

「超電導技術開発／高温超電導ケーブル実証プロジェクト」

事後評価報告書

表紙

平成26年11月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

研究評価委員会

平成26年11月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
理事長 古川 一夫 殿

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会 委員長 西村 吉雄

NEDO技術委員・技術委員会等規程第33条の規定に基づき、別添のとおり評価結果について報告します。

「超電導技術開発／高温超電導ケーブル実証プロジェクト」
事後評価報告書

平成26年11月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

目 次

はじめに	1
分科会委員名簿	2
審議経過	3
評価概要	4
研究評価委員会におけるコメント	7
研究評価委員会委員名簿	8
第1章 評価	
1. プロジェクト全体に関する評価結果	1-1
1. 1 総論	
1. 2 各論	
2. 評点結果	1-15
第2章 評価対象プロジェクト	
1. 事業原簿	2-1
2. 分科会における説明資料	2-2
参考資料1 評価の実施方法	参考資料 1-1
参考資料2 分科会議事録	参考資料 2-1

はじめに

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構においては、被評価プロジェクトごとに当該技術の外部専門家、有識者等によって構成される研究評価分科会を研究評価委員会によって設置し、同分科会にて被評価対象プロジェクトの研究評価を行い、評価報告書案を策定の上、研究評価委員会において確定している。

本書は、「超電導技術開発／高温超電導ケーブル実証プロジェクト」の事後評価報告書であり、NEDO技術委員・技術委員会等規程第31条に基づき、研究評価委員会において設置された「超電導技術開発／高温超電導ケーブル実証プロジェクト」（事後評価）研究評価分科会において評価報告書案を策定し、第40回研究評価委員会（平成26年11月27日）に諮り、確定されたものである。

平成26年11月
独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

「超電導技術開発／高温超電導ケーブル実証プロジェクト」

事後評価分科会委員名簿

(平成26年9月現在)

	氏名	所属、役職
分科 会長	いせ としふみ 伊瀬 敏史	大阪大学大学院 工学研究科 電気電子情報工学専攻 教授
分科 会長 代理	しもやま じゅんいち 下山 淳一	東京大学大学院 工学系研究科 応用化学専攻 准教授
委員	いちかわ みちはる 市川 路晴	一般財団法人 電力中央研究所 電力技術研究所 電力応用領域リーダー 上席研究員
	きす たかのぶ 木須 隆暢	九州大学 システム情報科学研究所 電気システム工学 部門 計測制御工学 教授
	つだ まこと 津田 理	東北大学大学院 工学研究科 電気エネルギーシステム 専攻 電気エネルギーシステム工学講座 応用電気エ ネルギーシステム分野 教授
	なかざわ まさあき 中澤 雅明	電気事業連合会 技術開発部 副部長
	ながしま けん 長嶋 賢	公益財団法人 鉄道総合技術研究所 浮上式鉄道技術 研究部 部長

敬称略、五十音順

審議経過

● 第1回 分科会（平成26年9月3日）

公開セッション

1. 開会、資料の確認
2. 分科会の設置について
3. 分科会の公開について
4. 評価の実施方法について
5. プロジェクトの概要説明

非公開セッション

6. プロジェクトの詳細説明

公開セッション

7. まとめと課題
8. 全体を通しての質疑
9. まとめ・講評
10. 今後の予定、その他、閉会

● 現地調査会（平成26年9月2日）

東京電力株式会社 旭変電所（神奈川県横浜市）

● 第40回研究評価委員会（平成26年11月27日）

評価概要

1. 総論

1. 1 総合評価

実適用をにらんだ要素技術の開発と実証試験を含んだトータルシステムとしての開発が行われ、国内で初めて超電導ケーブルを実系統に連系し、実フィールドで試験を1年以上行って性能を評価できたことは高く評価できる。機器を製作するケーブルメーカー、冷凍機メーカー、システムを運用する電力会社が一体となり、ケーブル設計やシステム設計を行うとともに、様々な実証試験データの詳細を共有できている点は、他国の超電導ケーブルプロジェクトでは見られない成果といえる。

超電導ケーブルを送変電設備の一部とみなし、電気事業法を適用した点は、今後の超電導ケーブルの実用化を推進していく上で重要な役割を果たすものと考えられる。本プロジェクトで蓄積された経験、技術、データを今後の超電導ケーブルプロジェクトに上手に継承して欲しい。多様な事故（建設時および運転時）を想定した対策の検討やマニュアル作りも重要と思われる。

超電導ケーブルのリアルタイムの運転状況をホームページで一般に公開していたことも評価できる。一方で、海外での認知度は必ずしも高くない。技術的成果は勿論のこと、プロジェクト成果の情報発信も、これまで以上に積極的に行うことが望ましい。その際、世界で開発されている種々のタイプの超電導ケーブルの中で三心一括型超電導ケーブルの特長を明らかにして、プロジェクト成果を発信して行く必要があると考える。

海外での適用も視野に入れるとのことであるが、世界最高のエネルギー密度を生かすことができる具体的な導入先の検討が肝要である。また、発電機引き出し線への適用が検討されているが、今回の開発成果がどのように活かされるのか明らかにすべきである。

1. 2 今後に対する提言

超電導ケーブルや超電導ケーブルシステムの設計で重要であるが必ずしも明確にはなっていない点である、ケーブル運用時の適切な負荷率の選定方法、低損失化を実現する超電導ケーブルの設計指針、ケーブルパラメータの選定方法、ケーブルシステムの送電可能距離（冷却ステーション間の許容最長距離）を、十分検討し明確にすることが望ましい。海外の技術レベルに遅れを取らないためにも、国・NEDO 主導の下で研究開発を推進していくことが肝要かつ急務である。また、冷却システムの性能向上、長距離冷却技術、液体窒素の循環ポンプも、重要な技術課題である。

事故時の安全対策については、ケーブル損傷時の電氣的な挙動のみならず、物理的な挙動（例えば、液体窒素の挙動）についても評価願いたい。試験項目、あるいは、本邦メーカーの国際競争力に資する仕様面についても、国際標準化において日本の主導的立場を維持していただきたい。

超電導ケーブルが効果を発揮する場所を種々検討してゆく必要がある。用途開拓と技術開発

により超電導ケーブルの実用化が加速することを望む。

2. 各論

2. 1 事業の位置付け・必要性について

超電導ケーブルの開発は、CO₂の抑制、エネルギーセキュリティの確保の観点から戦略的に進めるべきもので周辺への技術的波及効果も視野に含めた長期的な観点でNEDOが事業を推進することが望ましい。

トータルシステムの信頼性を実証するには、適用法令の対応を含む多岐にわたる技術課題の解決が重要であり、民間のみの対応では困難であることから、国・NEDOが主導の研究開発推進が不可欠となる。

超電導電力機器開発において、日本の国際競争力を維持していくためにも、国またはNEDOが主導していくことは重要である。

2. 2 研究開発マネジメントについて

これまでに、一貫して、コンパクトな超電導ケーブルの実現に主眼を置き、世界最高のエネルギー密度を有する超電導ケーブルの研究開発を推進しており、戦略性は妥当であるといえる。

研究開発計画は各開発段階について綿密にかつ効率的に組まれたものであり、結果的にその着実な遂行によってプロジェクトが成功に至ったことは計画が概ね適切であったことの証と見る。高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証、トータルシステムの開発、送電システムの運転技術の開発、実システムにおける総合的な信頼性の実証、超電導ケーブルの適用技術標準化の研究等、研究開発の目標設定も具体的でかつ明確であり、妥当である。ただし、予備的な運転に長期を要する新しい技術項目についての開発期間設定には、もう少し慎重になる必要があると考える。

超電導ケーブルシステムの構築に不可欠なケーブルメーカーと冷却メーカーが参画しており、両者が協力してケーブル設計やケーブルシステム構築を行うとともに、各種試験データを共有できている点は高く評価できる。要素開発と実証の段階において、それぞれでプロジェクトリーダーを設定したことは、それぞれの開発段階において目標とマネジメントの役割を明確にし、着実な研究推進に大きく貢献している。研究期間途中で震災の影響を受け、スケジュールの変更も余儀なくされたにもかかわらず、着実に研究を進め、全ての項目において目標を達成できたことは、各プロジェクトリーダーのマネジメント力によるところが大きい。

今回開発した超電導シールドを有する三心一括型超電導ケーブルの有用性については、海外のメーカーの技術動向を踏まえて良く考えておく必要があった。本プロジェクト成果の実用化・事業化に向けた戦略は明確になっているものの、具体的な適用先を明確にするまでに至っていない印象があり、今後は、世界最高のエネルギー密度を有する超電導ケーブル技術を生かせる適用先について、国内のみならず海外も視野に入れて戦略的に検討を進めることが望まれる。

2. 3 研究開発成果について

超電導ケーブルシステムの製作、設置は計画通りに行われ、臨界電流や低交流損失、事故電流対応など超電導ケーブルの特性も設計値を満たし、さらに14ヶ月にわたる長期の安定した通電運転実績を残したことより成果は目標を十分に達成している。世界でも同様なプロジェクトはあるが、最も質の高い成果を挙げたプロジェクトであることは間違いない。冷却技術については、これまで課題として上げられていた耐久性能と冷却効率を大幅に向上させたブレイトン冷凍機の開発は高く評価できる。

標準化に向けた活動も行われており、評価できる。今回の実証試験で得られた運用のノウハウは、国際標準化へ向けた重要なエビデンスとなりうる成果である。

ホームページで超電導ケーブルのリアルタイムの運転状況が公開されていたが、試験の透明性確保や、対外的アピールの面で良かった。国際・国内会議等での発表や論文発表は行われているが、依然として海外での認知度が低い印象がある。特に、他国の超電導ケーブルプロジェクトとの差別化が十分ではないため、今後は、日本の超電導ケーブル技術の特長や技術レベルがより明確になるように情報発信を推進していくことが望まれる。

2. 4 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

国内初となる超電導ケーブルの実システムとの連系を実現し、1年以上にも及ぶ連系運転を通じてトータルシステムの信頼性を検証するだけでなく、実用化に向けて解決すべき要素技術課題や課題解決方針を明確にできている点は高く評価できる。超電導ケーブルシステムが主要適用法令として電気事業法で取り扱われた事は、超電導ケーブルが電力機器として認知されたことを意味し、今後の実用化に向けて大きく前進するものである。本プロジェクトの成功は電力設備としての運用技術の確立に向けての大きな成果であり、事業化の点では将来、複合システム一式として内外に普及させられる可能性がある。

長期試験とはいえ電力システムとしての安定性、信頼性を完全に獲得するには天候不順や系統の事故などの経験が少なく、さらに冷却システムの長期運転技術の確立は今後の必須課題である。超電導技術の信頼性の向上、および冷却システムの保守技術の開発は地味ではあるが実用化のために根幹をなすものであり、今後進めるべき技術である。

世界最高のエネルギー密度を有する超電導ケーブルの要素・システム技術を構築してきたが、本特長を有する超電導ケーブルの適用先については必ずしも明確にはなっていないため、今後は国内だけでなく海外も視野に入れた検討が望まれる。ユーザであり電力システムを熟知している電力会社が主導的になって、成果の実用化・事業化シナリオづくりを行って頂きたい。

研究評価委員会におけるコメント

第40回研究評価委員会（平成26年11月27日開催）に諮り、本評価報告書は確定された。研究評価委員会からのコメントは特になし。

研究評価委員会

委員名簿（敬称略、五十音順）

職 位	氏 名	所 属、役 職
委員長	西村 吉雄	技術ジャーナリスト
委員長 代理	吉原 一紘	オミクロンナノテクノロジージャパン株式会社 最高顧問
委員	安宅 龍明	独立行政法人産業技術総合研究所 つくばイノベーション アーリーナ推進本部 共用施設調整室 招聘研究員
	伊東 弘一	学校法人早稲田大学 理工学術院 招聘研究員 公立大学法人大阪府立大学 名誉教授
	稲葉 陽二	学校法人日本大学 法学部／大学院 法学研究科 教授
	小林 直人	学校法人早稲田大学 研究戦略センター 副所長／教授
	佐久間一郎	国立大学法人東京大学大学院 工学系研究科 附属医療 福祉工学開発評価研究センター センター長／教授
	佐藤 了平	国立大学法人大阪大学 産学連携本部 名誉教授／特任 教授
	菅野 純夫	国立大学法人東京大学大学院新領域創成科学研究科 メディカルゲノム専攻 教授
	宮島 篤	国立大学法人東京大学 分子細胞生物学研究所 教授
吉川 典彦	国立大学法人名古屋大学 大学院工学研究科 マイク ロ・ナノシステム工学専攻 教授	

第1章 評価

この章では、分科会の総意である評価結果を枠内に掲載している。なお、枠の下の箇条書きは、評価委員の主な指摘事項を、参考として掲載したものである。

1. プロジェクト全体に関する評価結果

1. 1 総論

1. 1. 1 総合評価

実適用をにらんだ要素技術の開発と実証試験を含んだトータルシステムとしての開発が行われ、国内で初めて超電導ケーブルを実系統に連系し、実フィールドで試験を1年以上行って性能を評価できたことは高く評価できる。機器を製作するケーブルメーカー、冷凍機メーカー、システムを運用する電力会社が一体となり、ケーブル設計やシステム設計を行うとともに、様々な実証試験データの詳細を共有できている点は、他国の超電導ケーブルプロジェクトでは見られない成果といえる。

超電導ケーブルを送変電設備の一部とみなし、電気事業法を適用した点は、今後の超電導ケーブルの実用化を推進していく上で重要な役割を果たすものと考えられる。本プロジェクトで蓄積された経験、技術、データを今後の超電導ケーブルプロジェクトに上手に継承して欲しい。多様な事故（建設時および運転時）を想定した対策の検討やマニュアル作りも重要と思われる。

超電導ケーブルのリアルタイムの運転状況をホームページで一般に公開していたことも評価できる。一方で、海外での認知度は必ずしも高くない。技術的成果は勿論のこと、プロジェクト成果の情報発信も、これまで以上に積極的に行うことが望ましい。その際、世界で開発されている種々のタイプの超電導ケーブルの中で三心一括型超電導ケーブルの特長を明らかにして、プロジェクト成果を発信して行く必要があると考える。

海外での適用も視野に入れるとのことであるが、世界最高のエネルギー密度を生かすことができる具体的な導入先の検討が肝要である。また、発電機引き出し線への適用が検討されているが、今回の開発成果がどのように活かされるのか明らかにすべきである。

〈肯定的意見〉

- これまでの超電導プロジェクトの多くが、性能向上のための要素技術の開発と課題の抽出にとどまっていたが、本プロジェクトでは実適用をにらんだ要素技術の開発と実証試験を含んだトータルシステムとしての開発が行われ、運用方法、法対応などソフト面での成果が多く得られたことは高く評価できる。今回の成果は、超電導ケーブルが開発研究段階から、導入段階に入ったと強く意識させられた。
- 本プロジェクトは、平成12年度～平成16年度に実施された「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」で得られた研究開発成果に基づき、超電導ケーブルの線路建設や運転・保守を含めたトータルシステムの信頼性を実証するために、国内で初めて超電導ケーブルを実系統に連系した大変意義あるものであり、途中、東北地方太平洋沖地震の発生により中断したものの、所定の目標を十分に達成し、多くの有用な成果を挙げている点は高く評価できる。
- これまでは、一貫して、大都市部の地下にある管路等への敷設を想定した、コンパクトな超電導ケーブルの実現に主眼を置いた研究開発が進められており、その成果として世界最高のエネルギー密度を達成している点は高く評価できる。

- ・ 低交流損失のビスマス線材から超電導ケーブルまでを一貫して開発し、実フィールドで試験を1年以上行って性能を評価できたこと、並行して高効率の冷凍システムの開発までを実施したことは、非常に高く評価できる。
- ・ 新しい試みを多く含み、かつ震災などの予定外の影響を被りながらのプロジェクトで、かつ実系統接続という責任の重いものであったが、緻密な準備と運営のもと、実証試験を計画通りに終了し、かつ今後のプロジェクトにつながる要素技術も併せて育むことができたことから、高い評価を与えたい。
- ・ 3.11 東日本大震災を経て長期に渡る実証試験を着実に実行されたことに敬意を表する。また、これまであまり取り組みがされていなかった冷凍システムに関して、市場投入も意識した開発を行った功績も大きい。
- ・ 超電導ケーブルメーカーだけでなく、冷却メーカーも一緒になってケーブル設計やシステム設計を行うとともに、様々な実証試験データの詳細を共有できている点は、他国の超電導ケーブルプロジェクトでは見られない画期的な成果といえる。
- ・ 機器を製作するケーブルメーカー、冷凍機メーカー、システムを運用する電力会社が一体となり、国内初の実系統における実証を四季を通して実施し、当初の研究の目標を達成したことは評価できる。
- ・ 超電導ケーブルに関する法規上の対応において、超電導ケーブルの使用形態が送変電設備の一部であることから、関係省庁確認のうえ、高圧ガス保安法ではなく電気事業法を適用した点は、今後の超電導ケーブルの実用化を推進していく上で重要な役割を果たすものと考えられる。
- ・ 超電導ケーブルのリアルタイムの運転状況をホームページでも一般に公開していたことも評価できる。
- ・ プロジェクト遂行における取り上げるべき問題点などは無かった。

〈問題点・改善すべき点〉

- ・ 超電導シールドを有する三心一括型超電導ケーブルの開発について、超電導送電の実用化を目指してロードマップを描き、その過程でどのような位置づけにあるのかが明確ではない。特に世界のプロジェクトの中での位置づけが明確ではない。実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みの中にある「発電機引き出し線への適用」においては別の構造のケーブルが考えられており、今回の開発成果がどのように活かされるのか不明である。世界で開発されている種々のタイプの超電導ケーブルの中で三心一括型超電導ケーブルの特長を明らかにして、プロジェクト成果を発信して行く必要があると考える。
- ・ 本プロジェクトの成果から、技術的な実現性の見通しはおおむね得られ、初期導入ターゲットとして発電機引き出し線を検討しているが、具体性に乏しい感が否めない。交流以外への適用や海外への展開も視野に入れた新たな導入シナリオを十分に検討していく必要があると思われる。
- ・ 現在、超電導ケーブルの発電機引き出し線への適用が検討されているが、これまでの

研究開発とはケーブル構造やシステム構成など前提条件が異なるため、これまでの研究開発とは方向性が異なる印象を受ける。このため、これまでの研究開発との関連性をより明確にしておくことが望ましい。

- 今後は、海外での適用も視野に入れるとのことであるが、世界最高のエネルギー密度を生かすことができる具体的な導入先の検討が肝要である。また、これまでに多くの素晴らしい成果を挙げているものの、海外での認知度は必ずしも高くない。このため、技術的成果は勿論のこと、プロジェクト成果の情報発信も、これまで以上に積極的に行うことが望ましい。特に、今後は、他国のプロジェクトとの差別化（本プロジェクトの優位性、新規性、革新性）を明確にすることが重要になると考えられる。

〈その他の意見〉

- 本プロジェクトで蓄積された経験、技術、データを今後の超電導ケーブルプロジェクトに上手に継承して欲しい。今回は起こらなかったが多様な事故（建設時および運転時）を想定した対策の検討やマニュアル作りも重要と思われる。
- 震災関連事故のため抑えざるを得なかったかもしれないが、本プロジェクトの社会向け情報宣伝がもう少し活発に行えたらよかったと思う。
- 冷却システムの中で冷凍機本体の開発は重要だが、液体窒素を循環させるポンプも超電導送電の重要なアイテムであり、こちらの開発も進める必要があると考える。

1. 1. 2 今後に対する提言

超電導ケーブルや超電導ケーブルシステムの設計で重要であるが必ずしも明確にはなっていない点である、ケーブル運用時の適切な負荷率の選定方法、低損失化を実現する超電導ケーブルの設計指針、ケーブルパラメータの選定方法、ケーブルシステムの送電可能距離(冷却ステーション間の許容最長距離)を、十分検討し明確にすることが望ましい。海外の技術レベルに遅れを取らないためにも、国・NEDO 主導の下で研究開発を推進していくことが肝要かつ急務である。また、冷却システムの性能向上、長距離冷却技術、液体窒素の循環ポンプも、重要な技術課題である。

事故時の安全対策については、ケーブル損傷時の電氣的な挙動のみならず、物理的な挙動(例えば、液体窒素の挙動)についても評価願いたい。試験項目、あるいは、本邦メーカーの国際競争力に資する仕様面についても、国際標準化において日本の主導的立場を維持していただきたい。

超電導ケーブルが効果を発揮する場所を種々検討してゆく必要がある。用途開拓と技術開発により超電導ケーブルの実用化が加速することを望む。

〈今後に対する提言〉

- これまでの研究開発を通じて多くの成果を挙げており、トータルシステムの信頼性を実証できるまでに至っている点は高く評価できる。しかし、超電導ケーブルや超電導ケーブルシステムの設計で重要となる以下の点については、必ずしも明確にはなっていない。このため、後継のプロジェクトでは、以下の点についても十分検討し、明確にすることが望ましい。①超電導ケーブルの安定性・低損失化・経済性を考慮した、ケーブル運用時の適切な運転負荷率に対する I_c の選定、②低損失化を実現する超電導ケーブルの設計指針(均流化するのか、テープ線が経験する磁束密度を均一にするのか、その他の方法を採用するのか等)、③②を実現するケーブルパラメータの選定方法(撚りピッチ・層半径の算定方法)、④現在想定しているケーブルシステムの送電可能距離(冷却ステーション間の許容最長距離)。また国内では、本プロジェクトを中心に三相一括型超電導ケーブルの研究開発が行われているが、海外では、三相同軸型超電導ケーブルに関する研究開発も盛んに行われている。三相同軸型は、三相一括型に比べ、使用する超電導線を少なくできることから経済性の点で有利となるだけでなく、ケーブル設計で重要となる交流損失量を大幅に低減可能である。さらに、本プロジェクトの研究開発目標としてきた高電流密度化においても、三相一括型よりも高密度化が可能である。以上より、海外の技術レベルに遅れを取らないためにも、今後は、国・NEDO 主導の下で研究開発を推進していくことが肝要かつ急務である。
- 残されている技術課題としては、長距離冷却技術がある。本プロジェクトではケーブル長 240m と短距離であるが、実際の線路長は 5~10km にもおよび、さらに 10m 程度の高低差も含んでいる。このような長距離での初期冷却特性、液体窒素輸送特性の検証も必要であると思われる。
- 超電導機器にとって超電導線材の性能向上と冷却システムの性能向上は同じ程度の

効果がある。線材の性能を上げる代わりに効率の良い冷凍機で冷却温度を下げれば線材開発無しに高い臨界電流性能が獲得できる。もちろん液体窒素の固化も考えると無制限に温度を下げるわけには行かないが、費用対効果を考えれば、冷却システムの性能向上の方が効率良く機器性能を向上することができる可能性もある。また、冷却システムの中で冷凍機本体に並んで、液体窒素を循環させるポンプも超電導送電の重要なアイテムであり、こちらの開発も進める必要があると考える。

- 事故時の安全対策については、ケーブル損傷時の電気的な挙動のみならず、物理的な挙動（例えば、液体窒素の挙動）についても評価願いたい。国際標準化について、試験項目の標準化だけでなく、本邦メーカーの国際競争力に資する仕様面での標準化があれば、取り組みいただけると良いのではないかと考える。
- 今回のプロジェクトの成功は、日本において高温超電導技術がエネルギーインフラの一角を担いうることを明示した意味が大きく、次々と超電導ケーブル利用の価値と信頼性を高めるプロジェクトが生まれることを期待する。本実施者らを中心とした後継プロジェクトの展開はもとより、性能面、維持管理面、コスト面などを総合して選ばれる方法となるように技術をより早く高めるため、民間共同だけでなく学官の協力が得やすい体制のプロジェクト構成も有効と考える。
- 超電導ケーブルが効果を発揮する場所を種々検討してゆく必要がある。商用周波数の交流だけでなく、交流損失を減らすためには、直流送電および 10Hz 程度の低周波送電への応用が効果的であると考えられる。風力発電の大量導入が可能な北海道と本州の系統連系の強化、および東西連系の強化において直流および低周波送電の活用があるが、その中で電力変換器の耐電圧を低減できる超電導ケーブルの適用は効果的であると言える。また、近年需要が増加しているデータセンター内の送電は低圧の直流大電流である。洋上風力はケーブル送電となるが、ケーブルの静電容量による充電電流低減のために、直流や低周波送電が魅力的な用途である。用途開拓と技術開発により超電導ケーブルの実用化が加速することを望む。
- 本プロジェクトでも、国際標準化に向けた試験法の提案や規格化へ向けた取り組みがなされているが、今後とも、これまでの NEDO プロジェクトでの成果を生かして、国際標準化において日本の主導的立場を是非維持していただきたい。
- 実系統に導入するためには、依然課題も多く、民間のみでの開発には負担が大きいため、引き続き、NEDO の関与が望まれる。

1. 2 各論

1. 2. 1 事業の位置付け・必要性について

超電導ケーブルの開発は、CO₂の抑制、エネルギーセキュリティの確保の観点から戦略的に進めるべきもので周辺への技術的波及効果も視野に含めた長期的な観点で NEDO が事業を推進することが望ましい。

トータルシステムの信頼性を実証するには、適用法令の対応を含む多岐にわたる技術課題の解決が重要であり、民間のみの対応では困難であることから、国・NEDO が主導の研究開発推進が不可欠となる。

超電導電力機器開発において、日本の国際競争力を維持していくためにも、国または NEDO が主導していくことは重要である。

〈肯定的意見〉

- ・超電導ケーブルの開発は、CO₂の抑制、エネルギーセキュリティの確保の観点から戦略的に進めるべきもので、民間のみで研究開発を推進するのは困難であることから、周辺への技術的波及効果も視野に含めた長期的な観点で NEDO が事業を推進することが望ましい。超電導電力機器開発において、日本の国際競争力を維持していくためにも、国または NEDO が主導していくことは重要である。
- ・国内では電力需要そのものは省エネの推進もあり、低減傾向ではあるが、今後の電力システムは再生可能エネルギーの大量導入など変革の可能性があり、世界的にはエネルギー需要が増大することが多々あるため、事業目的も妥当であると言える。
- ・東北地方太平洋沖地震の発生により、エネルギー安定供給の早期実現が望まれており、地球環境問題への対応も併せ考えると、老朽化が進んでいる電力ケーブルの超電導化は急務である。また、トータルシステムの信頼性を実証するには、適用法令の対応を含む多岐にわたる技術課題の解決が重要であり、民間のみの対応では困難であることから、国・NEDO が主導の研究開発推進が不可欠となる。以上より、本プロジェクトの目的を、超電導ケーブルを実系統に連系してトータルシステムの信頼性を検証すること、とすることは妥当であるといえる。
- ・超電導という魅力的ではあるが実用化には困難を有する技術の実現に向けて NEDO の事業として実施し、実用化に向けた技術開発が出来たことは大きく評価される。国のエネルギー政策のための技術として、化石燃料を安価に輸入するための持ち札技術の一つとして超電導は必要不可欠な技術であると考えられる。
- ・このプロジェクトは、将来のエネルギーインフラに直接関わる重要なマイルストーンであり、また、企業単独では実現しづらい複合システムであることから NEDO の事業として最も相応しい課題の一つであったと思う。特に、震災の影響を乗り越えて終了できたことは NEDO の事業であったからであり、このような大災害や景気の大変動にも動じず、重要なプロジェクトを完遂に導く体制は、国策としてもっと充実させても良いと考える。もしこのプロジェクトが無ければ、超電導ケーブル技術で日本は大きく遅れをとり、単なる超電導線材や冷凍機の輸出国に留まってしまう危惧があったが、システムとして海外にも

進出できる実績ができたことは大きな成果である。

- ・超電導ケーブルについては、送電ロス削減に寄与し、また送電線建設コストの削減や、設置スペースが限られる場合の対応手段として期待されるものである。一方で、現状では、技術的課題も多く、民間のみでの開発には負担が大きいため、NEDO の関与が必要とされる事業として妥当であると考ええる。
- ・それぞれの企業単独ではできない超電導技術の基盤に関する取り組みを NEDO が主導した意義は大きい。
- ・超電導技術に対して冷却技術は基盤技術である。長期に渡り一定の支援を与えないとなかなか育たない。NEDO としてはこのような技術に継続的な支援を与える必要があると考ええる。

〈その他の意見〉

- ・震災以降の電力事情が大きく変化した状況において、今後は、国内への適用のみならず、海外への進出も視野に入れて検討を進める必要がある。
- ・民間の技術開発を資金的に援助するだけでなく、マーケット開発への手助けも必要であろう。NEDO は民間企業の活力を引き出してゆく必要がある。
- ・今回は実施期間が延びたこともあり、当初計画以上の課題に取り組み、それなりの見通しが得られている。他の NEDO プロジェクトでは目標や課題の設定にあまり柔軟性を感じないが、今回の成功事例をきっかけに、中途での課題の追加・縮小や実施期間について適度に柔軟な対応ができるような実施方法の導入も検討されるべきと考える。

1. 2. 2 研究開発マネジメントについて

これまでに、一貫して、コンパクトな超電導ケーブルの実現に主眼を置き、世界最高のエネルギー密度を有する超電導ケーブルの研究開発を推進しており、戦略性は妥当であるといえる。

研究開発計画は各開発段階について綿密にかつ効率的に組まれたものであり、結果的にその着実な遂行によってプロジェクトが成功に至ったことは計画が概ね適切であったことの証と見る。高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証、トータルシステムの開発、送電システムの運転技術の開発、実系統における総合的な信頼性の実証、超電導ケーブルの適用技術標準化の研究等、研究開発の目標設定も具体的でかつ明確であり、妥当である。ただし、予備的な運転に長期を要する新しい技術項目についての開発期間設定には、もう少し慎重になる必要があると考える。

超電導ケーブルシステムの構築に不可欠なケーブルメーカーと冷却メーカーが参画しており、両者が協力してケーブル設計やケーブルシステム構築を行うとともに、各種試験データを共有できている点は高く評価できる。要素開発と実証の段階において、それぞれでプロジェクトリーダーを設定したことは、それぞれの開発段階において目標とマネジメントの役割を明確にし、着実な研究推進に大きく貢献している。研究期間途中で震災の影響を受け、スケジュールの変更も余儀なくされたにもかかわらず、着実に研究を進め、全ての項目において目標を達成できたことは、各プロジェクトリーダーのマネジメント力によるところが大きい。

今回開発した超電導シールドを有する三心一括型超電導ケーブルの有用性については、海外のメーカーの技術動向を踏まえて良く考えておく必要があった。本プロジェクト成果の実用化・事業化に向けた戦略は明確になっているものの、具体的な適用先を明確にするまでに至っていない印象があり、今後は、世界最高のエネルギー密度を有する超電導ケーブル技術を生かせる適用先について、国内のみならず海外も視野に入れて戦略的に検討を進めることが望まれる。

(1) 研究開発目標の妥当性

〈肯定的意見〉

- これまでに、一貫して、コンパクトな超電導ケーブルの実現に主眼を置き、世界最高のエネルギー密度を有する超電導ケーブルの研究開発を推進しており、戦略性は妥当であるといえる。

(2) 研究開発計画の妥当性

〈肯定的意見〉

- 研究開発計画は各開発段階について綿密にかつ効率的に組まれたものであり、結果的にその着実な遂行によってプロジェクトが成功に至ったことは計画が概ね適切であったことの証と見る。この計画は他の新規複合システムの計画立案においても参考とされるべきものと思われる。

- ・高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証、トータルシステムの開発、送電システムの運転技術の開発、実系統における総合的な信頼性の実証、超電導ケーブルの適用技術標準化の研究等、研究開発の目標設定も具体的でかつ明確であり、妥当である。

- ・研究開発計画および実施体制については何ら問題は無く、適切であったと考える。

〈問題点・改善すべき点〉

- ・震災による実施期間延長が技術の向上や未経験の事象の把握に貢献したことは確かであり、順調に日程が消化されていれば、一部の技術については見切り発車となった可能性が否定できない。予備的な運転に長期を要する新しい技術項目についての開発期間設定には、もう少し慎重になる必要があると考える。

(3) 研究開発実施の事業体制の妥当性

〈肯定的意見〉

- ・実施体制において、超電導ケーブルシステムの構築に不可欠なケーブルメーカーと冷却メーカーが参画しており、両者が協力してケーブル設計やケーブルシステム構築を行うとともに、各種試験データを共有できている点は高く評価できる。
- ・要素開発と実証の段階において、それぞれでプロジェクトリーダーを設定したことは、それぞれの開発段階において目標とマネジメントの役割を明確にし、着実な研究推進に大きく貢献している。
- ・プロジェクトリーダーについて、固定とはされず、機器開発が中心となるフェーズでは住友電工、実系統における実証が中心となるフェーズでは東京電力が務めたが、プロジェクトを着実に実施する観点から適切であったものと思慮する。
- ・研究期間途中で震災の影響を受け、スケジュールの変更も余儀なくされたにもかかわらず、着実に研究を進め、全ての項目において目標を達成できたことは、各プロジェクトリーダーのマネジメント力によるところが大きい。
- ・実施期間中の各社の連携は良好に保たれており、予期せぬ期間延長に対してもうまくマネジメントされ当初予定以上の成果を挙げられたことは高く評価できる。

(4) 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

〈問題点・改善すべき点〉

- ・今回開発した超電導シールドを有する三心一括型超電導ケーブルの有用性については、海外のメーカーの技術動向を踏まえて良く考えておく必要があった。そうでないと、開発した技術が無駄なものになりかねない。研究開発成果の実用化・事業化に向けては、ユーザであり電力システムを熟知している電力会社が主導的になって戦略を練り、成果の実用化・事業化シナリオづくりを行って行くことが望まれる。
- ・本プロジェクト成果の実用化・事業化に向けた戦略は明確になっているものの、具体的な適用先を明確にするまでに至っていない印象があり、今後は、世界最高のエネルギー密度を有する超電導ケーブル技術を生かせる適用先について、国内のみならず海外も視野に入れて戦略的に検討を進めることが望まれる。

(5) 情勢変化への対応

〈肯定的意見〉

- ・大震災の発生という情勢変化にも対応してプロジェクトを遂行し、成果を挙げることが出来た。
- ・3.11 東日本大震災発生という困難な情勢の中、プロジェクトを推進して大きな成果を出した努力は大いに評価できる。

1. 2. 3 研究開発成果について

超電導ケーブルシステムの製作、設置は計画通りに行われ、臨界電流や低交流損失、事故電流対応など超電導ケーブルの特性も設計値を満たし、さらに14ヶ月にわたる長期の安定した通電運転実績を残したことより成果は目標を十分に達成している。世界でも同様なプロジェクトはあるが、最も質の高い成果を挙げたプロジェクトであることは間違いない。冷却技術については、これまで課題として上げられていた耐久性能と冷却効率を大幅に向上させたブレイトン冷凍機の開発は高く評価できる。

標準化に向けた活動も行われており、評価できる。今回の実証試験で得られた運用のノウハウは、国際標準化へ向けた重要なエビデンスとなりうる成果である。

ホームページで超電導ケーブルのリアルタイムの運転状況が公開されていたが、試験の透明性確保や、対外的アピールの面で良かった。国際・国内会議等での発表や論文発表は行われているが、依然として海外での認知度が低い印象がある。特に、他国の超電導ケーブルプロジェクトとの差別化が十分ではないため、今後は、日本の超電導ケーブル技術の特長や技術レベルがより明確になるように情報発信を推進していくことが望まれる。

(1) 目標の達成度と成果の意義

〈肯定的意見〉

- ・超電導ケーブルシステムの製作、設置は計画通りに行われ、臨界電流や低交流損失、事故電流対応など超電導ケーブルの特性も設計値を満たし、さらに14ヶ月にわたる長期の安定した通電運転実績を残したことより成果は目標を十分に達成している。世界でも同様なプロジェクトはあるが、最も質の高い成果を挙げたプロジェクトであることは間違いない。
- ・本プロジェクトでは、実用化へ向け必要となる目標を設定し、すべての項目において目標を達成したことは大変評価できる。特に、超電導ケーブルの導体技術については実用化に不可欠な中間接続技術を開発し、冷却技術については、これまで課題として上げられていた耐久性能と冷却効率を大幅に向上させたブレイトン冷凍機の開発は高く評価できる。今回の実証試験で得られた運用のノウハウは、国際標準化へ向けた重要なエビデンスとなりうる成果である。
- ・東北地方太平洋沖地震が発生した関係で、プロジェクト期間が予定よりも長くなったものの、システム構成・運転技術（4項目）、ケーブル設計・製造（4項目）、冷却系設計・製造（3項目）、実系統運転（3項目）、ケーブル高性能化（1項目）、冷却システム高性能化（2項目）、国際標準化（1項目）すべてにおいて研究目標としていた成果が得られており、耐短絡電流対策、交流損失低減対策、事故時の挙動検証・安全対策、冷却効率向上などの今後の具体的な課題も明確にできている点は高く評価できる。
- ・目標は十分に達成されたと考える。
- ・1年を超える実証試験を無事成功に導き、多くのデータを得た。また、見学者を多く受け入れ、PRに務めた。さらに、実験をネット経由でも公開することで成果の見える化を進めた。これらの成果は大いに評価できる。

(2) 知的財産権等の取得及び標準化の取組

〈肯定的意見〉

- ・標準化に向けた活動も行われており、評価できる。

(3) 成果の普及

〈肯定的意見〉

- ・住友電工のホームページで超電導ケーブルのリアルタイムの運転状況が公開されていたが、試験の透明性確保や、対外的アピールの面で良かったのではないかと。

〈問題点・改善すべき点〉

- ・成果の普及に向けた成果の広報活動を世界的に展開する必要があると考える。現時点ではまだ、十分に周知されていない様子である。
- ・これまでは、超電導ケーブルや冷却に関する技術的成果の公表については、国際・国内会議等での発表や論文発表を通じて適切に行われており、プロジェクト成果については、様々な手段により情報発信が行われているものの、依然として海外での認知度が低い印象がある。特に、他国の超電導ケーブルプロジェクトとの差別化が十分ではないため、今後は、日本の超電導ケーブル技術の特長や技術レベルがより明確になるように情報発信を推進していくことが望まれる。
- ・成果の海外へのPRについては工夫する必要がある。

〈その他の意見〉

- ・本プロジェクトの中で、成果として表に出てきてない様々なノウハウ（失敗や不具合などの苦労）が存在していると思われる。このようなノウハウは次へのステップアップへの糧となるので、できる限り何らかの形で残してほしい。
- ・700人を超える見学者を受け入れるなど、社会に見せる成果も挙げたがもう少し積極的に行われても良かったように思う。

1. 2. 4 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

国内初となる超電導ケーブルの実システムとの連系を実現し、1年以上にも及ぶ連系運転を通じてトータルシステムの信頼性を検証するだけでなく、実用化に向けて解決すべき要素技術課題や課題解決方針を明確にできている点は高く評価できる。超電導ケーブルシステムが主要適用法令として電気事業法で取り扱われた事は、超電導ケーブルが電力機器として認知されたことを意味し、今後の実用化に向けて大きく前進するものである。本プロジェクトの成功は電力設備としての運用技術の確立に向けての大きな成果であり、事業化の点では将来、複合システム一式として内外に普及させられる可能性がある。

長期試験とはいえ電力システムとしての安定性、信頼性を完全に獲得するには天候不順やシステムの事故などの経験が少なく、さらに冷却システムの長期運転技術の確立は今後の必須課題である。超電導技術の信頼性の向上、および冷却システムの保守技術の開発は地味ではあるが実用化のために根幹をなすものであり、今後進めるべき技術である。

世界最高のエネルギー密度を有する超電導ケーブルの要素・システム技術を構築してきたが、本特長を有する超電導ケーブルの適用先については必ずしも明確にはなっていないため、今後は国内だけでなく海外も視野に入れた検討が望まれる。ユーザであり電力システムを熟知している電力会社が主導的になって、成果の実用化・事業化シナリオづくりを行って頂きたい。

〈肯定的意見〉

- ・本プロジェクトの成功は電力設備としての運用技術の確立に向けての大きな成果である。事業化の点では、例えば“低損失高電流密度送電システム”などとして将来、複合システム一式として内外に普及させられる可能性がある。
- ・国内初となる超電導ケーブルの実システムとの連系を実現し、1年以上にも及ぶ連系運転を通じてトータルシステムの信頼性を検証するだけでなく、実用化に向けて解決すべき要素技術課題や課題解決方針を明確にできている点は高く評価できる。
- ・本プロジェクトにおいて、超電導ケーブルシステムが主要適用法令として、高圧ガス保安法ではなく電気事業法で取り扱われた事は非常に大きな意義を持つ。これは、超電導ケーブルが電力機器として認知されたことを意味し、今後の実用化に向けて大きく前進するものである。
- ・初めて実システムに超電導ケーブルを持ち込み、長期の実証試験に成功したという成果は大きい。
- ・本プロジェクトで実施した各種試験の評価項目や評価方法等の知見をデータとして国際標準化活動に提供・反映させることについても検討されており、超電導ケーブル技術の国際規格化や標準整備においても適切な対応が施されているといえる。
- ・高効率冷凍機の開発にめどをつけた点は評価できる。

〈問題点・改善すべき点〉

- ・長期試験とはいえ電力システムとしての安定性、信頼性を完全に獲得するには天候不順やシステムの事故などの経験が少なく、さらに冷却システムの長期運転技術の確立は今後の必須

課題である。

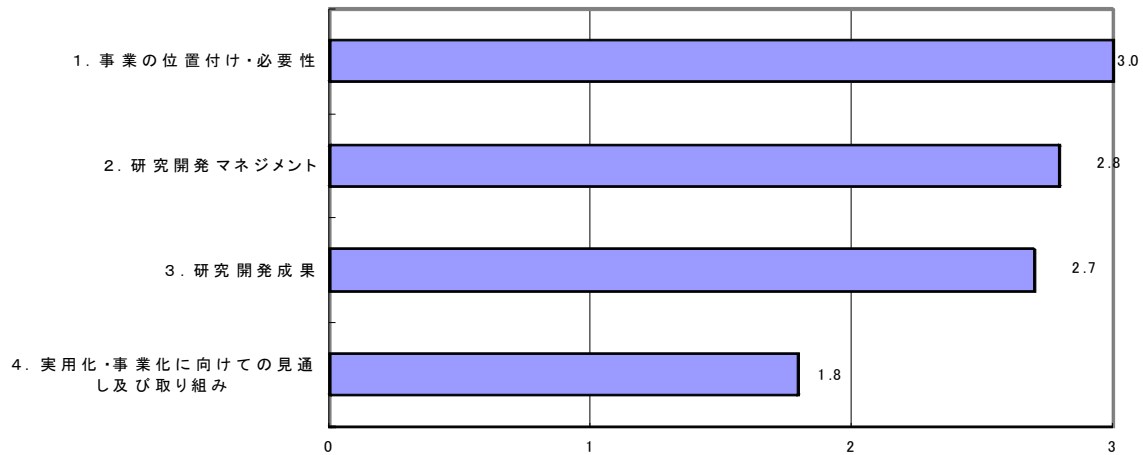
- 電力設備としてメンテナンスに要する手数を可能な限り低減させ、長期間安定して運転するための技術開発は今後行う必要がある。そのためには、超電導技術の信頼性の向上、および冷却システムの保守技術の開発は地味ではあるが実用化のために根幹をなすものであり、今後進めるべき技術である。
- これまで長期にわたり、大都市部の地下等にある管路への敷設を前提としたコンパクトな超電導ケーブルの研究開発を推進し、世界最高のエネルギー密度を有する超電導ケーブルの要素・システム技術を構築してきた。しかし、本特長を有する超電導ケーブルの適用先については、必ずしも明確にはなっていないため、今後は、国内だけでなく海外も視野に入れた検討が望まれる。
- ユーザであり電力システムを熟知している電力会社が主導的になって、成果の実用化・事業化シナリオづくりを行って行かなければならない。
- 変電所の中のループ線という、冷却には有利な条件での試験であったので、当初目標の送電に使うのであればその際の冷却システムをどうするのか検討する必要がある。

〈その他の意見〉

- 実用化に資するトータルシステムとしての送電損失の低減には、冷凍機の COP 向上が鍵となるため、今後の更なる COP 向上が望まれる。冷却能力維持のために、定期的な冷凍機真空引きを行っているが、実運用では、冷凍機出入口温度差が問題となる真空度を軽故障条件にして、真空引きを行うと良いのではないか。
- 超電導は若者の興味を引き、研究テーマを提供して人材育成を行うためにまだまだ魅力ある分野である。このような中でリニア新幹線に続いて超電導ケーブルが実用化に一步でも近づいたことを見せることは魅力を継続させるために必須であると考えます。今回の技術開発により実用化に大きく前進し、夢が大きく膨らむ技術開発が出来たことをより大々的にアピールすることを望む。
- 多彩なニーズ、場所に適応できるシステムに育つためには、長距離化や容量増、それらに合わせたケーブル構成の最適化などの研究開発や試験が様々なプロジェクトにおいて行われることが望ましい。
- 国際標準化は、継続的な取り組みが重要であり、日本の意見を今後とも発信していくため、引き続き NEDO の支援を続けていただきたい。

2. 評点結果

2. 1 プロジェクト全体



平均値

評価項目	平均値	素点 (注)					
		A	A	A	A	B	B
1. 事業の位置付け・必要性について	3.0	A	A	A	A	A	A
2. 研究開発マネジメントについて	2.8	B	A	A	A	A	A
3. 研究開発成果について	2.7	A	A	A	A	B	B
4. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて	1.8	C	B	B	B	B	B

(注) A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

〈判定基準〉

- | | |
|--------------------|------------------------------|
| 1. 事業の位置付け・必要性について | 3. 研究開発成果について |
| ・非常に重要 →A | ・非常によい →A |
| ・重要 →B | ・よい →B |
| ・概ね妥当 →C | ・概ね妥当 →C |
| ・妥当性がない、又は失われた →D | ・妥当とはいえない →D |
| 2. 研究開発マネジメントについて | 4. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて |
| ・非常によい →A | ・明確 →A |
| ・よい →B | ・妥当 →B |
| ・概ね適切 →C | ・概ね妥当 →C |
| ・適切とはいえない →D | ・見通しが不明 →D |

第2章 評価対象プロジェクト

1. 事業原簿

次ページより、当該事業の事業原簿を示す。

「超電導技術開発／高温超電導ケーブル
実証プロジェクト」
(事後評価) 分科会 資料 5-1

「超電導技術開発／高温超電導ケーブル
実証プロジェクト」

事業原簿 【公開】

「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」事業原簿
～目次～

事業原簿概要

用語集

I. 事業の位置づけ・必要性について	I -1
1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性	I -1
1.1 NEDOが関与することの意義	I -1
1.2 実施の効果（費用対効果）	I -3
2. 事業の背景・目的・位置づけ	I -5
II. 研究開発マネジメントについて	II -1
1. 事業の目標	II -1
1.1 研究開発目標	II -1
1.2 研究項目毎の目標	II -2
2. 事業の計画内容	II -8
2.1 研究開発の計画内容	II -8
2.2 研究開発の実施体制	II -27
2.3 研究開発の運営管理	II -29
2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメント の妥当性	II -32
3. 情勢変化への対応	II -34
4. 中間評価結果への対応	II -39
5. 評価に関する事項	II -42
III. 研究開発成果について	III -1
1. 事業全体の成果	III -1
1.1 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証	III -1
1.2 トータルシステム等の開発	III -5
1.3 送電システム運転技術の開発	III -6
1.4 実システムにおける総合的な信頼性の検証	III -7
1.5 ケーブルの高性能化の研究	III -9
1.6 冷却システムの高性能化の研究	III -11
1.7 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究	III -12

2. 研究開発項目毎の成果	Ⅲ-18
2.1 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証	Ⅲ-18
2.1.1 低交流損失超電導導体の性能検証	Ⅲ-18
2.1.2 短絡電流に対する超電導導体の性能検証	Ⅲ-35
2.1.3 中間接続部の検討	Ⅲ-46
2.1.4 終端接続部の検討	Ⅲ-62
2.1.5 検証用ケーブルシステムの構築と評価	Ⅲ-79
2.2 トータルシステム等の開発	Ⅲ-128
2.2.1 実証ケーブルシステムの基本構成と仕様の検討	Ⅲ-128
2.2.2 実証ケーブルシステムの付帯機器の検討	Ⅲ-135
2.2.3 冷却システムの設計検討	Ⅲ-142
2.2.4 実証ケーブルシステムの建設方法の検討	Ⅲ-201
2.2.5 まとめ	Ⅲ-206
2.3 送電システム運転技術の開発	Ⅲ-207
2.3.1 実証場所での系統特性調査	Ⅲ-207
2.3.2 平常時の運転技術開発	Ⅲ-229
2.3.3 事故時の運転技術開発	Ⅲ-238
2.3.4 保守・メンテナンス技術の開発	Ⅲ-249
2.3.5 まとめ	Ⅲ-253
2.4 実システムにおける総合的な信頼性の検証	Ⅲ-255
2.4.1 信頼性検証のための試験計画の立案	Ⅲ-255
2.4.2 実証システムの構築	Ⅲ-259
2.4.3 布設後のケーブル冷却試験	Ⅲ-306
2.4.4 冷却システムの初期冷却技術の検証	Ⅲ-325
2.4.5 冷却システム試験	Ⅲ-330
2.4.6 実証システムの循環冷却移行技術の検証	Ⅲ-352
2.4.7 系統連系前の実証ケーブルシステム性能の検証	Ⅲ-354
2.4.8 系統連系前の冷却システム性能の検証	Ⅲ-364
2.4.9 系統連系時の運転技術の検証	Ⅲ-373
2.4.10 系統連系後の実証ケーブルシステム運転性能評価	Ⅲ-377
2.4.11 系統連系後の冷却システム運転性能評価	Ⅲ-390
2.4.12 長期運転の信頼性評価	Ⅲ-398
2.4.13 冷却システムの保守性検証	Ⅲ-405

2.4.14	残存性能試験の評価	Ⅲ-408
2.4.15	短絡電流通過時のケーブルへの影響検討	Ⅲ-421
2.4.16	実証試験の成果の総括	Ⅲ-425
2.5	ケーブルの高性能化の研究	Ⅲ-429
2.5.1	大電流通電技術の検討	Ⅲ-429
2.5.2	大電流ケーブル用機器の開発	Ⅲ-443
2.6	冷却システムの高性能化の研究	Ⅲ-450
2.6.1	冷却システムの要求性能	Ⅲ-450
2.6.2	大容量高効率冷却システムの基本仕様	Ⅲ-452
2.6.3	ターボ圧縮機・膨張機の開発	Ⅲ-455
2.6.4	ブレイトン冷凍機の開発	Ⅲ-460
2.6.5	ブレイトン冷却システムの開発	Ⅲ-467
2.6.6	まとめと今後の課題	Ⅲ-474
2.7	超電導ケーブルの適用技術標準化の研究	Ⅲ-476
2.7.1	高温超電導ケーブルの標準化の研究	Ⅲ-476
2.7.2	高温超電導ケーブルの適用技術研究	Ⅲ-482
2.7.3	関連法規への対応	Ⅲ-493

Ⅳ.	実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて	Ⅳ-1
1.	電力事業を取り巻く環境	Ⅳ-1
2.	実用化・事業化の見通し	Ⅳ-1
3.	実用化に向けた課題	Ⅳ-5
4.	実用化・事業化までのシナリオ	Ⅳ-6
5.	波及効果	Ⅳ-8

付録資料

付録資料 1	イノベーションプログラム基本計画
付録資料 2	プロジェクト基本計画
付録資料 3	技術戦略マップ（分野別技術ロードマップ）
付録資料 4	事前評価関連資料 （事前評価書、パブリックコメント募集の結果）
付録資料 5	特許リスト
付録資料 6	発表・論文リスト

事業原簿概要

		作成日	平成 26 年 7 月 29 日
プログラム(又は施策)名	エネルギーイノベーションプログラム、ナノテク・部材イノベーションプログラム		
プロジェクト名	高温超電導ケーブル実証プロジェクト	プロジェクト番号	P 0 7 0 1 4
担当推進部/担当者	省エネルギー部/ 小坂 仁		
0. 事業の概要	<p>本プロジェクトでは、高温超電導ケーブルを社会の重要なインフラである電力供給システムに適用するために、「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」(平成 12 年度～16 年度)によって得られた高温超電導ケーブルの開発成果などを踏まえ、高温超電導ケーブルや冷却技術などを統合する高温超電導ケーブルシステムを構築して、高温超電導ケーブル単体だけではなく、線路建設、運転、保守を含めたトータルシステムの信頼性を実証するために、実系統に連系した実証試験を実施する。このことによって、高温超電導ケーブルのトータルシステムとしての総合的な信頼性を実証するとともに、革新的な高効率送電技術の開発・検証を行うことを目的とする。</p>		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>[事業の背景・目的・位置付け]</p> <p>エネルギー利用の効率化の促進、地球環境問題への対策の観点から省エネルギーや環境負荷低減に配慮したエネルギー利用が求められている。これを反映して、新・国家エネルギー戦略(2006 年 5 月経済産業省)では、省エネルギーとして 2030 年までに少なくとも 30%の効率改善を目指すことを目標として掲げている。また、新エネルギーイノベーション計画では、新たなエネルギーの貯蔵・輸送技術など、「革新的なエネルギー高度利用技術」の開発と利用を強化すると掲げている。さらに、エネルギー・環境施策の「原子力の推進・電力基盤の高度化」では、発電された電力を安定的かつ効率的に需要家へ届けるため送配電分野においては、電力供給を安定化させる技術や、発電電力を無駄なく輸送するための技術開発などにより、現状以上の供給信頼度性を実現することを掲げている。さらに新政府は、CO₂排出量を 1990 年度比 25%削減することを国際的に約束している。</p> <p>このような状況においては、十分な安全確保を前提に、需要に見合った信頼性の高い安定で効率的なエネルギー供給システムを構築することが重要である。効率的なエネルギー供給システムに資する技術として、高機能部材である超電導線材を利用し、大容量送電が可能となり送電損失を大幅に低減することが可能な高温超電導ケーブルシステムの技術を開発し、産業利用の早期実現を図ることは、エネルギー安全保障(セキュリティ)に貢献するとともに、社会や経済の安定した発展に大きく貢献すると考えられている。</p> <p>[NEDO が関与する意義]</p> <p>電気抵抗がゼロなどの特性をもつ超電導技術は、電力事業、情報通信、運輸、医療福祉等の幅広い分野で、様々な機器の飛躍的な性能向上・技術革新が可能である。その中でも、高温超電導ケーブル技術は、電力エネルギーの高効率な送電に貢献することができ、エネルギーの効率的な活用及び地球環境問題に対応し、CO₂排出量を削減する効果があると期待され、その公共性は高い。</p> <p>一方、従来ケーブルの更新需要は 2016 年頃から始まり、早期の実用化が望まれているが、その超電導ケーブルの実用化には、本プロジェクトにて提案する実用規模での実系統での実証試験が必須である。そのために必要な実証システムの構築、運転・メンテナンス・保守技術の開発には、量産開発の途中である高温超電導線材の使用、液体窒素温度で適用できるケーブル及びケーブル付属品(端末、ジョイント)の開発、液体窒素を循環冷却する冷却システムの構築など、これまで汎用されていない高価な材料、機器が必要であり、多額の費用がかかるのが実情である。</p> <p>従って、十分に公共性が高く、その実用化が急務であるが、開発には多額の費用がかかることから、国および NEDO が関与する必要があると考えられる。</p> <p>[実施の効果]</p> <p>2015 年頃からその実用化が始まると期待されており、2030 年断面において国内では 1000 億円をこえる市場が期待できる。また本技術は海外への転用も可能であり、米国では、送電系統の老朽化に伴うエネルギーセキュリティの観点から基幹送電系の強化(GRID2030)が計画されており、また中国では、国内経済の急成長に伴って、送電線の増設に対する需要が高まっていることなどから、海外における超電導ケーブルの需要は、国内需要の数十倍から数百倍になると推定されている。</p> <p>一方、超電導ケーブル導入による地球環境対策としての CO₂量削減の効果も期待できる。試算の結果、2030 年の省エネ効果は 279GWh/年となり、CO₂削減効果は 95kton-</p>		

		CO ₂ /年になると推計されている。尚、この推定は前述したように国内の 66kV 以上ケーブルへの適用を考えた場合であり、全世界で考えれば、数十倍～数百倍の効果が期待できる。							
II. 研究開発マネジメントについて									
事業の目標		<p>高温超電導ケーブルや冷却技術などを統合する高温超電導ケーブルシステムを構築して、高温超電導ケーブル単体だけではなく、線路建設、運転、保守を含めたトータルシステムの信頼性を実証するために、実システムに連系した実証試験を実施する。このことにより、高温超電導ケーブルのトータルシステムとしての総合的な信頼性を実証するとともに、革新的な高効率送電技術の開発・検証を行うことを目的とする。</p> <p>具体的には、将来の送電システムを想定した、66kV、200MVA 級の高温超電導ケーブルシステムの開発を行う。そのためには、高温超電導ケーブルの重要要素（ケーブル、中間接続部、冷却システム等）に関して、実システムに適用し得る所定の性能、機能を有することを、モデルシステムによって検証する。その後、中間接続部を有する三心一括型高温超電導ケーブルを、冷却装置や保護装置などの付帯設備とともに 66kV 実システムに接続し、長期連系試験を行う。これにより、高温超電導ケーブルシステムの信頼性・安定性の実証、実システムにおける運転方法・メンテナンス方法の検討、課題の抽出を行う。</p> <p>高温超電導ケーブルを適用する電力ネットワークの形態や規模などを考慮し、高温超電導ケーブルの適用技術を評価するとともに、冷却設備の安全性、運用性を考慮した法規制のあり方を検討する。また、実証試験を通じて、運転管理や評価・計測技術等の超電導送電システムの国際規格化を進めるために、標準化項目を整理して必要なデータ収集を行い、適用技術標準化の検討を行う。</p>							
事業の計画内容		主な実施事項	H19 年度	H20 年度	H21 年度	H22 年度	H23 年度	H24 年度	H25 年度
		(1) 高温超電導ケーブルの重要要素の研究	← 交流損失 1W/m/ph @ 2kA 開発			← 交流損失 1W/m/ph @ 3kA 開発			→
			← 短絡電流対応検討			← 短絡電流長尺シミュレーション			→
			← 接続部の検討 1μΩ@2kA			← 接続部の検討 1μΩ@3kA			→
			← 検証用ケーブルの製造、評価						
		(2) トータルシステム等の開発	← 基本仕様の検討		← 建設方法の検討				
			← 付帯機器の検討						
			← 冷却システムの設計検討						
		(3) 送電システム運転技術の開発	← 系統調査		← 平常時の運転技術開発				
					← 事故時の運転技術開発				
					← メンテナンス方法の検討				
		(4) 実システムにおける総合的な信頼性の検証		← 試験計画の立案			← 運転・評価		←
					← 実証用ケーブルシステムの製造・建設				← 残存性能評価
					← 冷却システムの構築				
		(5) 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究			← 高温超電導ケーブルの標準化の研究				
					← 高温超電導ケーブルの適用技術研究				
					← 関連法規への対応				
開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位：百万)		会計・勘定							
		一般会計							
		特別会計	81	150	962	638	492	593	339

円)	加速予算		80					
	総予算額	81	230	962	638	492	593	229
開発体制	経産省担当原課	製造産業局非鉄金属課						
	プロジェクトリーダー	H19～H20 年度 畑 良輔（住友電気工業株式会社 執行役員） H21 年度 原 築志（東京電力株式会社 技術開発研究所長） H25.6～ 本庄 昇一（東京電力株式会社 超電導技術グループマネージャー）						
	委託先（*委託先が管理法人の場合は参加企業数も記載）	住友電気工業株式会社						
情勢変化への対応	<p>(1)実施計画の見直し</p> <p>平成 19 年度～20 年度の研究成果を、実証プロジェクト推進委員会・WG 検討会、NEDO 主催の超電導技術委員会にて報告し、研究内容の評価、今後の指針への指導などを頂いている。その中で、冷却システムの特性把握が超電導ケーブル運転上重要な課題であることから、冷却システムの模擬試験、熱機械繰り返し試験などを追加すべきとの提言があった。</p> <p>実施者側で計画を見直し、30m ケーブル検証試験において、超電導ケーブルが室温から液体窒素温度に冷却される際に発生する引張力、圧縮力による、超電導ケーブルの特性への影響の評価を検証試験に追加する。また、冷凍機が故障した際のシステムの挙動、短絡電流のような定格電流を超えた過電流が流れた際のシステムの挙動、保護方法の検討なども実施するようにした。このように、30m ケーブル検証試験の計画を変更し、試験内容を充実させることとした。このため、30m ケーブル検証試験の試験期間については、冷熱サイクル試験（2 ヶ月）、限界性能試験（4 ヶ月）を追加し、6 ヶ月延長した。</p> <p>(2)事業期間の変更</p> <p>上記の実施内容の変更を反映すべく、全体の計画見直しを行った。この際、実証場所では負荷が大きな夏場、あるいは冬場は、系統が重負荷となる場合もあり、特に電力設備の停止を伴うような工事を実施することが困難である。ある程度の期間の設備停止が可能な時期としては、5 月あるいは 11 月が適していることから、これを考慮した結果、超電導ケーブルと系統との接続は H23 年 11 月頃となり、事業期間を当初の 5 年から 1 年延長し、6 年とするようにした。この計画変更については、H21 年 2 月に開催された NEDO 主催の超電導技術委員会にて審議され了承頂き、その後 NEDO 内の手続きを経て契約変更を行った。</p> <p>(3)東日本大震災による計画変更</p> <p>2011 年 3 月 11 日に東日本大震災が発生し、復興工事や電力需給の逼迫の影響により、本プロジェクトの変電工事の一部や冷却システム検証試験に、繰り延べや遅れが生じた。その為、関係各署と協議し、プロジェクト終了期間をさらに 1 年間延長することになった。一方、実用化を加速するにあたっては、大容量・高効率で低コストな冷凍機開発や、実適用場所の一つのターゲットになる発電機引出し線用の大電流ケーブルの開発などが必要であり、この延長期間において、本プロジェクトの予算を活用しながら、課題を前倒して実施することを提案し、NEDO 主催の超電導技術委員会（2011/9/27）にて了承頂いた。</p> <p>(4)プロジェクトリーダーの交代</p> <p>事業開始時は、住友電工の畑執行役員（当時）がプロジェクトリーダーに任命され、その役務に就いていた。事業の最初の 2 年間は、ケーブルの低損失化、短絡電流対応といった、ケーブルの要素開発を中心とする開発内容であり、ケーブル技術、超電導技術の専門家である畑執行役員が務めていた。事業の 3 年目を以降は、実証ケーブルシステムの構成、実証場所での運転などを検討し、実際に実証場所での工事、系統接続運転を行うことになることから、プロジェクトリーダーを系統技術・運転に詳しい東京電力の原技術開発研究所長に交代した。</p> <p>その後、原氏が東電記念財団に出向され、プロジェクトリーダーを継続することが難しくなったことから、平成 25 年 6 月に、東京電力・技術開発センターの本庄グループマネージャーに交代となった。</p>							

中間評価結果への対応	<p>(1) 総合評価 冷却システムの評価や技術課題の明確化についての体制の強化が望まれる【1】。また、単なる規格基準の国際標準化だけを指すのではなく、技術そのものを世界標準とするための活動が望まれる【2】。</p> <p>(2) 事業の位置付け・必要性 本格的な実用化に向けての課題として、長期に渡る信頼性など、本事業でカバーしきれない部分が残る。本事業終了後の実用化に向けた課題解決の方向性を本事業の期間中に明確にしておく必要がある。【3】</p> <p>(3) 研究開発マネジメント 今後の地球環境問題を考える際に、高温超電導ケーブルの低損失性が寄与できるのは、国内よりも東アジア諸国を中心とする海外電力網である可能性が高い。世界への貢献といった観点からも、プロジェクトの位置づけを見直すことも必要である。【4】 冷却システムに関して比重が軽いように感じる。可動部分を有するなど、信頼性を考える上では重要な部分である。冷却システムの評価や技術課題の明確化についての体制を強化すべき。【5】また、技術開発目標が国内の地中送電網への適用を目指した仕様となっている。開発される高温超電導ケーブル技術は世界的にも貢献が大きい技術であることを鑑みると、送電電圧階級毎の適応性などの設計研究では世界的なニーズも踏まえた検討を今のうちから行っておくことも必要である。【6】</p> <p>(4) 研究開発成果 今回は検証用として30m長のケーブルが製造されたが、30mの妥当性と製造技術の観点からの十分性への言及が若干弱かったように感じられた。これらの指標の妥当性についても示してほしい。【7】研究開発成果の発表先を見ると国内が中心であるが、むしろ海外を中心に発表することも検討してほしい。【8】</p> <p>(5) 実用化・事業化の見通し 実用化には、冷却システムの高効率化、低コスト化が実現できるかが大きなポイントである。特に、事業化までには、冷却システムの電力使用量の低減の問題を解決しなければならない。【9】成熟した日本の電力システムでは導入へのハードルが高い場合も、国際的にはそうでないことは多くある。日本での導入を前提にした規格化、標準化にこだわらず、柔軟な対応が必要である。【10】国際標準化に関しては、データの提供にとどまらず、最大限標準化そのものをリードすることが望まれる。【11】</p> <p>(指摘点に対する対応) 【1】冷却システムの評価や技術課題の明確化を図るため、冷却システムの検証期間の拡張や間接冷却方式の課題抽出を実施。また、プロジェクト推進のためのWGに冷却関係の専門家に参加頂くことを検討。 【2】今後、IEEE、CIGREなど電力関係国際会議あるいはASC、EUCAS、ISS、ICECなどの超電導応用国際会議での情報発信をさらに積極的に実施。また、CIGREにおける超電導ケーブル試験法に関するWGに日本委員として参加。 【3】長期に亘る信頼性評価など、現在の事業で実施が予定されていない課題について、解決の方向性を本事業の期間に明らかにした。 【4】超電導ケーブルシステム技術の世界展開を図るためにも、まずは国内実システムでの実証試験を通じて、運転技術や運用ノウハウを確立することが重要であると考えている。このため、本事業においては実証試験の実施に注力した。 【5】【1】に記載 【6】イットリウム系超電導電力機器技術開発PJにおいて、超電導ケーブルの高電圧化および大電流化の研究開発が行われている。このPJ実施者と緊密に情報交換しながら、超電導ケーブルの実適用化のための設計研究を進めた。 【7】超電導ケーブルの製造技術検証の面からは、ドラム巻き取り等の検証のため、30m以上の長さが望ましい。一方、製造に要するコストや冷却システムコストなど、費用対効果を考慮して、今回の検証用ケーブル長を30mと決定した。 【8】【2】に記載 【9】【1】に記載 【10】【2】に記載 【11】検証試験結果や実システムでの実証試験結果は、標準化検討において大きな武器であり、これらを有効に活用することで標準化作業をリードした。また、CIGREにおいて始まる標準化のWGに日本委員として参加した。</p>	
	事前評価	平成18年 2月に実施済み
	中間評価	平成21年 11月に実施済み
	事後評価	平成26年 9月に実施予定

Ⅲ. 研究開発成果
について

1 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証

- ・低交流損失型 TypeAC 線材を開発し、これを超電導ケーブル導体に適用した結果、交流損失 0.8 W/m/ph @ 2kA となり、中間目標 (1 W/m/ph 以下) を達成した。また、短尺ケーブルにて、交流損失の最終目標 1W/m/ph@3kA 以下を達成した。
- ・ケーブル構造として、140mm² のフォーマ、77mm² の銅シールドをもつ構造とし、最大 31.5kA、2 秒の短絡電流が通過してもケーブルにダメージがないことを確認した。また、もらい事故模擬試験を実施し、10kA、2 秒の短絡電流通過直後に 1.75kA の通電、及び対地定格 38kV の課電が可能なることを確認した。以上の結果、中間目標を達成した。
- ・中間接続部の接続抵抗部を開発し、導体部は 6.7nΩ/相@3kA、シールド部は 2.5nΩ/相@3kA であることを実証し、最終目標である 1μΩ/箇所@ 3kA 以下を達成した。また、ケーブルシステムに必要な中間接続部、終端接続部の設計を終えた。
- ・30m ケーブル検証システムとして、30m 級三心一括型超電導ケーブル、中間接続部、終端接続部、液体窒素循環冷却システムを製作し、システム構築を行った。構築時、中間接続部、終端接続部のケーブルとの組合せ施工手順を確認し、管理項目を把握した。
- ・本システムを用いて、①システムでの電氣的、機械的、熱的評価の実施、②冷却・昇温のヒートサイクル試験、③限界性能試験 (短絡電流模擬、冷凍機故障など) を実施した。また、対地電圧 51kV、電流 2kA (8 時間 ON、16 時間 OFF) の条件で、1 ヶ月の連続課通電試験に成功した。尚、この条件は 30 年間の加速試験に相当するものである。

2 トータルシステム等の開発

- ・実証ケーブルの基本構成を検討し、実証場所を東京電力管内の旭変電所 (横浜市) に決定した。また、実証場所での超電導ケーブルと既存設備との接続形態について検討し、遮断器、断路器等と組み合わせた接続方法を決定した。さらに実証場所での系統条件 (短絡電流条件、雷インパルス条件等) を踏まえ、超電導ケーブルへの基本仕様をまとめた。
- ・冷却システムのコンセプトについてまとめ、送電を停止しないシステム、負荷に追従可能なシステムを目指すこととした。冷却方式については、間接冷却と直接冷却から直接冷却方式を選択した。実証場所での電力負荷を想定し、冷却システムの必要冷凍容量を試算、1kW 級冷凍機の台数を 6 台に決定した。また、冷凍機、ポンプの構成を検討し、冷凍機については 2 台×3 並列の並列接続とすることとした。
- ・メーカー工場にて検証用冷却システムを構築し、機器性能、制御性、信頼性、バックアップ特性等の健全性を確認した。また、本検証で得た知見を生かし、旭変電所での実証システム用冷却システムの詳細設計をまとめた。
- ・超電導ケーブル実用化時の冷却システムへの要求事項、課題を整理し、大容量・高効率型冷凍機の開発目標 (冷却能力: 5kW、COP: 0.1、メンテナンス間隔: 30000 時間以上) をまとめた。また、ターボ圧縮機・膨張機的设计、製作、単体試験および、熱交換器、ポンプ等を含む冷却システムを構築し、開発目標を達成した。
- ・12kA/22kV 大電流ケーブルの仕様を満たす基本設計を確立し、試作した短尺ケーブルにより 12kA 安定通電、63kA、0.6sec の健全性を確認した。また、シミュレーションにより短絡時の温度解析結果において実測値と相違がないことを確認した。
- ・コンパクトな大電流ケーブル用端末の基本設計を確立した。また、試作した検証用機器にて電流リードの通電損失評価、FRP ブッシングの絶縁特性の健全性を確認した。

3 送電システム運転技術の開発

- ・実証場所である旭変電所で予想される短絡電流および継続時間をシミュレーション及び規格から検討し、事故直後の課電通電が「無」となる最大電流は、31.5 kA-2 秒、課電通電が「有」となる最大電流は 10 kA-2 秒であることを確認し、これを超電導ケーブル設計にフィードバックした。
- ・実証場所でのサージ電圧は、EMTP 解析の結果、200kV 程度であり、66kV 系統での LIWV (雷インパルス耐電圧): 350 kV よりも小さいことが判明した。
- ・常時運転については、冷却システムで超電導ケーブルの温度、圧力、流量を制御することが重要で、それぞれの制御指針を示した。温度制御については、冷凍機の ON/OFF 運転を試行しており、ケーブル入口温度±1K 程度で制御できることをシミュレーションにて示した。また、圧力制御については、自然加圧方式やヒータ方式による制御指針を示した。
- ・異常時の運転においては、まずは超電導ケーブルシステムに異常が起こった場合に想定される故障モードについて整理を行い、対応案について検討した。警報については、各故障モードについて超電導ケーブルの系統からの切り離しの要否を検討した上

<p>Ⅲ. 研究開発成果について</p>	<p>で、重故障と軽故障に分類した。</p> <p>4 実系統における総合的な信頼性の検証</p> <ul style="list-style-type: none"> ・現在使用されている CV ケーブルや OF ケーブルの試験法を参考に、超電導ケーブルが実系統での長期使用に耐える特性を持つことを確認するための試験項目およびそれらの実施時期や実施方法などの試験計画について検討した。 ・実証設備の構築にあたり、遮断器等の変電設備や冷却システム室、制御室等の建屋、警報、監視システム等を構築した。 ・住友工場にて、超電導ケーブル及び接続部を製造し、出荷試験により良好であることを確認した。また、実証場所にケーブル布設を行い、損傷が無いこと、端末、ジョイントの現地施工を実施し、冷却後の性能が良好であることを確認した。 ・冷却システムを実証場所に構築し、気密試験や、単体での動作確認、故障時対応試験等を行い、良好を確認した。また、各機器の性能試験を行い、系統連系前の状態として設計値以上の機器能力を確認した。冷却能力の温度依存性は 19.7 W/K (@1 台) であり、冷凍機の経年劣化による冷却能力低下への対策として、運転温度上昇により冷却能力が増大できることを確認した。冷却システム制御、および機器の切り替えは、システム検証と同様、温度・圧力・流量等の主要パラメータの変動時や、電源異常時において、シーケンス通りに正常に機能し、機器故障時やローテーション時においても、正常動作されることを確認した。 ・ケーブルと冷却システムを組合せた検証試験として初期冷却手順の確認を行い、ケーブルに損傷を与えずに LN2 温度までの冷却し、冷却システムでの流量・圧力異常や絶縁破壊に至る水分・不純物の混入防止等の作業手順を確立した。また、冷却システム内の差圧管理等により時間短縮することができた。 ・系統接続前の検証試験として、電気特性の健全性や、初期冷却手順、最適な冷却制御パラメータを確認した。 ・実証用ケーブルシステムと 66kV 実系統を接続し、1 年 2 カ月に亘る実系統連系運転を達成した。期間中、送電停止に伴うような異常はなく、安定した運転を確認した。 ・定期的に臨界電流測定等の各種検証試験を行い、ケーブル電気特性、絶縁特性の健全性を確認した。ケーブル熱損失については、今回の実証試験では臨界電流値に対し負荷率が小さかった為、交流損失による影響は小さく、外部からの侵入熱が主要な要因であった ・長期運転特性として、経時的な真空度悪化によるケーブル熱負荷、冷凍機冷却能力の低下を確認した。対策として、真空引きによる熱侵入低減や、メーカー推奨時間を基準とした冷凍機メンテナンス等を実施し、熱収支改善を図った。また、日射による管路表面の温度上昇が確認されたため、地中内に管路布設される通常の運用を考慮し、遮熱処理により温度低減を実施した。 ・系統切り替えを含む実系統連系時の負荷変動に対しては、冷媒温度、圧力、流量等、安定した運転制御を確認した。系統連系運転期間中の警報発生の実績は、重故障はなく、軽故障の発生のみであった。また、期間中、外部からの地絡電流流入、健全相の対地電圧上昇を経験したが、安定運転を維持することができた。 ・計画に基づきケーブル、冷却システムのメンテナンスを実施し、劣化特性や性能を評価した。 <p>5 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究</p> <ul style="list-style-type: none"> ・CIGRE B1 にて超電導ケーブルの試験法に関するワーキンググループ (WG) を設立するかどうかを検討するタスクフォース (TF) に、本プロジェクトでの検討結果を日本の例として情報提供した。この結果、TF において超電導ケーブルの WG が設立されることが決定し、超電導ケーブル試験項目とその内容について議論され、超電導ケーブル試験法におけるガイドライン発行した。 ・超電導ケーブルのメリットを評価する際に必要な項目についてまとめた。また、具体的な適用箇所を発電機引き出し線とした場合において、現状と低コスト化が進んだ場合での既存ケーブルとのコストを比較した。 ・旭変電所での超電導ケーブルシステムの搬入・据付・長期の実系統試験の全試験工程を対象とした時に、対応が必要となる関連法規を調査し、関係省庁と協議の結果、冷却システムを含む超電導ケーブルシステム全体は電気工作物として電気事業法が適用となる事を確認した。 ・実証試験を行うにあたり考慮すべき関連法規を整理し、必要となる許可、届出の申請手続きや方針案等を特記事項としてまとめた
----------------------	--

	投稿論文	[査読付き] 24 件、[その他] 64 件
	特許	出願済み 27 件 (※本PJ 推進のために、受託者費用で実施した関連研究に基づく特許出願を含む)
	その他の外部発表	新聞、テレビ報道件数 7 件
IV. 実用化・事業化の見通しについて	<p>(1) 超電導ケーブルの適用例と適用効果 超電導ケーブルの有効な適用例としては、①基幹系の電力送電網への導入において、既存 275kV ケーブルと同容量の電力を 66kV 超電導ケーブルで送電する場合、②経年化した 154kV の OF ケーブルの取替策としての適用、③発電所の引出口（発電機端～変圧器間）などの大電流が流れる部分への適用や、経年化した大容量 POF ケーブルの取替策、が考えられる。超電導ケーブルの適用により、大幅なコスト低減が期待できるとともに、送電ロスを半分程度まで低減でき、CO₂削減が期待できる。</p> <p>(2) 波及効果 諸外国においても交流超電導ケーブルの実証プロジェクトが進行中である。特に米国においては老朽化した送電ネットワークの近代化を目指したスマートグリッド構想が進行中で、超電導ケーブル技術もこの対策の一環として取り上げられている。本技術開発を早期に確立することで、諸外国の超電導ケーブル導入プロジェクトでの本技術の採用など、海外への波及効果も期待できる。</p> <p>地球温暖化対策として今後加速的に導入量が増加すると予想されている太陽光発電や風力発電などは、いずれも発電端は直流であり、ウィンドファームのように大規模集積化が進むと直流での直接送電のニーズが高まると予想される。また、データセンターなどでの電力消費は直流であり、低電圧大電流の直流配電システムへのニーズも高い。このような直流送電システムに対しても、本技術開発で培った超電導ケーブル技術の展開が可能で、これにより送電ロスはさらに大幅に低減でき、より大きな省エネルギー効果と CO₂削減効果をもたらすことができる。</p> <p>さらに本技術開発により、加圧液体窒素を用いた冷却システムの長期安定運転技術が確立されると、その冷却技術は超電導変圧器、超電導限流器、SMES（超電導電力貯蔵装置）など、その他の超電導電力機器の冷却技術として幅広く展開していくことが可能である。</p>	
V. 基本計画に関する事項	作成時期	平成 19 年 3 月 策定
	変更履歴	<p>平成 21 年 3 月 研究開発期間の変更 平成 22 年 3 月、2 事業（高温超電導ケーブル実証プロジェクト、イットリウム系超電導電力機器技術開発）を統合して新たに制定。 平成 23 年 1 月、平成 23 年度より、研究開発項目①「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」の共同研究事業（NEDO 負担率 2 / 3）への変更及び加速による研究内容を追加する変更。また、研究開発項目②「イットリウム系超電導電力機器技術開発」について、中間評価を踏まえ開発項目（イ）の内容縮小並びに開発項目（ロ）の実施内容追加、開発項目（二）の追加による改訂。 平成 23 年 7 月、根拠法を変更。 平成 24 年 3 月 研究開発項目①「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」の実施期間を延長。 平成 25 年 3 月、根拠法を変更。 平成 25 年 6 月 研究開発項目①「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」のプロジェクトリーダーを変更。</p>

用語集

索引	項目	解説
B	Bean モデル	超電導の振る舞いを記述するモデル。簡易的に臨界電流密度が磁場によらず一定であると仮定する。
	Bi2223 銀シース線材	Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{10+d} を用いた超電導線材。母材として銀を用いている。超電導臨界温度は-163℃ (110K)。
C	CIGRE	国際電力大会議
	CO ₂ 排出係数	1kWh 当たりの電力量を発電するのに、CO ₂ 排出量がどの程度となるかを示す係数。単位は、kg-CO ₂ /kWh が多く用いられる。
	COP	成績件数 (Coefficient Of Performance) とは冷凍量/所要動力で表される。
	CV ケーブル	Cross linked polyethylene Vinyl cable。架橋ポリエチレンを絶縁体とし、外側に遮蔽層と防食層を設けた乾式ケーブル。
D	DI-BSCCO 線材	従来の焼結工程を見直し、高圧焼結することにより臨界電流、歩留まり、製作単長などを飛躍的に向上させた Bi2223 高温超電導線材の商品名。
E	Ellipse モデル	Norris によって提唱された、超電導線材の通電損失を記述するモデルであり、主に低アスペクト比の楕円形状の線材の特性を良く記述する。
	EMTP	Electro-Magnetic Transients Program。電力系統での回路素子情報をコンダクタンスと電流源に等価変換し過渡現象解析する汎用デジタル計算。電力設備の耐雷、絶縁設計に使用されている。
F	FMEA (Failure Mode Effect Analysis)	故障・不具合の防止を目的とした、潜在的な故障・不具合の体系的なボトムアップによる分析方法。製品設計段階における設計 FMEA と、製造工程設計段階における工程 FMEA に分けられる。
	FRP ブッシング	端末などの電流導入部 (電流リードなど) の絶縁に用いられる管状絶縁物のこと。絶縁材料として FRP を採用しており、極低温雰囲気での耐久性に優れる。
	FTA (Fault Tree Analysis)	発生原因の潜在危険を論理的にたどって発生頻度を分析し、それぞれの発生確率を加算する故障・事故分析手法。望ましくない事象に対し、その要因を探るトップダウンの解析手法を特徴とする。これは、類似の故障モード影響解析の手法 FMEA とは逆の取り組みである。
G	GIS	Gas Insulated Switch。絶縁性能の高い六フッ化硫黄ガスを使用したガス遮断器。空気絶縁の場合に比べ、用地面積は少なくて済むが、工事費は高くなる。
	GM 型パルス管	パルス管冷凍機のうち、常温部に設置する圧力波発信源として圧縮機を別置きとし、圧力変動を弁の切替で行う冷凍機。
I	IEC	国際電気規格
J	JIS 圧力容器規格	強制法規における技術基準として制定され、JIS B8265m JIS B8266 を中心に整備された J I S 圧力容器規格体系のことをいう。
L	LCR メータ	LCR メータは L (インダクタンス)、C (キャパシタンス)、R (レジスタンス)、Z (インピーダンス) などのパラメータを交流で測定する装置である。発振器の信号を試料に加え、試料両端の電圧と、試料を流れる電流を求めて、両者の値からベクトル演算によってこれらパラメータを求める。
	LIWV	→雷インパルス耐電圧値。
M	ML-UCD モデル	多層超電導導体の交流損失を記述するモデル。各層に流れる電流が均流化されているという仮定のもとで、Bean モデルに基づいて交流損失を計算する。

N	n 値	超電導線材の電流－電圧特性を、電流を横軸として両対数グラフ化した場合の傾き。n 値が大きいほど、電流の増加に伴う電圧の発生が急激に起こる。
O	OF ケーブル	Oil-Filled cable。導体上に絶縁紙を巻き、外側に金属シースと防食層を設けたケーブル。金属シース内部に低粘度の絶縁油を脱気脱湿状態で充填して使用する。
P	PAS	IEC における公開仕様書
	PID 制御	フィードバック制御のひとつ。目標値と制御量の差を偏差値とし、偏差値の大きさに比例 (proportional) した動作 (P 動作), 偏差値の積分(integral)に比例した動作 (I 動作), 偏差の変化量 (differential)に比例した動作を組み合わせる制御。
	PID 制御用コントローラ	制御目標値と制御量の差である制御偏差を打ち消すために行なう動作を制御動作と言い、その基本動作に PID 動作がある。P は比例動作、I は積分動作、D は微分動作を表す。これらの制御を行なう機器を PID 制御用コントローラと呼ぶ。
	PLC	プログラマブルコントローラの略。リレー回路の代替装置として開発された制御装置であり、工場などの自動機械の制御に使われるほか、エレベーター・自動ドなど身近な機械の制御にも幅広く使用されている。
	POF ケーブル	パイプタイプ OF ケーブル。一般的に鋼管などのパイプに OF ケーブルを引き込み、絶縁油を充填、循環させる電力ケーブル。
	PPLP	溶融押出ポリプロピレン (PP) フィルムの両側をクラフト紙でサンドイッチした構造をしている。その優れた絶縁破壊特性と低誘電率、低 $\tan \delta$ により低誘電損失特性を有し、数多くの AC および DC 超高压ケーブル用絶縁材料として採用されている。
	PV 値	PV 値 (Process Value) とはフィードバック制御における制御対象となる値を指す。温度制御ならば対象となる場所の温度となる。
S	Strip モデル	Norris によって提唱された、超電導線材の通電損失を記述するモデルであり、主に高アスペクト比の薄膜形状の線材の特性を良く記述する。
T	$\tan \delta$	電気機器に使用する絶縁物に交流電圧を印可すると、絶縁体の漏れ電流による損失、誘電分極にもとづく損失及び部分放電にもとづく損失などが生ずる。このような損失分の電流位相は、理想的な絶縁物に流れる無損失電流より遅れる。その遅れ角 δ の正接を $\tan \delta$ (誘電正接) とよぶ。 $\tan \delta$ 値は絶縁物の寸法や、形状に無関係の誘電体損失の大小を表す指標として、絶縁物の吸湿、乾燥、汚損、ボイドの状態などの絶縁の性状、あるいは劣化の程度を判断する値として使用されており、 $\tan \delta$ 試験は絶縁材料、特に電力機器の絶縁試験の重要な試験項目である。
	Technical Committee 20	国際電気標準会議 (International Electrotechnical Commission) 内に設置される CV ケーブルなどの既存ケーブルの標準化を議論する委員会。TC20。超電導関連の標準化委員会は TC90。
	TS	IEC における技術仕様書
	TypeACT 線材	住友電工製の Bi2223 線材の呼称。超電導フィラメントに撚りが加えられているツイスト線材であり、銀シース線材の両面が金属テープにより補強されている。
	TypeHT 線材	住友電工製の Bi2223 線材の呼称。超電導フィラメントに撚りが加えられていない線材であり、銀シース線材の両面が金属テープにより補強されている。

U	UPS	Uninterruptible Power Supply。入力電源に停電などの異常が発生しても、一定時間は停電することなく電力を供給し続ける電源装置。無停電電源装置。
あ	アンカーボルト	構造部材(木材や鋼材)もしくは設備機器などを固定するために、コンクリートに埋め込んで使用するボルトのことを指す。アンカーボルトは、引張りやせん断に抵抗することによって、コンクリートに取り付けられた構造部材(木材や鋼材)もしくは設備機器が、分離・浮遊・移動・転倒することを防ぐ役割をもつ。
	安全弁	ガスや蒸気などの配管や容器において爆発を防ぐための安全機構を有する弁。密閉した容器などで内圧が上がりそのまま圧力上昇すると内圧のため容器が破損する。このような爆発をさけるために安全弁が使用され、容器の内圧が上がり過ぎないようにする治具。
い	イットリウム線材	YBCO あるいは ReBCO (Re: 希土類元素) の超電導材料で作られた線材。一般的に、テープ状であり、超電導部分は薄膜形状になっており、薄膜線材ともいわれている。
	インピーダンス	直流におけるオームの法則の電気抵抗の概念を複素数に拡張し、交流に適用したもの。インピーダンスにおいて、その実部 (Re) をレジスタンス (resistance) または抵抗成分、虚部 (Im) をリアクタンス (reactance) と呼ぶ。
	受入試験	出荷製品が「形式試験供試品と同等の製造・品質管理状態であることを確認」するために行うもの。出荷試験と同義。ここで形式試験とは、ある形式製品の設計・製造および施工方法を「認定」するために行うものである。
う	渦電流損失	電磁誘導により発生する渦電流によって生じるジュール損失。
え	液体窒素循環ポンプ	超電導ケーブルシステムへ、冷却された液体窒素を供給するためのポンプ。単に窒素循環ポンプ、あるいは循環ポンプと記載している場合がある。
	液体窒素循環冷却	被冷却体を冷却する 1 手法。冷凍機などで冷却された液体窒素を循環ポンプにより被冷却体に圧送し、液体窒素と被冷却体で熱交換を行うことにより冷却を行う。熱交換により温度の上昇した液体窒素は再び冷凍機などに圧送され、その温度は再び低下する。この循環サイクル回路を形成することにより、冷媒は蒸発することなく閉ループ循環を続けることができ、液の補給が不要であるという特徴を有する。
	エコキュート	ヒートポンプ技術を利用し空気の熱で湯を沸かすことができる電気給湯機のうち、冷媒として、フロンではなく二酸化炭素を使用している機種の種類総称。
	塩害	塩じんによる汚損のため、がい管の商用周波フラッシュオーバ電圧が低下すること。塩分付着密度および海岸からの距離の 2 つの条件をもとに区分されている。
お	オフセット	一般的には基準となるある点からの相対的な位置のことである。この場合ケーブル 3 心よりの状態と 3 芯に相関距離を設けた状態の位置関係をさす。
	オープン容器	浸漬冷却を行うため、冷媒を大気開放で貯液するための容器。
か	碍子	電線とその支持物とのあいだを絶縁するために用いる治具。
	回線	電力輸送を行う単位となる導体または導体系。例えば、三相交流では、3 つの導体を 1 回線という。
	回線延長	回線ごとの起点から終点までの線路長の合計。
	開発試験	開発品の設計・製造および施工方法が、「実用可能であることを実証する」ために行うものである。
	開閉サージ	電源、開閉器、ケーブルおよび架空線が種々組み合わせられた線路に電源、負荷の開閉によって発生し進行する異常電圧または電流。

	架空線	主に空気を絶縁体とした送電線路で、雷撃により雷サージの発生する可能性のある線路。
	片端接地	高圧ケーブルの片端でしゃへい層を接地する方式。電流が流れないためシース損失はゼロとなるが、サージが侵入した際開放端に異常電圧が生じる恐れがあり、避雷器などでその抑制を行う。
	過電圧	常規商用周波運転電圧を超えて発生する電圧。雷過電圧と開閉過電圧がある。
	可とうシールド管	液体窒素中で編索線部にシールドを取り付ける必要がある、熱収縮によりシールド部分に機械力が働くことを考慮して伸縮構造を持つフレキシ管をシールドとしたもの。
	過負荷	定格容量を超えた負荷。
	(変圧器) 過負荷運転	(変圧器の) 定格容量以上の負荷送電を行なう運転の事。
	過負荷電流	定格電流を超えた電流。
	過冷却	過冷却 (sub-cool) とは沸点と凝固点の間の液体の状態を指す。液体窒素では大気圧下で 77K から 63K の間となる。
	間接冷却方式	冷却システムにおいて、冷媒がブラインと呼ばれる不凍液を冷却し、これを介して目的物を冷却する方式。
	管路	主に地中に埋設されて活用される、ケーブルを収容するための管状の部材。ケーブルの引き入れや引き抜きを容易にし、布設後は外傷防止の役目を果たす。
き	逆フラッシュオーバ	鉄塔または架空地線が雷撃を受け、鉄塔の電位が著しく上昇して、鉄塔から電力線へフラッシュオーバすること。
	距離リレー	電圧および電流を入力量として、電圧と電流の比の関数が所定値以下となったとき動作するリレー。この比は、継電器のみるインピーダンスと呼ばれ、インピーダンスは送電線の距離の電氣的尺度であるので、距離継電器と呼ばれる。
	銀安定化層	超電導線材において超電導状態が維持できなくなった際の電流分流の役割を担う。また、超電導体そのものを機械的に保護する役目をもつ。
く	鞍型ピックアップコイル法	超電導線材の磁化損失測定に用いられるピックアップコイルの一種。線材面に平行な磁場に対する測定に用いられる。テープの一部分を囲む直方体面上にピックアップコイルを巻き、その面上での電界を測定することにより、マグネット磁界と合わせてポインティングベクトルを求めて、損失を算出する。
	クラフト紙	OF ケーブルの主絶縁材料として通常は絶縁油を含浸して使用する電気絶縁強度の高い絶縁紙。超電導ケーブルにおいて液体窒素含浸条件下で使用しても高い絶縁強度を有する。
け	軽故障	重故障には満たないが、想定し得る運転状況からの逸脱を検知して発信される故障情報。
	系統事故	地絡事故、短絡事故、断線、またはそれらが複合したことにより、線路または機器が送電不能に陥ること。通常、事故区間が遮断され系統全体は保護される。
	ケーブル	一般的には、電力用ケーブル、通信用ケーブル等の総称だが、前後の文脈から明らかな場合は、超電導ケーブルを単にケーブルと表記している場合がある。
	ケーブルコア	超電導ケーブル断熱管内に挿入されるコア。主に、導体層、絶縁層、シールド層から構成される。
	ケーブルドラム	運搬及び保管のためケーブルを巻き取る装置。巻わく。
	ケーブル保護リレー (Ry)	旭変電所の実証ケーブルシステム内での電氣的故障を検出するための電流差動式リレー。

こ	高温超電導体	1986年以降に発見された酸化物を中心とした超電導材料の総称。それ以前の超電導体の使用が液体ヘリウム温度で行われていたことに対して、高温超電導材料は液体窒素にて超電導特性を示すことから、相対的な意味で「高温」と名づけられた。
	更新需要	電力ケーブルなどにおいて、その寿命が近づいてきたことにより、新規ケーブルと代替する必要がある。その需要をさす。
	後備保護リレー	何らかの原因により主保護継電器で事故線路の遮断ができなかった場合に動作する保護継電器。事故による停電範囲は主保護よりも拡大するので、動作時間は主保護よりも遅れるように整定される。
	交流損失	超電導線材・導体に発生する損失。直流通電のみであれば超電導状態であれば抵抗がゼロであるため、損失は発生しないが、交流電流（交流磁界）を行なった場合には、ヒステリシス損失、渦電流損失、結合損失などの損失が発生する。これらの損失をまとめて交流損失と呼んでいる。
	交流抵抗	導体に交流電流を流した場合の実効抵抗。銅導体の場合は同じ電流値の直流を流した場合よりも表皮効果及び近接効果によって電気抵抗が高くなる。
	故障モード	超電導ケーブル、冷却システムに発生する故障、トラブルの進展状況により分類した形態。
さ	サージ	電線路あるいは、電気所母線を進行する電圧または電流。過渡的な過電圧や過電流全般。
	サージインピーダンス	雷サージや開閉サージなどの電流、電圧を関係づけるインピーダンス。システムのインダクタンス、静電容量をそれぞれL,Cとすると $\sqrt{L/C}$ で表される。
	サージインピーダンスローディング(SIL)	送電線内での無効電力の発生と消費がバランスする送電電力のこと。
	最高使用電圧	運用時にケーブルにかけられる電圧の最大値。
	再送電	短絡あるいは地絡事故が発生した際に、事故点を遮断した後に再び送電を開始すること。
	サブクール度	液体窒素飽和温度と過冷却液体窒素温度の差
	三心一括型	3つのケーブルコア（導体、絶縁体、シールド等からなる）が一つの断熱管の中に収納された超電導ケーブルの構造
	三相同軸型	3つの導体が同軸上に形成されたもので、各導体間には電気絶縁層が介在する。この導体が一つの断熱管の中に収納された超電導ケーブルの構造。
	残存性能	長期試験などを経験したケーブルが最終的に示す性能。初期との性能比較で、経年による劣化の有無を確認する。
	残留磁束	物質が対象かつ周期的に磁化された状態にあるとき、磁化力がゼロとなる磁束密度。
し	シーケンス	機器を自動制御する際の、あらかじめ設定しておく動作の順序。
	シールド	導体層に通電した際に発生する磁場を外部に漏らさないように、導体層と逆位相の電流を誘起させる層のこと。
	磁化損失	超電導線材に交流外部磁界を印加したときに生じる損失。
	軸方向磁場	超電導ケーブルの長手方向に発生する磁場。超電導層を形成する際に、超電導線材を芯材に対してスパイラル形状に巻付けるため、通電時に径方向だけでなく軸方向にも磁場が発生する。
	試験法	ケーブルなどの製品や部品の品質を確認するための試験の方法。
	事故点	線路に発生した絶縁破壊点、もしくはその点を含む切り離し可能な線路区間。早期の事故復旧に関わるものは後者である。

事故電流	系統事故に伴って流れる異常電流。短絡電流と地絡電流に大別される。
実系統	実際に電力が送電されている電力系統
実証（用）ケーブルシステム	旭変電所に設置された超電導ケーブル、中間接続部、終端接続部、監視システム等の総称。
実証ケーブルシステムの付帯機器	旭変電所における超電導ケーブル実証に必要な変電設備を指す。主要構成要素は、遮断器、断路器、ケーブル保護 Ry、保護・遮断システム等である。
実証システム	旭変電所における超電導ケーブル実証に使用される設備全体を指し、主要構成要素は実証ケーブルシステム、冷却システム、および付帯機器である。
遮断器	電力系統において、負荷電流や事故電流を遮断する能力を有する開閉器で、遮断方式により、ガス遮断器、空気遮断器などの種類がある。
遮断失敗	遮断器が何らかの原因により遮断できなくなる現象。
遮蔽電流	遮蔽層（シース層）を両端接地した際、導体電流により誘導される電流。
終端接続部	ケーブルの端が気中リード線と接続できるように接続端子を備えた接続箱。ケーブルヘッド。CH。超電導分野での通称は、「端末」。ただし、「端末」はケーブルの切断面に施す防水キャップの意で使用されることもあるので注意が必要。
出荷試験	→受入試験
主保護リレー	電力系統は何重にも組み合わせた保護継電器（リレー）によって保護されている。主保護継電器は、ある保護区間内に発生した事故に対し、一番目に動作するよう整定された保護継電器。
竣工試験	出荷試験に合格した製品が現地布設されるまでの間に、外傷や過度のわん曲などが原因で、設備が備えるべき性能を損なっていないか確認する試験。電気設備技術基準の解釈に基づいて行う電気試験も含む。
昇温	冷却を停止し、系内の温度を上昇させること。
真空断熱	熱の伝導のうち気体の対流熱伝導を抑制するため、断熱層を真空状態にする断熱方式。一般的には放射熱伝導を抑制するためのスーパーインシュレーション（多層断熱材）と組み合わせられて利用される。
浸漬冷却	液体窒素等の冷媒中に冷却対象物をそのまま浸して冷却すること。
振動レベル	振動加速度の実効値に対し、人体感覚に基づく補正を行い得られる値。単位はデシベル。単位記号は dB。
振動加速度レベル	振動の物理的なエネルギーの大きさを示す量で、単位はデシベル。単位記号は dB。
侵入熱	超電導ケーブルの断熱管外部（室温部）から内部に侵入する熱。超電導ケーブルでは侵入熱を抑えるため、二重の SUS コルゲート管の間を真空引きし、伝熱を抑えると同時に、スーパーインシュレーションと呼ばれる熱絶縁体を巻き付けて、輻射に伴う侵入熱の低減を行なう。
重故障	超電導ケーブル運転に重大な影響を及ぼす異常を検知して発信される故障情報。
重潮流	定格電力に近い電力の流れ。
従来ケーブル	既に実用化されている電力ケーブル。CVケーブル、OFケーブル、POFケーブルなどがある。
ジュール損失	電気抵抗×（電流の2乗）であらわされる発熱量。

	需給運用	時々刻々変動する需要に対し、常に供給力を確保して需要と供給力の均衡を図り、火力発電、原子力発電などの供給力を総合的に組み合わせて信頼性および経済性の高い運用を行う一連の業務。
	寿命指数	課電電圧に対する長期劣化特性を評価できる、ケーブル構造に依存する指標。CVケーブルやOFケーブルに代表される従来のケーブルの長期破壊特性は、課電電界 (kV/mm) のn乗と課電時間 (H) の積が一定になる特徴がある。ここでのnが寿命指数と定義される。
	ジョイント	中間接続部と同意。
	常温絶縁タイプ	超電導ケーブルの構造で、冷媒で冷却される部分が導体部だけであり、その上に断熱層、次に電気絶縁層、遮蔽層が形成されるケーブル。電気絶縁層は断熱層の外側にあるので、常温に置かれている。
	冗長	機器の信頼性を高める方策のひとつ。冗長とは複数の機器を用意しておくことで、待機冗長と切り替え冗長がある。待機冗長は機器が故障した際に予備機を稼動し、この間に故障機を整備する方式。切り替え冗長は定期的に機器を切り替え停止機を整備しておく方式。
	常電導	通常の金属など、有限の抵抗をもつ導体。超電導が電気抵抗ゼロであることに対する単語。
	常電導シールド層	銅などの常電導材料を用いて超電導シールド層に対して並列に設けられる層。事故電流が流れた際のバイパス回路の役割を担う。
す	水力発電所	水の落下エネルギーを用いて発電する施設。一般的には水車を用いた発電機、発生した電力を所定の電圧に変換し送電するための変圧器などで構成される。
	スターリングパルス管	パルス管冷凍機のうち、常温部に設置する圧力波発信源としてスターリング冷凍機の圧縮用ピストンを用いる冷凍機。
	スターリング冷凍機	冷凍機の種類。空間の常温側端に断熱圧縮を行うピストン、中間に蓄熱器、他端の低温側に断熱膨張を行うピストンを有する。両端のピストンが位相をずらして駆動されることで冷凍サイクルを構成する。理論的な効率理想サイクルといわれるカルノーサイクルと等しく高効率であり、小型化が容易である。
	ストレスコーン	高圧ケーブルの終端接続部において電界の集中を緩和させ、絶縁耐力を維持するために、遮へい層をコーン状にした部分。
せ	整定値	保護リレーを動作させるためのしきい値。電圧、電流、抵抗、タイマー等の数値をリレーに設定する。
	整定変更	電力系統構成の変更に伴って、リレー等の整定値を変更すること。
	接続抵抗	ケーブル超電導線材と中間接続部の縦添え超電導線材との接続は半田を使用している。その接続に伴う常電導抵抗を示す。
	線材の負荷率	超電導線材の臨界電流 (Ic) と通電電流 (It) の比 (It/Ic) によって定義される値。交流通電時には、電流のピーク値 (Ip) を用いて、Ip/Ic で定義される。
そ	送電損失	電力ケーブルが電力を輸送する際に発生する損失。超電導ケーブルの場合、ケーブルの交流損失、絶縁体の誘電損失、断熱管の侵入熱などが上げられる。また、それらの損失は極低温で発生するが、それを冷却するための動力が必要。一般に、その損失をCOPで割った値を送電損失としている。
	相分離母線	IPB(Isolated Phase Bus)とも呼ばれ、主に発電所引き出し線に用いられる。相毎に独立した金属外被 (アルミニウム製) で密封されており相間短絡を起こさない。外被内の導体は碍子で支持され、電流が大きい場合内部は強制風冷されることもある。
	相隔離	3相交流送電の、各相ケーブル間の距離。
	送電容量	ケーブルが送電する電力 (MVA)。三相交流の場合、相間電圧×電流× $\sqrt{3}$ で表される。

	素線絶縁銅撚り線	通常の銅撚り線に対して、素線（銅線）一本一本に絶縁を施したうえで撚った銅線のこと。
た	耐圧特性	耐圧力特性。容器、ケーブルなどが、内部圧力に対して示す特性。
	対地定格電圧	接地式線路において、高圧部と大地（アース）間の電圧を対地電圧、線路の定格送電時に印加される電圧を対地定格電圧という。
	たけのこ処理	タケノコの皮をはがすように超電導ケーブル終端を段々に処理していく方法。
	単心型	超電導ケーブルの構造において、一つのケーブルコアが、一つの断熱管の中に収納されているもの。
	単体運転	ケーブルを通さず、模擬負荷ヒータを使用し、冷却システムのみで運転することを指す。
	断熱管	ケーブル外部から液体窒素槽への熱侵入を防ぐ役割を担う。一般に、金属製の二重管の間にスーパーインシュレーションなどを用いた断熱層を設け、さらに高真空に保つことで熱侵入を低減する。
	断熱効率	損失を含んだ実際のターボ圧縮機またはターボ膨張機の仕事と断熱変化時の理想的な仕事の比。
	端末	終端接続部と同意
	端末容器	液体窒素を内蔵する容器と、液体窒素を内蔵した容器を真空断熱するために密封する構造を有した容器からなる2重容器のこと。
	短絡事故	交流送電の3相の内、2相が導通して起こる電気事故。
	短絡電流	電力系統の任意の地点において短絡事故が発生した場合に流れる事故電流。
	短絡発電機	短絡事故を模擬した大電流を発生するための試験設備。
	断路器	電力系統において、無負荷状態で電圧を開閉するために使用される開閉器で、通常は遮断器の前後に設置される。基本的に電流の開閉機能はない。
ち	窒素	分子量 28 の 2 原子分子。大気の 8 割を占め、空気中から分離採取される。沸点 77K、凝固点 63K であり、高温超電導体の冷却に広く用いられる。
	窒素循環ポンプ	冷却に用いる液体窒素は冷凍機を出て超電導ケーブル内を通過して冷凍機に戻り、再び系内を循環する。このためのポンプを窒素循環ポンプと称する。脈動を防ぐため遠心式ポンプが用いられ、駆動のためのモータは熱侵入を低減するため長軸でポンプ本体と接続される。
	中間接続部	電力送電線路として長尺のケーブルシステムでは製造面・輸送面よりケーブル長に制約がある場合が多くそこで数百mおきにケーブルを接続する必要がある。そのために必要となる超電導ケーブル同士をマンホール内にて接続するための機器。
	調相設備	無効電力の調整で送電線の力率を改善し受電側での電圧制御を行うための設備。
	超電導シールド層	導体層が発生する磁場を遮蔽するために、主に絶縁層の外側に超電導線材を用いて設けられる層。両端末で三相を短絡することにより、導体層に対して位相が反転した電流が誘導され、磁気遮蔽を可能とする。
	超電導導体	ある条件の下で電気抵抗がゼロとなる物質。ある条件とは臨界温度、臨界磁場、臨界電流密度を超えない範囲を指す。超電導体は、完全導電性、完全反磁性（マイスナー効果）、磁束の量子化、ジョセフソン効果などの他に類を見ない特性を示すため、省エネルギー技術など様々な応用が期待されている。また、高温超電導は 25 K（ケルビン）は絶対温度の単位で、0K=-273℃）以上に臨界温度をもつ物質で、主に銅酸化物系材料である。

	潮流	電力の流れ。
	貯液	液体窒素を系内に供給し、貯めること。
	直接冷却方式	冷却システムにおいて、冷媒が直接被冷却物を冷やす方式。
	直流抵抗	導体に直流電流を流した場合の実効抵抗。
	地絡事故	送電中の充電部とアース部が導通して起こる電気事故。一般に、短絡電流より電流値は小さい。
つ	ツイスト線材	Bi2223 線材において、超電導フィラメントに撚りが加えられている線材。
	通電損失	超電導線材に交流通電電流を流したときに発生する損失。
	通電用 CT	電力機器に通電を実施する際に用いられる変流器。
て	低温脆性	室温付近又はそれ以下の低温で、鉄鋼の衝撃値が急激に低下して、もろくなる性質。
	定格電流	設計で定められた規定条件下で作動する機器、装置等の電流範囲。
	鉄心	変圧器において、一次回路と二次回路を相互インダクタンスで結合する磁気回路。
	電圧安定性	電力系統の電圧は、発電機の出力、電圧、運転力率、負荷の消費電力、力率および系統の構成形態や変圧器の電圧調整器、シャントリアクトルや電力用コンデンサなどの調相設備などの運転状態により決定される。電力系統に何らかのじょう乱があったときに、電圧が新たな平衡点に落ち着く系統の能力または関連した性質のこと。
	電圧降下	電気回路に電流を流したとき、回路中に存在する電気抵抗の両端に電位差が生ずる現象のこと。
	電圧タップ	電氣的四端子法により2点間の電位差を測定する際に使用する電位測定線。
	電氣的四端子法	資料に対して電流を流した際に、ある区間に発生する電位差を測定する方法。電流リードと電圧リードに別々の線を用いる方法。一般に、二端子法と四端子法があるが、低抵抗の資料の測定に際しては精度の高い四端子法が用いられる。
	電磁力	アンペアが右ネジの法則に関連して電流の流れている2導線間に働く力について、両導線に流れる電流の積に比例し、両導線の間隔に反比例する力が働くことを発見した。両導線に流れる電流の向きが同方向のときは吸引力に反対方向のときは反発力になる。
	電流密度	電気導体に電界が与えられたときに、単位面積に垂直な方向に単位時間に流れる電気量（電荷）のこと。
	電流リード	電流を導入する役割をもつ導体（金属等）
	電力ネットワーク	電力系統と同義語。
	電力用規格 A-257 「22 kV CV ケーブル 用がい管形屋内外 テープ巻き式終端 接続箱」	電力会社で使用する電線や機器の統一規格として電気事業連合会が制定した規格の一つ。
と	トータルシステム	超電導ケーブル送電に必要な設備を指し、超電導ケーブル、中間接続部、終端接続部、冷却システム、監視システムからなる。
	導体接続金具	終端接続部において超電導導体に対して半田で電氣的に接続し、フォーマーに対して圧縮することにより機械的および電氣的に接続するための金具。
	導体接続スリーブ	両側ケーブルコア中心に位置する銅より線フォーマを機械的な圧縮力で接続するための部材。
	導体接続損失	導体が中間接続部、終端接続部などで、常電導導体と接続される際に、接続部に電気抵抗が発生するが、これに起因する損失。

	洞道	地中に構築する暗きょ（トンネル）。床上あるいは棚上にケーブルを布設することになる。
	銅保護層	超電導導体、シールド層近傍に設置され、端末部や接続部にて超電導導体および超電導シールドとそれぞれ電氣的に接続された銅導体を指す。超電導ケーブルにて短絡事故などが発生した場合、定格電流を超え超電導導体が常伝導化するが、このとき銅保護層に分流することにより超電導導体を保護する。
	トリップ	事故電流を遮断するための遮断器開放動作。
に	二重故障	機器の単一故障ではなく、同時に関連性の低い2箇所（以上）の機器で故障、トラブルが発生する事。
ね	熱侵入	低温容器内に室温領域から熱伝導、熱輻射などで侵入してくる熱量。熱侵入とも表記する。
	熱損失	超電導ケーブルシステムにおいて発生するジュール損や交流損失に伴う熱や侵入熱に伴う損失。これら損失に伴う熱により、冷媒の温度が上昇するため、必要な温度に冷却する必要がある。
	熱電対	異種金属の2接点間の温度差によって熱起電力が生じる現象（ゼーベック効果）を利用した温度センサ。
	熱輻射シールド	熱輻射は熱放射とも言い、物体から熱エネルギーが電磁波（波長により赤外線、可視光線、紫外線、x線、γ線）として放出される現象のこと。その電磁波を遮る部材を示す。
	熱物性値	熱伝導率、熱容量、熱収縮率等の温度依存性を有する物性値。
の	ノンツイスト線材	Bi2223線材において、超電導フィラメントに撚りが加えられていない線材。
は	バーンアウト信号	PID制御コントローラで入力値の参照ができなくなった場合に、ある一定の制御を行なうため、外部へ出力する制御信号。例えば温度を一定に保持する制御を行なっている途中で、温度が参照できなくなった場合に、温度を下げるようなバーンアウト信号（制御信号）を出す。
	バイパス回路	信頼性の不確かな回路や実験的な回路等と並行に設置した回路で、前者を切り離した場合に運用し、信頼度を確保するもの。本プロジェクトでは、CVケーブルによる線路がこれに該当する。
	バイパスライン	冷却システムにおける、冷凍機、実証ケーブルシステムの迂回経路を指す。
	ハイブリッド超電導導体	異なる種類の線材を用いて構成される超電導導体。
	バックアップ	信頼性から、ある機器が故障してもシステムの的にその機能を支えてシステムの運転に支障が及ばないようにすること。該当する機器を複数用意しておく場合は冗長化と証する。
	発電機引き出し線	発電機出力端と昇圧用変圧器間を接続するケーブル。一般的に低電圧、大電流となるため相分離母線などが用いられる。
	パルス管冷凍機	1961年ギフォードとロングスワースによって考案された、パルス音響理論に基づく冷凍機。低温部に可動部がなく信頼性が高く小型の冷凍サイクルを構築することが可能である。音波の山の部分では断熱圧縮することから温度が上がり、谷の部分では断熱膨張により温度が下がることを応用している。

	半割れ銅管	両側超電導ケーブルのシールド同士を接続する必要がある。中間接続部においては補強絶縁部を避けた形状でシールド超電導線材を積層し半田接続する必要があるため両側を絞り込んだ形状でかつ上下半割れ構造とした銅管を示す。
ひ	引き止め治具	端末容器本体に直接3心ケーブルを引き止める為に絶縁材料であるFRPの両端にSUSがついた治具を使用している。
	ヒステリシス損失	鉄心の磁区が交番磁界によって磁界の向きを変えるときに損失。鉄損。
	ビスマス線材	主にBi2Sr2Ca2Cu3O10+dを用いた超電導線材。超電導臨界温度は-163℃(110K)。
	歪ゲージ	機械的な寸法の微小な変化(ひずみ)を電気信号として検出するセンサで、材料や構造物の表面に接着してひずみを測定すれば、材料や構造体に加わった応力を推測することができる。
	標準化	ケーブルなどの製品や部品の品質、形状、寸法、施工手順、試験方法などを標準に従って統一すること。これに伴って効率化・合理化ができ、互換性も高まる。
	比率差動継電器	保護区間に入出力する電流のベクトル差が予定値を超えた場合、かつ、差動回路部分の動作コイルの電流と抑制コイルの電流の比が予定値を超えた場合に動作する継電器。RDFR。前者の条件のみで動作するのは差動継電器(DFR)という。差動、比率継電器は変圧器、発電機、母線の保護に用いられる。
あ	フィードバック制御	制御量(PV値)が目標値(SV値)になるよう、両者を比較を行いながら制御対象への操作量(MV値)を変化させていく制御方法。
	フィラメント	Bi2223銀シース線材の内部構造において、Bi2223で構成される細い糸状の箇所をさす。
	フィラメント間の結合	変動磁界下において、超電導フィラメント同時の間にマトリックスを介して遮蔽電流が還流する現象を結合といい、これにより生じるいわゆるジュール損失を結合損失と呼ぶ。
	フェランチ現象	大きな容量を持つ送電線線路の受電側で負荷を切り離したり、使われていなかった線路に負荷を繋いだりしたときに、線路のキャパシタンスに応じた充電電流が流れることが原因で、送電線路に電圧上昇が発生すること。
	フォーマ	超電導線材を用いて超電導層を形成する際の芯材。主に銅線を寄り合わせることで構成され、機械的な芯としての役割を担うとともに、短絡電流通過時のバイパス回路にもなる。
	負荷状況	電力系統において、最大許容電力に対して、実際に使用されている電力の割合の状況。
	負荷率	ある期間中の負荷の平均需要電力と最大需要電力の割合であり、次式で定義される。 負荷率[%]=(平均需要電力[W]/最大需要電力[W])×100 負荷率が高いほど設備が有効利用されているということになる。
	複合絶縁方式	2つ以上の絶縁体を併用した絶縁方式。本プロジェクトでは、絶縁紙PPLPに液体窒素を含浸させた絶縁となっている。
	ブッシング	端末容器を貫通する電流リードを通す通路をもち、容器から電流リードを絶縁するために用いる。
	部分放電	電極間に電圧を加えたとき、その間の絶縁物中で部分的に発生する放電をいい、電極間を完全に橋絡する放電は含まない状態。
	ブラケット	腕木など、片持ち状の支持具の総称

	ブレイトンサイクル	動作ガス（一般的にはヘリウム）の圧力を高める圧縮機、高圧ガスと低圧ガスの間で熱交換を行う熱交換器、高圧ガスを断熱膨張させて低圧低温のガスを生成する膨張機などで構成される冷凍機。大型の冷凍機に適す。
	分割集合フォーマ	複数の銅線を撚り合わせた導体を扇形の断面形状を有するセグメントに圧縮成型し、複数のセグメントを一体化することで形成した円形フォーマ。
へ	ヘリウム	分子量2の単原子分子。極めて安定であり他の物質と化学反応を起こすことはない。沸点が4.2Kとあらゆる物質中で最も低く、極低温冷凍機の動作ガスとして用いられる。天然ガス中から分離採取されるが日本は全量を米国から輸入している。
	変圧器の充電（ステップアップ）	電力系統中の変圧器は発電所出口端のものを除き、1次側（電源側）が高電圧、2次側（負荷側）が低電圧となっている。ステップアップは変圧器の2次側から充電を行なうこと。
	変圧器容量	変圧器の定格電圧、定格電流により求められる量。相電圧の $\sqrt{3}$ 倍（線間電圧）と定格電流の積で求められる。
	編素線	可とう性（柔軟性）を必要とする電気用導体として、軟銅線、スズメッキ軟銅線およびその他の素線を集束（集めて束により合わせる）したものを編組し、成型したもの。
	変電所バンク	変電所に設置された変圧器を指す。
	変電設備	一般的には、電力系統において電圧を変換するための設備の総称であるが、本事業原簿においては、文脈上誤解の恐れがない場合は、「実証ケーブルシステムの付帯機器」と同義として、旭変電所における超電導ケーブル実証に必要な変電設備に限定して表記している場合がある。
ほ	防水テープ	中間接続部は水没する可能性の高いマンホール内に設置されることが多い。そこで中間接続部外容器の外表面にはすぐれた絶縁性を保持すると共に、高い気密性が求められる。そのために使用する絶縁性を有するテープを示す。
	保護カバー	三相一括のジョイント接続部を一括で覆う上下半割れ形状の銅管で、ケーブルの熱収縮による窒素容器内での中間接続部の動きに対応し可動できる仕様となっている。
	保護協調	異常発生時において、電力系統の電流や電圧をもとに故障区間を判別および除去し、事故の拡大防止や系統への波及を防止すること。
	保護リレー	継電器の一種で、電流や電圧の急激な変化から電気回路を保護するための装置。
	母線	発電所や変電所で、電源から全電流を受け、外線に供給する幹線。ブス。
	母線連絡	2つ以上の母線を電氣的に連系可能にする線路、また連系すること。ブスタイ。
ま	埋設物	広義では、地中に埋設されているもの全てを示すが、それらは撤去可能や撤去困難なもの等さまざまである。本文中の既設埋設物とは、一般に実運用中の設備であり、撤去不可能かつ移設困難な設備を示している。
も	もらい事故	保護リレーによる保護区間外で短絡事故が起きた場合で、短絡事故電流が流れた直後も課通電のある場合の系統事故。
ゆ	誘電損失	ケーブルの絶縁物（誘電体）に電圧をかけた際に発生する損失。
よ	要素試験	設備の開発にあたり、比較的少量のサンプル等を用いて要求される性能毎に試験を行うこと。
	容量制御	冷凍機の出力（冷凍能力）のコントロール。

	予冷	冷却システムにおいては、循環ポンプ起動前に系内に液体窒素を流し冷却すること。
ら	雷インパルス耐電圧値 (LIWV)	雷撃に対して、避雷器を含まない線路が備える絶縁強度の標準値。避雷器の制限電圧はこれより低く設定され、これと組み合わせることで線路の絶縁協調が図られている。
	雷撃	異常電圧を生じる送電線路への落雷。雷撃箇所、侵入経路、波形および電流が、雷サージ解析の解析条件となる。
	雷サージ	雷撃に起因して線路に発生し進行する、異常電圧または異常電流。
り	リーク	配管や機器のシール部や溶接部から何らかの不具合により冷媒（液体窒素）が漏れること。真空層の場合には真空リークと言う。
	リザーバタンク	液体窒素は系内への不純物侵入を防ぐため閉サイクルで用いられる。しかし窒素温度が 77k から 63K まで変化すると液体の膨張・収縮が 7%程度生じる。この膨張・収縮変化を吸収するのがリザーバタンクと呼ばれる真空断熱容器である。さらにリザーバタンクを窒素圧力が最も低くなる窒素循環ポンプ吸入側に設置することで、その最低圧力を保持する圧力制御機能を持たせることで超電導ケーブル内での気泡の発生を防止し部分放電を防ぐ機能を付加している。
	臨界温度	温度上昇に伴い超電導状態（電気抵抗ゼロ）から常電導状態（電気抵抗を生じる）へと相転移する温度のこと。
	臨界電流	超電導材料に直流電流を流す場合、電気抵抗がゼロであるので、発生電圧もゼロであるが、通電電流が大きくなると、許容値を超え、超電導状態から常電導状態に転移し、電圧が発生する。ここでは、 $1 \mu V/cm$ の電圧が発生する直流電流を臨界電流（値）と定めている。
れ	冷却システム	超電導ケーブルの冷却維持に必要な設備の総称で、特に断りのない限り、旭変電所に設置された冷却システムを指す。主要構成要素は、冷凍機、液体窒素循環ポンプ、リザーバタンク、動力盤、制御盤等である。
	冷却能力	液体窒素の温度変動から算出した値、主に冷却システムとしての能力を表すために使用している。
	励磁突入電流	変圧器に電流を印加したときに生じる電流。
	冷凍機	対象となる物質から熱を奪い、それを水や空気などに移送する機械または装置の総称。対象物の温度を下げる働きをする。熱の輸送に使用される冷媒の種類、それを圧縮する方法、膨張により吸熱作用を発生させる工程などによっていくつかの冷凍方式に分類される。液体窒素温度冷却においては、スターリング方式、GM 方式がよく用いられる。
	冷凍機コールドヘッド	冷凍機の熱交換部。実証試験で使用予定であるスターリング型冷凍機では冷凍機内部のヘリウムガスと超電導ケーブルの冷媒である液体窒素をコールドヘッド（銅の熱交換部）を介して熱交換する。
	冷凍機の効率	動作温度において発熱量 $Q[W]$ を汲出すに必要な冷凍機の効率で、冷凍機所要動力 $W[W]$ とすると $COP=Q/W$ で表される。COP (Coefficient of Performance) とも表記する。
	冷凍能力	被冷却体の熱損失と定常的に温度バランスしているときの冷凍システムの能力で定義される。
	冷熱サイクル	ここでは、超電導ケーブルが室温と液体窒素温度を繰り返し経験するサイクルをさす。
ろ	ロードセル	力（質量、トルク）を検出するセンサのことで、これらの力を電気信号に変換するというものであり、荷重変換器とも呼ばれる。一般に変換器にはひずみゲージ式がよく用いられる。

	ロゴスキーコイル	ドイツの電気工学者であるロゴスキー (Rogowski) によって考案された電流検知センサ。被測定導体の周辺にロゴスキーコイルを設置すると、導体電流に対応した電圧がコイルの両端に誘起する。この電圧は導体電流の微分波形で、積分器を通すことで導体電流波形を再現できる。
--	----------	--

I. 事業の位置づけ・必要性について

1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

1.1 NEDO が関与することの意義

電気抵抗がゼロなどの特性をもつ超電導技術は、電力事業、情報通信、運輸、医療福祉等の幅広い分野で、様々な機器の飛躍的な性能向上・技術革新が可能である。その中でも、電力事業における高温超電導ケーブル技術は、電力エネルギーの高効率な送電に貢献することができ、エネルギーの効率的な活用及び地球環境問題にも対応することができるかと期待されている。

特に、2011年3月に発生した東日本大震災以降、国内のすべての原子力発電所が停止となり、代替としてCO₂排出が多い火力発電所がフル稼働の状態にある。このため、全発電量の約5%を占める送電損失の低減によるエネルギーの有効活用が、非常に重要な技術課題となっている。

また、大震災以降、湾岸地域などの需要地近傍での火力発電所の新・増設や、太陽光発電に代表される新エネ設備の展開が進められているが、大都市圏の既存の送電網では、これらの新電源の電力輸送に対応仕切れず、新たな送電網の構築が必要となってきた。さらに、戦後構築された電力送電設備には寿命を迎えているものもあり、特にOFケーブル、POFケーブルの更新は、2016年頃から本格化していくものと考えられている。

高温超電導ケーブル技術は、大容量の電力をコンパクトな形状で、かつ低損失に送電することができる技術であり、上記の送電網整備あるいは既存ケーブルの更新需要に適用できれば、より早期にエネルギー効率活用、地球環境への負荷低減に貢献できることから、その開発が急務である。

超電導ケーブルの実用化には、本プロジェクトにて提案する実用規模での実系統実証試験を行うことにより、高温超電導ケーブルを含むトータルシステムの信頼性の検証が必須である。そのために必要な実証システムの構築、運転・メンテナンス技術の開発には、量産開発の途中である高温超電導線材の使用、液体窒素温度で適用できるケーブル及びケーブル付属品（端末、ジョイント）の開発、液体窒素を循環冷却する冷却システムの構築など、これまで汎用化されていない高価な材料、機器が必要である。

また、高温超電導ケーブルで実用化に目処をつけることが出来れば、他の電力機器（超電導変圧器、超電導限流器、超電導電力貯蔵装置（SMES）など）への波及についても大きな成果が期待できる。

一方、上記の通り、汎用化されていない技術の適用、高価な材料、機器の購入、実系統連係を行うための法令解釈、整備など、民間企業のみでは十分な研究開発が実施され得ず、国及びNEDOの関与が必要と考えられる。さらに、エネルギーの効

率活用、地球環境の負荷低減への貢献など、公共性、公益性の高さからも国および NEDO の関与は適切であった。

1.2 実施の効果（費用対効果）

本プロジェクトの実施により、高温超電導ケーブルの早期の実用化が期待される。経済産業省及びNEDOが作成したロードマップによると、2015年頃からその実用化が始まると期待されている。同資料で検討された超電導ケーブルの市場規模の試算¹⁾に対し、震災の影響等を考慮すると現時点ではその市場規模は表 1.2-1 のようになるものと考えられる。この試算は1989年～2005年までの「66 kV以上の地中電力ケーブルの回線延長」から推定した今後のケーブル導入量の約10%が超電導ケーブルに置き換わったと仮定した場合の予測である。このように、2030年頃には国内で1000億円をこえる市場が期待できる。

また本技術は海外への転用も可能である。欧州では、環境意識の高まりなどから架空送電線の新・増設が困難な状況にある。さらに再生エネルギーの強化の一環としての水力発電所の新・増設や、既存送電網の送電能力の最大化を目指した地中送電線路の送電容量強化が、喫緊の課題となっている。これらを背景として、変電所間を結ぶ1 km級の超電導ケーブルの実適用も進められている。また中国では、国内経済の急成長に伴って、送電線の新・増設に対する需要が高まっている。このように、海外における超電導ケーブルの需要は、国内需要の数十倍から数百倍になると推定されている。

ここでは、地中線66 kV以上の地中電力ケーブルの超電導化について市場規模を推計したが、そのほかに、架空線の置き換え、直流配電システムへの超電導電力ケーブルの展開、海外市場への展開などが考えられるため、さらに大きな市場が期待できる。

表 1.2-1 予想される超電導ケーブルの市場規模

	超電導ケーブル線路 (累積) (km・回線)	金額 (億円)
2020年	30	60
2025年	190	380
2030年	400	800
2035年	650	1300

超電導ケーブルのコストは200千円/mと仮定

一方、超電導ケーブル導入による地球環境対策としてのCO₂量削減の効果も期待できる。上記の超電導ケーブル導入量をベースにCO₂削減量を計算すると、表 1.2-2 のように試算される。

2030年の省エネ効果は279 GWh/年となり、CO₂削減効果は95千t-CO₂/年になると推計した。公開データによると2004年度の1世帯当たりの電力消費量は、年間で約3,620 kWh (出典:「原子力・エネルギー」図面集 2005-2006) であることから、省エネ効果は、およそ8万世帯が1年間に消費する電力量が期待できる。

尚、この推定は前述したように国内の 66 kV 以上ケーブルへの適用を考えた場合であり、全世界で考えれば、数十倍～数百倍の効果が期待できる。

表 1.2-2 予想される省エネ量・CO₂削減量

年	超電導化による 損失低減量 (Lf=1.0)	累積 導入量	損失率 (Lf)	1年間の低減電力量 $A \times B \times C \times$ (24×365)	1年間の CO ₂ 削減量
単位	kW/km	km		GWh/年	千 t-CO ₂ /年
	A	B	C	D	E
2020年	50	30	0.7	10	3.5
2025年	70	190	0.7	82	28
2030年	70	400	0.7	172	58
2035年	70	650	0.7	279	95

(注)・常電導ケーブルの損失量は 100 kW/km、超電導ケーブルの損失量は 50 kW/km@2020年、30 kW/km@2025年以降と考え、その差が表中 A の損失低減量にあたる。

・CO₂の排出係数は、2020年において 0.35 (kg-CO₂/kWh)、2025年以降は 0.34 (kg-CO₂/kWh) とした。

参考文献

1) 「高温超電導電力応用機器の市場調査研究報告書」ISTEC、H19年

2. 事業の背景・目的・位置づけ

エネルギー利用の効率化の促進、地球環境問題への対策の観点から、省エネルギーや環境負荷低減に配慮したエネルギー利用が求められている。これを反映して、新・国家エネルギー戦略（2006年5月経済産業省）では、省エネルギーとして2030年までに少なくとも30%の効率改善を目指すことを目標として掲げている。また、新エネルギーイノベーション計画では、新たなエネルギーの貯蔵・輸送技術など、「革新的なエネルギー高度利用技術」の開発と利用を強化すると掲げている。さらに、エネルギー・環境施策の「原子力の推進・電力基盤の高度化」では、発電された電力を安定的かつ効率的に需要家へ届けるため送配電分野においては、電力供給を安定化させる技術や、発電電力を無駄なく輸送するための技術開発などにより、現状以上の高供給信頼性を実現することを掲げている。

平成20年3月に経済産業省が制定した「Cool earth - エネルギー革新技術計画」においては、エネルギー分野において、世界をリードできる技術分野に研究開発資源を重点化し、技術開発を加速・推進することにより、我が国の競争力を強化・維持しつつ、技術は我が国の貴重な資源であるとの認識に立って、重点的に取り組むべき21のエネルギー革新技術が選定されたが、超電導を用いた高効率送電技術は、この内の一つの技術として取り上げられている。

このような状況においては、十分な安全性確保を前提に、需要に見合った信頼性の高い安定で効率的なエネルギー供給システムを構築することが重要である。効率的なエネルギー供給システムに資する技術として、高機能部材である超電導線材を利用し、送電損失を大幅に低減することが可能な高温超電導ケーブルシステムの技術を開発し、産業利用の早期実現を図ることは、エネルギー安全保障（セキュリティ）に貢献するとともに、社会や経済の安定した発展に大きく貢献すると考えられている。

本技術は、超電導技術分野技術戦略マップのエネルギー・電力分野機器開発のうち「環境・エネルギー調和型社会の構築」、「送変配電」、「電力ケーブル」および、第3期科学技術基本計画のエネルギー分野の重点科学技術「電力供給システム」、「送電技術」に位置付けられており、その技術開発が大いに期待されている。

本プロジェクトでは、その高温超電導ケーブルを、社会の重要なインフラである電力供給システムに適用するために、「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」（平成12年度～16年度）によって得られた高温超電導ケーブルの開発成果などを踏まえ、高温超電導ケーブルや冷却技術などを統合する高温超電導ケーブルシステムを構築して、高温超電導ケーブル単体だけではなく、線路建設、運転、保守を含めたトータルシステムの信頼性を実証するために、実系統に連系した実証試験を実施する。このことによって、高温超電導ケーブルのトータルシステムとしての総合的な信頼性を実証するとともに、革新的な高効率送電技術の開発・検証を行うことを目

的とする。

これにより、安定的かつ高効率な電力供給に資する技術開発を行うとともに、高温超電導ケーブルの初期市場形成と新規産業の創出に貢献する。

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

1.1 研究開発目標

高温超電導ケーブルや冷却技術などを統合する高温超電導ケーブルシステムを構築して、高温超電導ケーブル単体だけではなく、線路建設、運転、保守を含めたトータルシステムの信頼性を実証するために、実システムに連系した実証試験を実施する。このことによって、高温超電導ケーブルのトータルシステムとしての総合的な信頼性を実証するとともに、革新的な高効率送電技術の開発・検証を行うことを目的とする。

具体的には、将来の送電システムを想定した、66 kV、200 MVA 級の高温超電導ケーブルシステムの開発を行う。そのためには、高温超電導ケーブルの重要要素（ケーブル、中間接続部、冷却システム等）に関して、三心一括型超電導ケーブル（図 1.1-1）が実システムに適用し得る所定の性能、機能を有することを、モデルシステムによって検証する。その後、中間接続部を有する高温超電導ケーブルシステムを、冷却装置や保護装置などの付帯設備とともに 66 kV 実システムに接続し、長期連系試験を行う。これにより、高温超電導ケーブルシステムの信頼性・安定性の実証、実システムにおける運転方法・メンテナンス方法の検討、課題の抽出を行う。

高温超電導ケーブルを適用する電力ネットワークの形態や規模などを考慮し、高温超電導ケーブルの適用技術を評価するとともに、冷却設備の安全性、運用性を考慮した法規制のあり方を検討する。また、実証試験を通じて、運転管理や評価・計測技術等の超電導送電システムの国際規格化を進めるために、標準化項目を整理して必要なデータ収集を行い、適用技術標準化の検討を行う。

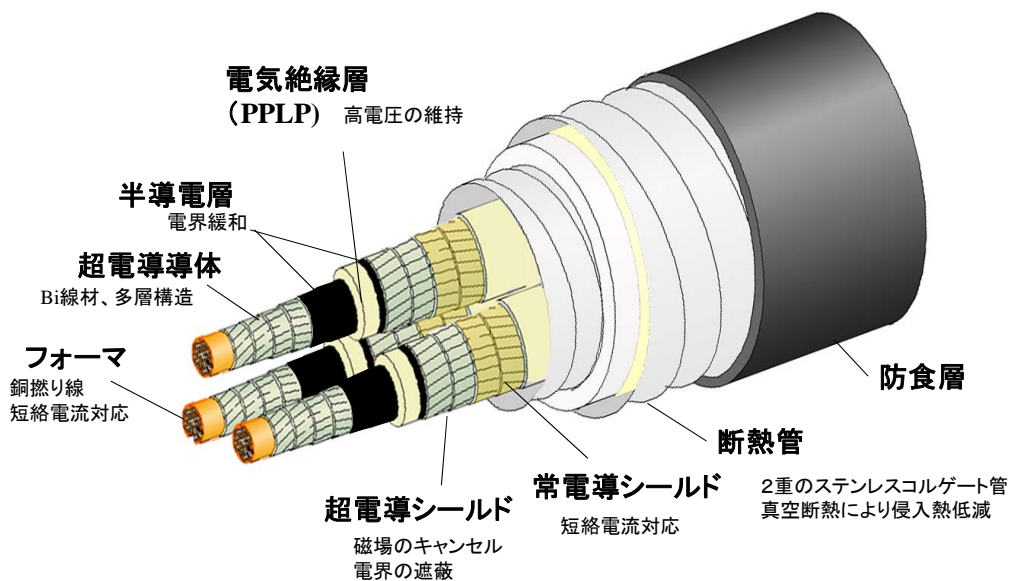


図 1.1-1 三心一括型高温超電導ケーブル

1.2 研究項目毎の目標

1.2.1 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証

(1) 研究開発の必要性

実系統連系試験に適用する高温超電導ケーブルシステムの重要要素（ケーブル、中間接続部、冷却システム等）に関して、実系統に適用し得る所定の性能、機能を有し送電システムが構築できることを模擬システムにより事前に検証する必要がある。

(2) 研究開発の具体的な内容

66 kV、200 MVA 級三心一括型高温超電導ケーブル等の重要要素技術が、実系統連系試験に適用可能であることを検証する。

(3) 達成目標

●中間目標（平成 21 年度中）

重要要素技術が、実系統連系に適用し得る次の性能、機能を有することを模擬システムにて検証する。

- ・交流損失：1 W/m/相（三心一括型高温超電導ケーブル（66 kV、2 kA）、150 mm ϕ 管路収容）
- ・短絡電流：31.5 kA-2 秒の短絡電流
- ・中間接続部の導体接続損失：2 kA 通電相当で $1\mu\Omega$ / 相以下

●最終目標（平成 25 年度中）

- ・交流損失：1 W/m/相（三心一括型高温超電導ケーブル（66 kV、3 kA）、150 mm ϕ 管路収容）
- ・中間接続部の導体接続損失：3 kA 通電相当で $1\mu\Omega$ / 相以下

(4) 目標設定の根拠

高温超電導ケーブルの実用化時のターゲットの一つに送電ケーブルへの適用が考えられている。東京電力と住友電工では、1,000 MVA 級の送電ルートを考えて場合の従来ケーブルと超電導ケーブルの経済性比較を実施している。これによると、従来ケーブルでは、275 kV 単心 CV ケーブルが 3 回線 9 条必要で、洞道内にケーブルを布設する必要がある。これに対し、超電導ケーブルは ϕ 150 mm 管路に収納できれば、土木費も含めた建設コストを大幅に削減できるので、超電導ケーブル適用にメリットがあるというもの。

また、送電損失の試算によると、上記 CV ケーブルの送電損失は、100 W/m/回線となる。超電導ケーブルの場合、交流損失 1 W/m/ph @ 3kA、侵入熱を 2 W/m、冷却システムの効率を 0.1 とすると、超電導ケーブルの損失は、 $(1 \times 3 + 2) / 0.1 = 50$ W/m/回線となり、CV ケーブルの 1/2 に低減することができる。

以上のように、ターゲットは 66 kV/3 kA 級、損失 1 W/m/ph @ 3kA、 ϕ 150 mm 管路への適用を目標とした。

1.2.2 トータルシステム等の開発

(1) 研究開発の必要性

高温超電導ケーブルシステムが、市場に導入されるためには、線路建設、運転監視、運用・保守方法などのトータルシステムとしての技術を確立する必要がある。

(2) 研究開発の具体的な内容

高温超電導ケーブルシステムの線路建設、運転監視、運用・保守方法等のトータルシステムとしてのシステム基本設計を確立するとともに、実運用を行う際の安全性や信頼性、経済性、環境面の評価を行う。

(3) 達成目標

●中間目標（平成 21 年度中）

高温超電導ケーブルシステムの線路建設、運転監視、運用・保守等を検討し、トータルシステム構築要領を作成する。

●最終目標（平成 25 年度中）

高温超電導ケーブルシステムの線路建設、運転監視、運用・保守方法等のトータルシステムとしてのシステム基本指針を作成する。また、既存ケーブルの送電損失に比べて 1/2 以下の高効率送電システムの設計技術を確立する。

(4) 目標設定の根拠

超電導ケーブルのケーブル・接続部については、1.2.1 節の目標にあるものが開発されるが、送電システムとしては、それに付属したシステム（冷却システム、計測・監視システム、保護・遮断システム等）と組み合わせられて初めて運用されるものと考えられる。それらの仕様、設計技術については、超電導ケーブルとしてはまだ確立されておらず、本プロジェクトで基本構成、設計指針の確立を目指す。

1.2.3 送電システム運転技術の開発

(1) 研究開発の必要性

送電システムの負荷や電流の変動などの系統変化や系統事故などに対応した平常時運用や事故時運用、および高温超電導送電システムの一部設備の障害時における復旧方法などの高温超電導ケーブルシステムの運転技術が、既存送電システムの運転と整合のとれた運用ができることは重要であり、そのための運転技術を開発することは必要である。

(2) 研究開発の具体的な内容

高温超電導ケーブルを用いた送電システムが、負荷や電圧の変動などの系統変化や系統事故などに対応した系統運用において、自動的に追従した運転（冷却含む）や、送電システムの一部設備の障害時における復旧方法など送電システムの運転技術を開発する。また、その運転技術を実系統連系試験において検証する。

(3) 達成目標

●中間目標（平成 21 年度中）

高温超電導ケーブルの運転技術が、既存送電システムの運転技術と整合するための課題を整理する。

●最終目標（平成 25 年度中）

既存送電システムの運転技術と整合のとれた平常時/事故時および障害復旧時等の高温超電導送電システムの運転技術指針を作成する。

(4) 設定の根拠

超電導ケーブルを実系統にて運転するためには、既存システムに接続する必要がある。超電導ケーブル特有の抵抗が非常に小さいことが、従来システムにどのような影響を与えるかなど、従来システムに接続した際の課題を検討する。また、超電導ケーブルは従来ケーブルと違い、冷却を維持する必要があるため、平常時、事故時に行うべき制御、管理項目をまとめておく必要がある。

1.2.4 実系統における総合的な信頼性の実証

(1) 研究開発の必要性

高温超電導ケーブルを社会の重要なインフラである電力供給システムに適用するためには、実系統に連系した実負荷での実証試験は不可欠であり、トータルシステムとしての安全性や信頼性の知見を得るための研究が必要である。

(2) 研究開発の具体的な内容

実系統連系試験のためのサイト選定や試験方法などの基本事項を検討する。その上で、実証試験の目的に沿った高温超電導ケーブルシステムの構築を行い、中間接続部を有する高温超電導ケーブルを実系統に連系して、12ヶ月以上の長期試験により総合的な信頼性の検証を行う。このことによって、高温超電導ケーブルのトータルシステムとしての安全性や信頼性を実証する。

(3) 達成目標

●中間目標（平成21年度中）

実系統連系試験サイトを決定するとともに、実系統連系試験基本計画書を作成する。

●最終目標（平成25年度中）

実系統に連系した12ヶ月以上の長期試験による総合的な信頼性の評価指針を作成する。

高温超電導ケーブルは次の要求仕様を達成するものとする。

- ・送電容量：200 MVA 級（66 kV、三心一括型高温超電導ケーブル、150 mmφ管路収容可能）

(4) 設定根拠

運転期間として12か月を選んだ理由は、日本特有の環境として、①季節により気候が変化するが、その四季を経験させる最小の期間であること、②従来ケーブルにおける開発試験の期間が、通常は約半年～1年に設定されていること、③冷却システムのメンテナンス間隔として約1年が設定されているが、それを経験させる最短の期間であること、の3点である。

1.2.5 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究

(1) 研究開発の必要性

超電導ケーブルは、効率的なエネルギー供給システムになくなくてはならないものであり、エネルギーの高効率な輸送だけでなく、系統安定化にも大きな効果が期待される。その早期の市場導入や実用化を円滑に進めるためには、冷却設備における規制緩和や運転管理などを考慮した既存電力ネットワークとの整合を取るための適用技術を標準化することが必要である。

(2) 研究開発の具体的な内容

超電導ケーブルを適用する電力ネットワークの形態や規模などから、超電導ケーブルの適用技術を評価するとともに、冷却設備の安全性、運用性を考慮した法規制のあり方を研究する。また、実証試験を通じて、運転管理や評価・計測技術等の超電導送電システムの国際規格化を進めるために、標準化項目を整理して必要なデータ収集を行い、適用技術標準化の研究を行う。

(3) 達成目標

- 中間目標（平成 21 年度中）
 - ・超電導ケーブルの適用技術の評価項目や冷却設備の法規制あり方の概要を取りまとめるとともに、超電導送電システムの国際規格化を進めるための標準化項目を作成する。
- 最終目標（平成 25 年度中）
 - ・電力ネットワークの形態や規模に応じた構成、機能、経済性、環境面などの適用技術や導入効果を評価して超電導ケーブルの導入シナリオを定める。
 - ・冷却設備における規制緩和に向けた技術基準を研究し、規制緩和の提案資料を作成する。
 - ・超電導送電システムの運転管理や評価・計測法等の国際規格化を進めるため PAS（公開仕様書）や TS（技術仕様書）策定に資するデータ整理を行い、規格の提案を目指す。

(4) 設定根拠

米国、ヨーロッパ、アジアと超電導ケーブルの開発が盛んになっており、その国際標準化が急務の課題となっている。日本はこの分野において、トップレベルの技術を持っており、これまで、及び本プロジェクトの成果を、国際標準化に向けて役立たせ、貢献する。

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の計画内容

2.1.1 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証

高温超電導ケーブルを実線路に適用するために、ケーブル、中間接続部、冷却システム等の重要要素に関して、実系統に適用し得る所定の性能、機能を有し送電システムが構築できることを検証する。

(1) 低交流損失超電導導体の性能検証

超電導体は臨界温度以下で電気抵抗がゼロになるので、ジュール損失はゼロであるが、交流電流を通電した場合、発生する変動磁場の影響で超電導体は交流損失(主にヒステリシス損失)を発生する。この損失は高温超電導ケーブルを冷却する冷却システムの容量を増加させる要因となるため、この損失を極力低減させる必要がある。ここでは自主開発した低交流損失型のビスマス線材を用いて、ケーブルの交流損失が 1 W/m/ph@2 kA 以下であることを、短尺ケーブルにて検証する。

平成 19 年度は、自主開発した低交流損失型ビスマス線材を用いて、短尺のケーブル導体を製作し、交流損失の評価を行い、中間目標である 1 W/m/ph@2 kA を検証する。

平成 20 年度は、長尺ケーブルの検証として、30 m 級ケーブルを製造し、その製造余長から短尺のケーブル導体を切り取り、導体・シールドの臨界電流特性、交流損失特性、機械特性(曲げ、引張り)を評価し、所定の性能を有していることを検証する。

平成 21 年度は、上記 30 m 級ケーブルを端末、ジョイントなどの付属機器と組み合わせ、冷却試験を実施し、交流損失の評価を行う。

平成 22～25 年度においては、最終目標である 1 W/m/ph@3 kA を達成すべく要素技術開発を実施する。中間目標までに達成した低交流損失線材の技術を発展させ、モデルケーブルで損失の検証を実施する。

(2) 短絡事故時対応超電導導体の性能検証

電力系統においてケーブルの相間短絡事故が起こった場合、定格電流に比べて非常に大きな短絡電流が流れる。実証ケーブルのターゲットである 66 kV 系統においては、電力系統の運用に最大 31.5 kA、2 秒流れると規定されているので、この短絡電流が流れてもケーブルが健全であることを検証する。また、この時に発生する

電磁力の影響を検証する。

また、短絡電流が通過した際に発生する発熱によって、液体窒素がガス化した場合でも、電気絶縁性能面への影響がないことを検証するため、短尺ケーブル導体を用いて、短絡電流通過後の発熱状況を模擬し、その時に電圧を印加する試験を実施することによって、短絡事故が起こった場合の電気絶縁特性への影響を検証する。

平成 19 年度は、短尺のケーブル導体に 31.5 kA、2 sec の電流を流し、ケーブル導体に影響がないことを、超電導導体の臨界電流の評価、解体後の超電導線材、電気絶縁材を目視等によって検証する。

平成 20 年度は、短尺ケーブル導体にて、短絡電流が通過したのちも所定の電流、電圧が運転できることを確認するための、検証試験を実施する。尚、実際の運転に際して、短絡電流通過後に再送電する条件については、以降の送電システムの運転技術の項で検討することになっており、その条件にて試験を行うこととする。

平成 21 年度は、長尺ケーブルを想定した場合の短絡電流通過後の冷媒挙動について、シミュレーションを行う。また、30 m 検証システムを用いて、短絡電流を模擬した電流を通過させ、循環冷却されている冷媒の、短絡電流通過後の冷媒挙動を実測する。その実測データをシミュレーション結果にフィードバックさせる。

平成 22～25 年度は、開発したシミュレーションコードを用いて、実証ケーブルでの短絡電流通過後の冷媒挙動、さらには実用化時を想定した長尺ケーブルでの冷媒挙動についてシミュレーションを行い、ケーブルシステム運用での課題の抽出を行う。

(3) 大電流接続部の性能・機能検証

高温超電導ケーブル線路は、ケーブルならびに大電流接続部である常電導機器と接続する終端接続部、高温超電導ケーブル同士を接続する中間接続部で構成される。これらの機器においては、超電導部－常電導部、あるいは超電導部－超電導部を接続する技術開発が必要である。

実証ケーブルにおいて、終端接続部と中間接続部に要求される接続部の特性（電気抵抗、通電特性、機械的特性（引張り、圧縮））を、単心模擬接続部を作製し検証する。特に接続部の電気抵抗特性については、中間目標である $1 \mu \Omega$ /箇所@2 kA 以下を検証する。

その結果をもとに、実証ケーブル線路の建設場所を考慮し、その組立て工法の検討から実用に供することが可能なサイズとなるように、66 kV 級中間接続部、66 kV 級終端接続部を設計する。

平成 19 年度は、本プロジェクトの実証ケーブルにおいて、それぞれの大電流接続部に要求される特性として、電気抵抗、通電特性、機械的特性（引張り、圧縮）を確認する。特に大電流接続部の電気抵抗特性については、中間目標である、 $1\mu\Omega$ /箇所@2 kA 以下を検証する。

さらに上記の大電流接続部の試験結果を反映させ、実証ケーブル線路の建設場所を考慮し、実用に供することが可能なサイズとなるように、66 kV 級中間接続部、66 kV 級終端接続部を設計し、その組立て工法を検討する。

平成 20 年度は、平成 19 年度の結果をもとに、三心一括型の中間接続部（窒素、真空容器を除く）を構築し、通電特性、接続抵抗、機械特性の評価を行う。終端接続部についても構築し、単体性能評価として、耐圧特性、侵入熱測定、真空特性等々を評価する。

平成 21 年度は、検証用 30 m ケーブルと開発した中間接続部、終端接続部と組み合わせ、冷却時の熱機械的な特性、電気的特性、熱損失等の評価を行う。

平成 22～25 年度は、最終目標である $1\mu\Omega$ @3 kA の接続抵抗の実証を行う。

(4) 検証用ケーブルシステムの設計・構築

検証用高温超電導ケーブル(30 m)、中間接続部、終端接続部、冷却システムを組み合わせ、検証用ケーブルシステムを構築し、課電試験・通電試験等を実施することによって、検証用ケーブルシステムが実証試験線路に要求される所定性能を有することを検証する。

平成 19 年度は、30 m 級ケーブルシステムを工場に構築する計画を立案し、システム設計を実施する。

平成 20 年度は、 $\phi 150$ mm 管路への布設検証、実証ケーブル場所を想定した模擬組立て検証を行い、線路建設の手順、組立て性、安全性等の評価・確認を行う。

平成 21 年度には、平成 20 年度に製造した 30m 級ケーブル検証システムを用いて、液体窒素にて冷却し、次の試験を行い、ケーブル、ジョイント、端末の各性能の評価を行う。

① 定格性能試験

超電導性能の確認（臨界電流測定、交流損失測定）

定格課通電の確認

長期課電試験（約 1 ヶ月）

② 冷熱サイクル試験（室温－液体窒素温度の繰り返し試験）

上記超電導性能、定格課通電性能の再確認

③限界性能試験

冷凍機故障模擬試験、過電流試験

④残存性能試験

平成 22 年度は、引き続き 30m 検証用ケーブルの残存性能確認、試験結果の解析を行い、実証試験の運転条件を取り決めるためのデータ整理を行う。

2.1.2 トータルシステム等の開発

(1) 実証ケーブルシステムの基本仕様

実証場所の選定及び、実証場所に構築する高温超電導ケーブルシステムの概念設計を行う。

平成 19 年度は、高温超電導ケーブルシステムの接続が可能な 66kV 級実系統の候補地から、電流容量、負荷状況、システム構築の実現性等を考慮し、実証場所を決定する。

実証場所での環境、系統条件と、実用時の高温超電導ケーブルシステムの検討課題を考慮し、実証ケーブルシステムの構成機器毎に基本仕様を整理し、本実証線路のコンセプトとしてまとめる。

(2) 実証ケーブルシステムの付帯機器の検討

超電導ケーブルシステムとして必要な付帯機器を検討し、システムの基本構成を設計する。

必要な付帯機器としては、ケーブルシステムの健全性、信頼性ならびに所定の性能、機能、損失、効率等を評価するために必要な運転・監視システム、超電導ケーブルシステムと既存系統との接続に必要な保護・遮断システムなどが考えられる。

運転・監視システムでは、必要な測定装置、センサーについて、要求される機能・性能を明確にし、それらの情報から運転・監視システム系統を取りまとめる。さらに、ケーブル、機器等の異常モードを検出し、各異常レベルに応じた警報を発することができるなど、総合的な運転・監視システムの構築を行う。

保護・遮断システムでは、超電導ケーブルシステムと既存系統との接続・切離しにより既存系統の信頼性を損なわない様にするもので、ここでは、「送電システムの運転技術の開発」で検討されるシステム異常時の対応方法に基づいて、システムを検討する。

平成 19 年度は、運転監視システムに関しては、測定装置、センサーについて、要求される機能・性能を明確にする。また、高温超電導ケーブルシステムの故障を想定した保護・遮断システムの基本概念を検討する。

平成 20～21 年度においては、運転・監視システムの基本設計を行い、検証用ケーブルシステムの運転・監視システムの製作を行う。保護・遮断システムについては、基本設計を行い、検証用ケーブルシステムに用いて、その基本機能の評価する。

(3) 冷却システムの設計

実証ケーブルシステムの冷却システム設計を行う。高温超電導ケーブルの実用化時の形態をイメージし、実証場所に応じたバックアップシステムを含めたシステム

の設計を行う。

平成 19 年度は、冷却システムに必要な基本特性・構成を検討するとともに、(1) 項「実証ケーブルシステムの基本仕様作成」の概念設計をもとに、実証ケーブル用冷却システムの概念設計を行う。使用する冷凍機については、実績のあるスターリング型のほかに、ブレイトン型、パルスチューブ型などが候補に挙げられることから、これらの冷凍機の特性を比較検討し、実証用冷却システムに適用する冷却システムを検討する。

平成 20～21 年度は、(1) 項の高温超電導ケーブルシステムの基本構成の検討結果を反映させ、実証ケーブルで使用する冷却システムの設計検討を行う。

(4) 超電導ケーブルの建設手法の検討

高温超電導ケーブルの実用化を考慮し、実証場所での線路建設手法の検討、施工基本計画の作成を行う。

ケーブルシステムは線路毎に線路固有の条件（布設レイアウトや周囲の条件に伴う熱機械的事項、系統条件など）があり、その条件によって線路建設の仕様、工法を検討する。ここでは、高温超電導ケーブルの一般的工法の検証を踏まえ、実証場所固有の条件を考慮し、ケーブル布設、中間接続部組立て、終端接続部組立て、冷却システム構築、周辺機器の構築に対する施工方法について検討する。

平成 20～21 年度は実証場所での施工基本計画を立案する。その計画に準じて、検証用ケーブルシステム」の建設を行い、その施工方法の評価を行う。

(5) 実証ケーブルシステムの詳細設計

平成 21 年度は、これまでの検討結果及び、30m ケーブル検証試験の成果を反映させ、実証用ケーブルシステムの詳細設計を行う。具体的には、実証場所の現地レイアウトの設計、実証用ケーブル、ジョイント、端末などの機器設計、冷却システムの構成・現地レイアウト詳細設計、警報システムの設計を行う。

平成 22 年度は、実証試験用の運転・監視システムの詳細設計を行い、製造及び確認試験を行う。また、実証場所での施工詳細手順の作成を行う。

冷却システムについては、前川製作所にて、複数の冷凍機、ポンプを組合せたシステム検証試験を行い、温度・圧力の制御手法の確認、故障対応、メンテナンス手法の検証を行う。

2.1.3 送電システム運転技術の開発

(1) 実証場所での系統特性調査

実系統では、負荷が刻々と変化し、それに対応した需給運用がなされており、高温超電導ケーブルシステムについても負荷の変動に対応した運転が必要になる。また、種々の電圧サージ（スイッチング、雷、他）、事故時の異常電流が発生する。高温超電導ケーブルシステムは従来ケーブルと比べて、低損失、低インピーダンスである特徴を有していることから、系統システム側へ及ぼす影響をシミュレーションによって調査する。

平成 19 年度は、実証場所での系統条件として、以下の項目を対象に影響の大きい事項を抽出し検討するとともに、「実証ケーブルシステムの概念設計」にフィードバックさせる。

- ・系統事故時に通過する短絡電流の調査
- ・系統事故時の保護リレー動作条件の調査
- ・サージに関する条件の調査
- ・系統負荷状態，潮流状況の調査
- ・過負荷許容条件の調査
- ・その他系統運用上の制約事項の調査

平成 20 年度は、実証場所での高温超電導ケーブルシステムの系統側への影響について調査を行い、その影響度合いに応じて対策を検討する。「高温超電導ケーブル導体の性能・機能検証」のケーブル導体評価結果をもとに、実証ケーブルのインダクタンス、キャパシタンス、交流損失による交流抵抗を算出する。これらから高温超電導ケーブルシステムのインピーダンスを求め、このシステムが系統側に接続された場合の以下の系統側への影響について調査する。

- ・高温超電導ケーブルシステム接続時の短絡電流への影響検討
- ・高温超電導ケーブルシステム接続時の系統インピーダンスの変化およびその影響検討
- ・その他高温超電導ケーブルシステム接続に伴う系統運用上の制約事項の検討

(2) 平常時の運転技術開発

高温超電導ケーブルの常時運転時に、高温超電導ケーブルの運用最適化に資する諸データ及び実績を得るための、制御パラメータ、監視パラメータについて検討し整理する。制御パラメータとしては、冷却用液体窒素の温度、圧力、流量等を挙げ、負荷変動に対する制御方法やその実現方法（自動、遠隔操作等）、気温等の環境変化に対する対応などについて検討する。

平成 19 年度は、高温超電導ケーブルシステムが正常に運用されていることを監視するために必要な計測データの種類と、それらの計測方法について概念検討を行

う。次に、高温超電導ケーブルシステムを正常に運用するために制御すべき機器の検討と、その制御方法や制御状態の確認方法について概念設計を行う。

平成 20 年度は、高温超電導ケーブルシステム実証試験箇所における、布設スペース等の物理的制約や、騒音など環境面での制約も考慮しつつ、平成 19 年度に検討した監視用の計測データについて、それらの計測手段、計測箇所の詳細設計を行うとともに、計測機器の仕様を検討する。次に、高温超電導ケーブルシステムを正常に運用するために制御すべき機器について、その運転・制御方法を詳細検討し、指針を策定する。

平成 21～22 年度は、平成 20 年度の指針に従い、超電導ケーブルシステムの平時の運転手法について、温度制御方法、圧力制御方法の手法をまとめ、30 m ケーブル検証試験の試験結果とあわせて、冷却システムの詳細設計にフィードバックさせる。

平成 22 年度は、30 m ケーブル検証試験結果、冷却システム検証試験結果をふまえ、平常時の運転・制御の詳細手法について検討し、マニュアルとしてまとめる。さらに、冷却システム検証試験の結果を踏まえ、実証ケーブルの保守・冷却システムのメンテナンスの計画をまとめる。

平成 23～25 年度は、作成したマニュアルについて、妥当性確認を行う。

(3) 事故時の運転技術開発

高温超電導ケーブルシステム及び系統に異常が起こった場合の想定される故障モードについて整理し、それぞれの故障モードに応じて運転技術を検討する。

平成 19 年度は、高温超電導ケーブルシステムに生じ得る異常事象や、実証場所において想定される短絡・地絡時の電流やサージ電圧、一連の系統保護システムから規定される異常電圧、電流の継続時間等について整理し、それらの異常について、運転・監視方法をまとめ、高温超電導ケーブルシステムの警報動作条件の検討および警報動作時の対応方針の概念設計を行う。

平成 20 年度は、検討した運転・監視方法の詳細設計、警報動作条件および警報動作時の対応方針の詳細検討を行い、対応指針を策定する。次に、この対応指針を実現するために必要な保護リレーの種別と動作条件を検討するとともに、保護リレー動作時の高温超電導ケーブルシステムの運用指針を策定する。

平成 21 年度は、実証用超電導ケーブルシステムで起こりうる想定事故について、

その要因と対策をまとめ、警報設計やその後の運用マニュアルにフィードバックさせる。また、事故後の超電導ケーブルシステム復帰の条件、手法について検討を行う。

平成 22 年度は、事故時、トラブル時の詳細検討結果をふまえ、各異常時に対応したマニュアルの作成を行う。

平成 23～25 年度は、作成したマニュアルについて、妥当性確認を行う。

(4) 保守・メンテナンスの基本計画作成

高温超電導ケーブルシステムの長期信頼性を評価・検証するにあたって必要な保守項目を整理し、その検証手法について検討する。特に冷却システムについては、回転機が使用される部位については定期的なメンテナンスが必要であることから送電を維持した状態での保守・メンテナンスの手法やシステム構成を検討し、実証ケーブルシステムに反映させる。

平成 20～22 年度は、実証ケーブルの保守・メンテナンスの基本計画について策定する。

2.1.4 実系統における総合的な信頼性の検証

(1) 総合的な信頼性検証のための試験計画立案

高温超電導ケーブルを適用する電力ネットワークの形態や規模などを考慮し、高温超電導ケーブルの適用技術を評価するために、66 kV、200 MVA 級の高温超電導ケーブルシステムをターゲットに、中間接続部、冷却システム、保護システムなどの付帯設備を含む高温超電導ケーブルシステムを構築し、長期連系試験を行う。これにより、高温超電導ケーブルシステムの信頼性・安定性の実証、実系統における運転方法・メンテナンス方法の検討、課題の抽出を行う。

平成 20 年度は、実系統への接続前の確認試験（課電試験、熱損失測定、遮断・保護確認試験など）について項目を整理し、基本試験計画について立案する。

平成 21 年度は、これまでの検討結果及び、30m ケーブル検証試験の成果を反映させ、実証用ケーブルシステムの詳細設計を行う。具体的には、実証場所の現地レイアウトの設計、実証用ケーブル、ジョイント、端末などの機器設計、冷却システムの構成・現地レイアウト詳細設計、警報システムの設計を行う。

(2) 実証用ケーブルシステムの製造

(1) で設計を行った、66 kV、200 MVA 級の三心一括型高温超電導ケーブルの製造及びジョイント、端末の製造及び、それらを冷却する液体窒素循環型の冷却システムを製造する。また、それらのケーブル、機器を、平成 19 年度に選定した実証場所に布設し組立てを行う。尚、現地に建設する前に必要な、単体での性能評価を事前に行う。

平成 21 年度は、実証用ケーブルに必要な超電導線材、フォーマなどの必要部材の製作、ジョイント、端末、冷却システムなどの部材の一部の調達を行う。

平成 22 年度には、ケーブル、ジョイント、端末などの必要機器の製造、平成 23 年度には現地布設、組立てを行い、実証運転を平成 24～25 年度にかけて実施する。尚、試験後、ケーブルの経年変化を確認するための残存性能試験を実施する。

平成 23 年度は、実証場所に、ケーブル布設、端末・ジョイントの組立を行う。冷却システムについては、冷凍機台数制御、故障時対応を踏まえた検証試験や、メンテナンスの事前検証など、実用運転を想定した検証を追加して行う。また、ケーブルシステムと冷却システムとを組合せて、ケーブルの電氣的性能を確認するとともに、冷却システムの制御パラメータの調整、トラブル時を想定した運転の検証を行う。

平成 24 年度は、引き続きケーブルシステムと冷却システムとの組合せ試験を実施し、ケーブル性能の確認、ケーブル接続後の冷却システム運転調整、警報・監視システムの機能確認を行う。変電設備の構築後、系統接続前の最終確認として竣工試験を実施し、ケーブル電気性能（Ic、耐電圧性能等）を確認する。

(3) 実証試験

(2)で構築した実証用ケーブルシステムを 66 kV 実系統と接続し、実証試験を行う。

平成 24 年度は、実証用ケーブルシステムと 66 kV 実系統を接続し、実証試験を開始する。また、その運転について監視を行うとともに、計画的なケーブル保守、冷却システムのメンテナンスを実行する。

平成 25 年度は、引き続き実系統での実証試験を行い、その運転について監視を行うとともに、計画的なケーブル保守、冷却システムのメンテナンスを実行する。また、定期的なケーブル性能評価も実施する。

2.1.5 ケーブルの高性能化の研究

将来の実用化のひとつのターゲットとなる、水力発電所用途を想定し、大電流超電導ケーブルの検討を行う。

平成 24 年度は、机上検討にて設計条件の確認、概略設計を行い、課題の抽出を行う。また、それらの課題にたいして、ケーブルの設計検討を行い、短尺ケーブルの試作、通電試験を実施する。端末についても、設計検討を行い、接続部のモデル検証、ブッシングの試作などを行い、それらの評価を実施する。

平成 25 年度は、大電流化の目標として選んだ 12 kA/22 kV 級ケーブルの設計検討を進め、シミュレーションによる損失や温度解析を行うとともに、短尺ケーブルの試作を行い、損失評価、機械特性評価、事故電流評価を行う。また、またケーブルと同容量を送電できる、コンパクトな端末部の設計検討を行い、端末部の試作、評価を行う。これらの実験結果を設計にフィードバックし、大容量・低損失ケーブル及び端末の基本設計を完了する。

2.1.6 冷却システムの高性能化の研究

超電導ケーブルの実系統への適用を想定した場合の冷却システムへの要求性能をまとめ、その要求性能を実現するための課題を整理する。また、実用化を考えた場合、大容量、高効率の冷却システムが必要であり、上記要求性能も考慮した、超電導ケーブル用大容量・高性能冷却システムの開発を行う。

平成 22 年度は、東京電力と住友電工において、超電導ケーブルの実用化を想定した冷却システムへの要求性能をまとめ、前川製作所にて、それらの要求を実現するための課題を整理し、実証用冷却システムへの反映についても検討する。

平成 23 年度は、前川製作所にて超電導ケーブル用大容量・高性能冷却システムの開発を開始し、性能、耐久性を決定するターボ圧縮機、膨張機的设计・製作・単体性能試験及び冷却システム全体の設計を行う。冷却システムの開発目標は、冷却能力：5 kW、COP：0.1、メンテナンス間隔：30,000 時間以上である。

平成 24 年度は、平成 23 年度に開発したターボ圧縮機、膨張機の単体性能試験を継続して行う。その後、熱交換器、循環ポンプ等と組み合わせた試験を実施し、実際の冷凍能力、COP の計測を行い、設計・製造の妥当性の確認を行う。

平成 25 年度は、平成 24 年度に開発したブレイトン冷凍機と液体窒素循環冷却システムを接続し、ケーブルを模擬した熱負荷を使って、長期の運転性能や負荷変動に対応した制御性の確認を行い、開発目標である冷却能力：5 kW、COP：0.1、メンテナンス間隔：30,000 時間以上を検証する。

2.1.7 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究

(1) 高温超電導ケーブルの標準化研究

高温超電導ケーブルの目的用途を体系的に整理し、実用化の促進・円滑化に資する高温超電導ケーブルの規格化・標準化の範囲の設定や項目検討等の技術調査を行う。さらに、国際標準化活動との連携（IEC TC90/TC20）を視野に入れ、実用化促進や産業競争力向上にも寄与するため、高温超電導ケーブルシステム自体や構成機器の設計要求、試験・評価方案について、海外の技術開発動向も踏まえつつ、PAS（公開仕様書）やTS（技術仕様書）策定に資するデータ（仕様、試験法）を整理する。

平成 19 年度は、標準化を行うべき項目について調査するとともに抽出を行う。

平成 20 年度は、抽出した項目を踏まえ、超電導送電システムの国際規格化を進めるための標準化項目を作成する。

平成 21 年度は、30 m 検証用ケーブルシステムの評価が進むので、その解析、まとめを行い、国際標準化のデータ収集を行う。

平成 22～24 年度にかけては、実証ケーブルの出荷試験、竣工試験、実証運転などの結果から、国際標準化のために必要なデータを収集する。

平成 25 年度は、IEC にて検討される超電導ケーブル試験法に関して、本プロジェクトの試験結果や運転状況について情報を提供する。

(2) 高温超電導ケーブルの適用技術研究

電力ネットワークの形態や規模に応じた構成、機能、経済性、環境面などの適用技術や導入効果の評価項目を整理し、高温超電導ケーブルシステムの適用効果、導入効果の評価を実施する。

平成 19～22 年度は、高温超電導ケーブルシステム構成機器（ケーブル、終端接続部、中間接続部、冷却システム、運転・監視システム、保護・遮断システム等）に関して、高温超電導ケーブルの固有の事象について整理し、これまでの開発で検証できているもの、今後検証が必要なものに分類する。また、高温超電導ケーブルシステムの適用効果、導入効果の評価項目を整理する。

平成 22～25 年度にかけては、超電導ケーブルの導入効果について、得られた試験結果をもとに検討する。

(3) 関連法規への対応

高温超電導ケーブルシステムは加圧された液体窒素で冷却されることから、高圧ガス保安法への対応が現状求められる。一方、実系統に接続される電気設備であるため、電気事業法の管理下で運用されるのが好ましい。このため、冷却設備における規制緩和に向けた技術基準を研究するとともに、電気事業法での適用に向けた検証データ、資料等を作成し、規制緩和に向けた活動計画を作成し関係官庁、団体と調整する。

平成 19 年度は、実証ケーブルの概念設計をもとに、関係官庁・団体と協議を行い、高圧ガス保安法及び電気事業法への対応の基本方針をまとめる。

平成 20 年度は関連法規適用に必要な検証データ、資料等を準備し、関連法規への対応プロセスを取りまとめる。

平成 21 年度は、平成 20 年度に引き続き関連法規適用に必要な検証データ、資料などの準備を行う。また、関連法規への最終的な対応プロセスを取りまとめる。

平成 22～25 年度は、冷却設備における規制緩和に向けた技術基準を研究するとともに、電気事業法での適用に向けた検証データ、資料等を作成し、規制緩和に向けた活動計画を作成する。

表 2.1-1 研究開発スケジュール

事業内容			平成19年度				平成20年度					
			第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期		
① 高温超電導ケーブルの総合的な信頼性の研究	a. 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証	(a)高温超電導ケーブルの性能・機能検証	導体の特性評価				検証用高温超電導ケーブルの設計・製作					
		(b)大電流接続部の性能・機能検証	超電導接続部の特性評価				短絡時の絶縁特性への影響評価		電磁力検証			
		(c)検証用ケーブルシステム的设计・構築	試験システム検討設計		大容量中間接続部の構築・単体評価		大容量終端接続部の構築・単体評価		試験方法の検討		システム構築	
		b. トータルシステム等の開発	(a)実証ケーブルシステムの概念設計	実証ケーブル仕様検討		運転・監視システム、付帯機器の基本設計		検証システム検討		冷却システム概念設計		冷却詳細設計
② 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究	a. 高温超電導ケーブルの標準化研究	(a)高温超電導ケーブルの系統特性調査	実証場所での系統条件検討				超電導ケーブル接続時の系統への影響検討					
		(b)高温超電導ケーブルの運転技術開発	冷却システム運転制御方法の検討				運転基本計画の策定					
		(a)総合的な信頼性検証のための試験計画立案	異常モード整理				異常時対応計画立案、リレーシーケンス設計					
		(b)線路建設手法の開発	保守基本計画の策定		施工基本計画策定		検証システム構築評価		基本試験計画策定			
用技術標準化の研究	a. 高温超電導ケーブルの標準化研究	b. 高温超電導ケーブルの適用技術研究	c. 関連法規への対応	評価項目の抽出				評価内容の検討				
				課題、評価項目整理								
				関連法規対応手順の検討				関連法規対応資料収集・作成				

表 2.1-2 実施計画（平成 21 年度～平成 22 年度）

事業内容			平成 21 年度				平成 22 年度			
			第 1 四半期	第 2 四半期	第 3 四半期	第 4 四半期	第 1 四半期	第 2 四半期	第 3 四半期	第 4 四半期
① 高温超電導ケーブルの総合的な信頼性の研究	a. 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証	(d) 検証用ケーブルシステムの評価	← 定格性能確認試験 →		← 冷熱サイクル試験 →		← 限界性能試験 →		← 残存性能確認試験 →	
	b. トータルシステム等の開発	(c) 実証ケーブルシステムの詳細設計	← 現地レイアウトの詳細設計 →				← 施工手順書の作成 →			
		(d). 冷却システムの高性能化の研究	← 冷却システムの詳細設計・機器の購入 →		← 警報システムの詳細設計 →		← 冷却システム検証試験 →		← 運転・監視システムの製造・評価 →	
			← 超電導ケーブルの製造 →		← 冷凍機等の製造 →		← 末端、ジョイント等部材製造 →		← 冷却システム構築・評価 →	
			← 基礎工事・建屋建設 →							
② 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究	a. 高温超電導ケーブルの標準化研究	(b) 実証用ケーブルシステムの製造	← 超電導線材の製造 →				← 実証用超電導ケーブルの製造 →			
	b. 高温超電導ケーブルの適用技術研究		← 国際標準化のためのデータ収集 (30m ケーブル) 冷 →				← CIGRE WG へのデータ提供 →			
	c. 関連法規への対応		← 関連法規の対応検討 →				← 低交流損失化の検討 →			

表 2.1-3 実施計画（平成 23 年度～平成 24 年度）

事業内容			平成 23 年度				平成 24 年度			
			第 1 四半期	第 2 四半期	第 3 四半期	第 4 四半期	第 1 四半期	第 2 四半期	第 3 四半期	第 4 四半期
① 高温超電導ケーブルの総合的な信頼性の研究	a. 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証	(a)高温超電導ケーブルの性能・機能検証	導体の特性評価（低交流損失化）							
	b. トータルシステム等の開発	(d)冷却システムの高性能化の研究 (e)ケーブルの高性能化の研究	冷凍機開発		圧縮機評価		冷凍機評価		要素技術開発	
	c. 送電システム運転技術の開発	(b)高温超電導ケーブルの運転技術開発	マニュアルの評価							
	d. 実システムにおける総合的な信頼性の検証	(b)実証用ケーブルシステムの製造 (c)実証試験	ケーブル布設 機器組立	冷却試験		竣工試験		実証試験		実証試験
② 超電導ケーブルの技術標準化の研究	a. 高温超電導ケーブルの標準化研究		CIGRE WG へのデータ提供							
	b. 高温超電導ケーブルの適用技術研究		低交流損失化の検討				適用・導入効果の検討			
	c. 関連法規への対応		関連法規適用への提案まとめ							

表 2.1-4 実施計画（平成 25 年度）

事業内容			平成 25 年度			
			第 1 四半期	第 2 四半期	第 3 四半期	第 4 四半期
① 高温超電導ケーブルの総合的な信頼性の研究	a. 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証	(a) 高温超電導ケーブルの性能・機能検証	←————— ケーブル導体の低損失化 —————→			
	b. トータルシステム等の開発	(d) 冷却システムの高性能化の研究	←—————			
		(e) ケーブルの高性能化の研究	←—————			
	c. 送電システム運転技術の開発	(b) 高温超電導ケーブルの運転技術開発	←—————			
d. 実システムにおける総合的な信頼性の検証	(c) 実証試験	←————— 実証試験 —————→				
	(d) 撤去・残存性能確認			←————— 撤去・残存性能確認 —————→		
② 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究	a. 高温超電導ケーブルの標準化研究	←—————				
	b. 高温超電導ケーブルの適用技術研究	←—————				
	c. 関連法規への対応	←—————				

2.2 研究開発の実施体制

本プロジェクトは、NEDO のプロジェクト公募に、住友電気、東京電力、前川製作所のチームで応募し、採択されたものである。具体的体制としては、平成 19～22 年度は、委託事業として実施者 NEDO から住友電気が委託を受け、東京電力、前川製作所が再委託を受ける形で開発を分担している。平成 23～25 年度は、共同研究事業として三社共同で受託をうけている。

また、NEDO は研究体を統括するために H19～H20 年度は、畑 良輔 住友電気 執行役員（現在は退職）、H21 年度～H25/6 月は、原 築志 東京電力 技術開発研究所長（現在は東電記念財団）を、H25/6 月以降は、東京電力 技術開発センター 本庄 昇一 グループマネージャーをプロジェクトリーダー（PL）とし、PL との間で密接な連携をとりながらプロジェクトの舵取りを行っている。

さらに、NEDO 内に産官学の有識者からなる委員会（超電導技術委員会）を設け委託研究開発に関する研究方針審議、個別成果のレビュー、問題解決のための方策の検討、NEDO 超電導研究開発プロジェクト間における技術情報の共有化を進め、研究開発の効率的、効果的实施を図っている。

平成 19～21 年までの研究体制を図 2.2-1 に、平成 22～25 年度までの研究体制を図 2.2-2 に示す。

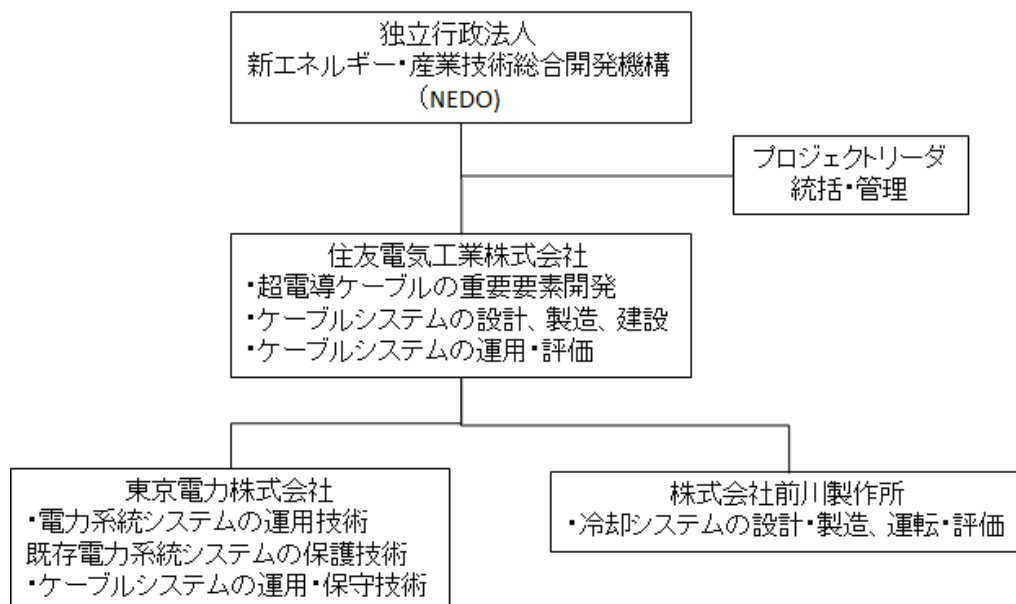


図 2.2-1 研究開発体制(平成 19～平成 21 年度)

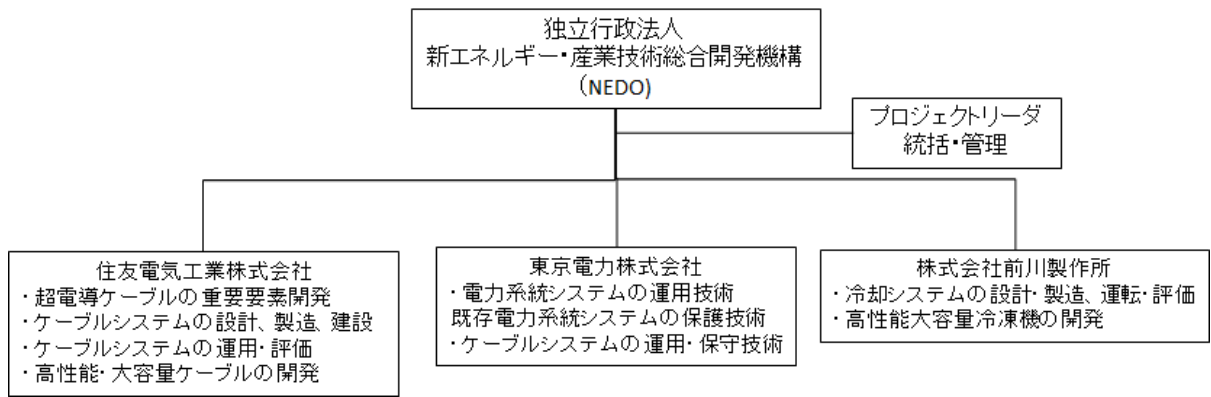


図 2.2-2 研究開発体制(平成 22～平成 25 年度)

2.3 研究の運営管理

プロジェクトの成果について評価をいただくために、NEDO が主催する超電導技術委員会に定期的に進捗を報告し、その方向性の修正、課題解決のための助言、開発加速のための協議等を実施いただいている。

また、プロジェクト内では、研究を効率的かつ機動的に運用するために、推進委員会及びワーキンググループを設け、実施者以外の有識者から意見を頂く形をとっている。

(1) 超電導技術委員会

NEDO 内には産官学の有識者による超電導技術委員会（平成 21 年度から委員長：大久保 仁 名古屋大学教授）が設けられ、NEDO の個々の超電導技術開発及び全体に関する研究方針審議、成果のレビュー、問題解決のための方策の検討、並びに技術情報の共有化を進めており、そこで得られた助言等をもとに NEDO 超電導技術開発の効率的、効果的運営が図られている。本プロジェクトも定期的な研究方針審議と成果のレビューは言うに及ばず、NEDO が行った基本計画見直しに対する大所高所からの審議、並行して進んでいた「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の超電導ケーブルの技術開発とのすり合わせを行う等、研究開発の効率的かつ効果的な実施に結びついている。

(2) 推進委員会

プロジェクト内に設置した推進委員会は推進委員長のもと、この事業目標（基本計画目標値）を達成するためプロジェクトを強力かつ効果的に推進することを目的としており、本プロジェクトの計画や進捗状況について、関係機関の上級管理者及び外部有識者により、俯瞰的、総合的に評価・審議いただいている。原則、2 回/年開催。

推進委員会のメンバーリストを表 2.3-1 に示す。

表 2.3-1 推進委員会メンバーリスト

	氏名	所属機関	専門分野
委員長	原 築志	東京電力 技術開発研究所長	電力システム
(交代)	本庄 昇一	東京電力 技術開発センター	電力システム
委員	雨宮 尚之	京都大学 教授	超電導材料、交流損失
委員	荒木 智勇	福井工業大学 教授	電力ケーブル
委員	大久保 仁	名古屋大学 教授	電力システム、電気絶縁
(交代)	早川 尚樹	名古屋大学 教授	電力システム 電気絶縁
委員	日高 邦彦	東京大学 教授	電力システム、電気絶縁
委員	淵野 修一郎	産業総合技術研究所 主任研究員	冷却システム、低温技術
委員	横山 明彦	東京大学 教授	電力システム、電力系統
委員	岡本 達希	電力中央研究所 研究参事	電力システム、電力系統
委員	大田 龍夫	関西電力 研究開発室長	電力システム
(交代)	三浦 良隆	関西電力 研究開発室長	電力システム
委員	佐藤 謙一	住友電工 技師長	超電導材料、低温技術
委員	川村 邦明	前川製作所 常務取締役	冷却システム、低温技術

(3) 高性能冷凍機開発検討委員会

超電導ケーブルの実用化に必要な、高性能・大容量のブレイトン冷凍機の開発を実施するために、外部の有識者の方から開発の進め方の審議や、進捗について評価頂いている。原則、2回/年開催。委員会のメンバーリストを表 2.3-2 に示す。

表 2.3-2 高性能冷凍機開発検討委員会メンバーリスト

	氏名	所属機関	専門分野
委員長	原 築志	東京電力 技術開発研究所長	電力システム
(交代)	本庄 昇一	東京電力 技術開発センター	電力システム
委員	塚本 修巳	上智大学 客員教授	電気工学、超電導工学
委員	大崎 博之	東京大学 教授	電気工学、超電導工学
委員	勝田 正文	早稲田大学 教授	機械工学
委員	春山 富義	高エネルギー加速器研究機構 教授	冷却システム、低温技術
(交代)	楨田 康博	高エネルギー加速器研究機構 准教授	冷却システム、低温技術
委員	淵野 修一郎	産業総合技術研究所 主任研究員	冷却システム、低温技術
委員	宗像 鉄雄	産業総合技術研究所 副研究部門長	冷却システム

(4) ワーキンググループ (WG)

推進委員会よりもさらに個別で、詳細な内容について審議、協議するために、プロジェクトの内容を3つに分け、3つのワーキンググループを設けている。それぞれのワーキンググループには、電力中央研究所と関西電力株式会社から委員を募り、

実施者側と忌憚ない意見交換を実施し、プロジェクトの進捗、内容について、協議している。表 2.3-3 にワーキンググループのタスク内容と参加社表を示す。

表 2.3-3 ワーキンググループタスク内容と参加社

WG	タスク内容	東電	関電	電中研	住電	前川
WG-1 (システム)	<ul style="list-style-type: none"> ・系統連係形態の仕様検討 ・実系統試験内容の検討 ・常時・非常時の運用方法の検討 	◎	○	○	○	—
WG-2 (ケーブル)	<ul style="list-style-type: none"> ・ケーブルシステムの仕様検討 ・ケーブル重要要素技術の基礎試験の検討・評価 ・ケーブルの信頼性・メンテナンス検討 	○	○	○	◎	○
WG-3 (冷却システム)	<ul style="list-style-type: none"> ・冷却システムの仕様検討 ・冷却システムの信頼性検討 ・高圧ガス法規等の対応検討 ・保守、メンテナンスの検討 	○	○	○	◎	○

2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

(1) 実用化・事業化につなげる戦略

超電導ケーブルの実用化・事業化をすすめるためには、最終ユーザーである電力会社の積極的関与が必要不可欠である。このため、要素技術開発が中心の前半2年間はケーブルメーカーがプロジェクトリーダーを務めたが、実証ケーブルシステムの構築や実証場所での運転が主体となる3年目以降は、電力会社がプロジェクトリーダーを務めることで、実適用時までを見通したプロジェクト運営に努めた。

プロジェクトを進める中で、実用化・事業化を推進するために研究開発の加速が不可欠と判断したテーマについては、NEDO主催の超電導技術委員会にて早期実施の提案を行い、本プロジェクト内で実施した。

その一例は、冷凍機の大容量・高効率化の研究開発である。本プロジェクトで採用したスターリング型冷凍機は、容量が1 kWと、実用機としては小型であるとともに、冷却効率が0.04という課題を抱えていた。超電導ケーブルの実用化設計では、超電導ケーブル適用による省エネ効果を最大限に活用するためには、冷凍能力が数 kWで、冷却効率が0.1程度の冷凍機の開発が必要不可欠との結論に至ったことから、このスペックを満たす冷凍機開発の必要性を訴求した。その結果、本プロジェクト内で、上記スペックを有するブレイトン冷凍機の研究開発を実施するに至り、工場試験において、要求性能を満たす冷凍機開発に成功した。

もう一例は、大電流ケーブルの研究開発である。超電導ケーブルの最終的な適用先としては、OFケーブルやPOFケーブルといった経年化した高電圧・大電流ケーブル代替を想定しているが、十分な信頼性が確立するまでは、比較的短距離の場所から初期導入していくことが現実的である。このような適用先のうち、超電導ケーブル導入により大きなメリットが見込める場所の一つが、発電機引き出し線である。発電機引き出し線は、電圧が10～20 kV、電流は10～15 kA程度と、比較的低電圧だが大電流であるという特徴を持つ。このような場所に超電導ケーブルを適用することで、建設コストの削減と通電損失の低減を図ることが可能となる。ただし、このような大電流ケーブル開発はこれまでに実施例がなく、超電導ケーブルの早期実用化を図るためには、このような大電流ケーブルの設計技術を確立することが重要である。このため、送電容量が12 kAの大電流ケーブルの開発の必要性を訴求し、本プロジェクトにおいて、大電流ケーブルの基本設計を完了した。

超電導ケーブルの実用化・事業化をはかる手段の一つとして、旭変電所の超電導ケーブル実証システムの見学・説明会を積極的に開催した。特に、最終ユーザーである電力事業者や、海外展開を見据え海外来訪者を対象とした見学・説明会に注力した。その結果、電力事業者は12件88名、海外来訪者は9件77名が見学に訪れ、その他の見学者も含めると、合計77件738名が旭変電所を訪れている。

(2) 実用化・事業化につなげる知財戦略・標準化戦略

超電導ケーブルの基本構造やシステムについては、これまでの開発で既知の技術

であるが、実システム運用に必要な、低損失、事故対応、システム運用に関して、新しい技術、アイデアを考案し、特許化を行う方針で、プロジェクトを進めた。

プロジェクト前半で、超電導ケーブルの低交流損失技術、事故電流対策、端末・ジョイントの接続技術について要素開発を行い、考案した技術内容について出願を行った。

超電導ケーブルの実システムでの運転を日本で初めて行うにあたり、その運用方法に関して、多くの時間を割き検討を行ったが、その運用に関して、冷却システムを絡めた制御方法について出願を行った。

プロジェクトの後半では、高性能・大容量冷凍機、高性能ケーブルという新しい技術開発を実施したので、それに関する技術に関して、出願を行った。

標準化については、まだ実用化前の段階ではあるが、米国、欧州、中国、韓国で実システムでの実証試験が始まっており、国際的にもその試験項目、試験内容を統一し、同じ尺度でケーブルを評価・試験すべきとの機運が高まり、まずは超電導ケーブルの試験法に関する国際規格を制定すべく、CIGRE WG B1.31 にて検討が始まった。本プロジェクトでも、その方向性に賛同し、プロジェクトの試験データ等を積極的にWGに提出し、またWGに参加し、超電導ケーブルが実用上問題のない性能を有することを確認するという観点から、日本での試験内容、項目を紹介し、試験法の提案を行った。

結果として、CIGRE WG で試験法に関するガイドラインが作成され、発刊された。(CIGRE TB-538) このガイドラインには、日本の意見も多く採用されている。

3. 情勢変化への対応

3.1 平成 21 年度における計画見直し

(1) ケーブル・冷却システム検証試験の追加

平成 19 年度～20 年度の研究成果を、実証プロジェクト推進委員会・WG 検討会、NEDO 主催の超電導技術委員会にて報告し、研究内容の評価、今後の指針への指導などを頂いた。その中で、冷却システムの特性把握が超電導ケーブル運転上重要な課題であることから、冷却システムの模擬試験、熱機械繰り返し試験などを追加すべきとの提言があった。

冷却システムについては、30 m ケーブル検証試験にて冷却システムの基本動作の確認を実施した後、実証場所での冷却システムを構築する計画であったが、実証用ケーブルの冷却システムは、構成要素である冷凍機、液体窒素ポンプが複数台必要でかつそれらの組合せ運転を実施する必要があるが、事前にその組合せ動作、運転制御方法などを十分に検討すべきとの意見であった。実施者側で計画を見直し、冷凍機、液体窒素ポンプの組合せ運転に関する、動作確認試験を実施するため、「システム検証試験」を実証ケーブル用冷却システムの構築前に、前川製作所にて、約 6 カ月間（組立、試験、撤去を含む）、実施することとした。

30 m ケーブル検証試験の試験内容についても、ケーブル、ジョイント、端末を組み合わせた、電氣的、機械的な特性を確認する計画にはなっているが、冷却試験が 1 回しか計画されておらず、試験期間も 4 カ月と短いものであり、検証内容を充実すべきとの意見を頂いた。実施者側で計画を見直し、超電導ケーブルが室温から液体窒素温度に冷却される際に発生する引張力、圧縮力による、超電導ケーブルの特性への影響の評価を検証試験に追加する。また、冷凍機が故障した際のシステムの挙動、短絡電流のような定格電流を超えた過電流が流れた際のシステムの挙動、保護方法の検討なども実施するようにする。このように、30 m ケーブル検証試験の計画を変更し、試験内容を充実させることとした。このため、30 m ケーブル検証試験の試験期間については、冷熱サイクル試験（2 ヶ月）、限界性能試験（4 ヶ月）を追加し、6 カ月延長した。

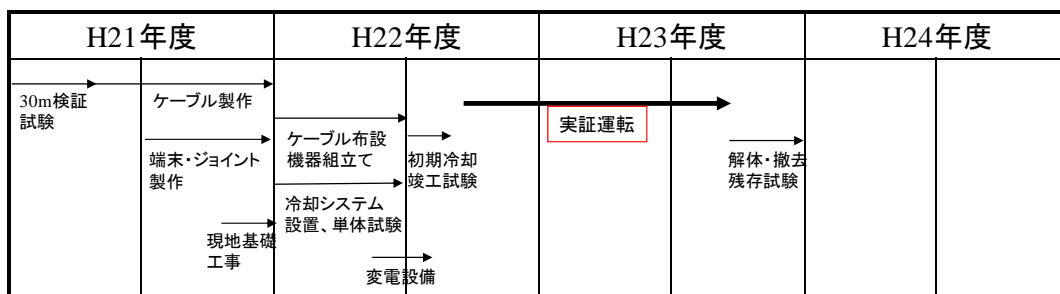
(2) 事業期間の変更

上記の実施内容の変更を反映すべく、全体の計画見直しを行った。全体計画の中で重要となるのは、実証場所での実システムへの連系開始のタイミングである。超電導ケーブルシステムを従来のシステムに接続するためには、ある程度の接続工事期間が必要で、またその一部の期間は実際に送電を停止する必要がある。実証場所の変電所は実際に大電力を変電・送電している変電所であり、負荷が大きな夏場、あるいは冬場は、システムが重負荷となる場合もあり、特に電力設備の停止を伴うような工事を実施することは不可能である。この時期を避け、ある程度の期間の設備停止が可能な時期としては、5 月あるいは 11 月が適している。この接続のタイミングと、上

記実施内容の変更に伴う、期間の延長を考慮した結果、事業期間を当初の5年から1年延長し、6年とするようにした。当初の計画と変更計画を図3-1に示す。

この計画変更については、平成21年2月開催のNEDO主催の超電導技術委員会にて審議され了承頂き、その後NEDOとの契約変更を行った。

●当初計画



●変更計画

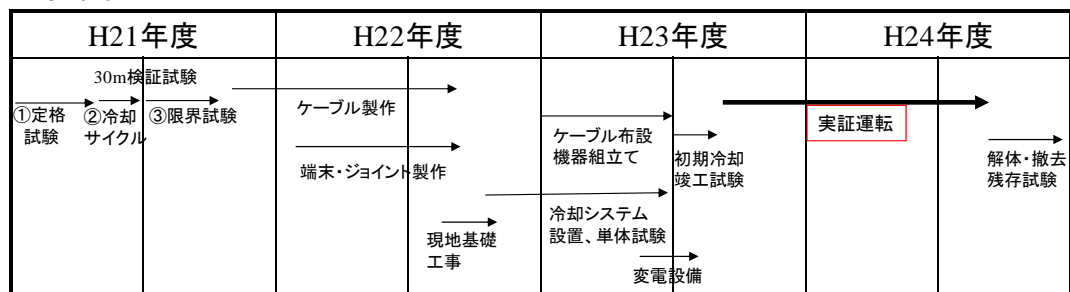


図3-1 平成22年度以降の当初計画と変更計画

3.2 東日本大震災による計画変更と実用化促進のための開発追加

2011年3月11日に東日本大震災が発生した。地震・津波に襲われた東北地区は甚大な被害があったが、福島原子力発電所の事故に端を発した東日本を中心とした電力需給の逼迫により、さらに各方面への影響が拡大した。本プロジェクトにおいても、震災当日は、計画通り旭変電所への端末機器の据え付けを実施しており、据え付けた直後に地震に見舞われたが、その端末機器や据え付け済みの冷却システムには、幸い被害はなかった。しかしながら、その後の復興工事や電力需給の逼迫の影響により、本プロジェクトの変電工事の一部や冷却システム検証試験に、繰り延べや遅れが生じた（図3-2参照）。その結果、関係各署と協議し、3-1節で変更したプロジェクト終了期間をさらに1年間延長することになった。

一方、実用化を加速するにあたっては、大容量・高効率で低コストな冷凍機開発や、実適用場所の一つターゲットになる発電機引出し線用の大電流ケーブルの開発などが必要であり、この延長期間において、本プロジェクトの予算を活用しながら、上記開発課題を前倒しで実施することを提案し、NEDO主催の超電導技術委員会（2011/9/27）にて了承頂いた。

最終的に変更となった計画を図3-3に示す。

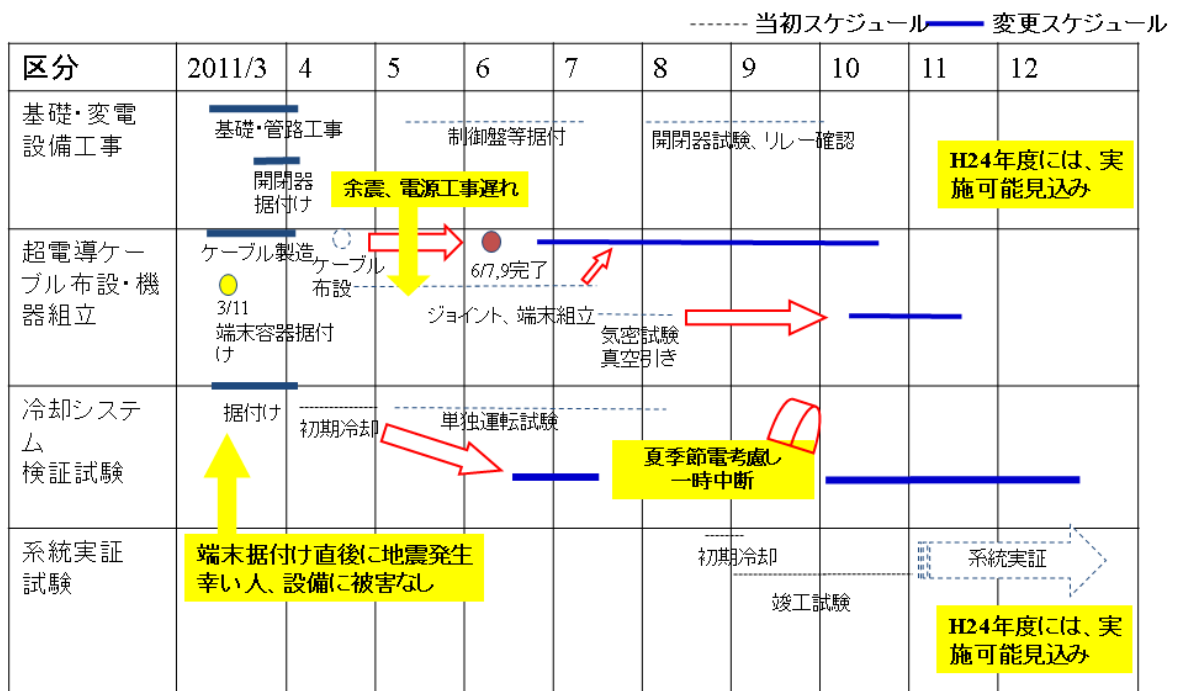


図3-2 震災の影響によるスケジュールの変更

H21年度変更計画

H22年度		H23年度		H24年度	
実証用ケーブル製作	→	ケーブル布設	→	実証運転	→
端末・ジョイント製作	→	機器組立て	→	初期冷却 竣工試験	→
	→	冷却システム 設置、システム試験	→		→
現地基礎 工事	→	変電設備	→		→
冷却システム 検証試験	→		→		→
					解体・撤去 残存試験

H23年度変更計画

H22年度		H23年度		H24年度		H25年度	
実証用ケーブル製作	→	ケーブル布設	→		→	実証運転	→
端末・ジョイント製作	→	機器組立て	→	初期冷却 竣工試験	→		→
	→	冷却システム 設置、システム試験	→		→		→
現地基礎 工事	→		→	変電設備	→		→
冷却システム 検証試験	→		→		→		→
						大電流ケーブルの開発	→
						大容量・高性能冷凍機の開発	→
							残存 試験

図 3-3 震災の影響による変更計画

3.3 プロジェクトリーダーの交代

事業開始時は、住友電工の畑執行役員（当時）がプロジェクトリーダーに任命され、その役務に就いていた。事業の最初の2年間は、ケーブルの低損失化、短絡電流対応といった、ケーブルの要素開発を中心とする開発内容であり、ケーブル技術、超電導技術の専門家である畑執行役員が務めていた。事業の3年目（平成21年）以降は、実証ケーブルシステムの構成、実証場所での運転などを検討し、実際に実証場所での工事、系統接続運転を行うことになることから、プロジェクトリーダーを系統技術・運転に詳しい東京電力の原技術開発研究所長に交代した。

その後、原氏が東電記念財団に出向され、本プロジェクトのプロジェクトリーダーを継続することが難しくなったことから、平成25年6月に、東京電力・技術開発センターの本庄グループマネージャーに交代となった。

4. 中間評価結果への対応

4.1 総合評価

本プロジェクトで開発が期待されているビスマス系高温超電導線材を用いた 3 相一括型の低損失でコンパクトな高温超電導ケーブルは、現状では世界の他の国では開発が難しい技術であり、電力技術において我が国が極めて優位に立てる技術の一つとなるものと期待できる。全般的に良く計画されたプロジェクトであり、中間目標もおおむね達成されている。未達成の部分についても達成への道筋が示されている。特に、これまで我が国の高温超電導ケーブル開発プロジェクトでは開発されたことが無い中間接続部の開発も順調に進められている。

超電導ケーブルの実用化に向けたコスト削減、送電ロスさらなる低減には、冷却システムの効率・能力の向上が重要なポイントである。冷却システムの評価や技術課題の明確化についての体制の強化が望まれる【1】。また、単なる規格基準の国際標準化だけを目指すのではなく、技術そのものを世界標準とするための活動が望まれる【2】。

(指摘点に対する対応)

【1】 冷却システムの評価や技術課題の明確化を図るため、冷却システムの検証期間の拡張や間接冷却方式の課題抽出を実施していきたい。また、プロジェクト推進のためのWGに冷却関係の専門家に参加頂くことを検討する。

【2】 今後、IEEE、CIGRE など電力関係国際会議あるいはASC、EUCAS、ISS、ICECなどの超電導応用国際会議での情報発信をさらに積極的に実施したい。また、CIGREにおける超電導ケーブル試験法に関するWGに日本委員として参加する。

4.2 事業の位置付け・必要性

高温超電導ケーブルは超電導電力応用で実用化が最も期待される分野であり、我が国の重要インフラである地中送電網の維持発展のために不可欠な技術開発である。本技術の開発・蓄積はわが国のエネルギーセキュリティ確保の観点からも国家戦略につながる重要な課題であり、NEDO プロジェクトとして適切である。

本格的な実用化に向けての課題として、長期に渡る信頼性など、本事業でカバーしきれない部分が残る。本事業終了後の実用化に向けた課題解決の方向性を本事業の期間中に明確にしておく必要がある。【3】

また、今後の地球環境問題を考える際に、高温超電導ケーブルの低損失性が寄与できるのは、国内よりも東アジア諸国を中心とする海外電力網である可能性が高い。世界への貢献といった観点からも、プロジェクトの位置づけを見直すことも必要である。【4】

(指摘点に対する対応)

【3】 長期に亘る信頼性評価など、現在の事業で実施が予定されていない課題につ

いて、解決の方向性を本事業の期間に明らかにする。

【4】超電導ケーブルシステム技術の世界展開を図るためにも、まずは国内実システムでの実証試験を通じて、運転技術や運用ノウハウを確立することが重要であると考えられる。このため、本事業には実証試験の実施に注力する。

4.3 研究開発マネジメント

研究開発推進にあたっては国内外の超電導ケーブル開発状況についての調査が行われており、内外の技術動向を踏まえた目標設定が成されている。さらに、目標設定が明確かつ具体的で定量化されており、十分な研究開発マネジメントが行われていると評価される。また、プロジェクトリーダーの途中交代を含め、実変電所構内での超電導ケーブル性能の実証試験とのプロジェクトの目的に相応しいプロジェクト推進体制を構築しており、効率的かつ漏れのない研究開発計画となっている。情勢変化への対応等も適切である。

冷却システムに関して比重が軽いように感じる。可動部分を有するなど、信頼性を考える上では重要な部分である。冷却システムの評価や技術課題の明確化についての体制を強化すべき。【5】 また、技術開発目標が国内の地中送電網への適用を目指した仕様となっている。開発される高温超電導ケーブル技術は世界的にも貢献が大きい技術であることを鑑みると、送電電圧階級毎の適応性などの設計研究では世界的なニーズも踏まえた検討を今のうちから行っておくことも必要である。【6】

(指摘点に対する対応)

【5】【1】に記載

【6】イットリウム系超電導電力機器技術開発PJにおいて、超電導ケーブルの高電圧化および大電流化の研究開発が行われている。このPJ実施者と緊密に情報交換しながら、超電導ケーブルの実適用化のための設計研究を進めていく。

4.4 研究開発成果

設定されている研究開発目標に対し、中間段階として極めて順調な研究開発成果を上げている。ほとんど全ての項目で中間目標値をクリアしており、最終目標も十分に達成可能と評価される。中間時点で達成された内容は世界最高レベルであり、建設コストも1/3に低減できる目途付けがされるなど、十分な成果が挙げられている。超電導ケーブルシステムのコンパクト化により、世界最高のエネルギー密度を達成でき、さらに既存管路に収容可能となったため大幅なコスト削減につながったことは大きな成果である。また、知的財産権の申請および論文の発表も適切に行われている。

今回は検証用として30m長のケーブルが製造されたが、30mの妥当性と製造技術の観点からの十分性への言及が若干弱かったように感じられた。これらの指標の妥当性についても示してほしい。【7】 また、世界的なデファクトスタンダード

技術とするためには、世界に対するアピールが極めて重要であり、我が国の高温超電導ケーブル技術の世界への周知を図るべきである。研究開発成果の発表先を見ると国内が中心であるが、むしろ海外を中心に発表することも検討してほしい。【8】

(指摘点に対する対応)

【7】超電導ケーブルの製造技術検証の面からは、ドラム巻き取り等の検証のため、30m以上の長さが望ましい。一方、製造に要するコストや冷却システムコストなど、費用対効果を考慮して、今回の検証用ケーブル長を30mと決定した。

【8】【2】に記載

4.5 実用化・事業化の見通し

実用化への技術的な課題は明確に示され、それに向けた方針も明確である。実証試験が実変電所に適用して実施されることを含め、実用化を十分に意識したプロジェクト計画となっており、またそれに向けた課題の抽出とその解決に向けた対応方針が明確になっている。本プロジェクトの適用により、建設コストが1/3に低減できるとの評価も得られており、十分な経済性が期待できると考えられる。本技術が、我が国の電力技術において世界を牽引する技術の一つとなる可能性は極めて高い。さらに、超電導応用技術の研究開発や人材育成にも大きな波及効果が期待できる。

実用化には、冷却システムの高効率化、低コスト化が実現できるかが大きなポイントである。特に、事業化までには、冷却システムの電力使用量の低減の問題を解決しなければならない。【9】 成熟した日本の電力系統では導入へのハードルが高い場合も、国際的にはそうでないことは多くある。日本での導入を前提にした規格化、標準化にこだわらず、柔軟な対応が必要である。【10】 国際標準化に関しては、データの提供にとどまることなく、最大限標準化そのものをリードすることが望まれる。【11】

(指摘点に対する対応)

【9】【1】に記載

【10】【2】に記載（コンパクトな三心一括構造などは日本のみならず、国際的にもメリットの大きい技術であり、本事業の成果を随時海外に発信する。）

【11】検証試験結果や実系統での実証試験結果は、標準化検討において大きな武器であり、これらを有効に活用することで標準化作業をリードしていく。また、CIGREにおいて始まる標準化のWGに日本委員として参加する。

5. 評価に関する事項

●過去に実施したそれぞれ（事前・中間・事後評価）について、次の項目を記述

- ①評価の実施時期（それぞれの実施年度）
- ②評価手法（外部評価、第三者評価など）＊
- ③評価事務局（研究評価部、推進部など）
- ④評価項目・基準（「標準的評価項目・基準」など）
- ⑤評価委員（それぞれの評価委員リストを記載。別添としても良い。）

	採択審査委員会（事前評価）	中間評価
①評価の実施時期	平成 19 年度	平成 21 年度
②評価手法	外部評価	
③評価事務局	新エネルギー部	研究評価部
④評価項目・基準	<p>①提案内容の評価（公募目的・目標との整合性および既存技術との優位差、提案の実現性、関連分野に関する実績）</p> <p>②提案者の評価（関連分野に関する実績、開発体制の整備、必要設備の保有、人材の確保）</p> <p>③成果の実用化（社会や他の技術への波及効果）</p>	<p>①事業の位置付け・必要性について：NEDO事業としての妥当性、事業目的の妥当性</p> <p>②研究開発マネジメントについて：研究開発目標の妥当性、研究開発実施の事業体制の妥当性、研究開発計画の妥当性、情勢変化への対応</p> <p>③研究開発成果について：中間目標の達成度、成果の意義知的財産権等の取得及び標準化の取組、成果の普及、成果の最終目標の達成可能性</p> <p>④実用化、事業化の見通しについて：④成果の実用化可能性事業化までのシナリオ、波及効果</p>
⑤評価委員	表 5-1 採択委員会委員	表 5-2 研究評価委員会委員 表 5-3 分科会委員

表 5-1 採択委員会委員リスト

採択審査委員	
正田 英介	財団法人 鉄道総合研究所 会長
仁田 旦三	財団法人 電力中央研究所 研究顧問
塚本 修巳	国立大学法人 横浜国立大学 教授
大久保 仁	国立大学法人 名古屋大学 教授
石山 敦	学校法人 早稲田大学 教授
福島 透	電気事業連合会 技術開発部長

表 5-2 研究評価委員会

	氏名	所属・役職
委員長	西村 吉雄	早稲田大学 客員教授
委員長代理	吉原 一紘	オミクロンナノテクノロジージャパン 株式会社 最高顧問
委員	安宅 龍明	オリンパス株式会社 コーディネータ
	伊藤 弘一	早稲田大学 客員教授
	稲葉 陽二	日本大学 教授
	大西 優	株式会社カネカ 顧問
	尾形 仁士	三菱電機エンジニアリング株式会社 取締役 社長
	小林 直人	早稲田大学 教授
	小柳 光正	東北大学 教授
	佐久間 一郎	東京大学 教授
	菅野 純夫	東京大学 教授
	富田 房男	放送大学 北海道学習センター所長
	架谷 昌信	愛知工業大学 教授
宮島 篤	東京大学 教授	

表 5-3 中間評価分科会委員

	氏名	所属・役職
分科会長	岩本 伸一	早稲田大学 教授
分科会長代理	伊瀬 敏史	大阪大学 教授
委員	秋田 調	電力中央研究所 企画グループマネージャー
	加藤 雅恒	東北大学 准教授
	白井 康之	京都大学 教授
	前川 治	株式会社東芝 統括技師長
	山口 浩	産業技術総合研究所 副研究ラボ長

所属・役職は中間評価当時のもの

Ⅲ 研究開発成果について

1 事業全体の成果

1.1 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証

(1) 低交流損失超電導導体の性能検証

高温超電導ケーブルは、電気抵抗がゼロであるためジュール損失が発生せず、送電損失が非常に小さいことが期待される。しかしながら、実際は超電導体に交流磁場が印加されると、主にそのヒステリシスによる磁化損失が発生する。従来の Bi2223 線材 (TypeHT 線材) を用いて構成した超電導ケーブル導体の交流損失計算値は $5.5 \text{ W/m/ph @ } 3 \text{ kArms}$ となり、本プロジェクトの目標値である $1 \text{ W/m/ph @ } 3 \text{ kArms}$ を達成するためには、超電導線材の大幅な低損失化が不可欠であることが判明した。

住友電工では、超電導フィラメントにツイストを施した低損失型 TypeACT 線材を自主開発しており、従来のノンツイスト線材に比べて $1/3$ の低損失化に成功している。しかしながら、全て TypeACT 線材を用いて構成した超電導ケーブル導体は、大電流化のためには、臨界電流 (I_c) 特性の向上が必要であった。従って、大電流化の観点から、TypeACT 線材と TypeHT 線材を適材適所で組み合わせたハイブリッド超電導導体の設計を検討した。

さらに、超電導線材の低損失化だけでなく、フォーマ内に発生する渦電流損失を $0.1 \text{ W/m/ph @ } 3 \text{ kArms}$ 以下に低減するため、 $\phi 0.8 \text{ mm}$ の素線絶縁銅線を用いた低損失型分割集合フォーマの開発を行った。

これらの低損失型分割集合フォーマ、TypeACT 及び TypeHT 線材を用いた超電導ケーブル導体を開発し、交流損失特性を評価した結果、 2 kArms 通電時の損失は 0.8 W/m/ph であり、中間目標 1 W/m/ph 以下の低損失化を達成した。さらに、高 I_c 型の TypeHT 線材を組み合わせた設計により、 3 kArms の大電流通電にも成功した。

最終目標 ($1 \text{ W/m/ph @ } 3 \text{ kA}$) の検証に際し、①ケーブル構造最適化による超電導層の大径化、②高 I_c 線材の適用、③線材巻きピッチ最適化による横磁場低減を行ったケーブルサンプルを試作して交流損失測定を検証した結果、 $1 \text{ W/m/ph @ } 3 \text{ kA}$ の低損失化に成功した。

(2) 短絡事故時対応超電導導体の性能検証

実系統では、定格の電流以外に事故電流と呼ばれる大電流が発生する。特に短絡事故時に発生する電流は大きく、 66 kV 級の系統での最大短絡電流は、 31.5 kA 、 2 秒と規定されている。一方、実証場所である旭変電所において事故のシミュレーションを行った結果、事故直後の再送電有の場合は、最大 10 kA 、 2 秒、再送電無では、 20 kA 、 2 秒であることがわかった。

このプロジェクトでは、①再送電無の場合は規定されている 31.5 kA 、 2 秒、②再送電有の場合は 10 kA 、 2 秒 (もらい事故)、の 2 ケースについて対応を考えるこ

とにし、①の場合は、短絡電流通過後もケーブル健全性が保たれることを確認すること、②の場合は、短絡電流通過直後に定格電流、電圧が印加できることの確認を行うことを目標とした。

ケーブル構造の設計の結果、短絡電流が流れてもケーブルの健全性が保たれるような温度上昇に抑えるため、短絡電流を分流させる常電導保護層を付加するケーブル設計を、ケーブル外径制約下で実施した。その結果、フォーマとして 140 mm^2 の銅撚り線構造を採用し、またシールド部にはトータル 77 mm^2 の断面積をもつ、銅テープ線を超電導シールドの外側に巻きつけることとした。

この構造をもつ、短尺の試験サンプルを作製して、最大 31.5 kA 、2 秒の短絡電流試験を実施した結果、超電導導体層及び超電導シールド層の温度上昇 ΔT はそれぞれ 120 K 及び 110 K であり、シミュレーション結果の予想範囲内であった。また、試験前後で試験サンプルに臨界電流特性の劣化はなく、要求される耐過電流特性を有することを確認した。

もらい事故模擬試験を実施した結果、 10 kA 、2 秒の短絡電流通過直後に 1.75 kA の通電、及び対地定格 38 kV の課電が可能なことを確認し、実証試験が実施される旭変電所線路で要求される特性を満足することを確認した。

以上の結果、プロジェクトの目標を達成した。

(3) 中間接続部の検討

中間接続部は、長尺のケーブルシステムには必要不可欠なものであり、ケーブル同士をマンホール内等にて接続している箇所を称する。本プロジェクトでは、 66 kV 、 3 kA 級中間接続部の開発を実施している。

66 kV 級中間接続部に必要な特性を検討し、仕様としてまとめた。また、構造について検討し設計を行った。

接続抵抗については、ジョイントモデルを作成し、導体部は $6.7 \text{ n}\Omega/\text{相}@3 \text{ kA}$ 、シールド部は $2.5 \text{ n}\Omega/\text{相}@3 \text{ kA}$ であることを検証し、目標値の $1 \mu\Omega/\text{箇所}@3 \text{ kA}$ 以下を達成した。

通電試験では、 3 kArms 、12 時間連続安定通電を検証した。また、短絡電流試験では短絡電流試験の前後において、サンプルの I_c 値に変化はなく、 $10 \text{ kA}-2 \text{ sec}$ 後の 1.75 kA 連続通電試験および $31.5 \text{ kA}-2 \text{ sec}$ の過電流に対して中間接続部の導体・シールド超電導線にダメージが発生しないことを確認した。

電気絶縁試験では、 $\text{AC}130 \text{ kV} \cdot 3 \text{ h}$ 、 $\text{Imp} \pm 385 \text{ kV}/3$ 回の所要性能を満足することを検証した。

機械特性試験では、三心一括の中間接続部試験サンプルを組立て、液体窒素の冷却条件下において、要求性能 $3 \text{ ton}/\text{三相}$ の引張試験および $0.5 \text{ ton}/\text{三相}$ の圧縮試験を実施し、試験前後で I_c 値に劣化がなく中間接続部の機械設計の妥当性を検証した。

熱損失では、三心一括の中間接続部における 3 kA 通電時の全体ロスが 72 W 程度

であると試算した。

これらの結果から、検討している構造は、中間接続部の所要性能である「耐熱機械力」「電流容量」「耐電圧」「圧力設計」に十分に満足するものであった。

(4) 終端接続部の検討

66 kV/3 kA 級の三相一括型端末の構造検討を行い、要求仕様に対して各種モデル試験を実施し、設計データを収集した。

通電試験では、3 kArms、8 時間以上の連続通電を行い、特に異常なく運転できることを実証した。

短絡電流試験では短絡電流試験の前後において、接続サンプルの I_c 値に変化はなく、10 kA-2 sec 後の 1.75 kA 連続通電試験および 31.5 kA-2 sec の過電流に対してダメージが発生しないことを確認した。

電気絶縁試験では、AC90 kV@3 時間、 $Imp \pm 385$ kV/3 回の所要性能を満足することを検証した。

機械特性試験では、ケーブルコアのオフセット部を模擬したサンプルを組立て、液体窒素の冷却条件下において、要求性能 3 ton/三相の引張試験および 0.5 ton/三相の圧縮試験を実施し、試験前後で I_c 値に劣化がなく中間接続部の機械設計の妥当性を検証した。また、ケーブルコアの応力を引きとめる治具を製作し、十分な機械特性を有していることを確認した。

3 kA 級電流リードの設計では 2500 mm² 燃線構造を選び、試作評価した結果、損失は計算値とよく一致し、170 W@3 kA であった。端末部の熱損失を算出し、無負荷時 415 W、通電時 635 W と推定した。

短絡時に流れる電流により、三相分岐部分に発生する電磁力を測定し、約 230 kgf であることがわかった。また、ケーブルコアにダメージがないことも確認した。

これらの結果から、検討している構造は、終端接続部の所要性能である「耐熱機械力」「電流容量」「耐電圧」「圧力設計」に十分に満足するものであった。

(5) 検証用ケーブルシステムの構築と評価

超電導ケーブル、ジョイント、端末について、各部の設計検討、要素技術検証を実施したが、使用における最終形態であるケーブルシステムとして、ケーブルと各機器とを接続した形で、各種試験を実施し特性の評価を行うため、検証用ケーブルシステムを構築し、その特性を評価した。

検証用システムは、30 m 級三心一括型超電導ケーブル、中間接続部、終端接続部、液体窒素循環冷却システムからなる。

30 m ケーブルはこれまでの要素試験結果をもとに設計したもので、導体 4 層、シールド 2 層、電気絶縁は 7 mm 厚 PPLP で構成されている。30 m ケーブル製造後、短尺を切り出し、出荷試験に相等するサンプル試験を実施、臨界電流 (I_c)、交流損失測定、課電試験、曲げ試験等を実施し、仕様を満足することを確認した。

中間接続部、終端接続部については、施工手順を確認し、管理項目を把握した。システム構築後、初期冷却試験を実施。システムは片側から低温窒素ガス、液体窒素を注入し、徐々に冷却した。冷却時にケーブルの静電容量を測定し、液体窒素が絶縁体に含浸していく状況を確認した。また、冷却時に超電導ケーブルが熱収縮によって発生する引張り力は2.4～2.7 tonであった。これは、ケーブル要素試験から予想される値とよく一致することを確認した。

冷却後、各種電気試験を実施した。導体の臨界電流測定を行い、 $I_c = DC5.4 \text{ kA}@77.4 \text{ K}$ を得た。通電試験においては、AC2 kAを24時間以上連続通電し、異常がないことを確認した。尚、超電導シールド側に流れる電流は、約AC1.8 kAであった。

従来ケーブルの竣工試験と同様に、定格電圧（66 kVの対地電圧38 kV）の2倍であるAC76 kV @ 10分間を課電し、良好であった。また、電圧対地51 kV、電流2 kA 8時間ON, 16時間OFFの条件で、1ヶ月の連続試験に成功した。この試験は30年間の加速試験に相当する。

室温と液体窒素温度を繰り返すヒートサイクルに関しては、ケーブルコアの動きはジョイント部で確認する限り±2 mm程度とほとんど動きのないものであった。 I_c 特性、課電特性とも冷却毎に測定したが特に変化があるものではなく、良好であった。

過負荷試験については、旭変電所で想定される過負荷最大電流2.36 kAを超える、電流2.5 kA、2.75 kAにおいて規定の8時間の通電ができることを確認した。3 kA通電においては、冷却能力の不足のため、3時間通電を確認するにとどまった。

短絡電流模擬試験においては、①もらい事故の最大電流10 kA、2 secと②旭最大事故電流相当（以上）の10 kA×18.6 secの通電を行った。①では温度、圧力の上昇はほとんど観測されず、連続して課通電できる見込みを得た。②では、温度上昇2 K、圧力上昇120 kPaであり、ケーブルにダメージがないことを確認した。また静電容量の変化から、回復時間は80分程度であった。

停電模擬試験では、冷凍機、ポンプがOFFの状態、定格通電を行い、約2時間の通電が行えることを確認した。

すべての試験を終了した後、ケーブルを解体し、各パートの I_c 測定、曲り部から切り取ったケーブルで課電試験を行った。 I_c の測定値は、初期の値と変わらなかったこと、試験電圧AC90 kV、AC120 kVを印加して異常がなかったことをそれぞれ確認し、ケーブルが検証試験でその性能が低下していないことを確認した。

1.2 トータルシステム等の開発

実証ケーブルの基本構成を検討し、東京電力管内の旭変電所（横浜市）に実証場所を決定した。また、実証場所での超電導ケーブルと既存設備との接続形態について検討し、遮断器、断路器等と組み合わせた接続方法を決定した。さらに実証場所での条件（短絡電流条件、雷インパルス条件等）を踏まえ、超電導ケーブルへの基本仕様をまとめた。

高温超電導ケーブルシステムと既存系統との接続において、高温超電導ケーブルシステムの故障を想定した運転・監視、保護・遮断システムなどの付帯機器の検討を行なった。

保護・遮断システムについては、超電導ケーブルにおいて電氣的な事故が発生した場合においても、既設の変圧器保護リレーにより保護可能であることを確認した。

冷却システムのコンセプトについてまとめ、送電を停止しないシステム、負荷に追従可能なシステムを目指すこととした。冷却方式については、間接冷却と直接冷却から直接冷却方式を選択した。実証場所での電力負荷を想定し、冷却システムの必要冷凍容量を試算、1 kW 級冷凍機の台数を、冗長性も考慮して 6 台に決定した。また、冷凍機、ポンプの構成を検討し、冷凍機については、2 台直列×3 並列の接続形態とした。ポンプについては、1 台故障時の冗長性を考慮して、2 台並列配置とした。

冷凍機とポンプはパスを切り離し、それぞれが故障しても独立に対応できるようにした。なお、長期信頼性検証を通じて、冷凍機各列流量の安定性に問題が出てきた場合に配慮して、並列パス毎に 1 台のポンプを対応させ、流量を個別調整できるような配置設計とした。

冷却システムの開発ステップは、30 m 検証ケーブルでの基本構成検討、前川製作所守谷工場で実施した冷却システム検証での冷凍機・ポンプの複数台制御試験、実証システムでの最終確認試験の三段階とした。本節では、30 m 検証ケーブル、システム検証の内容を踏まえ、最終段階の試験に向けて実証用冷却システムの詳細設計を実施した。

実証ケーブルの建設については、当初、平成 23 年 11 月からの実系統連系試験に向けて工事を進めていたが、平成 23 年 3 月 11 日の東日本大震災の影響により、旭変電所における施工手順を大幅に見直し、平成 24 年度第 3 四半期から実系統連系試験を開始することにした。

1.3 送電システム運転技術の開発

超電導ケーブルと従来ケーブルとの電気的特性の相違として、電気抵抗ゼロがあるが、これにより超電導ケーブルのインピーダンスは従来ケーブルよりも小さくなり、系統安定度向上に寄与できること、サージインピーダンスローディングが大きく大電流送電に適する、などを確認した。

超電導ケーブル接続時の短絡電流が流れた場合の超電導ケーブルシステムへの影響を検討するために、まず実証場所である旭変電所で予想される短絡電流および継続時間は、事故直後の課電通電が「無」となる場合は0～31.5 kA-2 sec および0～10 kA-3 sec、課電通電が「有」となる短絡事故は0～10 kA-2 sec の範囲であることが計算により判明し、それらを超電導ケーブルシステムの仕様として、ケーブル設計にフィードバックした。

実証場所でのサージ電圧は、EMTP 解析の結果、200 kV 程度であり、66 kV 系統での LIWV（雷インパルス耐電圧値）：350 kV よりも小さいことが判明した。

常時運転については、冷却システムで超電導ケーブルの温度、圧力、流量を制御することが重要で、それぞれの制御指針を示した。温度制御については、冷凍機の ON/OFF 運転を行うことで、ケーブル入口温度±1 K 程度で制御できることを示した。

異常時の運転については、まずは超電導ケーブルシステムに異常が起こった場合に想定される故障モードについて整理を行い、対応案について検討した。警報については重故障と軽故障に分類し、重故障の場合は送電を常電導回路に切り替える運用体制を構築した。

保守・メンテナンスについては、超電導ケーブルの各部でメンテナンスに必要な項目を整理した。冷却システムについては、定期的なメンテナンスが必要な主要機器として、冷凍機、循環ポンプ、冷却水循環システム、フィルタをピックアップし、それらの点検インターバル、点検項目等について詳細検討した。

1.4 実系統における総合的な信頼性の検証

旭変電所での一年以上に亘る実系統連系運転の達成を最終目的とし、その長期特性や信頼性の評価に加え、系統連系運転に至るまでの実証システムの製造・布設、出荷試験、初期冷却技術や系統接続前後の検証試験を実施した。

現在使用されている CV ケーブルなどの従来ケーブルでは、それらが実系統での長期使用に耐える特性を有しているかについての検証・確認を目的として、(1)開発段階で実施される開発試験、(2)ケーブル出荷段階で実施される出荷・受入試験、(3)ケーブル布設後の最終確認として実施される竣工試験が行われ、すべてに合格することが求められる。超電導ケーブルにおいても、従来ケーブルと同等の機能を有することが求められるが、それに加え、(4)超電導ケーブル特有の機能の健全性を確認することも必要となる。上記を踏まえ、超電導ケーブルの出荷時や布設後等の各段階に実施する試験項目・内容について検討した。

実証ケーブルの製造や、変電設備・冷却システム等の付帯設備を含む実証システムの構築を行い、各種試験により性能に異常がないことを確認した。

系統接続前の初期冷却技術として、実証ケーブル、冷却システムにおける各単体システムの冷却手順を検討し、最終的に両系を接続したシステム全体の循環冷却技術を確立した。冷却時は熱収縮による荷重値の監視を行い、手順変更による荷重低減、また、所要日数の短縮を図ることができた。

系統連系前には、ケーブルの電気特性試験、熱機械特性試験を行い、布設・熱サイクルに対する超電導ケーブルの健全性の確認を行った。また、システム応答性や機器切り替え等の制御性を検証し、正常動作を確認した。また、系統接続時は、バイパス用断路器等を含む変電設備の切り替え手順を確認し、安定した運転技術の確立及び切り替え前後の系統特性について検証した。

系統接続後は、負荷変動や系統切り替えに対するシステム応答性を検証し、安定運転が維持されていることを確認した。また、期間中の自然気象実績や事故電流等の系統実績についても調査し、その信頼性を評価した。さらに、残存性能確認を含む経時的な性能評価を実施し、熱損失の低減や冷凍機の効率向上といった課題を確認した。

主な研究成果を下記に示す。

- ・ 2012年10月29日～2013年12月25日の約14ヶ月間に亘る実系統連系運転を無事に達成した。定期検査に伴う計画的な送電停止を除くと、実日数は400日間程度であった。
- ・ 冷却時の熱収縮による端末荷重は最大で3トン程度以下に収まり、機械的強度上、支障がないことを確認した。
- ・ ケーブル電気定数は、静電容量 $C=185\text{ nF}$ 、 $\tan \delta=0.08\%$ 、伝搬速度 $1.9 \times 10^2\text{ m/}$

μs 、インダクタンス $L=0.10\ \mu\text{H/m}$ であり、また、部分放電測定や DC 課電試験 ($69\ \text{kV}\times 1.1\times 2=151.8\ \text{kV}$) により絶縁性能の健全性を確認した。

- ・ 臨界電流値 I_c は、第 1 回目の初期冷却時から系統連系運転終了後の残存性能確認に亘り計 5 回測定し、いずれも設計値と同等な約 $6400\ \text{A}@77.3\ \text{K}$ であり、各回における性能劣化は見られなかった。
- ・ 実系統連系運転中のケーブル熱負荷は $2300\sim 3100\ \text{W}$ の範囲で推移し、外部からの熱侵入が主要因で。交流損失の影響は $100\ \text{W}$ 以下であった。
- ・ ケーブル部、接続部の真空度において経時的な劣化が確認され、熱負荷増大の要因となった。真空度と熱負荷の相関性を確認し、真空引きによる熱負荷改善を図るとともに、長期的な真空度維持については今後の課題である。
- ・ 地上部布設の管路での日射による侵入熱増加が大きいことが判明した。通常の適用形態である地中布設の条件に近づける為、管路表面に遮熱処理を施し、日射分の表面温度上昇の抑止効果と侵入熱の低減を確認した。
- ・ 実系統連系運転中の最大電流は $1,127\ \text{A}$ であった。またこの間、50 回以上の系統切り替えや外気温度等による負荷変動を経験したが、冷媒温度：設定値 $\pm 1\ \text{K}$ 、冷媒流量： $40\ \text{L/min}$ 、冷媒圧力： $0.20\sim 0.25\ \text{MPaG}$ に制御され、安定運転が維持されることを確認した。
- ・ 運転温度の制御値である冷媒温度は、当初の $69\ \text{K}\pm 1\ \text{K}$ から通電中は $75.5\pm 1\ \text{K}$ 、停止中は $79\pm 1\ \text{K}$ まで設定値を上げ、実証システムが安定に制御されることを確認した。運転温度の上昇は、 $19.7\ \text{W/K@1}$ 台の冷却能力増加効果があり、また、高温域での安定運転の実績は、 ΔT の増加が予想される長距離線路への広範な適用に活かすことができる。
- ・ 実系統連系運転中、旭変電所 $66\ \text{kV}$ 母線に接続されている $66\ \text{kV}$ 架空送電線において雷による一線地絡事故が生じ、超電導ケーブルへの事故電流の流入を一回経験した。事故点遮断までの約 0.5 秒の間、健全相の対地電圧が $55\ \text{kV}\sim 65\ \text{kV}$ まで上昇し、約 $400\ \text{A}$ 以上の地絡電流が通過したが、ケーブルへの影響は見られなかった。
- ・ 自然気象実績として、最大で震度 4 の地震、台風接近に伴う最大 $19.0\ \text{m/s}$ の風速を経験したが、設備の健全性を確認した。
- ・ 実系統連系運転中の冷却システム COP は 0.04 程度であり、冷凍機冷却能力の経時的な劣化により、運転前と比較し $20\sim 30\%$ 程度の低下が見られた。冷却能力の劣化原因としては、断熱部の真空度低下、及びメーカー推奨メンテナンス周期 8000 時間に近づく機器の性能劣化が主であった。
- ・ 冷凍機冷却能力の劣化に伴い、真空度引き、冷凍機メンテナンスを中心に対策を行い、熱収支を改善した。さらに、今後の冷却システムの課題として、高効率化、メンテナンス周期の延伸化が重要であることを確認し、2.6 節「冷却システムの高性能化の研究」に活かすことができた。

1.5 ケーブルの高性能化の研究

実用化初期段階においては、水力発電所の発電機引き出し線など、導入メリットの大きな線路から超電導ケーブルの適用が始まると考えられる。上記引き出し線には 22 kV/12 kA 級の性能が要求され、ケーブルの大電流化が必須である。このため、22 kV/12 kA 級のケーブルおよび終端接続部の概念設計を行い、その設計に基づいた要素技術開発を行った。

(1) 適用可能性検討

大電流超電導ケーブルの導入モデルとして検討しているのは、発電機引き出し線（発電機～変圧器間）であり、発電した電力を変圧器で昇圧する前のため電流値が大きく、さらに負荷率が高いことが特徴である。一般的には相分離母線が用いられるが、大電流故に送電損失が大きく、また揚水発電所等の地下空間に配置される場合には、サイズが大きいためトンネルの建設コストが高くなる。

ここに、超電導ケーブルを適用すれば、建設コスト、送電損失の低減が期待できる。

(2) 大電流ケーブルの要素技術開発

大電流超電導ケーブルの設計概要を以下にまとめた。

- ・フォーマは可撓性を有し、短絡電流のバイパス回路となる銅保護層を巻き付ける構造とした。尚、金属管内部にも液体窒素を流すことで往復冷却を行う。
- ・超電導導体層は BSCCO 線材を用いた 4 層構造であり、想定臨界電流 (I_c) 値は 25~30 kA である。
- ・超電導シールド層は設けず、銅テープで遮蔽層を構成し、片端接地にすることで遮蔽電流が発生しない構造とした。

なお、本ケーブルはこれまでに例のない 12 kA 級であり、短絡電流も 63 kA 級と大きく、重要課題である「大電流化」および「耐短絡電流設計」に目処を付けることにより、大電流ケーブルの基礎設計を確立した。

電気特性として、サンプル長 3 m、 I_c 約 25 kA のサンプルケーブルにて交流損失を測定した結果、損失は約 15 W/m/ph@12 kA であり、計算結果との一致を確認した。また、12 kA、8 時間の単相連続通電試験にて、安定した通電を確認した。しかし、他相の磁場の影響を確認するために 2 相にて通電試験を実施したところ、10 kA までは通電可能であったが、11 kA では途中で電圧上昇が起こった。これは他相の磁場の影響により I_c が低下していることが原因であり、12 kA 通電には、他相磁場の影響を抑止する遮蔽方法の改善や離隔距離の検討が必要であることが分かった。

大気圧液体窒素に浸漬したサンプルで、単相での 63 kA、0.6 sec 短絡電流試験を実施したところ、温度上昇は 10 K でシミュレーションの予想値とほぼ同等とな

り、超電導ケーブルに損傷がないことを確認した。

さらに2相での短絡試験を実施したところ、導体温度上昇は約10 Kと単相と変わらず、また、電磁力の測定値は1300 kgf/mとなり、計算通りであることを確認した。

(3) 大電流ケーブル用機器の開発

22 kV/12 kA 発電所引き出し線（発電機～変圧器）に適用する超電導ケーブルシステムの所用性能を明確にし、コンパクト化、低損失化などを検討課題と位置付け端末の基本構造の検討を行った。

大電流ケーブル用端末の基本構造は、「端末容器（断熱容器）を、ケーブル側断熱容器と電流リード側断熱容器とに分け、断熱容器間に所定の絶縁性能を有する部材を設ける。ケーブルの導体と電流リードとの接続は、電流リード側断熱容器内で行う。」こととした。

要素開発としては、端末部の熱損失の主要因となる電流リードの熱損失の低損失化が重要な課題となるが、現状では12 kAでの安定した通電特性を優先し、通電試験により達成を確認することができた。通電時の損失については、約820 W/本@12 kAとなり、計算通りの値が得られた。

端末の構成部材であるFRP部材においても課電試験を実施し、22 kV級ケーブルの試験条件である、AC45 kV×10分間、IMP±165 kV各3回の電圧に耐えることを確認した。

1.6 冷却システムの高性能化の研究

実証試験で顕在化した旭変電所の冷却システムの課題および高温超電導ケーブルの実用化を想定した際の冷却システムへの要求仕様を踏まえて大容量高効率冷却システムの開発目標を策定し、冷凍機の必要単機容量:5 kW、COP:0.1、メンテナンス間隔:30,000 時間を目標とした。

上記の開発目標を考慮して、冷凍サイクルには逆ブレイトンサイクルを、圧縮機および膨張機にはターボ型を採用した。さらに、冷凍機の効率等を考慮して三段圧縮、一段膨張とし、膨張機で発生した動力を三段目圧縮機の駆動動力とするため、三段目圧縮機と膨張機を一体化させた。冷凍機の高信頼化のために、圧縮機、膨張機の軸受には非接触磁気軸受を採用し、オイルフリー化、メンテナンスフリー化を図った。また、ガスの物性値を考慮して冷媒にはネオンガスを採用した。

本ブレイトン冷凍機は、膨張機、熱交換器などの極低温となる機器をコールドボックス内に、それ以外の室温で運転される機器は圧縮機ユニット内に配置した。さらに、冷凍機の予冷や昇温時における冷媒循環系内へのガスの供給・回収、容量制御(圧力制御)を目的として三段目圧縮機出口と一段目圧縮機入口の間にバッファタンクを設置した。

ブレイトン冷凍機の性能確認試験では、冷凍機出口の液体窒素温度 77 K での冷凍能力は約 5.8 kW、モータ入力電力を基準とした COP は約 0.1 であり、開発目標を達成した。さらに、上記のバッファタンクを用いた圧力制御により、COP 一定での高効率運転が可能であることを確認した。

本開発で構築したブレイトン冷凍システムの液体窒素循環用の設備は、旭変電所で使用した冷却システムの構成および機器仕様を基本とした。スターリング冷凍機 6 台に代えて大容量のブレイトン冷凍機 1 台を設置することで、真空断熱配管の距離や本数が減少したため、旭変電所の冷却システムに比べて熱損失や圧力損失は半分程度まで低減した。3 週間の総合運転試験により、ブレイトン冷凍システムの制御性、信頼性、繰り返し負荷による安定性等を検証し、高温超電導ケーブル用冷却システムとして十分使用出来ることを確認した。

1.7 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究

(1) 高温超電導ケーブルの標準化の研究

超電導ケーブルは新しい技術であり、まだその規格は確立していない。しかしながら、米国、ヨーロッパ、中国、韓国などで開発が進んでおり、実用化に向けての規格化、標準化が望まれている。本プロジェクトでは、国際大電力システム会議（CIGRE）にて進めている超電導ケーブルの試験法に関するガイドライン作成に関して、検討した試験内容や実施した試験結果等の情報を提供し、その作成に協力した。

ガイドラインの内容としては、① Tests for Engineering Information、② Type test、③ Factory test、④ After laying test の章からなっている。各試験法に関しては、従来の電力ケーブルの試験項目に加えて、超電導ケーブル特有の試験項目を考慮し、その条件・方法が検討されている。

ガイドラインについては、” Recommendations for Testing of Superconducting Cables” として、CIGRE の TB538 として 2013 年 6 月に発刊された。

(2) 高温超電導ケーブルの適用技術研究

超電導ケーブルのメリットを評価する際に必要な、コスト計算時の考慮すべき項目について整理した。それらをもとに、66 kV 級超電導ケーブルの経済性メリットについて検討し、建設コストにおいては、2020 年頃を想定した場合、従来の 275 kV 級 CV ケーブルを使用する場合に比べて、60 %に低減できる結果となった。また、送電損失については、約 60 %に低減できると期待できる。

また、別の適用例として、発電機引き出し線の経済性メリットについて検討した。この場合も、2020 年頃を想定した場合、従来の相分離母線に比べて、建設コストは 60%、送電損失も 60%に低減できる見込みがあることが判った。

(3) 関連法規への対応

旭変電所での超電導ケーブルシステムの搬入・据付・長期の実系統試験の全試験工程を対象とした時に、対応が必要となる関連法規を調査するとともに、それらの対応等を検討し、適切に申請手続き等を行った。なお、関係省庁と協議の結果、冷却システムを含む超電導ケーブルシステム全体は電気工作物として電気事業法が適用となり、超電導ケーブルの接続技術は、省令 7 条を満たすと判断される技術要件にて適用可能となることを確認した。

表 1-1 に事業全体の成果のまとめについて記す。

表 1-1 高温超電導ケーブルシステムの成果全体まとめ

項目	目標	成果	達成度
1. 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証			
(a) 高温超電導ケーブルの性能・機能検証	(i) 高温超電導導体の性能機能を検証・評価する。(中間、最終)	<ul style="list-style-type: none"> 短尺ケーブルにて、交流損失の中間目標 1W/m/ph@2kA 以下を達成。 ケーブルフォーマ、Cu シールドをケーブル構造に適用し、短尺ケーブルにて 31.5kA-2 秒の健全性を確認。 短絡電流のもらい事故後(10kA-2 秒後)も定格電流、電圧が印加できることを確認。 短尺ケーブルにて、交流損失の最終目標 1W/m/ph@3kA 以下を達成。 	<p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p>
	(ii) 検証用高温超電導ケーブルを設計・製作する(中間、最終)	<ul style="list-style-type: none"> 30m 検証用の三心一括型高温超電導ケーブルを設計、製造した。 導体・シールドの臨界電流、交流損失、機械特性(曲げ、引張り)を評価し、所定の性能を有していることを確認 	<p>達成</p> <p>達成</p>
(b) 大電流接続部の性能・機能検証	(i) 中間接続部を設計し、性能機能を検証・評価する(中間)	<ul style="list-style-type: none"> 66kV 級中間接続部の基本設計を確立。 要素試験において、接続抵抗が 6.7nΩ/相@3kA(導体部)、2.5nΩ/相@3kA(シールド部)であることを確認し、最終目標値 1μΩ/箇所@ 3kA 以下を達成した。 通電試験、短絡電流試験、電気絶縁試験、機械特性試験を実施し良好な結果を得た。 30m 検証システムにて、組立て工法を確認した。 	<p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p>
	(ii) 終端接続部を設計し、性能機能を検証・評価する(中間)	<ul style="list-style-type: none"> 66kV 級終端接続部の基本設計を確立。 設計した終端接続部において、通電試験、短絡電流試験、電気絶縁試験、機械特性試験を実施し良好な結果を得た。 30m 検証システムで組立て工法を確認した。 	<p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p>
(c) 検証用ケーブルシステムの設計・構築	(i) 検証用ケーブルシステムを設計・構築する(中間)	<ul style="list-style-type: none"> 検証試験用のシステム設計を確立した。 30m ケーブル、中間接続部、終端接続部を備えたケーブルシステムを構築した。 	<p>達成</p> <p>達成</p>
(d) 検証用ケーブルシステムの評価	(i) 検証用ケーブルシステムの機能特性を検証・評価する(中間、最終)	<ul style="list-style-type: none"> 定格性能試験として、臨界電流試験、定格課通電試験、長期課電試験を実施し、良好な結果を得た。 4 回のヒートサイクル試験を行い特性に低下がないことを確認した。 冷凍機故障時、過電流通電を実施し、限界性能特性を把握した。 残存性能試験を実施し、各部の臨界電流、課電特性に劣化が無いことを確認した。 	<p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p>
2. トータルシステム等の開発			
(a) 実証ケーブルシステムの概念設計	(i) 実証ケーブルシステムの基本仕様を確立する(中間)	<ul style="list-style-type: none"> 実証場所を旭変電所に決定。 実証システムの基本構成、接続形態、基本仕様についてまとめた。 	<p>達成</p> <p>達成</p>
	(ii) 運転・監視システムの基本設計を確立する(中間)	<ul style="list-style-type: none"> 実証システムに要求される運転・監視機能を整理し、概念設計をまとめた。 運転・監視システムについて検討を行い、故障の重要度に応じて軽故障、重故障に分類し、警 	<p>達成</p> <p>達成</p>

		報情報を関係者に周知する概念設計をまとめた。	
	(iii) 実証ケーブル付帯機器の基本設計を確立する(中間)	<ul style="list-style-type: none"> 既設の変圧器保護リレーの設定で運用可能となる等、保護・遮断システムの基本設計を確立した。 基本設計を元にセンサーの要求仕様や計測項目を整理し、30m 検証用ケーブルの運転・監視システムを製作・評価した。 	達成 達成
	(iv) 冷却システムの設計を確立する(中間、最終)	<ul style="list-style-type: none"> 冷凍機の特性を比較検討し、実証システムに適用する冷却システムを選定した。 2(a)(ii)項、3(b)項の検討結果を反映し、詳細設計を確立した。 冷却システムのシステム検証試験の項目、内容を検討した。 	達成 達成 達成
	(v) 保守・メンテナンスの基本計画を作成する(中間)	<ul style="list-style-type: none"> 実証ケーブル・冷却システムの保守・メンテナンス項目を整理し、基本計画を作成した。(3.(b)参照) 	達成
(b) 線路建設手法の開発	(i) 実証場所での施工基本計画を立案する(中間・最終)	<ul style="list-style-type: none"> 平成21年度中間評価時点として、実証場所構築に向けた施工方法を検討し、施工基本計画を立案した。 東日本大震災の影響を考慮し、平成23年度に再度計画の見直しを実施した。 	達成 達成
(c) 実証ケーブルシステムの詳細設計	(i) 実証場所レイアウト、実証用ケーブル、機器、付帯設備等の詳細設計を確立する(中間)	<ul style="list-style-type: none"> 超電導ケーブルの布設形態等を示した実証システムの現地レイアウトを確立した。 実証用ケーブル、ジョイント、端末等の基本仕様、設計をまとめ、実証用ケーブル、機器の製造に反映させた。 実証システムの運転において主要指標となるLN温度、圧力の動作範囲をまとめ、警報しきい値を設定した。また、重故障警報項目を一覧にして整理した。 	達成 達成 達成
	(ii) メーカー工場にて冷却システム検証試験を実施し、各特性を評価する(中間、最終)	<ul style="list-style-type: none"> 検証用冷却システムを構築し、システム検証にて機器性能、制御性、信頼性、バックアップ特性等の健全性を確認した。 システム検証で得た知見を生かし、旭変電所での実証システム用冷却システムの詳細設計をまとめた。 	達成 達成
(d) 冷却システムの高性能化の研究	(i) 超電導ケーブルの実用化に向けた冷却システムの要求仕様が整理する(最終)	<ul style="list-style-type: none"> 超電導ケーブル実用化時の冷却システムへの要求事項、課題を整理し、開発目標としてまとめた。また、実証用冷却システムにおいても、顕在化された課題を整理した。 	達成
	(ii) 大容量・高効率型冷凍機の基本設計を確立する(最終)	<ul style="list-style-type: none"> ターボ圧縮機・膨張機の設計、製作、単体試験および、目標性能(冷却能力:5kW、COP:0.1、メンテナンス間隔:30000時間以上)を満たす冷却システム全体の設計を確立した。 	達成
	(iii) 冷凍機冷凍能力、COP等の性能試験を実施する(最終)	<ul style="list-style-type: none"> 熱交換器、循環ポンプ等を組み合わせた試験を実施し、冷凍能力5kW、COP0.1の開発目標を達成した。 	達成
	(iv) 冷凍機とLN2循環システムを組み合わせた冷却システム全体の性能試験を実施する(最終)	<ul style="list-style-type: none"> ケーブルを模擬した熱負荷を用いて長期の運転性能や制御性に問題無いことを確認した。 	達成
(e) ケーブル高性能化の研究	(i) 12kA/22kV 大電流ケーブルの基本仕様を確立し、検証試験を実施する(最終)	<ul style="list-style-type: none"> 大電流ケーブルの開発課題の抽出を行った。 12kA/22kV 大電流ケーブルの仕様を満たす基本設計を確立し、試作した短尺ケーブルにより12kA 安定通電を確認した。 63kA、0.6sec の短絡電流試験を行い、温度上昇は10K程度で収まり、過大な温度上昇が無いこ 	達成 達成 達成

		<p>とを確認した。また、シミュレーションによる温度解析結果と相違がないことを確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> コンパクトな大電流ケーブル用端末の基本構造の設計を行った。 試作した電流リードでの通電試験を行い、損失の評価を行った。 FRP ブッシングにて課電試験を実施し、絶縁性能の健全性を確認した。 	達成
3. 送電システム運転技術の開発			
(a) 高温超電導ケーブルの系統特性調査	(i) 系統要求仕様（短絡電流等）をまとめる（中間）	<ul style="list-style-type: none"> 実証場所での短絡電流条件は、0～31.5kA-2s(再送電無)、0～10kA-2s(再送電有)であることを確認した。 EMTP 解析の結果、LIWV350kV 以下であることを確認し、ケーブル設計にフィードバックした。 	達成
	(ii) 超電導ケーブルシステムのインピーダンスを算出し、系統への影響を評価する（中間）	<ul style="list-style-type: none"> 超電導ケーブルのインピーダンスは従来ケーブルよりも小さく、系統安定度向上に寄与すること、また、サージインピーダンスローディングが大きい為、大電流送電に適すること等を確認した。 	達成
(b) 高温超電導ケーブルの運転技術開発	(i) 平常時の運転技術指針を確立する（中間、最終）	<ul style="list-style-type: none"> 運転制御の重要パラメータとなる温度、圧力、流量について、動作範囲、制御指針等をまとめた。 制御対象（ケーブル入口、出口温度等）を抽出し、概念設計をまとめた。 温度制御については、冷凍機の ON/OF 運転によりケーブル入口温度±1K程度で制御できることをシミュレーションにて示し、30m ケーブル検証試験にて健全性を確認した。 圧力制御については、自然加圧方式やヒータ方式を採用し、30m ケーブル検証試験にて課題等を確認した。 実証ケーブル・冷却システムの保守・メンテナンス項目を整理し、基本計画を作成した。 	達成
	(ii) 事故時の運転技術指針を確立する（中間、最終）	<ul style="list-style-type: none"> 想定される故障モードを分析し、故障原因や故障の結果生じる事象について整理した。 故障の影響度に応じて軽故障、重故障に分類し、異常時における警報動作条件、対応フローを策定した。 事故後の超電導ケーブルシステムの保守対応として、系統切替条件や、ケーブル停止、復旧の方針について定めた。 実証試験にて事故・故障時対応の妥当性を検証した。試験中に重故障の発生は無かったが、発生した軽故障に対して良好な対応を実施した。また、事故実績として、近隣の架空送電線にて発生した地絡事故の流入に対し、実証システムの安定な制御を確認した。 	達成
4. 実系統における総合的な信頼性の検証			
(a) 総合的な信頼性検証のための試験計画立案	(i) 基本試験計画を立案する（中間）	<ul style="list-style-type: none"> 実系統への接続前確認試験について項目を整理し、要素試験、30m ケーブル検証試験の実施内容に反映した。また、試験項目、試験期間を2. (b) の計画作成に反映した。 	達成
	(ii) 実証用ケーブルシステムを製造する（最終）	<ul style="list-style-type: none"> 実証設備の構築にあたり、超電導ケーブル接続部、変電設備等の基礎工事を実施した。 遮断器等の変電設備や冷却システム室、制御室等の建屋を構築した。 住友工場にて、超電導ケーブル及び接続部を製 	達成

		<p>造し、出荷試験により良好であることを確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実証場所にケーブル布設を行い、損傷が無いことを確認した。 ・端末、ジョイントの現地施工を実施し、冷却後の性能が良好であることを確認した。 ・冷却システムを実証場所に構築し、気密試験や、単体での動作確認、故障時対応試験等を行い、良好を確認した。 ・警報、監視システム等の付帯設備を実証場所に構築した。 ・ケーブルと冷却システムを組合せた系統接続前の検証試験を行い、電気特性の健全性や、初期冷却手順、最適な冷却制御パラメータの確認を実施した。 	<p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p>
	(iii)実証試験を実施し、総合的な信頼性を検証する(最終)	<ul style="list-style-type: none"> ・実証用ケーブルシステムと 66kV 実系統を接続し、1年2カ月に亘る実系統連系運転を達成した。期間中、送電停止に伴うような異常はなく、安定した運転を確認した。 ・運転状況を監視し、負荷変動に対する応答性や、事故電流流入時におけるシステム健全性を確認した。また、外気温や系統切替回数等の外的要因等について実績を整理、評価した。 ・系統連系運転中、終了後において、臨界電流測定等の定期的な性能確認試験を行い、初期と比べて性能劣化がないことを確認した。 ・計画に基づきケーブル、冷却システムのメンテナンスを実施し、劣化特性や性能を評価した。 	<p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p>
5. 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究			
(a) 高温超電導ケーブルの標準化研究		<ul style="list-style-type: none"> ・超電導送電システムの国際規格化を進める標準化項目を作成した。 ・30m ケーブル検証試験にて収集した標準化に必要なデータ、及び実証試験の結果を日本における試験法として情報提供し、CIGRE の超電導ケーブル試験法の標準化検討をサポートした。 ・CIGRE にて超電導ケーブル試験法におけるガイドライン発行した。 ・国際規格化に向けて IEC へ働きかけ、TC20、TC90 で協議を開始した。 	<p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p>
(b) 高温超電導ケーブルの適用技術研究		<ul style="list-style-type: none"> ・超電導ケーブルのメリットを評価する際に必要な項目についてまとめた。 ・ケーブルの交流損失低減について新潟大学と共同研究を行い、交流損失の必要特性をまとめた。 ・66k 級超伝導ケーブルの経済性を検討し、従来ケーブルに比べて建設コスト、送電損失のメリットを算出した。 ・具体的な適用箇所を発電機引き出し線とした場合において、現状と低コスト化が進んだ場合での既存ケーブルとのコスト比較を実施した。 	<p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p>
(c) 関連法規への対応		<ul style="list-style-type: none"> ・電気事業法、高圧ガス保安法において、経済産業省原子力安全、保安院関東東北産業保安監督部に本プロジェクトの全体計画と試験方法、内容を説明し、本冷却システムは電気事業法に適用されることを確認した。 ・電気設備技術基準の解釈(省令7条関連)への対応として、超電導ケーブルのケーブル接続用件を経済産業省(同上)に確認し、方針を定めた。 	<p>達成</p> <p>達成</p>

	<ul style="list-style-type: none"> ・実証試験を行うにあたり考慮すべき関連法規を整理した。 ・関連法規に対し、必要となる許可、届出の申請手続きや方針案等を特記事項としてまとめた。 	<p>達成</p> <p>達成</p>
--	--	---------------------

2. 研究開発項目毎の成果

2.1 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証

2.1.1 低交流損失超電導導体の性能検証

(1) 開発目標

超電導体は臨界温度以下で電気抵抗がゼロになり、直流通電時のジュール損失はゼロである。しかしながら、交流電流を通電した場合には、発生する変動磁場の影響で超電導体は交流損失を発生する。この損失は高温超電導ケーブルを冷却する冷却システムの冷却容量を増加させる要因となるため、この損失を極力低減させる必要がある。

本プロジェクトの開発目標である 66 kV・3 kA 級の超電導ケーブルと同容量をもつ 275 kV 級の CV ケーブルとの損失比較を考える。CV ケーブルはおおよそ 100 W/m もの損失を発生する。この損失の 1/2 となるように、66 kV 級の超電導ケーブルの損失を低減することを目標とする。超電導ケーブルの損失の主要因は、ケーブル導体の交流損失と断熱管の熱侵入である。また、冷凍機の効率も考慮する必要がある。これまでの実績から推定される期待値は、断熱管の熱侵入熱は 2 W/m、冷凍機の効率は 0.1 程度と考えられる。これから、超電導ケーブルの交流損失を 1 W/m/ph@3 kA とすると、次式より超電導ケーブルの損失は CV ケーブルの損失の 1/2 になることが判る。

$$(\text{交流損失: } 1 \text{ W/m/ph} \times 3 \text{ 相} + \text{侵入熱: } 2 \text{ W/m}) / (\text{効率: } 0.1) = 50 \text{ W/m}$$

従って、本プロジェクトの交流損失の目標値を 1 W/m/ph@3 kA とする。尚、H21 年度中に達成する中間目標値は、1 W/m/ph@2 kA とする。

本節では、住友電工にて自主開発した低交流損失型のビスマス線材を用いて製作した短尺超電導導体の低損失化を検証する。

(2) 超電導ケーブルの交流損失

従来の Bi2223 銀シース線材はフィラメント同士の結合が切れていないため、同線材をスパイラル巻きして構成した多層超電導ケーブルの交流損失は、Bean モデル⁽¹⁾に基づいた多層均流化モデル (ML-UCD モデル) によって良く記述することができる。ML-UCD モデルは、各層のスパイラルピッチを調整することにより、各層の電流が均一化されている条件下において、着目する層を流れる電流と、他層を流れる電流とが作る磁場を考慮して各層の損失を算出することにより、多層導体の損失を導くことができる。厚さ $2d$ の超電導平板に、ピーク値 H_m の平行交流磁界が印加された場合の損失 P は以下の式で記述される。

$$P = \frac{2\mu_0}{3} \cdot \frac{H_m^3}{J_c d} \quad (H_m < H_p)$$

$$P = 2d\mu_0 J_c H_m \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{J_c d}{H_m}\right) \quad (H_m > H_p) \cdots (2.1.1-1)$$

ここで、 H_p は磁界がちょうど平板の中心に達したときの導体表面における磁界である。

ML-UCD モデルを用いて、表 2.1.1-1 に示す諸元を有する多層導体（導体 4 層、シールド 2 層）の交流損失を計算した結果を図 2.1.1-1 に示す。なお、線材は超電導フィラメントがツイストされていない従来の Bi2223 線材（幅 4.1 mm、厚さ 0.23 mm、臨界電流 $I_c=150$ A）を想定し、導体層及びシールド層の I_c はそれぞれ 5300 A 及び 5100 A として計算を行っている。2kArms 通電時の損失は、導体層が 1.8 W/m、シールド層が 0.7 W/m、合計で 2.5 W/m となる。さらに、3 kArms 通電時の損失は、導体層が 3.8 W/m、シールド層が 1.7 W/m、合計で 5.5 W/m となる。この計算から、本プロジェクトの目標である 1 W/m/ph@3 kA を達成するには、大幅な損失低減が必要である。そのためには、超電導線材の平行磁場に対する交流損失、つまり磁化損失の低減が不可欠である。

表 2.1.1-1 計算モデルの諸元

線材幅	4.1 mm
線材厚	0.23 mm
線材 I_c	150 A
n 値	20

導体構造	仕様	外径 (mm)
フォーマ		18.0
HTS 導体 1 層目	12 本	19.2
HTS 導体 2 層目	13 本	20.4
HTS 導体 3 層目	14 本	21.6
HTS 導体 4 層目	14 本	22.8
絶縁層		38.1
HTS シールド 1 層目	25 本	39.0
HTS シールド 2 層目	26 本	40.2

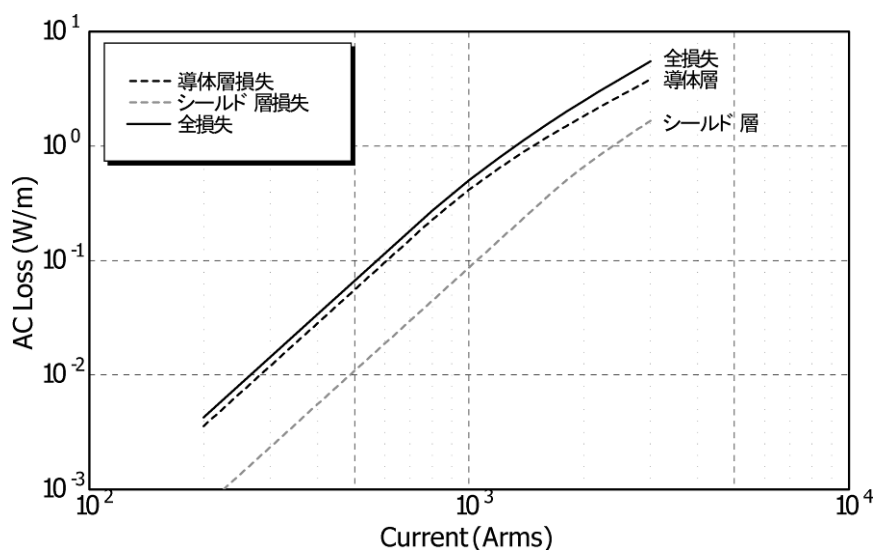


図 2.1.1-1 ML-UCD モデルを用いた超電導導体の交流損失計算結果

(3) 低交流損失型のビスマス線材の開発

超電導多芯線の交流損失低減には、フィラメントサイズを小さくする、ツイストピッチを短くする、母材の比抵抗を大きくすることが有効であると知られている。これまでの Bi2223 銀シース線材では、フィラメント間の結合が強く、単芯線のような特徴を示すことが多かった。このため、住友電工では、従来のノンツイスト線材 (TypeH: 4.1 mm^w、0.23 mm^t) に対して、フィラメントをツイストした線材 (TypeAC: 2.4 mm^w、0.18 mm^t) を開発し、交流損失 (平行磁場に対する磁化損失) の低減に成功している⁽²⁾。TypeAC 及び TypeH 線材の断面写真を図 2.1.1-2 に示す。図 2.1.1-3 は、700 Gauss の平行磁場中における線材の磁化損失測定結果を示しており、従来の TypeH 線材に比べて、平行磁場に対する磁化損失が 1/3 程度に低減されていることが分かる。なお、磁化損失測定は、鞍型ピックアップコイル法⁽²⁾により液体窒素中で測定した。

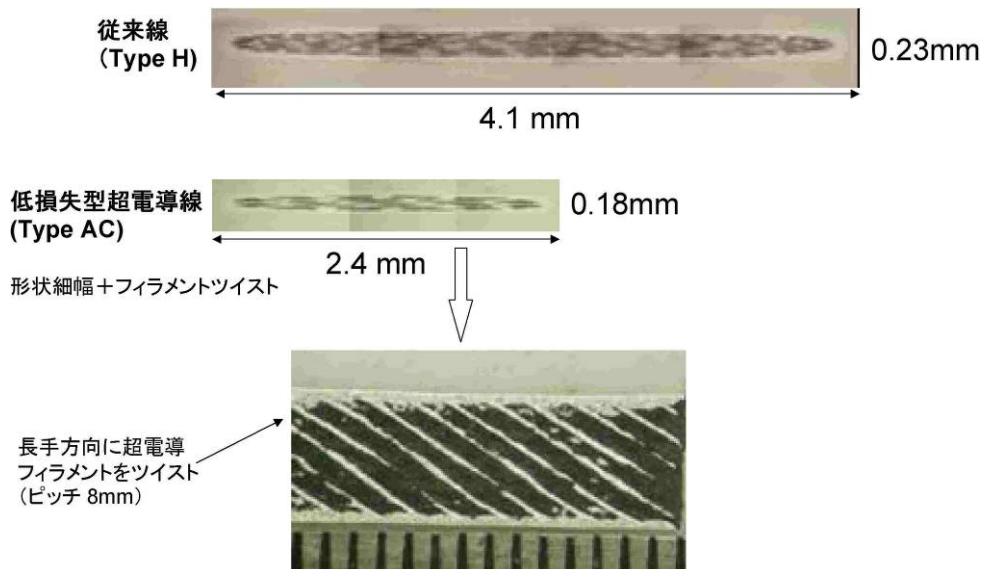


図 2. 1. 1-2 TypeH 線材と TypeAC 線材

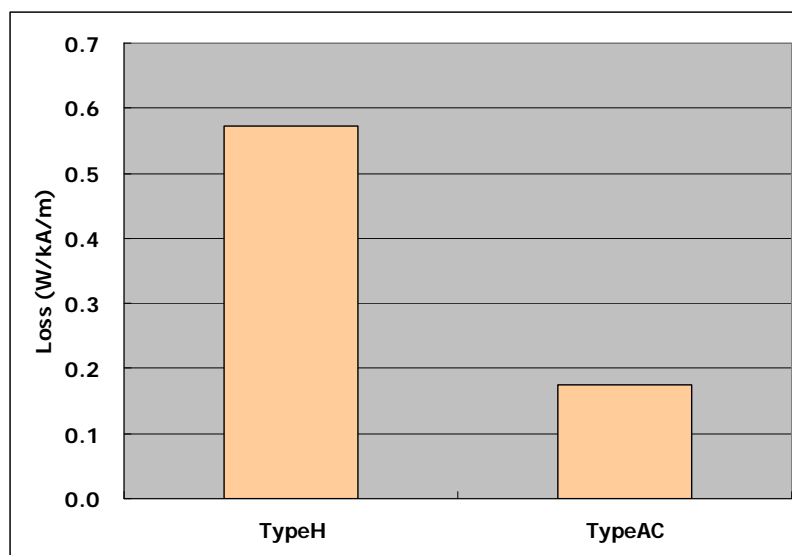


図 2. 1. 1-3 線材磁化損失測定結果 (平行磁場 700 Gauss 中)

(4) 低交流損失型線材を用いた超電導導体の検証

開発した低損失型 TypeAC 線材を用いて構成した超電導導体の低損失化を検証するために、表 2. 1. 1-2 に示す諸元を有する 1m の導体サンプルを作製し、交流損失測定を行った。なお、超電導線には、機械的な強度を確保するために、両面に厚さ 50 μm の銅板が半田付けされている (以下、補強されている線材は末尾に T を付け、TypeACT あるいは TypeHT と表記する)。1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ で定義した導体層の I_c は 4900 A、シールド層の I_c は 3600 A であり、使用した線材の I_c レベルの総和と同等であり、劣化なく導体作製が完了した。

交流損失測定は、図 2. 1. 1-4 に示すように、導体層とシールド層に往復通電を行い、導体層及びシールド層の直上に埋め込んだ電圧タップを用いた電氣的四端子法

により実施した。なお、交流損失測定は 60 Hz で実施したが、以下の議論では、測定した損失の値を 5/6 倍した 50 Hz 換算値を用いる。導体サンプルの交流損失測定結果を図 2.1.1-5 に示す。2 kArms 通電時の交流損失は、導体層とシールド層の損失の合計で 0.85 W/m となる。同図中には、ML-UCD モデルにより計算したノンツイスト線材を用いた導体の交流損失（図 2.1.1-1 に示した計算結果）も示してある。TypeACT 線材を用いて製作した導体の交流損失は、ノンツイスト線材により構成された導体に対して 1/3 程度に低減されており、TypeAC 線材を用いた超電導導体の低損失化が実証された。

表 2.1.1-2 超電導導体の諸元

導体構造	仕様	外径 (mm)
フォーマ	分割集合フォーマ	17.5
HTS 導体 1 層目	TypeACT、19 本	21.4
HTS 導体 2 層目	TypeACT、21 本	
HTS 導体 3 層目	TypeACT、22 本	
HTS 導体 4 層目	TypeACT、22 本	
絶縁層	PPLP、6mm 厚	34.3
HTS シールド 1 層目	TypeACT、36 本	36.6
HTS シールド 2 層目	TypeACT、38 本	
保護層	銅テープ、絶縁紙及び不織布	43.5

導体層 I_c	4900 A
シールド層 I_c	3600 A

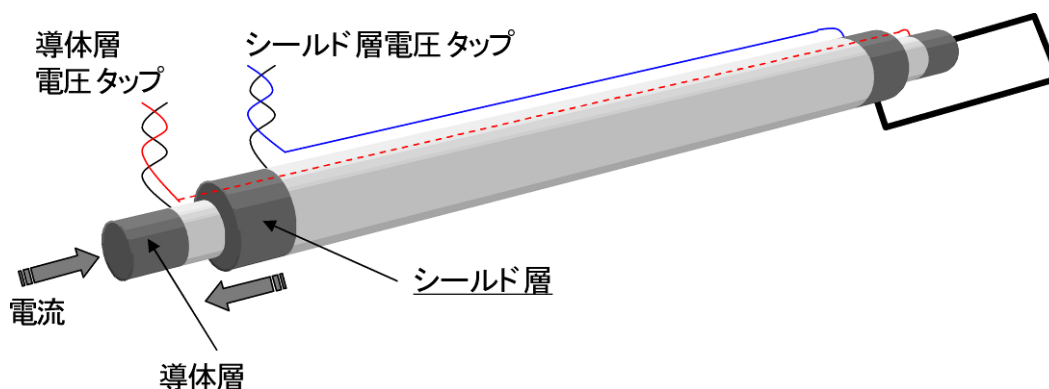


図 2.1.1-4 超電導導体サンプル概要

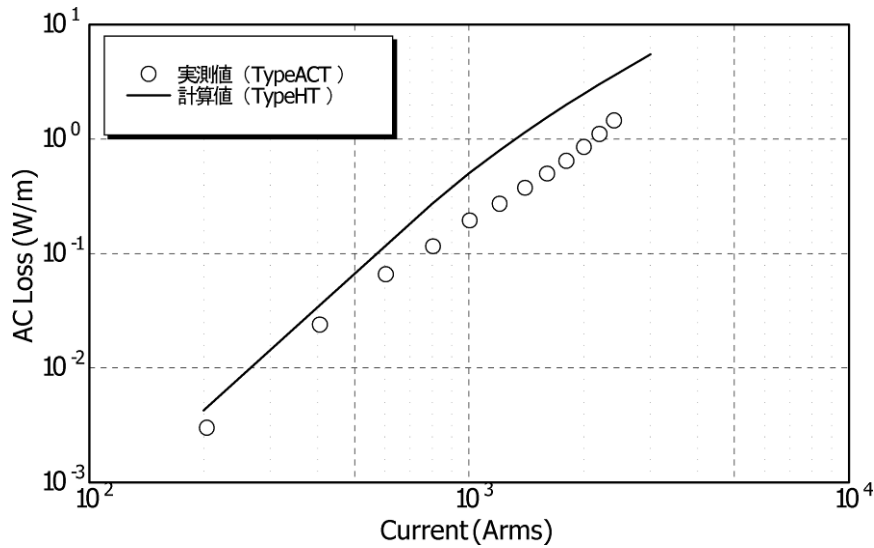


図 2.1.1-5 超電導導体の交流損失測定結果

(5) 超電導導体の交流損失解析モデルに関する検討

低損失型 TypeACT 線材を用いたケーブルコアを作製して、中間目標である 1W/m/ph@2 kArms 以下の低損失化を実証した。一方で、大容量化の観点からは、フィラメントにツイストを施していない高 I_c 型 TypeHT 線材を用いる方が有利と言える。このため、以下では、TypeACT 線材と TypeHT 線材を組み合わせたハイブリッド超電導導体の構造最適化について検討を行った。

ハイブリッド超電導導体の構造最適化を行ううえで、導体の交流損失解析モデルの確立は不可欠であるが、フィラメントにツイストを施すことによって、フィラメント間の結合を切ることに成功した TypeACT 線材に対して、等価厚さ $2d$ や中心到達磁界 H_p を理論的に求めるのは非常に難しい。このため、線材単体の交流損失測定結果を組み込んだ解析モデルを提案した。

平行交流磁界中にある超電導線材に対して交流通電を行った場合に発生する損失には、外部磁界によって生じる磁化損失と、通電電流によって生じる通電損失がある。一般に、ツイストが施されていない Bi2223 線材では、全損失はほぼ磁化損失によって支配されるが、ツイストが施された Bi2223 線材では、ゼロ磁界下における通電損失と、ゼロ通電時における磁化損失の和によって全損失がよく記述されることが報告されている⁽³⁾。

図 2.1.1-6 は鞍型ピックアップコイル法⁽²⁾によって測定した TypeACT 及び TypeHT 線材の外部変動磁界での磁化損失測定結果を示している。200 Gauss 以上の高磁界領域において、TypeHT 線材に比べて TypeACT 線材の損失が小さくなっており、ツイストによる損失低減効果が顕著となる。

通電損失は、Bean モデルに基づいて解析した下記の理論式が Norris によって求められており⁽⁴⁾、Bi2223 線材のように導体幅と厚さとの比（アスペクト比）が小さい場合には、線材断面を楕円形状として計算している Ellipse モデル式

(2.1.1-2) により良く記述されることが知られている (式中、 $z=I_p/I_c$)。

$$W_{N, Ellipse} = \frac{\mu_0 f I_c^2}{\pi} \left\{ (1-z) \cdot \ln(1-z) + z - z^2/2 \right\} \cdots (2.1.1-2)$$

$$W_{N, Strip} = \frac{\mu_0 f I_c^2}{\pi} \left\{ (1-z) \cdot \ln(1-z) + (1+z) \cdot \ln(1+z) - z^2 \right\} \cdots (2.1.1-3)$$

一方で、通電損失は線材形状、n 値及び Jc の均一性等に依存することが報告されていることから⁽⁵⁾、本報では実際に線材の通電損失を測定した実測値を用いる。図 2.1.1-7 に TypeACT 及び TypeHT 線材の通電損失測定結果を示す。TypeHT 線材が負荷率 0.3 以上の領域で Ellipse モデルとよく一致しているのに対して、TypeACT 線材は負荷率 0.7 以上の高負荷領域でのみ Ellipse モデルとよく一致しており、低負荷領域ではむしろ Strip モデルに近い。

図 2.1.1-6 及び図 2.1.1-7 の実測データを用いて、表 2.1.1-2 に諸元を示す超電導導体の交流損失を計算した結果を図 2.1.1-8 に示す。計算方法としては、各層均流化を前提として、各線材の負荷率及び印加される平行磁場を計算する。平行磁場に対する磁化損失を図 2.1.1-6 のデータより求め、負荷率に対する線材の通電損失を図 2.1.1-7 のデータより求め、線材磁化損失の総和 (緑線) と通電損失の総和 (青線) の合計によってケーブルコアの交流損失 (赤線) を求めた。計算結果は実測されたケーブルコアの交流損失特性をよく記述していることから、本章ではこの解析モデルを用いてケーブル構造の最適化について検討を行った。

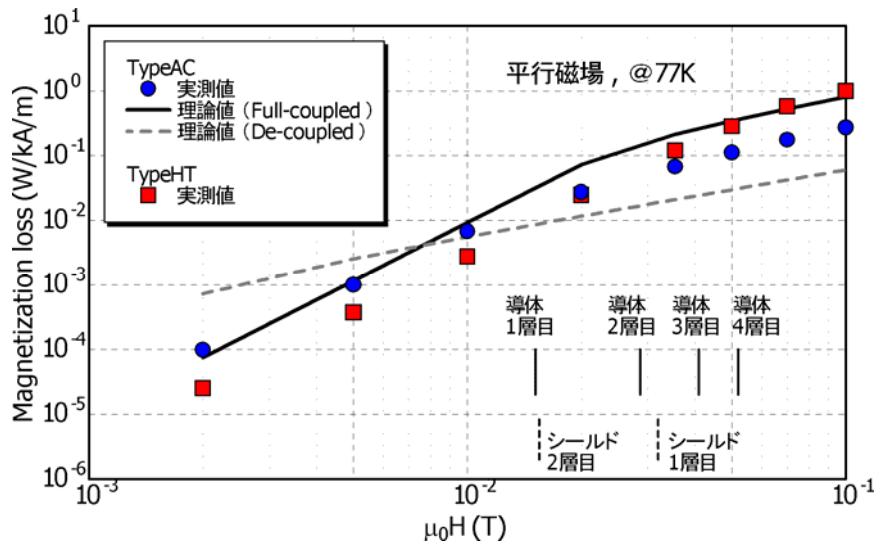


図 2.1.1-6 線材の磁化損失測定結果

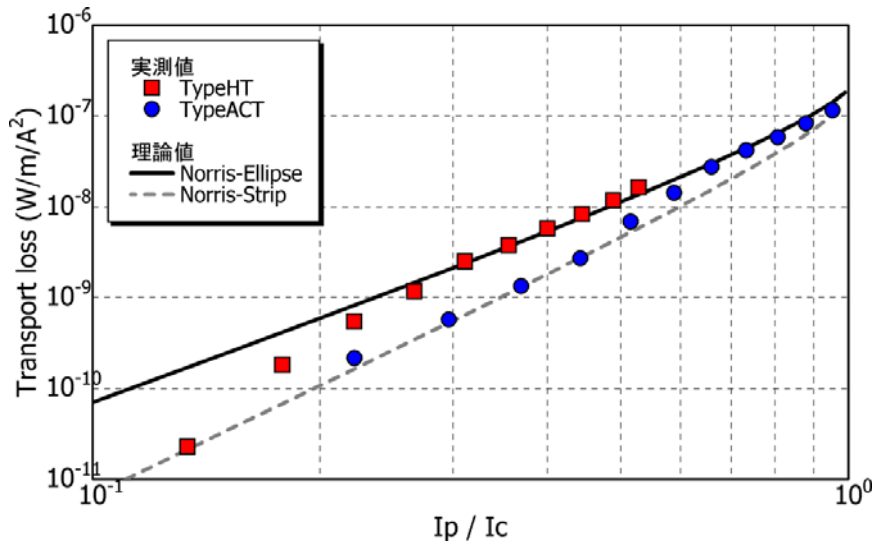


図 2.1.1-7 線材の通電損失測定結果

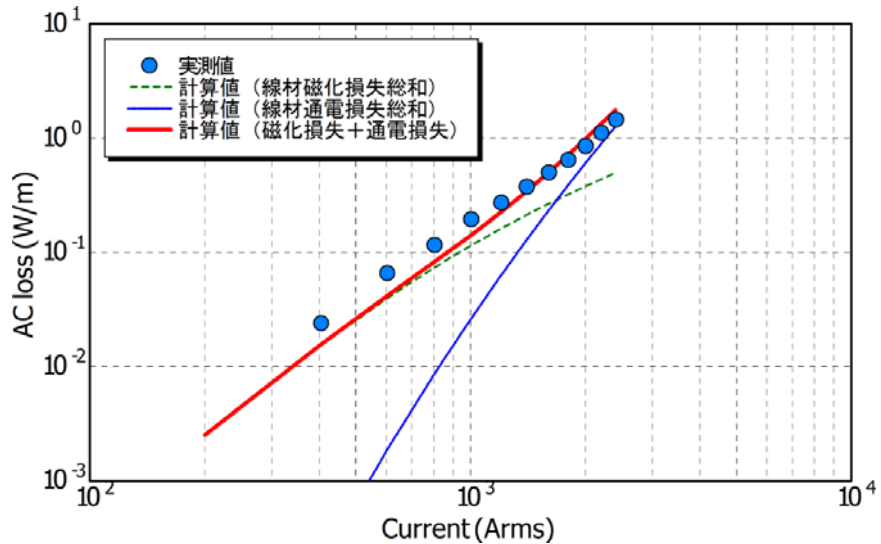


図 2.1.1-8 超電導導体の交流損失測定結果と解析モデルとの比較

(6) ハイブリッド超電導導体の構造最適化

まず、解析の前提となるケーブル構造について検討を行った。表 2.1.1-3 は、導体層及びシールド層の層数に対するケーブル外径計算値をまとめた結果を示している。上段が 7 mm 厚絶縁の場合の外径を、下段の () 内が 6 mm 厚絶縁の場合の外径を示している。一例として、導体 4 層、シールド 2 層、6 mm 厚絶縁の場合のケーブル構成を表 2.1.1-4 に示す。なお、線材は表 2.1.1-5 に諸元を示す TypeACT 線を用いており、フォーマ外径は 18 mm としている。実証プロジェクトでは、電気絶縁設計として、長期課電特性に関する実績を有する 7 mm 厚絶縁を採用する。このため、ケーブル外径を 150 mm 以下とするためには、表 2.1.1-3 に示すように、導体 4 層、シールド 2 層が許容最大層数となる。また、導体 2 層、シールド 1 層構

造では、高 I_c 型の TypeHT 線を用いたとしても 3 kA 級の容量を確保することは困難であり、以下の検討では、導体 4 層、シールド 2 層構造を前提としてケーブル構造の最適化を行う。

前節で提案した解析モデルを用いて、TypeACT 及び TypeHT 線材に対する各層の交流損失計算を行った結果を図 2.1.1-9 に示す。通電電流は 2 kArms であり、このとき各層に印加される平行磁場の最大値は、導体 1 層目が 0.015 T、導体 2 層目が 0.029 T、導体 3 層目が 0.041 T、導体 4 層目が 0.052 T、シールド 1 層目が 0.032 T、シールド 2 層目が 0.016 T であり、これの値は図 2.1.1-6 に示している。解析に用いた線材の諸元を表 2.1.1-5 に、ケーブルコアの諸元を表 2.1.1-6 に示す。図 2.1.1-9 に示した解析の結果の要点を以下にまとめる。

- ・ 磁場の小さい導体 1 層目及びシールド 2 層目については、TypeACT 線材を用いるよりも TypeHT 線材を用いる方が低損失となる。
- ・ 磁場の大きい導体 3、4 層目については、TypeHT 線材を用いるよりも TypeACT 線材を用いる方が低損失となる。
- ・ 導体 2 層目及びシールド 1 層目については、TypeACT 線材を用いた方が低損失となるが、TypeHT 線材を用いた場合との差は小さい。

ケーブル大容量化の観点から考えると、TypeHT 線材を用いる層を増やした方がケーブルの I_c が高くなるため、導体 3 層目及び 4 層目に TypeACT 線材を用い、他層には TypeHT 線材を用いたハイブリッドケーブル構造を設計案とし、1W/m/ph@2 kArms 以下の交流損失を達成できるか検証を行うこととした。

表 2.1.1-3 コア構造とケーブル外径計算値

	導体 2 層 シールド 1 層	導体 4 層 シールド 2 層	導体 6 層 シールド 3 層	導体 8 層 シールド 4 層
コア外径	42.2 (40.2)	45.3 (43.3)	48.3 (46.3)	51.4 (49.4)
ケーブル外径	137.0 (132.7)	143.6 (139.3)	150.1 (145.8)	156.7 (152.4)

※上段が 7 mm 厚絶縁、下段の () 内が 6 mm 厚絶縁の場合の外径

表 2.1.1-4 導体4層、シールド2層、6 mm 絶縁の場合のケーブル構造

	導体構造	外径 (mm)
コア	フォーマ	18.0
	HTS 導体層	21.8
	絶縁層 (半導電層込み)	35.2
	HTS シールド層	37.2
	PPLP 押さえ巻き層	38.4
	銅シールド層	40.6
	保護層	43.3
ケーブル	三心コア	93.3
	SUS コルゲート内管	108.3
	SUS コルゲート外管	132.3
	防食層	139.3

表 2.1.1-5 解析に用いた線材の諸元

	TypeACT	TypeHT
線材幅	2.7 mm	4.5 mm
線材厚	0.33 mm	0.35 mm
ツイストピッチ	8 mm	—
補強	銅合金 (50 μ m ^t , 両面)	銅合金 (50 μ m ^t , 両面)
I _c	50 A	160 A

表 2.1.1-6 解析に用いたケーブルコアの諸元

導体構造	線材本数 (TypeACT)	線材本数 (TypeHT)	内径 (mm)
HTS 導体 1 層目	19 本	11 本	18.0
HTS 導体 2 層目	21 本	12 本	19.0
HTS 導体 3 層目	22 本	13 本	20.0
HTS 導体 4 層目	22 本	13 本	21.0
HTS シールド 1 層目	37 本	22 本	35.5
HTS シールド 2 層目	39 本	23 本	36.5
導体 I _c	4200 A	7840 A	—
シールド I _c	3800 A	7200 A	—

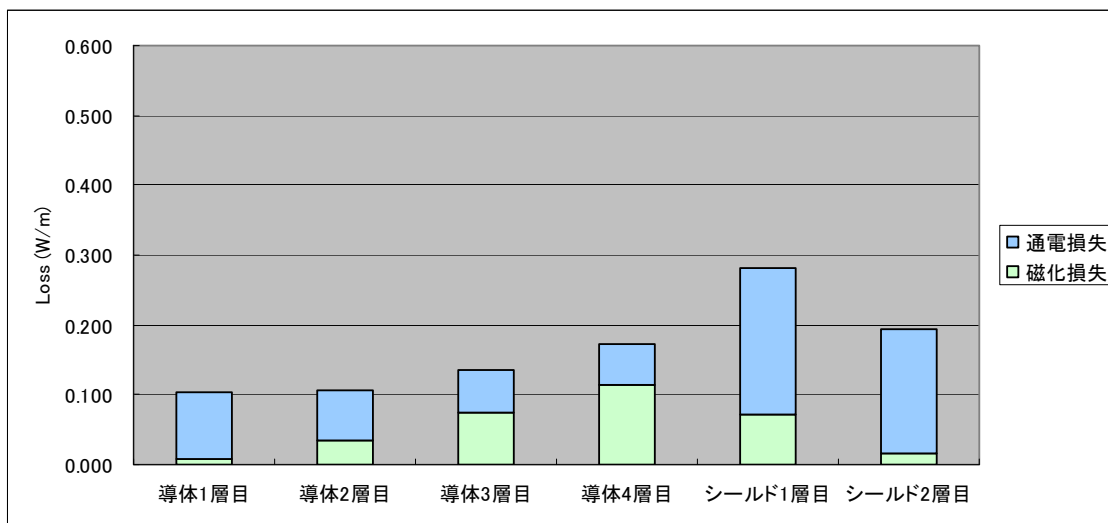


図 2.1.1-9 (a) TypeACT 線材を用いたケーブルコアの交流損失解析結果

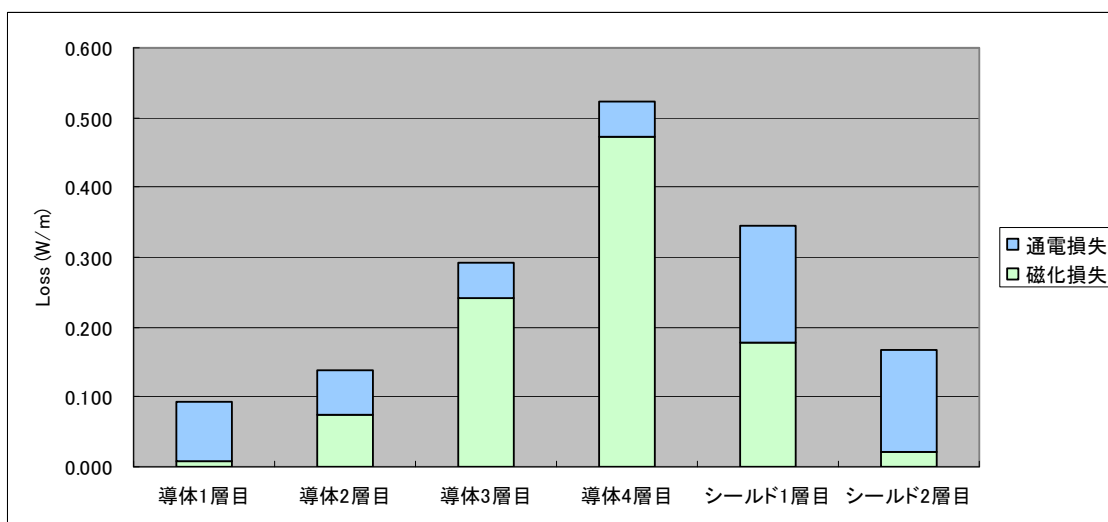


図 2.1.1-9 (b) TypeHT 線材を用いたケーブルコアの交流損失解析結果

(7) 低損失フォーマの開発

これまで、超電導線材内に発生する損失について議論してきたが、線材を巻き付けるために必要なフォーマ部分に発生する損失についても考慮する必要がある。各層の電流を均一化するために、線材の巻付けピッチを調整した均流化導体では軸方向の磁場が発生し、この軸方向磁場に起因して銅撚り線フォーマ内に渦電流損失が発生する。図 2.1.1-10 は、断面積 140 mm² のフォーマについて、フォーマを構成する銅素線の直径に対して発生する渦電流損失を計算した結果を示している。なお、素線は全て絶縁が施されていることを計算の前提としている。導体の巻付けピッチの構成にも依るが、3 kArms 通電時の軸方向磁場は 0.015~0.02 T 程度となり、このときのフォーマの渦電流損失を交流損失目標値 1 W/m/ph の 1 割程度 (0.1 W/m/ph) に抑えるためには、フォーマを構成する銅素線の直径を 1 mm 以下にする必要がある

る。

このため、 $\phi 0.8$ mm の素線絶縁銅素線を用いた低損失型銅撚り線フォーマの開発を実施した。表 2.1.1-7 にフォーマの諸元を、図 2.1.1-11 にフォーマの写真を示す。従来のフォーマが同心撚りされているのに対して、低損失型フォーマは多重撚りの分割集合の形態を採用している。このような形態をとることにより、交流通電時の偏流を抑制することで交流抵抗を小さくし、短絡電流が流れた際の発熱を抑制するとともに、細線を使用した際の機械的な強度を保つことに成功した。

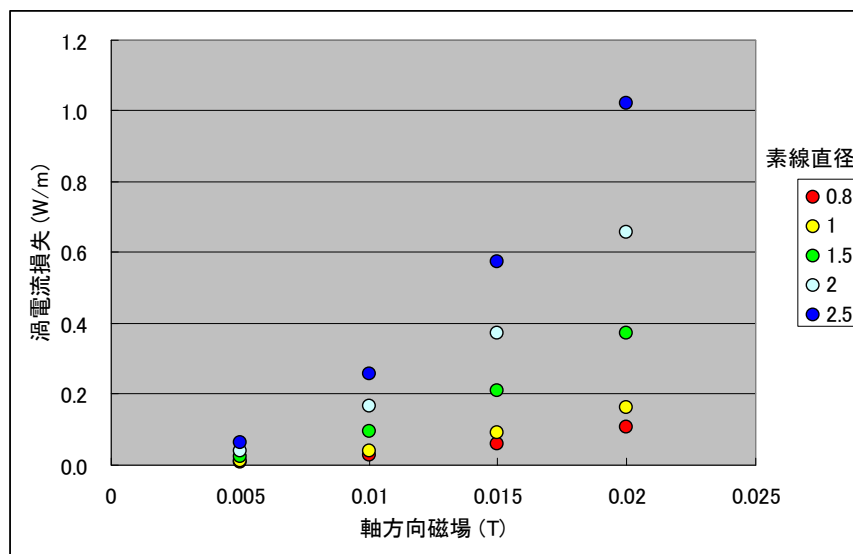


図 2.1.1-10 フォーマ素線径と渦電流損失計算値



図 2.1.1-11 低損失型分割集合フォーマと従来の同心撚りフォーマ

表 2.1.1-7 低損失型分割集合フォーマと従来の同心撚りフォーマの諸元

	分割集合フォーマ	同心撚りフォーマ
素線直径	0.8 mm	2.6 mm、1.5 mm
撚り線構成	分割集合型 (7×7)×6 分割集合	同心撚り型 φ2.6×19, φ1.5×30
断面積	140mm ²	140mm ²

(8) ハイブリッド超電導導体の交流損失検証

TypeACT 及び TypeHT 線材を組み合わせたハイブリッド超電導導体を作製し、交流損失を測定した。使用した線材の諸元を表 2.1.1-8 に、ケーブルコアの諸元を表 2.1.1-9 に示す。また、ケーブルコア構造図を図 2.1.1-12 に示す。なお、フォーマは開発した分割集合フォーマを使用した。1 μV/cm で定義した導体層の I_c は 6200 A、シールド層の I_c は 7500 A であり、高 I_c 型の TypeHT 線材を組み合わせることにより大容量化に成功、実際に 3 kArms 通電可能なことを確認した。

交流損失測定は、図 2.1.1-4 に示すように、導体層とシールド層の往復通電時に、それぞれ導体層及びシールド層直上に這わした電圧タップを用いた電氣的四端子法により実施した。測定結果を図 2.1.1-13 に示す。2 kArms 通電時の損失は 0.8 W/m/ph (導体層 0.5 W/m/ph、シールド層 0.3 W/m/ph、フォーマ損失込み) であり、中間目標である 1 W/m/ph@2 kArms 以下の低損失化を達成した。このようなハイブリッド構造により大容量化と低損失化を両立することに成功した。

表 2.1.1-8 ハイブリッドケーブルコアに用いた線材の諸元

	TypeACT	TypeHT
線材幅	2.7 mm	4.5 mm
線材厚	0.33 mm	0.35 mm
ツイストピッチ	8 mm	—
補強	銅合金 (50 μm ^t , 両面)	銅合金 (50 μm ^t , 両面)
I _c	50 ~ 60 A	160 A

表 2.1.1-9 ハイブリッドケーブルコアの諸元

導体構造	仕様	外径 (mm)
フォーマ	分割集合フォーマ	17.5
HTS 導体 1 層目	TypeHT、11 本	21.6
HTS 導体 2 層目	TypeHT、12 本	
HTS 導体 3 層目	TypeACT、23 本	
HTS 導体 4 層目	TypeACT、23 本	
絶縁層	PPLP、6mm 厚	34.5
HTS シールド 1 層目	TypeHT、21 本	36.8
HTS シールド 2 層目	TypeHT、23 本	
保護層	銅テープ、絶縁紙及び不織布	43.7
Ic 導体層/シールド層	6200 A / 7500 A	

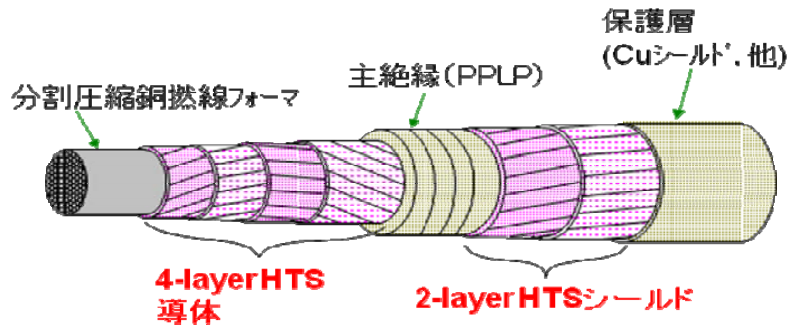


図 2.1.1-12 ハイブリッド型ケーブル構造

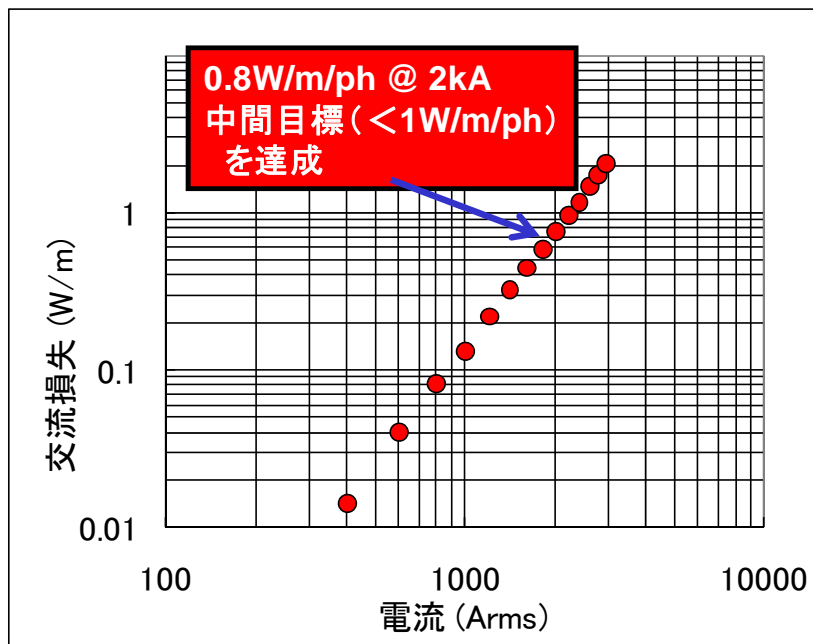


図 2.1.1-13 ハイブリッドケーブル導体の交流損失測定結果

(9) 短尺ケーブルでの交流損失低減検証

最終目標（1 W/m/ph@3 kA）達成のため、以下3点の低損失化手法を適用した短尺ケーブルサンプルを作製した。

- ・ 超電導層大径化（内径φ18→26 mm）による磁場低減。なお、主に下記のケーブル構造見直しにより、ケーブルコア径は実証ケーブルと同じサイズを維持した。
 - ◇ 絶縁厚：7→6 mmに低減（30 m 検証試験にて性能確認済み）
 - ◇ 抑え巻き層：線材高強度化により省略
- ・ 高 I_c 線材の適用（従来と比較して約2割の I_c 向上）。
- ・ 超電導線材の巻きピッチの最適化により、線材に対する横磁場の低減。

サンプルの長さは2.3 mであり、諸元を表 2.1.1-10 に示す。通電方式は、超電導導体層と超電導シールド層の往復通電（50Hz）とし、試験サンプルはオープン容器中で浸漬冷却した。損失検証結果は図 2.1.1-15 に示すとおりであり、ケーブル構造最適化と線材 I_c 向上により、1 W/m/ph@3 kA を達成した。

表 2.1.1-10 ケーブルサンプル諸元

導体構造	仕様	外径 (mm)
フォーマ	FRP パイプ	26
HTS 導体層	4 層、TypeACT	30
絶縁層	PPLP、6mm 厚	42
HTS シールド	2 層、TypeACT	44
保護層	銅テープ、不織布	46



図 2.1.1-14 ケーブルサンプル外観

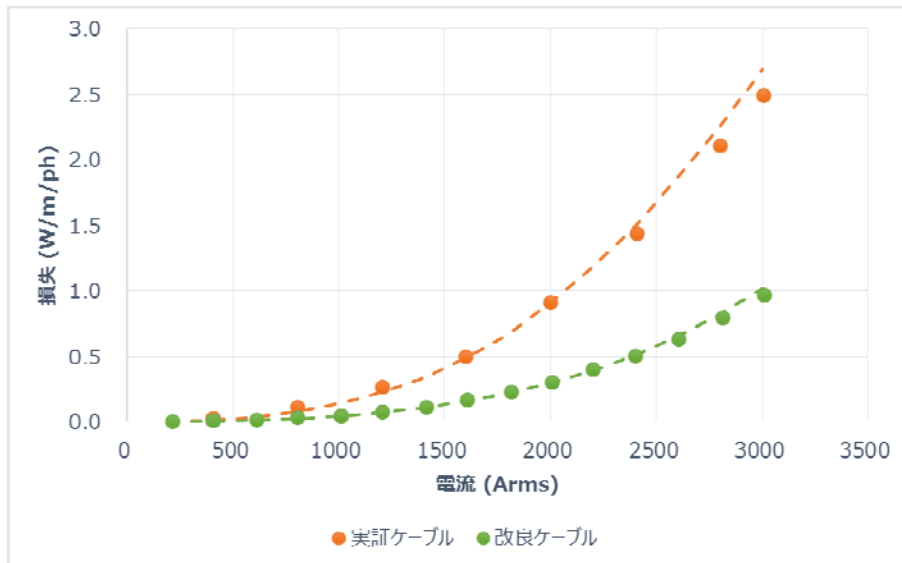


図 2. 1. 1-15 交流損失検証結果

(10) まとめ

- ・ 従来の Bi2223 線材を用いて構成した超電導導体の交流損失計算値は 5.5 W/m/ph@3 kArms となり、本プロジェクトの目標値である 1 W/m/ph@3 kArms を達成するためには、超電導線材の大幅な低損失化が不可欠であることが判明した。
- ・ 超電導フィラメントにツイストを施した低損失型 TypeACT 線材を自主開発した結果、従来のノンツイスト線材に比べて 1/3 の低損失化に成功した。
- ・ TypeACT 線材を用いて作製した超電導導体の交流損失を測定した結果、0.85 W/m/ph@2 kArms であり、中間目標 1 W/m/ph@2 kArms 以下の低損失化を達成した。
- ・ 線材単体の磁化損失及び通電損失測定結果を組み込んだ新たな損失解析モデルを開発し、TypeACT 線材を用いて構成した超電導導体の交流損失特性のシミュレーションに成功した。
- ・ 全て TypeACT 線材を用いて構成した超電導導体では、大容量化にはまだ I_c を向上させる必要があることから、開発した損失解析モデルを用いて、TypeACT 線材と TypeHT 線材を適材適所で組み合わせたハイブリッド超電導導体の設計を検討した。
- ・ 超電導線材の低損失化だけでなく、フォーマ内に発生する渦電流損失を 0.1 W/m/ph@3 kArms 以下に低減するため、 $\phi 0.8$ mm の素線絶縁銅線を用いた低損失型分割集合フォーマの開発を実施、製造に成功した。
- ・ 低損失型分割集合フォーマ、TypeACT 及び TypeHT 線材を用いたハイブリッド超電導導体を作製し、交流損失特性を評価した結果、2 kArms 通電時の損失は 0.8 W/m/ph であり、中間目標 1 W/m/ph 以下の低損失化を達成した。さらに、高 I_c 型の TypeHT 線材を組み合わせた設計により、3 kArms の大電流通電にも成功し

た。

- ・ 最終目標（1 W/m/ph@3 kA）の検証に際し、①ケーブル構造最適化による超電導層の大径化、②高 I_c 線材の適用、③線材巻きピッチ最適化による横磁場低減を行ったケーブルサンプルを試作して交流損失測定を検証した結果、1 W/m/ph@3 kA の低損失化に成功した。

2.1.2 短絡電流に対する超電導導体の性能検証

(1) 開発目標

電力系統においてケーブルの相間短絡事故が起こった場合、定格電流に比べて非常に大きな短絡電流が流れる。例えば、実証ケーブルのターゲットである 66 kV 系統においては、2.3.1 節で検討するように、最大「31.5 kA、2 秒」の短絡電流が流れると規定されている。超電導ケーブルの場合、この電流を超電導状態で流すには、非常に多くの本数の超電導線材が必要で、ケーブルの寿命期間に発生するかもしれない短絡電流のために、定格電流の 10 倍以上を流すための超電導線材を用いることは非常に不経済であるといえる。本節では、経済性も考慮し、短絡電流が流れた場合は超電導状態から常電導状態に移り抵抗による発熱が発生することを許容する設計指針とし、短絡電流が流れてもケーブルが健全であることを検証する。

また、31.5 kA の短絡電流条件は、超電導ケーブル直近で事故が発生した場合であり、短絡電流通過直後に再送電されることはないと考えられる。しかしながら、事故の種類や発生場所によっては、短絡電流通過直後に再送電されるケース（ここではこのようなケースを「もらい事故」と定義する）がある。2.3.1 節で解析するように、実証ケーブルが導入される旭変電所においては、もらい事故の最大電流は「10 kA、2 秒」であり、本条件に対してケーブルが即時送電復帰可能なことを検証する。

(2) 短絡電流対策の設計

上記のように、短絡電流が流れた場合、超電導状態を維持できないことを許容し、抵抗による発熱が発生しても、ケーブルが健全である設計とする。そのためには、定格電流以上の短絡電流が流れた場合に、超電導線材以外の常電導保護層に電流を分流させ、発熱を小さくすることで、温度上昇を抑制する必要がある。本プロジェクトでは、導体層では超電導線材を巻き付けるフォーマに短絡電流が分流できるように設計する。また、超電導シールドにおいても、短絡電流通過時には同レベルの電流が誘導されると想定され、シールドにも短絡電流を分流する常電導シールド層を設けることとした。

2.1.1 節で検討したように、外径 18 mm（クッション層込み）の分割集合フォーマを用いたケーブルコアにおいて、交流損失を $1 \text{ W/m/ph} @ 2 \text{ kArms}$ 以下とし、 3 kArms 通電可能な電流容量を確保するためには、超電導導体 4 層及び超電導シールド 2 層の構造が必要となる。7 mm 厚絶縁を前提として、ケーブル外径を 145 mm 以下に抑えるために許容される銅シールド層の最大層数は 3 層 (77 mm^2) となる。分割集合フォーマ及び 77 mm^2 の銅シールド層が常電導保護層として十分な断面積を有しているかを事前検討するため、31.5 kA、2 秒の短絡電流が流れた際のケーブルコア内の過渡温度上昇シミュレーションを実施した結果を図 2.1.2-1 に示す。シミュレーションは、ケーブルコア断面半径方向の一次元モデルに対して、超電導層の過

電流特性⁽¹⁾や常電導層の熱物性値の温度依存性を考慮した過渡電流分布解析及び過渡熱伝導解析の連成により実施した。超電導導体層及び超電導シールド層の温度上昇 (ΔT) は、それぞれ 127 K 及び 114 K であり、超電導線材にダメージが発生しない範囲内に収まっていると考えられ、上記常電導シールド層を有するケーブルコアに対して短絡電流試験を実施することとした。なお、銅シールド層 2 層 (50 mm²) 構造では、超電導シールド層の ΔT が 220 K になると予想され、2 秒間という短時間で常温まで温度上昇が発生するため、急激な熱膨張による機械的なダメージが発生する恐れがある。

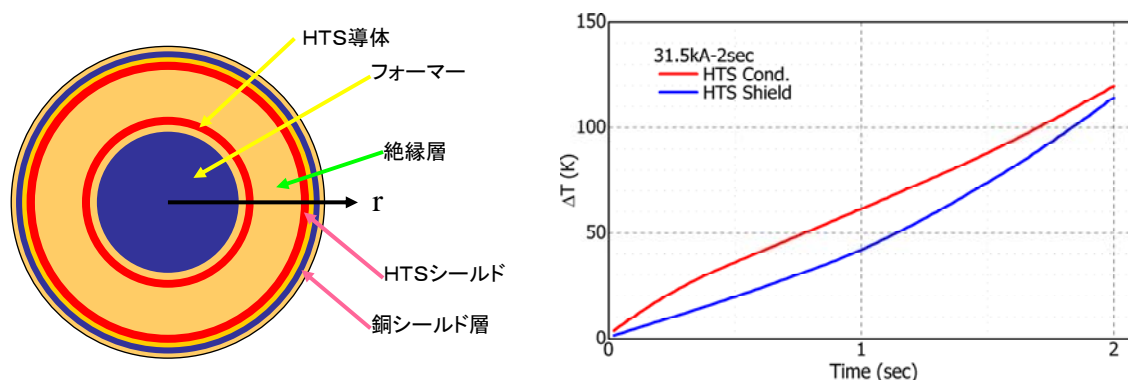


図 2.1.2-1 シミュレーションモデルの概要と解析結果

(3) 短絡電流試験

超電導ケーブル導体に最大 31.5 kA、2 秒の過電流が流れても導体が健全であることを確認するため、図 2.1.2-2 に示す短絡発電機を用いた試験設備にて、過電流が流れた際の温度上昇の確認及び、過電流が超電導特性に与える影響について検証した。

短絡試験は、図 2.1.2-3 に示すように、約 2.7 m の 2 本の超電導ケーブルコアを並べ、2 本のコアのシールド層を短絡、閉回路とした状態で導体層に直列往復通電を行うことで、シールド層に遮蔽電流を流す方式とした。試験サンプル及び試験場の写真を図 2.1.2-4 に示す。試験サンプルの諸元は表 2.1.2-1 に示すとおりであり、分割圧縮導体 (140 mm²) をフォーマとして用いた超電導導体 4 層、超電導シールド 2 層、銅シールド層 3 層 (77 mm²) でケーブルコアを構成している。試験サンプルの導体層の臨界電流 (I_c) は 6300 A (交流換算で 4.5 kArms 相当)、シールド層 I_c は 7700 A (交流換算で 5.5 kArms 相当) であり、計測素子として、短絡電流印加時のケーブルコア内部温度上昇を計測するための熱電対と、シールド層の誘導電流を計測するためのロゴスキーコイルが取り付けられている。

31.5 kA、2 秒の短絡電流印加時の導体層及びシールド層の電流波形を図 2.1.2-5 に示す。シールド層には導体層とほぼ逆位相の電流が誘起されるが、シールド層の

温度上昇と共に誘導電流は減衰していく。

過電流印加時の導体の温度上昇を図 2.1.2-6 に示す。最大 31.5 kA、2 秒印加時の温度上昇は、超電導導体層で約 120 K、超電導シールド層で約 110 K である。同図中には、31.5 kA、2 秒の短絡電流を印加した場合のシミュレーション結果（図 2.1.2-1 に示した結果）も示してあり、試験結果は解析結果から想定される範囲内である。短絡電流試験後の導体の健全性を確認するために実施した臨界電流測定結果を、試験前の測定結果と合わせて図 2.1.2-7 に示す。試験前後において、導体層及びシールド層の臨界電流に変化は見られず、最大 31.5 kA、2 秒の過電流に対してケーブルコアにダメージが発生しないことを確認した。

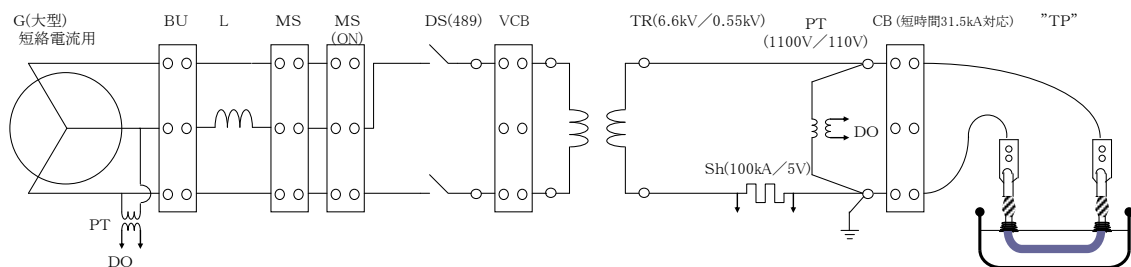


図 2.1.2-2 短絡電流試験回路の概要

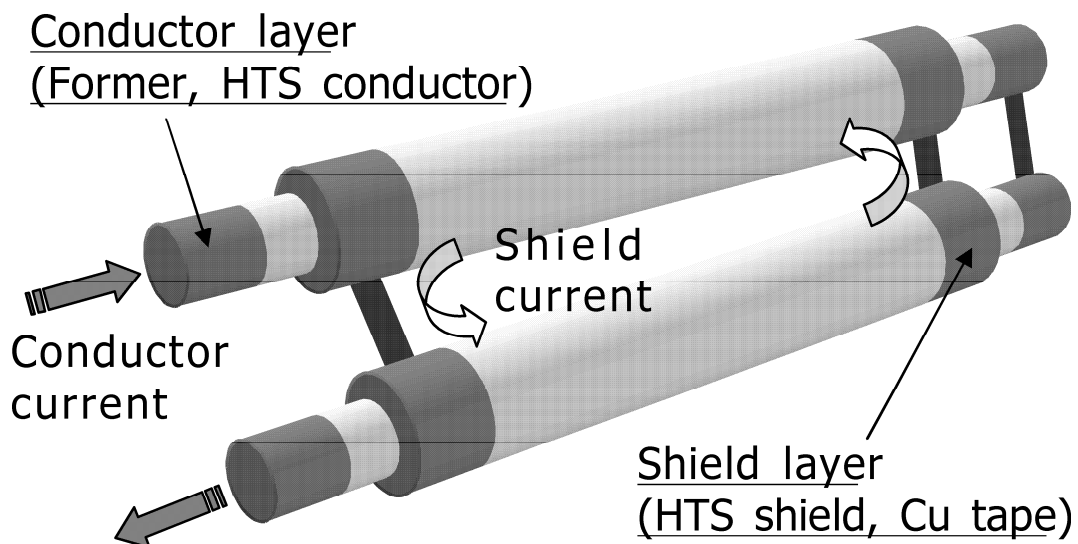


図 2.1.2-3 短絡電流試験サンプルの概要



図 2.1.2-4 試験サンプル及び試験場の写真

表 2.1.2-1 超電導ケーブル導体の諸元

構造	超電導線材	外径 (mm)	備考
フォーマ		18	素絶分割集合フォーマ
HTS 導体層	HT/HT/ACT/ACT	22	4 層、銅合金補強線
主絶縁層		35	PPLP 6 mm 厚
HTS シールド層	HT/HT	37	2 層、銅合金補強線
保護層		43	銅テープ 3 層、他
臨界電流 (1 μ V/cm 定義、77 K)	導体 $I_c=6300$ A (AC : 4.5 kArms 相当) シールド $I_c=7700$ A (AC : 5.5 kArms 相当)		

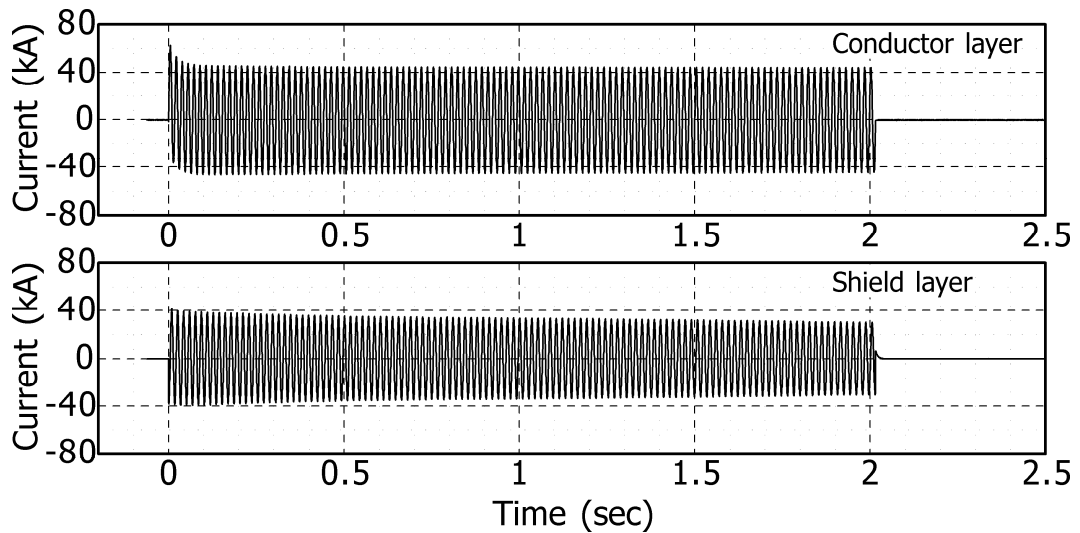


図 2.1.2-5 短絡電流試験時の電流波形

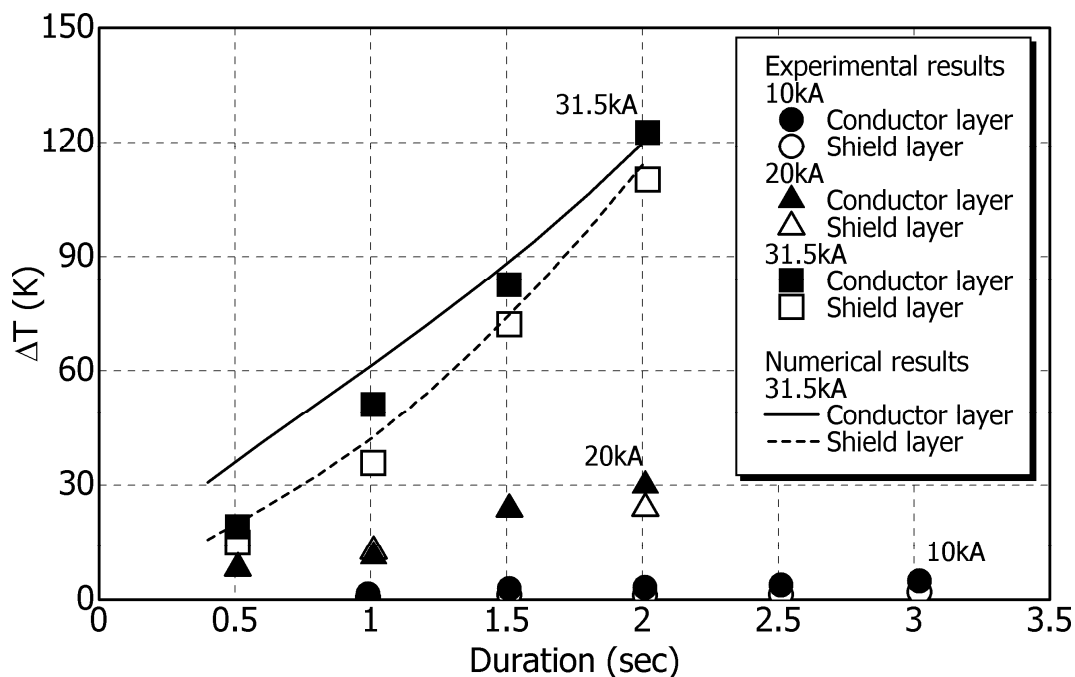


図 2.1.2-6 短絡電流試験時の導体温度上昇

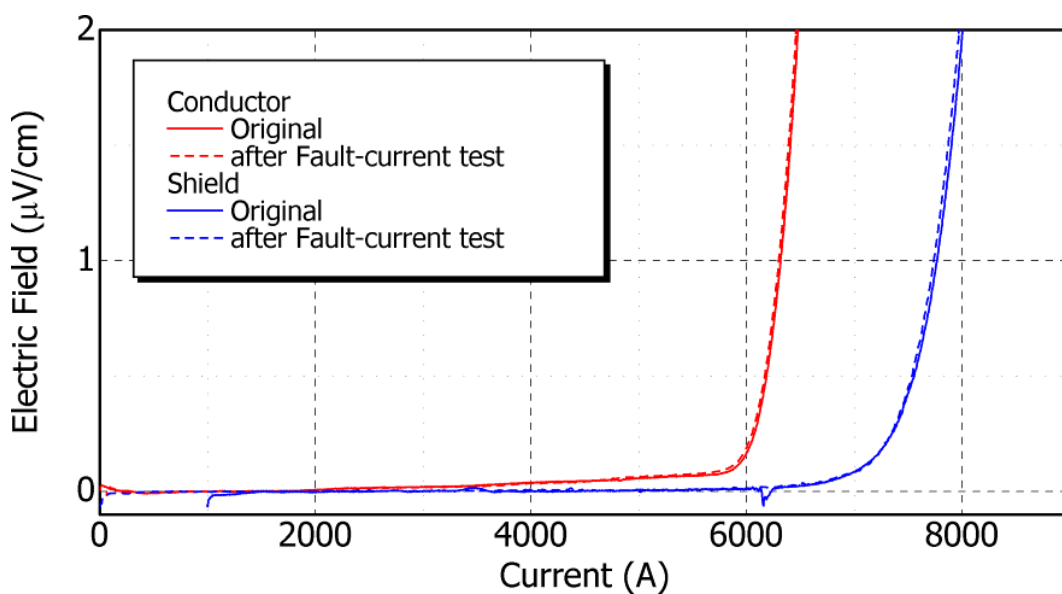


図 2.1.2-7 短絡電流試験前後の臨界電流測定結果

(4) もらい事故模擬通電試験

超電導ケーブル導体に 10 kA、2 秒の過電流が流れた直後に、実証試験が実施される東京電力の旭変電所の 154/66 kV バンクの 2 次側定格電流である「1.75kA」を通電することが可能か検証した。

試験回路の概要は図 2.1.2-8 に示す通りであり、短絡発電機を用いて短絡電流を

印加した直後に通電回路に切り替え、連続通電を実施した。なお、短絡電流印加後に連続通電に切り替える時間は約 50 msec である。

試験サンプルは短絡試験に使用したコアのうち 1 本だけを用い、図 2.1.2-9 に示すように、導体層とシールド層に往復通電を行う形式で実施した。もらい事故模擬通電試験時の写真を図 2.1.2-10 に示す。

図 2.1.2-11 は、10 kA、2 秒の短絡電流を印加した直後に 1.75 kA の連続通電を実施した試験における電流波形を示している。図 2.1.2-12 は、このときの超電導導体層及び超電導シールド層の温度上昇波形を示している。10 kA、2 秒の短絡電流を印加することでコアの温度は数 K 程度上昇するが、直後に連続通電を開始してもコアの温度は上昇することなく冷媒である液体窒素温度に復帰し、この後、安定に連続通電できることを確認した。なお、本試験において、10 kA、2 秒の過電流を印加した直後に最大 3 kA の連続通電も可能なことを確認している。

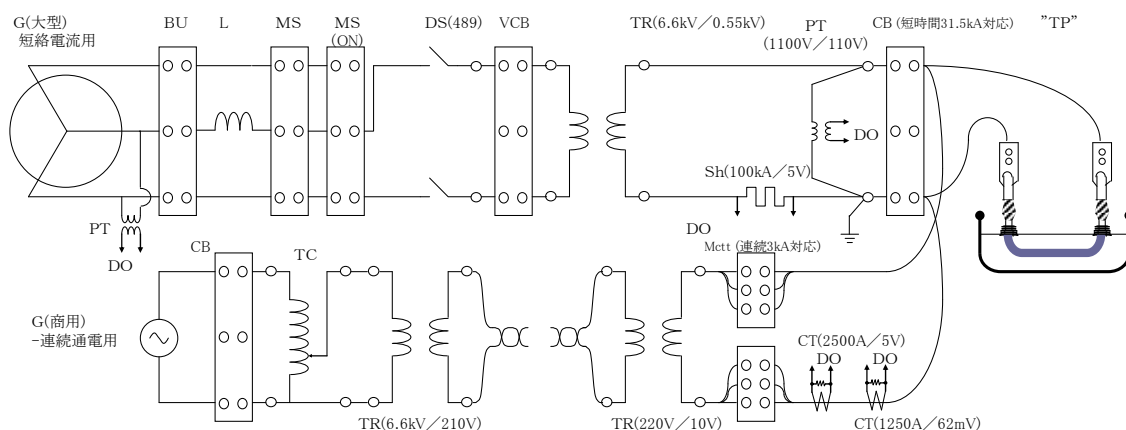


図 2.1.2-8 もらい事故模擬通電試験回路の概要

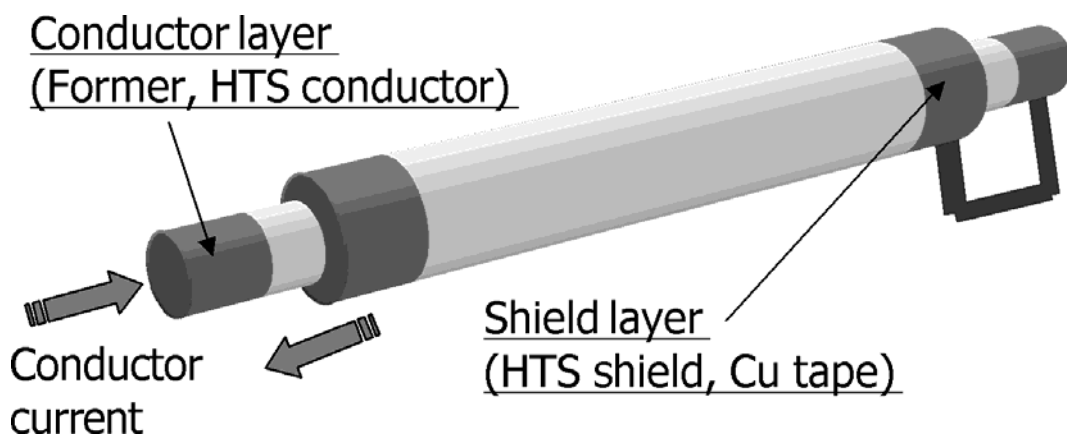


図 2.1.2-9 もらい事故模擬通電試験サンプルの概要



図 2.1.2-10 もらい事故模擬試験時の写真

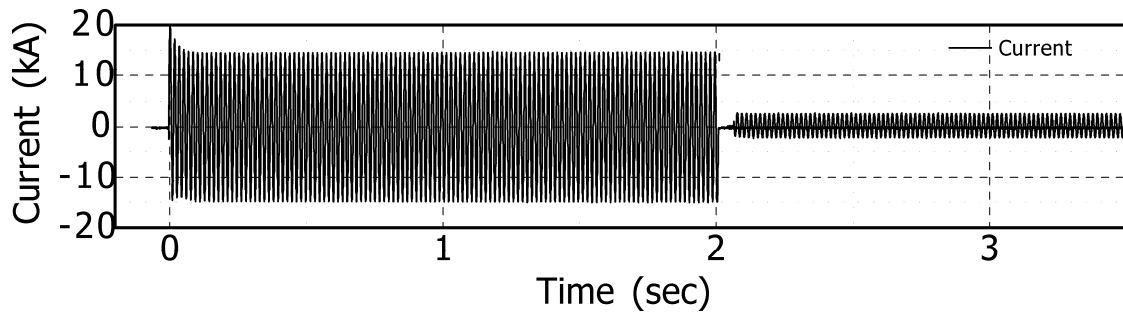


図 2.1.2-11 もらい事故模擬通電試験時の電流波形

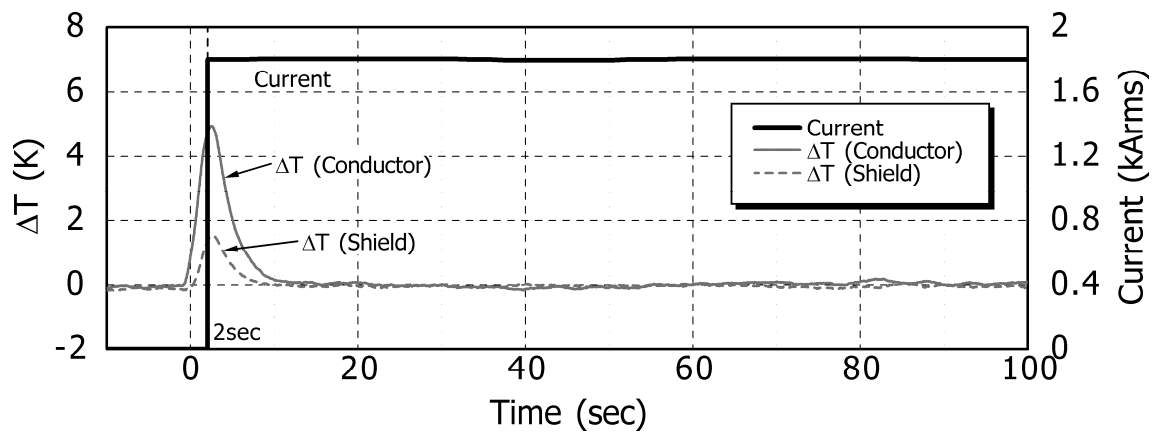


図 2.1.2-12 もらい事故模擬通電試験時の温度及び電流波形

(5) もらい事故模擬課電試験

超電導ケーブル導体に 10 kA、2 秒の過電流が流れた直後に、対地定格電圧以上の「40 kV」が課電可能か検証した。

試験回路の概要は図 2.1.2-13 に示す通りであり、短絡発電機を用いて短絡電流を印加した直後に課電回路に切り替え、連続課電を実施した。短絡電流印加後に連続課電に切り替える時間は約 50 msec である。なお、本試験では、シールド層を接地した状態で、短絡電流を導体層のみに印加し、直後に導体層に対して対地 40 kV の課電を実施した。

試験サンプルは、図 2.1.2-14 に示すように、中心にジョイント部を、端部にストレスコーンを有する約 4 m のケーブルコアである。試験サンプル及び試験場の写真を図 2.1.2-15 に示す。ケーブルコアの諸元は、表 2.1.2-2 に示す通りであり、短絡電流試験と同様に、分割圧縮導体 (140 mm²) をフォーマとして用いた超電導導体 4 層、超電導シールド 2 層、銅シールド層 3 層 (77 mm²) でコアを構成している。ただし、使用した線材は全て TypeACT 線であり、導体層の I_c は 4800 A である。

図 2.1.2-16 は、導体層に 10 kA、2 秒の過電流を印加した直後に、40 kV の課電を実施したときの電流及び電圧波形を示している。このとき、図 2.1.2-17 に示すように、試験サンプルは絶縁破壊することなく安定に連続課電できることを確認した。さらに本試験では、最大 31.5 kA、2 秒の過電流を印加した直後にも 40 kV の課電が可能であることを確認している。

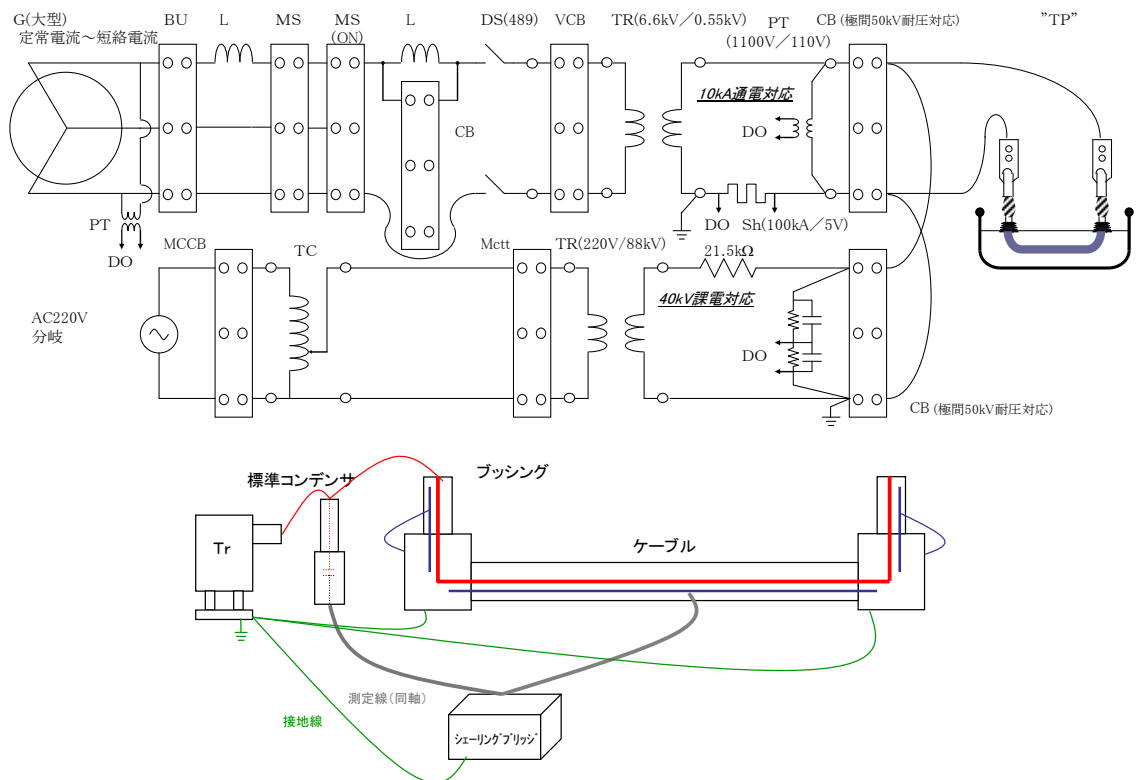


図 2.1.2-13 もらい事故模擬課電試験回路の概要

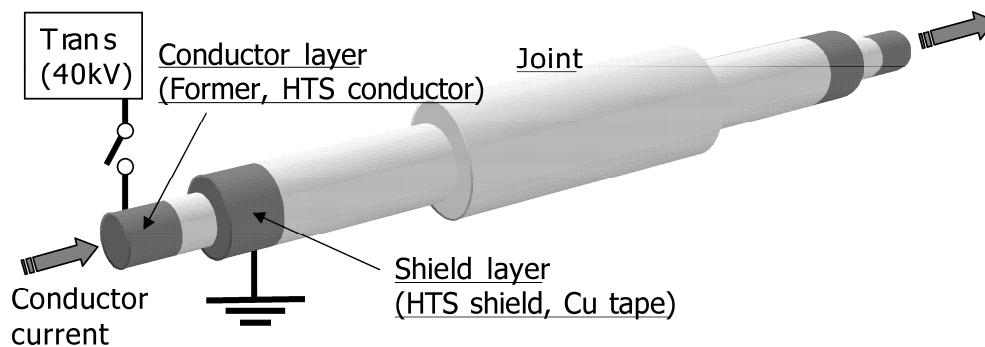


図 2.1.2-14 もらい事故模擬課電試験サンプルの概要

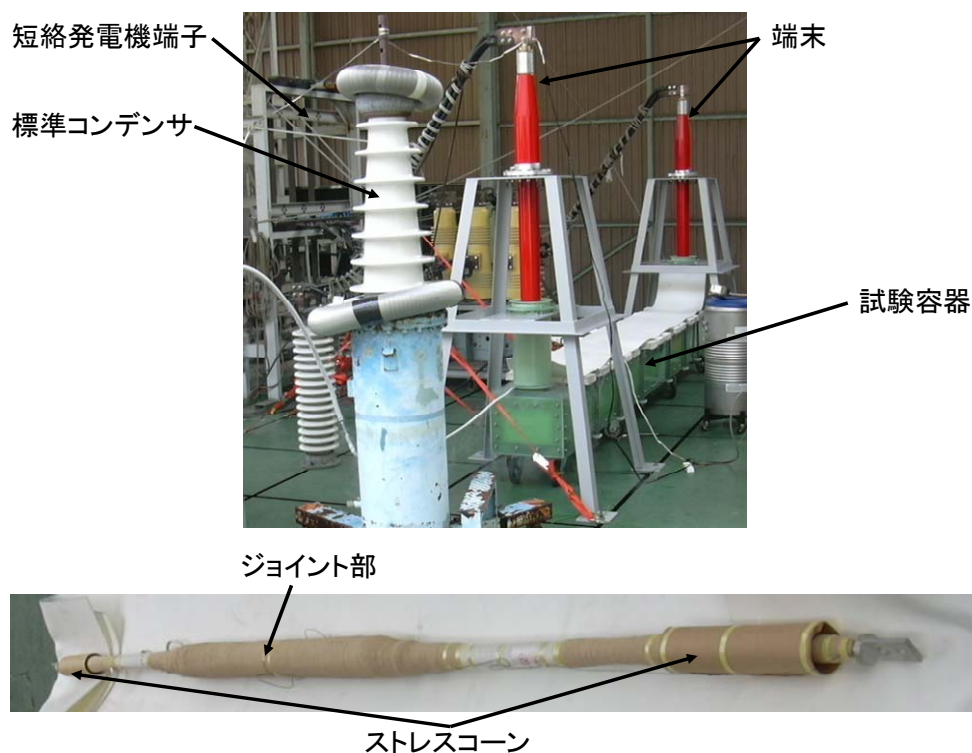


図 2.1.2-15 試験サンプル及び試験場の写真

表 2.1.2-2 超電導ケーブル導体の諸元

構造	超電導線材	外径 (mm)	備考
フォーマ		18	素絶分割集合フォーマ
HTS 導体層	ACT/ACT/ACT/ACT	22	4 層、銅合金補強線
主絶縁層		35	PPLP 6 mm 厚
HTS シールド層	ACT/ACT	37	2 層、銅合金補強線
保護層		43	銅テープ 3 層、他
臨界電流 (1 μ V/cm 定義、77 K)	導体 $I_c=4800$ A (AC : 3.5 kArms 相当)		

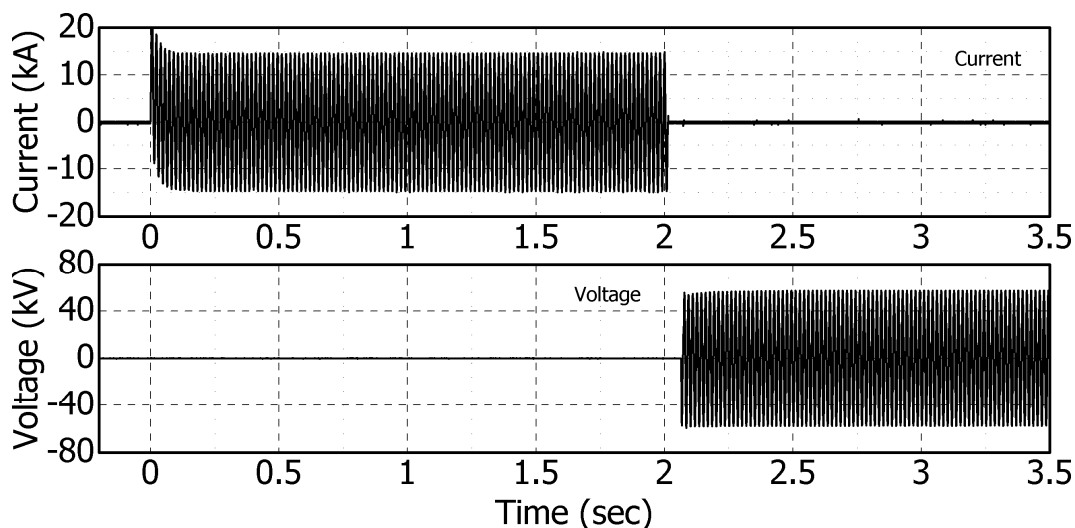


図 2.1.2-16 もらい事故模擬課電試験時の電流・電圧波形

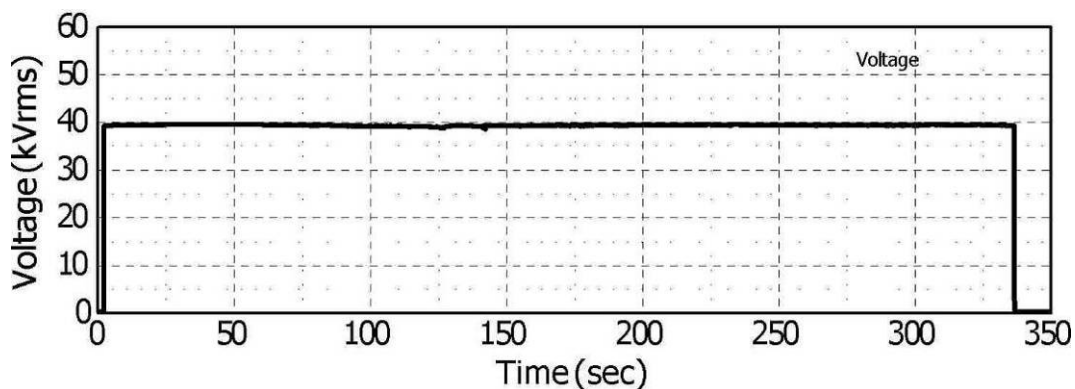


図 2.1.2-17 もらい事故模擬課電試験時の電圧波形

(6) まとめ

- ・ 66 kV 級の超電導ケーブルに要求される 31.5 kA、2 秒の短絡電流が流れても、ケーブルの健全性が保たれるような温度上昇を抑えるため、短絡電流を分流させる常電導シールド層を付加するケーブル設計を、ケーブル外径制約下で実施した。
- ・ その結果、フォーマとして 140 mm² の銅撚り線構造を採用し、またシールド部にはトータル 77 mm² の断面積をもつ、銅テープ線を超電導シールドの外側に巻きつけることとした。
- ・ ケーブル設計に対して事前に短絡電流が流れた際の過渡温度上昇シミュレーションを実施した結果、超電導導体層及び超電導シールド層の温度上昇 ΔT は共に 120 K 程度であり、超電導線材にダメージが発生しない範囲内に収まっていると判断した。
- ・ 短尺の試験サンプルを作製して、最大 31.5 kA、2 秒の短絡電流試験を実施した結果、超電導導体層及び超電導シールド層の ΔT はそれぞれ 120 K 及び 110 K であり、シミュレーション結果の予想範囲内であった。また、試験前後で試験

サンプルに臨界電流特性の劣化はなく、要求される耐過電流特性を有することを確認した。

- ・ もらい事故模擬試験を実施した結果、10 kA、2 秒の短絡電流通過直後に 1.75 kA の通電、及び対地定格 38 kV の課電が可能なことを確認し、実証試験が実施される旭変電所線路で要求される特性を満足することを確認した。

(7) 課題

短尺の超電導ケーブル導体を用いた短絡試験にて、要求される耐短絡電流特性を満足することを確認した。しかしながら、本試験はオープンバスの容器を用いて飽和液体窒素中で実施しているため、断熱管内の過冷却液体窒素で強制対流冷却される実際のケーブル運転形態とは試験条件が異なる。特に、長尺ケーブル断熱管の限られた空間内で大きな発熱が発生した場合に、圧力上昇等によりダメージが発生することが懸念される。過冷却液体窒素が循環した状態で、短絡電流が流れた場合のシステムへの影響を調べるため、2.1.5 節で開発した検証用超電導ケーブルを用いて、短絡電流模擬試験を行ったので、その結果については 2.1.5-5 節に記述する。

2.1.3 中間接続部の検討

2.1.3-1 中間接続部の開発目標

中間接続部は、長尺のケーブルシステムには必要不可欠なものである。一般に電力送電線路は、数 km～数 10 km と考えられる。その送電線路に供するケーブルを一単長で作製することは、製造能力面からよく検討する必要があるが、単長については輸送の制限で決まってくる場合が多い。そのため、通常はケーブル同士をマンホール内にて接続し、送電線路が形成されている。この接続部を中間接続部（ジョイント）と呼んでいる。

超電導ケーブルにおいても、中間接続部は必須の機器であり、その開発が実施されてきた⁷⁾。中間接続部に必要な要件を以下に簡単に示す。

電気的特性：超電導ケーブル同士を接続する際に接続抵抗が発生し、そのため発熱が生じるが、その発熱の影響を考慮し、安定に電流を通電できる必要がある。電圧については、ケーブル部と同等の絶縁性能を有する必要がある。

機械的特性：冷却時、昇温時にはケーブルに張力、圧縮力がかかる。その応力は中間接続部にも印加されることになるので、それらに耐える構造とする必要がある。また、内部に高圧力の液体窒素が流れることから、耐圧力構造である必要がある。

熱的特性：接続抵抗での発熱、外部からの侵入熱については、極力小さくし、冷却システムへの負担を小さくする必要がある。

本プロジェクトにおける 66 kV 級三相一括型中間接続部の所要性能を表 2.1.3-1 に示す。

電気的な性能に関しては、超電導ケーブルの特性に合わせて仕様を決定した。

接続抵抗に関しては、 $1 \mu \Omega$ /箇所@3 kA は、H21 年度までに達成するプロジェクトの目標である。

機械的な特性については、冷却時、昇温時のケーブル張力、圧縮力の要素試験結果からフィードバックした値である。圧力設計については、システム運転最大圧力 0.5 MPaG から設定している(2.3.2 節参照)。

また、中間接続部が設置されるマンホールは通常、地表よりも下部に位置しており、雨水が流れ込んで水没する可能性がある。そのために必要な防水処理を施す必要がある。

表 2.1.3-1 本プロジェクトにおける中間接続部の必要特性

No.	項目	必要特性	根拠
1	機械力	引張 3000 kgf/3相 圧縮 500 kgf/3相	ケーブル要素試験結果による (2.1.5節参照)
2	電流容量	3 kArms 連続通電	ケーブル性能に準ずる。
3	短絡電流	・ 31.5 kA@2 sec でダメージがないこと ・ 10 kA@2 sec で再送電可能なこと	ケーブル性能に準ずる。 (2.3.1節参照)
3	接続抵抗	<1 $\mu\Omega$ /箇所@3 kA	プロジェクト目標
4	耐電圧	AC90 kV/3 h Imp \pm 385 kV/3回 DC152 kV/10 min	ケーブル性能に準ずる。 (2.4.1節参照)
5	圧力設計	0.6 MPa \cdot G	システム許容圧力が 0.5 MPaG であるため。(2.3.2節参照)
6	耐水性	従来ケーブルと同レベル	

2.1.3-2 中間接続部の概略構造

図 2.1.3-1 に超電導ケーブル中間接続部の概略構造図を示す。基本構造は三心一括型の各ケーブルコアをそれぞれ接続し、一つの容器に入れる三心一括型の構造を採用する。尚、本構造は過去に開発を行った中間接続部の構造⁷⁾が基礎となっている。

ケーブルコア接続方法はまず、両側ケーブルコア中心に位置する銅より線フォーマを従来ケーブルと同様に銅製の導体接続スリーブを用いて機械的な圧縮力で接続する。その導体接続スリーブ上に両側ケーブルの超電導線同士を接続するためケーブルコアとは別に準備した超電導線の渡しを設け、半田を用いて電氣的な接続を行う。

電気絶縁層は補強絶縁紙(クラフト紙)を巻き付け、ストレスコーンを形成する。アース側の電気遮蔽層はメッシュテープ等の巻き付けにより形成する。超電導シールド層は、導体側と同様に超電導線の渡しを設け半田接続する。銅シールド層は、両側ケーブルの銅テープ層に編組銅線を用いて、圧着接続を行う。最後に保護層を巻き付け、各相間の機械的および電氣的接触から保護を行う。ケーブルコア接続の概略図を図 2.1.3-2 に示す。

三相のケーブルコアと窒素槽とは、機械的、電氣的に接続されておらず、内部のケーブルコアは窒素槽に対してフリーな状態になっている。

さらに、このケーブルコアの三相を各相それぞれ接続し、液体窒素が流れる窒素槽、その外側に外部からの侵入熱を低減する真空槽を設ける。これらの槽は耐圧力、耐腐食性を考え、ステンレス材料を選んでおり、現地で組み立て後に溶接を行い形成する。その後、真空槽を真空ポンプにて真空引きし、十分に真空度が良くなった状態で真空ポンプを切り離し、封じ切る構造となっている。

真空槽の外側には従来中間接続部と同様に、防水テープ処理が施され、中間接続部が水没しても機能が損なわれないようにしている。

尚、本プロジェクトでは、中間接続部において、ケーブルコアのシールド(電界遮蔽)層を大地に接地する処理は行わず、ケーブル端部で実施した。

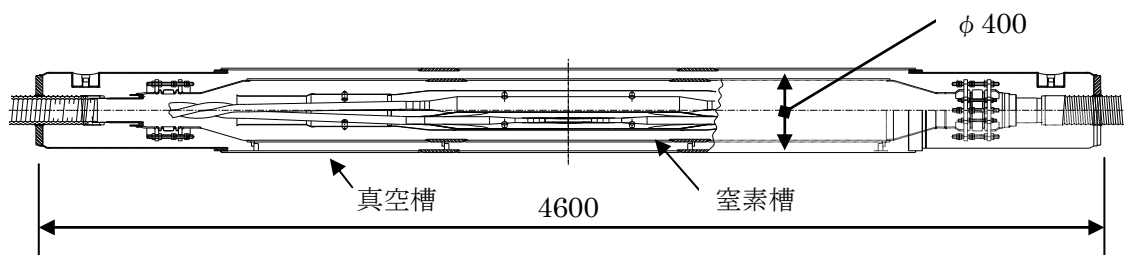


図 2.1.3-1 三心一括型 中間接続部全体構造図

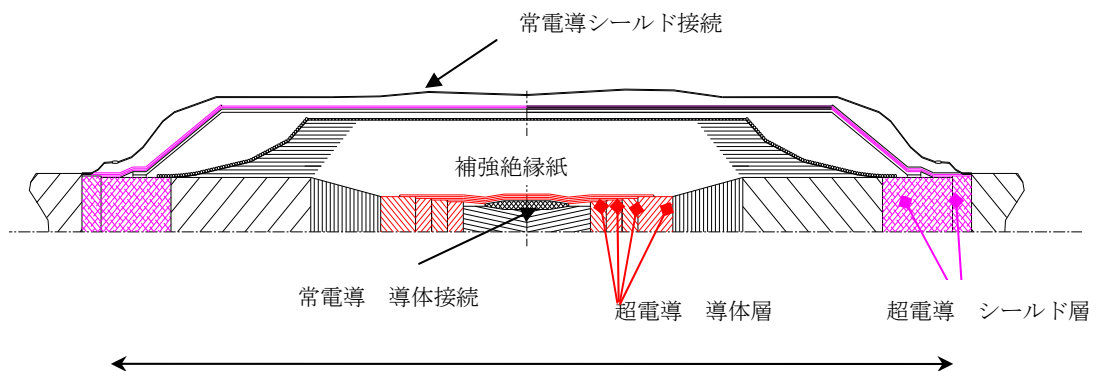


図 2.1.3-2 接続部構造図

2.1.3-3 中間接続部の各部設計検討と検証試験

(1) 導体・シールド接続抵抗測定

導体部の接続は、両側ケーブルコア中心に位置するフォーマを銅製の導体接続スリーブを用いて機械的な圧縮力で接続した後、その導体接続スリーブ上に両側ケーブルの超電導線同士を接続するためケーブルコアとは別に準備した超電導線の渡しを設け、半田を用いて電氣的な接続を行う。ケーブル導体部の超電導線4層と、渡し用の超電導線との接続長は各々25 mm、渡し用超電導線の本数は、Ic150 A級の線材が52本（13本×4層）である。

また、シールド部の接続は、半割れ銅管に予め超電導線材を縦添えしたものを準備し両側ケーブルのシールド層に半田を用いて電氣的な接続を行う。ケーブルシールド層の超電導線2層を、渡し用の超電導線との接続長は各々50 mm、渡し用超電導線の本数は、Ic=150 A級の線材が60本（20本×3層）である。

上記導体接続構造およびシールド接続構造をもつ試験サンプル（図2.1.3-3）にて、接続抵抗の測定を行った。サンプルに流した電流と図2.1.3-3中の電圧タップ間距離での発生電圧との関係を図2.1.3-4に示す。これより、導体部の接続抵抗値は $6.7 \text{ n}\Omega/\text{相}@3 \text{ kA}$ 、シールド部の接続抵抗値は $2.5 \text{ n}\Omega/\text{相}@3 \text{ kA}$ と計算された。これらの値はプロジェクトの目標の $1 \mu\Omega/\text{箇所}@3 \text{ kA}$ よりも十分小さな値であり、本構造で目標を達成できることを確認した。

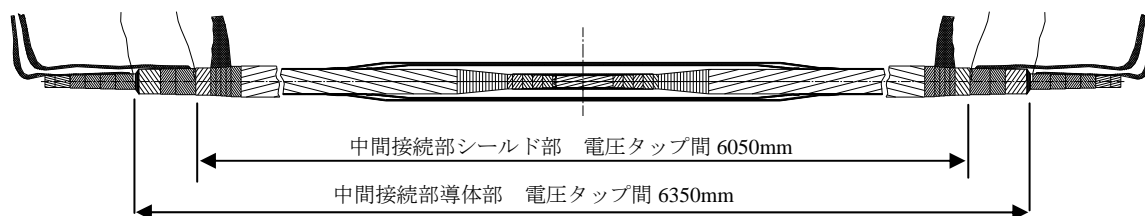


図 2.1.3-3 中間接続部 導体・シールド接続抵抗測定サンプル

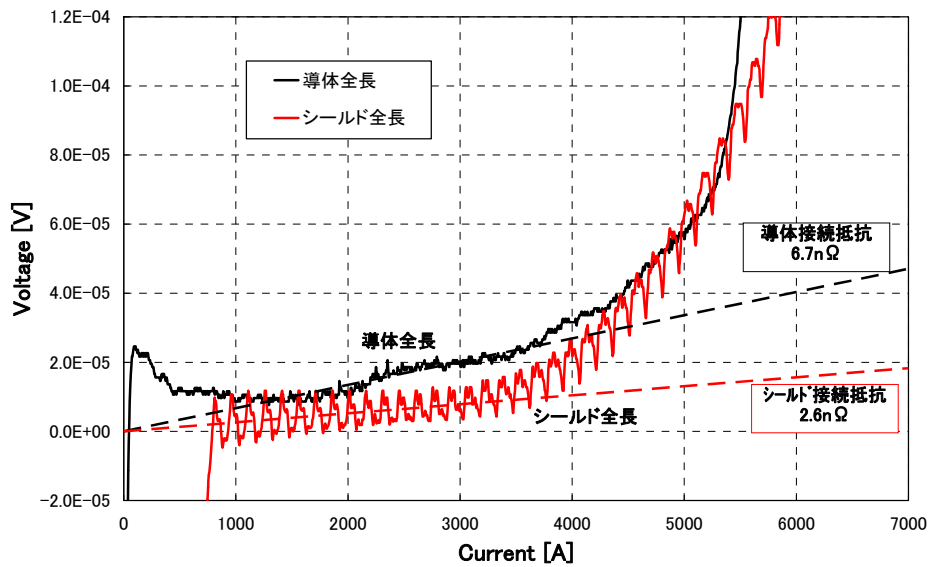


図 2. 1. 3-4 中間接続部 導体・シールド接続抵抗測定結果

(2) 通電試験

最終構造を有する中間接続部サンプルを組立て、図 2. 1. 3-5 に示す過冷却試験構成にて通電特性検証を行った。試験状況を図 2. 1. 3-6 に示す。試験は、ケーブル入口温度 77.5 K、液体窒素圧力 0.2 MPaG、液体窒素流量 20 L/min の条件下においてサンプルの導体層とシールド層への Go-Return 通電を行い、3 kArms・8 h 通電に対し図 2. 1. 3-7 に示す通り、ジョイント内部の温度が定常になること確認し 12 h 連続の安定運転に成功した。

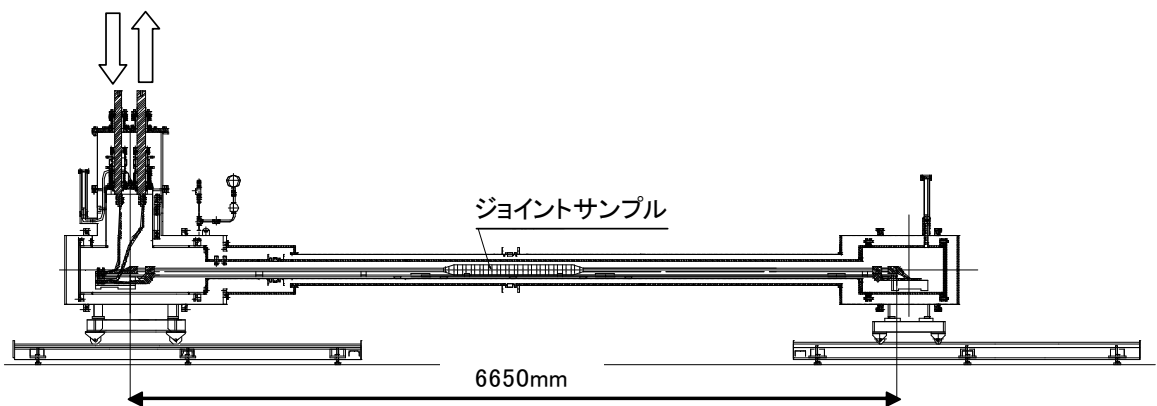


図 2. 1. 3-5 中間接続部 過冷却通電試験構成図



図 2.1.3-6 中間接続部 過冷却通電試験状況

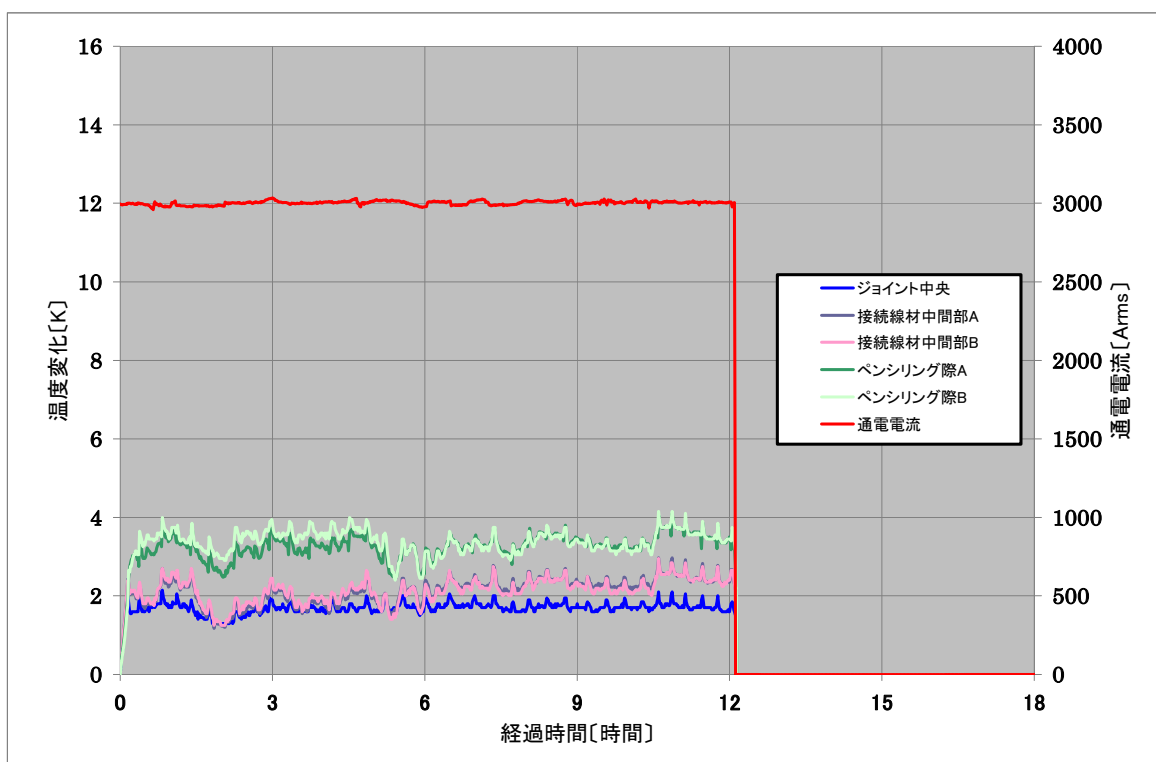


図 2.1.3-7(A) 中間接続部 過冷却通電試験結果

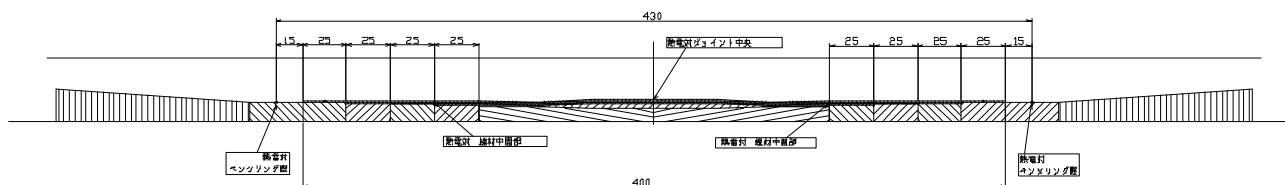


図 2.1.3-7(B) 通電試験における熱電対取り付け位置

(3) 中間接続構造の短絡電流試験

本試験では、ジョイントの接続部が、31.5 kA@2 sec の短絡電流が流れた場合に健全であるかどうか、また、10 kA@2 sec の短絡電流に対して、再送電可能かどうかを検証した。

中間接続部を含む試験サンプルの構成図を図 2.1.3-8 に示す。試験は、ケーブルコア 1 本のみを使い、導体層に電流を流し、反対側の端部でシールド層に接続し、シールド層にも電流を流す、Go-return 通電により実施した。

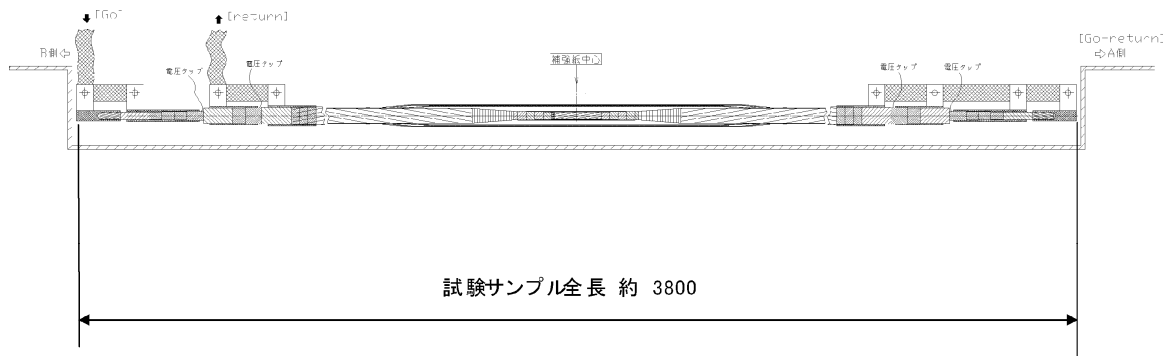
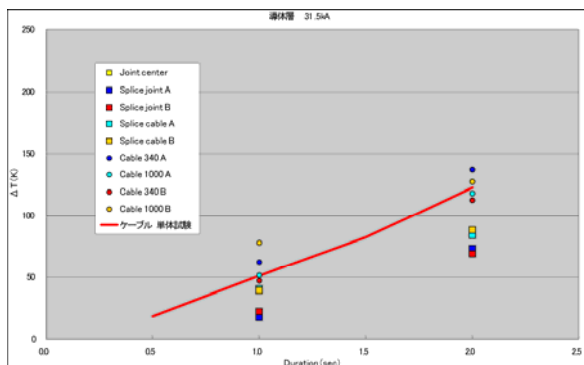
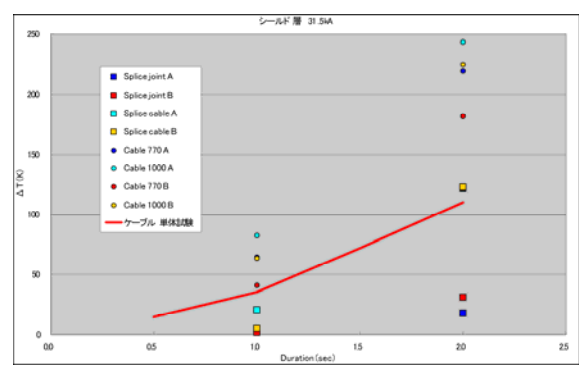


図 2.1.3-8 間接続部サンプルの構成

中間接続部サンプルの試験結果を図 2.1.3-9 に示す。31.5 kA 時の温度上昇は、中間接続部の導体部で 20K、シールド部では 1~2 K であり、いずれもケーブル部の温度上昇よりも小さいことが確認された。尚、熱電対の取り付け位置は図 2.1.3-7(B) に示すものと同じである。



(a) ケーブル導体試験結果



(b) シールド部試験結果

図 2.1.3-9 短絡電流試験時の各部の温度上昇

また、10 kA@2 sec 通電後 1.75 kA 通電したときの接続部の温度上昇を図 2.1.3-10 に示す。温度上昇は継続せず、短絡電流通過後はすぐに温度は元にもどり、定格通電ができることを確認した。

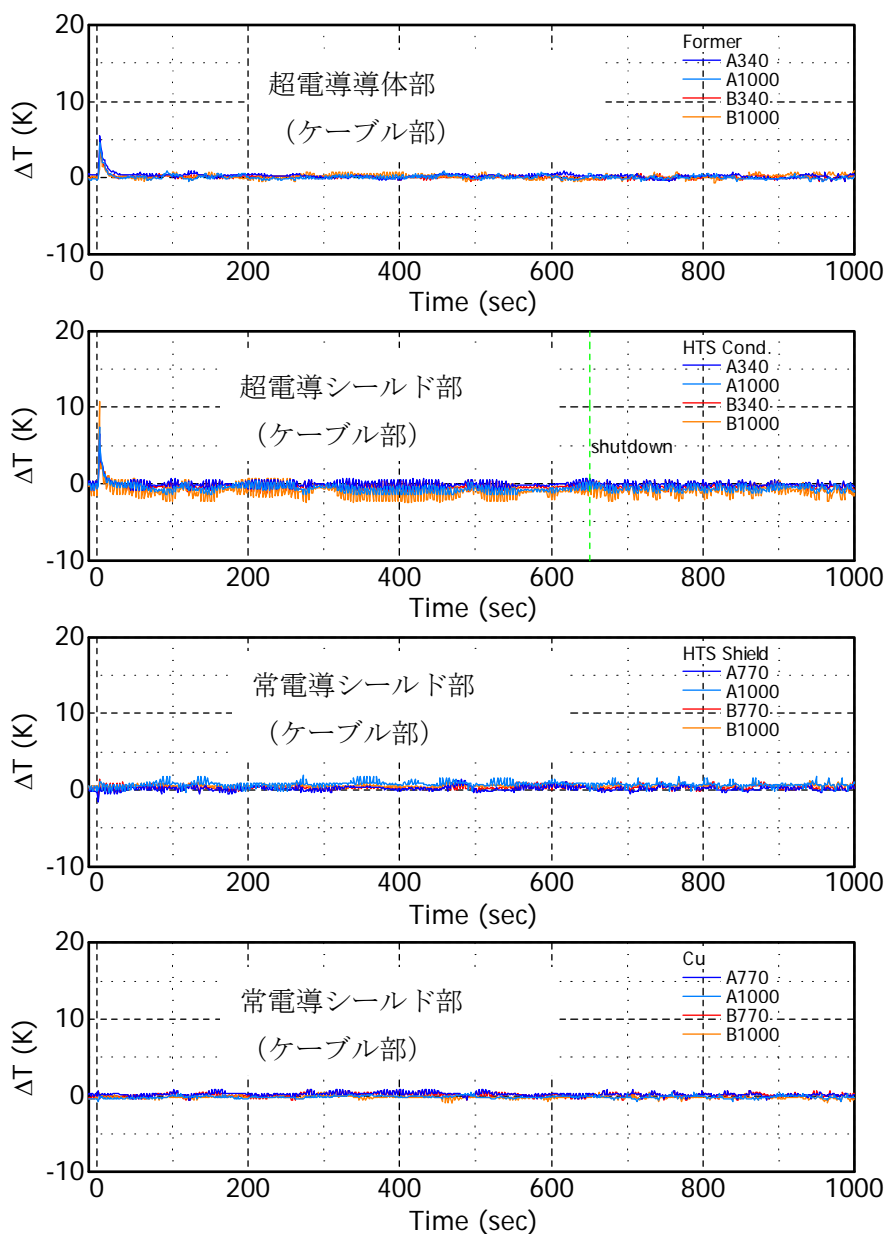


図 2. 1. 3-10 10 k A-2sec→1. 75 k A 通電時の温度上昇結果

図 2. 1. 3-11 に短絡電流試験の前後における試験サンプルの I_c 値比較データを示す。その結果、31.5 kA-2 sec の過電流および 10 kA-2 sec 後 2 kA 通電電流が印加されても中間接続部の導体・シールド超電導線にダメージが発生しないことを確認した。

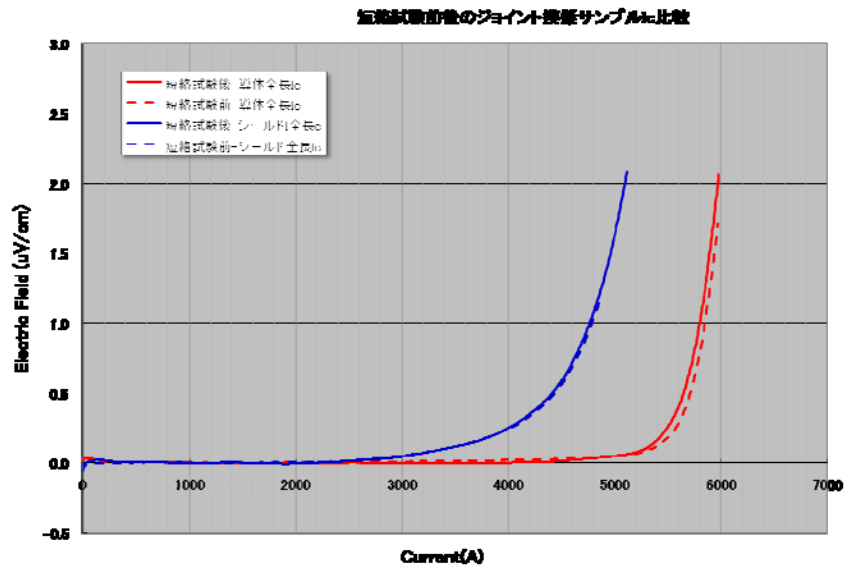


図 2.1.3-11 短絡電流試験後の Ic 値比較

(4) 電気絶縁試験

30 m 実証ケーブルと同じロッドから切り出したケーブルを使用し中央部に单相の中間接続部を組立した試験サンプルを用いて AC 課電、DC 課電、雷インパルス課電試験を実施した。試験は、図 2.1.3-12 に示す試験容器にて、実験を行った。試験状況写真を図 2.1.3-13 に示す。

試験結果を表 2.1.3-2 に示す。試験の結果、本接続構造は、所要性能を満足することが検証できた。

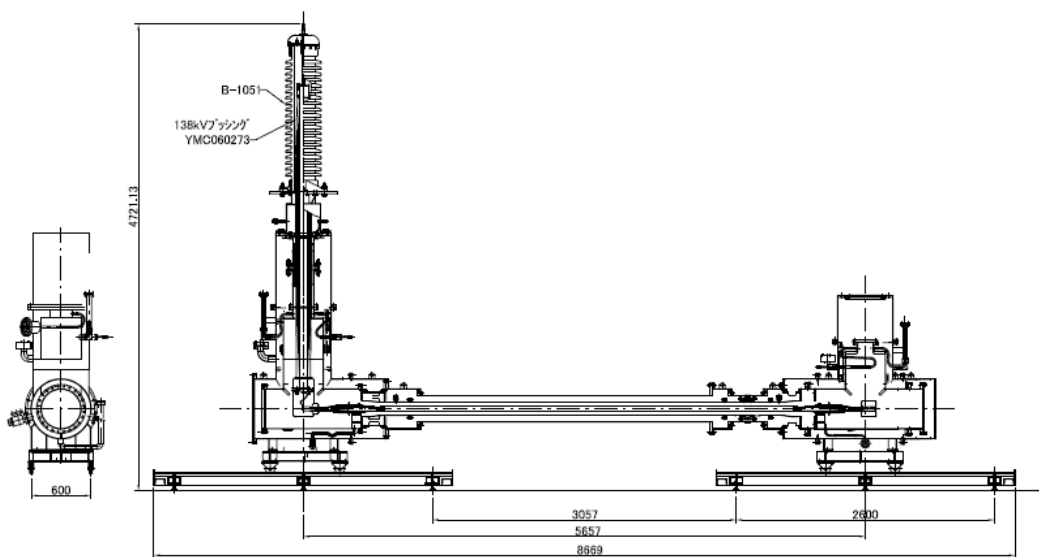


図 2.1.3-12 課電試験システム構成図



図 2.1.3-13 課電試験システム外観

表 2.1.3-2 課電試験結果

	試験内容	試験結果
1	AC 課電試験	①90 kV-3 時間 良好 ②150 kV-10 分 良好
2	DC 課電試験	-152 kV-10 分間 良好
3	Imp 課電試験	±385 kV 各 3 回 良好

(5) 機械試験

三心一括ケーブルシステムにおいて、ケーブルシステム完成後の初期冷却時にケーブルコアの熱収縮に伴う引張張力が中間接続部に印加される。またケーブルシステムの昇温時には圧縮力が印加される。中間接続部においては、これらの熱応力が繰り返し印加されてもケーブルと同様に性能が低下しないことが必要である。

ケーブルコアの機械試験の結果（2.1.5 節に記載）から、本ケーブル構造においては最大引張力 3000 kgf/3 相、最大圧縮力 500 kgf/3 相が発生すると予想される。

図 2.1.3-14 に示す通り、三心一括の中間接続部試験サンプルを組立て、液体窒素の冷却条件下において以下の条件による引張および圧縮試験を実施し試験前後で I_c 値に劣化がないことを確認した。試験状況の写真を図 2.1.3-15 に、 I_c 測定結果を図 2.1.3-16 に示す。

- ① 両端フリー冷却 → 引張荷重印加 [max3000 kgf]
- ② 両端フリー冷却 → 圧縮荷重印加 [max500 kgf]
- ③ 両端フリー冷却 → 引張荷重印加 [max3850 kgf]

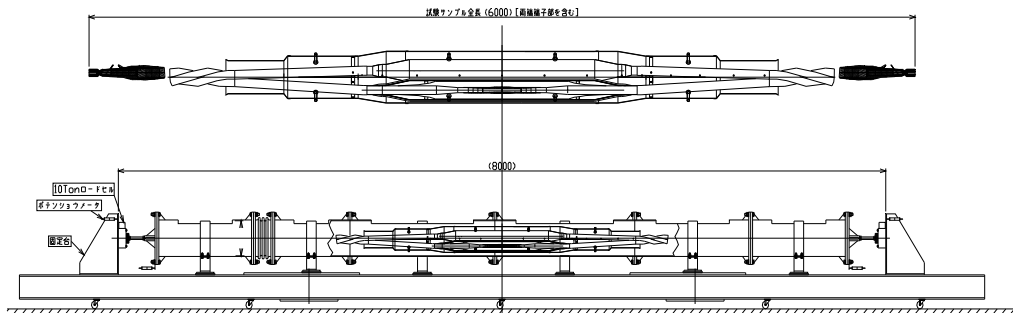
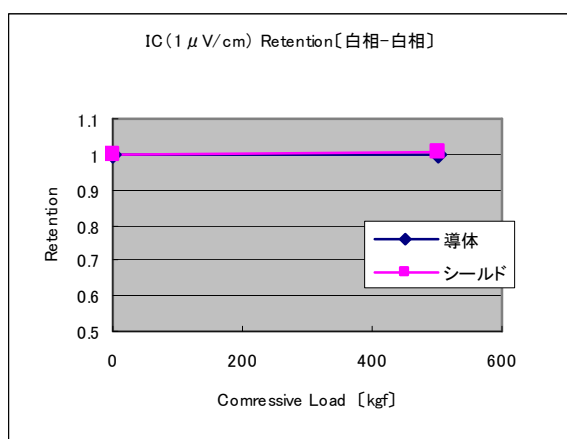


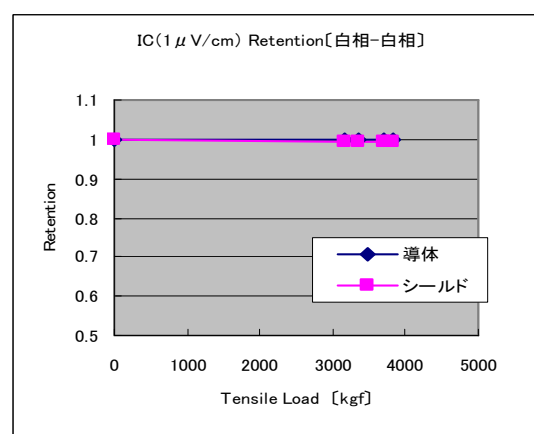
図 2.1.3-14 中間接続部冷却機械試験システム



図 2.1.3-15 中間接続部冷却機械試験状況



圧縮試験後の Ic 確認



引張試験後の Ic 確認

図 2.1.3-16 中間接続部冷却機械試験後の Ic 値比較

(6) 接続部把持構造

三心の接続部がそれぞれ組立完了した後は、ケーブルコアを中間接続箱両側のケーブル断熱管内に押し戻すことで三心接続部の外径を小さくすることができる。その後「保護カバー」を取り付けて三心を一体化し窒素容器間に半球状に加工したテフロン製支持材で把持する構造とした。この支持材は窒素槽とは固定されておらず、冷却時の熱収縮に伴うケーブルコアの移動をスムーズに行えるようにしている。

三心一括の構造図を図 2.1.3-17 に示す。

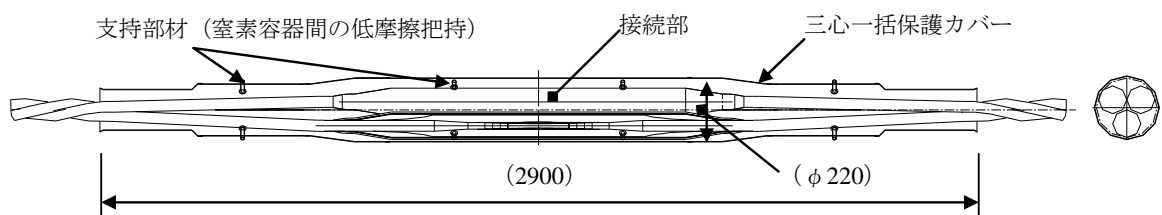


図 2.1.3-17 中間接続部三心一括構造図

(7) 窒素槽、真空槽の検討

窒素槽は、最大使用圧力が 0.5 MPaG とし JIS の圧力容器規格に準拠した圧力設計を実施した。窒素槽は組立施工性・高真空断熱層の長期信頼性の観点より接合部は溶接接続構造を採用した。使用する材料は、極低温領域まで低温脆性を示さない「オーステナイト系ステンレス鋼」SUS304 を選定した。

真空槽については、ケーブル部と同様に内管（窒素容器）、外管（真空容器）の二重構造としている。三心一括の接続部を収納し液体窒素を充填した空間となる窒素槽の外側に熱輻射シールド用の両面アルミニウム蒸着ポリエステルとポリエステルを交互に重ねた多層断熱層を用いて形成している。接続部の真空断熱層はケーブル部とは分離された構造であり中間接続部の真空槽の真空引きはケーブルと別々に実施する。

(8) 中間接続部の熱損失検討

中間接続部においてもケーブル部と同様に冷却システムコンパクト化の面から侵入熱を極力低減させる必要がある。接続部は真空槽に覆われ、外部からの熱侵入を抑える構造である。内側に配置される窒素槽の支持方法は、侵入熱を極力押さえる観点から低温域において熱伝導率が極めて低く、機械強度が期待できる FRP (Fiber Reinforced Prastic) 材で支持する構造とした。中間接続部への熱侵入量は、低温工学ハンドブックに準拠し、表 2.1.3-3 に示すように算出した。

表 2.1.3-3 中間接続部容器の熱侵入量

	熱侵入量	備考
Q1 [W]	4.8	両側 SUS コルゲートからの伝導
Q2 [W]	47	窒素容器支持材 (FRP) からの伝導
Q3 [W]	0.5	外気温 300[K]から容器への侵入熱

三心一括の接続部構造 (L=4.6 m) における AC3000 Arms (50 Hz) 通電時の損失を [Q₄] とした場合に単相ジョイント試験サンプルを用いた通電試験による AC 抵抗測定値を用いて以下の通り算出できる。但しケーブル部の損失は導体・シールドともに 1.0 W/m/ph@3 kA (50 Hz) とする。接続部は三心一括構造であるので、単相で算出した通電損失を 3 倍する必要がある。

本接続部における通電損失の測定に関しては、三心一括型接続部の組立検証試験を実施した 6m 長の接続部サンプルのうち 1 相を使用し導体-シールドに go-return の AC 電流を通電してロスを実測した。測定結果を図 2.1.3-18 に示す。ロス測定は 60 Hz で実施したが、損失計算では 50 Hz 換算値で算出している。測定の結果、3 kA 通電時の導体接続部ロスは 5.3 W/m、シールド接続部ロスは 6.3 W/m の結果が得られた。従って中間接続部の 3 kA 通電時の損失は、以下のように計算できる。尚、各部の長さは、図 2.1.3-19 に示す。

$$Q_4 = (Q_5 + Q_6) \times 3 \text{ 相分} = (6.3 \text{ W} + 12.0 \text{ W}) \times 3 = 54.9 \text{ W}$$

$$\text{導体部} \quad Q_5 = 5.3 \text{ W/m} \times 0.4 \text{ m} + 1.0 \text{ W/m} \times (4.6 - 0.4) \text{ m} = 6.3 \text{ W}$$

$$\text{シールド部} \quad Q_6 = 6.3 \text{ W/m} \times 1.4 \text{ m} + 1.0 \text{ W/m} \times (4.6 - 1.4) \text{ m} = 12.0 \text{ W}$$

これらの検討から、3 kA 通電時におけるジョイント部のトータルの熱損失は、(Q₁+Q₂+Q₃+Q₄) =107 W になる。

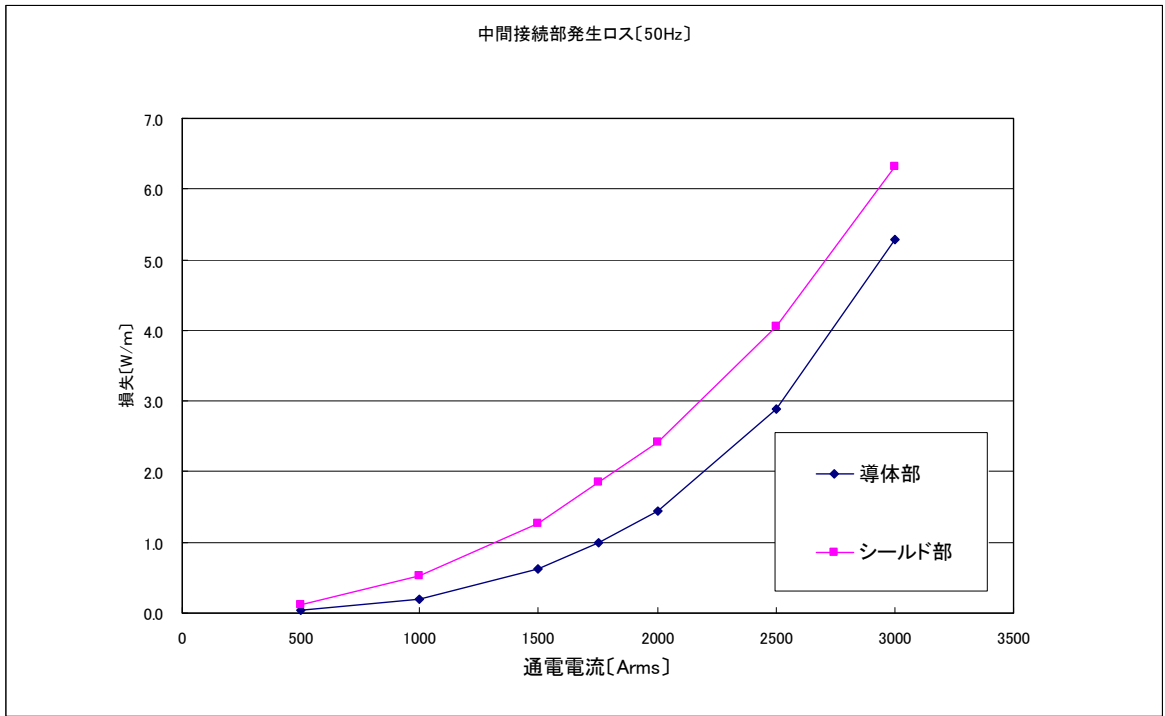


図 2.1.3-18 中間接続部通電ロス測定結果 (50Hz 換算値)

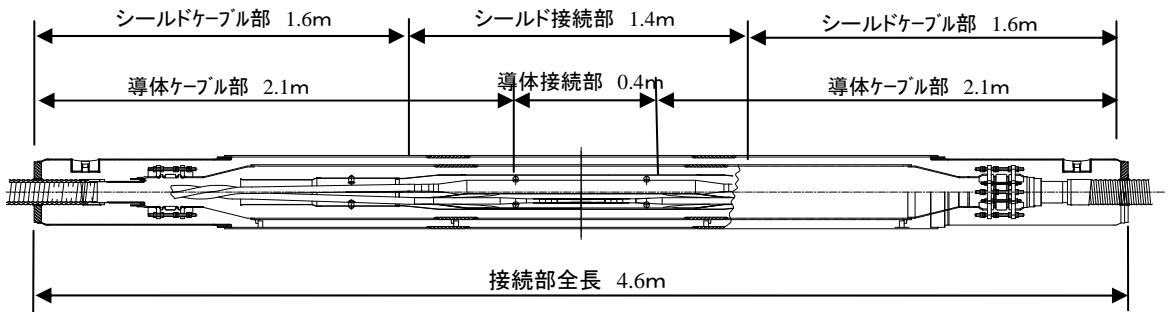


図 2.1.3-19 中間接続部通電試験サンプル構成損失の算出図

2.1.3-4 まとめ

- ・接続抵抗については、ジョイントモデルを作成し、本節で検討した導体接続構造、シールド接続構造において、導体部は $6.7 \text{ n}\Omega/\text{相}@3 \text{ kA}$ 、シールド部は $2.5 \text{ n}\Omega/\text{相}@3 \text{ kA}$ であることを検証し、目標値の $1 \mu\Omega/\text{箇所}@3 \text{ kA}$ 以下を達成した。
- ・通電試験では、 $3 \text{ kArms} \cdot 12 \text{ 時間}$ 連続安定通電を検証した。また、短絡電流試験では短絡電流試験の前後において、サンプルの I_c 値に変化はなく、 $10 \text{ kA} \cdot 2 \text{ sec}$ 後の 1.75 kA 連続通電試験および $31.5 \text{ kA} \cdot 2 \text{ sec}$ の過電流に対して中間接続部の導体・シールド超電導線にダメージが発生しないことを確認した。
- ・電気絶縁試験では、 $\text{AC}130 \text{ kV} \cdot 3 \text{ h}$ 、 $\text{Imp} \pm 385 \text{ kV}/3 \text{ 回}$ の所要性能を満足することを検証した。
- ・機械特性試験では、三心一括の中間接続部試験サンプルを組立て、液体窒素の冷却条件下において、要求性能 $3 \text{ ton}/\text{三相}$ の引張試験および $0.5 \text{ ton}/\text{三相}$ の圧縮試験を実施し、試験前後で I_c 値に劣化がなく中間接続部の機械設計の妥当性を検証した。
- ・熱損失では、三心一括の中間接続部における 3 kA 通電時の全体ロスが 72 W 程度であると試算した。

これらの結果から、検討している構造は、中間接続部の所要性能である「耐熱機械力」「電流容量」「耐電圧」「圧力設計」に十分に満足するものであった。この設計をもとに検証ケーブルシステムでの中間接続部を組立、冷却試験、各種電気試験等を実施した。その結果はシステム全体の試験結果として2.1.5節に記述する。

2.1.4 終端接続部の検討

2.1.4-1 終端接続部の開発目標

超電導ケーブルシステムの終端接続部は超電導ケーブルと常電導機器（例えば、送電線、遮断器、変圧器など）とを接続する箇所であり、温度的には、極低温部と常温部との接続部である。この終端接続部の特徴をまとめると以下のように記述できる。

「機械的」には超電導ケーブルシステム全体が、室温から液体窒素温度まで冷却されるために起こる熱収縮によりケーブル部に引張力が発生するが、その引張力を引止める構造を有する必要がある。尚、ケーブルの温度が室温に戻る時は圧縮力が働くので、その圧縮力にも耐える構造が必要である。また、冷媒である液体窒素には高い圧力がかけられるが、その圧力に耐える構造も必要となる。

「電氣的」には超電導部と常電導部との電氣的な接続部には、接続抵抗が発生する。この抵抗により、通電時には発熱が起こり、その温度上昇を考慮して安定に通電できる構造とする必要がある。

「熱的」には、接続する常温機器からの侵入熱、上述した接続抵抗による発熱など、ケーブル部と比べて、熱損失が多くなる箇所である。特に極低温部から常温部へ電気を引き出す電流リードからの侵入熱が大きく、その侵入熱の低減が重要であり、熱損失を小さくすることがシステム全体の運転コスト低減につながる。

本プロジェクトにおける 66 kV 級終端接続部の所要性能を表 2.1.4-1 に示す。

電氣的な性能に関しては、超電導ケーブルの特性に合わせて仕様を決定した。機械的な特性については、冷却時、昇温時のケーブル張力、圧縮力の要素試験結果からフィードバックした値である。圧力設計については、システム運転最大圧力 0.5 MPaG から設定している。(2.3.2 節参照)

地震対応については、従来ケーブルの終端接続部に課せられる仕様に準拠して設計を行っている。

表 2.1.4.-1 終端接続部の所要性能

No.	項目	所要性能		根拠
1	機械力	引張 3000 kgf/3 相 圧縮 500 kgf/3 相		ケーブル要素試験結果 (2.1.5 節参照)
2	電流容量	3 kArms 連続通電		ケーブル性能に準ずる。
3	短絡電流	<ul style="list-style-type: none"> ・ 31.5 kA@2 sec でダメージがないこと ・ 10 kA@2 sec で再送電可能なこと 		ケーブル性能に準ずる。 (2.3.1 節参照)
4	耐電圧	高電圧部	AC90 kV/3 h Imp±385 kV/3 回 DC152 kV/10 min	ケーブル性能に準ずる。 (2.5.1 節参照)
		接地端子	DC25 kV/10 min Imp-50kV/3 回	
5	圧力設計	0.6 MPaG		システム許容圧力が 0.5MPaG であるため。 (2.3.2 節参照)
6	耐震設計	水平 0.3 G、垂直 0.15 G		常電導機器の設計に準拠 (東京電力仕様による)

2.1.4-2 終端接続部の概略構造

図 2.1.4-1、図 2.1.4-2 に超電導ケーブル終端接続部の概略構造図を示す。基本構造は碍子垂直取り付け構造と、各相のケーブルコアにオフセット部を設けて一つの容器に入れる三相一括型構造とした。

各相のケーブルコアは導体接続金具(スリーブ)で接続され各々容器本体に引止められる。ケーブルコアと導体接続金具の接続方法はまず、超電導線材(導体)を各層接続長分段々になった、たけのこ処理をし、ケーブルコア中心にあるフォーマを導体接続金具に差し込み、圧縮し機械的に接続する。その後、この接続金具の超電導線材(導体)部分に半田を流し込み、電気的な接続を行う。

導体接続金具は FRP (Fiber reinforced plastic) パイプからなる、引止め治具と接続され、その引き止め治具が、容器本体と接続される。容器は別途、大地に固定されるため、ケーブルコア部分が、大地に固定されることになる。

電気絶縁層は、補強絶縁紙を巻き付けてストレスコーンを形成する。超電導シールド層および銅シールド層は、導体層と同様にたけのこ処理を実施しシールド接続金具をセットして半田流し込みにより接続した後に編素線で三相短絡する。

導体接続金具(スリーブ)と電流リードは編素線で電気的に接続され可とうシールド管に覆われて電界的に保護される。また、その編素線は容器本体に FRP パイプからなる支持治具で固定される。電流リードは 2500 mm²の素線絶縁導体からなり、ブッシングの内部を貫通している。

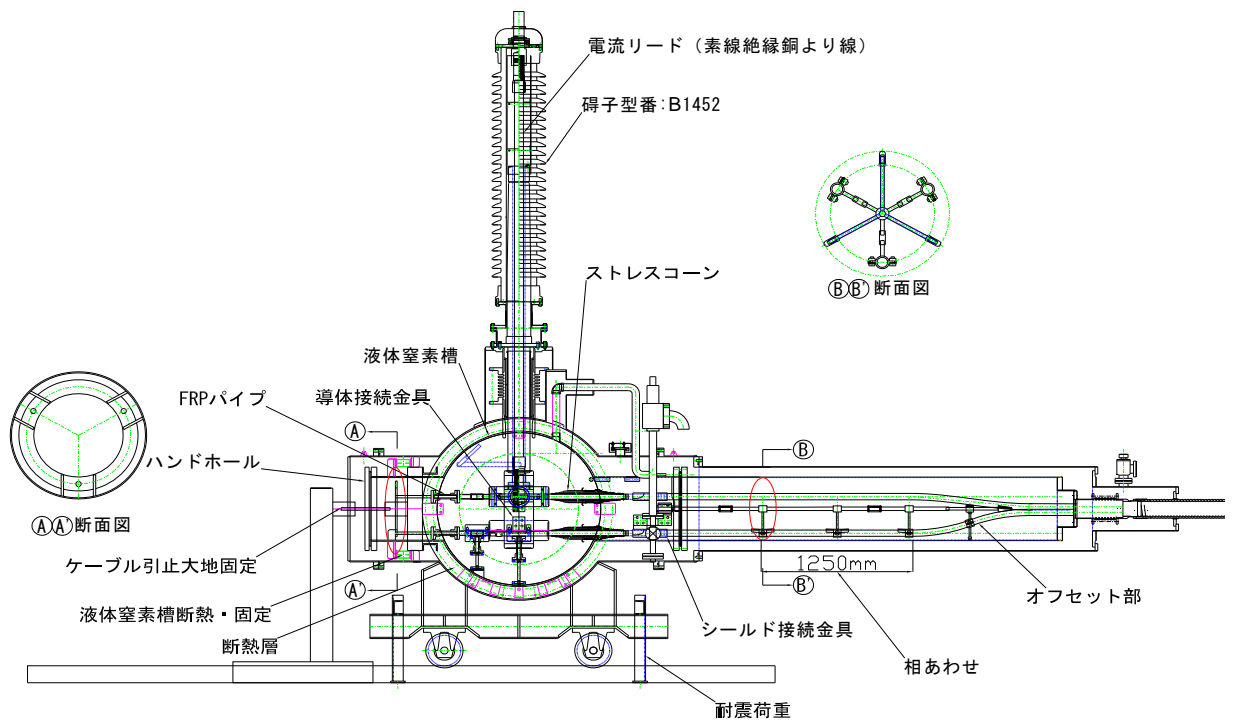


図 2.1.4-1 終端接続部の概略構造図 (側面図)

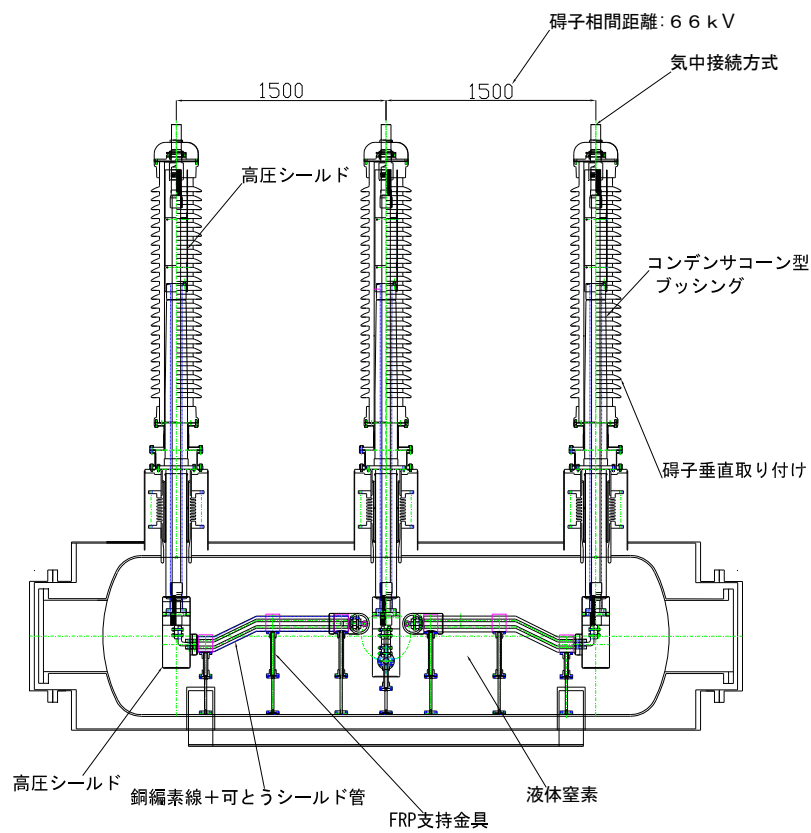


図 2.1.4-2 終端接続部概略構造図 (背面図)

2.1.4-3 終端接続部の各部設計検討と要素試験

(1) 接続抵抗測定

終端接続部では、超電導線と銅製の接続金具とが、半田で接続される。超電導線と接続金具との直流接続抵抗を、接続長さをパラメータとして測定し、有効な接続長を求めた。実験を行った超電導線と接続金具のモデル構造図を図 2.1.4-3 に、測手結果を図 2.1.4-4 に示す。試験の結果、30 mm 以上の接続長では接続抵抗の低下は緩やかになり、接続部の大きさをコンパクト化したいことから、ここでは、接続長として、30 mm を選んだ。

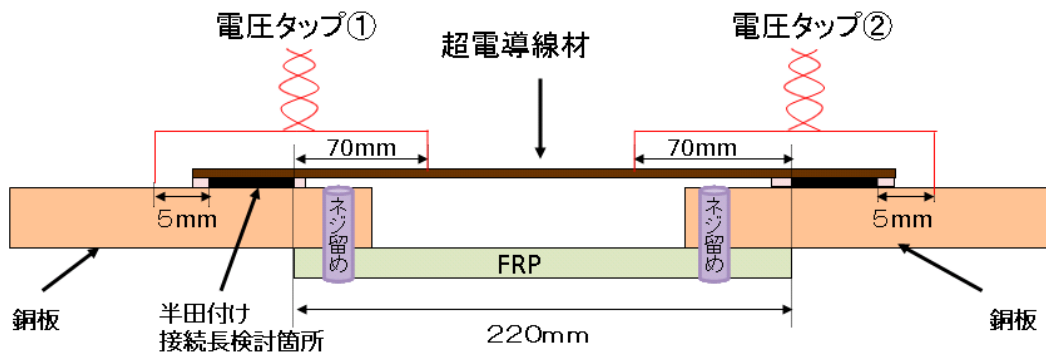


図 2.1.4-3 モデル構造図

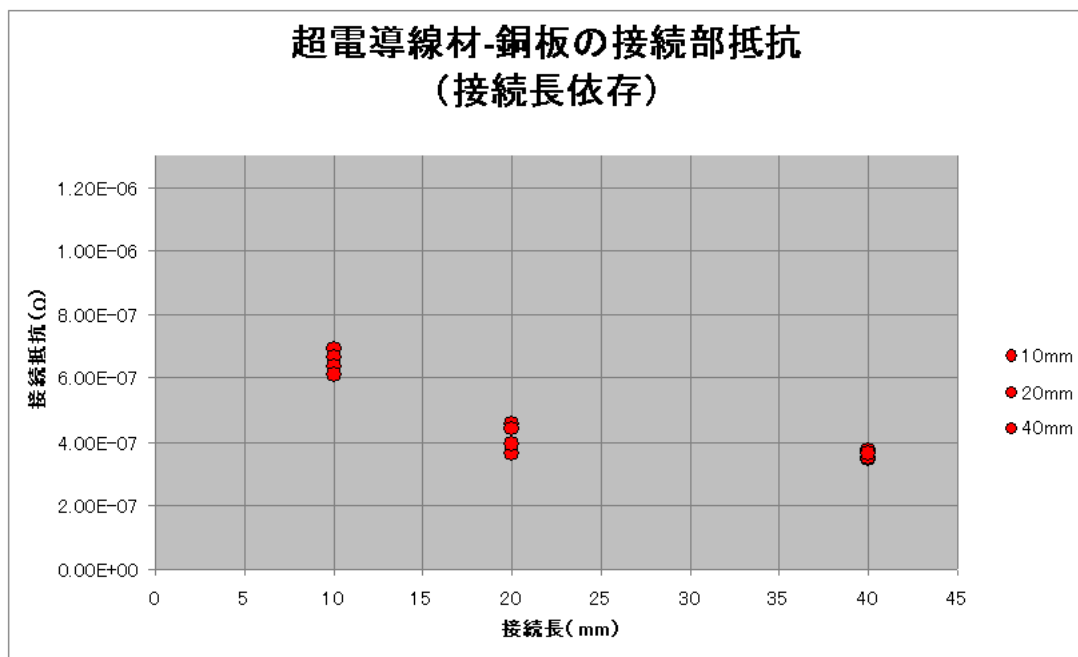


図 2.1.4-4 超電導線材と銅板の接続抵抗

(2) 通電試験

(1)で求めた接続長をもとに、超電導導体と接続金具、シールド部とシールド接続金具との接続モデルを作成し、接続抵抗の測定と3 kArmsの通電試験を行った。

導体接続構造を模擬したサンプル構造を図 2.1.4-5 に、試験状況写真を図 2.1.4-6 に示す。サンプルにAC3000 Armsを通電して測定した電圧（図 2.1.4-5 にVで図示）の変化を図 2.1.4-7 に示す。約8時間連続で通電を行ったが、測定した電圧は時間経過による変化がなく、特に発熱による接続部の抵抗変化もなく、安定に通電できたと判断される。温度も各測定点において変化ないことを確認した。

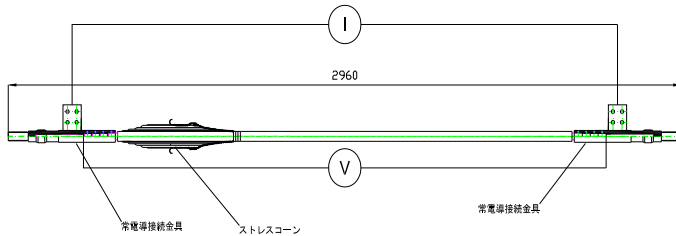


図 2.1.4-5 導体通電試験サンプル図



図 2.1.4-6 試験状況

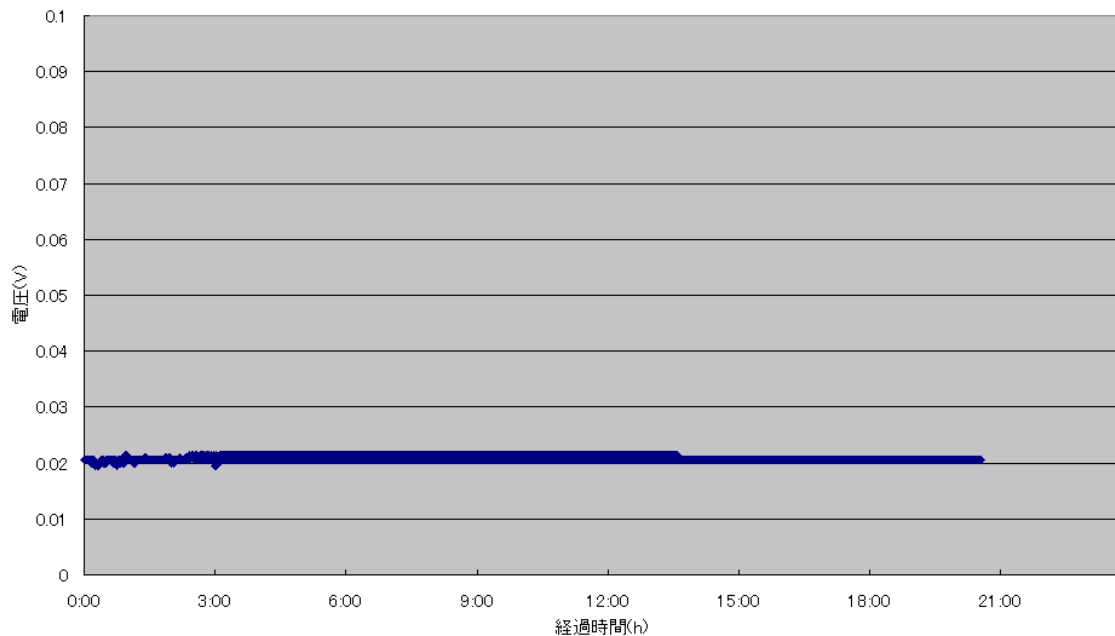


図 2.1.4-7 導体接続サンプルの通電結果

シールド接続部も同様に、その構造を模擬したモデルを作成した。そのモデル構造を図 2.1.4-8 に、試験状況写真を図 2.1.4-9 に示す。このモデルに、AC3000 Arms を通電して測定した電圧（図 2.1.4-8 に V として図示）の変化を図 2.1.4-10 に示す。同じく約 8 時間連続で通電を行ったが、測定した電圧に変化はなく、安定に通電できたと判断される。

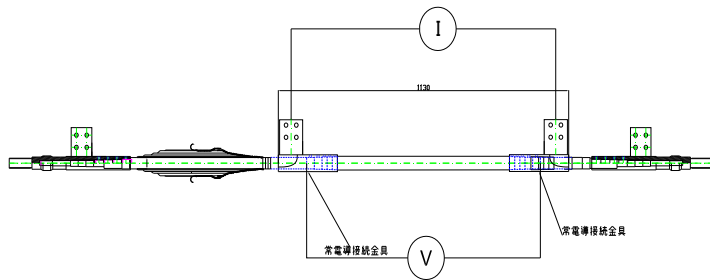


図 2.1.4-8 シールド通電試験サンプル図



図 2.1.4-9 試験状況

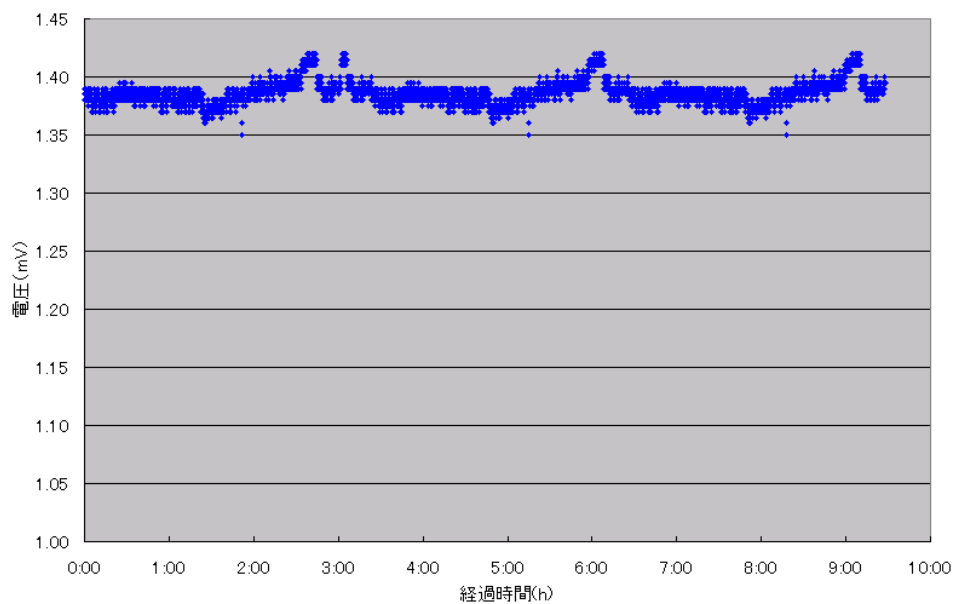


図 2.1.4-10 シールド接続サンプルの通電結果

(3) 短絡電流試験

超電導ケーブルシステムに要求される耐短絡電流特性は 2.1.4-1 節の開発目標に記載したように、最大 31.5 kA-2 sec の過電流が流れてもケーブルシステムにダメージなきこと（Ic 劣化なきこと）、及び 10 kA-2 sec の過電流が流れた直後にも送電可能なことを確認する必要がある。

ここでは、ストレスコーン（以下ストコン）部を有する終端接続部模擬サンプルを作成し、短絡電流試験を行った。サンプルの構成図を図 2.1.4-11 に、諸元を表

2.1.4-2 に示す。サンプルの全長は約 2.6 m であり、サンプル片側（図 2.4.1-11 の左側）にストコン部が設けられている。計測素子として、過電流印加時のケーブルコア内部温度を計測するための熱電対と、電流分布を計測するためのログスキーコイルを、図 2.4.1-11 に示す位置に取り付けている。ここで、電流は超電導部とフォーマ部に分流するが、全電流をログスキーコイル①で、超電導部部の電流をログスキーコイル②で測定を行った。

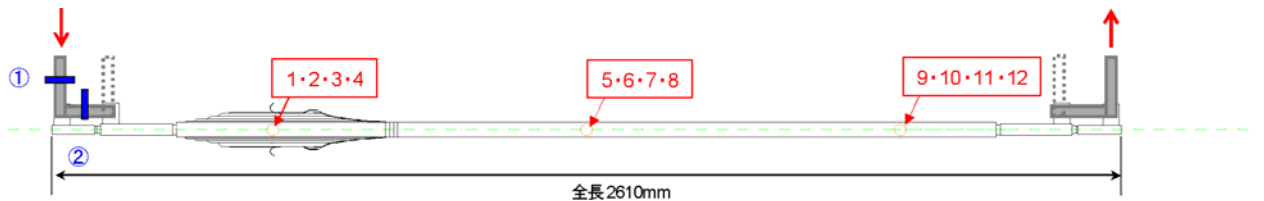


図 2.1.4-11 短絡試験サンプル構成図

①②はログスキーコイル、1～12 は温度測定用熱電対を示し、0°、90°、180°、270° の位置に取り付けている。

表 2.1.4-2 端末模擬サンプルの諸元

構造	超電導線材	外径 (mm)	備考
フォーマ		18	素絶分割集合フォーマ
HTS 導体層	HT/HT/ACT/ACT	22	4 層、銅合金補強線
主絶縁層		37	PPLP 7 mm 厚
臨界電流 (1 μ V/cm 定義、at 77 K)	導体 I_c =DC 5900 A (AC : 4.1 kArms 相当)		

端末サンプルの試験結果を表 2.1.4-3 示す。図 2.1.4-12 は 31.5kA における、端末サンプルの温度上昇とケーブルコアの試験結果とを比較したものを示す。これらから、端末サンプルのストコン部とケーブルコア部の温度上昇には差異が無く、どちらもケーブル単体試験結果と同等であった。

また、短絡電流試験後に、サンプルの健全性を確認するために I_c 測定を実施した結果を試験前データとともに図 2.1.4-13 に示す。試験前後において I_c 値に変化はなく、今回の短絡電流試験条件（最大 31.5 kA-2 sec）において、サンプルにダメージが無いことを確認した。

表 2.1.4-3 短絡電流試験結果

No.	短絡電流 (kArms)	短絡時間 (sec)	ΔT (K)		
			ストコン部	ケーブル部	
			ストコン部 (3, 4)	ケーブル中央部 (7, 8)	端末側 (11, 12)
1	10	2	6	7	5
2	10	3	12	9	8
3	20	2	38	36	39
4	31.5	1	45	50	47
5	31.5	2	97	94	100

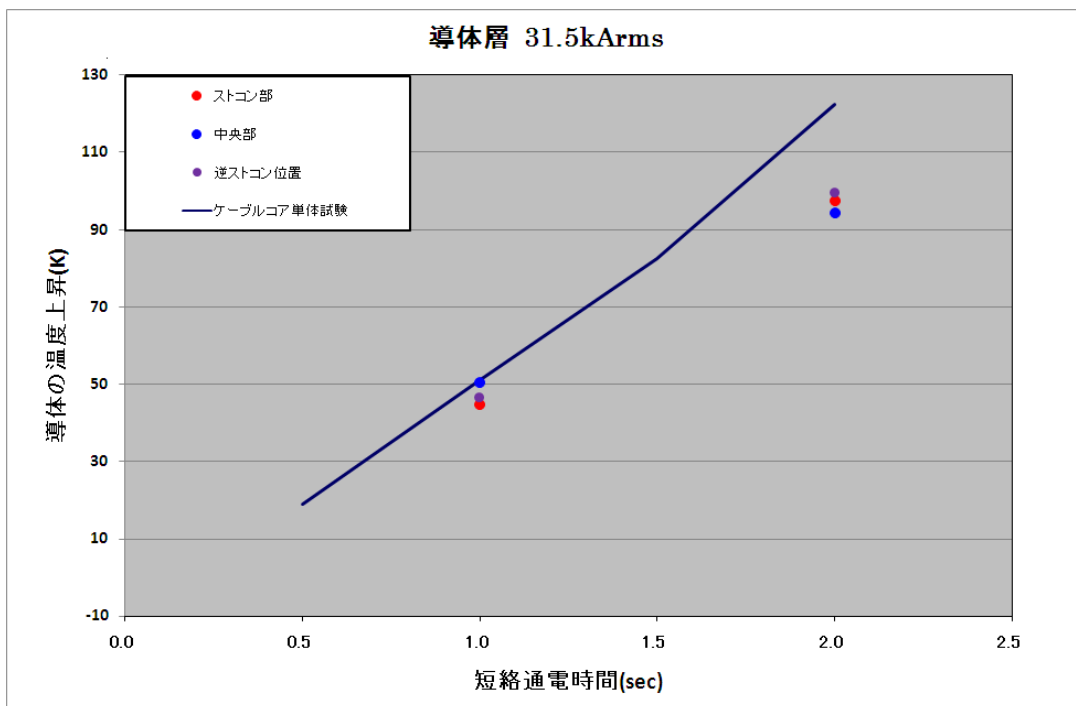


図 2.1.4-12 端末ストコン模擬サンプルとケーブルコア単体の導体温度上昇比較

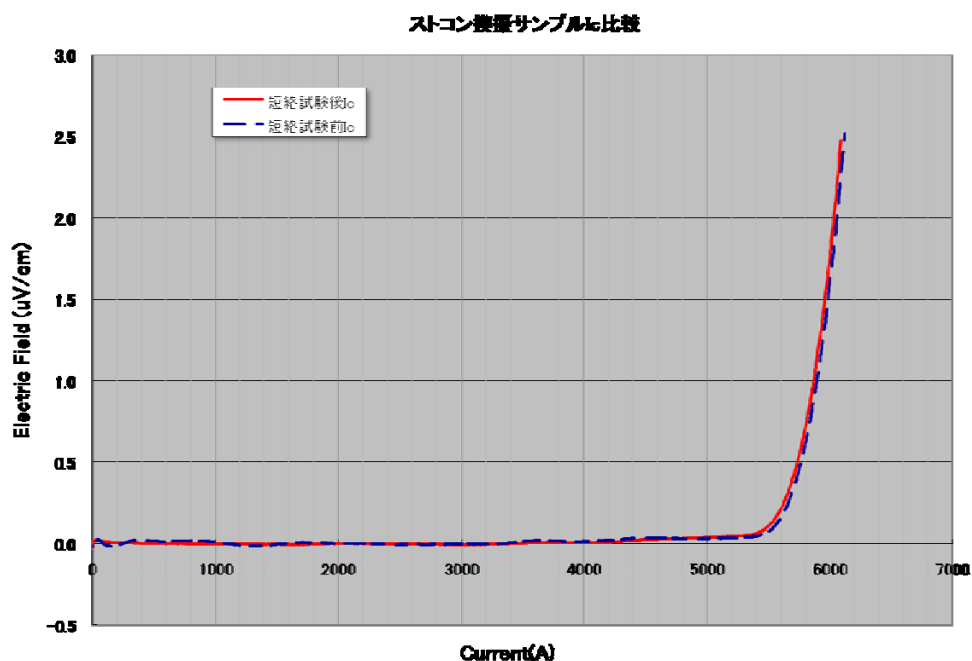


図 2.1.4-13 耐過電流試験前後の I_c 測定結果

10 kA 短絡電流後の再送電ケース模擬試験を耐過電流試験と同一サンプルを用いて実施した。使用したケーブルコアの諸元は表 2.1.4-2 に示すとおりである。試験方法としては、10 kA-2 sec の過電流を印加した直後にサンプルを発電機回路から切り離し、定格 1.75 kA の連続通電を実施した。なお、装置の特性上、短絡電流から定常電流に切り替えに要した時間は 50 msec であった。試験の結果、問題なく 10 kA-2 sec の短絡電流通過後に 1.75 kA の定格電流を流せることを確認した。

(4) 電気絶縁試験

(a) ストレスコーン部試験

超電導ケーブルの終端部には、2.1.4-2 で説明したように、電界緩和のためにストレスコーンを設けている。この部分での絶縁強度が十分であることが要求されるが、2.1.5 節で示したように、ケーブルサンプルとストレスコーンとが一体となったサンプルで試験を行い、良好な結果が得られている。試験結果については、2.1.5 節に示した。

(b) ブッシングと端末容器の組合試験

端末容器にブッシングを 3 本立て、両端のブッシングを図 2.1.4-14 に示すように窒素槽内部で編素線で接続し、ブッシング及び編素線と容器との絶縁隔離の性能確認、FRP 支持材の絶縁確認を行った。AC 耐電圧 130 kV/10 分の確認試験、DC 耐電圧 152 kV/10 分の確認試験、Imp 試験 ±385 kV/各 3 回の確認試験を実施し全て良好の結果を得た。図 2.1.4-15 に試験状況を示す。

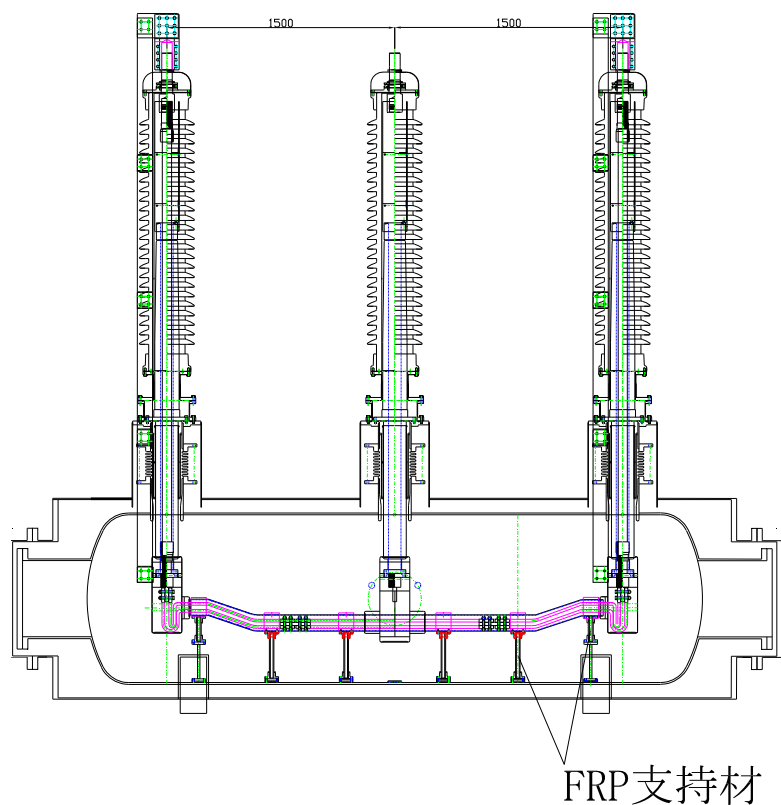


図 2.1.4-14 端末単体試験構成図



図 2.1.4-15 終端接続部単体試験状況

(5) 機械的特性試験（引張力、圧縮力）

(a) オフセット部の機械特性試験

ケーブルコアは断熱管の中では三心よりになっている。終端接続部のケーブル導入部への接続部で三心のよりをほどいてケーブルコアを三分岐する必要があるが、このオフセット部分には、ケーブルが冷却される時に発生する機械力が印加される。本設計では、オフセット半径はケーブルコアの最小曲げ半径 900 mm よりも大きい

1000 mm としており、図 2.1.4-16 に示すオフセット機械試験サンプルを作成し、冷却時に発生しうる最大荷重 1000 kgf (≒3000 kgf/3 相に相当) および、昇温時に発生する圧縮荷重 200 kg (≒500 kgf/3 相に相当) を 3 回繰り返し印加し、サンプルの I_c の変化を調べたが、特に I_c の劣化もなく本オフセット構造で、ケーブルが発生する機械力に耐えられることを検証した。

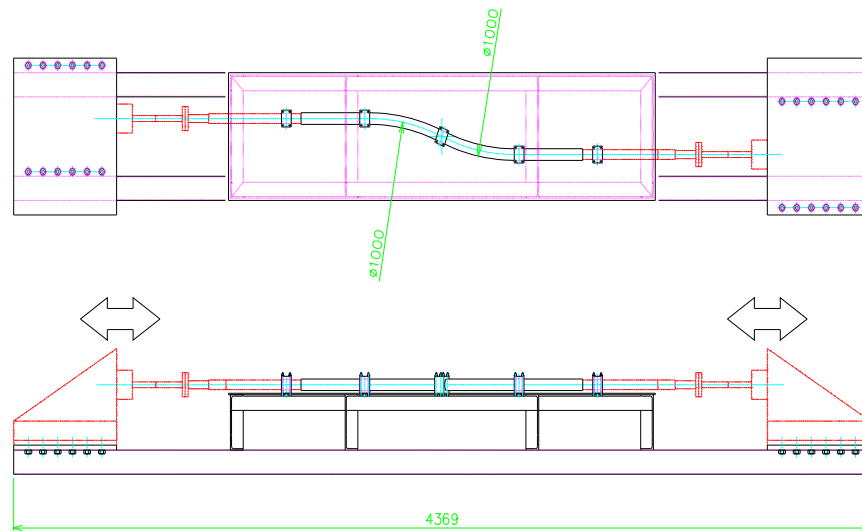


図 2.1.4-16 オフセット機械試験サンプル図

(b) ケーブルコア引き止め治具の機械特性試験

2.4.1-2 節の端末構造にて記述したように、ケーブルコアに発生する張力、圧縮力を容器本体に引き止める構造を検討している。そのために必要な、FRP 引き止め治具を試作し、その機械特性を調べた。引き止め治具の写真を図 2.1.4-17 に示す。FRP とステンレスの金具から構成されており、単体試験の結果、引張破壊値 10 ton、圧縮破壊値 9 ton、曲げ破壊値 0.49 ton であることを確認した。これらの結果から、ケーブルコアを引きとめるには十分な性能を有していると判断される。

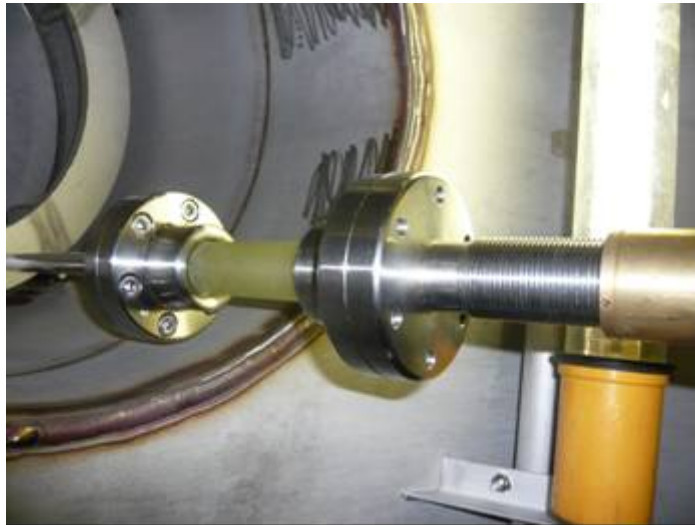


図 2.1.4-17 引き止め治具写真

(6) 電流リードの設計と侵入熱測定

電流リードのサイズは、端末容器やブッシング等の端末全体サイズに関わることから、小型化が期待されている。実証プロでは最大通電電流が 3 kArms と大電流である事から、施工性に優れている従来の銅パイプ設計ではなく、小型化に適している絶縁被覆を有する細径銅素線を撚り合わせた素線絶縁銅撚線を用いて設計を実施した。また、電流リードの熱損失は端末全体の熱損失において支配的であることから、電流リードの低損失設計が望まれている。電流リードの熱損失は電気抵抗から発生するジュール損失と常温側からの熱伝導による侵入熱が考えられ、この二つの熱損失を最小化するために、電流リード断面積の最適化を実施した。電流リード長さは実証試験場所の旭変電所の碍子サイズから 3.2 m と決定し、その長さで電流 3 kArms における断面積と電流リード単体の熱損失の相関を計算により求めた。その計算結果を図 2.1.4-18 に示す。図から判るように約 2500 mm²の時に 3 kArms 通電時の電流リード熱損失が最小となる。解析の妥当性を確認するため、2500 mm²断面積の電流リードを試作し侵入熱測定を実施した。試験状況写真を図 2.1.4-19 に示す。電流リードは FRP ブッシングに貫通される形で挿入され、通電するために 2 本の電流リードを容器に設置している。

電流リードの熱損失の実測値を図 2.1.4-18 内に示すが、実験値と解析値は良く一致する結果が得られた。以上の結果から、電流リードは長さ 3.2 m、断面積 2500 mm²の素線絶縁銅撚線とした。

また、電流リード部の通電電流による熱損失の変化の計算値と実測値の結果を図 2.1.4-20 に示す。0～3000 A の範囲で実験結果は計算値とよく一致する結果が得られている。

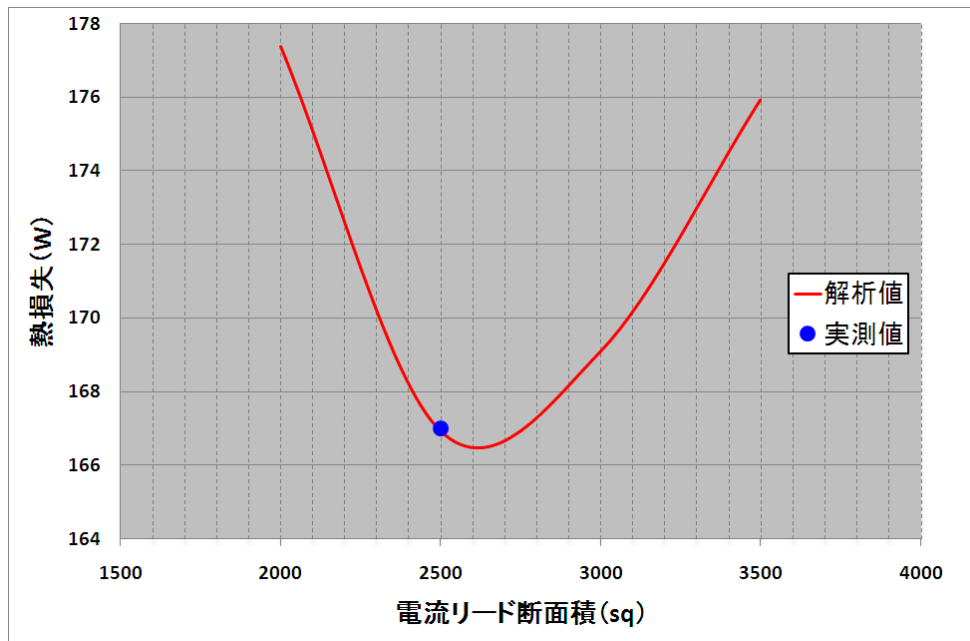


図 2.1.4-18 3 kArms 通電時の電流リード断面積と電流リード熱損失の相関関係



図 2.1.4-19 電流リード試験状況

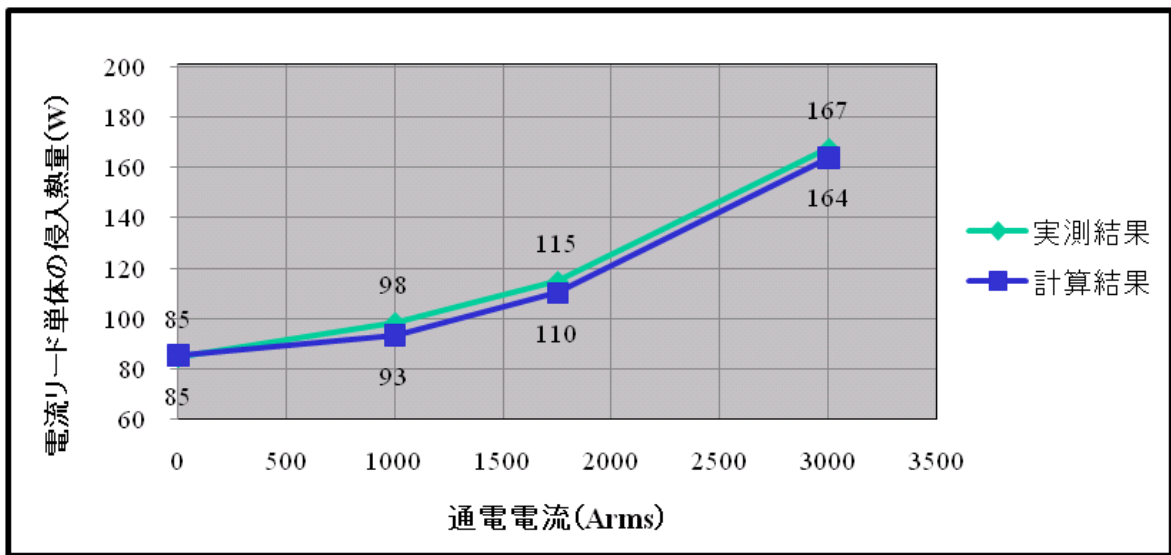


図 2. 1. 4-20 電流リード単体の熱侵入試験結果

(7) 終端接続部窒素容器構造

終端接続部の窒素容器は最大使用圧力を 0.5 MPaG として JIS 圧力容器規格に準拠した耐圧設計を実施する。窒素容器は高真空断熱層の長期信頼性をたかめる為に接合部は溶接接合構造を採用した。使用する材料は極低温領域まで低温脆性を示さない「オーステナイト系ステンレス鋼」SUS304 を選定した。SUS304 材は極低温領域での機械強度についても優れた特性を持つ。SUS304 の板厚は JIS 圧力容器規格の円筒胴の胴板厚の設計をもとに算出した。また窒素容器には安全弁をもうけて超電導ケーブルシステム全体の圧力上昇時の安全性を確保している。

終端接続部の断熱については、ケーブル部と同様に窒素槽と真空槽からなる二重構造としている。終端接続部の真空断熱層はケーブル部とは分離された構造であり、現地にてケーブルと組み合わせ後に、真空引きを行うようにする。

(8) 耐震構造

日本電気技術規格委員会 JEAG5003「変電所等における電気設備の耐震設計指針」をもとに水平方向 0.3 G、鉛直方向 0.15 G に対して耐震設計を実施する。終端接続部は運転時に液体窒素が充填された場合、総重量は 11.1 t となり鉛直方向には充分安全であるといえる。よって水平方向 0.3 G の地震力に対して転倒しないこと及び真空容器の中で窒素容器が揺れない構造を念頭に耐震設計を実施した。転倒に対しては容器本体から張り出した脚を大地にアンカーボルト固定する構造を採用している。

(9) 終端接続部侵入熱

設計した終端接続部の侵入熱、発熱の計算値を表 2.1.4-4 にまとめる。2.1.5 節で述べるとおり、30 m 検証システムで無負荷時、通電時の熱損失の評価を行い、設計値との比較を行った。

表 2.1.4-4 終端接続部侵入熱設計表

侵入熱発生箇所	熱損失 (W)		備考
	1750 A 通電時	無負荷時	
電流リード	330	255	3 本、図 2.1.4-20
端末容器侵入熱	160	160	ブッシング、輻射、FRP 支持材他
内部発熱部	145	0	5 箇所
トータル	635	415	

(10) 短絡時の電磁力について

本プロジェクトでは最大で 31.5 kA の短絡電流が通過する。超電導ケーブルにおいては、導体とは逆向きにシールドにも電流が誘起されることから、導体部から外部に漏れる磁場は小さく、大きな電磁力は働かないと考えられる。

しかしながら、端末部においては、三相短絡部よりも端末側では、シールド電流は流れないため、導体に短絡電流が流れることで、大きな磁場が発生し、他相との電流と相互作用し、大きな電磁力が働くものと推測される。

本節では、端末部の構造を模擬したモデルを用いて、短絡電流を流し、電磁力を測定し、その電磁力が印加されても端末が健全であることを実証したので、その内容について記述する。

電磁力試験のモデルサンプルを図 2.1.4-21 に示す。ケーブルコア三本を接続金具、FRP 引き止め治具を介して、容器に固定している。ケーブルコアの配置は実際の端末構造と同じにし、図のように断面的には逆三角形配置としている。

このモデルに①三相に 31.5 kA 三相通電を実施、②2相に 31.5 kA 往復電流を通電、の2ケースについて実験を行った。尚、電磁力の測定は②のケースについて実施し、ケーブルコア間にサポート部材を取り付け、その部材に歪ゲージを取り付けて、歪を計測し、電磁力への換算を行った。

図 2.4-1-22 に試験状況の写真を示す。試験の結果、②のケースでは電磁力は 230 kgf (引力) と計測された。計算値の 200 kgf とよく一致する結果であった。①ケースで 31.5 kA 三相短絡試験を実施したあと、サンプルの I_c 測定を実施したが、特に電磁力印加前後で I_c の変化がなく、支持方法に問題ないと考えられる。

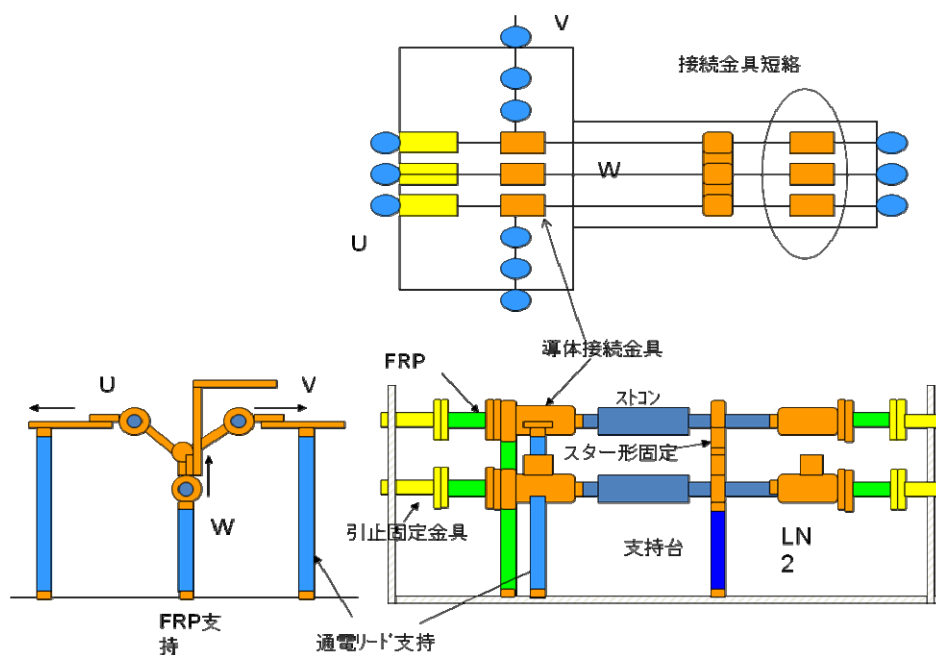


図 2.1.4-21 電磁力試験用サンプル

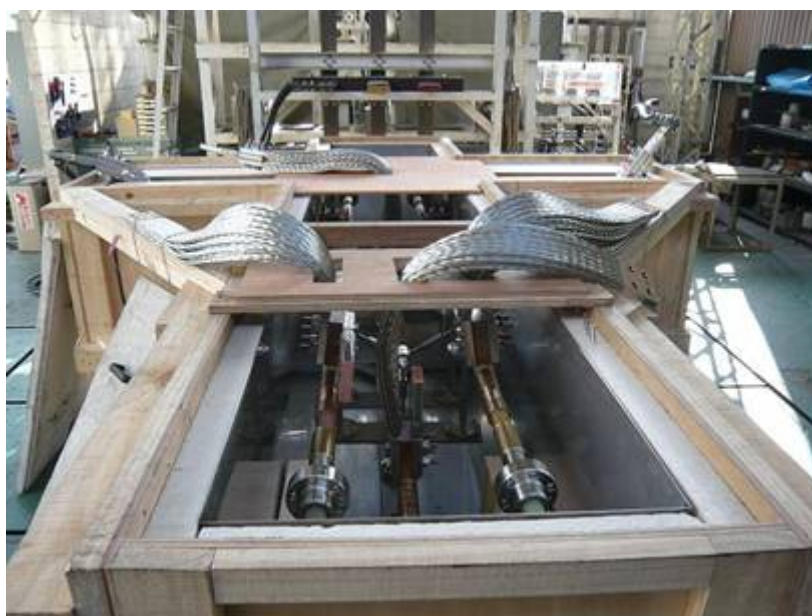


図 2.1.4-22 電磁力測定試験状況

2.1.4-4 まとめ

- 66 kV/3 kA 級の三相一括型端末の構造検討を行い、要求仕様に対して各種モデル試験を実施し、設計データを収集した。
- 通電試験では、3 kArms、8 時間以上の連続通電を行い、特に異常なく運転できることを実証した。
- 短絡電流試験では短絡電流試験の前後において、接続サンプルの I_c 値に変化はなく、10 kA-2 sec 後の 1.75 kA 連続通電試験および 31.5 kA-2 sec の過電流に対してダメージが発生しないことを確認した。
- 電気絶縁試験では、AC90 kV@3 時間、 $Imp \pm 385$ kV/3 回の所要性能を満足することを検証した。
- 機械特性試験では、ケーブルコアのオフセット部を模擬したサンプルを組立て、液体窒素の冷却条件下において、要求性能 3 ton/三相の引張試験および 0.5 ton/三相の圧縮試験を実施し、試験前後で I_c 値に劣化がなく中間接続部の機械設計の妥当性を検証した。
- ケーブルコアの応力を引きとめる治具を製作し、十分な機械特性を有していることを確認した。
- 3 kA 級電流リードの設計では 2500 mm² 撚線構造を選び、試作評価した結果、損失は計算値とよく一致し、170 W@3 kA であった。
- 熱損失では、端末部の損失を算出し、無負荷時 415 W、通電時 635 W と推定した。
- 短絡時に流れる電流により、三相分岐部分に発生する電磁力を測定し、約 230 kgf であることがわかった。また、ケーブルコアにダメージがないことも確認した。

これらの結果から、今回検討した構造は、端末の所要性能である「耐熱機械力」「電流容量」「耐電圧」「圧力設計」に十分に満足するものであり、この設計をもとに検証ケーブルシステムでの端末組立、冷却試験、各種電気試験等を実施した。その結果はシステム全体の試験結果として 2.1.5 節に記述する。

2.1.5 検証用ケーブルシステムの構築と評価

2.1.5-1 検証用ケーブルシステム概要

前節で検討したように、本プロジェクトに適用するために、超電導ケーブル、ジョイント、端末の設計検討、要素技術検証を実施してきた。しかしながら、それらは個別の技術であり、使用における最終形態であるケーブルシステムとしてまとめ、ケーブルと各機器とを接続した形で、各種試験を実施し特性の評価を行う必要がある。本プロジェクトでは、実システムでの実証試験の前に、検証用のケーブルシステムを構築し、その特性を評価することとした。

(1) 目的

検証用ケーブルシステム構築と評価の目的を以下に示す。

- ・超電導ケーブルとジョイント、端末を組合せたシステムを構築し、冷却試験、電気試験を行うことで、電氣的、機械的、熱的な特性を評価し、各部設計へのフィードバックを行う。
- ・ジョイントと端末の組立・施工について検討した手法について検証し、管理項目、方法について確認する。
- ・冷却システムでの、温度、圧力の基本制御動作の検証
- ・警報、監視システムの基本動作の確認
- ・事故を模擬した試験（冷凍機故障、短絡電流模擬）を実施し、対応方法、システム設計へ反映する。

(2) 検証ケーブルシステム構成

図 2.1.5-1 に検証用ケーブルシステムの構成を示す。ケーブル長さは 30 m 程度であり、途中に 90 度曲がり进行を設け、両端に端末、途中でジョイントを設けている。布設形体の曲がりを実証すること、端末、ジョイントとの組合せを考え、最低限必要な長さを 30 m とした。曲がり部の曲げ半径は、実際の曲がり部の最小半径が 5m 程度であることから、5m を選んでいる。尚、ケーブルの構造は後述するように三心一括型であるが、3 心のうち 2 心は超電導線を用いたケーブルコアであるが、残り 1 心はダミー線（グレードの低い超電導線を使用）を使用したケーブルコアとしている。このケーブルシステムを冷却システムに接続し、液体窒素を循環させることで冷却を行う。冷却システムは、1kW 級冷凍機 2 台、液体窒素循環ポンプ、リザーバタンクなどからなる。

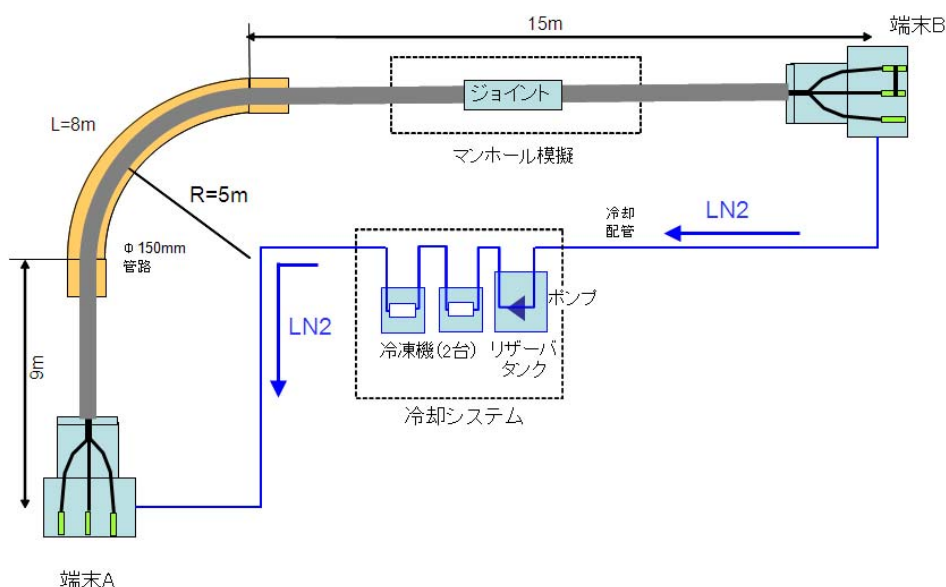


図 2.1.5-1 検証用ケーブルシステム構成図

2.1.5-2 検証用ケーブルの設計と製造

(1) ケーブル設計検討

検証用ケーブルシステムについては、2.1.1 節でケーブルの低交流損失化、2.1.2 節で短絡電流事故対応の検討結果をもとに実施するが、それらの性能以外に、ケーブルの仕様を決めるためには、ケーブルの機械特性、電気絶縁特性について、設計検討・検証を行う必要があり、それらの検証結果について記述する。

(a) 電気絶縁特性の検証

これまでの 66 kV 級超電導ケーブルの開発（参考文献）では、電気絶縁材料に PPLP (Polypropylene laminated paper) を用い、液体窒素を含浸させている。この PPLP は薄いテープ状に積層されており、この構造は室温時にはケーブルの曲げなどによる構造の乱れが少なく、また冷却時の熱歪に対してもよい耐性を有している。さらに、低温での $\tan \delta$ は 0.1 %以下と誘電損失が非常に小さい特性を持っている。このことから、本構造は超電導ケーブルに適した構造であると考えられており、本プロジェクトにおいても、本構造を踏襲する。

その電気性能を確認するために、モデルケーブルを作成し、2.4.1 節で検討した試験条件以上の条件で課電試験を行い、その特性について確認した。

課電試験に供したサンプルは PPLP の絶縁厚 6 mm、有効長約 4 m のケーブルコアである。今回実施した課電試験における回路の概略図を図 2.1.5-2(a)、(b)にそれぞれ示す。AC 課電においては部分放電を測定するためにケーブル端部に縁切り部を設け、部分放電が発生した場合の信号を両端から取り込み、時間差により発生箇所を特定するようにしている。

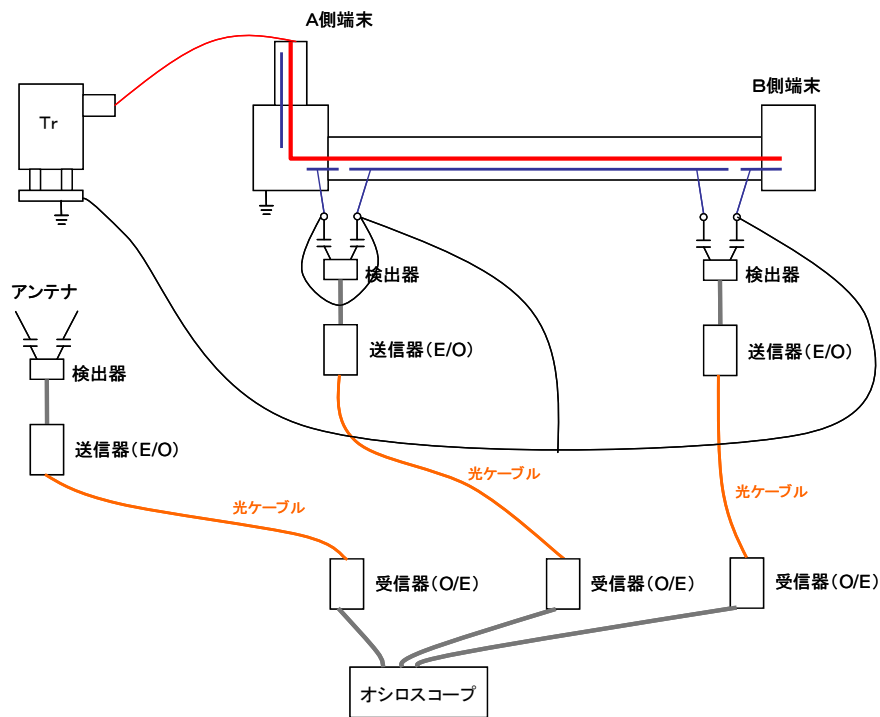


図 2. 1. 5-2 (a) AC 課電回路 (部分放電測定時)

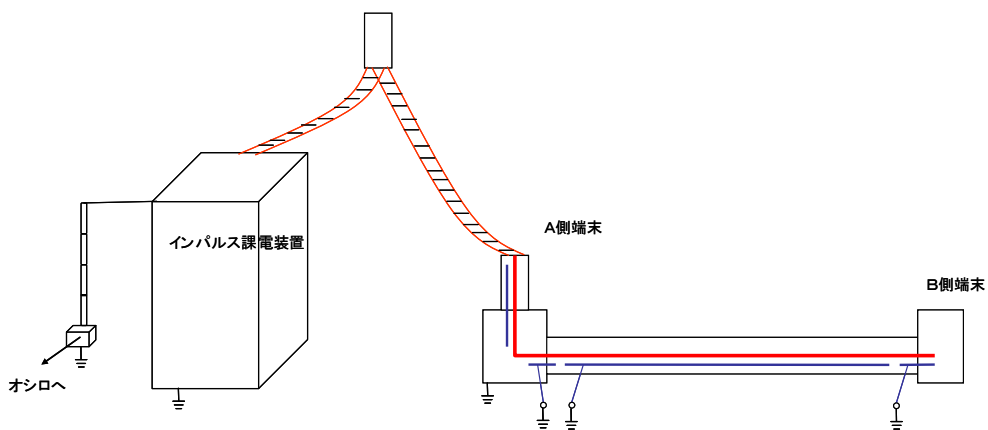


図 2. 1. 5-2 (b) Imp 課電回路

・試験結果

AC 課電試験条件と試験結果を表 2. 1. 5-1 に、雷インパルス試験条件と試験結果を表 2. 1. 5-2 に示す。いずれも試験結果は良好で、与えられた試験条件を満足するものであった。この結果、絶縁厚 6 mm でも、十分に試験電圧をクリアすることが確認できた。しかしながら、6mm での実績はまだ十分とは言えず、実施者にて協議の結果、これまで長期試験実績のある絶縁厚 7 mm を選定し、以下の検証ケーブルの設計を行った。

表 2.1.5-1 AC 課電試験条件および結果

項目	内容
試験条件	(1) 10 kV step/3 min で昇圧し、90 kV-3 時間ホールド (2) 10 kV step/3 min で昇圧し、130 kV-3 時間ホールド ※試験中は部分放電測定を実施。(2)においては、部分放電が発生した場合試験を中止することとした。
試験結果	(1) 90 kV 課電→特に異常なく良好 (PD 発生なし) (2) 130 kV 課電→課電開始から 1 時間 50 分後に PD 発生(200 pC 連続) ※部分放電感度は 60 pC

表 2.1.5-2 インパルス課電試験条件

項目	内容
耐圧試験条件	(1) +/-310 kV 3 回 (2) +/-350 kV 3 回 (3) +/-385 kV 各 3 回
破壊試験条件	下記の要領でインパルス試験を継続。BD が発生するまで試験を実施するが、上限試験電圧は+/-450kV とする +/-400 kV 3 回 +/-425 kV 3 回 +/-450 kV 3 回

(b) ケーブルの機械特性

ケーブルは室温から液体窒素温度に冷却すると、0.3 %の熱収縮を起こす。これまでの開発⁸⁾⁹⁾では、三心ケーブルを弛ませて、冷却時の熱収縮を弛みで吸収する方法が検討されてきた。

一方、本プロジェクトでは、φ150 mm 管路に適用するケーブルを目指しており、そのコンパクト化が求められている。これまでの設計検討の結果、これまで通り三心を弛ませる構造では、ケーブルサイズをコンパクトにすることが難しく、ここでは、三心を弛ませないことを前提にケーブル設計を行った。

三心を弛ませず、また端末を固定した状態において、ケーブルを室温から冷却すると、ケーブルコアに熱収縮による引張力が印加される。また、ケーブルを冷却状態から室温まで温度を上昇させる際には、ケーブルが伸びることによる圧縮力が発生する。本節では、これらの引張力、圧縮力をモデルケーブルにより実測し、それらの値を求めた。また、それらの応力が印加された場合のケーブルへの影響について調べた。

試験装置の概略図および概観写真を図 2.1.5-3 および図 2.1.5-4 に示す。三心コ

アサンプルは試験容器両端に固定されており、サンプルを液体窒素中に浸漬し、試験容器を引っ張ることにより試験サンプルの液体窒素中における引張試験を行う。試験容器部には、引張試験時に容器自体が分担する張力を抑制するためにベローズが2箇所挿入されており、0.3%伸びに相当するサンプル引張時に容器が分担する張力は約20 kgと、サンプル張力約3 tonレベルに比べ無視できるほど小さく抑制できている。なお、試験時の引張り量は、1.5 mmピッチのボルトナットの回転数により管理した。試験状況を図2.1.5-5に示す。

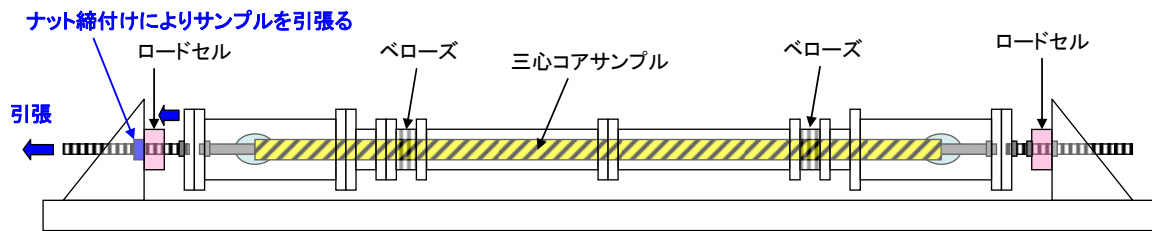


図 2.1.5-3 三心コア引張試験装置の概略図



図 2.1.5-4 三心コア引張試験装置の概観写真

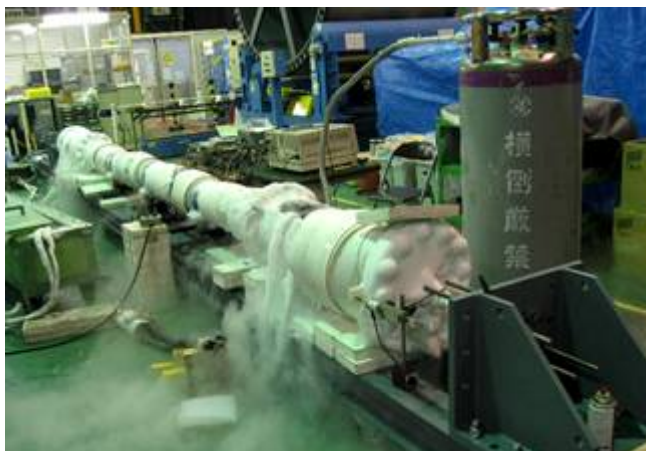


図 2.1.5-5 三心コアサンプルの LN2 中での引張試験状況

液体窒素中での引張試験完了後に、常温における三心ケーブルコア圧縮試験を実施した。試験装置の概略図および外観写真を図 2.1.5-6 および図 2.1.5-7 に示す。5 m 長の三心コアサンプルの中間に約 4 m の SUS コルゲートパイプ（内径 95 mm）が配置し、SUS コルゲートは曲がり等の動きがないように固定されている。なお、SUS コルゲートから露出している三心コア部分についてはバインド処理を行い、圧縮により当該部分で三心ケーブルコアが拡がらないように処置を行った。試験時の圧縮量は、引張試験時と同様に 1.5 mm ピッチのボルトナットの回転数により管理した。

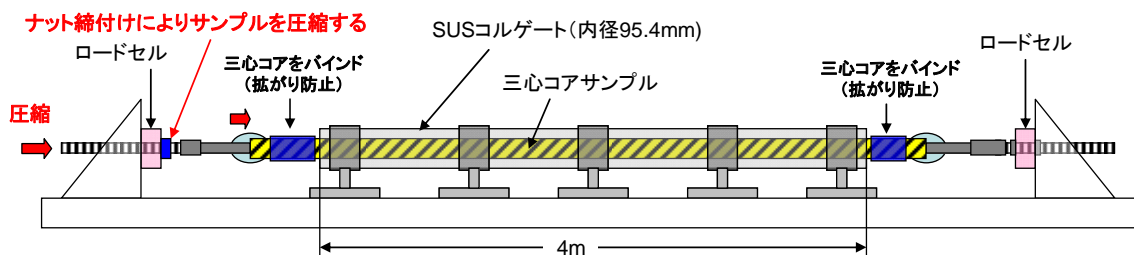


図 2.1.5-6 三心コア圧縮試験装置の概略図



図 2.1.5-7 三心コア圧縮試験装置の概観写真

液体窒素中における引っ張り試験および常温における圧縮試験における I_c 測定結果を図 2.1.5-8 にまとめる。液体窒素中においては最大 0.6 %の引っ張り歪み、常温においては最大 0.3 %の圧縮歪みを三心コアサンプルに印加したが、導体およびシールド I_c の低下は見られず健全であることが確認された。

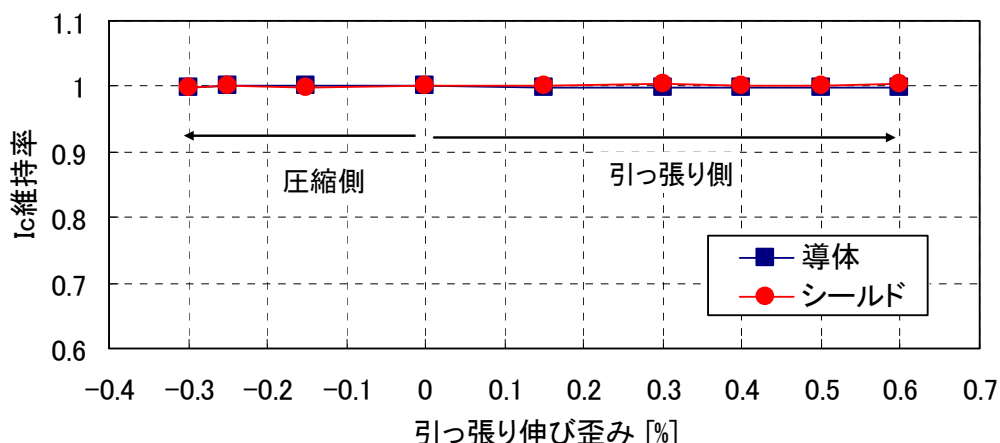


図 2.1.5-8 三心コアサンプルの熱機械試験結果

また、これら熱機械試験の結果、0.3%熱収縮に相当する引張力は約 3t、弛みを形成する圧縮力は 0.5t 発生することが確認された。上記のように、これら応力が印加されてもケーブルコアにダメージがないことを確認することができた。

なお、本測定サンプルで確認した発生応力は短尺・直線状態での値であり、実際の長尺ケーブルでは、曲がり、オフセットなどが存在することから、実際にケーブルに印加される応力は、これら応力よりも小さくなると予想される。

(2) ケーブル要求スペックと設計

ケーブルに要求されるスペック及び目標を表 2.1.5-3 にまとめる。各種要素試験により決定した検証用ケーブル向け超電導線材の仕様及びケーブル設計を表 2.1.5-4 及び表 2.1.5-5 にまとめる。ケーブルは、2.1.1 節で記述している高臨界電流型の TypeHT 線と、低損失型の TypeACT 線を組み合わせた、導体 4 層、シールド 2 層のハイブリッド構造である。尚、ケーブルコア 3 心のうち、2 心は前述する超電導線を用いた構造であるが、残り 1 心はダミー線（グレードの低い超電導線）を用いており、それぞれ超電導ケーブルコア、ダミーケーブルコアと称す。

主絶縁については、(1) (b) で記述した要素試験において 6 mm 厚の PPLP でも要求仕様を満足することを確認しているが、過去の長期試験の実績(参考文献)を考え、絶縁厚は 7 mm を採用した。

ケーブル外径は、150 mm 管路に適用できるサイズとなっている。

表 2.1.5-3 超電導ケーブルのスペック

項目	仕様
定格電圧	66 kV (サンプル試験：対地 AC90kV-3h、Imp±385 kC/3 回) (現地竣工試験電圧：対地 DC151.8kV-10min)
定格電流 (最大電流)	1.75 kA (2.63kA 1 回線事故対応時)
定格容量	200 MVA
ケーブルタイプ	三心一括型
コア交流損失	1 W/m/ph@2 kArms 以下
短絡電流対応	最大 31.5 kA、2 秒 (送電遮断) もらい事故 10 kA、2 秒 (遮断なし)
外径	150 mm φ 管路へ布設可能

表 2.1.5-4 超電導線材の仕様

タイプ	仕様
TypeHT 線	幅 4.5mm、厚み 0.35mm、50μm 厚銅合金両面補強 臨界電流 150A 以上
TypeACT 線	幅 2.7mm、厚み 0.33mm、50μm 厚銅合金両面補強 臨界電流 55A 以上

表 2.1.5-5 超電導ケーブルの設計

大項目	パーツ	構造・条件	外径(mm)
単心 コア (超電 導ケ ブル コア)	フォーマ	材料：0.8mm 絶縁銅線 構造：分割集合撚り線導体 銅断面積：140mm ²	18
	超電導導体	1 層目：TypeHT 線、11 本 2 層目：TypeHT 線、12 本 3 層目：TypeACT 線、21 本 4 層目：TypeACT 線、21 本 相間絶縁あり	22
	絶縁層	内部半導電層 PPLP 絶縁層 7mm 厚 外部半導電層	36
	超電導シールド	1 層目：TypeHT 線、22 本 2 層目：TypeHT 線、23 本 相間絶縁あり	45
	銅シールド	材料：銅テープ 構造：3 層構造 (相間絶縁あり) 銅断面積：80mm ²	
	保護層	クラフト紙、布テープ	
三心 コア	三心コア	緩みなし三心集合、 中心に計測線収納	
断熱管	内管	ステンレスコルゲート管	137
	真空断熱層	他相断熱材、スペーサ	
	外管	ステンレスコルゲート管	
防食層	防食層	PVC	144

(3) ケーブル製造

各種要素試験により決定した上記設計及びケーブル試作で確認した製造条件により、30 m 検証用ケーブルの製造を実施した。図 2.1.5-9 に製造概略工程と製造時の状況写真を示す。検証用ケーブルは、臨界電流特性が良好な超電導線を用いた絶縁厚 7 mm の超電導ケーブルコア 2 本（赤相、青相）と、低臨界電流線材を用いた絶縁厚 6 mm のダミーコア 1 本（白相）で構成される。なお、超電導ケーブルコアとダミーケーブルコアは絶縁厚が異なるが、保護層の厚みを調節することで、3 コアともに同じ外径に仕上げている。

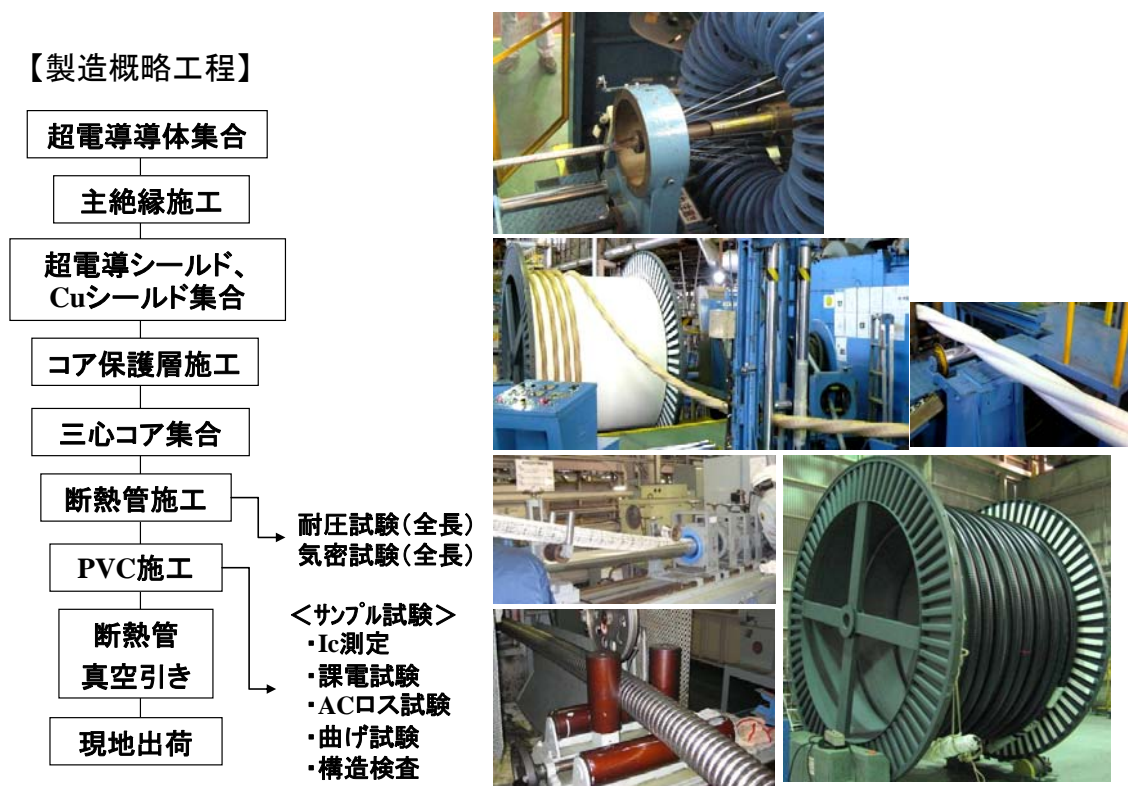


図 2.1.5-9 検証用ケーブル製造の概略工程と製造時の写真

(4) ケーブル出荷試験

30m 検証ケーブルの全長及び切り出しサンプルを用いた出荷試験結果を表 2.1.5-6 にまとめる。

臨界電流値については、超電導ケーブルコアの導体とシールドについて測定を行った。測定時の I-V カーブを図 2.1.5-10 に示す。試験結果の値は、導体が約 6000 A、シールドは約 7000 A であり、それぞれ使用した超電導線の特徴と本数から想定される値とよく一致する結果が得られた。

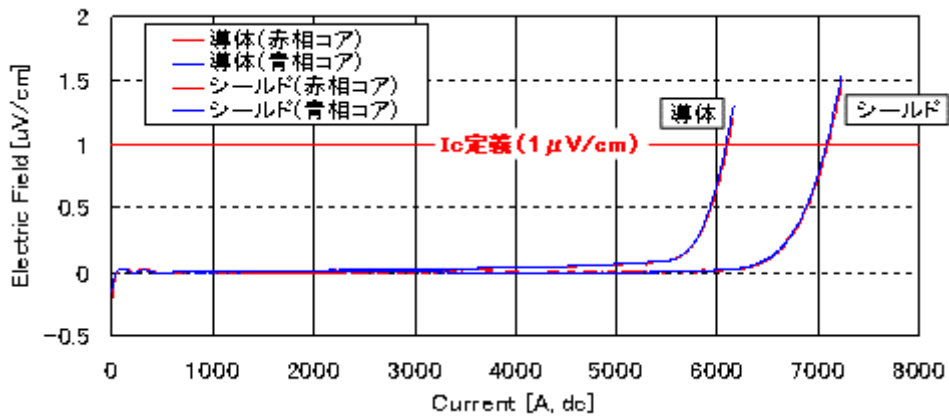


図 2. 1. 5-10 30m ケーブル臨界電流測定結果 (サンプル試験)

交流損失についても、2 m 級のケーブルコアにて、電気的手法（4 端子法）にて損失の測定を行った。その結果を図 2. 1. 5-11 に示す。測定結果は、0.83 W/m/ph @ 2 kA となり、設計通りの値が得られている。

【ACロス測定結果】

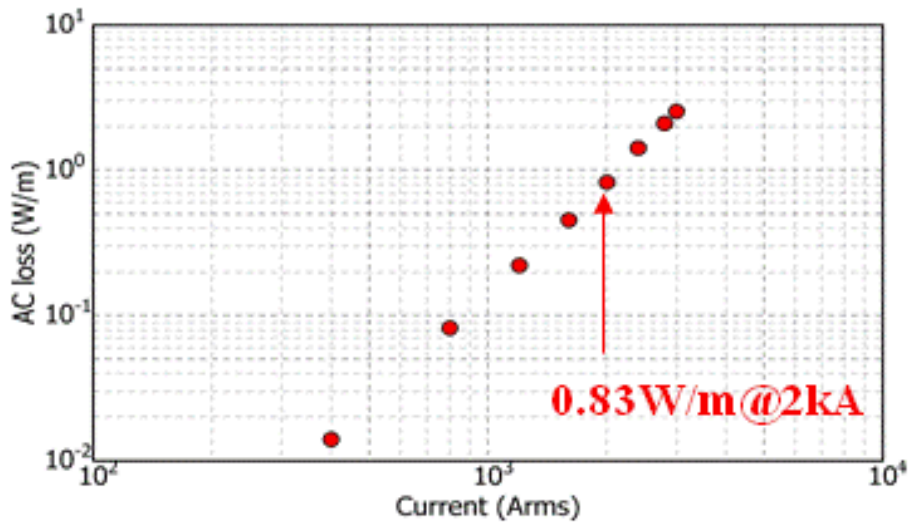


図 2. 1. 5-11 30m ケーブルの交流損失測定結果 (サンプル試験)

曲げ試験時の写真を図 2. 1. 2-5-12 に示す。曲げ試験は曲げ直径 ϕ 2400 mm (16.7 D 相当) に対する 2 往復の曲げを実施した。試験方法は、図に示すように、サンプルの片端を固定治具により固定し、左右 2 枚の ϕ 2400 mm の円盤にコルゲート管を沿わせた。曲げ試験後の臨界電流測定を実施した結果、臨界電流特性の劣化は認め

られず良好な結果が得られた。

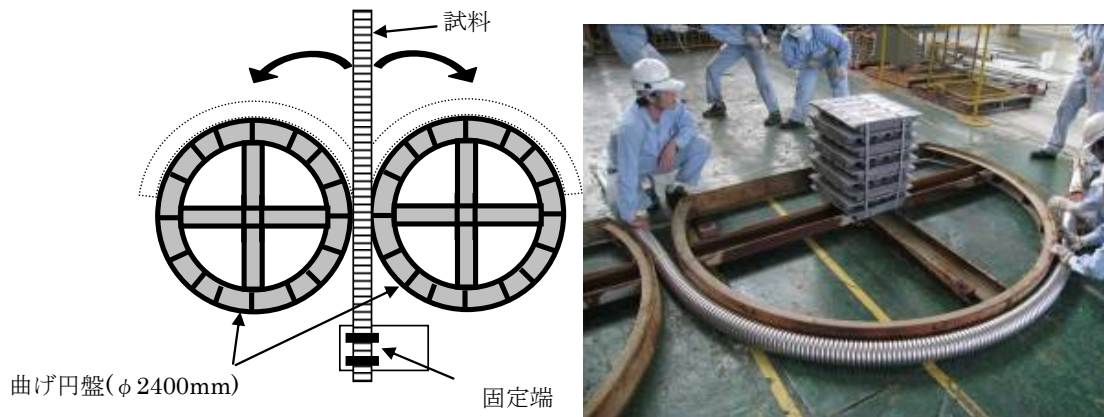


図 2.1.5-12 曲げ試験の概要及び試験時の写真

全ての出荷試験において良好な結果が得られ、製造したケーブルは要求仕様を満足することを確認した。表 2.1.5-6 に検証ケーブルの出荷試験結果をまとめる。

表 2.1.5-6 出荷試験結果

項目 仕様及び設計値	仕様及び設計値	サンプル	結果
線材	臨界電流 TypeHT 150A 以上 TypeACT 55A 以上	全数	要求臨界電流仕様を満足
ケーブル	構造・寸法	表 2.5.1-3 参照	1m サンプル 設計値と同等であることを確認
	耐圧力試験	試験圧力 0.75MPa (設計圧力 0.6MPa)	全長 0.75MPa-10min 保持で圧力低下なし
	曲げ試験	18D 相当曲げでダメージなきこと	6m サンプル 直径 2.4m (16.7D) の 2 サイクル曲 げで劣化なし 絶縁部他に異常なし
	真空度	5×10^{-3} Torr 以下	全長 出荷前及び布設後も 5×10^{-3} Torr 以下
コア	臨界電流	6m サンプル	導体 (赤相) : 6.1kA 導体 (青相) : 6.1kA シールド ¥ (赤相) : 7.1kA シールド (青相) : 7.1kA 使用線材臨界電流の総和とほぼ一致
	交流損失	1W/m/ph@2kArms 以下	2m サンプル 0.83W/m/ph@2kArms
	インダクタ ンス	設計値 0.12µH/m	2m サンプル 0.12 µH/m
	課電特性	AC : 90kV-3h Imp : ±385kV/3 回	ジョイントを 含む 6m サ ンプル 全ての課電試験をクリア (6mm 厚絶縁コアもクリア)

2.1.5-3 中間接続部と終端接続部の組立施工

検証用ケーブルと 2.1.3 節、2.1.4 節で検討した中間接続部及び終端接続部を組立、施工手順、管理内容について確認した。それぞれの施工内容について記述する。

(1) 中間接続部の組立施工

30m 検証ケーブルと中間接続部との組立施工を行った。組立は、開発目標である 7m マンホール内での組立を模擬するために、長さ 7 m×幅 2 m×高さ 2 m の囲いを作り、これを模擬マンホールと見立て、この中で組立を行った。中間接続部の施工手順と管理のポイントを表 2.5.1-7 に、組立中の主な工程の写真を図 2.1.5-13 に示す。

表 2.1.5-7 中間接続部の施工手順と管理ポイント

No	ブロック工程	主な施工内容	管理ポイント
1	組立準備	作業室スペース確認、レール確認	
2	ケーブル端部処理	真空槽等の端部部品挿入	
		切断位置確認～コア切断	切断位置
3	ケーブル導体接続	導体接続スリーブの圧着	圧縮力
		導体ブリッジ HTS 線材取り付け	超電導線取扱い
		加熱（半田モールド）	温度管理
4	補強絶縁紙巻き	補強絶縁紙巻き	形状
5	電界シールド処理	ケーブル部遮蔽処理	
6	ケーブルシールド接続	シールドブリッジ取り付け	超電導線取扱
		加熱（半田モールド）	温度管理
		ケーブル銅ダミー層接続処理	
7	計測線処理	光ファイバ接続、温度計取り付け	位置確認
8	窒素槽組立	窒素槽組立、溶接	溶接管理
		窒素槽気密試験	気密性
9	真空槽組立	真空断熱材取付	
		真空槽組立、溶接	溶接管理
10	容器ベーキング	加熱・真空引き	真空度
11	防食処理	防食巻き付け処理	



(a) 導体接続スリーブ



(b) 絶縁補強紙巻き



(c) 電界遮蔽処理



(d) 窒素槽組立



(e) 防食層施工後

図 2.1.5-13 中間接続部組立施工写真

(2) 終端接続部の組立

30m ケーブル検証試験用システムの終端接続部の組立についての概略工程と管理項目を表 2.1.5-8 に、組立中の主な写真を図 2.1.5-14 に示す。

また、完成した 30m ケーブルシステムを図 2.1.5-15 に示す。

表 2.1.5-8 概略工程

No.	ブロック工程	主な施工内容	管理ポイント
1	事前準備	作業用テント組立、レール布設	
2	ケーブル部組立準備	容器・部品の挿入	部品の順番
3	三相分岐処理	三心コア捩り戻し、相合わせ	相の確認
4	ケーブルコア切断	位置確認、ケーブルコア切断	切断位置
5	シールド層処理	保護層、Cu シールド層の除去	
		超電導シールド層処理	超電導線取扱い
6	補強絶縁紙巻き	補強絶縁紙巻き	形状
		遮蔽処理	
7	導体処理	導体層の処理	
		導体接続金具の圧縮・取り付け	圧縮力
		半田流し込み	挿入半田量(g)
8	シールド接続金具の接続	位置固定	
		半田流し込み	挿入半田量 (g)
9	導入部組立	サポート金具の取り付け	
10	ケーブル部・容器組立	容器の据付、ケーブル部との勘合	
11	容器内組立、配線	三相短絡	
		電流リード、高圧シールド組立	
		計測線、接地線取出し	健全性（導通）
12	液体窒素容器の組立	液体窒素容器の組立・溶接	溶接管理
13	液体窒素容器耐圧試験	液体窒素容器の気密試験	気密性
14	真空容器の組立	真空断熱材の取り付け	
		真空容器の組み立て・溶接	溶接管理
15	容器ベーキング	加熱・真空引き	真空度



(a) 3 芯コアオフセット成型



(b) 補強絶縁紙巻き



(c) 容器部分の組立



(d) 分岐部真空層組立



(e) 組立完了

図 2.1.5-14 終端接続部の施工写真



(a) 30m 検証システム全景



(b) ジョイント外観



(c) 端末外観

図 2.1.5-15 検証用 30m ケーブルシステム

2.1.5-4 冷却システムの構築と単体性能評価

(1) 目的

検証用 30m 長高温超電導ケーブルシステム特性確認試験用として本冷却システムを構築する。本システムを用いて検証試験を通じ、温度、圧力および流量の制御特性の確認を行うと共に、運転時の実異常モード、模擬異常などを検証し、実証用冷却システム製作に向けての課題等を抽出する。

(2) 冷却システム

検証用冷却システムで採用する冷却方式は図 2.1.5-16 に示すように、冷凍機側と超電導ケーブル側の液体窒素パスが同一であり、冷凍機で冷却された液体窒素が直接超電導ケーブルシステムに送られる方式である。これは東京電力・住友電工が電力中央研究所にて実施した「高温超電導ケーブルシステムの成立性検証に関する研究」における 100 m 長超電導ケーブルシステム、超電導発電関連機器・材料技術研究組合 (Super-GM) が実施した「交流超電導電力機器基盤技術の研究」プロジェクトにおける 500 m 長超電導ケーブルシステムの冷却に採用された方式である。これらの液体窒素循環冷却での採用実績に加え、超電導ケーブル入口温度の応答性が良いなどの特徴を有する。表 2.1.5-9 に今回製作した液体窒素循環冷却システムの主な仕様を、製作した冷却システムを図 2.1.5-17 に示す。

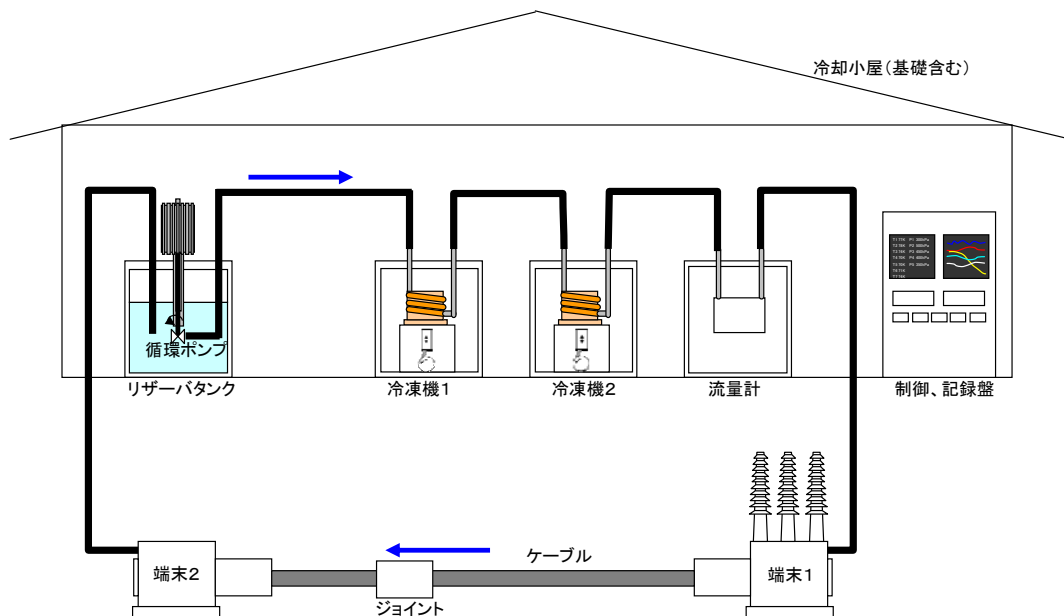


図 2.1.5-16 検証用冷却システムレイアウト図

表 2.1.5-9 検証用液体窒素循環冷却システム主な仕様

項目	仕様
液体窒素温度	67 ～ 77 K
液体窒素圧力	0.2 ～ 0.5 MPaG
液体窒素流量	～ 40 L/min
冷凍機	アイシン精機製スターリング方式 予想冷凍能力 1 kW @77 K または 0.8 kW @67 K 冷凍機1: AC 運転(出力 100 %一定) 冷凍機2: インバータ制御運転(出力 60-100 %可変)
循環ポンプ	バーバーニコルス社製 最大揚程約 180 kPa ×1 台
制御・計測盤	冷凍機および循環ポンプの運転制御。温度・圧力および流量調整機能およびシステムデータ記録機能。
法規対応	高圧ガス保安法 冷凍保安規則(第1種製造設備)



図 2.1.5-17 検証ケーブル用冷却システム

(3) 計測システム

計測システムの目的は、超電導ケーブルシステムの運転を行う際に各部温度、圧力、流量などの測定・監視を実施しシステムの性能を評価すること、およびシステムの運転を常時自動/手動で監視し、データや機器運転の異常が認められた際には速やかに警報の発令・連絡を実施し、システムを安全に運用管理することである。計測システムについては表 2.1.5-10、図 2.1.5-18 に示す超電導ケーブルシステムの物理量を観測できるようにした。流量、温度情報は主に各部の熱侵入特性や通電時の交流損失評価のためのデータとして用いられる。その他圧力、液面情報などはケーブルシステムの運転が定格の運転条件に見合っていることの確認および、その条件から逸脱した際のシステム状況、警報の条件判断などに用いられる。表

2.1.5-11 には主な計測用センサの仕様を示す。

監視機能に対しては、ネットワーク対応可能とし遠隔データ監視、警報受信が行えること、モジュールコンポーネントの採用によりシステムの増設、故障時等の際の交換が容易であること、実際に電力（変電、送配電）などで使用されている通信手段とのマッチングがあることなどを考慮し、PLC をベースにした監視ハードウェア、ソフトウェアの構築を実施することとした。

表 2.1.5-10 計測項目

記号	測定項目	記号	測定項目	記号	測定項目
Tr 1	リザーバ温度	Pr 1	リザーバ圧力	LM	リザーバ液面
Th	加圧ヒータ温度	Pr 2	LN2ポンプ出口圧力	Q	流量
Tr 2	冷凍機1入口温度	Pr 3	ケーブルシステム	LC1	A端末軸荷重①
Tc 1F	冷凍機1Front温度	Pr4	ケーブルシステム	LC2	A端末軸荷重②
Tc 1R	冷凍機1Rear温度	Ph	加圧圧力	LC3	B端末軸荷重①
Tr 3	冷凍機1出口温度	Hr	圧力制御用ヒータ出	LC4	B端末軸荷重②
Tc 2F	冷凍機2Front温度	Ps 1	A端末圧力	SUT	光ファイバ温度センサ
Tc 2R	冷凍機2Rear温度	Ps 2	B端末圧力	CC1	A端末液面
Tr 4	冷凍機2出口温度	Vt1	A端末真空度	CC2	
Tr 5	ケーブルシステム	Vc1	ケーブル1真空度	CC3	
Tr 6	ケーブルシステム	Vj	ジョイント真空度	CC4	
Ts 1	A端末内部温度①	Vc2	ケーブル2真空度	CC5	
Ts 2	A端末内部温度②	Vt2	B端末真空度	CC6	
Ts 3	ケーブル1入口温度	Is1	シールド電流 U	CC7	
Ts 3'	ケーブル1入口温度	Is2	シールド電流 V	CC8	
Ts 4	ケーブル1出口温度	Is3	シールド電流 W	CC9	
Ts 5	ケーブル2入口温度			CC10	
Ts 6	ケーブル2出口温度			CC11	B端末液面
Ts 6'	ケーブル2出口温度			CC12	
To	外気温			CC13	

表 2.1.5-11 主なセンサの選定

センサの種類	仕様		精度
温度センサ	Pt(白金測温抵抗)	14-500K	±0.02K
圧力センサ	増幅器内蔵歪ゲージ式	0~1MPa ABS	±2%
ロードセル	歪みゲージ式	+/- 10ton	±0.1% RO

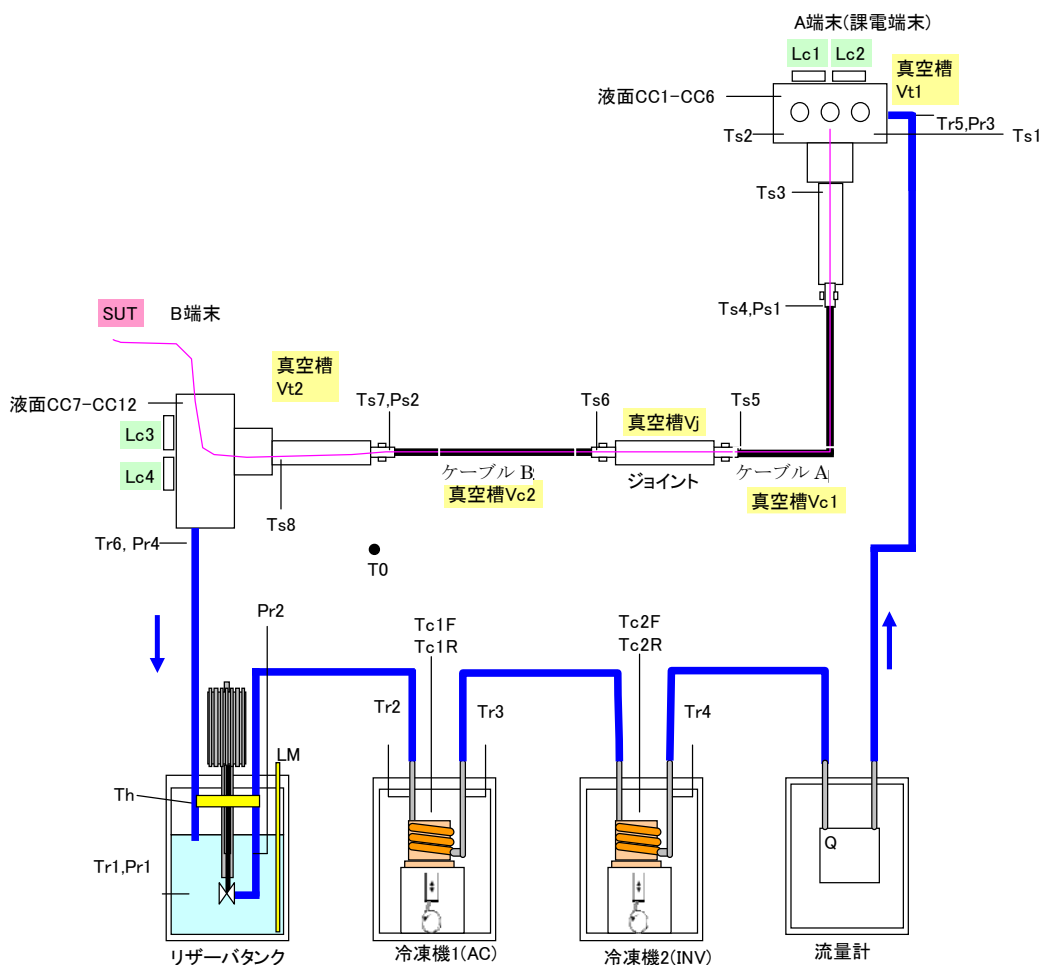


図 2.1.5-18 超電導ケーブルシステム計測データ配置

(4) 検証用冷却システム単体性能試験

仕様検討、設計、製作した検証用冷却システムに対し表 2.1.5-12 に示す内容の単体試運転を実施した。この結果、初期冷却特性、冷却能力特性試験などを通じて、設計通りのケーブル冷却能力を得ることができ、その他温度、圧力等の制御性も確認できた。以下で主な試験結果について報告する。

表 2.1.5-12 単体冷却試運転 試験項目一覧

試験内容		試験 No.	目的、概要	試験条件(例)	確認項目
初期冷却	過渡冷却特性	1	冷却システム単体の初期冷却特性、循環特性評価	タンク液面上限まで貯液	冷却時間、循環安定時間
基本性能試験	冷凍能力	3	冷凍機単体冷凍能力および冷却システムの冷凍能力を測定。B:実証システムの設計に反映。	【3-1】 ・タンク圧力= 0.2 MPaG ・流量= 40 L/min ・冷凍機1= On、冷凍機2= On(100%)	・冷凍機最大能力 ・冷凍機Off時の冷凍機熱負荷 ・インバータによる冷凍能力変化
	冷却システム熱損失	4	冷却システムの熱損失を算定。B:実証システムの冷却システム設計に反映。	・ケーブル入口温度= 67.77 K ・タンク圧力= 0.2 MPaG ・流量= 20.40 L/min ・冷凍機1= Off、冷凍機2= On(60%)	全体熱負荷からケーブルシステム熱負荷を差し引いて評価する。予想約400W
	圧力損失	6	ポンプの仕様(揚程等)が仕様通りであるか確認。	・ケーブル入口温度= 67.77 K ・タンク圧力= 0.2 MPaG ・流量= 20-40 L/min, 5 L/min step	流量、揚程を測定してポンプ性能、インバータ周波数との関係を確認する。
	制御特性	【熱負荷変動特性】 リザーバタンクヒータパワーを変化させた場合での温度応答性確認し、B:実証システムでの冷凍機制御設計に生かす。	8	・ケーブル入口初期温度= 67 K ・タンク圧力= 0.2 MPaG ・流量= 40 L/min ・ヒータ出力= 1200 - 1600 W	負荷変動時における温度の過渡応答性を確認。
			9	・ケーブル入口初期温度= 67 K ・タンク圧力= 0.2 MPaG ・流量= 40 L/min ・ヒータ出力= 400 - 600 W	温度の応答性を確認。
		【冷凍機インバータ制御特性】 冷凍機2のインバータ周波数を変化させた場合の温度応答性を確認。	10	・リザーバタンクヒータ= 1600 W ・初期温度Tr5= 77 K ・圧力Pr1= 0.2 MPaG ・流量= 40 L/min	温度の応答性を確認。
【冷凍機On/Off特性】 冷凍機1のOn/Offを行った場合での温度応答性、安定性を確認。B:実証で採用予定のON/OFF制御特性の把握を行う。	11	・初期ヒータ= 600W ・初期温度Tr5= 77 K ・圧力Pr1= 0.2 MPaG ・流量= 40 L/min	加圧用ヒータのPID制御特性調査。 液面、液温、制御圧力における制御性、安定性の確認。		
			B:実証システムで採用を予定している加圧用ヒータによる圧力制御特性を評価。実証システムでの設計に反映。	・流量 40L/min ・液面 上限近傍、下限近傍 ・Tr5 67K,77K ・圧力Pr1= 0.2, 0.3 MPaG	

(a) 冷却能力確認試験

冷凍機、冷却システムの冷凍能力を評価した。冷凍能力は、リザーバタンクに設けたヒータを用いて、液体窒素の温度が一定となるヒータの熱量と、リザーバタンク、配管への侵入熱等から求めた。冷凍機1の冷凍能力は、約-920 W@77 K、約-780 W@67 K、冷凍機2の冷凍能力は、約-1030 W@77 K、約-870 W@67 Kと実験により確認された。冷凍機1, 2の運転ではリザーバタンクヒータとのバランスから、約 1230 W@67 K、1550 W@77 Kの冷却能力を確認し、それぞれ設計値(1200 W, 1600 W)をほぼ満足した。以上より冷却システム冷却能力については液体窒素温度 67 K および 77 K いずれに対しても設計値にたいしてほぼ遜色ないことが確認できた。

(b) ポンプ能力確認試験

ポンプの揚程特性が仕様通りであることを確認した。図 2.1.5-19 の通り流量 40 L/min でのポンプ揚程は約 170 kPa となり、単体性能通りであることが確認できた。また図 2.1.5-20 の通り流量はインバータ回転数にほぼ比例することも確認された。

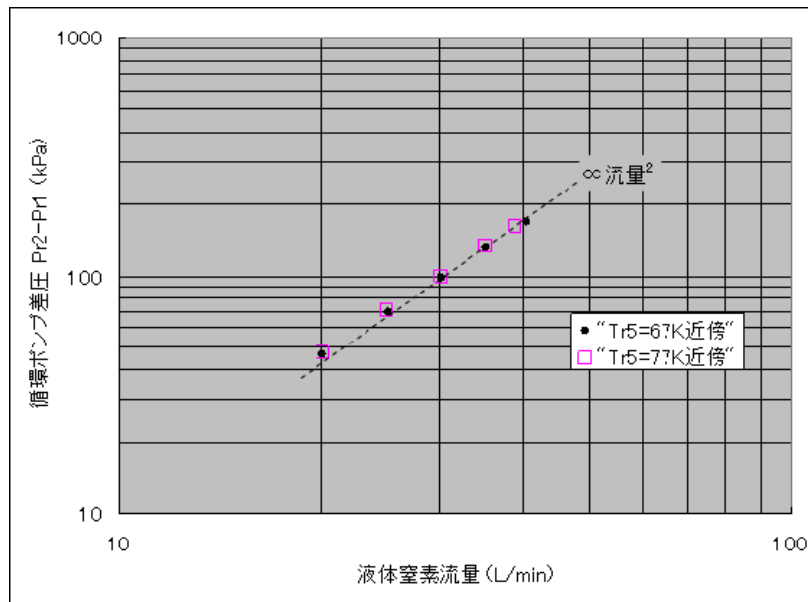


図 2.1.5-19 揚程確認試験
(液体窒素流量とポンプ揚程 (差圧) の関係)

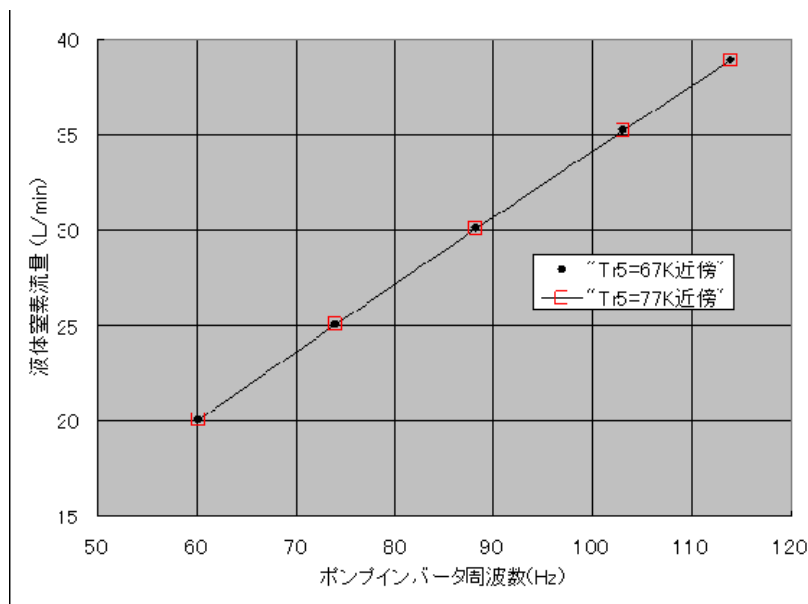


図 2.1.5-20 揚程確認試験
(ポンプインバータ周波数と液体窒素循環流量の関係)

(c) 温度過渡応答特性

試験条件は表 2.1.5-13 の通りである。冷却システムをある安定した温度、流量および圧力運転状態に保持した後、ケーブル負荷の模擬として使用しているヒータのパワーをステップ状に変化させ、単体冷却システムにおける液体窒素の温度変化並びに流量、圧力の安定性を観測した。例えば冷凍機 2 台 100 % 運転で 67 ⇔ 77 K となるようヒータパワーを 400 W 増減させた (1200 ⇔ 1600 W) 場合、温度

が安定するまでにはおおよそ 10 時間近くを要することがわかった。試験結果を図 2.1.5-21、22 に示す。これは系の液体窒素量および物性から推定される過渡応答特性とよく一致する。この結果により単体冷却試験での液体窒素量における負荷変動に対する過渡特性がわかり、これを利用して実証システムにおける負荷変動時の温度変化を予想し、冷凍機構成、運転方法などの設計に生かすこととした。

表 2.1.5-13 温度過渡応答特性試験条件

	試験8-①	試験8-②
冷凍機1、2動作	冷凍機1:ON、冷凍機2:ON (100%)	
流量(L/min)	40	
変化前ヒータ (W)	約 1200	約 1600
Tr5 安定温度(K)	67.3	77.3
変化後ヒータ(W)	約 1600	約 1200
Tr5 予想到達温度(K)	77.0	67.0

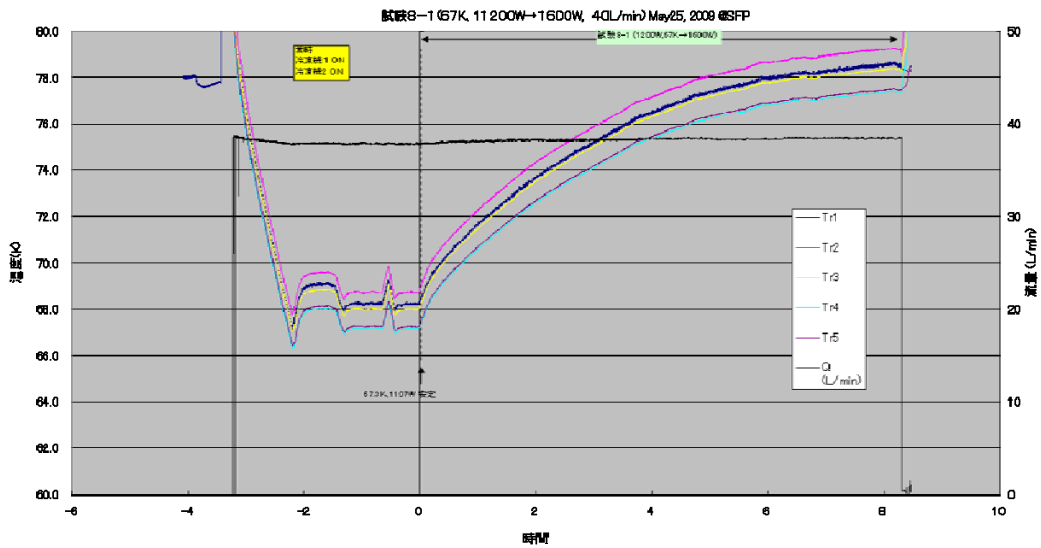


図 2.1.5-21 温度過渡応答試験
(67 K, 40 L/min ヒータ約 1200 W 安定 → ヒータ約 1600 W とした場合)

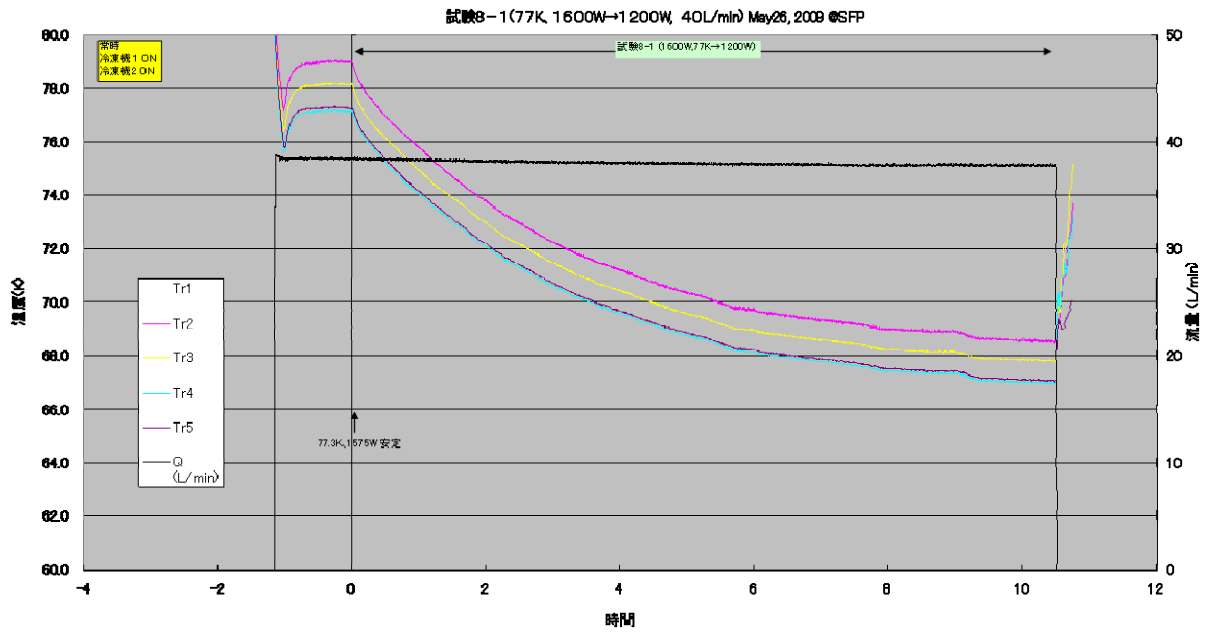


図 2.1.5-22 温度過渡応答試験

(77 K, 40 L/min ヒータ約 1600 W 安定 → ヒータ約 1200 W とした時の過渡応答)

また図 2.1.5-21、2.1.5-22 の結果より、冷却システム出口温度 (Tr5) の変化について図 2.5.1-23 にまとめた。両者の和の平均を取るとほぼ一定となっており、高温→低温および低温→高温での過渡応答に違いが見られないことを表している。

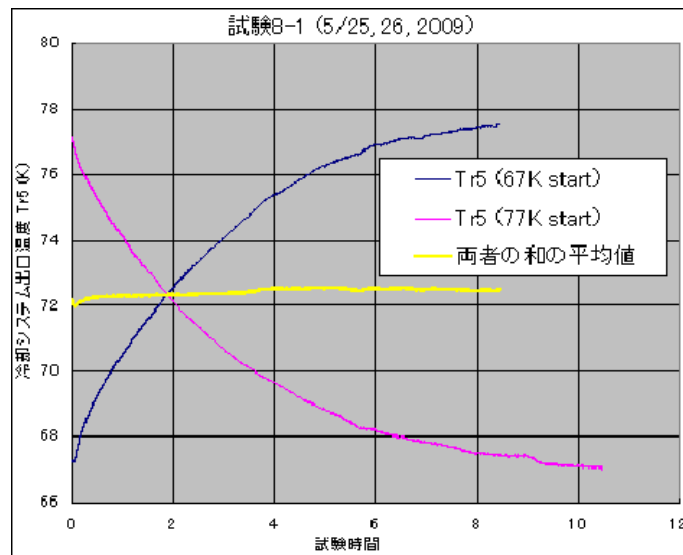


図 2.1.5-23 温度過渡応答試験 過渡応答特性 (低温↔高温での比較)

2.1.5-5 検証試験

構築した 30 m 検証用システムを冷却し、電気試験、機械試験、熱損失測定等、各種試験を実施する。表 2.1.5-14 に検証試験での試験内容を示す。

表 2.1.5-14 30m 検証試験内容

試験名	時期	試験項目	
①定格確認試験	H21/7~9	電気特性試験	Ic 測定 (導体部)、シールド誘導電流計測、C・tan δ 特性確認、定格課通電
		機械特性試験	冷却時の張力測定 ジョイント部の動き確認 (X 線)
		熱的特性試験	AC ロス測定 (2kA) 侵入熱測定
		長期課通電試験	対地 51kV 連続、通電 2kA (8hon, 16hoff)、1 カ月
②ヒートサイクル試験	H21/10	ヒートサイクル試験	一旦昇温、再度冷却を行い、上記の電氣的、機械的、熱的特性に変化がないことを確認する。
③限界性能確認試験	H21/11~H22/4	ヒートサイクル試験	一旦昇温、再度冷却を行い、上記の電氣的、機械的、熱的特性に変化がないことを確認する。
		限界性能試験	過電流通電試験 冷凍機故障模擬試験 短絡電流模擬試験 (~10kA)

(1) 初期冷却

システムの初期冷却は表 2.1.5-15 に示す手順にて実施した。

表 2.1.5-15 初期冷却手順

項目	内容
①窒素ガス置換	ケーブル、ジョイント、端末の窒素槽を窒素ガスに置換する。ここでは、図 2.1.5-1 のシステム構成図に示す A 端末側から窒素ガスを吹き流した。
②低温窒素ガスでの冷却	A 端末側から低温窒素ガスを流し、ケーブルを一方向に徐々に冷却吸する。
③液体窒素冷却	同じく A 端末から液体窒素を注入し、端末の派出弁から液が噴出するまで注入を行う。
④液体窒素循環歩冷却	リザーバタンクの液量が十分になれば、駅の補給をやめ、ポンプを起動し、循環冷却に切り替える。

冷却時のケーブル長手方向の温度分布の時間変化を図 2.1.5-24 に示す。ケーブルは A 端末側から徐々に冷却され、約 44 時間後に液体窒素温度まで冷却された。

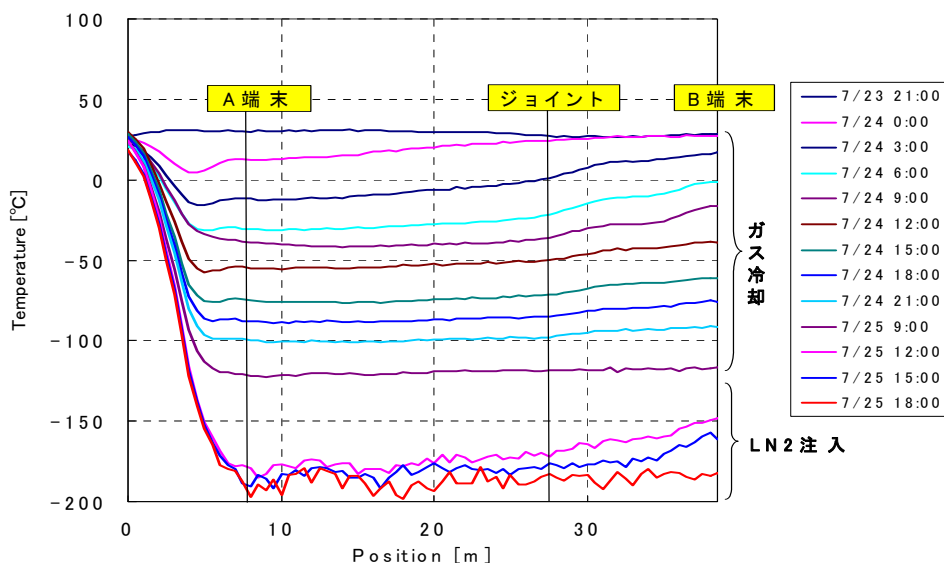


図 2.1.5-24 ケーブルシステム全長温度分布

また、冷却時のケーブルの静電容量を LCR メータにて測定した。静電容量の時間変化を図 2.1.5-25 に示す。ガス冷却が進むにつれ静電容量は減少傾向にあるが、液体窒素貯液後はケーブルコアの絶縁材料である PPLP への液体窒素の含浸が進行し、静電容量が上昇する。含浸が終了し一定となった値は 24.44 nF であり、計算値とよく一致する結果が得られた。

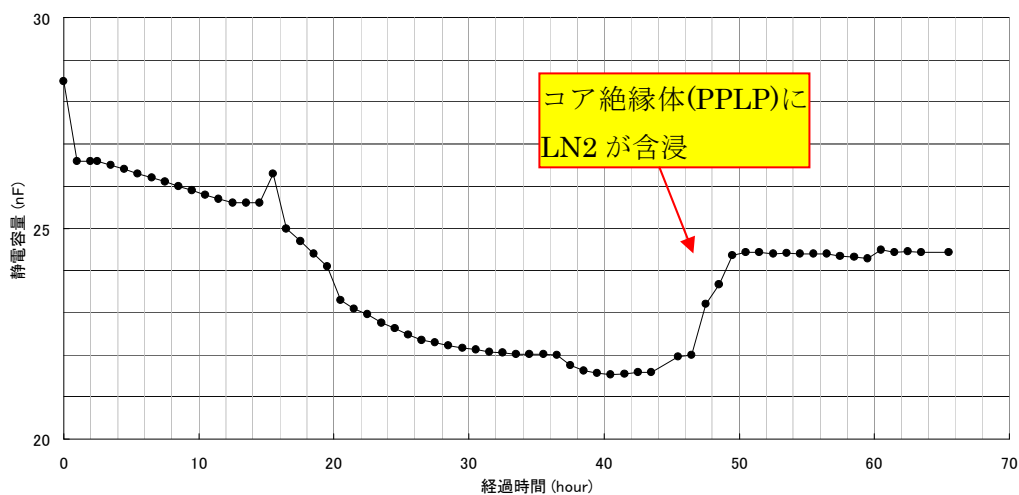


図 2.1.5-25 初期冷却時ケーブル静電容量変化 (LCR メータ計測)

冷却が進展するとケーブルは熱収縮するので、これによりケーブルを固定している端末への荷重が増加する。この荷重をロードセルにて測定を行った結果を図 2.1.5-26 に示す。荷重は、2500~2700 kgf/三相であり、2.1.5-1 節にて測定した

冷却時のケーブル張力とよく一致する結果が得られている。

以上の結果、初期冷却においては、特に異常なく冷却を完了することができた。

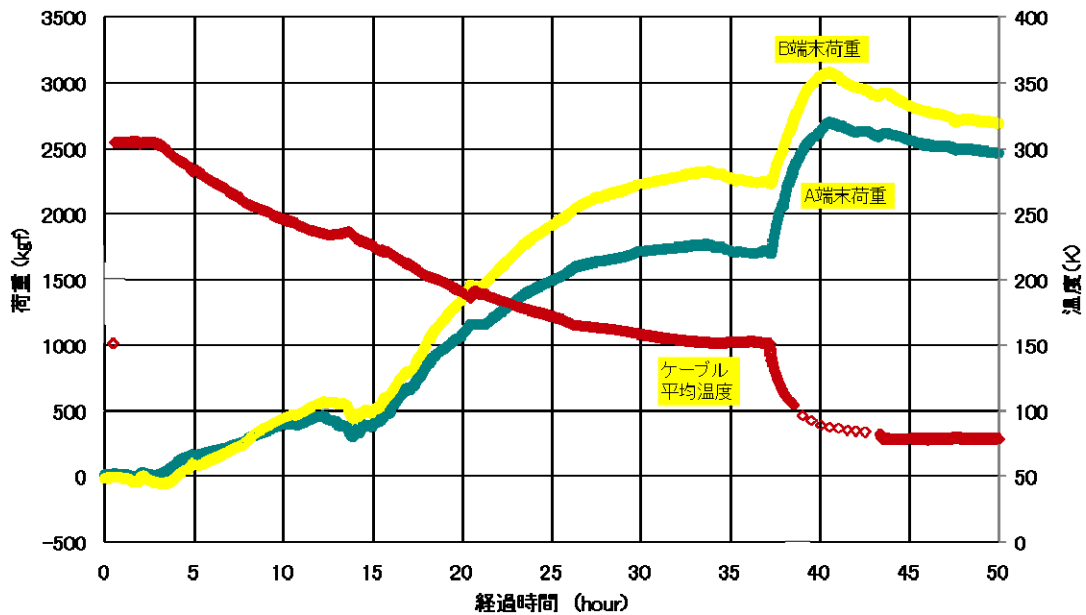


図 2.1.5-26 冷却時の端末荷重測定

(2) 臨界電流 (Ic) 測定

30m 検証システムの初期冷却終了後に、健全性を確認するため、全長の臨界電流 (Ic) 測定を実施した。測定回路の概要を図 2.1.5-27 に示す。測定は、7200 A/10 V の直流電源を用いて、30 m ケーブルの赤相と青相に往復通電を実施した。この際、電圧タップは端末電流リード上部に取り付けており、電流リード及び接続部の常電導抵抗を含んだ電圧を測定した。このため、図 2.1.5-28 に示すように、測定波形から常電導成分を除去した波形から 30 m ケーブルの臨界電流を算出している。なお、臨界電流は $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ の電界にて定義した。

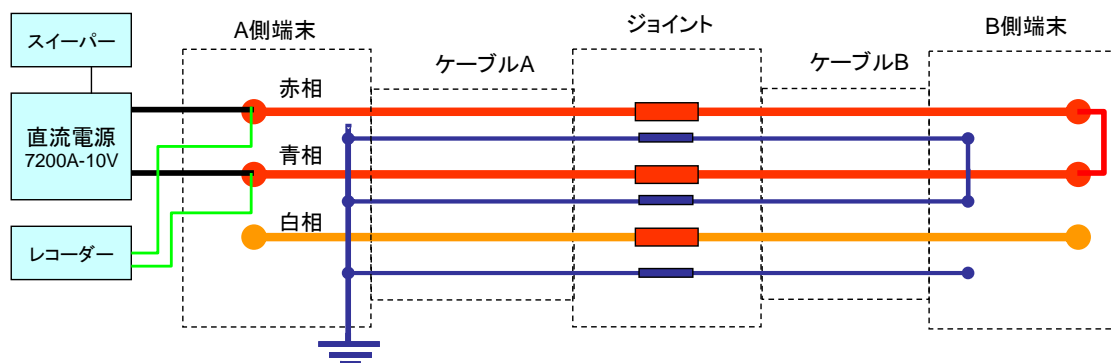


図 2.1.5-27 臨界電流測定回路の概要

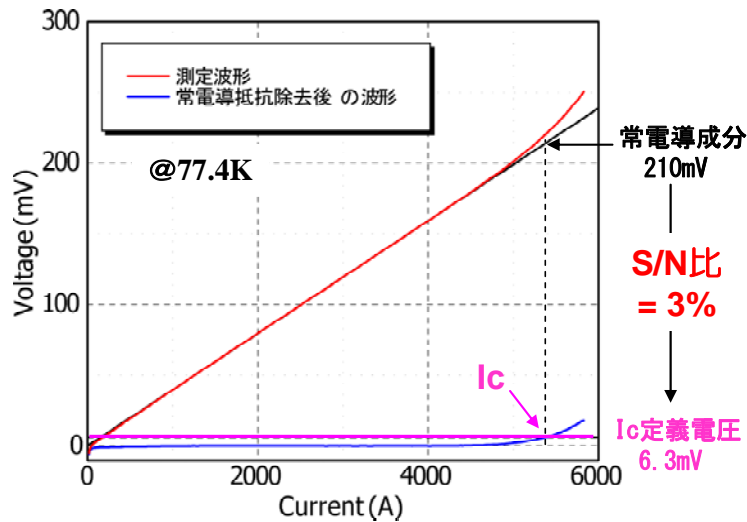


図 2. 1. 5-28 臨界電流測定時の電圧電流波形

I_c 測定結果を表 2. 1. 5-15 にまとめる。77. 4 K における I_c 測定結果は 5. 4 kA であり、出荷試験結果 (6. 1 kA) と比較して 1 割程度低い。本原因としては以下の 2 点が考えられる。

- 1) 図 2. 1. 5-1 に示すように、ケーブル長が 30 m と短いことに起因して、測定電圧にしめる常電導成分が非常に大きく、正確な測定が実施できていない。
- 2) 5 kA 以上の大電流通電を行っているため、2 コア (赤相と青相) の発生磁場による臨界電流低下が発生している。

表 2. 1. 5-16 I_c 測定結果

温度 (K)	臨界電流 (kA)
77. 4	5. 4
74. 3	6. 3
73. 5	6. 6

(3) 通電試験

30m 検証システムの健全性を確認するため、交流通電試験を実施した。測定回路の概要を図 2.1.5-29 に示す。通電は、通電用 CT を用いて、30 m ケーブルの赤相と青相に往復通電を実施した。この際、各層のシールド層にはそれぞれの導体層と逆位相の電流が誘起されるため、シールド電流を三相短絡部に取り付けたロゴスキーコイルを用いて測定した。定格 2kArms 通電時の電流波形を図 2.1.5-30 に示す。シールド層の誘導電流は 1.8 kA 程度（誘導率は 90 %程度）であり、これまでの実績⁸⁾と同等の結果が得られており、30m ケーブルの健全性を確認した。尚、通電は 24 時間連続で行い、異常がないことを確認した。

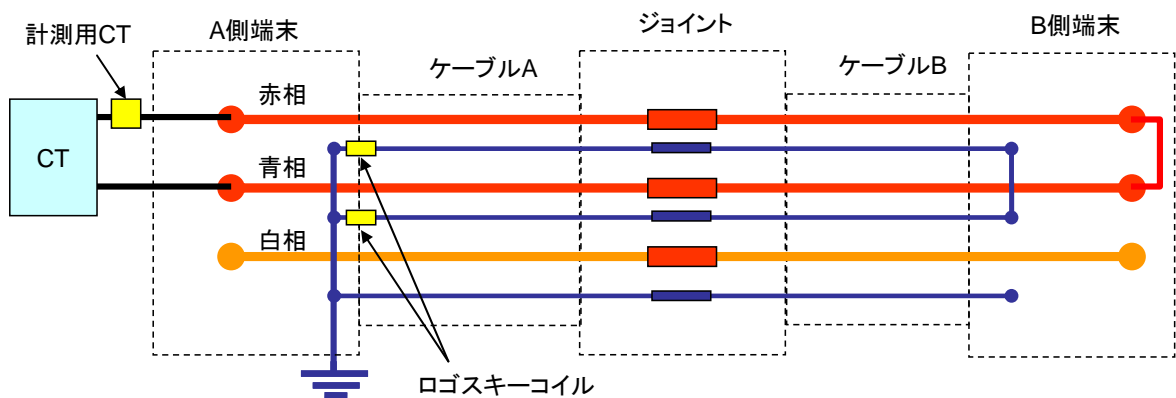


図 2.1.5-29 交流通電試験回路の概要

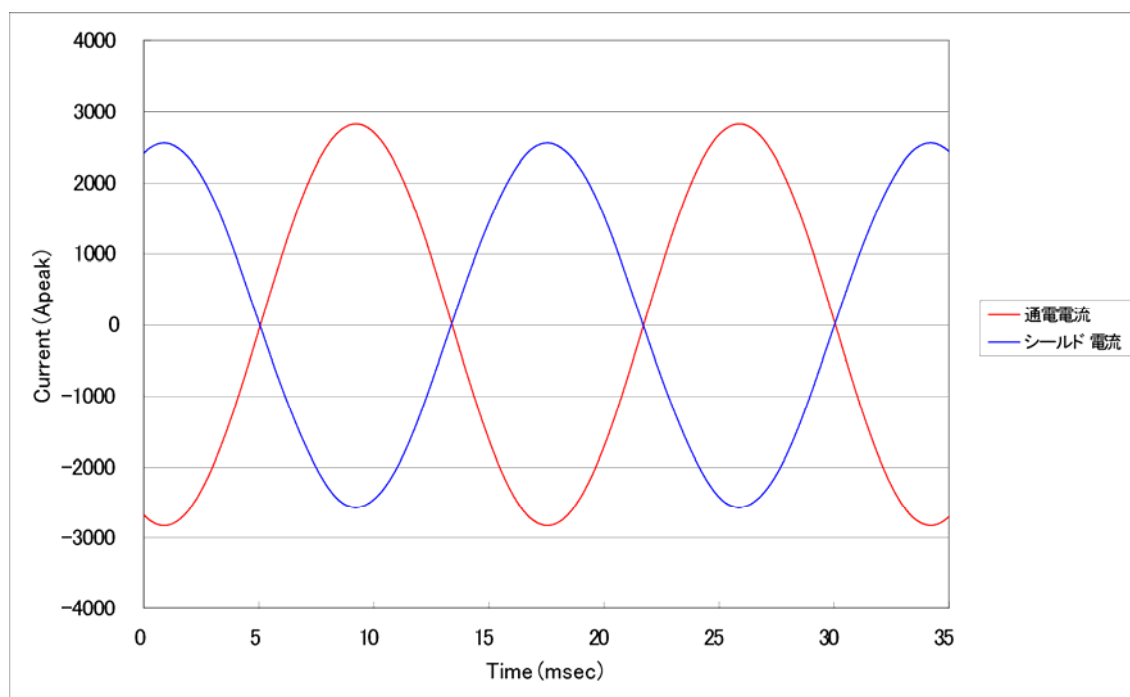


図 2.1.5-30 交流通電時の電流波形

(4) 課電試験

66 kV 級電力ケーブルの耐電圧試験として、以下の2項目を実施した。また、検証用ケーブルの静電容量 C 及び誘電正接 $\tan \delta$ を測定した。

- (1) 現地システム竣工耐圧試験 AC 76 kV (対地) - 10 分間
- (2) 系統最大電圧 (72 kV) 相当課電試験 AC 42 kV (対地) - 8 時間

課電試験結果を表 2.1.5-17 及び図 2.1.5-31 に示す。課電試験の結果、試験項目 (1)、(2) いずれにおいても、感度 100 pC にて PD は検出されなかった。また、C 及び $\tan \delta$ にも大きな変化はなかった。

表 2.1.5-17 検証用 30m ケーブル課電試験結果

項目		条件	結果
(1)	現地システム竣工耐圧試験	AC 76 kV (対地) - 10 分間	【良好】 ・ PD 検出なし (感度 100 pC) ・ C, $\tan \delta$ に大きな変化なし
(2)	系統最大電圧相当課電試験	AC 42 kV (対地) - 8 時間	【良好】 ・ PD 検出なし (感度 100 pC)

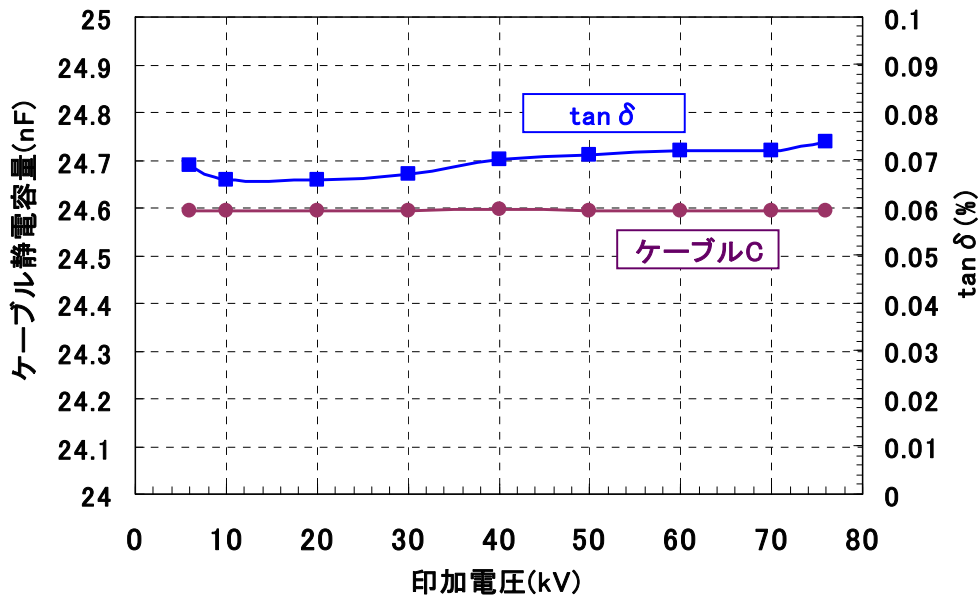


図 2.1.5-31 検証用 30m ケーブルの C 及び $\tan \delta$ 測定結果

(5) 定格課通電および長期課通電試験結果

30m 検証試験用超電導ケーブルシステムが 30 年にわたり定格課通電を行うことが可能かを検証した。試験期間をスケジュールの関係から 30 日間としたため、試験条件は、ケーブル寿命 30 年に相当する対地間定格電圧 51 kVrms を 24 時間連続で課電し、同時に定格通電電流 2kArms を 8 時間 On と 16 時間 off を繰り返し実施した。

試験回路を図 2.1.5-32 に示す。冷却システムの運転条件は、放電防止のためケーブル部最低圧力を 0.2 MPaG、LN2 温度はケーブル部出口温度を約 77 K、LN2 流量は 40 L/min で管理した。

試験期間の 30 日間、問題なく課通電を実施することが出来た。試験結果を図 2.1.5-33 に示す。試験後に実施した部分放電測定において、部分放電は検知されず良好であった。

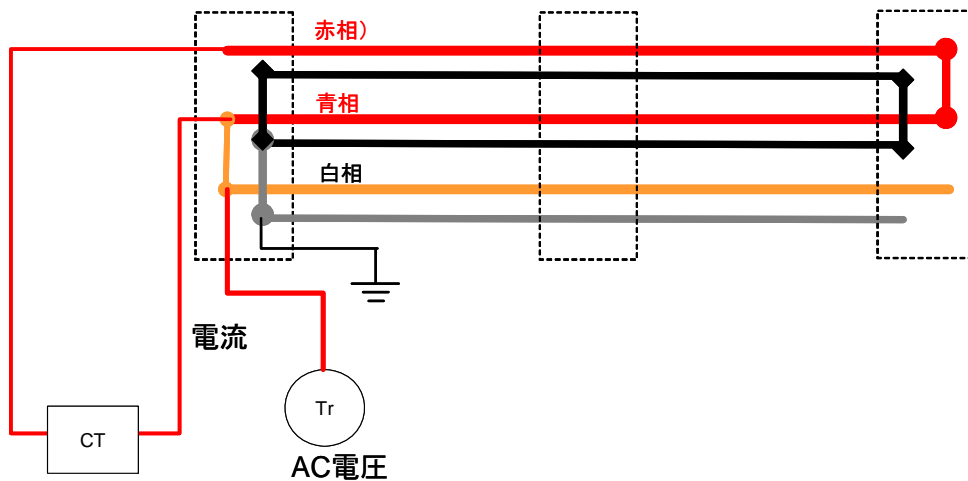


図 2.1.5-32 長期課通電試験回路図

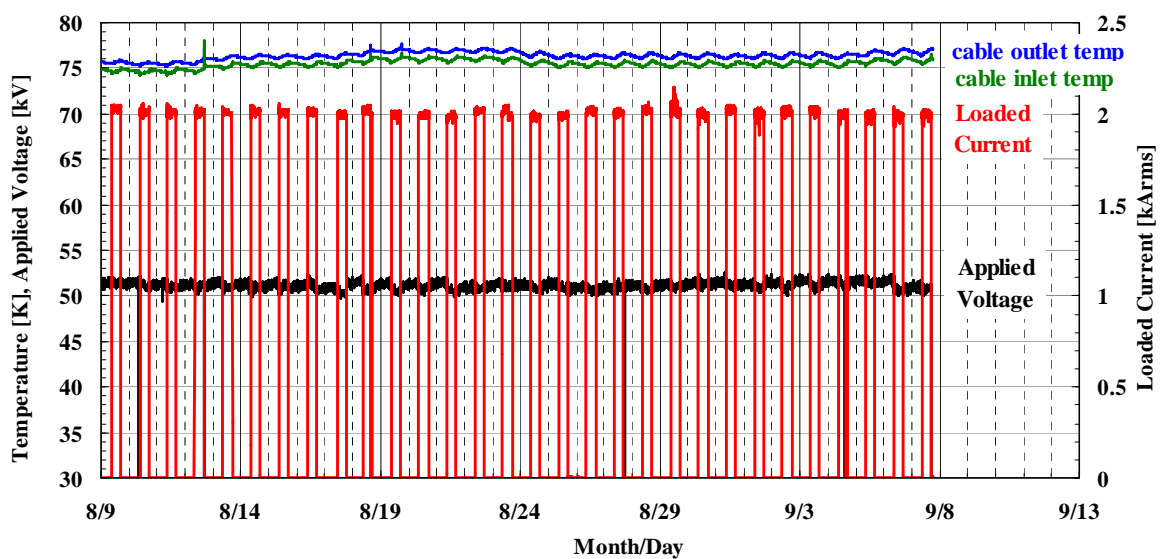


図 2.1.5-33 長期課通電試験結果

(6) 熱損失測定

(a) 基本計算方法および測定方法

超電導ケーブルシステムに取り付けた、測温抵抗温度計で端末部、ジョイント部およびケーブル両端の温度を計測。各両端部の温度差 dT (K) を測定することにより、流量 Q (kg/sec) における熱侵入量 W は以下のように求まる。

$$W = C \times Q \times dT \quad (W)$$

(ここに、 C : 液体窒素の定圧熱比熱 (J/kg/K) である)

流量を安定させ、リザーバタンクヒータ調整および冷凍機出力の調整により、系における冷凍と熱負荷をバランスさせ、各部温度を安定させる。この状態で各部の温度差を観測する。図 2.1.5-34 に無負荷における流量約 44 L/min での各部温度差の測定結果の例を示す。表 2.1.5-18 には各部温度差により測定される検証用超電導ケーブルシステムの各構成機器の割当を示す。

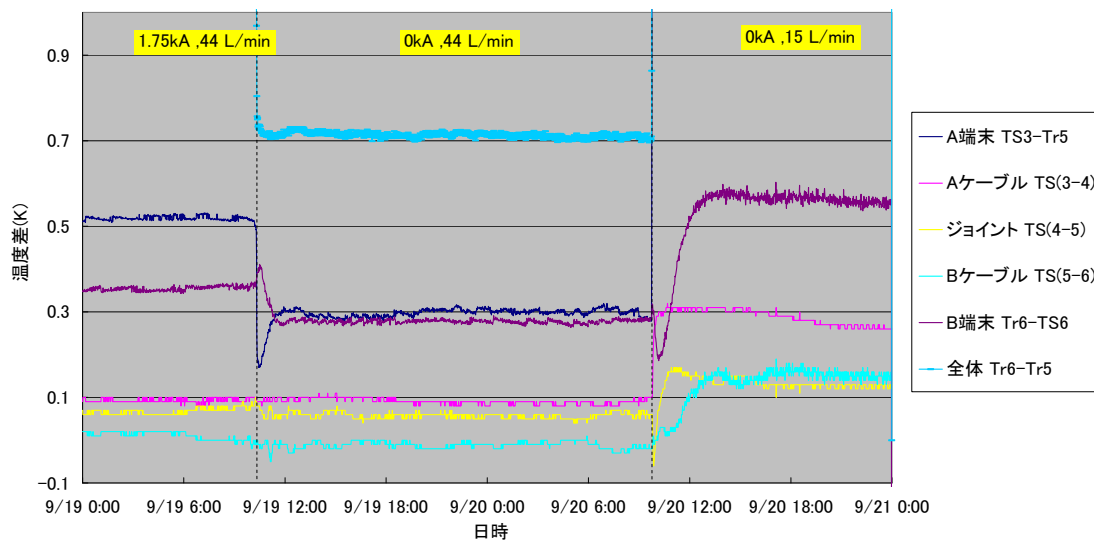


図 2.1.5-34 無負荷熱侵入量測定時の各部温度差例

表 2.1.5-18 各部温度の割当て

温度差	Ts3-Tr5	Ts4-Ts3	Ts5-Ts4	Ts6-Ts5	Tr6-Ts6	Tr6-Tr5
測定機器	A 端末	A ケーブル	ジョイント	B ケーブル	B 端末	ケーブルシステム全体

(b) 無負荷時の熱損失測定結果

表 2.1.5-19 に 1st クール、2nd クールでの無負荷熱損失測定結果を示す。

表 2.1.5-19 無負荷熱損失測定結果

	A端末 (W)	Aケーブル (W)	ジョイント (W)	Bケーブル (W)	B端末 (W)	全体 (W)
1st 7/28-31	609.8	117.3	27.5	22.9	243.9	1021.4
1st 9/19-20	722.8	106.8	42.5	34.9	220.1	1145.5
2nd 10/16-17	652.3	100.0	44.3	26.2	183.6	1032.5

ケーブル、ジョイント部および B 端末については値が小さくばらつきはあるものの、予想される測定誤差の範囲内で測定が行われている。A 端末についてはややばらつきが大きい結果となった。

(c) 通電時のケーブル熱損失測定結果

1st クールにおける、通電時の熱損失測定結果を図 2.1.5-35 に示す。ドットが測定結果であり、ラインが設計値を示している。なお、2 kArms 通電時には熱負荷と冷却能力とがバランスしなかったため、1~1.75 kArms 通電時の結果を示している。ケーブルについては、1.75 kArms までの通電によって発生する熱損失は、設計値と同等であり、交流通電によって過度な交流損失が発生していないことが分かる。

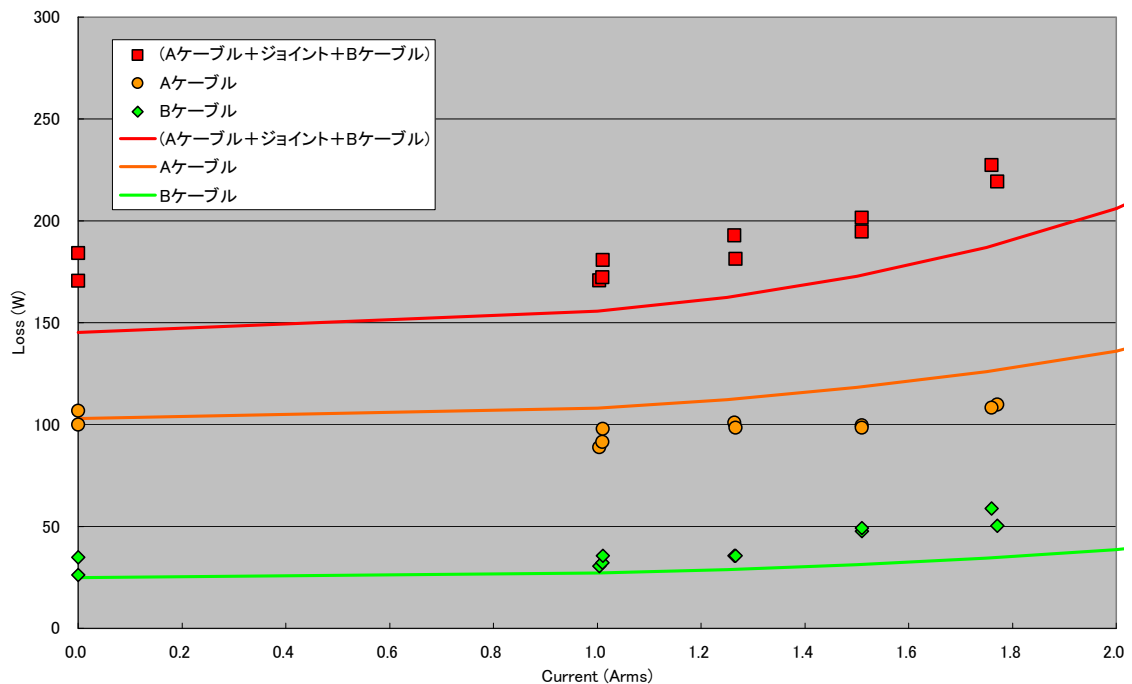


図 2.1.5-35 通電時の熱損失測定結果

(7) ヒートサイクル特性

本検証用ケーブルを用いて、計4回の冷却、昇温を繰り返し、各回の冷却時にケーブルの特性を測定し、その変化を分析した。以下にその特性について記述する。

(a) 機械特性

冷却毎の端末部の荷重の変化と、ジョイント内の移動距離をX線にて調べた結果を以下に示す。

図 2.1.5-36 に、端末荷重の変化を示す。冷却時には収縮力により、おおよそ 2500 kg の荷重が発生している。この荷重は回を追うごとに下がり気味であるが、ケーブルの位置がなじんできたためと考えられる。

図 2.1.5-37 にジョイント内部の X 線写真の例を示す。容器外側の基準位置に対して、内部のシールドマーキングの位置との差をとり、1 回目の冷却前の差を基準としたとき、マーキングの位置が 1 回目と 4 回目ではどのように変化したかを測定した結果を図 2.1.5-38 に示す。ズレの差は最大でも 2 mm 程度であり、ほとんど変化がないことが確認された。もともと、今回の設計がケーブルに熱収縮の吸収代がないため、ジョイント内部の移動はないと考えていたが、設計通りの結果になったと考えている。

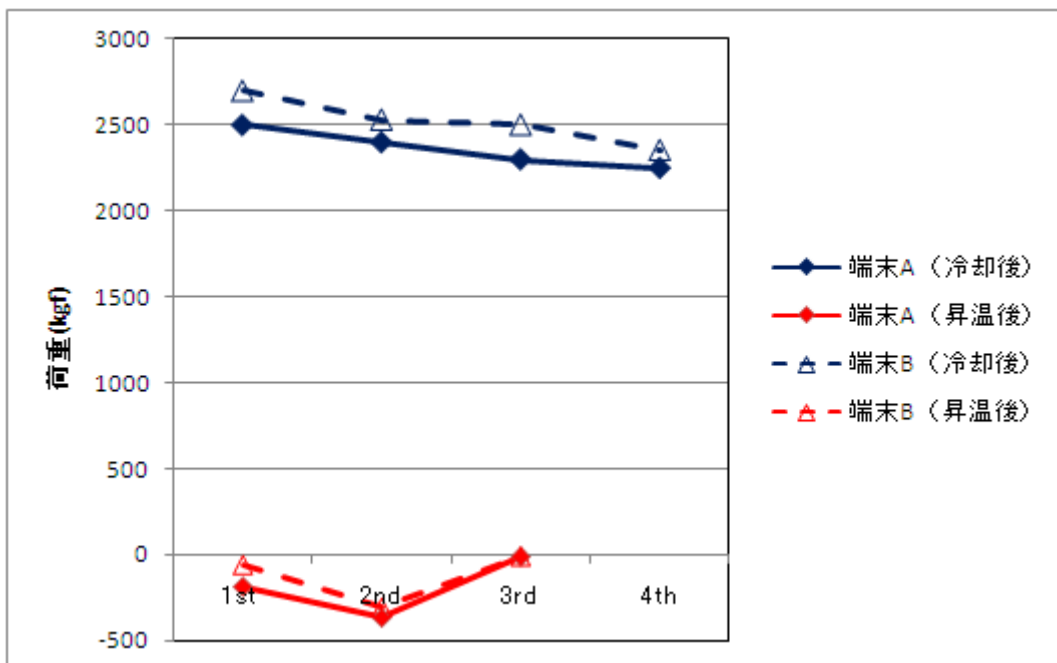


図 2.1.5-36 端末荷重の変化

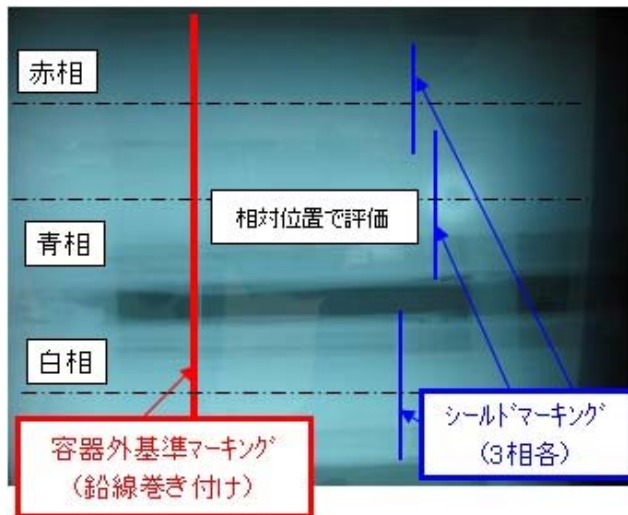


図 2.1.5-37 ジョイント内部の X 線写真

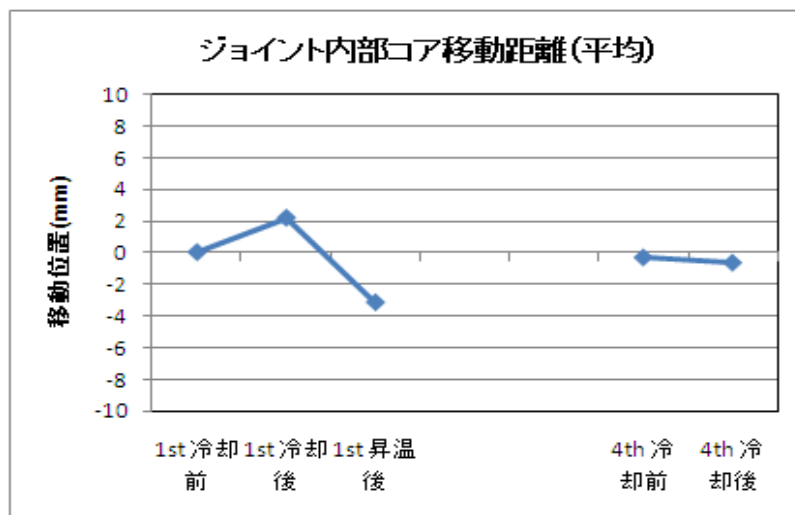


図 2.1.5-38 ジョイント内部の位置ずれ

(b) 臨界電流特性

各冷却毎の臨界電流値の測定結果を図 2.1.5-39 に示す。測定時での液体窒素入口、出口の平均温度を横軸に測定結果をまとめている。グラフ中の赤線は、線材の特性から得られる、ケーブル臨界電流の温度特性を示したもので、実測値は各回を問わず、このライン上にあることが判る。これから、ヒートサイクルを経験しても、臨界電流への影響はなかったと考えられる。

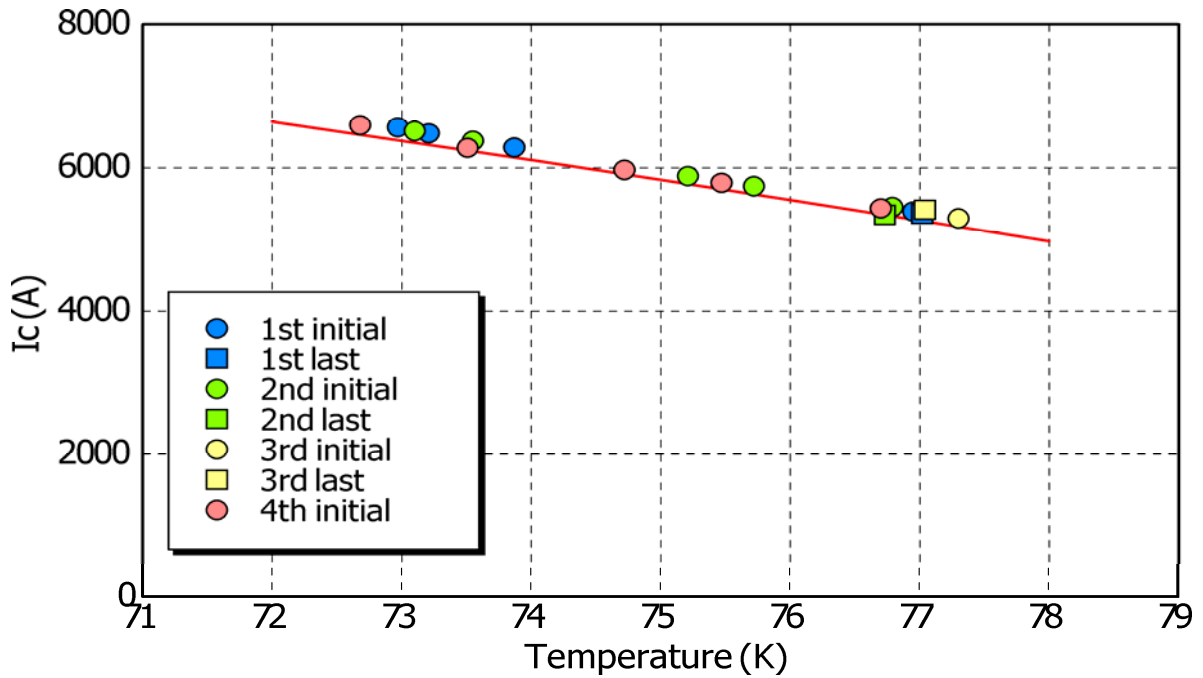


図 2. 1. 5-39 各冷却時の臨界電流値

(c) 課電特性

1 回目、2 回目の冷却時に、表 2. 1. 5-20 に示す条件で課電試験を行い、良好に課電できることを確認した。また、図 c-1 に示すように、90 kV までの静電容量、 $\tan \delta$ の測定を行ったが、設計通りの値が得られている。

表 2. 1. 5-20 課電試験条件と結果

項目	条件	定格試験(1stクール)	2ndクール
現地システム竣工耐圧試験	AC 76kV(対地) - 10分間	【良好】 PD検出なし(感度100pC) C, $\tan\delta$ に大きな変化なし	
	DC 152kV(対地) - 10分間	—	【良好】
ケーブル最大電圧(72kV)相当課電試験	AC 42kV(対地) - 8時間	【良好】 PD検出なし(感度100pC)	

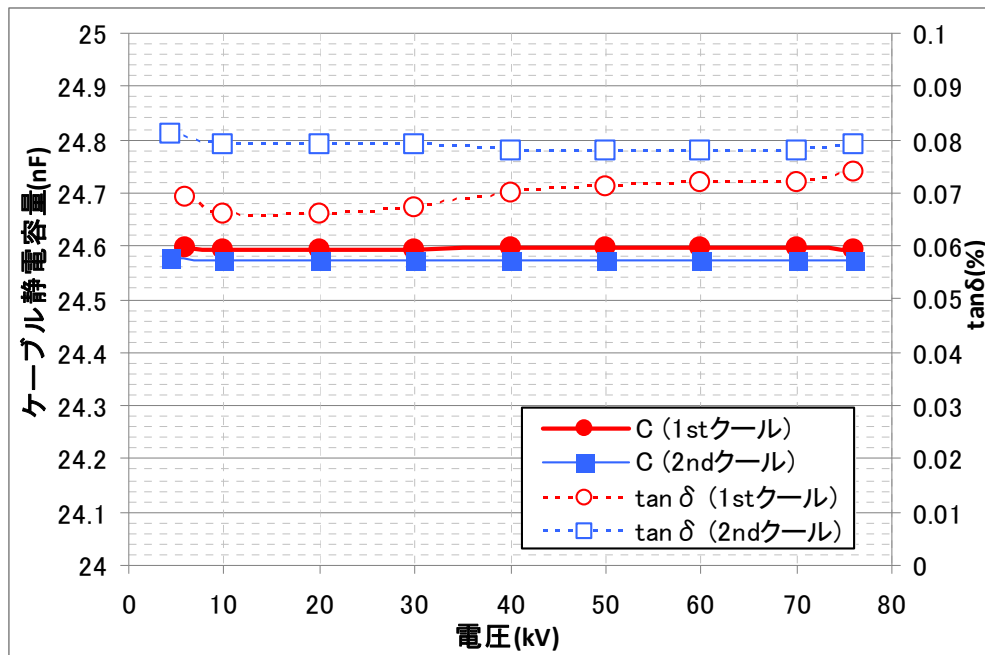


図 2.1.5-40 静電容量、tan δ 測定結果

(8) 過負荷試験

旭変電所での過負荷条件 2.36 kA 連続（定格の 135 %）通電が可能であることを確認するために、2.5 kA、2.75kA、3kA の通電試験を実施した。本試験では、超電導導体部に電圧タップを取り付け、発生電圧の変化をモニタしながら試験を行った。図 2.1.5-41～43 に結果を示すが、2.5kA、2.75kA では発生電圧は一定の値で落ち着いており、それぞれ 8 時間の通電が良好に行えることを確認した。3kA 通電の場合、冷凍能力が通電時の損失を下回り、温度が安定しなかったため、3 時間の通電にとどまった。いずれにしても旭変電所で想定される最大電流以上の電流を通電することができることを確認した。

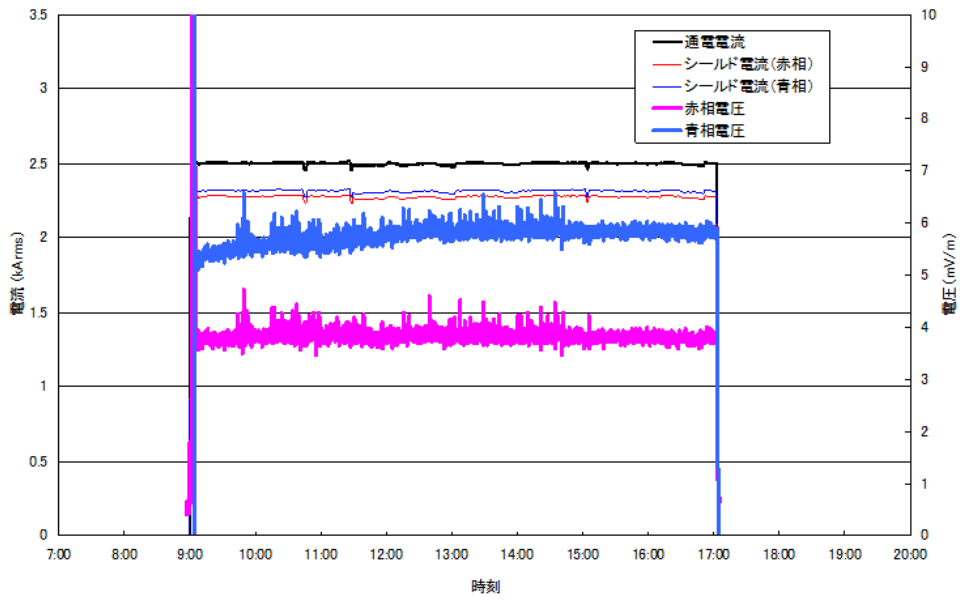


図 2.1.5-41 過負荷試験時の導体発生電圧(2.5kA)

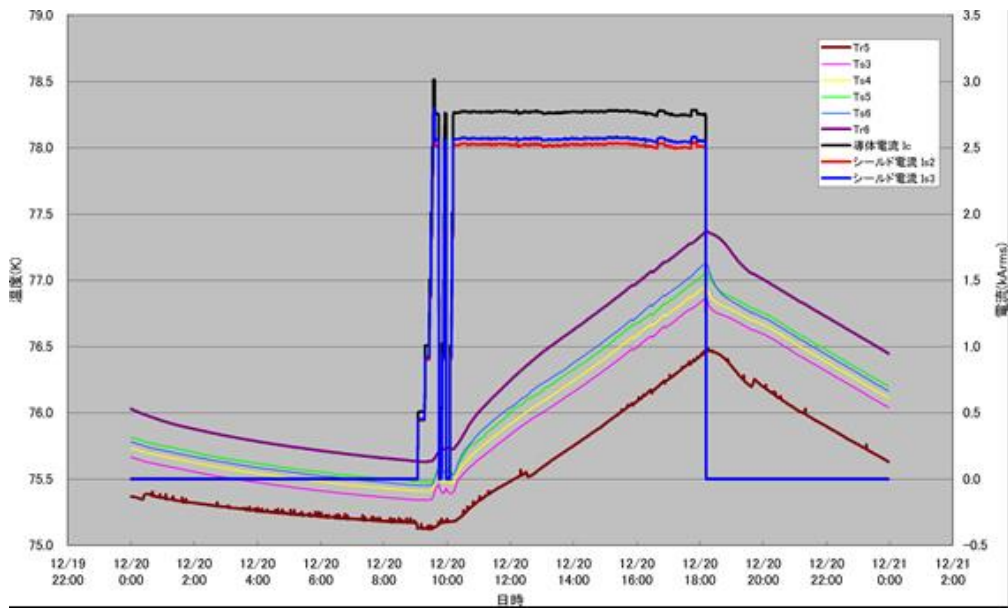


図 2.1.5-42 過負荷試験時の導体発生電圧(2.75kA)

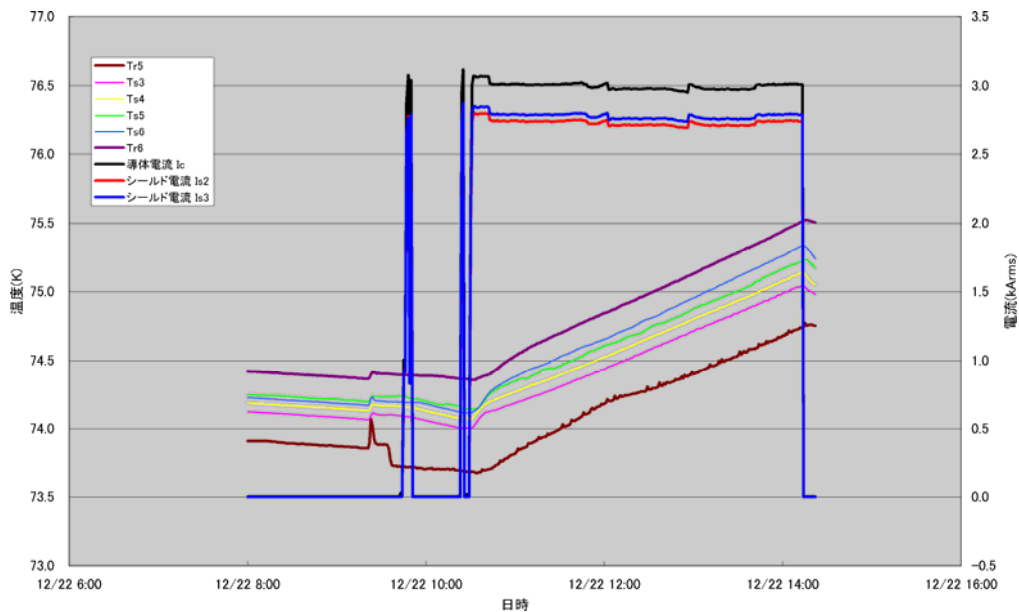


図 2.1.5-43 過負荷試験時の導体発生電圧(3.0kA)

(9) 限界性能試験

(a) 短絡電流模擬試験

検証用ケーブルシステムに短絡電流を模擬した電流を流し、ケーブルの温度変化、圧力変化、及びケーブルの健全性について調べた。

試験電流としては、もらい事故時の最大電流として、①10 kA×2 sec、旭変電所での最大事故電流 20 kA×2 sec を考えたが、電源設備の限界から電流は 10 kA とし、発熱エネルギーがそれ以上となるように通電時間を調整し、最終的に、②10 kA×18.6 sec とした。

①10 kA×2 sec 試験

電流通過時及び通過後のケーブル各部の温度変化、圧力変化を図 2.1.5-44、図 2.1.5-45 に示す。測定結果は特に変化をとらえることなく、温度、圧力上昇は見られなかった。これは、発生するエネルギーや短尺試験結果から予想される結果であった。

②10 kA×18.6 sec 試験

電流通過時及び通過後のケーブル各部の温度変化、圧力変化を図 2.1.5-46、図 2.1.5-47 に示す。温度上昇としては、 $\Delta T=2$ K、圧力上昇としては $\Delta P=120$ kPa が測定された。これらの結果の妥当性については、後述する章にて分析を行う。

また、ケーブルの復帰特性の測定を行った。試験後の I_c の変化、静電容量の変化を図 2.1.5-48、図 2.1.5-49 に示す。復帰時間は 60～80 分必要であった。

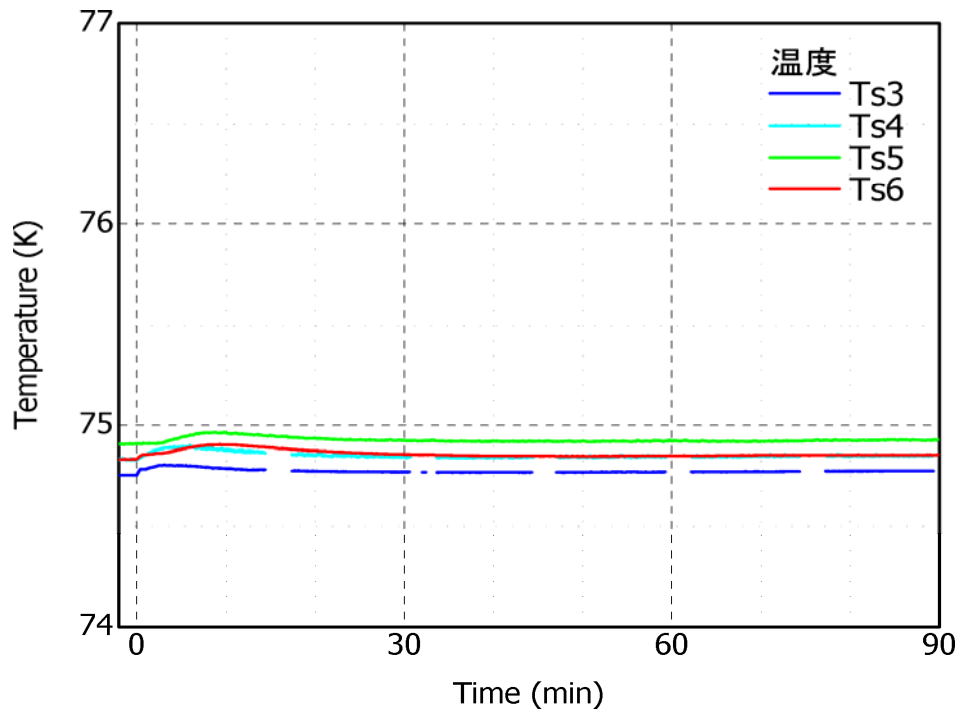


図 2.1.5-44 ①10 kA×2 sec 後 (時間0スタート) の温度変化

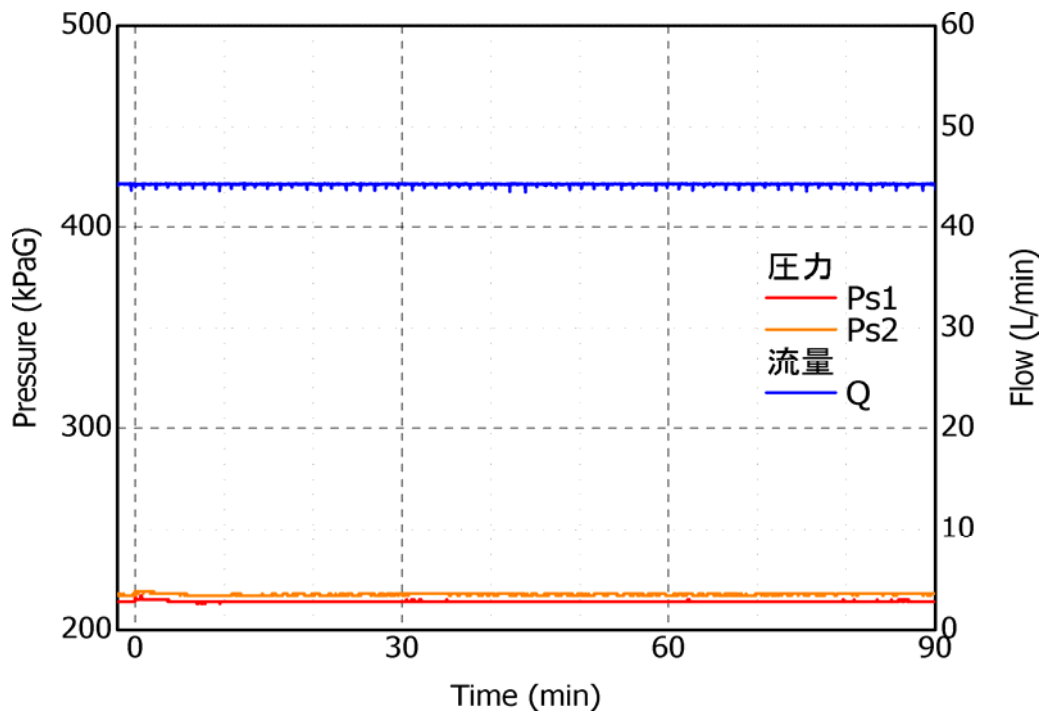


図 2.1.5-45 ①10 kA×2 sec 後 (時間0スタート) の温度変化

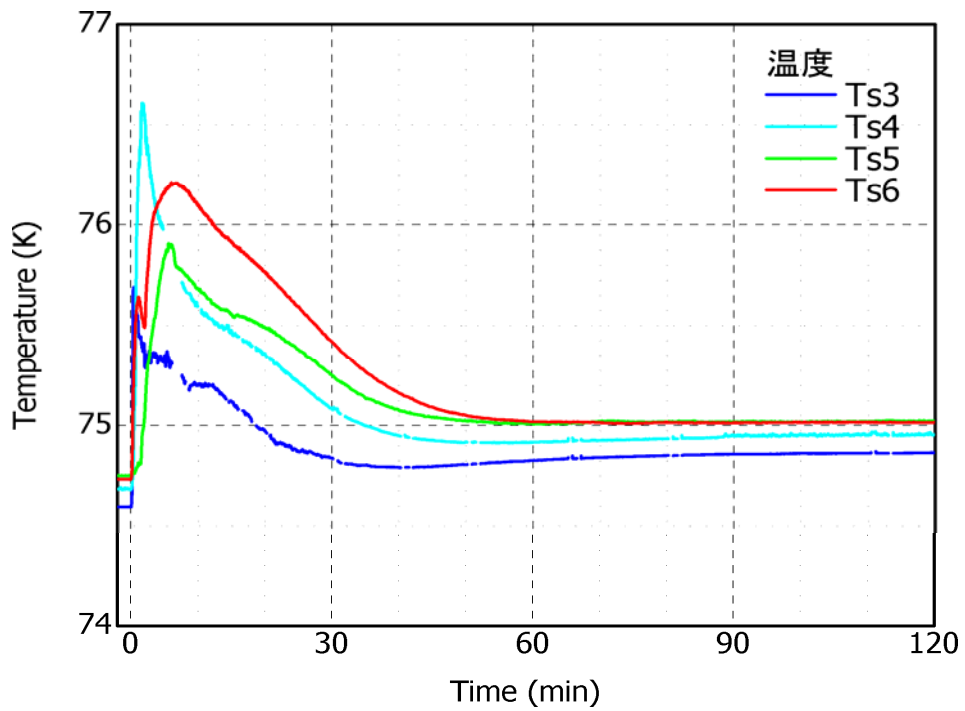


図 2.1.5-46 ②10 kA×18.6 sec 後 (時間0スタート) の温度変化

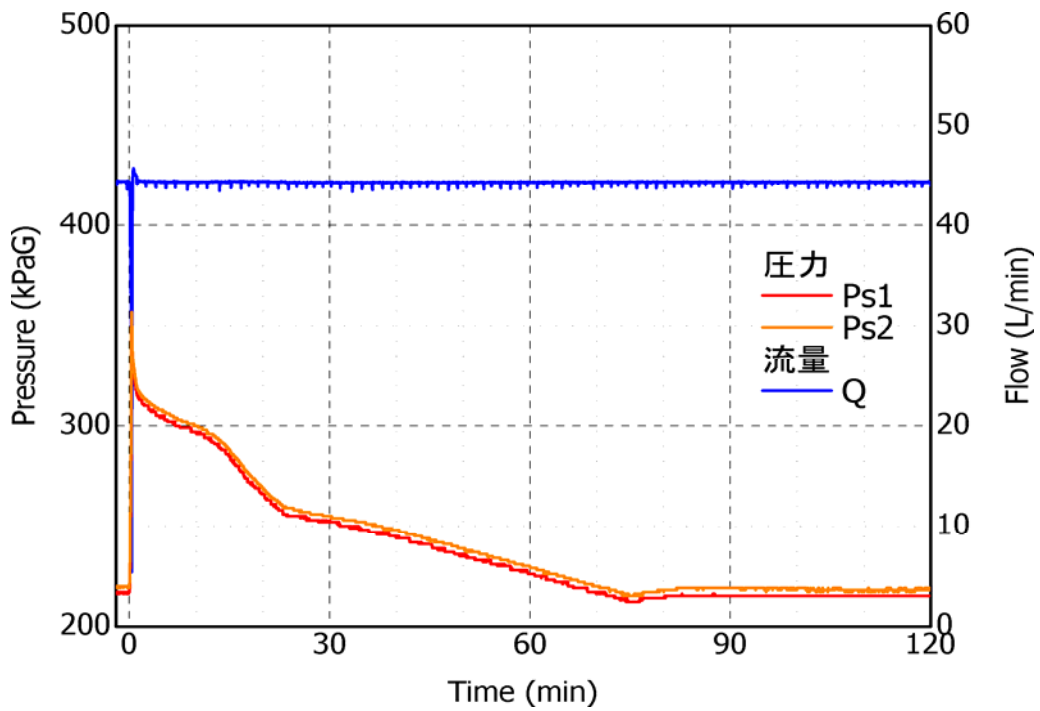


図 2.1.5-47 ②10 kA×18.6 sec 後 (時間0スタート) の圧力変化

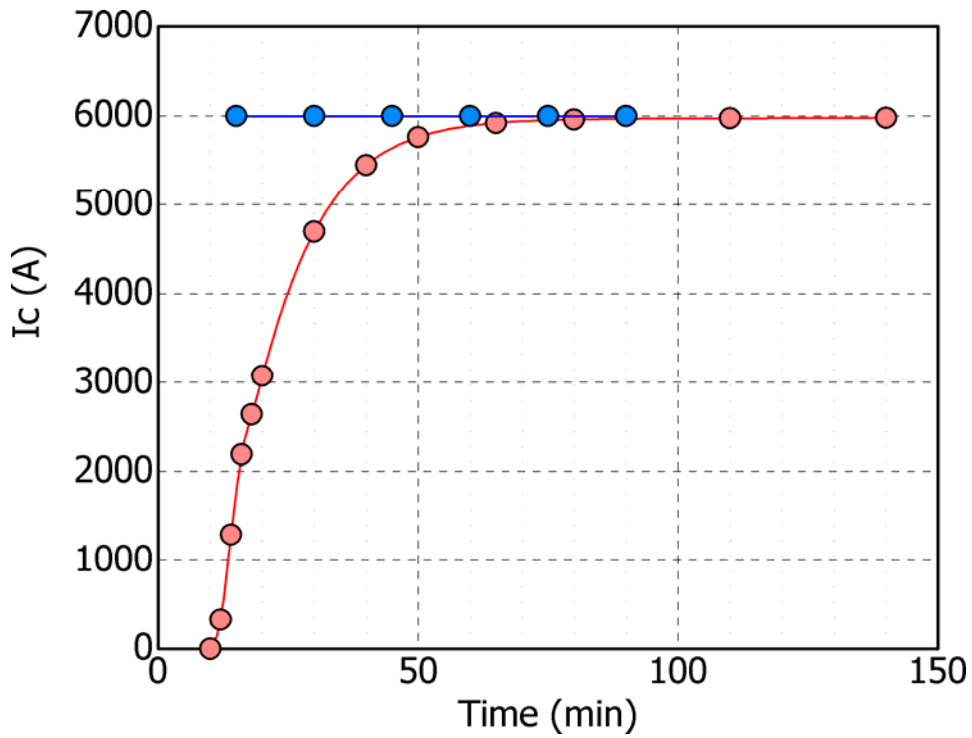


図 2.1.5-48 ②10 kA×18.6 sec 後（時間0スタート）の I_c の変化

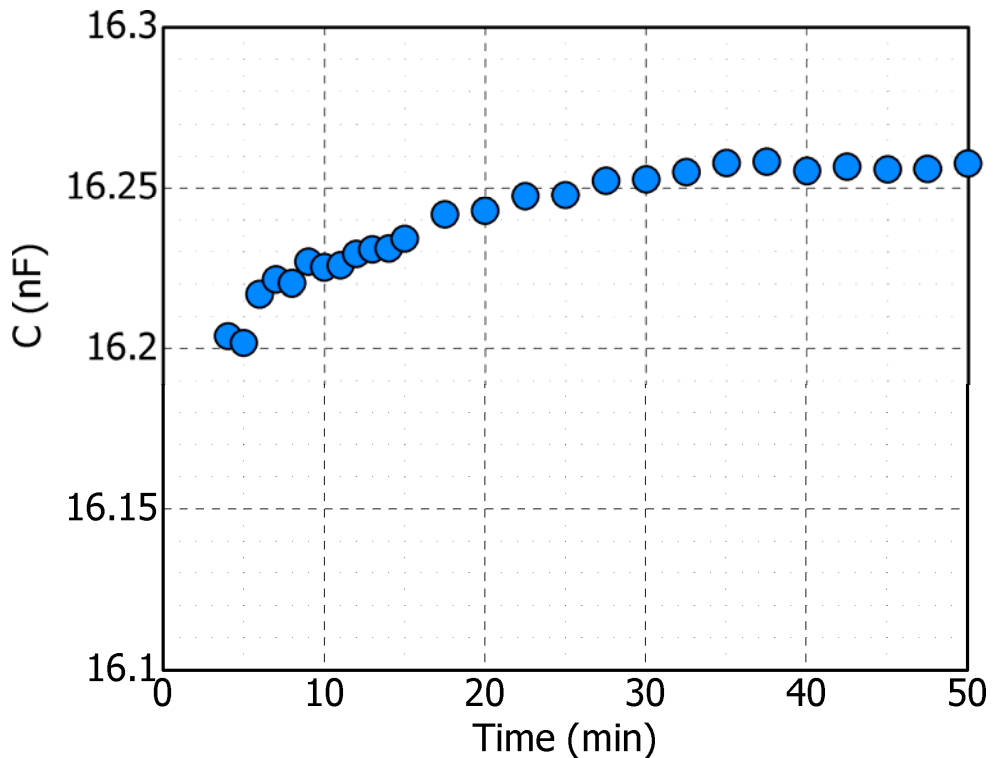


図 2.1.5-49 ②10 kA×18.6 sec 後（時間0スタート）の静電容量の変化

(b) 冷凍機停止試験

停電等冷凍機が長時間停止した場合のシステムへの影響を調査するために、定格電流 1.75 kA を通電した状態で、冷凍機を停止かつ循環ポンプON状態と、冷凍機

停止かつ循環ポンプ OFF 状態の試験を行った。前者のケーブルの温度、圧力の変化を図 2.1.5-50、図 2.1.5-51 に、後者の温度変化を図 2.1.5-52 に示す。

循環ポンプ ON 状態では、温度は 0.57 K/h で上昇する。これは、システム全体の熱負荷と液体窒素の総量から計算できる値に相当する。約 3 時間で、管理上限値として設定した 77 K となった。

循環ポンプ OFF 状態では、ケーブル末端部は 0.3 K/h、ジョイント付近は 1.2 K/h であった。温度センサを取り付けている位置しか温度測定ができないため、もっとも侵入熱が多い、曲り部では 6 K/h の温度上昇であると推定。これから 2 時間程度が限界と考え、通電は 2 時間で打ち切った。冷却システムが全停止する場合であっても、定格電流を 2 時間流せることを確認した。

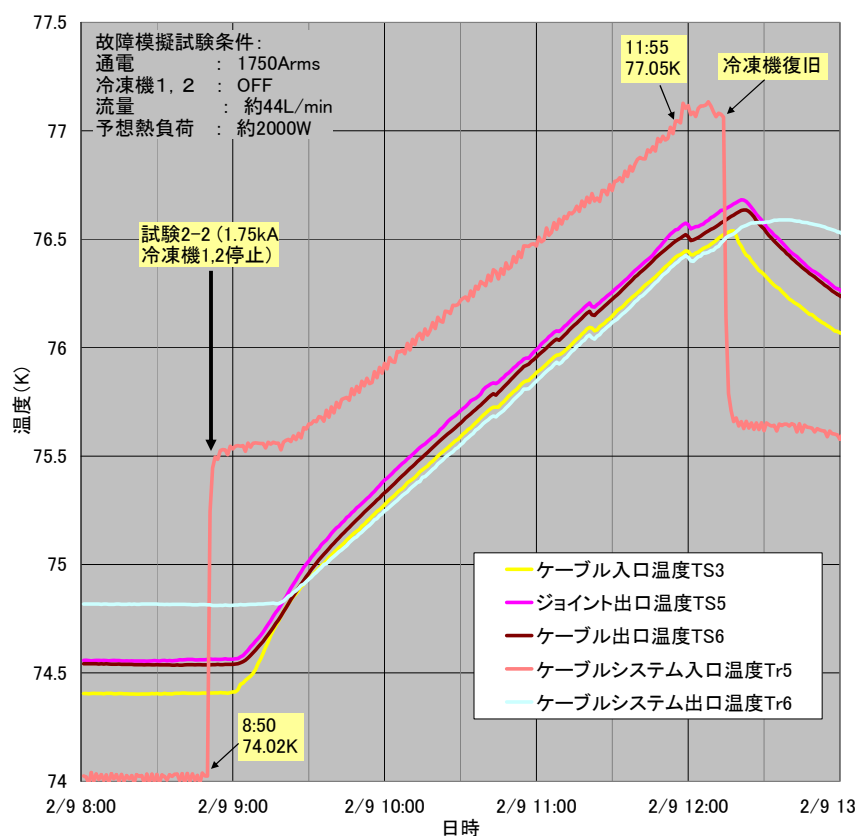


図 2.1.5-50 冷凍機 OFF ポンプ ON 状態での温度変化

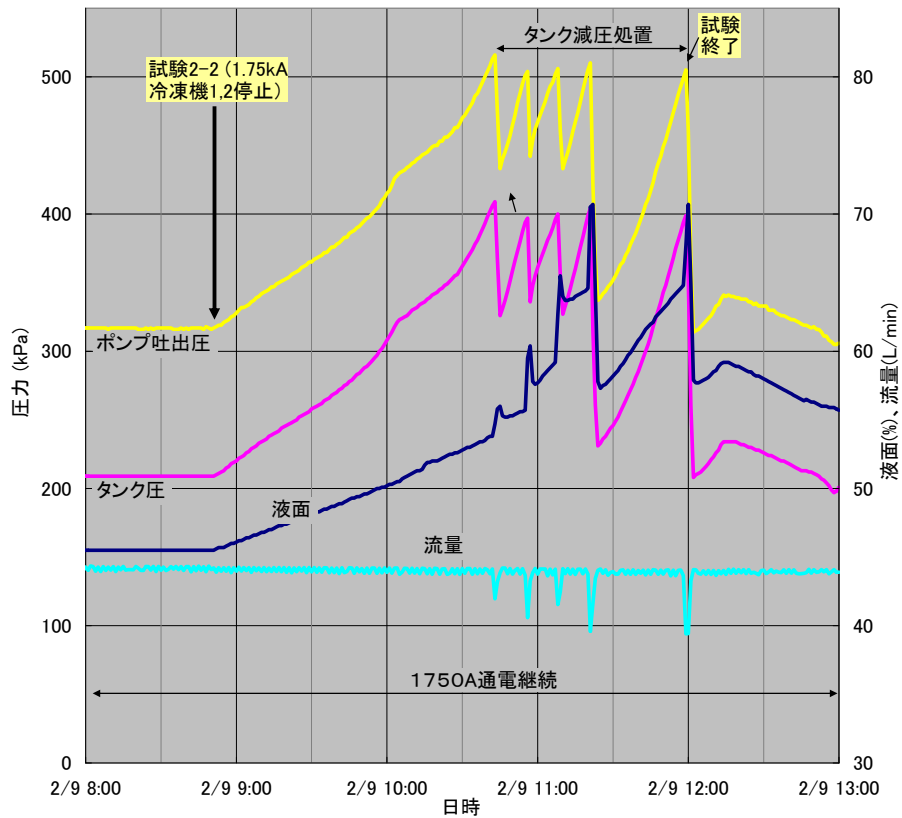


図 2. 1. 5-51 冷凍機 OFF ポンプ ON 状態での圧力・流量変化

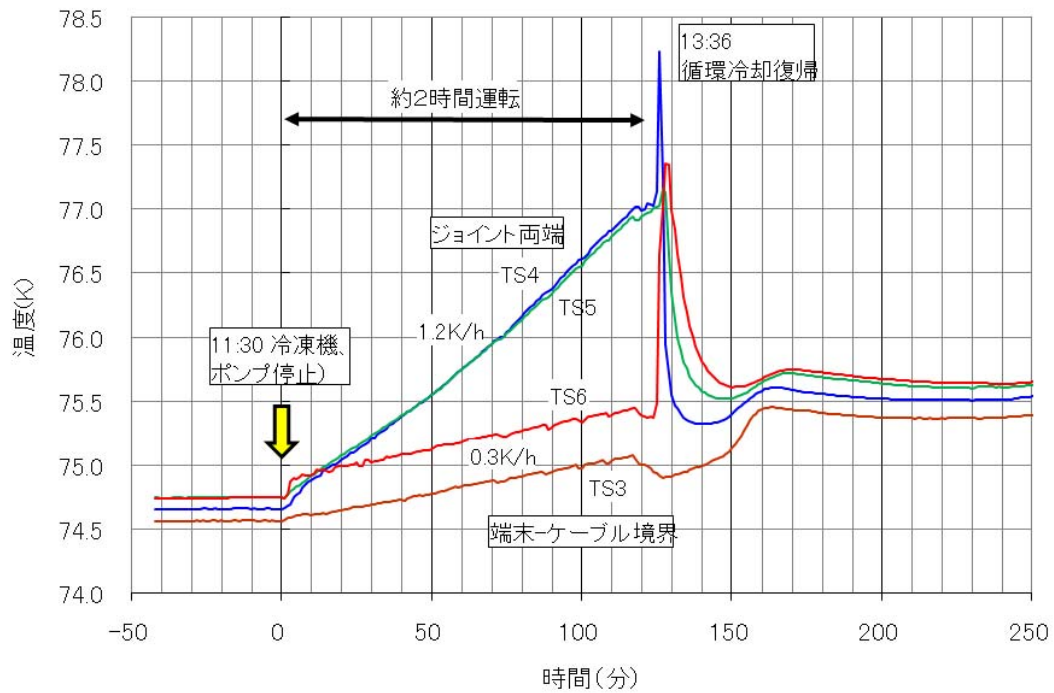


図 2. 1. 5-52 冷凍機 OFF、ポンプ OFF での温度変化(10) 残存性能試験

全ての検証試験終了後、ケーブルの残存性能を確認するために、図 2.1.5-53 に示すように検証ケーブルを解体、切断し、①～④のそれぞれの部位の I_c を測定した。結果を図 2.1.5-54 に示すが、それぞれ初期性能を維持していることを確認した。

また、③のサンプルを用いて、交流課電として、AC 90 kV×3 H、および、120 kV×10 min、また Imp 課電として、±385 kV/各 3 回を印加したが、いずれも良好に課電できることを確認した。

これらの結果により、ケーブルはヒートサイクル、長期課電、過負荷、限界性能等の諸試験を経ても特に特性の変化はみられず、良好であることが判った。

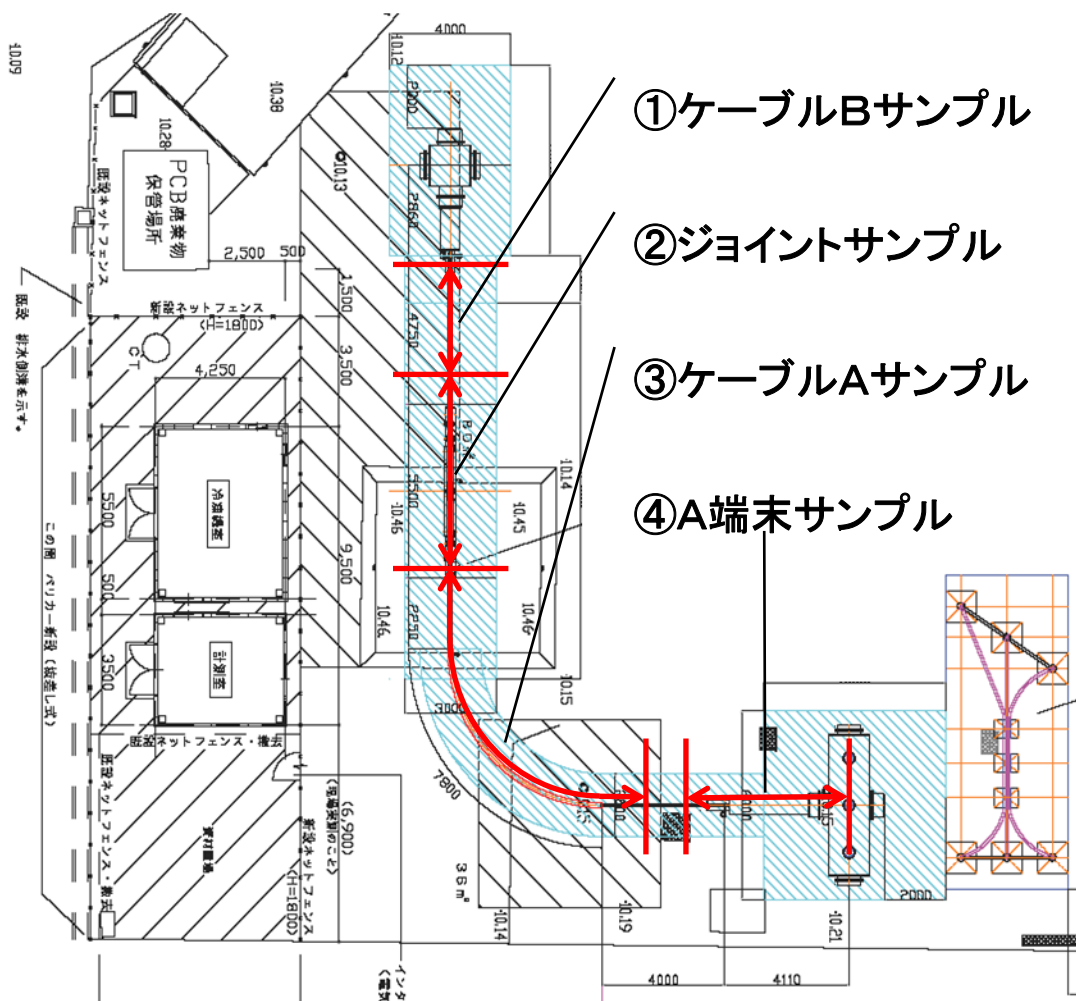


図 2.1.5-53 残存性能確認用サンプル切り取り位置

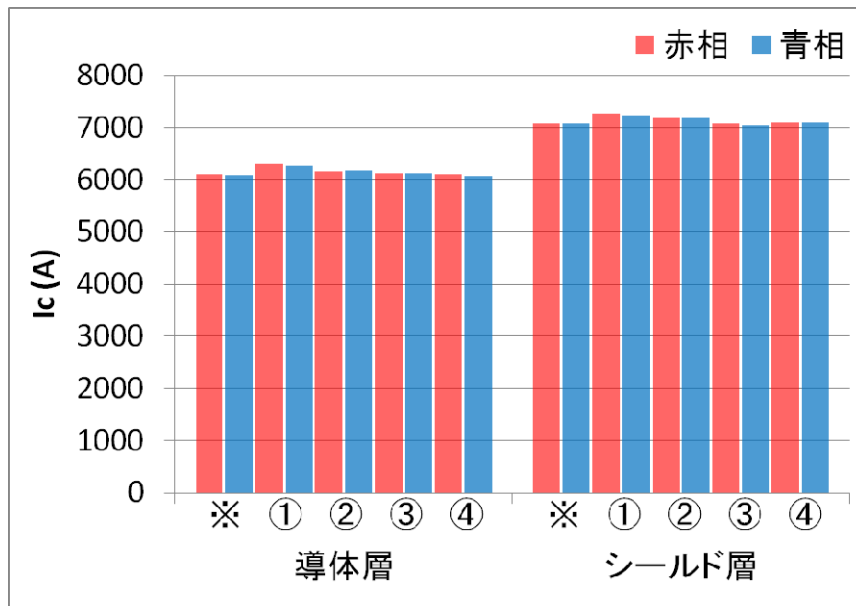


図 2.1.5-54 検証試験前後の Ic 測定結果
 (※は初期データ、①～④は残存性能試験データ)

2.1.5-6 まとめ

- ・ 検証用 30 m ケーブルの製作、建設を行った。
- ・ 30 m ケーブルは要素試験結果をもとに設計したもので、導体 4 層、シールド 2 層、電気絶縁は 7 mm 厚 PPLP で構成されている。
- ・ 30 m ケーブル製造後、短尺を切り出し、出荷試験に相等するサンプル試験を実施、臨界電流 (Ic)、交流損失測定、課電試験、曲げ試験等を実施し、仕様を満足することを確認した。

- ・ 中間接続部、終端接続部については、施工手順を確認し、管理項目を把握した。
- ・ 検証試験用のシステム構築後、初期冷却試験を実施した。システムは片側から低温窒素ガス、液体窒素の順に注入し、徐々に冷却した。
- ・ 冷却時にケーブルの静電容量を測定し、液体窒素が絶縁体に含浸していく状況を確認した。
- ・ 冷却時、超電導ケーブルが熱収縮によって発生する引張り力は 2.4~2.7 ton であった。これは、ケーブル要素試験から予想される値とよく一致した。

- ・ 冷却後、各種電気試験を実施した。
- ・ 導体の臨界電流測定を行い、Ic DC 5.4 kA @77.4 K を得た。
- ・ 通電試験においては、交流 2 kArms を 24 時間以上連続通電し、異常がないことを確認した。尚、超電導シールド側に流れる電流は、約 1.8 kArms であった。
- ・ 従来ケーブルの竣工試験と同様に、定格電圧 (66 kV の対地電圧 38 kV) の 2 倍である AC 76 kV @10 分間を課電し、良好であった。
- ・ 対地電圧 51 kV、電流 2 kArms 8 時間 ON, 16 時間 OFF の条件で、1 ヶ月の連続試験に成功した。尚、この試験は 30 年間の加速試験に相当する。
- ・ システムの熱損失の測定を行い、無負荷時の熱損失、通電時の熱損失ともに概ね設計通りの値が得られているが、A 端末については 600~722 W とバラつきが多い結果となった。
- ・ 室温と液体窒素温度を繰り返すヒートサイクルに関しては、ケーブルコアの動きはジョイント部で確認する限り ±2 mm 程度とほとんど動きのないものであった。Ic 特性、課電特性とも冷却毎に測定したが特に変化があるものではなく、良好であった。
- ・ 過負荷試験については、旭変電所で想定される過負荷最大電流 2.36 kA を超える、電流 2.5 kA、2.75 kA において規定の 8 時間の通電ができることを確認した。3 kA 通電においては、冷却能力の不足のため、3 時間通電を確認するにとどまった。
- ・ 短絡電流模擬試験においては、①もらい事故の最大電流 10 kA、2 sec と②旭最大事故電流相当 (以上) の 10 kA×18.6 sec の通電を行った。①では温度、圧力の上昇はほとんど観測されず、連続して課通電できる見込みを得た。②では、温度上昇 2 K、圧力上昇 120 kPa であり、ケーブルにダメージがないことを確認し

た。また静電容量の変化から、回復時間は 80 分程度であった。

- 停電模擬試験では、冷凍機、ポンプが OFF の状態で、定格通電を行い、約 2 時間の通電が行えることを確認した。
- すべての試験を終了した後、ケーブルを解体し、各パートの I_c 測定、曲り部から切り取ったケーブルで課電試験を行った。 I_c の測定値は、初期の値と変わらなかったこと、試験電圧 AC90 kV、AC120 kV を印加して異常がなかったことをそれぞれ確認し、ケーブルが検証試験でその性能が低下していないことを確認した。

引用論文リスト

- (1) 電気学会「超電導工学」
- (2) 笹重他：「低交流損失 Bi-2223 超電導線材の開発(3) ー多芯化、高 Je 化、ツイストピッチ低減の効果ー」、2007 年度春期低温工学・超電導学会、1P-p01 (2007)
- (3) Z. Jiang, N. Amemiya, N. Ayai and K. Hayashi, “Total AC loss characteristics of untwisted and twisted Bi-2223 multifilamentary tapes and interaction between self and external magnetic fields”, Supercond. Sci. Technol., vol.17, pp.1311-1318 (2004)
- (4) W. T. Norris, “Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying ac: isolated conductors and edges of thin sheets”, J. Phys. D3, pp. 489-507 (1970)
- (5) 宮城、塚本：「イットリウム系薄膜導体交流通電損失の n 値および導体断面内臨界電流分布依存性」、電気学会 B 部門論文、124 巻 1 号 (2004)
- (6) M. Shiotsu, et al., Advances in Cryogenic Engineering, Vol.44, pp.623-629 (1998)
- (7) T. Masuda, et al., “Design and experimental results for Albany HTS cable”, IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 15, No.2, (2005)
- (8) 増田等、「66kV 級 3 心一括型高温超電導ケーブルの開発」、SEI テクニカルレビュー第 159 号(2001)
- (9) 湯村等、「高温超電導ケーブルの実系統線路への適用 (米国 ALBANY プロジェクト)」、SEI テクニカルレビュー・第 174 号(2009)

2.2 トータルシステム等の開発

高温超電導ケーブルシステムが市場に導入されるためには、線路建設、運転監視、運用・保守方法などのトータルシステムとしての技術を確立する必要がある。

具体的に本節では、実証ケーブルシステムの基本構成と仕様を検討し、システムとしての構成を検討する。また、超電導ケーブルシステムの必要な付帯機器の検討、超電導ケーブルを極低温に維持するために必要な、冷却システムの設計検討及び、実証ケーブルシステムの建設方法の検討を行う。

2.2.1 実証ケーブルシステムの基本構成と仕様の検討

(1) 研究開発目的

高温超電導ケーブルシステムの接続が可能な 66 kV 級実系統の候補地から、電流容量、負荷状況、システム構築の実現性等を考慮し、以下の目的を満たすように実証ケーブルの実証場所を検討する。

- ・ 電圧：66 kV、容量：200 MVA のケーブルが接続できる回路を有すること
- ・ 実系統に接続し、変電所内にて実運転検証ができる十分なスペースを有すること
- ・ 運転監視・保守運用方法の検証が困難でないこと

次に、実証場所の系統構成や系統条件を考慮しつつ、実証場所における高温超電導ケーブルシステムの実系統への接続形態および、その機器構成を検討し、併せて高温超電導ケーブルシステムの基本仕様を検討する。

(2) 実証試験場所の選定

電圧：66 kV、容量：200 MVA のケーブルというターゲットならびに実系統に接続して実運転検証を行う点、また運転監視・保守運用方法の検証が目的となる点を鑑み、実証試験場所は試験のための十分なスペースを有する既存変電所とし、その選定を実施した。具体的な選定のフローを図 2.2.1-1 に示す。

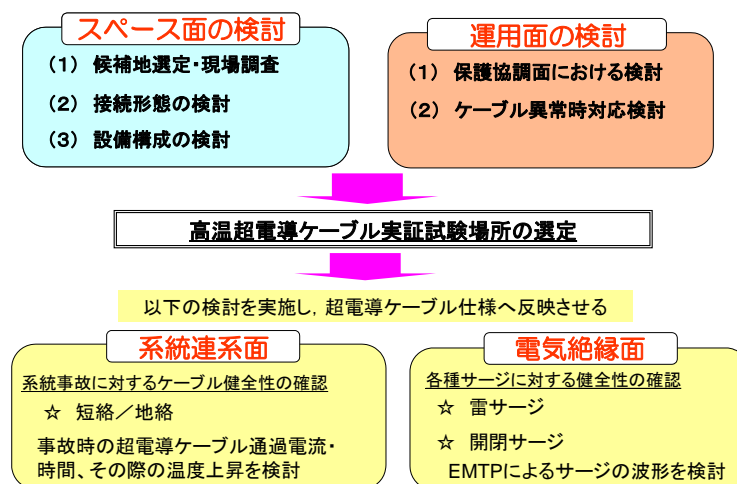


図 2.2.1-1 実証場所選定のフロー

変電所選定にあたっては、以下の条件により絞り込みを実施した。

- ・ 66 kV、200 MVA の変圧器を有すること
- ・ 試験スペース確保が容易な屋外変電所であること

この条件により 30 弱の変電所に絞り込みがなされた。さらに、以下の条件について各変電所の比較を実施した。

- ・ 66 kV 設備の形態（気中接続／GIS）
- ・ 用途区分（住居地域／工業地域等）
- ・ 騒音区分（第 1～4 種）：冷凍機騒音が約 80 dB 程度発生するため
- ・ 塩害区分（A～F 地区）
- ・ スペースの有無
- ・ 近々の新規工事計画の有無

これらを総合的に比較した結果、特にスペースを有すると考えられる 2 変電所が最良候補地として選択された。そこで、この 2 変電所について現場調査を実施した。その結果について表 2.2.1-1 にまとめる。同表から、塩害区分を除くすべての項目について、旭変電所は試験実施に適していることが判明した。また、塩害区分については、適用するがいし選定に留意する事で試験実施には支障がないことも確認できた。以上の検討結果から旭変電所を最適地として選定した。旭変電所の概要について、その所在地を図 2.2.1-2 に、変電所の特徴を表 2.2.1-2 にまとめる。

表 2.2.1-1 変電所比較検討

項目	箇所		旭変電所	
	X変電所			
66kV設備の形態	GIS、超電導ケーブルでは接続が複雑化	△	気中設備	◎
用途区分	「第1種住居地域」	△	「工業地域」	◎
騒音区分	第1種(昼50,夜45dB以下)	△	第4種(昼70,夜65dB以下)	◎
塩害区分	E地区	△	E地区	△
スペースの有無	空きスペースのほとんどは他用途で確保済み	△	変電所端部の直線構内道路(100m)を試験用に占有可能。まとまった敷地を試験用に確保可能	◎
その他制約	新規工事計画なし 試験設備のみの区画が困難	△	新規工事計画なし 既設設備との区画が容易	◎
総合評価	試験に利用できるスペースに制約あり	△	試験用の空きスペース確保、区画化が可能	◎



図 2.2.1-2 旭変電所の場所

表 2.2.1-2 旭変電所の概要

場所	神奈川県横浜市鶴見区
1次電圧	154 kV
2次電圧	66 kV
変電所出力	600 MVA (200 MVA 変圧器 : 3 台)
運転開始	1926 年 12 月
屋内外区分	屋外変電所

(3) 接続形態の検討

旭変電所における高温超電導ケーブルシステムの接続箇所について、154/66 kV 変圧器 2 次側、66 kV 母線、66 kV 母線連絡、66 kV 送電系統の 4 箇所を適用箇所候補として挙げ、それぞれの箇所の得失について比較検討を実施した。

まず、154/66 kV 変圧器 2 次側に接続する案について定格容量（電流）の面から検討を実施した。旭変電所の変圧器は 3 台ともに 200 MVA の容量であり、定格電流値は 1,750 A であることから、変圧器 2 次側（66 kV 側）に超電導ケーブルシステムを接続して実証試験を行なうことが可能である。

一方、66 kV の母線構成は甲母線・乙母線および 1 母線連絡（ブスタイ）の 2 母線 1 ブスタイ構成であり、このうち母線の一部を超電導ケーブルで置き換えることは系統構成上可能であるが、母線の定格電流は 3,500 A 以上であり、超電導ケーブル容量である 200 MVA 以上となることから、対応できないことがわかった。また、

母線連絡として超電導ケーブルを接続する系統構成の検討を実施したが、常時の負荷電流値がそれほど大きくない点、系統保護システムが複雑化することなどの点から試験箇所としては適さないことが判明した。

また、66 kV 送電系統の一部とする案については、常時の負荷電流値が大きい点に加え、旭変電所内のスペースの制約により超電導ケーブルの接続は困難であることが判明した。

以上の点を考慮し、旭変電所での超電導ケーブルの接続箇所は変圧器 2 次側とすることとした。接続する変圧器に関しては、旭変電所には変圧器が 3 台設置されている（主変 1B、2B、3B）が、すべて同容量（200 MVA）であるため、調相設備接続の有無、所内変圧器接続の有無、施工性等を勘案し、超電導ケーブルを接続する箇所として主変 2 号バンク 2 次側を選定することとした。旭変電所での超電導ケーブルの接続形態（系統構成）を図 2.2.1-3 に示す。

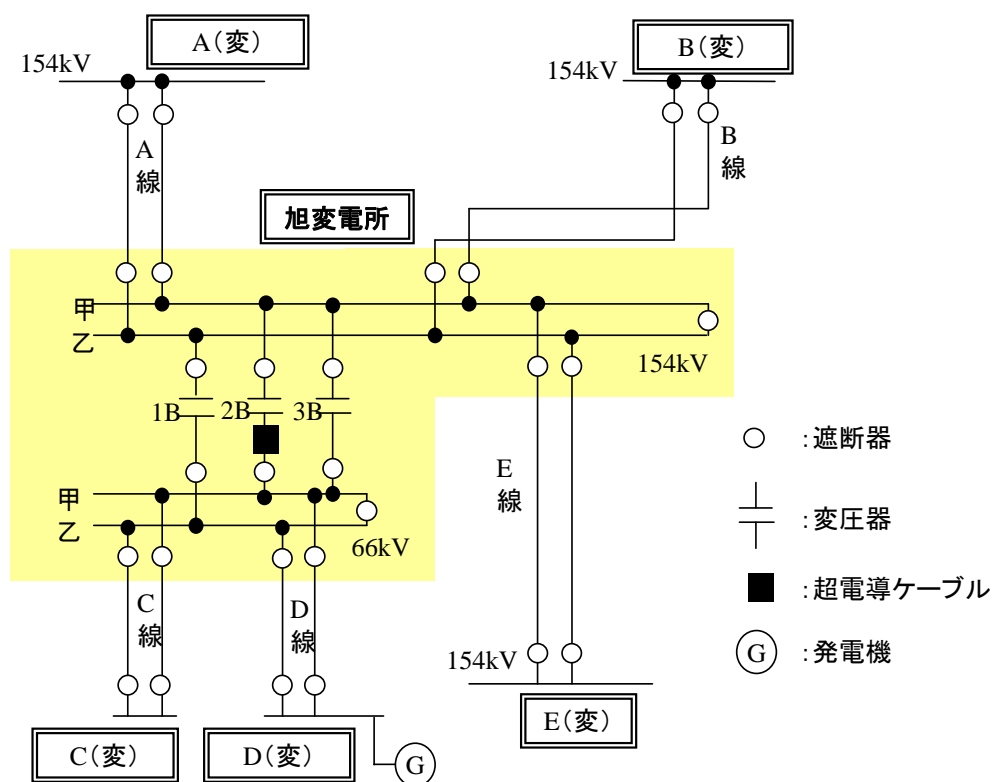


図 2.2.1-3 旭変電所における超電導ケーブルの接続形態（系統構成）

(4) 設備構成の検討

154/66 kV 変圧器 2 次側に超電導ケーブルを接続する場合の設備形態について検討を実施した。既設設備は、154/66 kV 変圧器の 2 次側と遮断器間が CV ケーブルで接続される形態となっている。また、CV ケーブルの端部は終端接続部 (CH) を介して遮断器に接続される。そこで、この 154/66 kV 変圧器の二次側の CV ケーブルの CH と、既設変圧器 2 次側遮断器の間にバイパス用の遮断器を設置するととも

に、この CH と既設変圧器 2 次遮断器との間に超電導ケーブルを接続する形態を検討した。検討結果としての機器配置イメージならびに単線結線図をそれぞれ図 2.2.1-4, 5 に示す。

この設備構成では超電導ケーブルの両側終端部から既設の CH、遮断器に接続する間に、断路器と遮断器を設置する形態となっている。遮断器や断路器の設置を含めた最終的な設備構成については、次節で述べる運用面での制約等も考慮して決定した。具体的には、バイパス用機器として、当初は遮断器の設置を検討していたが、超電導ケーブル側とバイパス側を併用した状態で切り替え操作を行う運用とすることで、より安価な断路器が適用可能であることが判明したことから、バイパス用機器として負荷切り替え機能付き断路器を採用した。

なお、超電導ケーブルシステムとしては、超電導ケーブル、中間接続部、終端接続部、必要冷却容量に基づく冷凍機、循環ポンプ、液体窒素タンクに加えて、運転監視・警報遮断システム・冷却コントロールシステム等を設置することになるが、これらの検討結果については次節以降に記載する。

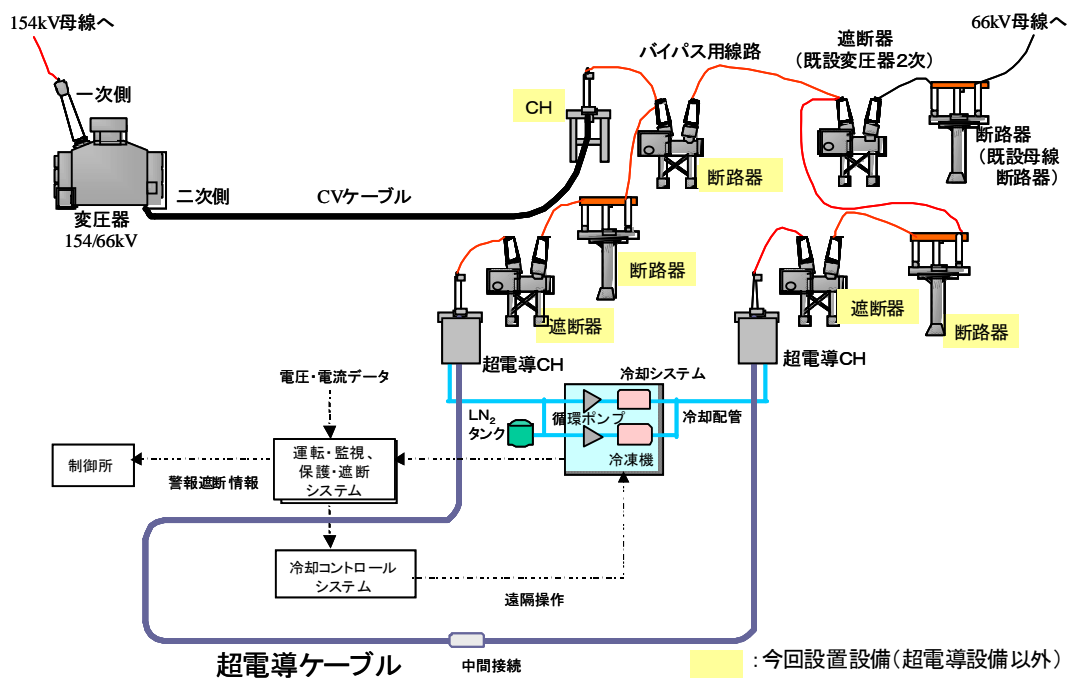


図 2.2.1-4 超電導ケーブル設備構成 (機器配置イメージ)

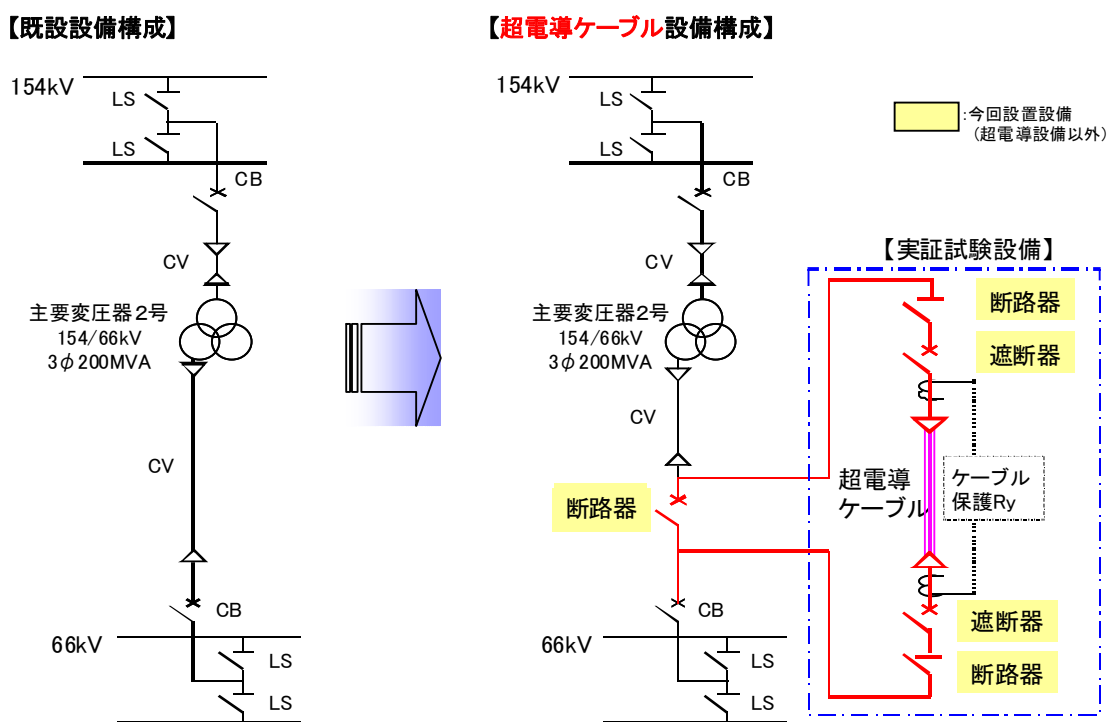


図 2. 2. 1-5 超電導ケーブル設備構成（単線結線図）

(5) 基本仕様の検討

超電導ケーブルに要求される基本仕様を、前記接続形態をもとに検討した。超電導ケーブルが接続される 66 kV 系統の最高使用電圧は 72 kV である。また、変圧器定格容量は 200 MVA であり、電流容量に換算すると 1,750 A である。従って、超電導ケーブルは 1,750 A の連続運転が可能である事が求められる。

次に定格電流を上回る過負荷電流に対する耐量としては、接続する既設変圧器の過負荷耐量条件を満足する必要がある。変圧器の過負荷耐量は過負荷電流値ごとの許容時間を表した過負荷耐量曲線図で表される。その代表的な値は、135 %過負荷に対して連続運転可能な事などである。

短絡電流については、接続する箇所ごとにその値が異なることから、慎重な検討が必要である。本検討結果は、2.3.1 節に詳述するが、本検討結果をまとめると、以下のとおりである。まず、短絡電流通過直後の再送電がない条件の場合は、31.5 kA-2 sec 及び 10 kA-3 sec の短絡電流に対してケーブルが健全である事が求められる。また、この場合、超電導ケーブル内温度が相当上昇することが予想され、液体窒素温度まで再冷却し、再送電が可能となる時間、すなわち復帰時間を明確化することが重要である。

短絡電流通過直後に再送電される条件の場合は、10 kA-2 sec 通過後の課・通電が可能である事が求められる。ただし、この条件は旭変電所の想定接続箇所における条件であり、66 kV 系統に共通する条件ではない。この為、この許容電流の幅が

極力広い事が、超電導ケーブルの幅広い普及の為に求められると言える。

雷インパルス耐電圧、いわゆる LIWV (Lightning Impulse Withstand Voltage) は 66 kV 系統では 350 kV であり、本超電導ケーブルもこのインパルス電圧に対して健全であることが求められる。

以上を踏まえ、本実証場所において実証ケーブルシステムに求められる基本仕様を表 2.2.1-4 に示す。

表 2.2.1-4 実証場所における実証ケーブルシステムに求められる基本仕様

項目	基本仕様
電圧階級	66kV(最高使用電圧72kV)
電流容量	1.75kA連続 (変圧器定格容量200MVA相当)
過負荷電流耐量	既設変圧器の過負荷条件を満足すること (135%過負荷時に連続運転可など)
短絡電流耐量	・31.5kA-2secでケーブルにダメージなし (短絡電流通過後課電通電なし) ・10kA-2sec通過後の課電・通電が可能 (短絡電流通過直後の課通電あり) ・短絡電流通電後の復帰時間明確化 (短絡電流通過後の課通電あり・なしの双方で)
雷インパルス耐電圧(LIWV)	±350kV

(6) 実証ケーブルの具体的な仕様の検討

実証試験用の超電導ケーブル設計において、表 2.2.1-4 に示した実証ケーブルシステムに要求される系統条件、及び 30 m 検証試験 (2.1.5-5 節) にて確認した曲げ特性、熱機械特性等を考慮し、具体的な仕様を決定した。実証ケーブルの具体的な仕様については、製造過程とあわせて 2.4.2 節にて後述する。

2.2.2 実証ケーブルシステムの付帯機器の検討

(1) 研究開発目的

高温超電導ケーブルシステムと既存系統との接続において、高温超電導ケーブルシステムの故障までを想定した運転・監視、保護・遮断システムなどの付帯機器の基本設計を検討する。

(2) 運転・監視システムの基本設計

高温超電導ケーブルシステムと既存系統との接続において、高温超電導ケーブルシステムの故障までを想定した運転・監視システムを検討する。

図 2.2.2-1 に運転・監視システムの概要を示す。運転・監視システムの役割は主に以下の点が挙げられる。

- ・超電導ケーブルシステム、冷却システムの運転制御、状態監視、機器故障時などの警報監視、記録
- ・超電導ケーブル通過電流・電圧の確認、記録
- ・超電導ケーブル用保護リレー（後述）の動作状況の把握
- ・運転箇所（給電所等）への情報発信

まず、1点目の「超電導ケーブルシステム、冷却システムの運転制御、状態監視、記録、機器故障時などの警報監視」については、超電導ケーブルシステムの各部温度や圧力、冷凍機や液体窒素循環ポンプなどの冷却システム機器の運転状態の把握と運転制御を行うものである。さらに機器の状態を常時監視し、異常の程度によってはシステムを安全方向へすみやかに停止するような制御（フェールセーフ機能）や4点目に挙げた「運転箇所（給電所）への情報発信」を行なおうとするものである。運転箇所においては、超電導ケーブルでの送電ができないような状態であることが警報により通知されると、バイパス回路への切り替え操作を実施し、超電導ケーブルでの送電を停止するといった運用を行なう。2点目の「超電導ケーブル通過電流・電圧の確認」については、通常時に加え、短絡電流などの事故電流が流れた場合や、雷インパルスが侵入した場合の超電導ケーブルシステムの信頼性を評価、検討する為に必要である。3点目の「超電導ケーブル用保護リレーの動作状況の把握」の詳細については（3）保護・遮断システムの基本概念検討にて後述するが、超電導ケーブル内部での事故を判定するための警報発生用として超電導ケーブル保護リレーを設置し、これにより、事故発生時の事故点の把握を容易にして、早期復旧を目指すものである。

図 2.2.1-4 に示したように、超電導ケーブルの電圧・電流データや、冷却システムの運転情報、さらに超電導ケーブル用保護リレーの動作状況の情報は、運転・監視、保護・遮断システムに集約される。このシステムにより、超電導ケーブルシステムの運転状態が常時監視され、そのデータが記録される。また、それらの情報や

保護リレーの動作状況などは制御所を介して運転箇所である給電所等に伝送される。さらに、超電導ケーブルに何らかの異常が発生した場合、このシステムがその状態の重要度を判断すると同時に、超電導ケーブルによる送電を停止すべきと判断した場合には、警報信号を制御所へ送信する。また、このシステムは冷却システムの運転状態や、冷媒温度・圧力・流量などの制御指令を常時監視している。なお、この冷却システムの運転・監視については2.2.3節に詳述する。

(3) 保護・遮断システムの基本概念検討

超電導ケーブルの保護ならびに遮断システムについての検討を実施した。検討結果を図2.2.2-1に示す。

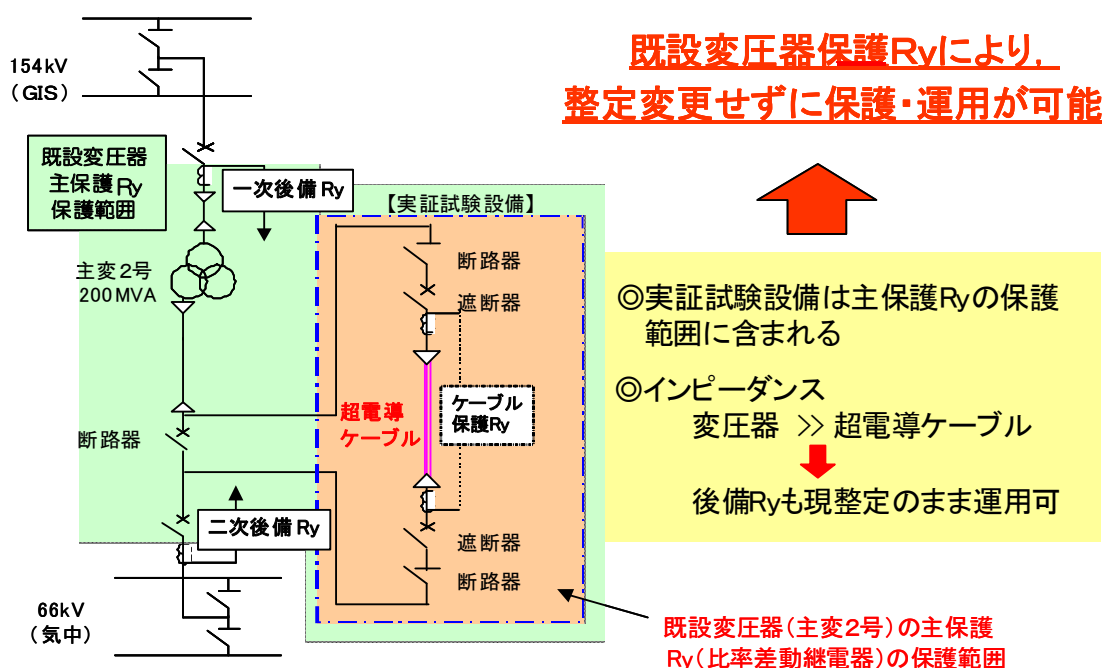


図2.2.2-1 ケーブル保護ならびに遮断システムについての検討

今回検討した154/66kV変圧器の2次側に超電導ケーブルを適用する場合において、超電導ケーブルならびに既設機器の保護という観点から重要となる点は以下のとおりである。

- ・超電導ケーブルは、既設リレーによる保護が可能か、あるいは超電導ケーブルのために新たな保護リレーシステムが必要か、検討する必要がある。
- ・超電導ケーブルを接続することにより、既設の保護リレーの整定変更や仕様の変更は必要か確認する必要がある。

上記の2点について検討を実施したところ、以下の検討結果が得られた。

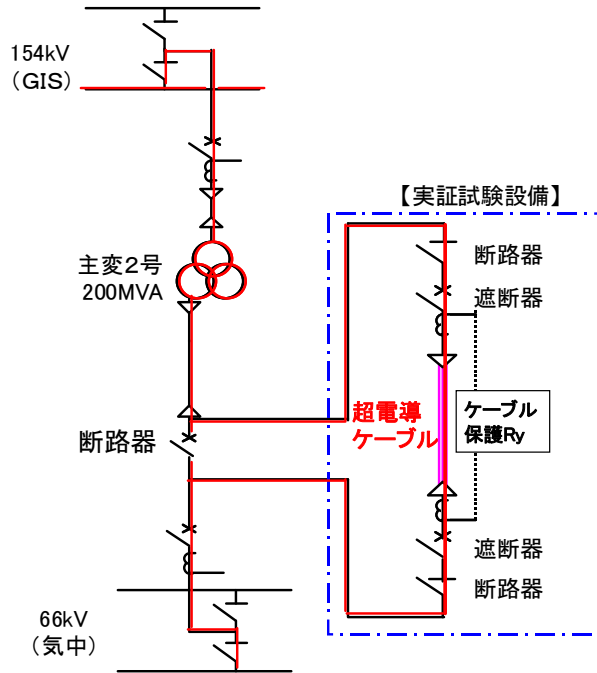
- ・超電導ケーブルは既設変圧器の主保護リレー、後備保護リレーの保護範囲に含まれ、変圧器保護リレーによる保護が可能なことから、超電導ケーブルのための新たな保護リレーシステムは不要である。(以下に詳述)
- ・既設変圧器の主保護リレーは比率差動継電器であり、リレー保護範囲内の短絡・地絡事故時の電流流入に対して、瞬時動作を行う。超電導ケーブル及びその両端に接続される遮断器、断路器、バイパス用断路器はすべて変圧器主保護範囲内に設置されるため、同リレーにより保護可能である。
- ・後備保護リレーは距離継電器であり、事故点までの距離に応じて動作条件が変化する。超電導ケーブルを適用した場合、超電導ケーブル分だけケーブル長が長くなってインピーダンスが増加し、これによって距離継電器の動作範囲が変わることが懸念された。しかし、変圧器のインピーダンスがケーブルに対して非常に大きいため、現整定値のままで変更は不要である(2.3.1節に詳述)。

なお、既設変圧器保護リレーだけを使用した場合には、リレー動作時に事故点に変圧器か超電導ケーブルかを判別することが困難である。これを回避するためには、超電導ケーブルでの事故有無を判別するためのケーブル保護リレーを適用することが有効である。図 2.2.2-1 にはこのケーブル保護リレーの適用例を示している。本リレーはあくまでも超電導ケーブルにおける事故有無の判別を目的として適用するものであり、リレー動作時に遮断器開放シーケンスを組み入れる必要はない。

遮断システム基礎概念の検討のため、上記の接続形態について2種類の事故を想定し、その場合の運用方法について検討を実施した。

まず、通常時の形態については図 2.2.2-2 に示すように、バイパス側の断路器を開放し、超電導ケーブルにより送電を実施する。

【通常形態】



通常時はバイパス側断路器を開放し、超電導ケーブルにて負荷送電

図 2. 2. 2-2 超電導ケーブル運転形態 (通常時)

次に超電導ケーブルに短絡あるいは地絡事故が発生した場合を想定した動作モードについて図 2. 2. 2-3 にまとめた。すなわち、超電導ケーブル部に短絡・地絡事故が発生した場合、変圧器主保護リレーが瞬時動作し、変圧器両端の遮断器を開放するため、変圧器および超電導ケーブルが系統から切り離される。この際、事故点が超電導ケーブル側であった場合には、ケーブル保護リレーも動作する。ケーブル保護リレーが動作しない場合は超電導ケーブル以外（例えば変圧器）が事故原因であり、変圧器再使用は不可能となる。ケーブル保護リレーが動作した場合は超電導ケーブル自体が事故原因であると判断できる。この場合は超電導ケーブル両端の遮断器を開放することにより実証試験設備を停止すると共に、バイパス用の断路器を投入して、変圧器を再使用する。以上、動作モードを時系列にまとめると以下のとおりとなる。

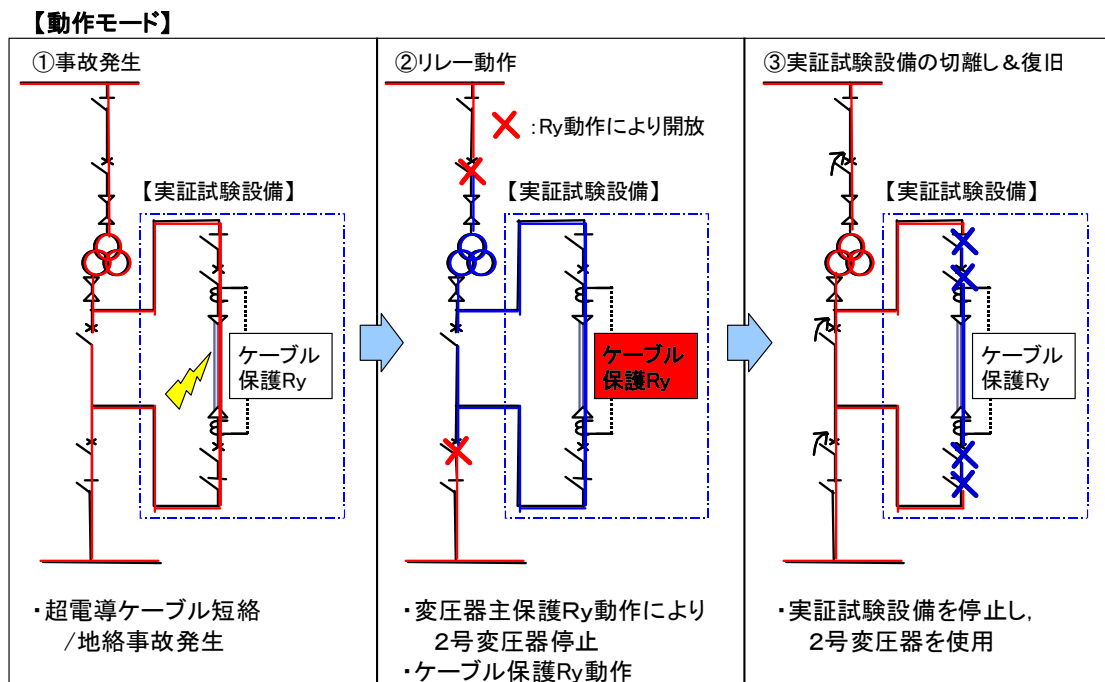


図 2. 2. 2-3 超電導ケーブル運転形態（短絡／地絡事故発生時）

- ・ 超電導ケーブルの短絡／地絡事故発生
- ↓
- ・ 変圧器主保護リレー動作により変圧器停止、超電導ケーブル保護リレー動作
- ↓
- ・ 超電導ケーブル両端遮断器開放により実証試験設備停止
- ↓
- ・ バイパス用の断路器を投入し、変圧器を使用

さらに超電導ケーブル固有のケースであるが、超電導ケーブル用冷却設備の異常時の動作モードを図 2. 2. 2-4 にまとめた。すなわち超電導ケーブル用冷却設備に異常が発生した場合には、その影響度の大きさによって重故障、軽故障等の警報を発信する。重故障は超電導ケーブル運転に重大な影響を及ぼす異常の場合に相当し、直ちに超電導ケーブルを停止する必要がある。この場合には、まずバイパス用の断路器を投入してバイパス回路を併用させる。次に超電導ケーブル両端の遮断器を開放して実証試験設備を停止させる。これにより、送電を停止させることなく、超電導ケーブルの系統からの切り離しを行うことができる。以上、動作モードを時系列にまとめると以下のとおりとなる。

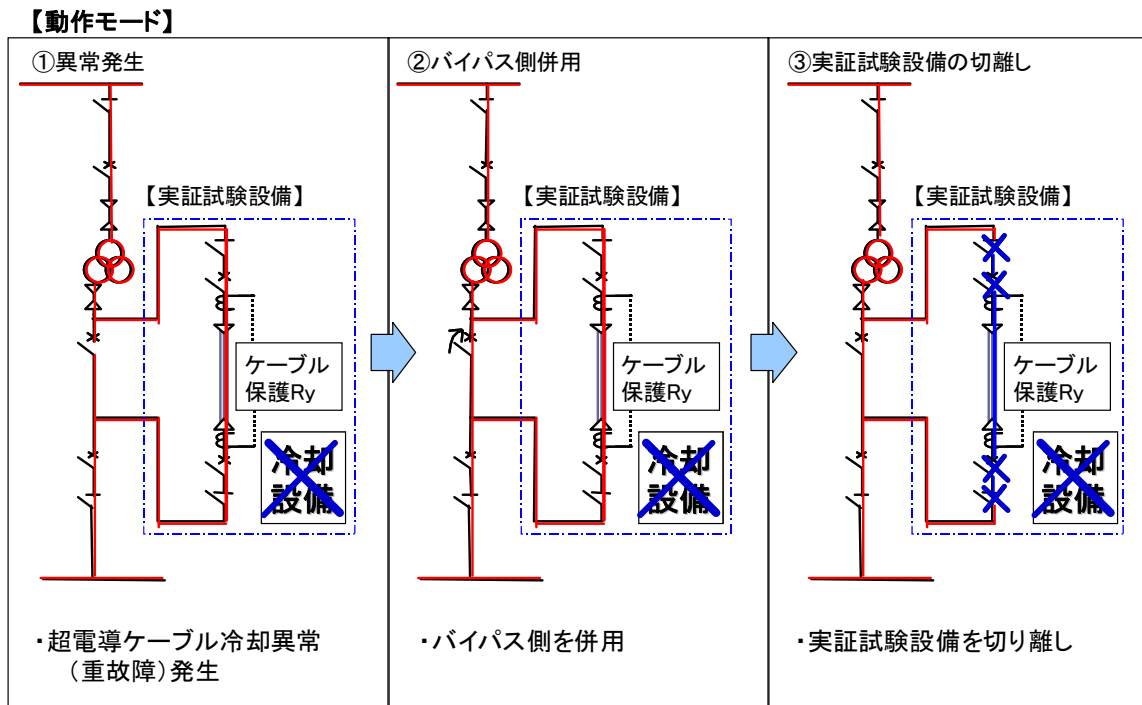


図 2. 2. 2-4 超電導ケーブル運転形態（冷却設備異常発生時）

- ・ 超電導ケーブル冷却異常発生
- ↓
- ・ バイパス用の断路器を投入し併用
- ↓
- ・ 超電導ケーブル両端遮断器開放により実証試験設備停止

(4) 計測・監視システムの概念設計

図 2. 2. 2-5 に、計測・監視システムの概要図を示す。超電導ケーブルシステムは無入運転を指向している為、システムの制御・運転状況の監視に加え、異常時には警報を関係者に通知するシステムを構築する必要がある。これらの役割を持つ機器として、冷却システム用の制御盤と、全体の情報を集約する超電導ケーブル監視盤の 2 つの構成を検討している。冷却システム制御盤は、冷却システムの制御・監視・計測を行うとともに、故障判定・警報表示を行う。同時に、冷却システムの運転情報・計測値・警報情報を超電導ケーブル監視盤に送信する。超電導ケーブル監視盤は、超電導ケーブルの温度・圧力・通電電流等の計測・監視を行うとともに、冷却システム制御盤からの計測値・警報情報と超電導ケーブルの計測値から、重・軽故障判定を行う。

重故障警報の場合、異常警報が給電所に送信され、1 時間以内にバイパス回路に切り替える。また、重・軽故障警報は関係者にメールにて送信され、初期対応が可能な体制とする。加えて、超電導ケーブルシステムの運転状態・計測値・画像を遠方にて確認するため、関係者にメールにて情報送信するものとした。

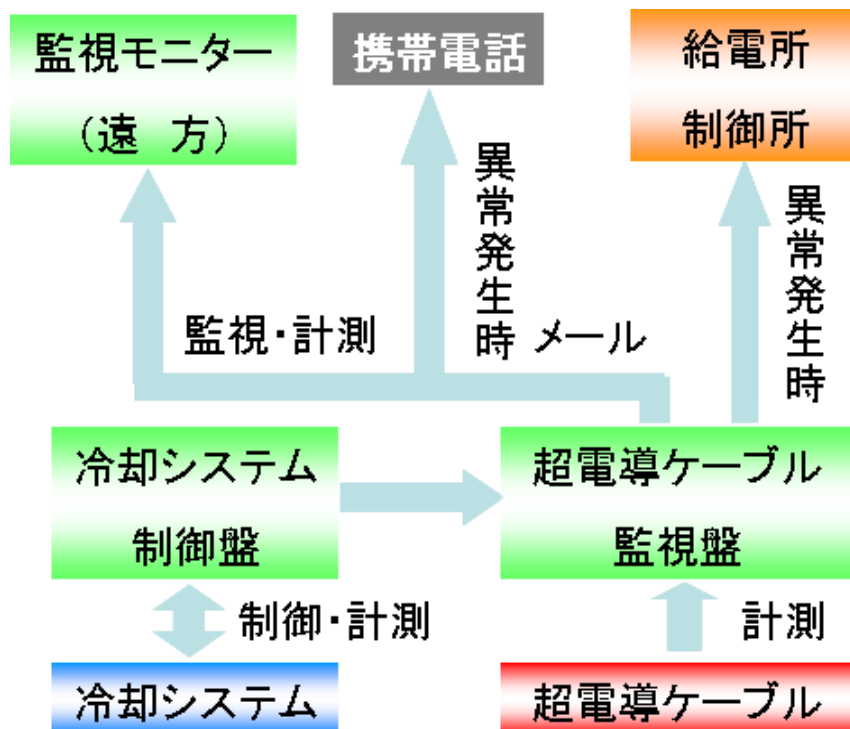


図 2. 2. 2-5 計測・監視システムの概要図

(5) まとめ

接続形態・設備形態・保護協調・異常時対応に関する検討の結果、旭変電所に超電導ケーブルを設置しての実証試験が可能であることが確認できた。

高温超電導ケーブルシステムと既存システムとの接続において、高温超電導ケーブルシステムの故障を想定した運転・監視、保護・遮断システムなどの付帯機器の検討を行なった。運転監視システムについては「超電導ケーブルシステム、冷却システムの運転制御、状態監視、機器故障時などの警報監視、記録」、「超電導ケーブル通過電流・電圧の確認、記録」、「超電導ケーブル用保護リレーの動作状況の把握」、「運転箇所（給電所等）への情報発信」などの役割を持ち、通常時の運転・監視はもちろん、異常時にも速やかな対応がとれるような構成を検討した。

また、保護・遮断システムについては、超電導ケーブルにおいて電氣的な事故が発生した場合でも、既設の変圧器保護リレーにより保護可能であることを確認した。また、早期復旧のために警報用リレーを設置する検討を行なった。さらに、冷却システムが故障した場合でも対応ができるように、運転箇所へ冷却システムの異常警報を通知して、無停電で切り替えが行えるような運転方法の検討を行なった。

2.2.3 冷却システムの設計検討

2.2.3-1 冷却システムのコンセプト

超電導ケーブルは、超電導線材の臨界温度以下に冷却されないとその機能を発揮しない。超電導ケーブルの冷却システムは、冷却するための液体窒素を供給し、超電導ケーブルシステムを運転可能な状態に維持する役割を担う。

冷却システムの基本構成要素は、冷媒の温度を下げる冷凍機、冷媒を循環させるために必要なポンプ、液体窒素の液貯めとなるリザーバタンク、温度、圧力、流量を計測するためのセンサ・装置、冷媒の通路となる配管やバルブ、温度、圧力などを制御するための制御装置等からなる。図 2.2.3-1 に冷却システムの基本構成例を示す。

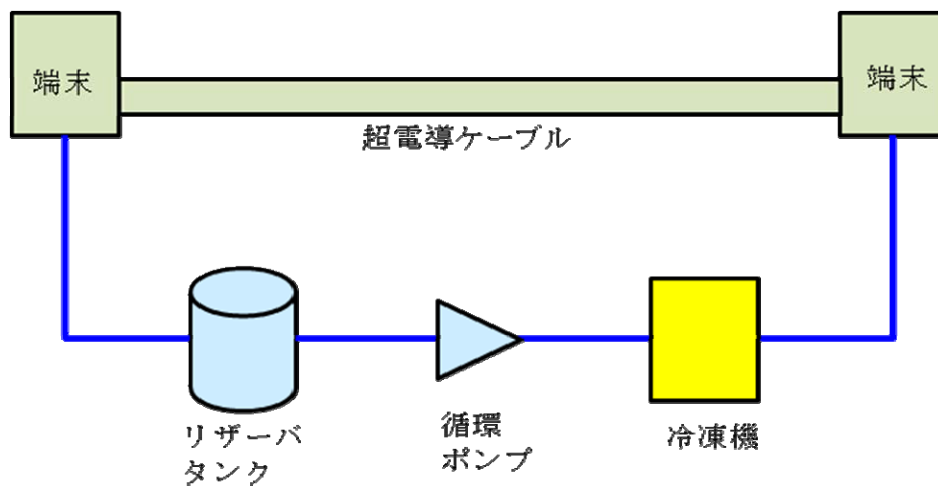


図 2.2.3-1 冷却システムの基本構成例

超電導ケーブルの冷却システムの基本的な運転機能としては、①送電を中断することなく運転でき、②ケーブルの負荷変動にも追随可能であること、があげられる。その基本運転機能を満たしながら、冷却システムに要求される基本特性と本プロジェクトでの対応方針を表 2.2.3-1 に示す。

信頼性については、冷却システムの故障により送電を中断させないことが重要であり、本プロジェクトでは冷凍機やポンプといった重要機器あるいは部品については冗長性をもたせることとし、バックアップ機能を持たせる設計とする。また、ある機器が故障し、バックアップに切り替わる場合も送電を止めないように行うこととする。メンテナンスなどで部品交換をする場合も同じである。

制御、運転については、温度、圧力などを超電導ケーブルが安定運転できる範囲に維持する機能を持ち、範囲を外れるとそれを検知し、警報を発信するシステムを備えていることが必要になる。本プロジェクトにおいても、入口温度の制御、最低圧力の維持などができるシステムとして、各部にセンサを取り付け、異常を検知し、警報を発信するシステムを構築する。

メンテナンス・保守については、機器毎に保守すべき管理項目を明確にし、メン

メンテナンスが容易であることが望まれる。本プロジェクトでは、保守項目を明確にし、メンテナンス手法の検討を行うこととする。

経済性については、高効率で安価なシステムが望まれる。効率については、冷凍機の高効率化が望まれることから、本プロジェクトにおいては、旭変電所における冷却システムに関しては個別の機器開発は実施しないが、後述する冷却システムの高性能化の研究において、大容量高効率冷凍システムの開発を実施している。システム全体の経済性としては、信頼性をあげるための冗長性とバランスをとり検討していく。

表 2.2.3-1 冷却システムへの要求事項と本プロジェクトでの対応方針

項目	要求事項	本プロジェクトでの対応方針
信頼性	冷却システムの故障によりシステムの運転を止めないこと	冷凍機、ポンプ等主要機器は冗長性を持たせ、連続運転可能とする。 故障機器からの切り替えは自動で行うこととする。
制御・運転	<ul style="list-style-type: none"> ・温度・圧力などの長期安定運転が可能なシステムであること。 ・異常検知、警報発信のシステムを備えていること。 	入口温度を設定値に制御、制御幅は検討 最低圧力以上の維持 警報システムの構築
メンテ・保守	保守すべき管理項目が明確であること、メンテが容易であること	項目の明確化、メンテナンス方法の検討、実証
経済性	高効率、安価であること	冷凍機の高効率化は対応せず。 信頼性とのバランスを考えた設計の実施

2.2.3-2 冷却方式の検討

冷却システムの構成、配置を考えるにあたり、過去の超電導ケーブル冷却システムの構成や、既設送電ケーブル用の洞道を冷却している間接水冷システムの構成について調査を行った。

これまでの超電導ケーブル用冷却システムについては、図 2.2.3-1 に示すような構成となっており、基本的には超電導ケーブルと冷凍機とポンプとが一つの冷却パスに並んでおり、冷媒である液体窒素がそれらのパスの中を循環する形式であった。この方式をここでは直接冷却方式と呼ぶこととする。

一方、洞道の間接水冷システムの構成は図 2.2.3-2 のようになっている。洞道を冷却するための冷却水は、送水ポンプにより送りだされ、温度が温まって水槽に戻ってくる。一方、この水槽の水は、チラーポンプにより冷凍機に送られ、水の温度は冷却されて水槽に戻ってくる方式である。洞道から帰ってくる温まった水と、冷凍機から戻ってくる冷却された水とが、水槽の中で混合されて全体に水温を下けている。冷凍機が、洞道に送られた冷却水を間接的に冷却していることから、この方式を間接冷却方式と呼ぶことにする。

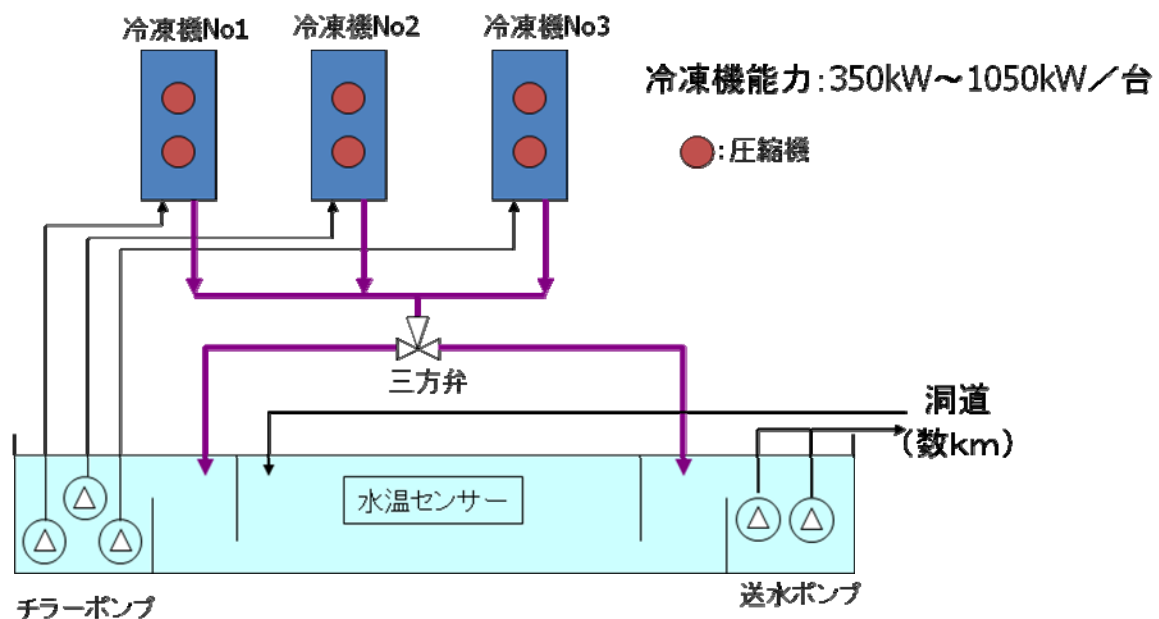


図 2.2.3-2 洞道間接水冷システムの構成例

このように冷却方式には直接冷却方式と間接冷却方式とがあることが解り、両方式について比較検討を行った。両者の比較を表 2.2.3-2 にまとめる。

間接冷却方式の特徴は、①冷凍機が冷却対象（ここでは洞道）と同じパスになっていないので、冷凍機の故障により冷凍機のパスが閉塞されても、冷却対象側に冷媒が遮断される恐れはない。また、②大きな冷媒槽を有しているのも、冷凍機が故障してもこの槽に蓄えられた冷水により熱容量的に許容できる時間は冷却対象を

冷却し続けることができる。また、冷媒槽の圧力を低下させることで冷媒を冷却する方式も付属することが可能である。③冷凍機の熱交換部分の圧力損失は小さくないが、冷却対象と冷凍機が分かれているので、冷却対象側の圧力損失を直接冷却システムと比べて小さくすることができる。などがあげられる。

一方、直接冷却方式については、①間接冷却と比べて熱効率がよい。これは、間接冷却が、冷媒対象を冷却する冷媒を、冷凍機側の冷媒で冷却することから、冷媒同士の熱交換、冷凍機との熱交換とを考える必要があることに対し、直接冷却ではケーブルを冷却する冷媒を直接冷凍機で冷却するので、熱交換は一回しか考えないで良いからである。また、②冷凍機の出力量調整により、冷媒の温度制御に対する応答性がよい、などが考えられる。

間接冷却システムは圧損を下げる観点から、長距離ケーブルへの冷却に適していると考えられる。一方、直接冷却方式は、応答性の観点から負荷変動の大きいケーブルで比較的短尺ケーブルに適していると思われる。

なお、間接冷却システムの液体窒素同士の熱交換方式については、適用例は確認されておらず、当該熱交換部については開発要素があるものと考えられる。

実用化時の長距離超電導ケーブルにおいては、間接冷却方式が望ましいと思われるが、本プロジェクトにおいては、上記熱交換部分の開発及び信頼性検証に相当な時間がかかると考え、直接冷却方式を選択した。なお、間接冷却方式の熱交換部については後述する冷却システムの高性能化の研究において、要素技術の検証を行った。

表 2.2.3-2 直接冷却方式と間接冷却方式の比較

項目	冷凍機間接冷却方式	冷凍機直接冷却方式
構成		
構成の特徴	超電導ケーブル液体窒素ハスから熱交換器を介し冷凍機を分離	超電導ケーブル液体窒素ハスに冷凍機を挿入
実績	地中用送電ケーブルの間接冷却 (液体窒素冷却は熱交換器等開発要素あり)	東電-SEI100mケーブル、Super-GMケーブル
運用の特徴	1) 冷凍機の故障(閉塞、熱侵入増加等)に際しても超電導ケーブルシステムへの影響が少ない。 2) 熱交換器にLN2減圧装置等を組み合わせ冷凍機故障時のバックアップ運転が可能。 3) 超電導ケーブルシステム側の圧力損失が小さい。	1) 冷却システム全体の熱効率が良い。 2) 超電導ケーブル入口温度の応答性が良い。 (システムの熱負荷測定試験に適する)

2.2.3-3 冷凍機配列の検討

(1) 冷凍機の種類

冷凍機的能力と超電導ケーブルの熱負荷は一致することがなく、冷凍機を組み合わせることで要求仕様を満足させることが必要である。現状の液体窒素温度付近で用いられる各種冷凍機の比較を行った。まとめを表 2.2.3-3 に示す。また、冷凍サイクルの特徴として、図 2.2.3-3 に各冷凍サイクルの 1 台あたりの冷凍能力を示す。

パルス管型冷凍機については、実績に乏しく、信頼性について不明確である。ブレイトン型については多数の実績はあるが、冷却容量が大容量向けであり、将来的には採用の可能性は十分にあるが、本プロジェクトでは、そのような大容量が必要ない。これらのことから、適度な冷凍能力をもち、十分な実績と、良好な効率特性を有する、スターリング冷凍機を選定した。

表 2.2.3-3 冷凍サイクルの比較

項目	スターリング冷凍機	スターリングパルス管	GM型パルス管	ブレイトンサイクル
冷凍容量(kW)	1kW(77K) 低温での容量低下:大	0.3及び1kW(77K) 低温での容量低下:大	1kW(65K) 低温での容量低下:大	10kW以上 低温での容量低下:小
メンテナンス間隔	6000~8000時間 メンテ所要期間 1ヶ月 △	長寿命 ○	長寿命(*1) ○	10,000時間以上(*2) メンテ所要期間 1週間 △
COP(運転効率)	0.067@77K(1kW) ○	0.038@77K(10W) △	0.036@65K(850W) △	0.06@77K ○
ケーブル用実績	有り	無し	無し	無し (He液化機実績多し)
現状レベル	○(カタログ品)	△(評価中)	×(開発中)	○(実用化)
騒音	80dB/台(*3)	50~60dB	50~60dB	88dB
設置スペース(5~10kW)	9m ² /kW(*4) △	4m ² /kW ○	2m ² /kW(*5) ○	8m ² /kW △
課題	騒音、保守対策 大容量化が必要	信頼性 熱交換器、大容量化	信頼性 圧縮機、大容量化	騒音、小容量化(*6)、 保守対策

(*1) 常温部ロータリーバルブの寿命は1年。

(*4) メンテナンススペースを含んだ数値。

(*2) 圧縮機の冗長化、2台とすることで停止時間をゼロにできる。(*5) 複数のパルス管に対し圧縮機を1台に集約可能。

(*3) 実際の騒音レベルは80dB×所要台数での騒音となる。

(*6) ISTECC/大陽日酸が2kW級を開発。

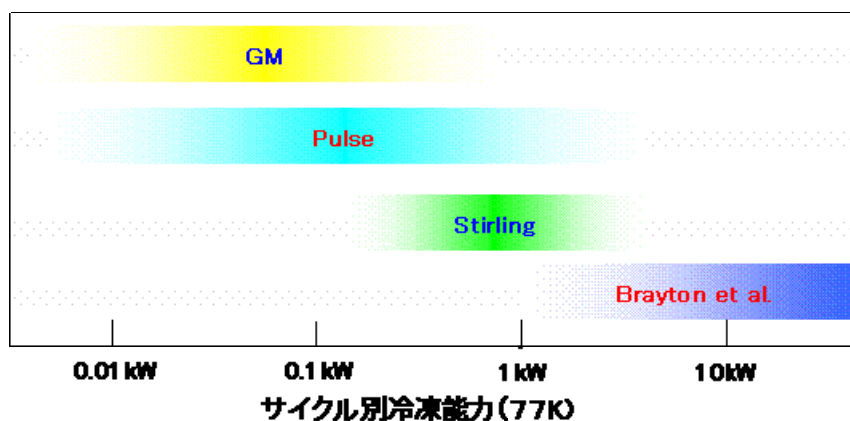


図 2.2.3-3 冷凍サイクルの冷凍能力

(2) 熱負荷の算出

実証運転時の熱負荷を算出するため、超電導ケーブルを接続する東京電力旭変電所の送電電流の実績を調査した。表 2.2.3-4 に冬季、春季、夏季の典型的な負荷パターンにおける送電電流の最大値と最小値を示す。この結果より、最大送電電流を 1000 A、最小送電電流を 500 A と想定することとした。この結果を元に超電導ケーブルの日間負荷平均送電電力量の推定を行った。図 2.2.3-4 に示すように平均的な日間電力の変動を参考に 18 時から 24 時までを中間送電電流の時間帯とし、この間の送電量を 750 A と想定することとした。

表 2.2.3-4 旭変電所における月別送電電流

月	送電電流 (Arms)	
	最大	最小
2月	約 800	約 500
4月	約 800	約 500
8月	約 1000	約 600

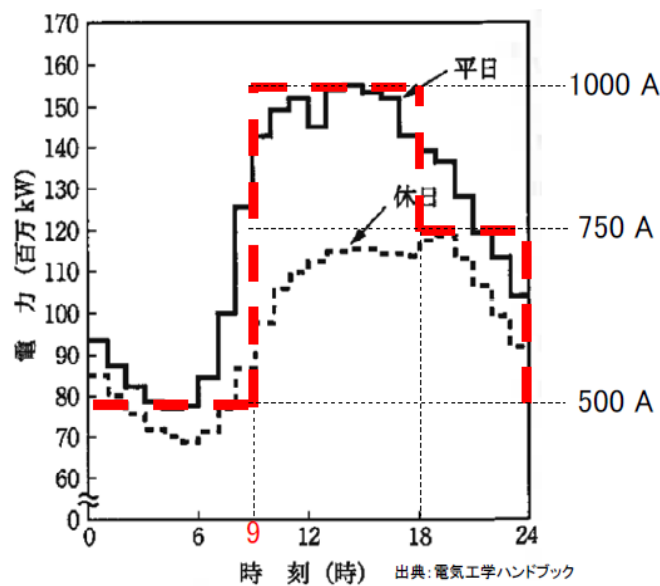


図 2.2.3-4 日間負荷変動の想定

この結果より、必要なスターリング冷凍機の台数の検討を行った。ケーブル熱負荷からケーブル無負荷通電時 (0 A)、最大負荷時 (1 kA)、超電導ケーブルの定格電流値 (1.75 kA) におけるケーブルの熱負荷を計算し、これに冷凍機側の熱負荷を加え、必要な冷凍機台数を算出した。結果は表 2.2.3-5 に示すように最大で 5 台の冷凍機の運転が必要であり、予備機 1 台を加えた 6 台を実証運転に必要な冷凍機台数とした。

(3) 配列方法の検討

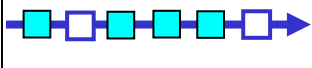
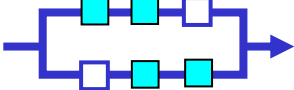
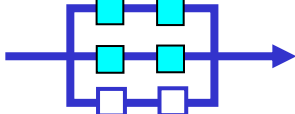
6 台の冷凍機の配列方法の検討を行った。これまでの超電導ケーブル冷却では、すべての冷凍機を直列に配置した方式であるが、今回は冷凍機が多く、冷凍機内の圧力損失が増えることが懸念された。そこで圧損低減と信頼性向上を考慮して並列配列方式についても検討を行った。検討に際しては将来の実用化（大容量・ケーブル長距離化）を考慮し、圧損を低減可能でかつローテーションでの運転が容易なシステムとして3 並列方式を選択した。（表 2. 2. 3-6 参照）

表 2. 2. 3-5 冷凍機必要台数

送電量	0kA	1kA	1.75kA
超電導ケーブル熱負荷	1,746	2,112	2,780
冷凍機負荷(圧損)	994		
全負荷	2,740	3,106	3,774
必要冷凍機台数	3.7	4.1	5.0

冷凍機能力 750W@67K

表 2. 2. 3-6 冷凍機の配列による特性比較

	直列	並列	3並列
配置			
流量[l/min]	40	20	13. 3
圧損[kPa]	63	13	7
冷凍機故障時の対応	予備機運転、該当機を切離し。	予備機運転、該当機を切離し。	パスごと予備パスに切替え。
メンテナンス・ローテーション	機器毎の運転時間に留意し実施。	機器毎の運転時間に留意し実施。パスの熱バランスに留意	予めローテーション運転を想定し、パスごとに実施するのでシンプル。
実績	100m、Super-ACE（最大4台直列）	なし	地中線冷却（予備機1セット）
選択	実績多数だが、実用時の大容量システムには圧損が大きく不向き。	冷凍機の台数により流量を変える必要があり、制御が複雑。	パス毎にON/OFFするので流量制御が容易。

2.2.3-4 実証用ケーブルの冷却システム構成

これまでの検討を踏まえ、実証用冷却システムの機器の構成については、図 2.2.3-5 に示す構成を考え、詳細検討を行った。本システム構成の特徴を以下に示す。

- ・冷凍機は予備機を入れて6台とし、2.2.3-3 節で検討したように冷凍機は2台×3 並列とする。
- ・ポンプは2台並列運転とする。
- ・冷凍機とポンプが一つの直列のパスに入っていないことから、冷凍機とポンプの故障はそれぞれ独立に扱うことができる。
- ・冷凍機6台のうち、必要な台数だけ ON して運転し、不必要なものは OFF にしておく。ただし、OFF 冷凍機は熱負荷となる。
- ・OFF 冷凍機も冷却されていることから、OFF から ON への切り替え時間を非常に短くすることが可能である。
- ・冷凍機が故障した場合は、冷媒はバイパス回路を流れ、冷凍機は切り離し修理することができる。
- ・ポンプについては、交互運転して使用することを前提として、後述するシステム検証および実証試験を通じて運転方法を最終決定する。
- ・交互運転で1台のポンプが故障した場合は、他方を運転し、故障ポンプは切り離す。
- ・冷媒はポンプを出たあと、三分岐することになるが、この分岐は配管、バルブの状態によってきまり、能動的な制御はできない。長期の信頼性については、長期実証試験を通じて検証・評価した。
- ・三分岐がうまくいかない場合は、図の点線を追加し、各冷凍機のパスにポンプを直列に入れることで流量を制御するように組み替える。

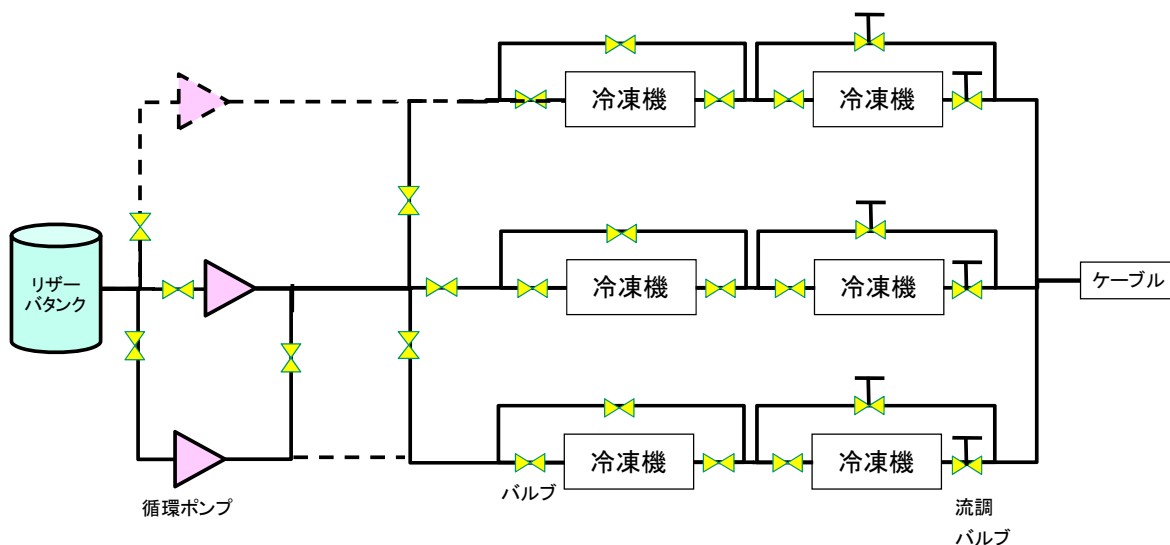


図 2.2.3-5 実証用冷却システムの構成

2.2.3-5 開発ステップ

(1) 開発ステップの検討

本プロジェクトにおいて冷却システムは実証運転において超電導ケーブルを1年間に渡り安定して冷却するだけでなく、将来の実用化を見据え、下記の項目に関し研究を行っている。

- ・冷却方法の検討：運転効率および信頼性を考慮した冷却方式の設計・検討
- ・制御方式の検討：安定した超電導ケーブル冷却のための温度、圧力、流量の制御
- ・高信頼化の検討：機器冗長化、バックアップ方式の検討、構成機器の異常モード検討

これらの研究を効率的に行うために段階的に冷凍システムの構築、検証を3つのステップに分けて行うこととした。

30m 検証試験：30m 実証ケーブル試験用の冷却システム。

システム検証：実証運転の事前検証を兼ね、冷却システムの主要部を構築。

実証運転：変電所における超電導ケーブル実証試験。

このスケジュールを表2.2.3-7に示す。30m 検証試験の研究成果も踏まえ、システム検証用の冷却システムの構築・検証を行い、これらの成果を受けて最終的な実証運転用冷却システムを決定している。

表 2.2.3-7 開発ステップのスケジュール

H20年度	H21年度	H22年度	H23年度	H24年度
	30m検証試験	システム検証	実証運転	

(2) 開発ステップ毎の検証項目

開発ステップ毎の検証項目を図2.2.3-6に、またそこでの冷却システムの構成を表2.2.3-8に示す。

30m 検証試験では30m 検証ケーブルの冷却に必要な冷却量を冷凍機2台で賄い、これを直列に配置することで実証運転中の冷凍機直列配置の運転状態を検証可能なものとしている。冷凍機内部のシーケンスは実証運転を想定したものとなっているが冷凍システムの運転は手動で行うことで構成機器（冷凍機、窒素循環ポンプ）

の基本的な運転方法の確認を行い、問題点の抽出を行なうこととしている。また、圧力制御に関しては別に記述するヒータ加圧制御とガス加圧制御の比較を実施する。また、窒素循環ポンプ、リザーバタンクは 30 m ケーブル検証試験にあわせた能力、大きさとしている。

システム検証ではすべての機器は実証運転と同じものを使用し、実証運転時に必要となるシステムとしての制御性、メンテナンス性、故障時の冗長系への切替え特性、ならびに実証運転時の冷却システムの設置方法などを検証する。冷凍機は 3 並列で設置するが各パスは 1 台ずつで構成する。また超電導ケーブルがないため模擬負荷で代用する。

実証運転では超電導ケーブルの長期冷却運転により、これまでの検討項目を検証するとともに将来の実用化に向け課題の抽出を行なう。

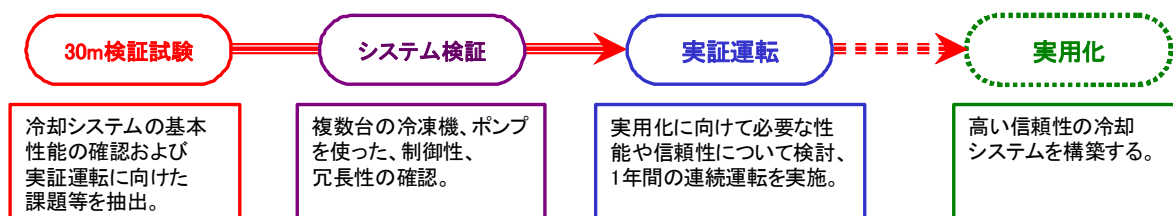


図 2. 2. 3-6 冷却システムの開発ステップ毎の検証

表 2. 2. 3-8 開発ステップにおける冷却システムの構成

主要機器		30m検証試験	システム検証	実証運転
冷凍機	スターリング冷凍機	2台×1列	1台×3並列(計3台)	2台×3並列(計6台)
循環ポンプ	遠心式ポンプ	30mケーブル用直列1台	240mケーブル用並列2台	同左
リザーバタンク	液の膨張代吸収圧力制御	容積300ℓ循環ポンプ内蔵ヒータ制御	容積1,000ℓポンプ別置きヒータ制御(冗長付)	同左
制御	温度制御 運転(機器)切替	インバータなし	台数制御あり	同左 同左
ケーブル		30m級	模擬	240m級
試験場所		住友電工熊取試験場	前川製作所守谷工場	東京電力旭変電所
装置イメージ図				
塗りつぶし(水色): 設置 塗りつぶし(黄色): 設置(容量が実証時と異なる) 白抜き: 未設置				

2.2.3-6 冷却システム検証

前川製作所守谷工場において、実証運転と同じものを使用し、実証運転時に必要となるシステムとしての機能性、制御性、メンテナンス性、故障時の冗長系への切替え特性の検証を行った。システム検証試験装置の構成を図 2.2.3-7、試験内容を表 2.2.3-9 に示す。

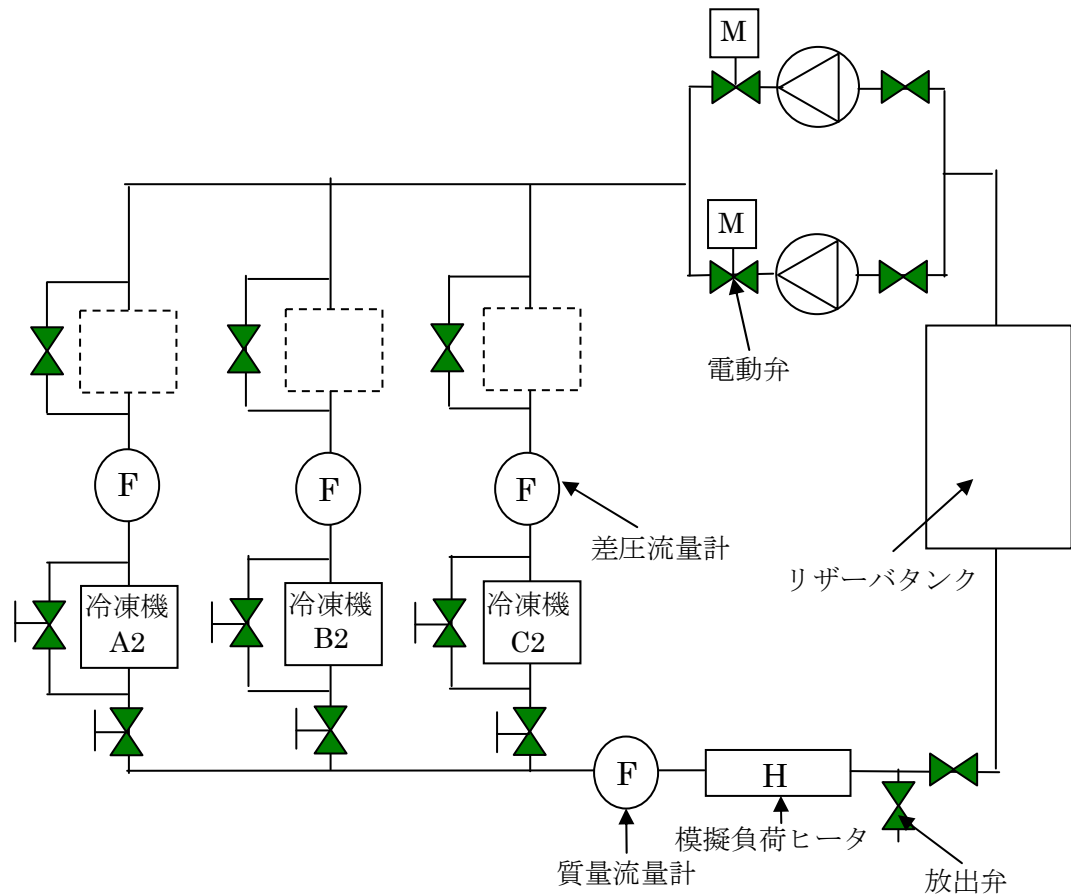


図 2.2.3-7 システム検証試験装置構成

表 2.2.3-9 システム検証試験内容

試験項目		目的	確認項目
機器性能	初期冷却試験	貯液、予冷、循環の手順を確認する。	冷却システムの予冷・循環手順
	循環ポンプ能力確認	循環ポンプの揚程と流量の関係を確認	設計値と同等であること
	冷却能力確認	冷凍機的能力を確認する。	設計値と同等であること
制御性	流量制御試験	流量が設定値で安定していること、3並列へ分配することが可能であること。	設定値で一定であること。
	温度制御試験 (ON-OFF制御)	質量流量計内温度が冷凍機ON-OFF制御により70±1Kで制御可能であることを確認する。	70±1Kで制御可能であること。
	温度制御試験 (インバータ制御)	質量流量計内温度が冷凍機の回転数制御により70±0.1Kで制御可能であることを確認する。	70±0.1Kで制御可能であること。
	温度制御試験 (コールドヘッドヒータ制御)	質量流量計内温度が冷凍機コールドヘッドヒータの出力制御により70±0.1Kで制御可能であることを確認する。	70±0.1Kで制御されていること。
	圧力制御試験	設定圧力で制御可能であることを確認する。	所定の圧力で制御可能であること。
信頼性	循環ポンプローテーション試験	起動循環ポンプが一定時間経過で切り替わることを確認する。	循環停止せずに切り替わること。
	冷凍機ローテーション試験	常時停止冷凍機が一定時間経過で切り替わることを確認する。	循環温度に大きな影響なく切り替わること
	警報確認試験	各機器の警報発生時の動作を確認する。	想定通りの動作が行われること。
	冷凍機故障時動作確認試験	冷凍機故障発生時に予備の冷凍機が自動で起動することを確認する。	故障発生後、問題なく予備機に切り替わること
	循環ポンプ故障時動作確認試験	循環ポンプ故障発生時に予備のポンプが起動し切り替わることを確認する。	故障発生後、問題なく予備機に切り替わること
	冷却水系統故障切り替え試験	冷却水系統の故障時に共通ラインに切り替り、故障列の冷凍機が運転継続可能であることを確認	故障発生後も冷凍機の運転に影響がないこと。
	自動再起動確認試験 (停電模擬試験)	停電時を模擬し、冷却システム停止後どの程度であれば自動再起動が可能であるかを確認する。	一定時間停止後、初期冷却手順無しで再起動可能であること。
	冷凍機メンテナンス	冷凍機の交換を実際に行い、方法・手順を確認する。	交換手順を確立する。
循環ポンプメンテナンス	循環ポンプの取り付け・取り外しを実際に行い。方法・手順を確認する。	交換手順を確立する。	
総合運転	日負荷変動試験	1日の負荷変動を模擬し、制御が追従可能であるかを確認する。	負荷が変動した場合でも設定範囲内で温度制御が可能であること
	過負荷変動試験	負荷を急変させた場合でも循環運転が維持可能であるかを確認する。	負荷急変の場合でも問題なく運転可能であること。

(1) 機能性確認

(a) 冷却システム初期冷却手順確認試験

冷却システムの初期冷却手順の確認を行った。初期冷却手順は、リザーバタンクへの貯液、系内の予冷、循環ポンプの起動の順番で実施している。リザーバタンクへの貯液以降の冷却手順は以下の通りである。

- ①冷凍機を全台起動させる。
- ②LN2 外部放出ラインを開ける
- ③リザーバタンク内圧力を 0.05 MPaG~0.07 MPaG まで加圧し、タンク内の液体窒素を系内に送り、系内を冷凍機各列出口温度、および質量流量計出口温度が 80 K となるまで予冷する。
- ④予冷完了後、サブクール度を取るためリザーバタンク内を加圧する。
- ⑤循環ポンプ起動、循環冷却開始。

循環ポンプ起動後にポンプ部分で液体窒素がガス化すると循環が行えなくなるため、サブクール度を取るようポンプ起動前に④の作業を実施している。試験では、リザーバタンク内圧力での飽和温度とリザーバタンク底面温度の差を基準としている。図 2. 2. 3-8 に循環ポンプ起動前後のサブクール度、循環流量、タンク内圧力、質量流量計出口温度、タンク底面温度のトレンドを示す。図に示すように、サブクール度が 10 K 程度であれば問題なく循環冷却が開始可能であることを確認した。本試験において、初期冷却手順を確認することができた。

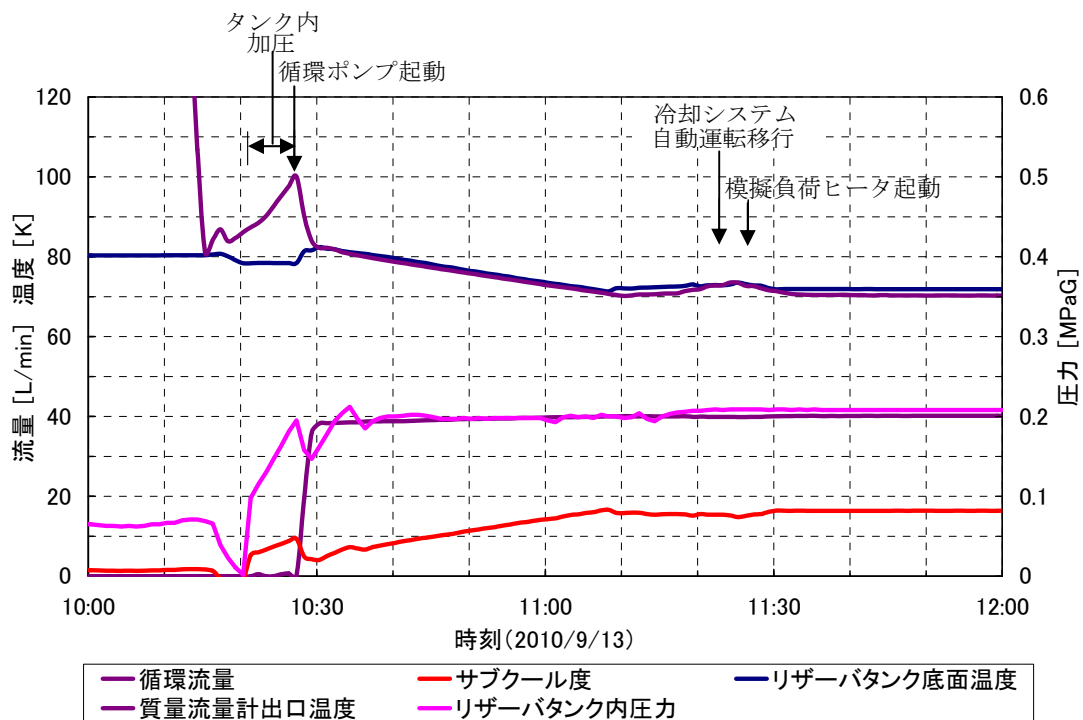


図 2. 2. 3-8 循環冷却開始時トレンド

(b) 循環ポンプ能力確認

今回の冷却システムに使用している循環ポンプがメーカー仕様通りの性能を有しているかの確認を実施した。試験は、循環ポンプの回転数が 3500、4000、5300 rpm の条件で行い、それぞれの条件で流量を変更し流量-揚程の測定を実施した。測定結果を図 2.2.3-9 に示す。

図 2.2.3-9 に示すように、それぞれの測定結果でメーカーの設計能力より高いことが確認された。

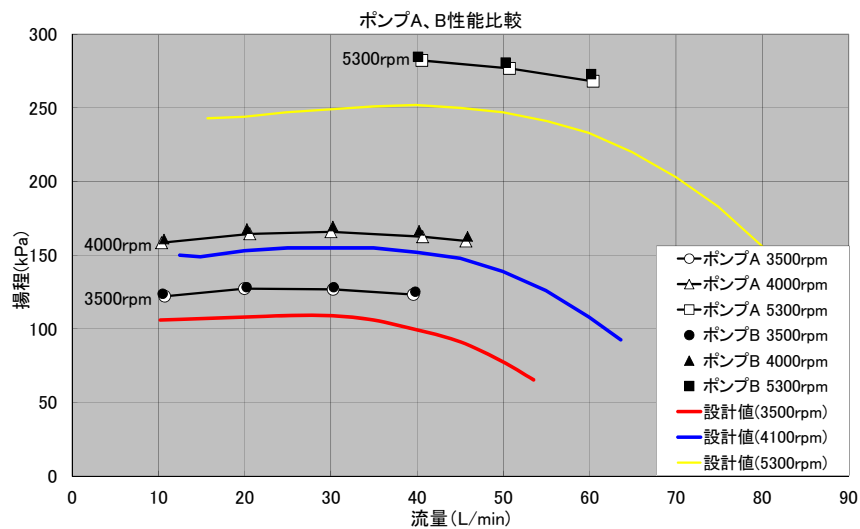


図 2.2.3-9 循環ポンプ能力確認結果

(c) 冷却能力確認

循環ポンプ同様、冷凍機の冷却能力がメーカー設計値通りであることの確認を実施した。冷却能力については、冷凍機出入口温度と流量より算出している。冷却能力は供給温度により変動があるため、本試験結果はコールドヘッドが 68 K の場合における試験結果である。また、システム検証試験では使用冷凍機が 3 台であるため 3 台分の結果である。表 2.2.3-10 に測定結果を示す。

いずれも、コールドヘッド温度 68 K における設計能力 (810±40 W) を満たしていることが確認された。

表 2.2.3-10 冷凍機能力測定結果

	冷凍能力 (@コールドヘッド温度約 68 K)
冷凍機 A2	778 W
冷凍機 B2	846 W
冷凍機 C2	771 W

(2) 制御性確認

(a) 流量制御確認試験

循環ポンプの周波数を一定とした条件で、循環流量が 40 L/min 一定で制御可能であることを確認した。また、各列の流量が均等となるように各列出口の流量調整弁を調整し、調整後も全体流量は一定であることを確認した。試験中の流量トレンドを図 2.2.3-10 に示す。図に示すように、循環流量は一定制御されており、冷凍機の発停の影響もないことが確認された。

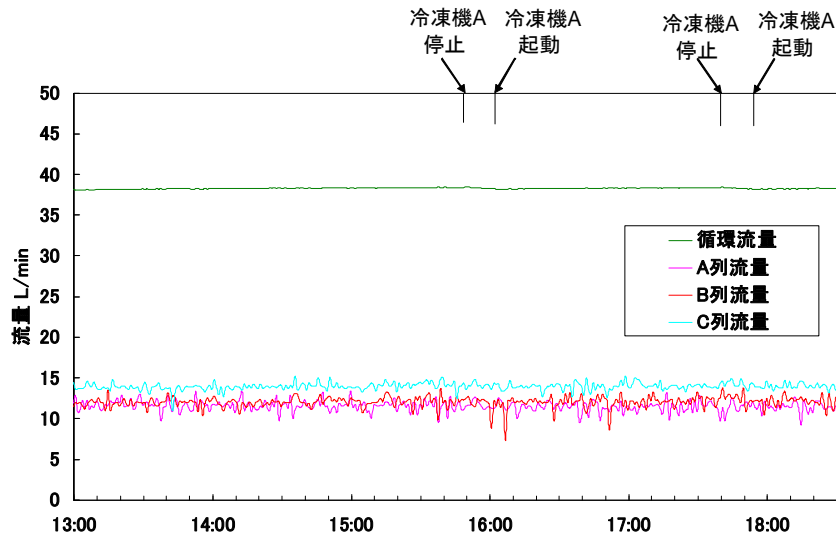


図 2.2.3-10 流量変化トレンド

(b) 温度制御確認試験

温度制御方式の制御状況の確認を行った。方式は冷凍機の ON-OFF 制御、インバータ制御、冷凍機内部のヒータ制御の 3 種類に関して確認を行った。

① 冷凍機 ON-OFF 制御

冷凍機 ON-OFF 制御については以下の手順で行われている。温度制御の概念図を図 2.2.3-11 に示す。

1. 制御点温度が設定値範囲の上限または下限に到達
2. 到達から設定時間（システム検証時は 1 分）経過後も設定温度範囲外であれば冷凍機が 1 台起動または停止する（上限時は起動、下限時は停止）。
3. 冷凍機発停動作後、設定時間内に制御点温度が制御範囲内となった場合は制御動作終了。なおも範囲外の場合は範囲内となるまで冷凍機がさらに起動または停止する。

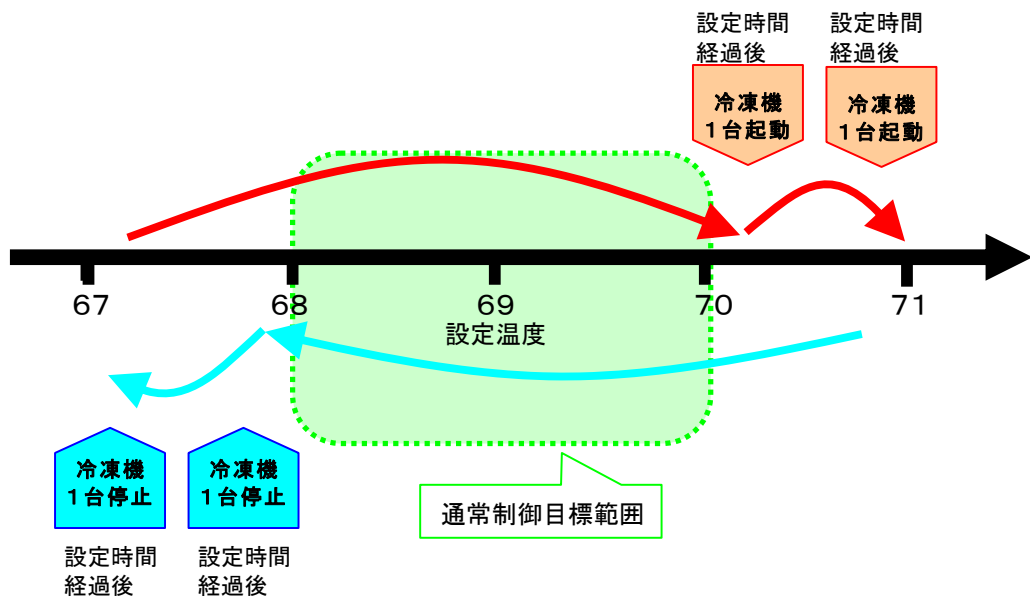


図 2. 2. 3-11 冷凍機 ON-OFF 制御概念図

制御点は冷凍機通過直後の質量流量計出口温度として、設定温度は 70 ± 1 K で試験を実施している。試験は、温度を変動させるために模擬負荷ヒータ出力を冷凍機 3 台分の熱量から冷凍機台数 2.5 台となるよう設定し、実施した。図 2. 2. 3-12 に試験中の温度変化トレンド、図 2. 2. 3-13 に冷凍機運転台数パターンを示す。

図に示すように、冷凍機発停により制御温度範囲内で制御されており、制御可能であることが確認できる。

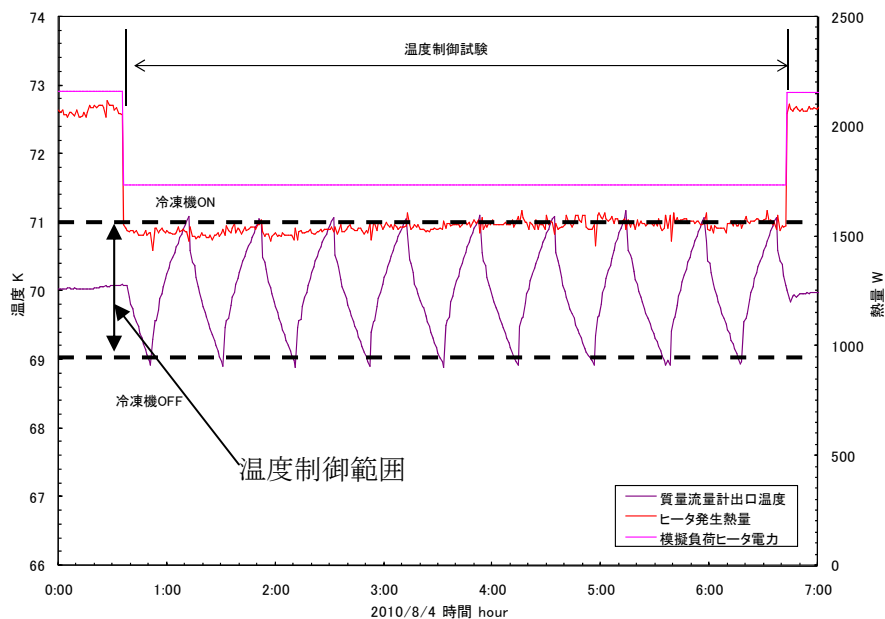


図 2. 2. 3-12 温度トレンド

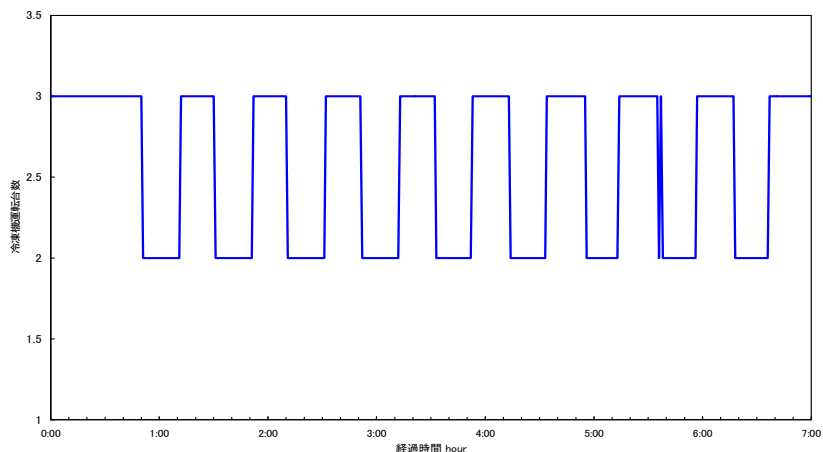


図 2.2.3-13 冷凍機運転台数

② 冷凍機インバータ制御

冷凍機インバータ制御による、温度制御状態を確認した。温度設定は 70 ± 0.1 K として、ON-OFF 制御の際と異なり、ヒータ出力を徐々に低下させ試験を行っている。図 2.2.3-14 に温度制御状況を示す。なお、インバータによる周波数変動可能範囲は 20 % 以内である。

ヒータ出力低下にともないインバータ制御により周波数が低下するため、図に示すように、周波数調整で冷却能力の調整が可能な範囲では設定温度 ± 0.1 K 以内の制御が可能である。しかし、負荷範囲によっては周波数変動可能範囲を超えてしまい、適切な制御が行えず、冷凍機の過度な発停が繰り返される部分が存在する。

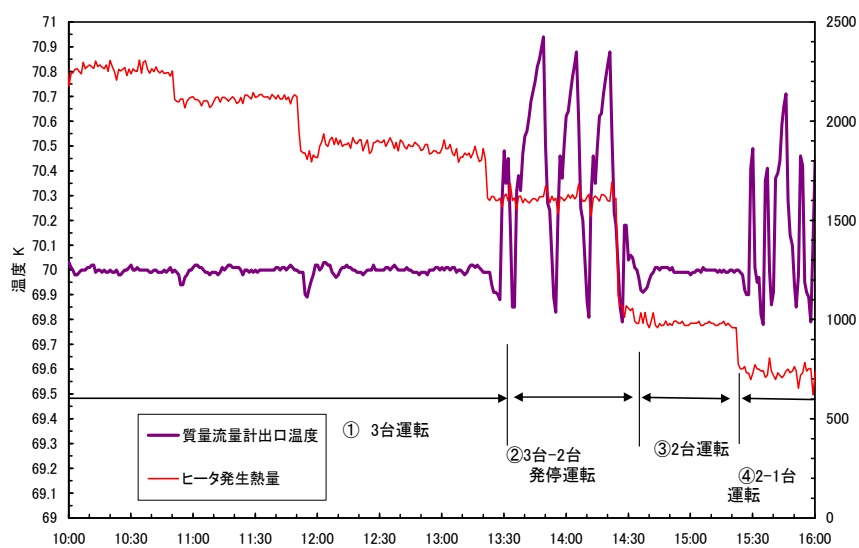


図 2.2.3-14 インバータ制御時温度変化

③ 冷凍機ヒータ制御

冷凍機ヒータ制御（冷凍機内のコールドヘッドヒータ電力制御）による、温度制御状態を確認した。設定温度は $70 \pm 0.1 \text{ K}$ として、インバータ制御と同様に模擬負荷ヒータ出力を徐々に下げていき温度制御状態を確認した。図 2.2.3-15 に結果を示す。図に示すように、模擬負荷ヒータ出力を低下させた場合においても設定温度範囲内で制御できていることが確認できる。また、インバータ制御と異なり制御不可能な範囲はない。

この試験結果から今後は、細かい範囲での温度制御に関しては冷凍機ヒータ制御を使用することとした。

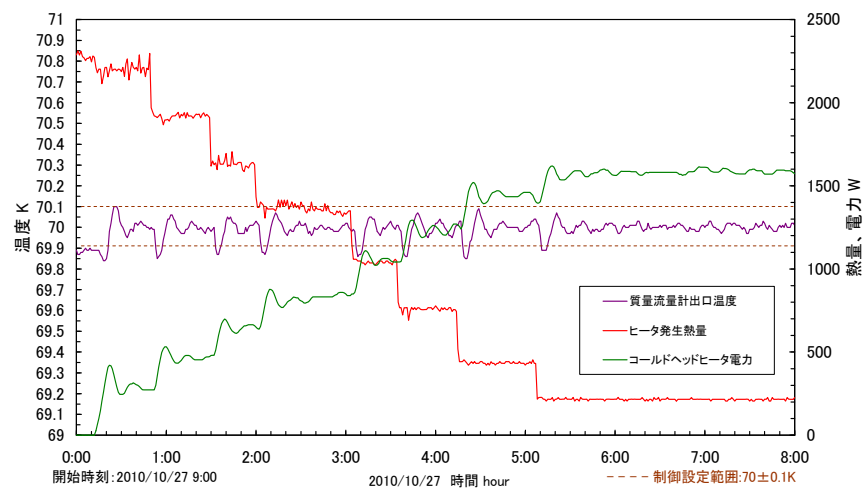


図 2.2.3-15 冷凍機ヒータ制御時温度変化トレンド

(c) 圧力制御確認試験

冷却システムの圧力制御方式として、外部ガス加圧制御、ヒータ加圧制御、自然加圧制御、凝縮減圧制御を使用している。各制御方式の制御方法を表 2.2.3-11 に示す。また、図 2.2.3-16 にリザーバタンク周辺の圧力制御装置フロー図を示す。それぞれの制御方式の圧力制御が有効であるかを確認する。

システム検証においては設定圧での制御状態に加えて、圧力低下状態からの復帰特性を確認するためタンク内圧力を 0.18 MPaG まで低下させた状況から試験を行ない、設定値である 0.2 MPaG までの圧力変化を合わせて確認した。

また、減圧制御である凝縮減圧制御については作動設定圧力とした、0.35 MPaG まで加圧を行い、作動確認を実施した。

表 2.2.3-11 圧力制御方法

制御方式	制御方法
外部ガス加圧	外部から窒素ガスをリザーバタンクへ供給し加圧する。
ヒータ加圧	タンク内部のヒータでタンク内液窒素表面の飽和温度を上げ加圧する。
自然加圧	循環液体窒素の一部を外気でガス化させ加圧する
凝縮減圧	リザーバタンク内の窒素ガス層を循環液体窒素と接触させることで液化させ減圧する。

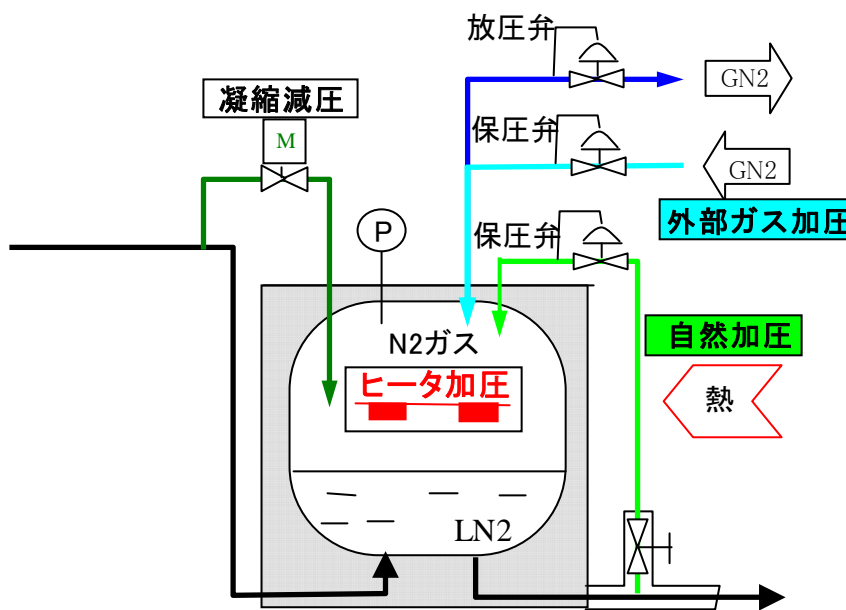


図 2.2.3-16 圧力制御装置フロー

① 外部ガス加圧制御

図 2.2.3-17 に試験結果を示す。図に示すように、設定圧力到達後は制御範囲内で制御されていることを確認した。また、圧力制御開始から 10 分程度で設定圧力まで復帰しており、圧力変化への応答性が良く急激な圧力変動へ対応可能であることが分かった。

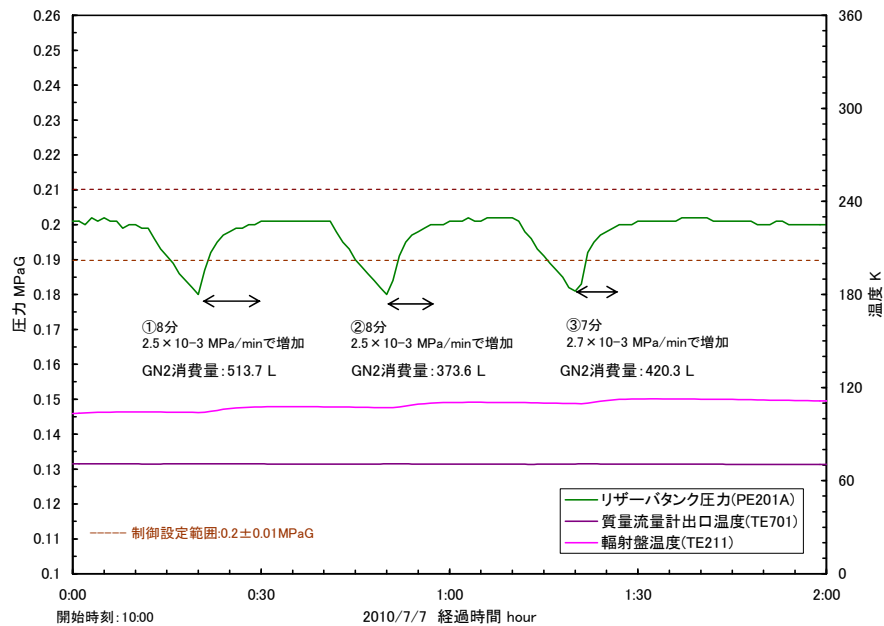


図 2.2.3-17 外部ガス加圧制御試験結果

② ヒータ加圧制御

リザーバタンク内に設置したヒータによる加圧制御状況の確認を行った。復帰特性トレンドを図 2. 2. 3-18、安定性確認結果を図 2. 2. 3-19 に示す。復帰特性については図 2. 2. 3-18 から 0.18MPaG から設定圧力の 0.2 MPaG に復帰するまでの時間は 2 時間と長く、急激な変動に対しての対応は難しいことが確認された。安定性に関しては、図 2. 2. 3-19 から 0.2 ± 0.01 MPaG 以内で制御可能であることを確認した。

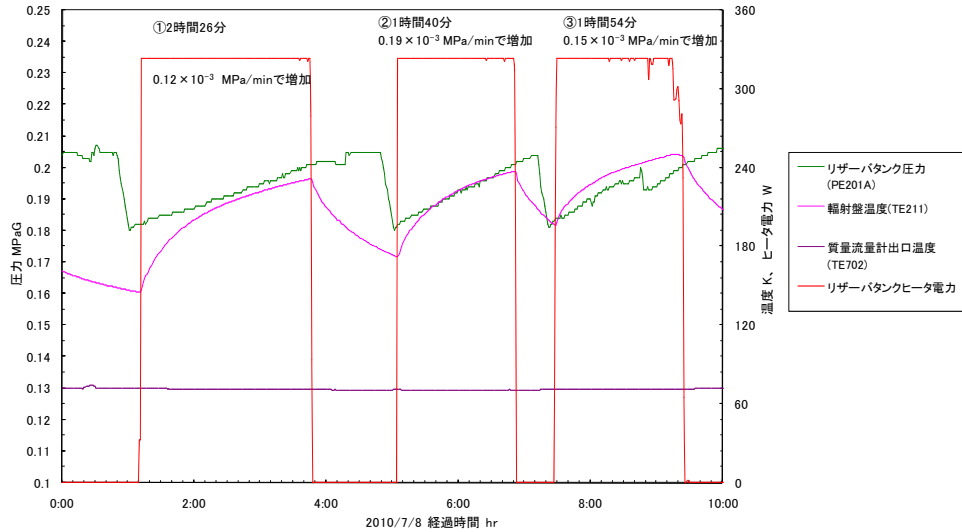


図 2. 2. 3-18 復帰特性確認結果

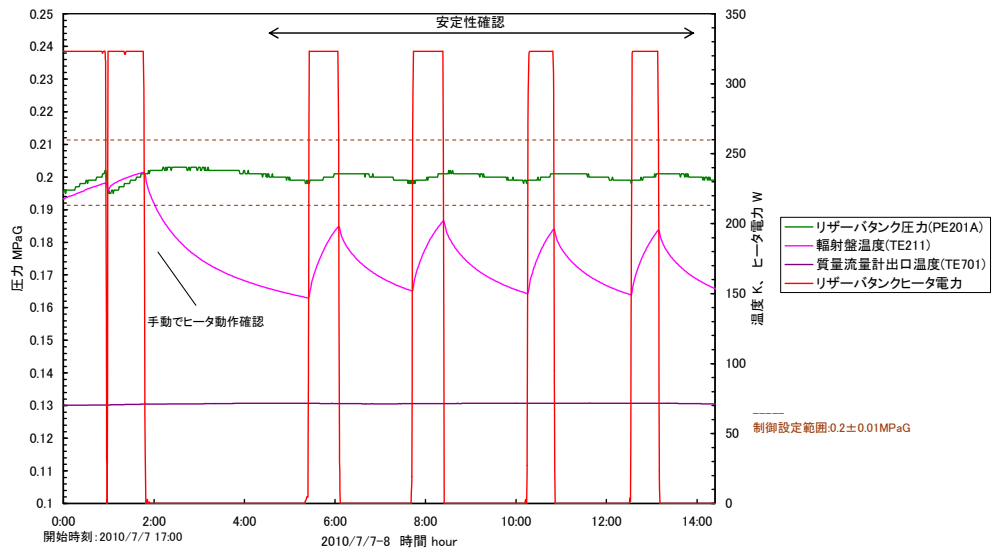


図 2. 2. 3-19 安定性確認結果

③ 自然加圧制御

この加圧方式は、循環させている LN2 の一部をガス化させ、リザーバタンクに送り加圧する方式である。図 2.2.3-20 に圧力復帰特性、図 2.2.3-21 に制御性確認結果を示す。図に示すように圧力復帰特性に関しては 0.18 MPaG から設定圧力の 0.2 MPaG までの復帰に 1 時間程度掛かるが、設定値付近での制御性としては外部ガス加圧と同様に設定値で安定した制御が可能であることが確認された。

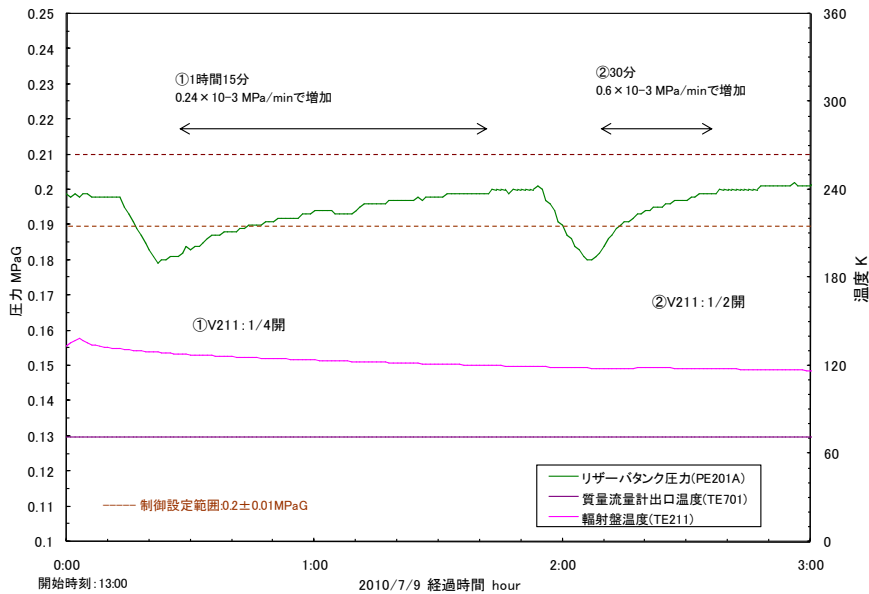


図 2.2.3-20 復帰特性確認結果

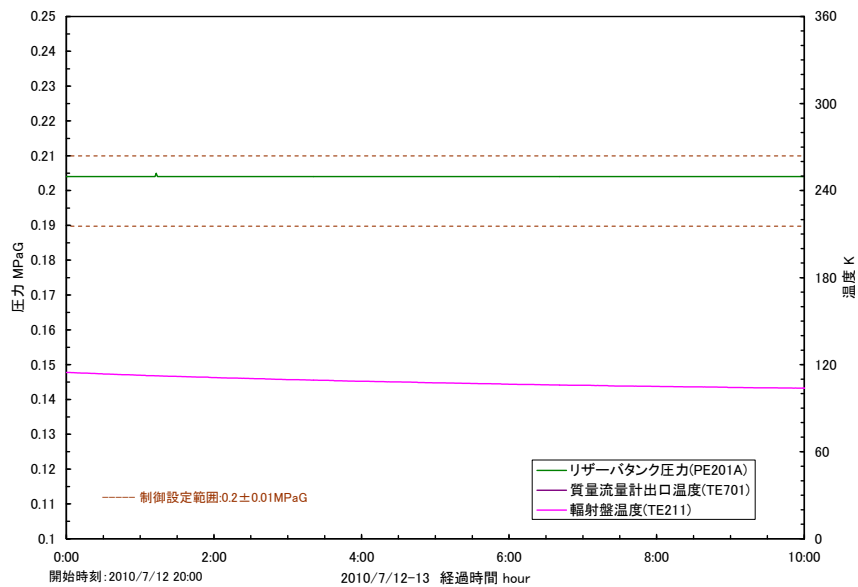


図 2.2.3-21 安定性確認結果

圧力制御確認結果から、外部からの窒素供給の必要ない自然加圧制御方式が問題なく使用できることが確認できた。ヒータ加圧に関しても、窒素供給の必要の無い加圧方式であるが、設定値での安定性から冷却システムの圧力制御に関しては、自

然加圧をメイン制御とし他の制御方式に関してはバックアップとして使用していくこととした。

④ 凝縮減圧制御

減圧制御として、タンク内の窒素ガスを再凝縮させ減圧を行う凝縮減圧制御を採用している。この制御の制御特性確認を実施した。確認は、外部ガス加圧及びヒータ加圧により加圧を行い実施した。凝縮減圧制御の設定圧力は0.35 MPaG としている。

図 2.2.3-22 に制御特性確認結果を示す。図に示すように、加圧が継続された状態でも凝縮減圧制御が作動することで、リザーバタンクの圧力上昇を抑制し、設定圧力で維持されることを確認した。

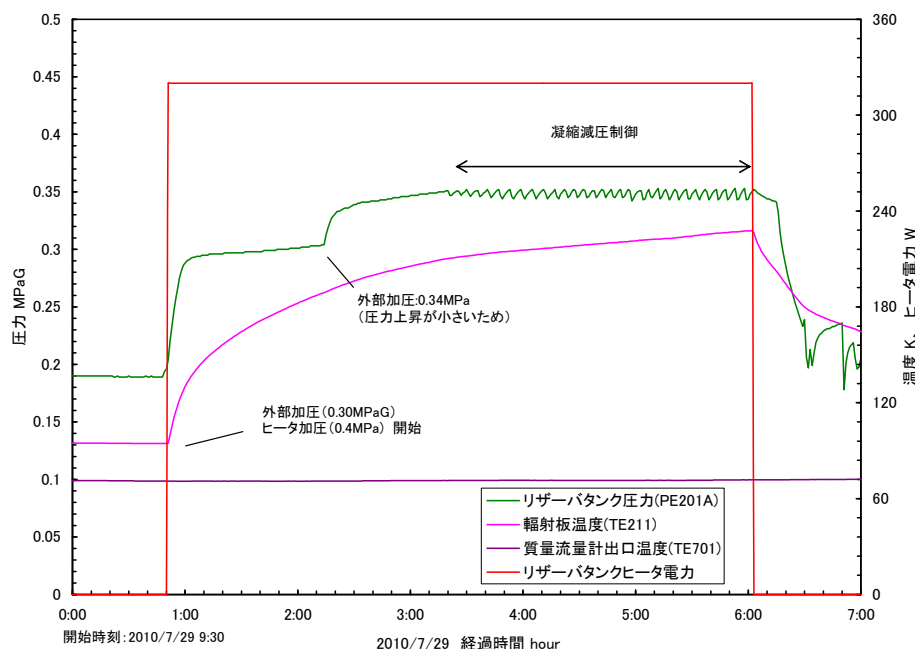


図 2.2.3-22 制御特性確認結果

(3) 信頼性確認

(a) 循環ポンプローターション運転試験

循環ポンプは故障時対応のために図 2. 2. 3-23 に示すように、2 台設置しており、運転時間の平準化のため通常時は一定時間で交互に運転することとした。切り替え手順の確認のため実際に以下の手順で切り替えを実施した。

1. 運転開始ポンプの放出弁を開放し予冷を開始。
2. 運転開始ポンプの吐出温度の飽和温度到達を確認後も一定時間予冷を継続
3. 運転開始ポンプの放出弁を閉じ、循環ポンプを起動させ吐出弁を開放する。
4. もう一方の循環ポンプを停止させ、吐出弁を閉じ切り替え完了。

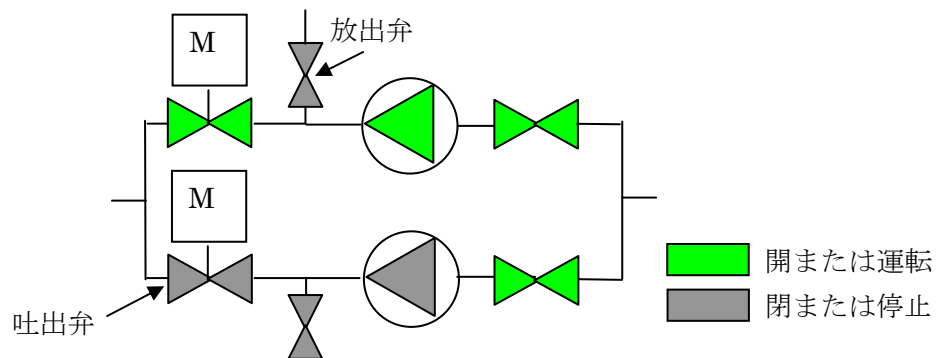


図 2. 2. 3-23 循環ポンプフロー（切り替え前状態）

図 2. 2. 3-24 に切り替え中のトレンドを示す。図に示すように、運転開始側ポンプ内の予冷を吐出側温度が飽和温度到達後も一定時間行うことで、問題なく切り替えを行うことが可能であることが確認された。しかし、今回のシステムでは停止ポンプの予冷に時間が掛かり、切り替えに 10 分程度必要であることが判明した。

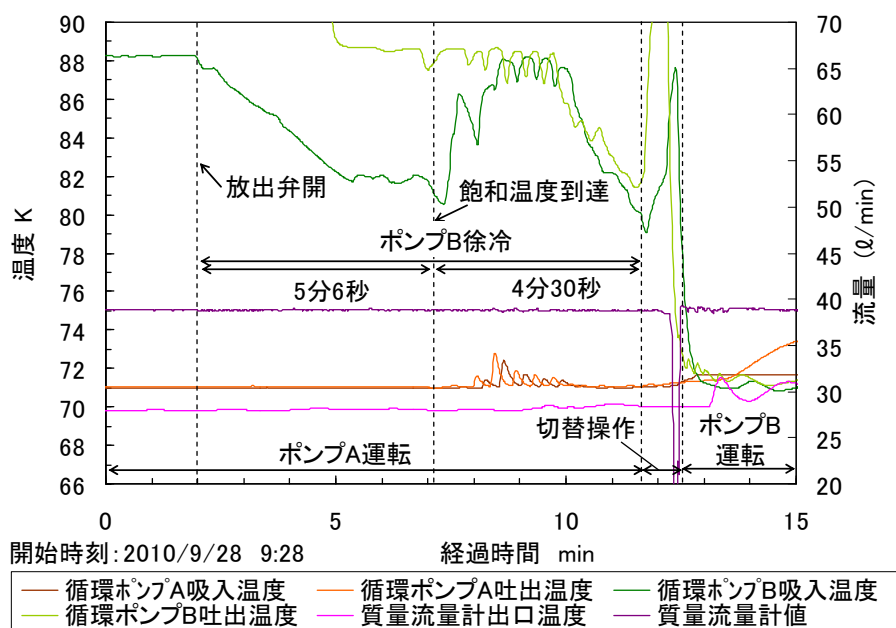


図 2. 2. 3-24 循環ポンプ切り替え時トレンド

(b) 冷凍機ローテーション運転

冷凍機に関しても循環ポンプ同様、予備機を設けており運転時間を均等とするために冷凍機発停の優先順位（主・副・予備）が一定時間で切り替わるようにしている。設定どおり切り替え動作が行われることを確認する。なお、冷凍機切り替え時の動作順は以下の通り。

1. 切り替え時間到達で冷凍機が 1 台起動
2. 冷凍機運転台数増加により循環温度低下
3. 温度制御設定範囲下限到達で優先順位の低下した冷凍機が停止し切り替え完了

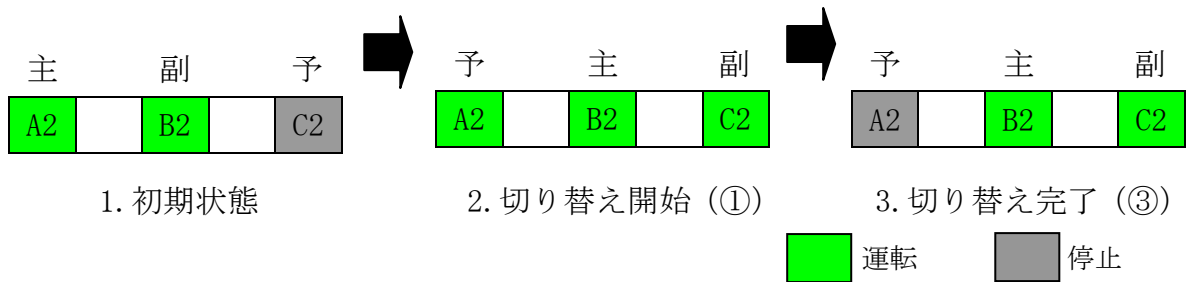


図 2. 2. 3-25 ローテーション切り替え時冷凍機状態 (A 列が主列の場合)

図 2. 2. 3-26 にローテーション切り替え中の質量流量計出口温度（制御温度）と各冷凍機の運転状態を示す。なお、図中の冷凍機ローテーション切り替えは 3 台-2 台発停運転中の 2 台運転中に実施している。

図に示すように、上記の順番で切り替えが行われており停止冷凍機が切り替わっていることが確認された。また、切り替え動作が起こった場合においても設定温度範囲内（70±1 K）で制御されていることが確認された。

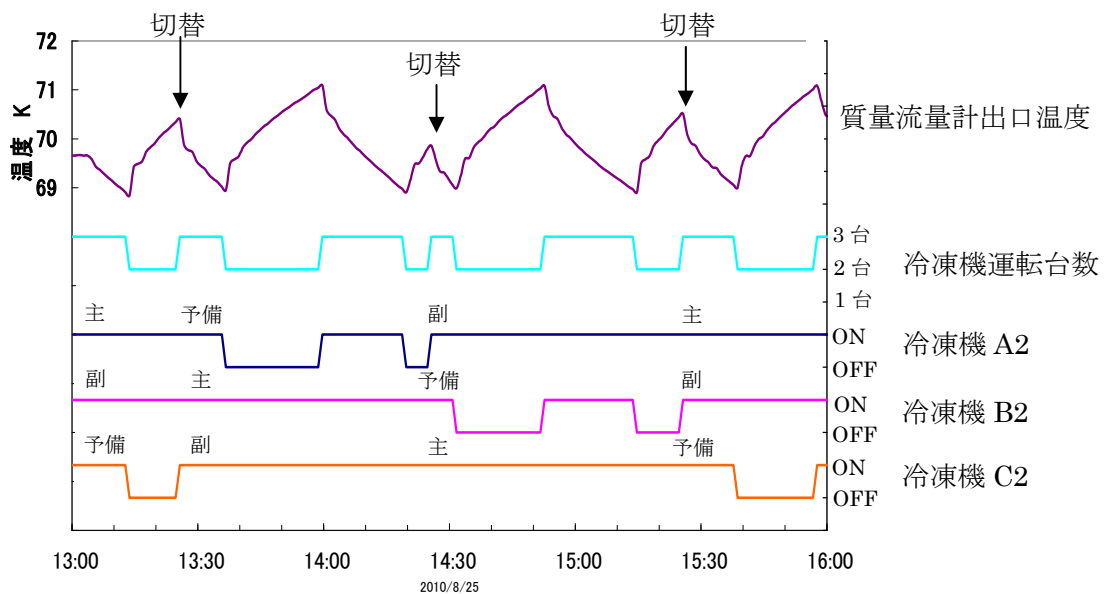


図 2. 2. 3-26 冷凍機ローテーション運転冷凍機運転状況

(c) 警報確認試験

警報発生時の各機器の停止動作確認のために、非常停止ボタンを押した場合と冷凍機に模擬的に警報を発生させた場合の動作について確認を行った。模擬警報については冷凍機のモータ温度異常を設定値の変更により発生させ確認を行った。それぞれの警報について設定どおりの対応がされることを確認した。

表 2.2.3-12 に警報確認試験結果を示す。表にそれぞれの機器の警報発生時の設定動作が書かれているが、警報発生により設定どおりの動作を行っていることが確認された。また、警報復帰後は自動で復帰することを確認している。

表 2.2.3-12 警報確認試験結果

機器	非常停止ボタン押下時のシステム停止動作設定内容	結果	冷凍機単体のモータ温度異常警報発生時のシステム停止動作設定内容	結果
冷凍機	運転冷凍機全台停止	良	警報該当冷凍機のみ停止	良
冷凍機コールドヘッドヒータ	停止	良	警報該当冷凍機のヒータのみ停止	良
循環ポンプ	停止	良	継続運転	良
模擬負荷ヒータ	停止	良	継続動作	良
電動弁・電磁弁	すべて閉	良	現状維持	良
冷却塔	停止	良	警報該当冷凍機に対応した冷却塔のみ停止	良

(d) 冷凍機故障時切り替え

冷凍機が故障により停止した場合速やかに予備の冷凍機が起動し、運転台数が維持され、質量流量計出口温度が維持されることを確認した。また、故障機が再起動しないことを確認するため、もう一台を故障で停止させ起動しないこと、温度制御により増台信号が入った場合における運転状態を合わせて確認した。結果を図 2.2.3-27 に示す。図に示すように、冷凍機故障後に予備機が起動し、循環温度が維持されていること、さらにもう 1 台故障させた場合も故障機は起動しないこと、温度上昇による温度制御範囲上限 (71 K) を超えても故障機が起動しないことを確認し、制御に問題のないことを確認した。

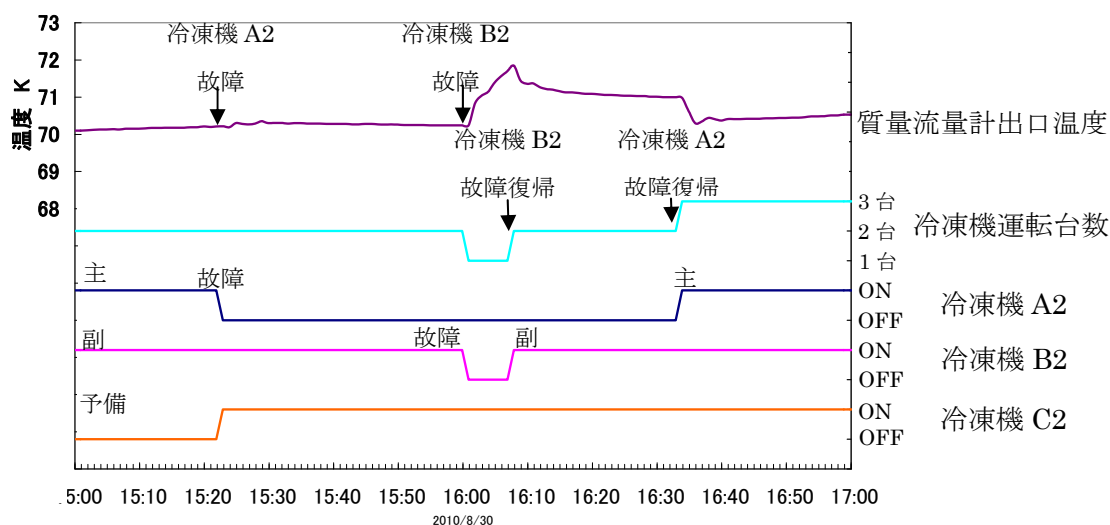


図 2. 2. 3-27 冷凍機故障切り替え冷凍機運転状況

(e) 循環ポンプ故障切り替え

循環ポンプが故障した場合に、待機側のポンプに切り替えが行われ循環が再開されることを確認した。切り替え動作についてはローテーション切り替えとほぼ同様であるが以下の通りである。なお、以下の手順は自動で行われている。

1. 循環ポンプへ試験信号を入力しアラーム状態を発生させ循環ポンプ停止同時に吐出弁閉止。
2. LN2 循環停止のため、冷凍機及び模擬負荷ヒータが停止。
3. 待機側ポンプの放出弁を開放し予冷を開始。
4. 待機側ポンプの吐出温度の飽和温度到達を確認後も一定時間予冷を継続
5. 待機側ポンプの放出弁を閉じ、循環ポンプを起動させ吐出弁を開放する。
6. LN2 循環再開後、冷凍機、模擬負荷ヒータ自動起動

図 2. 2. 3-28 に循環ポンプ故障切り替え時のトレンドを示す。図に示すように、故障後切り替えにより循環再開が可能であることが確認された。しかし、切り替え中の 10 分間は液体窒素循環が停止してしまうため、重故障発生基準の観点から循環停止時間の短縮が必要である。

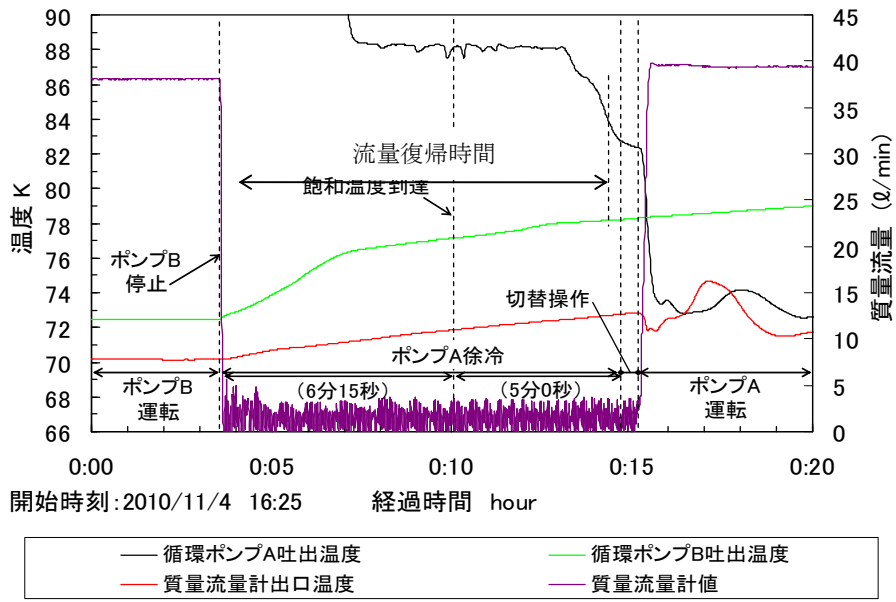


図 2. 2. 3-28 循環ポンプ故障切り替え時トレンド

(f) 冷却水系統故障切り替え

冷却水系統は、冷却塔及びポンプが故障した場合、図 2. 2. 3-29 のように共通ラインの弁が開き、故障した列の冷凍機へ冷却水を送る構造となっている。模擬的に冷却塔に警報を発生させ、設定どおりに動作すること及び仕様流量 (20 L/min) 以上が確保できることを確認した。

表 2. 2. 3-13 に故障切り替え前後の冷凍機への冷却水流量を示すが、冷却塔が故障停止後も流量に変動がないことを確認した。

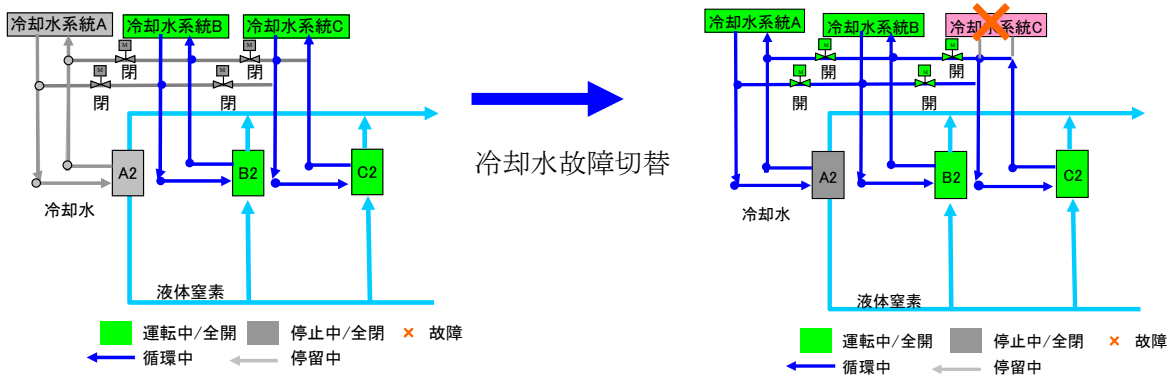


図 2. 2. 3-29 冷却水故障切り替え

表 2.2.3-13 冷却水系統切り替え前後の流量

		冷却塔3台運転 (冷却塔A停止)		冷却塔3台運転 (冷却塔B停止)		冷却塔2台運転		冷却塔1台運転	
		切替前	切替後	切替前	切替後	切替前	切替後	切替前	切替後
A列	運転(■)/停止(□)	■	□	■	■	□	■	□	■
	流量 Q /min	20.36	20.19	20.74	20.31	-	20.42	-	20.12
B列	運転(■)/停止(□)	■	■	■	□	■	■	□	■
	流量 Q /min	20.11	20.50	20.75	20.27	20.21	20.20	-	20.02
C列	運転(■)/停止(□)	■	■	■	■	■	□	■	□
	流量 Q /min	22.20	20.68	21.46	21.14	20.10	20.34	20.07	20.67

(g) 自動再起動確認試験 (停電模擬試験)

停電時からの復帰動作確認として、冷却システムを一定時間停止させた後に再起動を行い、復帰可能であるかを確認した。再起動に関しては復電後の自動復帰を想定し系内の予冷を実施せずに行った。なお、停止時間に関しては3分、30分、60分、90分で実施した。図2.2.3-30に最大の90分停止させた際の温度等の経時変化を示す。図に示すように、リザーバタンク底面温度及び質量流量出口温度は上昇しているが、予冷操作を行うことなく冷却システム再起動が可能であることを確認した。

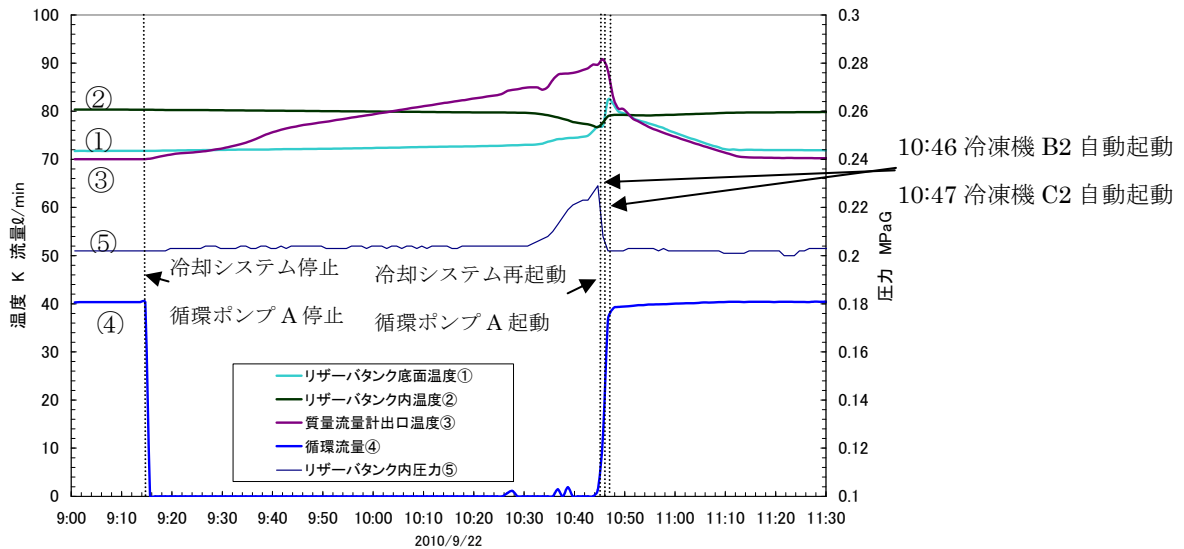


図 2.2.3-30 自動再起動確認試験中温度、流量トレンド

(h) 冷凍機メンテナンス

冷凍機メンテナンスを想定して、冷却システム運転状態での冷凍機の交換作業を実施した。作業手順については以下の通り

1. 交換冷凍機のラインをバイパスラインへ切り替える。
2. 冷凍機内部の液体窒素を抜き取り、内部の昇温を行う。
3. 冷却水接続配管、動力線、センサ線を冷凍機から取り外す。
4. 冷凍機接続真空配管を取り外す。
5. 冷凍機を移動させ、交換冷凍機を据え付ける。
6. 冷凍機接続真空配管を取り付ける。
7. 冷却水接続配管、動力線、センサ線を冷凍機へ取り付ける。
8. 気密試験、窒素置換、露点計測を実施する。
9. バイパスラインから冷凍機ラインへ戻す。

冷凍機交換作業に関しては、検討していた手順で作業可能であることを確認した。また、配管取り外し中は空気の侵入を抑えるため、図 2.2.3.31 のように内部に窒素を供給しながら実施していたが、作業性に問題はなかった。気密試験において、圧力保持での漏れ確認を実施中、圧力の低下がみられた。発泡試験により確認したところ漏れは確認されなかったため、圧力低下は液体窒素と接触している低温バルブ付近の窒素ガスが気密試験中に凝縮のするためであると判断した。この現象は構造上回避困難であることから、冷凍機交換後の気密試験は発泡確認のみを実施することとした。

旭変電所においては、冷凍機設置状況等の作業環境の違いがあるため再度手順確認を実施する。

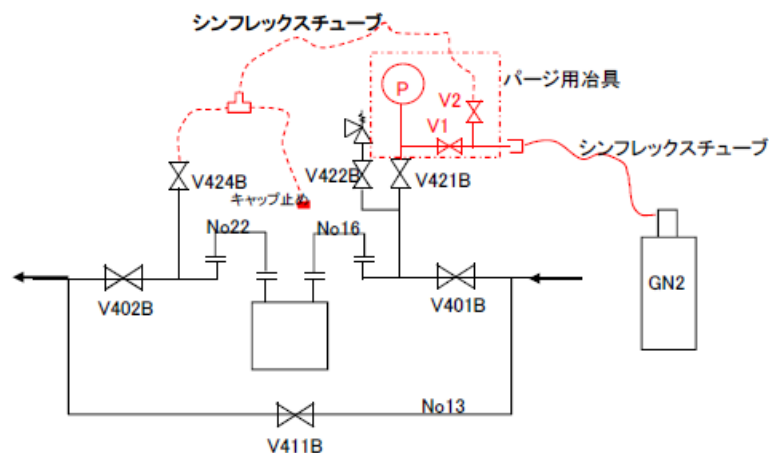


図 2.2.3-31 配管取り外し時の状態

(i) 循環ポンプメンテナンス

循環ポンプの故障時、定期メンテナンスを想定して、冷却システム運転中に循環ポンプの取り外し、取り付け作業を実施した。なお、循環ポンプはポンプ部分のみ（図 2. 2. 3-32 赤斜線部分）を取り外すことが可能な構造である。

作業内容は以下の通りである。

1. 循環ポンプ運転切り替え

※取り外しを行う循環ポンプが運転中であったため、停止させるために切り替えを実施した。

2. 循環ポンプ停止、ポンプ内部昇温（2日間）

※構造上内部の液抜きは実施できないため自然昇温

3. 循環ポンプ取り外し・目視状態確認

内部に窒素ガスを送りながら作業を実施した。

4. 循環ポンプ取り付け・動作確認

取り外し同様、内部に窒素ガスを送りながら実施。

5. 気密試験、窒素置換、露点確認

6. 循環ポンプ運転復帰

図 2. 2. 3-33 に循環ポンプメンテナンス中の循環温度変化を示す。メンテナンス中大きな変動はなく、作業による冷却システム運転へ影響はなかった。取り付け・取り外し作業についても検討していた方法で作業可能であり、作業後の循環ポンプについては異常なく運転を継続しており作業による機器への影響もなかったことを確認した。

なお、旭変電所においては本試験時と作業環境が異なるため再度作業確認を行う。

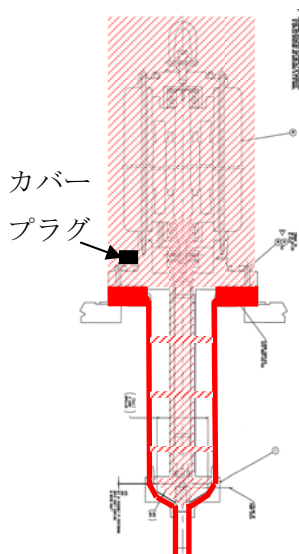


図 2. 2. 3-32 循環ポンプ構造図

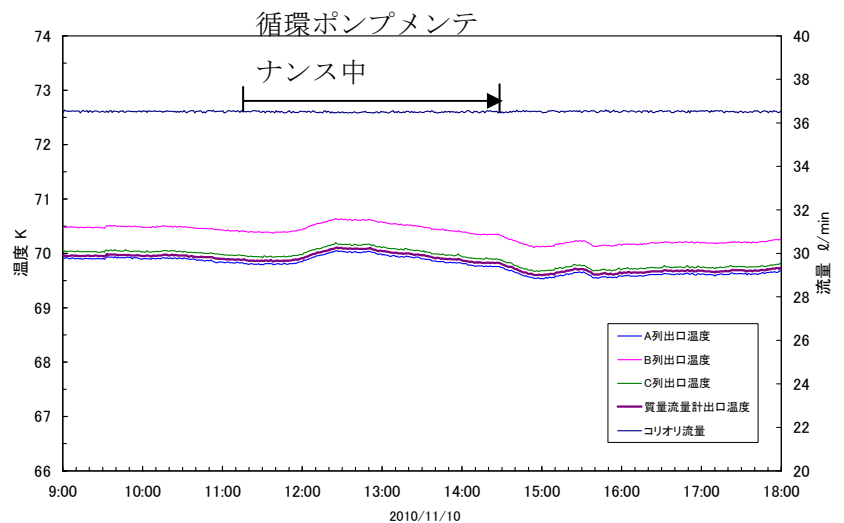


図 2. 2. 3-33 メンテナンス中温度変化

(4) 総合試験

(a) 日負荷変動確認試験

熱負荷変動への温度制御の追従性を確認するために、模擬負荷ヒータの発生熱量を変化させ温度制御状態を確認した。試験は以下運転パターンで2時間経過ごとに変更して実施した。

1. 冷凍機 1.5 台相当の熱負荷
2. 冷凍機 2.5 台相当の熱負荷
3. 冷凍機 2 台相当の熱負荷

図 2.2.3-34 に試験中の温度変化、図 2.2.3-35 に冷凍機運転台数変化を示す。それぞれの図から、熱負荷が変動した場合においても発停運転により台数が変動することにより設定温度範囲内で制御可能なことを確認した。

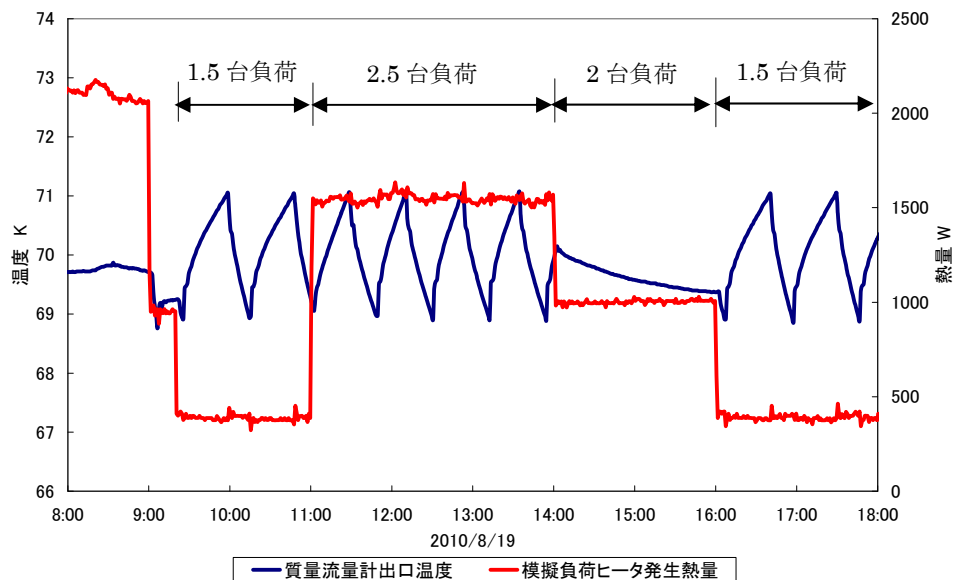


図 2.2.3-34 日負荷変動試験中温度変化

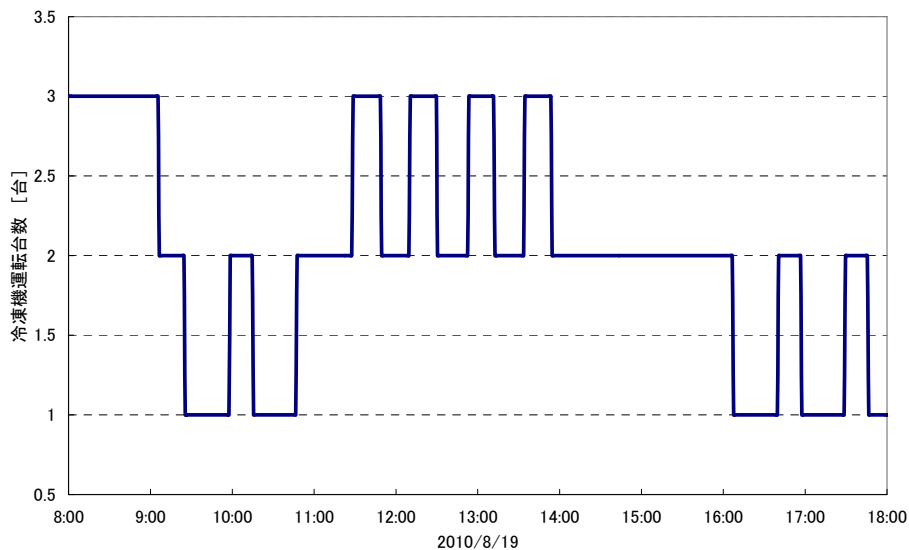


図 2.2.3-35 冷凍機運転台数変動

(b) 過負荷変動試験

急激な負荷変動に対する温度制御状況を確認するため、模擬負荷ヒータの発生熱量を 0 W から 3 台運転相当に急変させ、温度制御の状況を確認した。図 2.2.3-36 に温度変化、図 2.2.3-37 に運転台数変動を示す。

急激な負荷変動に対しては、温度制御により冷凍機が 1 台発停してもなお温度が制御範囲を超えていた場合はさらにもう 1 台の冷凍機が発停することで、制御温度範囲から大幅に逸脱することなく制御でき追従可能であることが確認された。

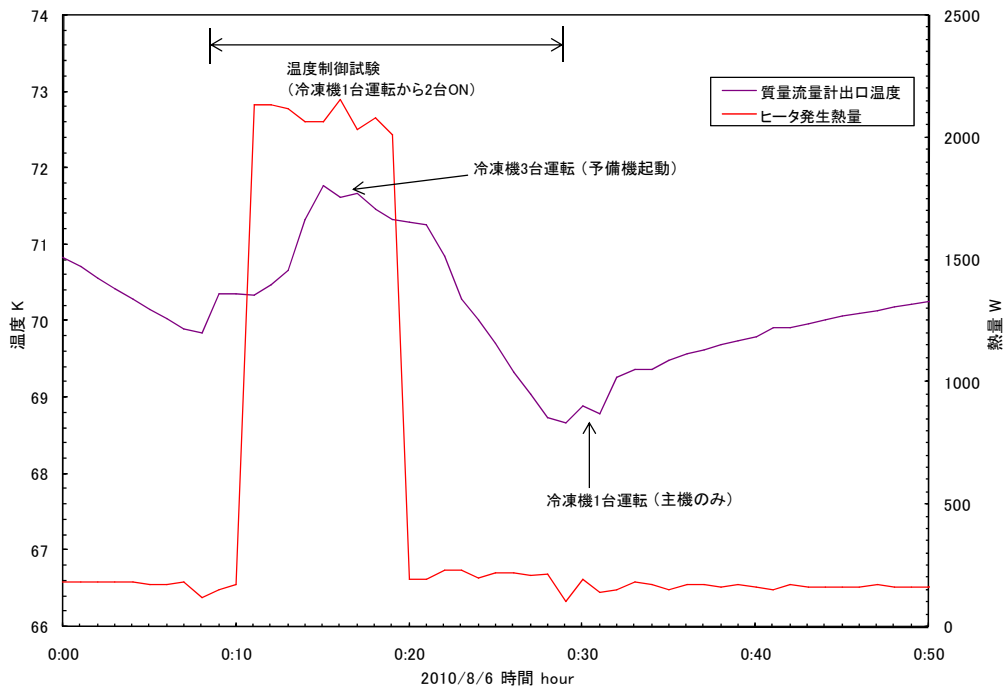


図 2.2.3-36 過負荷試験中温度変動

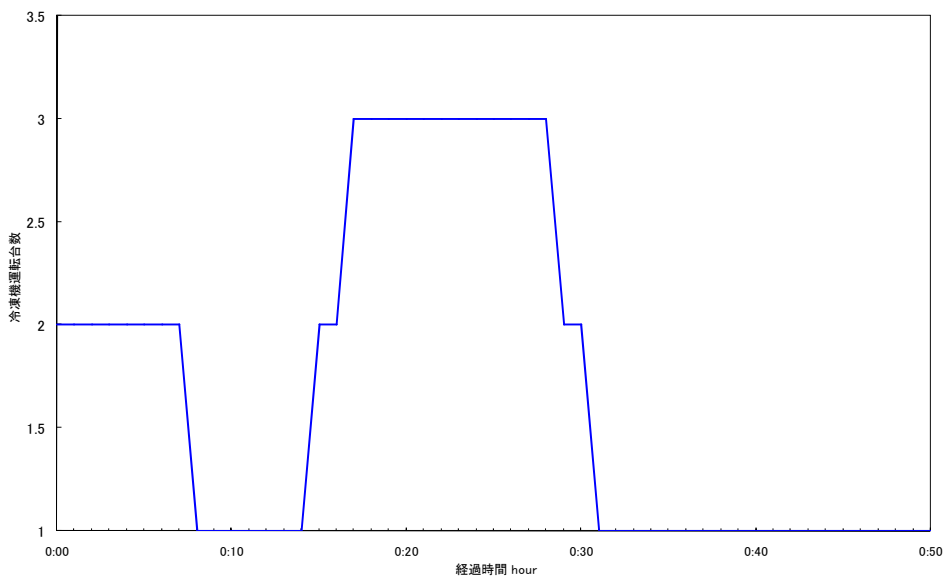


図 2.2.3-37 過負荷試験冷凍機運転状況

(5) システム検証まとめ

実証試験と同様の設備を使用し、試験を行うことで冷却システムの機器の健全性および初期冷却方法や温度制御及び圧力制御の運用面での方式の有効性や特性について確認でき、現状の方式で問題ないことが確認された。また、機器の信頼性として、冷凍機及び循環ポンプのローテーション及び故障時の予備機への切り替えに関しては、冷凍機は想定どおりの切り替えが実施可能であったが、循環ポンプに関しては故障時の循環停止時間が長くなることがわかり、対応を検討する必要のあることが判明した。

なお、システム検証試験の設備と実証試験の設備とでは、冷凍機台数等の条件が異なるため、冷却時の運転特性が異なるものになると考えられることから、旭変電所に移設後に同様の試験を実施することとした（次節以降参照のこと）。

2.2.3-7 実証ケーブルの冷却システム詳細設計

(1) 設計条件

使用する超電導ケーブルは三心一括型 66 kV-1.75 kA 級とし、ケーブル全長は 260 m である。図 2.2.3-38 に現地レイアウトを示す。

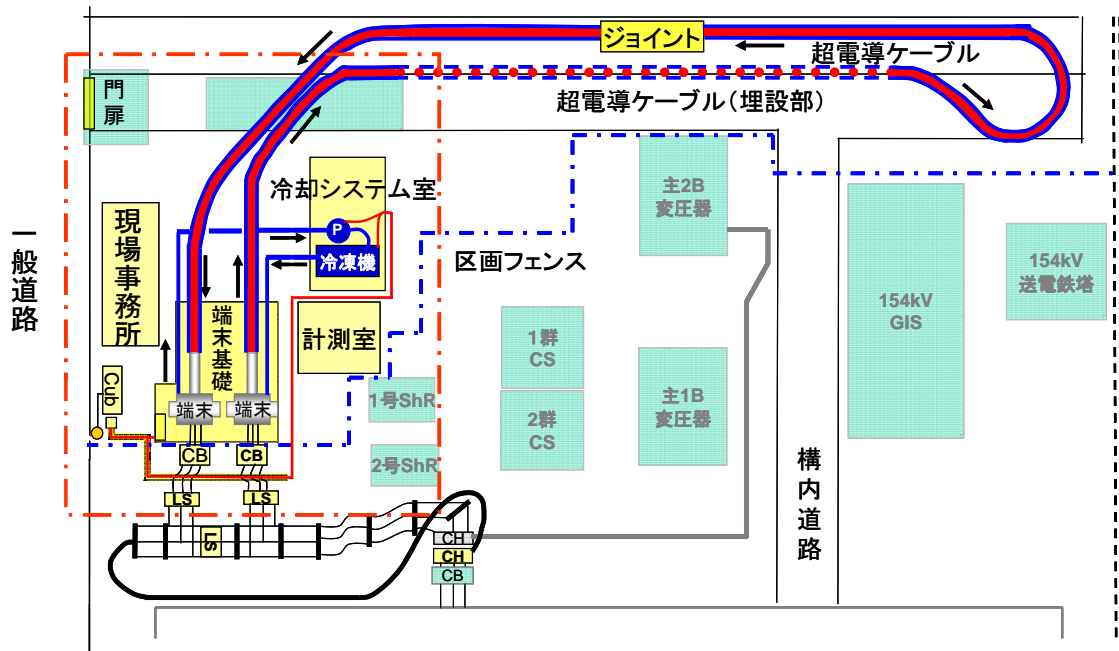


図 2.2.3-38 旭変電所レイアウト

(a) 超電導ケーブル冷却仕様

以下に超電導ケーブルの冷却仕様を示す。

温度範囲：65～77 K(ただし温度上限は試験の中で見直し)

圧力範囲：0.15～0.5 MPaG

循環流量：40 L/min

超電導ケーブル熱負荷範囲：1,746～2,780 W

ケーブル液体窒素貯液量：10,000 L

(b) 冷却システム機能仕様

本冷却システムは下記の条件を満たすようなシステムとする。

- 1) 液体窒素を過冷却状態にて超電導ケーブル本体に循環させる機能を有すること。
- 2) ケーブル部温度変化による液体窒素体積変化を吸収できる内容積を有すること。
- 3) 構成機器が故障しても運転が継続できる機能を有すること。
- 4) 送電を止めることなく、主要機器の点検、交換が可能な構成とすること。
- 5) 液体窒素の温度、圧力、流量を所定の値、範囲に制御できる機能を有すること。
- 6) 液体窒素への不純物混入によるシステムへのダメージを回避できる対策を施すこと。

(c) 適用法規及び規格

冷却システムは上記設計条件に加え、以下に示す法規及び規格に適合する仕様とする。

- 1) 電気事業法
- 2) 電気設備技術基準
- 3) 高圧ガス保安法冷凍保安規則（準拠）
- 4) 建築基準法
- 5) 消防法
- 6) 道路法
- 7) 道路交通法
- 8) 労働安全衛生法
- 9) 下水道法(水質汚濁防止法)
- 10) 騒音・振動規制法(横浜市条例)
- 11) 電気設備、機械設備改修工事共通仕様書
- 12) 電気規格調査会規格(JEC)
- 13) 日本工業規格(JIS)
- 14) 日本電気協会電気技術指針(JEAG)
- 15) 東京電力 社内規格

(2) 冷凍機選定と台数

(a) 機種選定

超電導ケーブルの最大熱負荷は2,780 Wなので、1～数 kW@77 Kクラスの冷凍機の選択が考えられる。現在市販されている極低温冷凍機にはスターリング冷凍機、パルス管冷凍機、ブレイトン冷凍機などがある。各冷凍機の特徴を表 2.2.3-14 に示す。国内での使用実績からスターリング冷凍機（冷凍能力 1.0 kW@80 K、0.8 kW@65 K）を選択する。

表 2.2.3-14 冷凍機比較

項目	①スターリング冷凍機	②スターリングパルス管	③GM製パルス管	④ブレイトンサイクル
冷凍容量	1kW (77K)	0.3及び1kW(77K)	1kW (65K)	5kW以上
メーカー	アイシン精機(1kW) stirling社(1～4kW)	アイシン精機(0.3kW) CFIC(1kW)	エアウオータ	前川、太陽日酸、 エアリキード
メンテナンス間隔	6000～8000時間	長寿命	長寿命 ^(※1)	30000時間以上
COP	0.0667@77K(1kW)	0.0377@77K(10W)	0.0358@65K(850W)	0.1(開発目標)
メンテナンス所要時間	数週間から1ヶ月	○	○	-
ケーブル用実績	有り	無し	無し	無し
現状レベル	○(カタログ品)	△(評価中)	×(開発中)	△(評価中)
騒音	80dB/台 ^(※2)	50～60dB	50～60dB	60dB
設置スペース(5～10kW)	9m ² /kW ^(※3)	4m ² /kW	2m ² /kW ^(※4)	3m ² /kW
課題、将来性	騒音、保守対策 大容量化が必要	長寿命で有利 熱交換器、大容量化	長寿命で有利 熱交換器、大容量化	小容量化

(※1) 常温部ロータリーバルブの寿命は1年

(※2) 実際の騒音レベルは80 dB×所要台数での騒音となる

(※3) メンテナンススペースを含んだ数値

(※4) 1 kW 機を複数組むことで5～10 kW 化が可能で、圧縮機は1台で対応可能

(3) スターリング冷凍機

(a) 冷却能力

1. 冷凍能力:1 kW (77 K)、0.8 kW (65 K) 括弧内温度は液体窒素温度
2. 液体窒素流量:10～20 L/min
3. 冷凍機コールドヘッド温度制御用ヒータ出力:600 W×2 台
4. 冷凍能力の微調整方法:コールドヘッドヒータの出力調整及び冷凍機のインバータ制御

(b) 構造

図 2.2.3-39 にスターリング冷凍機の構成図を示す。液体窒素は冷凍機冷却部に取り付けられた熱交換器（コールドヘッド）を流れることで冷却される構造となっている（図 2.2.3-40）。コールドヘッドは 1 台の冷凍機に 2 つ（F 側、R 側）設置されており、冷凍機内の液体窒素は R 側から F 側の方向に流れる。

それぞれの熱交換器上部には、コールドヘッド温度低下による熱交換器部分での液体窒素凍結防止および能力調整のためのヒータ（1 台 600 W）が設置されている。また、3 台分の冷凍機については能力調整方式としてインバータ制御による回転数制御も採用する。

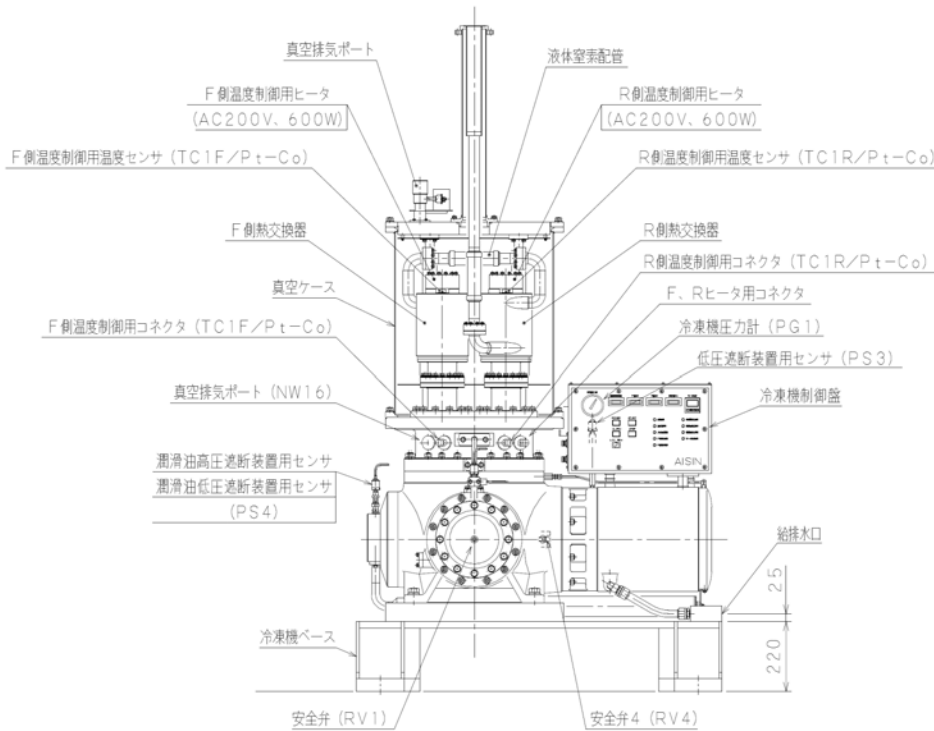


図 2.2.3-39 スターリング冷凍機構成図

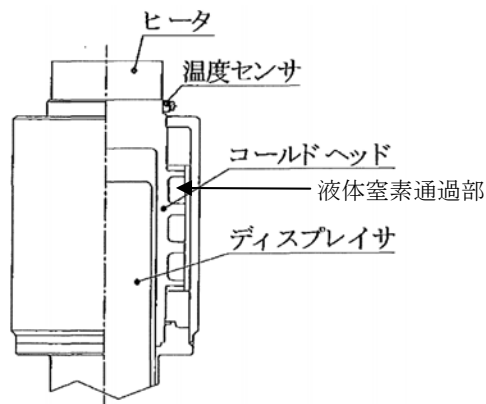


図 2.2.3-40 液体窒素冷却部構造図

(C) ユーティリティ

① 電力

冷凍機の電力仕様を以下に示す。

1. 消費電力 15 kW 以下
2. 電圧 AC200 V±10%
3. 電流 75 A 以下

② インバータ

1. 適用モータ容量:30 kW
2. 定格電流 115 A
3. 出力電圧 3相 200～240 V
4. 電源電圧 3相 200～220 V@50 Hz

③ 冷却水

冷凍機の冷却水仕様を以下に示す。

1. 冷却水温度 32 °C (冷凍機入口温度)
2. 水流量 20 ℓ/min
3. 水質 上水相当

(d) 冷凍機使用台数

冷却システム側の推定配管長さ、弁個数、バイヨネット個数等から熱負荷は約1kWと想定される。ケーブル部分を含めた最大熱負荷は約3.8kWであり、冷凍機1台の冷凍能力は0.8 kW@65 Kであり必要な冷凍機台数は

$$3.8 \text{ [kW]} \div 0.8 \text{ [kW]} = 4.75 \text{ [台]} \quad \dots (2.2.3-1)$$

となるため5台必要である。信頼性の観点から予備機を用意し、6台の冷凍機を使用する。

(4) 循環ポンプ

システム全体の圧力損失を0.15 MPa@40 L/min(常用流量)、0.25 MPa@50 L/min(最大流量)と想定し、これを満たす循環ポンプを選定する。選定したポンプの仕様を以下に示す。

(a) 選定ポンプ仕様

1. 最大吐出圧力：0.25 MPa@50 L/min
2. 揚程線図：図 2.2.3-41 に示す。
3. 基本性能：表 2.2.3-15 に示す。

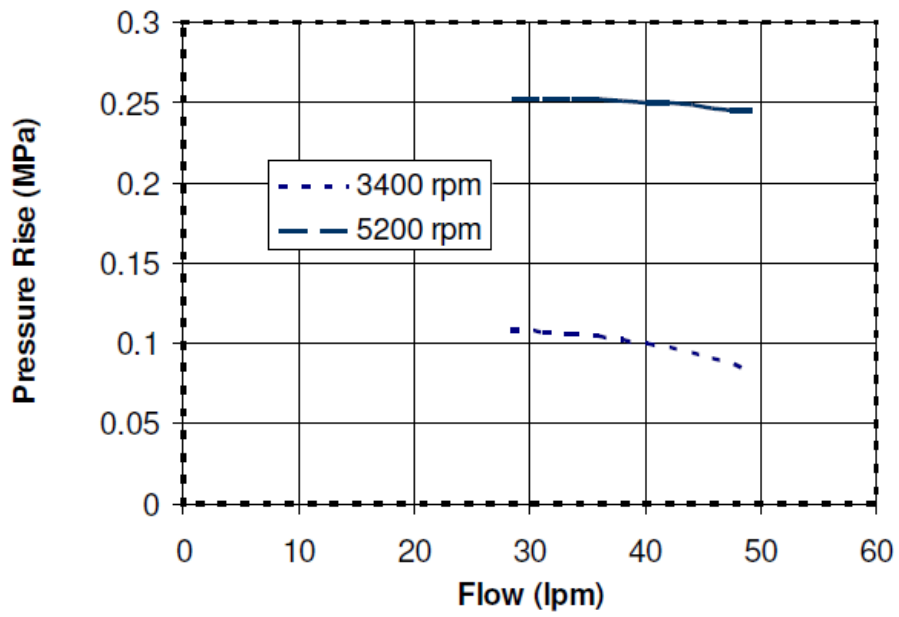


図 2.2.3-41 揚程性能

表 2.2.3-15 循環ポンプ基本能力

流体 条件	液体窒素			
	1	2		3
入口温度(k)	77	77		39.16
入口圧力(MPa)	0.3	10	barG	2.7
流量(1pm)	50	50	kg/sec	0.6
差圧(Bar)	1.8	3.5	bar	2.02
運転速度(rpm)	5200	3400		4700
参考ポンプ効率	0.51	0.51		0.51
参考ポンプ電力	0.34	0.14		0.35

(5) 冷却システムの構成

(a) 冷却システム基本構成

基本構成を図 2.2.3-42 に示す。超電導ケーブルから戻った液体窒素をリザーバタンクユニット、循環ポンプユニット、冷凍機ユニットの順に送液し、再び超電導ケーブルに送る構成とし、ケーブル供給側には流量計、戻り側にフィルタを設置する。また、冷却システム単体試験運転用に模擬負荷ヒータを備えたバイパスラインを設ける。

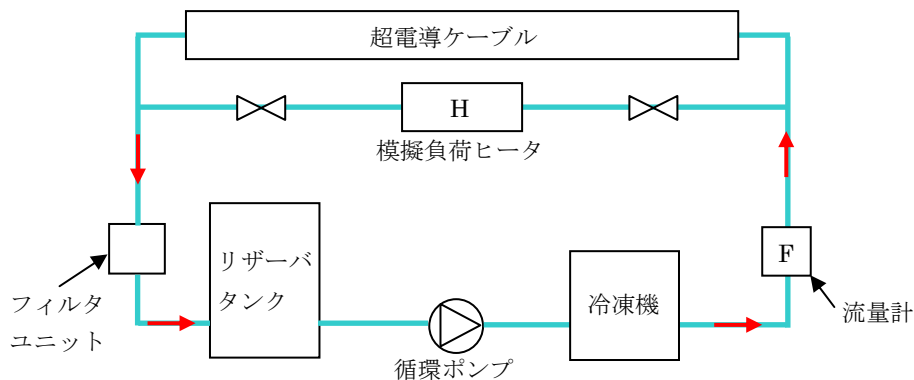


図 2.2.3-42 冷却システム構成

(b) 冷凍機配置検討

冷凍機配置の比較を表 2.2.3-16 に示す。直列とすると、冷凍機部全体での圧力損失が大きくなり、下流に向かうに従い液体窒素の温度が低下し冷凍機の能力が低下する。並列にした場合には、圧力損失および冷却能力の低下が直列と比べ小さいが、各列の流量調整が必要である。

冷凍機の能力、圧力損失、メンテナンスを考慮し 2 直列 3 並列を採用する。

表 2.2.3-16 冷凍機の配置

	①直列	②並列	③3並列
配置			
列流量[l/min]	40	20	13.3
列圧損[kPa]	63	13	7
冷凍機故障時の対応	予備機運転、該当機を切り離し	予備機運転、該当機を切り離し	予備機運転、列ごと予備列に切り替え
メンテナンス・ローテーション	機器毎の運転時間に留意し実施	機器毎の運転時間に留意し実施、各列の熱バランスに留意	列ごとにローテーションを実施するのでシンプル。
実績	100m、Super-ACE (最大4台直列)	なし	地中線冷却(予備機1セット)
特性	圧力損失が大きい。下流の冷凍機の能力低下	直列と比べ圧力損失、冷凍機能力低下が小さい 各列の流量調整必要	直列と比べ圧力損失、冷凍機能力低下が小さい 各列の流量調整必要

(c) 循環ポンプ配置検討

循環ポンプの配置の比較を表 2.2.3-17 に示す。表から並列とした。循環ポンプは1台で運転し、一定時間ごとに切り替えながら運転する予定であった。しかし、システム検証において、再起動時の待機ポンプ内部の予冷時間が長くなることが判明し、故障時には循環停止時間が長くなることが判明した。そのため2台同時運転とし内部予冷の不要な状況とする。

表 2.2.3-17 循環ポンプ配置

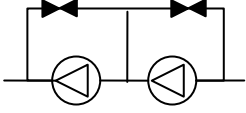
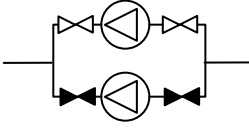
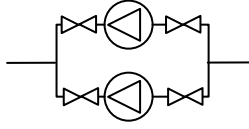
項目	直列	並列(1台運転)	並列(2台運転)
構成			
運転方法	1台運転、1台停止	1台運転、1台停止	2台運転
圧力損失	OFFポンプの圧損含	直列より低	直列より低
起動前準備	起動前の予冷不要	起動前の予冷必要	起動前の予冷不要
バイパス	必要	不要	不要

図 2.2.3-43 に循環ポンプの構成を示す。循環運転中のメンテナンスを考慮し前後にバルブを設け、循環経路からの切り離しを行える構造とする。メンテナンス終了後、再運転には循環ポンプ単独での予冷作業が必要となる。予冷を可能とするため、循環ポンプ吐出側にポンプ内の蒸発室素ガス放出弁を設ける。放出弁は自動制御での再起動を想定し電磁弁を採用する。

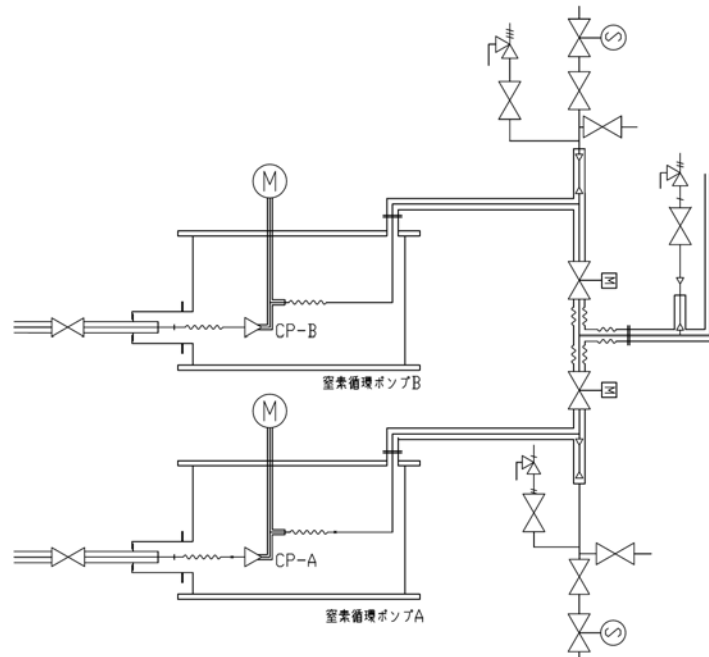


図 2.2.3-43 循環ポンプ構成図

(6) 冷却システムの温度制御と圧力制御方法

ケーブルの超電導状態の維持のために、冷却システム内の温度・圧力を一定範囲内で維持する必要がある。以下に、圧力制御、温度制御方法を示す。

(a) リザーバタンクの圧力制御方法

系内の圧力は、ケーブルの絶縁性能維持のために 0.1 MPaG 以上に保つ必要がある。過去に実施された超電導ケーブル試験の報告例では、加圧方法としては、ガスを外部から供給する方法を使用している。報告によると、当初はヘリウムガスを使用した加圧を実施していたが、循環液体窒素への溶解込みにより (1) ケーブルルート中、10 m の地上高の低圧部での気泡発生、(2) ガスだまりの発生による循環停止の問題が発生した。問題解決のため供給ガスを窒素に変更したが、供給ガスが凝縮するため凝縮分の液体窒素を捨てる必要が生じた。

外部供給なしの加圧方式としては、ヒータによりタンク内の気相部を加熱する方法、循環液体窒素の一部をガス化させタンク内に送る方法が考えられる。これらの方式の名称をそれぞれヒータ加圧、自然加圧とし、従来の方式は外部ガス加圧方式とする。表 2.2.3-18 に各方式の比較を示す。表に示すとおり、外部ガス加圧はガス補給が必要となるため今回のような長期無人運転を想定した装置には向かず、また、ヒータ加圧に関しては補給がないため長期無人運転可能であるが、ヒータ使用分の効率低下の課題がある。自然加圧は、循環液体窒素の一部を熱交換器で外気との熱交換によりガス化させタンクに供給する方式であるため、外部ガスの供給が不要なく長期無人運転に適している。比較の結果、自然加圧をメインの制御として使用し、他の制御に関しても故障時のバックアップとして装置に組み込む。

また、リザーバタンク内圧力が上昇した場合には、表 2.2.3-19 に示す減圧制御方式を使用する。凝縮減圧制御方式に関しては、内部の窒素ガスの放出が無いいため系内液量の変動はない。放圧弁を使用した場合は、内部の窒素ガスが放出されタンク液面が減少する。長期無人運転を想定していることから、通常時の減圧制御には、液量変化の無い凝縮減圧を使用し、放圧弁による圧力制御については停電中など凝縮減圧が作動しない場合の圧力上昇抑制用として安全弁とほぼ同等の働きとして使用する。

表 2.2.3-18 圧力制御方式比較（加圧制御）

方式	外部ガス加圧	ヒータ加圧	自然加圧
制御方法	外部ポンベから窒素ガスを供給	タンク内に設置したヒータで内部ガスを加熱	循環液体窒素の一部をガス化させタンク内へ供給
ガス補給の有無	有	無	無 (系内窒素を使用)
課題	外部ガスの補給及び供給ガスの液化	ヒータ使用による効率低下	低温ガス供給による調圧弁の凍結の可能性
実績	有	無	無

表 2.2.3-19 リザーバタンク内減圧方式

方式	凝縮減圧	放圧弁
方法	リザーバタンク上部の窒素ガス層を過冷却液体窒素と接触させ液化させることで減圧を行う。	圧力調整弁を使用し、タンク内が設定圧力以上となるとタンク内の窒素ガスを放出することで減圧を行う。
液量変化の有無	無	有

(b) ケーブル供給温度制御

温度制御方法としては、冷凍機の発停(ON-OFF 制御)制御、インバータにより冷凍能力を調整する方法、冷凍機の内臓ヒータ(コールドヘッドヒータ)により熱負荷を調節する方法がある。その比較を表 2.2.3-20 に示す。

ON-OFF 制御とインバータ制御は 1 長 1 短があるが、ノイズ対策と効率の面から ON-OFF 制御をメインの制御方式とし、ヒータ制御に関してはインバータと同じく精度の高い制御が可能であるが、ヒータ加熱分の効率低下や信頼性の面から液体窒素凝固防止用や細かな範囲での温度制御用として補助的に使用する。

表 2.2.3-20 温度制御方法比較

	冷却能力制御		熱負荷制御
	ON-OFF制御	インバータ制御	内臓ヒータ制御
方法	複数の冷凍機の発停により離散的に変更	個々の冷凍機の回転数をインバータで連続的に変更	冷凍機に内蔵されたヒータの出力を連続的に変更
制御幅	冷凍機能力の0%または100%	冷凍機能力の60%~100%	冷凍機能力の0%~100%
特徴	簡単、低コスト 離散的な制御のため温度の振幅不可避 メーカは1日1回以下の発停を推奨	精度の高い制御可能 複雑、ノイズ対策必要 インバータ効率分の損失が生じる	精度の高い制御可能 効率低下、ヒータの信頼性が低い
実績	なし	あり	あり

制御点としては、冷凍機出口温度、流量計出口温度、ケーブル入口温度、ケーブル出口温度などが考えられる。制御の応答性の面から制御対象（冷凍機）に近いほうが良いことから、流量計出口温度を制御点とし、温度計故障時のバックアップとしてケーブル入口温度を使用する。なお、冷凍機出口温度については、各列の冷凍機運転状態により変化するため今回は使用しない

(7) 冷却システム構成機器

冷凍機、循環ポンプ以外の構成機器に関して以下に示す。

(a) リザーバタンク

① 構造

図 2.2.3-44 にリザーバタンクの構造を示す。リザーバタンク内には、底面付近の過冷却液体窒素と飽和温度付近の液体窒素の対流による混合を防ぐために波切板を設ける。

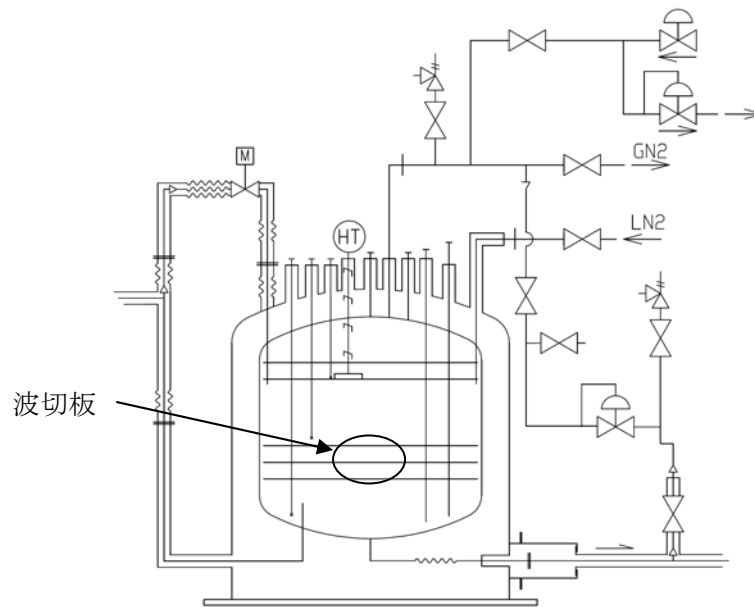


図 2.2.3-44 リザーバタンク構造

② 容積

超電導ケーブル部での貯液量 10,000 L(LC)の温度変化による体積変化量は、

$$10000 \text{ [L]} \times 0.06^* = 600 \text{ [L]} \quad \dots (2.2.3-2)$$

波切板位置までの液量は 300L のため必要タンク容量は、

$$300 \text{ [L]} + 600 \text{ [L]} (\text{増加分}) = 900 \text{ [L]} \quad \dots (2.2.3-3)$$

である。

高压ガス保安法では、低温貯槽にあってはその内容積に対する液化ガスの貯蔵が可能な部分の容積比は 0.9 と決められているためリザーバタンクの容積は 1000 L とする。

※液体窒素の温度 65 K と 77 K での比体積の変化率:約 0.06(飽和圧力:超伝導・低温工学ハンドブック、低温工学協会)

③ 圧力制御装置

2.2.3-7(6) 節で記載したようにリザーバタンクには、系内の圧力制御を行うために以下の制御装置を設置している。

- ・加圧用ヒータユニット

発熱部は3組（ブロック）とし、タンク上部の銅製伝熱板に配置する。各ブロックには3個のヒータを設ける（うち2本は予備）。

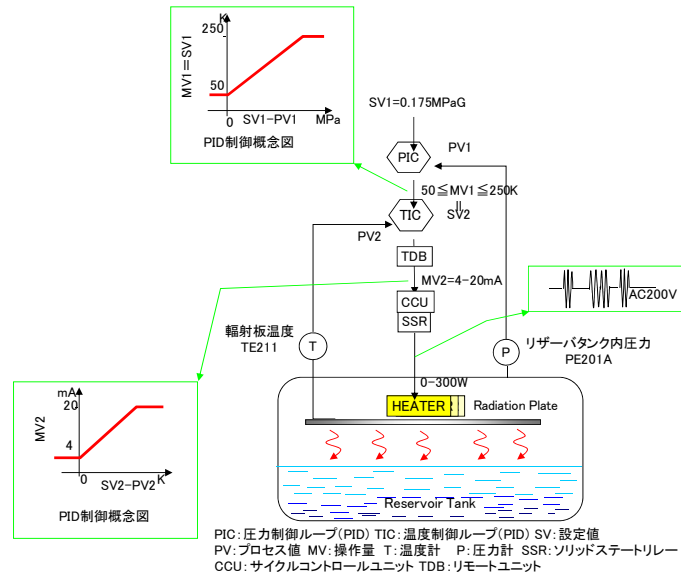


図 2.2.3-45 ヒータ加圧ユニット

- ・外部ガス加圧ユニット

外部に設置した高圧窒素ガスボンベよりガスを供給する。供給量は圧力調整弁によって調整する。

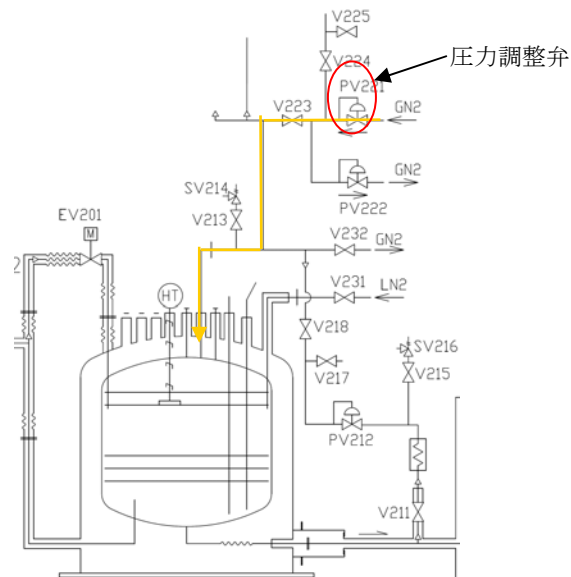


図 2.2.3-46 外部ガス加圧ユニット

・自然加圧ユニット

循環中の液体窒素の一部をガス化させ、リザーバタンクへ供給する配管を設ける。ガス化機能はリザーバタンク側には含まず、供給配管中に設ける。供給量はガス加圧ユニットと同様に圧力調整弁によって調整する。

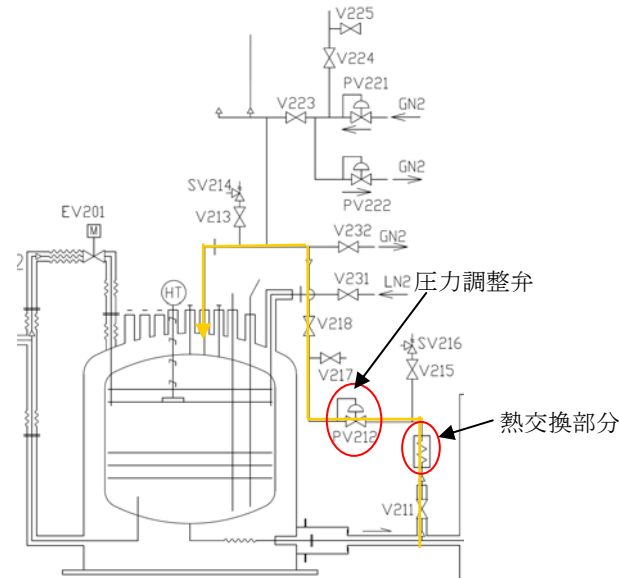


図 2.2.3-47 蒸発ガス供給ユニット

・凝縮減圧弁ユニット

液体窒素循環経路中にリザーバタンク上部へのバイパス配管を設け、配管中に電動弁（凝縮減圧弁）を設け、圧力上昇時に自動で電動弁が開き液体窒素が供給され内部の窒素ガスと接触させ液化させることで圧力を低下させる。

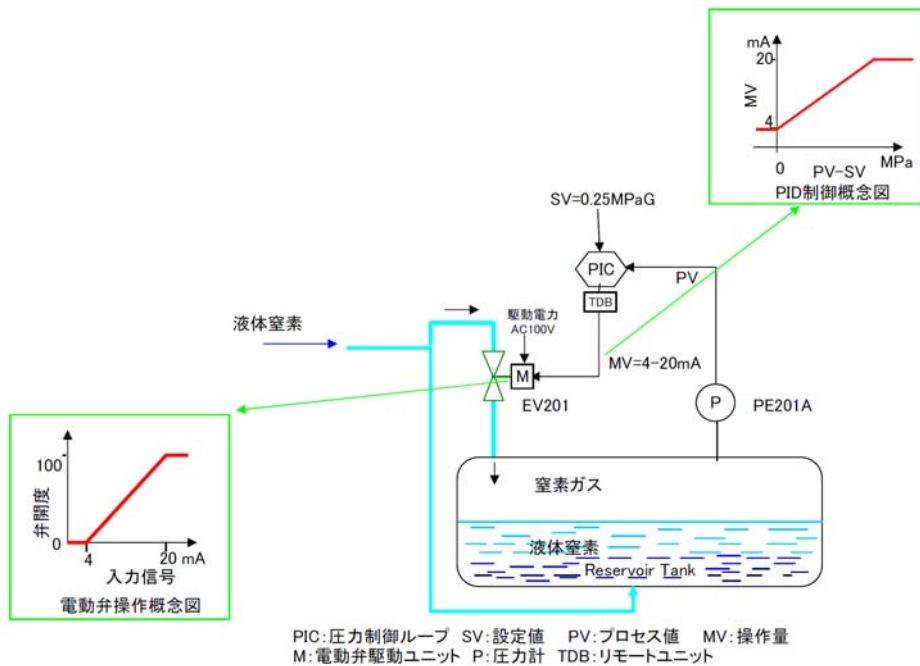


図 2.2.3-48 凝縮減圧弁ユニット

・放圧弁

停電等で凝縮減圧弁が作動しない場合や作動後もさらに圧力の上昇が続いた場合は、圧力調整弁が開き外部にタンク内の窒素ガスを放出することで内部の圧力を低下させる。設定値は凝縮減圧制御の設定値より高く設定している。

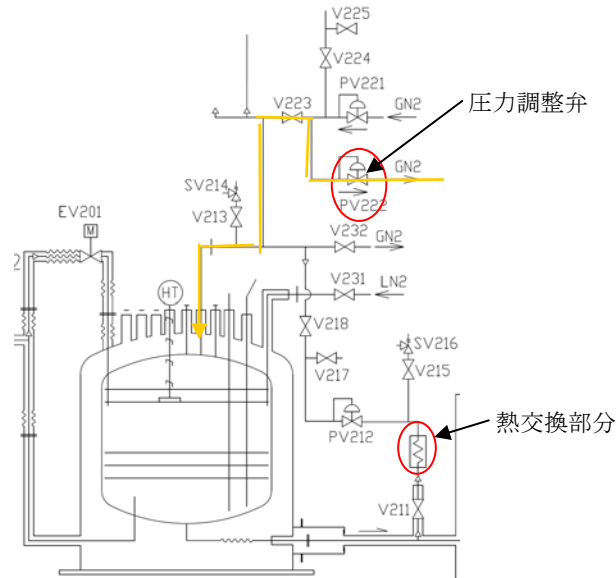


図 2. 2. 3. 49 放圧弁

(b) フィルタユニット

① 機能と役割

液体窒素中の不純物（ケーブル部で発生した異物等）がシステムの運転に影響を及ぼさないよう、循環経路内に不純物を取り除くフィルタを設ける。フィルタの設置位置は、ケーブル部からの異物が冷却システム構成機器に入るのを防ぐため、ケーブル出口側の配管に設置する。なお、システム検証時に水分によるフィルタの目詰まりが発生したため、冷却システムにおいてフィルタは交換可能な構造に変更し、交換作業中も循環運転が可能な構造とする。

② 構造

図 2. 2. 3-51 にフィルタユニットの構造図を示す。フィルタはバイヨネットフランジ配管に取り付け、フランジの取り外しでフィルタを引き抜ける構造とする。フィルタ内の液体窒素の流れ方向は内側から外側となる。フィルタユニットの前後には、メンテナンス時の切り離し用としてバルブを設置し、メンテナンス中も循環が維持できるようバイパスラインを設ける。

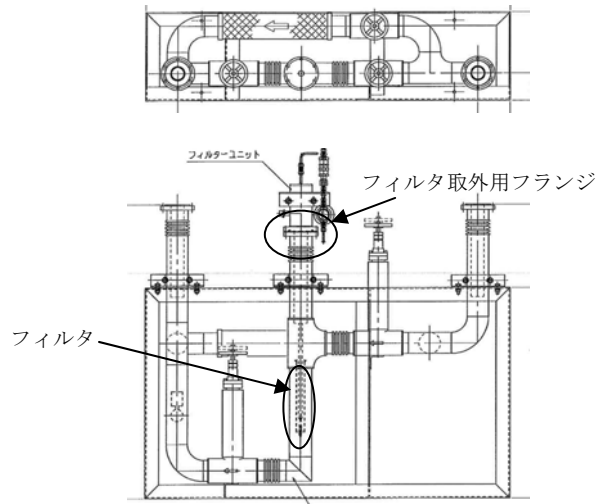


図 2. 2. 3-50 フィルタユニット構造図

(c) センサ

液体窒素の状態を監視するため温度計、圧力計、流量計、液面計などのセンサを用いる。主要な温度計は液体窒素温度域での測定精度が高い白金抵抗温度計(校正表付)を使用する。圧力計はひずみゲージ式およびブルドン管圧力計を使用する。なお、計測部および制御用の圧力計には測定精度が高く測定値を電気信号に変換可能なひずみゲージ式を採用し、現場での目視確認のみを行う圧力計には電源がOFFの場合でも圧力の確認が可能なブルドン管式を採用する。超電導ケーブルに搬送される液量測定は圧力変動の影響を受けにくいコリオリ式流量計を使用し、冷凍機ユニットの各列の流量は取り扱いの容易な差圧式流量計にて測定する。

(d) バルブ・安全弁

液体窒素に循環経路の変更、窒素ガスの系外への放出、系内圧力制御などのために、手動弁、電動弁、電磁弁、圧力調整弁、安全弁を用いる。液体窒素の循環経路に使用するバルブは循環窒素への熱侵入を防ぐため、真空ジャケット付のものを使用する。系内ガス放出経路に使用するバルブには真空ジャケット付のものは使用しないが、低温下で使用可能なものを用いる。各冷凍機への供給流量を制御する必要があるため、列出口側のバルブは細かい開度調整が可能な手動弁とする。

安全弁は、高圧ガス保安法冷凍保安規則に準拠し設置部の許容圧力を基準に設定圧力を選定する。

(8) 圧力損失の算定

冷却システムの圧力損失を表 2.2.3-21 に示す。模擬負荷ヒータはケーブル接続時には使用しないため、模擬負荷ヒータの圧力損失を合計から差し引くと、冷却システムの圧力損失は 0.053 MPa@40 L/min となる。さらに、ケーブルシステムの圧力損失は 0.03 MPa@40 L/min と想定されているため、システム全体での圧力損失は 0.083 MPa@40 L/min となる。

表 2.2.3-21 圧力損失

		単位	設計値
温度		K	67.0
流量		L/min	40.0
圧力損失	冷凍機 2 台 + 差圧式流量計	MPa	0.012
	模擬負荷ヒータ	MPa	0.085
	フィルタ	MPa	0.005
	配管・低温バルブ	MPa	0.036
	合計	MPa	0.138

(9) 熱損失の算定

冷却システムの熱負荷の推定値を表 2.2.3-22 に示す。本結果と超電導ケーブルの結果から冷凍機は最大 5 台使用すると推定される。本設計では停止中の冷凍機 1 台当りの熱負荷を約 100W と考える。停止中の冷凍機 1 台の熱負荷を考慮すると冷却システムの熱負荷は表 2.2.3-22 より約 1,058W となる。

表 2.2.3-22 冷却システム熱負荷

項目	単位	設計値
循環ポンプ熱負荷(2 台運転)	W	143.4
循環ポンプ仕事 ΔPV	W	91.7
模擬負荷ヒータ侵入熱	W	18.0
タンク・流量計・配管・バルブ の熱負荷	W	704.5
合計		957.6

(10) 主要機器の信頼性向上

(a) 冷凍機とローテーション

冷凍機の定期メンテナンスや故障の際にも冷却システムの運転継続を可能とするように冷凍機に冗長性を持たせる。必要台数よりも1台～2台多く設置することで、故障またはメンテナンスの際の予備機を確保する。

想定している冷凍機の通常時使用台数が3～4台であるため、通常の運転ではほぼ運転しない冷凍機が発生する。各冷凍機の運転時間を均一化させ、かつメンテナンス8,000時間を担保するため冷凍機は一定時間毎に列単位でローテーションを実施するようにする。

(b) 循環ポンプ

循環ポンプは信頼性向上のために故障、メンテナンスの際のバックアップ用として1台を増やし、2台設置とする。なお、1台故障停止においても循環可能とするため、1台分で循環可能な能力を持つポンプを使用する。

(11) 冷却水システム

冷却水システムに関しては、以下の項目に関して検討を行った。

①構成→②冷凍機要求条件→③冷却塔→④水ポンプ→⑤膨張タンク→⑥給水方法→⑦メンテナンス→⑧水質管理

(a) 構成検討

冷却水システムの構成方式の比較を表2.2.3-23に示す。

表 2.2.3-23 冷却水システム構成比較

方式	①個別方式	②複数方式
構成図		
冷却方法	冷凍機1台に対して冷却塔1台が対応	熱負荷に対して複数の冷却塔で対応 (冷却塔台数は負荷と能力から決定)
冷却水ポンプ台数	冷却塔1台につき1台使用	任意に設定可能
故障時対応	冷凍機及び冷却塔故障の場合には予備ユニットへ切り替え	冷却塔故障は予備機に切り替え
メンテナンス	冷却水システムのメンテナンスをする際に冷凍機側を停止させる必要あり。ただし故障機器の切り離しは容易	冷却水システムのメンテナンスの影響は出ないが、冷凍機側の場合はシステムを停止させる必要あり。

表より、故障、メンテナンス時の対応が簡潔（ユニット単位で切り替えが可能）であることから、個別方式をベースに検討を行う。

本冷却システムで個別方式を採用した場合の冷却塔設置検討図を図 2.2.3-51 に示す。冷却塔が 6 台必要であるため、図に示すように水ポンプ、薬液注入装置のスペースを含むと手狭である。そこで、スペースを確保するために複数方式として 1 台当り熱負荷 50 %能力の冷却塔を 3 台使用する構成（常用 2 台，予備機 1 台）を検討した。冷却塔設置検討図を図 2.2.3-52 に示す。個別方式と比較して、広い空きスペースが確保できることから複数方式の構成を採用する。

なお、故障ユニットを切り離し易くするため、図 2.2.3-53 に示すように通常運転時は冷凍機 2 台に対して冷却塔 1 台の個別方式で対応し、冷却塔故障時には共通ラインの電動弁が開くことで、複数方式となる方法で運用する。

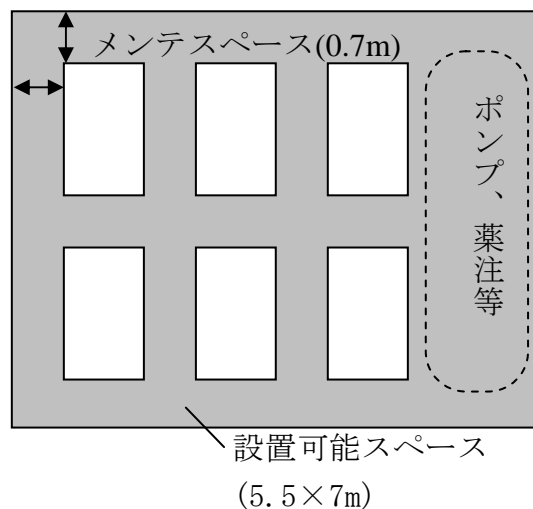


図 2.2.3-51 設置スペース検討例（個別方式採用）

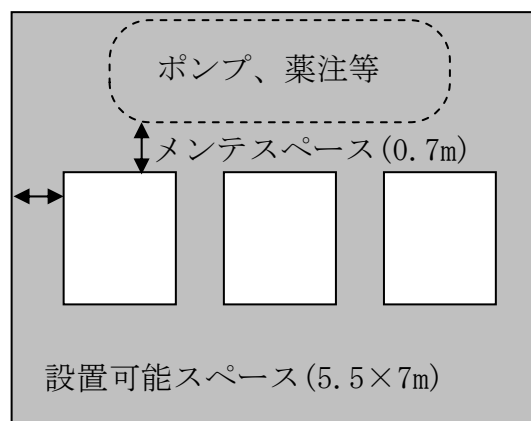


図 2.2.3-52 設置スペース検討例（複数方式採用）

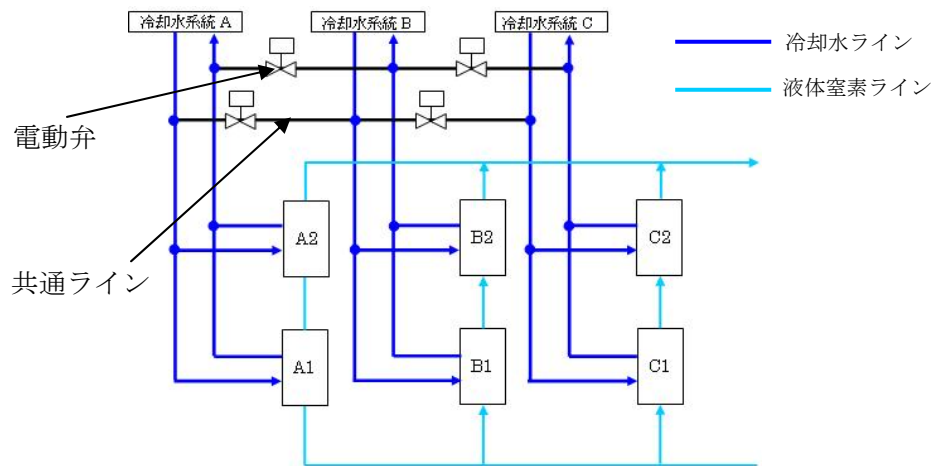


図 2. 2. 3-53 冷凍機との関係

(b) 冷却水システム要求条件

2. 2. 3-7 節で示した、冷凍機の冷却水仕様と複数方式の際の冷却塔 1 台で冷凍機 3 台を冷却する運転を考慮し、検討すると冷却水システムの要求条件は以下の通りとなる。

1. 冷却能力 45 kW 以上 (消費電力 15 kW×3 台)
2. 冷却水循環量 60 ℓ/min (1 台 20 ℓ/min×3 台)
3. 供給冷却水温度 32 °C 以下

(c) 冷却塔の選定

塩害対策および長期運転における水質劣化を考慮して、密閉式冷却塔を採用する。
(b) で示した要求条件から、今回は空研工業の KMC-15TR を選定した。

以下に選定した冷却塔の仕様を示す。なお、冷却能力は 45 kW 以上となっている。

- | | | |
|-----------|--------------|------------|
| 1. 冷却能力 | 45.21 kW | (下記条件時) |
| 2. 冷却水循環量 | 60 L/min | (冷凍機 3 台分) |
| 3. 冷却水温度 | 入口温度 42.8 °C | 出口温度 32 °C |
| 4. 外気湿球温度 | 29 °C | |

(d) 水ポンプの選定

① 圧損計算

冷却水配管及び機器の圧損を表 2.2.3-24 に記す。圧損計算は冷凍機の必要冷却水流量 20 L/min と冷却水システムの運転条件から以下の条件で計算した。

- a) 冷却水ポンプ 1 台で冷凍機 2 台対応
(流量：ポンプ吐出側 40 L/min、各冷凍機側 20 L/min)
- b) 冷却水ポンプ 1 台で冷凍機 3 台対応
(流量：ポンプ吐出側 40ℓ/min、各冷凍機側 20ℓ/min)

なお、共通ライン開放時は並列運転となるため、配管圧損は 1 系列の配管長（冷却塔から冷凍機までの往復配管）で計算した。

圧力損失は以下より算出した。

$$\Delta P = \lambda \times (L/D) \times \rho \times V^2 / 2 \quad \dots (2.2.3-4)$$

- λ : 管摩擦係数
- L : 配管長さ
- D : 配管径
- ρ : 流体密度
- V : 管内平均速度

Mises の式

$$\lambda = 0.0096 + 5.7 \times (0.35 \times 10^{-6} / D)^{0.5} + (2.88 / Re)^{0.5} \quad \dots (2.2.3-5)$$

Re : レイノルズ数

表. 2.2.3-24 圧損計算結果

冷凍機 1 台当たりの流量：1.2 m³/h、冷凍機圧損：200 kPa

		(a)				(b)			
ポンプ吐出流量(ℓ/min)		40				60			
配管条件	配管材(-)	ステンレス管				ステンレス管			
	配管厚さ(-)	sch10				sch10			
	配管呼径(A)	40	25	25	20	40	25	25	20
	流量(ℓ/min)	40	40	20	20	60	40	20	20
	管長(m)	5	40	8	0.5	5	40	8	0.5
	90° エルボ(個)	6	3	10	0	6	3	10	0
	ティー(個)	0	2	0	0	0	2	0	0
	ゲート弁(個)	3	0	2	0	3	0	2	0
	チャッキ弁、ストレーナ(個)	2	0	0	0	2	0	0	0
	流量計(kPa)	0	0	6.8	0	0	0	6.8	0
	圧力損失(kPa)	0.3	15.8	7.8	0.2	0.7	15.8	7.8	0.2
配管圧損	圧力損失(kPa)	24.1				24.5			
冷凍機圧損	圧力損失(kPa)	200				200			
冷却塔圧損	圧力損失(kPa)	7.2				7.2			
圧損合計	(kPa)	231.3				231.7			

② 水ポンプ選定

①の圧損計算に基づき 2 次ポンプの選定を行った。図 2. 2. 3-54 に冷凍機 2 台運転の場合と 3 台運転の場合の圧損抵抗および選定したポンプの性能曲線を示す。図中の a)、b) は表 2. 2. 3-24 の計算結果から圧損抵抗を 10 kPa ≒ 1 m として揚程換算した値である。

選定したポンプの仕様を以下に示す。

1. 型式：荏原製作所製 40LPD52.2A
2. 容量：60 L/min
3. 揚程：32.4 m
4. モータ出力 2.2 kW@AC200 V

図に示すように計算から求めた全損失水頭よりも余裕があり適切である。

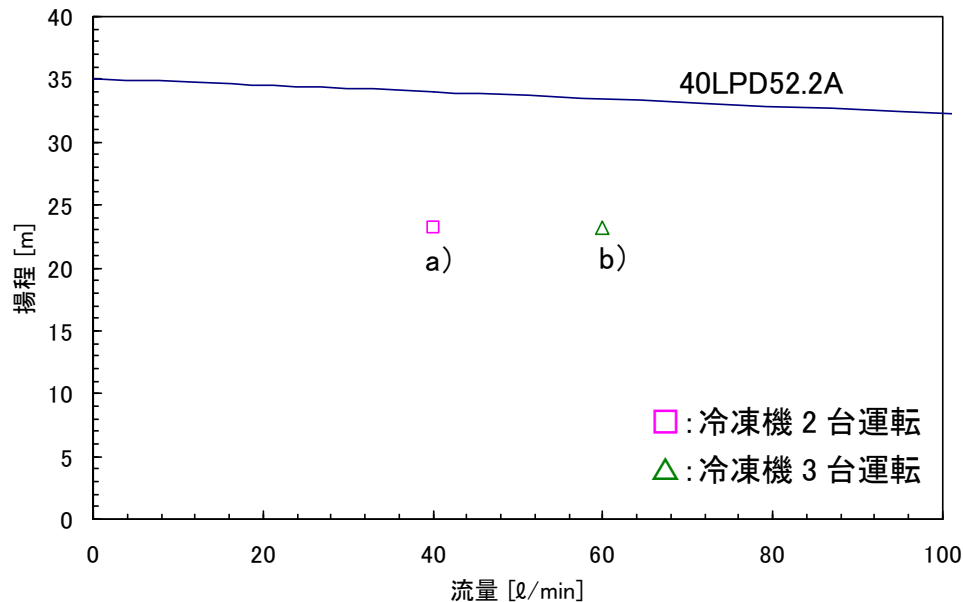


図 2. 2. 3-54 揚程曲線

(d) 膨張タンク選定

密閉式の冷却塔を使用し 2 次側冷却水は密閉となるため、温度・圧力による体積膨張分を補う膨張タンクを配管途中に設ける必要がある。タンク選定のために必要タンク容量を計算する。タンク容量を V として以下のように算出した。

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{\varepsilon \times V_s}{1 - \frac{P_1}{P_2}} \\
 &= \frac{0.006 \times 133}{1 - \frac{0.15}{0.1985}} = 3.27 \quad (\ell) \quad \dots (2. 2. 3-6)
 \end{aligned}$$

ε : 温水平均温度における水の膨張率、 $\varepsilon = 0.006$ (35 °Cの熱膨張比率)

V_s : システム全水量(ℓ)

$$V_s = \text{冷却塔コイル容積} : 65 \ell + \text{配管容積} 48 \ell + \text{冷凍機冷却水容積} 20 \ell \\ = 133 \ell$$

P_1 : タンク設置位置におけるシステム圧=給水圧力 (MPa)

$$P_1 = 0.05 + 0.1 = 0.15 \text{ MPa}$$

P_2 : タンク設置位置における運転時最高使用圧力

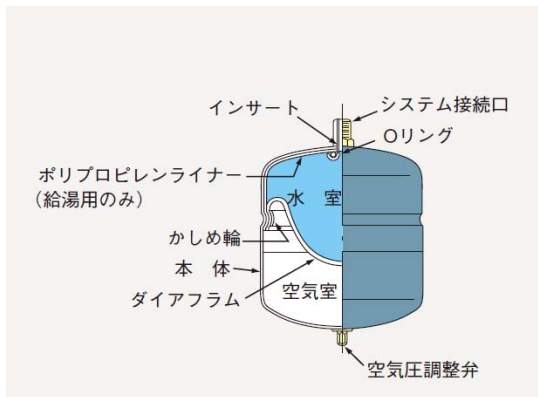
$$P_2 = P_1 + P_m$$

P_m : 安全弁設定圧 - (安全弁設定圧 \times 0.1+給水圧)

$$P_m = 0.49 - (0.49 \times 0.1 + 0.05) \\ = 0.0485 \text{ MPa}$$

$$P_2 = 0.15 + 0.0485 \\ = 0.1985 \text{ MPa}$$

以上の結果から選定したポンプの仕様及び構造を以下に示す。仕様に於いて、必要なタンク容量 3.27 ℓ に対して最大受水量 8.2 ℓ と余裕があり充分である。



仕様

型式 : EX-30

タンク容量 : 16.6 ℓ

最大受水量 : 8.2 ℓ

サイズ : 279 ϕ \times 384 H

主要諸元 : 最高仕様圧力 0.49 MPa

最高使用温度 95 °C

重量 4.1 kg

接続径 1/2B

図 2.2.3-55 膨張タンクの仕様と構造

(f) 給水方法

本冷却塔は密閉型であるため、密閉系に加圧による給水が必要となる。しかし、水道水の水压による直結給水はクロスコネクションとなり水道法により禁止されているため、加圧給水装置を設け、給水する。加圧給水装置は屋上に設置し、水道水は付属する給水タンクボールタップへ接続することで逆流を防止する。給水加圧ポンプより吐き出された補給水は冷却水循環回路の各冷却塔と循環ポンプ吸入配管に減圧調整弁を通して給水する。

(g) メンテナンス

実証試験では年間を通して冷凍機を止めることなく稼働することが求められるため、冷却塔の清掃、メンテナンスが重要となる。ここでは、運転 2,000 時間で各部の点検を実施し、状態に応じて清掃等の対応を行う。

(h) 補給水量と水質管理

冷却塔の冷却は、水の蒸発潜熱を利用して行われている。そこで、1 次側の循環水は蒸発等によって失われるため外部から常時補給する必要がある。さらに、水に含まれる不純物が濃縮するのを防止するための給水量（ブロー）も供給する必要がある。ブロー量は一般に循環水量の 0.3 %が必要である。表 2.2.3-25 に冷却水の水質基準値（水質基準及び管理方法の指針 JRA-GL-02-1994 規格）を示す。また、図 2.2.3-53（KMC-15TR、冷凍機 2 台－冷却塔 1 台）においての必要補給水量の計算例を以下に示す。

入口水温度 37 °C、出口水温度 32 °C、循環水量 6000 kg/h（100 L/min）、水の蒸発潜熱 2,520 kJ/kg、比熱 4.18 kJ/kg°C とすると蒸発量は

$$[(37-32) \times 6000 \times 4.18] / 2520 = 49.8 \text{ kg/h}$$

となる。キャリーオーバー（ファンによる外部飛散）0.05 % ($6000 \times 0.0005 = 3 \text{ kg/h}$) を考慮すると冷却塔 1 台当たりの補給水量は、

$$49.8 + 3 = 52.8 \text{ kg/h}$$

となる。そこで、冷却塔 3 台（冷凍機 6 台分）の必要供給水量は最大で、

$$52.8 \times 3 = 158.4 \text{ kg/h (約 2.6 L/min)}$$

である。

さらに、次冷却水の濃縮防止のため、貯水槽内の電気伝導率を測定し、断続的にブローダウンを行う。表 2.2.3-26 の基準を超えるとシリカ等が析出し熱交換効率の低下などの問題が生じるため、基準値以下に保持する必要がある。薬品注入は環境に影響を与える可能性があることから、補給水による希釈のみを実施する。水質が 2.5 倍以上濃縮されると濃縮倍数の一番小さいシリカの数値が JRA 基準を超えるため、電気伝導率の値で 2.5 倍以下に希釈するように管理する。

自動ブローによる、1 回当たりの補給水量を想定すると概算より、103 L である。計算方法は以下の通りである（アクアスより）。

・冷却塔の保有水量

$$\text{運転質量 (880 kg)} - \text{製品質量 (570 kg)} = 310 \text{ kg}$$

・ブロー量の計算

濃縮倍数の設定値を 2 倍として計算する。ブロー装置は導電率の値が 30 mS/m でブローを開始し、25 mS/m でブローを停止するものとする（導電率の設定値は変更可能）。30 mS/m の水を 15 mS/m の水を用いて 25 mS/m の水を 1L 作る場合、どの

割合で混合するかを計算する。30 mS/m の水の量を X、15 mS/m の水の量を Y とし
て、

$$\begin{aligned}
 X + Y &= 1 \\
 30X + 15Y &= 25 \\
 X &= 2/3 \\
 Y &= 1/3
 \end{aligned}$$

完全に置換できる場合でも 310 L の保有水量に対して、1 回当たり、103 L の補給水量が必要となる。

表 2.2.3-25 冷却水の水質基準値

	項目	単位	補給水 基準値	循環水 または 散布水	傾向	
					腐食	スケール
基準項目	PH(25℃)	—	6.0～8.0	6.5～8.2	○	○
	導電率(25℃)	mS/m	30以下	80以下	○	○
	塩化物イオンCl ⁻	mgCl ⁻ /L	50以下	200以下	○	
	硫酸イオンSO ₄ ²⁻	mgSO ₄ ²⁻ /L	50以下	200以下	○	
	酸消費量(pH4.8)	mgCaCO ₃ /L	50以下	100以下		○
	全硬度	mgCaCO ₃ /L	70以下	200以下		○
	カルシウム硬度	mgCaCO ₃ /L	50以下	150以下		○
	イオン状シリカ	mgSiO ₂ /L	30以下	50以下		○
参考項目	鉄	mgFe/L	0.3以下	1.0以下	○	
	銅	mgCu/L	0.1以下	0.3以下	○	
	硫化物イオンS ²⁻	mgS ²⁻ /L	検出されない こと	検出されない こと	○	
	アンモニウムイオンNH ₄ ⁺	mgNH ₄ ⁺ /L	0.1以下	1.0以下	○	
	残留塩素	mgCl/L	0.3以下	0.3以下	○	
	遊離炭酸	mgCO ₂ /L	4.0以下	4.0以下	○	
	安定度指数	—	—	6.0～7.0	○	○

表 2.2.3-26 JRA に基づいた濃縮管理

項目		横浜市水	JRA	濃縮倍数
電気伝導率(25℃)	mS/m	15	80	5.3
全硬度	mgCaCO ₃ /リットル	56	<200	3.6
カルシウム硬度	mgCaCO ₃ /リットル	38	<150	3.9
マグネシウム硬度	mgCaCO ₃ /リットル	16	—	—
塩化物イオン	mgCl ⁻ /リットル	7	<200	28.6
シリカ	mgSiO ₂ /リットル	20	<50	2.5

2.2.4 実証ケーブルシステムの建設方法の検討

(1) 研究開発目的

選定した旭変電所に目的とする超電導設備が構築できるか、設備構築レイアウトに加えて施工手順も含め詳細検討を行う。

(2) 設備構築レイアウトの検討

図 2.2.4-1 に超電導ケーブルシステム布設前の既設設備の配置状況を示す。超電導ケーブルシステムの布設・施工工事にあたっては、特に次に掲げる点に留意して検討を進めた。

- ・ 既設埋設物に支障を来さぬよう、関係箇所とよく確認すること。
- ・ 重量物の搬入について、重機の駐車および旋回スペースを確保すること。
- ・ ケーブル引き入れについて、ドラム車両の設置スペースを確保すること。
- ・ ケーブル引き入れについて、引き入れ時の側圧を低減すること。
- ・ 建築物等の関連法規への適切な対応をすること。

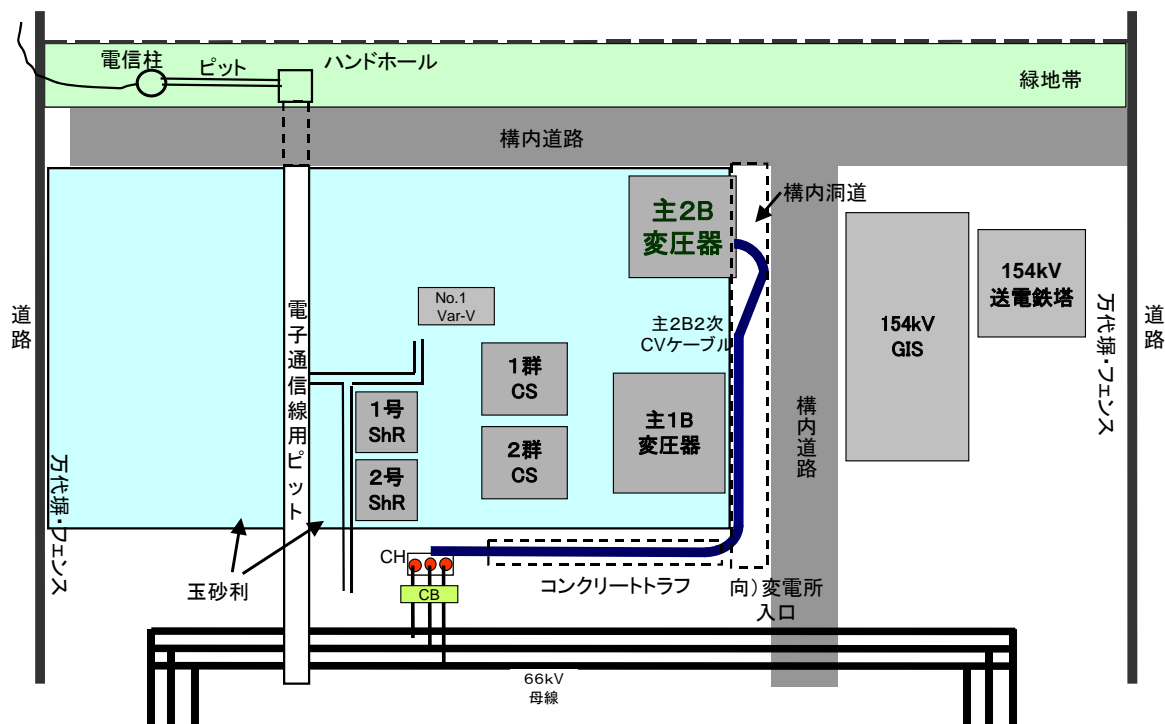


図 2.2.4-1 超電導ケーブルシステム施工前のレイアウト

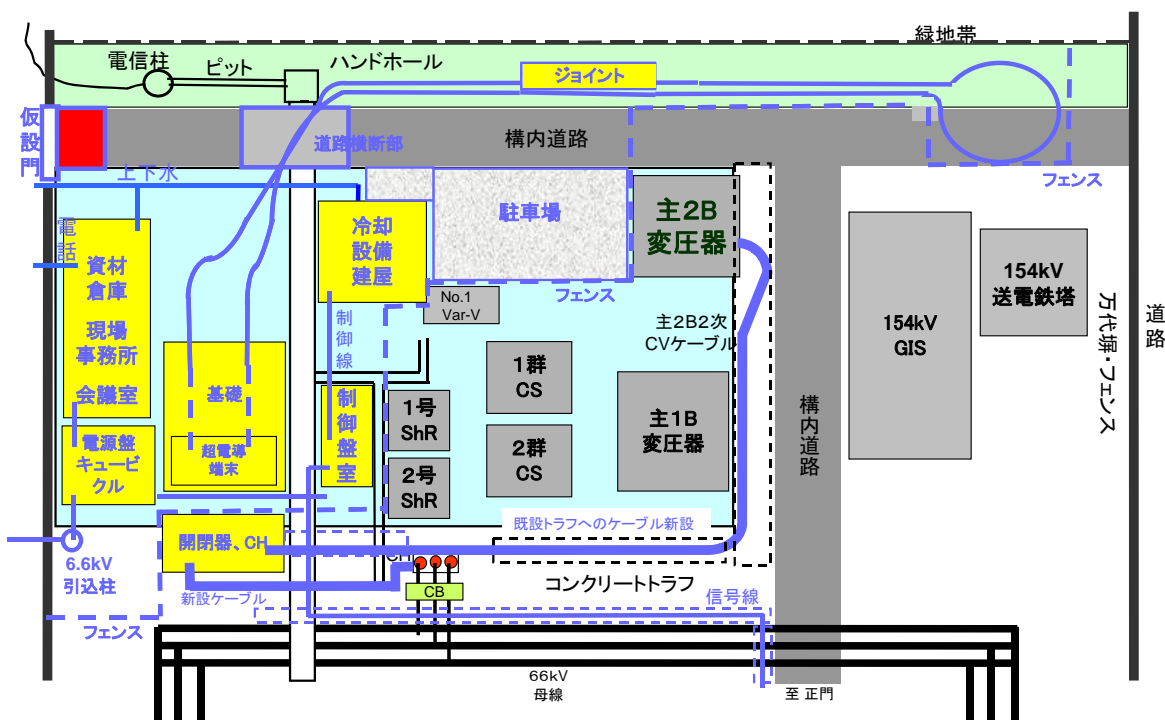


図 2.2.4-2 超電導ケーブルシステム施工後のレイアウト
(平成 21 年度における概略設計)

具体的なレイアウト検討としては旭変電所の空きスペースを活用し、また、既設主変 2 号変圧器の 2 次側に超電導ケーブルを接続するという観点、および施工性などを考慮し図 2.2.4-2 に示すように、まずは開閉器、超電導端末、超電導ケーブルルート、中間接続部などのルートを選定した。次に、試験に必要な冷却設備建屋や制御盤室、電源盤キュービクル、現場事務所等も、空きスペースに効率的にレイアウトを行ない、電源ケーブル、制御ケーブル、冷却水配管などの取り回しが容易となるように考慮した。図 2.2.4-2 での概略設計段階においては、154/66 kV 変圧器 2 次側から開閉器までの 66 kV ケーブルを引き替える計画であったが、詳細検討の結果、同ケーブルの引き替えには 154/66 kV 変圧器の改造が必要であること等コストアップに繋がることから、既存ケーブルを活用できる設備形態となるよう再検討した。最終レイアウトは図 2.2.4-3 の通り、既存 66 kV CV ケーブルのケーブルヘッド(CH)と 66 kV 母線側の遮断器(CB)を接続していた架線を取り外した上で、既存 CH から新設した架線により断路器(LS1, 2)および遮断器(CB1, 2)の開閉器を経由して超電導ケーブルと接続する設備形態とした。超電導ケーブルからの戻りラインとしては、CV ケーブルを新設し、この CV ケーブルの CH を既存 CV ケーブルの CH と 66kV 母線側既存 CB の間に設置した後、母線側既存 CB と接続した。また、バイパス回路用の断路器(LST10)を設置することで、超電導ケーブルの定期点検等による停止時も無停電でバイパス回路に切り替えが可能な形態とした。

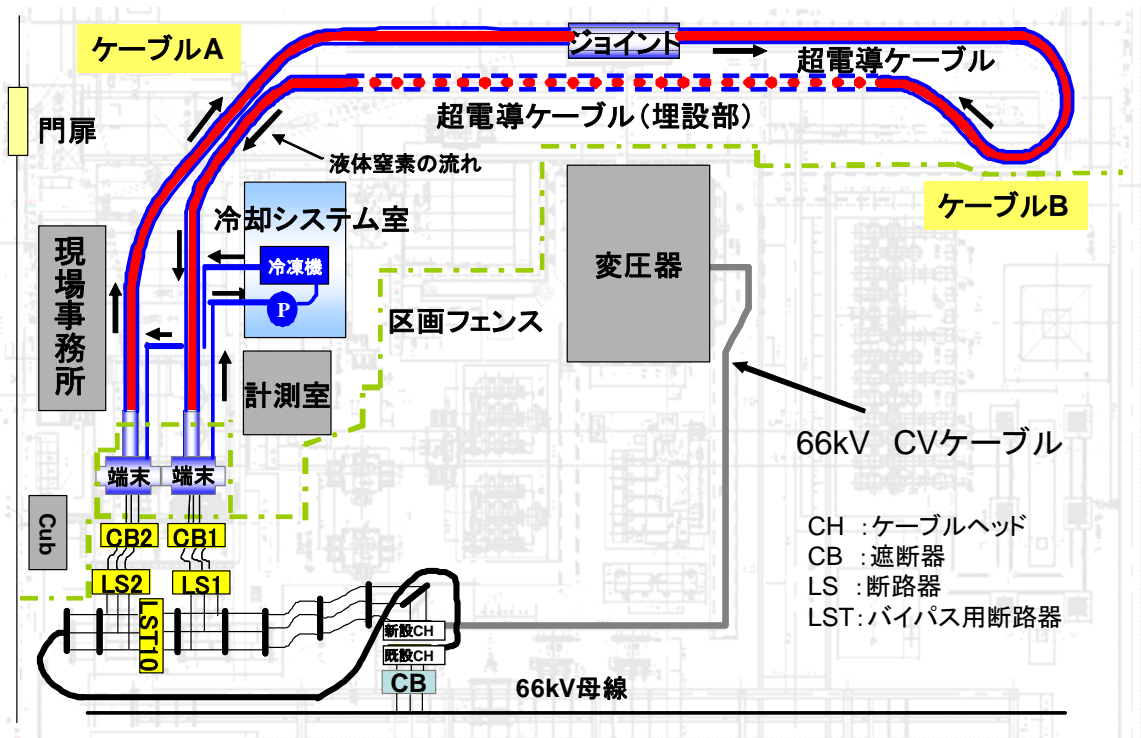


図 2.2.4-3 超電導ケーブルシステム施工後のレイアウト（最終）

(3) 施工手順の検討

図 2.2.4-3 の設備レイアウトを踏まえ、平成 21 年度に作成した旭変電所における工事の施工手順を表 2.2.4-1 に示す。当初、平成 23 年 11 月からの実系統連系試験に向けて、平成 21 年度より変電関係、土木関連、建築建屋関連の設計、平成 22 年度からは現地での整地・基礎工事を皮切りに各種建屋の建設、電源盤、冷却システム、開閉器等の搬入・据付、平成 22 年度末から平成 23 年度はじめにかけては超電導ケーブル用管路および超電導ケーブルの布設、端末、中間接続部などの組立を開始し、その組立後、初期冷却や警報対向確認試験、超電導ケーブル用保護リレーの設置などを経て実系統連系試験を迎え、試験終了後の平成 24 年 11 月以降には超電導ケーブルでの送電を停止し、昇温・解体撤去する手順を検討していた。

しかしながら、平成 23 年 3 月 11 日の東日本大震災の影響により、変電工事を一時中断せざるを得ない事態となったことから、旭変電所における施工手順を表 2.2.4-2 の通り大幅に見直した。具体的には、当初平成 23 年度に予定していた超電導ケーブル用リレー設置・試験等の変電関係工事をすべて平成 24 年度に延期した。また、平成 23 年度はじめから電源盤や冷却システムの搬入組立を実施し、平成 24 年度の第 2 四半期にかけて冷却システムの単体試験を実施した。平成 23 年度第 2 四半期から平成 23 年度末にかけては超電導ケーブル用管路および超電導ケーブルの布設、端末、中間接続部などの据え付け施工を実施し、平成 24 年度第 2 四半期において組立が完了した後、警報対向確認試験、超電導ケーブル用保護リレーの設置などを経て平成 24 年度第 3 四半期から実系統連系試験を開始、平成 25 年度

第3四半期以降に超電導ケーブルの送電を停止し、残存性能等の最終試験を実施した後に昇温する手順とした。

項目	時期	平成21年度			平成22年度				平成23年度				平成24年度				
		2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	
設計(建築・土木・変電)		■															
現地整備(整地・基礎・上下水・電話)				■	■	■											
冷却建屋・工事事務所建設				■	■	■											
開閉器基礎・超電導端末基礎・門扉						■	■	■									
電源盤搬入・冷却システム搬入組立・試験							■	■	■	■							
開閉器据付・試験									■								
管路布設、超電導ケーブル布設・端末・ジョイント据付施工									■	■	■						
超電導ケーブル用リレー設置・試験											■	■					
ケーブル初期冷却・警報対向試験												■	■				
既設主変2次ケーブル撤去・新ケーブル布設・CH端末													■	■			
制御回路切替・シーケンス														■	■		
給電対向試験・使用前自主検査															■		
実系統連系試験																■	
最終試験・冷却システム停止・昇温・撤去																	■
撤去・復旧																	■

表 2.2.4-1 旭変電所における施工手順(平成21年度時点)

項目	時期	平成21年度			平成22年度				平成23年度				平成24年度				平成25年度				
		2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	
設計(建築・土木・変電)		■																			
現地整備(整地・基礎・上下水・電話)				■	■	■															
冷却建屋・工事事務所建設				■	■	■															
開閉器基礎・超電導端末基礎・門扉						■	■	■													
開閉器据付・試験									■												
電源盤搬入・冷却システム組立									■	■											
冷却システム単体試験											■	■	■								
管路布設、超電導ケーブル布設・端末・ジョイント据付施工											■	■	■								
超電導ケーブル用リレー設置・試験													■	■							
冷却配管敷設工事・初期冷却														■	■						
ケーブル単体試験・システム総合試験															■	■	■				
CVケーブル・架線布設工事																■	■				
盤回収工事・シーケンス																	■	■			
給電対向試験・使用前自主検査																		■			
実系統連系試験																				■	
最終試験・冷却システム停止・昇温																					■

表 2.2.4-2 旭変電所における施工手順
(東日本大震災の影響により平成23年度にて見直しを実施)

(4) まとめ

- 旭変電所における超電導ケーブルシステムの設備レイアウトについて、概略設計を経て、図 2.2.4-3 の通り最終レイアウトを決定した。
- 旭変電所の工事にあたり、東京電力内の関係箇所と詳細な調整を進め、平成 21 年度時点で表 2.2.4-1 の通り施工手順を作成した。しかし、東日本大震災の影響により平成 23 年度時点で表 2.2.4-2 の通り施工手順の見直しを実施した。

2.2.5 まとめ

2.2節におけるまとめを以下に示す。

- ・ 実証ケーブルの基本構成を検討し、実証場所を選定。東京電力管内の旭変電所（横浜市）に決定した。
- ・ 実証場所での超電導ケーブルと既存設備との接続形態について検討し、遮断器、断路器等と組み合わせた接続方法を決定した。
- ・ 実証場所での条件を踏まえ、超電導ケーブルへの基本仕様をまとめた。

- ・ 高温超電導ケーブルシステムと既存系統との接続において、高温超電導ケーブルシステムの故障を想定した運転・監視、保護・遮断システムなどの付帯機器の検討を行なった。
- ・ 保護・遮断システムについては、超電導ケーブルにて電氣的な事故が発生した場合でも、既設の変圧器保護リレーにより保護可能であることを確認した。

- ・ 冷却システムのコンセプトについてまとめ、送電を停止しないシステム、負荷に追従可能なシステムを目指すこととした。
- ・ 冷却方式については、間接冷却と直接冷却から直接冷却方式を選択した。
- ・ 実証場所での電力負荷を想定し、冷却システムの必要冷凍容量を試算、1kW級冷凍機の台数を決定した。
- ・ 冷凍機、ポンプの構成を検討し、冷凍機については2台×3並列の並列接続することとした。ポンプについては、2台を交互運転することとした。
- ・ 冷凍機とポンプはパスを切り離し、それぞれが故障しても独立に対応できるようにした。尚、流量の分岐については、長期信頼性などを今後調査するが、安定性に問題があるようであれば、並列パス毎にポンプを設け、流量を調整できるようにする。
- ・ 冷却システムの開発ステップとして、30m 検証ケーブルでの基本構成検討、システム検証での冷凍機、ポンプの複数台制御検討、実証システムでの最終確認試験の三段階で行うこととした。
- ・ 実証ケーブルの建設について、設備形態の最終レイアウトを決定すると共に、東京電力内の関係箇所と工程調整を進めた。
- ・ 建設手順については、当初表 2.2.4-1 に示す手順を予定していたが、平成 23 年 3 月の東日本大震災の影響を受け、旭変電所における施工手順を表 2.2.4-2 の通り大幅に見直した。

2.3 送電システム運転技術の開発

送電システムの負荷や電流の変動などの系統変化や系統事故などに対応した平常時運用や事故時運用、および高温超電導送電システムの一部設備の障害時における復旧方法などの高温超電導ケーブルシステムの運転技術が、既存送電システムの運転と整合のとれた運用ができることは重要であり、そのための運転技術を開発することが必要である。

本節では、高温超電導ケーブルの実証場所での系統運転、接続条件を調査し、超電導ケーブルの平常時、異常時の運転手法について検討を行う。また、超電導ケーブルシステムの運転継続を行うための保守、メンテナンス技術の開発を行う。

2.3.1 実証場所での系統特性調査

(1) 研究開発目的

実系統では負荷が刻々と変化し、それに対応した需給運用がなされており、高温超電導ケーブルシステムについても負荷の変動に対応した運転が必要になる。また、系統で発生しうる種々の電圧サージ（スイッチング、雷、他）による過電圧や短絡電流などの事故電流にも耐えることが必要となる。また、高温超電導ケーブルは従来ケーブルと比べて、低インピーダンスという特徴を有していることから、その効果や影響についての検討が必要である。そこで、超電導ケーブルを実系統に連系して運転した場合の系統側へ及ぼす影響をシミュレーション等によって調査し、その影響度合いに応じた対策を講じることを目的として、以下の項目について調査・検討を実施する。

- ・ 超電導ケーブルと従来ケーブルの電気的特性の比較
- ・ 超電導ケーブルに流れる短絡電流の調査
- ・ 超電導ケーブル接続時の短絡電流への影響検討と保護リレー動作条件の調査
- ・ サージに関する条件の調査と影響検討
- ・ 落雷頻度の調査
- ・ 系統負荷状態、潮流状況の調査、過負荷許容条件の調査
- ・ 励磁突入電流の調査
- ・ その他超電導ケーブル接続に伴う系統運用上の制約事項の検討

(2) 超電導ケーブルと従来ケーブルの電气的特性的比較

超電導ケーブルと従来ケーブルの電气的特性、系統特性の比較検討を実施した。

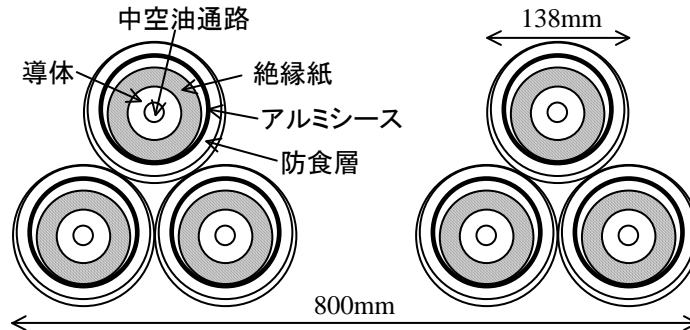


図 2.3.1-1 従来ケーブル (OF ケーブル) (275kV, 1000A, 2 回線)

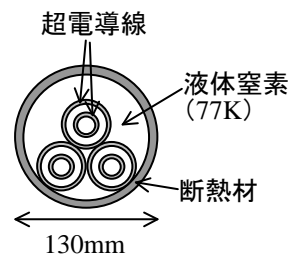


図 2.3.1-2 高温超電導ケーブル (66kV, 9000A, 1 回線)

図 2.3.1-1 は従来ケーブル (CV ケーブル) の断面図、図 2.3.1-2 は超電導ケーブルの断面図である。ともに 1000MW の送電容量を想定した断面構造模式図であり、同容量を送電するにあたり、従来ケーブル (OF ケーブル) では送電容量が発熱により制限されることから 500MW のケーブル 2 回線を洞道に布設することとなる (布設幅約 800mm)。一方、高温超電導ケーブルは导体部分の電流密度が現用ケーブルに比べて 1000 倍以上高くできる可能性があるため、冷却に必要なスペースを考慮してもケーブル外径を小さくすることができ、管路に設置することが期待できるとともに、リプレースなど既設設備の有効利用が可能になり、地中設備形成のコストダウンにつながると期待できる。

高温超電導ケーブルの系統特性上の特徴は、同容量の現用ケーブルと比べて低電圧・大電流であり、メリットとして、抵抗がゼロであることから損失を小さくすることができる、インピーダンスが小さく系統安定度向上に寄与できる、サージインピーダンスローディングが大きく大電流送電に適する、などが挙げられる。

以下、高温超電導ケーブルと現用ケーブルの諸定数と系統特性について検討を行った。一般に、送電線の系統特性はインダクタンスとキャパシタンスで決まる。もちろん、現用の架空線やケーブルには電気抵抗が存在するが、系統特性の議論ではそのインピーダンスへの寄与は無視できる。架空線の場合はキャパシタンスが小さいため、線路に沿った電圧降下はインダクタンスの寄与が大きい。安定に送電で

きる電力量を確保するために、重潮流の送電線ではインダクタンスを補償する対策がとられ、主として変電所において並列コンデンサーを接続する。一方、電力ケーブルの場合には絶縁物（誘電体）が導体外部に存在するため、線路のインピーダンスはキャパシタンスの寄与が相対的に大きい。この場合、系統特性上は問題ないが、軽負荷時には受電端の電圧が上昇することがあり（フェランチ現象）、対策としてシャントリアクトルを設置して、キャパシタンスを補償することが行なわれている。

表 2.3.1-1 に従来ケーブルと高温超電導ケーブルのケーブル定数を示す。

表 2.3.1-1 ケーブル定数

		従来ケーブル		高温超電導ケーブル
		275kV(OF,CV)	66kVVCV	
電圧	V(V)	275	66	66
リアクタンス	X(Ω /km)	0.114	0.159	0.0165
	%X(%/km)	0.151	3.65	0.378
対地アドミタンス	Y(Ω^{-1} /km)	1.19×10^{-4}	7.54×10^{-5}	1.53×10^{-4}
	%Y(%/km)	9.02×10^{-1}	3.28×10^{-2}	6.65×10^{-2}
サージインピーダンスローディング	SIL(MW)	2444	95	419

(%X,%Yは1000MVAベース)

表 2.3.1-1 中のサージインピーダンスローディング（SIL）は送電線にどの程度の電力を送電できるかの目安となる。SIL から離れた電力を送電する場合には、電力コンデンサーやシャントリアクトルによって、系統定数をコントロールする必要がある。

高温超電導ケーブルの%Xの値は66kVVCVケーブルの約1/10となっている。これは、現用ケーブルの場合、インダクタンスの値は各相の導体中心間距離で定まる（図 2.3.1-1 のように三相俵積みの場合）のに対して、高温超電導ケーブルの場合には、図 2.3.1-2 に示すように、導体電流と同じ大きさの逆位相の電流によって磁界を遮蔽するシールド層が存在するという構造のため、導体外径に対するシールド層内径の比がインダクタンスの大きさを決めるためである。

この結果、現用66kVVCVケーブルではSIL=95MWであるのに対し、高温超電導ケーブルではSIL=419MWとなり、現用CVケーブルに比べて高温超電導ケーブルは大容量送電に向いていると言える。なお、高温超電導ケーブルで419MW以上の送電には並列コンデンサーなどの調相設備を設置して、負荷端の電圧低下を抑える必要がある。現用の275kVVCVケーブルの場合には、電圧が高い分%Xは小さく、%Yは大きくなり、SIL=2444MWとなる。送電容量は約500MWであるから、SILに比べて十分小さく、電圧安定性は良好であるが、軽負荷時にシャントリアクトルを入れて負荷端の電圧上昇を抑える必要がある。

(3) 超電導ケーブル接続時のインピーダンス変化と影響検討

超電導ケーブルのインピーダンスは電力系統における発電機や変圧器のインピーダンスに比べれば十分小さく、電力系統のインピーダンスの変化はほとんど無視できるレベルである。よって、旭変電所での実証試験時に主変2号変圧器2次に超電導ケーブルを連系した場合でも、変圧器保護後備リレーである距離リレーなどの整定変更の必要はなく、現在の整定のままで超電導ケーブルの保護が可能である。

超電導ケーブルのインピーダンスを以下の通り求めた。結果を表2.3.1-2に示す。なお、表2.3.1-2にはCVケーブル(旭変電所既設CVケーブル2500mm²)の数値も併記した(CVケーブルは100m長、超電導ケーブルは300m長として計算)。超電導ケーブルの抵抗値については常時液体窒素で冷却し、超電導状態が保たれていれば0Ωとみなすことができる。しかし、ここでは系統への影響を考えるため、超電導ケーブルの超電導状態が壊れ、超電導ケーブルのインピーダンスが大きくなる常電導状態になった場合での検討を実施した。抵抗値を求めるにあたり、銀安定化層は無視してフォーマのみとし、さらに、常温での抵抗率を使用した⁽¹⁾。断面積については東京電力-住友電工が平成14年に実施した、100MVA級で100m長の超電導ケーブルを用いた成立性検証試験⁽²⁾(以下100m試験)のフォーマ断面積を用いた(短絡電流通過時を考慮し、有効断面積を半分とした)。また、超電導ケーブルのインダクタンス、キャパシタンスについても100m試験結果より求めた。

超電導ケーブルを接続する予定である旭変電所の154/66kV主変2号変圧器のインピーダンスについて表2.3.1-3に示す。インピーダンスZの添え字p、s、tはそれぞれ変圧器の1次、2次、3次を示す。

表2.3.1-2 CVケーブルと超電導ケーブルのインピーダンス
(CVケーブルは100m長、超電導ケーブルは300m長とした場合)

		CVケーブル	SCケーブル
抵抗	R(Ω)	0.000746	0.066
インダクタンス	L(H)	0.000083	0.0000522
キャパシタンス	C(F)	0.000000069	0.000000072
周波数	f(Hz)	50	50
角周波数	$\omega(=2*\pi*f)(rad/s)$	314	314
分母	$1-2w^2LC+w^4L^2C^2+w^2C^2R^2$	0.999998871	0.999999259
分子(実数部)	$R-2*w^2RLC$	0.000745999	0.065999951
分子(虚数部)	$wL-w^3L^2C+wCR^2$	0.026061985	0.016390892
インピーダンス実数部	R	0.000746	0.066
インピーダンス虚数部	X	0.026062015	0.016390905
インピーダンス	$Z=R+jX$	0.000746+j0.026	0.066+j0.016
インピーダンス	$ Z =\sqrt{R^2+X^2}$	0.026072689	0.068004866

表 2.3.1-3 旭変電所主変 2 号変圧器インピーダンス

	Zp-s	Zs-t	Zp-t	Zp	Zs	Zt
%Z	0.805	1.027	2.01	0.894	-0.089	1.116
154kV側から見たΩ値	17.395	22.192	43.434	19.318	-1.923	24.116
66kV側から見たΩ値	3.507	4.474	8.756	3.894	-0.388	4.861

表 2.3.1-2 より超電導ケーブルのインピーダンスは 0.068Ω (常電導状態での値) となることがわかった。一方、表 2.3.1-3 より、変圧器 1 次側のインピーダンス (Z_p) は 66kV 側から見たΩ値で 3.894Ω となっており、超電導ケーブルのインピーダンスは超電導状態がこわれた常電導状態の場合でも、主変 2 号変圧器のインピーダンスよりも十分小さく、短絡電流など事故電流への影響はほとんどない。

上記検討では旭変電所の主変 2 号変圧器 1 次側インピーダンスと超電導ケーブルの常電導状態でのインピーダンスを比較したが、実系統においては電源から超電導ケーブルを通して負荷に至るまでに、旭変電所の変圧器以外にも多くの送電線、変電機器が直列に接続されており、これら送電線・変電機器のインピーダンスなどを合わせた系統のインピーダンスと比較して超電導ケーブルのインピーダンスは非常に僅かなものとなる。送電線・変電機器のインピーダンスなどを合わせた系統のインピーダンスは超電導ケーブルに比べて十分大きいことから、超電導ケーブルが超電導状態から常電導状態に至る抵抗値の変化があっても系統には影響を及ぼさない。このため、超電導ケーブルを実系統に連系した場合においても短絡電流などの事故電流へ与える影響はほとんど無視することができる。

(4) 超電導ケーブルに流れる短絡電流の調査

実証試験が予定されている時点での系統構成を対象とするとともに、66 kV 側の電源設備構成も考慮して、超電導ケーブルが接続された状態で、超電導ケーブルを流れる短絡電流を検討した。図 2.3.1-3 は旭変電所での超電導ケーブルの接続構成を示しており、超電導ケーブルは 154/66 kV 主変 2 号変圧器の 2 次側に接続される。図 2.3.1-4 は実証試験時の系統構成を示しており、この系統図をもとに短絡電流計算プログラムを用いて短絡電流の計算を実施した。

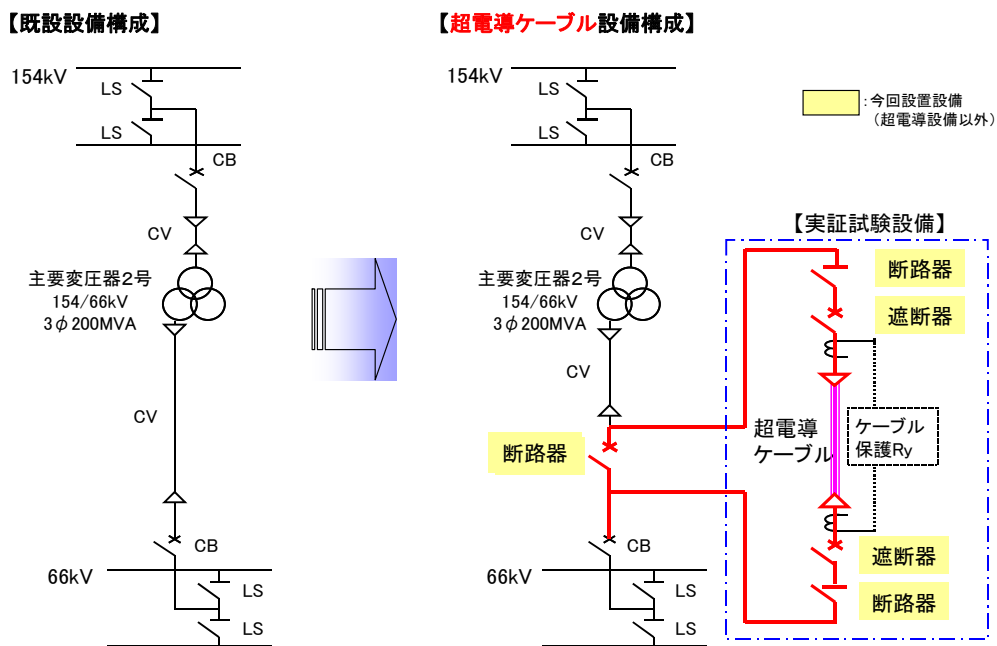


図 2. 3. 1-3 超電導ケーブル設備構成

短絡電流継続時間については主保護リレー動作時および遮断器の遮断失敗時などの後備保護リレー動作時の保護シーケンスを考慮して算出した。旭変電所における母線構成については供給信頼度、実証試験の継続性等を考慮して、主変1号変圧器を乙母線に、主変2、3号変圧器を甲母線へ接続した。超電導ケーブルが影響を受ける事故は、その様相から17パターンに集約できる。これらはさらに3つに大別される。図2.3.1-4に示した囲み数字はそれぞれ事故の様相により分類された番号を示している。○囲み数字は超電導ケーブル直近(バンク保護リレー保護範囲内)で事故が発生する場合で、バンク保護リレーが動作し、バンク両端の遮断器がトリップする結果、事故直後の課電通電が「無」となる場合である。一方、□と△の囲み数字はいずれも、バンク保護リレーの保護範囲外で事故が発生する場合で、□は事故除去直後の課電通電が「無」となる場合、△は「有」となる場合である。なお、バンク保護リレーの保護範囲外での事故を「もらい事故」と呼ぶこととする。

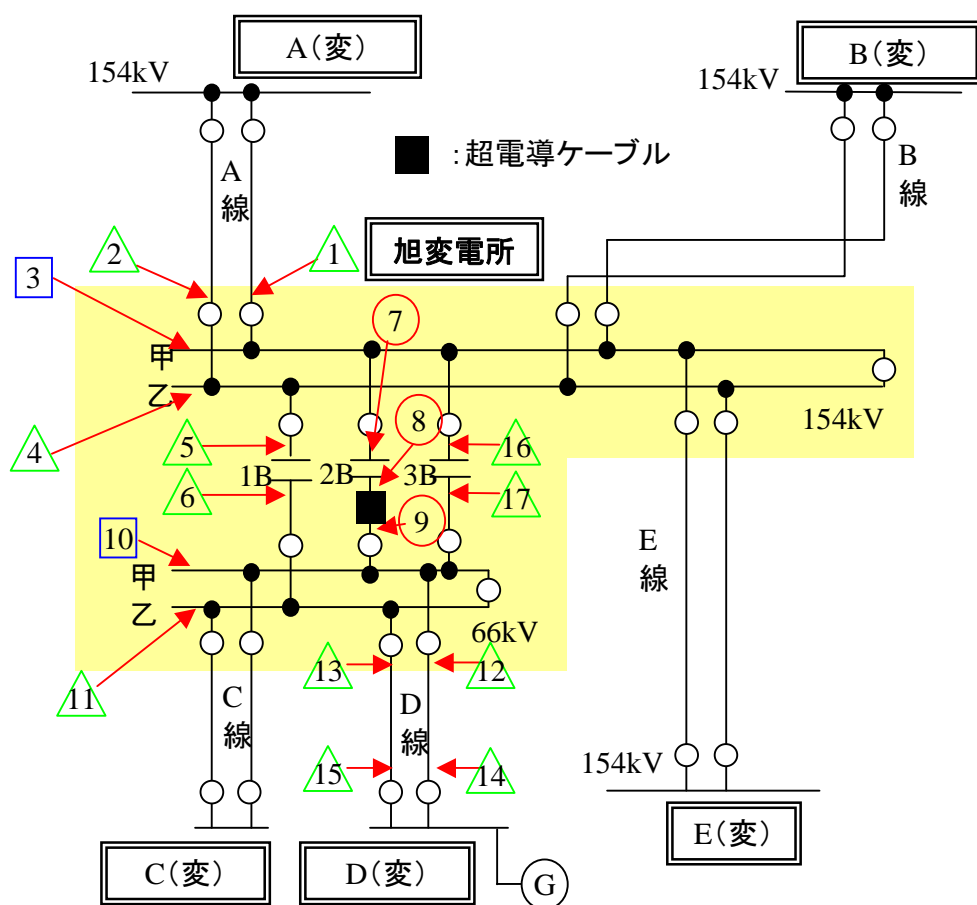


図 2.3.1-4 短絡電流計算に用いた系統図および事故パターン

図 2.3.1-5 に短絡電流および事故継続時間の計算結果を示す。図 2.3.1-5 中には上述した○、□、△のプロットに加え、塗りつぶしたプロット●、■、▲も示してある。塗りつぶしていないプロットについては主保護リレーが動作した場合であり、塗りつぶしたプロットは主保護リレーが不動作もしくは遮断失敗などにより、結果として後備保護リレーが動作して事故除去される場合である。なお、図 2.3.1-5 中には系統機器に求められる短絡電流のスペックである 31.5 kA-2 sec もあわせて掲載した。

図 2.3.1-5 から超電導ケーブルコアに流れる短絡電流条件を求めたところ、事故直後の課電通電が「無」となる短絡事故は 0~31.5 kA-2 sec および 0~10 kA-3 sec の範囲におさまることがわかった。一方、事故直後の課電通電が「有」となる短絡事故は 0~10 kA-2 sec の範囲におさまることが判明した。

	主保護Ry動作	後備保護 Ry動作	備考
超電導ケーブル直近事故 (バンク保護リレー保護範囲内)	○	●	事故直後課電通電「無」
もらい事故(事故電流通過) (バンク保護リレー保護範囲外)	□	■	事故直後課電通電「無」
	△	▲	事故直後課電通電「有」

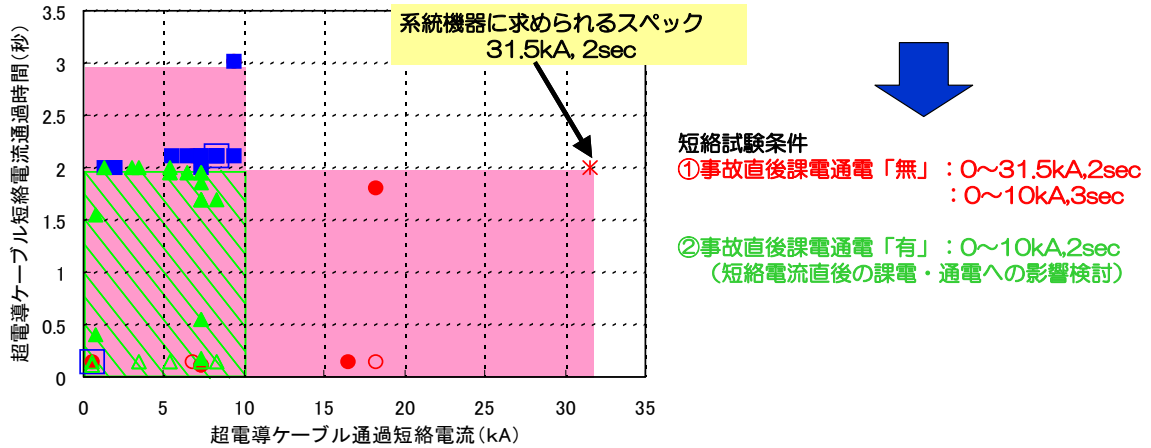
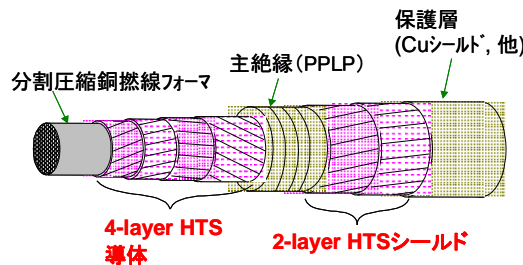


図 2.3.1-5 短絡電流計算結果

短絡電流に対する超電導ケーブルの健全性を検討する為、上記短絡電流試験条件をもとに、図 2.3.1-6 に示すスペックの短尺ケーブルコアを用いて、実際に短絡試験を実施した。



	仕様	外径(mm)
フォーマ	素絶分割集合フォーマ (140mm ²)	16
HTS 導体	4層 使用線材: 銅合金補強非ツイスト線材 (TypeHT) 銅合金補強ツイスト線材 (TypeACT)	21
主絶縁層	PPLP-6mm厚	35
HTS シールド	2層 使用線材: 銅合金補強非ツイスト線材 (TypeHT)	37
保護層	Cuシールド (77mm ²) 3層, 保護紙&布テープ	43
Ic特性	導体: 6320A シールド: 7770A	

図 2.3.1-6 短絡電流試験に使用したケーブルコア

試験は大気圧液体窒素中に浸漬冷却したケーブルコアを用いて実施した。ケーブルコアは導体層に TypeACT 線材と TypeHT 線材を、シールド層は TypeHT 線材を使用したもので、導体 I_c が 6,320 A、シールド層 I_c が 7,770 A である。

短絡試験結果を図 2.3.1-7 に示す。また、短絡試験結果から求めた $I^2 \times t$ (I : 短絡電流値、 t : 継続時間) 対導体層温度上昇 ΔT の実測値を図 2.3.1-8 に示す(2.1.2 節参照)。図 2.3.1-7 の短絡試験結果から 10 kA の短絡電流の場合は短絡電流通電時間に明確な相関性はなくほぼ一定で、温度上昇 ΔT は 3~4 K であることがわかった。また、31.5 kA-2 sec では導体層の温度上昇 ΔT は 120 K 以上であることがわかった。図 2.3.1-8 の短絡試験電流値と通電時間による温度上昇測定結果より温度上昇曲線を算出し、図 2.3.1-5 の計算結果と合わせたものを図 2.3.1-9 に示す。

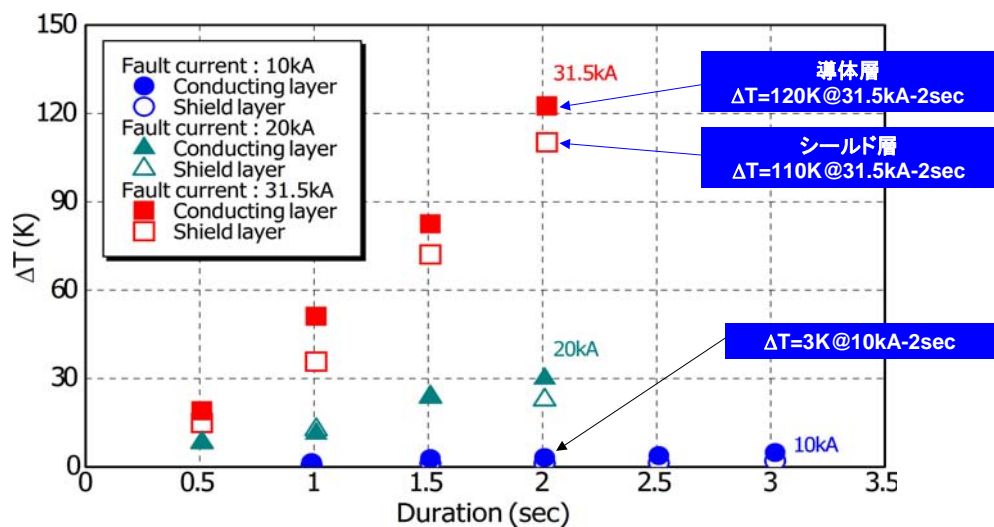


図 2.3.1-7 短絡試験結果

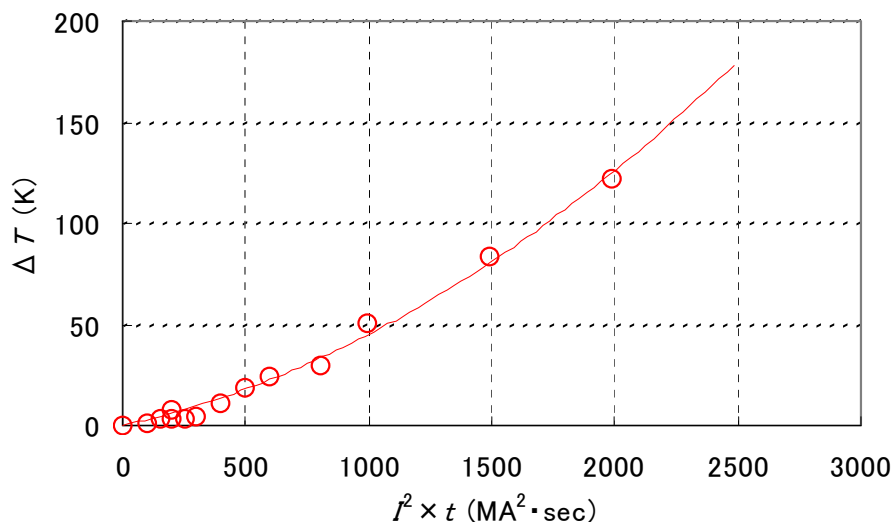


図 2.3.1-8 短絡電流通過時のケーブル温度上昇測定結果

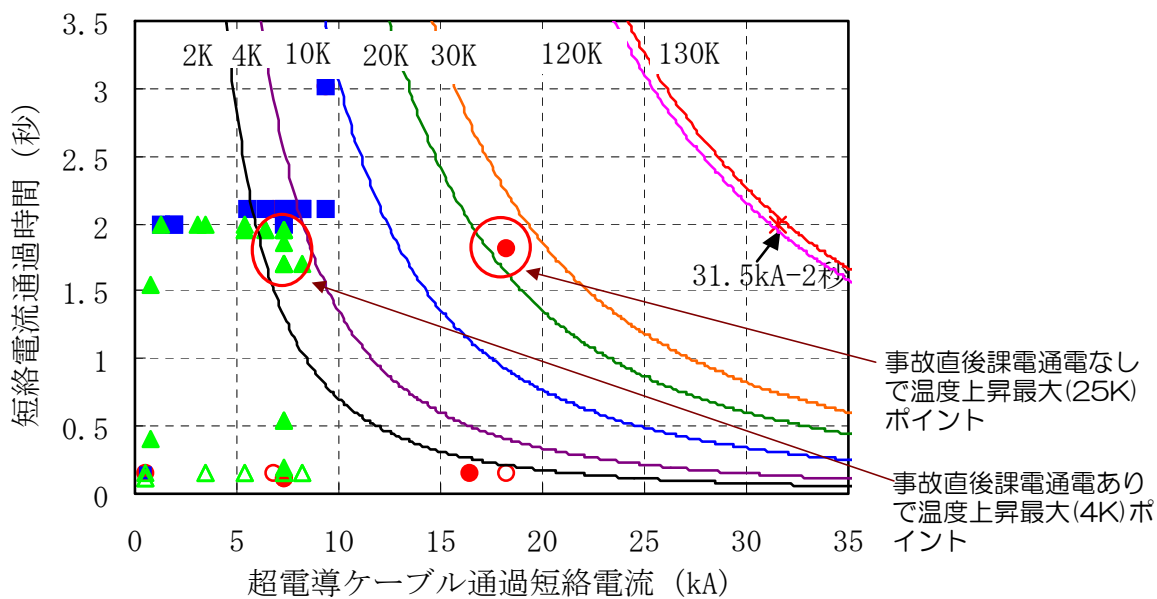


図 2.3.1-9 短絡電流計算結果と温度上昇予想曲線

図 2.3.1-9 から、事故直後通電有りの場合の温度上昇は最大で約 4 K (8.25 kA-1.7 sec)、通電無しの場合の温度上昇は最大で約 25 K (18.22 kA-1.81 sec)、また、31.5 kA-2 sec の場合には温度上昇は最大で 125 K 以下であることがわかった。

2.1.2 節で説明したように、31.5kA-2sec において、特にケーブルにはダメージがないことを検証している。また、10kA-2sec の場合は、すぐに定格電流、電圧を印加し、通電、課電ができることを確認している。

(5) サージに関する条件の調査と影響検討

(a) 雷サージ

超電導ケーブルは、同サイズの CV ケーブル等と比較して導体抵抗率、サージインピーダンスが共に小さいことから、超電導ケーブル内でのサージ伝搬特性が、既存送電線と大きく異なる事が懸念される。このため、EMTP による雷サージ伝搬特性の解析を実施した。

EMTP 解析を行うにあたっての条件を表 2.3.1-4 に示す。雷サージ解析は JEC-0102-1994「試験電圧標準」での解析条件を基本とした。解析対象は 154/66kV 変圧器の 2 次側に接続される超電導ケーブルであることから、66kV 側の送電鉄塔への雷撃時について解析した。超電導ケーブルの主要諸元を図 2.3.1-10、CV ケーブル諸元を図 2.3.1-11 に示す。

表 2.3.1-4 超電導ケーブルの雷サージEMTP解析の条件

主たる解析条件	JEC-0102-1994「試験電圧標準」を準拠
解析対象	154/66 kV 2次側送電鉄塔への雷撃
送電線	標準鉄塔、送電線モデル
他送電線状況	雷撃想定線路以外は開放条件（運用系統上最過酷条件）
雷撃	第1鉄塔雷撃の上相への逆フラッシュオーバー 雷撃電流は $30\text{kA} \cdot 1\mu\text{s}$
その他	引き込み部架空地線あり

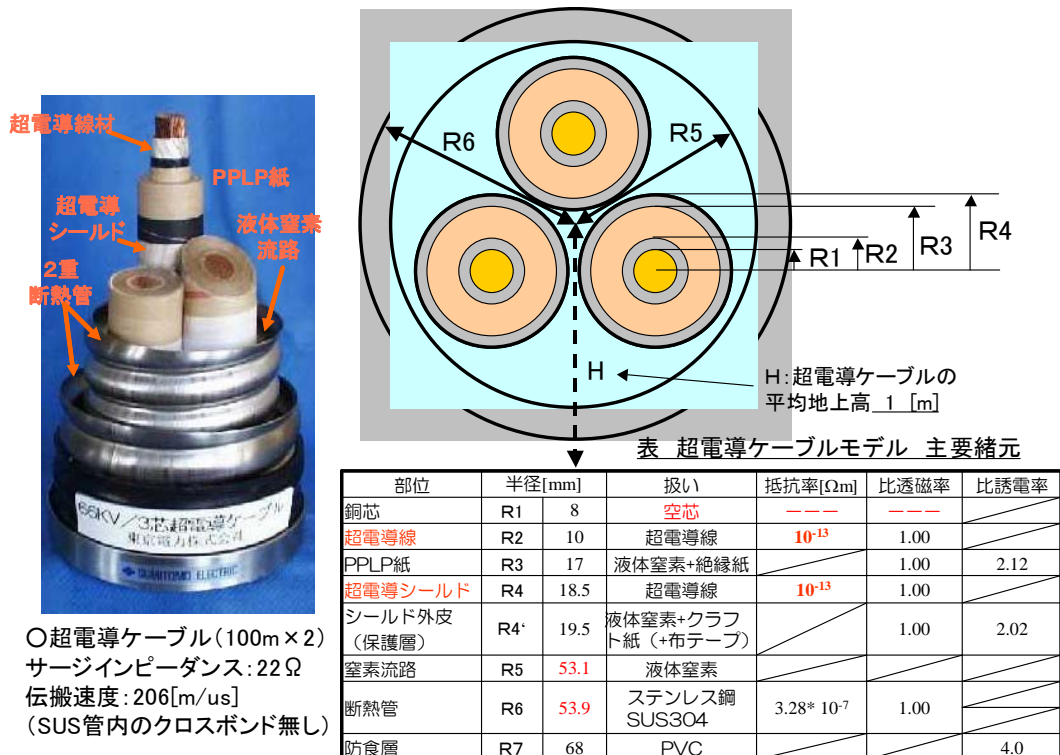


図 2.3.1-10 超電導ケーブルの主要諸元

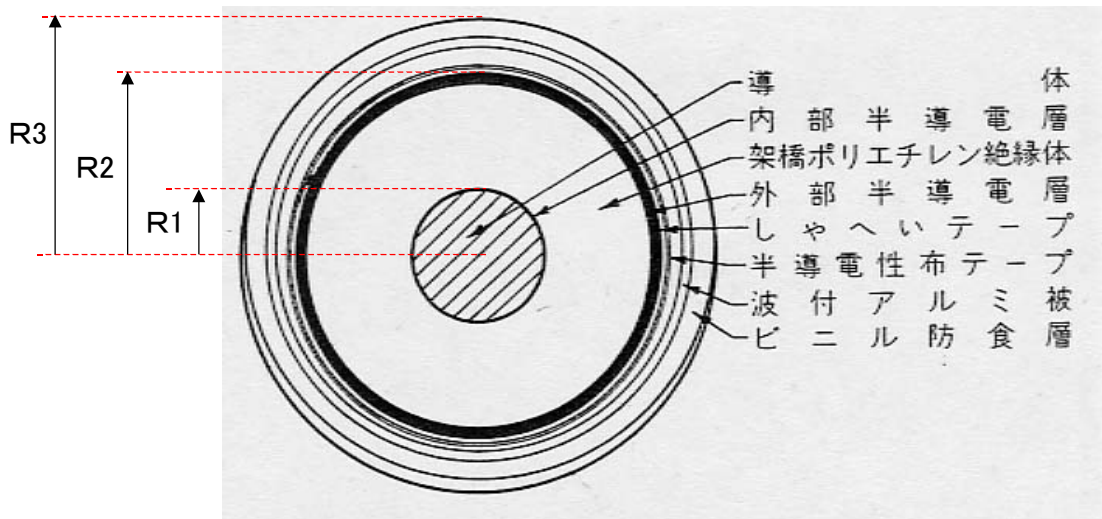


表 CVケーブル 主要諸元

部位	半径[mm]	
導体外径	R1	30.6
絶縁体外径 (外部半導電層含む)	R2	44.6
ケーブル外径	R3	51.6

図 2.3.1-11 66kV 単心CVケーブル (断面積 2500mm²) の主要諸元

解析モデルの概要を図 2.3.1-12 に示す。比較対象として、超電導ケーブル部分を CV ケーブルで置き換えた場合の解析についても実施した。解析結果を図 2.3.1-13、図 2.3.1-14、図 2.3.1-15、図 2.3.1-16 に示す。

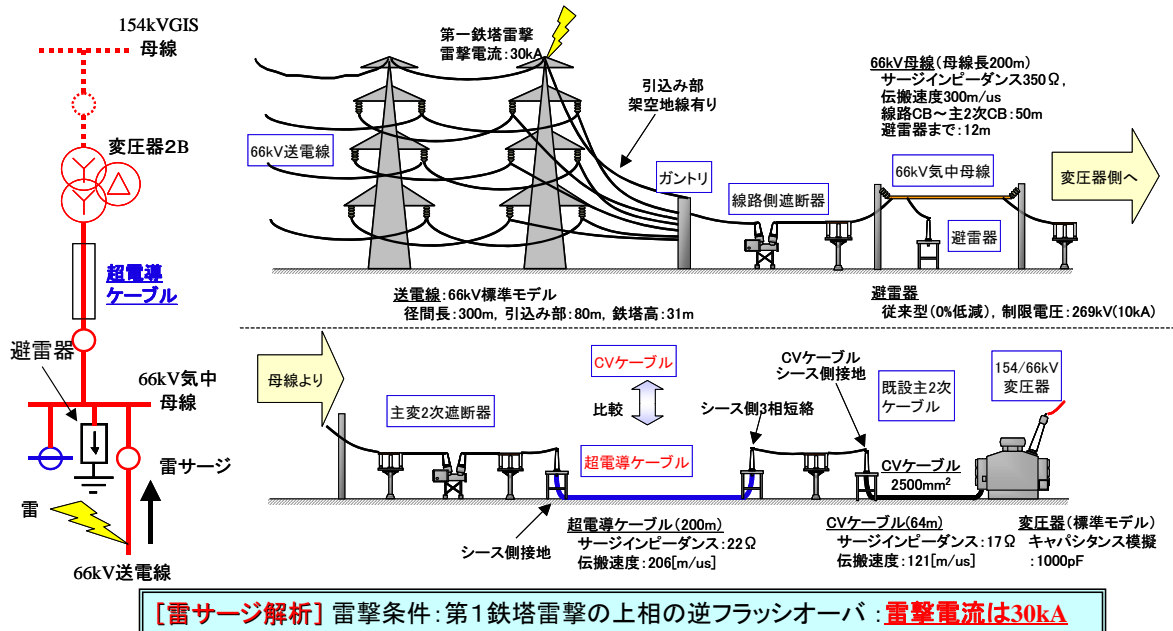


図 2.3.1-12 EMTP による超電導ケーブル雷サージ解析モデル

図 2.3.1-13、図 2.3.1-14 は、超電導ケーブルならびに CV ケーブルの発生過電圧波形の第 1 波を示したものである。それぞれ、変圧器端、導体-シース間（遮断器側、中間接続部、変圧器側）の波形を示しており、導体-シース間電圧の最大値は CV ケーブルで 191 kV、超電導ケーブルで 196 kV という結果が得られた。これは 66kV 系統の雷インパルス耐電圧値 (LIWV) 350 kV より小さく、LIWV 値を用いた雷インパルス試験によりケーブル健全性を確認することで、雷サージ対策は問題ないといえる。

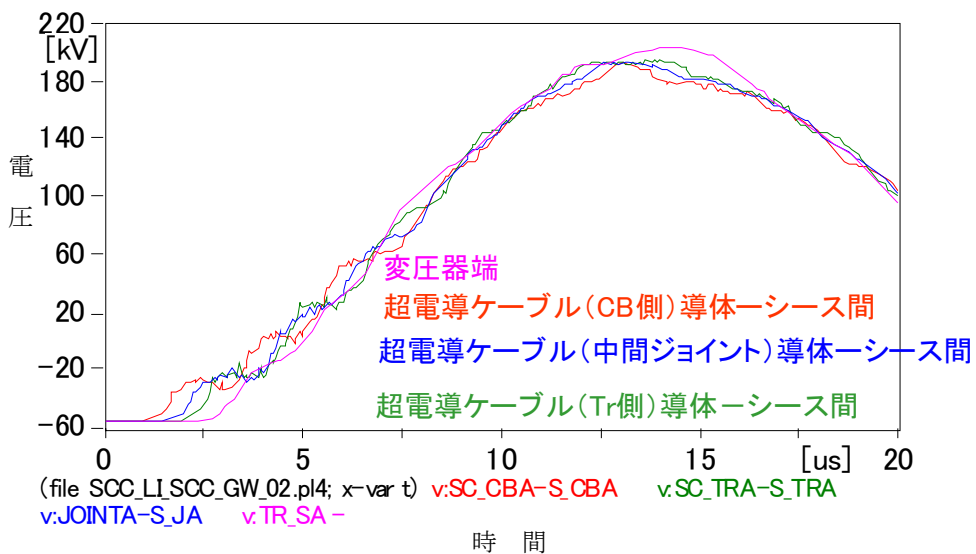


図 2.3.1-13 超電導ケーブルの雷サージ過電圧波形（第 1 波）

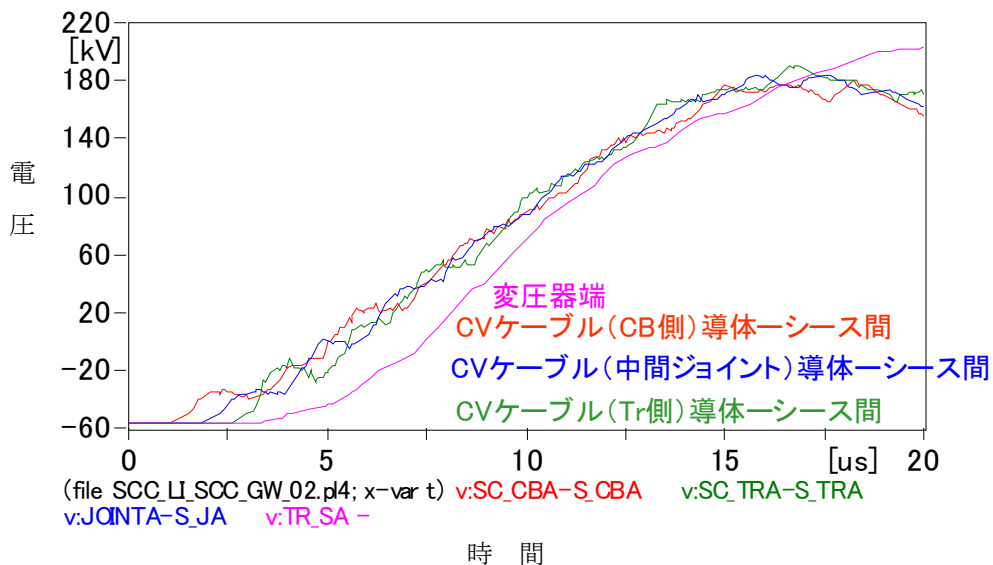


図 2.3.1-14 CV ケーブルの雷サージ過電圧波形（第 1 波）

図 2.3.1-15、図 2.3.1-16 は $300\ \mu\text{s}$ までの雷サージ電圧・電流波形のケーブルによる相違を示したものである。超電導ケーブルの電圧波形は雷撃から約 $17\ \mu\text{s}$ でピークを迎え、その後減衰していく。前述のとおり、超電導ケーブルの発生過電圧は最大 $196\ \text{kV}$ (超電導ケーブル Tr 側) となり、これは LIWV (雷インパルス耐電圧) : $350\ \text{kV}$ よりも小さく、絶縁設計に大きな影響を与えるものではないことがわかった。また、雷サージ伝搬速度は超電導ケーブルの場合 : $206\ \text{m}/\mu\text{sec}$ 、CV ケーブルの場合 : $121\ \text{m}/\mu\text{sec}$ とケーブルの形状 (サイズ) による違いはあるものの、発生過電圧値は超電導ケーブル、CV ケーブルともにほぼ同程度であることから、いわゆる「超電導」による低抵抗特性が雷サージの過電圧値、伝搬特性に大きな影響を与えないことがわかった。また、電流波形については雷撃から約 $9\ \mu\text{s}$ でピークとなり、その後減衰していく。解析結果から、超電導ケーブルを通過する電流のピーク値は $2.6\ \text{kA}$ (超電導ケーブル CB 側) となることが判明した。これは無負荷の場合であり、仮に負荷電流通電時に雷サージ電流が重畳した場合には、ケーブルの臨界電流値を超える可能性がある。ただし、継続時間は数十 μsec であり、発熱エネルギーは小さいため、送電には支障がないと考えられる。

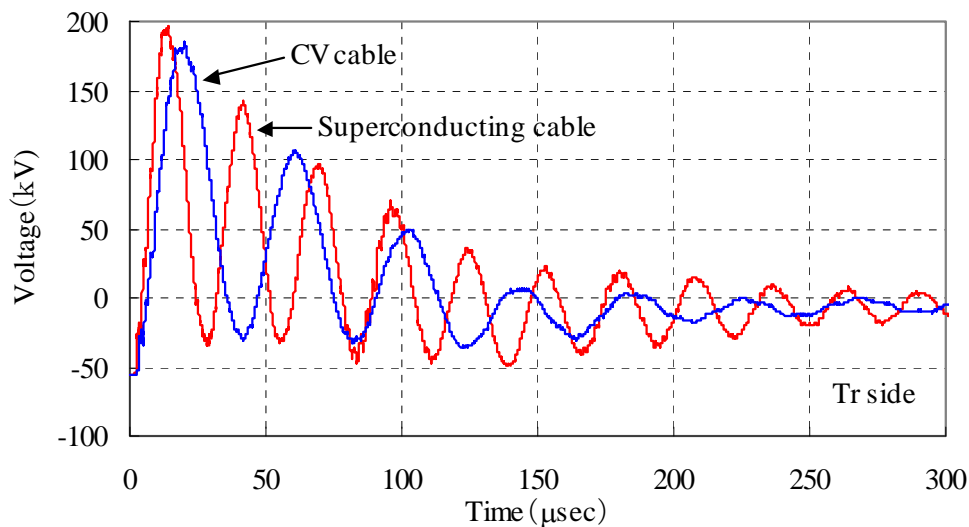


図 2.3.1-15 雷サージ電圧波形のケーブルによる相違

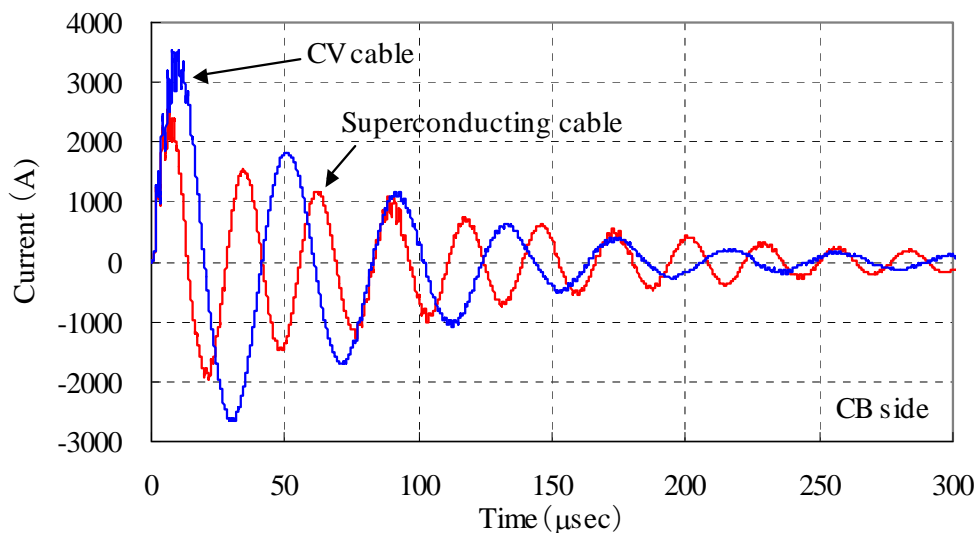


図 2.3.1-16 雷サージ電流波形のケーブルによる相違

(b) 開閉サージ

開閉サージ検討にあたっては、雷サージ同様、EMTP 解析を用いた。EMTP 解析を行うにあたっての解析条件を図 2.3.1-17 に、開閉サージ解析モデルを図 2.3.1-18 に示す。なお、雷サージ解析同様、超電導ケーブルでの解析に加え、超電導ケーブルを CV ケーブルで置き換えた場合の解析も実施した。解析対象は 154/66kV 変圧器 2 次ケーブルであり、条件 A は超電導ケーブル用 CB の開閉サージ、条件 B は変圧器 1 次 CB の開閉サージ (2 次側への移行サージ)、条件 C は変圧器 2 次 CB の開閉サージ (66kV 母線の充電) の条件である。なお、投入位相は A 相が+1PU (A 相の遮断器極間電圧が最大の条件) の条件である。解析に用いた超電導ケーブルおよび CV ケーブルの主要諸元は雷サージ解析と同様である。

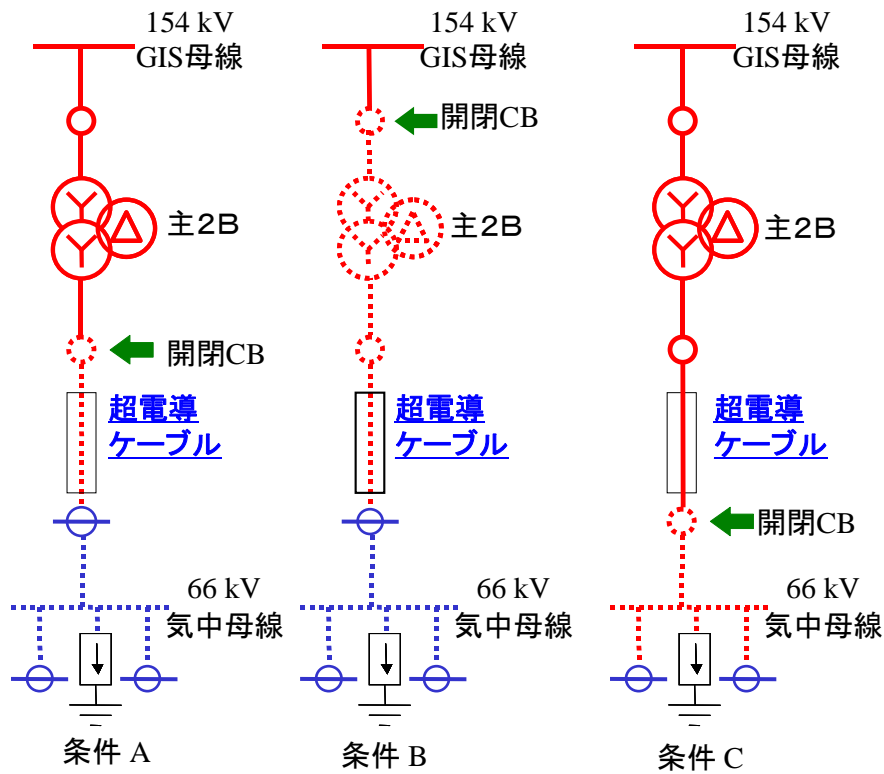


図 2.3.1-17 開閉サージ解析条件

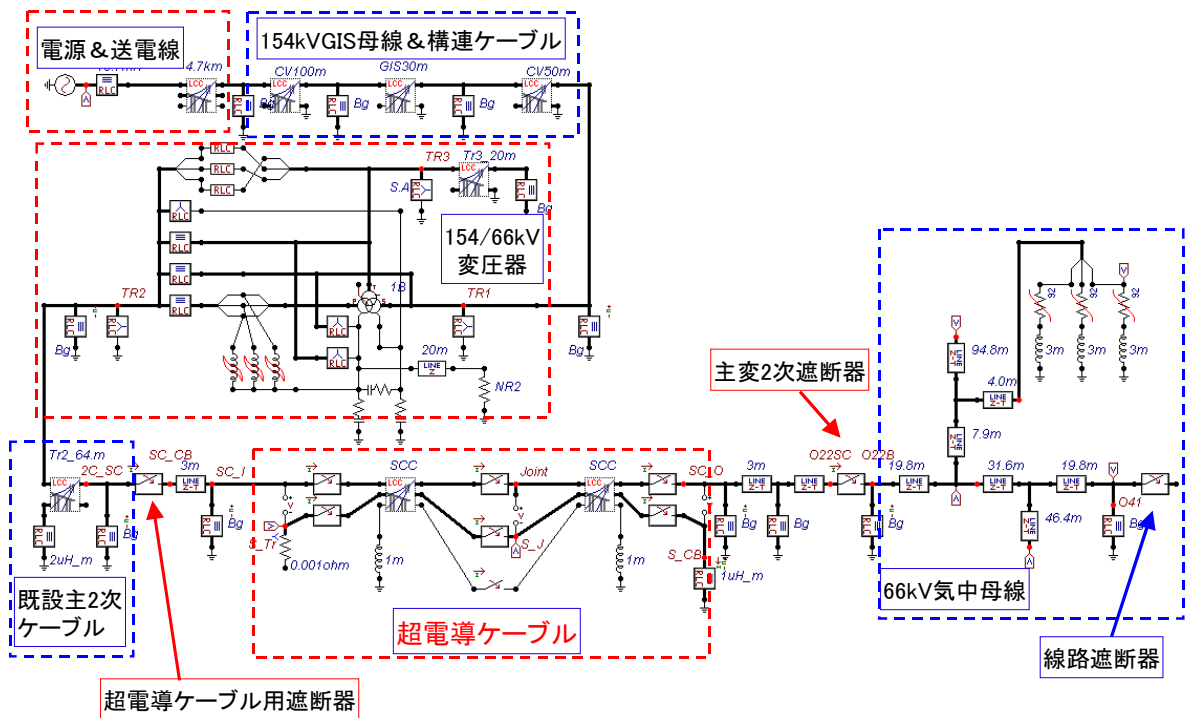


図 2.3.1-18 EMT Pによる超電導ケーブル開閉サージ解析モデル

図 2.3.1-19～24 に開閉サージ解析結果を示す。図 2.3.1-19、図 2.3.1-21、図 2.3.1-23 は、それぞれ条件 A、B、C での超電導ケーブル導体-シース間電圧、図 2.3.1-20、図 2.3.1-22、図 2.3.1-24 は、それぞれ条件 A、B、C での超電導ケーブル導体電流を示している。表 2.3.1-5 は開閉サージ発生過電圧の解析結果を集約したものである。

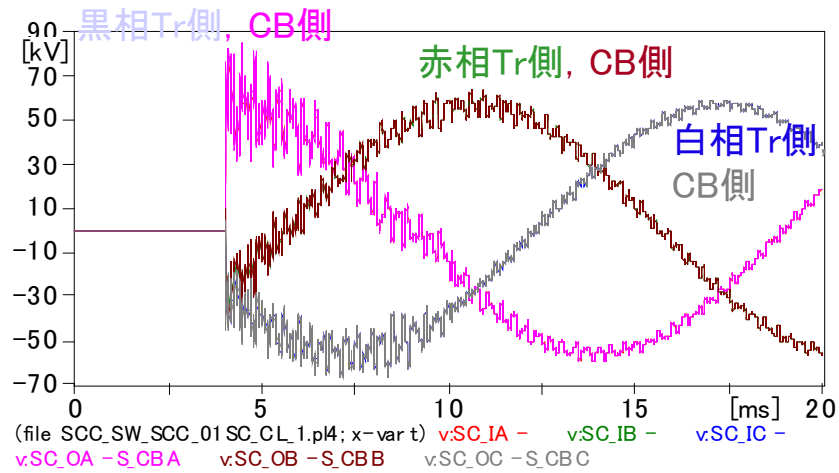


図 2.3.1-19 超電導ケーブル導体-シース間電圧 (条件 A)

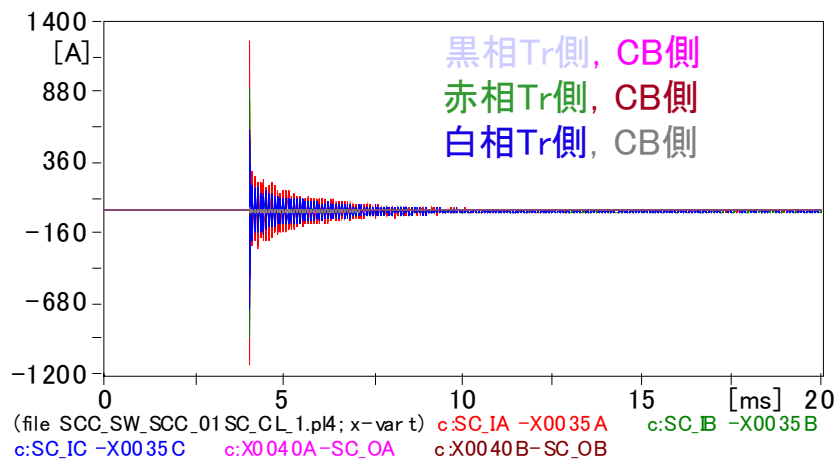


図 2.3.1-20 超電導ケーブル導体電流 (条件 A)

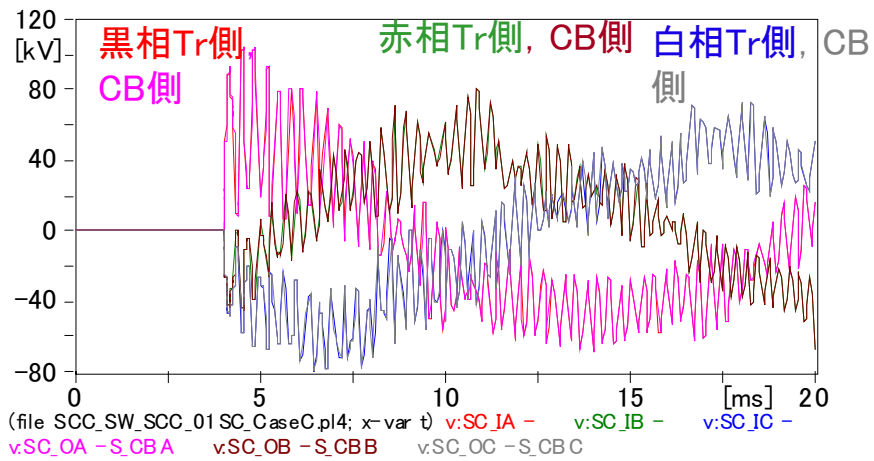


図 2. 3. 1-21 超電導ケーブル導体-シース間電圧 (条件 B)

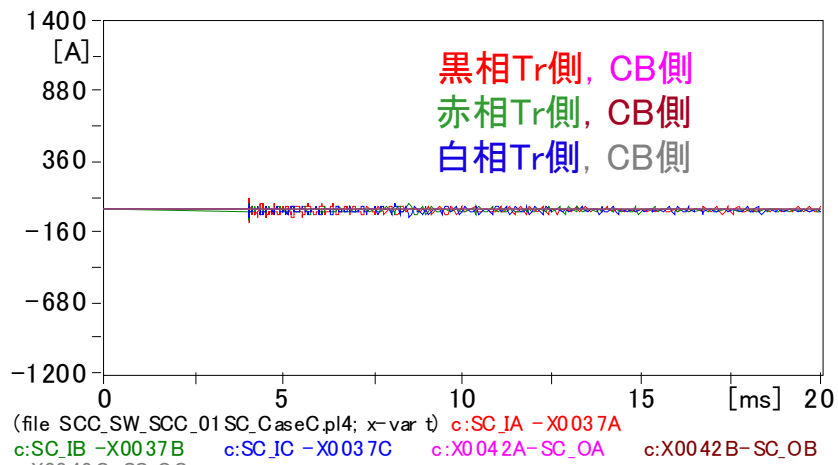


図 2. 3. 1-22 超電導ケーブル導体電流 (条件 B)

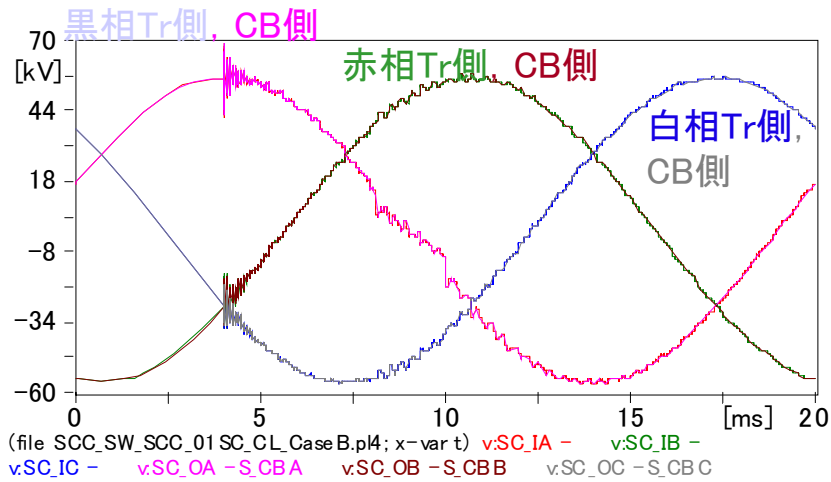


図 2.3.1-23 超電導ケーブル導体-シース間電圧 (条件 C)

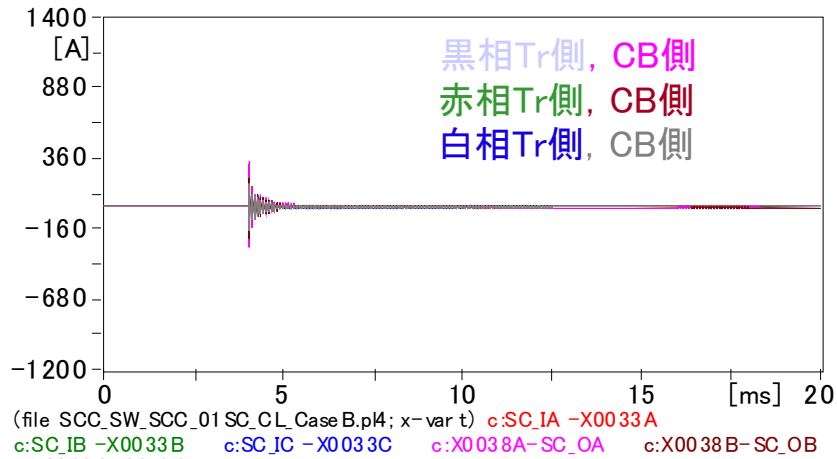


図 2.3.1-24 超電導ケーブル導体電流 (条件 C)

表 2.3.1-5 開閉サージ発生過電圧解析結果

ケース	条件 (充電対象)	ケーブル	発生過電圧 [kV]							
			変圧器端	ケーブル 導体-シース間			ケーブル シース対地間			主2次CB端 (66kV母線)
				Tr側	中間	CB側	Tr側	中間	CB側	
A	SCケーブル	超電導 ケーブル	80	84	82	86	2	3	3	86
B	変圧器+SC		104	104	104	104	1	1	0	104
C	66kV母線		58	71	61	70	0	6	6	76
A	CVケーブル	CVケーブル	90	86	86	88	46	42	8	87
B	変圧器+CV		100	100	99	100	3	2	1	100
C	66kV母線		58	64	63	63	7	7	9	72

開閉サージの解析結果から、超電導ケーブルに発生する過電圧値は変圧器と超電導ケーブルを充電する条件 B の場合に 100 kV 程度 (1.8 pu) で最大となるが、この値は LIWV 350 kV に対して十分低いことがわかった。また、超電導ケーブルにおける発生過電圧は CV ケーブル (2500 mm²) を使用したケースとほぼ同程度の過電圧であり、超電導ケーブルのサージ電流については数 msec で急速に減衰することがわかった。

(6) 落雷頻度の調査

旭変電所近傍での落雷頻度について調査を実施した。過去の落雷データはメッシュ分割された地図を用いて管理されており、このデータをもとにメッシュ範囲として、28 km×28 km、3 km×3 km、1 km×1 km の 3 つのレベルでのデータの調査を行った。

28 km の範囲でみると、10 年間の平均雷雨日数が 14 日/年であり、強雷地域である栃木・群馬・埼玉の 20～31 日/年に比して雷雨日数が少ない地域であるといえる。

また、2004～2006 年度の 3 カ年での落雷件数調査結果を、3 km 範囲でみると、2004 年度が 5 件、2005 年度が 3 件、2006 年度が 45 件、さらに 1 km 範囲でみると、2004 年度が 3 件、2005 年度が 3 件、2006 年度が 5 件との結果になった。以上より、変電所近辺 1 km 範囲においては、数件/年の落雷頻度であることがわかった。

(7) 系統負荷状態、潮流状況の調査、過負荷許容条件の調査

旭変電所は 154/66 kV 変圧器 3 台が設置されており、変圧器容量はすべて 200 MVA である。したがって、変圧器 2 次側の定格電流は 1,750 A である。定常時の各変圧器の負荷電流は 700 A 程度であり、平成 19 年夏期最大の実績値は約 1,100 A である。過負荷運転時においては定格電流に対して 150 % 運転に相当する 2,625 A の通電が可能であることが求められる。

表 2.3.1-6 旭変電所の定格電流ならびに負荷実績

箇所	定格電流	負荷実績
変圧器 1B2次	1750A (過負荷運転 150%= 2625A)	約1100A (H19夏期最大: 3バンク併用時), (通常700A程度)
変圧器 2B2次		
変圧器 3B2次		

(8) 励磁突入電流の調査

変圧器を充電する際、場合によっては全負荷電流の数倍の大きさの励磁突入電流が流入する。励磁突入電流の大きさ、継続時間を支配する要因は多く、鉄心の飽和特性、残留磁束の大きさと極性、充電時の電圧位相、回路のインピーダンス、結線などにより異なる。超電導ケーブルを実系統導入するにあたっては、励磁突入電流の超電導ケーブルへの電氣的ストレスについて検討する必要がある。

旭変電所における変圧器の励磁突入電流に対するリレー整定値を調査した結果、変圧器定格電流の 300 %でリレー動作するものであった。すなわち、300 %を超える励磁突入電流が流入した場合にはリレー動作により変圧器の両端の遮断器がトリップする。

変圧器 2 次側に超電導ケーブルを接続する形態の場合について、励磁突入電流の超電導ケーブルへの影響を 3 つのパターンに分けて検討した。

①変圧器 1 次側から変圧器を充電する（154 kV 側遮断器投入）場合

1 次側 154 kV 遮断器を投入して変圧器を充電する場合、変圧器 1 次巻線には励磁突入電流が流入するが、2 次側には直接この影響は現れず、また、ケーブル充電電流も 1 A 以下であるため、超電導ケーブルへの影響はない。

②変圧器 2 次側から変圧器を充電する（66 kV 側遮断器投入）場合

2 次側 66 kV 遮断器を投入して変圧器を充電する場合、変圧器 2 次巻線には励磁突入電流が流入するため、超電導ケーブルにも励磁突入電流が流れるが、66 kV 側からの変圧器の充電（ステップアップ）は、系統運用上実施しない。従って超電導ケーブルには励磁突入を流す運用をしないため、ケーブルへの影響はない。

③66 kV 送電系統に連系した変電所において変圧器を充電する場合

旭変電所につながる 66 kV 送電系統に連系した変電所において変圧器を充電する場合、その変圧器に流入する励磁突入電流分が、旭変電所の変圧器を通過する。この電流は前記のとおり様々な要因に影響される。対象となる変圧器のうち、最大容量のものは 45 MVA であり、励磁突入電流に対するリレー整定値が 1 次定格電流の 300 %であることから、これを最大値として検討する。変圧器 1 次定格電流は約 394 A であり、この 300 %は 1,182 A と求められる。

旭変電所の変圧器が 1 台停止中で、残り 2 台が 100 %の負荷送電中であるという、最過酷状態を仮定し、このとき、前記励磁突入電流が通過する場合を検討する。この場合、変圧器 2 次定格電流は 1,750 A であり、変圧器 1 台あたりを通過する励磁突入電流は 1,182 A の半分であることから、通過電流は 2,341 A となる。これは、変圧器 2 次定格の 134 %に相当し、過負荷運転電流である 2,625 A よりも少ない。従って、この場合についても励磁突入電流による影響はない。

なお、励磁突入電流の減衰時間については、最大値の 50 %に減衰するまでの時間として、1.2 sec～72 sec 程度であるとの報告がある⁽³⁾。

(9)まとめ

「超電導ケーブルと従来ケーブルの電気的特性の比較」では超電導ケーブルと従来ケーブルの電気的特性、系統特性の比較検討を実施し、高温超電導ケーブルの特徴、メリットとして、抵抗がゼロであることから損失を小さくすることができる、インピーダンスが小さく系統安定度向上に寄与できる、サージインピーダンスローディングが大きく大電流送電に適する、などを確認した。

「超電導ケーブル接続時のインピーダンス変化と影響検討」では常温（室温）状態での超電導ケーブルのインピーダンスを求め、系統短絡電流への影響を確認した結果、ほとんど影響がないことを確認した。

「超電導ケーブルに流れる短絡電流の調査」では旭変電所で予想される短絡電流および継続時間から、超電導ケーブルの温度上昇は 125 K で常温（室温）には至らないことが判明した。また、短絡電流による超電導ケーブルのインピーダンス変化の影響は軽微であることがわかった。

「サージに関する条件の調査と影響検討」では EMTP 解析を用いて雷サージおよび開閉サージによる過電圧を求めた。解析の結果、雷サージ・開閉サージによる過電圧は LIWV（雷インパルス耐電圧）：350 kV よりも小さく、絶縁設計に大きな影響を与えるものではないことがわかった。また、発生過電圧値は超電導ケーブル、CV ケーブルともにほぼ同程度であることから、いわゆる「超電導」による低抵抗特性がサージの過電圧値、伝搬特性に影響を与えないことがわかった。

「落雷頻度の調査」では旭変電所近辺での落雷頻度の実績調査を行ない、旭変電所近辺 1 km 範囲においては、数件/年の落雷頻度であることがわかった。

「系統負荷状態、潮流状況の調査、過負荷許容条件の調査」では超電導ケーブルを実系統連系する旭変電所での負荷状態、過負荷許容条件（主変 2 号変圧器）についての調査を行なった。調査の結果、超電導ケーブルを実系統連系する変圧器 2 次側の定格電流は 1,750 A、定常時の各変圧器の負荷電流は 700 A 程度であり、平成 19 年夏期最大の実績値は約 1,100 A であることがわかった。また、過負荷運転時においては定格電流に対して 150 % 運転に相当する 2,625 A の通電が可能であることが求められることがわかった。

「励磁突入電流の調査」では変圧器を充電する際に、場合により全負荷電流の数倍の大きさの電流が流入する励磁突入電流について調査を行なった。超電導ケーブルへの影響を考えるために、3 パターンの励磁条件を検討したが、いずれの条件でも超電導ケーブルへの影響はないことが確認できた。

以上の結果、超電導ケーブルを実証試験場所に実系統に連系した運転においても系統へ与える影響はほとんどないことがわかった。

2.3.2 平常時の運転技術開発

平常時においては、超電導ケーブルを冷却している液体窒素は、冷却システムにより、ある範囲の中に維持された状態にある。この液体窒素の条件を制御する項目としては、温度、圧力、流量がある。本節では、これらの超電導ケーブルを運転するパラメータについて、制御の指針や制御方法について記述する。

2.3.2-1 運転範囲の検討

ここで、本プロジェクトにおける温度、圧力の運転範囲とその根拠については以下のように考えている。なお、これらはいずれも設計段階の値であり、後述するとおり、実証運転を通じて妥当性を評価するとともに、必要に応じて随時見直しを行っている。

●温度範囲：65～77 K

最低温度は、液体窒素の固化温度 63.5 K に対して裕度を設けて 65 K とした。最高温度については、ケーブルの通電電流と臨界電流値との関係を設計する際に用いている温度である 77 K とする。

●圧力範囲：0.2 MPaG～0.5 MPaG

最低圧力については、窒素含浸 PPLP 電気絶縁の絶縁特性が十分に発揮される圧力として、0.2 MPaG を選んだ。最大圧力については、本プロジェクトにおけるケーブル長が 250 m 級であることから、圧力損失は 0.15 MPaG (@流量 40 L/min) 程度であり、あまり最大圧力を大きくとる必要がないこと、必要以上に構造設計を強固にせず、経済性を考慮したことから、最大圧力を 0.5 MPaG と選んだ。

●流量の選定

設計段階での実証ケーブル構造、現地概略レイアウト等から推定した、実証ケーブルシステムの圧力損失と温度差について、流量をパラメータに試算を行った。結果を図 2.3.2-1 に示す。上述した最低圧力 0.2 MPaG、最大圧力 0.5 MPaG の制限より、圧力損失は 0.3 MPa 以下にしたいことから、流量は 60 L/min 以下であることが判る。また、温度についても、運転温度範囲から 10 L/min では $\Delta T=10$ K 程度となり裕度はなく、流量は 10 L/min 以上が必要ということが判る。後述するように、流量は一定値にて流すこととするが、上記の範囲の中から、40 L/min を選び以後の検討を行った。

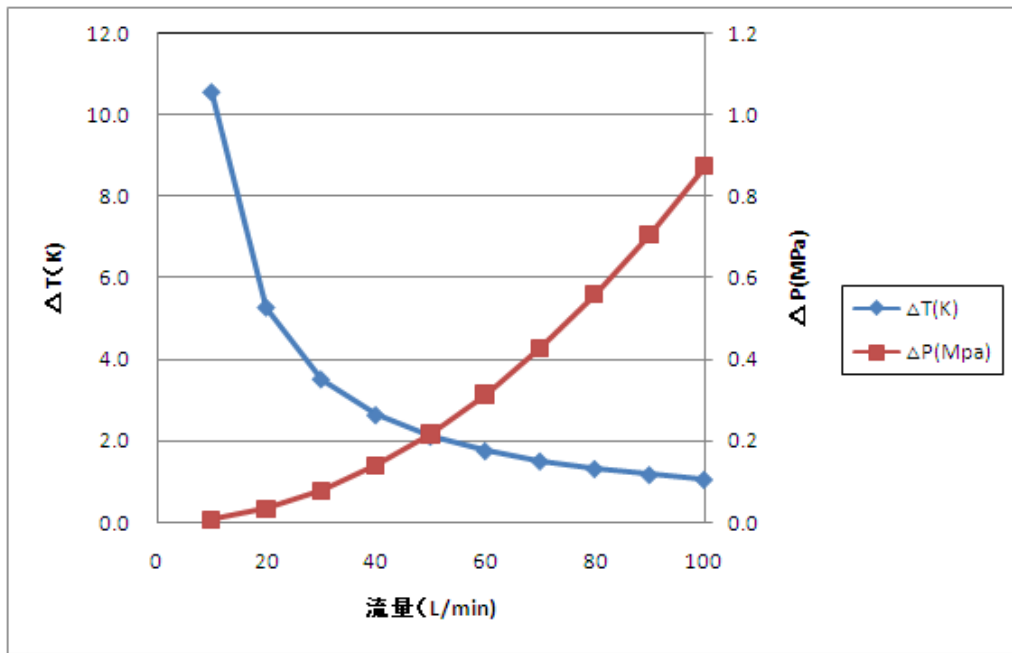


図 2.3.2-1 実証ケーブルの圧力損失と温度差の試算
(熱損失 3 kW、冷凍機 6 台直列の場合)

2.3.2-2 流量制御について

ケーブル側で発生する熱損失を液体窒素の熱容量で吸収するため、ケーブルが長尺になる、電流が増えるなどにより、熱負荷が大きくなると、流す流量を増やす必要がある。しかしながら、ケーブルの配管抵抗などで、流量の2乗に比例した圧力損失が発生し、流量が大きくなると圧損も大きくなり、構造物の許容圧力により流れる流量は制限される。

一方、ケーブル内に発生する熱負荷、圧損は流量が一定であれば、温度、圧力を測定することで、これらの値を算出することができ、ケーブルシステムの健全性を診断することができる。過去の超電導ケーブル運転の実績²⁾においても、常時は流量を一定に保っていることから、本プロジェクトにおいても流量を一定に維持することを指針とする。

なお、流量を制御するには、循環ポンプの出力を制御することになるが、流量はポンプの出力と相関があり、平常時はケーブルシステムの管内抵抗に大きな変化が起こることはなく、ポンプ出力が一定であれば、流量は一定に保たれる。逆に、流量に変化があれば、ケーブルシステム内の圧損が変化したことをあらわし、異常を検知しやすくなる。こういうことから、本プロジェクトにおいては、流量については、設定値を一定に保つフィードバック制御はかけずに、初期設定を維持する手法を選択する。なお、必要時は手動にて設定値を変更できるようにする。

2.3.2-3 温度制御について

(1) 制御の目的・方針

温度制御方式については、基本方針にもあるように負荷に応じて追従可能な運転を行うことを目指している。制御する温度は、本来なら通常時にケーブルの最大温度を示すケーブル出口温度が、ある許容値以下であるように、ケーブル出口温度を制御すべきであるが、ケーブル全体に貯められている液体窒素の量は非常に大量であり、冷却パスを考えるとケーブル出口は、温度を制御できる冷凍機からはもっとも離れた位置にあり、時間遅れが甚だしく、制御が困難であると考えられる。

本プロジェクトでは、ケーブル入口温度をある一定の温度に保ち、負荷により変動する出口側の温度をモニターし、許容温度以下であることを常に確認しながら運転するものとする。尚、負荷によりケーブル出口側の液体窒素の温度が変化し、入口側の温度を一定に保つには、冷凍機の出力を出口側の温度に応じて変化させる必要がある。入口側の温度の制御幅の中で、冷凍機の出力を制御する方式としては、表 2.3.2-1 に示すようにインバータ制御方式、冷凍機 ON/OFF 方式、ヒータによる全体の負荷調整方式がある。

ケーブル入口温度を一定にする制御幅を 0.1 K 程度に抑える必要がある場合は、インバータ制御や、ヒータ制御が有効であることが判っている。このうち、ヒータ制御は、ケーブル負荷+ヒータ負荷の合計が常に一定となるようにヒータ出力をコントロールするものであるが、ヒータ負荷分だけ余分に熱量を与えることにより、非効率である。

ON/OFF 運転は比較的制御が容易であるが、温度の変動が不可避であるため、温度制御幅を大きくとる必要がある。本プロジェクトでは、運転可能な温度制御幅を検討し、制御の容易な冷凍機 ON/OFF 運転を採用するとともに、2.2.3-7 節で述べたとおり、細かな範囲での温度制御が必要な場合は、制御範囲に制約のないヒータ制御を適用する。

表 2.3.2-1 冷凍機出力制御方式

	冷却能力制御		熱負荷制御
	ON-OFF制御	インバータ制御	内臓ヒータ制御
方法	複数の冷凍機の発停により離散的に変更	個々の冷凍機の回転数をインバータで連続的に変更	冷凍機に内蔵されたヒータの出力を連続的に変更
制御幅	冷凍機能力の0%または100%	冷凍機能力の60%~100%	冷凍機能力の0%~100%
特徴	簡単、低コスト 離散的な制御のため温度の振幅不可避 メーカーは1日1回以下の発停を推奨	精度の高い制御可能 複雑、ノイズ対策必要 インバータ効率分の損失が生じる	精度の高い制御可能 効率低下、ヒータの信頼性が低い
実績	なし	あり	あり

(2) 制御対象の検討

上記の結果を踏まえ計測個所の検討を行った。候補場所として液体窒素の流れに沿って冷凍機出口温度、端末入口温度、ケーブル入口温度、同出口温度、端末出口温度、リザーバタンク内温度、冷凍機入口温度が考えられる。ケーブル熱負荷の変動を一番早く検知できるのはケーブル出口温度であるが、ケーブル内液体窒素量が多く時定数が大きいと、たとえばケーブル出口温度が上昇に応じて冷却能力を増加させても、しばらくはケーブル出口温度上昇が継続するため、冷却システムがさらに冷却能力を増加させ、冷凍機出口温度を低下させようとするが、窒素の凝固点に近づくため冷却システムの運転が不安定になることが予想される。

そのため本システムでは冷凍機の冷却能力変化に敏感な冷凍機出口温度(ケーブル入口温度)を制御対象(PV値)とすることとした。負荷変動に対しては、通常の旭変電所における送電量変動(通電電流0 A~1 kA)によりケーブル内温度が上昇しても、出口温度が飽和点に達しない温度をPV値として設定し、対応することとした。

(3) 熱負荷の算出

ケーブル熱負荷の試算を行った。前述のとおり旭変電所における送電電流は最小で0.5 kA、最大で1 kA、中間で0.75 kAである。このときの熱負荷計算結果を表2.3.2-2に示す。ここに記す季節変動熱負荷変数とは、計算の基準が周囲温度300 Kであることから、旭変電所にて想定される最高温度が308 Kであること、および冷凍機出口温度を最初の想定温度77 Kから67 Kに変更したことにより、外部からの熱侵入量が $(308-67)/(300-77)=1.08$ 倍に増加するとして加えた係数である。

冷凍機の熱負荷は圧損が原因となるが、3 並列で各パスに冷凍機が直列で2台、各パスに液体窒素が均等に流れるとして994 Wの熱負荷を見積もった。これらの検討によるシステム全体の熱負荷を表2.3.2-3に示す。

(4) 温度制御の検討結果

長期連続運転を考慮すると、制御は単純化し、機器の運転は一定負荷で行うことが望ましい。また、冷凍機のON-OFF制御を考えると、冷凍機出口温度の変動が避けられないが、そのときの変動幅を狭くするとケーブルの温度は安定する反面、冷凍機の発停回数が増加し、冷凍機の信頼性に影響を及ぼす可能性がある。そこでPV値を67 K、その制御変動幅を ± 1 Kとし、冷凍機が各パス毎(2台ずつ)発停することを想定し、夏季の熱負荷が最も大きい時期の簡単なシミュレーションを行った。初期条件として冷凍機出口温度67 K、冷凍機は2パス(4台)運転中(冷凍能力>熱負荷)とした。この時、出口温度は徐々に低下し、66 Kに達したなら1パス(2台)の冷凍機を停止する。この段階で停止した冷凍機の熱負荷も含めた全熱負荷が冷凍能力を上回り出口温度は上昇に転ずる。出口温度が68 Kに到達したら停止中の1パス(冷凍機2台)を再起動することになる。このシミュレーション結

果を図 2.3.2-2 に示す。この結果、冷凍機の発停は1週間に3回程度であり、メーカーの推奨発停回数である1日1回以上の間隔を取ることが可能であることを明らかとした。

●熱損失計算条件

ケーブル互長 260 m
 通電電流 0, 500, 750, 1000 Arms
 相間電圧 66 kVrms
 相数 3 相
 送電周波数 50 Hz
 循環流量 40 L/min
 冷凍機台数 6台(予備機2台含む)

①無負荷損失 (0 A, 0 kV)

※季節熱負荷変動係数1.08を考慮した(2009/5/31)

	熱侵入量	数量	小計
①-1 端末容器	160 W/台	2 台	320 W
①-2 端末ブッシング	85 W/本	6 本	510 W
①-3 ジョイント容器	40 W/台	1 台	40 W
①-4 断熱管	2.5 W/m	260 m	650 W
無負荷損失合計①(小計合計×係数1.08を乗じた)			1641.6 W

②液体窒素の圧力損失 @ Q=40 L/min

	圧損		小計 (kPa)
②-1 端末容器	16 kPa/台	2 台	32
②-2 ジョイント容器	-	-	-
②-3 断熱管	0.16 kPa/m	260 m	41.6
圧損合計			73.6

圧損による熱損失 (= dP * Q / η、ポンプ効率 η=0.47) ②

104 W

③通電損失 @ 0.5kA

	熱侵入量	数量	小計
③-1 コア (W/m/3ph)	0.15 W/m/3ph	260 m	39 W
③-2 端末ブッシング (W/台)	2 W/本	6 本	12 W
③-3 端末内SC/NC渡り、接続部	3.94 W/箇所	6 箇所	24 W
③-4 ジョイント接続部 (W/箇所)	0.17 W/箇所	3 箇所	1 W
1kA通電損失合計③			75 W

④通電損失 @ 0.75kA

	熱侵入量	数量	小計
④-1 コア (W/m/3ph)	0.3 W/m/3ph	260 m	78 W
④-2 端末ブッシング (W/台)	5 W/本	6 本	30 W
④-3 端末内SC/NC渡り、接続部	9 W/箇所	6 箇所	53 W
④-4 ジョイント接続部 (W/箇所)	0.39 W/箇所	3 箇所	1 W
1kA通電損失合計④			162 W

④通電損失 @ 1.0kA

	熱侵入量	数量	小計
④-1 コア (W/m/3ph)	0.6 W/m/3ph	260 m	156 W
④-2 端末ブッシング (W/台)	8 W/本	6 本	48 W
④-3 端末内SC/NC渡り、接続部	15 W/箇所	6 箇所	90 W
④-4 ジョイント接続部 (W/箇所)	0.6 W/箇所	3 箇所	2 W
1kA通電損失合計④			296 W

⑥ 誘電損失 @66kV

	熱侵入量	数量	小計
⑥-1 コア (W/m/3ph)	0.27 W/m/3ph	260 m	70 W
⑥-2 端末ブッシング (W/台)	0 W/本	6 本	0 W
⑥-3 端末内SC/NC渡り、接続部	0 W/箇所	6 箇所	0 W
⑥-4 ジョイント接続部 (W/箇所)	0 W/箇所	3 箇所	0 W
誘電損失合計⑤			70.1 W

⑦ケーブルシステム熱損失合計

設計マージン0%を考慮	0A, 0kV (①+②)*1.0	0.5kA, 66kV (①+②+③)+	0.75kA, 66kV (①+②+④)+	1.0kA, 66kV (①+②+⑤)+
⑦ケーブルシステム熱損失合計	1746 W	1891 W	1979 W	2112 W

表 2.3.2-3 システム全体の熱負荷

ケーブル熱負荷				
課通電・電力量	0kA、0kV	0.5kA、66kV	0.75kA、66kV	1kA、66kV
熱負荷合計(W)	1746	1891	1979	2112
冷却システム熱負荷				
2台×3並列(W)	994			
全熱負荷(W)				
	2740	2886	2973	3106

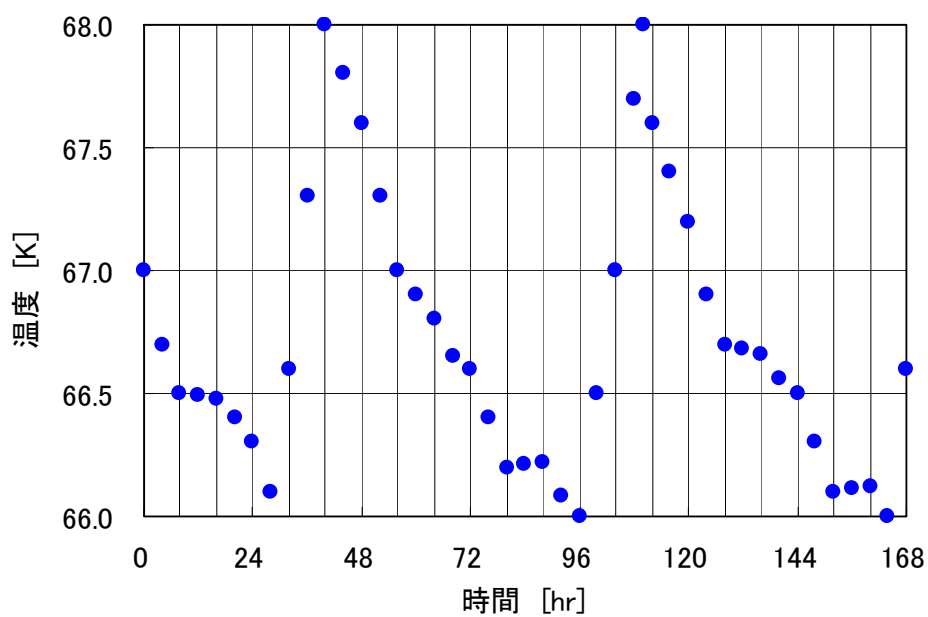


図 2.3.2-2 温度制御中の冷凍機発停回数の検討結果

2.3.2-4 圧力制御について

過去の実績では、ヘリウムガスによる加圧方式、窒素ガスでの加圧方式がとられてきた。ヘリウムガス方式については、ヘリウムが液体窒素に溶解込み、圧力の低い箇所（例えば高所）にて溶解込んだヘリウムガスが出現し、絶縁特性に影響を与える危険性があると指摘されている。

一方、窒素ガスを用いた加圧方式では、過去実績では、窒素ガスが液体窒素と接触する界面で、窒素ガスが液化し、窒素ガスを補給する必要や、液体窒素の液量が多くなり、外部に排出する必要が生じる。従って、窒素ガスの補給設備、液体窒素の排出機能を冷却システムに具備させておく必要がある。

超電導ケーブルシステムの実用化を考えた場合、このような設備、作業の負荷が軽減されるべきと考え、窒素ガスを補給する代わりに、液体窒素のリザーバタンク内に設けたヒータにより、液体窒素表面を加熱しガス圧を維持する方法も考えられる。

本プロジェクトでは、窒素ガスによる加圧方式とヒータ方式に加え、自然加圧方式を採用し、圧力維持、制御に容易で経済的な手法を検証・評価する。また、圧力上昇時の減圧制御として、凝縮減圧方式を採用した。

以下、本節では、ヒータ加圧制御についての検討として、30m 検証試験用の冷却システムにて試験を行ったのでその結果について記載する。

30 m 検証試験用の冷却システムの単体試験において、リザーバタンク内圧力 (Pr1) を 200 kPa に自動制御することを目標とし、液体窒素循環温度を 67 K で圧力制御の確認を行った。

試験結果を図 2.3.2-3 に示す。圧力は 200 kPa を境に +4 kPa、-3 kPa の範囲で制御できており、その制御の時定数はおよそ 90 分前後であった。運転中は循環する液体窒素の温度も安定しており、液面変化も全くなく、完全密閉系での冷却運転が行え、液の補給も不要であることが確認された。

ヒータ制御の課題としては、①圧力変化速度がゆっくりであるため、液温変化にどの程度追従できるかの確認が必要、②さらに長時間の確認試験が必要、③実際のケーブルと接続し、液体窒素の量が変わっても変化がないことなどがあげられる。

また冷却システムの熱負荷がガス加圧と比較すると約 100 W 増加することが確認され、④その熱負荷を低減することも必要である。

試験11(3) (66.8K, 40L/min, H21.8.4)

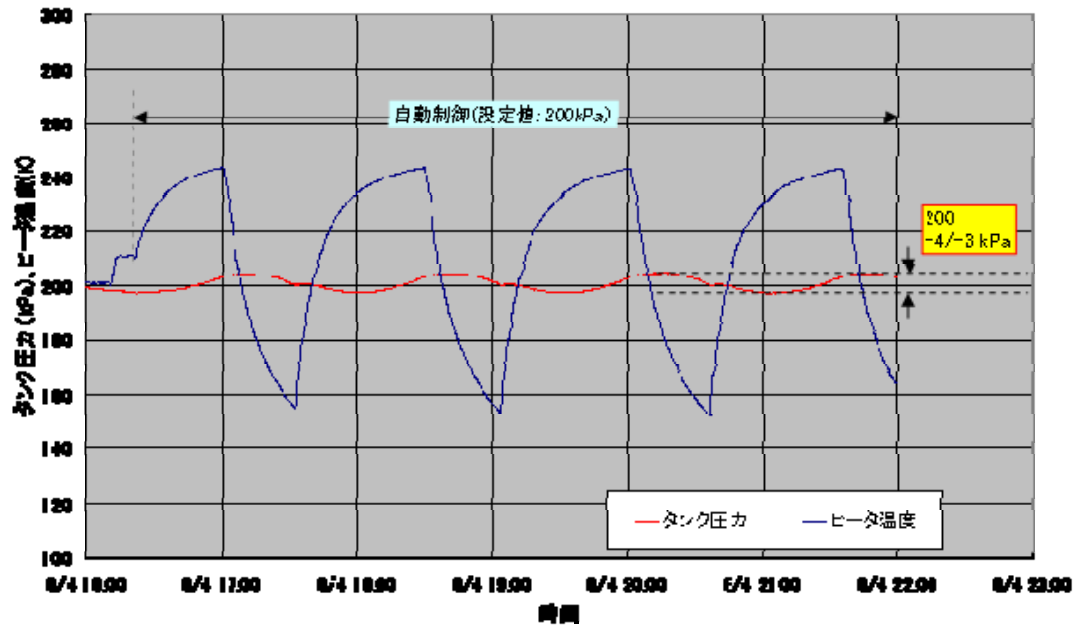


図 2.3.2-3 ヒータ加圧制御試験 (67 K、40 L/min)

2.3.3 事故時の運転技術開発

(1) 研究開発目的

超電導ケーブルシステム及び系統に異常が起こった場合の想定される故障モードについて整理し、それぞれの故障モードに応じて運転技術を検討する。

なお、検討項目のうち、実証場所において高温超電導ケーブルに生じ得る電氣的異常事象（想定される事故（短絡）電流やサージ電圧および異常電圧・電流の継続時間）に関しては2.3.1節に記載した。また、電氣的な異常事象の監視方法については2.2.2節に記載した。

ここでは主に冷却システムの運転技術開発に関する以下の検討を実施する。

- ・冷却システムの運転・監視方法の検討
- ・警報動作条件および警報動作時の対応方針の検討
- ・異常（故障）発生時の対応フロー検討

(2) 冷却システムの運転・監視方法の検討

今回の実証試験用超電導ケーブルの冷却システムの運転・監視方法を検討するにあたり、図2.3.3-1に示す冷却システムモデルを一例として取り上げ、これを用いて検討した。図2.3.3-1は予想される熱負荷に対して必要な冷凍機台数を超電導ケーブルと直列に配置・接続したものである。この方式はこれまで東京電力と住友電気工業が電力中央研究所において実施した100m長の超電導ケーブル試験でも実績がある冷却方式である。ただし、この冷却システムモデルはあくまでも冷却システムの運転・監視方法を検討する為に用いるものであり、実証試験で採用した冷却システム構成については、2.2.3節に記載した。

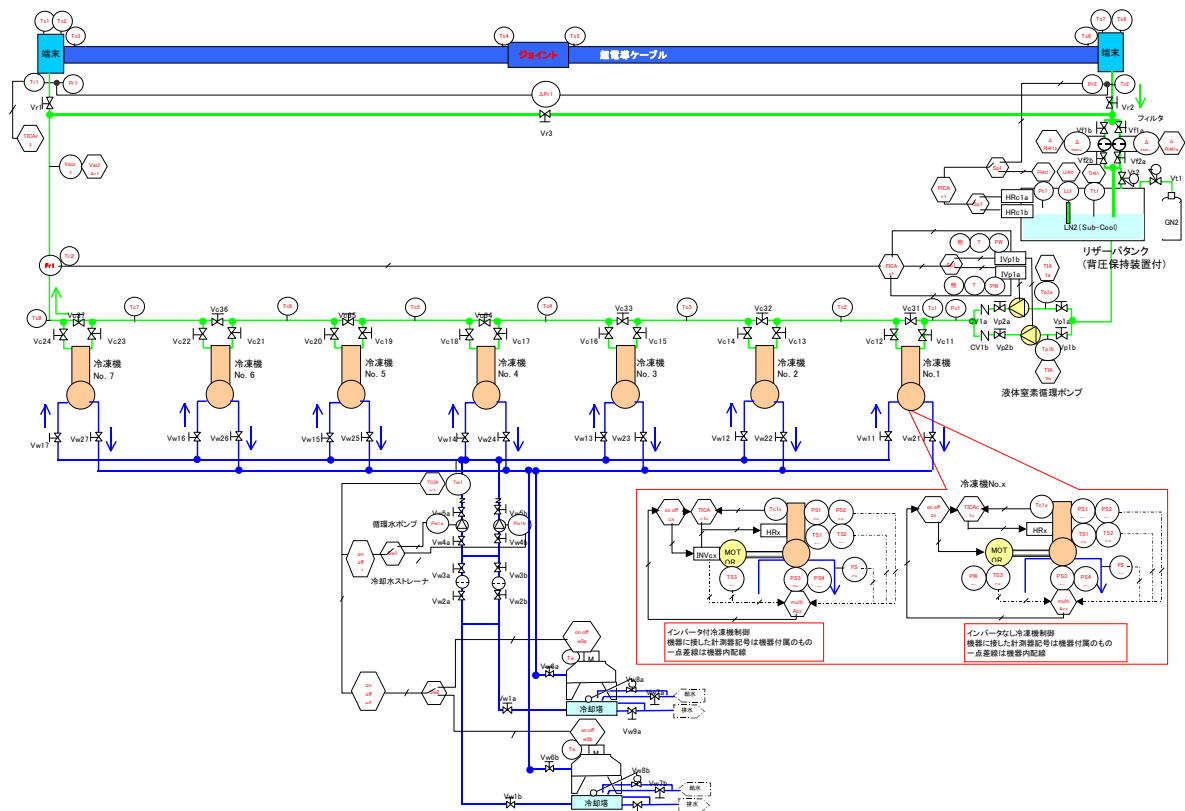


図 2.3.3-1 冷却システムモデル

図 2.3.3-1 の冷却システムの概念としては加圧・過冷却状態の液体窒素を循環し、超電導ケーブルでの交流損失や機器・配管からの熱侵入などの熱負荷を冷凍機と液体窒素循環ポンプにより循環冷却するものである。液体窒素循環冷却システムを構成する機器としては、冷凍機、超電導ケーブル用端末、超電導ケーブル、液体窒素リザーバタンク、液体窒素循環ポンプ、極低温バルブなどが挙げられる。なお、液体窒素循環システムの他に、冷凍機を冷却するための、水循環システム（水冷却塔、水循環ポンプ、バルブなど）も備える。

図 2.3.3-2 に冷却システムの監視・制御についての概念図を示す。冷却システムの運転は液体窒素温度、冷却システム圧力、液体窒素循環流量を制御することにより行う。これらの運転・制御や冷却システムの監視を行うために、インバータ、温度計、圧力計、流量計、液面計、PID 制御用コントローラ、ヒータなどの機器を用いる。運転制御・監視・警報システムは各機器から温度、流量、圧力、液面などのデータを取り込んで、冷却システムの制御（運転・停止）や警報発報を行う。なお、運転制御・監視・警報システムには停電時のバックアップとして UPS を設置する。

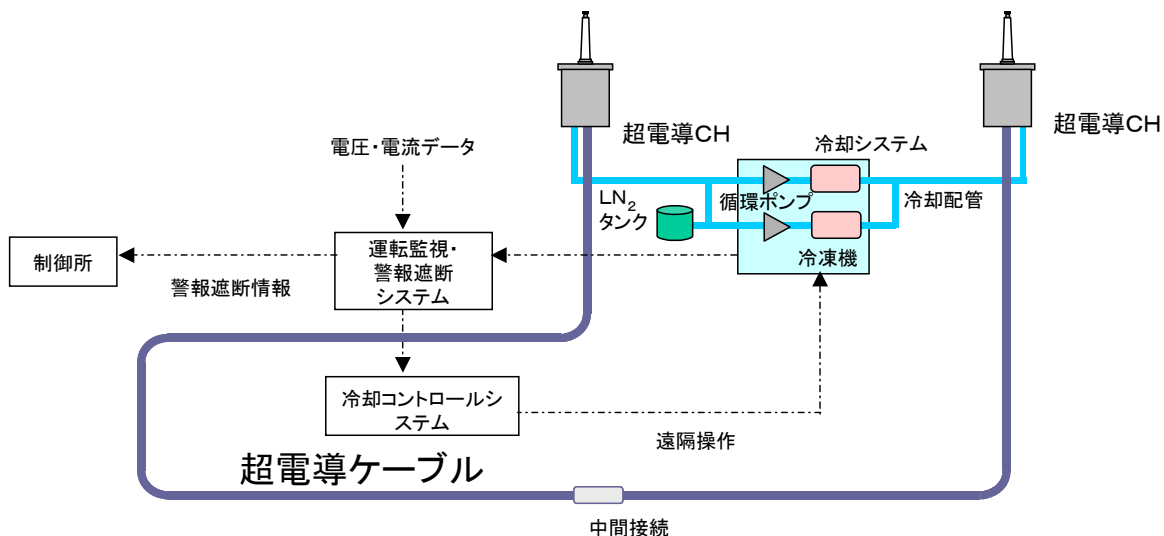


図 2.3.3-2 冷却システム運転監視制御概念図

(3) 警報動作条件および警報動作時の対応方針の検討

図 2.3.3-1, 2 に示すような冷却システムを構成する機器が故障した場合でも、冷却システムは必要な冷却を継続して行うこと、または、循環冷却が継続できなくなるおそれがある場合でも、超電導ケーブルからバイパス回路への切り替えが可能な時間的余裕をもつこと、その上で冷却システムを安全に停止することが求められる。このため、冷却システムを構成する機器が故障した場合に、どのような故障モード（事象）が考えられ、故障の結果が冷却システムにどのような影響を及ぼすか、どのような結果として表れるか、という点を故障影響解析に用いられる FMEA (Failure Mode Effect Analysis) の手法を用いて分析を行った。分析は図 2.3.3-1 のモデル冷却システムにおいて、各機器が故障した場合を想定した。故障モード検討の分析・整理結果を表 2.3.3-1 に示す。

表 2.3.3-1 故障モード分析・整理結果

分類	機器	故障原因例	故障の結果生じる事象
超電導ケーブル	ケーブル断熱管・端末・中間接続部	機械的リーク, 溶接不具合	真空悪化→侵入熱増大→温度上昇, 圧力上昇
機器・配管・容器	冷凍機	コールドヘッド凍結防止用ヒータ異常(断線)	冷凍機停止
	液体窒素循環ポンプ	短絡, 地絡	液体窒素循環ポンプ停止
	極低温バルブ	シール劣化	真空悪化→侵入熱増大→温度上昇, 圧力上昇
	真空断熱配管		
リザーバタンク			
計測器	質量流量計	ピックアップコイル断線	データ表示不能
	圧力計	ひずみゲージ断線	圧力制御不能
	温度計	断線, 温度計素子故障	温度制御不能
	液面計	断線, 変換器故障	液面不明
制御機器(制御盤)	コントローラー(温度, 圧力)	コントローラーCPU・I/O不調	冷凍機停止, 圧力制御不能
	圧力制御用ヒータ	ヒータ断線	圧力制御不能
	リレー(冷凍機ヒータ用)	電源過電流	冷凍機停止
電源関係	UPS	制御系故障	停電時の制御系停止
冷凍機冷却用循環水	冷却塔, 循環水ポンプ	過電流	冷却水温度上昇→冷凍機停止

表中の故障原因は代表的な例を示したものであり、また故障の結果生じる事象については、通常の運転制御機構やバックアップ機能が働いた場合に加え、これらの保護機能では制御しきれないほどに故障が進展した場合なども考慮して記入を行った。例えば、超電導ケーブルのケーブル断熱管に機械的リークや溶接不具合があった場合には、真空層の真空度が悪化し、侵入熱の増大につながる。侵入熱が増大した場合には通常制御により冷凍機の出力を増やすが、冷凍能力を超えるほどの熱侵入となった場合には、最終的に温度上昇および圧力上昇につながるということになる。

表 2.3.3-1 には各機器の代表的な故障原因を挙げたが、実際の作業では表 2.3.3-1 に挙げる機器に関して総計 70 項目にのぼる故障モードを推定し、故障時の事象について検討した。これらの検討の結果、故障時の事象の中には、冷却システムの運転継続に重大な影響を及ぼすもの、あるいは冷却システムが運転停止に至ってしまうものがあることが判明した。そこでこれらの事象に対しては、自動でその機能を維持させるシステム構成、もしくは制御方式とすることで、冷却システムが極力自動運転を継続できるようにする。表 2.3.3-2 はこの考えに沿って、機器の異常事象に対する対応方針をまとめたものである。

表 2.3.3-2 異常事象と対応方針

分類	事象	対応方針
機器	冷凍機異常停止時	予備冷凍機へ自動切替
	液体窒素ポンプ異常停止時	予備液体窒素ポンプへ自動切替 (常用・予備切替運転の場合)
計測器	圧力制御用圧力計不調時	予備圧力計へ自動切替
制御機器	圧力制御用ヒーター不調時	予備ヒーターへ自動切替
	計測線断線時 (温度制御用温度計)	コントローラーは上限または下限値と判断し、バーンアウト信号を発生しシステムを安全方向へ自動制御する
電源	停電時	UPSによる制御・計測系の電源バックアップ

例えば、冷凍機や液体窒素循環ポンプが異常により停止した場合には、予備機を自動起動することにより、冷却能力の低下を防ぐ。なお、液体窒素循環ポンプについては交互運転（常用・予備機運転）を行った場合を想定している。液体窒素循環ポンプ交互運転の場合には運転中のポンプが停止した場合に、予備機側のポンプを起動することとなるが、一方、並列2台同時運転中で、1台異常停止した場合には運転中の健全ポンプにより自動に必要な流量を流すことができる。ただし、循環ポンプ2台を並列同時運転時のポンプ特性についてのデータが不足していた。このため、30 m ケーブルシステムによる事前検証試験に引き続いて実施した冷却システム検証試験、および旭変電所での冷却システム性能特性試験を通じて、2台のポンプの最適運転方法について検討を行い、最終的には循環ポンプ2台を並列同時運転することとした。

計測器・制御機器の故障のうち、圧力制御に関しては、圧力計あるいは圧力制御用ヒーターの故障が考えられる。これらの故障が生じた場合、圧力制御不能となり、冷却システムの圧力低下または圧力上昇につながる可能性があることから、それぞれ予備器への自動切り替えが必要である。なお、温度制御に関しては、温度計が故障（計測線断線）した場合に、コントローラーで上限もしくは下限と判断して、バーンアウト信号を発生し、システムを安全方向へ制御する。安全方向への制御例としては、冷凍機全台運転が考えられる。冷凍機が全台運転すると、冷却能力が、熱負荷を上回ることになるが、その際は、冷凍機コールドヘッドの凍結用防止ヒーターが稼働するため、液体窒素の固化に至ることはない。

機器に故障や異常が発生した場合には、監視者へ異常を通報する。まず、初期段階として、「軽故障」として設備の異常を知らせることとする。「軽故障」レベルの異常が発生した場合には、通常のコールドシステムの制御や上述した自動制御などにより、システムを安定・安全な方向へ制御することを行うが、異常が急激に進展した

場合や、自動制御がうまく機能しない二重故障などの場合には、超電導ケーブルでの送電ができないおそれがあることから、最終段階として「重故障」警報を発報することとする。「重故障」レベルを設定する目安は、旭変電所においては超電導ケーブルでの送電をあきらめ、ただちにバイパス回路へ送電を切り替えるような状態である。なお、誤報防止のため、「重故障」警報発報はセンサーを複数用意しておいて、例えば3つのセンサーのうち、2つのセンサーによる測定値が異常レベル設定値を超えた場合に警報を発報するような多数決方式のシーケンスを採用している。

「重故障」警報を設定する代表的な異常状態としては、表 2.3.3-3 に示すような故障モードがあげられる。具体的には液体窒素温度上昇、圧力異常上昇、圧力異常低下、UPS容量低下の4つである。

表 2.3.3-3 「重故障」として分類する代表的な異常種別と故障事象

	異常	故障事象
重故障	液体窒素温度異常上昇	①故障発生→②発熱→③熱負荷増大→④冷凍機出力増 →⑤発熱(熱負荷)>冷凍能力→⑥液体窒素温度異常上昇→⑦臨界電流値低下
	圧力異常上昇	①故障発生→②圧力上昇傾向→③圧力調整弁による減圧制御 →④圧力上昇傾向>減圧制御→⑤圧力異常上昇→⑥安全弁動作
	圧力異常低下	①故障発生→②圧力低下傾向→③圧力制御用ヒータ出力増 →④圧力低下傾向>圧力制御用ヒータ能力→⑤圧力異常低下 →⑥主絶縁層(PPLP+LN ₂)絶縁特性低下
	UPS容量低下(停電時)	①停電発生→②UPSによる制御・計測回路バックアップ→③UPSによる給電 →④UPS容量低下→⑤UPS断・制御・計測・警報発報不能

1 つめの液体窒素温度上昇については、超電導ケーブルの臨界電流値低下、2 つめの圧力異常上昇は(高压ガス)安全弁の動作、3 つめの圧力異常低下は超電導ケーブルの主絶縁層の絶縁性能の低下、4 つめのUPS容量低下は冷却システムの制御・計測・警報発報の不能をそれぞれ招き、超電導ケーブルの運転に重大な影響を及ぼすものである。

なお、液体窒素循環流量異常低下については、冷却不能となる点、超電導ケーブルの温度上昇を把握できない点などから、「重故障」としたほうがよいのではないかとの議論があるが、液体窒素の温度異常上昇により代替することが可能である。なお、「重故障」「軽故障」の分類に関しては今後実施する冷却システムの実験評価試験の結果等もふまえて、最終的な分類を確定することと、2.3.2(5)節にて詳述している。

(4) 異常（故障）発生時の対応フロー検討

実証試験時に故障が発生した場合の対応フローについて、「重故障」「軽故障」それぞれについて図 2.3.3-3、2.3.3-4 に、旭変電所での実証試験時に異常が発生した場合の対応・連絡体制を図 2.3.3-5 に示す。

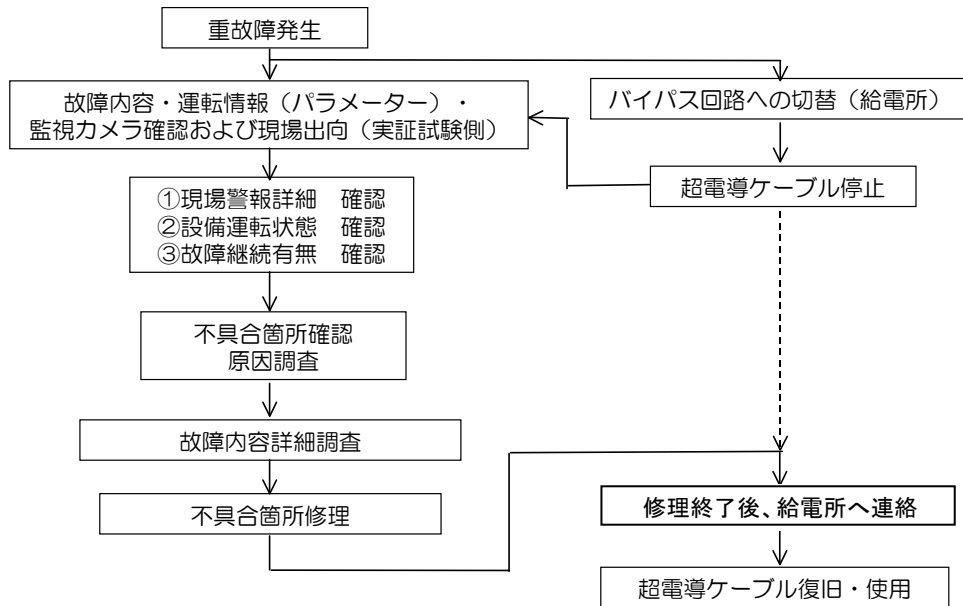


図 2.3.3-3 重故障発生時の対応フロー

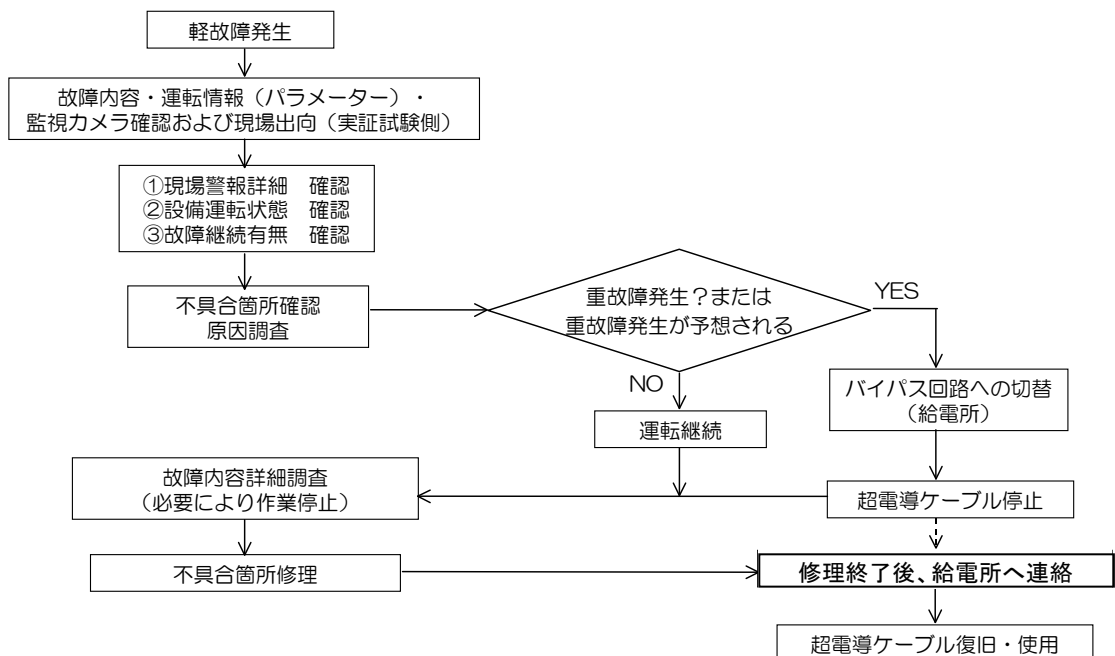


図 2.3.3-4 軽故障発生時の対応フロー

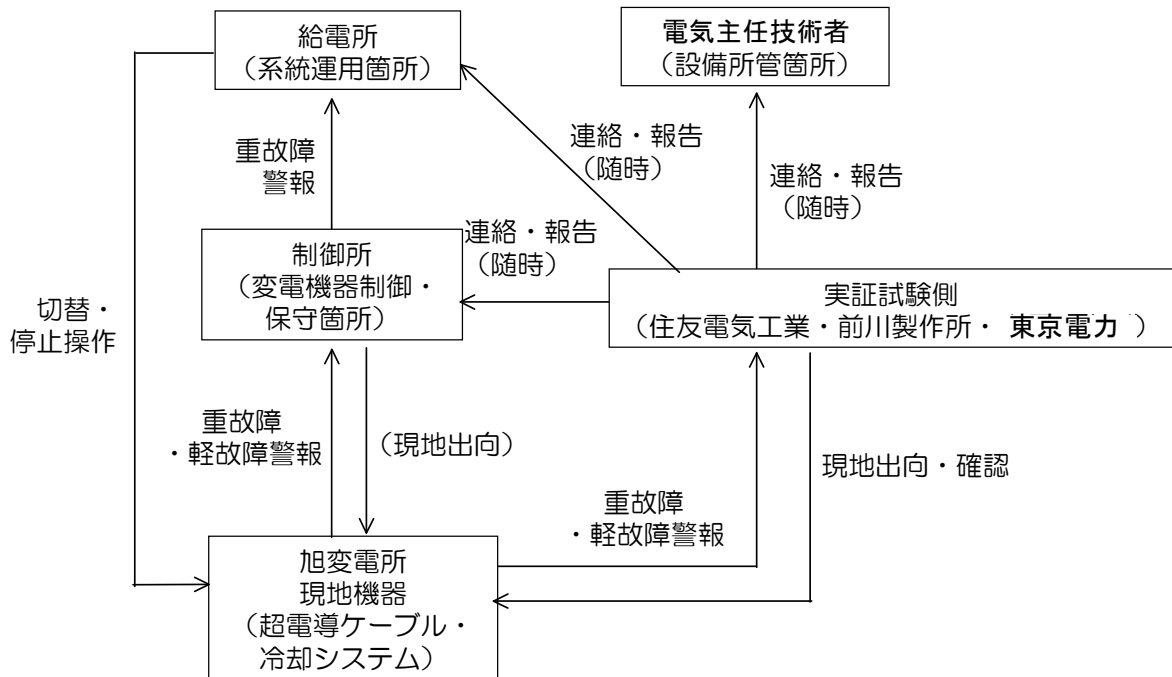


図 2.3.3-5 異常発生時の対応・連絡体制

「重故障」警報が発生した場合には直ちにバイパス回路への切り替えを行うとともに、現地出向し、現場警報詳細、設備運転状態、故障の継続有無などを確認する。不具合箇所が特定でき原因調査および修理が終われば、超電導ケーブルの復旧・使用が可能である。

一方、「軽故障」警報が発生した場合には、バイパス回路への切り替えはせず、現地出向を行い、現場警報詳細、設備運転状態、故障の継続有無などを確認するが、この間にも故障（異常）が進展して、「重故障」警報が発生または発生が予想される場合には、超電導ケーブルからバイパス回路への切り替えを行う。

異常モード検討に関しては、30 m 検証システムでの評価を行うとともに、事故解析に用いられる FTA (Fault Tree Analysis) ベースでの検討を実施し、FMEA ベースでの検討結果と突き合わせを行うことで、現地での対応手順・故障復旧手順の作成に反映させている。

(5) 実証システムの警報・監視項目

前節までの内容を踏まえ、旭変電所の実証システムにおける具体的な警報・監視項目について記載する。

実証システムの運転温度・警報温度を図 2.3.3-6 に示す。実証システムの運転において、液体窒素の運転温度は、安定供給・運転効率・ I_c 臨界電流値・冷却効率などを考慮する必要がある。運転限界温度値は、定格電流 1750 A が通電可能である液体窒素の臨界温度 90 K@0.2 MPaG とした。次に、冷却システムが 1 時間停止した場合の温度上昇分と短絡事故電流 (10 kA-2 s) の通電による温度上昇分と裕度を考慮し、90 K に到達する温度を重故障警報点 (83 K) とした。また、超電導ケーブル入口温度が基準となる運転制御温度 69 ± 1 K に対して、温度低下に対しては、液体窒素が固化する温度 (63.5 K) を考慮した軽故障警報点を 65 K とし、逆に温度上昇に対しては、超電導ケーブルによる温度上昇分 (3.5 K) を考慮した上昇傾向を感知する軽故障警報点を 76 K とした。

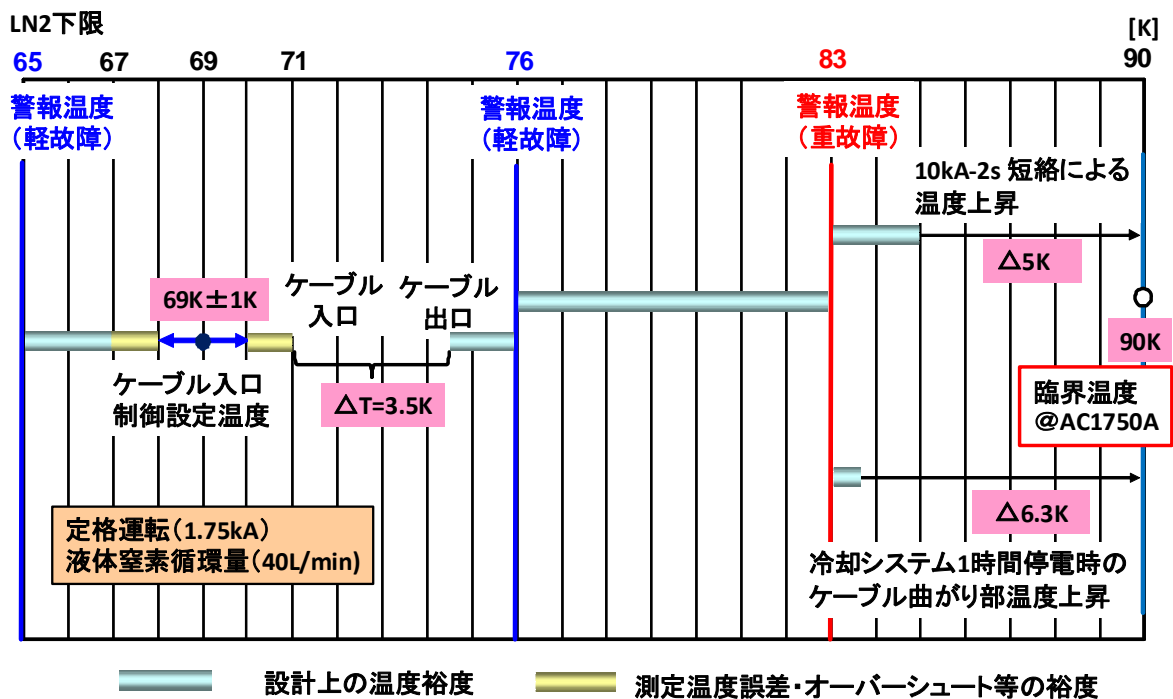


図 2.3.3-6 実証システムの運転温度・警報温度

実証システムの運転圧力・警報圧力を図 2.3.3-7 に示す。運転圧力は、電気絶縁特性の維持及び実証システムの運用面から、0.2 MPaG とした。この圧力制御点はリザーバタンク内圧力を基準とし、圧力が低下した場合、自然加圧・ヒータ加圧・ガス加圧の3つの加圧方式により圧力保持を行うとともに、圧力低下を感知する軽故障警報点を0.18 MPaG とした。さらに圧力が低下し、電気絶縁を危惧する前の圧力0.1 MPaG を重故障警報点とした。また、圧力が上昇した場合、凝縮減圧装置が動作し圧力を低下させるものとし、圧力上昇を感知する軽故障警報点は、凝縮減圧弁の動作点と同じ0.25 MPaG とした。さらに圧力が上昇する場合、安全弁動作により圧力を低下させるシステムとした。

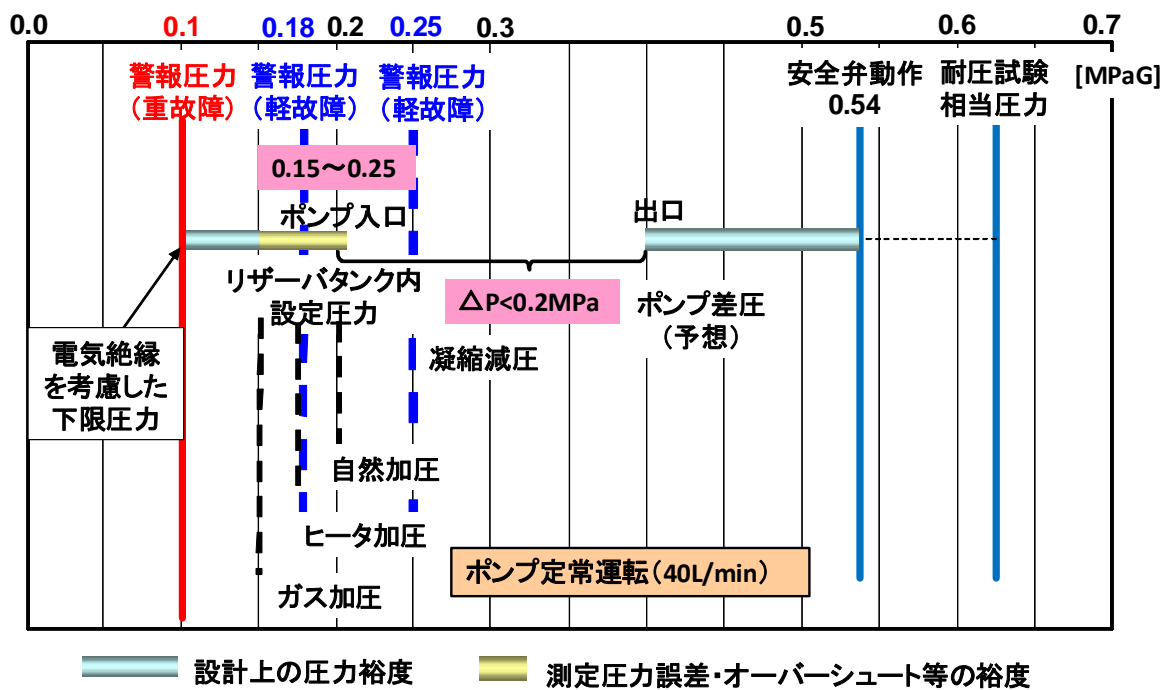


図 2.3.3-7 実証システムの運転圧力・警報圧力

実証システムの重故障警報項目を表 2.3.3-4 に示す。前節で述べた通り、軽故障は異常が進展した場合、最終的には重故障に至り、超電導ケーブルからバイパス送電へと切り替えが実施される。そのため、ここでは主要な項目として重故障の警報項目を列挙し、また、ケーブル・冷却システムのみでなく、故障検出用リレーの動作等を含めて設計した内容を示す。なお、重故障警報項目の設定理由は以下の通りである。①は超電導線が超電導状態から常電導状態に転移することで、超電導線が焼損し、短・地絡事故となる可能性がある。②は電気絶縁破壊に至る可能性がある。③、④、⑤は液体窒素循環ができなくなり、超電導ケーブルが局所的に温度上昇し、短・地絡事故となる可能性がある。⑥は、実証システムの監視が不能となる。⑦は、冷却システムの制御・監視が不能となる。⑧は現地の非常停止ボタンが押された場合で、冷却システムが全停となる。⑨は超電導ケーブルで短・地絡故障が生じた場合に発信される。

これらの項目の内、①、②、③、④については、計測値や機器動作状況を組合せた多重判定とし、計測値異常やセンサー異常等による誤動作を低減させ、信頼性を向上させている。

表 2.3.3-4. 実証システムの重故障警報項目

重故障警報項目		判断条件
①液体窒素温度 上昇		温度センサー13点(83K以上)のうち、2点が成立した場合
②液体窒素圧力 低下		圧力センサー4点(0.1MPa以下)のうち、2点が成立した場合
③液体窒素リザーバタンク 液面低下		リザーバタンク液面計2点(15%以下)およびリザーバタンク内温度センサー1点(85K以上)の計3点うち、2点が成立した場合
④液体窒素循環ポンプ 2台故障		循環ポンプA故障, Bの故障, 流量30L/min以下の3点のうち、2点が成立した場合
⑤制御・動力電源喪失		制御・動力電源喪失が5分継続した場合
⑥超電導ケーブル監視盤 異常		通信・警報不能の場合
⑦冷却システム制御盤 異常		通信・制御不能の場合
⑧冷却システム 非常停止		非常停止ボタンが押された時
⑨超電導ケーブル 故障検出用リレー	動作	超電導ケーブル内で短地絡事故が発生した場合
	異常	装置に異常が生じた場合

2.3.4 保守・メンテナンス技術の開発

2.3.4-1 保守・メンテナンスすべき項目

超電導ケーブルシステムの構成要素毎に保守・メンテナンスすべき項目について調べた。尚、警報システム、遮断システムなどは超電導ケーブル特有のものではなく、従来機器にて十分に保守・メンテナンスの必要性、手法が検討されていると考えられ、ここでは、超電導ケーブルと冷却システムについて項目を調べ、その結果を表 2.3.4-1 に示す。

超電導ケーブル部については、ケーブルの構成要素である超電導線、電気絶縁材料、断熱管等については、極低温に維持される部分は酸化劣化などの心配はなく、特にメンテナンスする必要はないと考えられる。常温部についても、ステンレスシース、防食層など従来ケーブルと同じ材料を用いており、特別なメンテナンスの必要はない。液体窒素については、OF ケーブルの油と同じ考え方で、その絶縁特性の低下が危惧されるが、油のように酸化劣化する要素はなく、今のところ不明である。今後の研究で液体窒素の取り替えなど保守が必要か否か明らかにしていきたいと考える。

ケーブルの断熱管の真空度については、徐々に悪くなる傾向にあり⁴⁾、悪くなった時点でメンテナンスする必要がある。端末、ジョイントについてもケーブルと同様で、真空度については、途中でメンテナンスが必要になると考えられる。その期間について実証運転にて調査する。

冷却システムについては、冷凍機、ポンプ、水冷システムなど回転機を使用している箇所があり、この部分については定期的にメンテナンスする必要がある。

その他、温度、圧力、流量を計測しているセンサー、機器については、メーカーの仕様に依じて、メンテナンスの必要があれば実施するものとする。

表 2.3.4-1 メンテナンスが必要と予想される項目

部位	項目
超電導ケーブル	断熱管の真空度
ジョイント、端末	真空層の真空度
冷却システム	冷凍機 循環ポンプ 冷却塔
計測センサー、機器	温度計 圧力計 流量計 真空計

2.3.4-2 冷却システムのメンテナンス

(1) メンテナンスの目的

冷却システムを構成する機器の内、故障した場合に冷却システムの稼働に甚大な影響を及ぼす機器については、予備機を用意するなど冗長性を確保すると共に、定期的なメンテナンス(整備、保守、監視、点検、手入れ)を実施して機器の故障を未然に防ぎ、寿命を延ばす対策が重要である。今回の冷却システムに関し、これに該当すると考えられる機器は稼働部分を有するスターリング冷凍機、液体窒素循環ポンプおよび冷却塔である。

極低温機器であるスターリング冷凍機と液体窒素循環ポンプのメンテナンス間隔はそれぞれ8,000時間と9,000時間であり1年間(およそ8,760時間)の連続運転を実施する実証試験中にそのメンテナンス時間を超えてしまうため、メンテナンスを実施する必要がある。冷却塔は汎用品でありメンテナンスに関しても十分な経験と実績を有しており、基本的には点検と清掃を適切に行えば1年間の運転は十分に行えるものである。

(2) 冷凍機メンテナンス

冷凍機の作動ガスであるヘリウム中に潤滑油が混じると低温部で固化することから、常温部と低温部はダイヤフラムで仕切られ、貫通部にはオイルセパレータが設置されている。メンテナンスは、この稼働部および熱交換器部となる。表2.3.4-2にその内容を記す。

表 2.3.4-2 スターリング冷凍機メンテナンス項目

推奨メンテナンス時間	8000[時間]	
メンテナンス内容	シール部品	交換
	蓄冷器	交換
	ヘリウムガス	交換
	オイル	交換
	機内ベーキング処理	

(3) 循環ポンプのメンテナンス

循環ポンプの推奨メンテナンス時間は9,000時間であり、9,000時間ごとにベアリングの点検、交換が必要である。

(4) 冷却水循環システムのメンテナンス

前述のとおり冷却塔は汎用品であり十分な実績を有す。そのためメンテナンスに関しても豊富な情報を有する。表2.3.4-3に冷却塔のメンテナンス項目の一例を示す。適切なメンテナンスを行えば2年間は部品の交換を行う必要がないことが分かる。

表 2.3.4-3 冷却塔のメンテナンス項目

機器名	部品名称	点検	清掃	点検・清掃	交換時期															交換	
		月1回	月1回(※)	年1回	1年	2年	3年	4年	5年	6年	7年	8年	9年	10年	11年	12年	13年	14年	15年		
本体	上部水槽	○	○																○	損傷による	
	下部水槽	○	○																○	〃	
	点検歩道			○															○	〃	
	点検扉			○															○	〃	
	充填材			○										○						〃	
	散水充填材			○										○						〃	
	コイル			○															○	〃	
	ストレーナー	○	○						○						○					○	〃
	ボールタップ	○							○						○					○	〃
	骨材			○																○	〃
	配管			○																○	〃
	側板			○																○	〃
	ルーバー			○																○	〃
	タラップ			○																○	〃
	配水弁			○																○	〃
ポンプ	○							○		○		○		○		○		○	○	メカシールは水漏れの 都度交換 20000時間毎にベアリン グ交換 使用頻度により異なる	
送風機	グリスアップ (給油式)	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1000時間毎に給油 使用頻度により異なる	
	軸受け (ベアリング)	○				○		○		○		○		○		○		○	○	20000時間毎にベアリン グ交換 使用頻度により異なる	
	モーター (ベアリング)	○				○		○		○		○		○		○		○	○	20000時間毎に給油 使用頻度により異なる	
	翼、羽根ピン			○															○	使用頻度により異なる	
	円盤			○															○	〃	
	ブーリー			○						○						○				〃	
	ファンベルト	○				○		○		○				○		○				〃	
	ベルトカバー			○															○	〃	
ドラム			○																○	〃	
保護金網			○																○	〃	

(※)冷却塔2000時間運転、1000時間停止を基本とするが、停止時の点検・清掃を行えば故障や能力の低下の可能性は少ない

(5) フィルタ

フィルタに関しては、目詰まり時の対応のために交換が可能な構造としている。交換目安は、期間ではなくフィルタ前後の圧力損失上昇、循環流量の低下状況から判断する。

2.3.4-3 実証ケーブルシステムのメンテナンス

超電導ケーブルの点検項目については、2.3.4-1 節に示したように、真空度の管理が重要であるが、その他に外観部の異常（霜付き、液漏れ等）に関しても留意する必要がある。さらに、今回初めての実系統接続試験であり、耐電圧特性についても長期的特性を確認するという点から、部分放電発生の有無を定期的に確認することにした。表 2.3.4-4 に超電導ケーブルの点検項目、保守項目を示す。

表 2.3.4-4 超電導ケーブルの点検、保守項目

	1 回/週	1 回/月	1 回/年	必要時、故障時
ケーブル外観	ケーブル・ジョイントの霜付き等の確認			
端末外観	端末容器の霜付き等の確認 バルブからのガス漏れ確認			
端末安全弁	ガス漏れ等の確認		動作確認	
真空度計測、真空引き	ケーブル断熱管真空度の測定			各部位の温度上昇、霜付き時に測定 → 必要時真空引き
部分放電		発生の有無確認		

2.3.5 まとめ

(1) 実証場所での系統特性調査

- ・ 超電導ケーブルのメリットとして、抵抗がゼロであることから損失を小さくすることができる、インピーダンスが小さく系統安定度向上に寄与できる、サージインピーダンスローディングが大きく大電流送電に適する、などを確認した。
- ・ 実証場所である旭変電所で予想される短絡電流および継続時間は、事故直後の課電通電が「無」となる場合は 0～31.5 kA-2 sec および 0～10 kA-3 sec、課電通電が「有」となる短絡事故は 0～10 kA-2 sec の範囲であることが解析により判明した。
- ・ 実証場所でのサージ電圧は、EMTP 解析の結果 LIWV (雷インパルス耐電圧) : 350 kV よりも小さいことが判った。

(2) 平常時の運転技術開発

- ・ 常時運転については、冷却システムで超電導ケーブルの温度、圧力、流量を制御することが重要で、それぞれの制御指針を示した。
- ・ 温度制御については、冷凍機の ON/OFF 運転の採用により、ケーブル入口温度±1K 程度で制御できることをシミュレーションにて示した。
- ・ 圧力制御については、加圧制御としては、窒素ガスによる加圧方式とヒータ方式に加えて、自然加圧方式を用いた制御方法を採用し、減圧制御としては、凝縮減圧方式を採用することとし、ヒータ加圧制御の特性評価を実施した。

(3) 事故時の運転技術開発

- ・ 異常時の運転においては、まずは超電導ケーブルシステムに異常が起こった場合に想定される故障モードについて整理を行い、対応案について検討した。
- ・ 警報については重故障と軽故障に分類し、それぞれの異常発生時の対応フローについて検討した。重故障は、超電導ケーブルシステムに重大な異常が発生した場合を想定しており、送電を直ちに常電導ルートに切り替えることとした。
- ・ 実証システムにおける温度、圧力、流量の運転範囲、警報点の設定を行うとともに、その設定根拠を明示した。

(4) 保守・メンテナンス技術の開発

- ・ 保守・メンテナンスについては、超電導ケーブルの各部で点検、保守が必要な項目について整理した。
- ・ 冷却システムについては、冷凍機、循環ポンプ、冷却水の冷却塔など、定期的なメンテナンスが必要な機器に関して、具体的メンテナンス項目やインターバルについて整理した。

引用論文リスト

- (1) 飯塚喜八郎 監修、“新版・電力ケーブル技術ハンドブック”、電気書院 (1989) 79-80
- (2) T. Masuda, M. Hirose, S. Isojima, S. Honjo, Y. Takahashi, and H. Suzuki: “Verification tests of a 100m High-Tc Superconducting Cable”, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2201: Asia Pacific, Conference Proceedings, Vol. 2, pp. 1298-1303 (2002)
- (3) 大岡登, 前川定雄 “標準電気機器講座 変圧器”、東京電気大学出版局 (1968) 1712-1717
- (4) 増田等、「3 心一括型超電導ケーブルの開発」、電気学会 B 部門誌 126 巻 8 号 (2006)

2.4 実システムにおける総合的な信頼性の検証

2.4.1 信頼性検証のための試験計画の立案

(1) 研究開発目的

現在使用されている CV ケーブルなどの従来ケーブルは、それらが実システムでの長期使用に耐える特性を有しているかを検証・確認することを目的として、開発段階で実施される開発試験、ケーブル出荷段階で実施される出荷・受入試験、ケーブル布設後の最終確認として実施される竣工試験が行われ、すべてに合格することが求められる。超電導ケーブルは従来ケーブルと同等の機能を有することが求められることに加え、超電導ケーブル特有の機能の健全性を確認することも必要となる。

そこで、超電導ケーブルが実システムでの長期使用に耐える特性を持つことを確認するための試験項目およびそれらの実施時期や実施方法などの試験計画について検討する。

(2) 試験項目一覧

このプロジェクトでは、目標に沿って設計した超電導ケーブルを用いて、先ず試験場での検証試験（ケーブル長 30 m）を行い、その結果を評価した上で、実システムでの連系試験を実施した。

試験法の策定にあたっては、将来の実用化製品に対する試験項目及び試験条件を検討することを目指しているが、超電導ケーブルの絶縁破壊データ等、十分な基礎データが取得されていないこともあり、その限界性能や諸特性を言及するにはデータ不足が否めない。今回の検討に際しては、その点を十分に考慮の上、足りない要素については OF ケーブルと CV ケーブルに代表される既存のケーブルでの考え方をもちって補うものとする。

選定した試験項目は表 2.4.1-1 の通りである。試験項目 1 番から 18 番は既存ケーブルの試験項目に準じて選出したものである。また、試験項目 19 番から 34 番は超電導ケーブル特有の試験である。

表 2.4.1-1 超電導ケーブル試験項目一覧表

No.	項目	要素試験	30m出荷試験	30m試験	実証出荷試験	実証竣工試験	残存性能試験
1	商用周波長時間耐電圧試験	●	●		●		●
2	長期課通電試験			○			
3	商用周波耐電圧試験	●		○(2の後)			
4	雷インパルス耐電圧試験(絶縁体)	●	●	●(2の後)	●		●
5	雷インパルス耐電圧試験(保護層)			●	●		●
6	出荷耐電圧試験		●		●		
7	部分放電試験	●	●	○	●		●
8	絶縁耐力試験			○		○	
9	外観点検	○	○	○	○	○	○
10	静電容量試験	●(室温、低温)	○(室温)、●	○	○(室温)、●	○	●
11	誘電正接試験	●	●	○	●	○	●
12	絶縁抵抗試験		●(室温)	○	○(室温)	○	○
13	直流耐電圧試験(シース)		○		○		○
14	導体抵抗試験(フォーマ)		●(室温)	○(室温)	○(室温)	○(室温)	
15	構造試験		●		●		●
16	曲げ試験	●	●		●		
17	極度曲げ試験	●(参考)					
18	プーリングアイ試験	●					
19	I _c 測定(導体、シールド)	●	●	○(導体のみ)	●	○(導体のみ)	●
20	交流損失測定	●	●	○(ΔT)	●		●
21	断熱管侵入熱測定	●(参考)		○(参考)		○(参考)	
22	断熱管側圧試験	●(参考)					
23	引張り、圧縮試験	●(参考)					
24	短絡試験(31.5kA)	●					
25	短絡通電試験	●					
26	短絡課電試験	●					
27	ケーブルコア側圧試験	●					
28	耐圧力試験		■(室温)	■(室温)	■(室温)	■(室温)	
29	気密試験		○(室温)	○(室温)	○(室温)	○(室温)	
30	真空リーク試験		○(室温)	○(室温)	○(室温)	○(室温)	
31	布設模擬試験	●					
32	圧力損失測定			○(参考)		○(参考)	
33	インダクタンス測定	●(参考)	●(参考)		●(参考)		
34	液体窒素性能検査						●(参考)

● サンプル or モデル試験

○ 全長試験

■ 部品での試験



: 既存ケーブルを考慮した試験

: 超電導ケーブル特有の試験

(3) 主な電気試験の試験条件

絶縁紙と液体窒素による複合絶縁方式である超電導ケーブル絶縁破壊メカニズムは、絶縁紙のギャップでの部分放電に起因し絶縁破壊が発生する OF ケーブルの破壊メカニズムと類似していると考えられることから、「JEC-3401-2006 OF ケーブルの高電圧試験法」に準拠して試験条件を検討した。主な電気試験として次の 4 つの試験、長期課通電試験、商用周波耐電圧試験、商用周波長時間耐電圧試験、雷インパルス耐電圧試験(絶縁体)についての試験条件を表 2.4.1-2 の通り設定した。

表 2.4.1-2 主な電気試験の試験条件

試験項目	OFケーブル (JEC-3401(2006))	超電導ケーブル (30m検証ケーブル)
形式試験 商用周波長時間耐 電圧試験 (サンプル)	$Vac = \frac{Um}{\sqrt{3}} \times K1 \times K2 \times K3$ Um: 最高使用電圧72kV、 K1: 時間係数 (30年/3時間)^(1/n), n=30 K2: 抜き取り試験に対する安全率 1.1 K3: その他係数 1.25 Vac=90kV @ 3時間	左記計算式において計算 超電導ケーブルのnについては、S-GMが n=49が報告されているが、データ数が少ない ために、厳しい側としてOFケーブルで使わ れているn=30を使用した。 Vac=90kV @ 3時間
開発試験 商用周波耐電圧試 験 (サンプル)	試験電圧 $V=Um \times C1 \times K3$ $C1=k1 \times k2 \times k3 \times k4$ k1: 1線地絡時の健全相の電圧上昇倍率=1.0 @ 66kV k2: 時間換算係数=(2/600)^(1/n) : n=20短時間領域 k3: 負荷遮断時の電圧上昇倍率=1.35 @ 66kV k4: 機器の耐電圧試験裕度 =1.14 K3: 不確定要素に対する裕度=1.1 V=100kV @ 10分	K2の値は未確定 厳しい側で考え、120kVとする。
開発試験 雷インパルス試験 (サンプル)	試験電圧=LIWV × K2' × K3'=425kV LIWV=350kV (66kV級) K2': 温度係数1.1 (常温) K3': 裕度 1.1 回数: ± 3回	左記計算式において、温度係数は温度変化が 小さいため、K2'=1.0として計算 試験電圧 385kV @ ± 3回
開発試験 長期課通電試験 (全長30m)	試験期間=30年/2^M M= (試験温度-基準温度) / 7 02~1.5年 試験電圧 (例) = (30年/試験期間)^(1/n) × Um / √3 = 48kV 試験期間0.5年、n=30、Um=72kV@66kV 通電条件: 当事者間で協議	試験期間については、試験スケジュールを 考え1ヶ月とする。 n=30、試験期間1ヶ月の時 V=51kV (30m全長試験) 通電条件: 8時間ON, 16時間OFF(協議中)

(4) V-t 特性での寿命指数 n の考え方

長期にわたる絶縁破壊強度特性である V-t 特性において、最も重要な指数は寿命指数 n である。n 値が大きいほど長期にわたる絶縁破壊強度の低下が少なく、試験電圧は低くなる。逆に n 値が小さいほど経年劣化が大きいため試験電圧は高くなる。

超電導ケーブルの n 値については、過去に Super-ACE のプロジェクトにおいて、n=49⁽¹⁾ という値が報告されているが、試験方法が特殊で大量の試験数を実施するのが困難なこともあり、統計的に十分な数のデータが取得されているとはいえない。そこで今回の実証試験においては、より厳しい側の数値として、OF ケーブルで使用されている n=30⁽²⁾ を採用した。

ただし、商用周波耐電圧試験については n=∞ とし、結果として試験電圧は 120 kV と設定する。(前述の n=49 の場合の試験電圧 108.5 kV より安全サイドである。) ここで商用周波耐電圧試験とは、短絡電流通電 (2 秒) を試験時間 10 分での課電に換算し、絶縁性能を確認する試験であり、他の電気試験とは反対に、n 値が大きいほど試験電圧が高くなる。

(5) 雷インパルス耐電圧試験の温度係数の考え方

ケーブルコアの温度は冷却システムの管理下にあり、その最大値であっても劣化をもたらす温度ではないため、温度係数による電圧設定の裕度を勘案する必要がな

い。このため、表 2.4.1-2 の OF ケーブルの雷インパルス試験にある温度係数(K_2') は 1.0 とし、超電導ケーブルでは 66 kV 級 LIWV の 1.1 倍である 385 kV とした。

(6) 絶縁耐力試験の試験条件

絶縁耐力試験は、電気設備技術基準の解釈 14 条「電路の絶縁抵抗及び絶縁耐力」に基づいて実施する。最大使用電圧が 60,000 V を超える中性点接地式電路に該当し、試験電圧は下記①②のうちどちらかを選択し、電路と大地の間に 10 分間課電して行う。

① 交流電圧 75.9 kV (系統最大電圧 69 kV \times 1.1)

② 直流電圧 151.8 kV (系統最大電圧 69 kV \times 1.1 \times 2)

また、「日本電気技術規格委員会規格 JESC E7001(1998) 電路の絶縁耐力の確認方法」において、特別高圧の既存 OF、CV ケーブルの絶縁耐力の確認方法として常規対地電圧課電による方法が掲載されているが、超電導ケーブルについては、新技術のため該当する電気規格調査会標準規格 (JEC) が無く、これまでの輸送と現地組立の実績が少ないことから、その対象にはならないとした。ただし、将来しかるべき理由を伴ってその対象とできる場合にはその限りではない。

本プロジェクトでは、上記試験法のうち、課電設備の簡易性から②を選択した。

(7) まとめ

既存の OF ケーブルおよび CV ケーブルの試験法を参考にしつつ、将来の実用化を見据えて超電導ケーブルで実証すべき試験項目、試験方法などを検討した。さらにこれらの試験法を今回の実証試験のいずれの段階で実施するかを試験計画を策定した。この試験計画に基づいて各種要素試験や 30 m ケーブルを用いた事前検証試験を実施している。

2.4.2 実証システムの構築

2.4.2-1 旭変電所基礎工事の施工

旭変電所での実証試験設備の構築にあたり、各設備の基礎工事（超電導ケーブル端末、開閉器および冷却システム室等）を実施した。図 2.4.2-1 に超電導ケーブル端末用基礎の施工途中および完成後、図 2.4.2-2 に冷凍機等を設置する冷却システム室建屋の施工途中および完成後、図 2.4.2-3 に試験用キュービクルの施工途中および完成後、図 2.4.2-4 に現場事務所の施工途中および完成後の写真を示す。いずれの作業も予定通り、施工が完了した。



図 2.4.2-1 超電導ケーブル端末用（左）配筋出来形 （右）土間コンクリート



図 2.4.2-2 冷却システム建屋 （左）基礎コンクリート工事、（右）完成後



図 2.4.2-3 試験用キュービクル (左) 据付様子、(右) 完成後

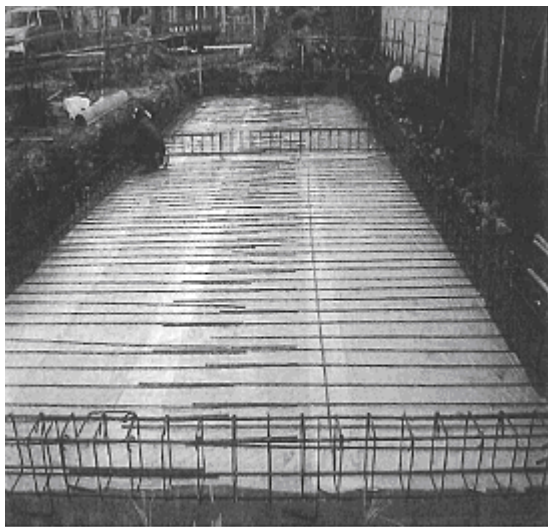


図 2.4.2-4 現場事務所 (左) 基礎工事 配筋施工状況、(右) 完成後

2.4.2-2 変電設備の建設

超電導ケーブルの実証試験に必要な、ガス遮断器や断路器等の変電設備の搬入・据え付けを行い、受け入れ検査にて仕様通りの性能を確認した。図 2.4.2-5 に遮断器の据え付け時および施工後、図 2.4.2-6 に断路器の施工完了後の写真を示す。いずれの作業も予定通り、施工が完了した。なお、開閉器（遮断器・断路器）の耐震設計については、「変電所等における電気設備の耐震設計指針 JEAG5003」に則り、水平加速度 3.0 m/s^2 に対して十分な強度を持った設計とした。



図 2.4.2-5 ガス遮断器（左）据え付け状況、（右）施工後



図 2.4.2-6 断路器 据え付け施工後

2.4.2-3 実証ケーブルシステムの製造

(1) 実証ケーブルの製造

2.2.1 節で検討した仕様を元に、実証用超電導ケーブルの製造を住友電工（大阪製作所）にて行った。製造した実証ケーブルの諸元を表 2.4.2-1、構造を図 2.4.2-7 に示す。

検証用ケーブルとほぼ構造は同じであるが、シースの上にステンステープを巻き付け、管路引き込み時の耐張力強化を行った。これは、後述するように実証場所の布設レイアウトがスペースの関係で、実線路ではありえない 5 mR の U ターン形状となっており、布設時の張力が大きくなると予想されたためである。このテンションメンバーをケーブル外層に施したため、ケーブル外径は 150 mm を超える結果となっている。

表 2.4.2-1 実証ケーブルの諸元

項目	諸元
構造	三心一括型
定格電圧	66 kV
送電容量	200 MVA
導体構造	ビスマス系超電導線材(Cu 撚線フォーマに巻きつけ)
絶縁構造	PPLP+LN2、厚み 7 mm (PPLP 層)
シールド構造	ビスマス系超電導線材+Cu テープ線
断熱管構造	ステンレス製 2 重コルゲート管 真空多層断熱構造
シース	下シース (PVC) + 抑えテープ (ステンレス製) + 上シース (PVC)
計測線*	テフロンチューブ (φ 4 mm) 内に光ファイバー (2 本)、 4 心線 (2 本) 配置
長さ (出荷時)	ケーブル A 78 m ケーブル B 160 m

*ジョイント部温度計 2 ケ所用の計測線

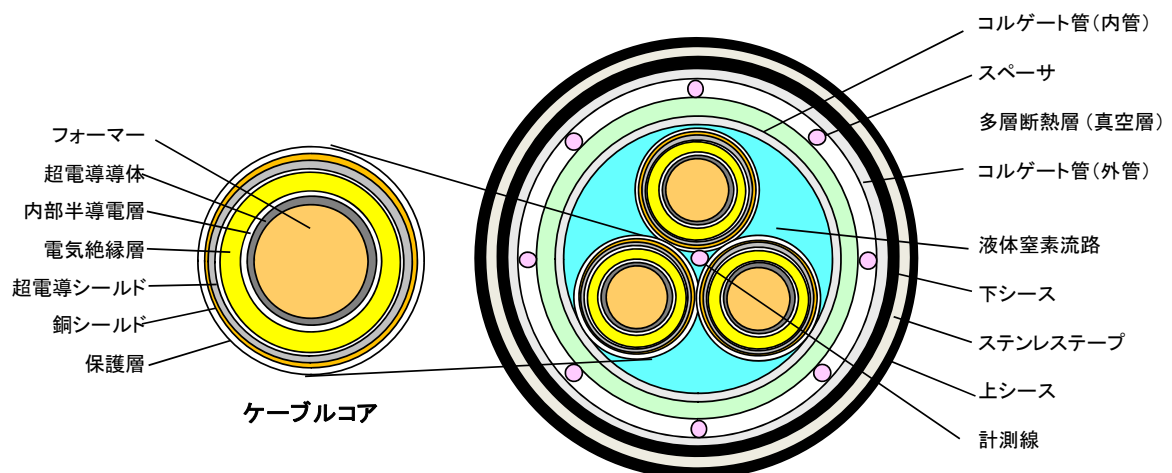


図 2.4.2-7 超電導ケーブル構造図

上記構造をもつケーブルを図 2.4.2-8 で示す工程にて製造を行った。

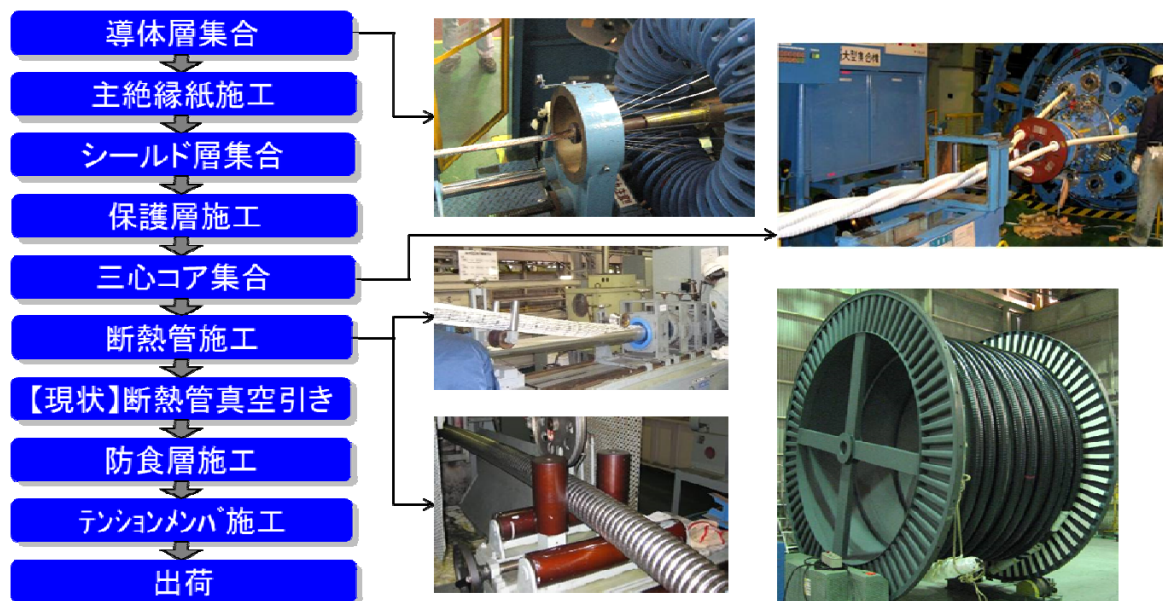


図 2.4.2-8 実証ケーブル製造工程

2.4.1 節で示した表 2.4.1-1 の試験項目に従い、製造したケーブルの出荷試験を実施した。主な検査・出荷試験の結果を以下にまとめる。いずれの試験結果も良好で、ケーブルが良品であることを確認した。

(a) 耐圧・気密試験

ケーブルの SUS コルゲート内管製造後、耐圧・気密試験を行った。

【サンプル】 全長

【試験条件】 試験圧力 0.75 MPaG ((設計圧力 0.5 MPaG+真空差圧 0.1 MPaG) × 1.25)
加圧ガス 窒素ガス、時間 10 分

【結果】 漏れなし。図 2.4.2-9、図 2.4.2-10 参照。

【参考法規等】 高圧ガス保安法



図 2.4.2-9 加圧直後の圧力計表示



図 2.4.2-10 10 分後の圧力計表示

(b) 真空リーク試験

ケーブルの SUS コルゲート内管製造後及び外管製造後にリーク試験を行った。

【サンプル】 全長

【試験方法】 断熱管を巻き付けたドラムに目張りをし、断熱管を真空に引いた状態で、ドラム～目張り間にヘリウムガスを 50 kPa×5 分注入、断熱管へのヘリウムガスリーク量をディテクターにて 3 時間測定

【結果】 真空リークなし (図 2.4.2-11 参照)
(10^{-10} Pam³/sec 以下の漏れ量)

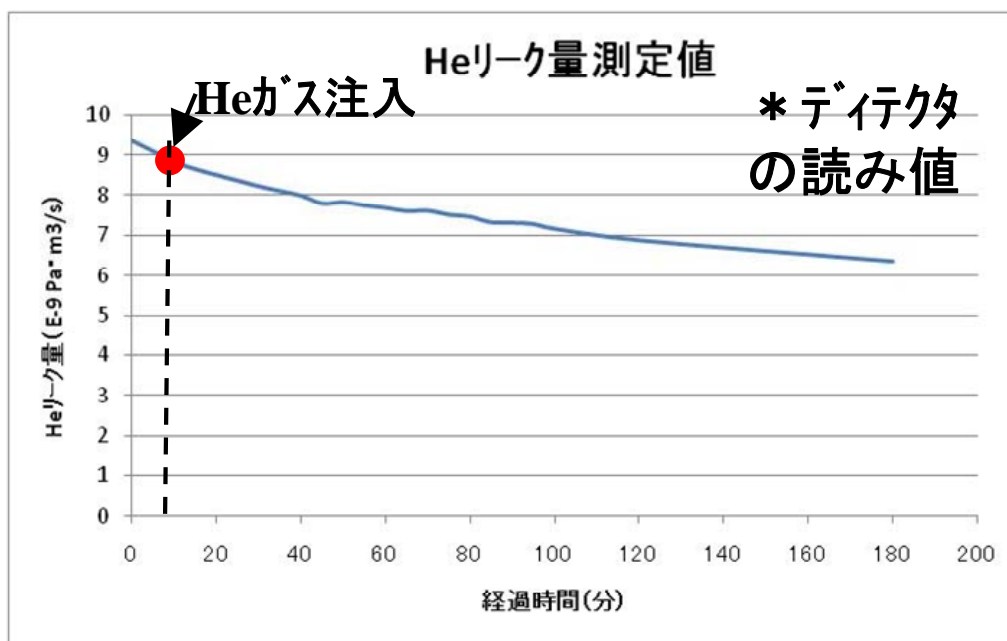


図 2.4.2-11 真空試験時のヘリウムガス漏れ量の変化 (外管製造後)

(c) 曲げ試験

【サンプル】 ケーブル 8 m (製造ケーブルから切取り)

【試験条件】 曲げ直径 18 D (D ケーブル外径) 以下の 2 往復曲げ

【結果】 曲げ直径 2.7 m (17 D 相当) にて 2 往復曲げを行い、
曲げ試験前後で臨界電流値に変化がないことを確認。(図 2.4.2-12)
また、解体検査で絶縁部に異常がないことを確認。



図 2.4.2-12 曲げ試験状況

(d) 臨界電流値測定

【サンプル】 三心コア 2.5 m (製造ケーブルから切取り)

【試験条件】 大気圧液体窒素中の測定
直流四端子法にて測定

臨界電流値の定義 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 相当の電圧が発生する電流

【結果】 導体：赤相 7090 A、黒相 7200 A、白相 7160 A

シールド：赤相 7650 A、黒相 7720 A、白相 7720 A

いずれも、設計値 (導体 6850 A、シールド 7330 A) 以上を確認した。各 I_c 測定結果を図 2.4.2-13、2.4.2-14 に示す。

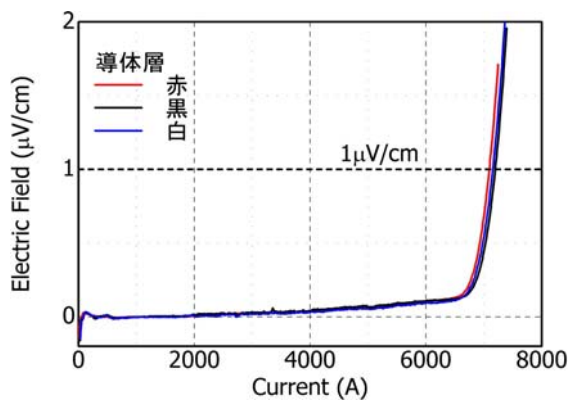


図 2.4.2-13 臨界電流測定 I-V 曲線 (導体)

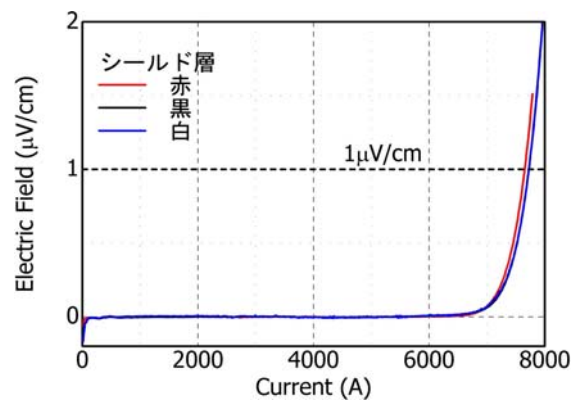


図 2.4.2-14 臨界電流測定 I-V 曲線 (シールド)

(e) 交流損失測定

【サンプル】 単心コア 2.5 m (製造ケーブルから切取り)

【試験条件】 大気圧液体窒素中の測定
交流四端子法にて測定

【結果】 測定値は、0.9 W/m/ph@2 kA であり、目標値 (1 W/m/ph) 以下であることを確認した。(図 2.4.2-15 参照)

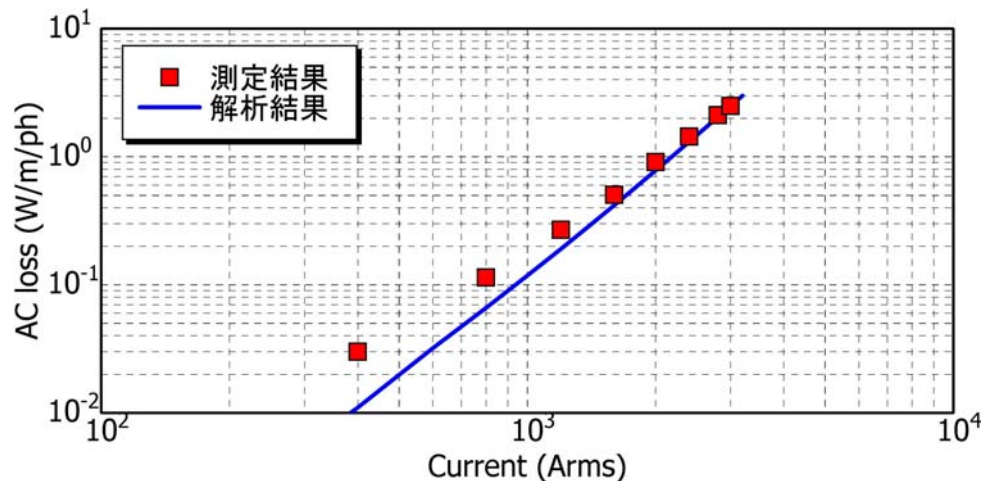


図 2.4.2-15 交流損失測定値の電流依存性

(f) 課電試験

【サンプル】 単心コア 6 m (曲げ試験後のサンプルより切取り)

【試験条件】 ① 商用周波耐電圧試験：対地 AC90 kV、3 時間

② 出荷耐電圧試験：対地 AC100 kV、10 分間

③ 雷インパルス耐電圧試験：対地 ±385 kV、3 回

【結果】 温度 77 K、圧力 0.15 MPaG の加圧液体窒素中で試験
いずれの試験も絶縁破壊を起こさず、良好であった。

①、②については、部分放電の発生無しを確認。

(ノイズレベル 60 pC)

試験時の雷インパルス波形を図 2.4.2-16 に示す。

【参考規格】 JEC-3401 (2006)

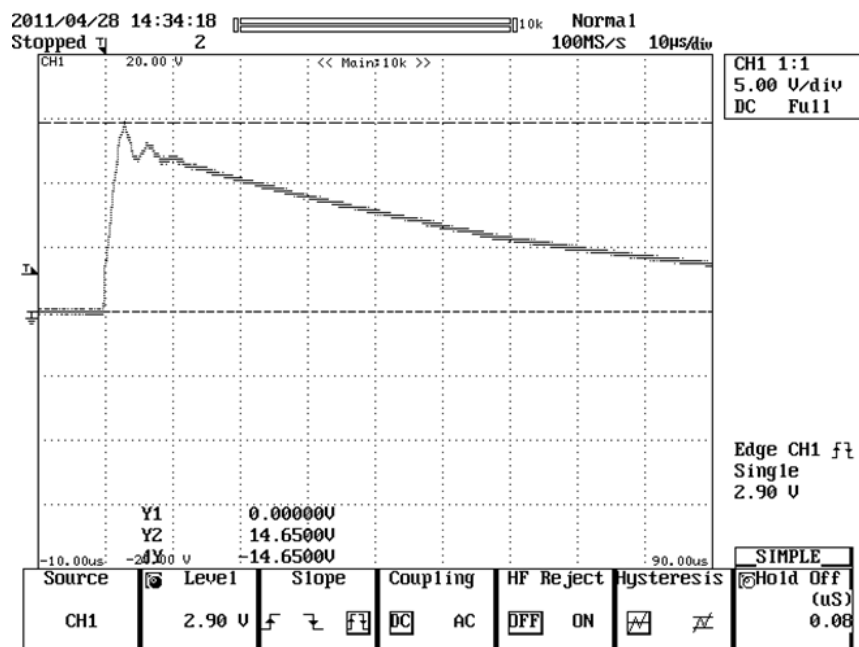


図 2.4.2-16 雷インパルス試験時の電圧波形

(g) 静電容量測定

【サンプル】 単心コア 6 m (曲げ試験後のサンプルより切取り)

【結果】 温度 77 K、圧力 0.15 MPaG の加圧液体窒素中で測定

静電容量 1.2 nF (設計 1.2 nF) ※km 当たりに換算

$\tan \delta$ 0.08 % (設計 0.1 %以下)

いずれも設計通りであることを確認した。

表 2.4.2-2 ケーブル出荷検査のまとめ

項目	試験条件、設計値	サンプル	試験結果	判定
耐圧力試験	試験圧力：0.75MPaG 使用ガス：N2ガス (設計圧力0.5+0.1)MPaG×1.25	ケーブル全長 (内管製造後)	試験圧力にて10分保持で圧力低下なし	合格
気密試験	試験圧力：0.6MPaG 使用ガス：N2ガス 設計圧力0.5+0.1MPaG	ケーブル全長 (内管製造後)	試験圧力にて10分保持で圧力低下なし	合格
Heリーク試験	測定感度レベルでリークが検出されないこと	ケーブル全長 (内管製造後及び外管施工後)	断熱管を巻き付けたドラムに目張りをし、ドラム～目張り間にHeガスを50kPa×5分注入、断熱管からのHeリーク量を3時間測定	<1E-8Pam ³ /s 良好
曲げ試験	180相当曲げでダメージなきこと	ケーブル(8m)	直径2.7m(16.9D相当)の両曲げ×2サイクルで、Ic低下なし 解体後の絶縁部他に異常なし	合格
Ic特性	導体 Ic>6850A/相 シールド Ic>7330A/相	三心コア(2.5m) (最終PVC工程後に採取)	導体(赤相) Ic=7090A 導体(黒相) Ic=7200A 導体(白相) Ic=7160A シールド(赤相) Ic=7650A シールド(黒相) Ic=7720A シールド(白相) Ic=7720A	良好(設計値以上を確認)
ACロス特性	<1W/m/ph@2kA	単心コア(2.5m)	測定値:0.91W/m/ph@2kA	合格
インダクタンス特性	設計値L=0.121μH/m	単心コア(2.5m)	測定値:0.124μH/m	良好
課電特性	AC:90kV/30時間 AC:100kV/10分 PD観測されないこと Imp ±385kV/3回	単心コア(6m) (曲げ試験後ケーブルより採取)	AC課電試験:90kV×30時間→良好 100kV×10分間→良好 (PD観測されず@感度60pC) Imp課電試験:±385kV/3回→良好	合格

(2) 中間接続部の構造及び出荷検査

中間接続部の諸元を表 2.4.2-3、構造を図 2.4.2-17 に示す。中間接続部は現地にて最終形態となるため、出荷検査としては各部の構造、寸法検査を実施し、いずれも良好であることを確認した。

表 2.4.2-3 中間接続部の諸元

項目	諸元
構造	三相一括型、ノーマルジョイント型
サイズ	長さ 4600 mm、外径 φ400 mm

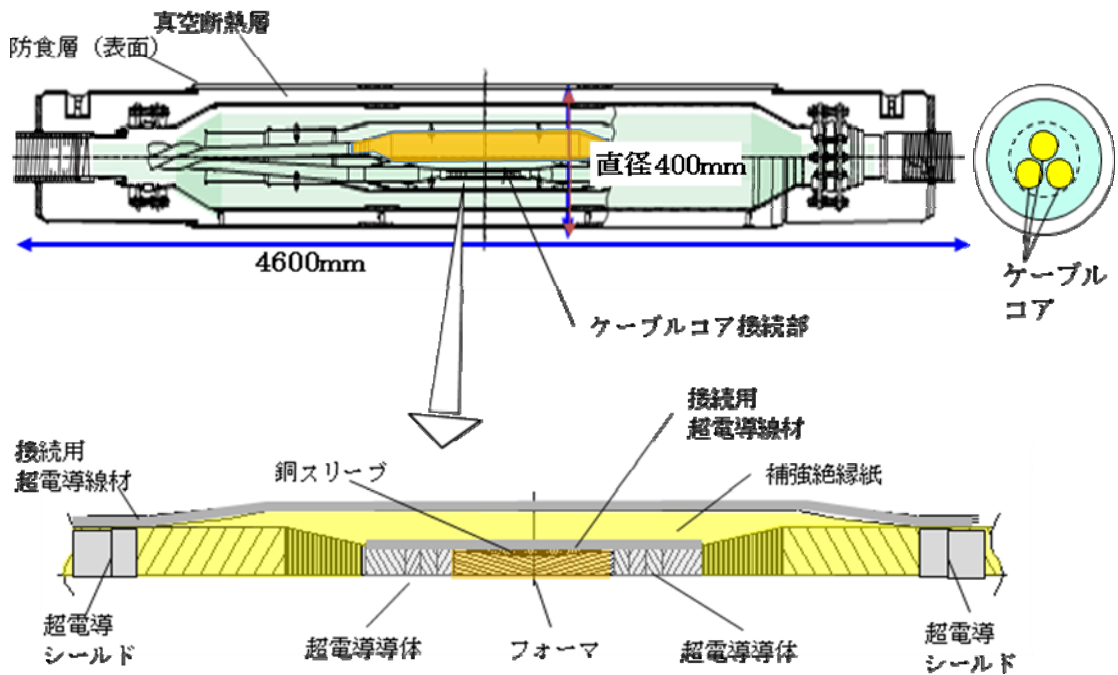


図 2.4.2-17 中間接続部構造

(3) 終端接続部の構造及び出荷検査

終端接続部の諸元を表 2.4.2-4、構造を図 2.4.2-18 に示す。

表 2.4.2-4 終端接続部の諸元

項目	諸元
構造	気中終端接続箱（三相一括型用）
碍子	B-1452 型
ブッシング	コンデンサーコーン型 FRP ブッシング 内部に 2500 SQ 電流リードを含む
耐震特性	水平荷重 0.3 G、垂直荷重 0.15 G の振動に耐える設計
サイズ	長さ 5580 mm、幅 5100 mm、高さ 4820 mm、

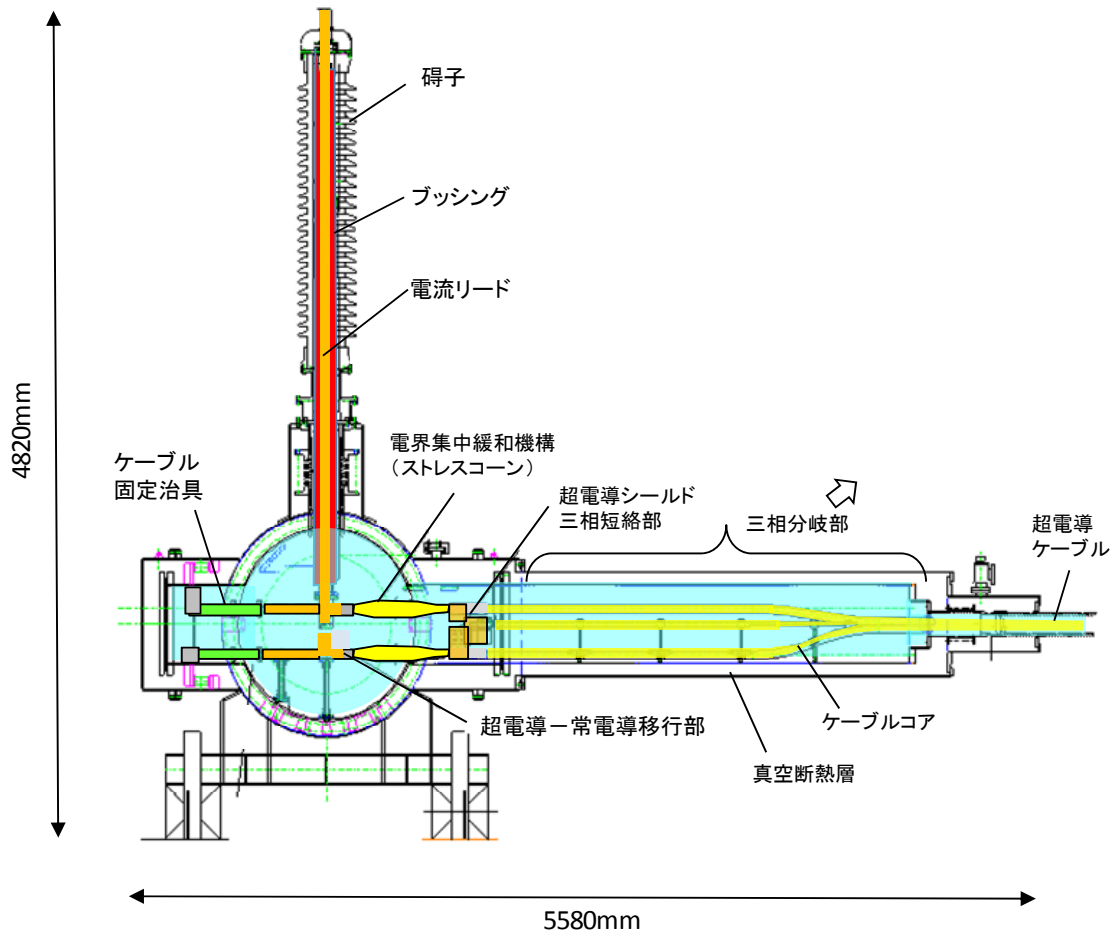


図 2.4.2-18 終端接続部構造

出荷検査については、端末容器とブッシングとを組み合わせ、下記の部品レベルでの試験、検査を行った。

(a) 耐圧力試験

【サンプル】 端末容器単体

【試験条件】 試験圧力 1.26 MPaG、15 分間

(設計圧力 0.9 MPa+真空差圧 0.1 MPa) ×1.25

【結果】 もれなし

(b) 課電試験

【試験条件】 出荷耐電圧試験：対地 AC120 kV、10 分間

【結果】 温度 79 K、圧力 0.3 MPaG の加圧液体窒素中で試験
絶縁破壊を起こさず、良好であった。

その他、部品については構造、寸法検査を実施し、良好であった。

2.4.2-4 ケーブルシステムの建設工事

(1) 工事概要

実証場所である旭変電所内に、66 kV、200 MVA 級の三心一括型超電導ケーブルシステムの建設工事を行った。システムの構成概要と配置形態を、表 2.4.2-5 と図 2.4.2-19 に示す。

表 2.4.2-5 超電導ケーブルシステム構成概要

システム	概要	備考
超電導ケーブル	66 kV/200 MVA 級、三心一括型超電導ケーブル 長さ 78 m と 160 m の 2 本 管路布設（地上布設＋埋設部）	ケーブル A (78 m) ケーブル B (160 m)
中間接続部	66 kV/200 MVA 級、三相一括型中間接続部、1 基 長さ 4600 mm×直径 φ 400 mm 地上布設	
終端接続部	66 kV/200 MVA 級、三相一括型気中終端接続部 2 基 長さ 5560 mm×幅 5100 mm×高さ 4820 mm 地上布設	
キュービクル (6kV 受電盤)	冷却システム、監視盤、工事用・試験用機器等へ電力を供給する。 一次側受電：6.6 kV/400 kVA 二次側容量：変圧器 6.6 kV/200 V, 300 kVA×2 変圧器 6.6 kV/100-200 V, 75 kVA×1	
監視装置	監視盤：ケーブル、冷却システムの測定データ（温度、圧力、流量等）を収集、記録し、予めきめられた閾値を越えた場合、所定の警報を発する。 監視カメラ：超電導ケーブル、冷却システムの外観を撮影	
冷却システム	超電導ケーブル、終端・中間接続部を液体窒素にて冷却するシステム	※冷却システム側の建設対象工事
冷却接続配管及び予冷機	・超電導ケーブルと冷却システムを結ぶ、液体窒素用冷却配管 ・ケーブル初期冷却時に用いる予冷機	

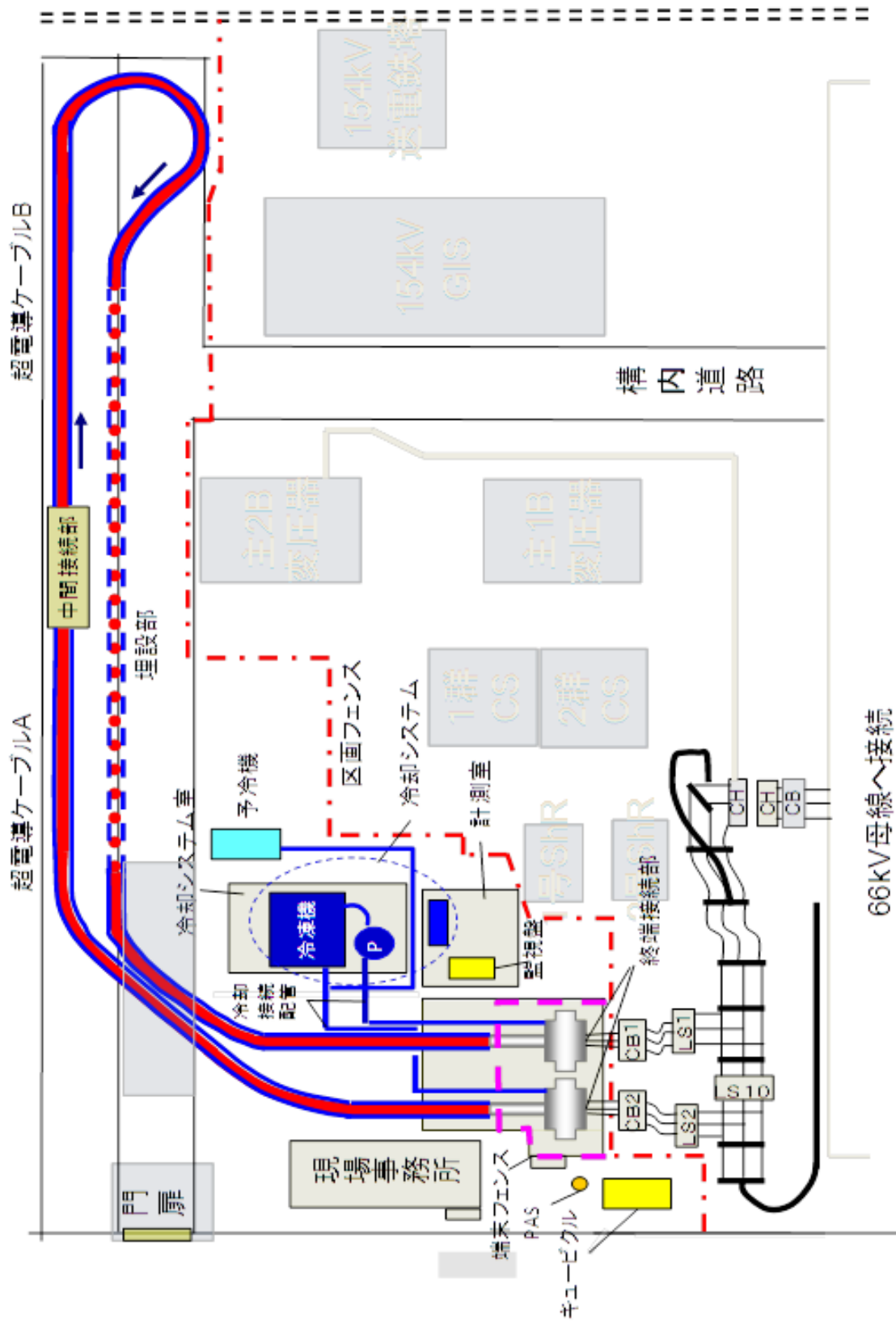


図 2.4.2-19 超電導ケーブルシステム配置図

具体的な工事内容は、次の項目に分かれる。各工事の概要を以下に示す。

(a) 電源配線関連工事

冷却システムや監視盤等に電力を供給するための6 kV受電設備(キュービクル、PAS)の設置及び冷却システム等への配線工事

(b) 超電導ケーブル布設準備工事

超電導ケーブルを引き入れる管路及び管路支持架台の設置

(c) 超電導ケーブル布設工事

所定の仕様を満足した超電導ケーブルの管路への引き入れ

(d) 中間接続部、終端接続部施工

下記の組立施工を実施

三相一括型の中間接続部1基、気中終端接続部2基

(e) 冷却接続配管工事

別途前川製作所が設置した冷却システムと超電導ケーブル端末部とを結ぶ冷却配管、予冷機及び冷却配管の設置。

(f) 警報システム設置工事

超電導ケーブル、冷却システムを状態監視する監視盤、変電所制御室との信号線配線、及び監視カメラの設置等。

(g) 付帯工事

超電導ケーブル端末の充電部を囲む端末フェンス、通行のためのステップやスロープの建設、酸欠メータの取付、及び部分放電測定装置の据付け、等。

(2) 工事期間

表 2.4.2-6 工程表 (平成 22 年 8 月～平成 24 年 11 月)

工事項目	平成22年					平成23年												平成24年												
	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
(1)電源配線関連 工事	■																													
(2)超電導ケーブル 布設準備工事						■																								
(3)超電導ケーブル 布設工事																														
(4)中間接続部、終 端接続陪施工																														
(5)冷却接続配管工 事																														
(6)警報システム設 置工事																														
(7)組合せ確認試験																														
(8)付帯工事						■																								
(9)竣工図書作成																														

(3) 電源配線工事

(a) 受変電設備工事

- ・屋外キュービクルの設置 (図 2.4.2-20)
- ・仮設電柱上へPAS の設置及び、PAS からキュービクルまでの電源線接続 (図 2.4.2-21)

表 2.4.2-7 キュービクル諸元

一次側受電容量	3φ3W 6.6 kV/400 kVA
二次側容量	3φ3W 変圧器 6.6 kV/200 V (300 kVA) × 2 台 1φ3W 変圧器 6.6 kV/200-100 V(75 kVA) × 1 台

(b) ケーブル配線工事

- ・工事事務所の分電盤設置 (図 2.4.2-22)
- ・ジョイント、端末エリアでの電力使用のための分電盤設置 (図 2.4.2-23、2.4.2-24)
- ・キュービクル、冷却システム間トラフの敷設 (図 2.4.2-25)
- ・キュービクルから各分電盤までの配線 (図 2.4.2-26、図 2.4.2-27)

(c) 二次側配管配線設備工事

- ・工事事務所建屋エアコン室外機の電源配管配線
- ・冷却システム建屋酸欠センサーの電源配管配線
- ・計測室酸欠警報盤、監視盤、冷却システム制御盤、換気ファン、エアコン室外機の各電源の配管配線工事

(d) 確認試験結果

表 2.4.2-8 確認試験結果

機器	試験内容	試験結果	判定	
6 kV ケーブル	外観点検	異常なし	良	
	絶縁抵抗測定	対地一括：1000 V,		1500 MΩ
		シース対地：500 V		100 MΩ
	絶縁耐力試験 (10350 V-10 分)	異常なし		
PAS	外観点検	異常なし	良	
	絶縁抵抗測定 1000 V メガー (相間、線間、対地一括)	相間：2000 MΩ 同相極間：2000 MΩ 対地一括：1500 MΩ		
	絶縁耐力試験 (10350 V-10 分)	異常なし		
	開閉動作試験	異常なし		
6 kV Cub	外観点検	異常なし	良	
	絶縁抵抗測定 (主回路対地一括：1000 V)	相間：2000 MΩ 同相極間：2000 MΩ 対地一括：1500 MΩ		
	主回路抵抗測定	異常なし		
	絶縁耐力試験 (10350 V-10 分)	異常なし		
	開閉動作試験、表示試験	異常なし		
継電器 OCR	外観点検	異常なし	良	
	動作値・動作時間	整定通り		
	シーケンス・表示試験	異常なし		
継電器 SOG	外観点検	異常なし	良	
	動作値・動作時間・位相特性	整定通り		
	シーケンス・表示試験	異常なし		

図 2.4.2-20
キュービクル据付

図 2. 4. 2-21
PAS 設置
(敷地外の 6kV から
PAS への配線除く)



図 2. 4. 2-22
工事事務所分電盤



図 2. 4. 2-23
中間接続部用
工事分電盤



図 2.4.2-24
終端接続用
工事分電盤



図 2.4.2-25
冷却システムーキュー
ービクル間トラフ



図 2.4.2-26
各分電盤までの配線
状況 (冷却システム室
南側)



図 2.4.2-27
各分電盤までの配線
状況 (冷却システム室
と計測室の間)



(4) 超電導ケーブル布設準備工事

(a) 超電導ケーブル用管路布設

- ・ケーブル布設ルートに基づき、表 2.4.2-9 の仕様の管路を、図 2.4.2-28 に示すレイアウトで設置。一部埋設部を含むため、掘削工事を実施。
- ・管路布設状態を図 2.4.2-29、埋設部の管路布設状況を図 2.4.2-30 に示す。

表 2.4.2-9 管路サイズ等スペック

区分	材質	サイズ	長さ
ケーブル A 用管路	PFP	内径 ϕ 175 mm	61.64 m
ケーブル B 用管路	PFP	内径 ϕ 175 mm	143.25 m

・管路支持方法

管路固定架台にて支持。支持間隔は 1 m を基本とした。

・架台の接地

管路固定架台については、接地線 (38 SQ) にて変電所構内の接地メッシュに接続した。取り付けの一例を図 2.4.2-31、図 2.4.2-32 に示す。

(b) 中間接続部基礎工事

幅 3.5 m × 長さ 10.3 m × 厚み 0.3 m のコンクリート基礎の設置。

図 2.4.2-33 参照。

(c) 仮設道路の設置

地表配管された管路を、上越しするための仮設道路を設置。

図 2.4.2-34 参照。

(d) 終端接続部施工ハウス設置・撤去

図 2.4.2-35 に示す施工用ハウスの設置、撤去の実施。

(e) 中間接続部施工ハウス設置・撤去

図 2.4.2-36 に示す施工用ハウスの設置、撤去の実施。

図 2.4.2-28
管路布設レイアウト

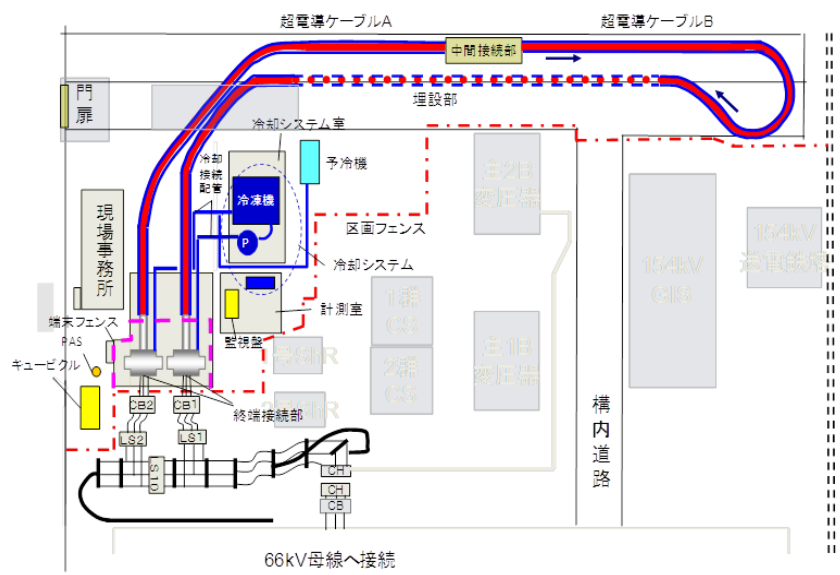


図 2.4.2-29
管路布設状況



図 2.4.2-30
埋設部の管路布設状況



図 2.4.2-31
端末 A 立ち上りの
の管路固定状況
(1)

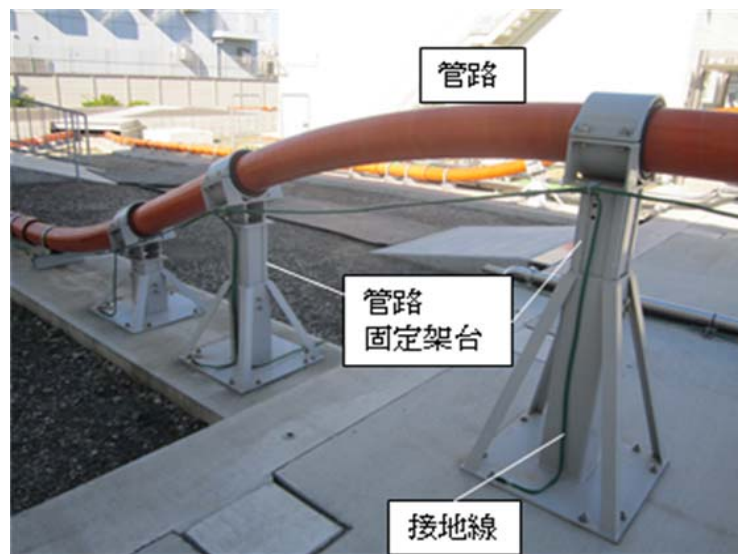


図 2.4.2-32
端末 A 立ち上りの
の管路固定状況
(2)



図 2.4.2-33
中間接続部基礎



図 2.4.2-34
仮設道路



図 2.4.2-35
終端接続部組立
用ハウス



図 2.4.2-36
中間接続部組立
用ハウス



(5) 超電導ケーブル布設工事

超電導ケーブルはドラムに巻かれ、トレーラーにて大阪の工場から旭変電所に輸送された。その後、ドラムは中間接続部予定位置付近に設けられたアンダーローラー上に設置され、ケーブル A、ケーブル B は、ともにジョイント側の管路口から、端末側に配置したウィンチ及び途中に配置したボールローラにて、管路に引き入れた。（図 2.4.2-37、図 2.4.2-38、図 2.4.2-39 参照）

引き入れ張力は、最大 1.3 ton と、許容張力 2 ton を超えない範囲であった。布設時のケーブル張力を図 2.4.2-40(a)（ケーブル A）、図 2.4.2-40(b)（ケーブル B）に示す。なお、ケーブルシールド層、ブッシング、ケーブル補強紙部、及び端末容器の接地については、接地箱内でまとめて変電所メッシュに接続した。

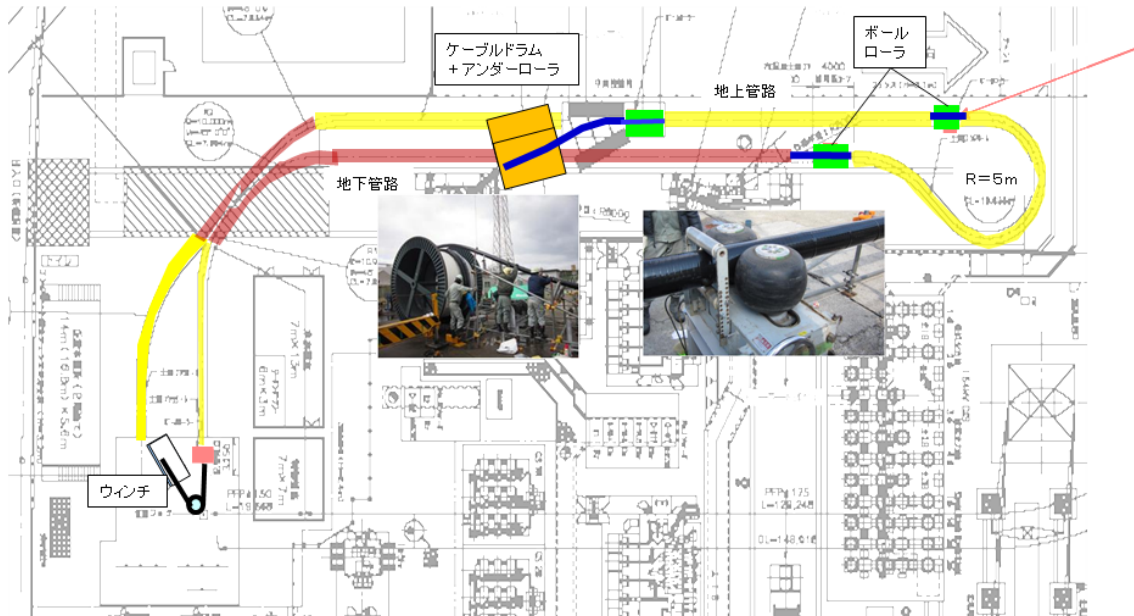


図 2.4.2-37 超電導ケーブル布設レイアウト



図 2.4.2-38 ケーブル布設状況（アンダーローラー側）

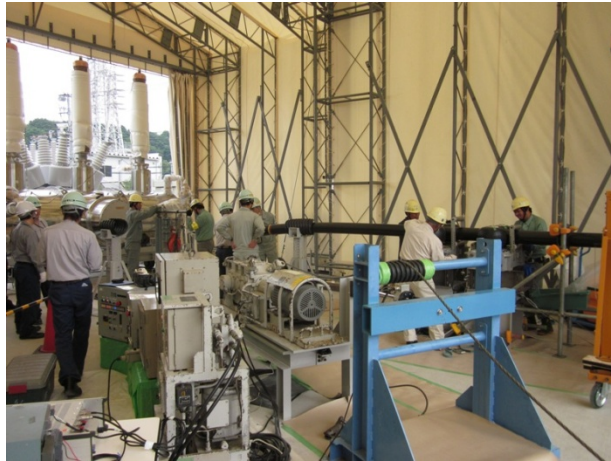


図 2.4.2-39 ケーブル布設状況（ウィンチ側）

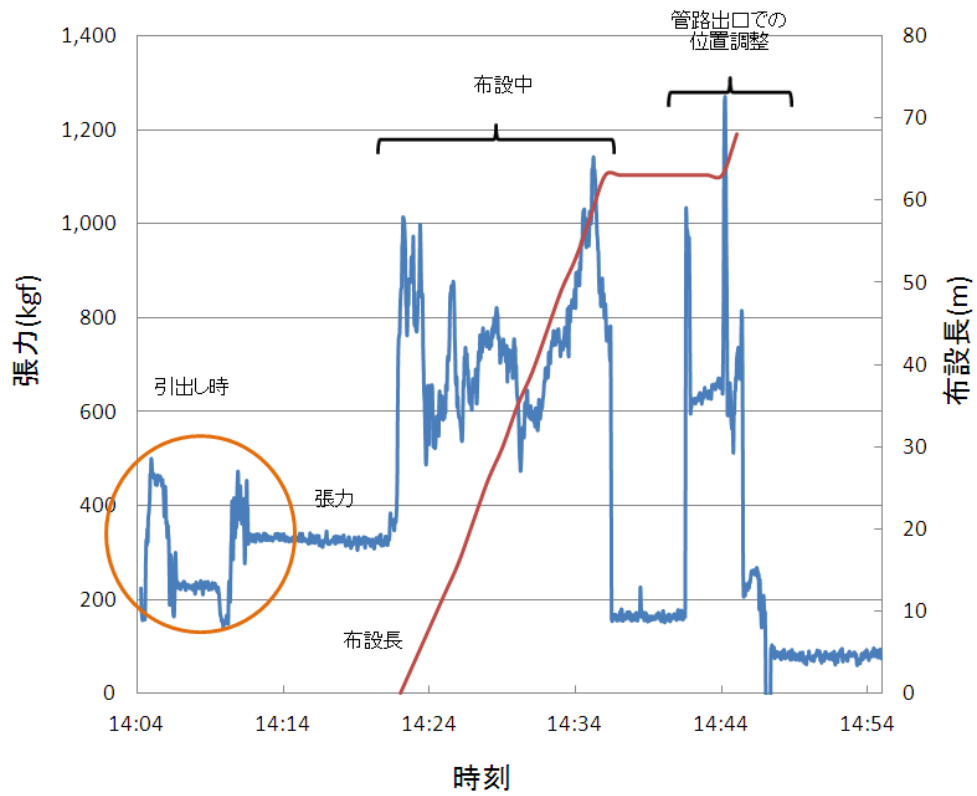


図 2.4.2-40(a) ケーブル A 引き入れ時の張力

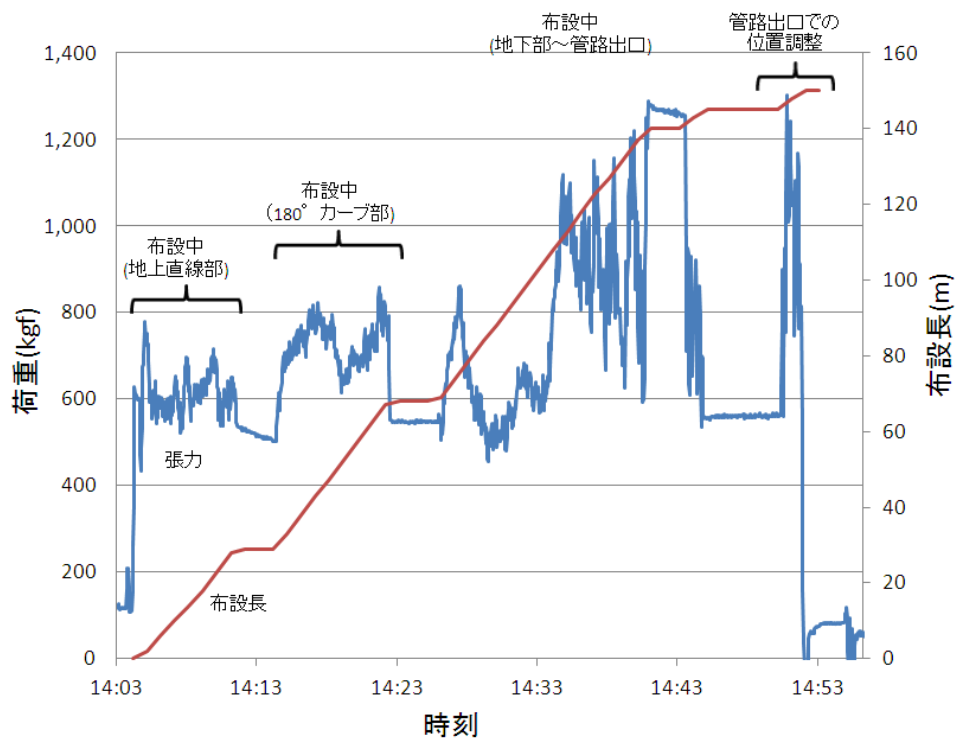


図 2.4.2-40(b) ケーブル B 引き入れ時の張力

(6) 中間接続部、終端接続部組立工事

中間接続部の組立工事工程については、中間接続部においては表 2.4.2-10、終端接続部においては表 2.4.2-11 の工程及び管理ポイントをもとに施工を行い、予定通り終了することができた。

表 2.4.2-10 中間接続部組立工程と管理ポイント

No	ブロック工程	主な施工内容	管理ポイント
1	組立準備	作業室スペース確認、レール確認	
2	ケーブル端部処理	真空槽等の端部部品挿入 切断位置確認～コア切断	切断位置
3	ケーブル導体接続	導体接続スリーブの圧着 導体ブリッジHTS線材取り付け 加熱(半田モールド)	圧縮力 超電導線取扱い 温度管理
4	補強絶縁紙巻き	補強絶縁紙巻き	形状
5	電界シールド処理	ケーブル部遮蔽処理	
6	ケーブルシールド接続	シールドブリッジ取り付け 加熱(半田モールド) ケーブル銅ダミー層接続処理	超電導線取扱い 温度管理
7	計測線処理	光ファイバ接続、温度計取り付け	位置確認
8	窒素槽組立	窒素槽組立、溶接 窒素槽気密試験	溶接管理 気密性
9	真空槽組立	真空断熱材取付 真空槽組立、溶接	溶接管理
10	容器ベーキング	加熱・真空引き	真空度
11	防食処理	防食巻き付け処理	



3.ケーブル導体接続



4.ケーブル導体接続



8.窒素層組立



9 真空層組立

表 2.4.2-11 中間接続部組立工程と管理ポイント

No	ブロック工程	主な施工内容	管理ポイント
1	事前準備	作業用テント組立、レール布設	
2	ケーブル部組立準備	容器・部品の挿入	部品の順番
3	三相分岐処理	三心コア撚り戻し、相合わせ	相の確認
4	ケーブルコア切断	位置確認、ケーブルコア切断	切断位置
5	シールド層処理	保護層、Cuシールド層の除去 超電導シールド層処理	超電導線取扱 形状
6	補強絶縁紙巻き	補強絶縁紙巻き 遮蔽処理	
7	導体処理	導体層の処理 導体接続金具の圧縮・取り付け 半田流し込み	圧縮力 挿入半田量(
8	シールド接続金具の接続	位置固定 半田流し込み	挿入半田量
9	導入部組立	サポート金具の取り付け	
10	ケーブル部・容器組立	容器の据付、ケーブル部との勘合	
11	容器内組立、配線	三相短絡 電流リード、高圧シールド組立 計測線、接地線取出し	健全性
12	液体窒素容器の組立	液体窒素容器の組立・溶接	溶接管理
13	液体窒素容器耐圧試験	液体窒素容器の気密試験	気密性
14	真空容器の組立	真空断熱材の取り付け 真空容器の組み立て・溶接	溶接管理
15	容器ベーキング	加熱・真空引き	真空度

3.三相
分岐処理



6.補強
絶縁紙巻



14. 真空
容器組立



(7) 冷却接続配管工事

図 2.4.2-41 に冷却接続配管の概略図と予冷機の位置を示す。予冷機は、超電導ケーブルの冷却時にいきなり液体窒素で冷却されるのではなく、徐々に冷却されるように、タンクローリ等から供給された液体窒素をヒータによりガス化し、所定の温度に上昇させた低温ガスを作り、その低温ガスを超電導ケーブルに供給するものである。

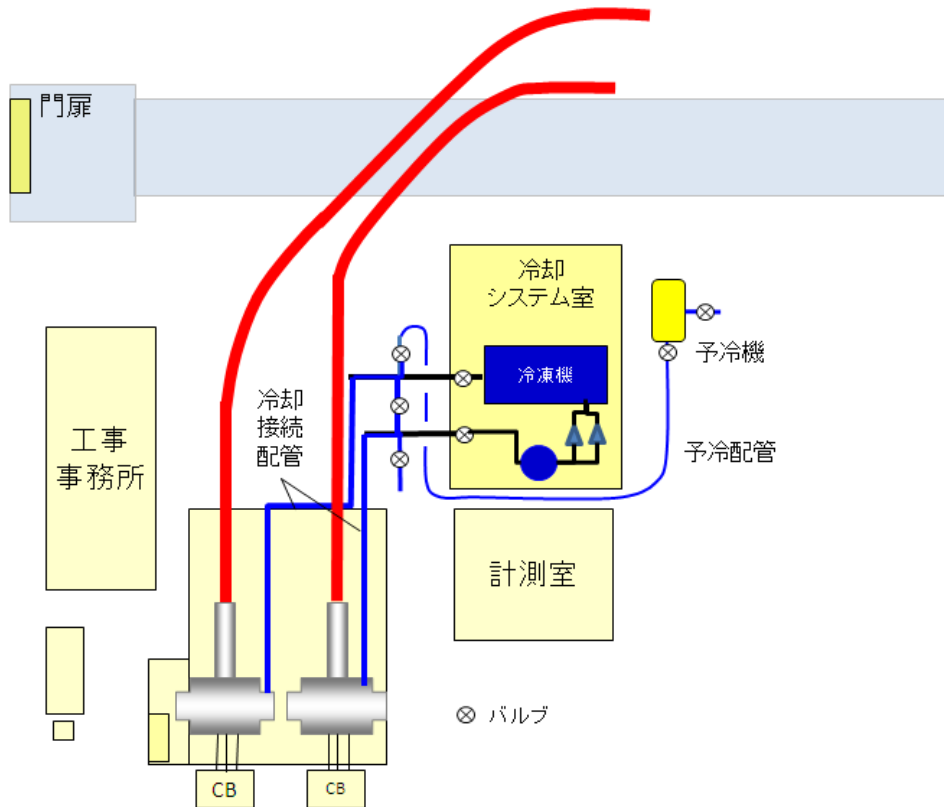


図 2.4.2-41 冷却接続配管と冷凍機の配置図

図 2.4.2-42
冷却システム外側の
冷却接続配管



図 2.4.2-43
端末 A 側の
冷却接続配管



図 2. 4. 2-44
 端末 B 側の
 冷却接続配管



図 2. 4. 2-45
 端末 B 側の
 冷却接続配管



(8) 警報システム設置工事

本警報システムは、ケーブルならびに冷却システムの運転状態を把握するため、各機器、センサー等の情報を一括収集し、記録／表示／伝送するとともに、システムで異常が発生した場合はそれを検知し、警報を発信するものである。

警報システムの主な構成機器およびそれぞれの機能を表 2. 4. 2-12 に示す。

表 2. 4. 2-12 警報システムの機器および機能

機器	主な機能
監視盤	<ul style="list-style-type: none"> ・ケーブルシステム情報、冷却システム制御盤情報（前川製作所担当）、UPS、酸欠モニター、監視カメラからの情報を集約し、運転状態をパネルディスプレイに表示する。 ・集約したデータの記録及び東京電力研究所、住友大阪製作所へ転送する。

	<ul style="list-style-type: none"> ・集約したデータから、装置の異常を判定し、警報を発信する。 ・警報は、重故障と軽故障に分けられ、重故障の場合は、旭変電所制御室内の超電導ケーブル IF 盤に重故障信号が送られる。軽故障の場合は、上記 IF 盤には信号は送られないが、超電導関係者の携帯電話等に警報が発信される
無停電電源装置 (UPS)	<ul style="list-style-type: none"> ・監視盤、冷却システム制御盤（前川製作所担当）を停電後 1 時間以上動作させる容量を有する。 ・停電発生時の動作状況を監視盤に送信する。
酸欠モニター	<ul style="list-style-type: none"> ・冷凍機室内の酸欠(酸素濃度 18%以下)を検出し、ブザー、パトライト、室外灯により周囲に知らせる。 ・計測結果を監視盤に送信する。
監視カメラ	<ul style="list-style-type: none"> ・ケーブルシステム、冷却システムの動画を監視カメラに送信する。
パネルディスプレイ	<ul style="list-style-type: none"> ・ケーブル・冷却システムの主な運転データ、推移グラフを表示

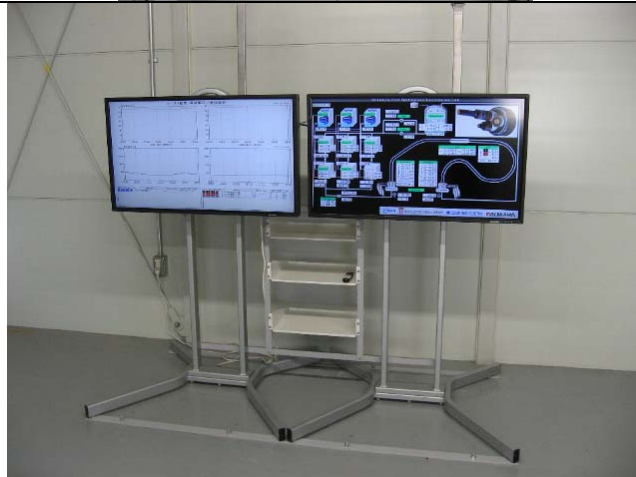
図 2.4.2-46
監視盤外観写真



図 2.4.2-47
監視盤内部写真



図 2.4.2-48
パネルディスプレイ
写真



2.4.2-5 冷却システムの建設

(1) 工事概要

実証場所である旭変電所内に、実証システムの冷却システムの建設工事を行った。冷却システムの構成概要を表 2.4.2-13 に冷却システム設置場所概観を図 2.4.2-49 に示す。

表 2.4.2-13 冷却システム構成内容

システム	概要
リザーバタンク	液体窒素温度変動による、体積変動分を吸収するタンク。 系内の圧力制御機能も持つ。
冷凍機	スターリング冷凍機 冷却能力：1kW@77 K、6 台使用
循環ポンプ	液体窒素を実証ケーブルへ供給し、循環させるためのポンプ。 2 台設置され、1 台のみでも循環可能な能力を持つ。
フィルタユニット	実証システム内の異物を捕らえるフィルタ。交換可能な構造としている。
模擬負荷ヒータ	冷却システムを切り離しての運転の際に負荷として利用するヒータ
冷却水系統	冷凍機の冷却水を供給するシステム。冷却塔・循環用ポンプで構成される。 通常は冷却塔 1 台で冷凍機 2 台へ供給するが、故障時に備え、凍機 3 台分へ供給可能な能力を持つ
動力盤	制御盤からの指令を受け、冷凍機、循環ポンプ、冷却水系統、ヒータを動作させる。 切り替えにより制御盤を介さず直接各機器の操作も可能。
制御盤	冷却システムの運転操作、状態監視、記録を行う。計測値が予め設定した閾値を超えた場合、所定の警報を発する。 無停電装置が接続されているため、停電時も状態監視が可能 ※無停電装置設置は 2.4.2-4 節に記載



冷却システム建屋



計測室

図 2.4.2-49 冷却システム設置場所外観

図 2.4.2-50 に計測室レイアウト、図 2.4.2-51 に冷却システムレイアウト、
図 2.4.2-52 に冷却システム建屋屋上の冷却塔のレイアウトを示す。

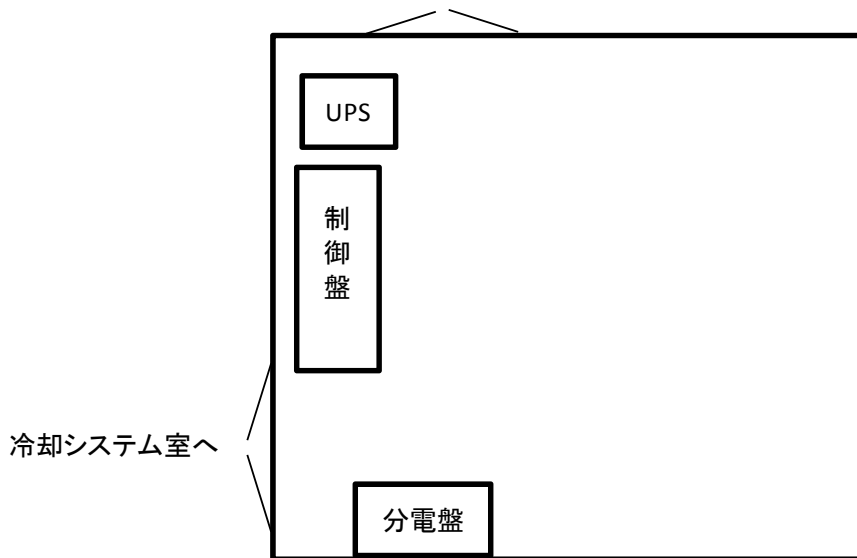


図 2.4.2-50 計測室レイアウト

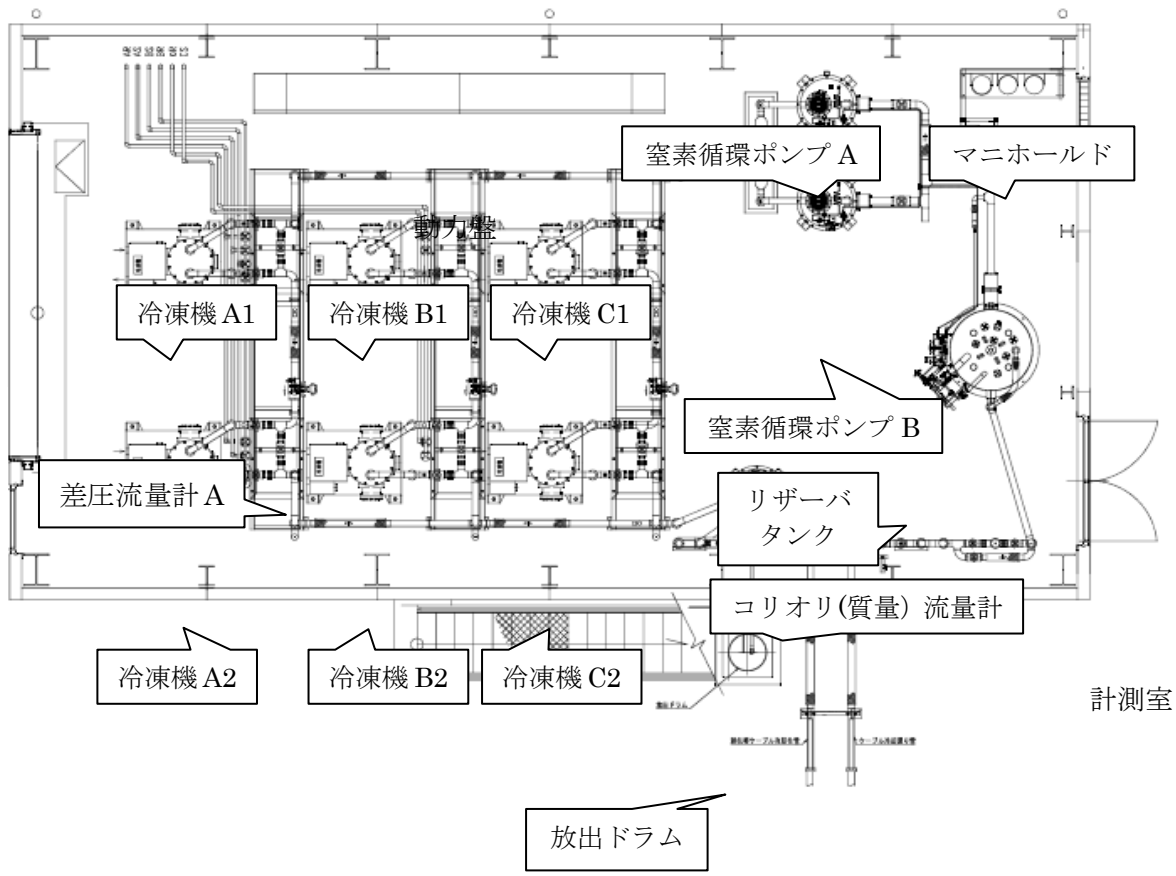


図 2.4.2-51 冷却システムレイアウト

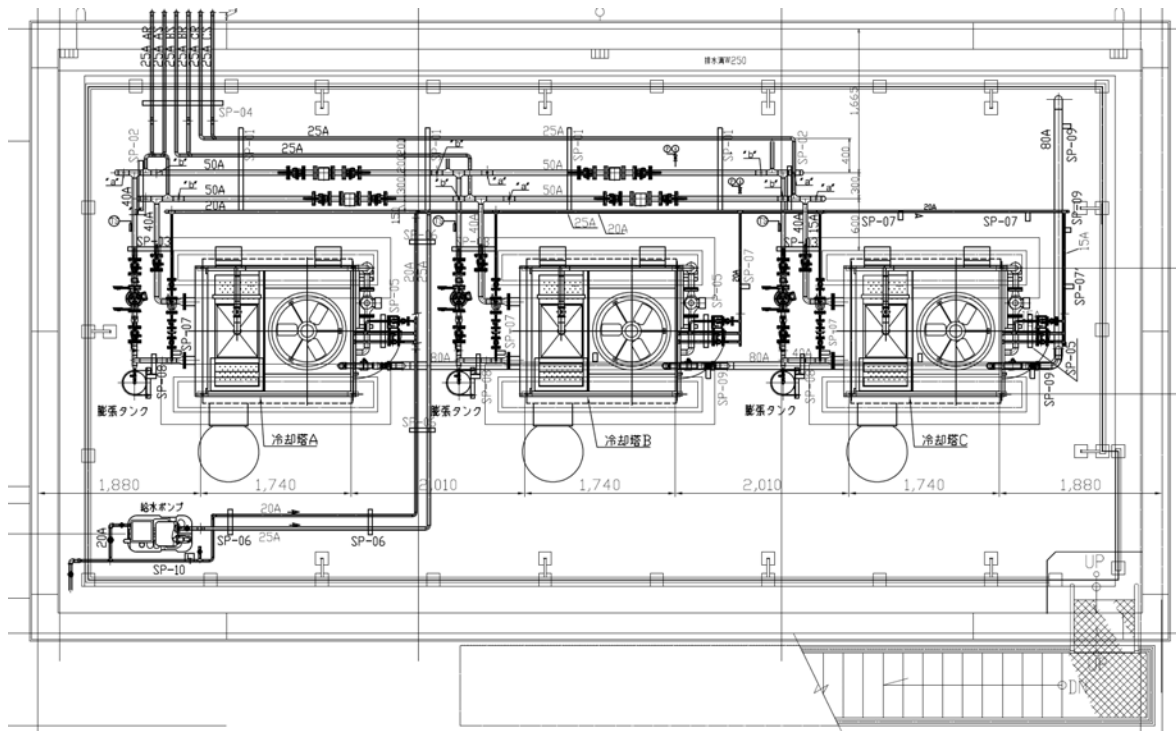


図 2.4.2-52 冷却塔レイアウト図

各工事の概要を下記に示す。

(a) 機器搬入・据付

リザーバタンク、循環ポンプ、冷凍機、質量流量計、冷却塔、動力盤・制御盤の搬入及び据付（循環ポンプ、冷凍機、質量流量計については仮置き）

(b) 冷却システム機器配管工事

液体窒素架台配管の設置、液体窒素配管の組み立て。

(c) 冷却水配管工事

冷却水系統の冷却塔 A 配管の設置。冷却塔 B 冷却塔 C

(d) 電気配線工事

動力盤・制御盤から機器、計装関係への配線設置。

(e) 運転前確認試験

外観確認、電気配線確認（導通チェック、絶縁抵抗確認）、シーケンス確認、気密試験、機器動作確認を実施。

(2) 工事期間

工事全体：平成22年12月～平成23年7月

表 2.4.2-14 工程表

	平成23年						
	1	2	3	4	5	6	7
機器搬入・据付	■	■					
冷却システム機器配管工事		■	■	■			
冷却水配管工事			■	■			
電気配線工事			■	■			
運転前確認試験				■	■	■	■

(3) 機器搬入・据付

冷却システム主要機器の搬入・据付工事を実施。

- ・ 動力盤及び制御盤の搬入、据付 (図 2. 4. 2-53)
- ・ リザーバタンク据付 (図 2. 4. 2-54)
- ・ 循環ポンプ据付 (図 2. 4. 2-55)
- ・ 冷凍機搬入、据付 (図 2. 4. 2-56)
- ・ 質量流量計据付
- ・ 冷却塔搬入、据付

図 2. 4. 2-53
制御盤据付



図 2. 4. 2-54
リザーバタンク据付



図 2.4.2-55
循環ポンプ据付



図 2.4.2-56
冷凍機据付



(4) 冷却システム機器配管工事

各機器を接続する、液体窒素配管及びケーブルへの接続配管の組み立て、安全弁等から屋外への窒素ガス放出配管の取り付けを実施。

- ・液体窒素架台配管の据付（図 2.4.2-57）
※冷凍機搬入前に実施
- ・冷却システム液体窒素配管組み立て（図 2.4.2-58）
- ・ケーブル接続配管（一部屋外配管）設置（図 2.4.2-59）
- ・屋外放出配管取り付け
- ・リザーバタンク～循環ポンプ間真空配管現地真空引き（図 2.4.2-60）

図 2.4.2-57
液体窒素配管架台据付



図 2.4.2-58
液体窒素配管組み立て

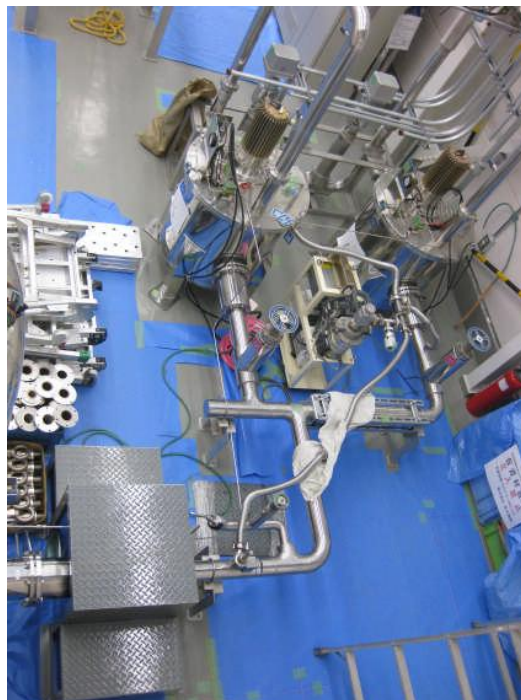


図 2.4.2-59
ケーブル接続配管設置



図 2.4.2-60

リザーバタンク～循環ポンプ
真空断熱配管現地真空引き



(5) 冷却水配管工事

屋上冷却塔周り配管と冷却システム建屋内の冷却水配管の設置を行った。

- ・ 屋上冷却水配管設置 (図 2.4.2-61)
- ・ 屋上～冷却システム建屋内配管設置 (図 2.4.2-62)
- ・ 冷却システム建屋内配管設置 (図 2.4.2-63)

図 2.4.2-61

屋上冷却水配管設置



図 2.4.2-62

屋上～冷却システム建屋内
接続配管設置



図 2.4.2-63

冷却システム建屋内配管設置



(6) 電気配線工事

各機器の動力線及び計装線、ラック、配管を設置

- ・ 冷却システム建屋内配線、ラック、配管設置 (図 2.4.2-64)
- ・ 計測室内配線、ラック、配管設置 (図 2.4.2-65)
- ・ 屋上配線、ラック、配管設置 (図 2.4.2-66)

図 2.4.2-64
冷却システム建屋内
配線、ラック、配管設置



図 2.4.2-65
計測室内配線、ラック設置



図 2.4.2-66
屋上配線、ラック、配管設置



(7) 運転前確認試験

初期冷却運転の前に、移設後の冷却システムに問題がないか動作確認等の試を実施した。表 2.4.2-15 に試験内容と結果を示す。表の結果より、各機器に問題なく正常に運転可能であることが確認された。

表 2.4.2-15 運転前確認試験結果

試験分類	試験名称	対象	簡易説明	判定	結果
構造	外観、構造試験	冷却システム 制御・計装盤、動力盤 冷却水システム	各機器の外観、据付状態を点検する。	○	目視確認、異常なし
電気	導通チェック	冷却システム 制御・計装盤、動力盤 冷却水システム	盤と構成機器間の接続を導通チェッカーまたはテスターを使用して行う。	○	各機器と構成機器間は指定どおり接続されていることを確認
	絶縁抵抗	冷却システム 制御・計装盤、動力盤 冷却水システム	各盤電源部の一次側充電部および、盤内を除く各動力回路(電動機を含む)の絶縁抵抗を測定する。	○	すべての測定点で判定条件である500V印加状態で10MΩ以上であることを確認
	シーケンス試験	制御・計装盤、動力盤	盤内の電気系統が展開接続図に基づいて構成され、内部機器類に接続の誤りがなく、正常に動作することを	○	それぞれの指令に対して、正常に動作することを確認した。また、通信系統に関しても正常であることを確認
耐圧・気密	耐水圧試験	冷却水システム	冷却水システムに設計圧力の1.5倍の水圧を印加する。	○	設定圧力の1.5倍である0.75MPaGの状態で規定値の10分間圧力の低下がないことを確認
	気密試験	冷却システム	冷凍保安則に準拠して冷却システムに窒素ガスを印加して行う。	○	系内圧力0.66MPaGで規定値の20分間圧力低下のないことを確認 また、発泡確認により漏れ無いことを確認
冷却水条件設定等	冷却水システム調整、条件設定	冷却水システム	ポンプ回転方向確認、フラッシング、補給水自動供給などの機能に関する設定を行う。	○	冷却水システムの動作、各機能の設定値を確認した。
	冷却水システム手動弁、電動弁確認	冷却水システム	冷却水システムの手動弁の健全性を確認し、電動弁が操作通りの動作を行うことを確認する。	○	手動弁、電動弁が正常に動くことを確認
	冷却水システム凍結防止ヒータ動作確認	冷却水システム／凍結防止ヒータ	冷却水システム凍結防止ヒータの動作を確認する。	○	ヒータが正常に動作することを確認
	冷却水流量確認	冷却水システム	各冷凍機の冷却水流量が通常時、故障時とも20L/分以上であることを確認する。	○	流量が20L/min以上で維持されることを確認
	散水ポンプ・冷却塔ファン動作確認	冷却水システム／散水ポンプ、冷却塔ファン	冷却塔の散水ポンプと冷却塔ファンが定格電流値以下で動作することを確認する。	○	散水ポンプ、冷却塔ファンが正常に動作することを確認
動作確認調整	手動弁、電動弁、電磁弁動作確認	冷却システム	手動弁の健全性確認と電動弁の動作確認及び電磁弁の動作確認を行う。	○	手動弁、電動弁が正常に動くことを確認
	循環ポンプ回転方向確認	冷却システム／循環ポンプ	循環ポンプAとBの回転方向が正しいことを確認する。	○	循環ポンプの動作に問題なく、回転方向も正しいことを確認した
	ヒータ動作確認	冷却システム／リザーバタンクヒータ、模擬負荷ヒータ	リザーバタンクヒータと模擬負荷ヒータが正常に動作することを確認する。	○	各ヒータが正常に動作することを確認
表示確認	圧力計表示確認	冷却システム／圧力計	窒素で加圧し圧力計、圧力センサーと校正済み圧力計と比較する。	○	測定値が誤差範囲内であることを確認
	温度計表示確認	冷却システム／温度計	Lakeshore社Pt側温抵抗体、CHINO製Pt-CO側温抵抗体、熱電対の温度表示を確認する。	○※	表示値が室温付近であり異常の無いことを確認 ※システム検証中に異常の発生した温度計については交換

○:合格 ×:不可

2.4.3 布設後のケーブル冷却試験

表 2.4.1-1 に定めた試験項目の内容に沿って、系統接続前の試験を実施した。試験項目と試験条件について、表 2.4.3-1 にまとめる。

表 2.4.3-1 系統接続前検証試験の内容

試験項目		試験内容	評価方法
気密試験		0.5MPaG-30 分間	圧力低下なきこと、リークなきこと
初期冷却試験	冷却中および冷却後	C, tan δ 測定 (AC 5kV 以下)	計算値との比較
		各部真空度測定	リークなきこと
		端末発生荷重 (コア張力)	予想値と比較
	冷却後	コアの動き (ジョイント部の動きで確認)	設計挙動範囲内のこと
冷却システム運転調整試験		冷却システム温度および圧力調整 & 追随性確認	所定範囲で追随・安定すること
熱損失測定 (無負荷時)		ケーブルシステム各部の熱損失測定 (ΔT 法)	設計値と比較
圧力損失測定		ケーブル両端での圧力差を測定する	
臨界電流 (I_c) 測定		各相コア超電導導体の I_c 測定	
絶縁抵抗試験 (メガー)		各相の高圧導体部と接地間の絶縁抵抗測定	絶縁抵抗に異常なきこと
竣工耐電圧試験		DC 152kV-10 分間	良好に課電できること
警報リレー確認試験		各警報リレー動作確認	警報が確実に発信されること
系統課電試験		系統電圧印加 (通電なし) -10 分間 部分放電 (PD) 測定	良好に課電できること PD 検出されないこと

2.4.3-1 初期冷却技術の検証

(1) 目的

超電導ケーブルシステムを窒素ガス徐冷、液体窒素貯液の手順を確認するとともに、ケーブルシステム貯液後、別途冷却した冷却システムとの接続、循環冷却立上げに至る手順を確認する。また上記作業における、冷却時間・消費液量の妥当性、ケーブルシステムの健全性(張力、 $C \cdot \tan \delta$ 、X線によるコア移動量など)を確認する。

(2) 冷却回路

図 2.4.3-1 に示す通りケーブルシステム(ケーブル、端末およびジョイントで構成)、冷却システムそれぞれを液体窒素冷却したのち接続し、ケーブルシステムの循環運転を立ち上げる。本節では、主に超電導ケーブルシステム側の初期冷却について述べる。

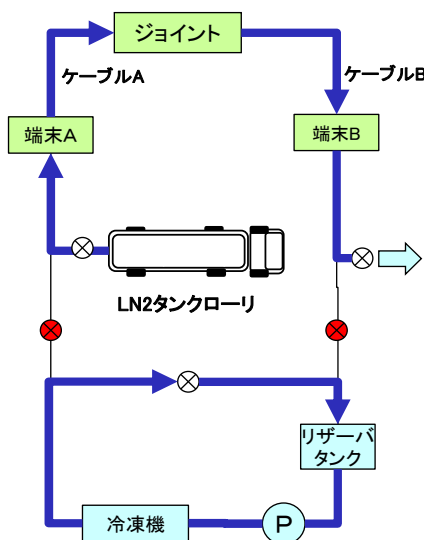


図 2.4.3-1 初期冷却試験回路 (装置全体)

(3) 冷却方法

図 2.4.3-1 のとおりケーブルシステムの冷却に必要な液体窒素はタンクローリにより供給される。タンクローリと超電導ケーブルの間には予冷・昇温器を設置し、液体窒素を気化させ、 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ の極低温ガスを生成したのちケーブルに導入し、第1段階、第2段階の冷却を実施し、急激な温度降下による各部の急な熱収縮を避けるようにする。極低温ガスによる冷却が完了したのちタンクローリから液体窒素を超電導ケーブルシステムに送出し、全体の貯液作業を実施する。

これまでの実績、ケーブルシステムの系の熱容量から推定される冷却時間、使用液体窒素量は以下の通りである。準備作業、予冷後の循環冷却以降を含め、初期冷却～循環冷却に至る作業日数は4日～5日と想定し、作業を実施した。

除冷 : 約 54 時間($-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$)

貯液 : 約 20 時間
 合計 : 約 74 時間 (約 3 日)
 使用液体窒素量 : 約 17,000 L (予想)

なお、タンクローリ使用(約 20,000 L、5 日間)に関しては「移動式製造設備」扱いとなるため、神奈川県庁に「一般保安規則・第 2 種貯蔵届け出」を実施した。

(4) 初期冷却試験結果 (第 1 回目)

2012 年 4 月 2 日より第 1 回目の初期冷却試験を実施した。ケーブル部の冷却作業については天候や張力管理などの関係で冷却停止期間が発生したため予定していた約 3~4 日よりも時間を要し、合計 9 日間であったが、無事液体窒素貯液を完了した。

その後冷却システムとの接続作業を実施し、同年 4 月 11 日より循環冷却運転に移行した。超電導ケーブルシステムの初期冷却に使用した液体窒素の総量は約 18,000 L となり、予想量 17,000 L とほぼ等しかった。初期冷却時のケーブルシステム各部の温度変化を図 2.4.3-2 に示す。ケーブルシステムの初期冷却が完了後、別途初期冷却を実施した冷却システムと接続し、循環冷却運転に移行した。

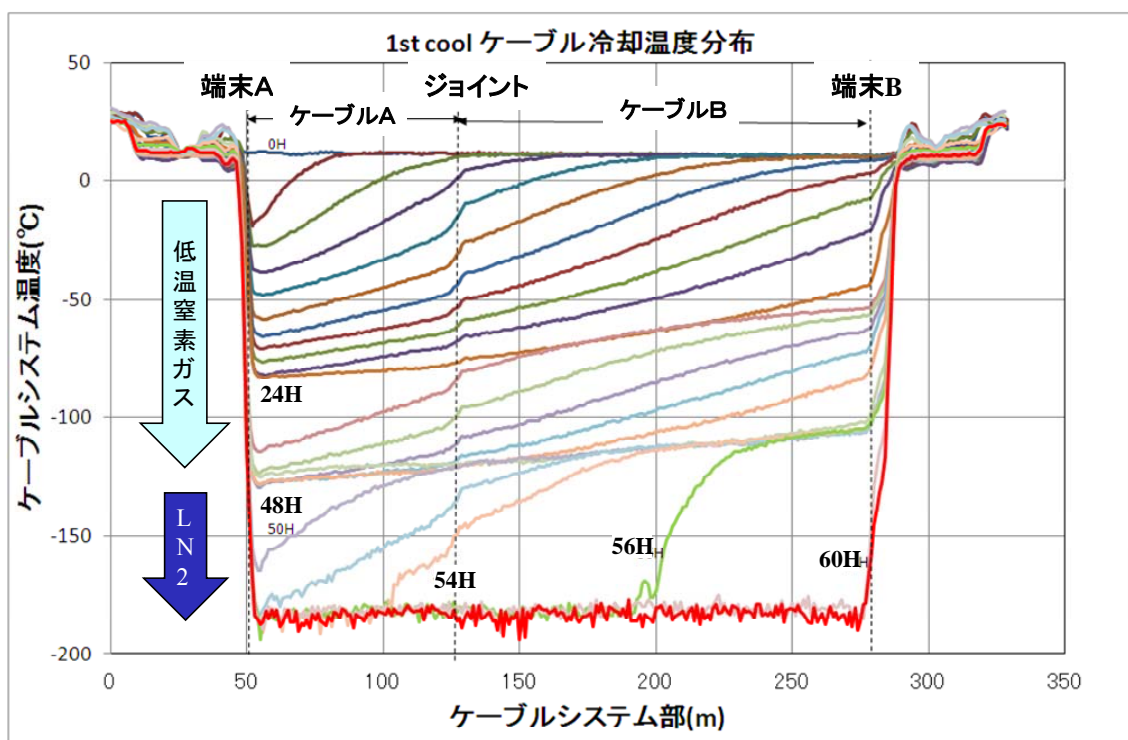


図 2.4.3-2 超電導ケーブルシステム初期冷却時の温度分布 (第 1 回目)

(5) 端末荷重解析

冷却時などに端末部に発生する荷重を計測するため、図 2.4.3-3 のように端末部と対地間にロードセルを設置した。初期冷却時の液体窒素貯液中、図 2.4.3-4 に示すように一時 B 端末側の荷重が 4 ton を超えたため、一時貯液を中断した、その後貯液を再開し、最終的には約 3 ton の荷重におさまった。なお、今回の液体窒素貯液は端末 A→ケーブル A→ジョイント→ケーブル B→端末 B の一方向で実施した。

端末 B の荷重と貯液の関係を解析したところ、図 2.4.3-1 において端末 B にケーブル B から液体窒素が流入した時点で荷重の増加が見られることがわかった。解析の結果端末 B については端末 A と異なり、ケーブル側より冷媒が流入し端末が貯液されることから、この冷却方向の影響により端末 B 側で端末 A と比較し大きな荷重が発生したと考えた。この解析結果を元に検討を実施し、次回初期冷却においては端末 B についても端末 A と同一の方向から貯液を実施するよう初期段階の冷却手順を見直した。



図 2.4.3-3 端末荷重測定用ロードセル

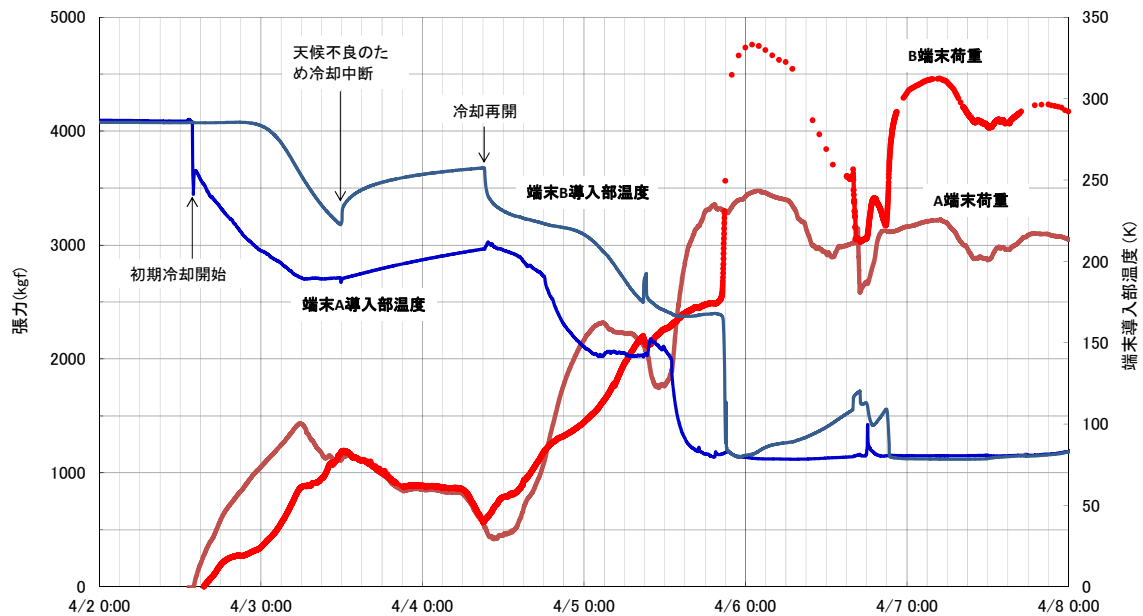


図 2. 4. 3-4 超電導ケーブルシステム初期冷却時の端末荷重変化 (第 1 回目)

(6) 冷却方法見直し

図 2. 4. 3-5 (a)～(d)の手順に初期冷却方法を見直した。ガス冷却までは第 1 回目冷却と同じく手順(a)のように端末 A→端末 B の方向に冷却を実施した。その後の液体窒素冷却において、まず手順(b)の通り端末 A のみを貯液し、完了したのち今度は端末 B のみの貯液を実施する。この際、図に示すとおり両端末への貯液方向は同一方向となるため、両端末ともに同じ冷却手順による熱機械力が発生することが期待される。手順(b)、(c)では端末部のそれぞれ約半分までの貯液を実施したのち手順(d)に切替え、端末 A から端末 B の一方向に対する貯液とした。手順(d)は第 1 回冷却と同じ方法である。

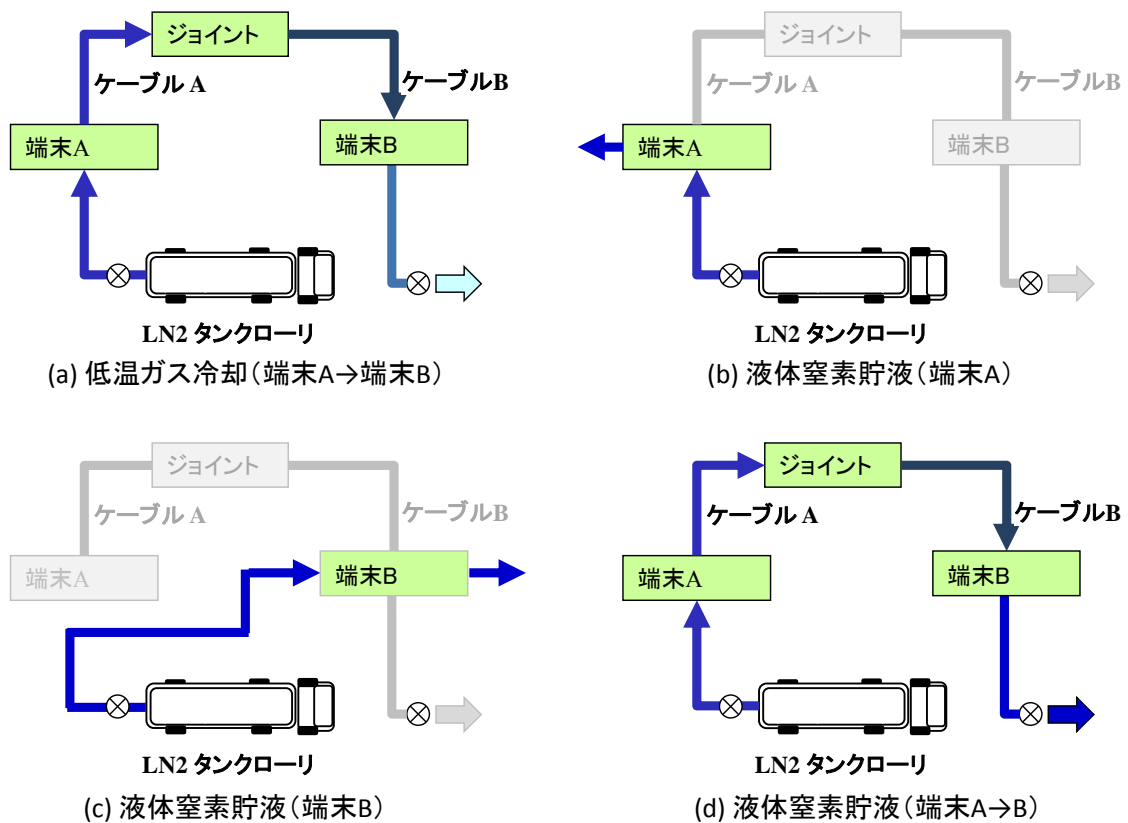


図 2. 4. 3-5 初期冷却方法の見直し (液体窒素貯液 手順 a~d)

(7) 初期冷却試験結果 (第 2、3 回目)

上記で検討した、初期冷却見直し後の第 2 回および第 3 回の冷却試験結果を以下に示す。第 2 回目の初期冷却時の温度分布を図 2. 4. 3-6 に、初期冷却時の端末荷重変化を図 2. 4. 3-7 に示す。A 端末側の荷重はこれまでと変わらず約 3 ton 程度であった。端末 B 側は前回の最大荷重約 4.8 ton から約 4 ton に低減され、冷却作業を中断することもなかった。これらの結果より初期冷却手順の見直しの効果が確認された。

図 2. 4. 3-8~図 2. 4. 3-9 には第 3 回目の初期冷却の様子を示す。ほぼ第 2 回初期冷却と同様の傾向であった。また、冷却に要した日数はそれぞれ約 3 日であり、予想された期間とほぼ一致した。

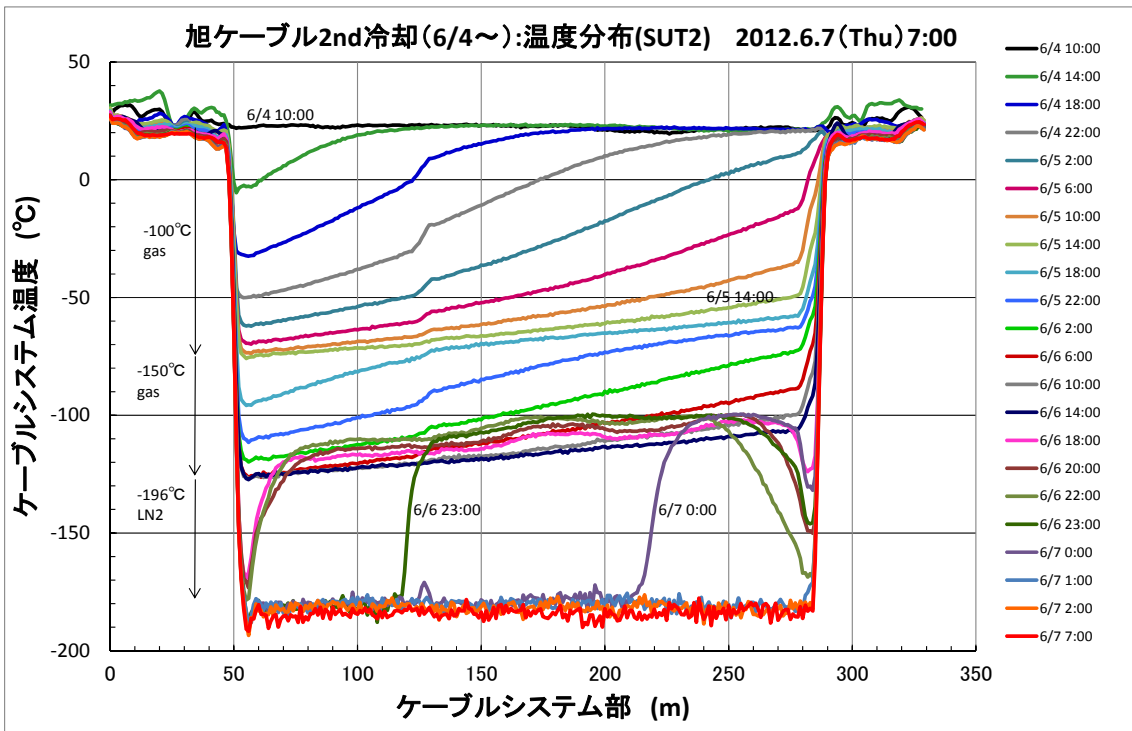


図 2.4.3-6 超電導ケーブルシステム初期冷却時の温度分布（第2回目）

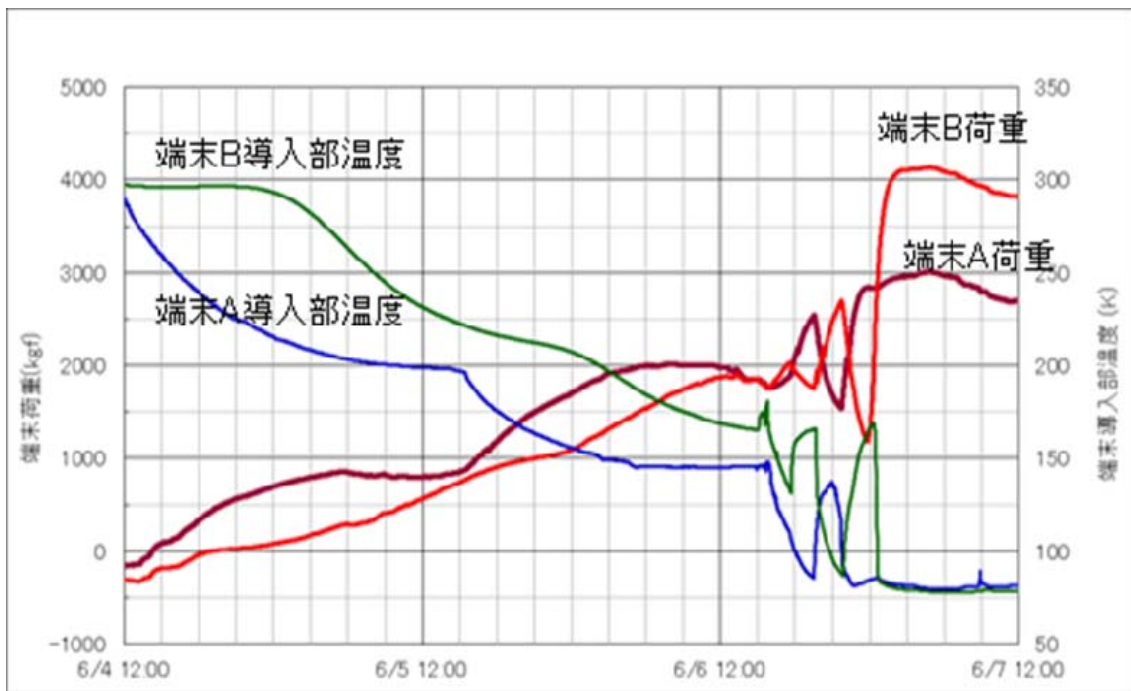


図 2.4.3-7 超電導ケーブルシステム初期冷却時の端末荷重変化（第2回目）

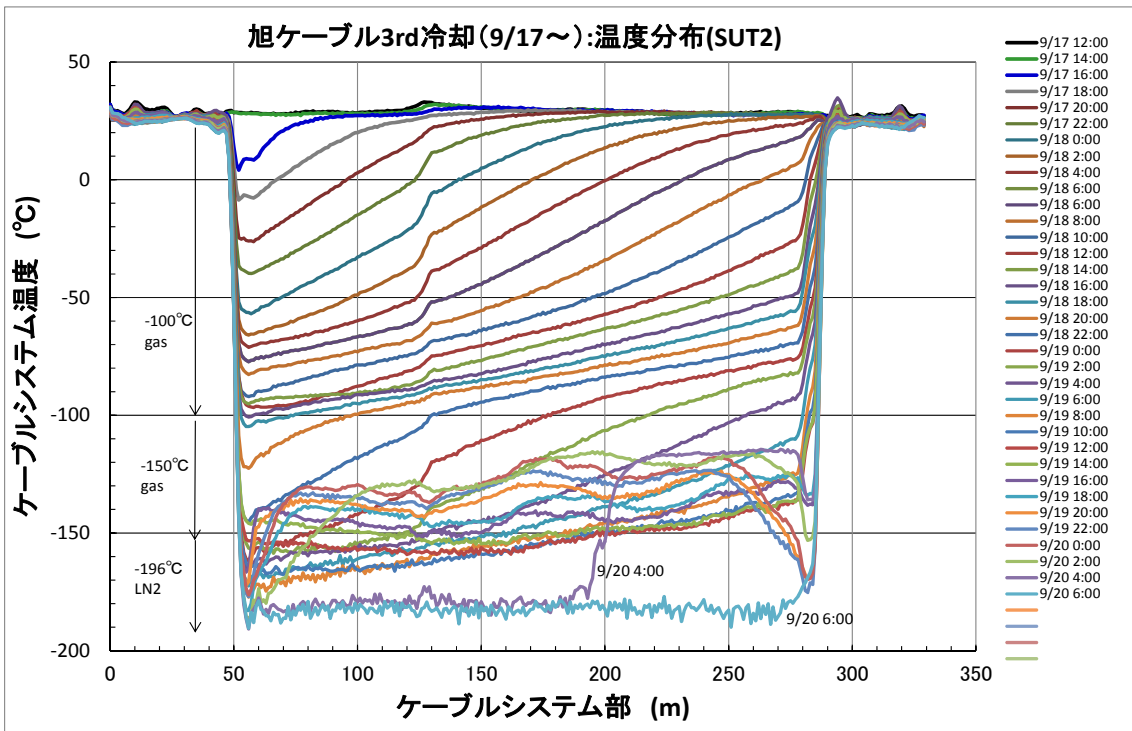


図 2.4.3-8 超電導ケーブルシステム初期冷却時の温度分布（第3回目）

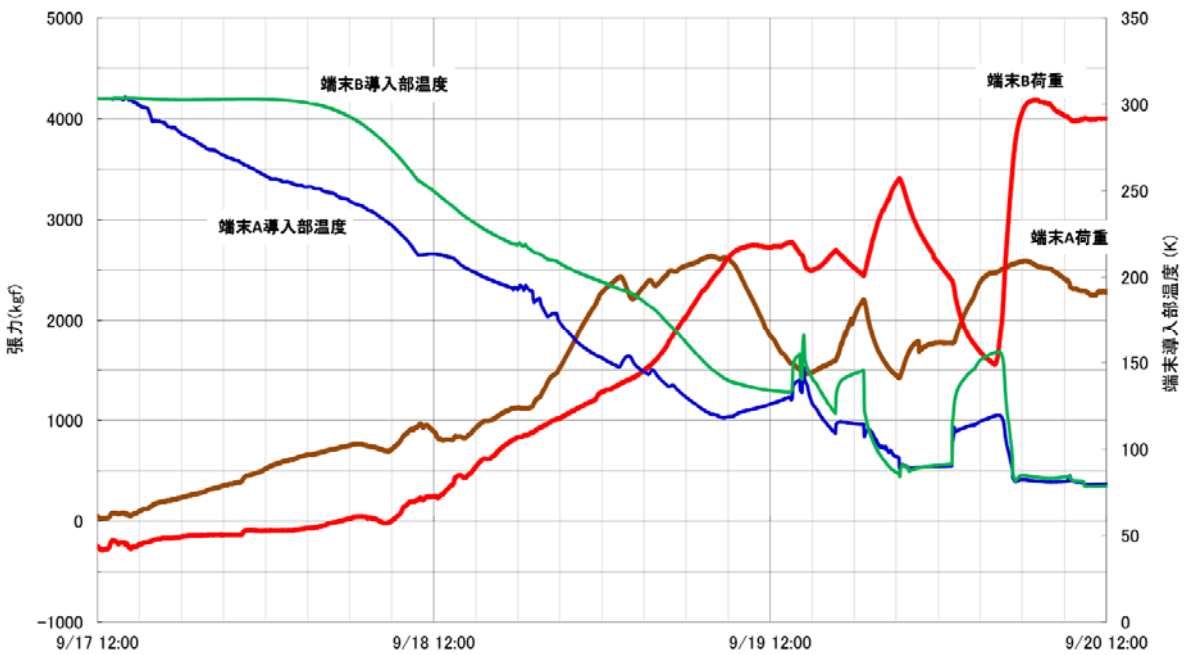


図 2.4.3-9 超電導ケーブルシステム初期冷却時の端末荷重変化（第3回目）

(8) まとめ

超電導ケーブルシステムの冷却手順を確認し、冷却時の熱機械応力を緩和する冷却方法などについての検証を実施した。また冷却に必要な液体窒素の消費量は試算結果とよく一致することを確認した。

2.4.3-2 単体試験の検証 C・tan δ 特性

(1) 目的

超電導ケーブルの静電容量 C、誘電正接 $\tan \delta$ を各初期冷却時、および長期試験終了時にそれぞれ測定し、設計値通りの値であることや、冷却／昇温や長期実系統運転によりそれらの値が変化しないことを確認する。

(2) 試験回路、試験方法

試験回路を図 2.4.3-10 に示す。高圧部は、端末 B 側で三相短絡し課電用トランスを接続、A 側は開放とし、三相一括で電圧を印加出来るようにする。ケーブル部のアースは図 2.4.3-10 の通り接地 BOX からスイッチ BOX を経て、シェーリングブリッジに接続される。またケーブル高圧部と並列に測定基準となる標準コンデンサ (100 pF) を設置し、シェーリングブリッジに接続する。トランスによりケーブル部および標準コンデンサに電圧を印加し、この際の信号によりシェーリングブリッジの平衡条件を求め、この際得られる静電容量 C および誘電正接 $\tan \delta$ の測定を実施する。なお、液体窒素冷却時のケーブル静電容量設計値は 181 nF、誘電正接は 0.1 % 以下である。

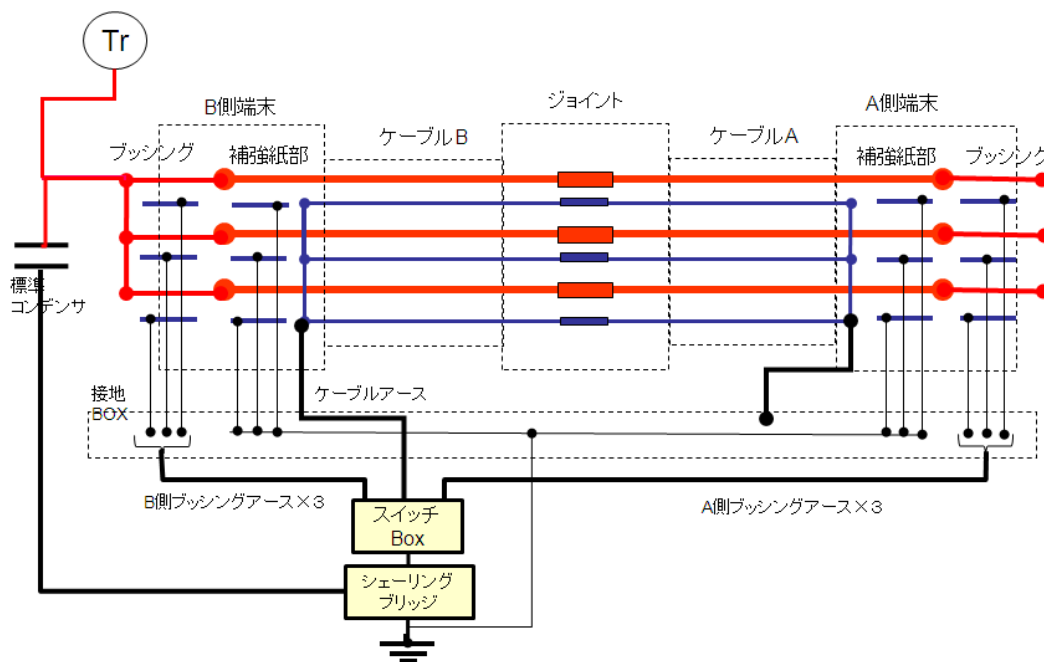


図 2.4.3-10 静電容量 C、誘電正接 $\tan \delta$ 測定回路

(3) 試験結果

表 2.4.3-2 に各冷却時における測定結果を示す。各冷却に対し静電容量は計算値 181 nF に対しほぼ等しい約 185 nF となった。 $\tan \delta$ は、ばらつきは多少あるものの、設計値である 0.1 % 以下となっている。

表 2.4.3-2 各冷却におけるケーブル静電容量、誘電正接測定結果

		ケーブル 平均温度 (K)	ケーブル	
冷却	測定時刻		C (nF)	tan δ (%)
第1回	2012/4/13 15:00	74.6	185.84	0.078
第2回	2012/6/8 23:00	77.3	184.90	0.054
第3回	2012/9/24 18:36	79.1	185.44	0.085
	2014/1/10 9:00	77.3	185.59	0.085

(4) まとめ

各冷却時の静電容量、誘電正接を測定した。各回の測定結果は設計値を満足しており、超電導ケーブルの電気定数が冷却試験を通じて安定であることが確認できた。

2.4.3-3 単体試験の検証 Ic 特性

(1) 目的

実証ケーブルシステムの臨界電流 (I_c) 特性を測定し、製造時、布設および冷却後、それぞれの測定結果を比較することにより、実系統運転後のケーブル健全性を確認する。

(2) 試験回路、試験方法

試験回路を図 2.4.3-11 に示す。通電方式は 2 コア往復通電とし、通電時の導体電圧を計測した。 I_c の定義電界は、 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ とし、ケーブル部平均温度約を 77.3 K に調整して測定を実施した。

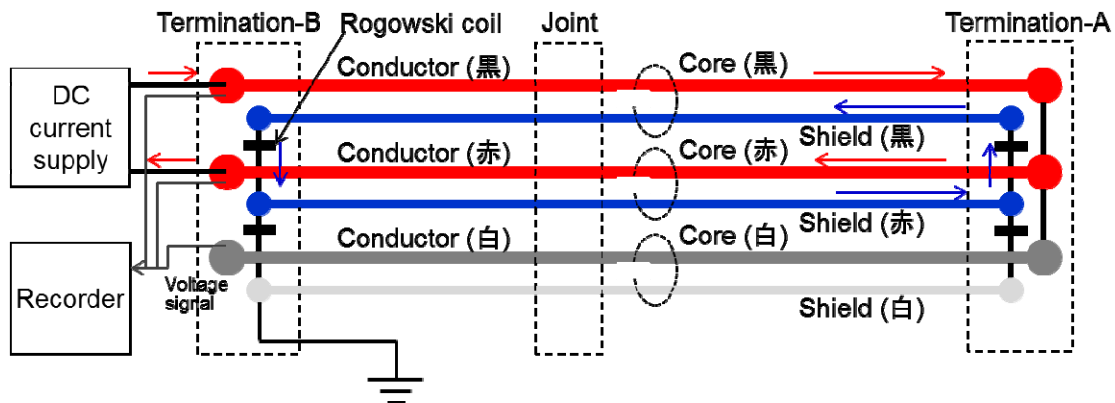


図 2.4.3-11 I_c 測定回路

(3) 試験結果

初期冷却 1 回目および 2 回目の I_c 測定結果を図 2.4.3-12 に示す。測定結果は、設計値と同等な約 6,400 A@77 K であり、ケーブルの布設や初期冷却などがケーブル性能に影響を及ぼすことなく、良好な性能を有していることが確認された。

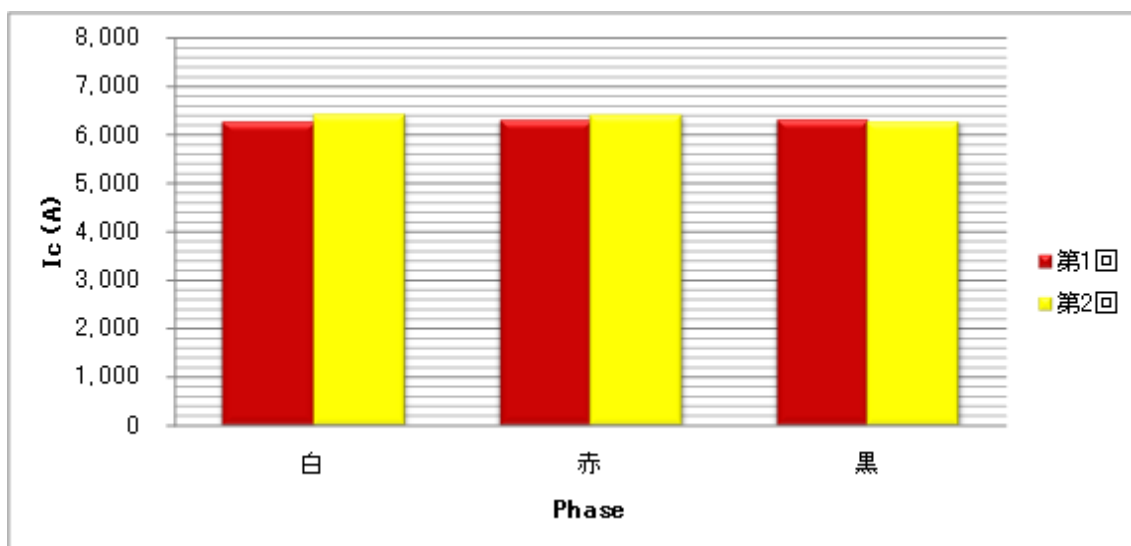


図 2.4.3-12 Ic 測定結果（初期冷却 1 回目、2 回目）

(4) まとめ

超電導ケーブル導体の性能を確認するため初期冷却後に Ic 測定を実施し、ケーブル布設、初期冷却を通じ劣化は認められず、所定の性能を維持していることを確認した。

2.4.3-4 単体試験の検証 ケーブル挙動(X線)

(1) 目的

超電導ケーブルを液体窒素冷却する際、コアには約0.3%の熱収縮が生じる。今回のシステムは両端末にてケーブルコアを固定しているが、端末、ジョイントやケーブル内の動きしるがありケーブルコアが移動する。超電導ケーブルの冷却、および昇温を通じ、代表点としてジョイント内ケーブルコアの移動量を確認する。

(2) 試験回路、試験方法

ジョイント部のケーブルコア接続部に鉛線を取付け、この部分を冷却前後にX線撮影を行うことにより、コア動きを確認した。また管路曲がり部についてもX線撮影を行い、コア動き、断熱管内外管の位置関係などを確認した。図2.4.3-13に超電導ケーブルのX撮影を実施した個所を示す。

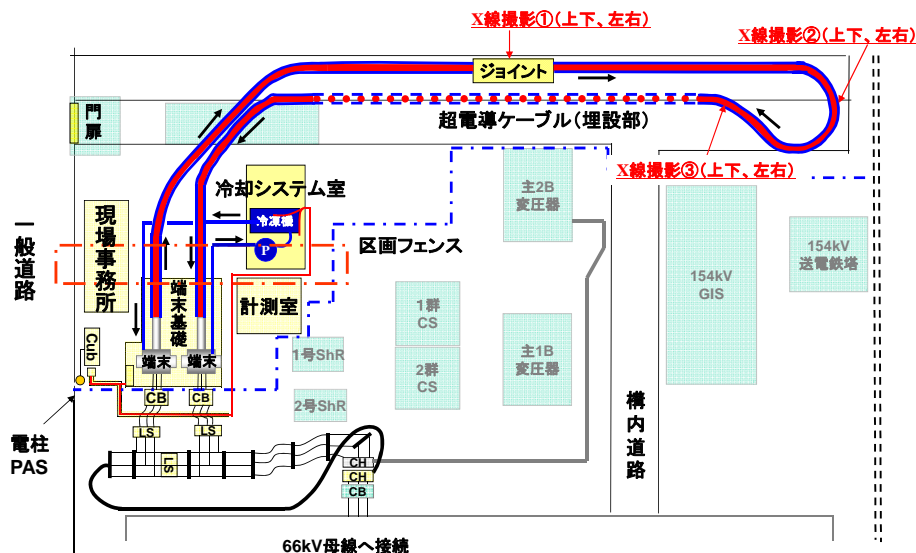


図2.4.3-13 超電導ケーブル X線撮影箇所

(3) 試験結果

表2.4.3-3に超電導ケーブルシステム組立後のコア位置、すなわち第1回冷却前を基準とし、第1回目冷却前後および第2回冷却前後でのコアの移動量をまとめる。

初期冷却は端末A側より行われるため、いずれの回も冷却時はA端末側に収縮されコアが移動するがその量は約30mm程度であった。また昇温後はコアが再度伸長するため初期位置に近づくが、やや初期冷却時に発生したコアの動きが残留する傾向にある。

表 2.4.3-3 各冷却前後におけるジョイント部コア移動量

試験タイミング	ジョイント部の動き [初期位置基準]
第1回冷却前	0mm
第1回冷却後	A端末側に30mm
第1回昇温後	A端末側に2mm
第2回冷却後	A端末側に33mm
第2回昇温後	A端末側に11mm

図 2.4.3-14～16 に、第 1 回冷却における超電導ケーブル曲がり部で撮影した X 線写真を示す。冷却前は図 2.4.3-14 に示すように断熱管内管は直線上に復元しようとするため、外管の曲げ方向外周側に位置しているが、冷却後は超電導ケーブルコアに発生する約 3～4 ton の熱収縮力による側圧で、単位長さ辺り約 600～800 kg/m の側圧を受け図 2.4.3-15 のように外管の曲げ方向内周側に寄せられる。この際断熱管内外管のクリアランスが小さくなるため、真空槽内に巻かれている断熱材が圧縮され、曲がり部内周では熱伝導が大きくなる傾向が予想される。再び昇温し室温に復帰すると、図 2.4.3-16 のようにコアの圧縮力が開放されるため、断熱管の位置関係は冷却前の状態にほぼ復帰することが確認された。

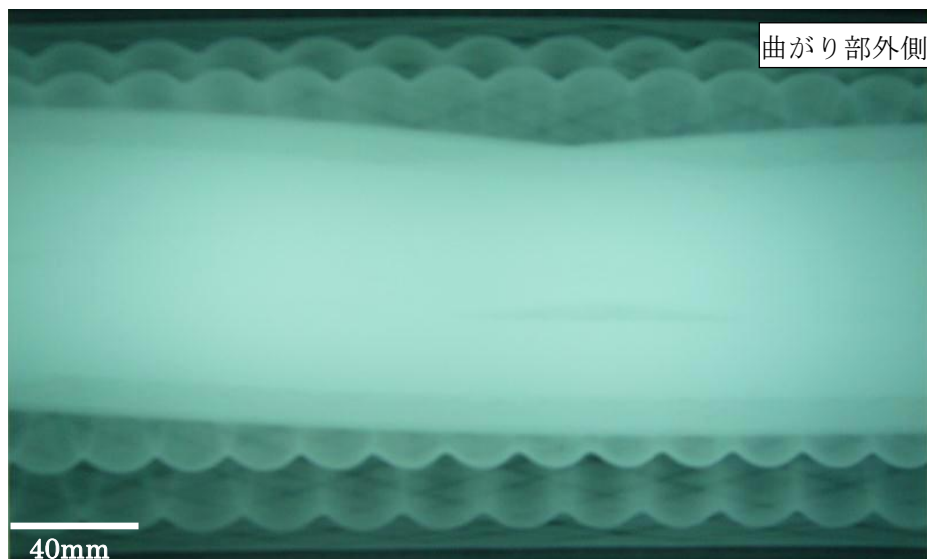


図 2.4.3-14 初期冷却前 (2012/3/22)

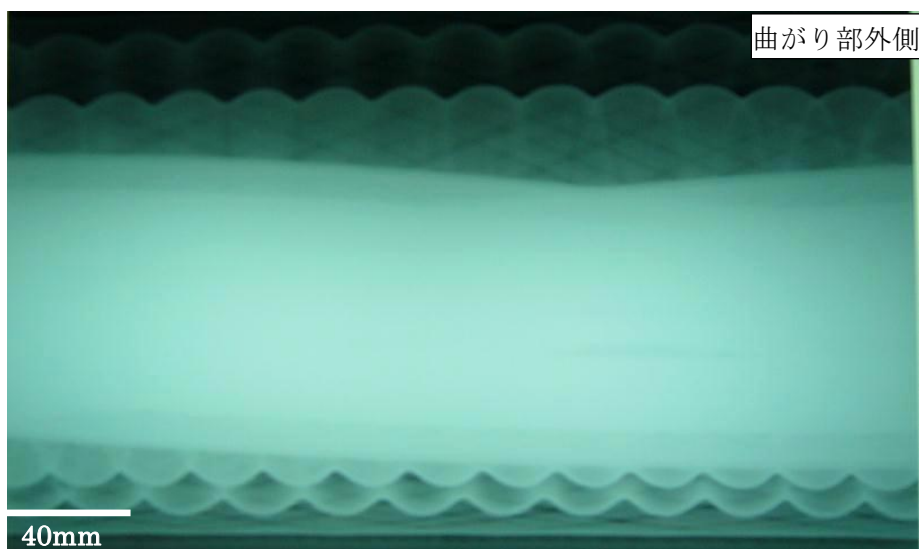


図 2. 4. 3-15 初期冷却後 (2012/4/12)

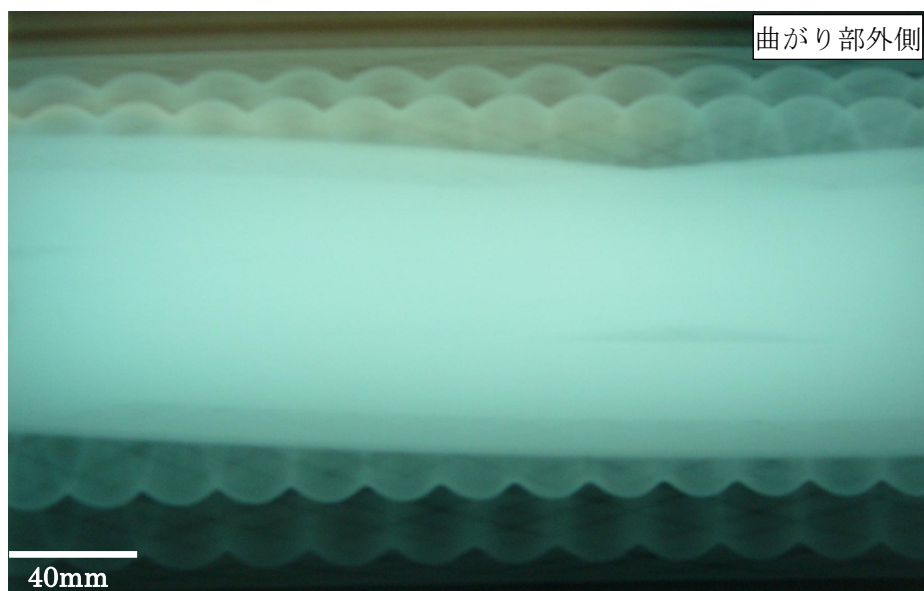


図 2. 4. 3-16 昇温後 (2012/5/17)

(4) まとめ

超電導ケーブルシステムの液体窒素冷却、および昇温後のジョイント部コア移動量、断熱管曲がり部の状況をX線で確認した。その結果、冷却によるコアの移動量は約 30 mm 程度であり、3 心コアに緩みがないため比較的小さい結果となった。また昇温後はもとの状態に復帰する傾向が見られることを確認した。断熱管曲がり部においては、冷却時ケーブルコアに発生する熱収縮力により曲がり部の内側方向に移動しようとする側圧が発生し、内周の断熱層が圧縮される傾向があることを確認した。これについても昇温後は冷却前の状況に復帰する傾向があることが確認された。

2.4.3-5 単体試験の検証 実証ケーブルシステム熱負荷

(1) 目的

無負荷時の超電導ケーブルシステムの各部熱侵入量を測定し、設計値との整合性を確認すると共に、実系統接続試験時に生ずる電気損失などの評価を行う際の基礎データとした。

(2) 試験回路、試験方法

図 2.4.3-17 に超電導ケーブルシステムに取り付けた代表的な温度測定点を示す。これらの温度計 2 点間の温度差、すなわち超電導ケーブルシステムの各コンポーネントの温度差 $dT(K)$ を以下のように定義する。

A 端末	TA4 — TL1
ケーブル A	TJ1 — TA4
ジョイント	TJ2 — TJ1
ケーブル B	TB4 — TJ2
B 端末	TL2 — TB4
ケーブル全体	TL2 — TL1

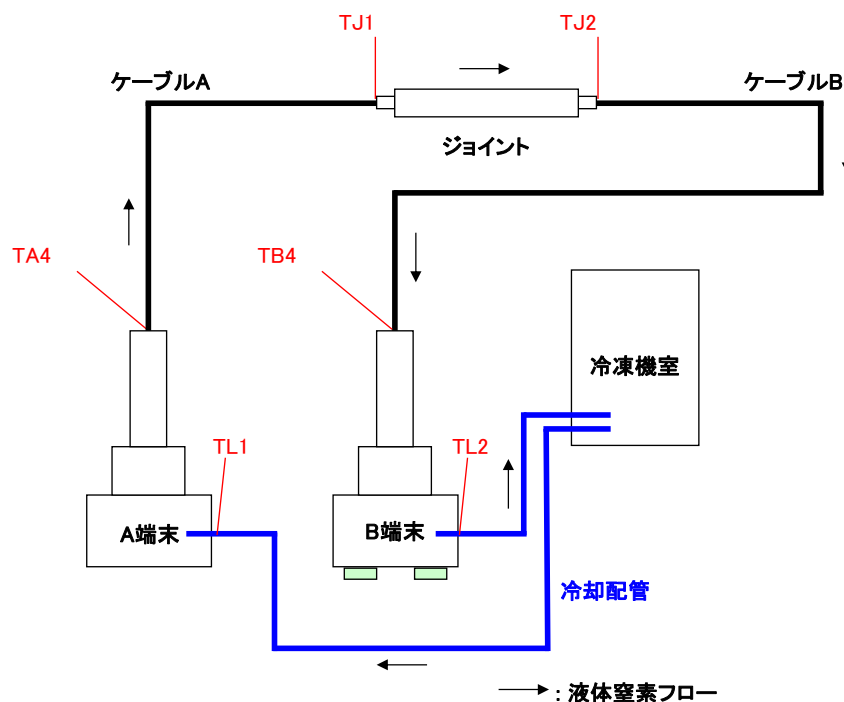


図 2.4.3-17 ケーブルシステム温度計取り付け位置

このときの液体窒素循環質量流量 dM/dt (kg/sec)、体積流量 dQ/dt (L/min)、液体窒素密度 ρ (kg/L)、液体窒素定圧比熱 C_p (J/kg/K) 及び温度差 dT (K) より、各部熱浸入量 W (W) は以下の通り求めることができる。

$$\begin{aligned}
 W &= C_p \times dM/dt \times dT \\
 &= C_p \times dQ/dt \times (\rho/60) \quad (\text{W})
 \end{aligned}
 \quad \dots (2.4.3-1)$$

(3) 試験結果

日射の影響の少ない夜間の運転データを用い、上述の式(2.4.3-1)の通り液体窒素循環流量と各部の温度差から熱侵入量を求めた。測定結果と設計との比較を表2.4.3-4に示す。各部に対しほぼ設計通りの値が得られている。ケーブル部に関しては直線部の侵入熱が3W/mであること、曲り部での側圧により侵入熱が直線部の2~4倍程度増加することを考慮している。なお、今回のケーブル布設レイアウトでは全長に対し曲がり部の占める割合は約40%であり、既存送電線路における割合よりも大きくなっている。

表 2.4.3-4 超電導ケーブルシステム 無負荷熱損失測定結果

部位	実測	設計
ケーブル部	A: 350 W B: 825 W	A: 341 W B: 858 W
ジョイント	20 W	40 W
端末	A: 595 W B: 608 W	A: 560 W B: 560 W
合計	2.398 kW	2.359kW

測定時条件：外気温 23℃、液温（入口）69K、流量 40L/min、夜間

(4) まとめ

循環する液体窒素の各部温度差、流量および液体窒素の比熱を用い、各部の無負荷熱侵入量の評価を実施した。評価の結果、各部の熱侵入量はそれぞれ予想される値とほぼ等しい結果を得た。

しかしながら、ケーブル部の損失は、平均5W/m程度と大きな結果となっている。これは、240mの全長で約40%が曲り部であり、曲り部はケーブル張力による側圧により侵入熱が増加している。事前の検証では、直線部の損失2~3W/mに対して、曲り部は10~11W/mと大きいことが、影響している。実線路では、直線部がほとんどで、曲り部もこのように急ではないが、曲り部での侵入熱増加を設計に考慮する必要がある。

2.4.3-6 昇温技術の検証

(1) 目的

液体窒素循環冷却試験の終了後、システム内の液体窒素を追い出し、系の温度を上昇させる作業手順の確認を実施する。

(2) 昇温回路

図 2.4.3-18 に昇温時の回路模式図を示す。液体窒素循環冷却システムと超電導ケーブルシステムを接続するバルブ（図示）2 箇所を閉とし、端末 A、B 両端から液体窒素を外部に放出する。放出に際しては昇温装置を用い、液体窒素を蒸発させ室温としたのち大気放出を実施した。

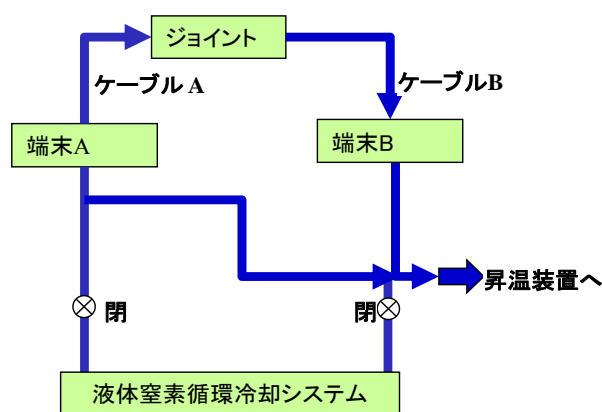


図 2.4.3-18 昇温回路

(3) 昇温方法

以下の手順で昇温作業を実施した。なお、作業中系内の圧力は昇温器の圧力調整弁により 0.4 MPaG 以下に保圧され、万一の場合でも 0.55 MPaG を超えないよう各部に安全弁を設置した。

- 1) 循環冷却停止後、バルブを閉止し、ケーブルシステムと冷却システムを切り離す。
- 2) 端末 A、B 両側より液体窒素を外部に追い出す。液体窒素は簡易断熱配管を介して昇温装置に送り、室温までガス化させた後大気放出する。昇温装置はおよそ毎時 100 L の液体窒素を蒸発させる能力を有する。
- 3) 液の追い出し作業完了後、超電導ケーブルシステムを密閉し、室温までの昇温を行う。

(4) 昇温結果

図 2.4.3-19 に第 1 回冷却後に実施した昇温作業時のケーブル部温度分布の推移を示す。2012 年 4 月 23 日 15 時より昇温を開始し、4 月 26 日 23 時頃に内部の液体窒素が蒸発した。平均で毎時 125 L の液体窒素が蒸発しており、昇温装置の能力が

らみて妥当な推移であった。その後各部の温度は上昇を続け、おおよそ 20 日後に全長がほぼ室温に復帰した。

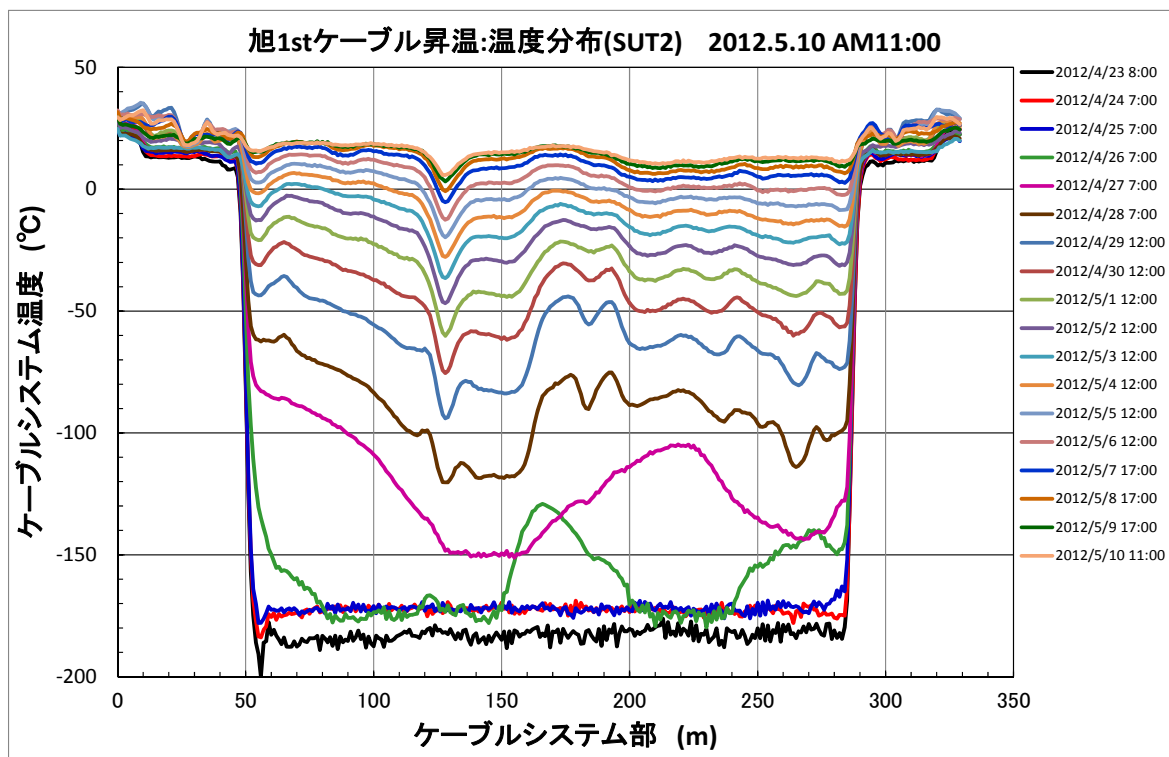


図 2.4.3-19 昇温時のケーブルシステム温度分布(第1回冷却後)

(5) まとめ

ほぼ予定通り、約 3 日間で超電導ケーブルシステムの液体窒素の追い出し作業を実施した。また全長の温度が室温に復帰するのに要するには約 20 日を要した。

2.4.4 冷却システムの初期冷却技術の検証

図 2.4.4-1 に冷却システムのレイアウト図を示す。

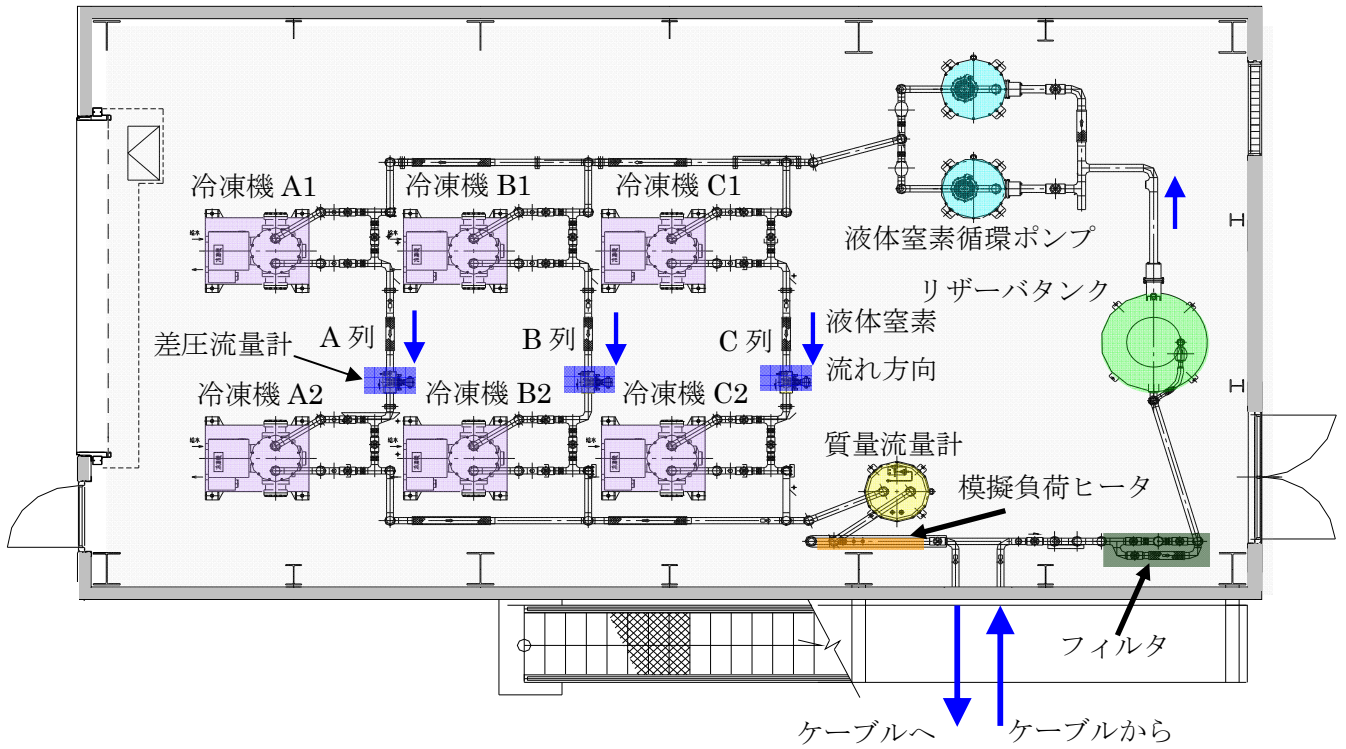


図 2.4.4-1 冷却システムレイアウト

2.4.4-1 初期冷却前準備

(1) 機器真空度測定

冷却システム運転前に各機器の常温状態における真空度を測定し、真空断熱層に問題のないことを確認した。真空度の基準値は0.25 torr以下としている。

表2.4.4-1に主要機器（冷凍機、リザーバタンク、循環ポンプ、コリオリ流量計）の真空度測定結果を示す。表に示すように、0.25 torr以下であり正常であることを確認した。

表 2.4.4-1 真空度測定結果

機器	真空度 (Torr)	機器	真空度 (Torr)
冷凍機 A1	0.185	リザーバタンク	0.025
冷凍機 A2	0.175	循環ポンプ A	0.138
冷凍機 B1	0.165	循環ポンプ B	0.207
冷凍機 B2	0.194	コリオリ流量計	0.068
冷凍機 C1	0.181		
冷凍機 C2	0.181		

(2) 冷却システム窒素置換・露点確認

冷却時の冷却システム液体窒素循環ライン内の水分凍結による運転への影響を無くすため、循環ライン（機器、配管）内を窒素ガスで置換した。システム検証においても同様に窒素置換を実施しているが、残留水分凍結の影響によるフィルタの目詰まりで連続運転中に循環流量の低下が発生したため今回は露点計測による水分量の管理を行った。

図2.4.4-2に窒素置換後の露点計測結果および置換窒素ガスの露点計測結果を示す。配管内の真空引きと窒素置換を3回繰り返し替えし、それぞれで測定を行った。露点の基準はボンベ窒素の露点+5℃を基点として、ボンベ窒素の露点が-50℃付近であることから-45℃以下と規定した。なお、露点-45℃での冷却システム内の推定水分量は約0.06gであり、流量低下の発生したシステム検証試験後の検出量の10gと比較すると微量である。3回置換終了後の露点計測結果は-55℃と基準値以下となり、使用した窒素ガスの露点-58℃とほぼ同等の値となった。露点管理値の有効性については、以降の試験において流量低下が発生していないことから数値としては妥当であると考えられる。

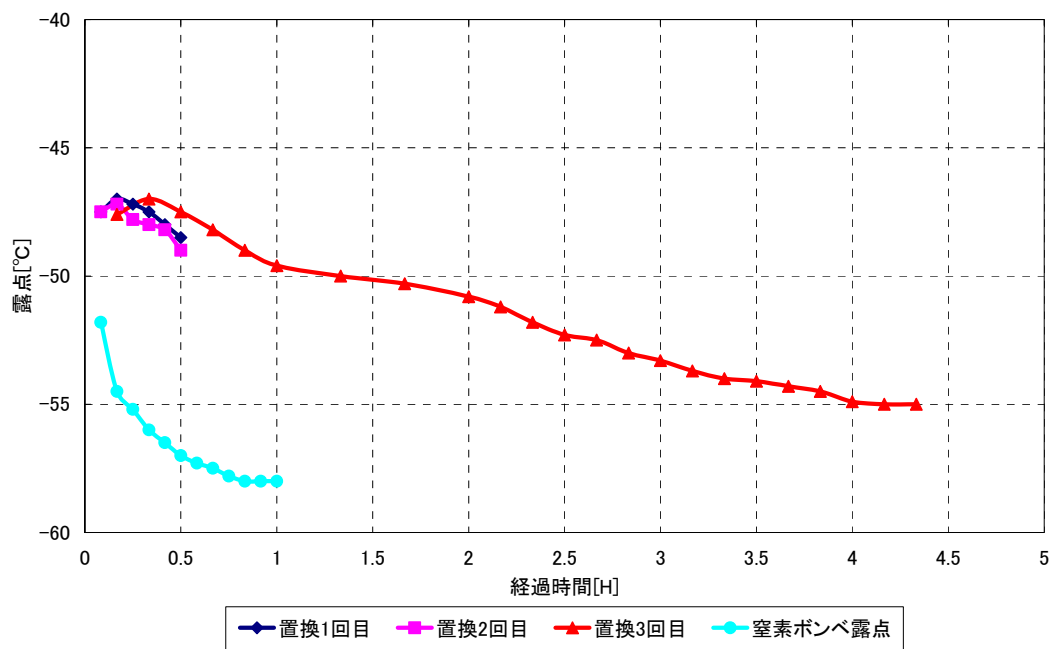


図 2.4.4-2 窒素置換後露点計測結果

2.4.4-2 初期冷却結果

初期冷却手順に関しては、2.2.3-6 節のシステム検証試験で確認したが、冷凍機設置台数、配管経路が異なるため、実証試験冷却システムにおいても再度検証を行った。手順はシステム検証と同様にリザーバタンクへの貯液、系内の予冷、循環ポンプの起動の順番で実施した。リザーバタンクへの貯液以降の冷却手順は以下の通りである。

1. LN2 外部放出ラインを開ける。
2. リザーバタンク内を加圧し、タンク内の液体窒素を系内に送り、冷凍機各列出口、質量流量計出口温度が 80 K となるまで予冷する。
3. 予冷完了後、サブクール度を取るためリザーバタンク内を加圧する。
4. 循環ポンプ起動、LN2 循環確認後に冷凍機を起動。

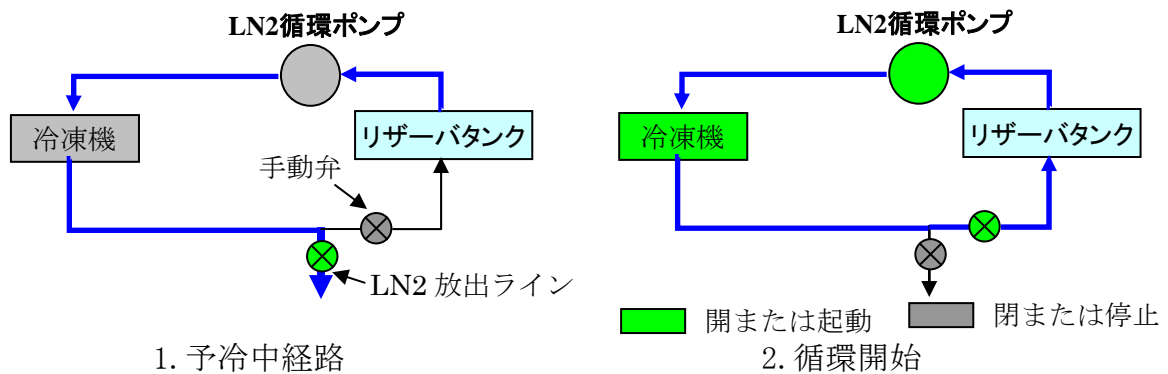


図 2.4.4-3 冷却システム初期冷却時概略フロー

図 2.4.4-4 に循環ポンプ起動前後の圧力及び温度のトレンドを示す。循環ポンプ起動時のサブクール度（飽和温度とリザーバタンク底面温度の差）はシステム検証と同様に 10 K 程度を基準としている。上記手順で循環冷却を開始することが可能であり、初期冷却手順を確立させることができた。

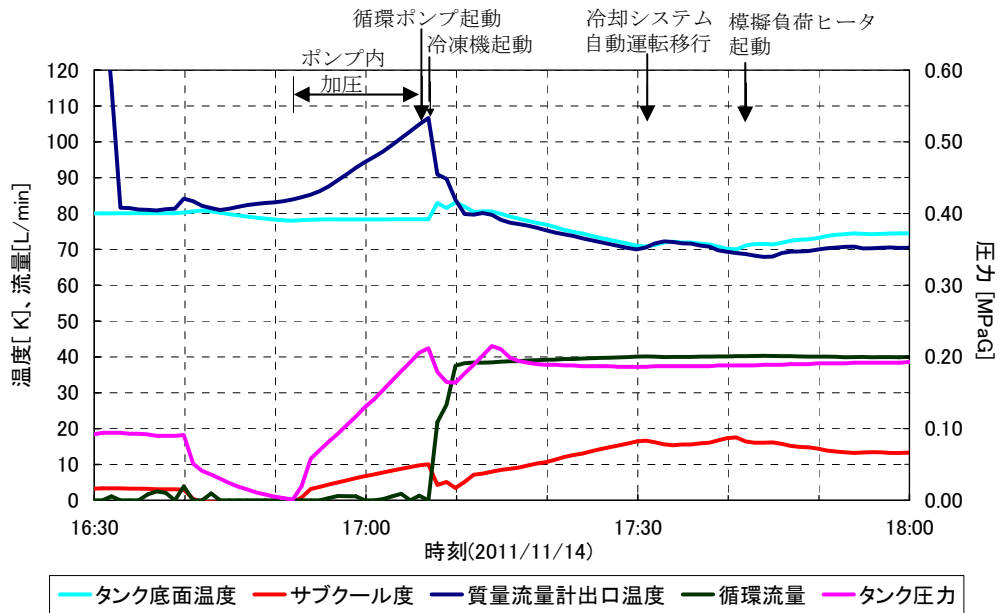


図 2.4.4-4 初期冷却循環ポンプ起動前後状態トレンド

2.4.5 冷却システム試験

ケーブル接続前に、冷却システム運転状態でシステム検証同様、機能性、制御性、メンテナンス性、故障時および非常時の対応状況の確認を行った。単体試験内容を表 2.4.5-1 に示す。

表 2.4.5-1 冷却システム試験内容

	試験項目	目的	確認項目
機器性能	初期冷却試験	貯液、予冷、循環の手順を確認する。	冷却システムの予冷・循環手順
	循環ポンプ能力確認	循環ポンプの揚程と流量の関係を確認	設計値と同等であること
	冷却能力確認	冷凍機の能力を確認する。	設計値と同等であること
制御性	流量制御試験	流量が設定値で安定していること、3並列へ分配することが可能であること。	設定値で一定であること。
	温度制御試験(ON-OFF制御)	質量流量計内温度が冷凍機ON-OFF制御により70±1Kで制御可能であることを確認する。	70±1Kで制御可能であること。
	温度制御試験(インバータ制御)	質量流量計内温度が冷凍機の回転数制御により70±0.1Kで制御可能であることを確認する。	70±0.1Kで制御可能であること。
	温度制御試験(コールドヘッドヒータ制御)	質量流量計内温度が冷凍機コールドヘッドヒータの出力制御により70±0.1Kで制御可能であることを確認する。	70±0.1Kで制御されていること。
	圧力制御試験	設定圧力で制御可能であることを確認する。	所定の圧力で制御可能であること。
信頼性	循環ポンプローテーション試験	起動循環ポンプが一定時間経過で切り替わることを確認する。	循環停止せずに切り替わること。
	冷凍機ローテーション試験	常時停止冷凍機が一定時間経過で切り替わることを確認する。	循環温度に大きな影響なく切り替わること
	警報確認試験	各機器の警報発生時の動作を確認する。	想定通りの動作が行われること。
	冷凍機故障時動作確認試験	冷凍機故障発生時に予備の冷凍機が自動で起動することを確認する。	故障発生後、問題なく予備機に切り替わること
	循環ポンプ故障時動作確認試験	循環ポンプ故障発生時に予備のポンプが起動し切り替わることを確認する。	故障発生後、問題なく予備機に切り替わること
	冷却水系統故障切り替え試験	冷却水系統の故障時に共通ラインに切り替え、故障列の冷凍機が運転継続可能であることを確認	故障発生後も冷凍機の運転に影響がないこと。
	自動再起動確認試験(停電模擬試験)	停電時を模擬し、冷却システム停止後どの程度であれば自動再起動が可能であることを確認する。	一定時間停止後、初期冷却手順無しで再起動可能であること。
	冷凍機メンテナンス	冷凍機の交換を実際に行い、方法・手順を確認する。	交換手順を確立する。
	循環ポンプメンテナンス	循環ポンプの取り付け・取り外しを実際に行い、方法・手順を確認する。	交換手順を確立する。
総合運転	日負荷変動試験	1日の負荷変動を模擬し、制御が追従可能であることを確認する。	負荷が変動した場合でも設定範囲内で温度制御が可能であること
	過負荷変動試験	負荷を急変させた場合でも循環運転が維持可能であることを確認する。	負荷急変の場合でも問題なく運転可能であること。

2.4.5-1 冷却システム機器性能確認

(1) 循環ポンプ能力確認

旭変電所への移設中に、循環ポンプの異常が発生していないことを確認するためにポンプ能力がシステム検証時と同等であることを確認した。今回は異常の有無確認が目的のため、測定回転数は1点(4000 rpm)のみで行っている。

図 2.4.5-1 にシステム検証と今回の試験結果を示す。図に示すようにシステム検証時とほぼ同等の結果であり、移設による性能変動がないことを確認した。

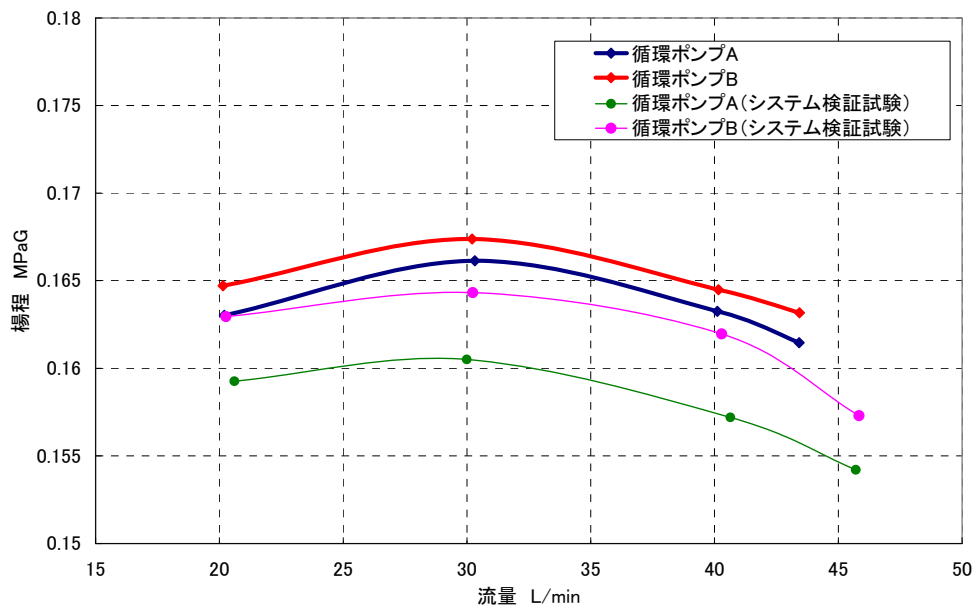


図 2.4.5-1 循環ポンプ能力確認結果

(2) 冷凍機単体冷却能力確認

冷却システム室に設置している冷凍機単体冷却能力の確認を行った。冷却能力は冷凍機出口温度 69 K、77 K の条件で測定を行った。それぞれの温度でのメーカ仕様の冷却能力は 780 W@69 K、960 W@77 K である。表 2.4.5-2 に能力測定結果を示す。測定結果にばらつきはあるが、平均値はメーカ仕様を超えていることを確認した。

表 2.4.5-2 冷凍機単体冷却能力測定結果

	コールドヘッド 温度 [K]	冷凍機出口 温度 [K]	冷却能力 [W] @69K	コールドヘッド 温度 [K]	冷凍機出口 温度 [K]	冷却能力 [W] @77K
冷凍機A1	67.52	68.94	737	75.44	76.95	965
冷凍機A2	67.34	69.02	823	75.15	76.92	1036
冷凍機B1	67.00	69.02	802	74.85	77.02	929
冷凍機B2	67.52	69.84	885	75.31	77.89	985
冷凍機C1	66.75	68.4	860	75.82	76.3	988
冷凍機C2	67.04	68.79	810	74.95	76.8	907
		平均	820		平均	968

(3) 圧力損失確認

冷却システムの圧力損失を測定し、設計値との比較を行った。なお、各要素の圧力損失は以下の各部圧力差圧から算出した。

$$\text{冷凍機ユニット圧力損失} = \text{質量流量計内圧力} - \text{循環ポンプ吐出圧力} \quad \dots(2.4.5-1)$$

$$\text{フィルタ圧力損失} = \text{バイパスライン出口圧力} - \text{リザーバタンク圧力} \quad \dots(2.4.5-2)$$

$$\text{模擬負荷ヒータ圧力損失} = \text{質量流量計内圧力} - \text{バイパスライン出口圧力} \quad \dots(2.4.5-3)$$

表 2.4.5-3 に圧力損失測定結果を示す。模擬負荷ヒータを除いた冷却システムの圧力損失は 0.045 MPa であり、設計値 0.053 MPa とほぼ同等の値であることが確認された。

表 2.4.5-3 圧力損失測定結果

		単位	測定結果	設計値 (参考)
温度 (測定箇所：質量流量計出口温度)		K	69.4	67.0
流量		L/min	40.6	40.0
圧力損失	冷凍機 6 台 + 差圧流量計	MPa	0.036	0.012
	模擬負荷ヒータ	MPa	0.104	0.085
	フィルタ	MPa	0.009	0.005
	配管・低温バルブ	MPa	0.000 [※]	0.036
	合計	MPa	0.149	0.138

※測定値の配管・低温バルブの圧力損失に関しては各要素に含まれる。

(4) 熱損失確認

冷却システムの熱損失を算出し、設計値との比較を行った。熱損失に関しては、以下の式より算出した。

$$\text{冷却システム熱損失} = 6 \text{ 台運転時冷却能力}^{\ast} - \text{液体窒素加熱量 (模擬負荷ヒータ)} \quad \dots(2.4.5-4)$$

※6 台運転時冷却能力 = 各冷凍機出入口温度から求めた冷却能力の 6 台合計値

表 2.4.5-4 に熱損失の算出結果を示す。6 台運転時の熱損失は 589 W であり、設計値の 957 W を下回る値であった。なお、表中の①～⑤の数値は以下の式で求めた。

①液体窒素加熱量（模擬負荷ヒータ）

$$=C_p \times \text{循環流量（質量流量）} \times \text{模擬負荷ヒータ出入口温度差}$$

②循環ポンプ熱損失

$$= \text{ポンプ出入口温度差} \times C_p(\text{ポンプ吸入温度換算}) \times \text{循環流量(質量流量)}$$

③循環ポンプ仕事 = ポンプ出入口圧力差 ΔP \times 循環流量(体積流量)

④冷凍機熱損失(停止時) = $C_p \times$ 各列流量(質量流量) \times 冷凍機出入口温度差

⑤タンク・流量計・配管・バルブ熱損失

$$= \text{冷却システム熱損失} - \text{循環ポンプ熱損失} - \text{循環ポンプ仕事}$$

表 2.4.5-4 熱損失測定結果と設計値

名称	内容	結果	設計値
循環ポンプ	②循環ポンプ熱損失 (ポンプ 1 台運転)	66 W	143.4 W
	③循環ポンプ仕事 ΔPV (配管等での 損失となるため熱損失に算入)	$\Delta P=0.15$ MPa、 $V=39.44$ L/min $\Delta PV = 97$ W	91.7 W
冷凍機	冷却能力(6 台運転時)	-5059 W	
	④冷凍機停止時熱損失 (1 台)	120 W	100 W
模擬負荷 ヒータ	①液体窒素加熱量 (模擬負荷ヒータ、6 台運転時)	4470 W	
その他	⑤タンク・流量計・配管・バルブの 熱損失	426 W	704.5 W
冷却システ ム熱損失	冷凍機 6 台運転時	589 W	939.6 W

(5) システム効率確認

冷凍機の効率 (COP) 及び冷却システム効率の確認を行った。冷凍機の効率は以下の式を使用して求めた。

$$\text{冷凍機効率} = \text{各冷凍機冷却能力} \div \text{各冷凍機消費電力} \quad \dots(2.4.5-5)$$

冷却システム効率については、冷凍機 6 台運転で、質量流量計出口温度が 69 K で一定状態となるように模擬負荷ヒータ加熱量を制御している条件で、測定を実施している。なお、冷却システム効率は以下の考えに基づいて求めた。まず、システム冷却能力は冷凍機の冷却能力から冷却システムの熱損失合計を差し引いたものであり、これと等価な測定量である「温度安定状態におけるヒータ加熱量」で算出する。次に、このシステム冷却能力をこのシステム稼働に必要な全電力で割ることで冷却システム効率を算出する。計算式は以下の通りとなる。

冷却システム効率＝模擬負荷ヒータ加熱量

÷ (冷凍機消費電力+循環ポンプ消費電力+冷却水消費電力)

・・・(2.4.5-6)

表 2.4.5-5 に質量流量計出口温度 69 K における出荷検査時の冷凍機効率、冷却システム冷凍機効率、冷却システム効率を示す。なお、表中の消費電力は、冷凍機単体の欄については各冷凍機の平均値、冷却システム効率の欄については冷凍機電力、循環ポンプ電力、冷却水系統電力の合計値を示している。冷凍機単体の効率は出荷検査時と同等の値であることが確認された。冷却システム効率には、循環ポンプ電力、冷却水消費電力および冷却システムの熱損失が含まれるため、冷凍機単体の効率よりも 16 % 近く低下することが判明した。

表 2.4.5-5 冷却システム効率算出結果

	冷凍機単体 (出荷時) @69K	冷凍機単体 @69K	冷却システム 効率 @69K
冷却能力(6台平均)	892W	820W	-
模擬負荷ヒータ出力	-	-	4485W
消費電力	14.2kW	13kW	85.2kW
効率(COP)	0.063	0.063	0.053

2.4.5-2 冷却システム制御性確認

(1) 流量制御確認試験

システム検証と同様に循環ポンプの周波数を一定として、各列の流量が均等となるよう調整を行った後、循環流量が一定に維持され、各列流量についても変動のないことの確認を行った。

図 2.4.5-2 に試験中の循環流量及び各列流量の変動を示す。図に示すように、循環流量は設定流量で一定に制御されており、各列の流量を調整した後も変動のないことを確認した。また、流量を 40 L/min に変更後も一定で制御可能であり、各列流量に関しても均等な流量を維持していることを確認した。

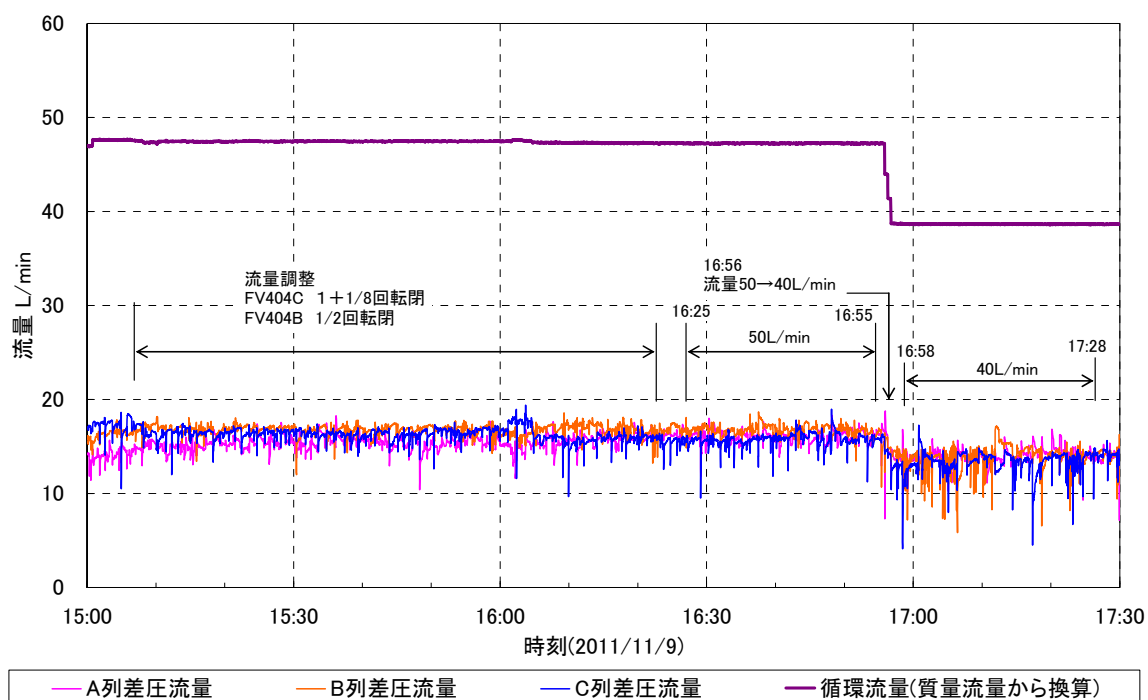


図 2.4.5-2 流量制御試験中の流量変化

(2) 温度制御試験

システム検証と同様に、冷凍機台数変動により設定温度範囲内で制御可能であることを確認した。なお、試験時の模擬負荷ヒータ負荷は、ケーブル接続時の想定運転状態である 4 台⇔3 台の発停運転を模擬するため、冷凍機 3.5 台分の負荷とした。

図 2.4.5-3 に試験中の温度変化を示す。図に示すように、制御温度上限及び下限到達後の冷凍機増減判断時間（設定時間）をシステム検証時と同様の 1 分間とした場合、上限到達時に冷凍機が 2 台増加する状態となった。これは、2.2.3-6 節で述べたとおり、冷凍機 ON-OFF 制御は設定値±1 K（制御温度上限および下限）到達後、設定時間経過で 1 台起動/停止し、その後さらに 1 K の温度差がつくか、設定時間内に設定値±1 K の範囲内とならない場合には、さらに 1 台起動/停止する仕様としたため、設定時間 1 分では 1 台目が起動後、設定時間内に設定値±1 K の範囲内

とならずに2台目が起動したためである。そこで、設定時間を2分間に変更して運転を行った結果、1台起動/停止の安定した運転状態で設定温度範囲内の制御が可能であることを確認できた。設定変更が必要だった理由としては、システム検証と冷凍機の設置台数が異なるため、実証設備では停止中の冷凍機の熱負荷が増加し、台数増後の温度低下速度が遅くなったためと考えられる。

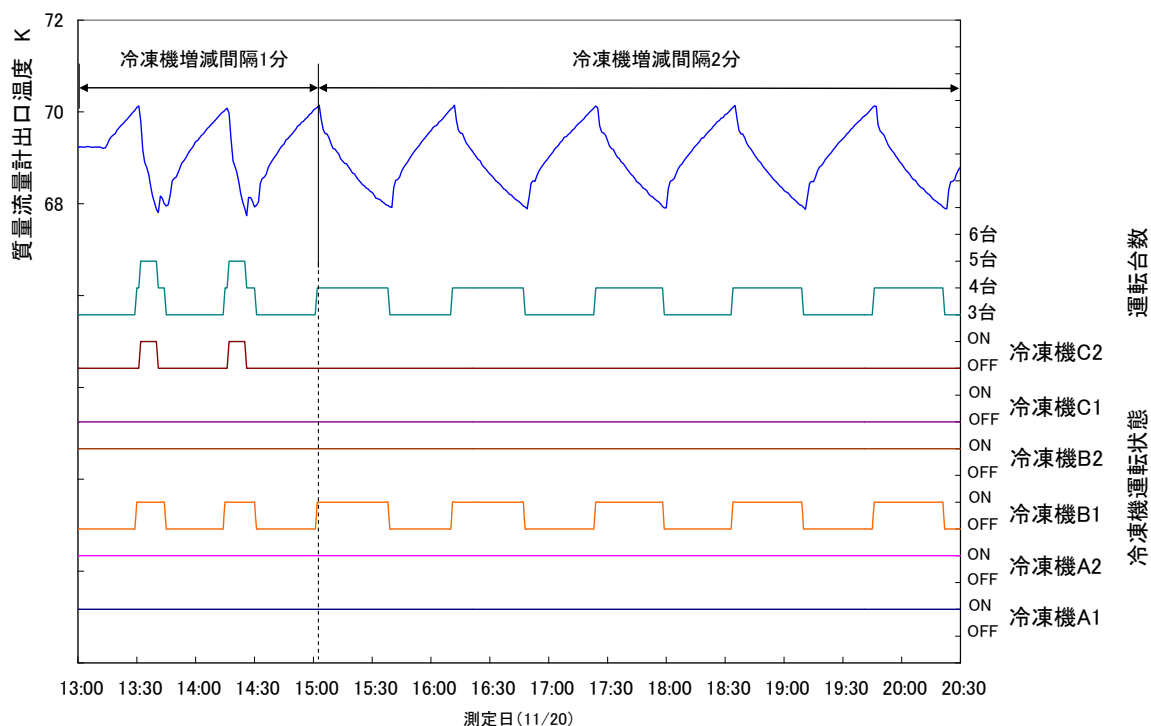


図 2.4.5-3 温度制御試験中の温度変化及び冷凍機運転状態

(3) 圧力制御確認

システム検証と同様にリザーバタンクの圧力制御方式の制御状況を確認する。ただし、今回の試験はそれぞれの制御設定値の状態でも維持可能であることを確認する。また、復帰特性確認に関しても設定値から圧力を下げ確認を行う。

(a) 外部ガス加圧

外部ガス加圧による圧力制御状況の確認を行った。設定値は0.15 MPaGとしている。図2.4.5-4に試験中の圧力状態を示す。図に示すように圧力制御作動後9分程度で0.15 MPaGに到達し、到達後は0.15 MPaG一定で制御されていることを確認した。

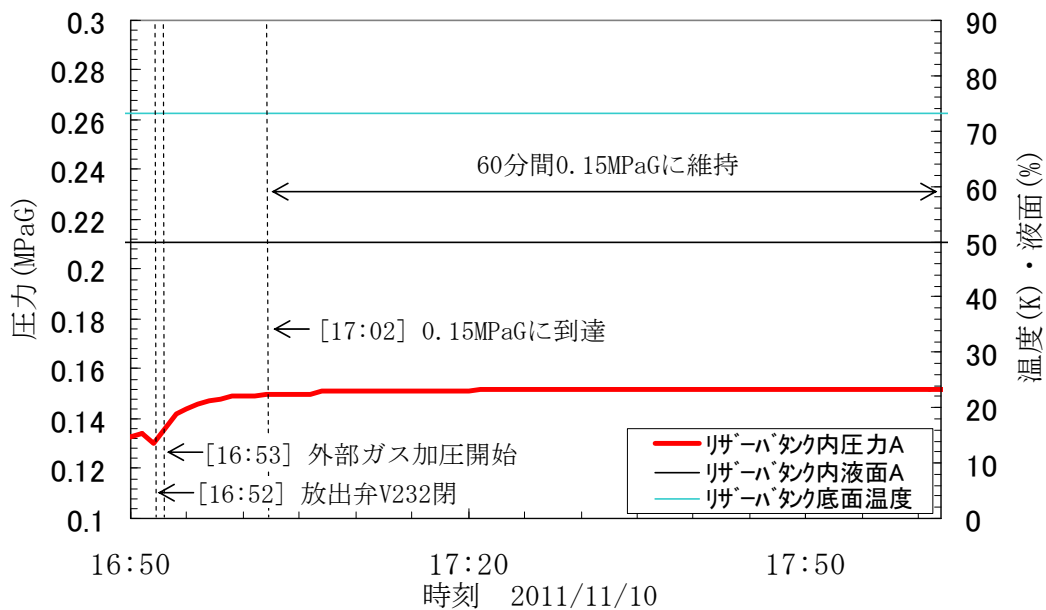


図 2.4.5-4 外部ガス加圧制御中圧力変動

(b) ヒータ加圧

リザーバタンクヒータでの圧力制御状況の確認を行った。設定圧力は0.175 MPaGとしている。図 2.4.5-5 に試験結果を示す。図に示すように、ヒータ加圧開始後、1 時間で0.175 MPaG に到達した、到達後も緩やかではあるが圧力の上昇が見られている。これは、図 2.4.5-6 に示すように復帰動作時にヒータによりタンク上部温度（輻射板温度）が上昇した影響が設定値到達でヒータが停止した後も残っているためであり、制御の安定性に関しては問題ないと考える。

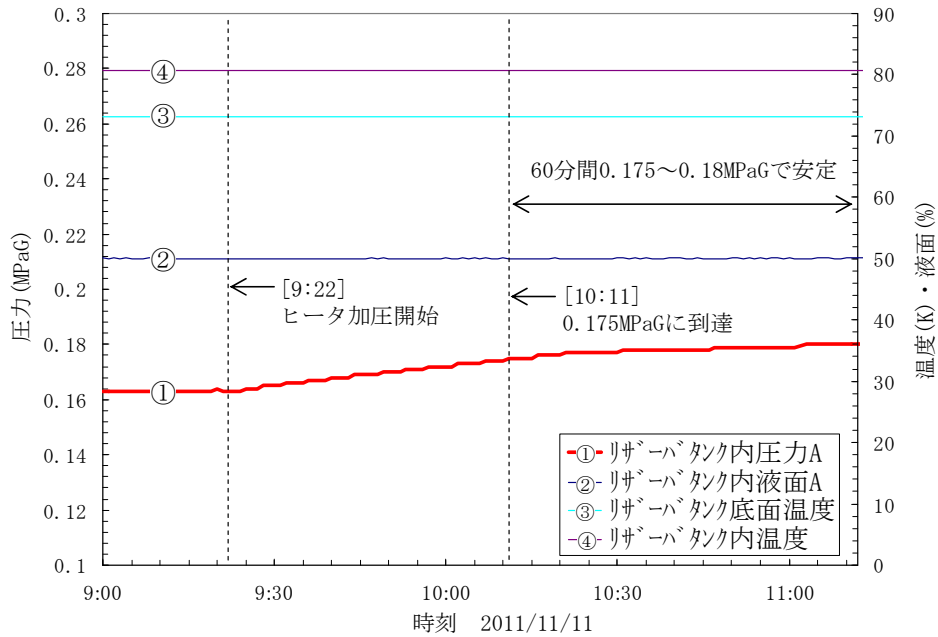


図 2.4.5-5 ヒータ制御試験時圧力変動

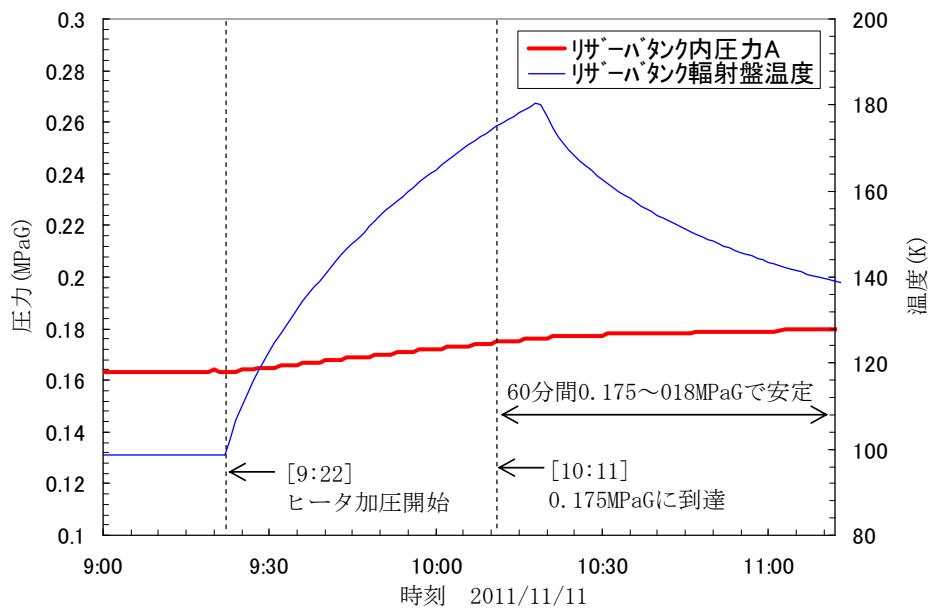


図 2.4.5-6 ヒータ試験時輻射板温度・圧力変動

(c) 自然加圧制御

自然加圧制御に関して、制御状態の確認を実施した。設定圧力は、仕様圧力で0.2 MPaGとしている。図 2.4.5-7 に試験結果を示す。加圧開始後 45 分で設定圧力 0.2 MPaG に到達し、以降は 0.2 MPaG で維持されている。外部ガス加圧と同様、ほぼ一定で制御されている。循環 LN2 をガス化させる方式であることから低温ガスによる調整弁凍結の可能性も考えられたが、今回の加圧範囲では問題がないことを確認した。

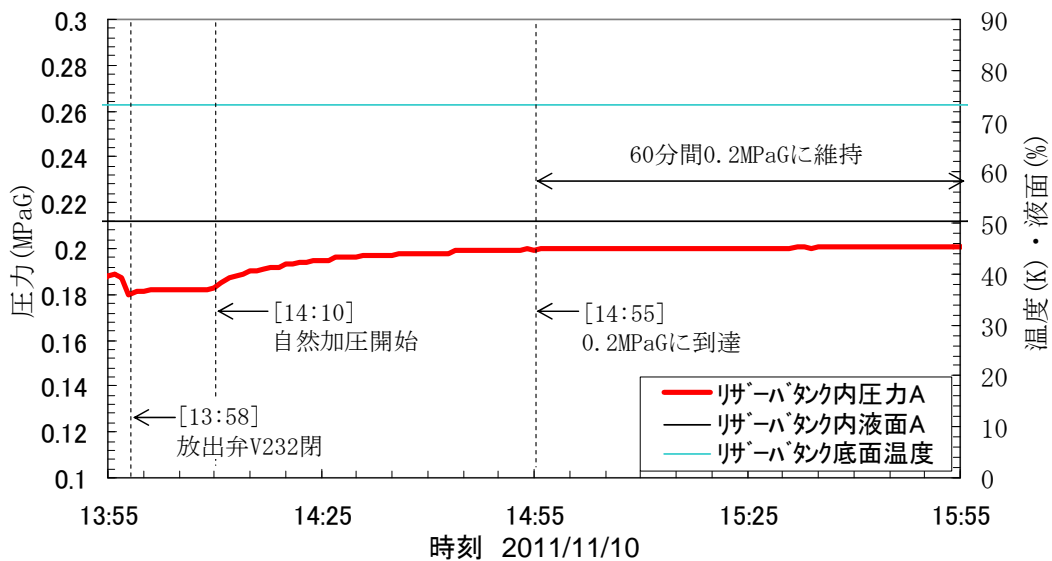


図 2.4.5-7 自然加圧制御試験結果

今回の圧力制御試験結果から加圧制御に関して、システム検証時同様に問題なく制御可能であることが確認された。このため、実証システムにおける圧力制御方式としては、自然加圧制御を主制御方式として実施していくこととした。

(d) 凝縮減圧制御試験

リザーバタンク上部の窒素ガスに過冷却液体窒素を接触させ液化させる、凝縮減圧方式の試験を実施した。設定値は 0.25 MPaG とし、外部ガス加圧を使用して模擬的に圧力を上昇させ制御状況を確認した。試験結果を図 2.4.5-8 に示す。

図に示すように、圧力が上昇し 0.25 MPaG 到達時点で電動弁が開き圧力が 0.25 MPaG で維持されていることが確認され、本制御方式で圧力上昇が抑えられることを確認した。

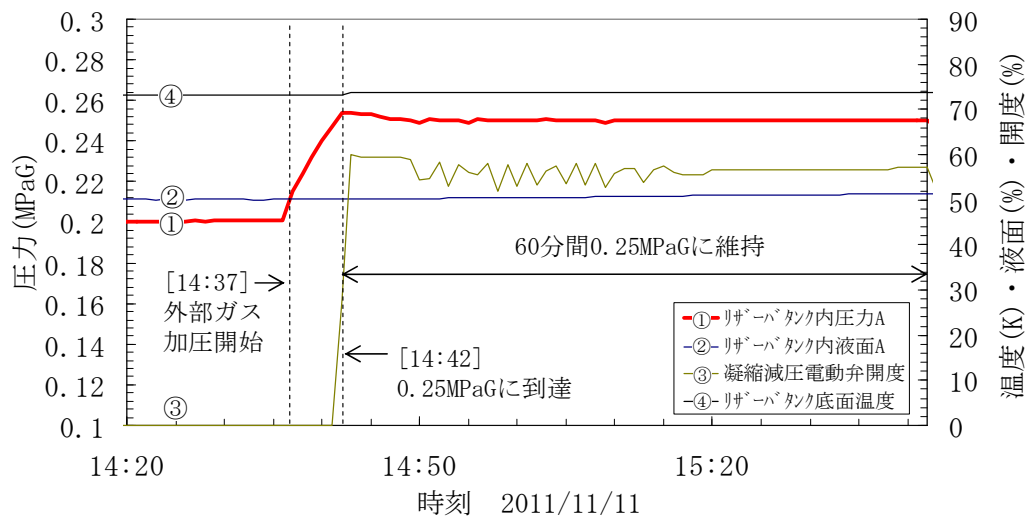


図 2.4.5-8 凝縮減圧制御試験結果

2.4.5-3 冷却システム信頼性確認

(1) 循環ポンプ並列運転

本冷却システムでは、循環ポンプは予備機を設け、故障やメンテナンス時も循環冷却が可能な構造としている。システム検証試験においては1台を停止状態で待機させていたが、故障切り替え試験において待機側ポンプの起動に時間がかかり循環停止時間が発生することが確認された。そこで、循環ポンプ内の予冷時間を無くし、切り替え時間を短くするため2台を常時並列運転させる方式について検討を行った。

図2.4.5-9に2台並列運転を行った際の流量、循環ポンプ吐出圧力を示す。図に示すように2台を並列運転で、40 L/minを維持した運転が可能であることを確認した。

この結果から、2台並列運転が可能であることが確認できたことから、以降の運転については2台並列運転を採用した。

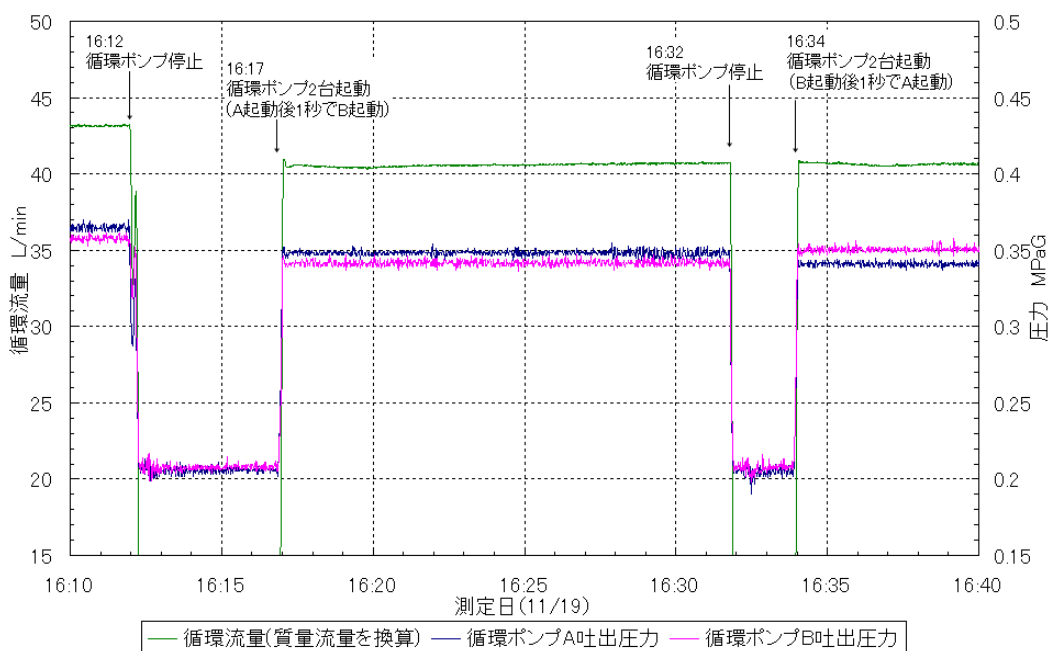


図 2.4.5-9 循環ポンプ並列運転試験結果

(2) 冷凍機ローテーション運転確認

想定運転台数が3台⇔4台発停運転であり、予備機がある関係から各冷凍機の運転時間にばらつきが生じる。運転時間を均一化して計画的なメンテナンスを行うため、3列に発停の優先順位を付け一定時間で優先順位を切り替える制御とした。ローテーション時の動作は以下の通りとなっている。

- ①切り替え時間到達で冷凍機2台起動（優先順位は切り替え後のもの）
- ②台数増加により循環温度が低下
- ③制御温度範囲下限到達で冷凍機2台停止、以降は通常温度制御で運転

図 2.4.5-10 にローテーション時冷凍機運転状態を示す。

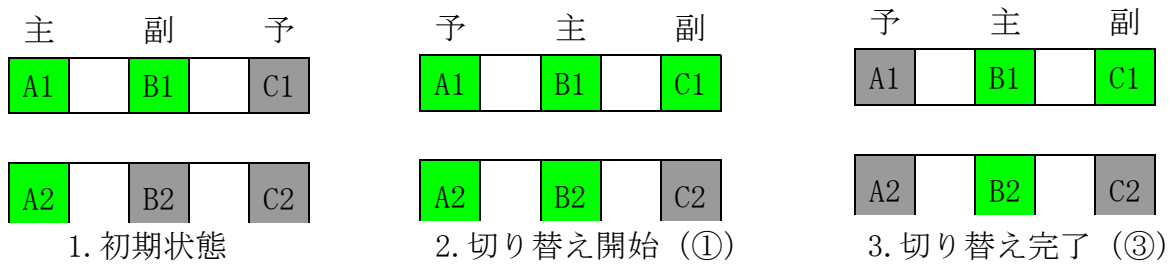


図 2.4.5-10 ローテーション時冷凍機運転状態 (A列が主列、3台運転の場合)

図 2.4.5-11 に試験中の循環温度と冷凍機運転状態を示す。ローテーション切り替え指令により上記どおりの動作が行われることを確認し、ローテーション動作中に温度制御範囲を大きく超えないことを確認した。

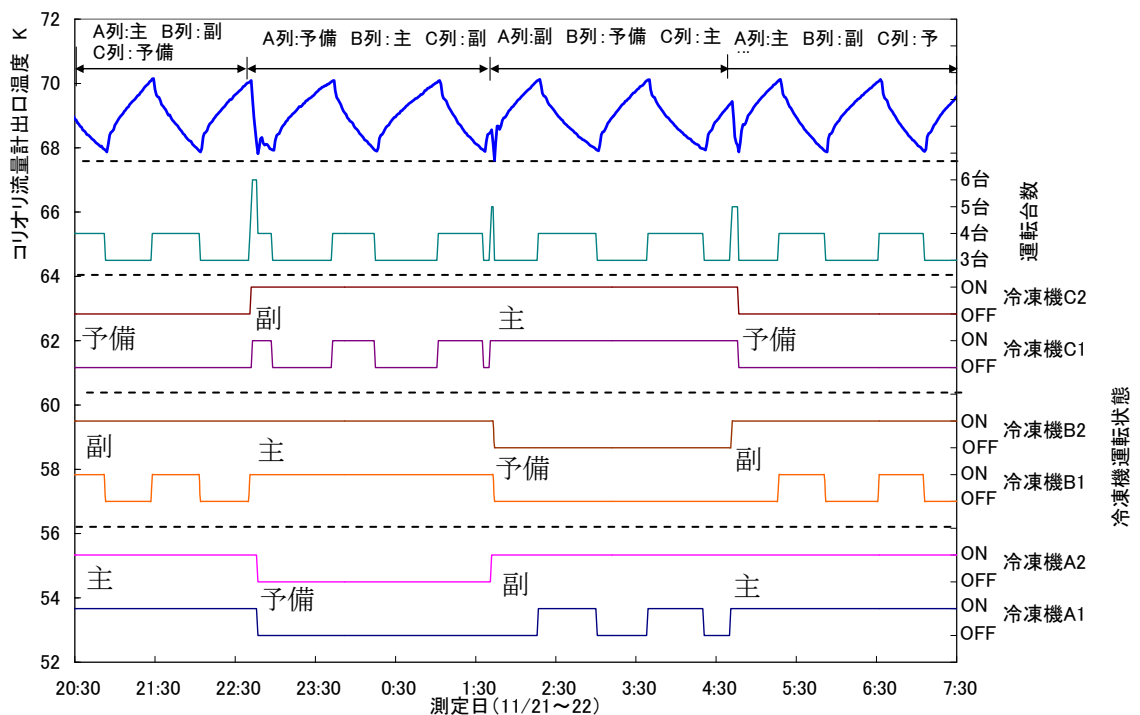


図 2.4.5-11 冷凍機ローテーション試験中冷凍機運転状態

(3) 冷凍機故障時切り替え

冷凍機が故障した場合、予備機の冷凍機が起動することを確認する。故障切り替え時の動作については以下の通り。

- ① 冷凍機が故障停止
- ② 即座に停止中で優先順位の高い冷凍機が起動
- ③ 故障冷凍機列に起動冷凍機がある場合はさらに1台が起動する。

※以降の冷凍機発停は温度制御により行われる。

- ④ 故障復帰後の冷凍機は温度制御により、故障前の優先順位に従い再起動する。

図 2.4.5-12 に故障切り替え試験結果を示す。冷凍機異常発生により待機していた冷凍機が起動することを確認した。また、切り替え中も制御温度範囲を大きく超えることなく運転が継続されていることが確認された。

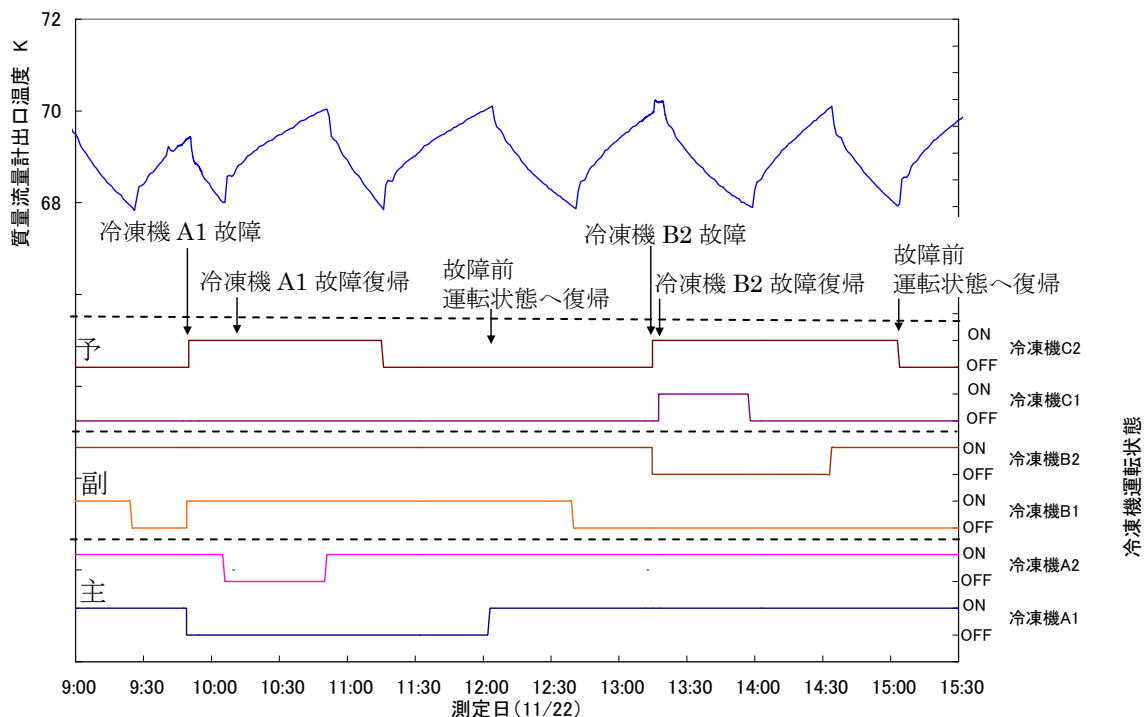


図 2.4.5-12 冷凍機故障時切り替え運転試験結果

(4) 循環ポンプ故障時切り替え運転

循環ポンプ並列運転の状態ですべてのポンプを循環停止させ、1台のみで循環継続可能か確認した。図 2.4.5-13 に切り替え中の循環流量変化を示す。図に示すように片方の循環ポンプ故障停止および復帰直後は一時的に流量低下するが、循環停止することなく1台運転に移行することが確認された。また、1台運転においても循環流量が40 L/minで維持されることを確認した。

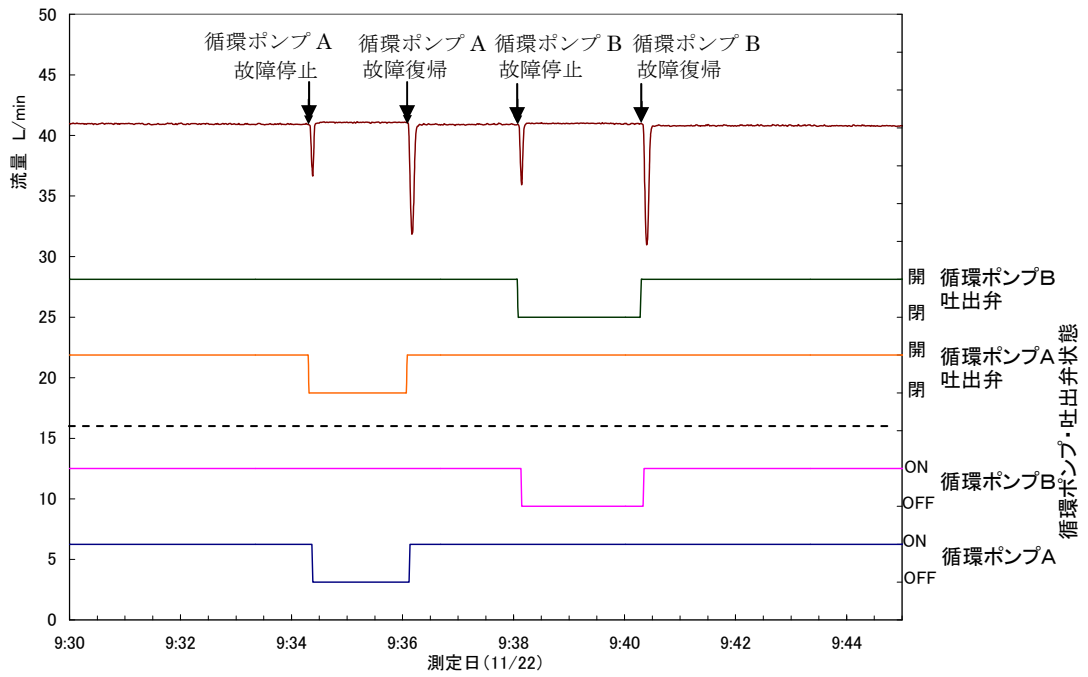


図 2.4.5-13 循環ポンプ故障切り替え試験結果

(5) 冷却水系統故障時切り替え

冷却水系統は冷却塔及びポンプが故障した場合、2.2.3-6節で示したように、共通ラインの弁が開き、故障した列の冷凍機へ冷却水を送る構造となっている。この際、停止中の冷却塔及びポンプは起動する。システム検証試験において動作確認を行ったが、冷凍機が6台と増加し、配管経路も変わっているため再度冷凍機の運転が維持できるかを確認した。

試験としては、A列、B列の冷凍機が運転状態でA列の冷却水系統に模擬的に故障を発生させ、停止中冷却水系統と共通ラインの弁が動作することで、各冷凍機の冷却水流量が維持され、冷凍機の運転が継続可能であることを確認した。図2.4.5-14に試験中の各冷凍機冷却水流量の変化を示す。図に示すようにA列冷却水系統故障停止後も冷却流量は故障前の状態で維持され、冷凍機の運転を継続することができた。

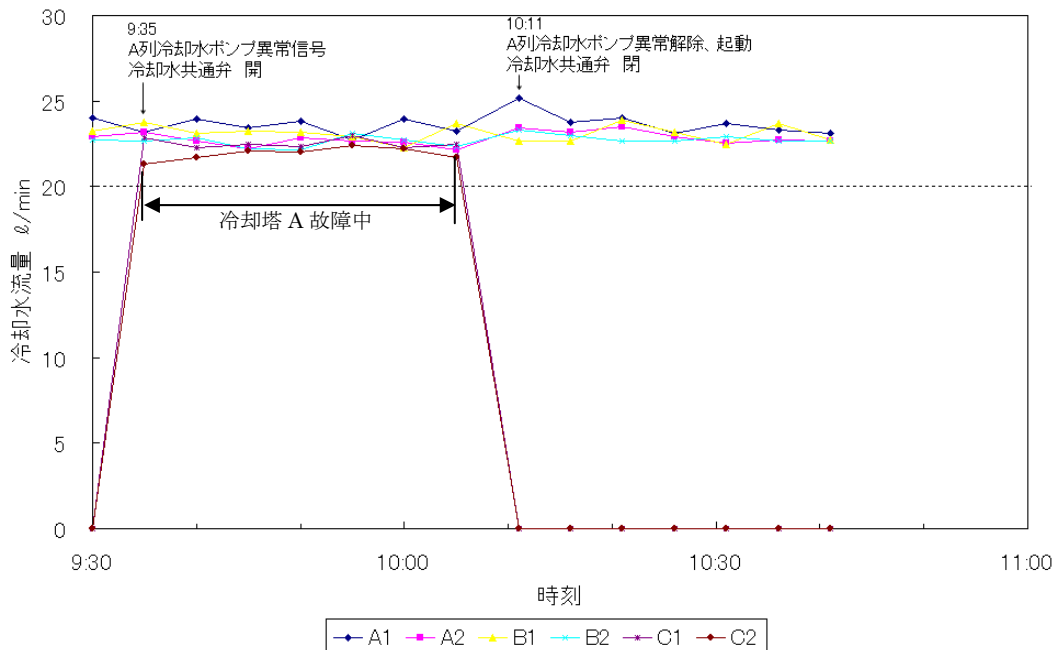


図 2.4.5-14 冷却水系統故障切り替え試験結果

(6) 停電模擬試験

冷却システムの停電時の動作を確認するため、実際に電気供給を停止させた停電模擬試験を実施し、冷却システムの停止・再起動動作が想定どおり行われるかを確認した。また、長時間停止した場合の冷却システム自動起動時の循環冷却の復帰可否について確認を行った。今回試験を行った停電間隔は1分、40分、65分である。それぞれの復電時の動作設定は以下の通り。

- 1分：復電後は再起動せず、停電から3分経過後に自動で再起動
- 3～60分：復電後すぐに自動で再起動する。(60分まで同様)
- 65分：復電後も自動での再起動は行われず、手動での再起動が必要。

試験の結果から、それぞれの停電時間において、上記の動作が行われることを確認した。1分停電においては、停止後のコリオリ流量計出口温度上昇は2K程度の上昇であり自動再起動後も問題なく循環冷却が行われた。図2.4.5-15に40分、65分停止中の各部温度、流量変化を示す。停電後、質量流量計出口温度は40分間で80K、65分間で85K付近まで上昇しており、一部配管内は液体窒素がガス化している状態であるが、復電後の再起動では初期冷却の操作を行うことなく循環冷却が再開可能であった。今回の結果から復電後自動で再起動を行う停電後60分間までは事前作業なく循環再開が可能であることが確認された。

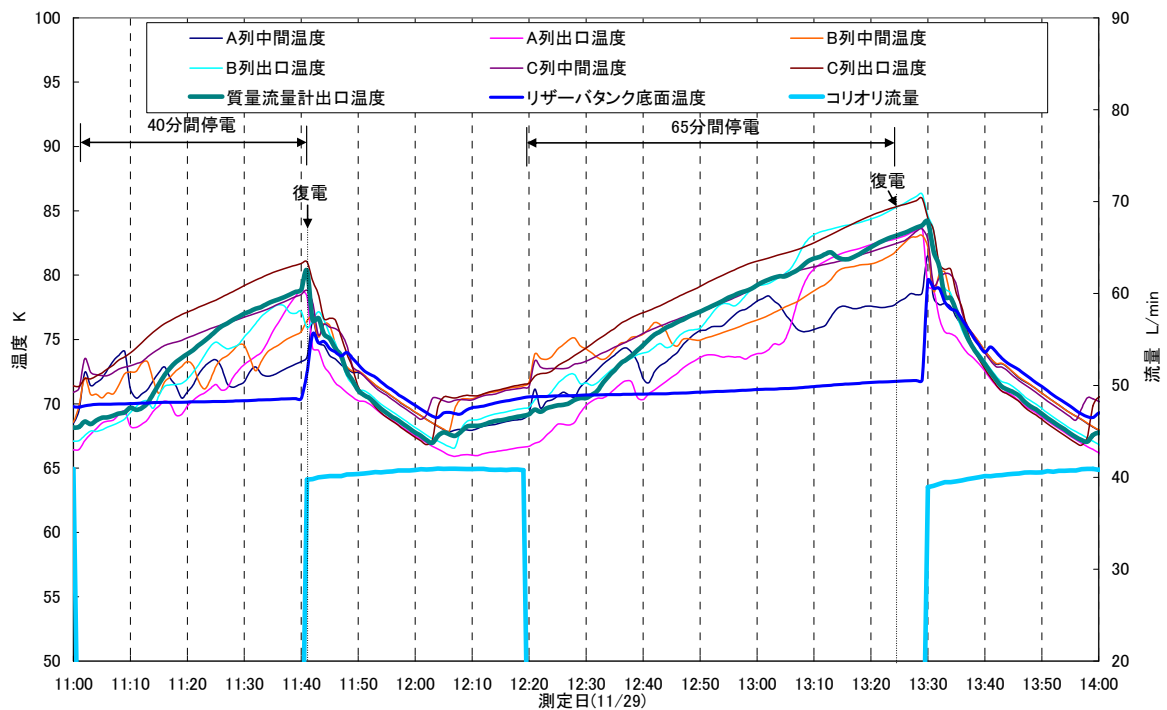


図 2.4.5-15 長時間停電試験時各部温度、流量変化

2.4.5-4 主要機器メンテナンス技術の検証

(1) 冷凍機メンテナンス方法

冷凍機は循環運転を行いながら熱交換が可能な構造としている。システム検証試験においても作業手順の確認を実施したが、冷却システム試験においても同様の方法で実施可能であるかを確認した。手順については以下の通り。

1. 交換冷凍機の冷媒流路をバイパスラインへ切り替える。
2. 冷凍機内部の液体窒素を抜き取り、内部の昇温を行う。
3. 冷却水接続配管、動力線、センサー線を冷凍機から取り外す。
4. 冷凍機接続真空配管を取り外す。
5. 冷凍機を移動させ、交換冷凍機を据付。
6. 冷凍機接続真空配管を取り付ける。
7. 冷却水接続配管、動力線、センサー線を冷凍機に取り付ける。
8. 気密試験、窒素置換、露点計測を実施する。
9. バイパスラインから冷凍機ラインへ切り替える。

冷凍機切り替え作業において、冷却システムの運転へ影響の大きい作業として循環ラインの切り替えと真空配管の取り外し・取り付けがある。循環ラインの切り替えに関しては、切り替え中はコリオリ流量計出口温度の変動が見られたが、大きな変動なく実施可能であった。配管取り付け・取り外し作業に関しては空気流入による水分混入の可能性がある。水分混入防止のため、図 2.4.5-16 に示すように取り付け・取り外し作業中は内部に窒素ガスを送りながら実施した。さらに、交換後は内部の窒素置換を行っている。復帰前に露点計測を行い、作業中の水分混入に関してはほぼないことを確認している。

今回の結果から、冷却システムの運転に影響を与えることなく交換が実施できていることから作業方法に問題のないことが確認された。

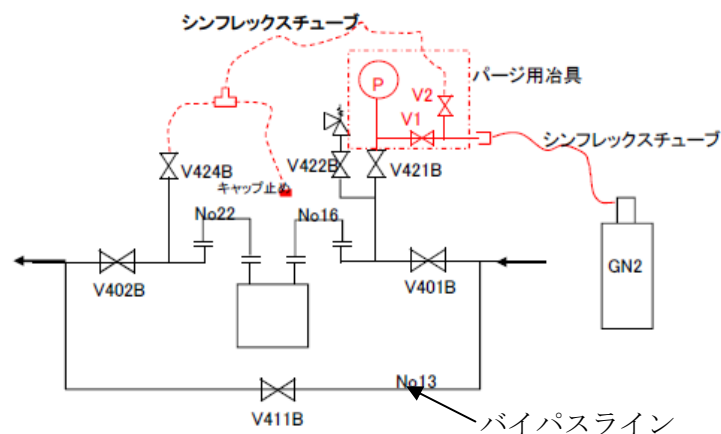


図 2.4.5-16 配管取り外し時の状態

(2) 循環ポンプメンテナンス方法

循環ポンプに関しても、予備機を設けることで循環運転を継続させながらメンテナンスが行える構造としている。冷凍機と同様にシステム検証試験において手順確認を実施している。冷却システム試験においては、作業中の内部の水分混入状況を確認するため常温状態で作業を実施した。常温で実施した理由は、低温部分に混入した水分が吸着されてしまい露点測定による内部水分状態の検証が行えないためである。作業内容は以下の通りである。

1. 交換循環ポンプの停止及び内部が昇温されていることを確認。
2. 循環ポンプ内の放出配管に窒素ポンペを接続し内部を窒素ガスで加圧可能な状態とする。
3. 循環ポンプ内の圧力を落とし、動力線を取り外す。
4. 循環ポンプ取り外し部分の周囲を袋で被い、袋内部を窒素置換する。
※作業中の水分混入を抑えるため。
5. 循環ポンプの接続部分を取り外し、ポンプ部分を抜き取る。
6. 循環ポンプの状態確認後、再びポンプ部分を取り付ける。
※作業手順確認が目的であるため交換は行わない。
7. 動力線を取り付け、回転方向を確認する。
8. 気密試験、窒素置換、露点計測を実施する。

冷却システム試験においては、システム検証時よりも水分混入を抑えるためにポンプ部分を袋で被い（図 2.4.5-17）、袋内を窒素ガスで置換した状態の中でポンプ部分の取り外し、取り付け作業を実施した。

今回の作業方法で交換作業は実施可能であり、露点測定結果から作業中の水分混入についてはほぼ無かったことを確認した。



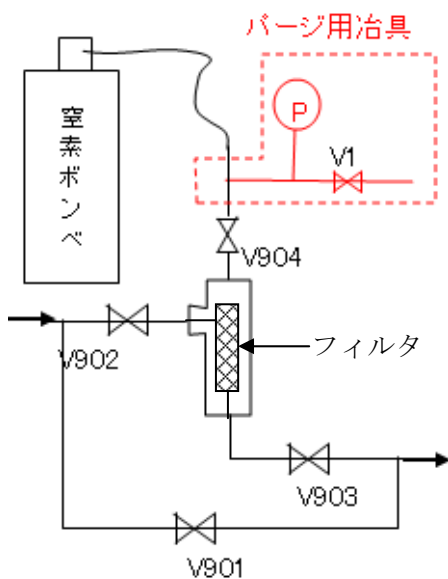
図 2.4.5-17 循環ポンプメンテナンス中ポンプ周り状態

(3) フィルタメンテナンス方法

トータルシステム内の異物を取り除くために、冷却システム配管中にフィルタを設置している。システム検証時には交換不可能であったが、目詰まり時に対応できないことから、冷却システム試験では交換可能な構造へ変更した。交換可能な構造としてはいたが、方法については想定手順で実施可能であるかが未確認であったため、常温時に実施し手順を確認した。実施内容は以下の通り。

1. フィルタラインへ窒素ガスパーズ用治具を取り付ける。(図 2.4.5-18 (a))
2. フィルタ部をバイパスラインに切り替える。
3. フィルタ周辺を袋で被い、袋内を窒素置換する。
※循環ポンプ同様水分混入を防ぐため
4. フィルタを取り外し、外した部分にはカバーフランジを取り付ける。
5. フィルタに異物・汚れがないか確認する。
6. フィルタ周辺を袋で被い、袋内を窒素置換した状態でフィルタを再び取り付ける。
7. 気密試験、窒素置換を実施する。

常温状態の作業ではあるが、検討していた手順でフィルタユニットの交換作業が可能であることを確認した。また、フィルタ内からは少量の異物が検出され(図 2.4.5-18 (b))、成分としては、主に有機物と Al を主とした金属であった。この異物に関しては配管内に残留していたものと考えられる。しかし、運転中に循環流量の変化や圧力損失に変化は無く、冷却システムの運転へ影響はなかった。



(a)

(b)

図 2.4.5-18 (a) フィルタメンテナンス中フィルタ周辺フロー
(b) フィルタ内で確認された異物

2.4.5-5 総合運転試験

(1) 冷却システム日負荷変動試験

旭変電所の夏季日負荷変動を想定して模擬負荷ヒータで熱負荷を変動させ、コリオリ流量計出口温度（制御温度）が 69 ± 1 K の範囲で制御されることを確認する。また、循環ポンプ 2 台並列運転及び温度制御、圧力制御、流量制御の長期間安定性を確認した。なお、模擬負荷ヒータの負荷については想定していた、1900 W(0:00～9:00)、2100 W(9:00～18:00)、2000 W(18:00～24:00)とした。図 2.4.5-19 に試験中の温度、圧力、流量変化を示す。

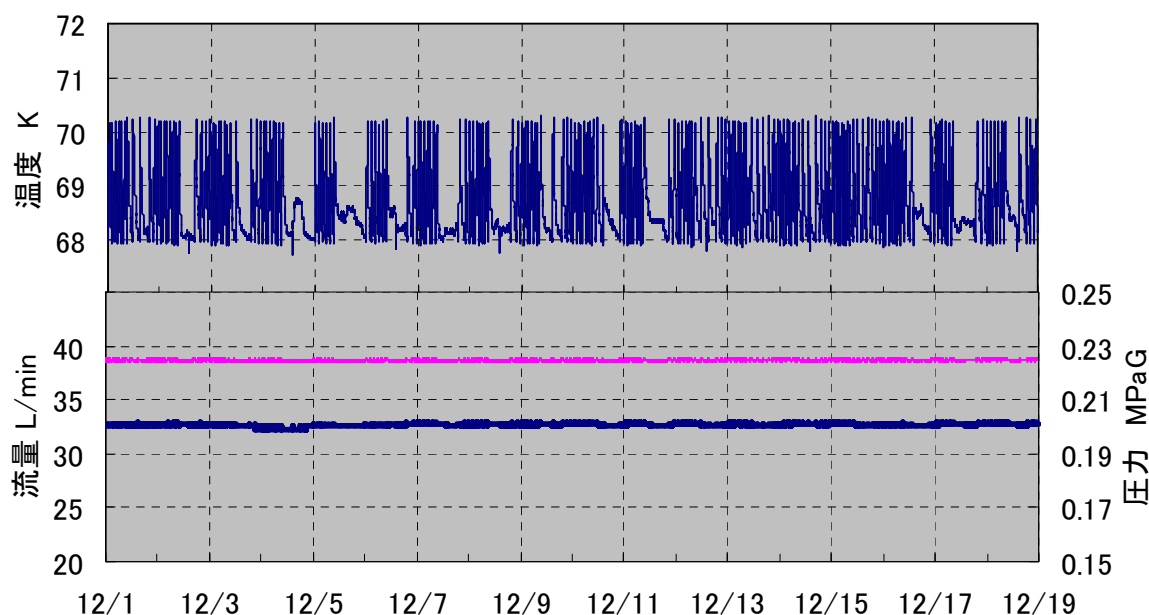


図 2.4.5-19 日負荷変動試験中温度、圧力、流量変化

図より負荷変動をさせても、コリオリ流量計出口温度は制御温度範囲内で制御されていることを確認した。また、流量は 40 L/min で安定して制御されており運転中の循環ポンプの異常もなかった。圧力は制御値の 0.2 MPaG で安定しており、冷却システムは想定どおりの運転が可能であることを確認した。

(2) 過負荷試験

冷却負荷が急変した場合でも冷却システムが問題なく運転可能であることを確認した。模擬負荷ヒータ負荷設定値は、通常運転より厳しい条件である 0 kA から 2.63 kA 通電に急変した状態を模擬するため、1700 W から 3500 W へ急変させた。上昇側に急変させた状態で 8 時間保持し、その後元に戻し運転状態を確認した。

図 2.4.5-20 に試験中の模擬負荷ヒータ出力、冷凍機運転台数、流量計出口温度変化を示す。

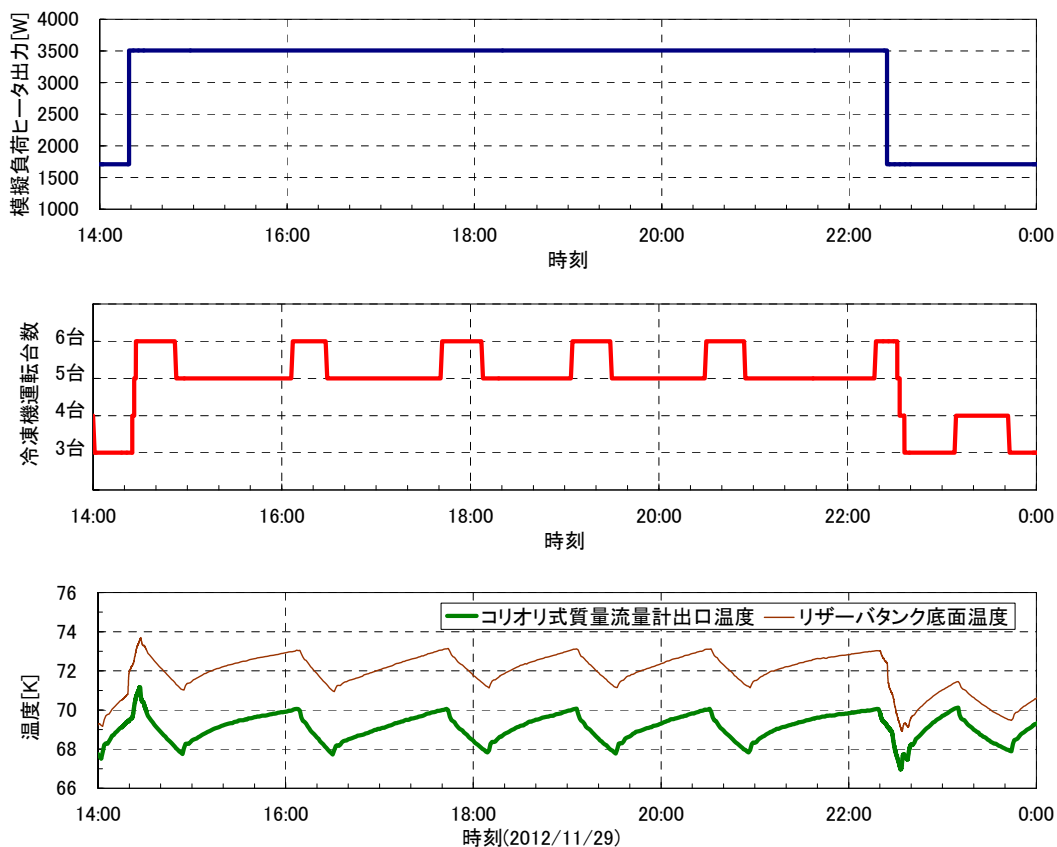


図 2.4.5-20 過負荷試験中変化

負荷変更後、温度は上昇を始めるが冷凍機運転台数が増加することで変動は 2 K 程度であった。また、負荷を元に戻した際も同様に運転台数が減少するため、こちらも上昇時同様 2 K 程度で抑えられており熱暴走することなく運転が可能であった。運転台数が追従した後は、制御範囲である 69 ± 1 K 内で制御されており、急激な負荷変動に対しても問題なく対応可能であることを確認した。

2.4.6 実証システムの循環冷却移行技術の検証

実証システムは、バイパスラインを設けることで冷却システムと実証ケーブルシステムを切り離すことが可能な設計としている。実証システムの循環冷却は、冷却システム、実証ケーブルシステムを個別で初期冷却を行った後に接続させる方法で行う。

本節では、実証システム循環冷却への移行作業である冷却システムと実証ケーブルシステムの接続作業方法の検証結果について記載する。

図 2.4.6-1 に 1 回目の接続作業中のリザーバタンク圧力、ケーブル圧力、リザーバタンク液面、循環流量変化を示す。

○ 1 回目の接続開始条件：冷却システム停止、液面 80 %

リザーバタンク内圧力 0.3 MPaG

リザーバタンク内圧力を通常時 (0.2 MPaG) よりも高く取っているのは、ケーブル側との差圧を大きくとり、循環ポンプ停止状態でもリザーバタンクから端末へ液体窒素を送るためである。接続開始後、ケーブル側への液体窒素流出によりリザーバタンク液面は低下するため、液体窒素を補給しながら実施していた。しかし、差圧を大きく取っていたため液体窒素流出量が多く、補給が追いつかずリザーバタンク液面が急激に低下したため、接続作業を中断して補給作業を行う必要があった。このため、接続は可能であったが作業が煩雑となった。そこで、2 回目の接続作業の際には接続開始条件を変更した。

○ 2 回目の接続開始条件：冷却システム運転、液面 80 %

リザーバタンク内圧力 0.1 MPaG

リザーバタンク内圧力を下げ、ケーブル側との差圧を小さくすることで液体窒素流出量を抑えることとした。また、冷却システムを運転状態で行い、接続完了後の再起動作業を無くすことで作業の簡略化を行った。

図 2.4.6-2 に 2 回目の接続作業中のリザーバタンク圧力、ケーブル圧力、リザーバタンク液面、循環流量変化を示す。差圧を小さくすることで液体窒素の流出量を抑えられ、リザーバタンクへの液体窒素の補給が追いついたことで、急激な液面低下を防げたため、作業を中断することなく接続を行えた。また、冷却システムを停止させずに実施可能であることが確認でき、作業を簡略化することができた。

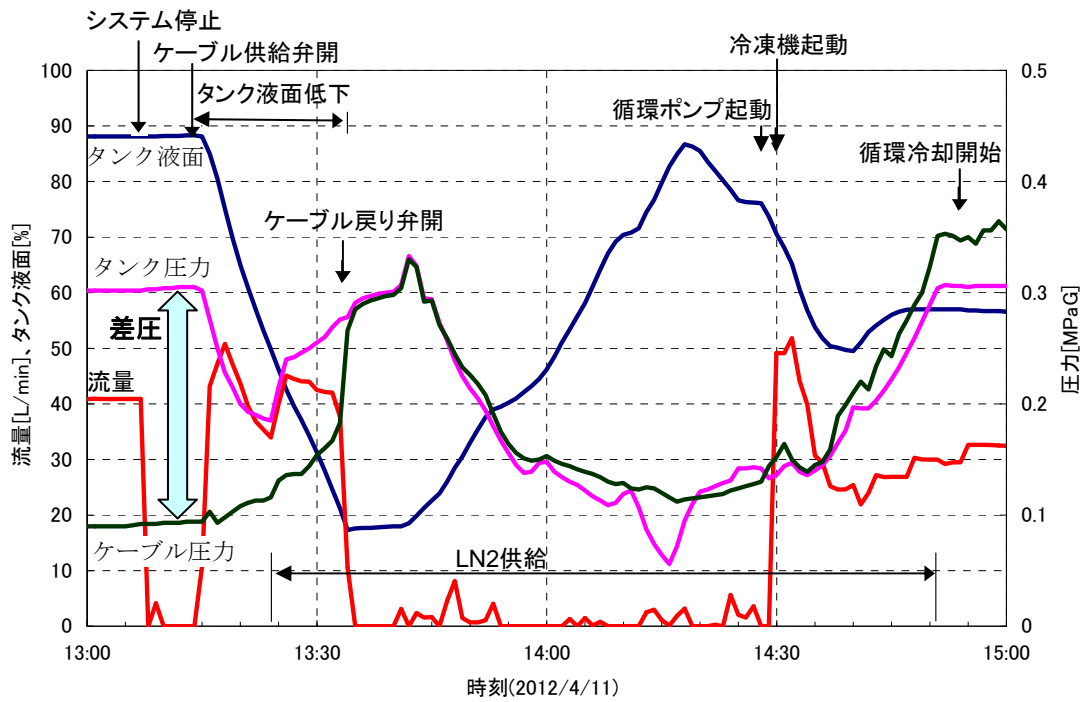


図 2.4.6-1 実証システム循環冷却移行作業中状態 (1回目)

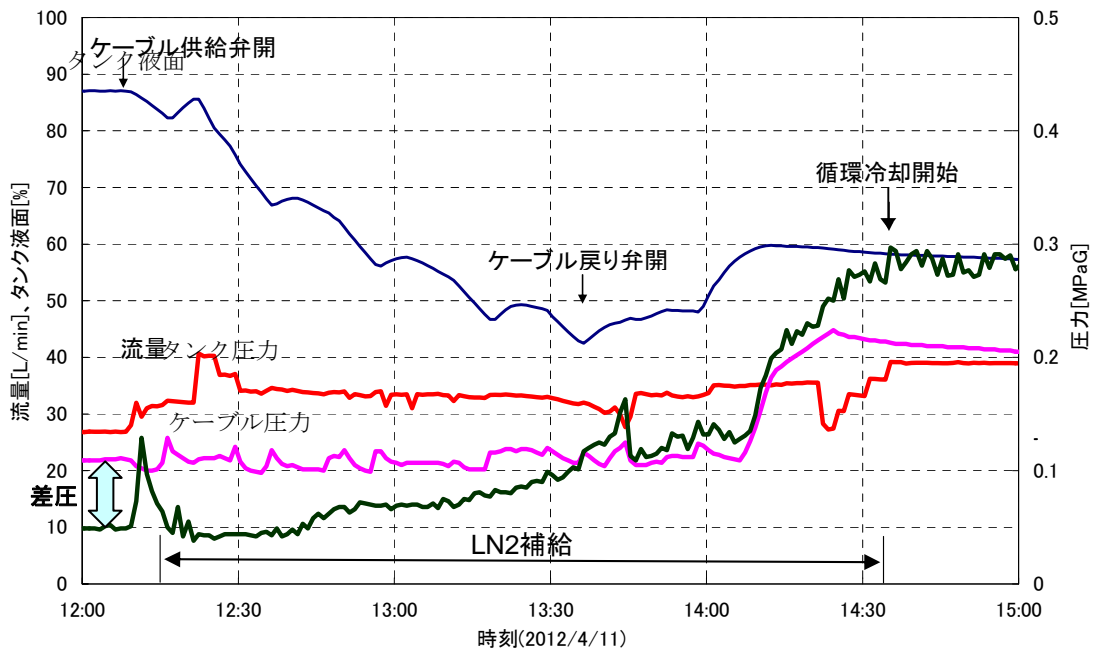


図 2.4.6-2 実証システム循環冷却移行作業中状態 (2回目)

2.4.7 系統連系前の実証ケーブルシステム性能の検証

実系統接続運転を実施するにあたり、2012年9月に第3回目の超電導ケーブルシステム冷却を実施した。これまで2回の冷却試験で実施したC・tan δ 測定およびI_c測定などの電気評価試験に加え、DC課電試験、部分放電測定試験を実施し超電導ケーブルシステムの健全性を確認した。また、測定された静電容量および部分放電伝搬速度よりケーブルのインダクタンスを計算し、従来ケーブルでの値との比較を実施した。

2.4.7-1 ケーブル電気特性評価 C・tan δ 特性

2.4.3-2節の「単体試験の検証 C・tan δ 特性」で説明した試験回路、試験方法により第3回目冷却(3rdクール)においても静電容量Cならびに誘電正接tan δ の測定を実施した。

(1) 1st、2ndクール試験での結果と、3rdクール試験の結果比較

第3回目の初期冷却後に実施したケーブルC、tan δ の測定結果を表2.4.7-1に示す。表中には第1回、第2回初期冷却試験後に実施した結果もあわせて示す。各回の測定の結果を比較すると、静電容量は各回とも約185nFでばらつきは小さく、tan δ に関しても設計値通り約0.1%以下となっている。

表 2.4.7-1 各冷却におけるケーブル静電容量、誘電正接測定結果

冷却	測定時刻	ケーブル部 平均温度 (K)	ケーブル	
			C(nF)	tan δ (%)
第1回	2012/4/13 15:00	74.6	185.84	0.078
第2回	2012/6/8 23:00	77.3	184.90	0.054
第3回	2012/9/24 18:36	79.1	185.44	0.085

(2) 評価結果

各冷却時の静電容量、誘電正接を測定した。各回の測定結果は設計値を満足しており、かつ各値のばらつきも小さくなっており、各冷却時においてこれら定数に大きな変化が見られていないことを確認した。超電導ケーブルの電気定数が冷却試験を通じて安定であることが確認できた。

2.4.7-2 ケーブル電気特性評価 Ic 特性

2.4.3-3 節の「単体試験の検証 Ic 特性」で説明した試験回路、試験方法により第3回目冷却(3rd クール)においても77Kにおける導体部の Ic 測定試験を実施した。

(1) 1st、2nd クール試験での結果と、3rd クール試験の結果比較

初期冷却1回目～3回目の Ic 測定結果を図2.4.7-1に示す。いずれの測定結果も、設計値と同等な約6400 A@77 Kであった。

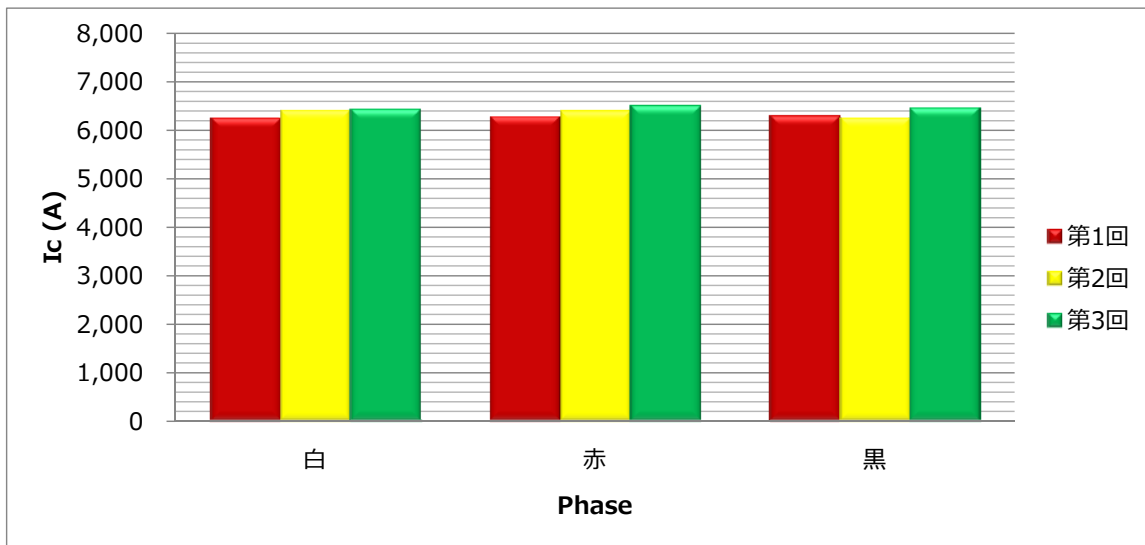


図2.4.7-1 Ic 測定結果(第1回目～第3回目冷却)

(2) 評価結果

ケーブルの布設や初期冷却などがケーブル性能に影響を及ぼすことなく、2回の熱サイクルと1回の冷却を実施しても熱機械的に安定しており、良好な性能を維持していることを確認した。

2.4.7-3 単体試験の検証 DC 課電試験

(1) 目的

ケーブル製造・布設・現地工事後のケーブル全長の絶縁性能確認を行うため、DC 耐電圧試験を実施した。試験条件は電技解釈 14 条（試験電圧=系統最大電圧 69 kV × 裕度 1.1 × 2 = 151.8 kV）に基づき、151.8 kV - 10 分間とした。

(2) 試験回路、試験方法

絶縁抵抗測定のための試験回路概略を図 2.4.7-2 に示す。B 端末 CH に試験用リード線を取り付け、各相 - 接地間および各相間の絶縁抵抗試験を実施した。なお DC 耐電圧試験前後に、ケーブル各相と接地間および各相間の絶縁抵抗試験（メガー / 1 kV）を実施し、良好であることを確認した。

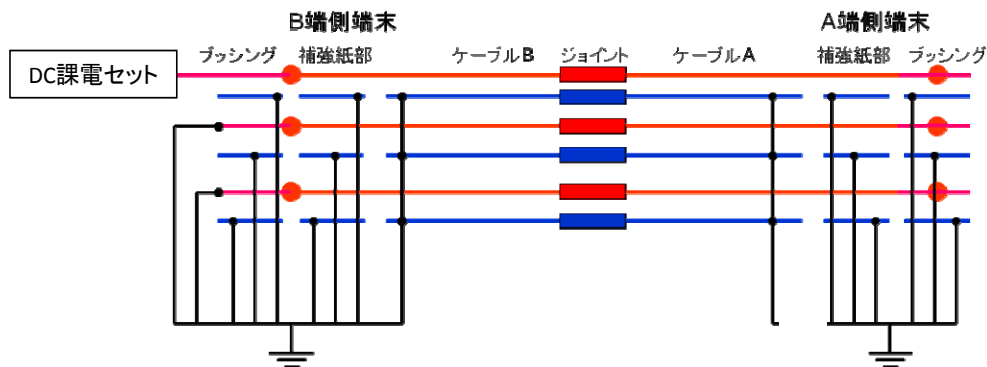


図 2.4.7-2 DC 耐圧試験回路

なお試験時の冷却条件は、ケーブル平均温度：77.3 K、圧力：0.15 MPaG（リザーバタンク圧力 / 警報下限値）、LN2 流量：40 L/min とした。

(3) 試験結果

2012 年 9 月 25 日に実施した DC 耐電圧試験（DC 151.8 kV - 10 分間）の状況を図 2.4.7-3 に、リーク電流測定結果を表 2.4.7-2 に示す。各相高圧部 - 接地間で行った DC 耐電圧試験 10 分間を無事完了し、その際のリーク電流の増大もなく、良好に課電が行えた。



図 2.4.7-3 DC 課電試験実施状況

表 2.4.7-2 DC 耐電圧試験時の各相漏洩電流の変化

経過 時間	漏洩電流／線路亘長 (μA)			経過 時間	漏洩電流／線路亘長 (μA)		
	黒	赤	白		黒	赤	白
1分	8.5	10.0	12.0	6分	8.5	8.5	9.0
2分	8.5	9.0	10.0	7分	8.5	8.5	8.0
3分	8.5	8.5	9.5	8分	8.5	8.5	8.0
4分	8.5	8.5	9.0	9分	8.0	8.5	8.0
5分	8.5	8.5	9.0	10分	8.0	8.5	8.0

(4) まとめ

実証試験運転前に超電導ケーブル全長への DC 課電を実施し、電技解釈となる 151.8 kV-10 分間の課電試験に合格した。この結果より、ケーブルシステムの電気絶縁の健全性が確認された。

2.4.7-4 単体試験の検証 部分放電試験

(1) 目的

実証試験における送電時、ケーブルシステムの部分放電システムを測定し、今回構築する測定系の感度を超える放電が発生していないことを確認する。

(2) 試験回路、試験方法

図 2.4.7-4 に計測システムを示す。両端末部の補強紙遮蔽層接地線とブッシング遮蔽層接地線それぞれに取り付けた検出器の信号を信号処理装置に導入し、データ収集および解析を行った。解析により放電信号の位相 ϕ 、強度 Q および頻度 n を算出し、得られた波形の状態などから部分放電判定を行った。

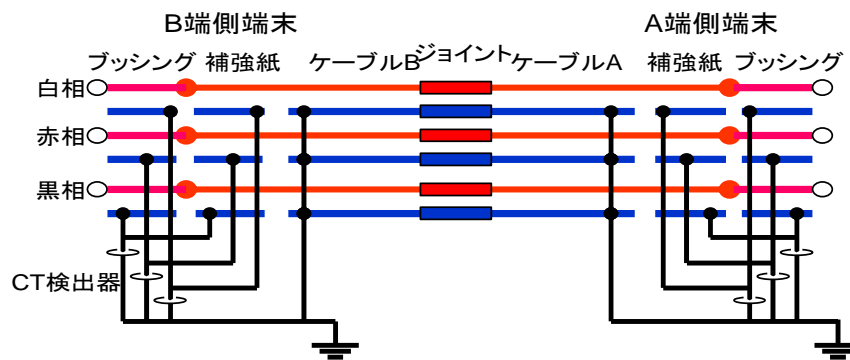


図 2.4.7-4 部分放電測定回路

(3) 試験結果

第 3 回冷却時、課電を実施しない（すなわち課電電圧 0 kV）の状態では超電導ケーブル端末両端に模擬パルスを注入し、測定感度の確認を実施した。その結果、今回の超電導ケーブルシステムにおける測定感度は端末部で約 50 pC、ケーブル部中央で約 200 pC と確認された。系統接続前に測定した部分放電測定の $\phi - Q - n$ の測定結果を図 2.4.7-5 に示す。

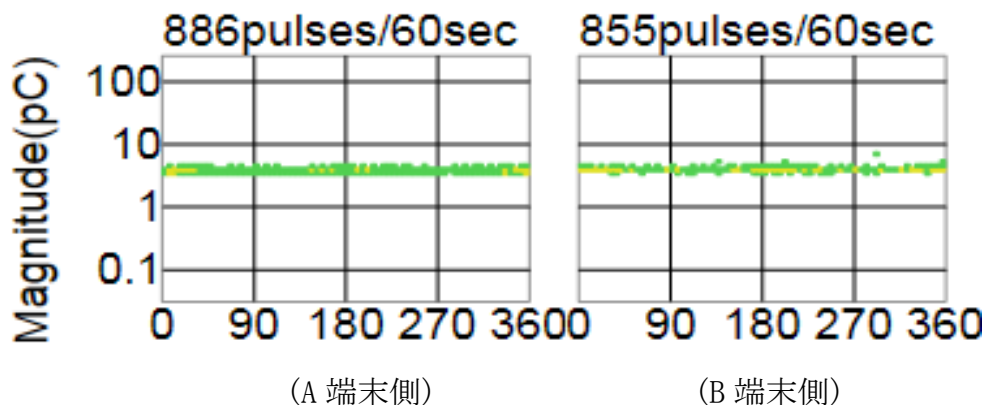


図 2.4.7-5 部分放電測定結果(実系統接続前)

(4) まとめ

超電導ケーブルシステムに対する部分放電測定回路を構築し、実系統接続前の測定を実施したところ、測定感度を超える部分放電は発生していないことを確認した。

2.4.7-5 単体試験の検証 ケーブル定数評価（静電容量、インダクタンス）

(1) 目的

超電導ケーブルシステムを既設の電力系統に接続する際、系統安定度などの系統解析に必要となる静電容量やインダクタンスの測定および計算を実施する。

(2) 測定方法

静電容量 C に関しては、2.4.3-2 節および 2.4.7-1 節で報告したケーブル電気特性評価結果により測定を実施した。インダクタンス L (H/m) については下記の通り式(2.4.7-1)が成立するため、既知のコア単位長さ辺りの静電容量 (F/m) の他、信号の伝搬速度 V (m/s) を測定することにより求めた。伝搬速度は片方の端末からパルス信号を入力した際、もう方端末に到達する伝搬時間より求めた。

$$\text{インダクタンス } L : L = \frac{1}{CV^2} \quad [\text{H/m}] \quad \dots (2.4.7-1)$$

(3) 測定、計算結果

図 2.4.7-6 に B 端末側に模擬パルスを注入した際、A 端末に波形が到達した際のオシログラフ波形を示す。測定の結果、伝搬時間は $1.2 \mu\text{sec}$ と求めた。この結果より伝搬速度 V を求めると、 $V = 1.9 \times 10^2 \text{ m/sec}$ となった。表 2.4.7-3 のデータより上式を用いてケーブル単位長さ辺りのインダクタンス L を計算すると、 $L = 0.10 \mu\text{H/m}$ と求めた。表 2.4.7-4 にインダクタンスについて既存ケーブルの一般的な値との比較値を示す。

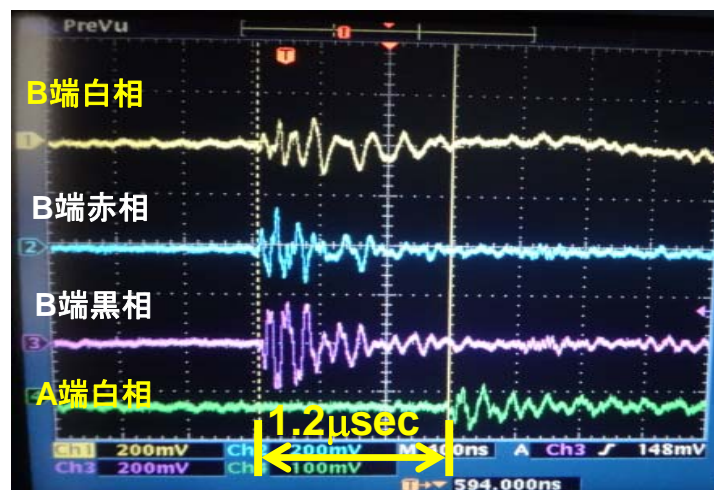


図 2.4.7-6 超電導ケーブル伝搬速度測定

表 2.4.7-3 ケーブル定数測定結果

要素	測定結果	備考
C	0.267 [nF/m/相]	初期冷却時に測定(185 [nF]) →設計値と一致
tan δ	0.08%	設計値:0.1%以下
(伝搬速度)	1.9×10^2 [m/ μ s]	測定値:1.2[μ s]

表 2.4.7-4 インダクタンス計算結果

要素	計算結果	備考
L	0.10 [μ H/m]	・短尺サンプル試験結果: 0.124 [μ H/m] ・一般的なCVケーブルの値: 0.16 [μ H/m]

(4) まとめ

系統解析に必要となる、超電導ケーブルシステムの静電容量C、インダクタンスLを実験結果により求めた。インダクタンスを既存ケーブルと比較した結果、約6割の値であることがわかった。

2.4.7-6 圧力損失測定

(1) 目的

LN2 循環冷却時におけるケーブルシステムの圧力損失を測定し、最適パラメーターを検証する。

(2) 測定方法

図 2.4.7-7 に測定回路を示す。液体窒素は冷凍機室よりまず A 端末に導入され、ケーブル A、ジョイント、ケーブル B を通過した後端末 B に戻り、冷凍機室に送られる循環運転が実施される。この際、図 2.4.7-7 に示すようにケーブルシステムの出入り口に取り付けた圧力計 PA、PB にて両端の圧力を観測し、流量を変えた場合の差圧 PA-PB を計算する。

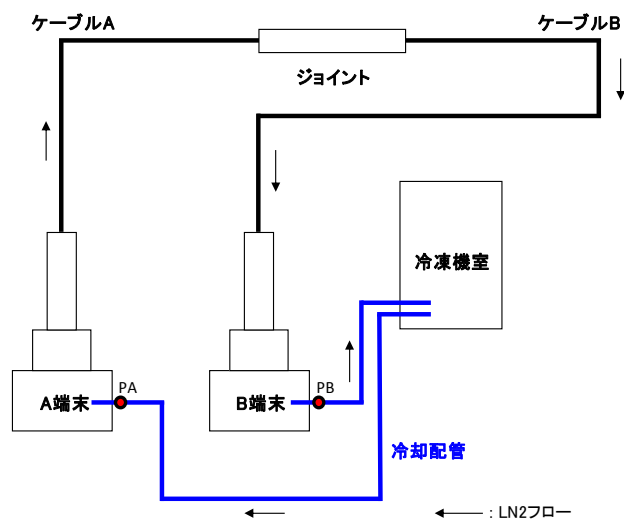


図 2.4.7-7 圧力損失測定回路

(3) 測定結果

流量を約 18 L/min から 40 L/min に変化させた際の測定結果を図 2.4.7-8 に示す。圧力損失は流量の二乗に良く比例した。定格流量 40 L/min におけるケーブルシステム全体の圧力損失は約 31 kPa であり、ケーブル部圧力損失は約 15 kPa/250 m として端末部圧損 は約 8 kPa/基と予想された。

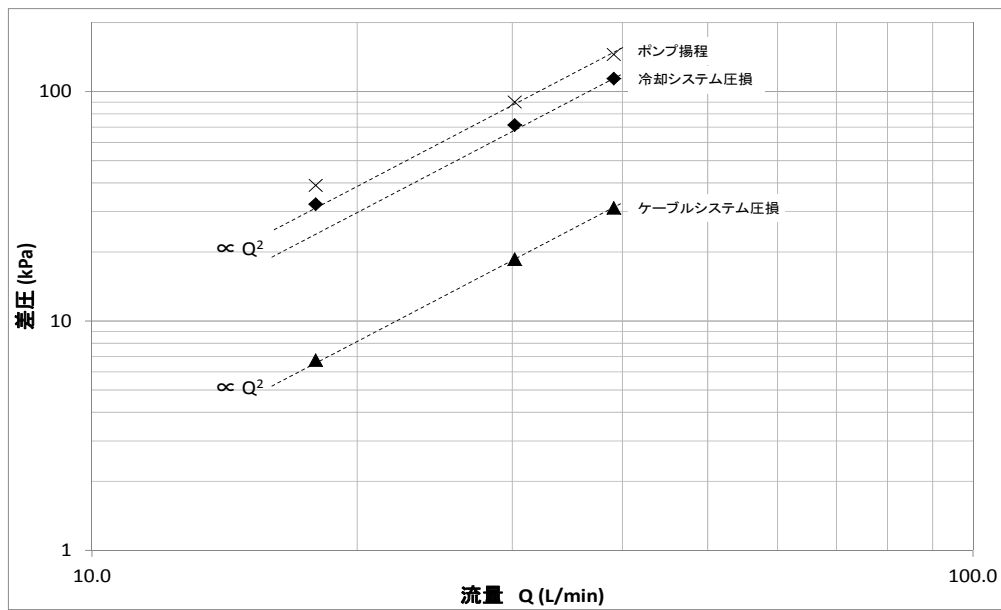


図 2.4.7-8 システムの流量－圧力損失特性

(4) まとめ

ケーブルシステムの圧力損失について測定を実施し、各部で予想される損失を求めた。この結果、ケーブルシステム全体で約 30 kPa の圧損となることがわかった。

2.4.8 系統連系前の冷却システム性能の検証

2.4.8-1 ケーブルシステム接続後の冷却システム性能特性

(1) 循環ポンプ性能特性

冷却システム試験において循環ポンプ能力の確認は実施しているが、全体の圧力損失が変動するため、実証システムでの循環ポンプの揚程－流量特性を確認した。図 2.4.8-1 に今回の測定結果と冷却システム試験での循環ポンプ能力測定結果を示す。

冷却システム試験においては、流量の調整を周波数固定でバルブ開度変更により行っていたのに対し、実証システムの試験においては、周波数の変更によって行っているためグラフの形状が異なる。しかし、流量と揚程の傾向に乱れはなく、このまま周波数を増加させた場合、冷却システム試験の 66.7 Hz の性能曲線と交わることから、実証システムにおいても循環ポンプ能力特性は大きく変わらないことが確認された。

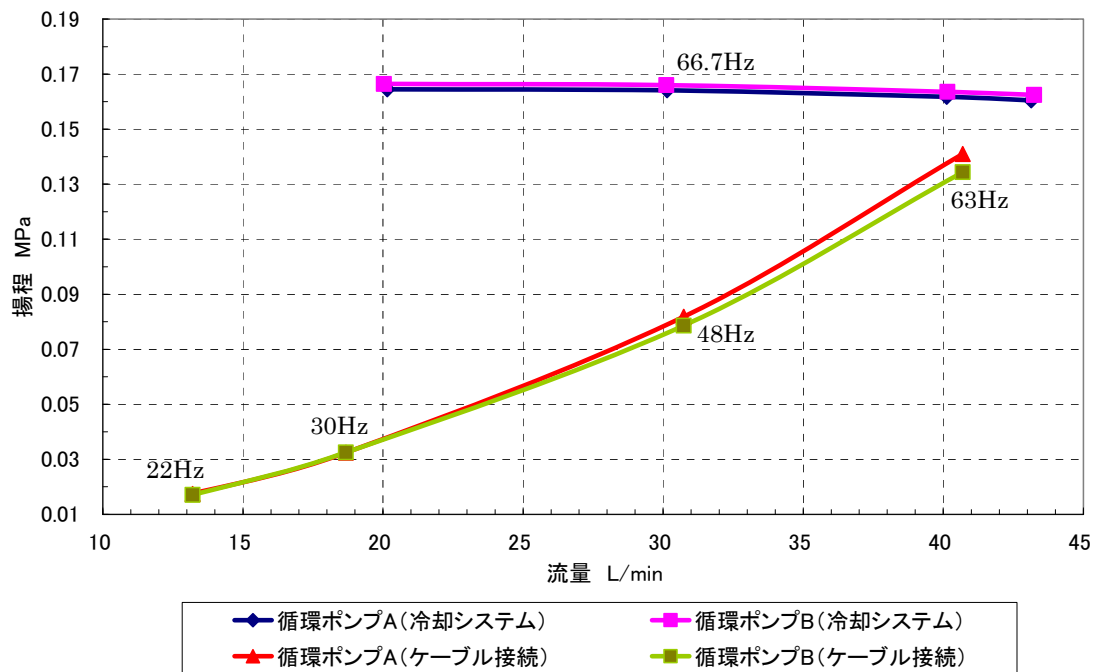


図 2.4.8-1 循環ポンプ能力測定結果

(2) 冷却能力の循環流量依存性

冷却能力と循環流量の関係を確認し、最適流量を検証するために循環流量を変更した場合における冷却能力の測定を実施した。実証システムでの温度一定状態としての試験では、冷凍機コールドヘッドヒータにより冷却能力調整を行っており能力変化が分かりにくいため、冷却システムにおける測定結果で検証を行った。運転条件は、冷凍機6台、温度69 K、流量30~57 L/minの範囲である。

図 2.4.8-2 に循環流量と冷却能力の関係を示す。図に示すように、40 L/min 以上においては、若干ではあるが能力が低くなっている。要因としては、図 2.4.8-3 に示すように流量増加により圧力損失が増加しており、これによる熱損失の増加が要因と考えられる。

本結果から、循環流量については40 L/minで運用することとした。

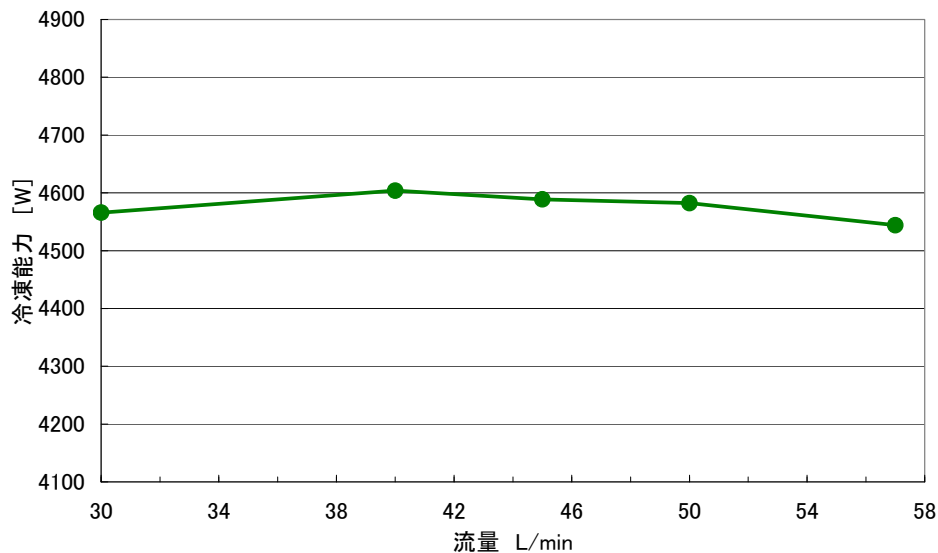


図 2.4.8-2 冷却能力の循環流量依存性

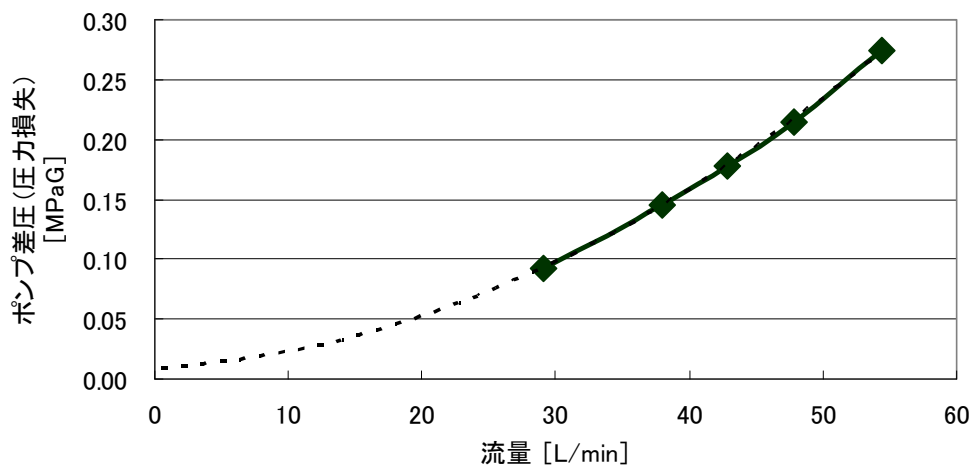


図 2.4.8-3 流量と圧力損失の関係

2.4.8-2 ケーブルシステム接続後の冷却システム制御性確認

(1) 温度制御特性確認

冷却システムの温度制御試験及び総合試験において、冷凍機 ON-OFF 制御により設定温度範囲内で制御可能であることは確認している。しかし、実証システムは液体窒素容量が異なるため、冷却システム試験とは温度変化特性が異なると考えられた。このため、実証システムにおいても同様の温度制御が行えるかを確認した。また、温度変動特性を確認した。

図 2.4.8-4 に設定値 69 ± 1 K における超電導ケーブル出入口変動を示す。図に示すように制御点としている質量流量計内温度とケーブル供給温度については、冷凍機の発停後すぐに温度が変動し、設定値の 69 ± 1 K で制御されている。対して、ケーブル戻り温度に関しては入口側の変動に対して時間遅れがあり、約 2 時間後に変動し始めるが、入口側と同様に ± 1 K の範囲内で変動をしている。冷凍機発停周期は、熱負荷により変動するが、図 2.4.8-4 の例では停止⇒運転⇒停止の 1 周期は約 40 時間となっている。

この結果から、温度変動特性は異なるが、ON-OFF 制御により設定値 ± 1 K 内で制御可能であることを確認した。

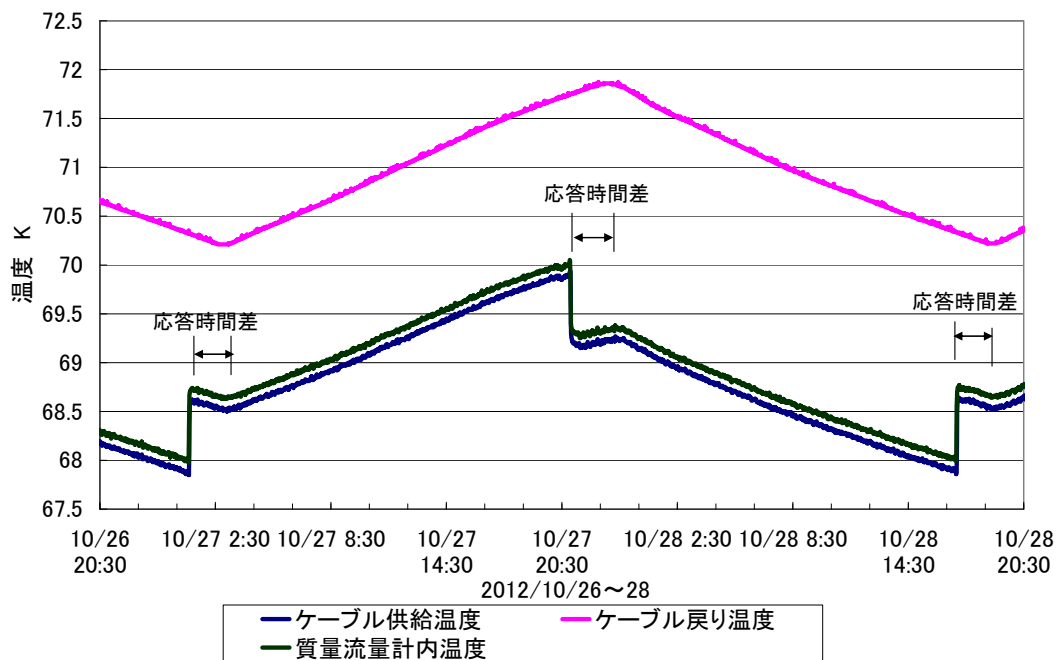


図 2.4.8-4 温度制御試験結果

(2) 圧力制御特性確認

実証システムの状態で各加圧制御の所定動作が正常に行われることを確認する。加圧制御停止時の圧力低下状況、各圧力制御にて所定圧力で制御可能であることを確認する。図 2.4.8-5 に試験中のリザーバタンク内圧力、リザーバタンクヒータ出力、輻射盤温度を示す。

自然加圧制御停止後 5 時間、状態推移を確認した結果、圧力低下量は 0.002MPaG 程度でほぼ低下しないことが確認された。冷却システム試験においても同程度であったため、ケーブルシステム接続の減圧特性への影響はないことが確認された。

自然減圧状態を確認後、ヒータ加圧の作動設定圧力 0.175 MPaG まで減圧を行い、設定圧力でヒータが動作することを確認した。作動確認後は、ヒータ作動圧以上の状態が続いたが再び設定圧力付近となった後は約 1 時間周期でヒータの ON-OFF を繰り返しながら設定圧力で安定することを確認した。この ON-OFF 周期についても冷却システム試験と同様であった。

外部ガス加圧制御の動作を確認するため、ヒータ制御を停止させ作動設定圧力の 0.150 MPaG まで減圧を行った。しかし、外部ガス加圧作動圧力付近で安定したが、加圧用ガスボンベ残圧に変動がなく、外部ガス加圧作動の有無を確認できなかった。

そこで、タンク内の窒素ガスの放出を行いながら作動確認試験を行い、ボンベ残圧の減少から、外部ガス加圧制御の動作を確認し、設定圧力付近で圧力が安定することを確認した。

上記の試験結果から、実証システムにおいてもヒータ加圧、外部ガス加圧に関しては冷却システム時と同様の制御が可能であることが確認された。

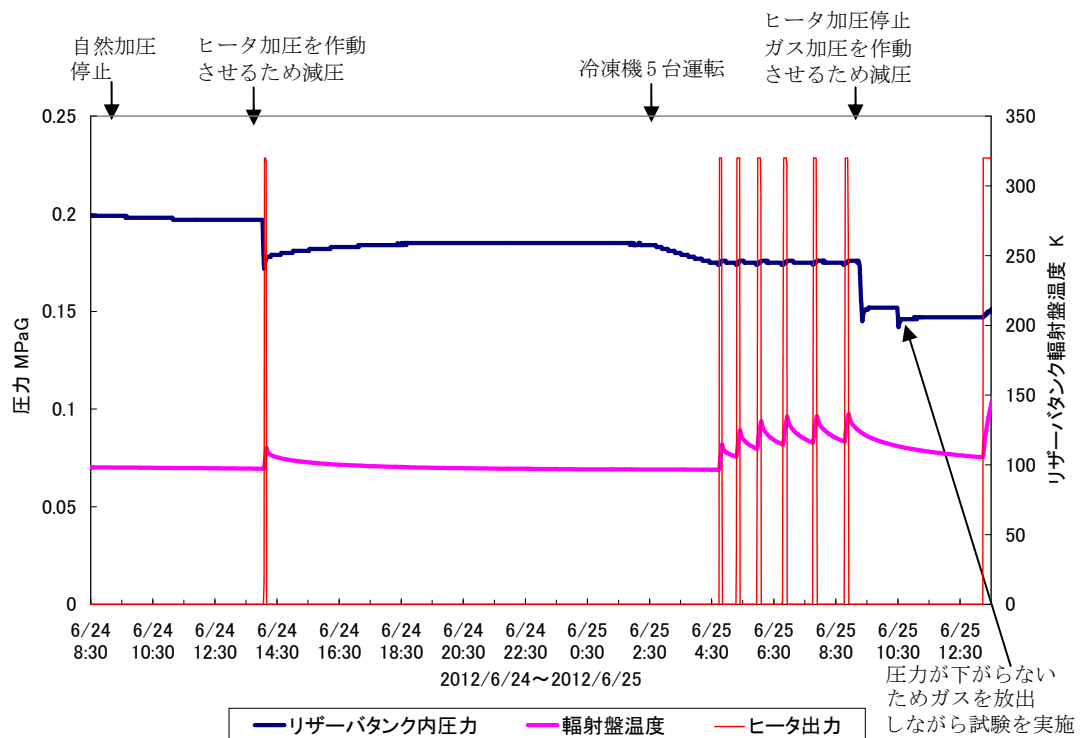


図 2-4-8-5 加圧制御特性確認結果

図 2-4-8-6 に温度制御中の自然加圧による圧力制御状態を示す。温度及び液面が変動した場合においても、リザーバタンク内圧力は自然加圧作動設定圧力の 0.2MPaG 付近で安定していることを確認した。

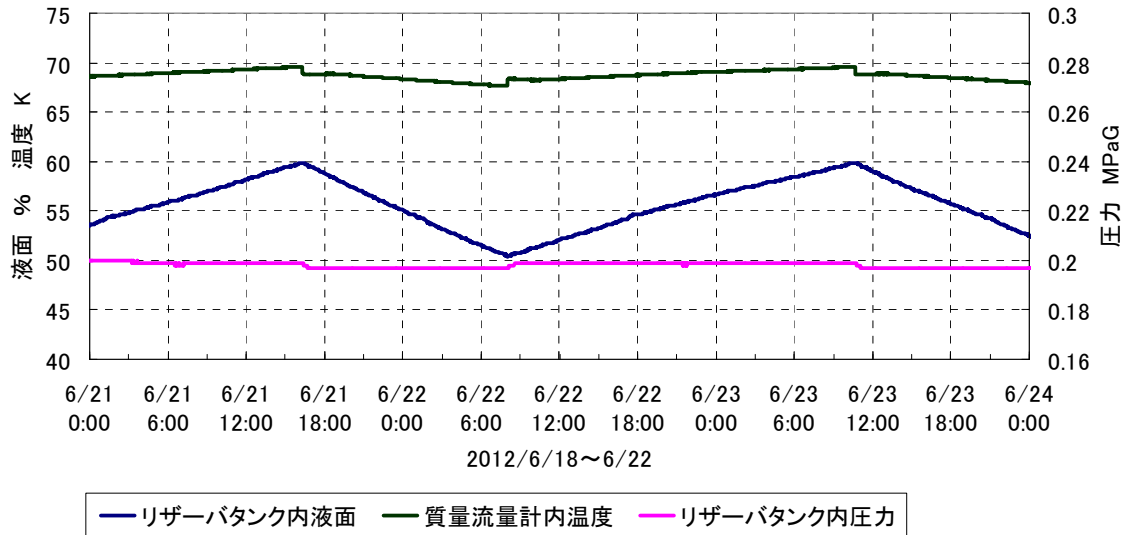


図 2. 4. 8-6 温度制御中圧力制御状態

実証システムにおける圧力制御動作確認の結果、冷却システムと同様の制御が可能であることを確認した。

(3) 循環流量制御特性確認

実証システムにおける、循環流量制御が正常に行われるかを確認する。図 2.4.8-7 に温度制御中の質量流量計内温度、液面、圧力、循環流量を示す。温度、液面、圧力が変動した場合においても循環流量は変動することなく、設定値である 40L/min で安定している。

ただし、長期運転においてはフィルタ目詰まりや循環ポンプ状態により流量の変動が起こる可能性があるため長期運転における安定性の検証は系統関係後のデータも合わせて検証する。

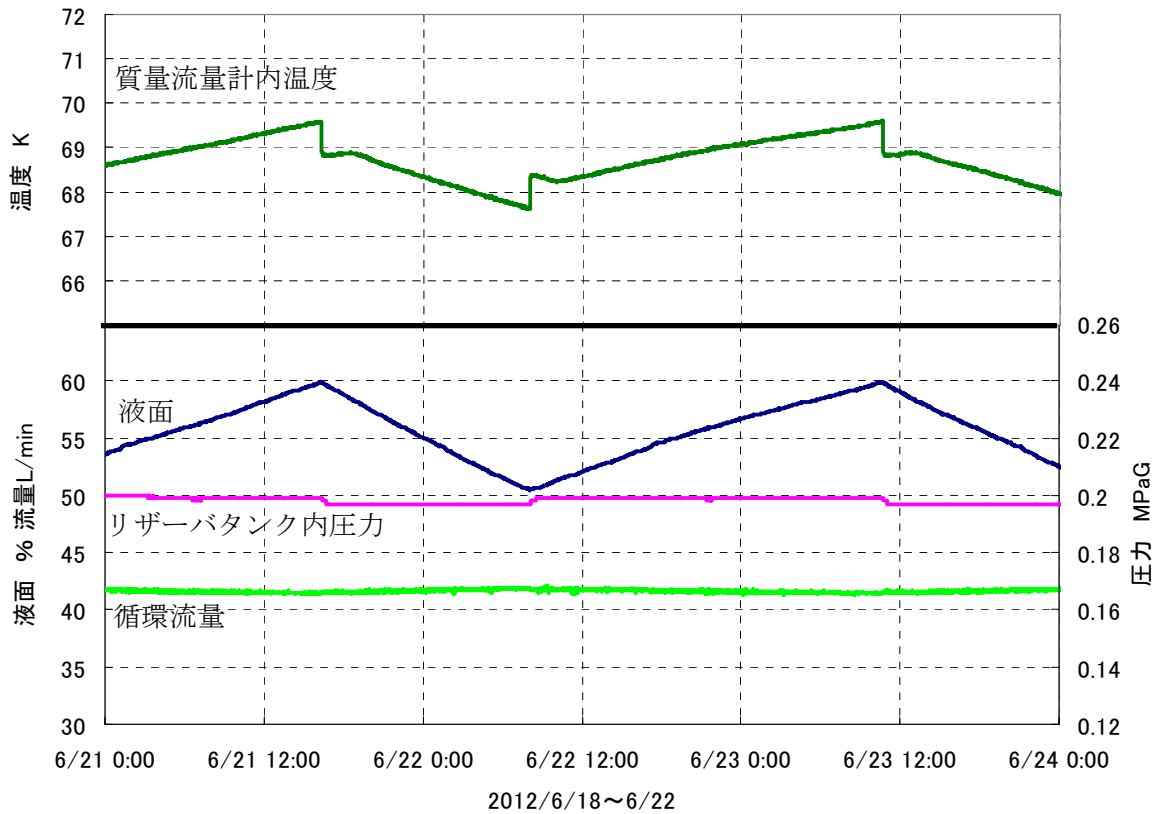


図 2.4.8-7 温度制御中の循環流量状態

2.4.8-3 ケーブルシステム接続後の主要機器メンテナンス作業確認

ケーブルシステム接続後の循環ポンプ、フィルタのメンテナンス作業について確認を行った。それぞれの作業手順に関しては2.4.5-4節と同様の方法で実施している。

(1) 循環ポンプメンテナンス作業確認

循環ポンプはどちらも運転中であることからメンテナンスのために、取り外す循環ポンプは停止させ内部の昇温を行う必要がある。図2.4.8-8に昇温中の循環ポンプの出入口温度、ケーブル供給温度を示す。図に示すように循環ポンプ吐出温度についてはポンプ停止から36時間後には280K付近で安定状態となっており昇温可能であったが、吸入側は液体窒素温度であり液体窒素が残留している。これは循環ポンプ部分が構造上、内部の液を放出できないためである。

昇温している間、供給温度の変動はないことから、循環ポンプ部分昇温による実証システム運転への影響はなかった。

吸入側の温度が低いことから、取り外し時の内部結露が考えられた。内部結露対策のために内部の窒素置換を行った袋内で取り外し作業を行った(図2.4.8-9)。取り外し後の内部に結露がなかったことから、対策が有効であることを確認した。

図2.4.8-10に作業中のケーブル供給・戻り温度及び流量の変化を示す。作業中に大きな変動は起こらず、復帰時に供給側温度の上昇が見られたが、戻り温度に関しては変化していないことが確認された。本結果から想定の作業方法で実証システムの運転へ影響を与えることなくメンテナンス作業が可能であることを確認した。

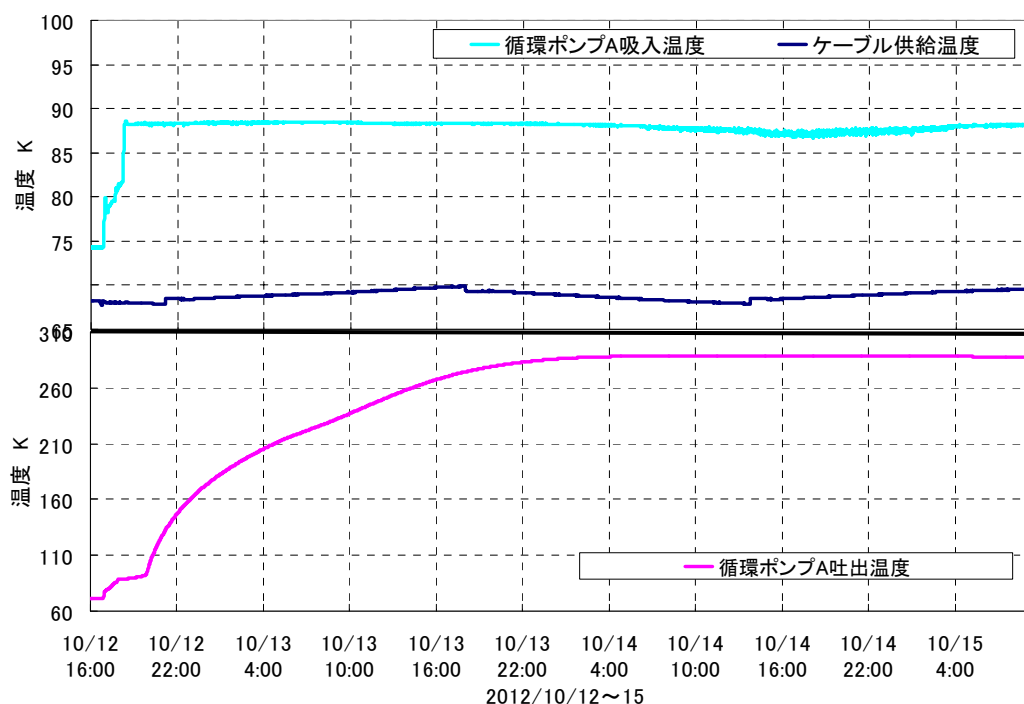


図 2.4.8-8 昇温中循環ポンプ出入口温度変化



図 2.4.8-9 ポンプ取り外し中状態

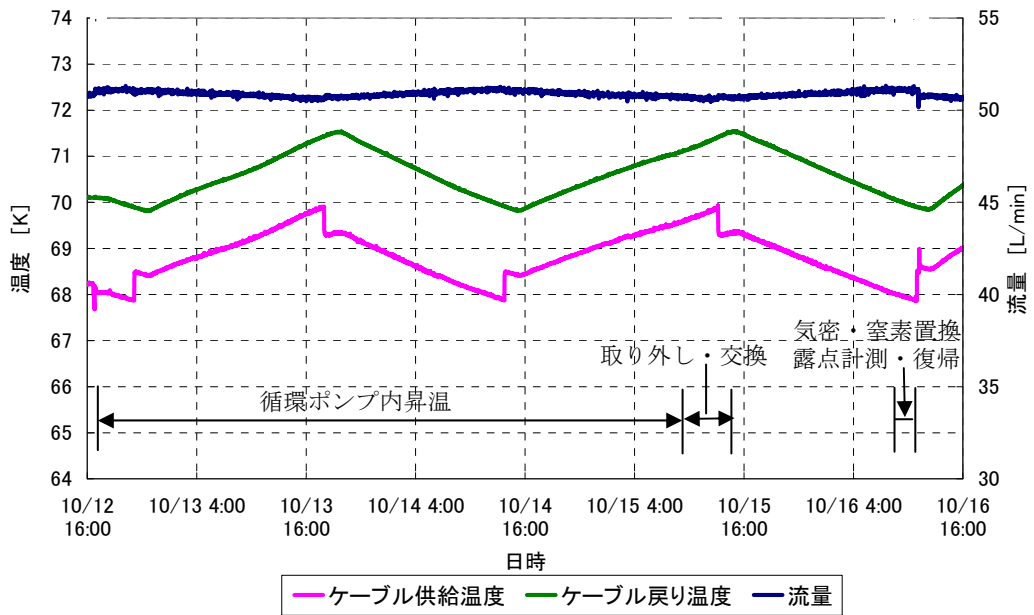


図 2.4.8-10 循環ポンプメンテナンス中ケーブル出入口温度、流量変化

(2) フィルタメンテナンス作業確認

循環ポンプ同様、ケーブルシステム循環運転中でのフィルタメンテナンス作業の確認を行った。フィルタラインをバイパスラインへ切り替え、前後のバルブを閉じ内部の昇温を実施した。

循環ポンプ同様、液体窒素が残留し内部が低温となるため取り外し時の内部結露防止のため、フィルタ周りを内部の窒素置換をした袋で被い実施した。(図 2.4.8-11) 取り外し後にフィルタ及び配管内部への結露は見られていない。

図 2.4.8-12 にフィルタメンテナンス作業中のケーブル供給・戻り温度、流量を示す。一連の作業中に大きな温度変動はなく、循環流量は、バイパス切り替え後にフィルタ分の圧力損失が低下するために増加するが、復帰後の流量はバイパス切り替え前と大きな変動はなく、ケーブル循環運転へ影響を与えることなく作業が可能であった。



図 2.4.8-11 フィルタ取り外し時状況

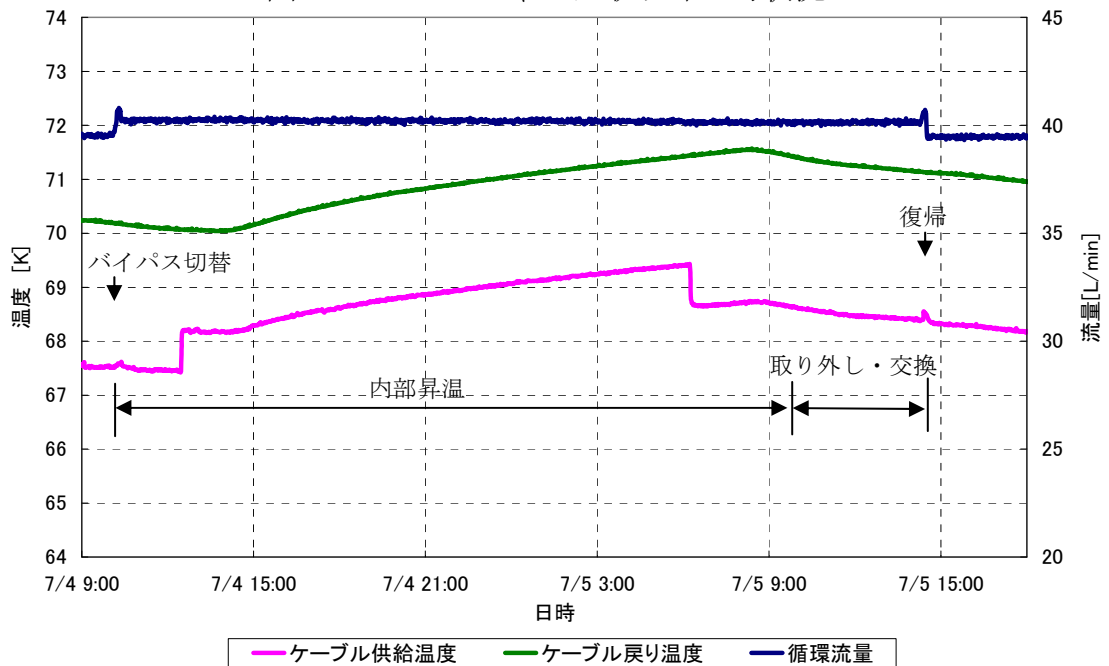


図 2.4.8-12 フィルタメンテナンス中温度、流量変化

2.4.9 系統連系時の運転技術の検証

(1) 超電導ケーブルの電気設備技術基準の適合検査

前述のとおり、超電導ケーブルを含めた実証システムに対する系統接続前の性能確認試験の結果は良好であり、また、変電設備（遮断器・断路器）に対する受け入れ試験の結果も良好であった。そこで、系統接続前に電気主任技術者による下記の社内検査を実施し、超電導ケーブルや変電設備を含めた実証システムが電気設備技術基準および電気設備の技術基準の解釈に適合するか確認を行った。

検査項目

- ・ 外観検査
- ・ 絶縁抵抗測定（絶縁抵抗測定記録）
- ・ 絶縁耐力試験（耐電圧試験記録）
- ・ 接地抵抗測定（接地抵抗測定記録）
- ・ 警報表示試験（警報試験結果報告）

検査の結果はいずれも良好であり、実証システムとして電気設備技術基準に適合することが確認された。

(2) 超電導ケーブルの系統連系手順

2.4.9(1)節にて記述したとおり、超電導ケーブルを含めた実証システムが電気設備技術基準に適合することを確認したことから、2012年10月29日の9時から変電設備および超電導ケーブルに対する系統課電試験を行った。主な手順は以下の通りである。

- ・ 図2.4.9-1(a)の通り、超電導ケーブルの両端に接続されている断路器LS1, LS2およびバイパス用断路器LST10を投入、遮断器CB1, 2を開放した状態で系統課電試験を実施し、断路器LS1, LS2, LST10の耐電圧性能に問題が無いことを確認した。
- ・ 続いて、図2.4.9-1(b)の通り、バイパス用断路器LST10を開放し、遮断器CB1, CB2を投入した状態で系統課電試験を実施し、遮断器CB1, CB2および超電導ケーブルの耐電圧性能に問題が無いことを確認した。

これらの系統課電試験結果が良好であることを確認したのち、高温超電導ケーブルシステムを実系統線路へ接続した。超電導ケーブルの系統への接続は、断路器LS1, 2および遮断器CB1, 2を投入し、バイパス用の断路器LST10は開放した状態から、154 kV/66 kV変圧器1次側に接続されている遮断器を投入することにより超電導ケーブルへの課電が開始され、66 kV母線に接続された遮断器を投入することによって通電が開始された。図2.4.9-2は超電導ケーブルを系統接続した際の電圧および電流値のグラフである。超電導ケーブルに対し、66 kVの電圧が印加され約400 Armsの負荷電流が流れたことが分かる。その後、バイパス断路器LST10と超電導ケーブルを併用した際のループ電流値の確認試験を実施した。その結果、バイパス用断路器と超電導ケーブルへの分流比率は9:1程度であることが確認された。

なお、図 2.4.9-3 は超電導ケーブルを接続した際のセレモニーの様子である。

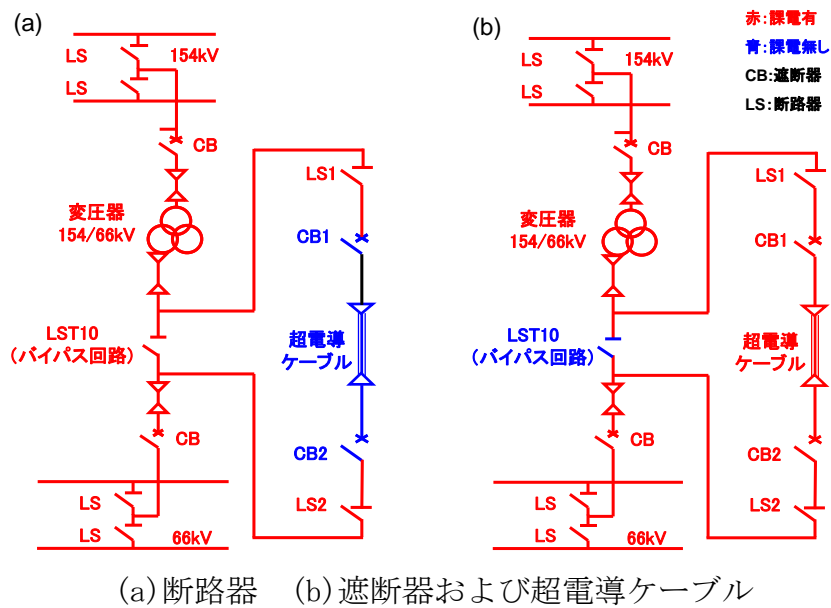


図 2.4.9-1 変電設備および超電導ケーブルに対する系統課電試験

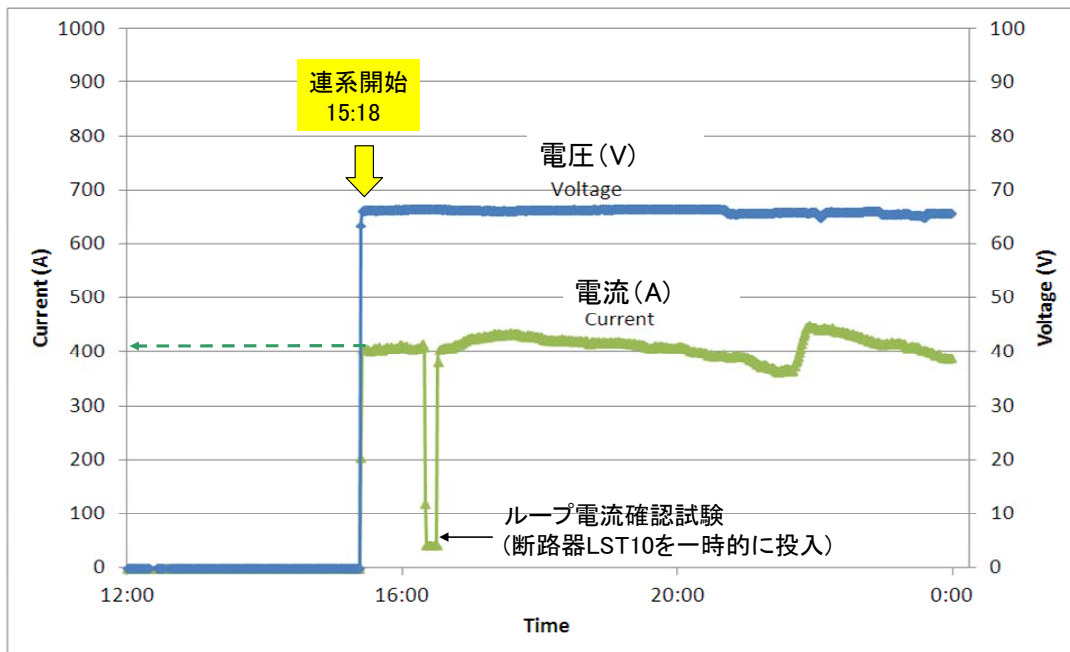


図 2.4.9-2 超電導ケーブル実系統接続時の電流および電圧値



図 2.4.9-3 接続セレモニーの様子

(3) 超電導ケーブルの運転初期時の特性について

系統連系後の約 1 週間における、超電導ケーブルへの通電電流・電圧、ケーブル供給温度・戻り温度およびケーブル内を流れる液体窒素の流量を図 2.4.9-4 に示す。同図より、系統連系により超電導ケーブルには 300~500 Arms の電流が通電され、66 kV の電圧が課電されたことが分かる。系統連系前の実証ケーブルシステムへの熱負荷は外部からの侵入熱のみであるのに対し、系統連系後は通電によるジュール損失および交流損失、課電による誘電損失が加わっており、これらの熱はケーブル内を循環する液体窒素に吸収される。そのため、液体窒素の温度はケーブルシステムを一周循環する毎にケーブル供給側と戻り側において温度差が生じるが、その値は 2 K 程度であることが同図から分かる。また、系統連系開始後、ケーブル供給側の温度は徐々に低下しているが、これは系統連系直後に動作していた冷凍機 5 台の冷却能力に対し、実証システム全体の熱負荷の方が小さいためである。その後、ケーブル供給側の温度が約 24 時間で約 1 K ほど低下し 68 K に達した後、ケーブル供給側の温度が上昇するのが同図より分かる。これは、冷凍機の運転台数はケーブル供給側の冷媒温度に対して中心値 69 ± 1 K の範囲で制御されており、ケーブル供給温度が 68 K に達したことで冷凍機が 1 台停止し計 4 台の運転となったことから、冷却能力が熱負荷より小さくなったためである。その後の運転温度も、冷凍機台数の制御によってケーブル供給側温度が 69 ± 1 K の範囲に収まっており、また、冷媒流量は 40 L/min で一定に維持されており、系統連系後も安定した運転が可能であることが確認された。

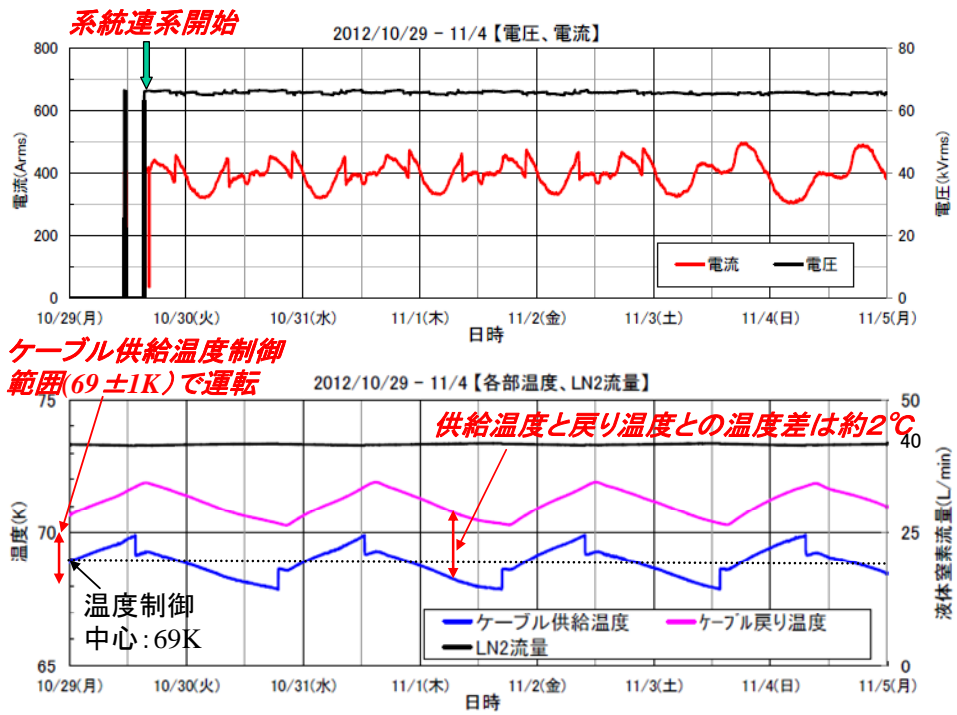


図 2.4.9-4 系統接続開始後の運転状況

2.4.10 系統連系後の実証ケーブルシステム運転性能評価

2.4.10-1 熱負荷経時変化

(1) 目的

実系統運転時のケーブルシステム熱負荷の経時変化を観測するとともに、気温や液体窒素温度の変化による無負荷熱損失の変化、課通電による電気損失の変化などを考慮した熱負荷計算値との比較を行い、長期運用時の熱負荷安定性の確認や、計算方法の妥当性の確認を実施する。

(2) 解析方法

2.4.3-5 節「単体試験の検証 実証ケーブルシステム熱負荷」で求めた方法により、ケーブルシステムの無負荷時の熱負荷を求めた。解析の結果、システム全体の無負荷時熱負荷は外気温 23 °C、平均液体窒素温度 69.58 K の際、平均値で約 2390 W と求めた。平均値の算出に際しては夜間の運転データを用い、日射の影響が極力小さくなるようにした。

この値をベースとして、外気温や日射、課通電損失が変化した場合のシステム熱負荷を求める際使用した式を式(2.4.10-1)に示す。無負荷熱損失はケーブルシステム表面温度と液体窒素温度との温度差に比例して変化すると考えた。これに各時点での通電損失、誘電損失を積算し系統運転中のケーブルシステム熱負荷の計算を実施した。

$$W(all) = 2390.1 \times \left(\frac{T_0 + \alpha + 273.15 - T_{all}}{23 + 273.15 - 69.58} \right) + Wca + 2 \times Wte + Wjo + Wdi$$

…(2.4.10-1)

ここに、

T_0 : 外気温(°C)

T_{all} : ケーブルシステム冷媒平均温度(K)

α : 日射による温度上昇(°C)

Wca : ケーブル A、B 通電損失合計(W)、

Wte : 端末通電損失(W/基)

Wjo : ジョイント通電損失(W/基)

Wdi : 誘電損失(W)

2390.1, 23, 69.58: それぞれ、無負荷熱負荷測定時の熱負荷平均値(W)、
外気温(°C)、平均液体窒素温度(K)

(3) 解析結果、原因の考察

2012年10月29日から開始した、実系統運転時の超電導ケーブルシステム熱負荷と、その計算値との比較を図2.4.10-1に示す。実系統運転開始から2013年4

月ごろまでは実測値と計算値がほぼ一致していたが、5月頃から実測値が計算値を上回る傾向が見られ始めた。各部の熱解析を実施したところ端末部の実測－計算の違いが大きい傾向となっていることがわかった。要因を検討した結果、端末部真空槽の真空度が系統接続前は 10^{-5} Torr 台で推移していたものが、2013年5月に確認したところ 10^{-3} Torr 台となっていた。このため熱負荷増加要因の一つとして端末真空度の悪化であると考え、真空引きなどの対応を実施した。図 2.4.10-1 に示す通り合計3回の端末真空引を実施したが、最初の2回は真空引き後封止すると再度真空度が悪化し、熱負荷が増加する結果となった。3回目の真空引き後は端末真空槽を封止しても熱負荷の増加は起こらず、計算値と実測値が比較的よく一致して推移した。これらの結果も 2.4.10-3 節で述べるように端末部真空度の値と相関が認められるため、端末封止真空度の悪化原因を調査し、長期にわたり良好な真空度を維持するための対策を今後検討することが重要である。

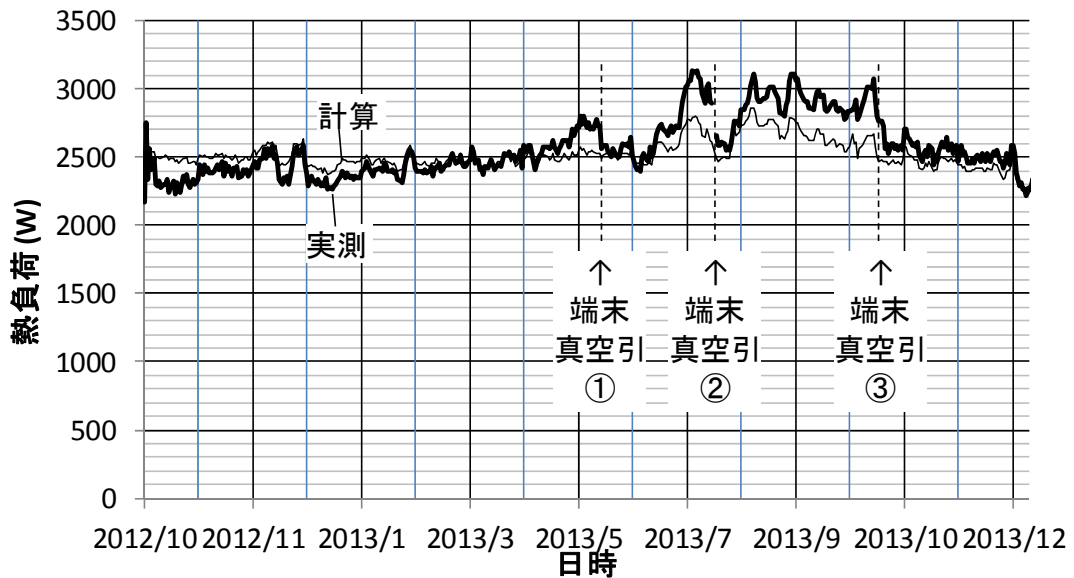


図 2.4.10-1 実系統運転時の超電導ケーブル熱負荷と計算値の比較

2.4.10-2 日射対策の検討

(1) 目的

熱負荷の経時変化を観測した際、日射によりケーブル表面温度が上昇し熱負荷の変動が大きくなったため、ケーブル管路表面に遮熱処理対策を実施しその遮熱効果を確認する。

(2) 遮熱塗料の仕様

使用した遮熱塗料の主な仕様を表 2.4.10-1 に示す。太陽からの放射光を反射する能力に優れ、塗膜自身の熱伝導率も低くなるよう工夫されている。図 2.4.10-2 の通り模擬の管路表面に遮熱塗料を塗布し、未施工の管路表面との温度をサーモグラフィで確認した所、最大で約 13 °C の温度低減効果が確認された。

表 2.4.10-1 遮熱塗料の仕様

項目	仕様
材料	アクリル水性塗料
反射率(JIS K5602)	81.9
耐久性	15 年以上
遮熱効果	最大約 13 °C の管路表面温度低減 (図 2.4.10-2) (旭変電所でのサンプル試験)

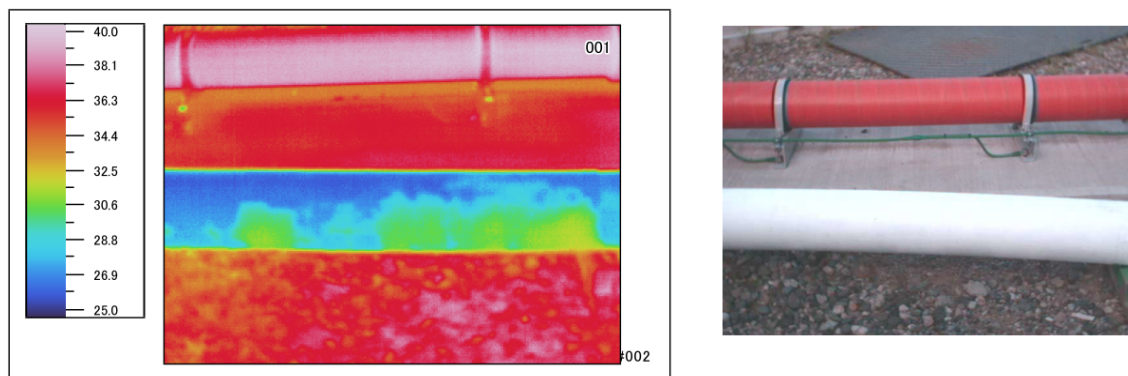


図 2.4.10-2 遮熱塗料効果確認

(3) 施工結果

上記遮熱塗料をケーブル管路に施工した結果を図 2.4.10-3 に示す。管路の他、コンクリートパッドにも遮熱施工を実施し、地面からの照り返しによる影響についても低減するようにした。

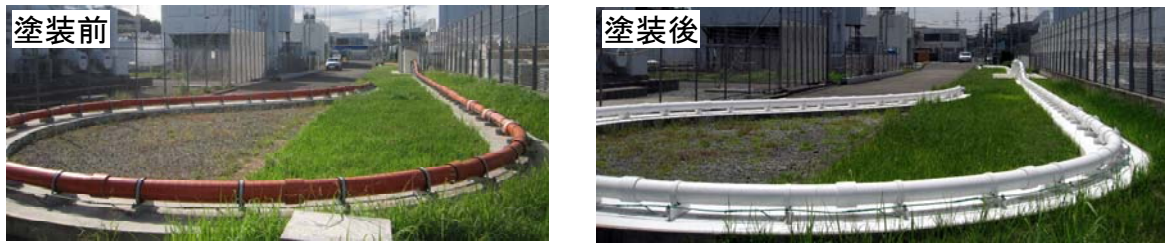


図 2. 4. 10-3 遮熱塗料施工前後の様子

(4) 遮熱効果のまとめ

図 2. 4. 10-4 にケーブル B における遮熱塗料施工前後の熱負荷の変化を示す。熱負荷の計算値は横浜市の外気温を考慮して計算したもの、実測は循環液体窒素のケーブル部温度差などから求めた値である。遮熱施工を実施する前は日中の熱負荷に対し、実測が計算よりも大きくなる傾向が認められ、夜間は両者がほぼ一致していることから、日射の影響によりケーブル B への熱負荷が増加していることがわかる。遮熱塗装施工後は 1 日を通じて計算と実測の差はほとんどなくなり、管路表面温度が日射により上昇することを抑制できていることがわかった。

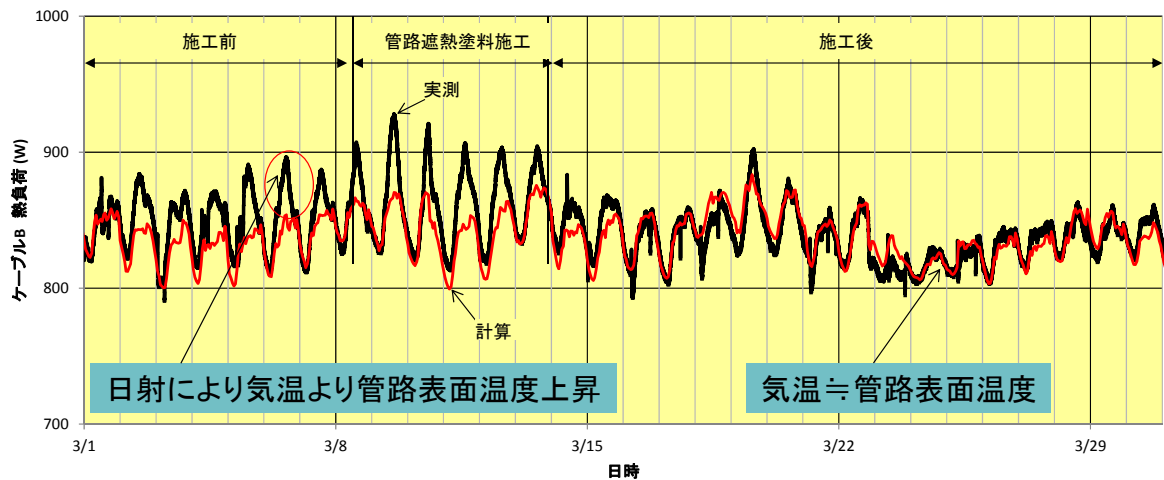


図 2. 4. 10-4 遮熱塗料施工前後での熱負荷の推移 (ケーブル B 部)

遮熱効果が確認されたため、その後端末、ジョイントについても遮熱施工を順次実施し、実証運転を継続した。

2.4.10-3 真空度の経時変化、熱損失特性への影響

(1) 目的

2.4.10-1 節「熱負荷経時変化」で述べたとおり、実証試験運転時に端末部の熱損失が悪化し、真空引きによりその改善が認められることがわかった。そこで本節では真空度と熱負荷の関係について調査する。

(2) 真空度－熱負荷の相関調査

2013年5月以降に測定を再開した端末A、Bの真空槽真空度を横軸、端末部熱侵入量の実測－計算値の差を縦軸にプロットした結果を図2.4.10-5に示す。真空度が 10^{-4} Torr以下では計算値との差がほぼ無くなるが、それ以上真空度が悪くなると実測熱負荷が増加し、 10^{-3} Torr付近では1端末あたり約100 Wの熱負荷の増加となった。この結果より端末熱負荷は真空槽の真空度に相関があることが確認された。

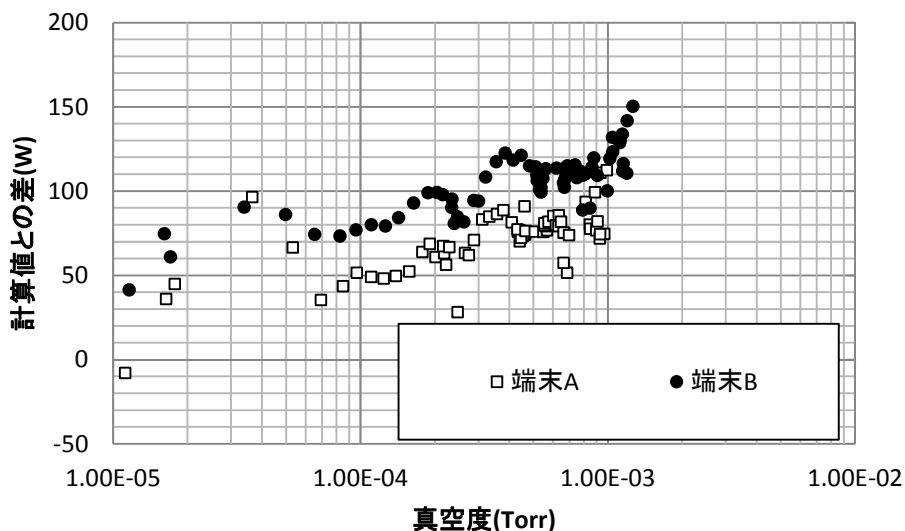


図 2.4.10-5 端末部真空度と熱負荷増加量の関係

(3) 再真空引きの効果、課題

2.4.10-1 節「熱負荷経時変化」の図2.4.10-1に示したとおり、真空引きにより真空度が良好に復帰するため熱負荷の増加を抑制することが出来ることがわかった。しかしながら真空引きにより封止真空度を維持できる場合と維持出来ない場合があることが判明した。これらの違いについて原因調査を進めるとともに、長期にわたり高真空を維持出来る方策についての検討が今後重要となる。

(4) まとめ

端末部の真空槽真空度と熱負荷の増加の関係について調査し、両者に相関があることを確認した。この結果より、長期にわたり熱負荷を安定して運用するためには

真空度を良好に維持することが必要である。実証試験運転の結果、真空度を良好に維持することに課題が見つかり、今後この対策検討が重要である。

2.4.10-4 実系統運転時の通電損失の評価

(1) 目的

実系統運転時の実負荷変動によるケーブル部通電損を計測データより分離し、得られた結果を短尺サンプル試験により求めた通電損と比較し、その整合性を確認する。

(2) 計算方法

実証試験における通電損は以下の式(2.4.10-2)で求めた。

$$\text{通電損} = \text{ケーブル部全熱損失} - \text{無負荷熱損失} - \text{誘電損失} \\ \dots (2.4.10-2)$$

ここにケーブル部全熱損失は2.4.3-5節「単体試験の検証 実証ケーブルシステム熱負荷」で述べたように、ケーブルシステム出入口温度差の実測値より算出した。また無負荷熱損失に関しては、2.4.10-1節「熱負荷経時変化」で述べた手順をケーブル部に応用し求めた。また誘電損失は2.4.3-2節「単体試験の検証 C・tan δ 特性」で求めた静電容量C、誘電正接 tan δ より計算した。

これに対し通電損失計算式は、超電導コアの短尺サンプルを用い4端子法で超電導部損失を計測した結果および、10 m サンプルにより超電導層へ通電した際の銅フォーマ・シールドへの分流比の実測値と、これに銅の比抵抗率、断面積を考慮してジュール損を計算した結果の合計として算出し、これを設計値とした。

(3) 計算結果

図2.4.10-6に、上記の検討で求めた実証運転時の通電損失を示す。夜間のデータのみをとりまとめた結果は設計値に近い結果となり、昼間のデータのみをとりまとめた結果は実測結果の方が大きくなる傾向となった。

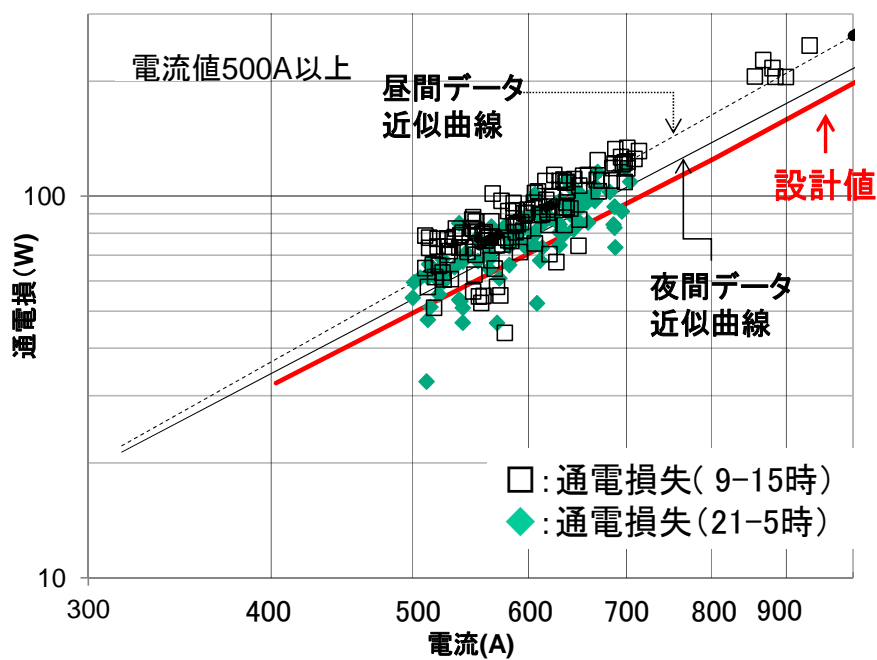


図 2.4.10-6 通電損の送電電流依存性(2012/12~2013/1)

(4) まとめ

通電損失の実測データは夜間をまとめた場合は設計値とほぼ一致した。また昼間のデータでとりまとめた場合、日射の影響による熱損失増加分が加わり、設計値より増加していると推定された。

2.4.10-5 長期運転時の部分放電評価

(1) 目的

長期実系統運転中の超電導ケーブルシステムに対し、定期的に部分放電計測を実施し、測定感度以上の部分放電が確認されるかを調査した。

(2) 確認方法

2.4.7-4 節「単体試験の検証 部分放電試験」で述べた部分放電測定装置を継続使用し、実系統運転中定期的に部分放電の測定試験を実施した。

(3) 確認結果

測定試験結果を表 2.4.10-2 にまとめる。実証運転開始前後および定期的な測定、再送電および長期実証試験終了直前などいずれの計測においても、測定感度以上の部分放電信号は検出されなかった。

表 2.4.10-2 長期実証運転中の部分放電測定試験結果

実施期間	2012年	2013年					
	10月29日	1月10、11日	2月8、14日	4月8、9日	6月21日	8月1日	12月25日
備考	系統 接続後	定期調査			系統 再接続後	系統 再接続後	長期系統接 続終了直前
結果	放電なし	放電なし			放電なし	放電なし	放電なし

(4) まとめ

実証運転試験中定期的に部分放電計測を実施し、測定感度以上の部分放電が検出されなかったことを確認した。

2.4.10-6 長期運転時のシールド電流評価

(1) 目的

実系統運転開始後、以下の2点を目的として超電導シールド層に流れるシールド電流測定を行った。

- ・ シールド層に誘導する電流値が設計通りであることの確認
- ・ 超電導シールド層にダメージがないことの確認

(2) 確認方法

実証ケーブルの終端接続部内にあるシールド層三相短絡部に取り付けたロゴスキーコイルを用いてシールド電流波形を測定し、超電導導体層に流れる電流波形と比較することで誘導率を算出した。

(3) 確認結果

各相のシールド電流波形を測定した結果を図 2.4.10-7 に示す。シールド電流誘導率を算出した結果は図 2.4.10-8 に示すとおりであり、全ての相で 89%である。また、導体電流との位相差は 1° 以下と小さいことが確認された。

この後、定期的にシールド電流測定を実施した結果、誘導率は 87~92%の範囲であった。本結果は設計値 92%とほぼ同等であり、超電導シールド層に大きなダメージはなく、想定どおりのシールド電流が誘導することが確認された。

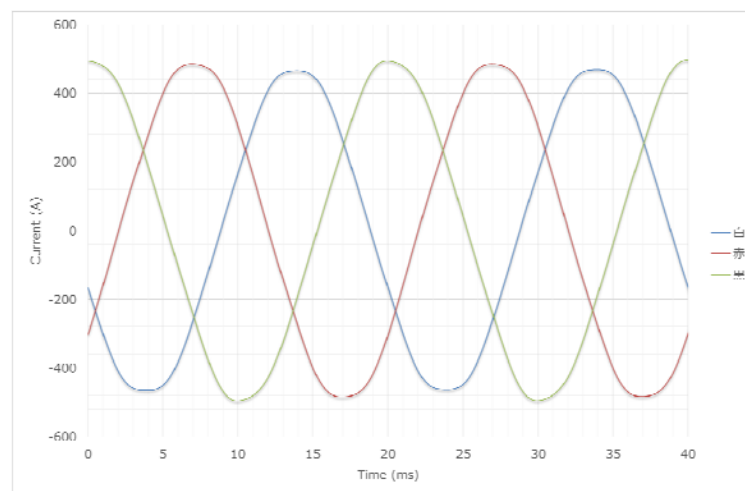


図 2.4.10-7 シールド電流波形 (2012 年 11 月 1 日 9:15)

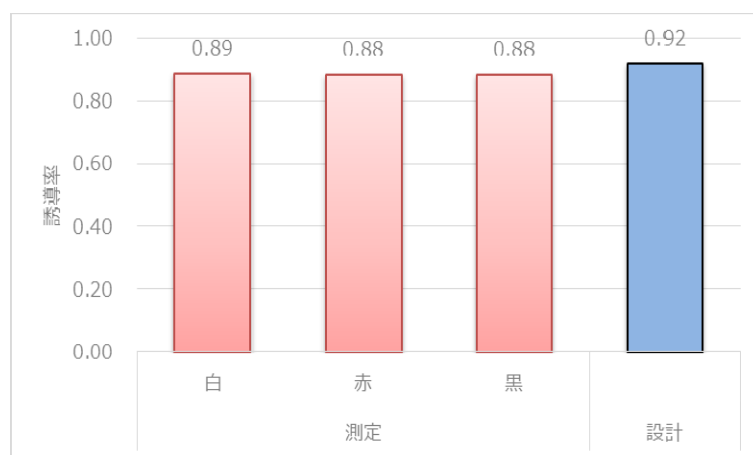


図 2.4.10-8 シールド電流誘導率

(4) まとめ

- ・ シールド電流誘導率測定結果は 87～92 %であり、設計値 92 %とほぼ同等であることが確認された。
- ・ 導体電流とシールド電流の位相差は 1° 以下であり、超電導シールド層に大きなダメージがないことが確認された。

2.4.10-7 ケーブル各部熱反応時間

(1) 目的

超電導ケーブルシステム内を循環液体窒素が循環しているが、この周回に要する各部の時間を把握し、将来の冷却系の設計に生かす。

(2) 確認方法

図 2.4.10-9 に冷凍機 4-5 台運転時の温度変化の代表例を示す。循環の流れ方向における温度計の順番は「ケーブル供給→ A 端末導入→ジョイント入口→ジョイント出口→ B 端末導入→ケーブル戻り」であり、冷凍機発停によりケーブル入口温度が急激に変化するが、この変化が各部に取り付けた温度計でどのように伝搬するかを調査した。

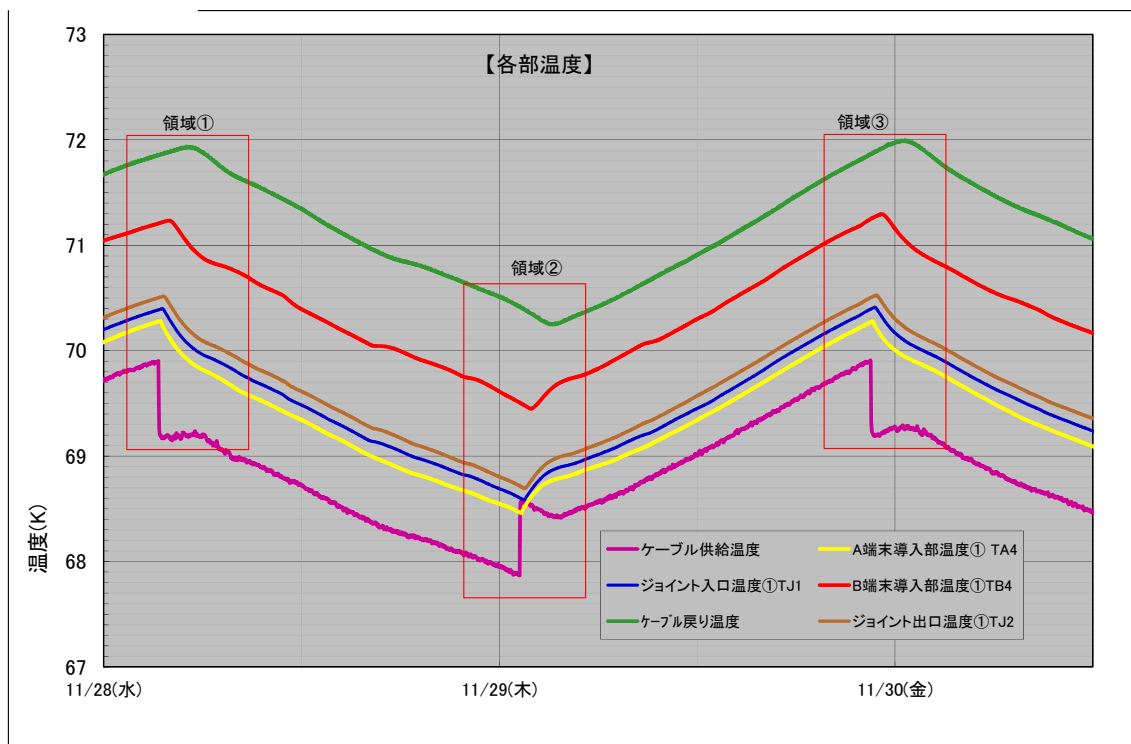


図 2.4.10-9 冷凍機発停に伴う各部温度変化

(3) 確認結果

図 2.4.10-9 に示した 3 個所の領域に対して、各部の入口の変化開始から、どの程度の時間後出口温度の反応が始まるかを調査した。結果を表 2.4.10-3 に示す。

表 2.4.10-3 各機器の出入り口温度の反応時間の差（時間差）

	時間差（分）		
	領域①	領域②	領域③
端末 A (ケーブル供給～導入部)	8	8	8
ケーブル A (導入部～ジョイント入口)	7	8	8
ジョイント (ジョイント入口～出口)	5	6	5
ケーブル B (ジョイント出口～導入部)	2 1	1 9	2 1
端末 B (導入部～ケーブル戻り)	7 6	7 8	7 7
全体 (ケーブル供給～ケーブル戻り)	1 1 7	1 1 9	1 1 9

(4) まとめ

超電導ケーブルシステム内を循環する液体窒素の流れを調査するため、冷凍機が発停した際の温度変化の伝搬する各部時間を調査した。ケーブルシステム全体では約 2 時間をかけ液体窒素が到達していることがわかった。また端末については入口側（端末 A）と出口側（端末 B）では反応する時間に差があるが、これは内部の液体窒素の流れに差があることが原因であると考えられる。

2.4.11 系統連系後の冷却システム運転性能評価

2.4.11-1 冷却能力経時変化

(1) 冷却能力の温度依存性

系統連系運転中に制御温度設定値を変更し、ケーブル供給温度と冷却能力の関係を確認した。図 2.4.11-1 に 2013 年 1 月～10 月における冷凍機 5 台運転でのケーブル供給温度と冷却能力の関係を示す。図中の黒線は、冷凍機 1 台での能力変動傾向 19.7 W/K から算出した 5 台運転時の冷却能力の推定値である。図に示すようにばらつきはあるものの、推定値の傾向と同傾向であることが確認でき、複数台の運用においても特性に変化の無いことが確認された。

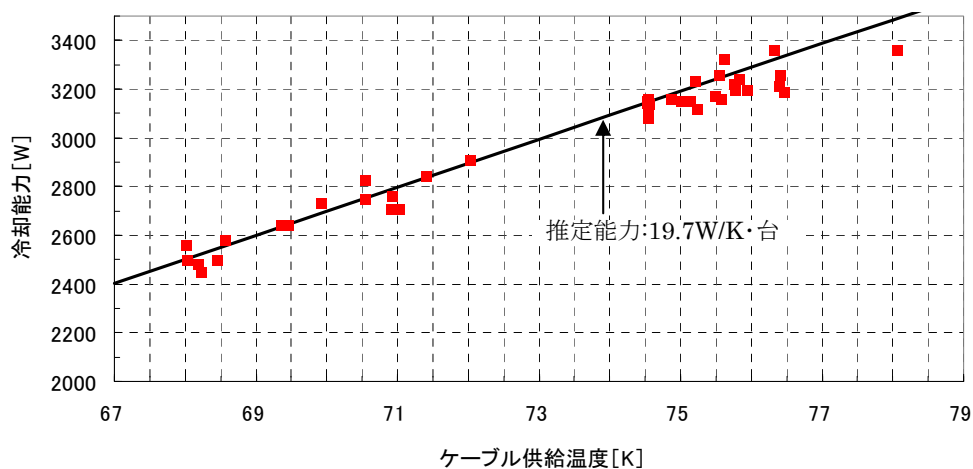


図 2.4.11-1 冷却能力の温度依存性

(2) 系統連系後の実証システム冷却効率 (COP) 確認

系統連系後の実証システムの COP の確認を行った。効率は以下の式で求めている。

$$\text{実証システム COP} = \text{実証ケーブルシステム負荷} / \text{全消費電力}^*$$

$$^* \text{全消費電力} = \text{冷凍機消費電力} + \text{循環ポンプ消費電力} + \text{冷却水消費電力}$$

表 2.4.11-1 に算出に使用した測定値と COP 算出結果を示す。系統連系後に制御温度の変更を行っているため、系統連系開始直後の 2012 年 11 月 12 日から 19 日の各データの平均値を利用した。なお、運転条件は冷凍機 4 台⇔5 台の ON-OFF 運転、制御温度 69±1 K である。効率が冷却システム効率 0.053 より低いのは、停止中の冷凍機の熱損失、ケーブル接続配管の熱損失が含まれているためである。

表 2.4.11-1 実証システム COP 算出結果

1. ケーブル負荷	2.53 kW
導体電流	415.0 Arms
導体電圧	65.9 kVrms
2. 消費電力	
冷凍機	55.38 kW
循環ポンプ	0.28 kW
冷却水系統	4.66 kW
合計	60.32 kW
COP	0.04

(3) 系統連系運転中の冷却能力経時変化

図 2.4.11-2 に系統連系運転中の冷却能力の変化を示す。なお、既に記述したように、系統連系中に制御温度変更を実施しており、供給温度変動による冷却能力への影響を無くすため、変更後の能力については推定能力変化を利用して@68 K 時の冷却能力に換算した値である。

図に示すように、冷却能力の低下が見られていた。本システムに使用した冷凍機については長期運転における冷却能力低下の事象が報告されており、要因としては表 2.4.11-2 に示すものが考えられる。そこで、それぞれの要因に対して適切な対応を適宜行うことで全体の能力低下を抑え、能力不足等のトラブルを起こすことなく運転を継続させることができた。なお、各対応の効果については 2.4.11-3 節で記述する。

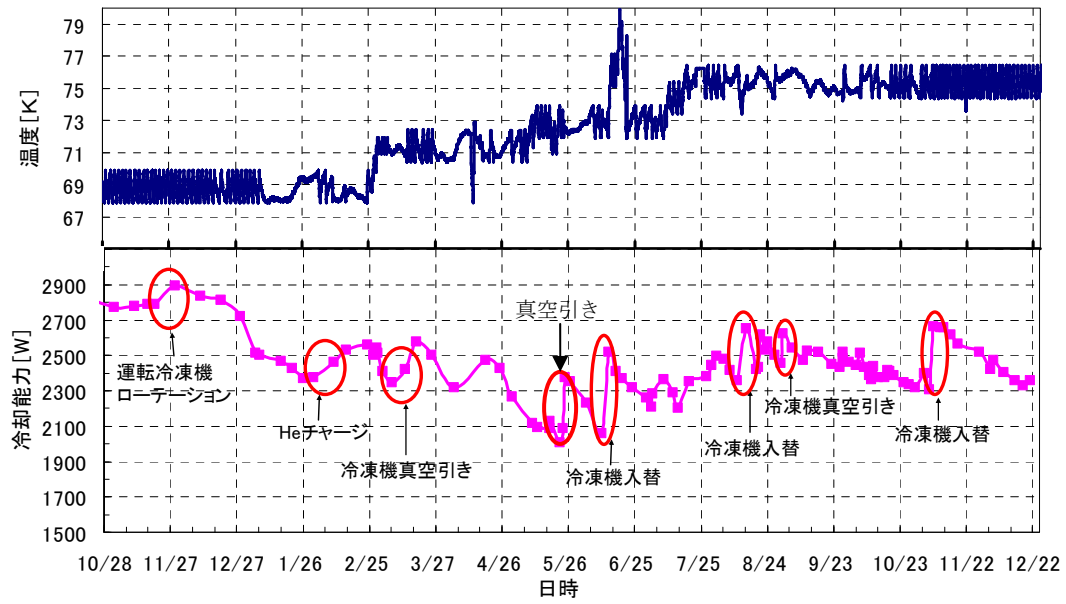


図 2.4.11-2 系統連系中の冷却能力変化

表 2.4.11-2 冷却能力低下要因

想定要因	対応
充填 He の減少	He 充填
冷凍機真空度の劣化	真空引き
冷凍機経年劣化	メンテナンス

2.4.11-2 冷凍機真空度経時変化

図 2.4.11-3 に系統連系中の冷凍機真空度の変化を示す。劣化速度に違いはあるが、時間経過により真空度の劣化が確認された。図 2.4.11-4 に急激な真空度劣化の発生した冷凍機 C1 の真空度と冷凍機出入口温度差を示すが、真空度が 10 Pa を越えてから温度差が急激に小さくなっていることが確認できる。流量については一定であることから、温度差の傾向が冷却能力の変化傾向と一致するため、真空度劣化が実際に冷却能力低下の要因となっていることが確認できる。

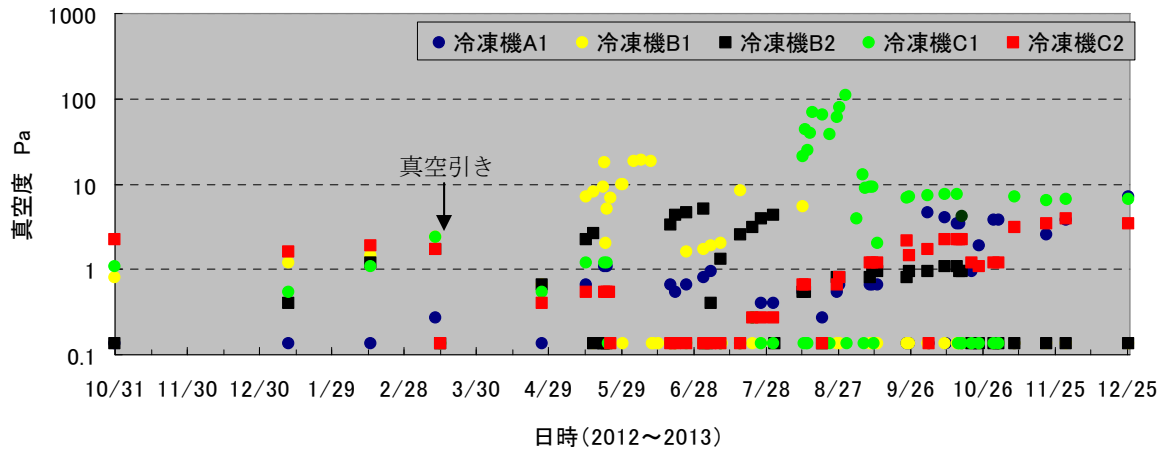


図 2.4.11-3 系統連系中の冷凍機真空度変化

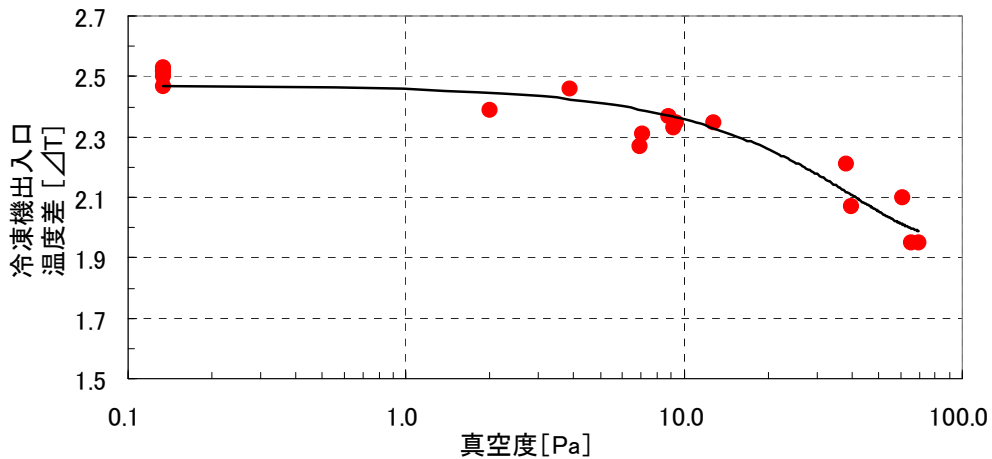


図 2.4.11-4 冷凍機出入口温度差と真空度の関係（冷凍機 C1）

2.4.11-3 冷却能力低下対策の評価

(1) He チャージ

冷凍機内の He 充填圧力を上げることで、冷却能力を維持した。ただし、チャージ量については冷凍機の動作警報値の関係から以下の数値のいずれかを超えないように設定した。

1. 冷凍機電流値 65 A
2. モータ温度 70 °C
3. 充填ヘリウム圧力 1.6 MPaG

He チャージは冷凍機に付いているチャージングアダプタへ He ガスボンベを接続して実施した。接続イメージを図 2.4.11-5 に示す。

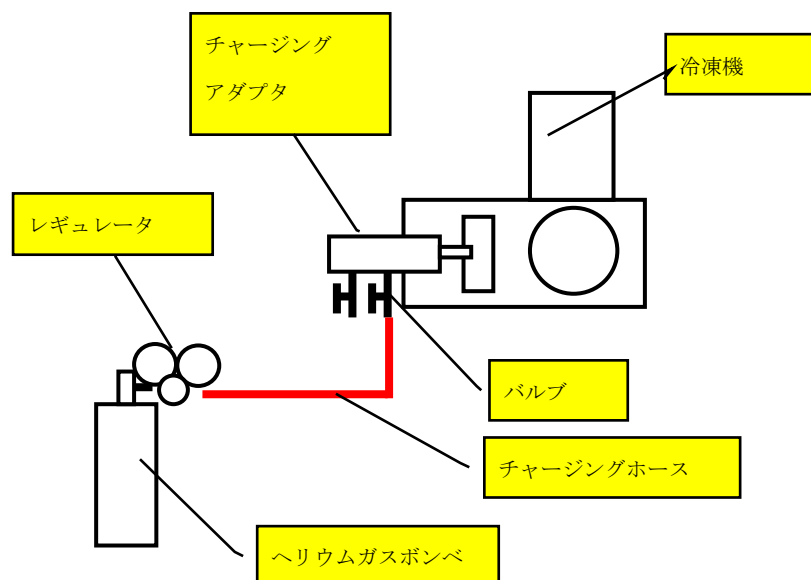


図 2.4.11-5 ヘリウムチャージ接続イメージ

表 2.4.11-3 に He チャージ前後の冷凍機運転状態を示す。冷凍機 B1 については電流値が上限に近かったため実施していない。冷凍機 C1 の実施日が異なるのは、冷凍機 B1 と同様の理由で 2013 年 2 月 14 日時点では実施ができなかったが、以降の冷凍機交換により、交換後の冷凍機の運転条件では実施可能になったためである。

冷却能力低下改善への効果としては、充填量等ではばらつきはあるがチャージ後は冷却能力は増加しており効果はあると言える。ただし、運転状態によってはチャージできない場合も考えられる。

表 2.4.11-3 He チャージ前後冷凍機運転状態

実施日		冷凍機A1	冷凍機A2	冷凍機B1	冷凍機B2	冷凍機C1	冷凍機C2
実施日		2013/2/14	2013/2/14	2013/2/14	2013/2/14	2013/7/29	2013/2/14
チャージ前	He圧力 (MPa)	1.33	1.32	1.3	1.32	1.32	1.32
	電流 (A)	39.2	57.5	60.2	63.4	58	61.5
	電力 (kW)	8.1	12.84	13.57	14.26	11.6	13.89
	モータ温度 (°C)	40	58	62	67	59	67
チャージ後	He圧力 (MPa)	1.57	1.45	1.38	-	1.42	1.39
	電流 (A)	42.7	62.1	62.5		64	62.95
	電力 (kW)	9.06	14.1	14.32		12.8	14.33
	モータ温度 (°C)	41	62	64		65	65
温度差	チャージ前	1.61	1.36	1.51	-	2.26	1.75
	チャージ後	1.87	1.51	1.61		2.54	1.81
※1	チャージ前後の差	0.26	0.15	0.1		0.28	0.06
能力改善効果 (W)		101	58	40	-	94	20

※1 各冷凍機出入口温度差

(2) 冷凍機真空引き

2.4.11-2 節で示したように、冷凍機真空度と冷却能力低下には関係があるため、真空引きにより真空度を改善させることで冷却能力復帰が可能である。

真空引きは、冷凍機真空断熱層の真空引きポートへ真空ポンプを接続して実施した。十分な真空引きを実施するため真空引き時間は3時間とした。

表 2.4.11-4 に一例として2013年5月17日から24日にかけて実施した真空引き結果を示す。冷凍機真空引き後に出入口温度差が大きくなっており真空引きに効果があることが確認された。また、真空度の劣化が大きい冷凍機ほど改善効果が大きいことが確認された。冷凍機 A1 の改善効果が大きいのは、この冷凍機に関しては測定真空度とは別の要因があったためと考えられる。

表 2.4.11-4 冷凍機真空引き結果

	実施日	真空引き前		真空引き後		温度差変化	改善効果 W
		真空度 (Pa)	冷凍機出入口温度差 (K)	真空度 (Pa)	冷凍機出入口温度差 (K)		
冷凍機A1	5/23	1.064	2.0	0.133以下※	2.14	0.14	52
冷凍機A2	5/22	2.261	1.28	0.133以下※	1.34	0.06	22
冷凍機B1	5/17	7.980	1.66	0.133以下※	1.78	0.12	46
冷凍機B2	5/17	2.660	0.81	0.133以下※	0.9	0.09	35
冷凍機C1	5/23	1.197	2.28	0.133以下※	2.35	0.07	24
冷凍機C2	5/24	0.532	2.16	0.133以下※	2.18	0.02	7

※測定真空計測定下限値：0.001torr(0.133 Pa)

2.4.11-4 振動の経時変化

(1) 振動測定

冷却システムの運転が建屋等に及ぼす影響を確認するため、定期的に振動測定を実施した。測定箇所は、図 2.4.11-6 に示す通り、冷凍機室建屋 1F・屋上、計測室、事務所棟とした。測定は、冷却システムを設置した平成 23 年から、実証試験が終了し冷却システムが停止直前となる平成 26 年 1 月まで、毎年定期的実施・評価した。また、測定時は、主要機器である冷凍機 6 台、循環ポンプ 2 台、冷却塔 3 セットなど全機器を稼働させた状態とし、20:30 以降のほぼ同一時刻に実施した。

(2) 経時変化測定結果

振動測定の経時変化の代表例として、冷凍機室建屋で冷凍機に近い測定点②の結果を図 2.4.11-7 に示す。振動測定結果は、経過日数に対して増加の傾向はなく、各年度を比較しても、ほぼ同じ傾向を示している。また、他の測定箇所についても同様であった。平成 23 年の冷凍機設置後の運転開始から、一年間の実系統連系運転を含む期間の振動測定を実施したが、顕著な影響は観測されていない。ただし、今後も慎重に観察していく必要がある。最終的に建屋の解体調査が必要である。

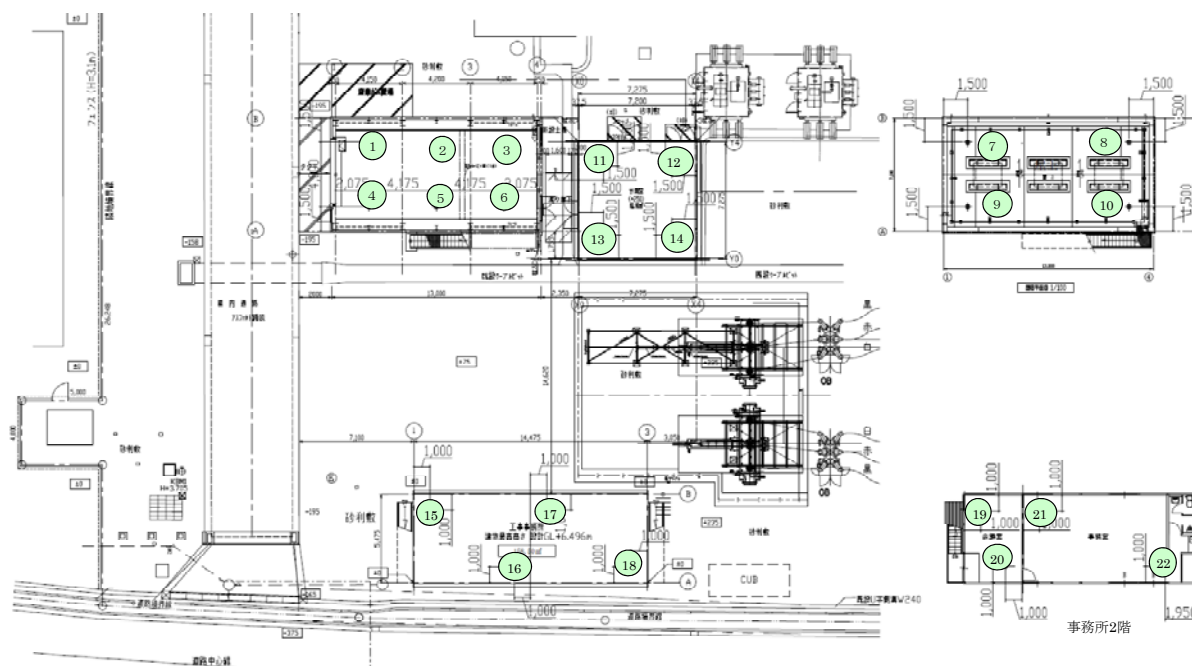
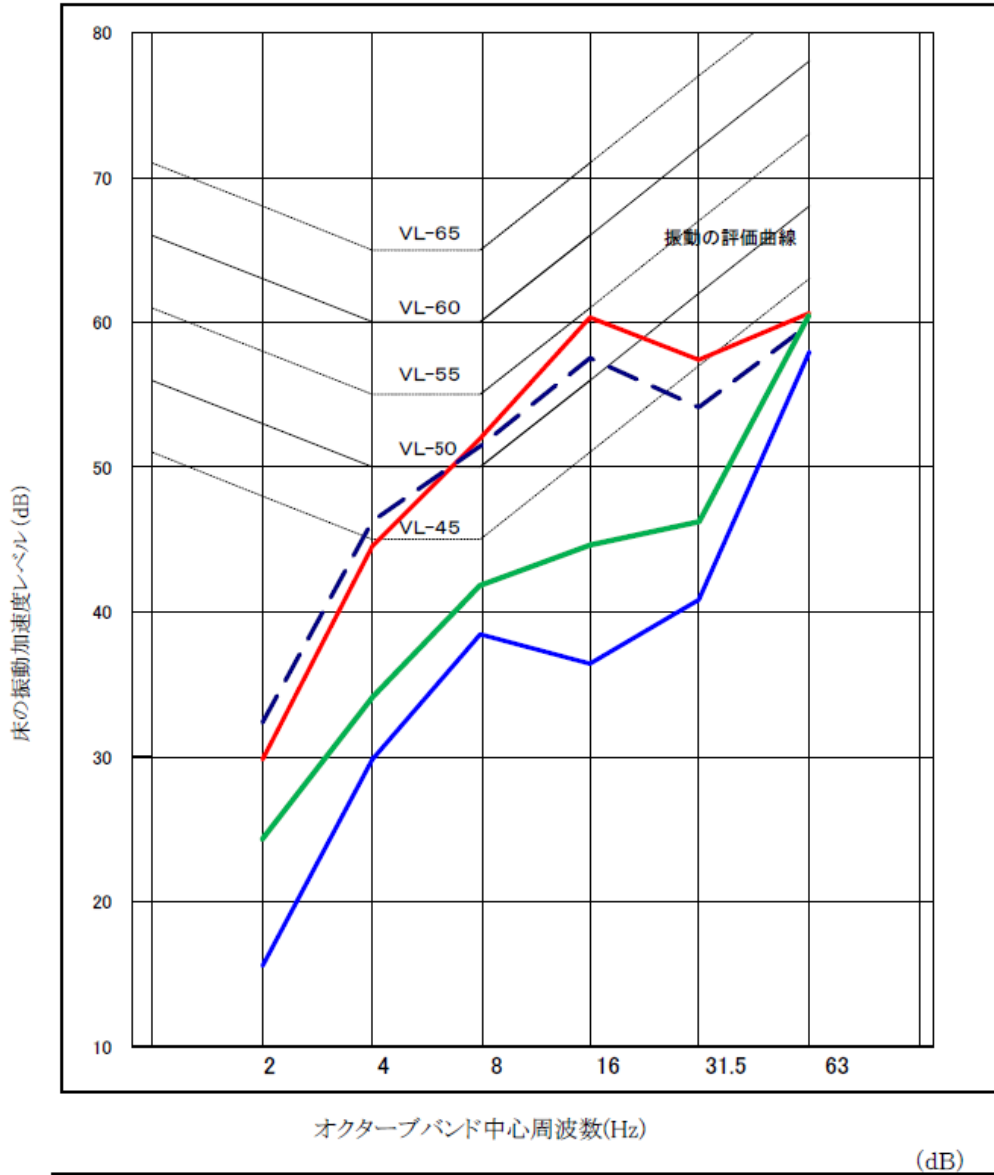


図 2.4.11-6 振動測定位置

測定地点No② 1/1 OCTHz振動レベル分析比較結果
 冷却室システム内床

測定ポイント	運転状況	振動レベル(Lv) AP値	振動加速度レベル(Lva) AP値
H26	全負荷運転	51.8 (dB)	74.5 (dB)
H25	全負荷運転	49.0	72.1
H24	全負荷運転	58.0	73.9
H23	全負荷運転	56.2	71.9



測定ポイント		オクターブバンド周波数					
		2	4	8	16	31.5	63
H26	振動レベル	21.3	34.1	41.8	38.6	34.2	42.5
	振動加速度レベル	24.3	34.1	41.8	44.6	46.2	60.5
H25	振動レベル	12.5	29.8	38.4	30.4	28.8	39.9
	振動加速度レベル	15.5	29.8	38.4	36.4	40.8	57.9
H24	振動レベル	26.8	44.5	52.0	54.3	45.4	42.6
	振動加速度レベル	29.8	44.5	52.0	60.3	57.4	60.6
H23	振動レベル	29.4	46.2	51.4	51.5	42.1	41.8
	振動加速度レベル	32.4	46.2	51.4	57.5	54.1	59.8
	振動感覚補正特性	3	0	0	6	12	18

図 2. 4. 11-7 振動測定経時変化結果

2.4.12 長期運転の信頼性評価

(1) 実系統運転実績総括

2012年10月29日に実系統連系運転を開始してから、約2ヶ月経過後の運転状況を図2.4.12-1に示す。リアルタイムで運転データが遠隔監視され、順調に無人運転が継続されている。ケーブル供給側の冷媒温度は、温度制御の中心値 69 ± 1 Kの範囲で安定に制御され、冷凍機の運転台数は4台 \leftrightarrow 5台に維持されていた。また、電流変動に対してリザーバタンク内の冷媒圧力は0.2 MPaG、循環流量40 L/minで一定に維持されていた。

運転実績の総括として、実系統連系の全期間である2012年10月29日～2013年12月25日の約14ヶ月間における運転状況の推移を図2.4.12-2に、運転実績を表2.4.12-1に示す。途中、臨界電流測定等の定期検査のために系統切り離しを実施したことから、実系統連系期間の日数は400日程度であった。また、本システムは冬季及び夏季期間を通し、無人状態で運転された。送電電流は、実系統連系直後の300～500 Armsから、その後、夏季において最大1127 Armsを記録した。超電導ケーブルの臨界電流値が77 Kで6000 A以上であることを考えると、臨界電流値に対する負荷電流の波高値の割合（負荷率）は27 %程度であり、電流に関して裕度のある運転であった。各相電流の不均衡率は相間電流差／平均電流として評価し、6.9 %程度であった。また、超電導シールド層のシールド率は89 %程度であった。電流変動に対するシステム応答性については、冷媒流量は40 L/min、冷媒圧力は動作範囲である0.20～0.25 MPaGに制御され、安定運転が維持されることを確認した。

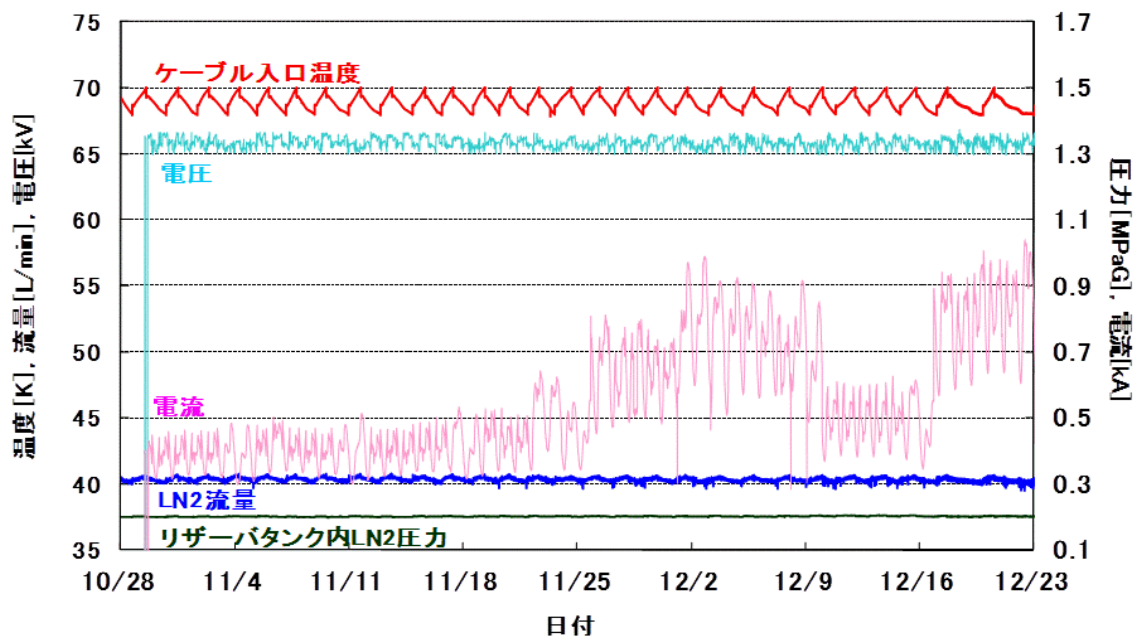


図 2.4.12-1 実系統連系開始から約2ヶ月経過後の運転状況

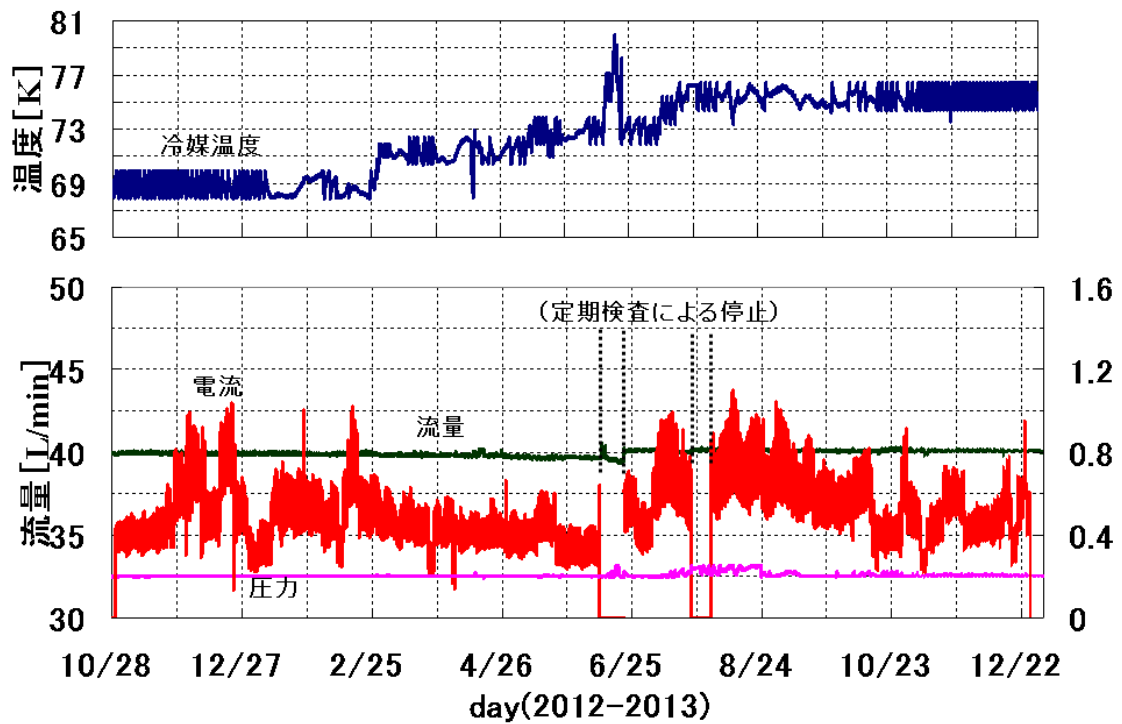


図 2.4.12-2 実系統連系期間中における運転状況の推移

表 2.4.12-1 実系統連系期間中の運転実績

項目	内容
実系統連系期間	H24.10.29～H25.12.25 (約400日間：定期検査期間除く)
定期検査期間	H25.6.10～6.21、H25.7.22～7.31
最大電流	1127 A (H25.8.10)
系統電圧	63.9 kV～67.1 kV
通電電流不平衡率	6.9 %程度
シールド電流率	89 %程度
系統切替	50回以上
過負荷	無
インパルス有無	無
事故電流	1回 [※2.4.12(4)節参照]

(2) 冷媒温度依存性

図 2.4.12-2 に示した通り、冷媒温度についてはケーブル入口温度を 69 ± 1 K で開始し、その後、設定温度を徐々に上げて冷凍機の冷却能力、交流損失等における温度依存性を観測・評価した。最終的には、超電導ケーブル通電中は 75.5 ± 1 K、停止中は 79 ± 1 K まで冷媒温度の設定値を上げ、実証システムが支障なく運転できることを確認した。なお、警報設定値については 2.3.3 節に記載したように、裕度を持たせた設定にしていたことから、運転温度変更に合わせて、実証システムの運用に支障がない範囲で警報設定値も変更した。

今回の実証システムは変電所構内の短距離線路であったが、今後、長距離線路での適用を考慮した場合、供給側に対する戻り側の冷媒温度の上昇は、実証システムでの $\Delta T = 2$ K よりも大きくなると考えられる。そのため、高域の温度範囲において安定運転を維持できたことは、実用化を踏まえた、より広範な適用に活かすことができる。また、冷媒温度を上げるメリットとしては、2.4.11 節に記載した通り 19.7 W/K@1 台の冷却能力の増加効果がある。逆に、デメリットとしては温度上昇による臨界電流値の低下が懸念される。臨界電流値に対する温度依存性については 2.4.14 節で詳述するが、 77.3 K の I_c 値 6200 A 程度に対し、 82 K では I_c 値 5200 A 程度に低減する。しかし、いずれの値においても定格電流に対し十分な裕度を持っている。また、 I_c 値に対する負荷率上昇により交流損失の上昇が予想されるが、今回の実証試験では、外気からの熱侵入が熱負荷の支配的な要因であり、通電電流値の変化による熱負荷への大きな影響は見られなかった。

(3) 系統切り替え等による電流急変の影響

系統切り替え等の通電電流急変が、実証システムに与える影響について評価した。図 2.4.12-3 は、定期検査のために停止していた超電導ケーブルを系統に再接続した際の運転データである。遮断器の投入により約 800 A (66 kV) の電流急変を経験したが、ケーブル内の液体窒素温度および圧力に大きな変動は見られなかった。また、表 2.4.12-1 に記載の通り、系統連系中に系統切り替えのため、電流値の急変を 50 回以上経験したが、いずれの場合も電流の急変による液体窒素の温度・圧力等の変動は見られず、安定運転を継続した。

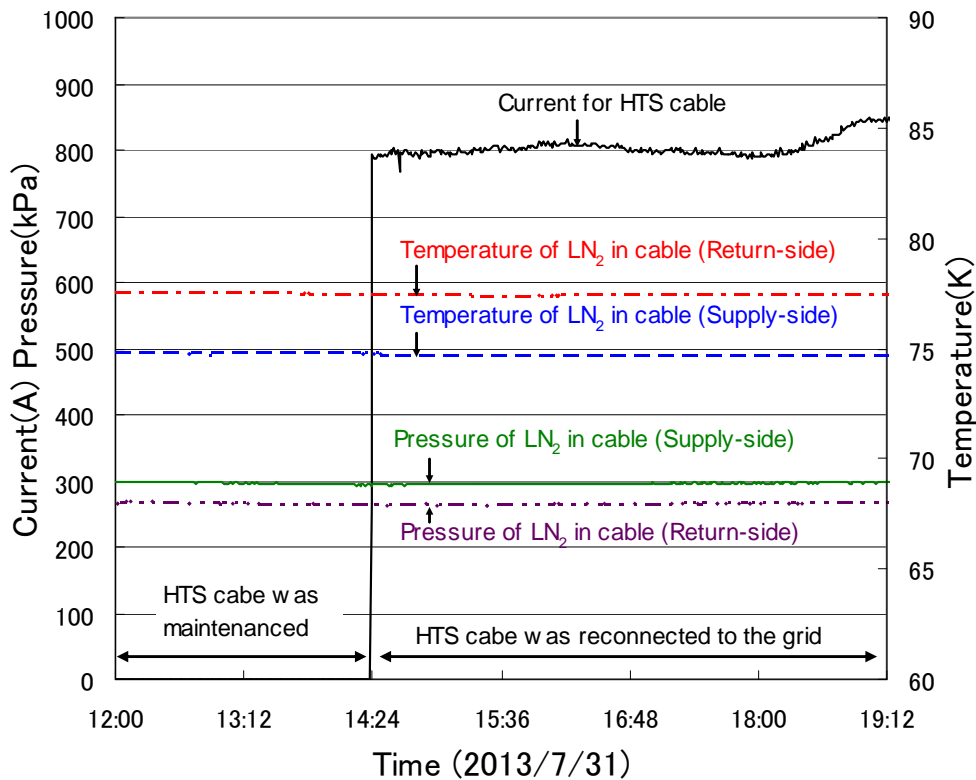


図 2. 4. 12-3 系統再接続時の電流急変による影響

(4) 外部事故による影響

実系統連系期間中、旭変電所に接続されている 66 kV 架空送電線路にて、雷による 1 線地絡事故が発生した。表 2. 4. 12-2 に事故の概要を示す。また、図 2. 4. 12-4(a) に地絡電流の流入経路、2. 4. 12-4(b) に事故時における旭変電所 66 kV 母線の各相電圧、及び変圧器中性点に流入した地絡電流（零相電流）のオシロ観測波形を示す。事故発生から事故点遮断までの約 0.5 秒の間、健全相の対地電圧が 55 kV~65 kV まで上昇し、約 400 A 以上の地絡電流の流入を経験した。事故後、超電導ケーブルに対し部分放電の測定を行ったが、部分放電は観測されずその後も安定した運転を継続した。また、実系統連系運転終了後の誘電正接 $\tan \delta$ 測定及び臨界電流 I_c 測定は、いずれの値も系統接続前と変化が無く、電気絶縁層及び超電導の各性能への事故による影響は確認されなかった。

表 2.4.12-2 66 kV 架空送電線（白相）における一線地絡事故

項目	内容
発生日時	H25年8月12日 19:36:38
事故箇所	66 kV 架空送電線 白相
事故内容	雷による1線地絡事故
事故時間	0.48 秒(24 サイクル)
動作遮断器	旭(変)66 kV送電線 遮断器 (10 秒後、再閉路成功)
対地電圧 (事故前→事故時)	黒:38.1 kV → 54.5 kV 赤:38.1 kV → 64.6 kV 白:38.1 kV → 7.2 kV
相間電圧	変化なし(66 kV)
地絡電流	415 A
負荷電流	約1000 A(各相)

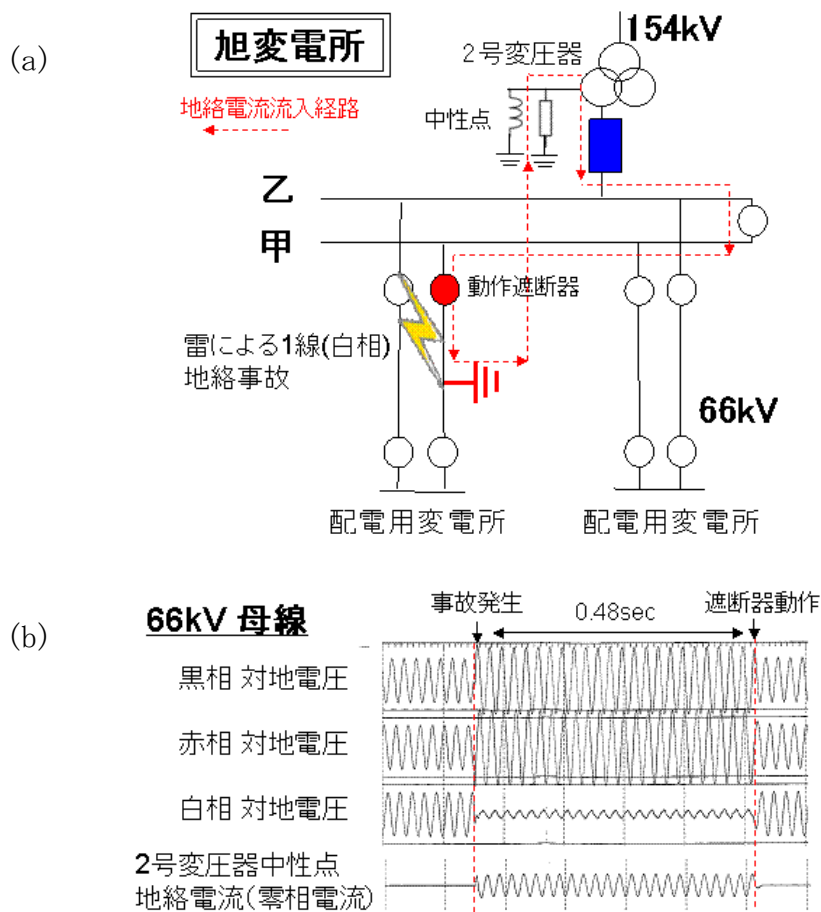


図 2.4.12-4 一線地絡事故様相

(a) 超電導ケーブルへの地絡電流流入経路、(b) 事故時のオシロ観測波形

(5) 実系統連系期間中の気象実績

実証試験場所である神奈川県横浜市の実系統連系期間中における外気温度の推移を図 2.4.12-5 に、気象実績を表 2.4.12-3 に示す。上記期間中の平均外気温度は 15.8 °C であり、最高温度と最低温度は 37.3 °C (H25.8.11)、-0.5 °C (H25.1.6) であった。台風実績については、上陸を含めて横浜市への接近を数回経験しており、実系統連系期間中の最大風速は平均風速 3.7 m/s に対し、台風 26 号が横浜市に接近した時の 19.0 m/s (H25.9.16) であった。地震については震度 5 以上の実績は無く、最大で震度 4 の地震を一回経験した。また、降雪日数はのべ 2 日間で、最大積雪は 13 cm であった。以上より、四季の変化を含め、これらの気象変動に対しても、実証システムの運転制御に影響を及ぼすこと無く、安定性を実証することができた。なお、本調査内容については、気象庁 HP における神奈川県横浜市の実績データを参考に作成した。

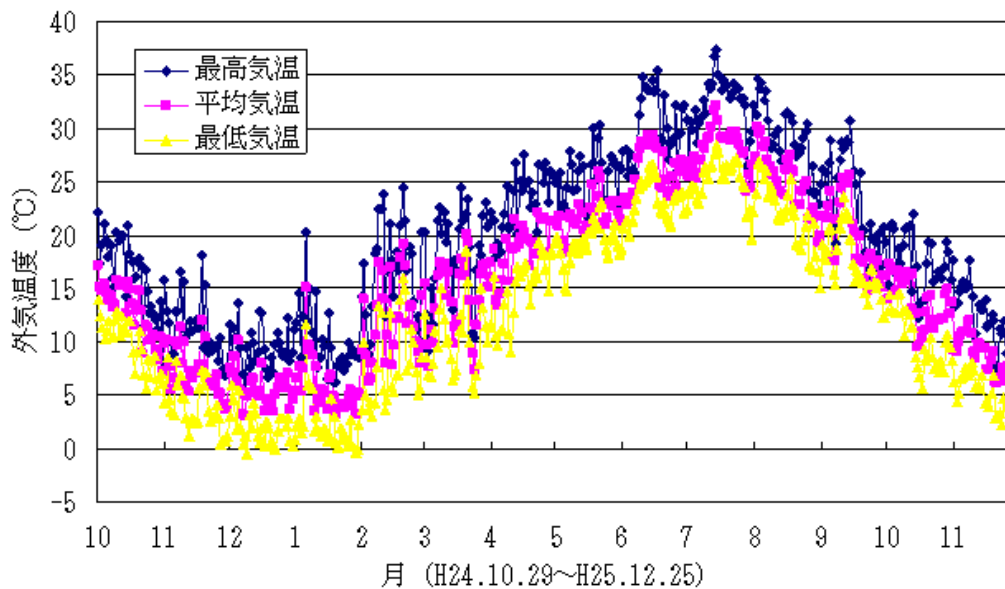


図 2.4.12-5 実系統連系期間中の外気温度の推移

表 2.4.12-3 実系統連系期間中の気象実績

項目	内容
平均外気温度	15.8 °C
最低外気温度	-0.5 °C (H25.1.6)
最大外気温度	37.4 °C (H25.8.11)
台風接近・上陸	有(横浜市)
平均風速	3.7 m/s
最大風速	19.0 m/s ※台風26号接近時(H25.9.16)
最大震度	震度4 ※1回 (H24.11.24)
最大積雪	13 cm (H25.1.14)

(6) 警報発生実績及び信頼性評価

実証システムは無人運転を指向しており、各部位に取り付けられた温度計や圧力計等が管理値を逸脱または機器故障を検出した場合に、警報が関係者にメール送信される。また、警報区分はシステムの継続的な運用が困難な場合に重故障、その他の軽微な故障は軽故障に分類されている。重故障の場合、給電所へ故障情報が通報され、1時間以内にバイパス回路に切り替えられる。

実系統連系期間中における警報発生実績を表 2.4.12-4 に示す。今回の実証試験では、超電導ケーブルシステムの送電停止に至るような重故障はなく、多くは運用面や設定値に関する軽故障のみであり、設定値の見直し等で解消されている。これらの経験を通じて得られた知見を、実用化時の運転運用技術に反映させることで、より信頼度の高いシステムの構築につなげたい。

表 2.4.12-4 警報発生実績

分類	発生警報項目（軽故障）	発生原因	対策
機器故障	UPS装置故障	UPSバッテリー経年劣化	UPS取替
運用・設定値不備	給水圧力低下	作業に伴う給水圧力低下	警報設定値変更
運用・設定値不備	冷凍機油圧低下	瞬時値が警報設定値より低下	時限タイマー設置
運用・設定値不備	冷凍機冷却水温度異常	外気温上昇による吐出ガス温度上昇	冷却水流量増加
運用・設定値不備	リザーバタンク圧力上昇	減圧機構の開始動作値を警報設定値と同値に設定	タンク内液面低減

2.4.13 冷却システムの保守性検証

実証試験中に保守が必要と考えられる主要機器は、冷凍機・循環ポンプ・冷却塔が挙げられる。実証試験中の各機器の保守結果について記述する。

2.4.13-1 冷凍機

(1) 保守の基本方針

冷凍機において、メーカー推奨の定期保守間隔は 8,000 時間であり、この保守間隔を基準にメンテナンスを行い、冷凍機の保守性を検証した。実証試験での冷凍機設置台数は 6 台であるが、夏季等の負荷が大きい時期には 5 台運転で 1 台予備機となり、全体としては 1 台～2 台が予備機となる運用が一般的であった。今回、冷凍機故障時に速やかな交換を可能とするため、6 台の設置冷凍機以外にもスタンバイ機を用意した。また、冷凍機メンテナンスには 2 ヶ月間必要となるため、運転時間、運転状況などから優先順位をつけ、メンテナンスは 1 台ずつ計画的に実施した。

(2) 冷凍機メンテナンス

冷凍機メンテナンスは、実証試験期間、定期保守間隔、及びスタンバイ機の確保等を考慮し、最終的に冷凍機 4 台分を実施した。そのうち、実証試験中の稼働時にメンテナンスをした冷凍機は 3 台あり、対象機器、及びメンテナンス前の運転状況・時間を表 2.4.13-1 に示す。なお、冷凍機メンテナンスに伴う冷凍機交換作業は、2.4.5 節の通り、予定通り実施することが出来た。

表 2.4.13-1 冷凍機運転状況と運転時間

冷凍機 No	運転状況	運転時間
No. 5	冷凍機 He 冷媒圧力、冷却能力が低下傾向となっていたため、状態確認も合わせメンテナンスを実施。	6,100 時間
No. 2	冷却能力が他機に比べ最も低下していたため、メンテナンスを実施。	7,480 時間
No. 3	冷凍機真空度の低下傾向が顕著であり、No. 2 冷凍機メンテナンス後は冷却能力が一番低く、運転時間も 8,000 h を超えていたため、メンテナンスを実施。	8,570 時間

(3) 冷凍機メンテナンス効果

図 2.4.13-1 に、冷凍機 No. 2、No. 3、No. 5 におけるメンテナンス前後の冷却能力変化を示す。メンテナンス後には、メンテナンス前に低下していた冷却能力が運転初期と同程度まで回復している。そのため、定期的なメンテナンスにより冷却能力を維持できることが確認された。

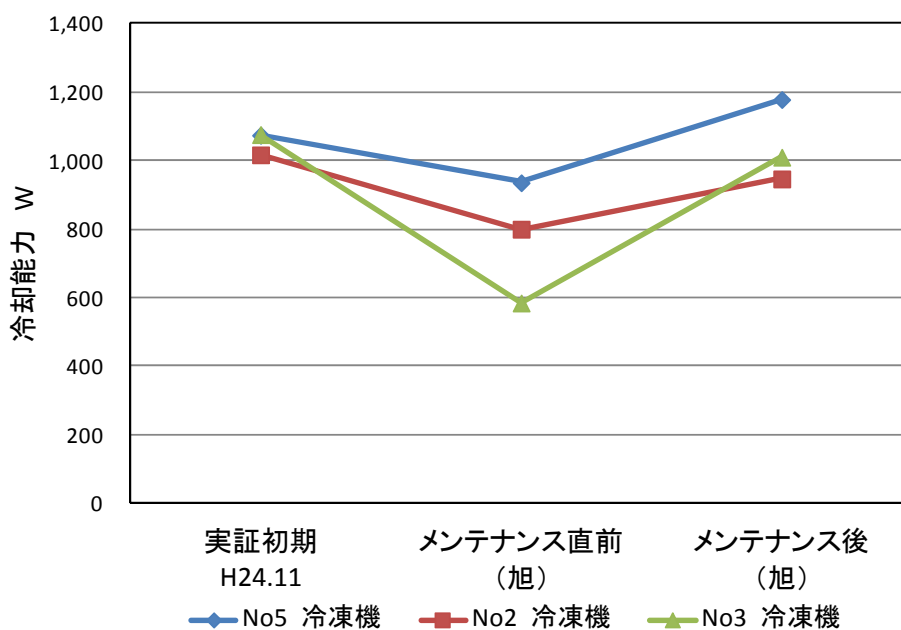


図 2.4.13-1 冷凍機メンテナンス前後における冷却能力の推移(77K 換算)

2.4.13-2 循環ポンプ

循環ポンプにおけるメーカー推奨の定期保守間隔は、9,000 時間となっている。今回、循環ポンプのメンテナンスは実証試験開始直前に実施しており、保守手順も確認している事から、実証試験運転中はメンテナンスを行わず、運転後に残存性評価を行うことにした。なお、残存性能評価については、2.4.14 節にて後述する。

2.4.13-3 冷却塔

表 2.4.13-2 に、冷却塔及び冷却水ポンプの主要な点検項目を示す。実証期間中、安定運転を維持しており、補修や大きなメンテナンスは実施しなかったが、冷却塔散水層は水垢等の汚れが確認されたため、適時清掃を実施した。散水層内の汚れは、本冷却塔が密閉型であるため冷凍機用の冷却水水質に影響は及ぼさないが、汚れが悪化すると熱交換の効率に支障が生じる恐れがあるため、汚れが目立った場合に清掃を実施した。なお、冷却塔散水層の清掃は冷却塔を停止させる必要がある為、あらかじめ設定されていた冷却塔清掃モードを使用した。これにより、清掃対象となる冷却塔 1 台が停止し、共通弁が開くことで、残りの冷却塔 2 台により運転が継続され、清掃時においても安定した運転を維持することができた。

表 2.4.13-2 冷却塔及び冷却水ポンプ点検項目

機器	項目
冷却塔	冷却塔水槽点検
	外観目視点検
	ボールタップ動作確認
	熱交換器（コイル）目視点検
冷却水ポンプ	動作状態確認
	漏れ確認
散水ポンプ	動作状態確認
	漏れ確認

2.4.14 残存性能試験の評価

2.4.14-1 長期運転終了後の Ic 特性の評価

(1) 目的

1年以上にわたる長期課通電試験の終了後、第5回目の Ic 測定試験を実施し、性能劣化の有無を確認した。なお、測定は2.4.3-3節「単体試験の検証 Ic 特性」にて示した試験回路を用い、同様の試験方法により実施した。

(2) 運転終了後の Ic 測定結果

図2.4.14-1に赤相の電流－電圧特性（I-Vカーブ）を、図2.4.14-2に Ic 測定結果を示す。両図とも、第5回目の測定結果に加え、これまで実施した1～4回目の測定結果も併記した。なお、第4回目の測定結果は、実系統連系運転中に一旦送電を停止し、中間評価を実施したものである。いずれの測定結果も設計値と同等な約6400 A@77.3 Kであり、各回における性能変化は無く健全性を確認することが出来た。

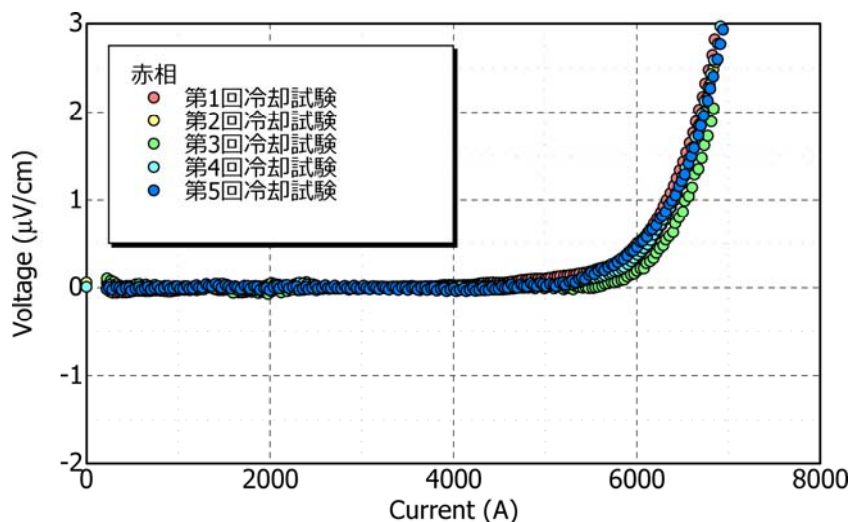


図 2.4.14-1 電流－電圧特性（I-Vカーブ）（赤相、77.3 K、励磁速度：480 A/sec）

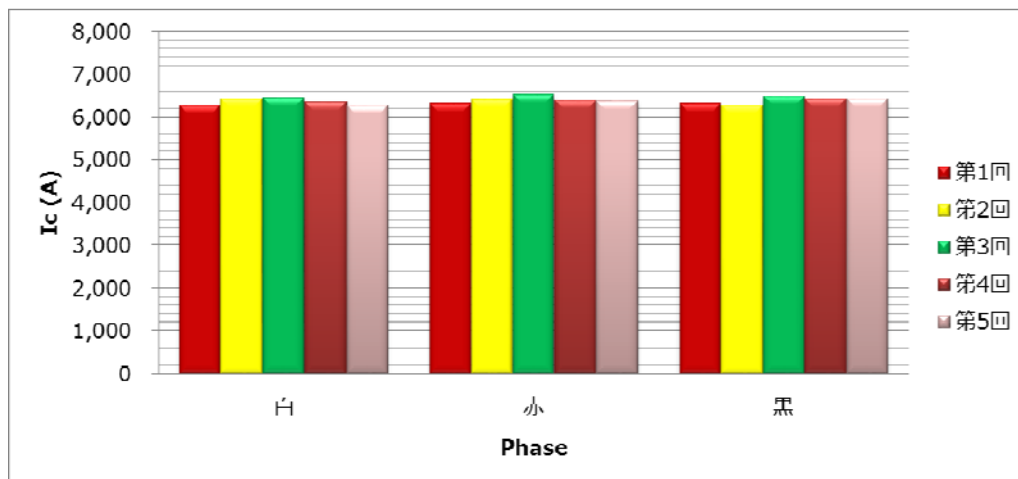


図 2.4.14-2 Ic 測定結果（@77.3 K）、（第1回～第5回）

(3) I_c の温度依存性検証

上記試験にて 77.3 K における残存性能の健全性を確認後、82 K に昇温し I_c の温度依存性を検証した。図 2.4.14-3 に、77.3 K、82 K における赤相の電流－電圧特性 (I-V カーブ) を示す。82 K における I_c 測定値は、77.3 K の測定値に対し 79～82 % であり、線材 I_c -T 特性から算出した I_c 比 78 % と概ね同等の結果であった。

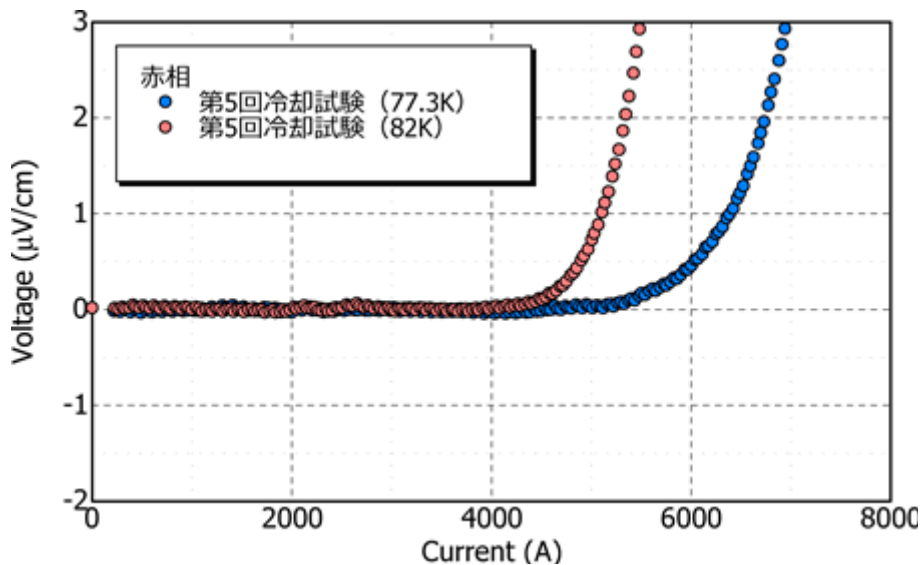


図 2.4.14-3 I_c 値の温度依存性 (@77.3 K、82 K)

(4) まとめ

ケーブル布設、冷却・昇温による熱サイクル、及び実系統運転による日負荷変化や長期課通電などを経験しても、ケーブルは熱機械的に安定しており、良好な通電性能を維持することを確認した。

2.4.14-2 長期運転終了後の C・tan δ 特性の評価

(1) 目的

上記と同様、長期運転終了後の残存性能確認を目的として、静電容量 C ならびに誘電正接 tan δ の測定を実施した。なお、測定は 2.4.3-2 節「単体試験の検証 C・tan δ 特性」にて示した試験回路を用い、同様の試験方法にて実施した。

(2) 運転終了後の C・tan δ 測定結果

表 2.4.14-1 に、運転終了後に実施した第四回目の C・tan δ 測定結果を示す。静電容量 C は設計値 181 nF に対し 186 nF、誘電正接は設計値 0.1 %以下に対し 0.085 となり、いずれもほぼ設計通りの値となった。なお、表中には第 1～第 3 回の初期冷却後に実施した結果も併記している。各回の測定の結果を比較すると、静電容量は各回とも約 185 nF でばらつきは小さく、tan δ に関しても設計値通り約 0.1 %以下であった。

表 2.4.14-1 ケーブル C・tan δ 特性 (第 1 回目～第 4 回目)

測定日		平均温度 (K)	ケーブル	
			C (nF)	tan δ (%)
第1回目	2012/4/13	74.6	186	0.078
第2回目	2012/6/8	77.3	185	0.054
第3回目	2012/9/24	79.1	185	0.085
第4回目	2014/1/10	77.3	186	0.085

(3) まとめ

初期冷却時 (第 1 回～第 3 回)、及び長期実系統運転の終了後 (第 4 回) に測定を実施し、各回とも設計値を満足し、変化が小さいことを確認した。以上より、冷却・昇温による熱サイクル、長期課通電運転等を通じて、超電導ケーブル電気定数の健全性を確認できた。

2.4.14-3 長期運転終了後のケーブル挙動の評価

(1) 目的

「2.4.3-4 単体試験の検証 ケーブル挙動(X線)」と同様、液体窒素による冷却にて発生する熱収縮、及び昇温時の熱膨張などによるケーブルコアの移動量を検証する。なお、試験方法、試験回路については2.4.3-4節と同様とし、今回は長期運転終了後の昇温前後について評価を実施した。

(2) 運転終了後における昇温前後のケーブル挙動確認結果

図2.4.14-4に長期運転前（冷却時）、図2.4.14-5に長期運転終了後（冷却時）、及び2.4.14-6に長期運転終了後（昇温後）の観測結果を示す。第1回冷却前の初期位置、すなわち容器外部とコアのPb線マーカの距離=103mmを基準位置（移動量0）とし、長期運転前後（冷却時）のコア移動量を比較すると、それぞれ38mm（マーカ間距離：65mm）であり、長期運転による影響はほとんどないことが分かる。長期運転終了後（昇温後）は、コア移動量が26mm（マーカ間距離：77mm）となり、初期の布設・組立後の位置からはわずかに移動が確認されたが、ジョイント構造から考えると十分な裕度であった。

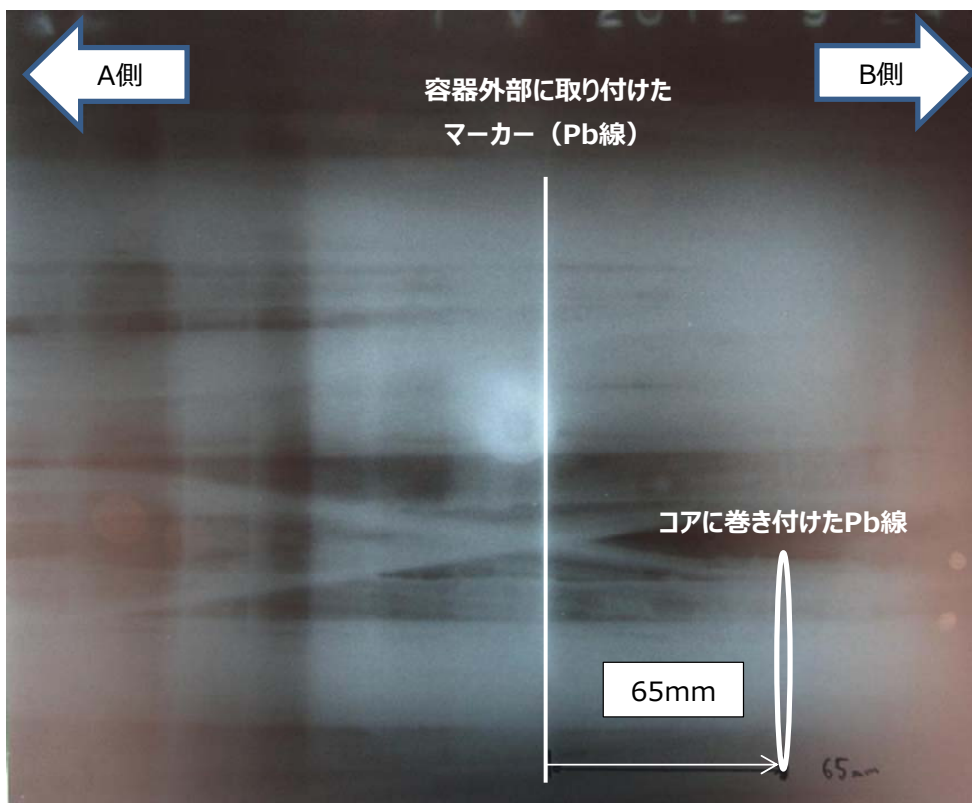


図 2.4.14-4 長期運転前（冷却時）

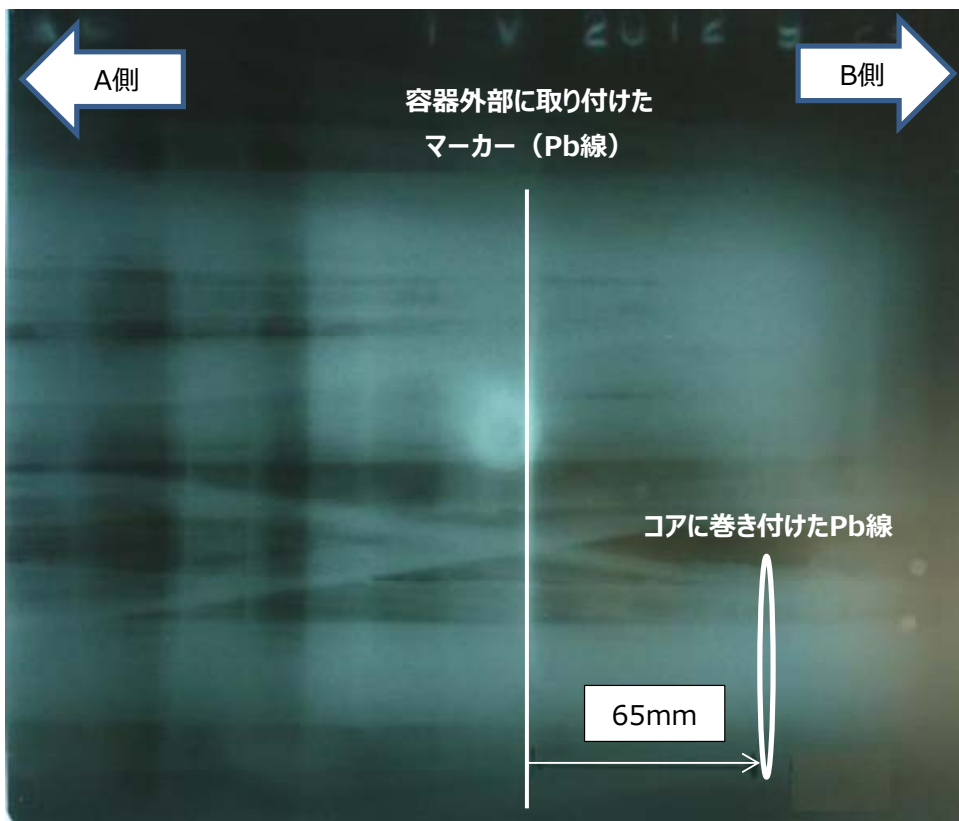


図 2. 4. 14-5 長期運転後（冷却時）

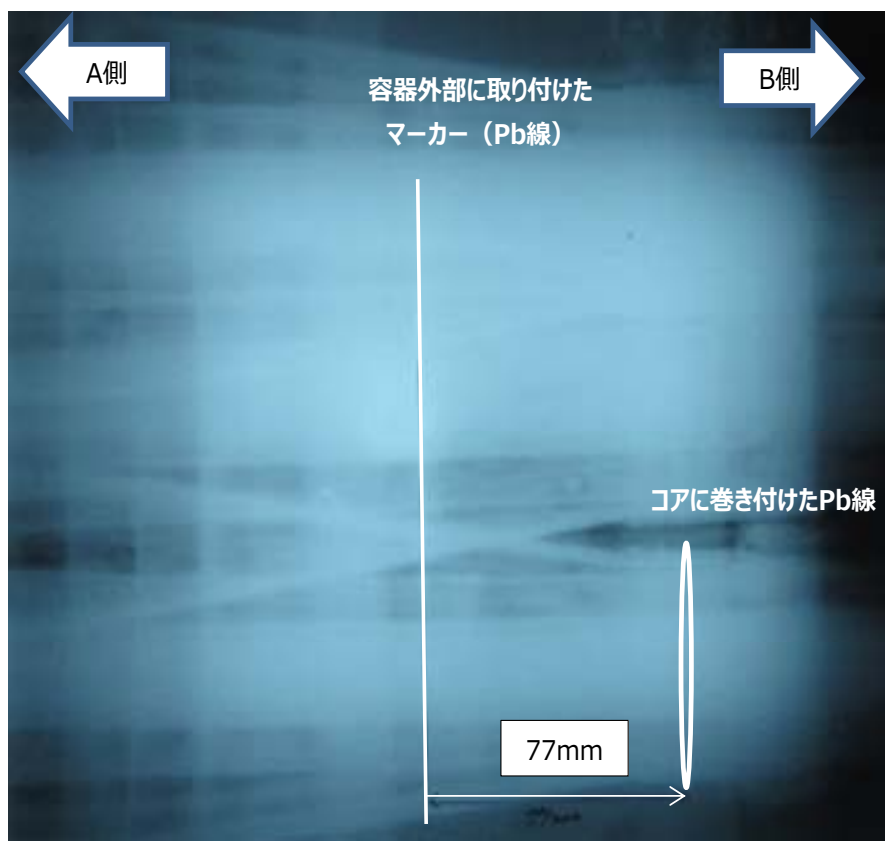


図 2. 4. 14-6 長期運転後（昇温後）

(3) これまでの結果との比較

表 2.4.14-2 に、今回（第 3 回冷却）の測定結果に加え、これまでに実施した第 1 回、第 2 回のケーブルコア移動量をまとめる。初期冷却は端末 A 側より行われるため、いずれの回も冷却時は A 端末側に収縮されコア移動が生じているが、移動量は最大で約 40 mm 程度であり、設計上十分裕度があることを確認した。また、昇温後は再度伸長するため初期位置に近づくが、やや初期冷却時に発生したコアの動きが残留する傾向にあった。

表 2.4.14-2 各冷却、昇温時のジョイント部コア移動量まとめ

試験タイミング	マーカー(容器)とPb線(コア接続部)の距離 [mm]	ジョイント部の動き [初期位置基準]
1stクール冷却前 (初期位置)	103	-
1stクール冷却後	73	A端末側に30mm
1stクール昇温後	101	A端末側に2mm
2ndクール冷却後	70	A端末側に33mm
2ndクール昇温後	92	A端末側に11mm
3rdクール冷却後	65	A端末側に38mm
3rdクール長期試験終了後	65	A端末側に38mm
3rdクール昇温後	77	A端末側に26mm

(4) まとめ

冷却、昇温によるコア移動量の変化を観測し、最大でも冷却時移動量は 40 mm 未満に収まり設計上十分裕度があることを確認した。また、長期運転前後の冷却時移動量はほとんど変化がないことも確認され、超電導ケーブルシステムの運転中の熱機械的な挙動の安定性を確認することができた。

2.4.14-4 冷却システムの経時変化確認

系統連系運転終了後の冷却システムへの影響を確認した。

(1) 真空度の経時変化確認

系統連系運転終了後の常温状態における主要機器（冷凍機、リザーバタンク、循環ポンプ、コリオリ流量計）の真空度の測定結果を表 2.4.14-3 に示す。ただし、冷凍機に関しては、2.4.11 節に示したように冷凍機入れ替えおよび真空引きを実施しているため参考値である。真空度に関しては管理値 0.25 torr 以下であり、系統連系運転中に異常の発生が無いことを確認した。

表 2.4.14-3 真空度測定結果（実証試験終了後、2014/2/6 測定値）

機器	真空度 (Torr)	機器	真空度 (Torr)
冷凍機 A1	0.095	リザーバタンク	0.001 以下*
冷凍機 A2	0.074	循環ポンプ A	0.132
冷凍機 B1	0.117	循環ポンプ B	0.075
冷凍機 B2	0.132	コリオリ流量計	0.042
冷凍機 C1	0.121		
冷凍機 C2	0.139		

※測定真空計の測定下限が 0.001 torr であったため。

(2) 冷却システム内露点確認

系等連系運転後の系内の水分量を確認するため、露点計測を実施した。露点計測に関しては以下の 2 つの経路で行った。

1. 冷凍機側：リザーバタンク～循環ポンプ～冷凍機
2. フィルタ側：リザーバタンク～フィルタ

図 2.4.14-7 に露点計測結果を示す。図に示すように、フィルタ側と比較して冷凍機側の露点に関しては $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ に達するまでに時間がかかっていた。状態確認のため、系内の水分量を各露点測定値における水分量 (g/m^3) と系内へ供給した窒素ガス量 (m^3) から算出した。測定結果を表 2.4.14-4 に示す。冷凍機側の水分量が多いが、水分量の合計は 1.12 g であり、大幅な流量低下が発生したシステム検証試験時の検出水分量 10 g と比較すると、1/10 程度である。

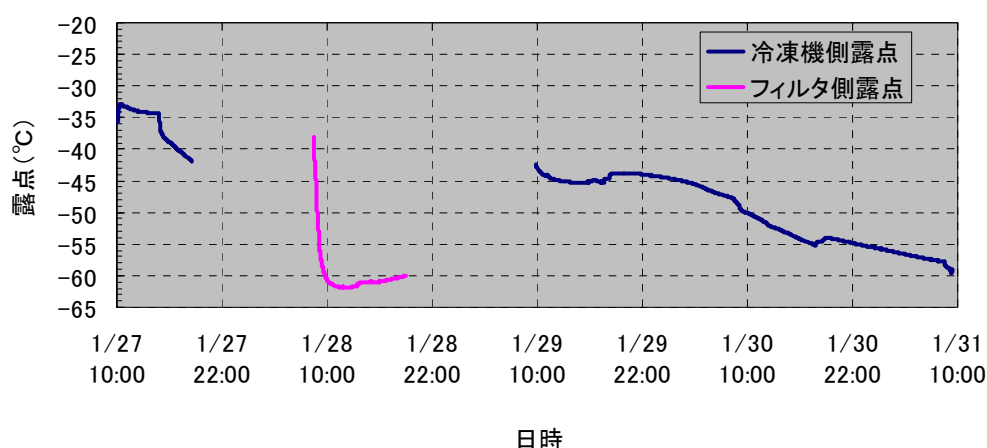


図 2. 4. 14-7 実証運転終了後の露点計測結果

表 2. 4. 14-4 各経路の検出水分量

冷凍機側	フィルタ側
1.08 g	0.04 g

(3) 冷却システム圧力損失の経時変化確認

圧力損失の経時変化を確認するため、系統連系運転後における冷却システムでの圧力損失を測定し、系統連系運転前の測定結果との比較を実施した。なお、圧力損失については以下の式より算出した。また、図 2. 4. 14-8 に各圧力の測定位置を示す。

$$\text{冷凍機ユニット圧力損失} = \text{質量流量計内圧力} - \text{循環ポンプ吐出圧力} \cdots (1)$$

$$\text{フィルタ圧力損失} = \text{バイパスライン出口圧力} - \text{リザーバタンク内圧力} \cdots (2)$$

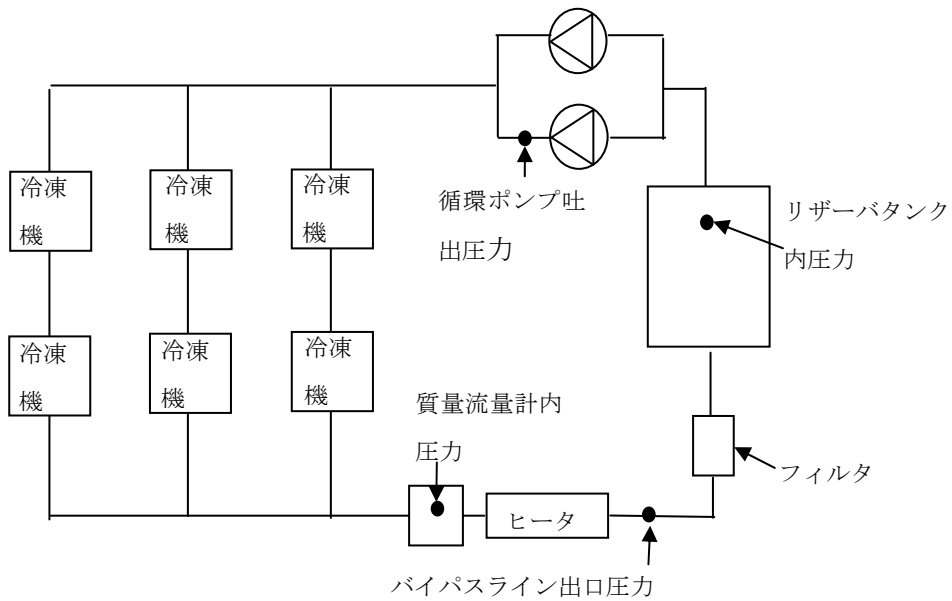


図 2.4.14-8 圧力損失算出使用圧力測定場所

表 2.4.14-5 に系統連系運転開始前（2011/11/28）と系統連系運転終了後（2014/1/22）における圧力損失測定結果を示す。表に示すように冷凍機側の圧力損失変化は無いが、フィルタの圧力損失が 9 kPa 大きくなっていた。しかし、システム検証試験時のフィルタ圧力損失変化 27 kPa と比較すると小さく、運転期間中に流量低下等の循環運転へ影響は見られなかった。

表 2.4.14-5 圧力損失測定結果

項目	測定値 (2014/1/22)	測定値 (2011/11/28)
冷凍機 6 台+ 差圧式流量計 +配管・バルブ(冷凍機ユニット)	37 kPa	36 kPa
フィルタ	18 kPa	9 kPa
全体損失（模擬負荷ヒータ除く）	55 k Pa	45 kPa

2.4.14-5 機器経時変化

系統連系運転後の機器状態を確認するため、循環ポンプ、フィルタについて取り外しを実施し、調査を行った。

(1) 循環ポンプ

循環ポンプに関しては、系統連系運転開始前の2012年8月にメンテナンスを行っており、系統連系運転中にはメンテナンスは実施していない。2台あるポンプの内、主として運転していた循環ポンプBに関しては、運転時の動作音を実証運転開始時と比較して若干大きくなっていたが、循環運転への影響は見られなかった。各ポンプの運転時間を表2.4.14-6に示す。

表 2.4.14-6 ポンプ運転時間

ポンプ A 運転時間	11,100 時間
ポンプ B 運転時間	11,800 時間

(推奨メンテナンス時間：9,000 時間)

取り外し後の外観目視確認では、ポンプAに関しては、変形などの大きな異常は見られなかったが、羽の裏面に油滴が確認された。(図2.4.14-9(a), (b)) ポンプBに関しては、羽の外周の一部にかすれた痕が確認されたが、ポンプA同様に変形などの異常は見られなかった。また、羽の裏面には水滴が確認された。(図2.4.14-10(a), (b))

油滴については常温ベアリング部分のオイル、水滴については系内残留水分と考えられる。ポンプBの動作音が大きくなっていたのはこの水分が要因と推測される。

今回の目視確認で、運転時間がメンテナンス推奨時間を越えていたが、ポンプに大きな損傷がないことから、メンテナンス推奨時間9,000時間については問題なく運転が可能であることが確認された。



(a) ポンプ A 羽根状況



(b) ポンプ A 羽根の裏面

図 2.4.14-9 循環ポンプ A 状態



(a) ポンプ B 羽根状況



(b) ポンプ B 羽根の裏面

図 2.4.14-10 循環ポンプ B 状態

(2) フィルタ

図 2.4.14-11(a) にフィルタの全景を示す、外観に関しては変形などの異常は見られなかった。シャフト部分に結露が見られたが液体窒素流路外であり、フィルタ部分に結露は見られていない。なお、フィルタ部内側に異物が確認されたがこれまでの取り外し時よりも量は少ない (図 2.4.14-11(b))。

系統連系運転中にフィルタ前後の圧力損失および循環流量に大きな変化が無かったため、交換作業を実施していないが、フィルタに異常は無く、異物の検出量についても運転に影響のない程度であった。この結果から、フィルタ前後の圧力損失及び循環流量の変化から交換の有無の判断が可能であることを確認した。



(a) フィルタ全景



(b) フィルタ内部異物

図 2.4.14-11 フィルタ状態

(3) 温度計

システム検証試験中に冷却システムに使用している温度計について、一部温度計で測定値にずれが生じていた。特に変動の大きかったA列入口温度計の常温での測定値変化を、B,C列の同位置に設置していた温度計測定値の変化と合わせて図2.4.14-12に示す。図に示すようにA列入口温度測定値のずれが徐々に広がっている。また、このほか4点の測定点でA列入口と比較すると程度は小さいが測定値のずれが発生していた。

ずれの大きいA列入口温度計に関しては、付近に新しい温度計を設置することで対応した。温度制御点として使用していた質量流量計出口温度計については、冷却システム試験中にずれが生じ始めたため、測定値のずれていない位置の近い質量流量計内温度計に切り替えを行い対応した。このほかのずれの生じた測定点に関しては、ずれ幅が小さく、制御に使用していない温度計であったため、冷却能力測定や熱負荷測定で使用する場合は個別にずれの補正を行うことで対応した。

原因に関しては、温度計が取り外せない状況であったため試験中に詳しい検証を行うことは難しく、試験終了後に解体調査を行うこととした。

図2.4.14-13にずれの大きかったA列入口温度計と系統連系運転後もずれが小さかったC列入口温度計の取り付け状態を示す。比較したところ取り付け状態については大きな違いは見られなかったことから温度計本体の問題と考えられ、引き続き調査を進めている。

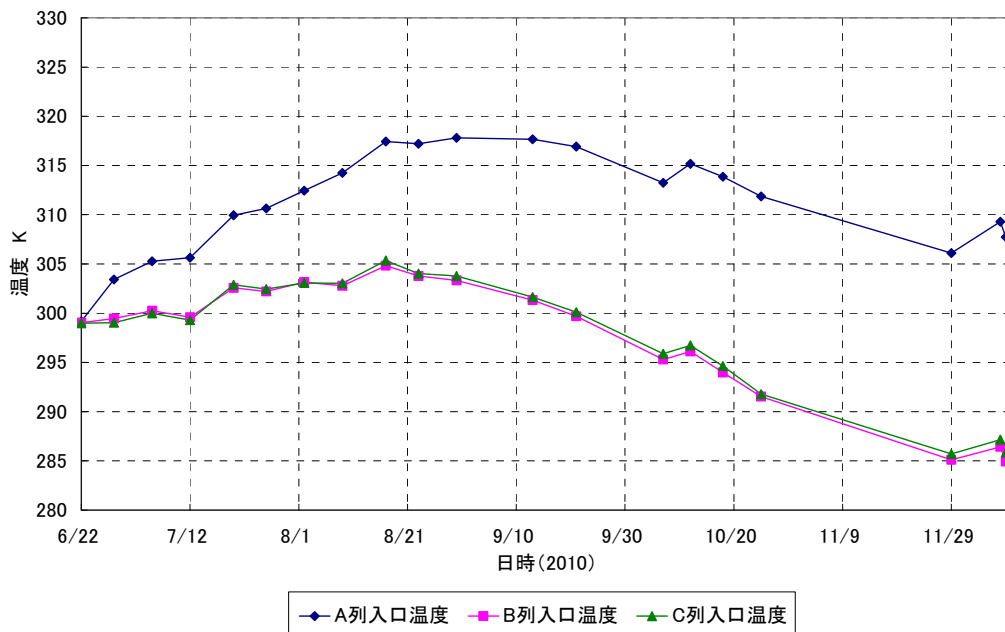
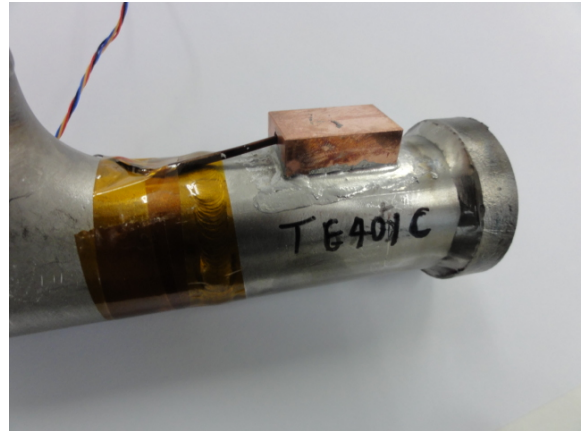


図 2.4.14-12 液体窒素ライン温度計測定値変動 (常温時)



(a) A列入口温度計



(b) C列入口温度計

図 2. 4. 14-13 温度計取り付け状態

2.4.15 短絡電流通過時のケーブルへの影響検討

(1) 開発目標

超電導ケーブルの実用化に向けた課題の一つとして、短絡事故電流通過時の発熱に対する冷媒液体窒素の挙動解析、温度・圧力変動への対応がある。

本節では、銅フォーマ内部のサブクール窒素を含めたケーブル数値解析モデルを構築し、ケーブル内の導体が短絡電流により加熱されたときの冷媒挙動シミュレーションを行った結果について述べる。

(2) 循環ポンプを考慮した解析モデルの構築

サブクール液体窒素の循環冷却系における循環ポンプからのポジティブフィードバックを考慮するために図 2.4.15-1 のようなモデル（モデルサーキュレーションモデル）を考案した。なお、端部圧力については、気体及び液体の流入量より以下の式から計算した。

$$P = \frac{P_0 \left(1 + \frac{\Delta V_{Gas}}{V_0} \right)}{\left(1 - \frac{\Delta V_{Liq}}{V_0} \right)} \quad \dots (2.4.15-1)$$

構築したプログラムの妥当性の検証のため、住友電工の熊取試験場に構築した 30 m 検証ケーブルシステムを用いた短絡電流模擬試験結果に対する解析を行い、試験データとの比較を行った。ケーブル断面図を図 2.14.15-2、解析パラメータは表 2.4.15-1 に示すとおりである。

解析結果を図 2.4.15-3 に示す。端末 A の圧力 (PA)、端末 B の圧力 (PB) およびリザーバタンクの圧力 (PRS) とともに、圧力上昇は概ね実証試験データと合っており、プログラムの妥当性が確認できたと言える。

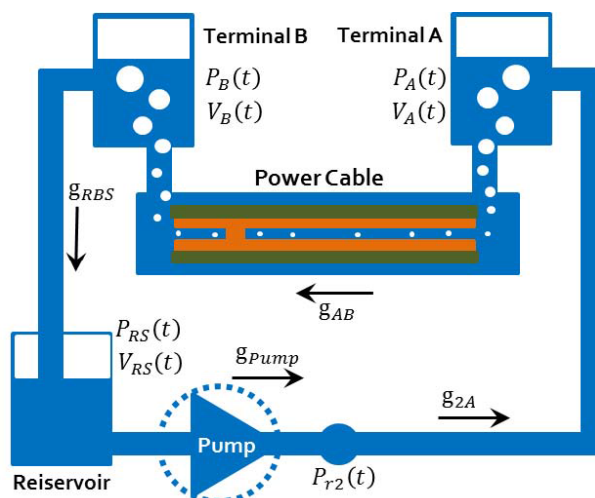


図 2.4.15-1 循環ポンプを考慮した解析モデル

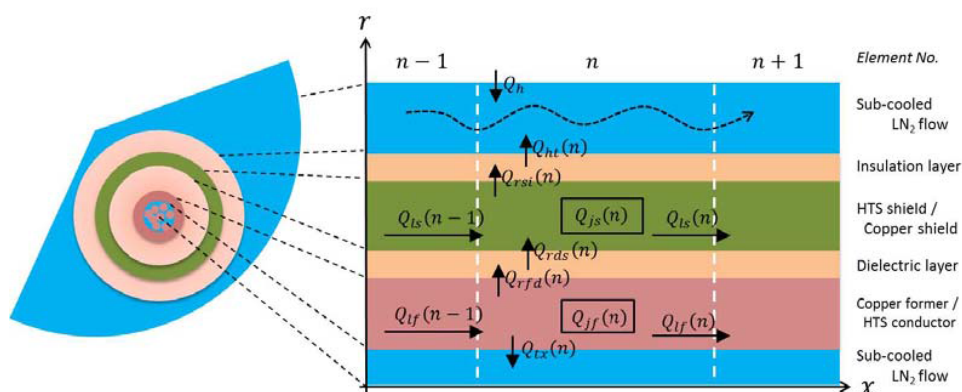


図 2.4.15-2 ケーブル断面の解析モデル

表 2.4.15-1 解析パラメータの諸元 (30 m ケーブル)

パラメータ	設定値
ケーブル長	30 [m]
A 端部初期気体体積	30 [L]
B 端部初期気体体積	11 [L]
A 端部から中間接続部までの距離	25 [m]
体積流量	44.4 [L/min]
A 端部初期圧力	318 [Pa]
B 端部初期圧力	321 [Pa]
リザーバタンク初期圧力	309 [Pa]
ポンプ部初期圧力	417 [Pa]
A 端部初期温度	74.282 [K]
B 端部初期温度	74.896 [K]
リザーバタンク初期温度	75.320 [K]
ポンプ部初期温度	74.446 [K]

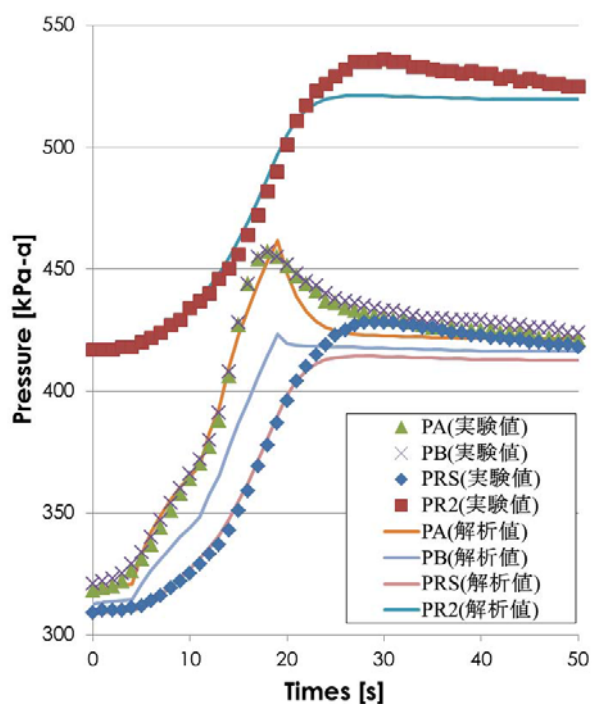


図 2.4.15-3 30 m ケーブル短絡電流模擬試験シミュレーション結果

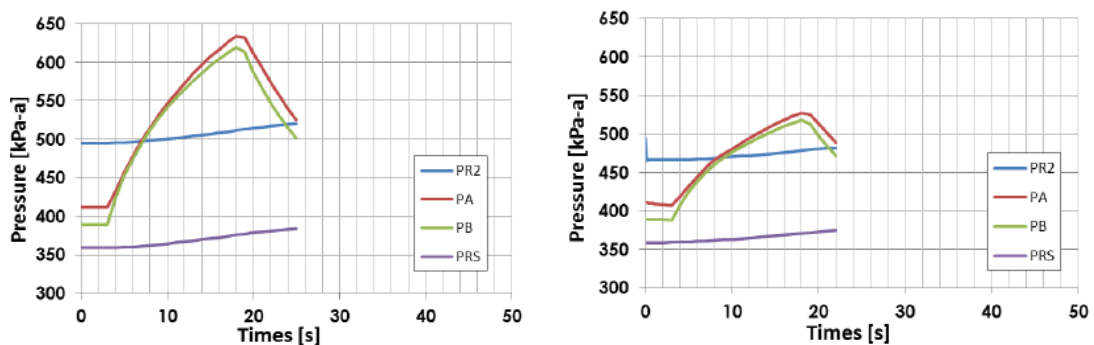
(3) 長尺ケーブルの解析

本ポンプサーキュレーションモデルを用いて、240 m ケーブルについて解析を行った。解析パラメータは表 2.4.15-2 に示すとおりであり、東京電力旭変電所に構築した 240 m ケーブルシステムに合わせて設定した。なお、解析は過電流通電時にフォーマ内部から発生する気体量をパラメータとして計算した。

解析結果を図 2.4.15-4 に示す。システムの圧力上昇は発生気体量に大きく依存しており、気体発生メカニズムをより詳細に検討するとともに、本現象を考慮したケーブルおよび冷却システム設計が重要であることを示唆している。

表 2.4.15-2 解析パラメータの諸元 (240 m ケーブル)

パラメータ	設定値
ケーブル長	240 [m]
A 端部初期気体体積	30 [L]
B 端部初期気体体積	30 [L]
A 端部から中間接続部までの距離	25 [m]
体積流量	39.1 [L/min]
A 端部初期圧力	311 [Pa]
B 端部初期圧力	289 [Pa]
リザーバタンク初期圧力	259 [Pa]
ポンプ部初期圧力	395 [Pa]
A 端部初期温度	76.840 [K]
B 端部初期温度	77.810 [K]
リザーバタンク初期温度	75.320 [K]
ポンプ部初期温度	74.446 [K]



(a) 発生気体比率 5%

(b) 発生気体比率 3%

図 2.4.15-4 240m ケーブルシミュレーション結果

(4) まとめ

- ・ 循環冷却ポンプまで考慮したポンプサーキュレーションモデルを構築し、事故電流が流れた際の冷媒圧力上昇を解析した結果、30m ケーブルシステム短絡電流模擬試験結果とほぼ一致することを確認した。
- ・ 本解析モデルを用いて 240 m ケーブルの圧力上昇解析を行った結果、圧力上昇はフォーマ内部の液体窒素蒸発量の割合に大きく影響されることを明らかにした。
- ・ 長尺ケーブルであるほど蒸発量の影響は大きくなり、フォーマ内部に存在する液体窒素の蒸発のメカニズムの解明が必要不可欠であるとともに、本現象を考慮したケーブルおよび冷却システム設計が重要であると考えられる。

2.4.16 実証試験の成果の総括

表 2.4.16-1 に、旭変電所実証試験の総括として、各システム単体試験を含む成果一覧を示す。

初期冷却は、ケーブルに損傷を与えずに LN2 温度までの冷却を達成すること、また、冷却システムでの流量・圧力異常や絶縁破壊に至る水分・不純物の混入防止等の、安全性を重視した。結果として、トラブル無く初期冷却が完了し、安定した系統運転に繋げることができたことは大きな成果と言える。今後、更なる改善課題としては、初期冷却時間の短縮や作業の簡素化がある。今回、主に冷却システム内の差圧管理等の作業手順の面から時間短縮を図ったが、ケーブル端末部の LN2 容積縮小等からも時間短縮の余地がある。今回の成果を生かし、多角的な点から更なる改善を検討していきたい。

ケーブル電気特性は、超電導ケーブル特有の項目として、臨界電流測定や、室温から LN2 温度までの熱サイクルに対するコア移動、絶縁性能の健全性確認がある。今回、布設、熱サイクルや系統送電後においても、出荷時と比較し性能劣化は見られず安定性を実証することができた。熱機械・圧力特性は、実証ケーブルの場合、超電導ケーブルの利点であるコンパクト化を優先し、ケーブル収縮代を設けずに端部で把持する構造としたが、健全性を確認することができた。ケーブル熱損失については、今回の実証試験では臨界電流値に対し負荷率が小さかった為、交流損失による影響は小さく、外部からの侵入熱が主要な要因となった。また、断熱管の真空度低下により徐々に侵入熱が増加する傾向が見られた。超電導ケーブルシステムの実適用のためには、真空度維持対策は今後の重要な課題の一つであるといえる。

冷却システムについては、系統連系運転前に各機器の性能試験を行い、設計値以上であることを確認した。また、冷却能力の温度依存性は 19.7 W/K (@1 台) であり、冷凍機の経年劣化による冷却能力低下時等に、運転温度上昇により冷却能力増大に対応できることが確認できた。冷却システム制御、および機器の切り替えは、システム検証と同様、温度・圧力・流量等の主要パラメータの変動時や、電源異常時において、シーケンス通りに正常に機能することを確認した。また、機器故障時やローテーション時においても、正常動作を確認した。

長期運転特性は、経時的な真空度悪化によるケーブル熱負荷、冷凍機冷却能力の低下を確認した。対策として、真空引きによる熱侵入低減や、メーカー推奨時間を基準とした冷凍機メンテナンス等を実施し、熱収支改善を図った。また、実証システムでは日射による管路表面の温度上昇が確認されたため、地中内に管路布設される通常の運用を考慮し、遮熱処理により温度低減を実施した。系統切り替えを含む実系統連系時の負荷変動に対しては、冷媒温度、圧力、流量等、安定した運転制御を確認した。系統連系運転期間中の警報発生の実績は、重故障はなく、軽故障の発生のみであった。

メンテナンス技術は、冷却システム循環を継続させた状態で、水分混入を防止する機器取り外し・取り付け方法を確立した。

表 2.4.16-1 旭変電所実証試験の成果一覧

分類	試験項目	目的	成果
初期冷却	初期冷却 (ケーブルシステム単体)	・安定性かつ時間短縮を考慮したケーブル初期冷却技術の検証	・冷ガスの段階的な冷却により、ケーブルに損傷を与えない安定した冷却方法の確立。(所要日数：3日間程度) ・冷却手順変更により最大荷重の低減。
	初期冷却 (冷却システム単体)	・冷却システム単体での初期冷却手順の検証	・初期冷却手順の確立。(所要時間：7時間) ・露点管理(-55℃以下)による水分混入防止技術の確立。
	循環冷却移立ち 上げ方法 (ケーブル+冷却システム)	・ケーブルシステムと冷却システムの循環冷却立上げ方法の検証	・両系差圧管理による接続手順の確立、時間短縮(2.5H→1.6H)の達成。 ・冷却システムを運転継続させる作業手順確立。
ケーブル電気特性	C・tan δ測定	・ケーブル絶縁層(PPLP)のLN2浸漬状態の検証 ・布設、熱サイクル、送電後の電気性能の健全性検証	・ケーブル電気絶縁層のLN2浸漬状態を確認。 ・電気性能健全性(C、tan δ)を確認。
	冷却・昇温後のコア移動 (X線測定)	・冷却、昇温後のジョイント内コア移動の検証	・ジョイント接続部の許容移動量(480mm/片側)に対し、十分な裕度を確認。 ・冷却開始側にコアが移動する傾向を確認。
	DC課電試験	・ケーブル絶縁性能の健全性検証	・DC151.8 kV@10分間を印可し絶縁性能健全性を確認。
	臨界電流測定	・電気性能の健全性検証 ・実線路におけるIc測定方法の検証	・実証試験前後において、設計値(6400A@77K)以上の性能維持を確認。 ・2コア往復通電による実線路測定方法の確立。
	部分放電	・ケーブル絶縁性能の健全性検証	・測定感度(端末部>50 pC、ケーブル部中央>200 pC)を超える部分放電の発生無しを確認。
	シールド特性	・超電導シールド層の電流遮蔽率検証	・超電導シールド層の遮蔽率は89%程度であり、設計値と概ね同等であることを確認。
ケーブル熱機械・圧力特性	冷却時機械応力検証	・熱収縮による荷重変化及び低減対策の検証	・端部把持による熱応力への対策を確認。 ・荷重分析より初期冷却手順を改善し、最大荷重を低減。
	圧力損失測定	・圧力損失に対する流量依存性の検証 ・流路の健全性検証	・圧力損失は流量の二乗に比例を確認。 ・異常な圧力上昇は無く、流路の健全性を確認。
	ケーブル熱損失	・無負荷時、通電時の熱損失の検証	・無負荷時(夜間)の熱損失は2300W程度であり、設計値と概ね一致を確認。 ・通電損は100W以下であり、影響が小さいことを確認。

冷却システム特性	冷凍能力	・冷凍機冷凍能力の検証	・冷凍機6台の冷凍能力平均値は820W@69Kであり、機器仕様を満たすことを確認。
	循環ポンプ特性	・循環ポンプ性能の検証	・循環ポンプ性能がメーカー設計値（揚程 0.15 MPa@40 L/min）を満たすことを確認。
	熱損失（冷却システム）	・冷却システム熱損失の検証	・実測値(@69K)が設計値以下を確認。 ・ポンプ(熱損+ Δ PV)=163W ・タンク, 配管, バルブ等=426W ・ケーブル接続配管=105W
	圧力損失（冷却システム）	・冷却システム圧力損失の検証	・実測値(@流量 40 L/min)：冷凍機6台+差圧式流量計=36kPa、フィルタ=9kPa ・経時劣化なしを確認。
	ケーブル各部伝熱反応時間	・ケーブルシステム各部の冷媒伝熱反応時間の検証	・ケーブルシステム一巡に要する伝熱時間は、2時間程度を確認。 ・入口側、出口側の端末部にて伝熱時間に大きな差を確認。
冷却システム特性	冷却システム効率	・冷却システム効率の検証	・冷凍機効率(冷凍機6台)=0.063@69K ・冷却システム効率(冷却システム単体、冷凍機6台)=0.053@69K ・冷却システム効率(実証運転中、冷凍機5台)=0.040@69K
	冷却能力温度依存性	・運転温度と冷却能力における相関性の検証	・冷却能力は運転温度に対し 19.7 W/K (@1台)の相関性を確認。
制御性	温度制御	・冷凍機の運転台数追従による温度制御の検証	・冷凍機の運転台数追従により、設定温度 \pm 1 Kの範囲で安定に制御されることを確認。
	圧力制御	・各圧力制御機構による圧力制御の検証	・各圧力制御機構（自然加圧制御：0.2 MPaG、ヒータ加圧制御：0.175 MPaG、外部ガス加圧制御：0.15 MPaG、凝縮減圧弁：0.25 MPaG）により、安定制御を確認。
	流量制御	・循環流量の安定制御の検証	・循環流量の設定値 40L/min 維持を確認。 ・冷凍機側の三並列流路において、均等に分流されることを確認。
	停電模擬試験	・電源異常時における冷却システム制御動作の検証	・停電後の復帰において、正常なシーケンス制御を確認。
冷却系機器切替	ポンプ並列運転	・ポンプ故障時における停止時間短縮の検証	・ポンプ二台の並列運転により、停止時間短縮、安定運転維持を確認。
	機器故障時の冗長性	・主要機器故障時の冗長性検証	・冷凍機、循環ポンプ、冷却塔において正常なバックアップ動作により運転維持を確認。
	ローテーション切替制御	・冷凍機ローテーション切替の安定制御の検証	・シーケンス通り冷凍機が正常に切り替わり、安定した温度制御を確認。

長期 運 転 特 性	ケーブル熱負荷 長期特性	・実証運転時のケーブル熱負荷変化の検証	・実証運転時のケーブル熱負荷は、2300～3100 W を確認。 ・運転開始後、徐々に真空度劣化による熱負荷上昇を確認。
	真空度 経時変化	・実証運転時の真空度経時変化の検証	・ケーブル、接続部、冷凍機に真空度の経時的な劣化を確認。 ・冷凍機を除く冷却システム各要素（ポンプ、冷却配管等）は劣化無しを確認。
	日射対策	・遮熱塗装による日射対策の効果検証	・日射による温度上昇の抑制を確認。
	冷却能力経時変化	・実証運転時の冷却能力経時変化の検証	・冷却能力の低下を確認し、真空引き、He 充填、メンテナンスによる対策効果を確認。
	運転温度変更時の システム信頼性	・高温域への温度変更に対するシステム信頼性の検証	・運転温度を 69～79K±1K まで変化させ、安定運転維持を確認。
	実系統負荷 変動への システム信頼性	・実系統連系時の負荷変動や系統切替に対する応答性の検証	・負荷変動や系統切替に対し、冷媒温度、圧力、流量等、システム全体の安定制御を確認。
	警報発生実績	・警報対応等による保守実績の検証	・送電停止に至るような重故障は無く、軽微な機器故障や設定値不備の軽故障のみを確認。
	機器残存性能確認	・実証運転後の冷却機器性能の検証	・循環ポンプ：一部摩耗が見られたが、メーカー推奨時間 9000 h は運転可を確認。 ・フィルタ：異物は見られたが、微量であることを確認。
メン テナ ンス	主要機器 メンテナンス	・循環運転中における冷凍機、ポンプ、フィルタのメンテナンス方法の検証	・循環運転を継続させながら、かつ水分混入を防止する機器取外し、取付け方法を確立。

引用論文リスト

- (1) 鈴木寛 他、“低温絶縁超電導ケーブルの絶縁設計とその実証”、電学論 B, 126 巻 4 号 (2006) 441-451
- (2) “JEC-3401-2006 0F ケーブルの高電圧試験法”、電気学会 電気規格調査会標準規格

2.5 ケーブルの高性能化の研究

本プロジェクトにおいて、66 kV 級三心一括型ケーブルを用いた国内初の実系統実証試験が完了し、運転および保守を含めたシステム全体の信頼性や安全性を議論するステージにある。次のステージである実用化初期段階においては、水力発電所の発電機引き出し線など、導入メリットの大きな線路から超電導ケーブルの適用が始まると考えられる。この引き出し線には 22 kV/12 kA 級の性能が要求され、ケーブルの大電流化が必須である。このため、22 kV/12 kA 級のケーブルおよび終端接続部の概念設計を行い、その設計に基づいた要素技術開発を行った。

2.5.1 大電流通電技術の検討

2.5.1-1 適用可能性検討

2.7.2 節では、超電導ケーブルを引出し線に適用した場合の経済性のメリットを算出し、その効果があることを確認している。

大電流超電導ケーブルの導入モデルとして検討しているのは、発電機引き出し線（発電機～変圧器間）であり、発電した電力を変圧器で昇圧する前であるため通電電流が大きく、さらに負荷率が高いことが特徴である。図 2.5-1 は、従来発電機引き出し線に用いられている相分離母線を示すが、直径 1 m 以上と大きく、また大電流故に送電損失が大きい。揚水発電所等の地下空間に配置される場合には、サイズが大きいためにトンネル等の掘削による建設コストが大きくなる場合があった。

超電導ケーブルを適用した場合のメリットを下記に記す。

- ・ 低損失な超電導ケーブル適用により送電損失削減効果大きい。
- ・ コンパクトな超電導ケーブルでは既設トンネルを活用できるため、建設コストが削減可能。
- ・ コンパクトでフレキシブルな超電導ケーブルを適用することで、スペースを有効活用でき、発電機と変圧器の配置自由度が増す。

以上のように、大電流ケーブルは超電導ケーブル適用のメリットが大きく、早期実用化のターゲットになると考えている。

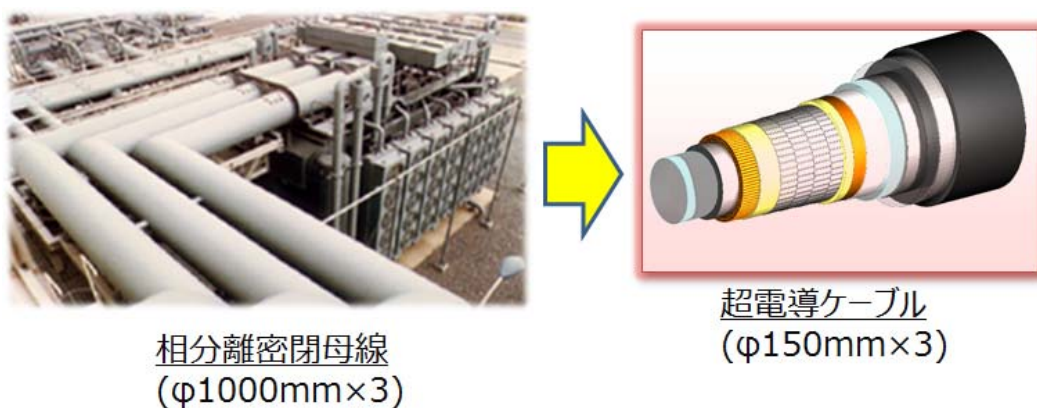


図 2.5-1 相分離母線

2.5.1-2 要素技術開発

(1) 開発課題

大電流超電導ケーブルの開発における技術的要点を下記に記す。

- これまでに実績のない AC12 kA の大電流を安定に流すことが重要であり、ケーブルコア内部の発熱量を低減し、内部冷却効果も加味して熱設計を行う必要がある。尚、2.7.2の検討から、交流損失の目標となる目安を10W/m/phとした。
- 最大 63 kArms の短絡電流に対しコア内部温度上昇を抑制するため、銅保護層の断面積を適切に設計するとともに、超電導シールドを有さないことに起因して二相短絡時等に相間に発生する電磁力対策が重要となる。相離隔を大きくすれば電磁力は低減するが、周囲構造材への電磁的影響は大きくなるため注意が必要である。
- 狭小スペースへ収納する必要があるため、ケーブルだけでなく終端接続部のコンパクト化が重要になる。
- 実用化には初期コスト削減が重要であり、先に述べたように、冷却システムを小規模化するためのケーブルシステム低損失化が重要課題となる。

これらの課題について、本検討では表 2.5.1-1 にまとめる内容を検討した。

表 2.5.1-1 開発課題と検討内容

部位	項目	課題	今回検討内容
ケーブル	定格電流通電	12kA 安定通電	<ul style="list-style-type: none"> • 導体部冷却特性向上を目指して、コア中心に冷却チャンネルを設ける。 • 短尺での 12kA 通電確認
	低損失化	<10W/m/ph	<ul style="list-style-type: none"> • シールドなし検討 • 短尺での損失測定 (従来設計適用性確認)
	事故電流対応	63kA/0.6sec 対応	<ul style="list-style-type: none"> • 銅保護導体の検討 • 短尺での温度特性、線材への影響確認
端末	コンパクト化	現地スペース対応	コンパクト化のための基本構造検討
	通電・低損失化	電流リード、接続部の安定通電、低損失化	<ul style="list-style-type: none"> • 従来設計による電流リード試作、評価。 • 低損失化のための指針確認

(2) ケーブル構造

大電流超電導ケーブルの設計概要を下記に記し、ケーブル仕様及び構造を表 2.5.1-1 及び図 2.5.1-1 に示す。

- ・ フォーマは可撓性を有する金属管の外周に、短絡電流のバイパス回路となる銅保護層を巻き付けて構成し、金属管内部にも液体窒素を流すことで往復冷却を行う。
- ・ 超電導導体層は DI-BSCCO 線材を用いた 4 層構造であり、想定臨界電流 (I_c) 値は 25~30 kA である。
- ・ 超電導シールド層は損失検討の結果、シールド層を設けない方が低損失になる可能性があること(注)、コスト的にも有利であることから、設けないこととし、銅テープで遮蔽層を構成し、片端接地にすることで遮蔽電流が発生しない構造とする。
- ・ 三条(三相)のケーブルは 350 mm 程度の離隔を確保して配置することにより、定常時の他相磁場の影響や、短絡電流が流れた際に発生する電磁力を抑制する。

(注) シールドなしの場合の交流損失とありの場合の交流損失との比較を図 2.5.1-2 に示す。シールドなしは、4 層導体、ありの場合は、4 層導体 + シールド 2 層で計算を行っている。

表 2.5.1-2 大電流ケーブルの構造

部位	仕様
フォーマ	中空金属パイプ (内部冷却)、銅保護導体 (400 mm ²)
超電導導体	4 層 (DI-BSCCO 線材)
電気絶縁	PPLP (t=3 mm)
遮蔽層	銅テープ
保護層	クラフト紙、布テープ
断熱管	二重 SUS コルゲート管 (SI & 真空断熱)

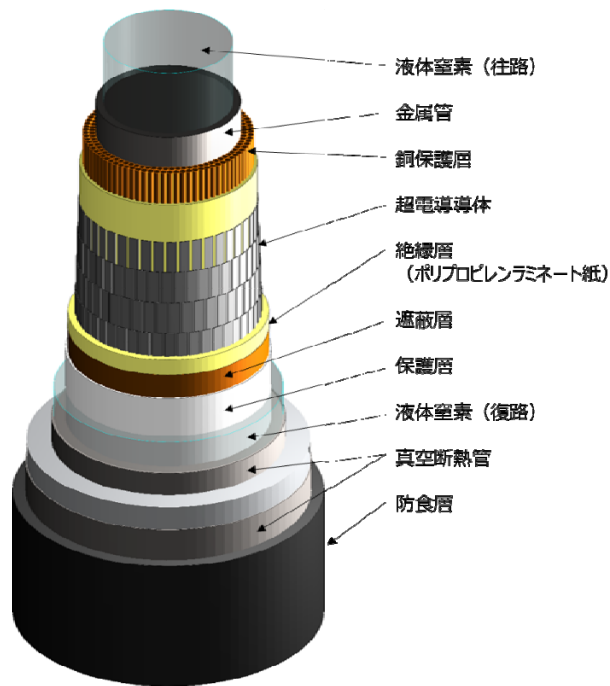


図 2.5.1-1 大電流ケーブルの構造

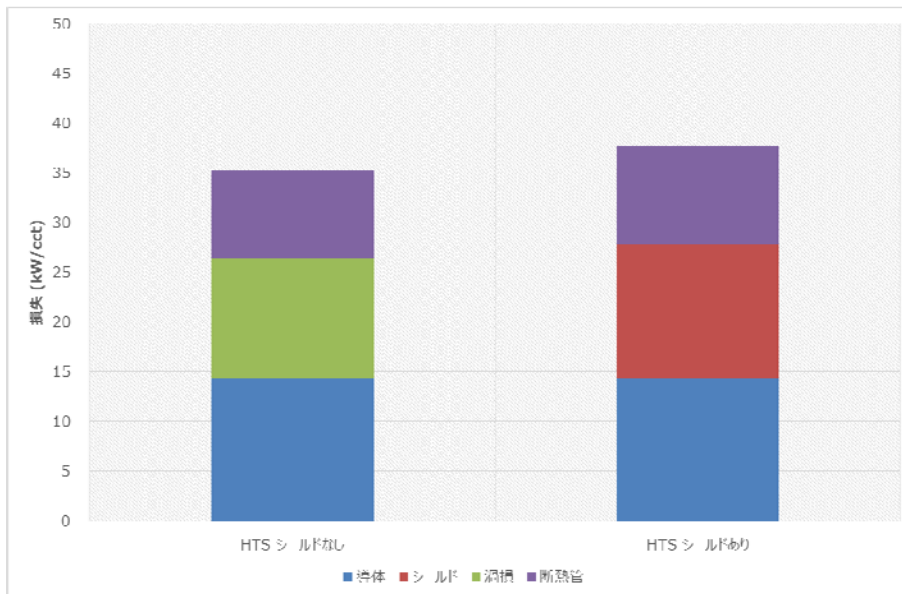


図 2.5.1-2 シールドあり、なしの交流損失比較

(3) 通電試験

(a) 損失検証試験

ケーブルコアサンプルの諸元を表 2.5.1-1 に示す。サンプル長は約 3 m であり、 I_c は約 25 kA である（図 2.5.1-3 参照）。本サンプルをオープン容器中で浸漬冷却し、単相通電の交流損失特性を測定した結果を図 2.5.1-4 に示す。12 kA 通電時（60 Hz）の損失は約 15 W/m/ph であり、mono-block モデルを用いた計算結果と一致す

ることを確認した。さらに、二相通電時の損失検証を行うとともに、ケーブル構造最適化および低損失線材適用によってケーブルの低損失化を図る。

表 2.5.1-1 ケーブルサンプル諸元

Layer	Specifications	O. D. (mm)
Former	FRP pipe	83
HTS conductor	4 layers of BSCCO wires	87
Insulation	PPLP [®] (3 mm ^t)	93
Protection	Kraft papers	95

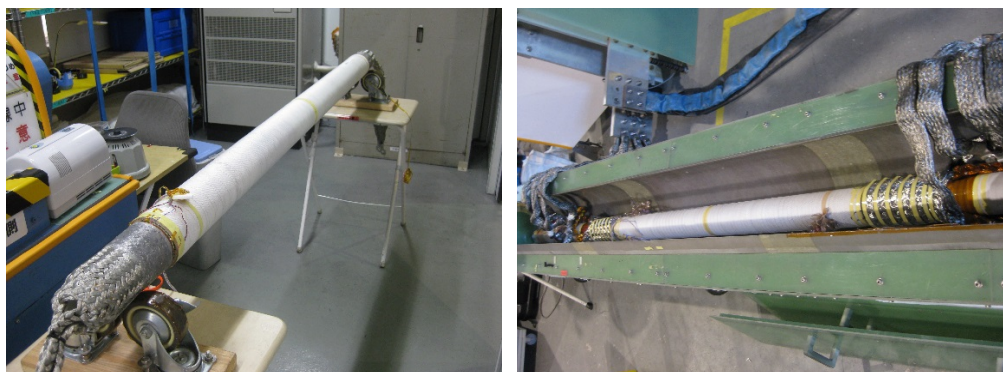


図 2.5.1-3 通電試験サンプルの外観

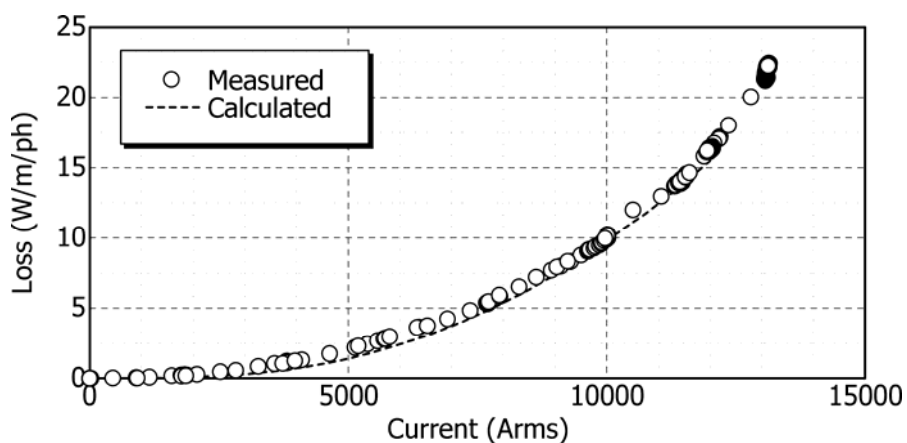


図 2.5.1-4 交流損失測定結果 (60 Hz)

(b) 単相通電試験

ケーブルコアサンプルの諸元を表 2.5.1-2 に示す。サンプル長は約 3 m であり、 I_c は約 25 kA である (図 2.1.5-5 参照)。本サンプルをオープン容器中で浸漬冷却し、12 kA の連続通電試験を行った。8 時間の連続通電 (電流波形は図 2.5.1-6 に示すとおり) の間、サンプルの両端電圧および内部温度は安定しており、12 kA の大電流を安定に流せることを確認した。

表 2.5.1-2 ケーブルサンプル諸元

Layer	Specifications	O. D. (mm)
Former	SUS pipe, Cu conductor (400 mm ²)	83
HTS conductor	4 layers of BSCCO wires	87
Insulation	PPLP [®] (3 mm ^t)	93
Protection	Cu tapes, Kraft papers	96

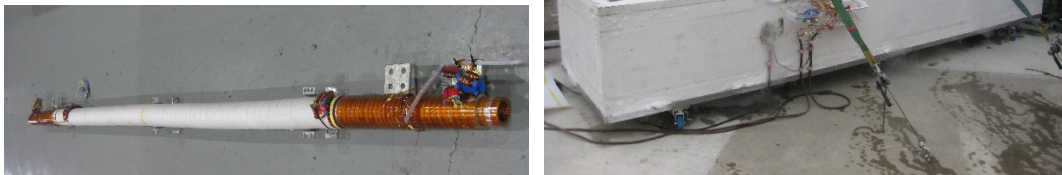


図 2.5.1-5 試験サンプル外観

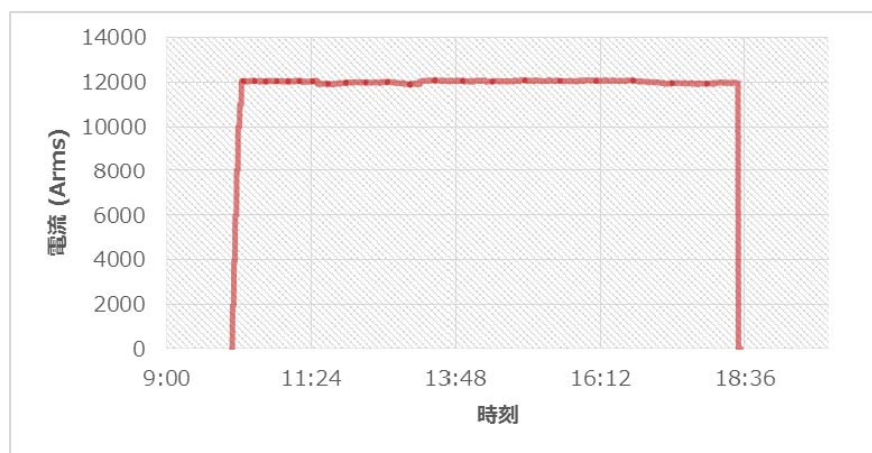


図 2.5.1-6 単相通電時の電流波形

(c) 二相通電試験

今回のケーブルは超電導シールドがないため、他相の磁場の影響で、当該相の I_c が低下すると予想される。図 2.5.1-7 は、2 相の相関距離と I_c との関係を示す。縦軸は、他相の影響がない場合の I_c を 1 とした時の相対的な値である。相間距離が短いほど、 I_c は低下する傾向にある。この関係を確認するために、350mm の相関距離の場合の I_c を調べた。

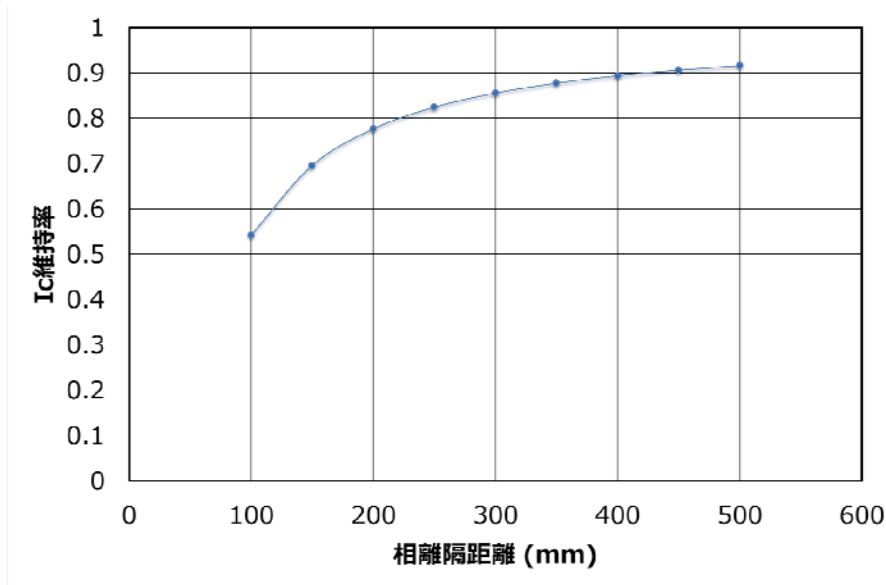


図 2.5.1-7 相関距離と I_c との関係

ケーブルコアサンプルの諸元を表 2.5.1-3 に示す。サンプル長は約 3 m であり、 I_c は約 25 kA である (図 2.5.1-8 参照)。2 本のサンプルを非金属製のオープン容器中に離隔 350 mm で配置して浸漬冷却して連続通電試験を行った。

- ・ 2 本のサンプルをそれぞれ単相通電した結果、12 kA の大電流を安定に通電できることを確認した。
- ・ 2 本の往復通電に切り替えて通電を行った結果、10 kA は安定に通電できたが、電流値を 11 kA に上げた直後からサンプル内部温度が上昇したため通電を停止した (図 2.5.1-9 参照)。

層 I_c が最も低い導体 4 層目に対して、温度をパラメータとして通電電流に対する負荷率を計算した結果を図 2.5.1-10 に示す。なお、自己磁場 (平行磁場) による I_c 低下だけでなく他相磁場 (垂直磁場) による I_c 低下も考慮している。

- ・ 8 kA 以上で他相磁場による I_c 低下が顕著となる。77 K において、12 kA 通電時の負荷率は 1.05、11 kA 通電時は 0.94 となる。11 kA 通電時に負荷率が 1 を超えるのは 81 K であり、図 2.5.1-8 に示したように 5 K 程度の温度上昇によりクエン

チするのは妥当と言える。

・二相通電時（三相通電時）に 12 kA を安定通電するためには、線材 I_c の向上、あるいは他相磁場の遮蔽が重要となる。

表 2.5.1-3 ケーブルサンプル諸元

Layer	Specifications	O. D. (mm)
Former	SUS pipe, Cu conductor (200 mm ²)	83
HTS conductor	4 layers of BSCCO wires	87
Insulation	PPLP [®] (3 mm ^t)	93
Protection	Cu tapes, Kraft papers	96



図 2.5.1-8 試験サンプル外観

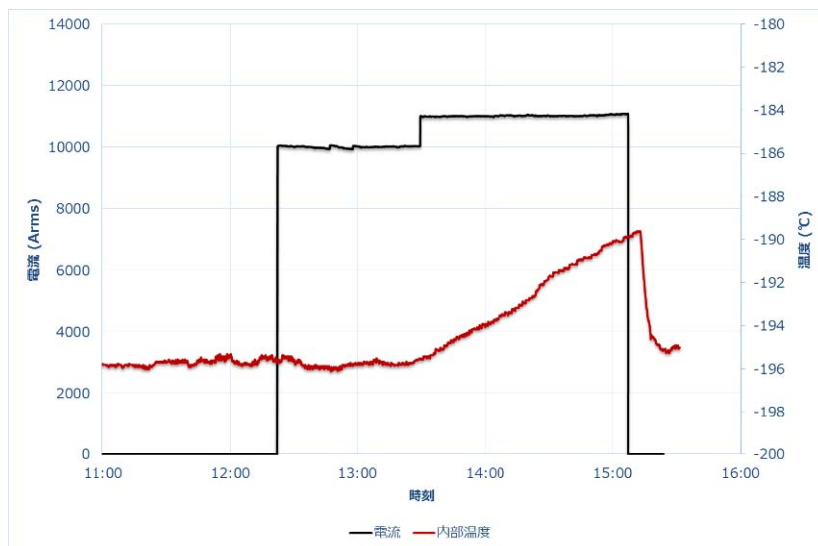


図 2.5.1-9 二相通電時の電流・温度波形

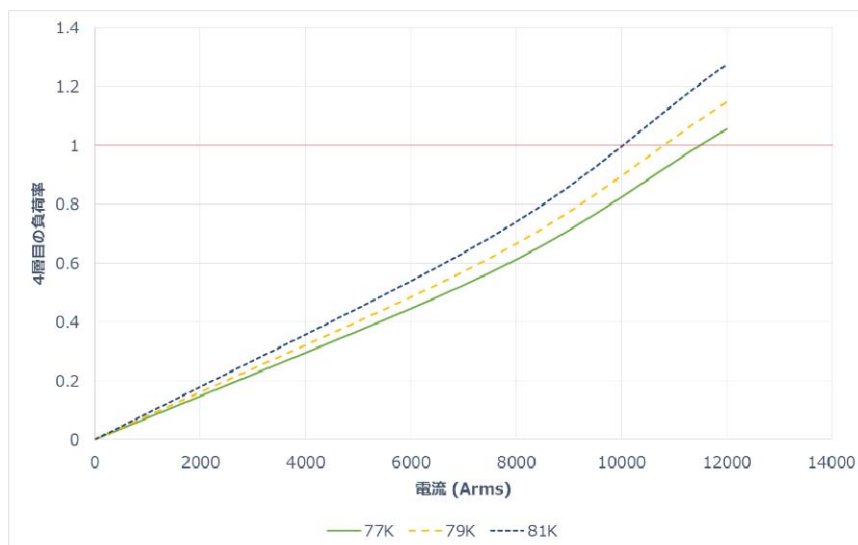


図 2.5.1-10 通電電流と4層目の負荷率相関

(4) 短絡電流試験

(a) 単相短絡試験

短絡電流試験に供試したケーブルコアサンプル（約 3 m）の諸元を表 2.5.1-4 に示す。銅保護層の断面積は、数値シミュレーション結果を反映して 400 mm^2 とした（図 2.5.1-11 参照）。本試験では、銅保護層断面積設計の妥当性検証を主目的とし、オープン容器中で浸漬冷却したケーブルコアに対して単相通電を行い、内部の温度上昇及び試験前後の I_c 特性を検証した。

・短絡電流 63 kArms に対して、通電時間と電流波形、通電時間と超電導導体層の温度上昇の関係を図 2.5.1-12 と図 2.5.1-13 にそれぞれ示す。破線で示したシミュレーション結果とドットで示した実測値はほぼ一致しており、銅保護層が設計通りに機能することを確認した。

・通電時間が 0.6 秒の場合の温度上昇は約 10 K、2 秒の場合は約 60 K である。短絡試験後にサンプルの I_c を再測定した結果、特に I_c の劣化はないことを確認した。

表 2.5.1-4 ケーブルサンプル諸元

Layer	Specifications	O. D. (mm)
Former	SUS pipe, Cu conductor (400 mm^2)	83
HTS conductor	4 layers of BSCCO wires	87
Insulation	PPLP [®] (3 mm^t)	93
Protection	Cu tapes, Kraft papers	96

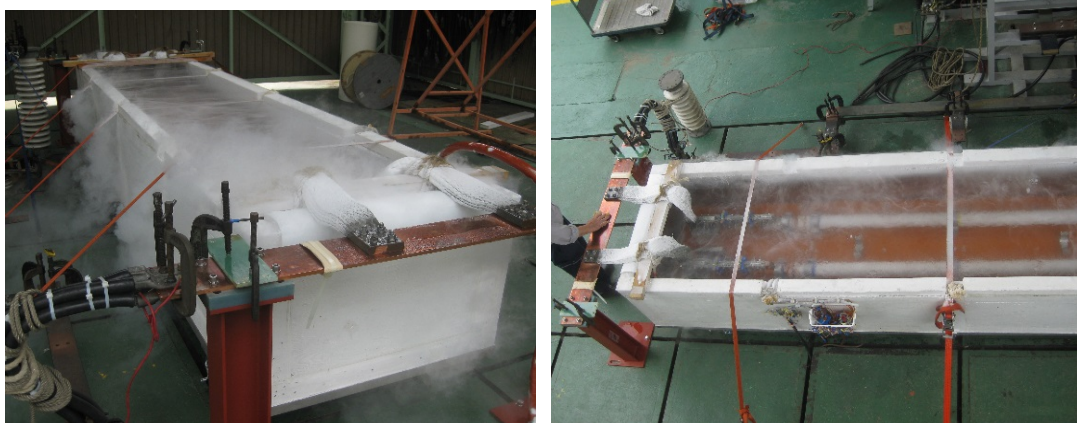


図 2.5.1-11 短絡試験サンプル外観

表 2.5.1-5 短絡試験条件

項目	諸元	備考
通電方式	単相通電	
電流値	最大 63 kArms、2 秒	要求仕様は最大 0.6 秒 過酷条件として最大 2 秒まで実施
冷却方式	浸漬冷却	オープン容器

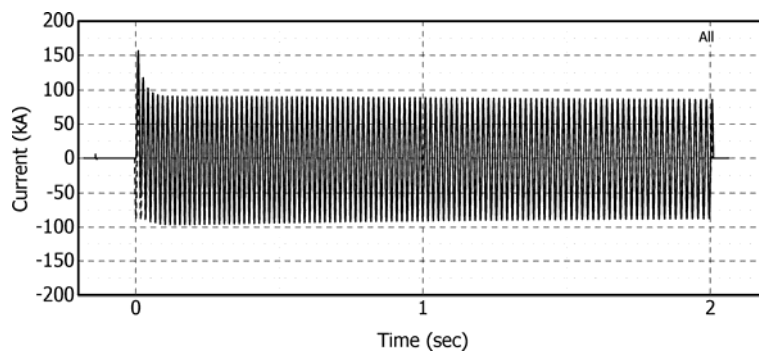


図 2.5.1-12 短絡電流波形 (63 kArms、2 秒)

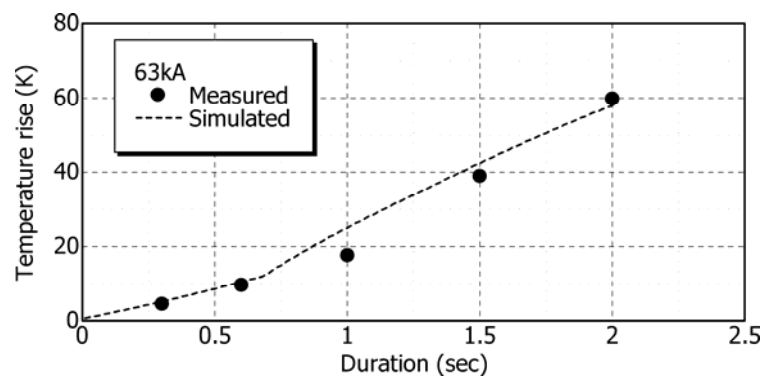


図 2.5.1-13 短絡電流通電時間と温度上昇

(b) 二相短絡試験

単相短絡試験により有用性が確認されたシミュレーションコードを用い、フォーマ部銅保護層の断面積をパラメータとして温度上昇解析を行った結果、通電時間が 0.6 秒であれば、200 mm² の銅保護層でも温度上昇が大きく変わらないことを確認した。このため、表 2.5.1-6 に示すように、銅保護層断面積を 200 mm² に低減したサンプル 2 本を作製し、離隔 350 mm で配置して二相短絡電流試験を実施した。なお、二相通電時にはコア間に電磁力（斥力）が発生する。実形態を模擬してケーブルコアは端部のみ固定し、断熱管内管を模擬した半割れコルゲート管でコアを把持する構成とした。なお、コルゲート管は所定の間隔で配置したブラケットにより固定した（図 2.5.1-14 参照）。

- ・コア内部の温度上昇を図 2.5.1-15 に示す。単相通電時と二相通電時の実験結果（ドット）に差異は見られず、シミュレーション結果（実線）と良く一致することが確認された。最大 63 kArms、0.6 秒通電時の温度上昇は約 10 K であり、設計通り過大な温度上昇が発生しないことが確認された。
- ・63 kArms 通電時の電流波形は図 2.5.1-16 に示すとおりであり、第 1 波のピーク値は約 150 kA である。このときに発生する電磁力は約 1,300 kgf/m と予想されるが、実際に測定した電磁力波形は図 2.5.1-17 に示すとおりであり、ほぼ想定どおりの電磁力が確認された。
- ・短絡試験後にサンプルの I_c を再測定した結果、I-V 特性に変化は無く、温度上昇および電磁力によりケーブルコアの超電導特性が低下しないことが確認された。

表 2.5.1-6 ケーブルサンプル諸元

Layer	Specifications	O. D. (mm)
Former	SUS pipe, Cu conductor (200 mm ²)	83
HTS conductor	4 layers of BSCCO wires	87
Insulation	PPLP [®] (3 mm ^t)	93
Protection	Cu tapes, Kraft papers	96

表 2.5.1-7 短絡試験条件

項目	諸元	備考
通電方式	単相、二相通電	
電流値	最大 63 kArms、0.6 秒	
冷却方式	浸漬冷却	オープン容器

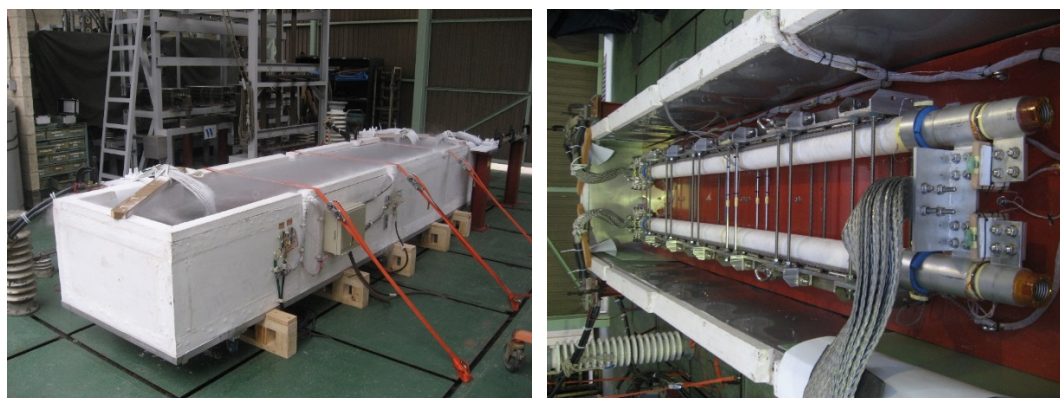
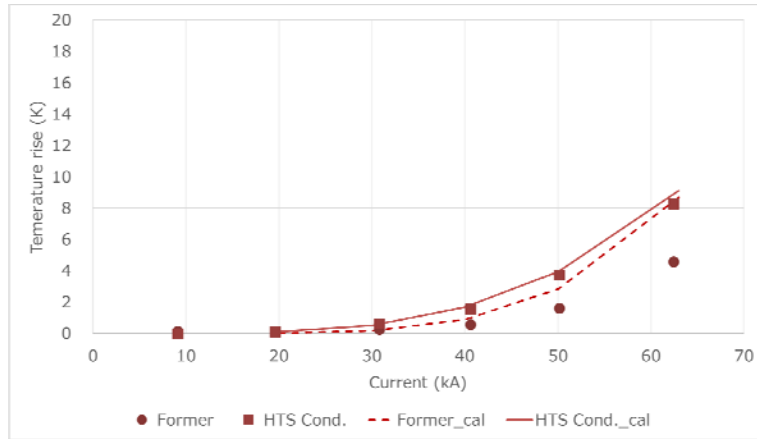
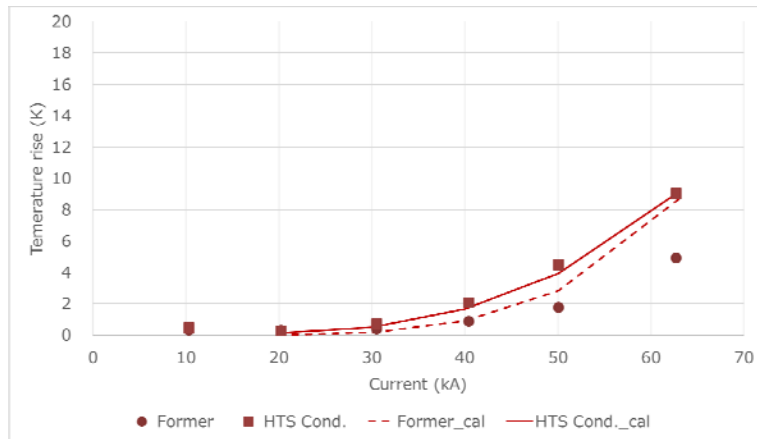


図 2.5.1-14 試験サンプル外観



(a) 単相通電時



(b) 二相通電時

図 2.5.1-15 単相通電時と二相通電時の温度上昇比較

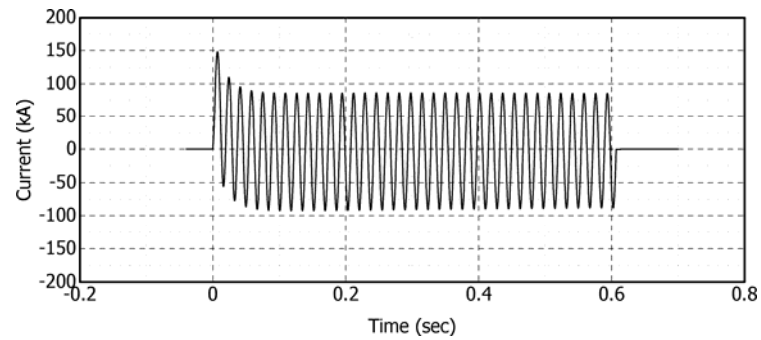


図 2.5.1-16 短絡電流波形 (63 kArms、0.6 秒)

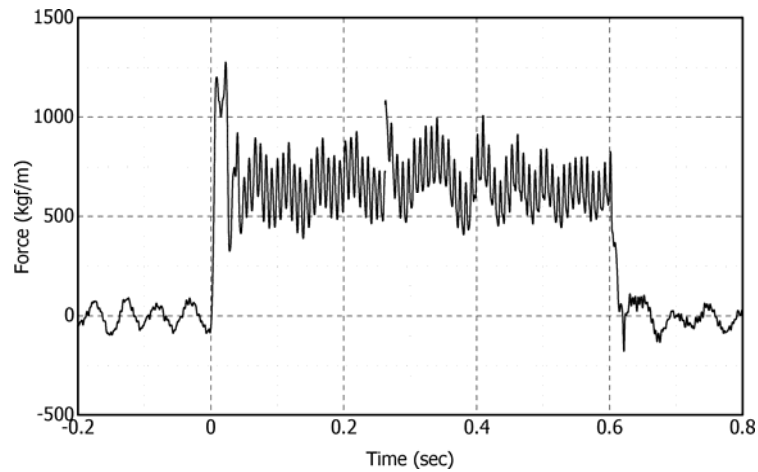


図 2.5.1-17 ケーブルコア間に発生する電磁力測定結果

(5) 曲げ試験

サンプルの諸元を表 2.5.1-8 に示す。サンプル長は約 3 m である。I-V 波形は 1、2 層目および 3、4 層目を合わせて測定し、それぞれの I_c は約 13 および 8 kA である。曲げ試験は、所定の径を有する曲げ治具に対してケーブルコアを沿わせた後に直状に戻し、さらに逆向きに曲げた後に直状に戻す工程を 1 サイクルとして、各曲げ径に対して 2 サイクル実施した (図 2.1.5-18 参照)。Φ2750 までの曲げに対して超電導特性が低下せず、十分な曲げ特性を有することを確認した。

表 2.5.1-8 ケーブルサンプル諸元

Layer	Specifications	O. D. (mm)
Former	SUS pipe, Cu conductor (400 mm ²)	83
HTS conductor	4 layers of BSCCO wires	87
Insulation	PPLP [®] (3 mm ^t)	93
Protection	Cu tapes, Kraft papers	96



図 2.5.1-18 曲げ試験時の写真

2.5.2 大電流ケーブル用機器の開発

2.5.2-1 大電流ケーブル用端末の基本性能

22 kV/12 kA 発電所引き出し線（発電機～変圧器）に適用する超電導ケーブルシステムの所用性能を表 2.5.2-1 に示す。この他に、端末寸法、耐圧力条件、損失、施工条件などが基本仕様として必要ではあるが、ここではコンパクト化、低損失化などを検討課題と位置付ける。

表 2.5.2-1 大電流ケーブル機器の所要性能

No	項目	所要性能
1	電流容量	12 kArms 連続通電 短絡電流 80 kA-2 sec
2	耐電圧	AC45 kV・10 min Imp±165 kV/3 回

2.5.2-2 端末の基本構造

コンパクト化、低損失化を志向した端末構造を検討するに当たり、これまでの三心一括型超電導ケーブルの端末構造に準じた 22 kV/12 kA 級端末の概略構造を図 2.5.2-1 に示す。これまでの端末構造が既存ケーブルに比して非常に大きいことが課題であることから、図 2.5.2-2 に示す構造を提示した。図 2.5.2-2 の構造は、低温絶縁・単心超電導ケーブルに対応可能な端末構造で、「特願 2011-196378」などに開示されている。

図 2.5.2-2 の基本構造は、「端末容器（断熱容器）を、ケーブル側断熱容器と電流リード側断熱容器とに分け、断熱容器間に所定の絶縁性能を有する部材を設ける。ケーブルの導体と電流リードとの接続は、電流リード側断熱容器内にて行う」としている。部材の構成を対比して図 2.5.2-3 に示す。

この構造の適用によって、

- 電流リードの部材に絶縁に必要な長さを考慮する必要が無く、電流リードのコンパクト化、低損失化の最適化に有効
- 従来は、電流リードを端末容器に固定した後にケーブル導体と接続する作業スペースが必要であったのが不要となる
- 導体接続部（露出部）において、断熱容器が同電位であるため、大きな隔離を必要としない
- 電流リードの形状、据付形態が柔軟に対応可能
- 総合的に、全体寸法のコンパクト化が図れ、組立手順等、施工面での改善も期待される

などの有効性が期待される。

尚、超電導ケーブルの流路がフォーマ内とコアの外側との往復で構成されることに留意した構造としている。

図 2.5.2-2 の基本構造を実現可能であることを確認するアプローチとして、

- ・大型化が懸念され、低損失化が必要な 12kA 級電流リードの現状把握
- ・新規構造の電気絶縁部材である FRP ブッシングの基本性能の確認

を実施した結果を次項に示す。

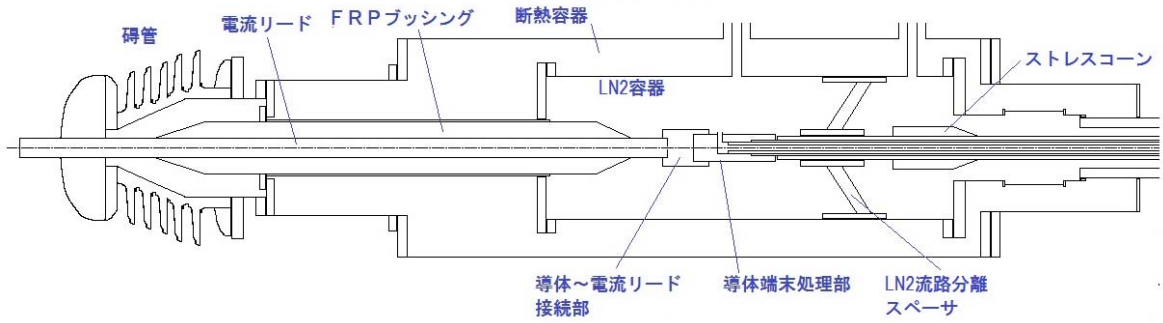


図 2.5.2-1 22 kV 級超電導ケーブル用端末 (従来型)

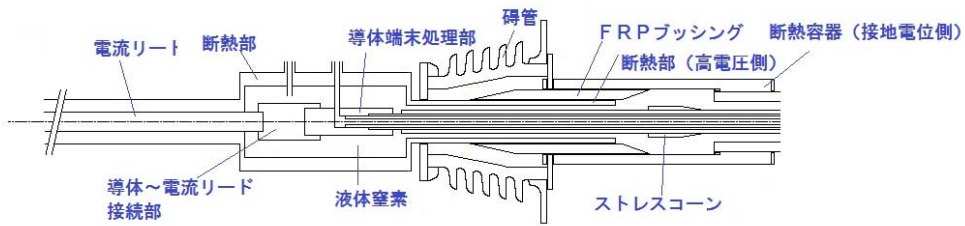


図 2.5.2-2 22 kV 級超電導ケーブル用端末 (コンパクト化案)

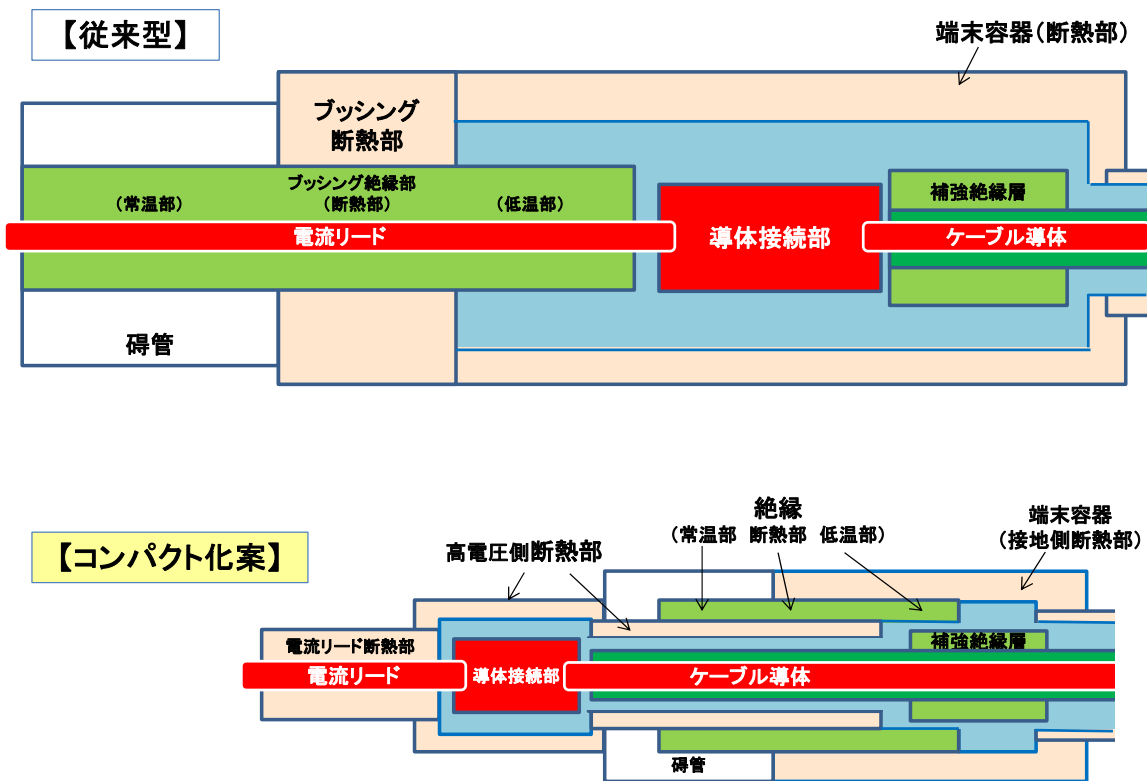


図 2.5.2-3 22 kV 級超電導ケーブル用端末の部材構成比較

2.5.2-3 大電流ケーブル機器の各部構造設計検討

(1) 電流リード熱損失の評価

ケーブル長が比較的に短い発電所引き出し線向けの大電流超電導ケーブルシステム全体の熱損失においては、経済性比較結果図 2.5.1-2(b)に示した通り、端末部の熱損失が支配的である。特に端末の損失における電流リードの熱損失が大部分を占める。従ってシステム全体の損失低減のためには電流リードの低損失化が効果的であると共に、その損失の定量的な評価は冷却システム熱負荷の設計が必要となる。

(a) 電流リード構造

12 kA 用電流リードとして、簡易に得ることが出来る 3500 mm² 素線絶縁導体を用いて試作を行った。電流リードの概略構造を図 2.5.2-4 に示す。超電導ケーブルとの接続箇所は液体窒素に浸漬され、撚り線部は真空層により断熱される構造とした。試作した電流リードの内部に熱電対を取り付け、通電時の温度変化を計測し、12 kA の安定通電の確認と、実測温度と計算解析値との比較を行った。電流リードを冷却するための浸漬冷却式の試験装置を用いた試験の外観を図 2.5.2-5 に示す。

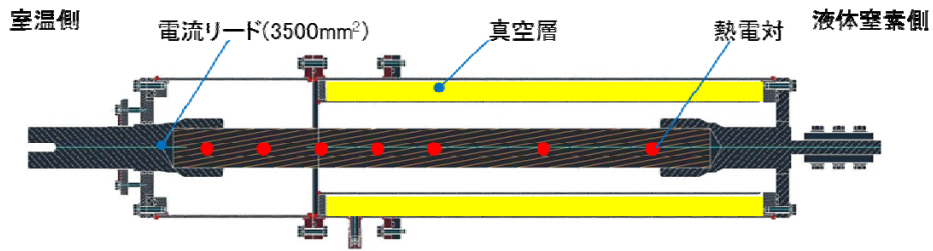


図 2.5.2-4 電流リード構造



図 2.5.2-5 12 kA 通電時の試験外観

(b) AC12 kA 通電試験結果

AC12 kA 通電時における電流リード内の温度分布の推移を図 2.5.2-6 に示す。約 5 時間の通電により電流リード内の温度は上昇を示した後に収束し、熱暴走しないことを確認することが出来た。このことから、現状の電流リードで 12 kA の安定通電を行うことが出来ることを確認した。

また、AC 通電中における電流リード内の収束温度の実測値と解析値との比較結果を図 2.5.2-7 に示す。解析は計測時の外気温 (280 K) で計算を行った。電流リード内の温度分布は実測値と解析値が整合することを確認した。現状の電流リードの熱損失は解析結果から電流リード 1 本当たり 820 W (@280 K) と評価した。今後、電流リードの低損失化を進めて行くことが重要である。

低損失化の指針として、銅撚り線部分の交直比を 1 に近づけることが重要である。今回のリードは撚線ではあるが、各素線のインピーダンスの違いにより、素線に電流の分布ができ、交流抵抗は直流抵抗の 2 倍程度であった。これは、電流通電に寄与が少ない素線が存在し、その分侵入熱が大きくなっていることを意味している。交直比を 1 に近づけ、各素線に電流が均等に流れるようにすることが重要。二次撚り線、三次撚り線の検討を進めていく。

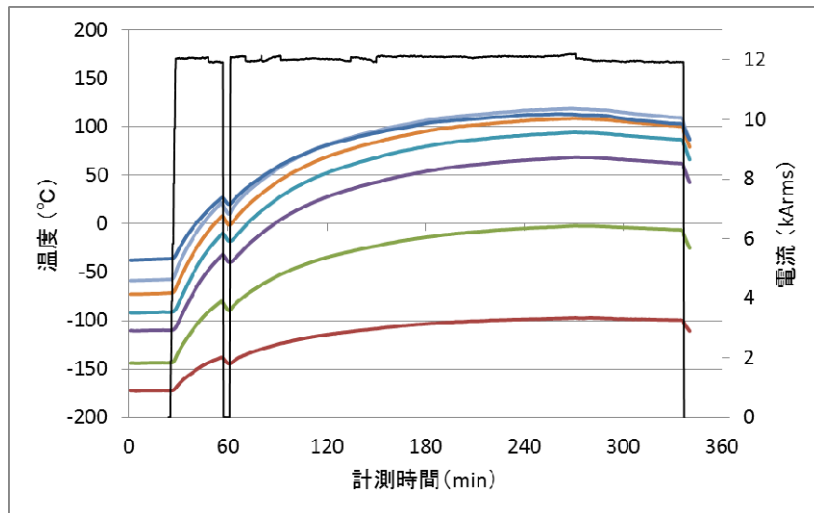


図 2.5.2-6 通電時の計測結果

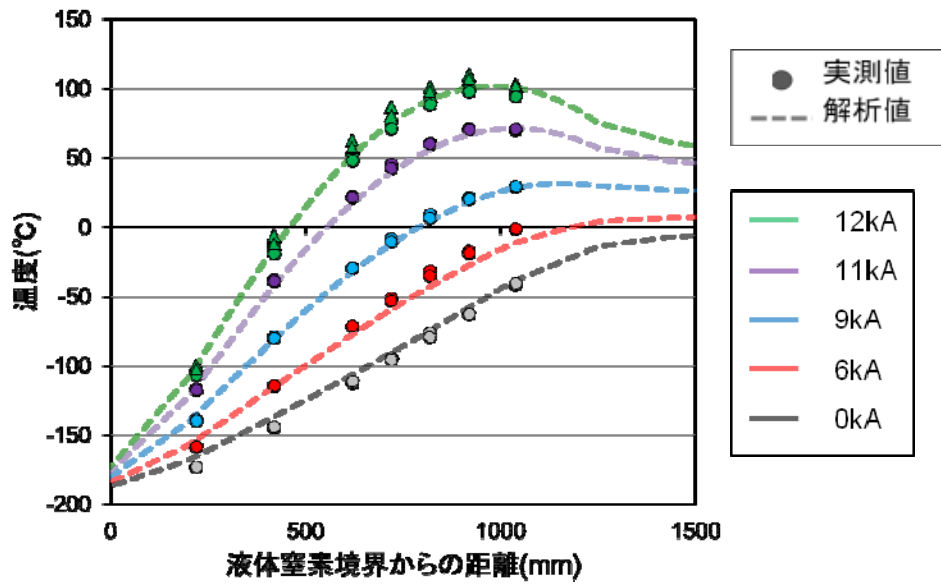


図 2.5.2-7 リード内温度分布の実測と解析比較

(2) FRP ブッシングの課電試験

大電流超電導ケーブル用末端のFRP ブッシングの絶縁性能を評価するために、図 2.5.2-8 に示す試験構成で、課電試験を行った。課電条件は、電力用規格 A-257「22 kV CV ケーブル用がい管形屋内外テープ巻き式終端接続箱」に準拠し、旭実証ケーブルと同様に温度影響を考慮しない条件として、AC45 kV×10 分間、IMP±165 kV 各 3 回の電圧に耐えること、とした。

浸漬冷却により大気圧下沸騰液体窒素中においても、絶縁破壊は確認されず、AC, IMP 共に良好であることを確認した。本試験により、FRP 部材および冷媒部の絶縁性能は十分であることを確認した。

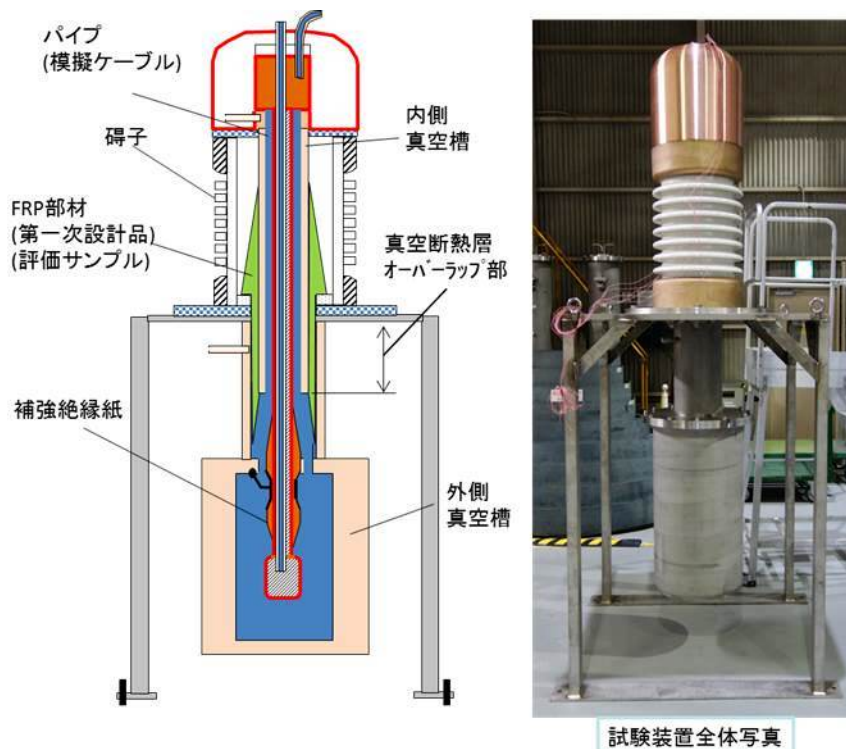


図 2.5.2-8 FRP ブッシング課電試験装置

表 2.5.2-2 課電試験結果

① 商用周波耐電圧試験	
条件	
0 kV→30 kV	1 分間昇圧、1 分間保持
30 kV→35 kV	1 分間昇圧、1 分間保持
35 kV→40 kV	1 分間昇圧、11 分間保持
40 kV→45 kV	1 分間昇圧、10 分間保持
結果	良好

② 雷 Imp 耐電圧試験		
条件		結果
130 kV	+ 3 回	良好
	- 3 回	良好
150 kV	- 3 回	良好
	+ 3 回	良好
165 kV	+ 3 回	良好
	- 3 回	良好

2.5.3 まとめ

・発電所の発電機引き出し線などを対象として AC12 kA 級大電流超電導ケーブルの設計検討および要素技術開発を行った。

・ケーブルの基本構造として単心型（空芯コア、超電導シールド無し）を選択し、大電流に特化した通電試験を行い、12kA を安定に通電できることを確認した。

・交流損失については、15W/m/ph と想定目標より大きいですが、今後、低交流損失線材の使用を検討し、低損失化を計る。

・シールドがないことにより、他相の磁場の影響が心配されるが、各コアの相間距離と I_c との関係を確認し、設計に考慮していく。

・電流 63kA/2sec までの短絡試験を実施し、ケーブルコアにダメージがないことを確認した。温度上昇は計算値とよく一致しており、銅フォーマを用いた設計の優位性を確認した。

・短絡時の 2 相通電の影響については、温度上昇等は単相通電と変わらないことを確認。電磁力については、実測値 1300kg/m と想定される値と一致した。

・曲げ試験では、 $\phi 2750\text{mm}$ の曲げにおいても性能が低下しないことを確認した。

・本検討により大電流ケーブルの基本設計を完了した。今後、さらなる低損失化を行い、詳細設計を検討していく。

・端末については、大電流通電可能なコンパクトな構造の基本設計を行った。

・電流リードとブッシングを分離することで、設計に自由度を持たせた。

・12kA 通電可能な電流リードを設計し、実際に通電を行い、損失は 820 W であった。さらなる低損失化には、電流リード導体の交直比を低減させることを検討する。

・電圧がかかるブッシングについては、FRPにて試作を行い、所定の電圧が印加できることを確認した。

2.6 冷却システムの高性能化の研究

2.6.1 冷却システムの要求性能

2.6.1-1 旭変電所冷却システムの課題

実証試験で顕在化した旭変電所の冷却システムの課題を図 2.6.1-1 に示し、各課題の説明を以下に記す。

- ・ 冷凍機の冷凍能力(1 kW 以下)、COP(0.05)、メンテナンス間隔(8,000 時間)ともに高温超電導ケーブルの実用化を想定した際の要求性能を満たしていない。
- ・ 冷凍機の単機容量が 1 kW 以下と小さく、高温超電導ケーブルの冷却に必要な冷凍能力を確保するために複数の冷凍機を真空断熱配管で接続したため圧力損失や熱損失が大きい。
- ・ 液体窒素の循環運転を維持したまま各冷凍機のメンテナンスを実施するため、メンテナンススペースを設ける必要があり、冷凍機の設置スペースが大きい。
- ・ 冷凍機で発生した冷熱を液体窒素に伝えるための熱交換器が冷凍機と一体化されており、熱交換器部での圧力損失ならびに液体窒素の搬送動力が大きい。
- ・ 各機器を分散して配置したため設置スペースが大きく、その結果としてコストも高くなる。

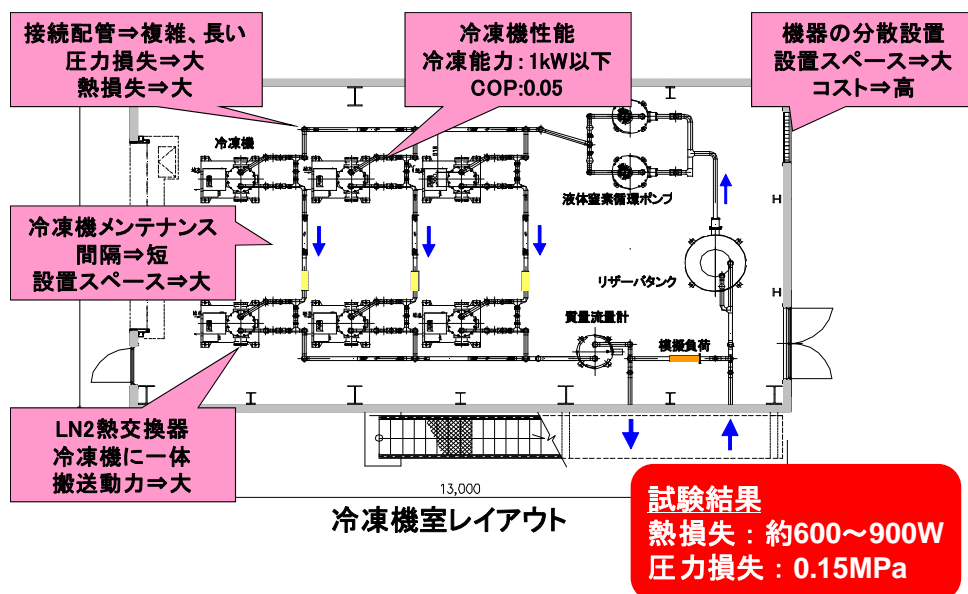


図 2.6.1-1 旭変電所冷却システムの課題

2.6.1-2 大容量高効率冷却システムの要求性能と開発目標

高温超電導ケーブルの実用化を想定した際の冷却システムへの要求性能を以下に示す。

- ・ 高温超電導ケーブルの実用化時の必要冷凍能力の単機容量は5～20 kWが望ましい。
- ・ 高温超電導ケーブルシステムとしての損失を従来ケーブルよりも50%削減するためには、冷凍システムのCOPは0.1が必要となる。
- ・ 実用化を考えた際に、冷凍機のメンテナンス間隔は産業用冷凍機と同等である必要がある。

前述の課題および要求仕様を踏まえて策定した大容量高効率冷却システムの開発目標を表2.6.1-1に示す。本開発では、冷凍機の容量は必要単機容量5～20 kWの範囲内の最小容量である5 kWとし、COPは実用化時に必要とされる0.1を目標とした。メンテナンス間隔の目標は産業用冷凍機と同等の30,000時間とした。

表 2.6.1-1 大容量高効率冷却システムの開発目標

項目	開発目標	従来性能*	開発のポイント	備考
容量	5kW級	1kW	ブレイトンサイクル	10,20kW級へ応用可
COP	0.1	0.05	圧縮・膨張機の高効率化と一体化	冷却水含む
メンテナンス間隔	30,000時間	8,000時間	非接触磁気軸受の開発	間接水冷システムの定期検査間隔を参考

* スターリング冷凍機

2.6.2 大容量高効率冷却システムの基本仕様

2.6.2-1 ブレイトン冷凍システムの基本設計

(1) 冷凍サイクル

前述の開発目標を考慮して、冷却サイクルには逆ブレイトンサイクルを用いた。開発した大容量高効率冷却システムの基本フローを図 2.6.2-1 に示す。以下、本冷凍機をブレイトン冷凍機、液体窒素循環システムまで含めた装置をブレイトン冷却システムとそれぞれ記す。

(2) 圧縮機・膨張機

逆ブレイトンサイクルの特性を最大限に生かすために圧縮機および膨張機にはターボ型を採用した。冷凍機の効率および適正圧力比、経済性を考慮して三段圧縮、一段膨張とし、圧縮機、膨張機の断熱効率をそれぞれ 0.8 とした。膨張機で発生した動力を三段目圧縮機の駆動動力とするため三段目圧縮機と膨張機を一体化させた。

冷凍機の高信頼化のために圧縮機、膨張機の軸受には非接触磁気軸受を採用し、オイルフリー化、メンテナンスフリー化を図った。

(3) 冷媒

想定される冷却温度で冷媒を選定すると、その候補はヘリウム、水素、ネオンになるが、ターボ圧縮機・膨張機の高効率化を達成するために、ガスの物性値(密度、音速、粘性)を考慮して冷媒にはネオンガスを採用した。

(4) 冷凍機ユニット

膨張機、熱交換器などの極低温となる機器はコールドボックス内に配置して真空断熱とし、それ以外の室温で運転される機器は圧縮機ユニット内に納めた。

(5) 運転制御

冷凍機の容量制御には、圧縮機、膨張機の回転数をコントロールする回転数制御と圧力制御を採用し、ブレイトン冷凍機出口の液体窒素温度を制御点として冷凍能力の調整を行った。圧力制御では、冷凍機の初期運転時のガス供給、停止時のガス回収用として三段目圧縮機出口と一段目圧縮機入口との間に配置したバッファタンクを用いて、回転機に流れるガスの体積流量をコントロールして COP 一定の高効率運転を行った。

(6) 液体窒素循環システム

ネオンガスと液体窒素の熱交換器には、高性能で低圧力損失、コンパクトなアルミプレートフィン型を採用し、コールドボックス内に設置した。その他のリザーバタンク、循環ポンプユニット、流量計などは、基本的には旭変電所で用いた冷却

システムと同様の仕様とした。

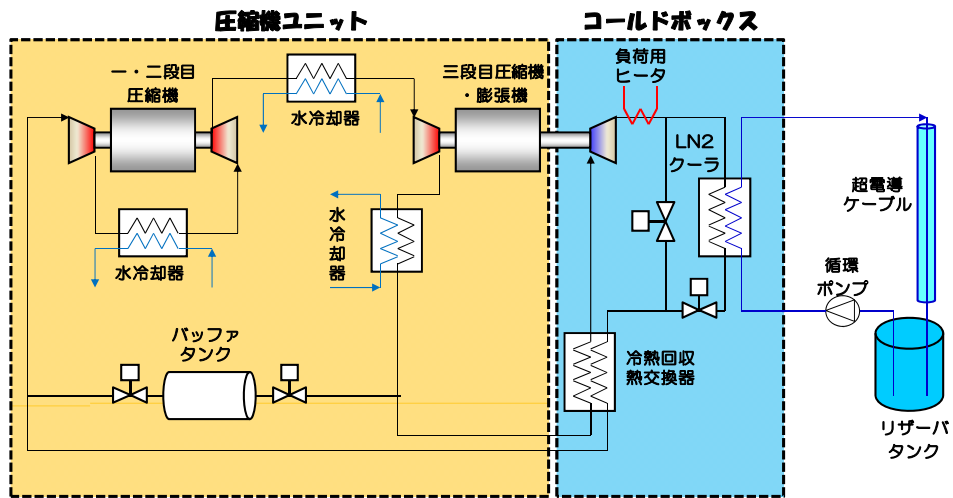


図 2.6.2-1 大容量高効率冷却システムの基本フロー

2.6.2-2 システムシミュレーションによる性能予測

圧縮機・膨張機の断熱効率、各部での損失、モータ効率などの基本条件、最低・最高条件を用いてシステムシミュレーションを行った。本開発で想定したブレイトン冷凍機の基本・最低・最高条件を表 2.6.2-1 に記す。シミュレーションの結果より、解析上考えられる COP は 0.09～0.11 であることが分かった。

表 2.6.2-1 各種性能の基本条件および最低・最高条件
(液体窒素供給温度 69K の場合)

項目		最低条件	基本条件	最高条件
一段目圧縮機 断熱効率	-	0.78	0.80	0.81
二段目圧縮機 断熱効率	-	0.78	0.80	0.81
三段目圧縮機 断熱効率	-	0.78	0.80	0.81
膨張機 断熱効率	-	0.78	0.80	0.83
熱交換器類 圧力損失	kPa	1.5 ~ 3.0	1.0 ~ 2.0	0.9 ~ 1.8
コールドボックス 熱損失	W	100	50	40
モータ効率	-	0.9		
COP	-	0.09	0.10	0.11

※使用ソフト：Aspen Plus Ver. 8.0

2.6.3 ターボ圧縮機・膨張機の開発

2.6.3-1 ターボ圧縮機・膨張機の仕様

システムシミュレーションから求めた運転条件（圧力、温度、流量）をもとにターボ圧縮機および膨張機の設計を行った。ターボ圧縮機・膨張機の設計仕様を表 2.6.3-1 に示す。開発目標の冷凍能力、COP を達成するためには、ターボ圧縮機・膨張機の断熱効率をそれぞれ 0.8 とする必要があるが、これは翼設計・製作の観点から非常に高い目標値である。

表 2.6.3-1 ターボ圧縮機・膨張機の設計仕様

	単位	一段目 圧縮機	二段目 圧縮機	三段目 圧縮機	膨張機
入口圧力	MPa	0.27	0.37	0.52	0.73
入口温度	K	308	313	313	78
流量	kg/s	0.33			
定格回転数	rpm	47,000		65,000	
目標断熱効率	-	0.8	0.8	0.8	0.8

動翼および静翼を図 2.6.3-1 に示す。動翼（圧縮機インペラ、膨張機ロータ）および静翼（圧縮機ベーン、膨張機ノズル）には低温脆性、振動、軽量化を考慮してアルミニウム合金を採用した。動翼の外径や枚数、回転数および静翼の枚数は、要求圧力比や比速度、負荷係数、理論速度比、流体解析結果より決定した。比速度、負荷係数、理論速度比は以下の式から算出可能で、圧縮機の種類などによって実用的な値が定まる。

$$Ns = 2\pi \cdot \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{\Delta h^{3/4}} \quad \psi = \frac{\Delta h}{U^2} \quad \frac{U}{C_0} = \frac{U}{\sqrt{2\Delta h}} \quad \dots(2.6.3-1)$$

Ns : 比速度、 n : 回転数、 Q : 体積流量、 Δh : 断熱熱落差、
 ψ : 負荷係数、 U : 周速、 C_0 : 理論断熱速度

断熱効率 0.8 を達成するためには、2次元設計では不十分であり、3次元の流体解析を用いて翼形状の最適化および加工形状の最適化を行った。本開発で製作した動翼を図 2.6.3-2 に示す。後段になるほどガス密度が高くなり、体積流量が小さくなるため、外径や流路面積は減少し、高速化する。



図 2.6.3-1 圧縮機・膨張機の動静翼



図 2.6.3-2 動翼形状

2.6.3-2 ターボ圧縮機・膨張機の構造

本ターボ圧縮機・膨張機は、高速モータを介して一、二段目圧縮機を一体構造、三段目圧縮機、膨張機を一体構造として、省スペース化および膨張機で発生した動力を圧縮機の駆動動力として利用することで高効率化を図った。モータはインバータによって可変速駆動し、モータの回転数制御と圧力制御の組合せにより冷凍能力を広運転範囲で高効率に制御することを可能とした。軸受部には非接触磁気軸受を採用し、非接触支持によるオイルフリー化、メンテナンスフリー化を図った。一・二段目圧縮機の外観を図 2.6.3-3 に、三段目圧縮機・膨張機の外観を図 2.6.3-4 にそれぞれ示す。一・二段目圧縮機と三段目圧縮機・膨張機は基本的な構造は同じであるが、ブレイトン冷凍機の配管構成から一・二段目圧縮機は水平配置、三段目圧縮機・膨張機は垂直配置とし、極低温となる膨張機部分は真空断熱されたコールドボックス内に配置した。

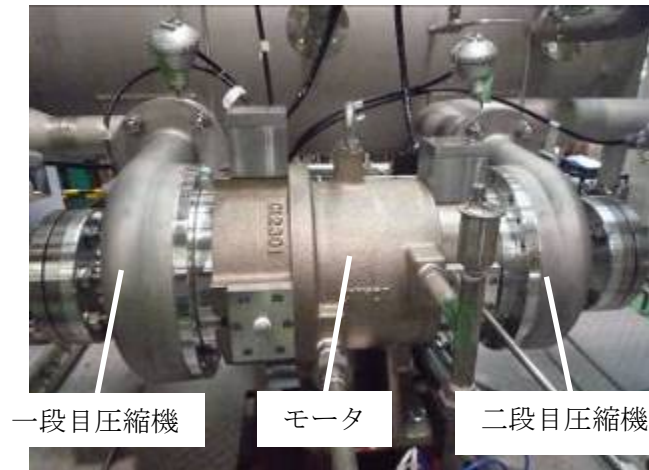


図 2.6.3-3 一・二段目圧縮機

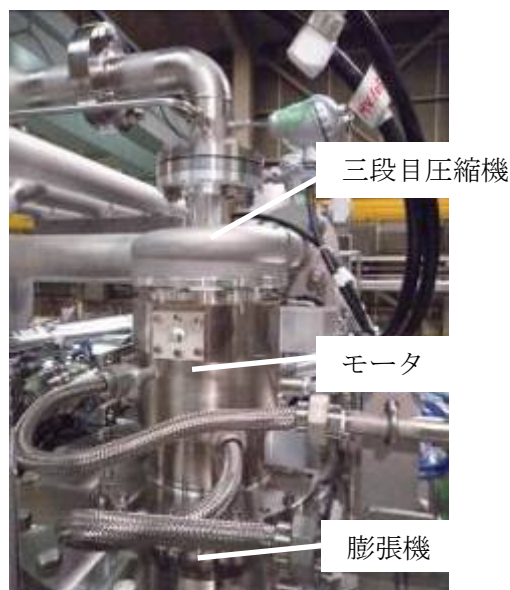


図 2.6.3-4 三段目圧縮機・膨張機

2.6.3-3 ターボ圧縮機・膨張機の性能試験結果

開発したターボ圧縮機・膨張機の性能試験では、膨張機出口温度を 57 K に固定し、設計回転数を 100 %N として回転数を変化させた。膨張機出口温度を安定させるために、膨張機出口に負荷用ヒータを設置し、ヒータ負荷を調整した。

ブレイトン冷却システムの運転範囲において、圧縮機は理想気体として取り扱うことが出来るが、臨界温度に近い極低温となる膨張機は圧縮係数に偏差が生じ、計算精度が落ちるため理想気体として取り扱うことが出来ない。そこで、本開発では冷媒熱物性データベース Refprop9.0 を用いて各運転条件でのエンタルピを求め、以下の式より断熱効率を算出した。

$$\eta_C = \frac{h_2' - h_1}{h_2 - h_1} \quad \eta_T = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_4'} \quad \dots (2.6.3-2)$$

η_C : 圧縮機断熱効率、 h_1 : 圧縮機入口エンタルピ、 h_2 : 圧縮機出口エンタルピ、
 h_2' : 断熱圧縮時の圧縮機出口エンタルピ、
 η_T : 膨張機断熱効率、 h_3 : 膨張機入口エンタルピ、 h_4 : 膨張機出口エンタルピ、
 h_4' : 断熱膨張時の膨張機出口エンタルピ

各圧縮機、膨張機の断熱効率の試験結果を図 2.6.3-5 に、圧力比の試験結果を図 2.6.3-6 にそれぞれ示す。膨張機の断熱効率は回転数を落とすとわずかに低下するが、圧縮機は 90～100 %N の運転範囲ではほぼ一定の効率であり、圧縮機、膨張機ともに断熱効率、圧力比はほぼ設計通りであることを確認した。

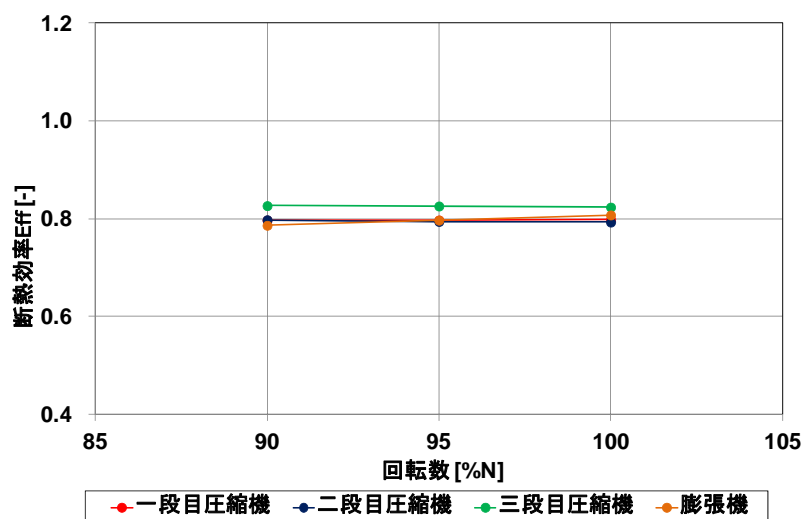


図 2.6.3-5 ターボ圧縮機・膨張機の断熱効率

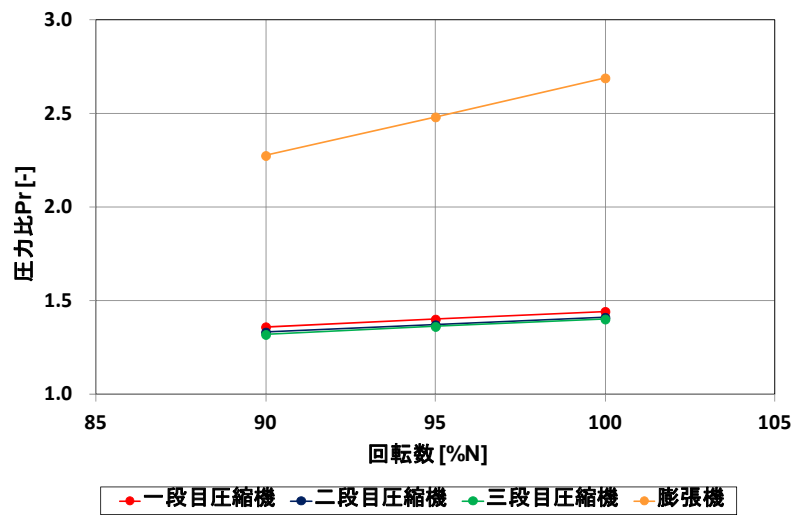


図 2.6.3-6 ターボ圧縮機・膨張機の圧力比

2.6.4 ブレイトン冷凍機の開発

2.6.4-1 ブレイトン冷凍機の仕様

ブレイトン冷凍機の外観写真を図 2.6.4-1 に示す。本冷凍機は一・二段目圧縮機、三段目圧縮機・膨張機、水冷却器、冷熱回収熱交換器、LN2 クーラ、バッファタンク、負荷用ヒータで構成し、それぞれをコールドボックスまたは圧縮機ユニットに納めた。

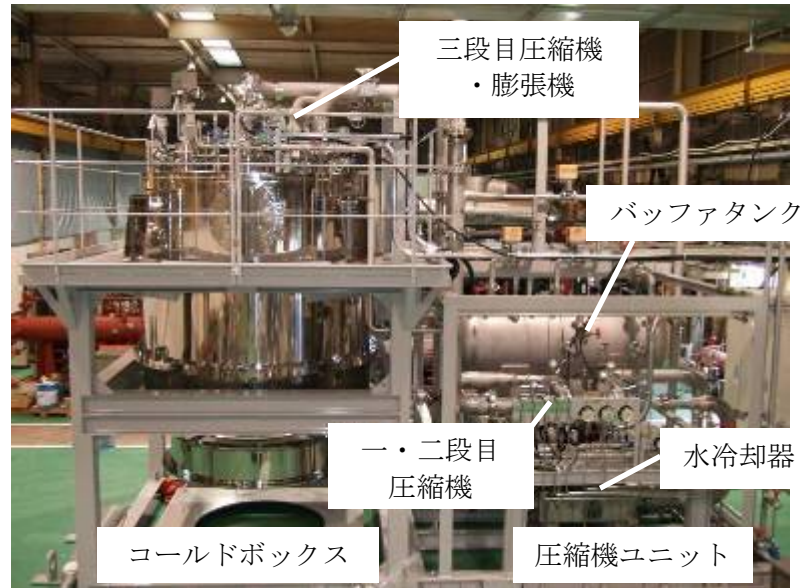


図 2.6.4-1 ブレイトン冷凍機

ブレイトン冷凍機の仕様を表 2.6.4-1 に示す。ブレイトン冷凍機の設置面積や重量は、旭変電所の冷却システム建屋の面積や耐震強度なども考慮して決定した。

表 2.6.4-1 ブレイトン冷凍機の仕様

項目	仕様
冷凍サイクル	逆ブレイトンサイクル
圧縮機・膨張機 段数	三段圧縮、一段膨張
圧縮機・膨張機 種別	ターボ型
冷凍能力	5 kW
容量制御方法	回転数・圧力制御
設置面積	15 m ²
重量(乾燥)	13 t

2.6.4-2 ブレイトン冷凍機の構造

(1) 圧縮機ユニット

圧縮機ユニットには一・二段目圧縮機、水冷却器、バッファタンクを配置した。圧縮機ユニットの外観図を図 2.6.4-2 に示す。

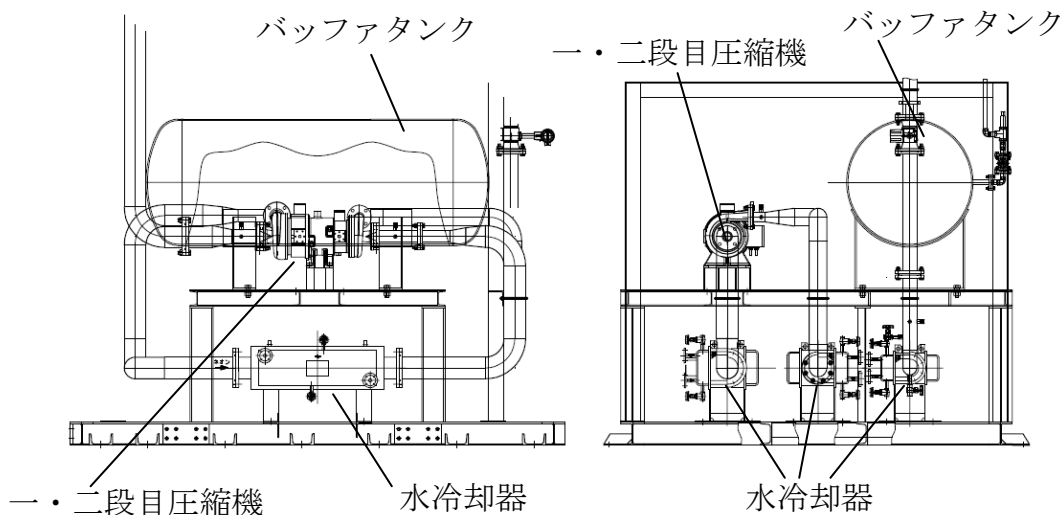


図 2.6.4-2 圧縮機ユニットの外観

(a) 一・二段目圧縮機

一・二段目圧縮機は、回転機の性能を十分発揮させるため、各圧縮機出口での急な曲がり、分流、絞り、拡大を避け、圧力損失を配慮した配管設計とした。

(b) 水冷却器

圧縮機での圧縮熱を除去するため、各圧縮機の出口に水冷却器を配置した。水冷却器の写真を図 2.6.4-3 に示す。本水冷却器はフィンチューブを用いており、圧力損失を抑える構造とした。



図 2.6.4-3 水冷却器

(c) バッファタンク

一般的に、ターボ型の冷凍機は回転数制御を用いて冷凍能力の調整を行うが、回転数のみによる容量制御では常に最高効率で運転することが出来ない。そこで、本ブレイトン冷凍機では、冷凍機を常に最高効率で運転するために、三段目圧縮機出口と一段目圧縮機入口の間に配置したバッファタンクを用いて圧力制御を行うこととした。バッファタンクの写真を図 2.6.4-4 に示す。本バッファタンクは、元々冷凍機の予冷や昇温時における冷媒循環系内へのガスの供給・回収を目的として設置したが、上記の容量制御にも使用することとした。



図 2.6.4-4 バッファタンク

(2) コールドボックス

コールドボックスには極低温となる膨張機、冷熱回収熱交換器、LN2 クーラ、負荷用ヒータを配置した。LN2 クーラに液体窒素を流さない冷凍機単体運転を想定し、LN2 クーラをバイパスさせるラインおよびバルブを設けた。コールドボックスの外観を図 2.6.4-5 に示す。本コールドボックスは、建屋の中に設置することを考慮し、コールドボックス内の機器のメンテナンスを行う場合には容器だけを下から外す構造とした。さらに、膨張機周辺のメンテナンスを行うためのマンホールを容器側面に取り付けた。

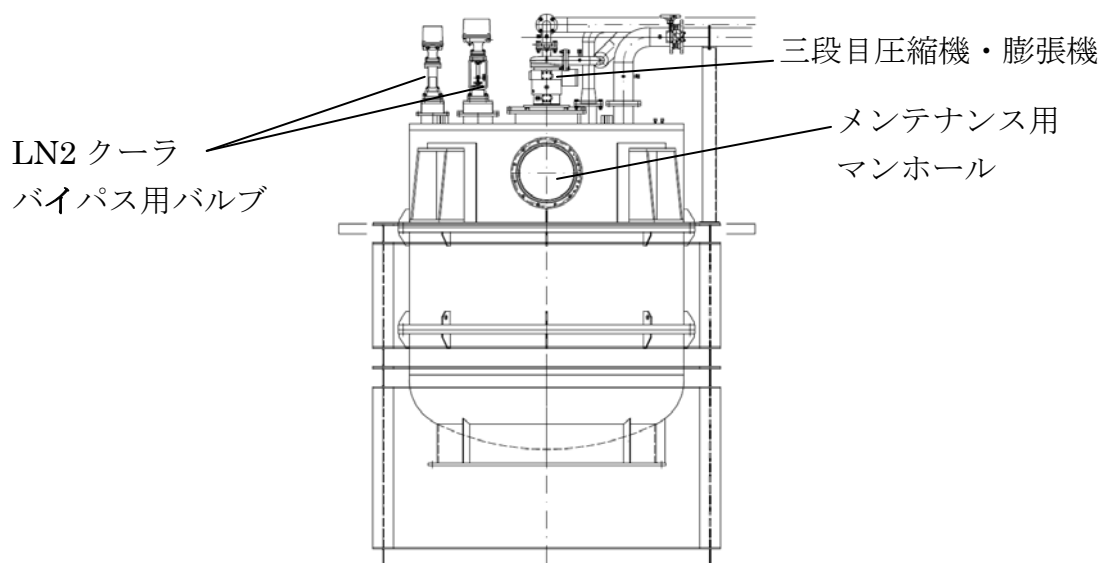


図 2.6.4-5 コールドボックス

(a) 三段目圧縮機・膨張機

三段目圧縮機・膨張機は、極低温になる膨張機部をコールドボックスの容器内に納めて真空断熱するため、コールドボックスの天板に垂直に設置した。

(b) 冷熱回収熱交換器、LN2クーラ

冷熱回収熱交換器およびLN2クーラには小型、高性能のアルミプレートフィン熱交換器を採用した。冷熱回収熱交換器は、ガスを室温から80 K付近まで冷却させるため熱交換器が長くなる。そこで、熱交換器を2つに分割して並列に並べ、直列にガスが流れように配管で接続した。

2.6.4-3 ブレイトン冷凍機の単体性能試験結果

(1) ブレイトン冷凍機の性能

ブレイトン冷凍機の冷凍能力、モータ入力電力基準でのCOPの結果を図2.6.4-6、図2.6.4-7にそれぞれ示す。冷凍機出口の液体窒素温度77 Kでの冷凍能力は約5.8 kW、モータ入力電力を基準としたCOPは約0.1であり、開発目標を達成した。ただし、膨張機の動翼部の隙間調整を行うことにより膨張機の断熱効率が向上する余地もあり、ブレイトン冷凍機のさらなる高効率化につながる可能性を見出した。

また、高速ビルトインモータについては、ネオンガス雰囲気にて高速運転されるため風損が大きく、設計効率を達成出来ていない。この風損の低減は今後の課題である。

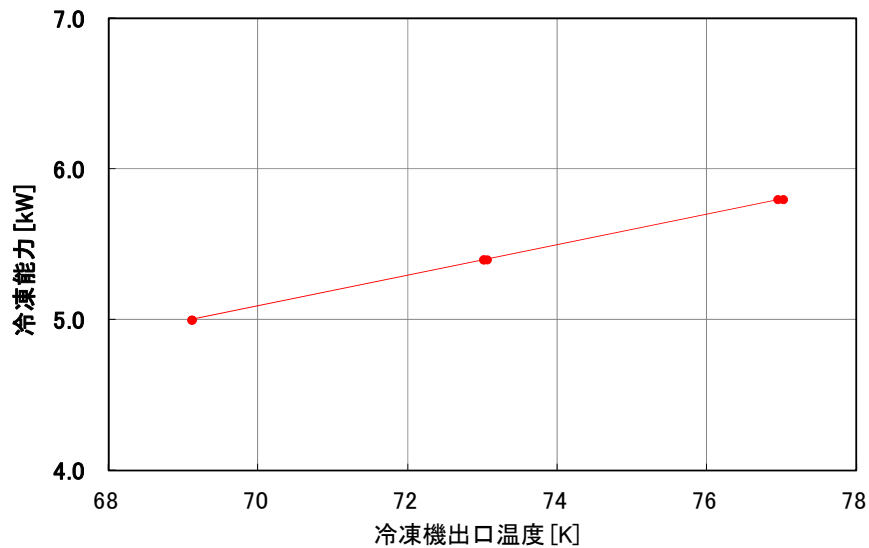


図 2.6.4-6 冷凍能力の試験結果

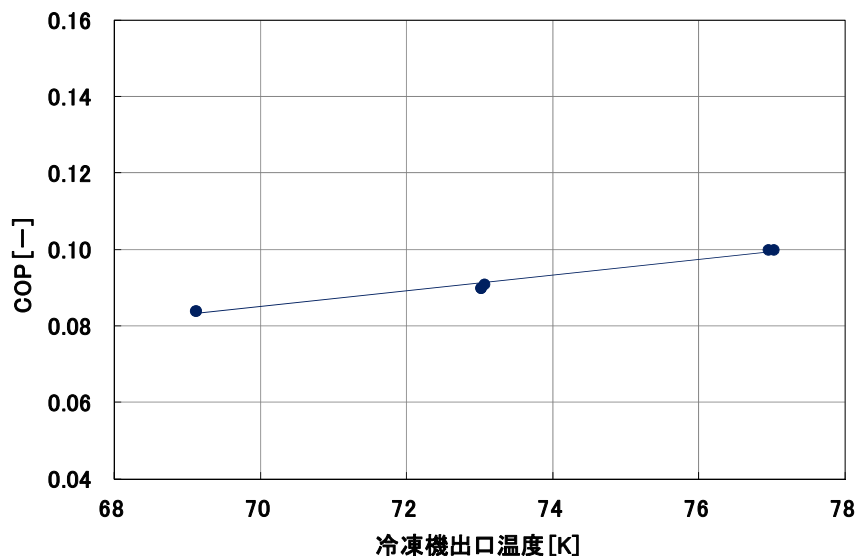


図 2.6.4-7 COP の試験結果(モータ入力電力基準)

(2) ブレイトン冷凍機の予冷および液体窒素循環への移行

本ブレイトン冷凍機は、冷凍機単体で運転する場合には膨張機出口温度を、液体窒素循環運転と組み合わせた運転の場合にはブレイトン冷凍機出口の液体窒素温度をそれぞれ制御点とし、回転数制御および圧力制御を用いてコントロールしている。冷凍機の予冷速度は、冷熱回収熱交換器の強度が熱応力により劣化しない速度としており、膨張機出口温度が冷却速度 60 K/hr を越えないようにターボ圧縮機・膨張機の回転数を制御させた。さらに、冷凍機起動の後に液体窒素循環ラインの予冷を経て循環ポンプを起動する手順としており、循環ポンプの起動を確認した後に、膨張機出口温度から冷凍機出口の液体窒素温度に制御点が自動で切り替わる。冷凍機起動から液体窒素循環運転までのブレイトン冷凍機の運転状態を図 2.6.4-8 に示す。冷凍機起動後の膨張機出口温度を見ると、冷却速度 60 K/hr を超えないようにターボ圧縮機・膨張機の回転数が制御されている。さらに、循環ポンプ起動前は膨張機出口温度が、起動後は冷凍機出口の液体窒素温度がそれぞれ一定になるようにコントロールされており、循環ポンプ起動後、一時的に LN2 クーラに熱負荷が入っても回転数制御により温度上昇を抑え、スムーズに制御点が切り替わっていることが分かる。

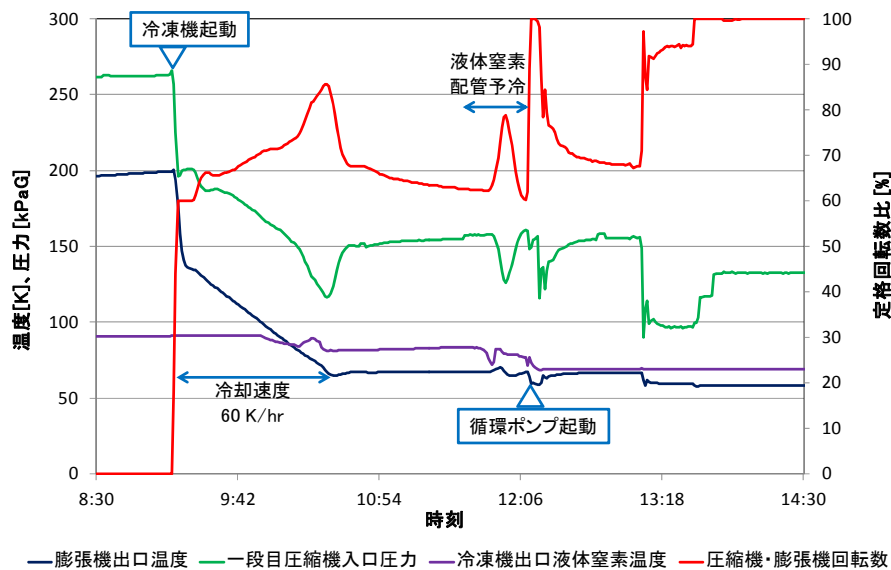


図 2.6.4-8 ブレイトン冷凍機の予冷・液体窒素循環運転

(3) ブレイトン冷凍機の容量制御

一般的なブレイトン冷凍機ではターボ圧縮機・膨張機の回転数制御により冷凍能力の調整を行うが、この方法では循環流量と圧力比の双方が変化してしまい、回転数に比例して COP が変化する。本開発で考案した圧力制御では、前述のバッファタンクを利用し、ターボ圧縮機・膨張機を定格回転数で一定に保ちながら循環するガスの圧力を変化させて容量制御を行うため、COP 一定での高効率運転が可能となる。

容量制御の試験結果の一例として、冷凍機出口の液体窒素温度 77 K での冷凍能力と COP の変化比を図 2.6.4-9 に示す。冷凍機出口の液体窒素温度 77 K の場合、冷凍能力比約 0.65~1.0 において COP 一定の高効率運転が可能であった。実証試験で得られた高温超電導ケーブルの日間・季間での熱損失の変動分は、本圧力制御で対応可能な範囲であり、常に高い COP で冷凍機の運転が出来ることを確認した。

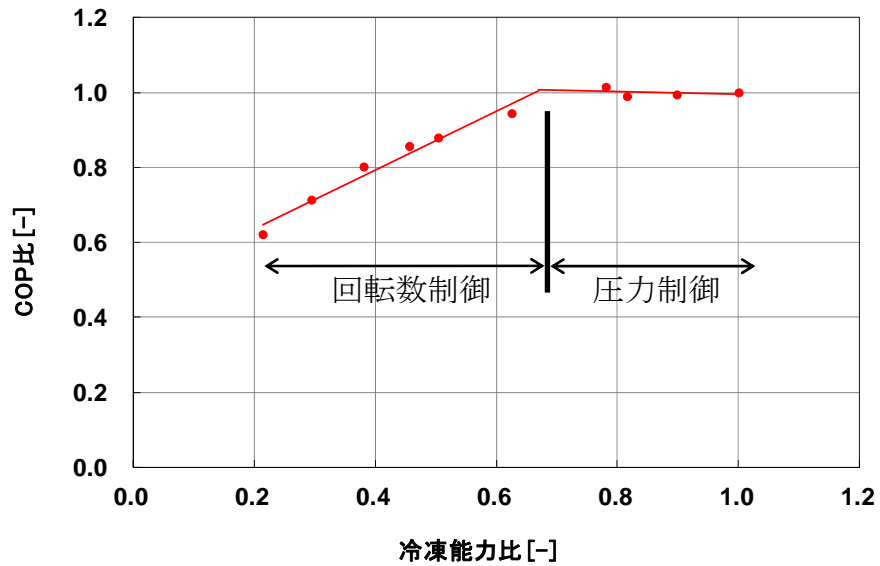


図 2.6.4-9 容量制御の試験結果

2.6.5 ブレイトン冷却システムの開発

2.6.5-1 ブレイトン冷却システムの仕様

本開発で構築したブレイトン冷却システムの液体窒素循環用の設備は、旭変電所で使用した冷却システムの構成および機器仕様を基本とした。旭変電所の冷却システムとブレイトン冷却システムの構成の比較を図 2.6.5-1 に、主要構成機器の仕様の比較を表 2.6.5-1 にそれぞれ示す。

ブレイトン冷却システムでは、リザーバタンク内に貯液された過冷却の液体窒素を、循環ポンプでブレイトン冷凍機に送り、ブレイトン冷凍機内の LN2 クーラでさらに液体窒素を冷却して循環させた。超電導ケーブル部での液体窒素の温度変化による体積変化を考慮してリザーバタンクの内容積は 1,000 L とした。循環ポンプには旭変電所冷却システムで使用した循環ポンプと同性能の遠心式を採用し、熱損失低減や省スペース化を図るため予備機を含めた 2 台の循環ポンプを 1 つの真空断熱容器内に並列に配置してユニット化した。ブレイトン冷却システム単体試験時の負荷として、超電導ケーブルを模擬した最大加熱量 6 kW の模擬負荷ヒータを設けた。なお、液体窒素の温度、圧力、循環流量、リザーバタンク液面を測定するため、液体窒素循環ラインの各部に温度計、圧力計を、ブレイトン冷凍機の出口に流量計、リザーバタンク内に液面計をそれぞれ設置した。

液体窒素の気化による超電導ケーブルの絶縁劣化を防ぐため、液体窒素の圧力をコントロールする必要がある。液体窒素の循環ラインで最も圧力が低くなるリザーバタンクに圧力制御装置を付加した。加圧は自然加圧、ガス加圧の 2 種類、減圧は凝縮減圧とガス放出の 2 種類とした。

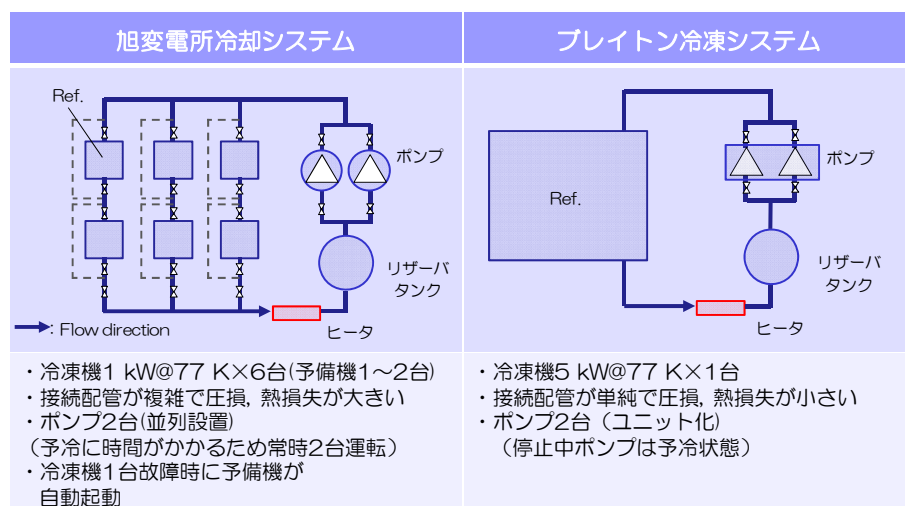


図 2.6.5-1 冷却システム構成の比較

表 2.6.5-1 主要構成機器仕様

機器名称	部品名称		仕様	
			旭変電所冷却システム	ブレイトン冷却システム
循環ポンプ ユニット	循環ポンプ 真空断熱容器		流量 20～50 L/min 最大吐出圧 0.25 MPa 2 ユニット	流量 20～50 L/min 最大吐出圧 0.25 MPa 1 ユニット
リザーバ タンク	リザーバタンク		内容量 1,000 L	
	圧力 制御 装置	自然加圧 ヒータ加圧 外部ガス加圧 凝縮減圧 ガス放出	最低圧力保証 自然加圧 0.2 MPaG ヒータ加圧 0.175 MPaG 外部ガス加圧 0.15 MPaG 凝縮減圧 0.25 MPaG ガス放出 0.4 MPaG	最低圧力保証 自然加圧 0.2 MPaG ヒータ加圧 なし 外部ガス加圧 0.15 MPaG 凝縮減圧 0.25 MPaG 放出ガス 0.4 MPaG

2.6.5-2 ブレイトン冷却システムの構成とレイアウト

ブレイトン冷却システムのレイアウトを図 2.6.5-2 に示す。本ブレイトン冷却システムは、大容量のブレイトン冷凍機 1 台を設置することで、真空断熱配管の距離や本数が減少したため、旭変電所の冷却システムに比べて熱損失や圧力損失を半分程度まで低減することが出来た。

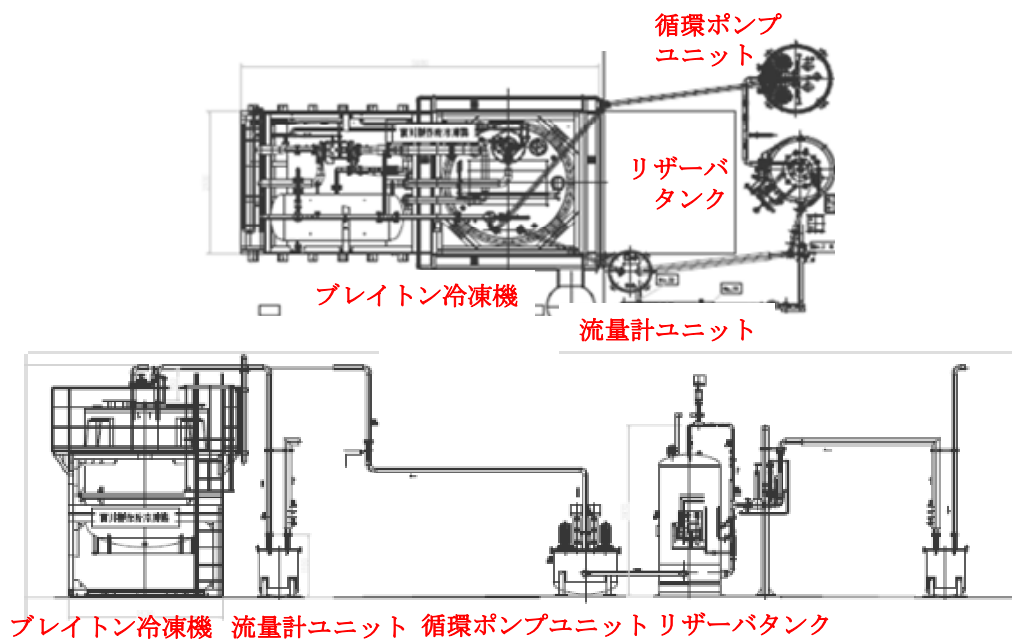


図 2.6.5-2 ブレイトン冷却システムのレイアウト

2.6.5-3 ブレイトン冷却システムの試験結果

(1) 基本性能確認試験

ブレイトン冷却システムの健全性、基本性能、制御性等の試験結果一覧を表 2.6.5-2 に示す。本システムの初期冷却は、配管予冷作業を除いて自動化されており、本試験にて液体窒素の循環運転動作がスムーズに行われることを確認した。さらに、システム全体の熱損失が減ったため、旭変電所の冷却システムに比べて予冷時間および予冷時の液体窒素消費量も低減した。負荷追従性の試験結果を図 2.6.5-3 に示す。模擬負荷ヒータ負荷 2 kW の場合には回転数制御、3 kW では圧力制御を用いて冷凍機出口の液体窒素温度が制御されており、2 kW から 3 kW への急激な負荷変動に対して、冷凍機出口の液体窒素温度はほぼ一定で維持され、このような急激な負荷の変動に対しても冷凍機の容量制御は問題なく行われることを確認した。

表 2.6.5-2 試験結果一覧

項目		目的	結果
健全性	真空度	液体窒素循環ラインの各機器の真空断熱層の真空度が閾値以下であることを確認する	良好
	気密試験	液体窒素循環ラインの配管・容器を基準圧力にて一定時間保持し、気密性に問題のないことを確認する	良好
	窒素置換、露点計測	液体窒素循環ラインの配管・容器内の水分を除去した後に、露点が閾値以下であることを確認する	良好
	圧力制御装置調整	圧力制御装置の動作圧力を設定する	良好
基本性能	貯液・循環運転	リザーバタンクへの貯液、初期冷却の自動制御を確認する	動作性良好。予冷時に消費する液体窒素量および予冷時間が低減
	流量調整	40L/min 一定で循環運転出来ることを確認する	良好
	冷凍能力	ブレイトン冷凍システムの冷凍能力を確認する	5.8 kW@77 K
	COP、圧力・熱損失	COP、圧力損失、熱損失を確認する	COP:0.1 W@77 K 圧力・熱損失は旭変電所冷却システムの半分程度であることを確認
動作確認	非常停止	非常停止動作が正常に行われることを確認する	良好
	警報動作	警報発報により各機器が正常に停止することを確認する	良好
	停電模擬	停電(模擬)でシステムが停止することを確認。さらに、30、60、90分停止させた後に冷却システムを起動し、配管予冷無しに液体窒素が循環することを確認する	良好。停止時間 30、60、90分において、配管予冷無しに液体窒素が循環することを確認
制御性	温度制御	繰り返しの負荷変動に対して冷凍機出口の液体窒素温度が制御範囲内でコントロールされることを確認する	温度制御範囲内でコントロールされることを確認
	負荷追従性	模擬負荷ヒータの負荷を 2 kW から 3 kW に急激に変化させて冷凍機の制御性を確認する	急激な負荷変動に対して、冷凍機の容量制御に問題がないことを確認
	加圧・減圧制御動作	加圧・減圧制御が正常に行われることを確認する	加圧制御は良好。減圧制御は継続研究(予定)
信頼性	総合運転	3週間の自動運転におけるブレイトン冷凍システムの信頼性、安定性を確認する。連続的な繰り返しの負荷変動に対するブレイトン冷凍機の容量制御の追従性を確認する	システムの制御性、信頼性に問題ないことを確認。負荷の繰り返し変動に対する冷凍機の追従性も問題なし
保守性	ポンプメンテナンス	循環ポンプのメンテナンス方法を確認する	継続研究(予定)
	冷凍機メンテナンス	冷凍機のメンテナンス方法を確認する	継続研究(予定)

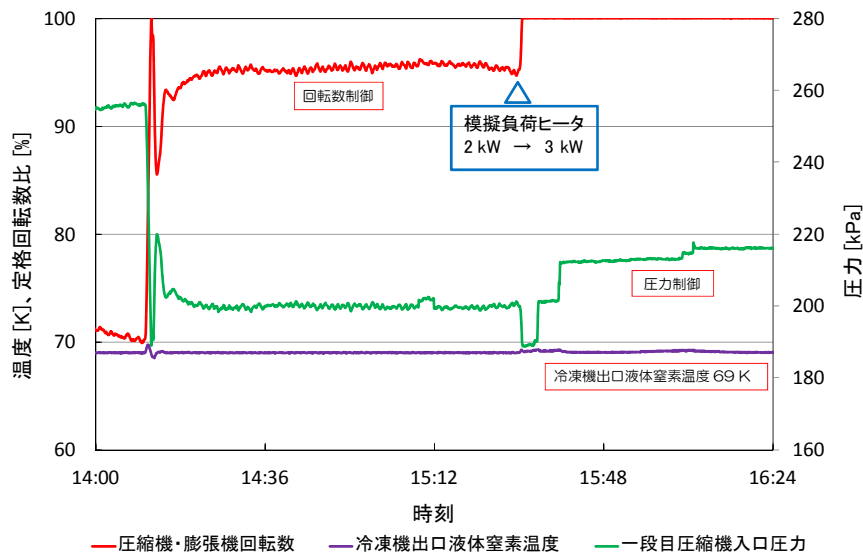


図 2.6.5-3 負荷追従性の試験結果

(2) 総合運転試験

ブレイトン冷却システムの制御性、信頼性確認のため3週間の総合運転試験を実施した。総合運転試験では、液体窒素の循環流量を40 L/minで一定とし、第1、2週の冷凍機の制御温度を69 Kとした。模擬負荷ヒータの熱負荷は、実証試験で得られた超電導ケーブルの日間・季間の熱負荷や運転温度、冷凍機の制御方式を考慮して設定した。総合運転試験で用いた模擬負荷ヒータの熱負荷を表2.6.5-3に示す。実証試験中の超電導ケーブルの最大熱負荷は3.1 kW、最低熱負荷は2.3 kWであり、夏季の日間の熱負荷の変動は約0.3 kWであった。そこで、第1週は最大熱負荷と日間負荷変動を考慮して日中の模擬負荷ヒータ負荷を3.1 kW、夜間を2.8 kWとした。第2週は、最低熱負荷と日間負荷変動を考慮したが、本冷凍機の2つの容量制御の方式が負荷に応じて切り替わる様子を確認するため、容量制御の境界負荷である2.3 kWを跨ぐように日中を2.4 kW、夜間を2.1 kWとした。第3週は、第1週で用いた模擬負荷ヒータ負荷を用いて、実証運転中に液体窒素のケーブル供給温度を上昇されたことを加味し、冷凍機制御温度を69 Kから77 Kまで一日2 K上昇させた。

総合運転試験の結果を図2.6.5-4に示す。総合運転試験では、定期的な運転状態の確認以外は自動運転を行い、機器の故障、トラブル、警報発報が一度も起こることなく、ブレイトン冷却システムの制御性、信頼性を確認することが出来た。さらに、模擬負荷ヒータの負荷の繰り返し変動に対し、ブレイトン冷凍機の容量制御は安定して行われており、液体窒素の冷凍機出口温度をほぼ一定に制御することができ、連続的な自動運転においても問題ないことを確認した。

表 2.6.5-3 模擬負荷ヒータ負荷

	時間 9:00 - 18:00	時間 18:00 - 翌 9:00	冷凍機出口 制御温度	容量制御方式
第 1 週	3.1 kW	2.8 kW	69 K	压力制御
第 2 週	2.4 kW	2.1 kW	69 K	压力・回転数制御
第 3 週	3.1 kW	2.8 kW	69 - 77 K (+2 K/day)	压力制御

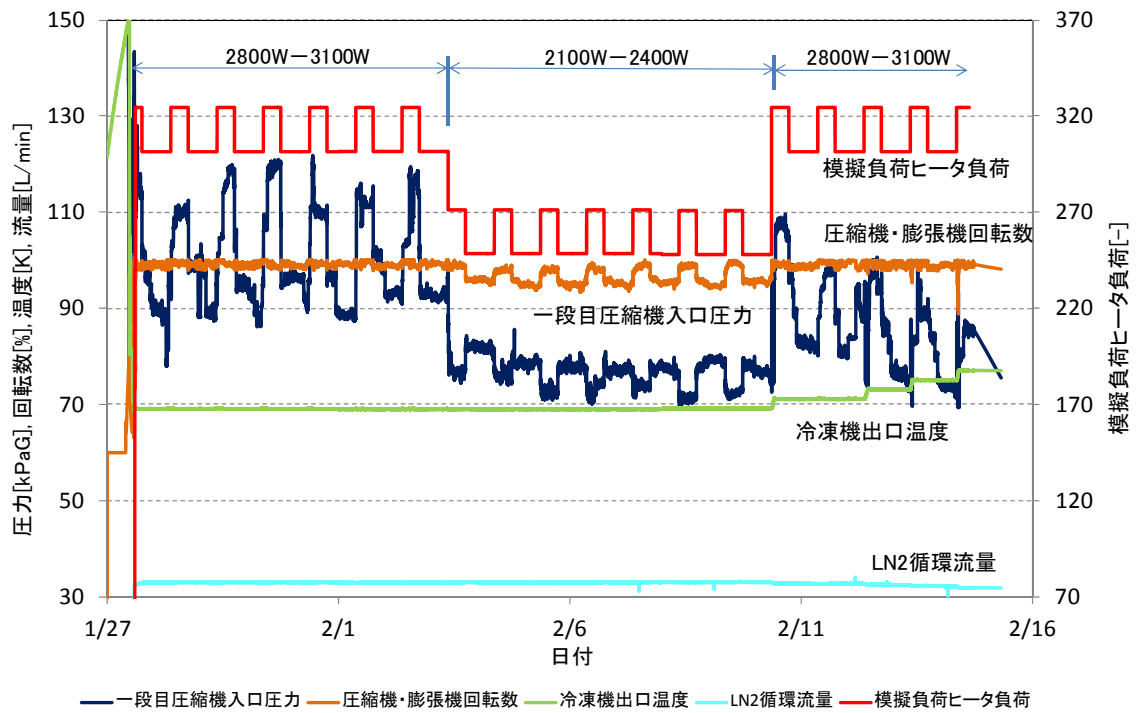


図 2.6.5-4 総合運転試験結果

2.6.6 まとめと今後の課題

本開発の成果のまとめを以下に示す。

- ブレイトン冷凍機の冷凍機出口の液体窒素温度 77 K での冷凍能力は約 5.8 kW、モータ入力電力基準の COP は約 0.1 であり、開発目標を達成した。
- 高い COP を維持しながら冷凍能力を制御する方法を考案し、総合運転試験での連続的な運転において、安定制御を確認した。
- 3 週間の総合運転試験にて、ブレイトン冷却システムの制御性、負荷追従性、安定性等を検証し、超電導ケーブル用冷却システムとして十分使用出来ることを確認した。
- 工場試験累計 1,000 時間以上の運転において冷凍機のトラブルはなく、ほぼ同型の空気冷凍機用ターボ圧縮機・膨張機の実績からもメンテナンス間隔 30,000 時間は達成出来る見通しを得た。

今後の課題を以下に示す。

- 膨張機の動翼部の隙間調整を行うことにより膨張機の断熱効率が向上する余地もあり、ブレイトン冷凍機のさらなる高効率化につながる可能性を見出した。
- 高速ビルトインモータは、ネオンガス雰囲気にて高速運転されるため風損が大きく、設計効率を達成出来ていない。この風損の低減は今後の課題である。
- ブレイトン冷却システムにおける冷凍機故障時のバックアップ方法を検討、検証する。
- メンテナンス間隔 30,000 時間検証を検討する。
- 短絡電流などの急激な過負荷を想定した冷凍機の制御の応答性や運転の安全性を検証する。

これらの課題を継続研究として実施する予定である。

引用論文リスト

- (1) 仲村直子 他、“冷媒にネオンを用いた超電導向け冷却システムの開発”、高圧ガス、通巻 524 号 (2013) 48-51
- (2) 仲村直子 他、“高温超電導ケーブル用冷却システムおよび高性能冷凍機の開発”、低温工学、Vol. 48 No. 7 (2013) 382-387
- (3) 大野隆介 他、“高温超電導ケーブル用ブレイトン冷凍システムの開発”、低温工学・超電導学会講演概要集、第 88 回 (2013) 215

2.7 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究

2.7.1 高温超電導ケーブルの標準化の研究

(1) 研究目的

高温超電導ケーブル実用化の促進のためには、技術的な課題や保守・メンテナンス方法の確立等の研究を進めると同時に、標準化に向けての研究も平行して推進していくことが重要である。

高温超電導ケーブル標準化に向けては、現在使用されている CV ケーブル、OF ケーブルでの標準化に向けての活動が参考になるが、CV ケーブル等については、使用電圧や導体断面積、絶縁材料等が各国によって異なることから、物品としての規格標準化は困難であり、日本では電気学会電気規格調査会標準規格 (JEC: Japanese Electrotechnical Committee) によりその試験法のみが定められている。国際標準としては、国際電気標準会議 (International Electrotechnical Commission) が定めた IEC 規格が存在する。高温超電導ケーブルの標準化としては、CV や OF といった既存ケーブルと同様に、試験法に限定するのが妥当と考えられる。本プロジェクトにおいては、主に試験内容について海外技術開発動向も踏まえつつ、素案作成ならびにデータ収集・整理を実施した。

また、2009 年に発足した CIGRE WGB1.31 では、超電導ケーブルの試験法に関するガイドラインについて協議されていたが、本プロジェクトで行った試験方法、試験結果について、随時 WG に提供することとした。

(2) 試験項目の抽出と標準化項目の作成

超電導ケーブル試験項目として、通常の CV ケーブル等と内容が等しいか、あるいは一部条件を変更している項目と、超電導ケーブル独自の項目に分類した上で、表 2.7.1-1 のとおり抽出・整理した。なお、超電導ケーブル独自項目については、過去国内外で実施されたプロジェクトでの試験内容等を考慮に入れて精査を行った上で、2.1.5 節に記述した「30m ケーブルシステム」を用いて試験内容ならびに標準化項目としての妥当性確認を実施している。

表 2.7.1-1 超電導ケーブル試験項目一覧表

No.	項目	要素試験	30m出荷試験	30m試験	実証出荷試験	実証竣工試験	残存性能試験
1	商用周波長時間耐電圧試験	●	●		●		●
2	長期課電試験			○			
3	商用周波耐電圧試験	●		○(2の後)			
4	雷インパルス耐電圧試験(絶縁体)	●	●	●(2の後)	●		●
5	雷インパルス耐電圧試験(保護層)			●	●		●
6	出荷耐電圧試験		●		●		
7	部分放電試験	●	●	○	●		●
8	絶縁耐力試験			○		○	
9	外観点検	○	○	○	○	○	○
10	静電容量試験	●(室温、低温)	○(室温)、●	○	○(室温)、●	○	●
11	誘電正接試験	●	●	○	●	○	●
12	絶縁抵抗試験		●(室温)	○	○(室温)	○	○
13	直流耐電圧試験(シース)		○		○		○
14	導体抵抗試験(フォーム)		●(室温)	○(室温)	○(室温)	○(室温)	
15	構造試験		●		●		●
16	曲げ試験	●	●		●		
17	極度曲げ試験	●(参考)					
18	ブリーディングアイ試験	●					
19	Ic測定(導体、シールド)	●	●	○(導体のみ)	●	○(導体のみ)	●
20	交流損失測定	●	●	○(ΔT)	●		●
21	断熱管侵入熱測定	●(参考)		○(参考)		○(参考)	
22	断熱管側圧試験	●(参考)					
23	引張り、圧縮試験	●(参考)					
24	短絡試験(31.5kA)	●					
25	短絡通電試験	●					
26	短絡課電試験	●					
27	ケーブルコア側圧試験	●					
28	耐圧力試験		■(室温)	■(室温)	■(室温)	■(室温)	
29	気密試験		○(室温)	○(室温)	○(室温)	○(室温)	
30	真空リーク試験		○(室温)	○(室温)	○(室温)	○(室温)	
31	布設模擬試験	●					
32	圧力損失測定			○(参考)		○(参考)	
33	インダクタンス測定	●(参考)	●(参考)		●(参考)		
34	液体窒素性能検査						●(参考)

- サンプル or モデル試験
- 全長試験
- 部品での試験

: 既存ケーブルを考慮した試験
 : 超電導ケーブル特有の試験

(3) 国際標準化に向けての活動

上記に示すような試験項目抽出・標準化項目作成を実施するとともに、国際標準化活動との連携を行った。超電導ケーブルの標準化にあたっては、日本が超電導ケーブル技術の国際的イニシアティブを取り、国際標準化を戦略的に推進するため、国内のアドホック委員会が平成19年5月に発足した。アドホック委員会委員長は東大・大崎先生、委員としては通常ケーブルの標準化活動に携わっている専門家、具体的には IECTC20 国内委員、超電導ケーブル関連推進者、経済産業省、事務局として社団法人日本電線工業会、(財)国際超電導産業技術研究センターを加えたメンバー構成であった。本プロジェクトからもこのアドホック委員会に委員として参画し、試験項目一覧や試験方法の検証成果、試験結果の妥当性等の情報提供を行った。

標準化活動状況に関するスキームについて図 2.7.1-1 にまとめた。

我国が国際的イニシアティブを取るべく、産官学連携して、国際標準化へ取り組み中

【IEC関連活動】

・IEC国内委員会(TC20&90)を中心にアドホック委員会を設立(H19/5月)



CIGREに検討要請

【CIGREの活動】

・SC-B1内にTFを設置、依頼を取り上げるか否か検討(H20/10～H21/9)? 賛成で可決
・超電導ケーブル試験法に関する可能性について、WG内で3年間検討する(H21/9月)



本プロジェクトの貢献内容

- ・試験法に関して整理
- ・30mケーブル試験での試験方法の検証、試験結果の妥当性の確認
- ・国内委員会、CIGRE委員会への情報提供



IEC内の審議を経て、国際標準化へ

図 2.7.1-1 高温超電導ケーブル標準化に関連するスキーム

超電導ケーブル国際標準化に向けて、アドホック委員会を中心として国際標準化への戦略を進めてきた。IEC 国内委員会との情報共有の中で、国際標準化提案の段階へ進んだ際には CIGRE（国際電力大会議）との協調が必要ではないかとの意見があり、結果として高温超電導ケーブル標準化に関する手続きの進め方については、IEC Technical Committee 20（以下 TC20 と略）議長は一般的な絶縁ケーブルと同様の手続きで進めるべきと判断し、CIGRE へ技術サポート協力を依頼する方針を決定した。

日本が国際幹事を務める IEC TC90 からの働きかけもあり、CIGRE 内に超電導ケーブルの試験法を検討する WG (working group) B1.31 が、TF(task force)をへて、2009年に設立された。WG B1.31は米国・カナダ・フランス・ドイツ・韓国・イタリア・オランダ・日本の8カ国（後にインドも参加）で構成され、議長は米国サウスワイヤー社 Lindsay 氏、Secretary は住友電工 増田氏であった。

WG への情報提供としては、日本での超電導ケーブル試験法実績に加え、Super-ACE 500 m ケーブルプロジェクト、住友電工/東京電力 100 m 実用性検証プロジェクト、米国オーバニープロジェクト、および本プロジェクトでの試験内容について、まとめて実施した。これらを元に作成された高温超電導ケーブル試験内容を表 2.7.1-2、2.7.1-3 に示す。

表 2.7.1-2 既実施の高温超電導ケーブル試験内容一覧（開発・工場試験）

Development or Type Tests	Sumitomo	Nexans	Russia VNIKP	Furukawa	Southwire /nktc	LS Cable
Test						
DC Ic	•	•	•	•	•	•
n-value		•			•	•
AC withstand	•	•	•	•	•	•
BIL	•	•	•	•	•	•
PD	•	•		•	•	•
tan-delta	•	•		•	•	•
bending	•	•		•	•	•
AC withstand on bent cable		•			•	
Ic of bent cable		•		•	•	
n-value of bent cable		•			•	
conductor resistance				•	•	
load cycle		•		•		•
DC voltage						
AC Loss	•	•	•	•	•	•
Short circuit			•	•	•	•
inductance	•					
capacitance	•	•		•	•	•
sheath voltage	•			•	•	
insulation resistance	•			•	•	•
visual inspection	•	•		•	•	•
cable pulling	•	•		•	•	•
cable thermal contraction	•			•	•	•
cryostat - heat leak	•	•		•		•
cryostat - side wall pressure	•	•		•		•
vacuum leak check	•	•	•		•	•
pressure test	•	•	•	•	•	•
pressure drop	•	•	•	•	•	•
Factory - Sample Tests						
Test						
AC withstand	•	•		•	•	•
BIL	•	•		•	•	•
PD	•	•		•	•	•
Capacitance	•	•		•		•
Inductance	•					
tan-delta	•	•		•		•
DC voltage	•					
sheath voltage	•			•		
insulation resistance	•			•		
conductor resistance				•		
cable bending	•	•				•
pulling eye test	•					
visual inspection	•	•		•	•	•
DC-Ic	•	•		•	•	•
AC Loss	•			•		•
cable pulling	•					
cable thermal contraction	•					•
Short circuit current	•					•
pressure test	•	•		•		•
vacuum leak check	•	•		•		•
cryostat - heat leak	•			•		•

表 2.7.1-3 既実施の高温超電導ケーブル試験内容一覧（布設後の試験）

After Laying Test	Sumitomo	Nexans	Russia VNIKP	Furukawa	Southwire /nktc	LS Cable
Capacitance	•	•		•	•	•
DC voltage	•					
tan-delta	•			•		•
Insulation resistance	•			•	•	•
conductor resistance				•		
DC-1c	•			•	•	•
AC voltage		•		•	•	•
PD		•		•		•
visual inspection	•	•		•	•	•
pressure test	•	•		•	•	•
vacuum leak check	•	•		•	•	•
pressure drop	•	•		•	•	•
cryostat - heat leak	•	•		•	•	•

(4) 超電導ケーブル試験法のガイドライン

2.7.1(3)節で説明した CIGRE WG B1.31 の活動により、超電導ケーブル試験法に関するガイドラインが、“Recommendations for Testing of Superconducting Cables”として、CIGRE の TB538 として 2013 年 6 月に発刊された。内容について、表 2.7.1-4 に示す。従来ケーブルの IEC 規格に準じて、超電導ケーブルに適用できるように検討がなされており、日本の意見も多数採用されている。

表 2.7.1-4 超電導ケーブルの試験法に関するガイドライン概要

項目	内容
1. Introduction	背景や用語の定義などの説明。1.4 節では、future work として、本 WG で協議された今後の課題について記されており、出荷時の全長課電試験、断熱管の長期特性、さらなる高電圧化向け(～275 kV)の試験方法、PQ テストについて記載されている。特に PQ テストについては、日本からの意見が反映され、今後の CIGRE or IEC で協議されるべきとしている。
2. Tests for Engineering Information	合否を判定するものではないが、ケーブルシステムに必要な情報として、交流損失、断熱管の侵入熱、静電容量やインダクタンス、事故電流通過時の特性の説明を記述。
3. Type test	<ul style="list-style-type: none"> ケーブルと機器とを組み合わせた Assembly 試験は、①曲げ試験、②耐圧力試験、③ロードサイクル試験、④AC 課電、⑤雷インパルス試験、⑥PD 試験、の順番に行う。尚、超電導体の臨界電流測定は、①の曲げ試験後に行う。 曲げ試験については、ケーブルコアのみを曲げる場合は、断熱管を模擬した管に入れて曲げることを追記。 耐圧力試験については、各国の法律あるいは基準に従うこととし、共通な試験条件は設けず。

	<ul style="list-style-type: none"> ・③④⑤⑥の試験電圧、試験時間については、基本的に IEC60502, IEC60840 の条件にならう。AC 耐圧試験においては、試験電圧は 2.5 U₀ に統一。また、PD 試験の感度においても、これまでの規格通り 5 pC となった。 ・尚、三相同軸ケーブルについては、相間に電圧を印加するので、試験電圧を$\sqrt{3}$倍する。 ・ケーブルのみの type test としては、曲げ試験を実施する。 ・機器の type test としては、機器を構成する部品の耐電圧試験を行う。
4. Factory test	<ul style="list-style-type: none"> ・試験項目としては、①ケーブルへの AC 課電試験、②機器への AC 課電試験、③臨界電流測定、④真空リーク試験、⑤耐圧力試験を行う。 ・①②③は、各国の現状での試験内容を反映させ、切り出しサンプルで試験を行うこととしている。全長試験については、今後の課題である。 ・④⑤については全長行うが、試験条件については、各国の法律、基準に従うものとした
5. After laying test	<ul style="list-style-type: none"> ・試験項目としては、①真空リーク試験、②耐圧力試験、③臨界電流測定、④課電試験である。 ・④については、各国の経験をもとに、AC 課電、DC 課電、低周波課電、soak 試験（24 時間定格課電）から選ぶこととした。

(5) まとめ

これまでに実施した高温超電導ケーブルの標準化に関して、推進スキームや活動状況についてまとめた。また、本プロジェクトで検討した試験法や試験結果を CIGRE WG の場で報告することで、本 WG が作成した超電導ケーブル試験法に関するガイドライン作成を促進することができた。

2.7.2 高温超電導ケーブルの適用技術研究

2.7.2-1 交流損失低減の検討

(1) 開発目標

超電導ケーブルの実用化に向けて交流損失の低減は課題の一つであり、 1W/m/ph @ 3kA を本プロジェクトの目標値としている。

本節では、超電導線材の交流損失測定結果をベースとしてケーブルの交流損失を理論計算し、上記目標値を達成するために必要なケーブル構造および線材特性について検討した結果について述べる。なお、本検討は新潟大学との共同研究において実施したものである。

(2) ケーブル交流損失解析モデル

超電導ケーブルの構造と解析モデルを図 2.7.2-1 に示す。ケーブルの撚り構造を考慮するため、各層の電流は線材方向にのみ流れるものとする。解析では一つの層をさらに図 2.7.2-1 に示すように厚さ方向に分割したモデルで考える。これにより各層の線材の局所的な電流分布を近似的に取り扱うことが可能となる。

Bi 系超電導線材には、超電導フィラメントがツイストされていない通常線材 (H 線) と、ツイストされている低損失線材 (AC 線) がある。H 線を用いた超電導層の損失は各層に発生する磁場の大きさに対してモノブロックモデルを用いて算出可能だが、AC 線を用いた超電導層の損失は図 2.7.2-2 に示す線材単体の交流損失測定結果をベースとして算出するモデルを採用した。

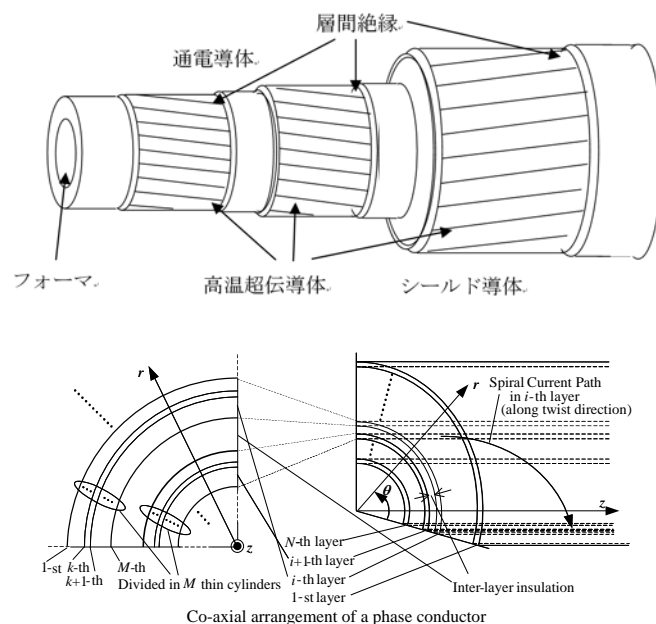


図 2.7.2-1 超電導ケーブル解析モデル

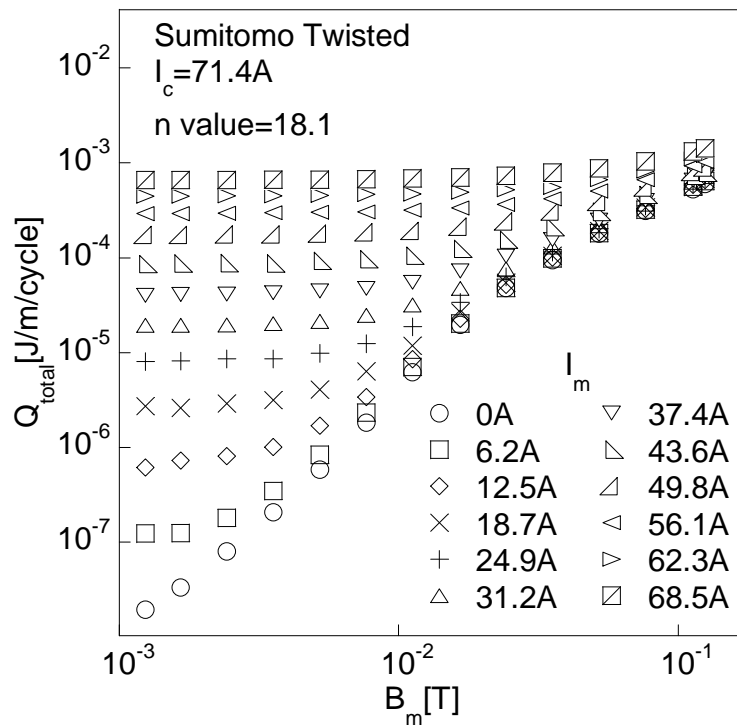


図 2.7.2-2 ツイスト線材 (AC 線) 損失測定結果

(3) ケーブル交流損失解析結果

解析に使用した線材の諸元は表 2.7.2-1 に示すとおりであり、ケーブルの諸元は表 2.7.2-2 に示すとおりである。2kA および 3kA 通電時のケーブル損失解析結果は図 2.7.2-3 に示すとおりであり、目標値 1W/m/ph@3kA を達成出来る構造は C1 のみとなる。シールド層の全層に H 線材を適用した C2 と比較して、シールド層の内層に AC 線材を適用した C1 および C3 は交流損失が大幅に低減されていることが分かる。また、シールド層の外層にのみ AC 線材を適用した C4 は交流損失が殆ど低減されていない。このことから、シールド層の最内層に AC 線材を適用することが交流損失の低減に繋がることが示された。

表 2.7.2-1 線材の諸元

	非ツイスト線材 (H 線)	ツイスト線材 (AC 線)
I_c (A)	162	71
線材幅 (mm)	4.5	2.6
線材厚 (mm)	0.35	0.32

表 2.7.2-2 ケーブル解析モデルの諸元

	C1	C2	C3	C4
導体 1 層目	AC	AC	AC	AC
導体 2 層目	AC	AC	AC	AC
導体 3 層目	AC	AC	AC	AC
導体 4 層目	AC	AC	AC	AC
シールド 1 層目	AC	H	AC	H
シールド 2 層目	AC	H	H	AC

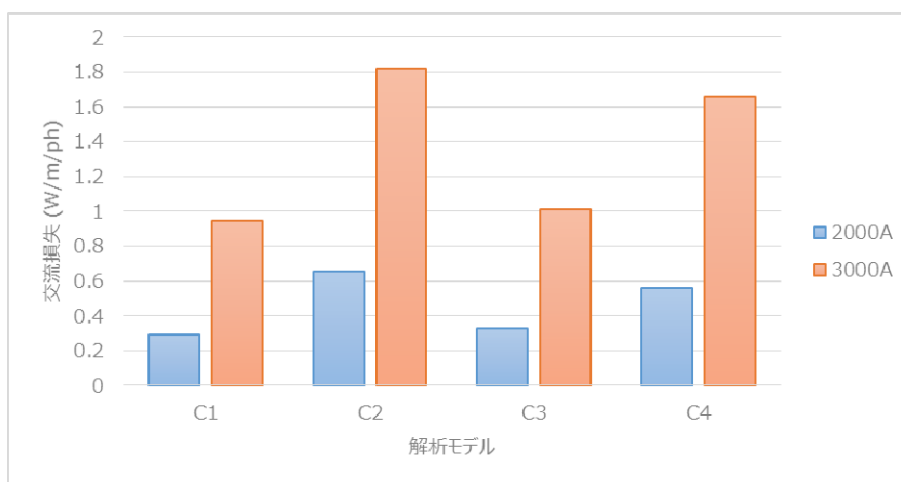


図 2.7.2-3 交流損失解析結果

(4) まとめ

- ・ ケーブル構造の見直しにより、実用化時を想定した交流損失目標値 1W/m/ph@3kA を達成できる可能性を示した。
- ・ 現状サイズのケーブルでは、導体層およびシールド層の全層にツイスト型線材（AC 線）を適用することにより最も交流損失を低減できる。
- ・ 交流損失の低減には、シールド最内層にツイスト型線材（AC 線）を適用することが有効である。
- ・ シールド層外層側は磁界が小さいため、ツイスト型線材（AC 線）を適用しても交流損失の低減にほとんど寄与しない。

2.7.2-2 超電導ケーブルの適用効果の評価

超電導ケーブルを電力ネットワークに適用を考えた場合、従来ケーブル、技術と比べてメリットがなければ、当然ながら超電導ケーブルは適用されない。そのメリットを論ずるにあたり、その評価すべき項目についてどのようなものがあるか検討し、以下にまとめる。

(1) 建設コスト

超電導ケーブルは大容量の電力をコンパクトな形状で送電できることが特徴の一つである。建設コストに含まれる項目を表 2.7.2-3 に示す。項目的には、従来ケーブルとほぼ同じで、冷却システムに関するコストが付加されていることが大きな違いである。

これまでの FS（参考文献）では、超電導ケーブルはサイズがコンパクトになることから、土木費が従来ケーブルと比べて安価になり、ケーブルシステム自体が高価になっても、全体として経済的なメリットがでると考えている。

表 2.7.2-3 建設コストの項目

分類	項目
構成要素の製造コスト	超電導ケーブル
	付属品（中継接続部、終端接続部）
	冷却システム
	計測、警報システム
送電線路の布設コスト	土木費（管路、洞道、マンホールなど）
	超電導ケーブル布設
	付属品組立
	冷却システム据え付け
竣工試験コスト	ケーブルシステム
	冷却システム

(2) 送電損失と運転コスト

超電導ケーブルのもう一つの特徴は、低損失送電である。超電導体は臨界温度以下で抵抗がゼロであるので、ジュール発熱がなく、低損失な送電ができると期待されている。しかしながら、交流磁場化では、超電導体のヒステレシス損失に起因する交流損失が発生し、その低減が課題であり、本プロジェクトでもその低減に取り組んできた。

超電導ケーブルの送電損失としては、上記の交流損失 Q_{ac} のほかに、絶縁体内で発生する誘電損失 Q_e 、室温から入ってくる断熱管の侵入熱 Q_h が考えられる。さらに、端末やジョイントでは、有限な接続抵抗があるので、そこでのジュール損失、

容器からの侵入熱も考える必要があり、まとめて付属品の熱損失 Q_a とする。これらの熱損失は、冷媒である液体窒素の温度を上昇させるため、これを冷凍機で冷却し温度降下させるのであるが、その冷凍機には熱損失分の冷凍能力が必要である。なお、冷却システム、冷却配管自体にも外部からの熱侵入 Q_c があり、これもトータルの熱損失にカウントする必要がある。

これらの熱損失すべてが、冷凍機で冷却されるが、その冷凍機の動力は冷凍機の効率 η を考慮して式 2.7.2-1 で計算される。

$$\text{送電損失} = (Q_{ac} + Q_e + Q_h + Q_a + Q_c) / \eta \quad \dots (2.7.2-1)$$

さらに運転コストは、この送電損失に電力代を乗じたもの、保守・メンテナンス費用を加える必要がある。表 2.7.2-2 に運転コストの項目リストを示す。

表 2.7.2-4 運転コストの項目

分類	項目
送電損失コスト	送電損失×電力単価
ケーブルメンテナンス	真空維持（必要時）
保守・メンテナンス	冷凍機メンテナンス
	循環ポンプメンテナンス、他
補器類	計測、警報システム動力、他

なお、これらの送電損失が従来ケーブルよりも低損失になる場合、CO₂ 排出低減効果として、低減分をメリットとして換算する場合がある。この場合のコストへの換算式を 2.7.2-2 に示す。

$$\text{低減効果} = \Delta W \times E \times F \quad \dots (2.7.2-2)$$

ΔW : 送電損失の常電導との差

E : 単位電力量あたりの CO₂ 排出量

F : 単位 CO₂ 重量あたりの、CO₂ 排出権取引量

(3) 66 kV 級ケーブルの経済性メリットの検討

適用例として、都市部の地下送電線を考えた場合、275 kV CV ケーブルを適用する場合と、66 kV 級超電導ケーブルを適用する場合とを検討し、それぞれの建設コスト、送電損失の比較を行った。

まず、検討条件を表 2.7.2-5 に示す。線路長は 10 km、3 回線で電力を 350 MVA × 3 回線を送電するケースを考える。超電導ケーブルの場合は既存の管路に布設を

行うが、CVケーブルの場合は、既設の管路に適用できないので、新規に洞道を建設するものとする。適用のイメージを図2.7.2-4に示す。

表 2.7.2-5 検討条件

項目	CV ケーブル	超電導ケーブル
容量・回線数	350 MVA×3 回線	350 MVA×3 回線
定格電圧、電流	275 kV / 0.75 kA	66 kV×3 kA
回線長	10 km	10 km
布設形態	新設洞道	既設管路

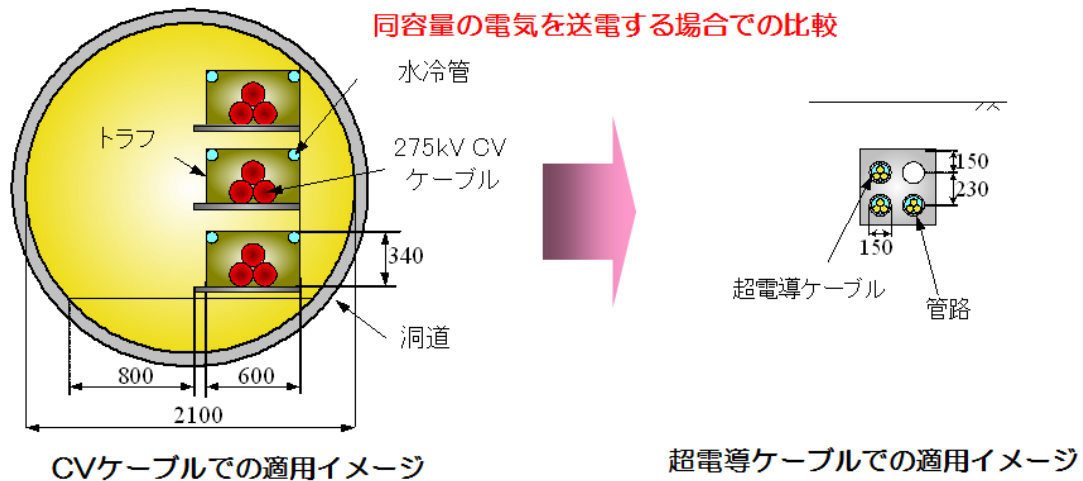


図 2.7.2-4 都市部地下送電線路のイメージ

建設コストとして、表 2.7.2-3 に示す製造コストと布設コストを見積もり、CV ケーブルの場合と超電導ケーブルの場合との比較を行った。コストを算出するうえで使用した主なコストを表 2.7.2-6 に示す。超電導ケーブルの場合は、現状での値と、低コスト化が進んだ 2020 年時に予想されるコストを想定して計算を行った。建設コストの計算結果を図 2.7.2-5 に示す。計算結果は CV ケーブルケースを 1 とした場合の超電導ケーブルケースを相対値で表した。計算結果では、現状では超電導ケーブル、冷却システムのコストが大きく、土木費低減のメリットを打ち消し、ほぼ同レベルとなるが、線材、冷却システムのコストが半減化すれば、60%に建設コストを低減できるものと考えている。

表 2.7.2-6 計算に使用した主な構成機器のコスト

項目	CV ケーブル	超電導ケーブル (現状)	超電導ケーブル (2020 年)
ケーブル	200 k¥/m/回線		
超電導線材		10 ¥/Am	5 ¥/Am
冷却システム		30 M¥/kW	15 M¥/kW
工事費用	3 M¥/m	50 k¥/m	50 k¥/m

- CV ケーブルの値段は材工込み、機器込み
- 工事費用は、CV ケーブルは洞道建設費、超電導は管路引込み費用

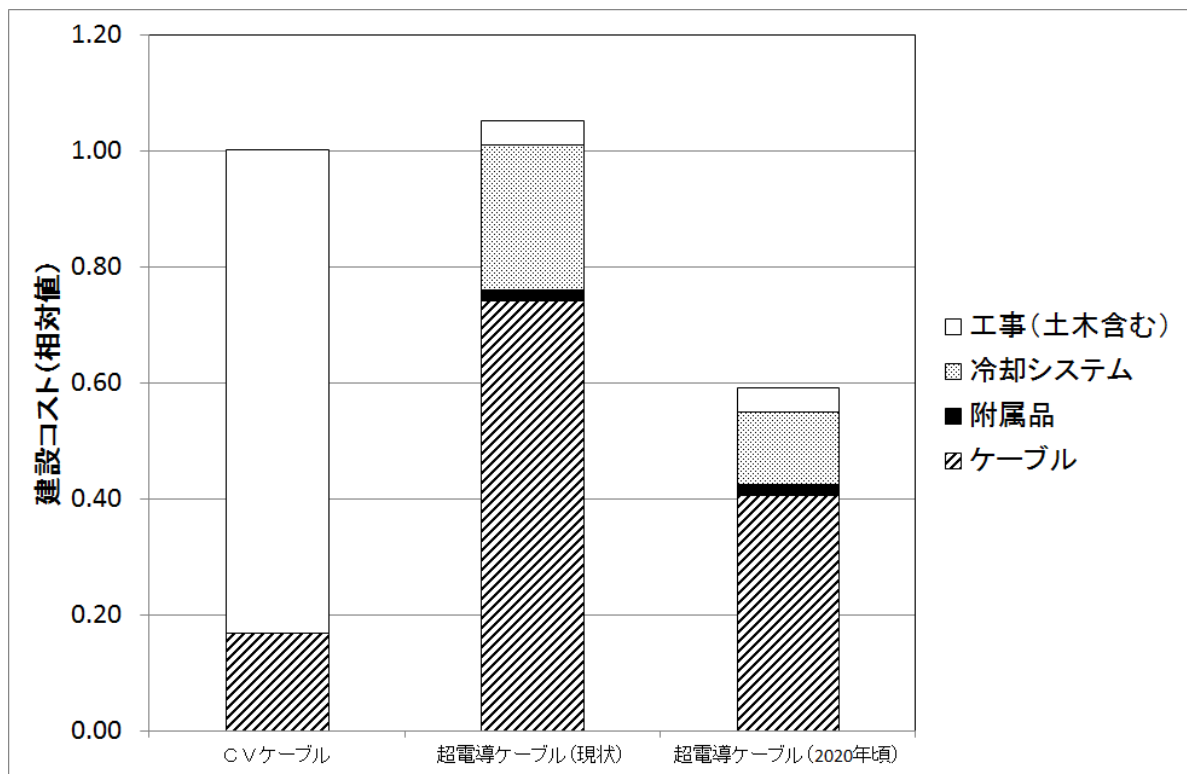


図 2.7.2-5 建設コストの比較 (相対値)

また、送電損失について計算を行った。計算条件を表 2.7.2-7 に示す。計算は実証ケーブルでの運転データから得られたデータを用いるケースと、2020 年頃に得られる性能を用いたケースで比較した。将来ケースの交流損失は、2.1 節で記述したように、1 W/m/ph@3 kA の目途を得ており、その数値を適用した。また断熱管の侵入熱は、実線路ではほとんどが直線であること、低損失開発が見込まれることから、1.8W/m を使用した。冷凍機の COP は、実証ケーブルでは、0.04、将来ケースは、2.6 節に記述した高性能冷凍機で実証した値の 0.1 を用いた。また、超電導ケーブルの損失の内訳はこの COP を考慮した値になっている。

尚、比較のための CV ケーブルの損失は 100W/m とした。

計算結果を図 2.7.2-6 に示す。実証ケーブルのデータでは、CV ケーブルの 2.5 倍程度であるが、2020 年では、超電導ケーブルの送電損失は CV ケーブルの約 60% に低減できることが判る。さらなる損失低下、冷凍機効率の向上により、超電導ケーブルのメリットが大きくなると期待される。

表 2.7.2-7 送電損失の計算条件

項目	実証レベル	2020 年レベル
交流損失	2.5 W/m/ph@3 kA	1 W/m/ph@3 kA
誘電損失	0.1W/m/ph@66kV	0.1W/m/ph@66kV
断熱管損失	2.5 W/m	1.8 W/m
機器損失	800W/基	700W/基
冷却システム COP	0.04	0.1

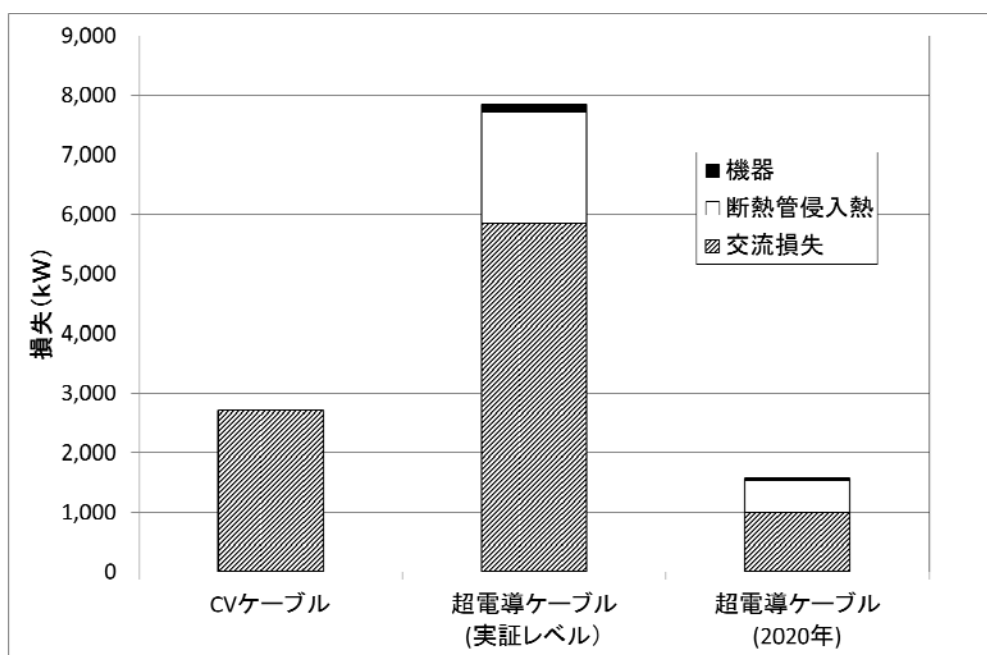


図 2.7.2-6 負荷率の違いによる送電損失の変化(66kV ケーブル)

(3) 発電機引出しケーブルの経済性メリットの検討

適用例として、水力発電所の発電機引き出し線を考えた場合、22 kV 相分離母線（アルミブスバー）を適用する場合と、22 kV 級超電導ケーブルを適用する場合とを検討し、それぞれの建設コスト、送電損失の比較を行った。

まず、検討条件を表 2.7.2-8 に示す。引出し線長さは現用の配置を考え 100 m、1 回線で電力を 450 MVA（22kV，12kA）を送電するケースを考える。超電導ケーブルの場合は既存の点検用スペースを活用するが、相分離母線の場合は、新規に洞道を建設するものとする。

表 2.7.2-8 検討条件

項目	相分離母線	超電導ケーブル
容量・回線数	450 MVA×1 回線	450 MVA×1 回線
定格電圧、電流	22 kV / 12 kA	22 kV×12 kA
長さ	100 m	100 m
布設形態	新設洞道	既設点検スペース

建設コストについて、相分離母線の場合と超電導ケーブルの場合との比較を行った。コストを算出するうえで使用した主なコストを表 2.7.2-9 に示す。超電導ケーブルの場合は、現状での値と、低コスト化が進んだ 2020 年時に予想されるコストを想定して計算を行った。

建設コストの計算結果を図 2.7.2-7 に示す。計算結果は相分離母線のケースを 1 とした場合の超電導ケーブルケースを相対値で表した。計算結果では、超電導ケーブルの場合、現状では超電導ケーブル、冷却システムのコストが大きく、相分離母線のコストの 10%程度の低減メリットにとどまるが、線材、冷却システムのコストが半減化すれば、60 %に建設コストを低減できるものと考えている。

表 2.7.2-9 計算に使用した主な構成機器のコスト

項目	水冷 CV	IPB	超電導ケーブル 2020 年レベル
導体損失 (W/m/ph)	477	135	1
断熱管損失 (W/m)			1
機器損失 (W/基)			800
冷却システム COP			0.1

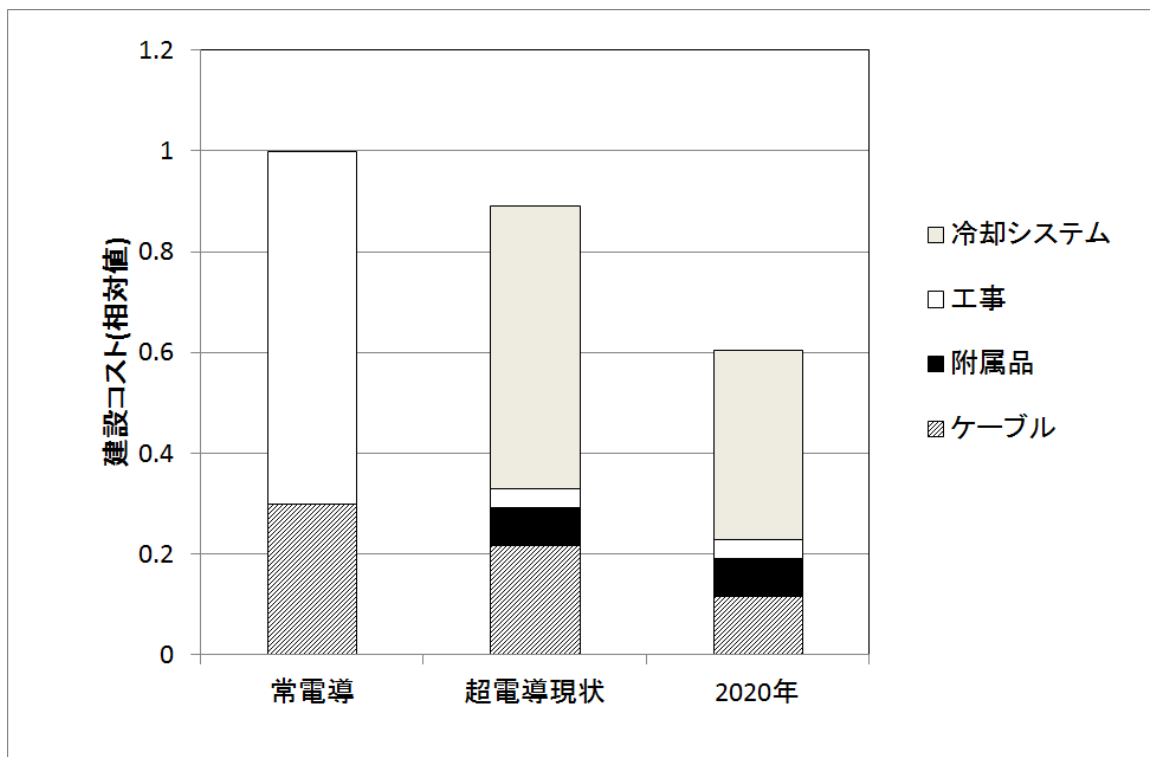


図 2.7.2-7 建設コストの比較（相対値）

また、送電損失について計算を行った。計算条件を表 2.7.2-10 に示す。計算は現状の相分離母線での損失、現状設備で水冷 CV ケーブルを用いた場合、将来（2020年）を想定した超電導ケーブルの各ケースについて計算を行い、比較を行った。

交流損失は、目標値である 10 W/m/ph@12 kA と用いた。また断熱管の侵入熱は、単心用であることから 1W/m とした。相分離母線の損失は、アルミブスバーの断面積等を考慮して、450 W/m/回線を用いた。水冷 CV ケーブルは 1450W/m/ph とした。冷凍機の COP は、2.6 節に記述した高性能冷凍機で実証した値として 0.1 を用いた。

計算結果を図 2.7.2-8 に示す。超電導の損失の内訳は冷凍機の COP を考慮した値となっている。

計算結果では、超電導ケーブルの送電損失は水冷 CV ケーブルの 20%、相分離母線の約 60 %に低減できることが判る。

表 2.7.2-7 送電損失の計算条件

項目	水冷 CV	IPB	超電導ケーブル 2020年レベル
導体損失 (W/m/ph)	477	135	1
断熱管損失 (W/m)			1
機器損失 (W/基)			800
冷却システム COP			0.1

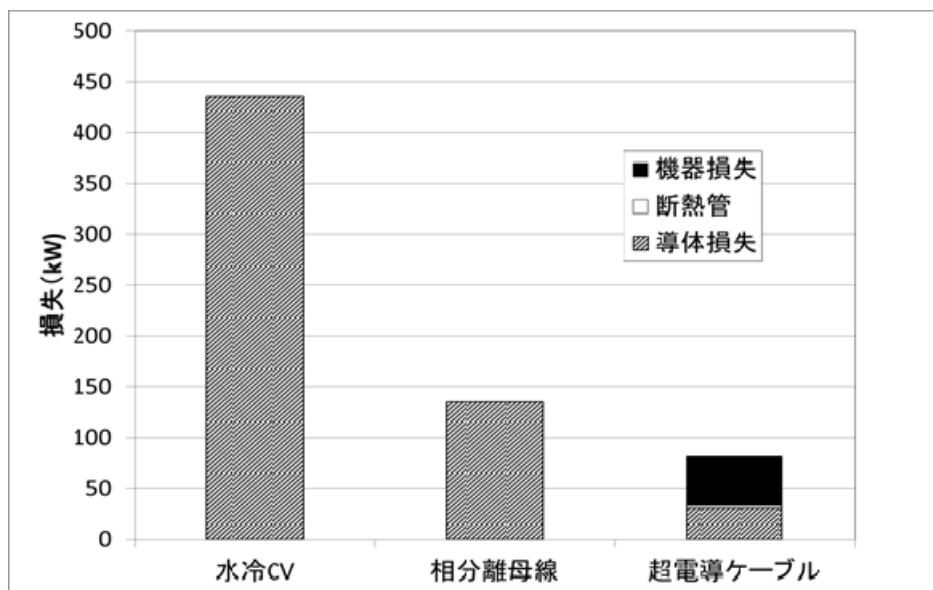


図 2.7.2-8 負荷率の違いによる送電損失の変化(発電機引き出し線)

2.7.3 関連法規への対応

(1) 研究開発目標（目的）

超電導ケーブルの実用化に向けては、技術的な課題の着実な克服は当然必要であるが、法律あるいは基準・規制等による制約をクリアすることも不可欠である。このため、冷却システムを含む超電導ケーブルシステムに関連する法規について調査を実施し、対応策を検討する。

(2) 対応内容

変電所での超電導ケーブルの実証試験を行うにあたり、考慮した関連法規は以下のとおりである。

- ・ 電気事業法
- ・ 電気設備技術基準
- ・ 変電所等における電気設備の耐震設計指針 JEAG5003
- ・ 高圧ガス保安法
- ・ 建築基準法
- ・ 道路法
- ・ 道路交通法
- ・ 騒音・振動規制法
- ・ 消防法
- ・ 下水道法(水質汚濁防止法)
- ・ 電気規格調査会規格(JEC)
- ・ 日本工業規格(JIS)
- ・ 日本電気協会電気技術指針(JEAG)
- ・ 東京電力 社内規格

試験にあたり、必要な許可・届出あるいは申請等手続きなどの特記事項を以下に記す。

(a) トータルシステムの適用法令（電気事業法ならびに高圧ガス保安法）

超電導ケーブルに関する関連法規については、電気事業法あるいは高圧ガス保安法に基づくと考えられる。設備に関しては二重の法規制を受けることはない。超電導ケーブルに関しては、実システムでの使用実績が未だなく、上記いずれの法規制に則るべきかの判断基準が確立していない。そこで、平成20年6月3日に、上記両法規制を管轄とする、経済産業省原子力安全・保安院関東東北産業保安監督部にて、本プロジェクトの全体計画と試験方法・内容等を説明し、対応すべき法規制の解釈について確認を行った。

この結果、今回使用する超電導ケーブルは、冷却システムを含めて変電のために設置する電気工作物であることから、電気事業法の適用がなされるという判断をい

ただいた。

ただし、冷却システムには高圧ガス（加圧液体窒素等）が使用されることから、これらの技術的取り扱いに関しては、高圧ガス保安法に規定される技術基準の精神に準拠することとした。

(b) 電気設備技術基準

超電導ケーブルは従来ケーブルと異なる特性を有しており、現行の基準は超電導ケーブルを想定して作られてはいない為、超電導ケーブルに適用した場合の解釈について検討する必要がある。特別な対応が必要と判断された項目として、電気設備技術基準の省令 7 条を下記に記載する。

〔省令 7 条〕電線の接続

- ・ 電線を接続する場合は、接続部分において電線の電気抵抗を増加させないように接続するほか、絶縁性能の低下（裸電線を除く。）及び通常の使用状態において断線のおそれがないようにしなければならない。

超電導ケーブルの場合、ケーブル部の電気抵抗は 0Ω であるのに対し、接続抵抗は有限の値を持つため、原理的に電気抵抗を増加させないように接続することは困難である。そのため、平成 22 年 12 月 1 日に、上記法規制を管轄とする経済産業省原子力安全・保安院関東東北産業保安監督部にて、対応すべき法規制の解釈について確認を行った。

その結果、超電導ケーブル接続部には、以下の機能を持たせることで省令第 7 条の解釈を満たすものと判断をいただいた。

〔省令 7 条の解釈確認結果〕超電導ケーブル接続における技術要件

- (1) 常温では、ケーブル部より電気抵抗が大きくないこと。
- (2) 冷却状態では、低抵抗接続技術を用いることで、接続部の電気抵抗が銅導体より小さいこと。
- (3) 十分な冷媒流路を確保するとともに、冷媒を循環させることで、温度分布が一様になるようにし、局所的な異常発熱を防止すること。
- (4) 十分な冷却が確保できない恐れがあるときは、超電導ケーブルを系統から切り離すこと（運転方法への反映）。

今回、超電導ケーブルの性能確認試験等により、上記の技術要件を満足することが確認できたことから、本超電導ケーブルの接続技術が実系統へ適用可能であると判断した。

(c) 変電所等における電気設備の耐震設計指針 JEAG5003

変電所構内に設置する電気設備に関しては、本指針に則り、水平加速度 3.0 m/s^2 に対して十分な強度を持った設計とした。

(d) 高圧ガス保安法

上述したように、トータルシステムは電気事業法が適用されるが、冷却システムには高圧ガス（加圧液体窒素等）が使用されることから、これらの技術的取り扱いに関しては、高圧ガス保安法に規定される技術基準の精神に準拠して、設計した。

またこれとは別に、実証ケーブルシステムの初期冷却時のタンクローリ使用（約 20,000L、5 日間）に関して、「移動式製造設備」扱いになるため、神奈川県庁に「一般保安規則・第 2 種貯蔵届け出」を実施した。

(e) 建築基準法

本プロジェクトにおいては、東京電力旭変電所敷地内に冷却システムを収容する冷却設備室や制御室、事務所等の建築物を設置することになるが、これらは設置期間が 1 年以上となることから、工事着工前に市の建築主事宛に建築確認申請書による届出が必要である。平成 22 年 3 月 23 日建築確認申請書に対する確認済証の交付を受け、平成 23 年 2 月 16 日にて、建築基準法第 7 条第 4 項の規定による検査の結果、建築基準法第 6 条第 1 項の建築基準関係規定に適合していることを証明された。

(f) 道路法、道路交通法

超電導ケーブルドラム、終端接続部、冷凍機等については、運搬段階において道路法・道路交通法の適用を受ける。高さや積載量等の制限を超えた場合には、警察署・市役所等の届出が必要となる。実用化を考慮すれば、特殊要素をなくすべきと考えられるため、荷姿・高さ制限等について出荷・運搬作業を想定した仕様となるよう機器設計を行うこととした。

(g) 騒音・振動規制法

騒音・振動に関しては、液体窒素冷却用冷凍機、水冷却塔が該当すると考えられる。実証試験場所の旭変電所は工業地域であるため以下の規制値以下にするような対策を行った。

【騒音規制】 横浜市生活環境の保全等に関する条例第 38 条別表 13

AM8:00～PM6:00 : 70dB 以下

AM6:00～8:00、PM6:00～11:00 : 65dB 以下

PM11:00～AM6:00 : 55dB 以下

【振動規制】 横浜市生活環境の保全等に関する条例第 38 条別表 14

AM8:00～PM7:00 : 70 dB 以下

PM7:00～AM8:00 : 65 dB 以下

(h) 消防法

消防法に関しては、以下のとおり必要な処理を行った。

【消防法】所轄消防署への提出

- ・ 防火対策物使用開始届（冷却システム建屋等）

(3) まとめ

旭変電所での超電導ケーブルシステムの搬入・据付・長期の実系統試験の全試験工程を対象とした時に、対応が必要となる関連法規を調査するとともに、それらの対応等を検討し、適切に申請手続き等を行った。なお、関係省庁と協議の結果、冷却システムを含む超電導ケーブルシステム全体は電気工作物として電気事業法が適用となり、超電導ケーブルの接続技術は、省令7条を満たすと判断される技術要件にて適用可能となることを確認した。

IV. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

1. 電力事業を取り巻く環境

地球温暖化対策としてのCO₂排出量の削減は、電力事業者にとって喫緊の課題の一つである。特に東日本大震災以降、原子力発電所の停止分を補うために、火力発電所の稼働比率が大幅に上昇している。例えば東京電力におけるCO₂排出源単位は、震災前の2010年度の0.375 kg-CO₂/kWhから、震災後の2012年度には0.525 kg-CO₂/kWh（いずれも炭素クレジット反映前）へと40%程度増加している。この対策として例えば電源系においては、火力発電所熱効率の大幅な改善や、家庭分野ではエコキュートなどの高効率機器の導入普及などを進めている。一方で流通設備を見ると送配電ロスが5%前後で推移しており、送配電ロスをさらに低減できるような有効な対策がないのが現状である。この送配電ロスを抜本的に削減するような技術開発が強く求められている。

次に、今後の電力需要の推移については、東京電力では電力需要が年平均で1%程度増加していくと想定している（「平成25年度数表で見る東京電力」より）。この想定に基づき今後の電源新設計画を立てており、川崎2号系列、千葉3号系列（いずれもLNG火力）などを新設予定である。このような電源設備の増強に対応して、建設コストを極力抑制しつつ、新たな流通設備の形成が必要となる。例えば、遠方の大型発電所から都内へと電力を輸送する275kVケーブルシステムの拡充や、東京湾岸火力からの電力を送電するケーブルシステムの新・増設である。

一方、既設の電力ケーブルのうちOFケーブルやPOFケーブルは布設後40年を経過しているものも多く、漏油問題などが生じている。アルミ被OFケーブルの寿命は50年程度と見積もられており、経年ケーブルから順次取替が必要となっている。特に大容量のPOFケーブルについては、2016年頃から取替検討が本格化すると想定されている。東京電力管内で現有するPOFケーブルシステムの回線延長は約240kmあり、また30年以上経過したOFケーブルシステムの回線延長は約530kmにおよんでいる。

超電導ケーブル技術は、上記の課題を解決できる唯一の革新技术であり、次世代の電力送電網の構築においても重要な技術と位置づけられる。

2. 実用化・事業化の見通し

超電導ケーブルの最も有効な適用例は、現在275kVの地中ケーブルで構成される基幹系の電力送電網への導入である。（以降、代表的な呼び名として「都内導入システム」と表記する。）電力需要の増加に伴い遠方大規模電源を増強する際には、それに合わせて275kV系の都内導入システムも拡充する事になる。これを既存の275kVケーブルで構築しようとする、新たに洞道（最低でも内径2.1m）の建設が必要である。しかしながら、特に都内においては地下空間に他の公共インフラ等が集中しており、新たな洞道を建設することが非常に困難になっている。これに対して超電導

ケーブル技術を適用すると、既存 275kV ケーブルと同容量の電力を内径 150mm の既設管路に収容可能な 66kV 超電導ケーブルで構築可能である。図 1-1 に既存の 275kV ケーブルを用いた場合の系統構成例と、66kV 超電導ケーブルを用いた場合の系統構成例、および両者のサイズ比較を示す。この図からわかるとおり、超電導ケーブルを適用することで洞道新設が不要となり、また既設管路の有効活用も可能なため、建設コストを大幅に低減できる。また超電導ケーブルは非常に低損失であるため冷却に必要な電力を考慮しても、送電ロスを半分程度まで低減でき、CO₂ 削減が可能となる。

別の適用例は経年化した既存 0F ケーブルの代替である。既存の 154kV 変電所・地中送電線は、今後老朽化対策および増容量対策が必要となるが、CV ケーブルで対応する場合にはケーブル容量の制約から既存 0F ケーブルより大径化するので、既設ケーブルを収容している管路の活用はできず、新たな洞道建設が必要となる。これに対して超電導ケーブル技術を活用すると、66kV 超電導ケーブルで大容量化に対応できるうえに既設管路の再利用も可能で、大幅なコストダウンと CO₂ 削減が可能である。図 1-2 にはこのようなパターンとして、湾岸火力発電所からの送電系統への超電導ケーブルの適用例を示す。このような適用により 154kV 系統を 66kV 系統にてリプレースでき、電圧階級の整理と、それに伴う 154kV 送変電設備の省略も併せて可能となる。

経年化した 154kV および 275kV の POF ケーブルの取替策として、CV ケーブルでの代替が検討されているが、CV ケーブルは POF ケーブルに比べて容量が小さいため、CV ケーブルを用いる場合には回線数を増加させる必要がある。この場合、既存洞道が回線増に対応可能かどうかなど様々な課題をクリアする必要がある。大容量送電が可能な超電導ケーブルを活用すれば、既設 POF ケーブルと同容量の電力を、回線数を増やすことなく送電できる。さらに POF ケーブルは送電容量確保のために油循環冷却システムと冷却ステーションを備えており、この冷却ステーションのスペースを有効利用して超電導ケーブル用冷却システムを構築可能である。

上記の他、発電所の引出口(発電機～変圧器間)などの大電流が流れる部分には、内部水冷ケーブルや GIL (ガス絶縁式送電ライン) などの大容量ケーブルが用いられている。これらは大容量であるために既存 CV ケーブルでの置き換えが困難で、経年後の代替策に苦慮しているのが実態である。コンパクトで大容量送電が可能な超電導ケーブルは、これら既設大容量ケーブルの代替策として早期の実用化が渴望されている。

図 1-3 には、既存の大容量ケーブルの例として、発電所引出口に利用されている既存内部水冷ケーブルの断面写真と、大容量ケーブルの代表である POF ケーブルの断面写真を示す。いずれも大容量であることから既存 CV ケーブルでの代替にはスペース等の制約があるが、コンパクトな大容量超電導ケーブルであれば、それらの制約なしでの代替が可能である。

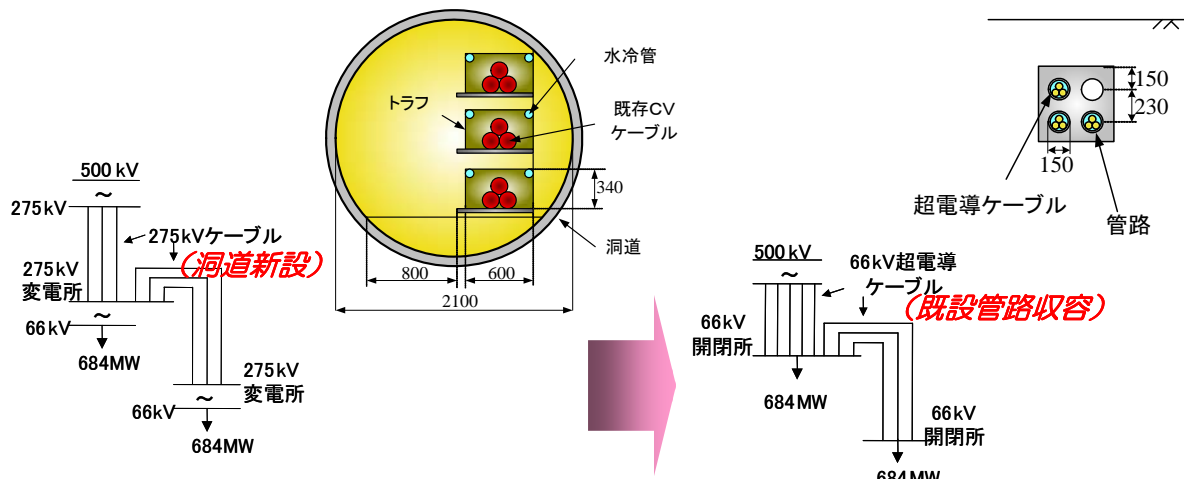


図 1-1 既存ケーブルと超電導ケーブルでの系統構成比較とサイズ比較
(都内導入系統)

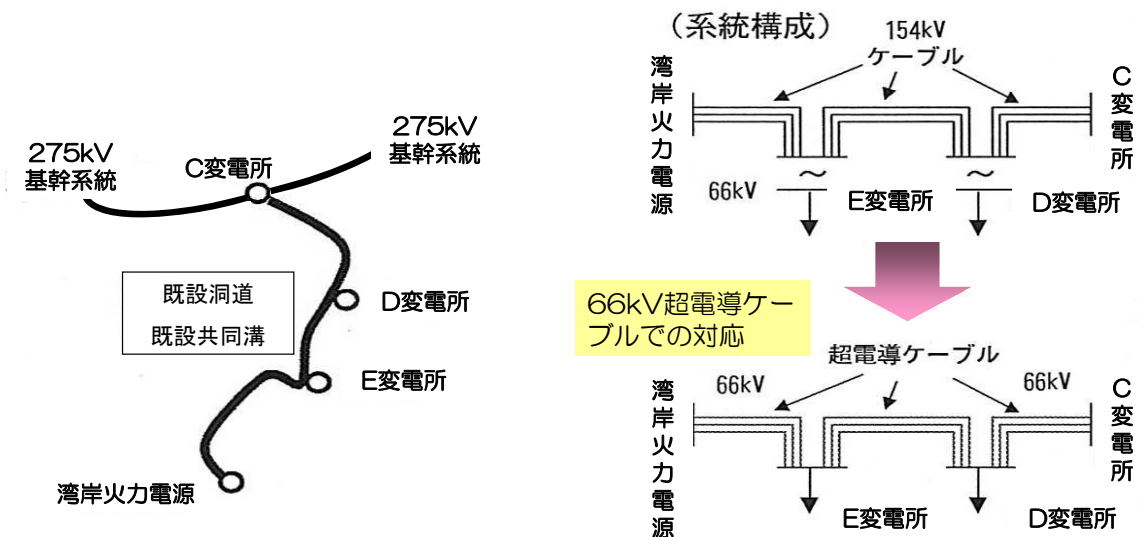


図 1-2 湾岸火力電源からの送電系統のリプレースへの超電導ケーブルの適用例

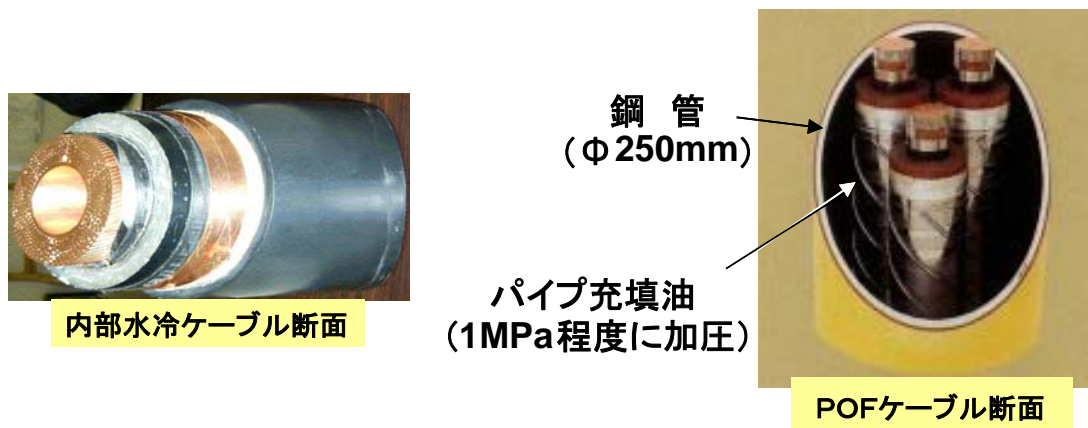


図 1-3 内部水冷ケーブルと POF ケーブルの断面写真

超電導ケーブルの適用により、1章に述べたとおり大幅なCO₂削減効果が期待できる。また、前述のように既存ケーブルでの系統構築から超電導ケーブルでの系統構築に移行することにより、既存ケーブル用の洞道新設が不要となるなど、大幅なコスト削減も期待できる。

図1-4、図1-5は、都市部の地下送電線に常電導ケーブル（275kV）と超電導ケーブル（66kV）を適用した場合の建設コストと送電損失の比較を示したものである。線材、冷凍機のコストが将来的に下がれば、建設コストは従来システムの60%に低減ができると期待される。また、送電損失についても将来的には、従来システムよの60%程度に損失を低減することが可能である。断熱管侵入熱の低減、冷凍機効率のさらなる向上により、さらに低損失化が期待できる。詳細はⅢ2.7-2節参照願います。

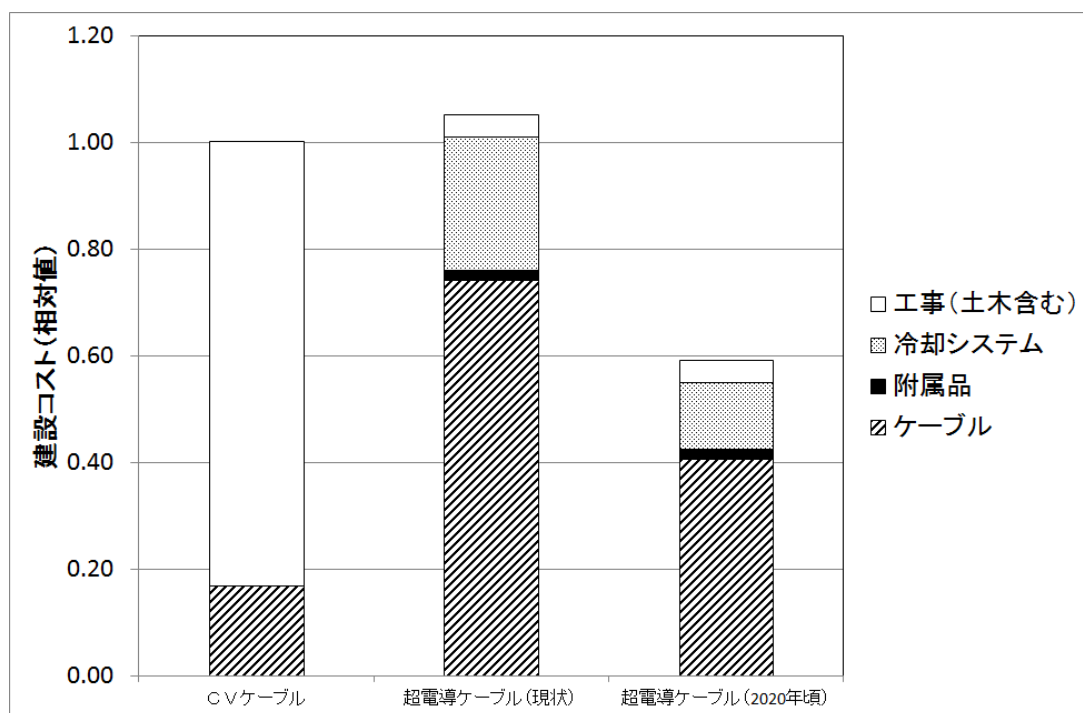


図1-4 建設コストの比較 (相対値)

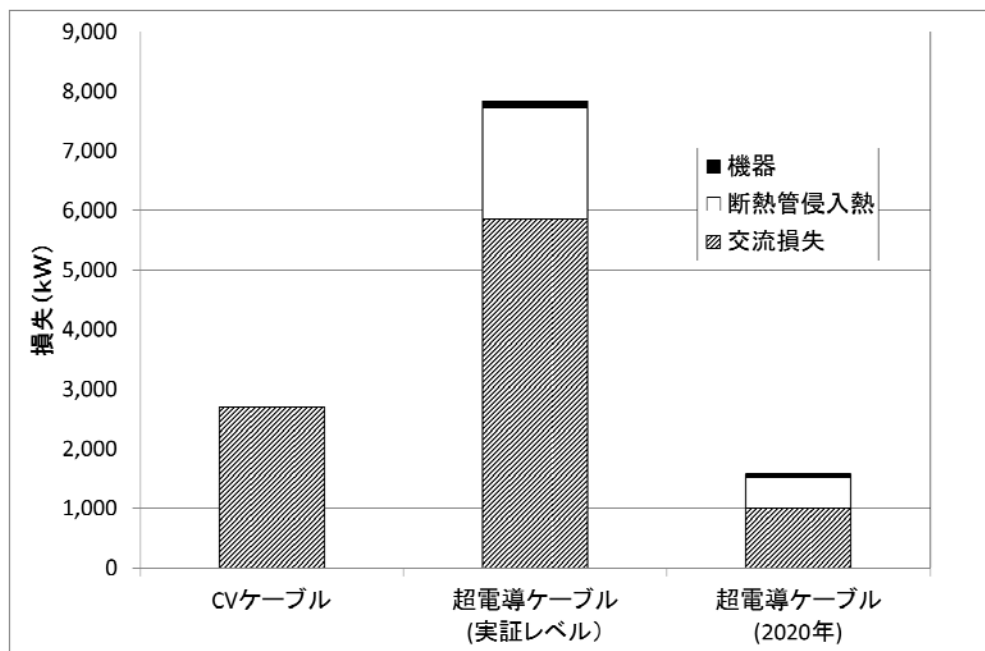


図 1-5 負荷率の違いによる送電損失の変化

3. 実用化に向けた課題

本技術開発を通じて、以下のような成果が得られている。

- 1) 電力ケーブル用製造装置を用いた、超電導ケーブルの量産化技術を確立するとともに、通常電力ケーブルと同様の輸送・布設技術により、超電導ケーブルを設置できることを検証した。
- 2) 高温超電導ケーブルの実システムでの運転性能や信頼性の実証を行い、超電導ケーブルの運転技術に加えて、保守・メンテナンスといった、通常運転での電力機器に求められる運用技術を確立した。

しかしながら、超電導ケーブル実用化に向けては、以下に列挙する課題を解決していく必要がある。

- 1) 超電導ケーブルの運転時に異常が起きた場合、あるいは何らかの事故が生じた場合の挙動や対処方法、対策等については、まだ十分に検討ができていないと難しい。実用化のためには、不測の事故（地絡・短絡等）時に生じる現象と影響を把握し、その結果を踏まえた安全性・信頼性の検証が必要不可欠であると考えます。また、超電導ケーブルに事故・故障等が生じた場合を想定すると、その影響を最小限に抑える等の、実用性をさらに向上させるための対策の検討も必要となる。引き続き、これらの検証を行うことが必要不可欠である。
- 2) また、本プロジェクトでの実証試験を通じて、実際の電力システムで要求される

高い信頼性を確保するためには、冷却システムの効率と耐久性をさらに改善する必要があることが明らかとなっている。そのため、本プロジェクトでは、高効率・大容量の冷凍機の開発を実施し、単体での性能確認にて目標レベルに達していることを確認した。引き続き、その冷凍機を用いた冷却システムの長期信頼性・安定性の確認を行っていく必要がある。

- 3) さらに、超電導ケーブルシステムの早期実用化のためには、超電導線材の高性能化・低価格化による超電導ケーブルコストの削減や、冷却システム系の低コスト化が不可欠である。超電導ケーブルシステムの将来コスト試算では、超電導ケーブルコストの低減に加え、冷却システムのさらなる高効率化と冷凍機単機容量の大型化も含めたトータルとしての冷却システムのコストダウンを前提としている。
- 4) 上記の線材の高性能化・低価格化、および冷却システムの高効率化・低コスト化が実現した後、超電導ケーブルシステムの実システム導入が本格的に開始されることになるが、電力システムの信頼性維持の観点からも、導入初期は比較的短距離（100m程度）で、運転実績確認を取りやすい箇所から試験的に導入が進むものとする。その一例は、水力発電所等の発電端に用いられる短距離大容量ケーブルへの適用である。ただし、この段階では量産効果が十分に働いていないことから、企業の努力だけでの実導入は困難で、国の支援を得ながら、同時に電力事業者同士の連携も常に視野に入れつつ実導入を目指して行けるよう、オールジャパンでの推進体制の構築が望まれる。

4. 実用化・事業化までのシナリオ

各社における超電導ケーブルシステムの実用化戦略は以下のとおりである。

・東京電力株式会社

前述の 1) の技術課題に記載した通り、超電導ケーブルは事故時における挙動や対策は未だ十分に検討したとは言えず、実適用を踏まえると安全性の検証が必要である。具体的には、超電導ケーブルに想定される異常を抽出し、超電導ケーブル布設時における公衆安全や、既設マンホール、ケーブル等の他設備に対する影響度を検討する。また、超電導ケーブルの特徴を踏まえると、低電圧、大電流運用である発電所引き出し線が初期導入候補の一つになると考えられる。この為、超電導ケーブル適用によりメリットが得られる箇所に対し、冷却設備等の付帯設備を含めた現地適用時のレイアウトや、長期運用時の安全性、保守性を検討する。

・住友電気工業株式会社

前述の 2) の技術課題へ対応するとともに、超電導ケーブルの低コスト化や、実際に建設される場所に適した機器の開発を行うことで、実用化が始まると考えており、2020年の実用化を目標に開発を進めている。

尚、実用化の初期のころは、都市部の地下送電線や発電機の引出し線を想定しており、よりメリットの大きいところから、徐々に導入が図られるようにユーザへアピールをしていきたいと考える。

・株式会社前川製作所

まずは、比較的短距離の超電導ケーブルを想定した 5 kW 冷凍機の高効率・高信頼性の検証を行うことで、実用化が加速すると考えている。また、さらなる、冷凍機の小型化・低コスト化を行うことで、市場の拡大を考えている。また、平行して超電導ケーブルの長距離化などに対応するために、冷凍機の大容量化を行い、さらに超電導ケーブル市場拡大に対応可能なように考えている。

前述した実用化までの課題を解決しつつ、これらの実用化戦略を推進するために、NEDO が平成 26 年度事業として公募を行った「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」に応募している。提案内容を以下に示す。

①「超電導ケーブルシステムの安全性評価方法の開発」

超電導ケーブルに不測の事故が生じる事項を検討し、それらの現象、影響を検証することで、超電導ケーブルの安全性・信頼性の評価を行う。具体定期には超電導ケーブルに系統事故（短絡・地絡等）、外傷事故が生じた場合を想定し、試験項目・内容を決定して、検証用装置の開発を行う。またその装置を用いた事故模擬試験を行い、冷媒挙動や外部への影響について測定・分析を行う。さらに、試験結果と事前のシミュレーションとの比較・フィードバックを行い、シミュレーションの精度向上を図る。これを用いて、実用化時を想定した長距離超電導ケーブルにおける、事故時シミュレーションを行い、その影響や対策を検討する。

②「高効率・高耐久冷却システムの開発」

超電導ケーブルの熱損失の要因となる、断熱管の侵入熱の低減を行う。開発目標としては、1.8W/m とする。

本プロジェクトで開発した大容量・高効率のブレイトン冷凍機を旭変電所に移設し、超電導ケーブルと接続した上で、1 年以上の実系統実証運転を行い、長期信頼性の検証を行う。また、冷却システムの過負荷試験や信頼性加速試験を行い、COP=0.11、保守・点検間隔が 40,000 時間以上となる検証を行う。

また、多様な現場に対応する冷却システムの設計技術、運転技術について検討する。

③「早期復旧等の実用性向上のための対策検討」

①の検証結果を反映させ、リスク低減及び早期復旧の観点から、超電導ケーブル及び冷却システムに付加すべき要素を定め、運転管理に係るガイドラインとして完成させる。

これらの超電導ケーブル実証研究が完了した後、超電導ケーブルシステムのさらなる高性能化・低コスト化の技術開発を進めることで、超電導ケーブルシステムの

大幅なコストダウンを進めていくべきである。

このように超電導ケーブルの実系統適用技術の見通しがつけば、電力系統への本格的な導入が可能となる。前述の通り、導入初期段階は比較的短距離で運転実績確認が容易な水力発電所発電端等の大電流ケーブル代替として試験導入されると予想している。その後、実系統での導入・運用実績を積みながら、超電導ケーブルにより最も大きな効果が得られる基幹系ケーブル系統へと、導入箇所を順次拡大していきたい。

事業化が軌道に乗るまでのシナリオは図 1-6 のようになると予想している。

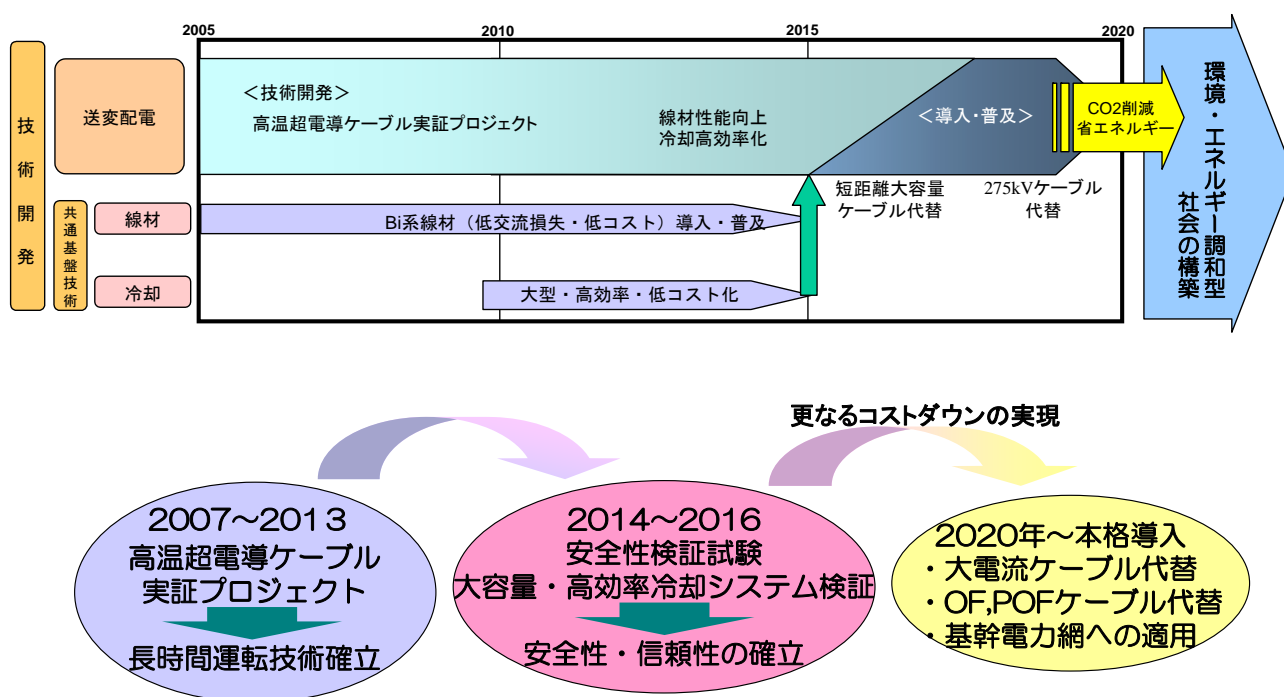


図 1-6 超電導技術分野の導入シナリオ（エネルギー・電力分野）

5. 波及効果

本技術開発は、高温超電導線材を活用した交流超電導ケーブルシステムの実証を目指すものである。

国内外での技術開発動向でも触れたとおり、諸外国においても交流超電導ケーブルの実証プロジェクトが進行中である。特に米国においては老朽化した送電ネットワークの近代化を目指したスマートグリッド構想が進行中で、超電導ケーブル技術もこの対策の一環として取り上げられている。米国で実証中の超電導ケーブルは、大容量化は容易だがコンパクト化が困難な単心タイプの超電導ケーブルと、コンパクト化に適するが高電圧化が困難な三相同軸タイプの超電導ケーブルである。また、昨今運開したドイツの Essen プロジェクトのケーブルも三相同軸型であるが、電圧

は 10kV である。本技術開発で採用している三心一括型超電導ケーブルは、大容量化、高電圧化、コンパクト化のいずれもバランス良く実現可能である。本技術開発を早期に確立することで、諸外国の超電導ケーブル導入プロジェクトでの本技術の採用など、海外への波及効果も期待できる。

地球温暖化対策として今後加速的に導入量が増加すると予想されている太陽光発電や風力発電などは、いずれも発電端は直流であり、ウィンドファームのように大規模集積化が進むと直流での直接送電のニーズが高まると予想される。また、データセンターなどでの電力消費は直流であり、低電圧大電流の直流配電システムへのニーズも高い。このような直流送電システムに対しても、本技術開発で培った超電導ケーブル技術の展開が可能で、これにより送電ロスはさらに大幅に低減でき、より大きな省エネルギー効果と CO₂ 削減効果をもたらすことができる。

さらに本技術開発により、加圧液体窒素を用いた冷却システムの長期安定運転技術が確立されると、その冷却技術は超電導変圧器、超電導限流器、高温超電導線材を用いた SMES など、その他の超電導電力機器の冷却技術として幅広く展開していくことが可能である。

付録資料 1

イノベーションプログラム基本計画

イノベーションプログラム 基本計画

平成21年4月
経 済 産 業 省

経済産業省

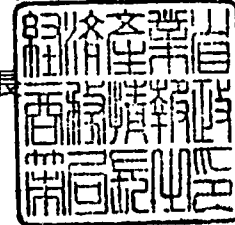
平成 21・03・23 産局第 2 号

平成 21 年 4 月 1 日

経済産業省産業技術環境局長



経済産業省商務情報政策局長



ITイノベーションプログラム基本計画の策定について

上記の件について、イノベーションプログラム実施要領（平成16・07・27産局第1号）第4条第1項の規定に基づき、別添のとおり制定する。

(別 添)

平成 21・03・23 産局第 2 号

平成 2 1 年 4 月 1 日

ITイノベーションプログラム基本計画

1. 目的

我が国が目指す高度情報通信ネットワーク社会の構築に向け、経済成長戦略大綱、IT新改革戦略、科学技術基本計画及び技術戦略マップ等に基づき、情報化の進展に伴うエネルギー消費量の増大等の課題にも考慮しつつ、その基盤となる情報通信機器・デバイス等の情報通信技術を開発し、実社会への利用を促進する。また、情報システム・ソフトウェアについて品質、信頼性及び生産性の向上を推進し、組込みソフトウェア産業強化、オープンソースソフトウェアを安心して活用するための環境整備、独創的な人材の発掘等、我が国産業競争力強化のための必要な基盤整備を実施することによって、ITの利活用の深化・拡大を図り、より豊かな国民生活を実現するとともに、我が国の経済活力の向上を図ることを目的とする。

2. 政策的位置付け

「経済成長戦略大綱」(2006年7月財政・経済一体改革会議。2007年6月改訂・経済財政諮問会議報告、2008年6月改訂・経済財政諮問会議報告)

IT革新による競争力強化、IT革新を支える産業・基盤の強化に必要な研究開発の推進に対応

「第3期科学技術基本計画」(2006年3月閣議決定)

国家的・社会的課題に対応した研究開発の重点推進4分野である情報通信分野、分野別推進戦略(2006年3月総合科学技術会議)における重点分野である情報通信分野に位置づけられるもの。

「IT新改革戦略」(2006年1月高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部)

次世代のIT社会の基礎となる研究開発の推進等に対応。「ITによる地域活性化等緊急プログラム」(2008年2月)、「IT政策ロードマップ」(2008年6月)、「重点計画 - 2008(2008年8月)」等を策定。

3. 達成目標

(1) 情報経済社会を形成する上で必要不可欠な基盤技術である情報通信機器・デバイス等に関しては、「革新的な技術の確立」と「その開発成果の普及促進」を図る。

【目標】

- ・情報通信機器・デバイス産業の付加価値額を、2020年度において、2008年度比で、約50%増加させる。
- ・半導体の微細化に係る革新的基盤技術の開発(テクノロジーノード45nm以細)
- ・革新的な大型ディスプレイ技術の開発(消費電力を現状機器と比較して約50%以下)

- ・革新的なネットワーク機器技術の開発（消費電力を現状機器と比較して60%以下）

(2) 経済社会システムの信頼性確保に大きく寄与する情報システム・ソフトウェアに関しては、品質、信頼性及び生産性の向上や産学官の開発リソースの連携強化により、「人材育成」と「ソフトウェア工学の開発」等を積極的に推進する。

【目標】

- ・情報サービス・ソフトウェア産業の付加価値額を、2015年度において、2004年度比で、約25%増加させる。
- ・組み込みシステム等の不具合発生率（2011年度までに2006年度比50%減）

4. 研究開発内容

[プロジェクト]

- ・ITコア技術の革新

[i] 世界最先端デバイスの先導開発

(1) 次世代半導体材料・プロセス基盤プロジェクト(MIRAI)(運営費交付金)

概要

テクノロジーノード45nm以細のデバイスの実現に必要な極限微細化技術や、新構造CMOSの研究開発などの既存技術のブレークスルーが期待される先端的基盤技術研究を行う。また、国際半導体ロードマップにおいてエマージングテクノロジーと呼ばれる萌芽的な先端基盤技術の開発に取り組み、技術の見極め・絞り込みを行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに半導体の微細化に関してテクノロジーノード45nm以細のデバイス実現に必要な革新的基盤技術を、産業界において自ら実用化に向けた展開を図る際の判断ができる水準まで技術開発を行い、技術選択肢として提示する。

研究開発期間

2001年度～2010年度

(2) 次世代低消費電力半導体基盤技術開発(MIRAI)(運営費交付金)(再掲)

概要

IT化の進展、IT利活用の高度化を支え、あらゆる機器に組み込まれている半導体の低消費電力化を図るため、テクノロジーノード(微細化レベル)45nm以細の次世代低消費電力半導体の実現を目指し、微細加工の基盤技術やマスク(半導体素子製造過程で用いる原板)の低コスト化・製造時間短縮に必要な基盤技術開発を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、マスク設計・描画・検査の各工程に共通的なマスクデータ処理技術、繰り返しパターンやパターン重要度を利用した描画・検査高速化技術等の基本的な開発及びEUVLマスク基盤技術として、許容欠陥の指標明確化、ブランクスの位相欠陥検査技術の確立等を完了する。

研究開発期間

2004年度～2010年度

(3) ドリームチップ開発プロジェクト(運営費交付金)

概要

あらゆる社会ニーズに情報技術が今後も迅速に対応し、夢の社会を創り上げるため新しい方向の半導体技術として、これまで平面的な構造に過ぎなかった半導体デバイスに、立体構造という新たな概念を取り込み、社会ニーズの要請に適確に対応すべく、産業・ユーザーと密接な連携をとりながら、多様な用途に応じた夢の新機能デバイス(ドリーム・チップ)を開発する。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、立体構造化技術を発展・統合し、これまでにない革新的な半導体(ドリームチップ)基盤技術を開発する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(4) 次世代プロセスフレンドリー設計技術開発(運営費交付金)(再掲)

概要

あらゆる機器に組み込まれている半導体の低消費電力化を図るため、テクノロジーノード45nm以細の半導体に対応するSoC(System on Chip)設計技術を開発する。具体的には、テクノロジーノード45nm以細の半導体の共通設計基盤技術開発として、DFM(Design For Manufacturing)基盤技術を中核とした設計及び製造の全体最適を確保する全く新しいSoC製造フローを開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

テクノロジーノード45nm以細のSoC開発において製造性を考慮した共通設計基盤技術を確立し、システムLSIデバイスの省エネルギーを実現するとともに、設計生産性を従来予想に比べ2倍にすることを目標とする。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(5) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 - うち新材料・新構造ナノ電子デバイス(運営費交付金)(再掲)

概要

従来の半導体は、性能の向上(高速化、低消費電力化、高集積化)を確保するために微細化が進められてきたが、絶縁性、誘電率等の物理的限界、微細化に伴う製造コストの増大など、集積度向上によるメリットが十分達成されなくなっている。

本研究開発では、シリコンで培った微細化技術やデバイス原理を活用しながら、シリコン材料の物理的限界を突破するための“新材料”および“新(デバイス)構造”の開発を行い、次世代の電子デバイス技術を確立する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、産業界が10年後を見据えた将来の電子デバイスを開発する際に、産業技術として活用できるかどうかの実現可能性を見極め、また技術シーズを確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(6) スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト (運営費交付金)(再掲)

概要

将来のエレクトロニクスにおいて中核的な基盤技術となり得るスピントロニクス技術 (電子の電荷ではなく、電子の自転 = 「スピン」を利用する全く新しいエレクトロニクス技術) を確立するため、強磁性体ナノ構造体におけるスピンの制御・利用基盤技術を開発し、我が国が世界に誇るシーズ技術を核として、産学官の共同研究体制を構築し、将来の中核的エレクトロニクス技術における我が国の優位性の確保を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、超高集積で高速な不揮発性メモリとして期待されるスピンメモリのための基盤技術を確立する。また、新ストレージ・メモリデバイス、不揮発性スピン光機能素子、スピン能動素子等の新しい動作原理によるスピン新機能素子の実現のための基盤技術を確立する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(7) 半導体機能性材料の高度評価基盤開発 (運営費交付金)(再掲)

概要

情報通信機器の高機能化や低消費電力化等の要求を満たす半導体集積回路を実現するため、新たな機能性材料開発に貢献する評価基盤技術を開発し、さらに開発した機能性材料を半導体及び半導体集積回路に適用できる統合的なソリューション技術を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術的目標及び達成時期

2011年度までに、半導体デバイス性能に直結する接合素子の性能性及び信頼性等、半導体製造プロセス全体を俯瞰しつつ機能性材料開発が可能となる評価基盤技術を開発し、開発した機能性材料を用いた統合的なソリューションが提案できる材料評価基盤を構築する。

研究開発期間

2009年度～2011年度

[ii] 半導体アーキテクチャの革新

(1) 半導体アプリケーションチッププロジェクト (運営費交付金)(再掲)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、情報通信機器、特に、情報家電 (車載を含む) の低消費電力化を実現できる半導体アプリケーションチップ技術の開発を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2009年度までに情報家電の低消費電力化を実現できるアプリケーションチップ技術を開発する。

研究開発期間

2003年度～2009年度

(2) 次世代回路アーキテクチャ技術開発事業

概要

大学等での優秀な人材による革新的な半導体デバイス技術の開発を促進するため、革新的なアイデアによる半導体デバイス技術の提案を募集し、研究開発により設計された半導体デバイスを実際の半導体デバイスとして試作・評価を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、本プロジェクトによって産業界が「実活用が期待できる」と評価する回路アーキテクチャを10件以上創出する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

[iii] 光技術の革新利用

(1) 低損失オプティカル新機能部材技術開発(運営費交付金)(再掲)

概要

近接場光の原理・効果を応用した低損失オプティカル新機能部材技術を開発し、実用化の目処を得ることを目的とする。動作原理に近接場光を用いるオプティカル新機能部材は、従来の材料特性のみに依存した光学部品では不可能な機能・性能を発揮し、液晶プロジェクター・液晶ディスプレイなど情報家電の省エネルギー、高性能・高信頼化を図る上でのキーデバイスとなることが期待できる。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、共通基盤技術として、ナノ構造部材の設計・作製・評価技術を開発するとともに、ナノ構造部材に発現する近接場光の機能を動作原理とする低損失オプティカル新機能部材を検討し機能を確認する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(2) 次世代光波制御材料・素子化技術(運営費交付金)(再掲)

概要

ガラス材料に関する精密モールド技術を確立し、機能性の高い光波制御素子を低コストで生産できるプロセス技術を開発することで部材の小型化・高機能化を図りつつ、省エネを実現する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2010年度までにサブ波長レベルの微細構造をガラス表面にモールド成形する技術を実現し、実装可能な具体的なデバイスを作製する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(3) 三次元光デバイス高効率製造技術(運営費交付金)(再掲)

概要

波面制御素子による空間光変調技術を確立し、ガラス中に三次元造形を高精度に一括形成できるプロセス技術を開発する。この技術を用いて、具体的な光デバイスを作製し、当該技術の有効性の確認と市場への早期参入のための基盤技術を確立する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに波面制御素子による空間光変調技術を用いたフェムト秒レーザー照射技術等を確立し、高精度の光デバイスを高速に作製できるプロセス技術を開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

・省エネ革新

[i] 情報ネットワークシステムの徹底的省エネの実現

(1) グリーンITプロジェクト(運営費交付金)(再掲)

概要

情報化社会の進展に伴うIT機器の消費電力の大幅な増大に対応し、抜本的な省エネを実現するため、サーバ、ネットワーク機器等の各装置の省エネに加え、省エネ型の巨大コンピューティング技術(グリーン・クラウドコンピューティング技術)、パワーエレクトロニクス技術等を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、IT機器・システムのエネルギー消費効率を2倍に向上させる基盤技術を開発する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(2) 次世代高効率ネットワークデバイス技術開発(運営費交付金)(再掲)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、ネットワークで伝送されるデータ量の爆発的増加に伴い、関連機器の消費エネルギーが増大している中で、ネットワーク全体の消費電力量を抑制することが喫緊の課題であり、消費エネルギーの低減に大きく貢献するルータ・スイッチの高速化のための研究開発を実施するとともに、機器そのものの消費エネルギーを低減するための研究開発を実施する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術的目標及び達成時期

2011年度までに、1チャンネルあたり40Gbps超の通信速度に対応するトラフィック計測・分析・管理技術や40Gbpsのインターフェース、さらなる通信速度向上(100Gbps超)を実現するハードウェア技術、SFQ(単一磁束量子)スイッチに関する基盤技術を開発する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) 次世代高効率エネルギー利用型住宅システム技術開発・実証事業 (再掲)

概要

ゼロ・エミッションハウスによる生活の大幅な省エネの実現に向け、家屋内直流配電システムや、電力需給の状態に応じた太陽電池等の分散型電源の制御、電力ネットワークを活用した家電の制御等、住宅全体としてエネルギーの最適制御を行うシステムの開発・実証を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術的目標及び達成時期

2011年度までに、直流給電・配電に関する規格の標準化、直流配電の電流・電圧の規格化、蓄電池設置に係る安全規制の改正に対する提案が可能となる技術を確立する。

研究開発期間

2009年度～2011年度

[ii] 情報機器の徹底的省エネの実現

(1) 次世代大型低消費電力ディスプレイ基盤技術開発 (運営費交付金)(再掲)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、次世代の大型液晶及び大型プラズマディスプレイに関する低消費電力ディスプレイを実現するための研究開発を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術的目標及び達成時期

2011年度までに、液晶に関しては、高効率バックライト、革新的な TFT アレイプロセス技術・製造装置及び低消費電力型の画像処理エンジン等に係る技術を確立する。また、プラズマディスプレイに関しては、超低電圧駆動等に係る技術を確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

[iii] 省エネを支えるプロセス基盤技術

(1) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 - うち窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発 (運営費交付金)(再掲)

概要

窒化物系化合物半導体は、パワーデバイス、高周波デバイス、発光デバイス等、重要なデバイスの飛躍的な性能向上と消費電力削減への貢献を期待されている。このため、従来の半導体材料では実現出来ない領域で動作可能なハイパワー・超高効率の電子素子、超高速電子素子等の作成に必要な窒化物系化合物半導体先進技術の国際競争力を強化すべく、高品質かつ大口径単結晶基板、高品質かつ大口径エピタキシャル成長技術等の開発を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、次世代窒化物系半導体デバイスを実現する以下結晶作製技術を開発する。

1) 基板技術 (GaN、AlNバルク結晶作製技術)

- ・口径2～4インチで高品質エピ成膜を可能とする低コストの単結晶基板作製技術の確立。

2) エピ技術 (エピタキシャル成膜及び計測評価技術)

- ・低欠陥高品質エピ層を実現する成膜技術及び膜成長過程を計測評価する技術の確立。
- ・高出力かつ高安定動作可能なエピ層の実現
- ・高耐圧超高速な新しいデバイス構造の開発

研究開発期間

2007年度～2011年度

・情報爆発への対応

ITの利活用による知の創造

(1) 情報大航海プロジェクト

概要

IT化の進展に伴い、現在、世界中において、情報量の「爆発」が起こっており、Web上のデジタル情報にとどまらず、社会活動のあらゆる場面において、情報の「創出」・「蓄積」がなされている。このため、個人情報や知的財産の適切な保護にも配慮しつつ、多種多様な大量の情報の中から必要な情報を簡便かつ的確に検索・解析するための技術開発を行うとともに、それらを用いた先進的な事業について実証することにより、技術の普及・展開を目指す。

技術的目標及び達成時期

2009年度までに、必要な情報を簡便かつ的確に検索・解析するための技術を開発し、汎用化してオープンに利用できるような共通基盤を構築する。

研究開発期間

2007年度～2009年度

(2) ITとサービスの融合による新市場創出促進事業

概要

サービスの生産性向上や新しいサービスを創出するため、サービス工学の手法を活用して、情報蓄積・解析技術等のサービス実現に必要な情報技術を特定し、それらを組み合わせることによって、業種横断的に活用可能な共通する基盤技術の技術開発に取り組むとともに、それらを用いた先進的な事業について公的な分野で実証し、共通化・汎用化を行ってオープンにし、情報蓄積・解析技術等を活用した新サービスを生み出す。

技術的目標及び達成時期

2012年度までに、サービスの生産性向上や多種多様な個人やビジネスのニーズ、社会的課題に応える新たなサービスを創出するための技術や方法論を確立し、サービス分野における新事業基盤を構築する。

研究開発期間

2009年度～2012年度

(3) 車載ITシステムを活用した緊急医療体制整備

概要

救急搬送時において救急センターや救急車側に医療機関のリアルタイム性を高めた情報を提供するとともに、医療機関までの最速な順路を示すことにより、適切かつ迅速な救急搬送体制の高度化に寄与するシステムを開発する。

技術的目標及び達成時期

2012年度までに、各医療機関における医療スタッフ状況に関する情報を収集するためのシステムの開発およびこれと救急センターと連結する車載器の開発、医療スタッフ状況情報収集システムと車載器とをネットワークで連結するシステムを開発する。

研究開発期間

2009年度～2012年度

・情報システム・ソフトウェアの安全性・信頼性・生産性の向上とオープンスタンダードの普及推進

(1) セキュアプラットフォームプロジェクト

概要

我が国産業のIT生産性の向上及び情報セキュリティレベルの底上げを図るため、異なる情報システムを一つのサーバ上に統合するだけでなく、これまで情報システムごとに別々に設定していた情報アクセス権限を統合し集中管理する機構を導入した革新的な仮想化技術(セキュア・プラットフォーム)の開発を行う。

技術的目標及び達成時期

2009年度までに、統合アクセス制御基盤や、それにより制御可能となるよう必要なアクセス機構を備えた仮想化機能等を開発する。

研究開発期間

2007年度～2009年度

(2) 産学連携ソフトウェア工学の実践(運営費交付金を含む)

概要

現場の技術者の経験則等に委ねられていたソフトウェア開発に、工学的手法を導入すべく、ソフトウェアエンジニアリング手法を開発・普及する。

最初の適用分野として自動車分野を取り上げ、車載制御用基盤ソフトウェア等の開発を行うとともに、工学的手法を適用して、統合システムの信頼性を向上させる設計ツールの開発にも着手する。

技術的目標及び達成時期

2009年度までに、本事業による成果をユーザやベンダなどの民間企業に広く普及し、活用することにより、我が国におけるソフトウェアの生産性及び信頼性を向上させる。

研究開発期間

2004年度～2009年度

(3) オープンソフトウェア利用促進事業(運営費交付金)

概要

誰もが利用できる標準化されたソフトウェアの活用を促進するため、その利用のための

技術的なガイド（技術参照モデル）の普及・改良や相互運用性を評価するための体制の整備等を進める。

技術的目標及び達成時期

2012年度までに、技術参照モデル（TRM）の開発・普及やOSSサポートに係る人材育成などを行うことにより、オープンスタンダードの普及推進を図る。

研究開発期間

2003年度～2010年度

（４）IT投資効率向上のための共通基盤開発プロジェクト

概要

我が国の生産性及び競争力の向上のため、情報家電をはじめとした分野でのIT投資を、競争領域と非競争領域に峻別し、非競争領域について共通基盤を開発・オープン化等を進めていく。海外の組込みソフトウェアの動向も調査することにより、国際的に通用する共通基盤の構築を目指す。あわせて情報システム分野において、海外の動向も踏まえつつ、業界横断的に利用可能な共通基盤を検討する。

技術的目標及び達成時期

非競争領域においては企業間で連携・強調し、IT投資の効率向上を図ることを目的とする共通基盤を2009年までに構築する。また、2010年までに共通基盤を用いた検証を行い、その結果を踏まえた上で、共通基盤の改善と産業界へ利用促進を図る。

研究開発期間

2008年度～2010年度

（５）ITSの規格化事業（第2フェーズ）

概要

主要国の自動車のITS技術及びその基盤となる電子化関連技術を調査し、今後標準化すべき分野の特定を行う。その結果をふまえ、標準化原案を作成し、ISOに提案を行う。また、当該原案が国際標準となるよう、ISOの国際会議に積極的に参加するとともに、随時、当該標準化原案の補強データを作成し、国際会議に提供する。

技術的目標及び達成時期

2010年度までにITSに係る標準化案を作成しISOに対して提案又は国際規格として制定する。また自動車の電子化技術に関して、次世代では日本が主導をとるべく戦略を策定。

研究開発期間

2006年度～2010年度

5．政策目標の実現に向けた環境整備

【法律】

- ・ 情報処理の振興を目的に、昭和45年に情報処理の促進に関する法律が制定。
- ・ 半導体集積回路の回路配置の適正な利用の確保を目的に、昭和63年に半導体集積回路の回路配置に関する法律が制定。

【税制】

- ・ 情報セキュリティ強化を確保しつつ生産性の向上を図るためのIT投資に対し、35%特別償却又は7%税額控除（情報基盤強化税制）。
- ・ ソフトウェアを含む機械装置等に対し、30%特別償却又は7%税額控除（中小企業投資促進税制）。

【国際標準化】

各プロジェクトで得られた成果のうち、標準化すべきものについては、適切な標準化活動（国際規格（ISO/IEC）、日本工業規格（JIS）、その他国際的に認知された標準の提案等）を実施する。特に、産学連携ソフトウェア工学の実践における組込みソフトウェア開発については、国際標準の動向を踏まえた開発を促進することにより、プロジェクトの成果の幅広い普及を促進する。

【関係機関との連携】

各プロジェクトのうち、研究開発を効率的・効果的に推進する観点から関係機関との連携が必要なものについては、これを積極的に行う。

但し、関係機関が行う研究開発等の独自性を妨げるものではない。

【導入普及促進】

成果の普及を図るため、これまでの終了プロジェクトの成果の全部または、一部についてはオープンソースソフトウェアとして公開する。また、高信頼な組込みソフトウェアの開発では、ソフトウェアエンジニアリングセンター（SEC）において提供される各種エンジニアリング手法を開発現場に適用し、当該技術の効果を明らかにしながら開発を進める。

【その他】

- ・ グラント事業
NEDOの産業技術研究助成事業を活用し、萌芽的・革新的な情報通信関係の技術シーズの発掘を行う。また、ソフトウェア分野の独創的な技術やビジネスシーズを有した人材を発掘する。
- ・ 事業終了後の連携
産学官連携の研究体制を通して活動を行い、これらの事業の終了後も各分野の研究者・技術者が有機的に連携し、更に新たな研究を作り出す環境を構築する。
- ・ 人材育成
ハードウェア分野においては、出来る限り大学との連携を重視し、各種フェローシップ制度を活用しつつ、最先端の情報通信基盤研究現場への学生等の参画を推進することにより次世代の研究開発人材の育成を図る。また、ソフトウェア分野における独創的な人材を発掘し、育成するとともに、優秀な人材が集うコミュニティを構築するなど、発掘された人材の才能をさらに伸ばすための取組を進める。
- ・ 広報／啓発
毎年10月を「情報化月間」としている。

6．研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの（事業名に（運営費交付金）と記載したものは、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で、当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

7．改訂履歴

- (1) 平成12年12月28日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画を制定。
- (2) 平成14年2月28日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画を制定。情報通信基盤高度化プログラム基本計画（平成12・12・27工総第12号）は廃止。
- (3) 平成15年1月31日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画を制定。情報通信基盤高度化プログラム基本計画（平成14・02・25産局第17号）及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画（平成14・02・25産局第18号）は、廃止。
- (4) 平成15年3月10日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画、次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画、次世代ディスプレイ技術開発プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。情報通信基盤高度化プログラム基本計画（平成15・01・29産局第1号）及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画（平成15・01・29産局第2号）は、廃止。
なお、情報通信機器高度化プログラム基本計画（平成15・01・29産局第1号）及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画（平成15・01・29産局第2号）の一部は、次世代ディスプレイ技術開発プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画へ移行。
- (5) 平成16年2月3日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。情報通信機器高度化プログラム基本計画（平成15・03・07産局第14号）、次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画（平成15・03・07産局第7号）、次世代ディスプレイ技術開発プログラム基本計画（平成15・03・07産局第4号）は、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画に統合することとし、廃止。また、情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成15・03・07産局第14号）は、廃止。
- (6) 平成17年3月25日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画を制定。高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画（平成16・02・03産局第1号）は廃止。また、平成17年3月31日付け、情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成16・02・03産局第2号）は廃止。
- (7) 平成18年3月31日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画（平成17・03・25産局第7号）及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成17・03・25産局第6号）は廃止。
- (8) 平成19年4月2日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画及び情

報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画（平成18・03・31産局第4号）及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成18・03・31産局第5号）は廃止。

- (9) 平成20年4月1日付け、ITイノベーションプログラム基本計画を制定。情報通信機器高度化・デバイス基盤プログラム基本計画（平成19・03・12産局第7号）及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成19・03・12産局第8号）は、本プログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (9) 平成21年4月1日付け、ITイノベーションプログラム基本計画を制定。ITイノベーションプログラム基本計画（平成20・03・27産局第1号）は、廃止。

経済産業省

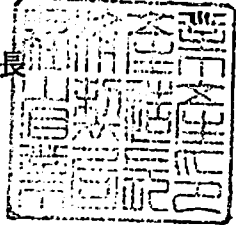
平成 21・03・25 産局第 1 号

平成 2 1 年 4 月 1 日

経済産業省産業技術環境局長



経済産業省製造産業局長



ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画の制定について

上記の件について、イノベーションプログラム実施要領（平成 1 6 ・ 0 7 ・ 2 7 産局第 1 号）第 4 条第 1 項の規定に基づき、別添のとおり制定する。

ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画

1. 目的

このプログラムは、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなど、あらゆる分野に対して高度化あるいは不連続な革新（ジャンプアップ）をもたらすナノテクノロジー及び革新的部材技術を確立するとともに、その実用化や市場化を促進することで、我が国産業の国際競争力の維持・強化や解決困難な社会的課題の克服等を可能とすることを目的とする。

2. 政策的位置付け

第3期科学技術基本計画（2006年3月閣議決定）

- ・「ナノテクノロジー・材料分野」は、特に重点的に研究開発を推進すべき分野（重点推進4分野）の一つに指定、優先的に資源配分することとされている。
- ・我が国の材料技術は、基礎研究から応用研究、素材、部材の実用化に至るまでの全ての段階において世界のトップレベルを堅持しており、我が国製造業の国際競争力の源泉となっている。

「イノベーション25」（2007年6月閣議決定）

- ・「ナノテクノロジー・材料分野」は、中長期的に取り組むべき課題として、「1.生涯健康な社会形成」、「2.安全・安心な社会形成」、「4.世界的課題解決に貢献する社会形成」、及び「5.世界に開かれた社会形成」の分野に位置付けられている。
- ・所要の措置を講じていくことが必要である事項として以下の点が指摘されている。
 - ・学際領域・融合領域における教育等人材育成、拠点形成
 - ・社会受容を促すための積極的な取り組み
 - ・知的財産確保のための戦略的な取り組み

「経済成長戦略大綱」（2006年7月財政・経済一体改革会議）

- ・「我が国の国際競争力の強化」の取り組みとして、高度な部品・材料産業やモノ作り中小企業の強化が掲げられている。
- ・「技術戦略マップ」の活用等により、ユーザー企業との垂直連携による研究開発を推進することを通して、我が国経済発展の基盤である高品質、高性能な部品・材料産業の強化を図ることが今後の取組として記載されている。

「新産業創造戦略2005」（2005年6月経済産業省）

- ・部材分野は、新産業群の創出を支える共通基盤技術として位置づけられている。
- ・「高度部材・基盤産業」の集積を形成していることが、「ものづくり」に不可欠な基盤技術のネットワーク化を通じた現場レベルでの迅速かつ高度な摺り合わせを可能としており、我が国「ものづくり」の強みの源泉となっていると記載されている。

3. 達成目標

- ・世界に先駆けて、ナノテクノロジーを活用した不連続な技術革新を実現する。

- ・我が国部材産業の強みを更に強化することで、他国の追随を許さない競争優位を確保するとともに部材産業の付加価値の増大を図る。
- ・ナノテクノロジーや高機能部材の革新を先導することで、これら部材を活用した情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなどの幅広い産業の付加価値の増大を図る。
- ・希少金属などの資源制約の打破、圧倒的な省エネルギー社会の実現など、解決困難な社会的課題の克服を目指す。

4．研究開発内容

[プロジェクト]

．ナノテクノロジーの加速化領域

ナノテクノロジーを活用した不連続な技術革新を加速・促進する。

(1) 異分野異業種融合ナノテクチャレンジ(運営費交付金)

概要

革新的なナノテクノロジーの研究開発を促進し、キーデバイスの早期実現を目指すため、大学や研究機関などの川上と企業などの川下の連携、異業種異分野の連携による提案公募によって、ナノテク実用化に向けたチャレンジを支援する。

技術目標及び達成時期

マテリアル・プロセス研究、加工・計測技術研究、昨今の環境意識向上に対応した研究、社会課題を解決するための基盤技術研究に加え、異分野等の融合研究を推進することにより、2011年度までにナノテクノロジーの産業化のための基盤的技術を確立し、実用化を図る。

研究開発期間

2005年度～2011年度

．情報通信領域

ナノテクノロジーや革新的部材開発技術を駆使して既存技術の微細化の壁を突破し、電子デバイス・光デバイスで世界をリードするとともに、高度化された製造技術の開発を行う。

(1) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 - うち新材料・新構造ナノ電子デバイス(運営費交付金)

概要

従来の半導体は、性能の向上(高速化、低消費電力化、高集積化)を確保するために微細化が進められてきたが、絶縁性、誘電率等の物理的限界、微細化に伴う製造コストの増大など、集積度向上によるメリットが十分達成されなくなっている。

本研究開発では、シリコンで培った微細化技術やデバイス原理を活用しながら、シリコン材料の物理的限界を突破するための“新材料”および“新(デバイス)構造”の開発を行い、次世代の電子デバイス技術を確立する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、産業界が10年後を見据えた将来の電子デバイスを開発する際に、産業技術として活用できるかどうかの実現可能性を見極め、また技術シーズを確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(2) スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト(運営費交付金)

概要

将来のエレクトロニクスにおいて中核的な基盤技術となり得るスピントロニクス技術(電子の電荷ではなく、電子の自転=「スピン」を利用する全く新しいエレクトロニクス技術)を確立するため、強磁性体ナノ構造体におけるスピンの制御・利用基盤技術を開発し、我が国が世界に誇るシーズ技術を核として、産学官の共同研究体制を構築し、将来の中核的エレクトロニクス技術における我が国の優位性の確保を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、超高集積で高速な不揮発性メモリとして期待されるスピンメモリのための基盤技術を確立する。また、新ストレージ・メモリデバイス、不揮発性スピン光機能素子、スピン能動素子等の新しい動作原理によるスピン新機能素子の実現のための基盤技術を確立する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(3) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 - うち窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発(運営費交付金)(再掲)

概要

窒化物系化合物半導体は、パワーデバイス、高周波デバイス、発光デバイス等、重要なデバイスの飛躍的な性能向上と消費電力削減への貢献を期待されている。このため、従来の半導体材料では実現出来ない領域で動作可能なハイパワー・超高効率の電子素子、超高速電子素子等の作成に必要な窒化物系化合物半導体先進技術の国際競争力を強化すべく、高品質かつ大口径単結晶基板、高品質かつ大口径エピタキシャル成長技術等の開発を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、次世代窒化物系半導体デバイスを実現する以下結晶作製技術を開発する。

1) 基板技術(GaN、AlNバルク結晶作製技術)

- ・口径2～4インチで高品質エピ成膜を可能とする低コストの単結晶基板作製技術の確立。

2) エピ技術(エピタキシャル成膜及び計測評価技術)

- ・低欠陥高品質エピ層を実現する成膜技術及び膜成長過程を計測評価する技術の確立。
- ・高出力かつ高安定動作可能なエピ層の実現
- ・高耐圧超高速な新しいデバイス構造の開発

研究開発期間

2007年度～2011年度

(4) 三次元光デバイス高効率製造技術(運営費交付金)

概要

波面制御素子による空間光変調技術を確立し、ガラス中に三次元造形を高精度に一括形成できるプロセス技術を開発する。この技術を用いて、具体的な光デバイスを作製し、当該技術の有効性の確認と市場への早期参入のための基盤技術を確立する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに波面制御素子による空間光変調技術を用いたフェムト秒レーザー照射技術等を確立し、高精度の光デバイスを高速に作製できるプロセス技術を開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(5) 低損失オプティカル新機能部材技術開発*(運営費交付金)(再掲)

概要

近接場光の原理・効果を応用した低損失オプティカル新機能部材技術を開発し、実用化の目処を得ることを目的とする。動作原理に近接場光を用いるオプティカル新機能部材は、従来の材料特性のみに依存した光学部品では不可能な機能・性能を発揮し、液晶プロジェクター・液晶ディスプレイなど情報家電の省エネルギー、高性能・高信頼化を図る上でのキーデバイスとなることが期待できる。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、共通基盤技術として、ナノ構造部材の設計・作製・評価技術を開発するとともに、ナノ構造部材に発現する近接場光の機能を動作原理とする低損失オプティカル新機能部材を検討し機能を確認する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(6) 超フレキシブルディスプレイ部材技術開発*(運営費交付金)(再掲)

概要

製造工程等の省エネルギー化を実現するために行う。従来、表示デバイスの製造には、真空蒸着と高温下での焼成と、それに伴う排ガス排水処理が必須であった。これを、ロールtoロール方式に代替することで常圧、常温下での製造を実現し、フレキシブルな薄型ディスプレイを製造する。そのために、有機TFT材料およびコンタクトプリント技術等を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術的目標及び達成時期

2009年度までに、実用化に向けた実証のための巻き取り方式ディスプレイのプロトタイプを試作する。またフレキシブルデバイス材料開発に貢献する部材ならびに薄膜複合化技術を開発し、これらをパネル化するための実用化技術を確立する。

研究開発期間

2006年度～2009年度

(7) 半導体機能性材料の高度評価基盤開発(運営費交付金)(再掲)

概要

情報通信機器の高機能化や低消費電力化等の要求を満たす半導体集積回路を実現するため、新たな機能性材料開発に貢献する評価基盤技術を開発し、さらに開発した機能性材料を半導体及び半導体集積回路に適用できる統合的なソリューション技術を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術的目標及び達成時期

2011年度までに、半導体デバイス性能に直結する接合素子の性能性及び信頼性等、半導体製造プロセス全体を俯瞰しつつ、機能性材料開発が可能となる評価基盤技術を開発し、開発した機能性材料を用いた統合的なソリューションが提案できる材料評価基盤を構築する。

研究開発期間

2009年度～2011年度

・ライフサイエンス・健康・医療領域

ナノテクノロジーを駆使して初めて可能となる診断・治療により革新的な医療を実現する。

(1) 次世代DDS型悪性腫瘍治療システムの研究開発事業(運営費交付金)

概要

DDSのさらなる裾野の拡大、及び早期実用化を目指し、様々な外部エネルギー(機器技術)と薬剤技術を組み合わせることにより、比較的人体の深部にある臓器(肺、消化器)等のがんを対象としたDDS型治療システムの開発を行う。

技術目標及び達成時期

光線力学治療システムの前臨床試験の開始及び治療効果・安全性の検証と、超音波診断・治療システムの前臨床試験を可能とする薬剤及び装置の完成に関する開発を難治性がんの治療に向けて行う。

研究開発期間

2006年度～2009年度

(2) 個別化医療実現のための技術融合バイオ診断技術開発(運営費交付金)(再掲)

概要

我が国が有する微細加工技術・表面処理技術といったナノテク等の強みを活かし、染色体異常を高感度、高精度かつ迅速、安価で非コード領域までを検出するゲノムアレイや解析基盤技術開発を行うとともに、全自動解析システムの開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、BAC(染色体の断片)を用いた非コード領域を含むゲノム全領域を検出できる高精度ゲノムアレイを開発する。さらに、臨床現場において、微量サンプル(数ナノグラム)から、12時間以内に染色体異常(増幅、欠失、コピー数多型等)を、低コストかつ定量性・再現性を確保して検出ができる自動染色体異常解析シス

テムのプロトタイプを開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(3) 分子イメージング機器研究開発プロジェクト(運営費交付金)

)生活習慣病超早期診断眼底イメージング機器研究開発プロジェクト

概要

細小血管の分子レベルでの代謝機能を非侵襲で可視化する細胞代謝イメージングを実現し、代謝異常を細胞レベルで観察することにより、生活習慣病に起因する血管病変等合併症の早期の診断・治療を図る。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、ナノテクノロジーを活用した光学基盤技術等を確立することにより、細胞やタンパク質レベルの組織診断を可能とする機器を開発する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

)悪性腫瘍等治療支援分子イメージング機器研究開発プロジェクト

概要

良性・悪性の区別も含めた腫瘍の超早期診断を実現するため、悪性腫瘍に特異的に反応する標的物質を利用することにより生体細胞の分子レベルの機能変化を抽出・検出できる機器の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、全身で3mm、局所で1mmの分解能を有する分子イメージング機器を開発する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

)新規悪性腫瘍分子プローブの基盤技術開発

「概要

分子イメージングにおいて、病変を可視化する分子プローブの開発を一層強化・促進するため、分子プローブの基盤要素技術と評価システムの開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、新規の近赤外蛍光分子プローブ及び小動物用近赤外蛍光イメージングシステムを試作し、同システムを用いて分子プローブのがん特異性を定量的に評価するための条件等を明らかにする。

研究開発期間

2008年度～2009年度

・エネルギー・資源・環境領域

ナノテクノロジーや革新的部材開発技術を駆使して、エネルギー・資源・環境等の社会的制約を克服すると同時に我が国の強みであるナノテク関連産業・部材産業の競争力を強化する。

() エネルギー制約の克服

(1) サステナブルハイパーコンポジット技術の開発 (運営費交付金) (再掲)

概要

炭素繊維複合材料は、軽量、高強度等の優れた特性を有している。従来の熱硬化性樹脂を用いた炭素繊維複合材料では成形性・加工性に乏しくリサイクルが困難であったため、熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維複合材料 (CFRTP) の開発を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、炭素繊維と熱可塑性樹脂との中間基材を開発し、高速成形技術、接合技術及びリサイクル技術を開発する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(2) マルチセラミックス膜新断熱材料の開発 (運営費交付金) (再掲)

概要

住宅やビルなどの冷暖房における大幅な省エネを実現する画期的な断熱性能を持つ壁および窓材料を、セラミックスのナノ多孔体構造やポリマー複合化構造などからなるマルチセラミックス膜アセンブリ技術によって開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、熱貫流率 (熱の伝わりやすさ) が $0.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ 以下、壁厚さ 10 mm 程度の超断熱壁材料および熱貫流率が $0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ 以下、光 (可視光) 透過率が 65% 以上 (Low-E ガラス使用)、ヘイズ率が 1% 以下の超断熱窓材料を実現する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) カーボンナノチューブキャパシタ開発プロジェクト (運営費交付金) (再掲)

概要

高純度、高密度に配向した長尺の単層カーボンナノチューブの大量合成技術を開発するとともに、これを用いた従来よりも格段にパワー (電力) と蓄電量が大きなキャパシタを開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、単層カーボンナノチューブの高度配向技術及び大量生産技術を確立するとともに、キャパシタ製造技術を確立することで、 20 Wh/Kg の高エネルギー密度と耐久性を有する電気二重層キャパシタを開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(4) 革新的省エネセラミクス製造技術開発(運営費交付金)(再掲)

概要

小型炉設備で生産可能な小型セラミック中空ユニットを複数組みあわせることで、これまでその製造が難しかった複雑形状かつ大型セラミクス部材を省エネで製作することができる革新的なセラミック部材製造技術を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2013年度までに、高機能化された小さな精密ブロックを立体的に組み上げ、高効率で接合、一体化をし、複雑形状や大型の部材を製造可能とする革新的なプロセス技術の基盤を確立し、高耐性部材、高温断熱部材及び高比剛性部材の試作を行う。

研究開発期間

2009年度～2013年度

(5) 革新的ガラス溶融プロセス技術開発(運営費交付金)(再掲)

概要

プラズマ等による高温を利用し瞬時にガラス原料をガラス化することにより、極めて効率的にガラスを気中で溶融(インフライトメルティング法)し省エネに資する革新的ガラス溶融プロセス技術を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、インフライトメルティング法により原料を溶解する技術、カレットをガラス原料として利用するため高効率で加熱する技術、カレット融液とインフライトメルティング法による原料融液とを高速で混合する技術を開発する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(6) 高温超電導電力ケーブル実証プロジェクト(運営費交付金)(再掲)

概要

革新的な高効率送電技術を確立して高温超電導ケーブルの実用化を促進するため、工業生産プロセスで実用化レベルに達している高温超電導線材(DI-BSCCO等)を活用し、首都圏の系統に接続する実証試験及び評価を行う。

なお、本事業は、発電用施設による電気の供給の円滑化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、200MVA級の中間接続部を有した三心一括型高温超電導ケーブルを、冷却装置や保護装置などの付帯設備とともに66KV実系統に接続して、12ヶ月以上の長期連系試験を行うことによって総合的な安全性や信頼性を実証する。

研究開発期間

2007年度～2012年度

(7) 発電プラント用超高純度金属材料の開発(運営費交付金)(再掲)

概要

超高純度金属材料を発電設備の蒸気配管等に実用化することを目指し、高純度金属材料の高度化に向けた低コスト・量産化製造技術を開発し、実使用環境における超高純度金属材料の耐久性試験等を行う。

なお、本事業は、発電用施設における電気の供給の円滑化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2009年までに、不純物総量100ppm未満、溶解量数100kg以上の低コスト・量産化技術製造技術を開発するとともに、製造された超高純度材料が発電プラントの各種機器に適用でき、本材料の持つ優れた特性を長期に亘って発揮できることを確認する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(8) セラミックリアクター開発(運営費交付金)(再掲)

概要

低温域かつ高効率なエネルギー変換を可能とする次世代型セラミックリアクターの実現のため、世界最高効率の燃料電池マイクロセルの集積構造技術等の開発を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、新電解質材料の適用や電極反応の高効率化等による、低温作動時(650以下)での出力性能を向上させる材料技術と共に、マイクロセルの集積構造化や精緻なインターフェース構築のための製造プロセス技術を開発。そして、これらの技術を統合することにより、次世代型セラミックリアクターとしてのプロトタイプモジュール実証(出力性能2kW/L等)を行う。

研究開発期間

2005年度～2009年度

() 資源制約の克服

(1) 希少金属代替材料開発プロジェクト(運営費交付金)

概要

ハイテク製品の製造に不可欠であり世界的な需給逼迫が懸念されるレアメタル(タングステン、インジウム、ディスプロシウム)について、ナノテクノロジー等の最先端技術を活用して、代替材料開発・使用量削減を行う。なお、平成21年度からは、これまでの対象3鉱種に加えて、白金、セリウム、テルビウム等も研究開発の対象とする。

技術目標及び達成時期

タングステン、インジウム、ディスプロシウムについては2011年度までに、白金、セリウム、テルビウム等については2013年度までに、使用原単位について現状と比較して削減ができる製造技術を開発し、ユーザー企業、大学等の外部機関に対して機能

評価のためにラボレベルで提供（試料提供）できる水準に至るまでの技術を確立することを目標とする。また、製品の機能や製造コストは現状と同等であることを少なくとも維持することを前提とする。

〔対象元素〕

- ・超硬工具向けタンゲステン（W）
- ・透明電極向けインジウム（In）
- ・希土類磁石向けディスプロシウム（Dy）
- ・排ガス浄化向け白金族（Pt）
- ・精密研磨向けセリウム（Ce）
- ・蛍光体向けテルビウム、ユーロピウム（Tb、Eu）

研究開発期間

2007年度～2013年度

（ ）環境制約の克服

（1）グリーン・サステナブルケミカルプロセス基盤技術開発

概要

化学品等の製造プロセスにおけるシンプル化、クリーン化、原材料・資源の多様化・有効利用、更に、廃棄物の減容化、容易なりサイクル等を実現し、産業競争力強化、国際規制の先取りを図って、将来にわたっても持続的に化学品等を製造するための必要なGSC（グリーン・サステナブルケミストリー）プロセスを開発する。

技術的目標及び達成時期

2015年度までに、有害な化学物質を削減できる又は使わない革新的な製造プロセス及び化学品の開発、廃棄物、副生成物を削減できる革新的な製造プロセス及び化学品の開発、資源生産性を向上できる革新的な製造プロセス及び化学品の開発を行う。

研究開発期間

2008年度～2015年度

（2）革新的マイクロ反応場利用部材技術開発*（運営費交付金）（再掲）

概要

マイクロリアクター、ナノ空孔などの精密反応場を利用し、反応分子の自由な運動を活性種レベルで制御した革新的な化学反応プロセスと新機能材料創成技術の確立を目指す。さらに、マイクロリアクターとナノ空孔反応場の組み合わせ、各反応場とマイクロ波等のエネルギー供給手段との組み合わせにより協奏的反応場を構成し、さらなる高効率生産等を可能にする基盤技術を開発する。これらの技術の確立により、反応システムの小型化、多段プロセスの簡略化等を通じた化学産業の製造工程等の省エネルギー化を図る。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術的目標及び達成時期

2010年度までに、マイクロリアクター技術、ナノ空孔技術を軸とし、これらに更にマイクロ波、超臨界流体等のエネルギー供給手段を組み合わせた協奏的反応場を構成

することにより、これまでにない革新的な化学反応プロセスを確立し、新機能材料創成技術を実現する。さらに、これらの技術を用いて高性能・高機能電子材料、医薬中間体などの部材を開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(3) 循環社会構築型光触媒産業創成プロジェクト(運営費交付金)

概要

我が国で発見された光触媒技術の新産業分野開拓を目指し、サイエンスにさかのぼることにより、紫外光のみならず、可視光レベルでの性能・機能の飛躍的な向上のための技術基盤を構築する。これにより、従来では困難とされてきた医療関連分野や住宅建材分野、環境関連分野等に光触媒技術を導入し、光触媒の最大のメリットである自然エネルギーを利用した安心・安全な環境を提供できる技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、材料レベルで紫外光応答型2倍、可視光応答型10倍の感度向上を達成し、その高感度光触媒を適用した薄膜プロセス技術の基盤技術を確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(4) 高感度環境センサ部材開発*

概要

ダイオキシンをはじめとする極微量有害有機物質を超高感度で安価かつ簡易に計測するために、高感度セラミックセンシング材料を用いた環境センサーを開発する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、ダイオキシン類、エストラジオール及びビスフェノールAについて、 $0.001 \text{ ng} \cdot \text{ml}$ の濃度において有意な電気信号として検出し得る小型・携帯型計測器に挿入可能な寸法のセンサ部材の開発を目標とする。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(5) 次世代高信頼性ガスセンサ技術開発(運営費交付金)(再掲)

概要

一酸化炭素中毒やガス漏れなどのガス事故を限りなくゼロに近づけるため、センサ素子のナノレベルでのメカニズム解析及び開発設計を行い、コードレスで高信頼性を有する次世代高信頼性ガスセンサ(COセンサ・メタンセンサ)を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、最先端のナノテクノロジー及びMEMS技術を導入し、電池駆動で5年以上の長寿命、高信頼性(数百ppm以下の故障率)、低コストなCOとメタンのセンサを開発する。

研究開発期間

2008年度～2011年度

・材料・部材領域

極めて広範囲な産業領域に波及する材料・部材領域について、ユーザー製造業等との連携（川上・川下連携）を促進し、高度な部材産業群の「すり合わせ力」を一層強化する。

（1）鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発（運営費交付金）（再掲）

概要

プラント、構造物や自動車等の革新的な高効率化、省エネルギー化、長寿命化、安全・安心化を図るため、最新の科学的知見を導入し、鉄鋼材料及び鋼構造体を超高機能化する基盤的研究開発を行う。具体的には、高強度鋼、高機能鋼の実用化拡大の基盤となる（1）高級鋼厚板（高強度鋼、極低温用鋼、耐熱鋼）溶接部の信頼性・寿命を大幅に向上する溶接施工技術（高密度・清浄熱源溶接技術）、及び金属組織制御技術を基本とする材料技術（クリーブ破壊及び水素破壊の機構解明等を踏まえた）の開発、（2）部材の軽量化を図るために強度、加工性等の最適機能傾斜を付与する機械部品鍛造技術（駆動部材の信頼性確保のための耐疲労破壊特性の向上を踏まえた）の開発を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、高級鋼厚板（高強度鋼・極低温用鋼・耐熱鋼）の溶接を予熱・後熱なしに可能とする溶接技術と材料技術を開発するとともに、傾斜機能部材の鍛造技術を開発する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

（2）超ハイブリッド材料技術開発（運営費交付金）

概要

従来実現が不可能と考えられていた相反する複数機能（トレードオフ機能）を両立できる材料を、異種素材の組合せ（ハイブリッド化）により実現するための技術を開発する。要素技術として、異種材料間の界面挙動をシミュレーション技術等により解明し、ナノレベルよりもさらに微小な原子・分子レベルでのハイブリッド化構造・配列制御のための合成技術を開発する。従来の単一材料では実現困難であったトレードオフの性能を引き出すことで、自動車用構造材料、パワーデバイス用材料、光学材料等を出口イメージとした、高機能革新部材製造に必要な技術基盤を開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、電気・電子材料、光学材料、その他工業材料について従来材料では実現できなかった相反機能を解消するとともに、市場評価が可能な成果物を供試し、市場（ユーザー）から、客観的な実用化研究開発課題を抽出する。また、単なる相反機能の解消ではなく、相反機能を制御・実現する技術を開発する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) 先端機能発現型新構造繊維部材基盤技術の開発 * (運営費交付金)

概要

電界紡糸や溶融紡糸等により創製される極微細な繊維状材料に対してナノオーダーの成形加工や微細な界面加工ならびに複合化することで材料を高機能化した革新的部材を創出する。高機能新材料を求めるユーザーの要望を満たす繊維の極微細加工と高次複合化を解決する基盤技術開発を行う。

技術的目標及び達成時期

2010年度までに、電界紡糸法による繊維高機能化、大型装置化技術およびナノ溶融分散紡糸法による超極細炭素繊維製造技術を開発し、これら基盤技術を活用して、高性能・高機能電池用部材、高性能・高機能フィルター用部材、高性能・高機能医療衛生用・産業用部材を開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(4) 次世代光波制御材料・素子化技術 * (運営費交付金) (再掲)

概要

ガラス材料に関する精密モールド技術を確立し、機能性の高い光波制御素子を低コストで生産できるプロセス技術を開発することで部材の小型化・高機能化を図りつつ、省エネを実現する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2010年度までにサブ波長レベルの微細構造をガラス表面にモールド成形する技術を実現し、実装可能な具体的なデバイスを作製する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(5) 高機能複合化金属ガラスを用いた革新的部材技術開発 (運営費交付金)

概要

複合化金属ガラス(金属ガラスマトリックス中に第二相として微結晶や微粒子または微小空隙等を分散させたもの)を創製して、次世代高密度記録媒体、超微小モータ用部材および高強度・高導電性電気接点部材を開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、複合化金属ガラス合金を創製し、従来の金属ガラス単層合金の持つ優れた特徴に加えて、塑性加工性、硬磁気特性、高電気伝導性等を付与する。この複合化金属ガラスの新規特性を用いて、従来の金属ガラス単層合金では為しえなかった革新的部材の開発を行い、さらに多様な工業製品に応用することで、我が国産業の優位性を確保する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(6) マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト* (運営費交付金)

概要

マグネシウム合金部材について、製品歩留まりが高く、高耐疲労性を付与する鍛造技術の開発を行う。また、循環型素材としてのマグネシウム合金部材の特性を活かし、リサイクル材の鍛造用ビレット化に係る課題抽出を行う。当該技術開発により、マグネシウム鍛造部材製造技術の基盤を構築し、我が国の家電、自動車等の川下産業の競争力の強化に不可欠な高度部材を供給する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに高強度・高耐疲労・加工性に優れたマグネシウム鍛造技術を確立する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

・ 共通基盤領域

ナノテクノロジー、部材分野の研究開発に必要な加工・計測・解析技術等の共通基盤の確立とともに、リスク不安に対処したリスク管理手法を開発し、社会に貢献する産業化の支援を相互的に推進する。

(1) ナノ粒子の特性評価手法開発 (運営費交付金)

概要

ナノ粒子のキャラクタリゼーション、計測技術の確立とともに、生体影響等評価手法、暴露評価手法及びナノテクノロジーによるリスク不安に対処したリスク管理手法を開発する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、生体影響等評価手法、暴露評価手法及びリスク評価手法を開発し、ナノ粒子のリスク評価及び管理の考え方の提言を行う。

研究開発期間

2006年度～2010年度

注：*印のある研究開発プロジェクトは、2006年度より開始された新産業創造高度部材基盤技術開発の一環として実施しているもの。

5. 政策目標の実現に向けた環境整備（関連施策）

ナノテクノロジーは、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなどの分野における科学技術の進歩や課題解決に貢献する重要な技術シーズである。そのため、ナノテクノロジーの研究開発と一体となった関連施策を実施することで、その成果を市場に出していくことが重要である。主な関連施策を、以下に示す。

〔技術戦略マップ〕

- ・NEDO及び経済産業省では、技術戦略マップを策定、毎年改訂し、ナノテクノロジー・部材分野の将来の方向性を見定めながら、合理的かつ効果的な研究開発プロジェクトを推進している。また、技術戦略マップを活用して、多様な連携（川上川下の垂直連携、異業種間の水平連携など）による研究開発を促進、支援し、当該分野の技術革新を促進している。

〔サンプル提供・実用化促進〕

- ・NEDOでは、実施するナノテクノロジー関連の研究開発プロジェクト成果のサンプルを対象として、それらを活用した用途の開発、実用化ないし製品化提案を有する企業とのマッチングを図ることで、プロジェクトの事業化を促進する取組みを実施している。

〔標準化〕

- ・経済産業省では、ナノテクノロジー関連の研究開発成果を社会及び市場等に普及するための環境整備として、ナノテクノロジーの標準化活動（ISO/IEC、JIS）を推進している。

〔広報〕

- ・ナノテクノロジーに関する先端技術及び製品等の世界最大の展示会である「nano tech」が毎年日本で開催されている。

〔社会受容〕

- ・ナノテクノロジーの産業化の推進とともに、ナノ粒子のキャラクタリゼーション技術や人の健康や環境に及ぼす影響等の潜在的な課題に関する知見を蓄積する等のナノテクノロジーの社会受容に対する取組みを推進している。
- ・経済産業省では、2006年度から「ナノ粒子の特性評価手法開発」を開始し、工業ナノ粒子の有害性評価手法、また、そのリスク評価手法の確立を目標としたプロジェクトを開始しているところ。
- ・OECDでは、2006年9月、化学品委員会に工業ナノ材料作業部会（WPMN）が設置され、代表的な14種の工業ナノ材料について、試験計画の合意と試験実施を目的とする「スポンサーシッププログラム」が実施されている。スポンサーシッププログラム対象物質のうち、カーボンナノチューブ（単層、多層）、フラーレンの3物質については日本が中心となって担当し、「ナノ粒子の特性評価手法開発」等の成果で貢献している。

〔人材育成〕

- ・経済産業省では、「製造中核人材育成事業」を実施しており、産学連携による波及効果の高い人材育成プログラムを開発、実践している。ナノテクノロジー関連の人材育成プログラムも複数実施している。

（例）ナノテク製造中核人材の養成プログラム

概要：情報家電、燃料電池、ロボット、医療機器、バイオ等の応用分野において、その産業の基盤と創出を支える中堅企業を対象として、「基礎加工技能・技術、特殊な要素技能・技術に習熟し、製造技術の高度化を図る人材」及び「豊富なナノ加工プロセスの知識や先端機器を使いこなすノウハウ等を習熟し、製造現場の技能・技術を統括できず人材」を育成するもの。

- ・ N E D Oでは、我が国の産業技術の発展のため、先端分野や融合分野の技術を支える人材の育成と、人的交流の面から産学連携を促進するための「場」の形成を促進する取組みを実施している（N E D O特別講座）。具体的には、優れた成果を生み出しつつあり、大学が技術の中核となっている研究開発プロジェクトをコアプロジェクトとし、そのプロジェクトリーダーの所属大学に拠点を設置し、関連技術の人材育成、人的交流の拡大、周辺研究の実施を行うもの。ナノテクノロジー関連の研究開発プロジェクトも複数実施している。

〔関係機関との連携〕

- ・ ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 - うち新材料・新構造ナノ電子デバイスプロジェクト、希少金属代替材料開発プロジェクトにおいては、文部科学省との合同会議を設置するなど、連携しつつプロジェクトを推進している。

〔他省庁との連携〕

- ・ 総合科学技術会議 / 連携施策群において、「ナノバイオテクノロジー」「ナノテク研究推進と社会受容」等が設置され、関係省庁と連携して実施している。

6．研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの（事業に（運営費交付金）と記載したもの）は、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で、当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

7．改訂履歴

- (1) 平成12年12月28日付け制定。
- (2) 平成14年2月28日付け制定。材料ナノテクノロジープログラム基本計画（平成12・12・27工総第16号）は、廃止。
- (3) 平成15年3月10日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成14・02・25産局第8号）は、廃止。
- (4) 平成16年2月3日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成15・03・07産局第1号）は、廃止。
- (5) 平成17年3月31日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成16・02・03産局第7号）は、廃止。
- (6) 平成18年3月31日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成17・03・25産局第4号）は、廃止。
- (7) 平成19年4月2日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成18・03・31産局第13号）は、廃止。
- (8) 平成14年2月28日付け制定。
- (9) 平成15年3月10日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成14・02・25産局第9号）は、廃止。
- (10) 平成16年3月7日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成15・03・07産局第5号）は、廃止。
- (11) 平成17年3月31日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成16・03・07産局第5号）は、廃止。
- (12) 平成18年3月31日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成17・03・25産局第3号）は、廃止。
- (13) 平成19年4月2日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成18・03・31産局第14号）は、廃止。
- (14) 平成20年4月1日付け、ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成19・03・20産局第1号）および革新的部材プログラム基本計画（平成19・03・19産局第4号）は、本イノベーションプログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (15) 平成21年4月1日付け制定。ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画（平成20・03・24産局第1号）は、廃止。

経 済 産 業 省

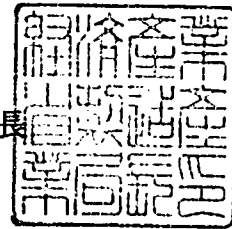
平成21・03・27産局第2号

平成21年4月1日

経済産業省産業技術環境局長



経済産業省製造産業局長



ロボット・新機械イノベーションプログラム基本計画の制定について

上記の件について、イノベーションプログラム実施要領（平成16・07・27産局第1号）第4条第1号の規定に基づき、別添のとおり制定する。

ロボット・新機械イノベーションプログラム基本計画

1. 目的

我が国の製造業を支えてきたロボット技術・機械技術を基盤とし、IT 技術・知能化技術など先端的要素技術との融合を促進することにより、家庭、医療・福祉、災害対応など幅広い分野で活躍する次世代ロボットや新機械技術の開発・実用化を促進し、生産性の向上と人間生活の質の向上を実現するとともに、我が国経済社会の基盤である製造業の競争力の維持・強化を目指す。

2. 政策的位置付け

経済財政改革の基本方針 2008 (2008 年 6 月閣議決定)

経済成長戦略の 3 本の柱、革新的技術創造戦略のうち、革新的技術戦略のひとつとしてロボット技術が位置付けられている。

科学技術基本計画 (2006 年 3 月閣議決定)

ロボット・新機械技術は、特に重点的に研究開発を推進すべき分野 (重点推進 4 分野) の一つである情報通信分野や、推進分野であるものづくり技術分野、社会基盤分野に位置付けられている。

「経済成長戦略大綱」(2006 年 7 月財政・経済一体改革会議。2008 年 6 月改定版を経済財政諮問会議に報告)

国際競争力の強化の取組みのうち、世界の潜在需要を喚起する新産業群の創出において、我が国が特に優位性を有し、早期にその成果を社会に還元するため、積極的な実証や環境整備を行うべき技術として、ロボットや MEMS 技術が位置付けられている。

「新産業創造戦略」(2005 年 6 月経済産業省取りまとめ)

先端的新産業分野として、「ロボット」を戦略 7 分野の一つとして掲げ、2010 (平成 22 年) までの市場規模、その成長に向けたアクションプログラムを盛り込んでいる。当該アクションプログラムには、ユーザ (施設、地域) を巻き込んだ実証試験を中心としたモデル開発事業による先行用途開発、モデル事業と連携した重要な要素技術や共通インフラ技術の開発支援、及び人間とロボットの共存に必要な安全性の確保と、保険制度等の制度基盤の整備が提示されている。

新機械技術の重要分野である MEMS 技術について、当該新産業群の創出を支える重点四分野 (「科学技術基本計画」による) の分野間の融合による推進が指摘されている。

「イノベーション 25」(2007 年 6 月閣議決定)

ロボット・新機械技術は、生涯健康な社会や多様な人生を送れる社会の実現に向けて、中長期的に取り組むべき課題として、新たな走行車等の普及促進のための環境整備、高度みまもり技術導入のためのルール作りなどの安全・安心な社会形成、また、ユビキタスネットワークや民生用ロボットの本格普及に向けた環境整備、低侵襲診断・治療技術の実現、安全・安心な社会のための将来デバイスの実現、さらに世界的課題解決に貢献する社会のための新しいものづくり技術など、今後の研究開発の進展等によって、その成果を社会に適用していく上で取組が必要であるとともに、随時見直しをし、その取組を加速・拡充していくことが必要とされている。

「ロボット産業政策研究会」報告書（2009年3月とりまとめ）

近い将来に、次世代ロボットが実際に役立つものになるよう、特に技術開発・事業開発、安全確保、社会ルールの整理・策定のための取組等についてまとめた。

3．達成目標

- (1) 我が国製造業の高度化に必要な基盤技術である機械分野においては、パイオ技術やIT技術等の異分野技術を活用した従来の機械の概念を超えた新しい機械の創造及びその計測技術の確立を図ることを目標とする。例えば、2015年頃に革新的MEMSの本格普及を目指すことにより、安全・安心な社会の構築に貢献する。
- (2) 安全・安心な社会、便利でゆとりある生活の実現のために必要不可欠なロボットは、信頼性技術、高機能化・知能化技術、システム化技術が特に重要であり、これら技術を開発することで、2015年頃には、自律的に多様な作業を行うロボットの実用化を目指す。

4．研究開発内容

[プロジェクト]

．ロボット技術開発

(1) 生活支援ロボット実用化プロジェクト（運営費交付金）

概要

介護者支援や移動支援等の生活支援にあたっては、人との接触度が高くなるため、より一層の安全性の確保が必要。このため生活支援ロボットの対人安全性技術の開発・実証と、安全基準設定等に向けた安全性・有効性データの集約・分析を実施する。

技術目標及び達成時期

2013年度までに、生活支援ロボットのリスクアセスメント手法や、安全性基準適合性評価手法・情報の蓄積提供手法を確立する。また、対人安全性に関する指標、機械・電気安全、機能安全の試験・評価方法や手順について、国際標準提案を行えるようにするとともに、実証試験を実施する。

研究開発機関

2009年度～2013年度

(2) 基盤ロボット技術活用型オープンイノベーション促進プロジェクト（運営費交付金）

概要

これまでの研究開発プロジェクトの成果を活用し、生活環境やロボットで使用される各種要素部品をRT(Robot Technology)システムで利用しやすい共通の接続方式、制御方式の下で利用可能な形で提供(RTコンポーネント化)するための基盤を開発する。これにより既存の生活環境を簡単にRTシステム化し、それらを活用することにより様々な生活支援機能の提供、基盤ロボット技術の普及と標準化を推進する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、共通の通信インタフェースとRTミドルウェアで動作させる基盤通信モジュール、既存の要素部品をRTコンポーネント化したRT要素部品、それらを用いたRTシステムを開発する。

研究開発期間

2008年度～2010年度

(3) 次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト(運営費交付金)

概要

生活空間や多品種少量生産の製造現場など状況が変わりやすい環境下では、ロボットの使用条件や用途は大きく限定されている。これを克服するため、ロボットが確実性(ロバスト性)をもって稼動し、ロボットの環境・状況認識能力等の向上とともに、ロボットの知能要素をモジュール化し、その蓄積管理及び組合せ等を可能とする技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、次世代ロボットが高度な作業(タスク)を行う上で必要な効率的で実用的な知能化技術を開発する。具体的には、魅力的でニーズが高いタスクを設定し、知能化技術モジュールを開発し、高機能なロボットシステムの構築を実証する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(4) 戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト(運営費交付金)

概要

市場ニーズ及び技術戦略マップに基づき、約10年後にロボット技術の活用により達成するミッションを設定した上で、これを達成するために必要なロボットシステム及び要素技術開発を、関係府省の連携の下で実施する。

技術目標及び達成時期

市場ニーズ及び技術戦略マップに基づき、約10年後にロボットを活用して達成するミッションを設定した上で、これを達成するために必要なロボットシステム及び要素技術の開発を実施する。具体的かつ先端的なRT開発を支援することで、我が国のRT競争力の維持・発展を図るとともに、研究開発成果の他分野(自動車、情報家電等)への波及を図る。

研究開発期間

2006年度～2010年度

・MEMSの技術開発・新機械産業の領域開拓

(1) 異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト(運営費交付金)

概要

高信頼性が必要な医療分野や特殊環境等で活用され、医療や安全・安心等の社会的課題を解決する、小型・高性能・省エネルギーな次世代デバイスの基盤プロセス技術を、MEMS製造技術とナノ・バイオ等の異分野技術の融合により開発する。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、次世代デバイス製造に必要な不可欠な基盤プロセス技術群である、バイオ・有機材料融合プロセス技術、3次元ナノ構造形成プロセス技術、マイクロ・ナノ構造大面積・連続製造プロセス技術を開発すると共に、得られた知見を系統的に蓄積しデータベース化し、従来の技術情報と統合的に取り扱える知識データベースシステム整備を行う。

研究開発期間

2008年度～2012年度

5. 政策目標の実現に向けた環境整備(成果の実用化、導入普及に向けた取組)

[導入普及促進]

ロボットやその関連部品等の見本市の開催等を支援することによって、システム開発者、要素部品の開発者、ロボットユーザ等との間のマッチングを図り、中小・ベンチャーや異業種企業のロボット産業への参入を促進する。

また、市場創出に貢献するロボットを表彰し、ロボットユーザ、メーカーから一般の方まで広くPRする表彰制度「今年のロボット」大賞を共催機関と協力して実施している。

開発したソフトウェア等の成果については、広く一般に提供するなど積極的な普及を図ることにより、より多くの開発主体がロボット技術開発に参加できる環境を創出し、ロボット技術開発の裾野の拡大を図る。

将来のロボットは人に接する場面が多くなるであろう。したがって、ロボットの導入・普及を促進するためには、安全に対する考え方を整理し、周知することが重要である。平成19年7月には人間と共存する次世代ロボットの安全性を確保するための基本的な考え方をまとめた「次世代ロボット安全性確保ガイドライン」をとりまとめた。今後は、普及や具体化に向けた取組みが求められており、技術開発と並行して安全に係るルールなどの整備を推進することで普及をより現実化させることが必要である。

MEMSの一層の実用化促進を図るため、異分野や製造設備を有していない企業でも容易にMEMSビジネスに参入できるように、MEMS用設計・解析支援システムを開発した。その成果を活用しつつ、実習を中心とした人材育成及び試作環境の充実、製造拠点(ファンドリー)強化などMEMS産業全体の競争力の維持・強化を図る。

[標準化]

各プロジェクトで得られた成果のうち、標準化すべきものについては適切な標準

化活動（国際規格（ISO/IEC）、日本工業規格（JIS）、その他国際的に認知された標準団体（OMG等）への提案等）を実施する。

特に、ロボットの安全基準や性能の評価基準については、過去に実施した研究開発プロジェクト等による実証データや「次世代ロボット安全性確保ガイドライン」の活用を図りつつ我が国発の国際標準としての提案について検討し、拡大するロボット市場における国際競争力の確保を目指す。

なお、これまでの研究施策の成果である、ロボット部分品の接続の共通化を目指したRTM（ロボット・テクノロジー・ミドルウェア）が、OMG（ソフトウェア技術の国際標準化団体）において、平成19年12月に標準仕様として採択されている。

MEMS技術・製品を世界市場に広く普及するために技術戦略マップに基づくMEMS標準化戦略の策定、国際規格案の開発、提案、推進等の標準化活動に継続的に取り組む。

6. 研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの（事業名に（運営費交付金）と記載したものは、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で、当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

7. 改訂履歴

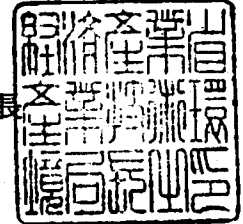
- (1) 平成14年2月28日付け、21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画制定。
- (2) 平成15年3月10日付け制定。21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画（平成14・02・25産局第3号）は、廃止。
- (3) 平成16年2月3日付け制定。21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画（平成15・03・07産局第11号）は、廃止。
- (4) 平成17年3月31日付け制定。21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画（平成16・02・03産局第16号）は、廃止。
- (5) 平成18年3月31日付け制定。21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画（平成17・03・25産局第18号）は、廃止。
- (6) 平成19年4月2日付け制定。21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画（平成18・03・31産局第7号）は、廃止。
- (7) 平成14年2月28日付け、新製造技術プログラム基本計画制定。
- (8) 平成15年3月10日付け制定。新製造技術プログラム基本計画（平成14・02・25産局第6号）は、廃止。
- (9) 平成16年2月3日付け制定。新製造技術プログラム基本計画（平成15・03・07産局第9号）は、廃止。
- (10) 平成17年3月31日付け制定。新製造技術プログラム基本計画（平成16・02・03産局第11号）は廃止。
- (11) 平成18年3月31日付け制定。新製造技術プログラム基本計画（平成17・03・25産局第5号）は、廃止。
- (12) 平成19年4月2日付け制定。新製造技術プログラム基本計画（平成18・03・31産局第6号）は、廃止。

- (1 3) 平成 2 0 年 4 月 1 日付け、ロボット・新機械イノベーションプログラム基本計画
制定。2 1 世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画(平成 1 9 ・ 0 3 ・ 1 5
産局第 2 号)及び新製造技術プログラム基本計画(平成 1 9 ・ 0 3 ・ 1 9 産局第
3 号)は、本イノベーションプログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (1 4) 平成 2 1 年 4 月 1 日付け制定。ロボット・新機械イノベーションプログラム基本
計画(平成 2 0 ・ 0 3 ・ 2 7 産局第 3 号)は、廃止。

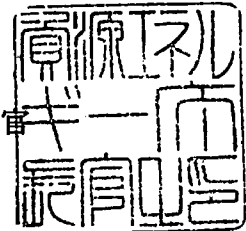
経済産業省

平成21・03・26産局第1号
平成21年4月1日

経済産業省産業技術環境局長



経済産業省資源エネルギー庁長官



エネルギーイノベーションプログラム基本計画の制定について

上記の件について、イノベーションプログラム実施要領（平成16・07・27産局第1号）第4条第1項の規定に基づき、別添のとおり制定する。

エネルギーイノベーションプログラム基本計画

1. 目的

資源に乏しい我が国が、将来にわたり持続的発展を達成するためには、革新的なエネルギー技術の開発、導入・普及によって、各国に先んじて次世代型のエネルギー利用社会の構築に取り組んでいくことが不可欠である。他方、エネルギー技術開発は、長期間を要するとともに大規模投資を伴う一方で将来の不確実性が大きいことから、民間企業が持続的な取組を行うことは必ずしも容易ではない。このため、政府が長期を見据えた将来の技術進展の方向性を示し、官民双方がこの方向性を共有することで、長期にわたり軸のぶれない取組の実施が可能となる。

エネルギー安全保障の確立や、世界全体の温室効果ガスを 2050 年までに半減するという長期目標を達成するため、以下に政策の柱毎に目的を示す。

1-1. 総合エネルギー効率の向上

1970 年代以来、官民をあげて省エネルギーに取り組み、産業構造の転換や新たな製造技術の導入、民生機器の効率改善等により世界最高水準の省エネルギーを達成している。今後、「新・国家エネルギー戦略」に掲げる、2030 年までに GDP あたりのエネルギー利用効率を約 30% 向上を実現していくためには、産業部門はもとより、全部門において、総合エネルギー効率の向上に資する技術開発とその成果の導入を促進する。

1-2. 運輸部門の燃料多様化

ほぼ 100% を石油に依存する運輸部門は、我が国エネルギー需給構造上、最も脆弱性が高く、その需給構造の次世代化は、将来に向けた早急な対策が不可欠な課題となっている。

「新・国家エネルギー戦略」に掲げる目標（2030 年に向け、運輸部門の石油依存度が 80% 程度となることを目指す）の実現のためにも、官民が中長期的な展望・方向性を共有しつつ、技術開発と関連施策を推進する。

1-3. 新エネルギー等の開発・導入促進

太陽光、風力、バイオマスなどの新エネルギーは、エネルギー源の多様化や地球温暖化対策の観点から重要である。しかし、現時点では経済性や出力安定性といった普及へ向けての課題が存在する。

そのため、これらの課題解決に向けた技術開発の推進及び新エネルギーの導入促進のための関連施策の実施により、更なる新エネルギーの普及を推進する。

1-4. 原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

原子力発電は供給安定性に優れ、運用時に CO₂ を排出しないクリーンなエネルギー源である。安全確保を大前提に核燃料サイクルを含む原子力発電を着実に推進する。

1-5. 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

化石燃料資源の大宗を輸入に依存する我が国にとって、その安定供給の確保は国家安全保障に直結する課題である。このため、石油・天然ガス等の安定供給確保を目指し、我が国企業による資源国における資源開発等に対する支援等の施策を進めるとともに、その有効かつクリーンな利用を図る。

2. 政策的位置付け

低炭素社会づくり行動計画（2008年7月閣議決定）

2008年6月の福田総理（当時）のスピーチ「福田ビジョン」等を受け、我が国が低炭素社会へ移行していくための具体的な道筋を示すため、国全体を低炭素化へ動かす仕組みや革新的な技術開発、国民一人ひとりの行動を促すための取組について策定。

「環境エネルギー技術革新計画」や「Cool Earth - エネルギー革新技術計画」等に示された革新的技術の開発に5年間で300億ドル程度を投入するという具体的な目標が示された。

環境エネルギー技術革新計画（2008年5月）

温室効果ガスの大幅な削減を目指すだけでなく、エネルギー安全保障、環境と経済の両立、開発途上国への貢献等を考慮し、以下の戦略等を策定。

1. 低炭素社会実現に向けた我が国の技術戦略
2. 国際的な温室効果ガス削減策への貢献策
3. 革新的環境エネルギー技術開発の推進方策

Cool Earth - エネルギー革新技術計画（2008年3月）

2007年5月の総理イニシアティブ「クールアース50」を受け、世界全体の温室効果ガスの排出量を現状に比して2050年までに半減するという長期目標を達成するため、エネルギー分野における革新的な技術開発について検討をおこない、21の技術を選定。

エネルギー基本計画（2007年3月閣議決定）

重点的に研究開発のための施策を講ずべきエネルギーに関する技術及びその施策として、

1. 総合エネルギー効率の向上に資する技術
2. 原子力利用の推進とその大前提となる安全の確保に資する技術
3. 運輸部門のエネルギー多様化に資する技術
4. 新エネルギーに関する技術
5. 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用に資する技術

以上が位置づけられている。

新・国家エネルギー戦略（2006年5月）

世界最先端のエネルギー需給構造の実現を図るため

1. 省エネルギーフロントランナー計画
2. 運輸エネルギーの次世代化計画
3. 新エネルギーイノベーション計画
4. 原子力立国計画

以上の計画が位置づけられている。また、資源外交、エネルギー環境協力の総合的な強化を図るため、「総合資源確保戦略」が位置づけられている。

第3期科学技術基本計画（2006年3月閣議決定）

国の存立にとって基盤的であり国として取り組むことが不可欠な研究開発課題を重視して研究開発を推進する「推進4分野」であるエネルギー分野、分野別推進戦略（2006年3月総合科学技術会議）における「推進4分野」であるエネルギー分野に位置付けられている。

経済成長戦略大綱（２００６年７月財政・経済一体改革会議）

資源・エネルギー政策の戦略的展開として

- １．省エネルギーフロンティア計画
- ２．次世代自動車・燃料イニシアティブ等による運輸エネルギー次世代化
- ３．新エネルギーイノベーション計画
- ４．原子力立国計画
- ５．資源外交、環境・エネルギー協力等の総合的な強化

以上が位置づけられている。

京都議定書目標達成計画（２００５年４月閣議決定）

「京都議定書の約束を達成するとともに、更に「脱温暖化社会」に向けて長期的・継続的な排出削減を進めるには、究極的には化石燃料への依存を減らすことが必要である。環境と経済の両立を図りつつ、これらの目標を達成するため、省エネルギー、未利用エネルギーの利用等の技術革新を加速し、効率的な機器や先進的なシステムの普及を図り、世界をリードする環境立国を目指す。」とされている。

３．達成目標

３ - 総合エネルギー効率の向上

転換部門における「エネルギー転換効率向上」、産業部門における「製造プロセス効率向上」、民生・運輸部門における「省エネルギー」などにより、GDP当たりのエネルギー消費指数を２０３０年度までに少なくとも３０％改善することを目指す。

３ - 運輸部門の燃料多様化

バイオマス由来燃料、GTL、BTL、CTLなどの新燃料、電気自動車や燃料電池自動車などの導入により、現在ほぼ１００％の運輸部門の石油依存度を２０３０年までに８０％程度とすることを目指す。

３ - 新エネルギー等の開発・導入促進

太陽光、風力、バイオマスなどの新エネルギーの技術開発や燃料電池など革新的なエネルギー高度利用を促進することにより、新エネルギー等の自立的な普及を目指すことで、エネルギー源の多様化及び地球温暖化対策に貢献する。

３ - 原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

２０３０年以降においても、発電電力量に占める比率を３０～４０％程度以上とすることを目指すため、高速増殖炉サイクルの早期実用化、既設軽水炉代替へ対応する次世代軽水炉の開発、軽水炉技術を前提とした核燃料サイクルの確立、放射性廃棄物対策などの技術開発を推進する。

３ - 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

石油・天然ガスの化石燃料の安定供給確保を目指し、資源獲得能力の強化に資する先端的な技術開発を推進するとともに、環境負荷低減のために化石燃料の効率的かつクリーンな利用を促進するための技術開発・導入を目指す。

4. 研究開発内容

4 - . 総合エネルギー効率の向上

4 - - . 共通

(1) 省エネルギー革新技术開発事業 (運営費交付金)

概要

テーマ公募型事業として、「Cool Earth-エネルギー革新技术計画」に基づき、「先導研究」、「実用化開発」及び「実証研究」の3つの技術開発フェーズに加え、「挑戦研究」フェーズを追加し、革新的な省エネルギー技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

世界全体の温室効果ガス排出量を現状に比べて2050年までに半減するという長期目標を実現するための「Cool Earth-エネルギー革新技术計画」の主旨に基づき、大幅な省エネルギー効果を発揮する革新的なエネルギー使用合理化技術について研究開発・実用化を推進する。

研究開発時期

2003年度～2013年度

(2) エネルギー使用合理化産業技術研究助成事業 (運営費交付金)

概要

産業界や社会のニーズに応える省エネルギー技術のシーズの発掘とその育成、並びに、省エネルギー技術に関する次世代の研究リーダーの育成を図る。この目的のため、産業界からの期待が高い技術領域・課題を提示した上で、大学や独立行政法人の研究者等から研究開発テーマを募集する。厳正な外部評価によって省エネルギー効果があり且つ独創的・革新的なテーマを選定し、研究者代表者個人を特定して助成金を交付する。

技術的目標及び達成時期

独創性のある研究者等を助成すると共に、中間評価ゲート方式が醸成する競争的環境の下で企業との連携を強化させることにより、10～15年後の実用化が有望な革新的省エネルギー技術の研究開発を促進する。本事業では革新的省エネルギー技術の実用化への第1歩となる特許について、助成期間終了後の出願比率を100%とすることを目標とするとともに、省エネルギー技術に関する次世代の研究リーダーの育成を図る。

研究開発期間

2000年度～

(3) 新エネルギー技術実用化補助事業 (運営費交付金)(4 - - 参照)

(4) 非化石エネルギー産業技術研究助成事業 (運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . 超燃焼システム技術

(1) 環境調和型製鉄プロセス技術開発 (運営費交付金) (再掲)

概要

高炉ガスからの効率的な二酸化炭素分離と中低温排熱の有効活用及び水素を炭素(コークス)の一部代替として鉄鉱石を還元する革新的製鉄プロセスの開発を行う。

技術的目標及び達成時期

最終的な技術開発目標として製鉄プロセスにおけるCO₂排出量を30%削減することを目指し、2050年までに実用化する。

研究開発期間

2008年度～2017年度

(2) 資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発 (運営費交付金)

概要

高品位な製鉄材料(鉄鉱石・石炭等)の入手が困難になってきていることから、原料使用量の低減及び、比較的入手が容易な低品位原料の使用拡大を図ることが喫緊の課題となっている。本技術開発では、還元剤として低品位な石炭と鉄鉱石の塊成物を開発し、炉内反応の高速化・低温化を実現することにより、省エネルギーで高効率な革新的製鉄プロセスを開発する。

技術的目標及び達成時期

2011年度までに、革新的塊成物の組成・構造条件の探索、革新的塊成物の製造プロセス、革新的塊成物による高炉操業プロセスを開発する。これらによる効果は、年産400万トン規模の中型高炉に適用した場合の炭材使用量のうち高品位炭使用量が約80%から50%程度に削減可能となるとともに、革新的塊成物を高炉に使用する操業技術の改良による還元材比の低減により、新開発のプロセスを含めた製鉄プロセスでの投入エネルギーは約10%削減される。

研究開発期間

2009年度～2011年度

(3) 革新的ガラス溶融プロセス技術開発 (運営費交付金)

概要

プラズマ等による高温を利用し瞬時にガラス原料をガラス化することにより、極めて効率的にガラスを気中で溶融(インフライトメルティング法)し省エネに資する革新的ガラス溶融プロセス技術を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術的目標及び達成時期

2012年度までに、インフライトメルティング法により原料を溶解する技術、カレットをガラス原料として利用するため高効率で加熱する技術、カレット融液とインフライトメルティング法による原料融液とを高速で混合する技術を開発する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(4) 革新的マイクロ反応場利用部材技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、マイクロリアクター、ナノ空孔などの精密反応場を利用し、反応分子の自由な運動を活性種レベルで制御した革新的な化学反応プロセスと新機能材料創成技術の確立を目指す。さらに、マイクロリアクターとナノ空孔反応場の組み合わせ、各反応場とマイクロ波等のエネルギー供給手段との組み合わせにより協奏的反応場を構成し、さらなる高効率生産等を可能にする基盤技術を開発する。これらの技術の確立により、反応システムの小型化、多段プロセスの簡略化等を通じた化学産業の製造工程等の省エネルギー化を図る。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術的目標及び達成時期

2010年度までに、マイクロリアクター技術、ナノ空孔技術を軸とし、これらに更にマイクロ波、超臨界流体等のエネルギー供給手段を組み合わせた協奏的反応場を構成することにより、これまでにない革新的な化学反応プロセスを確立し、新機能材料創成技術を実現する。さらに、これらの技術を用いて高性能・高機能電子材料、医薬中間体などの部材を開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(5) 鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発(運営費交付金)

概要

プラント、構造物や自動車等の革新的な高効率化、省エネルギー化、長寿命化、安全・安心化を図るため、最新の科学的知見を導入し、鉄鋼材料及び鋼構造体を超高機能化する基盤的研究開発を行う。具体的には、高強度鋼、高機能鋼の実用化拡大の基盤となる(1)高級鋼厚板(高強度鋼、極低温用鋼、耐熱鋼)溶接部の信頼性・寿命を大幅に向上する溶接施工技術(高密度・清浄熱源溶接技術)及びクリープ破壊、金属組織制御技術を基本とする溶接材料技術(クリープ破壊及び水素破壊の機構解明等を踏まえた)の開発、(2)部材の軽量化を図るために強度、加工性等の最適機能傾斜を付与する機械部品鍛造技術(駆動部材の信頼性確保のための耐疲労破壊特性の向上を踏まえた)の開発を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、高級鋼厚板(高強度鋼・極低温用鋼・耐熱鋼)の溶接を予熱・後熱なしに可能とする溶接技術と材料技術を開発するとともに、傾斜機能部材の鍛造技術を開発する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(6) 希少金属等高効率回収システム開発

概要

小型電子・電気機器にはベースメタルや、金、銀等の貴金属の他、インジウム、ニッケル等の希少金属等を含有している。現状では、これらの機器が廃棄された後は、非常に高温で処理する乾式製錬技術を用いてリサイクル・処理されているため、多大なエネルギーを消費するばかりか、回収可能な金属が銅、金、銀等に限定されており、その他の希少金属等は回収できずに廃棄処分されている。このため、湿式製錬技術を活用した高効率な最適技術の開発等を通じて、回収工程の省エネルギー及び希少金属等の回収率向上を図る。

技術目標及び達成時期

- ・ 従来方法(乾式製錬)で処理する場合に比べて、大幅な省エネルギーの実現(省エネルギー効果:原油換算で約78万kL/年削減)
- ・ 廃小型電子・電気機器、廃超硬工具等中に含まれる希少金属等の回収率の向上(インジウム0%→90%、ニッケル50%→95%、コバルト0%→95%、タンタル0%→80%、タングステン90%→95%、レアアース0%→80%)

研究開発期間

2007年度～2010年度

(7) 低品位鉱石・難処理鉱石に対応した革新的製錬プロセス技術の研究開発

概要

世界的な鉱石品位の低下、不要元素等の不純物の増加に対応するため、我が国非鉄金属業においては、低品位鉱石の利用拡大による我が国の鉱物資源の安定供給確保の強化が喫緊の課題となっているため、低品位・難処理鉱石の革新的な省エネルギー型の製錬プロセスを開発する。

技術目標及び達成時期

低品位鉱石及び難処理鉱石から効率的に銅等有用な非鉄金属を回収するため、低品位鉱石・難処理鉱石に対応した省エネルギー型プロセスによる新たな選鉱技術、製錬技術及び不純物対策技術の研究開発を行う。

(1) 高品位精鉱回収技術

低品位鉱石・難処理鉱石から高品位の精鉱を得る選鉱技術の開発。

ハンドリングが難しい極微細鉱等難処理鉱を処理する製錬技術の開発。

(2) 有用金属の抽出等回収技術

低品位精鉱から含有金属を高効率に回収する製錬技術の開発。

(3) 高濃度不純物の除去等対策技術

不要な元素(ヒ素、ビスマス、アンチモン等)等を多く含む精鉱からの不純物除去、分離、安定化等技術の開発。

上記要素技術を開発し、将来的にエネルギー消費原単位の悪化が予測される非鉄金属製錬について、省エネルギー見込み量、原油換算約2.6万KLを達成。

研究開発期間

2009年度～2012年度

(8) 環境調和型水循環技術開発

概要

我が国が強みを持つ、膜技術を始めとする水処理技術を強化し、省水型・環境調和型の水循環システムの開発に資する省エネ・省水型の要素技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2013年度までに、以下の技術を開発する。

- 革新的膜分離技術の開発：

従来法に比べ膜透過加圧エネルギー等を50%以上削減。

- 省エネ型膜分離活性汚泥法（MBR）技術の開発：

従来法に比べ膜洗浄の曝気（空気気泡）エネルギー等を30%以上削減。

- 有用金属・有害物質の分離・回収技術の開発：

従来法に比べ汚泥の削減により汚泥処理・処分エネルギーを80%以上削減。

- 高効率難分解性物質分解技術の開発：

従来法に比べ窒素処理に係るエネルギーを50%以上削減。

オゾン酸化法等のエネルギーを50%以上削減。

研究開発期間

2009年度～2013年度

(9) 微生物機能を活用した環境調和型製造基盤技術開発

i) 微生物機能を活用した高度製造基盤技術開発（運営費交付金）

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、省エネルギーかつ環境負荷が少ないといった特徴を有する微生物機能を活用した有用物質の革新的な生産プロセス（モノ作り）の技術を構築するため、産業用途に必要な機能既知遺伝子で構成されたゲノムを持ち、物質生産性向上につながる性能を備えた高性能宿主細胞の創製や、微生物反応の多様化・高機能化技術を開発するとともに、バイオマスを原料として有用物質を体系的かつ効率的に生産する（バイオリファイナリー）ための基盤技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、物質生産性向上につながる性能を備えた高性能宿主細胞を創製するとともに、バイオプロセスの実用化適用範囲の拡大のための微生物反応の多様化・高機能化技術の開発を行う。バイオリファイナリー技術については、バイオマスを高効率で糖化し、糖から高効率で各種化成品の基幹物質を生産するバイオプロセス体系を構築する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

ii) 微生物群のデザイン化による高効率型環境バイオ処理技術開発（運営費交付金）

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、従来エネルギー多消費・廃棄物多排出型であった廃水・廃棄物処理において、微生物群の構成及び配置等を人為的に制御（デザイン化）することで、その処理効率を大幅に向上させ、省エネルギーで廃棄物も少ない高効率型廃水、廃棄物処理の基盤技術を確立する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、特定有用微生物群を人為的に安定導入・維持もしくは人為的に空間配置・優先化させる等のデザイン化技術を開発し、従来の廃水、廃棄物処理に比べより高効率で省エネルギーな処理技術を開発するとともに、実用化に資するための実証可能なテストプラント規模にて評価する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(10) 省エネルギー型化学技術創成研究開発補助事業

概要

化学企業が有する技術シーズの中で、省エネルギーのポテンシャルが大きいにもかかわらず民間だけで事業を進めるには開発リスクが大きいこと等がネックになって十分な研究開発費が投じられていない技術に対して、戦略的な研究開発支援を実施することにより、化学産業のみならず、各種最終製品や他産業において抜本的なエネルギー効率の改善を促進するものである。

技術的目標及び達成時期

2010年度までに、将来の発展が有望な技術に関する研究開発の実施とその実用化と普及を通し、化学産業のみならず他分野も含めた我が国省エネルギー対策への一層の寄与を目標とする。

研究開発期間

2004年度～2010年度

(11) エネルギー使用合理化繊維関連次世代技術開発

概要

製造エネルギーの低減を図ることができる革新的な繊維製品製造技術の開発や、使用することでエネルギー消費の低減が可能となる新たな繊維製品を開発。

技術的目標及び達成時期

2010年度までに、以下の開発を行う。

次世代資材用繊維の開発

ポリエチレンテレフタレート製造エネルギー低減技術の開発

研究開発期間

2005年度～2009年度

(12) 高効率ガスタービン実用化技術開発

概要

省エネルギー及びCO₂削減の観点から電力産業用高効率ガスタービンの実用化を目指し、大容量機(25万kW程度(コンバインド出力40万kW))の高効率化(52%~56%)のために1700級ガスタービンの実用化に必要な先端要素技術を適用した各要素モジュールの検証等を実施する。また、小中容量機(10万kW程度)の高効率化(45%~51%)のために有望とされている高湿分空気利用ガスタービンの実用化に必要な多段軸流圧縮機、多缶燃焼器等の開発を行うとともにシステムの信頼性等の検証を行う。

技術的目標及び達成時期

1700級ガスタービン実用化技術開発：先端要素技術を活用した燃焼器、タービン、圧縮機等各モジュールの検証等を行い、送電端熱効率56%以上の達成が可能なことを確認する。

高湿分空気利用ガスタービン実用化技術開発：2011年までに軸流圧縮機の3.5%(空気重量比)吸気噴霧冷却技術、低NO_x燃焼技術(運用負荷帯で10ppm以下)等を開発すると共に、実機に近い条件での要素機器の信頼性・耐久性を確認する。

研究開発期間

2008年度~2011年度

(13) エネルギー使用合理化高効率パルプ工程技术開発(運営費交付金)

概要

紙パルプ産業では、環境に関する自主行動計画に基づき、2010年度までに製品当たり化石エネルギー原単位を1990年度比13%削減し、CO₂排出原単位を10%削減することを目指し、紙パルプ工程における省エネルギー対策を着実に進めているものの、より一層の省エネルギー対策を進めるためには、技術開発によるブレークスルーが必要となっている。紙パルプ産業は、エネルギー多消費型産業のひとつであり、紙パルプ工程での省エネルギー対策は波及効果が大きいことから、紙パルプ工程におけるエネルギー使用合理化に資する技術開発を提案公募により実施する。

技術的目標及び達成時期

京都議定書の第1約束期間中、又は、第2約束期間中を目途として実用化に至るような技術開発を行うことで、京都議定書の第1約束期間の目標を着実に達成するとともに、現在、検討が行われている第2約束期間に向けた省エネルギー対策の更なる深化を進めていく。

研究開発期間

2005年度~2010年度

(14) 革新的省エネセラミックス製造技術開発(運営費交付金)

概要

小型炉設備で生産可能な小型セラミック中空ユニットを複数組みあわせること

で、これまでその製造が難しかった複雑な形状を持つ大型セラミックス部材を省エネで製作することができる革新的なセラミック部材製造技術を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。
技術目標及び達成時期

2013年度までに、高機能化された小さな精密ブロックを立体的に組み上げ、高効率で接合、一体化をし、複雑な形状の部材や大型の部材を製造可能とする革新的なプロセス技術の基盤を確立し、高耐性部材、高温断熱部材及び高比剛性部材の試作を行う。

研究開発期間

2009年度～2013年度

- (15) 発電プラント用超高純度金属材料開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (16) 先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発(4 - - 参照)
- (17) 噴流床石炭ガス化発電プラント開発(4 - - 参照)
- (18) 石油精製高度機能融合技術開発(4 - - 参照)

4 - - . 時空を超えたエネルギー利用技術

- (1) カーボンナノチューブキャパシタ開発プロジェクト(運営費交付金)

概要

高純度、高密度に配向した長尺の単層カーボンナノチューブの大量合成技術を開発するとともに、これを用いた従来よりも格段にパワー(電力)と蓄電量が大きなキャパシタを開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。
技術目標及び達成時期

2010年度までに、単層カーボンナノチューブの高度配向技術及び大量生産技術を確立するとともに、キャパシタ製造技術を確立することで、20Wh/Kgの高エネルギー密度と耐久性を有する電気二重層キャパシタを開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

- (2) イットリウム系超電導電力機器技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (3) 高温超電導電力ケーブル実証プロジェクト(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (4) 固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (5) 燃料電池先端科学研究(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (6) 固体酸化物形燃料電池システム要素技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (7) 水素貯蔵材料先端基礎研究事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (8) 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (9) 固体酸化物形燃料電池実証研究(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (10) 大規模電力供給用太陽光発電システム安定化等実証事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (11) 次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (12) 革新型蓄電池先端科学基礎研究(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . 省エネ型情報生活空間創生技術

(1) グリーンITプロジェクト(運営費交付金)

概要

情報化社会の進展に伴うIT機器の消費電力の大幅な増大に対応し、抜本的な省エネを実現するため、サーバ、ネットワーク機器等の各装置の省エネに加え、省エネ型の巨大コンピューティング技術(グリーン・クラウドコンピューティング技術)、パワーエレクトロニクス技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、IT機器・システムのエネルギー消費効率を2倍に向上させる基盤技術を開発する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(2) 次世代高効率ネットワークデバイス技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、ネットワークで伝送されるデータ量の爆発的増加に伴い、関連機器の消費エネルギーが増大している中で、ネットワーク全体の消費電力量を抑制することが喫緊の課題であり、消費エネルギーの低減に大きく貢献するルータ・スイッチの高速化のための研究開発を実施するとともに、機器そのものの消費エネルギーを低減するための研究開発を実施する。

技術的目標及び達成時期

2011年度までに、1チャンネルあたり40Gbps超の通信速度に対応するトラフィック計測・分析・管理技術や40Gbpsのインターフェース、さらなる通信速度向上(100Gbps超)を実現するハードウェア技術、SFQ(単一磁束量子)スイッチに関する実現を可能とするための基盤技術を開発する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) 次世代大型低消費電力ディスプレイ基盤技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、次世代の大型液晶及び大型プラズマディスプレイに関する低消費電力ディスプレイを実現するための研究開発を行う。

技術的目標及び達成時期

2011年度までに、液晶に関しては、高効率バックライト、革新的なTFTアレイプロセス技術・製造装置及び低消費電力型の画像処理エンジン等に係る技術を確立する。また、プラズマディスプレイに関しては、超低電圧駆動等に係る技術を確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(4) 有機発光機構を用いた高効率照明の開発 (運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、蛍光灯に代わる高効率照明として有機EL発光機構を用いるための技術開発課題(発光効率、演色性、面均一性、生産コスト)等を明らかにし、それをブレイクスルーしうる技術シーズを抽出する。

技術目標及び達成時期

2009年までに現在一般に普及している蛍光灯照明に代わる高効率照明としての必要スペックを達成するとともに、次世代照明として同じく期待されているLEDとの差別化要素を技術的に達成し、大面積/高スループット/低コストで量産するプロセス技術を開発する。また、現在蛍光灯の間接・拡散照明が用いられている照明機器を代替する有機EL照明を実用的なコストで製造できる技術を確認する。

研究開発期間

2007年度～2009年度

(5) マルチセラミックス膜新断熱材料の開発 (運営費交付金)

概要

住宅やビルなどの冷暖房における大幅な省エネを実現する画期的な断熱性能を持つ壁および窓材料を、セラミックスのナノ多孔体構造やポリマー複合化構造などからなるマルチセラミックス膜アセンブリ技術によって開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、熱貫流率(熱の伝わりやすさ)が $0.3\text{ W/m}^2\text{ K}$ 以下、壁厚さ10mm程度の超断熱壁材料および熱貫流率が $0.4\text{ W/m}^2\text{ K}$ 以下、光(可視光)透過率が65%以上(Low-Eガラス使用)、ヘイズ率が1%以下の超断熱窓材料を実現する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(6) 超フレキシブルディスプレイ部材技術開発 (運営費交付金)

概要

製造工程等の省エネルギー化を実現するために行う。従来、表示デバイスの製造には、真空蒸着と高温下での焼成と、それに伴う排ガス排水処理が必須であった。これを、ロールtoロール方式に代替することで常圧、常温下での製造を実現し、フレキシブルな薄型ディスプレイを製造する。そのために、有機TFT材料およびコンタクトプリント技術等を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術的目標及び達成時期

2009年度までに、実用化に向けた実証のための巻き取り方式ディスプレイのプロトタイプを試作する。またフレキシブルデバイス材料開発に貢献する部材ならびに薄膜複合化技術を開発し、これらをパネル化するための実用化技術を確立する。

研究開発期間

2006年度～2009年度

(7) 低損失オプティカル新機能部材技術開発（運営費交付金）

概要

近接場光の原理・効果を応用した低損失オプティカル新機能部材技術を開発し、実用化の目処を得ることを目的とする。動作原理に近接場光を用いるオプティカル新機能部材は、従来の材料特性のみに依存した光学部品では不可能な機能・性能を発揮し、液晶プロジェクター・液晶ディスプレイなど情報家電の省エネルギー、高性能・高信頼化を図る上でのキーデバイスとなることが期待できる。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、共通基盤技術として、ナノ構造部材の設計・作製・評価技術を開発するとともに、ナノ構造部材に発現する近接場光の機能を動作原理とする低損失オプティカル新機能部材を検討し機能を確認する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(8) 次世代光波制御材料・素子化技術（運営費交付金）

概要

ガラス材料に関する精密モールド技術を確立し、機能性の高い光波制御素子を低コストで生産できるプロセス技術を開発することで部材の小型化・高機能化を図りつつ、省エネを実現する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2010年度までにサブ波長レベルの微細構造をガラス表面にモールド成形する技術を実現し、実装可能な具体的なデバイスを作製する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(9) 次世代高効率エネルギー利用型住宅システム技術開発・実証事業

（運営費交付金）

概要

ゼロ・エミッションハウスによる生活の大幅な省エネの実現に向け、家屋内直流配電システムや、電力需給の状態に応じた太陽電池等の分散型電源の制御、電力ネットワークを活用した家電の制御等、住宅全体としてエネルギーの最適制御

を行うシステムの開発・実証を行う。

技術的目標及び達成時期

2011年度までに、直流給電・配電に関する規格の標準化、直流配電の電流・電圧の規格化、蓄電池設置に係る安全規制の改正に対する提案が可能となる技術を確立する。

研究開発期間

2009年度～2011年度

4 - - . 先進交通社会確立技術

(1) エネルギーITS (運営費交付金)

概要

平成19年5月の「次世代自動車・燃料イニシアティブ」に基づき、運輸部門のエネルギー消費効率改善のため、自動運転・隊列走行技術、高度交通流制御技術等の省エネルギーに資するITS技術の開発を行う。

技術的目標及び達成時期

2012年度までにCO2削減効果評価方法の確立を図るとともに、2020年代に実用化が見通せる運転制御、隊列走行の基盤技術の確立を目指す。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(2) サステナブルハイパーコンポジット技術の開発 (運営費交付金)

概要

炭素繊維複合材料は、軽量、高強度等の優れた特性を有している。従来の熱硬化性樹脂を用いた炭素繊維複合材料では成形性・加工性に乏しくリサイクルが困難であったため、熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維複合材料(CFRTP)の開発を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、炭素繊維と熱可塑性樹脂との中間基材を開発し、高速成形技術、接合技術及びリサイクル技術を開発する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(3) 次世代構造部材創製・加工技術開発 (次世代航空機用)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、航空機、高速車両等の輸送機器への先進材料の本格導入を加速させるため、先進複合材料及び先進金属材料について部材開発、設計試作及び評価を実施することで、軽量化によりエネルギー使用効率を大幅に向上させる革新的な構造部材の創製・加工技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、複合材の構造健全性診断技術、チタン合金の創製・加工技術を確立するとともに、航空機用エンジンへの適用を目指し、耐熱・耐衝撃性に優れた複合材料を開発する。

研究開発期間

2003年度～2012年度

(4) 環境適応型小型航空機用エンジン研究開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、エネルギー使用効率を大幅に向上し、環境対策にも優れた次世代の小型航空機用エンジンの開発にとって重要な要素技術の研究開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、エネルギー使用効率を大幅に向上する構造設計技術、騒音、NOx等の環境負荷対応に優れた環境対策技術、インテグレーション技術、高バイパス比化等の高性能化技術といった要素技術の研究開発・実証を行う。

研究開発期間

2003年度～2010年度

(5) 省エネ用炭素繊維複合材技術開発

概要

航空機、自動車、鉄道、船舶等の輸送機械等における炭素繊維複合材の適用範囲を拡大し、省エネルギーの促進を図るため、先進的な炭素繊維複合材成形技術や、耐雷対策の容易化技術等の研究開発・実証を行う。

技術目標及び達成時期

2013年度までに、従来の方法に比べ、曲率の大きな部位の成形も行うことができるVaRTM(バータム)法等の炭素繊維複合材成形技術や、炭素繊維複合材を用いた製品の耐雷性能を容易に確保する技術の研究開発・実証を行う。

研究開発期間

2008年度～2013年度

(6) 燃料電池システム等実証研究(運営費交付金)(4 - - 参照)

(7) 次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . 次世代省エネデバイス技術

(1) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 - うち窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発(運営費交付金)

概要

窒化物系化合物半導体は、パワーデバイス、高周波デバイス、発光デバイス等、重要なデバイスの飛躍的な性能向上と消費電力削減への貢献を期待されている。このため、従来の半導体材料では実現出来ない領域で動作可能なハイパワー・超

高効率の電子素子、超高速電子素子等の作成に必要な窒化物系化合物半導体先進技術の国際競争力を強化すべく、高品質かつ大口径単結晶基板、高品質かつ大口径エピタキシャル成長技術等の開発を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。
技術目標及び達成時期

2011年度までに、次世代窒化物系半導体デバイスを実現する以下結晶作製技術を開発する。

1) 基板技術 (GaN、AlNバルク結晶作製技術)

・口径2～4インチで高品質エピ成膜を可能とする低コストの単結晶基板作製技術の確立。

2) エピ技術 (エピタキシャル成膜及び計測評価技術)

・低欠陥高品質エピ層を実現する成膜技術及び膜成長過程を計測評価する技術の確立。

・高出力かつ高安定動作可能なエピ層の実現

・高耐圧超高速な新しいデバイス構造の開発

研究開発期間

2007年度～2011年度

(2) 次世代低消費電力半導体基盤技術開発 (MIRAI) (運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展、IT利活用の高度化を支え、あらゆる機器に組み込まれている半導体の低消費電力化を図るため、テクノロジーノード(微細化レベル)45nm以細の次世代低消費電力半導体を実現するため、微細加工の基盤技術やマスク(半導体素子製造過程で用いる原板)の低コスト化・製造時間短縮に必要な基盤技術の開発等を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、マスク設計・描画・検査の各工程に共通的なマスクデータ処理技術、繰り返しパターンやパターン重要度を利用した描画・検査高速化技術等の基本的な開発及びEUVLマスク基盤技術として、許容欠陥の指標明確化、ブランクス位相欠陥検査技術の確立等を完了する。

研究開発期間

2001年度～2010年度

(3) 半導体アプリケーションチッププロジェクト (運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、情報通信機器、特に、情報家電(車載を含む)の低消費電力化を実現できる半導体アプリケーションチップ技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに情報家電の低消費電力化を実現できるアプリケーションチ

ップ技術を開発する。

研究開発期間

2003年度～2009年度

(4) 次世代プロセスフレンドリー設計技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、あらゆる機器に組み込まれている半導体の低消費電力化を図るため、テクノロジーノード45nm以細の半導体に対応するSoC(System on Chip)設計技術を開発する。具体的には、テクノロジーノード45nm以細の半導体の共通設計基盤技術開発として、DFM(Design For Manufacturing)基盤技術を中核とした設計及び製造の全体最適を確保する全く新しいSoC製造フローを開発する。

技術目標及び達成時期

テクノロジーノード45nm以細のSoC開発において製造性を考慮した共通設計基盤技術を確立し、システムLSIデバイスの省エネルギーを実現するとともに、設計生産性を従来予想に比べ2倍にすることを目標とする。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(5) 半導体機能性材料の高度評価基盤開発(運営費交付金)

概要

情報通信機器の高機能化や低消費電力化等の要求を満たす半導体集積回路を実現するため、新たな機能性材料開発に貢献する評価基盤技術を開発し、さらに開発した機能性材料の半導体及び半導体集積回路への適用を可能とする統合的なソリューション技術を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術的目標及び達成時期

2011年度までに、半導体デバイス性能に直結する接合素子の性能性及び信頼性等、半導体製造プロセス全体を俯瞰しつつ、機能性材料開発が可能となる評価基盤技術を開発し、開発した機能性材料を用いた統合的なソリューションが提案できる材料評価基盤を構築する。

研究開発期間

2009年度～2011年度

4 - - . その他

(1) 次世代構造部材創製・加工技術開発(次世代衛星基盤)

概要

国際商業市場における我が国衛星メーカーの競争力を強化するべく、準天頂衛星システム(利用者に対し、米国が運用するGPSとの補完による高精度な位置情報等の提供を可能にするシステム)の構築に不可欠な基盤技術(産業競争力強

化にも直結する衛星の軽量化、長寿命化に関する技術等)の開発を行う。本プロジェクトの一部については、他部門と比較して需要増加の割合が高い運輸部門のエネルギー消費を抑制すべく、自動車、高速車両等の輸送機器の軽量化・効率化にも資する複合材料製造設計等の基盤技術を確立するためのものであり、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

静止軌道と一定の角度をなす傾斜軌道に複数の衛星を配置し、見かけ上、常に天頂付近に最低1つの衛星を位置させるシステム。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、準天頂衛星システムの構築に不可欠な基盤技術(産業競争力強化にも直結する衛星の軽量化、長寿命化に関する技術等)の開発を実施し、宇宙空間での技術実証を行う。

研究開発期間

2003年度～2010年度

4 - . 運輸部門の燃料多様化

4 - - . 共通

- (1) 新エネルギー技術実用化補助事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (2) 非化石エネルギー産業技術研究助成事業(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . バイオマス由来燃料

- (1) 新エネルギー技術研究開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (2) E3地域流通スタンダードモデル(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (3) バイオマス等未活用エネルギー実証事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (4) バイオマスエネルギー地域システム化実験事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (5) セルロース系エタノール革新的生産システム開発(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . G T L 等の合成液体燃料

- (1) 天然ガスの液体燃料化(G T L)技術実証研究(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . 燃料電池自動車および水素関連技術

- (1) 固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (2) 燃料電池先端科学研究(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (3) 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (4) 水素貯蔵材料先端基盤研究事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (5) 水素社会構築共通基盤整備事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (6) 燃料電池システム等実証研究(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . 電気自動車

- (1) 次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (2) 革新型蓄電池先端科学基礎研究(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - . 新エネルギー等の開発・導入促進

4 - - . 共通

(1) 新エネルギー技術研究開発(運営費交付金)

概要

新エネルギーの自立的普及に向けて、太陽光、風力、バイオマスなど新エネルギー分野でのイノベーションを促進すべく、高効率かつ低コストを目指した先進的技術開発を実施する。具体的には以下の研究開発を実施する。

- A. 革新的な太陽電池の開発を実施する研究拠点を形成し、海外との研究協力等を行いながら、超長期の視野に立って、飛躍的な性能向上を目指した太陽光発電技術の開発を推進する。(革新型太陽電池国際研究拠点整備事業)
- B. 中長期的に、より一層の高効率化と低コスト化を目指して、革新的な材料、構造等を採用した太陽光発電技術の開発を推進する。(太陽光発電システム未来技術研究開発)
- C. 2020年の目標発電コスト14円/kWhおよび太陽光発電システムの大幅な効率向上を実現すべく、未来技術研究開発などで得られた要素技術開発の成果の内、実用化が期待できる太陽電池作製に係る技術について課題を設定し早期実用化を助成する。(太陽光発電システム実用化促進技術開発)
- D. 電力供給源としての太陽光発電の信頼性を確立し、今後の太陽光発電システムの円滑な普及促進を図るため、太陽光発電システムの大量普及時に不可欠な性能評価技術やリサイクル・リユース技術等システムの共通基盤技術に係る研究等を実施する。(太陽光発電システム共通基盤技術研究開発)
- E. PVシステムの普及拡大のため、「集中連系型太陽光発電システム実証研究」の設備を有効利用しながら、認証制度にも資する複数台連系に係わる試験方法を確立する。(単独運転検出装置の複数台連系試験技術開発研究)
- F. 風力発電技術の国際的な動向を把握しつつ、我が国の複雑地形における風力発電利用上の各種課題を克服するための基礎から応用までの技術について研究開発を行う。具体的には我が国の厳しい風特性を反映した風特性モデルの確立及び高々度風況観測を簡便に行うためのリモートセンシング技術の精度検証・評価を行う。

また、全国規模での落雷電流計測、落雷様相観測による雷特性の把握、落雷特性・落雷保護対策と被害実態との相関把握、上記を踏まえた効果的な落雷保護対策の検討及び実機規模での実雷による保護対策検証等を実施し、高精度落雷リスクマップを作成するとともに、風力発電設備へのより効果的な落雷等に対する対策を策定する。(次世代風力発電技術研究開発事業)
- G. 我が国特有の海上特性や気象・海象条件を把握し、これらの自然条件に適した洋上風況観測法や風力発電システムに関する技術開発とその実証を行なうと共に、環境影響評価システム手法を確立する。(洋上風力発電技術研究開発)
- H. バイオマスのエネルギー利用の促進を図るためには、発生地域が分散し、形状・性状が多種多様にわたるバイオマス資源を利用しやすい形態の有用エネルギーへ効率的に転換できる技術を開発する。(バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発)

I .世界的にもベンチャー企業による太陽光発電、新型風力発電、燃料電池、バイオ燃料分野におけるイノベーション活動が活発化していることを踏まえ、詳細目標設定・多段階選抜形の米国S B I R制度を参考に特定のキーテクノロジーに対するベンチャーのチャレンジを強力に支援する。(新エネルギーベンチャー技術革新事業)

技術目標及び達成時期

- A . 2050年までに「変換効率が40%超」かつ「発電コストが汎用電力料金並み(7円/kWh)」の太陽電池を実用化することを目指した研究開発の中で、変換効率40%超の実現に向けた技術の基礎・探索研究段階と位置づけて研究開発を実施する。
- B . 2020年頃に業務用電力料金並の発電コスト(14円/kWh、モジュール製造原価として75円/W程度)、2030年頃に火力発電の発電コスト(7円/kWh、モジュール製造原価として50円/W程度)の実現に向けた中・長期的な技術開発を行う。
- C . 2015年に向けて市場競争力を備えた本格生産・商用化を目指す。
- D . 2020年度の技術開発目標である発電コスト14円/kWhを目指し、中期的な視点での太陽光発電の普及拡大に資する。
- E . 2009年度末までに、電力系統側が受け入れ可能な、導入台数の制限のない能動型単独運転検出装置の試験方法を確立する。
- F . 2012年度までに、風力発電の基礎から応用までの技術について、国際的な動向を把握しつつ、我が国特有の気象・地形に起因する各種問題(風車耐久性等)を克服するための研究開発を行って、我が国の風車産業の振興に資するとともに、IEA RD&D WINDなどの最先端の国際的風力発電共同研究に研究成果を反映させる。
- また、2012年度までに、高精度落雷リスクマップを作成するとともに、風力発電設備へのより効果的な落雷等に対する対策を策定する。
- G . 2013年度までに、我が国の海象・気象条件に適した、洋上風況観測システム、洋上風力発電システム及び環境影響評価の手法等の技術を確立する。
- H . 2004年度より、バイオマスエネルギー転換プロセスにおける各工程のボトルネックを抽出し、2008年度までに開発が完了するよう、それぞれのボトルネックをブレイクスルーする要素技術開発を提案公募方式により実施する。更に、2005年度より2009年度まで、バイオマスのエネルギー転換・利用技術等の分野において2030年の普及を目指した新規な革新的技術を発掘するための先導技術研究開発を提案公募方式により実施する。
- I .潜在的なオプションの顕在化や関連産業分野の技術開発による技術革新により、新エネルギー導入促進技術オプションの多様化と経済性の向上に寄与する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(2) 新エネルギー技術フィールドテスト事業(運営費交付金)

概要

2010年度の新エネルギー導入目標達成に向け、新技術を活用した太陽光発電及び太陽熱利用システムの有効性の検証、バイオマス熱利用システムの性能・経済性等の検証、風車立地に必要な高所の風況データの収集・解析など総合的な新エネルギーフィールドテストを実施する。具体的には以下のフィールドテストを実施する。

- A. 新技術を活用した太陽光発電システム等を設置し、出力特性等の情報収集及び分析を行うことで、その有効性を確認するとともに、ガイドラインの策定等により広く情報発信を行う。(太陽光発電新技術等フィールドテスト事業)
- B. 新利用形態の太陽熱利用システムや未利用分野においてシステムを設置し、出力特性等の情報収集及び分析を行うことで、その有効性を確認するとともに、ガイドラインの策定等により広く情報発信を行う。(太陽熱高度利用システムフィールドテスト事業)
- C. 広く薄く賦存するバイオマスを、民間企業や研究機関等において研究開発が終了段階をむかえた高効率に熱利用できるシステムを設置し、設置場所の熱需要に合わせたフィールドテストを実施することにより、実運転におけるバイオマス熱利用転換システムとしての課題抽出、解決を行い、早期実用化を図り、バイオマスエネルギーの導入促進を行う。(地域バイオマス熱利用フィールドテスト事業)
- D. 風力発電の導入目標(2010年度300万kW)を達成するため、共同研究事業者と大型風車の導入普及に必要な高所の風況データの収集・解析・評価を行い、公開する。(風力発電フィールドテスト事業)

技術目標及び達成時期

- A. 設置システムについて、2007年度に策定したガイドラインを2009年度、2012年度及び2015年度に見直し改訂する。
- B. 設置システムについて、2007年度に策定したガイドラインを2009年度に改訂する。また、2012年度及び2015年度に見直し改訂する。
- C. 一定レベルまで確立されたバイオマス熱利用技術について、性能や経済性等の状況・データを収集・分析し、熱利用システムの有効性を実証するとともに、これらの結果を公表することで汎用性の高い熱利用システムの確立し、2010年度のバイオマス熱利用の導入目標(308万KL)達成を目指す
- D. 2010年度までに、高所の風況データの解析・評価を行い、導入普及に有用な資料の取りまとめを行い、これらの結果を風力発電事業者、研究機関や風力発電事業を計画している各種団体等に公開することにより、風力発電導入の素地を形成し、風力発電の導入を拡大する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) 新エネルギー技術実用化補助金(運営費交付金)

概要

科学技術基本計画における戦略的技術領域・課題にかかる技術課題等で石油代替エネルギーの製造・生成・利用に資する実用化開発を行う民間企業に対し助成支援する。

技術目標及び達成時期

助成事業終了後3年以上を経過した時点で25%の実用化達成率。加えて、知的資産経営の方針に対する審査時の評価を通じて、「技術等の知的資産を活かす経営の下で収益拡大を図る(技術を経営、収益につなげる)」意識を普及させる。

研究開発期間

2000年度～

(4) 非化石エネルギー産業技術研究助成事業(運営費交付金)

概要

産業界や社会のニーズに応える石油代替技術のシーズの発掘とその育成、並びに、石油代替技術に関する次世代の研究リーダーの育成を図る。この目的のため、産業界からの期待が高い技術領域・課題を提示した上で、大学や独立行政法人の若手研究者等から研究開発テーマを募集する。厳正な外部評価によって石油代替効果があり且つ独創的・革新的なテーマを選定し、研究者代表者個人を特定して助成金を交付する。

技術目標及び達成時期

独創性のある若手研究者等を助成すると共に、中間評価ゲート方式が醸成する競争的環境の下で企業との連携を強化させることにより、10～15年後の実用化が有望な革新的石油代替技術の研究開発を促進する。本事業では革新的石油代替技術の実用化への第1歩となる特許について、助成期間終了後の出願比率を100%とすることを目標とするとともに、石油代替技術に関する次世代の研究リーダーの育成を図る。

研究開発期間

2000年度～

4 - - . 太陽・風力

(1) 太陽光発電無線送受電技術の研究開発

概要

将来の新エネルギーシステムとして期待される宇宙太陽光発電システム(SSPS)の中核的技術として応用可能なマイクロ波による太陽光発電無線送受電技術の確立に向け、安全性や効率性等の確保に不可欠な精密ビーム制御技術の研究開発を行う。

技術目標及び達成時期

2012年度までに複数のフェーズドアレイパネル間の位相同期を行い、パイロット信号の方向にマイクロ波を電送するレトロディレクティブ技術を活用した精密ビーム制御技術の確立を目指す。

研究開発期間

2008年度～2012年度

4 - - . 電力系統制御・電力貯蔵

(1) 革新型蓄電池先端科学基礎研究(運営費交付金)

概要

電池の基礎的な反応原理・反応メカニズムを解明することで、既存の蓄電池の性能向上及び革新型蓄電との実現に向けた基礎技術の確立を目指す。

技術目標及び達成時期

世界最高レベルの放射光施設を用いた評価装置により、蓄電池の反応メカニズムを解明するとともに、2030年に電気自動車の航続距離500km、コスト1/40を実現すべく、新材料の開発を行う。

研究開発期間

2009年度～2015年度

(2) 次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)

(3) 大規模電力供給用太陽光発電システム安定化等実証事業(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . バイオマス・廃棄物・地熱等

(1) E3地域流通スタンダードモデル創成事業(運営費交付金)

概要

離島(全域)におけるエタノール3%混合ガソリン(E3)の製造から給油までの大規模なフィールドテストを通じ、E3利用に関する社会システムモデルの構築と一般社会へ適用する際の技術課題の抽出を行う。

技術目標及び達成時期

2010年の「京都議定書目標達成計画」の導入目標(50万kl)に資するため、2009年度にE3利用の社会モデルを構築し、2011年度までにその検証を行う。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(2) バイオマス等未活用エネルギー実証事業(運営費交付金)

概要

地域に賦存する未活用な資源であるバイオマスをエネルギーとして有効活用するため、溶融ガス化等熱化学的変換技術による燃料化システムやメタンガス等生物化学的変換技術による燃料化システム等の実証試験事業、事業可能性調査等を実施し、利用ノウハウ等を蓄積、本格的なバイオマス等エネルギーの導入を推進する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、バイオマス等の種別やエネルギー変換手法、更には地域

特性を加味した一連のエネルギー転換システム毎のフィージビリティスタディや試験設備の設置により、バイオマス等の運搬・収集、エネルギー転換及びエネルギー利用に係るデータの収集、分析、評価を実施し、その結果をフィードバックすることによって本格的なバイオマス等エネルギーの導入を目指す。

研究開発期間

2001年度～2009年度

(3) バイオマスエネルギー地域システム化実験事業（運営費交付金）

概要

バイオマスエネルギーの資源収集・運搬、転換、残渣処理、利用までの一連の利活用システムについての、各要素の連携の最適化を図るための実証を実施することによって、地域特性に適合した地域主導によるバイオマスの地産地消・地域循環型の先導的モデルシステムを構築することによりバイオマスエネルギーの導入を促進する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、国内バイオマス資源の安定的かつ経済的な供給システム、最適なエネルギー転換技術、エネルギー転換後に発生する残渣の処理等の一連の地産地消型エネルギー転換システムについて、ノウハウ蓄積、課題抽出及びその対策方法の策定、技術確立を行う。また、ここで確立されたバイオマスエネルギーシステムは他地域への波及を先導する事例となることを目標とする。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(4) セルロース系エタノール革新的生産システム開発（運営費交付金）

概要

大規模安定供給が可能で、かつ食料と競合しない、草本系、木質系のセルロース系バイオマス原料の栽培からバイオエタノール製造までの一貫生産システムを構築し、環境負荷、経済性等を評価する。加えて、大規模生産に当たり危惧されている、生態系破壊、森林破壊、ライフサイクルでの環境負荷増大等の負の影響についての適切な評価、認証等、持続可能なバイオ燃料の生産拡大を担保する社会システム整備のあり方についても調査研究を行う。

技術目標及び達成時期

2015年までに、製造コスト40円/L以下、エネルギー回収率35%以上を達成するための技術開発を行う。

研究開発期間

2009年度～2013年度

4 - - . 燃料電池

(1) 固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発(運営費交付金)

概要

自動車用、家庭・業務用等に利用される固体高分子形燃料電池(PEFC)の実用化・普及に向け、要素技術、システム化技術及び次世代技術等の開発を行うとともに、共通的な課題解決に向けた研究開発の体制の構築を図る。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、固体高分子形燃料電池の経済性・耐久性の向上や高性能化のための技術開発を行い、燃料電池の普及段階へ向けて必要な基本的技術を確立する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(2) 燃料電池先端科学研究(運営費交付金)

概要

燃料電池の基本的反応メカニズムについての根本的な理解を深めるために、高度な科学的知見を要する現象解析及びそのための研究体制の整備を行い、現状の技術開発における壁を打破するための知見を蓄積する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、燃料電池内における反応機構を電気化学(電極触媒反応、イオン移動、分子移動等)及び材料化学(溶解・腐食反応、錯形成反応、ラジカル反応、固相内拡散等)の観点から解明する。また、燃料電池新技術の性能を適切に評価・実証するための基本システムを構築する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(3) 固体酸化物形燃料電池システム要素技術開発(運営費交付金)

概要

固体酸化物形燃料電池(SOFC)は発電効率が高く、分散型電源として期待されるが、実用化・普及のためには耐久性・信頼性向上、低コスト化等の課題を解決することが必要であり、材料開発や劣化要因解明など基盤的な要素技術の研究を行う。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、耐久性・信頼性の向上のための劣化要因解明等の基礎研究、低コスト化のための材料等や高出力セルスタックの開発、起動停止対応等の実用性向上のための技術開発を実施する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(4) セラミックリアクター開発 (運営費交付金)

概要

低温域かつ高効率なエネルギー変換を可能とする次世代型セラミックリアクターの実現のため、世界最高効率の燃料電池マイクロセルの集積構造技術等の開発を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、新電解質材料の適用や電極反応の高効率化等による、低温作動時 (650 以下)での出力性能を向上させる材料技術と共に、マイクロセルの集積構造化や精緻なインターフェース構築のための製造プロセス技術を開発。そして、これらの技術を統合することにより、次世代型セラミックリアクターとしてのプロトタイプモジュール実証 (出力性能2 kW/L等)を行う。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(5) 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発 (運営費交付金)

概要

水素の製造・輸送・貯蔵等に係る機器やシステムについて、性能・信頼性・耐久性の向上や低コスト化を目指す水素利用技術の研究開発を行い、水素社会の実現に必要な基盤技術の確立を図る。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、水素製造・貯蔵・輸送・充填に関する機器やシステムの信頼性・耐久性向上、低コスト化、性能向上等実用化検証や要素技術開発、及び当該技術を飛躍的に進展させることができる革新的技術開発や調査研究などを行い、その成果を産業界に提供することにより、水素エネルギー初期導入間近の関連機器製造・普及技術として完成させ、水素社会の真の実現に必要な基盤技術の確立を図る。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(6) 水素貯蔵材料先端基盤研究事業 (運営費交付金)

概要

世界トップ水準の優れた研究者を中核に、国内外の研究機関・企業のバーチャルな連携の下、高圧水素貯蔵に比べよりコンパクトかつ効率的な水素貯蔵を可能とする水素貯蔵材料の性能向上に必要な条件等を明らかにすることにより、燃料電池自動車の航続距離の飛躍的向上を図る。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、水素貯蔵材料の基本原理、さらには水素貯蔵能力の革新的向上に必要な条件を明らかにすることにより、水素をより安全・簡便・効率的かつ低コストに輸送・貯蔵するための技術基盤を確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(7) 水素先端科学基礎研究事業(運営費交付金)

概要

水素の輸送や貯蔵に必須な材料に関し、水素脆化等の基本原理の解明及び対策の検討を中心とした高度な科学的知見を要する先端的研究を、国内外の研究者を結集し行うことにより、水素をより安全・簡便に利用するための技術基盤を確立する。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、水素脆化、水素トライボロジーの基本原理の解明及び対策の検討等を行い、水素をより安全・簡便に利用するための技術指針を産業界に提供する。

研究開発期間

2006年度～2012年度

(8) 水素社会構築共通基盤整備事業(運営費交付金)

概要

燃料電池の導入・普及に資する基盤整備のため、製品性能の試験・評価手法及び国内外の基準・標準の確立を図る。

技術目標及び達成時期

2009年度を目途に、安全性等に係るデータを取得し、そのデータを基に試験・評価手法の確立、国際標準の確立、規制の再点検を三位一体で進める。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(9) 固体酸化物形燃料電池実証研究(運営費交付金)

概要

発電効率が高く、分散型電源として期待される固体酸化物形燃料電池(SOFC)の研究開発・実用化の促進のため、耐久性を始めとしたデータの取得・課題抽出等のための実証を実施する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、SOFCシステムの実証試験を数十～数百台規模で実施し、蓄積が不足している耐久性を始めとした実証データの取得・課題抽出等を行い、SOFC技術開発等へのフィードバックを行う。

研究開発期間

2007年度～2010年度

(1 0) 燃料電池システム等実証研究 (運営費交付金)

概要

実条件に近い中での燃料電池自動車等の実証走行や、高圧水素貯蔵システム、多角的な燃料供給システムの検証を進め、水素エネルギー社会における水素利用の課題等を抽出するとともに、燃料電池・水素に対する国民的理解の醸成を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、実使用条件下における技術的課題を抽出するとともに、環境特性、エネルギー総合効率、安全性、耐久性等に関する基準・標準に資するデータを取得し、燃料電池自動車、水素ステーションの研究開発等へのフィードバックを行う。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(1 1) 将来型燃料高度利用技術開発 (4 - - 参照)

4 - . 原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

4 - . 軽水炉・軽水炉核燃料サイクル

< 新型軽水炉 >

(1) 次世代軽水炉等技術開発

概要

2030年前後に見込まれる大規模な代替炉建設需要に対応するため、安全性・経済性、信頼性等に優れ、世界標準を獲得し得る次世代軽水炉の技術開発を行う

技術目標及び達成時期

2010年度までに、次世代軽水炉の実現に必要な要素技術開発等及びプラント概念の成立性について見通しを得るための概念設計検討を行う。

研究開発期間

2008年度～2010年度 (見直し)

< 軽水炉使用済燃料再処理技術の高度化 >

(2) 使用済燃料再処理事業高度化

概要

再処理施設で用いられるガラス固化技術について、より多くの白金族元素等を含む高レベル廃液を溶融可能な新しい性状のガラスを開発するとともに、これに対応しうる新型の溶融炉を開発することにより、我が国の使用済燃料再処理技術の高度化を図る。新型ガラス溶融炉の開発に際しては、六ヶ所再処理工場の運転経験を反映する研究もあわせ行う。

技術目標及び達成時期

より多くの白金族元素等を含む高レベル廃液を溶融可能なガラス及び溶融炉の開発等によって、より高品質のガラス固化体を製造可能なガラス固化技術を開発する。

また、本事業によって開発されたガラス固化技術を、5年程度で更新が計画されている日本原燃株式会社六ヶ所再処理工場のガラス溶融炉及び同工場のガラス固化施設の運転に反映させる。

研究開発期間

2009年度～2011年度

< プルサーマルの推進 >

(3) 全炉心混合酸化物燃料原子炉施設技術開発

概要

プルサーマルが当面のプルトニウム利用策として期待されていることを踏まえ、既存の軽水炉に比べ約3倍のプルトニウムを装荷することができる全炉心混合酸化物燃料原子炉に必要な技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、原子炉の開発に必要な設計、解析、試験等を行い、全炉心混合酸化物燃料原子炉技術を確立する。

研究開発期間

1996年度～2011年度

< 軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの円滑な移行のための技術開発 >

(4) 高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発

概要

FBR実証炉及び関連サイクル施設の早期実現を図るため、文部科学省と連携し、「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」を推進する。そのなかで、次世代再処理工場から発生する高線量回収ウラン等を既存軽水炉燃料製造施設で取扱可能とする、次世代再処理工場と調和可能な回収ウラン等の除染技術について、調査・基礎試験等を行い、商業的に利用可能な除染技術候補の検討等を実施する。選定された技術については、プロセス試験等を実施する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、回収ウラン等の除染プロセスの候補技術の洗い出し及び候補プロセス技術の基礎試験を終了し、次世代再処理技術との適合性の検証を行い、プロセス試験を実施すべき除染プロセス技術を選定する。

また、2015年までに、選定した除染プロセス技術について工学化規模でのプロセス試験を行い、商業的に利用可能な転換前高除染技術としての実効性を検証する。

研究開発期間

2007年度～2015年度

< ウラン濃縮技術の高度化 >

(5) 遠心法ウラン濃縮技術開発

概要

我が国におけるウラン濃縮技術や生産能力の維持・向上のため、世界最高水準

の性能を有するなど国際的に比肩し得る経済性と性能を有する新型遠心分離機を開発する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、国際役務価格\$100/kg SWU相当を目指して、現在実用化している金属胷遠心分離機の約5倍という高い分離性能や同遠心分離器を上回る寿命など国際的に比肩し得る技術レベルを有する新型遠心分離機の開発を目指すとともに、最終仕様の新型遠心分離機を多数台用いたカスケード試験の実施により商用プラントとしての信頼性を確立し、運転要領の策定を行う。

研究開発期間

2002年度～2009年度

< 回収ウラン >

(6) 回収ウラン利用技術開発

概要

六ヶ所再処理工場で回収される回収ウランを再濃縮し、再び軽水炉で利用するため、濃縮施設等既存施設への影響等を把握し、転換プロセスを中心とした回収ウラン利用技術を開発する。併せて劣化ウラン酸化固形化についても検討を行う。

技術目標及び達成時期

2012年頃までに、劣化ウランの取扱・管理の容易さや貯蔵効率を向上させるための劣化ウラン酸化固形化（再転換を含む）技術の研究開発を行い、同技術に係る基礎プロセスを確立する。2015年度頃までに、再処理により回収される回収ウランの濃縮が可能な商用遠心分離機的设计を確定する。

研究開発期間

2008年度～2015年度

< 共通基盤技術開発 >

(7) 革新的実用原子力技術開発

概要

第4世代原子力システムに関する国際フォーラム（GIF）や国際原子力エネルギー・パートナーシップ（GNEP）等の国際協力枠組みにおいて国際連携による研究開発が提案されている技術分野や、近年希薄化が懸念される原子力を支える基盤技術分野について、産業界の参画やニーズ提示のもと、大学等が実施する研究活動への支援や将来の原子力人材の育成を実施しており、各分野の目的に沿った革新的な技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度まで、基盤技術分野、国際協力技術分野において個別テーマ毎に研究開発を実施する。

研究開発期間

2000年度～2011年度（見直し）

4 - - . 高速増殖炉（FBR）サイクル

（1）発電用新型炉等技術開発

概要

FBR実証炉及び関連サイクル施設の早期実現を図るため、文部科学省と連携し、「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」を推進する。具体的には、実証炉に必要な要素技術のうち、設計・建設段階において必要となる実プラント技術として、格納容器設計技術、耐震性評価技術、高温材料設計技術、保守・補修技術、大型構造物製作技術の試験等を実施する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、実証炉の概念設計へ反映しうる設計基準データ等の技術的根拠を得る。

研究開発期間

2007年度～2010年度

（2）高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発（4 - - 参照）

4 - - . 放射性廃棄物処理処分

（1）地層処分技術調査等

概要

）地層処分共通技術開発

高レベル放射性廃棄物等の地層処分における共通的技術として、今後段階的に進められる処分地選定の際に重要となる地質等調査技術の高度化開発を行う。

）高レベル放射性廃棄物関連処分技術開発

高レベル放射性廃棄物処分に係る基盤技術として、人工バリア等の長期性能評価技術、処分場操業の際のオーバーパック溶接や搬送・定置等の遠隔操作技術の開発を行う。

）TRU廃棄物処分関連技術開発

TRU廃棄物の地層処分に係る基盤技術として、高レベル放射性廃棄物との併置処分の可能性も念頭に、TRU廃棄物に固有に含まれる核種の閉じ込め技術や人工バリア等の長期性能評価技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

）地層処分共通技術開発

2011年度までに、処分地選定の初期段階で必要となる地上からの調査技術のうち、特に沿岸域の環境や高精度での地下水評価等に係る調査評価技術の高度化・確証を行う。

）高レベル放射性廃棄物関連処分技術開発

2011年度までに、人工バリア等の長期性能評価技術や遠隔操作等の工学技術について高度化を図り、幅広い地質環境に対応可能な技術選択肢と成立性を提示する。

）TRU廃棄物処分関連技術開発

2011年度までに、TRU廃棄物に固有に含まれるヨウ素129や炭素1

4の閉じ込め、高アルカリ環境下での人工バリアの性能評価等に関し、幅広い地質環境に対応可能なデータ・モデルの整備と技術選択肢の提示を行う。

研究開発期間

1998年度～2011年度

(2) 管理型処分技術調査等

) 地下空洞型処分施設性能確認試験

概要

TRU廃棄物や発電所廃棄物等の余裕深度処分において検討されている「地下空洞型処分施設」の成立性確認のため、実規模大の空洞を利用した総合的な確認試験を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、実規模大の空洞内にコンクリートピット等からなる地下空洞型処分施設を構築し、施工性や初期性能の総合的な確認を行う。

研究開発期間

2006年度～2011年

(3) 放射性廃棄物共通技術調査等

概要

) 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査

放射性廃棄物処分に係る国内外の最新知見の収集・分析、重要かつ基礎的な課題の抽出並びに研究を実施し、長期に及ぶ処分事業等を支える技術基盤の拡充を図る。

) 放射性核種生物圏移行評価高度化調査

放射性廃棄物処分の安全評価に共通的な基盤情報として、生物圏における核種移行プロセスを評価するため、日本の風土を反映した核種移行パラメータ・モデルを整備する。

技術目標及び達成時期

) 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査

2011年度までに、放射性廃棄物処分に共通的な重要基礎技術として、地質環境の長期安定性評価、人工バリアや岩盤の長期挙動評価等に係る知見を整備する。

) 放射性核種生物圏移行評価高度化調査

2011年度までに、沿岸域の環境も含めたわが国表層環境への適用とTRU廃棄物に固有の核種等を考慮した、生物圏核種移行のモデルとデータベースを構築する。

研究開発期間

2001年度～2011年度

4 - - . 原子力利用推進に資する電力系統技術

(1) イットリウム系超電導電力機器技術開発(運営費交付金)

概要

世界的にも我が国が最先端の技術力を有する次世代高温超電導線材を活用し、経済社会の基盤となる電力の安定的かつ効率的な供給システムを実現するため、系統を適正に制御し、電力供給を安定化させるための技術及び発電電力を無駄なく輸送するための高効率な送電技術の確立を目指す。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、イットリウム系超電導線材を用いたSME S、電力ケーブル、変圧器実現のための重要な技術開発を行い、各機器の成立性を実証する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(2) 高温超電導ケーブル実証プロジェクト(運営費交付金)

概要

革新的な高効率送電技術を確立して高温超電導ケーブルの実用化を促進するため、工業生産プロセスで実用化レベルに達している高温超電導線材(DI-BSCCO等)を活用し、首都圏の系統に接続する実証試験及び評価を行う。

なお、本事業は、発電用施設による電気の供給の円滑化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、200MVA級の中間接続部を有した三心一括型高温超電導ケーブルを、冷却装置や保護装置などの付帯設備とともに66KV実系統に接続して、12ヶ月以上の長期連系試験を行うことによって総合的な安全性や信頼性を実証する。

研究開発期間

2007年度～2012年度

4 - - . その他電力供給安定化技術

(1) 大規模電力供給用太陽光発電系統安定化等実証事業(運営費交付金)

概要

大規模太陽光発電を電力系統に連系した場合に課題となる系統安定化対策やピーク対策のための技術等を開発するとともに、その有効性を実証する。

また、国内外の先進的な次世代技術の価格性能を比較することを通じて技術開発を加速する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、下記の実証研究を行い、その有効性を確認する。

(イ) 蓄電池等を組み合わせた出力変動抑制システムの有効性。

(ロ) 発電出力のピーク制御(午後のピーク帯へのシフト)の有効性。

(ハ) 大型インバータによる高調波抑制システムの有効性。

(ニ) 国内外メーカーの太陽電池モジュールの特性比較を行い、性能、経済性等

を比較・検証。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(2) 次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発(運営費交付金)

概要

蓄電池技術は、新エネルギーの出力安定化や燃料電池自動車(FCEV)・ハイブリッド自動車(HEV)・電気自動車(EV)等の高効率次世代自動車に共通する重要なコア技術である。そこで、高性能蓄電システムに係る要素技術開発、新材料開発及び基盤技術の開発を行う。

A．系統連系円滑化蓄電システム技術開発

B．次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発

技術目標及び達成時期

A．2010年度末において、寿命10年、コスト4万円/kWh、1MW規模のシステムおよび要素技術の確立と2030年において寿命20年、コスト1.5万円/kWh、20～30MW規模の蓄電システムを見通せる技術開発。また、新エネルギー対応の充放電パターン等、基礎データの整備、大型化に伴う安全性や寿命等の評価手法の確立。

B．2011年度末において、電池開発では、0.3kWhモジュールを作製し、重量エネルギー密度100Wh/kg、出力密度2000W/kg、寿命10年、コスト4万円/kWhを達成すること(条件:3kWhの組電池、100万台生産ベース)。電池構成材料及び電池反応制御技術の開発では重量エネルギー密度200Wh/kg、出力密度2500W/kg、コスト3万円/kWhを小型単電池で達成すること(上記と同条件)。たま、電池周辺機器開発では、格段の高性能化、コンパクト化、低コスト化を達成すること。さらに、重量エネルギー密度500Wh/kgを見通せる新規概念・構造の蓄電池基礎開発の他、劣化・寿命診断法、安全性評価などの各種試験法等の開発およびそれら共通基盤技術の基準・標準化。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) 発電プラント用超高純度金属材料の開発(運営費交付金)

概要

超高純度金属材料を発電設備の蒸気配管等に実用化することを目指し、高純度金属材料の高度化に向けた低コスト・量産化製造技術を開発し、実使用環境における超高純度金属材料の耐久性試験等を行う。

なお、本事業は、発電用施設における電気の供給の円滑化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2009年までに、不純物総量100ppm未満、溶解量数100kg以上の低コスト・量産化技術製造技術を開発するとともに、製造された超高純度材料が発電プ

ラントの各種機器に適用でき、本材料の持つ優れた特性を長期に亘って発揮できることを確認する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

4 - . 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

4 - - . 石油・天然ガス・石炭の探鉱・開発・生産技術

(1) 石油・天然ガス開発・利用促進型大型/特別研究(運営費交付金)

概要

石油及び可燃性天然ガス資源の開発に係る技術の振興を図る観点から、大水深、複雑な地層といった悪条件化が進む石油・天然ガスの探鉱・開発技術、利用拡大が見込まれる天然ガス田の開発促進に資する天然ガス有効利用技術等について、短期間で実用化が期待され、民間ニーズに直結した研究開発を提案公募により実施する。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、我が国の石油・天然ガスの探鉱・開発技術力の向上、及び天然ガスの利用の促進に向けた天然ガスの有効利用技術の開発を行う。

研究開発期間

2001年度～2012年度

(2) 石炭生産技術開発

概要

石油代替エネルギーである石炭の安定供給を図るため、発熱量が低いものの低灰分、低硫黄といった特徴を有する低品位炭の有効利用を目的として、低品位炭の発熱量を高め、自然発火性を抑制する低品位炭改質技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、3500～5000kcal/kgの発熱量の低品位炭を瀝青炭並みの6000kcal/kg以上に改質する低品位炭改質技術を開発し、600t/d大型実証プラントでの製造技術を確立する。

研究開発期間

2006年度～2009年度

(3) 石油精製物質等簡易有害性評価手法開発(運営費交付金)

概要

石油の生産及び流通の合理化を図る観点から、石油製品等に含まれる化学物質によるリスクを把握し、必要な対策を適切に行うことを可能とするため、*in vitro*培養系技術等の活用により遺伝子組換え細胞等を用いた*in vitro*系簡易有害性予測手法、また、トキシコゲノミクスを活用した短期動物試験結果と相関する遺伝子発現データセットを開発する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、遺伝子導入技術、幹細胞分化誘導技術、生物発光技術等

を適用した培養細胞を用いて、試験期間1ヶ月程度、発がん性、催奇形性及び免疫毒性を予測評価できる試験手法を開発し、また、遺伝子発現解析技術を短期動物試験に適用し、28日間反復投与試験結果と相関する遺伝子発現データセットを完成させる。また、標準的な試験プロトコルを策定する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(4) 石油資源遠隔探知技術の研究開発

概要

我が国が開発・運用する多様な地球観測センサ(ASTER、PALSAR等)の地球観測データを用いて、石油・天然ガス等の安定供給確保のため、資源開発・探査、環境観測等に有効なデータの処理解析手法の研究開発を行う。また、地球観測データのような大容量のデータを容易に扱えるシステムの研究開発を実施することで資源開発・探査、環境観測を含む多様な分野でのリモートセンシングの利用拡大を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、資源開発・探査、環境観測等の分野における地球観測データ処理・解析技術の向上及び地球観測データの利用の拡大を図る。

研究開発期間

1981年度～2010年度

(5) ハイパースペクトルセンサ等の研究開発(運営費交付金)

概要

資源開発に有効な岩石・鉱物や地質構造解析の高次元解析を可能とするハイパースペクトルセンサの開発を行うとともに、軌道上におけるデータ取得の実証を行い、センサ技術の確立を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までにスペクトル分解能200バンド前後のハイパースペクトルセンサを開発し、地表面のスペクトル情報を取得して資源開発に有効なセンサ技術の実証を行う。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(6) 次世代合成開口レーダ等の研究開発

概要

石油の生産及び流通の合理化を図る観点から行うものであり、石油及び可燃性天然ガス資源等の開発に資するため、資源探査能力を格段に向上した合成開口レーダである次世代合成開口レーダ(PALSAR)の健全性評価やセンサを維持することにより、取得される画像データを用いた石油・天然ガス資源の遠隔探知を行う技術を確立する。

技術目標及び達成時期

PALSAARの開発、健全性の評価・維持を実施することにより、2010年度までに、レーダ技術の高度化（アンテナ指向の電子制御化、分解能の向上、多偏波観測等）を図る。

研究開発期間

1993年度～2010年度

(7) 極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システムの研究開発

概要

石油の生産及び流通の合理化を図る観点から行うものであり、石油及び可燃性天然ガス資源等の開発に資するため、資源探査能力を格段に向上した光学センサである資源探査用将来型センサ（ASTER）の健全性評価やセンサを維持することにより、取得される画像データを用いた石油・天然ガス資源の遠隔探知を行う技術を確立する。

技術目標及び達成時期

ASTERの開発、健全性の評価・維持を実施することにより、2010年度までに、センサ技術の高度化（ポインティング機能の追加、分解能の向上、熱センサの搭載等）を図る。

研究開発期間

1987年度～2010年度

4 - - . 石油・天然ガスの有効利用技術

(1) 石油燃料次世代環境対策技術開発

概要

バイオマス燃料から製造した石油製品が自動車排出ガスに及ぼす影響、新たな自動車燃焼技術（自着火燃焼（着火までに燃料と空気を十分に混合し、その混合気体を点火プラグの使用なしで圧縮することにより着火させる燃焼法でNOx排出低減、熱効率が高い等の利点がある））に適応した燃料に関する技術開発を実施する。

また、建設機械、発電機等のオフロードエンジンの排ガスによる環境負荷低減や石油燃焼機器の効率的な利用を進めるための技術開発を実施する。

技術目標及び達成時期

バイオマス燃料の利用時における、燃料と自動車エンジン技術の両面の影響評価を進め、技術的課題を解決し、運輸部門における燃料多様化を目指す。

また、オフロードエンジンの規制は欧米が先行していることから、2012年頃、欧米において規制強化が予定されている排ガス規制に対応した技術を確立し、我が国における規制強化に対応可能な燃焼技術を実現することを目指す。

研究開発期間

2002年度～2011年度

(2) 石油精製高度機能融合技術開発

概要

石油精製業を中心とする石油コンビナート全体の横断的かつ高度な運営機能の融合を図り、単独企業のみでは達成困難なコンビナート域内の省資源、省エネルギーの向上を進めるため、異業種異企業間における限りある貴重なエネルギー資源の利用効率の高い生産技術に関し技術の開発・実証を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、我が国における他のコンビナートへの波及効果を含め、CO₂排出量を63万トン/年削減可能とする技術を確立する。

研究開発期間

2006年度～2009年度

(3) 将来型燃料高度利用技術開発

概要

省エネ、二酸化炭素削減効果が見込まれる燃料電池自動車の燃料である高純度(99.99%以上)水素を安定的かつ経済的に供給することは重要である。石油は、その長所として豊富な水素供給余力と安価な水素製造技術及び全国に展開した災害に強いガソリンスタンドを保有している。これら石油の長所を活かした水素供給システムの確立により、水素社会の早期実現に貢献するものである。本事業では、製油所からの高純度水素供給技術開発とガソリンスタンドを拠点とする高純度水素製造技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

コスト低減のため製油所におけるナフサから高効率(80%以上)な高純度水素製造を可能とする新たな技術を開発する。また、供給地のガソリンスタンドにおいて有機ハイドライドから高純度の水素を高効率(80%)に取り出すための水素発生装置を開発する。また、脱硫後の灯油硫黄分を検出限界以下の10ppb以下とする脱硫剤の開発を行うとともに、貴金属使用量を2-3wt%から0.5wt%以下まで低減しても、従来と同等の高い性能が維持できる改質触媒を開発する。さらに、膜分離型反応器を用いた99.99%高純度水素の製造効率を80%、4万時間の耐久性が期待できる水素製造システムを開発する。

研究開発期間

2008年度～2010年度

(4) 革新的次世代石油精製等技術開発

概要

原油価格の高騰・高止まりや原油の重質化と製品需要構造変化等の石油を巡る大きな環境変化のなか、連産品である石油製品を今後とも長期的に安定化かつ効率的に供給するためには、製油所の更なる高度化に向けた技術の開発実用化が必要である。このため、非在来型原油を含めた重質油を原料として、製油所におけるボトムレス化、余剰となる分解留分の高付加価値等のためのプロセスや触媒技術等の開発を行う。また、次世代の技術シーズ創出のため、これまでの技術とは

異なる発想により我が国唯一の革新的な新規触媒研究、新規膜分技術研究、新規製造プロセス研究等を産官学の連携等により実施する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに重質油対応型高過酷度接触流動分解技術(HS-FCC)については、3千BD規模(商業レベルの1/10規模)の実証研究を通じ、プロピレン収率20%以上(既存技術4%程度)、将来不足が予想される高オクタン価ガソリン基材(RON98(既存技術92程度))の製造を可能とする技術を確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(5) 次世代高信頼性ガスセンサー技術開発

概要

一酸化炭素中毒やガス漏れなどのガス事故を限りなくゼロに近づけるため、センサー素子のナノレベルでのメカニズム解析及び開発設計を行い、コードレスで高信頼性を有する次世代高信頼性ガスセンサ(COセンサ・メタンセンサ)を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、最先端のナノテクノロジー及びMEMS技術を導入し、電池駆動で5年以上の長寿命、高信頼性(数百ppm以下の故障率)、低コストなCOとメタンのセンサを開発する。

研究開発期間

2008年度～2011年度

(6) 天然ガスの液体燃料化(GTL)技術実証研究(運営費交付金)

概要

硫黄等を含まず排出ガスがクリーン、着火性が高いという特徴を有することから石油系燃料代替として期待されるGTLについて、天然ガス中に含まれるCO₂を除去せず、原料として積極的に活用することから、従来利用が困難であったCO₂を多く含むガス田からの天然ガスが利用可能、CO₂除去装置が不要であることによる生産設備コストの低減が可能、といった強みを有する我が国独自のGTL製造技術の確立を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、実証プラントによる運転研究(500バレル/日)を行い、商業規模でのGTL製造技術を確立する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(7) 石油・天然ガス開発・利用促進型大型/特別研究(運営費交付金)(4 - - 参照)

(8) 高効率ガスタービン実用化技術開発(4 - - 参照)

4 - - .メタンハイドレート等非在来化石資源の利用技術

(1)メタンハイドレート開発促進委託費

概要

日本周辺海域に相当量の賦存が見込まれ、国産のクリーンなエネルギー資源として有望なメタンハイドレートを利用可能とするため、資源量評価手法、生産手法及び環境影響評価手法等の確立のための技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2016年度までに、商業的産出のための技術を整備することを目指し、日本周辺海域におけるメタンハイドレートの賦存状況と特性の明確化、有望賦存海域からのメタンハイドレート資源フィールドの選択及び現場産出試験等による生産手法の確立等を推進する。

研究開発期間

2001年度～2016年度

(2)革新的次世代石油精製等技術開発(4 - - 参照)

4 - - .石炭クリーン利用技術

(1)革新的ゼロエミッション石炭火力発電プロジェクト

概要

石炭の高効率な利用を図るために、

- ・ 酸素吹きによる石炭ガス化発電の開発実証及び化学吸収法によるCO₂の分離・回収技術の実証
- ・ 石炭ガス化発電からCCSまで一貫したトータルシステムの設計等
- ・ 次世代IGCC(石炭ガス化複合発電)など革新的な石炭ガス化技術にかかる先進基盤研究

を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、パイロットプラントにおいて、高圧の石炭ガスからCO₂の分離・回収技術の確立及びガス化炉の信頼性向上へ向けて、3炭種以上の適応炭種拡大試験を実施する。

研究開発期間

2007年度～2012年度

(2)国際革新的ゼロエミッション石炭火力発電プロジェクト補助金

概要

石炭火力発電から排出されるCO₂の削減技術について諸外国との実証事業等を実施し、当該技術の普及基盤を整備することにより、エネルギー供給に対する環境上の制約を取り除き、もって我が国エネルギー需給構造の安定化を図る。

技術目標及び達成時期

石炭ガス化技術等実証普及事業では、海外において取り組みが進められているゼロエミッション型石炭火力発電の石炭ガス化・発電技術、CO₂分離回収技術、

CO₂輸送貯留技術等に関する情報収集や関連する技術調査の実施等により、我が国におけるゼロエミッション型石炭火力発電の実用化開発に資する技術・知見を得る。

酸素燃焼国際共同実証事業では、既存の微粉炭火力発電の改造による酸素燃焼方式のゼロエミッション型石炭火力発電プラントの実用化を目標とするものであり、既存のプラントの改造により対応可能であること、酸素燃焼を行うことにより、燃焼ガスからCO₂を分離する装置が不要であることから、比較的 low コストで極めて大きなCO₂削減効果が期待できる。

石炭火力発電原油増進回収国際共同事業では、2008年5月の日中首脳会談で合意された「日中間でのCCS-EOR（二酸化炭素の回収・貯留、石油増進回収法）協力」に係る日中共同事業として、中国における石炭火力発電CCS-EOR事業の事前調査としてCCS-EORの有効性確認、CCS-EORの経済性・事業実現性等を検討する。これらにより、多量のCO₂排出削減を実現するモデルの構築、世界のCO₂排出削減への貢献が期待出来る。

研究開発期間

2007年度～2016年度

(3) 先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発費補助金

概要

従来の超々臨界圧火力発電(USC)は、蒸気温度の最高温度は630程度が限界で、送電端熱効率も42～43%が原理的限界といわれてきた。しかしながら、近年の材料技術の進歩により、700以上の蒸気温度を達成できる可能性が見えてきたことから、これらの材料を活用した先進超々臨界圧火力発電技術(A-USC)の開発を行うものである。A-USCは、蒸気温度700級で46%、750級で48%の高い送電端熱効率の達成が可能な技術であり、2020年以降増大する経年石炭火力発電のリプレース需要に対応するため、早急に技術開発を進める必要がある。そのため、ボイラーメーカー、タービンメーカー及び材料メーカーが共同でA-USCの技術開発に取り組む。

技術目標及び達成時期

平成22年度までにシステム基本設計を完了し、シミュレーションにより送電端熱効率46%～48%の達成が可能なことを確認する。平成24年度までにボイラー、タービン部材等が700以上の蒸気温度に耐えられるかどうかを試作、評価し、経済性を含めたシステム成立性への見通しを得る。平成27年～平成28年度に実缶試験、回転試験を実施し、蒸気温度700以上の条件下でボイラー、タービンの信頼性を確認する。また、ボイラー、タービン部材について3万～7万時間の長期信頼性試験を実施し材料特性を検証する。

研究開発期間

2008年度～2016年度

(4) 石炭利用技術開発(一部、運営費交付金)

概要

環境適合的な石炭利用の拡大を図るため、石炭利用プロセスにおける環境影響を低減させる手法の開発等、クリーン・コール・テクノロジーの開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、

- ・ 化学原料等に利用可能な合成用ガスを石炭乾留ガスから無触媒で製造する技術をパイロットプラントで確立する(無触媒石炭乾留ガス改質技術開発)。

2011年度までに、

- ・ 石炭利用プロセスにおいて、環境分析技術の高精度化、環境影響成分の挙動解析のためのモデルの構築等により、環境への影響低減手法を開発する(戦略的炭化ガス化・燃焼技術開発)。

研究開発期間

1995年度～2011年度

- ・ 戦略的炭化ガス化・燃焼技術開発 2007年度～2011年度
- ・ 無触媒石炭乾留ガス改質技術開発 2006年度～2009年度

(5) 噴流床石炭ガス化発電プラント開発費補助金

概要

供給安定性に優れた石炭の高効率かつ低環境負荷での利用を図るため、石炭をガス化して燃料とし、コンバインドサイクル(ガスタービンと蒸気タービンの組合せ)を駆動する高効率発電技術(石炭ガス化複合発電技術(IGCC: Integrated coal Gasification Combined Cycle)の実証試験を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、25万kWの実証機を用いた実証試験により、熱効率40.5%(送電端、高位発熱量ベース)を目指す。この目標は50万kWの商用機における熱効率46～48%に相当する。本技術は実証試験終了後の2010年度より商用化が可能である。

研究開発期間

1999年度～2009年度

(6) 資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発(運営費交付金)(4 - 参照)

4 - - . その他・共通

- (1) 新エネルギー技術実用化補助事業 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (2) 非化石エネルギー産業技術研究助成事業 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (3) 固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (4) 燃料電池先端科学研究 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (5) 固体酸化物形燃料電池システム要素技術開発 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (6) 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (7) 水素貯蔵材料先端基盤研究 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (8) 水素社会構築共通基盤整備事業 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (9) 水素先端科学基礎研究事業 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (10) 固体酸化物形燃料電池実証研究 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (11) 燃料電池システム等実証研究 (運営費交付金)(4 - - 参照)

5．政策目標の実現に向けた環境整備（成果の実用化、導入普及に向けた取組）

5 - ．総合エネルギー効率の向上

- 事業者単位の規制体系の導入
- 住宅・建築物に係る省エネルギー対策の強化
- セクター別ベンチマークの導入と初期需要創出（高効率機器の導入補助等）
- トップランナー基準の対象機器の拡充等
- アジアにおける省エネルギー対策の推進を通じた我が国の国際競争力の向上
- 国民の省エネルギー意識の高まりに向けた取組

5 - ．運輸部門の燃料多様化

- 公共的車両への積極的導入
- 燃費基準の策定・改定
- アジアにおける新エネルギー協力
- 国際標準化による国際競争力向上

5 - ．新エネルギー等の開発・導入促進

- 補助金等による導入支援
- 新エネルギーベンチャービジネスに対する支援の拡大
- 新エネルギー産業構造の形成
- 電気事業制度・ガス事業制度の在り方の検討

5 - ．原子力利用の推進とその大前提となる安全の確保

- 電力自由化環境下での原子力発電の新・増設の実現
- 資源確保戦略の展開
- 次世代を支える人材育成
- 中小型炉の海外市場への展開、我が国原子力産業の国際展開支援
- 原子力発電拡大と核不拡散の両立に向けた国際的枠組み作りへの積極的関与
- 国と地域の信頼強化

5 - ．化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

- 資源国等との総合的な関係強化（研究開発の推進・協力、人材育成・技術移転、経済関係強化など）
- 化石燃料のクリーンな利用の開拓

6．研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金による実施されるもの（事業名に（運営費交付金）と記載したものは、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

また、事業名に（採択テーマ）と記載された事業は、提案公募事業により採択されたテーマを記載したものであり、その採択や評価等は、提案公募事業の実施機関の責任の下、実施されるものである。

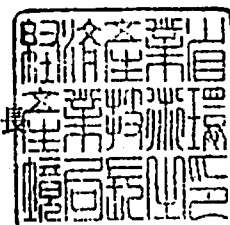
7. 改訂履歴

- (1) 平成16年7月7日付け、省エネルギー技術開発プログラム基本計画、新エネルギー技術開発プログラム基本計画、燃料技術開発プログラム基本計画、電力技術開発プログラム基本計画、原子力技術開発プログラム基本計画制定。固体高分子形燃料電池/水素エネルギー利用プログラム基本計画(平成16・02・03産局第6号)は、新エネルギー技術開発プログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (2) 平成17年3月31日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第8号) 新エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第10号) 燃料技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第12号) 電力技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第11号) 原子力技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第13号)は、廃止。
- (3) 平成18年3月31日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第14号) 新エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第9号) 燃料技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第17号) 電力技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第12号) 原子力技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第13号)は、廃止。また、次世代低公害車技術開発プログラム基本計画(平成17・03・29産局第2号)は、省エネルギー技術開発プログラム基本計画及び燃料技術開発プログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (4) 平成19年4月2日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成17・03・31産局第19号) 新エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成18・03・31産局第15号) 燃料技術開発プログラム基本計画(平成18・03・31産局第18号) 電力技術開発プログラム基本計画(平成18・03・31産局第17号) 原子力技術開発プログラム基本計画(平成18・03・31産局第16号)は、廃止。
- (5) 平成20年4月1日付け、エネルギーイノベーションプログラム基本計画制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成19・03・26産局第1号) 新エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成19・03・20産局第4号) 燃料技術開発プログラム基本計画(平成19・03・19産局第7号) 電力技術開発プログラム基本計画(平成19・03・16産局第3号) 原子力技術開発プログラム基本計画(平成19・03・23産局第2号)は、本プログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (6) 平成21年4月1日付け制定。エネルギーイノベーションプログラム基本計画(平成20・03・25産局第5号)は廃止。

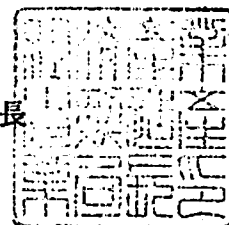
経済産業省

平成21・03・24産局第1号
平成21年4月1日

経済産業省産業技術環境局長



経済産業省製造産業局長



環境安心イノベーションプログラム基本計画の制定について

上記の件について、イノベーションプログラム実施要領（平成16・07・27産局第1号）第4条第1項の規定に基づき、別添のとおり制定する。

環境安心イノベーションプログラム基本計画

1. 目的

資源制約を克服し、環境と調和した持続的な経済・社会の実現と、安全・安心な国民生活を実現するため、革新的な技術開発や低炭素社会の構築等を通じた地球全体での温室効果ガスの排出削減、廃棄物の発生抑制（リデュース）、製品や部品の再使用（リユース）、原材料としての再利用（リサイクル）推進による循環型社会の形成、バイオテクノロジーを活用した環境に優しい製造プロセスや循環型産業システムの創造、化学物質のリスクの総合的な評価及びリスクを適切に管理する社会システムの構築を推進する。

2. 政策的位置付け

第3期科学技術基本計画（2006年3月閣議決定）及び分野別推進戦略（2006年3月総合科学技術会議）における国家的・社会的課題に対応した研究開発の重点推進分野である環境分野及び国の存立にとって基盤的であり国として取り組むことが不可欠な研究開発の推進分野であるエネルギー分野に位置付けられるものであるほか、次のとおり位置付けられている。

新産業創造戦略2005（2005年6月経済産業省）

先端的新産業分野として揚げられた戦略7分野の一つの「環境・エネルギー・機器・サービス」及び「健康・福祉・機器・サービス」に該当し、「技術戦略マップ」を活用し、効果的な研究開発を促進することが今後の取組として指摘されている。

「新・国家エネルギー戦略」（2006年5月経済産業省）

省エネルギーフロントランナー計画において省エネルギー技術開発の一層の推進を図ることとしている。

経済成長戦略大綱（2006年7月財政・経済一体改革会議）

「環境と経済の両立を図るため、金融面からの環境配慮を進めるとともに、環境技術の開発、3Rイニシアティブやアジア環境行動パートナーシップ構想による優れた技術・制度の国際的な普及と標準化等に向けた取組を進める」との方針が示されている。

イノベーション25（2007年6月閣議決定）

イノベーション立国に向けた政策ロードマップ - 社会システムの改革戦略 - 早急に取り組むべき課題「環境・エネルギー等日本の科学技術力による成長と国際貢献」において、「環境・資源・エネルギー等の世界的制約となる課題の解決に貢献し、技術開発や環境整備を通じて持続可能な産業体系・社会基盤・生活を実現することにより世界と日本の経済成長の原動力とするエコイノベーションを実現すべきである。」との方針が示されている。

イノベーション立国に向けた政策ロードマップ - 技術革新戦略ロードマップ「世界的課題解決に貢献する社会 ものづくり技術分野」の中で「3R型設計・生産・メンテナンス技術、製品の設計・製造段階でのリサイクル阻害物質の使用排除を可能とする技術、製品中の有用・有害物質管理技術の開発・標準化」が資源を有効利用し、環境に配慮したものづくり技術として位置づけられている。

21世紀環境立国戦略（2007年6月閣議決定）

今後1、2年で重点的に着手すべき八つの戦略の中で「3R関連法制度等の充実や技術開発の支援を通じて、製品のライフサイクル全体での天然資源投入量の最小化や

再生資源の高付加価値製品への利用を促進し、資源生産性の更なる向上と環境負荷の低減を図る」との方針が示されている。

同じく、今後1、2年で重点的に着手すべき八つの戦略のうち「環境・エネルギー技術の中核とした経済成長 - 環境技術・環境ビジネスの展開」において「環境重視・人間重視の技術革新・社会革新を図る「エコイノベーション」というコンセプトの下、我が国の強みである「ものづくり」と「環境・省エネ」の技術力を梃子に、持続可能な生産システムへの転換、ゼロエミッション型社会インフラ整備、環境価値を重視した持続可能な生活の実現に向けた技術革新と社会システム改革を一体的に推進し、その成果をOECD等を通じて世界に発信する。」との方針が示されている。

「地球温暖化対策技術研究開発の推進について」(2003年4月総合科学技術会議)

総合科学技術会議重点分野推進戦略専門委員会に設置された温暖化対策技術プロジェクトチームでまとめられた上記報告書における研究開発推進戦略に対応するものである。

京都議定書目標達成計画(2005年4月閣議決定)

目標達成のための対策と施策のうち地球温暖化対策技術開発の推進に位置づけられるものである。

Cool Earth - エネルギー革新技术計画(2008年3月経産省公表)

重点的に取り組むべきエネルギー革新技术「21」を含むものである。

低炭素社会づくり行動計画(2008年7月閣議決定)

「低炭素社会を目指し、長期目標を実現するために重要な革新的技術開発の推進及び既存先進技術の普及促進を行う。」とされている。

産業構造審議会廃棄物・リサイクル小委員会基本政策ワーキンググループ報告書(2008年1月)

「近年、安定供給が懸念されているレアメタルの中には、使用製品からの回収・再利用技術が確立していないものもあることから、回収された使用済製品から効率的に抽出するための新たな技術の開発にも取り組むべきである。」とされている。

バイオマス・ニッポン総合戦略(2006年3月閣議決定)

バイオマスの変換に関する戦略として、経済性の向上、革新的な変換技術の開発に取り組むこととしている。

ドリームBTジャパン(2008年12月BT戦略推進官民会議取りまとめ)

バイオテクノロジー(BT)を活用して、環境に優しい低炭素社会の実現と環境修復のための技術開発と実用化支援を行うこととしている。

3. 達成目標

・地球温暖化防止新技術

- (1) 世界全体の温室効果ガス排出量を現状に比して2050年までに半減するという長期目標を達成するため、経済成長と温室効果ガスの排出削減の双方を同時に達成できる革新的技術を開発するとともに、低炭素社会モデル構築に向けた取り組みを推進。

【目標】 世界全体の温室効果ガス排出量を現状に比して2050年までに半減

- (2) 「京都議定書」で課せられた温室効果ガス削減目標の達成

(「京都議定書目標達成計画」に示された各部門の目安としての目標(基準年比)は以下のとおり)

【目標】

エネルギー起源CO₂: +1.3~2.3%

非エネルギー起源CO₂: 0.04%

メタン: 0.9%

一酸化二窒素： 0.6%
代替フロン等3ガス： 1.6%

() 「京都議定書目標達成計画」とは、「地球温暖化対策の推進に関する法律」に基づき、「京都議定書」の6%削減約束を確実に達成するために必要な措置を定めるものをいう(平成17年4月閣議決定、平成18年7月一部改定、平成20年3月全部改定)

・資源制約克服 / 3R

「第2次循環型社会形成推進基本計画(平成20年3月閣議決定)に基づき、2015年度までに以下の目標の達成を図る。

資源生産性：約42万円/トン(2000年度：約26万円/トン)

循環利用率：約14~15%(2000年度：約10%)

最終処分量：約23百万トン(2000年度：約57百万トン)

(備考)

資源生産性 = (GDP) / (天然資源等投入量)

循環利用率 = (循環利用量) / (循環利用量 + 天然資源等投入量)

・環境調和産業創造バイオ

バイオプロセスによって有用物質を生産し、廃棄物や汚染物質を発酵等により処理又は再資源化するという、循環型の産業システムを実現するために必要な技術基盤の構築を図るとともに、遺伝子組換え体の産業利用における安全性管理の充実を図る。具体的には、工業プロセスにバイオテクノロジーを導入することや、微生物や植物機能等を活用したモノ作り技術の開発、バイオマス利用、及びバイオ技術による産業廃水等処理技術の開発等を通して、環境調和型産業の創出に資する。

・化学物質総合評価管理

化学物質のリスクの総合的な評価を行いつつ、リスクを評価・管理するための技術体系を構築する。そのために、化学物質のリスクに係る国民の理解増進のための基盤、事業者が自らリスクを判断する手段及び国が規制等の施策を講ずる際の手段として、化学物質のライフサイクルにわたるリスクの総合的な評価管理を行うための手法を確立するとともに、リスクの削減に資するプロセス、手法の開発、さらには知的基盤を整備する。

4. 研究開発内容

- 1. CO2固定化・有効利用技術

地球温暖化対策のため、排出される二酸化炭素を分離回収・固定化することや、有用物質に変換する技術を開発し、低炭素社会の構築に資する。

() 共通技術開発等

(1) プログラム方式二酸化炭素固定化・有効利用技術開発

概要

二酸化炭素の固定化・有効利用技術開発は、現時点においては基礎的な段階に属する研究が多く、長期的観点からの取り組みが必要不可欠。このため本事業では将来において実現可能性の高い二酸化炭素固定化・有効利用技術に関する革新的な技術シーズを発掘し、実現可能性を確認した上で、基盤技術として確立する。

事業期間

1999年度～2011年度

実施形態

適切な研究課題等を選定して研究開発を実施。

(2) 地球環境国際研究推進事業

概要

地球温暖化問題の解決に向け、CTI（気候変動技術イニシアティブ）等の国際的な枠組みを活用し、諸外国の先進的取組との研究協力や、発展途上国への技術普及を進めることにより、世界的な温暖化問題への取り組みを強化する。

事業期間

2002年度～2011年度

実施形態

諸外国との連携のもと、テーマ毎に適切な体制を構築し実施。

() 二酸化炭素回収・貯留(CCS)に関する技術開発

(1) 分子ゲート機能CO₂分離膜の技術研究開発

概要

二酸化炭素回収・貯留(CCS)の実用化に向け、最大の課題のひとつであるCO₂分離回収コストの大幅低減を目指し、圧力を有するガスからのCO₂/H₂の分離用に期待されている膜分離技術の実用化のため、分子ゲート機能CO₂分離膜の高圧下におけるCO₂/H₂選択性の向上、分離膜モジュールの大型化等に取り組む。

技術目標及び達成時期

2015年頃において、石炭ガス化複合発電(IGCC)等で発生する圧力ガスから従来の3分の1程度(1,500円/t-CO₂程度)のコストでCO₂を分離回収することを可能とする膜分離技術の確立を目指す。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(2) 二酸化炭素貯留隔離技術研究開発

概要

二酸化炭素回収・貯留(CCS)(地中貯留及び海洋隔離)の実用化に向け、CCS実施における安全性評価・社会的信頼醸成に必要な基盤技術や手法の開発に重点的に取り組む。本事業の実施にあたっては、国内外で実施される実証事業等と必要な連携をしながら取り組む。

また、本事業で獲得した安全性評価等に関する知見を活用し、CCS事業を計画する上での基礎情報である、貯留隔離ポテンシャルの調査を行う。

技術目標及び達成時期

貯留した二酸化炭素のモニタリング技術、挙動予測手法、環境・生物影響評価、安全性評価手法の開発、及び全国貯留層賦存量調査を行う。

研究開発期間

フェーズ1：2000年度～2004年度

フェーズ2：2005年度～2012年度

注) 本事業は、平成20年度までの「二酸化炭素地中貯留技術研究開発」(うち実証試験を除く)と「二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発」を統合したもの。

(参考：「二酸化炭素海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発」の研究開発期間)

フェーズ1：1997年度～2001年度

フェーズ2：2002年度～2006年度

フェーズ3：2007年度～2011年度

当初単独事業として2011年度まで実施する予定であったが、2009年度

より地中貯留技術研究開発と事業統合。海底下帯水層への地中貯留等に係る、安全性評価・環境影響評価等にこれまでの成果を活用する。

(3) 二酸化炭素削減技術実証試験委託費

概要

二酸化炭素回収・貯留(CCS)技術の実用化に向けた実証試験を行う。具体的には、火力発電所等の大規模発生源から分離回収したCO₂を年間約10万トン規模で地下帯水層(地下1,000m程度)等へ貯留する技術を実証するとともに、長期挙動予測可能な二酸化炭素挙動予測シミュレーション技術、モニタリング技術等の基盤技術の確立を行う。

技術目標及び達成時期

2015年度までに、CCS技術の本格導入となる、100万トン/年規模での地中貯留を実現するために必要な基盤技術を確立する。

研究開発期間

2008年度(補正)~2013年度

() 環境調和型製鉄プロセス技術開発(運営費交付金)

概要

高炉ガスからの効率的な二酸化炭素分離と中低温排熱の有効活用及び水素を炭素(コークス)の一部代替として鉄鉱石を還元する革新的製鉄プロセスの開発を行う。

技術目標及び達成時期

最終的な技術開発目標として製鉄プロセスにおけるCO₂排出量を30%削減することを目指し、2050年までに実用化する。

研究開発期間

2008年度~2017年度

() 大規模植林

(1) バイオ技術活用型二酸化炭素大規模固定化技術開発

概要

バイオエタノール化に適した樹木への環境耐性付与を遺伝子技術により実施し、これら原料樹木の不良環境下での効率的な植林技術を開発する。

技術目標及び達成時期

事業4年目までに、未利用の不良環境地でも生育できる高セルロース樹木を遺伝子技術により開発し、実証植林を行う。

研究開発期間

2008年度~2011年度

- 2. 脱フロン等技術

代替フロンの排出量を抑制するため、代替フロンを削減する技術(脱フロン等技術)を開発する。

(1) 革新的ノンフロン系断熱材技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、住宅・建築物の省エネルギーという社会適用性に応えるため超微細発泡等による断熱性能の向上のための技術開発を行う。

技術的目標及び達成時期

既存のノンフロン断熱材では達成できていない断熱性能を実現し、更には従来のフ

ロン断熱材の断熱性能を超える高断熱性能を実現する断熱材を2012年頃を目途に開発する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(2) ノンフロン型省エネ冷凍空調システムの開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、家庭用・業務用及び運輸用エアコン及びショーケース等に使用可能なノンフロンかつ高効率を達成でき、安全性についても配慮された新たな冷凍システムの開発を行う。

技術的目標及び達成時期

2009年度までに、ノンフロン(自然冷媒等)型省エネ冷凍・空調システムを開発する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

・資源制約克服/3R

() 金属資源等3R対策

(1) 希少金属等高効率回収システム開発(再掲)

概要

小型電子・電気機器にはベースメタルや、金、銀等の貴金属の他、インジウム、ニッケル等の希少金属等を含有している。現状では、これらの機器が廃棄された後は、非常に高温で処理する乾式製錬技術を用いてリサイクル・処理されているため、多大なエネルギーを消費するばかりか、回収可能な金属が銅、金、銀等に限定されており、その他の希少金属等は回収できずに廃棄処分されている。このため、湿式製錬技術を活用した高効率な最適技術の開発等を通じて、回収工程の省エネルギー及び希少金属等の回収率向上を図る。

技術目標及び達成時期

- ・従来方法(乾式製錬)で処理する場合に比べて、大幅な省エネルギーの実現(省エネルギー効果:原油換算で約78万k1/年削減)
- ・廃小型電子・電気機器、廃超硬工具等中に含まれる希少金属等の回収率の向上(インジウム0% 90%、ニッケル50% 95%、コバルト0% 95%、タンタル0% 80%、タングステン90% 95%、レアアース0% 80%)

研究開発期間

2007年度～2010年度

(2) 希土類金属等回収技術研究開発

概要

今後、普及拡大が見込まれる製品の製造工程において排出されるレアアースを含む不要物など技術的・経済的に抽出が困難なレアアース含有物について、レアアース等有用金属のリサイクル技術の研究開発を行う。

具体的には、液晶パネル用ガラス、ハードディスク用ガラスの製造工程等で使用された低品位状態のレアアースについて高品位化し再利用するための技術開発を実施する。

技術目標及び達成時期

液晶パネル用ガラス、ハードディスク用ガラスなどの精密な表面処理が必要な製品の研磨に使用されているセリウム等のレアアースを含有する研磨剤について、

研磨廃滓中のレアアース成分と不純物の分離に新たな低温での化学的・物理的プロセスを確立・導入（具体的には低温での効率的な化学処理や、研磨剤成分ではなく不純物を物理的に分離する回収プロセスに変更する等）することでレアアース回収プロセスの低コスト化及びエネルギー使用合理化を目標とする。

研究開発期間

2008年度（補正）～2012年度

（3）希少金属代替材料開発プロジェクト（再掲）

概要

希少金属は、特殊用途において希少な機能を発揮する一方で、その希少性・偏在性・代替困難性から、市場メカニズムが必ずしもうまく機能せず、その供給停止は川下の経済成長の制約要因となりうるリスクを伴っている。近年、「コンピュータによる材料設計」、「ナノテクによる微細構造制御」等が飛躍的に向上した結果、従来できなかった、「コンピュータによる最適制御設計による候補元素系の探索」、「結晶粒界、界面の制御等マイクロ構造の制御」等が可能となりつつあることから、こうした最先端技術を用いることで、希少金属の新たな代替/使用量低減技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、以下希少金属元素の使用原単位について現状と比較して以下の低減ができる製造技術を開発し、ユーザー企業、大学等の外部機関に対して機能評価のためにラボレベルで提供できる（試料提供）水準に至るまでの技術を確立することを目標とする。また、製品の機能や製造コストは現状と同等を少なくとも維持することを前提とする。

- ・透明電極向けインジウム（In）：現状から50%以上低減
- ・希土類磁石向けディスプロシウム（Dy）：現状から30%以上低減
- ・超硬工具向けタングステン（W）：現状から30%以上低減

研究開発期間

2007年度～2011年度

（ ）水資源制約克服

（1）環境調和型水循環プラント実証事業（運営費交付金）

概要

我が国が強みを持つ、膜技術を始めとする水処理技術を活用し、省水型・環境調和型の水循環システムを開発するとともに、海外展開等を支援する。

技術目標及び達成時期

2013年度までに省水型・環境調和型の水循環システムを確立し、以降、国内外の水不足が深刻な地域へ当該水循環システムを順次普及させる。

研究開発期間

2009年度～2013年度

（2）環境調和型水循環技術開発（運営費交付金）（再掲）

概要

我が国が強みを持つ、膜技術を始めとする水処理技術を強化し、省水型・環境調和型の水循環システムの開発に資する省エネ・省水型の要素技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2013年度までに、以下の技術を開発する。

- 革新的膜分離技術の開発：

従来法に比べ膜透過加圧エネルギー等を50%以上削減。

- 省エネ型膜分離活性汚泥法（MBR）技術の開発：
従来法に比べ膜洗浄の曝気（空気気泡）エネルギー等を30%以上削減。
- 有用金属・有害物質の分離・回収技術の開発：
従来法に比べ汚泥の削減により汚泥処理・処分エネルギーを80%以上削減。
- 高効率難分解性物質分解技術の開発：
従来法に比べ窒素処理に係るエネルギーを50%以上削減。
オゾン酸化法等のエネルギーを50%以上削減。

研究開発期間

2009年度～2013年度

・環境調和産業創造バイオ

(1) 植物機能を活用した高度モノ作り基盤技術開発

() 植物利用エネルギー使用合理化工業原料生産技術開発（運営費交付金）

概要

現在の化学工業プロセスに代わる、植物の有する有用物質生産能を活用した省エネルギー・低環境負荷型の工業原料生産プロセスへの変換を促進する。具体的には、工業原料の生産に関わる重要な物質生産プロセスに関する代謝系をゲノム情報に基づき解析するとともに、有用物質生産制御に必要な一連の代謝遺伝子群の発現を統一的に制御する技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、工業原料として有望なバイオマスとしてイソプレノイド、油脂などの有用物質生産に関わる代謝経路とその調節メカニズム及び生産物質の蓄積・移動に係るメカニズムの解析を行い、関連遺伝子情報を整備するとともに、統括的発現制御技術を開発する。

研究開発期間

2002年度～2009年度

(ii) 植物利用高付加価値物質製造基盤技術開発

概要

動物や微生物による物質生産と比較して、安全性が高い、生産コストが低い、省エネルギーで環境調和型といった特徴を有する植物を活用した高機能タンパク質等の高付加価値物質生産（モノ作り）の基盤技術を開発するために、有用物質を高効率に高生産させる組換え植物の基盤技術を開発するとともに、閉鎖型人工環境下での高効率な栽培技術の開発を一体的に進める。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、実用植物において実用可能なレベルまで有用物質を効率的に高生産・高蓄積させる組換え植物を開発するとともに、目的有用物質を安定かつ均一に生産・蓄積させる栽培技術を確立し、その生産の実用性を閉鎖型人工環境下において確認する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(2) 微生物機能を活用した環境調和型製造基盤技術開発（再掲）

() 微生物機能を活用した高度製造基盤技術開発（運営費交付金）

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、省エネルギーかつ環境負荷が少ないといった特徴を有する微生物機能を活用した有用物質の革新的な生産プロセス（モノ作り）の技術を構築するため、産業用途に必要な機能既知遺伝子で構成されたゲノムを持ち、物質生産性向上につながる性能を備えた高

性能宿主細胞の創製や、微生物反応の多様化・高機能化技術を開発するとともに、バイオマスを原料として有用物質を体系的かつ効率的に生産する（バイオリファイナリー）ための基盤技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、物質生産性向上につながる性能を備えた高性能宿主細胞を創製するとともに、バイオプロセスの実用化適用範囲の拡大のための微生物反応の多様化・高機能化技術の開発を行う。バイオリファイナリー技術については、バイオマスを高効率で糖化し、糖から高効率で各種化成品の基幹物質を生産するバイオプロセス体系を構築する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(ii) 微生物群のデザイン化による高効率型環境バイオ処理技術開発（運営費交付金）

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、従来エネルギー多消費・廃棄物多排出型であった廃水・廃棄物処理において、微生物群の構成及び配置等を人為的に制御（デザイン化）することで、その処理効率を大幅に向上させ、省エネルギーで廃棄物も少ない高効率型廃水、廃棄物処理の基盤技術を確立する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、特定有用微生物群を人為的に安定導入・維持もしくは人為的に空間配置・優先化させる等のデザイン化技術を開発し、従来の廃水、廃棄物処理に比べより高効率で省エネルギーな処理技術を開発するとともに、実用化に資するための実証可能なテストプラント規模にて評価する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発（再掲）

概要

食料と競合しないセルロース系バイオマスからバイオ燃料を製造する革新的技術の開発を軸に、バイオ燃料生産に有用な遺伝子組み換えによる植物・微生物の開発等、バイオ燃料のコスト競争力強化に資するバイオリファイナリーの一環として、ブタノール、プロピレン等の製造技術の実用化を目指した開発を行う。

技術目標及び達成時期

2013年度までに、セルロース系バイオマスを原料とし、バイオ燃料製造の従来技術に比べて画期的に優れた効率や低コスト化を可能とする糖化・発酵等の基盤技術を開発するとともに、バイオマス利用に資する微生物の利用基盤技術の開発を行う。さらに、プロパノール等の高効率取得のための触媒開発等により、化成品製造の実用化を目指した技術開発を行い、バイオマスに関する燃料分野と化成品分野の融合・連携を図る。

研究開発期間

2007年度～2013年度

- 1. 化学物質総合評価管理

(1) 化学物質の最適管理をめざすリスクトレードオフ解析手法の開発（運営費交付金）

概要

化学物質のリスクを共通指標で比較、検討し、事業者等における代替物質の選択の際に、リスクの相互比較が可能となるリスク評価手法及び社会経済分析等リスクトレードオフ解析手法を構築する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、代表的な化学物質用途群につき、化学物質のライフサイクルに応じたあらゆる暴露を考慮した排出量推計手法や室内暴露評価手法等環境動態解析手法を構築する。さらに、用途群内の物質間でのリスクトレードオフ解析手法を開発する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(2) ナノ粒子の特性評価手法開発(運営費交付金)(再掲)

概要

ナノ粒子のキャラクタリゼーション、計測技術の確立とともに、生体影響等評価手法、暴露評価手法及びナノテクノロジーによるリスク不安に対処したリスク管理手法を開発する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、生体影響等評価手法、暴露評価手法及びリスク評価手法を開発し、ナノ粒子のリスク評価及び管理の考え方の提言を行う。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(3) 構造活性相関手法による有害性評価手法開発(運営費交付金)

概要

従来の動物実験による反復投与毒性試験に代わり、*in silico* や類推等を用いた予測・評価を可能とするため、既知の毒性情報を整備したデータベースを基に、よりの確に効率よく毒性を評価可能とする有害性評価支援システムを構築する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、公開されている反復投与毒性試験データや毒性作用機序情報が搭載されたデータベース、肝臓における代謝産物・代謝経路を予測する手法、及び対象とする化学物質の標的臓器・症状やその毒性の強さの範囲等を予測する手法を開発する。さらに、それらを統合して毒性判断に必要な情報を効率的に抽出する有害性評価支援システムを構築する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(4) 石油精製物質等簡易有害性評価手法開発(運営費交付金)(再掲)

概要

石油の生産及び流通の合理化を図る観点から、石油製品等に含まれる化学物質によるリスクを把握し、必要な対策を適切に行うことを可能とするため、*in vitro* 培養系技術等の活用により遺伝子組換え細胞等を用いた *in vitro* 系簡易有害性予測手法、また、トキシコゲノミクスを活用した短期動物試験結果と相関する遺伝子発現データセットを開発する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、遺伝子導入技術、幹細胞分化誘導技術、生物発光技術等を適用した培養細胞を用いて、試験期間1ヶ月程度、発がん性、催奇形性及び免疫毒性を予測評価できる試験手法を開発し、また、遺伝子発現解析技術を短期動物試験に適用し、28日間反復投与試験結果と相関する遺伝子発現データセットを完成させる。また、標準的な試験プロトコルを策定する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

- 2 . 化学物質リスク削減技術開発

アスベスト含有建材等回収・処理等技術開発事業（運営費交付金）

概要

今後、大量の排出が予測されるアスベスト含有建材等の廃棄物を対象として、そのアスベスト含有状況について簡易かつ確実な探知・分析を可能とし、安全性、信頼性の高い回収・処理を実現する関連機器・システムの技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、アスベスト含有製品の使用時、解体・回収・廃棄時においてオンサイト方式で検出感度0.1wt%超レベルに検出できる計測技術を確立し、アスベストを含む建材等の回収・除去現場におけるアスベストの飛散及びばく露を最小化し、回収・除去の安全性及び信頼性等を確保する技術を確立する。また、アスベスト含有廃棄物の無害化処理における安全性、効率性に優れた技術を確立する。

研究開発期間

2007年度～2009年度

・その他

エコイノベーション推進・革新的温暖化対策技術発掘・実証プログラム（運営費交付金）

概要

エコイノベーション（環境重視・人間重視の技術革新・社会革新）の創出および、低炭素社会の構築のため、それに資するテーマを公募し、その実現可能性調査や地域実証試験を実施する。発掘された技術シーズや実証された有望な社会システムモデルは広く国民に示し、民間におけるエコイノベーション推進や低炭素社会構築に関する研究や取組を加速させる。

技術目標及び達成時期

FS結果や実証モデルから生み出された公的機関の実施する研究開発件数や民間主導の取り組みモデル件数を事業のアウトカムとしてモニタリングする。

また、OECDにおいて、エコイノベーション・ロードマップとともに、その進捗を測る指標の2010年を目処にした作成が検討されているところ。こうした指標を参考とし、エコイノベーションが進展する度合いの数値化を可能にした上で調査段階でこれらの指標を設定し国際比較を行う。

研究開発期間

2008年度～2012年度

5 . 政策目標の実現に向けた環境整備（成果の実用化、導入普及に向けた取組）

【導入普及促進】

排出量の多い品目・業種や処理困難物を中心にリサイクルシステムなどの実証・市場化対策に関するフィージビリティ・スタディを実施する。

サプライチェーングループを対象に、部品等の仕様と原材料の使用・副産物の発生状況等に関する診断を実施し、製品設計及び製造プロセスの同時改善の方向性に関する提案、指導を行うとともに、取組事例を分析・評価し、資源投入量の抑制効果の高い優良な事例を公開する。

商品選択に資するわかりやすい3R配慮情報（省資源性や再生資源・部品の使用状況等）を消費者に提供し、環境配慮型製品の市場拡大を推進するため、指標の策定や、情報提供手法の確立、製品の情報検索が可能なシステムの検討・開発を行う。

3R対策が講じられている製品等の市場開拓を促進するため、政府が環境物品等を率先購入することを定めたグリーン購入法について、同法の判断基準が引き続き3R対策

を適切に反映するようにしていく。

化学物質の有害性評価、暴露分析、リスク評価等のデータベースの構築を図るとともに、それらの手法の各種活動（事業者の自主管理活動、事業者、地方自治体等が国民とリスクコミュニケーションを図る活動等）等への導入を図る。

公害防止設備に対する優遇税制等の支援を行う。

【法規制・制度改革】

二酸化炭素回収・貯留（CCS）の国内での本格実施に必要な法規制・制度の整備等に関して検討を行う。

資源有効利用促進法等のリサイクル関連法制度によるスキームを活用して、3R対策を網羅的に講じることにより、循環型社会の構築を図る。

遺伝子組換え生物等の使用等の規制による生物の多様性の確保に関する法律（カルタヘナ法）に基づく立入検査で査収した生物が遺伝子組換え生物であるか否かを判断するための基盤的な技術の高度化や収去方法を確立すること等により、的確な法律の執行体制を整備する。

【ガイドライン】

事業者による自主的取組を促進する観点から、産業構造審議会において策定している「業種別・品目別廃棄物処理・リサイクルガイドライン」（自主的な目標の設定）について、3R対策を加速する観点から適宜フォローアップを行い、改定を行う。

【基準・標準化】

各プロジェクトや民間における技術開発等で得られた成果のうち、標準化すべきものについては、適切な標準化活動（国際規格（ISO/IEC）、日本工業規格（JIS）その他国際的に認知された標準の提案等）を実施する。

CO₂回収・貯留後のモニタリング、植林等によるCO₂固定化量の計算、バイオマス利用時のCO₂排出削減量の評価、環境影響や安全性評価手法など、CO₂固定化・有効利用を推進するに当たって標準化が必要となる事項については、研究・開発状況や社会情勢を常に意識しながら計画的に標準化を推進する。

リサイクル品などの3R配慮製品に対する需要の創出・拡大を図るため、「環境JIS策定促進のアクションプログラム」に基づき、リサイクル品等の品質基準及び試験評価方法の規格（環境JIS）の策定を引き続き推進する。

バイオマス由来プラスチックにおけるバイオマス含有量測定の標準化を推進するとともに、生分解性プラスチックに係る微生物嫌気分解試験方法の国際標準化を着実に実施する。

石油精製物質等簡易有害性評価手法開発については、開発された簡易有害性評価手法等を2014年度を目途に経済開発協力機構（OECD）にテストガイドラインとして提案することを検討し、国際標準化を推進する。

【調達促進】

バイオマス由来プラスチック等、生物機能を用いた生産プロセスにより生産された製品について、グリーン購入法に基づく調達品目として位置付けられるべく検討を行う。

【広報・啓発】

研究開発プロジェクトの成果について広く普及啓発を図るため、シンポジウム等を行う。

3Rの普及・促進を図るため、毎年10月を「3R推進月間」とし、この期間を中心として、3R活動への関係者の取組を促すための「3R推進功労者等表彰」や、循環ビジネス振興のための「資源循環技術・システム表彰」等の普及啓発活動を実施する。

【知的基盤整備】

国内外との共同研究等を通じ、革新的な温暖化対策技術や方策についての情報交換に資する、情報ネットワークの構築等を行う。

物質生産用に関与された汎用宿主細胞や取得した生物遺伝資源は、独立行政法人製品

評価技術基盤機構に整備し、社会に幅広く提供する。

独立行政法人製品評価技術基盤機構の化学物質管理センターにて事業者・国民・公的機関の化学物質管理に関する冷静な対話（科学的知見の共有）を促進するための知的情報基盤整備を図る。

【国際協力】

生物多様性条約に基づく遺伝子資源へのアクセス促進事業において、日本のバイオ関連企業の遺伝子資源保有国（途上国）の遺伝子資源に対するアクセスを促進するための技術的環境整備及び遺伝子資源へのアクセス実施の調整を行う。

【他省庁との連携】

総合化学技術会議が推進する科学技術連携施策群の「食料・生物生産研究」及び「総合的リスク評価による化学物質の安全管理・活用のための開発技術」、ライフサイエンスPT、社会還元プロジェクトの下での関係府省間における適切な連携の実施。

【プロジェクト等との連携】

CO₂固定化・有効利用技術のロードマップに基づき、技術シーズ発掘型技術開発事業成果のプロジェクトへの取り込みや、プロジェクト間の連携により、低炭素社会モデルの構築に資する効果的なCO₂固定化・有効利用システムの実現を図る。

植物機能を活用したモノ作り基盤技術開発に係る2つのプロジェクト間での、遺伝子高発現技術やモデル植物での基盤技術及び実用作物への技術展開に関する情報交換を推進する。

6. 研究開発の実施に当たっての留意事項

- ・事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの（事業名に（運営費交付金）と記載したものは、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。
- ・プログラム目標等については、京都議定書目標達成計画の評価・見直しプロセスに伴う対応を行う。
- ・各プロジェクトを横断的観点からマネジメントする体制を整備し、技術の進捗状況や社会情勢等を踏まえた適切な資源配分、技術成果のレビュー、普及施策の検討、実施すべき技術開発テーマ・領域・分野等の検討等を実施する。

7. 改訂履歴

- (1) 平成12年12月28日付け、生物機能活用型循環産業システム創造プログラム基本計画、化学物質総合評価管理プログラム基本計画制定。
- (2) 平成14年2月27日付け、生物機能活用型循環産業システム創造プログラム基本計画制定。生物機能活用型循環産業システム創造プログラム基本計画（平成12・12・27工総第15号）は、廃止。平成14年2月28日付け、革新的温暖化対策技術プログラム基本計画、3Rプログラム基本計画、化学物質総合評価管理プログラム基本計画制定。化学物質総合評価管理プログラム基本計画（平成12・12・27工総第14号）は、廃止。
- (3) 平成15年3月10日付け制定。革新的温暖化対策技術プログラム基本計画（平成14・02・25産局第16号）、3Rプログラム基本計画（平成14・02・25産局第13号）、生物機能活用型循環産業システム創造プログラム基本計画（平成14・02・25産局第5号）、化学物質総合評価管理プログラム基本計画（平成14・02・25産局第7号）は、廃止。
- (4) 平成16年2月3日付け制定。革新的温暖化対策技術プログラム基本計画（平成15・03・07産局第18号）及びエネルギー環境二酸化炭素固定化・有効利用プログラム基本計画（平成15・03・07産局第19号）は、革新的温暖化対策技術プログラム基本計画に統合することとし、廃止。3Rプログラム基本計画（平成15・03・

- 07産局第6号) 生物機能活用型循環産業システム創造プログラム基本計画(平成15・03・07産局第3号) 化学物質総合評価管理プログラム基本計画(平成15・03・07産局第8号)は、廃止。
- (5)平成17年3月31日付け制定。地球温暖化防止新技術プログラム基本計画(平成16・02・03産局第13号) 3Rプログラム基本計画(平成16・02・03産局第5号) 生物機能活用型循環産業システム創造プログラム基本計画(平成16・02・03産局第15号) 化学物質総合評価管理プログラム基本計画(平成16・02・03産局第3号)は、廃止。
- (6)平成18年3月31日付け制定。地球温暖化防止新技術プログラム基本計画(平成17・03・25産局第8号) 3Rプログラム基本計画(平成17・03・29産局第1号) 生物機能活用型循環産業システム創造プログラム基本計画(平成17・03・25産局第2号) 化学物質総合評価管理プログラム基本計画(平成17・03・25産局第10号)は、廃止。
- (7)平成19年4月2日付け制定。地球温暖化防止新技術プログラム基本計画(平成18・03・31産局第9号) 3Rプログラム基本計画(平成18・03・31産局第10号) 生物機能活用型循環産業システム創造プログラム基本計画(平成18・03・31産局第3号) 化学物質総合評価管理プログラム基本計画(平成18・03・31産局第11号)は、廃止。
- (8)平成20年4月1日付け、環境安心イノベーションプログラム基本計画制定。地球温暖化防止新技術プログラム基本計画(平成19・03・19産局第6号) 3Rプログラム基本計画(平成19・03・19産局第5号) 生物機能活用型循環産業システム創造プログラム基本計画(平成19・03・16産局第2号) 化学物質総合評価管理プログラム基本計画(平成19・03・20産局第2号)は、本イノベーションプログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (9)平成21年4月1日付け制定。環境安心イノベーションプログラム基本計画(平成19・03・25産局第7号)は、廃止。

経済産業省

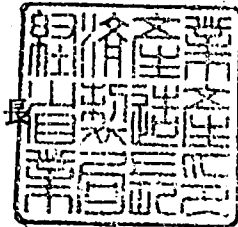
平成21・03・26産局第3号

平成21年4月1日

経済産業省産業技術環境局長



経済産業省製造産業局長



健康安心イノベーションプログラム基本計画の制定について

上記の件について、イノベーションプログラム実施要領（平成16・07・27産局第1号）第4条第1項の規定に基づき、別添のとおり制定する。

健康安心イノベーションプログラム基本計画

1. 目的

今後、世界に類を見ない少子高齢化が進展する我が国において、国民が健康で安心して暮らせる社会を実現することは喫緊の課題である。具体的には、個の医療を通じて健康寿命の延伸、QOL (Quality of Life: 生活の質) の向上を図ることが求められている。

この目的を達成するため、創薬に資する基盤技術の開発、再生医療の確立、医療機器・福祉機器の開発等の手段を適切に組み合わせることによって、健康維持増進、疾患の早期診断、及び適切な治療法の提供を実現するほか、関連産業の競争力強化・ベンチャー企業の創出を図る。

2. 政策的位置付け

革新的医薬品・医療機器創出のための5か年戦略(2009年2月12日改訂)

内閣府、文部科学省、厚生労働省及び経済産業省の間において革新的な医薬品・医療機器の創出に向け、研究資金の集中投入、ベンチャー企業の育成、臨床研究・治験環境の整備、アジアとの連携、薬事法における審査の迅速化・質の向上、イノベーションの適切な評価、官民対話等、研究から上市に至る過程の一貫かつ集中的な支援を実施することとしている。

「ドリームBTジャパン」(2008年12月11日BT戦略推進官民会議)

2002年に策定した「バイオテクノロジー戦略大綱」以降、バイオテクノロジーをめぐる状況が変化してきたことを背景に、新産業の育成・創出、食糧問題解決、バイオマス利活用等の課題に対処すべく、イノベーション強化11項目や官民が協働で取り組むべき最重点課題を策定した。

新経済成長戦略のフォローアップと改訂(2008年9月19日閣議決定)

2006年6月に経済産業省がとりまとめた「新経済成長戦略」を、資源価格の高騰等の構造変化を踏まえフォローアップと改訂を行った。「資源生産性競争」時代における経済産業構造の構築、世界市場獲得と持続的発展のためのグローバル戦略の再構築、地域・中小企業・農林水産業・サービスの未来志向の活性化を3つの柱として、「新経済成長戦略」を強化した。

「iPS細胞研究の推進について(第一次とりまとめ)」(2008年7月3日総合科学技術会議iPS細胞研究WG)

iPS細胞研究の成果がもたらす医療への波及効果や新しいバイオインダストリーの進展等について検討を行い、iPS細胞研究を推進するための研究推進体制、国の支援の在り方、知的財産戦略、国際化協力の在り方等を取りまとめた。

「イノベーション25」(2007年6月閣議決定)

生涯健康な社会形成に向けて中長期的に取り組むべき課題として、治療重点の医療から予防・健康増進を重視する保健医療体系の転換、生命倫理・安全性と医療技術促進政策の調和などをとりあげ、再生医療及び在宅医療・介護に係る社会還元加速プロジェクトを実施するとともに、臨床研究・臨床への橋渡し研究をはじめとする研究開発ロードマップの提示により所要の措置を講じていくこととしている。

がん対策推進基本計画（2007年6月閣議決定）

がん対策基本法に基づき、国、地方公共団体及び関係者等が、がん対策を総合的かつ計画的に推進するために策定された基本方針であり、取り組むべき施策の一つとして「がん研究」が取り上げられている。具体的には、現状、診断薬・診断機器の開発、治療薬・治療機器の開発等が推進されているが、さらに、有用な早期診断技術についての研究開発の推進等に取り組むことが提示されている。

新健康フロンティア戦略（2007年4月新健康フロンティア戦略賢人会議）、同アクションプラン（2007年12月）

健康寿命の延伸や生活の質の向上を図ることを目的として策定された新健康フロンティア戦略及び新健康フロンティア戦略アクションプランの中で、「人間の活動領域の拡張に向けた取組」及び「医療・福祉技術のイノベーション」において、「先進的予防・診断・治療技術の開発」や「医薬等ベンチャー・基盤産業支援対策」等の施策が提示されている。

科学技術の振興及び成果の社会への還元に向けた制度改革について（2006年12月総合科学技術会議）

科学技術の振興や成果還元上障害となる制度的な阻害要因として研究現場等で顕在化している諸問題を解決するための制度改革の実現に向け、制度所管省庁等が取り組むべき工程表とともに意見具申を行っている。

この中で、「治験を含む臨床研究の総合的推進」として、支援体制等の整備増強、臨床研究者・臨床研究支援人材の確保と育成、研究推進や承認審査のための環境整備、国民の参画の4つの観点から改革の方向を示している。

経済成長戦略大綱（2006年7月財政・経済一体改革会議）

がん等の生活習慣病や感染症等各種疾病対策の推進等国民の保健医療水準の向上に資する医薬品・医療機器産業について、関係府省・機関、企業等の双方向の連携の下、特に、基礎・基盤研究、臨床研究及び基礎研究から臨床研究への橋渡し研究を推進するとともに、臨床研究基盤の整備、治験環境の充実等の国民に医薬品・医療機器を迅速に届けるための環境整備を行うことが提示されている。

第3期科学技術基本計画（2006年3月閣議決定）

第2期計画において、優先的に資源を配分することとされたライフサイエンス分野を、引き続き、特に重点的に研究開発を推進すべき分野（重点推進4分野）として位置づけ。また、研究分野の重点化にとどまらず、分野内の重点化も進め、選択と集中による戦略性の強化を図り、基本理念の下で新たに設定する6つの政策目標（イノベーター日本 - 革新を続ける強靱な経済・産業を実現、生涯はつらつ生活 - 子供から高齢者まで健康な日本を

実現等)との関係を明確化することとしている。

3. 達成目標

医薬品開発の成功確率の向上に資する技術開発や、基礎研究から臨床への橋渡し研究等を通じた、医薬品の上市期間の短縮や開発コストの低減を図る。

医療機器¹など先進的な技術開発等の推進による国内外生産シェアの増大、厚生労働省との連携事業(マッチングファンド、医療機器開発ガイドラインの策定など)による開発から製品に至るまでの期間の短縮等を達成する。

再生医療の早期実現を目標とした研究体制整備と産業化支援を行う。

高齢者・障害者の自立促進や介護者の負担軽減等のため、優れた技術や創意工夫のある福祉用具の実用化支援を行う。

4. 研究開発内容

・創薬・診断

- 1. 革新的医薬品の創出

(1) 糖鎖機能活用技術開発(運営費交付金)

概要

我が国が強みを持つ糖鎖工学分野において、これまでに取得・開発した「糖鎖遺伝子ライブラリー」「糖鎖構造解析技術」「糖鎖合成技術」を活用し、癌や感染症など様々な疾病に関与する糖鎖の機能を解析する基盤技術を確立し、我が国の優位性を維持するとともに、創薬・診断等の分野における糖鎖機能の産業利用の促進を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、糖鎖や糖タンパク質などの機能を分子レベルで効率的に解明するための基盤技術、糖鎖の機能解析・検証技術、及び、有用性が認められた糖鎖機能を産業利用するための基盤技術を開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(2) 機能性RNAプロジェクト(運営費交付金)

概要

近年の研究成果により、タンパク質の合成に関与する既知のRNAとは異なり、がんや発生分化等の重要な生命現象に関与するタンパク質をコードしていないRNA(機能性RNA)の存在が明らかになってきており、世界中の注目を集めている。機能性RNAは再生医療やRNA医薬等への応用化にもつながることが期待されていることから、機能性RNA解析のための新規ツールを開発し、機能解析を行うことにより、本分野における我が国の優位性を確立する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、機能性RNAの候補となるRNAをゲノム配列上から探索

¹ 医療機器は、画像診断システムなどの「診断機器」、生体機能補助・代行機器などの「治療機器」、その他家庭用医療機器、歯科材料、眼科用品を含む。

するバイオインフォマティクス技術の開発や、機能性RNAを解析するための支援機器やツールの開発を行い、機能性RNAの機能解析を行う。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(3) ゲノム創薬加速化支援バイオ基盤技術開発(化合物等を活用した生物システム制御基盤技術開発)(運営費交付金)

概要

我が国が強みとする完全長cDNAライブラリーやタンパク質相互作用解析技術等を最大限に活用し、重要なタンパク質ネットワーク解析等により創薬の対象となるタンパク質の効率的な絞り込みを行うとともに、疾患等の生物現象を制御する化合物の探索まで、一貫した技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、超高速・高感度にタンパク質の相互作用を解析する技術や疾患を制御する化合物の探索・評価技術を開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(4) ゲノム創薬加速化支援バイオ基盤技術開発(創薬加速に向けたタンパク質構造解析基盤技術開発)

概要

創薬上重要な膜タンパク質は複合体を形成していることも多く、その構造解析及び相互作用の情報を取得することは創薬研究において重要であるが、その解析は非常に困難である。そこで、膜タンパク質やその複合体の構造情報を取得する新たな技術等の開発に向けて、タンパク質の立体構造及びその構造変化や膜タンパク質複合体の構造情報等の解析及び構造情報を基にした高精度なシミュレーション技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに生体内に近い状態での膜タンパク質及びその複合体の構造解析手法、リガンド分子との相互作用解析手法を確立するとともに、当該技術から得られた情報に基づくin silicoスクリーニング手法を確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(5) ゲノム創薬加速化支援バイオ基盤技術開発(細胞アレイ等による遺伝子機能の解析技術開発)(運営費交付金)

概要

世界的にゲノム創薬が競争激化しているが、創薬のターゲットとなる遺伝子を絞り込みいち早く特許を押さえてしまうことが産業競争力強化のためには重要である。このためには、生体内で非常に複雑に制御されている遺伝子ネットワークシステムを高速・高感度に解析するシステムを開発し、創薬のターゲットの効率的な絞り込みを行うことが必要である。具体的には、多数の細胞に同時に異なる遺伝子を高効

率で導入することにより、複数の遺伝子発現等の時系列計測を行い、得られる種々の細胞応答データから遺伝子ネットワークを解析する細胞アレイ技術を確立し、疾患関連遺伝子等、特定の創薬ターゲットの同定に有用な汎用性の高い解析ツールの開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、細胞イベント（遺伝子発現、たんぱく質の細胞内局在性等）を測定するための網羅的なレポーターシステム並びに測定装置を新規に開発し、得られるデータから遺伝子ネットワークの解析システムを確立する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(6) 新機能抗体創製技術開発（運営費交付金）

概要

ポストゲノム研究や診断・創薬等において重要となっている機能を有する抗体を創製するため、創薬標的として産業利用上重要だが、解析が困難な膜タンパク質やタンパク質複合体を特異的に認識できる抗体を系統的に作成する技術や抗体の分離・精製を高効率に行うための技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、産業上有用と考えられるタンパク質やその複合体を特異的に認識する抗体を創製するための基盤技術、及び、製造コスト低減に向けた抗体の分離・精製等を高効率に行う技術を開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(7) 基礎研究から臨床研究への橋渡し促進技術開発（運営費交付金）

概要

がん対策等の国民医療高度化を目指し、急速に発展している多様なバイオ技術の融合と医療現場への円滑な橋渡しによるイノベーションの創出・加速のため、総合科学技術会議のもと文部科学省及び厚生労働省と連携し、橋渡し研究の強化に一体的に取り組む。具体的には、民間企業と臨床研究機関（文部科学省や厚生労働省が整備する橋渡し研究拠点等）が一体となって行う、医薬品、医療機器、診断ツール等の開発を推進する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに医療現場及び臨床研究からのフィードバックに基づく研究開発により、医薬品、医療機器、診断ツール等の研究開発成果を円滑に実用化につなげる仕組みを確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(8) 幹細胞産業応用促進基盤技術開発（運営費交付金）

) i P S 細胞等幹細胞産業応用促進基盤技術開発

概要

創薬プロセス効率化や再生医療への応用が期待される i P S 細胞等幹細胞について、産業応用に不可欠な基盤技術の開発や、i P S 細胞に関連した産業応用事例創出の促進を行う。

技術目標及び達成時期

2013年度までに、安全で効率的な i P S 細胞の作製技術を開発するとともに、産業応用に繋げるために必要となる i P S 等幹細胞の選別・評価・製造技術を開発し、産業上利用可能な創薬スクリーニングシステムを確立する。

研究開発期間

2009年度～2013年度

）研究用モデル細胞の創製技術開発

概要

医薬品開発における安全性や薬理評価の確実性の向上等、創薬に向けた研究開発を加速するためには、ヒト生体内における様々な反応や遺伝子の機能をより高い精度で解析するツールの開発が重要である。そのため、人体の組織や疾病等の様々なヒトモデル細胞株を創製するための基盤となる技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、創薬等の研究開発に資する研究用細胞の創製技術を確立し、複数種の研究用のヒトモデル細胞を創製する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

- 2 . 診断ツールの開発

(1) 個別化医療実現のための技術融合バイオ診断技術開発 (運営費交付金)

概要

我が国が有する微細加工技術・表面処理技術といったナノテク等の強みを活かし、染色体異常を高感度、高精度かつ迅速、安価で非コード領域までを検出するゲノムアレイや解析基盤技術開発を行うとともに、診断への応用を可能とする全自動解析システムの開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、BACを用いた非コード領域を含むゲノム全領域を検出できる高精度ゲノムアレイを開発する。さらに、臨床現場において、微量サンプル(数ナノグラム)から、12時間以内に染色体異常(増幅、欠失、コピー数多型等)を、低コストかつ定量性・再現性を確保して検出ができる自動染色体異常解析システムのプロトタイプを開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(2) 糖鎖機能活用技術開発 (運営費交付金) 【再掲】

(3) 基礎研究から臨床研究への橋渡し促進技術開発 (運営費交付金) 【再掲】

- 3 . 創薬・診断に係る基盤整備

(1) 統合データベースプロジェクト

概要

ライフサイエンス分野では、自身の研究成果と既存の研究成果と対比することにより、自身の研究成果の仮説を考案する手がかりが得られたり、新しい実用化の発想が得られたりする可能性があるため、国家プロジェクト等により産生された研究データを一括して活用できるデータベースが、産業界や社会から要望されている。

このため、政府全体の「生命科学データベース統合化の取組」の一環として、経済産業省関連の公的資金研究から産出される研究データを、産業上の有用性を評価のうえ、統合化し、産業界等に提供する。

技術目標及び達成時期

2010年までに経済産業省関連機関により実施されたライフサイエンス分野の研究開発プロジェクトの成果に関する情報提供サイトを構築・運用する。また、ヒト遺伝子に関連した各種研究成果に関しては、平成17～19年度に実施したゲノム情報統合プロジェクトにおいて構築した「ヒト全遺伝子のアノテーション統合データベース (H-Invitational)」を基礎として、経済産業省関連の研究成果を連携して利用できるシステムを構築する。

研究開発期間

2008年度～2010年度

・医療機器、再生医療、福祉機器

- 1 . 医療機器の開発

(1) 分子イメージング機器研究開発プロジェクト (運営費交付金)

) 生活習慣病超早期診断眼底イメージング機器研究開発プロジェクト

概要

細小血管の分子レベルでの代謝機能を非侵襲で可視化する細胞代謝イメージングを実現し、代謝異常を細胞レベルで観察することにより、生活習慣病に起因する血管病変等合併症の早期の診断・治療を図る。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、ナノテクノロジーを活用した光学基盤技術等を確立することにより、細胞やタンパク質レベルの組織診断を可能とする機器を開発する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

) 悪性腫瘍等治療支援分子イメージング機器研究開発プロジェクト

概要

良性・悪性の区別も含めた腫瘍の超早期診断を実現するため、悪性腫瘍に特異的に反応する標的物質を利用することにより生体細胞の分子レベルの機能変化を抽出・検出できる機器の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、全身で3mm、局所で1mmの分解能を有する分子イメー

ジグリング機器を開発する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

) 新規悪性腫瘍分子プローブの基盤技術開発

「概要

分子イメージングにおいて、病変を可視化する分子プローブの開発を一層強化・促進するため、分子プローブの基盤要素技術と評価システムの開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、新規の近赤外蛍光分子プローブ及び小動物用近赤外蛍光イメージングシステムを試作し、同システムを用いて分子プローブのがん特異性を定量的に評価するための条件等を明らかにする。

研究開発期間

2008年度～2009年度

(2) 次世代DDS型悪性腫瘍治療システムの研究開発事業(運営費交付金)

概要

DDSのさらなる裾野の拡大、及び早期実用化を目指し、様々な外部エネルギー(機器技術)と薬剤技術を組み合わせることにより、比較的人体の深部にある臓器(肺、消化器)等のがんを対象としたDDS型治療システムの開発を行う。

技術目標及び達成時期

光線力学治療システムの前臨床試験の開始及び治療効果・安全性の検証と、超音波診断・治療システムの前臨床試験を可能とする薬剤及び装置の完成に関する開発を難治性がんの治療に向けて行う。

研究開発期間

2006年度～2009年度

(3) インテリジェント手術機器研究開発プロジェクト(運営費交付金)

概要

手術中にごん細胞等の病巣部の位置や動きを正確に診断しながら、必要最小限の切除で確実かつ安全に治療できる診断と治療が一体となった内視鏡手術支援システムの開発を行う。

技術目標及び達成時期

・主要部位対象機器研究開発

脳神経外科領域、胸部外科領域、及び消化器外科領域を対象に、基盤技術を確立し、それらの技術を融合化して、製品化・実用化の目処をつける。非臨床試験を実施し、その有効性と安全性を確認する試験結果を得ることを目標とする。

・研究連携型機器開発

子宮内で行われる出生前治療を行うための新しい手術システム・機器を開発する。非臨床試験を実施し、その有効性と安全性を確認する試験結果を得ることを目標とする。

研究開発期間

2007年度～2011年度（研究連携型機器開発は、2007年度～2009年度）

（4）基礎研究から臨床研究への橋渡し促進技術開発（運営費交付金）【再掲】

- 2 . 再生医療の実用化

（1）再生医療評価研究開発事業（運営費交付金）

）評価技術の開発

概要

ヒトから細胞を採取し、これを体外で培養、必要に応じて組織に分化させ、これを患者に移植・治療する再生医療の国内での早期実用化、産業化を目指し、患者自身の細胞の採取・培養から組織形成・治療までの評価プロセス及び基準を開発、体系化する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、再生医療の早期実用化、産業化のための、細胞培養評価法の開発、組織形成評価法の開発、実用化レベルでの評価基準の確立を行う。

研究開発期間

2005年度～2009年度

）心筋再生治療研究開発プロジェクト

概要

心筋再生治療の早期実用化を目指すために、厚い心筋組織で構築された内部に酸素や栄養を供給できるような血管網を有するバイオ心筋の作成技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに厚さが5mm以上、酸素、栄養を供給できる血管網を有した心筋組織を開発する。

研究開発期間

2006年度～2009年度

）三次元複合臓器構造体研究開発プロジェクト

概要

生体適合性等を備えた三次元複合臓器構造体を開発し、従来のティッシュエンジニアリング技術では適用できない臓器の再生を可能にするため、大型化、三次元構造化、自己組織化及び計測評価法の確立のための技術基盤の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに従来のティッシュエンジニアリング技術による単層構造に比べて再生組織の厚さが10倍以上及び構造体積は100倍以上、含有組織は従来の単一組織から3種類以上の複合組織化技術を開発する。

研究開発期間

2006年度～2009年度

（2）基礎研究から臨床研究への橋渡し促進技術開発（運営費交付金）【再掲】

- 3 . 福祉機器の開発

(1) 福祉用具実用化開発推進事業 (運営費交付金)

概要

「福祉用具の研究開発及び普及の促進に関する法律」(福祉用具法)に基づき、高齢者・障害者及び介護者の生活の質の向上を目的として、生活支援分野、社会活動支援分野を中心とした福祉用具の実用化開発を行う民間企業等に対し、研究開発費用の2/3以内を補助することで、多様な福祉ニーズに対応するとともに、当該分野における新産業の創出、成長の促進に資する。

技術目標及び達成時期

高齢者、障害者の生活支援、社会参加支援に資する福祉用具の実用化開発を促進することにより、高齢者等の生活における負担の軽減を図り、安全で安心のできる生活を実現する。より具体的な目標として、各々の補助対象事業終了後3年経過した時点で50パーセント以上を製品化する。

研究開発期間

1993年度～

- 4 . 医療機器、再生医療等に係る基盤整備

(1) 医療機器開発ガイドライン策定事業

概要

医療機器産業への投資、新規企業参入、医療機器研究開発の促進及び薬事法審査の円滑化・迅速化にも資する「医療機器開発ガイドライン」を厚生労働省との連携の下、産学の協力を得て、個別の医療機器ごとに策定し、国内での機器開発促進の環境整備を図るとともに、医療機器産業に製品として、または部品・部材の供給として参入しやすい環境を整備するための方策を検討し、医療機器分野の活性化・国際競争力の強化を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、今後実用化が期待される先進的な医療機器(7機種程度)について、工学的安定性や生物学的安定性等に関する詳細な評価基準を策定し、開発ガイドラインとして取りまとめる。また、平成20年度事業において抽出された医療機器分野への新規参入促進および部材・部品供給活性化における課題について、モデル契約の策定やリスクマネジメント手法の開発等、具体的な方策を検討し、医療機器産業の活性化に資するものとする。

研究開発期間

2008年度～2010年度

(2) 福祉機器情報収集・分析・提供事業

概要

福祉用具法に基づき、民間による福祉機器の実用化のための研究開発を促進するため、福祉機器に関する産業技術に係る情報の収集・分析・提供事業を実施することで、当該分野における福祉機器の普及や新規産業の創出・成長の促進を図る。

技術目標及び達成時期

各年において福祉機器に係るニーズ等の調査の実施及び福祉用具実用化推進事業で開発された福祉機器の各種展示会等への出展による情報収集・分析・情報の提供を実施する。

研究開発期間

1993年度～

5．政策目標の実現に向けた環境整備（成果の実用化、導入普及に向けた取組）

[調査研究]

（１）バイオインダストリー安全対策調査（２０００～２００９年度）

バイオテクノロジーの安全性を確保するため、これまで得られている知見を基に、安全性関連データベースの整備、安全性評価手法の高度化に必要な事項の検討及びガイドラインの作成を行う。

（２）バイオ事業化に伴う生命倫理問題等に関する研究（２００２～２０１１年度）

バイオテクノロジーの実用化に際して、新たな技術に対する国民の理解と合意を得るため、新たな技術の産業化に伴って発生する、我が国の社会における様々な問題を、文献の収集、国内外の調査等を行うことにより研究する。さらに、バイオテクノロジーに対する理解を深めるための情報発信等、社会的受容（public acceptance）を高めるための活動を支援する。

[標準化]

・各プロジェクトで得られた成果のうち、標準化すべきものについては、適切な標準化活動（国際規格（ISO/IEC）、日本工業規格（JIS）、その他国際的に認知された標準の提案等）を実施する。具体的には、統合データベースの情報やインターネットに公開されている情報資源等を相互運用するために、必要なデータ形式、フォーマット等の標準化を推進する。

・高齢者等支援機器については、関係省庁との緊密な連携の下、標準化等の手法による実用化及び普及の方策を検討する。

[導入普及促進]

・ゲノム研究の進展は、個人遺伝情報を用い、情報技術を駆使した幅広い医療・健康サービスによる人々の健康や福祉の向上、さらには新しい医療・健康サービス産業の育成に重要な役割を果たそうとしているが、その際、人権を尊重し、社会の理解と協力を得て、個人遺伝情報の厳格な管理の下で適正に事業を実施することが不可欠である。そのため、個人遺伝情報を安全に保護するために作成した事業者が遵守すべきルール「経済産業分野のうち個人遺伝情報を用いた事業分野における個人情報保護ガイドライン（2004年12月17日告示）」（個人遺伝情報保護ガイドラインという）を適切に運用する。

[産業間連携]

・バイオベンチャーは商品を市場に送り出すまでに長期間を要する、研究開発のために多額の資金調達を必要とする、事業を行うために様々な規制・審査を経る必要がある等、他業種のベンチャー企業と比較して困難な問題を抱えていることが多い。そのため、バイオ

ベンチャーの様々な問題に対して施策への反映を検討し、補助金等の施策の紹介を通じてバイオベンチャー振興を図る。

- ・「産業クラスター計画」に基づき、全国のバイオクラスターにおいて、企業間のネットワーク形成の支援、産学連携による研究開発プロジェクトの支援、地域系ベンチャーファンドによる資金調達支援等を実施していく。

- ・医療の進歩・国民の健康に貢献する医療機器・用具の産業技術力向上及び国際競争力強化を目指し、研究開発から市場化までのすべてのプロセスにおけるマクロな戦略の検討と、医療機器の重要性について社会的認知の向上を実現するための仕組み及び個別プロジェクトの形成をはかることを使命とした「医療技術産業戦略コンソーシアム(METIS)」が平成13年に設立され、現在第3期に入っているところである。

[プロジェクト等間の連携について]

- ・ゲノム創薬加速化支援バイオ基盤技術開発(化合物等を活用した生物システム制御基盤技術開発)については、タンパク質機能解析・活用プロジェクトの成果を活用することで、超高速・高感度にタンパク質の相互作用を解析する技術を開発する。

- ・ゲノム創薬加速化支援バイオ基盤技術開発(創薬加速に向けたタンパク質構造解析基盤技術開発)については、「生体高分子立体構造情報解析」の成果を活用することで、膜タンパク質やその複合体の構造情報を取得する新たな技術等の開発に向けて、タンパク質の立体構造及びその構造変化や膜タンパク質複合体の構造情報等の解析及び構造情報を基にした高精度なシミュレーション技術を開発する。

- ・糖鎖機能活用技術開発については、糖鎖合成関連遺伝子ライブラリー構築、糖鎖エンジニアリングプロジェクトの成果を活用することで、糖鎖の機能を効率的に解析するための基盤技術を開発する。

- ・ゲノム創薬加速化支援バイオ基盤技術開発の「化合物等を活用した生物システム制御基盤技術開発」、「創薬加速に向けたタンパク質構造解析基盤技術開発」については、必要に応じ、各々の成果を活用し、効率的、効果的な研究開発を図る。

[関係機関との連携]

- ・総合科学技術会議が推進する基本政策推進専門調査会 分野別推進総合PT ライフサイエンスPT及び科学技術連携施策(「生命科学の基礎・基盤」、「臨床研究・臨床への橋渡し研究」)の下、各プロジェクトについて、関係府省との適切な連携を図る。

- ・「革新的創薬等のための官民対話」の場を通じ、医薬品分野のイノベーションの創出と産業の国際競争力強化に係る諸施策の方向性に対する製薬業界、教育・研究機関、行政(内閣府、文部科学省、厚生労働省、経済産業省)の認識の共有化を図る。

[その他]

- ・一段と激化する特許戦争の中、成果実用化・効率的な研究開発を推進するため、プロジェクト企画段階から、研究テーマ周辺の論文及び特許状況のサーベイ実施やプロジェクト実施段階における特許出願後の事業化構想等、特許に関する戦略的取組(プロパテントアプローチの導入)を実施する。

- ・医療機器の審査体制の強化による薬事法審査の迅速化の観点から、2004年より独立行政法人産業技術総合研究所の工学系研究者を独立行政法人医薬品医療機器総合機構

へ派遣しているところである。

6．研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの（事業名に（運営費交付金）と記載したものは、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で、当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

なお、適切な時期に、実用化・市場化状況等について検証する。

7．改訂履歴

- (1) 平成12年12月28日付けがん・心疾患等対応高度医療機器プログラム制定。
- (2) 平成14年2月26日付け健康維持・増進のためのバイオテクノロジー基盤研究プログラム基本計画制定。
- (3) 平成14年2月28日付け健康寿命延伸のための医療福祉機器高度化プログラム基本計画制定。がん・心疾患等対応高度医療機器プログラム（平成12・12・27工総第13号）は、廃止。
- (4) 平成15年1月27日付け健康維持・増進のためのバイオテクノロジー基盤研究プログラム基本計画制定。健康維持・増進のためのバイオテクノロジー基盤研究プログラム基本計画（平成14・02・25産局第4号）は、廃止。
- (5) 平成15年3月10日付け健康寿命延伸のための医療福祉機器高度化プログラム基本計画制定。健康寿命延伸のための医療福祉機器高度化プログラム基本計画（平成14・02・05産局第2号）は、廃止。
- (6) 平成16年2月3日付け制定。健康維持・増進のためのバイオテクノロジー基盤研究プログラム基本計画（平成15・01・23産局第4号）及び健康寿命延伸のための医療福祉機器高度化プログラム基本計画（平成15・03・07産局第17号）は、本プログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (7) 平成17年3月31日付け制定。健康安心プログラム基本計画（平成16・02・03産局第12号）は、廃止。
- (8) 平成18年3月31日付け制定。健康安心プログラム基本計画（平成17・03・25産局第1号）は、廃止。
- (9) 平成19年4月2日付け制定。健康安心プログラム基本計画（平成18・03・31産局第2号）は、廃止。
- (10) 平成20年4月1日付け制定。健康安心プログラム基本計画（平成19・03・20産局第5号）は、廃止。
- (11) 平成21年4月1日付け制定。健康安心プログラム基本計画（平成20・03・25産局第6号）は廃止。

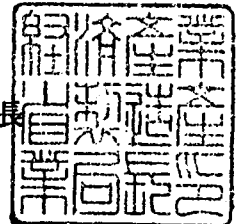
経済産業省

平成21・03・26産局第2号
平成21年4月1日

経済産業省産業技術環境局長



経済産業省製造産業局長



航空機・宇宙産業イノベーションプログラム基本計画の制定について

上記の件について、イノベーションプログラム実施要領（平成16・07・27産局第1号）第4条第1項の規定に基づき、別添のとおり制定する。

航空機・宇宙産業イノベーションプログラム基本計画

1. 目的

今後、市場規模の拡大が見込まれるとともに、その先端的な部品、材料、システム技術の波及効果を通じて我が国製造業全体の高度化をもたらし、また安全保障上の重要な基盤である航空機産業に関連する技術開発を積極的に推進する。

また、大きな技術波及効果を有し、国民の安全にも密接に関わるだけでなく、高度情報化社会の実現、地球環境の保全、資源開発等多様な社会ニーズに応える基盤となる宇宙産業の国際競争力の強化を図る。

2. 政策的位置付け

第 3 期科学技術基本計画（2006 年 3 月閣議決定）

航空機分野は、先端技術と高度な材料・部品等をシステム統合する分野であり、重点推進 4 分野及び推進 4 分野のうち、「情報通信」、「環境」、「ナノテクノロジー・材料」、「ものづくり技術」、「社会基盤」、「エネルギー」といった複数の分野にまたがる技術開発課題を有している。航空機分野の技術は他分野への技術波及効果も高く、その開発は産業技術政策上も極めて重要であり、特に、環境負荷低減を実現するための技術課題については、地球温暖化対策等の観点からも積極的に取り組むべきである。

第 3 期科学技術基本計画を踏まえて策定された分野別推進戦略では、航空機分野に関連するプロジェクトは主に「社会基盤」分野に位置づけられており、「高速輸送を可能とし、大量運航によって社会生活を支えているのみならず、産業政策上、安全保障上も重要な役割を担っており、諸外国と同様に研究開発リスクを国が負担しつつ、国民の航空輸送ニーズの多様化に応え、安全や環境問題に配慮した技術開発に取り組む必要がある。特に、我が国主導で航空機およびエンジンをインテグレーションできる技術を向上させるとともに、中長期的に技術を育成するための課題に取り組む必要がある」とされている。本プログラム基本計画に含まれる各研究開発事業についても、戦略重点科学技術及び重要な研究開発課題として指定されている。

宇宙分野は、推進分野である「フロンティア」分野において、国家基幹技術、戦略重点科学技術及び重要な研究開発課題に位置付けられた。また、総合科学技術会議において「我が国における宇宙開発利用の基本戦略」（2004 年 9 月総合科学技術会議）が決定されている。

21 世紀環境立国戦略（2007 年 6 月閣議決定）

世界最高水準にある我が国の優れた省エネ技術等の普及、更なる技術開発により、エネルギー効率の一層の改善を図るため、次世代環境航空機の開発・普及などによる航空機からの CO₂ 排出抑制対策等、物流分野のエネルギー効率の改善を進め、運輸部門にお

ける省エネ対策を推進することとされている。

環境エネルギー技術革新計画（2008年5月総合科学技術会議決定）

2030年頃までに必要な、二酸化炭素削減効果の大きなエネルギー需要側の技術として、また、国際的な新たな二酸化炭素排出削減の枠組みに対応する技術として、「低燃費航空機（低騒音）」に関連する技術を開発・普及すべきであるとされている。

経済成長戦略大綱（2008年6月改定）

「新経済成長戦略」（平成18年6月）や「革新的技術戦略」（平成20年5月）に基づいて、特に、極限状態における高信頼性が求められる次世代環境航空機の研究開発や、主として国際市場への参入を目指す先進的宇宙システム等の新産業群の実現に向けた普及促進策等の環境整備や研究開発を積極的かつ適切に推進することとされている。

さらに、「地理空間情報活用推進基本計画」（平成20年4月15日閣議決定）に基づき、地理情報システムの利用拡大や衛星測位の研究開発等により、地理空間情報を高度に活用する社会の実現を図るとともに、現在の開発成果の果実を有効に活用する等宇宙の利用・産業化を積極的に推進することとされている。

経済財政改革の基本方針2008（2008年6月閣議決定）

上記「環境エネルギー技術革新計画」（平成20年5月19日）を推進するために、支援措置を講ずることとされている。

また、「宇宙基本法」及び「地理空間情報活用推進基本法」を踏まえ、我が国の総合的な安全保障も視野に入れ、宇宙の開発利用、産業化を総合的かつ計画的に実施するとともに、衛星による測位・監視技術等の活用による災害・安全保障情報の迅速な提供及び共有、先端的な研究開発等を推進することとされている。

低炭素社会づくり行動計画（2008年7月閣議決定）

「環境エネルギー技術革新計画」に示された技術ロードマップ等（低燃費航空機（低騒音）技術など）の実施に向け、今後5年間で300億ドル程度を投入することとされている。また、このうち、「Cool Earth - エネルギー技術革新計画」に示された重点的に取り組むべき21のエネルギー革新技術についても、必要な予算を確保して開発を進めることとされている。

新経済成長戦略改訂版（2008年9月閣議決定）

よりエネルギー消費の少ない輸送システムを実現するため、次世代航空機を含む省エネ型交通機関の普及・開発加速等を推進することとされている。

また、「環境エネルギー技術革新計画」及び「Cool Earth - エネルギー技術革新計画」の実現に向け、低燃費・低騒音航空機を含む革新的技術の開発を適切に推進することとされている。

「e-Japan戦略」（2003年7月、IT戦略本部とりまとめ）

宇宙分野は、新しいIT活用戦略〔衛星測位システム（GPS等）の高度な活用と、準天頂衛星システム等の測位システムや地理情報システム（GIS）の研究開発や整備を統合的に推進し、我が国の国土空間における正確な位置を知ることができる環境の整備〕、「e-Japan重点計画2004」（平成2004年6月、IT戦略本部とりまと

め)における重点政策5分野の1つに対応するものである。

3. 達成目標

大きな技術波及効果によって環境をはじめ、情報、材料等の分野に高付加価値を生み出す航空機関連技術について、材料・構造・システム関連等の中核的要素技術力を一層強化・保持するとともに、機体及びエンジンの完成機関連技術を強化する。

我が国宇宙産業の国際競争力強化に向け、次世代の宇宙機器の開発及び宇宙利用の促進に資する技術を強化する。これにより、我が国における宇宙開発利用の産業化を促進し、自立的な宇宙産業を育成することで、世界の宇宙機器マーケットにおける我が国のシェア拡大を図る。

4. 研究開発内容

【プロジェクト】

- ・航空機関連(広く産業技術を対象とした研究開発であって航空機関連技術にも裨益するものを含む)

(1) 小型民間輸送機等開発調査

概要

我が国主導の機体開発を実現するため、小型民間輸送機等の開発可能性を検討すべく、市場調査及び要素技術開発等を実施する。

技術目標及び達成時期

次期輸送機(C-X)、救難飛行艇(U.S.-2)等の防衛省機の民間転用を含め、我が国における民間航空機開発を促進するため、市場動向調査や要素技術開発を実施する。

研究開発期間

1989年度～2011年度

(2) 超高速輸送機実用化開発調査

概要

将来の国際共同開発においても、我が国産業界が然るべき役割を果たすため、遷・超音速領域の飛行を想定した超高速機について、市場ニーズ及び経済性への要求に関する検討を行うとともに、技術的課題の抽出、各要素技術開発等を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、遷・超音速域(マッハ0.9～1.6程度)を飛行する超高速機の実現のために解決すべき技術的課題を抽出する。また、実現にあたり特に重要となる空力及び材料・構造等の技術分野について、超高速機の低抵抗化・低騒音化に資する数値流体(CFD)解析手法や軽量かつ製造コストの低い超高速機用機体構造(胴体・主翼等)の検討等を行う。

研究開発期間

2002年度～2011年度

(3) 先進空力設計等研究開発

概要

空力設計、開発・生産システム等に係る先進的技術の研究開発・実証を通じて、製造業全体の開発・生産プロセス等の高度化等を図る。

技術目標及び達成時期

2013年度までに、空力設計、開発・生産システム等に係る先進的技術の研究開発・実証を行う。

研究開発期間

2008年度～2013年度

(4) 航空機用先進システム基盤技術開発

概要

航空機の環境適合性、運航経済性、安全性といった要請に対応した、軽量・低コストかつ安全性の高い先進的な航空機用システムを開発する。

技術目標及び達成時期

通信アンテナ、気象用レーダ等の高性能化等を実現する航空機システム先進材料技術、航空機エンジン用低損失ギアボックスシステム、航空機の安全性向上及び運航コスト低減に資する先進パイロット支援システム等を2011年度までに開発する。

研究開発期間

1999年度～2011年度

(5) 省エネ用炭素繊維複合材技術開発

概要

航空機、自動車、鉄道、船舶等の輸送機械等における炭素繊維複合材の適用範囲を拡大し、省エネルギーの促進を図るため、先進的な炭素繊維複合材成形技術や、耐雷対策の容易化技術等の研究開発・実証を行う。

技術目標及び達成時期

2013年度までに、従来の方法に比べ、曲率の大きな部位の成形も行うことができるV a R T M (バータム) 法等の炭素繊維複合材成形技術や、炭素繊維複合材を用いた製品の耐雷性能を容易に確保する技術の研究開発・実証を行う。

研究開発期間

2008年度～2013年度

(6) 次世代航空機用構造部材創製・加工技術開発

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、航空機、高速車両等の輸送機器への先進材料の本格導入を加速させるため、先進複合材料及び先進金属材料に

ついて部材開発、設計試作及び評価を実施することで、軽量化によりエネルギー使用効率を大幅に向上させる革新的な構造部材の創製・加工技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、複合材の構造健全性診断技術、チタン合金の創製・加工技術を確立するとともに、航空機用エンジンへの適用を目指し、耐熱・耐衝撃性に優れた複合材料を開発する。

研究開発期間

2003年度～2012年度

(7) 環境適応型小型航空機用エンジン研究開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、エネルギー使用効率を大幅に向上し、環境対策にも優れた次世代の小型航空機用エンジンの開発にとって重要な要素技術の研究開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、エネルギー使用効率を大幅に向上する構造設計技術、騒音、NOx等の環境負荷対応に優れた環境対策技術、インテグレーション技術、高バイパス比化等の高性能化技術といった要素技術の研究開発・実証を行う。

研究開発期間

2003年度～2010年度

(8) 先進操縦システム等研究開発(財投出資)

概要

操縦システム、コックピットシステムに係る先進的技術の研究開発・実証を通じて、製造業全体の開発・生産プロセス等の高度化等を図る。

技術目標及び達成時期

2013年度までに、操縦システム、コックピットシステムに係る先進的技術の研究開発・実証を行う。

研究開発期間

2008年度～2013年度

・宇宙産業関連

1. 輸送系産業競争力向上基盤技術開発

(1) 次世代輸送系システム設計基盤技術開発プロジェクト(運営費交付金)

概要

国際ロケット市場における我が国宇宙産業の競争力確保を図るため、ロケットを効率的に開発・運用し、ロケットの開発、衛星の受注から打上までの期間を大幅に短縮する基盤技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、ロケットの設計及び衛星対応設計の効率化技術等を確立する。

研究開発期間

2001年度～2010年度

2. 衛星系産業競争力向上基盤技術開発

(1) 次世代衛星基盤技術開発プロジェクト(準天頂衛星システム開発プロジェクト)

概要

国際商業市場における我が国衛星メーカーの競争力を強化するべく、準天頂衛星システム(利用者に対し、米国が運用するGPSとの補完による高精度な位置情報等の提供を可能にするシステム)の構築に不可欠な基盤技術(産業競争力強化にも直結する衛星の軽量化、長寿命化に関する技術等)の開発を行う。本プロジェクトの一部については、他部門と比較して需要増加の割合が高い運輸部門のエネルギー消費を抑制すべく、自動車、高速車両等の輸送機器の軽量化・効率化にも資する複合材料製造設計等の基盤技術を確立するためのものであり、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

静止軌道と一定の角度をなす傾斜軌道に複数の衛星を配置し、見かけ上、常に天頂付近に最低1つの衛星を位置させるシステム。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、準天頂衛星システムの構築に不可欠な基盤技術(産業競争力強化にも直結する衛星の軽量化、長寿命化に関する技術等)の開発を実施し、宇宙空間での技術実証を行う。

研究開発期間

2003年度～2010年度

(2) SERVISプロジェクト(運営費交付金)

概要

我が国宇宙産業の国際競争力を強化するため、衛星の低コスト化、短納期化及び高機能化を実現すべく、民生部品・民生技術の衛星転用促進に向け、耐放射線試験等の地上試験や技術実証衛星による宇宙実証を行い、民生部品・民生技術の衛星転用に必要な知的基盤(データベース、ガイドライン)を整備する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、民生部品・民生技術の耐放射線試験等の地上試験や技術実証衛星による宇宙実証を行い、その結果を知的基盤(データベース、ガイドライン)として整備する。また、これら成果等を基に、国際標準化提案について検討を行う。

研究開発期間

1999年度～2010年度

(3) 小型化等による先進的宇宙システムの研究開発（運営費交付金）

概要

我が国宇宙産業の国際競争力を強化し、国際衛星市場への参入を目指すため、今後、科学、地球観測、安全保障等の分野で活用が進む小型衛星について、大型衛星に劣らない機能、低コスト、短期の開発期間を実現する高性能小型衛星の研究開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、大型衛星に劣らない機能（光学分解能0.5m未満（軌道高度400～600km）、データ伝送速度800Mbps、衛星質量400kg程度）、低コスト（我が国の既存衛星に比べ、開発・製造コスト約15分の1）、短期の開発期間（我が国の既存衛星に比べ、開発期間約3分の1）を実現する高性能小型衛星を開発する。また、衛星システムを低コスト、短期間で実現するための新たな設計思想、開発・製造・運用の手法・仕組みを構築する。

研究開発期間

2008年度～2010年度

(4) ASTERプロジェクト

概要

石油の生産及び流通の合理化を図る観点から行うものであり、石油及び可燃性天然ガス資源等の開発に資するため、資源探査能力を格段に向上した光学センサである資源探査用将来型センサ（ASTER）の健全性評価やセンサを維持することにより、取得される画像データを用いた石油・天然ガス資源の遠隔探知を行う技術を確立する。

技術目標及び達成時期

ASTERの開発、健全性の評価・維持を実施することにより、2010年度までに、センサ技術の高度化（ポインティング機能の追加、分解能の向上、熱センサの搭載等）を図る。

研究開発期間

1987年度～2010年度

(5) PALSARプロジェクト

概要

石油の生産及び流通の合理化を図る観点から行うものであり、石油及び可燃性天然ガス資源等の開発に資するため、資源探査能力を格段に向上した合成開口レーダである次世代合成開口レーダ（PALSAR）の健全性評価やセンサを維持することにより、取得される画像データを用いた石油・天然ガス資源の遠隔探知を行う技術を確立する。

技術目標及び達成時期

PALSARの開発、健全性の評価・維持を実施することにより、2010年度までに、レーダ技術の高度化（アンテナ指向の電子制御化、分解能の向上、多偏波観測等）を図る。

研究開発期間

1993年度～2010年度

(6) ハイパースペクトルセンサ等の研究開発(運営費交付金)

概要

資源開発に有効な岩石・鉱物や地質構造解析の高次元解析を可能とするハイパースペクトルセンサの開発を行うとともに、軌道上におけるデータ取得の実証を行い、センサ技術の確立を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までにスペクトル分解能200バンド前後のハイパースペクトルセンサを開発し、地表面のスペクトル情報を取得して資源開発に有効なセンサ技術の実証を行う。

研究開発期間

2007年度～2011年度

3. 宇宙利用促進基盤技術の開発

(1) 次世代地球観測衛星利用基盤技術の研究開発

概要

我が国が開発・運用する地球観測センサや2007年度よりNEDOにて開発が始まったハイパースペクトルセンサ等により得られる地球観測データから、有用な情報を効果的・効率的に抽出するため、スペクトルデータの収集と蓄積、物質ごとの特徴的なスペクトルデータの研究、衛星から得られたデータと地上データと比較・処理解析し、対象物を特定する解析手順・手法、多様なデータとの融合処理等の高付加価値データの処理解析技術等の研究開発を行う。

また、鉱物資源分野においては、金属鉱床タイプに応じた総合解析探査技術等を開発し、その標準解析手順書等を作成する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、環境観測、災害監視、資源探査、農林水産等の分野におけるハイパースペクトルセンサにより得られる地球観測データ処理・解析技術の向上及び地球観測データ利用の拡大を図る。

研究開発期間

2006年度～2011年度

(2) 石油資源遠隔探知技術の研究開発

概要

我が国が開発・運用する多様な地球観測センサ(ASTER、PALSA R等)の地球観測データを用いて、石油・天然ガス等の安定供給確保のため、資源開発・探査、環境観測等に有効なデータの処理解析手法の研究開発を行う。また、地球観測データのよ

うな大容量のデータを容易に扱えるシステムの研究開発を実施することで資源開発・探査、環境観測を含む多様な分野でのリモートセンシングの利用拡大を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、資源開発・探査、環境観測等の分野における地球観測データ処理・解析技術の向上及び地球観測データの利用の拡大を図る。

研究開発期間

1981年度～2010年度

(3) 太陽光発電無線送受電技術の研究開発

概要

将来の新エネルギーシステムとして期待される宇宙太陽光発電システム(SSPS)の中核的技術として応用可能なマイクロ波による太陽光発電無線送受電技術の確立に向け、安全性や効率性等の確保に不可欠な精密ビーム制御技術の研究開発を行う。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、複数のフェーズドアレーアンテナパネル間の位相同期を行い、パイロット信号の方向にマイクロ波を電送するレトロディレクティブ技術を活用した精密ビーム制御技術の確立を目指す。

研究開発期間

2008年度～2012年度

5. 政策目標の実現に向けた環境整備

(航空機)

〔人材育成〕

- ・大学から有用な人材を航空機産業に迎えるとともに、開発から次期開発までのサイクルの長い航空機産業において継続的に人材を育成することが重要である。

〔防衛調達等を通じた航空機産業の高度化について〕

- ・効率的な研究開発や生産に向けたインセンティブ等を通じて我が国の航空機産業・技術基盤の維持・育成にも資する防衛調達・研究開発が実現するよう、引き続き関係省庁と連携することが重要である。
- ・防衛機の民間転用を円滑化するための制度整備等について、関係省庁と連携することが重要である。

〔関係機関との連携〕

- ・民間航空機開発推進関係省庁協議会(防衛庁(当時)、文部科学省、国土交通省及び経済産業省局長級による協議会)を設置(平成15年9月)し、研究開発の円滑な実施を図るため、関係省庁の連携を強化。また、協議会の下に、各省庁の担当課長からなる幹事会も併せて設置。産業構造審議会航空機委員会において航空機産業全般にかかる課題と対策を議論。

〔その他〕

- ・ 中小企業のネットワーク化や認証取得により、我が国の部品・素材の採用拡大を図ることが重要である。
- ・ 航空機においては、機体の使用期間が20～30年と長く、維持に係るコストやサービス品質が重要な要素であることから、自動認識技術の活用等を通じた整備業務等における効率化や高付加価値化を目指すことが重要である。

(宇宙産業)

[関係機関との連携]

宇宙産業の振興を基本理念の一つに掲げている宇宙基本法を踏まえ、宇宙産業の国際競争力の強化に向けて、宇宙開発戦略本部の下、関係府省及び機関との連携を進める。

また、産業化を促進するための環境整備(宇宙機器のシリーズ化による低コスト化・信頼性向上、小型化やセンサなどの高機能化、宇宙輸送手段の維持・発展、中小企業や大学等の技術活用など)を推進する。

[プロジェクト等との主要な連携について]

小型化等の先進的宇宙システムの研究開発では、民生部品・民生技術の採用に関するSERVISプロジェクトの成果等、関連事業の成果を活用する。

ASTERプロジェクト及びPALSARプロジェクトの成果を、石油資源遠隔探知技術の研究開発プロジェクトで活用することで、人工衛星から取得される画像データを用いた石油・天然ガス資源の遠隔探知を行う技術を確立する。

[導入普及促進]

プロジェクトを通じて得られた基盤技術、データ(宇宙利用可能民生部品データベース、リモートセンシングデータ等)等について、成果報告会、データベースの一般公開、画像データの一般提供等により、可能な限り速やかに社会に普及し、民間主導による実用化、新技術への応用を促進する。また、リモートセンシングデータについては、継続提供等の利用側の要求に応えるため、データのアーカイブ化や配信システムの整備を進める。

6. 研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの(事業名に(運営費交付金)と記載したものは、中期目標、中期計画等に基づき、実施されるものである。

7. プログラムの期間

プログラムの期間は2003年度から2013年度まで。

8. 改定履歴

(1) 平成15年3月10日付け制定。

(2) 平成16年2月3日付け制定。民間航空機基盤技術プログラム基本計画(平成15・

03・07産局第12号)及び宇宙産業高度化基盤技術プログラム基本計画(平成15・03・07産局第13号)は、廃止。

(3)平成17年3月31日付け制定。民間航空機基盤技術プログラム基本計画(平成16・02・03産局第8号)及び宇宙産業高度化基盤技術プログラム基本計画(平成16・02・03産局第9号)は、廃止。

(4)平成18年3月31日付け制定。民間航空機基盤技術プログラム基本計画(平成17・03・25産局第11号)及び宇宙産業高度化基盤技術プログラム基本計画(平成17・03・25産局第10号)は、廃止。

(5)平成19年4月2日付け制定。民間航空機基盤技術プログラム基本計画(平成18・03・31産局第12号)及び宇宙産業高度化基盤技術プログラム基本計画(平成18・03・31産局第8号)は、廃止。

(6)平成20年3月31日付け制定。民間航空機基盤技術プログラム基本計画(平成19・03・23産局第3号)及び宇宙産業高度化基盤技術プログラム基本計画(平成19・03・16産局第4号)は、廃止。

(7)平成21年4月1日付け制定。航空機・宇宙産業イノベーションプログラム基本計画(平成20・03・31産局第5号)は、廃止。

付録資料 2

プロジェクト基本計画

(エネルギーイノベーションプログラム・ナノテク・部材イノベーションプログラム)
「超電導技術研究開発」基本計画

省エネルギー部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

資源に乏しい我が国が、将来にわたり持続的発展を達成するため、革新的なエネルギー技術の開発、導入・普及によって、各国に先んじて次世代型のエネルギー利用社会の構築に取り組んでいくことを目的とした「エネルギーイノベーションプログラム」、及び、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなど、あらゆる分野に対して高度化あるいは不連続な革新（ジャンプアップ）をもたらすナノテクノロジー及び革新的部材技術を確立するとともに、その実用化や市場化を促進することで、我が国産業の国際競争力の維持・強化や解決困難な社会的課題の克服等を可能とすることを目的とした「ナノテク・部材イノベーションプログラム」、の一環として本プロジェクトを実施する。

エネルギー資源の約8割を海外に依存する我が国は、近年増加している世界のエネルギー需給動向の変動によって社会・経済が大きな影響を受けるため、エネルギー利用効率化の促進が求められている。また、地球環境問題への対策の観点から省エネルギーや環境負荷低減に配慮したエネルギー利用が求められている。このような状況においては、十分な安全確保を前提に、需要に見合った信頼性の高い安定で効率的なエネルギー供給システムを構築することが重要である。そこで本研究開発では、高機能部材である超電導線材を利用し、送電損失を大幅に低減することが可能な高温超電導ケーブルシステム及び超電導電力機器を開発することにより、経済社会を支える重要なエネルギーである電力の一層の安定的かつ効率的な供給システムの実現に資することを目的とする。

(2) 研究開発の目標

本研究開発は、電力供給信頼度の向上、電力分野におけるCO₂削減、新エネルギー導入に対する電力系統の安定化等に貢献することを目標とする。なお、個々の研究開発項目の目標は別紙「研究開発計画」に定める。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

[委託事業(平成19～22年度)、共同研究事業(NEDO負担率2/3、平成23～25年度)]

① 高温超電導ケーブル実証プロジェクト

[委託事業]

② イットリウム系超電導電力機器技術開発

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」という。）が、単独ないし複数の原則本邦の企業、大学等の研究機関(原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業の特別な研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点からの国外企業との連携が必要な場合はこの限りではない)から公募によって研究開発実施者を選定し実施する。

NEDOは、研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルを検討し、これを最大限活用することにより効率的な研究開発を図る観点から、委託先決定後に必要に応じて研究開発責任者(プロジェクトリーダー)を指名し、その下に効果的な研究を実施する。なお、本研究開発ではプロジェクトリーダーは研究開発項目毎に指名し、別紙研究開発計画に記載する。

(2) 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及び研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標、並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて外部有識者による技術検討委員会を設置し、開発内容について審議し、その意見を運営管理に反映させる他、プロジェクトリーダーを指名しているプロジェクトは、四半期に一回程度プロジェクトリーダー等を通じてプロジェクトの進捗について報告を受けること等を行う。

3. 研究開発の実施期間

本研究開発の実施期間は研究開発項目ごとに以下のとおりとする。

① 高温超電導ケーブル実証プロジェクト

本研究開発の期間は、平成19年度から平成25年度までの7年間とする。

② イットリウム系超電導電力機器技術開発

本研究開発の期間は、平成20年度から平成24年度までの5年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価及び事後評価を実施する。なお、中間評価結果を踏まえ必要に応じてプロジェクトの加速・縮小・中止等の見直しを迅速に行う。評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。なお、評価の実施時期や方法は、研究開発項目毎に別紙研究開発計画に記載する。

5. その他重要事項

(1) 研究開発成果の取扱いについて

①成果の普及

本研究開発で得られた研究成果についてはNEDO、委託先とも普及に努めるものとする。

②知的基盤整備事業又は標準化等との連携

得られた研究開発の成果については、知的基盤整備又は標準化等との連携を図るためデータベースへのデータ提供、標準案の提案等を積極的に行う。

③知的財産権の帰属

本研究開発で得られた研究開発の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

(2) 基本計画の変更

NEDOは、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、内外の研究開発動向、政策動向、プログラム基本計画の変更、評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

(3) 根拠法

① 高温超電導ケーブル実証プロジェクト

「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第十五条第1項第一号イ」

② イットリウム系超電導電力機器技術開発

「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第十五条第1項第一号イ」及び

「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第十五条第1項第九号」

6. 基本計画の改訂履歴

(1) 平成22年3月、2事業（高温超電導ケーブル実証プロジェクト、イットリウム系超電導電力機器技術開発）を統合して新たに制定。

(2) 平成23年1月、平成23年度より、研究開発項目①「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」の共同研究事業（NEDO 負担率2/3）への変更及び加速による研究内容を追加する変更。また、研究開発項目②「イットリウム系超電導電力機器技術開発」について、中間評価を踏まえ開発項目（イ）の内容縮小並びに開発項目（ロ）の実施内容追加、開発項目（二）の追加による改訂。

(3) 平成23年7月、根拠法を変更。

(4) 平成24年3月 研究開発項目①「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」の実施期間を延長。

(5) 平成25年3月、根拠法を変更。

(6) 研究開発項目①「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」のプロジェクトリーダーを変更。

(別紙) [研究開発計画]

研究開発項目①「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」

[研究開発の目的]

高温超電導ケーブルは、超電導技術分野技術戦略マップのエネルギー・電力分野機器開発のうち「環境・エネルギー調和型社会の構築」、「送変配電」、「電力ケーブル」および、第3期科学技術基本計画のエネルギー分野の重点科学技術「電力供給システム」、「送電技術」に位置付けられている。本研究開発項目では、この高温超電導ケーブルを社会の重要なインフラである電力供給システムに適用するために、「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」(平成12年度～16年度)によって得られた高温超電導ケーブルの開発成果などを踏まえ、高温超電導ケーブルや冷却技術などを統合する高温超電導ケーブルシステムを構築する。また、超電導ケーブル単体だけではなく、線路建設、運転、保守を含めたトータルシステムの信頼性を実証するために、実システムに連系した実証試験を実施する。このことによって、超電導ケーブルのトータルシステムとしての総合的な信頼性を実証するとともに、革新的な高効率送電技術の開発・検証を行うことを目的とする。

これにより、安定的かつ高効率な電力供給に資する技術開発を行うとともに、超電導ケーブルの初期市場形成と新規産業の創出に資する。

[研究開発の目標]

平成21年度までに、高温超電導ケーブルシステムの重要要素(ケーブル、中間接続部、冷却システム等)に関して、実システムに適用し得る所定の性能、機能を有し、送電システムが構築できることをモデルシステムによって検証した上で、平成25年度までに、200MVA級の中間接続部を有する三心一括型高温超電導ケーブルを、冷却装置や保護装置などの付帯設備とともに66kV実システムに接続して12ヶ月以上の長期連系試験を行うことによって総合的な安全性や信頼性を実証する。

超電導ケーブルを実用に供する上での運転技術の指針や課題等を明らかにして、高効率送電技術の開発・検証を行うとともに、高圧ガス保安法の規制緩和や国際標準化の提案を行う。

[研究開発の内容]

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について実施する。

- (イ) 高温超電導ケーブルの総合的な信頼性研究
 - (i) 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証
 - (ii) トータルシステム等の開発
 - (iii) 送電システム運転技術の開発
 - (iv) 実システムにおける総合的な信頼性の実証

- (ロ) 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究

(イ)「高温超電導ケーブルの総合的な信頼性研究」

高温超電導ケーブルを社会の重要なインフラである電力供給システムに適用するためには、高温超電導ケーブル単体のさらなる低損失化や低コスト化を図るだけでなく、線路建設、運用、保守を含めたトータルシステムとしての総合的な信頼性を確立することが要求される。そのためには、実系統に連系した実負荷での実証試験は不可欠であり、高温超電導ケーブルシステムの安全性や信頼性の知見を得るための総合的な信頼性研究が必要である。

(i) 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証

1. 研究開発の必要性

実系統連系試験に適用する高温超電導ケーブルシステムの重要要素（ケーブル、中間接続部、冷却システム等）に関して、実系統に適用し得る所定の性能、機能を有し送電システムが構築できることを模擬システムにより事前に検証する必要がある。

2. 研究開発の具体的な内容

66kV、200MVA 級 3 心一括型高温超電導ケーブル等の重要要素技術が、実系統連系試験に適用可能であることを検証する。

3. 達成目標（平成 21 年度中）

重要要素技術が、実系統連系に適用し得る次の性能、機能を有することを模擬システムにて検証する。

- ・ 交流損失：1W/m/1 相（3 心一括型高温超電導ケーブル（66kV、2kA）、150mm φ 管路収容）
- ・ 短絡電流：31.5kA・2 秒の短絡電流
- ・ 中間接続部の導体接続損失：2kA 通電相当で $1\mu\Omega$ / 相以下

(ii) トータルシステム等の開発

1. 研究開発の必要性

高温超電導ケーブルシステムが、市場に導入されるためには、線路建設、運転監視、運用・保守方法などのトータルシステムとしての技術を確立する必要がある。

2. 研究開発の具体的な内容

高温超電導ケーブルシステムの線路建設、運転監視、運用・保守方法等のトータルシステムとしてのシステム基本設計の確立および高効率な冷却システムの開発を行うとともに、実運用を行う際の安全性や信頼性、経済性、環境面の評価を行う。

3. 達成目標

中間目標（平成21年度中）

高温超電導ケーブルシステムの線路建設、運転監視、運用・保守等を検討し、トータルシステム構築要領を作成する。

最終目標（平成23年度中）

高温超電導ケーブルシステムの線路建設、運転監視、運用・保守方法等のトータルシステムとしてのシステム基本指針を作成する。また、既存ケーブルの送電損失に比べて1/2以下の高効率送電システムの設計技術を確立する。

(iii) 送電システム運転技術の開発

1. 研究開発の必要性

送電システムの負荷や電流の変動などの系統変化や系統事故などに対応した平常時運用や事故時運用、および高温超電導送電システムの一部設備の障害時における復旧方法などの高温超電導ケーブルシステムの運転技術が、既存送電システムの運転と整合のとれた運用ができることは重要であり、そのための運転技術を開発することは必要である。

2. 研究開発の具体的な内容

高温超電導ケーブルを用いた送電システムが、負荷や電圧の変動などの系統変化や系統事故などに対応した系統運用において、自動的に追従した運転（冷却含む）や、送電システムの一部設備の障害時における復旧方法など送電システムの運転技術を開発する。また、その運転技術を実系統連系試験において検証する。

3. 達成目標

中間目標（平成21年度中）

高温超電導ケーブルの運転技術が、既存送電システムの運転技術と整合するための課題を整理する。

最終目標（平成25年度中）

既存送電システムの運転技術と整合のとれた平常時/事故時および障害復旧時等の高温超電導送電システムの運転技術指針を作成する。

(iv) 実系統における総合的な信頼性の実証

1. 研究開発の必要性

高温超電導ケーブルを社会の重要なインフラである電力供給システムに適用するためには、実系統に連系した実負荷での実証試験は不可欠であり、トータルシステムとしての安全性や信頼性の知見を得るための研究が必要である。

2. 研究開発の具体的な内容

実系統連系試験のためのサイト選定や試験方法などの基本事項を検討する。その上で、実証試験の目的に沿った高温超電導ケーブルシステムの構築を行い、中間接続部を有する高温超電導ケーブルを実系統に連系して、12ヶ月以上の長期試験により総合的な信頼性の検証を行う。

このことによって、高温超電導ケーブルのトータルシステムとしての安全性や信頼性を実証す

る。

3. 達成目標

中間目標（平成21年度中）

実系統連系試験サイトを決定するとともに、実系統連系試験基本計画書を作成する。

最終目標（平成25年度中）

実系統に連系した12ヶ月以上の長期試験による総合的な信頼性の評価指針を作成する。

高温超電導ケーブルは次の要求仕様を達成するものとする。

- ・送電容量：200MVA 級（66kV、3心一括型高温超電導ケーブル、150mmφ管路収容可能）
- ・交流損失：1W/m/1相（3心一括型高温超電導ケーブル（66kV、3kA）、150mmφ管路収容）
- ・短絡電流：31.5kA-2秒の短絡電流に対応
- ・中間接続部の導体接続損失：3kA 通電相当で1μΩ/相以下

(ロ)「超電導ケーブルの適用技術標準化の研究」

1. 研究開発の必要性

超電導ケーブルは、効率的なエネルギー供給システムになくってはならないものであり、エネルギーの高効率な輸送だけでなく、系統安定化にも大きな効果が期待される。その早期の市場導入や実用化を円滑に進めるためには、冷却設備における規制緩和や運転管理などを考慮した既存電力ネットワークとの整合を取るための適用技術を標準化することが必要である。

2. 研究開発の具体的な内容

超電導ケーブルを適用する電力ネットワークの形態や規模などから、超電導ケーブルの適用技術の評価するとともに、冷却設備の安全性、運用性を考慮した法規制のあり方を研究する。

また、実証試験を通じて、運転管理や評価・計測技術等の超電導送電システムの国際規格化を進めるために、標準化項目を整理して必要なデータ収集を行い、適用技術標準化の研究を行う。

3. 達成目標

中間目標（平成21年度中）

- ・超電導ケーブルの適用技術の評価項目や冷却設備の法規制あり方の概要を取りまとめるとともに、超電導送電システムの国際規格化を進めるための標準化項目を作成する。

最終目標（平成25年度中）

- ・電力ネットワークの形態や規模に応じた構成、機能、経済性、環境面などの適用技術や導入効果を評価して超電導ケーブルの導入シナリオを定める。
- ・冷却設備における規制緩和に向けた技術基準を研究し、規制緩和の提案資料を作成する。
- ・超電導送電システムの運転管理や評価・計測法等の国際規格化を進めるため PAS（公開仕様書）または TS（技術仕様書）案を作成する。

[研究開発の実施方法]

(1) 研究開発の実施体制 研究開発に参加する研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、NEDO は東京電力株式会社 技術統括部 技術開発センター 超電導技術グループマネージャー 本庄 昇一を研究開発責任者（プロジェクトリーダー）とし、その下に研究者を可能な限り結集して効果的な研究開発を実施する。

[評価に関する事項]

NEDO は、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目的達成度、成果の技術的意義ならびに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成21年度、事後評価を平成26年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえて必要に応じプロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗動向等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

[その他の重要事項]

(1) 研究開発成果の取り扱い

① 共通基盤技術の形成に資する成果の普及

得られた研究開発成果のうち、下記共通基盤技術に係る研究開発成果については、NEDO、実施者とも普及に努めるものとする。

a) 実系統への適用技術の確立

- ・ 超電導送電システムの総合的な信頼性技術
- ・ 高効率超電導送電システムの運転技術

② 標準化等との連携

得られた研究開発成果については、知的基盤整備または標準化等との連携を図るため、データベースへのデータ提供、標準情報（TR）制度への提案等を積極的に行う。

特に、冷却設備の規制緩和に関しては積極的に提案を行う。

(2) その他

- ・ 高圧ガス保安法の緩和を提案するために委員会を設置する。

研究開発項目②「イットリウム系超電導電力機器技術開発」

〔研究開発の目的〕

経済社会の基盤となる電力の安定的かつ効率的な供給システムを実現するため、システムを適正に制御し、電力供給を安定化させるための技術及び発電電力を無駄なく輸送するための高効率な送電技術の確立を目指す。そのため、世界的にも我が国が最先端の技術力を有する超電導技術を活用して、コンパクトで大容量の電力供給が期待できるイットリウムに代表されるレアアース系酸化物高温超電導線材（以下「イットリウム系超電導線材」という）を用いた超電導電力機器の開発を目指す。特に、超電導電力貯蔵システム（SME S）、超電導電力ケーブル及び超電導変圧器の実用化に向けた技術を開発し、産業利用の早期実現を図ることにより、経済社会を支える重要なエネルギーである電力の一層の安定的かつ効率的な供給システム実現に資することを目的とする。

なお、本プロジェクトは、「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」（平成15年度～19年度）及び「超電導電力ネットワーク制御技術開発」（平成16年度～19年度）によって得られた開発成果を踏まえて、実用レベルに達したイットリウム系超電導線材を用いて開発を行う。また、本プロジェクトの研究対象機器は、第3期科学技術基本計画のエネルギー分野の重点科学技術「送電技術」、「電力系統制御技術」、「電力貯蔵技術」に位置付けられており、さらに、超電導技術分野の技術マップ（平成19年4月制定）のエネルギー・電力分野機器開発にも位置づけられている。

〔研究開発の目標〕

（イ）超電導電力貯蔵システム（SME S）の研究開発

平成22年度までに、2GJ級SME Sの開発を見通す高磁界かつコンパクトなコイル設計技術の開発並びにメンテナンスを容易とするコイルの伝導冷却技術開発を行う。

平成24年度までに2GJ級SME Sに必要となるイットリウム系超電導線材及びコイルの構造を評価し、高磁界コンパクトSME Sコイルシステム化技術のための重要な要素技術開発に向けた課題を抽出し、解決策を提案することで、2GJ級SME Sの開発が可能であることを証明する。

（ロ）超電導電力ケーブルの研究開発

平成22年度までに、電力ケーブルの大電流・低交流損失ケーブル化技術、高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術に関する要素技術の開発を完了する。

平成24年度までにケーブル対応線材の安定作製技術開発及び66kV大電流ケーブルシステム、275kV高電圧ケーブルシステムの課通電特性や送電損失等の実用性を検証し、各々のケーブルシステムの実用可能性を証明する。

（ハ）超電導変圧器の研究開発

平成22年度までに、超電導変圧器用の低損失化技術、大電流巻線技術及び限流機能の開発を行い、66kV/6.9kV-2MVA級変圧器の設計を完了する。

平成24年度までに、2MVA級超電導変圧器モデルを試作・評価し、低損失（従来線材対比の交流損失1/3以下）、大電流（2kA級）で、保護のための限流機能（過大電流を定格電流の3倍以下に抑制）を有する66/6kV 20MVA級超電導変圧器システムの成立性を実証する。

（ニ）超電導電力機器用線材の技術開発

平成22年度までに、電力機器応用の長期信頼性試験等を実施する実用化技術開発の際に必要な性能及び製造速度等を満足させるイットリウム系超電導線材作製技術の開発を実施する。

平成24年度までに、同線材の線材長及び臨界電流等の再現性確認による安定製造技術開発を

行う。さらに、2020年頃を想定した超電導電力機器の導入・普及の際のコストを含めた必要条件に耐え得る線材の作製技術を開発する。

(ホ) 超電導電力機器の適用技術標準化

超電導電力機器の早期市場導入や実用化を円滑に進めるために共通基盤となる標準化を進める。

平成24年度までに、超電導線材及びその試験方法並びに超電導電力ケーブル及びその試験方法について、国際標準化に資する規格素案を作成する。また、イットリウム系超電導線材等を適用した変圧器等の機器及びこれらの試験方法の規格素案を作成する。

[研究開発の内容]

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について実施する。

[委託事業]

(イ) 超電導電力貯蔵システム (SMES) の研究開発

- (i) 2GJ 級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発
- (ii) 高効率コイル伝導冷却技術開発
- (iii) SMES 対応線材開発
- (iv) 高信頼性・高耐久性 SMES コイル要素技術開発

(ロ) 超電導電力ケーブルの研究開発

- (i) 大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発
- (ii) 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発
- (iii) 超電導電力ケーブル対応線材開発
- (iv) 66kV 大電流ケーブルシステム検証
- (v) 275kV 高電圧ケーブルシステム検証

(ハ) 超電導変圧器の研究開発

- (i) 超電導変圧器巻線技術開発
- (ii) 冷却システム技術開発
- (iii) 限流機能付加技術開発
- (iv) 超電導変圧器対応の線材開発
- (v) 2MVA 級超電導変圧器モデル検証

(ニ) 超電導電力機器用線材の技術開発

- (i) 線材特性の把握
- (ii) 磁場中高 I_c 線材作製技術開発
- (iii) 低損失線材作製技術開発
- (iv) 高強度・高 J_e 線材作製技術開発
- (v) 低コスト・歩留向上技術開発

(ホ) 超電導電力機器の適用技術標準化

- (i) 超電導線材関連技術標準化
- (ii) 超電導電力ケーブル関連技術標準化
- (iii) その他超電導電力機器関連技術標準化等

(イ)「超電導電力貯蔵システム（SME S）の研究開発」

SME Sは、高速な充放電特性や高い繰り返し耐久性を持ち、高出力化や大容量化に優れた電力貯蔵装置である。今後、ますます大規模電源の遠隔化が予想されるが、有効電力・無効電力の同時補償により、有効な長距離大容量送電システムの安定化対策が可能なSME Sは、中間開閉所の設置や送電ルートの複数化等による従来の対策に替わる電力系統安定化装置として期待されている。

このため、「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」（平成 15 年度～19 年度）及び「超電導電力ネットワーク制御技術開発」（平成 16 年度～19 年度）によって得られた開発成果を踏まえて、実用レベルに達したイットリウム系超電導線材を用い、従来の金属系超電導線材を用いたSME Sコイルでは実現不可能であった2GJ級大容量SME Sコイルを可能とする高磁界・コンパクトコイルの構成のための重要な要素技術の開発を行い、同コイル巻線に必要な線材及びコイル構造を評価し、信頼性・耐久性を向上させることで高磁界コンパクトSME Sの実用化を目指す。また、並行してメンテナンスが容易で、イットリウム系超電導線材の性能向上が期待できる温度領域での高効率な伝導冷却技術を開発する。また、SME Sの性能向上とともに導入促進に資する線材開発を行う。

(i) 2GJ級高磁界・コンパクトコイル構成技術開発

1. 研究開発の必要性

2GJ級大容量SME Sコイル実現のためには、従来の金属系SME Sでは達成できなかったレベルの貯蔵エネルギー密度の向上が課題となり、磁場中特性に優れるイットリウム系超電導線材によるコイルを用いた高磁界化による貯蔵エネルギー高密度化が必要となる。この高磁界コイルの実現には、コイル通電時に発生する通電電流と最大経験磁場、コイル径の積として加わる強力な電磁力（フープ応力）の繰り返しに耐えるコイル構成を開発することが不可欠である。

2. 研究開発の具体的な内容

- ・ 従来の金属系SME Sコイルの許容可能なフープ応力(300MPa程度)の2倍の応力(600MPa)を連続して繰り返し加えても使用可能な高強度コイルを開発する。
- ・ SME Sシステムとして必要な通電電流を実現させる積層複合導体を用いたコイル構成技術の開発を行う。

3. 達成目標

最終目標（平成22年度中）

- ・ フープ応力 600MPa 以上、通電電流 2kA 以上のSME Sコイル構成技術を開発する。

(ii) 高効率コイル伝導冷却技術開発

1. 研究開発の必要性

SME Sの安定した動作には、コイルの熱安定性が不可欠であり、従来の金属系SME Sで用いられてきた4K温度領域に比べコイルの比熱が高くなる20K以上の温度領域での適用が可能となれば、その安定性が飛躍的に向上する。また、イットリウム系超電導線材は、低温になるに従い飛躍的に磁場中臨界電流特性が向上し、20K近傍の温度領域では、10Tの磁場中でもその特性低下が実用上の問題とならなくなる。しかし、この温度領域では熱伝導率が小さいため、高効率な熱伝導冷却技術が必要である。同時に、伝熱性能とトレードオフの関係になる電気絶縁性能においても高い絶縁性能を有したコイル構造の開発を要する。

2. 研究開発の具体的な内容

- ・ 20～40K 付近の温度領域における伝導冷却を可能とするコイル構造を開発するとともに、高熱伝導性能とトレードオフの関係になる電気絶縁性能においても、高い性能を有したコイル構造を開発する。
- ・ 上記で試作したコイルがSME Sの運転条件から予想される発生熱を伝導冷却により冷却可能であることを検証するとともに、必要な絶縁性能を有することを検証する。

3. 達成目標

最終目標（平成22年度中）

- ・ 20～40K 付近の温度領域における伝導冷却を可能とするコイル伝導冷却技術を開発する。
- ・ 2kV 以上の電気絶縁性能を有する高熱伝導コイル構造を開発する。

(iii) SME S 対応線材開発

1. 研究開発の必要性

SME S用高磁界コンパクトコイル構成のためには、積層複合導体・SME S本体の構造を含めた機器サイドの開発に必要な安定した線材製造技術の確立が求められる。

2. 研究開発の具体的な内容

- (a) 線材安定製造・歩留り向上技術

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・ モデルコイル試作に必要な下記仕様に相当する線材の安定製造技術を確立する。
仕様：Ic=20A/cm 幅@77K&3T で強度 1GPa を有する 100m に相当する線材

(iv) 高信頼性・高耐久性SME S コイル要素技術開発

1. 研究開発の必要性

2G J 級電力系統制御用SME Sシステムの実用化を実現するためには、高磁場で利用できコンパクトで熱安定性に優れたコイル構造の開発や、そのコイルを高い信頼性で利用可能な冷却技術開発に加え、SME Sシステムとしての信頼性向上を図ることが必要不可欠である。SME Sは電力機器として、超電導コイルへの繰返し充放電が要求され、繰返し運転において十分な信頼性、耐久性を有していることが求められる。既に、SME Sの系統制御機能については金属系超電導コイルを用いた20MJ級SME Sシステムの実系統連系試験により確認されており、その試験で2万回以上の繰返し試験を実施している。リチウム系超電導コイルを用いたSME Sシステムにおいても同等の性能を有することを検証することが不可欠である。そのためには、SME Sシステムの要素コイルについて、SME S運転条件におけるコイルの限界性能を把握し、SME Sコイルシステムとしての信頼性・耐久性を向上させる必要がある。

2. 研究開発の具体的な内容

- ・ 電力系統制御用SME Sとして、前記(i) 2G J 級高磁界・コンパクトコイル構成技術開発、及び(ii) 高効率コイル伝導冷却技術開発の成果を踏まえつつ、SME S実運転条件を模擬した試験システムにより、コイル線材及びコイル構造を評価し、コイル限界性能を把握することでSME Sコイルシステムとしての信頼性・耐久性向上技術を確立する。また、クエンチ検出・保護も考慮し、実運転に耐えうるコイル要素技術の開発に向けて課題を抽出し、解決策を提案する。
3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・2GJ級SME Sコイル基本システム構成の最適化並びに高磁界コンパクト・高効率伝導冷却コイルを用いた評価用試験モデルの設計を完了する。
- ・SME Sシステムとしての適用性を検証評価する試験計画を作成する。

最終目標（平成24年度中）

- ・実運転条件におけるコイル線材及びコイル構造を評価することで、2万回繰返し充放電試験と同等レベルの信頼性・耐久性を持つコイル要素技術開発に向けて課題を抽出し、解決策を提案する。

(ロ)「超電導電力ケーブルの研究開発」

超電導電力ケーブルはコンパクトな形状で大容量送電を可能とし、既設管路を有効活用した送電容量の増大が可能である。今後、都市部の電力需要増大への対策や老朽化した設備のリプレース対策として地中ケーブルへの適用が期待されている。また、超電導電力ケーブルは既存の導体ケーブルに比較し、送電ロスを低減することが可能であることから、省エネルギー、地球温暖化対策に貢献できることも期待されている。

このため、「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」（平成15年度～平成19年度）によって得られたイットリウム系超電導線材作製技術開発、機器要素技術開発などの成果を活用し、コンパクトで大容量送電を可能とする超電導電力ケーブルについて、大電流導体化技術、冷却技術を含めた高電圧絶縁技術、低損失化技術、中間接続や終端接続等の大容量接続技術、機械的特性向上技術等の技術開発を行う。さらに最終目標として、この成果を活かした超電導電力ケーブルシステムを開発し検証することによって、高効率な超電導電力ケーブルによる送電技術に目途を付ける。

また、電力ケーブルの性能向上とともに導入促進に資する超電導線材開発を行う。

(i) 大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発

1. 研究開発の必要性

イットリウム系超電導線材はビスマス系超電導線材に比べ交流損失を低減することが可能であるが、そのためには線材を細線化する必要がある。一方、ケーブルの通電電流を5kAに大電流化する場合、多層導体を形成する必要がある。このように細線化線材を多層に集合した構造は未だ実現されておらず、ケーブルとして導体化時の線材特性への影響、多層導体構造での低交流損失設計及び実証、超電導ケーブルの機械的強度特性検証等を行う必要がある。併せて大電流適用に対応した超電導-常電導接続部の構造設計の検証と電流リード部の開発を行う必要がある。

また、三心一括ケーブルとする場合には、機械特性（引張り、曲げ）、熱収縮応力下でのケーブル変形の影響、短絡電流通過時の電磁力によるケーブルコアへの影響等が懸念されるため、それらの検証・評価を行う必要がある。

2. 研究開発の具体的な内容

(a)大電流・低交流損失技術の基礎特性評価

大電流ケーブルに使用する超電導線材の多層導体化時の交流損失を含めた電気的特性の基礎データを取得し、コンパクトで低損失なケーブル設計技術を確立する。

- ・素線及びケーブル導体の交流損失の測定・評価

- ・ケーブル導体の曲げ、引張り特性の評価
- ・コンパクトで低損失なケーブル設計

(b)大容量接続技術の開発

- ・超電導-常電導接続部の構造設計検証
- ・5kA 級電流リードの開発

(c)三心一括ケーブル導体の検証

- ・三心一括ケーブル導体の試作・評価
- ・短絡電流通過時のケーブル性能への影響検証

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

大電流ケーブル導体等の特性試験によって、コンパクトで低損失なケーブル設計技術及び大容量接続技術等を確立する。

- ・ケーブル損失（交流損失） 2 W/m-相@5kA 以下
- ・短絡試験（31.5kA, 2sec 相当）でケーブルの性能に劣化が無いこと
- ・5kA 連続通電※を行いケーブル導体、超電導-常電導接続部、電流リードに異常がないこと

※ケーブルの熱平衡が得られるまで連続通電を行う

最終目標（平成24年度中）

中間接続部を有する大電流ケーブルコアを作成し、課電および機械強度特性の評価を行い、中間接続部の要素技術を確立する。また実用化に向けて、更なる交流損失の低減に向けたケーブル構造を検討し設計する。

(ii) 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発

1. 研究開発の必要性

66kV 級超電導電力ケーブルに比べて 275kV 級高電圧超電導電力ケーブルは、高電圧に対する絶縁技術が要求される。このため、電氣的絶縁性能を確保しつつケーブルをコンパクト化する技術、誘電損失を低減しつつ液体窒素による導体冷却を適切に行う技術等を確立したうえで高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の技術開発を行う必要がある。

2. 研究開発の具体的な内容

(a) 高電圧絶縁・低誘電損失技術の基礎特性評価

超電導電力ケーブルに使用する電気絶縁材料の電氣的基礎特性、絶縁厚さと誘電損失の関係など基礎データを取得し、コンパクトで低損失なケーブル設計の基礎特性を確立する。

- ・絶縁材料の基礎特性評価
- ・誘電損失の評価

(b)大径ケーブルの熱収支特性評価

常時及び事故時の発熱・冷却に関する熱収支検討を行い、ケーブルの最適設計手法を確立し、短絡電流通過時でも熱的に破壊しないことを確認する。

- ・通常通電時の熱特性把握
- ・事故時の熱特性把握

(c)高電圧接続技術の開発

中間及び終端の接続部を開発し、交流電圧及びインパルスに対して十分な性能を有することを確認する。

- ・耐電圧試験（交流耐電圧試験条件、インパルス耐電圧試験条件）計画書の作成
- ・中間接続部の開発及び耐電圧試験で異常がないこと
- ・終端接続部の開発及び耐電圧試験で異常がないこと

(d)ケーブル性能評価

中間目標で得られた技術を用いて、275kV 高電圧ケーブルシステム検証用ケーブルと同仕様の短尺ケーブルコアモデルを製作し、上記(a)～(c)の性能を確認する。

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

高電圧ケーブル導体等の特性試験によって、コンパクトで低損失なケーブル設計技術及び大電圧接続技術等を確立する。

- ・ケーブル損失（交流損失、誘電損失） 0.8 W/m-相@3kA 以下
- ・短絡試験（63kA, 0.6sec 相当）でケーブル性能に劣化が無いこと
- ・275kV 連続課電※を行いケーブル導体、超電導-常電導接続部、電流リードに異常がないこと

※ケーブルの熱平衡が得られるまで連続課電を行う。

最終目標（平成24年度中）

- ・中間目標で得られた技術を用いて、短尺ケーブルコアモデルを作製し、その性能について評価・検討し、各種コア構造のシステム設計の妥当性を検証することによって、275kV 高電圧ケーブルシステムに反映する。

(iii) 超電導電力ケーブル対応線材開発

1. 研究開発の必要性

大電流及び高電圧電力ケーブルを実現するためには、損失低減やコンパクト化などの課題に対する導体・ケーブルの構造を含めた機器サイドの開発に必要な線材を安定して作製する技術の確立が求められる。

2. 研究開発の具体的な内容

(a)線材安定製造・歩留向上技術

(b)システム検証用線材の安定作製、加工、評価

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・ケーブルシステム検証に必要な下記仕様に相当する線材を安定に作製可能な技術を確立する。

仕様：Je=15kA/cm²（2mm 幅×20m）に相当する線材

最終目標（平成24年度中）

上記仕様に相当するシステム検証用線材の安定作製、加工、評価、を確実に実施する。

(iv) 66kV 大電流ケーブルシステム検証

1. 研究開発の必要性

66kV 大電流ケーブルの実用性を検証するためには、大電流通電技術、交流損失低減技術、誘

電損失低減技術の開発成果を活かしたケーブルを開発し、実用化時の要求仕様に基づいた課通電試験を行う必要がある。

2. 研究開発の具体的な内容

前記、(i) 大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発及び(ii) 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発の成果を踏まえつつ、検証用超電導ケーブルシステムの設計・製作を行い、課通電試験によってケーブル性能を検証する。

- ・両端に終端接続部を有する 66kV/三心一括/5kA,15m 長の超電導ケーブルシステムを開発する。
- ・66kV 大電流ケーブル実用化時の耐久性を評価できる試験条件を設定し、開発したケーブルの課通電試験を実施する。

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・両端に終端接続部を有する検証用 66kV/三心一括/5kA,15m 長の超電導ケーブルシステムのシステム設計を完了する。
- ・耐久性を評価できる課通電試験計画書を作成する。

最終目標（平成24年度中）

- ・下記性能を有する 66kV/三心一括/5kA,15m 長の超電導ケーブルを作製する。
 - －ケーブル外径；内径 150mm φ の管路に収納できること
 - －ケーブル損失（交流損失、誘電損失）；2.1 W/m・相@ 5kA 以下
 - －中間目標で得られた課通電試験の設定条件下における課通電試験を実施し、試験計画書の性能を満足することを検証する。

(v) 275kV 高電圧ケーブルシステム検証

1. 研究開発の必要性

275kV 高電圧ケーブルの実用性を検証するためには、高電圧絶縁技術、誘電損失低減化技術、大電流通電技術、交流損失低減技術の開発成果を活かしたケーブルを開発し、実用化時の要求仕様に基づいた課通電試験を行う必要がある。

2. 研究開発の具体的な内容

前記、(i) 大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発、及び(ii) 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発の成果および短尺ケーブルコアモデルにおける成果を踏まえつつ、検証用超電導ケーブルシステムの設計・製作を行い、課通電試験によってケーブル性能を検証する。

- ・両端に終端接続部と中間接続部を有する 275kV/単心/3kA,30m 長の超電導ケーブルシステムを開発する。
- ・275kV 高電圧ケーブル実用化時の耐久性を評価できる試験条件を設定し、開発したケーブルの課通電試験を実施する。

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・両端に終端接続部と中間接続部を有する検証用 275kV/単心/3kA,30m 長の超電導ケーブルシステムのシステム設計（各種コア構造を含む）を完了する。
- ・耐久性を評価できる課通電試験計画書を作成する。

最終目標（平成24年度中）

- ・下記性能を有する 275kV/単心/3kA,30m 長の超電導ケーブルを作製する。
 - －ケーブル外径；150mmφ 以下
 - －ケーブル損失（交流損失、誘電損失）；0.8W/ m・相@3kA 以下
 - －中間目標で得られた課通電試験の設定条件下における課通電試験を実施し、試験計画書の性能を満足することを検証する。

(ハ)「超電導変圧器の研究開発」

超電導変圧器は従来の変圧器に比べ、高効率でコンパクト化が可能であり、絶縁に油を用いないため、不燃で環境負荷が小さいことを特長とする。今後、都市部を主体とした電力需要増加に伴う変圧器容量対策や変電所の新設対策及び経年劣化に伴う変圧器のリプレース対策に貢献すると考えられている。また、大容量送電を可能とする超電導電力ケーブルとの組み合わせにより、より高効率な電力供給システムが可能となる技術として期待されている。

このため、「超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）」（平成15年度～平成19年度）におけるイットリウム系超電導線材作製技術開発、機器要素技術開発などの成果を活用し、コンパクトで高効率な超電導変圧器に必要な巻線技術、高電圧絶縁技術等の技術開発を行う。さらに最終目標として、超電導変圧器を開発し、検証することによって、高効率な変電技術に目途をつける。

また、変圧器の性能向上とともに導入促進に資する線材開発を行う。

(イ) 超電導変圧器巻線技術開発

1. 研究開発の必要性

20MVA 級超電導変圧器の実現のためには、従来の金属系超電導線材やビスマス系超電導線材では達成できなかった大電流化、低損失化が課題となる。これら課題の解決には、細線化したイットリウム系超電導線材を積層し、大電流化した導体による巻線コイル製作技術が必要となる。また同時に、同構造のコイルが系統や変圧器の故障により発生する短絡電流に対しても、変圧器を健全に維持できる強度を有する構造とする必要がある。

2. 研究開発の具体的な内容

超電導応用基盤技術開発（第Ⅱ期）における検証の結果より、以下の開発を行う。

- ・多層並列転位構造を最適化し、2kA が通電可能な巻線コイルを開発する。
- ・細線化線材により、無加工線を使用した場合に対し損失が 1/3 以下となる 100m 級巻線コイルを開発する。
- ・短絡電流（20MVA 級変圧器%インピーダンス 15%相当）により、巻線が劣化しない巻線コイルを開発する。

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・2kA 級の超電導通電特性を検証する。
- ・短絡電流（20MVA 級変圧器%インピーダンス 15%相当）により、巻線が劣化しないことを検証する。

最終目標（平成24年度中）

- ・2MVA 級超電導変圧器モデル検証のため、大電流モデルを設計・製作し、通電試験の実施、解析等により大電流巻線技術を確立する。
- ・100m 級巻線コイルにて、交流損失が 1/3 以下（対細線化しない線材）となることを検

証する。

(ii) 冷却システム技術開発

1. 研究開発の必要性

過去最大規模の超電導変圧器を高効率かつコンパクトな姿で実現するには、超電導巻線を低温に維持する保冷容器は変圧器に対して過大とならない範囲で従来より大きいものが必要であり、また冷却システムは保守性能を高めて高効率化する必要があるため、新たな開発が必要である。

なお、保冷容器及び冷却システムの一部は、超電導変圧器システム全体が従来にない大きさのため、設計技術についても開発する必要がある。

2. 研究開発の具体的な内容

- ・ 超電導変圧器に適用可能な大型非磁性保冷容器を開発する。
- ・ 高効率で保守性能に優れた高効率冷却装置を開発する。
- ・ 保冷容器と冷却装置からなる冷却システムは後述の超電導変圧器モデルと組み合わせて性能を検証する。

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・ 保守性能の高いコンパクトな冷却システム用の高効率圧縮機（断熱効率 $\geq 65\%$ ）及び高効率膨張機（断熱効率 $\geq 65\%$ ）を検証する。

最終目標（平成24年度中）

- ・ 三相非磁性で容器容量 10m³級の大型非磁性保冷容器を開発し、保冷性能（既存の小型容器相当の 20W/m² 以下）を試験にて検証する。
- ・ 試作した冷却システムの試験にて冷凍性能（冷凍機冷凍能力 2kW@65K、冷凍機効率 COP $\geq 0.06@80K$ ）を検証する。

(iii) 限流機能付加技術開発

1. 研究開発の必要性

超電導変圧器は限流機能を備えることにより自身の健全性を維持するとともに、電力系統の事故時の過大な事故電流を瞬時に抑制して事故の波及抑制ができ、電力系統の短絡容量対策にも貢献する。さらに、将来的に超電導電力ケーブルと超電導変圧器を連系して適用する場合にも限流機能は相互の導入促進に貢献すると考えられる。

2. 研究開発の具体的な内容

- ・ 限流技術の基礎試験を行い、限流機能付加変圧器の設計手法を確立する。
- ・ 数百 kVA 級変圧器単相巻線モデルを試作し、限流特性を検証する。

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・ 限流機能付加変圧器の設計手法を確立する。

最終目標（平成24年度中）

- ・ 数百 kVA 級単相変圧器の巻線モデルにより、過大電流の限流機能（過大電流を定格電流の3倍以下に抑制）を検証する。

(iv) 超電導変圧器対応線材開発

1. 研究開発の必要性

20MVA 級超電導変圧器を実現するためには、交流損失低減に代表される課題の解決のために超電導変圧器構造を含めた機器サイドの開発を進めるとともに、安定した線材製造技術の確立が求められる。

2. 研究開発の具体的な内容

(a)線材安定製造技術・歩留り向上技術

(b)システム検証用線材の安定作製、加工、評価

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・変圧器モデル検証に必要な下記仕様に相当する線材を安定に作製できる技術を確立する。

仕様：5mm 幅 3 分割にて $I_c=50A@65K\&0.01T$ 、100m 以上に相当する線材

最終目標（平成24年度中）

- ・上記仕様に相当するシステム検証用線材の安定作製、加工、評価を確実に実施する。

(v) 2MVA 級超電導変圧器モデル検証

1. 研究開発の必要性

配電用変圧器（66kV/6.9kV-20MVA 級）の実現には、巻線技術（低損失技術、大電流技術等）や冷却システム技術等の要素技術を総合的に組み合わせた実機を作成し、実用化時の要求使用に基づいた課通電試験による検証を行う必要がある。

2. 研究開発の具体的な内容

20MVA 級変圧器を検証可能な 66kV/6.9kV-2MVA 級モデルを開発し、前記、(i) 変圧器巻線技術開発及び (ii) 冷却システム技術開発の成果を踏まえつつ、検証用変圧器システムの設計・試作を行い、課通電試験によって性能を検証する。

- ・要素技術（巻線、保冷容器、冷却システム等）を組合せて 66kV/6.9kV-2MVA 級超電導変圧器モデルを開発する。
- ・交流損失低減や耐電圧性を考慮した試験条件の設定を行い、開発した変圧器モデルの課通電試験を実施する。
- ・66kV/6.9kV-2MVA 級超電導変圧器モデルの特性を検証する。

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

- ・66kV/6.9kV-2MVA 級超電導変圧器モデルのシステム設計を完了する。
- ・交流損失低減や耐電圧性を考慮した課通電試験計画書を作成する。

最終目標（平成24年度中）

- ・66kV/2MVA 級超電導変圧器モデルを試作し、中間目標で得られた設定条件における課通電試験を実施し、試験計画書の性能を満足することを検証する。

(ニ)「超電導電力機器用線材の技術開発」

リットリウム系超電導電力機器開発に不可欠な超電導線材の開発は、超電導電力機器開発に並行して進めることが、将来の実用化に向けて重要かつ効率的と言える。臨界電流等の超電導特性、

交流損失、機械強度等の評価、イットリウム系超電導線材の微細構造解析、伝熱解析等の評価結果等を線材作製技術開発にフィードバックし、よりの確で効率的な線材開発を図る。また将来の実用化に向けて、磁場中臨界電流特性や線材機械強度の向上、工業的臨界電流密度 (J_e) の向上、交流損失低減技術開発と密接に関係する線材特性の均一性向上等の更なる線材性能の向上を目的とした開発を行う。

本事業に引き続いて想定されている電力機器応用の長期信頼性試験等を実施する実用化技術開発の際に必要な性能及び製造速度等を満足させるイットリウム系超電導線材作製技術の開発を前期3ヵ年で実施し、その安定製造技術開発を後期2ヵ年で実施する。さらには、2020年頃を想定した電力機器の導入・普及の際のコストを含めた必要条件に耐え得る線材の作製技術の開発を目的とする。

(i) 線材特性の把握

1. 研究開発の必要性

イットリウム系超電導線材の実用化には更なる基礎特性の向上とともに機器の仕様に即した線材開発が必要である。これまでは長さや特性の向上を中心に開発が行われてきたが、ユーザー側からは同時に保存、機器化及び使用環境での耐久性に関する系統的な情報が要求される。

2. 研究開発の具体的な内容

保存環境(湿度、温度等)、機器化及び運転環境を模擬した様々な環境下(真空中、液体窒素中、曲げ、引っ張り等)に線材を保存し、臨界温度(T_c)や臨界電流(I_c)等の特性の経時・経年変化を評価する。必要に応じてX線回折による構成相の確認とともに微細組織観察を実施し、劣化機構とこれを抑制する手法の提案を目指す。

3. 達成目標

中間目標(平成22年度中)

- ・電力ケーブル耐久試験適正条件を決定する。

最終目標(平成24年度中)

- ・各種機器環境に対する耐久性を評価する。

(ii) 磁場中高臨界電流(I_c)線材作製技術開発

1. 研究開発の必要性

イットリウム系超電導線材の実用化には更なる基礎特性の向上とともに各機器の特殊仕様に即した線材開発が必要である。SMESや変圧器などの磁場中応用に対しては、それぞれの運転温度・磁場中での特性向上技術開発が必要である。

2. 研究開発の具体的な内容

高磁場中(～10T)での応用となるSMES及び比較的低磁場(～0.1T)ながら垂直磁場成分が関与するソレノイドコイルが想定されている超電導変圧器等の応用を想定し、磁場中特性の向上技術を開発する。

- ・人工ピン止め点導入関連技術を開発する。
- ・高不可逆磁場材料を開発する。

3. 達成目標

中間目標(平成22年度中)

実用化技術開発時(本プロジェクト終了後)に必要な下記仕様に相当する線材の作製技術を開

発する。

- ・ $I_c=30A/cm$ 幅@77K,3T-50m
- ・ $I_c=300A/cm$ 幅@65K,0.02T-50m (5mm 幅-5 分割時に $I_c=100A$ に相当)

最終目標 (平成 24 年度中)

導入普及時(2020 年頃)に必要と想定される下記仕様に相当する線材の作製技術を開発する。

- ・ $I_c=50A/cm$ 幅@77K,3T-200m
- ・ $I_c=400A/cm$ 幅@65K,0.1T-100m (5mm 幅-10 分割時に $I_c=100A$ に相当)

(iii) 低交流損失線材作製技術開発

1. 研究開発の必要性

イットリウム系超電導線材の実用化には更なる基礎特性の向上とともに各機器の特殊仕様に即した線材開発が必要である。ケーブルや変圧器などの交流応用に対しては、線材としても、それぞれの用途に適応した交流損失低減技術開発が必要である。超電導電力ケーブルでは、真円断面形状からのずれや線材間ギャップ数・間隔等の制御、超電導変圧器では、コイル形状における垂直磁場成分の変動に伴う交流損失低減のためのフィラメント化が必要であり、均一な線材とともに加工技術の開発が必要となる。

2. 研究開発の具体的な内容

交流応用が想定されている超電導電力ケーブル、超電導変圧器から求められる線材として交流損失の低減化技術を開発する。

- ・ 均一線材作製技術を開発する。
- ・ 細線加工技術を開発する。

3. 達成目標

中間目標 (平成 22 年度中)

実用化技術開発時 (本プロジェクト終了後)に必要な下記仕様に相当する線材の作製技術を開発する。

- ・ 2mm 幅- $I_c=300A/cm$ 幅-50m
- ・ 5mm 幅 5 分割-50m—分割無しに比べて交流損失 1/5

最終目標 (平成 24 年度中)

導入普及時(2020 年頃)に必要と想定される下記仕様に相当する線材の作製技術を開発する。

- ・ 2~4 mm 幅以下- $I_c=500A/cm$ 幅-200m
- ・ 5mm 幅 10 分割-100m—分割無しに比べて交流損失 1/10

(iv) 高強度・高工業的臨界電流密度 (J_e) 線材作製技術開発

1. 研究開発の必要性

イットリウム系超電導線材の実用化には更なる基礎特性の向上とともに各機器の特殊仕様に即した線材開発が必要である。SMES やケーブルなどの応用に対しては、それぞれの用途に適応した高強度化及び高 J_e 化技術開発が必要である。SMES 応用においては、強磁場下での強いフープ力が想定され、ケーブル応用では冷却時収縮長の裕度を内部構造で確保しにくく冷却時の応力が想定されるとともにコンパクト化、低損失化の観点から高 J_e 線材の開発が必要である。

2. 研究開発の具体的な内容

強磁場中での応用に対し高強度が必要な SMES、高強度とともに高 Je 特性が求められる超電導電力ケーブルから求められる線材として高強度・高 Je 線材の作製技術を開発する。

- ・高強度金属基板対応線材作製技術を開発する。
- ・高臨界電流 (I_c) 化技術を開発する。

3. 達成目標

中間目標 (平成 22 年度中)

実用化技術開発時 (本プロジェクト終了後) に必要な下記仕様に相当する線材の作製技術を開発する。

- ・ $I_c=300A/cm$ 幅-1GPa-50m
- ・ $Je=30kA/cm^2$ -50m

最終目標 (平成 24 年度中)

導入普及時(2020 年頃)に必要と想定される下記仕様に相当する線材の作製技術を開発する。

- ・ $I_c=500A/cm$ 幅-1GPa-200m
- ・ $Je=50kA/cm^2$ -200m

(v) 低コスト・歩留向上技術開発

1. 研究開発の必要性

超電導線材の実用化には基礎特性の向上とともに、上述の機器に適応した特殊仕様を満たす技術開発が必要であるが、全ての機器に対する必要条件として、更なるコストの低減と量産化に繋がる安定製造技術開発が必要である。

2. 研究開発の具体的な内容

本事業に引き続いて想定されている電力機器応用の長期信頼性試験等を実施する実用化技術開発及び超電導電力機器の導入普及が本格的となる 2020 年を見据え、その時に必要とされる低コストかつ安定なイットリウム系超電導線材の製造プロセス技術を開発する。

- ・実用化技術開発用線材の安定製造・歩留向上技術を開発する。
- ・低コスト対応高速・高 I_c 化技術を開発する。
- ・接続および補修技術を開発する。

3. 達成目標

中間目標 (平成 22 年度中)

- ・技術コスト 3 円/Am を実証する。

最終目標 (平成 24 年度中)

- ・中間目標技術を安定に作製可能な技術を開発する。(線材長及び臨界電流等の再現性を確認)
- ・技術コスト 2 円/Am を実証する。

(ホ) 「超電導電力機器の適用技術標準化」

超電導電力機器にとって共通の基盤となる超電導線関連技術並びに超電導電力ケーブル等の超電導電力機器適用技術の標準化等を行う。

(i) 超電導線関連技術標準化

1. 研究開発の必要性

超電導電力機器の開発の促進と高効率化のため、種々の超電導電力機器に共通の超電導線関連技術並びに超電導電力機器固有の超電導線関連技術の標準化研究は必要である。

2. 研究開発の具体的な内容

イットリウム系超電導線と実用超電導線材との特質を対比調査するとともに、過去に実施された超電導線関連技術標準化の研究成果と一体化し、国際標準化に資する情報の集約並びに国際標準規格の素案作成を行う。

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

イットリウム系を含む超電導線材並びにその試験方法の規格素案を作成するとともに、国際合意の醸成（アドホック設置活動）を行う。

最終目標（平成24年度中）

国際規格提案を目指して超電導線材並びにその試験方法の規格素案を作成する。

(ii) 超電導電力ケーブル関連技術の標準化

1. 研究開発の必要性

イットリウム系を含め、高温超電導線を適用した超電導電力ケーブルの実証試験が国内外で多数実施されている。特に、我が国の超電導電力ケーブル技術は世界をリードしている。

超電導電力ケーブルの開発の促進と国際競争力の確保のため超電導電力ケーブル関連技術の標準化研究は必要である。

2. 研究開発の具体的な内容

イットリウム系超電導線を含む超電導線を適用した超電導電力ケーブル技術を調査するとともに、過去に実施された超電導電力ケーブル関連技術標準化の研究成果との融合を図り、

国際標準化に資する情報を整理し、国際標準規格の素案を作成する。

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

イットリウム系を含む超電導線を適用した超電導電力ケーブル並びにその試験方法の規格素案を作成するとともに、IEC/TC90（超電導技術を扱う国際電気標準会議の技術委員会）、及びIEC/TC20（既存電力ケーブルを扱う国際電気標準会議の技術委員会）等と連携して国際合意の醸成（アドホック設置活動）を行う。

最終目標（平成24年度中）

国際規格提案を目指して、超電導電力ケーブル並びにその試験方法の規格素案を作成する。

(iii) その他超電導電力機器関連技術の標準化等

1. 研究開発の必要性

電力に対するニーズの多様化に伴い電力機器も多様化している。かかる状況にかんがみ、電力の安定供給のみならず、電力品質に対する技術対応が重要になっている。したがって、超電導電力ケーブルのみならず電力品質等に有効な超電導電力機器技術やシステム化技術の標準化研究は必要である。

2. 研究開発の具体的な内容

超電導変圧器、SME Sなどの超電導電力機器を対象に、その電力品質や制御に関連する技術調査を実施し、国内外における諸標準化に資する。また、冷却設備の安全性、運用性を考慮した法

規制の在り方を研究する。

3. 達成目標

中間目標（平成22年度中）

イットリウム系を含む超電導線等を適用した超電導変圧器、SME S等の機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化の基礎となるデータ等の体系化を行う。

最終目標（平成24年度中）

- ・イットリウム系超電導線材等を適用した超電導変圧器、SME S等の機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化素案を作成するとともに、国際合意の醸成（アドホック設置活動）を行う。
- ・冷却システムの安全性、運用性を考慮した規制緩和に向けた提案資料を作成する。

[研究開発の実施方法]

(1) 研究開発の実施体制

研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 所長 塩原 融氏をプロジェクトリーダーとし、中部電力株式会社 電力技術研究所 研究主査 長屋 重夫氏、財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 電力機器研究開発部長 大熊 武氏、九州電力株式会社 総合研究所 電力貯蔵技術グループ グループ長 林 秀美氏および財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 線材研究開発部長 和泉 輝郎氏をサブプロジェクトリーダーとして効果的な研究開発を実施する。

[評価に関する事項]

NEDO は、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成22年度、事後評価を平成25年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえて必要に応じプロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗動向等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

[その他の重要事項]

(1) 共通基盤技術の形成に資する成果の普及

得られた研究開発成果のうち、下記共通基盤技術に係る研究開発成果については、NEDO、実施者とも普及に努めるものとする。

【標準への提案、取得】

- ・超電導線材関連技術の国際標準提案
- ・超電導電力ケーブル等の超電導電力機器適用技術の国際標準提案

付録資料 3

技術戦略マップ（分野別技術ロードマップ）

超電導技術分野

超電導技術は、電気抵抗がゼロであるという特徴的な性質により電流が流れる際のエネルギー・ロスを抑えることができることや、磁石からでる磁力線を超電導物質が跳ね返す性質（マイスナー効果）、超電導物質内部に侵入した磁力線を捕捉してしまう性質（ピンニング効果）等の様々な特長を有している。1986年に「高温超電導物質」と呼ばれる酸化物系超電導物質が発見されたことをきっかけに、科学技術の大幅な加速進展のみならず、エネルギー・電力分野を始め、産業・輸送分野、診断・医療分野、情報・通信分野等の幅広い分野において、超電導技術の応用に関する期待が世界中で高まり広く研究に取り組まれてきたが、工業化を図るために不可欠な技術が近年出そろい始めており、超電導材料を用いた様々な機器の開発・実証・実用化が現実のものとなりつつある。その一方では、新しい超電導物質の発見や超電導現象の理論解明によるブレークスルーへの試みも続けられており、「常温超電導物質」の発見という人類の夢に向けた試みも絶えてはいない。【参考資料1：超電導の性質と将来性】 【参考資料2：超電導物質の探索】

また、京都議定書発効に伴う温暖化緩和策の一環としての省エネルギー技術の開発・導入や各種資源の枯渇・高騰等も喫緊の課題となっており、「クールアースーエネルギー革新技術計画」の技術テーマにも選定される等、超電導技術を早期に実用化することによって、環境負荷の低減と資源の有効な利用という2つの目的を効率的かつ実効的に達成し、多様な分野におけるエネルギーの効率的利用に資すること等が強く期待されている。

これらの状況を踏まえ、かつての「夢の超電導技術」から「21世紀のキーテクノロジー」と呼ばれるまでに進化を遂げつつある超電導技術について、諸々の社会ニーズに対応していくことを念頭に中長期的な観点と早期実用化の観点から技術戦略マップを作成した。

なお、2020年頃迄を目途に実現が期待される社会の姿についてのイメージを得るため、【参考資料3：社会に役立つ超電導技術 2020年の社会像】を示した。

超電導技術分野の技術戦略マップ

I. 導入シナリオ

(1) 超電導技術分野の目標と将来実現する社会像

研究開発の戦略的な推進については、様々な社会ニーズと研究開発目標との関係を明らかにした上で、効率的な研究開発体制を構築することが重要である。特に、超電導技術応用機器の開発に際しては、全ての機器開発の共通基盤技術である超電導材料の開発（線材化・バルク化・デバイス化）と機器適用周辺技術開発（冷凍・冷却技術）とを同時並行的に進め、要求仕様を相互にフィードバックさせながら、各種応用機器を実現するためのタイムリーな技術開発を進めていくことが必要不可欠である。

超電導技術分野は、その将来的な優位性の高さから、日米欧での熾烈な技術開発競争がなされているところであり、また、韓国、中国も積極的な技術開発を行っている等、海外の動向も無視できない状況にある。（【参考資料4：世界のY系超電導線材開発状況】【参考資料5：SFQ技術の国際評価】等）。しかし、研究開発を推進した結果として国際的な競争力を発生させ得るに足る研究成果が得られたとしても、実用化・事業化が行われなければ何の役にも立たない。研究開発の初期段階から将来の事業化を想定した企業が参画すること等により、スムーズな事業化につながる方策を講じていくことが重要である。

欧米においては、技術的に未成熟な段階から幾つものベンチャー企業が起業し、超電導技術産業に係る市場を創出するべくチャレンジを繰り返してきた。我が国においては、官民のリソースの選択と集中を行うことによりここまで研究開発を進めてきたところであるが、21世紀における良好な環境の維持と我が国経済の持続的成長とを両立させていくためには、超電導技術産業市場の早期創出と自律的な発展の開始に向けた導入普及促進策等の推進や、規制緩和、標準化等を通じた新たな市場競争ルールの導入といった関連施策を行うことにより、民間企業が市場競争の中で自ら効率的な事業展開を図っていくための戦略的な体制作りと研究開発とを一体的に推進することが必要である。

前述のように、近い将来において超電導技術を適用した機器の実現が期待される分野は、①エネルギー・電力分野（電力ケーブル、限流器、変圧器、発電機、フライホイール、SMES（超電導電力貯蔵装置）等）、②産業・輸送分野（船用モータ、磁気浮上式鉄道用マグネット、半導体引上装置、磁気分離装置等）、③診断・医療分野（MRI、NMR、MCG（心磁計）、MEG（脳磁計）、質量分析器等）、④情報・通信分野（ルータ・スイッチ、SFQコンピュータ、バンドパスフィルタ、ADコンバータ等）の4分野に大きく分けることができる。分野によって求められる社会ニーズ等には異なる部分があるが、共通基盤技術が成長しつつあることにより、戦略的な機器開発・導入を図るべき時期が到来していることについては一様である。そこで、4分野それぞれにお

ける代表的かつ戦略的な機器について、開発・導入に係る想定シナリオを時系列で示すこととした。

(2) 関連施策の取組

我が国経済が将来にわたって更なる発展を遂げていくためには、先導的効果を狙った高度に進んだ機器の開発投入や、全ての活動の基礎となるエネルギーについて将来顕在化することが懸念される資源制約等を総合的に考慮した、効率的なアプローチを図っていくことが重要である。また、そのためには、①研究開発の戦略的な推進が不可欠であるとともに、②国際的な競争力を有する研究成果の実用化・事業化の推進、③導入普及促進策、関連産業連携策、規制緩和、標準化等の関連施策と研究開発との一体的な推進が必要である。

〔規制・制度改革〕

- ・超電導技術の実用化を促進するため、高圧ガス保安法、電気事業法などの規制について導入促進のための規制緩和を図る必要がある。

〔基準・標準化〕

- ・超電導機器の導入に向けて、研究開発と並行して標準化の検討を進めることが重要なテーマについて、各分野の導入シナリオに示した。（2006年版策定時から）
- ・超電導関係の国際標準化のための取組及び具体的進展状況について理解を容易にするため、【参考資料6：超電導標準化マップ】を示した。（2007年版策定時から）

〔広報・啓発〕

- ・例年春に行われている「超電導技術動向報告会」や、2007年から冬に開催されることになった「超電導 EXPO」等の展示会を通じて、超電導技術及び超電導市場の最近の動向について広く周知する機会の増加を図る。

(3) 改訂のポイント

- エネルギー・電力分野及び産業・輸送分野を中心に、最新動向を踏まえた改訂を行った。特にエネルギー・電力分野及び産業・輸送分野については、2030年までの技術開発及び実用化のシナリオを追加した。
- エネルギー・電力分野、産業・輸送分野、診断・医療分野、及び情報・通信分野における技術開発及び実用化のシナリオについて、最近の研究開発の進展状況に伴う見直しを行った。
- エネルギー・電力分野において、今後の次世代電力システムへの展開の可能性も視野に入れ、従来のエネルギー貯蔵、送配電、発電用の機器を統合する「システムインテグレート」という領域を追加した。
- エネルギー・電力分野の関連施策にCO₂の25%削減目標（2020年）を加えるとともに、スペースの関係から一部の施策を削除した。
- エネルギー・電力分野等における海外での取組について、米国、欧州、アジアにおける最新の研究開発プロジェクト等を追記した。

Ⅱ. 技術マップ

(1) 技術マップ

超電導技術は、導入シナリオで示した4つの分野において、効率的かつ各々の導入目的に合致した研究開発を行うための技術指標を明確化する必要があるとの観点から技術をカテゴライズした。また、これらと同時並行的に進めていく必要がある共通基盤技術についても、素材・部品を供給するという観点から技術をカテゴライズした。

具体的には、それぞれ以下に示すような考え方に基づく分類を行っている。

① エネルギー・電力分野

エネルギー・電力分野の技術を、発電（創る）技術、送変配電（送る）技術、エネルギー貯蔵（貯める）技術の3つに大別し、これを大分類とした。また、それぞれの技術の利用形態に応じて開発すべき機器が異なるため、これを中分類とした。その上で、利用形態に応じた機器を開発するためにマイルストーンを置いて取り組んでいくことが必要と考えられる主要な技術課題（大電流化、低損失化等）について、小分類とした。

② 産業・輸送分野

産業・輸送分野の技術を、磁場応用（造る）技術、計測機器（測る）技術、回転機（動かす）技術、変圧器（変える）技術の4つに大別し、これを大分類とした。また、それぞれの技術の利用形態に応じて開発すべき機器が異なるため、これを中分類とした。その上で、利用形態に応じた機器を開発するためにマイルストーンを置いて取り組んでいくことが必要と考えられる主要な技術課題（小型軽量化、高磁場化、大容量化等）について、小分類とした。

③ 診断・医療分野

診断・医療分野の技術を、マグネット応用（視る）技術、加速器応用（治す）技術、高周波デバイス応用（測る）技術、SQUID応用（診る）技術の4つに大別し、これを大分類とした。また、それぞれの技術の利用形態に応じて開発すべき機器が異なるため、これを中分類とした。その上で、利用形態に応じた機器を開発するためにマイルストーンを置いて取り組んでいくことが必要と考えられる主要な技術課題（磁場安定化技術、高感度化等）について、小分類とした。

④ 情報・通信分野

情報・通信分野の技術を、コンピュータ・ネットワーク機器（判断する）技術、無線アクセス系機器（飛ばす）技術、計測機器（測る）技術の3つに大別し、これを大分類とした。また、それぞれの技術の利用形態に応じて開発すべき機器が異なるため、これを中分類とした。その上で、利用形態に応じた機器を開発するためにマイルストーンを置いて取り組んでいくことが必要と考えられる主要な技術課題（処理能力／ラック向上、低コスト化等）について、小分類とした。

⑤ 共通基盤技術

共通基盤技術は、超電導材料の開発（線材化・バルク化・デバイス化）及び機器適用周辺技術開発（冷凍・冷却技術）から構成されることから、これを大分類とした。超電導材料の開発については、それぞれを実現する製造方法やそれを加工する方法により技術的アプローチも異なると考えられるため、これを中分類とした。また、同じ製造方法でも物質により性質等が異なってくることから超電導物質別の小分類、同じ加工方法でも実現すべき形状により性質等が異なってくることから加工の要素技術別の小分類とした。

冷凍・冷却技術については、適用される対象の機器等により要求性能が大きく変わることから、これを中分類とした。また、同じ機器でも使用される超電導物質によって要求される冷却能力等が大きく異なってくることから、冷却能力・冷却手法別の小分類とした。

（２）重要技術の考え方

技術マップにおいて抽出された各技術項目はいずれも不可欠であり、官民の一体的取組みや民間の主体的な取組み等による積極的な開発が望まれるが、以下の観点から評価されるものを重要技術と位置づけ、技術マップ中に色分けして示した。

- ① 2020年頃迄を目途に、産業及び技術のブレークスルーを生み出す可能性のある技術
- ② 超電導技術による実現の可能性が高く、コスト・性能等の面で競争優位性を生み出す可能性のある技術
- ③ これらの機器を実現するために不可欠な共通基盤技術

（３）改訂のポイント

- エネルギー・電力分野、産業・輸送分野を中心に、最新動向を踏まえた改訂を行った。
- エネルギー・電力分野の電力ケーブルの技術小分類について、超電導ケーブルを実用化するために低コスト化が重要な課題であることから、「低コスト化」を重要技術に位置づけた。
- 産業・輸送分野の「廃水磁気分離装置」について、工業廃水や自然界に放出される排水の浄化・処理だけでなく、原料や廃棄物からの異物・有価物の磁気分離等の応用も有望と考えられることから、より広い用語として「排水・資源循環磁気分離装置」に修正した。また、「非接触磁気軸受回転機」を、より分かりやすく直接的な名称である「スピンコーター」に修正した。
- 産業・輸送分野の「車載用モータ」の技術小分類（小型軽量化、高速回転、効率向上）について、専門家の助言を得て、より適切な技術課題（小型軽量化、可変速駆動に対して高効率、高トルク密度化）に修正した。
- 産業・輸送分野の輸送用機器の技術中分類に、今後実用化が期待される「鉄道用直流き電」を新たに追加した。
- 診断・医療分野のマグネット応用の技術中分類に、今後実用化が期待される「細胞・

タンパク磁気分離」を新たに追加した。

Ⅲ. 技術ロードマップ

(1) 技術ロードマップ

技術マップに示された各技術課題のうち、重要技術として選定されたものについて、2020年頃迄を目途に、中長期的視点から各技術課題に必要と考えられるマイルストーンを配し、4つの技術分野及び共通基盤技術のそれぞれにおけるロードマップとして示した。

(2) 改訂のポイント

- エネルギー・電力分野、産業・輸送分野、共通基盤技術を中心に、全分野の技術ロードマップについて、最新の動向を踏まえた多くの改訂を行った。
- 特にエネルギー・電力分野、産業・輸送分野については、従来の2020年までのロードマップを2030年まで延長した。
- エネルギー・電力分野の電力ケーブルについては、技術マップの技術小分類において「低コスト化」を重要技術に位置づけたことを受けて、対応する項目・記述を技術ロードマップに追加した。
- 共通基盤技術－線材のBi2223の大電流化について、最新の状況に合わせて数値を改訂するとともに、量産ベースの数値であることを明記した。
- 共通基盤技術－線材のY(RE)系のコストについては、技術コストからプライスマドを含む値であることを確認した。
- 共通基盤技術－バルクの技術ロードマップについて、最新の状況を踏まえて、過年度のローリングにおいて今後の課題とされてきた全面的な見直し・改訂を行った。

Ⅳ. その他の改訂のポイント

○ 特許の出願動向

- 超電導技術に関する特許出願動向について、【参考資料7：超電導技術に関する国際特許出願動向】を新たに追加した。
- 日本、中国、韓国の超電導関連の国際特許出願件数とその世界に占める割合は、2000年代前半から後半にかけて大きく増加している。一方、米国、欧州は前半から後半にかけて減少している。ただし直近の動きを見ると、日本は2005年（国際出願件数）、2007年（世界に占める割合）をピークに減少傾向にある一方で、米国は2008年に国際出願件数を大きく増加させている。
- 世界平均と比べた場合の超電導分野への力の入れ方を示す超電導特化度は、日本が最も高く、かつ2000年代前半から後半にかけて上昇している。韓国も2000年代後半から、超電導分野に力を入れている。

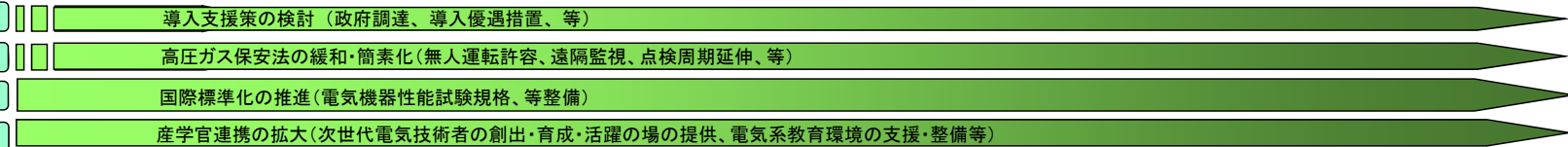
超電導技術分野の導入シナリオ (エネルギー・電力分野) (1/4)

関連施策

エネルギー・電力
関連政策

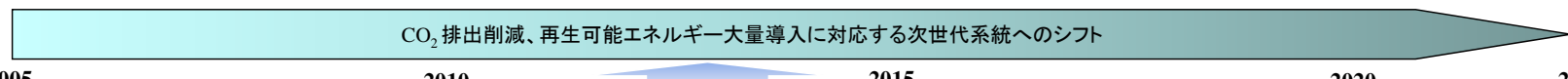


環境整備

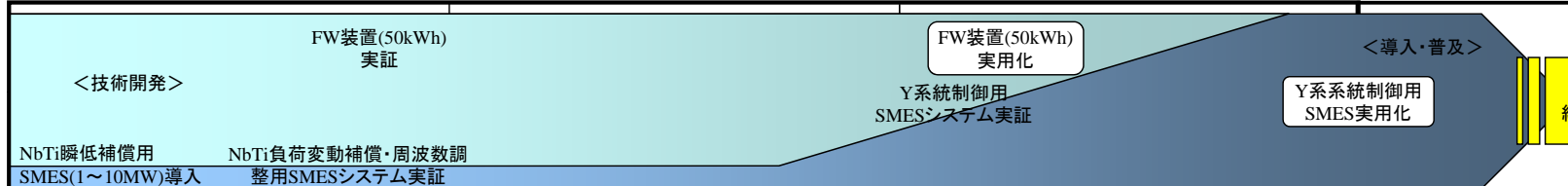


技術開発

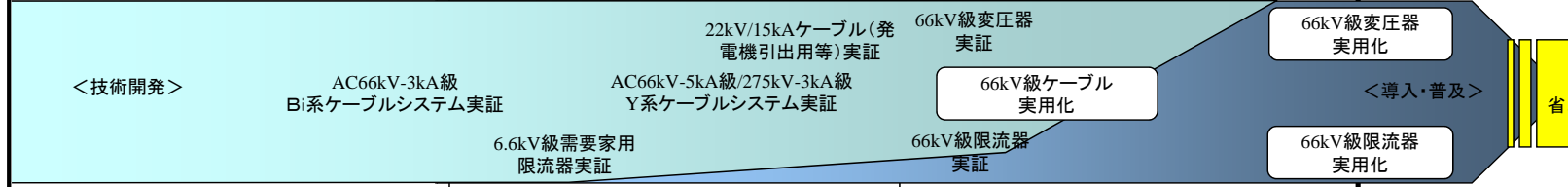
システムインテ
グレート



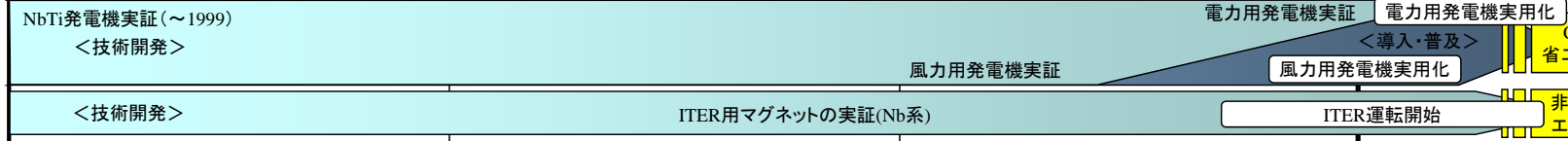
エネルギー
貯蔵



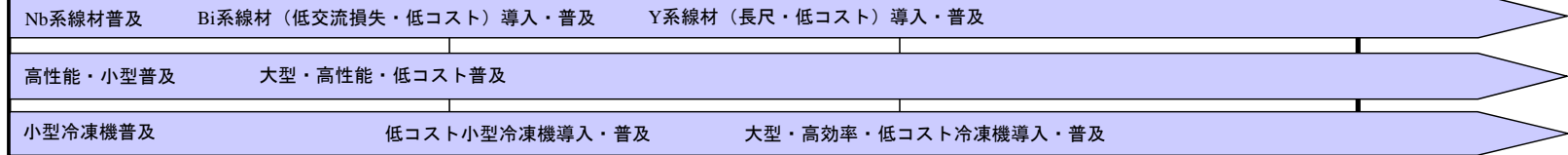
送変配電



発電



共通基盤
技術



海外での
取り組み

米国

欧州

中国

韓国

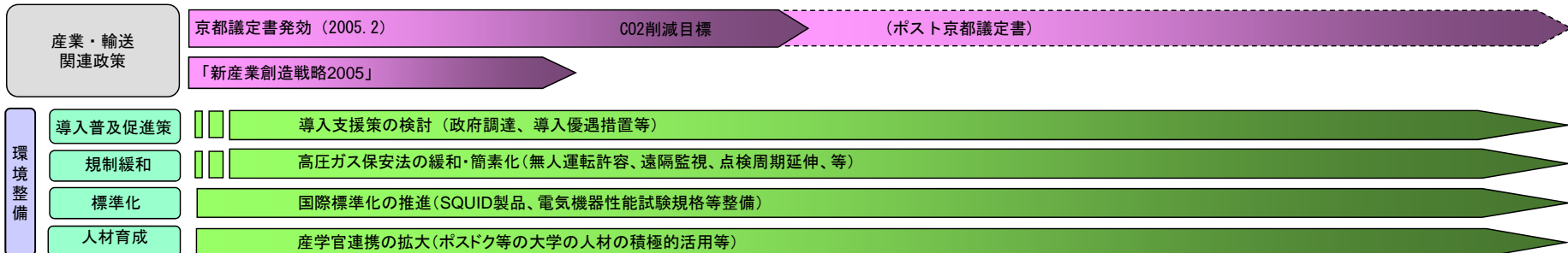


多様化する電源ニーズに対応する高信頼かつ高品質電力の供給・運用

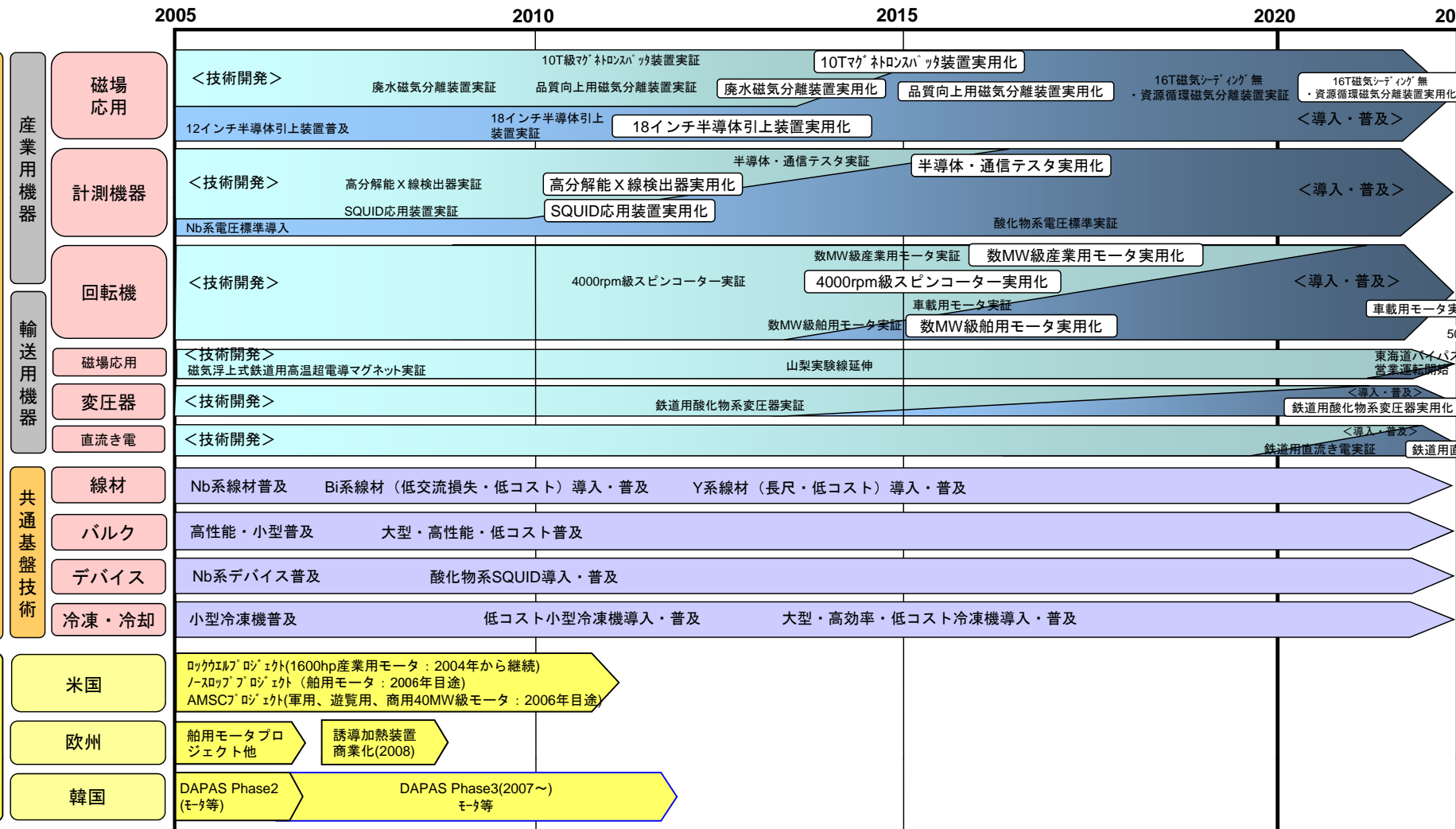
環境・エネルギー調和型社会の構築

超電導技術分野の導入シナリオ（産業・輸送分野）（2/4）

関連政策



技術開発

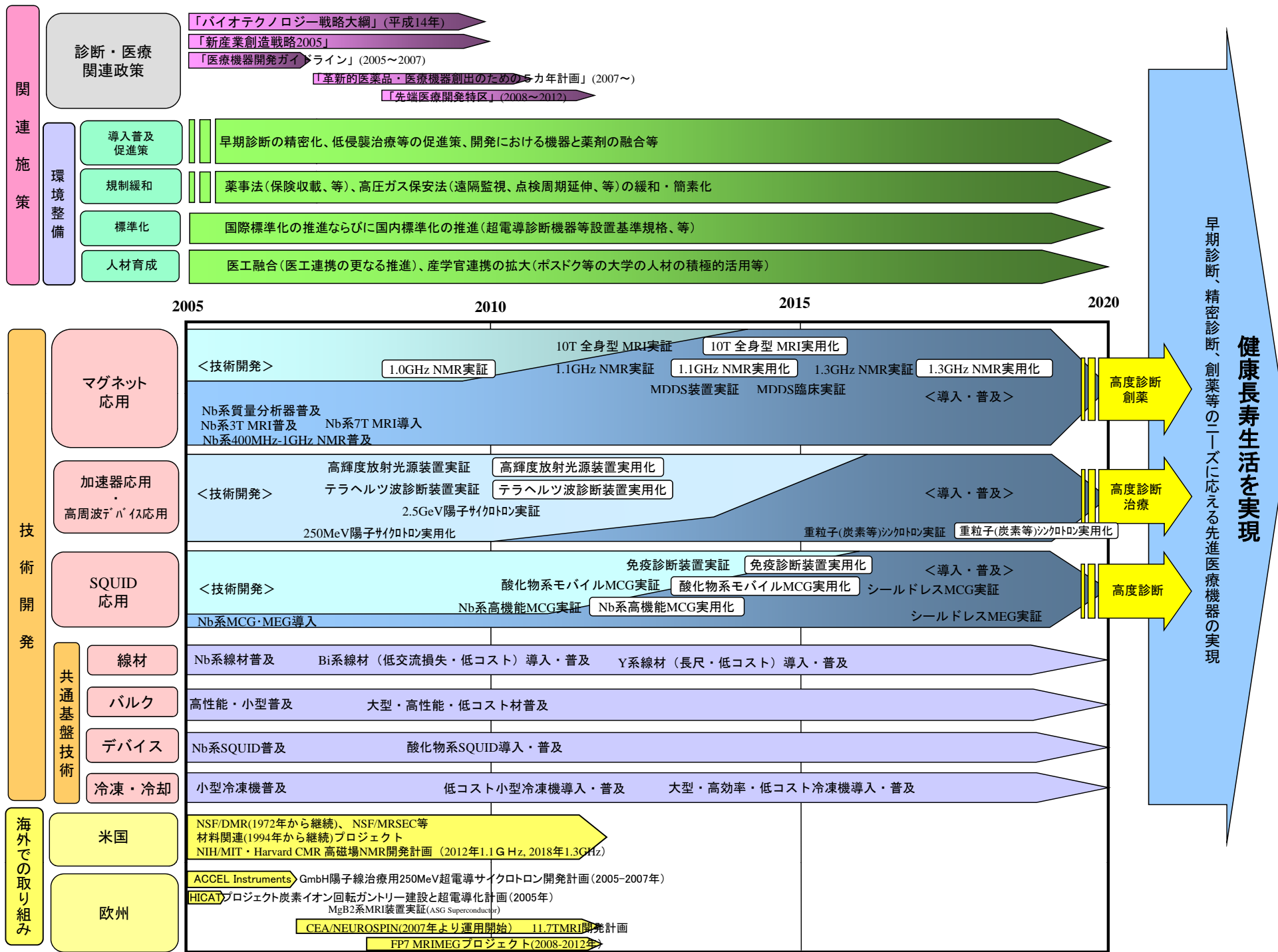


世界をリードする高度産業基盤構築

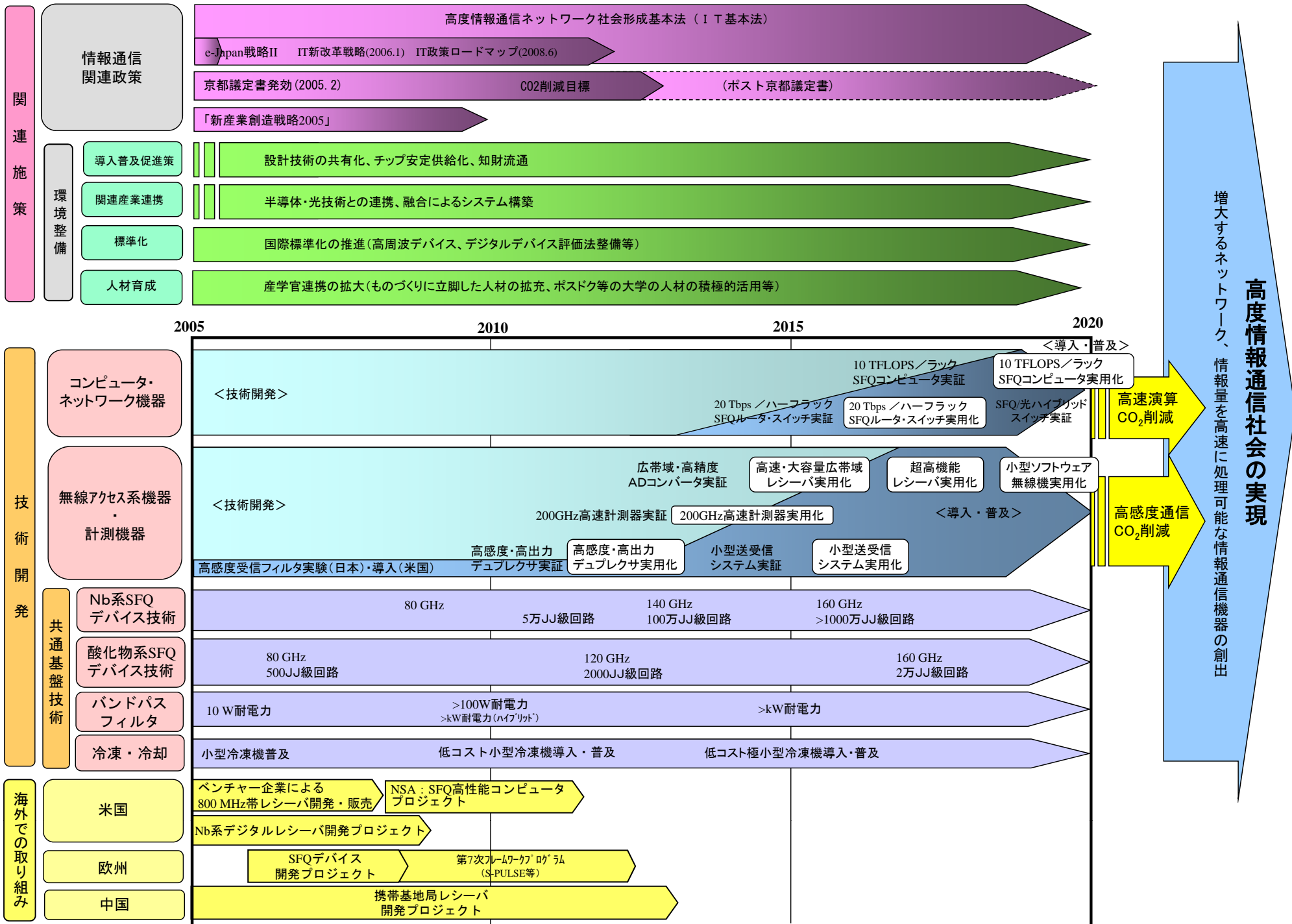
小型・軽量化、高速化、高度生産性等を通じた高度産業基盤の実現

- 高度生産性 小型化
- 高度生産性 高信頼性
- 小型化 軽量化 CO₂削減
- 小型化 軽量化 CO₂削減

超電導技術分野の導入シナリオ（診断・医療分野）（3/4）



超電導技術分野の導入シナリオ（情報・通信分野）（4/4）



超電導技術分野の技術マップ(エネルギー・電力分野)

(1/5)

ニーズ	シーズ			
	技術大分類	技術中分類	技術番号	技術小分類
環境・エネルギー調和型社会の構築	エネルギー貯蔵	SMES	101	・低コストシステム化 ・大容量化 ・コイルの高性能化 ・高信頼性化 ・耐高電圧化
		フライホイール	102	・大容量化 ・低損失化 ・総コスト低減
	送変配電	限流器 (SN転移型)	103	・高電圧化 ・大電流化 ・常電導転移時高抵抗化 ・高速超電導復帰機構
		電力ケーブル	104	・長尺化 ・高電圧化 ・大電流化 ・低損失化 (AC) ・短絡対策 (AC) ・低コスト化
		電力用変圧器	105	・不燃化、コンパクト化 ・Sub-cool LN2技術 ・高電圧化 ・大容量化 ・低コスト化
		同期調相機	106	発電機と共通
	発電	発電機	107	・大容量化 ・低コスト、コンパクト化
		核融合用マグネット	108	・磁場中高特性化 ・大電流高強度化技術 ・低損失化 ・耐放射線化

 重要技術

超電導技術分野の技術マップ(産業・輸送分野)

(2/5)

ニーズ	シーズ					
	技術大分類	技術中分類	技術番号	技術小分類		
世界をリードする高度産業基盤構築	産業用機器	磁場応用	半導体引上装置	201	・ウエハ大口径化	
			鉄鋼圧延装置	202	・配列構造均一化	
			磁性材料調質装置	203	・配列構造均一化	
			排水・資源循環磁気分離装置	204	・高磁場化(磁気シーディング無)	
			粒子加速器	205	・高磁場化 ・磁場均一化	
			マグネトロンスパッタ装置	206	・高磁場化 ・大面積化	
			磁気シールド	207	・高臨界温度化 ・低コスト化	
		計測機器	半導体・通信テスタ (サンプラ)		208	・広帯域化 ・多チャンネル化 ・低コスト化(モジュールコスト) ・冷却技術
			電圧標準	交流	209	・出力周波数向上 ・高温動作化 ・高精度化
				直流	210	・高温動作化 ・高電圧化 ・低コスト化 ・低周波数利用技術
			X線検出器 (EDX)		211	・エネルギー分解能向上 ・計数率向上 ・小型化、低コスト化
			宇宙線検出器		212	・高感度化 ・小型化
			ミキサ		213	・低ノイズ化 ・高周波化
			ポロメータ		214	・エネルギー分解能向上 ・低コスト化
	SQUID 応用装置	構造物検査	215	・小型化、自動化 ・高機能化 ・測定高速化		
		食品・工業製品検査	216	・磁気シールド簡易化 ・異物検出限界向上 ・低コスト化		
		半導体検査	217	・空間分解能向上 ・測定高速化 ・低コスト化		
		鉱物探査	218	・探査深度 ・環境ノイズ除去技術 ・小型化		
	回転機	スピンドーター *		219	・高速回転化 ・高載荷力化	
		産業用モータ *		220	・高速回転、大容量化 ・小型軽量化 ・効率向上 ・低速回転、大容量化	
	輸送用機器	回転機	船用モータ *		221	・低速回転、大容量化 ・小型軽量化 ・効率向上 ・高速回転、大容量化
			車載用モータ *		222	・小型軽量化 ・可変速駆動に対して高効率 ・高トルク密度化
		磁場応用	磁気浮上式鉄道用マグネット		223	・信頼性向上、低コスト化
		変圧器	鉄道用変圧器 *		224	・大容量化 ・低損失化 ・小型軽量化
		直流き電	鉄道用直流き電		225	・システム化 ・省エネ

* 印は、「エネルギー・電力分野」の機器と関連する技術であり、環境・エネルギー調和型社会の構築にとっても重要である。

 重要技術

超電導技術分野の技術マップ(診断・医療分野)

(3/5)

ニーズ	シーズ			
	技術大分類	技術中分類	技術番号	技術小分類
健康長寿生活の実現	マグネット 応用	MRI	301	・大口径、短軸化 ・高磁場化 ・線材高特特性化 ・磁場安定化技術
		NMR	302	・超高磁場化 ・磁場安定化技術
		質量分析器	303	・高磁場化 ・高均一化
		MDDS (磁気誘導薬物配送)	304	・高磁場化 ・高磁気勾配化 ・小型・軽量化 ・低消費電力化 ・ナノ磁性粒子薬剤開発
		磁気誘導カテーテル	305	・高磁場化 ・高磁気勾配化
		細胞・タンパク磁気分離	306	・小型化 ・短時間励減磁
	加速器 応用	高輝度放射光源 (アンジュレータ・ ウイグラー)	307	・高輝度化 ・磁石ギャップ長可変技術
		テラヘルツ波 診断装置(光源)	308	・高機能化
		医療用粒子線 加速器	309	・高機能化 ・コンパクト化
	高周波 デバイス応用	MRI/NMR (高周波プローブ)	310	・高感度化 ・低損失化
		質量分析器 (イオン検出器)	311	・分解能向上 ・測定時間短縮 ・高機能化
		テラヘルツ波 診断装置(検出器)	312	・高機能化
	SQUID 応用	SQUID 免疫診断装置	313	・システム高感度化 ・高機能化(多検体処理) ・操作性向上 ・低コスト化
		MCG (心磁計)	314	・高感度化 ・磁気シールド簡易化 ・高機能システム化
		神経磁気診断装置 (MEG(脳磁計)、脊髄・末 梢神経磁場計測装置)	315	・磁気シールド簡易化 ・多チャンネル化 ・高機能化 ・低コスト化
		超低磁場NMR/MRI	316	・複合化 ・新機能化 ・分解能向上

 重要技術

超電導技術分野の技術マップ(情報・通信分野)

(4/5)

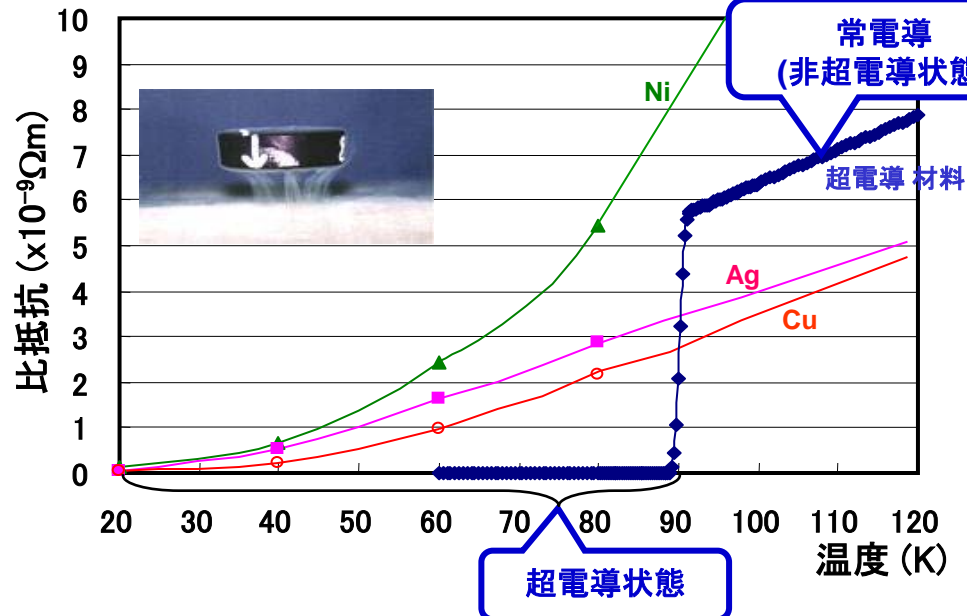
ニーズ	シーズ			
	技術大分類	技術中分類	技術番号	技術小分類
高度情報通信社会の構築	コンピュータ・ネットワーク機器	SFQルータ・スイッチ	401	<ul style="list-style-type: none"> ・大容量化 ・方式、アーキテクチャ ・ラック当たりスループット向上 ・低コスト化
		SFQコンピュータ、サーバ	402	<ul style="list-style-type: none"> ・SFQプロセッサの大規模化 ・高速超電導メモリ大容量化 ・処理能力/ラック向上 ・低消費電力化 ・アーキテクチャ
		量子コンピュータ	403	<ul style="list-style-type: none"> ・回路規模(対応量子ビット数)拡大 ・回路消費電力低減 ・高速化
	無線アクセス系機器	高精度・広帯域ADコンバータ(無線用)	404	<ul style="list-style-type: none"> ・方式 ・帯域・ビット精度向上 ・低コスト化 ・モジュール小型化
		受信フィルタ	405	<ul style="list-style-type: none"> ・高機能化 ・小型化 ・モジュール低コスト化 ・周波数調整技術
		送信フィルタ	406	<ul style="list-style-type: none"> ・耐電力特性向上 ・高調波歪み低減 ・送受信複合化 ・低コスト化
		衛星用通信機器(フィルタ、マルチプレクサ)	407	<ul style="list-style-type: none"> ・小型化、軽量化 ・高信頼化 ・高機能化 ・送受信複合化 ・冷却技術
		超電導アンテナ	408	<ul style="list-style-type: none"> ・指向性、効率向上 ・アレイ化 ・冷却技術 ・環境ノイズ影響低減技術
	計測機器	広帯域ADコンバータ(計測用)	409	<ul style="list-style-type: none"> ・帯域、ビット精度向上 ・モジュール小型化、低コスト化
		高速計測機器(サンブラ)	410	<ul style="list-style-type: none"> ・方式(入力、被測定対象) ・広帯域化 ・小型化、低コスト化 ・高感度化

 重要技術

超電導技術分野の技術マップ(共通基盤技術) (5/5)

技術大分類	技術中分類	技術番号	技術小分類
超電導線材技術	加工熱処理法技術 (含ブロンズ法技術)	501	・NbTi
			・Nb ₃ Sn
			・その他(Nb ₃ Al等)
	パウダーインチューブ法技術	502	・Bi2212
			・Bi2223
			・MgB ₂
			・その他
	薄膜線材技術	503	・Y(RE)系
			・その他
	導体化技術	504	・歪特性改善技術
コイル化技術	505	・素線接続技術	
		・巻線技術	
		・絶縁技術	
超電導バルク技術	溶融凝固バルク技術	506	・RE123系
			・Bi2212系
			・その他
	焼結バルク技術	507	・RE123系
・Bi系			
超電導デバイス技術	デジタルデバイス技術	508	・Nb集積回路プロセス技術
			・NbN集積回路プロセス技術
			・酸化物集積回路プロセス技術
			・Nb系SFQデバイス
			・NbN系SFQデバイス
			・酸化物系SFQデバイス
			・入出インターフェイス技術
			・低温実装技術
	SQUID応用技術	509	・Nbプロセス技術
			・酸化物プロセス技術
			・Nb系SQUID
			・酸化物系SQUID
	高周波デバイス技術	510	・実装技術
			・MgB ₂ 薄膜技術
			・RE123系薄膜技術
			・バンドパスフィルタ
			・アンテナ
			・実装技術
冷凍・冷却技術	パワー機器用冷凍機技術	511	・4K冷凍機
			・20K～50K冷凍機
			・65K冷凍機
	デバイス機器用冷凍機技術	512	・4K冷凍機(1～3W)
			・4K冷凍機(0.1～0.5W)
			・50K、70K冷凍機
	大容量冷却技術	513	・LNG冷熱利用技術
			・サブクール冷却技術
			・LH ₂ 冷熱利用技術
	伝導冷却技術	514	・高効率冷却技術
	クライオスタット技術	515	・薄肉断熱技術
			・封止化技術
・低熱侵入化			
電流リード技術	516	・機械的強度	
		・耐高電圧化	
		・大電流化	

重要技術

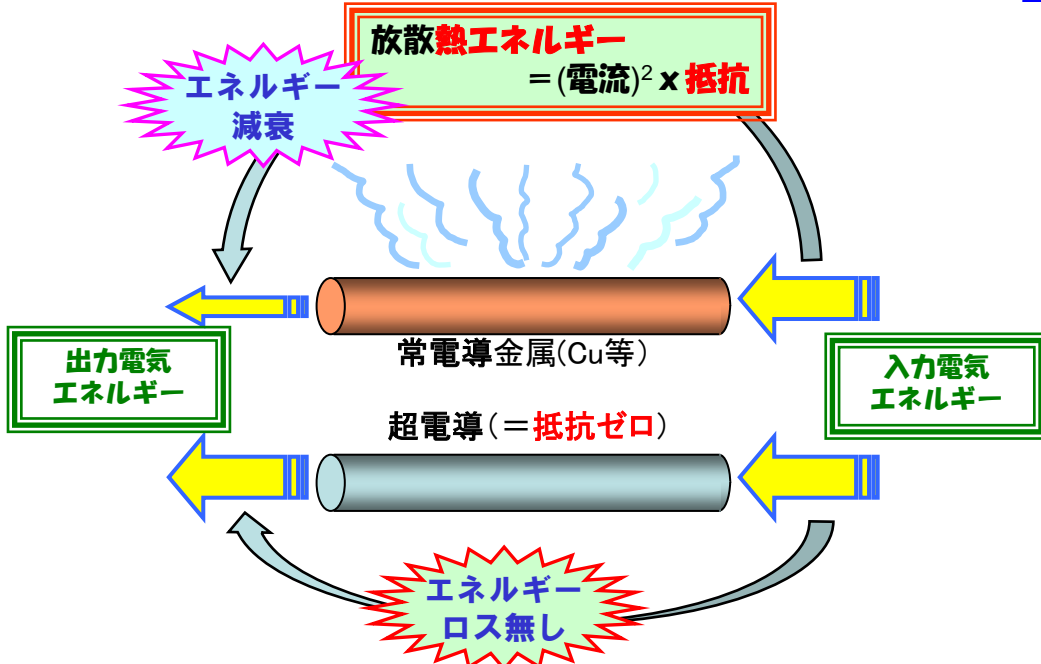
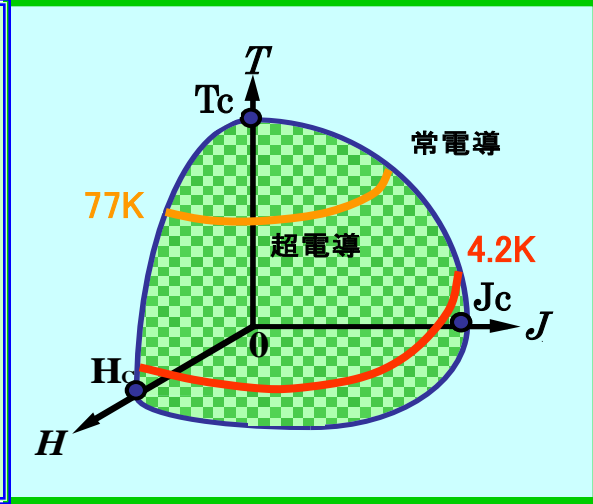


3つの臨界値

臨界温度 (T_c)
超電導を示す温度の上限

臨界電流 (J_c)
超電導を維持できる電流の上限

臨界磁場 (H_c)
超電導を維持できる磁場の上限



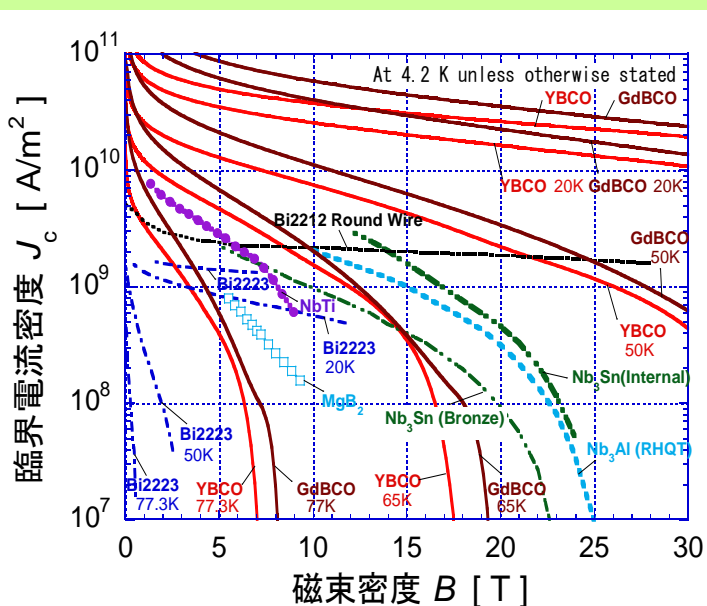
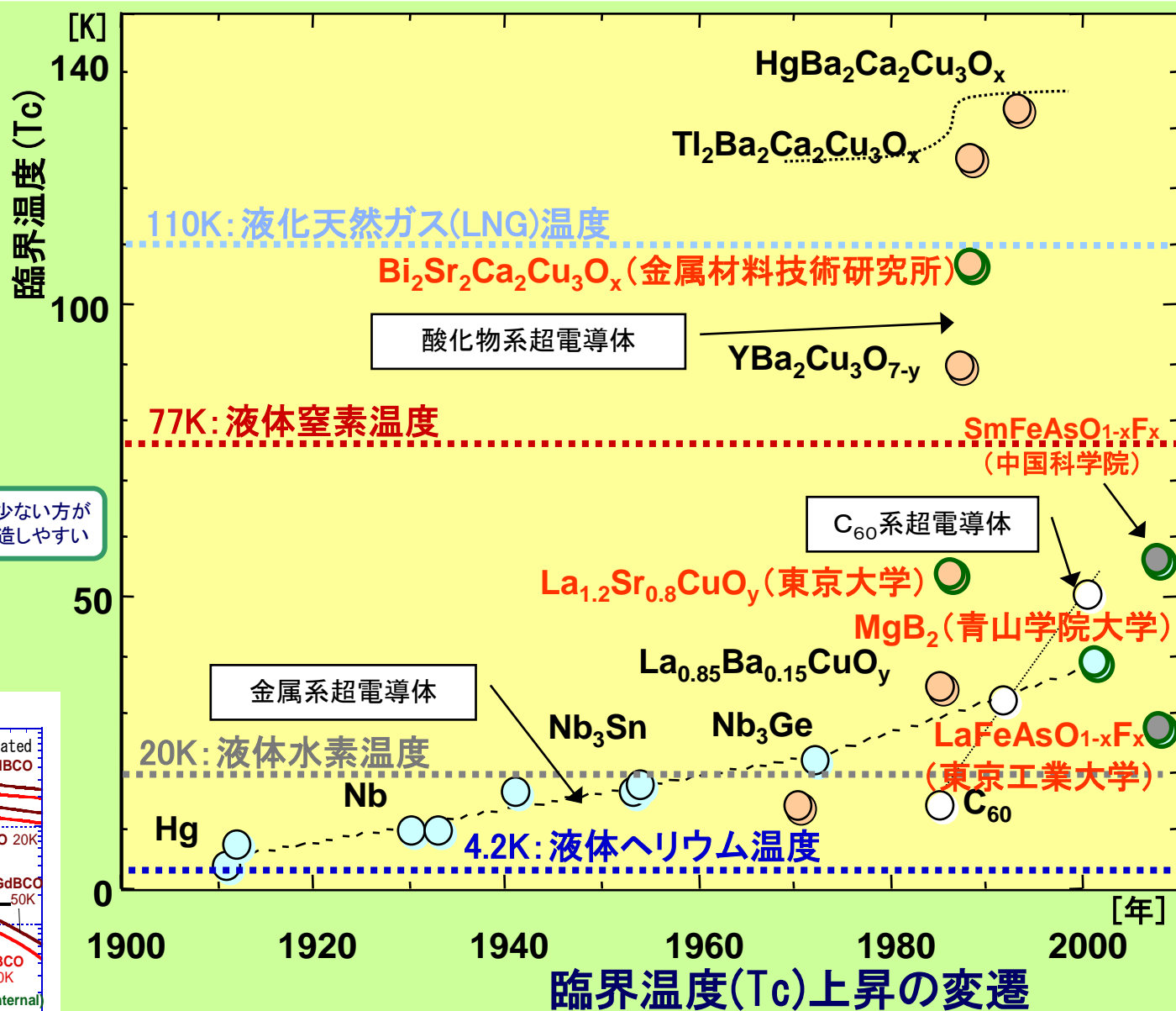
超電導の4条件 (田中の基準)

以下の4条件を全てクリアして、初めて超電導体と認定される。
(東京大学の田中昭二教授が1987年に提唱した客観的条件)

- 結晶構造およびその物質の何が超電導体であるのか
- マイスナー効果を示すか
- 電気抵抗が転移点付近で急激に消失するか
- 実験結果に十分再現性があるか

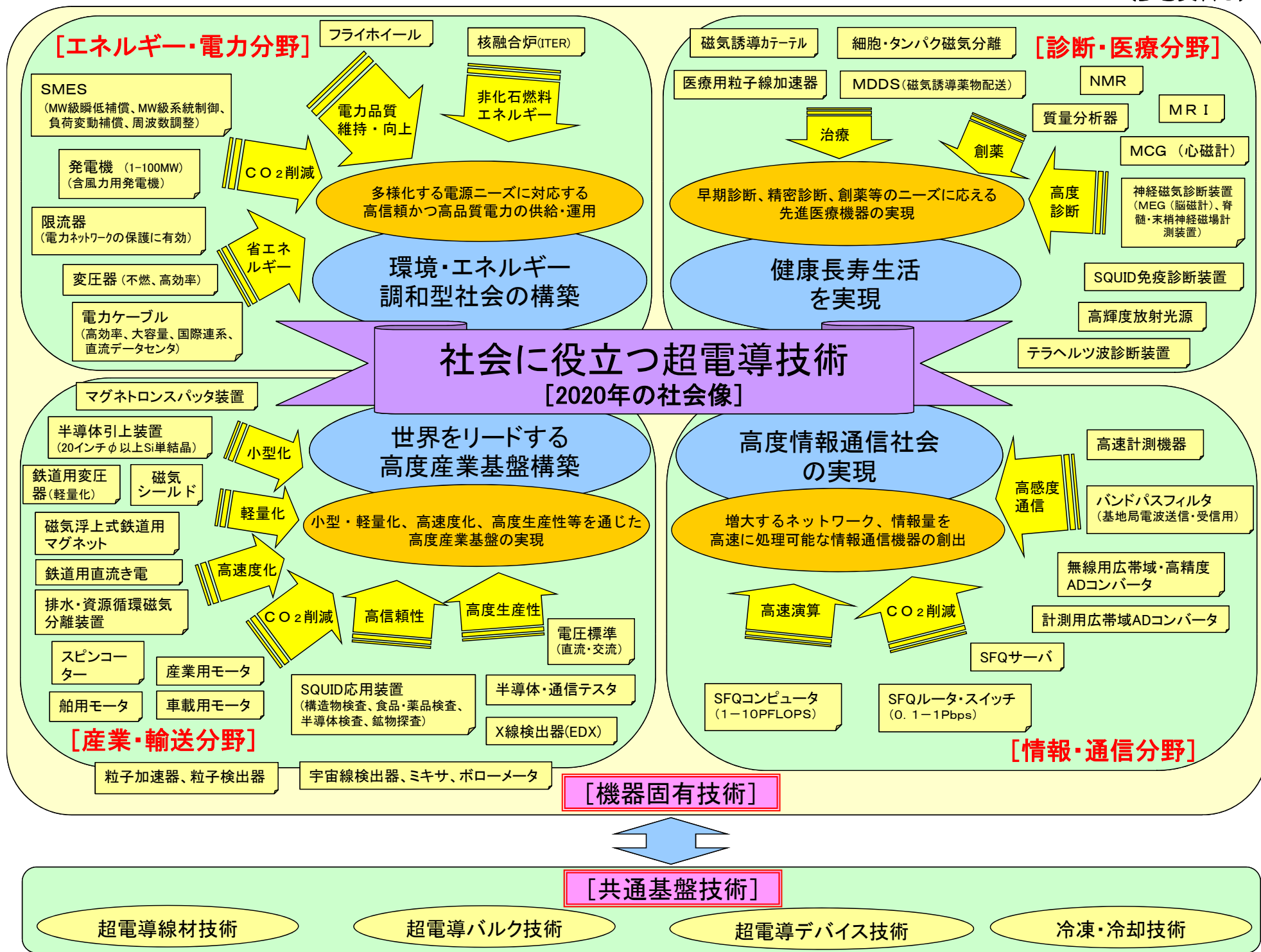
系 (代表物質)	元素数	T _c
Hg系 (HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x)	5	>110
Tl系 (Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x)	5	
Bi系 (Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x)	5	>77
Y系 (YBa ₂ Cu ₃ O _{7-y})	4	
Fe系 (SmFeAsO _{1-x} F _x)	5	>20
La系 (La _{0.9} Sr _{0.1}) ₂ CuO _y)	4	
MgB ₂ (MgB ₂)	2	
Nb系 (Nb ₃ Sn, NbTi)	2	>4.2

元素数が少ない方が
比較的製造しやすい

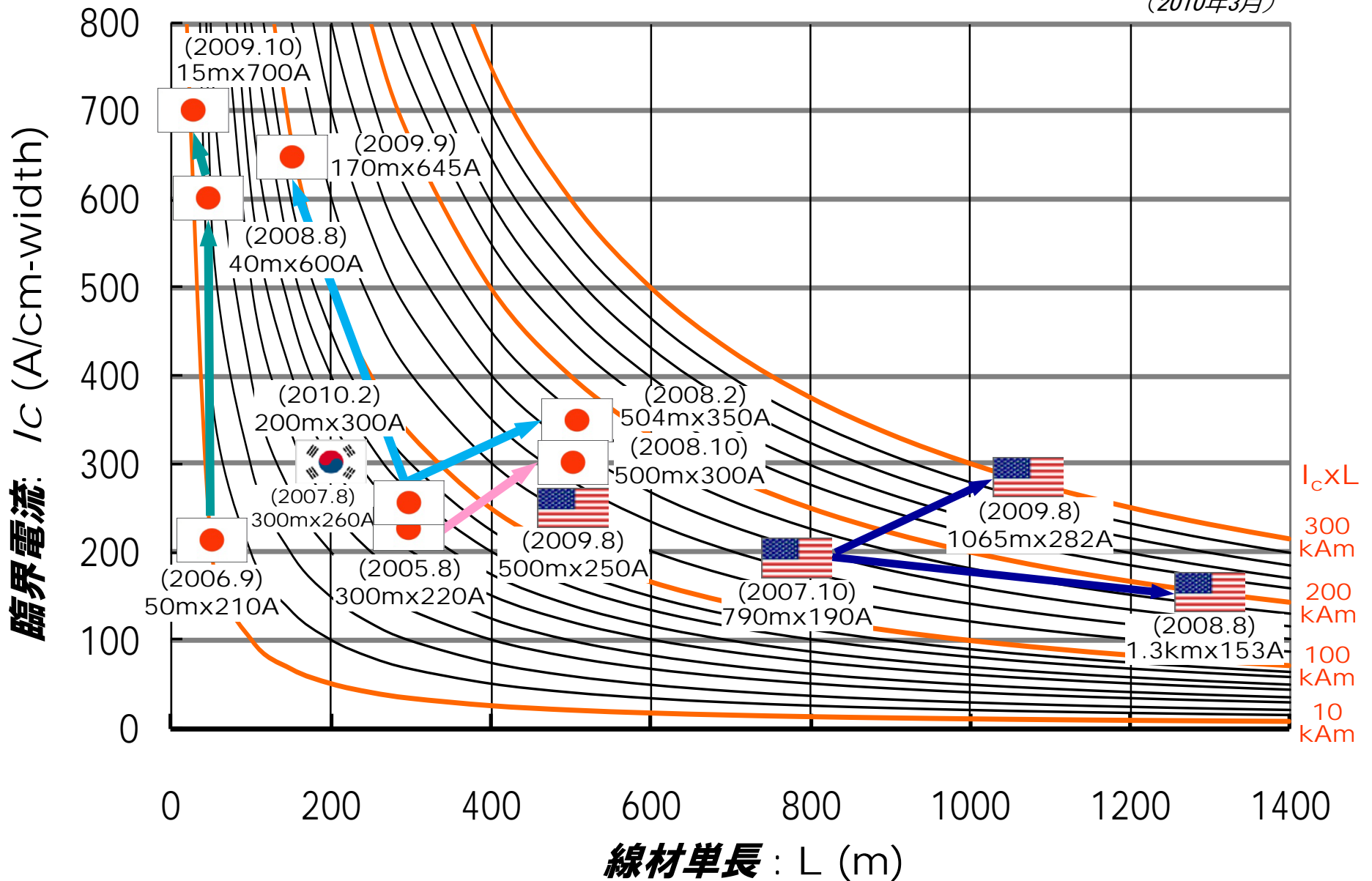


各種超電導線材の臨界電流密度
(九州大学 木須教授 作成)

(参考資料2: 超電導物質の探索)



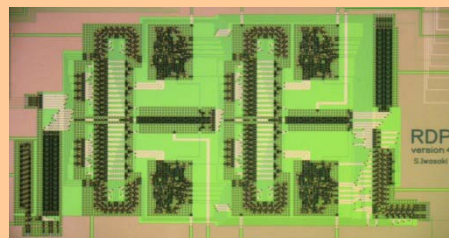
(2010年3月)



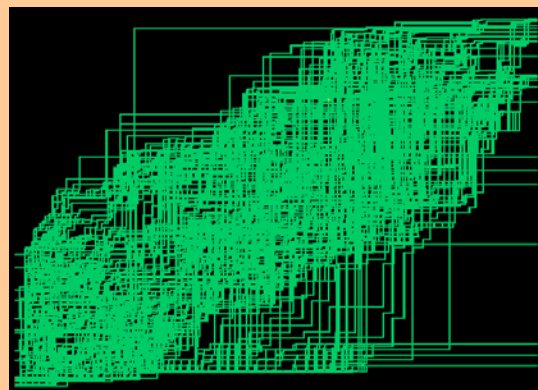
参考資料4：世界のY系超電導線材開発状況

(参考資料5：SFQ技術の国際評価)

名古屋大学がSRL標準プロセスで作製した11,000接合からなる20GHz動作再構成可能なデータパスを持つプロセッサ
(高性能計算機のアクセラレータとして使用) (2008.8)



超電導工学研究所及び名古屋大学が作製した自動配線ツールでレイアウトした大規模SFQ回路(16x16 switch circuit) (2005.3)



名古屋大学がSRL-ADPで作製した90GHz動作2x2 SW (2008.10)

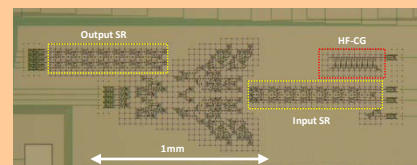


TABLE E-1. REASONS TO DEVELOP SUPERCONDUCTIVE COMPUTER TECHNOLOGY

Technological	Financial
NSA's computing needs are outstripping conventional technology.	Market forces alone will not drive private industry to develop SC technology.
RSFQ technology is an excellent candidate for higher-performance computing capability.	The federal government will be the primary end user of SC computer technology.
RSFQ technology has a clear and viable roadmap.	Other federal government missions will benefit from advances in SC technology.

TABLE E-2. RSFQ SUMMARY

Technical Advantages	Technical Challenges
The most advanced alternative technology.	Providing high-speed and low-latency memory.
Combines high speed with low power.	Architecting systems that can tolerate significant memory access latencies.
Ready for aggressive investment.	Providing very high data rate communications between room temperature technology and cooled RSFQ.

TABLE E-3. DIGITAL RSFQ TECHNOLOGY'S CURRENT STATE OF THE INDUSTRY

Country	Entity	Status
	ISTEC/SRL	<ul style="list-style-type: none"> Joint government/industry center, probably doing the most advanced work in digital RSFQ anywhere in the world today. Responsible for the Earth Simulator system.
	HYPRES	<ul style="list-style-type: none"> Private company focused entirely on SC digital electronics. Has operated the only full-service commercial foundry in the U.S. since 1983.
	Northrop Grumman	<ul style="list-style-type: none"> Had the most advanced foundry and associated design capability until suspended last year. Still has a strong cadre of experts in the field.
	Stony Brook U, UC Berkeley, JPL	<ul style="list-style-type: none"> Currently conducting academic research.
	Chalmers U of Technology	<ul style="list-style-type: none"> Currently conducting academic research.
	NSA, NIST	<ul style="list-style-type: none"> Have resident expertise.

RSFQ技術の評価 ※米ではSFQをRSFQと呼称する
(米NSA「超電導技術評価」報告書(2005.8)より抜粋)



SUPERCONDUCTING TECHNOLOGY ASSESSMENT

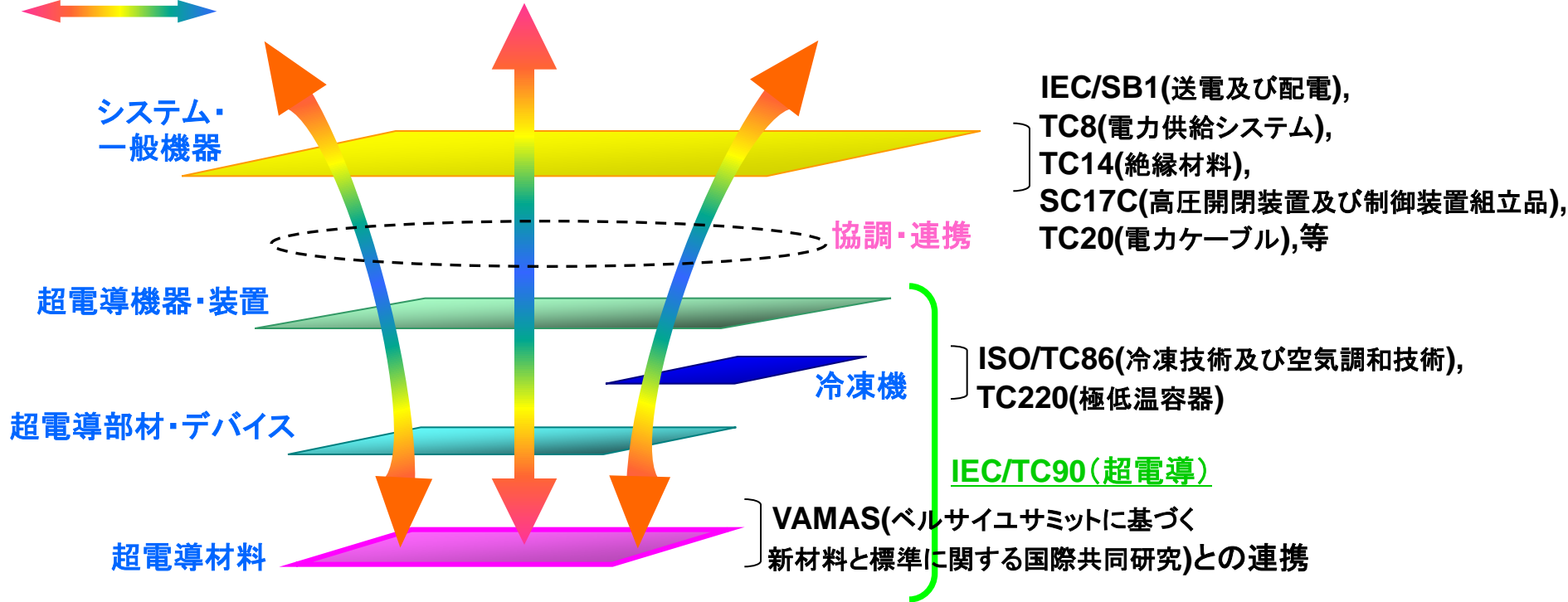


National Security Agency
Office of Corporate Assessments

AUGUST 2005

(参考資料6:超電導標準化マップ)

活発 将来活動



用語
(1規格)

電流リードの特性
(1新規格案検討)
[2010年制定見込]

超電導材料の
性能試験方法
(13規格+改正)

	臨 界 電 流	残 留 抵 抗 比	機 械 強 度	表 面 抵 抗	臨 界 温 度	交 流 損 失	捕 捉 磁 場	
済								Nb-Ti
								Nb ₃ Sn
		検討						酸化物
							未定	MgB ₂

規格化進捗状況

※ 1性能ごとの規格ではないため、規格数と項目数は一致していない。

付録資料 4

事前評価関連資料
(事前評価書、パブリックコメント
募集の結果)

事前評価書

作成日		平成18年2月26日
1. 事業名称 (コード番号)	高温超電導ケーブル実証プロジェクト	
2. 推進部署名	新エネルギー技術開発部	
3. 事業概要	<p>(1) 概要：高温超電導ケーブルを社会の重要なインフラである電力供給システムに適用するため、本事業では、66kV、200MVA級3芯一括型高温超電導ケーブルのシステムとしての開発を行い、変電所構内における実系統運用試験によって検証・評価し、総合的な信頼性を確立する。これらによって、実用化に向けた革新的な高効率送電技術を確立する。</p> <p>(2) 事業規模：総事業費 27億円（委託）</p> <p>(3) 事業期間：平成19年度～23年度（5年間）</p>	
4. 評価の検討状況		
<p>(1) 事業の位置付け・必要性</p> <p>[事業の位置づけ]</p> <p>超電導ケーブルは、NEDOが平成16年度まで実施した「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」において①超電導送電ケーブル用導体の技術開発、②液体窒素による500m長の導体を冷却する技術開発を行い、実用に供するための成立性を明らかにした。しかし、社会の重要なインフラである電力供給システムに適用するためには、超電導ケーブル単独ではなく超電導送電ケーブルシステムとしての総合的な信頼性を確立することが必要である。そのため、これまでに開発してきた高温超電導ケーブルや冷却技術などを統合して、実系統に高温超電導ケーブルを連系したシステムとしての実証試験を実施することで、超電導技術を用いた革新的な高効率送電技術の確立を目指す。</p> <p>超電導技術分野の技術マップ（平成18年4月制定）において、エネルギー・電力分野機器開発のうち「環境・エネルギー調和型社会の構築」、「送変配電」、「電力ケーブル」に位置付けられる。また、エネルギー分野の重点科学技術「電力供給システム」、「送電技術」に位置付けられている。</p> <p>[事業の必要性]</p> <p>高温超電導ケーブルを社会の重要なインフラである電力供給システムに適用するためには、さらなる低損失化、低コスト化を図り、省エネルギー効果を確実にするとともに、線路建設、運用、メンテナンスを含めた総合的な信頼性を確立することが要求される。そのためには、実系統に連系した高電圧・大電流での実証試験が不可欠である。安全性や信頼性の知見を得るための実証試験は、超電導ケーブルの中間接続や実系統と連系した運用試験など、技術的・設備的にリスクを伴ったものであるが、日本が先行する超電導技術が長期に亘り競争力を維持する上で重要である。さらに、実証実験を通じて超電導送電システムの運転管理や評価・計測技術の規格化を進め、早期に国際規格化をはかることも重要である。</p>		

(2) 研究開発目標の妥当性

高温超電導ケーブルの総合的な信頼性を確立するため、高温超電導線材を用いた超電導ケーブルを実系統の変電所内電力用ケーブルとして連系し、実証試験及び評価を行う。

[中間目標]

現状の技術は、信頼性や経済性も含めて実用に供するための高温超電導ケーブルシステムが成立するかどうかの検証を行っているレベルであるので、以下のような中間目標を定めて、実系統での実証試験に進めるかどうかの評価を加えるものとする。

①超電導ケーブルシステムの検証

実系統に連系するための事前評価として、3芯一括型高温超電導ケーブルが66kV/2kA、交流損失1W/m/1相以下の性能を達成できることを確認する。

②システム運用の実証試験項目検討

超電導送電ケーブルシステムの運用（冷却含む）において実証すべき試験項目を明確化し、実系統連系試験に最適なサイトを選定する。

③運転・保守方法の検討

運転監視、保守・運用方法について検討し、評価基準を明確にして実線路としての運用が可能なことを確認するための試験内容を定める。

[最終目標]

高温超電導ケーブルの実系統での実証試験を行い、超電導ケーブルを用いた送電技術を確立する。

①実系統における送電実証

200MVA級の中間接続部を有した高温超電導ケーブルを、遮断器や保護装置などの付帯機器とともに66kV実系統に接続し、連続6ヶ月以上の連続運転を行うことによって安全性や信頼性を確認する。

②システム運用の実証

実系統に連系して、負荷の変動や過電流等の系統電流の変化に自動的に追従したシステム運用（冷却含む）などが可能なことを確認する。

③運転・保守方法の実証

実証試験における運転監視、保守・運用方法が、実運用を行う際の安全性や信頼性に適合することの評価を行うとともに、経済面・環境面での効果を明確化する。

④標準化のデータ収集

実証実験を通じて超電導送電システムの運転管理や評価・計測技術の国際規格化を進めるための標準化項目を明確化するとともに、必要なデータ収集を行う。

上記の研究開発目標は、技術戦略マップ「超電導技術分野ロードマップ 電力ケーブル」の実現に向けた目標設定であり妥当であると考える。

(3) 研究開発マネジメント

公募により実施体制を決定し、効率的かつ効果的な研究の推進を図るためPLの指名又は委嘱を行う。本事業開始後3年目に中間評価を予定しており、その結果を踏まえて事業全体について見直しを行うことも想定する。また、超電導関連の他プロジェクトとの連携を行い、最先端の超電導材料開発の成果が、本事業に役立つように効率的に進める。また、超電導分野の事業を効率的に進捗させるため外部有識者からなる超電導技術委員会に専門的知見の提供・助言を求め、適宜計画の調整を図る。

事後評価については平成24年度に外部有識者からなる委員会にて実施する。

(4) 研究開発成果

本事業の研究開発成果で、実用化が促進されることによって、水力発電機端構内連絡ケーブルなどへの超電導ケーブルシステムの適用が期待できる。また、超電導ケーブルの導入によって既存ケーブルに比べて電力損失が約 50W/m・cct 低減の省エネルギー効果が見込まれており、このことによって 2020 年に CO2 削減は、28 千トン/年の削減(高温超電導市場開拓検討委員会:2006 年)が期待できる。システム運用性で重要な冷却技術の研究開発成果は産業分野で利用される冷却機器の信頼性向上に広くて適用されることが期待できる。

(5) 実用化・事業化の見通し

超電導ケーブルは、既存のケーブルに比べて送電容量の大幅な増加や運転損失の低減による省エネ効果が見込まれており、本事業の成果によって、超電導ケーブルのトータルシステムの信頼性(運用・保守)が、実用に供するレベルに達したことを示すものである。このことによって、既存送電ケーブルのリプレース需要などへの適用が期待され、需要の増加によって経済性の改善に関する技術開発が加速されることで「超電導技術分野ロードマップ」で示されている「2016 年頃、66kV 電力ケーブルの実用化」が期待できる。

(6) その他特記事項

平成 18 年 12 月から平成 19 年 3 月まで、「高温超電導ケーブル開発動向に関する調査」を実施する。この中で、既存及び開発段階の超電導ケーブルの比較調査を行い、超電導ケーブルを実用化するための課題を明らかにする。本調査の成果は、本事業の基本計画策定等に反映させる予定。

5. 総合評価

本事業は、超電導送電ケーブルシステムを社会インフラに導入するのに必要な安全性や信頼性を評価・確認するため、実系統に連系した高電圧・大電流での技術的・設備的なリスクを伴った実証試験を実施するものであり、超電導ケーブルにおける革新的な高効率送電技術を確立するために不可欠と考えられるため、NEDO 事業として実施する意義があると判断する。

「高温超電導ケーブル実証プロジェクト基本計画（案）」に対するパブリックコメント募集の結果について

平成19年4月5日
NEDO技術開発機構
新エネルギー技術開発部

NEDO POST 3において標記基本計画（案）に対するパブリックコメントの募集を行いました結果をご報告いたします。
みなさまからのご協力を頂き、ありがとうございました。

1. パブリックコメント募集期間

平成19年2月26日～平成19年3月5日

2. パブリックコメント投稿数＜有効なもの＞

計0件

＜高温超電導ケーブル実証プロジェクト＞

投稿No.6

2006/09/20 (水) 08:53

2000～2004年度に実施された「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」が成功裏に終了したことで日本の超電導技術の実力を世界に示すことができた。しかし、事業原簿によれば、超電導ケーブル実用化を目指し、研究成果を踏まえた更なる冷凍機の高信頼化、低コスト化、及び、ケーブル冷却システムの技術開発の重要性が記載されている。さらに、経済産業省の技術戦略マップには共通基盤技術として、パワー機器応用65K冷凍機の大容量化、高信頼化、高効率化、低コスト化の目標が示されており、当プロジェクトにおいて、この目標に沿った最適な冷却システム及び冷凍機開発を実現することが超電導ケーブル実用化に必要と考える。

1) 高信頼化

冷凍機単体に比べ、ケーブル含む冷却システム全体の信頼性検証は相対的に十分とはいえない。そのため、実線路を想定した長期連続運転による危急時を含めた運用方法の確立、信頼性に関する実証と課題の洗い出しを行い、システムの信頼性を定量的に評価しその向上を図ることが、実用的な超電導ケーブルの系統運用のために重要な研究項目であると考え。そのため当プロジェクトにおける中間接続部を持つ実線路運用を考えた冷却試験は非常に貴重なデータを得られる機会であると確信する。その中で冷却システム全体を考慮し、トータルシステムとして低コストかつ効率的な冷媒流路の冗長化検討と冷媒流量制御方法の確立も信頼性向上に必要と考える。冷凍機や送液ポンプなどの個々の構成機器についても冗長系を持たずに高信頼化を達成させることが必要であり、そのための研究実施を期待する。

2) 高効率化

長距離管内の冷媒搬送では全体損失の中に占める搬送損失の割合が非常に大きくなる。圧力損失の増大は送液ポンプの昇圧比を大きくすることになり、ポンプ動力の増大や熱侵入量の増大を引き起こす。このため送液ポンプ自体の高効率化達成を図るとともに、熱伝達率及び管摩擦係数を考慮したケーブル内の冷媒流路形状等の見直しを行うことが長距離配管の設計技術の確立に必要である。このため当プロジェクトの実験成果が実用的な冷却システムの運用を行い設計にフィードバックすることが非常に重要な項目であり、その研究実施を期待したい。また、実ケーブルにおいては中間接続や分岐や必要となると考えるが、システム全体を考えた適正な冷媒流路の確保及び冷媒分配方法の確立が信頼性の上からも必要であり、その意味から当プロジェクトは的を射た研究と考える。さらに、冷凍機単体の高効率向上に際して重要なのは定格点の効率ではなく年間を通した通年効率を評価することが重要である。そのためには冷凍サイクルも含め新たな冷凍システムへのチャレンジも視野に入れる必要があると考える。

投稿No.5

2006/09/19 (火) 15:36

本プロジェクトは、平成12年度から16年度にNEDOにおいて実施された「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」の「超電導送電ケーブル基盤技術の研究開発」の研究成果を踏まえ、超電導送電ケー

ブルの実用化への中間ステップに位置付けられるプロジェクトと考えられます。その観点から、実系統
連係試験による実証研究により信頼性を確立することは国家的に取り組むべき課題であり、必要性は
非常に高いと思われます。

さらに本プロジェクトを有意義なものにし、その有効性を高めるためには、「交流超電導電力機器基
盤技術研究開発」の研究成果で得られた実用化に向けた技術課題をきちんとクリアしておく必要があ
ります。

「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」の事業原簿のIV-18に「2.3 実用化に向けた長期計画と
開発目標のマイルストーン」に記載されていますが、「今後の技術課題としては、ケーブルでは超電導ケ
ーブル中間接続技術の開発である。」と記載されています。この技術課題は本プロジェクトで解決され
るでしょう。その他、経済性に関しては、「超電導線材の低コスト化、液体窒素冷凍機の冷凍効率の高
効率化技術の確立が不可欠である。これらの基盤技術や周辺技術を結集して超電導ケーブルと限流
器、変圧器を組み合わせた超電導送変電パイロットシステムを試験して、コストダウンの方策を明ら
かにする必要があります。」と記載されています。交流損失や断熱管の熱侵入の更なる低減も低コスト化のた
めの開発課題として挙がっています。

特に超電導送電ケーブルに最適な冷却システムの構築は非常に重要だと思います。超電導ケーブ
ルに最適な冷凍機は今のところ世の中に存在していないため、高効率の超電導ケーブル用冷凍機
の開発は不可欠ですし、コストを議論するためには、超電導ケーブルの運転温度(運転温度により冷凍
機効率と使用する超電導線材コストとはトレードオフの関係にあるため)も考慮した最適な冷却システ
ムの開発が必要となります。また、信頼性の観点からはシステム振動による冷却不安定性の解析をき
ちんと行っておく必要があります。

以上の観点からもご検討いただき、より有意義なプロジェクトにしていいただければ幸いです。

投稿No.4

2006/09/19 (火) 09:49

高温超電導ケーブルは日本が世界を席巻する技術の一つです。

三芯一括式100m高温超電導ケーブル試験、交流超電導電力機器基盤技術研究開発プロジェクトの
単芯500m高温超電導ケーブル試験等、世界に先駆けて実施してきました。交流基盤プロジェクトの
終了に伴い、国内の超電導ケーブルプロジェクトは終了してしまい、これらの試験で培われてきたノウ
ハウなどが失われてしまう恐れがありましたが、アメリカや韓国に超電導ケーブルが納入され、技術は
受け継がれてきましたが、超電導ケーブルの技術が海外に流出してしまうことが懸念されます。

先月末に開催されたApplied Superconductivity Conference 2006でも、アメリカのアルバニープロジェ
クトや韓国のDAPASプロジェクトの概要が報告され、海外のプログラムが華々しく発表されていました。
三芯一括式の高温超電導ケーブル技術は前述のとおり日本企業が世界に先駆けて開発したものであ
り、それが海外で活用されることはうれしいことですが、日本国内で実施されないことは憂うべきこと
でした。そんな中、国内において高温超電導ケーブルの実証試験を実施するという今回のプログラムは
日本発の技術が国内でも実証されるという喜ばしい試験であると思われます。500mケーブルは今なお
世界最長の超電導ケーブルであり、それらの試験で得られた知見も活用することにより、将来の電力

送電技術の一つとして技術を国内で確立することは重要かつ有効なことと思われます。今ここでこの試験を実施することが、海外に追いつかれたこの分野において、再度日本が一步抜き出す大きなチャンスだと思われます。ぜひとも国内の様々な知見を結集し、成功裏にこの実証試験が遂行されることに期待します。

投稿No.3

2006/09/14 (木) 19:05

高温超電導の電力応用に関する技術開発は、省エネルギー・地球環境負荷低減や、電力の品質向上・コスト低減による社会的・経済的効果を意図して、国家的に取り組むべき課題である。とりわけ、送電ケーブルへの応用は、老朽化して非効率な電力システムの改善と安定運用を目指して、事業者の規制や送電インフラの近代化などを進めている米国で、早期の実用化が見込まれている。現在、活発な技術開発・実証研究が進められており、わが国の民間企業も重要な一員として参加している。わが国内においても、将来のリプレース需要を見越して、超電導送電ケーブルの実証研究に積極的に取り組んで、システムの信頼性を検証し、実用化を促進することが重要であり、本事業を推進する必要性は高い。ここ数年の国家プロジェクトや民間の努力によって、第1世代のビスマス系超電導線材の特性は飛躍的に向上して実用化レベルに達しており、また、更なる低コスト化・低損失化が見込める第2世代の希土類123系線材の長尺化も実現しているため、本事業を開始する時期としても適当と判断される。

高温超電導ケーブル実証事業の必要性は上記に述べた通りであるが、その有効性をさらに高めるためには、短絡事故時の故障電流を大きく低減できる限流器の研究開発を並行して進めることが望ましい。現在の超電導ケーブルは、定格電流の10倍以上にもなる短絡電流に対応するため、高温超電導導体層の内側と磁気シールド導体層の外側に銅の保護導体を装備している。特に、外側の保護導体の存在は、ケーブルのコンパクト性を損なうため、その省略が強く求められているが、超電導送電ケーブルと直列に限流器を接続することによって、それが実現できる。本事業のみを考慮すれば、コンパクト性はそれほど大きなファクターではないかも知れないが、将来の実用化を考えると、経済性から実現可能性の高い管路布設を想定した場合に重要となる。超電導送電ケーブルの実用化を真剣に考えている米国においては、電力研究所(Electric Power Research Institute)が中心になり、エネルギー省の援助を得つつ、送電レベル(69 kV)の半導体限流器の開発、超電導限流器の研究開発を進めている。これまで、6.6 kV 等の配電レベルでは(常電導の)限流器がいくつか実用化しているが、今回の事業で想定している 66 kV で使えるものはまだ無く、技術的・経済的な困難性から民間のみでの自主的な取り組みは期待できない。わが国においても、超電導送電ケーブルの短絡事故対策と言う観点から、66 kV 級限流器の研究開発に、国家プロジェクトとして積極的に取り組むべきであると思う。

投稿No.2

2006/09/14 (木) 14:13

高温超電導ケーブル実証プロジェクトの必要性と有効性についてのコメント:

(1) 必要性

超電導技術は電力機器にとって重要な究極の省エネルギー技術であり、将来の地球規模の環境に関わるエネルギーに対して必須の技術である。とりわけ、超電導ケーブルは最大磁界が高くないので

高温超電導線を使用するには最適であり、最も早い実用化が期待される。

日本における超電導ケーブルの開発は、国家プロジェクトとして推進され、「66kV-1kA級3心一括高温超電導ケーブル-100m」の性能検証試験、および、「単相77kV-1kA級高温超電導ケーブル-500m」の長尺冷却実証試験が行われた。これらの技術は世界的な評価を受け、その実績を元に、米国のアルバニープロジェクトでわが国の高温超電導線が使用されることになった。

一方、米国においては、実システムでの運転を目的とした3つの超電導ケーブルのプロジェクト(アルバニー、ロングアイランド、オハイオ)が開始され、実システムに組み込まれて運用を開始した。日本の超電導ケーブル技術は世界をリードしているにもかかわらず、米国のほうが早く実システム運用を開始しているはその国の事情によるところが多いと思われる。わが国では、これまでに着実に推進してきた実証試験結果を踏まえて、その次のステップである実システム運用での運用システムや信頼性などを今回のプロジェクトで実施することになっている。したがって、本プロジェクトは超電導ケーブルの実用化に大きな飛躍が期待できるので、本プロジェクトの必要性は十分に高いものと判断できる。

(2)有効性

今回の超電導ケーブル実証プロジェクトに関して、日本では、3心一括型(超電導シールド付単相同軸ケーブルを3本収納した形)を進めているが、米国では、この方式以外に、Tri-axial(3相同一軸型)の超電導ケーブルも推進しており、これは、超電導材料を半分近くまで削減できる経済性のある方式である。したがって、ケーブルを小型にできるために熱侵入が少ないこと、および、超電導材料の量が少ないので交流損失も減少できるなどの利点を有している。最近では、米国の超電導ケーブルプロジェクトの一つとして、オハイオ州コロンバスの変電所で実際に設置して実試験を開始した。高温超電導材料は高価格とならざるを得ないので、経済性のあるTri-axial型も開発することが肝要と思われる。

低コスト、低損失を目標とした本プロジェクトを有意義なものとするには、両者を比較しながら、良い方法を選択することが本プロジェクトの有効性を高めることになろう。

投稿No.1

2006/09/11(月) 21:14

本プロジェクトの必要性と有効性を考察するためには、わが国における高温超電導ケーブルの研究開発の主要な歴史を振り返る必要がある。

約20年前に高温超電導材料が発見された後、ケーブルメーカーにより実用レベルのビスマス系高温超電導線材の製造技術が開発された。これを基に、次のステップとして、ケーブルメーカーと電力会社との協同研究が実施された。この協同研究では、66kV1kA級3心一括型高温超電導ケーブルが設計・製造され、2001年～2002年の1年間に亘り100mの試験線路で実用性能の検証が行われた。次に、経産省産業環境局のプロジェクト「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」の一環として、2003年～2005年に77kV1kA級単心高温超電導ケーブルの長尺冷却実証試験が500mの試験線路を建設して実施された。

以上二つの高温超電導ケーブル及び長尺冷却性能実証試験では、当時の技術レベルでの目標を達成したが、実用線路への導入を可能とするために次の三つの課題を残したと考える。すなわち、

① 定格電流1kA級の性能は検証されたが、交流高温超電導ケーブルの生命線ともいえる導体交流



損失の更なる低減が必要である。それに関連するが、交流高温超電導ケーブルのメリットが発揮できる定格電流 2kA 級以上の領域を合理的なケーブル外径と交流損失の値で実現する技術が確立されていない。

- ② ケーブル終端接続部については、技術的課題とその解決策が見出されたが、実用線路で通常必要となる中間接続部の設計・製作・施工・性能に関しては未検証である。
- ③ 高温超電導ケーブルは、 -200°C 程度の冷却を必要とするビスマス系高温超電導体を使用するという点において画期的な技術であるにも拘わらず、ケーブル技術者による設計・工場での製造・フィールドでの施工及び電気事業者による線路運用等の経験・実績は十分でない。

本プロジェクトの研究内容概要によれば、定格電流 2~3kA 級の技術検証を目標としているので、最近開発された加圧焼成法による高性能ビスマス系線材などの新技術導入が ① の課題の解決に繋がるであろう。また、② の中間接続部も本プロジェクトで検証の対象となっており、③ の関連では、実際の変電所構内での線路として建設し、運用することになっているので技術実績・経験の不足を補えようである。

本プロジェクトは、高温超電導ケーブルの初めての実線路運用を目的としているので、過去に実施された二つのプロトタイプ高温超電導ケーブル・冷却システムの性能実証試験の延長線上に位置付けることによって、その実施の意義と必要性が見出せると考える。また、有効性の視点からは、上記①、②及び③に示したような課題を解決し、最新技術を導入した高温超電導ケーブルを合理的なサイズと交流損失の値で実現し、真に実用線路への適用を可能とする技術レベルに到達することが期待できる。

以上

付録資料 5

特許リスト

付録資料 5 特許リスト

出願日	特許番号	出願に係る特許等の標題	出願人
H19/8/9	公開 2009-043626	超電導ケーブルの接続構造	住友電工
H19/8/13	特許4986291	超電導ケーブル	住友電工
H19/8/13	公開 2009-048793	超電導複合線材および超電導ケーブル	住友電工
H20/1/16	特許5108538	超電導層の端部構造、接続構造及び接続方法	住友電工
H20/1/16	特許5108539	超電導ケーブルの中間接続構造	住友電工
H20/1/16	特許4980254	超電導ケーブルの端末接続部構造	住友電工
H20/7/9	特許 4751424	超電導ケーブルコアの接続構造	住友電工
H20/7/9	公開 2010-021260	極低温機器用の電流リード及び端末接続構造	住友電工
H20/7/9	特許 4927794	超電導ケーブル用フォーマの接続方法、および超電導ケーブル用フォーマの接続構造	住友電工
H20/7/9	特許 5166144	超電導ケーブル	住友電工
H20/8/22	特許 5126975	交流用超電導ケーブル	住友電工
H20/10/28	特許 4927804	超電導ケーブルの端末接続構造	住友電工
H21/1/15	公開 2010-165552	超電導ケーブル、及びそれを用いた接続構造並びにその施工方法	住友電工
H21/1/15	特許 5093926	はんだ付け装置及びはんだ付け方法	住友電工
H21/2/24	公開 2010-200463	超電導ケーブルを用いた送電システム	住友電工
H21/6/1	特許 5443835	超電導ケーブル線路	住友電工
H21/7/23	特許 5400512	断熱管	住友電工
H21/8/19	特許 5416509	超電導ケーブルの中間接続構造	住友電工
H21/8/25	特許 5390297	超電導ケーブルの接続部、及びそれを用いた超電導ケーブル線路	住友電工
H21/9/3	公開 2011-054500	超電導ケーブル冷却装置及び方法	住友電工 東京電力 前川製作所
H24/12/26	出願 2012-283425	超電導装置の冷却システム及び冷却方法	前川製作所 住友電工 東京電力
H25/5/31	出願 2013-116116	ブレイトンサイクル冷凍機	前川製作所
H25/11/11	出願 2013-233149	膨張機一体型圧縮機及び冷凍機並びに冷凍機の運転方法	前川製作所
H26/3/6	出願	交流用超電導ケーブル、及び交流用超	住友電工

	2014-044363	電導ケーブルの製造方法	東京電力
H26/3/6	出願 2014-044364	超電導ケーブル線路、及び断熱管路	住友電工 東京電力
H26/3/28	出願 2014-068959	超電導ケーブルの端末構造	住友電工 東京電力

付録資料 6

発表・論文リスト

付録資料6 発表・論文リスト、プレス発表等、受賞実績

○発表・論文リスト

発表日	発表媒体	発表タイトル	発表者
H19.11	International Workshop on HTS Power Applications 2007	Cable Project in Japan	本庄昇一
H20.3	平成20年電気学会全国大会	低損失超電導ケーブル導体の開発	大屋正義 他
H20.3	平成20年電気学会全国大会	高温超電導ケーブル実証プロジェクト (系統導入時の雷サージによる影響検討)	鬼頭 豊 他
H20.3	平成20年電気学会全国大会	高温超電導ケーブル実証プロジェクトの概要	三村 智男 他
H20.5	2008年度春季低温工学・超電導学会	低損失 Bi2223 超電導ケーブル導体の開発	大屋 正義
H20.5	2008年度春季低温工学・超電導学会	Bi2223 超電導ケーブル導体の過電流特性	大屋 正義
H20.6	超伝導科学技術研究会	高温超電導ケーブル実証プロジェクト	本庄 昇一
H20.8	平成20年電気学会電力・エネルギー部門大会	高温超電導ケーブル実証プロジェクトーケーブル導体に関する検討ー	大屋 正義
H20.8	平成20年電気学会電力・エネルギー部門大会	高温超電導ケーブル実証プロジェクトー短絡電流による影響検討ー	鬼頭 豊
H20.8	Applied Superconductivity Conference (ASC2008)	A New HTS Cable Project in Japan	湯村 洋康
H20.11	2008年度秋季低温工学・超電導学会	Bi2223 超電導ケーブルの交流損失特性	大屋 正義
H20.11	International Superconductivity Symposium (ISS2008)	Design study of a HTS cable in YOKOHAMA Project	増田 孝人
H20.11	International Superconductivity Symposium (ISS2008)	Outline of a new HTS Cable Project in Yokohama	三村 智男
H20.11	EPRI meeting	A New HTS Cable Project in Yokohama, Japan	Randy Show
H20.11	低温工学協会「2008年度九州・西日本支部若手セミナー」	超電導技術の応用～送電ケーブル～	本庄 昇一
H21.3	平成21年電気学会全国大会	高温超電導ケーブル実証プロジェクトー開発状況ー	野口 裕

H21. 3	平成 21 年電気学会全国大会	高温超電導ケーブル実証プロジェクト－ケーブル設計ならびに 30m 検証試験－	増田 孝人
H21. 3	平成 21 年電気学会全国大会	高温超電導ケーブル実証プロジェクト－耐短絡電流特性に関する検討－	増田 孝人
H21. 3	平成 21 年電気学会全国大会	高温超電導ケーブル実証プロジェクト－冷却システム構成の検討－	鬼頭 豊
H21. 3	平成 21 年電気学会全国大会	高温超電導ケーブルの保護について(短絡電流対応の検討)	増田 孝人
H21. 5	2009 年度春季低温工学・超電導学会	超電導送電ケーブル用冷却システムの研究概要	池内 正充、他
H21. 5	CIGRE D1 Workshop	Demonstration HTS cable project in YOKOHAMA	三村 智男
H21. 6	電気学会・超電導応用研究会	高温超電導ケーブル実証プロジェクトの開発状況	増田 孝人
H21. 9	EUCAS 2009	Update of YOKOHAMA Project (HTS Cable Design and Evaluation)	湯村 洋康、他
H21. 10	低温工学・超電導応用研究会	高温超電導ケーブル実証プロジェクト	増田 孝人
H21. 11	電気学会論文誌 B	高温超電導ケーブル実証プロジェクトの進捗状況	増田 孝人、本庄 昇一
H21. 11	International Superconductivity Symposium (ISS2009)	Test results of a 30-meter HTS cable pre-demonstration system in Yokohama project	渡部 充彦、他
H21. 12	14th US-Japan Workshop on Advanced Superconductors	Status of the Yokohama Project - Superconducting Cable Demonstration in Japan -	三村 智男
H21. 12	日本冷凍空調学会誌 冷凍	超電導ケーブル用冷却設備	矢口 広晴、渡部 充彦
H22. 2	International Superconductivity Industry Summit (ISIS-18)	Superconducting cable demonstration project in Japan	原 築志
H22. 3	平成 22 年電気学会全国大会	高温超電導ケーブル実証プロジェクト－30m ケーブル検証試験結果－	芦辺 祐一 他
H22. 4. 15	2nd Japan-Korea Superconductivity Workshop 2010	HTS Cable Demonstration Project in Yokohama	Y. Kitoh

H22. 5. 12	2010 年度春季低温工学・超電導学会	サブクール窒素による強制冷却 HTS-Power-Cable の過渡熱安定性シミュレーション	我妻洸, 淵野修一郎, 古瀬充穂, 増田孝人, 大屋正義, 本庄昇一, 三村智男, 野口裕
H22. 5. 12	2010 年度春季低温工学・超電導学会	超電導ケーブル用冷却システムの構築	池内正充, 大野 隆介, 仲村 直子, 矢口広晴, 町田明登, 渡部充彦, 増田孝人, 野口裕, 鬼頭豊, 三村智男, 本庄昇一
H22. 5. 25	ISTEC 技術動向報告会	Bi 系超電導ケーブル実証と今後の期待	原築志
H22. 6. 10	電気学会超電導応用電力機器研究会	高温超電導ケーブル実証プロジェクト-30m ケーブルシステム検証試験結果-	大屋正義, 増田孝人, 湯村洋康, 渡部充彦, 芦辺祐一, 本庄昇一, 三村智男
H22. 7. 1	ICEC2010	Liquid nitrogen cooling system for Yokohama HTS cable project	M. Watanabe
H22. 7. 27	NEDO 新エネルギー技術報告会	高温超電導ケーブル実証プロジェクト	原築志
H22. 8. 1	Applied Superconductivity Conference 2010	Status of superconducting cable demonstration project in Japan	T. Masuda, H. Yumura, M. Watanabe, M. Ikeuchi, H. Yaguchi, S. Honjo, T. Mimura, Y. Kitoh, Y. Noguchi
H22. 8. 5	Applied Superconductivity Conference 2010	Test Results of a 30m HTS cable for Yokohama Project	T. Masuda, H. Yumura, M. Ohya, Y. Ashibe, M. Watanabe, M. Minamino, H. Ito, S. Honjo, T. Mimura, Y. Kitoh, Y. Noguchi
H22. 8. 5	Applied Superconductivity Conference 2010	Stability Analysis of HTS Power Cable With Fault Currents	M. Furuse, S. Fuchino, K. Agatsuma, T. Masuda, M. Ohya, S. Honjo, T. Mimura, Y. Noguchi
H22. 9. 2	平成 22 年度電気学会電力・エネルギー部門大会	高温超電導ケーブル実証プロジェクト - 30m ケーブル検証試験結果 -	大屋正義, 増田孝人, 湯村洋康, 渡部充彦, 芦辺祐一, 本庄昇一, 三村智男
H22. 9. 2	平成 22 年度電気学会電力・エネルギー部門大会	高温超電導ケーブル実証プロジェクト - ケーブルシステム検討状況 -	野口裕, 増田孝人, 湯村洋康, 渡部充彦, 池内正充, 矢口広晴, 本庄昇一, 三村智男, 鬼頭豊
H22. 10 . 5	ISIS-19	Progress of High-Tc Superconducting Cable Demonstration in Actual Power System	T. Hara

H22.10 .27	2nd Japan-Korea Superconductivity Workshop 2010 (2nd JKSW)	Update of HTS Cable Demonstration Project (Yokohama Project)	T. Nishimura, T. Masuda, H. Yumura, M. Watanabe, Y. Ashibe, H. Ito, M. Ohya, S. Honjo, T. Mimura, H. Ichikawa, Y. Noguchi
H22.11 .2	24 th International Symposium on Superconductivity (ISS2010)	Recent progress of the HTS Cable Demonstration Project (Yokohama Project) -Verification test results of the 30-meter HTS cable system-	T. Masuda, H. Yumura, M. Watanabe, Y. Ashibe, M. Ohya, S. Honjo, T. Mimura, Y. Kitoh, Y. Noguchi
H22.12 .1	NEDO 省エネルギー技術フォーラム	高温超電導ケーブル実証プロジェクト	原築志
H22.12 .3	2010 年度秋季低温工学・超電導学会	HTS ケーブルの過電流通電時の過渡熱安定性解析	我妻洸, 古瀬充穂, 淵野修一郎, 増田孝人, 大屋正義, 本庄昇一, 三村智男, 野口裕
H22.12 .3	2010 年度秋季低温工学・超電導学会	超電導ケーブル用冷却システムの単体運転試験	大野隆介, 下田将大, 池内正充, 矢口広晴, 町田明登, 渡部充彦, 増田孝人, 野口裕, 市川裕士, 三村智男, 本庄昇一, 原築志
H23.1. 20	電気学会超電導応用電力機器研究会	高温超電導ケーブル実証プロジェクト-30m ケーブルシステム検証試験結果-	大屋正義, 増田孝人, 広田博史, 湯村洋康, 渡部充彦, 芦辺祐一, 伊藤秀樹, 本庄昇一, 三村智男, 原築志
H23.3. 17	平成 23 年電気学会全国大会	高温超電導ケーブル実証プロジェクト -冷却システム検証試験 (Phase 1)-	池内正充, 下田将大, 大野隆介, 矢口広晴, 渡部充彦, 増田孝人, 野口裕, 市川裕士, 三村智男, 本庄昇一, 原築志
H23.6. 10	超電導応用電力機器研究会	高温超電導ケーブル実証プロジェクト-実証試験向け超電導ケーブル製造-	畳谷和晃, 増田孝人, 広田博史, 中西辰雄, 湯村洋康, 渡部充彦, 芦辺祐一, 斎藤高広, 大屋正義, 本庄昇一, 原築志
H23.6. 22	Jicable 2011	HIGH TC SUPERCONDUCTING CABLE PROJECT IN YOKOHAMA, JAPAN	T. MASUDA, H. YUMURA, H. HIROTA, S. HONJO, T. HARA, M. IKEUCHI, H. YAGUCHI
H23.7. 6	第 160 回高電圧研究会	超電導ケーブル開発の状況	増田 孝人
H23.8. 30	電気学会電力・エネルギー部門大会	長尺三心一括型超電導ケーブルの臨界電流測定 (1) -数値解析-	大屋正義, 湯村洋康, 広田博史, 増田孝人, 野口裕, 三村智男, 本庄昇一, 原築志

H23. 9. 22	EUCAS 2011	Recent progress of Liquid nitrogen cooling system (LINCS) for Yokohama HTS cable project	M. Watanabe, H. Yumura, H. Hirota, T. Masuda, M. Shimoda, R. Ohno, M. Ikeuchi, H. Yaguchi, H. Ichikawa, T. Mimura, S. Honjo and T. Hara
H23. 9. 27	The 15th Japan-US Workshop on Advanced Superconductors	Development of High-temperature Superconducting Cable	M. OHYA, H. YUMURA, H. HIROTA, T. MASUDA, T. MIMURA, S. HONJO, T. HARA
H23. 11 . 9	2011 年度秋季低温工学・超電導学会	長尺三心一括型超電導ケーブルの臨界電流測定	大屋正義, 湯村洋康, 広田博史, 増田孝人, 三村智男, 本庄昇一, 原築志
H23. 12 . 12	金属・セラミックス/超電導応用電力機器合同研究会	超電導ケーブルの開発状況と今後	本庄昇一, 原築志, 増田孝人
H23. 12 . 14	第 280 回電気材料懇談会	Bi 実証ケーブル線路の建設	斎藤高廣
H24. 1. 20	電気材料技術懇談会 新春座談会	超電導応用技術の開発状況	増田孝人
H24. 3. 15	2012 春応用物理学会講演会 特別企画シンポジウム	超電導ケーブル開発の状況	増田孝人
H24. 5. 24	ICEC24-ICMC2012	Recent Progress of Liquid Nitrogen Cooling System for Yokohama HTS Cable Project	N. Nakamura, M. Shimoda, T. Komagome, R. Ohno, H. Yaguchi, H. Ichikawa, T. Mimura, T. Hara, M. Watanabe, T. Masuda
H24. 6. 21	超電導応用電力機器研究会	高温超電導ケーブル実証プロジェクトの進捗状況	稲垣芳宏, 大屋正義, 芦辺祐一, 渡部充彦, 湯村洋康, 中西辰雄, 広田博史, 増田孝人, 大野隆介, 矢口広晴, 三村智男, 原築志
H24. 5. 17	ICEC24-ICMC2012	Thermal stability analysis of HTS power cable with fault currents	M. Furuse, K. Agatsuma, S. Fuchino, T. Masuda, H. Yumura, M. Watanabe, M. Ohya, S. Honjo, T. Mimura, Y. Noguchi, H. Ichikawa, T. Hara
H24. 5. 19	日韓 Workshop	Development of High-temperature Superconducting Cable	Masayoshi Ohya
H24. 7. 11	ICEE 2012	In-grid demonstration of High-temperature Superconducting Cable	M. Ohya, Y. Ahibe, M. Watanabe, H. Yumura, T. Nakanishi, H. Hirota, T. Masuda, H. Ichikawa, T. Mimura, S. Honjo, T. Hara

H24. 9. 13	電気学会電力・エネルギー部門大会	高温超電導ケーブル実証プロジェクト —第1回冷却試験—	大屋正義、渡部充彦、湯村洋康、中西辰雄、広田博史、増田孝人、矢口広晴、池内正充、本庄昇一、原築志
H24. 10 .8	ASC 2012	Update of YOKOHAMA HTS Cable Project	M. Watanabe, H. Yumura, H. Hirota, T. Masuda, M. Shimoda, R. Ohno, M. Ikeuchi, H. Yaguchi, H. Ichikawa, T. Mimura, S. Honjo, T. Hara
H24. 11 .7	2012年度秋季低温工学・超電導学会	高温超電導ケーブルの実線路実証試験	大屋正義、芦辺祐一、渡部充彦、湯村洋康、中西辰雄、広田博史、増田孝人、大野隆介、下田将大、仲村直子、駒込敏弘、矢口広晴、池内正充、町田明登、市川裕士、三村智男、本庄昇一、原築志
H24. 11 .7	2012年度秋季低温工学・超電導学会	高温超電導ケーブル用冷却システム試験	大野隆介、下田将大、駒込敏弘、仲村直子、池内正充、矢口広晴、町田明登、渡部充彦、増田孝人、市川裕士、三村智男、本庄昇一、原築志
H24. 12 .5	ISS2012	In-grid demonstration of high-temperature superconducting cable	M. Ohya, Y. Ashibe, M. Watanabe, H. Yumura, T. Nakanishi, H. Hirota, T. Masuda, R. Ono, M. Shimoda, N. Nakamura, T. Komagome, H. Yaguchi, M. Ikeuchi, A. Machida, H. Ichikawa, T. Mimura, S. Honjo, T. Hara
H25. 1. 15	超電導応用電力機器研究会	長尺三心一括型高温超電導ケーブルの臨界電流測定	大屋正義、湯村洋康、広田博史、増田孝人、市川裕士、三村智男、本庄昇一、原築志
H25. 1. 23	低温工学・冷凍部会第3回超電導応用研究会シンポジウム	超電導ケーブルの試験結果と実証運転状況	渡部充彦
H25. 1. 23	低温工学・冷凍部会第3回超電導応用研究会シンポジウム	高温超電導ケーブル実証プロジェクトの冷却システムおよび冷凍機の開発状況	町田明登
H25. 3. 2	Journal of International Council on Electrical Engineering	In-grid demonstration of High-temperature Superconducting Cable	M. Ohya, Y. Ashibe, M. Watanabe, H. Yumura, T. Nakanishi, H. Hirota, T. Masuda, H. Ichikawa, T. Mimura, S. Honjo, T. Hara

H25. 3. 20	平成 25 年電気学会全国大会	高温超電導ケーブルの実系統運転特性評価(1) ーシステム構成と系統実証内容ー	三村智男, 市川裕士, 本庄昇一、渡部充彦, 増田孝人、廣瀬正幸、大野隆介, 矢口広晴, 町田明登、原築志
H25. 3. 20	平成 25 年電気学会全国大会	高温超電導ケーブルの実系統運転特性評価(2) ー警報・監視システムー	市川裕士, 三村智男, 本庄昇一、渡部充彦, 増田孝人、矢口広晴, 町田明登、原築志
H25. 3. 20	平成 25 年電気学会全国大会	高温超電導ケーブルの実系統運転特性の評価(3) ー系統接続前のケーブル特性評価ー	増田孝人、大屋正義、豊谷和晃、渡部充彦、湯村洋康、三村智男, 市川裕士, 本庄昇一、原築志
H25. 3. 20	平成 25 年電気学会全国大会	高温超電導ケーブルの実系統運転特性評価(4) ー系統負荷変動に伴うケーブルの運転特性ー	渡部充彦, 斎藤高広, 増田孝人, 下田将大, 大野隆介, 仲村直子, 矢口広晴, 市川裕士, 三村智男, 本庄昇一, 原築志
H25. 3. 20	平成 25 年電気学会全国大会	高温超電導ケーブルの実系統運転特性評価(5) ー系統負荷変動に伴う冷却システムの運転特性ー	町田明登、下田将大、大野隆介、仲村直子、矢口広晴、三村智男、市川裕士、本庄昇一、渡部充彦、増田孝人、原築志
H25. 3. 20	平成 25 年電気学会全国大会	ツイスト型高温超電導線材の適用による多層同軸型スパイラルケーブルの交流損失低減効果	大塚良介, 福井聡, 小川純, 岡徹雄, 佐藤孝雄, 大屋正義, 増田孝人
H25. 4. 16	未踏科学技術協会 第 39 回シンポジウム	高温超電導ケーブル 系統実証運転の状況について	本庄 昇一
H25. 5. 7	3rd Asia-Arab Sustainable Energy	Progress in the development of Large refrigerator for HTS Cable	N. Nakamura, S. Komatsu, M. Komeda, S. Uedal, M. Kudo, M. Machida, H. Ichikawa, T. Mimura, S. Honjo, M. Watanabe, T. Masuda, T. Hara
H25. 5. 13	第 87 回 2013 年度春季低温工学・超電導学会	高温超電導ケーブルの冷却特性評価	大野隆介, 下田将大, 仲村直子, 矢口広晴, 町田明登, 渡部充彦, 増田孝人, 市川裕士, 三村智男, 本庄昇一, 原築志
H25. 7. 10	16th US-Japan workshop on advanced superconductors	In-grid High-temperature Superconducting Cable Project in Japan	Yoshihiro Inagaki
H25. 7. 10	名古屋大学 パワーテクノプロムナード 第 6 回「超電導ケーブルで変わる次世代電力機器・システム」	超電導ケーブルのシステムへの導入(責務、試験法)方法	本庄 昇一

H25. 7	低温工学 48 巻 7 号	高温超電導ケーブル用冷却システムおよび高性能冷凍機の開発	仲村直子, 小松峻介, 植田翔太, 米田昌生, 工藤瑞生, 町田明登
H25. 7. 26	未踏科学・超伝導科学技術研究会	極低温冷凍機の進展とその応用の拡大	町田明登
H25. 8. 27	電気学会 B 部門 新潟	高温超電導ケーブルシステムの実系統運転 (1)	渡部充彦, 増田孝人, 仲村直子, 矢口広晴, 町田明登, 丸山修, 三村智男, 本庄昇一, 原築志
H25. 8. 27	電気学会 B 部門 新潟	高温超電導ケーブルシステムの実系統運転 (2)	下田将大, 大野隆介, 仲村直子, 矢口広晴, 町田明登, 渡部充彦, 増田孝人, 三村智男, 本庄昇一, 原築志
H25. 9. 15	EUCAS 2013 (European Conference in Applied Superconductivity)	Characteristics of HTS cable system on real grid operation	M. Watanabe, M. Ohya, H. Yumura, T. Masuda, N. Nakamura, R. Ono, H. Yaguchi, A. Machida, T. Nakano, O. Maruyama, S. Honjo
H25. 9. 24	電気学会・超電導研究会@東電技術開発 C	高温超電導ケーブルの実系統運転	下田将大, 大野隆介, 仲村直子, 矢口広晴, 町田明登, 渡部充彦, 増田孝人, 中野哲太郎, 丸山修, 本庄昇一
H25. 10 . 4	NEDO-CDTI Workshop	In-grid Demonstration of 200 MVA Superconducting Cable System	Shoichi. Honjo
H25. 10 . 15	22nd World Energy Congress (Daegu, Korea)	In-grid Demonstration of 200 MVA Superconducting Cable System	S. Honjo, T. Mimura, T. Hara
H25. 10 . 30	NEDO 省エネルギー技術フォーラム 2013	高温超電導ケーブル実証プロジェクト	本庄 昇一
H25. 11 . 18	ISS2013 (Plenary)	High temperature superconducting cable demonstration project in Japan	Shoichi. Honjo
H25. 11	低温工学 48 巻 11 号	NEDO「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」	本庄昇一, 丸山修, 中野 哲太郎, 増田孝人, 渡部充彦, 大屋正義, 町田明登, 矢口広晴, 仲村直子
H25. 11	高圧ガス 11 月号	冷媒にネオンを用いた超電導向け冷却システムの開発	仲村直子
H25. 12	2013 年度秋季低温工学・超電導学会	高温超電導ケーブルの実証試験	渡部充彦, 大屋正義, 増田孝人, 下田将大, 仲村直子, 矢口広晴, 町田明登, 中野哲太郎, 丸山修, 本庄昇一
H25. 12 . 6	2013 年度秋季低温工学・超電導学会	高温超電導ケーブル用ブレイトン冷凍システムの開発	大野隆介, 植田翔太, 小松峻介, 仲村直子, 米田昌生, 工藤瑞生, 矢口広晴, 町田明登, 本庄昇一

H26. 3. 18	平成 26 年電気学会全国大会	高温超電導ケーブルの実系統運転成果および評価 (1) ー長期運転特性・信頼性ー	中野哲太郎, 丸山修, 本庄昇一, 渡部充彦, 増田孝人, 廣瀬正幸, 下田将大, 仲村直子, 矢口広晴, 町田明登
H26. 3. 18	平成 26 年電気学会全国大会	高温超電導ケーブルの実系統運転成果および評価 (2) ー超電導ケーブルの電氣的・熱的特性ー	渡部充彦, 大屋正義, 増田孝人, 下田将大, 仲村直子, 矢口広晴, 中野哲太郎, 丸山修, 本庄昇一
H26. 3. 18	平成 26 年電気学会全国大会	高温超電導ケーブルの実系統運転成果および評価 (3) ー冷却システムの運転制御性・長期特性ー	下田将大, 大野隆介, 仲村直子, 矢口広晴, 町田明登, 渡部充彦, 増田孝人, 中野哲太郎, 丸山修, 本庄昇一
H26. 3. 18	平成 26 年電気学会全国大会	AC12kA 級大電流高温超電導ケーブルの開発	大屋正義, 増田孝人, 廣瀬正幸, 中野哲太郎, 丸山修, 本庄昇一
H26. 3. 25	International Symposium on DC Superconducting Power Transmission Line (Chubu University)	Real grid HTS cable project in Japan	Michihiko Watanabe

○ プレス発表等（成果の普及努力）

発表年月	発表場所、雑誌	発表社
H20. 2. 13	「高温超電導ケーブル」を電力系統に連系する日本初の実証試験の実施について	東京電力/住友電気
H20-7	洞爺湖サミット記念展示会	住友電気
H20-12	エコプロダクト展	住友電気
H21. 5	「日刊工業新聞」記事掲載	東京電力
H21. 11	「家電月報アルレ（ALLE）」記事掲載	東京電力
H21. 11	「電気新聞」記事掲載	住友電気/東京電力
H21. 11	「日経ヴェリタス」記事掲載	住友電気/東京電力
H21. 11	「日経産業新聞」記事掲載	住友電気/東京電力
H21. 12	「電気評論」記事掲載	東京電力
H22. 2	「日刊工業新聞」記事掲載	住友電気/東京電力
H22. 3	「ガスレビュー」記事掲載	住友電気/東京電力
H22. 3	「日本鉄鋼協会会報誌（ふえらむ）」記事掲載	住友電気
H22. 4	NHK・おはよう日本（ニュース番組）放映	東京電力/住友電気
H22. 8	「日本経済新聞」記事掲載	東京電力/住友電気/前川製作所
H22. 8	「電気新聞」記事掲載	東京電力/住友電気/前川製作所
H22. 9	「電気評論 9月号」記事掲載	東京電力/住友電気/前川製作所
H22. 10	「電気新聞」記事掲載	東京電力/住友電気/前川製作所
H23. 1	「日本経済新聞」電子版記事掲載	東京電力/住友電気/前川製作所
H23. 1	「日経産業新聞」記事掲載	住友電気/東京電力/前川製作所
H23. 1	「電気評論 1月号」記事掲載	東京電力/住友電気/前川製作所
H23. 1	BS 日テレ（BS フロンティア） 放映	東京電力/住友電気
H23. 2	「日刊工業新聞」記事掲載	住友電気/東京電力
H23. 3	テレビ東京・Fine（ニュース番組）放映	東京電力/住友電気
H23. 5. 2	「鉄鋼新聞」記事掲載	住友電気
H23. 5. 30	「日経産業新聞」記事掲載	住友電気
H23. 7. 6	「東京読売新聞」記事掲載	東京電力/住友電気
H23. 7. 25	「Fujisankei Business Eye」記事掲載	東京電力/住友電気
H23. 9. 20	「BS フジ・ガリレオ」テレビ放映	東京電力/住友電気/前川製作所

H23. 11. 19	「東京新聞」記事掲載	東京電力/住友電工/前川製作所
H23. 11. 2	「Fujisankei Business Eye」記事掲載	東京電力/住友電工
H24. 1. 19	「鉄鋼新聞」記事掲載	住友電工
H24. 10	実証運転開始の記者会見実施 朝日、産経、読売、日経、日経産業、化学工業日報、電気新聞 に掲載される。 NHK, テレビ神奈川にて放送される。	NEDO/東京電力/住友電工/前川製作所
H24. 11	日経産業新聞	東京電力
H24. 11	日刊工業新聞	前川製作所
H24. 12	雑誌「OHM」2012年12月号	NEDO/東京電力/住友電工/前川製作所
H25. 12	Supercom	東京電力
H25. 1	月刊ガスレビュー 2013年1月号 No. 759	前川製作所
H25. 1	未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会 FSST NEWS	住友電工
H25. 1	日経産業新聞 掲載	
H25. 1	「電気評論」 掲載	東京電力
H25. 1	SEI テクニカルレビュー No. 182	住友電工
H25. 2	日経産業新聞 掲載	
H25. 3	日経ヴェリタス 掲載	東京電力/住友電工
H25. 3	日本機械工業連合会会誌「産業機械」 2013年3月号 No. 750	前川製作所
H25. 4	SEI Technical Review No. 76 'Japan' s First Live Power Transmission Using 3-in-One Superconducting Cable (High-Temperature Superconducting Cable Demonstration Project)'	住友電工
H25. 4	「月刊電機 (韓国・電友文化社)」 掲載	東京電力
H25. 6	「超電導 Web21」2013年6月号特集 掲載	前川製作所
H25. 8	雑誌「OHM」(超電導ケーブルの現状と展望) 掲載	住友電工
H25. 11	「高圧ガス」誌 掲載	前川製作所
H25. 12	ガスレビュー No. 782 掲載	前川製作所
H25. 12	EINA Magazine (Electrical Insulation News in Asia)	住友電工
H25. 12	低温工学・関西特集号	住友電工
H26. 1	「電気評論」掲載	東京電力
H26. 2	BBC Horizons, Demand For Power Episode 11 part 2, Super conductors	東京電力/住友電工

○ 受賞実績

- ・ 電気材料技術懇談会 平成 25 年度技術褒賞（優秀論文賞）
- ・ 未踏科学技術協会 第 18 回超伝導科学技術賞（平成 26 年）
- ・ 電気学会 第 70 回電気学術振興賞（進歩賞）（平成 26 年）

2. 分科会における説明資料

次ページより、プロジェクト推進・実施者が、分科会においてプロジェクトを説明する際に使用した資料を示す。

高温超電導ケーブル実証プロジェクト

(平成19年～平成25年)

事後評価分科会説明資料

ープロジェクトの概要ー

平成26年9月3日

独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
省エネルギー部

プロジェクトの概要説明

- I. 事業の位置づけ・必要性
- II. 研究開発マネジメント

高温超電導ケーブル実証プロジェクトの狙い

I 高温超電導ケーブルの総合的な信頼性研究

- ・実用化に向けて実系統連系試験を行い実運用に近い形態で線路建設、運転、保守を含むトータルシステムの長期信頼性を検証する

II 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究

- ・実証試験の評価項目、方法などの知見をデータとして、国際標準化活動に提供していく

→ **革新的な高効率送電技術の実用性を検証**

研究開発の背景

○電力需要見通し（東京電力の場合）

- a) 販売電力量：平成17年～28年度：1.1%増
- b) 最大電力：平成17年～28年度：0.9%増

○経年劣化したケーブルの更新

- ・大半のPOF、OFケーブルは布設後既に30年以上経過し、経年劣化問題が顕在化。
- **今後リプレース工事が増加する予定**

建設コストを極力抑えつつ、都市地域の過密化による需要増加に対応した**流通設備形成が必要**

需要増を見越した**大容量化**
建設コストを抑える**コンパクト化**

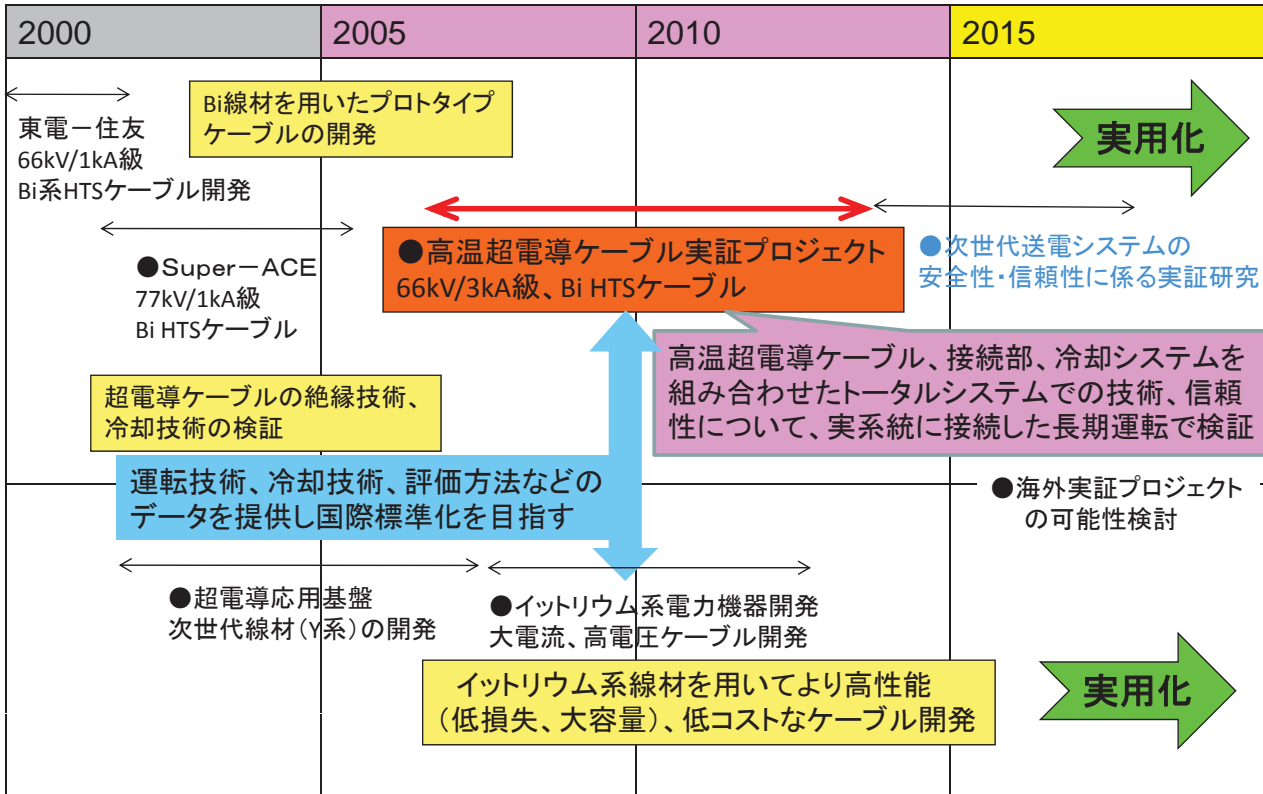
地球環境問題への対策の観点から省エネルギーや環境負荷低減に配慮したエネルギー利用が重要となっている

- 国家エネルギー戦略（2006年5月経済産業省）省エネルギーとして2030年までに30%の効率改善
- 新エネルギーイノベーション計画
新たなエネルギーの貯蔵・輸送技術など、「革新的なエネルギー高度利用技術」の開発
- 原子力の推進・電力基盤の高度化計画
送配電分野においては、電力供給を安定化させる技術や、発電電力を無駄なく輸送するための技術開発の促進
- Cool earth-エネルギー革新技術計画
2008年3月経済産業省が制定。21のエネルギー革新技術の一つに「**高効率送電技術**」が選定される
- 政府方針
CO₂排出量を1990年比25%削減

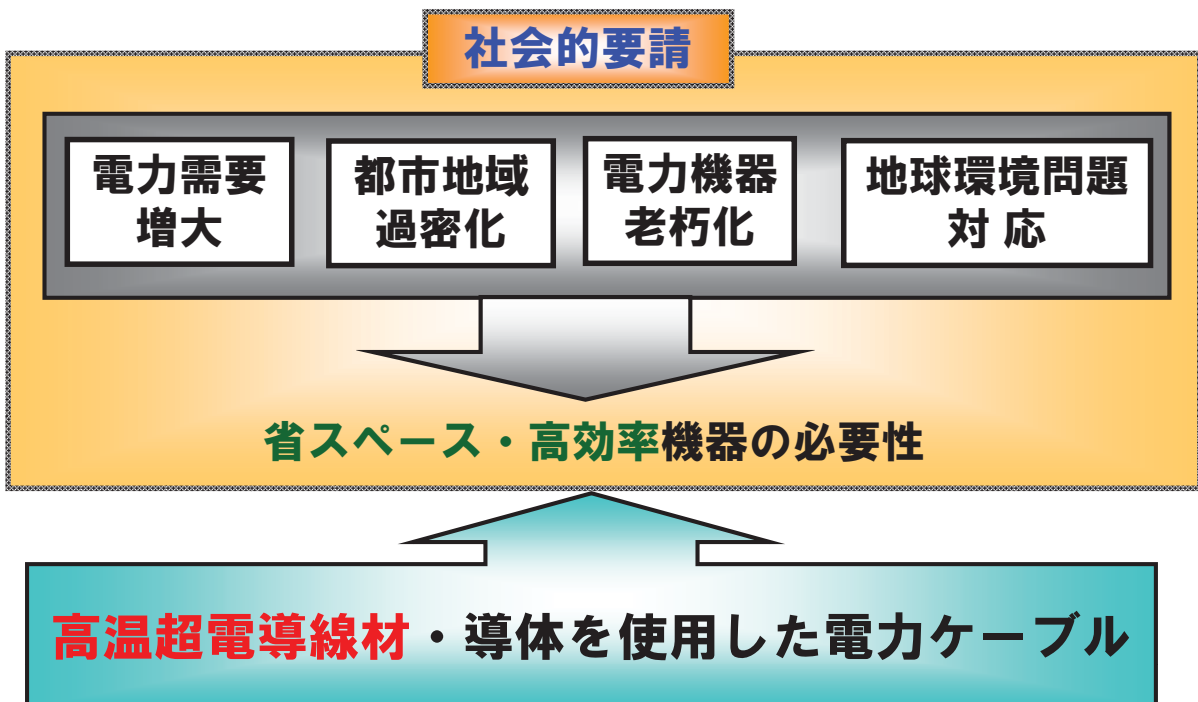
環境を考慮した**送電ロス削減**

高温超電導ケーブルの早期実用化が必要

事業の位置づけ



研究開発の必要性



NEDOが関与する意義

社会的側面

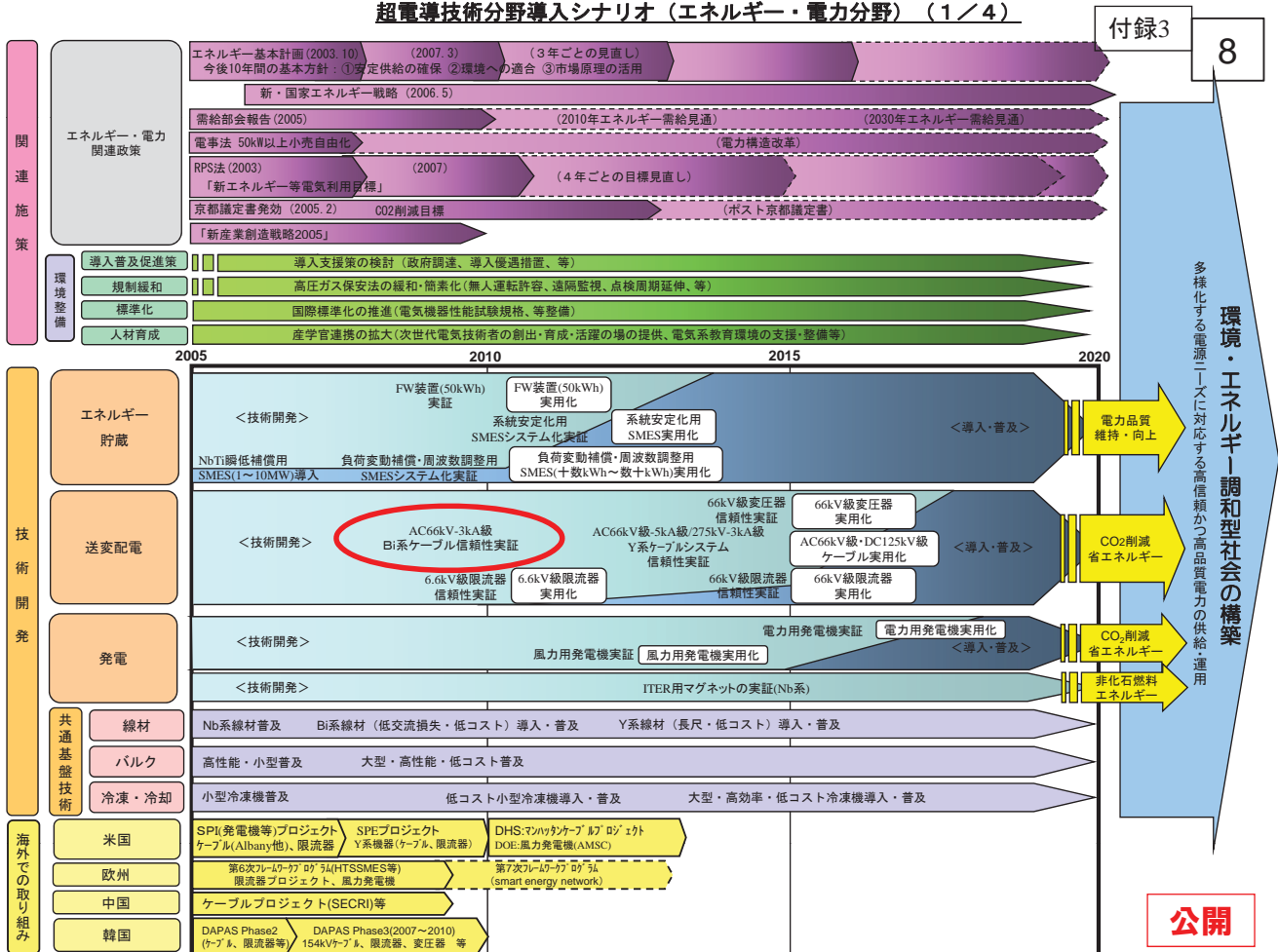
- エネルギー安定供給（電力ケーブル老朽化更新）
地球環境問題への対応
→ 超電導技術の早期実用化、導入普及が期待される

技術的側面

- ほとんど実用化例がない、高温超電導現象による革新的技術開発
- 実用化には多くの技術課題（適用法令含む）を有する
→ 民間のみでの事業は困難
- 国際競争力強化→主に米国、韓国（国の支援で強力に推進）

国・NEDOが主導し、産学官の英知を結集して
研究開発を推進する必要がある

超電導技術分野導入シナリオ（エネルギー・電力分野）（1/4）



国	プロジェクト	実証系統	線材	m	電圧・電流	備考
日本	NEDO高温超電導ケーブル	Grid(東電旭変電所)	Bi	250	AC66kV-3.0kA	2012/10~2013/12
日本	高温超電導直流送電システムの実証研究	直流電源設備からの送電	Bi	500 1000	DC20kV-3.0kA他	2013/4事業開始、建設中
日本	鉄道総研き電線	鉄道総研構内試験線路	Bi	30	DC1.5kV-5.0kA	2013/4~
米国	LIPA プロジェクト	Grid(送電線)	Bi/Y	600	AC138kV-2.4kA	線材:AMSC ケーブル:NEXANS
米国	Hydraプロジェクト	Grid(送電線)	Y	200	AC13.8kV-4.0kA	線材:AMSC ケーブル:Southwire
米国	Chicagoプロジェクト	Grid(配電線)	Y	5000	AC20kV程度	2014~(計画) 線材:AMSC
メキシコ	CASATプロジェクト	水力発電所引出	Bi	17	AC50kV-3.0kA	
ドイツ	Ampacityプロジェクト	Grid(配電線)	Bi	1000	AC10kV-2.3kA	2011-2016 線材:住友電工、ケーブル、限流器:NEXANS 実証中で最長
ロシア	サンクトペテルブルク	Grid(配電線)	Bi	2500	AC20kV-1.4kA	2015-2020
中国	雲南プロジェクト	Grid(変電所)	Bi	33.5	AC35kV-2.0kA	線材:AMSC ケーブル:Inno Power(中)
中国	甘肅省全超電導変電所	Grid(変電所)	?	75		2011-2015 SMES:0.5MVA、限流器220kV、変圧器630MVA オール超電導変電所
中国	国家電網プロジェクト	Grid(送電線)	Y	1100	AC110kV	計画検討中
韓国	DAPAS(2)	試験所	Y	100	AC154kV-3.75kA	試験中 線材:AMSC ケーブル:LS(韓)
韓国	GENI	Grid(Icheon変電所)	Y	500	AC23kV-1.25kA	終了 線材:AMSC ケーブル:LS(韓) 限流器:SuNAM(韓)
韓国	JEJU	Grid(GuemAk 変電所)	Y	500	DC80kV-6.25kA	2014系統連系予定 500MVA ケーブル:LS(韓)
韓国	JEJU	Grid(GuemAk 変電所)	Y	1000	AC154kV-1.87kA	2015系統連系予定 500MVA

事業の目的と実施の効果

<事業目的>

高温超電導ケーブルを実系統に連系し、線路建設、運転、保守を含めたトータルシステムの信頼性を実証する

<実施の効果>

- ・従来技術では実現し得ない革新的技術の確立
- ・従来機器の飛躍的な性能の向上

対象: **エネルギー分野**、産業・輸送分野、医療分野等

エネルギー効率化による
省エネ及びCO₂削減効果

コンパクト化、建設コスト削減による
電気料金の低減効果

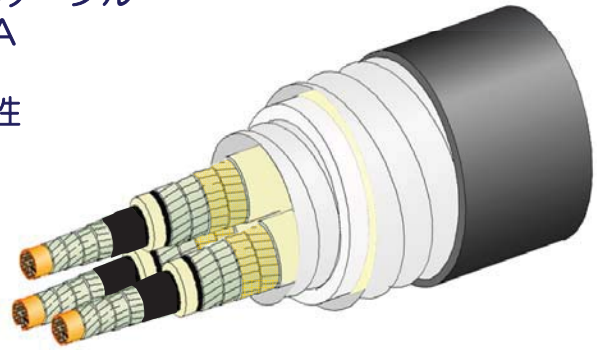
- 高温超電導ケーブルシステムを実系統に連系した実証試験を行うことにより、トータルシステムとしての総合的な信頼性を実証
- コンパクトで革新的な高効率送電技術を確立

＜開発目標＞

- ✓ 66kV, 200MVA級の三心一括型超電導ケーブル
- ✓ 低損失化 : 交流損失1W/m/相@3kA
- ✓ コンパクト化 : φ150mm管路収容
- ✓ 事故電流対応 : 31.5kA, 2secでの健全性

＜検証項目＞

- ✓ 実系統への接続技術、システム構成検討
- ✓ 負荷変動への冷却システムの追従性
- ✓ 運転監視方法、保守方法の検証

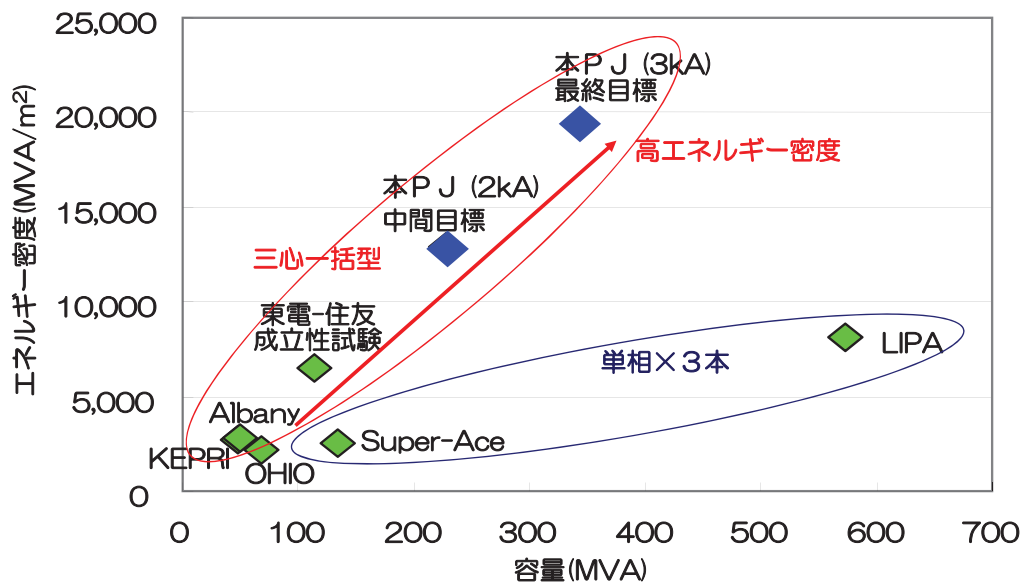


項目	中間目標 (H21年度末)	最終目標 (H25年度末)
(1)総合的な信頼性研究 ①高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 交流損失 : 1W/m/相 @2kA ✓ 事故電流対応 : 31.5kA, 2secでの健全性検証 ✓ 中間接続部の導体接続損失 : 1 μΩ / 相以下@2kA ✓ 30m事前検証試験の実施 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 交流損失 : 1W/m/相 @3kA ✓ 中間接続部の導体接続損失 1 μΩ / 相以下@3kA
②トータルシステム等の開発	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 実証試験場所の決定 ✓ 実証用冷却システムの設計 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 実証試験線路建設 ✓ 運転監視、運用・保守技術確立
③送電システム運転技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 実証ケーブルの系統特性調査 ✓ 平常時のシステム制御方法の決定 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 平常時/事故時、障害復旧時等の制御指針決定
④実系統における総合的な信頼性の実証	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 実証ケーブルの確認試験の検討 ✓ 超電導線材他の製造 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 実系統での12ヶ月の長期実証試験
(2)超電導ケーブルの適用技術標準化の研究	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 国際標準化項目の作成 ✓ 関連法規対応 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 超電導ケーブルの導入シナリオの策定 ✓ 国際規格化を進めるための実証試験データの収集・整理

▶ 実システム適用を念頭においての開発目標設定を実施

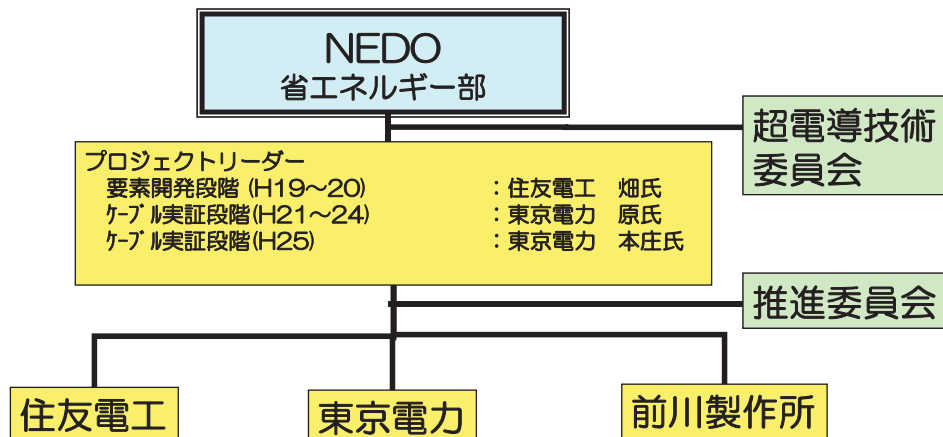
主な開発目標	根拠
最終目標値： 定格 66kV/3kA 容量 350MVA	既存275kVケーブルの代表的ケーブル容量350MVAを66kV超電導ケーブルで実現するために必要な目標値
中間目標値： 定格 66kV/2kA 容量 200MVA	66kV系統における代表的な送電容量 (154kV/66kV変圧器の2次側定格容量に相当)
交流損失： 1W/m/相	超電導ケーブルの冷却に必要なエネルギーを考慮しても、送電損失が既存ケーブルの1/2以下となる損失レベル
短絡電流： 31.5kA、2sec	66kV級遮断器に規定されている過電流レベル
ケーブルサイズ： φ150mm管路収容可能	66kV既存ケーブル用の代表的な管路サイズ
12ヶ月の実証試験	<ul style="list-style-type: none"> ・ 対環境性を考えた場合、四季を経験させる最小の期間 ・ 従来ケーブルにおける開発試験の期間は半年～1年 ・ 冷却システムのメンテナンス間隔の最低期間

▶ コンパクトな三心一括構造により、世界最高のエネルギー密度達成



国内外の主要超電導ケーブルPJのケーブル容量とエネルギー密度

項目	平成19年度	平成20年度	平成21年度	平成22年度	平成23年度	平成24年度	平成25年度
高温超電導ケーブルの重要技術の検証	高温超電導ケーブルの性能・機能検証 大電流接続部の性能・機能検証		機能検証				
	検証用ケーブルシステムの設計・構築		評価				
トータルシステム等の開発	実証ケーブルシステムの概念設計		線路建設手法の開発		実証ケーブルシステムの詳細設計		
					冷却システムの高性能化の研究		
					ケーブルの高性能化の研究		
送電システム運転技術の開発	高温超電導ケーブルの系統特性調査		高温超電導ケーブルの運転技術開発				
実系統における総合的な信頼性の検証	総合的な信頼性検証のための試験計画立案		実証ケーブルシステムの製造			実証試験	
超電導ケーブルの適用技術標準化の研究	高温超電導ケーブルの標準化研究		高温超電導ケーブルの運用技術研究				
	関連法規への対応						



住友電気	<ul style="list-style-type: none"> ✓プロジェクト総括 ✓超電導ケーブル・接続部の要素技術開発、設計、製造、工事
東京電力	<ul style="list-style-type: none"> ✓プロジェクトリーダー ✓実系統との接続検討、運転技術開発、法令対応
前川製作所	<ul style="list-style-type: none"> ✓冷却システム設計、製造、工事

推進委員会の構成および活動実績

【開催：年2回】

＜設置目的＞

外部有識者による評価・審議の実施、指摘事項のPJへの反映

＜委員長＞ 原氏 / 本庄氏（東京電力）

＜委員＞

雨宮教授（京大）、荒木教授（福井工大）、大久保/早川 教授（名大）、日高教授（東大）、淵野主研（産総研）、横山教授（東大）
大田/三浦 室長（関西電力）
岡本参事（電中研）、佐藤氏（住友）
川村氏（前川）

➤ 主な指摘事項およびPJへの反映状況

- ✓ 30m事前検証試験の充実
→ ヒートサイクル試験、限界性能試験を追加
- ✓ 長尺ケーブルでの過電流通過後の冷却特性検証
→ シミュレーション解析の追加
- ✓ 実証試験時、過電流通過後の健全性確認方法
→ 部分放電測定可否の追加検討

高性能冷凍機開発検討委員会の構成および活動実績

【開催：年2回】

＜設置目的＞

高性能・大容量のプレイトン冷凍機の開発

＜委員長＞ 原氏 / 本庄氏（東京電力）

＜委員＞

塚本教授（上智大）、大崎教授（東大）
勝田教授（早稲田大）、春山教授/槇田准教授（高エネルギー加速器研究機構）
淵野主研（産総研）
宗像副研究部門長（産総研）

➤ 主な指摘事項およびPJへの反映状況

- ✓ 旭実証冷却システムとの比較
→ 実証試験の課題を整理し、開発に反映
- ✓ 冷却システムとしての健全性の検証
→ 3週間の総合運転試験の実施
- ✓ プロジェクト成果の公開の充実
→ 国内外の学会等で発表

WGの活動実績

各社での検討結果を持ち寄り方針・対策決定するための専門家を含めた担当者会議

	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25
WG1（系統・実証試験関係）	9回	8回	6回	4回	33回	38回	41回
WG2（機器開発・検証関係）	10回	11回	6回	5回			
WG3（冷却システム関係）	6回	16回	13回	13回			

※H23年度以降は、旭変電所での実証運転に向けWG1～3を統合して実施。

(1) 事前の検証試験の充実

- ・ NEDO技術委員会、実証プロジェクト推進委員会からの指摘をうけ、事前の検証試験を充実することとした。
- ・ 具体的には、ヒートサイクル試験、限界性能試験を追加
- ・ 実施内容の追加により、全体計画を見直した結果、実証場所の工事停止期間のタイミングから系統連係開始がH23年11月となることが判明。
- ・ このため事業期間をH24年度まで延長。

(2) 東日本大震災への対応

- ・ 東日本大震災の被害の復興工事と電力需給逼迫の影響により、変電工事の一部と冷却システム検証試験の実施を遅らせる必要が生じた。
- このため、事業期間をH25年度まで1年間延長。

(3) プロジェクトリーダー (PL) の交代

- ・ 事業が要素技術開発からシステム検証の段階に移行するタイミングで材料からシステムへ開発の中心が移ると考えてH21年度にPLを住友電工・畑氏から東京電力・原氏へ交代。
- ・ 原氏が東電記念財団に出向し、PL業務の継続が難しくなりH25年6月に、東京電力・本庄氏へ交代。

(1) 冷却システムの評価や技術課題の明確化

「超電導ケーブルの実用化に向けたコスト削減、送電ロスのさらなる低減には、冷却システムの効率・能力の向上が重要なポイントである。冷却システムの評価や技術課題の明確化についての体制の強化が望まれる。」

- ・ 冷却システムの評価や技術課題の明確化を図るため、冷却システムの検証期間の拡大や間接冷却方式の課題抽出を追加。
- ・ プロジェクト推進のためのWGに冷却関係の専門家を追加。

(2) 標準化活動の強化

「単なる規格基準の国際標準化だけを目指すのではなく、技術そのものを世界標準とするための活動が望まれる」

- ・ IEEE、CIGRE など電力関係国際会議、ASC、EUCAS、ISS、ICECなどの超電導応用国際会議での情報発信をさらに積極的に実施。
- ・ CIGREにおける超電導ケーブル試験法に関するWGに日本委員として参加。

高温超電導ケーブル実証プロジェクト

プロジェクトの概要

「5.2 研究開発成果および実用化に向けての見通し及び
取り組みについて（公開）」

平成26年9月3日

東京電力株式会社
本庄 昇一

Ⅲ. 研究開発成果 目標の達成度と成果の意義

プロジェクト概要

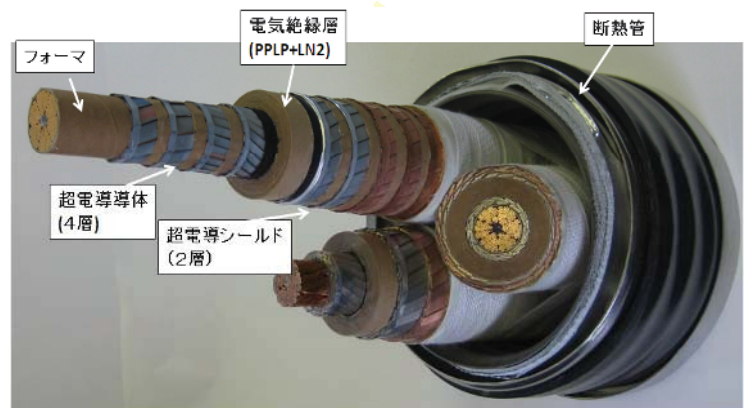
公開

Ⅲ p.1,23-28

2

- **概要** 要: **東京電力神奈川支店 旭変電所にて、**
高温超電導ケーブルシステムを実系統に連系した
実証試験を実施する。
- **スペック**: **66kV、200MVA級の三心一括型超電導ケーブル**
長さ約240m、ジョイント1箇所含む

- **研究期間**: 平成19～25年度
- **PL**: 本庄(東京電力(株))
- **体制**: 東京電力(株)
住友電気工業(株)
(株)前川製作所



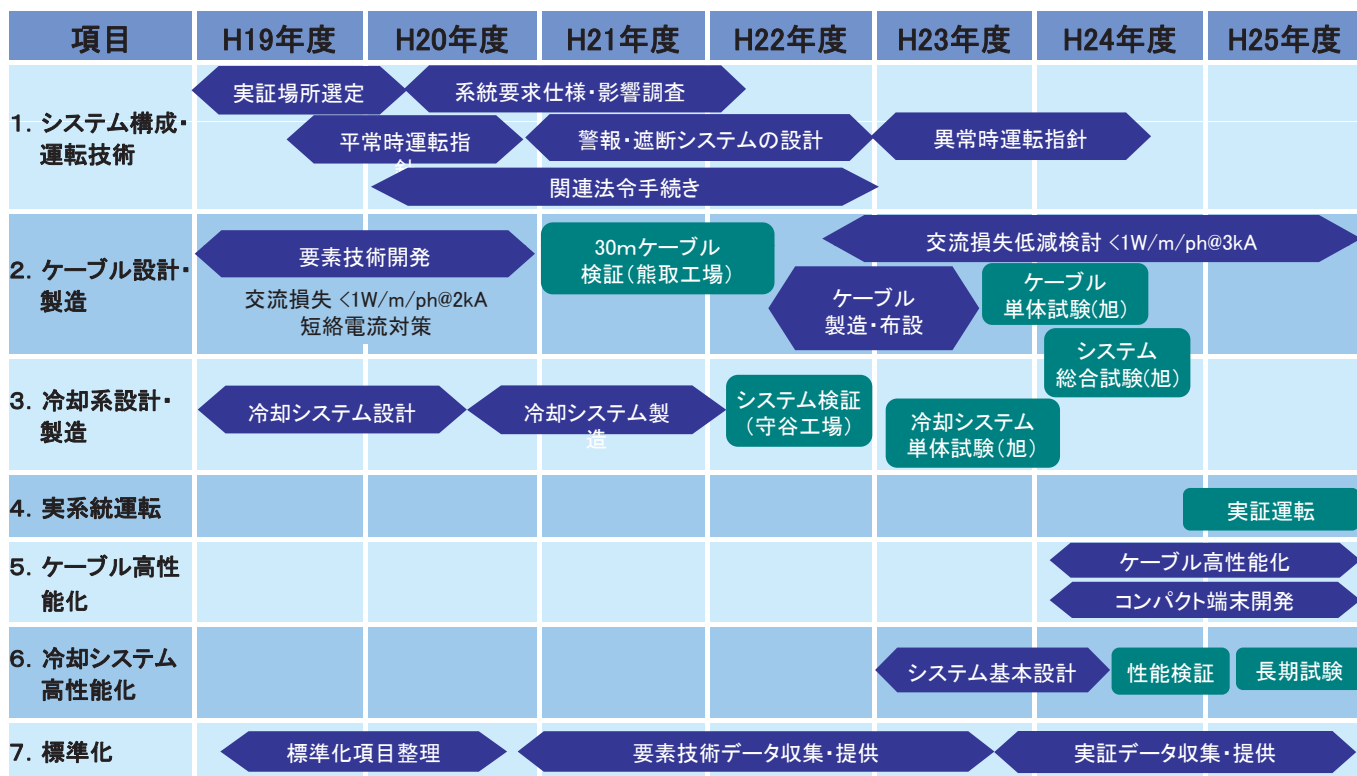
三心一括型超電導ケーブル

年度展開

公開

Ⅲ p.13-17

3



高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価分科会



目標の達成度

公開

Ⅲ p.13-17

4

研究目標	達成度
1. システム構成・運転技術	○ ○ ○ ○ ○
2. ケーブル設計・製造	○ ○ ○ ○ ○
3. 冷却系設計・製造	○ ○ ○ ○
4. 実系統運転	○ ○ ○
5. ケーブル高性能化	○
6. 冷却システム高性能化	○ ○
7. 国際標準化	○

達成度：◎大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価分科会

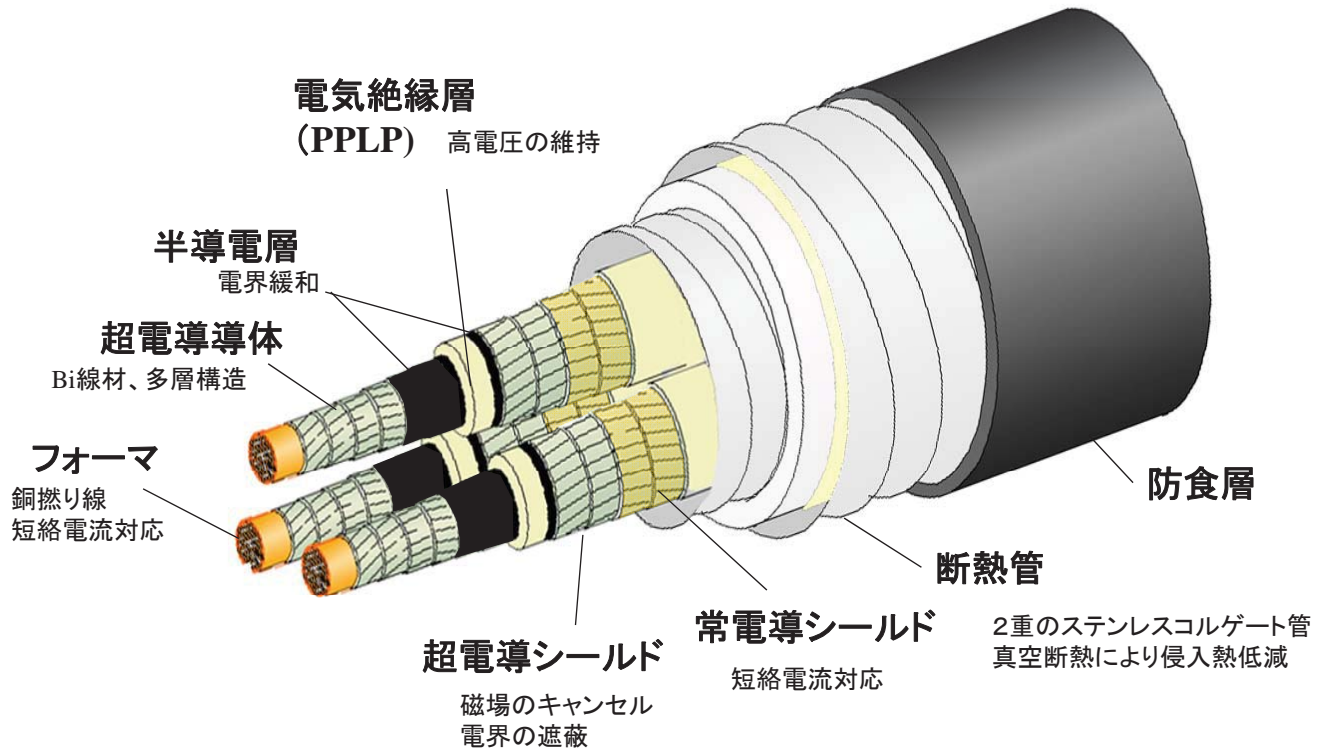


ケーブル構造

公開

Ⅱp.1,Ⅲp.1-4

5



高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価分科会

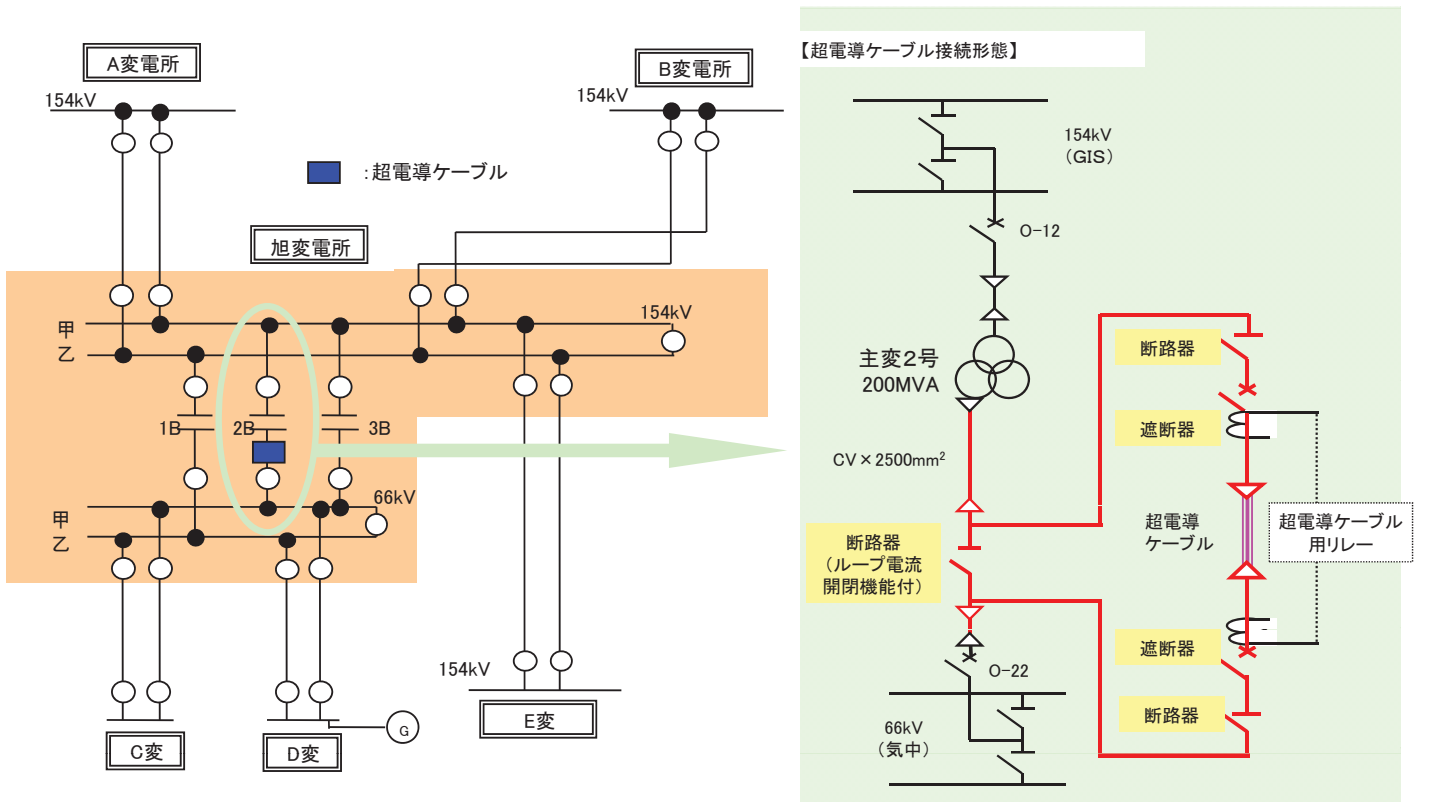


系統構成

公開

Ⅲp.130-138

6



高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価分科会



旭変電所現地状況

公開

Ⅲp.284-291

7



端末部



ジョイント部



超電導ケーブル布設状況



冷却システム

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価分科会



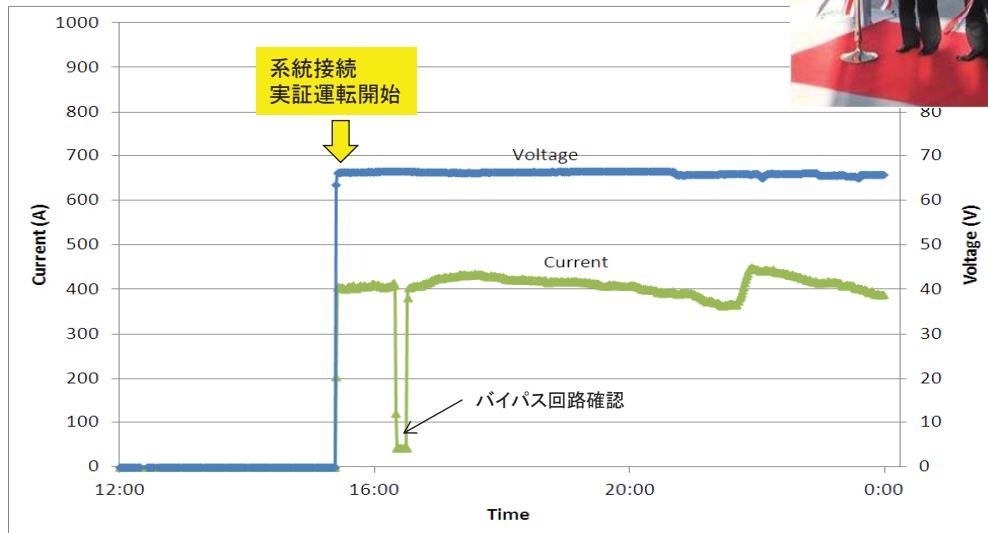
実系統運転開始時の状況

公開

Ⅲp.374-375

8

10/29: 国内初となる超電導ケーブルの実系統運転をスタート

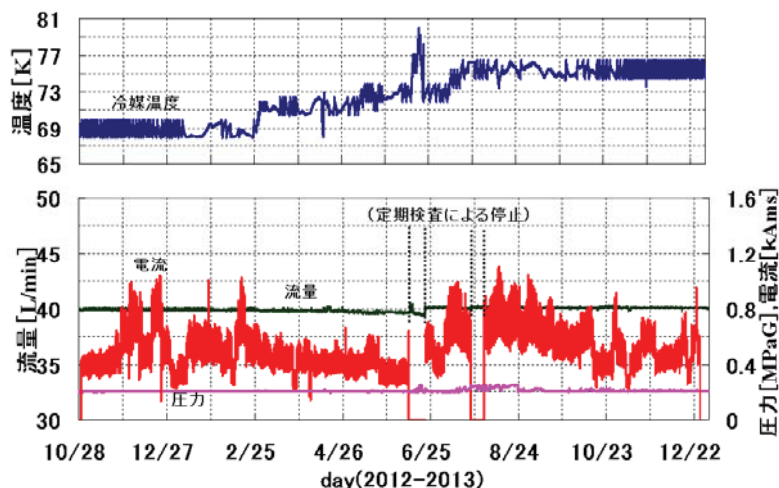


高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価分科会



▶ 高温超電導ケーブルの総合的な信頼性検証

→ 12ヶ月以上に及ぶ国内初となる実系統連系運転を達成。



実系統連系期間中の運転状況推移

- ✓ 運転・運用マニュアルを整備
- ✓ 年間を通じた安定運転
- ✓ 定期的な電気特性確認
- ✓ 冷却システムメンテナンス

知的財産権＜出願状況＞

	要素技術・製造技術	施工・運用技術	冷却システム	合計
特許出願	15	8	4	27

※本PJ推進のために、受託者費用で実施した関連研究に基づく特許出願を含む

研究発表数(論文・講演等)

項目	件数
論文(査読付き)	24
論文(その他)	64
研究発表・講演	18
プレス発表	54
受賞実績	3

見学対応(旭超電導設備)

件数	見学者数
総計 77	総数 738
(電力 12)	(82)
(海外 9)	(77)

プレス発表(成果の普及)

公開

付録6

11

- 当日来場メディア: 25社(30名)
- メディア掲載: 読売新聞、電気新聞他 計8記事
- テレビ放映: NHK首都圏ネットワーク TVKニュース



NEDO、東電など
超電導、国内発の連系
横浜市で実証開始

東電旭変電所
「超電導」で送電効率アップ
1年かけ初の実証実験

平成24年10月30日 平成24年10月30日
電気新聞1面 読売新聞33面

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価分科会



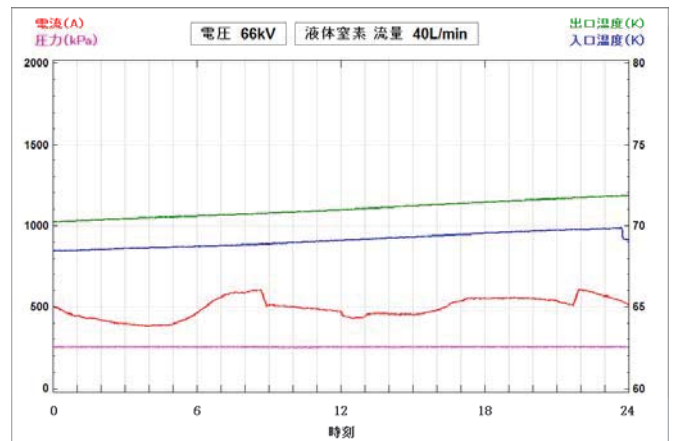
Webモニタリング(成果の普及)

公開

Ⅲ p.141

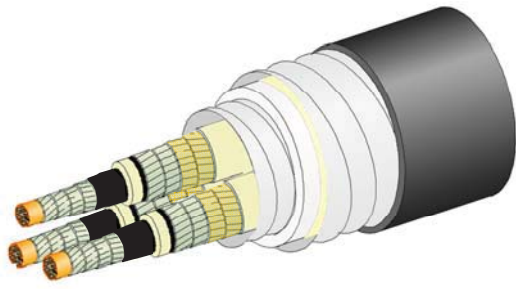
12

■住友電気工業(株)HPにて、超電導ケーブルの運転状況をWebにてご確認頂けるように、運転状況を公開 (<http://www.sei.co.jp/super/cable/jissho.html>)



高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価分科会





三心一括型高温超電導ケーブルシステム

海外展開

- ✓ 欧州において、環境意識の高まりから超電導ケーブルの適用技術が注目
- ✓ 海外大都市の地下送電に、コンパクト・大容量の超電導ケーブル適用の可能性あり

冷却システム

- ✓ 超電導電力機器の冷却技術として幅広く活用可能
- 冷却システム高性能化では、従来技術に比べ高水準となる冷却能力 5kW、COP=0.1 を達成

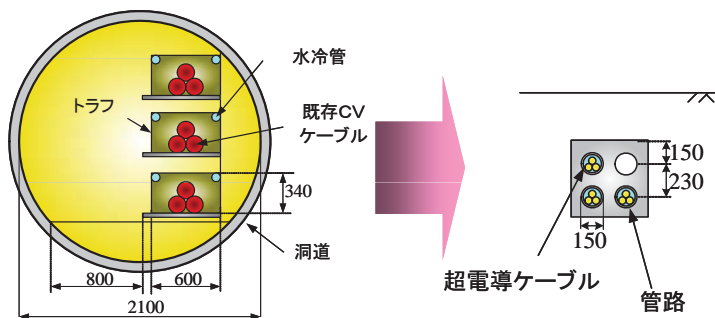
直流ケーブル応用

- ✓ 鉄道用き電線の直流送電への適用
- ✓ データセンターなど低電圧大電流の直流配電システムへの適用

66kV地中送電ケーブルへの導入効果検討

<都内導入系統>

- ✓ 洞道布設が必要な既存275kVケーブルの代替として、既存管路に収容可能な三心一括型超電導ケーブルを適用

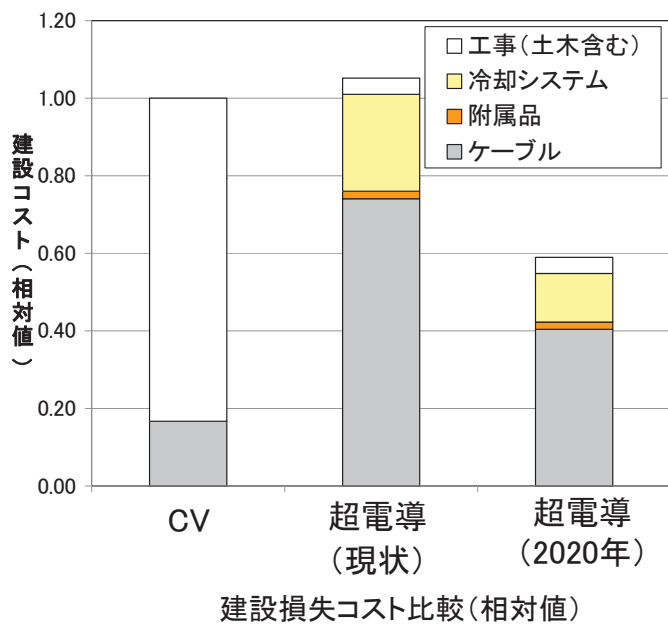


適用モデル

試算条件

項目	CVケーブル	超電導ケーブル
容量・回線数	350 MVA × 3回線	350MVA × 3回線
電圧、電流	275kV / 0.75kA	66kV × 3kA
回線長	10km	10km
布設形態	新設洞道	既設管路

建設コスト低減効果



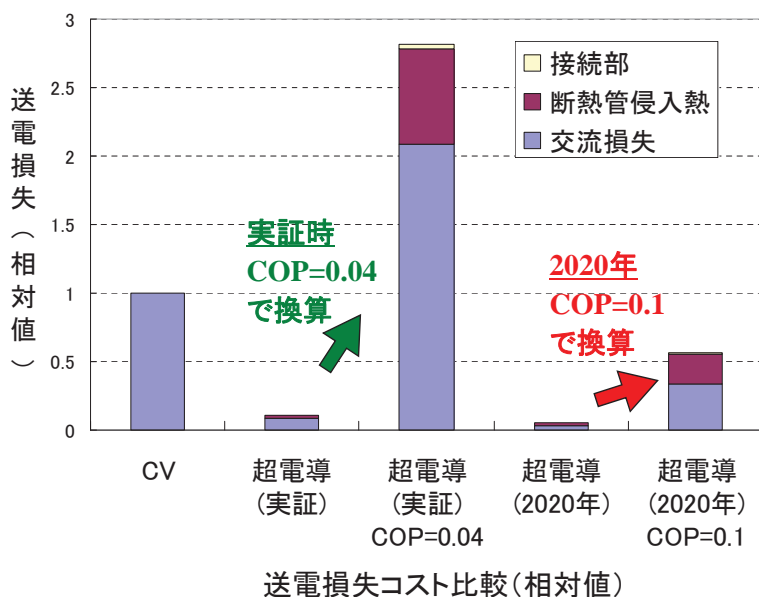
超電導ケーブル諸元

項目	単価(現状)	(2020年)
超電導線	10¥/Am	5¥/Am
ケーブル化	80k¥/m/相	
終端部	20M¥/基	
中間接続部	10M¥/箇所	
工事	50k¥/m	
冷却システム	30M¥/kW	15M¥/kW

常電導ケーブル諸元

項目	単価
275kV CV	200k¥/m/cct
洞道建設費	3M¥/m

送電損失低減効果



超電導ケーブル

項目	内訳(実証)	内訳(2020年)
ACロス	2.5W/m/相@3kA	1.0W/m/相@3kA
断熱管侵入熱	2.5W/m/回線	1.8W/m/回線
端末損失	700W/基	700W/基
小計	303kW	150kW
冷凍機COP	0.04	0.1
合計	7830kW	1572kW

実証試験の成果と実用化までの課題

公開

IV p.5-9

17

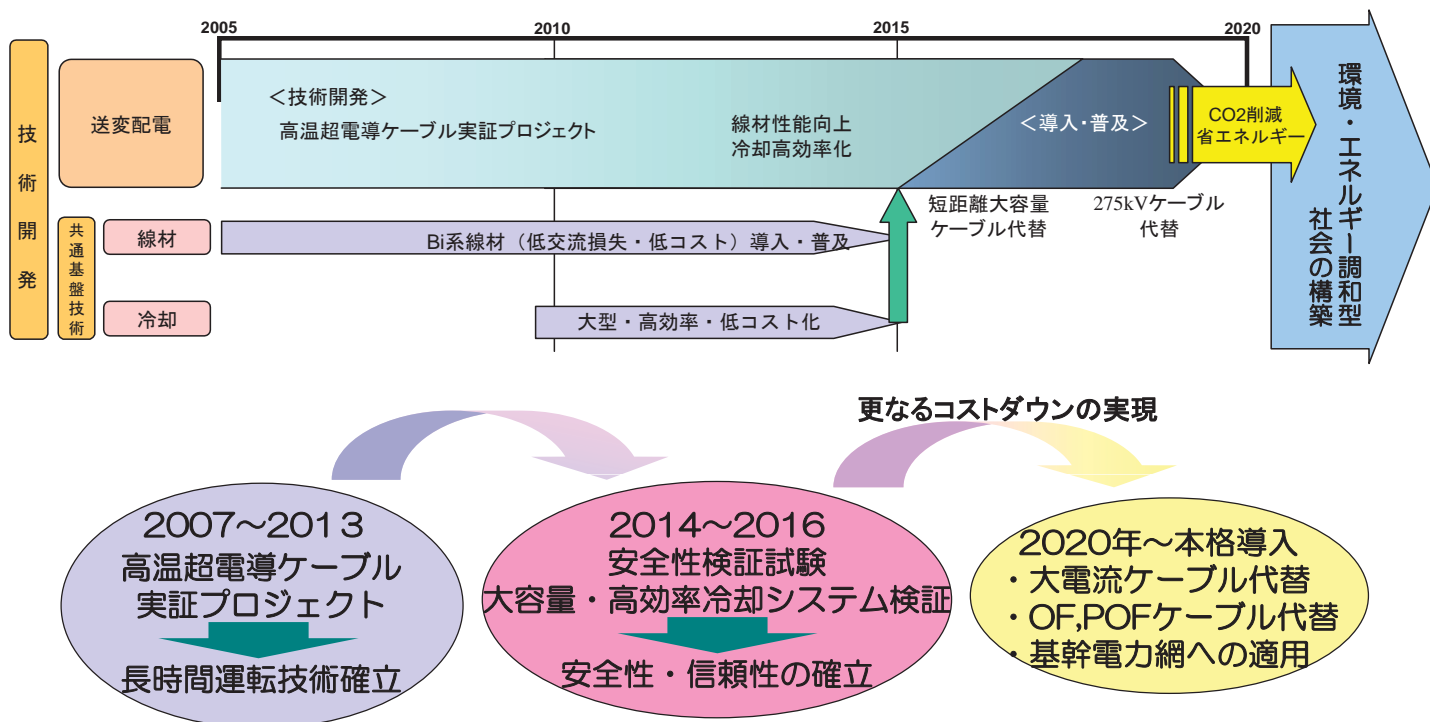
項目	本PJを通じた課題	今後の取り組み
事故時の安全対策	大きな事故電流、トラブルの経験が無く未検証	・モデル試験にて検証
低損失化	損失の更なる低減が必要	・真空度維持方法の検討 ・線材レベルでのACロス低減の検討
機器真空度の維持	真空度劣化により侵入熱増加	・真空度維持方法の検討
大電流ケーブルの開発	12kA級ケーブル・端末の基本設計に対し実機での検証が必要	・低損失化 ・ケーブル、機器を組み合わせた総合運転試験
高性能冷凍機の開発	効率の更なる改善が必要 冷凍機の長期間性能維持	・高効率化 ・実系統運転による長期性能検証

実用化・事業化の見通し

公開

IV p.6-9

18



「6.1-1. 実証システムの構成・運転技術」 (公開)

平成26年9月3日

東京電力株式会社
 本庄 昇一

6.1-1. 実証システムの構成・運転技術

公開

Ⅲ p.13-17

2

年度展開

項目	H19年度	H20年度	H21年度	H22年度	H23年度	H24年度	H25年度
1. システム構成・運転技術	実証場所選定		系統要求仕様・影響調査				
		平常時運転指	警報・遮断システムの設計		異常時運転指針		
			関連法令手続き				
2. ケーブル設計・製造	要素技術開発 交流損失 <1W/m/ph@2kA 短絡電流対策		30mケーブル 検証(熊取工場)	交流損失低減検討 <1W/m/ph@3kA			
				ケーブル 製造・布設	ケーブル 単体試験(旭)		
3. 冷却系設計・製造	冷却システム設計	冷却システム 製造		システム検証 (守谷工場)	冷却システム 単体試験(旭)	システム 総合試験(旭)	
4. 実系統運転							実証運転
5. ケーブル高性能化						ケーブル高性能化 コンパクト端末開発	
6. 冷却システム高性能化					システム基本設計	性能検証	長期試験
7. 標準化	標準化項目整理		要素技術データ収集・提供			実証データ収集・提供	

事業目標の達成度

事業目標(実施計画書)			達成度
項目	内容		
(a)実証ケーブルシステムの概念設計	実証ケーブルシステムの基本仕様	【1】実証場所の決定 【2】系統接続形態	○ ○
(d)高温超電導ケーブルの系統特性調査	系統特性調査	【3】実証場所での短絡電流の調査	○
	系統側への影響調査	【4】実証場所でのサージに対する影響調査	○
(c)実証システムの設計		【5】系統インピーダンスの変化及びその影響検討	○
(b)線路建設手法の開発		【6】運転・監視、保護・遮断システムの基本設計確立	○
(e)運転技術開発	平常時の運転技術開発	【7】実証場所での施工計画、レイアウト決定	○
		【8】運転制御に必要なパラメータの制御方針	○
	異常時の運転技術開発	【9】温度・圧力制御方法のまとめ	○
(f)法規対応		【10】異常時の故障モード分析と対応	○
		【11】警報項目、異常時の対応フロー策定	○
		【12】関連法規への対応整理	○

達成度：◎大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

主要成果 【1】実証場所の決定

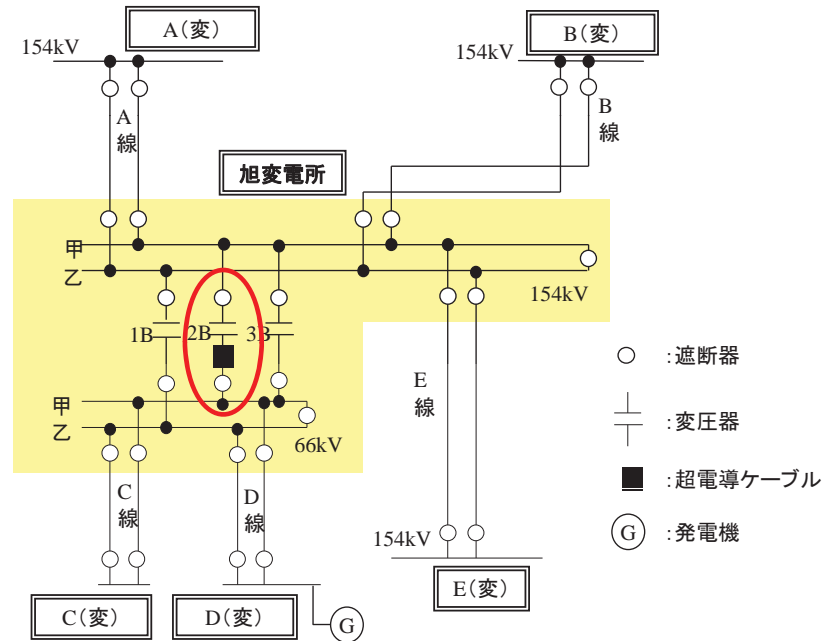
■東京電力管内の30数か所の候補地から、送電容量、建設スペース等を比較検討し、旭変電所(横浜市)に決定。



項目	簡所	
	X変電所	旭変電所
66kV設備の形態	GIS、超電導ケーブルでは接続が複雑化	△ 気中設備 ◎
用途区分	「第1種住居地域」	△ 「工業地域」 ◎
騒音区分	第1種(昼50,夜45dB以下)	△ 第4種(昼70,夜65dB以下) ◎
塩害区分	E地区	△ E地区 △
スペースの有無	空きスペースのほとんどは他用途で確保済み	△ 変電所端部の直線構内道路(100m)を試験用に占有可能。まとまった敷地を試験用に確保可能 ◎
その他制約	新規工事計画なし 試験設備のみの区画が困難	△ 新規工事計画なし 既設設備との区画が容易 ◎
総合評価	試験に利用できるスペースに制約あり	△ 試験用の空きスペース確保、区画化が可能 ◎

主要成果 【2】実証場所の接続形態

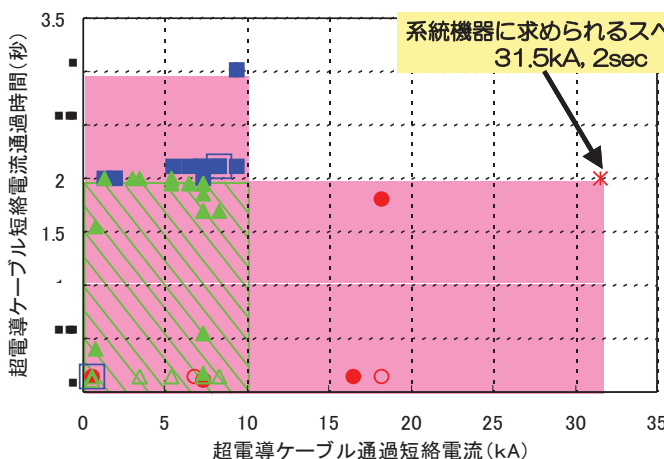
■ 旭変電所内の154kV/66kV、200MVAの2号変圧器2次側の66kV端に接続。



主要成果 【3】短絡電流条件の検討

旭変電所にて想定される事故ケース(17パターン)での電流値・継続時間を算出

	主保護Ry動作	後備保護 Ry動作	備考
超電導ケーブル直近事故 (バンク保護リレー保護範囲内)	○	●	事故直後課電通電「無」
もらい事故(事故電流通過) (バンク保護リレー保護範囲外)	□	■	事故直後課電通電「無」
	△	▲	事故直後課電通電「有」

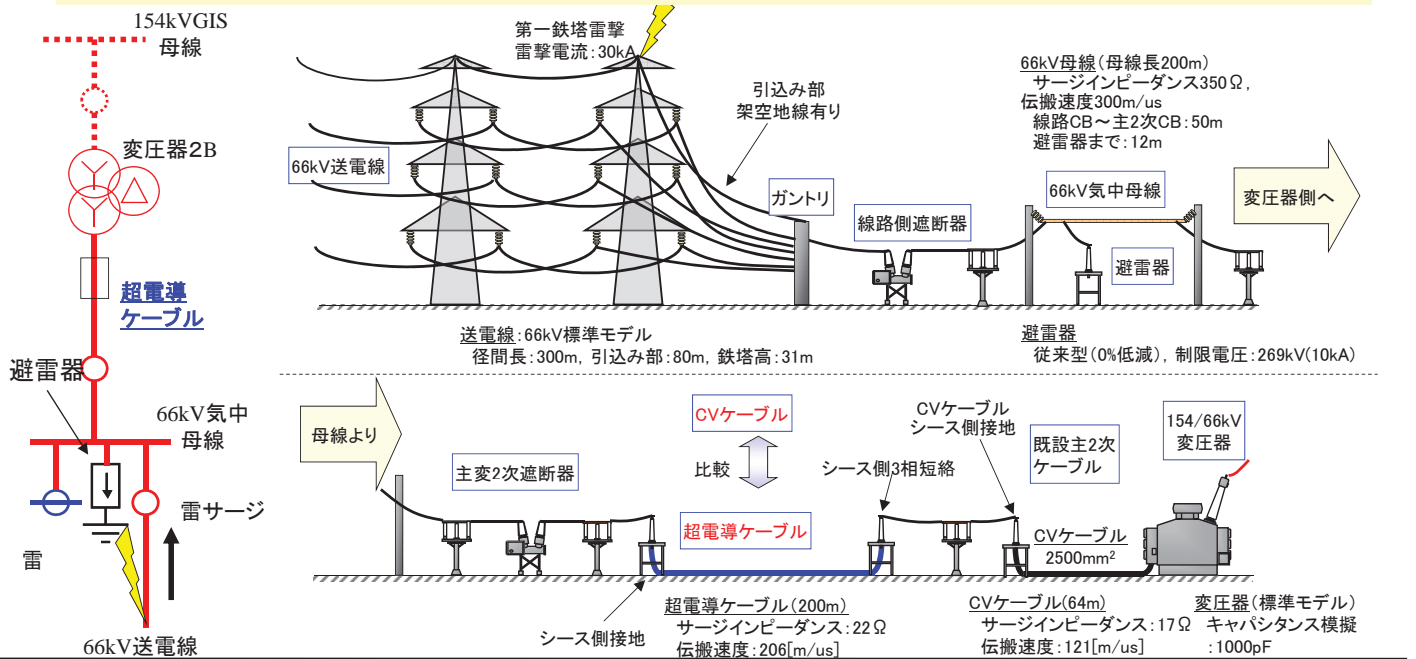


短絡試験条件
 ①事故直後課電無 : 0~31.5kA 2sec
 : 0~10kA 3sec
 ②事故後課電有 : 0~10kA 2sec
 (短絡電流直後の課電・送電への影響検討)

ケーブル設計へフィードバック

主要成果 【4】サージに対する影響調査

●雷サージ解析: 超電導の低インピーダンス特性がサージに与える影響及び試験電圧の検討をEMTP解析を用いて実施



高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価



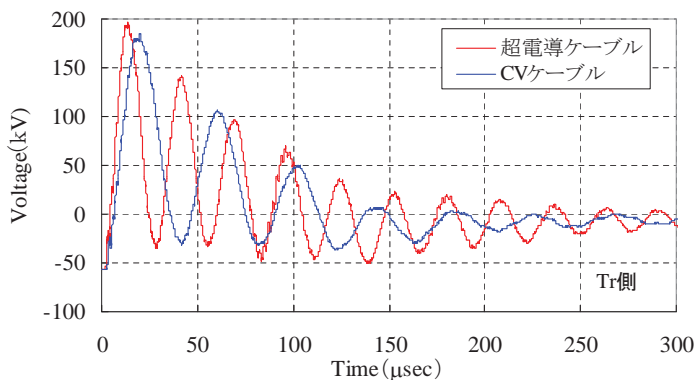
主要成果 【4】サージに対する影響調査

発生過電圧値はCVケーブルのケースと同レベル

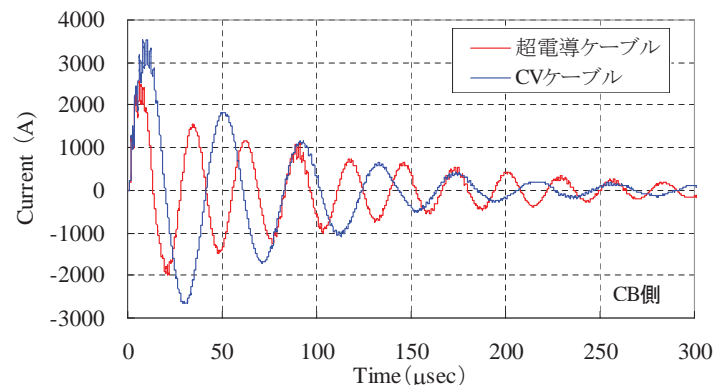
➡ 「超電導」の低抵抗特性は雷サージ伝搬特性に影響を与えないことが判明

旭変電所での発生過電圧196kV

➡ 従来ケーブル規格の雷インパルス耐電圧(LI WV) 350kVを超えない→試験法に反映



電圧波形



電流波形

雷サージ解析結果(解析条件: 第一鉄塔、シース片端接地、30kA雷撃)

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価



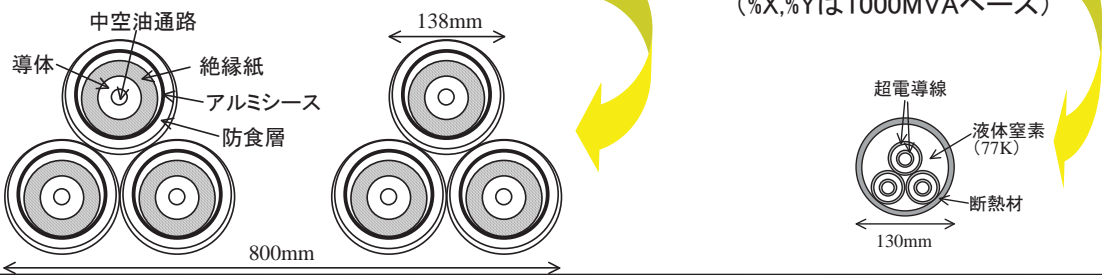
主要成果 【5】系統インピーダンスの変化とその影響

従来ケーブルに対する超電導ケーブルの特性

- 超電導シールド層の効果で、従来ケーブルよりリアクタンスが1桁以上小 → 系統安定度向上
- 同電圧の従来ケーブルと比較してSIL値が大きく、大容量送電向き

	電圧 V(V)	従来ケーブル		高温超電導ケーブル
		275kV(OF,CV)	66kVCV	
リアクタンス	X(Ω/km)	0.114	0.159	0.0165
	%X(%/km)	0.151	3.65	0.378
対地アドミタンス	Y(Ω ⁻¹ /km)	1.19 × 10 ⁻⁴	7.54 × 10 ⁻⁵	1.53 × 10 ⁻⁴
	%Y(%/km)	9.02 × 10 ⁻¹	3.28 × 10 ⁻²	6.65 × 10 ⁻²
サージインピーダンス ローディング(SIL)	SIL(MW)	2444	95	419

(%X,%Yは1000MVAベース)

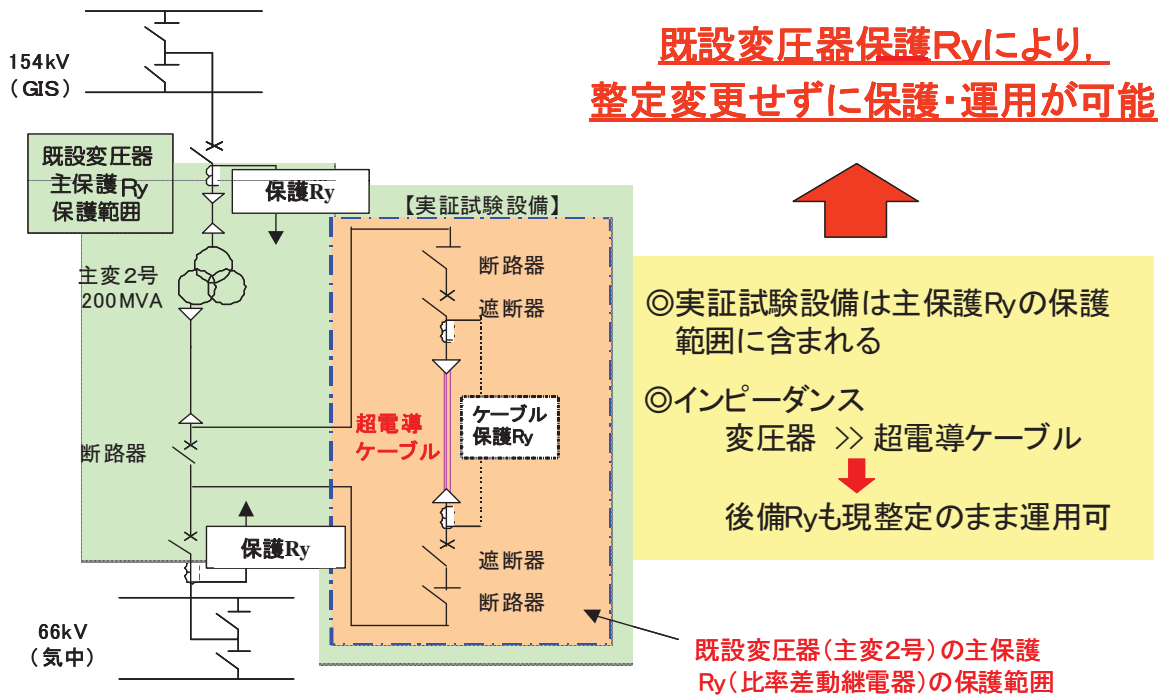


主要成果 【5】実証場所の系統要求仕様

項目	要求仕様
電圧階級	66kV(最高使用電圧72kV)
電流容量	1.75kA連続 (変圧器定格容量200MVA相当)
過負荷電流耐量	変圧器過負荷条件を満足(135%連続等)
短絡電流耐量	・31.5kA-2sec, 10kA-3secでケーブルにダメージなし (短絡電流通過後の課電通電なし)
	・10kA-2sec通過後の定格課電・通電が可能なこと。 (短絡電流通過後の課電通電あり)
	・短絡電流通電後の復帰時間明確化 (短絡電流通過後の課電通電あり・なしの双方で)
雷インパルス耐電圧	±350kV

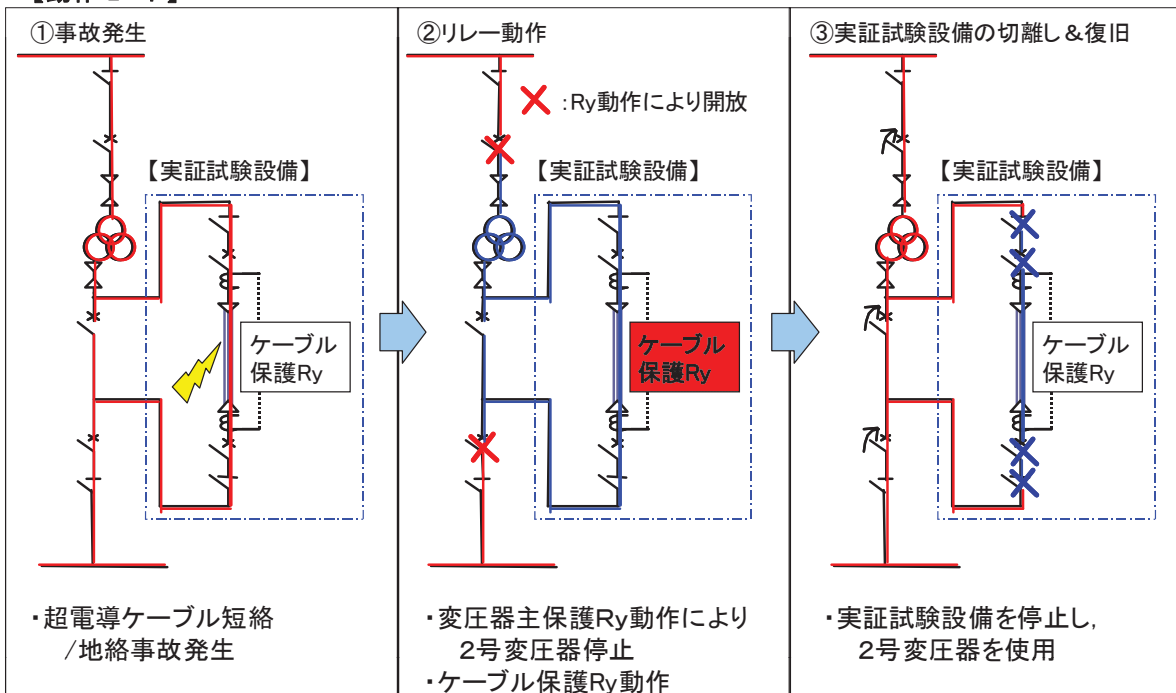
→ ケーブル設計へ反映

主要成果 【6】保護・遮断システムの検討

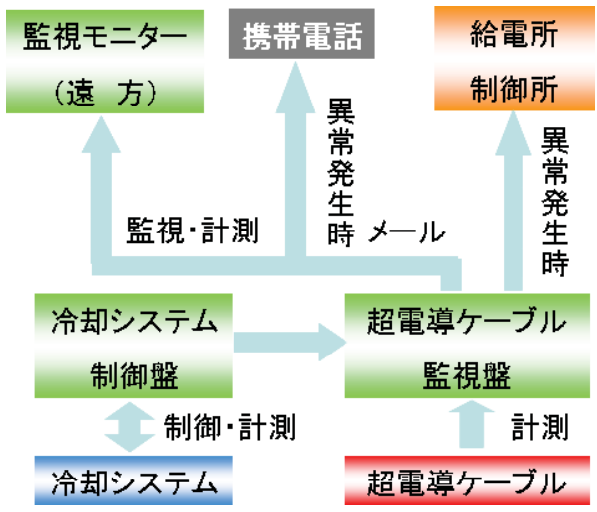


主要成果 【6】保護・遮断システムの検討

【動作モード】



主要成果 【6】警報・監視システムの基本設計



警報・監視システムの概念図

○「無人運転」を指向した警報・監視システムの設計を実施

- 警報項目を軽故障・重故障に分類。
- 全ての警報情報は関係者にメール送信され、初期対応が可能な体制とした。
- 重故障の場合、給電所に送信され1時間以内にバイパス回路に切り替え。
→ 東電社内で、給電箇所等を交えた「運用マニュアル(社外秘)」を作成。

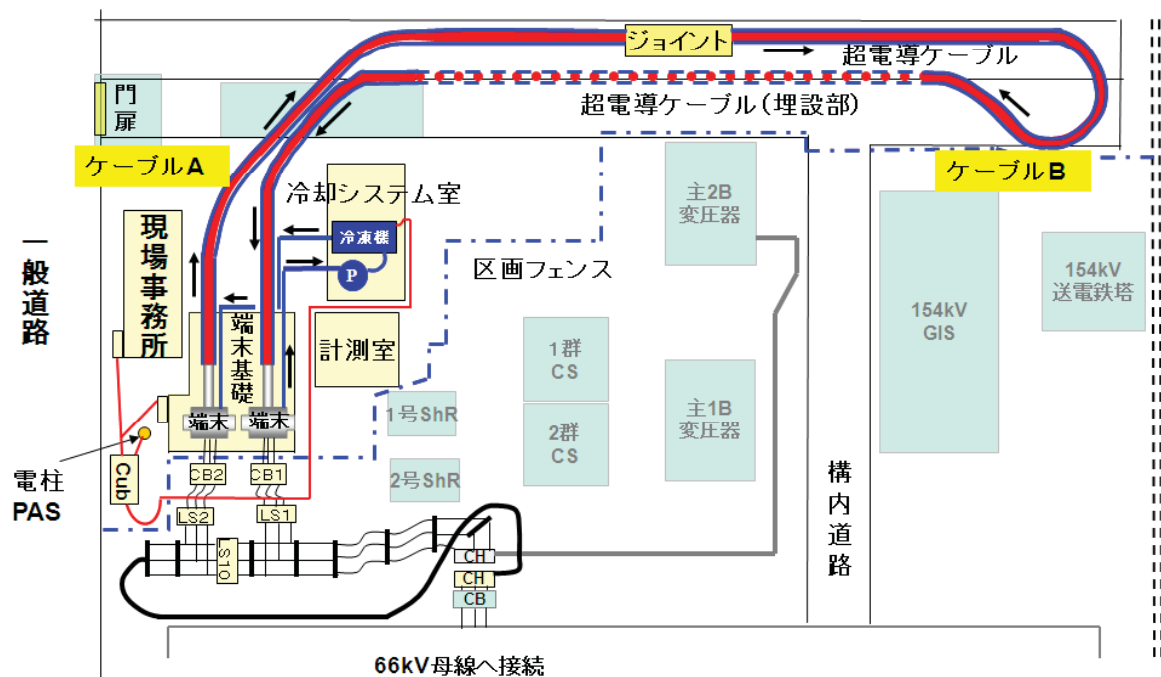
主要成果 【7】実証場所での施工計画決定

東日本大震災発生

項目	平成21年度				平成22年度				平成23年度				平成24年度				平成25年度			
	2Q	3Q	4Q		1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
設計(建築・土木・変電)	■																			
現地整備(整地・基礎・上下水・電話)					■															
冷却建屋・工事事務所建設					■															
開閉器基礎・超電導端末基礎・門扉									■											
開閉器据付・試験													■							
電源盤搬入・冷却システム組立													■							
冷却システム単体試験													■							
管路布設・超電導ケーブル布設・ 端末・ジョイント据付施工									■											
超電導ケーブル用リレー設置・試験																	■			
冷却配管敷設工事・初期冷却																	■			
ケーブル単体試験・システム総合試験																	■			
CVケーブル・架線布設工事																	■			
盤回収工事・シーケンス																	■			
給電対向試験・使用前自主検査																	■			
実系統連系試験																	■			
最終試験・冷却システム停止・昇温																				

※震災後、一部の試験を延期し冷却システム試験を拡充

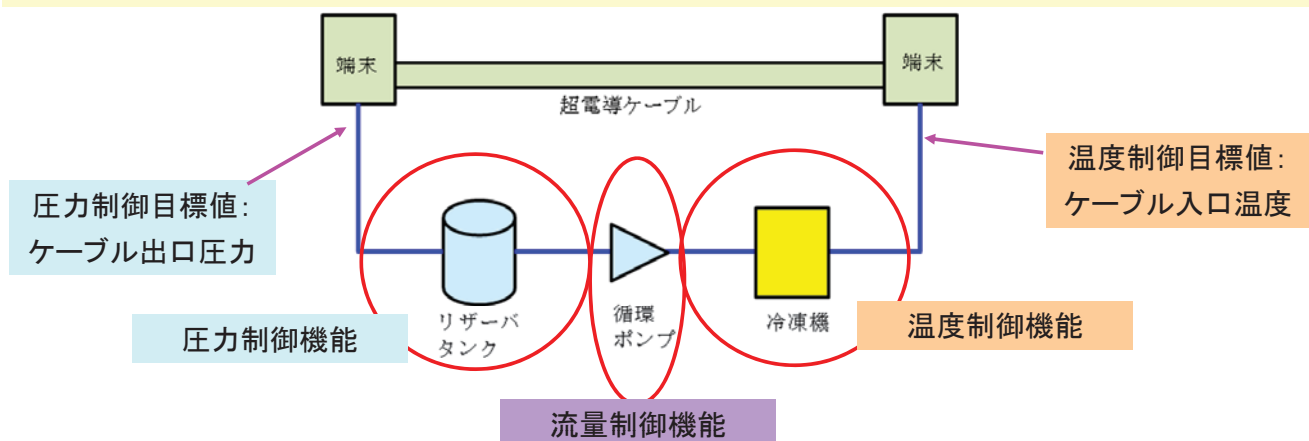
主要成果 【7】実証システムレイアウト



主要成果 【8】主要(冷却系)パラメータの制御方針

■ 平常時の運転技術として、主要パラメータに対する制御方針を検討

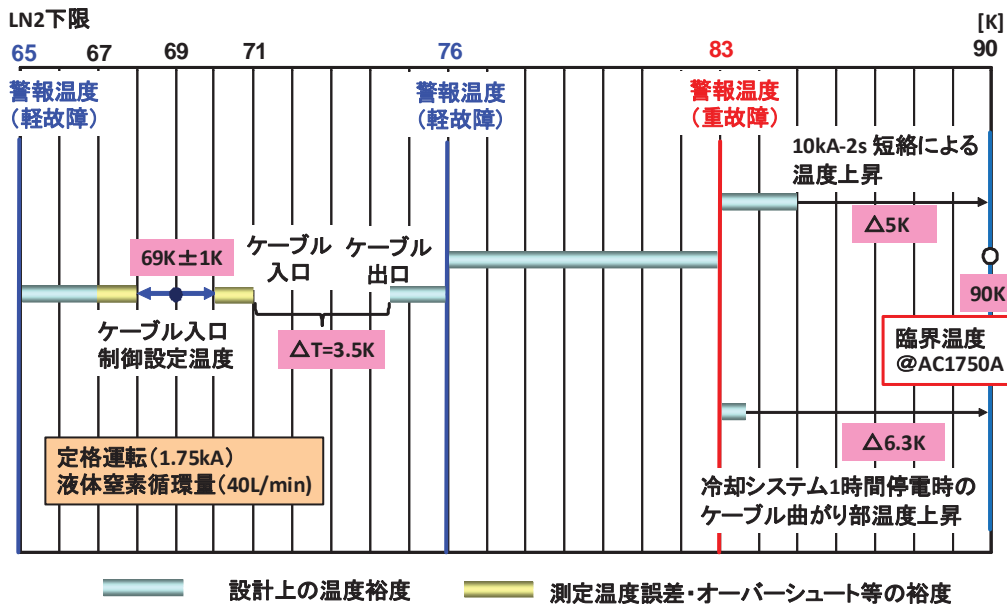
- <温度> 冷凍機の運転台数制御
- <圧力> リザーバタンク(ケーブル出口圧力)の圧力制御
- <流量> 循環ポンプの出力調整



主要成果 【9】温度制御方法の検討

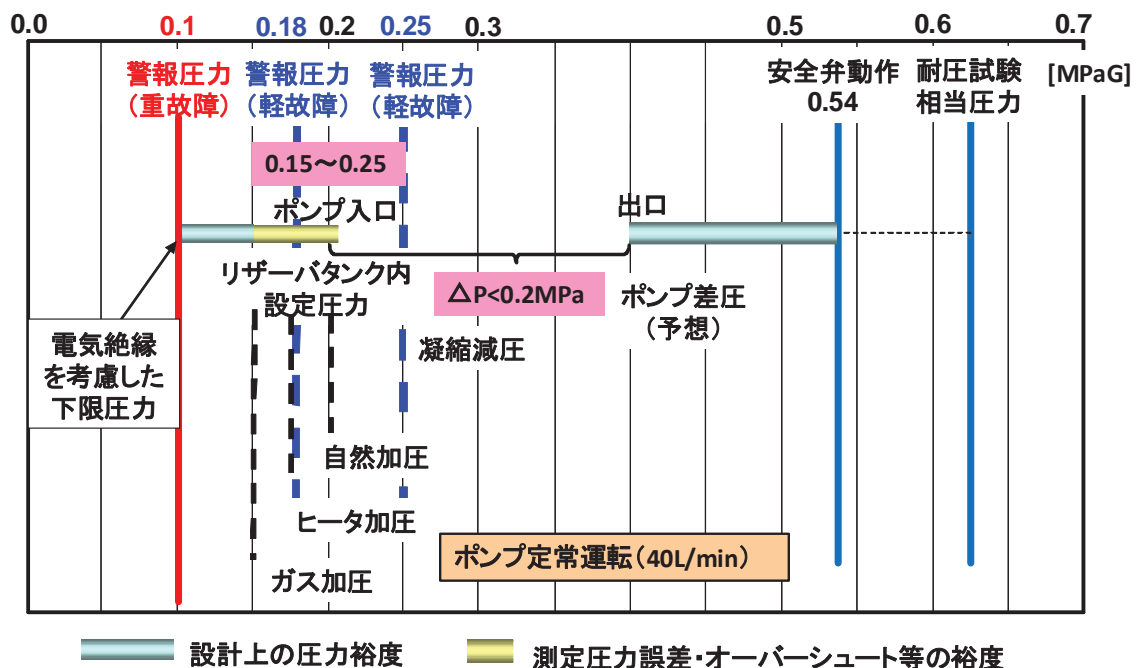
実証システムの運転温度・警報設定範囲

[制御方式: 冷凍機運転台数制御 (ON/OFF 運転)、制御対象: ケーブル入口温度]



主要成果 【9】圧力制御方法の検討

実証システムの運転圧力・警報設定範囲



主要成果 【10】事故時の故障モード分析

分類	機器	故障原因例	故障の結果生じる事象
超電導ケーブル	ケーブル断熱管・端末・中間接続部	機械的リーク, 溶接不具合	真空悪化→侵入熱増大→温度上昇, 圧力上昇
機器・配管・容器	冷凍機	コールドヘッド凍結防止用ヒータ異常(断線)	冷凍機停止
	液体窒素循環ポンプ	短絡, 地絡	液体窒素循環ポンプ停止
	極低温バルブ	シール劣化	真空悪化→侵入熱増大→温度上昇, 圧力上昇
	真空断熱配管		
	リザーバタンク		
計測器	質量流量計	ピックアップコイル断線	データ表示不能
	圧力計	ひずみゲージ断線	圧力制御不能
	温度計	断線, 温度計素子故障	温度制御不能
	液面計	断線, 変換器故障	液面不明
制御機器(制御盤)	コントローラ(温度, 圧力)	コントローラCPU・I/O不調	冷凍機停止, 圧力制御不能
	圧力制御用ヒータ	ヒータ断線	圧力制御不能
	リレー(冷凍機ヒータ用)	電源過電流	冷凍機停止
電源関係	UPS	制御系故障	停電時の制御系停止
冷凍機冷却用循環水	冷却塔, 循環水ポンプ	過電流	冷却水温度上昇→冷凍機停止

主要成果 【11】警報設定項目及び異常時の対応

■超電導ケーブル送電からバイパス送電へと切替が実施される故障を、「重故障」と設定。

実証システムの重故障警報項目

分類	重故障警報項目	判断条件
設定閾値上限or下限	✓LN2温度 上昇	温度センサ13点(83K以上)中、2点が成立
	✓LN2温度 低下	圧力センサ4点(0.1MPa以下)中、2点が成立
	✓LN2リザーバタンク液面低下	リザーバタンク内の液面計2点(15%以下)、温度センサ1点(85K以上)の計3点中、2点が成立
機器故障	✓LN2循環ポンプ 2台故障	ポンプA故障、ポンプB故障、流量30L/m以下の3点中、2点が成立
電源喪失 制御・監視不能	✓制御・動力電源喪失	制御・動力電源が5分喪失
	✓超電導ケーブル監視盤異常	通信・警報不能
	✓冷却システム監視盤異常	通信・制御不能
非常停止	✓冷却システム非常停止	非常停止ボタンが発動
故障検出	✓超電導ケーブル故障検出用リレー動作	超電導ケーブル内で短絡・地絡事故発生
	✓超電導ケーブル故障検出用リレー異常	装置異常

主要成果 【12】法規対応

■主要適用法令の整理

電気事業法での適用を関係省庁に確認

(経済産業省原子力安全・保安院関東東北産業保安監督部(当時))

→高圧ガス保安法では取り扱わない。ただし、技術的基準は準拠する。

■電気設備基準への対応

【省令7条】電線の接続では、電線の電気抵抗を増加させないように接続する必要あり。

超電導ケーブル接続における以下の技術要件を保安監督部に説明し了解を得る。

・技術要件

- (1)常温では、ケーブル部より電気抵抗が大きくない。
- (2)冷却状態では、接続部の電気抵抗が銅導体より小さい。
- (3)十分な冷媒流路を確保することで、局所的な異常発熱を防止する。
- (4)十分な冷却が確保できない恐れがあるときは、超電導ケーブルを系統から切り離す。

■その他

建築基準法、道路法、騒音・振動規制法、消防法などに照らし合わせて、建設、運用を実施

「6.1-2 高温超電導ケーブルの設計・構築 ①重要要素技術の検証」 (公開)

平成26年9月3日

住友電気工業株式会社
増田 孝人

6.1-2 ①重要要素技術の検証

公開

Ⅲ p.13-17

2

年度展開

項目	H19年度	H20年度	H21年度	H22年度	H23年度	H24年度	H25年度
1. システム構成・ 運転技術	実証場所選定	系統要求仕様・影響調査	警報・遮断システムの設計 平常時運転指針 関連法令手続き	異常時運転指針			
2. ケーブル設計・ 製造	要素技術開発 交流損失 <1W/m/ph@2kA 短絡電流対策	30mケーブル 検証(熊取工場)		交流損失低減検討 <1W/m/ph@3kA ケーブル製造・布設	ケーブル 単体試験(旭)		
3. 冷却系設計・ 製造	冷却システム設計	冷却システム 製造	システム検証 (守谷工場)	冷却システム 単体試験(旭)	システム 総合試験(旭)		
4. 実系統運転							実証運転
5. ケーブル高性能 化						ケーブル高性能化 コンパクト端末開発	
6. 冷却システム 高性能化					システム基本設計	性能検証	長期試験
7. 標準化	標準化項目整理		要素技術データ収集・提供			実証データ収集・提供	

開発目標

●基本計画：高温超電導ケーブルの重要要素に関して実系統に適用しうる所定の性能、機能を有し、送電システムが構築できることをモデルシステムによって検証する。

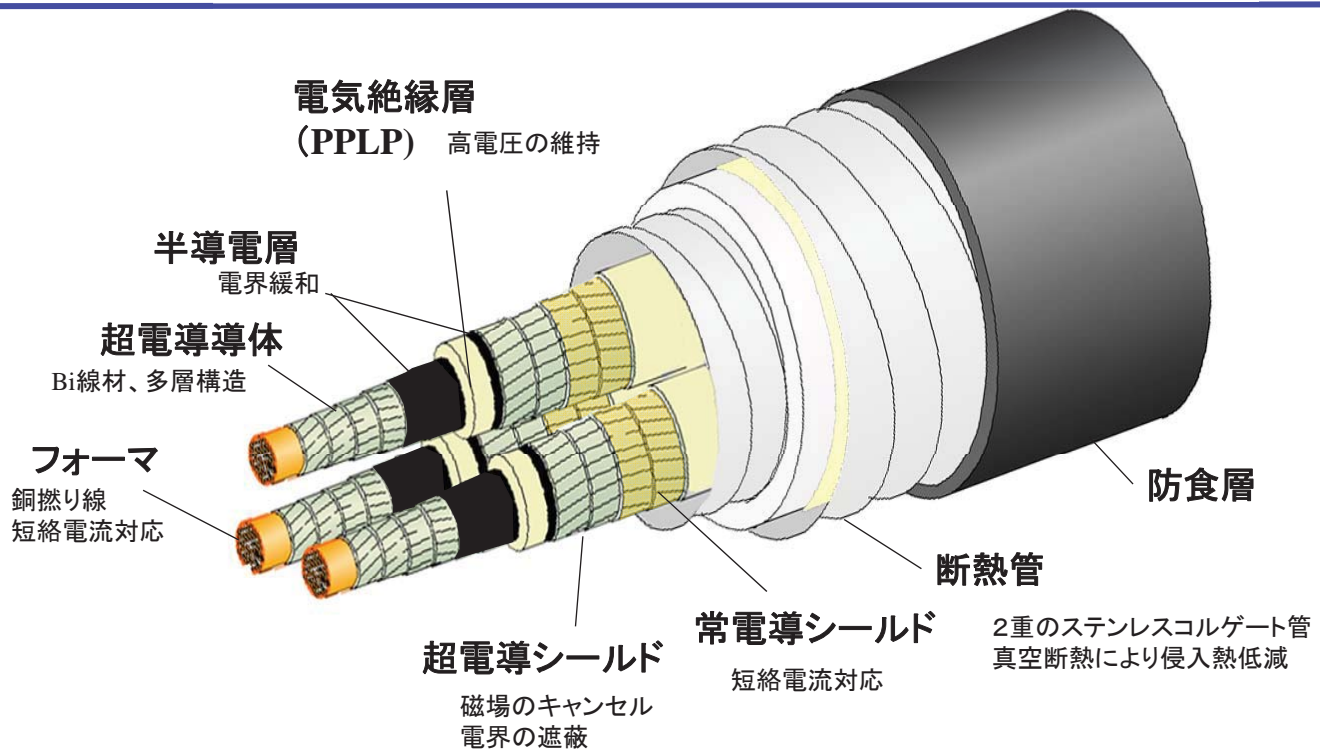
項目		開発目標	達成度
要素技術 開発	(a) 低交流損失化	【1】<1 W/m/ph @ 2kA (中間) <1W/m/ph @ 3kA(最終)	○ ○
	(b) 対短絡電流	【2】31.5kA @ 2secでダメージなし 【3】10kA@2sec通過後、定格課通電可	○ ○
	(c) 接続部の接続抵抗	【4】<1 $\mu\Omega$ /箇所 @ 3kA	○
システム	(d) 30m検証用システムの構築	【5】30m級ケーブルの設計、製造 【6】接続部の設計、製造 【7】検証システム建設	○ ○ ○
	(e) 30m検証用システムの評価	【8】定格性能の検証 【9】ヒートサイクルの影響確認 【10】限界性能の確認	○ ○ ○

達成度：◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

研究開発目標の根拠・意義

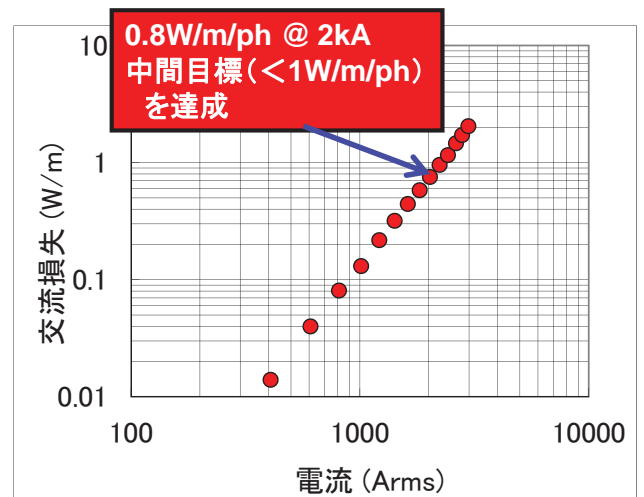
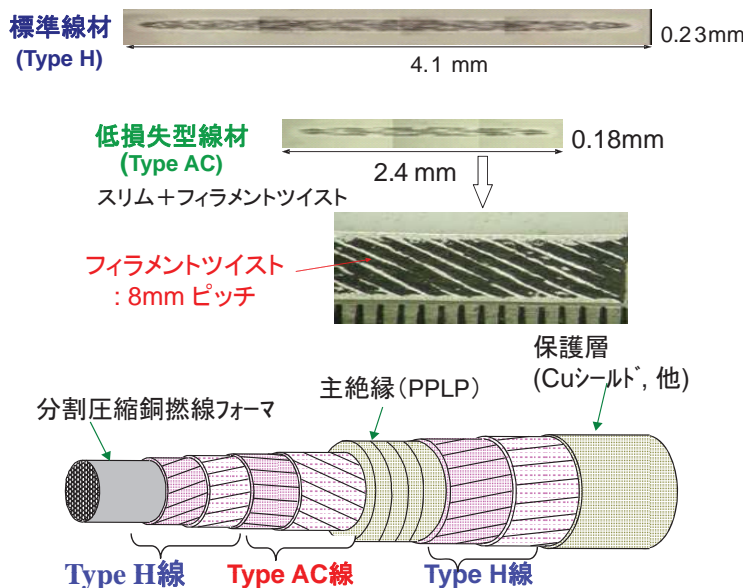
主な開発目標	根拠
最終目標値： 定格 66kV/3kA 容量 350MVA	既存275kVケーブルの代表的ケーブル容量350MVAを66kV超電導ケーブルで実現するために必要な目標値
中間目標値： 定格 66kV/2kA 容量 200MVA	66kV系統における代表的な送電容量 (154kV/66kV変圧器の2次側定格容量に相当)
交流損失： 1W/m/相	超電導ケーブルの冷却に必要なエネルギーを考慮しても、送電損失が既存ケーブルの1/2以下となる損失レベル
短絡電流： 31.5kA、2sec	66kV級遮断器に規定されている過電流レベル
1年間の実証試験	<ul style="list-style-type: none"> ・対環境性を考えた場合、四季を経験させる最小の期間 ・従来ケーブルにおける開発試験の期間は半年～1年 ・冷却システムのメンテナンス間隔の最低期間

三心一括型超電導ケーブル構造



主要成果 【1】低交流損失化(1)

低損失線材と標準線材を組合わせて使うケーブル導体構造を開発

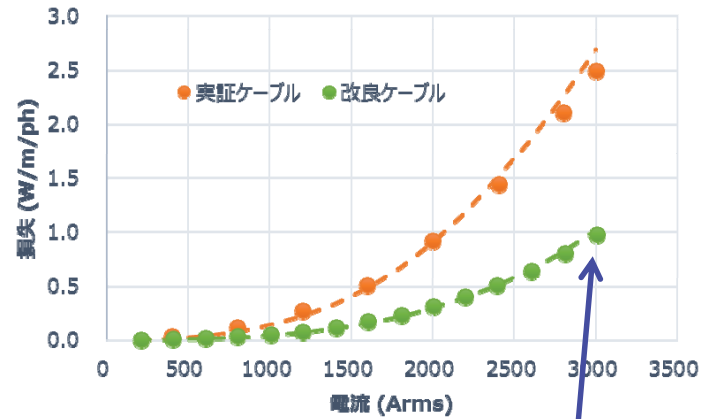


主要成果 【1】低交流損失化(2)

導体構造・サイズの見直しと線材特性の向上で1W/m/ph@3kA達成

層	諸元
フォーム	フォーム + クッション層
超電導導体層	4層構造 Type AC線使用
絶縁層	主絶縁 PPLP 6mm厚 (<7mm)
超電導シールド層	2層構造 Type H線使用
保護層	銅シールド、クラフト紙、不織布

	線材Ic (A)	
	H22	H24
AC線	75	85
標準線	175	200



2m級サンプル
大気圧液体窒素下で測定

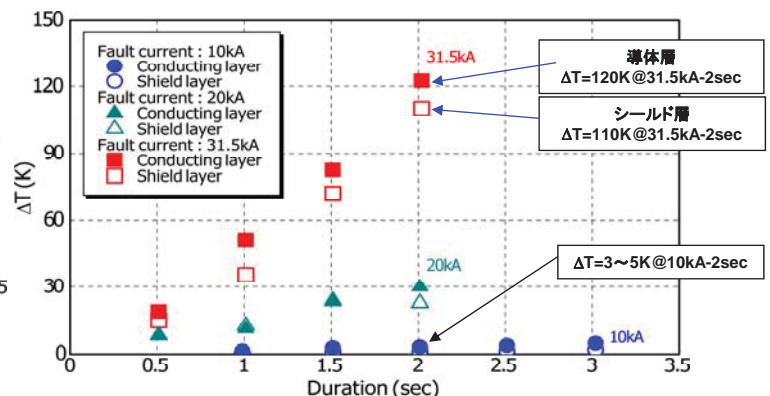
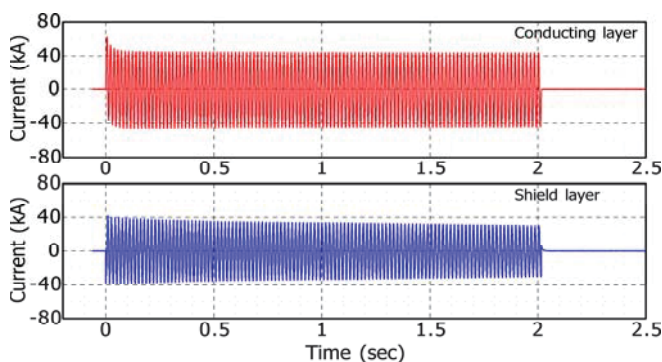
最終目標
1 W/m/ph @ 3kA達成

超電導ケーブル実証プロジェクト中間評価



主要成果 【2】短絡電流対応(31.5kA)

最大短絡電流 31.5kA、2secにおいて、ケーブルにダメージがないことを確認



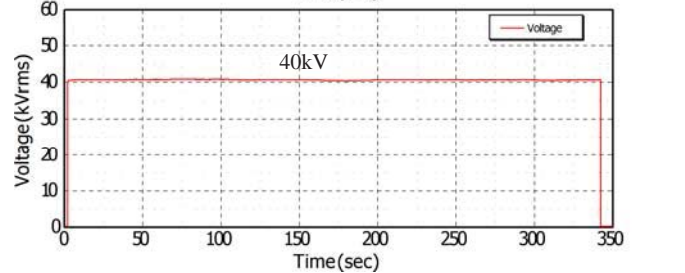
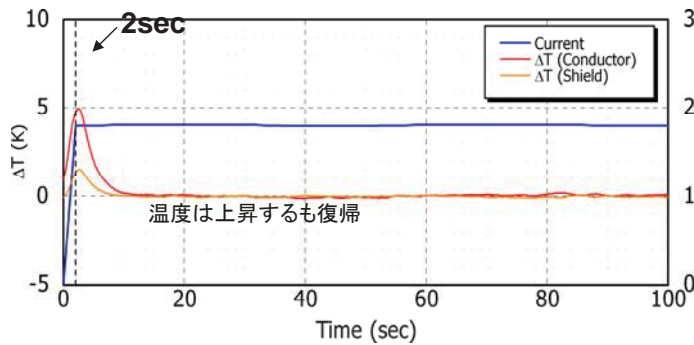
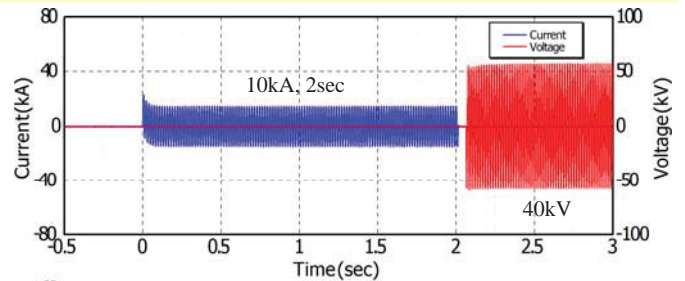
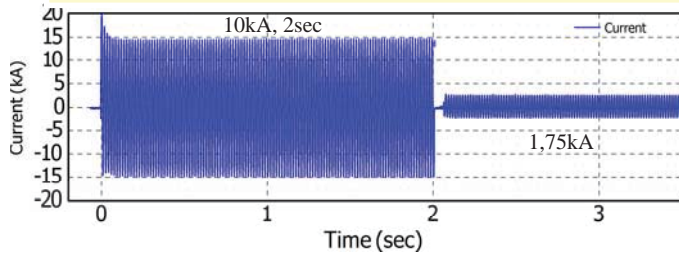
Ic 特性 : 短絡試験前後(最大31.5kA/2sec)で
Ic特性に変化なし →ダメージなしを確認

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価



主要成果 【3】短絡電流対応 もらい事故通電試験

もらい事故時の最大短絡電流 10 kA、2secにおいて、短絡電流通過後直後の定格課電・通電可能



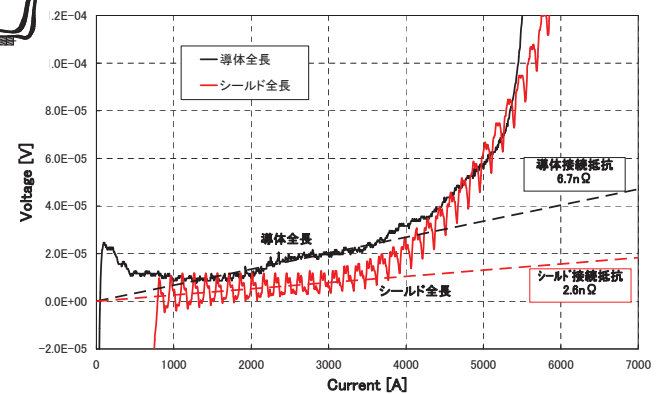
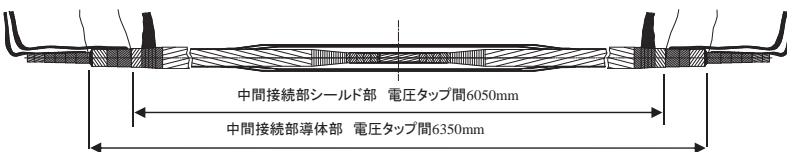
高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価



主要成果 【4】中間接続部の接続抵抗

中間接続部において、接続抵抗が $< 1 \mu\Omega$ /箇所であることを確認

導体・シールド接続部のDC抵抗測定結果



測定箇所	接続抵抗/相
HTS導体ブリッジ部	6.7nΩ
HTSシールドブリッジ部	2.6 nΩ

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価



主要成果 【5】検証用30mケーブル(設計)

項目	設計諸元	補足
フォーマ	素絶分割集合導体 (140mm ²)	短絡試験結果より選定
HTS導体	4層(線材:HT/HT/ACT/ACT) 素線のIc総和: 約6100A	設計交流損失 0.5W/m/ph @ 2kArms
主絶縁	PPLP-7mm厚	(6mm厚でスペッククリア) 今回は実績と裕度を考え7mm厚を採用
HTSシールド	2層(線材:HT/HT) 設計Ic: 約7000A	設計交流損失 0.3W/m/ph @ 2kArms
保護層	Cuシールド(80mm ²)、保護紙&布テープ	Cuシールドは短絡試験結果より決定
三心コア	撚りピッチ: 約1200mm	従来実績準拠(ケーブル試作で確認済)
断熱管	SUSコルゲート二重管	東電-住友100mと同等構造を採用
防食層	PVC-3.5mm厚	従来ケーブル規格準拠

※3心コアのうち 2心:超電導コア、1心:ダミーコア(絶縁厚6mm)

主要成果 【7】検証システムの構築



HTSケーブル



ジョイント部



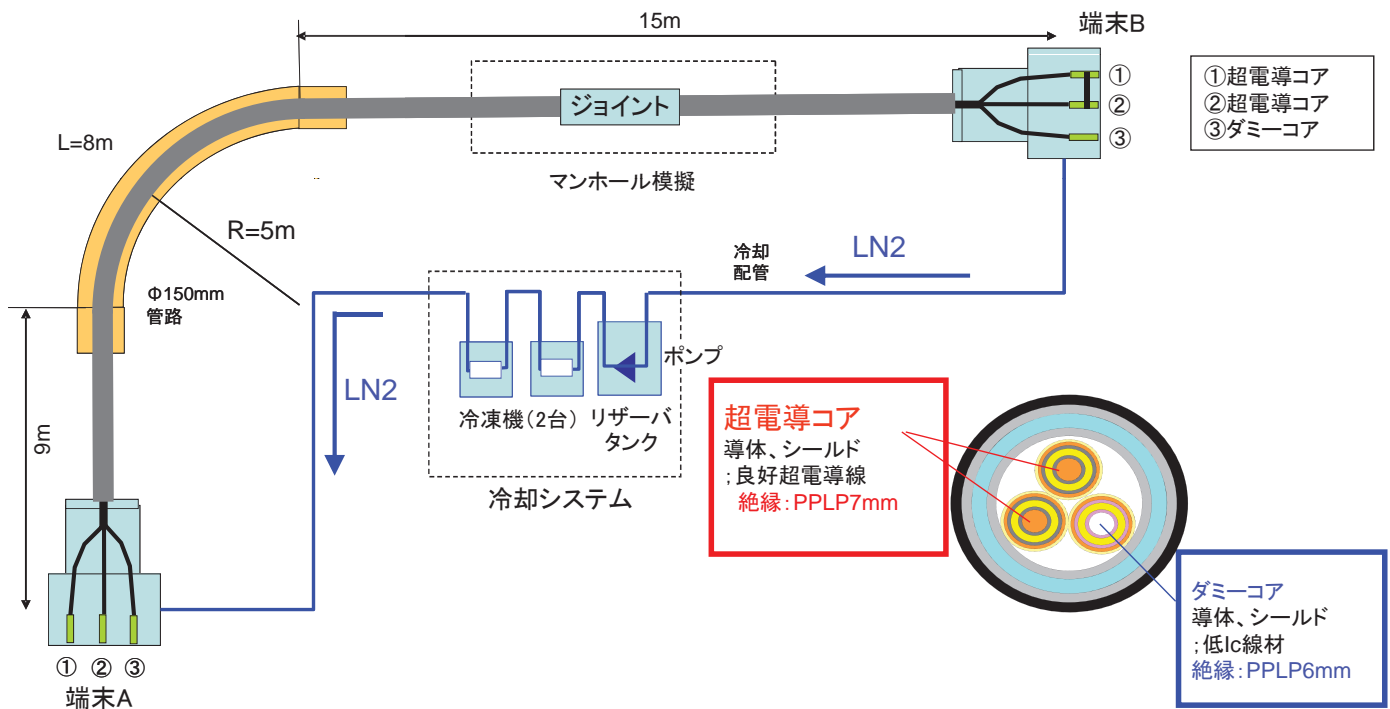
端末部



冷却システム室

中間目標達成

主要成果 【7】検証システムの構築



主要成果 【8】【9】【10】検証用システムの評価

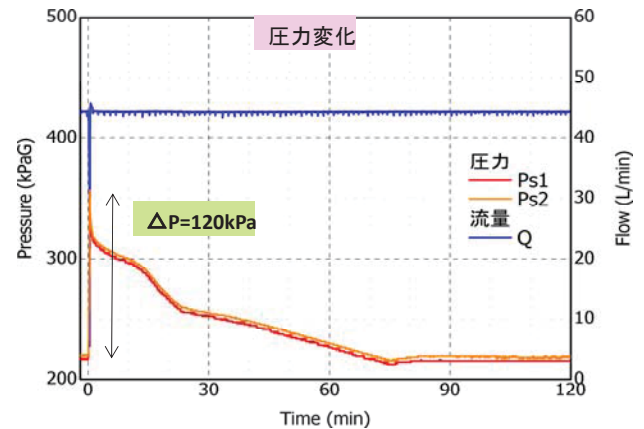
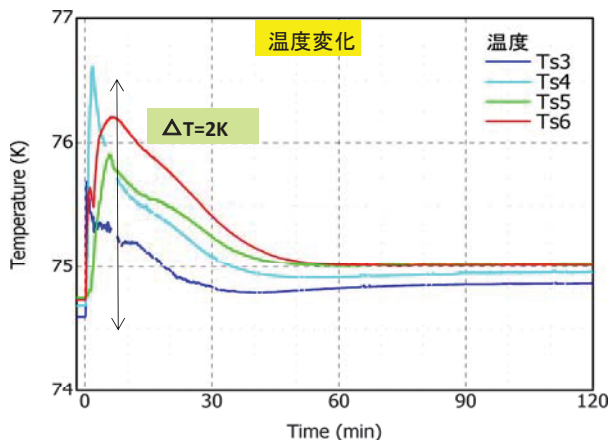
設計した超電導ケーブル含む各機器の送電システムとしての機能確認

試験項目・内容	結果	判定	
電気特性	Ic測定	Ic測定: 導体6kA(導体部)	設計通り
	課電試験	対地AC 76kV@10分間、対地DC -152kV@10分間	良好
	長期課通電試験	対地AC51kV、2kA(8H-on、16H-off)、1ヶ月間(30年相当)	良好
機械特性	張力測定	冷却時のケーブル張力 最大 3ton(@端末端)	許容値以下
熱的特性	熱損失	ケーブル熱損失 140~180W @ 0A, 180~220W@1.75kA	設計通り
ヒートサイクル試験		室温⇔LN2温度の繰り返し(4回)により、Ic、課電特性、張力などに大きな変化なし	良好
限界性能試験	過負荷試験	過負荷 2.75kA @ 8 時間実施 (旭変電所での過負荷条件)	良好
	短絡電流模擬試験	10kAの短絡電流模擬試験を実施(旭変電所での短絡条件 20kA-2sec相当以上のエネルギー投入条件で試験)	残存性能 評価良好
	冷却システム停止試験	①冷凍機 OFF、ポンプ ON @ 1.75kA 3時間実施 ②冷凍機 OFF、ポンプ OFF @ 1.75kA 2時間実施	残存性能 評価良好

主要成果 【10】限界性能試験(短絡電流試験)

10kA/18secの短絡電流(20kA/2sec以上)に耐える性能を確認

- ・20kA/2secは旭変電所で予想される最大短絡電流
- ・液体窒素温度上昇最大 $\Delta T=2K$ 、圧量上昇最大 $\Delta P=120kPa$
- ・ケーブルシステムにダメージなし。残存性能良好
- ・温度、圧力の復帰時間は60～80分。

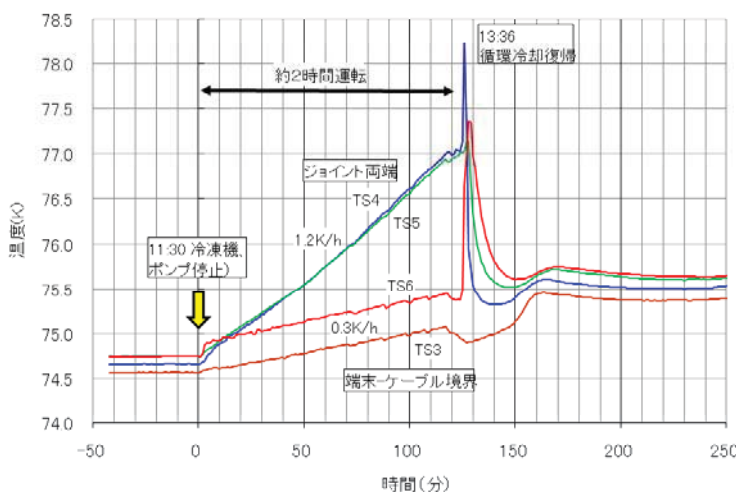


高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価



主要成果 【10】限界性能試験(冷凍機故障模擬試験)

冷凍機、ポンプが停止した状態でも、定格1.75kA通電で2時間以上の運転を確認



ケーブル・端末(Ts3,Ts6)は計算値とよく一致。
 ⇒ ほぼ計算通りの温度上昇をしていると推定

- ・ケーブル曲り部の温度上昇は、6K/h
 $74.5K+12K=86.5K$ まで上昇したと推定
 →1750A時の臨界温度付近

各部の温度上昇率 計算値

ジョイント両端(Ts4,Ts5)	0.7K/h
ケーブル-端末境界(Ts3,Ts6)	0.3K/h
ケーブル直線部	2 K/h
ケーブル曲り部	6K/h

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価



成果のまとめ

	項目	開発成果	達成度
要素技術 開発	(a) 低交流損失化	交流損失 <1W/m/ph @ 3kAを短尺ケーブルにて確認	○
	(b) 対短絡電流	66kV規格である、31.5kA @ 2secでダメージなし 現地もらい事故時の最悪条件10kA@2secにて、直後の 定格課通電が可能であることを確認	○
	(c) 接続部の接続 抵抗	接続抵抗<1 $\mu\Omega$ /箇所 @ 3kAを確認	○
システム	(d) 30m検証用シ ステムの構築	事前検証用の30m級ケーブルシステムの設計、製造、 構築を実施	○
	(e) 30m検証用シ ステムの評価	所定の通電特性、長期課電特性を有することを確認ヒート サイクル試験、過電流試験、冷凍機停止試験にて、運 用上問題ないことを確認	○

「6.1-2 高温超電導ケーブルの設計・構築 ②実証用ケーブルシステムの構築」 (公開)

平成26年9月3日

住友電気工業株式会社
増田 孝人

年度展開

項目	H19年度	H20年度	H21年度	H22年度	H23年度	H24年度	H25年度
1. システム構成・ 運転技術	実証場所選定	系統要求仕様・影響調査	警報・遮断システムの設計	異常時運転指針			
2. ケーブル設計・ 製造	要素技術開発 交流損失<1W/m/ph@2kA 短絡電流対策	30mケーブル 検証(熊取工場)	ケーブル 製造・布設	交流損失低減検討<1W/m/ph@3kA	ケーブル 単体試験(旭)	システム 総合試験(旭)	
3. 冷却系設計・ 製造	冷却システム設計	冷却システム 製造	システム検証 (守谷工場)	冷却システム 単体試験(旭)			
4. 実系統運転							実証運転
5. ケーブル高性 能化						ケーブル高性能化 コンパクト端末開発	
6. 冷却システム 高性能化					システム基本設計	性能検証	長期試験
7. 標準化	標準化項目整理	要素技術データ収集・提供				実証データ収集・提供	

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価



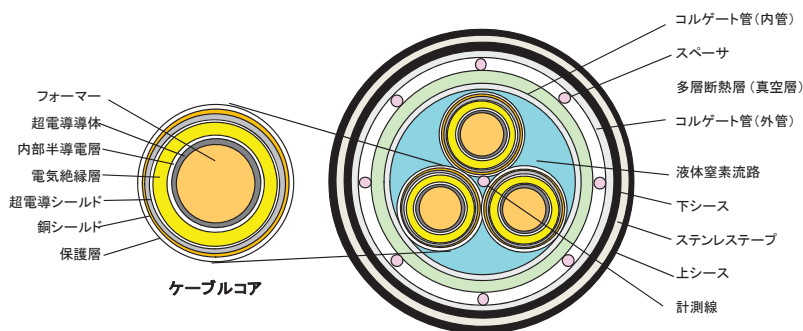
開発目標

項目	開発目標	達成度	
実証用ケー ブルシステ ムの製造	ケーブル・ 機器の製 造	【1】実証用ケーブルの設計、製造 【2】ケーブル出荷試験の合格 【3】ジョイント、端末の設計及び出荷検査の合格	○ ○ ○
	現地布設、 組立	【4】ケーブルにダメージのない現地布設の実施 【5】端末、ジョイントの組立施工の完工	○ ○
	系統接続 前試験	【6】実系統接続前の試験項目の確定 【7】初期冷却にて、ケーブルにダメージがないこと 【8】所定の通電特性を有することの確認 【9】所定の電圧を良好に印加できることの確認 部分放電がないことの確認	○ ○ ○ ○

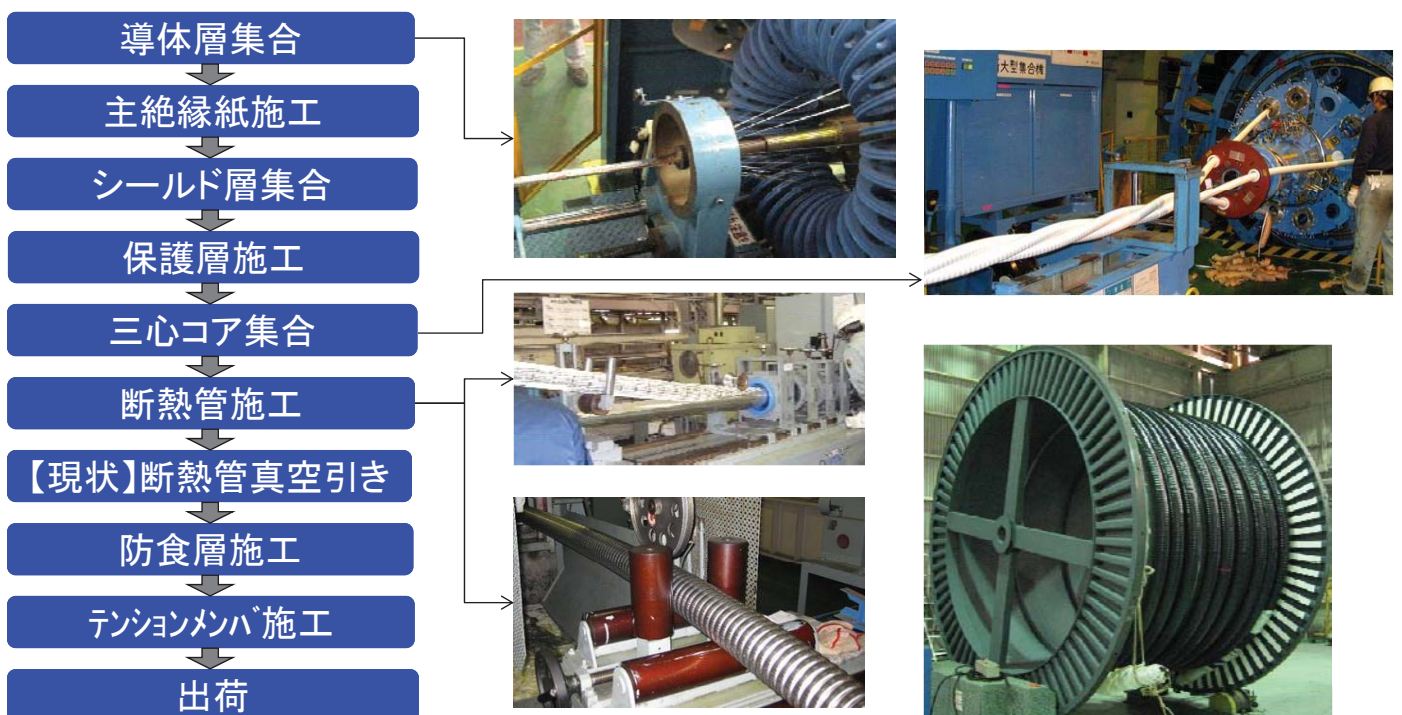
達成度：◎ 大幅達成、○ 達成、△ 達成見込み、× 未達

主要成果 【1】実証ケーブルの設計製造

項目	諸元
構造	三心一括型
定格電圧	66 kV
送電容量	200 MVA
導体構造	ビスマス系超電導線材 (Cu燃線フォーマに巻きつけ)
絶縁構造	PPLP+LN2、厚み7 mm (PPLP層)
シールド構造	ビスマス系超電導線材+Cuテープ線
断熱管構造	ステンレス製2重コルゲート管, 真空多層断熱構造
シース	下シース(PVC)+抑えテープ(ステンレス製)+上シース(PVC)
計測線*	テフロンチューブ(φ4 mm)内に光ファイバー(2本)、4心線(2本)配置
長さ(出荷時)	ケーブルA 78 m, ケーブルB 160 m



主要成果 【1】実証ケーブルの製造



主要成果 【2】ケーブル出荷試験

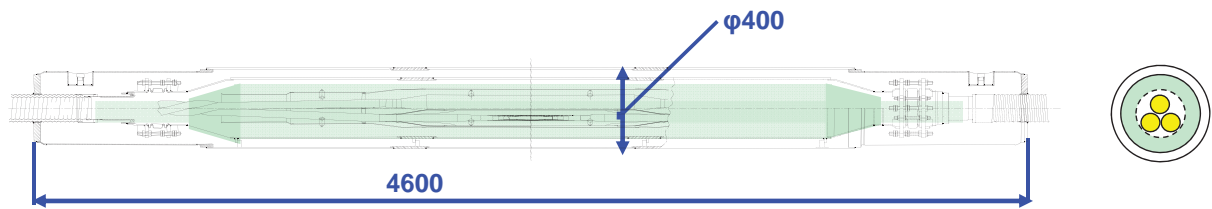
項目	試験条件、設計値	サンプル	試験結果	判定
耐圧力試験	試験圧力：0.75MPaG 使用ガス：N ₂ ガス (設計圧力0.5+0.1)MPaG×1.25	ケーブル全長 (内管製造後)	試験圧力にて10分保持で圧力低下なし	合格
気密試験	試験圧力：0.6MPaG 使用ガス：N ₂ ガス 設計圧力0.5+0.1MPaG	ケーブル全長 (内管製造後)	試験圧力にて10分保持で圧力低下なし	合格
Heリーク試験	測定感度レベルでリークが検出されないこと	ケーブル全長 (内管製造後及び外管施工後)	断熱管を巻き付けたドラムに目張りをし、ドラム～目張り間にHeガスを50kPa×5分注入、断熱管からのHeリーク量を3時間測定	<1E-8Pam ³ /s 良好
曲げ試験	180相当曲げでダメージなきこと	ケーブル(8m)	直径2.7m(18.90相当)の両曲げ×2サイクルで、I _c 低下なし 解体後の絶縁部他に異常なし	合格
I _c 特性	導体 I _c >8850A/相 シールド I _c >7330A/相	三心コア(2.5m) (最終PVC工程後に採取)	導体(赤相) I _c =7090A 導体(黒相) I _c =7200A 導体(白相) I _c =7180A シールド(赤相) I _c =7850A シールド(黒相) I _c =7720A シールド(白相) I _c =7720A	良好(設計値以上を確認)
ACロス特性	<1W/m/ph@2kA	単心コア(2.5m)	測定値:0.91W/m/ph@2kA	合格
インダクタンス特性	設計値L=0.121μH/m	単心コア(2.5m)	測定値:0.124μH/m	良好
課電特性	AC: 90kV/3時間 AC: 100kV/10分 PD観測されないこと Imp ±385kV/3回	単心コア(6m) (曲げ試験後ケーブルより採取)	AC課電試験: 90kV×3時間→良好 100kV×10分間→良好 (PD観測されず@感度60pC) Imp課電試験: ±385kV/3回→良好	合格

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価

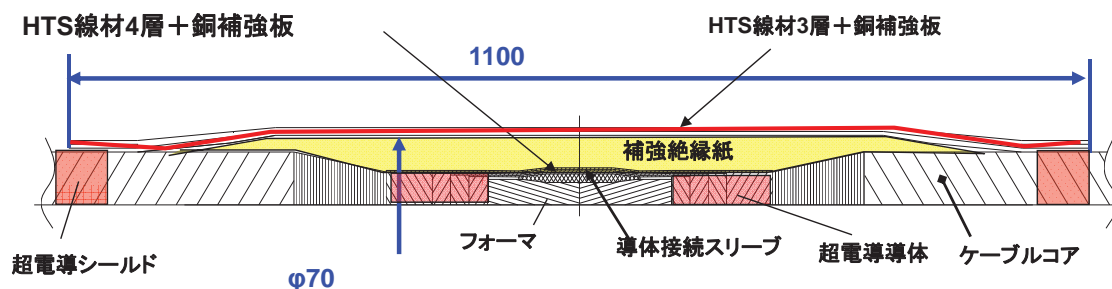


主要成果 【3】中間接続部の設計

3心一括型 ジョイント全体構造



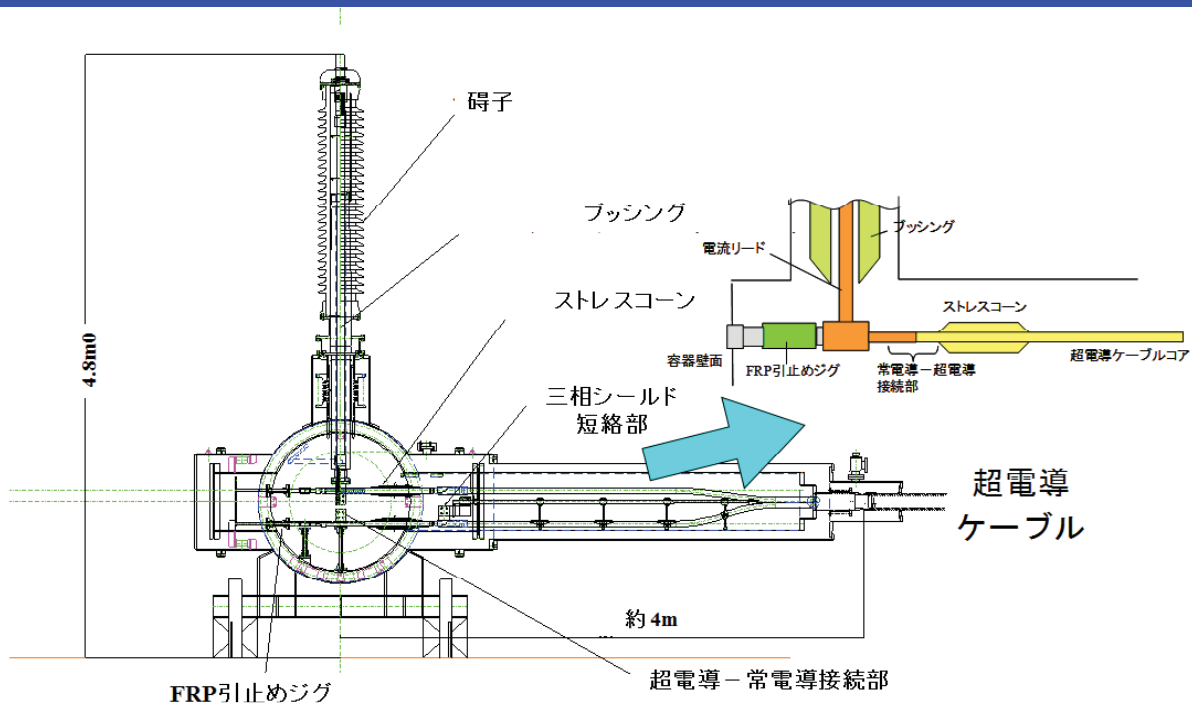
ジョイント接続部



高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価



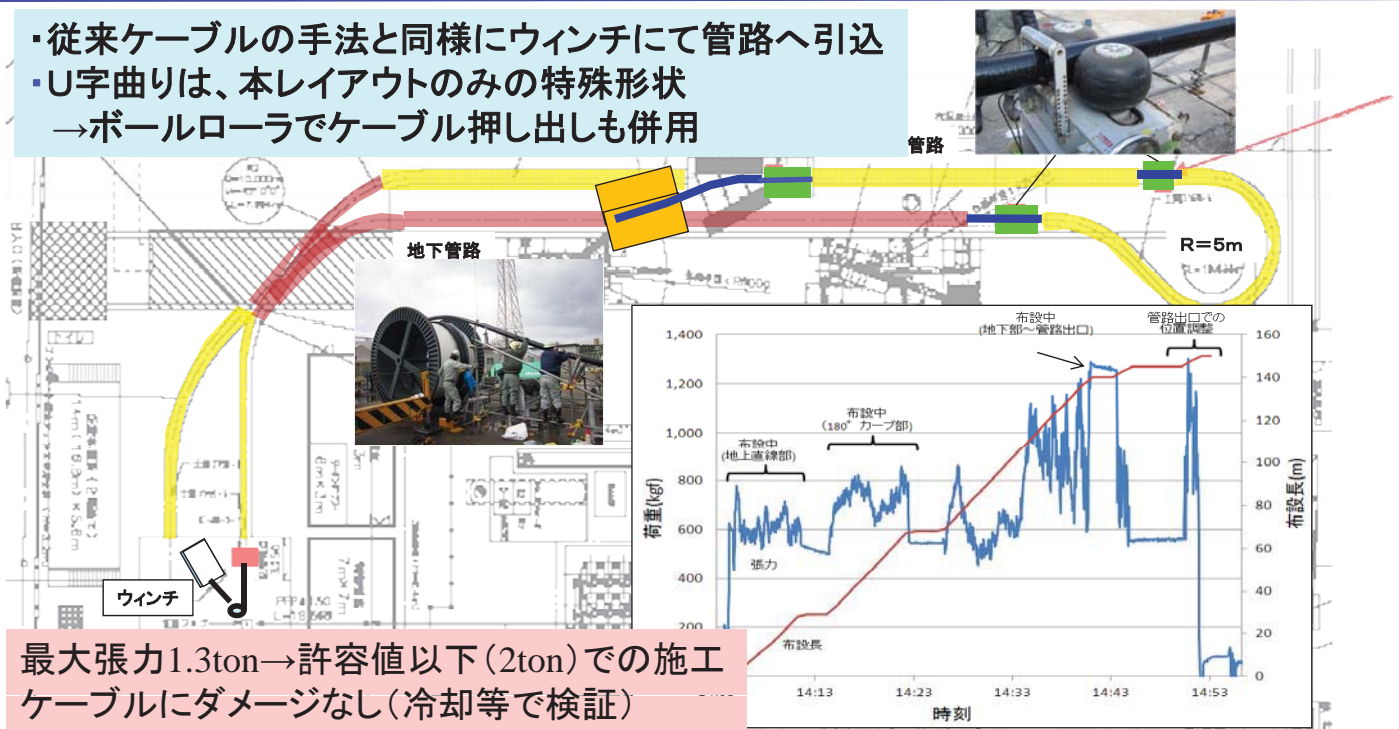
主要成果 【3】終端接続部の設計



9

主要成果 【4】ケーブルの現地布設

- ・従来ケーブルの手法と同様にウインチにて管路へ引込
- ・U字曲りは、本レイアウトのみの特殊形状
→ボールローラでケーブル押し出しも併用



最大張力1.3ton→許容値以下(2ton)での施工
ケーブルにダメージなし(冷却等で検証)

主要成果 【5】中間接続部の組立施工

No	ブロック工程	主な施工内容	管理ポイント
1	組立準備	作業スペース確認、レール確認	
2	ケーブル端部処理	真空槽等の端部部品挿入 切断位置確認〜コア切断	切断位置
3	ケーブル導体接続	導体接続スリーブの圧着	圧縮力
		導体ブリッジHTS線材取り付け	超電導線取扱い
		加熱(半田モールド)	温度管理
4	補強絶縁紙巻き	補強絶縁紙巻き	形状
5	電界シールド処理	ケーブル部遮蔽処理	
6	ケーブルシールド接続	シールドブリッジ取り付け	超電導線取扱い
		加熱(半田モールド)	温度管理
		ケーブル銅ダミー層接続処理	
7	計測線処理	光ファイバ接続、温度計取り付け	位置確認
8	窒素槽組立	窒素槽組立、溶接	溶接管理
		窒素槽気密試験	気密性
9	真空槽組立	真空断熱材取付 真空槽組立、溶接	溶接管理
10	容器ベーキング	加熱・真空引き	真空度
11	防食処理	防食巻き付け処理	



3.ケーブル導体接続



4.ケーブル導体接続



8.窒素層組立



9.真空層組立

主要成果 【5】終端接続部の組立施工

No	ブロック工程	主な施工内容	管理ポイント
1	事前準備	作業用テント組立、レール布設	
2	ケーブル部組立準備	容器・部品の挿入	部品の順番
3	三相分岐処理	三心コア燃り戻し、相合わせ	相の確認
4	ケーブルコア切断	位置確認、ケーブルコア切断	切断位置
5	シールド層処理	保護層、Cuシールド層の除去 超電導シールド層処理	超電導線取扱い 形状
6	補強絶縁紙巻き	補強絶縁紙巻き 遮蔽処理	
7	導体処理	導体層の処理 導体接続金具の圧縮・取り付け 半田流し込み	圧縮力 挿入半田量(
8	シールド接続金具の接続	位置固定 半田流し込み	挿入半田量
9	導入部組立	サポート金具の取り付け	
10	ケーブル部・容器組立	容器の据付、ケーブル部との勘合	
11	容器内組立、配線	三相短絡 電流リード、高圧シールド組立	
12	液体窒素容器の組立	計測線、接地線取出し 液体窒素容器の組立・溶接	健全性 溶接管理
13	液体窒素容器耐圧試験	液体窒素容器の気密試験	気密性
14	真空容器の組立	真空断熱材の取り付け 真空容器の組み立て・溶接	溶接管理
15	容器ベーキング	加熱・真空引き	真空度

3.三相分岐処理



6.補強絶縁紙巻



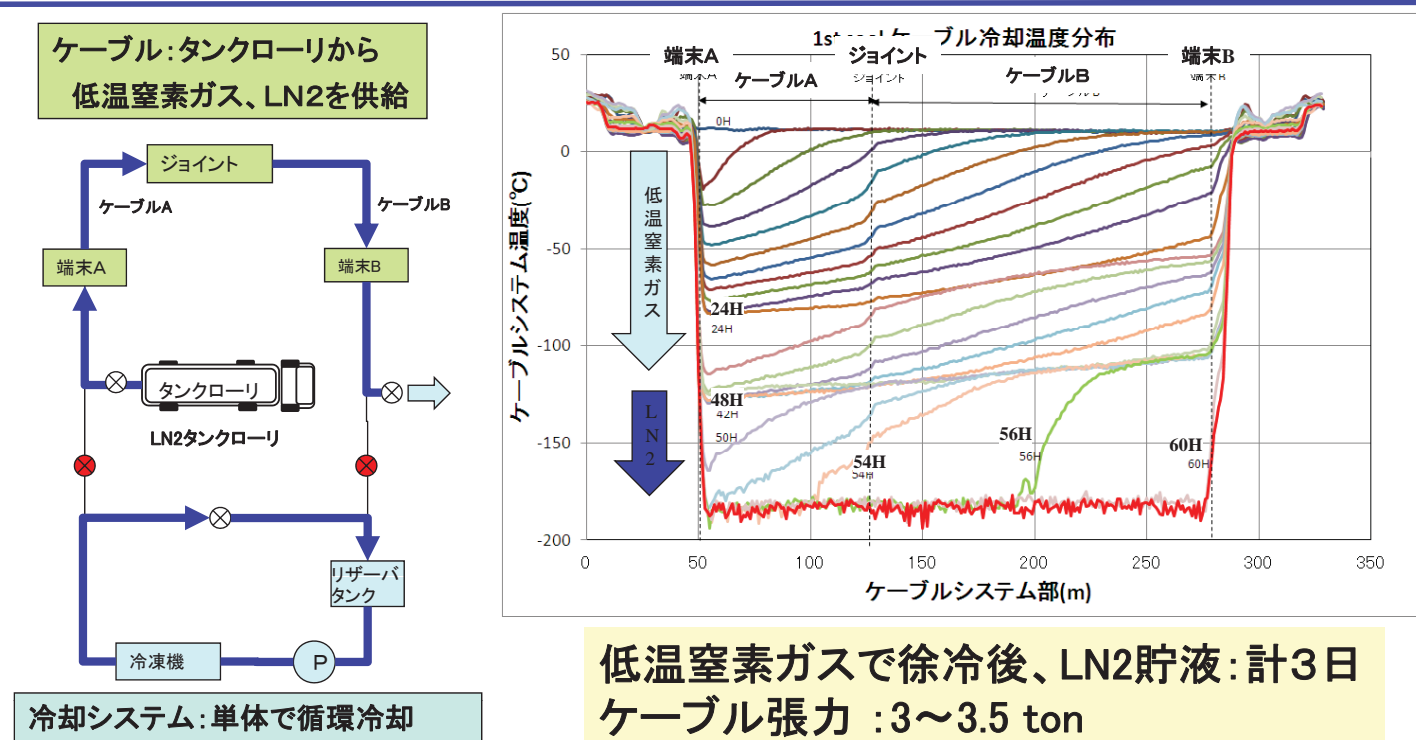
14. 真空容器組立



主要成果 【6】実系統接続前の確認試験

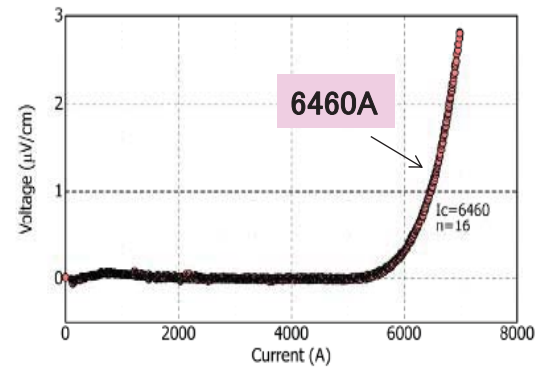
試験項目		試験内容	評価方法
気密試験		0.5MPaG-30分間	圧力低下なきこと、リークなきこと
初期冷却試験	冷却中および冷却後	C, tanδ測定(AC 5kV以下)	計算値との比較
		各部真空度測定	リークなきこと
	冷却後	末端発生荷重(コア張力)	予想値と比較
		コアの動き(ジョイント部の動きで確認)	設計挙動範囲内のこと
冷却システム運転調整試験		冷却システム温度および圧力調整&追従性確認	所定範囲で追従・安定すること
熱損失測定(無負荷時)		ケーブルシステム各部の熱損失測定(ΔT法)	設計値と比較
圧力損失測定		ケーブル両端での圧力差を測定する	
臨界電流(Ic)測定		各相コア超電導導体のIc測定	
絶縁抵抗試験(メガー)		各相の高圧導体部と接地間の絶縁抵抗測定	絶縁抵抗に異常なきこと
竣工耐電圧試験		DC 152kV-10分間	良好に課電できること
警報リレー確認試験		各警報リレー動作確認	警報が確実に発信されること
系統課電試験		系統電圧印加(通電なし)-10分間 部分放電(PD)測定	良好に課電できること PD検出されないこと

主要成果 【7】系統接続前性能検証



主要成果 【8】【9】系統接続前性能検証

試験項目	試験結果	備考
臨界電流測定	約6500A@77K →他相の磁界、温度分布を考慮した計算値と一致	Ic定義: 1 μ V/cm
DC耐電圧試験	151.8kV@10分間 →良好に課電	電気設備技術基準より
熱損失測定	ケーブルシステム 2.4kW @69K、無負荷	冷却システム配管等損失:1kW
PD測定	片端を系統接続し、課電した状態でPD測定→PD観測されず	感度50pC



Ic測定時のI-V曲線(赤相)

- ・出荷、布設、初期冷却を通じてケーブルに損傷がなく、所定の性能を有していることを確認
- ・一旦昇温し、2回目、3回目冷却時も同様の性能を確認
→繰り返し熱応力による性能低下なし

主要成果 【8】【9】系統接続前性能検証

夜間・無負荷時のケーブル部・ジョイント・端末の損失(外部からの侵入熱)は、ほぼ設計通りの値が得られている。

夜間・無負荷時のケーブル各部侵入熱

部位	実測	設計
ケーブル部	A: 350 W	A: 341 W
	B: 825 W	B: 858 W
ジョイント	20 W	40 W
端末	A: 595 W	A: 560 W
	B: 608 W	B: 560 W
合計	2.398 kW	2.359kW

- ケーブル部の侵入熱
直線部: 2~3 W/m
曲り部: 10~11 W/m
(※側圧の影響)
→本レイアウトの内、U字等の曲り部は40%を占める。

測定時条件: 外気温23℃、液温(入口)69K、流量40L/min、夜間

成果のまとめ

項目		開発成果	達成度
実証用ケーブルシステムの製造	ケーブル・機器の製造	<ul style="list-style-type: none"> ・実証用ケーブルの設計、製造を行い、所定の出荷試験を行い、これに合格した。 ・ジョイント、端末の設計及び部品の製造を行い、各部品の出荷検査を行い合格であることを確認した。 	○ ○
	現地布設、組立	<ul style="list-style-type: none"> ・現地ケーブル布設を行い、所定の位置にダメージなく、ケーブル布設を完了した。 ・端末、ジョイントの組立施工を所定の管理を行い、完工した。 	○ ○
	系統接続前試験	<ul style="list-style-type: none"> ・実系統接続前の試験項目、内容について決定した。 ・初期冷却でケーブル冷却を行い、ダメージがないことを確認した。 ・所定のI_c特性を有することを確認した。 ・所定の課電試験(DC152kV)を良好に行えた。また、試充電にてPD発生がないことを確認した。 ・ケーブル熱負荷が想定内であることを確認した。 	○ ○ ○ ○ ○

達成度：◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

「6.1-3 冷却システムの設計・構築」 (公開)

平成26年9月3日

株式会社前川製作所 町田 明登

6.1-3 冷却システムの設計・構築

公開

Ⅲ p.13-17

2

年度展開

項目	H19年度	H20年度	H21年度	H22年度	H23年度	H24年度	H25年度
1. システム構成・ 運転技術	実証場所選定	系統要求仕様・影響調査	警報・遮断システムの設計	異常時運転指針			
2. ケーブル設計・ 製造	要素技術開発 交流損失 <1W/m/ph@2kA 短絡電流対策	30mケーブル 検証(熊取工場)	ケーブル 製造・布設	交流損失低減検討 <1W/m/ph@3kA	ケーブル 単体試験(旭)	システム 総合試験(旭)	
3. 冷却系設計・ 製造	冷却システム設計	冷却システム 製造	システム検証 (守谷工場)	冷却システム 単体試験(旭)			
4. 実系統運転							実証運転
5. ケーブル高性 能化						ケーブル高性能化 コンパクト端末開発	
6. 冷却システム 高性能化					システム基本設計	性能検証	長期試験
7. 標準化	標準化項目整理	要素技術データ収集・提供				実証データ収集・提供	

事業目標の達成度

基本計画: 冷却システムの設計・製造・実証試験の実施から送電を停止しないシステム、負荷に追従可能なシステムを確立する。

事業目標(実施計画書)			達成度
項目	内容		
冷却システムの設計・構築	冷却システムの設計・検証試験	【1】実用化時をイメージした、実証用冷却システムの設計基本計画の策定 【2】前川製作所守谷工場にて冷却システム検証試験を実施し、各特性を評価	○ ○
	実証用冷却システムの建設・事前検証	【3】実証用冷却システムの建設 【4】冷却システム機器性能確認 【5】冷却システム信頼性検証 【6】実証ケーブルとの接続、及び組み合わせ後の運転特性確認	○ ○ ○ ○

主要成果 【1】冷却システムの検討(仕様)

実証試験用冷却システムの開発方針

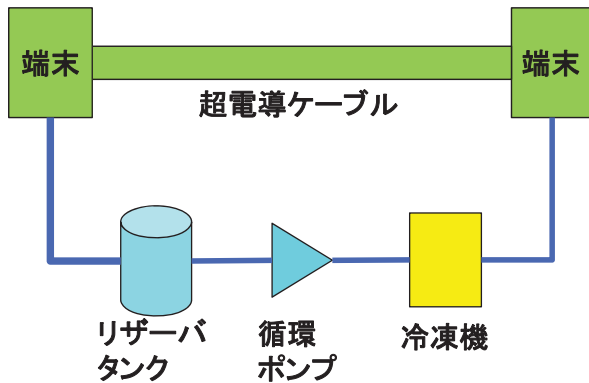
運転を中断しない技術の検証(高信頼性)、負荷変動等に追従した運用

冷却システムへの要求事項

項目	要求事項	本プロジェクトでの対応方針
信頼性	・冷却システムの故障によりシステムの運転を止めないこと	・冷凍機、ポンプ等の主要機器は冗長性を持たせ、連続運転可能とする ・故障機器からの切替は自動で行うこと
運転・制御	・長期安定運転が可能な制御システムであること ・異常検知、警報発信のシステムを備えていること	・温度、圧力を制御してサブクール状態を維持し、LN2無補給運転を可能とすること 温度: 入口温度を設定値に自動制御 圧力: 最低圧力以上に維持 ・警報システムの構築
保守・メンテナンス	・保守すべき管理項目が明確であること、メンテナンスが容易であること	・保守項目の明確化、メンテナンス方法の検討および検証
経済性	・高効率であること ・安価であること	・冷凍機の高効率化は対応せず ・信頼性とのバランスを考えた設計の実施

主要成果 【1】冷却システムの検討(構成)

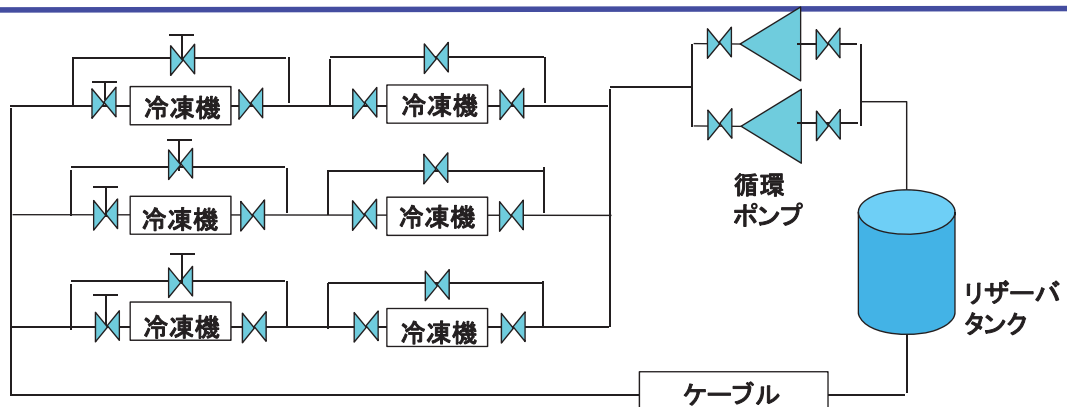
- ・冷却方式： 運転実績と応答性の良さから超電導ケーブルと冷凍機がシリーズにつながる**冷凍機直接冷却方式**を採用
- ・冷凍機： 過去の実績から**1kW級スターリング冷凍機**を採用
- ・冷凍機台数： 系統運転での必要台数は5台。故障時の冗長性を考慮し、**予備機1台を含めた6台構成**



通電	0A	1kA	定格 1.75kA
ケーブル総負荷	1746	2112	2780
冷凍機圧損	994		
全負荷	2740	3106	3774
冷凍機台数	3.7	4.1	5.0

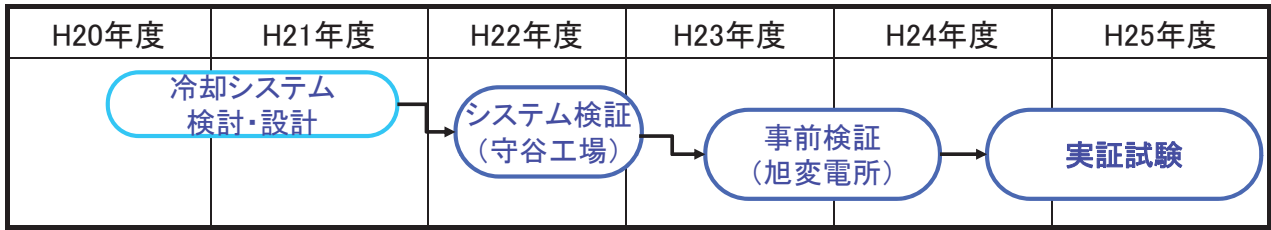
予備機1台を含め6台構成を採用

主要成果 【1】冷却システムの検討(レイアウト)



項目	内容
常時運転	循環ポンプは交互運転。冷凍機は2台直列×3並列構成で、バイパス以外のバルブは常時開。冷凍機は必要台数だけON/OFF運転。
異常時	ポンプ異常時はもう一台と切替。故障ポンプは切り離し、修理。 冷凍機異常時はOFF冷凍機と切替。故障冷凍機はバイパスを使って切り離す。 ポンプと冷凍機の故障は独立して扱える。
懸案事項	液体窒素の三分岐流量はバルブ、配管により決まり、能動的な制御は不可。安定性の検討必要。

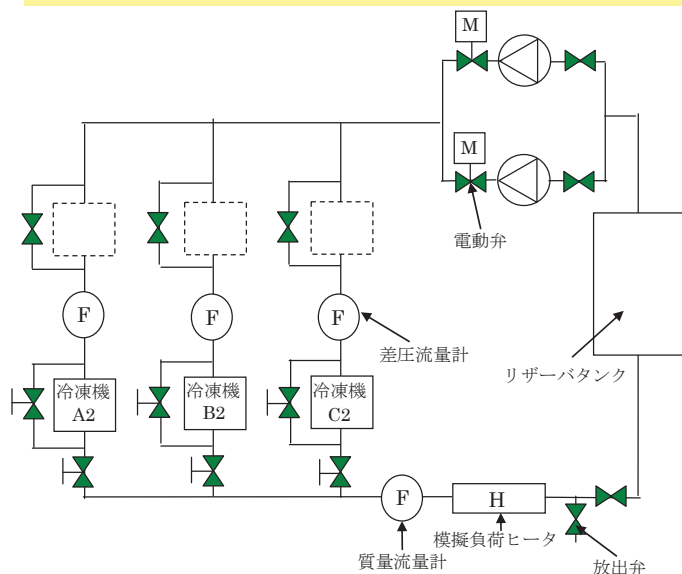
主要成果 【1】冷却システム検証スケジュール



主要機器		システム検証	事前検証
冷凍機	スターリング冷凍機	1台×3並列(計3台)	2台×3並列(計6台)
循環ポンプ	遠心式ポンプ	260mケーブル用. 並列2台	260mケーブル用. 並列2台
リザーバタンク	液の膨張代吸収	容積1,000ℓ	容積1,000ℓ
ケーブル		模擬	260m級
試験場所		前川製作所守谷工場	東京電力旭変電所
装置イメージ図			
塗りつぶし(水色):設置 白抜き:未設置			

主要成果 【2】冷却システム検証試験(概要)

実証試験用冷却システムと同様構成(冷凍機は3台)の冷却システムを製作し、冷却システムの基本的な性能、制御性を確認



システム検証試験装置レイアウト

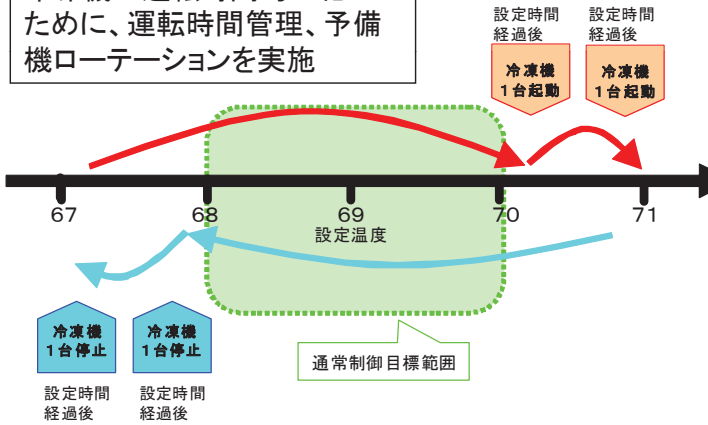
検証項目の一例

- ・機器性能:
冷却能力、循環ポンプ性能確認
- ・制御性:温度、圧力、流量制御確認
- ・信頼性:
故障切替試験(冷凍機、循環ポンプ)
メンテナンス方法確認(冷凍機、循環ポンプ)

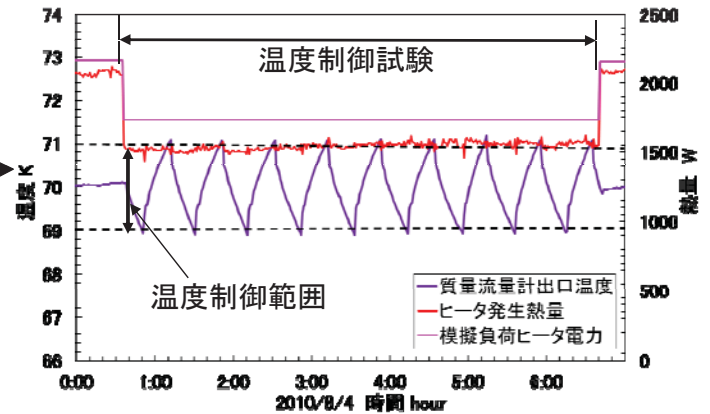
主要成果 【2】冷却システム検証試験(温度制御)

温度制御方式(冷凍機台数制御)の制御性を確認

冷凍機の運転時間均一化のために、運転時間管理、予備機ローテーションを実施



冷凍機台数制御概念図

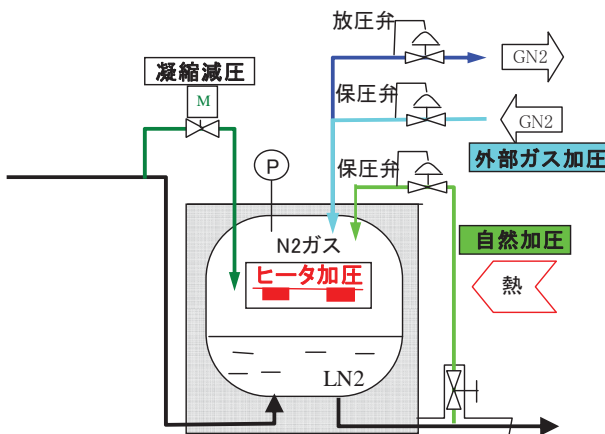


温度制御中の温度トレンド

冷凍機の台数制御により制御範囲内での温度制御が可能であることを確認

主要成果 【2】冷却システム検証試験(圧力制御)

各圧力制御方式において設定圧力で制御可能なことを確認

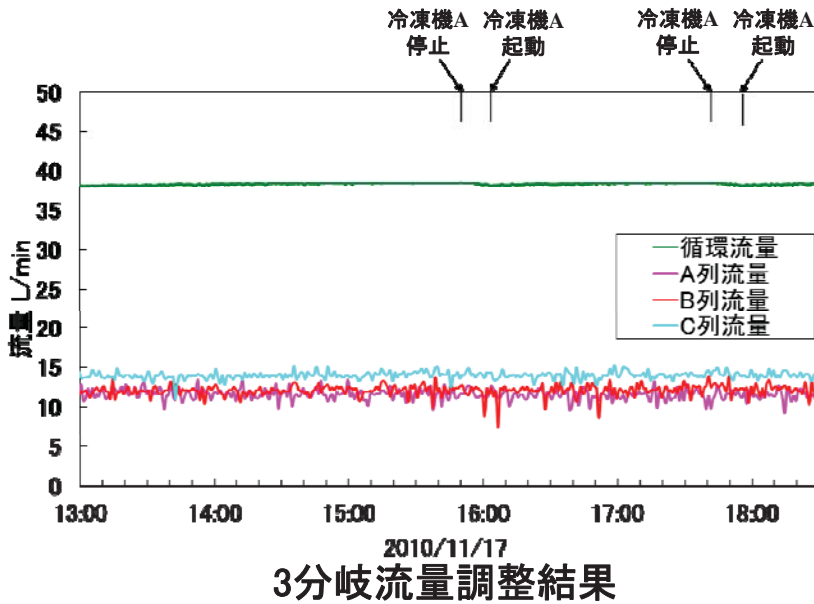


制御方式	制御方法
自然加圧	循環液体窒素の一部を外気でガス化させて加圧する
ヒータ加圧	タンク内部に設置したヒータでタンク内液体窒素表面温度を上げて加圧する
外部ガス加圧	外部から窒素ガスをリザーバタンクへ供給して加圧する
凝縮減圧	リザーバタンク内の窒素ガス層を循環液体窒素と接触させることで液化させて減圧する

各圧力制御共に制御性に問題なし。窒素ガス補給が必要なく無人長期運転に向いている自然加圧を常時使用し、他制御はバックアップとする

主要成果 【2】冷却システム検証試験(流量制御)

循環ポンプの運転周波数を固定した状態において循環流量が一定となること、3分岐の流量調整が可能であることを確認

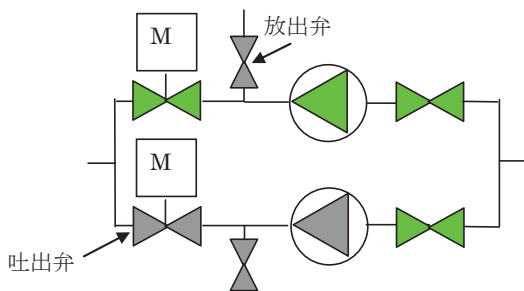


- ・循環流量は常に一定である
- ・3流路へほぼ均等に流すことが可能である
- ・冷凍機運転状態変動による流量への影響はない

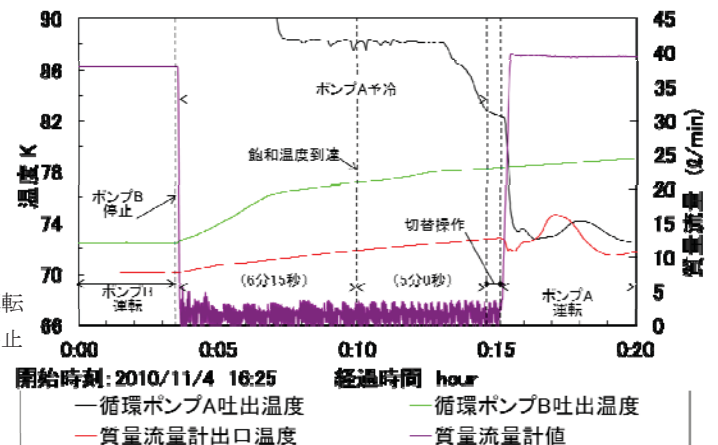
循環ポンプ2台、3分岐の構成で運用可能であることを確認

主要成果 【2】冷却システム検証試験(故障切替)

運転中ポンプ故障時に待機側ポンプへの短時間切替を確認



循環ポンプフロー



循環ポンプ故障切替中トレンド

切替完了までの循環停止時間が長くなるため2台同時運転に変更

主要成果 【3】冷却システムの建設

検証試験で性能・機能の健全性が確認出来たため、旭変電所へ冷却システムの移設および周辺設備建設を実施

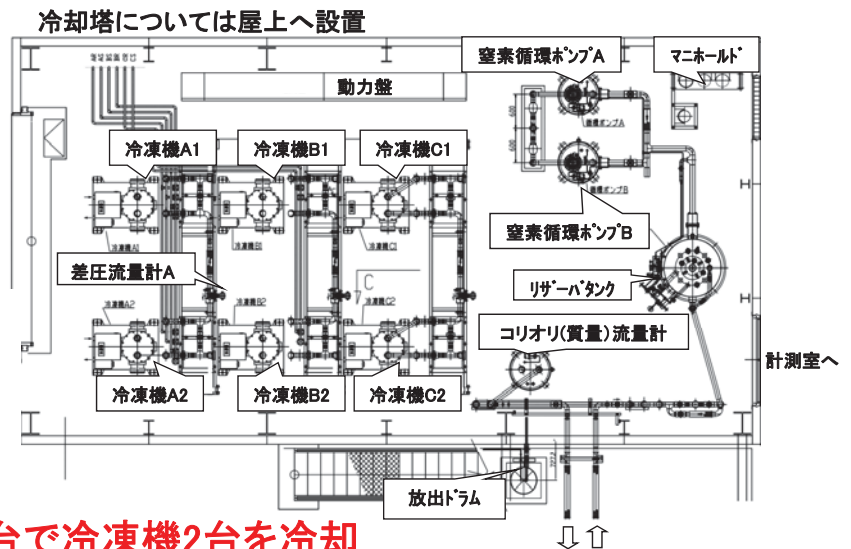


冷却システム建屋

冷却水系統

3台の冷却塔を使用。冷却塔1台で冷凍機2台を冷却

冷却塔故障時には残り2台の冷却塔で対応可能(自動切替)



主要成果 【3】冷却システムの建設



冷却システム外観



冷凍機



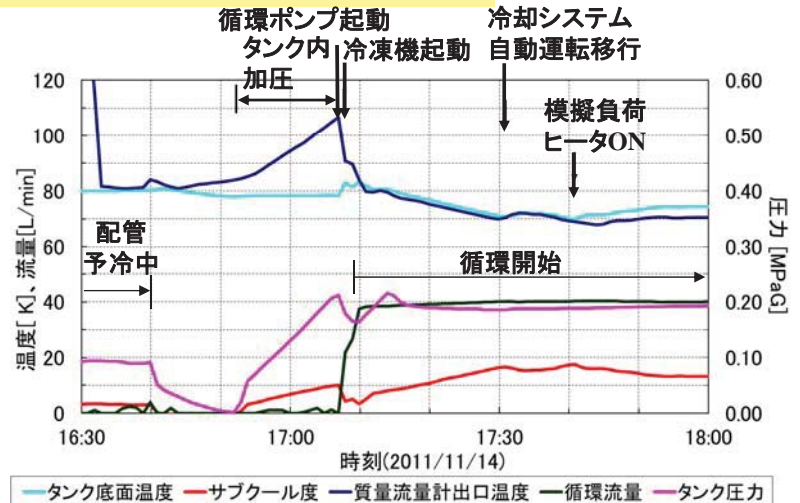
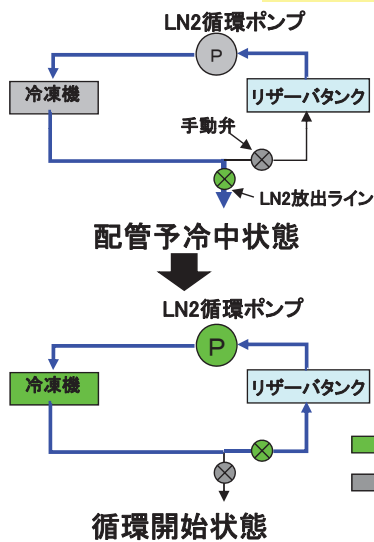
循環ポンプ



リザーバタンク

主要成果【4】事前検証(初期冷却試験)

冷却システムの初期冷却手順を確認



初期冷却作業中トレンド

冷凍機熱交換器部での凍結を防ぐ初期冷却方法を確立
移設後の機器・システムの健全性、動作確認を実施

主要成果【5】事前検証(故障切替)

冷凍機・循環ポンプ故障の際に予備機が動作し、循環温度が維持されることを確認

冷凍機故障時の動作

1. 予備機起動
2. 故障機列に起動冷凍機がある場合は2台目が起動
3. 温度制御に従い台数制御

模擬的に故障停止を行い、シーケンス通りの動作を確認

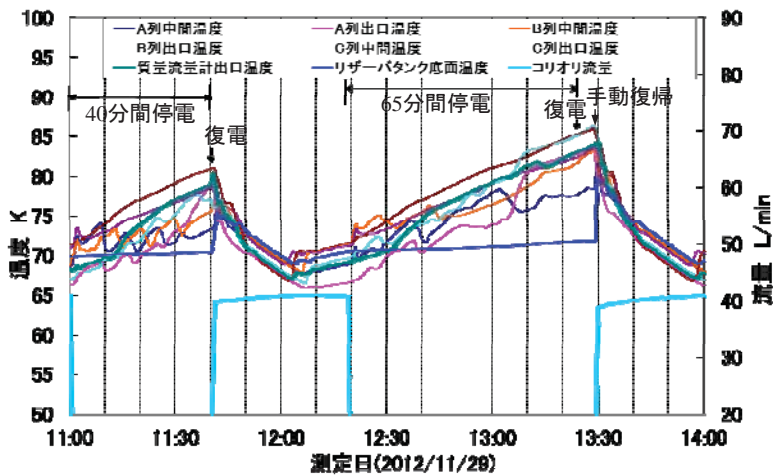
循環ポンプ故障時の動作

1. もう一方のポンプにて運転
2. 一時的に流量は低下するが循環運転は継続

循環運転を停止させることなく故障時切替可能なことを確認

主要成果【5】事前検証(停電試験)

停電時の液体窒素の温度状態、復電時の復帰状況を確認



停電模擬時の液体窒素の温度状態

停電時の動作設定

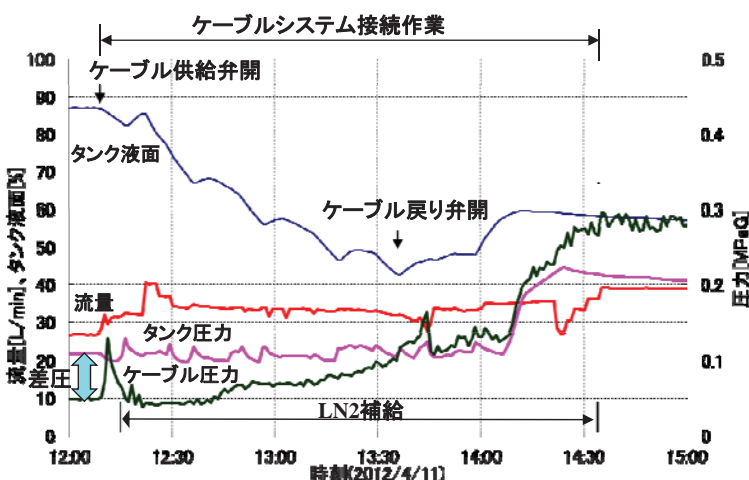
- 1分: 復電後も停電から3分経過までは再起動なし
- 3-60分: 復電後すぐに自動で再起動
- 60分以上: 自動での再起動なし



- ・正常動作を確認
- ・60分までは冷却システム再起動可能

主要成果【6】ケーブル循環冷却移行手順検証

冷却システムとケーブルシステムの接続、循環冷却移行手順を確認



ケーブル循環運転開始時の状態

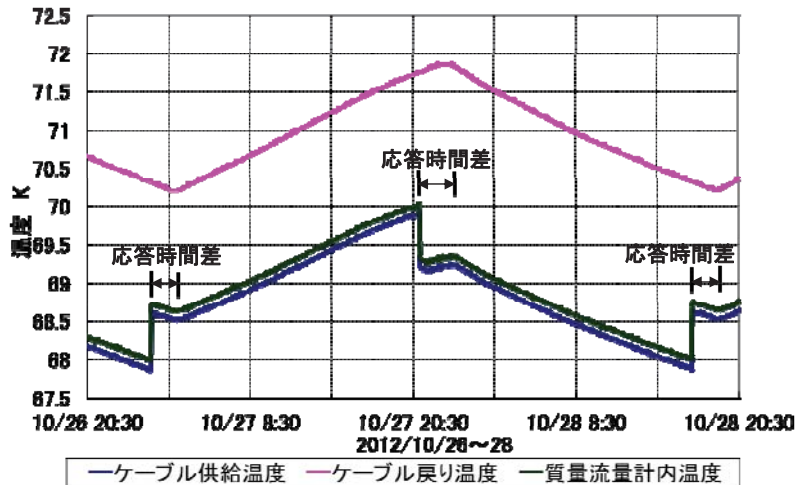
冷却システムの起動タイミングや冷却システム側とケーブルシステムの差圧等の条件を変更、手順を検証



- 冷却システムとケーブルシステムの差圧を抑えることでスムーズに移行出来ることが分かり、液体窒素のケーブル循環手順を確立

主要成果【6】ケーブル冷却時制御(温度)

冷凍機台数制御での温度制御性を確認



ケーブル入口・出口温度の状態

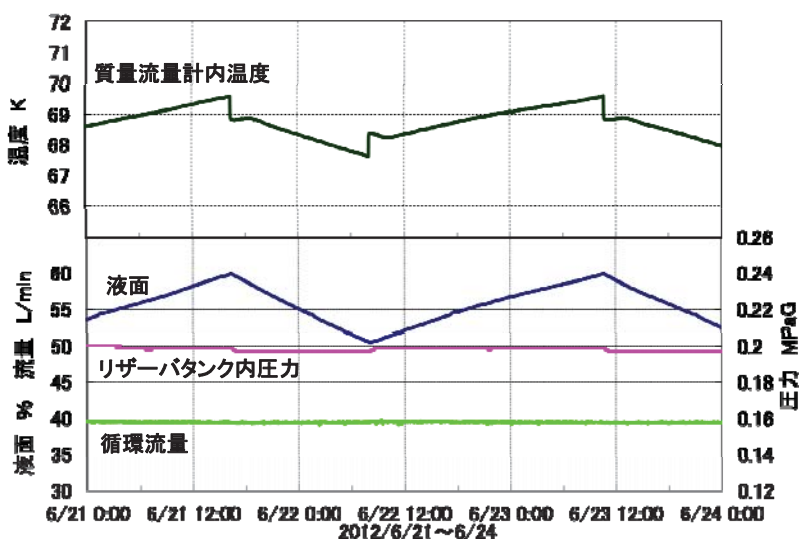
- ・ケーブル入口を設定温度範囲内(69±1K)で制御出来ることを確認
- ・冷凍機ON-OFF周期は負荷により異なる(左図では40時間)



ケーブル接続後も冷凍機台数制御で温度制御が可能であることを確認

主要成果【6】ケーブル冷却時制御(圧力・流量)

ケーブル循環運転時の流量、圧力の制御性を確認



循環流量・タンク内圧力の状態

- ・ケーブル接続後も圧力、流量の制御性に問題無いことを確認
- ・ケーブル部での温度変動による液体窒素体積変動によりリザーバタンク液面は変動するが、圧力、流量への影響は無い



ケーブル接続後も圧力、流量の安定制御が維持されることを確認

成果まとめと今後の課題

- システム検証試験(守谷工場)、事前検証試験(旭変電所)を実施し、冷却システム単体での性能・制御・信頼性に問題のないことを確認
- 冷凍機・循環ポンプの故障時に予備機が作動し、循環温度、圧力、流量を維持できることを確認
- ケーブルシステム、冷却システムを別々に初期冷却を行い、その後、スムーズに接続する方法を確立した
- ケーブルシステムとの接続後、温度・圧力・流量は安定した制御が行われることを確認し、本システムで実証試験を行うことが可能であることを検証した

「6.1-4 実システムにおける総合的な信頼性検証」 (公開)

平成26年9月3日

東京電力株式会社
 本庄 昇一

6.1-4 実システムにおける総合的な信頼性検証

公開

Ⅲ p.13-17

2

年度展開

項目	H19年度	H20年度	H21年度	H22年度	H23年度	H24年度	H25年度
1. システム構成・ 運転技術	実証場所選定	系統要求仕様・影響調査	平常時運転指	警報・遮断システムの設計 関連法令手続き	異常時運転指針		
2. ケーブル設計・ 製造	要素技術開発 交流損失 <1W/m/ph@2kA 短絡電流対策		30mケーブル 検証(熊取工場)		交流損失低減検討 <1W/m/ph@3kA ケーブル製造・布設	ケーブル 単体試験(旭)	
3. 冷却系設計・ 製造	冷却システム設計	冷却システム 製造		システム検証 (守谷工場)	冷却システム 単体試験(旭)	システム 総合試験(旭)	
4. 実システム運転							実証運転
5. ケーブル高性能 能化						ケーブル高性能化 コンパクト端末開発	
6. 冷却システム 高性能化					システム基本設計	性能検証 長期試験	
7. 標準化	標準化項目整理		要素技術データ収集・提供			実証データ収集・提供	

系統連系試験における検証項目一覧

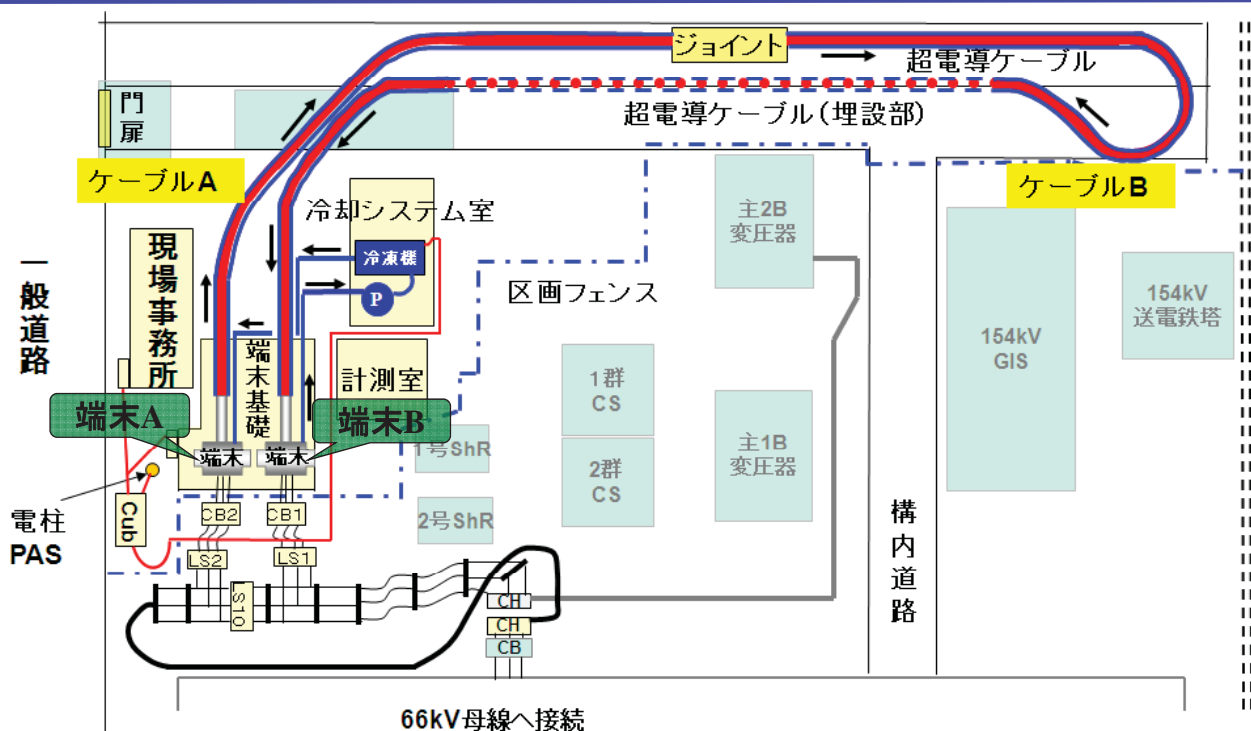
検証項目		主な実施内容	達成度
システム機能検証	初期冷却	✓ケーブル単体初期冷却方法 ✓循環冷却立上げ方法	○
	【1】ケーブル電気特性	✓臨界電流 ✓部分放電測定 ✓ケーブル定数 ✓シールド特性 ✓交流損失	○
	【2】ケーブル熱機械特性	✓初期冷却時機械応力 ✓ケーブル各部熱損失（無負荷時、通電時）	○
	【3】冷却特性	✓冷凍機・循環ポンプ性能 ✓熱損失・圧力損失 ✓ケーブル各部冷却反応時間 ✓冷却システム効率（COP）	○
制御性	温度・圧力制御	✓温度制御特性 ✓圧力制御特性	○
	冷却系機器切替	✓台数制御方式 ✓ローテーション制御 ✓故障時の冗長性 ✓ポンプ並列運転	○
信頼性	【4】長期運転性能	✓負荷変動 ✓日射の影響評価 ✓熱負荷経時変化 ✓運転温度上昇時の特性 ✓冷却能力の運転温度依存性 ✓冷却能力経時変化 ✓系統運転実績 ✓警報発生実績	○
保守性	メンテ技術	✓運転状態での主要機器メンテ方法検証	○

達成度：◎大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価



実証システムレイアウト



高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価



主要成果 【1】系統連系前後の臨界電流特性

○I_c測定 系統接続前

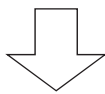
- 1回目: 冷却後1回目 (H24.4) → 昇温
- 2回目: 冷却後2回目 (H24.6) → 昇温
- 3回目: 冷却後3回目 (H24.9)

○I_c測定 系統接続後 中間評価

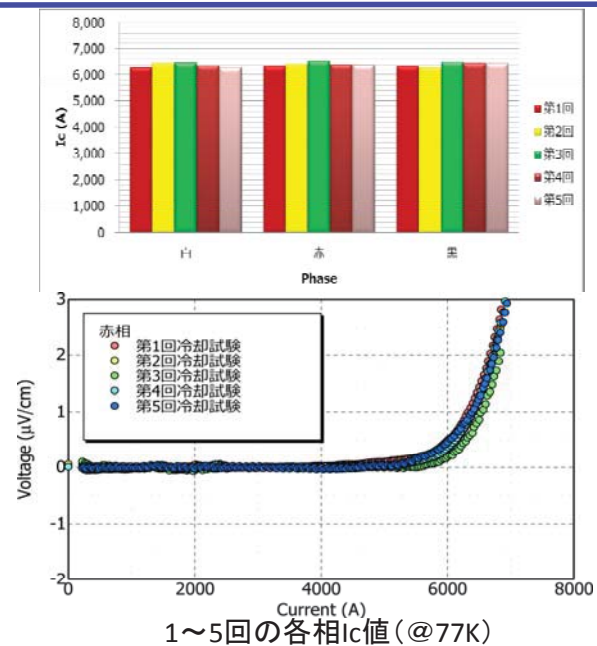
- 4回目: 実系統接続 9ヶ月後 (H25.7)

○I_c測定 系統接続終了後 最終評価

- 5回目: 実系統接続 14ヶ月後 (H26.1)

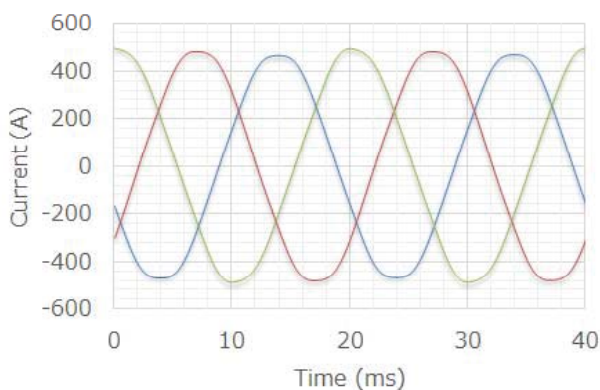


臨界電流値の性能劣化無しを確認。

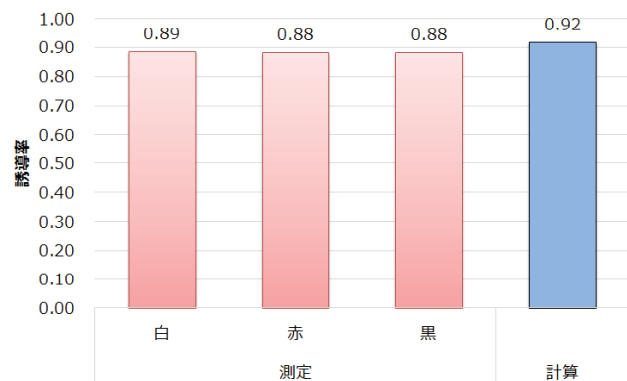


■その他試験(C・tan δ 測定、部分放電試験、ケーブルコア移動X線撮影)においても劣化・異常は見られず、運転後のケーブル健全性を確認。

主要成果 【1】シールド特性



シールド電流波形



シールド電流測定値・計算値

- シールド層三相短絡部にロゴスキーコイルを取り付け、波形を計測
- シールド電流の誘導率の実測は88%
→ケーブル内磁界分布や不平衡電流を考慮した解析に概ね一致

主要成果 【2】各部の熱損失評価

夜間・無負荷時のケーブル部・ジョイント・端末の損失(外部からの侵入熱)は、ほぼ設計通り。

夜間・無負荷時のケーブル各部侵入熱

部位	実測	設計
ケーブル部	A: 350 W B: 825 W	A: 341 W B: 858 W
ジョイント	20 W	40 W
端末	A: 595 W B: 608 W	A: 560 W B: 560 W
合計	2.398 kW	2.359kW

■ ケーブル部の侵入熱

直線部: 3 W/m

曲り部: 10~11 W/m

(※側圧の影響)

→本レイアウトの内、U字等の曲り部は40%を占める。

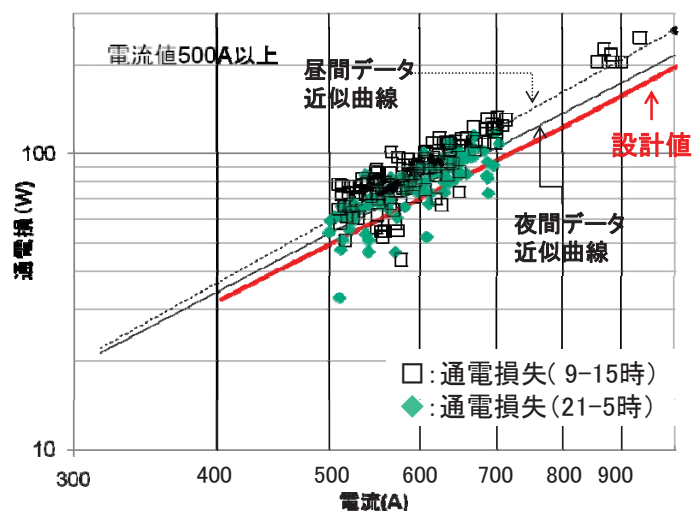
測定時条件: 外気温23°C、液温(入口)69K、流量40L/min、夜間

主要成果 【2】ケーブル部通電損

■ 通電損算出

通電損 = ①ケーブル部全熱損失
- ②侵入熱 - ③誘電損

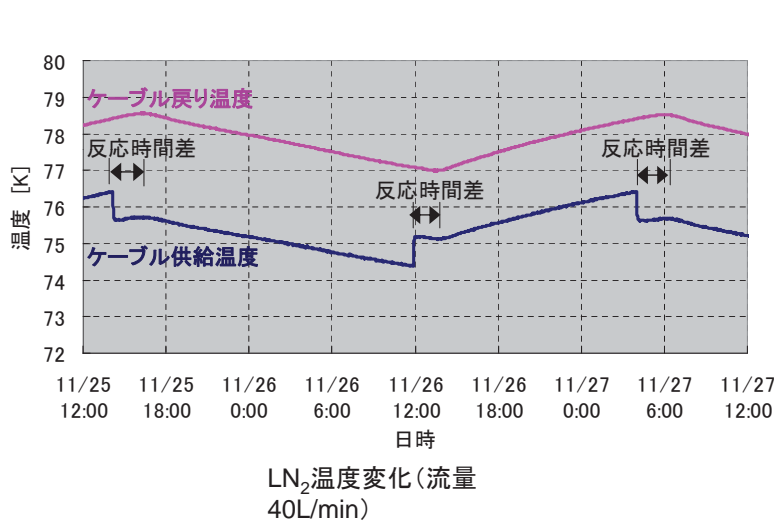
- ①: 出口-入口温度の ΔT より算出
- ②: 夜間・無負荷時の実測値より算出
- ③: C 、 $\tan \delta$ より算出



通電損の電流依存性(2012/12~2013/1)

- ・通電損の夜間データは設計値とほぼ一致。
- ・昼間データは、日射の影響により設計値より増加。 →日射影響対策へ反映

主要成果 【3】ケーブル各部冷却反応時間



ケーブル各部冷却反応時間差 (@40L/min)

要素	実測反応時間差	流量・容積から計算した反応時間
端末A	9分	105分
ケーブルA	8分	7.1分
ジョイント	5分	6.3分
ケーブルB	22分	15.4分
端末B	98分	105分
合計	142分	

- 端末A内冷媒は温度反応時間にほとんど寄与せず。逆に端末Bはほぼ全量が寄与。
- ケーブル部は流量から計算した反応時間より若干の遅れあり。

主要成果 【3】システム冷却効率(COP)の測定

$$\text{システムCOP} = \text{ケーブル負荷} / \text{全消費電力}$$

$$\text{システムCOP} = 0.04$$

※ケーブル入口温度 69±1 K
冷凍機4-5台運転

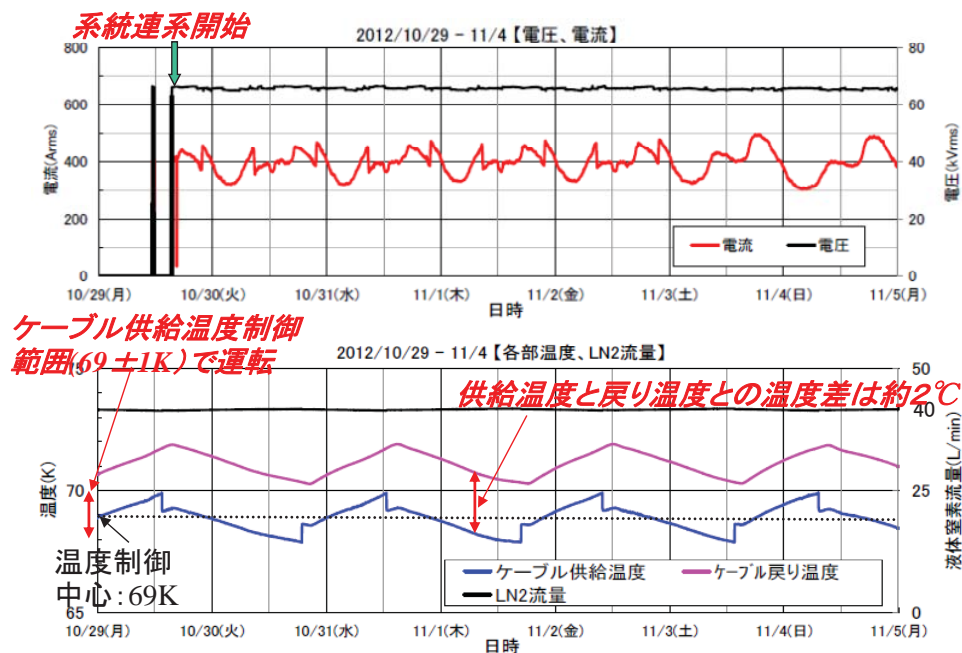
cf. 冷凍機単体 COP=0.06 @ 69K

1. ケーブル負荷	2.53 kW (415Arms)
2. 全消費電力	60.32 kW
冷凍機	55.38 kW
循環ポンプ	0.28 kW
冷却水設備	4.66 kW

(測定期間: 2012/11/12~19の平均値)

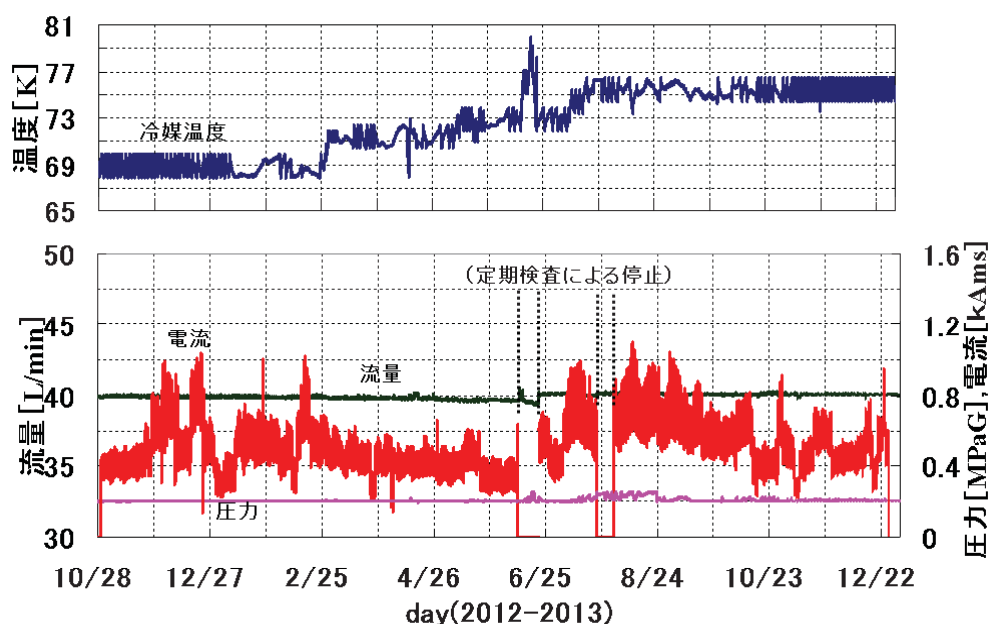
- 機器の複数台配置により、配管・バルブ等の熱損失が増加しCOP低下
→ 実証試験で顕在化した課題として、大容量・高効率冷却システムの開発へフィードバック

主要成果 【4】系統接続開始後の初期特性



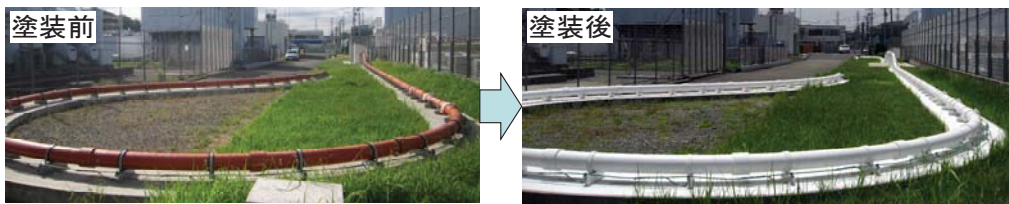
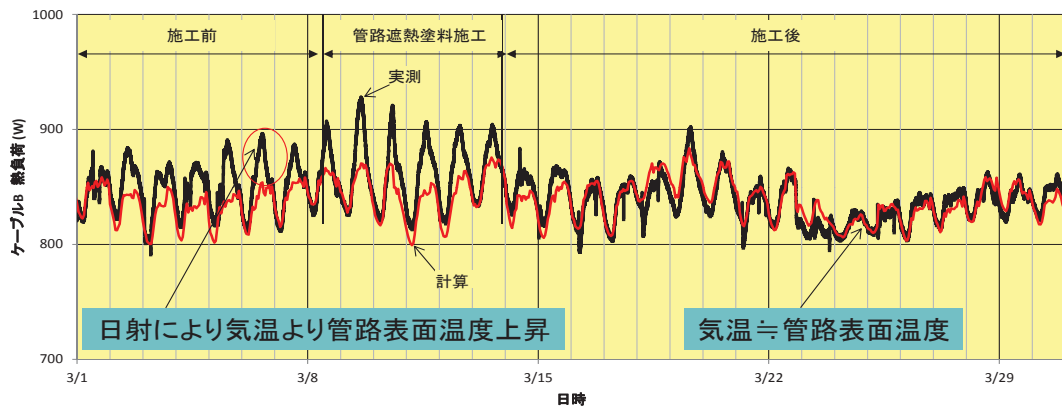
■ 系統連系接続後も温度差一定に維持されており、安定運転を確認。

主要成果 【4】全期間の運転状況推移



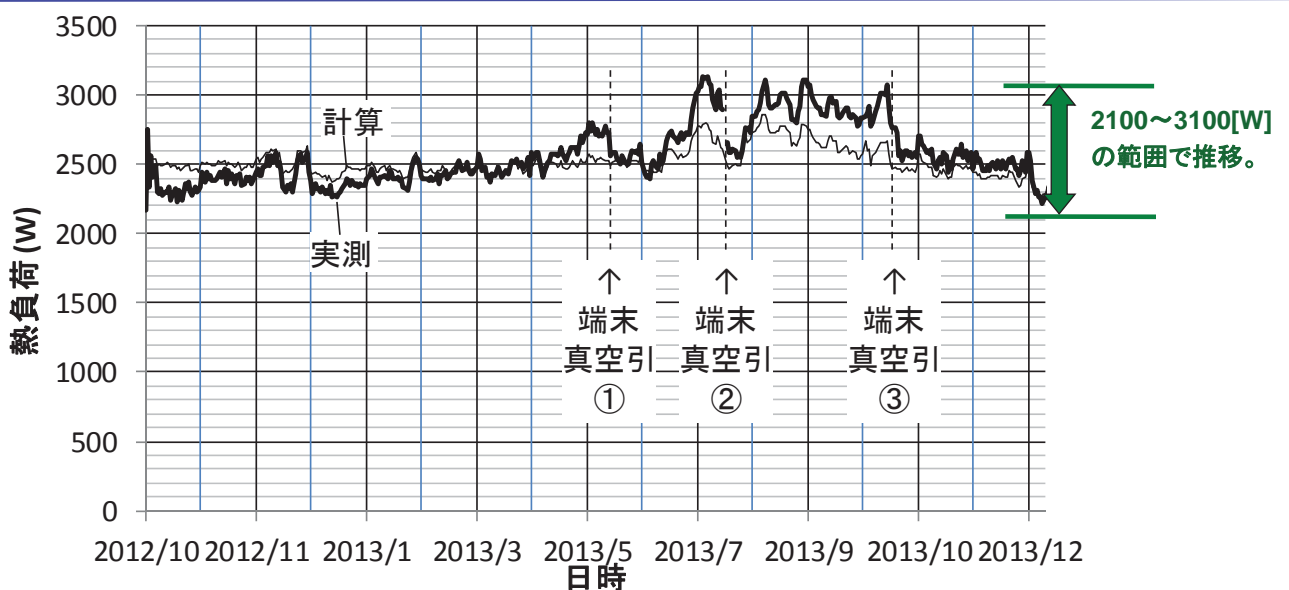
■ 運転温度変更: 最高77Kまで運転温度を変更し、冷凍機冷却能力、LN₂ 圧力上昇等の変動要因に対する安定運転維持を確認。

主要成果 【4】日射の影響評価と対策効果検証



■ 塗装前は昼間に急激な温度上昇があったが、塗装後は温度上昇が抑制され、計算でよくシュミレートできることを確認。

主要成果 【4】熱負荷経時変化の検証

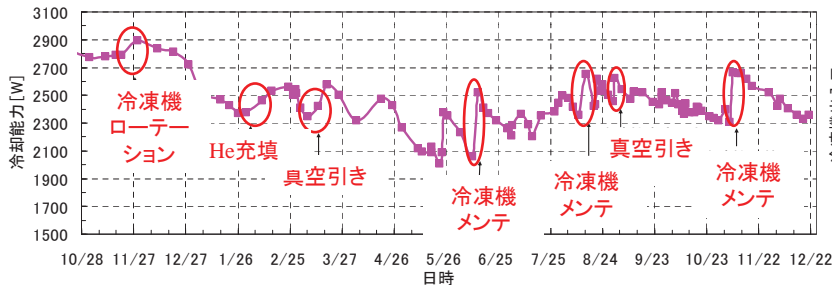


■ 5月以降、計算値に対し実測値の熱負荷増加を確認。

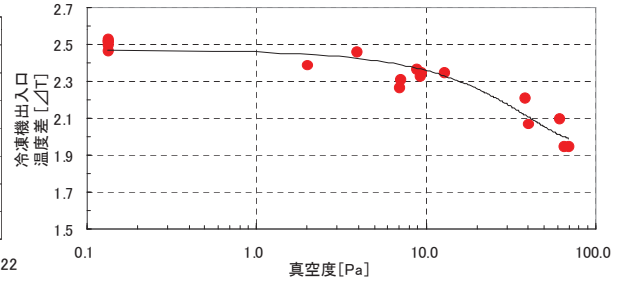
→ 真空引きによる改善効果が確認された為、真空度維持が課題であると判明。

主要成果 【4】冷却能力の経時変化検証

冷却能力は実システム運転開始から一ヶ月経過後、徐々に性能低下。



冷却能力推移



真空度低下による冷却能力低下

■対策1:「定期的な冷凍機真空引き」

効果:30~100 [W/台]

対策2:「冷媒He充填」

効果:40 [W/台]

対策3:「冷凍機メンテナンス(基準:8000[h]毎)」

効果:100~400 [W/台]

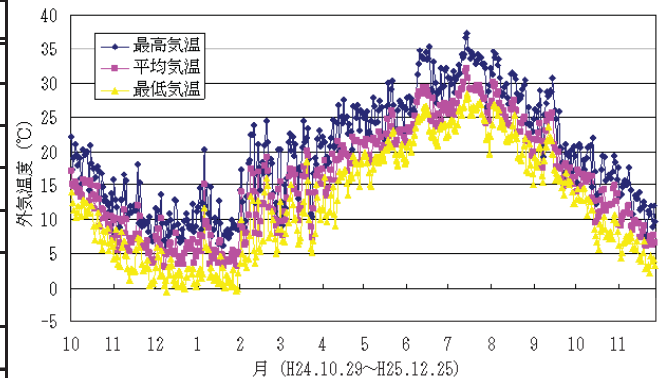
主要成果 【4】システム運転実績

項目	内容
実システム接続期間	H24.10.29~H25.12.25 (約400日間:定期検査期間除く)
定期検査期間	H25.6.10~6.21、H25.7.22~7.31
最大電流	1127A (H25.8.10)
系統電圧	63.9kV~67.1kV
通電電流不平衡率	6.9%程度
シールド電流率	88%程度
系統切替	50回以上
過負荷	無
インパルス有無	無
事故電流	1回

主要成果 【4】実系統連系運転中の気象実績

項目	内容
平均外気温度	15.8 °C
最低外気温度	-0.5 °C (H25.1.6)
最大外気温度	37.4 °C (H25.8.11)
台風接近・上陸	有(横浜市)
平均風速	3.7 m/s
最大風速	19.0 m/s ※台風26号接近時(H25.9.16)
最大震度	震度4 ※1回 (H24.11.24)
最大積雪	13 cm (H25.1.14)

実系統連系期間中の気象実績

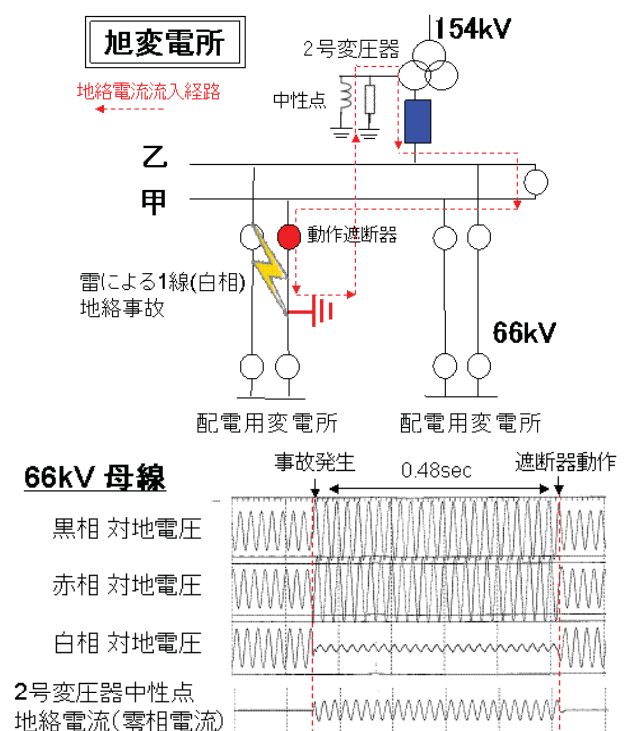


実系統連系期間中の外気温度の推移

主要成果 【4】雷による1線地絡事故の影響

項目	内容
発生日時	H25年8月12日 19:36:38
事故箇所	66 kV 架空送電線 白相
事故内容	雷による1線地絡事故
事故時間	0.48 秒(24 サイクル)
動作遮断器	旭(変)66 kV送電線 遮断器 (10 秒後、再閉路成功)
対地電圧 (事故前→事故時)	黒:38.1 kV → 54.5 kV 赤:38.1 kV → 64.6 kV 白:38.1 kV → 7.2 kV
相間電圧	変化なし(66 kV)
地絡電流	415 A
負荷電流	約1000 A(各相)

- 健全相対地電圧の上昇、地絡電流流入を経験。
- ・超電導ケーブルの運転は安定を維持。
- 残存性能試験においても健全性を確認。



主要成果 【4】警報発生実績評価

- 【重故障】:なし
- 【軽故障】:軽微な故障のみ。

警報発生実績

区分	分類	発生警報項目	内容	対策
軽故障	機器故障	UPS装置故障	UPSバッテリーの経年劣化	UPS取替
軽故障	運用・設定値不備	給水圧力低下	作業に伴う給水圧力低下	警報設定値変更
軽故障	運用・設定値不備	冷凍機油圧低下	瞬時値が警報設定値より低下	時限タイマー設置
軽故障	運用・設定値不備	冷凍機冷却水温度異常	外気温上昇による吐出ガス温度上昇	冷却水の流量増加
軽故障	運用・設定値不備	リザーバタンク圧力上昇	警報設定値と凝縮減圧弁動作値を同値にしていた為、減圧弁正常動作時に発生	タンク内液面低減

■超電導ケーブルシステムに関わる故障は発生せず、安定運転を確認。

まとめ

「成果」

- ・実システムにおける安定的な1年以上の運転実績
- ・系統切替を含む急激な負荷変動に対する安定制御
- ・運転後を含む電気性能の健全性維持
- ・冷凍機メンテナンスを含む保守技術確立

「実証試験で確認できなかった点、今後の課題」

- ・過大な事故電流の流入無し(実証試験では地絡電流の流入のみ)
- ・重大トラブルの実証なし(事故時の挙動未検証)
- ・効率向上必要(COP改善、真空度維持、ACロス低減)

「6.1-5. ケーブルの高性能化」 (公開)

平成26年9月3日

住友電気工業株式会社
増田 孝人

①重要要素技術の検証

公開

Ⅲ p.13-17

2

年度展開

項目	H19年度	H20年度	H21年度	H22年度	H23年度	H24年度	H25年度
1. システム構成・ 運転技術	実証場所選定	系統要求仕様・影響調査	平常時運転指	警報・遮断システムの設計	異常時運転指針		
2. ケーブル設計・ 製造	要素技術開発 交流損失 <1W/m/ph@2kA 短絡電流対策		30mケーブル 検証(熊取工場)		交流損失低減検討 <1W/m/ph@3kA	ケーブル 単体試験(旭)	
3. 冷却系設計・ 製造	冷却システム設計	冷却システム 製造		システム検証 (守谷工場)	冷却システム 単体試験(旭)	システム 総合試験(旭)	
4. 実系統運転							実証運転
5. ケーブル高性能 能化						ケーブル高性能化 コンパクト端末開発	
6. 冷却システム 高性能化					システム基本設計	性能検証	長期試験
7. 標準化	標準化項目整理		要素技術データ収集・提供			実証データ収集・提供	

開発目標

発電機引き出し部のような、大電流(12kA以上)が通電可能な超電導ケーブルの開発を実施する。

項目	開発目標	達成度
④ケーブルの高性能化	ケーブル 【1】大電流ケーブル開発の課題の抽出 【2】ケーブルの設計検討、基本設計の完了 【3】12kA通電特性の確認、他相通電の影響確認 【4】事故電流通電時の評価	○ ○ ○ ○
	端末 【5】コンパクト端末の設計検討、基本設計の完了 【6】端末部材の試作、評価 【7】ブッシングの試作、評価	○ ○ ○

達成度：◎ 大幅達成、○ 達成、△ 達成見込み、× 未達

大電流ケーブル適用のターゲット

発電機引き出し線 (22kV/12kA級)



相分離密閉母線
(φ1000mm×3)



超電導ケーブル
(φ150mm×3)

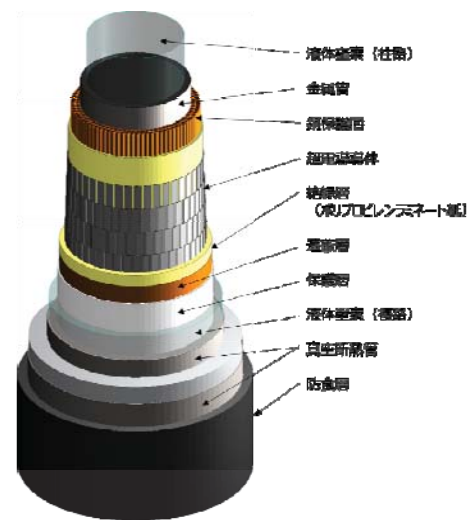
- ・コンパクトな形状
→ 水力、揚水発電所でのトンネル・岩盤掘削のコスト削減
- ・大電流送電時の低損失化
- ・フレキシブルなケーブル適用で、発電機と変圧器の配置自由度増

主要成果 【1】大電流ケーブルの課題

部位	項目	課題	今回検討内容
ケーブル	定格電流通電	12kA安定通電	<ul style="list-style-type: none"> ・ 導体部冷却特性向上を目指して、コア中心に冷却チャンネルを設ける。 ・ 短尺での12kA通電確認
	低損失化	<10W/m/ph	<ul style="list-style-type: none"> ・ シールドなし検討 ・ 短尺での損失測定（従来設計適用性確認）
	事故電流対応	63kA/0.6 sec対応	<ul style="list-style-type: none"> ・ 銅保護導体の検討 ・ 短尺での温度特性、線材への影響確認
端末	コンパクト化	現地スペース対応	コンパクト化のための基本構造検討
	通電・低損失化	電流リード、接続部の安定通電、低損失化	<ul style="list-style-type: none"> ・ 従来設計による電流リード試作、評価。 ・ 低損失化のための指針確認

主要成果 【2】ケーブル基本構造の設計検討

部位	仕様	補足説明
構造	単心型	三心型ではケーブル外径大で製造不可
フォーマ	中空金属パイプ（内部冷却）＋銅保護導体（400 mm ² ）	冷却能力の向上 60kA級短絡電流対応
超電導導体	4層（DI-BSCCO線材）	AC線材にて低損失化
電気絶縁	PPLP (t=3 mm)	22kV級の従来設計
遮蔽層	銅テープ	超電導層なし（低コスト化）
保護層	クラフト紙、布テープ	
断熱管	二重SUSコルゲート管（SI & 真空断熱）	従来設計



主要成果 【3】ケーブル通電特性の確認

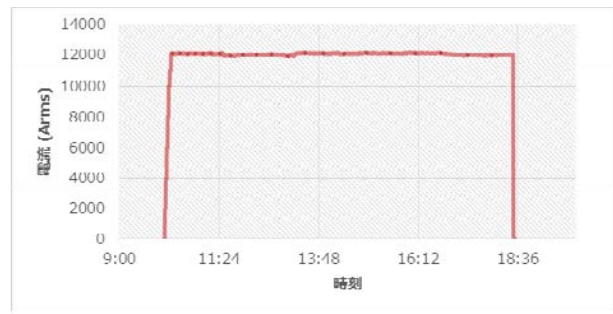
12kA安定通電、交流損失評価



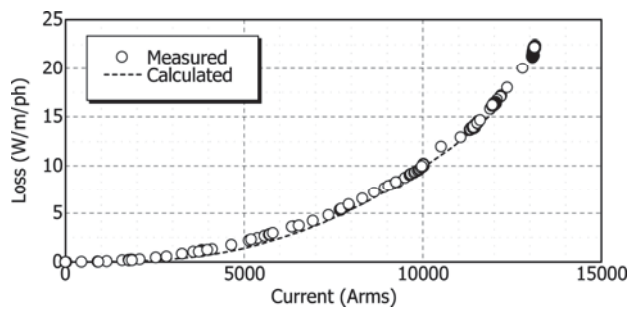
サンプルケーブル(3m)

15W/m@12kA

→さらなる低減が必要



12kA安定通電の確認



交流損失測定結果

主要成果 【3】ケーブル通電特性(他相の影響)

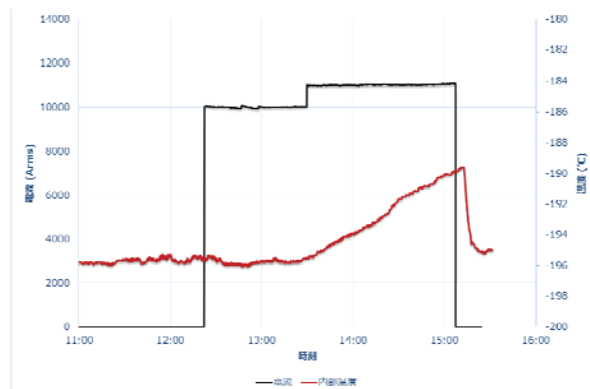
通電特性(2相通電)



サンプルケーブル(3m)

通電結果

単相通電では12kA安定通電可能であったが、
2相通電では、他相の磁場の影響により11kA通電時で温度上昇
→他相磁場考慮したIcマージンを設計に考慮



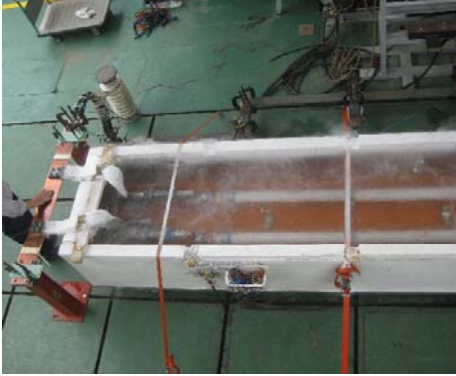
通電試験結果(2相)

主要成果 【4】事故電流通電時の評価

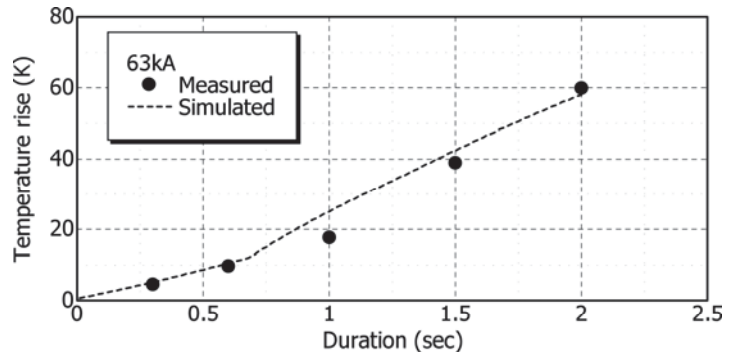
短絡試験(63kA, 2sec)

試験結果

63kA/2secでの温度上昇は、約60Kと計算通りの値。
試験前後でのIc特性に変化なし。



サンプルケーブル(3m)
フォーマCuサイズ(400mm²)



通電試験結果 (2相)

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価

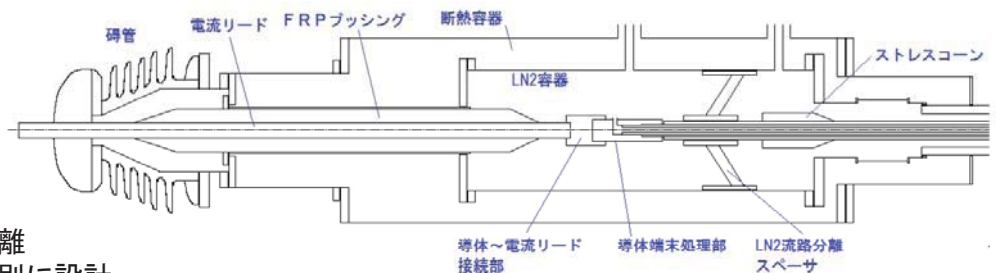


主要成果 【5】端末のコンパクト化検討

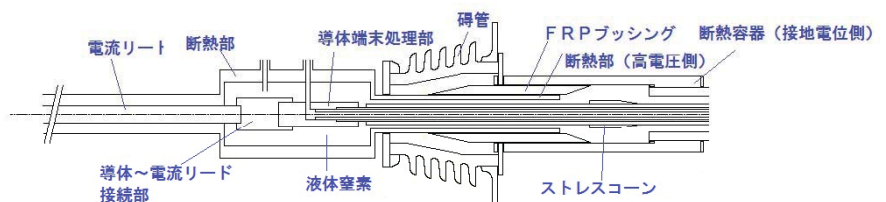
設計の特徴

- 電流リードとブッシングを分離
→ブッシングと電流リードを個別に設計
・従来設計では、電流リードとブッシングが一体化しているため、ブッシングが大きくなる方向
・本設計では、ブッシングサイズを小さくし、電流リードの設計に自由度あり。

- 電流リードとケーブルの接続部を高電圧部に設置
→容器側と同電位であるため、大きな隔離は不要



従来設計



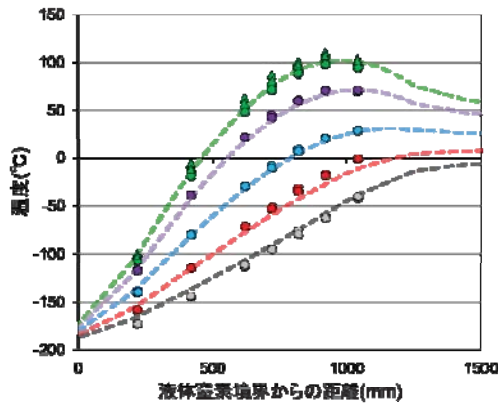
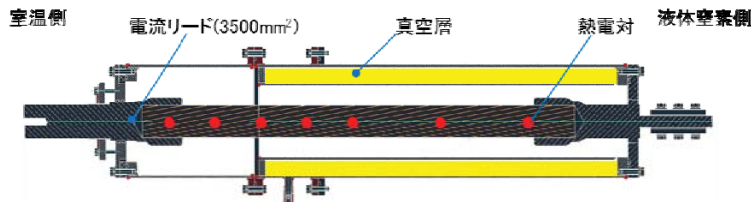
考案した設計

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価



主要成果【6】電流リードの設計検討

従来設計での電流リード試作、評価（撚り線、3500mm²）



12kA安定通電の確認

損失820W@12kA

→従来設計通り

低損失化の指針

・導体の交直比の低減

3500SQ(交直比3)

→3次撚線等、交直比を1に近づけ

通電に寄与しない断面積の低減

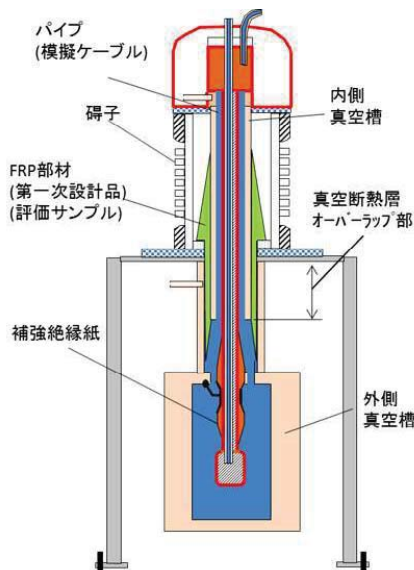
・常温部での熱交換量の増加

→熱交換面積の増加等

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価



主要成果【7】ブッシングの試作・評価



試験装置全体写真

電圧が印加するブッシング部をFRPにて試作し、課電試験を実施。

試験条件

AC45 kV×10分間、

IMP±165 kV各3回

(電力用規格A-257「22 kV

CVケーブル用がい管」による)

→良好に課電できることを確認

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価



成果のまとめと今後の課題

大電流超電導ケーブルと端末の設計検討および要素技術開発を行った。

- ・ケーブル構造→単心型(空芯コア、超電導シールド無し)を選択。
- ・12kA安定通電、交流損失は15W/m/ph
→今後、低交流損失線材の使用等で低損失化を計る。
- ・他相の磁場の影響を調査→設計に反映する。
- ・電流63kA/2secの短絡試験を実施→ケーブルにダメージがないことを確認。
- ・短絡時の電磁力は1300kg/m

- ・端末については、大電流通電可能なコンパクトな構造の基本設計を行った。
- ・従来設計での電流リードで12kA通電を実施。損失820W/本。
→電流リード導体の交直比を低減させ、低損失化を計る。
- ・FRPブッシングを試作→課電試験良好



大電流ケーブル、端末の基本設計を完了

「6.1-6 冷却システムの高性能化」 (公開)

平成26年9月3日

株式会社前川製作所 町田 明登

6.1-6 冷却システムの高性能化

公開

Ⅲ p.13-17

2

年度展開

項目	H19年度	H20年度	H21年度	H22年度	H23年度	H24年度	H25年度
1. システム構成・ 運転技術	実証場所選定	系統要求仕様・影響調査	警報・遮断システムの設計	異常時運転指針			
2. ケーブル設計・ 製造	要素技術開発 交流損失 <1W/m/ph@2kA 短絡電流対策	30mケーブル 検証(熊取工場)	交流損失低減検討 <1W/m/ph@3kA	ケーブル 製造・布設	ケーブル 単体試験(旭)	システム 総合試験(旭)	
3. 冷却系設計・ 製造	冷却システム設計	冷却システム 製造	システム検証 (守谷工場)	冷却システム 単体試験(旭)			
4. 実系統運転							実証運転
5. ケーブル高性 能化						ケーブル高性能化 コンパクト端末開発	
6. 冷却システム 高性能化					システム基本設計	性能検証	長期試験
7. 標準化	標準化項目整理	要素技術データ収集・提供				実証データ収集・提供	

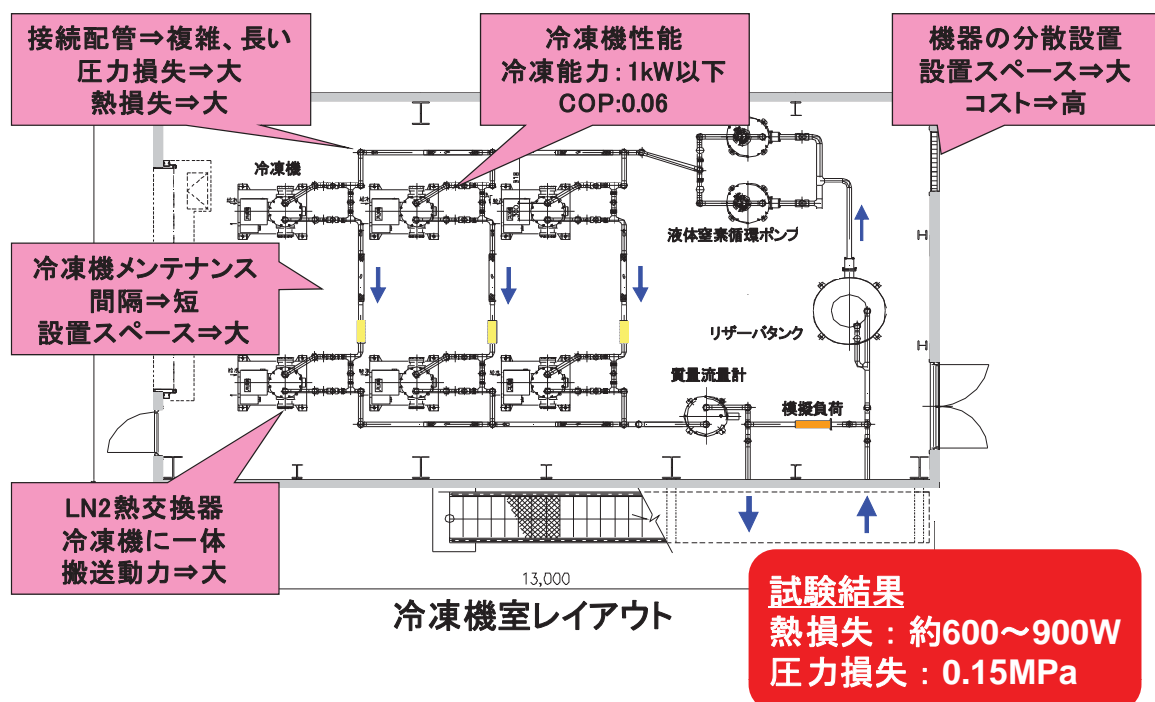
事業目標の達成度

基本計画： 冷凍能力:5 kW、COP:0.1、メンテナンス間隔:30,000時間以上の性能を満たす大容量高効率冷却システムを開発する

事業目標(実施計画書)		達成度	
項目	内容		
冷却システムの高性能化	(i)ケーブル実用化時の冷却システム要求仕様検討	【1】ケーブル実用化時の冷却システムへの要求事項、実証用冷却システムの課題を整理、開発目標性能を策定	○
	(ii)大容量高効率冷却システムの基本設計	【2】ターボ圧縮機・膨張機的设计、製作、単体試験 【3】冷却システムの全体設計	○ ○
	(iii)冷凍機単体での性能試験	【4】熱交換器、循環ポンプ等を組み合わせた性能試験を実施	○
	(iv)冷却システム全体での性能試験	【5】ケーブルを模擬した熱負荷での制御性や長期の運転性能を確認	○

達成度：◎大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

主要成果 【1】実証用冷却システムの課題抽出



主要成果 【1】大容量高効率冷却システムの開発目標決定

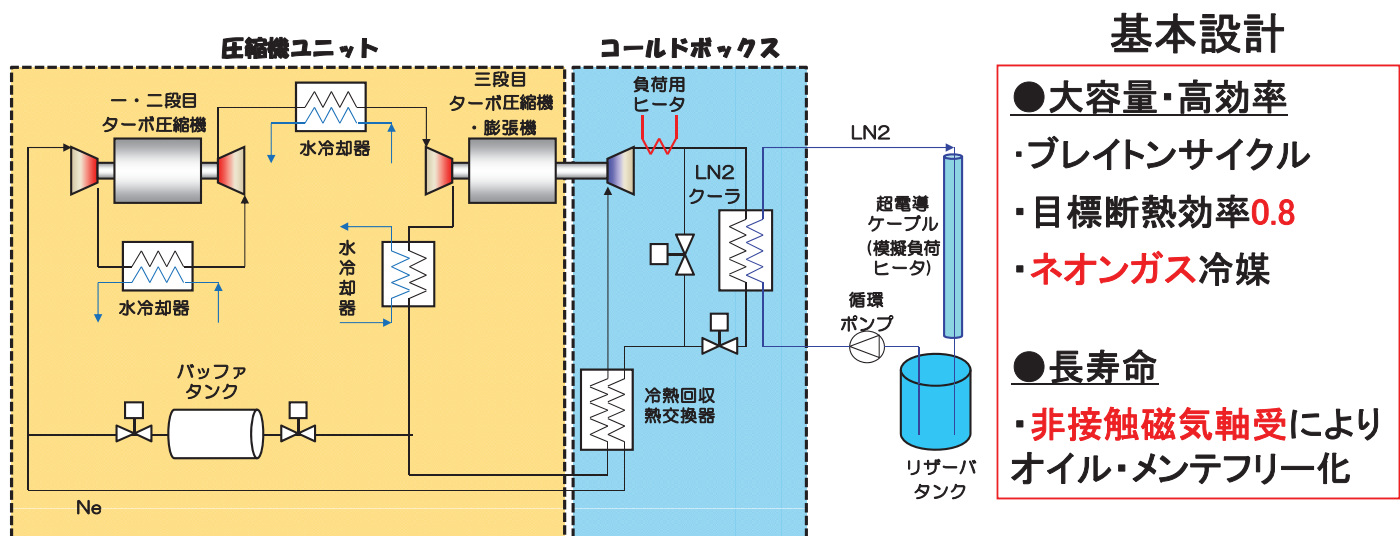
高温超電導ケーブル実用化時の要求性能

- ・ケーブル実用化時の必要冷凍能力は**5~20 kW(単機容量)**が望ましい
- ・ケーブルシステム損失を**50 %削減**(従来比)するためにはCOP**0.1**が必要
- ・地中線間接水冷システムの定期検査間隔と冷凍機メンテナンス間隔は**同等である**ことが望ましい

大容量高効率冷却システムの開発目標

項目	開発目標	従来性能*	開発のポイント	備考
容量	5kW級	1kW	ブレイトンサイクル	10,20kW級へ応用可
COP	0.1	0.06	圧縮・膨張機の高効率化と一体化	冷却水含む
メンテナンス間隔	30,000時間	8,000時間	非接触磁気軸受の開発	間接水冷システムの定期検査間隔を参考

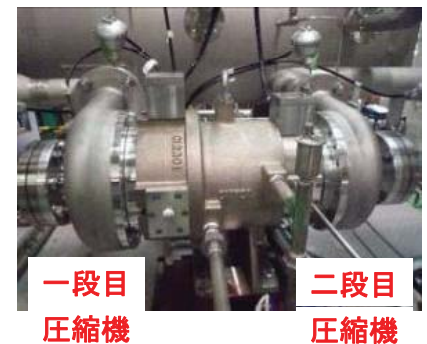
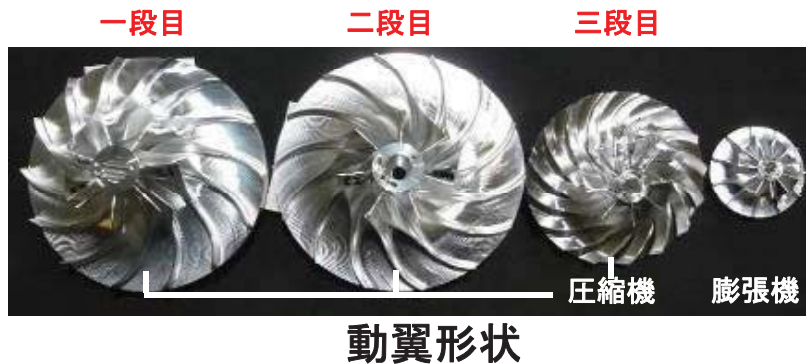
主要成果 【2】ブレイトン冷凍システムの基本設計



ブレイトン冷凍システムの基本フロー

主要成果 【2】ターボ圧縮機・膨張機的设计、製作

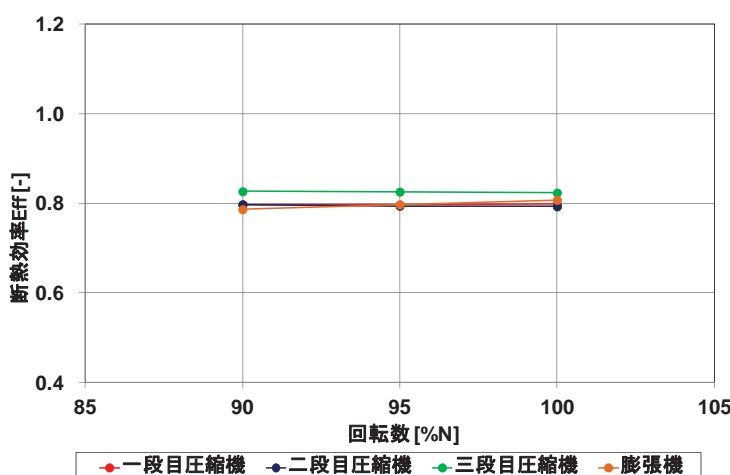
	単位	一段目 圧縮機	二段目 圧縮機	三段目 圧縮機	膨張機
入口圧力	MPa	0.27	0.37	0.52	0.73
入口温度	K	308	313	313	78
流量	kg/s	0.33			
定格回転数	rpm	47,000		65,000	
目標断熱効率	-	0.8	0.8	0.8	0.8



高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価



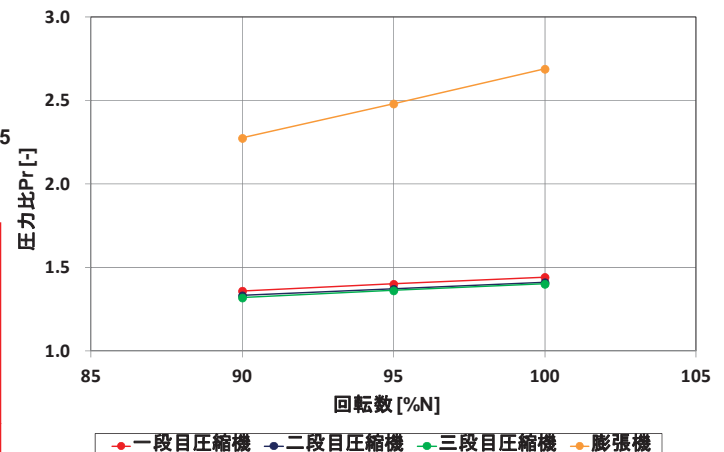
主要成果 【2】ターボ圧縮機・膨張機のパフォーマンス試験



ターボ圧縮機・膨張機設計通り

・断熱効率: **0.8**

・圧力比: **1.4** (膨張機**2.6**)



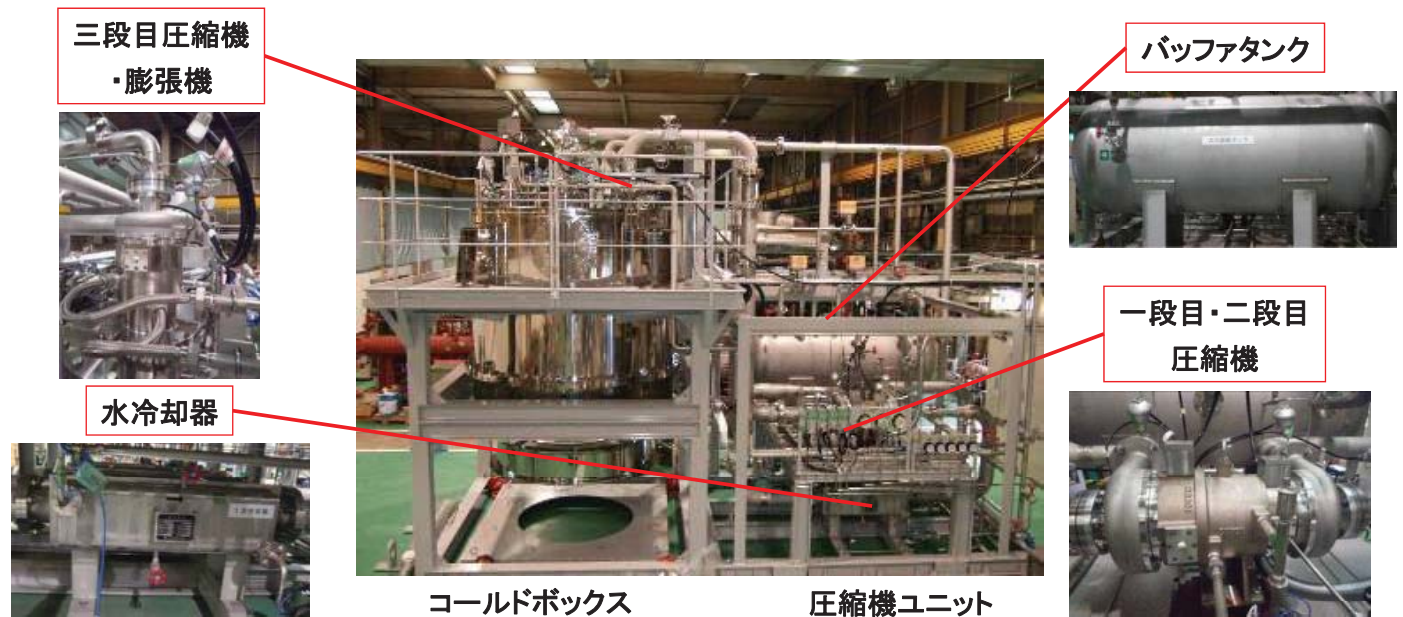
膨張機断熱効率には**圧縮部から膨張部へのガス流通と膨張機動翼部の隙間調整が重要であることを確認**

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価

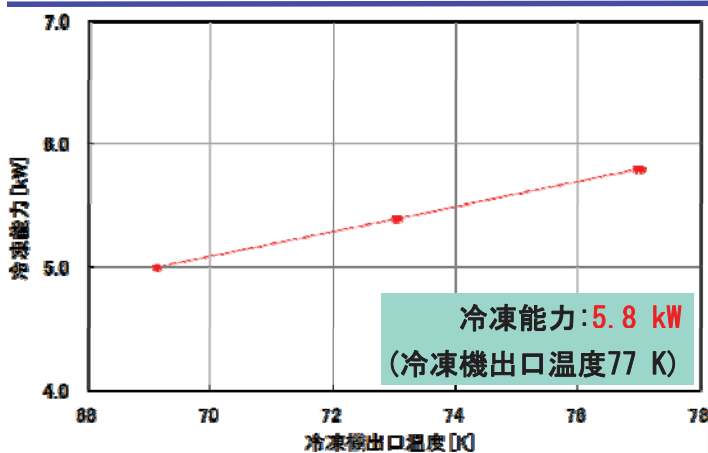


主要成果 【3】ブレイトン冷凍機の全体設計

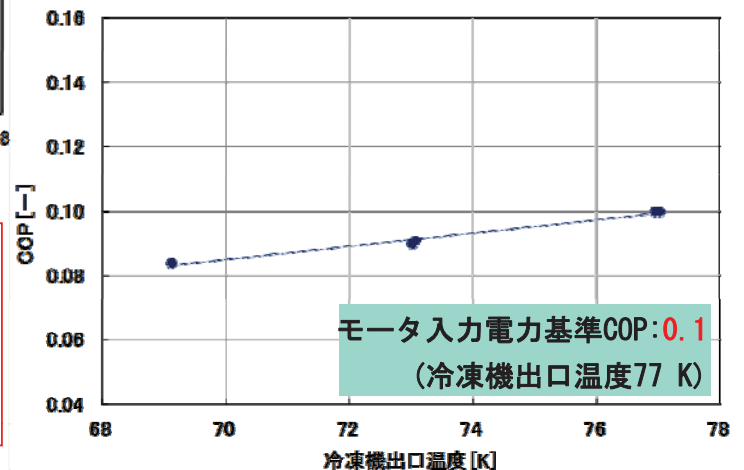
実証用冷却システム建屋の面積や耐震強度等を考慮して設計



主要成果 【4】ブレイトン冷凍機の性能試験

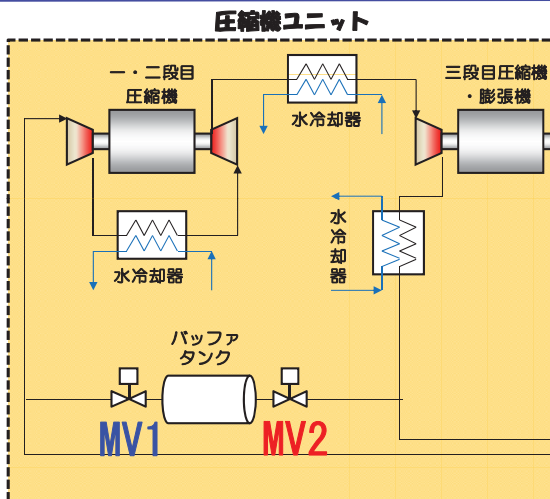


冷凍能力、COPともに
開発目標を達成



電気総合効率: 80% (設計値90%)
高速ビルトインモータの風損
低減により高効率化の可能性

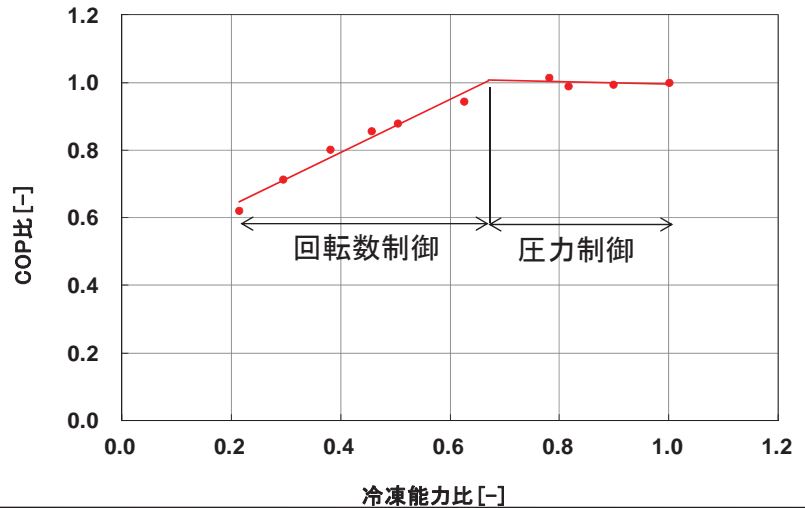
主要成果 【4】ブレイトン冷凍機の容量制御



容量制御方法

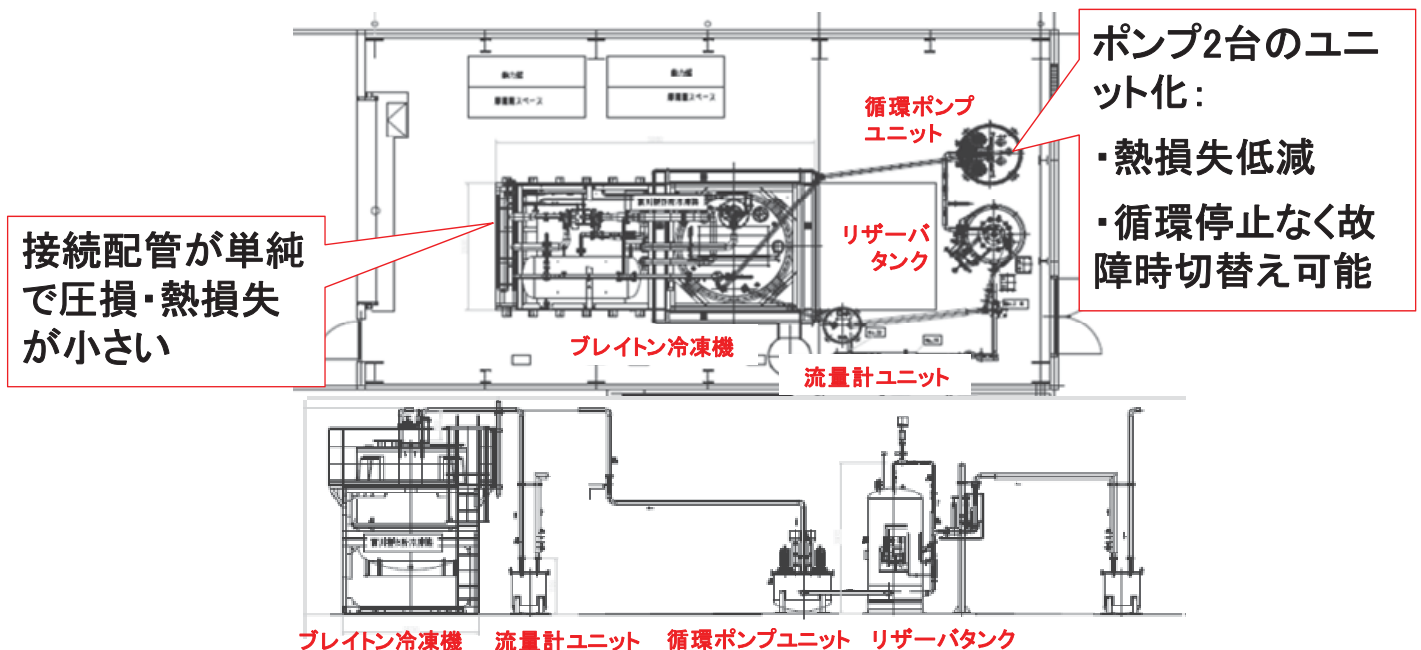
- ・冷凍能力増加 → 循環Ne流量増加 (MV1コントロール)
- ・冷凍能力減少 → 循環Ne流量減少 (MV2コントロール)

高COP一定での容量制御方法を考案 (特許出願)。ケーブル熱負荷の変動に対し、常に**最高COP**で運転可能



主要成果 【5】ブレイトン冷却システムのレイアウト

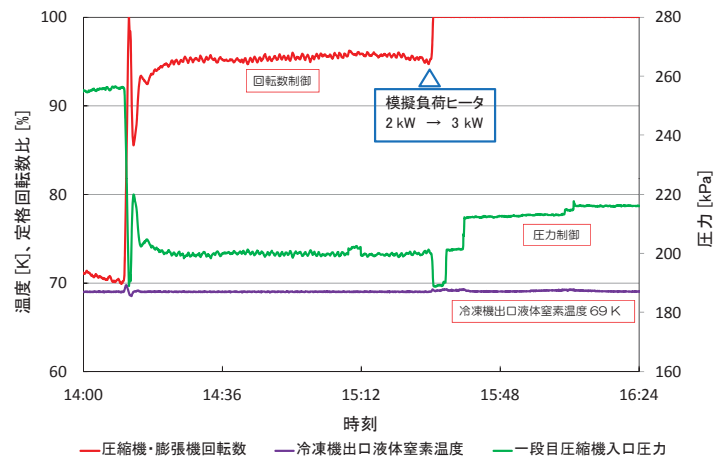
旭変電所冷却システム室に設置した場合



主要成果 【5】基本性能確認試験の結果

試験結果の一例

項目	内容	結果	
基本性能	循環運転	初期冷却の自動制御を確認	動作性良好。予冷時の消費LN2量・予冷時間低減
	冷凍能力	ブレイト冷凍システムの冷凍能力確認	5.8 kW@77 K
	COP、圧力・熱損失	COP、圧力損失、熱損失確認	COP:0.1 W@77 K 圧力・熱損失は実証用の半分
制御性	温度制御	繰り返しの負荷変動による温度制御性確認	制御範囲内での温度コントロールを確認
	負荷追従性	急激な負荷変動変化における冷凍機制御性確認	冷凍機の容量制御に問題がないことを確認

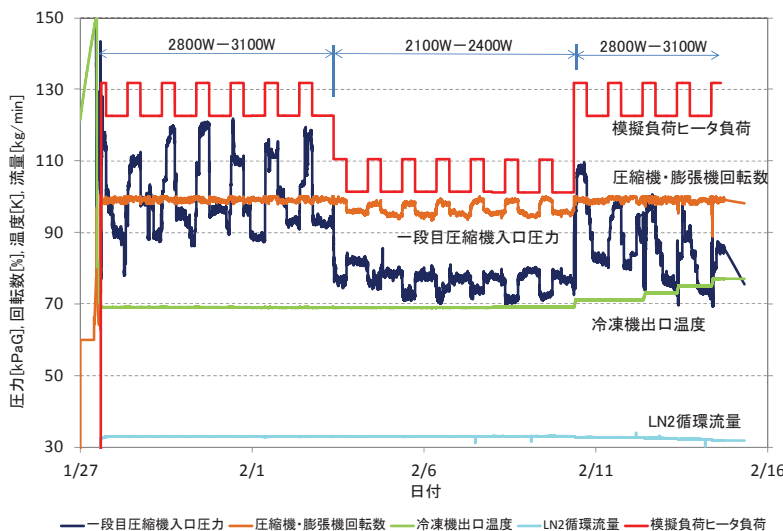


負荷追従性試験結果

性能・機能・制御性ともに良好であることを確認

主要成果 【5】総合運転試験の結果

週	9:00 - 18:00	18:00 - 翌9:00	冷凍機出口制御温度	容量制御方式
1	3.1 kW	2.8 kW	69 K	圧力
2	2.4 kW	2.1 kW	69 K	圧力・回転数
3	3.1 kW	2.8 kW	69 - 77 K(+2 K/day)	圧力



・連続運転での制御性・信頼性を確認
・繰り返し負荷変動での安定温度制御を確認

成果まとめと今後の課題

成果まとめ

- ・冷凍能力:5.8 kW、COP:0.1(液体窒素温度77 K)は**開発目標を達成**
 - ・**高COP一定容量制御方法を考案**(特許出願)
 - ・**ケーブル用冷却システムとしての健全性を確認**
 - ・累計1,000時間以上でのトラブルなし
- メンテナンス間隔30,000時間達成の見通し**

今後の課題

- ・圧縮機-膨張機でのガス流通、膨張機の間隙調整、モータ部での風損低減により**さらなる高効率化の見通し**
- ・長時間特性評価(メンテナンス間隔 30,000時間)の検討

「6.2 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究」 (公開)

平成26年9月3日

住友電気工業株式会社
 増田 孝人

6.2 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究

年度展開

項目	H19年度	H20年度	H21年度	H22年度	H23年度	H24年度	H25年度
1. システム構成・ 運転技術	実証場所選定	系統要求仕様・影響調査	平常時運転指 針	警報・遮断システムの設計 関連法令手続き	異常時運転指針		
2. ケーブル設計・ 製造	要素技術開発 交流損失 <1W/m/ph@2kA 短絡電流対策	30mケーブル 検証(熊取工場)		交流損失低減検討 <1W/m/ph@3kA	ケーブル 製造・布設	ケーブル 単体試験(旭)	
3. 冷却系設計・ 製造	冷却システム設計	冷却システム 製造	システム検証 (守谷工場)	冷却システム 単体試験(旭)		システム 総合試験(旭)	
4. 実系統運転							実証運転
5. ケーブル高性 能化						ケーブル高性能化 コンパクト端末開発	
6. 冷却システム 高性能化					システム基本設計	性能検証	長期試験
7. 標準化	標準化項目整理		要素技術データ収集・提供			実証データ収集・提供	

開発目標

項目	開発目標	達成度
(1) 高温超電導ケーブルの標準化研究	【1】超電導送電システムの国際規格化を進めるための試験法に関する標準化項目の作成	○
	【2】試験データ等をCIGREへ提供し、試験法の標準化へ貢献する。	○ ○
	【3】国際標準化のために、IECへ情報提供を実施する。	
(2) 高温超電導ケーブルの適用技術研究	【4】超電導ケーブル適用効果、導入効果の評価項目の整理	○
	【5】高温超電導ケーブルシステムの適用効果、導入効果の評価 交流損失必要特性のまとめ	○ ○
(3) 関連法規への対応	高圧ガス保安法及び電気事業法等の関連法規への対応プロセスのまとめ	○
	関連法規に対する課題、今後の方針案のまとめ	○

達成度：◎ 大幅達成、○ 達成、△ 達成見込み、× 未達

主要成果 【1】試験項目の整理

No.	項目	要素試験	30m出荷試験	30m試験	実証出荷試験	実証竣工試験	残存性能試験
1	商用周波長時間耐電圧試験	●	●		●		●
2	長期導通試験			○			
3	商用周波耐電圧試験	●		○(2の後)			
4	雷インパルス耐電圧試験(絶縁体)	●	●	●(2の後)	●		●
5	雷インパルス耐電圧試験(保護層)			●	●		●
6	出荷耐電圧試験		●		●		
7	部分放電試験	●	●	○	●		●
8	絶縁耐力試験			○		○	
9	外観点検	○	○	○	○	○	○
10	静電容量試験	●(室温、低温)	○(室温)、●	○	○(室温)、●	○	●
11	誘電工接試験	●	●	○	●	○	●
12	絶縁抵抗試験		●(室温)	○	○(室温)	○	○
13	直流耐電圧試験(シース)		○		○		○
14	導体抵抗試験(フォーム)		●(室温)	○(室温)	○(室温)	○(室温)	
15	構造試験		●		●		●
16	曲げ試験	●	●		●		
17	極度曲げ試験	●(参考)					
18	フーリングアイ試験	●					
19	I _g 測定(導体、シールド)	●	●	○(導体のみ)	●	○(導体のみ)	●
20	交流損失測定	●	●	○(ΔT)	●		●
21	断熱管侵入熱測定	●(参考)		○(参考)		○(参考)	
22	断熱管側圧試験	●(参考)					
23	引張り、圧縮試験	●(参考)					
24	短絡試験(31.5kA)	●					
25	短絡導通試験	●					
26	短絡保護試験	●					
27	ケーブルコア側圧試験	●					
28	耐圧力試験		■(室温)	■(室温)	■(室温)	■(室温)	
29	気密試験		○(室温)	○(室温)	○(室温)	○(室温)	
30	真空リーク試験		○(室温)	○(室温)	○(室温)	○(室温)	
31	布設模擬試験	●					
32	圧力損失測定			○(参考)		○(参考)	
33	インダクタンス測定	●(参考)	●(参考)		●(参考)		
34	液体窒素性能検査						●(参考)

● サンプル or モデル試験
○ 全長試験
■ 部品での試験
□ 既存ケーブルを考慮した試験
◻ 超電導ケーブル特有の試験

主要成果 【2】【3】国際標準化への取り組み

我国が国際的イニシアティブを取るべく、産官学連携して、国際標準化へ取り組み中

【IEC関連活動】

・IEC国内委員会(TC20&90)を中心にアドホック委員会を設立(H19/5月)



CIGREに検討要請

【CIGREの活動】

・SC-B1内にTFを設置、依頼を取り上げるか否か検討(H20/10～H21/9)→賛成で可決
・超電導ケーブル試験法に関する可能性について、WG内で3年間検討する(H21/9月)



IEC内の審議を経て、国際標準化へ

本プロジェクトの貢献内容

- ・試験法に関して整理
- ・30mケーブル試験での試験方法の検証、試験結果の妥当性の確認
- ・国内委員会、CIGRE委員会への情報提供



主要成果 【2】【3】国際標準化への取り組み

●CIGRE WG B1.31へ貢献

主査:米国、幹事:日本

参加国 蘭、カナダ、韓国、独、仏、伊、西、印

超電導ケーブル試験法に関するガイドライン作成

CIGRE TB538として発刊(2013/6)



実証プロジェクト
試験方法、試験結果
の情報提供

●IECでの国際標準化活動へ貢献

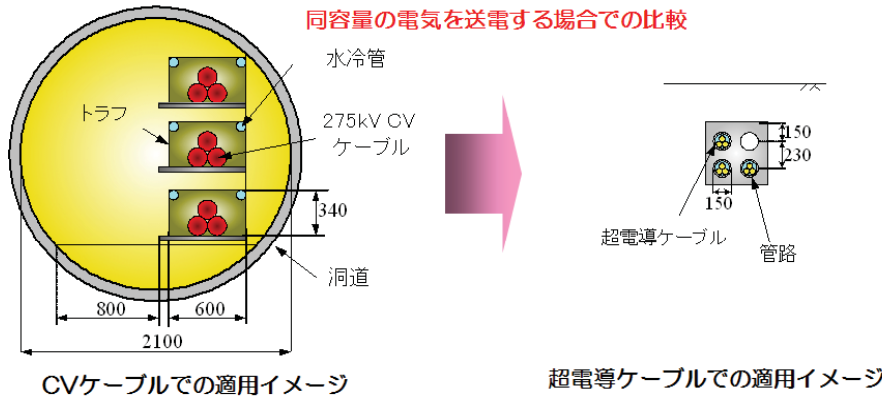
CIGREでの活動を受けて、IECで準備中

アドホックメンバーとして参加。提案書準備中

主要成果 【4】【5】導入効果の検討

66kV級地下送電ケーブルの導入効果検討

項目	CVケーブル	超電導ケーブル
容量・回線数	350 MVA × 3回線	350 MVA × 3回線
定格電圧、電流	275 kV / 0.75 kA	66 kV × 3 kA
回線長	10 km	10 km
布設形態	新設洞道	既設管路

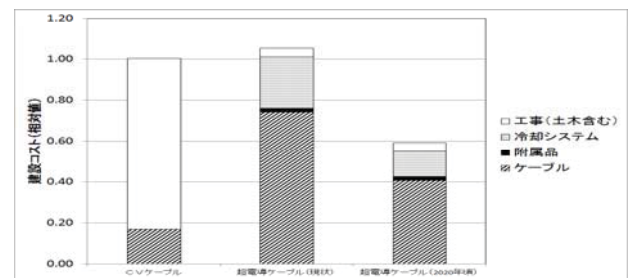


主要成果 【4】【5】導入効果の検討

66kV級地下送電ケーブルの導入効果検討

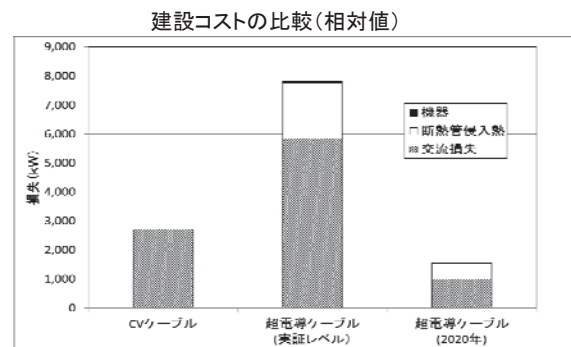
建設コスト計算条件

項目	CVケーブル	超電導ケーブル (現状)	超電導ケーブル (2020年)
ケーブル	200 k¥/m/回線		
超電導線材		10 ¥/Am	5 ¥/Am
冷却システム		30 M¥/kW	15 M¥/kW
工事費用	3 M¥/m	50 k¥/m	50 k¥/m



送電損失計算条件 (超電導ケーブル)

項目	実証レベル	2020年レベル
交流損失	2.5 W/m/ph@3 kA	1 W/m/ph@3 kA
誘電損失	0.1W/m/ph@66kV	0.1W/m/ph@66kV
断熱管損失	2.5 W/m	1.8 W/m
機器損失	800W/基	700W/基
冷却システム COP	0.04	0.1

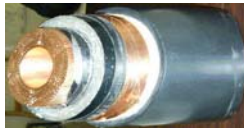


CVケーブルの損失 100W/m

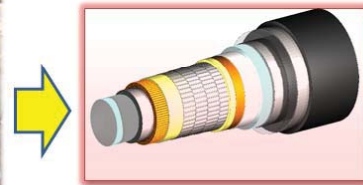
主要成果 【4】【5】導入効果の検討

発電機引出しケーブルの導入効果検討

項目	従来設備	超電導ケーブル
容量・回線数	450 MVA × 1回線	450 MVA × 1回線
定格電圧、電流	22 kV / 12 kA	22 kV × 12 kA
長さ	100 m	100 m
布設形態	新設洞道	既設点検スペース



内部水冷CVケーブル

相分離密閉母線
(φ1000mm×3)超電導ケーブル
(φ150mm×3)

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価

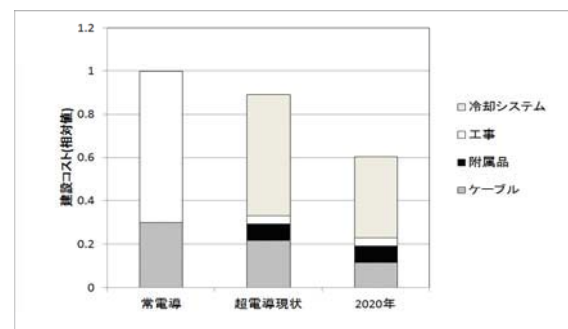


主要成果 【4】【5】導入効果の検討

発電機引出しケーブルの導入効果検討

建設コスト計算条件

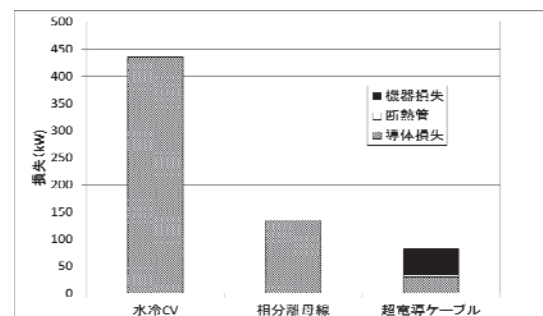
項目	相分離母線	超電導ケーブル (現状)	超電導ケーブル (2020年)
ケーブル	800 k¥/m/相		
超電導線材		10 ¥/Am	5 ¥/Am
冷却システム		30 M¥/kW	15 M¥/kW
工事費用	3 M¥/m	50 k¥/m	50 k¥/m



建設コストの比較(相対値)

送電損失計算条件

項目	水冷CV	IPB	超電導ケーブル 2020年レベル
導体損失(W/m/ph)	1450	455	10
断熱管損失(W/m)			1
機器損失(W/基)			800
冷却システムCOP			0.1



送電損失の比較

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事後評価



成果のまとめ

●標準化研究

・CIGREへ試験データ等の情報を提供し、超電導ケーブル試験法に関するガイドライン制定に貢献した。

→今後は、IECでの国際規格制定を目指し、日本の意見を発信していく。

●適用研究

・66kV地下送電システム、22kV発電機引き出し線についてコストメリットを計算し、従来システムの60%になる目途を得た。

・送電損失についても、従来システムの60%になる目途を得た。

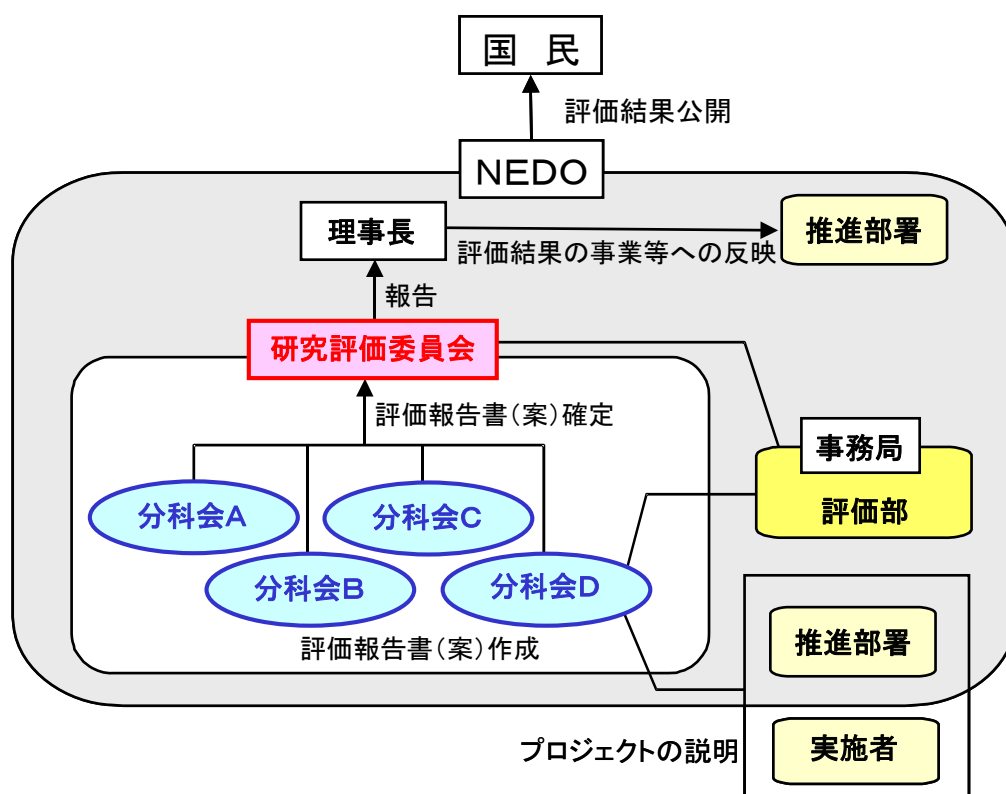
→冷却システムのCOP向上、断熱管低損失化など必要。

参考資料 1 評価の実施方法

本評価は、「技術評価実施規程」（平成 15 年 10 月制定）に基づいて研究評価を実施する。

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）における研究評価の手順は、以下のように被評価プロジェクトごとに分科会を設置し、同分科会にて研究評価を行い、評価報告書（案）を策定の上、研究評価委員会において確定している。

- 「NEDO 技術委員・技術委員会等規程」に基づき研究評価委員会を設置
- 研究評価委員会はその下に分科会を設置



1. 評価の目的

評価の目的は「技術評価実施規程」において。

- 業務の高度化等の自己改革を促進する
 - 社会に対する説明責任を履行するとともに、経済・社会ニーズを取り込む
 - 評価結果を資源配分に反映させ、資源の重点化及び業務の効率化を促進する
- としている。

本評価においては、この趣旨を踏まえ、本事業の意義、研究開発目標・計画の妥当性、計画を比較した達成度、成果の意義、成果の実用化の可能性等について検討・評価した。

2. 評価者

技術評価実施規程に基づき、事業の目的や態様に即した外部の専門家、有識者からなる委員会方式により評価を行う。分科会委員選定に当たっては以下の事項に配慮して行う。

- 科学技術全般に知見のある専門家、有識者
- 当該研究開発の分野の知見を有する専門家
- 研究開発マネジメントの専門家、経済学、環境問題、国際標準、その他社会的ニーズ関連の専門家、有識者
- 産業界の専門家、有識者

また、評価に対する中立性確保の観点から事業の推進側関係者を選任対象から除外し、また、事前評価の妥当性を判断するとの側面にかんがみ、事前評価に関与していない者を主体とする。

これらに基づき、分科会委員名簿にある7名を選任した。

なお、本分科会の事務局については、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構評価部が担当した。

3. 評価対象

平成19年度に開始された「超電導技術開発／高温超電導ケーブル実証プロジェクト」を評価対象とした。

なお、分科会においては、当該事業の推進部署から提出された事業原簿、プロジェクトの内容、成果に関する資料をもって評価した。

4. 評価方法

分科会においては、当該事業の推進部署及び実施者からのヒアリングと、それを踏まえた分科会委員による評価コメント作成、評点法による評価及び実施者側等との議論等により評価作業を進めた。

なお、評価の透明性確保の観点から、知的財産保護の上で支障が生じると認められる場合等を除き、原則として分科会は公開とし、実施者と意見を交換する形で審議を行うこととした。

5. 評価項目・評価基準

分科会においては、次に掲げる「評価項目・評価基準」で評価を行った。これは、NEDOが定める「標準的評価項目・評価基準」（参考資料 1-7 頁参照）をもとに、当該事業の特性を踏まえ、評価事務局がカスタマイズしたものである。

プロジェクト全体に関わる評価については、主に事業の目的、計画、運営、達成度、成果の意義、実用化に向けての見通しや取り組み等を評価した。各個別テーマに係る評価については、主に、その目標に対する達成度、成果の意義、実用化に向けての見通しや取り組み等を評価した。

評価項目・評価基準

1. 事業の位置付け・必要性について

(1) NEDOの事業としての妥当性

- ・ 特定の施策（エネルギーイノベーションプログラム／ナノテク・部材イノベーションプログラム）、制度の下で実施する事業の場合、当該施策・制度の目標達成のために寄与しているか。
- ・ 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされる事業か。
- ・ 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか。

(2) 事業目的の妥当性

- ・ 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献の可能性等から見て、事業の目的は妥当か。

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断できる具体的かつ明確な開発目標を設定しているか。

(2) 研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマごとの配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3) 研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 適切な研究開発実施体制になっており、指揮命令系統及び責任体制が明確になっているか。
- ・ 研究管理法人を経由する場合、研究管理法人が真に必要な役割を担っているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and/or 競争が十分に行われる体制となっているか。

- ・ 知的財産取扱（実施者間の情報管理、秘密保持、出願・活用ルール含む）に関する考え方は整備され、適切に運用されているか。

(4) 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

- ・ 成果の実用化・事業化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化・事業化シナリオに基づき、成果の活用・実用化の担い手、ユーザーが関与する体制を構築しているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダーが選任されている場合、成果の実用化・事業化シナリオに基づき、適切な研究開発のマネジメントが行われているか。
- ・ 成果の実用化・事業化につなげる知財戦略(オープン/クローズ戦略等) や標準化戦略が明確になっており、かつ妥当なものか。

(5) 情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向等に機敏かつ適切に対応しているか。

3. 研究開発成果について

(1) 目標の達成度と成果の意義

- ・ 成果は目標を達成しているか。
- ・ 成果は将来的に市場の拡大あるいは市場の創造につながることを期待できるか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。
- ・ 目標未達成の場合、達成できなかった原因が明らかで、かつ目標達成までの課題を把握し、この課題解決の方針が明確になっているなど、成果として評価できるか。
- ・ 設定された目標以外に技術的成果があれば付加的に評価する。
- ・ 世界初、世界最高水準、新たな技術領域の開拓、又は汎用性のある成果については、将来の産業につながる観点から特に顕著な成果が上がっている場合は、海外ベンチマークと比較の上で付加的に評価する。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 大学又は公的研究機関で企業の開発を支援する取り組みを行った場合には、具体的に企業の取り組みに貢献しているか。

(2) 知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、又は実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(3) 成果の普及

- ・ 論文等の対外的な発表は、将来の産業につながる観点から戦略的に行われているか。
- ・ 成果の活用・実用化の担い手・ユーザー等に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

4. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

実用化

- ①電力設備としての運用技術を確立すること
- ②年間を通じた安定性能を確認すること
- ③冷却システムの保守技術を確立すること

事業化

当該研究開発に係る機器、システム、サービス等の販売や利用により、企業活動(売り上げ等)に貢献することである。

(1) 成果の実用化・事業化の見通し

- ・ 産業技術としての見極め（適用可能性の明確化）ができているか。
- ・ 実用化に向けて課題が明確になっているか。課題解決の方針が明確になっているか。
- ・ 成果は市場やユーザーのニーズに合致しているか。
- ・ 実用化に向けて、競合技術と比較し性能面、コスト面を含み優位性は確保される見通しはあるか。
- ・ 量産化技術が確立される見通しはあるか。
- ・ 事業化した場合に対象となる市場規模や成長性等により経済効果等が見込めるものとなっているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
- ・ プロジェクトの直接の成果ではないが、特に顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)がある場合には付加的に評価する。

(2) 実用化・事業化に向けた具体的取り組み

- ・ プロジェクト終了後において実用化・事業化に向けて取り組む者が明確になっているか。また、取り組み計画、事業化までのマイルストーン、事業化する製品・サービス等の具体的な見通し等は立っているか。

はじめに

本「標準的評価項目・評価基準」は、「技術評価実施規程」に定める技術評価の目的^{*}を踏まえ、NEDOとして評価を行う上での標準的な評価項目及び評価基準として用いる。

本文中の「実用化・事業化」に係る考え方及び評価の視点に関しては、対象となるプロジェクトの特性を踏まえ必要に応じ評価事務局がカスタマイズする。

※「技術評価実施規程」第5条(技術評価の目的) ①業務の高度化等自己改革の促進、②社会への説明責任、経済・社会ニーズの取り込み、③評価結果の資源配分反映による、資源の重点化及び業務の効率化促進

なお「評価項目」、「評価基準」、「評価の視点」は、以下のとおり。

- ◆評価項目：「1. . . .」
- ◆評価基準：上記、各項目中の「(1) . . .」
- ◆評価の視点：上記、各基準中の「・」

評価項目・基準・視点

1. 事業の位置付け・必要性について

(1) NEDOの事業としての妥当性

- ・ 特定の施策（プログラム）、制度の下で実施する事業の場合、当該施策・制度の目標達成のために寄与しているか。
- ・ 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされる事業か。
- ・ 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか。

(2) 事業目的の妥当性

- ・ 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献の可能性等から見て、事業の目的は妥当か。

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断できる具体的かつ明確な開発目標を設定しているか。

(2) 研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマごとの配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3) 研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 適切な研究開発実施体制になっており、指揮命令系統及び責任体制が明確になっているか。
- ・ 研究管理法人を経由する場合、研究管理法人が真に必要な役割を担っているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and/or 競争が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 知的財産取扱（実施者間の情報管理、秘密保持、出願・活用ルール含む）に関する考え方は整備され、適切に運用されているか。

(4) 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

（基礎的・基盤的研究開発及び知的基盤・標準整備等研究開発の場合は、「事業化」を除く）

- ・ 成果の実用化・事業化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化・事業化シナリオに基づき、成果の活用・実用化の担い手、ユーザーが関与する体制を構築しているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダーが選任されている場合、成果の実用化・事業化シナリオに基づき、適切な研究開発のマネジメントが行われているか。
- ・ 成果の実用化・事業化につなげる知財戦略(オープン/クローズ戦略等) や標準化戦略が明確になっており、かつ妥当なものか。

(5) 情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向等に機敏かつ適切に対応しているか。

3. 研究開発成果について

(1) 目標の達成度と成果の意義

- ・ 成果は目標を達成しているか。
- ・ 成果は将来的に市場の拡大あるいは市場の創造につながることを期待できるか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。
- ・ 目標未達成の場合、達成できなかった原因が明らかで、かつ目標達成までの課題を把握し、この課題解決の方針が明確になっているなど、成果として評価できるか。
- ・ 設定された目標以外に技術的成果があれば付加的に評価する。
- ・ 世界初、世界最高水準、新たな技術領域の開拓、又は汎用性のある成果については、将来の産業につながる観点から特に顕著な成果が上がっている場合は、海外ベンチマークと比較の上で付加的に評価する。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 大学又は公的研究機関で企業の開発を支援する取り組みを行った場合には、具体的に企業の取り組みに貢献しているか。

(2) 知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、又は実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(3) 成果の普及

- ・ 論文等の対外的な発表は、将来の産業につながる観点から戦略的に行われているか。
- ・ 成果の活用・実用化の担い手・ユーザー等に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

(4) 成果の最終目標の達成可能性(中間評価のみ設定)

- ・ 最終目標を達成できる見込みか。
- ・ 最終目標に向け、課題とその解決の道筋が明確に示され、かつ妥当なものか。

4. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

本項目における「実用化・事業化」の考え方

当該研究開発に係る試作品、サービス等の社会的利用(顧客への提供等)が開始されることであり、さらに、当該研究開発に係る商品、製品、サービス等の販売や利用により、企業活動(売り上げ等)に貢献することを言う。

なお、評価の対象となるプロジェクトは、その意図する効果の範囲や時間軸に多様性を有することから、上記「実用化・事業化」の考え方はこうした各プロジェクトの性格を踏まえ必要に応じカスタマイズして用いる。

(1)成果の実用化・事業化の見通し

- ・ 産業技術としての見極め(適用可能性の明確化)ができているか。
- ・ 実用化に向けて課題が明確になっているか。課題解決の方針が明確になっているか。
- ・ 成果は市場やユーザーのニーズに合致しているか。
- ・ 実用化に向けて、競合技術と比較し性能面、コスト面を含み優位性は確保される見通しはあるか。
- ・ 量産化技術が確立される見通しはあるか。
- ・ 事業化した場合に対象となる市場規模や成長性等により経済効果等が見込めるものとなっているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
- ・ プロジェクトの直接の成果ではないが、特に顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)がある場合には付加的に評価する。

(2)実用化・事業化に向けた具体的取り組み

- ・ プロジェクト終了後において実用化・事業化に向けて取り組む者が明確になっているか。また、取り組み計画、事業化までのマイルストーン、事業化する製品・サービス等の具体的な見通し等は立っているか。

◆プロジェクトの性格が「基礎的・基盤的研究開発」である場合は以下を適用

4. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

(1)成果の実用化の見通し

- ・ 実用化イメージに基づき、課題及びマイルストーンが明確になっているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
- ・ プロジェクトの直接の成果ではないが、特に顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)がある場合には付加的に評価する。

(2) 実用化に向けた具体的取り組み

- ・ 成果の実用化に向けて、誰がどのように引き続き研究開発を取り組むのか明確になっているか。

◆プロジェクトの性格が「知的基盤・標準整備等の研究開発」である場合は以下を適用

4. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

(1) 成果の実用化の見通し

- ・ 整備した知的基盤についての利用は実際にあるか、その見通しが得られているか。
- ・ 公共財として知的基盤を供給、維持するための体制は整備されているか、その見込みはあるか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
- ・ J I S 化、標準整備に向けた見通しが得られているか。注) 国内標準に限る
- ・ 一般向け広報は積極的になされているか。
- ・ プロジェクトの直接の成果ではないが、特に顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)がある場合には付加的に評価する。

(2) 実用化に向けた具体的取り組み

- ・ 成果の実用化に向けて、誰がどのように引き続き研究開発を取り組むのか明確になっているか。

参考資料 2 分科会議事録

研究評価委員会

第1回「超電導技術開発／高温超電導ケーブル実証プロジェクト」(事後評価)分科会 議事録

日 時 : 平成26年9月3日(水) 10:00～18:00

場 所 : WTC コンファレンスセンター Room B

(世界貿易センタービル 3階)

出席者(敬称略、順不同)

<分科会委員>

分科会長 伊瀬 敏史 大阪大学大学院 工学研究科 電気電子情報工学専攻 教授
分科会長代理 下山 淳一 東京大学大学院 工学系研究科 応用化学専攻 准教授
委員 市川 路晴 一般財団法人 電力中央研究所 電力技術研究所 電力応用領域 領域リーダー
／上席研究員
委員 木須 隆暢 九州大学 システム情報科学研究所 電気システム工学部門 計測制御工学 教授
委員 津田 理 東北大学大学院 工学研究科 電気エネルギーシステム専攻 電気エネルギーシ
ステム工学講座 応用電気エネルギーシステム分野 教授
委員 中澤 雅明 電気事業連合会 技術開発部 副部長
委員 長嶋 賢 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 浮上式鉄道技術研究部 部長

<実施者>

本庄 昇一 東京電力株式会社 技術統括部 技術開発センター 副所長
丸山 修 東京電力株式会社 技術統括部 技術開発センター 超電導技術グループ 副主任
増田 孝人 住友電気工業株式会社 超電導製品開発部・ケーブル技術グループ グループ長
渡部 充彦 住友電気工業株式会社 超電導製品開発部 ケーブル技術グループ 主席
町田 明登 株式会社前川製作所 技術研究所 所長
矢口 広晴 株式会社前川製作所 技術研究所 課長

<推進者>

植田 文雄 NEDO 理事
島 昌英 NEDO 省エネルギー部 部長
楠瀬 暢彦 NEDO 省エネルギー部 主任研究員
小坂 仁 NEDO 省エネルギー部 主査
木下 晋 NEDO 省エネルギー部 主査

<評価事務局等>

小笠原 有香 NEDO 技術戦略研究センター 職員
佐藤 嘉晃 NEDO 評価部 部長
成田 健 NEDO 評価部 主査

議事次第

【公開セッション】

1. 開会、資料の確認
2. 分科会の設置について
3. 分科会の公開について
4. 評価の実施方法について
5. プロジェクトの概要説明
- 5-1. 事業の位置付け・必要性、研究開発マネジメントについて
- 5-2. 研究開発成果および実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて
- 5-3. 質疑応答
6. プロジェクトの詳細説明

高温超電導ケーブル実証プロジェクト

- 6.1. 高温超電導ケーブルの総合的な信頼性研究
- 6.1-1. 実証システムの構成・運転技術
- 6.1-2. ケーブルの設計・構築
- 6.1-3. 冷却システムの設計・構築
- 6.1-4. 実系統における総合的な信頼性検証
- 6.1-5. ケーブルの高性能化の研究
- 6.1-6. 冷却システムの高性能化
- 6.2. 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究

【非公開セッション】

- 6.3. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組み

【公開セッション】

7. まとめと課題
8. 全体を通しての質疑
9. まとめ・講評
10. 今後の予定、その他
11. 閉会

議事録

【公開セッション】

- 1.開会、資料の確認
 - ・配布資料確認（評価事務局）
 - ・伊瀬分科会長挨拶
 - ・出席者の紹介（評価事務局、推進者）
- 2.分科会の設置
 - ・研究評価委員会分科会の設置について、資料1に基づき評価事務局より説明。
- 3.分科会の公開について
 - 評価事務局より資料2及び資料3に基づき説明が行われ、「6.3. 実用化・事業化に向けての見通し及び取

り組み」を非公開とすることが了承された。

4.評価の実施方法及び評価報告書の構成

評価の手順を評価事務局より資料 4-1～4-5 に基づき説明した。

5.プロジェクトの概要説明（説明、質疑応答）

推進者・実施者より資料 6-1 及び資料 6-2 に基づき説明が行われ、以下の質疑応答が行われた。

【津田委員】 まず、定義的なものを確認させてください。電流容量については、今回は 66 kV、3 kA とのことですが、定格は 1,750 A となっています。この違いはどの様に解釈すればよろしいでしょうか？

【本庄 P L】 プロジェクトとしましては、実系統に接続するという事で実系統側の制約条件があったということで、今回、場所の制約等を考えたときに、使用できるところが 200 MVA 級の変圧器の 2 次側ということで、まずそこが決まりました。そこから行きますと、電流容量としてはトランス容量が 200 MVA ですので、電流容量、定格としては 1,750 A になったということがございます。

一方、プロジェクトとしましては、3 kA 流せるケーブルを製作するという事を一つの目標としておりましたので、現地に適用したものは 1,750 A の定格のケーブルということですが、能力的には 3 kA を流す能力があるというものを開発しております。

【津田委員】 ということは、今回ケーブルには 3 kA は流さなかったが、3 kA 流せる技術を開発した、という意味でしょうか。

【本庄 P L】 旭変電所のケーブルにつきましては、3 kA の通電が可能になってございます。ただし、これまた午後ご報告しますが、交流損失につきましては 2 kA で 1 W/m という性能を持ったものが旭変電所に入っています。一方、3 kA で 1 W/m という性能については別途評価をしているということで、そこが 2 段階の構成になっています。

【津田委員】 わかりました。あと、このプロジェクトの位置づけですが、最近では、他国でも盛んに超電導ケーブルの研究開発が行われていますが、現在、日本で研究開発されているケーブルの特長は何かでしょうか？ご説明の中では、高エネルギー密度というのを挙げられておりますが、海外に展開する場合や、基幹ケーブルとして実用化する場合は、その方向性も随分変わってくると思われそうです。例えば、海外で、高エネルギー密度化が要求されているところで、もう少し大容量化や高電圧化したいという場合に、ビスマス系やイットリウム系、三相一括型や三相同軸型がある中で、今は 66 kV クラスの三相一括型の高密度型ケーブルしか対応できない、となると、立ち後れてしまう様な気が致します。こうした観点では、本プロジェクトをどの様な位置づけとして捉えられているのでしょうか？また、先程は、コスト削減や AC ロス削減の話もございましたが、それぞれを実現するケーブルがイットリウム系だったりビスマス系だったりすると、これまでのプロジェクトを振り返ったときに、同じ方向を向いてきているのかが疑問に思えてしまいます。その辺はどの様にお考えでしょうか？

【楠瀬主研】 それについては NEDO のほうからお答えさせていただきたいと思えます。このプロジェクトの売りはどこかという今の先生のご質問に関して申しますと、日本の超電導技術の優れているところは、材料からケーブル化まで一貫してできるところがまず 1 つ。ご案内のとおり、韓国にしてもヨーロッパのプロジェクトにしても、線材は他の国から買ってきてケーブル化をしております。

さらに言うと、我が国のプロジェクトの優れているところは、冷却システムまで含めて検証がきちんとできている。これにつきましても、韓国のプロジェクトは冷凍機のところでかなり苦戦しているやに聞いておりますし、ドイツのプロジェクトについては市街地だとかいろいろ、彼らなりの戦略は

あると思いますけれども、冷凍機は使っていない、使えるものがないというふうに理解しております。

そういう意味では、将来的な、ある意味、国プロですから、一番難しいところを狙ってトータルのシステムとして検証させていただいて、これを今度、じゃ、どういうふうにも実際に合わせて展開していくか。それぞれに合わせてグレードを変更していくような形になるのではないかと考えております。そういう形で今後は展開していくと考えております。

ですから、同じタイムスパンで今から実証を行うと、電圧階級はどこがいいのかとか、どういう冷却システムがいいかというのは、これまでの知見を踏まえながら、より詳細な設計をしていくことが可能ということではないかと考えております。

【津田委員】 ありがとうございます。それで、本プロジェクトで取り扱っているケーブルが、今までにない高密度であると言われているのは、同じ材料の線材に流せる電流量が年々増えており、その結果として高密度になった、ということでしょうか？

【楠瀬主研】 そうです。

【津田委員】 電流を増やすだけでしたら、超電導線を沢山巻いたり、超電導線に流す電流を多くしたりすればよいと思うのですが、高密度化を進めていく中で醸成してきた他の技術は何になりますでしょうか？冷却技術でしょうか？高密度化したことによって得られた、他には無い技術というと、どういう技術になりますでしょうか？

【本庄PL】 やはり最終的には、先ほど楠瀬主研からもお話しありましたけれども、システム全体で設計というのが非常に重要なテーマになってきているということで、最終的にここでシステムの総合試験ということで、組み合わせた試験ということでここにかかなりの力を加えております。

先ほど、たくさん巻くということで大容量になるということなんですけれども、そうすると、当然、交流損失の問題とかでロス自体が増えてくる。それに対して、冷却システムを組み合わせて、どれだけの冷却システムにしてどういう運転をしていくかということというのは、やはりケーブルだけ、あるいは冷却システムだけで見ているとなかなかやっぱり見えてこないところがあるということで、今回は実施者が3者とも集まってそれぞれが何を考えているのかということを見出しながらシステムを組み上げたということが一番大きなところじゃないかと思います。

【津田委員】 その辺のご苦労がよくわかるので、むしろそういうところを系統立ててアピールすると良い。日本というのはそういう技術を持っているというのはすごくわかるんですけれども、意外とある断面的にしか言われるケースがなくて、その辺をもうちょっとうまくアピールされるのがいいのかなというのはすごく感じたものですから。ありがとうございました。

【楠瀬主研】 ご助言ありがとうございます。そこはNEDO側のアピールの不足しているところです。このプロジェクトでは3kAでやらせていただいておりますし、もう終わってしまいましたけれども、リットリウムのほうでは世界最大電流の5kAをやっております。そして、電圧は低いですが、大電流ケーブルとして12kAも今、開発をいただいております。

そういう意味では、そういうところを通じて交流損の話あるいは冷却の話きちん検証し、使えるように、どうしても電流が大きくなりますと、たくさん巻くとともに分流がきちんとできるかというようなどころも課題が出てきて、そこもいち早く対応することで世界に先駆けてやっているというふうに自負しているんですが、それをうまくPRできてないところは我々がもう少し個々のプロジェクトではなくて、トータルで見ると日本はこういうところに有利性があるということをご説明すべきところですので、そこは今後そういう形にしたいと考えております。ありがとうございます。

【伊瀬分科会長】 ありがとうございます。

他にございますでしょうか。

はい、どうぞ。

【長嶋委員】 最初に、超電導ケーブルのメリットというところで、コンパクト化、大容量化と、あと、省エネというのがあったんですが、やはりこれは両方やらないといけないのか、コンパクト化がうまくいって、もちろん省エネ化というのは必要なんですけども、それは後から来てもいいものなのかというか、どちらを重視するのかということをお聞きしたいんですけども。

【楠瀬主研】 これは適用ケースによって違ってくるというふうに、現時点では想定しております。例えば大電流の母線みたいなどころであれば、コンパクト化ということもですけども、現実的に大きな発熱を低減できるということで大きな省エネ効果も期待できます。逆に都市の中心部のようなところの老朽ケーブルの代替ということであれば、どうしても基幹系統であれば多重化していますので負荷率としては低くなりますので、必ずしも省エネ性が現状に比べて大きく出るということではないと思います。そこに対してはコンパクト性によって追加の工事費が要らないということで、社会インフラをそういう意味では低コストで維持あるいは高度化するというところにメリットがあるというふうになってくるのではないかと考えております。

【長嶋委員】 今のに関連して。本庄様をご説明された15ページの建設コストのお話で、ちょっと細かいところに入ってしまって申しわけないんですが、超電導のほうで工事費がないというのは、これは今のことと理解すればよろしいのでしょうか。

【本庄P L】 ここでの仮定としましては、超電導ケーブルは既設の管路が流用できるということで、この既設管路流用ということを条件にした計算になってございます。

【長嶋委員】 わかりました。

【伊瀬分科会長】 中澤委員お願いします。

【中澤委員】 今の長嶋委員のご発言について私のほうからもコメントさせていただきたいんですけども、楠瀬主研から4ページのところについてご説明があったと思うんですが、送電ロスについては、やっぱり我々としては必ず低減していきたいと思ってございます。

それから、大容量化、コンパクト化というところでは、電力需要の見通しというところでいきますと、3.11以降若干状況は変わっておるところではございますが、リプレース時、本庄P Lからもご説明あったように、既設管路を使いたいというそういう中で、系統によってはやっぱり大容量化したところもあるんですね。そういったところで、現状だとOFだとサイズの的にちょっと難しいというところでも超電導だと省スペースでいけるとかそういう可能性もあるので、やはり非常に有用な技術だと思ってございます。

なお、このような技術というのは、民間だけだと開発リスクというのは非常に大きいものですから、今回、NEDO様のご支援のもとメーカー様と東京電力様が一体となって開発したのは非常に意義があるかなと思ってございます。

【楠瀬主研】 ありがとうございます。

【伊瀬分科会長】 ちょっと私のほうから。これ、ビスマス系のプロジェクトで、並行してイットリウム系のプロジェクトがあって、将来的にはこの2つがどういうふうに位置づけ、すみ分けしながらしていくのかということをお伺いしたいと思います。

【楠瀬主研】 我々のほうでは2つのプロジェクトをまさに運用させていただいておりますので、実力と

いうのもある程度正確に、きちんと把握しているつもりですが、そういう意味では、当然ながら研究開発のスタートあるいは進捗からいって、5年程度の技術の差があるというふうに認識しております。

そういう意味では、やはり今の技術を、ビスマスの第1世代の技術できちんとケーブルをつくることによって、もしビスマスに匹敵する、あるいはそれを上回るイットリウム線の線材が量産も含めてできるようなになれば、適材適所で使っていくのではないかと考えております。

ただし、先生ご案内のとおり、イットリウムには片面にしか超電導層がついていないというようなことも含めて、まだやはり全く同じ構成ではないということもあります。その辺はケーブルとして長いものを今後つくっていく上での課題等も潰していって、最後はまさにそこまで行けば、今度は競争という形になるのではないかと考えております。

【伊瀬分科会長】 はい、下山委員。

【下山分科会長代理】 NEDOのプロジェクトについて、大体、私、同じことをいつも聞いているんですが、このプロジェクトを立ち上げる検討を始めたのが9年ぐらい前ですか。

【楠瀬主研】 そうです。

【下山分科会長代理】 それで、7年ぐらい前からスタートしていると。目標というのは、基本的に7年前、9年前の情勢に応じて設定されて実施されたものであると。実際技術の進歩を考えると、7年、9年たつと時代遅れということにもなりつつあるんですが、たまたまケーブルにおいては今でも高評価できる結果になっていると。ほかの、コイルとかだったらとてもじゃないですけども、遅れて大変なんですけれども。

これ、実施している途中で、もう少し目標を高目に持てたとか、何かそういうようなところ。実施計画として全部〇がついていたんじゃないですか。〇なんだけど、これ、余裕の〇なのか、ぎりぎり〇なのか、いろいろな評価があると思うんですね。その辺の伸びしろみたいなのを何かちょっとコメントできたら、差し支えない範囲でお願いいたします。

【楠瀬主研】 そういう意味では、このプロジェクトは2度にわたりまして実施期間を延長させていただきましたが、それとともに、内容につきましても実はかなり大きく追加をさせていただいております。

というのは、1つが、当時の計画では、まずこのプロジェクトは実系統で接続しようということでしたので、スターリングの冷凍機を使って実際にはやっております。昨日も一部の先生に見ていただいた構成になっています。ただし、それではやはりCOPが低くて、あるいはメンテナンスのことで実用性が低いという判断のもと、ブレイトン冷凍機の開発を当初の計画にはなかったんですけども、それを追加しております。そういう意味では、途中で大きく見直しをしまして、実用性の検討の上で必要となる容量あるいはメンテナンス間隔ということでブレイトン冷凍機の開発を追加することを決めさせていただきました。

あとは、プロジェクトが進行している中で、どこに一番早く国内で適用できるかという検討をする中で、母線というようにところで大容量、10kAを超えるようなところで、低電圧だからゆえにロスが大きいところでは導入のメリットがあって、コンパクト化ということも含めて、コストパフォーマンスということで競争力もあるのではないかとということがある程度見通せてきましたので、低電圧、大容量ケーブルの開発も追加しております。そういうことで、本プロジェクトについては、開発内容を追加したけれども、それも達成できたので、そういう意味では伸びしろというわけではないと思いますが、ある程度フレキシブルに対応できたのではないかと考えてはおります。

何か本庄PLのほうからあれば追加をお願いします。

【本庄PL】 今、楠瀬様にご説明していただいたとおりということで、特に5番のケーブルの高性能化、それから、冷却システムの高性能化というところはかなり背伸びをしたチャレンジングな目標に対して今回チャレンジしたということで、何とか成果にたどり着いていますけれども、まだまだこの部分は両方とももっと上げていくべき技術だということです。特に冷却システムにつきましては、何とか工場での試験というところまでたどり着きましたけれども、これを実系統で本当にうまく使っていけるのかという、負荷変動に対してどうなのかといったところはこれから検証するべきところが残っていると考えています。

それから、ケーブルの高性能化につきましても、基本的な設計まではできたということですが、実際にそれが機器として成立するかどうかという検証というのはまだこの先にその技術開発は必要だということです。そういう意味ではかなりこの5番と6番はチャレンジングな目標に対して途中からチャレンジしたという項目になってございます。

【下山分科会長代理】 それで、やはりそういうふうにどんどん積み重ねていって、最終的な評価の時点でこのプロジェクトの今の位置づけというのをもう1回、他のその後走り始めたプロジェクト、世界での何かと比較していただいて、今の時点でのこのプロジェクトの独自性というか優位性、また欠けている部分があれば欠けている部分、そういうのをマトリックス的に分析いただくのが多分成果を評価するのに一番いいんじゃないかと思うんですけれども、そういう試みの予定はございますか。

【楠瀬主研】 今、下山先生からいただいた意見そのままではないんですけれども、そういう意味では、このプロジェクトの後継ということではないんですけれども、安全性と信頼性の評価のプロジェクトを今年度立ち上げました。その検討段階において、これまでのイットリウム系の事業、あるいはケーブル実証の事業、あるいは世界の情勢を踏まえて何をターゲットとすべきか、あるいはどういうことが欠けているかということを考えてみました。そうすると、やはり実用化する上で、まだ世界的に手がついていないのが、冷凍機の信頼性をさらに上げるということと、事故が起こったときにどういうふうなことが起こるか、あるいはどういうふうな対処を想定していけばいいかということについて、手がついていないのではないかとということ进行分析しまして、それをプロジェクトとして立ち上げ、予算要求させていただいたという経緯はございます。

【下山分科会長代理】 それは課題なんですよ。

【楠瀬主研】 はい。

【下山分科会長代理】 そうじゃなくて、だから、今のまだ優位性を保っている部分とか全部含めて何か総合的な比較があると、このプロジェクトの位置づけが強くアピールできるんじゃないかなと思います。以上です。

【伊瀬分科会長】 今の点はよろしゅうございますでしょうか。このプロジェクト、ここがすばらしかったという。

【楠瀬主研】 すばらしかったというのは、先ほども申し上げましたけれども、やはりトータルシステムとしてやり遂げたこと。だからこそ、今、海外の調査をやらせていただいていますけれども、海外の電力会社を訪問しても、ぜひ話を聞かせて欲しいという反応を頂いております。日本はこういう形で日本の国内で実系統に接続しているということを説明すると、それだったら、自分たちも話のテーブルにのりましょうということで、複数の国からそういう話を具体的に聞かせて欲しいと、あるいは導入メリットによってはケーススタディ的なことをやるようなところまで関心を持っていただけるというのは、我々のこのプロジェクトの、あるいは今までの超電導技術開発の成果だと考えております。

【伊瀬分科会長】 木須委員お願いします。

【木須委員】 研究の位置づけに関してなんですが、先ほどございました、材料からシステムまでやれるのが日本の優位性ということ、私もまさしくそうだと思います。それで、イットリウム系とビスマス系のすみ分けのような話もあったんですけども、今回やらえたケーブルのトータルシステムとして設計されて、さらに運用されたという部分においては、将来のイットリウム系のケーブルでも同じような、適用技術という意味では非常に適切な設定ではないかと思うんですけども、例えばビスマス系固有の問題とか、イットリウム系固有の問題があるのか、あるいは今回の技術というのは、ケーブルとしてはそのまま同じ技術として考えていいのか、そこらあたり、もし何かございましたらコメントいただけますでしょうか。

【本庄PL】 プロジェクトをスタートするときに、イットリウム系かビスマス系かという議論が社内でも当然ありました。今回は系統に接続するというので、やはりそこは信頼性の部分というのはどうしても譲れないということがありました。ビスマス系につきましては、既に100mあるいは500mのケーブルの検証試験を電中研様の横須賀の試験場のほうで行った実績もあるということで、それをベースにした技術ということで、ビスマス系であれば系統連系することに対する信頼性としては確認できるだろうということもありまして、ビスマス系を選択したというところでございます。

ただし、電力会社というか実施者としては、ビスマス系でなければだめだというわけではなくて、当然、将来的にはビスマス系、イットリウム系というのは、性能、コスト等で選択されていくものになるということです。今回入れるに当たっても、ビスマス系だからとかイットリウム系だからということを除いて、超電導ケーブルとして布設導入に対してどういう要件を持っているべきだとか、そういうことなどで評価しながら入れているということになってございます。

ご質問のビスマス系あるいはイットリウム系の特徴というところにつきましては、実はまだイットリウム系の超電導ケーブルに対する評価がまだ十分私どもとしてできていないところがありますので、そこについてはもう少し検証していく必要があるということは考えております。ビスマス系につきましては、やはりロス部分がどこまで今後性能が上がっていくかというところが、それは線材の性能向上、それから、機器としての設計の技術というところでは、ビスマス系に特化したところとしても、そういったところの課題というか、今後まだ性能向上していくという余地はあるのかなというふうに考えてございます。

【楠瀬主研】 NEDO側としましては、イットリウム系のプロジェクトの最後に、世界でも一番性能の高いフジクラさんの線材を使ったケーブルを単相ではありますけれども、つくりまして、交流損の低減とかが材料の性能とどうリンクするかというようなところについて評価することを追加的に実施しました。そういう意味では、やはり高性能化によって交流損は減るといふところまでは確認できておりますが、そちらのケーブルについても、例えば過渡的な応答とか限界試験的なところでどうなるかというところが残念ながらまだ検証できていません。

そこにつきましては、今年度からの新規プロジェクトの中で破壊試験的なことをやる中で、今度のプロジェクトは、ビスマス系、イットリウム系両方とも評価対象として体制に入っていて行きますので、その中で全体として同じような評価といっても、電圧階級等変わりますけれども、そのような評価を通じて、ビスマス系とイットリウム系でどこまで同じなのか、どこからが違うかというところは検討して参りたいと考えております。

【木須委員】 わかりました。冷却システムはもちろんそうだと思うんですけども、システムの運用に

関しては、将来的にも今回の知見がかなり生きるという理解でよろしいでしょうか。

【楠瀬主研】 はい、そこはそういうふうと考えております。

【木須委員】 あとは、マネジメントに関してなんですけれども、追加項目が2件ほどあってということなんですけれども、これはやっぱり推進委員会なんかからのフィードバックが適宜うまく活かした結果ということでもよろしいでしょうか。

【楠瀬主研】 まずは実施者様のほうの推進委員会が1段です。加えて中間評価のときにも冷却のところの拡充というのを強く意識するように意見をいただきましたので、そういう意味では外部有識者の先生方からの意見が強く影響したと考えております。

【木須委員】 ありがとうございます。

【本庄P L】 それに加えて、NEDO様の超電導技術委員会のほうで非常にたくさん有意義なコメントをいただいて、それもこの新しい検証項目に反映させていただいております。

【伊瀬分科会長】 あと、市川委員のほうから何かございますか。

【市川委員】 先ほど下山先生もおっしゃられましたけれども、今回、目標の達成度ということで、7項目が全て達成度〇ということになっています。やはりこのプロジェクトの中で最も難易度が高いものもあると思われましてけれども、そういう難易度というか、このプロジェクトで達成を最重要視していたものは何かという、そういうような難易度的なものが表現されていけば、評価するほうもそれを重点的に評価できると思います。そのあたりのめり張りというか、目標のめり張りを、後でもよろしいですけれどもはっきりとご説明していただければと思いますので、よろしくお願ひします。

【楠瀬主研】 はい、わかりました。

6. プロジェクトの詳細説明

6.1-1 実証システムの構成・運転技術（説明、質疑応答）

実施者より資料7-1-1に基づき説明が行われ、以下の質疑応答が行われた。

【市川委員】 質問ですが、短絡条件の検討のところでもらい事故でご検討されていますが、もらい事故の場合、約10kA、2秒ということで、短絡電流直後にまた課通電を行うという検討ということなんですけれども、10kAが超電導ケーブルに流れたときに、超電導ケーブルはこれはもう臨界電流を超えてクエンチ状態に入っていると考えてよろしいでしょうか。

【本庄P L】 細かいところはこの後のケーブルの機器開発の中で実際に短絡試験、地絡試験を30mの検証試験の中で行っていますので、そちらで増田さんのほうから説明してもらえるとと思います。基本的には、定格としては3kA、I_cの合計で7kA程度ですので、そういう意味では10kAですと臨界電流を超える電流は流れているという形になります。

【市川委員】 そうすると、このケーブル設計へフィードバックというのは、これは実際に布設したケーブルへのフィードバックと考えてよろしいんですか。

【本庄P L】 この条件を30mのケーブル設計に反映させまして、この条件で短絡・地絡試験を実際に30mのケーブルで行いまして、検証した後に本番のケーブルを製造しているという形になります。

【市川委員】 ありがとうございます。

【伊瀬分科会長】 ほかにございますでしょうか。

では、下山委員お願ひします。

【下山分科会長代理】 これ、変電所を実施場所として選ばれて、そのときに起こり得る事故のケースを想定していろいろ試されているんですが、例えば普通の都市の送配電線の途中に使うとか、そういう場合にはまた別の条件が課される、もしくはこれよりもやさしい条件が課せられるのかと思うんですけども、この試験でいろいろなアプリケーションに対して事故対応が大体網羅されたというふうに見てよろしいのでしょうか。

【本庄PL】 実際の送電系統でも31.5kA、2秒という基準の中で現在の設備がつくられておりますので、そういった意味では今回の試験で31.5kA、2秒に対して超電導ケーブルが健全であるということを確認できたということですので、基本的な考えとしては送電ケーブルに対しても使用可能かと思えます。

ただ、1つ考えなければいけないのが、今回長さが240mということで、長さが長くなりますと、短絡直後は超電導ケーブルは大丈夫だと思うんですけども、その後じわじわと中から熱が発生して、それを液体窒素が奪う形になります。そうすると、液体窒素の流れがありますと、今回240mだと2時間程度なんですけれども、あっという間にもとへ戻ってきますので再冷却かかりますけれども、長くなると中でずっと温度が上がり続けていくということがあります。長さの問題というのは今回のところでは十分に把握し切れていないということになりますので、これは何らかの方法で検証する必要があると考えています。

【伊瀬分科会長】 津田委員、お願いします。

【津田委員】 ご説明ありがとうございました。1点お伺いしたいのは、保護・遮断の考え方です。実用化する場合には、今回の保護の考え方がベースとなり得るのでしょうか？今回の考え方は汎用性があるのでしょうか？それとも、今回は、旭変電所に適用することを想定した特殊なものなのでしょうか？通常のケーブルの場合は2回線布設するなど、事故時の対応や保護の考え方はいろいろあると思うのですが、保護や遮断についてベースとなる汎用性ある考え方については、今回はどの様に解釈すればよいのでしょうか？

【本庄PL】 通常の送電系統ですと3回線運用ということで、ケーブル系統で3回線引いているということになります。実は今回も3バンク構成のところに置いてありますので、そういう意味では3回線送電とほぼ同じような形態になっているということで、3回線という意味では同じような検証ができている。それから、今回ここにケーブルの事故検出リレーをつけて検出しているということで、通常のケーブルもこういう形で両端で内部故障を判別するということをやっていますので、そういった意味では今回は比較的標準に近い形の技術を使って検証できたと考えております。

【津田委員】 ありがとうございます。

【伊瀬分科会長】 では、中澤委員お願いします。

【中澤委員】 今のご質問に関連してなんですが、故障表示で重故障、軽故障とあると思うんですけども、これ、今回は変圧器の2次側だったんですが、送電線に適用する場合も同じような故障システムになるのでしょうか。何かシステムとして変わってくるかあるのでしょうか。

【本庄PL】 温度、圧力、リザーバの液面低下と、それから、ポンプ停止等というのは基本的には同じような考えでできるかと思えます。

【伊瀬分科会長】 よろしゅうございませうか。

では、木須委員お願いします。

【木須委員】 警報の設定について詳細な検討をされているんですけども、まず1点質問なんですが、

これ、いろいろなパラメータが途中に出てきているんですけども、これは実際のケーブルでそういう状況で測られて、それをベースに出されているという理解でよろしいでしょうか。

【本庄 P L】 はい。特にここにありますが、例えば温度上昇ですと、検出・評価用に温度センサーを全部で 13 点とっています。このうち、どういう条件でこの温度上昇の警報を出すかということで、1 つでも出たら温度上昇の警報を出すとなると一つ一つのセンサーに対しての信頼度が非常に要求されますので、今回は 13 点のうち 2 つ以上が同じ温度上昇という信号を出した場合には重故障を出そうということでアンド条件をつけているということで、基本的に温度とか圧力、それから、リザーバタンク等については、多重化を考えた設計をしています。

【木須委員】 わかりました。それで、今検討された警報を出すことによって、これでオーケーだというか、その検証みたいなやつはどのような形でチェックをされるんでしょう。

【本庄 P L】 2 つあって、1 つはこの温度でちゃんと出るかどうかという問題に対しては、系統に接続する前に模擬的な信号を入れまして、その信号で出るかどうかという検証をしています。もう 1 つは、温度センサー自身がちゃんとしたデータを示しているかどうかということもありまして、これについては検証中を通じていろいろなところのデータを比較しながら各点の時系列の推移等を評価しまして、故障がないかどうかというのを検証しながら進めていったというような実態です。

【木須委員】 わかりました。ありがとうございます。

【伊瀬分科会長】 長嶋委員お願いします。

【長嶋委員】 事故時、携帯電話で呼び出すというような格好になっていますけれども、これ、実際動作の確認はどういうふうにしたのかということと、実際に誤作動か何かは知りませんが、それが機能したことがあったんでしょうかということです。

【本庄 P L】 2 番目の実際に動作したかどうかということについては、6. 1-4 か 5 の実証運転のほうの説明の中でさせていただきたいと思います。実際、5 種類ほどの軽故障が出ています。ただし、重故障は発生しておりません。

それから、もう 1 つ何でしたっけ？

【長嶋委員】 あったんであれば動作したということなんでしょうけれども、我々も似たようなことをやっているんですが、実際に本当に問題が起こったときにそれが機能してちゃんと呼び出しがかかるのか、そういうの確認です。

【本庄 P L】 確認は事前に系統接続前に、相当箇所一点一点全部出しています。それから、途中 2 回ほど性能評価のために系統から切り離して I c 測定とかしておりますけれども、そのときも停止するときに出るべき軽故障の信号が出るかどうかということもチェックするというので、多重でチェックして行っております。

【伊瀬分科会長】 そうしましたら、私のほうから。インピーダンスの関係で、従来の同電圧の機種と、ケーブルと比較をして、サージインピーダンスローディングが大きくて、大容量送電向きということなんですが、これ、電圧の波形を見ますとちょっと大き目に電圧が出て、これで大容量送電向きというのがどういうふうに結びつくのかなというのがよくわからないところです。

【本庄 P L】 サージのほう、こちらのほうでしょうか。

【伊瀬分科会長】 その結果と、それから、その前のスライドで、大容量送電向きというコメントがあるんですけどね。

【本庄 P L】 まず大容量送電向きという意味では、ここのサージインピーダンスローディングのところ

を評価してということで、通常の例えば66kVのCVケーブルですと、サージローディングインピーダンスローディングが95MWですから、95MW程度以上の電力を送ろうとすると電圧ドロップが大きくなってしまふということに対して、超電導ケーブルは400MWですから、400MW前後で流すと非常に安定性がいいというか、電圧ドロップがほとんどないという形になります。ですから、そういう意味では、これは同じ電圧階級で比べると大容量に向いているという、そういう意味をこの文章は示しているということになります。

【伊瀬分科会長】 それはどういうことですか。

【本庄PL】 これはリアクタンスが一桁小さいと。何で小さいかという、中に超電導のシールド層がありますので、導体層とシールド層の間の距離が非常に短いということでインダクタンスが小さくなる。一方、通常のケーブルですと磁気的なシールドがありませんので、ここと他相との間の相間距離がインダクタンスにきいてきますので、そういう意味では比較的距離があるのでインダクタンスが大きくなってしまふという形になります。一方、超電導の場合は、それぞれ自分の中で磁場がゼロになる場所がありますので、そういった意味で距離が短いので、インダクタンスが小さくなるということです。

【伊瀬分科会長】 それは今回そういう構造をとられたということであって、超電導線だからシールド層があるというわけでもないわけですね。

【本庄PL】 そうですね。ですから、つくり方によっては、例えば単相ケーブルでシールドをつけないというような設計をすればこちらになりますので、そういう意味ではこの一括のケーブルの場合とはいう前提条件つきということになります。

【伊瀬分科会長】 そういうことですね。そのために今回そういう設計を採用されたということなんでしょう。

【本庄PL】 ええ、採用した結果としてこうなったということになっています。

【伊瀬分科会長】 そういうことですか。線の簡単化というところから見ますと、シールド層がない設計というのも魅力的だと思うんですけども。

【本庄PL】 そうですね、確かにおっしゃるとおりだと思います。その場合は、こういった条件というのはちょっと外れてくるということです。

【伊瀬分科会長】 そういうことですか。わかりました。
ほかに。下山委員、お願いします。

【下山分科会長代理】 リアクタンスが一桁下って系統安定性が向上してあります。それ、シールド層のおかげですから、超電導のケーブル自体を使ったことによる系統に対するメリットというのは何かあるのでしょうか。

【本庄PL】 そういう意味では、超電導だからという意味でいくと、やはり通常の抵抗が小さいということがあると思います。送電系統からすると、抵抗とインダクタンスですとインダクタンスはるかに大きいので、送電に対しては抵抗はほとんど効いてこないということになります。ただし、抵抗が効くものとして、交流損失というか通電ロスが効いてくると思いますので、この通電ロスが超電導の場合は原理的に低くできる可能性を持っていると、そこが違うのかなと思います。

【下山分科会長代理】 例えば交流波形がきれいになるとか、そういうようなことはあまり？

【本庄PL】 あまりその効果は出ないんじゃないかなと思います。

【下山分科会長代理】 わかりました。

【伊瀬分科会長】 ほかにいかがでございましょうか。

では、市川委員をお願いします。

【市川委員】 最後に法規対応が述べられていますが、今回適用法令としまして電気事業法を適用されたということで、これまでの研究開発等では、やられていた超電導機器はほとんどが高压ガス保安法、こちらが適用されていましたが、これは今回電気事業法が適用されたということで、超電導機器も電力機器としての位置づけという形で大きな前進と思われませんが、海外もこのような法規対応というのはどのような状況になっているか、おわかりでしたら教えていただきたいと思います。

【本庄 P L】 増田さん、わかりますか。

【増田 G r 長】 知っている限りですけれども、海外は、法律というよりはスタンダード、規格で規定されている。アメリカでしたら A S M E で規定されており、そういう規格に対して試験をしたり、システムを構築するということになっています。だから、法律的に決まっているのは日本と韓国ぐらいですかね。最近スペインもそういうことがあるというのがわかってきましたので、今調べているところです。ドイツでは、スタンダードを遵守して作製したと、聞いています。

6.1-2. ケーブルの設計・構築（説明、質疑応答）

実施者より資料 7-1-2 に基づき説明が行われ、以下の質疑応答が行われた。

【津田委員】 ご説明ありがとうございました。幾つかお伺いしたいのですが、、、。まず、4 ページ目ですが、交流損失の設定が 1 W/m/p h ということで、現在使用しているケーブルの 2 分の 1 以下というのが目標に掲げられていますが、このときの CV ケーブルの設計条件はどうなっているのでしょうか？超電導ケーブルの交流損失が 1 W/m/p h であれば、CV ケーブルは 2 W/m/p h 以上ということだと思のですが。

【増田 G r 長】 CV ケーブル側は電圧が 27 万 5,000 V で容量が 350 MVA なので、正確な電流値は忘れましたが、700 から 800 A ぐらいだと思います。それで、CV ケーブルの導体損失であったり、シース損失であったり、誘電損失を計算すると、1 m 当たり 100 W というのが出てきます。超電導ケーブル側は、導体交流損が 1 W/m/p h ですから、三相で 3 W/m。ここでの仮定は、断熱管は 2 W/m としています。そうすると、トータル 5 W/m。冷凍機の COP を 0.1 と仮定すると、これで 50 W/m の冷凍動力が必要。それで、50 W/m と 100 W/m を比べて 2 分の 1 としています。

【津田委員】 わかりました。あと、ケーブルのことですが、冷凍機の性能を上げる以上にケーブルの低損失化は重要だと思うのですが、ケーブル設計のときに、例えば、ケーブルピッチなど、どの様な考え方で低交流損失化をしようとしているのでしょうか？この様に構成すればロスが減る、という様な基本的な設計指針については、どのように考えられているのでしょうか？

【増田 G r 長】 いろいろとその検討はしていますが、4 層導体というのは電流容量から決まっています。この時、各層に流れる電流が等しい、均流化したほうが低交流損失になります。ただ、最近ではこのバランスを多少変えたほうが低損失になる結果も出てきています。

さらに、低交流損失化のためには、線材自身の損失を下げる必要があるということで低交流損失型の AC 線を開発し使用しています。この場合は、全部 AC 線にしたほうが低損失にはなりますが、費用対効果といえますか、4 層のうち内層 2 層を AC 線にするのと、4 層全部を AC 線に変えるのとは、

損失は大きく変わらなかったなので、今回はこの2層だけにしました。

それから、あとは線材に印加される磁場の大きさをできるだけ小さくしたい。ケーブルコアのサイズが大きいほうが低交流損失化には向くと思います。ただ、コンパクトという要求もありますので、そのあたりが取り合いになるというところですよ。

【津田委員】 昔は、電流分布がアンバランスだったのを均流化することが低交流損失化に有効とされてきました。しかし、ケーブルロス、通電損失より磁化損失が支配的で、磁化損失は経験磁場の大きさで決まりますので、電流分布を均一にするよりは、経験磁場を均一にして磁化損失を均一にする方が、ロスが小さくなります。そして、低損失化を突き詰めていくと、ケーブルの中でシールド層のロスが一番大きくなる、という結果も出ています。ですので、シールド層の損失が一番大きくなっていないということは、まだ導体層のロスを減らすことができる、ということの意味を意味していて、低ACロスの線を使うのは、導体層よりもシールド層の方が効果的、ということが考えられます。この様に、経験磁場ができるだけ均一になるように作るとか、交流損失が多いのはシールド層なので、シールド層に低ACロスの線を使うとか、その様な設計指針が明確になっているとよいと思うのですが、低交流損失化への設計指針がいつも曖昧になっているような気がします。ですので、その辺についてよくご検討いただきたいと思います。そして、もし知見が得られているのであれば、それらをまとめていただきたいと思います。

あとは、直流通電時の電流量は測定可能ですが、交流通電時には、ケーブルピッチなどが電流分布に影響してくるので、均流化するように設計していたとしても、実際にはどれだけの電流量になっているかの評価は難しいと思います。例えば、ケーブルピッチから計算したロスの量と、実測したロスの量を比較することにより評価するなど、色々と考えられると思うのですが、この件で何か検討されたことはありますか？

【増田Gr長】 交流損失の設計の指針に関しては、今ご指摘いただいたとおり、この当時はもちろん均流化ということで考えていましたけれども、最近はいろいろとやってみて、言われたとおり、磁化損が一緒になるとか、そういったほうがいいのかというふうには思っています。

あと、この後出てきますが、もっと大電流になった場合より顕著になっています。今日の発表で実はそこまでは説明してはいないですけども、各層の線材本数が違うので、それぞれの層のI_cが異なります。そうすると、各層が負担する電流の負荷率をどういうふうにしたらいいのかと、そういうところを最近検討して見せて、そこをいろいろと変えていくとさらに低損失になるというのが最近わかってきたところです。

【津田委員】 最後に、一番関心がある、というかお伺いしたいのは、今言われた負荷率の考え方です。これだけでロスが大きく変わってきますので。

【増田Gr長】 そうですね。

【津田委員】 今回の実証試験で実際に流している電流は、定格から比べると随分と低い値になっています。安全性を十分確保されようとするのはわかるのですが、負荷率が小さい状態で大丈夫とするのでは不十分で、大丈夫であることをアピールするには、実用化する場合と同レベルの負荷率で試験をして大丈夫であることを示すべきだと思います。また、小さい負荷率で運転する、ということは、その分超電導線を沢山使用しなければならぬことになり、低コスト化という意味でも矛盾することになり、今回の実施内容が、実用化する場合と乖離していると言わざるを得ません。今回の様に、非常に安全サイドで試験をして、「実用化する場合、本当にそんな低負荷率で使用するの？」

という質問に対して、「いや、実用化する場合の負荷率は50%程度だよ」と言われても、本当に信頼性が確保されているのかは疑問です。例えば、先程言った様な不均一な電流分布が生じると、電流マージンは設計時よりも小さくなってしまいます。そういった問題が起きる可能性がある中で実証試験をすることで、初めてシステムの信頼性を確保できるような気が致します。また、交流損失の目標値が1W/mと小さかったとしても、超電導線の本数を多くすれば容易に達成することができます。以上のことを考えますと、もうそろそろ負荷率について何か指針を出せるようにした方がよいと思うのですが、その辺についてどの様にお考えなのかを教えてくださいませんか？

【増田Gr長】 負荷率をどうすればよいという明確な設計基準があるかということ、今はそういうわけではないです。やっぱり実績を積んでみてということなので、今回は交流損失を下げるという意味と、安全率を設けて、ある程度負荷率を下げての設計になっています。先ほど言いました負荷率を各層で変えて設計したケーブルは、全体的にはもう少し負荷率が上がります。これは、線材量を減らすという目的もあります。今後そういうところの設計検討を続けて、指針を出していきたいと思います。

【津田委員】 ありがとうございます。

【伊瀬分科会長】 では、木須委員をお願いします。

【木須委員】 すみません、今のACロスの件なんですけれども、多分ケーブルの性能としてはかなり大事なところということでいろいろ検討されていると思います。先ほどあったと思うんですが、今、ツイスト線を使われているということは、考え方としてはフィラメントのデカップルをしてロスを下げるということだと思えます。ただ、ご存じのように、コート線材なんかですと、モノフィラメントなんだけれども、幅を細くして真円に近づけることによってロスを下げるというような結果が出ていますけれども、今の場合は幅と厚さが薄くなっていますけれども、その効果はかなり効いているのか、あるいはやっぱり素線としてのデカップルのフィラメントのマルチ化、3線化というか、フィラメントの効果がきいているのか、それは今、どういうところまで来ているんでしょうか。

【増田Gr長】 なかなか分けて測れていないので難しい。

【木須委員】 例えば理論的には、ツイスト線だとこれぐらい下がるというのがフィラメント形状で大体出てくると思うんですけれども。

【増田Gr長】 デカップリングが完全ではないですね。AC線のツイストピッチは8ミリぐらい、さらに小さくするともっとデカップリング悪くなっていくので、計算よりはまだ悪いとは思っています。言われたように、薄くする効果も多少きいていますので、それをあわせて低交流損失になっていると考えています。割合はまだわかってないです。

【木須委員】 それともう1点ちょっとお伺いしたかったのが、温度の維持が冷凍機が止まっても2時間もつというのが曲がりて決まっていますよというお話だったと思うんです。6K/hということで、これ、直線部を見ると、2K/hですから、そういう意味だとあと3倍ということで6時間ぐらいは直線部だけであればもつと思うんですけれども、曲げのところの例えば熱容量を工夫してふやすとか、断熱をそこだけよくするとか、区間としてはそんなに長くはないので、そういった工夫をやるとかなりもつと稼げるとか、そういった知見というのは何か得られているんでしょうか。

【増田Gr長】 計算上は侵入熱と熱容量だけで計算していますので、もちろん熱容量をふやせば、あれだけ長く持ちます。

【木須委員】 今の場合は直線と曲がりも同じ仕様でやって、その結果3倍ぐらい違っているというふうに理解したんですけれども、曲げのところだけ特別に少し断熱を工夫するとか、そういったことをや

るような余地があるのでしょうか。そうすると、あと3倍ぐらい、6時間ぐらい持つということであれば、また大分違うような気がしたんですけども。

【増田G r長】 曲り部だけ構造を変えるということは、頑張ればできると思いますが、基本的にケーブルコアは管路を通ってくるので、そこだけサイズが大きくなったりするわけにはいかないんです。

【木須委員】 じゃ、スペース的にはなかなか難しいということでしょうか。

【増田G r長】 位置的には多分最初からここだというのは予測することはできますけれど、その部分を特別に何かプラスする、大きなものをつけるとか、構造的に変えるということをするのは難しいと思っています。

【木須委員】 わかりました。

【伊瀬分科会長】 では、下山委員をお願いします。

【下山分科会長代理】 その絵が出ているので、まず簡単に1つ。この温度が上がっていったとき、負荷率がどんどん変わりますよね。

【増田G r長】 はい。

【下山分科会長代理】 それはカウントしているんですか。要するに、ACロスが温度が上がればどんどん上がってくるんですけども、それはもうカウントしなくてもいいぐらいの変化ですか。

【増田G r長】 この辺の温度が少し変わっても、ACロスの的にはそんなに変わらないというのは確認しています。

【下山分科会長代理】 ああ、そうか。負荷率が随分低いところで使っているから、そう見えるわけですね。

【増田G r長】 そうです。

【下山分科会長代理】 これが、だから、逆に言うと、負荷率が5割とかになってくると、温度の上昇によるACロスの変化が顕著に出てくるので深刻だということですね。

【増田G r長】 はい。

【下山分科会長代理】 あと、これ、どの人の発表で聞けばいいのかわからなくてここで聞くんですけども、断熱のことについて、多分前川さんからは発表ないと思うんです。いいですね。ここで聞くんですね、断熱は。

断熱の技術というのは非常に重要だと思います。それで、この試験ではわざとジョイント部をつかって、現地で真空引きをする、そういうようなことをされています。それについてあまり報告がないんですけども、こちらのほうには0.1 torrとかそういうふうに引けていることを確認したとあるんですけども、これ、もう少し改善の余地はないのでしょうか。特にさっき曲げのところは5mRなので、あれは現実的じゃないぐらい曲がっているんですけども、断熱層薄くなっているわけですね、あそこ。

【増田G r長】 そうですね。

【下山分科会長代理】 実際のケーブル設計で何Rぐらいまでならそのことは影響が出てこないとか、それから、真空度がもう半分、3分の1になったときに、どれぐらいの効果というか、要するに、これからケーブルを長くしていったときに管の壁から入ってくる熱がどんどん無視できなくなってきますよね。それをちょっとお聞かせください。

【増田G r長】 まず曲げ特性に関しては、把握はしています。どれぐらいの曲げRになればどれぐらい侵入熱がふえるかというのは把握しています。本日は、資料は持ってきていませんけれども、先ほど

の5 mRのところでは直線部の4倍から5倍ぐらい侵入熱が増えています。大体10 W/mは超えるようなレベルになっています。ですから、その10 W/mとを入れて6 K/hというのが計算されています。曲り部の侵入熱は非常に大きな値になっていますが、10 mRとか20 mRとかになると増加はあまり影響はないレベルです。

真空度に対する侵入熱の影響というのももちろん把握しています。真空度に関しては、大体マイナスの4乗からマイナスの5乗 torr、運転中でそのぐらいの高真空でないと今の理想の侵入熱を達成しません。マイナス3乗 torr になってくると侵入熱は増加してきます。そういうデータを持っていました、真空度をいかに維持するかというところが課題でありました。

断熱管の部分に関しては維持はできるんですけども、昨日見ていただきましたように管路を白く塗っています。地表面に出ているので、日射の影響で表面温度が非常に上がり、(遮熱塗料で)白く塗らないと70度にも80度にもなる。これはベーキングしているのと変わらないので、どんどんアウトガスが出てきて、真空度が悪くなる。それを避けるためにも白く塗ったということが実際です。

【下山分科会長代理】 真空度自体は、この運転の間保たれていることは確認できたのでしょうか。

【増田G r 長】 できています。一部課題として挙げさせてもらったのは、端末部分の真空度が我々の想定を超えて悪くなっている。それで、途中、メンテナンスのときに真空引きをしています。

【伊瀬分科会長】 では、次、中澤委員お願いします。

【中澤委員】 今、真空あたりのお話があったのですが、長期的な使用を考えたときに、電気的な接続の部分、ハンダ接続の部分で長期的にずっと使用した場合にリスクがあったりしないのかとか、そのあたりも教えていただきたいのですが。

【増田G r 長】 電気的な部分の長期的な特性と言われると、ハンダ接続での劣化要因としては機械的な振動や、引っ張り力などが考えられます。化学的な変化なども考えられると思いますが、液体窒素を使っているので、極低温での化学的な変化というのはほとんど起こらないと考えています。そうすると、機械的な張力による影響ですが、超電導線材この部分は機械的な張力がかからないような設計になっており、全部の張力がフォーマ部分で持つようになっています。ですから、このフォーマ部分の長期的な機械特性がどうなるかに関わってきます。この技術は基本的にはOFケーブルで使っている技術でありまして、OFケーブルでは長期的な特性が確認されていると思います。

【伊瀬分科会長】 長嶋委員お願いします。

【長嶋委員】 14ページの長期課通電試験で1カ月やって30年相当だということなんですが、この考え方を教えていただけますか。どういうふうにカウントするのかという。

【増田G r 長】 ちょっと式を忘れましたけれども、V-T特性というのがありまして、電気絶縁の長期特性を示しますが、その絶縁破壊強度と時間との関係をカーブで描きまして、その曲線の指数部の値をn値とよび、このn値というのが超電導ケーブルの場合は実測で50ぐらいであるのが確認されています。OFケーブルでは30です。超電導ケーブルでも50はちょっと行き過ぎだということで、30の値で計算しています。n値30を使って、66kVの対地電圧38kVに対してn値と実運転時間30年と試験時間1カ月を使って計算すると、試験電圧が対地51kVと計算できます。

【長嶋委員】 それはこの報告書のほうに書いてあるんですか。

【増田G r 長】 はい、出ていると思います。

【長嶋委員】 わかりました。じゃ、それはちょっと教えていただくとして。

もう1つ、先ほど負荷のところ、約半分ぐらい、今のCVケーブルの半分ぐらいになるとおっし

やっていて、ちょっと内訳よくお話ししていただいたんですが、最初の本庄さんがご説明された資料の2020年の目標が約半分ぐらいになっているんですが、それと同じことだと思えばいいんですか。

【増田Gr長】 そうですね。1W/m/ph、3kAというのは、一応今回で最終目標として達成はしましたが、長尺という意味ではまだ確認できていないので今後の課題です。侵入熱については、次期プロジェクトのほうで目標になっている、1.8W/mを達成すれば、損失がCVケーブルの半分になることが到達できると考えています。

【長嶋委員】 わかりました。

【伊瀬分科会長】 市川委員。

【市川委員】 今回、ケーブルの現地布設ということで従来工法を使って布設されているんですけども、今回は張力の許容値を2tonというふうに規定しているんですけども、これの根拠はどこから来ているんですか。

【増田Gr長】 事前に計算をしまして、このUの字の5mR部分を引き込むときにどのぐらいの張力が必要か算出すると2tonぐらい必要ということだったので、ケーブルは2tonの張力設計にしています。ただ、少し裕度も持たせたかったので、ボールローラーを設けて、押し込みを入れて実際の張力を軽減させています。

【市川委員】 2tonというのは、ケーブルにダメージを与えないということで、超電導ケーブルの引っ張り張力のほうから来ているのではないということですか。

【増田Gr長】 そうですね、説明をだいぶ割愛しましたがけれども、これは断熱管の外側にテンションメンバを設けていまして、そこで引っ張っています。そのテンションメンバのサイズを変えることで、2tonでも3tonでも設計はできます。

【市川委員】 そのケーブルは1キロとかそういう長さで実際の管路に引き込むと思うんですけども、それはもう既にCVとかOFで引っ張られて、どのぐらいの張力が出るかというものはっきりしていると思います。そのときの張力でも超電導にダメージがないということは、もう既にそういう計算とかはされているということを考えてよろしいですか。

【増田Gr長】 実際にかかる張力というのはもちろんルートによって違うんですけども、曲り部で張力が大きくかかります。ケーブルの重さや長さで変わりますが、多分2tonぐらいだと通常引き込める範囲だと思います。

【市川委員】 そうですね、実際CVとかと比べるとはるかにこの超電導ケーブルは軽いので、逆にこれが最大と思えば、実際にも全然問題ないと考えてよろしいということですね。

【増田Gr長】 はい。

【市川委員】 あとは、中間接続部についても、実際の布設場所であるカルバート内を考えて作業されていると思いますが、実際カルバート内に入れるのに小さなマンホールのところから搬入することになりますが、そういうところも問題ないと考えてよろしいですか。

【増田Gr長】 一応マンホールサイズも考え、その中を通る装置で全部やっています。

【市川委員】 ありがとうございます。

【伊瀬分科会長】 私から1つ、シールド層の効果ですけども、系統については、先ほどありましたようにインピーダンスが小さくなるということでしたけれども、ケーブルそのものについてはシールド層の効果というのは何かございますでしょうか。

【増田Gr長】 超電導導体は、磁場がかかるとIcが下がります。三心型のように、他相が近いと他相

の磁場の影響が懸念される。他相の磁場の影響がないようにするためには、超電導シールドは必要です。

【伊瀬分科会長】 ACロスを減らすという効果もありますね。

【増田G r長】 もちろんそうですね。

【伊瀬分科会長】 それから、シールド層のI cがちょっと大きくなっているんですけども、あれはあなってしまった？ 7,000Aという数字がありましたけれども。

【増田G r長】 そうです。それは単純にサイズの問題です。シールド層は径が大きいので超電導線の本数が多く、ICが導体層よりも高くなっています。

【伊瀬分科会長】 結果的にそうなってしまったということですか。

【増田G r長】 そうです。

【伊瀬分科会長】 わかりました。

6.1-3. 冷却システムの設計・構築（説明、質疑応答）

実施者より資料7-1-3に基づき説明が行われ、以下の質疑応答が行われた。

【市川委員】 旭変電所の系で一旦とめて、温度をもう一度冷やされて、一番後ろまで冷えるのに2時間かかったと申されましたが、もしこれが実系統というか、実際に布設されて2kmのケーブルである場合、その10倍時間がかかるということよろしいでしょうか。

【町田所長】 そこはそうではなくて、今回も短いことを想定して冷凍機の配置とか、冷却システム側の設計を行っております。ですから、長くなっても、結局流量を増やしてあげてケーブルの入口から出口までの間の温度差をどのぐらいに想定するかによって決まります。今回2Kという想定でしたが、2Kに想定すると、単位長さあたりの熱負荷が同じであれば、1キロになると約4倍の長さになりますので、4倍の流量の液体窒素を流さないといけないということになります。

【市川委員】 実際、4倍の流量を流せるのですか。

【町田所長】 1キロだったら多分流せると思うんですけども、実際の長距離冷却を想定すると、やはり5キロとか10キロとかという冷却ステーション間になってしまいますので、そうすると、そうはなかなかいかない。ですから、温度差をもう少し広げるという方向に若干なるかと思えます。

【市川委員】 流量にも多分最適流量があると思うので、そのような観点からいって、超電導ケーブルの場合、今の最初から最初まで途中で冷却を置かないということだと、逆に言うと、どのぐらいの距離で冷却を途中で置かなければならなくなるかという観点からもあると思うので、その両方の観点から最適、経済的に一番優れているのはどういうことかというのは今後検討をしていただきたいと思えます。

【町田所長】 そうですね。一昨年NEDOさんの委員会の中で、さまざまなケースで冷凍機のステーション間をどうするかとか、そういうことは一度検討させていただいております。やはり長距離冷却ですとなるべく長いスパンでやりたくなる。そうすると、ポンプの能力が今度は問題だね、冷凍機は何とかなるんだけど、ポンプが本当に大丈夫かなというような課題も含めてまとめさせていただいております。

【伊瀬分科会長】 それでは、木須委員。

【木須委員】 今回システムの運用の話を中心にご紹介いただいたと思うんですけども、例えばコルゲ

ート管の中でどういうふうな流れになっているとか、どういう冷却特性になっているとか、そういったご検討は何かやられているのでしょうか。多分そういった条件があると、何kmまでこの方式で冷やせますよというようなことが出てくるんじゃないかなと思うんですけども。

【町田所長】 残念ながら私どもの会社ではそのシミュレーションはやってないんですけども、住友電工さんのほうでは多少やられていると思います。

【増田Gr長】 断熱管のコルゲートで圧損がどうなのかとかいうのは、このプロジェクトの前で評価しておりまして、そのデータは持っています。先ほどの質問とちょっとかぶりますけれども、やっぱり長距離になると温度差と圧損の両方を考えて、最適な流量を決めていく必要がある。温度差的には $\Delta T 10 K$ ぐらいです。それから、圧損としては1MPa、10気圧ぐらいでおさまるようなシステムにしたいと考えています。それで冷却システムのステーション間隔が大体3kmから5kmぐらい、もちろんケーブルによってですけども、実現できると思います。

【伊瀬分科会長】 それでは、下山委員お願いします。

【下山分科会長代理】 昨日実際にあそこの冷却室のところで窒素のラインを見たら、あそこに来ているパイプは50mmφぐらいの穴しかあいてないんですね。

【町田所長】 はい。

【下山分科会長代理】 これ、全体流量としてはかなりゆっくりのように見えるんですけども、そこを通るときはものすごく速いですよね。

【町田所長】 はい。

【下山分科会長代理】 実際にこれ、今毎分40Lで冷やしていますけれども、どれぐらいまで今のシステムで流量を増やせる？ かなり圧損が増えてくるような気がするんですけども。

【町田所長】 そうですね、圧損に関しましては、ポンプの特性との兼ね合いもありますので、今、数字として細かい数字がお話しできませんけれども、実は冷却システム側の、後で高効率冷凍機のほうで少しお話ししようと思っていたんですけども、実際にやってみて、冷凍機を複数台を設置する方式というのが、冷凍機を接続する配管が多くあり、大体ここの液体窒素の冷却システム側の断熱配管を流れているところというのが20Aから25A、ですから、20mmから25mmぐらいの径なんですね。

そこの中はご指摘のように流速が毎秒2mとかそういうふうにかなり早くなってきて、ケーブル側を流れているところは大体毎秒30cmとかそのぐらいなんですけれども、冷却システム側だけの圧損、それから、熱損失、これも冷凍機の負荷になってしまうので、やはりそこも合わせた設計をしないといけないと、ケーブル側で一生懸命下げただけでも、冷却システム側でどんどん熱負荷が、圧損が多くなってしまいうばかなことにならないようにやっぱりしなければいけないというのが、改めてこの実証試験をやってわかっております。

【下山分科会長代理】 あとは、この次に本庄さんのほうから説明があると思うんですけども、実際にこれ、冷凍機、使っている間にへたってきたわけですよね。

【町田所長】 はい。

【下山分科会長代理】 これは時間で見ると、リニアに何か効率が落ちてきたというイメージなのか、それとも、ある段階段階で不連続に劣化してきたのか、それとも、冷凍機ごとに個性があったのかとか、何かその辺はいかがでしょうか。

【町田所長】 まず冷凍機ごとの個性は相当あります。ですので、個体差が相当あって、8,000時間運

転してもそんなに能力的に落ちなかったものもあるし、3,000時間ぐらいからどんどん落ちていつてしまっているものもあります。

その原因は、我々も他社さんの冷凍機なのでなかなか言いづらいところもあるんですが、摺動部の摩耗による性能劣化もちろんあるんですが、冷凍機の真空で断熱されている、熱交換器のところの真空度の劣化の影響が、ここが個体差が大きいんですね。ですので、夏場なんかはここら辺にいったい露がついたりしていたんですが、やはり真空度を測ってみると、その影響が大きい。ですから、途中で真空引きして性能が少し回復したというデータも後で本庄さんのほうから紹介あると思うんですが、そういうことがわかりました。

【伊瀬分科会長】 ほかにも。

津田委員。

【津田委員】 詳細なるご説明ありがとうございました。細かい点で恐縮ですが、設定温度を6.9 Kプラスマイナス1 Kにされた理由は何でしょうか？

【町田所長】 冒頭の概要のご説明のときに本庄さんのほうからあったように、絵があるほうがいいんですけども、ケーブルの出口側の温度、ここからだんだん追って行って入口側の温度を決めたということになります。

【津田委員】 それは、あくまでも今回の短距離システムを想定した、ということでしょうか？

【町田所長】 はい。

【津田委員】 冷却する立場からすれば、6.7 Kにしてもそれほど差がないと考えてよろしいでしょうか？

【町田所長】 6.5 Kより下というのはなかなか難しいんですけども、6.7 Kぐらいまでですと、冷凍機の運用上の問題は大きくありませんが、その分効率が落ちます。温度に対して冷凍機の効率はリニアに落ちてきますので、全体の効率を考えると、なるべく温度は高いほうが省エネになるということになります。

【津田委員】 それで、出口側の温度の制約から運転温度を決めているのでしょうか？あと、冷凍機のメンテナンス期間が実用化のときには一番重要になると思うのですが、技術的にはメンテ期間を延ばすことができるのか、ここがネックになっていて、今はメンテ期間を延ばせていないとか、その辺はどのような状況なのでしょう？

【町田所長】 冷凍機に関しましては、やはり今回私どもがブレイトン冷凍機を開発させていただきましたが、そちらにすることによって飛躍的にメンテ期間は延ばすことができると思っています。ただ、寿命があるというかメンテをしなければいけないという主なものはやっぱりポンプになるんですけども、ポンプに関してはやはり運用上の問題で、多少延ばすことはできると思っていますが、やはりある程度の時間を決めて、1万時間とか2万時間、まあ、2万は行かないですけども、運用上でやはりメンテナンスをしていくという、軸受部分とかを取りかえていくということになるかと思っています。

【津田委員】 もう1点ですが、ケーブルを設計するときは、交流損失の問題と圧力損失の問題について考える必要がありますが、一方は冷却の問題であるのに対し、もう一方は電気的な問題となります。話を聞いていて、ケーブル側の設計条件が決まってから冷却側の設計条件について検討した、という印象を受けたのですが、実際に運転するときには、圧損がかなりきいてくるような気がします。そうすると、ケーブル径をできるだけ小さくする方が望ましい、ということになり、先程増田さんが言われたようなケーブル設計にもかなり影響を及ぼすような気がします。以上の様な、実用化に向けての

設計指針というか考え方について、何かコンセプトがございますでしょうか？

【町田所長】 ですから、アプリケーションによって多分それぞれ考え方が変わってくると思うんですけども、やはり長距離冷却みたいなものに関しては、コストとか設置の問題とかがありますので、なるべく冷却ステーションの距離を長くしたい。そうなってくると圧損がやはり問題になってきて、圧損をなるべく少なくするような構成にしていくということは、今回当初から私どもも議論に参加させていただいたということでお互いに大分理解ができてきていると思っていますので、アプリケーションが決まれば、最適なシステム対応というような課題というのは、最初の議論の中ではっきりして、対策を打つものは対策を打つということが今後はできるようになったと思っています。

【津田委員】 今回は、そうやって、前川製作所さんと住友電工さんが一緒に検討されているから、その様なアプリケーションに応じた最適なシステム設計ができていて、ということが他にはない画期的な成果になっている、という理解でよろしいでしょうか？

【町田所長】 そうですね、はい。

【津田委員】 わかりました。それから、今回はケーブルが5 m径で曲げられていますが、その部分ではケーブル中の導体位置が直線部とかなり違っていると思うのですが、その部分の圧損は、直線部に比べて大きくなっていないのでしょうか？

【町田所長】 今回、ケーブルの圧損自体はですね……。

【津田委員】 変わらないですか。

【町田所長】 もう問題にならないぐらいの値なので、多分圧損に関してはそんなに大きな影響はないと。ただ、熱損失に関しては課題となっています。

【津田委員】 それでは、ケーブル中の導体位置がどうであれ、ケーブル全断面積に対する冷媒流路の断面積の割合がある程度決まれば、圧損は決まるということでしょうか？

【町田所長】 基本的には流速と表面の形状によって決まりますので。

【津田委員】 ケーブル断面中の導体位置が変わると、場所によって液体窒素の密度差ができる様な気がするのですが、その影響は大きくない、ということでしょうか？

【町田所長】 若干はあると思うんですけども、もともと流速が30 cm/secぐらいと非常に遅いからです。

【津田委員】 わかりました。どうもありがとうございました。

【伊瀬分科会長】 あと、いかがでしょうか。

中澤委員。

【中澤委員】 ご質問というか、コメントになってしまうのですが、冒頭の本庄PLからのご説明でもあったんですけども、今回改めて、最終的にシステム自体の損失を減らすときに、循環系も含めた冷却システムで考える大切さというのを今日聞いていてつくづく思いました。今後の損失低減をぜひ期待していますというのと、町田所長のお話でもあったんですけども、今回、冷却機メーカーさんと電線メーカーさんが一体となってやる必要性というのを感じました。以上です。

【町田所長】 ありがとうございます。

【伊瀬分科会長】 長嶋委員のほうから何かございましょうか。

【長嶋委員】 今回、ケーブルは一応、試験設備の中で折り返してきているという感じで、冷却しやすいやり方なんじゃないかなと思うんですが、実際本当に送電用という形で考えるときの何か概念図みたいなものを資料の中で探したんですが見つけられなかったんですが、そういうことももし何かお考え

がありましたら教えていただきたい。

【町田所長】　今回は試験の設置の場所問題もあって、折り返して、端末が横並びにあって、その脇に冷凍機室があるという、そういう意味では非常にやりやすい、冷却しやすい方法だったと思います。ケーブルの冷却をしていくと、さまざまな考え方があってと思うんですが、冷却ステーションごとに折り返して冷やしてあげるという方式と、それから、バケツリレーみたいな形で、片道切符で最後に冷却ステーションでぐるっと折り返して戻ってくるというような形、大きくは多分2種類が考えられるだろうと思っております。

これもやはりアプリケーションが決まらないと机上の空論みたいなところがございます、ですから、長距離冷却は、多分配置によっては、私は個人的には片道切符で最後のところを戻してあげるというような形がいいのかなと思っておりますが、それもやっぱりアプリケーションごとに検討していくべき課題だろうと思っております。それでよろしいでしょうか。

【長嶋委員】　はい。

【伊瀬分科会長】　そうしましたら、私のほうから。今回そこに出ていますように、オン・オフ制御、台数制御ということでやられたんですが、もし冷凍機の能力可変制御ができれば、これ、台数制御じゃなくて、連続的に運転したほうが効率よくなるんじゃないかということも考えられるんですが、その辺はいかがでございましょうか。

【町田所長】　そうですね、こちらはもうこれしか方法がないということで。今回、残念ながら私どもの冷凍機が間に合わずに、スターリング冷凍機で、容量が小さいやつ複数台設置という形をとったためにこういう運転をしたわけなんです、後ほどご説明いたします新型ブレイトン冷凍機は、容量可変になっております。ですから、負荷に合わせて温度を一定にするように冷凍機の能力を変えていける。それはコンプレッサとかの回転数を変えたり、循環する流量を変えたりという方法でやれるものができました。

先ほど下山先生からご指摘があったように、この内容と新しい冷凍機の内容というのは、これらで課題がわかったものを全てそちらの冷凍機で何とか解決しようというようなやり方なので、ここまでの発表ですともう大分時代が前の技術になってしまったというような形になっているんですが、実際にやった内容ということで今回、報告させていただきました。

【伊瀬分科会長】　わかりました。どうもありがとうございました。

6.1-4. 実系統における総合的な信頼性検討（説明、質疑応答）

実施者より資料 7-1-4 に基づき説明が行われ、以下の質疑応答が行われた。

【津田委員】　ご説明ありがとうございました。8 ページ目の通電損失ですが、先程のご説明では、算出方法は、全損失から平均的な侵入熱と誘電損を引く、ということでしたが、ということは、昼間は、侵入熱が平均値よりも多くなりますので、実際の通電損失はこれより小さくなり、侵入熱が平均値よりも小さくなる夜間の通電損失は、これらより少し大きくなり、8 ページ目のグラフでは、白のプロット（昼間）と緑のプロット（夜間）の間に実際の値が来る様な気がします。このとき、13 ページ目の縦軸のケーブルでの熱負荷が、夜間では非常によく合っている、とすると、侵入熱以外に何か別のロスが発生している様にも思えるのですが、その点についてはどうお考えでしょうか？

【本庄 P L】　先ほどの計算式の部分は、この侵入熱ということで、規定温度に対して、昼夜の温度差を

平均すると大体6℃なんです。6℃分の温度が上がったときに侵入熱がどのくらい増えるかというのを計算して、それを引いているという形になっています。そういう意味では、夜も常に温度が最低になるかということ、これでいくと21時から5時ということで、まだ21時とかいうところは温度が下がっていく段階なので、夜の段階のデータとしてはそこそこのいいデータが出ているのかなとは思いますが、ですから、そういう意味では、昼間のデータのほうが6℃よりもはるかに大きな温度差の影響が出ているということを示しているということで、おそらく両方とも同じような傾向を出しているとは思いますが。

【津田委員】 原因不明な別の損失が発生している、というように解釈しなくてもよい、ということでしょうか？

【本庄P L】 はい。

【津田委員】 わかりました。今のことも関係するのですが、先程増田様のお話で、基本設計では侵入熱が2W/mぐらいというのに対して、実際には3W/mになっているということでしたが、この差はケーブルを長距離化するときにはすごく影響してくると思います。この差が単なる侵入熱によるものなのか、それとも他に要因があるのか、その辺はどうでしょうか？

【本庄P L】 これは増田さんからのほうがよろしいですか。

【増田G r 長】 先ほど2W/mと言ったのは、将来的といいますか、F/Sでの前提条件で与えた数値です。今回の実証プロジェクトのケーブルでの断熱管が3W/mになったのは、サイズの制限から、交流損を減らすという方向で設計したため、断熱管の侵入熱にしわ寄せが行った。断熱管は、サイズの的に大分厳しい設計をしているので、侵入熱が多くなっている。

【津田委員】 断熱管の侵入熱にしわ寄せが行ったというのはどういうことですか？

【増田G r 長】 できればもう少し断熱管の断熱層を広げたい要望があったんですけども、逆にここは狭くなっている。

【津田委員】 その辺の制約条件は、ケーブルをより重視した、という意味でしょうか？

【増田G r 長】 全体サイズを考えてということですよ。

【津田委員】 それでは、そういったことへの解決策や対応策というのはもう明確になっていて、たまたま今回はそういう仕様でやったので3W/mになった、ということでしょうか？

【増田G r 長】 もちろんサイズを広げれば損失は下がる方向だと思いますが、全体のサイズが大きくなるので、そのあたりの兼ね合いでまだまだ改善の余地はあると思います。

【津田委員】 わかりました。

【本庄P L】 今回、先ほどお話あったんですけども、Uの字のところを引き込むということで、テンションかなり強くなるので、あえてテンションメンバを入れているという形になります。二重断熱管のところのすき間がその分減ってきているということもあって3W/mぐらいになっているということで、実機で使うときにはその分が減る可能性があるのと、ただ逆に言うと、今度は長くなるので、長くなるとその分またテンションメンバが要るんじゃないかとかという話がありますが、その辺の兼ね合いで決まってくるかなという感じがあります。

【津田委員】 あと1点すみません。10ページ目のCOPの計算のところ、停止している冷凍機が熱負荷になる、という点がよくわからなかったのですが、運転していない冷凍機は除外していないのでしょうか？

【本庄P L】 6台とも全て液体窒素が全部通る形になっていますので。止まっているときも除外してい

ないんです。常に冷えた状態になっている。

【津田委員】 ということは、評価上も考慮している、ということですか？

【本庄 P L】 単体の試験ですと入口と出口の温度差から見ますから、これはもう単純にその冷凍機がどれぐらいの能力を持っているかということになります。システムで見ますと、冷却室に入って出てくる温度差と、そこの全部で使っているエネルギーがどのぐらい使っているかと、単純に言うとそのうことで決まりますので、そういう意味では中にある配管が多ければ多いほど増えますし、中で停止している冷凍機が多ければ、その分ロスが増えてしまうということになります。

【津田委員】 そういうことですね。システム全体で評価していて、実質的な部分だけの評価ではないということですね？

【本庄 P L】 そうですね。

【津田委員】 わかりました。逆に、今回は、実質的な部分だけの評価はされていないのですか？今後の汎用性のことを考えると、むしろ、今回採用しているシステム構成に起因する影響を取り除いた方が、純粹に見やすくなると思うのですが如何でしょうか？

【本庄 P L】 停止したものを除いてという計算もしております。

【津田委員】 そうですか。

【本庄 P L】 ただ、やはり使用者側から見ると、システムとしてどうかというところが重要ですので。

【津田委員】 それはそうですね。わかりました。ありがとうございます。

【伊瀬分科会長】 では、下山委員。

【下山分科会長代理】 こういうふう長いこと試験やって、この情報が非常に重要だということはよくわかるんですけども、かつてアメリカの Albany で似たようなケーブル試験が比較的長い時間行われて、全く同じような規格の超電導線使ってやられたと思います。そのときにもう幾らかこういうような知見は得られていたと思うんですが、今回のプロジェクトでよりあらわになった点がどこであるかというのがまず1つ目の質問です。あと、2つ目は簡単です。

【本庄 P L】 Albany のほうの試験、私も一度見に行きましたけれども、結果として、データとしてどういう特性を持っているかという、こういった実測のデータはあまり出てきてないんじゃないかなと思います。そういう意味では見るだけは見たんですけども、結果としてどんなものかというのはなかなか評価しづらいところがあったんですね。ですから、今回の中でこういったかなり細かいところまでデータが出たというのは、それ一つ一つが非常に重要なデータがとれたと思っています。

【下山分科会長代理】 あと、今回のプロジェクトはバイパスの形でつくっていますので、保険かかっています。実際にこれ、ケーブル運用するときには、実際に都市間のときはきっとバイパスはつけませんよね。

【本庄 P L】 そのバイパスはどちらの？

【下山分科会長代理】 今の場合短絡しているところを盲腸みたいに出してケーブルをつけていますから、いつでもこっちに逃げるができますけれども、実際の運用になって幹線に使えるようになってくると、やはり超電導メインで、ほかのルート回ればいいんですけども、そんな簡単に切りかえるわけにはいなくなってくると思うんです。

そういう意味で、このプロジェクトで難しかったかもしれないですけども、今、出口温度として最高 79 K まで上げましたよね。もっと温度が高いところまで上げたときに何が起こるのか。要するに、電流は下げれば超電導は壊れないわけですけども、そのとき冷却機で何が起こるのかとか、そ

ういう試験というのはやる予定はなかったんでしょうか。極限的なところで何が起こるかというのはこういうときにしかできない試験だと思って見ていたんですけれども。

【本庄 P L】 系統を接続した状況でということになると、やはり重故障、何かあったときに系統を止める影響を与えるということを避けるために、ぎりぎりのところかなということで79Kまでにしているということです。

これ、個別で別にしました？

【増田 G r 長】 温度が高いところではやれてない。I cについては温度が高いところでも測っていますので、それで、大体どれぐらいの温度まで運転できるかという想定はしています。

【下山分科会長代理】 いや、超電導は大丈夫だと思んですけども、冷却システムのほうで何か起こりやしないかということを行っている。

【町田所長】 冷却システムの場合は、出口側、ガスが途中で発生をするということになったときに何が起きるかというのが1つの目安になるんですが、実は今回は77Kでも10K以上、88Kとかまでのサブクールマージンを持っておりまして、逆に言うと、冷却システム側よりはケーブル側の出口温度を監視することで問題ないだろうと思ってはいました。あとは、先ほど本庄さんからおっしゃっていただいたように、途中で何か異常があった場合ですね。例えばどこで漏れてしまったとか。そういうことは全くないような運用をしてしまったというのが今回のプロジェクトでございまして、それはやはり今後検証はしておかないといけないんだろうなどは思います。

【増田 G r 長】 先ほどのAlbanyのことで少し補足します。我々住友電工、は、ケーブル側のデータというのはもちろん我々が独自でとっていますので、データは持っていますし、ある程度レポートも出させてもらっているのですが、どういう運転状況であったかというのはそれを見ていただければわかると思いますが、冷却に関してのデータは、我々でさえもらえてない。冷却は当時のBOC社が担当していましたが、ほとんどデータを出さないところでして、こういった冷凍機のCOPも我々は全くわからなかったです。そういう点では、今回冷却システムも含めたデータがとれたということで意義があったと思います。

【下山分科会長代理】 わかりました。

【伊瀬分科会長】 次、中澤委員。

【中澤委員】 何点かご質問があるんですが。1点目は、14ページで真空の話が出ていたんですが、真空が悪くなっている原因として、終端か中間接続部かどちらかだと思んですけども、その辺の原因分析とか、どちらの部分が悪いとかかそういう評価とかはされていますでしょうか。

【増田 G r 長】 個別にデータをとっていますので、終端部分が悪くなったというのは確認しています。

【中澤委員】 中間部じゃなくて終端部のほう？

【増田 G r 長】 終端部です。

【中澤委員】 わかりました。それで、15ページのところで、対策として定期的な真空引きというのがあるんですけども、右側のグラフとか見てみますと、真空度が1から10のどこかの、そこぐらいまでフラットで来ていて、ある時点から急激に悪くなっているように見えるので、真空度を接点化して軽故障か何かに持っていき、それで監視するやり方もあるのかなと思います。

それから、もう1点ご質問です。遮熱の話があったと思んですけども、遮熱の考え方なのですが、これは直射の遮熱という理解でよろしいでしょうか。というのは、埋設部は直射が当然関係ないと思うので、そういう理解でよろしいかということです。

【本庄PL】 はい、これは直射の遮熱になります。ですから、地中で全部使う分にはこの問題は出てこないと思います。ただ、例えば発電所で使う場合とかLNGの配管とかも地上を這う場合とかがありますよね。だから、そういったところも同じようなことになっているということで、例えば超電導ケーブルを発電機の引き出し口で使う場合に、それが地上部分を這う場合があるのであれば、同じようなことは考える必要があると思います。

【伊瀬分科会長】 よろしゅうございましょうか。

では、長嶋委員。

【長嶋委員】 先ほど津田先生のほうからもお話がありましたけれども、冷凍機のオン・オフ制御でやられたと。さっき町田さんのところで申し上げるべきだったのかもしれませんが、これ、やっぱり回転数を変えれば能力はコントロールできると思います。我々もやったことあるんですけども、そういうやり方をすれば、効率も一応単体の能力からそれほど落ちないなんていうこともあるんじゃないかなということで、そういう使い方をするかしないかは、別にこれはスターリングの問題じゃないんじゃないかなということもさっき思ったものですから申し上げたかった。

あとは、軽故障があったときに冷凍系は問題なかったというお話なんですけど、冷凍機は大体8,000時間でメンテナンスをやられていたということなんですけど、ポンプも標準、大体どれぐらいでやられていたんでしょう。

【町田所長】 実際の試験においては9,000時間ぐらいでやって、メンテナンスした内容に関しては、中の部品のチェックとかそういうことをやりました。

【長嶋委員】 そこでトラブルが起きたりとか、何か不具合があったということはない？

【町田所長】 そうですね、冷凍機もポンプもそうなんですけれども、運転しながら系内を開放して行くことになるものですから、一番気をつけなければいけないのは、外気というか大気が中に入って、特に水分が悪さをするという事は絶対に避けなければいけないということで、そのやり方に関しては事前の準備も含めて相当やりましたというか、工場試験から3回にわたってやり方を確認して、実際の実証試験でもポンプは1回、それから、冷凍機は全数行ったということになります。

【長嶋委員】 わかりました。ありがとうございます。

【伊瀬分科会長】 市川委員お願いします。

【市川委員】 今回検証項目の中で電気的特性としていろいろとられているんですけども、その中で臨界電流でケーブルの劣化状況の判定というか評価をしています。これが実際に敷設されたケーブルにおいては臨界電流測定というのは基本的には不可能かと思われませんが、実際運用されたケーブルにおいて臨界電流にかわる評価法というのは何かお考えがあるんでしょうか。

【本庄PL】 やはり臨界電流測定は何らかの方法で現地でもしたいなという気持ちはあります。ですが、長距離になりますので、今回みたいに両方端末が並んでいればすぐI_c測定もできるんですけども、もう行ったきりになりますので、そうした場合は、向こうで例えば黒相と白相を短絡して黒・白相だけで測定するとかですね。ただ、臨界電流は相当高いので、それなりの設備を置かないと直流の電流測定ができなくなるので、そこはちょっと課題にはなるかとは思いますが、ただ、それ以外で特性というとなかなか難しいかなと。ですから、布設前に工場で見ながら、布設の施工管理でというのは、それ、今、通常のやり方ですけども、それ以外、今のところどうかなというところがありますね。

【市川委員】 実際今回試験を行って、基本的にはもうほぼ全然変わらないというような状況だと思われまます。さらに短絡試験もやられて劣化もないということなので、そういう意味では、工場出荷時に1

度検査しておけば、想定された範囲内での使用では劣化はないと考えて、現地での臨界電流測定は不要というようなことは言えないのでしょうか。

【本庄PL】 端末とジョイントが現地施工になって、超電導線自体にさわるんですね。今はそこ、ごらんいただきました超電導と超電導の接続部分はハンダで接続しているということで、ハンダの温度と時間の管理をすることで問題ないだろうということにしていますけれども、それに対して、本当にそれを電氣的に評価しないままに使っていいかどうかというのは、その施工技術のところとあわせて評価すべきところだと、課題としては残っていると思います。

【市川委員】 今のお話を聞きますと、ケーブル全長においては問題ないけれども、接続部が問題ということで、逆に接続部だけの評価だと、何か技術的に可能ではないかと思われませんが、全体で評価しなければいけないのか、それとも部分的に評価するのか、その辺は実際ケーブルが運用された場合に、検査の経済性とかも考えて、やるべき項目とやらなくてもいい項目があると思うので、その辺の検討もよろしくお願ひしたいと思います。

【本庄PL】 どうもご指摘ありがとうございます。

【伊瀬分科会長】 木須委員。

【木須委員】 先ほどありました10ページのCOPの話ですけれども、私もこのデータは、ケーブルのパフォーマンスという意味では非常に大事なデータが得られたんじゃないかと思います。今回のケーブルは240mとわりと短い状況で、片やU字の部分でしたり、端末の部分があるということで、そういう意味では、超電導ケーブルから見るとかなり厳しい条件の数値として出ているんじゃないかと思います。

例えばこの結果をもとに、もうちょっと長いケーブルにしたときに、例えば冒頭、CVケーブルの2分の1というような目標があるというお話が出たと思うんですけれども、逆にどれぐらいの長さであればかなりメリットが見込めるとか、そういったオペレーションの条件に関する検討なんかもできるんじゃないかと思っているんですけれども、そういった検討って何かされているのでしょうか。

【本庄PL】 個別のところについてはまだ、どのぐらいの長さでCOPから経済性が出るという、そこまで個別のところまで見ておりませんので、今後、そういった対象を具体的に選定しながらそういう評価をしていくという段階に入っていくかなと思います。

【木須委員】 ありがとうございます。

【伊瀬分科会長】 それでは、私のほうからも1つ。通電損と評価しておられましたのでお聞きしますけれども、今回の試験で通電損によらないベースの損失と通電損による部分の損失というのはどのぐらいの割合かというのをもし評価しておられましたら教えていただきたいんです。超電導の場合、どうしてもベースの部分の損失が大きくなってしまうという傾向があります。

【本庄PL】 そういう意味では、こちらにありますのは熱損失のデータということで、無負荷状態で測定したもので、これが1つのベースのデータかと思います。これに対して通電損失、誘電損失がのってくるという形になって、誘電損失はほとんど無視できるということになりますので、このデータが基準になる、電圧・電流が流れていないときにこれだけのものが出ているというところのベースになると思います。それが実測で2,400kWということになります。これに通電損がのるんですけれども、そういう意味ではここがかなりの支配的なところを占めているというデータになっているかと思ひます。

【伊瀬分科会長】 わかりました。

6.1-5. ケーブルの高性能化の研究（説明、質疑応答）

実施者より資料 7-1-5 に基づき説明が行われ、以下の質疑応答が行われた。

【津田委員】 ご説明ありがとうございました。少し気になるのは、高性能化ということで、これまでの成果の延長ということを考えて、シールド層を無くすという発想には至らないと思いますので、シールド層を無くした点が奇異に感じられます。もちろん、シールド層でのロス、先程言いました様に非常に大きいので、そのロス分を無くすというのはわかるのですが、シールド層が無いと、今言われているように、垂直磁場の影響で I_c が下がり負荷率が上がることによるロス増大が起きることが予想されます。これが、これまでにシールド層付きの三相一括型を採用されてきた理由だと思のですが、今回高性能化ということで、シールド層無し、を選ばれたというのは、これまでの成果とどう結び付けようとしている、ということなのでしょうか？

【増田 G r 長】 シールドの損失が低減できるというのはもちろんそうなんですけれども、設置場所の自由度があるということです。こういった 1 m 級のブスバーが入るようなスペースがあるので、超電導ケーブルとしては、管路の中におさめる場合と異なり、空間にもっと自由度があるので、もう少し相間距離を広げられるんじゃないかと考えています。そうすると磁場の影響も小さい。そういう発想からシールドなし、コストの面もありましたので、検討しているところです。相間距離 350 mm が現行設備の 1 つの例ですけれども、それをもとに試験を実施すると、磁場の影響があるというところでは。

【津田委員】 それと関係して、350 mm 離れたときのケーブルの AC ロスは測定されていないのでしょうか？

【増田 G r 長】 今日の結果には入っていないんですけれども、実験は行っています。

【津田委員】 そうですか。その場合、シールド層が無い分 I_c が下がって、負荷率が上がりますのでロスが増えると思うのですが、メートル当たりどれくらいロスが増えたのでしょうか？

【増田 G r 長】 数値的に今ははっきり覚えていませんけれども、それほど大きくなくて、5%か10%か、それぐらいの影響だったと思います。

【津田委員】 その程度ですか。

【増田 G r 長】 その程度と思います。

【津田委員】 その程度であれば、シールド層を無くす、という解もあり得る、ということでしょうか？

【増田 G r 長】 そういうことです。

【津田委員】 あと 1 点だけすみません。このケーブル構造の図を見るとピッチがないように見えるのですが、これは意図的なものなのでしょうか？真っ直ぐ並んでいるように見えるのですが、、、。

【増田 G r 長】 単なる絵の問題で、実際にはあるピッチで巻かれています。

【津田委員】 そうですか。別の概念が入っているのかと思ったのですが。そういうことではないのですかね？

【増田 G r 長】 一番最初のほうで議論した均負荷化というのは、この 4 層のピッチ調整の中に今後入れたいと思います。この絵は特に意図はありません。

【津田委員】 わかりました。ちなみに、今回は、 I_c が何 A の線材をトータル何本使用する、ということで設計されたのでしょうか？ どうか、試作ですか？

- 【増田G r 長】 そうですね、I c 的にはですね……。
- 【津田委員】 先程言われていた I c 2 0 0 A の線ですか？
- 【増田G r 長】 1 2 k A だから I c は多分 2 万 A 超えていたと思うんですけども、2 万か 2 万二、三千 A だと思うんですけどね。それで、2 0 0 A 級を使っているんで、多分磁場を考慮して線材本数は 1 2 0 本ぐらいは使っていたと思います。ちょっと不正確だと思いますけれども、大体それぐらいのオーダーです。
- 【津田委員】 それなら、1 2 k A 流すのに対して、負荷率は 5 0 % ぐらいのイメージですね？
- 【増田G r 長】 そうですね。
- 【津田委員】 わかりました。ありがとうございました。
- 【伊瀬分科会長】 では、下山委員お願いします。
- 【下山分科会長代理】 基本的なところで、これは長さとしてどれぐらいのものを想定しているんでしょうか。
- 【増田G r 長】 今の発電機とステップアップトランスとの間というのは大体 1 0 0 m 以下なんですね。だから、発電機の引き出し線としてはおそらく 1 0 0 m 以下だとは思いますが。
- 【下山分科会長代理】 そうすると、やっぱり末端の影響がでかいからということでいろいろ考えてらっしゃると思うんですけども……。
- 【増田G r 長】 そうですね、はい。
- 【下山分科会長代理】 実際に置きかえるメリットというのは、さっき、穴掘らなきゃいけないとかいろいろありましたよね、最初の建設で。それ以外に、運転のときのエネルギー的な面でのメリットというのは、この今の実験で十分に出ることがもう証明されているんですか、これ。
- 【増田G r 長】 この後のセッションでこの F / S を報告することになっているのでそこでお話ししますけれども、先ほどの 1 0 W / m とか想定した数値であれば、メリットは十分出ます。
- 【下山分科会長代理】 わかりました。
- 【伊瀬分科会長】 ほかの委員の方々よろしゅうございますでしょうか。
- では、中澤委員。
- 【中澤委員】 1 0 ページの部分で少し教えていただきたいのですが、断熱とか冷却とかいう面での管理値なり目標値みたいなものはあるのでしょうか。その辺よくわからなかったものですから。
- 【増田G r 長】 この末端部分の熱的な損失でいきますと、真空断熱層からの侵入熱と、電流リードから入ってくる熱量と、超電導と常電導の接続部の発熱等がありますが、電流が大きいので、ほとんどがこの電流リードと接続部の発熱です。侵入熱等はもちろん計算していますが、多分数十 W のオーダーでほとんど無視できるレベルです。
- 【中澤委員】 侵入熱はもうそんなに気にしなくていいレベルということでしょうか？
- 【増田G r 長】 もちろん真空とかを維持するためには従来の技術で対応でき、それほどシビアじゃない。むしろこの電流リードの侵入熱をいかに減らすかというところがポイントになります。
- 【伊瀬分科会長】 あとは、市川委員お願いします。
- 【市川委員】 短絡試験をされて検証されているんですけども、6 3 k A、2 秒ということで温度上昇は問題ない範囲ということなんですけれども、これ、先ほどの説明で電磁力に関して大体 1. 3 t o n ということなんですけれども、6 3 k A の短絡で 1. 3 t o n ってちょっと小さく感じるんですけども、これは直流部なしの状態での電磁力の検証なんですか。

- 【増田G r 長】 すみません、詳しい状況までは今覚えてなくて、後でまた回答させていただきます。
- 【伊瀬分科会長】 他はいかがでございましょう。
長嶋委員、よろしゅうございますか。
- 【長嶋委員】 はい。
- 【伊瀬分科会長】 では、木須委員。
- 【木須委員】 これ、先ほど100m程度ということで、冷却の問題は特に重要ではなくて、むしろ末端とかACロスの部分がドミナントだというふうに考えておけばよろしいですか。
- 【増田G r 長】 冷却に関しては、このシステムで大体10kW級の冷却が要ります。短いんですけども、熱量的には大きい。そうすると、冷却システムとして信頼性のあるものであったり、COPが高いものであったり、長距離ケーブル用の冷却システムとも共通的な課題です。先ほどの ΔT とか ΔP とか、それを考慮したシステム設計になります。
- 【木須委員】 後で多分話あると思うんですけども、10kWということは、ブレイトン冷凍機の例えば5kW2台とか、そういうイメージで考えた？
- 【増田G r 長】 そういうイメージを持っております。
- 【木須委員】 わかりました。
- 【伊瀬分科会長】 遮蔽層ですけども、超電導の遮蔽層をなくされたんですけども、銅のは残っているんですけども、これもなくすという選択はなかったんですか。
- 【増田G r 長】 Cuの遮蔽層は、電界遮蔽の役割です。この部分に大きな電流は流れない設計です。
- 【伊瀬分科会長】 なるほど、そういうことですか。
それから、ブッシングですけども、そこの熱侵入が大きいということですけども、高温超電導の高温超電導のものを使ってワークするという案はございませんでしょうか。
- 【増田G r 長】 そういう材料があればいいんですけども。
- 【伊瀬分科会長】 今のところないということで。
- 【増田G r 長】 はい。
- 【伊瀬分科会長】 なるほど、そうですか。わかりました。
では、津田委員。
- 【津田委員】 1点だけお伺いしたいのですが、、、この種のケーブル設計で、シールド層を無しとする場合、線材に磁場が印加されないようにするには、層数が少ないほうがよいと思うのですが、、、今回は4層にされていて、1本が150mm ϕ ですと、径を4倍の600mm ϕ にすれば1層にできますので、その方がロスは小さくなるような気がするのですが、その辺はどのようにお考えでしょうか？
- 【増田G r 長】 設備投資すればできると思いますが、今ある設備でつくれるケーブルサイズの限界があります。断熱管のコルゲートでも結構サイズ的にぎりぎりであったり、絶縁紙を巻くサイズにも限界があります。あとは $\phi 600$ mmになるとドラムに巻けないような気がしますので、なかなかそのあたりの制限があります。
- 【津田委員】 そういう制約もあるということですね。
- 【増田G r 長】 ありますね。
- 【津田委員】 わかりました。ありがとうございました。
- 【伊瀬分科会長】 はい。
- 【下山分科会長代理】 コルゲート管使わなきゃいけないんですか、これ。

- 【増田Gr長】 メリットの一つにレイアウトの自由度もあると考えて、コルゲート管を使う設計になっています。
- 【下山分科会長代理】 自由度がある必要がある場所かどうかという……。
- 【増田Gr長】 それは場所によりますね。
- 【下山分科会長代理】 固定して使ってしまう方がいいわけですので、そんな制約はないような気がするんですけども。
- 【増田Gr長】 確かにそうなるとう1mの管とあんまり変わらない話にもなるんですけども、サイズを大きくするという意味ではそうかもしれません。少なくとも絶縁を巻くという意味では、やっぱり600mmまではなかなか今の設備では巻けないです。

6.1-6. 冷却システムの高性能化（説明、質疑応答）

実施者より資料7-1-6に基づき説明が行われ、以下の質疑応答が行われた。

- 【津田委員】 ご説明ありがとうございました。まずお伺いしたいのは、11ページ目の高COP一定での容量制御方法を考案されたということで、これは素晴らしいことだと思うのですが、この実験結果は77Kでの結果でしょうか？
- 【町田所長】 11ページ目のやつは、これは、そうですね……。
- 【津田委員】 77K？
- 【町田所長】 ごめんなさい、これは69Kのときでございます。
- 【津田委員】 そうですか。
- 【町田所長】 はい。COP比で書いてありますので。
- 【津田委員】 比ですね。絶対値ではなくて、…。
- 【町田所長】 絶対値ではない。
- 【津田委員】 それは、温度に関係なくこの様な制御方法が適用できる、ということを確認された、という解釈でよろしいでしょうか？
- 【町田所長】 そうですね。最後の総合運転試験のところを見ていただくとわかるんですが、温度を上げたときにも圧力制御を常に負荷の変動に対して行っているということで、そこにCOPを直接書き込んでないんですけども、その3パターンそれぞれにおいて、2つ目の第2週目のパターンは若干回転数制御が入っております。ここのパターンのときだけは回転数制御が入っておりますので、若干性能的に総合効率としては下がってはいます。
- 【津田委員】 それでは、実証用のケーブルを使うときには、0.08ぐらいで運転ができるということでしょうか？
- 【町田所長】 69Kですか？
- 【津田委員】 69Kです。
- 【町田所長】 そうですね、69Kだとそうなりますが、先ほど言いましたように、モーターの部分であるとか、全体の漏れ損失であったり、流体的なところも含めて若干改善の余地はあると思っておりますので、さらにそれを上げるための努力はしていきたい。
- 【津田委員】 まだ余地はあるということでしょうか？
- 【町田所長】 あると思っています。

【津田委員】　　そういうことですか。あと、少し細かいことで恐縮ですが、5ページ目の、今回メンテ時間を確保するという意味で非接触軸受とあるのですが、具体的にはこういった軸受けを使用されているのでしょうか？

【町田所長】　　図を用意してなくてわかりづらいんですけども、これが大体配置とさせていただくと、軸受の部分というのはこのモーターを介して左右両方ついております。それをマグネットベアリングで保持しています。

【津田委員】　　永久磁石型ということですか？

【町田所長】　　永久磁石ではなくて、電気コイル型の吸引型のマグネットベアリングを使っています。ですから、運転中は常に非接触ということですよ。

【津田委員】　　わかりました。ありがとうございました。

【伊瀬分科会長】　　ほかの委員の方々いかがでしょう。

では、下山委員をお願いします。

【下山分科会長代理】　　これ、ブレイトン冷凍機にしてCOP=0.1を目指される。もっと上は行けないんですか、原理的に。

【町田所長】　　そうですね、一応今、考えられる限りのことはやったつもりなんですけど、先ほども申しましたように、圧縮機・膨張機の断熱効率、これがやはり全体のCOPに対して支配的になります。ですので、上げるとしたらこれをさらに効率を上げていくということになるんですが、数%ぐらいは、数%といってもかなり下のほうの数%ですけども、もう少し上げられるかなという感触は持っています。

【下山分科会長代理】　　それから、あともう1つ、目標3万時間ということで設計されている。一番寿命にききそうな箇所ってどこだとお考えでしょうか。

【町田所長】　　今のところ、我々として点検として3万時間とっております。基本的には非接触で回しますんで、消耗する部品はありません。ただ、中に使っています、先ほどのマグネットベアリングをきちっと制御するためのセンサーであったり、制御回路だったりというところはやはり電子部品になりますので、それはある程度の時期に交換をしないとイケないと思っております。あとは、シール材とガスケットとかOリングとかそういうものは、接触してなくても静止状態で使ってもやっぱり劣化をしますんで、そういうものは交換しなければいけない。あとは、3万時間で1回点検をさせていただいて、問題がなければそのまま使う方向に行こうと思っております。

もう1点、マグネットベアリングがもし何か変なことが起きた場合とか、UPSで電源は確保しているんですが、電源が落ちた場合とかいうときには、保護用の転がり軸受というか、普通のベアリングの中に入れてあります。もしそういうことが起きた場合は、その転がり軸受というのは数回ぐらいは使えるんですが、ドライの状態でございますので、ある程度何回かそういうことが起きた場合は交換をしなければいけないというところが、正直ベースで言いますとそこがネックになるかもしれないなと思っています。

【下山分科会長代理】　　わかりました。

【楠瀬主研】　　1点だけ補足させていただきます。今の下山先生のご質問に関しては、我々もやはり冷凍機のところのCOPはもっと上げていただきたいと。冷凍機メーカーさんは、もういっぱいいっぱいですよと言っているんですけども、今までいろいろケーススタディ等をやって、このところでやはり経済性が大きく変わるということがわかりましたので、今年度からのプロジェクトではCOP=0.11

と、10%、1割なんですけれども、改善し、それとともに、除去する熱のほう、断熱のケーブルのほうの性能を同じく1割上げて、トータルで2割、侵入熱と冷凍機でそれぞれ1割ずつ頑張っていたいて、トータルで2割の効率改善をするということを目標に3年間でやっていただくと。すごく高い目標ではあるんですけれども、やはり目標を掲げてやっていただくことで技術は必ず進歩すると思っております、そういう形で設定させていただいております。

【下山分科会長代理】 できれば0.15ぐらいにして……。

【楠瀬主研】 そこはいろいろ考えてみましたが難しい。

【下山分科会長代理】 0.12までしかできなかったからNEDOではペケかもしれないけれども、そのほうがいいのかもしいかなど。

【楠瀬主研】 いろいろとそこは相談しているんですけれども、なかなかちょっと。そこで、我々としてはトータルで考えるということで、2割の効率アップということを狙わせていただきました。

【下山分科会長代理】 例えばこれ、3段あって、結局ブレイトンサイクルって、上がぎざぎざしてしまいますよね。

【町田所長】 はい。

【下山分科会長代理】 これもっと段数ふやして、それ、ならしたら多少よくなるとか、そういうことはないんですか。

【町田所長】 若干ですけどあります。

【下山分科会長代理】 ある？

【町田所長】 はい。冷凍機って基本的に、全てが100%の効率で運転しても、温度差があれば効率が決まってしまうまして、この温度帯ですと0.23だったかな、が最高効率になります。今、パーセントカルノーで40%弱ぐらいまでは来ておりますので、一般の空調機器みたいなものと60%ぐらい行っているんですが、いろいろな放熱分とか損失とかという部分もやはりありますので、とにかくやれることは全部やるというつもりではございますが、0.15はちょっと難しいかなと思っております。今のところ、一応世界最高効率だろうと思っております。

【伊瀬分科会長】 ほかに。

では、中澤委員のほうからお願いします。

【中澤委員】 冷凍機は専門外なので素人的なところで教えてほしいんですけれども、途中も少し出てきたんですが、今回ネオンガスを冷媒として使われたという話で、何かほかに代替のものもいろいろあるという話だったと思います。もし仮に代替のものを何かがあって使うともうちょっと効率が上がるのかという可能性がどれぐらいあるのかなというのが1つです。

もう1つ、今回5kWをまず目指してということだと思っておりますが、5kWからさらに10kWとか20kWというところを目指したときに、ネックとなる部分が何になるかと、その辺を教えてください。

【町田所長】 まず冷媒に関してですが、今回の温度帯で使えるものが、ネオンガスのほかにヘリウムガスと水素ガスになります。実は速度型のコンプレッサというのは、実際にガスの音速に対して回転数が決まっています。その3つの中で一番音速が遅いのがネオンガスでございます。一般的に金属系の超電導で使われているのはヘリウムを使って4.2Kまで冷やすということになります。ヘリウムでももちろんこのシステムは成立しますが、回転数がこの倍ぐらいになってきます。そうすると、モーターであったり、先ほどの風損であったり、そういうところがやはり効率的にもかなり厳しいとい

うことになってまいりますし、同じ能力を出すためのインペラの径もさらに小さくなっていくということになりますので、今のところネオンガスが最適だと思っております。

それから、あと、何でしたっけ。ごめんなさい。

【中澤委員】 10 kW、20 kWを目指したときのネックについて伺いたいです。

【町田所長】 一応小さいほうからやらせていただいたのは、もちろん予算の関係もあったんですが、やはり小型のものの方が効率を出すのは非常に難しいと思っております。これの20 kWぐらいまでのものであれば、同じシステムで大型化というのは、そのまま技術の延長線上でできると思っておりますので、そちらは大丈夫だと思っております。

【伊瀬分科会長】 長嶋委員。

【長嶋委員】 冷凍機のメンテナンス間隔のことなんですが、もう既に似たようなものは前川さんはつくられていると思われているんですが、そういう意味で、3万時間というのはもう既にほかのものでは達成しているからこれもできますよというようなふうに考えればいいですか。

【町田所長】 そうですね、今回3万時間と書いてみたものの、どうやって検証しようかというのは非常に難しいんですが、接触しているものであれば、消耗度合いでこのぐらいまで使えますよというのができるんですが、非接触で運転しているものですから、どうやって検証しようかというところは難しいと思われているんですが……。

【長嶋委員】 逆にもうつくられたもので。

【町田所長】 はい。それで、私どもの空気を使った冷凍機というものが、圧縮機1段なんですが、全く同じ構造のもので同じマグネットベアリングを使っているものが既に商品化されてもう5年経過をしております。これもNEDOさんのプロジェクトで開発させていただいたんですが。そちらの実績からいうと、運転時間はまだ3万時間までは行っていないんですけども、5年間無開放で運転されておりますので、基本的な構造とか部品の信頼性とかいう部分からすると、十分問題ないかなとは思っています。

【長嶋委員】 あと、ちょっと細かいことを伺いたいんですけども、さっき、反発性磁気軸受とおっしゃいましたけれども、普通の磁気軸受でいいんですよね。電磁石で使っているのです。

【町田所長】 そうですね、電磁石です。

【長嶋委員】 わかりました。それと、膨張機と圧縮機のところで、軸周りのすき間のところでガスが吹き抜けるようなことが問題だというふうなことをさっきご説明なさったと思うんですけども。

【町田所長】 そうですね、これも構造図がなくて申しわけないですけども、ここが非接触のためにすき間がずっとモーターも含めてあいております。モーターの部分のローターの表面温度が百二、三十度ぐらいまで上がりますので、こちら側からもしガスがこちら側に漏れてしまうと、ここでさらに過熱をされて、高い温度のガスがこっち側に、系内に入ってしまう。それが冷凍機の膨張機の性能にすごく影響するということが実験でもわかっております。そのために、この一部のガスを、ほんのわずかなんですけども、ここから抜くという回路を設けているのと、それから、なるべく漏れないようにここにやはり非接触シール、ラビリンスみたいなものなんですが、そういうものを設けてなるべく抵抗をつけてあげるということをした結果、80%を達成できたということになります。

【長嶋委員】 わかりました。ありがとうございます。

【伊瀬分科会長】 では、木須委員。

【木須委員】 冷媒にネオンガスを用いられているということで、コールドボックスのところの熱交換で

窒素を冷やされているというふうに理解したんですけれども、逆に冷え過ぎない工夫といたしますか、凍ってしまう可能性もあると思うんですけれども、そういったところは具体的な工夫は何かやられているのでしょうか。

【町田所長】 このLN2クーラというところで熱交換をしているんですが、実際はここからネオンガスが出てきたものが実は60Kとか58Kぐらい、要は、窒素の三重点よりも下がっているんですね。私どもも当初からこの熱交換器の中で凍結するのではないかとというふうに心配をしております、それを凍結させないように熱交換器側に工夫をしています。流れていけば凍結はしないんですが、ここで偏流が起きてしまったり、そういうことがないような構造を採用しているということと、このインターロックをしっかりとつけることで、ある温度以上には絶対下がらないということをやっております。

【木須委員】 わかりました。それと、9ページの写真を拝見すると、コールドボックスが大体半分ぐらいのサイズを占めているんですけれども、これ、やっぱり今後もう少し大きいやつをつくられるときには、これがそのまま倍々で大きくなっていくのか、あるいは大型の大容量になるとコールドボックスの分が相対的に小さくなるのか、そこら辺は何かあるのでしょうか。

【町田所長】 今、とにかく効率を、COPを目標達成させるということで、今回は大きさに関してあんまり重きを置かずに物をつくってしまったというところがございますが、実際に設置する場合はやはり大きさの問題が非常に出てまいります。ですので、基本的にコンパクト化をあわせて今後検討していくということと、これ、中に入っているのは熱交換器なんですが、その形状の問題もあって結構すかすかなんです。ですから、設計をもう少しコンパクト側に寄せた設計をすることで、20kWになっても実際、今のサイズからそんなに大きくはならないように考えています。

【木須委員】 わかりました。どうもありがとうございます。

6.2. 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究（説明、質疑応答）

実施者より資料7-2に基づき説明が行われ、以下の質疑応答が行われた。

【市川委員】 今回の成果でいろいろな試験項目の整理ということで、その結果を踏まえて規格化、CIGRE、IECへということで進められて、この成果を規格に反映するというのは非常に有意義なことだと思います。

その中で、規格化を進めていく中で留意していただきたいのは、実際にこの試験規格、これまでの知見でいろいろ出てくると思うんですけれども、その試験が実際試験を受ける側の試験機関で実施可能な試験であるのかどうかということも1つあると思うのです。

要は、こういう試験法でやれば評価できますよというようなを出しても、それを実施できる試験機関がなければ机上の空論になってしまいますので、その辺も踏まえた形での試験規格化を進めていただければ、試験を行うほうの試験機関としても、実際の規格として通りやすい。特に日本の場合はこのようにいろいろな試験をやっていますので、その中から、こういうことはできるけれども、こういうことは実際の試験はできないよという実績がありますので、それを踏まえてぜひIEC等の規格化を進めていただきたいと思います。

【増田Gr長】 ありがとうございます。実際問題、多分今の従来ケーブルの試験設備でないのが、冷却システムだと思いますので、そのあたりが今後のご相談かと思います。

【伊瀬分科会長】 よろしいですか。

では、木須委員。

【木須委員】 国際標準化を考えたときに、各国でケーブルのコード自体が違う部分も出てくると思うんですけども、標準化は、ケーブルの性能としては、例えばロスがメートル当たり幾らとかそういう定義の仕方もあると思うんですけども、そういう方式の違いをどういうふうによく折り合いをつけようかというところがポイントのような気がします。これからの検討ということとは思うんですけども、どういった方向性を考えられているのかというのをちょっとお聞かせいただければ。

【増田G r長】 製品に関する標準化というのはまだ早いといえますか、各国で構造が異なり、足並みがそろっていないので難しい。ただ、試験に関しては標準化できるんじゃないかということで、まず試験法の標準化をやっています。そこでは、三心一括型と単心型というのは、試験電圧的にはあまり変わらなくて、三相同軸だけがやっぱり相間電圧がそのままかかりますので、試験電圧のレベルが少し変わります。そこを踏まえて、各国で調整したということです。

【木須委員】 そういう意味だと、イットリウム系とビスマス系というのもほとんど区別なく今は行こうという、そういう方向性？

【増田G r長】 そうですね、Y系とビスマスに関しては区別はつけてないです。

【木須委員】 わかりました。ありがとうございます。

【伊瀬分科会長】 では、中澤委員。

【中澤委員】 国際的な競争力という観点で、現時点で結構なんですけれども、この部分の仕様の標準化は譲れないよとか、そういうことはお考えとありますか。

【増田G r長】 仕様の標準化という意味ですか。

【中澤委員】 ええ。そういうのはまだこれからなんでしょうか。

【増田G r長】 実はあまりないんですけども、もし線材の規格であったり、導体の規格を考えるのであれば、やっぱり日本の考え方というのを率先して主張していく。つまり、損失を下げるであったり、サイズをここに抑えるとか、そういうことは考えたいと思います。

【伊瀬分科会長】 いかがでございましょう。

では、津田委員をお願いします。

【津田委員】 ご説明ありがとうございました。2点ほどお伺いしたいのですが、1点目は、標準化のところの交流損失で、30mの場合は ΔT ということで、温度差で評価した、ということですが、その前の要素試験では、どの様な電気的方法で測定されたのでしょうか？ また、相毎とか、どの様な括りで測定されているのでしょうか？交流損失の電気的測定は非常に難しく、電圧タップを付けても、どこを測定しているのか、というのは、まだ明確になっていないと思うのですが。

【増田G r長】 交流損失については、試験法の標準化のガイドラインの中では、細かな測定方法までは規定していません。項目を挙げているというレベルで、そこまで規定しているとなかなか進まなかったもので、測定方法までは規定していません。交流損失に関しては、私もいろいろな測り方があるのは知っていますが、ここでは端部を一括にして測るやり方をやっています。ただ、計測線の取り回しでも変わってきますし、そのあたりは今度新しく交流損失測定試験に関するワーキングができるという話も聞いていますので、そこで議論されると思っています。

【津田委員】 では、今後検討されるということでしょうか？

【増田G r長】 はい。

【津田委員】 わかりました。あと1点。2020年の試算では、これが半分になっているのですが、残りの年数を考えると、ある意味チャレンジングである様に感じるのですが、これはビスマス系で実現する、という解釈でよろしいでしょうか？

【増田Gr長】 我々は、今のところビスマスで考えています。コスト的には線材の現状価格は10円/Amですが、将来的に5円/Amになる目標で開発を進めています。

【津田委員】 それは、Icを上げることによって、という解釈でよろしいでしょうか？

【増田Gr長】 そうですね、Icの向上と、もちろん製造プロセス、製造コストを下げるというのも今、並行してやっております。

【津田委員】 そうですか。ありがとうございました。

【伊瀬分科会長】 では、下山委員。

【下山分科会長代理】 いろいろな国が参加してやっていますけれども、日本は今、立場上は幹事ということになってはいますけれども、かなりイニシアチブをとれる立場にあるのでしょうか。

【増田Gr長】 ワーキンググループはもう既に解散しているので、今時点では別に幹事ではないのですが、ディスカッションでは、日本の意見を大分言ったつもりですが、押されたところもあります。

【下山分科会長代理】 ドイツなんかとの折り合いいいんですか。

【増田Gr長】 ドイツとは意見が近かったですね。

【下山分科会長代理】 近い？

【増田Gr長】 ええ。

【下山分科会長代理】 アメリカが遠いんですか。

【増田Gr長】 いや、そういうわけではないんですけれども。日本と違ったのは、今回のガイドラインに入っていないんですけれども、PQテストというのがあります。大体新しいケーブルというのは長期間の試験をするというのが日本では普通なんですけれども、それを超電導ケーブルでもやるべきだという話をしたんですけれども、結局それは受け入れられなかった。PQテストは将来的に検討しようということになっています。彼らは、PQテストをやると価格が上がるという意味合いで反対していました。

【非公開セッション】

6.3.実用化・事業化に向けての見通し及び取り組み

省略

【公開セッション】

7.まとめと課題

実施者より資料8に基づき説明が行われ、以下の質疑応答が行われた。

【市川委員】 まとめということでお聞きしたいのですが、このまとめの一番最初に研究目標と達成という形で全部達成しているんですけれども、このプロジェクトを実施して、特に実証研究ということで、この最初に掲げた目標以外に、何かこの実証研究で初めてわかったという事象ということはないのでしょうか。

【本庄PL】 先ほどから説明していますが、これまでの開発というのは主にケーブルの開発ということだったわけです。100mのケーブルのときもそうですし、冷凍機というのは補機の扱いでこ

れまで来ていたというところがあります。今回初めて実システムに入れるということで、運用を考えた場合には、ケーブル以上に冷却システムそのものの運転・運用技術の確立が非常に重要だということで、そのあたりがこの中で改めてクローズアップされてきたと。

ですから、プロジェクトの最初は、1 kWのスターリング冷凍機を持ってくればおそらく運転がうまくいくんじゃないかということもありましたけれども、設計等を進めているうちに、どうやって6台を併用運転していくのかとか、あるいは温度・圧力の制御方式とそういったものを無人で運転していく技術とか、そういったところが非常に重要だということがわかってきました。あわせて、大容量の冷凍機開発も必要だということで、このあたりがこのプロジェクトを通じてやはり見えてきたところかなと思います。

【増田Gr長】 追加でよろしいですか。私の考えですが、今日あまりアピールできなかったんですけども、やはりソフト面ですが、初めて日本の電力システムに入れるというところで、どういうプロセスでこれを入れていくかというところを勉強、経験できたというのが非常に大きいんです。

超電導ケーブルは、工場での製造及び試験等があり、QC工程等いろいろと管理面で東電さんから細かなチェックをされていますし、出荷試験の方法や、国際標準化のところでしゃべりましたけれども、従来ケーブルの試験を踏まえて、かつ超電導特有の試験も項目を挙げて全てチェックしました。あとは、法的なところで電気事業法の対応の仕方とか、そういうことを勉強できました。また、運用面で、超電導ケーブルを運用するに当たって何に注意をする必要があるか、あるいは警報の設定の仕方とか、そこは実は時間を非常にかけてソフト面を充実させました。

これらは多分今後超電導ケーブルを運用するに当たって、ひな形になると思っております。これをもとにすれば大体どこでも運用できるんじゃないかと考えています。そのあたりが今日、どこまで話ができただかという、あんまりできていなかったかもしれません。

【伊瀬分科会長】 では、次、中澤委員。

【中澤委員】 今後の取り組みというところで、事故時の安全対策というところがあったと思います。今後、モデル試験において電氣的な現象は当然検証されると思うんですけども、例えば損傷に対して窒素がどうなるか、物理的な現象あたりもしっかりご検証いただけるとありがたいかなと思ってございます。

【本庄PL】 おっしゃるとおりで、電氣的なトラブルに加えて、外傷に対する影響とか、あるいはケーブルがどこか破損した場合にどうなるかといった、特に液体窒素を扱いますので、液体窒素が公衆災害になる可能性があるかどうかというところをしっかりと見ないと、やはり実系統で使うというのはなかなか難しい。今回は変電所という限定したスペースでしたので、閉空間に近く公衆災害というところはそれほど気にしないで済んだんですけども、今後実際に管路、洞道に布設されて公道の下に入るということになってくると、そのあたり一番重要な課題になってくると思いますので、しっかりと検証していきたいと思います。

【伊瀬分科会長】 長嶋委員お願いします。

【長嶋委員】 冷凍の関係なんですけれども、冷凍機がブレイトンになって非常に長く使えるというのは非常にいいことだと思います。関連してやっぱり動くものというポンプとかもあると思うんですが、そういうところも長くしておく必要があるんじゃないかなと思って、そのあたりは今後どうするご予定なのかというのをちょっとお聞きしたい。

【町田所長】 長嶋さんもお存知だと思いますが、今、ポンプも海外メーカーさんのやつを採用している

というのが現状でございまして、ポンプだけを提供しているメーカーさんなので、こういうシステムにマッチしたというところになるとなかなか難しいということになります。ですので、我々として、先ほどのところにはあまり書かなかったんですが、今後はそこも含めた形、長距離になればなるほどポンプの能力が冷凍機以上にもしかするとボトルネックになってくるということも考えなければいけませんので、今後はそこも含めたシステム開発という形も考えていきたいと思っております。

【楠瀬主研】 私のほうから1点補足させていただきます。本プロジェクトとは全く別なんですけど、同じ省エネ部の公募型事業の中で、超電導用のポンプを含む技術開発をやっているものもございまして。こちらにつきましても、今年度からは超電導技術委員会で国プロと一緒に有識者の先生にご指導いただきながらマネジメントを進めたいと思っておりますので、そういうところから場合によっては使える技術があれば、ケーブルあるいは小さな定置型の用途等に使えるものが出てくるようなことも期待しつつ、マネジメントしていきたいと考えております。

【伊瀬分科会長】 下山委員。

【下山分科会長代理】 このプロジェクトの間にすごくたくさん生データがそろっているはずなんです。今、その一部について解析された結果の報告がありましたけれども、そのデータをさらに、暇を見てと言ったら失礼なんですけれども、解析を進めていただいて、これ、後に残る実験データですので、ぜひ活用いただきたいなというコメントが1つです。

それから、長い将来に向けて、いろいろなのが絡むんですけども、メンテナンスフリーという方向に、無人運転と言ったら変なんですけれども、そういうベクトルをきちっといろいろなところで見せていただけるような展開がいいのかなと思いましたがということです。コメントです。

【本庄PL】 ありがとうございます。

【伊瀬分科会長】 そのほか。では、津田委員。

【津田委員】 1つ気になっている点があるのですが、何度も言いますように、すごく素晴らしい成果を挙げられていて、様々な定量的な評価もされていて非常に素晴らしいと思うのですが、この技術でどこまでの距離を対応できるかを明確にする必要があると思います。例えば、実際にはその距離で実用化しない場合でも、ここまでの長さであれば対応できる、という限界がわかっているならば、設計も安心してできます。実際には、先程言った温度差が当然できますので、何度から何度までの間であれば大丈夫か、ということも知っておく必要があると思います。勿論、それらの制約条件は、容量や通電電流や電圧階級によって変わってくると思いますので、それぞれの条件に対して、今の技術では、どれだけの距離まで対応できるのか、ということについて検討されたらよいと思います。

【本庄PL】 一応そちらについては定常時と、それから、事故時とあると思うんですけども、特にまずは事故時に、先ほど液体窒素の温度上昇という問題があって、それが長距離になると今回のプロジェクトよりもより過酷になってくるであろうと考えております。そこは実験というのはなかなか難しいので、シミュレーションでまずはどのぐらいの温度上昇が出てくるのかということから、設計に対してどういうふうな制約条件があるのかと、まずそこを詰めようということで、新しい今年度からのプロジェクトの中でそのシミュレーションのところもしっかりとして、早期にデータを積み上げていきたいと考えております。

8.全体を通しての質疑

全体を通しての質問は、特になかった。

9.まとめ・講評

各委員から、以下の講評があった。

【長嶋委員】 まず初めに、このプロジェクト、震災等も挟んで困難な時期に、皆様方の1年以上にもわたる大変な試験をやられたということに非常に敬意を表したいと思います。

それで、今日何度か発言したので、大体、私、偏った発言ばかりで、冷凍をもともとちょっとやっていたところもありまして、私の持論としましては、超電導機器というのは冷凍が必ず大事で、セットで、超電導の性能を上げるのと冷凍の性能を上げるのは同じ効果をシステムとして持つと思いますので、そこを今回の中で取り組まれたということは非常に大きなことだと思えますが、今後ますますそこを取り組んでいただければと思います。

特に冷凍をインフラに持ち込むという初めての試みだと思えます。超電導ケーブルは動かないですけども、冷凍機とかポンプだとかそういうものは動いていきますので、その信頼性を上げるとか、効率を上げておくということが非常に大事だと思えますので、ますます頑張ってくださいと思います。以上です。

【伊瀬分科会長】 次、中澤委員をお願いします。

【中澤委員】 まずは国内初の実システムでの連系ということで、また震災という大きな状況変化もあって、本当に大変なご苦労があったんじゃないかなと思います。

それから、今回は、送電線のメーカー様と、冷凍機のメーカー様と、あと、実際運用される東京電力様と一体となって、本当に素晴らしい成果が出たのかなと思っています。また、住友電工様のほうでウェブで種々のデータをリアルタイムで出されていたということも、透明性という面でも良かったし、対外的なアピールという意味でも非常に良かったかなと思っています。実証事業者様におかれましては、本当に感謝申し上げます。

それから、NEDO様におかれましても、冒頭でも申し上げたんですけども、まだまだ手放しでどんどん導入できるという段階にないものですから、これまでのご支援に感謝するとともに、引き続きご支援を賜ればと思います。

最後になりますが、本日、伊瀬先生をはじめとした先生方、超電導の実現に向けていろいろご助言等いただきまして、本当にありがとうございました。

【伊瀬分科会長】 次、津田委員。

【津田委員】 本日はこのような場に出席させていただきまして、ありがとうございました。また、関係者の方々には、本当に色々と懇切丁寧にご説明いただきまして、本当にありがとうございました。

最初、プログラムをいただいたときに、今日はかなり長い1日になるな、と覚悟していたのですが、息つく暇がないといえますか、本当にあっという間に終わってしまった、というのが率直な印象です。それだけ中身の濃かった発表会であり、濃い内容だった、ということに改めて痛感しております。

中澤委員や長嶋委員が言われていましたように、本当に色々なご苦労があったと思いますが、それ分、しっかりとした成果が出ている様な気がしています。本当にご苦労様でした。

2つほど言わせていただきたいのですが、1点目が、この前のASCだけでなく過去の学会でもそうですが、日本がこれだけの技術を持っていながら、周りにはあまり認知されていない、というのを感じます。ある学会では、招待講演で、超電導ケーブルの世界情勢が紹介されていたのですが、その中では日本のプロジェクトの紹介が一つもされていませんでした。それが故意的だったのかはわかりま

せんが、それくらい伝わっていないということですので、技術的な面でも主張する必要がありますが、この様なプロジェクトをやっているということももっと主張すべきだと思います。一番大事なのは、他とは何が違うのか、ということを確認してアピールすることだと思います。何となく他と同じ様なことやっている、という様に捉えられがちですので、その辺をもう少しうまく対応していただいた方がよい様な気がしています。それが1点目です。

2点目は、非常に細かい話になってしまうのですが、基本技術がこの様に押さえられてきている中で、三相同軸型について何の試みもないというのが気になります。海外でも色々な場所への適用が考えられていますが、適材適所に対応するための手段として、三相一括型や三相同軸型、交流や直流があると思うのです。ですので、それらに関する基本技術を全部押さええているからこそ、ここではこれがよい、ということと言えるようになり、日本のケーブル技術を売り込む際に、説得力をもって相手に説明できる様になるのだと思います。

これまでに力を入れてきたのは三相一括型ですので、それを推し進めるのもよいですが、超電導ケーブル全体における現時点での技術的課題が何であり、今後はどの様な検討をすべきか、という点にも少し目を向けていただいた方がよい様な気が致します。国の方針や企業の皆様の方針もあると思いますので、勿論、可能な範囲で、ということになるかと思いますが、こうした日本の超電導ケーブル技術が世界をリードしている、という状況をキープするためにも、今後は是非ともご検討いただきたいと思っています。本日はどうもありがとうございました。

【伊瀬分科会長】 次、木須委員お願いいたします。

【木須委員】 本日は長時間にわたりまして詳細なご説明いただきまして、どうもありがとうございました。今日は時間も限られているということで成果を中心にご発表いただいたと思うんですけども、おそらくその陰には相当なご苦勞もあったのではないかとということで、関係者の皆様のご尽力に敬意を表したいと思います。

特に今回感じましたのは、ケーブルのシステム全体としての信頼性の確認ができたということで、実際運用の際の法的規制も含めまして、あるいは実際運用することによって得られたデータとかノウハウというのは、やはり実用化に向けては非常に重要なステップではなかったのかなというふうに強く感じました。

それと同時に、COPは0.1というすばらしい数値を達成されているわけですが、さらによくなる余地もあるということと、また、ACロスに関しましてはもう少し改善の余地もあるということで、後継の信頼性あるいは安全性確認のプロジェクトの中でそれらをぜひさらにブラッシュアップしていただいて、技術レベルを高めていただきたい。そういう意味の研究開発も今後やはり必要ではないかと感じています。

それと最後に、我々、大学の工学部の中で超電導技術の研究をやっているわけですが、ここ一、二年特に感じますのは、学生の中で超電導をやりたくて来たという学生が少なからず出てきているんです。彼らはやっぱりこういった超電導ケーブルのプロジェクトなんかを知っているわけですし、そういう意味ではこういった分野の人材育成という意味でも非常に大きな波及効果があると感じています。実用化までもう一步のところに来ていると思いますので、今後も実用化をぜひ実現させていただきたいと感じております。本日はどうもありがとうございました。

【伊瀬分科会長】 市川委員お願いします。

【市川委員】 本日はすばらしい成果をご報告いただきまして、本当にありがとうございました。今回成

果をいろいろお聞きしまして、全て非常にすばらしく成果を上げているのですけれども、先ほどから言われていますように、この成果を上げるために並々ならぬ努力、そして、いろいろな問題点があった、それを克服してここの成果にたどり着いていると思います。

ここの成果報告の中では全てうまくいっている成果という形ですけれども、実際にはこういういろいろな問題があって、そしてその上にこの成果が成り立っていると思います。その辺の問題というのも大きな成果だと思いますので、それを次のステップに結びつけて大きく飛躍していただきたいと思います。

また、このように実用化に非常に近づいた状態になっています。今回プロジェクトを率いていただいています本庄様、増田様、町田様、これまで並々ならぬご尽力があったと思います。ぜひともこの方々が現役であるうちに実用化にまで結びつけていただければと祈念しておりますので、応援いたしますので、今後ともご尽力をよろしくお願いします。

【伊瀬分科会長】 下山委員。

【下山分科会長代理】 今日は1日このプロジェクトについてより深いところまで知ることができまして、ありがとうございました。私自身もこのプロジェクト、前からすごく興味を持っていて、実施者の方ご存知のように、熊取も行きましたし、守谷も行きましたし、基礎工事を始めれば瓦れきがいっぱい地下から出てきて困っていた旭変電所の更地にも行きました。

ずっと見ていて、本当にできるのかなという印象を最初は持っていたんですが、震災を乗り越えて、形になって、言っているのかな、予定どおりの、通電後の、1年遅れでしたけれども、実際にちゃんと実施できた。一時期は、この試験止まってしまうんじゃないかと思ってすごく心配していたんですが、無事再開できたというのが個人的には非常によかった。災害を乗り越えてというか、逆風に打ち勝つてという印象だったんですが。

かつ、話がありましたように、ウェブで公開されていたように、毎日状況がわかると。時々ウェブで情報が出てないと、何が起こったんだろうと心配になるんです。それ、メンテナンスでしたと後でわかるんですが。そういうふうに非常に天候に左右されるようなフィールドでの試験、高温超電導を使った長期試験って、実際の系統につないだ試験という意味では初めてですね。これがうまくいったということはこれ、非常に自信になったと思います。もちろん日々冷や冷やして作業されていたこともあったと思うんですが、その経験を積まれた実施者の皆様の、逆に言うと経験、あと、ノウハウ、そういうものが非常に今後役立つんじゃないかと。

プロジェクトの成功だけでなく、こういう技術を持った日本の人が人材としてきちっと、僭越な言い方をしたら、育った。これ、非常に大きな効果だと。さっき木須先生が、学生が興味を持つようになったと。もちろん見ていて、お互い、例えば住友電工の中、それから、東京電力の中、それから、前川製作所の中でこのプロジェクトってやっぱり特別な成果だったと思うんです。そういう意味で、今後プロジェクト続いていきますけれども、どんどん若手に継承して行って、この流れをとめない、もっと広げていくような方向に進んでいただければ、特に現役中に大きなプロジェクトをやらなくても済むと思いますので、ぜひそのように続けていただけたらと思います。今日はどうもありがとうございました。

【伊瀬分科会長】 それでは、最後に私からですが、本日は長時間にわたりまして有意義なディスカッションありがとうございました。特に、実施者の東京電力様、それから、住友電気工業様、前川製作所様には、すばらしいプロジェクトの成果をご発表いただきまして、本当にありがとうございました。

また、委員の方々におかれましても、熱心なご討論ありがとうございました。

超電導は夢ばかりであると言われてきたわけですが、リニアは夢の実現に向かって動き出して、次はやはり超電導ケーブルかなというふうに思っております。私のところに超電導の関係のことをやりたいんだというようなことで来る学生もおりますので、やはり次世代の人材育成のためにこういう夢のあるテーマというのは非常に大事だと思います。夢が少しずつ実現していくんだということを見せることは、学生、若い人の育成にとって非常に大事なことだと思っておりますので、今後とも実現に向けてよろしく願いしていきたいと思っております。また、大学におきましても、そういうことに関連したテーマを取り上げて行っていきたいと考えております。私の関連でいきますと、今日も話がありましたように、やはりまだ交流損失が問題になっておるわけですが、周波数を変換するという事はパワーエレクトロニクスで非常に容易になってきておりますので、50ヘルツ、60ヘルツにこだわらずに、さらにちょっと低いところの10ヘルツぐらいの周波数で使えば、超電導もそのメリットが出てくるのではないかとということで、低周波送電ということで最近テーマを取り上げているところでございます。そういうことで、周波数を変えたらどうなるのかというようなことも今後少し検討していければいいんじゃないかと思っております。ということで、以上でございます。本当に本日はありがとうございました。

10.今後の予定、その他

11.閉会

配布資料

- | | |
|----------|--|
| 資料 1 | 研究評価委員会分科会の設置について |
| 資料 2 | 研究評価委員会分科会の公開について |
| 資料 3 | 研究評価委員会分科会における秘密情報の守秘と非公開資料の取り扱いについて |
| 資料 4-1 | NEDOにおける研究評価について |
| 資料 4-2 | 評価項目・評価基準 |
| 資料 4-3 | 評点法の実施について |
| 資料 4-4 | 評価コメント及び評点票 |
| 資料 4-5 | 評価報告書の構成について |
| 資料 5-1 | 事業原簿（公開） |
| 資料 6-1 | プロジェクトの概要説明資料（公開）
事業の位置付け・必要性、研究開発マネジメント |
| 資料 6-2 | プロジェクトの概要説明資料（公開）
研究開発成果、実用化・事業化に向けての見通し及び取り組み |
| 資料 7-1-1 | プロジェクトの詳細説明資料（公開）
高温超電導ケーブルの総合的な信頼性研究
実証システムの構成・運転技術 |
| 資料 7-1-2 | プロジェクトの詳細説明資料（公開）
高温超電導ケーブルの総合的な信頼性研究
ケーブルの設計・構築 |
| 資料 7-1-3 | プロジェクトの詳細説明資料（公開） |

	高温超電導ケーブルの総合的な信頼性研究 冷却システムの設計・構築
資料 7-1-4	プロジェクトの詳細説明資料（公開）
	高温超電導ケーブルの総合的な信頼性研究 実システムにおける総合的な信頼性検証
資料 7-1-5	プロジェクトの詳細説明資料（公開）
	高温超電導ケーブルの総合的な信頼性研究 ケーブルの高性能化の研究
資料 7-1-6	プロジェクトの詳細説明資料（公開）
	高温超電導ケーブルの総合的な信頼性研究 冷却システムの高性能化
資料 7-2	プロジェクトの詳細説明資料（公開）
	超電導ケーブルの適用技術標準化の研究
資料 7-3	プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
	実用化・事業化に向けての見通し及び取り組み（非公開）
資料 8	まとめと課題
資料 9	今後の予定
参考資料 1	N E D O 技術委員・技術委員会等規程
参考資料 2	技術評価実施規程

以上

本研究評価委員会報告は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）評価部が委員会の事務局として編集しています。

平成26年11月

NEDO 評価部

部長 佐藤 嘉晃

主幹 保坂 尚子

担当 成田 健

* 研究評価委員会に関する情報は NEDO のホームページに掲載しています。

(http://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_index.html)

〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地

ミューザ川崎セントラルタワー20F

TEL 044-520-5161 FAX 044-520-5162