

「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（案）概要

目 次

分科会委員名簿	1
評価概要（案）	2
評点結果	5

はじめに

本書は、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）の研究評価委員会分科会（第1回（平成26年9月3日）及び現地調査会（平成26年9月2日））において策定した評価報告書（案）の概要であり、NEDO技術委員・技術委員会等規程第32条の規定に基づき、第40回研究評価委員会（平成26年11月27日）にて、その評価結果について報告するものである。

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」分科会
（事後評価）

分科会長 伊瀬 敏史

「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院 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

「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)

評価概要 (案)

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システムに連系し、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。

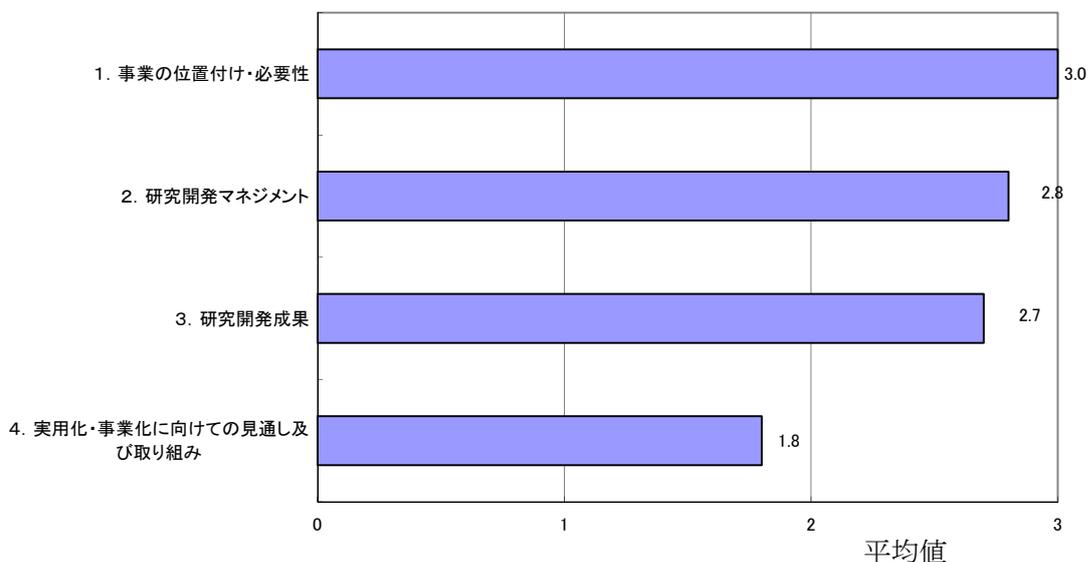
2. 4 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

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。

評点結果〔プロジェクト全体〕



評価項目	平均値	素点 (注)					
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

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

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

〒105-6103 東京都港区浜松町2-4-1 世界貿易センタービル 3階

－ 議 事 次 第 －

【公開セッション】

- | | |
|---|---------------------|
| 1. 開会、資料の確認 | 10:00 ～ 10:10 (10分) |
| 2. 分科会の設置について | 10:10 ～ 10:15 (5分) |
| 3. 分科会の公開について | 10:15 ～ 10:20 (5分) |
| 4. 評価の実施方法について | 10:20 ～ 10:25 (5分) |
| 5. プロジェクトの概要説明 (説明35分、質疑20分) | |
| 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 | 10:25 ～ 10:40 (15分) |
| 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 | 10:40 ～ 11:00 (20分) |
| 5-3. 質疑応答 | 11:00 ～ 11:20 (20分) |
| (昼食 休憩) | 11:20 ～ 12:10 (50分) |
| 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(東京電力(株))
(説明20分、質疑応答20分) | 12:10 ～ 12:50 (40分) |
| 6.1-2. ケーブルの設計・構築(住友電気工業(株))
(説明25分、質疑応答25分) | 12:50 ～ 13:40 (50分) |
| 6.1-3. 冷却システムの設計・構築((株)前川製作所)
(説明20分、質疑応答20分) | 13:40 ～ 14:20 (40分) |
| 6.1-4. 実系統における総合的な信頼性検証(東京電力(株))
(説明20分、質疑応答20分) | 14:20 ～ 15:00 (40分) |
| (休憩) | 15:00 ～ 15:10 (10分) |
| 6.1-5. ケーブルの高性能化の研究(住友電気工業(株))
(説明15分、質疑応答15分) | 15:10 ～ 15:40 (30分) |
| 6.1-6. 冷却システムの高性能化((株)前川製作所)
(説明15分、質疑応答15分) | 15:40 ～ 16:10 (30分) |

6.2. 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究（住友電気工業(株)）
（説明10分、質疑10分） 16:10 ～ 16:30（20分）

◆非公開資料の取り扱いに関する説明（評価部） 16:30 ～ 16:35（5分）

（入替） 16:35 ～ 16:40（5分）

【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
（東京電力(株)、住友電気工業(株)、(株)前川製作所）
（説明10分、質疑15分） 16:40 ～ 17:05（25分）

（入替） 17:05 ～ 17:10（5分）

【公開セッション】

- | | |
|-------------------------------------|--------------------|
| 7. まとめと課題（東京電力(株)）
（説明10分、質疑10分） | 17:10 ～ 17:30（20分） |
| 8. 全体を通しての質疑 | 17:30 ～ 17:40（10分） |
| 9. まとめ・講評 | 17:40 ～ 17:55（15分） |
| 10. 今後の予定、その他 | 17:55 ～ 18:00（5分） |
| 11. 閉会 | 18:00 |

以 上

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)分科会による 現地調査会

日 時 :平成26年 9月2日(火) 14:00～16:00

場 所 :東京電力株式会社 旭変電所
(神奈川県横浜市)

【議事次第】

- | | |
|--------------------------|------------------|
| 1. 開会 | 14:00 |
| 2. 挨拶・現地調査会の概略説明 | 14:00～14:10(10分) |
| 3. プロジェクト概要および研究開発成果のご説明 | 14:10～14:40(30分) |
| 4. <u>(見学施設)</u> 現地説明 | 14:40～15:40(50分) |
| 5. 質疑応答 | 15:40～16:00(20分) |
| 6. 閉会 | 16:00 |

以上

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	P07014
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		← 残存性能評価
					← 実証用ケーブルシステムの製造・建設				
					← 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 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。 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 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 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 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、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>							

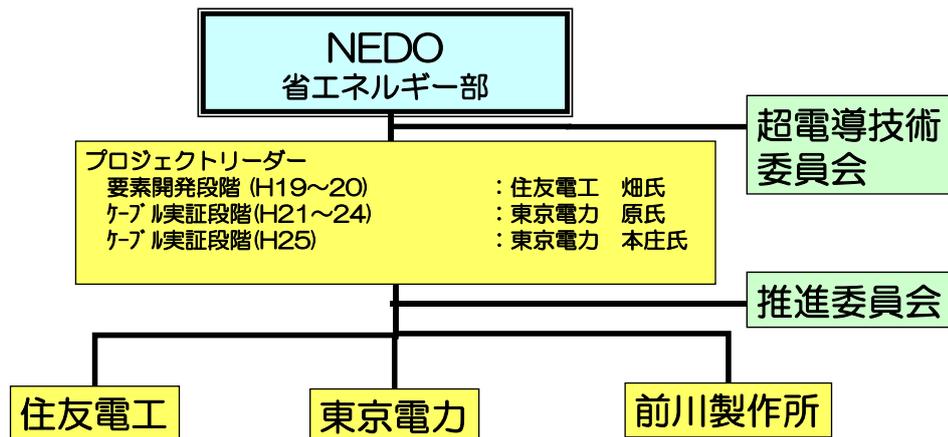
中間評価結果への対応	<p>(1) 総合評価 冷却システムの評価や技術課題の明確化についての体制の強化が望まれる【1】。また、単なる規格基準の国際標準化だけを指すのではなく、技術そのものを世界標準とするための活動が望まれる【2】。</p> <p>(2) 事業の位置付け・必要性 本格的な実用化に向けての課題として、長期に渡る信頼性など、本事業でカバーしきれない部分が残る。本事業終了後の実用化に向けた課題解決の方向性を本事業の期間中に明確にしておく必要がある。【3】</p> <p>(3) 研究開発マネジメント 今後の地球環境問題を考える際に、高温超電導ケーブルの低損失性が寄与できるのは、国内よりも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う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、まずは国内実系統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>		
	評価に関する事項	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

<p>Ⅲ. 研究開発成果について</p>	<p>1 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 <p>2 トータルシステム等の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 <p>3 送電システム運転技術の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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>

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 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	実証用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					



住友電工	<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