

### 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 10km 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。<sup>7)</sup> 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 66kV 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 @ 3kA 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 0.5MPaG 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 3000kgf/3相 圧縮 500kgf/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	3kArms 連続通電	ケーブル性能に準ずる。
3	短絡電流	・31.5kA@2sec でダメージがないこと ・10kA@2sec 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 @ 3kA	プロジェクト目標
4	耐電圧	AC90kV/3h Imp $\pm$ 385kV/3回 DC152kV/10min	ケーブル性能に準ずる。 (2.4.1節参照)
5	圧力設計	0.6MPa $\cdot$ G	システム許容圧力が0.5MPaG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<sup>7)</sup>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するものとする。

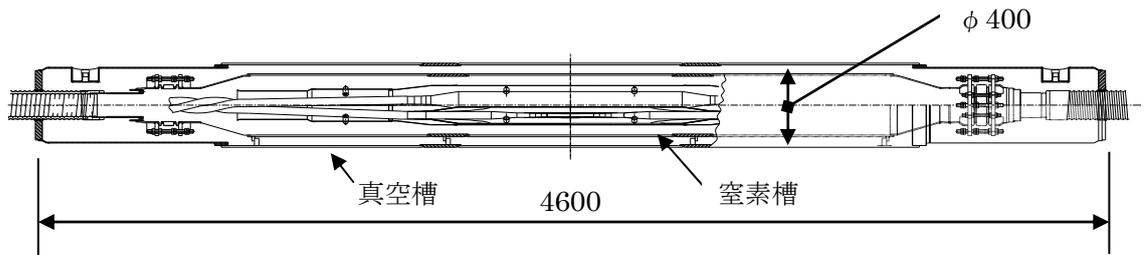


図 2.1.3-1 三心一括型 中間接続部全体構造図

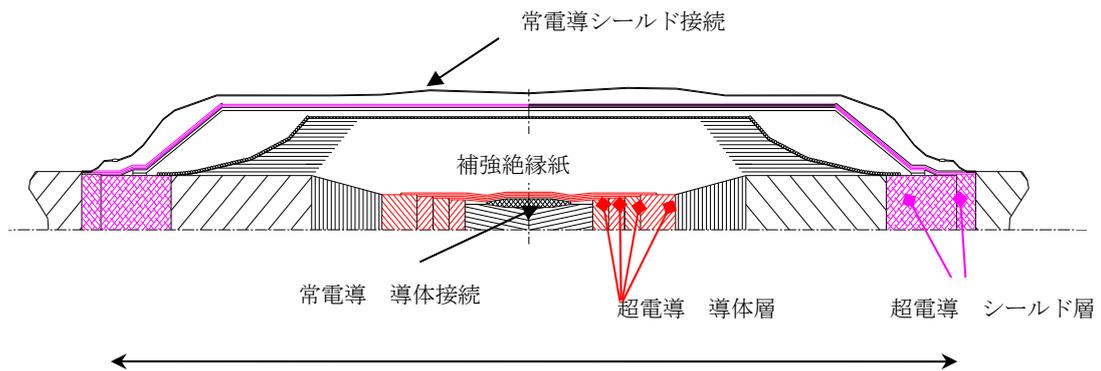


図 2.1.3-2 接続部構造図

## 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25mm、渡し用超電導線の本数は、Ic150A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50mm、渡し用超電導線の本数は、Ic150A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。

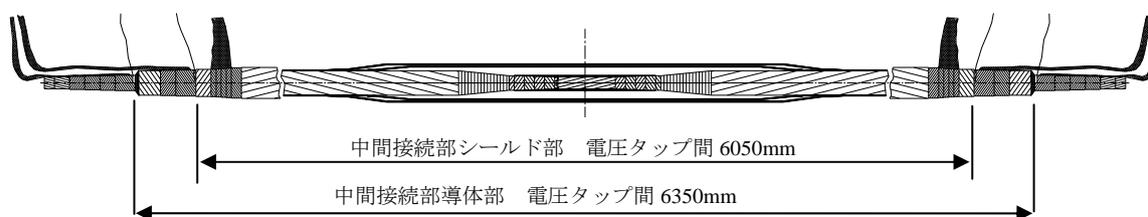


図 2.1.3-3 中間接続部 導体・シールド接続抵抗測定サンプル

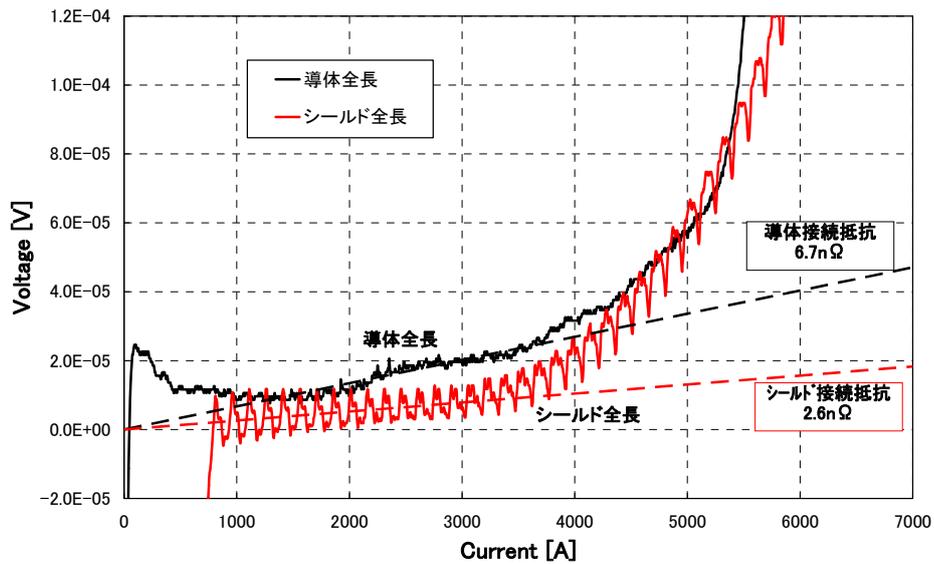


図 2. 1. 3-4 中間接続部 導体・シールド接続抵抗測定結果

## (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 77.5K、液体窒素圧力 0.2MPa・G、液体窒素流量 20L/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、3kArms・8h 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 12h 連続の安定運転に成功した。

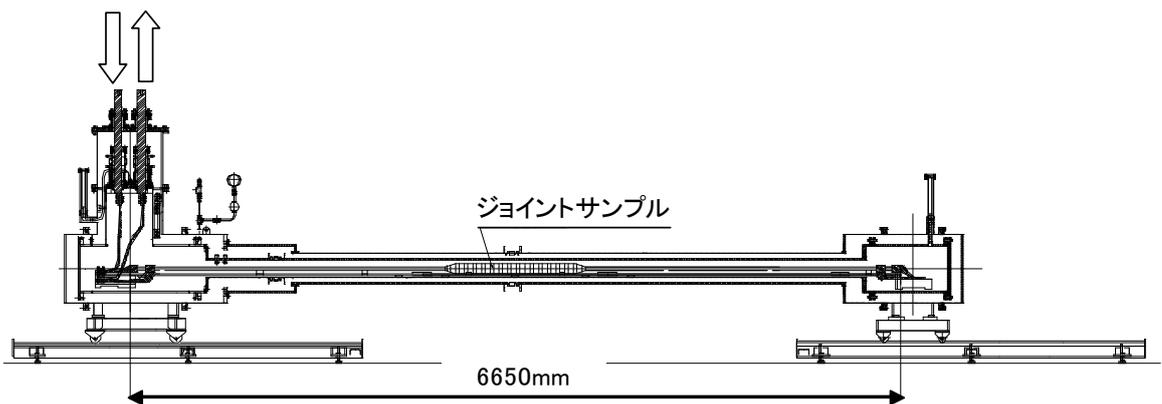


図 2. 1. 3-5 中間接続部 過冷却通電試験構成図



図 2.1.3-6 中間接続部 過冷却通電試験状況

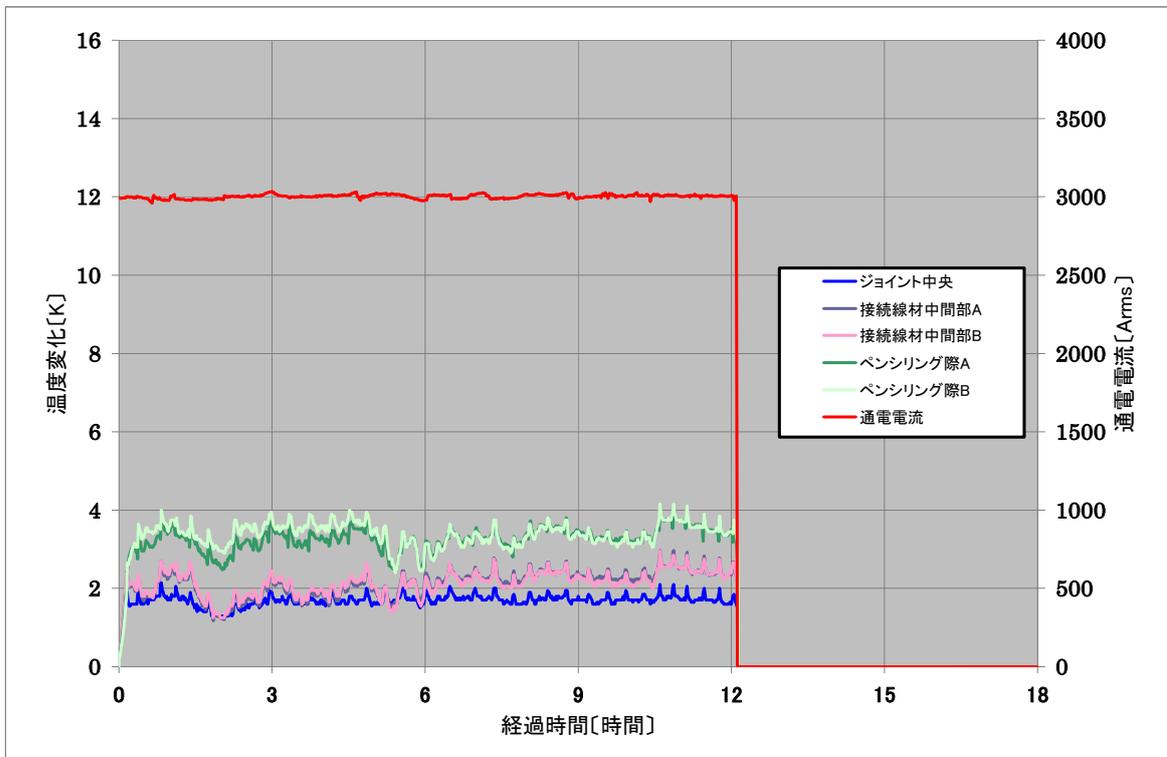


図 2.1.3-7(A) 中間接続部 過冷却通電試験結果

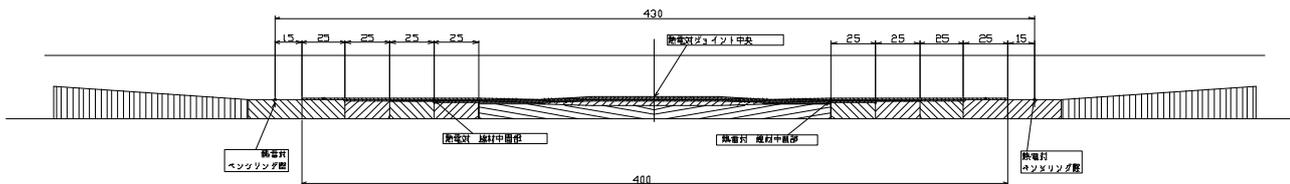


図 2.1.3-7(B) 通電試験における熱電対取り付け位置

### (3) 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、31.5kA@2sec 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@2sec の短絡電流に対して、再送電可能かどうかを検証した。

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。

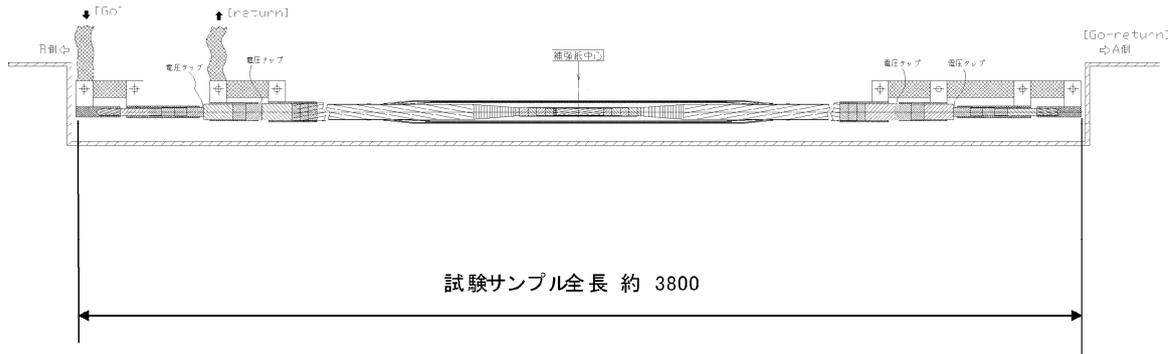
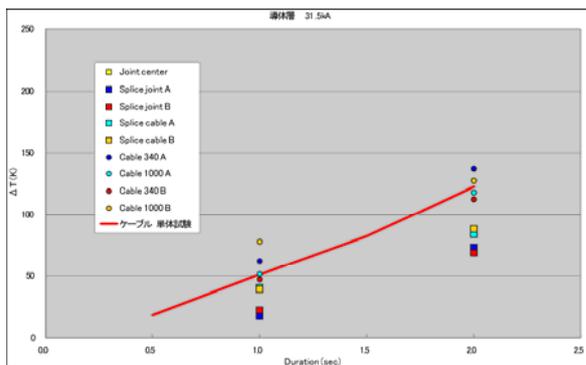
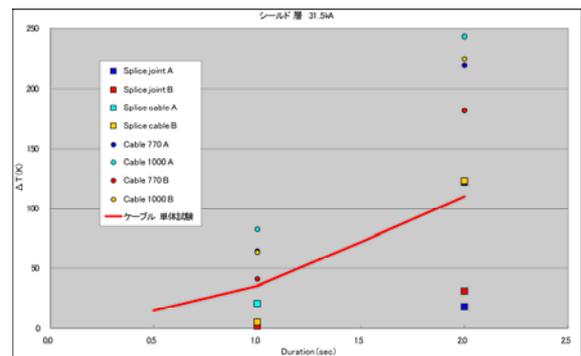


図 2.1.3-8 間接続部サンプルの構成

間接続部サンプルの試験結果を図 2.1.3-9 に示す。31.5kA 時の温度上昇は、間接続部の導体部で 20K、シールド部では 1~2K 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@2sec 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。

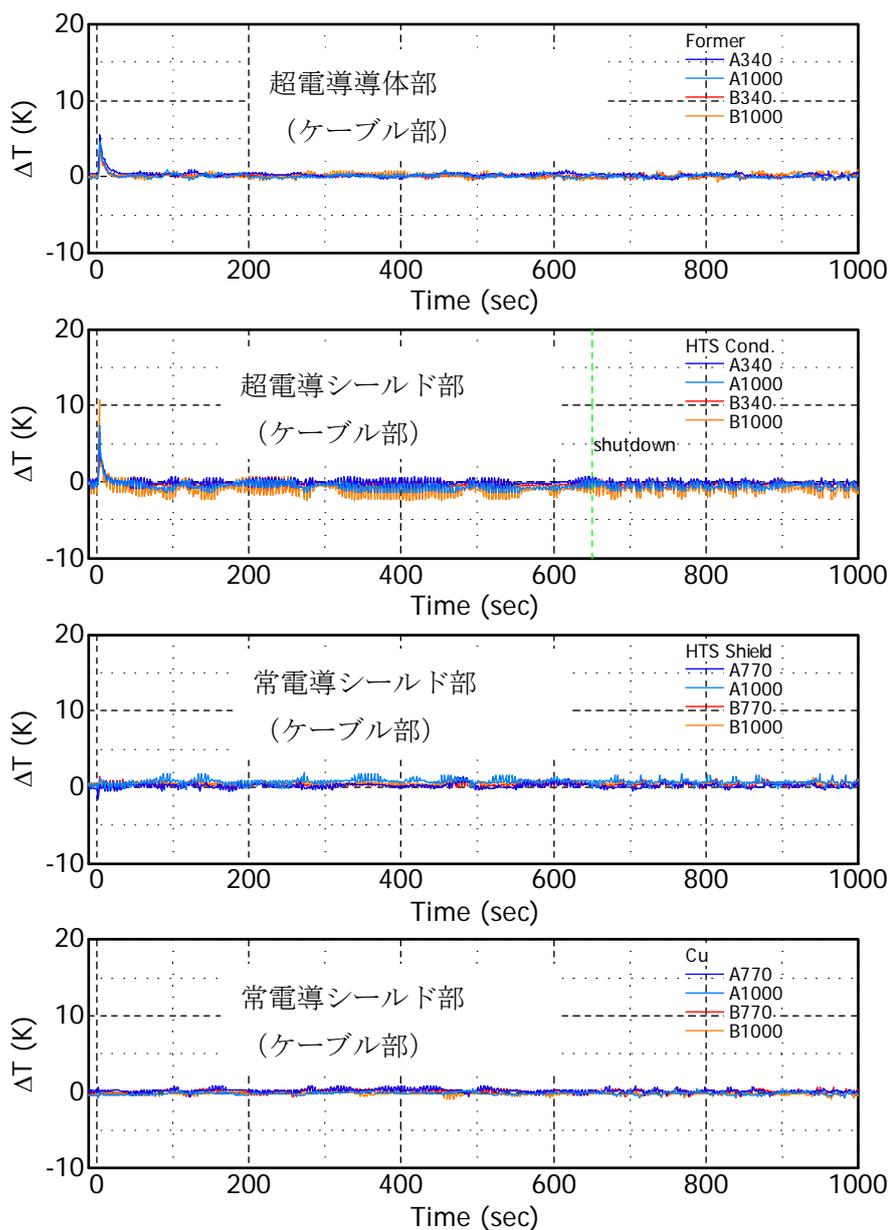


図 2. 1. 3-10 10 k A-2sec→1. 75 k A 通電時の温度上昇結果

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 k A-2sec の過電流および 10 k A-2sec 後 2 k A 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。

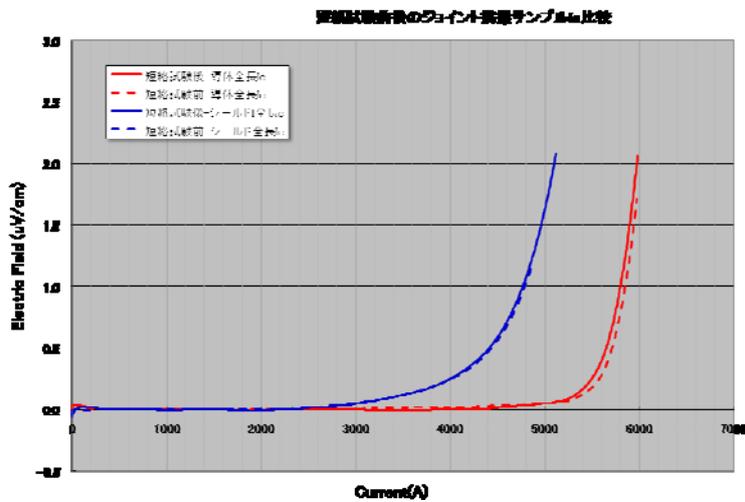


図 2.1.3-11 短絡電流試験後の Ic 値比較

#### (4) 電気絶縁試験

30m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。

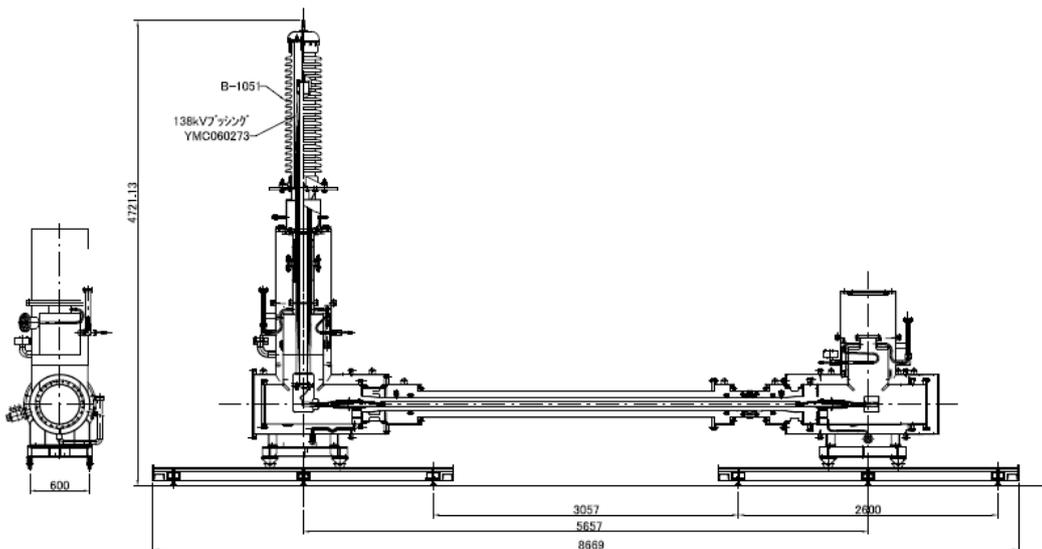


図 2.1.3-12 課電試験システム構成図



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	①90kV-3 時間 良好 ②150kV-10 分 良好
2	DC 課電試験	-152kV-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 3000kgf/3 相、最大圧縮力 500kgf/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 [max3000kgf]
- ② 両端フリー冷却 → 圧縮荷重印加 [max500kgf]
- ③ 両端フリー冷却 → 引張荷重印加 [max3850kgf]



## (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。

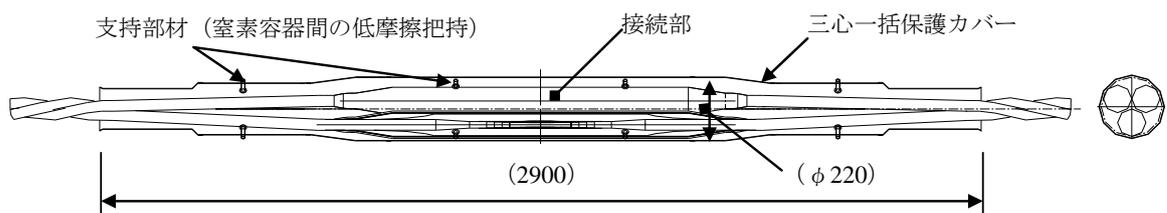


図 2.1.3-17 中間接続部三心一括構造図

## (7) 窒素槽、真空槽の検討

窒素槽は、最大使用圧力が 0.5MPa・G 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=4.6m) における AC3000Arms (50Hz) 通電時の損失を [Q<sub>4</sub>] 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 1.0W/m/ph@3kA (50Hz) 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 60Hz で実施したが、損失計算では 50Hz 換算値で算出している。測定の結果、3kA 通電時の導体接続部ロスは 5.3W/m、シールド接続部ロスは 6.3W/m の結果が得られた。従って中間接続部の 3kA 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。

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

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

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

これらの検討から、3kA 通電時におけるジョイント部のトータルの熱損失は、(Q<sub>1</sub>+Q<sub>2</sub>+Q<sub>3</sub>+Q<sub>4</sub>) =107W になる。

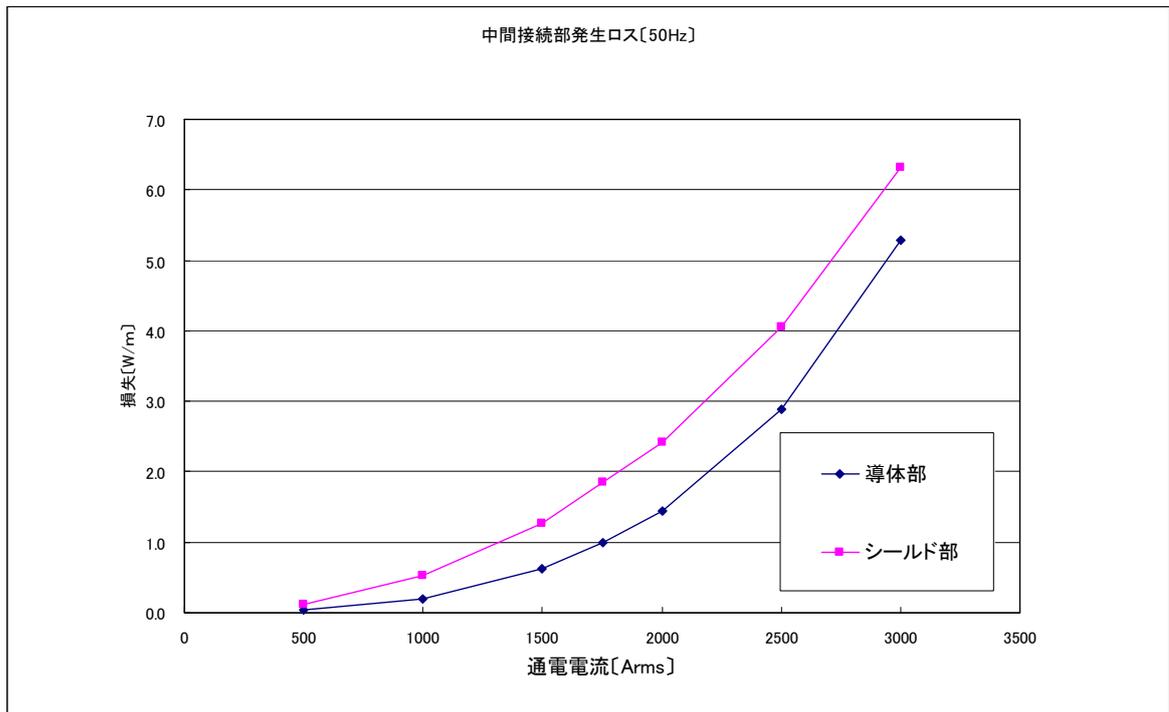


図 2.1.3-18 中間接続部通電ロス測定結果 (50Hz 換算値)

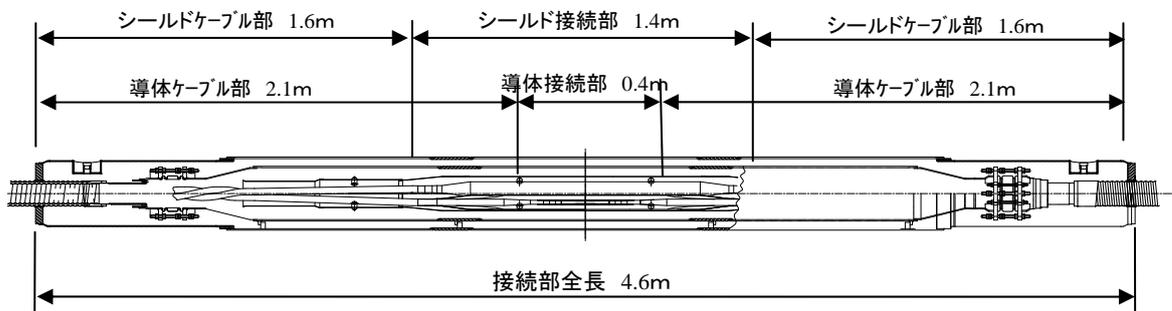


図 2.1.3-19 中間接続部通電試験サンプル構成損失の算出図

### 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、 $3\text{kArms}$  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  $1.75\text{kA}$  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  $3\text{kA}$  通電時の全体ロスは  $72\text{W}$  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 66kV 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 0.5MPaG 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うこととする。

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 3000kgf/3相 圧縮 500kgf/3相	ケーブル要素試験結果 (2.1.5節参照)	
2	電流容量	3kArms 連続通電	ケーブル性能に準ずる。	
3	短絡電流	・ 31.5kA@2sec でダメージがないこと ・ 10kA@2sec 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	AC90kV/3h Imp±385kV/3回 DC152kV/10min	ケーブル性能に準ずる。 (2.5.1節参照)
		接地端子	DC25kV/10min Imp-50V/3回	ケーブル防食層 (JEC3402) に準ずる。
5	圧力設計	0.6MPa・G	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 0.3G、垂直 0.15G	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付構造と、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 2500mm<sup>2</sup>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。

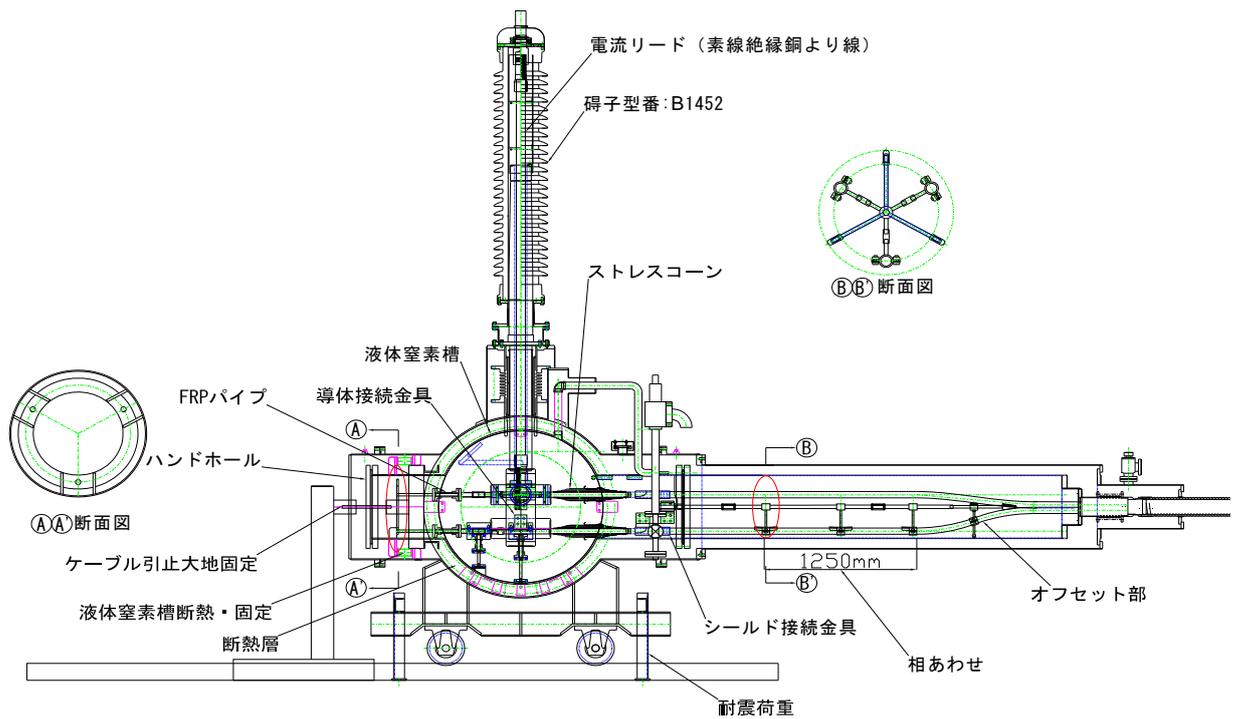


図 2.1.4-1 終端接続部の概略構造図 (側面図)

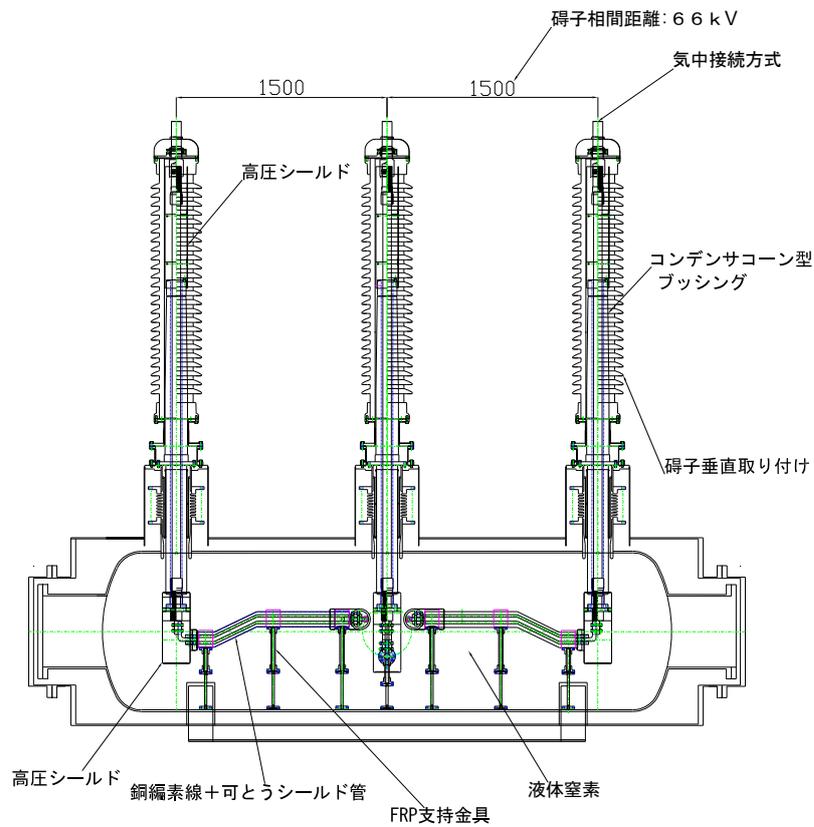


図 2.1.4-2 終端接続部概略構造図 (背面図)

## 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、30mm 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、30mm を選んだ。

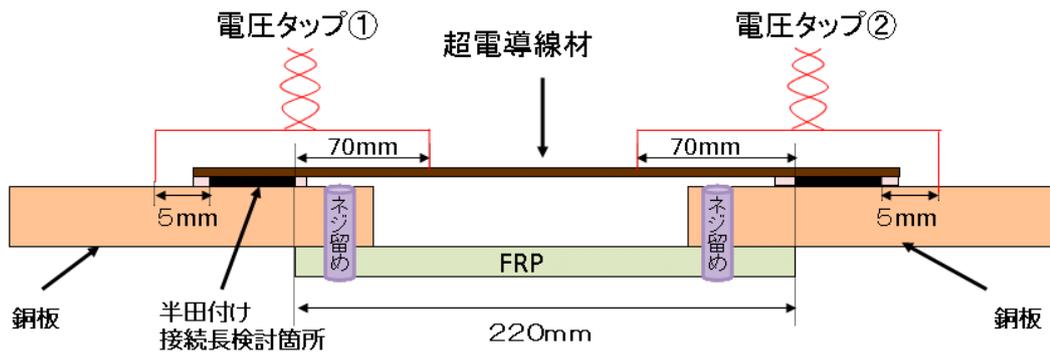


図 2. 1. 4-3 モデル構造図

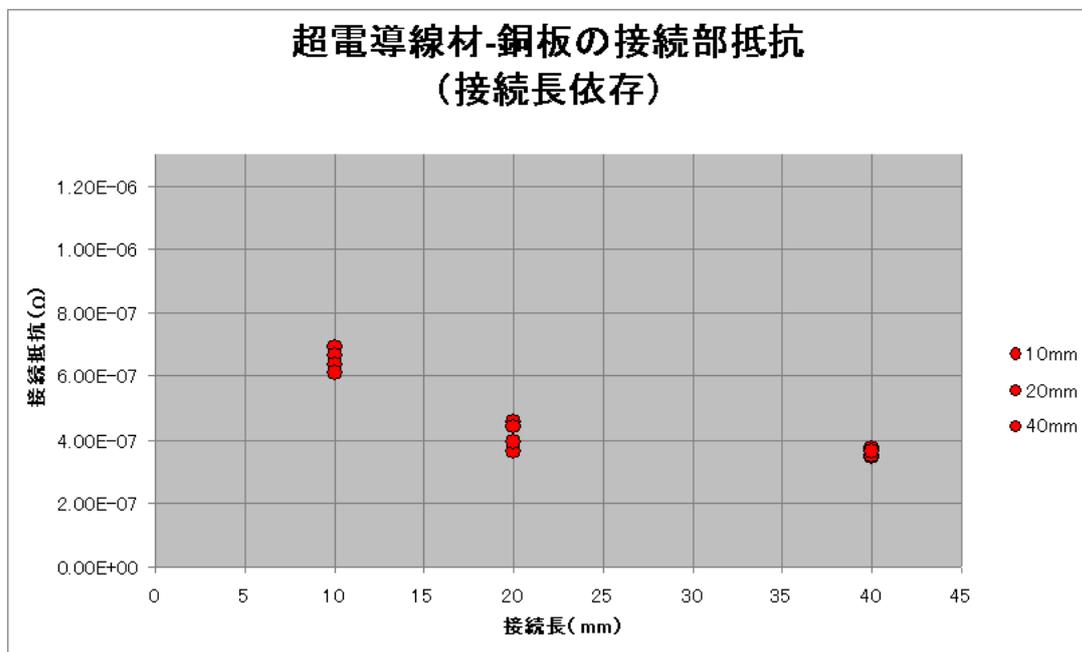


図 2. 1. 4-4 超電導線材と銅板の接続抵抗

## (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3kA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AC3000Arms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。

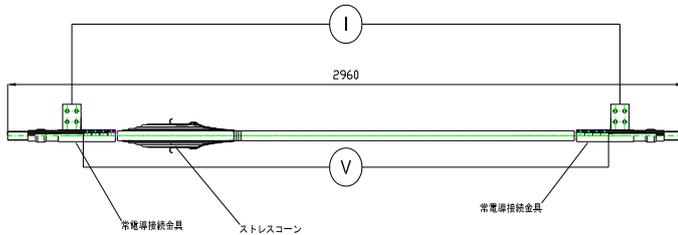


図 2.1.4-5 導体通電試験サンプル図



図 2.1.4-6 試験状況

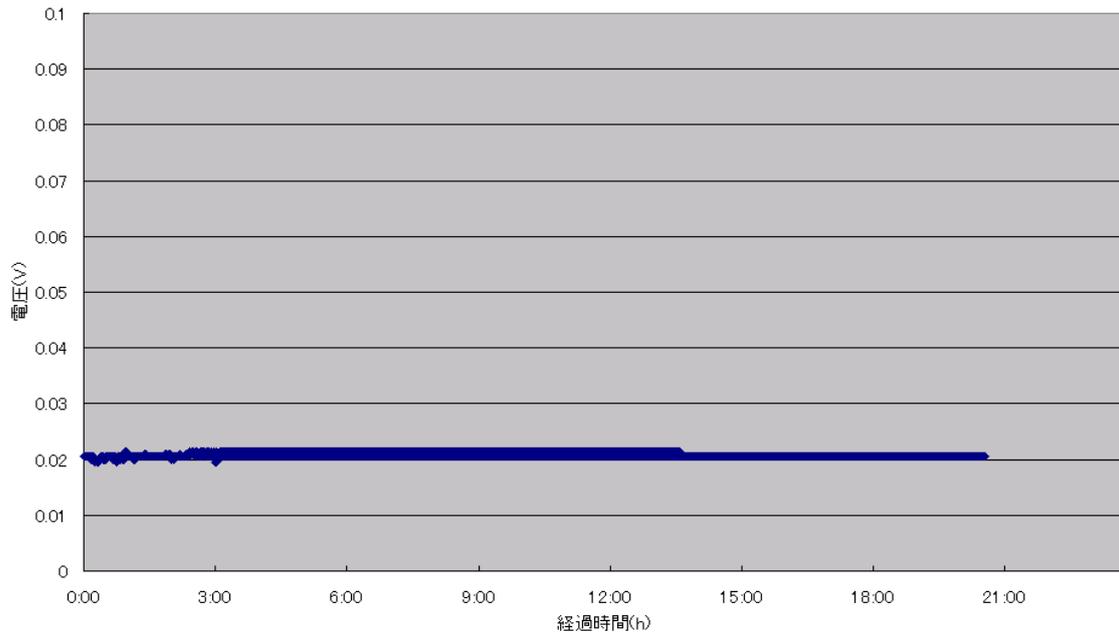


図 2.1.4-7 導体接続サンプルの通電結果

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、AC3000Arms 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。

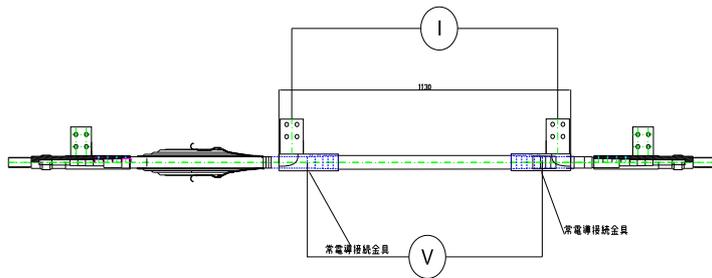


図 2.1.4-8 シールド通電試験サンプル図



図 2.1.4-9 試験状況

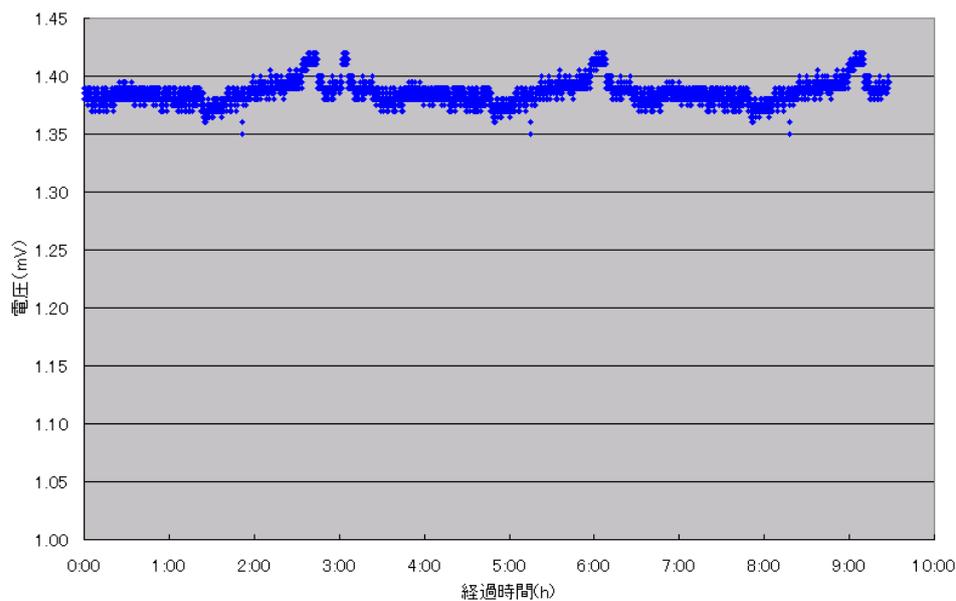


図 2.1.4-10 シールド接続サンプルの通電結果

### (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 の開発目標に記載したように、最大 31.5kA-2sec 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 10kA-2sec 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 2.6m 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 7mm 厚
臨界電流 ( $1\mu\text{V}/\text{cm}$ 定義、at 77K)	導体 $I_c=5900\text{A}_{dc}$ (AC : 4.1kArms 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 31.5kA-2sec）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)	$\Delta T$ (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

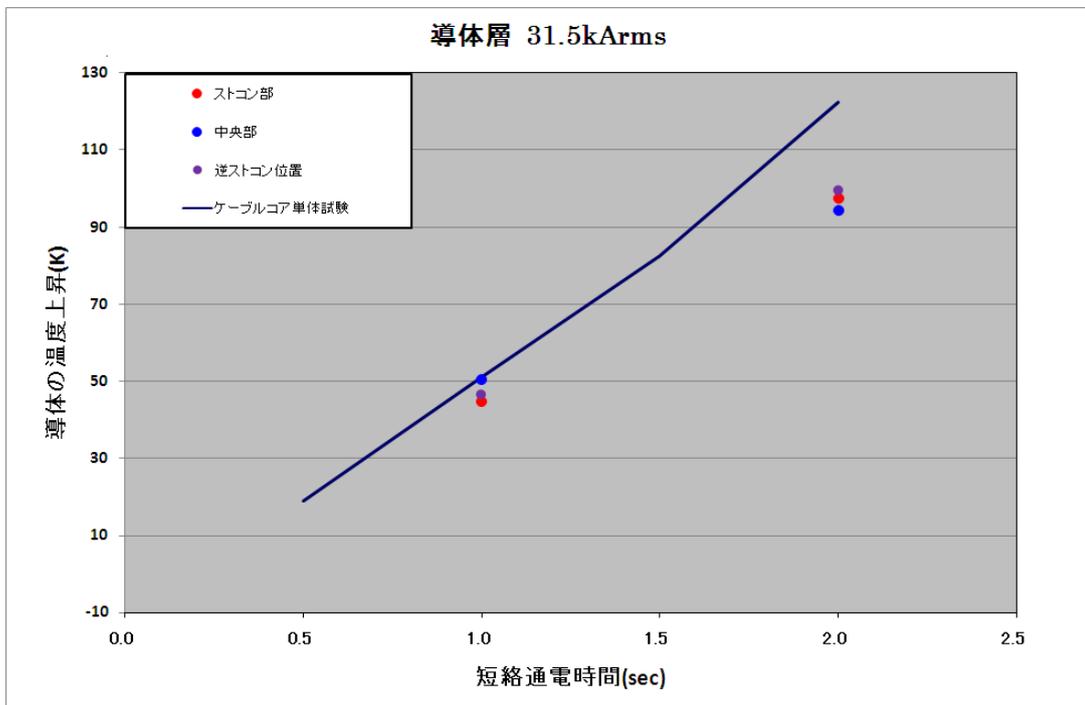


図 2.1.4-12 端末ストコン模擬サンプルとケーブルコア単体の導体温度上昇比較

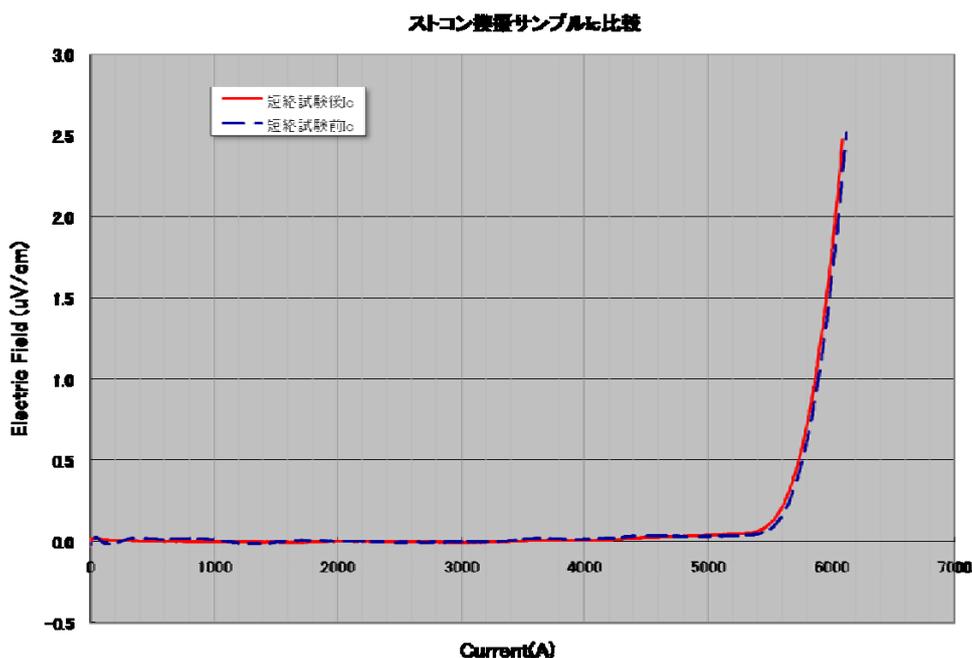


図 2.1.4-13 耐過電流試験前後の  $I_c$  測定結果

10kA 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、10kA-2sec 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 1.75kA 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 50msec であった。試験の結果、問題なく 10kA、2sec の短絡電流通過後に 1.75kA 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 節で示すように、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 130kV/10 分の確認試験、DC 耐電圧 152kV/10 分の確認試験、Imp 試験 ±385kV/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。

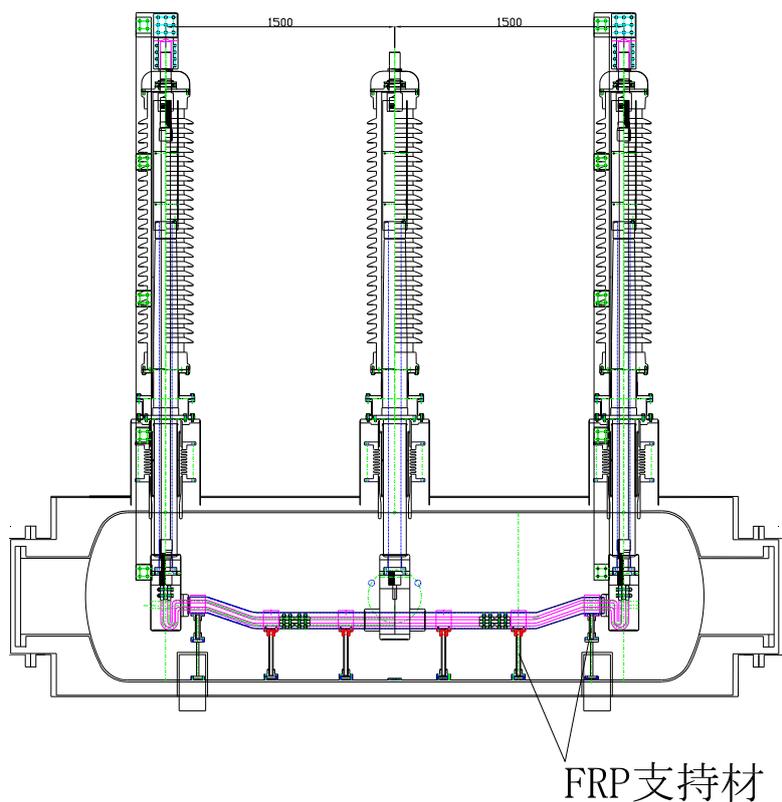


図 2.1.4-14 端末単体試験構成図



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 900mm よりも大きい

1000mm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 1000kgf (≒3000kgf/3 相に相当) および、昇温時に発生する圧縮荷重 200kg (≒500kgf/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。

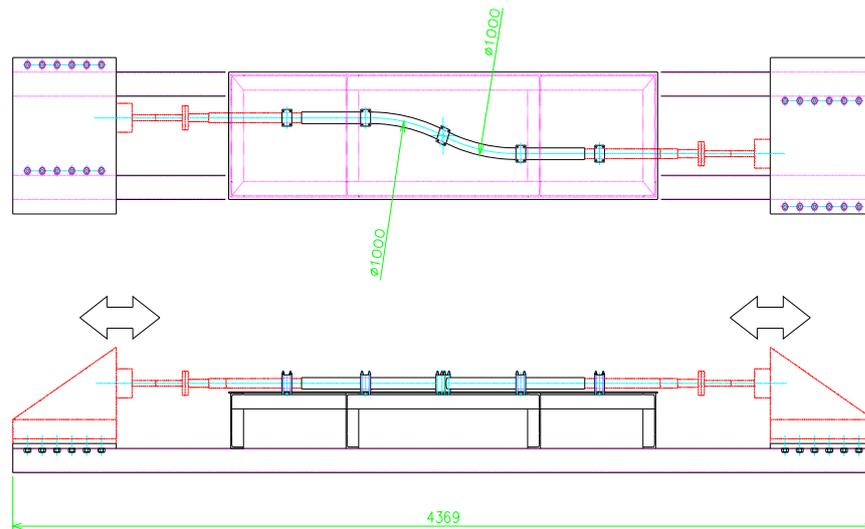


図 2.1.4-16 オフセット機械試験サンプル図

#### (b) ケーブルコア引き止め治具の機械特性試験

2.4.1-2 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 9ton、曲げ破壊値 0.49ton 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。

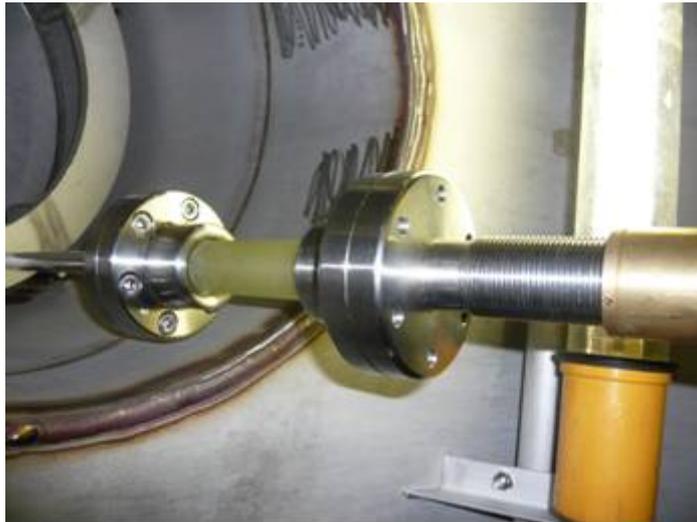


図 2.1.4-17 引き止め治具写真

#### (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 3kArms 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 3.2m と決定し、その長さで電流 3kA 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 2500mm<sup>2</sup> の時に 3kArms 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、2500mm<sup>2</sup> 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 3.2m、断面積 2500mm<sup>2</sup> 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。0～3000A 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。

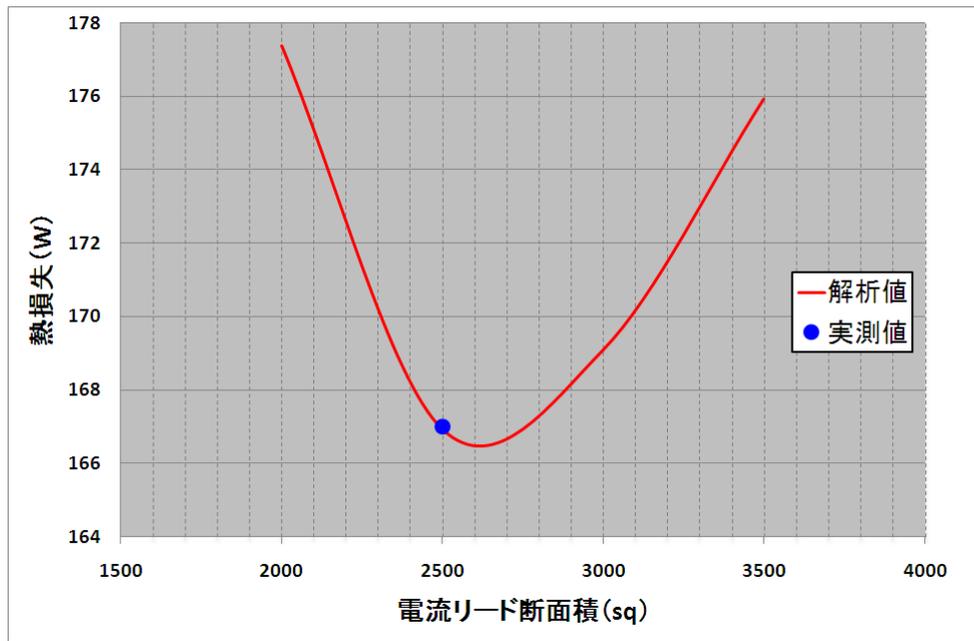


図 2.1.4-18 3kArms 通電時の電流リード断面積と電流リード熱損失の相関関係



図 2.1.4-19 電流リード試験状況

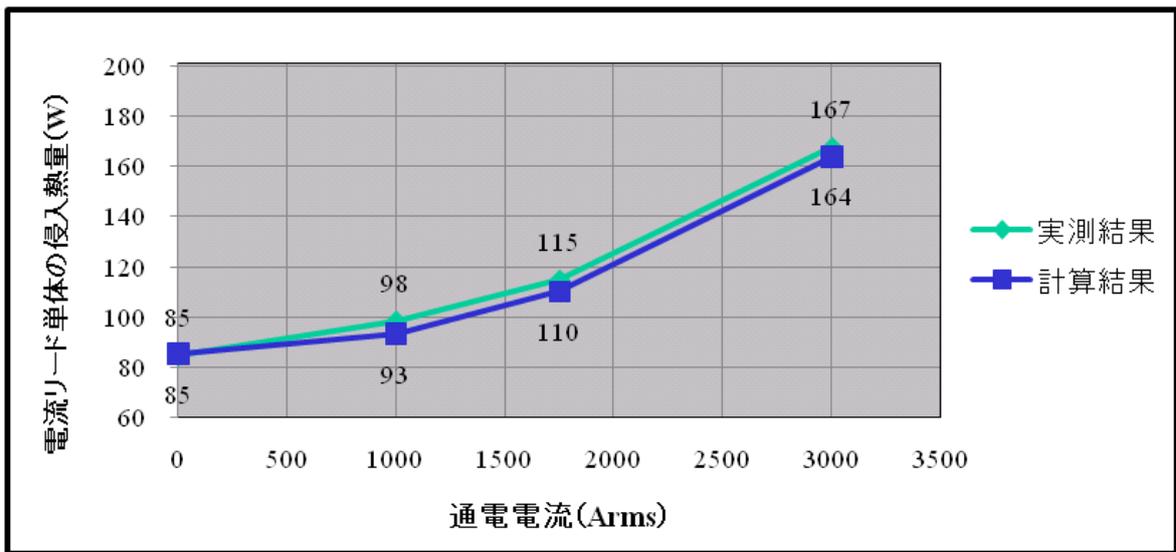


図 2. 1. 4-20 電流リード単体の熱侵入試験結果

#### (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  $0.5\text{MPa}\cdot\text{G}$  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  $0.3\text{G}$ 、鉛直方向  $0.15\text{G}$  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  $11.1\text{t}$  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  $0.3\text{G}$  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。今後、30m 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う予定である。

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
	1750A 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 31.5kA 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 31.5kA 三相通電を実施、② 2 相に 31.5kA 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 230kgf (引力) と計測された。計算値の 200kgf とよく一致する結果であった。①ケースで 31.5kA 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。

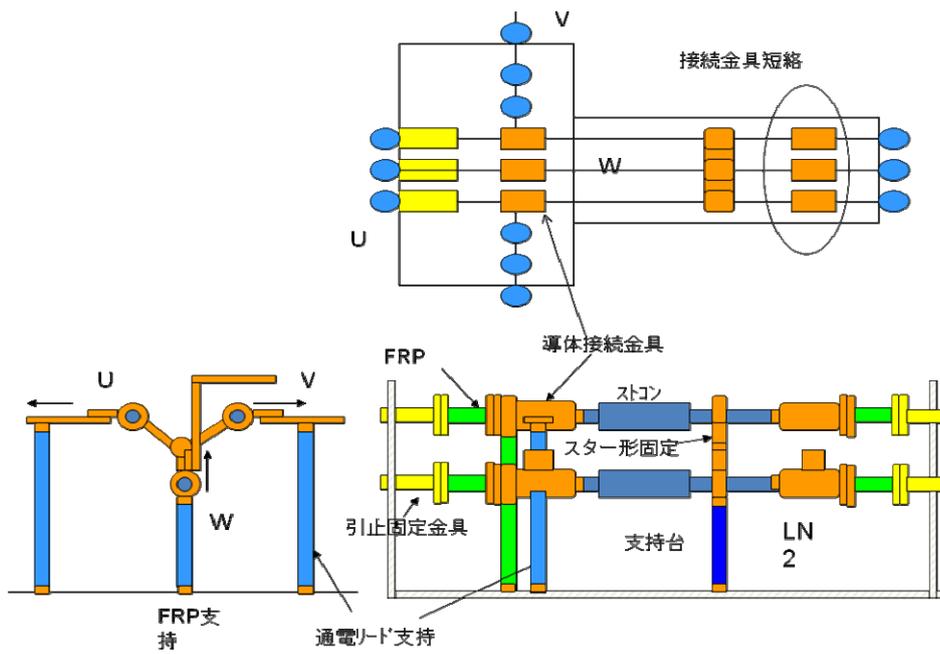


図 2. 1. 4-21 電磁力試験用サンプル

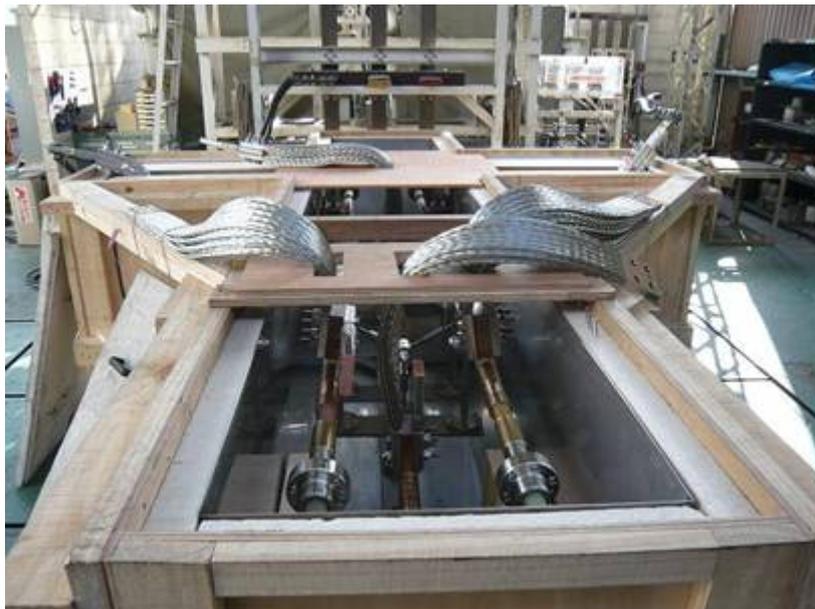


図 2. 1. 4-22 電磁力測定試験状況

#### 2.1.4-4 まとめ

- ・66kV/3kA 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、3kArms、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-2sec 後の 1.75 kA 連続通電試験および 31.5kA-2sec 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 3ton/三相の引張試験および 0.5ton/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。
- ・3kA 級電流リードの設計では 2500mm<sup>2</sup> 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、170W@3kA であった。
- ・熱損失では、端末部の損失を算出し、無負荷時 415W、通電時 635W 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 230kgf 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、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 30m 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。布設形体の曲がり进行を実証すること、端末、ジョイントとの組合せを考え、最低限必要な長さを 30m 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。

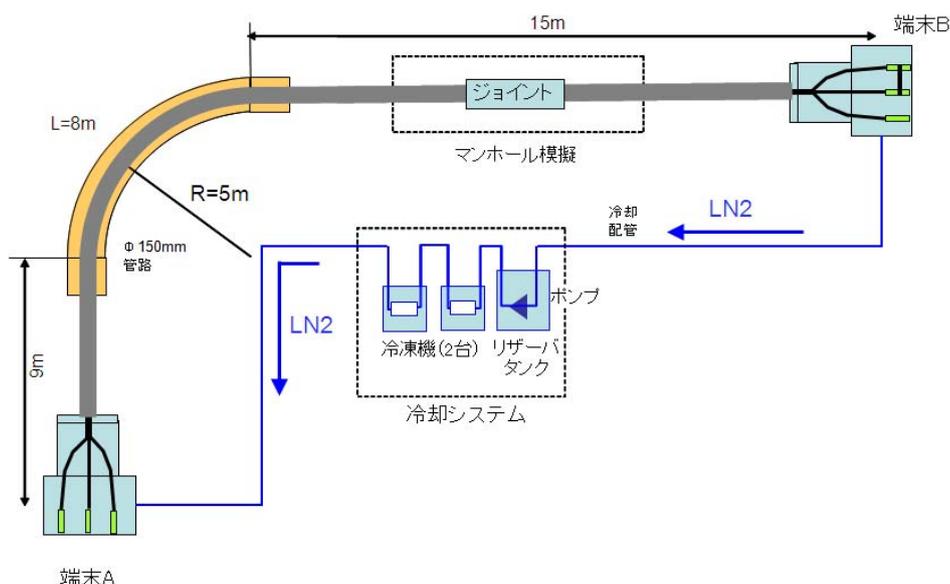


図 2.1.5-1 検証用ケーブルシステム構成図

## 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 66kV 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 6mm、有効長約 4m 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。

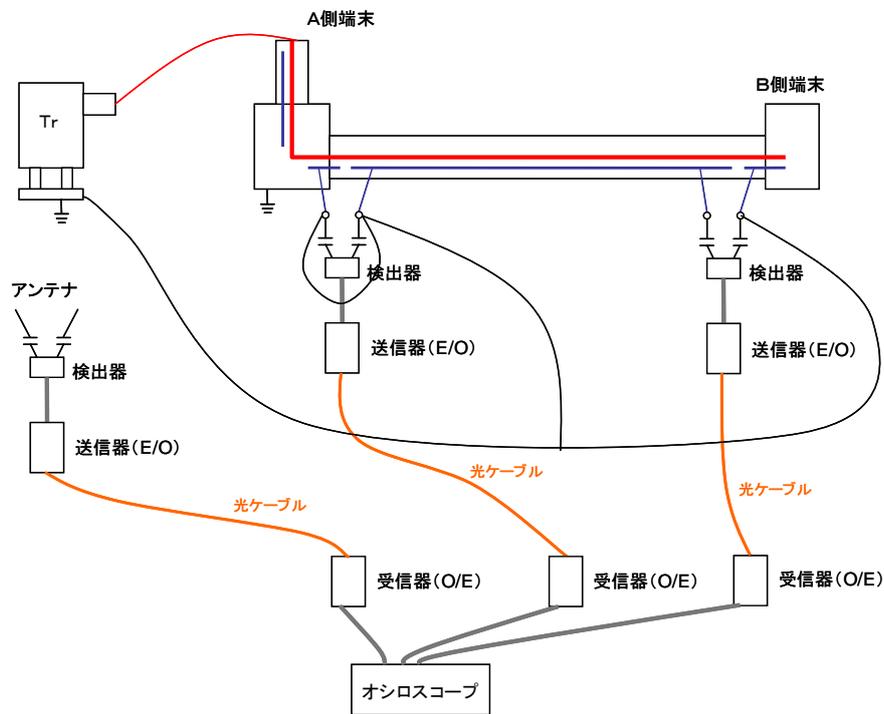


図 2. 1. 5-2 (a) AC 課電回路 (部分放電測定時)

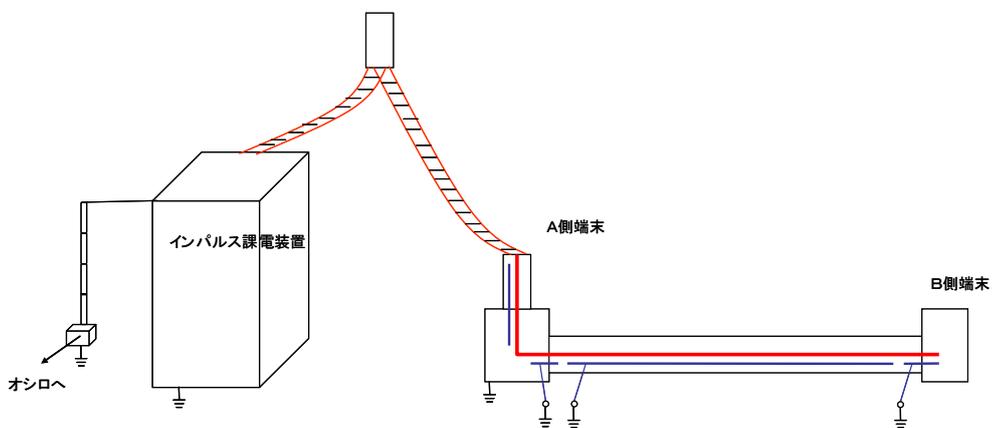


図 2. 1. 5-2 (b) Imp 課電回路

・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 6mm 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 7mm を選定し、以下の検証ケーブルの設計を行う。

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) 10kV step/3min で昇圧し、90kV-3 時間ホールド (2) 10kV step/3min で昇圧し、130kV-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) 90kV 課電→特に異常なく良好 (PD 発生なし) (2) 130kV 課電→課電開始から 1 時間 50 分後に PD 発生(200pC 連続) ※部分放電感度は 60pC

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) +/-350kV 3 回 (3) +/-385kV 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 +/-400kV 3 回 +/-425kV 3 回 +/-450kV 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<sup>8)9)</sup>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、φ150mm 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進めている。

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20kgと、サンプル張力約3ton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、1.5mm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。

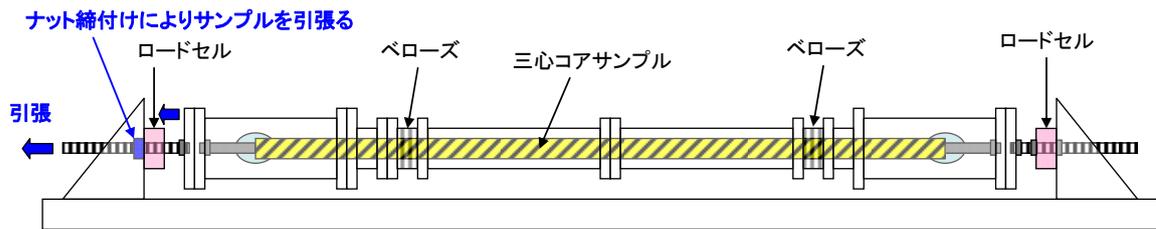


図 2.1.5-3 三心コア引張試験装置の概略図



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。5m 長の三心コアサンプルの中間に約 4m の SUS コルゲートパイプ（内径 95mm）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 1.5mm ピッチのボルトナットの回転数により管理した。

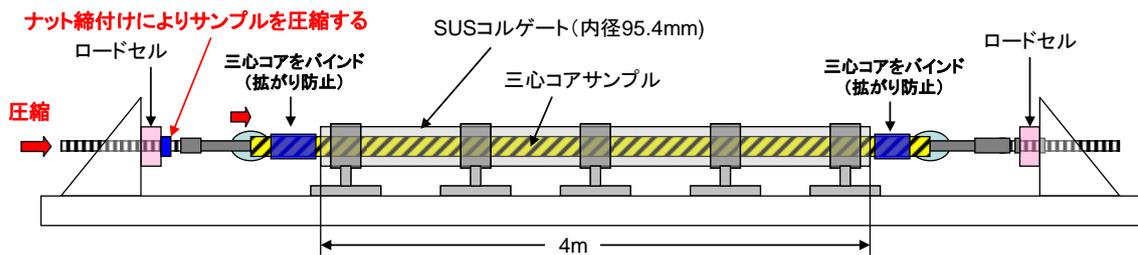


図 2.1.5-6 三心コア圧縮試験装置の概略図



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。

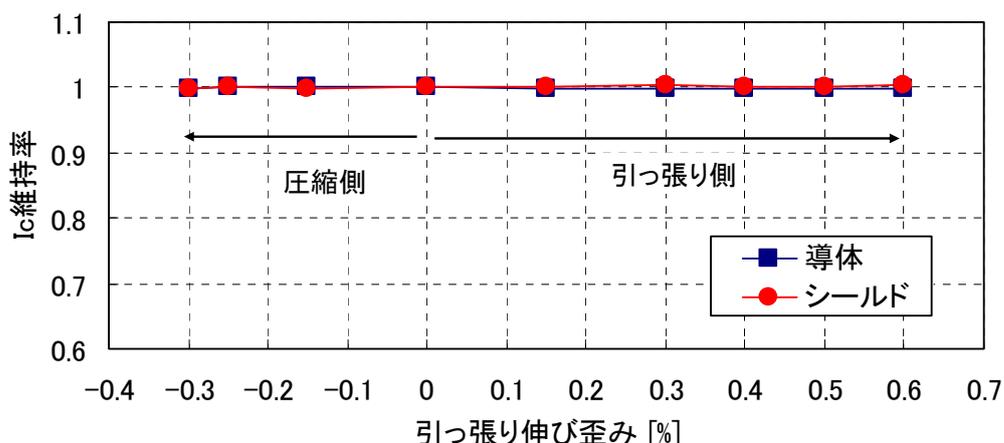


図 2.1.5-8 三心コアサンプルの熱機械試験結果

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 6mm 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 7mm を採用した。

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 k C/3 回) (現地竣工試験電圧：対地 DC151.8kV-10min)
定格電流 (最大電流)	1.75kA (2.63kA 1回線事故対応時)
定格容量	200MVA
ケーブルタイプ	三心一括型
コア交流損失	1W/m/ph@2kArms 以下
短絡電流対応	最大 31.5kA、2 秒 (送電遮断) もらい事故 10kA、2 秒 (遮断なし)
外径	150mm 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 <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	
	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、30m 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 7mm 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 6mm 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。

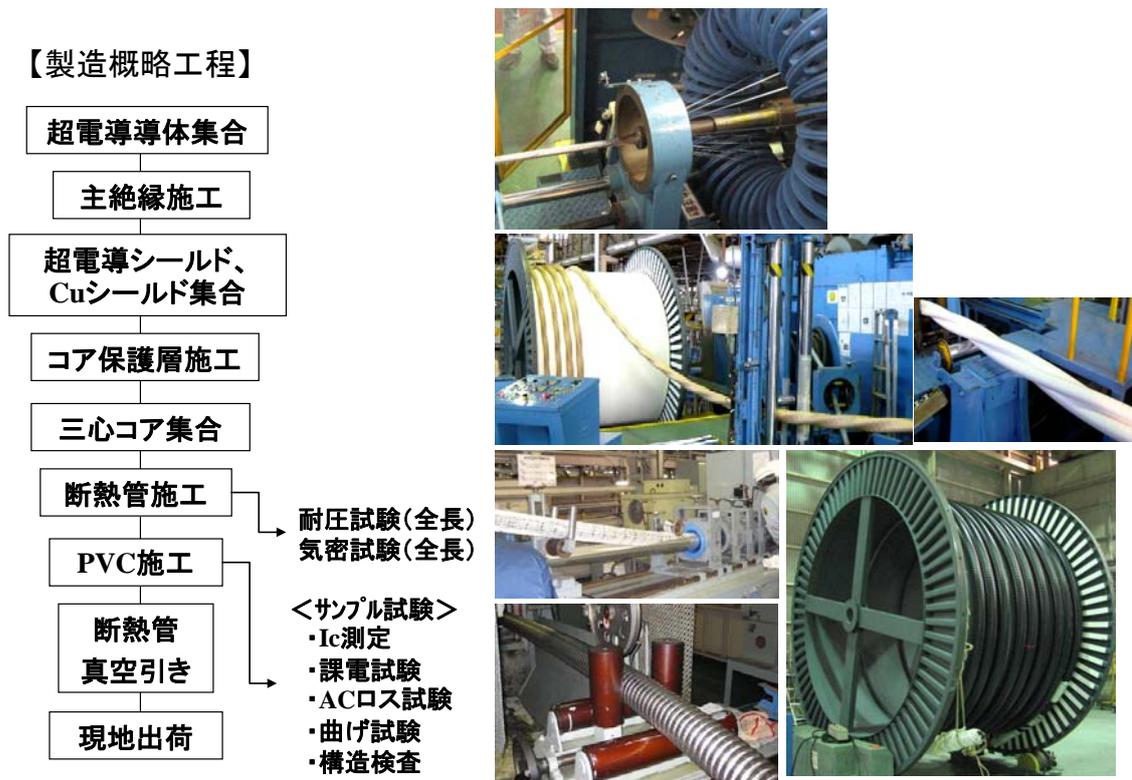


図 2.1.5-9 検証用ケーブル製造の概略工程と製造時の写真

### (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 6000A、シールドは約 7000A 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。

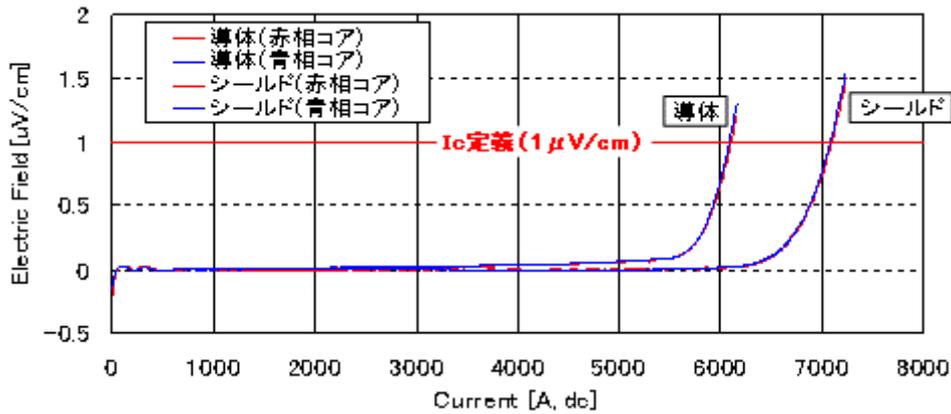


図 2. 1. 5-10 30m ケーブル臨界電流測定結果 (サンプル試験)

交流損失についても、2m 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. 83W/m/ph @ 2kA となり、設計通りの値が得られている。

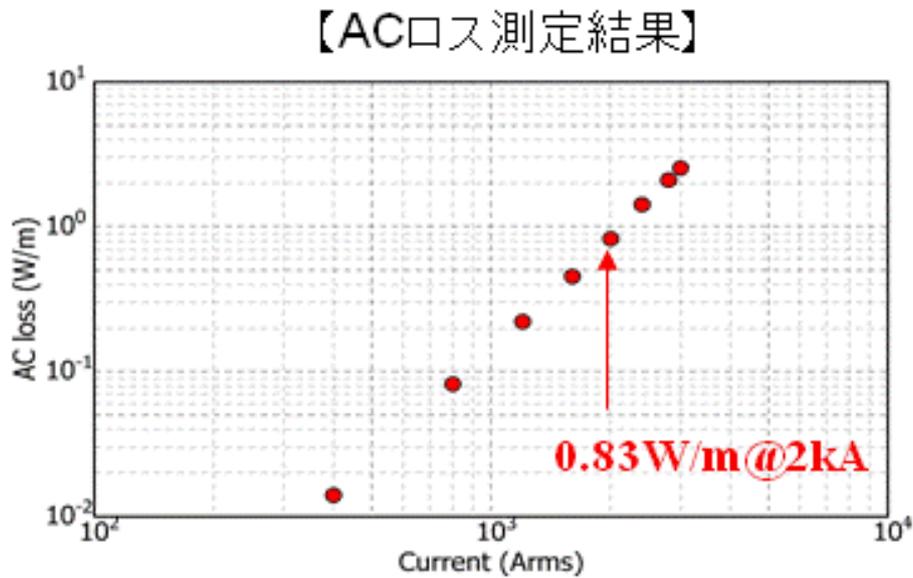


図 2. 1. 5-11 30m ケーブルの交流損失測定結果 (サンプル試験)

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  $\phi$  2400mm (16. 7D 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  $\phi$  2400mm 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。

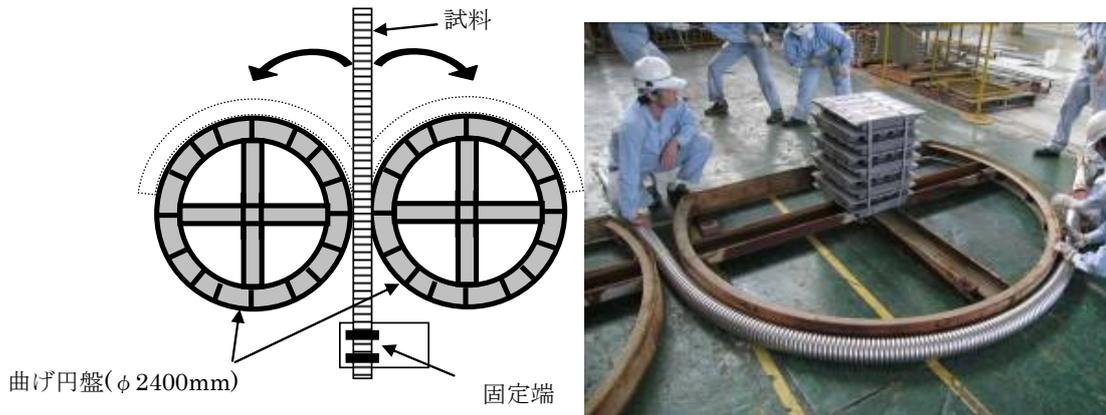


図 2.1.5-12 曲げ試験の概要及び試験時の写真

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	$5 \times 10^{-3}$ Torr 以下	全長	出荷前及び布設後も $5 \times 10^{-3}$ 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 $\Delta$ (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 0.12 $\mu$ H/m	2m サンプル	0.12 $\mu$ H/m
	課電特性	AC : 90kV-3h Imp : $\pm 385$ kV/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)

## 2.1.5-2 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 7m×幅 2m×高さ 2m 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	
		3心撚り戻し、コア相合せ	相確認
		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	
		スロープ部遮蔽処理	
6	ケーブルシールド接続	シールド半割れ銅管ブリッジ HTS 線材取り付け	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	3心小径化	3心コア押し戻し	
8	計測線処理	光ファイバ接続、温度計取り付け	位置確認
9	窒素槽組立	窒素槽組立、溶接	溶接管理
		窒素槽気密試験（社内検査）	気密性
10	真空槽組立	真空断熱材取付	
		真空槽組立、溶接	溶接管理
11	容器ベーキング	加熱・真空引き	真空度
12	防食処理	防食巻き付け処理	



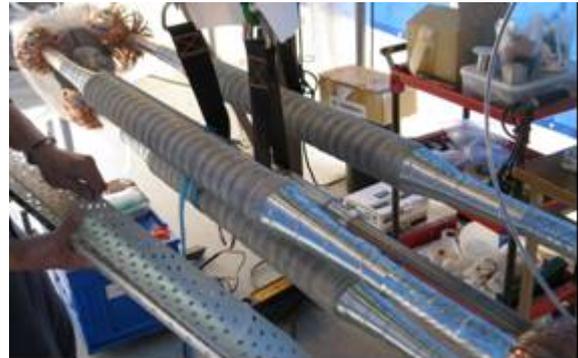
(a) 導体接続スリーブ



(b) 超電導導体ブリッジ接続



(c) 絶縁補強紙巻き



(d) シールド処理



(e) 電界遮蔽処理



(f) 窒素槽組立



(g) 真空層組立



(h) 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	ケーブル直出し	
		容器・部品の挿入	部品の順番
		ベローズ付きフランジの溶接	
3	三相分岐処理	機材の搬入	
		三心コア撚り戻し、相合わせ	相の確認
		オフセット成型	
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
		シールド接続金具の取付	
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	
		フォーマの切断	切断位置
		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	
		ケーブル引き止め治具組立	
		センサー取り付け	取付け位置
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
16	容器外部の配線接続	計測小屋への配線接続	



(a) 3 芯コアオフセット成型



(b) 保護層、Cu シールド層の除去



(c) 補強絶縁紙巻き



(d) 遮蔽処理



(e) 導体接続金具の圧縮



(f) 容器部分の組立



(g) 分岐部真空層組立



(h) 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

### 2.1.5-3 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の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。

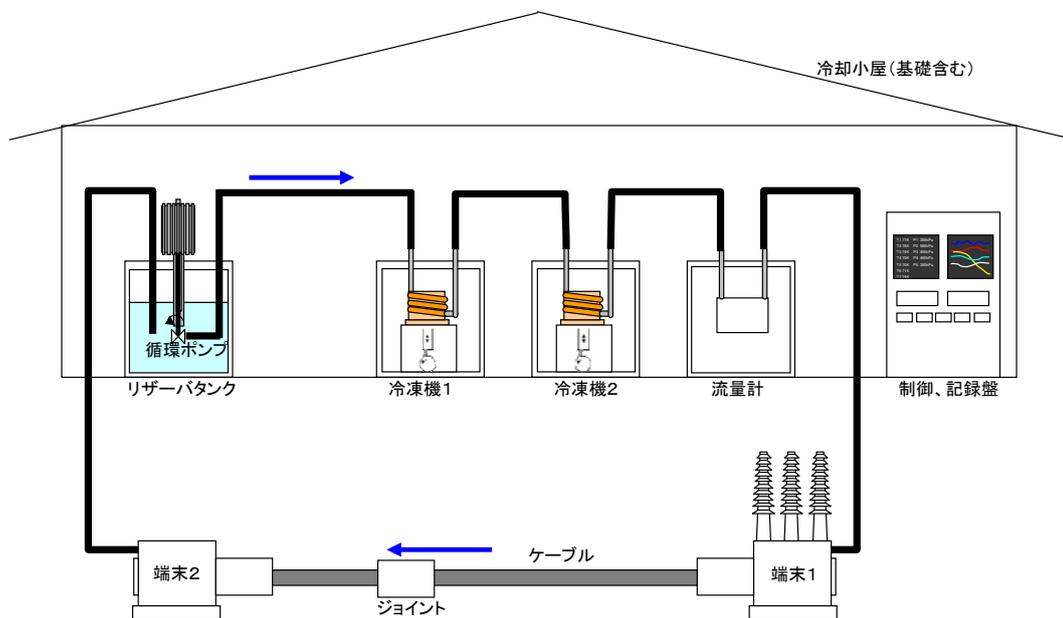


図 2.1.5-16 検証用冷却システムレイアウト図

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	B端末液面
Ts 6	ケーブル2出口温度			CC11	
Ts 6'	ケーブル2出口温度			CC12	
To	外気温			CC13	

表 2.1.5-11 主なセンサーの選定

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

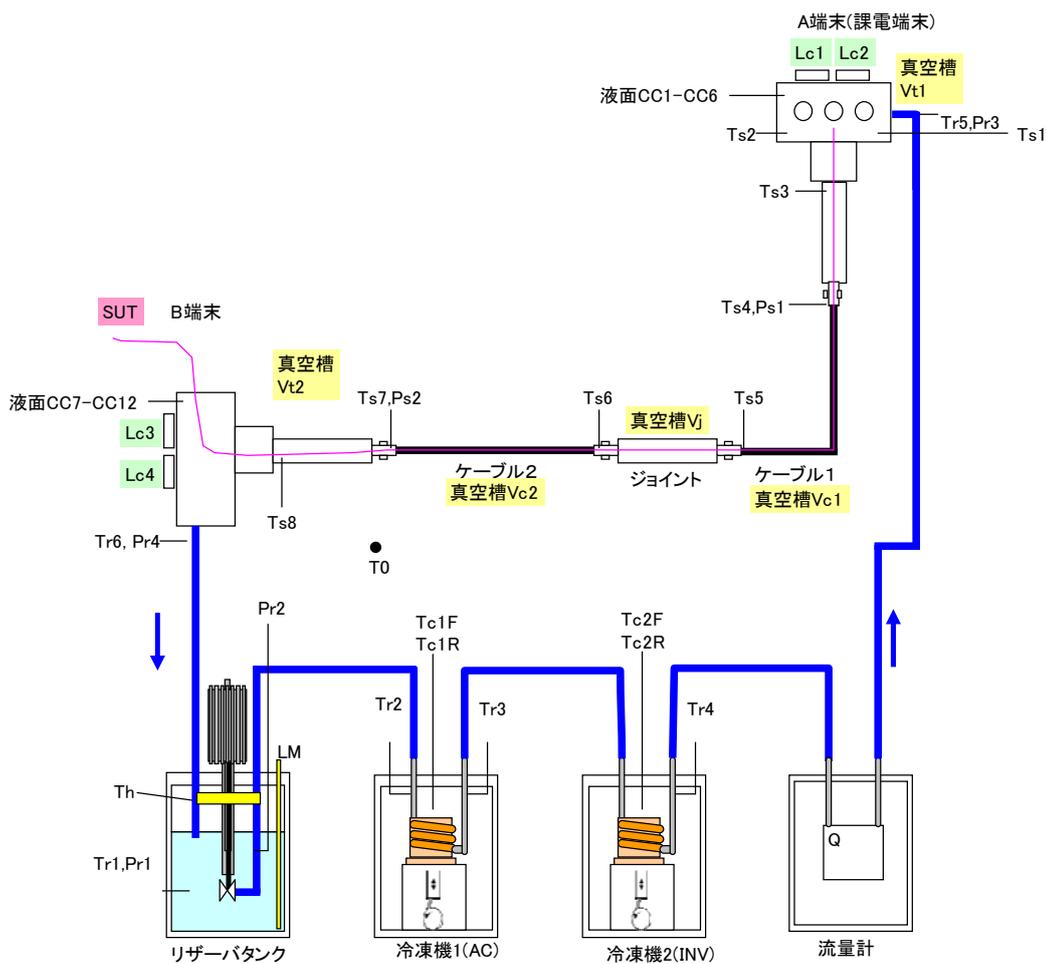


図 2.1.5-18 超電導ケーブルシステム計測データ配置

#### (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	【8-1】 ・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 【8-2】 ・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	負荷変動時における温度の過渡応答性を確認。
			9	【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。 【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。	・リザーバタンクヒータパワー= 1600 W ・初期温度Tr5= 77 K ・圧力Pr1= 0.2 MPaG ・流量= 40 L/min
		10	【10-1】 ・初期ヒータ= 600W ・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。	
	11	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	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。	

(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 40L/min でのポンプ揚程は約 170kPa 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。

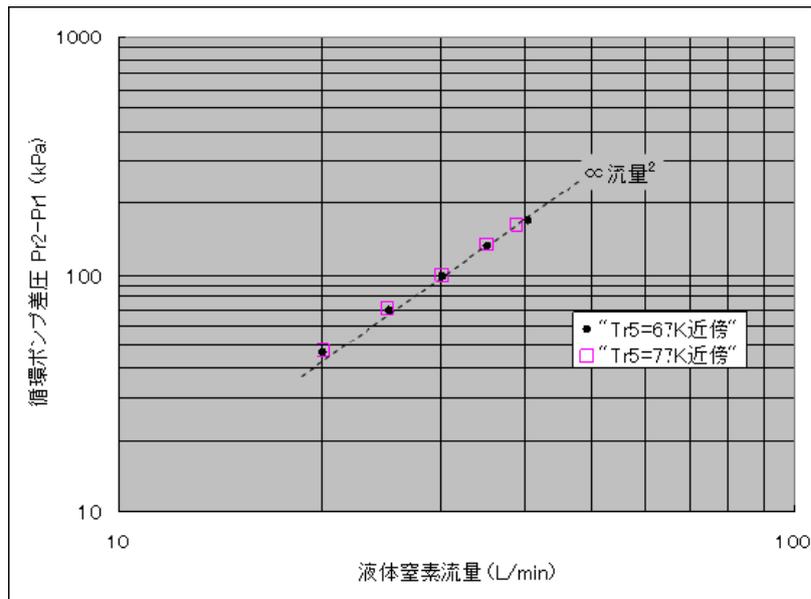


図 2.1.5-19 揚程確認試験 液体窒素流量とポンプ揚程(差圧)の関係

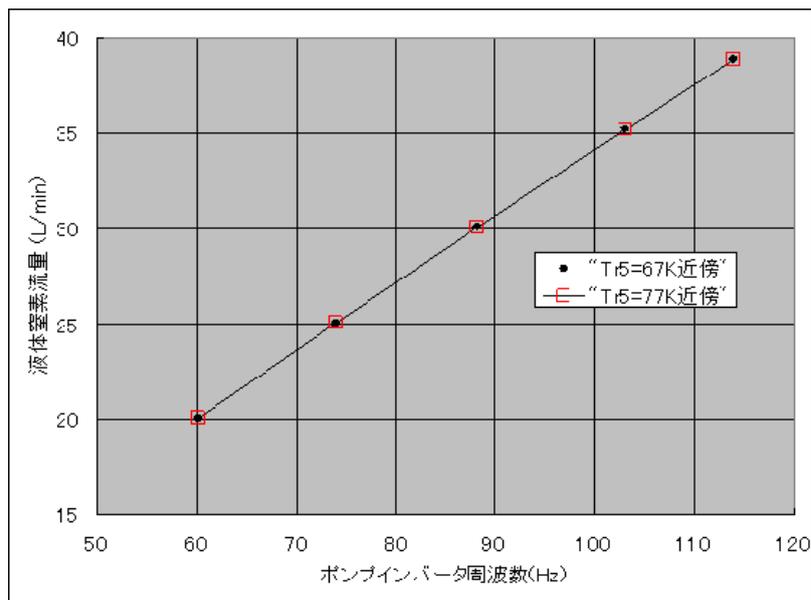


図 2.1.5-20 揚程確認試験 ポンプインバータ周波数と液体窒素循環流量の関係

### (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電力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 となるようヒータ電力を 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する。

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

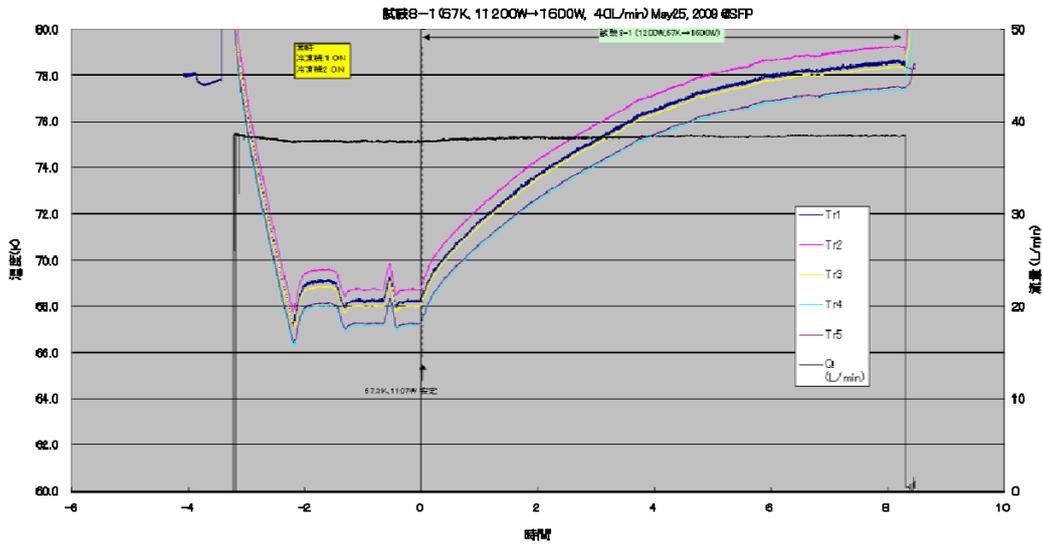


図 2.1.5-21 温度過渡応答試験 (67K, 40L/min ヒータ約 1200W 安定 → ヒータ約 1600W とした場合)

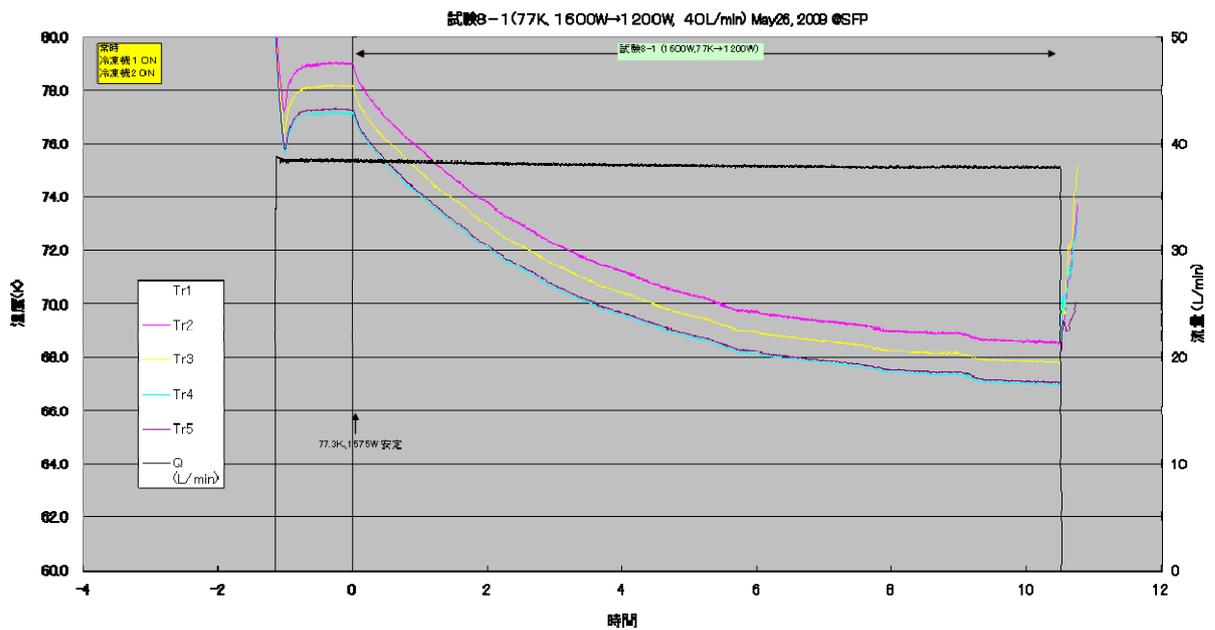


図 2.1.5-22 温度過渡応答試験 (77K, 40L/min ヒータ約 1600W 安定 → ヒータ約 1200W とした時の過渡応答)

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。

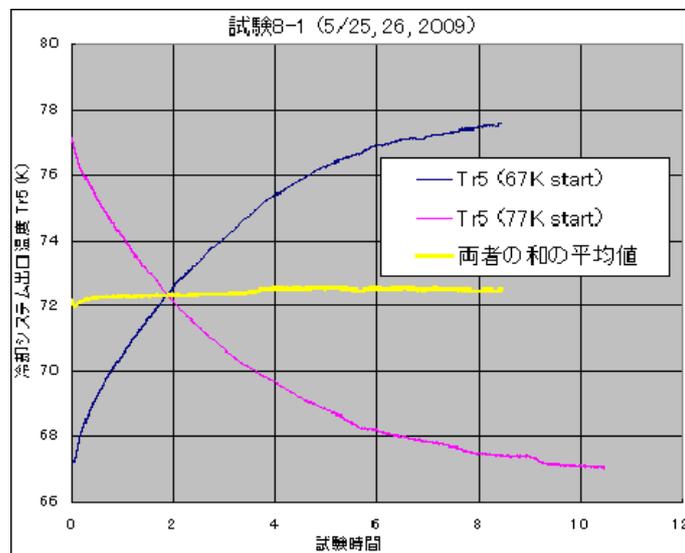


図 2.1.5-23 温度過渡応答試験 過渡応答特性(低温⇔高温での比較)

## 2.1.5-4 検証試験

構築した 30m 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。2009/9/30 時点では、第一回目の定格確認試験が終了したところであり、データを解析中である。本節では、試験の実施状況と、データまとまった試験に関する結果を記述する。

表 2.1.5-14 30m 検証試験計画

試験名	予定	試験項目・内容	
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(対地40kV,2kA)
		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) 断熱管侵入熱測定
		長期課通電試験	対地51kV-連続, 通電2kA-8hrON/16hOFF、1ヶ月
②ヒートサイクル試験	H21/10	ヒートサイクル試験	一旦昇温し、再度冷却を行い、上記電氣的、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 ~H22/1	ヒートサイクル試験	一旦昇温し、再度冷却を行い、上記電氣的、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	短絡電流模擬試験(~10kA)、 過電流通電(~3kA)試験、冷凍機故障模擬試験

### (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。

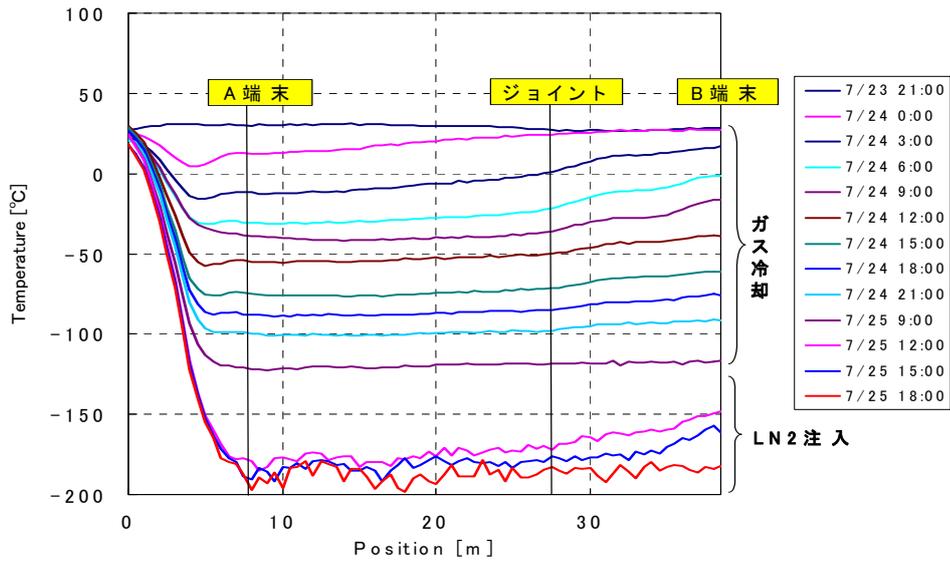


図 2.1.5-24 ケーブルシステム全長温度分布

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。

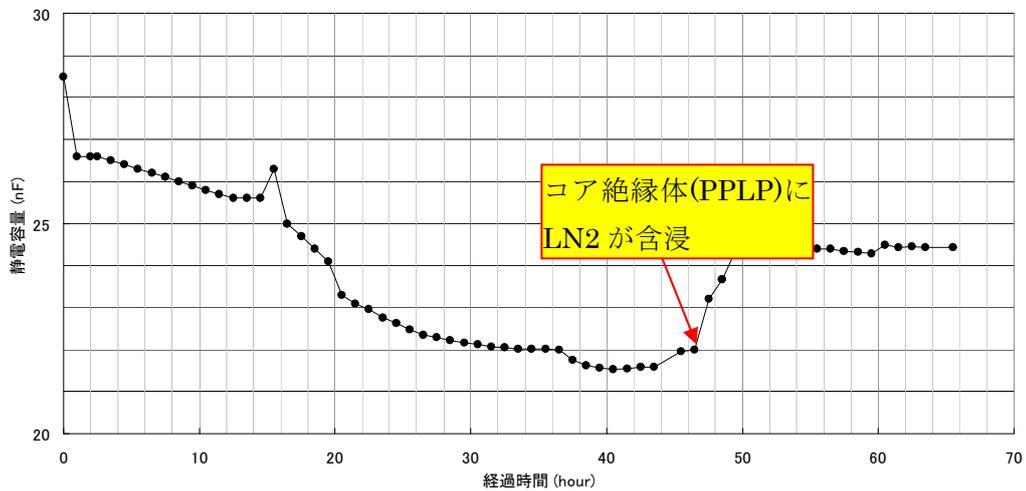


図 2.1.5-25 初期冷却時ケーブル静電容量変化 (LCR メータ計測)

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、2500~2700kgf/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。

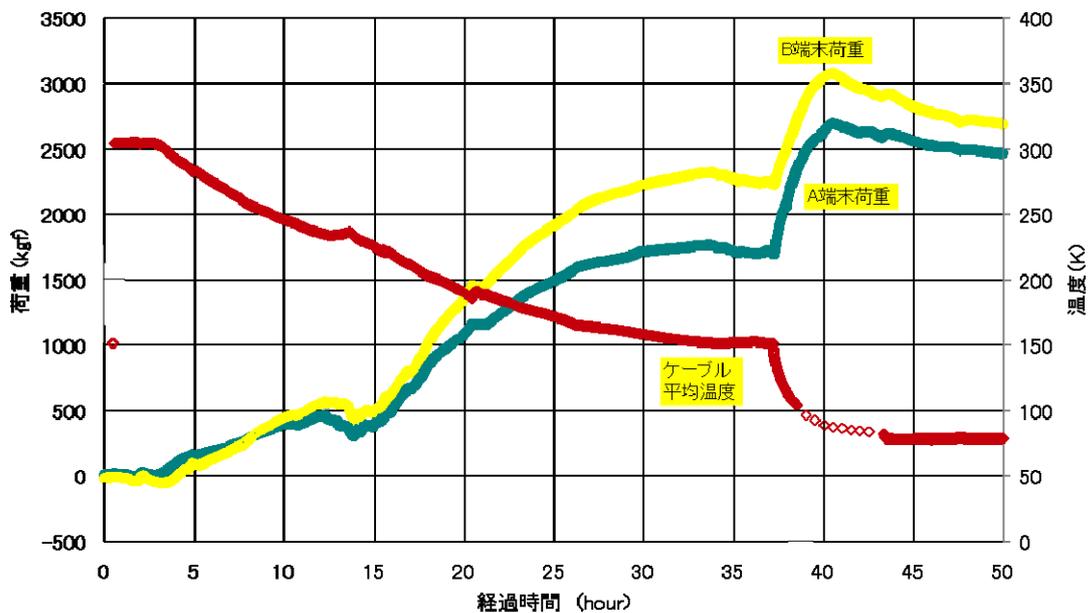


図 2.1.5-26 冷却時の端末荷重測定

## (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、7200A/10V の直流電源を用いて、30m 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 30m 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。

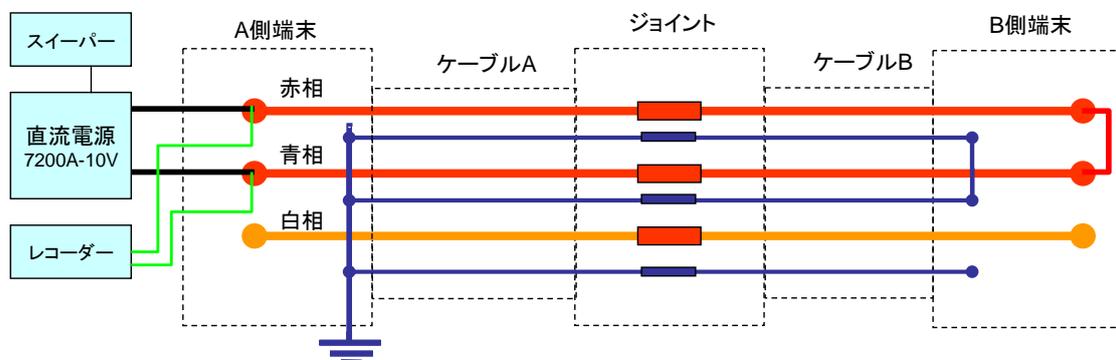


図 2.1.5-27 臨界電流測定回路の概要

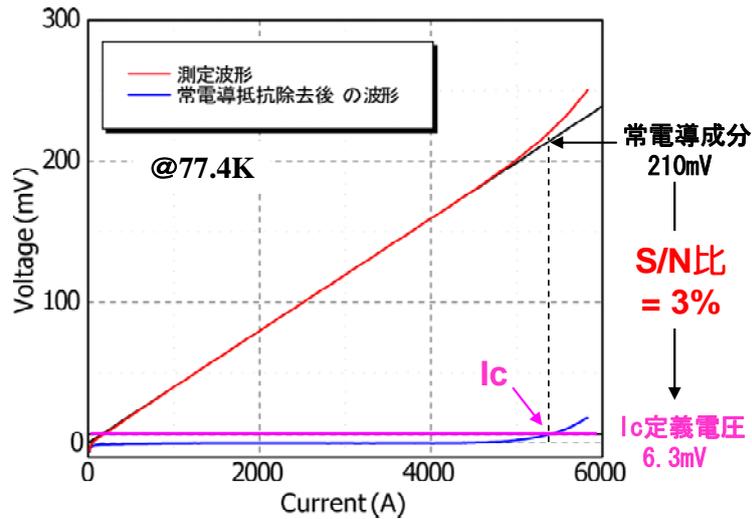


図 2. 1. 5-28 臨界電流測定時の電圧電流波形

$I_c$  測定結果を表 2. 1. 5-15 にまとめる。77. 4K における  $I_c$  測定結果は 5. 4kA であり、出荷試験結果 (6. 1kA) 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 30m 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) 5kA 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。

1) については、今後の試験において、超電導導体直上に電圧タップを取り付け直して正確な  $I_c$  測定を実施することを計画している。2) については、短尺サンプルを用いて磁場の影響を検証することを計画している。

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、30m 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 1.8kA 程度（誘導率は 90%程度）であり、これまでの実績<sup>8)</sup>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ている。

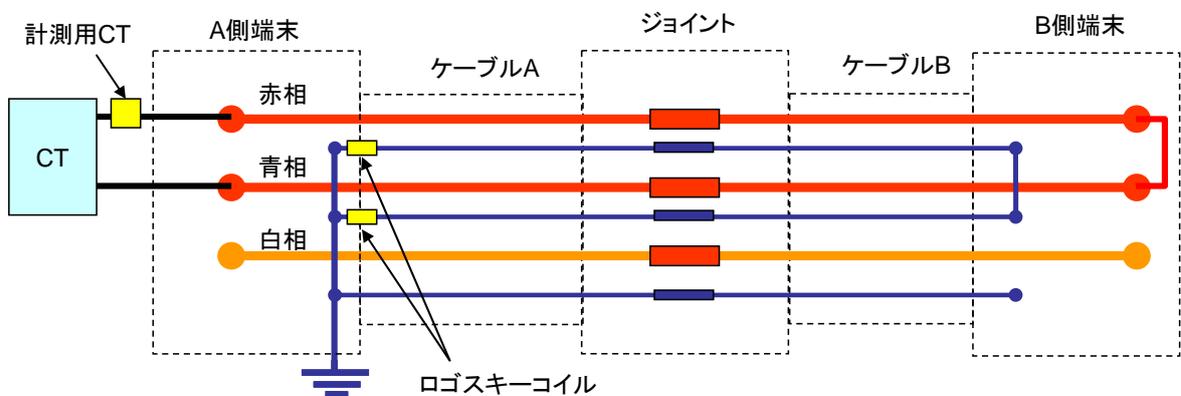


図 2.1.5-29 交流通電試験回路の概要

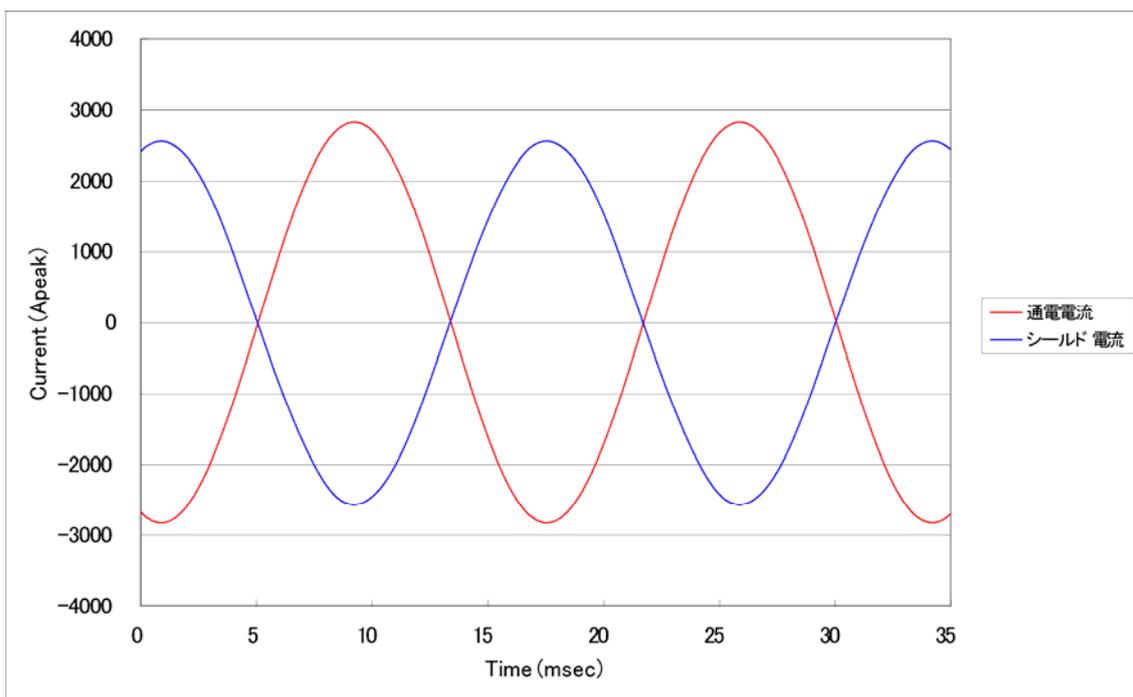


図 2.1.5-30 交流通電時の電流波形

#### (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 AC76 kV(対地) - 10 分間
- (2) 系統最大電圧(72 kV)相当課電試験 AC42 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)

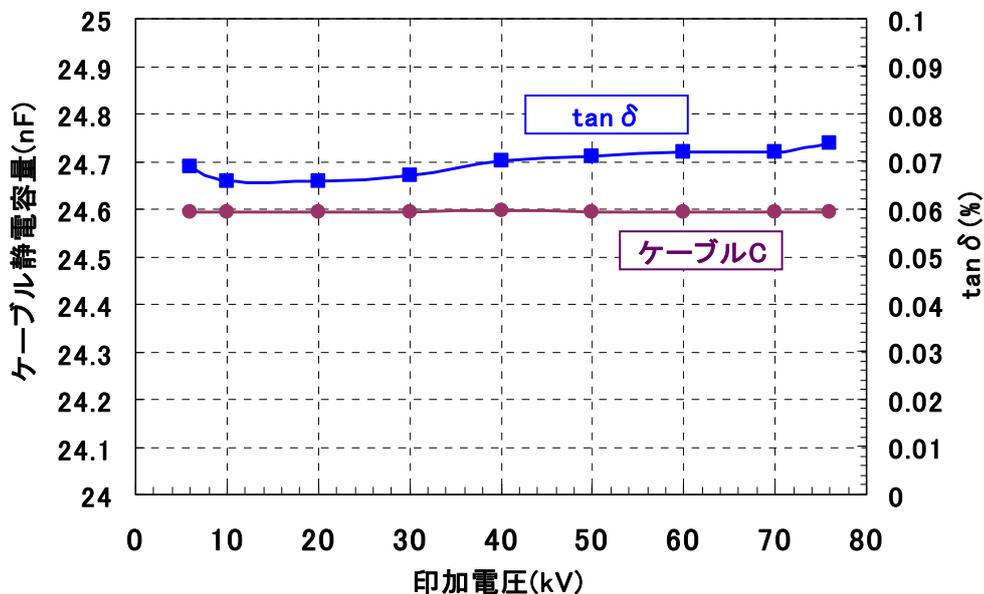


図 2.1.5-31 検証用 30m ケーブルの C 及び  $\tan \delta$  測定結果

### (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 51kVrms 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 0.2MPaG、LN2 温度はケーブル部出口温度を約 77K、LN2 流量は 40L/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。

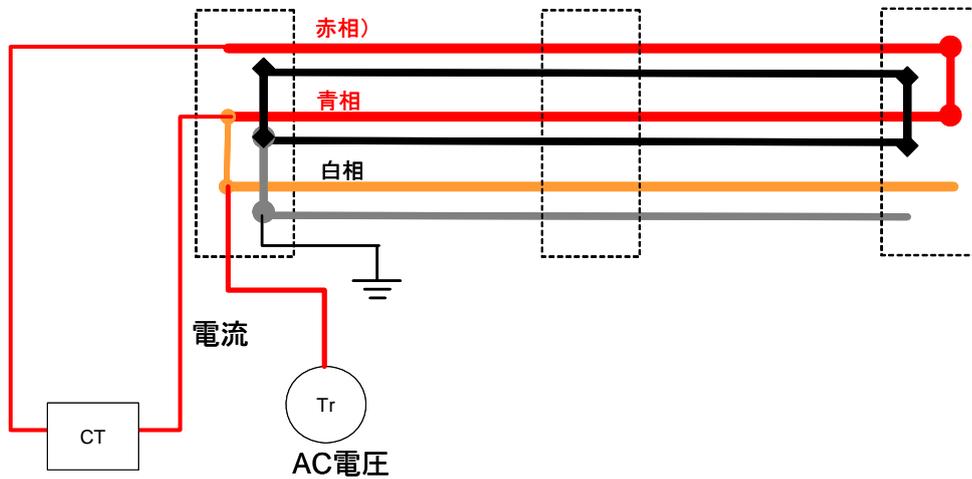


図 2.1.5-32 長期課通電試験回路図

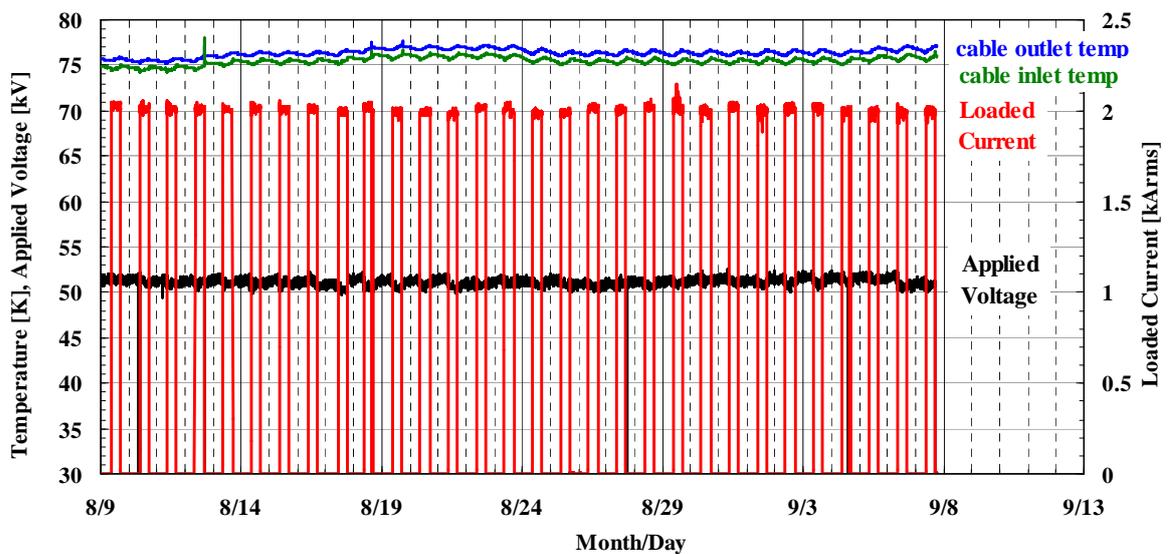


図 2.1.5-33 長期課通電試験結果

## 2.1.5-5 まとめ

- ・ 検証用 30m ケーブルの製作、建設を行った。
  - ・ 30m 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 7mm 厚 PPLP で構成されている。
  - ・ 30m 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。
  - ・ 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 2.4~2.7ton 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。
- 
- ・ 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、 $I_c$  DC5.4kA @ 77.4K を得た。
  - ・ 通電試験においては、AC2kA 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 AC1.8kA であった。
  - ・ 従来ケーブルの竣工試験と同様に、定格電圧 (66kV の対地電圧 38kV) の 2 倍である AC76kV @ 10 分間を課電し、良好であった。
  - ・ 電圧対地 51kV、電流 2kA 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、この試験が 30 年間の加速試験に相当する。

## 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 A L B A N Y 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 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、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：66kV、容量：200MVA 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。

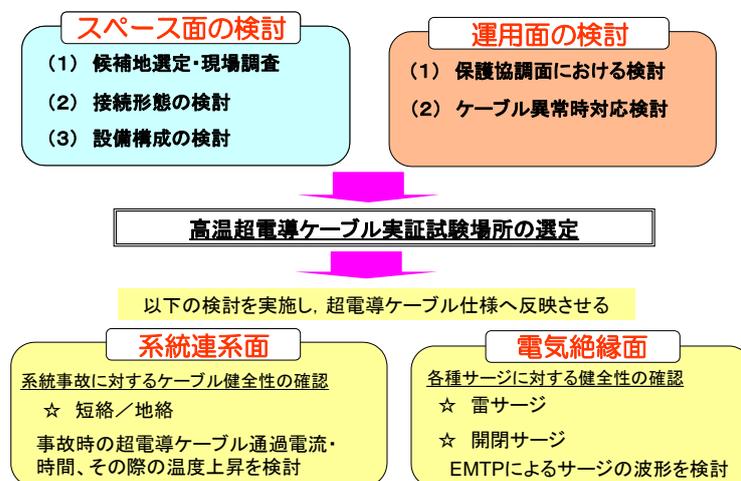


図 2.2.1-1 実証場所選定のフロー

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	◎

。



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、66kV 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くない点に加え、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（200MVA）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。

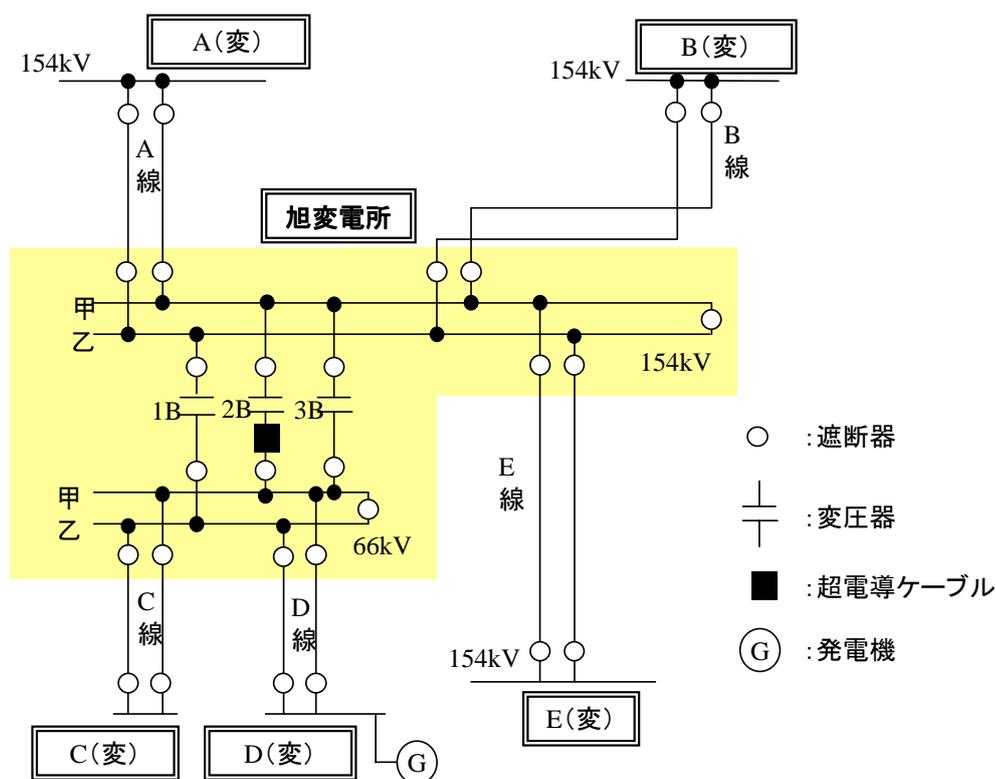


図 2.2.1-3 旭変電所における超電導ケーブルの接続形態（系統構成）

#### (4) 設備構成の検討

154/66kV 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、154/66kV 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 154/66kV 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。ただし、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される。

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。

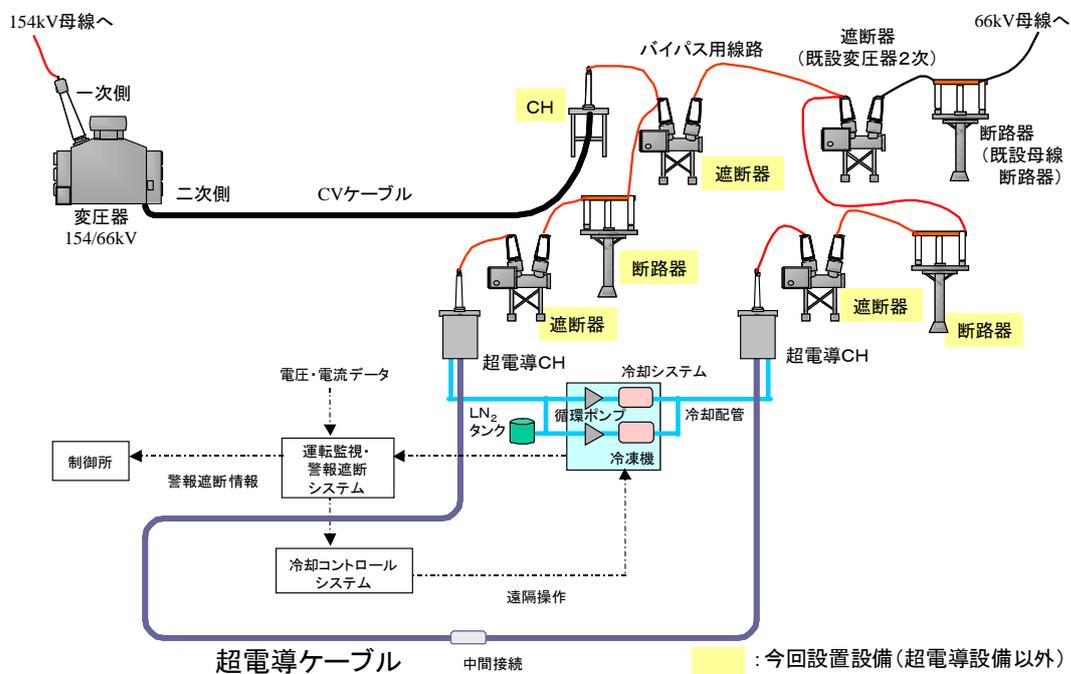


図 2.2.1-4 超電導ケーブル設備構成 (機器配置イメージ)

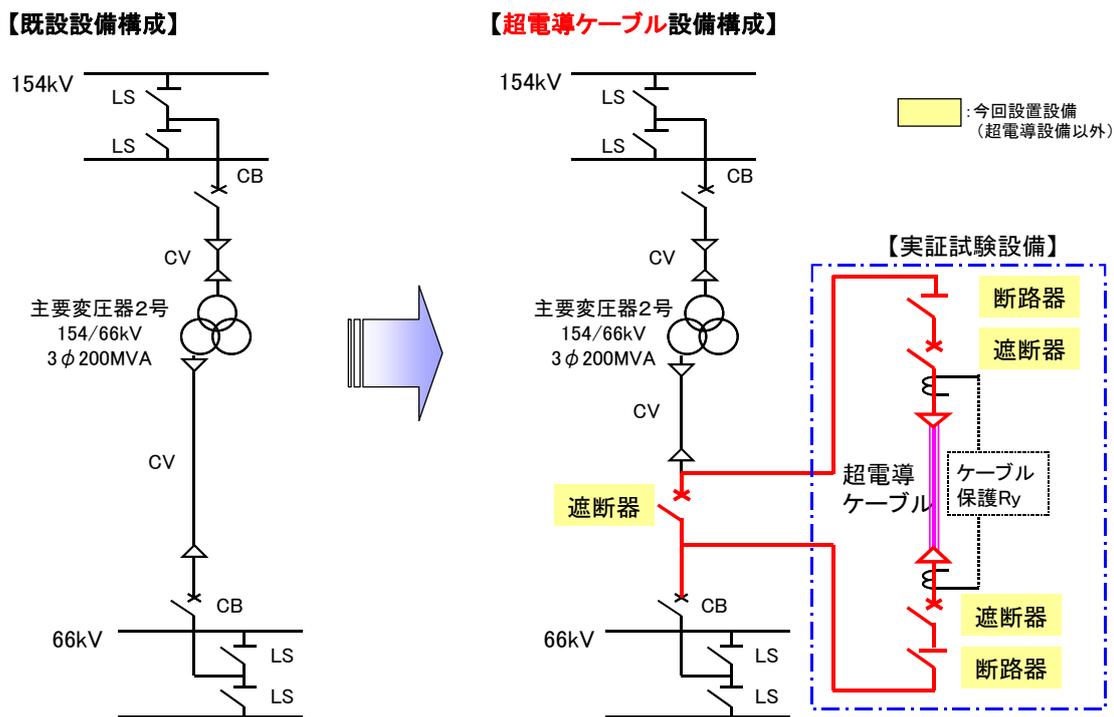


図 2.2.1-5 超電導ケーブル設備構成（単線結線図）

### (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、前期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 66kV 系統の最高使用電圧は 72kV である。また、変圧器定格容量は 200MVA であり、電流容量に換算すると 1,750A である。従って、超電導ケーブルは 1,750A 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、31.5kA-2sec 及び 10kA-3sec 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に場合は、10kA-2sec 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、66kV 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 66kV 系統では 350kV 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。

#### (6)まとめ

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て、実証場所として旭変電所を選定した。また、接続箇所を 154/66kV 変圧器の 2 次側とし、この場合の接続形態、設備形態を決定した。本実証場所での高温超電導ケーブルシステムの基本仕様となる要求事項について、表 2.2.1-4 にまとめる。

表 2.2.1-4 実証場所における超電導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	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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)</li> <li>・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)</li> <li>・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)</li> </ul>
雷インパルス耐電圧(LIWV)	±350kV

## 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替操作を実施し、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予定である。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する予定であり、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・警報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を常時監視し、冷媒温度・圧力・流量などの制御指令を、冷却コントロールシステムを介して冷却システムに伝送する事で、冷却システムを遠隔自動操作する。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。

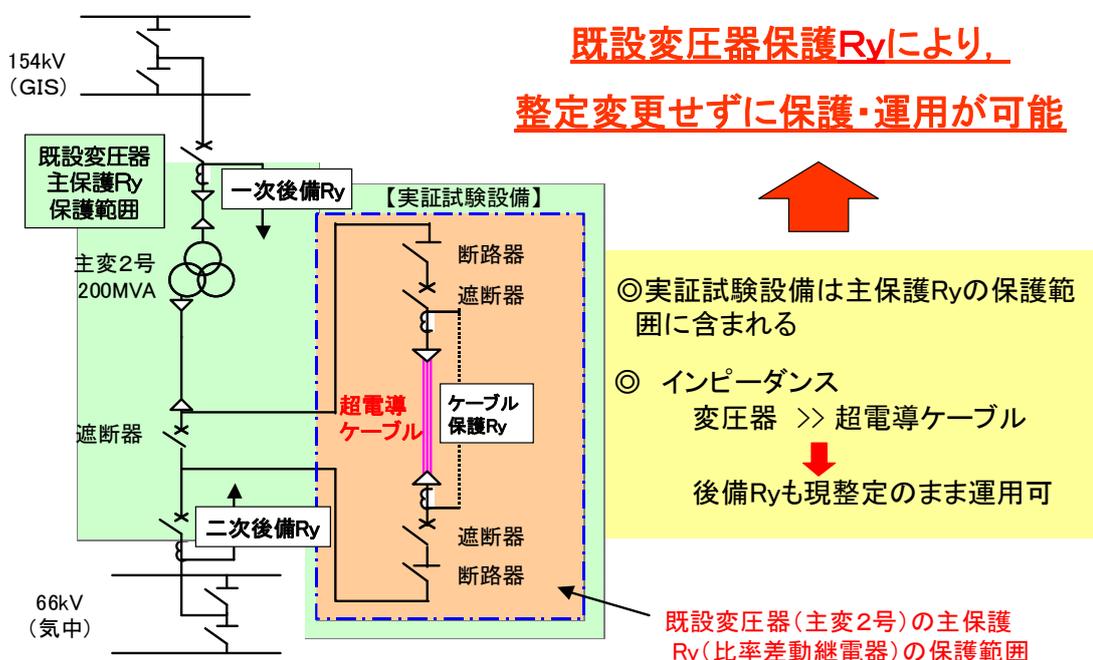


図 2.2.2-1 ケーブル保護ならびに遮断システムについての検討

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、バイパス用遮断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。

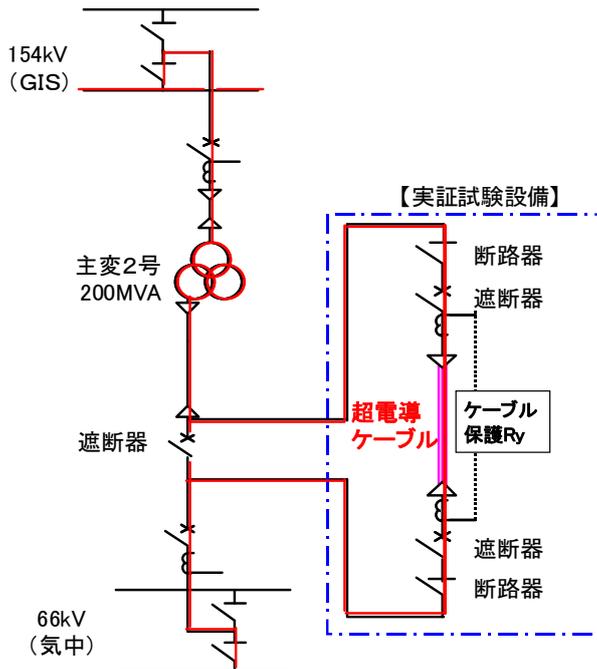
・後備保護リレーは距離継電器であり、事故点までの距離に応じて動作条件が変化する。超電導ケーブルを適用した場合、超電導ケーブル分だけケーブル長が長くなってインピーダンスが増加し、これによって距離継電器の動作範囲が変わることが懸念された。しかし、変圧器のインピーダンスがケーブルに対して非常に大きいため、現整定値のまま変更は不要である(2.3.1節に詳述)。

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が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、バイパス側の遮断器を開放し、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遮断器を開放し、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、バイパス用の遮断器を投入して、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。

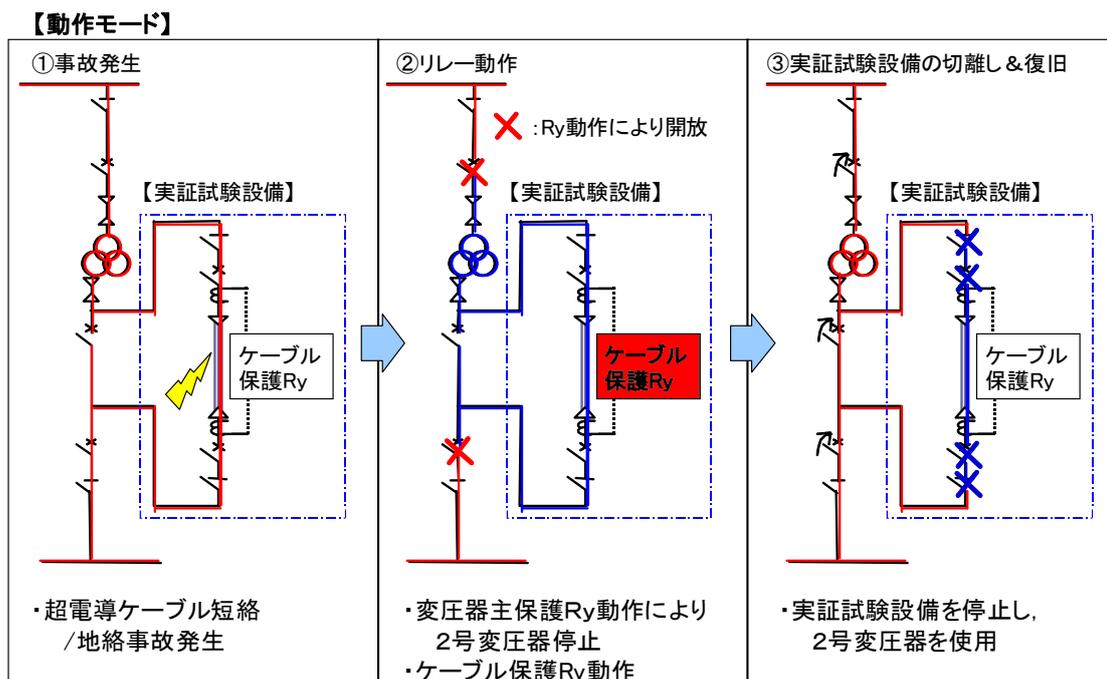


図 2. 2. 2-3 超電導ケーブル運転形態（短絡／地絡事故発生時）

- ・ 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
- ↓
- ・ バイパス用の遮断器を投入し、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従って重故障、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、まずバイパス用の遮断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。

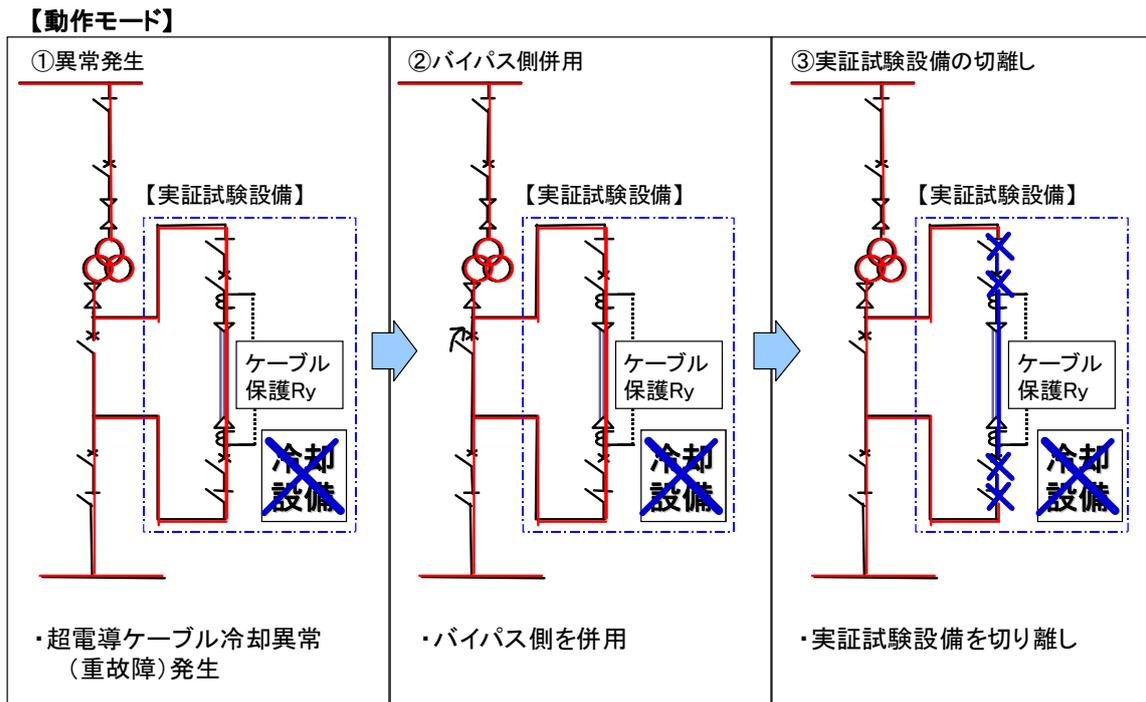


図 2.2.2-4 超電導ケーブル運転形態（冷却設備異常発生時）

- ・ 超電導ケーブル冷却異常発生
- ↓
- ・ バイパス用の遮断器を投入し併用
- ↓
- ・ 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)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を検討を行なった。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にでも、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について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、無停電で切替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ー・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。

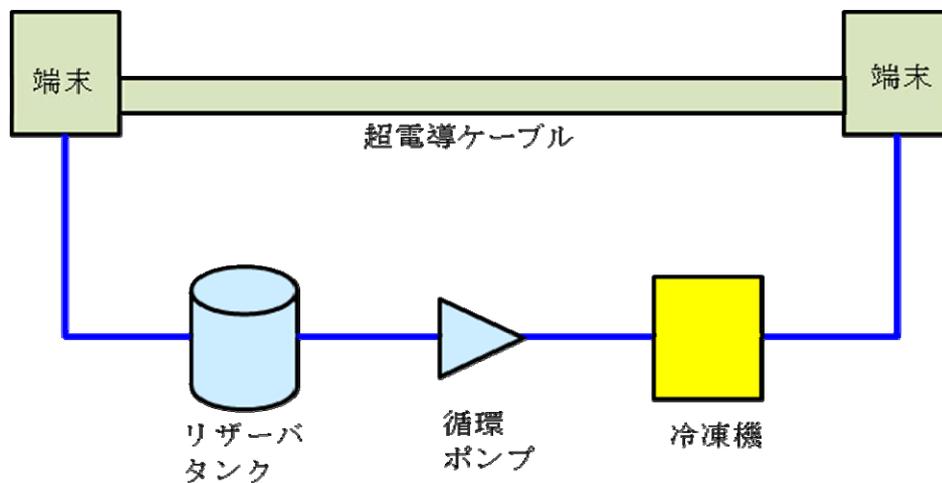


図 2.2.3-1 冷却システムの基本構成例

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、各部にセンサーを取り付け、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が、本プロジェクトにおいては、個別の機器開発は実施しない方針であり、対応しない計画である。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"> <li>・温度・圧力などが長期安定運転が可能なシステムであること。</li> <li>・異常検知、警報発信のシステムを備えていること。</li> </ul>	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、冷凍機から帰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げている。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。

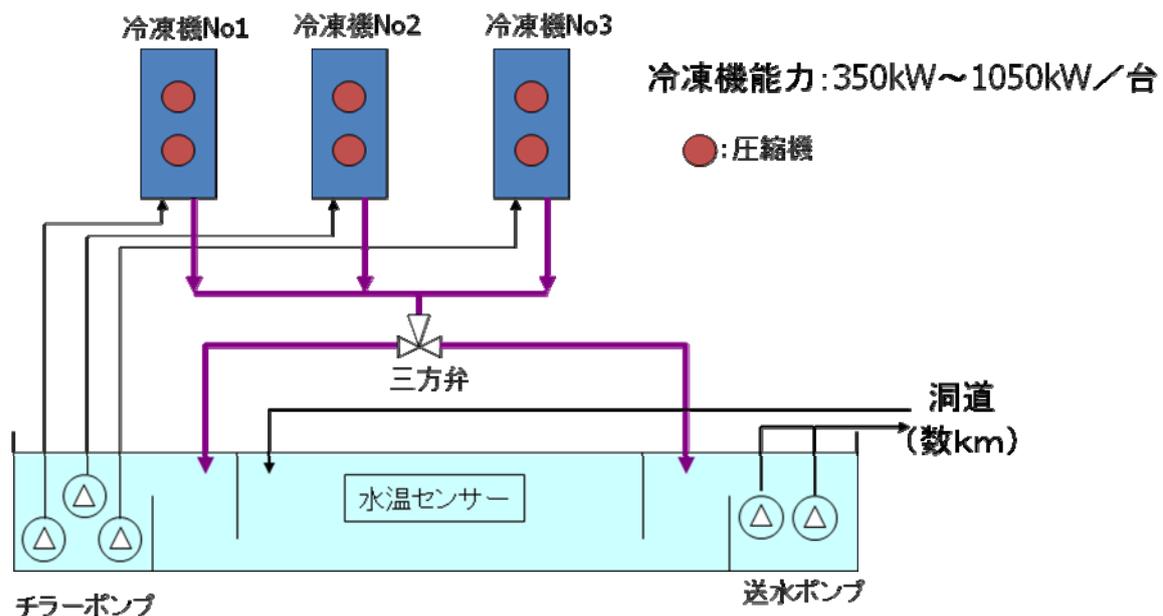


図 2.2.3-2 洞道間接水冷システムの構成例

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で、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、この冷媒槽を負圧にす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。

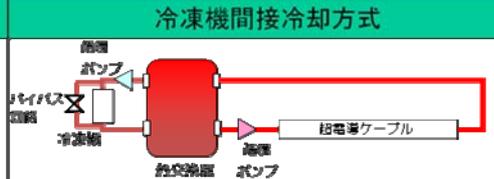
一方、直接冷却方式については、①間接冷却と比べて熱効率がよい。これは、間接冷却が、冷媒対象を冷却する冷媒を、冷凍機側の冷媒で冷却で冷却することから、冷媒同士の熱交換、冷凍機との熱交換とを考える必要があることに対し、直接冷却ではケーブルを冷却する冷媒を直接冷凍機で冷却するので、熱交換は一回しか考えなくて良いからである。また、②冷凍機の出力量調整により、冷媒の温度制御に対する応答性がよい、などが考えられる。

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。

尚、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、適用例を調査中であるがまだ確認されておらず、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。尚、間接冷却方式の熱交換部については引き続き検討を行い、要素技術の検証を進めていく。

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-SE1100m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 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 <sup>2</sup> /kW(*4) △	4m <sup>2</sup> /kW ○	2m <sup>2</sup> /kW(*5) ○	8m <sup>2</sup> /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。

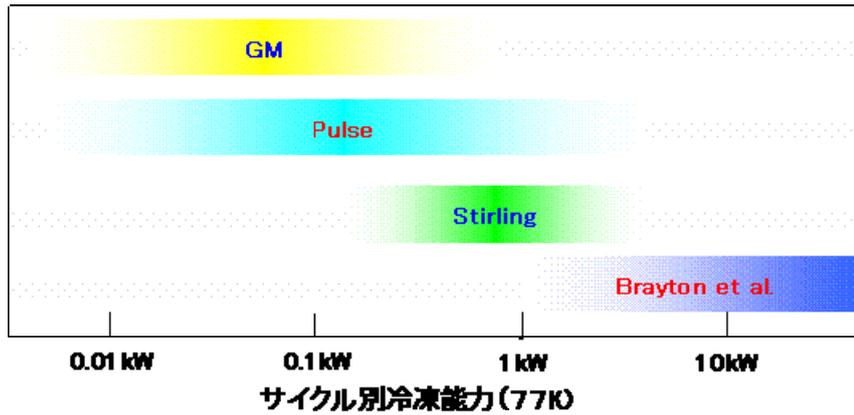
(\*4) メンテナンススペースを含んだ数値。

(\*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、夏季の典型的な不可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 1000A、最小送電電流を 500A 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 750A 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

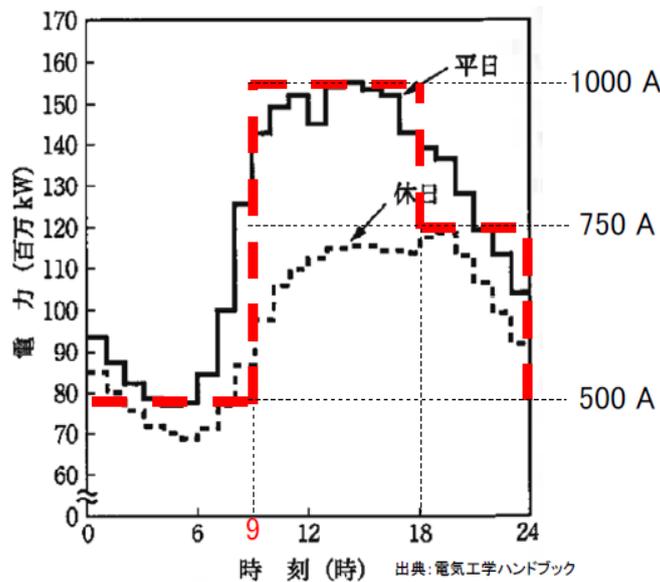


図 2.2.3-4 日間負荷変動の想定

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課通電時 (0A)、最大負荷時 (1kA)、超電導ケーブルの定格電流値 (1.75kA) 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。

表 2. 2. 3-5 冷凍機必要台数

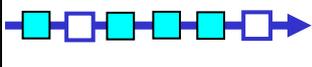
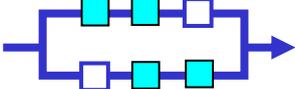
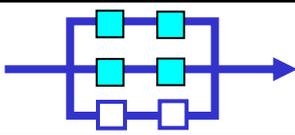
送電量	0kA	1kA	1.75kA
超電導ケーブル熱負荷	1,746	2,112	2,780
冷凍機負荷(圧損)	994		
全負荷	2,740	3,106	3,774
必要冷凍機台数	3.7	4.1	5.0

冷凍機能力 750W@67K

### (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. 3-6 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、詳細検討している。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 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 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。
- ・ 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、今後検証することとする。
- ・ 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。

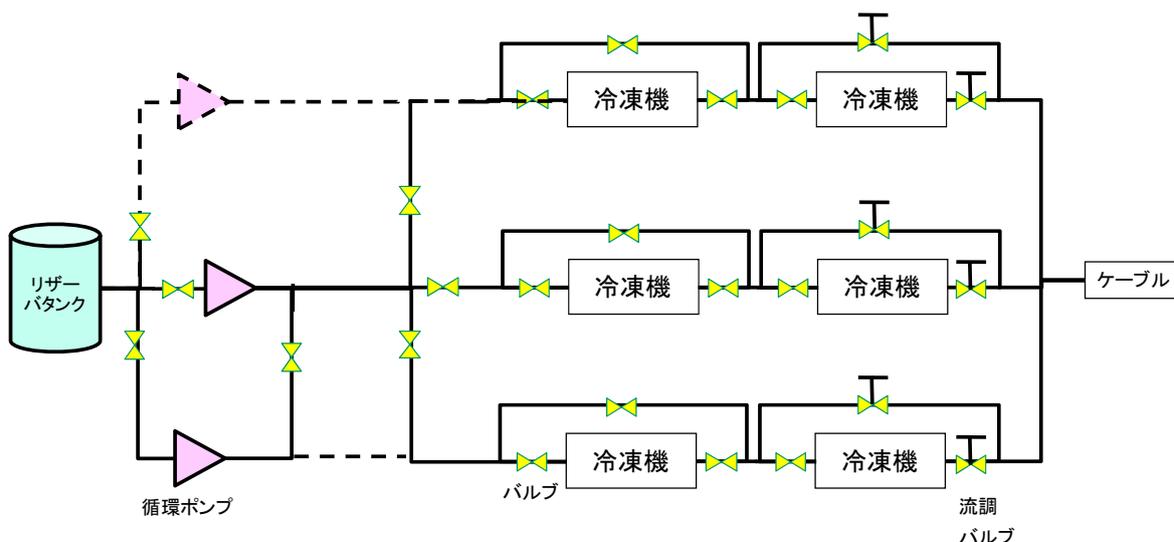


図 2.2.3-5 実証用冷却システムの構成

## 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。現在30m検証試験を実施中であり、そ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を平行して行っている。

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

各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 30m 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。

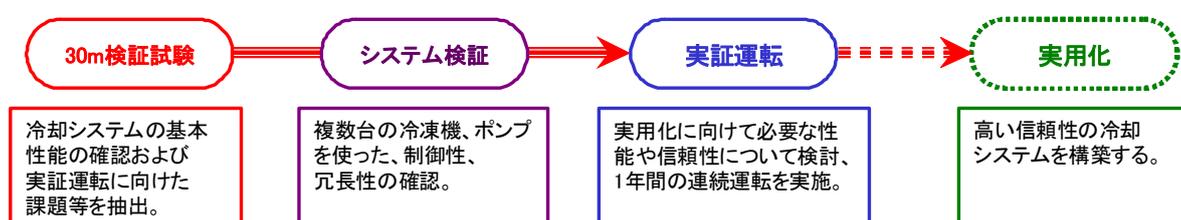


図 2.2.3-6. 冷却システムの開発ステップ毎の検証

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	260m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 循環ポンプ内臓 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)切り替え	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	260m級
試験場所		住友電工ファインポリマ	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				

## 2.2.4 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る必要がある。

- ・ 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。

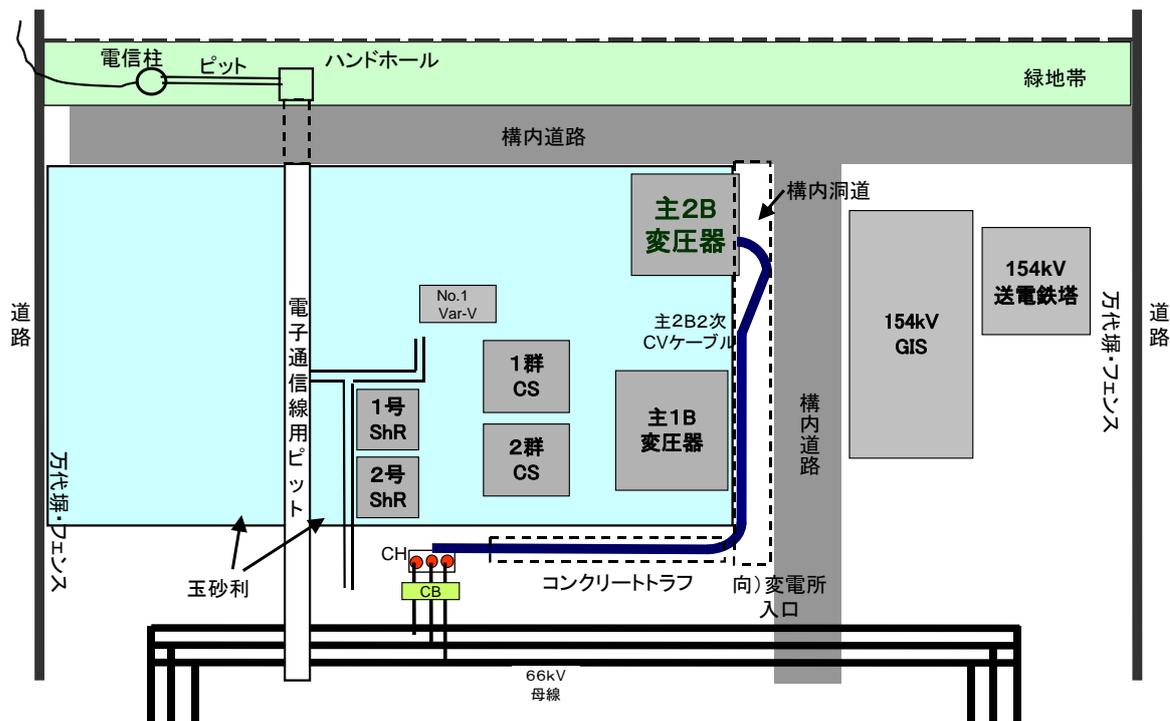


図 2.2.4-1 施工前概略図

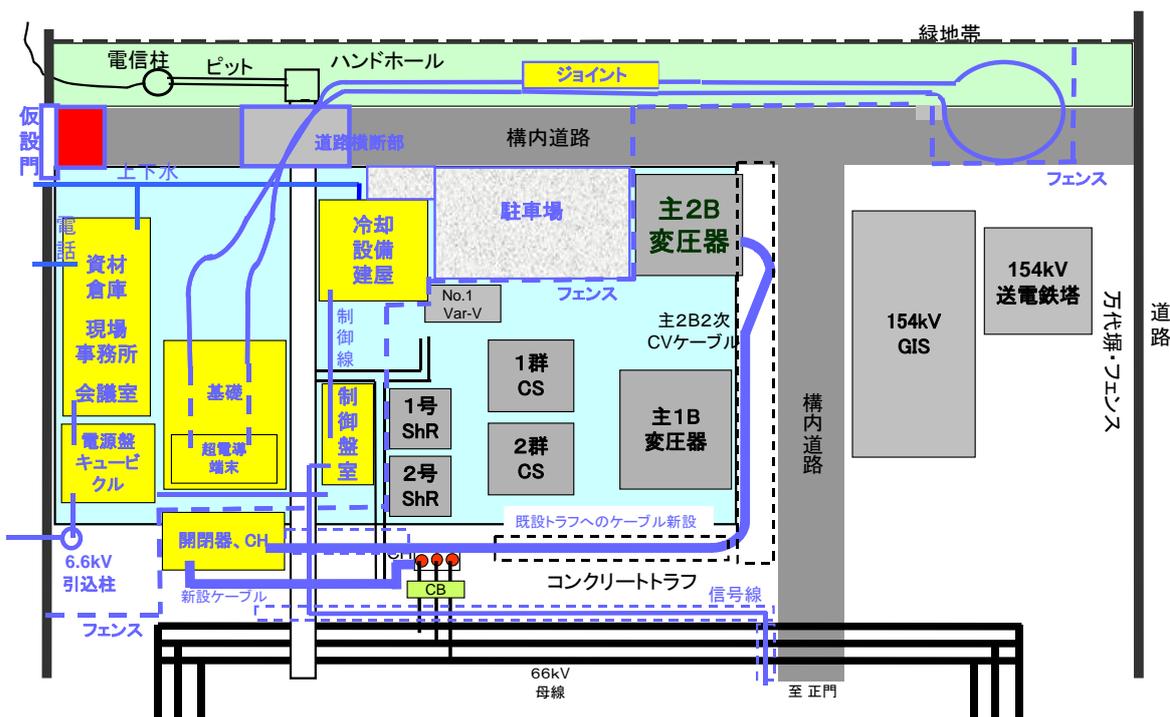


図 2. 2. 4-2 施工後概略図

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。

### (3)まとめ

設備レイアウトの検討は概ね終了しているが、実際の施工にあたり、どのように関連作業との協調をとり工事を進めていくかに充分留意する必要があるため、現在、東京電力内の関係箇所と工程調整を進めている。

表2.2.4-1に旭変電所における今後の工事予定を以下に示す。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を行なう予定である。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・据付を行なう予定である。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、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

統連系試験を迎える予定である。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、解体撤去を予定している。

表 2.2.4-1 旭変電所における今後の工事予定

項目	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												■				
<b>実系統連系試験</b>											■					
最終試験・冷却システム停止・昇温・撤去														■		
撤去・復旧														■		

## 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を検討を行なった。

- ・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、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する。

- ・実証ケーブルの建設については、現在、東京電力内の関係箇所と工程調整を進めている。

- ・建設手順について確認し、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の実施、平成22年度から現地での整地・基礎工事、各種建屋の建設、電源盤、冷却システム、開閉器等の据付、平成22年度末から超電導ケーブル用管路の据付け、超電導ケーブルの布設、端末、中間接続部などの組立、初期冷却や警報システムの構築等を行い、実系統連系試験を迎える予定である。

## 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。

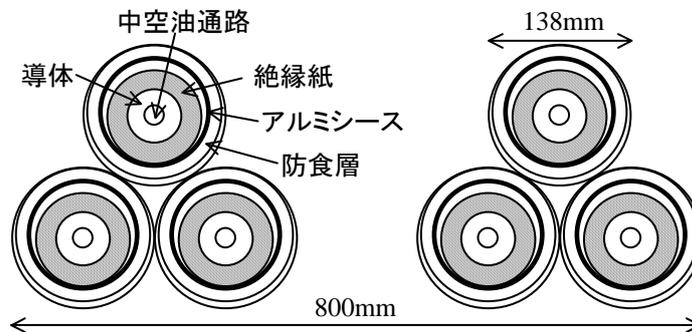


図 2.3.1-1 従来ケーブル (OF ケーブル) (275kV, 1000A, 2 回線)

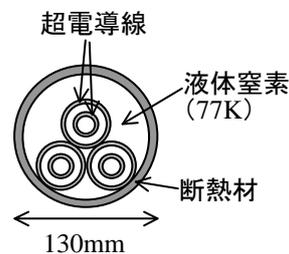


図 2.3.1-2 高温超電導ケーブル (66kV, 9000A, 1 回線)

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導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)	66kVCV	
電圧	V(V)	275	66	66
リアクタンス	X( $\Omega$ /km)	0.114	0.159	0.0165
	%X(%/km)	0.151	3.65	0.378
対地アドミタンス	Y( $\Omega^{-1}$ /km)	$1.19 \times 10^{-4}$	$7.54 \times 10^{-5}$	$1.53 \times 10^{-4}$
	%Y(%/km)	$9.02 \times 10^{-1}$	$3.28 \times 10^{-2}$	$6.65 \times 10^{-2}$
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66kVCV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66kVCV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275kVCV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、変圧器保護後備りレーである距離り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 2500 mm<sup>2</sup>）の数値も併記した（CV ケーブルは 100 m 長、超電導ケーブルは 300 m 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 0 Ω 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<sup>(1)</sup>。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<sup>(2)</sup>（以下 100 m 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 100 m 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 154/66 kV 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 100 m 長、超電導ケーブルは 300 m 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。

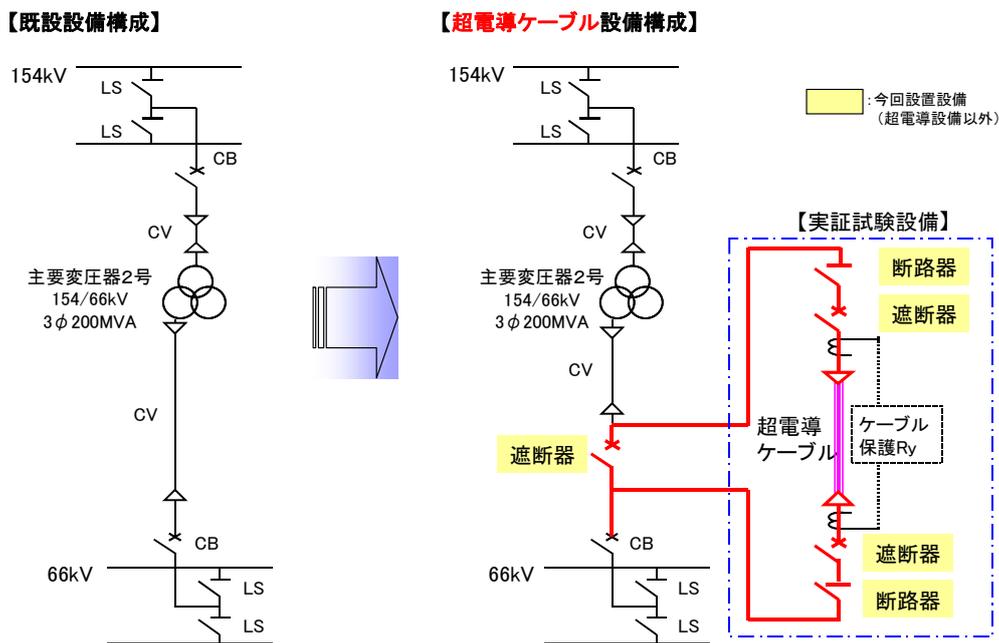


図 2.3.1-3 超電導ケーブル設備構成

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することを予定している。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。

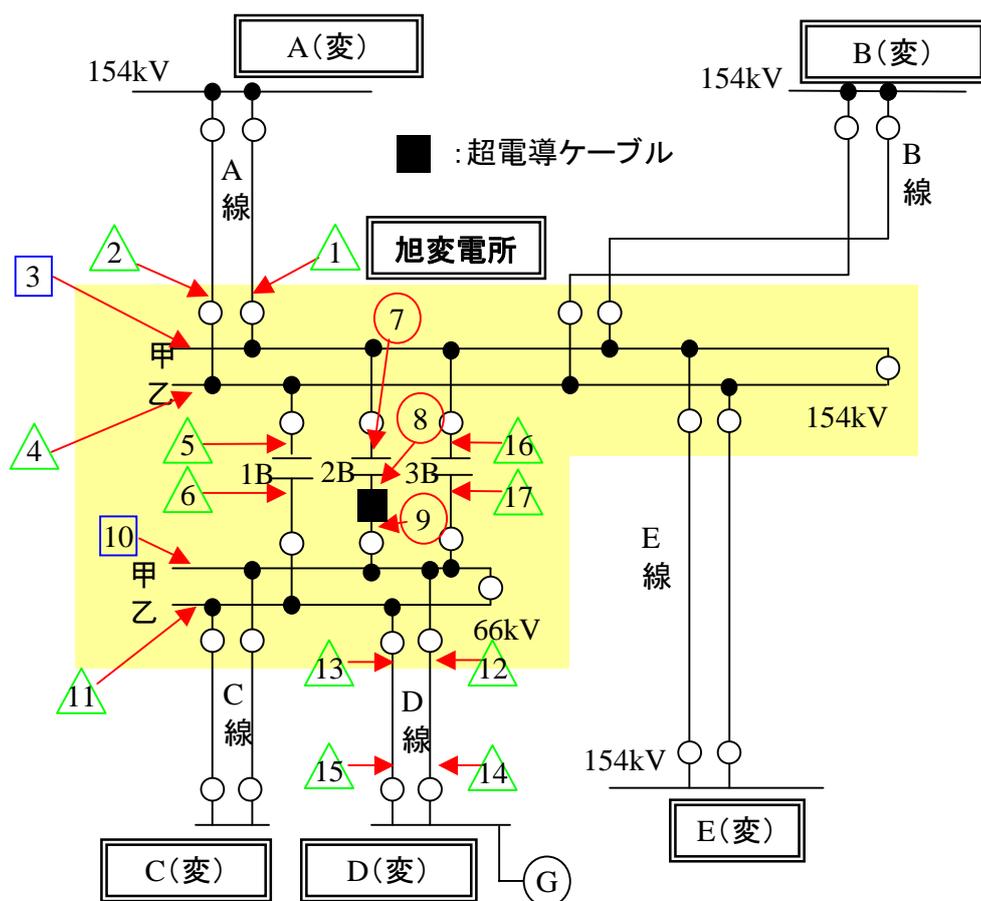


図 2.3.1-4 短絡電流計算に用いた系統図および事故パターン

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。



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  $\Delta T$  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  $\Delta T$  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  $\Delta T$  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。

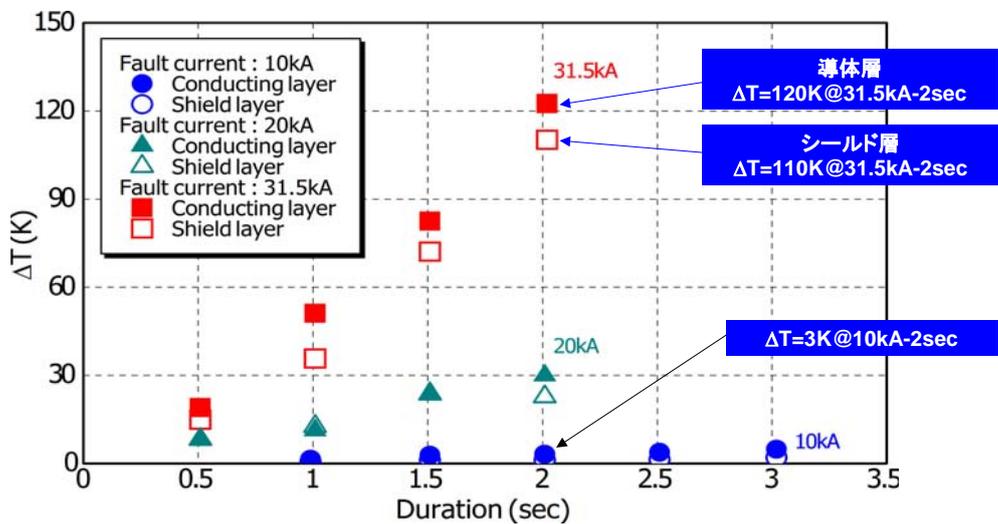


図 2.3.1-7 短絡試験結果

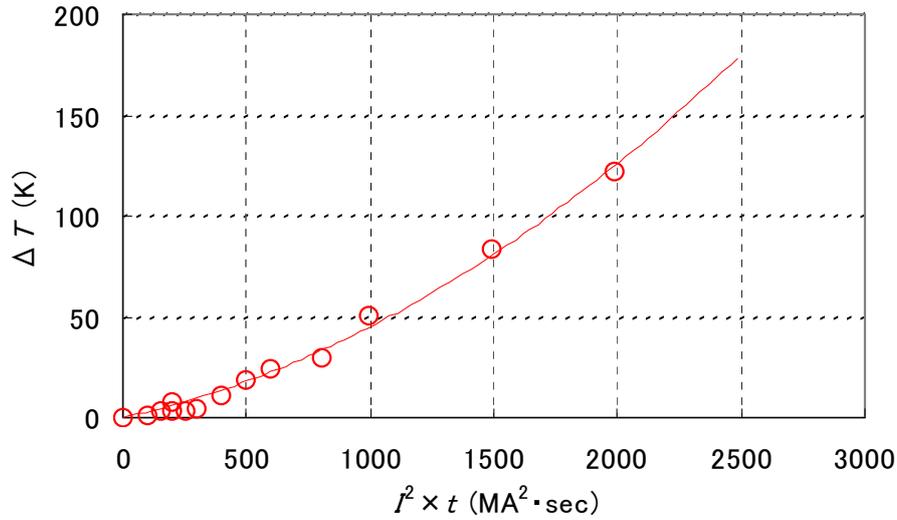


図 2.3.1-8 短絡電流通過時のケーブル温度上昇測定結果

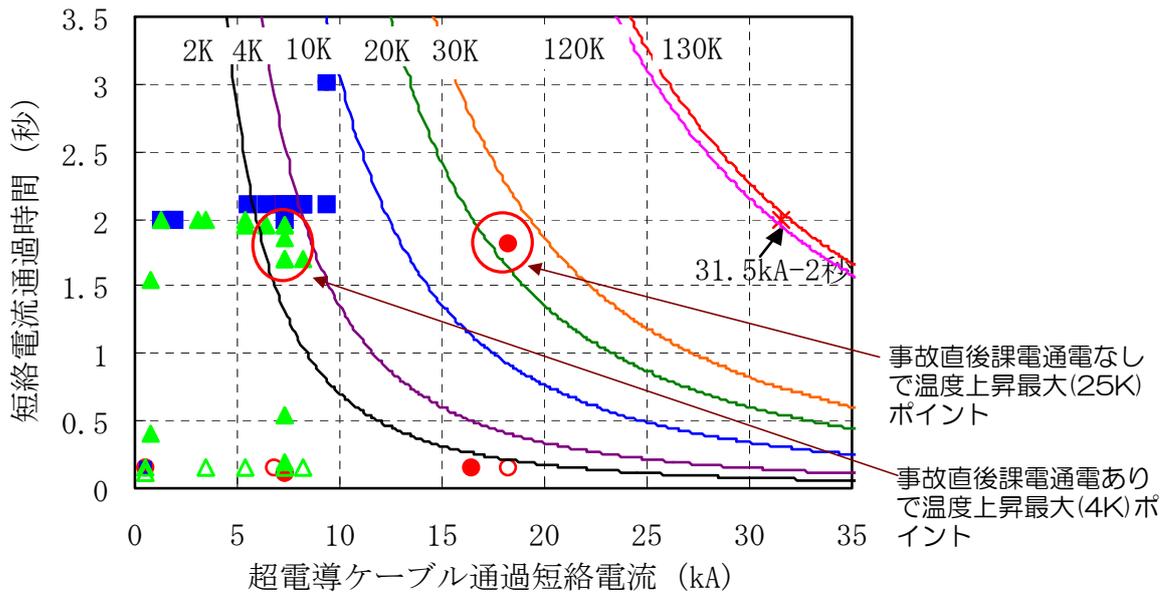


図 2.3.1-9 短絡電流計算結果と温度上昇予想曲線

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

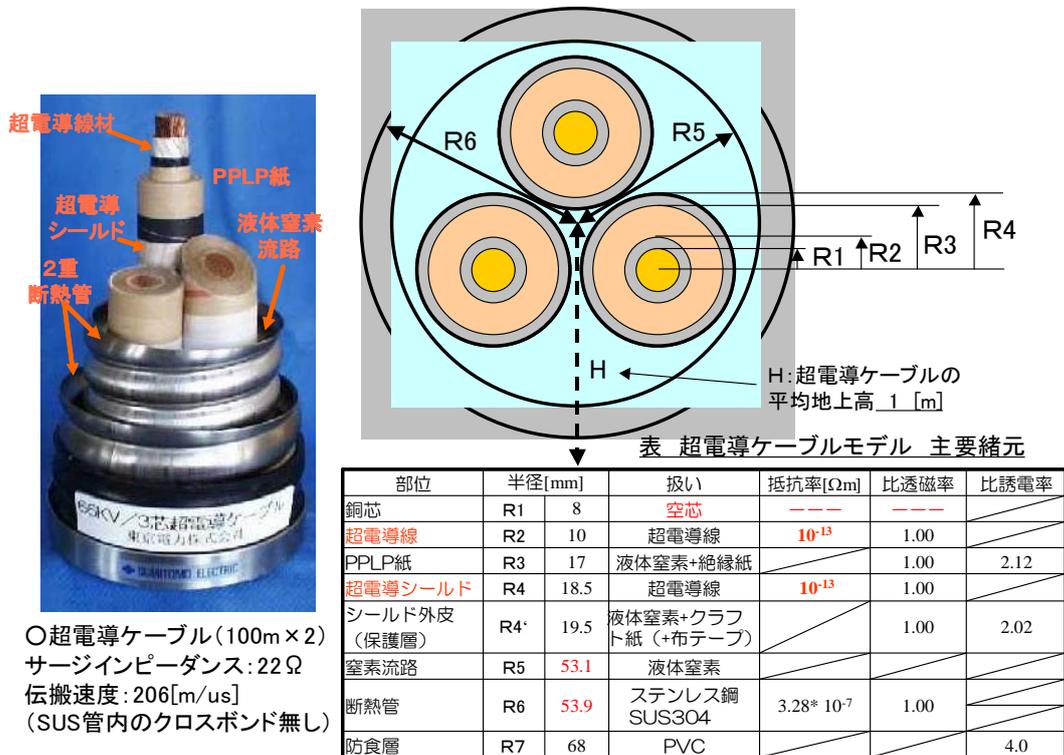


図 2.3.1-10 超電導ケーブルの主要諸元

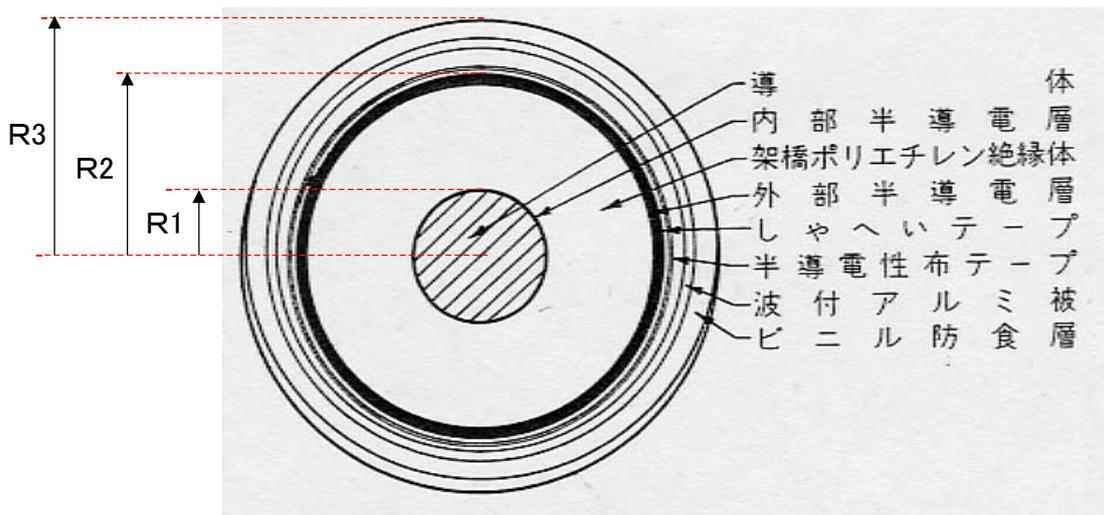


表 CVケーブル 主要諸元

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 2500mm<sup>2</sup>) 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。

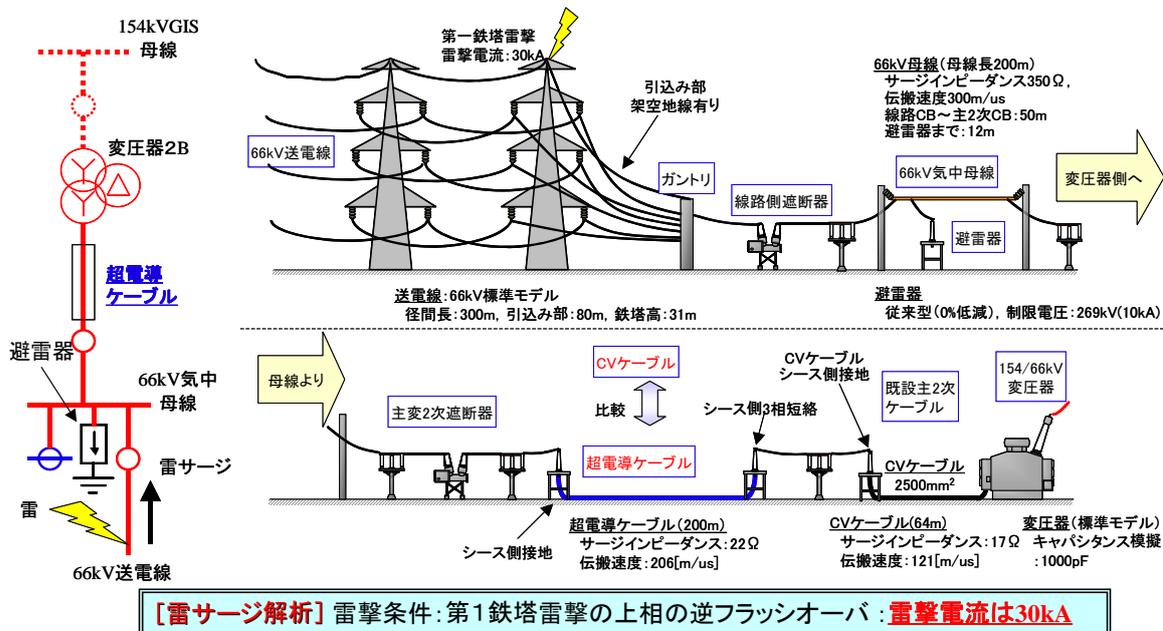


図 2.3.1-12 EMTP による超電導ケーブル雷サージ解析モデル

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。

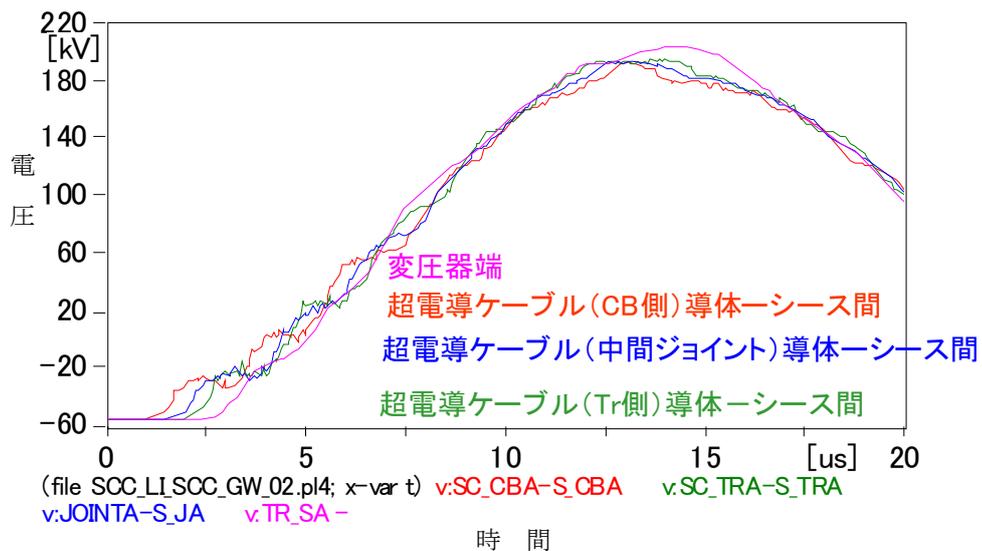


図 2.3.1-13 超電導ケーブルの雷サージ過電圧波形（第 1 波）

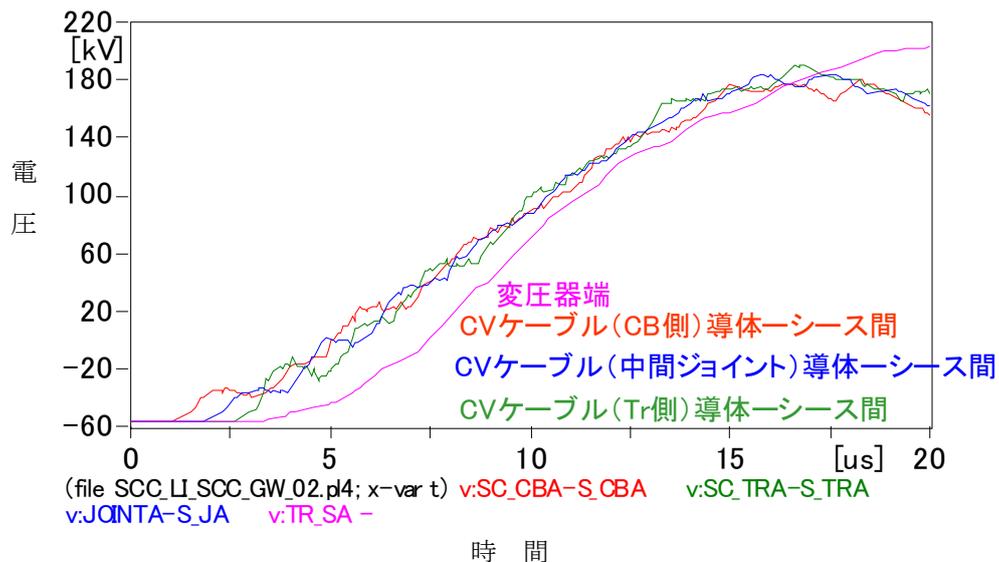


図 2.3.1-14 CV ケーブルの雷サージ過電圧波形（第 1 波）

図 2.3.1-15、図 2.3.1-16 は 300  $\mu$ 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  $\mu$ 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 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 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 m/ $\mu$ sec、CV ケーブルの場合 : 121 m/ $\mu$ 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  $\mu$ 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 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  $\mu$ sec 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。

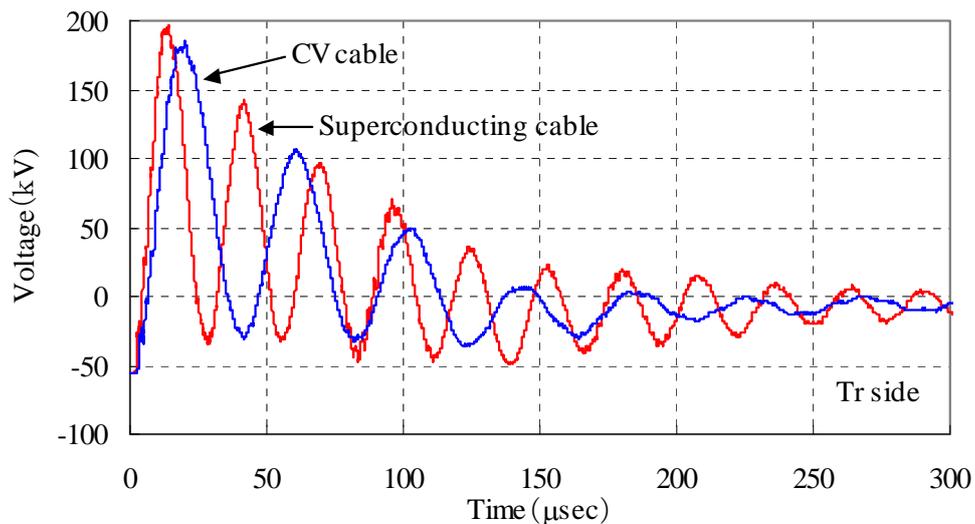


図 2.3.1-15 雷サージ電圧波形のケーブルによる相違

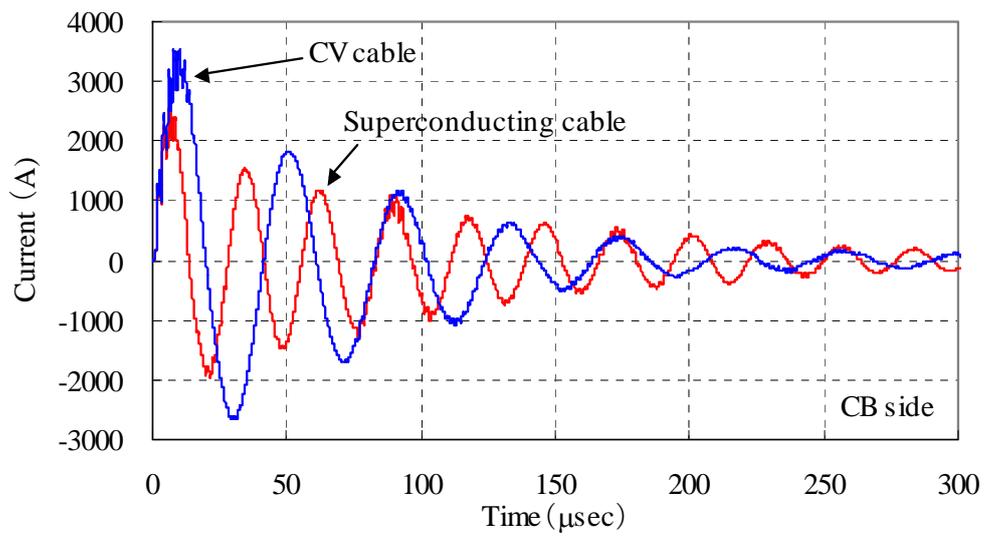


図 2.3.1-16 雷サージ電流波形のケーブルによる相違

(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。

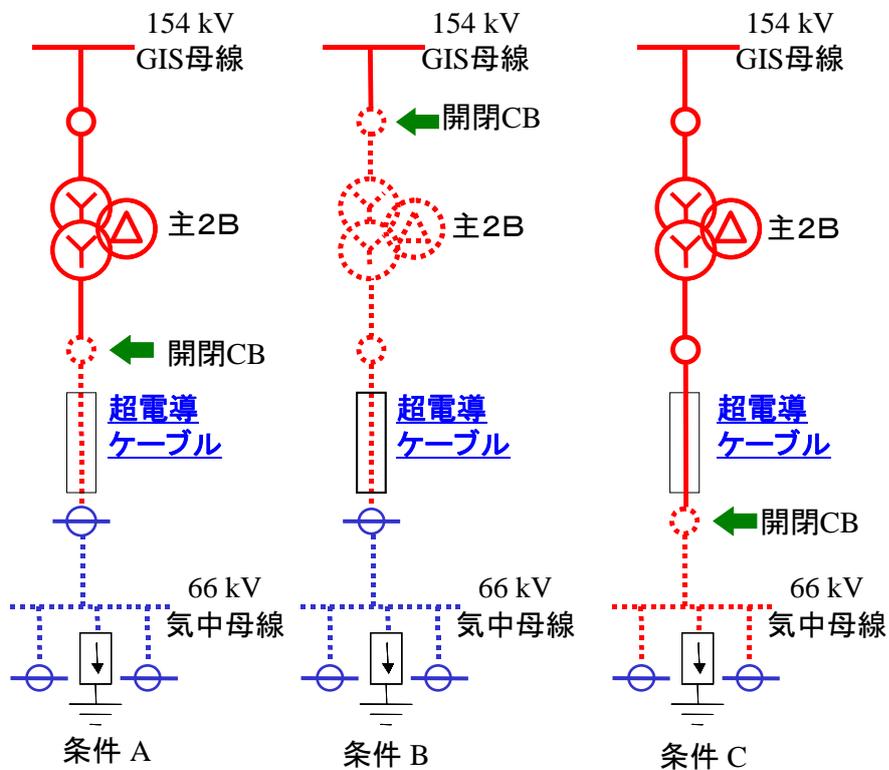


図 2.3.1-17 開閉サージ解析条件

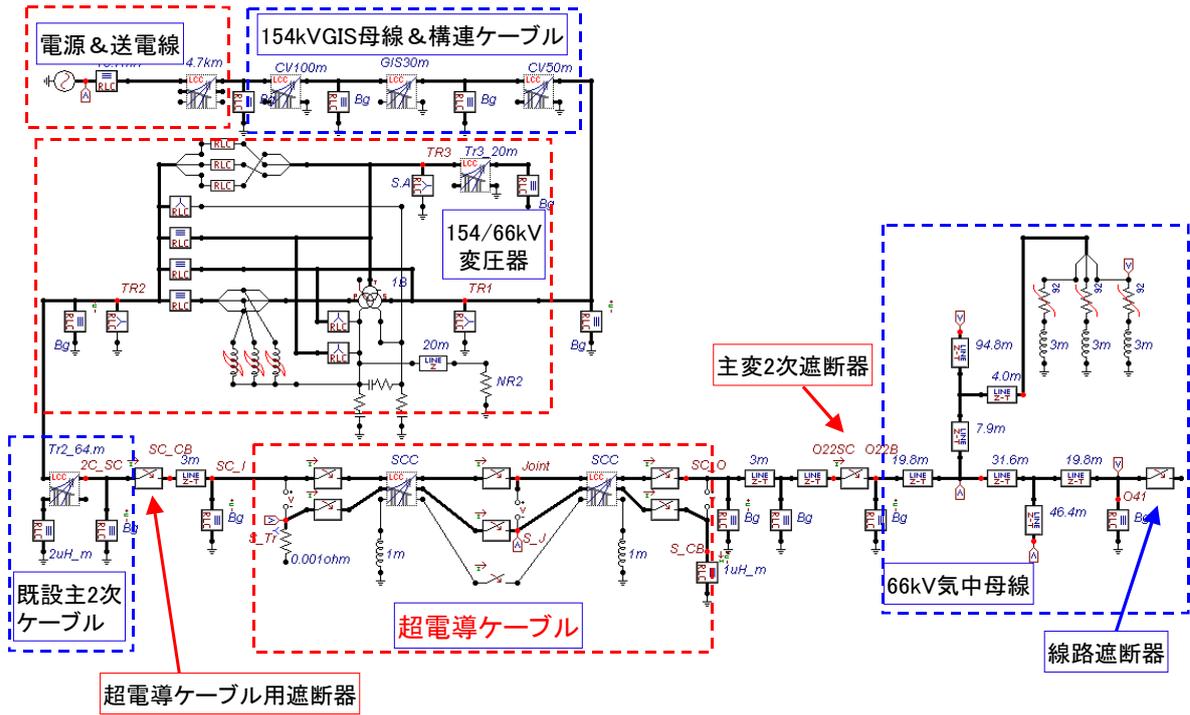


図 2.3.1-18 EMT Pによる超電導ケーブル開閉サージ解析モデル

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。

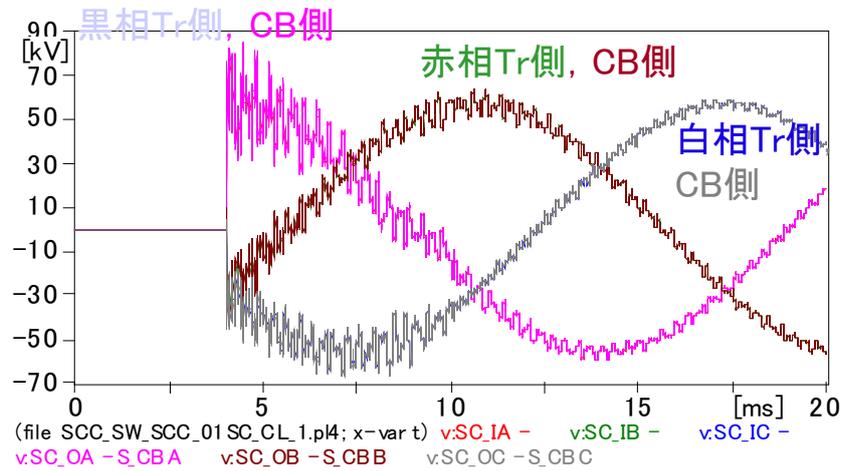


図 2.3.1-19 超電導ケーブル導体-シース間電圧 (条件 A)

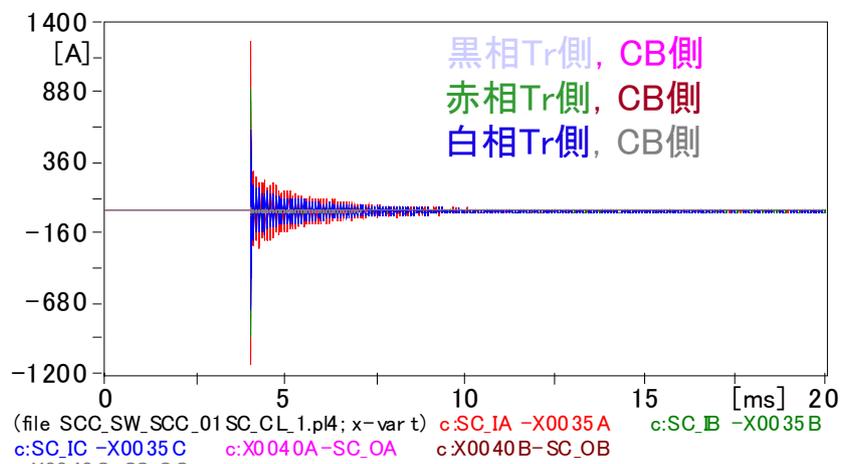


図 2.3.1-20 超電導ケーブル導体電流 (条件 A)

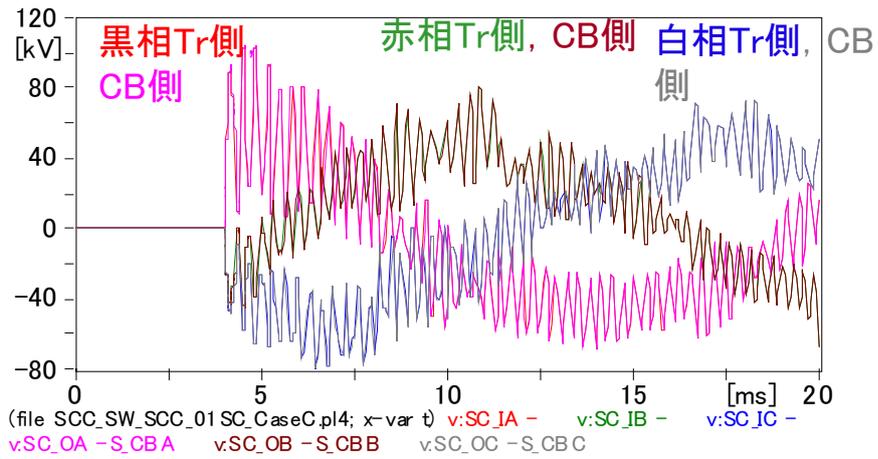


図 2. 3. 1-21 超電導ケーブル導体-シース間電圧 (条件 B)

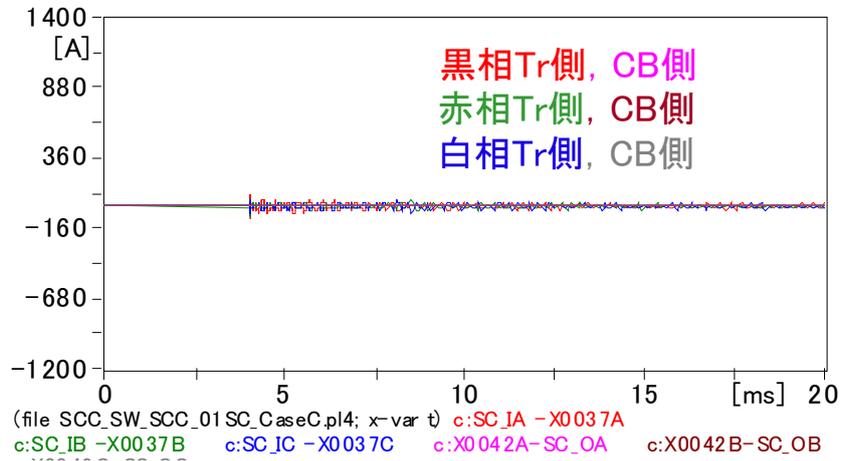


図 2. 3. 1-22 超電導ケーブル導体電流 (条件 B)

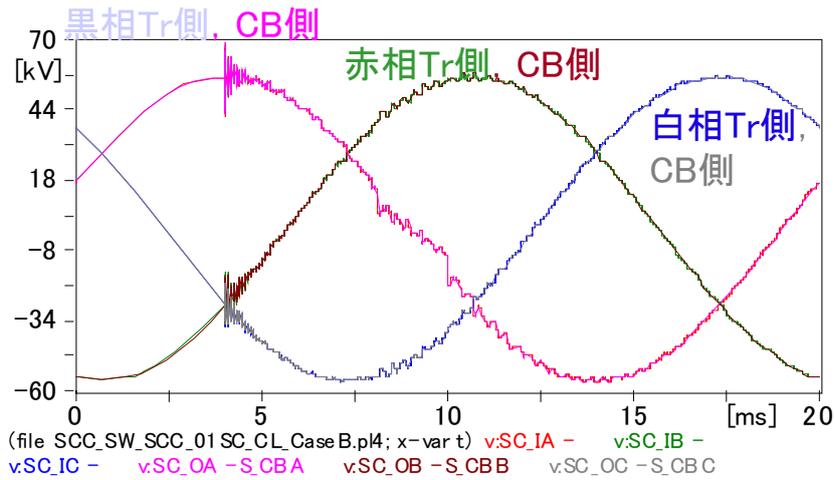


図 2.3.1-23 超電導ケーブル導体-シース間電圧 (条件 C)

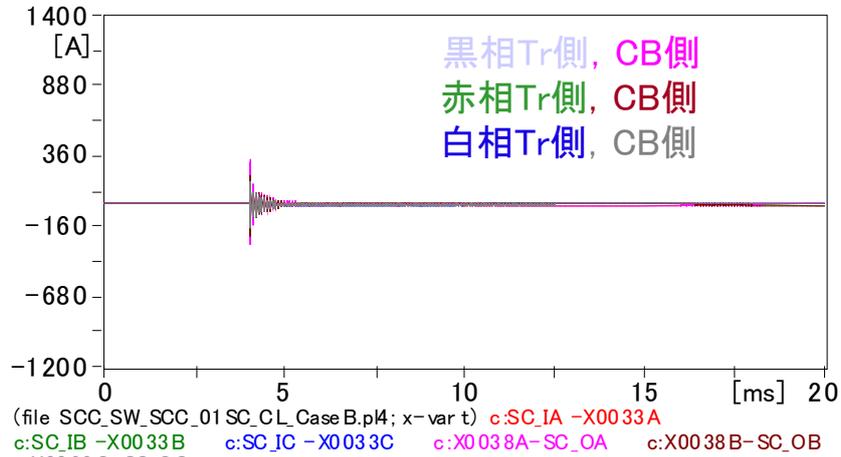


図 2.3.1-24 超電導ケーブル導体電流 (条件 C)

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 mm<sup>2</sup>) 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<sup>(3)</sup>。

## (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。今後、超電導ケーブルを長距離送電ケーブルとして適用した場合の FS を実施していく。

## 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をある範囲の中に冷却システムが維持している状態にある。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。

#### ●温度範囲：65～77K

最低温度は、液体窒素の固化温度 63.5K に対して裕度を設けて 65K 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 77K とする。尚、この最高温度については、実証ケーブルの設計が完了し臨界電流値が決まった時点で、妥当か否か見直すものとする。

#### ●圧力範囲：0.2MPaG～0.5MPaG

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、0.2MPaG 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 250m 級であることから、圧力損失は 0.15MPaG (@流量 40L/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 0.5MPaG と選んだ。

#### ●流量の選定

現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 0.2MPa、最大圧力 0.5MPa の制限より、圧力損失は 0.3MPa 以下にしたいことから、流量は 60L/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 10L/min では $\Delta=10K$  程度となり裕度はなく、流量は 10L/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、40L/min を選び以後の議論を進めていくこととする。尚、実証ケーブル構造、現地レイアウトの詳細が決まった段階で改めて圧力損失、温度差について計算しなおし、運転範囲の妥当性を確認するものとする。

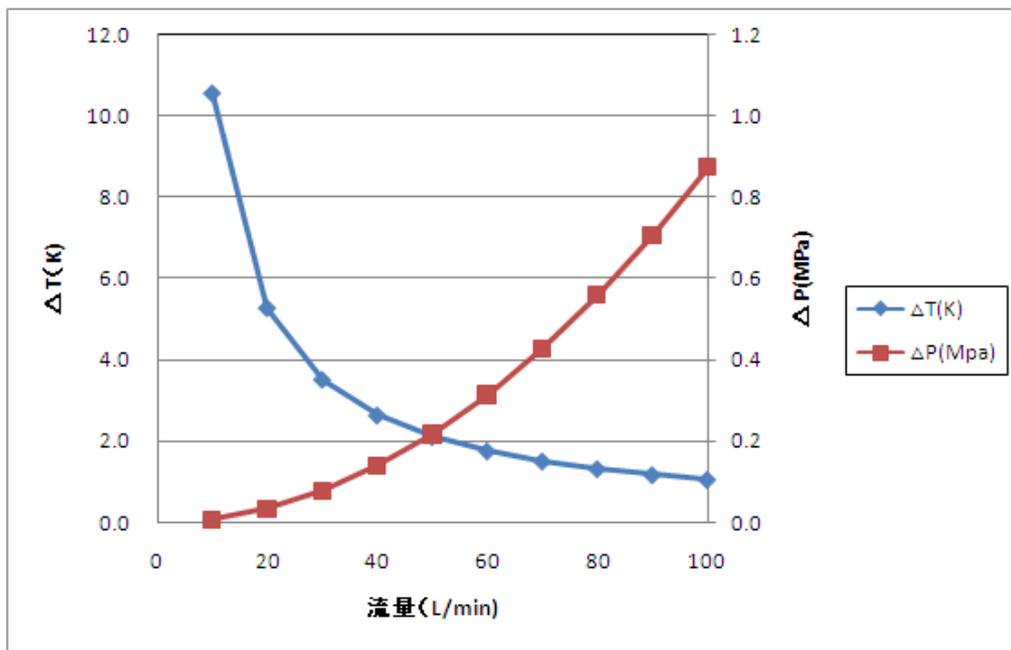


図 2.3.2-1 実証ケーブルの圧力損失と温度差の試算  
(熱損失 3kW、冷凍機 6 台直列の場合)

### 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<sup>2)</sup>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。

尚、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。このことから、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。尚、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 0.1K 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 運転を検討するとともに、インバータでの冷凍機出力調整も行えるようにする。

表 2.3.2-1. 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

### (3) 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、時定数が大きいと、たとえば急激にケーブル出口温度が上昇しても冷凍機出入口温度は変化がなく冷却能力を増加させると窒素の凝固点に近づくため今以上の冷凍能力の増大が難しく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0A~1kA)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。

### (4) 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0.5kA、最大で1kA、中間で0.75kA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300Kであることから、旭変電所にて想定される最高温度が308Kであること、および冷凍機出口温度を最初の想定温度77Kから67K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994W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。

### (5) 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67K、その制御変動幅を±1K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67K、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、66K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も熱負荷も含め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68K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。

表 2.3.2-2 超電導ケーブル熱負荷の算出

●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

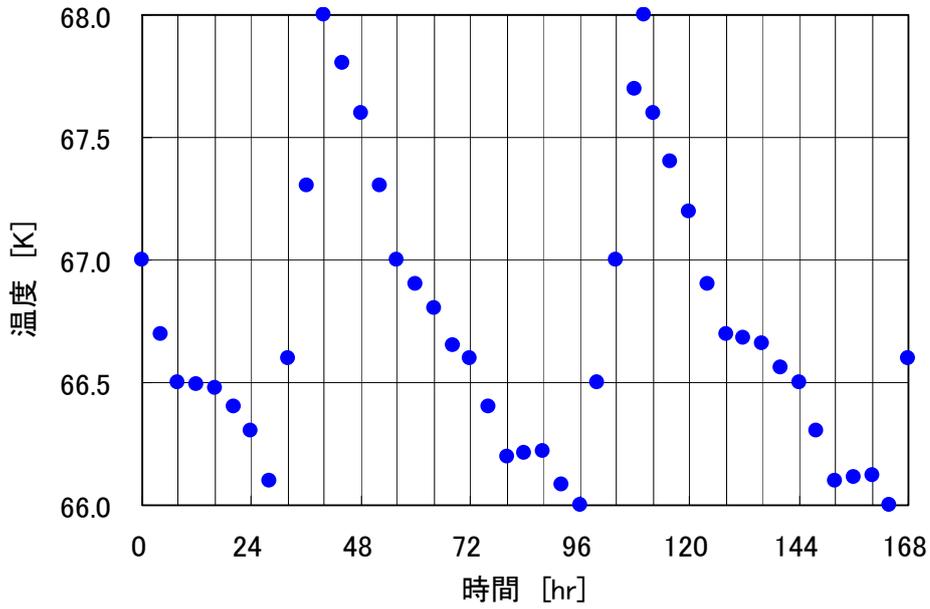


図 2.3.2-2 温度制御中の冷凍機発停回数の検討結果

#### 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の両方を検討し、圧力維持、制御に容易で経済的な手法を検討する。

以下、本節では、ヒータ加圧制御について検討し、30m ケーブル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。

検証用ケーブル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 200kPa に自動制御することを目標とし、液体窒素循環温度を 67K、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 200kPa を境に +4kPa、-3kPa 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。

今後の課題としては、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、などを確認する。

また冷却システムの熱負荷がガス加圧と比較すると約 100W 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) (67.8K, 40L/min) H21.8.4

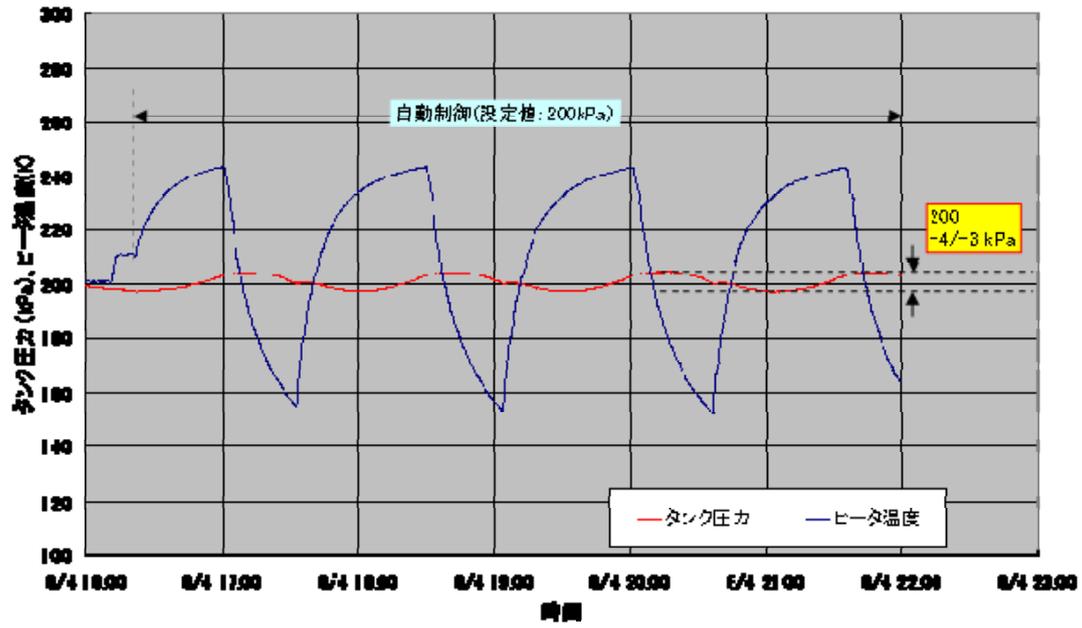


図 2.3.2-3 ヒータ加圧制御試験 (67K、40L/min)

### 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株式会社で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、実証試験で採用すべき冷却システム構成については、2.4.3節にて検討する。

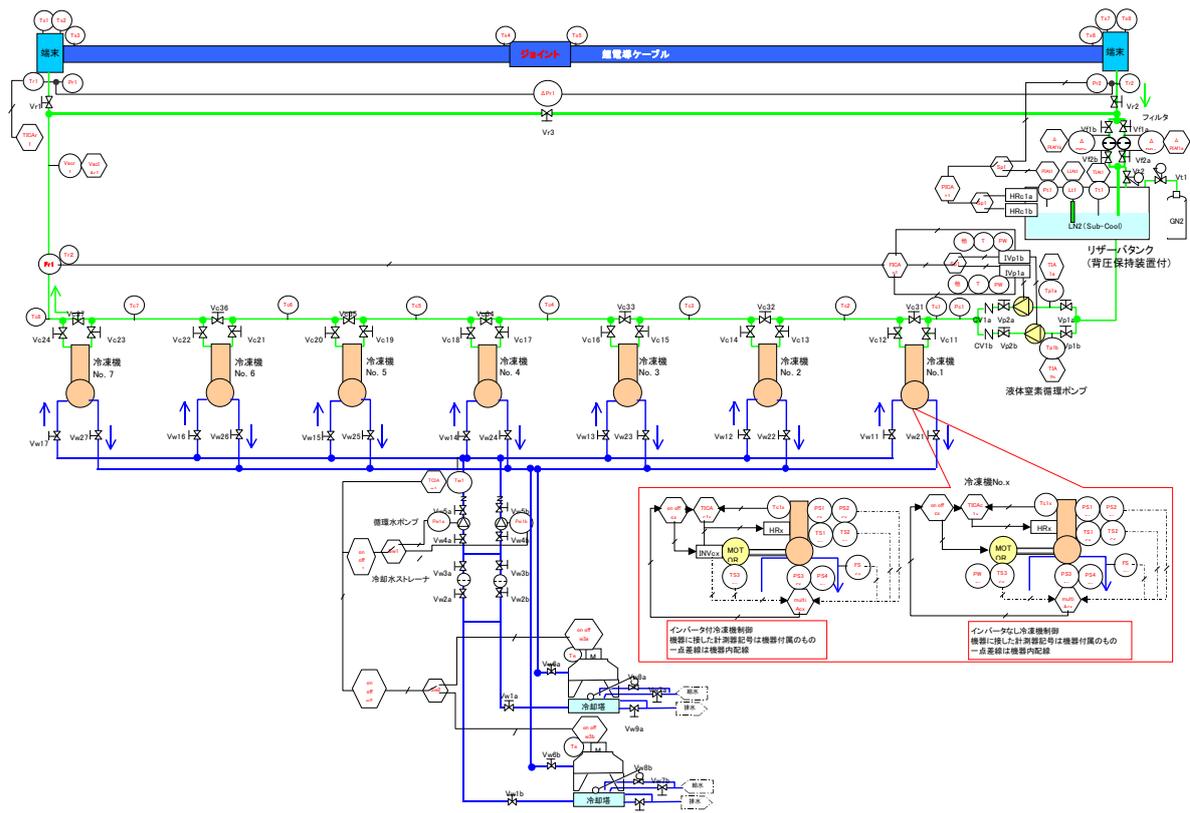


図 2.3.3-1 冷却システムモデル

図 2.3.3-1 の冷却システムのご概念としては加圧・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外に、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、インバーター、温度計、圧力計、流量計、液面計、PID制御用コントローラー、ヒーター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 を設置することを考えている。

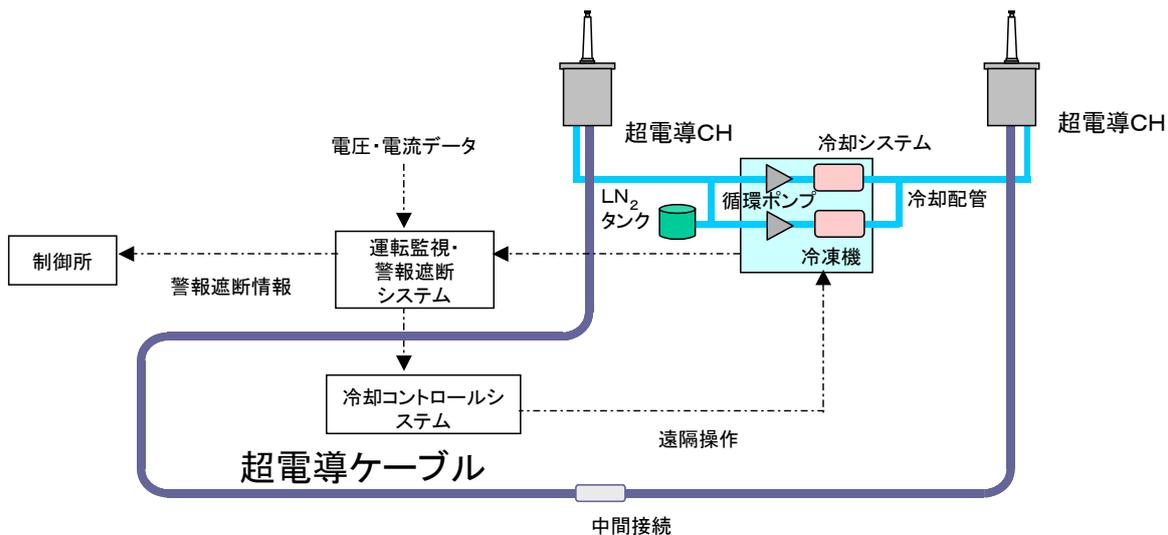


図 2.3.3-2 冷却システム運転監視制御概念図

### (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替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おり、現時点で、このような運転方法が採用可能かどうかを判断することが困難である。このため、現在実施中の30mケーブルシステムによる事前検証試験に引き続いて冷却システムの特性評価試験を実施し、この中で2台のポンプの最適運転方法について検討する予定である。

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稼働するため、液体窒素の固化に至ることはない。

なお、旭変電所での実証試験時には今後の検討により、自動制御について変更する可能性があるが、それぞれの自動制御について、旭変電所での実証試験までに冷却システムの特性評価試験の中で検証を行い、その制御性・有効性などの確認を行う予定である。

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、通常の冷却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を考えている。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とするのがよいと考えられる。

「重故障」警報を設定する異常状態としては、表 2.3.3-3 に示すような故障モードを想定している。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 <sub>2</sub> )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（高圧ガス）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、現段階では液体窒素の温度異常上昇により代替することを考

えている。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特性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について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。

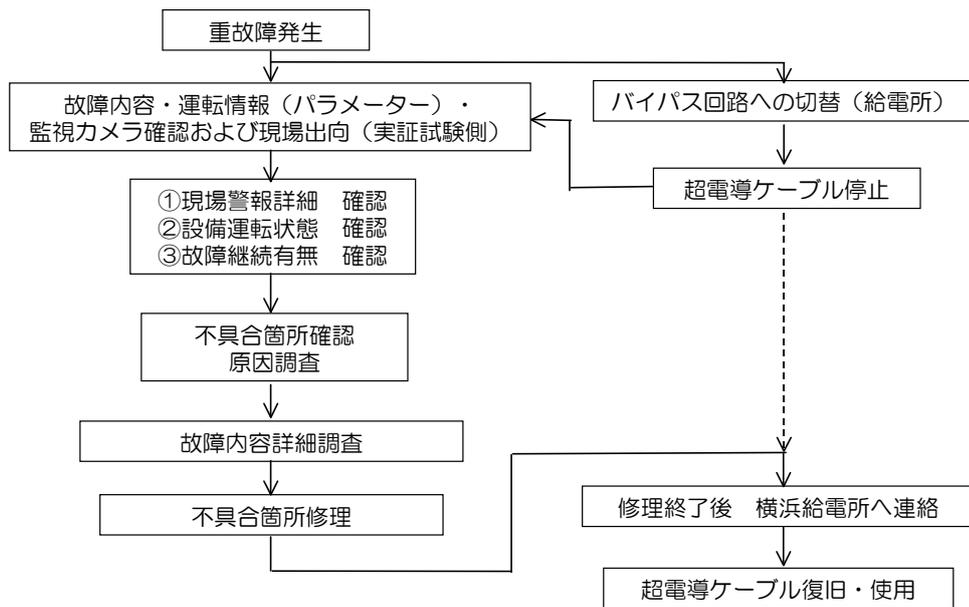


図 2.3.3-3 重故障発生時の対応フロー

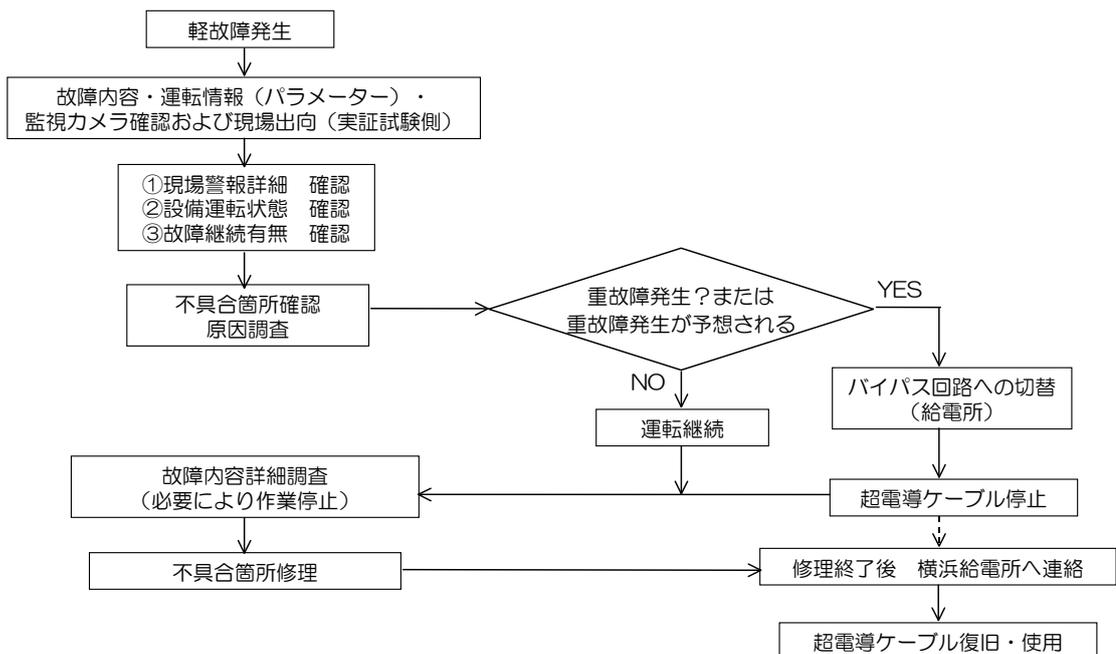


図 2.3.3-4 軽故障発生時の対応フロー

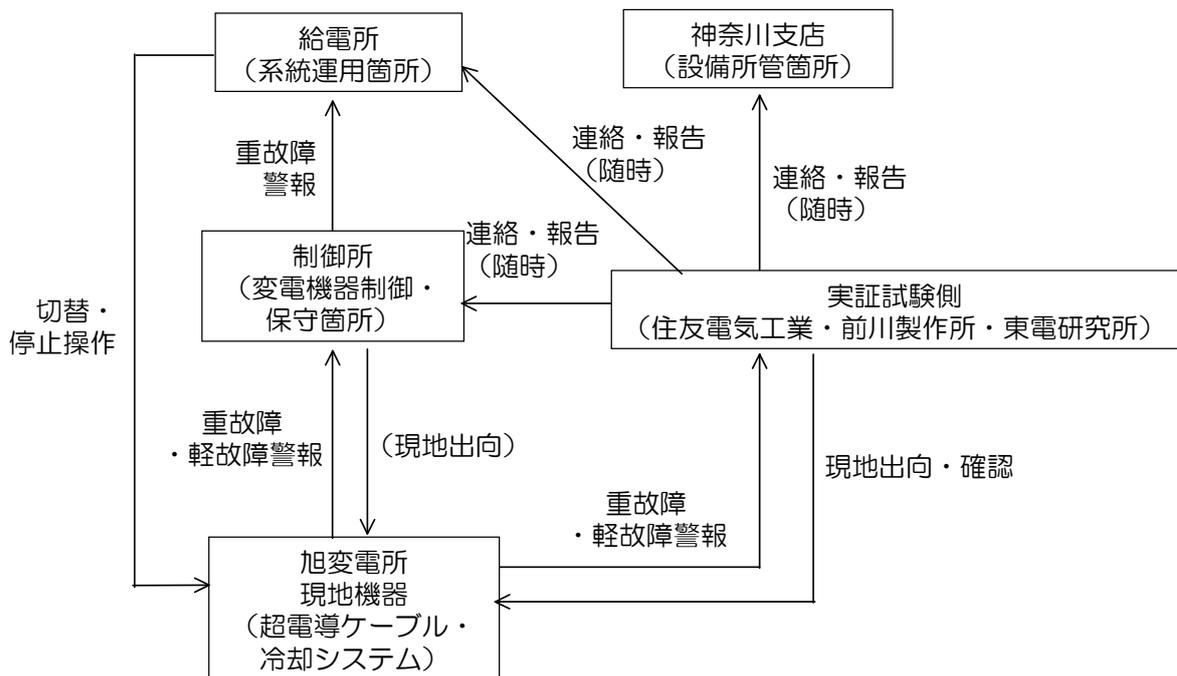


図 2.3.3-5 異常発生時の対応・連絡体制

「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替を行うとともに、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替はなく、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替を行うことを予定している。

異常モード検討に関しては、現在実施している 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つなげていくこととする。

## 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各構成要素毎に保守・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替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<sup>4)</sup>、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。その期間については、今後の研究で明確にしていく。

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ぐと共に、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 5,000 時間であり 1 年間(およそ 8760 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

循環ポンプの運転時間は 5,000 時間であり、5,000 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

### 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、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計算により判明した。
- ・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 運転を志向しており、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。
- ・圧力制御については、ヒータを用いた制御方法を試行しており、さらに実験を続けていく。

#### (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の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ルートに切り替えることとする。

#### (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、冷凍機、循環ポンプ、冷却水の冷却塔が定期的にメンテナンスが必要である。

## 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する。

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 <sub>c</sub> 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) $\sim (1/n)$ 、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) $\sim (1/n)$ :n=20短時間領域 k3: 負荷遮断時の電圧上昇係数=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 $\times K2' \times K3'=425kV$ LIWV=350kV (66kV級) K2': 温度係数1.1 (常温) K3': 裕度 1.1 回数: $\pm 3$ 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 @ $\pm 3$ 回
開発試験 長期課通電試験 (全長30m)	試験期間=30年/2 <sup>M</sup> $M = (\text{試験温度} - \text{基準温度}) / T$ 02~1.5年 試験電圧 (例) $= (30\text{年}/\text{試験期間}) \sim (1/n) \times Um / \sqrt{3} = 48kV$ 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 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 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 (K2')

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×1.1)

② 直流電圧 151.8 kV (系統最大電圧 69 kV×1.1×2)

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。

#### (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 30m ケーブルを用いた事前検証試験を推進している。

#### 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 OF 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 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究

### 2.5.1 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・整理を実施する。

#### (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項目に分類した上で 2.4.1 節表 2.4.1-1 の内容を現在抽出している。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い、2.1.4 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。

#### (3) 国際標準化に向けての推進体制

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に努めている。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を平成 19 年 5 月発足させた。アドホック委員会委員長に東大・大崎先生、委員として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としている。

#### (4) 標準化に向けた活動状況

標準化活動状況に関するスキームについて図 2.5.1-1 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 2.5.1-1 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の年次目標としては2012年を設定し、これ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った。TC20国際委員でも同様の意見があり、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。この内容については、以下のようにIEC TC20国際委員会にて承認されている。

「超電導ケーブル標準化については、数年前にCIGRE WGが存在していたこともあり、CIGRE WGを再度設立すべきかを判断するタスクフォース（以下TFと略）を立ち上げ、TF検討結果により今後の進め方を定める」

TF 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カ国で構成され、議長は米国サウスワイヤー社Lindsay氏、Secretaryに住友電工磯嶋氏と決定した。タスクフォースの期間は平成20年10月から1年間と設定された。

この決定に則し、アドホック委員会では、日本CIGRE委員会国内委員を通じてTFを支援が可能なようサポートを行う体制を整備し、さらに日本CIGRE国内委員会の委員長であるJPS片貝氏に適宜アドホック委員会出席を依頼し、タイムリーな情報交換を実施した。TFへの情報提供としては、議長より日本国内での超電導ケーブル試験法実績報告が求められたため、Super-ACE500mケーブル、住友電工/東京電力100m実証試験、米国オーバニープロジェクト、横浜プロジェクトでの試

験内容について情報提供を実施した。これらを元に作成されたこれまでの高温超電導ケーブル試験内容については表 2.5.1-1、2 に示す。

平成 21 年 9 月 CIGRE SC-B1 定例会議（於：ポーランド）において TF の検討結果を受けて WG 発足が承認された。期間は 3 年間と設定され、今後の標準化作業はこの WG 実施内容を中心に推進していくこととなる。

表 2.5.1-1 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	•	•	•	•	•	•
<b>Factory - Sample Tests</b>						
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 2.5.1-2 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-Ic	•			•	•	•
AC voltage		•		•	•	•
PD		•		•		•
visual inspection	•	•		•	•	•
pressure test	•	•		•	•	•
vacuum leak check	•	•		•		•
pressure drop	•	•		•	•	•
cryostat - heat leak	•	•		•	•	•

(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。

今後は CIGRE WG の作業を中心に標準化作業を順次推進する。

## 2.5.2 高温超電導ケーブルの適用技術研究

超電導ケーブルを電力ネットワークに適用する場合、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 2.5.2-1 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 F S (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 2.5.2-1 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 (中間接続部、終端接続部)
	冷却システム
	計測、警報システム
送電線路の建設コスト	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いる。

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。尚、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  $\eta$  を考慮して式 2.5.2-1 で計算される。

$$\text{送電損失} = (Q_{ac} + Q_e + Q_h + Q_a + Q_c) / \eta \text{ ----- (2.5.2-1)}$$

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 2.5.2-2 に運転コストの項目リストを示す。

表 2.5.2-2 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

尚、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、CO<sub>2</sub> 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 2.5.2-2 に示す。

$$\text{低減効果} = \Delta W \times E \times F \text{ ----- (2.5.2-2)}$$

$\Delta W$  : 送電損失の常電導との差

$E$  : 単位電力量あたりの CO<sub>2</sub> 排出量

$F$  : 単位 CO<sub>2</sub> 重量あたりの、CO<sub>2</sub> 排出権取引量

### (3) まとめ

- ・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。
- ・今後、各部の開発状況、最新の情報を収集し、超電導ケーブル適用について F S を実施し、経済性の比較を検討していく。

### 2.5.3 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。

旭変電所での超電導ケーブルの実証試験を行うにあたり、対応すべきと考えられる関連法規は以下のとおりである。

- ・ 電気事業法（施行規則を含む）
- ・ 高圧ガス保安法
- ・ 消防法
- ・ 道路法
- ・ 道路交通法
- ・ 建築基準法
- ・ 労働安全衛生法
- ・ 騒音・振動規制法

現段階では、完全に法規類調査が終了していないが、許可・届出あるいは申請等手続きが必要と考えられるものについて以下に記す。

#### i) 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結論を得た。

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ている。

## ii) 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1年以上設置する必要があることから、工事着工前に県庁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。

## iii) 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ている。

## iv) 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うこととしている。

【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

## v) その他

消防法・労働安全衛生法に関しては、現在調査中であるが、届出等の対象となる可能性があるものは以下のとおり。今後さらに調査を行った上で必要な処理を行うものとする。

【消防法】 所轄消防署への提出

- ・ 特別高圧変電設備、蓄電池設備の設置届
- ・ 防火対策物使用開始届

【労働安全衛生法】 所轄労働基準監督署への提出

- ・ 第1種圧力容器設置届

### (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た。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ている。

## IV. 実用化・事業化の見通しについて

### 1. 実用化・事業化の見通し

#### (1) 電力事業を取り巻く環境

地球温暖化対策としてのCO<sub>2</sub>排出量の削減は、電力事業者にとっても喫緊の課題である。例えば東京電力では、CO<sub>2</sub>排出源単位を2008～12年度の5年間平均で1990年度比20%削減という自主目標を掲げている。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などを進めている。一方で流通設備を見ると送配電ロスも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、東京電力では販売電力量が年平均で1%程度増加していくと想定している。この想定に基づき今後の電源新設計画を立てており、平成28年度までに原子力発電所では大間、福島第1の7,8号機、東通1号で計約550万kWを、火力発電所では富津4号、川崎1,2号などで計約360万kW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、新たな流通設備形成が必要である。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ケーブル系統の拡充や、東京湾岸火力からの電力を送電するケーブル系統の新・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ケーブル系統の回線延長は約240kmあり、また30年以上経過したOFケーブル系統の回線延長は約530kmにおよんでいる。

超電導ケーブル技術は、上記のすべて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) 超電導ケーブルの適用例と適用効果

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「都内導入系統」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系の都内導入系統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、CO<sub>2</sub>削減が可能となる。

別の適用例は経年化した既存 OF 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 OF 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 CO<sub>2</sub>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。

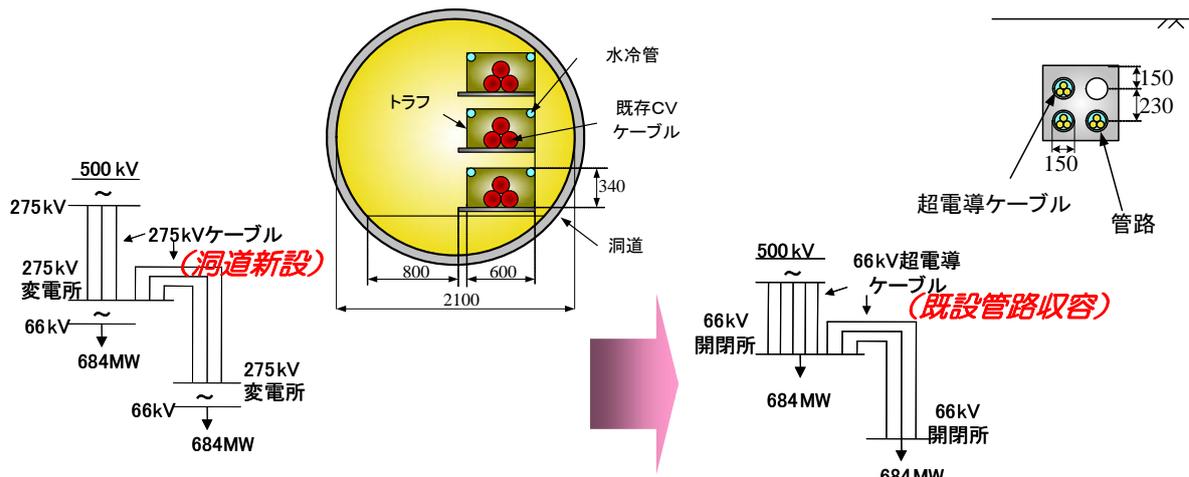


図 1-1 既存ケーブルと超電導ケーブルでの系統構成比較とサイズ比較  
(都内導入系統)

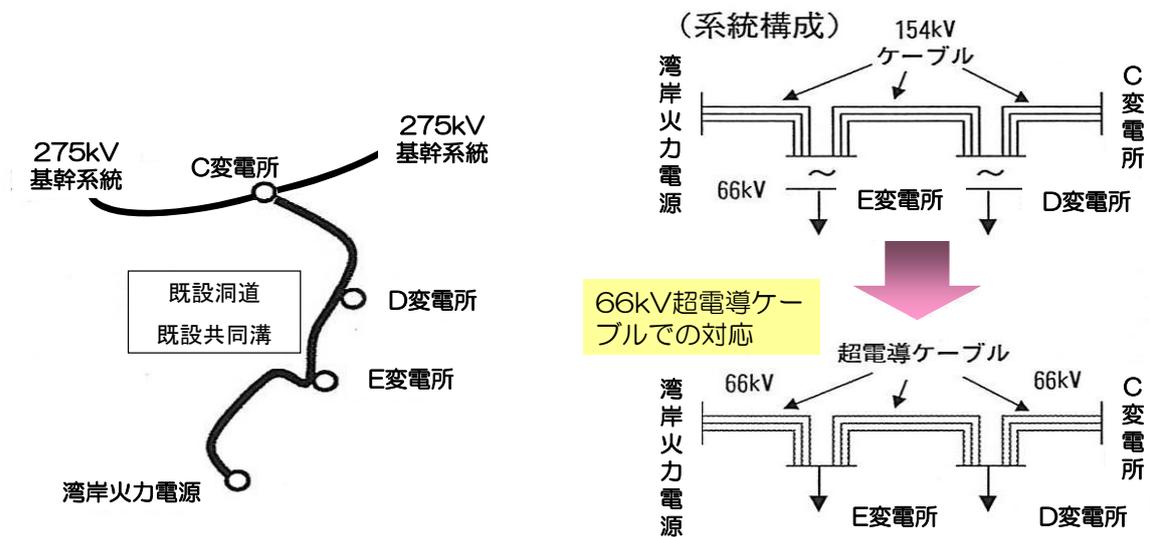


図 1-2 湾岸火力電源からの送電系統のリプレースへの超電導ケーブルの適用例

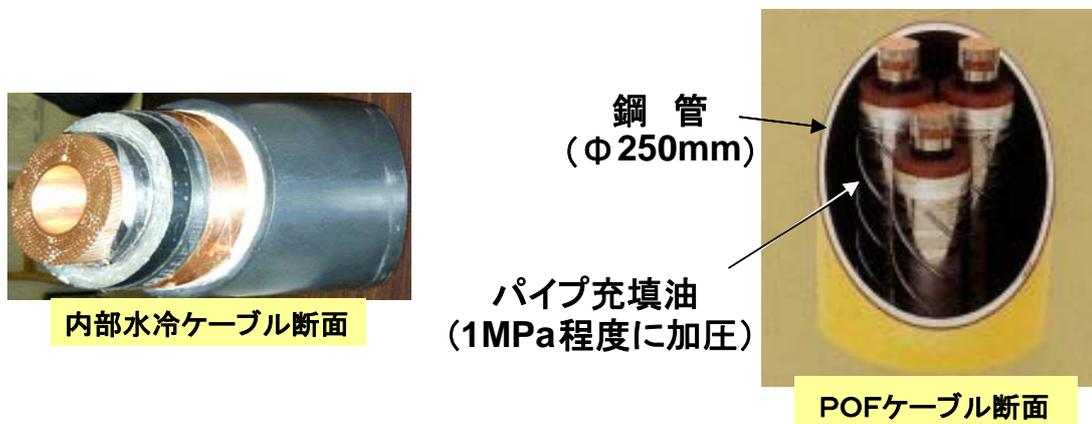


図 1-3 内部水冷ケーブルと POF ケーブルの断面写真

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CO<sub>2</sub>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は既存CVケーブル系統新設コストと、超電導ケーブル系統新設コストを比較したものである。既存ケーブル系統の場合、洞道新設の影響で、1kmあたり11億円程度の建設費が見込まれるが、超電導ケーブルの場合、線材コストの低減や冷却システムコストの低減が進めば、管路新設コストを含めても、1kmあたり4億円程度で建設できると期待されている。

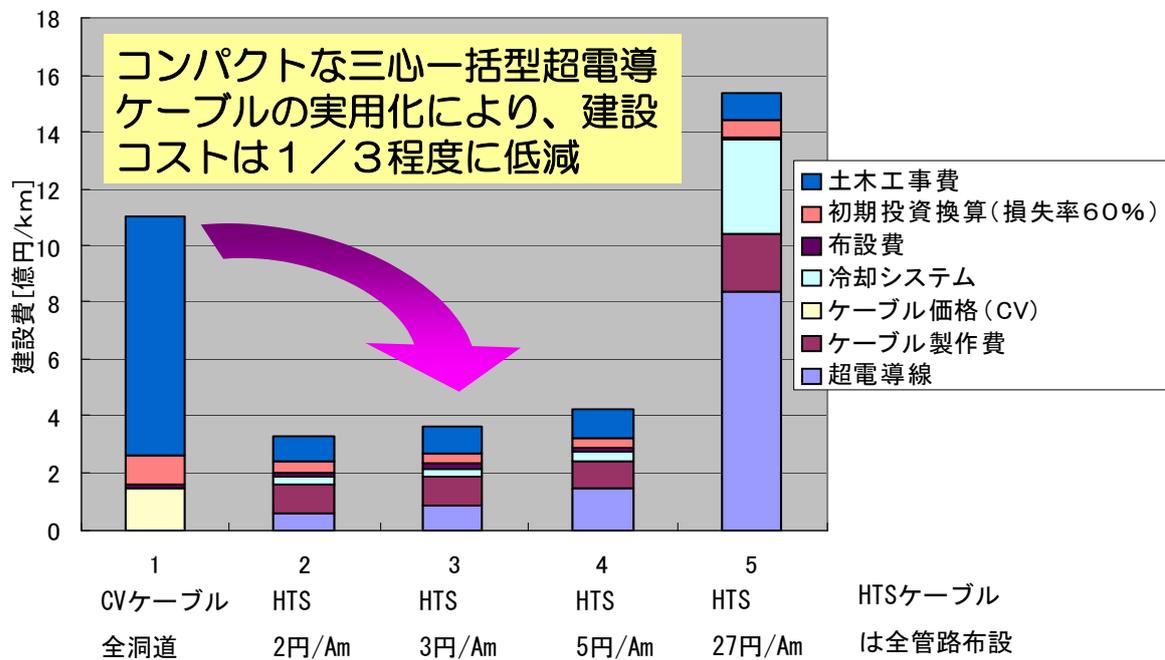


図1-4 既存CVケーブル系統新設時と超電導ケーブル系統新設時のコスト比較 (超電導ケーブルコストは、将来の線材単価(円/Am)毎に算出)

### (3) 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。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CO<sub>2</sub>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。

### (4) 実用化までのシナリオ

高温超電導ケーブルシステムの実用化に向けては、以下のような展開が考えられる。

- 1) 本技術開発により、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が実証できる。併せて運転技術や保守・メンテナンスといった、電力機器に求められる運用技術が確立される。
- 2) 本技術開発終了後、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とともに、冷却システム系の高効率化・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、冷却システムの高効率化による COP の向上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が進展することを前提としている。前期の超電導ケーブル実用化時のコストダウン効果を実現させるためにも、

- 3) 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系統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、一企業の努力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くことになる。
- 4) 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システムへの導入が順次進められる。

## 2. 今後の展開

平成 21 年度の研究開発により、30m ケーブルを用いた事前検証試験中で、年度内に完了する予定である。この試験では、超電導ケーブルの製造技術検証と性能検証を主眼においている。このため冷却システムについては、1 ポンプ+2 冷凍機の直列運転という、極めてベーシックな構成としている。旭変電所での実証試験では複数台のポンプと複数台の冷凍機を用いた運転が必要で、このような複数台運転技術については過去の超電導ケーブルプロジェクトにおいても実施したことがない。このため、旭変電所での実証試験までの間に、この全く新しい冷却システム系の運転特性についての検証を予定している。

実証ケーブルについては、必要線材を製造中で、Type-HT 線材 60km、Type-AC 線材 45km を平成 21 年度中に製造完了に予定である。その後、平成 22 年度にケーブル化、出荷試験、ジョイント、端末の製造を行い、平成 23 年度前半に、現地ケーブル布設、機器組立を実施し、竣工試験を経て、平成 23 年度後半から実系統運転に入る予定である。旭変電所において、1 年間に亘る長期実証試験を実施するとともに、試験終了後は超電導ケーブルシステムの残存性能検証を実施する。

これらの超電導ケーブル実証試験が完了した後、超電導ケーブルシステムの高性能化・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、導入箇所を順次拡大していく。

事業化が軌道に乗るまでのロードマップは表 2-1 のようになると予想している。

表 2-1 超電導技術分野の導入シナリオ

