

「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」

事業原簿【公開】

| | |
|------|--|
| 担当部室 | 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー技術開発部 |
|------|--|

高温超電導ケーブル実証プロジェクト事業原簿

～目次～

事業原簿概要

用語集

I. 事業の位置づけ・必要性について

- 1. N E D O の関与の必要性・制度への適合性 I -1
 - 1.1 N E D O が関与する事の意義 I -1
 - 1.2 実施の効果 I -2
- 2. 事業の背景・目的・位置づけ I -4

II. 研究開発マネジメントについて

- 1. 事業の目標 II -1
 - 1.1 研究開発目標 II -1
 - 1.2 研究項目毎の目標 II -2
- 2. 事業の計画内容 II -7
 - 2.1 研究開発の計画内容 II -7
 - 2.2 研究開発スケジュールと予算 II -17
 - 2.3 研究開発の実施体制 II -18
 - 2.4 研究の運営管理 II -20
- 3. 情勢変化への対応 II -22
- 4. 海外における高温超電導ケーブルの開発動向 II -24

III. 研究開発成果について

- 1. 事業全体の成果 III -1
 - 1.1 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証 III -1
 - 1.2 トータルシステム等の開発 III -5
 - 1.3 送電システム運転技術の開発 III -6
 - 1.4 実系統における総合的な信頼性の検証 III -7
 - 1.5 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究 III -8
- 2. 研究開発項目毎の成果 III -12
 - 2.1 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証 III -12
 - 2.1.1 低交流損失超電導導体の性能検証 III -12
 - 2.1.2 短絡電流に対する応超電導導体の性能検証 III -27
 - 2.1.3 中間接続部の検討 III -38

| | | |
|-------|-----------------------|-------|
| 2.1.4 | 終端接続部の検討 | Ⅲ-53 |
| 2.1.5 | 検証用ケーブルシステムの構築と評価 | Ⅲ-70 |
| 2.2 | トータルシステム等の開発 | Ⅲ-103 |
| 2.2.1 | 実証ケーブルシステムの基本構成と仕様の検討 | Ⅲ-103 |
| 2.2.2 | 実証ケーブルシステムの付帯機器の検討 | Ⅲ-110 |
| 2.2.3 | 冷却システムの設計検討 | Ⅲ-116 |
| 2.2.4 | 実証ケーブルシステムの建設方法の検討 | Ⅲ-126 |
| 2.2.5 | まとめ | Ⅲ-129 |
| 2.3 | 送電システム運転技術の開発 | Ⅲ-130 |
| 2.3.1 | 実証場所での系統特性調査 | Ⅲ-130 |
| 2.3.2 | 平常時の運転技術開発 | Ⅲ-153 |
| 2.3.3 | 事故時の運転技術開発 | Ⅲ-161 |
| 2.3.4 | 保守・メンテナンス技術の開発 | Ⅲ-169 |
| 2.3.5 | まとめ | Ⅲ-172 |
| 2.4 | 実システムにおける総合的な信頼性の検証 | Ⅲ-174 |
| 2.4.1 | 信頼性検証のための試験計画の立案 | Ⅲ-174 |
| 2.5 | 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究 | Ⅲ-178 |
| 2.5.1 | 高温超電導ケーブルの標準化の研究 | Ⅲ-178 |
| 2.5.2 | 高温超電導ケーブルの適用技術研究 | Ⅲ-183 |
| 2.5.3 | 関連法規への対応 | Ⅲ-185 |

| | | |
|------------|------------------------|-------------|
| IV. | 実用化・事業化の見通しについて | IV-1 |
| 1. | 実用化・事業化の見通し | IV-1 |
| 2. | 今後の展開 | IV-4 |

付録資料

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

事業原簿概要

作成日

平成 21 年 11 月 12 日

| | | | |
|--------------------|---|----------|--------|
| プログラム(又は施策)名 | エネルギーイノベーションプログラム、ナノテク・部材イノベーションプログラム | | |
| プロジェクト名 | 高温超電導ケーブル実証プロジェクト | プロジェクト番号 | P07014 |
| 担当推進部/担当者 | 新エネルギー技術開発部/ 山下 恒友 | | |
| 0. 事業の概要 | <p>本プロジェクトでは、高温超電導ケーブルを社会の重要なインフラである電力供給システムに適用するために、「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」(平成 12 年度～16 年度)によって得られた高温超電導ケーブルの開発成果などを踏まえ、高温超電導ケーブルや冷却技術などを統合する高温超電導ケーブルシステムを構築して、高温超電導ケーブル単体だけではなく、線路建設、運転、保守を含めたトータルシステムの信頼性を実証するために、実系統に連系した実証試験を実施する。このことによって、高温超電導ケーブルのトータルシステムとしての総合的な信頼性を実証するとともに、革新的な高効率送電技術の開発・検証を行うことを目的とする。</p> | | |
| I. 事業の位置付け・必要性について | <p>[事業の背景・目的・位置付け]</p> <p>エネルギー利用の効率化の促進、地球環境問題への対策の観点から省エネルギーや環境負荷低減に配慮したエネルギー利用が求められている。これを反映して、新・国家エネルギー戦略(2006 年 5 月経済産業省)では、省エネルギーとして 2030 年までに少なくとも 30%の効率改善を目指すことを目標として掲げている。また、新エネルギーイノベーション計画では、新たなエネルギーの貯蔵・輸送技術など、「革新的なエネルギー高度利用技術」の開発と利用を強化すると掲げている。さらに、エネルギー・環境施策の「原子力の推進・電力基盤の高度化」では、発電された電力を安定的かつ効率的に需要家へ届けるため送配電分野においては、電力供給を安定化させる技術や、発電電力を無駄なく輸送するための技術開発などにより、現状以上の供給信頼度性を実現することを掲げている。さらに新政府は、CO₂ 排出量を 1990 年度比 25%削減することを国際的に約束している。</p> <p>このような状況においては、十分な安全確保を前提に、需要に見合った信頼性の高い安定で効率的なエネルギー供給システムを構築することが重要である。効率的なエネルギー供給システムに資する技術として、高機能部材である超電導線材を利用し、大容量送電が可能となり送電損失を大幅に低減することが可能な高温超電導ケーブルシステムの技術を開発し、産業利用の早期実現を図ることは、エネルギー安全保障(セキュリティ)に貢献するとともに、社会や経済の安定した発展に大きく貢献すると考えられている。</p> <p>[NEDO が関与する意義]</p> <p>電気抵抗がゼロなどの特性をもつ超電導技術は、電力事業、情報通信、運輸、医療福祉等の幅広い分野で、様々な機器の飛躍的な性能向上・技術革新が可能である。その中でも、高温超電導ケーブル技術は、電力エネルギーの高効率な送電に貢献することができ、エネルギーの効率的な活用及び地球環境問題に対応し、CO₂ 排出量を削減する効果があると期待され、その公共性は高い。</p> <p>一方、従来ケーブルの更新需要は 2016 年頃から始まり、早期の実用化が望まれているが、その超電導ケーブルの実用化には、本プロジェクトにて提案する実用規模での実系統での実証試験が必須である。そのために必要な実証システムの構築、運転・メンテナンス・保守技術の開発には、量産開発の途中である高温超電導線材の使用、液体窒素温度で適用できるケーブル及びケーブル付属品(端末、ジョイント)の開発、液体窒素を循環冷却する冷却システムの構築など、これまで汎用されていない高価な材料、機器が必要であり、多額の費用がかかるのが実情である。</p> <p>従って、十分に公共性が高く、その実用化が急務であるが、開発には多額の費用がかかることから、国および NEDO が関与する必要があると考えられる。</p> <p>[実施の効果]</p> <p>2015 年頃からその実用化が始まると期待されており、2030 年断面において国内では 1000 億円をこえる市場が期待できる。また本技術は海外への転用も可能であり、米国では、送電系統の老朽化に伴うエネルギーセキュリティの観点から基幹送電系の強化(GRID2030)が計画されており、また中国では、国内経済の急成長に伴って、送電線の増設に対する需要が高まっていることなどから、海外における超電導ケーブルの需要は、国内需要の数十倍から数百倍になると推定されている。</p> <p>一方、超電導ケーブル導入による地球環境対策としての CO₂ 量削減の効果も期待できる。試算の結果、2030 年の省エネ効果は 279CWh/年となり、CO₂ 削減効果は 95kton-CO₂/年になると推計されている。尚、この推定は前述したように国内の 66kV 以上ケーブルへの適用を考えた場合であり、全世界で考えれば、数十倍～数百倍の効果も期待できる。</p> | | |

II. 研究開発マネジメントについて

事業の目標

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

具体的には、将来の送電システムを想定した、66kV、200MVA級の高温超電導ケーブルシステムの開発を行う。そのためには、高温超電導ケーブルの重要要素（ケーブル、中間接続部、冷却システム等）に関して、実システムに適用し得る所定の性能、機能を有することを、モデルシステムによって検証する。その後、中間接続部を有する三心一括型高温超電導ケーブルを、冷却装置や保護装置などの付帯設備とともに66kV実システムに接続し、長期連系試験を行う。これにより、高温超電導ケーブルシステムの信頼性・安定性の実証、実システムにおける運転方法・メンテナンス方法の検討、課題の抽出を行う。

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

事業の計画内容

| 主な実施事項 | H19年度 | H20年度 | H21年度 | H22年度 | H23年度 | H24年度 |
|-------------------------|---|--|---------------------|---|---------|----------|
| (1) 高温超電導ケーブルの重要要素の研究 | ← 交流損失 1W/m/ph @ 2kA 開発 ← 短絡電流対応検討 ← 接続部の検討 1μΩ@2kA | ← 検証用ケーブルの製造、評価 | | ← 交流損失 1W/m/ph @ 3kA 開発 ← 短絡電流長尺シミュレーション ← 接続部の検討 1μΩ@3kA | | |
| (2) トータルシステム等の開発 | ← 基本仕様の検討 | ← 建設方法の検討 ← 付帯機器の検討 | | ← 冷却システムの設計検討 | | |
| (3) 送電システム運転技術の開発 | ← 系統調査 | ← 平常時の運転技術開発 ← 事故時の運転技術開発 | | ← メンテナンス方法の検討 | | |
| (4) 実システムにおける総合的な信頼性の検証 | | ← 試験計画の立案 | ← 実証用ケーブルシステムの製造・建設 | ← 冷却システムの構築 | ← 運転・評価 | ← 残存性能評価 |
| (5) 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究 | | ← 高温超電導ケーブルの標準化の研究 ← 高温超電導ケーブルの適用技術研究 | ← 関連法規への対応 | | | |

開発予算
(会計・勘定別に事業費の実績額を記載)
(単位：百万円)

| | | | | | | |
|-------|-----|-----|-----|-------|-------|-------|
| 会計・勘定 | | | | | | |
| 一般会計 | | | | | | |
| 特別会計 | 100 | 160 | 923 | | | |
| 加速予算 | | 80 | | | | |
| 総予算額 | 100 | 240 | 923 | (650) | (400) | (380) |

| | | |
|------------|---|--|
| 開発体制 | 経産省担当原課 | 製造産業局非鉄金属課 |
| | プロジェクトリーダー | H19～H20年度 畑 良輔（住友電気工業株式会社 執行役員） H21年度 原 築志（東京電力株式会社 技術開発研究所長） |
| | 委託先（*委託先が管理法人の場合は参加企業数も記載） | 住友電気工業株式会社 |
| 情勢変化への対応 | <p>(1) 実施計画の見直し 平成19年度～20年度の研究成果を、実証プロジェクト推進委員会・WG検討会、NEDO主催の超電導技術委員会にて報告し、研究内容の評価、今後の指針への指導などを頂いている。その中で、冷却システムの特性把握が超電導ケーブル運転上重要な課題であることから、冷却システムの模擬試験、熱機械繰り返し試験などを追加すべきとの提言があった。 実施者側で計画を見直し、30m ケーブル検証試験において、超電導ケーブルが室温から液体窒素温度に冷却される際に発生する引張力、圧縮力による、超電導ケーブルの特性への影響の評価を検証試験に追加する。また、冷凍機が故障した際のシステムの挙動、短絡電流のような定格電流を超えた過電流が流れた際のシステムの挙動、保護方法の検討なども実施するようにする。このように、30m ケーブル検証試験の計画を変更し、試験内容を充実させることとした。このため、30m ケーブル検証試験の試験期間については、冷熱サイクル試験（2ヶ月）、限界性能試験（4ヶ月）を追加し、6ヶ月延長する。</p> <p>(2) 事業期間の変更 上記の実施内容の変更を反映すべく、全体の計画見直しを行った。この際、実証場所では負荷が大きな夏場、あるいは冬場は、系統が重負荷となる場合もあり、特に電力設備の停止を伴うような工事を実施することが困難である。ある程度の期間の設備停止が可能な時期としては、5月あるいは11月が適していることから、これを考慮した結果、超電導ケーブルと系統との接続はH23年11月頃となり、事業期間を当初の5年から1年延長し、6年とするようにした。この計画変更については、H21年2月に開催されたNEDO主催の超電導技術委員会にて審議され了承頂き、その後NEDO内の手続きを経て契約変更を行っている。</p> <p>(3) プロジェクトリーダーの交代 事業開始時は、住友電工の畑執行役員（当時）がプロジェクトリーダーに任命され、その役務に就いていた。事業の最初の2年間は、ケーブルの低損失化、短絡電流対応といった、ケーブルの要素開発を中心とする開発内容であり、ケーブル技術、超電導技術の専門家である畑執行役員が務めていた。事業の3年目以降は、実証ケーブルシステムの構成、実証場所での運転などを検討し、実際に実証場所での工事、系統接続運転を行うことになることから、プロジェクトリーダーを系統技術・運転に詳しい東京電力の原技術開発研究所長に交代した。</p> | |
| 中間評価結果への対応 | | |
| 評価に関する事項 | 事前評価 | 平成18年 2月に実施済み |
| | 中間評価 | 平成21年 11月に実施予定 |
| | 事後評価 | 平成25年度に実施予定 |

Ⅲ. 研究開発成果
について

- 1 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証
 - ・低交流損失型 TypeAC 線材を開発し、これを超電導ケーブル導体に適用した結果、交流損失 0.8 W/m/ph @ 2kA となり、中間目標 (1 W/m/ph 以下) を達成した。
 - ・ケーブル構造として、140mm² のフォーマ、77mm² の銅シールドをもつ構造とし、最大 31.5kA、2 秒の短絡電流が通過してもケーブルにダメージがないことを確認した。また、もらい事故模擬試験を実施し、10kA、2 秒の短絡電流通過直後に 1.75kA の通電、及び対地定格 38kV の課電が可能であることを確認した。以上の結果、中間目標を達成した。
 - ・中間接続部の接続抵抗部を開発し、導体部は 6.7nΩ/相@3kA、シールド部は 2.5nΩ/相@3kA であることを実証し、中間目標を達成した。また、ケーブルシステムに必要な中間接続部、終端接続部の設計を終えた。
 - ・30m ケーブル検証システムとして、30m 級三心一括型超電導ケーブル、中間接続部、終端接続部、液体窒素循環冷却システムを製作し、システム構築を行った。構築時、中間接続部、終端接続部のケーブルとの組合せ施工手順を確認し、管理項目を把握した。
 - ・本システムを用いて、①システムでの電氣的、機械的、熱的評価の実施、②冷却・昇温のヒートサイクル試験、③限界性能試験 (短絡電流模擬、冷凍機故障など) を実施する計画。既に①は実施済みで、ケーブルが所定の性能を有することを確認した。さらに電圧対地 51kV、電流 2kA (8 時間 ON、16 時間 OFF) の条件で、1 ヶ月の連続課通電試験に成功した。尚、この条件は 30 年間の加速試験に相当するものである。
- 2 トータルシステム等の開発
 - ・実証ケーブルの基本構成を検討し、実証場所を東京電力管内の旭変電所 (横浜市) に決定した。また、実証場所での超電導ケーブルと既存設備との接続形態について検討し、遮断器、断路器等と組み合わせた接続方法を決定した。さらに実証場所での系統条件 (短絡電流条件、雷インパルス条件等) を踏まえ、超電導ケーブルへの基本仕様をまとめた。
 - ・冷却システムのコンセプトについてまとめ、送電を停止しないシステム、負荷に追従可能なシステムを目指すこととした。冷却方式については、間接冷却と直接冷却から直接冷却方式を選択した。実証場所での電力負荷を想定し、冷却システムの必要冷凍容量を試算、1kW 級冷凍機の台数を 6 台に決定した。また、冷凍機、ポンプの構成を検討し、冷凍機については 2 台×3 並列の並列接続とすることとした。
- 3 送電システム運転技術の開発
 - ・実証場所である旭変電所で予想される短絡電流および継続時間をシミュレーション及び規格から検討し、事故直後の課電通電が「無」となる最大電流は、31.5 kA-2 秒、課電通電が「有」となる最大電流は 10 kA-2 秒であることを確認し、これを超電導ケーブル設計にフィードバックした。
 - ・実証場所でのサージ電圧は、EMTP 解析の結果、200kV 程度であり、66kV 系統での LIWV (雷インパルス耐電圧) : 350 kV よりも小さいことが判明した。
 - ・常時運転については、冷却システムで超電導ケーブルの温度、圧力、流量を制御することが重要で、それぞれの制御指針を示した。温度制御については、冷凍機の ON/OFF 運転を試行しており、ケーブル入口温度±1K 程度で制御できることをシミュレーションにて示した。圧力制御については、ヒータを用いた制御方法を志向しており、さらに実験を続けていく。
 - ・異常時の運転においては、まずは超電導ケーブルシステムに異常が起こった場合に想定される故障モードについて整理を行い、対応案について検討した。警報については、各故障モードについて超電導ケーブルの系統からの切り離しの要否を検討した上で、重大故障と軽故障に分類した。
- 4 実系統における総合的な信頼性の検証
 - ・現在使用されている CV ケーブルや OF ケーブルの試験法を参考に、超電導ケーブルが実系統での長期使用に耐える特性を持つことを確認するための試験項目およびそれらの実施時期や実施方法などの試験計画について検討した。
- 5 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究
 - ・CIGRE B1 にて超電導ケーブルの試験法に関するワーキンググループ (WG) を設立するかどうかを検討するタスクフォース (TF) に、本プロジェクトでの検討結果を日本の例として情報提供した。この結果、TF において超電導ケーブルの WG が設立されることが決定し、今後 3 年間、超電導ケーブル試験項目とその内容について議論される。
 - ・旭変電所での超電導ケーブルシステムの搬入・据付・長期の実系統試験の全試験工程を対象とした時に、対応が必要となる関連法規を調査し、関係省庁と協議の結果、冷却システムを含む超電導ケーブルシステム全体は電気工作物として電気事業法が適用となる事を確認した。

| | | |
|---------------------|---|--|
| | 投稿論文 | [査読付き] 6 件、[その他] 26 件 |
| | 特許 | 出願済み 25 件 (※本 PJ 推進のために、受託者費用で実施した関連研究に基づく特許出願を含む) |
| | その他の外部発表 | 新聞、テレビ報道件数 7 件 |
| IV. 実用化・事業化の見通しについて | <p>(1) 超電導ケーブルの適用例と適用効果</p> <p>超電導ケーブルの有効な適用例としては、①基幹系の電力送電網への導入において、既存 275kV ケーブルと同容量の電力を 66kV 超電導ケーブルで送電する場合、②経年化した 154kV の OF ケーブルの取替策としての適用、③発電所の引出口（発電機端～変圧器間）などの大電流が流れる部分への適用や、経年化した大容量 POF ケーブルの取替策、が考えられる。超電導ケーブルの適用により、大幅なコスト低減が期待できるとともに、送電ロスを半分程度まで低減でき、CO₂ 削減が期待できる。</p> <p>(2) 波及効果</p> <p>諸外国においても交流超電導ケーブルの実証プロジェクトが進行中である。特に米国においては老朽化した送電ネットワークの近代化を目指したスマートグリッド構想が進行中で、超電導ケーブル技術もこの対策の一環として取り上げられている。本技術開発を早期に確立することで、諸外国の超電導ケーブル導入プロジェクトでの本技術の採用など、海外への波及効果も期待できる。</p> <p>地球温暖化対策として今後加速的に導入量が増加すると予想されている太陽光発電や風力発電などは、いずれも発電端は直流であり、ウィンドファームのように大規模集積化が進むと直流での直接送電のニーズが高まると予想される。また、データセンターなどでの電力消費は直流であり、低電圧大電流の直流配電システムへのニーズも高い。このような直流送電システムに対しても、本技術開発で培った超電導ケーブル技術の展開が可能で、これにより送電ロスはさらに大幅に低減でき、より大きな省エネルギー効果と CO₂ 削減効果をもたらすことができる。</p> <p>さらに本技術開発により、加圧液体窒素を用いた冷却システムの長期安定運転技術が確立されると、その冷却技術は超電導変圧器、超電導限流器、SMES（超電導電力貯蔵装置）など、その他の超電導電力機器の冷却技術として幅広く展開していくことが可能である。</p> | |
| V. 基本計画に関する事項 | 作成時期 | 平成 19 年 3 月 策定 |
| | 変更履歴 | 平成 21 年 3 月 研究開発期間の変更 |

用語集

| 索引 | 項目 | 解説 |
|----|-------------------------------------|--|
| B | Bean モデル | 超電導の振る舞いを記述するモデル。簡易的に臨界電流密度が磁場によらず一定であると仮定する。 |
| | Bi2223 銀シース線材 | Bi2Sr2Ca2Cu3O10+d を用いた超電導線材。母材として銀を用いている。超電導臨界温度は-163℃ (110K)。 |
| C | CIGRE | 国際電力大会議 |
| | CO ₂ 排出係数 | 1kWh 当たりの電力量を発電するのに、CO ₂ 排出量がどの程度となるかを示す係数。単位は、kg-Co ₂ /kWh が多く用いられる。 |
| | COP | 成績件数 (Coefficient Of Performance) とは冷凍量/所要動力で表される。 |
| | CV ケーブル | Cross linked polyethylene Vinyl cable。架橋ポリエチレンを絶縁体とし、外側に遮蔽層と防食層を設けた乾式ケーブル。 |
| E | Ellipse モデル | Norris によって提唱された、超電導線材の通電損失を記述するモデルであり、主に低アスペクト比の楕円形状の線材の特性を良く記述する。 |
| | EMTP | Electro-Magnetic Transients Program。電力系統での回路素子情報をコンダクタンスと電流源に等価変換し過渡現象解析する汎用デジタル計算。電力設備の耐雷、絶縁設計に使用されている。 |
| F | FMEA (Failure Mode Effect Analysis) | 故障・不具合の防止を目的とした、潜在的な故障・不具合の体系的なボトムアップによる分析方法。製品設計段階における設計 FMEA と、製造工程設計段階における工程 FMEA に分けられる。 |
| | FTA (Fault Tree Analysis) | 発生原因の潜在危険を論理的にたどって発生頻度を分析し、それぞれの発生確率を加算する故障・事故分析手法。望ましくない事象に対し、その要因を探るトップダウンの解析手法を特徴とする。これは、類似の故障モード影響解析の手法 FMEA とは逆の取り組みである。 |
| G | GIS | Gas Insulated Switch。絶縁性能の高い六フッ化硫黄ガスを使用したガス遮断器。空気絶縁の場合に比べ、用地面積は少なく済むが、工事費は高くなる。 |
| | GM 型パルス管 | パルス管冷凍機のうち、常温部に設置する圧力波発信源として圧縮機を別置きとし、圧力変動を弁の切替で行う冷凍機。 |
| I | IEC | 国際電気規格 |
| J | JIS 圧力容器規格 | 強制法規における技術基準として制定され、JIS B8265m JIS B8266 を中心に整備された J I S 圧力容器規格体系のことをいう。 |
| L | LCR メータ | LCR メータは L (インダクタンス)、C (キャパシタンス)、R (レジスタンス)、Z (インピーダンス) などのパラメータを交流で測定する装置である。発振器の信号を試料に加え、試料両端の電圧と、試料を流れる電流を求めて、両者の値からベクトル演算によってこれらパラメータを求める。 |
| | LIWV | →雷インパルス耐電圧値。 |
| M | ML-UCD モデル | 多層超電導導体の交流損失を記述するモデル。各層に流れる電流が均流化されているという仮定のもとで、Bean モデルに基づいて交流損失を計算する。 |
| N | n 値 | 超電導線材の電流-電圧特性を、電流を横軸として両対数グラフ化した場合の傾き。n 値が大きいほど、電流の増加に伴う電圧の発生が急激に起こる。 |
| O | OF ケーブル | Oil-Filled cable。導体上に絶縁紙を巻き、外側に金属シースと防食層を設けたケーブル。金属シース内部に低粘度の絶縁油を脱気脱湿状態で充填して使用する。 |
| P | PAS | IEC における公開仕様書 |

| 索引 | 項目 | 解説 |
|----|------------------------|--|
| P | PID 制御 | フィードバック制御のひとつ。目標値と制御量の差を偏差値とし、偏差値の大きさに比例 (proportional) した動作 (P 動作), 偏差値の積分(integral)に比例した動作 (I 動作), 偏差の変化量 (differential)に比例した動作を組み合わせる制御。 |
| | P I D制御用コントローラ | 制御目標値と制御量の差である制御偏差を打ち消すために行なう動作を制御動作と言い、その基本動作にPID動作がある。Pは比例動作、Iは積分動作、Dは微分動作を表す。これらの制御を行なう機器をPID制御用コントローラと呼ぶ。 |
| | PLC | プログラマブルコントローラの略。リレー回路の代替装置として開発された制御装置であり、工場などの自動機械の制御に使われるほか、エレベーター・自動ドなど身近な機械の制御にも幅広く使用されている。 |
| | P O F ケーブル | パイプタイプOFケーブル。一般的に鋼管などのパイプにOFケーブルを引き込み、絶縁油を充填、循環させる電力ケーブル |
| | P P L P | 熔融押出PPフィルムの両側をクラフト紙でサンドイッチ下構造をしている。その優れた絶縁破壊特性と低誘電率、低 $\tan \delta$ により低誘電損失特性を有し、数多くの AC および DC 超高压ケーブル用絶縁材料として採用されている。 |
| | PV 値 | PV 値 (Process Value) とはフィードバック制御における制御対象となる値を指す。温度制御ならば対象となる場所の温度となる。 |
| S | Strip モデル | Norris によって提唱された、超電導線材の通電損失を記述するモデルであり、主に高アスペクト比の薄膜形状の線材の特性を良く記述する。 |
| T | $\tan \delta$ | 電気機器に使用する絶縁物に交流電圧を印可すると、絶縁体の漏れ電流による損失、誘電分極にもとづく損失及び部分放電にもとづく損失などが生ずる。このような損失分の電流位相は、理想的な絶縁物に流れる無損失電流より遅れます。その遅れ角 δ の正接を $\tan \delta$ (誘電正接) とよぶ。 $\tan \delta$ 値は絶縁物の寸法や、形状に無関係の誘電体損失の大小を表す指標として、絶縁物の吸湿、乾燥、汚損、ボイドの状態などの絶縁の性状、あるいは劣化の程度を判断する値として使用されており、 $\tan \delta$ 試験は絶縁材料、特に電力機器の絶縁試験の重要な試験項目である。 |
| | Technical Committee 20 | 国際電気標準会議 (International Electrotechnical Commission) 内に設置される CV ケーブルなどの既存ケーブルの標準化を議論する委員会。TC20。超電導関連の標準化委員会は TC90。 |
| | TS | IEC における技術仕様書 |
| | TypeACT 線材 | 住友電工製の Bi2223 線材の呼称。超電導フィラメントに撚りが加えられているツイスト線材であり、銀シース線材の両面が金属テープにより補強されている。 |
| | TypeHT 線材 | 住友電工製の Bi2223 線材の呼称。超電導フィラメントに撚りが加えられていない線材であり、銀シース線材の両面が金属テープにより補強されている。 |
| U | UPS | Uninterruptible Power Supply。入力電源に停電などの異常が発生しても、一定時間は停電することなく電力を供給し続ける電源装置。無停電電源装置。 |
| あ | アンカーボルト | 構造部材(木材や鋼材)もしくは設備機器などを固定するために、コンクリートに埋め込んで使用するボルトのことを指す。アンカーボルトは、引張りやせん断に抵抗することによって、コンクリートに取り付けられた構造部材(木材や鋼材)もしくは設備機器が、分離・浮遊・移動・転倒することを防ぐ役割をもつ。 |

| 索引 | 項目 | 解説 |
|----|-----------|--|
| あ | 安全弁 | ガスや蒸気などの配管や容器において爆発を防ぐための安全機構を有する弁。密閉した容器などで内圧が上がりそのまま圧力上昇すると内圧のため容器が破損する。このような爆発をさけるために安全弁が使用され、容器の内圧が上がり過ぎないようにする治具。 |
| い | イットリウム線材 | YBCO あるいは ReBCO (Re: 希土類元素) の超電導材料で作られた線材。一般的に、テープ状であり、超電導部分は薄膜形状になっており、薄膜線材ともいわれている。 |
| | インピーダンス | 直流におけるオームの法則の電気抵抗の概念を複素数に拡張し、交流に適用したもの。インピーダンスにおいて、その実部 (Re) をレジスタンス (resistance) または抵抗成分、虚部 (Im) をリアクタンス (reactance) と呼ぶ。 |
| | 受入試験 | 出荷製品が「形式試験供試品と同等の製造・品質管理状態であることを確認」するために行うもの。出荷試験と同義。ここで形式試験とは、ある形式製品の設計・製造および施工方法を「認定」するために行うものである。 |
| う | 渦電流損失 | 電磁誘導により発生する渦電流によって生じるジュール損失。 |
| え | 液体窒素循環ポンプ | 超電導ケーブルシステムへ、冷却された液体窒素を供給するためのポンプ。 |
| | 液体窒素循環冷却 | 被冷却体を冷却する 1 手法。冷凍機などで冷却された液体窒素を循環ポンプにより被冷却体に圧送し、液体窒素と被冷却体で熱交換を行うことにより冷却を行う。熱交換により温度の上昇した液体窒素は再び冷凍機などに圧送され、その温度は再び低下する。この循環サイクル回路を形成することにより、冷媒は蒸発することなく閉ループ循環を続けることができ、液の補給が不要であるという特徴を有する。 |
| | エコキュート | ヒートポンプ技術を利用し空気の熱で湯を沸かすことができる電気給湯機のうち、冷媒として、フロンではなく二酸化炭素を使用している機種の種類総称。 |
| | 塩害 | 塩じんによる汚損のため、がい管の商用周波フラッシュオーバー電圧が低下すること。塩分付着密度および海岸からの距離の 2 つの条件をもとに区分されている。 |
| お | オフセット | 一般的には基準となるある点からの相対的な位置のことである。この場合ケーブル 3 心よりの状態と 3 芯に相関距離を設けた状態の位置関係をさす。 |
| か | 碍子 | 電線とその支持物とのあいだを絶縁するために用いる治具。 |
| | 回線 | 電力輸送を行う単位となる導体または導体系。例えば、三相交流では、3 つの導体を 1 回線という |
| | 回線延長 | 回線ごとの起点から終点までの長さ合計 |
| | 開発試験 | 開発品の設計・製造および施工方法が、「実用可能であることを実証する」ために行うものである。 |
| | 開閉サージ | 電源、開閉器、ケーブルおよび架空線が種々組み合わさった線路に電源、負荷の開閉によって発生し進行する異常電圧または電流。 |
| | 架空線 | 主に空気を絶縁体とした送電線路で、雷撃により雷サージの発生する可能性のある線路。 |
| | 過電圧 | 常規商用周波運転電圧を超えて発生する電圧。雷過電圧と開閉過電圧がある。 |
| | 可とうシールド管 | 液体窒素中で編素線部にシールドを取り付ける必要がある、熱収縮によりシールド部分に機械力が働くことを考慮して伸縮構造を持つフレキシ管をシールドとしたもの。 |
| | 過負荷 | 定格量を超えた負荷。 |

| 索引 | 項目 | 解説 |
|----|--------------|---|
| か | (変圧器) 過負荷運転 | 変圧器の定格容量以上の負荷送電を行なう運転の事。 |
| | 過負荷電流 | 定格電流を超えた電流。 |
| | 過冷却 | 過冷却 (sub-cool) とは沸点と凝固点の間の液体の状態を指す。液体窒素では大気圧下で 77K から 63K の間となる。 |
| | 間接冷却方式 | 冷却システムにおいて、冷媒がブラインと呼ばれる不凍液を冷却し、これを介して目的物を冷却する方式。 |
| | 管路 | 主に地中に埋設されて活用される、ケーブルを収容するための管状の部材。ケーブルの引き入れや引き抜きを容易にし、布設後は外傷防止の役目を果たす。 |
| き | 逆フラッシュオーバー | 鉄塔または架空地線が雷撃を受け、鉄塔の電位が著しく上昇して、鉄塔から電力線へフラッシュオーバーすること。 |
| | 距離リレー | 電圧および電流を入力量として、電圧と電流の比の関数が所定値以下となったとき動作するリレー。この比は、継電器のみるインピーダンスと呼ばれ、インピーダンスは送電線の距離の電氣的尺度であるので、距離継電器と呼ばれる。 |
| | 銀安定化層 | 超電導線材において超電導状態が維持できなくなった際の電流分流の役割を担う。また、超電導体そのものを機械的に保護する役目をもつ。 |
| く | 鞍型ピックアップコイル法 | 超電導線材の磁化損失測定に用いられるピックアップコイルの一種。線材面に平行な磁場に対する測定に用いられる。テープの一部分を囲む直方体面上にピックアップコイルを巻き、その面上での電界を測定することにより、マグネット磁界と合わせてポインティングベクトルを求めて、損失を算出する。 |
| | クラフト紙 | OF ケーブルの主絶縁材料として通常は絶縁油を含浸して使用する電気絶縁強度の高い絶縁紙。超電導ケーブルにおいて液体窒素含浸条件下で使用しても高い絶縁強度を有する。 |
| け | 軽故障 | 重故障には満たないが、想定し得る運転状況からの逸脱を検知して発信される故障情報。 |
| | 系統事故 | 地絡事故、短絡事故、断線、またはそれらが複合したことにより、線路または機器が送電不能に陥ること。通常、事故区間が遮断され系統全体は保護される。 |
| | ケーブルコア | 超電導ケーブル断熱管内に挿入されるコア。主に、導体層、絶縁層、シールド層から構成される。 |
| | ケーブルドラム | 運搬及び保管のためケーブルを巻き取る装置。巻わく。 |
| こ | 高温超電導体 | 1986 年以降に発見された酸化物を中心とした超電導材料の総称。それ以前の超電導体の使用が液体ヘリウム温度で行われていたことに対して、高温超電導材料は液体窒素にて超電導特性を示すことから、相対的な意味で「高温」と名づけられた。 |
| | 更新需要 | 電力ケーブルなどにおいて、その寿命が近づいてきたことにより、新規ケーブルと代替する必要がある。その需要をさす。 |
| | 後備保護リレー | 何らかの原因により主保護継電器で事故線路の遮断ができなかった場合に動作する保護継電器。事故による停電範囲は主保護よりも拡大するので、動作時間は主保護よりも遅れるように整定される。 |
| | 後備リレー | →後備保護リレー |
| | 交流損失 | 超電導線材・導体に発生する損失。直流通電のみであれば超電導状態であれば抵抗がゼロであるため、損失は発生しないが、交流通電（交流磁界）を行なった場合には、ヒステリシス損失、渦電流損失、結合損失などの損失が発生する。これらの損失をまとめて交流損失と呼んでいる。 |

| 索引 | 項目 | 解説 |
|----|-----------------------|--|
| こ | 故障モード | 超電導ケーブル、冷却システムに発生する故障、トラブルの進展状況により分類した形態。 |
| さ | サージ | 電線路あるいは、電気所母線を進行する電圧または電流。過渡的な過電圧や過電流全般。 |
| | サージインピーダンス | 雷サージや開閉サージなどの電流、電圧を関係づけるインピーダンス。系統のインダクタンス、静電容量をそれぞれL,Cとすると $\sqrt{L/C}$ で表される。 |
| | サージインピーダンスローディング(SIL) | 送電線内での無効電力の発生と消費がバランスする送電電力のこと。 |
| | 最高使用電圧 | 運用時にケーブルにかけられる電圧の最大値。 |
| | 再送電 | 短絡あるいは地絡事故が発生した際に、事故点を遮断した後に再び送電を開始すること。 |
| | 三心一括型 | 3つのケーブルコア(導体、絶縁体、シールド等からなる)が一つの断熱管の中に収納された超電導ケーブルの構造 |
| | 三相同軸型 | 3つの導体が同軸上に形成されたもので、各導体間には電気絶縁層が介在する。この導体が一つの断熱管の中に収納された超電導ケーブルの構造。 |
| | 残存性能 | 長期試験などを経験したケーブルが最終的に示す性能。初期との性能比較で、経年による劣化の有無を確認する。 |
| | 残留磁束 | 物質が対象かつ周期的に磁化された状態にあるとき、磁化力がゼロとなる磁束密度。 |
| し | シーケンス | 機器を自動制御する際の、あらかじめ設定しておく動作の順序。 |
| | シールド | 導体層に通電した際に発生する磁場を外部に漏らさないように、導体層と逆位相の電流を誘起させる層のこと。 |
| | 磁化損失 | 超電導線材に交流外部磁界を印加したときに生じる損失。 |
| | 軸方向磁場 | 超電導ケーブルの長手方向に発生する磁場。超電導層を形成する際に、超電導線材を芯材に対してスパイラル形状に巻付けるため、通電時に径方向だけでなく軸方向にも磁場が発生する。 |
| | 試験法 | ケーブルなどの製品や部品の品質を確認するための試験の方法。 |
| | 事故点 | 線路に発生した絶縁破壊点、もしくはその点を含む切り離し可能な線路区間。早期の事故復旧に関わるものは後者である。 |
| | 事故電流 | 系統事故に伴って流れる異常電流。短絡電流と地絡電流に大別される。 |
| | 実系統 | 実際に電力が送電されている電力系統 |
| | 遮断失敗 | 遮断器が何らかの原因により遮断できなくなる現象。 |
| | 重故障 | 超電導ケーブル運転に重大な影響を及ぼす異常を検知して発信される故障情報。 |
| | 終端接続部 | ケーブルの端が気中リード線と接続できるように接続端子を備えた接続箱。ケーブルヘッド。CH。超電導分野での通称は、「端末」。ただし、「端末」はケーブルの切断面に施す防水キャップの意で使用されることもあるので注意が必要。 |
| | 重潮流 | 定格電力に近い電力の流れ。 |
| | 従来ケーブル | 既に実用化されている電力ケーブル。CVケーブル、OFケーブル、POFケーブルなどがある。 |
| | ジュール損失 | 電気抵抗×(電流の2乗)であらわされる発熱量 |
| | 需給運用 | 時々刻々変動する需要に対し、常に供給力を確保して需要と供給力の均衡を図り、火力発電、原子力発電などの供給力を総合的に組み合わせ信頼性および経済性の高い運用を行う一連の業務。 |
| | 出荷試験 | →受入試験 |

| 索引 | 項目 | 解説 |
|----|------------|---|
| し | 主保護リレー | 電力系統は何重にも組み合わせた保護継電器（リレー）によって保護されている。主保護継電器は、ある保護区間内に発生した事故に対し、一番目に動作するよう整定された保護継電器。 |
| | 寿命指数 | 課電電圧に対する長期劣化特性を評価できる、ケーブル構造に依存する指標。CV ケーブルや OF ケーブルに代表される従来のケーブルの長期破壊特性は、課電電界 (kV/mm) の n 乗と課電時間 (H) の積が一定になる特徴がある。ここでの n が寿命指数と定義される。 |
| | 竣工試験 | 出荷試験に合格した製品が現地布設されるまでの間に、外傷や過度のわん曲などが原因で、設備が備えるべき性能を損なっていないか確認する試験。電気設備技術基準の解釈に基づいて行う電気試験も含む。 |
| | ジョイント | 中間接続部と同意 |
| | 常温絶縁タイプ | 超電導ケーブルの構造で、冷媒で冷却される部分が導体部だけであり、その上に断熱層、次に電気絶縁層、遮蔽層が形成されるケーブル。電気絶縁層は断熱層の外側にあるので、常温に置かれている。 |
| | 冗長 | 機器の信頼性を高める方策のひとつ。冗長とは複数の機器を用意しておくことで、待機冗長と切り替え冗長がある。待機冗長は機器が故障した際に予備機を稼動し、この間に故障機を整備する方式。切り替え冗長は定期的に機器を切り替え停止機を整備しておく方式。 |
| | 常電導 | 通常の金属など、有限の抵抗をもつ導体。超電導が電気抵抗ゼロであることに対する単語。 |
| | 常電導シールド層 | 銅などの常電導材料を用いて超電導シールド層に対して並列に設けられる層。事故電流が流れた際のバイパス回路の役割を担う。 |
| | 浸漬冷却 | 液体窒素等の冷媒中に冷却対象物をそのまま浸して冷却すること。 |
| | 侵入熱 | 超電導ケーブルの断熱管外部（室温部）から内部に侵入する熱。超電導ケーブルでは侵入熱を抑えるため、二重の SUS コルゲート管の間を真空引きし、伝熱を抑えるとともに、スーパーインシュレーションと呼ばれる熱絶縁体を巻き付けて、輻射に伴う侵入熱の低減を行なう。 |
| す | スターリングパルス管 | パルス管冷凍機のうち、常温部に設置する圧力波発信源としてスターリング冷凍機の圧縮用ピストンを用いる冷凍機。 |
| | スターリング冷凍機 | 冷凍機の種類。空間の常温側端に断熱圧縮を行うピストン、中間に蓄熱器、他端の低温側に断熱膨脹を行うピストンを有する。両端のピストンが位相をずらして駆動されることで冷凍サイクルを構成する。理論的な効率はいわゆるカルノーサイクルと等しく高効率であり、小型化が容易である。 |
| | ストレスコーン | 高圧ケーブルの終端接続部において電界の集中を緩和させ、絶縁耐力を維持するために、遮へい層をコーン状にした部分。 |
| せ | 整定値 | 保護リレーを動作させるためのしきい値。電圧、電流、抵抗、タイマー等の数値をリレーに設定する。 |
| | 整定変更 | 電力系統構成の変更に伴って、リレー等の整定値を変更すること。 |
| | 接続抵抗 | ケーブル超電導線材と中間接続部の縦添え超電導線材との接続は半田を使用している。その接続に伴う常電導抵抗を示す。 |
| | 線材の負荷率 | 超電導線材の臨界電流 (I_c) と通電電流 (I_t) の比 (I_t/I_c) によって定義される値。交流通電時には、電流のピーク値 (I_p) を用いて、 I_p/I_c で定義される。 |
| そ | 送電損失 | 電力ケーブルが電力を輸送する際に発生する損失。超電導ケーブルの場合、ケーブルの交流損失、絶縁体の誘電損失、断熱管の侵入熱などが上げられる。また、それらの損失は極低温で発生するが、それを冷却するための動力が必要。一般に、その損失を COP で割った値を送電損失としている。 |

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

| 索引 | 項目 | 解説 |
|----------|-----------|---|
| つ | ツイスト線材 | Bi2223 線材において、超電導フィラメントに撚りが加えられている線材。 |
| | 通電損失 | 超電導線材に交流通電電流を流したときに発生する損失。 |
| | 通電用 CT | 電力機器に通電を実施する際に用いられる変流器 |
| て | 低温脆性 | 室温付近又はそれ以下の低温で、鉄鋼の衝撃値が急激に低下して、もろくなる性質。 |
| | 定格電流 | 設計で定められた規定条件下で作動する機器、装置等の電流範囲。 |
| | 鉄心 | 変圧器において、一次回路と二次回路を相互インダクタンスで結合する磁気回路。 |
| | 電圧安定性 | 電力系統の電圧は、発電機の出力、電圧、運転力率、負荷の消費電力、力率および系統の構成形態や変圧器の電圧調整器、シャントリアクトルや電力用コンデンサなどの調相設備などの運転状態により決定される。電力系統に何らかのじょう乱があったときに、電圧が新たな平衡点に落ち着く系統の能力または関連した性質のこと。 |
| | 電圧降下 | 電気回路に電流を流したとき、回路中に存在する電気抵抗の両端に電位差が生ずる現象のこと。 |
| | 電圧タップ | 電气的四端子法により2点間の電位差を測定する際に使用する電位測定線。 |
| | 電气的四端子法 | 資料に対して電流を流した際に、ある区間に発生する電位差を測定する方法。電流リードと電圧リードに別々の線を用いる方法。一般に、二端子法と四端子法があるが、低抵抗の資料の測定に際しては精度の高い四端子法が用いられる。 |
| | 電磁力 | アンペアが右ネジの法則に関連して電流の流れている2導線間に働く力について、両導線に流れる電流の積に比例し、両導線の間隔に反比例する力が働くことを発見した。両導線に流れる電流の向きが同方向のときは吸引力に反対方向のときは反発力になる。 |
| | 電流密度 | 電気導体に電界が与えられたときに、単位面積に垂直な方向に単位時間に流れる電気量（電荷）のこと。 |
| | 電流リード | 電流を導入する役割をもつ導体（金属等） |
| 電力ネットワーク | 電力系統と同義語。 | |
| と | 導体接続金具 | 終端接続部において超電導導体に対して半田で電气的に接続し、フォーマーに対して圧縮することにより機械的および電气的に接続するための金具。 |
| | 導体接続スリーブ | 両側ケーブルコア中心に位置する銅より線フォーマを機械的な圧縮力で接続するための部材。 |
| | 導体接続損失 | 導体が中間接続部、終端接続部などで、常電導導体と接続される際に、接続部に電気抵抗が発生するが、これに起因する損失。 |
| | 洞道 | 地中に構築する暗きょ（トンネル）。床上あるいは棚上にケーブルを布設することになる。 |
| に | トリップ | 事故電流を遮断するための遮断器開放動作。 |
| | 二重故障 | 機器の単一故障ではなく、同時に関連性の低い2箇所（以上）の機器で故障、トラブルが発生する事。 |
| | 熱侵入 | 低温容器内に室温領域から熱伝導、熱輻射などで侵入してくる熱量。熱侵入とも表記する。 |
| ね | 熱損失 | 超電導ケーブルシステムにおいて発生するジュール損や交流損失に伴う熱や侵入熱に伴う損失。これら損失に伴う熱により、冷媒の温度が上昇するため、必要な温度に冷却する必要がある。 |
| | 熱電対 | 異種金属の2接点間の温度差によって熱起電力が生じる現象（ゼーベック効果）を利用した温度センサ。 |

| 索引 | 項目 | 解説 |
|----|-------------|--|
| ね | 熱輻射シールド | 熱輻射は熱放射とも言い、物体から熱エネルギーが電磁波（波長により赤外線、可視光線、紫外線、x線、γ線）として放出される現象のこと。その電磁波を遮る部材を示す。 |
| | 熱物性値 | 熱伝導率、熱容量、熱収縮率等の温度依存性を有する物性値。 |
| の | ノンツイスト線材 | Bi2223 線材において、超電導フィラメントに撚りが加えられていない線材。 |
| は | バーンアウト信号 | PID 制御コントローラで入力値の参照ができなくなった場合に、ある一定の制御を行なうため、外部へ出力する制御信号。例えば温度を一定に保持する制御を行なっている途中で、温度が参照できなくなった場合に、温度を下げるようなバーンアウト信号（制御信号）を出す。 |
| | バイパス回路 | 信頼性の不確かな回路や実験的な回路等と並行に設置した回路で、前者を切り離した場合に運用し、信頼度を確保するもの。本プロジェクトでは、CV ケーブルによる線路がこれに該当する。 |
| | ハイブリッド超電導導体 | 異なる種類の線材を用いて構成される超電導導体。 |
| | バックアップ | 信頼性から、ある機器が故障してもシステムの的にその機能を支えてシステムの運転に支障が及ばないようにすること。該当する機器を複数用意しておく場合は冗長化と証する。 |
| | パルス管冷凍機 | 1961 年ギフォードとロングスワースによって考案された、パルス音響理論に基づく冷凍機。低温部に可動部がなく信頼性が高く小型の冷凍サイクルを構築することが可能である。音波の山の部分では断熱圧縮することから温度が上がり、谷の部分では断熱膨張により温度が下がることを応用している。 |
| | 半割れ銅管 | 両側超電導ケーブルのシールド同士を接続する必要がある。中間接続部においては補強絶縁部を避けた形状でシールド超電導線材を積層し半田接続する必要があるため予め両側を絞り込んだ形状でかつ上下半割れ構造とした銅管を示す。 |
| ひ | 引き止め治具 | 端末容器本体に直接 3 心ケーブルを引き止める為に絶縁材料である FRP の両端に SUS がついた治具を使用している。 |
| | ヒステリシス損失 | 鉄心の磁区が交番磁界によって磁界の向きを変えるとききの損失。鉄損。 |
| | ビスマス線材 | 主に Bi2Sr2Ca2Cu3O10+d を用いた超電導線材。超電導臨界温度は -163℃ (110K)。 |
| | 歪ゲージ | 機械的な寸法の微小な変化（ひずみ）を電気信号として検出するセンサで、材料や構造物の表面に接着してひずみを測定すれば、材料や構造体に加わった応力を推測することができる。 |
| | 標準化 | ケーブルなどの製品や部品の品質、形状、寸法、施工手順、試験方法などを標準に従って統一すること。これに伴って効率化・合理化ができ、互換性も高まる。 |
| | 比率差動継電器 | 保護区間に入入りする電流のベクトル差が予定値を超えた場合、かつ、差動回路部分の動作コイルの電流と抑制コイルの電流の比が予定値を超えた場合に動作する継電器。RDFR。前者の条件のみで動作するものは差動継電器（DFR）という。差動、比率継電器は変圧器、発電機、母線の保護に用いられる。 |
| ふ | フィードバック制御 | 制御量（PV 値）が目標値（SV 値）になるよう、両者を比較を行いながら制御対象への操作量（MV 値）を変化させていく制御方法。 |
| | フィラメント | Bi2223 銀シース線材の内部構造において、Bi2223 で構成される細い糸状の箇所をさす。 |

| 索引 | 項目 | 解説 | |
|-----------------|------------|---|---|
| ふ | フィラメント間の結合 | 変動磁界下において、超電導フィラメント同時の間にマトリックスを介して遮蔽電流が還流する現象を結合といい、これにより生じるいわゆるジュール損失を結合損失と呼ぶ。 | |
| | フェランチ現象 | 大きな容量を持つ送電線線路の受電側で負荷を切り離したり、使われていなかった線路に負荷を繋いだりしたときに、線路のキャパシタンスに応じた充電電流が流れることが原因で、送電線路に電圧上昇が発生すること。 | |
| | フォーマ | 超電導線材を用いて超電導層を形成する際の芯材。主に銅線を寄り合わせることで構成され、機械的な芯としての役割を担うとともに、短絡電流通過時のバイパス回路にもなる。 | |
| | 負荷状況 | 電力系統において、最大許容電力に対して、実際に使用されている電力の割合の状況 | |
| | 複合絶縁方式 | 2つ以上の絶縁体を併用した絶縁方式。本プロジェクトでは、絶縁紙 PPLP に液体窒素を含浸させた絶縁となっている。 | |
| | ブッシング | 端末容器を貫通する電流リードを通す通路をもち、容器から電流リードを絶縁するために用いる。 | |
| | 部分放電 | 電極間に電圧を加えたとき、その間の絶縁物中で部分的に発生する放電をいい、電極間を完全に橋絡する放電は含まない状態。 | |
| | ブレイトンサイクル | 動作ガス（一般的にはヘリウム）の圧力を高める圧縮機、高圧ガスと低圧ガスの間で熱交換を行う熱交換器、高圧ガスを断熱膨張させて低圧低温のガスを生成する膨張機などで構成される冷凍機。大型の冷凍機に適す。 | |
| | 分割集合フォーマ | 複数の銅線を撚り合わせた導体を扇形の断面形状を有するセグメントに圧縮成型し、複数のセグメントを一体化することで形成した円形フォーマ。 | |
| | へ | ヘリウム | 分子量 2 の単原子分子。極めて安定であり他の物質と化学反応を起こすことはない。沸点が 4.2K とあらゆる物質中で最も低く、極低温冷凍機の動作ガスとして用いられる。天然ガス中から分離採取されるが日本は全量を米国から輸入している。 |
| 変圧器の充電（ステップアップ） | | 電力系統中の変圧器は発電所出口端のものを除き、1次側（電源側）が高電圧、2次側（負荷側）が低電圧となっている。ステップアップは変圧器の2次側から充電を行なうこと。 | |
| 変圧器容量 | | 変圧器の定格電圧、定格電流により求められる量。相電圧の $\sqrt{3}$ 倍（線間電圧）と定格電流の積で求められる。 | |
| 編素線 | | 可とう性（柔軟性）を必要とする電気用導体として、軟銅線、スズメッキ軟銅線およびその他の素線を集束（集めて束により合わせる）したものを編組し、成型したもの。 | |
| 変電所バンク | | 変電所に設置された変圧器を指す。 | |
| ほ | | 防水テープ | 中間接続部は水没する可能性の高いマンホール内に設置されることが多い。そこで中間接続部外容器の外表面にはすぐれた絶縁性を保持すると共に、高い気密性が求められる。そのために使用する絶縁性を有するテープを示す。 |
| | | 保護カバー | 三相一括のジョイント接続部を一括で覆う上下半割れ形状の銅管で、ケーブルの熱収縮による窒素容器内での中間接続部の動きに対応し可動できる仕様となっている。 |
| | | 保護協調 | 異常発生時において、電力系統の電流や電圧をもとに故障区間を判別および除去し、事故の拡大防止や系統への波及を防止すること。 |
| | | 保護リレー | 継電器の一種で、電流や電圧の急激な変化から電気回路を保護するための装置。 |
| | | 母線 | 発電所や変電所で、電源から全電流を受け、外線に供給する幹線。ブス。 |

| 索引 | 項目 | 解説 |
|----|------------------|--|
| ま | 母線連絡 | 2つ以上の母線を電氣的に連系可能にする線路、また連系すること。ブスタイ。 |
| | 埋設物 | 広義では、地中に埋設されているもの全てを示すが、それらは撤去可能や撤去困難なもの等さまざまである。本文中の既設埋設物とは、一般に実運用中の設備であり、撤去不可能かつ移設困難な設備を示している。 |
| も | もらい事故 | 保護リレーによる保護区間外で短絡事故が起きた場合で、短絡事故電流が流れた直後も課通電のある場合の系統事故。 |
| ゆ | 誘電損失 | ケーブルの絶縁物（誘電体）に電圧をかけた際に発生する損失。 |
| よ | 要素試験 | 設備の開発にあたり、比較的少量のサンプル等を用いて要求される性能毎に試験を行うこと。 |
| ら | 雷インパルス耐電圧値（LIWV） | 雷撃に対して、避雷器を含まない線路が備える絶縁強度の標準値。避雷器の制限電圧はこれより低く設定され、これと組み合わせることで線路の絶縁協調が図られている。 |
| | 雷撃 | 異常電圧を生じる送電線路への落雷。雷撃箇所、侵入経路、波形および電流が、雷サージ解析の解析条件となる。 |
| | 雷サージ | 雷撃に起因して線路に発生し進行する、異常電圧または異常電流。 |
| り | リーク | 配管や機器のシール部や溶接部から何らかの不具合により冷媒（液体窒素）が漏れること。真空層の場合には真空リークと言う。 |
| | リザーバタンク | 液体窒素は系内への不純物侵入を防ぐため閉サイクルで用いられる。しかし窒素温度が 77 K から 63 K まで変化すると液体の膨張・収縮が 7%程度生じる。この膨張・収縮変化を吸収するのがリザーバタンクと呼ばれる真空断熱容器である。さらにリザーバタンクを窒素圧力が最も低くなる窒素循環ポンプ吸入側に設置することで、その最低圧力を保持する圧力制御機能を持たせることで超電導ケーブル内での気泡の発生を防止し部分放電を防ぐ機能を付加している。 |
| | 臨界温度 | 温度上昇に伴い超電導状態（電気抵抗ゼロ）から常電導状態（電気抵抗を生じる）へと相転移する温度のこと。 |
| | 臨界電流 | 超電導材料に直流電流を流す場合、電気抵抗がゼロであるので、発生電圧もゼロであるが、通電電流が大きくなると、許容値を超え、超電導状態から常電導状態に転移し、電圧が発生する。ここでは、 $1 \mu\text{V/cm}$ の電圧が発生する直流電流を臨界電流（値）と定めている。 |
| れ | 励磁突入電流 | 変圧器に電流を印加したときに生じる電流。 |
| | 冷凍機 | 対象となる物質から熱を奪い、それを水や空気などに移送する機械または装置の総称。対象物の温度を下げる働きをする。熱の輸送に使用される冷媒の種類、それを圧縮する方法、膨張により吸熱作用を発生させる工程などによっていくつかの冷凍方式に分類される。液体窒素温度冷却においては、スターリング方式、GM 方式がよく用いられる。 |
| | 冷凍機コールドヘッド | 冷凍機の熱交換部。実証試験で使用予定であるスターリング型冷凍機では冷凍機内部のヘリウムガスと超電導ケーブルの冷媒である液体窒素をコールドヘッド（銅の熱交換部）を介して熱交換する。 |
| | 冷凍機の効率 | 動作温度において発熱量 $Q[\text{W}]$ を汲出すに必要な冷凍機の効率で、冷凍機所要動力 $W[\text{W}]$ とすると $\text{COP}=Q/W$ で表される。COP (Coefficient of Performance) とも表記する。 |
| | 冷凍能力 | 被冷却体の熱損失と定常的に温度バランスしているときの冷凍システムの能力で定義される。 |
| | 冷熱サイクル | ここでは、超電導ケーブルが室温と液体窒素温度を繰り返し経験するサイクルをさす。 |

| 索引 | 項目 | 解説 |
|----|----------|--|
| ろ | ロードセル | 力（質量、トルク）を検出するセンサーのことで、これらの力を電気信号に変換するというものであり、荷重変換器とも呼ばれる。一般に変換器にはひずみゲージ式がよく用いられる。 |
| | ロゴスキーコイル | ドイツの電気工学者であるロゴスキー（Rogowski）によって考案された電流検知センサ。被測定導体の周辺にロゴスキーコイルを設置すると、導体電流に対応した電圧がコイルの両端に誘起する。この電圧は導体電流の微分波形で、積分器を通すことで導体電流波形を再現できる。 |

I. 事業の位置づけ・必要性について

1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性

1.1 NEDOが関与する事の意義

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

一方、発電設備および送配電設備は、将来の需要予測に基づいて着実に整備していく必要がある。エコキュートに代表される家庭用・産業用の高効率電力機器への熱源転換の進展や、電気自動車の普及拡大などにより、今後の電力需要は年率で1%程度の伸びが予測されている。このため、この需要増加に対応した送電線網をエネルギー利用の効率を考えながら整備していく必要がある。また、戦後構築された電力送電設備には寿命を迎えているものもあり、特にOFケーブル、POFケーブルの更新は、2016年頃から本格化するものと考えられており、早期実用化、早期導入普及が求められており、この公共性の高さからも国及びNEDOの関与が必要と考えられた。

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

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

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

一方、上記の通り、汎用化されていない技術の適用、高価な材料、機器の購入、実系統連係を行うための法令解釈、整備など、民間企業のみでは十分な研究開発が実施され得ず、国及びNEDOの関与が必要と考えられる。さらに、エネルギーの効率活用、地球環境負荷低減などに貢献できることから国およびNEDOの関与は適切であった。

1.2 実施の効果

本プロジェクトの実施により、高温超電導ケーブルの早期の実用化が期待される。経済産業省及びNEDOが作成したロードマップによると、2015年頃からその実用化が始まると期待されており、それ以降の高温超電導ケーブルの市場規模は表1.2-1のように試算されている¹⁾。この試算は1989年～2005年までの「66kV以上の地中電力ケーブルの回線延長」から推定した今後のケーブル導入量の約10%が超電導ケーブルに置き換わったと仮定した場合の予測である。このように、2030年には国内で1000億円をこえる市場が期待できる。

また本技術は海外への転用も可能であり、米国では、送電システムの老朽化に伴うエネルギーセキュリティの観点から基幹送電系の強化（GRID2030）が計画されており、また中国では、国内経済の急成長に伴って、送電線の増設に対する需要が高まっていることなどから、海外における超電導ケーブルの需要は、国内需要の数十倍から数百倍になると推定されている。

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

表 1.2-1 予想される超電導ケーブルの市場規模

| | 超電導ケーブル線路 (累積) (km・回線) | 金額 (億円) |
|-------|---------------------------|---------|
| 2015年 | 30 | 60 |
| 2020年 | 190 | 380 |
| 2025年 | 400 | 800 |
| 2030年 | 650 | 1300 |

超電導ケーブルのコストは200千円/mと仮定

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

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

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

表 1.2-2 予想される省エネルギー・CO₂削減量

| 年 | 超電導化による 損失低減量 (Lf=1.0) | 累積 導入量 | 損失率 (Lf) | 1年間の低減電力量 A×B×C×(24×365) | 1年間の CO ₂ 削減量 |
|-------|------------------------------|-----------|-------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 単位 | kW/km | km | | GWh/年 | 千 t-CO ₂ /年 |
| | A | B | C | D | E |
| 2015年 | 50 | 30 | 0.7 | 10 | 3.5 |
| 2020年 | 70 | 190 | 0.7 | 82 | 28 |
| 2025年 | 70 | 400 | 0.7 | 172 | 58 |
| 2030年 | 70 | 650 | 0.7 | 279 | 95 |

(注) 常電導ケーブルの損失量は 100kW/km、超電導ケーブルの損失量は 50kW/km@2015 年、30kW/km@2020 年以降と考え、その差が表中 A の損失低減量にあたる。

・CO₂ の排出係数は、2015 年において 0.35 (kg-CO₂/kWh)、2020 年以降は 0.34 (kg-CO₂/kWh) とした

参考文献

- 1) 「高温超電導電力応用機器の市場調査研究報告書」ISTEC、H19 年

2. 事業の背景・目的・位置づけ

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

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

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

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

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

的とする。

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

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

1.1 研究開発目標

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

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

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

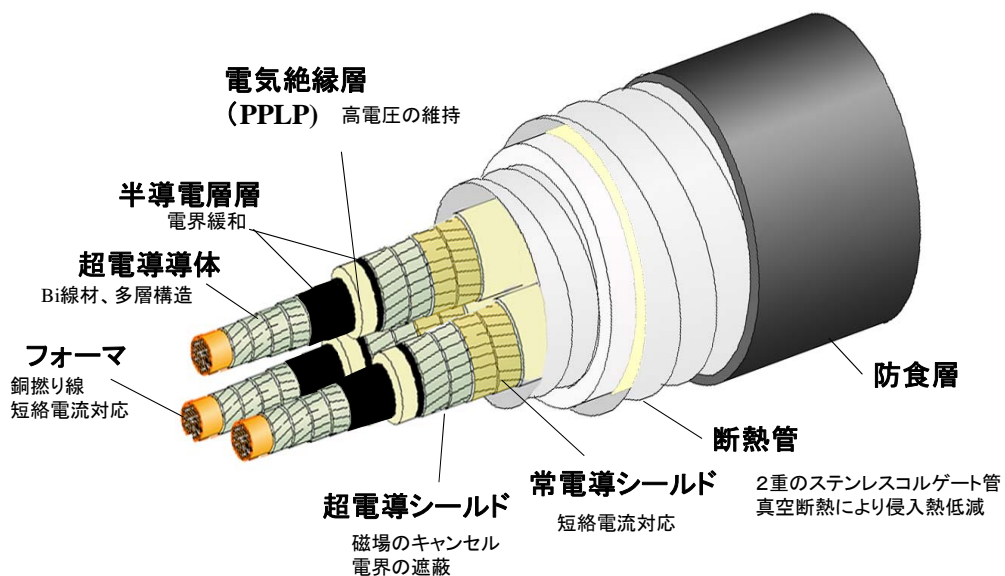


図 1.1-1 三心一括型高温超電導ケーブル

1.2 研究項目毎の目標

1.2.1 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証

(1) 研究開発の必要性

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

(2) 研究開発の具体的な内容

66kV、200MVA 級 3 心一括型高温超電導ケーブル等の重要要素技術が、実系統連系試験に適用可能であることを検証する。

(3) 達成目標

● 中間目標（平成 21 年度中）

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

- ・ 交流損失：1W/m/1 相（3 心一括型高温超電導ケーブル（66kV、2kA）、150mm φ 管路収容）

- ・ 短絡電流：31.5kA-2 秒の短絡電流

- ・ 中間接続部の導体接続損失：2kA 通電相当で $1\mu\Omega$ / 相以下

● 最終目標（平成 24 年度中）

- ・ 交流損失：1W/m/1 相（3 心一括型高温超電導ケーブル（66kV、3kA）、150mm φ 管路収容）

- ・ 中間接続部の導体接続損失：3kA 通電相当で $1\mu\Omega$ / 相以下

(4) 目標設定の根拠

高温超電導ケーブルの実用化時のターゲットの一つに送電ケーブルへの適用が考えられている。東京電力と住友電工では、1500MVA 級の送電ルートを考えて場合の従来ケーブルと超電導ケーブルの経済性比較を実施している。これによると、従来ケーブルでは、275kV 単心 CV ケーブルが 3 回線 9 条必要で、洞道内にケーブルを布設する必要がある。これに対し、超電導ケーブルは φ 150mm 管路に収納できれば、土木費も含めた建設コストを大幅に削減できるので、超電導ケーブル適用にメリットがあるというもの。

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

以上のように、ターゲットは 66kV/3kA 級、損失 1W/m/ph @ 3kA、φ 150mm 管路へ

の適用を目標とした。

1.2.2 トータルシステム等の開発

(1) 研究開発の必要性

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

(2) 研究開発の具体的な内容

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

(3) 達成目標

●中間目標（平成21年度中）

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

●最終目標（平成24年度中）

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

(4) 目標設定の根拠

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

1.2.3 送電システム運転技術の開発

(1) 研究開発の必要性

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

(2) 研究開発の具体的な内容

高温超電導ケーブルを用いた送電システムが、負荷や電圧の変動などの系統変化

や系統事故などに対応した系統運用において、自動的に追従した運転（冷却含む）や、送電システムの一部設備の障害時における復旧方法など送電システムの運転技術を開発する。また、その運転技術を実系統連系試験において検証する。

(3) 達成目標

●中間目標（平成21年度中）

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

●最終目標（平成24年度中）

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

(4) 設定の根拠

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

1.2.4 実系統における総合的な信頼性の実証

(1) 研究開発の必要性

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

(2) 研究開発の具体的な内容

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

(3) 達成目標

●中間目標（平成21年度中）

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

●最終目標（平成24年度中）

実系統に連系した12ヶ月以上の長期試験による総合的な信頼性の評価指針を

作成する。

高温超電導ケーブルは次の要求仕様を達成するものとする。

- ・送電容量：200MVA 級（66kV、3心一括型高温超電導ケーブル、150mmφ管路収容可能）

(4) 設定根拠

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

1.2.5 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究

(1) 研究開発の必要性

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

(2) 研究開発の具体的な内容

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

(3) 達成目標

- 中間目標（平成21年度中）
 - ・超電導ケーブルの適用技術の評価項目や冷却設備の法規制あり方の概要を取りまとめるとともに、超電導送電システムの国際規格化を進めるための標準化項目を作成する。
- 最終目標（平成24年度中）
 - ・電力ネットワークの形態や規模に応じた構成、機能、経済性、環境面などの適用技術や導入効果を評価して超電導ケーブルの導入シナリオを定める。
 - ・冷却設備における規制緩和に向けた技術基準を研究し、規制緩和の提案資料を作成する。
 - ・超電導送電システムの運転管理や評価・計測法等の国際規格化を進めるため PAS

(公開仕様書) や TS (技術仕様書) 策定に資するデータ整理を行い、規格の提案を目指す。

(4) 設定根拠

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

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の計画内容

2.1.1 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証

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

(1) 低交流損失超電導導体の性能検証

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

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

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

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

平成 22~24 年度においては、最終目標である 1W/m/ph @ 3kA を達成すべく要素技術開発を実施する。中間目標までに達成した低交流損失線材の技術を発展させ、モデルケーブルで損失の検証を実施する。

(2) 短絡事故時対応超電導導体の性能検証

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

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

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

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

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

平成 22～24 年度は、開発したシミュレーションコードを用いて、実証ケーブルでの短絡電流通過後の冷媒挙動、さらには実用化時を想定した長尺ケーブルでの冷媒挙動についてシミュレーションを行い、ケーブルシステム運用での課題の抽出を行う。

(3) 大電流接続部の性能・機能検証

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

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

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

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

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

平成 20 年度は、平成 19 年度の結果をもとに、三心一括型の中間接続部（窒素、真空容器を除く）を構築し、通電特性、接続抵抗、機械特性の評価を行う。終端接

続部についても構築し、単体性能評価として、耐圧特性、侵入熱測定、真空特性等
を評価する。

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

平成 22～24 年度は、最終目標である $1\mu\Omega @ 3kA$ の接続抵抗の実証を行う。

(4) 検証用ケーブルシステムの設計・構築

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

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

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

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

① 定格性能試験

超電導性能の確認（臨界電流測定、交流損失測定）

定格課通電の確認

長期課電試験（約 1 ヶ月）

② 冷熱サイクル試験（室温－液体窒素温度の繰り返し試験）

上記超電導性能、定格課通電性能の再確認

③ 限界性能試験

冷凍機故障模擬試験、過電流試験

④ 残存性能試験

2.1.2 トータルシステム等の開発

(1) 実証ケーブルシステムの基本仕様

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

平成 19 年度は、高温超電導ケーブルシステムの接続が可能な 66kV 級実系統の候補地から、電流容量、負荷状況、システム構築の実現性等を考慮し、実証場所を決定する。実証場所での環境、系統条件と、実用時の高温超電導ケーブルシステムの検討課題を考慮し、実証ケーブルシステムの構成機器毎に基本仕様を整理し、本実証線路のコンセプトとしてまとめる。

(2) 実証ケーブルシステムの付帯機器の検討

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

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

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

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

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

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

(3) 冷却システムの設計

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

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

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

(4) 超電導ケーブルの建設手法の検討

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

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

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

2.1.3 送電システム運転技術の開発

(1) 実証場所での系統特性調査

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

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

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

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

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

(2) 平常時の運転技術開発

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

平成 19 年度は、高温超電導ケーブルシステムが正常に運用されていることを監

視するために必要な計測データの種類と、それらの計測方法について概念検討を行う。次に、高温超電導ケーブルシステムを正常に運用するために制御すべき機器の検討と、その制御方法や制御状態の確認方法について概念設計を行う。

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

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

(3) 事故時の運転技術開発

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

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

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

平成 21～22 年度は、実証用超電導ケーブルシステムで起こりうる想定事故について、その要因と対策をまとめ、警報設計やその後の運用マニュアルにフィードバックさせる。また、事故後の超電導ケーブルシステム復帰の条件、手法について検討を行う。

(4) 保守・メンテナンスの基本計画作成

高温超電導ケーブルシステムの長期信頼性を評価・検証するにあたって必要な保守項目を整理し、その検証手法について検討する。特に冷却システムについては、

回転機が使用される部位については定期的なメンテナンスが必要であることから送電を維持した状態での保守・メンテナンスの手法やシステム構成を検討し、実証ケーブルシステムに反映させる。

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

2.1.4 実システムにおける総合的な信頼性の検証

(1) 総合的な信頼性検証のための試験計画立案

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

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

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

(2) 実証用ケーブルシステムの製造

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

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

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

2.1.5 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究

(1) 高温超電導ケーブルの標準化研究

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

平成19年度は、標準化を行うべき項目について調査するとともに抽出を行う。

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

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

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

(2) 高温超電導ケーブルの適用技術研究

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

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

平成22～24年度にかけては、超電導ケーブルの導入効果について、得られた試験結果をもとに検討する。

(3) 関連法規への対応

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

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

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

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

平成 22～24 年度は、冷却設備における規制緩和に向けた技術基準を研究するとともに、電気事業法での適用に向けた検証データ、資料等を作成し、規制緩和に向けた活動計画を作成する。

2.2 研究開発スケジュールと予算

| | H19 年度 | H20 年度 | H21 年度 | H22 年度 | H23 年度 | H24 年度 |
|-------------------------|---|--|---|---|--------------|---------------|
| (1) 高温超電導ケーブルの重要要素の研究 | <p>交流損失 1W/m/ph @ 2kA 開発</p> <p>短絡電流対応検討</p> <p>接続部の検討 1μΩ@2kA</p> | <p>検証用ケーブルの製造、評価</p> | | <p>交流損失 1W/m/ph @ 3kA 開発</p> <p>短絡電流長尺シミュレーション</p> <p>接続部の検討 1μΩ@3kA</p> | | |
| (2) トータルシステム等の開発 | <p>基本仕様の検討</p> | <p>建設方法の検討</p> <p>付帯機器の検討</p> <p>冷却システム的设计検討</p> | | | | |
| (3) 送電システム運転技術の開発 | <p>系統調査</p> | <p>平常時の運転技術開発</p> <p>事故時の運転技術開発</p> <p>メンテナンス方法の検討</p> | | | | |
| (4) 実システムにおける総合的な信頼性の検証 | | <p>試験計画の立案</p> | <p>実証用ケーブルシステムの製造・建設</p> <p>冷却システムの構築</p> | | <p>運転・評価</p> | <p>残存性能評価</p> |
| (5) 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究 | | <p>高温超電導ケーブルの標準化の研究</p> <p>高温超電導ケーブルの適用技術研究</p> | <p>関連法規への対応</p> | | | |
| 予算* (百万円) | 100 | 240 | 923 | (650) | (400) | (380) |

* 予算の()は、未確定。

2.3 研究開発の実施体制

本プロジェクトは、NEDO のプロジェクト公募に、住友電工及び東京電力、前川製作所のチームが応募し、これに採択された。具体的体制としては、実施者NEDOから住友電工が委託を受け、さらに開発を分担し、東京電力、前川製作所が再委託を受けている。

また、NEDOは研究体を統括するためにH19～H20年度は、畑 良輔 住友電工 執行役員（現在は退職）、H21年度は、原 築志 東京電力 技術開発研究所長をプロジェクトリーダー（PL）とし、PL との間で密接な連携をとりながらプロジェクトの舵取りを行っている。

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

具体的な研究体制を図 2.3-1 に示す。

研究の実施場所については、各社にて実施するが、高温超電導ケーブルの重要要素技術の開発に関しては、住友電工の大阪製作所にて実施している。また事前の検証用システムについては、住友電工の熊取・超電導ケーブル実験場にて構築し、試験を実施している。

東京電力では、実証場所が横浜市の旭変電所に選定されたが、その変電所を統括する神奈川支店、鶴見支社等と連携をとりながら、超電導ケーブルの試験法、実証システムの構成、運用方法等について検討を行っている。

前川製作所では、冷却システムの検討を実施しているが、検証用ケーブルシステムの冷却システムの構築、運用については住友電工の熊取・超電導ケーブル実験場にて住友電工と共同で実施している。また、今後予定している複数の冷凍機、液体窒素循環ポンプでのシステム検証試験では、前川製作所の工場内にシステムを構築し、検証を行う計画である。

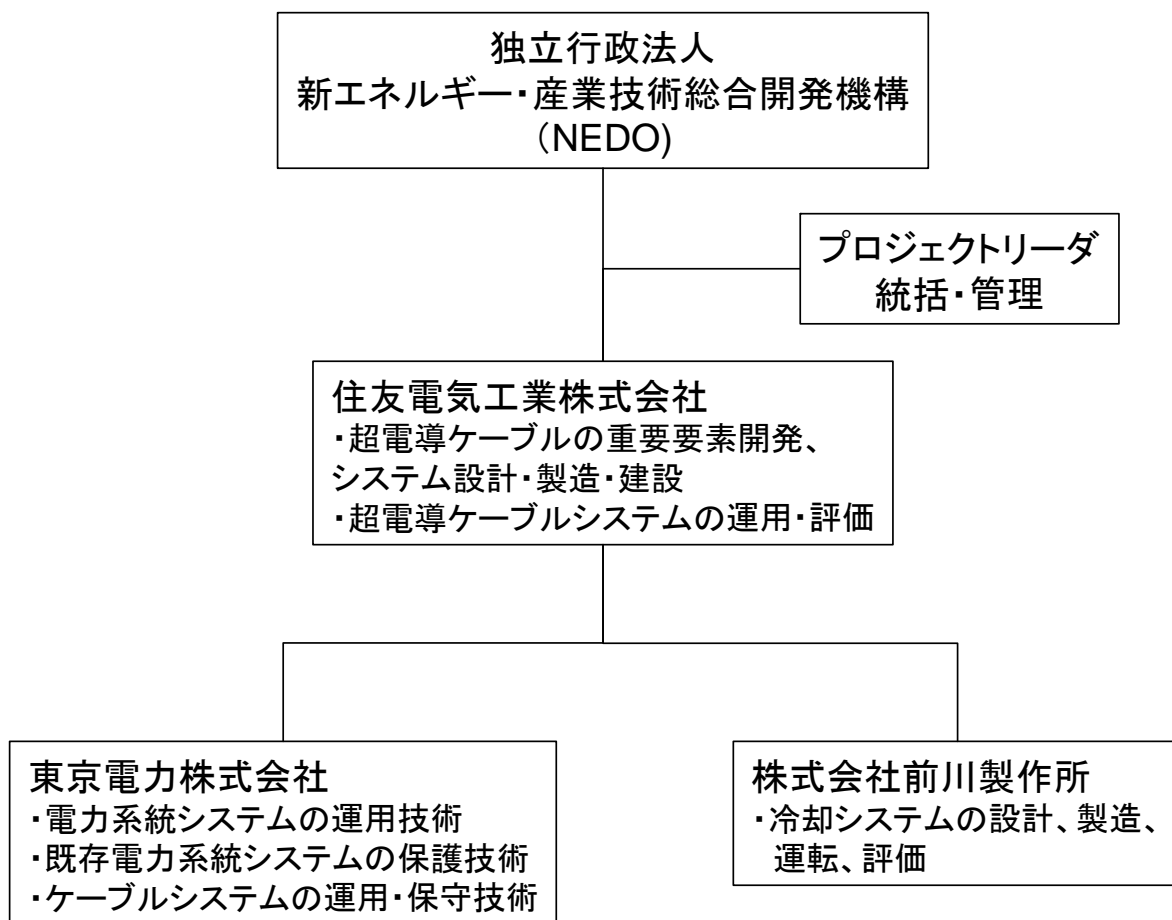


図 2.3-1 研究開発体制

2.4 研究の運営管理

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

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

(1) 超電導技術委員会

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

(2) 推進委員会

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

推進委員会のメンバーリストを表 2.4-1 に示す。

表 2.4-1 推進委員会メンバーリスト

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

(3) ワーキンググループ (WG)

推進委員会よりもさらに個別で、詳細な内容について審議、協議するために、プロジェクトの内容を3つに分け、3つのワーキンググループを設けている。それぞれのワーキンググループには、電力中央研究所と関西電力株式会社から委員を募り、実施者側と忌憚ない意見交換を実施し、プロジェクトの進捗、内容について、協議している。表 2.4-2 にワーキンググループのタスク内容と参加社表を示す。

表 2.4-2 ワーキンググループタスク内容と参加社

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

3. 情勢変化への対応

(1) 実施計画の見直し

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

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

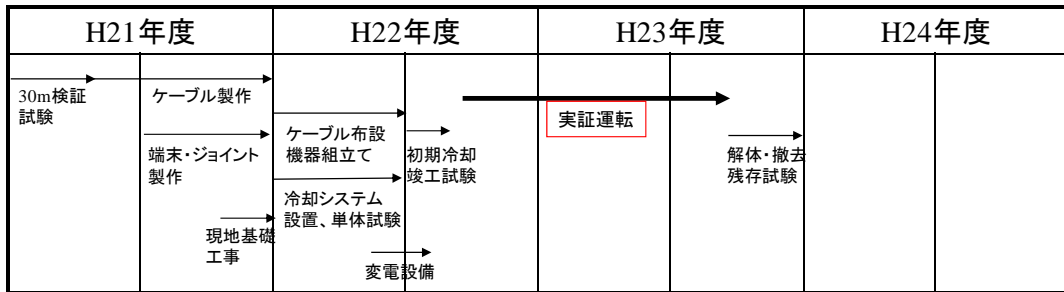
30mケーブル検証試験の試験内容についても、ケーブル、ジョイント、端末を組合わせた、電氣的、機械的な特性を確認する計画にはなっているが、冷却試験が1回しか計画されておらず、試験期間も4カ月と短いものであり、検証内容を充実すべきとの意見を頂いた。実施者側で計画を見直し、超電導ケーブルが室温から液体窒素温度に冷却される際に発生する引張力、圧縮力による、超電導ケーブルの特性への影響の評価を検証試験に追加する。また、冷凍機が故障した際のシステムの挙動、短絡電流のような定格電流を超えた過電流が流れた際のシステムの挙動、保護方法の検討なども実施するようにする。このように、30mケーブル検証試験の計画を変更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

(2) 事業期間の変更

上記の実施内容の変更を反映すべく、全体の計画見直しを行った。全体計画の中で重要となるのは、実証場所での実系統への連系開始のタイミングである。超電導ケーブルシステムを従来の系統に接続するためには、ある程度の接続工事期間が必要で、またその一部の期間は実際に送電を停止する必要がある。実証場所の変電所は実際に大電力を変電・送電している変電所であり、負荷が大きな夏場、あるいは冬場は、系統が重負荷となる場合もあり、特に電力設備の停止を伴うような工事を実施することは不可能である。この時期を避け、ある程度の期間の設備停止が可能な時期としては、5月あるいは11月が適している。この接続のタイミングと、上記実施内容の変更に伴う、期間の延長を考慮した結果、事業期間を当初の5年から1年延長し、6年とするようにした。当初の計画と変更計画を図3-1に示す。

この計画変更については、H21年2月開催のNEDO主催の超電導技術委員会にて審議され了承頂き、その後NEDOとの契約変更を行っている。

●当初計画



●変更計画

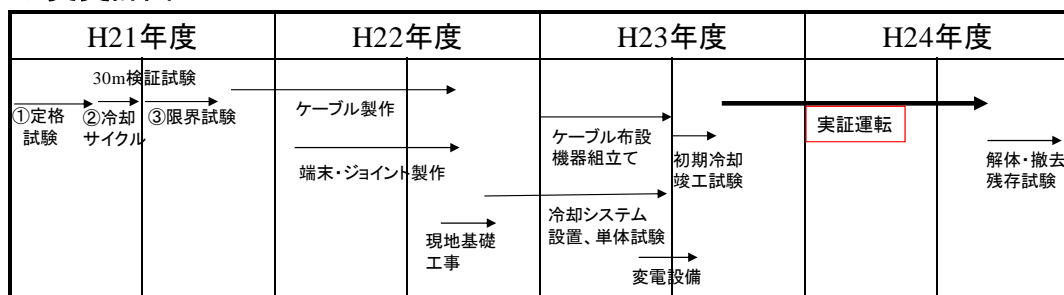


図 3-1 平成 22 年度以降の当初計画と変更計画

(3) プロジェクトリーダーの交代

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

4. 海外における高温超電導ケーブルの開発動向

4.1 米国の超電導ケーブルプロジェクト

(1) Albany プロジェクト¹⁾

米国 Albany での超電導ケーブルデモプロジェクト。参加企業は、SuperPower (メインコントラクター、線材)、住友電工 (線材、ケーブル)、BOC (冷却)、National Grid (電力) であり、DOE (Department of Energy, エネルギー省)、NY 州から資金援助を受けている。第一期は、34.5kV/800A/350m のケーブルを住友電工製のビスマス線材で三心一括型超電導ケーブルを製造し、Albany 市内の2つの変電所を結ぶ線路の一部に布設し、実系統へ接続して2006/7～2007/3まで運転。その後、第2期として、上記のうち30m部分をSuperPower社製のイットリウム線材を用いた超電導ケーブルに置き換え、再運転を2008/1～2008/4まで実施。それぞれ、問題なく運転が実施することができ、プロジェクトは終了した。

(2) LIPA プロジェクト²⁾³⁾

Long Island での超電導ケーブルデモプロジェクト。参加企業は、AMSC (線材、メインコントラクター)、NEXANS (ケーブル)、Air Liquid (冷却)、LIPA (電力) であり、DOE から資金援助を受けている。定格は、138kV/2.4kA/600m であり、AMSC 社製のビスマス線材で単芯型超電導ケーブル×3相を製造し、Long Island の変電所と発電所間を結ぶ線路に布設し、2008/4 から実系統へ接続しての運転を開始。現在も稼動中である。その後、第2期の計画として、三相のうち1相のみをイットリウム線材を用いた超電導ケーブルに変更するとのことで、開発を進行中。

(3) Columbus プロジェクト^{4),5)}

Ohio 州での超電導ケーブルデモプロジェクト。参加企業は、Southwire (メインコントラクター、ケーブル)、AMSC (線材)、Plaxair (冷却)、AEP (電力) であり、DOE から資金援助を受けている。定格は、13.8kV/2.5kA/200m であり、AMSC 社製のビスマス線材で三相同軸型超電導ケーブルを製造し、AEP 社の変電所構内に布設し、2006/9 から実系統へ接続しての運転を開始。現在も稼動中である。

(4) New Orleans プロジェクト (米)⁶⁾

New Orleans 州に13.2kV/2.5kA/2400mの超電導ケーブルを建設し、実系統での運転を行う。当該地区の増容量を行うのに、従来ケーブルでは変電所を増設する必要があるが、低電圧・大容量の超電導ケーブルで電力を導入すれば、変電所を省略することができる。DOEからの資金援助はあるが、超電導ケーブルのメリットを活かすプロジェクトになる。

2008年にスタート、2011年の運転開始を目指している。

(5) Hydra プロジェクト⁷⁾

New York 州での超電導ケーブルデモプロジェクト。参加企業は、AMSC 社（メインコントラクター、線材）、Southwire 社（ケーブル）、ConEdison（電力）等であり、DHS (Department of Homeland and Security) から資金援助を受けている。定格は、13.8kV/4kA/300m であり、AMSC 社製のイットリウム線材で三相同軸型超電導ケーブルを開発する予定である。プロジェクトは 2008 年にスタート。2010 年の ConEdison 社ネットワークでの運転開始を目指している。

4.2 欧州の超電導ケーブルプロジェクト

(1) Neuron プロジェクト⁸⁾

オランダアムステルダム市内に 50kV/3000A/250MVA、長さ 6km の超電導ケーブルを適用する計画を検討中。アムステルダムを市外の一次変電所から市内の配電変電所への導入線。現在、50kV/100MVA/3 回線の POF ケーブルが使われている。そのうちの 1 回線を超電導ケーブルに増容量して置き換える。計画がうまく立ち上がれば、2012 年に運転開始を目指している。

4.3 アジアの超電導ケーブルプロジェクト

(1) DAPAS プロジェクト^{9),10)}

DAPAS プロジェクトは、2001 年にスタートし、2003 年には 22.9kV、1260A、30m 単心ケーブルが開発されている。このプロジェクトは、KERI (Korean Electrotechnology Research Institute)、LS Cable（前 LG ケーブル）、KIMM (Korea Institute of Machinery and Materials) らが、協同で開発に取り組んでいる。

本プロジェクトでは、2004 年には 30m 単心ケーブルが開発・評価されたのち、2004 年に 30m 三心ケーブルが開発され、その後韓国電力のコチャン試験所に設置され、各種試験が実施されている。

最近では、154kV 級超電導ケーブルの開発に取り組んでおり、上述のコチャン試験所に電力を供給する送電系統に布設して、系統試験を実施する計画になっている。

(2) KEPCO 500m ケーブル

韓国電力 (KEPCO) 管内の変電所構内に 22.9kV/1250A/500m の三心一括型超電導ケーブルを建設し、実系統での運転を行う計画。参加者は、LS ケーブル (ケーブル)、韓国電力、他である。2008 年度にスタートし、2010 年の運転開始を目指す。

(3) 雲南プロジェクト¹¹⁾

中国雲南地区の Fuji 変電所構内に、35kV、2kA、33.5m の超電導ケーブルが布設され、2004 年 3 月に運転が始まっている。プロジェクトの主管、ケーブルの設計は、Innopower Superconductor Cable 社が行った。その他に雲南電力会社（竣工試験、メンテナンス等）、プラズマ物理研究所（端末開発）、での協力を実施、Innova

Superconductor Technology 社（線材供給）、Tsinghua 大学、China Electronics Technology Corporation（冷却システム）、上海ケーブル（ケーブル製作）、NEXANS（断熱管）が参加している。

ケーブル構造は、単心×3相、常温絶縁タイプ、直径112mmである。線材はBi2223超電導線材を用い、4層構造である。断熱管はSUSコルゲートで作られている。絶縁は常温タイプのXLPEを使用している。

ケーブル試験では、部分放電テスト at 39kV（感度1pC）、AC耐圧104kV、インパルステスト±250kV（10回）を行い、竣工試験では55kV for 5minの試験が行われた。冷却システムは、2kWの容量があり、GM冷凍機7setで構成されている。超電導ケーブルは、実際のグリッドに接続され、10万人のユーザに電力を供給している。

(4) 蘭州プロジェクト¹²⁾

中国蘭州地区に、6.6kV、1600A、75mの超電導ケーブルが布設され運転されている。このプロジェクトには、電気技術研究所（IEE）、中国科学院（CAS）、物理化学技術研究所（TIPC）、Changtong電力ケーブル会社が参加している。

事前のテストで、電圧10.5kV、1600Aの運転を確認した。また、臨界電流値はDC5300Aであった。

実際に運転を実施したのち、プロジェクトは終了した。

4.4 研究開発目標の世界比較

上記のとおり世界各国で超電導ケーブル開発が進められている中で、本プロジェクトの研究開発目標の特徴は、コンパクトな三心一括型構造の超電導ケーブル開発を志向している点である。三心一括型超電導ケーブルは、単相超電導ケーブルや三相同軸超電導ケーブルなどの国外の研究開発目標と比較して、大容量化・コンパクト化・低損失化をバランス良く実現することができる。図4.4-1は国内外の主要な超電導ケーブルプロジェクトにおけるケーブル容量とエネルギー密度を比較したものである。この図から明らかなように、本プロジェクトでの開発目標である、150mmφ管路収容可能なサイズで66kV/2kA～3kA級の超電導ケーブルは、世界最高のエネルギー密度を実現するものである。人口密度が高く、地下空間の稠密度化が進んでいる我が国や、海外の大都市向けとして最も高い効果が期待できる研究開発目標となっているといえる。

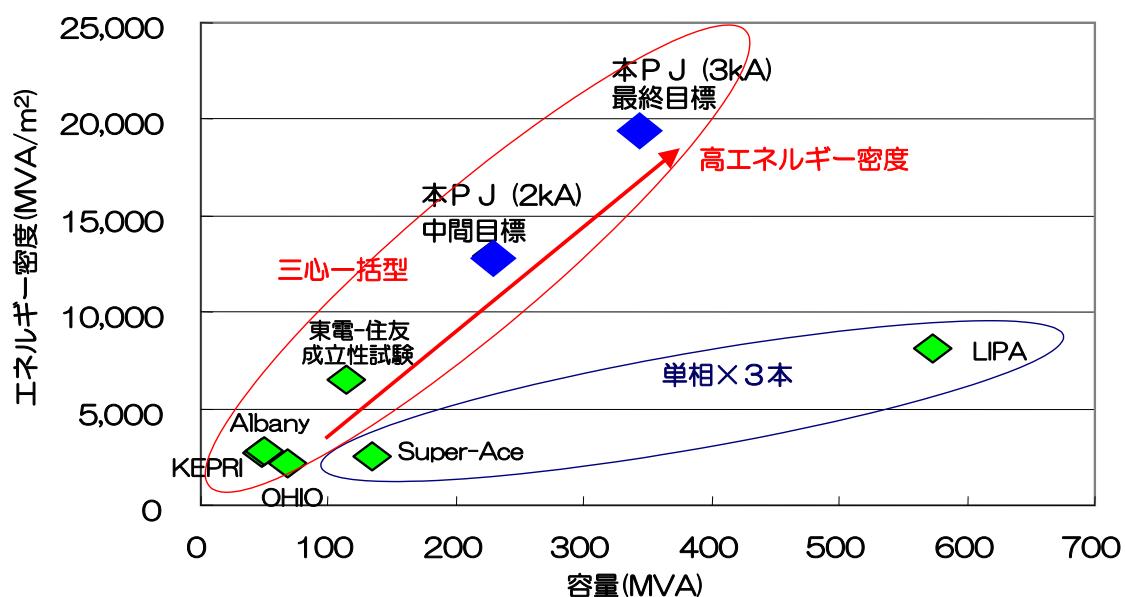


図 4.4-1 国内外の主要な超電導ケーブルのエネルギー密度比較

参考文献リスト

- (1) T. Masuda et. al., "Fabrication and Installation Results for Albany HTS cable", IEEE Trans. Appl. Super. Vol 17, No.2, (2007)
- (2) News release by AMSC on April 22, 2008
- (3) 米国NY州ロングアイランドにおける高温超電導送電プロジェクトの概要
海外電力 第50巻 No.9 (2008/9)
- (4) "Columbus Project Profile", Southwire Home page
- (5) D. Lindsay, et. al., "Operating of 13.2 kV Superconducting Cable System at AEP Bixby Station", B1-107, CIGRE 2008
- (6) "New Orleans Project Profile", Southwire Home page
- (7) "Manhattan Project Profile", Southwire Home page
- (8) A. Geschiere, et. al., "Optimizing Cable Layout for Long Length High Temperature Superconducting Cable Systems", B1-307, CIGRE 2008
- (9) "Development of a single-phase 30 m HTS power cable", ACASC(2005)
- (10) "Development of the 22.9-kV Class HTS Power Cable in LG Cable", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 15, NO. 2, (2005)
- (11) "Introduction of China's First Live Grid Installed HTS Power Cable System", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 15, No. 2, (2005)
- (12) AMSC news release, 2005/4/11

Ⅲ 研究開発成果について

1 事業全体の成果

1.1 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証

(1) 低交流損失超電導導体の性能検証

高温超電導ケーブルは、電気抵抗がゼロであるためジュール損失が発生せず、送電損失が非常に小さいことが期待される。しかしながら、実際は超電導体に交流磁場が印加されると、主にそのヒステレシスによる磁化損失が発生する。従来のBi2223線材(TypeHT線材)を用いて構成した超電導ケーブル導体の交流損失計算値は5.5W/m/ph @ 3kArmsとなり、本プロジェクトの目標値である1W/m/ph @ 3kArmsを達成するためには、超電導線材の大幅な低損失化が不可欠である。住友電工では、超電導フィラメントにツイストを施した低損失型TypeACT線材を自主開発しており、従来のノンツイスト線材に比べて1/3の低損失化に成功した。

しかしながら、全てTypeACT線材を用いて構成した超電導ケーブル導体は、大電流化のためには、臨界電流(Ic)特性の向上が必要であった。従って、大電流化の観点から、TypeACT線材とTypeHT線材を適材適所で組み合わせたハイブリッド超電導導体の設計を検討した。

さらに、超電導線材の低損失化だけでなく、フォーマ内に発生する渦電流損失を0.1W/m/ph @ 3kArms以下に低減するため、φ0.8mmの素線絶縁銅線を用いた低損失型分割集合フォーマの開発を行った。

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

(2) 短絡事故時対応超電導導体の性能検証

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

このプロジェクトでは、①再送電無の場合は規定されている31.5kA、2秒、②再送電有の場合は10kA、2秒(もらい事故)、の2ケースについて対応を考えることにし、①の場合は、短絡電流通過後もケーブル健全性が保たれることを確認すること、②の場合は、短絡電流通過直後に定格電流、電圧が印加できることの確認を行うことを目標とした。

ケーブル構造の設計の結果、短絡電流が流れてもケーブルの健全性が保たれるような温度上昇を抑えるため、短絡電流を分流させる常電導保護層を付加するケーブ

ル設計を、ケーブル外径制約下で実施した。その結果、フォーマとして 140mm^2 の銅撚り線構造を採用し、またシールド部にはトータル 77mm^2 の断面積をもつ、銅テープ線を超電導シールドの外側に巻きつけることとした。

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

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

以上の結果、プロジェクトの目標を達成した。

(3) 中間接続部の検討

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

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

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

通電試験では、 3kArms 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 1.75kA 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 3kA 通電時の全体ロスが 72W 程度であると試算した。

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

(4) 終端接続部の検討

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、10kA-2sec 後の 1.75kA 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、AC90kV@3時間、 $Imp \pm 385kV/3$ 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。また、ケーブルコアの応力を引きとめる治具を製作し、十分な機械特性を有していることを確認した。

3kA 級電流リードの設計では 2500mm² 燃線構造を選び、試作評価した結果、損失は計算値とよく一致し、170W@3kA であった。端末部の熱損失を算出し、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、終端接続部の所要性能である「耐熱機械力」「電流容量」「耐電圧」「圧力設計」に十分に満足するものであった。

(5) 検証用ケーブルシステムの構築と評価

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

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

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。また、冷却時に超電導ケーブルが熱収縮

によって発生する引張り力は2.4～2.7ton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ことを確認した。

冷却後、各種電気試験を実施した。導体の臨界電流測定を行い、 I_c DC5.4kA @ 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。また、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。この試験は30年間の加速試験に相当する。

今後、ヒートサイクル試験、限界性能試験を実施していく。

1.2 トータルシステム等の開発

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

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

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6台に決定した。また、冷凍機、ポンプの構成を検討し、冷凍機については2台×3並列の並列接続することとした。ポンプについては、2台を交互運転するとした。

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。

1.3 送電システム運転技術の開発

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

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

実証場所でのサージ電圧は、EMTP 解析の結果、200kV 程度であり、66kV 系統での LIWV (雷インパルス耐電圧) : 350 kV よりも小さいことが判明した。その結果、ケーブルの試験電圧に反映した。

常時運転については、冷却システムで超電導ケーブルの温度、圧力、流量を制御することが重要で、それぞれの制御指針を示した。温度制御については、冷凍機の ON/OFF 運転を志向しており、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。

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。

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。

1.4 実系統における総合的な信頼性の検証

これまでの成果として、実系統連系試験サイトを決定するとともに、実系統連系試験基本指針を検討した。

現在使用されている CV ケーブルなどの従来ケーブルは、それらが実系統での長期使用に耐える特性を有しているかを検証・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系統での長期使用に耐える特性を持つことを確認するための試験項目およびそれらの実施時期や実施方法などの試験計画について検討した。

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。

H22 年度には、旭変電所に布設する実証用ケーブル製造、基礎工事を実施し、H23 年度には現地にて実証ケーブルシステムの構築し、実証試験を開始する予定である。

1.5 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究

(1) 高温超電導ケーブルの標準化の研究

超電導ケーブルは新しい技術であり、まだその規格は確立していない。しかしながら、米国、ヨーロッパ、中国、韓国などで開発が進んでおり、実用化に向けての規格化、標準化が望まれている。本プロジェクトでは、国際電気規格（IEC）や国際大電力システム会議（CIGRE）にて進めようとしている超電導ケーブルの試験法に関して、実施する試験内容や結果、検討内容等必要な情報を提供する予定である。

これまでの成果として、CIGRE B1にて超電導ケーブルの試験法を検討するワーキンググループ（WG）を設立するかどうか検討する、タスクフォース（TF）に日本の代表として住友電工の磯嶋氏がメンバーとなり参加、磯嶋氏のサポートを行った。TFとしては、超電導ケーブルのWGが設立されることが決定し、今後3年間、超電導ケーブル試験項目とその内容について議論される。予想される動きとしては、その議論内容がCIGREのrecommendationとしてIECに提案され、その後IECにて試験法の規格が議論されることが考えられる。

(2) 高温超電導ケーブルの適用技術研究

超電導ケーブルのメリットを評価する際に必要な、コスト計算時の考慮すべき項目について整理した。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FSを実施し、経済性の比較を検討していく。

(3) 関連法規への対応

旭変電所での超電導ケーブルシステムの搬入・据付・長期の実系統試験の全試験工程を対象とした時に、対応が必要となる関連法規を調査するとともに、それらの対応等を検討した。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た。

表 1-1 に事業全体の成果のまとめについて記す。

表 1-1 高温超電導ケーブルシステムの成果全体まとめ

| 項目 | 目標 (H21 年度達成) | これまでの成果 | 達成度 |
|-------------------------------|---|---|--|
| 1. 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証 | | | |
| (1) 低交流損失超電導導体の性能検証 | <ul style="list-style-type: none"> 交流損失：1W/m/相 @2kA の短尺での検証 30m ケーブルの交流損失の評価 | <ul style="list-style-type: none"> 低交流損失型超電導線材を用いて、短尺ケーブルにて、0.83W/m/相 @ 2kA を達成 30m 検証ケーブルでの損失評価中 | 達成 達成見込み (H22/3) |
| (2) 短絡事故時対応超電導導体の性能検証 | <ul style="list-style-type: none"> 短絡電流：31.5kA-2 秒の短絡電流対応 もらい事故時(10kA-2 秒)後も定格の電流、電圧が印加できることの確認 長尺ケーブルを想定した場合の短絡電流通過後の冷媒挙動について、シミュレーションにて把握。 30m 検証システムを用いて、短絡電流を模擬試験を行い、対応方法の検討を行う。 | <ul style="list-style-type: none"> ケーブルフォーマ、Cu シールドをケーブル構造に採用し、31.5kA-2 秒において、短尺ケーブルが健全であることを確認した。 10kA-2sec 後に、定格電圧、電流が印加できることを確認した。 長尺ケーブルでの冷媒挙動についてシミュレーションを検討中 H21 年下期に実施予定 | 達成 達成 達成見込み (H22/3) 達成見込み (H22/3) |
| (3) 中間接続部の検討 | <ul style="list-style-type: none"> 中間接続部の導体接続損失：2kA 通電相当で $1\mu\Omega$/相以下 66kV 級中間接続部の設計完了 その設計の妥当性について検証試験を実施すること。 30m 検証ケーブルにて組立て施工 | <ul style="list-style-type: none"> 66kV 級中間接続部を設計 要素試験において、接続抵抗が、導体部は $6.7n\Omega$/相@3kA、シールド部は $2.5n\Omega$/相@3kA であることを検証し、最終目標値の $1\mu\Omega$/箇所 @ 3kA 以下を達成した。 設計した中間接続部において、通電試験、短絡電流試験、電気絶縁試験、機械特性試験を実施し良好な結果を得た。 30m 検証システムで組立て工法を確認した。 | 達成 |
| (4) 終端接続部の検討 | <ul style="list-style-type: none"> 66kV 級終端接続部の設計完了 その設計の妥当性について検証試験を実施すること。 30m 検証ケーブルにて組立て施工 | <ul style="list-style-type: none"> 66kV 級終端接続部を設計 設計した終端接続部において、通電試験、短絡電流試験、電気絶縁試験、機械特性試験を実施し良好な結果を得た。 30m 検証システムで組立て工法を確認した。 | 達成 |
| (5) 検証用ケーブルシステムの構築と評価 | <ul style="list-style-type: none"> 30m ケーブル、中間接続部、終端接続部を備えたケーブルシステムを構築する。 本システムで以下の試験を行う。 <ol style="list-style-type: none"> 定格性能試験 超電導性能の確認（臨界電流測定、交流損失測定）、定格課通電の確認、長期課電試験（約 1 ヶ月） 冷熱サイクル試験（室温-液体窒素温度の繰り返し試験） 限界性能試験 冷凍機故障模擬試験、過電流試験 残存性能試験 | <ul style="list-style-type: none"> 30m ケーブルの製造を行い、所定の性能をもつことをサンプル試験にて確認した。 30m ケーブルを中間接続部、終端接続部と組み合わせ、ケーブルシステムを構築した。 定格性能試験では、臨界電流測定、定格課通電試験、長期課電試験を実施し、いずれも良好な結果を得た。 H21/下期に、②③④を実施する。 | 達成 達成 達成 達成見込み (H22/3) |

| 項目 | 目標 (H21 年度達成) | これまでの成果 | 達成度 |
|-------------------------|--|--|---------------------------|
| 2. トータルシステム等の開発 | | | |
| (1) 実証ケーブルシステムの基本仕様 | 実証場所の選定及び、実証場所に構築する高温超電導ケーブルシステムの概念設計を行う。 | <ul style="list-style-type: none"> ・実証場所を旭変電所に決定 ・実証システムの基本構成、仕様についてまとめた。 | 達成 |
| (2) 実証ケーブルシステムの付帯機器の検討 | 超電導ケーブルシステムに必要な、運転・監視システム、保護・遮断システムなどの付帯機器の仕様について検討する。 | <ul style="list-style-type: none"> ・運転・監視については、必要な機能とシーケンスについて検討。 ・保護・遮断システムについては、超電導ケーブルでも、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。 | 達成 達成 |
| (3) 冷却システムの検討 | <ul style="list-style-type: none"> ・冷却システムの基本コンセプトの検討 ・実証ケーブル用冷却システムに設計検討の実施 | <ul style="list-style-type: none"> ・冷却システムのコンセプトについてまとめ、送電を継続し、負荷に応じた対応ができるシステムを目指す。 ・実証用冷却システムの構成を決定。詳細設計中。 | 達成 達成見込み (H22/3) |
| (4) 超電導ケーブルの建設手法の検討 | ・実証場所での施工基本計画の作成 | ・実証場所を管轄する東京電力担当部署内で施工方法を検討し、計画を作成した。 | 達成 |
| 3. 送電システム運転技術の開発 | | | |
| (1) 実証場所での系統特性調査 | <ul style="list-style-type: none"> ・実証場所での系統条件を調査・検討 ・超電導ケーブルシステムのインピーダンスを求め、系統接続時の影響を検討する。 | <ul style="list-style-type: none"> ・実証場所での短絡電流条件は、事故直後の再送電無の場合は、0～31.5 kA-2 sec、再送電有の場合は、0～10 kA-2 sec の範囲であることを計算により求めた。サージ電圧は、EMTP 解析の結果、200kV 程度と判明。それらを超電導ケーブルシステムの仕様として、ケーブル設計にフィードバックした。 ・超電導ケーブルのインピーダンスは従来ケーブルよりも小さくなり、系統安定度向上に寄与できること、サージインピーダンスローディングが大きく大電流送電に適する、などを確認した | 達成 |
| (2) 平常時の運転技術開発 | <ul style="list-style-type: none"> ・高温超電導ケーブルシステムを正常に運用するために制御すべき機器の検討 ・その制御方法や制御状態の確認方法について概念設計の実施 ・30m ケーブル検証試験にて基本動作の確認。 | <ul style="list-style-type: none"> ・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、その制御方法について絞って検討し、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。 | 達成 達成 達成見込み (H22/3) |
| (3) 事故時の運転技術開発 | <ul style="list-style-type: none"> ・高温超電導ケーブルシステムの警報動作条件の検討および警報動作時の対応方針の概念設計 ・保護リレー動作時の高温超電導ケーブルシステムの運用指針 ・起こりうる想定事故について、その要因と対策のまとめ | <ul style="list-style-type: none"> ・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し、指針をまとめた。 ・警報については重故障と軽故障に分類し、重故障の場合の対応案をまとめた。 ・事故後のケーブル復帰条件については検討中 | 達成 達成 達成見込み (H22/3) |
| (4) 保守・メンテナンスの基本計画作成 | ・実証ケーブルの保守・メンテナンスの基本計画 | 冷却システムのメンテナンス条件について調査した。具体的なメンテナンス方法については、冷却システム詳細設計と進める。 | 達成見込み (H22/3) |

| 項目 | 目標 (H21 年度達成) | これまでの成果 | 達成度 |
|-----------------------------|---|--|--------------------------------|
| 4. 実系統における総合的な信頼性の検証 | <ul style="list-style-type: none"> ・実系統への接続前の確認試験について項目を整理 ・実証用ケーブルシステムの詳細設計の実施。 | <ul style="list-style-type: none"> ・試験項目、内容について整理し、要素試験、30m ケーブル試験に反映。 ・実証ケーブルの詳細設計中。 | <p>達成</p> <p>達成見込み (H22/3)</p> |
| 5 超電導ケーブルの適用技術標準化の研究 | | | |
| (1) 高温超電導ケーブルの標準化研究 | <ul style="list-style-type: none"> ・超電導送電システムの国際規格化を進めるための標準化項目を作成する。 ・30m ケーブルにて標準化に必要なデータを収集する。 | <ul style="list-style-type: none"> ・CIGRE 超電導ケーブルの試験法についての標準化検討をサポート。日本における試験法を整理し情報提供 ・30m ケーブルの情報を提供する予定 | <p>達成</p> <p>達成見込み (H22/3)</p> |
| (2) 高温超電導ケーブルの適用技術研究 | <ul style="list-style-type: none"> ・超電導ケーブルシステムの適用効果、導入効果の評価項目を整理する。 | <ul style="list-style-type: none"> ・超電導ケーブルのメリットを評価する際に必要な項目についてまとめた。 | <p>達成</p> |
| (3) 関連法規への対応 | <ul style="list-style-type: none"> ・高圧ガス保安法及び電気事業法等の関連法規への対応プロセスをまとめる。 | <ul style="list-style-type: none"> ・関係各所と協議し、実証ケーブルは電気事業法にて取り扱うことを確認。その他、遵守すべき法についてまとめ対応指針を決めた。 | <p>達成</p> |

2. 研究開発項目毎の成果

2.1 高温超電導ケーブルの重要要素技術の検証

2.1.1 低交流損失超電導導体の性能検証

(1) 開発目標

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

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

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

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

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

(2) 超電導ケーブルの交流損失

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

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

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

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

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

表 2.1.1-1 計算モデルの諸元

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

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

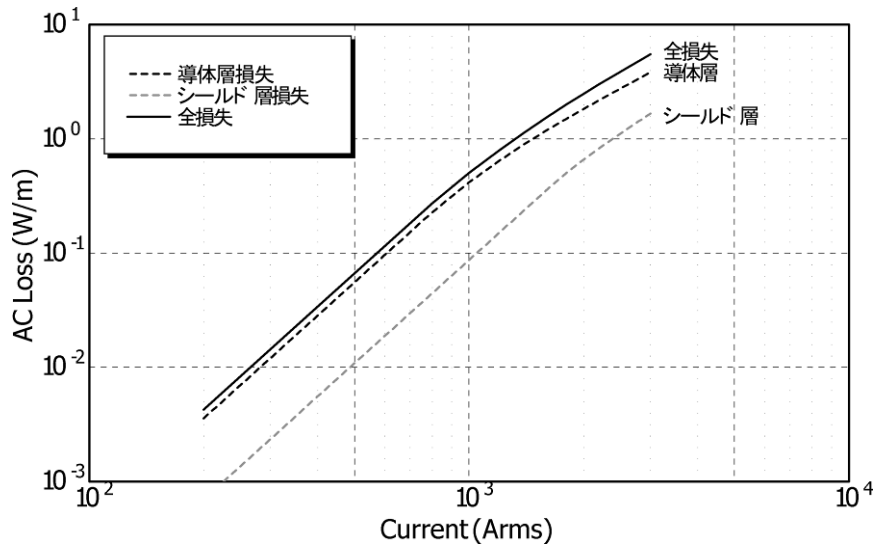


図 2.1.1-1 ML-UCD モデルを用いた超電導導体の交流損失計算結果

(3) 低交流損失型のビスマス線材の開発

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

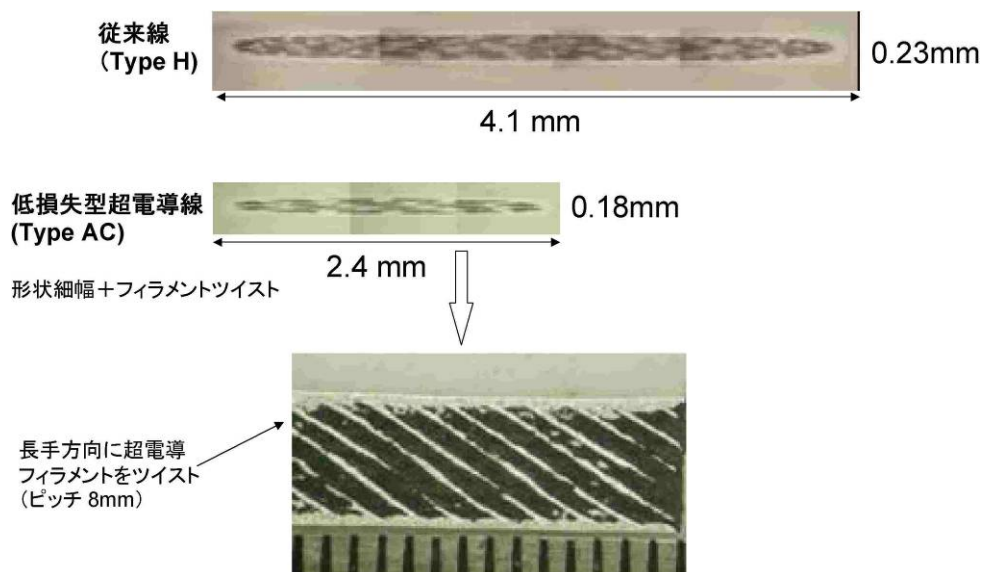


図 2. 1. 1-2 TypeH 線材と TypeAC 線材

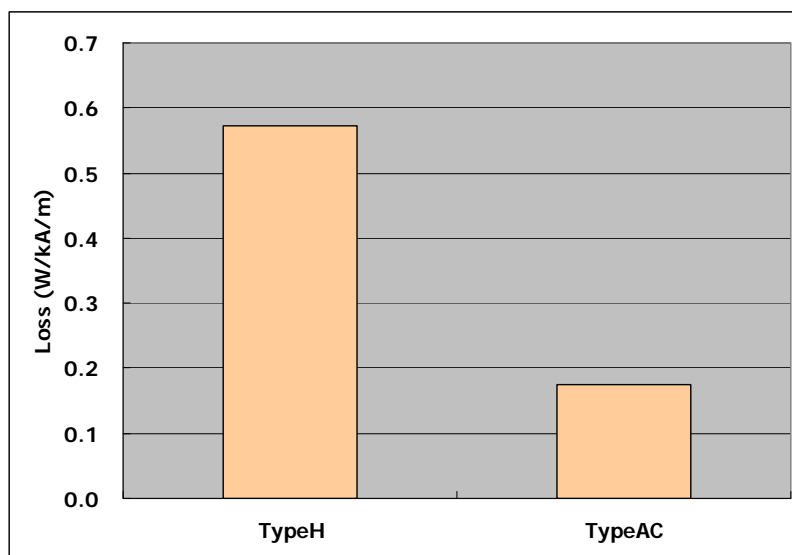


図 2. 1. 1-3 線材磁化損失測定結果 (平行磁場 700Gauss 中)

(4) 低交流損失型線材を用いた超電導導体の検証

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

交流損失測定は、図 2.1.1-4 に示すように、導体層とシールド層に往復通電を行い、導体層及びシールド層の直上に埋め込んだ電圧タップを用いた電气的四端子法により実施した。なお、交流損失測定は 60Hz で実施したが、以下の議論では、測定した損失の値を 5/6 倍した 50Hz 換算値を用いる。導体サンプルの交流損失測定結果を図 2.1.1-5 に示す。2kArms 通電時の交流損失は、導体層とシールド層の損失の合計で 0.85W/m となる。同図中には、ML-UCD モデルにより計算したノンツイスト線材を用いた導体の交流損失（図 2.1.1-1 に示した計算結果）も示してある。TypeACT 線材を用いて製作した導体の交流損失は、ノンツイスト線材により構成された導体に対して 1/3 程度に低減されており、TypeAC 線材を用いた超電導導体の低損失化が実証された。

表 2.1.1-2 超電導導体の諸元

| 導体構造 | 仕様 | 外径 (mm) |
|---------------|---------------|---------|
| フォーマ | 分割集合フォーマ | 17.5 |
| HTS 導体 1 層目 | TypeACT、19 本 | 21.4 |
| HTS 導体 2 層目 | TypeACT、21 本 | |
| HTS 導体 3 層目 | TypeACT、22 本 | |
| HTS 導体 4 層目 | TypeACT、22 本 | |
| 絶縁層 | PPLP、6mm 厚 | 34.3 |
| HTS シールド 1 層目 | TypeACT、36 本 | 36.6 |
| HTS シールド 2 層目 | TypeACT、38 本 | |
| 保護層 | 銅テープ、絶縁紙及び不織布 | 43.5 |
| 導体層 I_c | 4900 A | |
| シールド層 I_c | 3600 A | |

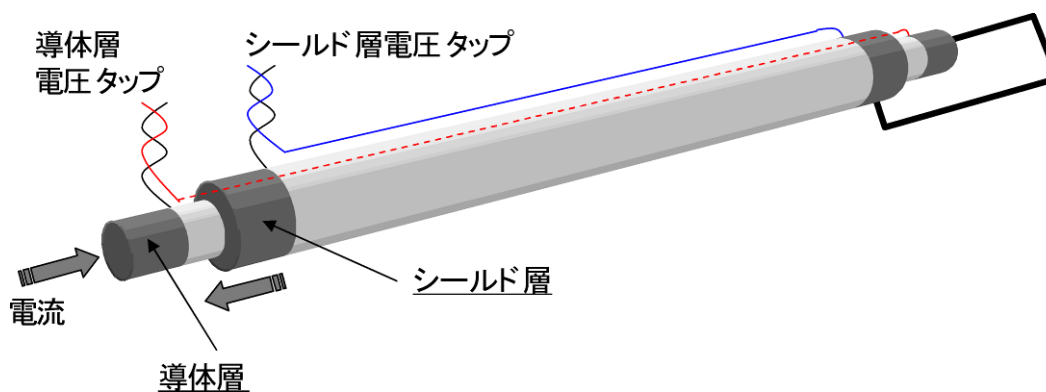


図 2.1.1-4 超電導導体サンプル概要

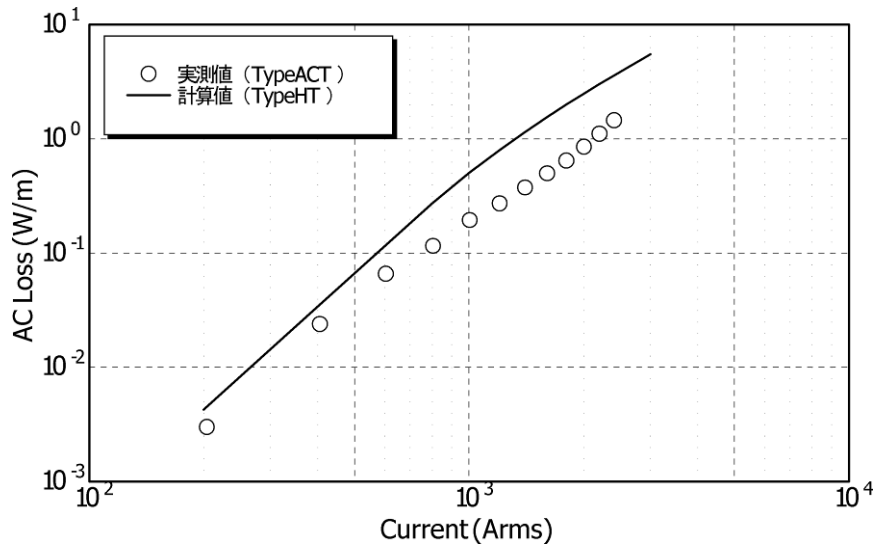


図 2.1.1-5 超電導導体の交流損失測定結果

(5) 超電導導体の交流損失解析モデルに関する検討

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

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

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

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

通電損失は、Bean モデルに基づいて解析した下記の理論式が Norris によって

求められており⁽⁴⁾、Bi2223 線材のように導体幅と厚さとの比（アスペクト比）が小さい場合には、線材断面を楕円形状として計算している Ellipse モデル（式 2.1）により良く記述されることが知られている（式中、 $z = I_p/I_c$ ）。

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

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

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

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

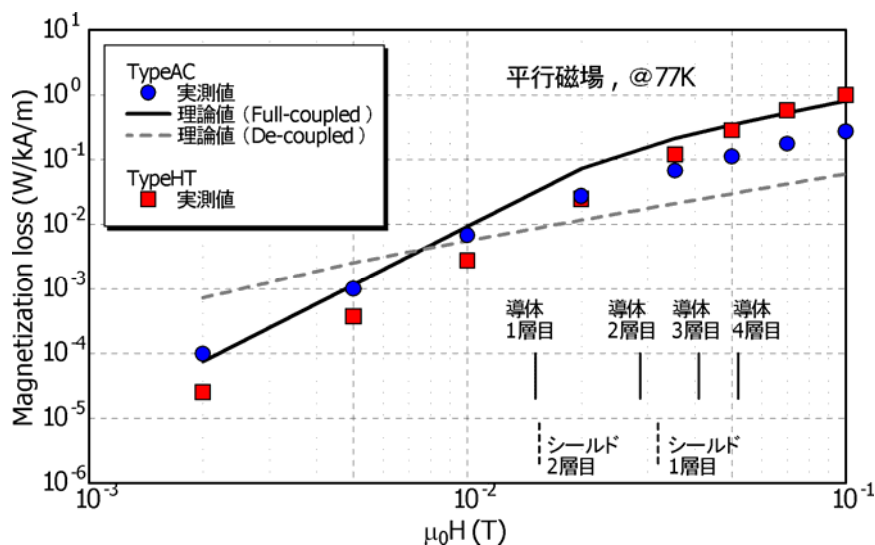


図 2.1.1-6 線材の磁化損失測定結果

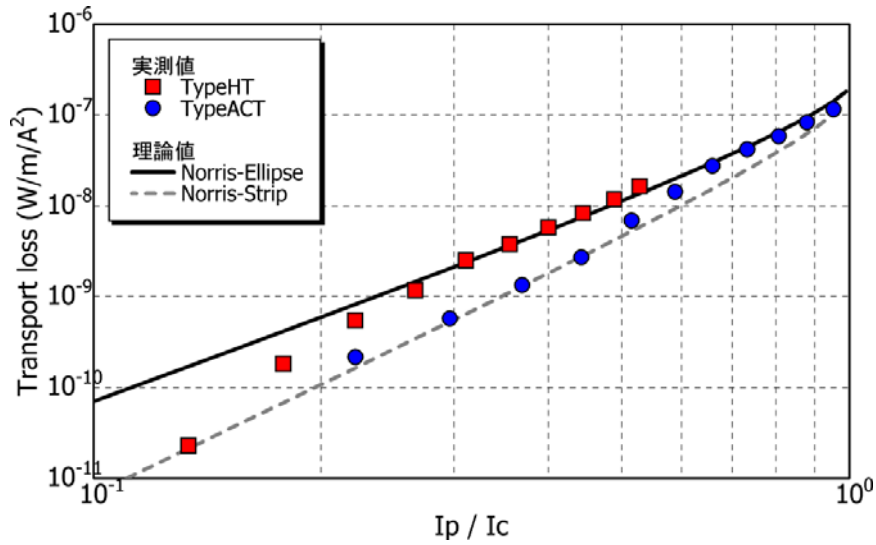


図 2.1.1-7 線材の通電損失測定結果

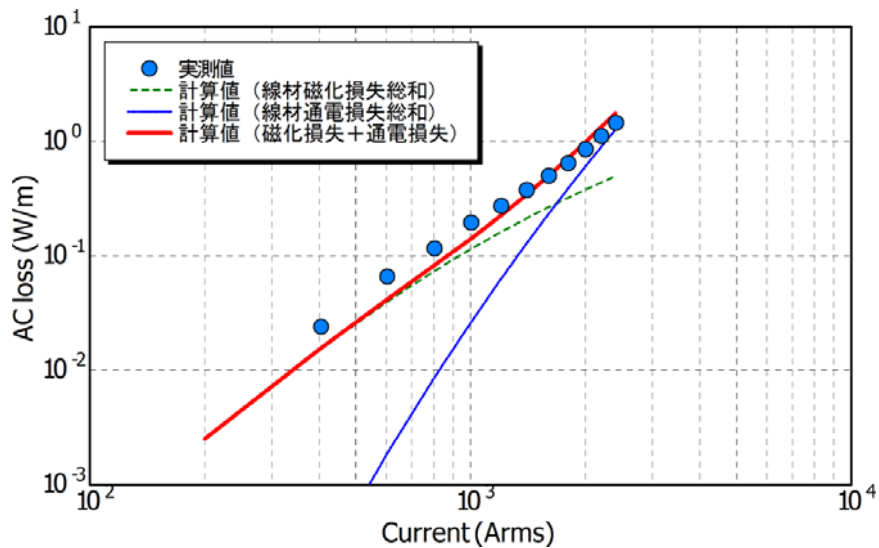


図 2.1.1-8 超電導導体の交流損失測定結果と解析モデルとの比較

(6) ハイブリッド超電導導体の構造最適化

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

採用する。このため、ケーブル外径を 150mm 以下とするためには、表 2.1.1-3 に示すように、導体 4 層、シールド 2 層が許容最大層数となる。また、導体 2 層、シールド 1 層構造では、高 Ic 型の TypeHT 線を用いたとしても 3kA 級の容量を確保することは困難であり、以下の検討では、導体 4 層、シールド 2 層構造を前提としてケーブル構造の最適化を行う。

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

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

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

表 2.1.1-3 コア構造とケーブル外径計算値

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

※上段が 7mm 厚絶縁、下段の () 内が 6mm 厚絶縁の場合の外径

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

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

表 2.1.1-5 解析に用いた線材の諸元

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

表 2.1.1-6 解析に用いたケーブルコアの諸元

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

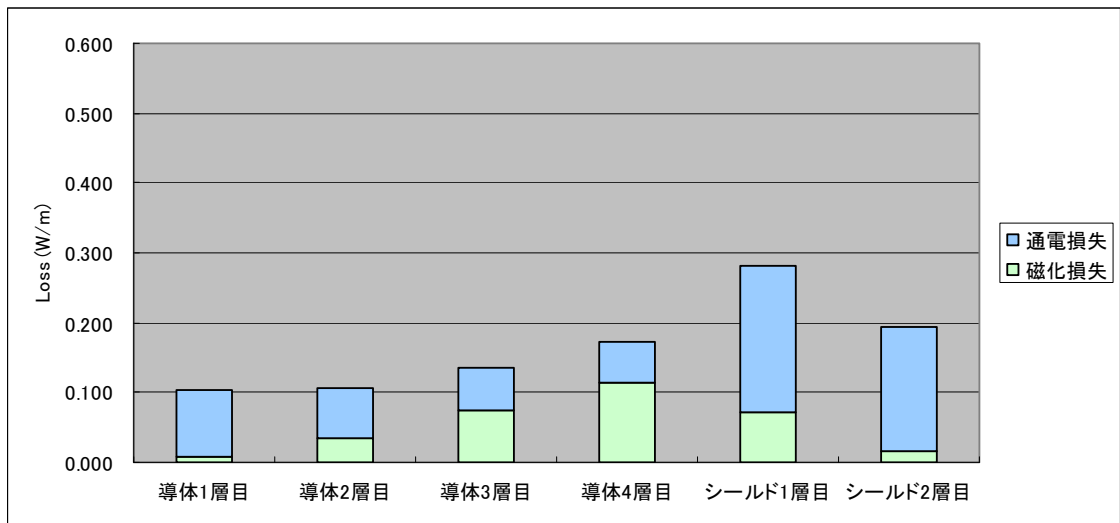


図 2. 1. 1-9 (a) TypeACT 線材を用いたケーブルコアの交流損失解析結果

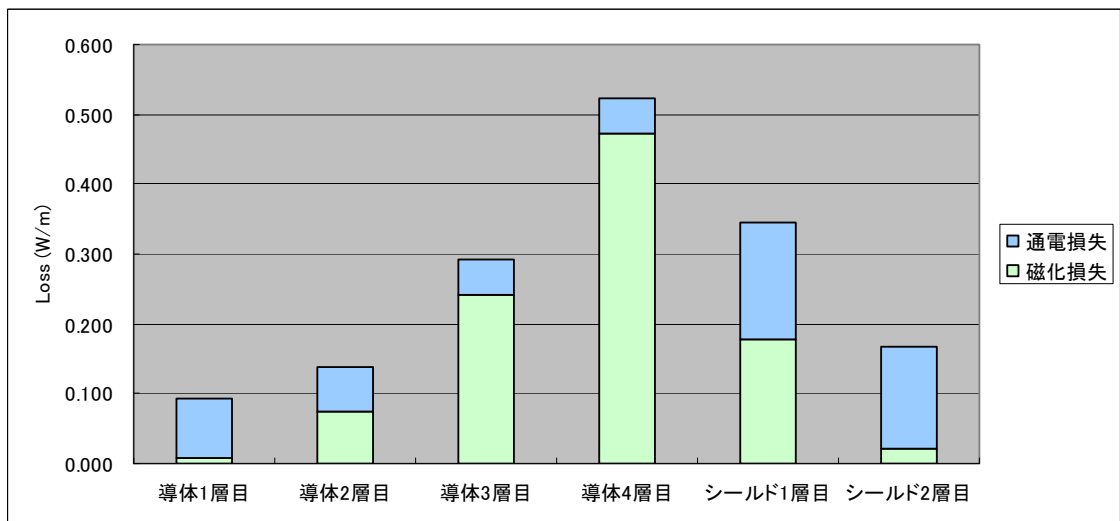


図 2. 1. 1-9 (b) TypeHT 線材を用いたケーブルコアの交流損失解析結果

(7) 低損失フォーマの開発

これまで、超電導線材内に発生する損失について議論してきたが、線材を巻き付けるために必要なフォーマ部分に発生する損失についても考慮する必要がある。各層の電流を均一化するために、線材の巻付けピッチを調整した均流化導体では軸方向の磁場が発生し、この軸方向磁場に起因して銅撚り線フォーマ内に渦電流損失が発生する。図 2. 1. 1-10 は、断面積 140mm^2 のフォーマについて、フォーマを構成する銅素線の直径に対して発生する渦電流損失を計算した結果を示している。なお、素線は全て絶縁が施されていることを計算の前提としている。導体の巻付けピッチの構成にも依るが、3kArms 通電時の軸方向磁場は

0.015~0.02T 程度となり、このときのフォーマの渦電流損失を交流損失目標値 1W/m/ph の 1 割程度 (0.1W/m/ph) に抑えるためには、フォーマを構成する銅素線の直径を 1mm 以下にする必要がある。

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

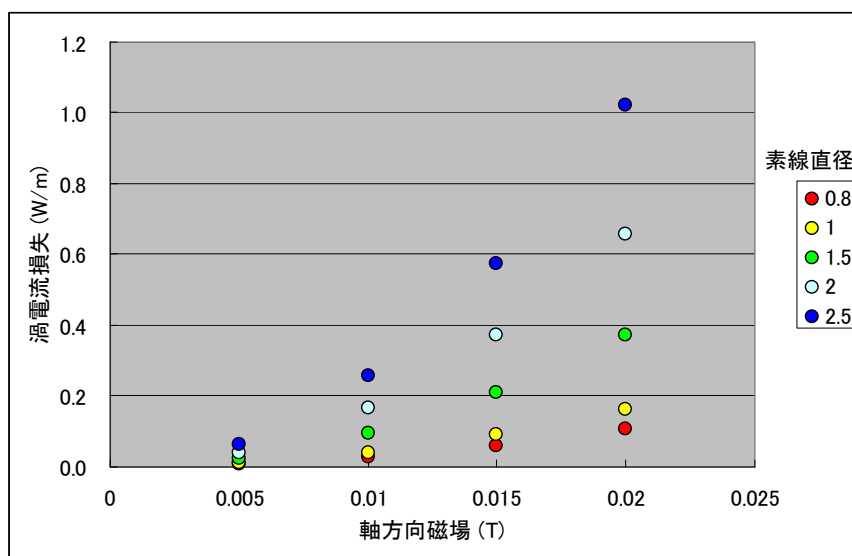


図 2.1.1-10 フォーマ素線径と渦電流損失計算値



図 2.1.1-11 低損失型分割集合フォーマと従来の同心撚りフォーマ

表 2.1.1-7 低損失型分割集合フォーマと従来の同心撚りフォーマの諸元

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

(8) ハイブリッド超電導導体の交流損失検証

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

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

表 2.1.1-8 ハイブリッドケーブルコアに用いた線材の諸元

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

表 2.1.1-9 ハイブリッドケーブルコアの諸元

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

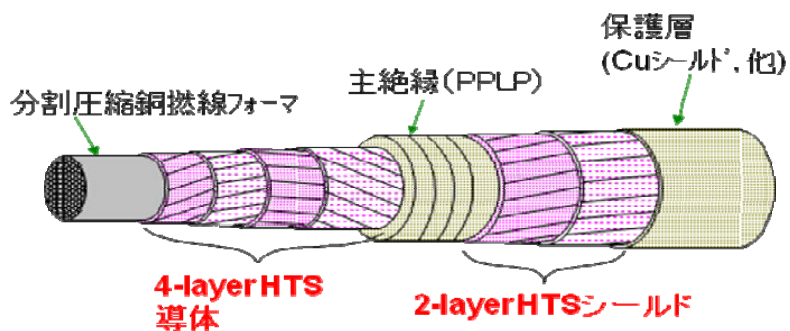


図 2.1.1-12 ハイブリッド型ケーブル構造

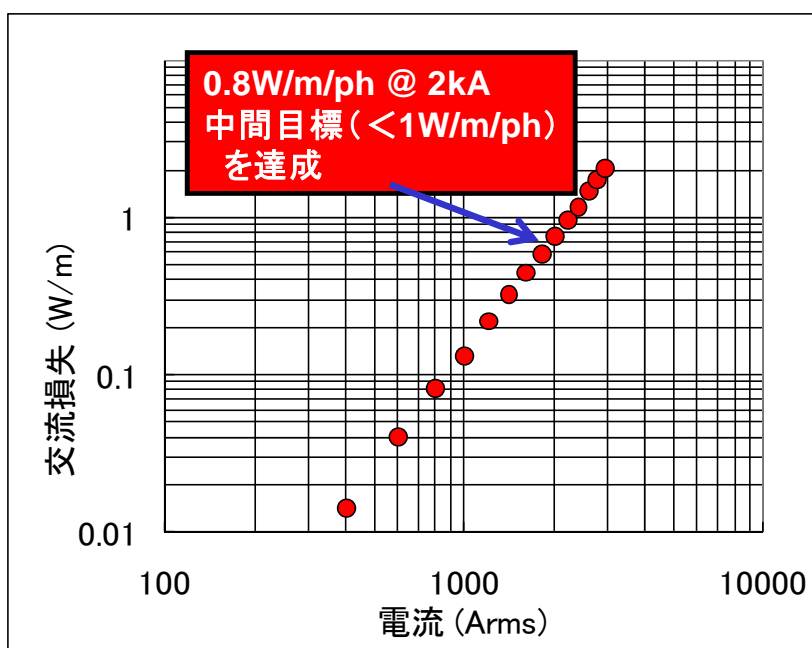


図 2.1.1-13 ハイブリッドケーブル導体の交流損失測定結果

(9) まとめ

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

(10) 今後の開発指針

本章では、短尺の超電導導体を用いた電氣的な測定法により中間目標 $1\text{W/m/ph @ }2\text{kArms}$ 以下の低損失化を実証した。本設計に基づいて検証用 30m ケーブルを製造、検証システムを組み上げ、長尺ケーブルの交流損失特性をカロリメトリック法により測定することで、短尺導体に対する測定結果との比較検討を行う予定である。

本プロジェクトの最終目標である $1\text{W/m/ph @ }3\text{kArms}$ を達成するためには、超電導線材のさらなる低損失化が必須である。開発した損失解析モデルを用いて、目標を達成するために要求される線材特性について検討を行い、線材開発にフィードバックを行う。また、線材の低損失化だけでなく、ケーブル設計の改善により低損失化を実現する可能性についても検討を行っていく。

2.1.2 短絡電流に対する超電導導体の性能検証

(1) 開発目標

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

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

尚、31.5kA、2秒の短絡電流が流れた際のケーブルの健全性を検証することがH21年度までの中間目標である。

(2) 短絡電流対策の設計

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

2.1.1節で検討したように、外径18mm（クッション層込み）の分割集合フォーマを用いたケーブルコアにおいて、交流損失を1W/m/ph @ 2kArms以下とし、3kArms通電可能な電流容量を確保するためには、超電導導体4層及び超電導シールド2層の構造が必要となる。7mm厚絶縁を前提として、ケーブル外径を145mm以下に抑えるために許容される銅シールド層の最大層数は3層(77mm²)となる。

分割集合フォーマ及び 77mm^2 の銅シールド層が常電導保護層として十分な断面積を有しているかを事前検討するため、 31.5kA 、2 秒の短絡電流が流れた際のケーブルコア内の過渡温度上昇シミュレーションを実施した結果を図 2.1.2-1 に示す。シミュレーションは、ケーブルコア断面半径方向の一次元モデルに対して、超電導層の過電流特性⁽¹⁾や常電導層の熱物性値の温度依存性を考慮した過渡電流分布解析及び過渡熱伝導解析の連成により実施した。超電導導体層及び超電導シールド層の温度上昇 (ΔT) は、それぞれ 127K 及び 114K であり、超電導線材にダメージが発生しない範囲内に収まっていると考えられ、上記常電導シールド層を有するケーブルコアに対して短絡電流試験を実施することとした。なお、銅シールド層 2 層 (50mm^2) 構造では、超電導シールド層の ΔT が 220K になると予想され、2 秒間という短時間で常温まで温度上昇が発生するため、急激な熱膨張による機械的なダメージが発生する恐れがある。

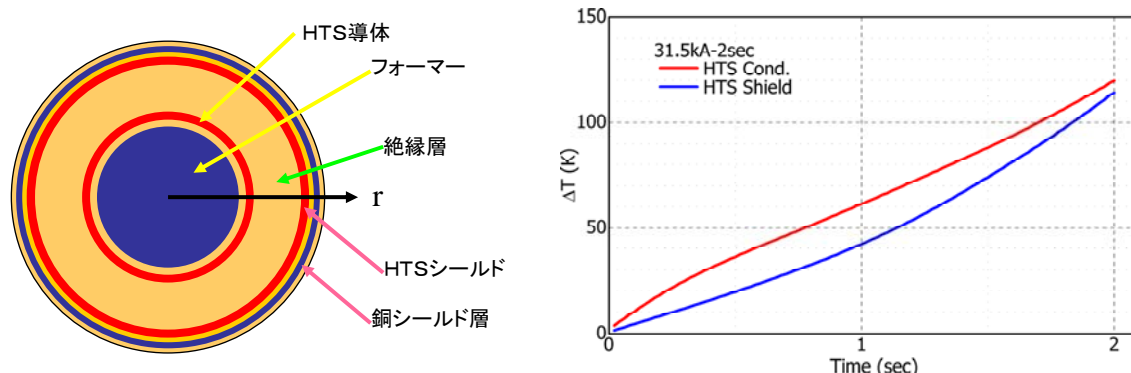


図 2.1.2-1 シミュレーションモデルの概要と解析結果

(3) 短絡電流試験

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

短絡試験は、図 2.1.2-3 に示すように、約 2.7m の 2 本の超電導ケーブルコアを並べ、2 本のコアのシールド層を短絡、閉回路とした状態で導体層に直列往復通電を行うことで、シールド層に遮蔽電流を流す方式とした。試験サンプル及び試験場の写真を図 2.1.2-4 に示す。試験サンプルの諸元は表 2.1.2-1 に示すとおりであり、分割圧縮導体 (140mm^2) をフォーマとして用いた超電導導体 4 層、超電導シールド 2 層、銅シールド層 3 層 (77mm^2) でケーブルコアを構成している。試験サンプルの導体層の臨界電流 (I_c) は 6300A (交流換算で 4.5kArms 相当)、シールド層 I_c は 7700A (交流換算で 5.5kArms 相当) であり、計測素子と

して、短絡電流印加時のケーブルコア内部温度上昇を計測するための熱電対と、シールド層の誘導電流を計測するためのロゴスキーコイルが取り付けられている。

31.5kA、2秒の短絡電流印加時の導体層及びシールド層の電流波形を図 2.1.2-5 に示す。シールド層には導体層とほぼ逆位相の電流が誘起されるが、シールド層の温度上昇と共に誘導電流は減衰していく。

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

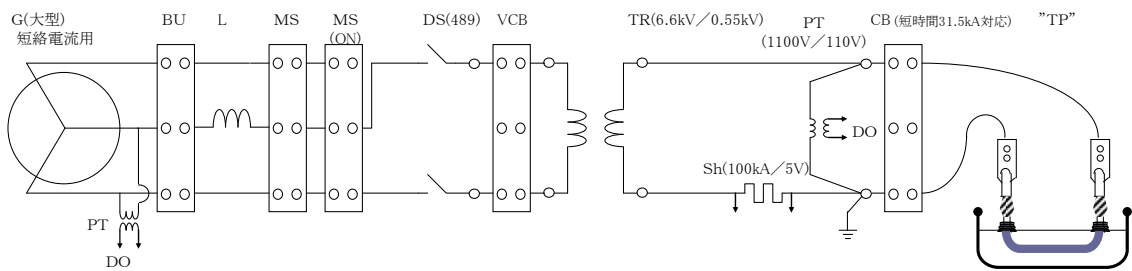


図 2.1.2-2 短絡電流試験回路の概要

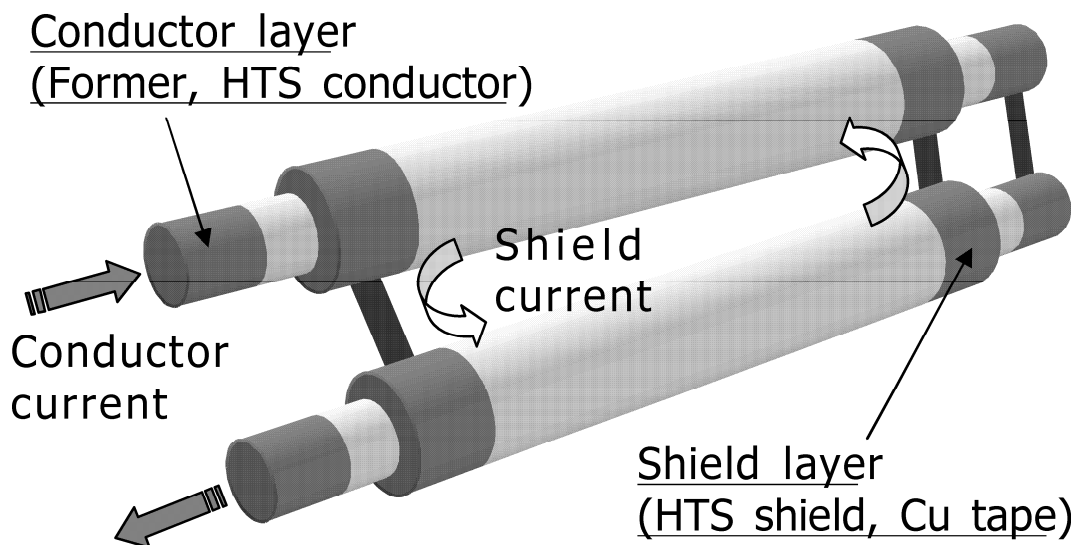


図 2.1.2-3 短絡電流試験サンプルの概要



図 2.1.2-4 試験サンプル及び試験場の写真

表 2.1.2-1 超電導ケーブル導体の諸元

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

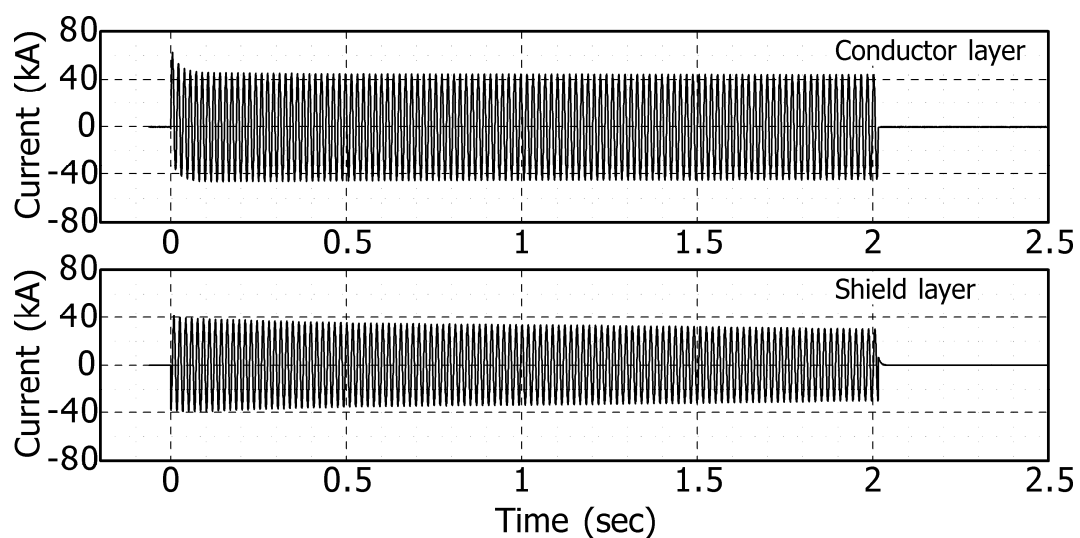


図 2.1.2-5 短絡電流試験時の電流波形

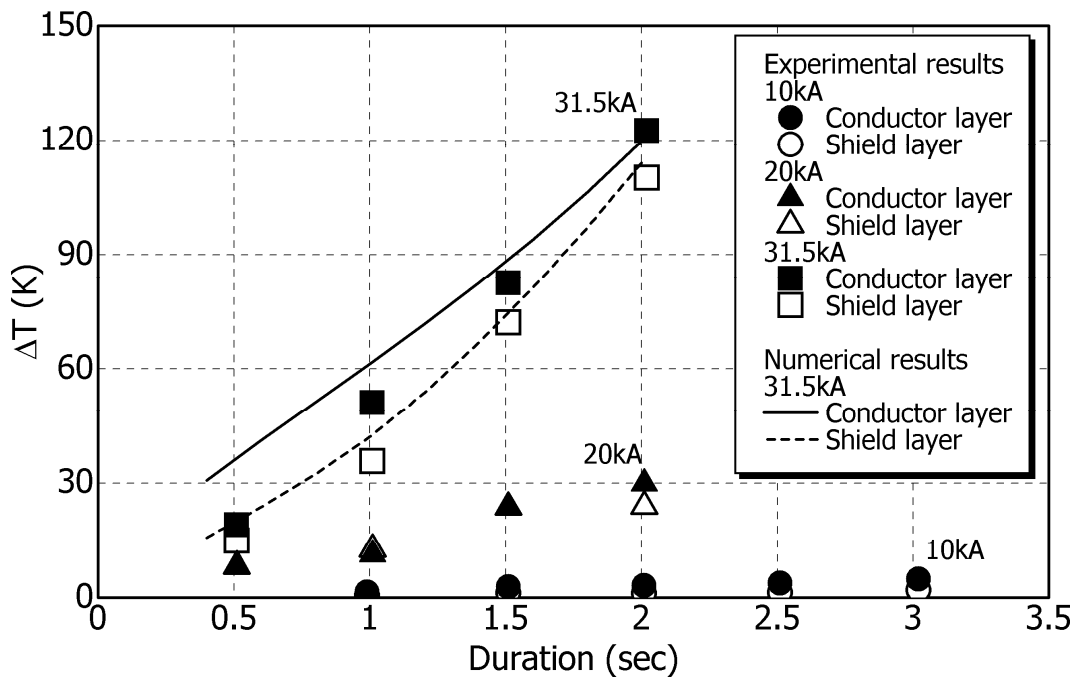


図 2.1.2-6 短絡電流試験時の導体温度上昇

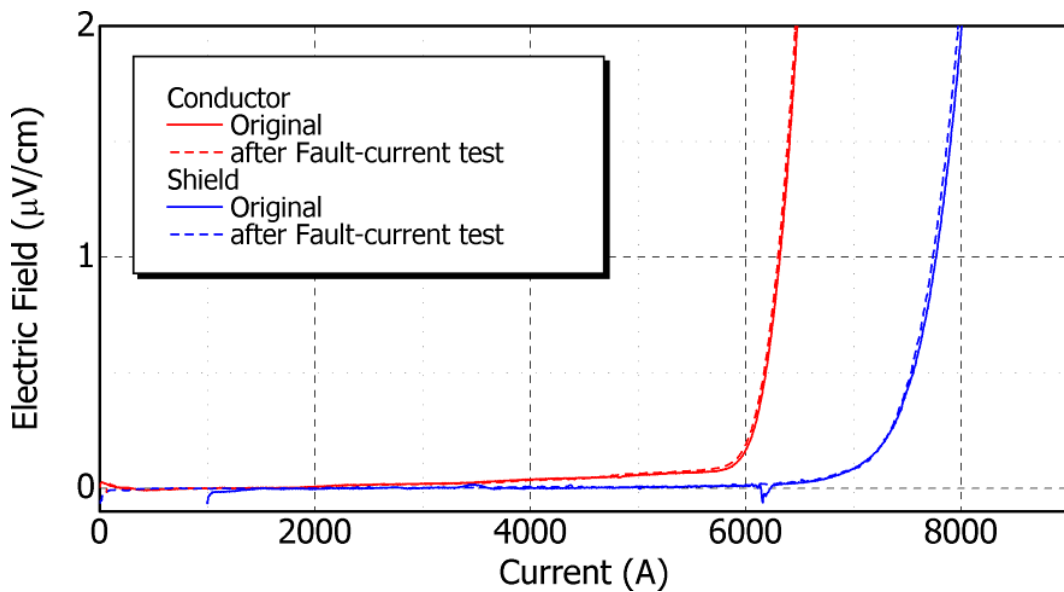


図 2.1.2-7 短絡電流試験前後の臨界電流測定結果

(4) もらい事故模擬通電試験

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

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

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

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

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

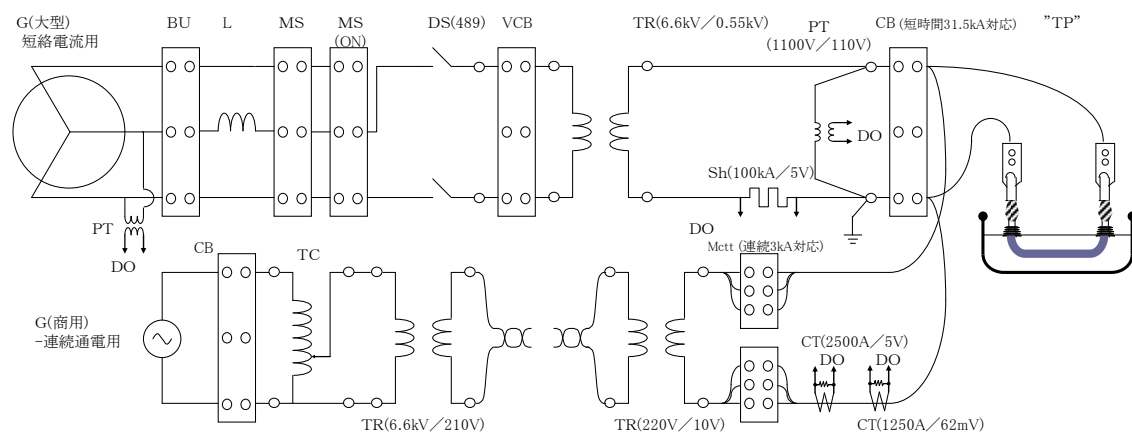


図 2.1.2-8 もらい事故模擬通電試験回路の概要

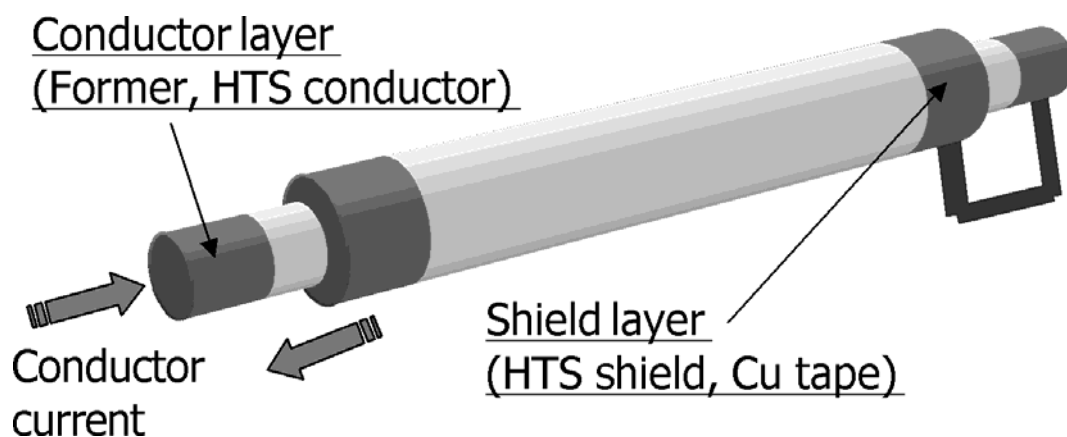


図 2.1.2-9 もらい事故模擬通電試験サンプルの概要



図 2.1.2-10 もらい事故模擬試験時の写真

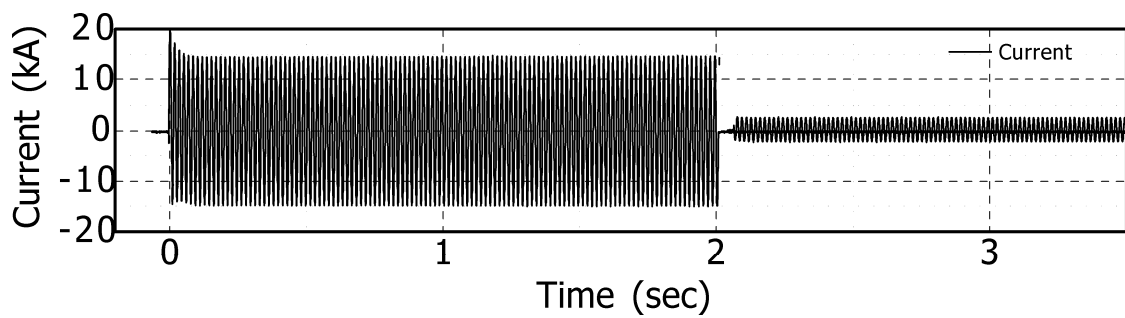


図 2.1.2-11 もらい事故模擬通電試験時の電流波形

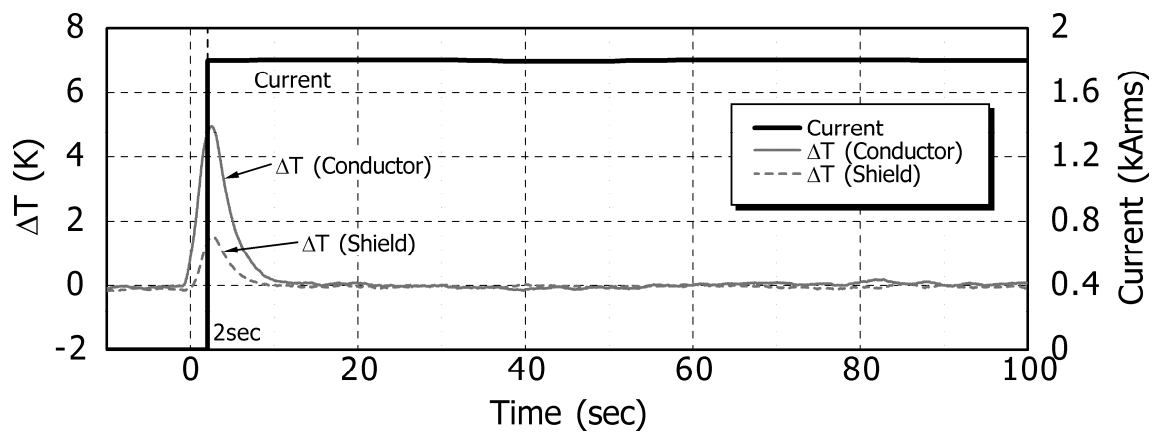


図 2.1.2-12 もらい事故模擬通電試験時の温度及び電流波形

(5) もらい事故模擬課電試験

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

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

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

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

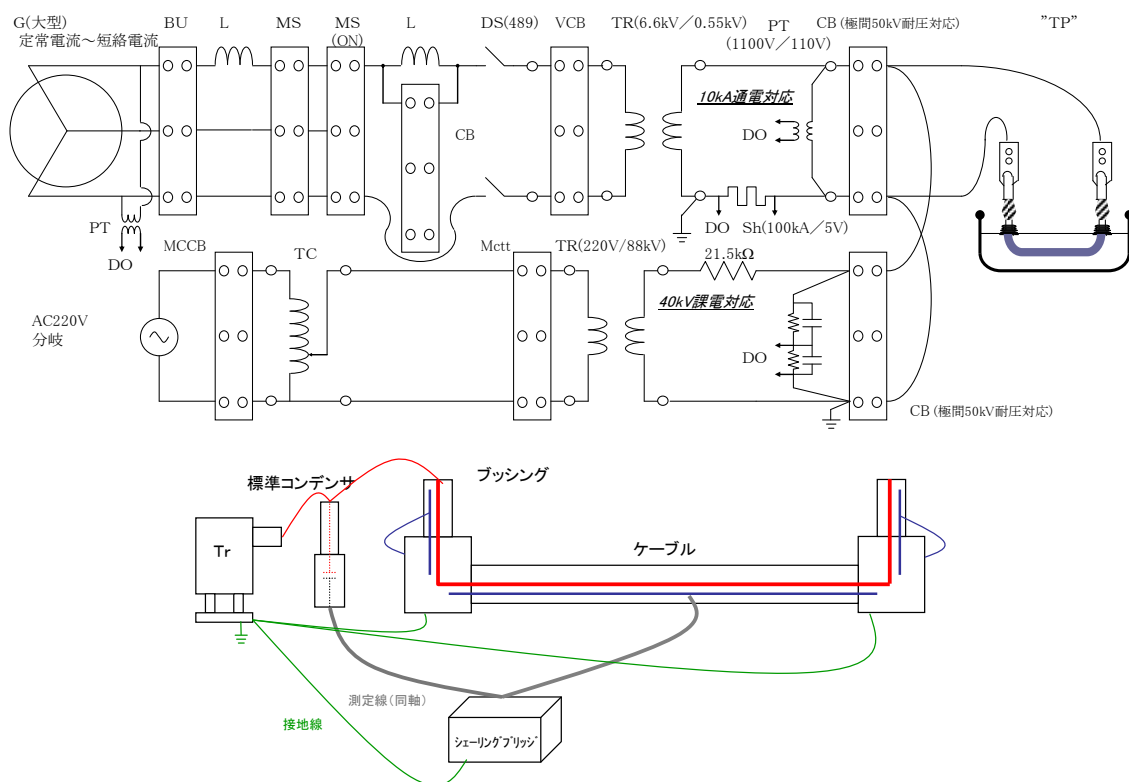


図 2.1.2-13 もらい事故模擬課電試験回路の概要

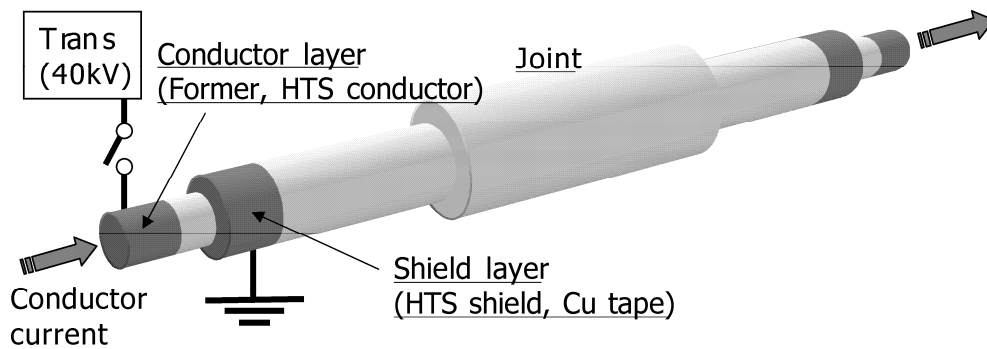


図 2.1.2-14 もらい事故模擬課電試験サンプルの概要

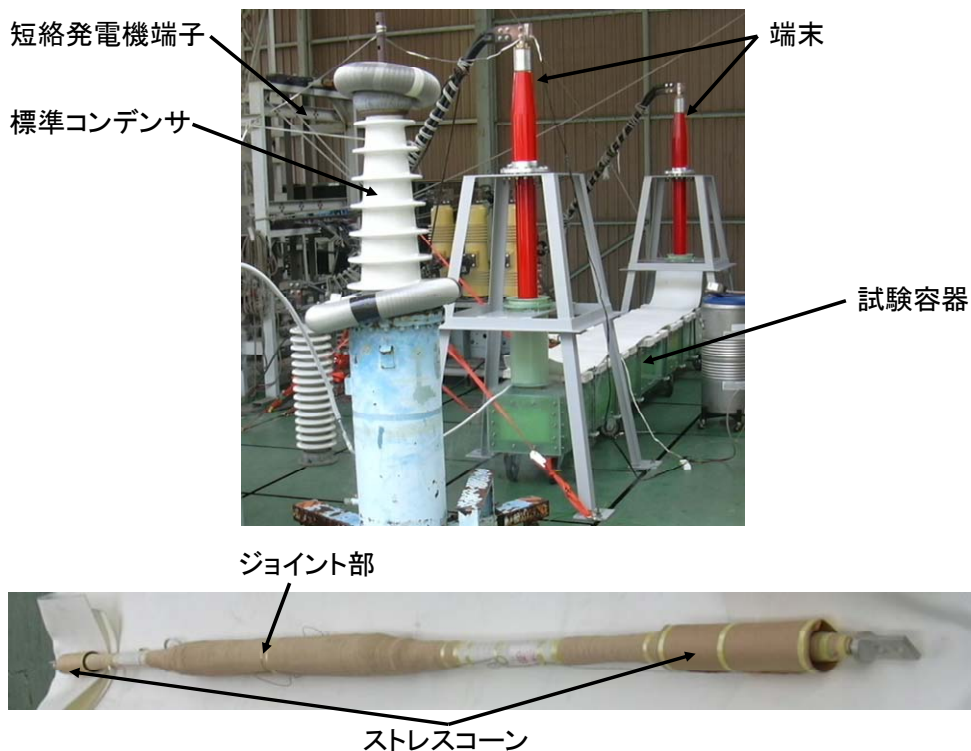


図 2.1.2-15 試験サンプル及び試験場の写真

表 2.1.2-2 超電導ケーブル導体の諸元

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

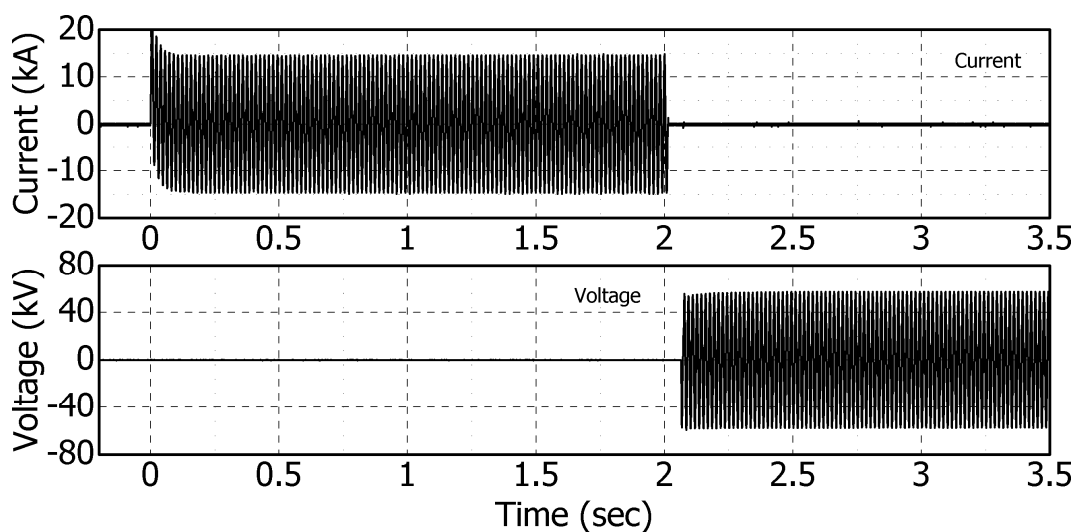


図 2.1.2-16 もらい事故模擬課電試験時の電流・電圧波形

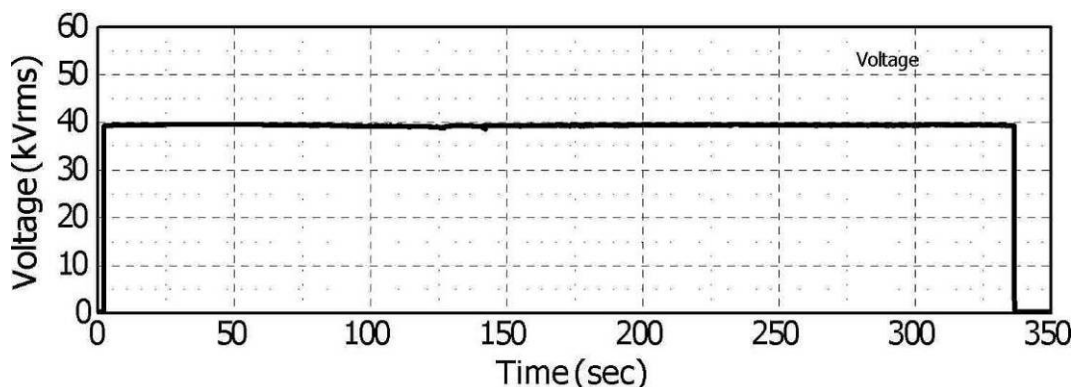


図 2.1.2-17 もらい事故模擬課電試験時の電圧波形

(6) まとめ

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

た結果、超電導導体層及び超電導シールド層の ΔT はそれぞれ 120K 及び 110K であり、シミュレーション結果の予想範囲内であった。また、試験前後で試験サンプルに臨界電流特性の劣化はなく、要求される耐過電流特性を有することを確認した。

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

(7) 今後の計画

短尺の超電導ケーブル導体を用いた短絡試験にて、要求される耐短絡電流特性を満足することを確認した。しかしながら、本試験はオープンバスの容器を用いて飽和液体窒素中で実施しているため、断熱管内の過冷却液体窒素で強制対流冷却される実際のケーブル運転形態とは試験条件が異なる。特に、長尺ケーブル断熱管の限られた空間内で大きな発熱が発生した場合に、圧力上昇等によりダメージが発生することが懸念される。このため、産業総合研究所とともに、短絡電流通過時における断熱管内の冷媒挙動をシミュレートする解析を実施している。本解析により現象解明への目処を立てるとともに、ケーブルシステムへのフィードバックを行う。