

## 平成 2 1 年度実施方針

新エネルギー技術開発部

1. 件名 ; プログラム名 エネルギーイノベーションプログラム  
(大項目) イットリウム系超電導電力機器技術開発

## 2. 根拠法

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第 1 5 条第 1 項第 1 号イ

## 3. 背景及び目的・目標

資源に乏しい我が国が、将来にわたり持続的発展を達成するため、革新的なエネルギー技術の開発、導入・普及によって、各国に先んじて次世代型のエネルギー利用社会の構築に取り組んでいくことを目的とした「エネルギーイノベーションプログラム」の一環として本研究開発を実施する。

経済社会の基盤となる電力の安定的かつ効率的なエネルギー供給システムを実現するため、システムを適正に制御し、電力供給を安定化させるための技術及び発電電力を無駄なく輸送するための高効率な送電技術の確立を目指す。そのため、世界的にも我が国が最先端の技術力を有する超電導技術を活用して、コンパクトで大容量の電力供給が期待できるイットリウムに代表されるレアアース系酸化物高温超電導線材（以下「イットリウム系超電導線材」という）を用いた超電導電力機器の開発を目指す。特に、超電導電力貯蔵システム（SMES）、超電導電力ケーブル及び超電導変圧器の実用化に向けた技術を開発し、産業利用の早期実現を図ることは、経済社会を支える重要なエネルギーである電力の一層の安定的かつ効率的な供給システムを実現することに大きく貢献する。

本プロジェクトの研究対象機器は、第 3 期科学技術基本計画のエネルギー分野の重点科学技術「送電技術」、「電力系統制御技術」、「電力貯蔵技術」に位置付けられており、さらに、超電導技術分野の技術マップ（平成 1 9 年 4 月制定）のエネルギー・電力分野機器開発にも位置づけられている。

本プロジェクトでは、「超電導応用基盤技術開発（第 II 期）」（平成 1 5 年度～1 9 年度）及び「超電導電力ネットワーク制御技術開発」（平成 1 6 年度～1 9 年度）によって得られた開発成果を踏まえて、実用レベルに達したイットリウム系超電導線材を用い、次世代電力機器としての SMES、超電導電力ケーブル及び超電導変圧器の実用化に目途をつけることを目的に以下の研究開発を実施する。

## 〔委託事業〕

## 研究開発項目① 「超電導電力貯蔵システム（SMES）の研究開発」

平成 2 2 年度までに、2GJ 級 SMES の開発を見通す高磁界かつコンパクトなコイル設計技術の開発並びにメンテナンスを容易とするコイルの伝導冷却技術開発を行う。

平成 2 4 年度までに SMES 対応線材の安定作製技術開発及び 2MJ 級モデルコイルシステムを用いた SMES の動作試験を行い、高磁界コンパクト SMES の実用化に目途をつける。

#### 研究開発項目② 「超電導電力ケーブルの開発研究」

平成22年度までに、電力ケーブルの大電流・低交流損失ケーブル化技術、高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術に関する要素技術の開発を完了する。

平成24年度までにケーブル対応線材の安定作製技術開発及び66kV大電流ケーブルシステム、275kV高電圧ケーブルシステムの課通電特性や送電損失等の実用性を検証し、実用化に目途をつける。

#### 研究開発項目③ 「超電導変圧器の研究開発」

平成22年度までに、超電導変圧器用の低損失化技術、大電流巻線技術及び限流機能の開発を行い、66kV/6.9kV-2MVA級変圧器の設計を完了する。

平成24年度までに、2MVA級超電導変圧器モデルを試作・評価し、低損失（従来線材対比の交流損失1/3以下）、大電流（2kA級）で、保護のための限流機能（過大電流を定格電流の3倍以下に抑制）を有する66/6kV 20MVA級超電導変圧器システムの成立性を実証する。

#### 研究開発項目④ 「超電導電力機器の適用技術標準化」

平成24年度までに、超電導線及びその試験方法並びに超電導電力ケーブル及びその試験方法について、国際規格提案を行う。また、イットリウム系超電導線材等を適用した変圧器、SME S等の機器及びこれらの試験方法の標準化素案を作成する。

### 4. 事業内容

#### 4.1 平成20年度（委託）事業内容及び進捗状況

財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 所長代行 塩原 融氏をプロジェクトリーダーとし、中部電力株式会社 電力技術研究所 研究主査 長屋重夫氏、財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 電力機器研究開発部 部長 藤原 昇氏、九州電力株式会社 総合研究所 電力貯蔵技術グループグループ長 林 秀美氏および財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 線材研究開発部 部長 和泉 輝郎氏をサブプロジェクトリーダーとして以下の研究開発を実施した。

#### 研究開発項目①「超電導電力貯蔵システム（SME S）の研究開発」

大電流容量・高磁界コンパクトコイルを目指したイットリウム系集合導体について検討を行い、積層複合化導体のせん断応力等の機械特性を評価するとともに、線材積層効果等による交流損失を評価し、高強度・低損失が実現可能な定格2kA級コイルの集合導体構造を決定した。また、テープ状集合化導体において課題となる偏流に対して、コイル間転位等による各素線インピーダンスが等価回路となるトロイド型コイル構造の評価を開始した。

電気絶縁2kVを上回るコイル構造において、 $3\text{W}/\text{m}^2$ の冷却能力を有する伝導冷却性能を検討するとともに、コイルと冷凍機間の長距離冷却の熱交換損失を最小化する冷却システムの基本設計を実施した。

2GJ級トロイド型コイルにおいて、コイル間・巻棒構造等による向心力等を評価し、支持構造の有効性を確認した。

SME S対応イットリウム系超電導線材の安定製造技術開発においては、高磁界・コンパクトコイル構成技術開発に供するコイル導体検討用 IBAD-MOCVD 線材を作製した。線材の安定した長尺性と超電導特性の実現のため、基板の表面欠陥を抑制する研磨技術を検討し長尺平滑基板作製の見通しを得た。

SME S対応線材開発において、磁場中特性向上を目指して、人工ピン導入プロセス

開発として PLD 法、MOD 法の検討を行い、PLD 法では、BZO ナノロッドピン導入プロセスでの高速化の開発を行い、15 m/h で 30 A/cm 幅@3 T 相当の  $I_c$  を得ることに成功している。一方、MOD 法では、(Y-RE)BCO の混晶系に BZO ナノ粒子ピン導入方法の開発に成功し、Y-Gd 混晶系において短尺で 35 A/cm 幅@3 T (760 A/cm 幅@自己磁場) の特性を得ている。また、MOCVD 法による RE 混晶線材の試作を開始した。

#### 研究開発項目②「超電導電力ケーブルの研究開発」

大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発においては、単心 3kA 級導体の試作・評価を行うとともに、ケーブルシステムの設計を開始した。また、交流損失低減のため、線材可撓性、線材幅による交流損失評価を実施した。

高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術開発においては、電気絶縁材料候補 (PPLP-A、PPLP-C、タイベック、ノーメックス) の基礎特性把握を行った。また、終端接続部の試作・評価を行った。この他、2 層 1m の超電導体の試作・評価を行った。これらの結果を踏まえ、ケーブルシステムの設計を開始した。

ケーブル対応線材の安定製造技術開発においては、大電流ケーブル用として、3kA 級導体の開発に供するクラッド基板-PLD 線材を製造した。高電圧ケーブル用として、単心 2 層 1m 導体に供する IBAD-MOD 線材を製造した。

超電導電力ケーブル対応線材開発において、経時経年変化対応技術開発として保存環境及び製作・運転環境の調査による把握を行うと共に基礎試験を開始した。また、低損失線材を目指して均一特性技術として MOD 法線材において塗布法の改善により濃化液体の発生を抑制し、長手方向での均一性の向上に成功した。また、クラッド基板上での中間層の安定化を図り、(100)配向率 97 %の中間層を安定して作製可能とした。さらに、高強度高  $J_e$  向上技術として 70  $\mu$ m 厚の強加工ハステロイ基板を作製し、強度評価を行うことにより 1 GPa 応力下においても  $I_c$  低下を抑制可能である指針を得た。

#### 研究開発項目③「超電導変圧器の研究開発」

変圧器巻線技術開発においては、線材の安定化銅構造を決定するため、モデルコイルを製作し、過電流通電試験を実施した。また、エッジワイズ曲げ歪による  $I_c$  劣化特性のため、モデルコイル製作と曲げ歪の  $I_c$  変化を確認した。さらに、交流損失低減のため、二次巻線口出し構造の検討を開始した。

冷却システム技術開発においては、小型膨張タービンの性能向上のため、インペラー形状を変更し、性能試験を実施した。また、小型ターボ式圧縮機の断熱効率向上のための構造解析、シミュレーションによる熱交換器の形状の小型化・効率化の検討を開始した。

限流機能付加技術開発においては、4 巻線構造の限流機能モデルの巻線を行った。

変圧器対応の線材安定製造技術開発においては、2MVA 級変圧器モデル機線材用として、平成 20 年度計画 IBAD-PLD 線材及び IBAD-MOD 線材を提供した。また、交流損失低減のため、レーザースクライビング溝加工細線化技術の検討を行い、30m 長 3 分割の安定製造技術開発の見通しを得た。

超電導変圧器対応線材開発において、低損失線材開発を目的として、均一特性技術開発を行った。PLD 法においてレーザの安定化等により長手方向での特性変動を偏差 10% 以内を実現し、幅方向の均一性を分割線材で評価した。また、スクライビング分割技術としてレーザ出力制御、2 段階エッチング、マスキング技術等の改善によりプロセス時間を 1/10 に短縮し、低下率を 20 %に抑制することに成功し、これを評価する手法を複数開発し、100 m-5 分割線材の評価技術の見通しを得た。

#### 研究開発項目④「超電導電力機器の適用技術標準化」

超電導線関連技術標準化の研究は、実用超電導線の超電導線材側及び機器側からの特

性項目を対比し、補充すべき試験項目を調査・抽出した。また、過去に作成した超電導に係わる規格素案を、国際規格化の観点から規格目次等を調査し、平成20年版規格素案を作成した。さらに、IEC/TC90 国際会議において、超電導線の国際標準化を提案し、標準化のためのアドホックグループ設置に対する基本合意が得られた。

超電導電力ケーブル関連技術標準化の研究は、超電導電力ケーブルの技術動向を国際会議、パネル討論会等を通じて調査した。また、過去に作成した超電導電力ケーブルに係わる規格素案、関連国際規格等を調査し、平成20年版規格素案を作成した。さらに、IEC/TC90 国際会議において、超電導電力ケーブルの国際標準化を提案し、標準化のための活動を IEC/TC20 並びに国際大電力システム会議 CIGRE と連携して実施する基本合意が得られた。

超電導電力機器関連技術標準化の研究は、SME S 及び超電導変圧器の国際標準化に関して、従来の試験方法等技術側面の調査に加え、今後の国際標準化に必要な環境側面及び安全側面並びに規格目次の調査を開始した。また、超電導限流器について、わが国、米国、韓国等の技術動向並びに標準化ニーズについて調査を開始した。

#### 4. 2 実績推移

- ・実績額推移 平成20年度（電源勘定） 2, 797百万円
- ・成果の普及・啓蒙
  - 特許 7
  - 論文 18
  - 講演 75

#### 5. 事業内容

財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 所長 塩原 融氏をプロジェクトリーダーとし、中部電力株式会社 電力技術研究所 研究主査 長屋 重夫氏、財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 電力機器研究開発部 部長 藤原 昇氏、九州電力株式会社 総合研究所 電力貯蔵技術グループ グループ長 林 秀美氏および財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 線材研究開発部 部長 和泉 輝郎氏をサブプロジェクトリーダーとして以下の研究開発を実施する。なお、実施体制については、別紙を参照のこと。

##### 5. 1 平成21年度（委託）事業内容

研究開発項目①「超電導電力貯蔵システム（SME S）の研究開発」

- ・従来の金属系 SME S コイルに対し、2 倍の応力（600MPa）が連続して繰返し加えられても使用可能な高強度コイルの開発を引き続き実施する。
- ・ SME S システムとして必要な通電電流 2kA 以上を実現させる積層導体での導体・コイル構成技術の開発を引き続き実施する。
- ・コイル側面で単位面積当たり  $3\text{W}/\text{m}^2$  以上の冷却能力を持つコイル伝導冷却手法の開発を引き続き実施する。
- ・2kV 以上の電気絶縁性能を有した高伝熱コイル構造の開発を引き続き実施する。
- ・2MJ モデルコイル試作に必要な仕様線材の安定製造技術の確立に向けた開発を引き続き実施する。
- ・多数コイルのクエンチ保護方法について検討を開始する。
- ・磁場中高臨界電流 ( $I_c$ ) 線材作製技術開発として、PLD 法及び MOD 法において成膜条件等線材作製プロセスの適正化とともに効果的な人工ピン止め点材料等の検討を行い、更なる特性向上を図る。また、MOCVD 法において RE 混晶系での特性向上を図る。さらに異方性低減材料開発への指針を得る。

- ・ 高強度・高工業的臨界電流密度 ( $J_e$ ) 線材作製技術開発として、線材の薄肉化と長尺化を進め、高  $I_c$  化技術開発の成果と統合し、高  $J_e$  化、 $>30 \text{ kA/cm}^2$  (@77 K, 0 T) を実現する。
- ・ 低コスト・歩留向上技術開発として、PLD 法でのさらなる高速化とともに  $I_c$  値の向上及び長尺化を図る。MOD 法では反応領域の拡大により本焼速度を向上させるとともに、安定製造実現に必要な因子の解明を行う。また、5 mm 幅 5 分割線材に対応した接続・補修技術への見通しを得る。

#### 研究開発項目②「超電導電力ケーブルの研究開発」

- ・ 大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発は、超電導線材の多層時の電気的特性、交流損失の基礎データを取得し、コンパクトで低損失なケーブル設計技術の検討を実施し、短尺ケーブルコアにて、 $0.7 \text{ W/m/ph at } 3 \text{ kA}$  の損失を実証する。また、5kA 級通電の検証を行う。
- ・ 5kA 級端末の設計検討を行い、電流リードの試作・評価を実施する。
- ・ 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発は、電気絶縁の電気的基礎特性、絶縁厚さと誘電体損失の関係など基礎データを取得し、コンパクトで低損失なケーブル設計技術の検討を行う。また、中間接続部、終端接続部の設計を実施する。
- ・ 電力ケーブルの常時及び異常(短絡事故)時の発熱・冷却に関する熱収支検討を行い、ケーブルの最適設計手法を検討する。
- ・ 275kV 高電圧ケーブルシステム検証は、高電圧絶縁技術、誘電体による損失低減化技術を活かしたケーブルの設計を実施する。
- ・ 超電導電力ケーブル対応線材安定製造技術開発においては、システム検証に必要なとなる線材の安定製造技術の開発を実施する。
- ・ 線材特性把握として種々線材に対し、様々な環境下での経時経年特性評価を行うとともに、特性劣化を抑制する線材作製条件への指針を得る。
- ・ 低交流損失線材作製技術開発として、平成 20 年度成果に基づいて、成膜条件の適正化とともに加工技術の精度向上、劣化・膜剥離抑制技術開発や評価技術開発により 5 mm 幅 5 分割及び 2 mm 幅線材に適応した線材を実証する。また、幅広線材として 3 cm 幅線材の成膜技術を開発する。
- ・ 高強度・高工業的臨界電流密度 ( $J_e$ ) 線材作製技術開発として、線材の薄肉化と長尺化を進め、高  $I_c$  化技術開発の成果と統合し、高  $J_e$  化、 $>30 \text{ kA/cm}^2$  (@77 K, 0 T) を実現する。
- ・ 低コスト・歩留向上技術開発として、PLD 法でのさらなる高速化とともに  $I_c$  値の向上及び長尺化を図る。MOD 法では反応領域の拡大により本焼速度を向上させるとともに、安定製造実現に必要な因子の解明を行う。また、5 mm 幅 5 分割線材に対応した接続・補修技術への見通しを得る。

#### 研究開発項目③「超電導変圧器の研究開発」

- ・ 変圧器巻線技術開発においては、分割線材の巻線特性、多層転位モデル、短絡電流モデルの検証を実施する。
- ・ 冷却システム技術開発においては、小型・高効率な膨張タービン、ターボ式圧縮機を改良するとともに冷却装置を設計検討する。
- ・ 限流機能付加技術開発においては、4 巻線構造の限流機能モデルの特性試験を行い、過大電流に対する基礎的応答特性を評価する。さらに、数 100kVA 限流機能付変圧器を設計検討する。
- ・ 2MVA 級超電導変圧器モデルの検証においては、要素技術の開発成果を反映し 2MVA 級超電導モデルを設計検討する。
- ・ 超電導変圧器対応の線材開発においては、2MVA 級変圧器モデル機で必須となる線材の安定製造技術の開発を実施する。
- ・ 磁場中高臨界電流 ( $I_c$ ) 線材作製技術開発として、PLD 法及び MOD 法において成膜条件等線

材作製プロセスの適正化とともに効果的な人工ピン止め点材料等の検討を行い、更なる特性向上を図る。また、MOCVD 法において RE 混晶系での特性向上を図る。さらに異方性低減材料開発への指針を得る。

- ・ 低交流損失線材作製技術開発として、平成 20 年度成果に基づいて、成膜条件の適正化とともに加工技術の精度向上、劣化・膜剥離抑制技術開発や評価技術開発により 5 mm 幅 5 分割及び 2 mm 幅線材に適応した線材を実証する。また、幅広線材として 3 cm 幅線材の成膜技術を開発する。
- ・ 低コスト・歩留向上技術開発として、PLD 法でのさらなる高速化とともに  $I_c$  値の向上及び長尺化を図る。MOD 法では反応領域の拡大により本焼速度を向上させるとともに、安定製造実現に必要な因子の解明を行う。また、5 mm 幅 5 分割線材に対応した接続・補修技術への見通しを得る。

#### 研究開発項目④「超電導電力機器の適用技術標準化」

- ・ 超電導線関連技術標準化の研究は、イットリウム系超電導線を含む超電導線並びにその試験方法の平成 20 年度版規格素案を精査し、平成 21 年度版規格素案を作成する。また、パネル討論会、IEC/TC90 アドホックグループ等国际標準化に資するための技術情報並びに標準化情報を集約する。
- ・ 超電導電力ケーブル関連技術標準化の研究は、イットリウム系超電導線並びにビスマス系超電導線を適用した超電導電力ケーブルの技術調査を継続するとともに、平成 20 年度版規格素案を精査し、平成 21 年度版規格素案を作成する。また、CIGRE におけるタスクフォース TF 報告書の作成並びに CIGRE におけるワーキンググループ WG 設置提案に資する。
- ・ 超電導電力機器関連技術標準化の研究は、SMES、超電導変圧器、超電導限流器等の技術動向調査及び標準化ニーズ調査を継続する。また、平成 20 年度に作成した SMES 及び超電導変圧器の規格目次案に加え、国際規格項目への環境側面及び法規制を含む安全側面に係わる事項の導入を行う。

#### 5. 2 平成 21 年度事業規模

エネルギー特別会計（電源勘定）2, 796 百万円（継続）

（注） 事業規模については、変動があり得る。

#### 6. その他重要事項

##### (1) 運営・管理

本プロジェクトの推進方針及び新エネルギー技術開発部が所管する他の超電導関連プロジェクトとの調整については、新エネルギー技術開発部が主催する予定の「超電導技術委員会」において、有識者の意見を取り入れつつ進めることとする。また、四半期に 1 回程度プロジェクトリーダー等を通じてプロジェクトの進捗について報告を受けることとする。

##### (2) 複数年度契約

平成 20～22 年度の複数年度契約を締結済み。

#### 7. スケジュール

本年度のスケジュール

平成 21 年      3 月上旬・・・ 部長会  
                  5 月頃      ・・・ 第 1 回超電導技術委員会

平成22年 10月頃・・・ 第2回超電導技術委員会  
2月頃・・・ 第3回超電導技術委員会

8. 実施方針の改訂履歴

(1) 平成21年3月5日、制定

「イットリウム系超電導電力機器技術開発」実施体制

