

「高温超電導実用化促進技術開発」基本計画

省エネルギー部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

① 政策的な重要性

再生可能エネルギー利用を更に向上させるため分散化する発電所から集中化傾向にある需要地にエネルギーロス無く送電を行う送電技術や、都市部を中心とした鉄道輸送力を電圧降下させることなく高めるための送電技術を確立することは重要な課題である。これらの課題解決のために、大電流・高磁場を発生可能で、電気抵抗による損失なく電気を送れる超電導技術が期待されている。

一方で、平成24年末、超電導状態にするために冷媒として用いられるヘリウムが世界的に供給不足となる「ヘリウムショック」により、磁気共鳴画像装置（以下「MRI」(Magnetic Resonance Imaging) という。）、核磁気共鳴装置（以下「NMR」(Nuclear Magnetic Resonance) という。）等の停止を余儀なくされた。世界の商用ヘリウムの約8割を生産する米国では、平成27年までの期限付きでの民間へのヘリウム放出抑制を平成32年まで延長することとなったが、それまでに備蓄が底をつく可能性があると言われている。近年ヘリウムは、米国産の供給量の減少と半導体用としての中国での需要が急増のため、国内供給大手業者が平成31年1月から販売価格の25%引き上げ交渉に入ると報道されており、ヘリウム資源問題はさらに厳しい状況となっている。そのためヘリウムの供給不足リスクに備え、液体ヘリウムを必要としない超電導応用技術開発を行うことが資源セキュリティの観点からも急務となっている。

② 我が国の状況

超電導交流送電ケーブルシステム¹の開発に関し、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下「NEDO」という。）は「超電導技術開発／高温超電導ケーブル実証プロジェクト」（平成19年度～平成25年度）において、66kV／200MVA級三心一括型超電導ケーブルシステムの一年間以上の実系統連系試験を行い、電力システムの一部として利用可能な信頼性を有することを検証するとともに、冷却システム²に関しては、数kW級のブレイトン冷凍機開発を実施し冷凍機単独でCOP (Coefficient of Performance) ³0.10を達成した。その後、「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」（平成26

¹本文書中において、超電導ケーブルシステムとは、高温超電導線材を用いた超電導ケーブル、液体窒素循環による冷却システム及び電力等制御システムからなるシステム全体を指す。

²本文書中において、冷却システムとは、液体窒素等の循環により超電導ケーブルを所定の温度以下に保つことを目的としたシステムを指す。

³本文書中において、COPは次の様に定義する。冷却システムの定格運転条件における、1時間当たりの、(冷却能力) / (冷凍機動力+ポンプ動力)

年度～平成27年度)において実際の電力系統へ導入するため、地絡・短絡などの事故時の安全性評価と対応策の構築、ブレイトン冷凍機の耐久性評価を進めている。

また、経済産業省が実施する「高温超電導直流送電システムの実証研究」及び「高温超電導技術を用いた高効率送電システムの実証事業」(平成24年度～平成27年度)では、データセンターへの直流送電実用線路及び長距離(1km)直流送電実験線路を敷設し、超電導直流送電の実証試験等を行っている。

鉄道き電線へ適用可能な超電導直流送電ケーブルシステムの開発に関しては、公益財団法人鉄道総合技術研究所(以下「鉄道総研」という。)等が、国立研究開発法人科学技術振興機構による研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」及び国土交通省による鉄道技術開発費補助事業の一環として推進し、平成27年に伊豆箱根鉄道・駿豆線において、国内外で初めての営業線での超電導送電による列車走行実験に成功しており、実用化に向けた基礎技術開発が開始された段階にある。

一方、我が国の高温超電導マグネット(コイル)の研究開発に関しては、特にMRI及びNMRに対して、ヘリウム冷媒を使用しないこと、システムのコンパクト化や高解像度化などが期待されている。更なる高磁場実現により高解像度化や、従来の水素に加え、炭素、窒素、酸素及びリン等の計測核種の拡大を狙った高温超電導高磁場・高安定コイル開発を経済産業省、国立研究開発法人日本医療研究開発機構が「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト」(平成25年度～平成27年度)により実施し、高温超電導線材(Y系線材)による高安定かつ高均一磁場を発生する高磁場コイル実現の可能性を検証している。

超電導線材に関しては、その電気特性、線材製造要素技術ともに世界を先導してきた。Bi系線材は、被覆材として銀を用いるため線材のコスト高が懸念されているものの、線材自体は量産化が可能な技術水準に達している。Y系線材は、高磁場中でも高い臨界特性を示すほか、線材に使用される銀の使用量が少ないため材料コストはBi系線材に比べて有利になると期待されている。日本はこれまで、性能向上を重視して技術開発を進め、初期には米国と、近年は韓国と競いつつ世界の先頭を走ってきた。

③ 世界の取組状況

韓国は、平成29年～平成31年の予定でソウルの南Shingalにおいて、2カ所の中間接続部を持つREBCO高温超電導ケーブルによるAC23kV 50MVAの1kmの商用実系統連系プロジェクトを実施中である。また、平成29年～平成33年の予定で、高温超電導ケーブルにより市内の変電所を削減し、経済性を高めたAC23kV 50MVAの3km級の新しいグリッドモデル開発プロジェクトを実施中である。さらに、JEJUプロジェクトにおいては、80kV/500MVA級、長さ500mの超電導直流ケーブル及び154kV/500MVA級、長さ1kmの超電導交流ケーブルを開発して、実系統にて実証する計画を発表している。

ドイツは、Ampacityプロジェクトで、Bi系線材を用いた10kV/40MVA級、長さ1kmの三相同軸型超電導交流ケーブルを開発し、平成26年春には超電導限流器と組み合わせて実系統試験を開始し、現在も継続中である。

鉄道き電線における、諸外国の取組は現在のところ報告されていない。

高温超電導のMRI用マグネットに関する海外の研究開発に関しては、イタリアでMgB₂線材を用いた0.5テスラ（テスラ：磁束密度単位、以下「T」という。）マグネットが、ドイツではBi系線材による全身用0.2Tマグネットが開発された。米国ではBi系線材による四肢用1.5Tマグネット開発を進めている。またニュージーランドではY系線材による1.5T四肢用マグネットを、中国ではBi系線材による1.5Tマグネットが開発され、現在は3T、7Tマグネットの研究開発が進められている。

Y系線材の研究開発に関しては、韓国SuNAMや米国AMSC、Super Power（古河電気工業）、露SuperOXが、線材性能の向上や低コスト化に向けた長尺線材の高速製造等に関する開発を実施している。

④ 本プロジェクトのねらい

これまで実施してきた高温超電導の要素技術開発の成果は、実用化へ向けた開発へ移行可能な段階にある。本プロジェクトでは高温超電導技術の適用により、大きな省エネルギー効果、我が国の送配電システムの高度化、ヘリウム供給リスクへの対応及び大きな市場創出等が期待される送配電並びに高磁場コイル分野において、事業化に近い段階のものから原理実証、フェージビリティスタディ（FS）開発を総合して実施、各実施内容が事業化に進むための適切な技術開発を行う。このため本プロジェクトにおいては、a. 高温超電導送配電技術開発、b. 高温超電導高磁場マグネットシステム技術開発を総合的に推進する。

a. 高温超電導送配電技術開発においては、電力分野及び運輸分野への技術開発を実施する。

電力分野においては、今後再生可能エネルギー利用を更に向上させるため、分散化する発電所から集中化傾向にある需要地にエネルギーロスを最小限に抑えて送電を行う送電技術の確立が必要となる。このため本プロジェクトでは、超電導ケーブルシステム実用へ不可欠な安全性能の確保、事故・故障発生時の復旧方法策定を実施する。また、平成24年度から経済産業省が実施する「高温超電導直流送電システムの実証研究」及び「高温超電導技術を用いた高効率送電システムの実証事業」の研究開発成果を共有し、超電導直流送電技術の実証を行い、設計・建設方法及び運用・保守・障害復旧などの基準案策定を「電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発」として実施する。

運輸分野においては、低損失・大容量送電が可能な鉄道き電線システム開発と安全性及び信頼性の実証を総合的に実施することにより、都市部を中心とした鉄道輸送力を電圧降下させることなく高める送電技術の確立を目指し、「運輸分野への高温超電導適用基盤技術開発」を実施する。

b. 高温超電導高磁場マグネットシステム技術開発はその応用分野は多岐に渡るが、ヘリウムレス及び省エネルギー並びに競争力強化のための実用化共通基盤技術として更に実用完成度を高めるため、MRI分野への適用を主眼とした高温超電導高安定磁場マグネットシステムの技術開発を「高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発」として実施する。

高温超電導高安定磁場マグネットシステムの市場展開時期を平成38年に設定し、投入時期にMRI市場拡大が予測される3T級以上のMRIへの適用を主眼とした伝導冷却方式の超電導マグネットシステムの実現に向けた技術開発及び実証を行う。具体的には、コイル化技術、発生磁場の整形技術、マグネット小型化技術などを確立し、高温超電導を適用したMRIの技術実証を行う。なお、マグネット開発における高電流密度化などによる高磁場発生技術、線材使用量最少化を実現するためのマグネット小型化技術の開発により製造コストの低減を図る。

また、さらなる省エネルギーの可能性のある永久電流運転モードでのMRIの実現に必須であるY系高温超電導線材の超電導接続技術と、永久運転モードでの損傷対策技術の開発を「高温超電導線材の超電導接続技術」として実施する。

さらに、超電導応用商品実現のための基盤技術開発として、超電導マグネット用途の要求を満たす磁場特性の向上及びコスト低減を目指す高温超電導線材の技術開発を「高温超電導高磁場コイル用超電導線材の実用化技術開発」として実施する。

「電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発」はこれまでの研究開発成果を基に、実証を通して実用化への仕上げを実施する実用化促進実証技術開発として、「運輸分野への高温超電導適用基盤技術開発」、「高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発」及び「高温超電導高磁場コイル用超電導線材の実用化技術開発」は実用への基盤技術を確立するため研究開発を実施する実用化促進基盤技術開発として実施する。

(2) 研究開発の目標

①アウトプット目標

a. 高温超電導送配電技術開発

a-1 電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発

今後、超電導ケーブルシステムを電力系統へ導入するために、通常時の信頼性だけでなく、ケーブルに対する外部からの電氣的・機械的な損傷等による不測の事故（地絡・短絡・外傷等）時に生じる現象と影響を把握し、その結果を踏まえて安全性、信頼性を検討する必要がある。また、冷却システムの大きさ、効率と耐久性及びコストを更に改善する必要もある。加えて、事故・故障等を早期に検知するとともに、その影響を最小限に抑える等、実用性を向上させるための対策も重要である。

以上を踏まえて、本プロジェクトの開発目標を以下のとおり定める。

【最終目標（平成30年度）】

- 1) 安全性評価試験による影響検証に係る最終目標
 - ・送電用及び配電用超電導ケーブル仕様案の決定
 - ・超電導ケーブルシステム安全性評価試験方法の作成
 - ・作成した安全性評価試験方法の国際標準化活動への反映
 - ・安全性評価の対象となる事象による超電導ケーブルシステムへの影響を、実用上信頼できる評価を行うためのシミュレーション技術の完成
- 2) 早期復旧等の実用化のための対策検討に係る最終目標
 - ・リスク低減及び早期復旧の観点から、超電導ケーブル及び冷却システムに付加すべき要素の決定
 - ・復旧方法等の検討結果を反映した、運転管理に係るガイドライン作成
- 3) 超電導ケーブルの侵入熱低減技術の開発に係る最終目標
 - ・実運用を想定した条件で、直線部でのケーブル長さ当たりの熱侵入量を1.8 W/m/条 以下
- 4) 冷却システムの高効率化技術の開発に係る最終目標
 - ・系統連系試験の実施
 - ・実運用を想定した条件で、冷却システム全体のCOPを0.11以上とすること、及び冷凍機本体並びに主な冷却システム構成機器の保守・点検間隔を40,000時間以上とすること
- 5) 超電導直流送電システムの実用化開発に係る最終目標
 - ・実用線路での運転試験を実施
 - ・設計、運用、保守ガイドライン作成等

a-2 運輸分野への超電導適用基盤技術開発

今後、鉄道き電線へ適用可能な超電導ケーブルシステムの実用化へ向けては超電導ケーブルの長距離冷却技術開発が必要である。

本プロジェクトの開発目標を以下のとおり定める。

【中間目標（平成30年度）】

- 1) 鉄道き電線に必要な長距離冷却基盤技術の構築
 - ・サイズ2 m³/kWの冷凍機の開発
 - ・揚程0.6 MPa、流量50 L/min以上の極低温循環ポンプの開発
 - ・2 W/m以下、真空維持1年以上を見通せる断熱管の開発
 - ・システム保全技術の検証
- 2) km級長距離冷却システムの構築及び検証

【最終目標（平成32年度）】

- 1) 路線環境に対応した信頼性評価
- 2) 鉄道き電線用長距離冷却システムの設計・評価基準、保全基準の策定

b. 高温超電導高磁場マグネットシステム技術開発

b-1 高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発

本開発では、「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト」における技術開発の残課題を踏まえて、ヘリウムレス、省エネルギー及びシェア拡大に資する3 T級MRI用を主眼とした高温超電導高磁場マグネットシステムの開発を行う必要がある。

以上を踏まえて、本プロジェクトの開発目標を以下のとおり定める。

【中間目標（平成30年度）】

- 1) コイルの大型化に対応した磁気・構造設計を実施し、1/2サイズのアクティブシールド型3 Tマグネットの試作（直径500 mmボア、3 T、漏れ磁場（2.5 m×3 m））
- 2) 磁化の影響評価として、高温超電導コイルの磁化の定量測定、評価（安定度、均一度）。高温超電導マグネットによる小領域（30 mmDSV (Diameter of Spherical Volume)）イメージング実証
- 3) マグネットシステム最適化として、マグネット励磁電源と磁場保持電源の分離システムの実証
- 4) コイル保護として、モデルコイルによるコイル保護検討

【最終目標（平成32年度）】

- 1) 磁化の影響評価と抑制技術開発のために、磁化を考慮した磁場解析手法の確立。1/2サイズ3 Tマグネットによるイメージング実証（150 mmDSV）。磁場均一度10 ppm（250 mmDSV）未満、磁場安定度1 ppm/hr未満性能を達成。
- 2) コイルの小型化として、1/2サイズのアクティブシールド型5 Tマグネット設計技術（低温超電導コイル比線材量30%以上低減、磁場安定度0.1 ppm/hr未満）の確立に向けた7 T検証コイルの試作（コイル平均電流密度200 A/mm²（7 T）超）
- 3) マグネットシステム最適化として、コスト低減に向けたコイル形状、冷凍機能力、クライオスタット等のシステム最適化実施
- 4) ドライブモードでのコイル保護として、焼損対策手法の確立

b-2 高温超電導線材の超電導接続技術

更なる省エネルギーを実現するMRIコイルの将来技術として、永久電流モードの運転があるが、その実現のためには、超電導接続技術の実現に向けた研究開発がもとめられている。また、永久電流モード運転時の保護・焼損対策技術の開発が必要である。

以上を踏まえて、本プロジェクトの開発目標を以下のとおり定める。

【最終目標（平成32年度）】

- (1) 高温超電導接続技術として、接続点での抵抗値 $10^{-12} \Omega$ 以下の接続を実現
- (2) 永久電流モード高温超電導マグネットの保護・焼損対策技術理論の構築と実証

b-3 高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発

高温超電導線材（Y系線材及びMgB₂線材など）はコスト面、材料面また冷媒としての液体ヘリウムレスの観点からも超電導コイル応用分野への適用が期待されている。しかし、低価格化実現が遅れており、超電導応用機器開発を推進する上で大きな課題となっている。加えて、更なる高磁場特性の向上が求められている。

この課題を解決するため、高磁場条件下での高電流密度性能を安定的に得るための特性改善と、工法改善による生産性向上を実現するための研究開発が必要である。

以上を踏まえて、本プロジェクトの開発目標を以下の通り定める。

【最終目標（平成30年度）】

- 1) 高磁場コイル用線材として、以下を開発目標とする。
 - ・ Y系線材の場合、温度30K、磁場7T条件にて平均電流密度 400 A/mm^2 以上。MgB₂線材の場合、温度20K、磁場2T条件にて平均電流密度 250 A/mm^2 以上
 - ・ 1kmにおける臨界電流の低下率（（全長の臨界電流平均値－臨界電流最小値）／全長の臨界電流平均値）を0.15未満
- 2) 生産性向上目標として、完成品の単位時間当たり生産長を 50 m/hr 以上

②アウトカム目標

a. 高温超電導送配電技術開発

大都市圏での局所的な電力需要の伸びや電力インフラ機器の経年による置き換えが予想される中、電力インフラの拡充・ケーブル交換には、共同溝の使用制約や送電網の用地買収条件を考慮すると、従来の銅ケーブルに比べ、高効率で送電容量の大きい超電導ケーブルの実用化が必要である。超電導ケーブルは、導入初期時には、揚水発電所の発電機引出線や都市部の地中ケーブルへの適用が見込まれている。超電導ケーブルは、従来の地中ケーブルに対して送電損失を1/2程度に抑えられることから、例えば、110kV以上275kV以下の地中ケーブルのうち20%が超電導ケーブルに置き換わり、ケーブルの年間平均利用率を50%と仮定した場合、年間51GWh省エネルギー効果が得られると見込まれる。なお、超電導ケーブルを用いた送電システムの国内の市場規模は、平成42年において首都圏を中心に年間105億円程度見込まれる。

鉄道き電線への超電導ケーブルシステム適用では、大幅な電圧降下ロス削減、再生電力の利用により、平成42年度において年間69GWh省エネルギー効果が

得られると見込まれる。加えて、電圧降下抑制により運行間隔の短縮、変電所間隔の拡大などが図れる。なお、超電導ケーブルを用いた鉄道き電線システムの国内の市場規模は、平成42年において年間50億円程度見込まれる。

b. 高温超電導高磁場マグネットシステム技術開発

MR I用途を主眼とした高温超電導マグネットは30K程度での運転を想定する。現行の低温超電導MR Iマグネットの温度が4.2Kであるため、消費電力は30%低減(2kW/台)。年間17MWh/台の省エネ効果が期待できる。平成42年度において年間65GWh省エネルギー効果が得られると見込まれる。

また、高温超電導MR Iマグネットは、現行の低温超電導マグネットと同一サイズでの高磁場化が可能となる。これにより、現在広く医療現場で使用されている。1.5T低温超電導MR Iシステムの寿命によるシステム置き換えの際、3T高温超電導マグネットが採用される可能性が高くなる。この3T高温超電導MR Iシステムが医療現場に浸透することにより、現行よりも高解像度な医療画像取得が可能になり、脳梗塞などの微小領域疾患の診断が期待できる。さらに、高磁場MR Iシステムの実現により、神経系や細胞レベルでの診断に向けた医療情報の提供が可能になることも期待されている。また、いち早く世界市場に高温超電導技術による小型3Tマグネットを浸透させることができれば、これまで立ち後れていた我が国のMR Iの世界シェアを拡大することができる。なお、高温超電導マグネットを用いたMR Iの国内の市場規模は、平成42年において年間965億円程度見込まれる。

③アウトカム目標達成に向けての取り組み

NEDOは、ケーブル、冷却システムの製造段階等で冷却に用いる液体窒素等が高圧ガス保安法の適用を受ける可能性があるため、規制緩和等に向けた働きかけを必要に応じて実施する。また、先端分野での国際標準化活動を積極的に進め、将来の海外市場展開を円滑に行う。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

< a. 高温超電導送配電技術開発 >

【助成事業】

研究開発項目①「電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発」

(実施期間：平成28年度～平成30年度)

これら研究開発は、実用化に向けて企業の積極的な関与により推進されるべき研究開発であり、助成事業として実施、中小企業の場合にはNEDO負担率2/3、その他の場合にはNEDO負担率1/2とする。

【委託事業→助成事業】

研究開発項目②「運輸分野への高温超電導適用基盤技術開発」

(実施期間：平成28年度～平成30年度 委託事業

平成31年度～平成32年度 助成事業

平成28年度～平成30年度は公共性の高い事業設備に関する技術開発で、実用化に向けハイリスクな「基盤的技術開発」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ち寄り協調して実施する事業であり、委託事業として実施する。平成31年度～平成32年度は助成事業として実施し、NEDO負担率2/3とする。

< b. 高温超電導高磁場マグネットシステム技術開発 >

【委託事業→助成事業】 研究開発項目③「高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発」

(実施期間：平成28年度～平成30年度 委託事業

平成31年度～平成32年度 助成事業

平成28年度～平成30年度は、実用化に長期間を要するハイリスクな「基盤的技術開発」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ち寄り協調して実施する事業であり、委託事業として実施する。平成31年度～平成32年度は助成事業として実施し、NEDO負担率2/3とする。

【委託事業】

研究開発項目④「高温超電導線材の超電導接続技術」

本研究開発項目は、「基盤的技術開発」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ち寄り協調して実施する必要がある研究開発であり、委託事業として実施する。

【委託事業+助成事業】

研究開発項目⑤「高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発」

(実施期間：平成28年度～平成30年度)

本研究開発項目の中で、研究開発項目③を実施上不可欠な高磁場特性改善は、「基盤的技術開発」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ち寄り協調して実施する必要がある研究開発であり、委託事業として実施。その他の研究開発は、実用化に向けて企業の積極的な関与により推進されるべき研究開発であり、助成事業として実施、中小企業の場合にはNEDO負担率2/3、その他の場合にはNEDO負担率1/2とする。

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

プロジェクトマネージャー(以下「PM」という)にNEDO 省エネルギー部 特定分野専門職 岩坪哲四郎を指名して、プロジェクトの進行全体を企画・管理

や、そのプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させる。

NEDOが公募によって研究開発実施者を選定する。

研究開発実施者は、企業や大学等の研究機関等（以下、「団体」という。）のうち、原則として日本国内に研究開発拠点を有するものを対象とし、単独又は複数で研究開発に参加するものとする。ただし、国外の団体の特別の研究開発能力や研究施設等の活用又は国際標準獲得の観点から必要な場合は、当該の研究開発等に関し国外での団体と連携して実施することができるものとする。

なお、各実施者の研究開発資源を最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、NEDOが選定した研究開発責任者（プロジェクトリーダー）国立研究開発法人産業技術総合研究所 TIA推進センター 上席イノベーションコーディネータ 岡田道哉氏の下で、各実施者が、それぞれの研究テーマについて研究開発を実施する。

（２）研究開発の運営管理

NEDOは、研究開発全体の管理・執行に責任を負い、研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適時に把握し、必要な対策を講じるものとする。運営管理にあたっては、効率的かつ効果的な方法を取り入れることとし、次に掲げる事項を実施する。

① 研究開発の進捗把握・管理

プロジェクトマネージャーは、プロジェクトリーダーや研究開発実施者と緊密に連携し、研究開発の進捗状況を把握する。また、外部有識者で構成する技術委員会を組織し、定期的に技術評価を受け、目標達成の見通しを常に把握することに努める。

② 技術分野における動向の把握・分析

PMは、プロジェクトで取り組む技術分野について、必要に応じて内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し、技術の普及方策を分析、検討する。なお、調査等を行う場合、委託事業として実施する。

3. 研究開発の実施期間

本事業の期間は、平成28年度から平成32年度までの5年間とする。

なお、研究開発項目①及び⑤においては、平成28年度から平成30年度までの3年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、プロジェクト評価を実施する。評価の時期は、研究開発項目①及び⑤については平成31年度に中間評価を実施する。研究開発項目②～④については中間評価を平成30年度、事後評価

を平成33年度に実施し、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。また、中間評価結果等を踏まえ必要に応じ研究開発の加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。

5. その他重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

① 共通基盤技術の形成に資する成果の普及

研究開発成果のうち共通基盤技術に係るものについては、プロジェクト内で速やかに共有した後、NEDO及び実施者が協力して普及に努めるものとする。

② 標準化施策等との連携

得られた研究開発成果については、標準化に向けてデータの提供等を積極的に行う。具体的には、超電導ケーブルシステム安全性評価試験方法の国際標準化活動への反映等を行う。

③ 知的財産権の帰属、管理等取扱い

委託研究開発及び共同研究の成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、全て委託先に帰属させることとする。なお、本プロジェクトの当初から、事業化を見据えた知財戦略を検討・構築し、適切な知財管理を実施する。

④ 知財マネジメントに係る運用

「高温超電導実用化促進技術開発」プロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」に従って運用する。

(2) 「プロジェクト基本計画」の変更

PMは、当該研究開発の進捗状況及びその評価結果、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、研究開発費の確保状況等、プロジェクト内外の情勢変化を総合的に勘案し、必要に応じて目標達成に向けた改善策を検討し、達成目標、実施期間、実施体制等、プロジェクト基本計画を見直す等の対応を行う。

(3) 根拠法

本プロジェクトは、「国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構法」第15条第1項第一号二、第三号及び第九号に基づき実施する。

6. 基本計画の改訂履歴

(1) 平成28年2月、制定。

(2) 平成28年5月、PMの変更およびPLの指名により改訂。

(3) 平成31年●月 研究開発項目③のうち高温超電導線材の超電導接続技

術を④として新設。②、③を助成に変更。③の目標値の一部変更。

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目①「電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発」

1. 研究開発の必要性

安定供給が要求される電力システムに超電導ケーブルシステムを実運用行うためには、安全性・信頼性の確保と合わせて、事故・故障等が発生した場合の影響最小化、早期復旧方法の事前確立が必要である。これまで「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」にて、このような超電導ケーブルシステムとしての研究開発を実施したが、継続して実用化に向けた検討と検証を行い、評価試験方法を普及させる必要がある。

なお、平成24年度から経済産業省が実施する「高温超電導直流送電システムの実証研究」及び「高温超電導技術を用いた高効率送電システムの実証事業」の研究開発成果を共有し超電導直流送電技術の実証を行い、設計・建設方法及び運用・保守・障害復旧などの基準案策定を実施する。

2. 研究開発の具体的な内容

(1) 安全性評価試験による影響検証

- 超電導ケーブルシステムでの絶縁破壊等の電氣的事故、機械的故障や損傷、並びに、冷却システムの故障等、超電導ケーブルシステムで想定される各種の事故・故障を、海外での適用も考慮に入れて、抽出・分類し、発生頻度及び損害レベルを考慮して、安全性評価試験を行うべき項目を選定する。また、試験条件及び試験方法等、安全性評価試験の実施に係る細目を決定する。
- 安全性評価試験に用いる超電導ケーブルサンプルを基礎検討も含め想定する用途に応じて作製する。当該ケーブルサンプルを用いて、安全性評価試験を実施する。また、安全性評価の対象とする事象による超電導ケーブルシステムへの影響について、実用的な信頼性で評価するシミュレーション技術を開発する。その試験結果及びシミュレーションにより、超電導ケーブルシステムに及ぼす影響を検証する。
- 決定した安全性評価試験方法を、IEA、ISO等の場を通じて、国際的に共有し普及・標準化を目指す。

(2) 早期復旧等の実用化のための対策検討

- 試験結果及びシミュレーションによって示された影響の度合いに応じて、超電導ケーブルシステムとしての、事故・故障発生頻度の低減、損害の低減、及び事故・故障からの復旧方法等を検討する。
- 検討の結果、事故・故障発生頻度及び損害の低減のために、超電導ケーブルに付加すべき要素が明確になった場合は、安全性評価試験におけるケーブルサンプルの試作に反映する。
- 復旧方法等の検討結果を、運転管理に係るガイドラインとして取りまとめる。

(3) 超電導ケーブルの侵入熱低減技術の開発

- 超電導ケーブルの断熱に係る構造・材質を改良して、2種類以上の電圧階級

について試作した超電導ケーブルの改善効果を実験によって確認する。

(4) 冷却システムの高効率化技術の開発

- ・ 冷却システムを小型化するとともに、効率を向上させる技術開発を行う。
- ・ 開発した冷却システムと超電導ケーブルを組み合わせ、系統連系長期運転試験を行い、性能及び耐久性の評価、各種データを蓄積、超電導ケーブル設計・冷却システム設計・運転管理ガイドラインに反映させる。
- ・ 長期試験終了後の装置の残存性能検証、寿命40,000時間を担保する加速試験方法を確立する。

(5) 超電導直流送電システムの実用化開発

- ・ 実用線路での運転試験を実施する。
- ・ 超電導直流送電システムを実用化するために必要なガイドラインの策定等を実施する。

3. 達成目標

【最終目標】

(1) 安全性評価試験による影響検証に係る最終目標

- ・ 送電用及び配電用超電導ケーブルの仕様案の決定
- ・ 超電導ケーブルシステムの安全性評価試験方法の作成
- ・ 作成した安全性評価試験方法を国際標準化活動に反映
- ・ 安全性評価の対象となる事象による超電導ケーブルシステムへの影響を、実用上信頼できる評価を行うためのシミュレーション技術の完成

(2) 早期復旧等の実用化のための対策検討に係る最終目標

- ・ リスク低減及び早期復旧の観点から、超電導ケーブル及び冷却システムに付加すべき要素の決定
- ・ 復旧方法等の検討結果を反映した、運転管理に係るガイドライン作成

(3) 超電導ケーブルの侵入熱低減技術の開発に係る最終目標

- ・ 実運用を想定した条件で、直線部でのケーブル長さ当たりの熱侵入量が1.8 W/m/条以下

(4) 冷却システムの高効率化技術の開発に係る最終目標

- ・ 系統連系試験の実施
- ・ 実運用を想定した条件で、冷却システム全体のCOPを0.11以上とすること、及び冷凍機本体並びに主な冷却システム構成機器の保守・点検間隔を40,000時間以上とすること

(5) 超電導直流送電システムの実用化開発に係る最終目標

- ・ 実用線路での運転試験を実施
- ・ 設計、運用、保守ガイドライン作成等

4. 研究開発スケジュール

	平成28年度	平成29年度	平成30年度
電力送電用高温超電導 ケーブルシステムの実用化開発			
(1) 超電導ケーブル 安全性検証と基準策定	ケーブルサンプル作成		
	メーカー試験・	分析評価	ケーブル設計仕様策定
			安全性評価試験案作成
		評価試験方法の普及・国際準化	
(2) 早期復旧ガイドライン策定	復旧方法の検討		
		早期復旧ガイドラインの作成	
(3) 超電導ケーブルの侵入熱低減	冷却循環による長尺評価	断熱設計仕様の確立	
(4) 冷却システムの高効率化	系統連系運転		
		残存性能試験 解体撤去	ケーブル解体調査
(5) 超電導直流送電システム ガイドライン策定	系統運転評価		
	設計・運用・保守ガイドライン策定		

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目②「運輸分野への高温超電導適用基盤技術開発」

1. 研究開発の必要性

超電導技術は、直流電気抵抗がゼロであるという特徴的な性質により、送電ケーブルへの適用が期待されている。特に、鉄道等社会インフラへ導入できれば波及効果が極めて大きいと考えられるが、長距離冷却技術などの重要な課題が解決されておらず、普及段階への大きな足枷となっている。

この課題解決に向け、必要な冷凍機、極低温循環ポンプ、断熱管などの基盤技術の開発を行うとともに、km級の長距離冷却システムを構築し、安定性、信頼性及び実用性の確保を目指す。

2. 具体的研究内容

実用化の重要な課題である長距離冷却技術の開発を行う。

(1) 鉄道き電線に必要な長距離冷却基盤技術の構築

- ・小型冷凍機の開発
- ・液体窒素循環ポンプの開発
- ・断熱管の開発

(2) 長距離冷却システムの構築及び評価

- ・窒素冷却による超電導動作確認
- ・システム保全技術の構築

3. 達成目標

【中間目標（平成30年度）】

(1) 鉄道き電線に必要な長距離冷却基盤技術の構築

- ・小型冷凍機（設置寸法 2 m³/kW）の開発
- ・揚程0.6 MPa、流量50 L/min以上の液体窒素循環ポンプの開発
- ・2 W/m以下、真空維持1年以上を見通せる断熱管技術
- ・システム保全技術の検証

(2) km級長距離冷却システムの構築及び検証

【最終目標（平成32年度）】

- ・路線環境に対応した信頼性評価
- ・鉄道き電線用長距離冷却システム設計・評価基準及び保全基準の策定

4. 研究開発スケジュール

	平成28年度	平成29年度	平成30年度	平成31年度	平成32年度
(1) 超電導ケーブルの長距離冷却技術開発					
①コンパクト冷凍機技術開発	■				
②液体窒素循環ポンプ技術開発	■				
③断熱管技術開発	■				
(2) 長距離冷却システム構築・評価					
①実環境下での評価実施			■	■	■
②システム保全技術	■	■	■		

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目③「高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発」

1. 研究開発の必要性

次世代高磁場MRI用のコイルとして、コスト面、材料面又は液体ヘリウムレスの観点からY系線材の適用が期待されている。

しかし、Y系線材には、機械応力に対する超電導特性劣化や循環電流が原因となる磁場の乱れなどの課題があり、コイル化技術及び設計技術の向上に向けた研究開発が求められている。

さらに、今後永久電流モードでの安定高磁場生成のためには、超電導接続技術の実現に向けた研究開発が求められている。

2. 具体的研究内容

(1) 高温超電導コイルの実用化技術開発

- ・ コイル・マグネット製作技術として、コイルの巻線などの加工時、冷却時及び励磁時に生じる超電導特性の劣化を防ぐ構造、製造方法及び品質管理法を確立する。
- ・ 線材の磁化による磁場乱れ対策として、線材の磁化による磁場の乱れ及び安定性の影響を解析・実測両面から定量化し、対策技術を確立する。
- ・ コイル保護手法の検討として、コイルに異常が発生した場合のコイル焼損を防止する保護手法を開発する。

(2) 高温超電導マグネットのシステム最適化技術開発

- ・ 高磁場・高電流密度コイル設計技術の開発として、実機コイルの高磁場化と小型化に対応した磁気設計、構造設計、冷却設計技術を確立する。
- ・ 省エネ・低コストシステムの開発として、励磁用と定常運転用で電源を分割する省エネシステムや運転条件（冷却温度、電流等）最適化等による低コスト化を検討する。

3. 達成目標

【中間目標（平成30年度）】

- (1) コイルの大型化に対応した磁気・構造設計を実施し、1/2サイズのアクティブシールド型3Tマグネットの試作（直径500mmボア、3T、漏れ磁場（2.5m×3m））
- (2) 磁化の影響評価として、高温超電導コイルの磁化の定量測定、評価（安定度、均一度）。高温超電導マグネットによる小領域（30mm球）イメージング実証
- (3) マグネットシステム最適化として、マグネット励磁電源と磁場保持電源の分離システムの実証
- (4) コイル保護として、モデルコイルによるコイル保護検討

【最終目標（平成32年度）】

- (1) 磁化の影響評価と抑制技術開発のために、磁化を考慮した磁場解析手法の確立。1/2サイズ3Tマグネットによるイメージング実証（150mm球）。磁場均一度10ppm未満（250mmDSV）、磁場安定度1ppm/hr未満。
- (2) コイルの小型化として、1/2サイズのアクティブシールド型5Tマグネット設計技術（低温超電導コイル比線材量30%以上低減、磁場安定度0.1ppm/hr未満）の確立に向けた7T検証コイルの試作（コイル平均電流密度200A/mm²（7T）超）
- (3) マグネットシステム最適化として、コスト低減に向けたコイル形状、冷凍機能力、クライオスタット等のシステム最適化
- (4) ドライブモードのコイル保護として、焼損対策手法の確立

4. 開発スケジュール

	平成28年度	平成29年度	平成30年度	平成31年度	平成32年度
マイルストーン			■ 3T-1/2マグネット撮像評価		■ 最大磁場Z発生
(1) 高温超電導コイルの実用化技術開発					
①コイル・マグネット製作技術		3T-1/2マグネット試作	磁場評価・撮像	Z検証コイル試作	磁場評価
②磁化による磁場乱れ対策	磁場変動、磁化解析		磁場変動、磁化解析		
③コイル保護手法の検討	コイル保護方式検討		コイル保護実用化検討		
(2) 高温超電導マグネットのシステム最適化開発					
①高磁場・高電流密度コイル設計技術	3T-1/2マグネット設計	5T-1/2マグネット基本設計	Z検証コイル設計	3T実機マグネット小型化	
②省エネ・低コストシステムの開発		システム省エネ・低コスト検討			
(3) 超電導接続技術開発		高温超電導線材の超電導接続技術検討			コイル試作・評価

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目④「高温超電導線材の超電導接続技術」

1. 研究開発の必要性

次世代高磁場MRI用のコイルとして、コスト面、材料面又は液体ヘリウムレスの観点からY系線材の適用が期待されている。

しかし、Y系線材には、機械応力に対する超電導特性劣化や循環電流が原因となる磁場乱れなどの課題があり、コイル化技術及び設計技術の向上に向けた研究開発が求められている。

さらに、今後永久電流モードでの安定高磁場生成のためには、超電導接続技術の実現に向けた研究開発が求められている。

2. 具体的研究内容

(1) 高温超電導線材の超電導接続技術開発

- ・実用的永久電流マグネットに必要な高温超電導接続技術を開発する。
- ・高温超電導マグネットの永久電流モード運転時における異常検出、保護・焼損対策技術を開発する。

3. 達成目標

【最終目標（平成32年度）】

- ・高温超電導接続技術として、接続点での抵抗値 $10^{-12} \Omega$ 以下の接続を実現
- ・永久電流モード高温超電導マグネットの保護・焼損対策技術理論の構築と実証

4. 開発スケジュール

	平成28年度	平成29年度	平成30年度	平成31年度	平成32年度
マイルストーン					
(1) 超電導接続技術開発		高温超電導線材の超電導接続技術検討			
		異常検出および保護焼損対策技術検討			

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目⑤「高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発」

1. 研究開発の必要性

高温超電導線材（Y系線材及びMgB₂線材など）はコスト面、材料面また液体ヘリウムレスの観点からも超電導コイル応用分野への適用が期待されているが、このためには高磁場特性の向上、及び低価格化の実現が必要である。

この課題を解決するため、高磁場条件下での高電流密度性能を安定的に得るための特性改善と、工法改善による生産性向上を実現するための研究開発が必要である。

以上を踏まえて、本プロジェクトの開発目標を以下の通り定める。

2. 具体的研究内容

- (1) 高磁場コイル用途線材として、高磁場での臨界電流密度の向上、及び全長に渡る均一性能の向上を図る
- (2) 製造各プロセス改善により、スループットを上げる

3. 達成目標

【最終目標】

- (1) 高磁場コイル用線材として、以下を開発目標とする。
 - ・ Y系線材の場合、温度30K、磁場7T条件にて平均電流密度400A/mm²以上。MgB₂線材の場合、温度20K、磁場2T条件にて平均電流密度250A/mm²以上。
 - ・ 1kmにおける臨界電流の低下率（(全長の臨界電流平均値－臨界電流最小値)／全長の臨界電流平均値）を0.15未満
- (2) 生産性向上目標として、完成品の単位時間当たり生産長を50m/hr以上

4. 開発スケジュール

	平成28年度	平成29年度	平成30年度
①高磁場特性改善			
・高磁場臨界電流密度の向上	—————		
・全長に渡る磁場安定特性の向上	—————		
②生産性改善	—————		