

平成 2 9 年度実施方針

省エネルギー部

1. 件名： 高温超電導実用化促進技術開発

2. 根拠法

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 1 5 条第一号ニ、第三号及び第九号

3. 背景及び目的、目標

3. 1 研究開発の背景・目的

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。このような背景のもと、エネルギー基本計画（平成 2 6 年 4 月閣議決定）では超電導技術などの基盤技術の開発を加速することが必要とされている。

一方で、平成 2 4 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 2 7 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 3 2 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。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。

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 1 9 年度～平成 2 5 年度）において、6 6 k V / 2 0 0 M V A 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 k W 級のブレイトン冷凍機開発を実施し冷凍機単独で C O P（Coefficient of Performance）³ 0. 1 0 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 2 6 年度～平成 2 7 年度）において実際の

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）

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、ブレイト冷凍機の耐久性評価を進めてきた。

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事業」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（1 km）直流送電実験線路を敷設し、超電導直流送電の実証試験を行っていた。

韓国は、平成23年からGENIプロジェクトで、リットリウム系線材を用いた22.9 kV/50 MVA級、長さ410 mの三心一括型超電導ケーブルの実系統実証試験を実施している。また、80 kV/500 MVA級、長さ500 mの超電導直流ケーブル、及び、154 kV/500 MVA級、長さ1 kmの交流超電導ケーブルを開発し、実系統での実証を開始した。ドイツは、Ampercityプロジェクトで10 kV/40 MVA級、長さ1 kmの三相同軸型ケーブルを開発し、超電導限流器と組み合わせた実系統試験を実施している。

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り、国際優位性を確保している。

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。

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0.2 Tマグネットが開発され、現在Y系線材による1.3 T無冷媒マグネットを開発している。米国ではBi系線材による四肢用1.5 Tマグネット開発を進めており、最近ではMgB₂線材による1.5～3 Tマグネットの開発も計画されている。またニュージーランドではY系線材による1.5 T四肢用マグネットを、中国ではBi系線材による1.5 Tマグネットが開発され、現在は3 T、7 Tマグネットの研究開発が進められている。

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。

韓国 SuNAM や米国 AMSC、Super Power（古河電気工業）は、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。

3. 2 研究開発目標

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、フィ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した「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分野への適用を狙い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。

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目指す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技術開発」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。

[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」

【最終開発目標】（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1.8W/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

[委託事業]

研究開発項目②「運輸分野への超電導適用基盤技術開発」

【中間開発目標】（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2m³/kWの冷凍機の開発
 - ・ 揚程0.6MPa、流量50L/min以上の極低温循環ポンプの開発
 - ・ 2W/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) 2km級長距離冷却システムの構築及び検証

【最終開発目標】（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の設計・評価基準、保全基準の策定

[委託事業]

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」

【中間開発目標】（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（30mmDSV (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

【最終開発目標】（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（150mmDSV）。磁場均一度10ppm（250mmDSV）未満、磁場安定度0.1ppm/hr未満を達成。
- (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5Tマグネットの試作（コイル平均電流密度200A/mm²（7T）超、低温超電導コイル比線材量30%以上低減、磁場均一度10ppm（250mmDSV）、磁場安定度0.1ppm/hr未満）
- (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、クライオスタット等のシステム最適化実施
- (4) コイル保護として、焼損対策手法の確立
- (5) 高温超電導接続として、接続点での抵抗値10⁻¹²Ω以下の接続を実現

[委託及び助成事業]

研究開発項目④「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」

【最終開発目標】（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[委託事業]。
 - ・ 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[助成]

事業]

4. 実施内容及び進捗（達成）状況

プロジェクトマネージャーにNEDO 省エネルギー部 主任研究員 岩坪 哲四郎を、プロジェクトリーダーに国立研究開発法人 産業技術総合研究所 岡田 道哉氏を指名して、以下の研究開発を実施した。

4. 1 平成28年度事業内容

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」

66kV短絡・地絡試験ならびに275kV地絡試験を行い、試験結果の分析を実施した。窒素漏えい試験の予備試験を実施し漏えい量の把握を行った。外傷事故時の冷却システムの影響評価として、真空断熱が失われた条件でのシステム挙動データを取得した。長尺の超電導ケーブルサンプルを製作し、長尺での超電導ケーブルの冷却特性を評価した。ケーブルシステムについて、DC課電試験により各層の臨界電流測定を行い、当初性能を確認するとともに、系統連系試験のために、トラブル対策を行ったブレイトン冷却システムの性能を超電導ケーブルと接続した状態で確認した。

超電導直流送電については、1km送電システムにて試験を行い、長距離を模擬した低流量液体窒素循環試験では、20km長で温度差20K以下に相当する条件で安定冷却に成功した。また、過酷試験で温度、電流、電圧等の通電限界性能を評価し、長期運転性能試験を行い、試験後の残存性能を評価し、設計・運用・保守ガイドラインの策定を行った。

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」

長距離冷却システムの主構成機器である冷凍機、液体窒素循環ポンプ等について、中間目標値に基づく設計、製作を進めた。断熱管については短尺での性能評価及び長尺製造技術開発に必要な装置を製作した。電流リード小型化に向けた電界解析モデルの構築や、冷却システム・超電導ケーブルの状態監視についての検出原理検証を行った。

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」

超電導特性の劣化、線材の磁化による磁場乱れ等を検討するため、1/2アクティブシールド型3T高温超電導コイルを設計し、巻線を開始した。省エネ型マグネット励磁電源の分離システムを設計し導入した。また、永久電流運転を目指し種々の材料・方法による超電導接続形成可能性の検討を行った。さらにコイル保護・焼損対策とし基礎検討を開始した。

高温超電導（REBCO）線の超電導層同士を直接接続する超電導接続の測定方法として、線材をワンターンループさせて直接接続し、接続抵抗を測定する磁場減衰法のための装置の構築を実施した。加えて、機械的応力下での超電導接続の特性評価のための評価方法を検討、評価装置の設計を行った。さらに、平成30年度に評価する小型コイルの設計を進め、そのコイルの設計の妥当性を確認するために要素コイルを4つ試作して、磁場中での特性評価を実施した。

研究開発項目④「高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発」

臨界電流密度の安定化（ばらつきの低減）、高磁場臨界電流密度向上、安定化磁場発生用線材開発のため、課題の抽出整理とともに設備導入を実施した。また、製造線速向上に向けた課題抽出及び設備導入を実施した。

4. 2 事業推移（平成29年2月14日現在）

	平成28年度
実績額推移 需給勘定（百万円）	1,500
特許出願件数（件）	2
論文発表数（報）	18 他に解説等0
フォーラム等（件）	6 展示会出展1

5. 事業内容

プロジェクトマネージャーにNEDO 省エネルギー部 主任研究員 岩坪 哲四郎を、プロジェクトリーダーに国立研究開発法人 産業技術総合研究所 岡田 道哉氏を指名し、以下の研究開発を実施する。実施体制については、別紙を参照のこと。

5. 1 平成29年度事業内容

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」

短絡事故時の解析として、3km長さで、短絡電流が通過した場合の超電導ケーブルの挙動をシミュレーションする。66kV地絡試験として、平成28年度に引き続き、ケーブルを模擬した短尺での試験を行い、地絡時の保護層の構造検討を行う。また、平成30年度に実施する地絡試験システムの設計を行う。275kV地絡試験として、2.5m長、1m長の地絡試験を実施する。液体窒素漏えい（マンホール内で液体窒素が漏えい）の模擬試験を行い、その対策検討を行う。地中管路を模擬した液体窒素漏えい試験を実施し、周囲環境への影響を確認するとともに、洞道内での窒素漏洩による影響評価を行う。ブレイト冷却システムを超電導ケーブルに接続させた状態での長期実系統連系試験を実施する。

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」

コンパクト冷凍機、液体窒素循環ポンプの製作を完了し、ターボ回転機の単体回転試験を行い、中間目標値を満足する見通しを得る。断熱管については、短尺サンプルでの性能評価に基づき構造設計を完了するとともに、長尺製造に必要な装置の製作を継続する。解析に基づく小型電流リード設計及び実験との比較による解析モデルの評価・改良を行う。システム保全技術として異常の有無を判定する技術、ケーブル位置計測技術等の開発を行う。

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」

前年度に続き1/2アクティブシールド型3T高温超電導コイルを試作する。試作では1.2mの大口径コイルの巻線を行い特性評価する。また、超電導接続のための材料及びプロセスの開発を行う。超電導接続技術については、MRIマグネットでの接続を想定した磁場中での接続抵抗測定を行い、 $10^{-12}\Omega$ 台の接続抵抗を実現する。超電導接続部について化学的な劣化及び機械的な劣化を防止する保護方法を、接続サンプルを用いた特性評価を通して開発する。小型コイルの部分モデルとなる要素試験コイルを試作して特性評価を行い、平成30年に評価する小型コイルの設計及び試作に必要なデータを習得する。

研究開発項目④「高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発」

製造ラインの最適化等を進め、低ばらつきの1km級線材試作、人工ピン導入線材の磁場中特性最適化と線材構造最適化を行う。また、細線化や撚り線形状の最適化と撚り線の損失見積り等を行う。線速律速工程については設備改良を行い、前年度導入設備については製造条件の最適化を行う。

5.2 平成29年度事業規模

	委託事業	助成事業	合計
需給勘定	1,204百万円	196百万円	1,400百万円（継続）

事業規模については、変動があり得る。

6. その他重要事項

6.1 評価

NEDOは、①事業の位置づけ・必要性、②研究開発マネジメント、③研究開発成果、④実用化・事業化に向けての見通し及び取組みの4つの評価項目について、外部有識者による評価を実施する。評価の時期は、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。

6.2 運営・管理

本研究開発については、NEDOが設置した超電導技術評価委員会においてプロジェクトの実施内容を詳細に検討し、その結果を適切に実施計画に反映し、着実な研究開発業務の運営を図る。

6.3 知財マネジメントに係る運用

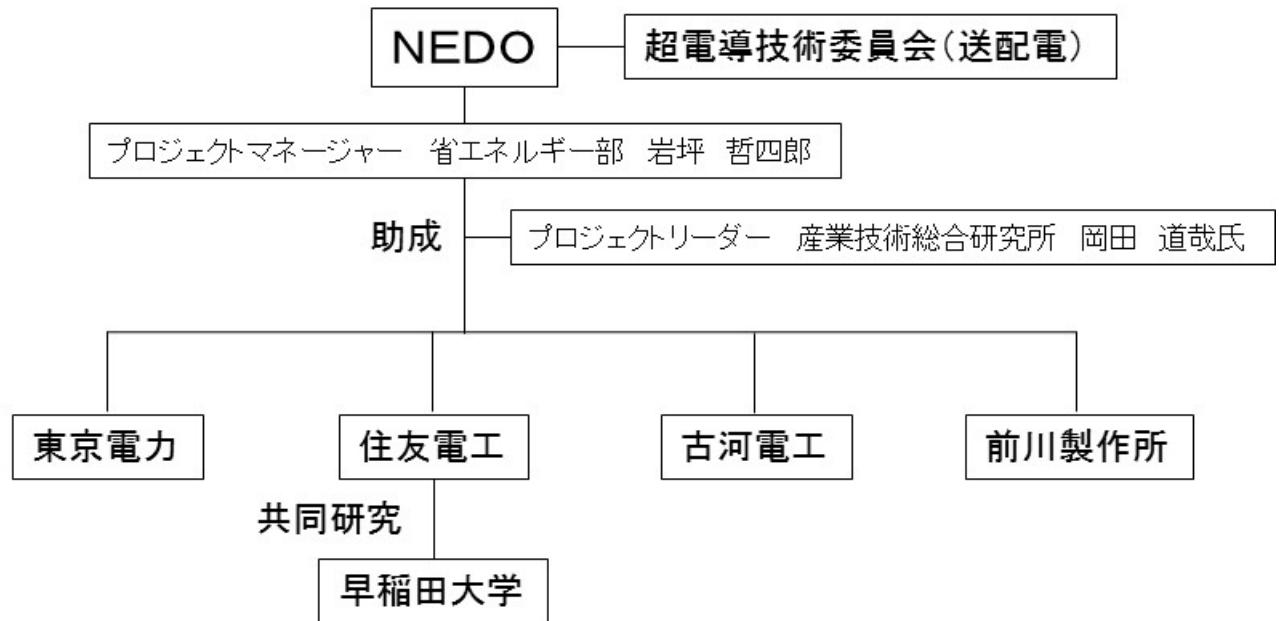
「NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」に従ってプロジェクトを実施する。（研究開発項目②、③及び④の委託事業のみ）

7. 実施方針の改訂履歴

- (1) 平成29年2月、制定

(別紙) 高温超電導実用化促進技術開発 実施体制図

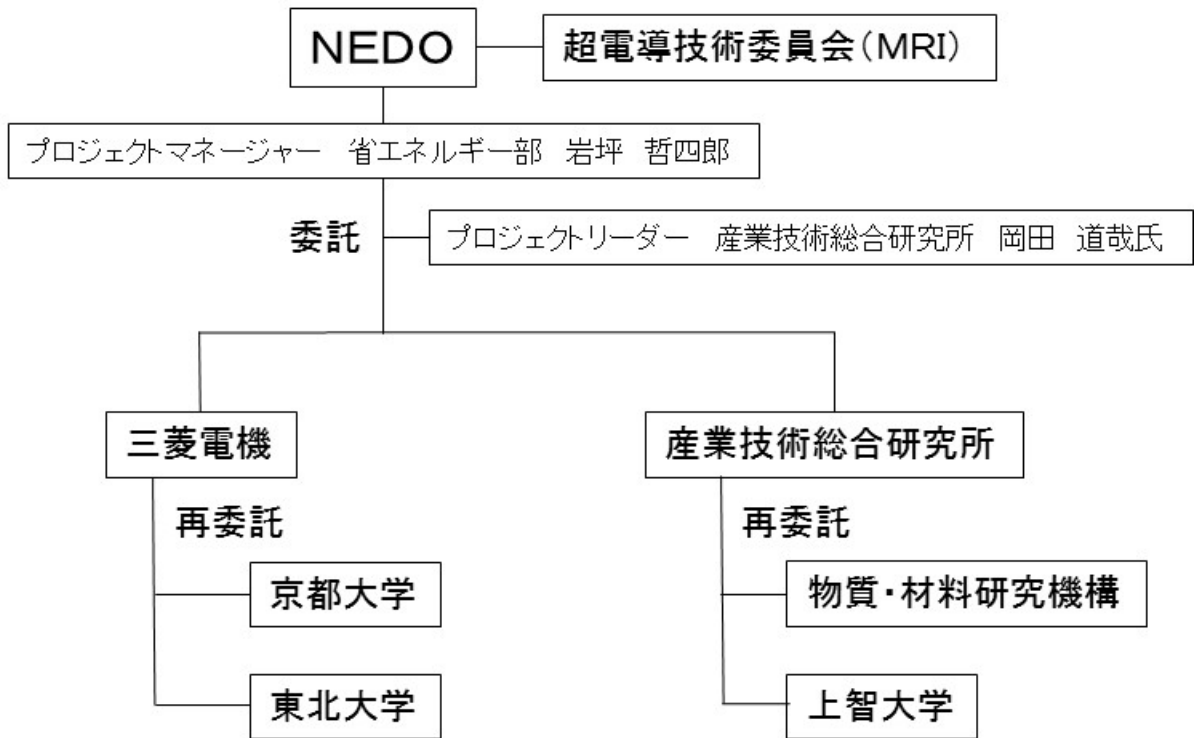
①電力送電用超電導ケーブルシステムの実用化開発



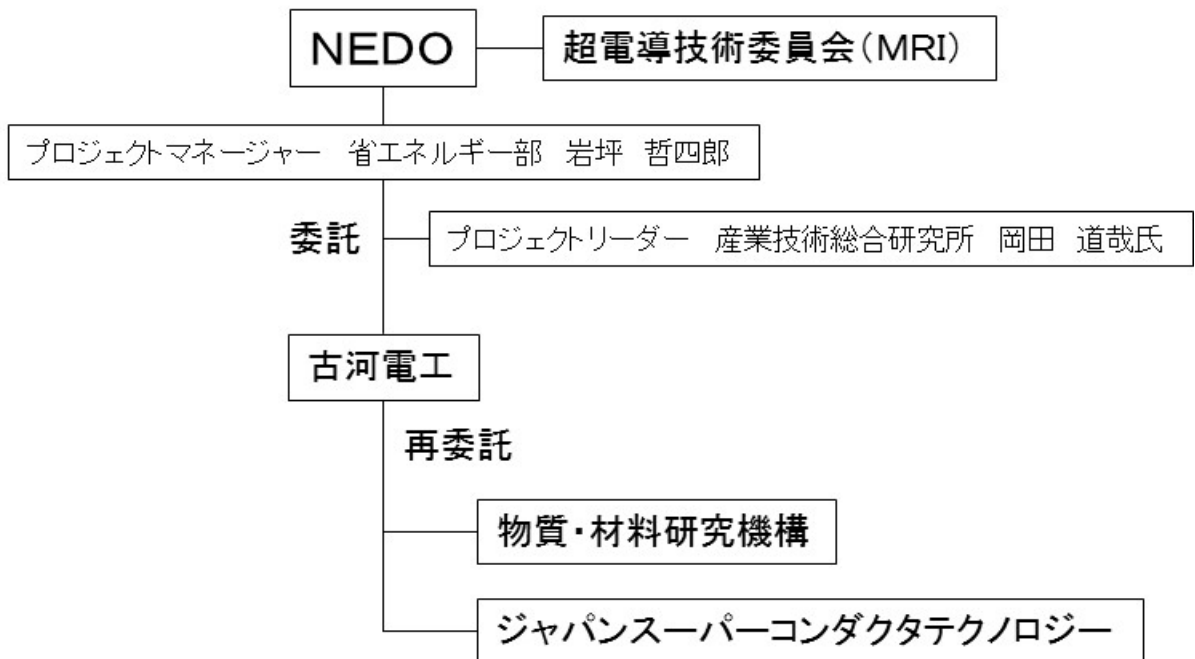
②運輸分野への高温超電導適用基盤技術



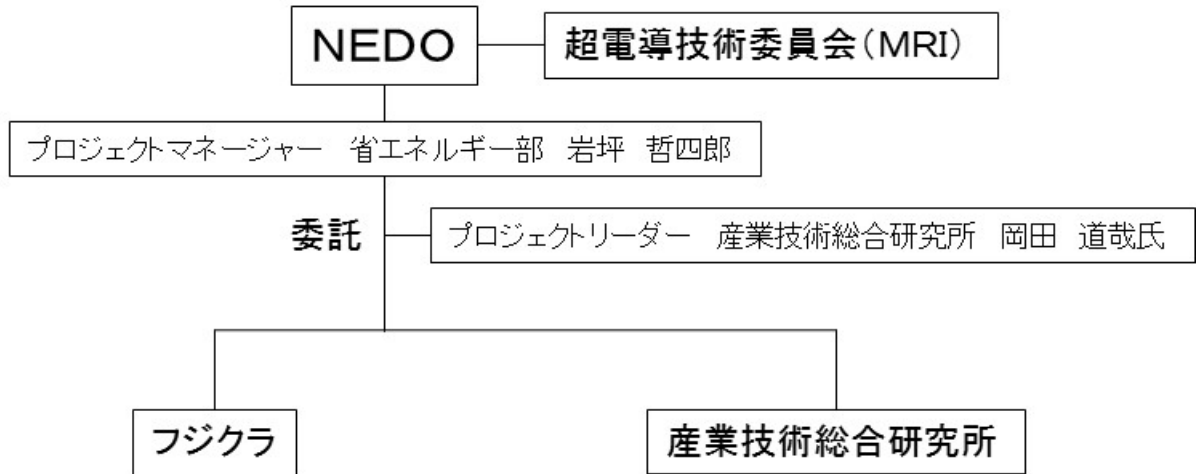
③高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発



④高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発



⑤高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発



⑥高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発

