

21世紀へのチャレンジ

超電導技術の電力への応用

A Challenge to Succeed the 21st Century Application of Superconductivity to Electrical Power Technology

(電力技術研究所)

近年、電気エネルギーの重要性が高まり、その需要は着実な伸びを示している。また、地球環境問題が叫ばれている今、省エネルギー効果が大きい「超電導」に大きな期待が寄せられている。電気抵抗がゼロになるこの技術を電力に応用すれば、電力供給の安定化やエネルギーの有効活用、電力機器の小型・軽量化が可能となる。すでに、超電導技術は医療分野に一部実用化されており、リニアモーターカーや核融合などへの応用も検討されている21世紀を担う技術である。

(Electric Power Research & Development Center)

As electricity has been positioned higher among various forms of energy supplies, demands for electricity have been continuously growing. In the meantime, increasing concern over the global environment causes superconductivity to be highlighted as one of the most promising technologies for energy saving. Application of this technology, which makes resistance to become zero, to the field of power electricity will help stabilize electric power supply, improve the efficiency of energy utilization and reduce the size and weight of electric power equipment. Being already put into practical use in the field of medical electronics, superconductivity has been studied for such applications as Maglev and nuclear fusion and has a great potential to make the base of technological innovation which is fruitful in the 21st century.

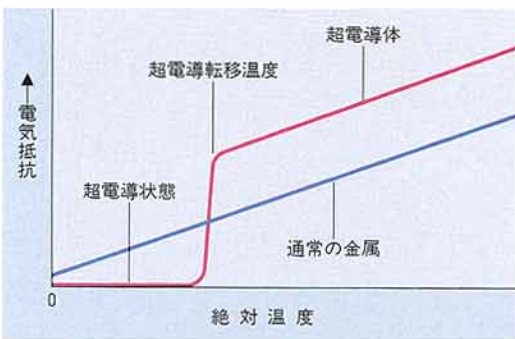
1 超電導とは

金属をどんどん低い温度に冷却していくと、その電気抵抗はどうなるのか？ 通常の金属では、その抵抗は温度に比例して小さくなっていき、最後には残留抵抗と呼ばれる抵抗が残るが、ある種の材料では電気抵抗が突然ゼロになる現象が起きる（第1図）。

この現象は超電導と呼ばれ、今世紀の初め、水銀の電気抵抗の消滅という形で発見された。当時の科学界では、気体の液化が1つの大きなテーマであり、いろいろな気体が液化されていったが、ヘリウムガスの液化は、なかなか成功しなかった。1908年オランダの

ヘリウムガスがこの最後まで液化できなかったヘリウムガスの液化に成功した。彼はこの液体ヘリウムを使って、いろいろな金属の電気抵抗を測定しているうちに、水銀の電気抵抗が4.2K（-269℃）で急激に減少することを発見した（1911年）。これが人類の前に超電導が姿を現した最初である。この超電導現象にはもう一つ、おもしろい特性があり、磁石から出ている磁力線を超電導体ははね返してしまう。これはマイスナー効果と呼ばれ、最近発見された液体窒素温度77K（-196℃）で超電導となる酸化物超電導体で磁石の上に浮く様子がよく新聞、雑誌で紹介された（第2図）。

こうした超電導特性を持つ材料は電気抵抗がゼロで



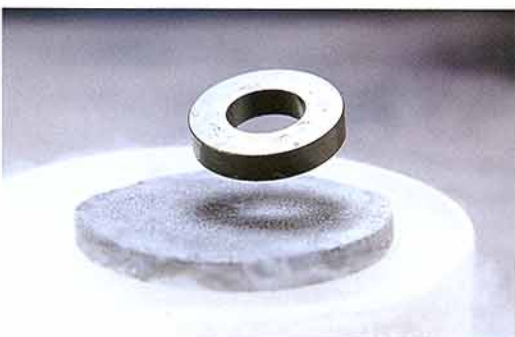
第1図 超電導体の抵抗—温度特性

第1表 超電導の電力分野への応用例

適用機器	超電導化のメリット	課題
発電機	・発電機効率の向上 ・小型軽量化 ・系統安定度の向上	・回転子構造（電磁力、冷却） ・界磁巻線の機械的電氣的安定性 ・電機子巻線の機械的電氣的安定性
送電ケーブル	・効率向上 ・小型化 ・低電圧大容量送電（系統構成の低コスト化）	・超電導体の低交流損失化 ・熱収縮対策 ・絶縁方法
変圧器	・効率向上 ・小型軽量化	・低交流損失超電導線材の開発
電力貯蔵	・高効率電力貯蔵 ・エネルギーの出し入れが高速で可能	・電磁力支持法 ・クエンチ防止対策 ・磁気シールド

第2表 電力以外の分野への超電導の応用例

分野	応用例	効果
輸送・交通	・リニアモーターカー ・超電導推進船	・スピードアップ ・低騒音化
医療	・磁気共鳴イメージング装置（MRI）	・X線CTよりも精度がよく、応用範囲が広い（既に商品化）
情報・通信	・超高速コンピュータ（ジョセフソン素子）	・小型化 ・超高速、低消費電力
計測	・超高性能電子顕微鏡	・分解能の向上
その他	・シンクロトン放射線装置（SR） ・核融合	・超微細加工可能 ・高磁場



第2図

あるため、電流を流しても電気エネルギーのロスがなく、銅などの常電導材料よりも高い電流密度で電流を流すことができる。

2 超電導技術の経緯

1911年に水銀、続いてスズ、鉛などの金属が超電導になることが発見され、これらを用いて超電導電磁石をつくることが試みられたが、いずれも低い磁界で超電導状態が破れてしまい失敗した。その後、種々の金属が超電導になることが発見されたが、超電導電磁石を実用化できる材料が発見されたのは、超電導発見以来約半世紀たってからで、1961年には高い磁界を発生する超電導電磁石が試作された。これを契機に世界各国で優れた特性をもつ超電導材料、超電導線材の開発が進められ、電力応用の研究開発も盛んになった。

3 電力への応用

超電導技術の電力分野への応用は、日本の場合、通産省工業技術院のムーンライト計画の一環として行われている技術開発を始め、企業や大学等で様々な研究が進められている。その項目としては、発電機、送電ケーブル、変圧器、電力貯蔵、核融合といったものがあげられる。例えば発電機では、回転子コイルに超電導を用いれば、その電流密度は常電導に比べはるかに大きく、コイルの太さを大幅に細くできるため、発電

機を小型・軽量化でき、電力損失も低減できる。また超電導では電気抵抗がゼロのため、超電導コイルに十分な電流を流し、その両端をつないで閉回路にすれば、半永久的に電流が流れ続け、電力を高効率で貯蔵できる。さらに送電に利用すれば、大電力を送ることも可能になる。

代表的な超電導材料としてはNbTi（ニオブチタン）やNb₃Sn（ニオブスズ）といった金属系のものが実用化されており、新しい超電導体である酸化物系も実用化に向けて研究が進められている。

なお、超電導技術の応用例を電力とそれ以外の分野について、それぞれ第1・2表に示した。

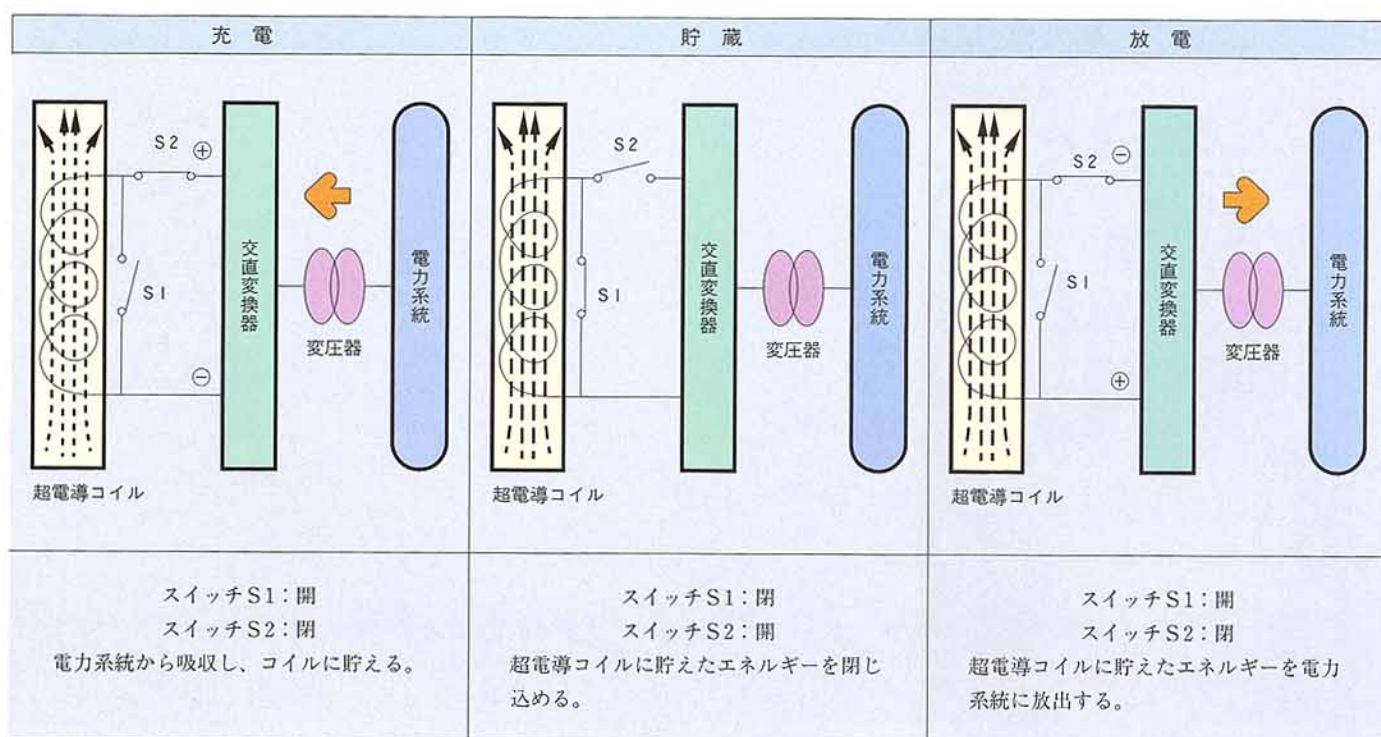
4 当社の開発の現状と今後の予定

当社が取り組んでいる超電導技術の電力への応用に関する研究開発としては、超電導電力貯蔵装置（Super-conducting Magnetic Energy Storage：SMES）、超電導発電機、超電導ケーブル、酸化物超電導材料等がある。以下、開発の現状と今後の予定を紹介する。

(1) SMES

① 開発の背景

SMESとは、電気抵抗がゼロの超電導線で作ったコイルに電流を流し、電気エネルギーを磁気エネルギーとして貯える電力貯蔵装置である。超電導コイルには直流が流れているので、交流が流れている電気系統と接続するために、交直変換器を使用して第3図に示す



第3図 超電導電力貯蔵の原理

ように電力の充電・貯蔵・放電を行う。

SMESの技術的な特徴は、

- イ) 電力の貯蔵効率が良い
- ロ) 貯えた電力の出し入れ速度が速い (10⁻³秒程度) があげられる。これらの特徴を使えば、負荷変動抑制による電力品質の維持、安定度向上による送電電力の増大、効率の良い電力貯蔵によるロードレベリング (負荷平準化) 等に効果が期待できる。

当社ではSMESの制御技術や異常時の保護技術の開発を行っている。また、SMES開発の国家プロジェクトにも参加し、この中でSMESの心臓部である超電導コイルの要素技術開発を担当している。

②開発の現状

電力貯蔵容量 1 MJ (300Wh)、出力50kWのSMESシステムを製作し (第4図)、当研究所にある電力系統を模擬した送電線装置と組み合わせた実験研究を行った。この結果、SMESの基本特性を把握し、電力系統での適用効果を実験的に確認した (第5図)。

特に安定度の向上効果では、発電機動態安定度および過渡安定度について実験を行い、適切な制御を行えばSMESの効果により、系統の電力動揺が早くおさまることを検証した。

③ 今後の予定

SMESの実系統への適用を目指して、SMESの運用、保護のための改善、またSMESの主要構成要素の超電導コイルの試験・評価技術や、クエンチ検出装置と保護技術の研究などを引き続き行っていく。

また、国家プロジェクト「超電導電力貯蔵システム要素技術開発調査」に参加し、当社に与えられた課題であるSMES用超電導コイルの開発を進めている。

(2) 超電導発電機

① 開発の背景

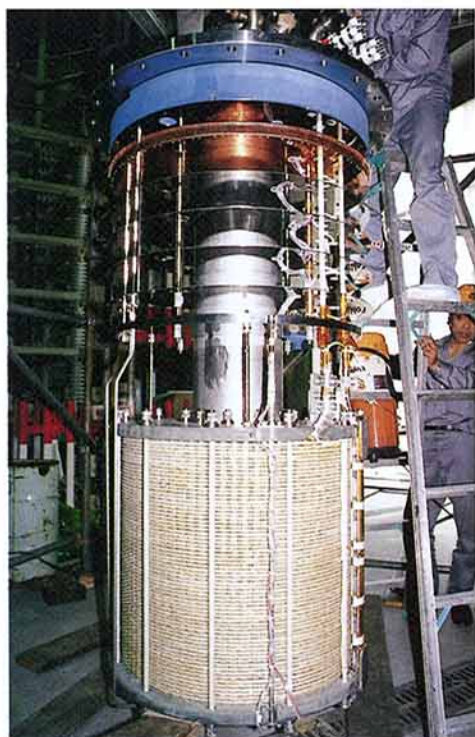
超電導発電機については、通産省工業技術院のムーンライト計画の一環として新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から受託し、技術開発を行う「超電導発電関連機器・材料技術研究組合 (略称Super-GM)」に、当社も参画している。

このプロジェクトは、1988年から8年間の予定で20万kW級パイロット (技術的検証) 機の設計と製作に必要な要素技術を確立することを目標に、構造材料などの要素技術を開発。また、これら要素技術を結集した7万kW級モデル機を製作し、実負荷運転試験や各種の事故を想定した過酷試験を含む現地 (フィールド) 試験を実施し、超電導発電機システムの総合的な運転性能と信頼性を検証することを目的としている。

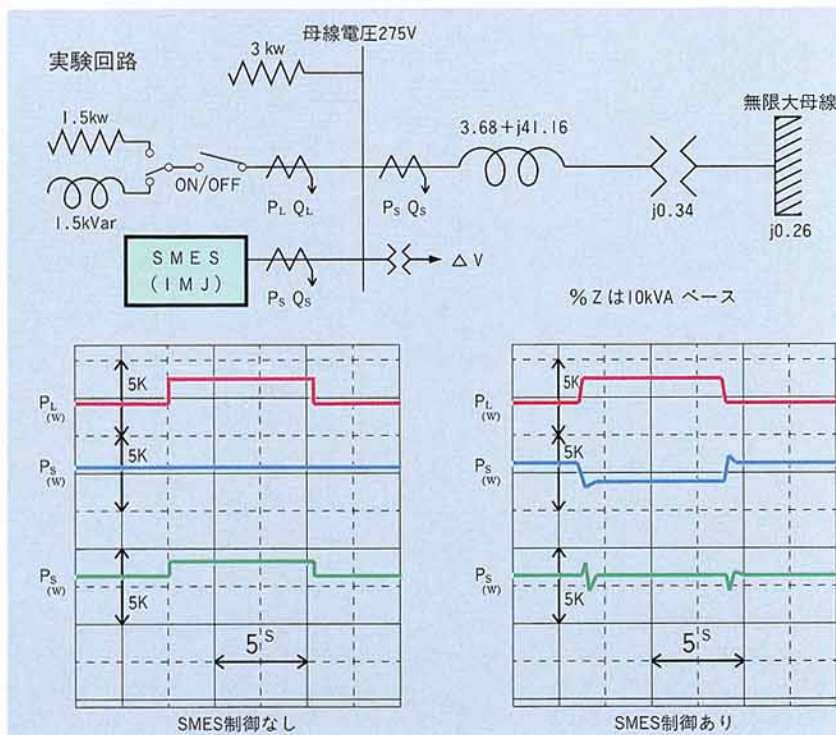
なお、超電導発電機の構造は第6図に示した通りである。

② 開発の現状

超電導発電機には、電機子巻線も含めた完全超電導発電機と界磁巻線のみを超電導化した超電導発電機とがある。このプロジェクトでは、現時点で技術開発の見通しがあり、また、経済的メリットも追求できる界磁巻線のみを超電導化した第一段階の超電導発電機を開発している。これまでに、ロータ部分モデルによる



第4図 超電導コイル内部構造



第5図 SMES変動負荷試験結果の例

回転励磁試験を行うなど各種部分モデルを製作し、超電導固有技術や製作技術などの検証をほぼ完了した。現在、7万kW級モデル機の製作に目途をつけ、一部製作に着手している。

③ 今後の予定

現地試験（大阪市内の火力発電所構内を予定）に向け、7万kW級モデル機の製作や試験設備建設準備が進められる予定である。

(3) 超電導ケーブル

① 開発の背景

通常、送電用ケーブルに電流を流すと、電気抵抗による発熱を生じるため、送電容量は導体温度が許容値を超えない範囲に限定される。もし、超電導体をケーブルに使用すれば、抵抗がゼロのため送電容量を飛躍的に増大できる。しかしながら、液体ヘリウム冷却の場合、超電導状態を維持するための断熱構造や冷却システムのコストが高く、1回線当たり500万～1000万kVAという非常な大電力送電でなければ在来技術と競合できない状況にあった。高温超電導の出現は、この問題を一気に解決するものである。

今後、酸化物超電導体による長尺線材の製作が可能になれば、安価な液体窒素での冷却が可能となるため、超電導ケーブルの実用化が期待できる。当社では、その時に必要となる極低温での絶縁体の電気絶縁特性や交流損失など基礎的な特性についての調査試験を行っている。

なお、超電導ケーブルの概念は第7図のようになる。

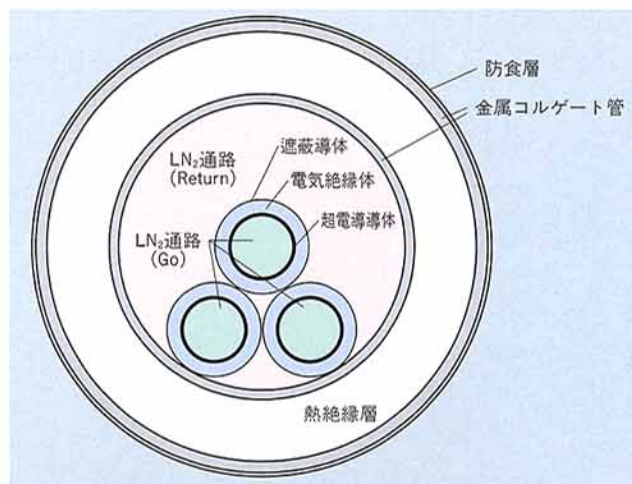
② 開発の現状

酸化物超電導ケーブルの各種絶縁材料について、極低温での電気絶縁特性や機械的特性を調べ、特性の良い有望な材料について選定を行っている。また、ケーブルの設計を行う上で必要となるヒステリシス損失の測定や、その評価方法について検討を行っている。

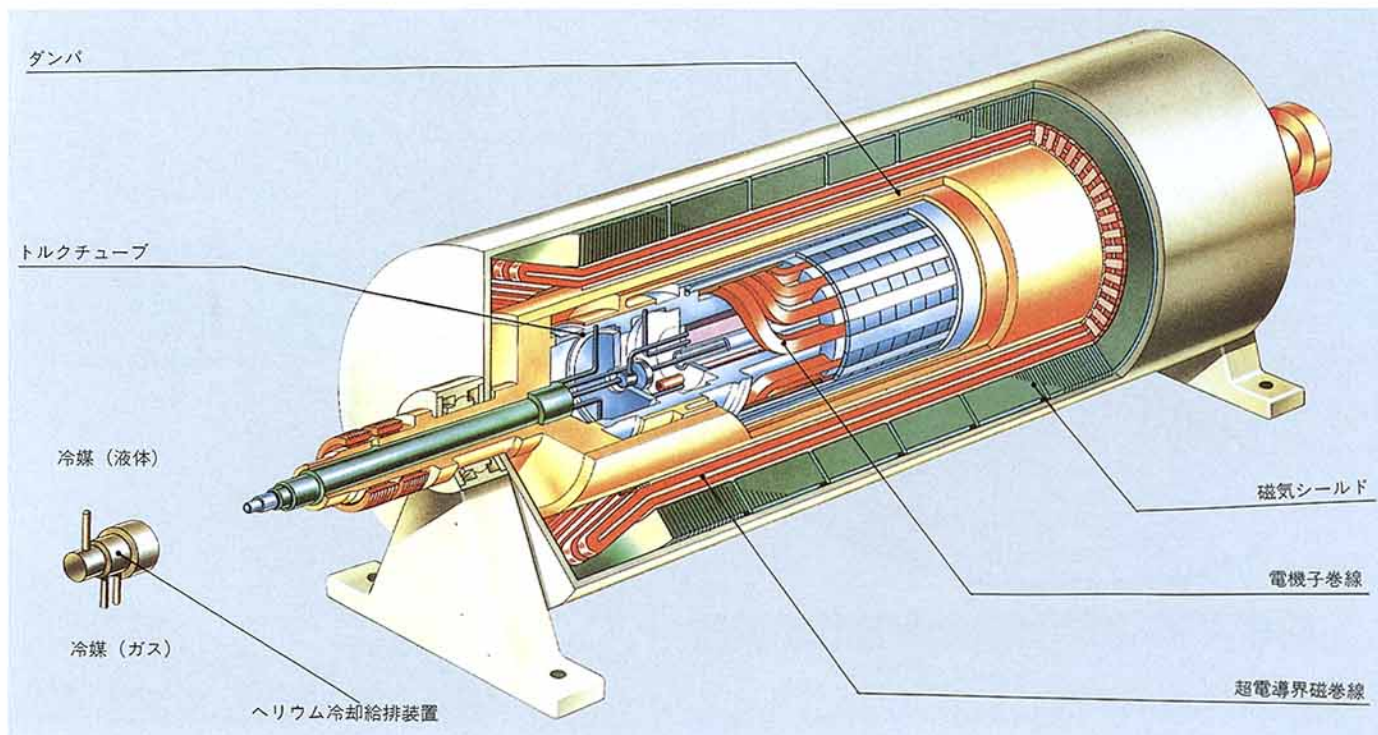
③ 今後の課題

超電導ケーブルの実現には、ケーブル設計・製作上の課題のほか、ケーブルの冷却、熱絶縁、接続技術、布設工事技術の確立や、熱機械的挙動対策など多くの課題が残されている。

現在はケーブル設計に応用できる基礎特性について調査中であるが、線材の長尺化など製作上の課題について見通しが得られれば、さらに残された技術上の課



第7図 超電導ケーブル概念図



第6図 超電導発電機の構造図

題を順次検討していく予定である。

(4) 酸化物超電導材料

① 開発の背景

超電導体としては、まず純金属、続いて合金、金属間化合物で種々の超電導材料が発見されてきたが、 Nb_3Ge (ニオブ3ゲルマニウム) の23K (-250°C) が最高であり、応用には依然として液体ヘリウムでの極低温冷却が必要なことが技術面やコスト面で実用化の障害となっていた。

そこへ、1986年にベトノルツとミュラーによってランタン系酸化物が金属系よりも高い温度で超電導体になることが確認されると、この新しいタイプの超電導体の探索が世界各国で行われ、液体窒素温度 (77K、-196°C) を超える超電導体も発見された。これにより超電導技術に対する期待が一気に高まり、全世界で一大研究開発がスタートした。

当社でも電力分野への応用を目指して研究開発に着手し、線材化技術の開発に成功している。

② 開発の現状

酸化物超電導体は従来の金属系と違い、非常にもろい材料であるため、そのままでは曲げることができない。このため、超電導ケーブルやコイル等への応用を考えた場合、曲げることのできる長い線材を作る技術が必要となる。

現在、酸化物超電導体をガス状態から合成するCVD法によって、金属テープの上に線材化することに成功し、同プロセスの線材としては世界最高の特性を持つ超電導体 (1平方センチ当たり7万アンペアの電流を流すことができる) を得ている (第8図)。

③ 今後の課題

酸化物超電導体の超電導特性は今までの金属系に比べ、多くの異なる性質を持ち、実用化にあたっては十分にこれらを解明する必要がある。大きく分けると次の3つが指摘されている。

イ) 超電導体の結晶異方性 (結晶の方向により電流の

流れやすさが大きく異なる)

ロ) 結晶粒界の存在 (超電導体の結晶と結晶の間に、電流の流れ難い部分ができる)

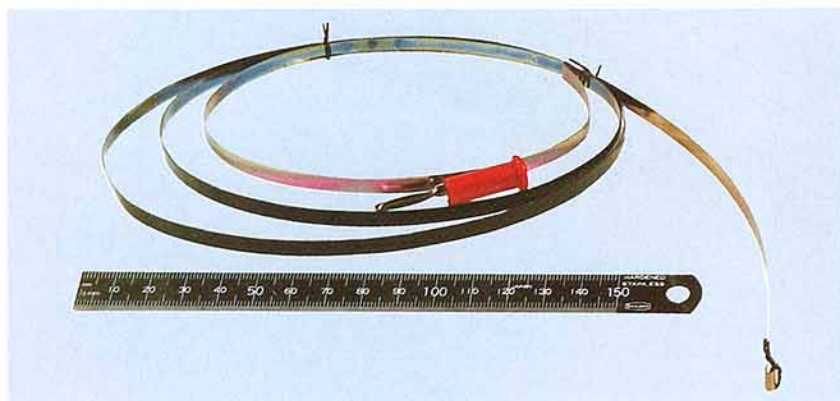
ハ) 磁束のピン止め点の問題 (超電導体に電流を流す場合、電流によって発生するローレンツ力で磁束が動かないように固定する必要がある。もし磁束が動くと、これがエネルギーの損失となり超電導状態が壊れてしまう)

現在、イ) の問題点に対して、超電導体を溶融した液体状態から成長させることで、結晶が一方方向に揃った超電導体を合成し、超電導特性の異方性の問題に取り組んでいる (第9図)。

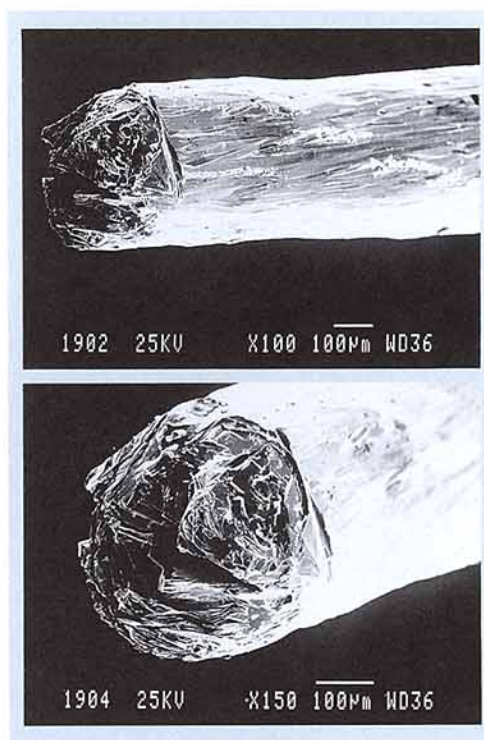
5 夢から現実へ

産業や暮らしのソフト化、ハイテク化、そして情報通信を中心とする高度情報化社会の進展に伴い、それを支える電気に対して信頼性の向上や高品質化がますます求められている。また一方では、基幹エネルギーとして資源の有効利用や経済性といった点から、より一層の高効率化、コストダウンが重要性を増している。

こうした中で、今回紹介した電力分野における超電導技術の応用は21世紀の電力を担う技術として期待されている。その実用化に向けては、まだまだ越えなければならないハードルも多いが、我々はこの超電導という人類に与えられた素晴らしい贈り物を実用化すべく、全力を挙げて今後も研究開発を進めていきたい。



第8図



第9図

(上: 100倍、下150倍)