超電導電気機器研究開発の現状と展望

——実用化に近づきつつある夢の技術——

特集解説

塚 本 修 巳

横浜国立大学

梅 田 政 一

電子技術総合研究所

秋 田 調

電力中央研究所

キーワード

超電導応用, 高温超電導体, 低温超電導体

1. 序

1950年代末からニオブとすずの金属間化合物 (Nb_3Sn) や、ニオブとチタンの合金 (NbTi) などの実用に耐える高臨界磁界をもつ金属系超電導材料が次々と発見され、超電導の電気機器への応用のための研究・開発が本格的に始まった。これらの超電導体は液体ヘリウム温度に冷却する必要があり、低温超電導体とも呼ばれている。また、1983年にフランスで金属系超電導体を用いた 50/60 Hz の周波数でも使用可能な交流超電導線が開発され、それまで準直流的な分野に限られていた超電導応用の分野を大幅に広げた。更に 1986 年になって、液体窒素温度でも超電導になる高温酸化物超電導体が発見され、今まで超電導化のメリットがなかった機器まで超電導化が考えられるようになり、超電導ブームが起きたことは記憶に新しい。

超電導体には高い密度の電流を損失無しに流すことができるので、電気機器、エネルギー機器に応用すれば機器の大幅な高効率化、小型・軽量化が可能となるのみならず、新しい機能をもつ機器も実現できる。図 1 には超電導の電気機器への応用とそれを実現するための基礎技術の樹木図が示してある。ここに示されている応用機器は一部で既に実用化されており、他もほとんどが実用試作段階、モデル機器試作段階に達しており、超電導の実用化が着実に進んでいる。

本解説では、応用の基礎となる超電導線材技術の現状と実用段階に致達しつつある超電導応用機器の開発の現状について概観し、更に将来、どのような応用の芽があるかについて述べることにする。

2. 線材技術

超電導応用電力機器の研究開発を進めるためには、超電導材料の線材化技術の大幅な向上が必要である。超電導現象を示す材料は、今日までに数千種類発見されているが、線材化に成功した材料は NbTi 合金材料と金属間化合物である Nb_3Sn , V_3Ga , Nb_3Al の数種類に過ぎない。これ

図 1 超電導応用技術とそれを支える基礎技術

は、優れた超電導特性を示す材料であっても、線材化プロセスで要求される極細多芯化のための加工性、量産性、機械的・熱的特性などの条件を満たすかどうかで、淘汰された結果である。酸化物超電導材料は臨界温度 T_c を飛躍的に高め、注目される超電導材料であるが、金属系材料と同様に線材化プロセスの開発過程で材料の淘汰が行われることになる。

金属系超電導線材では、直流・パルス超電導機器への応用線材として技術的に確立され、超電導線材・導体に要求される高臨界電流密度、電磁安定性、熱的安定性、低電磁損失などの高性能化研究開発が進められた結果、商用周波数で使用可能な線材にまで発展した。今後の研究開発が進めば交流電力機器への適用が可能となろう。一方、酸化物系超電導線材に関しては、長尺化、高電流密度化への努力がはらわれている。長尺化に関してはビスマス系 (Bi 系: $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ -Bi 系 2223 相, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ -Bi 系 2212 相) の超電導パウダを銀のパイプに入れ、テープ状に伸線した Bi 系銀シース線材の開発が進んでいる。また、高電流密度化に関しては、イットリウム系 (Y 系:

State of the Art and Future Prospects of Superconductor Applications — Dream is Coming True —

By Osami Tsukamoto (Yokohama National University), Masaichi Umeda (ETL), Shirabe Akita (CRIEPI).

YBa₂Cu₃O₇-Y 系 123 相) 超電導体を金属基材上に CVD (化学蒸着法), PVD (物理的蒸着法) により析出させた線材の開発が進んでいる。

2.1 金属系超電導線材の現状

金属系超電導線材は超電導応用機器に必要な導体特性が多様化したことにより、種々の線材・導体の研究開発が進められている。これらの導体は、大きく分類すると高磁界用導体・大電流容量導体・高電流密度導体に分けられ、また、用途別にも分類できる。機器に要求される超電導線材の仕様は多様化しており機器特有の要請から、図 2 に示すように、直流・パルス磁界発生装置用導体としては超電導線を多数本束ねてケーブル状にしてコンジット内に納めたケーブルインコンジット型(c), 超電導線を多重により合わせ、所定の形状にした成形より線型(b)が開発されている。また、交流電力機器用としては多重より線導体(a), (b)があげられる。

交流用超電導線材・導体の研究開発は商用周波数で使用可能な電力機器の実現のために、日本とフランスを中心に研究開発が進められている。超電導線は直流では損失はゼロであるが、交流では種々の原因で損失が発生する。交流超電導線はこれらの損失を実用レベルまで低減するために工夫がされている⁽¹⁾。損失を抑制した交流素線は銅とニッケルでできた合金の母材中に、多数の微細超電導フィラメントを配した構造になっており、線径 0.2~0.3 mm, 超電導フィラメント径は~100 nm, フィラメント数は 30~50 万本, 電流密度は 2,000~4,000 A/mm²程度のものが得られている。この素線を 6 本束ねることによりクエンチ電流 $I_q \sim 2$ kA at 0.5 T の交流特性をもつ線材の開発に成功している⁽²⁾。また 2 T 級の交流マグネットも試作されている⁽³⁾。現在これらの交流線材を実用規模の交流電力機器に適用可能な電流容量 3~20 kA 級多重より線導体の開発が行われている。このようなより線導体では電磁気的な不安定性が現在大きな問題となっている⁽⁴⁾。

2.2 酸化物超電導材料の線材化

現在、図 3 に示すような機器開発目標に向けて、Y 系 123 相 (臨界温度 $T_c=92$ K), Bi 系 2212 相 ($T_c=80$ K), Bi 系 2223 相 ($T_c=108$ K), タリウム系 Tl₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀ (Tl 系 2223 相) ($T_c=125$ K) などの線材化の研究開発が精力的に行われている。

Y 系 123 相の線材化は金属基材 (ハステロイ) 上に緩衝層を蒸着し、化学蒸着法 (CVD) や物理蒸着法 (レーザーアブレーション) で~1 mm 程度蒸着、更に安定化のために銀めっきを行うプロセス技術が知られている。臨界電流密度 J_c は液体窒素温度 (77 K) で 10,000 A/mm² (外部磁界零で) を有するものが報告されている⁽⁵⁾。しかし、PVD, CVD 法では長尺の線材を作ることが今後の課題である。

Bi 系 2212 相, 2223 相は PIT (Powder In Tube) 法で長尺線材化が精力的に行われている。PIT 法は銀パイプに Bi 系超電導粉体をつめて伸線、圧延、プレス加工など

図 2 金属系各種超電導導体

図 3 酸化物系超電導体の研究開発目標

でテープ状を製作した後、Bi 系 2212 相/Ag 線材では部分溶融熱処理、Bi 系 2223 相/Ag 線材では所定の熱処理を行い線材とする。現在、超電導層の臨界電流密度は短尺線材で 77 K で $J_c=500\sim700$ A/mm², 数百 m~km 級長尺線材では 77 K で $J_c=80\sim120$ A/mm² であると報告されている (いずれも外部磁界零で)⁽⁶⁾。PIT 法では銀と超電導体の断面積比は 2~3 であることから、線材としての臨界電流密度は上記電流密度の 1/3~1/4 程度に低下する。これは、金属系線材の 1 桁低い値である。しかし、プロセス加工技術の向上が今後期待されることから有望な線材化技術である。

Tl 系超電導材料はプラズマ溶射法、スプレー法で線材化研究が進められている。これらは短尺線では 77 K で $J_c=200\sim900$ A/mm² と高い電流密度になることが報告されている⁽⁷⁾。いずれも、長尺化のための基礎プロセス技術の確立が今後の課題となっている。

3. 応用機器

3.1 超電導電力機器

(1) はじめに

超電導の電力機器応用は、超電導発電機や超電導エネルギー貯蔵 (SMES) などの高磁界直流応用、および電力ケーブルなどの低磁界交流応用について、1960 年代から研究開発が開始された。特に 1980 年代に入って、低損失での交流送電が可能な交流線材が開発されたため、発電機電機子の超電導化や、超電導変圧器および超電導限流器な

ど、高磁界交流応用についても研究が開始された。

現在、超電導電力機器は開発途上にあり、実際の商用電力系統内で運用される機器の開発は来世紀となろう。そこで、ここでは各種の超電導電力機器について、そのメリットなどを分析し、将来へ向けての技術展望を行う。

(2) 超電導発電機

超電導発電機については、現在通商産業省工業技術院のニューサンシャイン計画の一環として、超電導発電関連機器・材料技術研究組合 (Super-GM) で平成 10 年度までの予定で 20 万 kW 級の界磁を超電導化した発電機の開発を目標として、この 3 分の 1 スケールの 7 万 kW 級モデル機の開発が進められている。図 4 に工場試験中の状況を示す。この計画では金属系の NbTi 超電導線が界磁巻線に使用されている⁽⁸⁾。21 世紀の早い時点で超電導発電機あるいは超電導調相機として実用化されるものと期待されている。

界磁を超電導化した界磁超電導発電機では、電機子の外周に交流磁界が漏洩しないように、鉄製のバックコアを取り付ける必要がある。しかし、これ以外は鉄心を用いる必要がなく、空心構造で発電に必要な高磁界が得られるので、従来機では得られない様々なメリットが生ずる。具体的には、同期リアクタンスを現用機の 1/3 から 1/5 に低減できることによる、限界送電電力の向上および電圧安定性の改善、更に発電機効率の 0.5~1% 向上、発電機重量と寸法の半減などがあげられている。

一方、電機子までを超電導化した全超電導発電機の開発も検討されているが、高磁界の交流で十分低損失な線材がまだ開発されていないので、発電機としてのメリットがどの程度出せるかについては明確になっていない。

金属系超電導線材を用いた、界磁超電導発電機は、新規の要素技術開発はほとんど終了しており、現在発電機としての全体システムが、電力機器として必要とされる過渡特性や長期信頼性を満たせるようにするべく研究開発が進められている。このような研究開発状況からみると、機器の経済性が現状の見通しのとおりに得られれば、21 世紀の

図 4 工場試験中の 7 万 kW 級超電導発電機モデル機 (工業技術院ニューサンシャイン計画において開発中)

早い時点で実用化されていくものと予想される。また超電導発電機の小型軽量という特徴は、従来発電所の再開発のように限られた場所で、新規発電所建設を行う場合は大きなメリットとなろう。

(3) 超電導エネルギー貯蔵 (SMES)

SMES は、コイルに電流を流すと磁気的なエネルギーが蓄積される原理を利用し、コイルを超電導化して貯えられたエネルギーが減衰しないようにした装置であり、超電導の利用により初めて成立する技術である。

SMES については、1960 年代に技術的な成立可能性が提案され、1970 年代に入って日米を中心にして概念設計研究が活発に行われた。この結果、SMES では経済性において装置のスケールメリットが大きいため、エネルギー貯蔵の経済性を発揮させるためには揚水発電所に相当するような貯蔵容量 5 GWh 級の大型の SMES が必要であることが示された⁽⁹⁾。現在、資源エネルギー庁では、ISTEC に依頼し、負荷平準化を目指した第一段階としての 0.1 MWh 級の小規模 SMES の要素技術開発を進めており、平成 8 年度には要素コイルの性能試験を実施している。

また、SMES では入出力装置に半導体素子を用いた交直変換装置を使用するため、高速で入出力電力を制御できる。この機能を利用して、電力系統の安定化やパルスの電力供給に使用する研究も活発に行われている⁽¹⁰⁾。現在、この考え方を更に進めて、SMES を瞬時電圧低下および瞬時停電対応の電源として用いるマイクロ SMES の試験的実用化が、アメリカを中心として進められている。貯蔵エネルギーが 1~5 MJ と小さいのに対し、定格出力電力が 0.5~1 MVA と大きくとれる点に特徴がある。

(4) 超電導ケーブル

電力ケーブルは超電導の低磁界交流応用であるため、Nb や Nb₃Sn の金属系超電導テープ材料を利用した研究開発が 1960 年代から開始された。1980 年代にはアメリカのブルックヘブン国立研究所で 100 m 級のモデル線路での実証試験まで行われた。このケーブルは 230 kV、4,000 A の定格で Nb₃Sn 導体とポリプロピレン絶縁テープを用い、超臨界ヘリウムで冷却される⁽¹¹⁾。

このような研究開発と同時に実施された経済性検討では、何回線かの電力ケーブルから成る 1 ルート当たりの送電容量が 5 GVA から 10 GVA と大容量にならないと、超電導電力ケーブルのほうが経済的とはならないとされた⁽¹²⁾。これは、送電コストの比較では単位電力を単位長さ当たり送電する場合の年間コスト (円/kVA・km・年) で比較するが、超電導ケーブルでは、大容量送電でも 1~2 回線ですみ、地中送電コストの大きな部分を占める洞道の建設コストの増加が抑制されるためである。

超電導ケーブルは他の超電導応用電力機器と異なり、超電導を保つために必要な冷却対象が長大になる。このため、断熱層を通しての浸入熱が冷却システムの熱負荷の主要成分となる。よって、低温での冷却能力と冷却システムへの投入電力の比である冷却システムの効率がカルノー効

率の制限により 300 分の 1 から 1,000 分の 1 と非常に低い液体ヘリウム冷却では、浸入熱の低減が重要な技術開発課題となる。これに対して、酸化物高温超電導材料を導体を用い、液体窒素で冷却すれば、冷却システムの効率が 10 分の 1 から 30 分の 1 と 30 倍以上改善されるので、固定的な負荷となる浸入熱の影響を低減できる。

このような効果により、超電導線材のコストが金属系材料と酸化物材料で同一であるとして試算すると、従来の OF ケーブルによる送電コストに対し超電導ケーブルのほうが有利になる送電容量は 1 ルート当たり 2 GVA 程度となり、適用できる範囲が大幅に拡大する。すなわち、都心部の基幹地中送電ではほとんどの地点で超電導ケーブルを適用するメリットが得られることになる。このため、現在高温超電導線材を用いることを前提とした、超電導ケーブル開発が世界各国で進められている。我が国では、超電導ケーブルのコンパクト性を最大限に活用した、管路への敷設が可能な 0.5~1 GVA/回線級の三相一体型超電導ケーブルの開発が、東京電力などで進められている。図 5 に三相通電試験をしたケーブルのモデルを示す。

(5) 超電導限流器

超電導限流器は、超電導の特徴を利用した電力系の短絡事故時の短絡電流を制限する装置である。利用法としては、超電導電力機器と直列に設置し、超電導機器に臨界電流を超える過大な電流が流れないようにすることのほかに、短絡電流を遮断容量以内に抑制するためや、短絡電流による電磁力を低減し、耐電磁力設計を軽減することに使用することが考えられている。

具体的に短絡電流を制限する方法としては、主に二つの方法が考えられている。一つは、超電導線材の臨界電流を短絡電流以下に設定しておき、短絡電流が流れると超電導が常電導に転移して、常電導状態の高抵抗により電流が抑制される方式 (SN 転移型) である。もう一つは、超電導体をシールド材として用いる方法 (磁気シールド型) である。通常は、回路のインダクタンスをシールド効果により小さくさせておく。短絡電流が流れるとシールド材に流れ

る電流が超電導の臨界電流を超え常電導化し、シールド効果がなくなることにより、通電回路のインダクタンスが大きくなり電流が抑制される方式である。

超電導限流器では常電導転移という物質の相変化を利用しているので、他方式では得られない鋭い限流効果と高速動作が可能である。このような観点から、世界各国で原理実験や 6 kV 級の低圧用限流器の開発が進められている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。図 6 に、東京電力と東芝が開発した 6.6 kV/2,000 A_{rms} SN 転移型超電導限流器用コイルの外観を示す。

(6) 超電導変圧器

超電導変圧器は、変圧器の巻線を超電導化することにより、高効率化、小型・軽量化することを目指した超電導電力機器である。現在、数百 kVA 級の変圧器の試作も含めて、主として日本で研究が進められている。超電導変圧器は典型的な従来機器の代替技術であり、超電導化のメリットをどれだけ発揮できるかが実用化のかぎとなる。

従来の変圧器は、巻線の銅線と鉄心での損失の比率を最適化することにより、運転時の総合損失を最小化する設計基準を採用している。これに対し、超電導変圧器では、高電流密度特性を利用して、巻線のターン数を増加させ、鉄心の使用量を低減させることが可能である。このような方法により変圧器を大幅に軽量化することができる。更に鉄心の断面積を減少させ、極限的には空心とする変圧器設計も可能である。

超電導変圧器は、従来変圧器の代替としてだけでは実用化は困難と思われ、従って従来変圧器にはない超電導変圧器特有の新しい機能の開発が実用化のかぎとなる。

(7) ま と め

超電導発電機、超電導エネルギー貯蔵、超電導ケーブ

図 5 高温超電導ケーブル (プロトタイプ) の断面構造 (東電・住友電工) 66 kV/1,000 A_{rms} 級

図 6 超電導限流器用コイル (東電・東芝) 6.6 kV/2,000 A_{rms} 級

図 7 山梨実験線用車両の概要

ル、超電導限流器および超電導変圧器について、技術的な特徴と将来へ向けての実現見通しを述べた。いずれの技術も、超電導特有の性能の発揮が実用化のポイントで、今後はこのような性能を高めるための研究開発が重要になってくる。

3.2 磁気浮上式鉄道

超電導を利用した磁気浮上式鉄道は、車両が線路に相当するガイドウエーと非接触で走行するために、500 km/h 以上の速度でも安定した走行が可能である。車両を浮上および案内させる原理は、車両の側面に超電導コイルを設け、地上側のガイドウエーの側壁に車上の超電導コイルに対面するように常電導の8字コイルを並べ、車両の走行に伴って両者に生じる電磁誘導作用を利用したものである⁽¹⁵⁾。車両を駆動するには、リニアモータを用いる。すなわち、車両側の超電導磁石の走行に同期させて地上側に設置した推進用のコイル (常電導) に変電所から速度に応じた所用の周波数の電流を通電し、推進力を発生させる。

日本における超電導磁気浮上式鉄道の開発は、1962 年に開始された。1977 年には宮崎実験線において試験車両による走行実験が開始され、1979 年 12 月に 517 km/h の速度記録が達成された。その後、試験車両を改良し、走行実験が継続され、今日に至っている。しかし、延長約 7 km の宮崎実験線の実験では不十分であることから、1989 年に山梨県に延長 42.8 km の実験線を建設されることとなった。現在そのうち 18.4 km を先行区間として建設が進められており、1997 年の春に本格的な実験の開始が予定されている。図 7 に山梨実験線用車両の概要が示してある。

磁気浮上列車の心臓部に当たる超電導コイルは、車両の浮上、推進に十分な起磁力があり、浮上力・推進力、電磁応力に対し十分な機械的強度を維持しつつ車載可能なレベルまで軽量化されていなければならない。現在は 10 年前の宮崎実験線用車両に比べ、磁石重量当たりの浮上力の比率は 3.9 から 7.8 へと約 2 倍に向上している。また、ひところ問題となった超電導コイルが列車の走行中に電磁的に加振されクエンチする問題⁽¹⁶⁾も解決され、山梨実験線用車両のコイルについてはほぼ開発が終わっている。

図 8 大型ヘリカル装置 (LHD) の外観

3.3 核融合装置

磁気閉込め型の核融合装置は大きな空間に強い磁界を必要とする。銅コイルで必要な磁界を発生するためには膨大な電力を必要とし、消費電力は核融合発電炉ができたとしてもその出力を上回ると予想され、コイルの超電導化は必須であると考えられている。また、実験用の装置でも大型化すると銅コイルでは消費電力が大きくなりすぎ、実験に支障をきたすと考えられ、超電導コイルを用いることが考えられている。現在、建設中または開発中の超電導大型実験装置として、我が国の大型ヘリカル装置 (LHD)⁽¹⁷⁾および、日・米・ヨーロッパ連合・ロシアの共同開発になる国際熱核融合炉 (International Thermonuclear Experimental Reactor; ITER) がある⁽¹⁸⁾。LHD は、プラズマで閉込め用の磁界をすべて超電導コイルで発生する世界初の装置で、1990 年より 8 年計画で核融合科学研究所 (土岐市) において建設が進められている。LHD 本体は、外直径が約 13.5 cm、高さが約 8.8 m で、ドーナツ型断熱真空容器の中心部に大半径 3.9 cm のプラズマ真空容器が設置され、図 8 に示すように、この外側にこれを囲むように 2 条のヘリカルコイルと、プラズマの位置を制御するための 3 対のポロイダルコイルが取り付けられる。第 1 期ではヘリカルコイルを 4.2 K の常流動液体ヘリウムで浸漬冷却し第 2 期には 1.8 K 超流動ヘリウムで浸漬冷却し超電導性能を向上させる予定である。1.8 K 冷却では蓄積エ

エネルギーは1.6 GJ になり^{*1}、単体のコイルとしては世界最大級になる。その他のコイルは極低温ヘリウムにより強制冷却される。ヘリカルコイル導体の最大経験磁界は9.2 T (第2期) でNbTi 導体を用いられる。

ITER は、コイル高さが17 m という大型コイル群で構成され、総蓄積エネルギーは約45 GJ に達する。導体は巨大な電磁応力に耐えるように、高張力鋼でできたコンジット内に超電導ケーブルを入れた強制冷却導体を用いられ、導体の最大の経験磁界は11.1 T の高磁界になるので、Nb₃Sn 導体を用いられる。

核融合装置に用いられる超電導コイルは、大型、高磁界が特徴で、またトカマク型用のポロイダルコイルでは速い変動の磁界に対して、低損失かつ安定に動作する必要がある。このため、導体は高機械強度、高電流密度、大電流容量が要求され、かつ変動磁界に対して低損失であることが必要で、現在も精力的な開発が行われている。

3.4 高エネルギー物理用マグネット

素粒子について研究を行う高エネルギー物理実験の分野では多くの超電導マグネットが使われており、この分野では超電導化が常識となっている。使われる超電導マグネットは、荷電粒子の運動量分析のために用いられる大型測定器用マグネットと高エネルギー粒子加速器において荷電粒子の偏向と収束のために用いられる二重極・四重極などのマグネット群とに分類される。

(1) 大型測定器用超電導マグネット

大型測定器用超電導マグネットの開発は、超電導線がクエンチしないようにする安定化技術^{*2}の確立とほぼ時期を同じくして1960年代の後半に始まった。1968年には、アメリカ・アルゴンヌ研究所の水素泡箱に、中心磁界1.8 T、内径2.2 m、蓄積エネルギー80 MJの当時としては最大の超電導マグネットが作られた。その後、米欧において中心磁界3~3.5 T、内径3~4.5 m、蓄積エネルギー70~800 MJの水素泡箱用超電導マグネットが1972年までに次々と完成し実用に供された。特に欧州共同原子核研究所(CERN)の超電導マグネットは800 MJと、現在でも単機として最大の蓄積エネルギーを有している。また、1970年代の後半から80年代の前半にかけて、高エネルギー加速器において粒子衝突実験が可能になったことにより、大型で素粒子の透過性の優れた超電導マグネットが開発されるようになった。これらの超電導マグネットは、中心磁界1~1.5 T、コイル内径1.6~2.2 m、蓄積エネルギー5~11 MJであり、アルミ安定化超電導線が巻かれ、巻

表1 各種超電導加速器の緒元

	Tevatron	HERA	RHIC	SSC	LHC
国	アメリカ	ドイツ	アメリカ	アメリカ	スイス
エネルギー(GeV)	1000	820	100/U	20000	7700
周囲長(km)	6.28	6.33	3.83	87.12	24.66
運転温度(K)	4.6	4.5	4.6	4.35	2.0
二重極コイル数	774	416+6	372	7736	1792
磁界(T)	4.4	4.68	3.45	6.6	10.0
内径(mm)	76.2	75	80	50	50
四重極コイル数	216	224	492	1564	392
磁界傾斜(T/m)	75.8	91.18	71.8	206	250
完成年	1985	1990	1998	中止	2004

線部が薄いのが特徴である。この種のコイル技術は主として日本で確立し、現在世界各国の高エネルギー物理実験装置に多数用いられている。

(2) 加速器用超電導マグネット

素粒子を加速し蓄積する加速器リングでは高いエネルギーの粒子を蓄えるために、高い磁界と大きな周囲長のリングが必要となる。このため、超電導マグネットを用いなければ電気エネルギー消費量が膨大となり、大型の装置は成立しない。加速器用リングでは二重極または四重極マグネットを多数並べ、荷電粒子束を偏向収束させリング内に蓄積する。表1には代表的な超電導粒子加速器の諸定数が示してある⁽¹⁹⁾。これらの装置にはいずれも金属系低温超電導線が用いられており、運転温度は4.2 K 付近または超流動ヘリウムを用いた1.8 K 付近である。

1985年には、アメリカ・フェルミ研究所で、総数800基に及ぶ多数の超電導二重極および四重極マグネットを周囲長6 kmのリング状に配置した、Tevatronと呼ばれている超電導シンクロトロンが完成し、運転を開始した。これに続いて完成したドイツ電子シンクロトロン(DESY)のHERA超電導シンクロトロンや、現在建設中のアメリカ・ブルックヘブン研究所のRHIC(重イオン衝突器)では周囲長数km、数百基のマグネットからなる超電導リングをもっている。1993年に中止されたアメリカ・SSC計画では、数千基の超電導マグネットを周囲長90 kmのリングに配置した超大型装置を建設する予定であった。これら加速器の超電導マグネット技術はいずれもTevatronで開発された技術を発展させたものである。1995年になって、CERNにある周囲長さ27 kmの既存のトンネルに、2千数百基の超電導マグネット群を設置し、これらを超流動ヘリウム冷却することによって、10 T級の磁界を発生させるLHC(Large Hadron Collider)計画の開発研究が認められた。LHC計画が完成すると、NbTi超電導マグネットの巨大システムを加圧超流動ヘリウムで冷却し、励磁し、高精度の加速器システムを運転するという、極めて水準の高い超電導応用技術が展開されることになる。

3.5 医療用MRI

MRIは磁気共鳴イメージング装置の略称で、人体細胞

*1 コイルの蓄積エネルギーは、コイルのインダクタンスを L 、通電電流を I として $LI^2/2$ で示される。

*2 超電導体は常電導状態になると急激に抵抗が大きくなるので、コイルの一部が常電導に転移すると、そこで大きな熱が発生し、コイル全体を熱しコイルの超電導状態が喪失してしまう(クエンチという)。この対策として、超電導体の回りに銅やアルミの低抵抗常電導金属を複合させ、超伝導体が常電導転移した場合電流をこの常電導金属に分流させ、ジュール発熱を押さえクエンチの発生を防ぐようにするのを安定化という。

に含まれる水素などの原子核の磁気共鳴現象を利用して人体の断層画像を映し出す医用画像診断装置である。生体中の原子核は固有のスピンを有し、静磁界中では磁界の方向と平行な軸を中心とした歳差運動を行うが、その回転角周波数は原子核によって異なる核固有の値である。例えば、ITの磁界におけるプロトンの固有周波数は42.6 MHzである。ここで、この周波数に一致する周波数をもった励起用の高周波パルスを生体に照射すると磁気共鳴現象が起き、生体中の対象核種は励起される。励起された核種はもとのエネルギー状態に復帰するが、そのとき吸収されたエネルギーは電磁波として外部に放出される。この放出された信号を受信コイルで検出すれば、対象核種の位置およびその位置における核種の情報が得られ、これをもとに画像(MRI)が形成される。

MRI装置は、高周波パルスを照射するRFコイル、位置情報を与えるための傾斜磁界コイルおよび静磁界を与えるマグネットより構成される。前者の2種類のコイルは常電導であるが、静磁界マグネットは、永久磁石、常電導、超電導の各方式がある。現在の主流は超電導方式と永久磁石方式であって、超電導マグネットを採用したMRIでは変動の少ない0.5~1.5 Tの高い磁界を利用できるので、信号のS/N比が高く高画質の画像が得られる。1995年4月現在、日本国内では2,331台のMRIが稼働しており、そのうち、超電導方式が1,776台(0.25~0.5 T機が1,007台、1.0 T以上が759台)、永久磁石方式が498台、常電導方式が67台である。

最近のトピックスとして、開放空間に静磁界を作り、被検者に医者が直接近できるようにしたインターベンショナルMRIが開発されており⁽²⁰⁾、これで高速な走査ができるようになると、画像確認をしながら手術などの治療を行うことが可能となる。

MRIの性能の向上のため、高温超電導を導入することが考えられている。1枚の画像を数十msで撮る高速画像化技術が急速に進んできており、このため傾斜磁界コイルに大電流(数百A)を流す必要があり、発熱処理を抑えるために高温超電導化が期待されている。また、受信RFコイルに高温超電導体を用いて超電導化しS/Nを向上させた例が報告されている。

3.6 磁気分離

磁気分離は磁氣的吸引力、反発力を利用して分離したい対象物を物理的に分離する技術である。この技術は古くから砂鉄、鉄鉱石の選別のような固体の分離から始められた。1970年代には、磁気分離技術は重金属をフェライト化する方法と磁気分離技術が結びついて、研究配水などの無害化処理する液体に含まれる物質の分離を行う産業分野が開拓された。また、高こう配磁気分離法の発明⁽²¹⁾により、カオリン粘土中の不要鉄分の除去による精製、製鉄所配水の水の純化による再利用などで永久磁石、電磁石を利用した磁気分離技術が開発された。これらの技術は、1980年代では材料生産技術の高度化、廃棄物の再資源化

と減量化および二次廃棄物化を防ぐうえで広く普及してきた。例えば、沸騰水型原子炉における復水中の放射性クラッドの除去の分野にも適用された⁽²²⁾。更に、カオリン粘土精製装置の超電導化などが進められた⁽²³⁾。1990年代に入ると大量の希薄懸濁液を安価に処理し、資源化できなかった未利用資源の開発などにも注目され、地球環境の保全の高まりとともに磁気分離技術の研究開発が広がりをみせている。例えば、ガラス研磨廃棄物の再資源化システム、下水処理試験プラントの稼働、放射性廃棄物低減のための検討が進められた。

磁気分離技術への超電導マグネットの応用は、超電導状態に維持する冷凍負荷動力が軽減することから、現在の永久磁石、電磁石利用型磁気分離装置は超電導化されている。酸化物系線材によるマグネットが可能となれば経済性が更に高くなることが予想される。更に、無害化や再資源化処理技術が遅れている先端産業の廃棄物処理、医薬品、材料精製における高分級・高純度化、また低品位未利用資源の濃縮分離による資源化応用技術分野に研究開発が進むと考えられる。これらの分野では分離対象の磁化・磁化率が小さいことから、高磁界・高こう配磁気分離法が必要で、超電導マグネットの適用が不可欠である。

3.7 産業応用

産業分野についても超電導応用開発が着実に進んでいる。例えば、半導体結晶引上げ装置で、溶融シリコンに超電導マグネットでは磁界をかけると対流が抑制され高品質の結晶が得られるため、近年この方式が普及した。また、製鉄分野では電磁気作用を利用した電磁冶金に超電導を利用することが検討されている⁽²⁴⁾。最近、小型冷凍機技術が進歩してきており、冷凍機と超電導マグネットを直結した伝導冷却マグネットが開発されている⁽²⁵⁾。このため、容易に数~10 Tの磁界が得られるようになってきており、産業分野での応用が期待されている。更に、高温超電導体を用いた超電導モータや、イングクタ類を高温超電導体で作り、半導体変換素子も液体窒素温度で動作するようにした小型、高率の電力変換装置の開発もアメリカで行われている。

産業応用では、一般に必要とされる超電導装置の規模が他の応用に比較して小さいため、応用研究が遅れていたが、小型冷凍機技術の進歩、高温超電導体の導入により、以上のような応用が考えられるようになってきた。今後この分野での進展が大いに期待される。

3.8 新しい応用の芽

超電導の電気機器への応用にあたっては、超電導を利用しなければ実現できない機能および性能をいかに引き出すかが、実現のかぎになる。このような観点から、超電導をみるといくつかの特徴をあげることができる。

まず、ジョセフソン効果に代表されるように、量子効果を巨視的に利用できることである。この特徴は既に、SQUID(超電導量子干渉素子)による磁束測定などで実用化されており、今後医療応用および磁化による探傷など

工業応用が拡大していくものと考えられる。また、高温超電導体は層状構造であるため物性の異方性が大きく、この異方性の活用が望まれる。特に、Y系高温超電導材料のように、異方性が強い材料では単結晶自身がジョセフソン接合を内包しており、この特性を利用することも可能である。このような、これまでの超電導体にはなかった物性は、新しい超電導デバイスの実現などに結びつく可能性が大いにある。これまでに、Y系高温超電導体単結晶内のジョセフソン接合を電力用スイッチとして応用する考えや、ミリ波などとの相互作用を利用する考えなどが提案されている。

4. 結 言

以上のように、技術的課題は現在まだ多くあるものの、夢の技術である超電導の応用は実用化に向かって着々と進んでいる。

本解説では、超電導の各種機器への応用を中心とし、基礎技術のより詳細な内容については誌面の都合もあり述べなかった。しかし、機器の超電導性能を高い信頼度で発揮させるために、図1に示したように応用の樹木を支える根として基礎技術が重要であることはいうまでもない。従来、応用開発が進むと、今までなかった新しい現象が現れ、この現象の解明により応用上の技術的課題が解決され、更に応用分野が広がることがしばしばあった。

未知の現象の解明、技術的課題の解決を行うための基礎技術と応用技術は両輪の輪で、どちらが欠けてもうまく進まない。今後とも両者のバランスのとれた研究・開発が重要である。

なお、本解説記事は、超電導応用電力機器技術委員会、交流超電導技術および超電導応用機器・導体特性の両調査専門委員会の委員各位の支援と資料の提出によってできたものであることを付記する。(平成8年4月18日受付)

文 献

- (1) 住吉:「超電導体の電磁特性」, 低温工学, **24**, 152 (平元)
- (2) 宮下, 他:「Cu-Ni-Mn合金を複合した超極細多芯交流用Nb-Ti超電導線材」, 同上, **29**, 229~238 (平6)
- (3) 三浦, 他:「人工ピン型Nb-Ti交流用超電導線材を用いた高磁界交流マグネットの開発」, 同上, **29**, 637~645 (平6)
- (4) 塚本:「交流超電導応用の現状」, 電学誌, **112**, 970~978 (平6-12)
- (5) X. D. Wu, et al.: *Appl. Phys. Lett.*, **65**, 1961 (1994)
- (6) M. Ueyama, et al.: "Adv. in superconductivity VII", Proc. ISS'94, (1995) Springer, Tokyo
- (7) T. J. Doi, et al.: "Adv. in superconductivity VII", *ibid.*, (1995) Springer, Tokyo
- (8) 超電導発電関連機器・材料技術研究組合: Super-GM Review, (平5-11)
- (9) R. J. Loyd, et al.: "Conceptual Design and Cost of a Superconducting Magnetic Energy Storage Plant", EPRI Report, EM-3457, Project RP 1199-17, Final Report (June 1983)
- (10) 上山:「電力貯蔵」, ISTECHジャーナル, **7**, No. 1, 34~37 (平6)
- (11) E. B. Forsyth: "The 60 Hz Performance of Superconducting Power Transmission Cables Rated for 333 MVA per Phase", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, **PAS-103**, No. 8, 2023

~2033 (1984)

- (12) 鈴木, 他:「液体窒素冷却交流超電導ケーブルの概念設計と経済性評価」, 電中研研報, W 88004 (昭63~8)
- (13) T. Hara, et al.: "Development of a new 6.6kV/1500A class superconducting fault current limiter for electric power systems", *IEEE Trans. Power Deliv.*, **8**, No. 1, 182 (1993)
- (14) T. Verhaege, et al.: "Experimental 7.2kV/1kA/3kA peak current limiter system", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **3**, No. 1, 574~577 (1993)
- (15) 正田英介, 他編: 磁気浮上鉄道の技術 (平4) オーム社
- (16) 鈴木栄司:「浮上式鉄道用超電導磁石の電磁加振に伴う発熱現象」, 低温工学, **29**, No. 10, 495~503 (平6)
- (17) O. Motojima: "LHD Magnet System Design And Construction", *Fusion Technology*, Vol. **26**, 437~444 (1994)
- (18) 多田英介, 他:「ITER炉構造と超電導コイル・システム」, 低温工学, **28**, No. 1, 2~15 (平5)
- (19) S. Wolff: "Superconducting magnet", *Int. J. Mod. Phys. A* (Proc. Suppl.), 576~582 (1993)
- (20) E. T. Laskaris, et al.: "A Cryogen-Free Open Superconducting Magnet for Interventional MRI Applications", *IEEE Trans. AS.*, **5**, No. 2, 163~168 (1995)
- (21) Kolm: US patent 3567026 (1991); 3676337 (1972)
- (22) 早田, 他:「高勾配磁気フィルタ用拡散接合型マトリックスのBWR復水処理への応用」, 応用磁気学誌, **8**, 209 (昭59)
- (23) Selvaggi, et al.: "An industrial superconducting high gradient magnetic separator", *Adv. Cryo. Eng.*, **33**, 53 (1988)
- (24) O. Tsukamoto, et al.: "Development of superconducting linear induction motor for steel making processes", *IEEE Trans. Magnetics*, **27**, No. 2, 2248~2251 (1991)
- (25) M. Urata, et al.: "A 6T Refrigerator-Cooled NbTi Superconducting Magnet with 10mm Room Temperature Bore", *IEEE Trans. AS.*, **5**, No. 2, 169~172 (1995)

塚本 修 己 (正員) 1941年9月20日生。1965年3月東京大学工学部電気工学科卒業。1970年同大学大学院博士課程修了。同年横浜国立大学工学部電気工学科勤務。同講師, 助教授を経て, 現在, 同電子情報工学科教授。超電導工学, 機器制御の研究に従事。工学博士。低温工学協会会員。

梅田 政 一 (正員) 1944年11月15日生。1967年3月東京電機大学工学部電子工学科卒業。1965年4月電子技術総合研究所入所, 現在に至る。主として, 大型超電導マグネットの設計を行う。現在, 超電導線材の評価技術の研究に従事。工学博士。応用物理学会, 低温工学・超電導学会会員。

秋田 調 (正員) 1954年8月20日生。1979年3月東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年4月(財)電力中央研究所入所。超電導電力機器, 極低温抵抗ケーブルの研究を開始。現在, 超電導特別研究室長として, 超電導電力機器の基礎技術および超電導の交流応用の研究に従事。1988年電気学会進歩賞, 1993年同論文賞受賞。低温工学協会, IEEE 会員。