

超電導技術が築く未来社会

Superconducting Technologies Contributing to the Future

新 政憲
M. Arata

浦田 昌身
M. Urata

山田 穰
Y. Yamada

超電導応用機器は、機器の小型化、高効率化が可能のために環境調和型機器としても期待され、次世代の電力機器として研究が進められている。当社は、機器の小型化、高効率化などの高性能化だけでなく、従来の機器にない機能の実現を旨として核融合炉、超電導限流器、超電導電力貯蔵システム(SMES)などの実用化開発を行っている。

これらの超電導応用機器の開発を支える最新の超電導技術として、大型コイルを実現する強制冷却導体技術、電気だけで -269°C に冷却し高磁界を発生する冷凍機冷却磁石技術、および高温超電導技術とこれらを適用した大型ヘリカル装置用の世界最大級の強制冷却型コイルをはじめとする超電導応用機器を開発した。

Superconducting devices realize compact size and high efficiency as well as placing a low burden on the environment. As next-generation power equipment, the fusion reactor, superconducting fault current limiter, superconducting magnet energy storage(SMES)system, and other superconducting machines are now under intensive development and are expected to realize innovative functions.

This paper describes Toshiba's research and development activities related to forced-flow-cooled superconductor technology, cryocooler-cooled superconducting magnet technology, and high-temperature superconducting technology, as well as the recent technologies supporting them.

1 まえがき

超電導状態の材料は、電気抵抗がなくエネルギーロスがない。このため、超電導を電力系統や電気機器に活用すれば電力の利用効率が飛躍的に高まる。また、超電導は大空間に強い磁界を発生できる。この性質を利用すれば、エネルギー問題の解決につながる核融合炉の建設や、革新的な社会インフラである超電導リニアなどが可能になる。このように、超電導は未来社会を支える技術である。

このような観点から、当社は超電導技術の開発を積極的に進めている。

ここでは、当社の超電導技術開発の現状を紹介する。

2 21世紀の超電導社会

21世紀は、超電導によりどのような未来社会が実現するであろうか。まず、人類のエネルギー問題の解決に向けて核融合炉の建設が進む。電力系統には、超電導発電機、超電導変圧器、超電導限流器、超電導送電、SMESが活用され、送電ロスの低減により二酸化炭素の排出量が削減されている。大都市間には超電導リニアが走り、ビジネスや生活のスタイルが大きく変わっている。また、医療診断用のMRI(磁気共鳴イメージング装置)や小型超電導加速器を応用した医療装置の開発により、がんなどの疾病の診

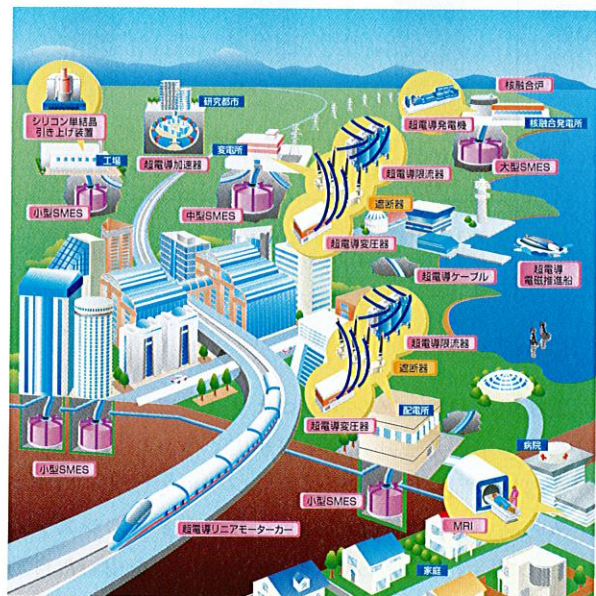


図1. 超電導未来都市 超電導技術が実現するエネルギー損失ゼロの世界を活用して環境にやさしい社会を旨とする。

Future city fully utilizing superconductivity

断や治療が格段に進歩している。

図1のような未来社会の実現に向けた当社の超電導機器開発の現状を次章で述べる。

3 超電導機器開発の現状

3.1 核融合炉用磁石

核融合は、太陽がもつプラズマ核融合反応を地上で実現し、海水に含まれる無尽蔵の重水素から無限のエネルギー源を確保するものである。熱プラズマを安定に閉じ込め、制御するために、大空間に強大な磁界を発生できる超電導磁石が必要である。

核融合炉用の超電導磁石には、強制冷却導体を用いることが多い。強制冷却導体は、多数の細い超電導線をケーブル状により合わせ、コンジットと呼ばれる金属管に収められた構造である(図2)。導体には、数万 A の電流を流す。ステンレス管が強大な電磁力を支えるので、大型コイルに適している。導体内部には、超臨界圧ヘリウムというガス状の冷媒を流す。

文部省核融合科学研究所では大型ヘリカル装置の建設を進めている。当社は、プラズマ位置制御用のポロイダルコイルを納入した。その中の外側垂直(OV)磁場コイルは、外径 11.6 m、内径 10.8 m、高さ 0.54 m、蓄積エネルギー 251 MJ と強制冷却型超電導コイルとしては世界最大である。導体には、NbTi 超電導線を使用した強制冷却超電導導体を用いている。プラズマの閉込めを向上させるため、高い磁場精度が要求されるので、外径、内径とも ± 2 mm の精度で製作している。また、導体の接続部には、NbTi フィラメントの超電導接続を実現し、接続部の小型化と、不整磁界の低減を可能にした。完成した OV 磁場コイルの外観を図3に示す。

現在、日本、米国、EU、ロシアの4極の国際協力により国際熱核融合実験炉(ITER)の工学設計活動が進められている。炉にはプラズマ点火、閉込め、制御のための数十台の大型磁石が必要である。21世紀初頭の建設を旨としており、そのための研究開発も国際協力で行われている。当社は、プラズマ生成用中心ソレノイド(CS)コイルのモデルコイルを日本原子力研究所から受注し、設計・製作を進めている。CSモデルコイルは外径 3.6 m、内径 1.6 m、高さ 1.8 m のソレノイド巻きで、運転電流 46 kA でコイル中心に 13 T の磁界を発生させる計画である。

3.2 超電導限流器

超電導限流器は、システムを連係して系統間で電力を融通する際に、事故点に流れ込む事故電流を、超電導線材のクエ



図2. 強制冷却導体 この導体で、数万 A の電流を流すことが可能。ステンレス管が強大な電磁力を支えるので、直径 10m を超える大型コイルに適している。

Forced-flow-cooled superconductor

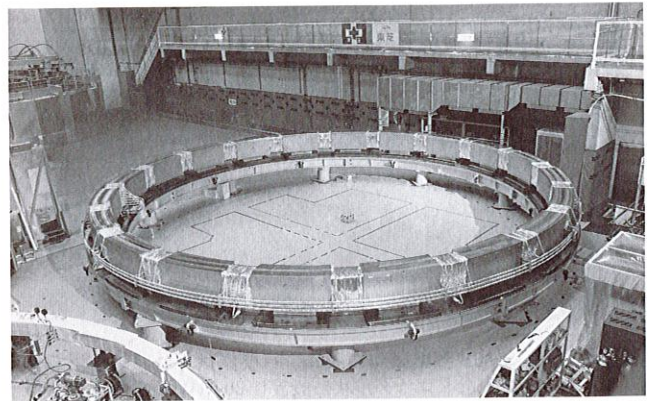


図3. 大型ヘリカル装置用外側垂直磁場コイル 支持用の板と冷却用の配管を取り付けて完成した世界最大の強制冷却型コイルである。

Outer vertical magnetic field coil for large helical fusion test device

ンチ(常電導化)現象を利用して抑制するものである。連係点に限流器を導入すれば系統の短絡電流が抑制され、遮断器の大容量化や送電設備の強化なしに自由に連係できるようになるので、系統の信頼性と系統運用の経済性が大幅に向上する。

当社は、東京電力(株)との共同研究により、配電に相当する電圧レベルで適用できる 6.6 kV の単相限流試験装置の開発を終了した。この装置は、小型冷凍機をもち、液体ヘリウムなどの冷媒の補充が不要なシステムで、系統事故時に限流抵抗 6 Ω を発生して事故電流を限流する。開発した限流器について、短絡発電機で限流動作を確認した結果を図4に示す。限流器がない場合の短絡電流(56 kA)が、1 ms 以下の短時間で 4.5 kA 以下に限流されている。今後、さらに高い電圧階級に向けて限流器の開発を進める。

3.3 超電導電力貯蔵システム(SMES)

SMES は、超電導コイルに磁気エネルギーを貯蔵し、

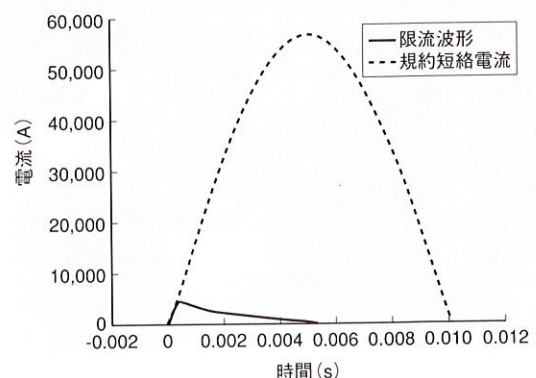


図4. 超電導限流器の限流動作時電流測定波形 電力系統に生じた事故電流により超電導コイルがクエンチし、数 Ω の抵抗が発生する。限流器がない場合に比べて、事故電流を 1/10 に抑制する。

Fault current waveform when fault current limiter operating

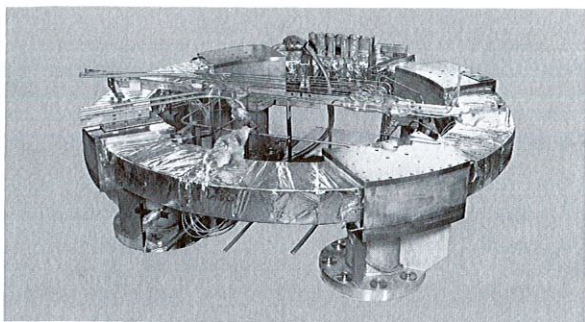


図5. 20 MW SMES 要素試作コイル 要素試作コイルの2倍の厚みのコイル12個をトロイダル状に設置し20 MW SMESが構成される。

Prototype forced-flow-cooled superconducting coil for 20 MW SMES system

高速に電力を出し入れする装置である。現在、資源エネルギー庁からの委託により、国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)および、中部電力(株)が100 kW・h(20 MW)の電力を貯蔵できる小規模 SMES パイロットプラント建設のための要素技術の開発調査を、1991年から8か年計画で進めている。当社は、パイロットプラントの要素試作・評価を受託している中部電力からコイル製作を受注した。このコイルの試験は、ISTECと日本原子力研究所の共同研究として実施された。コイルは外径3.3 m、内径2.8 m、高さ2.3 mで、SMESでは世界で初めて強制冷却導体が採用されている(図5)。導体は、NbTi超電導線材をより合わせたものが肉厚2.3 mmのステンレス製のコンジットに収納されている。コイルは、定格20 kAを超える35.4 kAまでの通電を達成したが、これを当社がISTECから受注し米国ローレンスリバモア国立研究所と研究契約を締結し

た米国試験請負に基づいて、97年から長期繰返し通電試験を実施する予定である。

3.4 その他の超電導機器

前述の超電導機器のほかに、当社では、速応励磁型の超電導発電機(新エネルギー・産業技術総合開発機構/超電導発電関連機器・材料技術研究組合からの受託)、超電導リニア山梨実験線に向けた車載用の超電導磁石(東海旅客鉄道(株)、(財)鉄道総合技術研究所納入)、超電導磁気推進船ヤマト1の磁気推進用磁石(財)シップアンドオーシャン納入)、医療診断用MRI、加速器用の偏向磁石や粒子検出器用の超電導磁石、世界最高の36.04 Tを発生した金属材料技術研究所納入ハイブリッドマグネット(図6)、超電導磁気分離装置やシリコン単結晶引き上げ装置などの産業用超電導磁石など各種の超電導機器の開発を進めている。

4 最近の超電導技術

4.1 冷凍機冷却超電導磁石

これまで述べてきた超電導磁石では、超電導を得るために液体ヘリウムが必要であった。液体ヘリウムは高価であるうえ、取扱いに熟練を要し、これが超電導機器の普及の障害になっていた。当社は、液体ヘリウムを用いなくて小型の冷凍機だけで常温から4 Kまで冷却できる超電導装置(冷凍機直冷式磁石)を開発した。図7に、常温ポア40 cmで1.4 Tの磁界を発生できる冷凍機直冷式磁石を示す。

冷凍機には、当社が世界で初めて開発した、4 Kまで冷凍できる小型冷凍機を用いた。冷凍機は、上部から供給されるヘリウムガスが熱交換されて4 Kに冷却され、断熱膨張して冷凍力を得る。熱交換の材料として、低温で大きな比熱をもつEr₃Niを東京工業大学と共同で開発して冷凍機

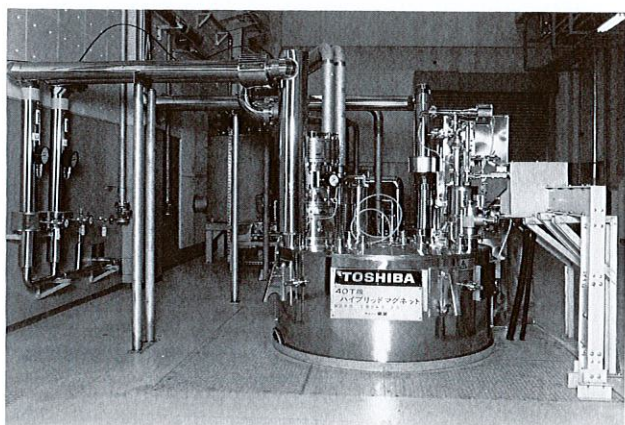


図6. 金属材料技術研究所納入ハイブリッドマグネット 超電導コイルと水冷式銅コイルとの組合せて世界最高の36.04 Tを発生した。

Hybrid magnet

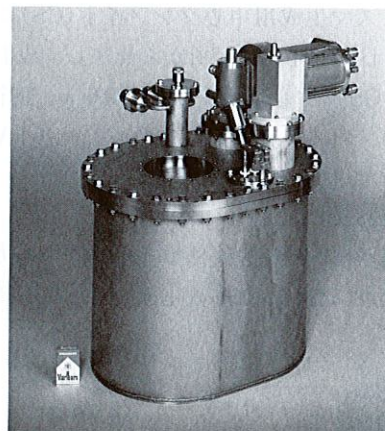


図7. 冷凍機直冷式磁石 当社が世界で初めて開発したコイルの冷却に液体ヘリウムを用いなくて、小型の冷凍機だけで強い磁界を発生できる超電導磁石である。

Cryocooler-cooled superconducting magnet

を実現した。

冷凍機直冷式磁石を用いれば、液体ヘリウムが不要なので、磁石の維持費を大幅に低減できる。さらに、液体ヘリウム注入の作業空間が不要で、磁石の容器も1/3以下になる。スイッチ一つで超電導コイルが得られるので、従来よりはるかに手軽に超電導が利用できるようになる。簡便な超電導装置としてライフサイエンスを含む幅広い分野への展開が注目を集めている。

4.2 高温超電導

超電導現象は、長い間、液体ヘリウム温度付近だけに限定されると信じられてきた。1986年にスイスのベドノルツとミュラーがさらに高い温度で超電導を示す高温超電導材料を発見して以来、この常識が覆され、最近では150 Kで超電導を示す超電導材料も発見されている。当社は、超電導原料として、鉛添加ビスマス系超電導原料を世界に先駆けて開発した。

この超電導原料は臨界温度が110 Kと高く、平板型結晶で線材に加工しやすい特長をもつ。高温超電導体はセラミックスで加工がむずかしいので、金属製のシース材に入れて加工する。シースに銅を用いると、線材の熱処理中に高温超電導体の酸素を奪い線材特性が劣化するが、銀を用いると銀は酸素と反応しないため、超電導特性を劣化させない(銀シース法)。この手法により開発した超電導線材の断面写真を図8に示す。鉛添加ビスマス系超電導原料と銀シース法は当社で初めて開発したものであるが、世界標準の技術になっている。

4.3 今後の技術動向

つい最近まで、超電導と言えば液体ヘリウムの呪縛から逃れられなかった。これからは、冷凍機や高温超電導材料を用いることで、冷却に束縛されない簡単な使いかたができるようになっていくであろう。図9に今後の方向を示唆する装置を示す。図の直方体の箱に4個の高温超電導バルク体が収められている。冷凍機で一度バルク体を冷却した後、冷凍機を容器から切り離し、容器の断熱構造でバルク体を極低温状態(すなわち超電導状態)に維持する。テーブルにはネオジム系の磁石が直径1.5mの円形に設置されて

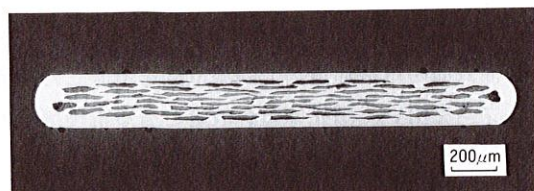


図8. 銀シース法で製作した高温超電導線材の断面 当社で開発した鉛添加ビスマス系原料と銀シース法による導体製作技術は世界中でもっとも広く利用される標準技術となった。

Cross-sectional view of high-temperature superconductor manufactured by silver sheath method

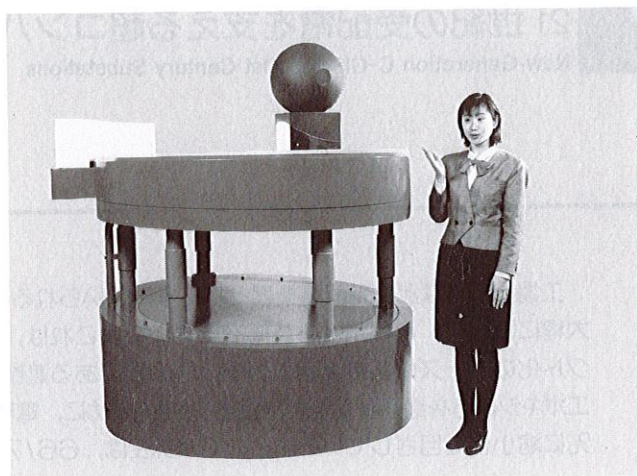


図9. 高温超電導と超断熱技術を組み合わせた浮上搬送デモ 高温超電導と冷凍機で冷却した後切り離し、長時間90 K以下に保冷する超断熱技術の組合せで自律的に浮上と案内が行われる。

Levitated transportation demonstration with high-temperature superconductor and super-thermal insulation technique

おり、高温バルク材との相互作用で直方体の箱に浮上/案内力が生ずる。この結果、球体は磁石経路に沿って摩擦なしに動き、磁気浮上搬送として利用できる。冷媒や冷凍機をまったく搭載しない超電導の新しい活用が広がるものと期待している。

5 あとがき

超電導の特長をじょうずに活用すれば、ライフスタイルを一変させる革新技術を創造できるばかりか、エネルギー問題のような地球規模の問題解決に大きく貢献できる。さらに、高温超電導材料の臨界温度などの特性が向上すれば、家電製品から電力送電まで超電導が幅広く活用され、超電導が浸透した未来社会が実現していくものと考えている。



新 政憲 Masanori Arata

重電技術研究所電磁装置・放電応用技術開発部主査。
超電導発電機、山梨超電導リニア用超電導磁石、超電導限流器の開発に従事。電気学会会員。
Heavy Apparatus Engineering Lab.



浦田 昌身 Masami Urata

電力事業部新エネルギー技術開発部主査。
超電導マグネットの研究・開発に従事。
Power Systems Div.



山田 穰 Yutaka Yamada, D. Eng.

研究開発センター 機械・エネルギー機器研究所主任研究員、工博。
金属系および酸化物超電導線の開発に従事。
Energy & Mechanical Research Labs.