

高エネルギー物理学や材料開発などの先端科学分野では、幅広く超電導が活用されている。当社は、高エネルギー加速器に用いられる超電導装置として、10 T 偏向マグネット、粒子加速用超電導キャビティ、高エネルギー粒子の飛跡を検知する粒子検出器、気球で上空に打ち上げ宇宙粒子線の観測を行う検出器などを製作した。さらに、先端材料開発用の高磁界マグネットとして世界最大磁界級の 40 T 級ハイブリッド マグネットを製作した。

Representative superconducting apparatus for scientific research includes that for high-energy accelerators, such as dipole magnets, cavities, and detectors. Toshiba has fabricated a superfluid helium-cooled 10 T dipole magnet, a superconducting Nb cavity, and particle detector magnets for the National Laboratory for High Energy Physics, KEK. Another superconducting apparatus for scientific research is the high-field magnet for material science. A 40 T-class hybrid magnet, consisting of a superconducting magnet and a water-cooled copper magnet, has been fabricated by Toshiba for the National Research Institute for Metals. This magnet has attained the current world record of 36.2 T.

1 まえがき

物質の究極の姿を求める高エネルギー物理学や、新しい材料を探求する物性研究などの先端科学分野では、超電導機器が多く用いられている。加速器では、粒子を曲げる偏向マグネット、粒子ビームを収束させる収束マグネット、粒子を加速する高周波加速空洞、粒子衝突後の飛跡の検出器などに超電導が使用されている。また、物性研究には高磁界マグネットとして、超電導磁石と常電導磁石を組み合わせたハイブリッド マグネットが活用されている。

ここでは、先端科学研究に用いられる超電導機器として、加速器用の超電導装置と物性研究用のハイブリッド マグネットについて述べる。

2 加速器用超電導機器

2.1 偏向マグネット

高エネルギー物理学を目ざす加速器にとって、粒子を曲げる偏向マグネットや、粒子ビームを収束させる収束マグネットの超電導化は欠かせない技術である。マグネットの磁界を高めると、加速器のエネルギーを増やしたり加速器を小型にするうえで大きな効果がある。ここでは、次世代の加速器として欧州で開発中の LHC (Large Hadron Collider) 加速器をモデルに開発した、8~10 T クラスの高磁界偏向マグネット (双極マグネット) について述べる。この偏向マグネットは、高エネルギー加速器研究機構 (以下、KEK と略記) と欧州国際原子核研究所 (CERN) の技術協力により行われ、KEK の基本設計に基づき開発した。

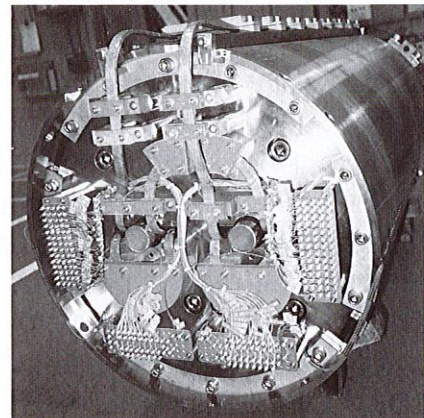


図1. 2口径双極マグネットの外観 2本の双極マグネットを並列に配置し、磁気回路を構成することで小型化を実現した。

Twin-aperture dipole magnet

当社は、1989年より KEK から2種類の設計で計5台の双極マグネットを受注し製作した。マグネットの外観を図1に、諸元を表1に示す。第一の設計はコイルの内径 50 mm で中心磁界 10 T を発生するもので大キーストン (台形断面) 平角ケーブルによる巻線ウェッジ (スパーサ) なしコイル、対称・単口径カラー1コイルの並列組合せによる対口径化など日本独自の設計思想によるものである。第二の設計は内径 56 mm で中心磁界 8.65 T を発生するもので、ウェッジを用い欧米流の設計と合わせ特性を評価するものである。

2種類のマグネットは、ともに NbTi 超電導線を用いて巻き上げ、加圧超流動ヘリウム (1.9 K) で冷却して運転する。このマグネットの技術上の難点は、従来のものと比較し次

表1. 双極マグネットの主要諸元
Specifications of dipole magnet

| 項目 | 1, 2, 3号機 | 4, 5号機 |
|----------------|---------------------|----------|
| 設計中心磁界 | 10 T | 8.65 T |
| 電流 | 12,720 A | 11,537 A |
| コイル巻線内径 | 50 mm | 56 mm |
| ウエッジ (ノコイル) | なし | 6 |
| 鉄ヨーク外径 | 560 mm | 520 mm |
| 蓄積エネルギー (単口径) | 333 kJ/m | 290 kJ/m |
| 運転負荷点 (Iop/Ic) | 92 % | 88 % |
| 到達磁界 | 10.3 T | 9.6 T |
| 超電導線 | NbTi/Cu (ラザフォードタイプ) | |
| 運転温度 | 1.9 K | |
| 冷却方式 | 加圧超流動ヘリウム単相流 | |

2号機は対口径, 他は単口径

の2点と考えられる。

- (1) 超流動ヘリウム 1.9 K では 4 K に比較して, 超電導線の比熱が 1 けた以上低下するので, 許容擾(じょう)乱が 4 K に比べて小さい。
- (2) 電磁力は磁界の二乗に比例するので, 10 T クラスのマグネットでは従来より電磁力が数倍大きくなる。

以上の点を考慮し, 三次元磁界解析, 構造解析による検討を加えた結果, 次のような独自の構造を採用した。

- (イ) コイルエンド導体の電磁力自己保持型の適正配置
- (ロ) コイルエンドのビーム軸方向の加圧固定機構

この構造により, 強大な電磁力に対しても導体移動の生じないコイル固定構造を得ることができた。3号機の励磁試験の結果, 目標とされた中心磁界 10 T を達成し, 当該機種としては世界でもトップクラスとなる 10.3 T の中心磁界を発生できた^{(1),(2)}。さらに, 設計を変更して製作した 4, 5号機では, 目標とする中心磁界 8.65 T をクエンチ (常電導転移) なしで達成するとともに, 超電導負荷点としてほぼ 100 % の性能 (中心磁界 9.63 T) を達成した⁽³⁾。

2.2 粒子検出器用超電導マグネット

2.2.1 開発課題 近年, 高エネルギー物理学の研究において, 超電導マグネットを組み込んだ粒子検出器を利用した実験で大きな成果が報告されている。通常, 高エネルギー荷電粒子の検出器は, 次の機器から構成される。

- (1) 粒子の通過を検出する飛跡検出器
- (2) 粒子のエネルギーを測定するカロリメータ
- (3) 飛跡検出器に磁界をかける超電導マグネット

衝突型加速器を使用した研究では二つの荷電粒子のビームを正面衝突させ, その衝突点に粒子検出器が設置され, 崩壊した粒子の検出を行う。また, 同様の検出器を高エネルギー宇宙粒子線の検出に使用する研究も行われている。これは, 検出器を宇宙粒子線と大気との相互作用による二次粒子生成の少ない宇宙空間に持ち出して, 宇宙粒子線の測定を行うものである。

ここでは, 粒子検出器用超電導マグネットとして前者のタイプであるアメリカ イリノイ州にあるフェルミ国立加速器研究所 (FNAL) の陽子-反陽子衝突型加速器 (Tevatron) に設置予定の D0 検出器用の超電導マグネット (以下, D0 と呼ぶ) と, 現在, KEK に建設中の電子-陽電子衝突型加速器 (B ファクトリ) へ納入した検出器用超電導マグネット (以下, Belle と呼ぶ) について述べる。また, 宇宙粒子線の検出器として, KEK へ納入した超電導マグネット (以下, PC-MAG と呼ぶ) について述べる。これらの超電導マグネットの諸元を表 2 に示す。

表2. 超電導マグネットの主要諸元
Specifications of superconducting magnet

| 項目 | D0 | Belle | PC-MAG |
|---------|--|------------------------|-------------------------|
| クライオ外径 | 1.4 m | 4.0 m | 1.2 m |
| クライオ長さ | 2.7 m | 4.4 m | 2.0 m |
| 常温ボア径 | 1.1 m | 3.4 m | 0.85 m |
| 全体質量 | 3,500 kg | 20,000 kg | 400 kg |
| 中心磁場 | 2.0 T | 1.5 T | 1.2 T |
| 定格電流 | 4,740 A | 4,000 A | 520 A |
| 蓄積エネルギー | 5.2 MJ | 35 MJ | 815 kJ |
| コイル形状 | 2層ソレノイド | 単層ソレノイド | 4層ソレノイド |
| 超電導線 | NbTi-Cu-Al | NbTi-Cu-Al | NbTi-Cu-Al |
| 寸法 | 5.3×15 mm ² 4.0×15 mm ² | 3.0×33 mm ² | 1.3×1.9 mm ² |

粒子検出器用超電導マグネットには, 粒子透過性の良い薄肉構成と, 長期間の放射線に耐える材料で構成されていることが求められる。そのために次の方法をとった。

- (1) アルミ安定化超電導線の使用 PC-MAG には数百 A クラスの小断面積のアルミ安定化超電導線にホルマール絶縁した線を使用し, D0, Belle には断面積の大きい超電導線で URG (絶縁フィルム+ガラス) 絶縁した線を使用した。
- (2) 間接冷却法 超電導コイルの冷却には間接冷却法を用いた。サポートシリンダと呼ばれるアルミ円筒が, コイルの外側に絶縁材を介して接着される。コイルは, サポートシリンダからの熱伝導で冷却される。接着層は十分な機械的強度 (せん断強度) をもつとともに, サポートシリンダとコイル間の伝熱も確保する必要がある。絶縁材として, 絶縁フィルムとガラスをはり合わせた材料を採用した。また, 低温での冷却性能, コイルクエンチ保護のため純アルミシートを用いてコイルの均熱化を図った。
- (3) 巻棒レスコイルの製造 粒子検出器用超電導マグネットは薄肉にする必要があるため, 巻棒がない方式をとり, コイルはアルミ合金製のサポートシリンダで

外側から保持をした。コイル製造方法として、D0、PC-MAG はコイル巻線後にサポートシリンダに挿入して製作した。Belle では、サポートシリンダの内側から外側に向けて超電導線を押し付けながら巻線を行う方法をとった。

- (4) 超電導線接合技術 アルミ安定化 NbTi-Cu 超電導線の安定化材を除去せずに接続するために、溶接接合や超音波素子を利用したハンダ接合の製造技術を開発し、接合箇所の状況、超電導線のサイズに応じて適用した。

次に、各超電導マグネットの特徴について述べる。

2.2.2 D0 用超電導マグネット コイルは、アルミ安定化 NbTi-Cu 超電導線を 2 層巻き、サポートシリンダを焼きばめして製作した。また、磁界各場所の強弱に応じて使用する線材を選択するグレーディングをして、磁界を均一にしている。サポートシリンダ外周にはアルミ合金製の液体ヘリウム冷却配管が溶接され、熱伝導によりコイルは冷却される。また、アルミ合金製の液体窒素配管を備えた 1 段の輻射シールドと多層スーパーインシュレーションが、コイルを囲み配置されている。電流リード部と冷媒供給口が設置される液体ヘリウム貯蔵用断熱容器のコントロールデュワは、コイル本体部分から離れた位置に設置されるため、約 15 m の配管で接続されており、184 mm×70 mm のステンレス製管の中に液体窒素配管と熱輻射シールド、液体ヘリウム配管と超電導線を収めてあり、全体の熱収縮による変形、熱応力を考慮した設計を行っている。マグネットの外観を図 2 に示す。

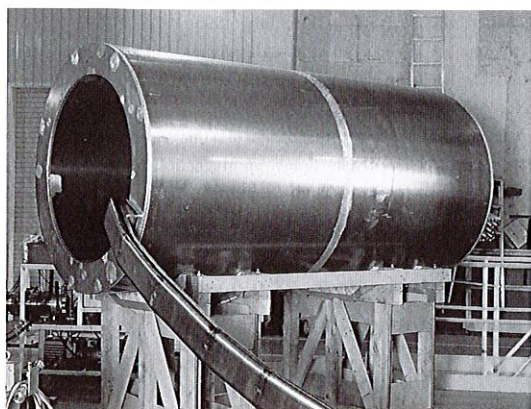


図 2. D0 粒子検出器用超電導マグネットの外観 マグネットは、コントロールデュワから約 15 m の配管で接続されている。
D0 superconducting magnet

2.2.3 Belle 用超電導マグネット Belle は、サポートシリンダ外周に配置した液体ヘリウム冷却配管でコイルを冷却する点や、液体窒素配管が配置されている熱輻射シ

ールドを備える構造は D0 と同じであるが、内側に粒子検出器を組み込むため室温の空間を大きくとった構造で、間接冷却超電導マグネットとしては最大級の大きさである。コイルはサポートシリンダに向けて内巻きで製作され、超電導線からサポートシリンダへの押付け力とコイル軸方向の圧縮力が残るように製作されている。

2.2.4 PC-MAG 用超電導マグネット^{(4),(5)} PC-MAG は、気球で約 35 km 上空まで打上げ、宇宙粒子線の観測を行う検出器に組込まれている。このため、アルミハニカム製真空容器を採用して大幅な軽量化を図るとともに、落下時の 10 G の衝撃に耐える構造設計を行った。コイルは永久電流モードで運転される。サポートシリンダ端に液体ヘリウム貯蔵タンクが溶接され、熱伝導によりコイルは冷却される。コイルの周りには、蒸発ヘリウムガスで冷却される 2 段のアルミ合金製輻射シールドと、多層スーパーインシュレーションが配置され、室温からの輻射熱の侵入を抑えた構造となっている。

2.3 超電導高周波加速キャビティ

高周波加速キャビティは一種の電気的な LC 共振器である。これに共振周波数 (数百 MHz~GHz) のラジオ波を加えると、ビーム方向に高周波の電界が発生し、ビームを加速する。ビームを効率良く加速するために、超電導キャビティには高い加速電界が求められる。

キャビティが高電界を作ると、キャビティ内表面に高周波の循環電流が流れる。超電導キャビティには、ジュール損失がほとんどないので、常電導キャビティより一けた以上高い加速電界を得ることができる。このため、次世代の加速器への応用を旨とし、各社とも積極的な開発を行っている。当社は、95 年度より KEK との共同研究を開始し、開発を進めている。

これまで、共振周波数 1.3 GHz のニオブ製 3 セル超電導キャビティを製作し性能測定を行った。図 3 にその外観を示す。セルを 3 個連結した構造で、セル内径 207 mm、全長 600 mm である。超電導キャビティの場合、電界が高いのでキャビティ内表面での放電を防止するために、表面欠陥が少ない清浄な表面を得ることが重要である。このため表面

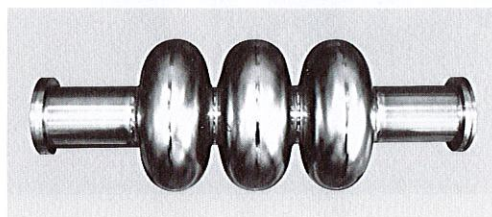


図 3. 3 セル超電導キャビティ セルを 3 個連結した構造で、キャビティの寸法はセル内径 207 mm、全長 600 mm にしてある。
3-cell superconducting cavity

処理としてバレル研磨，内面電解研磨，真空熱処理，高圧洗浄を実施した。測定の結果，キャビティの表面抵抗は測定温度 2 K で約 20 nΩ と非常に小さく，理想的な清浄表面であることがわかった。また，高電界発生試験では 10^{10} オードの Q 値が得られ，到達加速電界 18 MV/m を得た。今後，さらに高い加速電界を旨とした開発を進めていく。

3 ハイブリッド マグネット

超電導マグネットと水冷銅マグネットを組み合わせたハイブリッドマグネットは，高磁場発生装置として物性研究や材料開発などに利用されている。当社は，84年に日本で初めて，東北大学金属材料研究所に 30 T 級ハイブリッドマグネット（超電導マグネット 12 T 級+水冷銅マグネット 19 T 級）を納入した。95年には，世界最大磁界級の 40 T 級ハイブリッドマグネットシステムを科学技術庁金属材料技術研究所に納入した。図 4 にハイブリッドマグネット本体の外観を示す。外側に，常温ボア径 400 mm の 15 T 級超電導マグネット，内側に常温ボア径 30 mm の 25 T 級水冷銅マグネット，または常温ボア径 50 mm の 20 T 級水冷銅マグネットを組み合わせ，それぞれ 40 T 級，35 T 級の磁界を発生できる。全体システムは，マグネット本体のほか，超電導マグネット用電源，定格 35 kA-430 V の水冷銅マグネット用直流電源および冷却水量 700 m³/h，冷凍能力 15 MW 級の水冷銅マグネット用冷却水設備，さらにこれら全体の監視

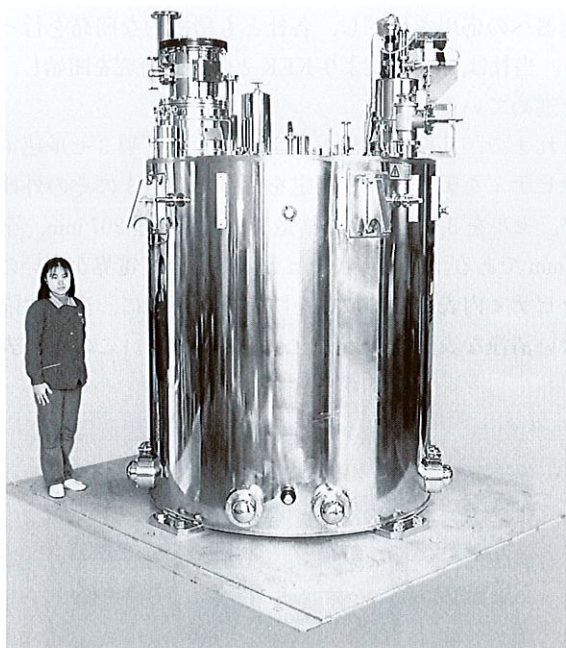


図 4. 40T 級ハイブリッドマグネット 外側の 15T 級超電導マグネットと，内側の 25T 級水冷マグネットを組み合わせて 40T 級の磁界を発生できる。

40 T-class hybrid magnet

・運転・保護を行う監視制御装置などで構成されている。

超電導マグネットは 58 個のダブルパンケーキを積層して形成されている。各パンケーキは，4 種類の超電導導体でグレーディングされ，内側の高磁界用導体には Nb₃Sn を，また外側の低磁界用導体には NbTi を使用している。定格電流および最大蓄積エネルギーは，それぞれ 1,476 A，63.4 MJ で，冷却には液体ヘリウム浸漬冷却方式を用いている。このマグネットは，一般の研究者にも開放された共同利用施設となっている。現状の運転実績は，超電導マグネット単体で 14.2 T，ハイブリッドマグネットでは 36.2 T まで行っており，この磁界は定常磁界で世界最高記録となっている。

4 あとがき

前述のように，高エネルギー物理学から物性物理，材料開発まで，先端科学のさまざまな分野で超電導が幅広く活用されている。当社では今後とも，この種の装置の開発に取り組み，先端科学の進歩に貢献していく所存である。

謝 辞

超電導マグネットの開発にあたりご指導をいただいた 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)，金属材料技術研究所をはじめ，関係者の方々に深く感謝の意を表する。

文 献

- (1) A. Yamamoto, T. Shintomi, et al., Development of twin aperture dipole magnets for the Large Hadron Collider, IEEE Trans. on Appl. Super., vol. 3, No. 3, p.1016, June (1995)
- (2) A. Yamamoto, T. Shintomi, et al., Test results of a single aperture 10 tesla dipole model magnet for the Large Hadron Collider, IEEE Trans. on Magnetics, vol. 32, No.4, p.2116, July (1996)
- (3) T. Shintomi, A. Yamamoto et al., Development of a 56mm aperture superconducting dipole model magnet for LHC, IEEE Trans. on Appl. Super., vol. 7, No. 2, p.558, June (1997)
- (4) A. Yamamoto et al., Conceptual design of a thin superconducting solenoid for particle astrophysics, IEEE Trans. on Magnetics, MAG-24, p.1421 (1988)
- (5) Y. Makida et al., Performance of a thin superconducting solenoid for particle astrophysics, Adv. Cryo. Eng., vol. 37A, p.401 (1992)



小林 孝幸 Takayuki Kobayashi

京浜事業所 機器装置部。
超電導機器の開発設計に従事。
Keihin Product Operations



中郡 忠重 Tadashige Chugun

京浜事業所 電動機部参事。
加速器用マグネットの開発設計に従事。電気学会会員。
Keihin Product Operations



太田 智子 Tomoko Ota

重電技術研究所 電磁装置・放電応用技術開発部。
加速器技術の研究に従事。物理学会会員。
Heavy Apparatus Engineering Lab.