

次世代高温超電導線材を用いた小型超電導磁石の開発

浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

主任研究員 小方 正文

1. はじめに

次世代高温超電導線材を用いた高温超電導磁石の開発を進めている。高温超電導磁石の最大の特長は、従来の低温超電導磁石よりも高い温度で使用できることである。これまでは絶対温度 4 K (-269°C)の液体ヘリウムを用いて冷却する必要があったのに対し、高温超電導化により、77 K (-196°C)の液体窒素でも冷却できる可能性が出てきた。そして運用温度の高温化に伴う冷凍システムの小型・軽量化、消費電力の低減効果は、高温超電導ならではのメリットである¹⁾。また近年の高温超電導線材の性能向上は顕著であり、特に高磁場中でも優れた通電特性を有する次世代高温超電導線材は、コイル用途に適した材料である。

そこで、次世代高温超電導線材の適用可能性を確認することを目的とした小型の高温超電導磁石を開発した。この超電導磁石は、コイル温度 50 K (-223°C)で浮上式鉄道用超電導磁石と同じオーダーの 1 T 以上の磁場が発生でき、コイル温度 50 K 以下を 9 時間にわたり保持することが可能である。

2. 次世代高温超電導線材を用いた小型超電導磁石の特徴

今回開発した超電導磁石は、浮上式鉄道用超電導磁石の約 1/4 寸法のコイルを 1 個内蔵した全長 600 mm の小型の定置型磁石で、製作に当たっては、希土類系高温超電導線材の使用、励磁用電源を分離可能、冷凍機無しで運用可能という特徴的な仕様を盛り込んだ。

高温超電導線材には、主に希土類系線材、ビスマス系線材があり、図 1 に示すように高温・高磁場中における臨界電流密度は、次世代高温超電導線材と呼ばれる希土類系線材の方が良好な特性を有している²⁾。そこで本超電導磁石には、高磁場を発生するコイル用途に適した希土類系線材を用いることとした。

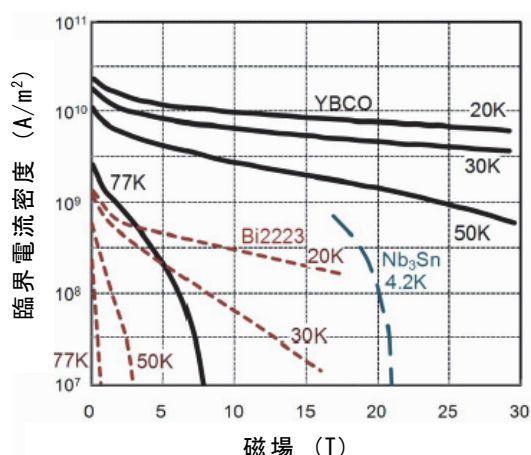


図 1 希土類系(YBCO)線材とビスマス系(Bi2223)線材の磁場中通電特性比較²⁾

表 1 使用した希土類系線材の仕様

線材幅	4.1 mm
線材厚さ	0.1 mm
線材タイプ	YBCO (MOCVD 法) / ハステロイ
臨界電流値	112 A (77 K 冷却時)

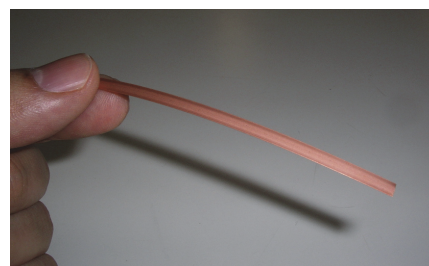


図 2 希土類系線材外観

3. 磁石構成と主要仕様

3.1 積層パンケーキコイル

使用した希土類系線材の仕様を表 1 に、外観を図 2 に示す。幅 4.1 mm、厚さ 0.1 mm の薄いテープ状の線材で、ハステロイ基板上に MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 法で YBCO (イットリウムとバリウムの銅酸化物) 超電導層が成膜されている²⁾。このテープ状線材を用いてレ

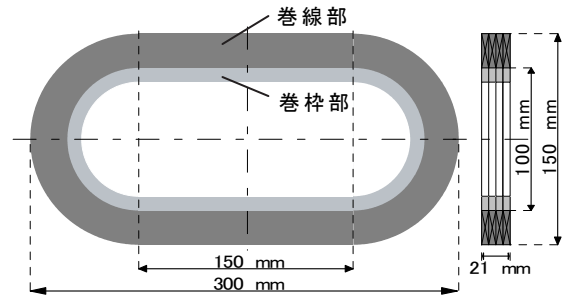


図 3 積層パンケーキコイル

ーストラック形に巻き重ねるようにして製作したパンケーキコイルを 4 個積層して積層パンケーキコイルとした (図 3)。そして、積層パンケーキコイル全体をアルミニウム製のコイルケースに収納した後にエポキシ樹脂で一体含浸固定した。これは、コイルケースの機械的強度を利用したコイルの変形防止目的の他、冷凍機無しの構成とすることを考慮し、アルミニウム製コイルケースの熱容量も利用することで、コイル温度の上昇抑制を図ったものである。

3.2 冷却機構

冷凍機無しの構成とした本超電導磁石には、図 4 に示す冷却機構を採用した。冷却は、内部に引き通した冷却配管内に低温のヘリウムガスを導入して行う。冷却配管外面は、輻射シールド、コイルケースの順に熱接触しており、積層パンケーキコイルは周囲のコイルケースを経て伝導冷却され、冷却完了後は、低温ヘリウムガスの導入を止め、冷却配管ポートから外部配管を切り離す。なお、冷却を止めると、外部からの熱侵入によってコイル温度の上昇が始まるが、コイル温度が 20 K から 50 K に上昇するまでの時間が 8 時間以上となるように、コイルケースに約 6 kg、輻射シールドには約 10 kg のアルミニウムを熱容量部材として用いた。また内部温度の上昇に伴って真空容器内に増大する不純ガスの吸着を促進する目的で、コイルケース表面に活性炭を設置して保冷性能の向上を図った。

3.3 通電機構

外部の励磁用電源を切り離してもコイル電流を保持するためには、磁石側の電流回路にスイッチ機構を内蔵して、閉ループ電流回路を構成する必要がある。そこで本超電導磁石では、銅の接触面を有する機械式スイッチを採用し、接触面にはインジウムメッキを加工して低抵抗を図った。本超電導磁石の通電機構の模式図を図 5 に示す。磁石励磁時は、機械式スイッチをオフにして電流掃引を開始し、所定の電流値に到達した後、機械式スイッチをオンにして電源電流をゼロとし、通電用ケーブルを分離する。消磁時は、機械式スイッチをオフにすることで、内蔵した保護抵抗 (0.1 Ω) により閉ループ電流を安全に消費する。

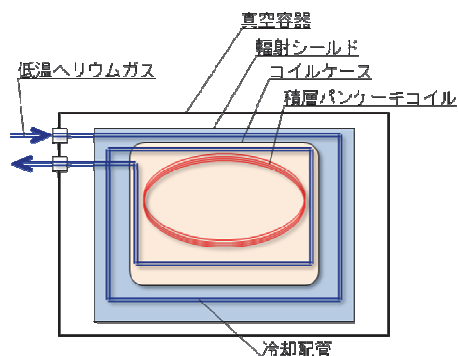


図 4 冷却機構模式図

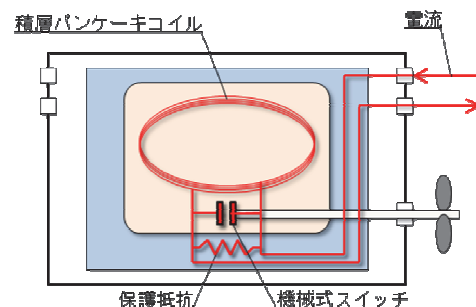


図 5 通電機構模式図

3.4 主要仕様

完成した小型超電導磁石の外観を図 6 に、主要仕様を表 2 に示す。机上にも設置可能な、長さ 600 mm、質量 50 kg 程度の大きさで、レーストラックコイル中心位置に室温ボア空間を設けている。

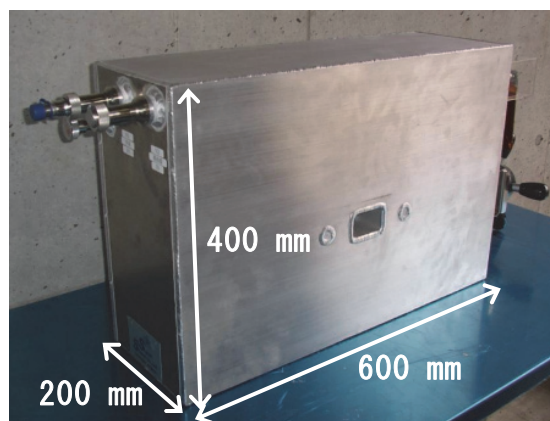


図 6 小型超電導磁石外観

4. 実験結果

4.1 通電性能

コイル温度を 25 K から 77 K の間で一定に保持した状態で臨界電流値を測定して本超電導磁石の通電性能を確認した。試験結果を図 7 に示す。このように低温ほど臨界電流値が大きくなる性能を確認した。また、図 8 にはコイル温度と発生磁場の関係を示す。このように、コイル温度 50 K における発生磁場は 1.3 T であり、目標としたコイル温度 50 K において 1 T 以上の磁場発生が可能なことを確認した。

また、本超電導磁石を初期冷却温度 20 K まで冷却すると同時に、定格電流 86 A を通電して閉ループ電流回路を構成し、冷却配管および通電用ケーブルを切り離して磁石単独で運用した。このときの閉ループ電流の測定結果を図 9 に示す。電流値は初期の 86 A から徐々に減衰していき、10 時間後には 24 A となった。なお、図中の点線は改良後の理想的な特性を予測した計算値であり、閉ループ電流回路抵抗の低減等の改良により、一層の特性向上が期待される。

表 2 小型超電導磁石の主要仕様

線材仕様	幅 4.1 mm / 厚さ 0.1 mm YBCO (MOCVD 法) / ハステロイ 臨界電流 112 A (77 K)
コイル形状	レーストラック形 (パンケーキコイルを 4 個積層)
巻線内直径	100 mm
巻線外直径	150 mm
巻線直線部長さ	150 mm
巻線厚さ	21 mm
ターン数	562 ターン
線材長さ	400 m
含浸材料	エポキシ樹脂
インダクタンス	97 mH
定格電流	86 A
磁石構成	コイル / コイルケース / 輻射シールド / 多層断熱材 / 真空容器
真空槽吸着材	活性炭(150g)
冷却方法	低温ヘリウムガスによる初期熱交換方式
初期冷却温度	20 K
励磁方法	機械式スイッチによる閉ループ電流方式
定格磁場	コイル最大経験磁場 1T(50K において)
外寸法	幅 600 mm / 高さ 400 mm / 厚さ 200 mm
質量	52 kg

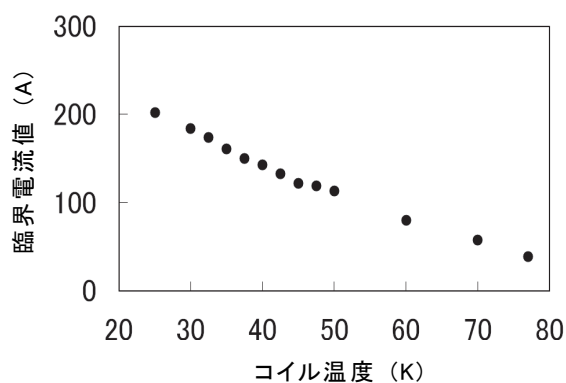


図 7 小型超電導磁石の通電性能試験結果

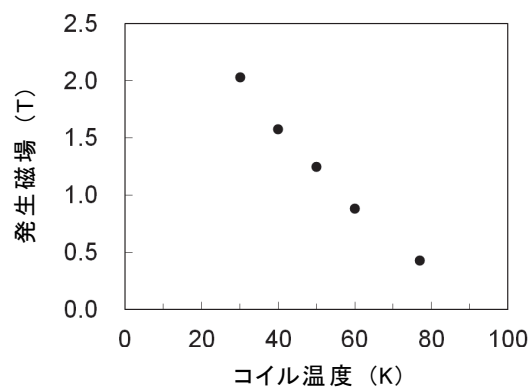


図 8 小型超電導磁石の磁場発生性能

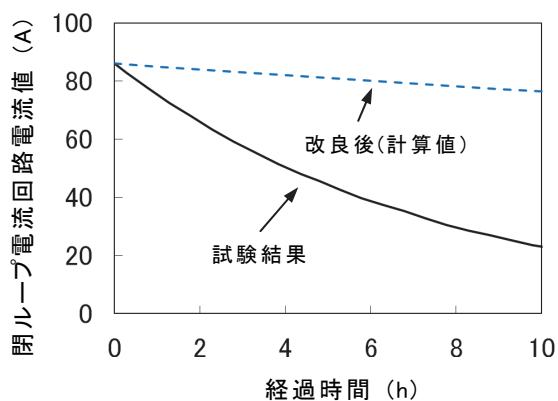


図9 小型超電導磁石の電流減衰特性

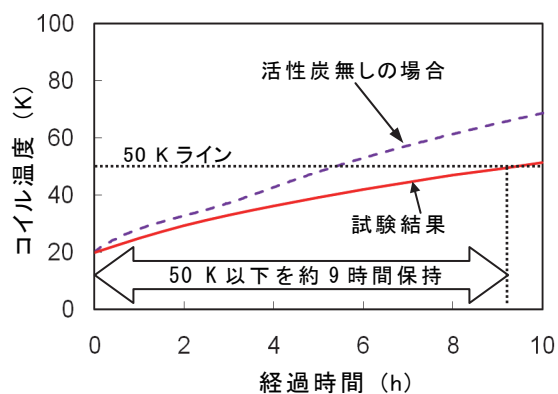


図10 小型超電導磁石の保冷性能

4.2 保冷性能

本超電導磁石を初期冷却温度の 20 K まで冷却した後のコイル温度の上昇特性実験結果を図 10 に示す。別途実施した活性炭無しのモデル超電導磁石の実験結果と比較して、活性炭有りの本超電導磁石は低温状態を長く保持し、コイル温度が 20 K から 50 K まで上昇する時間は約 9 時間となった。こうして、アルミニウムの熱容量と活性炭の効果を利用することにより、冷凍機無しでもコイル温度 50 K 以下を 8 時間以上にわたり保持できる保冷性能目標を確認した。

また、本超電導磁石は冷凍システムを搭載しない構成であるので、高圧ガス保安法の適用を受けない。この点は、超電導磁石を実際に運用していく上で大きなメリットである。

5. おわりに

冷凍機の動作音や外部の励磁電源からの電流供給も無く、本超電導磁石が永久磁石のように静かに磁場を発生している様子は、従来の低温超電導磁石では実現できない、高温で運用可能な高温超電導磁石ならではのものであり、次世代高温超電導線材の適用可能性を示すことができたと考えている。次に、本研究の成果をまとめる。

- (1) 次世代（希土類系）高温超電導線材を用いて、冷凍機無しで運用可能な小型の高温超電導磁石を完成させた。
- (2) コイル温度 50 K で 1 T 以上の磁場発生性能があることを確認した。
- (3) コイル温度 50 K 以下を 8 時間以上保持できる保冷性能があることを確認した。

今後は、電流減衰特性の改善も進め、コイル温度 50 K において 5 T クラスの磁場発生が可能な高温超電導磁石の開発を進めていく。

本研究は、国土交通省からの補助金を受けて実施した。

文 献

- 1) 小方正文他：希土類系高温超電導線材の浮上式鉄道用磁石への適用性評価，鉄道総研報告，Vol.24, No.1, pp.5-10, 2010
- 2) 塩原融：次世代高温超電導線材の特徴と研究開発動向，電気学会誌，Vol.126, No.5, pp.268-271, 2006