

冷凍機無しで超電導を長時間維持する希土類系高温超電導磁石

小方 正文* 水野 克俊* 荒井 有気*
長谷川 均* 笹川 卓** 長嶋 賢*

Cryocooler-free Superconducting Magnet System Using High-temperature Superconducting Wire Based on Rare Earth Barium Copper Oxide

Masafumi OGATA Katsutoshi MIZUNO Yuuki ARAI
Hitoshi HASEGAWA Takashi SASAKAWA Ken NAGASHIMA

RTRI is studying the application of a Rare Earth (RE) high-temperature superconducting wire to a superconducting magnet as one of research studies for superconducting MAGLEV. The greatest feature of a high-temperature superconducting magnet is usable at high temperature than conventional low-temperature superconducting magnet. Above all, an RE wire, which has superior characteristic in a high magnetic field, is suitable for coil applications. To confirm the applicability of an RE wire, we developed the cryocooler free High-temperature superconducting magnet using RE wires of about one quarter of the size of a real machine. This magnet can generate a magnetic field stronger than 1 T at a coil temperature of 50 K, and has a cold insulation performance that is able to keep a coil temperature lower than 50 K more than eight hours after initial cooling.

キーワード：希土類，高温超電導，線材，保冷，RE，HTS，SCM

1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道に関する基礎研究のひとつとして、希土類 (RE: Rare Earth) 系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℃) 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℃) の液体窒素でも冷却できる可能性が出てきた。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。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希土類系線材は、コイル用途に適した材料である。

そこで、希土類系線材の適用可能性を確認することを目的として、コイル寸法を実機の約1/4のサイズとした、冷凍機無しで運用可能な希土類系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℃) で浮上式鉄道用超電導磁石と同じオーダーの1T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。

* 浮上式鉄道技術研究部 (低温システム)

** 浮上式鉄道技術研究部 (電磁力応用)

2. 高温超電導磁石の利点

図1に、現在の浮上式鉄道用超電導磁石 (NbTi線材使用、運用温度4.2 K)¹⁾ を高温超電導化する効果を示す。超電導コイルの運用温度が上がると、冷凍機で直接コイルを冷却する伝導冷却方式が採用できるので、冷却用寒剤 (液体ヘリウム、液体窒素)、寒剤用タンク、配管類が全て不要となる。そして、冷凍負荷低減により冷凍機は小型軽量、低消費電力なタイプに置き換えることができる。また、コイルの運用温度が上がると線材材料自身の比熱も増大するので、局所発熱に対する超電導状態の安定性が向上する。さらに、運用温度を50 K程度まで上げることができれば、輻射シールドが省略可能となり、外

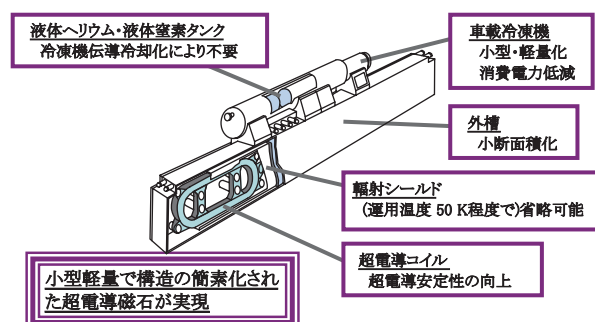


図1 現在の超電導磁石 (NbTi線材使用) の高温超電導化がもたらす効果²⁾

特集：浮上式鉄道技術と在来鉄道への応用

槽の小断面積化や、超電導コイルを地上コイル側へ寄せた配置も容易になる。これらの利点により、小型軽量で構造の簡素化された信頼性の高い超電導磁石を実現することができると思われる²⁾。

3. 冷凍機無しで運用可能な希土類系高温超電導磁石の特徴

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 程度の小型の定置型磁石である。製作に当たっては、高温超電導線材を用いた超電導磁石の可能性を実際に確認することを目的として、希土類系高温超電導線材の使用、通電用電源が分離可能、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。

3.1 希土類系高温超電導線材の使用

高温超電導線材には、主として希土類系線材、ビスマス系線材、 MgB_2 (二ホウ化マグネシウム) 線材の3種類があり、この中で高温・高磁場中における通電特性が最も良好なのが希土類系線材である。

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採用した。

3.2 通電用電源が分離可能

浮上式鉄道用超電導磁石と同様、本超電導磁石も磁石単体で磁場発生が可能であることを目標とし、閉ループ電流回路を構成するためのスイッチを磁石内部に設けることにより、通電用電源を本超電導磁石から分離して運用できる構成を採用した。

3.3 冷凍機無しで運用可能

通常、超電導磁石を運用するためには、超電導コイルを冷却するための冷凍機や寒剤が欠かせない。しかし高温超電導線材を適用することでこの制約は大幅に緩和される。例えば、従来の NbTi 線材 (運用温度 4.2 K) の代わりに、希土類系線材を用いて 50K 程度で運用できれば、線材材料の熱容量は数百から千倍程度に増大するため、同じ熱侵入量を仮定すれば、コイルの温度上昇は僅か数百分の一から千分の一程度に収まることになる。コイル単体の温度上昇が緩やかになることは、コイル冷却無しでも超電導状態を比較的長く維持できることに等しい。

そこで、本超電導磁石には高温超電導磁石の究極の形態と考えられる冷凍機無しの構成を採用した。ただし、一定の励磁運用時間を確保するために、非磁性かつ軽量のアルミニウムを熱容量部材として活用することにより、コイル温度 50K 以下を 8 時間以上にわたり保持できる保冷性能を有することを目標とした。なお、保冷性能に関する検

討の詳細は、本号の特集論文「希土類系高温超電導磁石の保冷特性評価試験」にあるので参照していただきたい。

4. 磁石製作

本超電導磁石を製作するにあたり、希土類系線材単体の通電特性評価から着手し、順次、シングルパンケーキコイルの製作と通電特性評価、積層パンケーキコイルの製作、機械式スイッチを有する通電機構の構築を行い、最後に保冷性能を有するクライオスタットとして全体をとりまとめ、冷凍機無しで運用可能な希土類系高温超電導磁石として完成させた。

4.1 希土類系線材通電特性評価

使用した希土類系線材の仕様を表 1 に示す。幅が 4.1 mm、厚さが 0.1 mm のテープ状の線材 (図 2) で、ハステロイ基板上に MOCVD 法で YBCO (イットリウムとバリウムの銅酸化物) 層が成膜されている³⁾。この線材の 77 K (液体窒素温度) 冷却時の臨界電流値は 112 A である。

線材をコイルに適用する場合、コイルは磁場を発生する装置であるので、コイルを構成する線材自身にも磁場が印加されることになり、線材の臨界電流値が低下することに注意しなければならない。すなわち、コイル設計のためには、磁場中における線材の通電特性を詳細に把握しておく必要がある。更に希土類系線材は、線材平面を貫く磁場の角度によって通電特性が変わる異方性も有しているため、十分なコイル設計のためには、磁場 (B)、磁場角度 (θ)、温度 (T) をパラメータとしたときの詳細な臨界電流 (I_c) データが必要となる。

そこで、これらのパラメータを任意に設定して線材 I_c を測定することのできる、 I_c - B - θ - T 試験装置を開発し⁴⁾、希土類系線材の通電特性評価を行った。評価の一例として、 θ を線材平面に平行な方向ならびに垂直な方向としたときの、 I_c の B (0 ~ 5T) および T (20 ~ 77K) 依存性を図 3 に示す。

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)

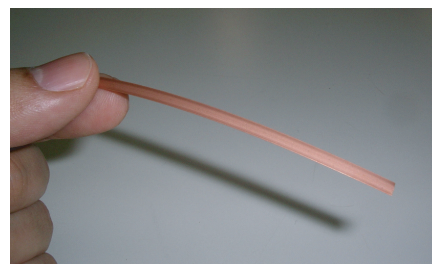
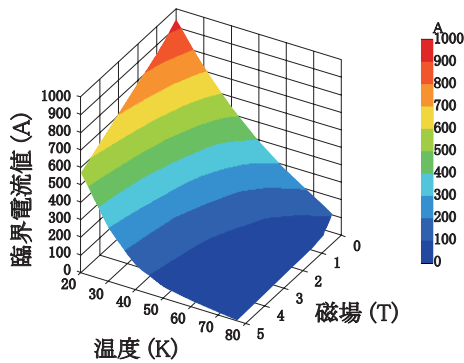
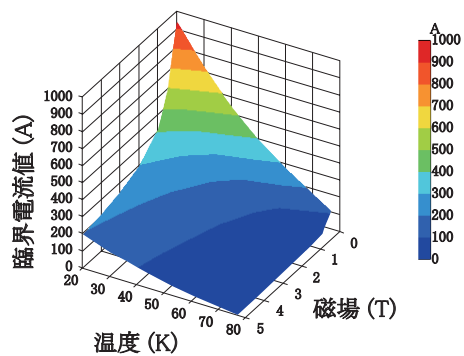


図 2 希土類系線材外観



<磁場は線材平面に平行な方向>



<磁場は線材平面に垂直な方向>

図3 希土類系線材の通電特性評価結果

4.2 シングルパンケーキコイル

テープ状の線材を線材自身の上に巻き重ねる方式のコイルをパンケーキ巻コイル、あるいは簡単にパンケーキコイルと呼び、最内周と最外周に巻き線の終端部を有する最もシンプルな形のコイルがシングルパンケーキコイルである。シングルパンケーキコイルはテープ状線材を用いる高温超電導コイルの基本形状であり、目的の磁場発生性能のコイルを得るために、複数個を積層して使用することが多い。

そこで、図4の外観で、表2に示す仕様のレールトラック形シングルパンケーキコイルを5個製作し、それぞれ77 Kの液体窒素中で通電特性を評価した。図5に結果を示すように、コイルの臨界電流値やn値（超電導特性の良否の指標）にバラツキが見られたため、比較的特性の

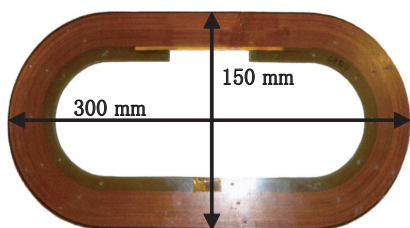


図4 シングルパンケーキコイル (#4)

表2 シングルパンケーキコイル (#4) の仕様

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)
巻線内直径	100 mm
巻線外直径	150 mm
直線部長さ	150 mm
線材長さ	100 m
含浸材料	エポキシ樹脂
ターン数	143 ターン
インダクタンス	7.7 mH

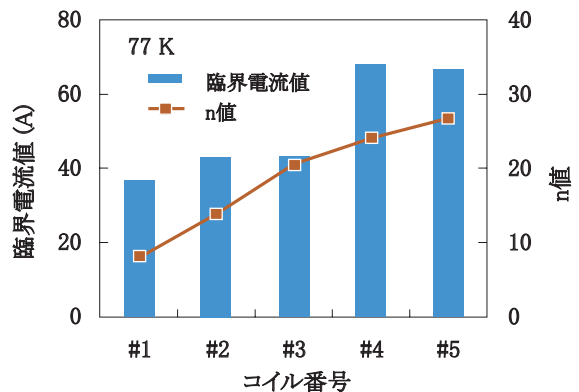


図5 シングルパンケーキコイル5個の通電特性

良好な#2, #3, #4, #5の4個のシングルパンケーキコイルを用いて積層パンケーキコイルを構成することとした。

なお、#1コイルはテスト用シングルパンケーキコイルとして用い、更に低温における通電性能評価を実施した。結果を図6に示す。低温になるほど臨界電流値が大きくなり、最低温度20 Kにおいて約300 Aとなった。図6には、線材単体の通電特性(図3)とコイル形状から導いた臨界電流の計算値も示している。これより、#1コイルの臨界電流値は線材平面に垂直方向の磁場の影響が支配的であることがわかるが、実験結果はこれら計算値よりも小さい値であった。これは、コイル化後の線材の通電特性がコイル化前よりも低下していることを意味しており、コイル化に伴う線材通電特性の劣化を示唆している。

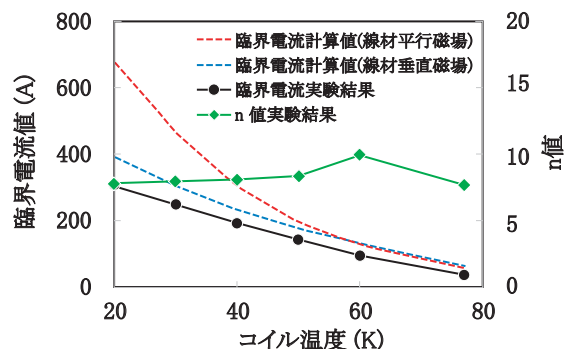


図6 シングルパンケーキコイル (#1) の通電性能結果

特集：浮上式鉄道技術と在来鉄道への応用

4.3 積層パンケーキコイル

製作したシングルパンケーキコイルを、#4、#2、#5、#3の順に重ねてエポキシ樹脂により接着して一体化した。各コイル間は、巻き線の最内周、最外周、最内周の順に巻き線端部をハンダ接合して直列接続し、積層パンケーキコイルとした(図7)。なお、目標の1Tを発生するためには、本コイルの形状で86Aを通電する必要がある。

そして本超電導磁石では、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て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の目的の他、冷凍機無し

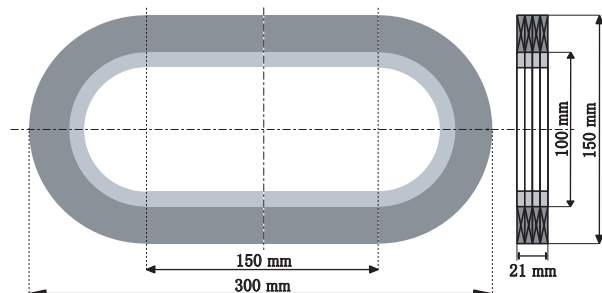


図7 積層パンケーキコイル

4.4 通電機構

磁石単体で磁場発生させるためには、外部の励磁用電源を切り離しても電流を保持できるよう、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。従来の低温超電導磁石では、超電導材料の温度をヒータ制御することで、超電導抵抗(ゼロ抵抗)と比較的大きな常電導抵抗との差をスイッチとして利用する熱式スイッチが用いられた。しかし運用温度が50Kクラスの高温超電導磁石で使用できる熱式スイッチは未だ実用化されていない。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た。接触面にはインジウムメッキを加工して低抵抗化を図った。機械式スイッチの仕様を表3に示す。

本超電導磁石の通電機構の模式図を図8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。消磁は、機械式スイッチをオフにして、内蔵した保護抵抗(0.1Ω)により閉ループ電流を安全に消費する。

表3 機械式スイッチの仕様

接触面材質	無酸素銅(インジウムメッキ)
接触面積	約3000mm ²
オン時接触抵抗	1μΩ以下(77K)

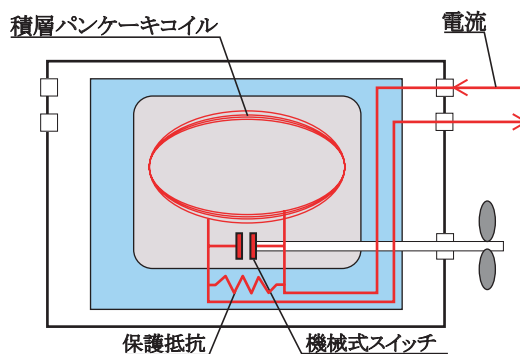


図8 通電機構模式図

4.5 冷却機構

冷凍機無し

の構成とした本超電導磁石には、図9に示す冷却機構を採用した。磁石内部は断熱のために真空とし、冷却は、内部に引き通した冷却配管の中に低温のヘリウムガスを導入して行う。冷却配管は、輻射シールド、コイルケースの順に熱的に接触しており、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る。コイル冷却速度は毎時約30Kとし、コイルを室温から20K以下まで初期冷却するのに要する時間は約10時間である。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りコイル温度が上昇し始めるが、コイル温度が20Kから50K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6kg、輻射シールドに約10kgのアルミニウムを熱容量部材として用いた。

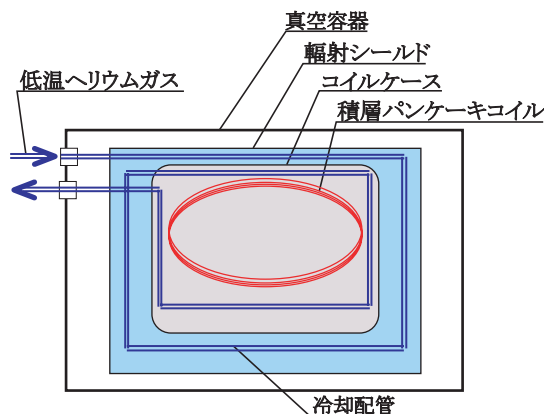


図9 冷却機構模式図

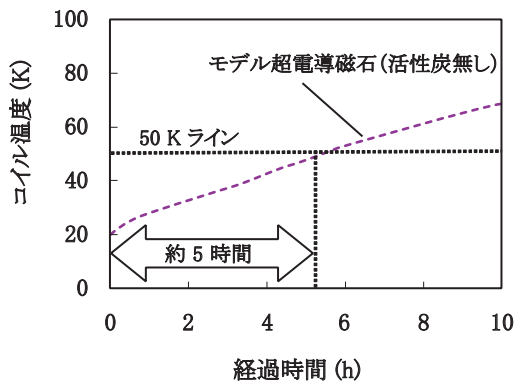


図10 モデル超電導磁石（活性炭無し）の保冷性能

し、温度上昇に伴い真空容器内に増大する不純ガスの吸着を促進することで、保冷性能の向上を図ることとした。

4.6 主要仕様

完成した超電導磁石の主要仕様を表4に、外観を図11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、外観上の特徴として、レーストラックコイルの中心位置に磁場観測用の小型室温ボア空間を設けている。図12には、通電用ケーブルの着脱を行うため

表4 冷凍機無しで超電導を長時間維持する希土類系高温超電導磁石

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 (シングル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
直線部長さ	150 mm
コイル厚さ	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
真空槽内吸着材	活性炭
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 (50 K)
外寸法	幅 600 mm / 高さ 400 mm / 厚さ 200 mm
質量	52 kg

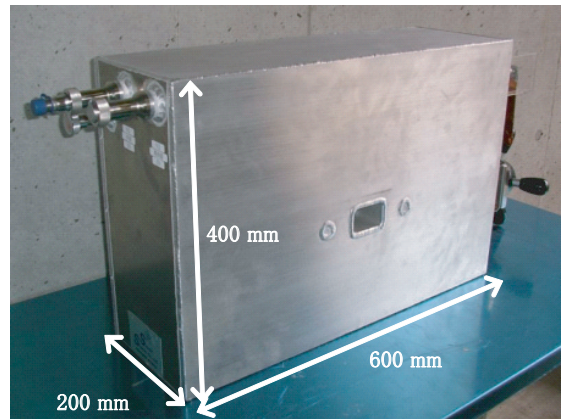


図11 冷凍機無しで超電導を長時間維持する希土類系高温超電導磁石



図12 通電用電極部（裏側） 図13 冷却配管ポート部

の通電用電極部を示す。図13には、磁石冷却用の低温ヘリウムガス供給配管および回収配管を着脱するための冷却配管ポート部を示す。

5. 試験結果

5.1 通電性能

本超電導磁石の通電性能を確認するため、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、各臨界電流値を測定した。試験結果を図14に示す。臨界電流性能は、コイル温度が低いほど値が上昇する通常の特性であったが、予め測定した線材単体の通電特性（図3）およびコイル形状から導いた臨界電流計算値と比較すると、低温において計算値よりも小さい値を示した。この

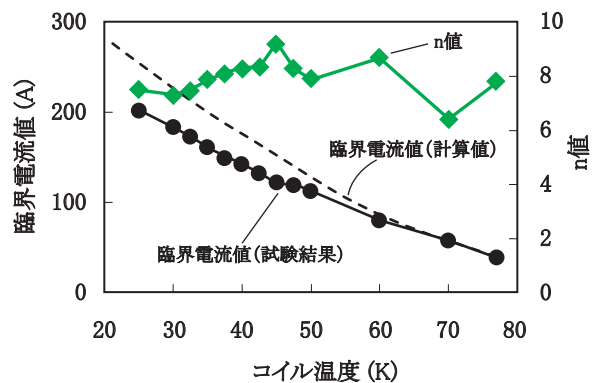


図14 超電導磁石の通電性能試験結果

特集：浮上式鉄道技術と在来鉄道への応用

要因としては、図6に示したシングルパンケーキコイルの通電性能と同様、コイル化に伴う線材の通電特性低下が考えられる。さらに本磁石は4個のシングルパンケーキコイルを積層したものであるため、各コイルにおける劣化要素が複合された可能性もある。またn値の試験結果は7程度であった。

コイル温度50 Kにおける臨界電流値は113 Aで、このときの発生磁場は1.3 Tであった。設計値よりも若干の低下は見られたものの、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通電性能であることを確認した。

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15に示す。電流値は初期の86 Aから徐々に減衰し、10時間後には24 Aとなった。この減衰特性は、閉ループ電流回路の抵抗を $3.2\mu\Omega$ 、n値を7とした場合に等しいので、図15に示す計算値のように、回路抵抗の低減や、n値の向上によって改善することができると考えられる。

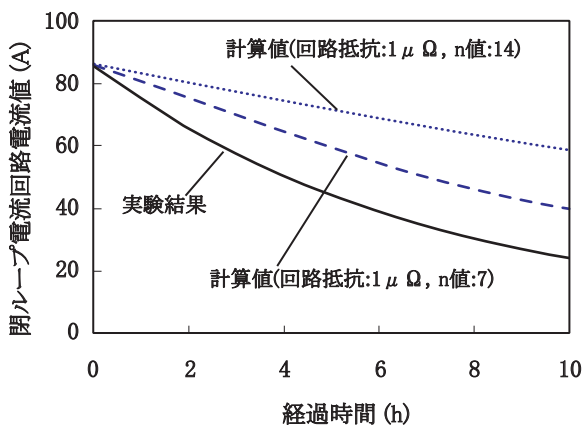


図15 閉ループ電流回路の電流減衰特性 (実験結果は回路抵抗: $3.2\mu\Omega$ 、n値:7の特性に等しい)

5.2 保冷性能

本超電導磁石を初期冷却温度20 Kまで冷却した後の保冷性能を図16に示す。活性炭無しモデル超電導磁石の結果と比較して、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に上昇する時間は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で、目標とした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であることを確認した。

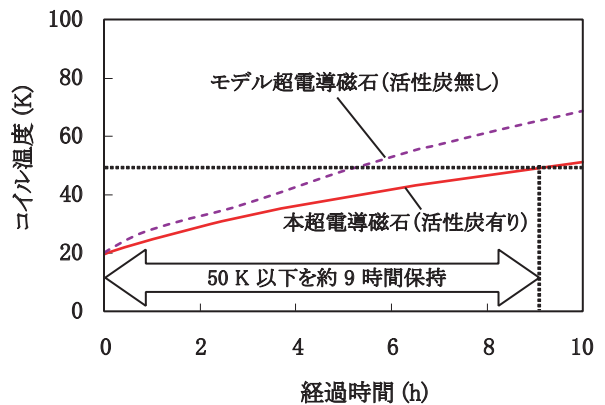


図16 保冷性能

6. おわりに

本超電導磁石が、冷凍機の動作音も外部電源からの電流供給も無く、一定時間、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ことであり、希土類系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) 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9時間保持できる保冷性能があることを確認した。

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ため、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の非常に大きなメリットである。

今後は、電流減衰を改善のための改良とともに、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希土類系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) 鉄道総合技術研究所編：ここまで来た！超電導リニアモーターカー，交通新聞社，pp.223-225，2006
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 小方正文他：高温超電導線材通電特性試験装置の開発，鉄道総研報告，Vol.22，No.11，pp.23-28，2008