

希土類系高温超電導磁石の保冷特性評価試験

水野 克俊* 宮崎 佳樹*

小方 正文* 長嶋 賢*

Cold Storage Experiments of Rare Earth HTS Magnet

Katsutoshi MIZUNO Yoshiki MIYAZAKI

Masafumi OGATA Ken NAGASHIMA

One of the advantages of high temperature superconductor (HTS) is its operational temperature. Due to its high operational temperature, specific heat of HTS material is several hundred times higher than that of the LTS. Therefore, continuous cooling is inessential for the HTS magnet. We investigate the possibility of a novel HTS magnet, which is operable without cooling system for a limited time. The most important factors of such a concept are thermal insulation and cold storage characteristics. Several experiments revealed that gas conduction became dominant heat leak source. We tested activated carbon to reduce gas conduction, and water ice was also used to increase heat capacity.

キーワード：高温超電導，保冷，伝熱，熱物性，真空度，保冷剤

1. はじめに

超電導体は電気抵抗がゼロであるため通電時に発熱がなく、磁気浮上式鉄道など強磁場発生用の電磁石には不可欠な技術である。ただし、超電導体は運用時に極低温を保つ必要があり、冷却断熱技術は超電導機器の実用化において重要な役割を果たしている。すでに実用化されている金属系の超電導体においては液体ヘリウム温度(4K)付近まで冷却する必要があり、冷却のコストが非常に大きいことが課題である。

近年開発の進んでいる高温超電導体(以下、HTS)の利点は、運用温度が高くなったことにより冷却系が簡素化できる点である。特に希土類系高温超電導体は磁場中での臨界電流特性に優れていることから、磁気浮上式鉄道用超電導磁石への適用が期待される^{1), 2)}。また、液体窒素温度近傍では超電導磁石を構成する材料の熱物性も大きく変わるため、HTS磁石に最適化した冷却システムを検証する必要がある。

顕著な熱物性の変化として挙げられるのが、比熱の増大である。図1に示すように低温超電導(～10K)の温度域では金属材料の比熱は極めて小さい。すなわち、わずかな熱侵入が存在しただけで急激な温度上昇を引き起こすため、連続的な冷却が不可欠であった。しかしながら、HTSの温度域(～77K)では比熱は数百倍、あるい

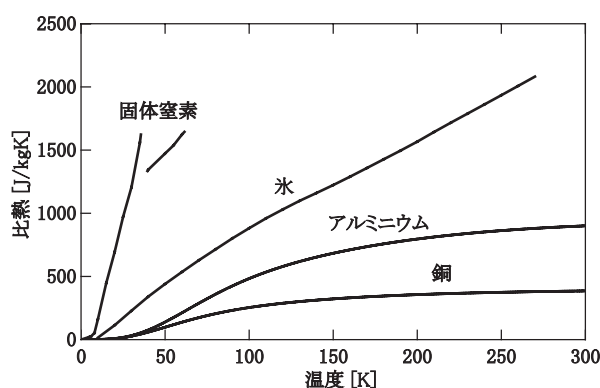


図1 比熱の温度依存性^{3), 4)}

はそれ以上になる。そのため、液体ヘリウムが不要になっただけでなく、限られた時間ならば冷却系を分離した状態でも極低温を維持し、超電導磁石としての運用が可能になると考えられる。

冷却系が分離可能になれば超電導磁石の大幅な軽量化が可能であり、磁気浮上式鉄道に代表されるような輸送機搭載型の超電導機器には大きな利点となり得る。加えて、車載冷凍機が不要になれば車上電源も小型化できるので消費電力の面でも有利である。

筆者らは本コンセプトを採用した冷凍機分離可能な小型希土類系超電導磁石を製作し、50K以下という希土類系超電導体の十分に運用可能な温度を冷却系なしで9時間保持することに成功している⁵⁾。冷凍機分離可能な超電導磁石に関しては本号の特集論文「冷凍機無しで運用

* 浮上式鉄道技術研究部(低温システム)

特集：浮上式鉄道技術と在来鉄道への応用

可能な希土類系高温超電導磁石」で詳細を報告する。

本論文では、この希土類系超電導磁石の前段階として行った超電導磁石の断熱保冷特性に関する研究で得られた知見を報告する。数値解析および、超電導磁石の熱特性を模擬した試験装置による保冷実験から、金属系超電導体では見られなかった高温超電導磁石特有の熱侵入を明らかにすることができた。また、極低温において比熱の高い水 (H_2O) を保冷剤として用い、僅かな重量増加だけで保冷時間の延長が可能なが実証された。

2. 極低温機器における伝熱

超電導磁石に代表される極低温機器は熱侵入を最小に抑えるために様々な工夫が施されている。伝熱には三つの形態があり、熱伝達 (対流)、熱ふく射および熱伝導である。熱伝達を低減するために超電導コイルは真空容器内に収められており、 10^{-1} Pa 以下のような圧力の低い範囲では式 (1) に示す式で伝熱量が求められる⁶⁾。

$$Q_{\text{conv}} = \Lambda p (T_H - T_L) \quad (1)$$

なお、 Λ は式 (2) のように定義される。

$$\Lambda = \frac{1}{2} \frac{\alpha_H \alpha_L}{\alpha_H + \alpha_L - \alpha_H \alpha_L} \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \right) \left(\frac{R}{2\pi M} \right)^{1/2} \frac{2}{\sqrt{T_H} + \sqrt{T_L}} \quad (2)$$

T は温度を示し、添え字の H は高温端、 L は低温端を示す。 p は圧力、 M は分子量、 γ は比熱比、 R はモルあたりの気体定数である。 α は熱適応係数と呼ばれるものであり、壁面の清浄度とガスの種類に依存する。窒素の場合ならば $0.7 \sim 0.8$ 程度である。式 (1) からわかるように伝熱量は圧力に比例するので、高真空状態ならば熱伝達の影響はほぼ問題にならない。

ただし、真空中でもふく射、すなわち電磁波の形で熱は伝わる。これを低減するためふく射シールドと図 2 に示すような多層断熱材 (Multi Layer Insulation: MLI) が用いられるのが一般的である。通常、ふく射伝熱は式 (3) で示される。

$$Q_{\text{rad}} = \sigma A \frac{\varepsilon}{2 - \varepsilon} (T_H^4 - T_L^4) \quad (3)$$

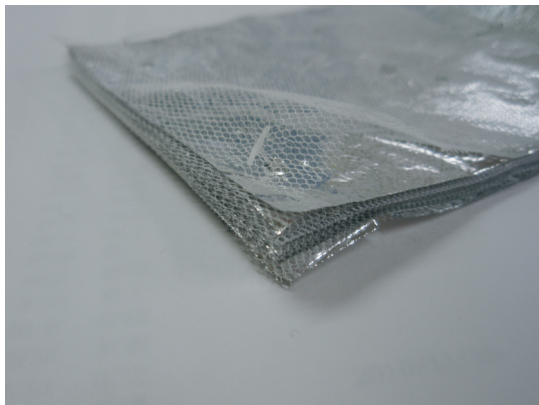


図 2 多層断熱材 (MLI) の一例

なお、 A は表面積、 ε はふく射率、 σ はステファノーボルツマン定数である。式 (3) で示されるように温度の 4 乗の差に比例し、熱伝導とは異なり距離に依存しない特徴がある。そのため、高温端と低温端の間に中間層を置くごとに伝熱量を大幅に低減できる。金属の薄板でできた中間層がふく射シールドと呼ばれるものであり、アルミ蒸着フィルムを積層したものが MLI である。MLI は層密度が高いものの、各層が接触しているため熱伝導による伝熱を招いてしまう。そのため超電導コイル周りにふく射シールドを配置し両者を非接触に保ち、さらにその周りを MLI で覆うのが一般的な構成である。

コイルを支える荷重支持材や電流リードなど真空容器とコイルにつながる構造物を介しての熱伝導に対しては、材料を工夫することにより断熱性を高めている。荷重支持材には、高強度かつ熱伝導率の低い FRP 材がよく用いられる。熱伝導率は温度依存性があるため、極低温の試験装置のように温度差が激しいときは式 (4) に示すように熱伝導率 λ の温度積分値から伝熱量 Q_{cond} を求める。 S は断面積、 L は伝熱方向の長さである。

$$Q_{\text{cond}} = \frac{S}{L} \left(\int_{T_L}^{T_H} \lambda dT \right) \quad (4)$$

3. 試験方法

3.1 試験装置概要

図 3 と図 4 に今回用いた保冷試験装置の模式図と外観写真を示す。本装置は熱特性を評価することが目的であるので、実際の超電導コイルではなく、その熱容量と表面積を再現した銅の剛体 (以下、ダミーコイル) が用いられている。

冷却には 2 段 GM 冷凍機を用いており、冷熱の発生する 2nd ステージ部分にはアルミ製のフレキ板が取り付けられている。フレキ板の片端にはマルチラムと呼ばれるコネクタが取り付けられている。本来マルチラムは大電流用のコネクタであるものの、これを熱スイッチとして用いている。マルチラムのソケットがふく射シールドおよびダミーコイルに取り付けられており、真空容器上部のハンドルを操作することにより冷凍機とふく射シールド、ダミーコイルの接触、非接触が切り替え可能な機構になっている。その他試験装置の仕様を表 1 および 2 に示す。

なお、本試験装置は磁気浮上式鉄道用超電導磁石の約 1/3 のスケールとなっている。そのため、熱容量は実機と比較して 1/3 の 3 乗、ふく射伝熱量は表面積に比例するため 1/3 の 2 乗となっている。熱侵入の比率を保つため熱伝導に関しても実機の 1/3 の 2 乗になるよう設計されている。このように熱容量と熱侵入量の比は実機とは同じではないので、実機における保冷能力は本試験装置の約 3 倍になると予測される。

表1 ダミーコイルとふく射シールドの仕様

	重量 [kg]	表面積 [m ²]	材質
ダミーコイル	9.28	0.33	無酸素銅
ふく射シールド	1.86	0.6	アルミニウム (A1050)

表2 荷重支持材の仕様

重量 [kg]	断面積 [mm ²]	高さ [mm]	数量	材質
0.26	239	160	4	アルミナ FRP

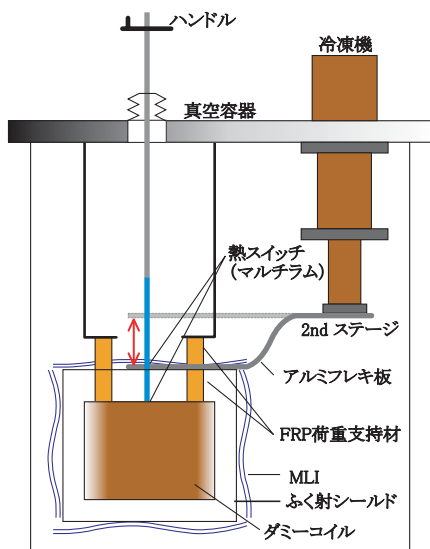


図3 保冷試験装置模式図

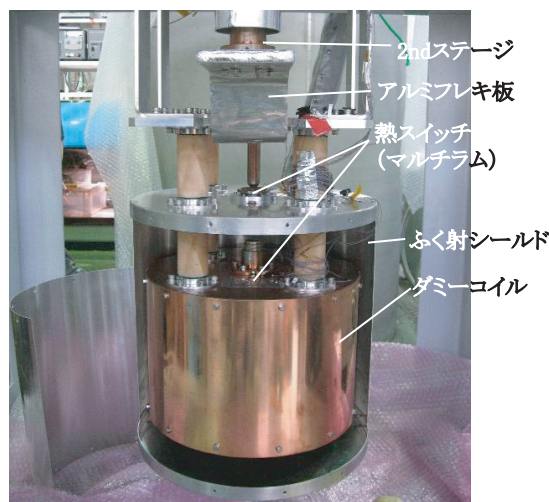


図4 保冷試験装置外観

3.2 試験装置解析モデル

本研究では冷却系分離時の昇温特性を予測するため数値解析を行っている。解析では真空容器—ふく射シールド—ダミーコイルの系を想定している。真空容器は300Kで温度一定とし、ふく射シールドとダミーコイルは初期温度20Kとした。また、真空度は十分に高いもの

とし、熱侵入はふく射および荷重支持材からの熱伝導のみを考慮した。温度上昇は緩やかであることが予想され、なおかつ熱伝導率が高い材料でできていることからシールドおよびダミーコイルは温度分布を持たないと仮定した。

ふく射および熱伝導による伝熱量は式(3)および(4)から求めることができるものの、MLIを介してのふく射に関しては熱伝導の効果も加わるため計算が困難である。そのため、式(5)に示すように、過去の試験結果等で得られた300Kから77Kの伝熱量を基本として温度差の4乗に比例するようにモデル化した。 α は300Kから77Kにおける単位面積当たりの伝熱量（実験値）である。

$$Q_{MLI} = A\alpha \frac{(T_H^4 - T_L^4)}{(300^4 - 77^4)} \quad (5)$$

4. 保冷能力評価試験

4.1 数値解析との比較

図5に実験と解析によるダミーコイルとふく射シールドの冷却系分離後の昇温カーブを示す。保冷能力の評価基準として、本研究ではコイル温度が20Kから50Kに至る時間を保冷時間と定義している。ガス伝導を考慮しない解析では保冷時間は約6時間に対し、実際には3時間強と半分程度になっている。温度上昇の特徴として、はじめは両者とも似た傾向を示していたものの、2時間を過ぎたところから実際のコイル温度は急激に上昇している。ふく射率や熱伝導率、比熱等の物理量は温度依存性を持っているが、これほど急激な温度上昇を熱物性の面から説明することはできない。

図5には温度カーブに加えて真空容器内の圧力変化が示されている。コイル温度が急上昇するタイミングは圧力の上昇と一致しており、真空度の悪化によるガス伝導が原因であると考えられる。式(1),(2),(3),(4)からそれぞれの伝熱形態におけるコイルへの伝熱量を見積もることができ、一例として冷却系分離後3時間の各伝熱量はガ

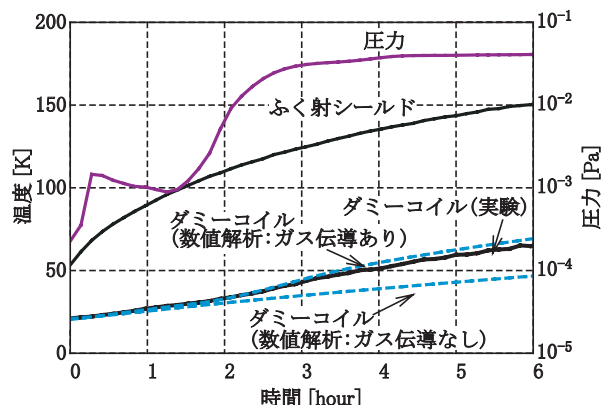


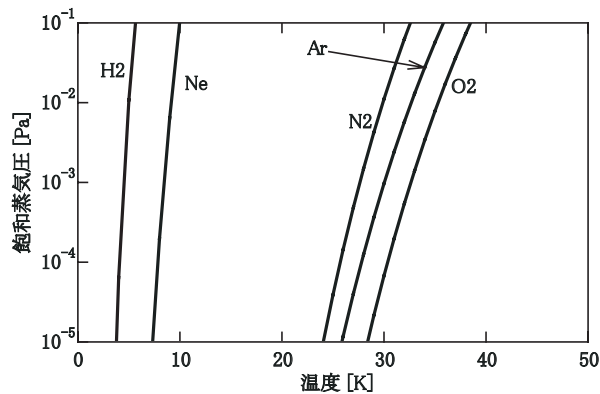
図5 保冷試験時のダミーコイル、ふく射シールド温度および圧力変化

特集：浮上式鉄道技術と在来鉄道への応用

ス伝導 1.5W, 荷重支持材からの熱伝導 0.48W, ふく射 0.18W となる。この条件下ではガス伝導が支配的であり、解析ではこの効果を考慮しなかったため保冷時間に大きな隔たりが現れたと考えられる。得られた圧力変動をもとに、ガス伝導の効果を考慮した解析を行ったところ図5に示すようにほぼ実験結果と一致した。

4.2 ガス伝導のプロセス

実験時の真空度の悪化を調査した結果、真空度の悪化はコイル温度が30K近傍にさしかかったところで起きることが判明した。30Kは重要な意味を持っており、図6に示すように窒素、アルゴン、酸素、など空気を主体とするガスの飽和蒸気圧が上昇する温度域である。すなわち、冷却完了時にはクライオポンプ効果（冷却面に気体分子が凝縮する現象）によりコイルに付着していた気体分子がコイル温度の上昇に伴い放出されたとすれば急激な圧力上昇の説明ができる。

図6 飽和蒸気圧の温度依存性⁷⁾

4.3 活性炭を用いた断熱向上

ガス伝導を低減するには真空度自体を高める必要がある。容器内に放出されるアウトガスは真空容器、断熱材、樹脂材料などから発生するといわれている。事前に長時間の真空引きを行ったり、ベーキング（加熱することによりアウトガスをたたき出す手法）によってアウトガスの発生量を減らすことは可能である。ただし、これらの手法の効果は定量的な評価が難しく、さらに超電導磁石の構成によってはベーキングを行うことができない場合もある。

そこで、吸着剤として広く用いられている活性炭を試験装置内部に設置することにより真空度の改善を試みた。活性炭は表面に小さな凹凸が無数にあるため表面積が極めて広く、物理吸着によって様々なガスを吸着することが知られている。物理吸着は可逆過程であり温度依存性があるため、定期的に超電導磁石を昇温して真空引きを行えば繰り返し使える見込みもある。

ただし、活性炭は古くから低温機器において用いられ

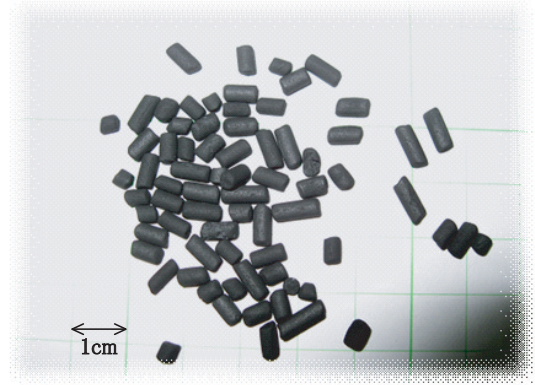


図7 実験に用いた活性炭

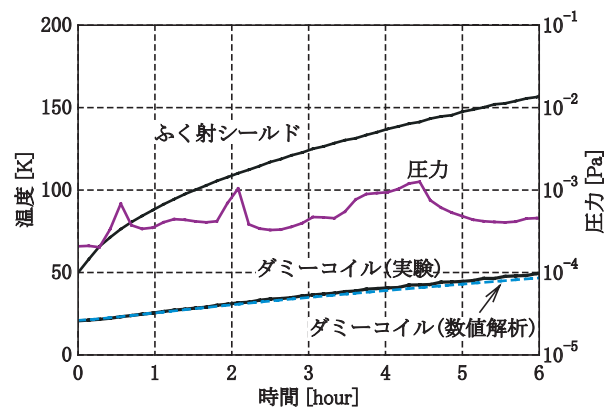


図8 活性炭を用いた保冷試験時の温度、圧力変化

ているものの、多くは10K以下の温度における水素の吸着材としてである。そのため、20～50Kの温度域で窒素など空気を主体とするガスに対して、活性炭を用いた例は少なくデータも不足している。よって本研究では試験的に図7に示すようなペレット状の活性炭100gをダミーコイルに設置して、効果を検証した。活性炭を配置したときの保冷試験結果を図8に示す。

冷却系分離から6時間にわたって真空度はほぼ 10^{-3} Pa以下を維持しており、活性炭の効果が明確に現れる結果となった。式(1),(2)からガス伝導による伝熱量を見積もとると、 10^{-3} Pa以下ならば0.1W以下であり、ふく射や熱伝導に対して小さく、ほぼ影響しない程度である。そのため、事前に行った数値解析とコイル温度はよく一致しており、保冷時間も3時間から6時間へと大幅に改善された。これは磁気浮上式鉄道用の超電導磁石サイズに換算すれば、保冷時間は3倍になり、18時間の保冷が可能であると考えられる。

本研究は冷却系を分離しての超電導磁石運用という特殊なケースのためガス伝導が問題になったものの、通常の伝導冷却HTS磁石においても運用温度しだいではガス伝導について考慮する必要がある。特に大型の超電導機器ならば冷却コストに直結する大きな問題である。活性炭が真空度の改善に有効なことは明確であるものの、吸

着可能なガスの種類と量、温度依存性など不明確な部分が多いので、アウトガスの特性や活性炭の吸着能力の評価は今後の研究課題である。

5. 保冷剤評価試験

5.1 極低温領域における保冷剤

保冷能力の改善には二通りの手法があり、一つは第4章で示したような熱侵入自体を低減する方法、もう一つは熱容量を追加、すなわち比熱の高い物質を保冷剤として用いる方法である。

図1に示したように、固体窒素は極低温において極めて比熱が大きく保冷剤としては魅力的である。加えて、35K付近で比熱のカーブが不連続になっており、これは結晶構造の転移に伴うものである。このときの潜熱も利用できれば非常に高い保冷効果が期待できる。ただし、窒素が気化した場合に備えて安全弁などの配管類が必要である。固体窒素が昇華して冷却対象との接触面が減少するドライアウトと呼ばれる現象も報告されており⁸⁾、取り扱いが容易ではないのが難点である。

一方、水 (H_2O) では比熱は固体窒素には及ばないものの、銅やアルミなどの金属材料に比べれば十分に大きい。取り扱いが極めて簡単であり、配管類も不要なので容器に水を取めて所定の箇所にだけ取り付けただけでよい。水から氷へ相変化する際の膨張が課題であったものの、容器内に10%強の空隙を持たせるか柔軟性のある容器に入れることで解決できることが事前の実験により確認されている。

このほかに固体ネオンも熱容量が大きいことで知られているが、高価であることから人工衛星のセンサ冷却などにしか用いられていない。

これらの特性を踏まえ、今回は最も取扱の容易である水を保冷剤として試験することとした。

5.2 保冷剤として水を用いた保冷試験

氷の設置箇所にはコイルとふく射シールドの二か所が考えられる。コイルに置いた場合では熱侵入量自体はほぼ変わらず、熱容量が増加する。ふく射シールドへの配置では、コイル熱容量は変わらないものの、シールドの温度上昇を抑えることができ、結果的にコイルへの熱侵入を低減できる。これら設置場所による保冷効果を評価するため、1kgの水をコイルに配置した場合と、シールドに配置した場合の保冷試験を行った。なお、相変化に伴う破損を防ぐため、ラミネートフィルムでできた氷容器を用いた。ふく射シールドの重量が約2kg、ダミーコイルが9kg強であるので、全体に占める氷の容量は僅かである。装置の構成と氷の設置場所を図9に示す。なお、これらの試験では第4章で示した活性炭をガス伝導対策

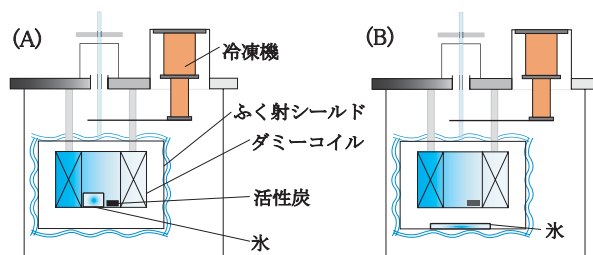


図9 氷の配置 (A) ダミーコイル (B) ふく射シールド

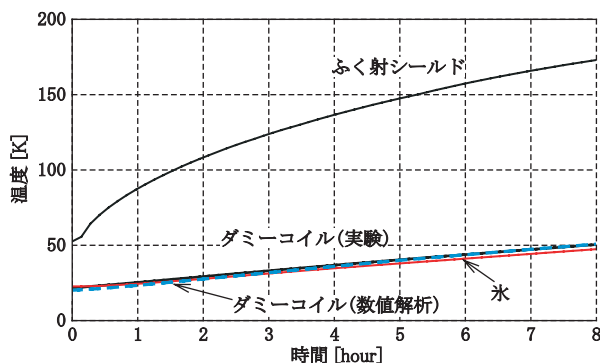


図10 ダミーコイルに氷を設置した際の保冷試験結果

に用いている。

図10にダミーコイルへ氷1kgを取り付けたときの保冷試験結果を示す。氷容器にも温度計が付けられているので、コイル、シールド温度に加えて氷の温度も示す。

氷とダミーコイルの温度差は極めて小さく、両者の熱伝導は十分であることを示している。破線で示したコイル温度の解析値と実験結果はよく一致しており、解析では氷が温度分布を持たないと仮定している。氷の冷熱がむらなく保冷に利用されていることがわかる。保冷時間は氷なしのときの6時間から8時間弱へ延長された。磁気浮上式鉄道用の超電導磁石サイズに換算すれば24時間の保冷が可能であることを示唆している。磁気浮上式鉄道への適用を想定すると、夜間超電導磁石の冷却を行い、日中冷却系なしでの運用になると考えられ、これを実現するには十分な保冷能力であるといえる。

次にふく射シールドに氷を配置したときの結果を図11に示す。保冷時間はコイル取り付け時と同様に8時間であった。しかし、氷とシールドの温度差は最大で約20Kになっている。シールド上面に温度計が取り付けられているのに対し、氷はシールド底面に位置しているため、シールド壁面で温度差が付いてしまったと考えられる。温度差が存在すればその分だけ氷の冷熱が保冷に利用されないことになるので、氷の設置場所については改善の余地がある。加えて、熱スイッチの抵抗が予想よりも大きかったためシールド初期温度も50Kと高めであり、低温域での氷の冷熱を十分に活かしきれていない。

今回の試験では氷の設置場所による保冷時間の改善は同程度であったものの、ふく射シールドへの設置では改

特集：浮上式鉄道技術と在来鉄道への応用

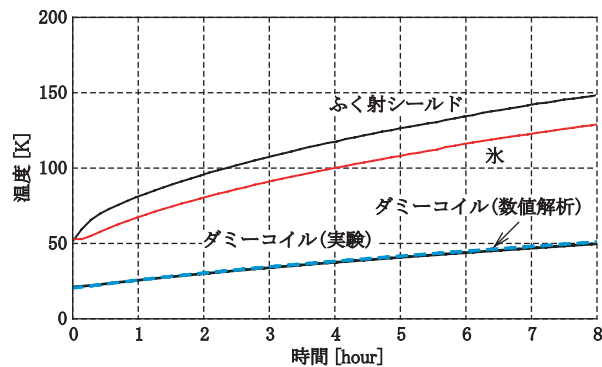


図11 ふく射シールドに氷を設置した際の保冷試験結果

善の余地が大きいので、今後の改良次第では熱容量体の設置場所にはシールドが適していると考えられる。

6. まとめ

本研究は HTS 磁石から冷却系を分離して、HTS 磁石の熱容量だけで極低温を維持し、超電導磁石としての運用が可能であるかの検証を目的としている。実験には超電導コイルの熱物性を模倣した銅の剛体でできたダミーコイル (9kg) とふく射シールド (2kg) からなる保冷試験装置を用いて保冷能力の評価、改善を行い、以下の結論が得られた。図12には本試験装置を用いた保冷試験結果のまとめを示す。

- (1) 冷却系切り離した後、ダミーコイルの温度上昇に伴い真空容器内の真空度が悪化し、アウトガスによって熱侵入が促進されることが明らかになった。ガス伝導の低減には活性炭の超電導磁石内部への設置が有効であり、他のふく射や熱伝導と比較して、十分に小さい熱侵入量に抑えることができた。
- (2) 低温で比熱の大きい氷 (H_2O) を保冷剤として用いたところ、ダミーコイルとふく射シールドと比較して僅かな重量 (1kg) でも保冷能力の改善が確認された。氷の設置場所にはコイル、ふく射シールドの二か所が試され、いずれも保冷剤の取り付け場所として十分に機能することが確認された。ただし、シールドへの氷取り付けの場合、初期温度が高めであり、シールド-氷間の熱抵抗も大きかったので改善の余地がある。

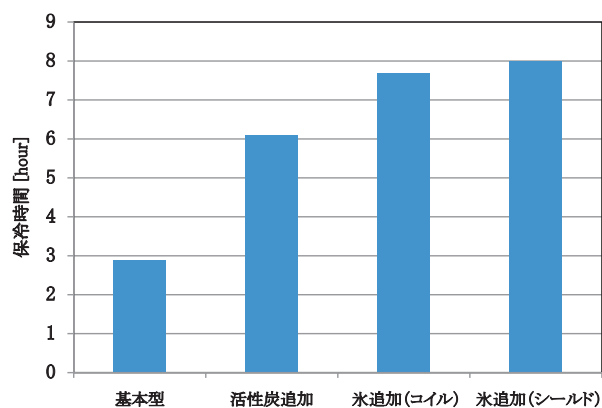


図12 保冷時間 (20K ~ 50K) まとめ

能することが確認された。ただし、シールドへの氷取り付けの場合、初期温度が高めであり、シールド-氷間の熱抵抗も大きかったので改善の余地がある。

- (3) 試験装置のスケールを考慮して、磁気浮上式鉄道用の超電導磁石サイズに換算すれば、最大24時間に及ぶ保冷時間 (20K ~ 50K) が実現可能であると考えられる。これは夜間超電導磁石の冷却を行い、日中冷却系なしでの運用が十分に可能な保冷能力である。

7. 今後の展開

本研究では活性炭と氷を用いることにより超電導磁石の保冷特性を大幅に改善することができた。しかしながら、活性炭のアウトガスの吸着能力に関しては不明確な点も多く、実際の超電導磁石に活性炭を実装する際の指針を立てるためにも、活性炭およびアウトガスの特性を調査する必要がある。

また、さらなる保冷能力の改善を目指すには保冷剤として、例えば固体窒素のようなより比熱の高い物質も視野に入れる必要があるので、そのための要素技術の研究も予定している。

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

文 献

- 1) M. Ogata, Y. Miyazaki, H. Hasegawa, T. Sasakawa and K. Nagashima, "Basic study of HTS magnet using 2G wires for maglev train," Physica C, Vol.470, pp.1782-1786, 2010.
- 2) H. Ohsaki, "Impact of High-Temperature Superconductors on the Superconducting Maglev," Proc. of Maglev 2008, No 92, 2008.
- 3) W.F. Glauque and J.W. Stout, "Entropy of water and the third law of thermodynamics. The heat capacity of ice from 15 to 273° K," J. Am. Chem. Soc, Vol.58, pp.1144-50, 1936.
- 4) Scott TA., "Solid and liquid nitrogen," Phys Rep, Vol.27(3), pp. 89-157, 1976.
- 5) 小方正文, 水野克俊, 荒井有気, 長谷川均, 笹川卓, 長嶋賢: 冷却システムと励磁電源が分離可能な RE 系モバイルマグネット, 第82回2010年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, pp.196, 2010
- 6) 社団法人 低温工学協会編: 超電導・低温工学ハンドブック, オーム社, pp.347-348, 1993
- 7) 同6), pp.1036-1037
- 8) T. Nakamura, K. Higashikawa, I. Muta, A. Fujio, K. Okude and T. Hoshino, "Improvement of dissipative property in HTS coil impregnated with solid nitrogen," Physica C, Vol.386, pp.415-418, 2003.