

# 希土類系高温超電導線材を用いた 浮上式鉄道用超電導磁石の構成

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

## Study on Component of Superconducting Magnet for Maglev Using High-temperature Superconducting Wire Based on Rare Earth Barium Copper Oxide

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

The use of a high-temperature superconducting wire in an on-board superconducting magnet for the maglev train has several advantages. Therefore, we performed a numerical analysis to calculate the mass of the superconducting magnet and the energy consumption of the on-board cryocooler taking into consideration the characteristics of high-temperature superconducting wires based on rare earth barium copper oxide. Consequently, we obtained the conclusion that enables to constitute the superconducting magnet for maglev even with performance of the present commercial wire. Moreover, we expect to reduce both the superconducting magnet's mass and manufacturing costs by the future improvement in performance of the wire.

キーワード：希土類，高温超電導，線材，保冷，超電導磁石

### 1. はじめに

2011年は超電導現象が発見されてちょうど100年であり、現在、希土類系（RE系）高温超電導線材の開発が著しく進展しつつある。臨界電流値（ $I_c$ ）および製造可能な線材長も向上しており、近い将来、液体窒素温度で500 A/cm-w（1cm幅のテープ線材の臨界電流を表す単位）を超える $I_c$ を有し、1000mの線材長を超える線材の供給が始まることが確実と考えられる。この線材はこれまで様々な超電導機器に適用されてきたビスマス系（Bi系）高温超電導線材に比べて、高温、高磁場中での臨界電流密度が大きいこと、高強度であること、銀を使わないため低コスト化の見込みがあることなどの特長があるとされている。著者らは、このような線材の特性を活かせば、軽量で信頼性の高い浮上式鉄道用超電導磁石が構成可能であると考え、浮上式鉄道用超電導磁石への適用検討を行っている<sup>1)</sup>。

### 2. 高温超電導磁石構成の考え方

高温超電導線材を用いると、これまでの超電導磁石で用いていた液体ヘリウムを使用する必要がなくなるので、以下に述べる複数の冷却方式が選択できる。

\* 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）

#### 2.1 2段冷凍機による伝導冷却方式

冷却温度が4.2Kから30Kに変わるだけで、超電導コイルの熱的安定性は向上し、車載冷凍機の質量や消費電力が低減される見込みもある。この場合の超電導磁石は図1の構成が考えられる。2段冷凍機を用い、冷凍機の1段ステージで輻射熱シールド板（以下ではシールド）を冷却し、2段ステージで超電導コイルを冷却する方式である。

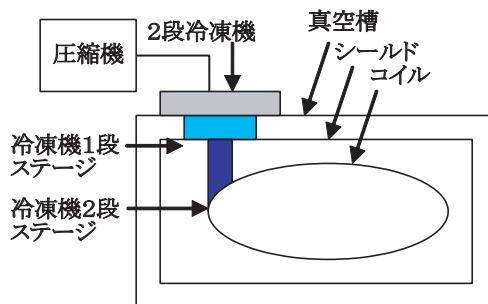


図1 2段冷凍機で冷却する高温超電導磁石の模式図

#### 2.2 単段冷凍機による伝導冷却方式

希土類系高温超電導線材の特徴である、高温・高磁場中での大臨界電流密度を活かす別の展開もありうる。例えば運転温度を50K程度まで上昇すれば、下記のような利点が考えられ、これまでの超電導磁石システムを大幅に変更できる可能性がある。

- ・単段冷凍機で冷却できる（ニオブチタン線材を用いた

特集：浮上式鉄道技術と在来鉄道への応用

従来のシステムでは、2段予冷機とジュールトムソン回路を組み合わせた冷凍機を用いている。

- ・超電導コイルのシールドが省略できる。
- ・断熱構造が簡略化できる。

これにより超電導磁石クライオスタット断面の小面積化が可能となるので、質量や製造コストの大幅低減が期待できる。この場合の超電導磁石は図2の構成が考えられる。この磁石は図1に示した超電導コイルを囲んでいたシールドが無い分、超電導コイルが地上コイルに近づくことができるので、地上コイルに鎖交する超電導コイルの磁束量が増大し、浮上式鉄道全体システムに対して下記の利点が考えられる。

- ・浮上力特性が向上し、浮上開始速度が低減できる。
- ・車両走行時の地上コイル電流が低減できて省エネになり、地上コイルの寿命が伸びる。

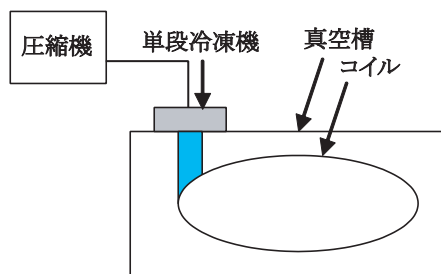


図2 単段冷凍機で冷却する高温超電導磁石の模式図

2.3 冷凍機非搭載方式

磁石の温度が50Kになると熱容量が飛躍的に増大する。例えば銅の比熱と比較すると、50Kでは4Kの約1000倍となる。逆に言えば、同じ熱侵入であればコイル温度の上昇が1/1000ですむため、1日程度であれば冷凍機を車上に搭載せず、コイル部の熱容量により走行時の保冷を行うなどの運用も考えられる。その場合、夜間は車両基地等で地上設備の大型冷凍機により、20K程度まで磁石の冷やし込みを行い、昼間の走行時に50K以上にならないような熱設計を行えばよい。この時、20K～50Kの温度領域での熱侵入を低減する必要があるためシールドは必須である。その場合、超電導磁石は図3に示す構成が考えられる。

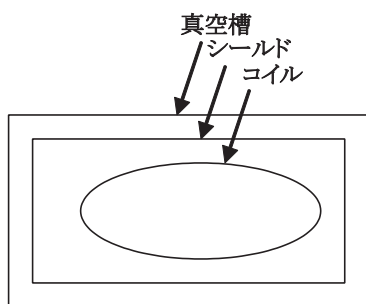


図3 冷凍機を搭載しない高温超電導磁石の模式図

この構成では車載冷凍機が無いので、大幅な質量低減や車上の消費電力の大幅な低減が可能となる。また、高压ガス関連機器を車上に搭載しないですむため、高压ガス保安法に抵触しなくなることで、台車の軽量化が進むため、乗り心地が向上すること、などの副次的な利点も考えられる。

3. 車載冷凍機の検討

高温超電導線材の導入により期待できる効果を、磁石質量の低減、並びに車載冷凍システムのエネルギー消費を数値化して議論する。中でも超電導磁石の質量でコイル温度に依存するのは、主に冷凍システムと超電導コイル巻線である。そこで本研究では特にこの2点に注目して測定データや文献データから超電導磁石質量見積りを行い、そのコイル温度依存性を求めた。

3.1 質量および消費電力の計算方法

一般に同じ冷凍能力であれば、冷凍システムは冷却温度が上昇するにつれて質量が減少し、また質量と消費電力は比例関係にあるとされている。Nisenoffは、多くの市販冷凍機の実例を調べ、図4のように冷却温度と冷凍能力が決まれば、冷凍機の消費電力と質量を定量的に近似できるよう整理されたデータを報告している<sup>2)</sup>。著者らはこの結果を回帰分析することで、温度20Kから77Kの間で使用できる以下の計算式を作成した<sup>1)</sup>。

$$Q_{in} = 111943 \times Q_{out}^{0.8437} \times T_{op}^{-0.0247 \log Q_{out} - 1.7332} \quad (1)$$

$$M = Q_{in} / 20 \quad (2)$$

ここで、 $Q_{in}$ は冷凍機の消費電力(W)、 $Q_{out}$ は冷凍能力(W)、 $T_{op}$ は冷凍機の冷却温度(K)、 $M$ は圧縮機を含む冷凍機の質量(kg)である。

上式から求められる数値は、一般の市販冷凍機のデータを元にしており、浮上式鉄道用に開発したものは、さらに軽量かつ高効率な冷凍機となる可能性も高い。

一方、車載冷凍機に必要な冷凍能力は、超電導磁石内部への熱侵入量から決定される。熱侵入量の主要な要素は3つあり、放射熱 $Q_{rad}$ 、荷重支持材からの伝導熱 $Q_{cond}$ 、お

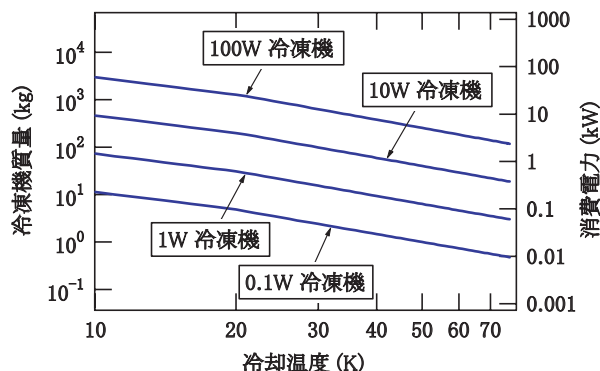


図4 市販冷凍機の質量および消費電力調査結果<sup>2)</sup>

よび超電導コイルの電流リードからの侵入熱 $Q_{PL}$ である。

ここでは高温超電導コイルの運用温度を20Kから65Kまでの範囲で変えることを考え、それぞれの場合に必要な冷凍システムの質量および消費電力を計算した。図1の様に従来通りシールドがある場合（2段冷凍機伝導冷却方式）と、図2の様に磁石構造の簡素化のためにシールドを省略した場合（単段冷凍機伝導冷却方式）について検討した。計算条件として下記のような仮定を置いた。

- 2段冷凍機伝導冷却方式では冷凍機の1段ステージでシールドを77Kに冷却するものとする。冷凍機の2段ステージは高温超電導コイルを冷却する。シールドへの熱侵入としては、室温300Kからの荷重支持材の伝導熱 ( $Q_{cond}^{300K-77K}$ ) およびシールド表面への放射熱 ( $Q_{rad}^{300K-77K}$ )、金属製電流リードからの侵入熱 ( $Q_{PL}^{300K-77K}$ ) を加算した。高温超電導コイルへの熱侵入としては、77Kのシールド部分からの荷重支持材の伝導熱 ( $Q_{cond}^{77K-TopK}$ ) およびコイル表面への放射熱 ( $Q_{rad}^{77K-TopK}$ )、高温超電導リード<sup>3)</sup>からの侵入熱 ( $Q_{HTSPL}^{77K-TopK}$ ) を加算した。実質的には $Q_{HTSPL}^{77K-TopK}$ は無視できるほど小さい。これらを合算して冷凍機の合計消費電力を求めた。式で表すと下式のようになる。(5)式の右辺は冷凍機の消費電力 $Q_{in}$ を必要な冷凍能力 $Q_{out}$ と冷却温度 $T_{op}$ の関数として表現した。また(2)式から合計質量を計算した。

$$Q_{out}^{shield} = Q_{rad}^{300K-77K} + Q_{cond}^{300K-77K} + Q_{PL}^{300K-77K} \quad (3)$$

$$Q_{out}^{coil} = Q_{rad}^{77K-TopK} + Q_{cond}^{77K-TopK} + Q_{HTSPL}^{77K-TopK} \quad (4)$$

$$Q_{in} = Q_{in}^{1st}(Q_{out}^{shield}, 77) + Q_{in}^{2nd}(Q_{out}^{coil}, T_{op}) \quad (5)$$

- 単段冷凍機伝導冷却方式では冷凍機の1段ステージで高温超電導コイルを冷却する。高温超電導コイルへの熱侵入としては、室温300Kからの荷重支持材の伝導熱 ( $Q_{cond}^{300K-TopK}$ ) およびコイル表面への放射熱 ( $Q_{rad}^{300K-TopK}$ )、金属製超電導リードからの侵入熱 ( $Q_{PL}^{300K-TopK}$ ) を加算した。式で表すと下式のようになる。

$$Q_{out}^{coil} = Q_{rad}^{300K-TopK} + Q_{cond}^{300K-TopK} + Q_{PL}^{300K-TopK} \quad (6)$$

$$Q_{in} = Q_{in}(Q_{out}^{coil}, T_{op}) \quad (7)$$

### 3.2 質量および消費電力の計算結果

図5が計算結果である。左軸に質量、右軸に消費電力を示している。いずれのケースでもコイルの冷却温度が上昇するに従って質量と消費電力は低減されるが、2段冷凍機伝導冷却方式では単段冷凍機の場合に比べてその傾向が緩やかになる。これは、消費電力も質量も(5)式の右辺第1項の全体に占める比率が大きいため、温度異存性が小さく見えるからである。一方で、単段冷凍機伝導冷却方式は温度異存性が大きいため、低温領域では冷

凍システムが大きくなってしまふものの、液体窒素温度に近づくにつれ、2段冷凍機伝導冷却方式の値に近づく。

ここでの検討では単段冷凍機伝導冷却方式は2段冷凍機伝導冷却方式に比べて数値的なメリットが見えない。しかし、超電導磁石全体を考えた場合、シールドを省略して地上コイルとの実空隙が低減すると、同じ浮上力であれば起磁力低減が可能となるので、コイル質量低減、線材コスト低下にもつながる可能性がある。

また、単段冷凍機としては開発を進めてきたアクティブバッファ型パルス管冷凍機<sup>4)</sup>が適用しやすい。パルス管冷凍機は現在最も普及しているギフォード・マクマホン冷凍機の低温ディスプレイサのかわりにパルス管(ステンレス製の管)があるだけで、低温部に動作部品を持たず、機器の信頼性、メンテナンス性も高い。車載冷凍機として使用する場合には図6のような構成を考えられる。破線で囲んだ筒状の冷凍機部分に圧縮機からガスを供給すると、筒中央の冷却部が冷える構造なので、浮上式鉄道用超電導磁石への組み込みに適している。また、冷凍機部は単純な構造なので、図のように複数の冷凍機を1台の圧縮機と組み合わせて運転を行うことも可能であり、車上の艱装性も良い。現在、50Kで100kW級の冷凍機を開発中である<sup>4)</sup>。

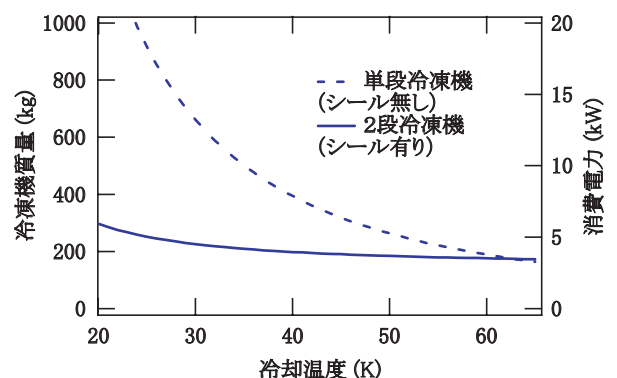


図5 浮上式鉄道用超電導磁石の車載冷凍機の質量および消費電力(計算値)

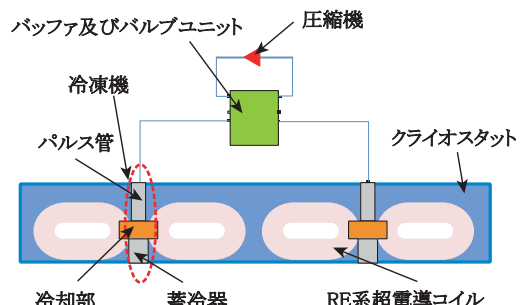


図6 浮上式鉄道用超電導磁石に単段パルス管冷凍機を組み込む構成

## 4. 超電導コイルの検討

### 4.1 線材の臨界電流特性

ここ数年、高温超電導線材の製造技術も著しく進展

特集：浮上式鉄道技術と在来鉄道への応用

し、メーカ、研究機関、大学等により臨界電流値 ( $I_c$ ) あるいは臨界電流密度 ( $J_c$ ) などの最高値が逐次更新され、着実な進歩を遂げている。しかし、そのような特性を有する線材が市販製品になるまでには数年かかるようである。一方、現状で入手可能な市販の高温超電導線材の性能については、メーカから自己磁場中、かつ液体窒素温度 (77K) での臨界電流値のデータは提供されるものの、外部磁場中あるいはより低温における臨界電流値はわからないのが現状である。実際にコイル製作を検討する際には、巻線に用いる線材のデータを正確に把握しておく必要がある。

そこで温度 (10K ~)・磁場強度 (~5.5T)・磁場角度 (0~95°) 等をパラメータとして、市販線材の臨界電流特性を把握するために高温超電導線材評価試験装置を開発して、入手可能な複数の RE 系線材評価を行っている<sup>5)</sup>。この装置はさらなる改良を行い、超音波モータの適用により、磁場角度を低温状態で任意の角度に変更する機能を追加したので、線材評価速度が向上している。

図7に本試験装置で取得した代表的なデータを示す。この線材は Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) 法により製造された線材 (幅 4.1mm, 厚さ 0.1mm) であり、磁場 B や磁場角度依存性が大きい。グラフ中には線材の超電導結晶の c 軸に平行に磁場を印加した場合 (B//c 軸: 実線) と、ab 面に平行に磁場を印加した場合 (B//ab 面: 破線) のデータを示している。なお、c 軸と磁場のなす角度については、0°, 30°, 45°, 60°, 90° で測定した。

その結果、角度が増大するにつれて  $I_c$  が単調に増大する傾向が確認された。この線材については磁場強度が一定であれば、B//c 軸の  $I_c$  が最小で、B//ab 面の  $I_c$  が最大となる。また、低温では実線と破線の違いは大きい、高温になるほどその違いは小さくなる傾向がわかる。これら

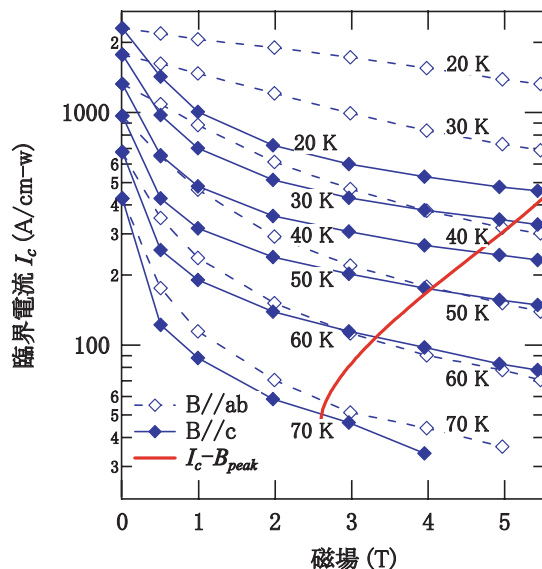


図7 市販希土類系高温超電導線材の臨界電流値 ( $I_c$ ) の温度、磁場、磁場角度依存性

のことから、この線材でコイルの設計をする際には、B//c 軸の  $I_c$  データ (実線) を用いてコイルの最大経験磁場から  $I_c$  を決めれば良い。

4.2 超電導コイルの質量検討

上記で測定した市販線材を用いて、浮上式鉄道で使用している NbTi コイルと同一の中心線形状を有する レーストラックコイルの質量見積りを行った。前提条件を表1に示す。コイル構造を 10mm 幅の線でパンケーキ巻きにした 6 つのコイルを積層する構造とし、起磁力が 700kA になるまでコイルの巻数を増やす方向で検討した。この時、コイル巻線断面に占める超電導線材の断面積比である占積率、 $I_c$  に対する運転電流の比率を負荷率として、設計に裕度を持たせた。計算で求めた、線材の  $I_c$  とコイルの最大経験磁場  $B_{peak}$  との関係を示したのが図7の右上がりの太い実線 ( $I_c - B_{peak}$ ) である。この線と線材の特性曲線の交点がそれぞれの温度におけるコイルの  $I_c$  値を示しており、実際のコイルの運転電流は  $I_c$  の 80% の値となる。

コイルの起磁力を求めた運転電流で除すことによってコイルのターン数を決定し、レーストラックコイルに必要な線材の長さを算出し、線材の比重を銅と同じと仮定して、超電導コイルに使用する線材の質量と運転温度の関係求めたものが図8の実線である。

超電導コイルは一つの磁石の中に4個入っており、その合計質量を縦軸にしている。質量は温度の上昇とともに増加しており、その傾向は高温になるほど大きい。従って、直接液体窒素でコイルを冷却するのはかなり困難と考えられる。

一方、最近では磁場中での臨界電流値を向上するために、超電導体部分に人工的な欠陥 (人工ピン) を導入した超電導線材も広く開発され、販売もされるようになった。これらの線材の臨界電流値を測定しているが、数年後には  $I_c = 500 \text{ A/cm-w}$  で 1000 m 長の線材も入手できるようになると言われている。そこで、今回は今後の可能性を調べ

表1 超電導コイル質量検討の前提条件

コイル形状	レーストラック型
コイル長軸 (コイル中心線)	1070 mm
コイル短軸 (コイル中心線)	500 mm
起磁力	700 kA
巻線方法	パンケーキ巻×6積層
コイル軸長 (厚さ)	66 mm
占積率	70 %
負荷率	80 %
(線材仕様)	
線材幅	10 mm
線材厚さ	0.1 mm
$I_c$ (77K, 自己磁場)	263A/cm-w

るために、米国のロスアラモス国立研究所 (LANL) で測定した短尺の高性能線材 ( $I_c = 550\text{A/cm-w}$ ) の  $I_c$  測定結果<sup>6)</sup>を用いて同じ条件で、コイル質量を計算した。その結果が図8の破線である。臨界電流特性が優れているため、温度領域によるが、市販線材に比べると100~200kg程度の軽量化が可能となることが分かる。

運転温度20K, 30K, 50Kの3つのケースについて、コイルの設計例を表2に示す。市販線材を用いる場合、必要な線材の長さは20Kで約5km, 50Kでは約14kmである。これに伴ってコイルの巻厚も20Kで39.5mm, 50Kで103.5mmとなっている。巻線断面積としては、66mm×100mmレベルは許容されると考えるので、コイルの大きさとしては50Kでもコイル製作は可能と考える。巻数の自乗に比例して自己インダクタンスが増大し、励磁消磁に支障を来す場合には複数本のテープ線材を並列に巻いて、自己インダクタンスを低減する事も可能である。1本の超電導線に直列に巻いた場合には、運転電流は50Kでは139Aとなっているが、4本の超電導線を並列に巻けば556Aとなり、自己インダクタンスも2H程度まで低減できる。

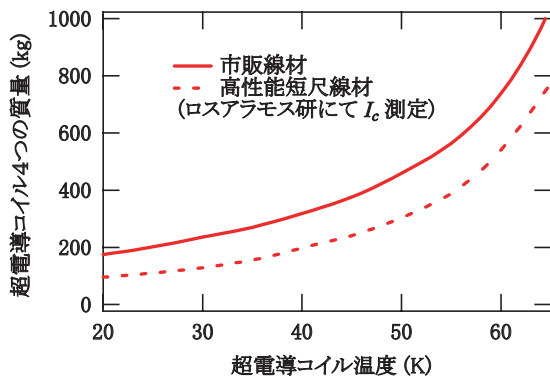


図8 浮上式鉄道用超電導コイルの質量 (計算値)

表2 高温超電導コイルの設計例

運転温度 (K)	20	30	50
巻厚 (mm)	39.5	53.1	103.5
総巻数 (Turn)	1921	2580	5034
通電電流値 (A)	364.4	271.3	139.1
最大経験磁場 (T)	5.6	5.1	4.0
インダクタンス (H)	5.6	9.7	31.8
線材長/コイル (m)	5207.8	6994.7	13646.3
コイル質量/4コイル (kg)	175.3	235.5	459.4

### 5. 超電導コイルと車載冷凍機の組合せに関する検討

4章に示した超電導コイルと冷凍機の質量の合計を示したものが図9である。温度が高くなれば増加傾向にあるコイル質量と、逆に温度が高くなれば減少傾向にある

冷凍機の質量との加算なので、ある温度で質量の最小値が見られる。単段冷凍機伝導冷却方式では市販線材のコイルを用いた場合、全体質量は40Kと50Kの間で最小値をとり、2段冷凍機伝導冷却方式では20Kと30Kの間で最小値をとる。一方、線材特性の優れた短尺試料線材の性能を用いてコイルを検討したケース(破線)では、単段冷凍機を用いた場合、2段冷凍機を用いた場合とも、合算値が最適値をとる温度が若干上昇している。これは、今後線材性能が向上するとコイル運用温度の最適値が向上することを示唆している。

図8と図9のデータを元に、2章で述べた3種類の磁石構成について検討する。

はじめに、2段冷凍機伝導冷却方式は、質量を重視すると20Kと30Kの間で使用するのが最適となる。30Kまで冷却すればコイル質量は235kgと軽量になり、冷凍機の質量、消費電力も20Kの場合より小さな値となるので、現状の線材特性でも十分実現性が高い。

次に、単段冷凍機伝導冷却方式は40Kと50Kの間で使用するのが適しているが合計質量、および冷凍機消費電力は2段冷凍機伝導冷却方式より大きな値になっている。ただし、3.2節で述べたように、シールド省略、外槽小型化による軽量化、これに伴って超電導コイルの起磁力低減効果、磁石構造簡略化によるコストの大幅低減等、ここに挙げた数値以外の大きなメリットが期待できる。今後、詳細な検討をする予定である。

最後に、冷凍機非搭載方式は冷凍機の質量は無いため、車両搭載質量としてはコイルの質量だけとなる。そのためこの方式は軽量化の可能性が高い。しかし、2.3節で述べたように、車両走行中はコイルの熱容量だけで低温を維持する必要があるため、コイル温度として熱容量が高い高温域、例えば50K程度を上限としてコイル設計をする必要がある。この上限温度を高く設定すれば保冷時間が増大し、低く設定すればコイル質量が軽量化され

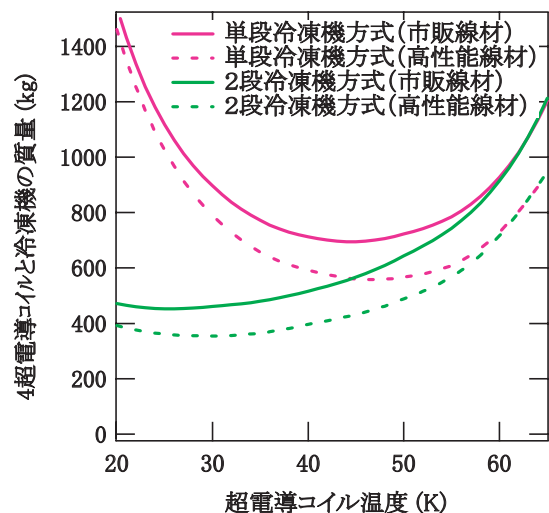


図9 超電導コイルと車載冷凍機の合計質量

## 特集：浮上式鉄道技術と在来鉄道への応用

ることになる。従って、磁石の保冷性能の正確な把握し、性能向上によって保冷時間を延長することで冷凍機非搭載方式の実現可能性も向上する。この方式が実現すれば、車載冷凍機消費電力ゼロとなるメリットも大きい。

冷凍機非搭載方式はかなり究極的な考え方であるが、この方式の検討で得られた知見は冷凍機伝導冷却方式の安全対策にも役立つ。この検証は冷凍機がトラブル等で停止した場合、どの程度の時間、超電導コイルが使えるかという磁石の冗長性検証そのものだからである。

著者らはこの冷凍機非搭載方式を基本に、保冷特性評価や小型の高温超電導磁石を開発している。詳細は本報告書の「希土類系高温超電導磁石の保冷特性評価試験」および「冷凍機無しで運用可能な希土類系高温超電導磁石」を参照されたい。

## 6. コスト検討

高温超電導磁石導入の実現性を議論するためには、コスト検討も非常に重要である。経済産業省の「技術戦略マップ」<sup>7)</sup>に高温超電導線材や冷凍機のコストについても記述があるので、これを元に検討する。まず、線材のコストについては、ここでは近い将来、線材の臨界電流および長さあたりの単価が1~3円/Amになることを予測している。77 K, 0 Tでの $I_c$  (今回検討している市販線材では263A/cm-w)を用いると30Kのコイルのコストが4コイル分で700万円~2000万円程度、50Kのコイルのコストは4コイル分で1400万円から4000万円程度と材料だけで非常に高価なものとなる。一方、冷凍機のコストは「技術戦略マップ」に、冷凍能力(W)あたりのコストとして示されている。これによれば、2010年時点で4K冷凍機は500万円/W、20K冷凍機は10万円/W、50K冷凍機は5万円/W、65K冷凍機は3.5万円/65Kなどとなっている。冷却温度が4Kから20Kに上昇するだけでコストが1/50に変化する。これだけのコスト変化を前提にすると、たとえ高温超電導線材のコストが上記のように大きくても、高温超電導線材を導入する意義は大きい。

## 7. まとめ

本研究では、高温高磁場領域での特性が優れた希土類系高温超電導線材を用いて、その特長を活かす超電導磁石構成を提案した。また超電導磁石を構成する要素の中で、超電導コイル冷却温度により、最も影響を受ける冷凍機とコイル本体について、実験データや文献値を用いて数値的な検討を行った。これらの結果をまとめると以下のようなことになる。

- (1) 冷凍機の質量は超電導コイルの冷却温度が上昇すると共に低減するが、超電導コイルの質量は逆に増大するので、これらを加算した値はある温度に最小値を持つ。
- (2) 超電導コイルと冷凍機の合計質量が最小値を持つ温度は、線材性能が向上するにつれて高温側に移行する。
- (3) 冷却温度、30K付近で使用する場合には2段式冷凍機による伝導冷却方式が最も軽量の磁石を構成できる。
- (4) 冷却温度を50Kなどの高温で運転する場合には、シールドを省略してコイルを単段冷凍機で冷却する方式、冷凍機を搭載せずコイル部の熱容量で低温を維持する方式等の、従来の磁石と大幅に異なる磁石構成が考えられる。前者はシールドが無いため、超電導磁石の構造を簡素化し、真空槽の質量を低減する効果がある。後者は、冷凍機を搭載しないため、その分の質量低減が可能であり、車上の冷凍機消費電力を無くせる等の効果も大きい。

現時点ではまだ線材のコストが高価なこともあり、今後は当面の目標として、小型ながら5Tの磁場を発生する高温超電導磁石の開発を進める予定である。

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) Nagashima, K. et al., "Preliminary Study of High-Temperature Superconducting Magnets Using 2G Wires" MAGLEV' 2008, pp.264-267, 2008.
- 2) Nisenoff, M., "CRYOGENIC REFRIGERATION: The Enabling Technology for Superconducting Electronics Applications" Proc. The 1999 International Workshop on Superconductivity, pp. 2-5, 1999.
- 3) 小方正文 他: 超電導磁石への高温超電導バルク体電流リードの適用, 鉄道総研報告, Vol.20, No.8, pp.11-16, 2006
- 4) 池田和也 他: 並列パルス管冷凍システムの開発, 2010年秋来低温工学会講演概要集, Vol.83, pp.108, 2010
- 5) 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
- 6) Holesinger and, T. et al., "Multi-Scale Characterization: Evaluation of Microstructural and Superconducting Properties Across Multiple Length Scales in 2nd Generation HTS Wire", presented at the U.S. DOE Superconductivity for Electric Systems Annual Peer Review, 2008, Washington DC.
- 7) 経済産業省編: 技術戦略マップ 2010, [http://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu\\_kakushin/kenkyu\\_kaihatu/str2010.html](http://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu_kakushin/kenkyu_kaihatu/str2010.html)