

希土類系高温超電導線材を用いた小型5テスラ超電導磁石の開発

浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

研究員 水野克俊

1. はじめに

高温超電導線材は従来のニオブチタン線材と比較して運用温度を大幅に高くできるため、冷却装置の効率が上昇し、消費電力の低減が期待される。高温、高磁場環境での通電特性に優れた次世代希土類系高温超電導線材を磁気浮上式鉄道に適用できれば、超電導磁石の冷却系およびその電源系を大幅に小型軽量化できる。ここでは、希土類系高温超電導線材の浮上式鉄道への適用可能性を実証すべく、実機と同等の磁場を発生する小型5テスラ超電導磁石を製作したので報告する。

2. 次世代高温超電導線材を用いた小型5テスラ超電導磁石の特徴

今回開発した超電導磁石は5 T(テスラ)の高磁場を40 Kを超える温度で発生することができる。本磁石は希土類系高温超電導線材からなる直径約130 mmの円形コイルを積層した構造であり、コイル形状こそ異なるものの、コイルの最大経験磁場は磁気浮上式鉄道用超電導磁石と同等であり、電流密度についても遜色ない値である。

このような高温での高磁場実現は希土類系高温超電導線材の磁場中での優れた通電特性に由来している。しかしながら、希土類系高温超電導線材が市販されるようになったのは近年であり、磁石への応用技術は十分に確立されていない。そのため、本超電導磁石開発に当たっては、希土類系高温超電導線材評価から始まり、磁場解析に基づくコイル設計、コイル製作手法検討、真空容器構造の検証も行っている。

3. 超電導磁石製作

3.1 希土類系高温超電導線材評価

希土類系高温超電導線材は図1に示すようなテープ状の線材であり、ニッケル合金基板の上に各種中間層、超電導層、安定化層が積層された構造を有する。今回の磁石製作に用いたのは幅4 mm、厚み0.1 mmのSuperPower社(古河電工グループ)製SCS4050-APであり、コイル設計の

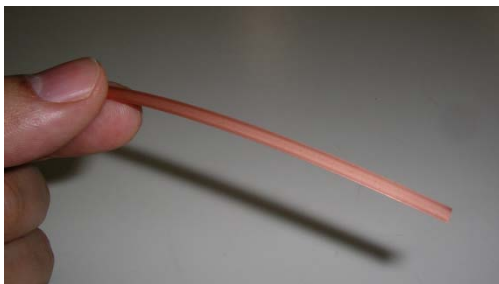


図1 希土類系高温超電導線材外観

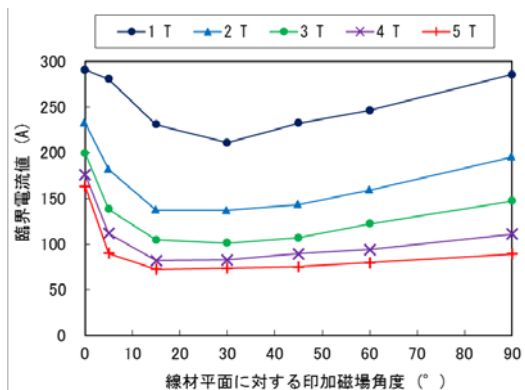


図2 希土類系高温超電導線材臨界電流値の磁場角度依存性 (50 K)

ため通電試験を実施した。希土類系高温超電導線材は温度，経験磁場の強度だけでなく，磁場の角度によって臨界電流が異なる。40 K を超える温度での 5 T の磁場の実現を目標としており，この温度域を中心に通電試験を実施した。一例として 50 K での臨界電流磁場角度依存性を図 2 に示す。磁場の角度が線材に平行な時にピーク値を持っていることが分かる。5 T の経験磁場ならば角度によらず 80 A 程度の臨界電流が見込めるので，定格電流を 80 A として設計を行うこととした。

3. 2 コイル設計

本超電導磁石製作は高温で 5 T が実現できることの実証を目的としており，形状は製作の容易な円形コイルとした。ダブルパンケーキコイルと呼ばれる扁平なコイルを複数個製作し，それらを金属製のケースに収めて積層することにより 5 T の磁場が発生可能な構造とした。(図 3)

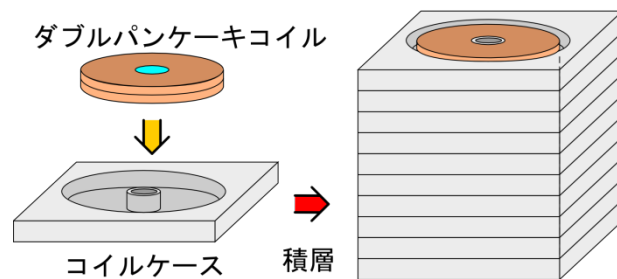


図 3 コイル製作手順

ダブルパンケーキコイルあたり 200 m の希土類系高温超電導線材を使用すると仮定し，80 A 通電時に 5 T 発生可能な積層数を磁場解析によって求めた。図 4 に示すように，ダブルパンケーキコイル 10 個積層時に中心磁場が 5 T となる。また，このときのコイルの負荷率(臨界電流に対する通電電流の割合)についても希土類系高温超電導線材評価試験の結果をもとに予測を行ったところ，負荷率は最大で 96 %であった。そのため，製作する希土類系高温超電導磁石は運用温度 50 K 前後で 5 T 発生可能であると予測される。

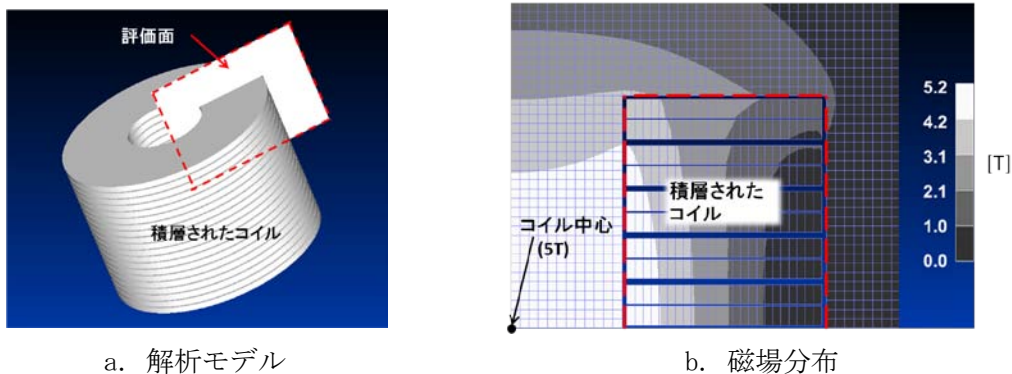


図 4 コイル磁場解析

3. 3 コイル製作

希土類系高温超電導線材は引きはがし方向の熱応力に弱いため，エポキシ樹脂のような接着力が高く熱収縮率が高い材料で含浸(モールド)すると性能が著しく低下してしまう。そのため，コイルの含浸には接着力を持たないパラフィン，あるいはエポキシ樹脂に比べて接着力の弱いシアノアクリレート樹脂を用いることとした。なお，シアノアクリレート樹脂は瞬間接着剤として広く知られている樹脂である。

磁場解析の結果に基づいて，10 個のダブルパンケーキコイルを製作した。ダブルパンケーキコイルの仕様を表 1 に，外観写真を図 5 に示す。また，これらのダブルパンケーキごとに液体窒素中で通電試験を実施した。希土類系高温超電導線材の特性には個体差があるため，コイルの臨界

電流にもバラつきがあったものの、希土類系高温超電導線材評価結果から予測される最低臨界電流は 27 A であり、すべてのコイルでこれを上回っていた。そのためコイル劣化等なく製作できたと考えられる。

表 1 ダブルパンケーキコイル仕様

使用線材	SuperPower Inc. : SCS4050-AP
線材幅 / 厚さ	4.1 mm / 0.1 mm
内径/外径	50 mm / 132 mm から 135 mm
巻数	672 ターン
使用線材長	196 m
コイルケース寸法	155 mm × 155 mm × 10 mm

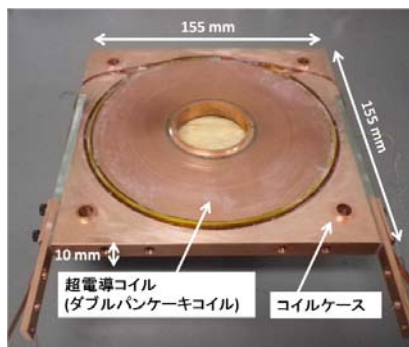


図 5 ダブルパンケーキコイル外観

3. 4 超電導磁石仕様

今回目標とするような 40 K を越える運用温度になれば、冷凍機の効率は大きく上昇するので真空槽内の伝熱構造を簡素化することができる。そのため、真空槽は超電導コイルに合わせてコンパクトになり、コイルから発生する磁場をより有効に利用することができる。今回製作した超電導磁石の構造を図 6 に示す。真空槽、超電導コイル、電流リードと単段冷凍機から構成されるシンプルな構造となっている。ふく射シールドと呼ばれる断熱層がないので、超電導コイルと真空槽内面の隙間が 5 mm、真空槽外側表面までの距離でも 20 mm となっている。その他超電導磁石の仕様を表 3 に示す。

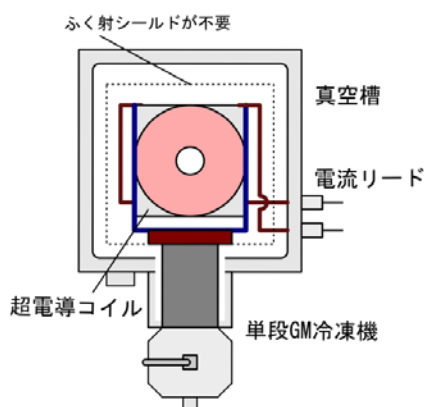


図 6 超電導磁石内部構造模式図

表 3 超電導磁石仕様

コイル部形状 (ケース含む)	155 mm × 155 mm × 101 mm
使用線材長	約 2 km
定格電流	80 A
電流密度 (定格運転時)	130 A/mm ²
クライオスタット形状	400 mm × 400 mm × 210 mm (冷凍機ユニットを除く)
クライオスタット材質	アルミニウム
冷凍機	単段 GM 冷凍機
電流リード容量	100 A

4. 試験結果

4. 1 励磁試験結果

製作した超電導磁石を冷却し、温度条件ごとに通電電流に対するコイル中心での発生磁場とコイル電圧の計測を行った。45 K における励磁試験結果を図 7 に示す。通電電流が 80 A を越えたところからコイル電圧の上昇が急激になっているものの、80 A 通電時に目標であるコイル中心磁場 5 T を達成できた。40 K、50 K においても通電試験を実施し比較したところ、40 K の条件では、ほぼ電流リード上限値の 96 A まで通電でき、6 T の高磁場が達成された。一方で 50 K にお

いては 4.4 T と 5 T には到達できず、解析による予測とは若干異なっている。希土類系線材は通電性能の個体差が大きく、液体窒素中と低温磁場中での通電特性にも相関が低いいため、コイル化時の性能予測を正確に行うには使用線材全ての通電評価を事前に行う必要がある。今回のコイル製作には大量の希土類系高温超電導線材を用いており、性能評価を行うことができたのは一部の線材だけであった。そのため、コイルの設計手法の改善は今後の課題と考えられる。

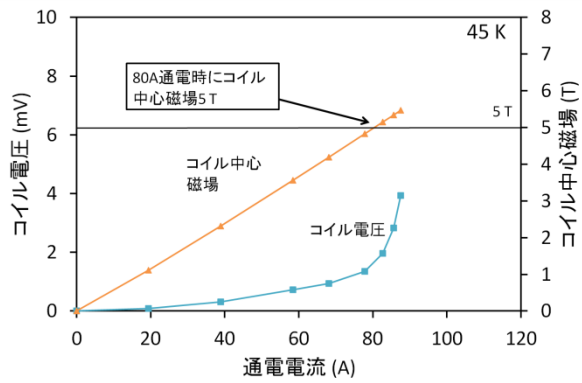


図 7 45 K における超電導磁石の励磁試験結果

4. 2 耐久性試験結果

超電導コイルはコイル自身が発生する磁場により大きな電磁力を受けるので、機械的な強度についても検証する必要がある。

試験としては、製作した磁石を 5 T まで励磁した後に消磁する作業を 100 回繰り返し、その前後でコイルの発生電圧に変化がないか評価した。図 8 に示すように、試験後の方が全体的に発生電圧は少なくなっているものの、その差は僅かであり、確認された差は通電特性の変化を示すような明確なものではなかった。

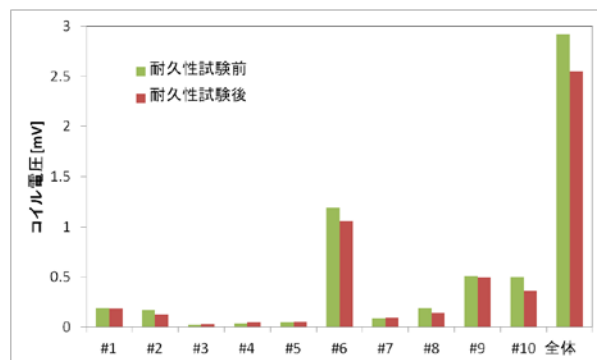


図 8 繰り返し励常時後のコイル電圧

5. おわりに

希土類系高温超電導線材を用いた超電導磁石製作を行い、超電導磁石としては極めて高い温度で高磁場を実現できることを実証した。磁気浮上式鉄道をはじめとする超電導機器の運用温度が飛躍的に向上し、冷凍機消費電力の低減や磁石構造の簡素化が今後期待される。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- (1) コイル温度 45 K において 5 T、40 K においては 6 T の高磁場が発生できることを実証した。
- (2) 5 T までの磁石の励消磁を 100 回行ってコイル通電特性に劣化や変化は確認されなかった。

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) 水野克俊他：希土類系高温超電導線材を用いた超電導コイル製作手法の提案，鉄道総研報告，Vol. 26, No. 5, 2010
- 2) 水野克俊他：冷却系の簡素化が可能な 5T 級希土類系高温超電導磁石，鉄道総研報告，Vol. 27, No. 7, 2013