山梨実験線用超電導磁石の熱負荷増特性

土島 秀雄, 寺井 元昭*, 吉田 史**, 渡邊 洋之**
 山地 睦彦***, 松田 正治****, 地蔵 吉洋*****, 藤本 泰司*****

鉄道総合技術研究所 国分寺市光町 2-8-38

* 東海旅客鉄道(株) 東京都中央区八重洲 1-6-6

** (株)日立製作所日立工場 日立市幸町 3-1-1

*** (株)東芝府中工場 府中市東芝町1番地

**** (株)東芝 東京都港区芝浦 1-1

***** 三菱電機(株) 尼崎市塚口本町 8-1-1

(1994年5月18日受理)

Heat Load Characteristics of New Superconducting Magnet for Yamanashi Test Line

Hideo TSUCHISHIMA, Motoaki TERAJ,* Hakaru YOSHIDA,** Hiroyuki WATANABE,**
 Mutsuhiko YAMAJI,*** Masaharu MATSUDA,**** Yoshihiro IZO***** and Yasushi FUJIMOTO*****

Railway Technical Research Institute, 2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji 185

* Central Japan Railway Company, 1-6-6 Yaesu, Chuo-ku, Tokyo 103

** Hitachi Works, Hitachi Ltd., 3-1-1 Saiwai-cho, Hitachi 317

*** Fuchu Works, Toshiba Corp., 1-banchi, Toshiba-cho, Fuchu 183

**** Toshiba Corp., 1-1 Shibaura, Minato-ku, Tokyo 105-01

***** Mitsubishi Electric Corp., 8-1-1 Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki 664

(Received May 18, 1994)

Synopsis :

Superconducting magnets which are installed on a Maglev vehicle vibrate under the influence of various disturbances in running. Main disturbance is the harmonic ripples of electromagnetic flux generated by ground coils. To estimate the influence of the harmonic flux ripples, the facilities called an electromagnetic vibration simulator were constructed. Heat load in some magnets, made in 1980's, extremely increased on the high frequency region in the electromagnetic vibration test. We have investigated the cause of these phenomena from various aspects, and made short superconducting magnet models containing a single superconducting coil and superconducting magnets with high rigidity having different internal structures for testing various ideas to reduce the heat load. As a result, we have obtained good results. Then we have started on production of the new superconducting magnets for Yamanashi test line. Here is an outline of the new magnets.

Keywords : superconducting magnet, Maglev, heat load, electromagnetic vibration test

1. はじめに

浮上式鉄道用の超電導磁石は、走行中、さまざまな外乱を受け振動する。この外乱の中で、超電導磁石の熱負荷増の特性に最も大きな影響を及ぼすのが地上コイルからの高調波磁界による電磁加振力である。この走行中の高調波磁界による電磁加振力の影響を模擬・

評価する装置として電磁加振装置を開発・製作し、これまでさまざまな試験を行ってきた。

初期の超電導磁石では、この電磁加振装置での実走行模擬負荷相当の試験では、特定の周波数で熱負荷が著しく増大し液体ヘリウムの蒸発量に換算して数十Wの値にもなることが明らかとなり、大きな問題となった。これに対して、国鉄民営分割後、浮上式鉄道の研

究・開発を継承することとなった鉄道総研では、原因の分析と種々対策の検討およびこれらを確認する試験を重ねてきた。

一方、平成元年度山梨実験線の建設が本決まりとなった。そして平成2年度に入り、鉄道総研、JR東海、鉄道建設公団からなる山梨実験線の建設プロジェクトチームが発足し、超電導磁石システムについては鉄道総研とJR東海を中核として日立・東芝・三菱の重電3社が協力する形で強力に開発を推進する体制が出来上がった。

この山梨実験線の建設プロジェクトチームでは、超電導コイルのクエンチと熱負荷増に対する対策を山梨実験線の超電導磁石システムの最も重要な課題と位置付け、以後この課題の解決に向け全力を投入しつつ山梨実験線の超電導磁石システム全般の設計を進めていくこととなった。そしてクエンチ対策については平成3年度、熱負荷増に対する熱ロス対策については平成4年度にはばメドが得られたので、これらを受けて東芝、三菱電機においては、平成3年度末から山梨実験線で実運用する超電導磁石の開発・製作を開始し、平成4年度末各々 No.1 超電導磁石（以下 SCM1、SCM2 と略す）を完成した。また日立においては、本特集の他論文¹⁾で述べた超電導磁石の製作および試験結果をもとに、平成4年度更に高性能・高信頼性化を図る超電導磁石（以下実証 SCM と略す）の試作を重ね、この結果をもとに平成5年度末から No.1 超電導磁石の開発・製作を開始することとした。

以下、最新の熱ロス対策を盛り込んで完成した山梨実験線用の両 No.1 超電導磁石：SCM1 と SCM2、および日立製の山梨実験線のプロトタイプとなる実証 SCM について熱ロス対策を中心として述べる。

2. 山梨実験線超電導磁石の基本的考え方と SCM1 および SCM2 の基本構成

2.1 山梨実験線超電導磁石の基本的考え方

山梨実験線の超電導磁石は軽量・コンパクトという浮上式鉄道用超電導磁石の基本特性のほか、次の点に特に重点をおいた構成としている。

- ①クエンチ対策の強化
- ②車載冷凍機を運転しての液体ヘリウムの補給なしで連続運用できるレベルへの熱負荷増の低減
- ③トラブル発生時予備となる台車と振り替えて運用することを前提とした互換性を配慮した構成
- ④総合的な信頼性・耐久性の向上

Vol. 29 No. 10 (1994)

2.2 両 SCM の基本構成

上記基本的考え方に対する SCM1 および SCM2 の具体的構成は次のとおりである。

まず、クエンチ対策²⁾については本稿の主旨ではないので簡単に述べるが、

- ①コイル断面寸法の拡大による電流密度の低減と曲げ剛性の向上による安定性の増大
- ②振動によるクエンチを引き起こす主要原因と考えられる超電導コイルと内槽間の機械的すべりによる摩擦発熱に対してグレーディング（SCM1：内外周部のコイルの線材に内部より太い線材を使用する方法）、ダミー線（SCM2：内外周部の超電導コイルの線材に電流を流さない部分を設ける方法）の熱バッファを設け発熱を抑える構造
- ③コイルの荷重支持材の上下支持間隔を上げ、コイルのローリングやねじり変形がしにくい構造とする
- ④限られた空間の中でできるだけ内槽部の液体ヘリウムの保有空隙を多くするよう構成し、外乱に対して液の確保を図り安定性を増大する

等の対策が取られている。

熱負荷増の具体的な対策については次項に詳しく述べるが、車載冷凍システムとしては、冷凍機の能力を 8 W 以上とし、超電導磁石の静置熱侵入量を 5 W 以下として静置時の冷凍負荷余裕を 3 W 以上とするとともに、走行時の超電導磁石の熱負荷増を、山梨実験線の連続耐久試験時の走行パターンを模擬した電磁加振試験で得られる走行時模擬平均熱侵入量として 8 W 以下に抑えることで、基本的に液体ヘリウムの補給なしで連続的に運用できるような、完全にクローズドな（完結した）システムの構成を考えている。

また、互換性に関しては、具体的な構成として、車体部へわたる超電導磁石関係のすべての制御・計測配線、配管を互換性を考えた共通仕様とするとともに、車体部との取り付け寸法を統一している。また、超電導磁石自身は台車中心に対して点対称とし、台車のどちら側にも取り付け構成とし、かつ極力山梨実験線車両のいずれの位置の台車にも取り付けよう、台車と超電導磁石間の互換性も配慮している。

また、総合的な信頼性・耐久性の向上としては、まず、設計段階でデザインレビューを行い、設計上の問題点を摘出し、車載冷凍システムとしては 1 万時間以上の連続運転が確認されたものと同部品を組み込むとともに、超電導磁石、車載冷凍システムとも要素段階

Table 1 Basic characteristics of the superconducting magnet.

Items	Specifications
Dimension of SCM	5.40 m(L) × 1.175 m(H)
Weight of SCM	less than 1,500 kg
Volume of LHe tank	about 50 litres
Volume of LN ₂ tank	about 40 litres
Superconducting coil	
Magnetomotive force	700 kA (1,400 turns)
Shape of SC coil	race track
Copper ratio of SC wire	1.0–1.5
Dimension of SC wire	1.1 mm × 2.5 mm
Heat leakage to inner vessel	4 W
Levitative force per magnet	98 kN
On-board refrigerator	built-in type
Refrigeration capacity	more than 8 W at 4.4 K

Fig.1 Illustration of the superconducting magnet.

で配管部の振動試験等を行い耐久性に問題のある部分の摘出を図り、更に全体組立完成後は電磁加振試験や機械的加振試験を十分行った上で、山梨実験線に搬入することとしている。

以上の基本構成を配慮して設計した両 SCM の基本仕様を Table 1 に示す。

また、Fig.1 に山梨実験線超電導磁石の外観イメージ、Fig.2 に SCM1 の外観写真を示す。

3. 熱負荷増発生の原因と SCM1 および SCM2 の具体策

3.1 熱負荷増発生の原因

熱負荷増発生の原因としては、現在次の3つが主なものと考えられている^{2,3)}。

- ①超電導コイル・内槽と輻射シールド板・外槽の共振域での振動による相対変位による渦電流損失
- ②地上コイルから外槽、輻射シールド板を貫通通過する高周波磁界による渦電流損失

Fig. 2 Outside view of the superconducting magnet.

③内槽・超電導コイルの振動に伴う変形による超電導コイルと内槽・コイル押えの機械的すべりによる摩擦発熱

当初は①が主原因でこれに対する対策によってほぼ問題が解決できると考えていたが、その後①の対策が進むにつれて②③も無視できないオーダであることがわかり、特に次項で述べる輻射シールド板の高抵抗化によって②が問題となり、総合的な対策が必要となった。

3.2 両 SCM の熱負荷増対策の具体策

浮上式鉄道用超電導磁石では限られた空間と重量の制約を配慮した上で、総合的な観点から進める必要がある。以下、実際の対策を示す。

- ① 従来の超電導コイルの内側コーナ部4点を押さえる構造から、更に外側コーナ部4点の支持を加え内槽を振動しにくい構造とし超電導コイル・内槽と輻射シールドおよび外槽の相対変位を減らすことで渦電流損失を低減する。また、コイルの外側コーナ部の支持点を増設することによってコイル自身を変形しにくい構造とし機械摩擦発熱損失を低減する。
- ② 台車側の外槽の等価板厚を厚くして、超電導磁石全体の剛性を上げ内槽の振動加速度を低減する。ただし、当該外槽部は重量増を抑えるためハニカム構造とする。
- ③ 輻射シールド板と超電導コイル・内槽間に発生する相対変位に伴う渦電流発熱損失自身を減らすため、輻射シールド板を高抵抗化することによって誘起渦電流を減らし当該損失を減らす。
- ④ 内槽部に発生する渦電流発熱損失自身を減らす

Fig. 3 Increase in heat load resulted from the vibration test (SCM 1).

Fig. 4 Acceleration in SCM 1 resulted from the vibration test.

ため内槽表面を銅メッキし、低抵抗化する。

- ⑤ 地上コイルから透過する高調波磁界による渦電流損失を低減するため地上コイル側外槽の材料を純アルミ材とすると共に板厚を増大する。

SCM 1 および SCM 2 と実証 SCM では特に上記③項が異なっており、前者は輻射シールド板を高抵抗化しているのに対して後者は従来の純アルミ材のままとし、シールド板を内槽を含めシェル型形状とするとともに支持点を増やし、多点支持する等の構造的な工夫をしてより振動しにくい構造とし、相対変位に伴う渦電流損失を低減する考えとなっている。

4. SCM 1 および SCM 2 の電磁加振試験結果

4.1 SCM 1 の試験結果

Fig. 3 に浮上用地上コイルの加振を模擬する電磁加振試験における熱負荷増の特性を示す。また、この時の超電導磁石を励磁した場合の加振の、当該超電導磁石を構成する4個の超電導コイルのうち両側の2コイ

Fig. 5 Increase in heat load resulted from the vibration test (SCM 2).

ルの振動加速度を Fig. 4 に示す。超電導磁石を励磁した場合の加振の熱負荷増のピークは 120 Hz, 200 Hz, 320 Hz 付近にあり、両側 2 コイルの振動加速度もこの点で大きくなっており、両者が対応していることがわかる。

超電導磁石を励磁しない場合の加振の熱負荷増は、加振周波数の増大に対応して、指数的に減少している。この場合、超電導磁石はほとんど振動せず、輻射シールド板は高抵抗化していることから、この損失はほとんど外槽を透過する高調波磁界による渦電流損失によるものと考えられる。励磁時と無励磁時の熱負荷増にかなり差があり、超電導コイル・内槽と外槽の相対変位による渦電流損失およびコイルの機械的すべりによる摩擦発熱損失がまだかなり残っていると考えられる。

また、冷凍システムとして重要な、山梨実験線の連続耐久試験時の走行パターンを模擬した電磁加振試験での走行時模擬平均熱侵入量は 8.5 W であった。

4.2 SCM 2 試験結果

Fig. 5 に浮上用地上コイルの加振を模擬する電磁加振試験における熱負荷増の特性を示す。また、この時の当該超電導磁石を構成する 4 個の超電導コイルのうち端部のコイルの内槽 8 点の平均振動加速度を Fig. 6 に示す。熱負荷増のピークは 180 Hz 付近にあり、端部のコイルの内槽 8 点の平均振動加速度もこの点で大きくなっており、両者が対応している。点線の予測値は 1 コイルのモデル超電導磁石での電磁加振試験での熱負荷増の結果の機械損失分（励磁時の加振データから無励磁時の加振データを差し引いたもの）を 4 倍したものから、1 コイルモデル超電導磁石から SCM 2 の内槽のメッキへの変更による渦電流損失の変化分を渦電流解析シミュレーションモデルで計算して求めて差し引いて得たものであり、ほぼこの線上に上記熱負荷増のデータはのっている。

Fig. 6 Acceleration in SCM 2 resulted from the vibration test.

また、山梨実験線の連続耐久試験時の走行パターンを模擬した電磁加振試験での走行時模擬平均熱侵入量は約 8.7 W であった。

4.3 その他の試験結果

両超電導磁石とも車載冷凍機を運転しての励消磁では、超電導磁石の液体ヘリウムタンクの内圧は安全弁の吹き出し圧力 0.4 atg 以下であり、励消磁時の液体ヘリウム損失量は 3 l 未満であった。

また、SCM 1 は GM 冷凍システム、SCM 2 は高い能力が得られるスターリングサイクル冷凍システムを採用しており、前者は 8 W 以上、後者は 10 W 以上の冷凍能力が確認でき、超電導磁石と組み合わせた試験でも十分な冷凍余裕があることが確認できた。

山梨実験線の連続耐久試験を模擬する電磁加振試験での走行時模擬平均熱侵入量は、両超電導磁石とも 8 W 程度であるので、車載冷凍機を運転しての液体ヘリウムの補給なしでの連続的な運用がほぼ可能と判断できる結果となる。

なお、クエンチ対策の効果の詳細については、本稿の主旨ではないので省略するが、両超電導磁石とも、前述した対策の結果、超電導コイルとしては共振点の曲げおよびねじり加振に対しても 80 g 程度までクエンチしないレベルとなり、従来のものに比べて大幅にその特性が改善されていることが確認できている。

5. 実証 SCM の試作試験結果

5.1 実証 SCM 試作の目的

実証 SCM は、これまでに得られた、耐クエンチ性能向上、電磁加振時発熱低減、車載冷凍機性能向上等の技術開発成果を基に、さらに性能向上を図って山梨実験線用実機と同等のフルサイズ超電導磁石を試作し、性能評価することによって、山梨実験線において要求されている超電導磁石性能の実現可能性を実証することを目的とし、東海旅客鉄道㈱、㈱日立製作所の

Fig. 7 Illustration of the prototype superconducting magnet.

共同開発により平成4年度から平成5年度にかけて試作試験を行ったものである。

5.2 試作超電導磁石仕様の考え方

上記目的を達成するため、超電導磁石基本仕様を次の様に設定した。

(1) 重量

山梨実験線用超電導磁石仕様値である、単体重量1,400 kg（車載冷凍機重量を含み、冷凍機用圧縮機ユニット、超電導磁石保護回路等の重量を除く）を実現する。

(2) 全熱負荷性能

静置熱侵入量と、電磁加振による熱負荷増分とを合わせた全熱負荷量を8 W以下とし、車載冷凍機（冷凍能力8 W以上）運転下における熱負荷バランスを実現する。

(3) 耐クエンチ性能向上方策

リニア車両走行中の電磁的外乱に起因するコイルクエンチの主要因となっている、内槽容器～超電導コイル間の機械的ロス（微小すべり摩擦発熱）を低減するため、内槽剛性/構造を最適化し、内槽容器による超電導コイル拘束力を可能な限り大きくする。超電導線材銅比については、軽量化および温度マージン確保の観点から1を選定する。

(4) 電磁加振時発熱低減方策

- ① アルミ材を用いた輻射シールド板を内槽容器とともにシェル構造とし、両者を近接して配置することによって機械的剛性を高くし、かつそれらの磁氣的結合が極めて大きくなることによって相対変位を極小化して、超電導磁石内部の振動に伴う電磁的ロス（渦電流発熱）を抑制する。
- ② 磁気抵抗効果の少ないアルミ材を、内槽容器表面に接着して低電気抵抗化し、電磁的ロスを抑制する。
- ③ 台車枠側外槽材にはハニカム構造を採用し、クライオスタット剛性向上と軽量化を両立させる。

- ④ 地上コイル側外槽材については板厚を確保するとともに、A 5083 材に低電気抵抗アルミ（A 1070 材）をクラッドした板材を採用し、磁気シールド性能を向上する。

- ⑤ 内槽荷重支持材を機能別に分散配置することにより、内槽の局所的変形を抑え、かつ内槽振動の固有値を上げる⁴⁾。

(5) 車載冷凍機

リニア車両用として開発した、8 W 級 GM サイクル冷凍機を搭載する。

(6) 信頼性・耐久性向上方策

信頼性・耐久性設計の前提となる、山梨実験線における超電導磁石実負荷条件が明確でない段階ではあるが、営業線段階で求められる信頼性・耐久性レベルを確保すべく設計・製作を進める。例えば、PCS（永久電流スイッチ）についてはあらかじめ単体機械加振試験を実施し、耐振性、安定性等の確認を行った上で超電導磁石に組み込む。また、クライオスタット内部構成要素の固有振動数は、可能な限り実使用領域以上に向上させる設計を行い、各要素ごとにその確認を行う。

5.3 試作超電導磁石性能試験結果

(1) 重量実測結果

Fig. 7 に試作超電導磁石の全体図を示す。単体実測重量は1,392 kg であり、仕様値を満足した。

(2) PCS 機械加振特性

PCS 単体での機械加振試験を下記の条件により行い、振動加速度10 g 以上に耐え、かつ安定性に問題がないことを確認した。

印加磁界—1 Tesla

PCS 電流—超電導コイル起磁力800 kA 相当（定格起磁力700 kA）

加振周波数—50～400 Hz

- (3) 内槽容器～超電導コイル間機械ロス特性
機械ロス発熱が振動速度の2乗にほぼ比例している

Fig. 8 Increase of heat load under the vibration test of the prototype superconducting magnet.

ことを確認した。

(4) 静置熱侵入量実測結果

静置状態での熱侵入量実測値は 4.6 W であった。

(5) 電磁加振試験熱負荷特性

電磁加振試験にあたっては、超電導磁石を取り付ける台車枠剛性が熱負荷特性に及ぼす影響を見るため、台車枠の超電導磁石取付部に挿入する金具のばね係数を変化させる事により、3 段階の台車枠剛性を模擬した。

Fig. 8 に試験により得られた熱負荷増分特性を示す。加振周波数 100 Hz 前後から 350 Hz の間で種々の超電導磁石振動モードが存在し、共振に伴う熱負荷ピークが見られる。全体的な周波数特性は台車枠剛性パラメータにかかわらず類似しているが、240~260 Hz 付近に現れる熱負荷ピークに関しては台車枠剛性との相関が見られる。このピークは同一の振動モードで生じており、模擬台車枠剛性が小さくなるに従って振動共振周波数が低下し、一方ピーク値は大きくなる傾向が出ている。振動諸量との関係を見ると、内槽振動速度と熱負荷増分との相関が高く、内槽容器~超電導コイル間で生ずる機械的ロスが熱負荷増のほとんどの要因を占めていると考えられる。本試験結果から、静置熱侵入量 4.6 W と電磁加振時熱負荷増分とを合わせた全熱負荷量は 6~7 W となり、車載冷凍機冷凍能力の 8 W 以内に収めることができた。

(6) 冷凍機バランス運転特性

超電導磁石内のヘリウム冷却系を封じ切り、車載冷凍機を運転した状態で、山梨実験線での走行状態を模擬した周波数掃引電磁加振試験を実施した。ヘリウム冷却系の内圧、液量等に変化はなく、安定した熱負荷バランス運転を確認した。

5. 4 今後の課題

実証 SCM の試作試験により、山梨実験線において要求される熱負荷性能が初めて達成され、電磁加振下における車載冷凍機による熱負荷バランス運転が実証でき、山梨実験線における円滑な超電導磁石運用の見通しが得られた。

今後は、営業線段階を念頭に置きつつ、長期間にわたって超電導磁石各構成要素の機能が問題なく発揮され、超電導安定性が維持されることを、信頼性・耐久性確認試験により実証することとしている。また、地上コイル構成簡素化による建設コスト低減の観点から、より大きな電磁的外乱に耐える超電導磁石の開発、ならびに性能のばらつきが小さく、製造コスト低減が可能な、量産対応超電導磁石設計・製造法の検討が課題である。

6. ま と め

初期の超電導磁石では、電磁加振試験において、特定の周波数領域で数十 W にも達する熱負荷増による熱ロスが発生し、大きな問題となった。これに対して原因を分析し、種々検討を行い、これに基づく諸対策を実施したモデル試験等をいろいろと重ねた結果、山梨実験線の運用に耐えるレベルの熱負荷増特性の超電導磁石が開発・製作できることとなった。

今後、これらの結果をもとに引き続き山梨実験線用の超電導磁石の製作を進め、平成 7 年度半ばにはほぼ、山梨実験線用の第 1 編成車両に搭載する超電導磁石の製作を完了する予定である。

最後に山梨実験線超電導磁石の開発・製作は運輸省補助金によるとともに、一部は J R 東海の技術開発によるものであり、これまでの省を始めとする関係各所の皆様の暖かい御支援・御協力に深く感謝するとともに、引き続き山梨実験線の成功に向けての強力な御支援をお願いする次第である。

参 考 文 献

- 1) 滝沢照広ら：低温工学 29 (1994) 504
- 2) E. Suzuki, et al.: The International Conference on Speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles (1993) 352
- 3) H. Nakashima, et al.: 13th International Conference on Magnetically Levitated System and Liner Drive (1993) 160
- 4) 坂本 茂ら：日本機械学会第 71 期通常総会 (Mar. 1994)