

磁気浮上特性基礎試験装置用 超電導マグネット

Superconducting Magnet for Magnetic Suspension Device

A magnetic suspension device using a superconducting magnet was constructed and tested.

A series of experiments on this device which utilizes magnetic interaction between excited superconducting windings and rotating normal conducting loops proved successful indicating the possibility of its practical application to the linear motor driven high speed train.

斎藤龍生* Ryûsei Saitô
 多田直文** Naobumi Tada
 木村 浩*** Hiroshi Kimura
 高橋孝夫** Takao Takahashi

1 緒 言

磁気力を利用して物体を浮上させる構想は従来からもあるが、近年超電導技術の急速な進歩により、強力な磁界が比較的小形、軽量のマグネットにより発生できるようになったことおよび次期の陸上輸送手段として超高速列車計画が世界各国で立案され、磁気浮上列車方式として最有力な手法と目されるようになったことから、あらためて新しい観点から研究開発が進められようとしている。

磁気浮上の方式もまた多様であるが、車上に超電導マグネットを置き、地上に常電導ループを並べ、車上コイル電流と列車の走行に伴い地上コイルに誘起される電流との相互作用

によって生ずる反発力を利用する方法がPowell, Damby⁽¹⁾によって提唱され、最も有力な方法の一つとされている。

超高速磁気浮上列車計画を考える場合、この超電導誘導反発磁気浮上は計画の根幹の一つをなすもので、ソフト、ハードの両面であらかじめ十分な試作試験を必要とする分野である。

わが国では日本国有鉄道が超高速磁気浮上列車の開発計画を進めており、昭和45年度の技術課題として「超電導磁気浮上特性基礎試験装置」の建設を計画し、超電導マグネット部を日立製作所、電源計測部を東京芝浦電気株式会社、回転円

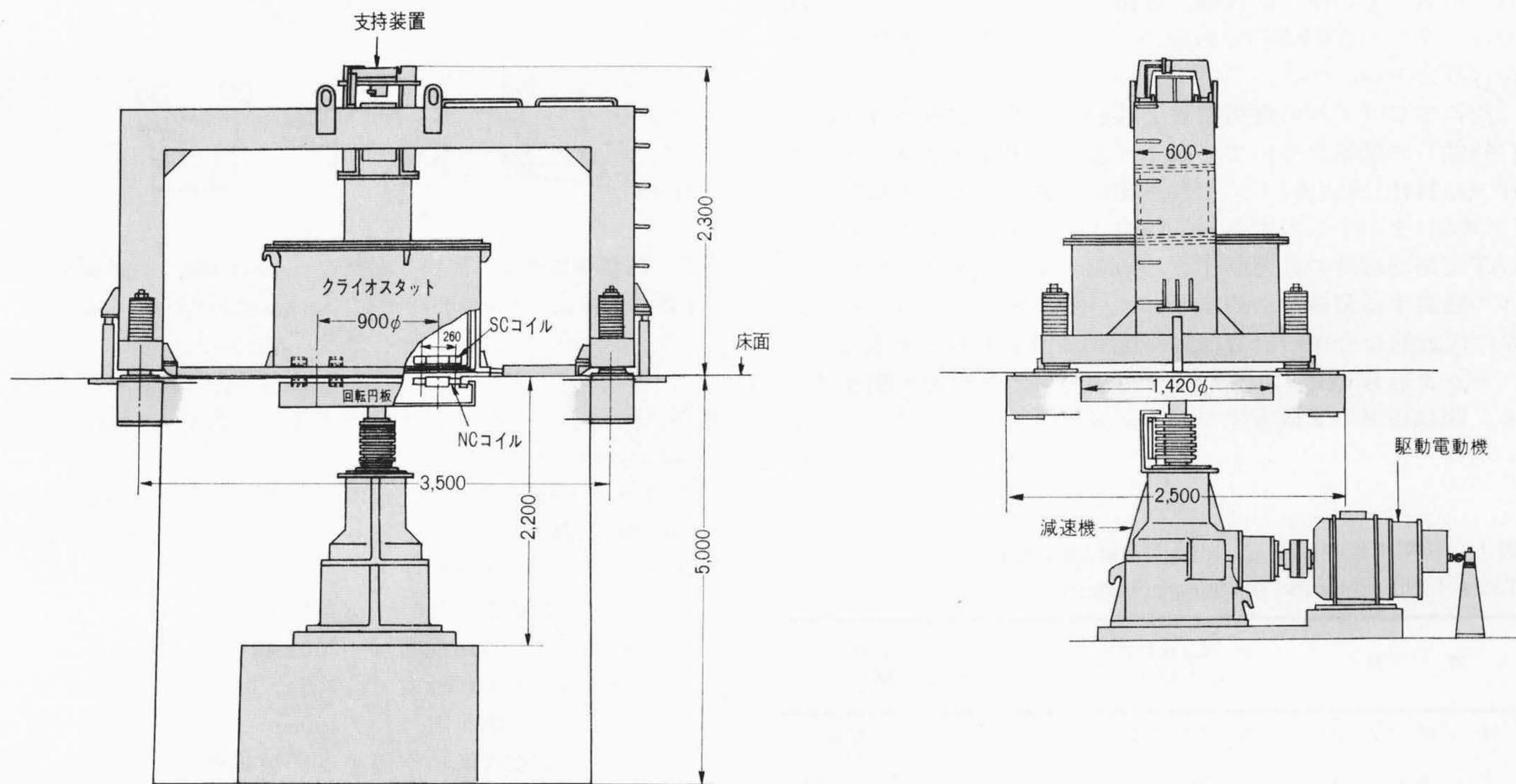


図1 超電導磁気浮上特性基礎試験装置 回転円板に取り付けられたNCコイルが回転すると、SCコイルとの間に誘導反発力を生ずる。

Fig. 1 Superconducting Magnetic Suspension Device

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所日立研究所 *** 日立製作所中央研究所

板、冷凍機を三菱電機株式会社がそれぞれ日本国有鉄道の指導のもとに製作した。

本報告は上記装置を用いた各種試験のうち、主として超電導マグネットに関する事項について述べたものである。

2 装置概要

本装置は列車走行を地上側常電導コイル(NCコイル)の回転で模擬しており、その主要部の構成は下記のとおりである。

(1) 超電導マグネット〔超電導コイル(SCコイル)、クライオスタット〕

(2) 回転円板装置およびNCコイル

NCコイル数/SCコイル数

= 1 : 2, 1 : 3, 1 : 4

(3) 超電導マグネット支持装置

(4) 回転円板駆動装置

このほか、冷凍機、SCコイル励磁電源、NCコイル用リアクトル、各種計測装置が用意されている。装置主要部の構成は図1に示すとおりである。

3 超電導マグネット

3.1 超電導線材

SCコイル用線材として2種類の線材を試験に供した。第一の線材はHISUPER-10ZMBで、形式としてはマルチコア線材に属するもので平角断面を有している。第二の線材はHISUPER-271ZFMBでファインマルチ形に属するもので断面は円形である。超電導線の仕様は表1に示すとおりである。

3.2 超電導コイル

本装置は列車の走行をNCコイルの回転で模擬しているためSCコイルも図2に示すようにセクタ形のコイル2個を配している。おのおのはN極、S極を形成しており、定格起磁力はいずれも200kATである。コイルの寸法他は表2に示すとおりである。

次にSCコイルの負荷特性と線材の磁界、電流特性($H \rightarrow I_c$ 特性)の関係について考察しておく。図3は2種の線材の $H \rightarrow I_c$ 特性(実測値)と、これを用いたSCコイルの負荷特性(計算値)を示すものである。図中1および1'で示す点が200kAT定格励磁時の負荷動作点である。なお磁界は、SCコイルの経験する最高値で表示されている。SCコイルの経験磁界の代表的な分布の計算値は、図4に示すとおりである。

セクタ形SCコイルの形成する磁界を示したのが図5である。図は磁界のz成分すなわち、NCコイルループとの鎖交

表1 超電導線の仕様 使用超電導線2種の仕様を示す。

Table 1 Specification of Superconductor

項目	HISUPER-10ZMB	HISUPER-271ZFMB
組成 (at%)	Nb-70Ti-2.5Zr	Nb-62.5Ti-2.5Zr
寸法	1.6t×7w	2.7φ
素線数	10	271
Cu/Super	20	8.2
絶縁	スパイラル (0.2tテープ)	スパイラル (0.4tテープ)
形式分類	マルチコア	ファインマルチコア

表2 超電導コイル諸元 超電導コイル2種の寸法、巻数ほかを示す。
Table 2 Dimensions of Superconducting Coils

項目	コイル (1) HISUPER-10ZMB	コイル (2) HISUPER-271ZFMB	備考
寸法			
D _o (mm)	900	900	
W (mm)	260	260	
A (mm)	85	49	
B (mm)	60	54	
巻数	252	240	} 1セグメントあたり
定格起磁力 (kAT)	200	200	
エネルギー (kJ)	60	65	200kAT

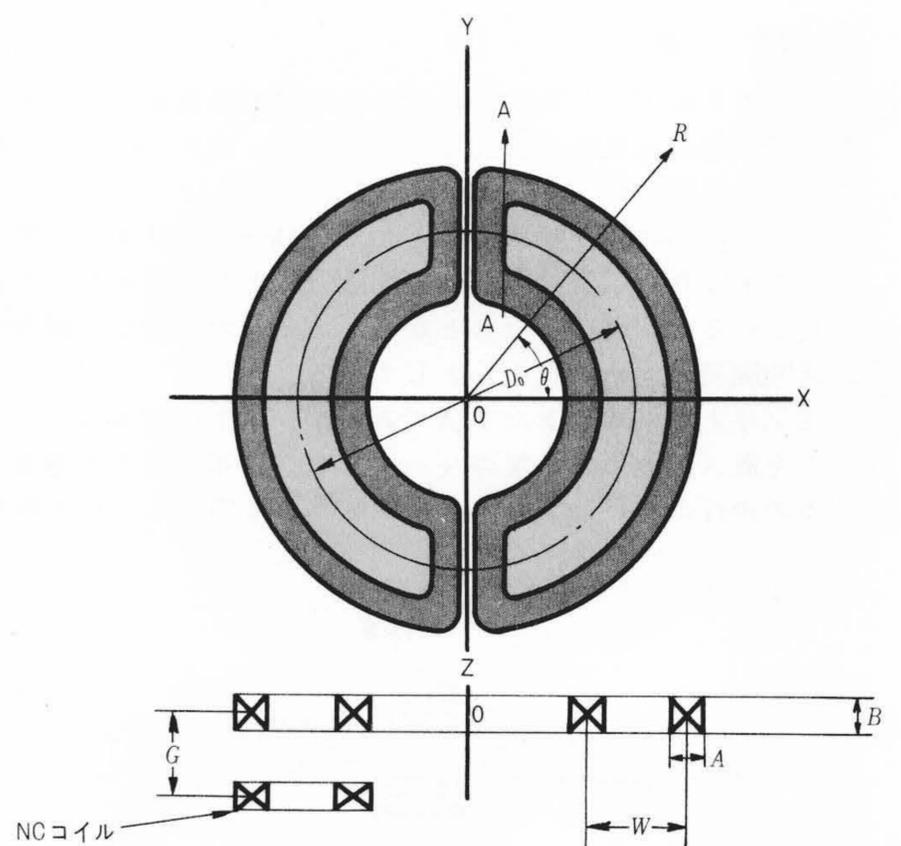


図2 超電導コイルの形状と座標 コイルはN極、S極で構成される。
Fig.2 Shape and Co-ordinate of Superconducting Coils

成分に相当するものでこの磁界によってNCコイルに起電力が誘起され反発電流が流れる。

SCコイルは自己の直流電流とNCコイルの電流による両方の磁界を経験することになり、これが超電導体に対する動作条件を規定することになる。

すなわち、本装置においては条件として、

超電導コイル起磁力 200kAT

常電導コイル起磁力 7.5kAT

コイル中心間距離 150mm

とした場合、超電導体に作用する経験磁界は、

直流磁界成分(最高値) 20kG(コイル(1)), 22kG(コイル(2))

脈動磁界成分(最高値) ±80G

脈動磁界周波数 0~80Hz

(回転速度0~100km/h, NCコイル/SCコイル=2~4)

である。

経験磁界の位置に関する分布について簡単に触れるならば、SCコイル自身による最高磁界は、図4に示すようにコイル

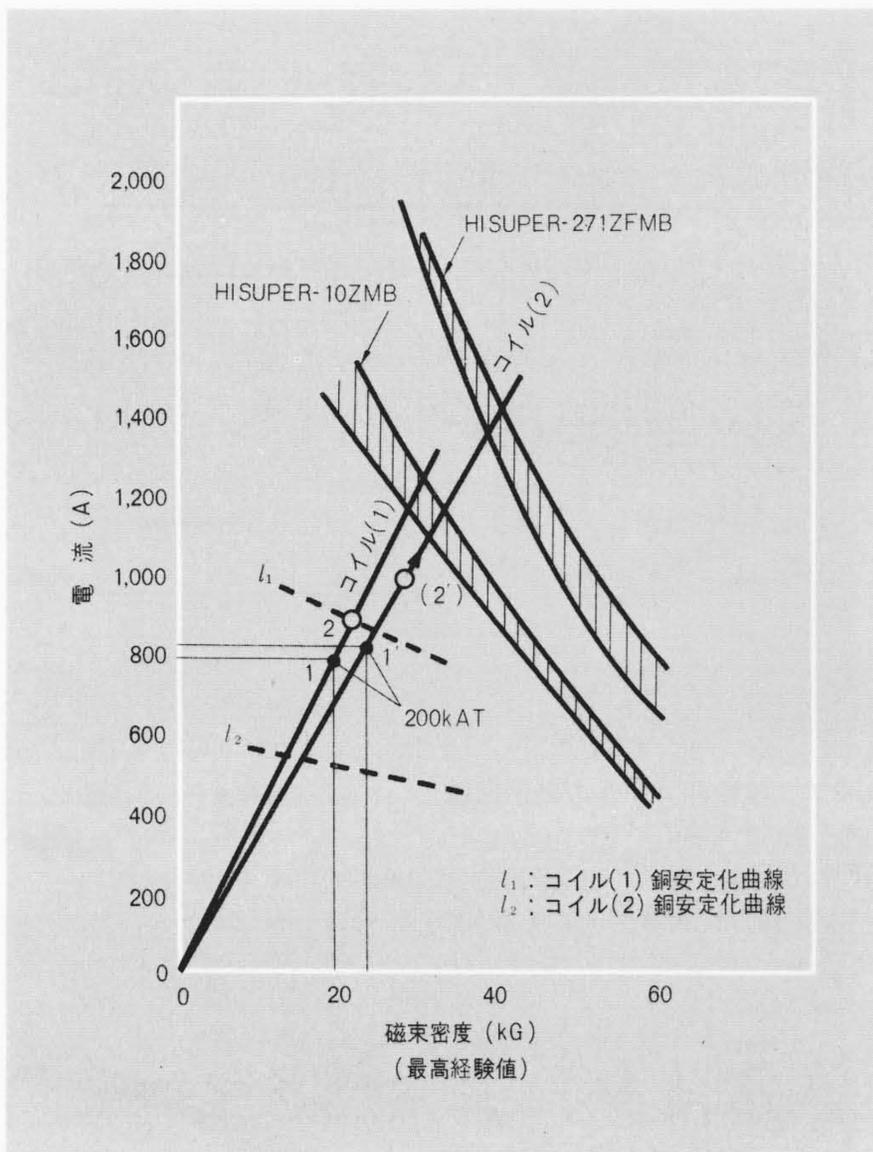


図3 超電導線の短尺H-I_c特性と負荷特性 ●1, ●1'は定格値, ○2は抵抗発生点, ⊕(2')は最高励磁点(抵抗発生せず)。

Fig. 3 Short Sample H-I_c Curve of Superconductor and Load Line

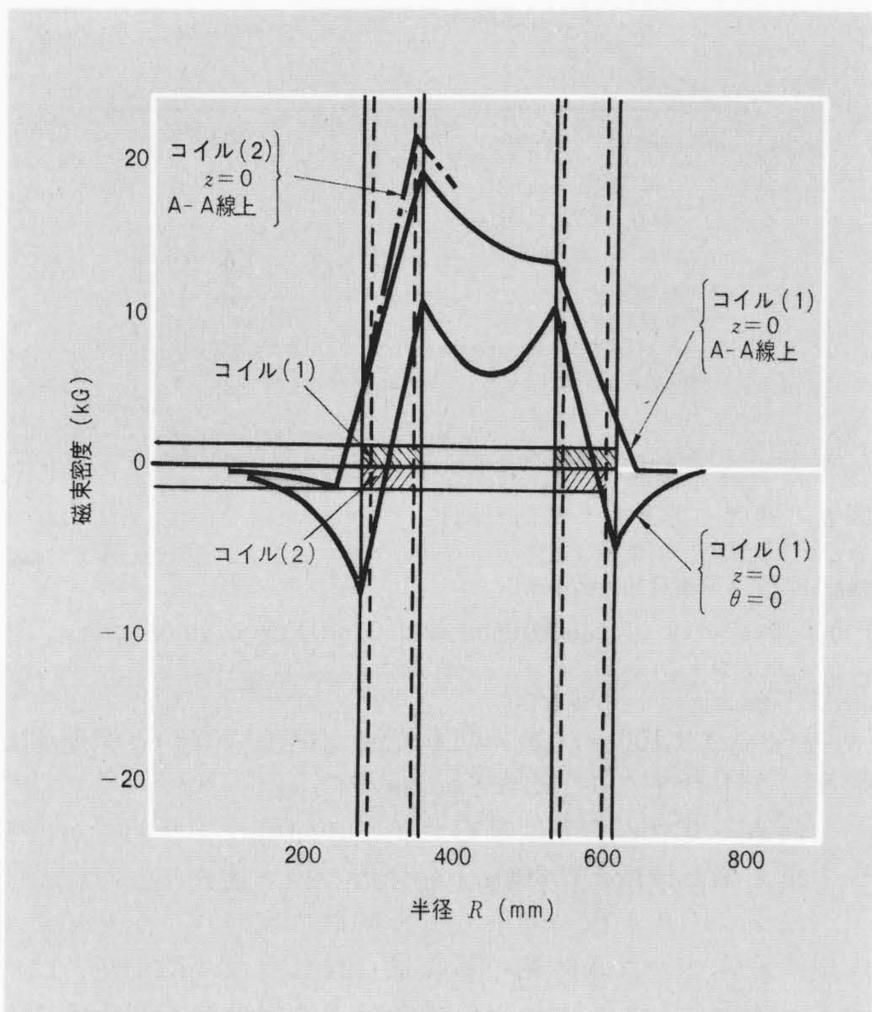


図4 超電導コイルの経験磁界分布 コイル(1), (2)は巻線断面寸法が異なる。

Fig. 4 Field Distribution on Superconducting Coils

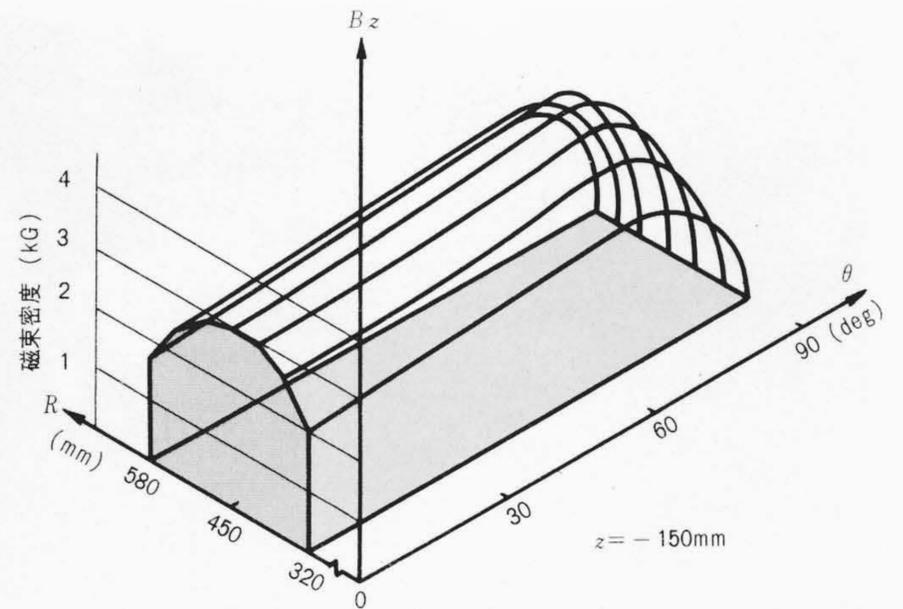


図5 超電導コイルの常電導コイル部磁界分布(B_z成分) 本磁界成分がNCコイルに誘導電流を発生させる。

Fig. 5 Field Distribution (B_z) on Normal Coil by Superconducting Coils

端の曲部内側に発生する。一方、NCコイルからの影響は $\theta = 0$ の近傍においては B_z , B_r は直流分が主体であり脈動分は $\pm 10\%$ 程度である。また B_θ 成分は直流分、脈動分ともこの位置では小さい。

一方、 $\theta = 90$ 度の近傍になると、直流分は B_θ が増大し、 B_z , B_r はともに減少する。代わって B_z , B_r , B_θ ともに脈動分が増加し、 B_r , B_z においては脈動分は直流分の $\pm 300 \sim 600\%$ にも達している。

このことからSCコイルの主たる浮上力は、平均的には $\theta = 0$ の近傍のいわゆる直線近似部に生じ、一方、 $\theta = 90$ 度の近傍では強烈な脈動力が作用し、その方向は平均的には反発方向であるが瞬間的には吸引力も作用することがわかる。

3.3 クライオスタット

クライオスタットは円筒縦軸形であり、断熱には高真空液体窒素シールド方式を採用している。SCコイルはクライオスタットの液体ヘリウムその底部に固定した構造であり、浮上力が支持装置に伝達できる。

SCコイル励磁のために当初2本のパワーリードを設けたが、後に3本のパワーリードと1個の機械式永久電流スイッチを設け、コイルの個別励磁と、永久電流モードの励磁が可能となるよう改造した。

本クライオスタットにおいては底部に水冷パイプ付きの3.2mm厚の銅製円板を設け、脈動磁界に対しSCコイル部をシールドすることが可能なよう考慮してある。

超電導マグネットの外観は図6に示すとおりである。

3.4 SCコイル励磁回路

SCコイルの励磁は5V, 1,000Aの定電流制御直流安定化電源を使用している。図7はSCコイルの励磁回路を示したものである。

4 試験結果

4.1 DC電源励磁

2種類のコイルの励磁負荷曲線は図3に示すとおりである。

(1) コイル(1)の特性

コイル(1)の励磁は最高1,000A/10minの励磁速度までN, S両極直列で行なった。定格の200kAT 800Aまでの励磁は全く安定で特筆すべきものはなかった。

次に1,000A/50minの励磁速度で過励磁試験を行なった

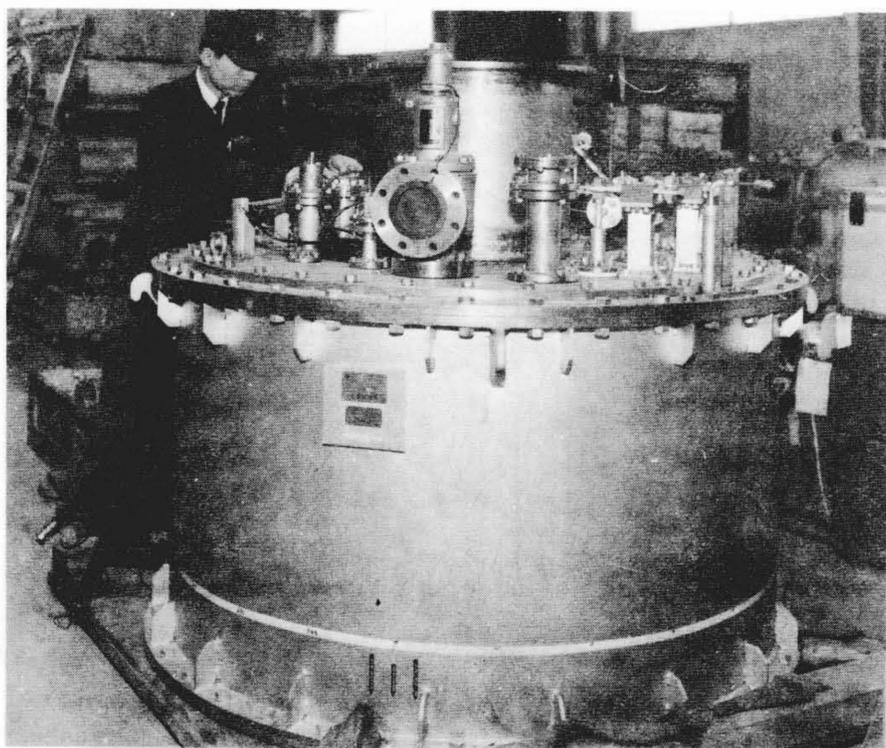


図6 超電導マグネット 超電導マグネットの完成写真を示す。
Fig.6 Superconducting Magnet

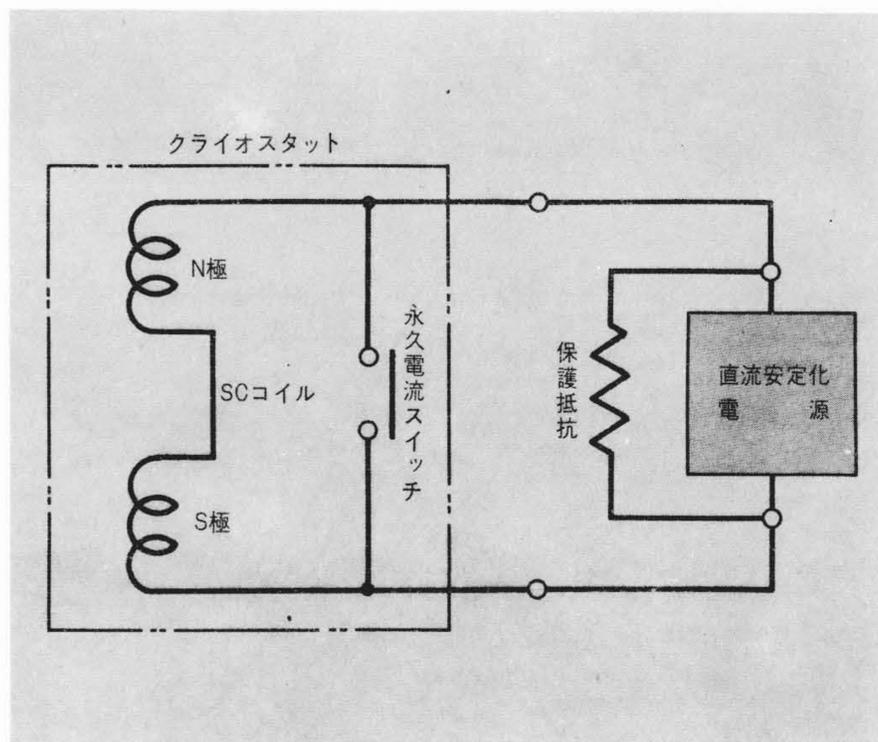


図7 超電導コイルの励磁回路 N極、S極は直列とし共通に永久電流スイッチを設けている。
Fig.7 Exciting Circuit for Superconducting Coils

ところ880Aで約40mVの常電導抵抗に起因する電圧が発生し、900Aでは100mVに達した(図3中の2で示す点)。

(2) コイル(2)の特性

コイル(2)の励磁も最高1,000 A / 10 minの励磁速度まで行なった。

励磁はN極、S極のそれぞれ個別および両者直列同時励磁で試験した。いずれの励磁においても定格の835Aを上回る電源容量いっばいの1,000Aに至るまで常電導抵抗の発生は認められなかった(図3中の(2)で示す点)。

4.2 永久電流励磁

コイル(2)についてN、S極直列にて永久電流励磁の試験を行なった。永久電流スイッチ容量の関係で電流は500Aとしたが、きわめて安定であり減衰は測定時間内には観測されなかった。

4.3 磁気浮上試験

磁気浮上試験は各種のパラメータを選んで行なわれたが、本報告では超電導マグネットの特性と密接な関連を有する事象に限定して述べることにする。

(1) 励磁方式と浮上特性

図8は速度と浮上力、制動力の関係をコイル(2)による実測値によって示したものである。同図では電源励磁と永久電流励磁の場合の同一条件下の浮上、制動特性を示している。

(2) 磁気シールドと浮上特性

磁気シールド板の有無と浮上、制動特性を同じくコイル(2)の実測値について示したのが図8である。一連の試験において浮上力、制動力ともにシールド板の影響はほとんど現われなかった。

(3) 浮上試験と液体ヘリウムの蒸発量

液体ヘリウムの蒸発量はオリフィス流量計を用いて試験の全工程にわたって連続的に測定された。図9は代表的な2種の試験の1サイクル分のヘリウム蒸発量の実測結果を示すものである。図9はいずれもコイル(2)を対象に500A電源励磁、SC、NCコイル間隔255mm、リアクトル0タップの共通条件で磁気シールド板のある場合とない場合を対比したものである。試験はSCコイルを励磁した状態でNC

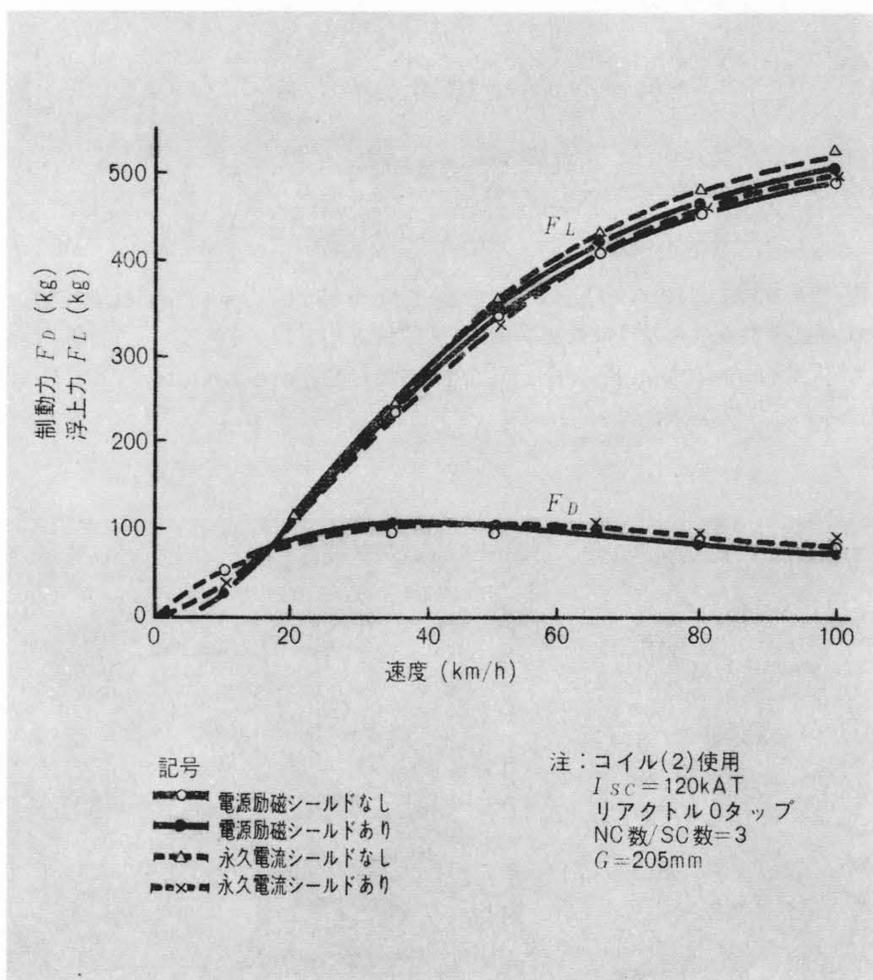


図8 速度一浮上力、制動力特性 速度100kmでは浮上力はほぼ一定値となる。また、制動力は速度40km/h付近で最大となる。磁気シールドの総合性能に対する影響は比較的小さい。
Fig.8 Property of Suspension and Drag Force vs Velocity

コイルをまず100km/hまで回転させ、徐々に0へと減速するまでを1サイクルとして行なわれた。

液体ヘリウム蒸発はNCコイルの回転により明らかにその量を増し速度が約30km/hの付近で極大値を示した。

磁気シールド板の効果もまた明白に現われ、1サイクル中の液体ヘリウム蒸発の基底量(NCコイル静止時)に対する増分はシールドのない場合はある場合の約2.7倍であった。

同様な試験のコイル(1)に対する結果でも前述の数値は約2.6倍であった。

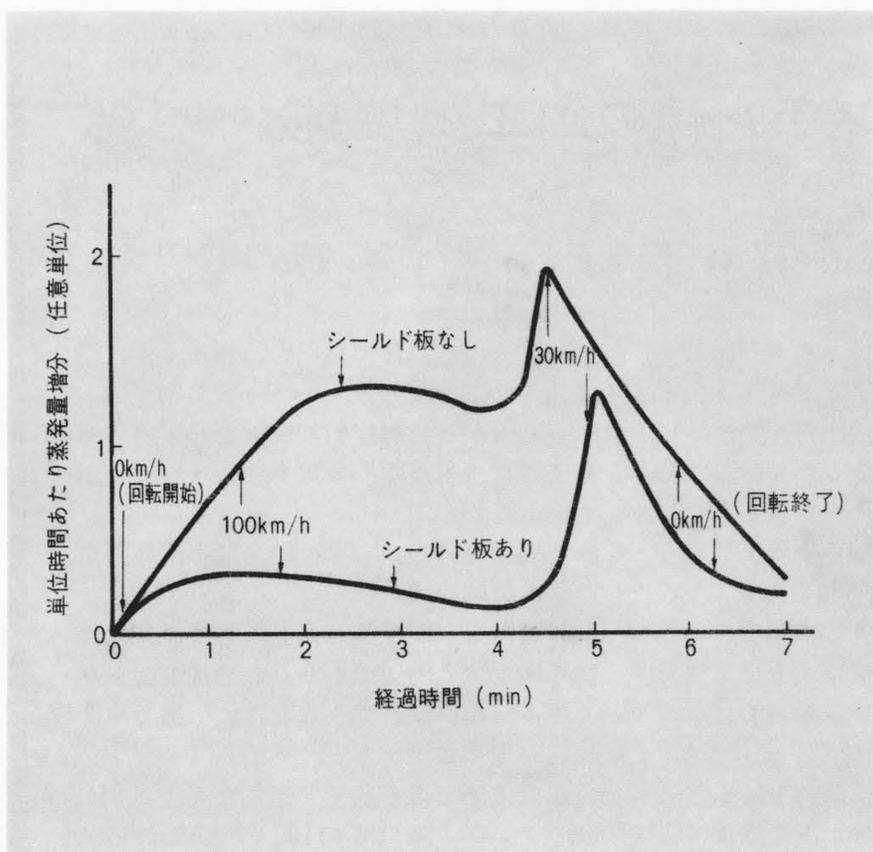


図9 動的試験中の液体ヘリウム蒸発量 回転浮上試験中のヘリウム蒸発量の増分。

Fig.9 Consumption Rate of Liq He Owing to Dynamic Operation

4.4 SCコイルの耐外乱性

SCコイルのNCコイル、電源などに起因する外乱に対する耐性についていくつかの試験を試みた。

(1) 電源のしゃ断

コイル(1)を励磁中700Aにおいて電源をトリップさせた。しかし、SCコイルは常電導転移などを呈することなくエネルギーは保護抵抗に回収された。

(2) NCコイル回路の投入および開放

コイル(1)に対し、SC、NCコイル間げき161mm、NCコイルリアクトル0タップ、SCコイル電流250A、NCコイル電流155Aの設定条件で、NCループ回路の瞬時投入および開放を行なったが、SCコイル端に約1.3Vの電圧が誘起されたほかは全く安定で異常は認められなかった。

(3) 永久電流スイッチの緊急開放

コイル(2)を永久電流モードで励磁し、端子間に保護抵抗を接続した状態で永久電流スイッチを開放する試験を行なった。試験はSCコイル電流100Aおよび500Aについて行なわれたが、いずれも安定にエネルギー回収がなされ常電導転移などの発生は認められなかった。なお、このときの電流減衰時定数は75秒であった。

5 検 討

試験結果の中から興味ある現象について考察を試みる。

5.1 2種の超電導コイルの励磁特性

10ZMB線を用いたコイル(1)の880Aにおける常電導抵抗の発生は、900Aまでの励磁がクエンチを発生することなく可能であったことから部分的な転移が生じたものと解釈され、その全コイル長に対する割合は約0.03%と推定される。

コイル電流の上限を決定したものはSteklyの安定化パラメータ⁽²⁾が1となる銅安定化特性がこの電流値と一致することから、Cryogenic Stabilizationの限界であると断定できる(図3, 曲線 l_1)。

一方、271ZFMB線を用いたコイル(2)が1,000Aの励磁に対しても全く安定であったことは、同じ条件で求めた銅安定化曲線が図3の l_2 となることを考えるならば、 $H \rightarrow I_c$ 特性の向上もさることながら、いわゆるファインマルチ線に起因する安定化の効果が発揮されたものと推論できる。

5.2 永久電流モードの励磁

永久電流モードの励磁はきわめて安定である。また浮上特性についても測定範囲で電源励磁と特別の差異はなく、動作も安定であり、十分実用に供しうるものである。

5.3 磁気シールドの効果

磁気シールド効果は本試験にみるかぎりきわめて好結果をもたらしているといえる。すなわち、浮上力、制動力にさしたる変化を与えることなく、一方では液体ヘリウムの蒸発量を少なくしていることである。

NCコイルの回転と液体ヘリウムの蒸発量の変動については、電磁気的な原因のほかに、機械的な原因があることが明らかである。すなわち、浮上試験中超電導マグネットは振動を生じ、特に30km/h付近では支持装置系との関連で共振を生じ、著しい振動が発生する。図9の測定結果は振動が液体ヘリウムの蒸発と密接な関係を有することを示している。つまり振動に伴う液面の揺れはクライオスタットの壁面の高温部に液面を移動させこれによって生ずる熱交換のために蒸発が増大するものと考えられる。もちろん、この場合クライオスタットの揺れがNCコイル磁界を切ることに起因した電磁気的な熱発生も当然含まれている。

6 結 言

Powellそのほかによって提唱された誘導反発磁気浮上は本装置の試験により成功し実証された。

将来、車上の磁界発生源となるべきマグネットに超電導マグネットを用い、電源励磁、永久電流モード励磁のいずれにおいても安定な浮上力の発生をみることができた。

本報告では浮上理論の詳細については触れなかったが、理論計算と実測の結果は、仮定と測定精度の条件の範囲でよく一致した。

採用した2種類の超電導線は設計の範囲においてそれぞれ安定に動作した。特に271ZFMB線の成果は軽量化を必要とする車載装置用の超電導線材としてファインマルチタイプの線材の有効性を示唆している。変化磁界の超電導体に及ぼす影響は最も懸念されたところであったが、本試験の範囲では問題はみられなかった。

本装置により超電導マグネットによる誘導反発磁気浮上が実証されたことは、超高速磁気浮上列車構想中最大の問題の一つに技術的解決を与えたものであり、今後の超高速列車計画に対して意義深い成果をもつものである。

終わりに臨み本装置の建設と運転試験にあたり、その立案と指導にあたられた日本国有鉄道本社、同鉄道技術研究所の関係各位ならびに装置建設を分担された東京芝浦電気株式会社、三菱電機株式会社の関係各位に対し謝意を表する次第である。

参考文献

- (1) J. B. Powellほか: Highspeed Transport by Magnetically Suspended Trains. ASME 66-WA/RP-5 (1967)
- (2) Z. J. J. Steklyほか: I. E. E. Trans. Nucl. Sci. NS-12 365 (1965)
- (3) 特許出願中



ドープしたタングステン線の加工と焼鈍

日立製作所 山本博司

日本金属学会誌 36-4 310 (昭47-4)

白熱電球を点灯するとタングステンフィラメントは二次再結晶して繊維組織を失い、衝撃で断線しやすくなる。また繊維組織のタングステンフィラメントは引っぱって素線に近い状態まで伸ばすことができるが、二次再結晶するとわずかに伸ばしただけで断線するようになる。タングステン線の脆(ぜい)化の要因には合金化、酸化、異種元素の汚染などがあるが、なかでも最も大きいのが上記の二次再結晶である。だが白熱電球を点灯したときのタングステンフィラメントの温度は必ず二次再結晶を引き起こすので、二次再結晶による脆化を最小限にとどめることがタングステンフィラメントに課せられた必要条件となる。本研究ではフィラメントの原線であるタングステン細線を製作する工程のうち伸線工程の加工と中間焼鈍がタングステン細線の二次再結晶とどのように関係し脆化に影響するかを調べた。

用いた試料は酸化タングステン粉末にケ

イ酸カリウム、塩化アルミニウムを微量ドープし、水素で還元したタングステン粉末を希フッ酸で洗浄した後、圧粉、焼結、鍛造、伸線の工程を経て製作した細線で、特に線径0.47mm以下の伸線条件を変えたものである。試料の寸法は伸線の中間工程から採取した直径0.207~0.055mmである。これを500~3,000°Cで3分間乾燥水素中で加熱した後、組織の観察、X線による構造解析および室温引張強さと伸びの測定を行なった。その結果、以下のことを明らかにした。

- (1) 線径0.47mmで一度中間焼鈍をしてから、以降無焼鈍で伸線すると加工度が増加するに伴って加工線の引張強さが大きくなり、二次再結晶温度が低くなる。
- (2) 線径0.47mmとこれ以降の伸線工程で中間焼鈍を施したときは、引張強さの大きい(有効加工度の高い)ものほど二次再結晶温度が上昇する。
- (3) 上記の伸線条件が異なった2種類の線に共通して、二次再結晶温度の高いものほ

ど、二次再結晶後の靱(じん)性がすぐれ引張強さが高くなる。

(4) したがって線径0.47mmとこれ以降の伸線工程で適当な中間焼鈍を施しかつ最終加工度を高く(線径0.055mmで引張強さ300kg/mm²以上)すると、二次再結晶温度が高くなり二次再結晶後の靱性が大となる。

(5) 適当な中間焼鈍とは引張強さの10%程度を減少する焼鈍であり、最終加工度を高くするためには、できるだけ太い線で中間焼鈍を施す必要がある。

この結果を適用して製作した直径0.055mmのタングステン線を100V-60Wの白熱電球用フィラメントとなし、点灯と同じ条件、すなわちアルゴン+10%窒素中で通電し2,500°Cに加熱した後、室温引張りによるフィラメントの伸びを調べた。そして鍛造から伸線に切り換えた線径および中間焼鈍を施した線径が太いものほど、すなわち有効加工度の高いものほど、すぐれた延性を示すことを確認した。



ドープしたタングステンフィラメントの靱性に及ぼす熱処理条件の影響

日立製作所 山本博司 鴨下源一

日本金属学会誌 36-9, 875 (昭47-9)

タングステン線は二次再結晶してもろくなるが、著者らはこれまでにこの脆(ぜい)化の原因をタングステン線製作工程から摘出して対策し靱(じん)性を改善した(粉体および粉末冶金, 19 (1972), 15 金属学会誌, 36 (1972), 310)。

本研究は、上記の研究結果を適用して製作した直径0.055mmのタングステン線を100V-60Wの白熱電球フィラメントと同形の二重コイルとし、種々の熱処理条件で再結晶させて組織と引張り試験による伸びとを調べ、二次再結晶後の延性を飛躍的に改善するための熱処理条件を見いだすことを目的としたものである。

試料とした上記タングステンフィラメントは次の工程により製作した。すなわち、酸化タングステン粉末に微量のケイ酸カリウム、塩化アルミニウムをドープ、これを乾燥水素で還元して生成したタングステン粉末を希フッ酸で洗浄、ひき続いて圧粉、焼結、鍛造(スウエーピング)、伸線の各工

程を経て製作した直径0.055mmの細線を二重コイルにしたものである。試料の加熱は直接通電して行なったが、加熱ふんい気は乾燥水素および白熱電球に用いるアルゴン+10%窒素でこれら両ふんい気は比較のため用いられた。引張り試験は最初試験温度の影響を調べるため、-40~+200°Cで行なわれ、その後ほとんどの場合、脆性温度領域を避けて60°Cの水浴中で行なわれた。さらにタングステンフィラメントの材質(ドープならびに加工度)およびニッケル、鉄などの汚染の影響を調べた。以上の研究で得た結果は次のとおりである。

(1) 白熱電球を点灯するとタングステンフィラメントは二次再結晶し脆化する。この脆化をなくすためには、二次再結晶粒を線軸方向に長く成長した粗大結晶粒とし、かつ粒界が線軸方向と平行に近く複雑に入り組んだ組織となすべきである。

(2) このような組織を得るためには、ドープ成分のアルミニウムをできるだけ多く

(W₄O₁₁に対してAl₂O₃として0.05%ドープする程度)し、かつ伸線工程で強加工したタングステン線(線径0.055mmでの引張り強さ300kg/mm²以上)でフィラメントを製作する必要がある。

(3) またタングステンフィラメントを酸素や水分のない中性ガス(アルゴン、窒素)か還元性ガスの水素中で、昇温速度をできるだけおそく(36.3°C/s以下)して加熱し二次再結晶させれば、さらにすぐれた延性を得ることができる。

(4) 従来のタングステンフィラメントを二次再結晶させたとき伸びは150~200%であったが、上記の実験結果を適用して製作したタングステンフィラメントは、二次再結晶しても600~800%の伸びを示し、非常にすぐれた延性を得た。

(5) 汚染元素としてのニッケル、鉄などは一般にタングステンを脆化するが、用い方によっては延性を改善する可能性のあることを示した。