磁気浮上超高速列車用のモデル超電導電磁石の試作[†]

鈴木 浩・石塚 光二・仲田 享司
松田 正治・高野 直行

東京芝浦電気株式会社総合研究所電気機械研究所 神奈川県川崎市小向東芝町 1
(1972年 9 月 28 日 受理)

“A Model Superconducting Magnets for a Magnetically Suspended High-Speed Train”

by Hiroshi SUZUKI, Koji ISHIZUKA, Takashi NAKADA,
Shoji MATSUDA, Naoyuki TAKANO

Toshiba Research and Development Center, Tokyo Shibaura Electric Co., Ltd.
1 Komukai Toshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki.

(Received September 28, 1972)

Synopsis :

This paper describes characteristics and behaviours of a model superconducting magnet used for a magnetically suspended highspeed train.

If the characteristics length of the order of 1 m is chosen for a model superconducting magnet as compared with the real vehicle dimension, the dimension 7-10 cm would be possible as a dimension between the center of the winding and the surface of the cryostat bottom which faced to the ground coil array; containing the radiation shielding layer as the inner structure of the cryostat. The coil dimension of 1.2 m long and 0.3 m wide measured to the winding were chosen as a result of the coil configuration studies of the levitation characteristics. The maximum field were 27 KG at the designed operating current of 500 A.

The electromagnetic force on the superconducting coil has three components; the lift force, the transverse and the driving forces. The lift force acting on the entire part of the windings was held with the coil former. And the force on the former was held and transmitted concentrically with the four columns to the part of room temperature.

For the horizontal components of the force; the transverse force or driving force, the coil was fixed with the thin rods of stainless steel, to the side wall of the outer vessel.

The electromagnetic forces acting of the superconducting magnet were determined using a “static levitation experiment” facility in which the superconducting magnet was set above the model ground coils involving a stabilizer coil.

In the static test, the rigidity of the cryostats against the lift and transverse force acting on the superconducting coils inside the cryostats was also tested.

Finally, the dynamic tests using a disc of 3.1 m in diameter as a coil track or a sheet track were performed.

The evaporation rate of liquid helium was 5~10 l/h throughout those experiments.

1. はじめに

電子計算機制御による輸送システムの誘導技術の発達が新しい輸送形態を生み出しつつある¹⁾。その中で、増大する旅客量対策、無公害技術開発の要求に応えるものとして、浮上方式の超電導列車が検討されはじめた²⁾。

種々の浮上方式が提案されている中でも磁気浮上方式は騒音、排気ガスを伴わない方式であり、とくに超電導電磁石を使うものは、永久電流により浮上そのもののために電力消費がないから、それ自身によるものはもちろんとして、新しい電力需要による新しい環境汚染の可能性をとまなわない。また、冷却剤である液体ヘリウムは不活性で軽いガスなので、これによる地上の状態の変質も考える必要がない、とされている。

超電導磁気浮上超高速列車は、超電導電磁石を車上に積んで、地上に敷設した地上コイル群列上ないしは銅やアルミニウムのシートをレール状に敷いたシート軌道上を超高速で走行する³⁾⁴⁾。車上超電導電磁石の作る磁界が、地上コイル中に誘起する電流やシート中に誘起される渦電流が、超電導電流に作用して生じる反発力が、この方式の浮上原理となっている⁵⁾。

この目的で使われる超電導電磁石には、これまでに用いられていた物理実験用の超電導電磁石（クライオスタットを含めて）はもちろんのこと、超電導応用の電力機器の超電導磁界発生部とは異なる、種々の性質が要求される。超電導電磁石は車両を一樣な浮上高さで支えねばならない。したがって超電導コイルは、車両全体を覆わないまでも、車両底面を一樣に支えるだけの拡がり、分布を必要とする。また、基本的には現在の車輪に対応した役割をはたすので、横へ張り出した腕または翼の形式をとるにしても、頭上懸架方式をとるにしても、車体の高さに比較して丈の低い、扁平なものが要求される。ちなみに現在の動輪径は約90cmである⁶⁾。

この超電導電磁石は、自分自身はもちろんのこと乗客を積んで車両を浮上、支持しなければならない。超電導電磁石が軌道と作用して発生する浮上力に比べて、超電導電磁石の重量は、小さくなければならない。超電導電磁石そのものの重さが、このような立場から問題になったことはこれまではなかったことである。

走行中の車両は軌道の不均一性や突風、軌道近くの橋梁のような磁性構造物の分布の変化に対応して動揺することが考えられる。このときの振動に伴う ac 作

用の超電導コイルや極低温状態の構造材への影響の考慮も新しい局面の一つである。これには超電導線、超電導コイル、永久電流状態の ac 対策がある。ここに使われる超電導コイルは比較的低磁界、大電流で使われるが、これも超電導応用としては特殊な部類に入る。

超電導磁気浮上が大量輸送の手段として成立するためには、この方式が充分経済的なものでなければならぬ。そしてそれを決める一つの鍵はヘリウムによる冷却システムの経済性であり、その基本には超電導電磁石の断熱性能の良さが確立されていなければならない。さらに、多数の乗客の輸送手段として動作、運転の安全性、信頼性の高さが要求されてくる。

以上の諸要件のうちで超電導電磁石の技術的な可能性および設計製作技術を検討する目的で、実験室規模でありながらできるだけ実規模に近い超電導電磁石を開発、試作し、その冷却、励磁の特性を実験的に研究した。

2. 試作目標の決定と試作された超電導電磁石 M-1

2.1 超電導コイルの規模

考えられている地表と超電導電磁石底面の間隔は 7～10 cm である⁷⁾⁸⁾⁹⁾。軌道としてコイル群列方式をとるものとして、一両 30 トン程度の車両を浮上させる超電導電流は 100 kAT のオーダーであると算出されている⁹⁾。超電導線の電流容量を 500～1,000 A と選ぶと、数百ターンのコイルとなる。この電流容量をもつ市販の多心、銅安定化超電導線を使うものとすれば、コイル断面は 10～50 平方センチメートル程度になる。

実規模に近い超電導電磁石の特性長さを 1m 程度と設定して、この程度の拡がりを持つ底平面の真空断熱容器と、その内部構造として液体窒素冷却のふく射熱シールド層、液体ヘリウム槽を考え、さらに浮上力を受ける超電導コイルの成形枠を考えに入れたとき、超電導コイル中心と最外槽の真空断熱容器の底面との距離は 7～10 cm 程度と考えられる。この値を基準に、とくにコイルの横幅と浮上高さの関係においてコイルの大きさの浮上特性に及ぼす影響を検討して、コイルの大きさを 0.3m×1.2m に決定した¹⁰⁾¹¹⁾。

2.2 浮上力、横方向力の伝達構造

超電導線または超電導コイルに働く電磁石の垂直方向の成分が浮上力に対応する。液体ヘリウムの 4.2°K

にある超電導コイルから常温空間にある車体に浮上力を伝える構造体は、複合構造を用いたとしても、乗客を含めた全車両を支えた上で、極低温域へ常温からの熱損失を極小に抑えねばならない。これは重量物を支えるための頑丈な構造物と伝熱面積という点で、むしろ要求となる。さらに丈の低い構造という点で、超電導電磁石とクライオスタットの組み合わせに、これまで切実な要求ではなかったことがつけ加えられている。

超電導コイル全体に分布して加わる電磁力を受けるのにコイル全体で受ける方法と集中的に受ける方法が考えられる。コイルの成形に必要な巻棒の上下面を利用して浮上力およびコイル重量を受け、この巻棒面上で適当な位置で集中的に力を受ける方式をここでは採用した。

この力の集中伝達部では、基本的には従来の円筒形のクライオスタットの上部構造を使い、液体ヘリウムの導入管、蒸発ヘリウムの出口、液面計導入管、電流リード線、温度や磁束測定用の素子のリードの導入などの機能をもたすことを考えた。この部分の主要構造は Fig. 1 に示したように、コイル成形棒から直接、常温部へぬける金属円筒で、円筒の座屈に対する強度をそのまま利用している。また、液体ヘリウム中の極低温での材料の機械的強度の変化を補う目的で、液体ヘリウム槽底とコイル成形棒をボルト固定することによって、ボルトの引張り強度をも、浮上力伝達に参加させた。

Fig. 1 The structure for transmitting forces from the superconducting coil.

この支持円筒はコイル上に四本設けてあり、後述のような冷却計画を実行できるような種々の導入管を配分して組み込んである。この円筒を通して力は、このモデル超電導電磁石では、上面のフランジに伝えられるようになっている。換言すれば、浮上力が働かないときの超電導コイルは、真空容器であるクライオスタット外槽の中に、フランジからぶら下げられている形になる。

一方、電磁力の横方向の成分は推進力（または走行抵抗力）や案内力（または脱線させる方向の力）となるもので、ぶら下がっているコイルに対して、それを横にふれさせるような方向に働く。この横方向の力に対しては、以前に試作し、報告したことのある超電導発電機の超電導フィールド・コイルを固定した方法；つづみの張り紐構造を採用した¹²⁾。

2.3 熱侵入とその断熱法

磁気浮上超高速列車用の超電導電磁石の極低温部への侵入熱源は二つに分類できる。

- (a) クライオスタットの構造自体に由来するもの
- (b) 超電導の浮上動作に由来するもの

この後者には、例えば地上コイル軌道の断続構造に原因した超電導線の ac 損失やクライオスタットの各槽の誘導加熱による温度分布の再編成に由来するものが含まれる。

ここでは浮上用超電導電磁石の試作目標としては (a) の熱侵入を最小にすることを選び、試作結果の超電導電磁石を用いて (b) の調査を実験的に行なえるようにした。

この目的を達する断熱構造の基本構想としては、従来のクライスタットの 3 層構造を選んだ。すなわち、真空容器としての外槽、冷却槽としての液体ヘリウム槽、その中間の液体窒素温度のふく射シールド板である。

ふく射シールドとしては、多層断熱技術が、その高性能さ、軽量さ、第二の冷媒の不要なことなどから利用されるべきであるが、試作した構造のように多層断熱層を縦貫する支持物が沢山ある場合もそれだけの性能を十二分に発揮させるのに疑問の余地があるので、ここでは採用を見送った¹³⁾。

その支持構造を通しての熱侵入を小さくし、支持物を短くするためにはふく射シールド板の窒素温度を利用した。すなわち円筒および横張り線は、いずれも中間を窒素温度に冷やして、常温部からの侵入熱を全て液体窒素に吸収させた。したがって液体ヘリウムへ

の侵入熱を決める温度の高温側は全ての支持構造で77°Kに固定してある。

とくに円筒部では円筒壁や電流リード線と蒸発してくる液体ヘリウムの熱交換を有効に利用して侵入熱を減らす構造を採用した。この方法は、大電流リードの設計などで採られている方法でもあり、また蒸発ガスを利用したガスシールドへ発展する第一段階の方法として、前述した強制冷却のふく射シールド板という中間冷却の活用技術とともに、磁気浮上では当然使われていく技術であると考えられる。

以上の検討の結果、設計に採用した基本構造は Fig. 2 のようになる。図中に主要な熱侵入量の計算値を書き加えておいた。

Heat leak to the LHe vessel

elements	materials	cross section cm	numbers	temperature °K	total heat leak (watt) hr
tower	SUS	0.21	4	77-4.2	5.3
tension rod	SUS	0.062	16	77-4.2	0.26
power lead (I=0)	electro copper	0.2	4	300-4.2	1.2

Heat generation in power lead by transport current is 0.88m W/A.
This become 1 Watt when 500A, two lead.

Fig. 2 Cross section of cryostat, and heat leaks.

2.4 形状と重量

超電導コイルの長さ、幅、クライオスタットの高さを決めるよりどころの数値は、以上のように決まった。さらにこれを規定してモデル超電導電磁石として全体の形状を決めるのに、磁気浮上模擬試験の装置の設計と、実車での超電導電磁石の使われ方を考慮に入れた。

超電導電磁石の浮上中の特性および浮上力特性を研究する試験装置としては、静止した超電導電磁石に対して軌道コイル側を動かす方式を考えた。軌道コイルを Fig. 3 のように円板の外縁に沿って並べて回し、軌道コイルの上に超電導電磁石を固定して、これに働く浮上力、横方向力、進行方向の力を測定するとともに

Fig. 3 Schematic configuration of the dynamic test with the rotating disc PROPULSIVE

に、超電導コイルおよびその周辺に現われる電磁的な変化を動的に調べようとするものである。軌道コイルの最大速度としては、浮上力が十分に飽和領域に入っていて、制動力も低速側の特性を脱しているような速度として 80~120 km/hr を決め、これが実現できるような最大の円板直径を選んだ。円板は外縁に、超電導コイルの長さの半分の軌道コイル 12 ケをとりつけた FRP の組み合わせ構造で直径 3.1 m、周速 124 km/hr、軌道コイルの中心で 100 km/hr のものを用意することにした。超電導コイルはこの軌道コイルの進行に合わせて、コイル中心で 2.5m の曲率をもつ弧状のものを作った。

超電導電磁石の外形を規定する制約の一つに、その底部の問題がある。超電導コイルと軌道コイルの間で有効な浮上力を発生させるために二つのコイルはできるだけ近づかなければならない。このために幅 0.3m ていどの超電導コイル幅では底面は大部分が平面になる。また、浮上状態の横方向の位置の安定性や、車両の走行のために、超電導コイルの左右に生じている磁界を利用することも考えられるので、浮上力のときと同じくクライオスタットの側壁も薄く、超電導コイルに密着していることが望ましい。この考えに従って超電導電磁石の外形も弧状とした。

超電導電磁石の外形を決める真空容器は扁平な底面でしかも超電導電磁石と底面間の距離をつめるために補強リブを思うように入れることができないため厚手の材料が使われて非常に重たいものになる。側板と上板には適当な補強リブを入れて材料を薄くし軽くする努力をした。

最終的なモデル超電導電磁石の外形は Fig. 4 のようになり、試作した超電導電磁石 2 台の重量は、ステンレス鋼 SUS 27 の外槽付き 748 kg および 675 kg

となった。構成各部の重量を Table 1 に示した。2 台の重量の違いは後述するように使用した線材の違いに対応している。後に外槽だけをアルミ合金にした結果、重量を 625, 555 kg に軽減することができた。この点についてはさらに設計の検討を進めて、側面を Fig. 5 に示すように波形板にすることによって一層

Fig. 4 The model superconducting magnet for a magnetically suspended high speed train

Fig. 5 Corrugate sheet wall

Table.1 The large part of the weight of the magnet was occupied by the weight of the outer vessel.

Vacuum vessel	340 kg(SUS)		
	215 kg(Al)		
Radiation shield	80 kg		
Liquid helium vessel	70 kg		
Former	45 kg(IMIwire)		
	56 kg(CSTwire)		
Wire and others	140 kg(IMIwire)		
	192 kg(CSTwire)		
Total	IMIwire 675 kg(SUS)	555 kg(Al)	
	CSTwire 748 kg(SUS)	625 kg(Al)	

の軽量化をはたせることが判っている。

Table 1 にもあるように、この段階の超電導電磁石重量の約半分は真空容器となる外槽がしめている。これは外槽を外圧に耐えるばかりでなく、超電導コイルの quench が液体ヘリウムの急膨張、液体ヘリウム槽の破裂をひき起こすという事態に備えて防爆容器としても内圧にもたえるように設計されていることに原因がある。この点は、これまでの経験、磁気浮上用超電導コイルの蓄積エネルギーレベルを考えてみて、外圧容器としてのみ使うことにすれば材料の質および大きさはもとより構造上からもずっと軽くできるので、この立場での磁気浮上用超電導電磁石も現在、開発中である。

外槽のほか、シールド板、液体ヘリウム槽、支持構造物、コイル成形枠、超電導線そのものについても、それぞれ単独で、または複合構成体として軽量化の方針があり、そのプログラムはすでに明らかにした通りである¹¹⁾。実際約 60 kg の重さの差が出てくるのである。

2.5 モデル超電導電磁石の予冷システムとタワー

背の低い、拡がりのある形状の超電導電磁石の冷却と液体ヘリウムの注入は、従来の深底のクライオスタットとその底部に収められた超電導コイルの冷却、液体ヘリウム浸漬とは違った冷却手段を必要とする。実際広い容器底面の一部に、直径 10 mm にも満たない液体ヘリウム移送管の口から流れ出る液体ヘリウムを順調に注入するためには、予冷サイクルの組み立て、寒冷蒸発ガスの利用に充分に配慮を必要とする。

試作超電導電磁石では、この問題を、浮上力伝達のための支持方式と同時に解決している。先に 2.2 および 2.3 で説明したように超電導コイルの支持円筒は、ここで採用した変形レーストラック形状の長手方向の両端と、コイル中央に四本設けられている。

この種、超電導電磁石の冷却、運転、測定に必要なものはおおそ次のようなものである。

- (1) 予冷寒冷ガス入口
- (2) 予冷寒冷ガス出口
- (3) 液体ヘリウム注入口
- (4) 蒸発ヘリウムガスの出口
- (5) 液面計導入用パイプおよび温度、磁束等のセンサー類の配線の出口
- (6) 超電導電磁石励磁用の電流リード線
- (7) 永久電流スイッチの操作桿またはリード線出口

Fig. 6 Schematic view of superconducting magnet.

- (8) 圧力計, 安全弁
- (9) とくに試作超電導電磁石のような拵りのある構造の液体ヘリウム槽の場合には, 種々の部分での圧力調整用のガス抜き導管
- (10) 全ての導管系についての Thermal Oscillation 対策

これらのものは一つで幾つかの機能を兼ねることできる。試作した超電導電磁石では Fig. 6 に概要を示したように以上の機能導管を分布させた。さらに, 利用する導管の組み合わせによって, 超電導コイルの一端から他端へ徐々に冷却を進めることも, 超電導コイル全体を一様に冷却してゆくことも任意に選べるようにした。同様に液体ヘリウムの注入も, 液体ヘリウム槽の一部から注入することも, 全体にわたって一様に注入することもできるようにしてある。

また, 蒸発ガス回収口やガス抜き導管の調節を, 超電導コイルや液体ヘリウム槽の各部位の温度分布を見ながら冷却が効率的に進むように, 行なえるようになっている。

同様に, 電流リード線の通電時には, ここを冷やして通る蒸発ガス量を増加できるようにしてある。

このような機能導管の導入口が集まった支持円筒の頭は結局, Fig. 4 に見たようにクライオスタット上面に盛り上った姿となった。表面から上に出た円筒の部分は, 内部に収納した導管が蒸発ヘリウムと熱交換する部分を増すという効果はあるにしても, 多分に従来の深底筒形クライオスタットに対する設計者, 研究

者の郷愁のようなものといった感じがする。この部分は超電導電磁石の盲腸である。機能的にはアクセスファネルまたはサービスファネルと呼ぶべき部分と思われるが, ここではタワーないしはエントツと呼ぶことにした。

2.6 超電導線, 超電導コイルと永久電流スイッチ

超電導線としては東芝—昭和電線電纜で製造された半安定化超電導線 CST-8 と IMJ-361 多心電導線を用いた。何れも 500 A で使用している。これらの線の構造および特性についてはすでに報告してある⁽¹¹⁾⁽¹⁴⁾。

超電導コイルは, これらの超電導線をすでにのべたように円板軌道の曲率に合わせた変形レーストラック形に巻いたもので, いずれも 400 ターン巻いた。その構造は Fig. 7 に示した CST-8 の場合のようにソレノイドに巻いて, 層間に 1 mm のスペーサを入れて

Fig. 7 The cross section of superconducting coil.

液体ヘリウムの冷却通路としてある。通電時のコイル自体の電磁力や、浮上力を含む軌道コイルからの動的な電磁力に、超電導コイルの滑りなどで超電導性に破綻が起きないように、コイルの成形には充分の配慮を必要とした。この問題は、コイルの形に凹部が含まれているので、とくに丸断面の IMI-361 の成形の際にはむずかしい問題であった。巻き線作業の終わった超電導コイルを Fig. 8 に示した。この図には超電導コイルに装着された熱式永久電流スイッチも見える。この永久電流スイッチの電流容量は 700 A である。超電導電磁石と組み合わせたときの電流減衰は通常の測定器では、ほとんど測定できないほどであった。

3. 試 験

3.1 冷却特性

試作超電導電磁石の予冷は東芝総合研究所の液化機で行なわれた。この際、2.5 で述べた機能導管の利用によって極めて簡略に冷却できることを確かめたので、その後は浮上実験に先立って、実験装置に組み込んだ状態で Fig. 9 に示した簡便な予冷システムを利用して冷却した。この回路によって液体窒素で冷やされたヘリウムガスを超電導電磁石に送り込み、超電導コイルが約 100°K に達してからは直接、液体ヘリウムを

Fig. 8 The superconducting coil under construction

送り、その蒸発ガスの顕熱利用を行なうことで、少量の液体ヘリウムによる短時間のクールダウンが可能となっている。冷却進行の様子の一例を Fig. 10 に示した。貯液の終わるまでに要した液体ヘリウムの量は CST-8 コイルで 130 l であった。

3.2 励磁その他の試験

超電導状態になった試作電磁石を使って、10 A/sec の励磁速度までの励磁実験を行ない、超電導コイルの安定性を確かめると同時に、周辺の磁束分布を測定した。

また、下においた同形の常電導コイルに電流を流して超電導コイルに電磁力を作用させ、クライオスタット外部に現われる種々の方向の力を測定して、構造の安定性を確かめると同時に、静止状態での軌道コイルとの相対的位置による種々の方向の力の分布、変化を調べた。さらに常電導コイルに 50 Hz 交流電流を流して冷却や超電導状態の変化を調べた。最後に、常電導コイルを使って静的な状態で実際に超電導電磁石を浮き上がらせて、その軽量さを確かめた。これらの実

Fig. 9 Cooling system

Fig. 10 Cool-down characteristics

験の詳細については別に報告してある通りである。なお、この際、液面高さの時間変化および流量計記録によって求めた液体ヘリウムの蒸発量は液面の位置で変化して 5~10 l/hr であった。

これだけの試験を済ませた上で、試作超電導電磁石を直径 3.1m の回転円板軌道（コイル軌道およびシート軌道）と組み合わせ動的な浮上特性を実験的に調べた¹⁵⁾。この結果については現在、整理中である。

4. ま と め

磁気浮上超高速列車用の超電導電磁石の設計法、製作技術、運転上の問題を経験、解決するために、実際の使用状態を考慮に入れた実規模に近いモデル超電導電磁石を試作した。

試作の目標は軽量であり、扁平であり、構造的にも極低温装置としてもまた超電導特性の上からも安定であることであつた。

実験によって、実空隙 55 mm のところで 800 kg の浮上力を得た。また丈の高さは 55 cm、液体ヘリウム槽から常温面までの浮上力伝達構造体の長さは 35 cm であった。

実験中の液体ヘリウムの蒸発量は 5~10 l/hr であった。この際、クライオスタットの冷却構造設計の際の考慮がいずれも有効であったことが明らかになった。

この開発研究にあたり御指導頂いた日本国有鉄道技術開発室京谷好泰開発主幹、日本大学理工学部安河内昂教授、東芝総合研究所岡本晴道研究主幹、米満博夫主任研究員、荻原宏康主任研究員に感謝します。

なお、この研究は一部、46年度運輸省試験研究補助金によって行なわれたものである。

引 用 文 献

- 1) 一條幸夫：20 世紀の鉄道，至誠堂（S45）
- 2) 奥 猛，京谷好泰，佐貫利雄：超高速新幹線，中公新書，272（S46-12）
- 3) J. R. Powell and G. T. Danby：Magnetic Suspension for Levitated Tracked Vehicles, CRYOGENICS 11 192 (1970)
- 4) C. Guderjahn and S. L. Wipf：Magnetically Levitated Transportation, CRYOGENICS 11, 171 (1970)
- 5) 山村 昌：超高速列車の磁気軌道，電学誌，91 2215（S-46）
- 6) 電気学会大学講座，電気鉄道
- 7) 高野一郎，齊藤幸信：超電導磁気浮上の解析，第 7 回低温工学研究発表会（S-46-5）
- 8) 山田忠利，岩本雅民：超高速列車における浮上特性の理論特性，電学誌 B. Vol 92-B p. 19（S47-1）
- 9) I. Takano, Y. Saito and H. Ogiwara：Characteristics of The Magnetic Levitation for High-speed Trains ICEC-4 J-4 (1972)
- 10) 松田正治，齊藤幸信，荻原宏康：磁気浮上超高速列車の浮上特性，および横方向力特性 低温工学誌 Vol. 7 No. 3 27 (1972)
- 11) 荻原宏康，高野直行：磁気浮上用超電導電磁石 東芝レビュー，Vol. 27-7 p. 630 (1972)
- 12) 米満博夫，高野直行，齊藤幸信，森本和三：超電導発電機，低温工学誌，Vol. 4 No. 5 201 (1969)
- 13) F. E. Swalley, C. D. Nevius：Practical problems in Design of high-performance Multilayer Insulation System for Cryogenic Stages. adv. cry. Eng 10 (1967)
- 14) 岡本晴道 他：シングル銅マルチ超電導線，第 8 回低温工学研究発表会（S46-11）
- 15) 仲田享司，高野直行：超電導磁気浮上動的浮上実験，第 9 回低温工学研究発表会（S47-5）