

磁気浮上走行試験装置（ML-100）用 超電導マグネット

Superconducting Magnet for “ML-100”

A magnetically levitated experimental vehicle (ML-100) was designed and constructed in commemoration of the Centenary of the Japanese National Railways. For magnetic levitation the vehicle is provided with two superconducting magnets developed by the authors. The test operation of the vehicle ended with success in 1972, in which the superconducting magnets showed stable performance in levitating vehicle body giving a bright prospect for the completion of a new railway transportation of tomorrow.

齊藤龍生* Ryusei Saitô
藤永高正* Takamasa Fujinaga
多田直文** Naobumi Tada
木村 浩*** Hiroshi Kimura

1 緒 言

わが国では現在東海道、山陽両新幹線電車が開発され、旅客輸送上大きな成果を上げているが、激増する輸送需要に対処するためさらに輸送効率の高い超高速鉄道の開発が必要となりつつある。この傾向は、世界的にも大都市の密集する地域においては共通の問題であり、各国で超高速鉄道の開発が進められている。

日本国有鉄道では、これらの情勢に対処し超高速鉄道の実用化を図るため各種の研究を進めているが、去る昭和47年、鉄道100年を記念して磁気浮上走行試験装置（以下、ML-100装置と略す）を建設し浮上走行試験を行なった。

超高速鉄道に共通する技術的特徴は非粘着式駆動と車体の浮上支持である。ML-100装置においては、推進方式としてリニアインダクションモータを、浮上方式として誘導反発式磁気浮上方式を採用しており、車上に4個の超電導コイルが搭載されている。

本稿ではこのML-100装置に用いられた超電導マグネットについて報告する。

なお走行試験車については、すでに報告されている⁽¹⁾のでそれを参照されたい。

2 ML-100装置の概要

ML-100装置の基本仕様は表1に、また装置の構成は図1に示すとおりである。試験車は地上一次のリニアインダクションモータによって駆動され、車上に搭載された超電導マグネットと地上に配置された常電導コイルとの間に生ずる誘導反発力によって磁氣的に浮上する。試験線は全長480m、走行速度は最高60km/hで、この時車体は約100mm浮上するように設計されている。

超電導マグネットの基本仕様は表2に示すとおりで、自重と車体重量を浮上支持する。

表1 ML-100装置の基本仕様 超電動マグネットを用いた本格的な磁気浮上列車の試験装置のおもな仕様を表示した。

Table 2 Specification of ML-100

項 目	仕 様
1. 方 式	
支持方式	超電導誘導反発式磁気浮上
推進方式	地上一次リニア インダクション モータ
案内方式	摺動式
2. 性 能	
試験線長	480m
最高速度	60km/h
加減速度	3.5km/h/s
浮上支持荷重	3,500kg
浮上高さ	100mm (60km/h)
最大推力	約1,000kg

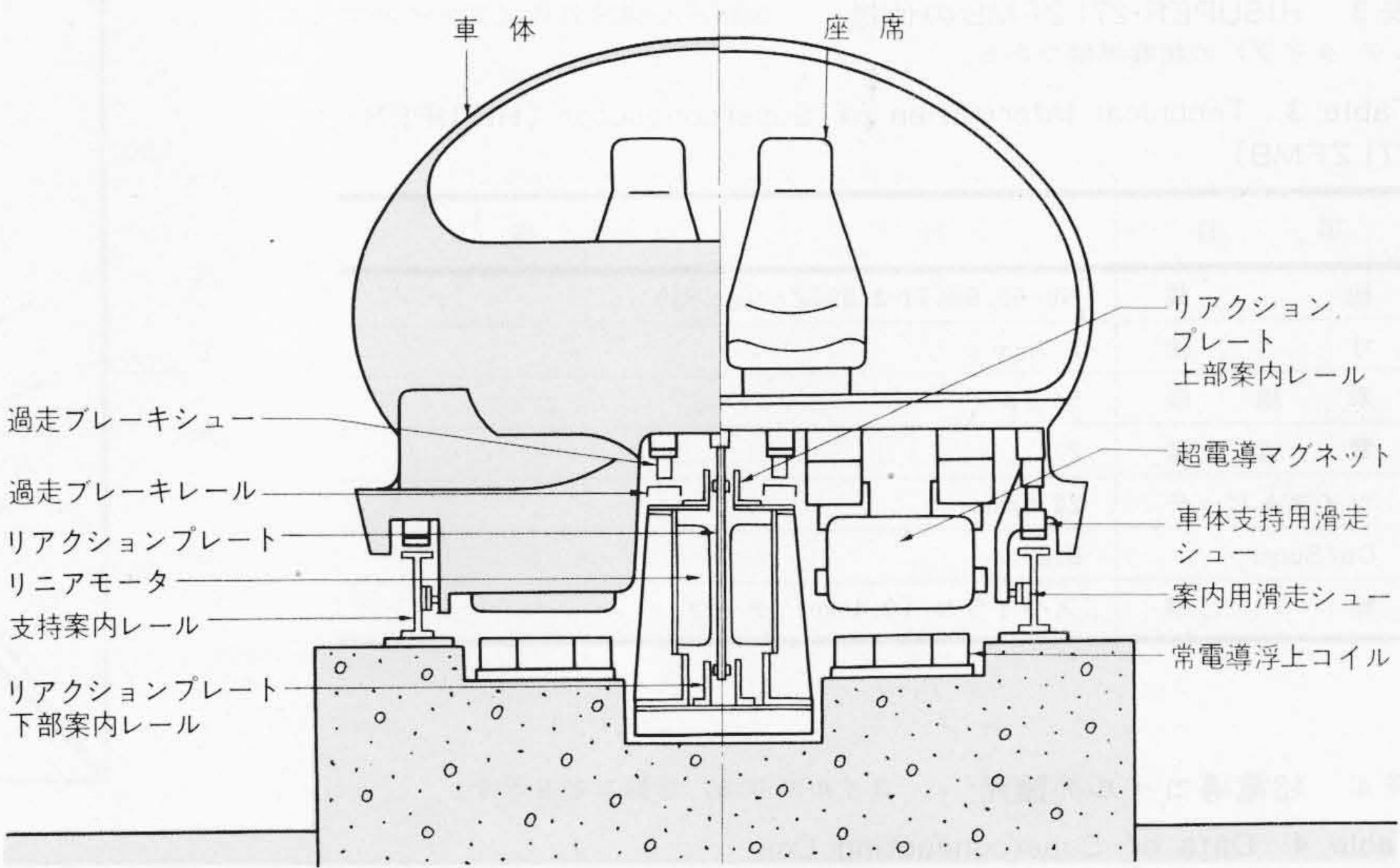


図1 ML-100装置の構成図 走行試験線上で浮上走行状態の断面を示すものである。試験車はリニアモータで駆動され、超電導マグネットと常電導浮上コイル間の誘導反発力で磁氣的に浮上する。

Fig. 1 Configuration of Experimental Equipment

* 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

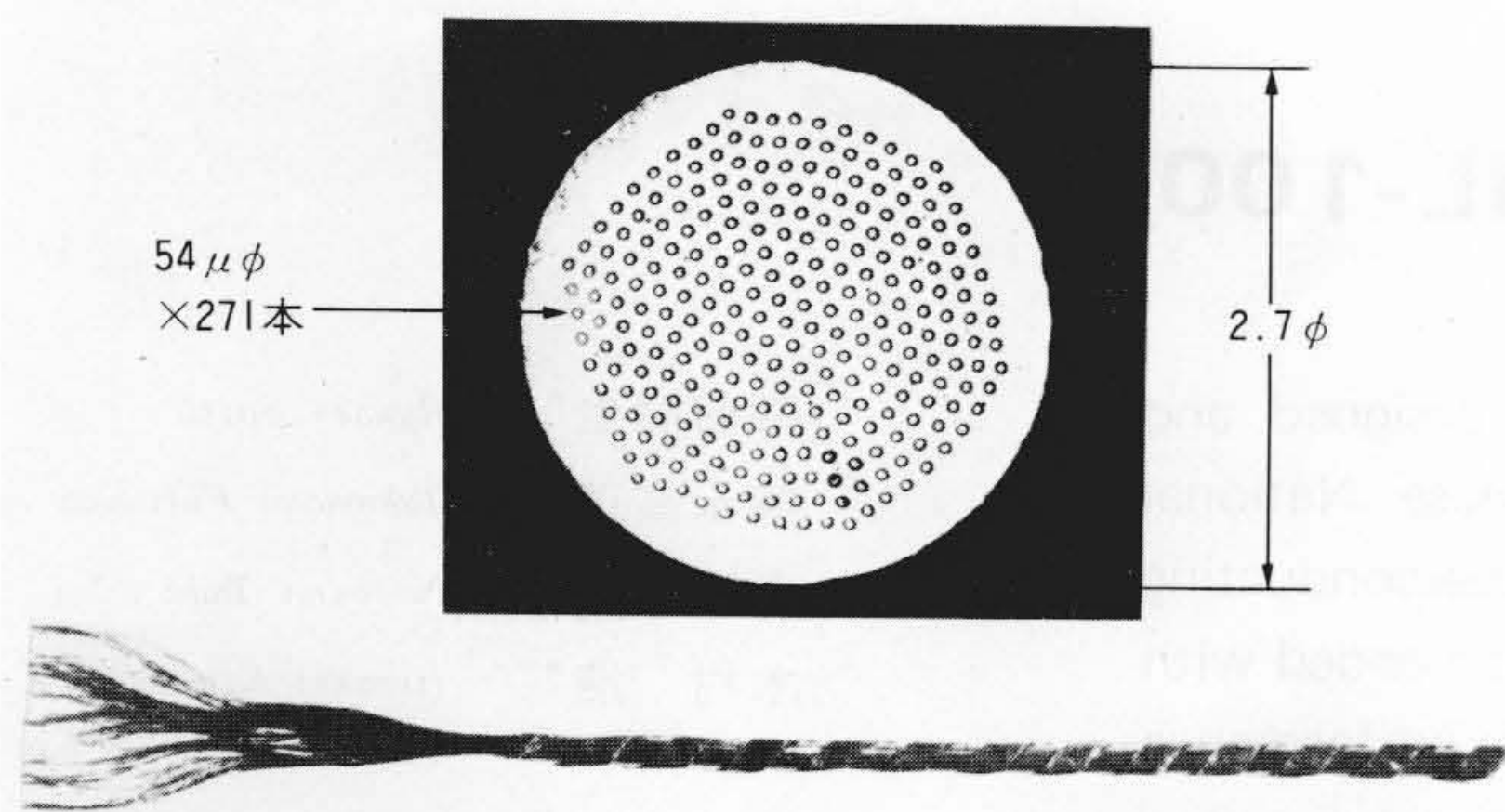


図2 HISUPER-271ZFMBの断面と試料 超電導線は、銅基材の中に埋め込まれている。

Fig. 2 Section and Outside View of HISUPER-271 ZFMB

表2 超電導マグネットの基本仕様 超電導マグネットは、超電導コイルと断熱槽であるクライオスタットから構成される。

Table 2 Specification of Superconducting Magnet

項 目	仕 様
超電導ループ数	4
ループ寸法	長さ1,550mm×幅300mm (レーストラック形)
極ピッチ	前後 1,800mm 左右 1,200mm
起磁力	250kAT/ループ
励磁方式	永久電流モード
外形寸法	長さ4,250mm×幅600mm×高さ400mm 2基

表3 HISUPER-271 ZFMBの仕様 極細多心複合方式 (ファインマルチタイプ) の超電導線である。

Table 3 Technical Information of Superconductor (HISUPER-271 ZFMB)

項 目	仕 様
組 成	Nb-62.5%Ti-2.5%Zr (at %)
寸 法	2.7mm φ
素 線 径	54 μφ
素 線 数	271
ツイストピッチ	22.6mm
Cu/Super	8.2
絶 縁	スパイラル (0.4mmt テープ)

表4 超電導コイルの諸元 コイルの寸法、巻数などを示す。

Table 4 Data of Superconducting Coil

諸 元	数 値
巻 数	360T
定 格 電 流	695A
寸 法	中心寸法：長さ1,550mm×高さ300mm 断面寸法：幅62mm ×高さ65 mm
インダクタンス	200 mH
エ ネ ル ギ ー	50kJ

3 超電導マグネット

3.1 超電導線材

超電導コイル用線材として、極細多心複合超電導線HISUPER-271ZFMBを採用した。超電導線の仕様は表3に示すとおりである。また、図2は超電導線の断面写真を示すものである。

3.2 超電導コイル

超電導コイルは進行方向の左右に各前後2ループ、計4ループが設けられている。超電導コイルの諸元は表4に示すとおりである。

定格値250kATに励磁したときコイルの最大経験磁界は、レーストラック形コイルの湾曲部内側中心で20kGに達する。図3は、コイルの励磁特性を超電導線の特性とともに示したものである。

地上コイルに誘起される電流からの変動磁界は最大250G、脈動の基本周波数は最大25Hzである。

定格励磁点の電流は先行試験の結果を参考に設定したもので、最大磁界点における最小伝搬電流⁽²⁾にはほぼ等しい値となっている。

コイルにはスパイラル絶縁方式を採用しており、スペーサ絶縁を施したボビンに巻かれている。

3.3 クライオスタットとマグネット アセンブリ

ML-100装置では四つの超電導コイルを左右2台のクライオスタットに収納しており、したがって、マグネットとしては進行方向に二つのコイルを収納したものが一つの構成体となり、内蔵される両コイルの間には特別の区画、壁などは設

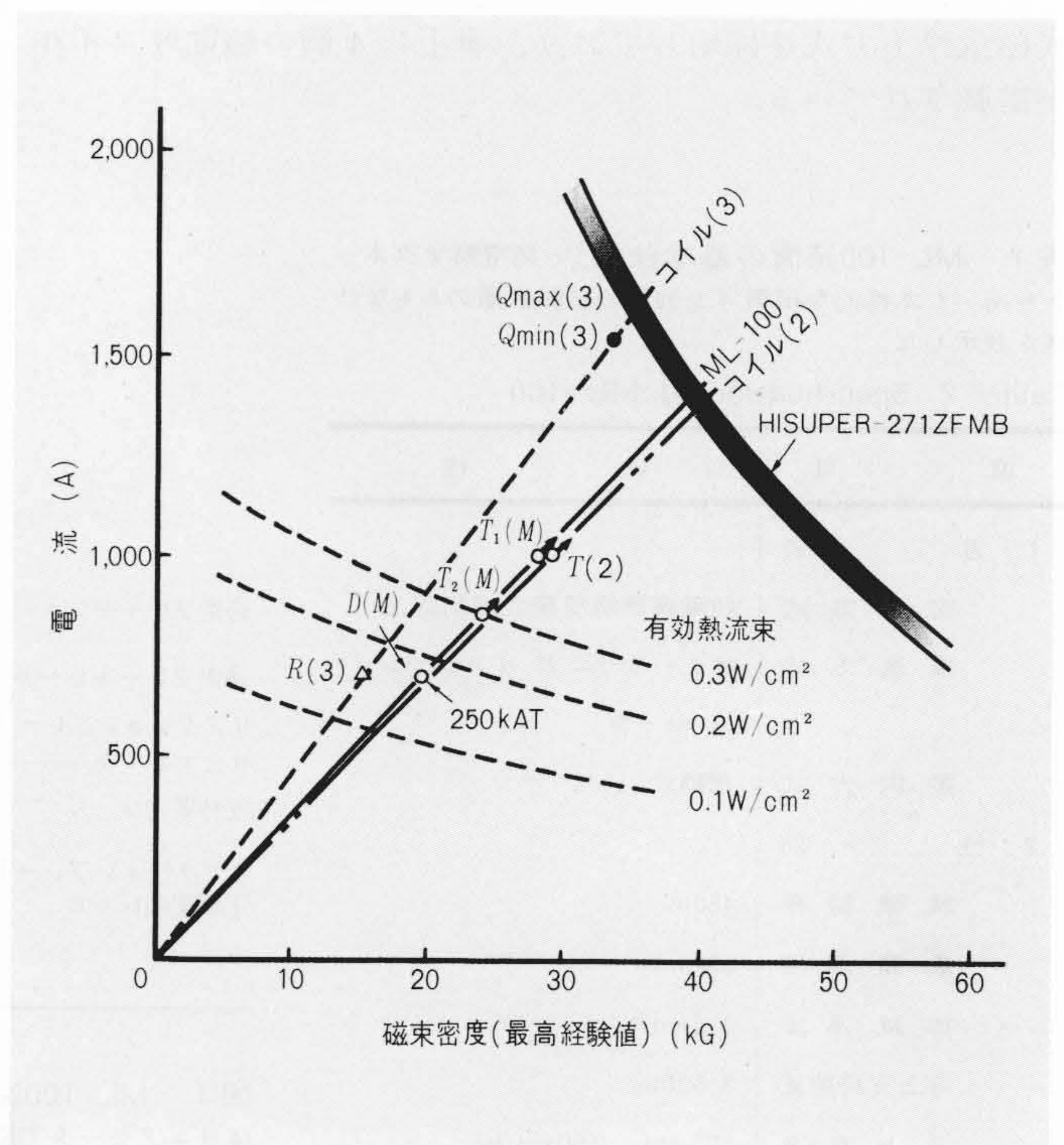


図3 超電導線の短尺 $H \rightarrow I_c$ 特性と励磁特性 本装置のコイルはML-100で示している。 $D(M)$ 、 $T_1(M)$ 、 $T_2(M)$ はそれぞれ定格値、単独コイル試験値、完成マグネット試験値である。 $T(2)$ はコイル(2)の試験値、 $Q_{min}(3)$ 、 $Q_{max}(3)$ 、 $R(3)$ はそれぞれコイル(3)の最小、最大到達値および回復値を示す。

Fig. 3 $H \rightarrow I_c$ Property of Short Superconductor and Excitation Lines

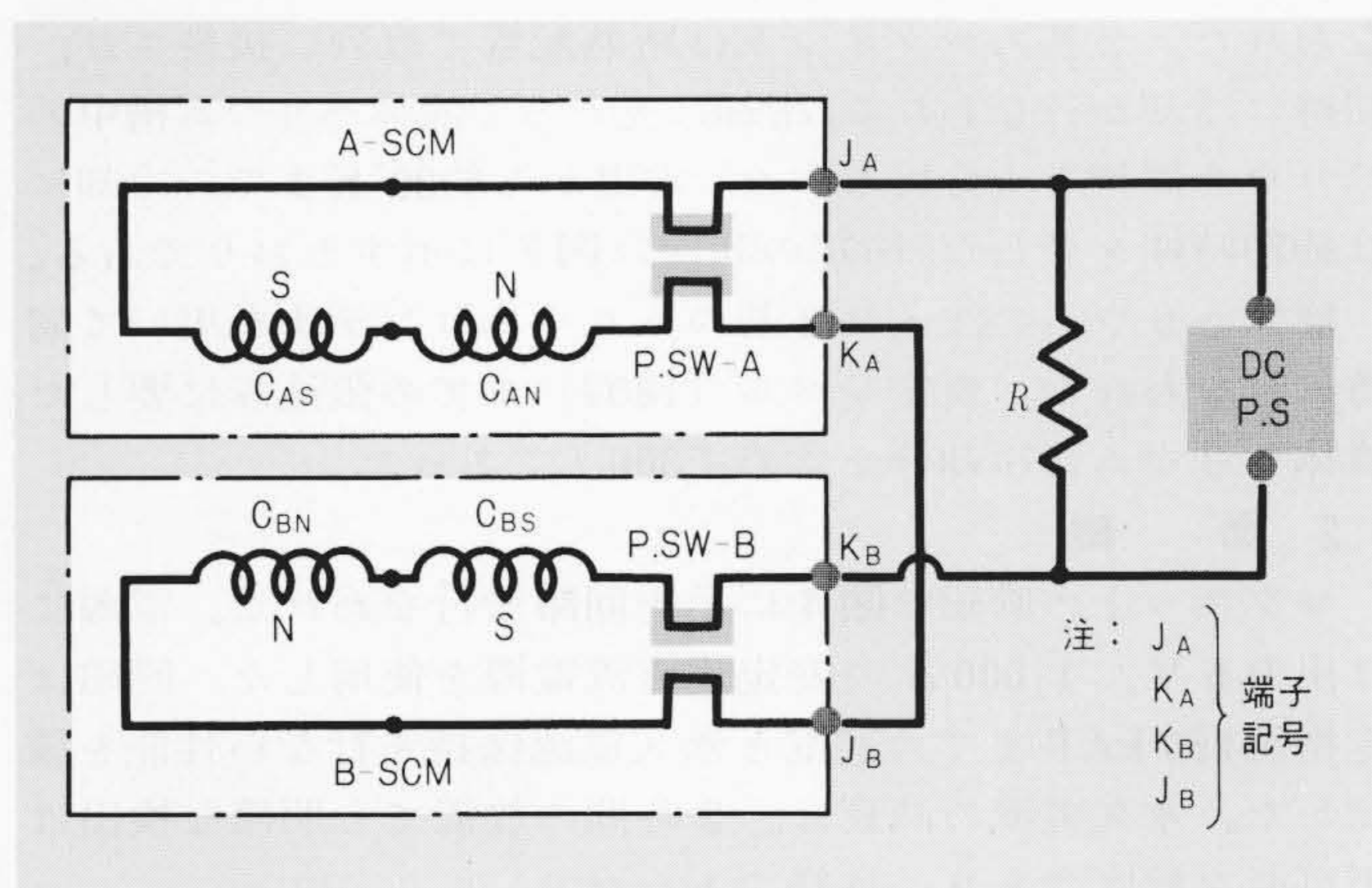


図4 超電導マグネットの励磁回路 SCMは超電導マグネットで、A、B 2基より成り、それぞれ2極のコイルCを有してS極、N極を形成し、共通の永久電流スイッチP.S.W.を有しており、保護抵抗Rを介して直流電源DC P.S.に接続されている。

Fig. 4 Exciting Circuit for Superconducting Magnets

けていない。そして二つのコイルは、内部で電氣的に接続されている。

クライオスタットの断熱には、蒸発したヘリウムガスをシールド板に通じる高真空ヘリウムガス冷却シールド方式を採用しており、冷媒としては液体ヘリウムのみを用いるが補助的に液体窒素でもシールド板を冷却できる構造となっている。

コイルを収納した液体ヘリウム槽は、低温圧力容器として

の機能に加えて、コイルに作用する電磁力の支持および伝達体としての役割をも有している。また、加減速、振動時の液面揺れ防止構造として垂直バッフルを内蔵している。

クライオスタットへの作用力として考慮したものは、浮上力、制動力、変位力、マグネット間電磁力、加減速慣性力、加振力、および熱収縮力であり、これらに対して液体ヘリウム槽を断熱支持する必要がある。本装置では引張支持部材と圧縮支持部材とを組み合わせ、前者にはステンレス鋼製の細棒を用い一部にはばね構造を併用し、後者にはFRP（ガラス繊維強化プラスチック）製の部材を使用している。液体ヘリウム槽と外部をつなぐ五つのポート部にはステンレス鋼ベローズを使用している。これらの金属部材はすべて輻射シールド板と中間で熱的接触を行ない、いわゆるサーマルアンカを形成して液体ヘリウム槽への熱侵入を防止している。熱侵入の計算値は非通電時の合計で9.67W、液体ヘリウム換算で13.2l/hである。

クライオスタットの構造材としては液体ヘリウム槽にステンレス鋼、輻射シールド板に銅、真空容器にアルミニウム合金を用いた。超電導マグネットの重量は1,000kgである。

3.4 制御・操作

(1) 励磁回路

超電導マグネットの極性は前後、左右ともに異極配置を標準とする。したがって、1台のクライオスタット中の接続は前後コイルがS極、N極となるよう直列接続し、端末は一回路として永久電流スイッチを経由してパワーリードに接続している。そうして2台のマグネットは、外部でさらに直列接続し両端は並列保護抵抗を経て励磁電源に接続する回路とし

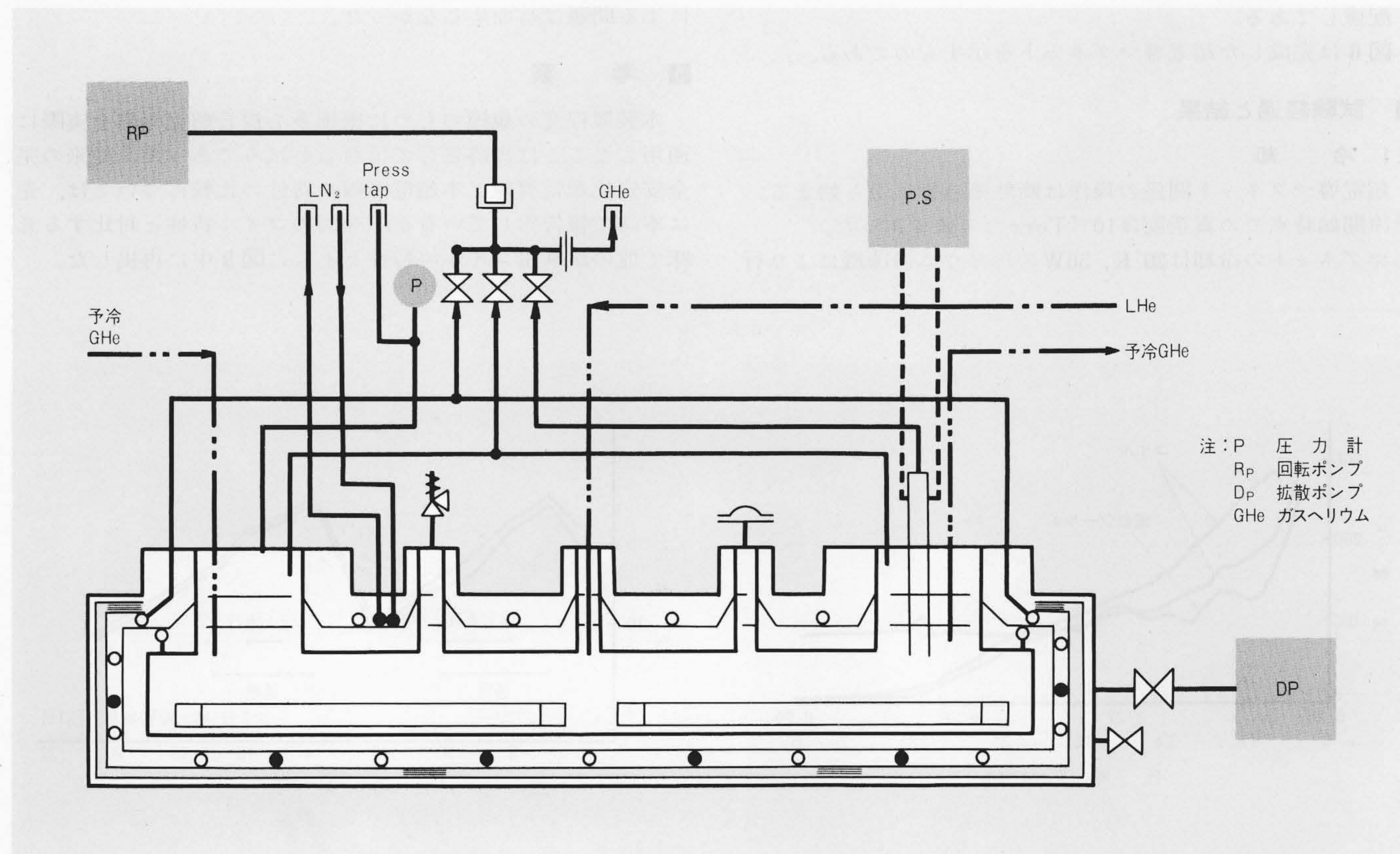


図5 配管系統図 液体ヘリウム(LHe)のみを用いるガスシールドタイプのクライオスタットで、液体窒素(LN₂)は補助的に初期の冷却に用いられる。

Fig. 5 Piping Flow Sheet

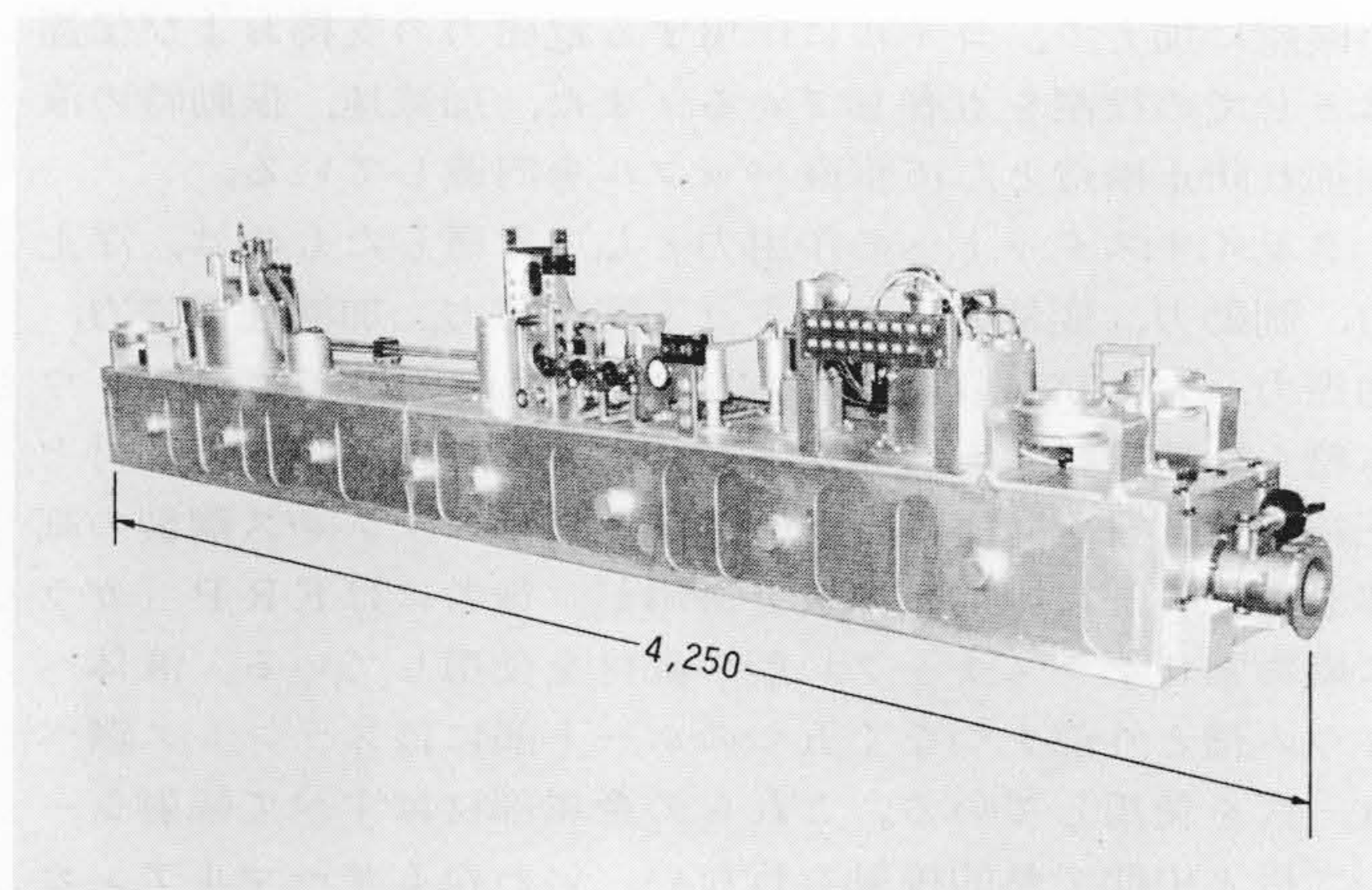


図6 超電導マグネット 完成した超電導マグネットの外観を示すものである。(全長:4,250mm)

Fig. 6 Appearance of Superconducting Magnet

である。

使用した永久電流スイッチは機械式でねじ機構により接触子を開閉するものである。

励磁回路は図4に示すとおりである。

(2) 配管系統

ML-100装置用超電導マグネットのフローシートは図5に示すとおりである。

本装置は最初冷凍機によるヘリウムガス冷却を行ない、40～20°Kとしたのち液体ヘリウムを注入する冷却操作を行なう。

蒸発ヘリウムガスは、輻射シールド板、パワーリード、上部ポートの3系統に分配され、流量はバルブで調節できるよう配慮してある。

図6は完成した超電導マグネットを示すものである。

4 試験経過と結果

4.1 冷却

超電導マグネット関係の操作は断熱槽の排気から始まる。予冷開始時点での真空度は 10^{-7} Torr台の値であった。

マグネットの冷却は20°K、50Wのヘリウム冷凍機により行

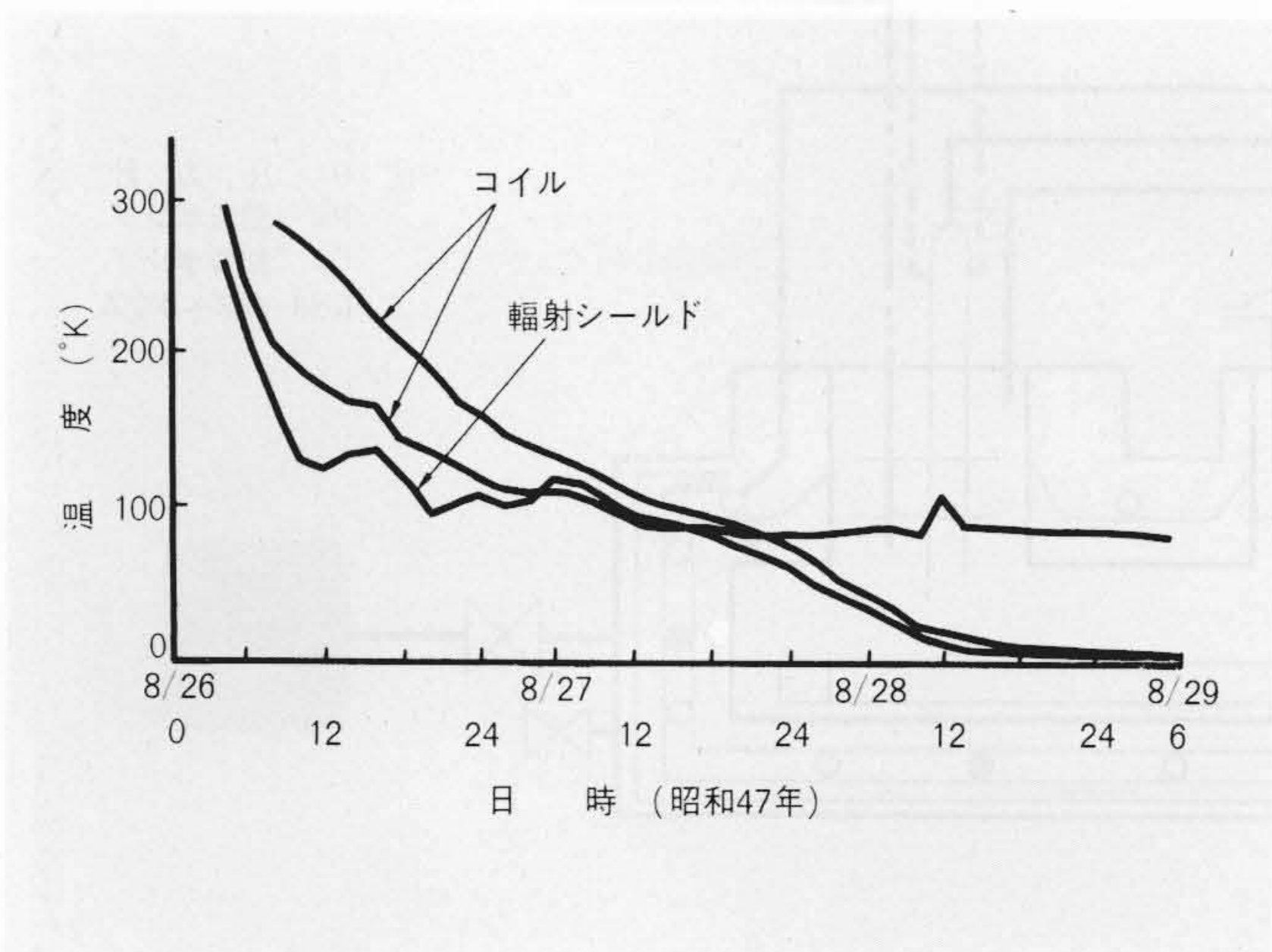


図7 超電導マグネットの冷却特性 超電導マグネットは、ヘリウム冷凍機で極低温に冷却される。

Fig. 7 Cooling of Superconducting Magnet

なわれた。2基のマグネットは断熱配管で直列に接続され、同時に冷却が行なわれる。冷却に先だて液体ヘリウム槽中のヘリウム置換を十分行なった。常温から約20°Kまでの冷却には約70時間を要した。冷却の状況は図7に示すとおりである。

液体ヘリウムの注入は2基のヘリウムコンテナを用いて同時に行なわれた。規定レベル(180l)までの張込みに要した液体ヘリウムは冷却分を含めて300lであった。

4.2 励磁

マグネットの励磁は図4に示す回路で行なわれた。電源には出力5V、1,000Aの安定化直流電源を使用した。励磁は定格値250kATまでの通電と永久電流保持を行ない性能を確認した。永久電流の減衰は、2時間の放置でも明確な検出は不可能な程度であり、良好であった。

走行のための励磁は、浮上条件を最適に選ぶため240kATに設定し、永久電流保持とした。

4.3 走行時の特性

ML-100の走行試験は速度50km/hないし60km/hで行なわれた。すべての走行試験を通じて超電導マグネットの動作はきわめて安定しており、機器の動作は正常であった。

走行をも含めた液体ヘリウムの消費状況は図8に示すとおりである。走行時間が片道30秒と短いせいもあるが、走行中の液体ヘリウムの消費に特別な兆候はみられなかった。

走行時の液面揺れは当初より議論された問題であったが、液面計の記録よりバップルは十分液の移動防止の役めを果たしていることが確認された。

地上コイルからの変化磁界は、超電導マグネットの真空槽下部のサーチコイルには検出されていたが、内部のサーチコイルでは検知されなかった。

超電導マグネットの振動は、定常的には0.15g程度で振動による問題は当面生じなかった。

5 考察

本装置程度の規模のものに極細多心複合超電導線を実際に適用したことは当時としては新しい試みであった。従来の完全安定化超電導線と本超電導線の特性の比較については、先に本誌で報告⁽³⁾しているが、今回のコイル特性と対比する意味で他の試験用コイルの特性とともに図3中に再掲した。

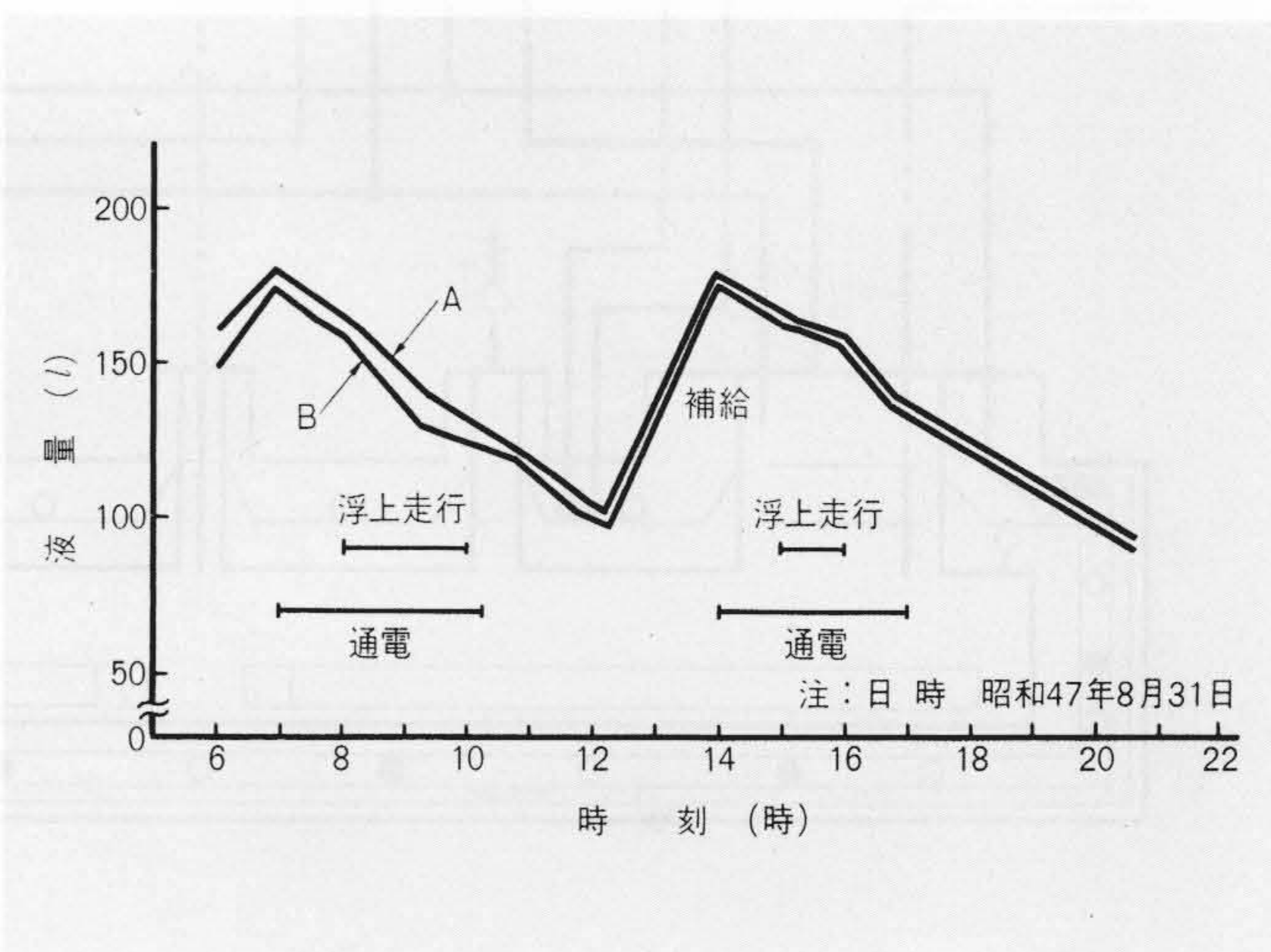


図8 液体ヘリウムの消費状況 液体ヘリウムを張り込んだのち、所要の試験を行なう。液体ヘリウムの1回使用可能量は約80lである。

Fig. 8 Condition of Liquid Helium Consumption

コイル(3)は同じ線材を用いた小規模なソレノイドコイルで常電導転移に至るまでの試験と回復電流を求める試験を行なったものである。到達電流は初回の励磁ではほぼ $H \rightarrow I_c$ 値に達しトレーニング現象などはほとんどみられなかった。回復電流の有効熱流束は $0.15\text{W}/\text{cm}^2$ 付近であり、従来の完全安定化条件の値とはほぼ一致している。

コイル(2)は前述のセクタ形コイル⁽³⁾で $1,000\text{A}$ までの励磁はきわめて安定であった。

ML-100装置用コイルは部品の段階で $1,000\text{A}$ 、完成試験で 850A (122%)までの励磁を行ない性能を確認したが、全く正常であり定格の 250kAT (695A)の励磁に対しては地上コイルからの影響などを考慮しても十分な性能を有しているとみられる。

これらのコイルの試験結果は、いわゆる完全安定化の領域を超えてなお安定な運動が可能なことを示しており、極細多心複合超電導線の有効性を示すものといえる。

クライオスタットの断熱性能は、励磁、浮上走行をも含めて液体ヘリウムの蒸発量表示で $13\sim 15\text{l/h}$ であり、計算値とよく一致している。本装置に採用した高真空ヘリウムガス冷却シールド方式の断熱は、運転操作が簡単であり、管理も容易で車載用として適した方法といえよう。今回の装置では走行時の振動に起因するとみられる液体ヘリウム消費の増加はほとんどみられなかった。おそらく今回の装置は、液体ヘリウム槽と常温をつなぐ部材の周囲長が小さいことと、バッフルの効果のため液面が揺れることによって、温度の高い部分に触れる割合が少なかったためと推定される。

マグネットの機構部については、本報告の執筆時点で100往復以上の走行をくり返しているが装置は正常である。

6 結 言

われわれは、ML-100装置用超電導マグネットを製作し、試験車に搭載して磁気浮上走行試験を行なった。試験の全工程を通じ超電導マグネットは十分にその性能を発揮し、ML-100装置の主幹コンポーネントとしての任務を完全に遂行した。

ML-100装置計画の成功とこれによって得られた技術的成果は、未来の超高速鉄道計画に明るい見通しを与えるとともに、貴重な資料を提供した。また、世界初の本格的超電導磁気浮上車として一般にも公開され、未来鉄道の一端を披露した。

今後、本計画の成果をもとにさらに一歩進んだ計画への発展を期待するものである。

終わりに臨み、本装置の設計、製作に終始ご指導を賜った日本国有鉄道技術開発室、車輛設計事務所、鉄道技術研究所の関係各位および本装置の製作にあたりご協力をいただいた三菱電機株式会社ならびに東京芝浦電気株式会社の関係各位に対し深く感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- (1) 永弘, 寺田他: 「磁気浮上走行試験車」 日立評論 55, 591 (昭48-6)
- (2) J.E.C. Williams: Physics Letters', 19, 2, 96 (1965)
- (3) 斎藤, 多田他: 「磁気浮上特性基礎試験装置用超電導マグネット」 日立評論 55, 585 (昭48-6)

論文抄録

逆導通サイリスタ

日立製作所 八尾 勉・亀井達彌

電気学会誌 93-2, 31 (昭48-2)

これまでの逆阻止サイリスタでは、高耐圧、高速度化が限界に近づいている。この現状を打開するために検討され始めたのが逆導通サイリスタである。逆電圧の阻止能力はないが、その代わり順阻止電圧を高くしかも高速度にできる理論的な可能性がある。

最近、特にわが国で逆導通サイリスタの逆方向に通電する性質を積極的に利用し、チョッパやインバータ回路のバイパスダイオードを複合化した新しい形の逆導通サイリスタが開発、実用化された。この素子は、従来の逆阻止3端子サイリスタとpn接合ダイオードを逆並列に接続するよう一体化した電力用複合素子である。阻止能力、スイッチング性能がすぐれているほか、回路応用上次のような大きなメリットを持っている。

サイリスタとバイパスダイオードを逆並列に接続したチョッパ回路において、個別に二つの素子を結線すると配線のインダク

タンスによって発生する起電力のため、サイリスタの逆電圧期間がダイオードの通電期間の半分以上になる。サイリスタのターンオフ時間は一定値以下にできないため、ダイオードの通電期間を十分長くする必要があり、大きな転流LCを用いなければならない。逆導通サイリスタを使用すると配線インダクタンスの悪影響がなく、ダイオード通電期間をサイリスタのターンオフ時間まで短縮できるので装置の小形軽量化や高速制御性の点で非常に有利になる。

このような目的に使われる逆導通サイリスタでは内蔵したサイリスタとダイオード部分間の相互干渉作用を防止する必要がある。ダイオード部分に大電流が流れたあと、再びサイリスタ部分に順電圧が印加されたとき電圧を阻止できる状態に回復していなければならないが、ダイオードに流れた電流の影響を受けてサイリスタが誤点弧しやすくなる。

このような相互干渉の問題は、内蔵した

サイリスタ、ダイオード部分の間に隔離領域を置き、その部分で過剰な少数キャリアをすみやかに再結合して消滅させる方法により解決されている。

地下鉄電車の主回路チョッパ用として平均電流 400A 、順阻止電圧 $1,200\sim 1,300\text{V}$ 、ターンオフ時間 $20\sim 25\mu\text{s}$ クラスの素子が最初に開発され、車両搭(とう)載実用化の試験(昭和45年)を経て昭和46年初めより営業運転にはいり、約2年の運転実績を得ている。この実績によってさらに広範囲な用途への使用が計画されつつあると同時に、素子の性能向上の努力が積極的に続けられている。

最近では、平均電流 400A 、順阻止電圧 $2,500\text{V}$ 、ターンオフ時間 $30\sim 40\mu\text{s}$ といった素子をはじめとし、逆阻止サイリスタではとうてい実現されない高耐圧、高速サイリスタの開発、実用化の研究が行なわれている。