

45 kG 鞍形超電導マグネット

45 kG Saddle-shaped Superconducting Magnet

木村 浩* 土井 俊雄* 佐藤 新太郎*
Hiroshi Kimura Toshio Doi Shintarô Satô
笠原 達雄** 飯塚 富雄***
Tatsuo Kasahara Tomio Iizuka

要 旨

昭和42, 43年度にわたる通産省委託研究として大形鞍(くら)形超電導マグネットの試作, 実験を行なった。線材としては日立製作所で開発した Nb-40Zr-10Ti 3元合金線 10本を $0.7\text{ cm} \times 0.16\text{ cm}$ の平角銅線に2段に埋め込んだ10Xストリップを本超電導マグネット用に設計して使用した。マグネットの寸法は内径 38 cm, 外径 88 cm 長さ 180 cm である。クライオスタットは MHD ダクト用の直径 25 cm の常温空間を持ち, 液体ヘリウム槽(そう)の外径 150 cm, 深さ 330 cm である。運転試験の結果, 下記目標仕様を上回る性能を確認することができた。

	試験結果	目標仕様値
中心磁束密度	47 kG	45 kG
磁界均一度	95%	>85%
永久電流減衰時定数	1,300 h	>720 h
液体 He 蒸発量(非通電時)	10 l/h	<15 l/h

1. 緒 言

本報告は, 昭和42, 43年度にわたって通産省大型プロジェクト「MHD 発電の研究」の一環として日立製作所が研究を委託された「45 kG 超電導電磁石の試作研究」に関する報告である。

日立製作所では昭和37年ごろから超電導材料の研究を開始し, Nb-Zr-Ti 3元合金⁽¹⁾線を開発し, 次いでその応用として超電導マグネットの研究を行っていた。本委託研究はこれらの研究成果を基礎として出発し, 42年度には設計および装置の製作を行ない社内での予備試験を行なった。43年度にはこれらの装置を電気試験所田無分室に運搬, 据付・配線を行なったのち, 総合運転試験によって性能を確認した。

なお総合運転試験は同じく委託研究によって製作された三菱電機製ヘリウム液化冷凍機系と組み合わせて行なわれた。

2. 超電導マグネット

2.1 線材(超電導ストリップ)

超電導ストリップの設計は次の方針に従って行なわれた。

- (1) 中心磁束密度が 45 kG の超電導マグネットの線材の経験する最大磁束密度は, 簡単な計算から 50~55 kG 程度であると推定し, この条件下でも 500 A 以上の通電容量を持ち, しかもじゅうぶんに安定化されていること。
- (2) 45 kG の超電導マグネットのコイル形状は, 常温空間の直径に対する仕様が 25 cm であることからクライオスタットの断熱層の厚さを考慮して内径 38 cm の鞍形とした。
- (3) 超電導ストリップは端面冷却としたため絶縁テープは片平面貼付(ちょうふ)である。絶縁テープはコイルに成形したとき, あるいは液体ヘリウムに浸せきしたときはがれないだけじゅうぶんの接着強度を有すること。
- (4) 長尺の超電導ストリップの製作が可能であること。

以上の点を種々検討した結果, 日立製作所で開発した直径 0.25 mm の Nb-40Zr-10Ti 合金線を 10 本, 平角銅に平行に埋め込んだ

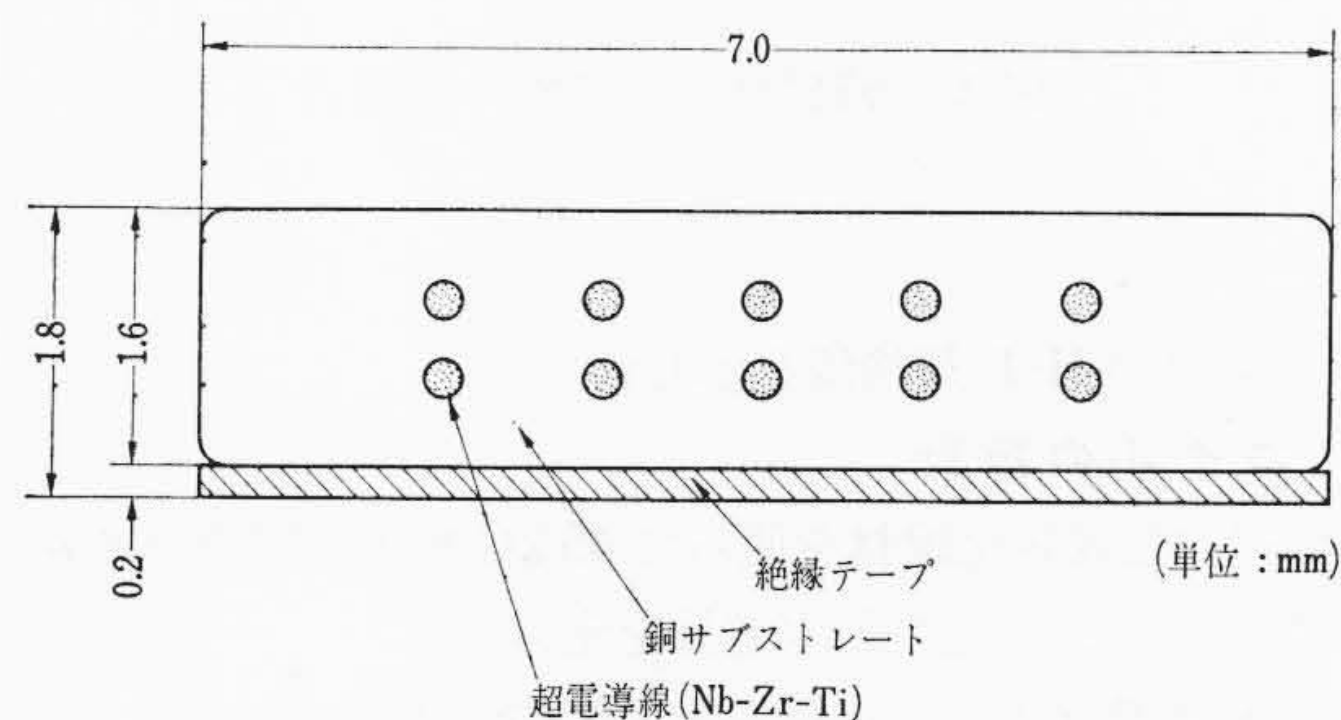


図1 HISUPER-10X ストリップ断面図

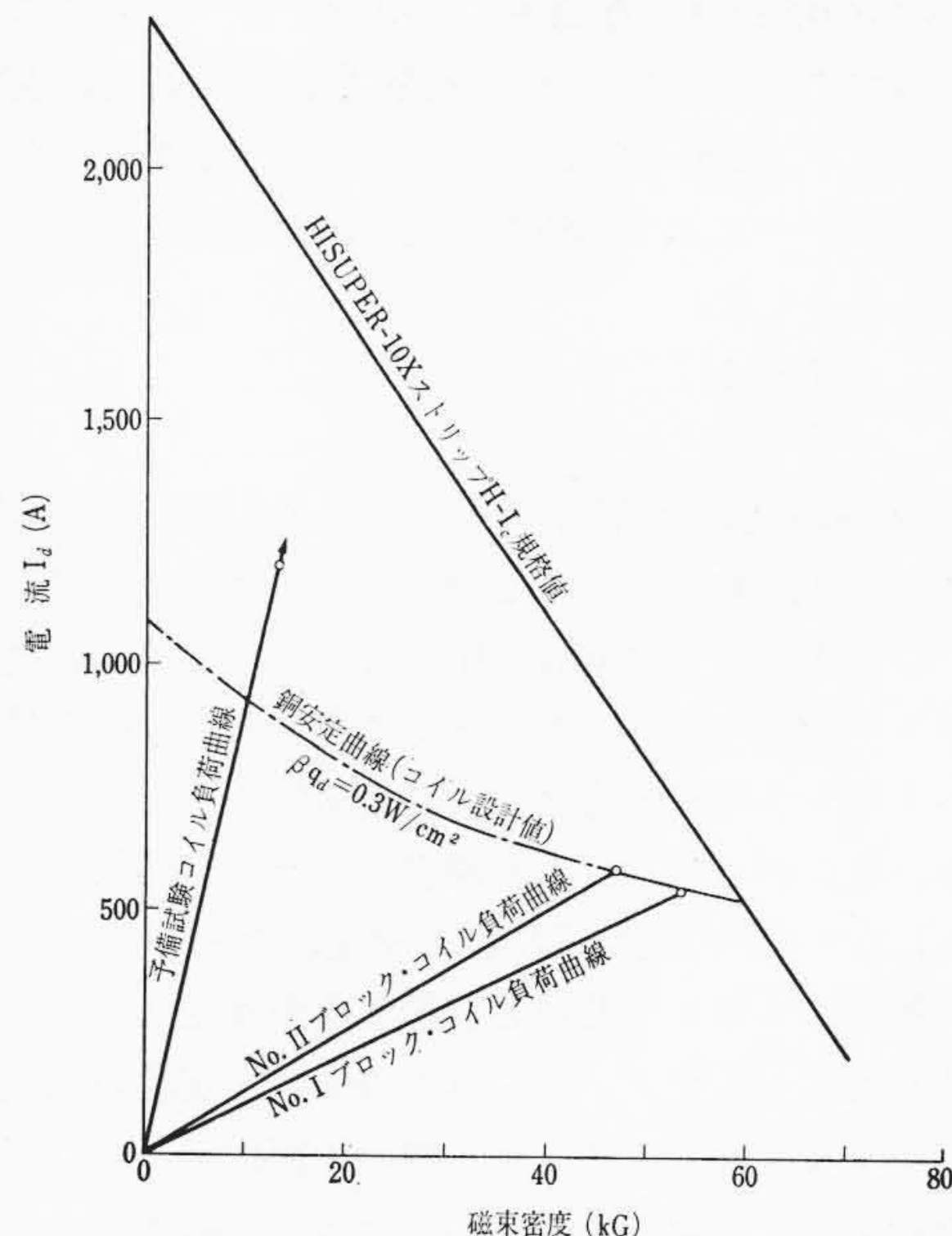
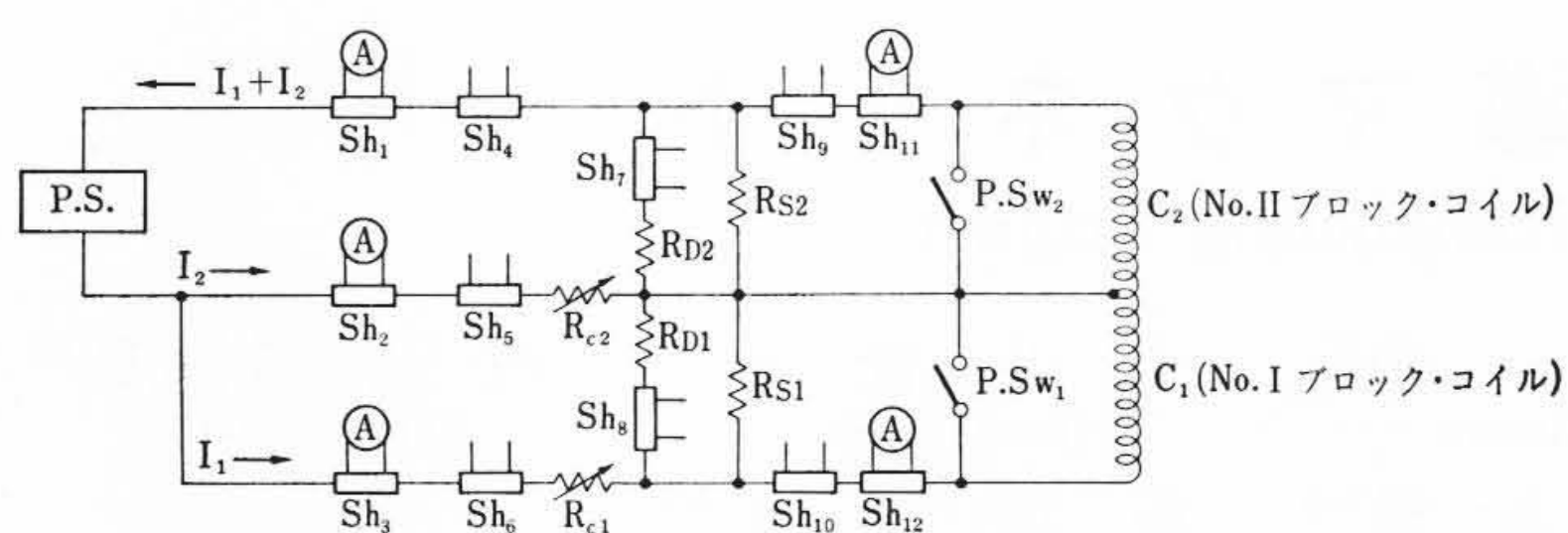


図2 銅安定曲線とコイル負荷曲線

HISUPER-10X ストリップを設計した。10本の素線の埋め込みに際しては, コイル成形時に線材に加わる各種加工を考慮して2段5列に埋め込む方式を採用することとし, ストリップ断面を $7.0\text{ mm}^w \times 1.6\text{ mm}^t$ と決定した。

図1は HISUPER-10X ストリップの設計断面図である。また図2

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



P.S.: DC 20V, 2,000A 安定化電源
A: 電流計
Sh 1~3: 電流計用シャント抵抗
Sh 4~10: 記録計用シャント抵抗
P.S.w: 永久電流スイッチ
R_D: 保護抵抗
R_S: 安定抵抗
R_C: 制御抵抗
C: 超電導コイル

図3 励磁回路

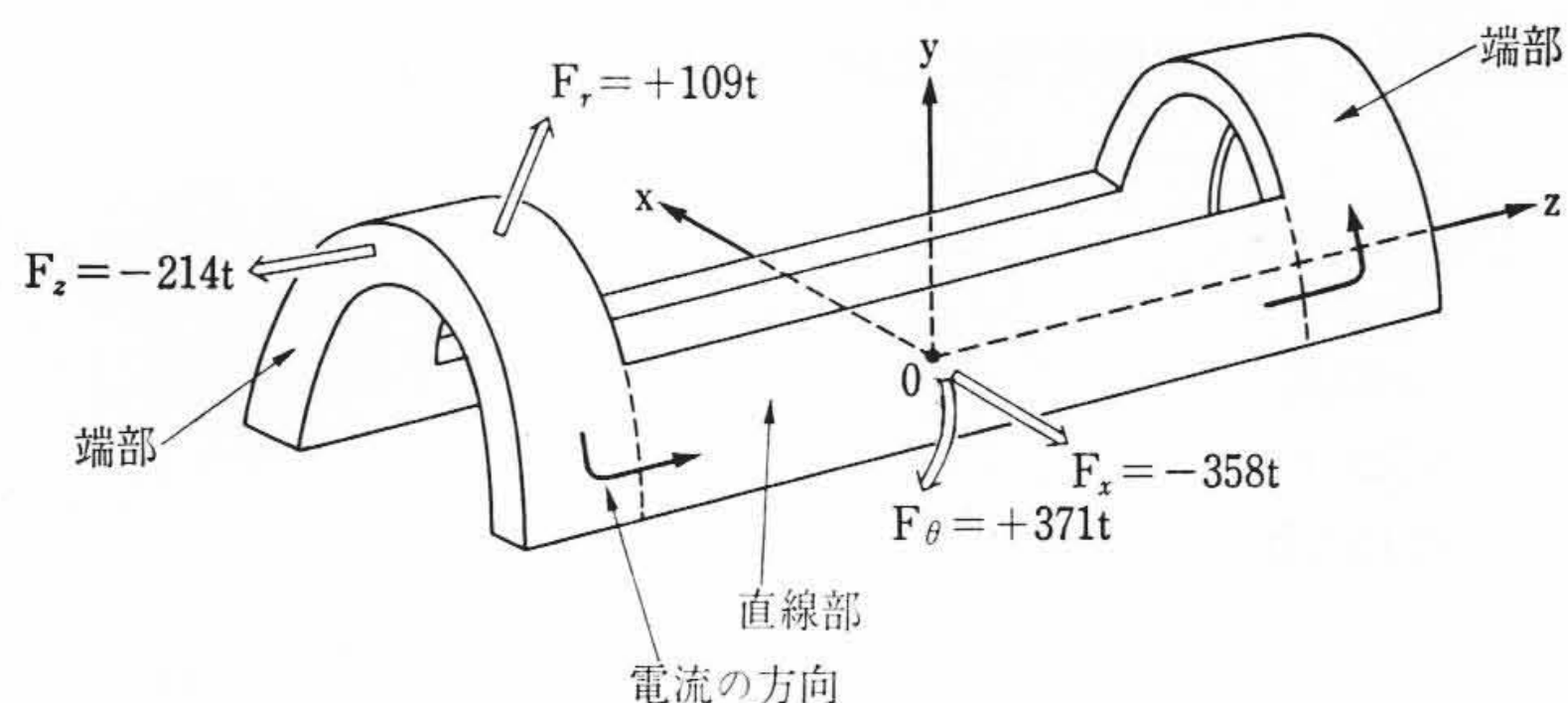


図4 鞍形コイルに働く電磁力

にストリップの H-I_c 規格値を示した。

2.2 コイルの設計

2.1 で述べた安定化線材を使って 45 kG 鞍形超電導コイルを設計するにあたって、下記の基本方針を定めた。

(1) 超電導コイルは完全安定化領域で運転できることを目標に設計する。

本コイルは 5 MJ 程度の貯蔵エネルギーを持つ世界的にみても大形の超電導マグネットであり、定格運転では絶対に常電導転移 (quench) することがない設計にすることが必要である。コイルの安定化パラメータ α_c は Stekly 氏⁽²⁾、その他に従い、次式で与えられるものとした。

$$\alpha_c = \frac{\rho_d I_d^2 / A}{\beta q_d P_c}$$

ここに ρ_d = 銅の設計比抵抗, I_d = 設計コイル電流, β = 露出係数, q_d = 設計熱流束, P_c = ストリップの冷却面周囲長, A = 銅断面積である。この式の分子は quench によって超電導線に流れていた全電流が、平角銅のサブストレートに流れたときの発熱量、分母は液体ヘリウムへの熱伝達 (いずれも単位長あたり) を示したものである。したがって $\alpha_c = 1$ が両者のバランスが取れた条件を示し、 $\alpha_c < 1$ でコイルの超電導特性は安定になる。

コイル層間のスペース間隔と臨界熱流束 q_c との関係はあらかじめ測定したクーリング・チャンネルのモデル実験の結果⁽³⁾を参考にした。モデル実験ではチャンネル壁の片面にヒータを置き、この面のみ全面発熱した場合の液体ヘリウム中の核沸騰から膜沸騰に転移する臨界熱流束とチャンネルの間隔、傾き角との関係を測定しておいた。コイル全体の設計熱流束 (βq_d) はこれらの値から 0.3 W/cm² とした。

図 2 に示すコイル設計銅安定曲線 ($\alpha_c = 1$ としたときの磁束密度とコイル電流の関係を示し、この曲線より下側が超電導コイルの安定化領域になる) と次に述べる磁界分布計算の結果から決まるコイル負荷曲線との交点として第 I, 第 II コイル・ブロックの

表1 45 kG 鞍形コイル仕様

中心磁束密度	45 kG
均一磁界空間	10 cmφ×60 cm L
コイル内径	38 cmφ
コイル外径	88 cmφ
コイル長	180 cm
全巻数	7,630 ターン
全層数	22 層

各設計電流を求めた (第 I, 第 II コイル・ブロックについては次に述べる)。

(2) コイル全体を第 I ブロック (内層側) と第 II ブロック (外層側) に分割し、その励磁電流を外層側を大きく内層側を小さくする分割励磁方式とする。これは図 2 からわかるように、高磁界になるほど臨界電流値 (超電導状態で流しうる最大電流) が小さくなる超電導線材の特性と、鞍形コイルの線材が経験する臨界分布を計算すると、外層側のほうが磁界が低いことを利用したものである。これによって線材の特性をできるだけ生かして使うねらいを持っている。しかしコイルの励磁電流が異なるため 2 台の電源を使うのではコストも高く、操作も複雑になる。このため図 3 に示すように 1 台の直流電源と制御抵抗を組み合わせた分割励磁方式を考案した。

コイルの最終仕様値は表 1 に示すとおりである。

2.3 電磁力および磁界分布の計算

鞍形コイル各部に働く電磁力および磁界分布の計算を HITAC 5020 F を使って行なった。計算にあたっては鞍形コイルを図 4 に示すように計算に便利な形にモデル化し、端部の半円形電流と直線部の直線電流による力と磁界を計算した。

計算の結果として導体各部に作用する体積力 (body force) を同図に示してある。直線部には F_x として外向きに -358t, F_θ として +371t の力が、また端部には F_z として外向きに -214t, F_r としてふくらもうとする方向に 109t の力がそれぞれ働く。図では片側コイルだけを考えているが、完全なコイルでは同一形状のコイルが上下逆転して円筒空間を包む形になるので、 F_x は 2 倍しなければならない。またコイル層間、ターン間の圧縮力についても計算を行なった。コイル設計にはこれらの力に対しじゅうぶん耐えうる支持構造を考えなければならない。

常温空間中心軸上の磁界分布は図 5 に点線で示すとおりである。

また常温空間内磁界分布として z をパラメータに $y=0$ での x 方向分布を図 6 に、 $x=0$ での y 方向分布を図 7 に示した。図 5~7 からわかるように $z=\pm 30$ cm, $x=y=\pm 19$ cm で考えられる空間内の B_y に関する均一度の計算値は約 89% である。

またコイル各部の磁界分布を計算した結果、第 I, 第 II 各ブロックの超電導線材が経験する最大磁束密度はそれぞれ 53.5 kG, 47 kG であった。図 2 にコイル負荷曲線を示した。

2.4 永久電流スイッチ

超電導コイルは電気抵抗が 0 であるため、励磁した状態で短絡すればコイル電流は減衰することなく環流し続ける。これを永久電流と呼ぶ。MHD 発電機用マグネットもこの永久電流状態で使用するのが便利である。本研究ではこのための永久電流スイッチの開発と、45 kG 鞍形マグネットの永久電流励磁実験を行なった。

このための永久電流スイッチはクライオスタットの外部から機械的に開閉ができる機構を持っている。すなわちクライオスタット上ぶた上に水平に取り付けられたシャフト終端の円形ハンドルを回転することによってスイッチを開閉する。永久電流スイッチ主要部の構造は図 8 に示すとおりである。スイッチ接片は厚さ 1 cm, 有効接触面積 18.5 cm² の無酸素銅 (OFC) で接触面には厚さ 250 μ のイン

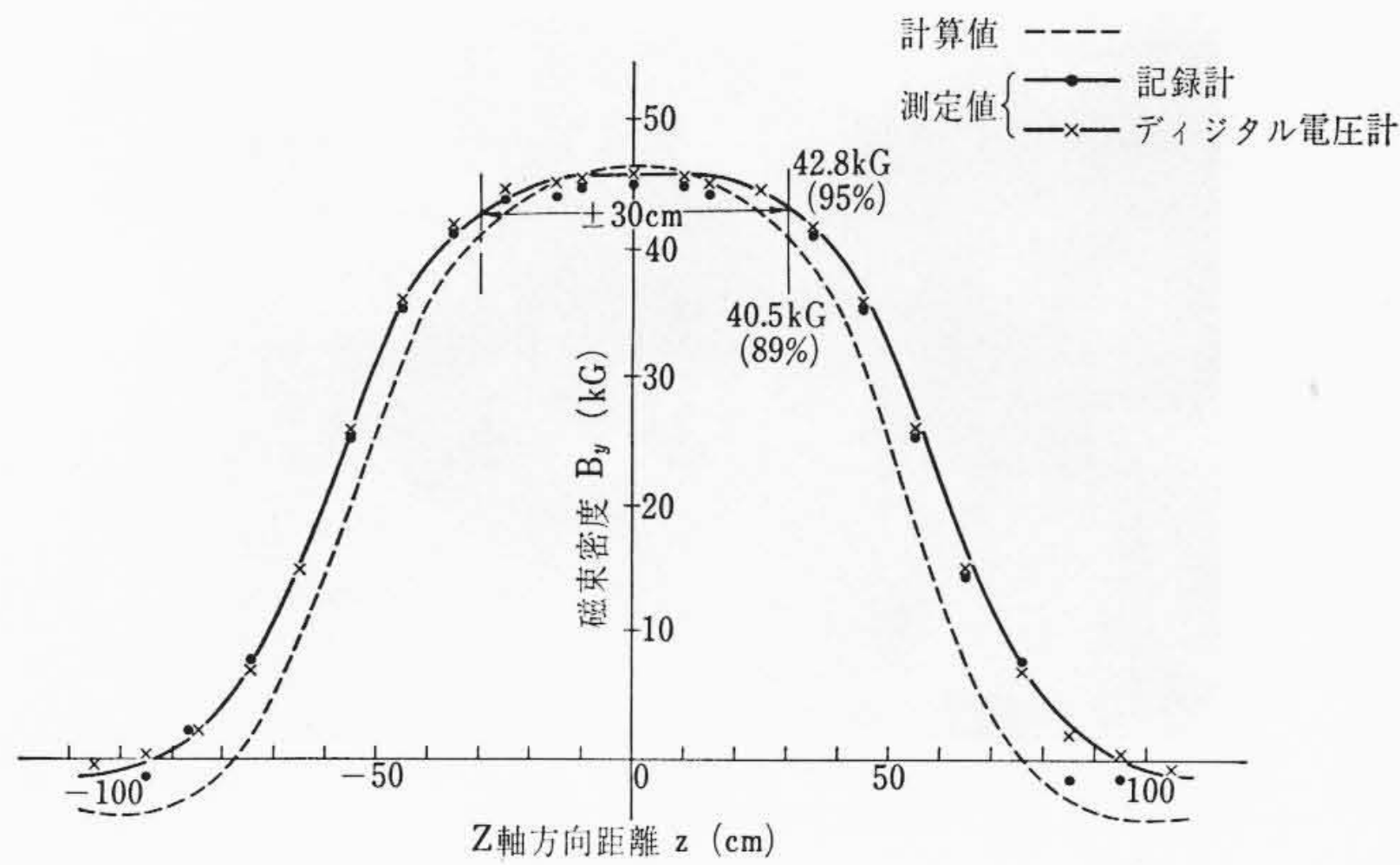


図5 Z軸上磁束密度分布 $B_y(z)$

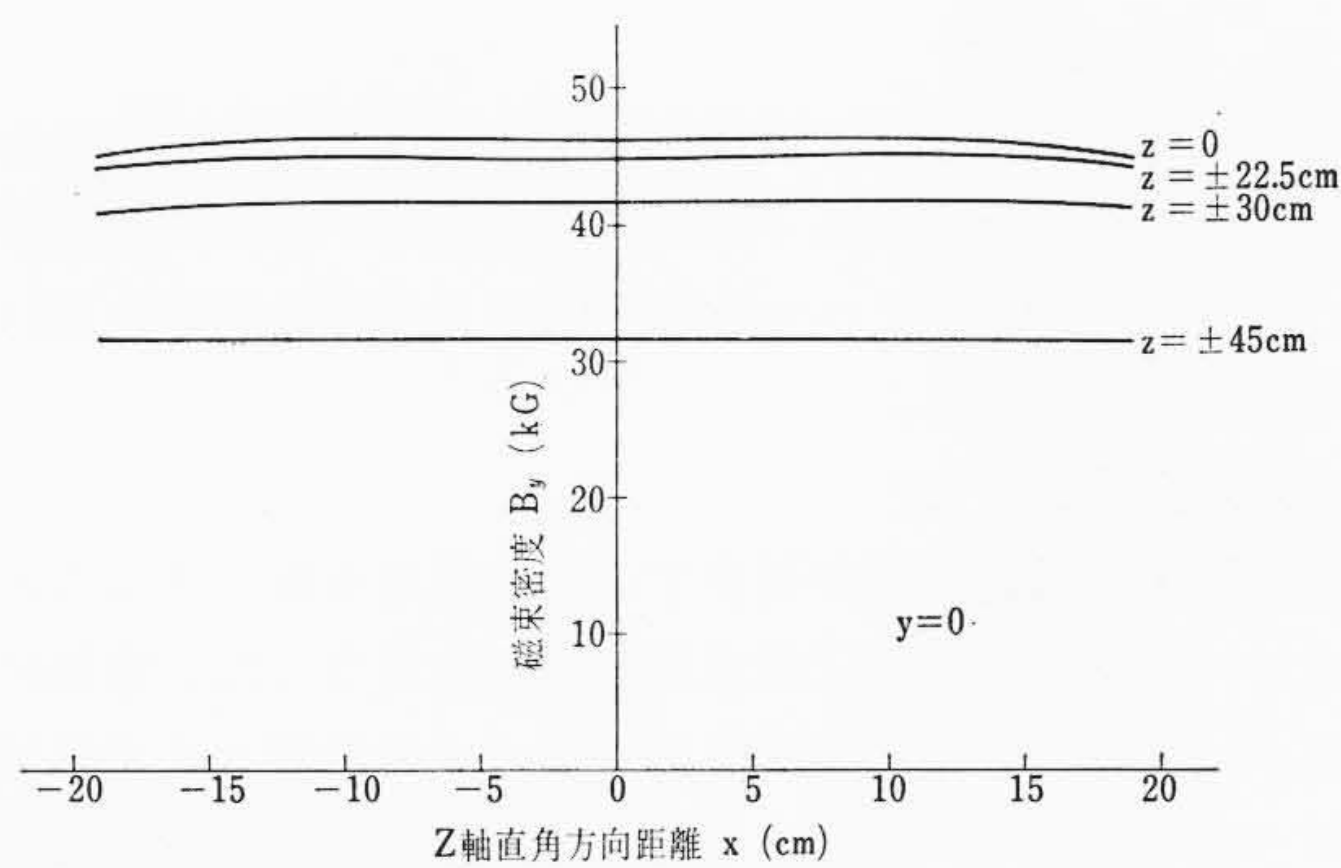


図6 X軸上磁束密度分布 $B_y(x)$

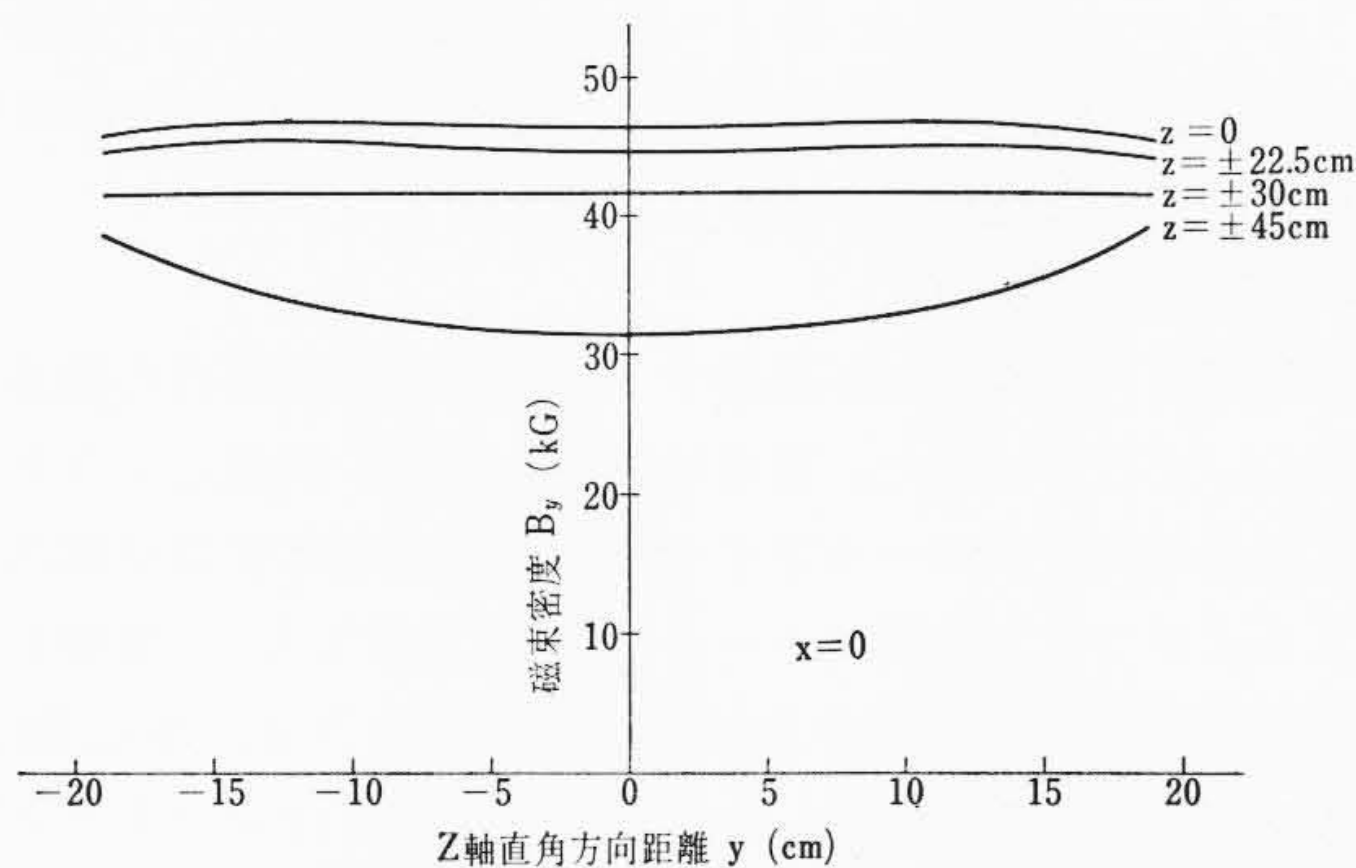


図7 Y軸上磁束密度分布 $B_y(y)$

ジウム・コーティングを施してある。このようにスイッチ部分には常電導体を使ったため、永久電流には後述のような若干の減衰があることは免れない。

図9はクライオスタットに組み込み中の超電導マグネットを示したものである。

3. クライオスタット

3.1 クライオスタットの設計

超電導マグネットを収納するクライオスタットは、中心部に直径25 cmの常温空間を有する縦形同心円筒状とした。

液体ヘリウム貯槽と外側容器との間は熱絶縁のために高真空中に保持し、液体窒素による冷却と蒸発ヘリウムガスの顕熱による冷却を併用した。液体ヘリウム貯槽と外側容器との間には、液体窒素を流通させるための蛇管(だかん)を巻回したふく射しゃへい用の銅板

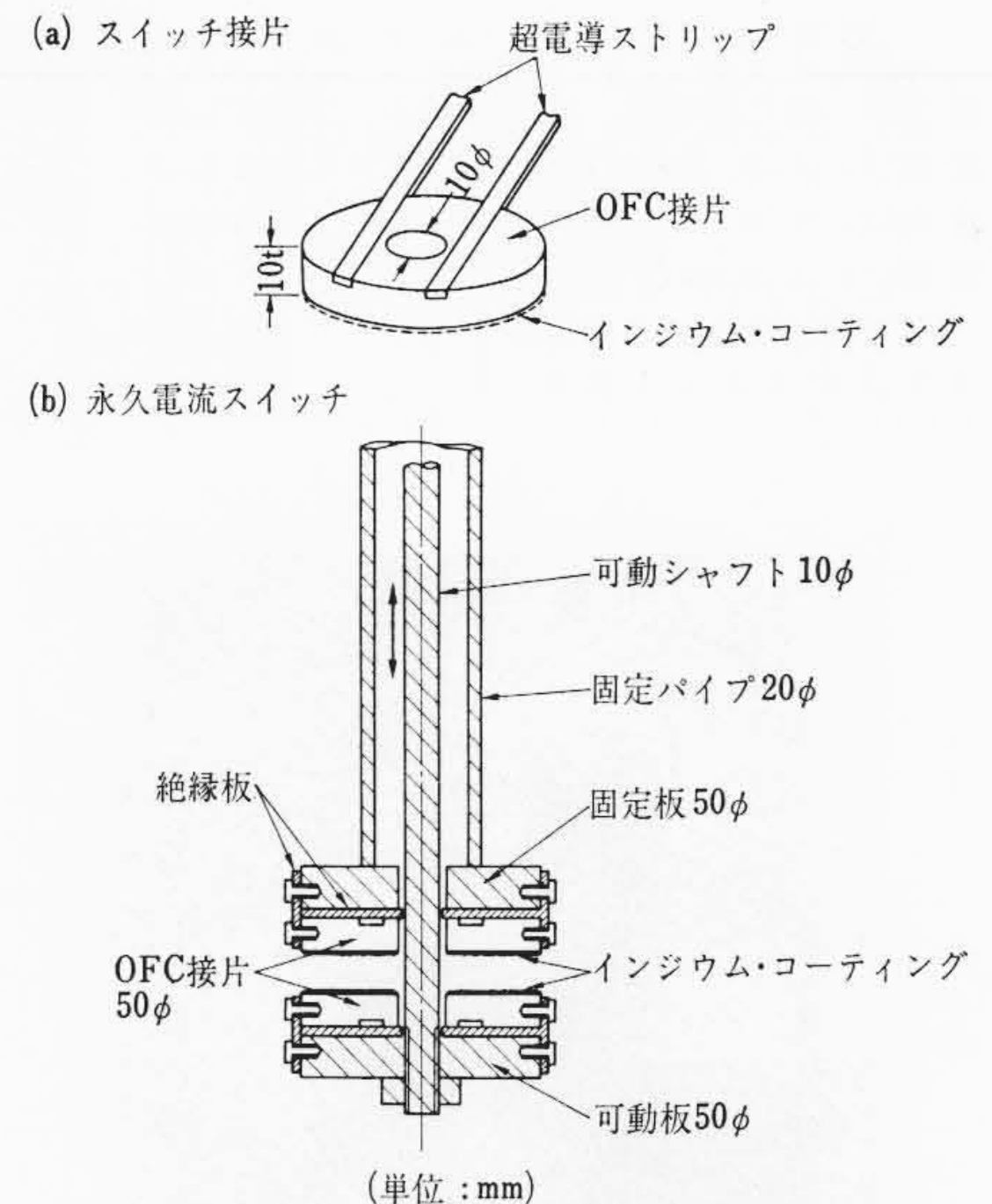


図8 永久電流スイッチ



図9 組立中の超電導マグネット

をそう入し、外筒部および底部にはふく射しゃへい板の熱絶縁のために積層断熱材を巻く方式とした。液体ヘリウム貯槽の上部には常温フランジ面からの侵入熱を防ぐために、4層の発泡(はっほう)スチロールと金属板とから成る上部ふく射しゃへい板と液体窒素で冷却されたふく射しゃへい板をそう入した。したがって、液体ヘリウムの周囲はほぼ完全に液体窒素で包囲していることになる。さらに液体ヘリウム貯槽の壁は伝導による侵入熱低減のためその厚さをできるだけ薄くし、材質を低熱伝導性のステンレス鋼とした。また、この貯槽壁には上部ふく射しゃへい板や測定用導線など各種そう入物とともに蒸発ヘリウムガスで冷却する。

本クライオスタットは特にMHD発電機と組み合わせて使用することを目的とするものであり、発電ダクトを通過したあとのプラズマ流路があまり長くないためにも、超電導コイル上部と上ぶたの間の距離をできるだけ縮める設計方針を採り、しかも液体ヘリウムの熱侵入を極力少なくするように留意した。したがって、コイル長約2 mに対してクライオスタットの深さは3.3 mであり、従来のこの種のクライオスタットに比べてずっと浅い設計になっている。しかも後述するように、液体ヘリウム蒸発量も非常に少ない設計とすることができた。

また、安全性の面からクライオスタットとその周辺機器は、すべて人間が近寄らなくても運転が可能のようにクライオスタット操作盤で制御できるように考慮されている。

表2 クライオスタット仕様

常温空間直径	25 cm ϕ
液体ヘリウム槽内径	32 cm ϕ
液体ヘリウム槽外径	150 cm ϕ
液体ヘリウム槽深さ	330 cm
クライオスタット外径	180 cm
クライオスタット高さ	450 cm

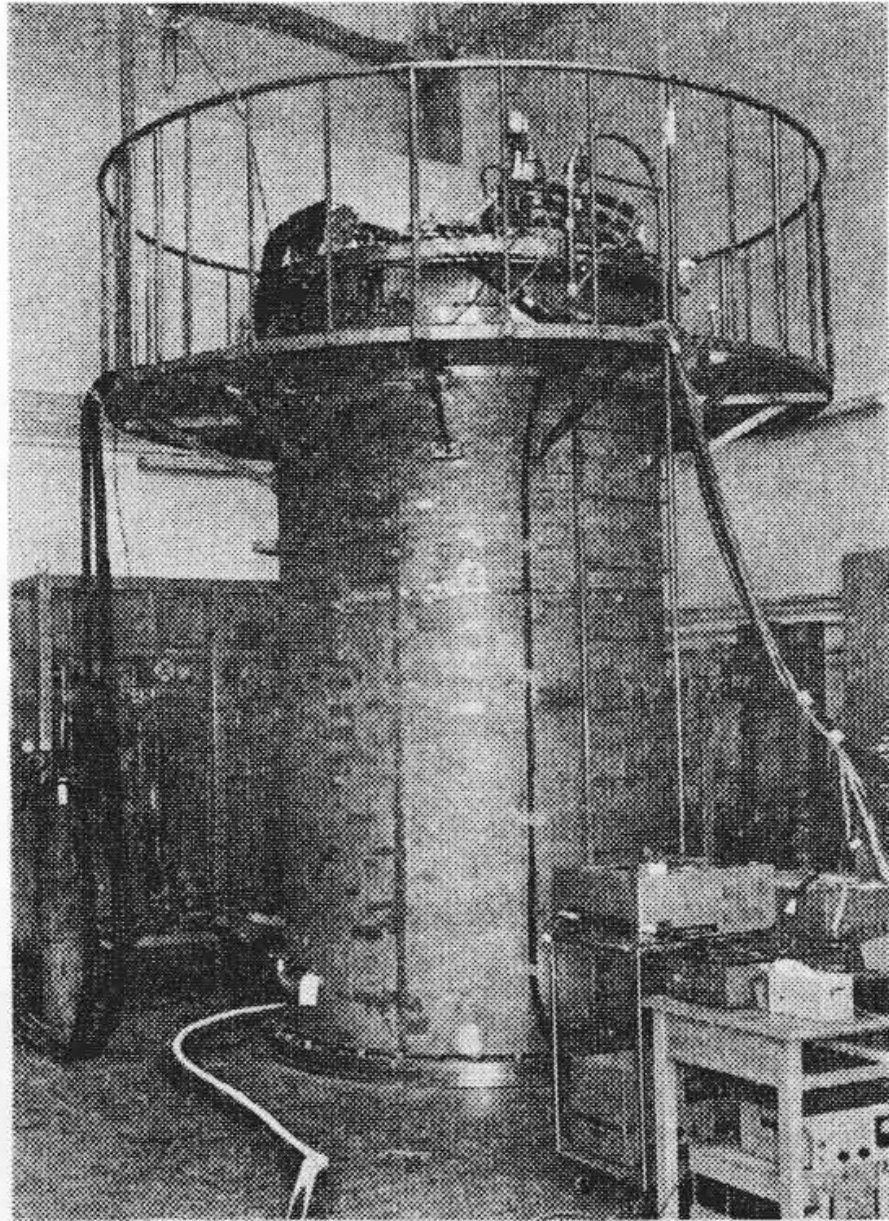


図10 クライオスタット

クライオスタットの主要寸法は表2に、また外観写真は図10に示すとおりである。

3.2 熱計算

クライオスタットの熱計算は、ふく射、伝導による侵入熱、パワーリードとコイル接続部でのジュール発熱について詳細に行なわれた。その結果は、ふく射による侵入熱 3.9 W、クライオスタット壁からの伝導による侵入熱 1.5 W、測定用導線、その他の伝導による侵入熱 1.0 W、パワーリードの伝導による侵入熱 0.7 W (通電中のジュール損失を含む侵入熱 4.0 W) である。

3.3 安全対策

本超電導コイルの運転時の貯蔵エネルギーは約 5 MJ に達する。このエネルギーがコイルの常電導転移その他の原因によって瞬時に液体ヘリウムを気化するようなことがあれば爆発事故を起こすおそれがある。これに対しては、下記の対策を用意してじゅうぶん安全な設計とした。

- (1) 超電導線材は安定化されたものを用い、コイル設計にあたっては定格運転時には完全安定化領域にある設計方針を採った(前述)。
- (2) 万一、常電導転移が起こった場合はこれを検出し、励磁電源の掃引停止さらには安全回路動作によって貯蔵エネルギーの大部分を外部保護抵抗に消費させ、液体ヘリウムの気化を最小限に止めるための安全回路を設けた。
- (3) クライオスタット内部で液体ヘリウムの蒸発が激しくなり内圧が上昇した場合は、次の順序に従ってそれぞれの圧力で安全弁が動作し、ヘリウムガスを排出して、内圧の上昇を防ぐ設計とした。

- ①バイパス弁 (0.4 kg/cm²G)、②大気開放弁 (0.5 kg/cm²G)、③バネ安全弁 (0.6 kg/cm²G)、④破壊板 (0.8 kg/cm²G)。これらはクライオスタットの上部あるいは配管に取り付けられた。
- (4) クライオスタットの三方をコンクリート壁で囲い、万一爆発事故が起こっても運転要員そのほか人身の安全を図った。上記のほか地震、火災、停電などの事故対策にも万全を期した。

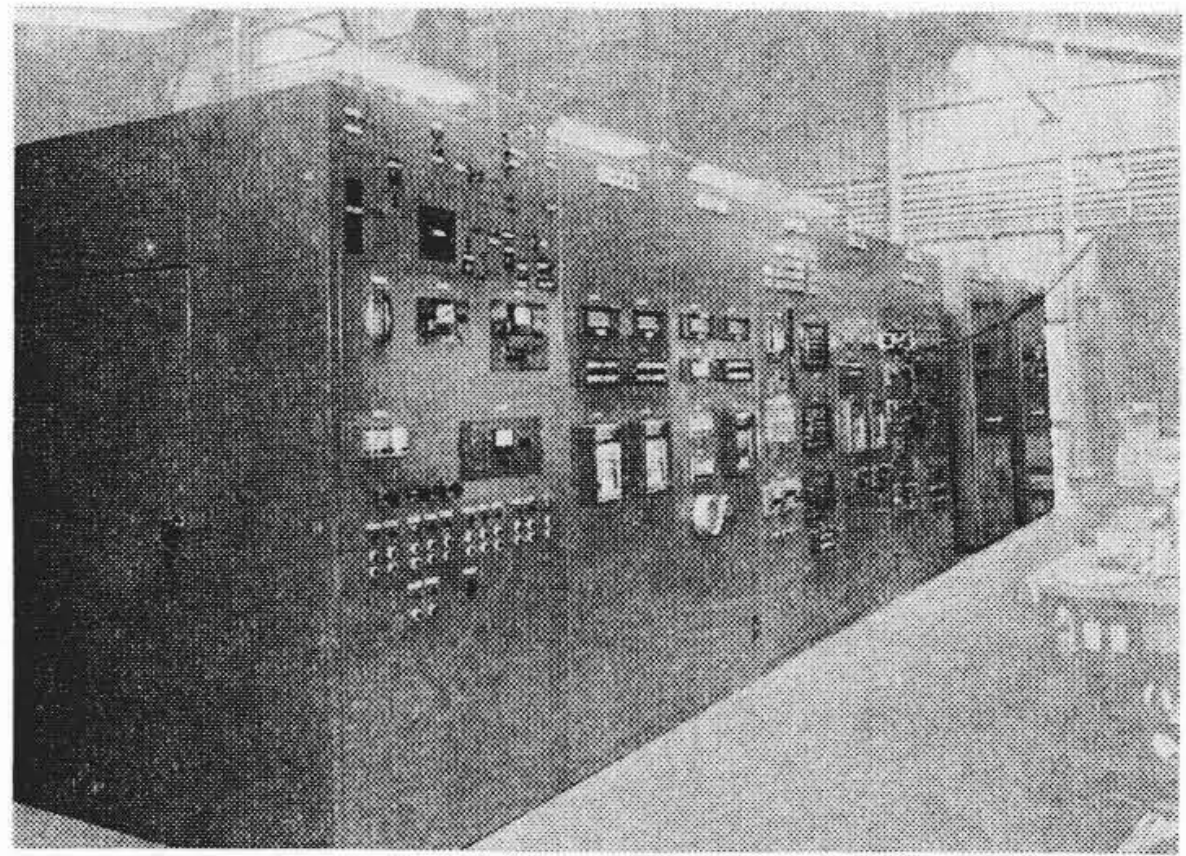


図11 計測制御盤

4. 付属装置

4.1 計測装置

超電導マグネットの予冷、液体ヘリウムの注入、励磁実験を通じての計測、測定を行なうため下記の各種測定素子および測定器を準備した。これらの測定はすべて遠隔操作により計測制御盤(図11)で行なえるようにしてある。

4.1.1 端子電圧測定

励磁実験中の常電導部の発生する異状現象を観測するため、コイル各ユニットの端子電圧測定用の端子を用意した。実験にあたってはコイル全体の端子電圧と各ブロック最内層コイルの端子電圧を6ペンレコーダに記録するようにした。これ以外の端子電圧は必要に応じて観測、記録された。

4.1.2 電流測定

図3に示したように、励磁回路中の各部分の電流が測定できるようにシャント抵抗を Sh 1~12 まで 12 個設けた。このうち Sh 1~3 および 11, 12 は直接電流計に接続し、Sh 4~10 は 6 ペンレコーダに入れて記録できるようにした。

4.1.3 磁界測定

磁界測定はコイル線材が経験する磁界と常温空間内の磁界の2種類について行なわれた。前者はコイル各部の計測しようとする位置に磁界の向きにホール素子を設置し、後者は常温空間内を自由にスライドできる治具にホール素子を設置した。電磁石励磁中にこの治具を常温空間中心軸に沿って移動させ、中心軸上磁界分布を測定できるようにした。ホール素子にはシーメンス社製 SBV-552 を使用し、前者は液体ヘリウム中 4.2°K で、後者は室温でそれぞれ校正した。

実際の測定にあたっては常温空間内の温度変化が問題になるが、加温した窒素ガスを常時流し校正時の温度に近くなるように保った。また、ホール素子を校正する際には、常温とドライアイス温度の二とおりについて出力電圧の温度依存性を調べたが、その差は 45 kG 付近で 1%/95°C 程度でほとんど差がないことを確かめておいた。ホール素子の制御電流は定電流電源により 10 mA とした。

4.1.4 温度測定

主として予冷時の温度測定用に、銅コンスタンタン熱電対をクライオスタットおよびコイル各部に取り付けた。また運転中のコイル温度上昇測定用には銅-金合金熱電対とカーボン抵抗を取り付けた。

4.1.5 圧力測定

クライオスタットの内圧測定のために、ブルドン管式連成計とストレンゲージを使った絶対圧伝送器によって指示、記録することにした。

4.1.6 流量測定

流量の制御と直読のために浮式流量計を、また全流量はベンチュリ管によって検知し、記録のために変換器としてストレンゲージを使った差圧伝送器を使用した。

4.1.7 液面計測

ヘリウムの液面測定にはさまざまな方法があるが、どれも一長一短があり特にすぐれているものはない。通常は摺動（しゅうどう）式カーボン抵抗の抵抗測定で比較的容易にかつ高い精度で液面測定が可能であるが、本装置はクライオスタット周辺への人間の接近なしに測定する必要があるため、次に述べる固定式のカーボン抵抗を使用した。

クライオスタットの底から 20~200 cm の範囲に、20 cm ごとに置かれた 10 個のカーボン抵抗に若干の電流を流して熱を発生させておくと、液中と気中の熱伝達の差から温度上昇の違いが現われ、液体ヘリウムの液面を知ることができる。この差が最も大きくなるのは、カーボン抵抗表面の液中における熱伝達が核沸騰から膜沸騰に移行する直前であるが、熱損失も大きいので最適値より低目の電流を選んだ。Allen-Bradley 社製 1/10 W, 100 Ω のモールド抵抗の最適値は 20 mA 付近であるが、本計測装置には 2.5 mA を選んだ。

また、連続的に液面を記録監視するためにハンプソン式の差圧計で液面を測定した。しかし 4.2°K の気体でも液体の 13% の密度を有するから、差圧から液量を求める場合、これによる誤差は無視できない。液体の貯蔵量を知る目安としては使用できるが、高精度の液面読取りには不適當である。

4.1.8 ひずみ測定

電磁石励磁中の各種応力測定には、この目的のために開発した強磁界、極低温用接着形ひずみ測定法を用いることにした。

ゲージ素子として、新興通信工業製 S108Ds ワイヤゲージ⁽⁴⁾を使用した。本素子は 4.2°K での磁気抵抗効果のため見掛けひずみを生ずるが、見掛けひずみの磁界依存性が Kohler の法測に従い、0~20 kOe の低磁界側で放物形を、20 kOe 以上の高磁界側で直線性を示す。さらに常温から 4.2°K の極低温までの温度範囲にわたってゲージ率の温度依存性はきわめて小さく（ $\pm 0.5\%$ 最大）、0~70 kOe の強磁界によってもゲージ率はほとんど変化しない。また各ロット内あるいは各ロット間で高磁界側でも見掛けひずみおよびゲージ率のばらつきはきわめて少ない。

本ゲージを超電導コイル、電磁力サポート表面その他に貼付し、動ひずみ計および 6 ペン記録計によって記録測定した。なお本装置の貼付箇所近傍にホール素子を設置して磁界を測定した結果、貼付位置における磁界の影響は、きわめて小さかった。

4.2 液体窒素タンク

クライオスタットのふく射しゃへい板の冷却および排気装置のトラップ冷却用液体窒素供給のために、図 12 に示す液体窒素タンクを製作した。クライオスタットの液体窒素使用量は定常時約 30 l/h であり、200 時間分の液体窒素を貯蔵することを目標に張込み容積は 6,000 l とした。

5. 運 転 試 験

5.1 予備運転試験結果とその検討

予備運転試験は総合運転試験に先だって、製作した各機器の性能を確認し各種測定法を検討するために社内で行なわれた。しかし 45 kG 鞍形コイル全体を液化冷凍装置なしで 4.2°K まで冷却するには膨大な量の液体ヘリウムを必要とするために不可能である。したがって、鞍形コイルは最内層 1 セグメント（2 層巻き）のみを組み込み、クライオスタットにできる空隙（くうげき）には液体ヘリウム排

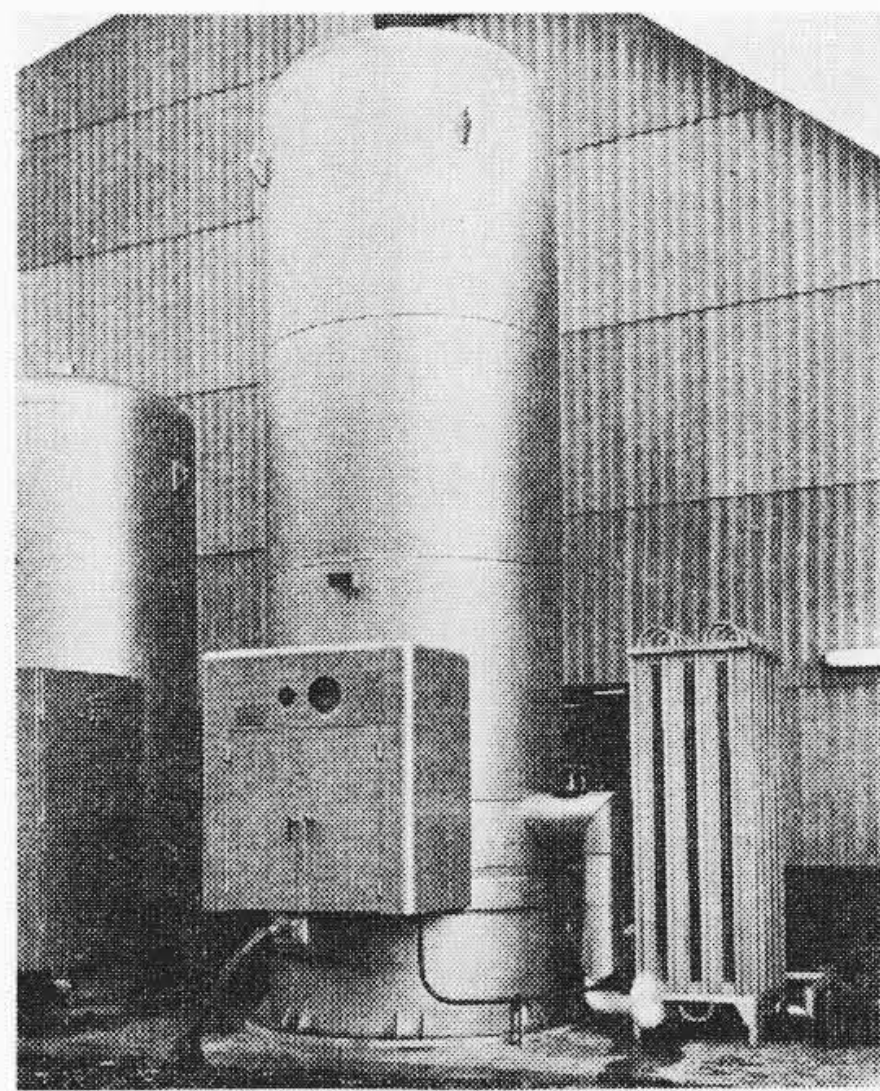


図 12 液体窒素タンク

除用のダミー容器を別に製作して取り付けした。クライオスタットやその制御盤その他付属装置、液体窒素タンクには、本番のものをそのまま使用した。

予備試験の実験項目は次のとおりである。(a) 液体窒素による初期冷却と液体ヘリウムの注入、(b) コイル励磁特性測定、(c) 中心磁束密度、線材経験磁束密度測定、(d) 永久電流励磁特性測定、(e) 急速励磁とインダクタンス測定、(f) クライオスタット性能測定、(g) 貯蔵エネルギー除去実験、(h) 励磁時の鞍形コイルのひずみ測定。実験用の液体ヘリウムは約 4,000 l で、アメリカ AIRCO 社から空路輸入した。

実験結果については紙数の関係から簡単に触れるにとどめる。実験(b)においてコイル電流 1,200 A まで励磁したが、常電導転移その他の異常現象は全く現われなかった。電磁力サポートの強度は 1,200 A で設計したのでこれ以上の励磁は行なわなかった。さらに実験(e)では 1 分 12 秒で 1,200 A に達する急速励磁を行なったが、特に問題はなかった。実験(c)において測定した 900 A 通電時の中心磁束密度は 6.9 kG、線材経験磁束密度は 10.0 kG であった。HISUPER-10X ストリップの H-Ic 特性とこの測定値によるコイル負荷曲線を図 2 に示した。前述のように 45 kG 鞍形コイルに対する銅安定曲線は臨界熱流束 $= 0.3 \text{ W/cm}^2$ で設計されているが、コイル電流 1,200 A はこれを大幅に上回る電流値まで励磁しても問題なかったことを意味し、本番コイルで 45 kG を発生しうる見通しは明るくなった。

電磁力サポートのひずみ測定結果の一例は図 13 に示すとおりである。各ひずみゲージの出力はコイル電流の 2 乗に比例して変化していることがわかる。コイル電流 1,200 A のとき位置 S_1 におけるひずみの最大値は $+4.7 \times 10^{-4}$ であり、ステンレス鋼のヤング率を、 $2.03 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ とすれば応力は $9.5 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$ となる。

5.2 総合運転試験結果とその検討

総合運転実験は下記目標仕様を満足できるか否かの確認を主目的として行なわれた。

- (1) 鞍形超電導コイルの中心磁束密度 $B_0 = 45 \text{ kG}$ の達成。
- (2) クライオスタット常温空間中の MHD 発電ダクト有効体積 (10 cm ϕ $\times$ 60 cm 長) 内の磁束密度均一度が B_0 の 85% 以上であることの確認。
- (3) 永久電流励磁を行なった場合、減衰時定数が 720 時間以上であることの確認。
- (4) クライオスタット特性の確認。特に非通電時、通電時、永久電流励磁時の液体ヘリウム蒸発量が目標値以内であることの確認。

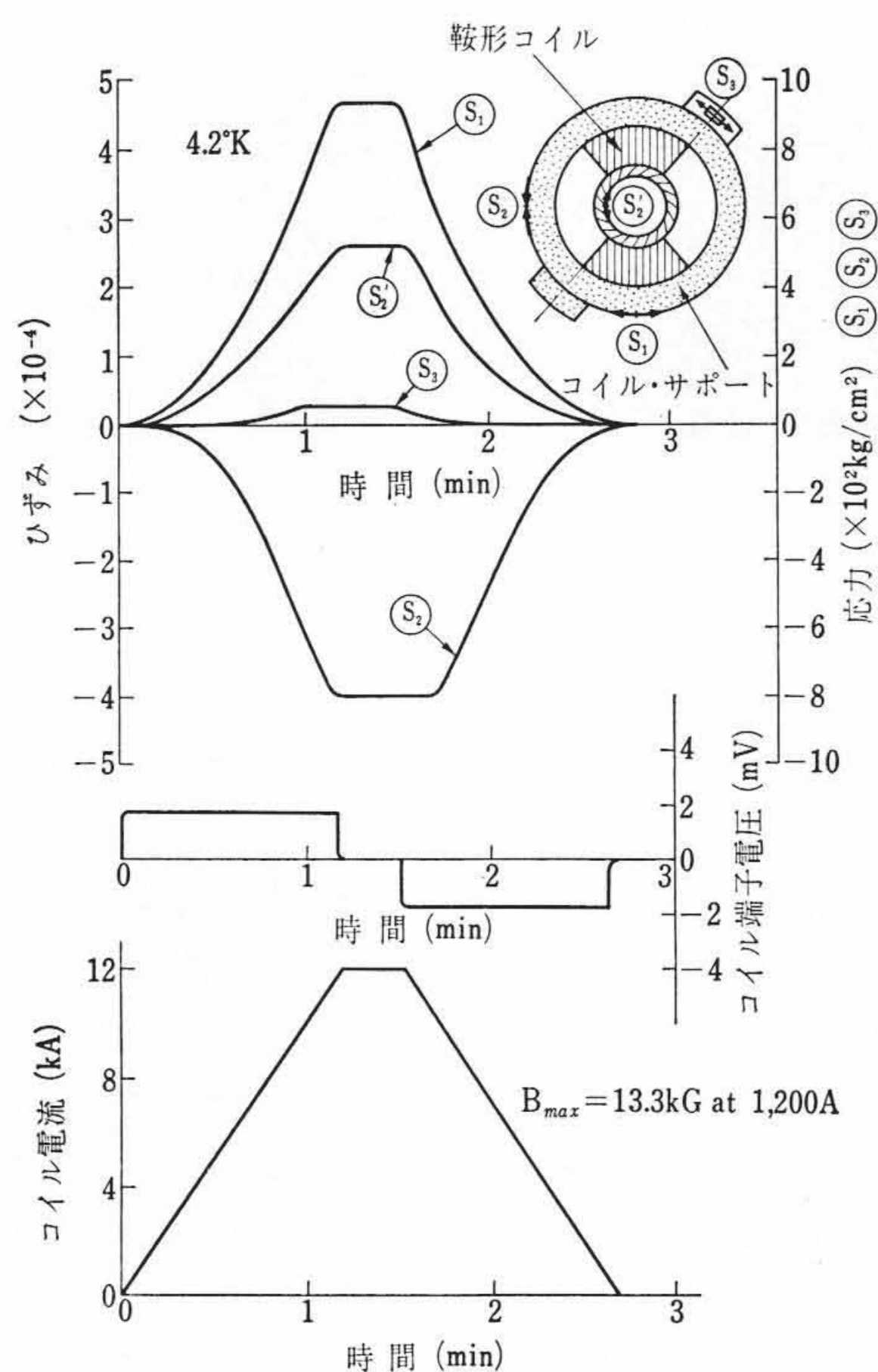
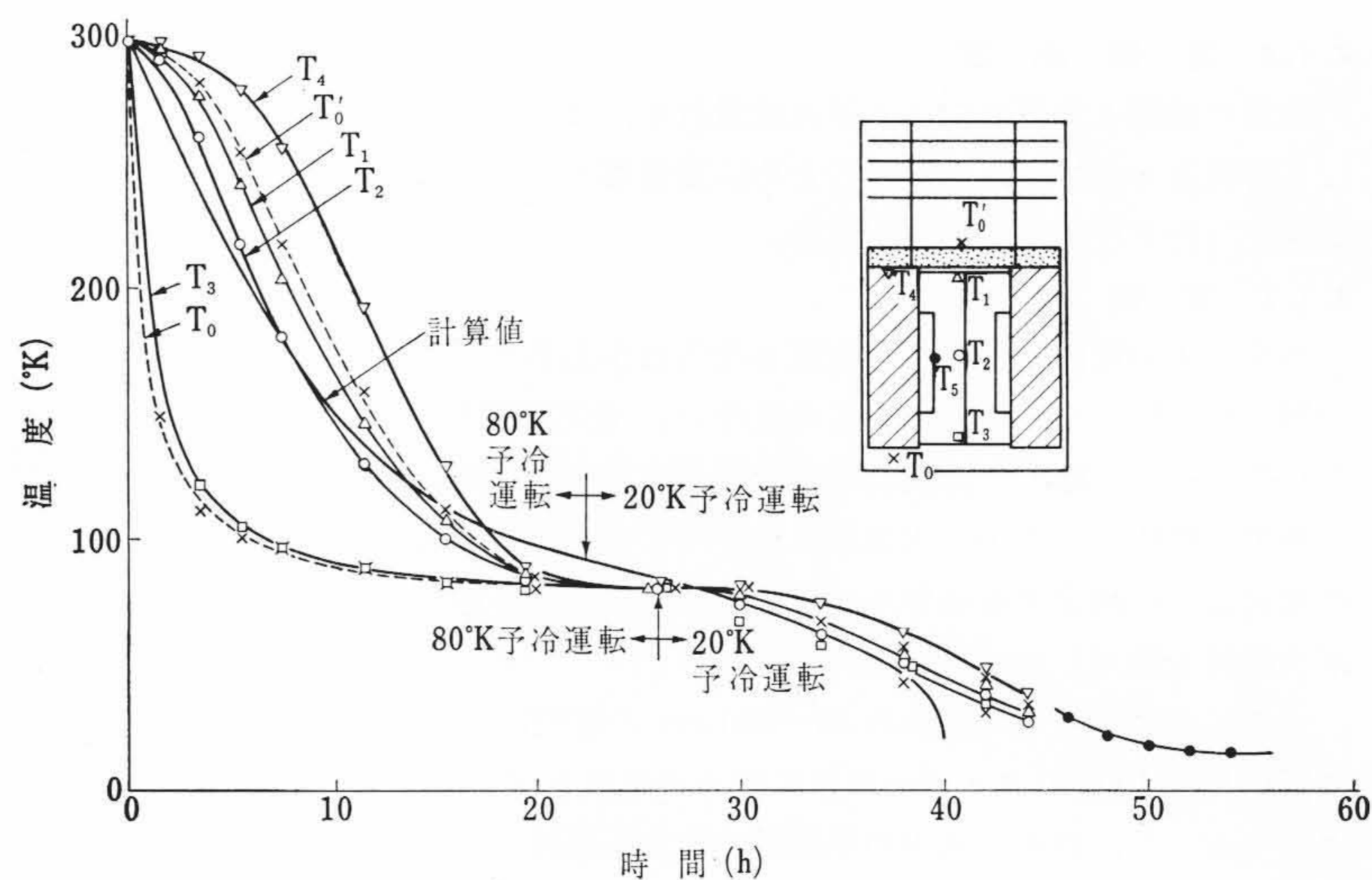


図13 鞍形コイルのひずみと応力
(予備運転試験)



計算の条件

80°K 予冷運転		20°K 予冷運転	
コイル銅換算重量	9.0 t	コイル銅換算重量	7.2 t
予冷ガス入口強度	80°K	冷凍能力	1 kW
予冷ガス流量	400 Nm ³ /h	熱侵入	100 W
熱交換効率	100%		

図15 コイルの予冷曲線

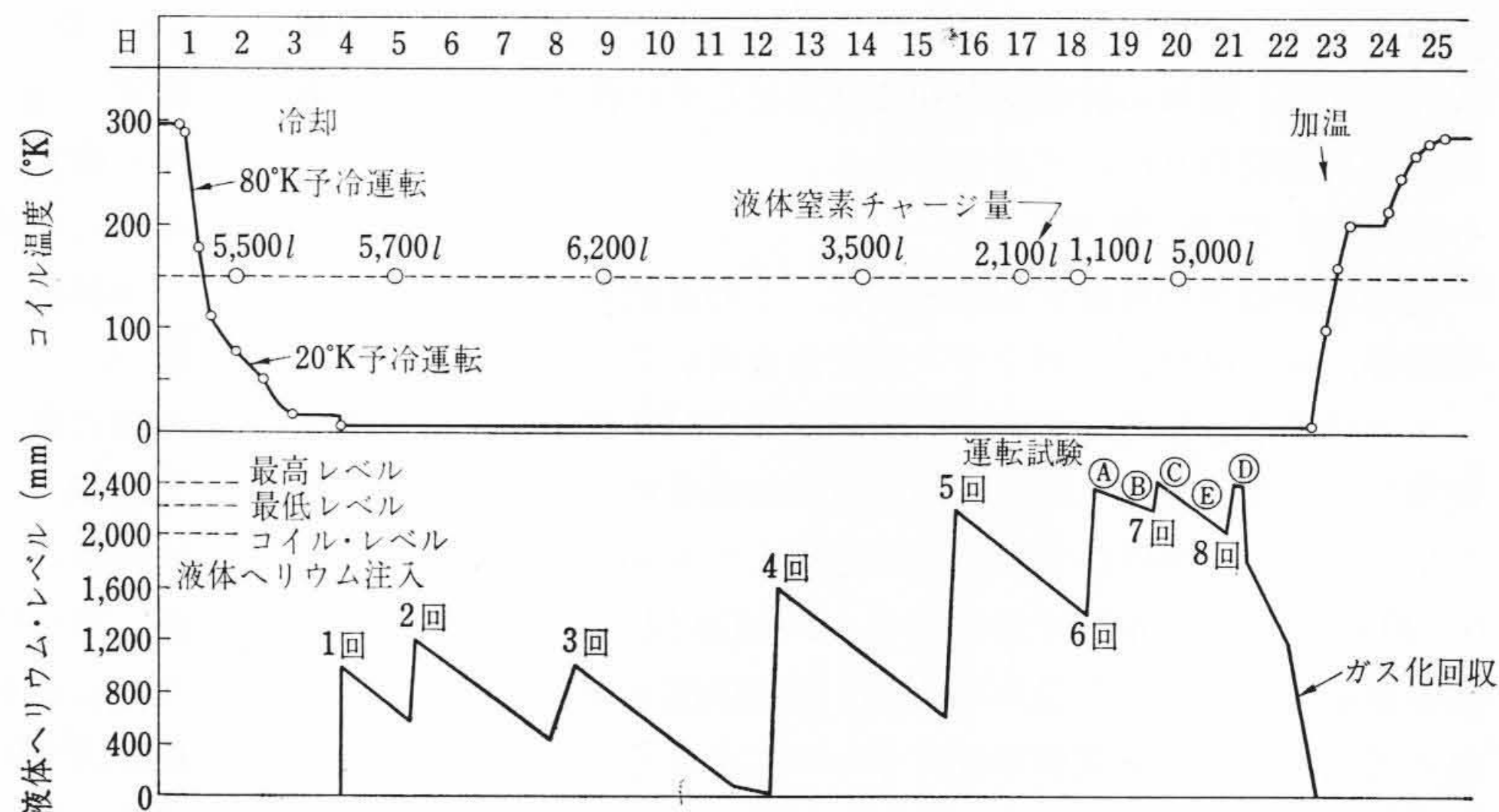


図16 総合運転試験実施経過

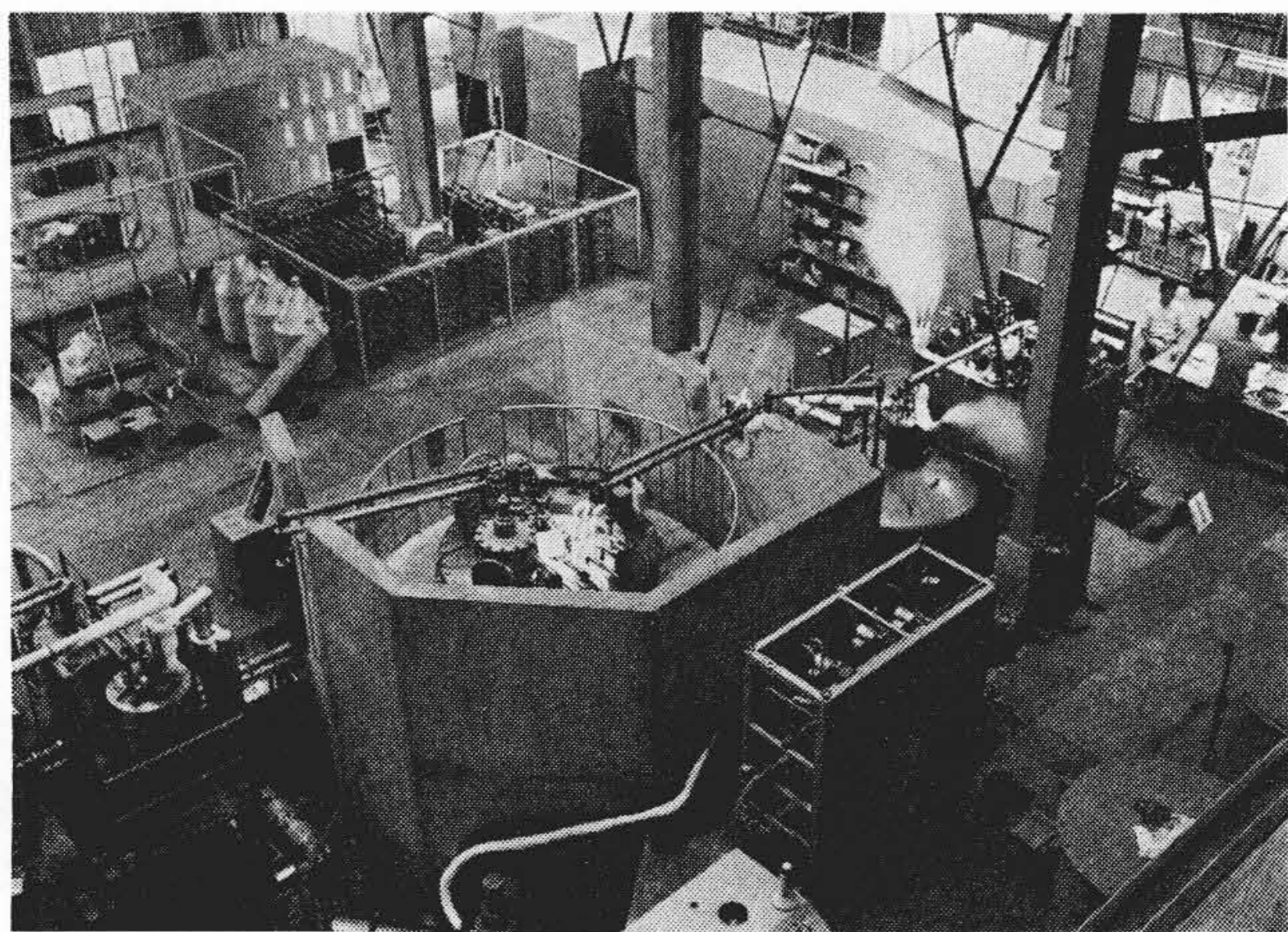


図14 45 kG 鞍形超電導マグネット装置全景

A. クライオスタットの測定, B. 準備励磁, C. 低速励磁と磁束密度分布の測定, D. 中速励磁, E. 永久電流励磁。

実験は電子技術総合研究所田無分室超電導マグネット建屋内で行なわれた。装置の全景(三菱電機製液化冷凍系を含む)は図14に示すとおりである。

5.2.1 コイルの予冷

コイルの予冷は三菱電機製の冷凍機によって行なわれたが、そのときのコイル温度は図15に示すような変化を示した。図には代表的な点の温度だけプロットしたが、同一高さではほぼ同一温度変化を示した。30°K以上は熱電対で、30°K以下はカーボン抵抗温度計(図中T₅)でコイル温度を測定したが、40~20°K間は両者とも精度が悪い。コイルの最終到達温度は14°Kであった。

第3次予冷(液体ヘリウムによる予冷)はきわめてスムーズで、所要液体ヘリウム量は50 l程度と推定される。しかしその後の液体ヘリウムの張り込みにはかなりの時間を要した。その模様を示したのが図16である。

5.2.2 超電導コイル特性(実験項目C, D)

実験C低速励磁では5.6 A/minの比較的遅い掃引速度で励磁し

(5) 励磁回路, クライオスタット操作盤, 計測装置, 液体窒素タンクなどの諸系統が正常に動作することの確認。
これらの目的を達成するために次の実験を行なうことにした。

た。初めての励磁なので 200~100 A おきに一時掃引を停止して、端子電圧、液体ヘリウム蒸発量、その他異常現象が現われていないことを確認しながら慎重に励磁電流を増加して行なった。励磁開始後約 4 時間で第 I ブロックコイル電流 480 A、第 II ブロックコイル電流 525 A で中心磁束密度 $B_0=45\text{ kG}$ に達した。後述の磁束密度分布測定を行なったのち、さらに励磁電流を第 I ブロック 500 A 第 II ブロック 550 A まで増加し、中心磁束密度は最大値 47 kG を記録したが、コイルには全く異常はなかった。約 1 時間この状態を保ったあとで 45 kG まで電流を下げて実験 E 永久電流励磁を行なった。

実験 D では励磁速度を 11.1 A/min と速くして零磁界から 1 時間 17 分で定格の 45 kG まで励磁することができた。

また本超電導コイルの最大貯蔵エネルギーは、 $4.5\times 10^6\text{ J}$ であった。

磁束密度分布の測定は、中心磁束密度が 45 kG になるように励磁電流を固定した状態で行なわれた。常温空間中心軸上での磁界分布は図 5 に実線で示すとおりである。もちろん磁界の向きは、MHD 発電に有効な成分 B_y について測定した。この結果磁束密度均一度は有効磁界長 60 cm ($z=\pm 30\text{ cm}$) 区間において 95.3% になり、有効磁界端での磁束密度は 42.8 kG であった。

磁束密度分布測定結果と前に述べた設計計算結果とを比較すると、

- (i) 中心磁束密度と励磁電流の比が設計値に比べてやや大きくなった。
- (ii) 中心軸上の磁束密度分布が計算による分布より幅が広がった。

これはコイル形状を図 4 のように磁束密度分布計算用にモデル化したときの直線部と端部の分断のしかたが大きな原因と思われる。すなわち、実際のコイル形状では端部と直線部の接続部分は曲線的につながっており、 B_y に寄与する直線部は実効的にはモデルよりかなり長い。このために同一コイル電流に対しては中心磁束密度の計算値は低目に出、また中心点より端部に近づくにつれて実測値のほうが磁束密度がさらに高くなっているものと思われる。

5.2.3 永久電流励磁 (実験項目 E)

永久電流励磁実験ではコイル中心磁束密度を 45 kG に設定し、2 個の永久電流スイッチ (図 3 参照) を閉じた。その後、電源電流を下げ始めた時点から 11 時間 04 分たってスイッチを開放するまで永久電流を保持した。永久電流励磁中の磁界変化は、各部に取り付けたホール素子出力電圧を常時記録計に記録させるとともに、デジタル電圧計で 1 時間おきに測定した。

これらの値から算出した永久電流減衰の時定数は、1,330 時間以上であった。

永久電流減衰の原因となる回路内抵抗分は、永久電流スイッチ 2 個の接触抵抗、ストリップと接片の接続抵抗、ストリップとストリップ間の接続抵抗などがことごとく直列にはいった場合の全抵抗と考えられ、上記時定数から算出すると約 $7\text{ }\mu\Omega$ になる。この値は設計目標値の約半分で仕様をじゅうぶん満足している。

5.2.4 クライオスタットの熱特性 (実験項目 A, C, D, E)

非通電中の液体ヘリウム蒸発量は、液体ヘリウム最高液面 (底からの高さ 240 cm) から高さ 234 cm まで液面の下がる時間から

表 3 試験結果と設計値

鞍 形 コ イ ル 特 性	試 験 結 果	設 計 値
中 心 磁 束 密 度	47 kG	46 kG
磁 界 均 一 度	95%	89%
(10 cmφ×60 cm L 内)		
電 流 減 衰 時 定 数	1,300 時間	>720 時間
(永 久 電 流 励 磁)		
ク ラ イ オ ス タ ッ ト 液 体 He 蒸 発 量		
非 通 電 時	10 l/h	11 l/h
通 電 時	11~13 l/h	16 l/h
永 久 電 流 励 磁 時	12 l/h	14 l/h

平均して求めたもので、定常状態ではないが実用上の蒸発量を与える。永久電流モードにおける蒸発量は、底からの高さ 234 cm から 225 cm まで液面が下がる間で測定した。通電中の蒸発量は、通電時間が短く液面降下速度や蒸発ガス流量からの測定が不可能だったので、非通電中および永久電流モードにおけるデータから推定した。

超電導コイルおよびクライオスタット性能測定値は目標値とともに表 3 に示すとおりである。

表 3 からわかるように、クライオスタットの熱特性は総合的には目標値よりやや良好であった。侵入熱の個々の経路を分析することはかなり困難であるが、非通電時について 3.2 で述べた設計値の内容と比較すると、傾向としてはパワーリードの侵入熱は増加し、ふく射による侵入熱は減少、伝導による侵入熱はほぼ設計値に近かったものと推定される。パワーリードの侵入熱の増加は通電時の性能を重視して材質を変えたことに原因があり、ふく射による侵入熱の減少はふく射面のふく射能を設計値よりも小さくできたことによる。

6. 結 言

本試作研究によって完成した 45 kG 超電導電磁石は、鞍形超電導マグネットとしてこれまで世界最大であった AVCO 社のもの (内径 30.5 cm, 中心磁束密度 37 kG, 貯蔵エネルギー 3.9 MJ) を抜いた世界最大の規模のものである。これを超電導材料を含めてすべて国産品で製作しその運転試験に成功したことにより、わが国における大形超電導マグネットの設計、製作、計測、運転などの技術的基盤は確立されたものと考ええる。今後さらに大形、高磁界の各種超電導マグネットが建設され、MHD 発電機をはじめ原子核実験用、核融合装置用、あるいは超高速列車浮上用などの応用分野が開拓されることを期待している。

終わりに本研究を遂行するにあたり種々ご指導いただいた電子技術総合研究所森所長、伏見機器部長、日本大学安河内教授、東京大学関口教授、東京工業大学森教授、また特に総合運転試験についてご指導、ご協力いただいた超電導研究室等々力室長をはじめ同研究室のかたがた、設計、製作、実験にあたられた社内関係各位に厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

(1) 土井, 大原, ほか: 日本特許 No. 507097
(2) Z. J. J. Stekly et al.: IEEE Trans. on Nuclear Science NS-12 (1965) 367
A. R. Kantrowitz et al.: Appl. Phys. Lett. 6 (1965) 56
(3) 尾形, 剣持, ほか: 低温工学 4 (1969) 219
(4) 川辺, 七里: 第 5 回低温工学発表会 (1969) S-2