45 kG 鞍形超電導電磁石 (その 1)

——電磁石, クライオスタット, 総合運転——

木 村 浩*・土 井 俊 雄*・佐 藤 新太郎*
笠 原 達 雄**・飯 塚 富 雄***

*日立製作所中央研究所 東京都国分寺市東恋ヶ窪 1-280

**日立製作所日立工場 茨城県日立市幸町 3-1-1

***日立製作所日立研究所 茨城県日立市久慈町 4026

(1970年 3 月 4 日受理)

45 kG Saddle Shaped Superconducting Magnet, Part 1

——Magnet, Cryostat & Their Test Results——

Hiroshi KIMURA*, Toshio DOI*, Shintaro SATO*, Tatsuo
KASAHARA**, and Tomio IZUKA***

*Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd., 1-280 Higashikoigakubo, Kokubunji, Tokyo

**Hitachi Works, Hitachi, Ltd., 3-1-1 Saiwai-cho, Hitachi-shi, Ibaragi-ken

***Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd., 4026 Kuji-machi, Hitachi-shi, Ibaragi-ken

(Received March 4, 1970)

A large saddle shaped superconducting magnet was built and tested.

The conductor used was a composite consisting of 0.7 cm wide by 0.16 cm thick copper strip in which ten Nb-40Zr-10Ti (HISUPER X-alloy) wires were embedded in two rows. The physical characteristics of the magnet were as follows: winding inside diameter, 38 cm; winding outside diameter, 88 cm; overall length, 180 cm. A cryostat to contain the coil had a room temperature space (25 cm in diameter) for MHD plasma duct. Outside diameter and depth of the liquid helium vessel were 150 cm and 330 cm, respectively.

As a result of the test running the following characteristics of the magnet and cryostat were assured.

	Test Results	Design Values
Central field	47 kG	45 kG
Field uniformity	95%	>85%
Current decay time-constant (persistent mode)	>1,300 hours	>720 hours
Boil-off rate of liquid helium (with magnet not energized)	10 l/h	11 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」に関するもので

ある。

日立製作所では昭和 37 年頃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なっていた。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・配線等を行なった後、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. 超電導電磁石

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った。

(i) 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、50~55 kG 程度であると想定し、この条件下でも 500 A 以上の通電容量を持ちしかも十分に安定化されていること。

(ii) 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。

(iii) 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とした。絶縁テープはコイルに成形した時、あるいは液体ヘリウムに浸漬した時はがれないだけ十分な接着強度を有すること。

(iv) 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、日立で開発した直径 0.25 mm の Nb-40 Zr-10 Ti 合金線を 10 本、平角銅に平行に埋め込んだ 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 mm×1.6 mm¹ と決定した。

Fig. 1 は HISUPER-10X ストリップの設計断面である。また Fig. 2 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当って、下記の基本方針を定めた。

(i) 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大型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 Stekly²⁾、その他に従い次式で与えられるものとした。

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

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。

コイル層間のスペーサ間隔と臨界熱流束 q_c との関係は予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ーを置き、この面のみ全面発熱した場合の液体ヘリウム中で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。

Fig. 2 に示すコイル設計銅安定曲線 ($\alpha_c=1$) 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 ブロックの各設計電流を求めた (第 I、第 II ブロックについては次に述べる)。

(ii) 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。このために Fig. 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。

コイルの最終設計値を Table 1 に示す。

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は日立 HITAC-5020 F を使って行なった。計算に当ってはコイルは Fig. 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

Fig. 1 Cross-section of HISUPER-10X strip.

Fig. 2 Copper stability curve and coil load line.

P.S.	D.C. 2000A-20V Stabilized Power Supply	R_p	Shunt Protection Resistor
A	Ammeter	R_s	Shunt Stabilizing Resistor
Sh1~3	Shunt resistor for ammeter	R_c	Controlling Resistor
Sh 11,12	" for recorder	C	Superconducting Coil
Sh4~10			
P.Sw	Persistent Switch		

Fig. 3 Coil energizing circuit.

Table 1 45 kG saddle shaped coil specifications

Central magnetic field B_0	45 kG
Effective volume for MHD power generation	10 cm ϕ $\times$ 60 cmL
Coil inside diameter	38 cm ϕ
Coil outside diameter	88 cm ϕ
Coil length	180 cm
No. of total turns	7,630
No. of layers	22

Fig. 4 Electro-magnetic body force.

Fig. 5 Magnetic field distribution on Z axis; $B_y(z)$.

Fig. 6 Magnetic field distribution; $B_y(x)$
 $y=0, z=0, \pm 22.5, \pm 30, \pm 45 \text{ cm}$.

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 -358 ton , F_θ として $+371 \text{ ton}$ の力が、また端部には F_z として外向きに -214 ton , F_r としてふくらもうとする方向に 109 ton 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 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十分耐え得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を Fig. 5 に点線で示す。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 Fig. 6 に、 $x=0$ での y 方向分布を Fig. 7 に示した。Fig. 5~7 から分かるように $z=\pm 30 \text{ cm}$, $x=y=\pm 19 \text{ cm}$ 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。Fig. 2 にコイル負荷曲線を示した。

2.4 永久電流スイッチ

永久電流励磁実験を行なう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にした。すなわちクライオスタット上蓋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を Fig. 8 に示す。スイッチ接片は厚さ 1 cm , 有効接触面積 18.5 cm^2 の無酸素銅(OFC)で接触面には厚さ 250μ のインジウムコーティングを施した。

Fig. 9 にクライオスタットに組み込み中の超電導電磁石を示す。

3. クライオスタット

3.1 クライオスタットの設計

超電導電磁石を収納するクライオスタットは、中心部に $25 \text{ cm}\phi$ 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を巻回した輻射しゃへい用の銅板を挿入し、外

Fig. 7 Magnetic field distribution; $B_y(y)$
 $x=0, z=0, \pm 22.5, \pm 30, \pm 45 \text{ cm}$.

Fig. 8 Mechanical persistent switch.

Fig. 9 Superconducting magnet assembly.

筒部および底部には輻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層の発泡スチロールと金属板とからなる上部輻射しゃへい板と液体窒素で冷却された輻射しゃへい板を挿入した。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はできるだけ薄くし、材質は低熱伝導性のステンレス鋼とした。また、この貯槽壁は上部輻射しゃへい板や測定用導線など各種挿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後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蓋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2m に対してクライオスタットの深さは3.3m 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な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した。

クライオスタットの主要寸法を Table 2 に、また

Table 2 Cryostat specifications

Room temperature space diameter	25 cmφ
Liquid He vessel inside diameter	32 cmφ
Liquid He vessel outside diameter	150 cmφ
Liquid He vessel depth	330 cm
Cryostat outside diameter	180 cm
Cryostat height	450 cm

Fig. 10 Cryostat.

外観写真を Fig. 10 に示す。

3.2 熱計算

クライオスタットの熱計算は、輻射、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った。その結果は、輻射による侵入熱 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（ジュール発熱を含む侵入熱）0.7 W（通電中 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十分安全な設計とした。

(i) 超電導線材は安定化されたものを用い、コイル設計に当っても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）。

(ii) 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。

(iii) 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 ($0.4 \text{ kg/cm}^2\text{G}$)、②大気開放弁 ($0.5 \text{ kg/cm}^2\text{G}$)、③パネ安全弁 ($0.6 \text{ kg/cm}^2\text{G}$)、④破壊板 ($0.8 \text{ kg/cm}^2\text{G}$)。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た。

(iv) 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他人身の安全をはかった。

上記の他、地震、火災、停電その他の事故対策にも万全を期した。

4. 付属装置

4.1 計測装置

超電導磁石の予冷、液体ヘリウムの注入、励磁実験を通じて計測、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 (Fig. 11) で行なえるようにした。

Fig. 11 Controlling and measuring panels.

(a) 端子電圧測定

励磁実験中の常電導部の発生その他の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。実験に当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ビジーコードに記録させた。

(b) 電流測定

Fig. 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~Sh 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 を 6 ペンレコーダに入れて記録できるようにした。

(c) 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 種類について行なった。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較正した。

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較正時の温度に近くなるように保った。また、ホール素子を較正する際には、常温とドライアイス温度の二通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 流した。

(d) 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-金合金熱電対を、液体ヘリウム沸騰検出用にカーボン抵抗を取り付けた。

(e) 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。

(f) 流量測定

流量の制御と直続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。

(g) 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優れているものがない。通常は撓動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 毎に置かれた 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ブ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の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、高精度の液面読みとりには不適當である。

(h) 歪測定

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、極低温用接着型歪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 S 108 D_s 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歪を生じるが、見掛け歪の磁界依存性が Kohler の法則に従い、0~20 kOe の低磁界側で放物型で 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極めて小さく ($\pm 0.5\%$ 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歪およびゲージ率のバラツキは極めて少ない。

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、動歪計および 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極めて小さかった。

4.2 液体窒素タンク

クライオスタットの輻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、Fig. 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。

Fig. 12 Liquid nitrogen tank.

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立って、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った。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 まで冷却することは莫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には液体ヘリウム排除用のダミー容器を別に製作して取り付けた。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通りである。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歪測定。実験は液体ヘリウム約 4,000 l を米国 A IRCO 社から空路輸入して行なった。

実験結果については紙数の関係から簡単に触れるに止める。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 まで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 $H-I_c$ 特性とこの測定値によるコイル負荷曲線を Fig. 2 に示した。前述のごとく、45 kG 鞍形コイルに対する銅安定曲線は 臨界熱磁束 = 0.3 W/cm^2 で設計されているが、コイル電流 1,200 A はこれを大幅に上廻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 を発生し得る見通しは明るくなった。

電磁力サポートの歪測定結果の一例を Fig. 13 に示した。各歪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分かる。コイル電流 1,200 A の時位置 S_1 における歪の最大値は $+4.7 \times 10^{-4}$ 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の項目を主目的として行なった。

- (i) 鞍形超電導コイルの中心磁束密度 $B_0 = 45 \text{ kG}$ の達成。
- (ii) 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 cmφ×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。
- (iii) 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。
- (iv) 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。
- (v) 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項目を行なうことにした。A. クライオスタットの性能測定、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。

実験は電気試験所田無分室超電導マグネット建屋内で行なった。装置の全景 (三菱電機製液化冷凍系を含む) を Fig. 14 に示す。

- (a) コイルの予冷

Fig. 13 Strain and stress of saddle shaped coil (Preliminary test running).

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、その時のコイル温度は Fig. 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 T_s) 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 50l 程度と推定される。しかしその後の液体ヘリウムの張込みにはかな

りの時間を要した。その模様を Fig. 16 に示す。

(b) 超電導コイル特性 (実験項目 C, D)

実験 C 低速励磁では 5.6A/分 の比較的遅い掃引速度で励磁した。初めての励磁なので 200~100A 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、その他異状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った。励磁開始後約 4 時間で第 I ブロックコイル電流 480A、第 II ブロックコイル電流 525A で中心磁束密度 $B_0=45$ kG に達した。後述の磁束密度分布測定を行なった後、さらに励磁電流を第 I ブロック 500A、第 II ブロック 550A

Fig. 14 Bird's-eye view of 45 kG superconducting magnet apparatus.

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後で 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/分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 4.5×10^5 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った。常温空間中心軸上での磁界分布を Fig. 5 に実線で示す。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有効磁界長 60 cm ($z = \pm 30$ 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 Fig. 4 のごとく磁束密度分布計算用にモデル化する時の直線部と端部の分断の仕方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方が磁束密度がさらに高くなっているものと思われる。

(c) 永久電流励磁 (実験項目 E)

Fig. 15 Cooling down curve.

Fig. 16 Process for cooling down and test running.

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入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 $7\mu\Omega$ になる。この値は設計

目標値の約半分で仕様を十分満足した。

(d) 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 まで液面の下る時間から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は不可能だったので、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を目標値とともに Table 3 に示した。

Table 3 Test results and design values

Saddle Shaped Coil		
	Test Results	Design Values
Central magnetic field	47 kG	46 kG
Field uniformity (10 cm×60 cmL)	95%	>89%
Current decay time-constant (Persistent mode)	>1,300 hours	>720 hours
Cryostat (Boil-off rate of liquid helium)		
With magnet not energized	10 l/h	11 l/h
With magnet energized	11~13 l/h	16 l/h
Persistent mode	12 l/h	14 l/h

Table 3 から分かるように、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難しいが、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、輻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、輻射による侵入熱の減少は輻射面の輻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、わが国における大型超電導マグネットの設計、製作、計測、運転等の技術的基盤は確立されたものと考え

える。今後さらに大型、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等の応用分野が開拓されることを期待したい。

終りに本研究を遂行するに当り種々ご指導いただいた電気試験所森所長、伏見機器部長、日大安河内教授、東大関口教授、東工大森教授、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方々に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 土井, 大原, 他…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, 他: 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.