

大形超電導マグネットの開発

Development of a Large Superconducting Magnet

A large superconducting magnet for researches on 1,000 kW class MHD power generation has been completed recently. With racetrack-shaped coils this remarkable magnet features high magnetic stored energy (60 MJ) and high magnetic field intensity (45 kG at the center and 67.5 kG on the conductor). In an operation test, which involved excitation up to the rated magnetic field and quick elimination of the magnetic stored energy, it showed satisfactory performance and characteristics.

齊藤 龍生* Ryusei Saitô
金森 直和* Naokazu Kanamori
加沢 義彰* Yoshiaki Kazawa
多田 直文** Naobumi Tada
木村 浩*** Hiroshi Kimura
佐藤新太郎*** Shintarô Satô
笠原 達雄* Tatsuo Kasahara

1 緒 言

近年目覚しい進歩をとげてきた超電導技術は、電気機器の分野に新たな可能性を広げようとしている。

超電導の最も顕著な現象である電気抵抗ゼロの特性は、電気機器の無損失化につながるものであり、エネルギーの高効率利用に寄与するとともに、従来、ジュール損失のために不可能であった高電流密度化が実現し、機器のより高磁界化、小形化並びに軽量化が可能となってきた。

既に超電導技術の応用は、高磁界マグネットの部門で実用段階に入っており、また、Magnetohydrodynamics (以下、MHDと略す) 発電、磁気浮上、加速器及び回転機分野でも開発が進められており、更に核融合、エネルギー蓄積などへの適用が期待されるに至っている。

我が国における超電導技術開発の主要な流れの一つは、通商産業省工業技術院の大型プロジェクトであるMHD発電の研究開発の一環としての超電導マグネットの開発である。

今回、本プロジェクトの前期最終計画として1,000kW級MHD発電機の建設が電子技術総合研究所で行なわれ、日立製作所は、工業技術院よりの委託により本超電導マグネットの設計、製作を行ない、電子技術総合研究所の指導のもとに運転試験を行なった。

表1 超電導マグネットの仕様 幅広の常温空間とレーストラック形コイルに特徴を有する。完全安定化領域の運転では、中心磁束密度45kGを発生できることを目標としている（昭和45年度大型プロジェクト委託研究実施計画書による）。

Table 1 Specification of Superconducting Magnet

項 目		仕 様
1. 超電導コイル	形 式	縦形レーストラック形コイル
	磁 束 密 度	50 kG (目標)
	磁 界 有 効 空 間	100×250×1,200 (mm)
	磁 界 均 一 度	90% 以上
2. クライオスタット	形 式	中心部常温空間付縦形
	常 温 空 間 寸 法	390 mm×1,300 mm
	定常時液体ヘリウム消費量	
	非 通 電 時	80 l/h 以下 (目標)
	通 電 時	100 l/h 以下 (")
	断 熱 方 式	高真空液体窒素シールド方式

本装置に用いる超電導マグネットは、その磁界強度とエネルギー規模を総合的にみて世界最大級の装置と評価されるものであり、とりわけ従来のくら形コイル⁽²⁾⁽³⁾から一転してレーストラック形コイルを採用した点に大きな特徴を有している。

本稿は上記超電導マグネットの開発に関し論述したものである。

2 装置概要

2.1 装置の構成

超電導磁界発生装置は、磁界発生主体である超電導マグネットとこれを極低温に冷却するヘリウム冷凍液化装置⁽¹⁾、超電導マグネットを励磁する直流安定化電源及び制御計測装置などより構成されている。

2.2 超電導マグネットの性能仕様

超電導マグネットの試作研究に際し、目標とした仕様は表1に示すとおりである。

3 超電導マグネット

3.1 形成の選定

MHD発電機用の超電導マグネットのコイル形状として従来から提唱されている方式は、いわゆるくら形コイルであり、既に「45kG超電導電磁石」⁽²⁾において実績を有している。

本超電導マグネットではMHD発電機構成上の要請として、長方形常温空間を確保するという特殊性を主体に検討した結果、レーストラック形を採用することにした。

次にコイルの安定化の方式についてCryogenicに完全安定化された領域で計画するか、準安定領域で計画するかが重要なポイントとなる。本装置では、先行プロジェクト⁽³⁾の結果、装置の規模、使命などを考慮して安全、確実な安定化領域での計画を行なうべきであると判断した。すなわち、本超電導マグネットにおいては、完全安定化領域では中心磁束密度45 kGを目標とし、但し、準安定化領域で励磁可能であれば中心磁束密度50kGを発生できるように線材の電流容量などを設計することを基本方針とした。

3.2 電流素の効果的配置

レーストラック形コイルにおいて、中心磁束密度を最も効果的に発生するためのコイル配置について検討した。

まず簡単のために、無限長直線電流で考察すると電流が点

* 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

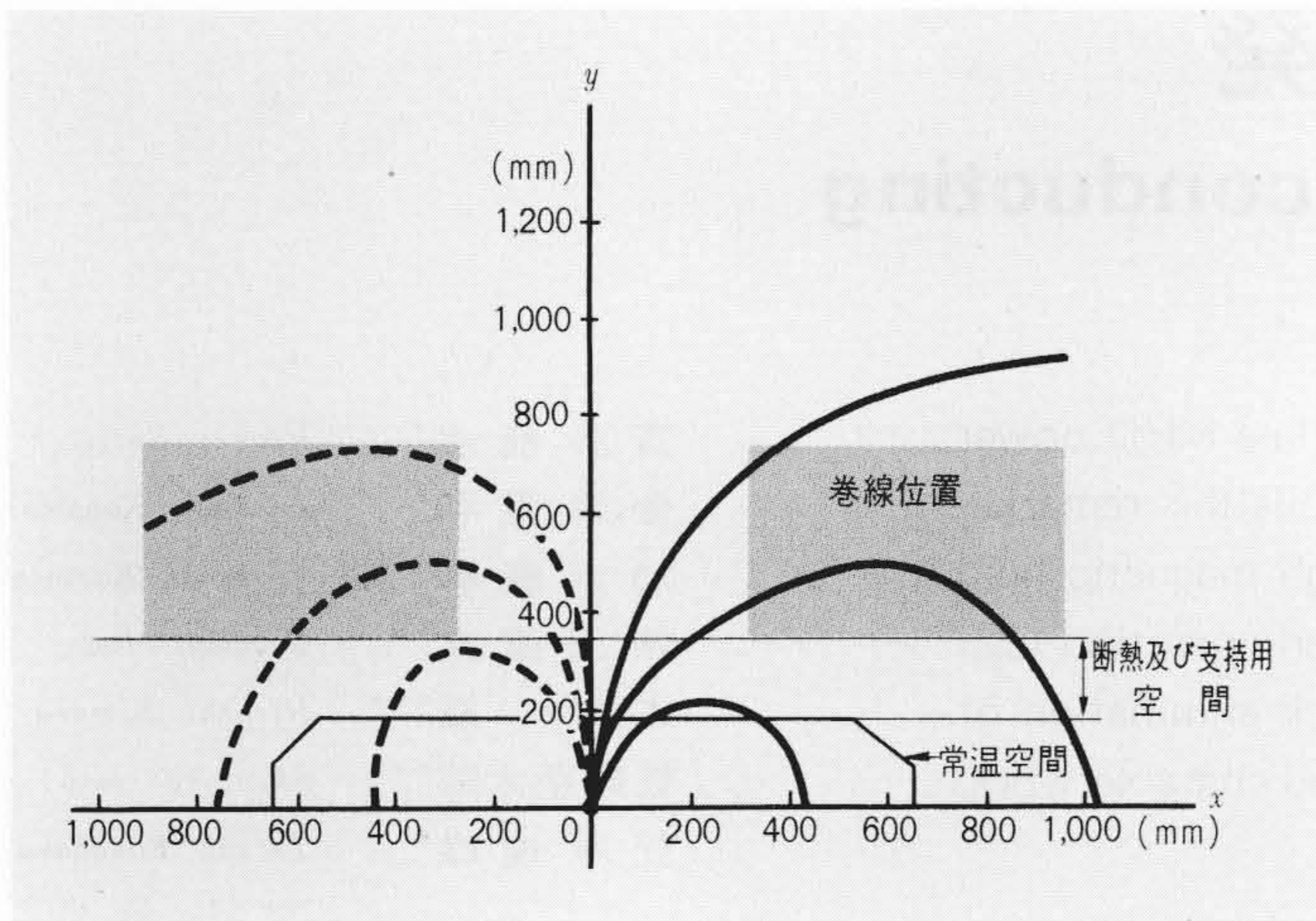


図1 電流の等価位置とコイル配置 図の右半分は、単位電流の等価位置の軌跡を、左半分は単位線長当たりでみた単位電流の等価位置の軌跡を示している。

Fig. 1 Equivalent Locus of Current and Position of Coil

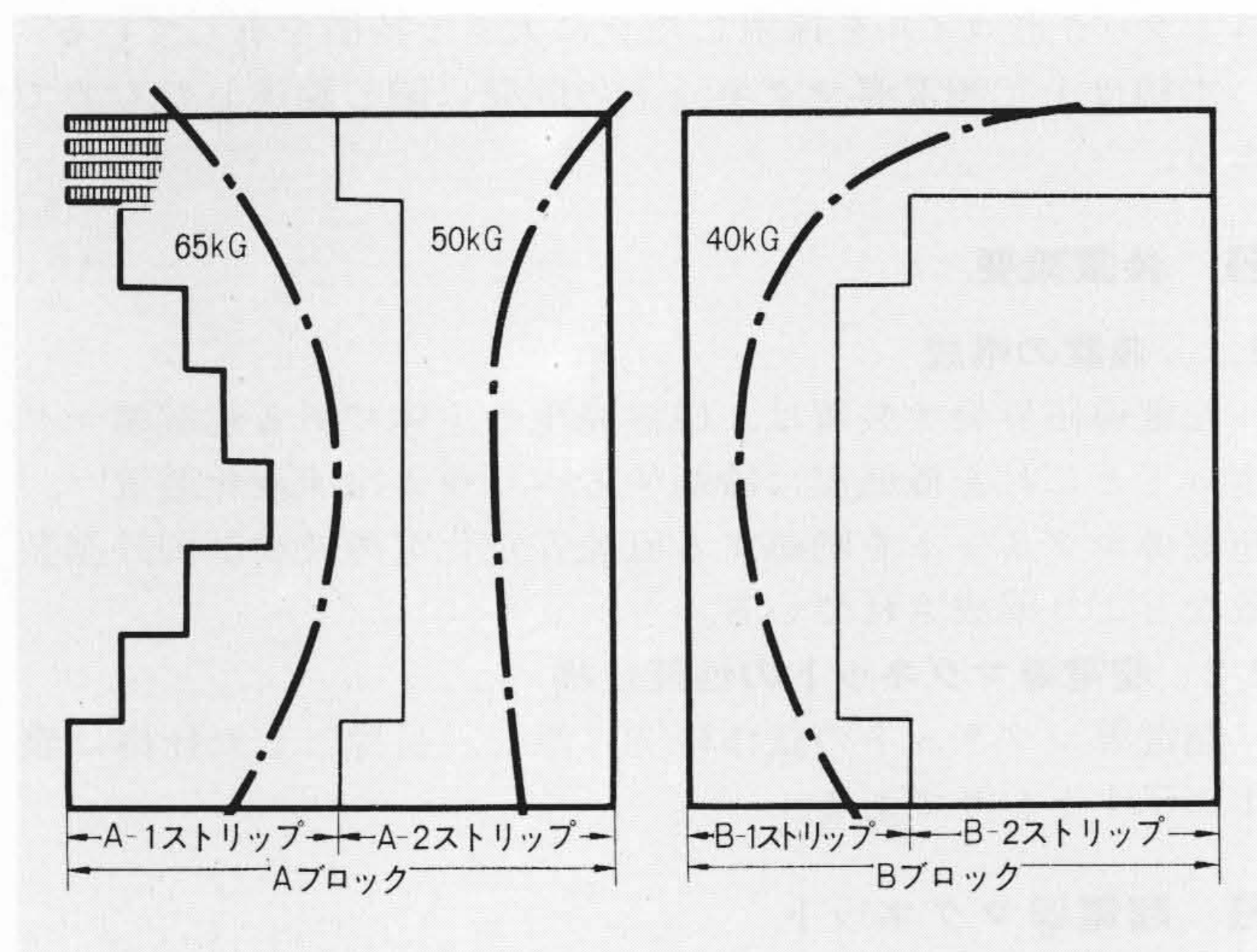


図2 コイル断面と磁界領域の区分 ロばし形に切り欠いた断面は、コイルの経験磁界を下げる。一点鎖線は等磁界線を、実線は超電導線の使用区分を示し、A、Bブロックではコイル電流密度が異なっている。

Fig. 2 Configuration of Coil Cross-section and Distribution of Field Domain

(x , y) に位置し Z 方向に流れている場合、原点 ($0,0$) に生ずる磁界の y 方向成分を一定にするような電流の x - y 平面上の軌跡は下記(1)式、

$$(x - \frac{1}{k})^2 + y^2 = (\frac{1}{k})^2 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $k = K \frac{B_y(0,0)}{I}$ ($B_y(0,0)$: 原点の y 方向磁界、

I : 電流、 K : 比例定数)

で与えられる円上にあり、半径の小さいものほど $B_y(0,0)$ の発生に対して効果的なことを意味する。

次に実際の有限長レーストラック形コイルでは、端部効果及び各電流路において一周する電流路長が異なることに留意しなければならない。従って、

(a) 単位電流当たりの $B_y(0,0)$

(b) 単位線長当たり、単位電流当たりの $B_y(0,0)$

について検討する必要がある。図1は計算の結果を実際のコイル配置とともに示すものである。

3.3 コイル断面形状と電流分布の決定

超電導コイルにおいては、超電導体の H - I_c 特性を十分に考慮した設計を行なうことが技術的にも経済的にも重要である。つまり、第一は超電導体を経験する最高磁界を極力小さくすることであり、第二は与えられた経験磁界に対し最適の超電導体を使用し、これに見合った電流を選ぶことである。

図1に示すようなコイル断面では、中心磁束密度とコイルの最大磁束密度(端部曲線頂部巻線内側縁)との比は約1.7となり、中心磁束密度50kGに対し85kGとなり、合金系線材の使用点としては高磁界側に寄りすぎており実用的でない。そこで我々は図2に示すようなロばし形のコイル断面について検討した結果、上述の比を1.5にまで下げることができ絶対値において10kG減の75kGに抑えることが可能となった。

コイル断面中の磁界分布を求めてみると、図2のような等磁界線が得られる。そこで、本装置ではコイルを領域A及びBに分けてコイル電流密度を変えるとともに、各領域に対し2種類の超電導体を使用することとした。なお領域A、Bの電流密度比は、1:1.23に設定した。

3.4 磁界分布

MHD発電チャネル用として規定された空間の磁界分布を求め、中心磁界に対する比率で表わしたものを図3に示した。

3.5 電磁力と支持

コイルに作用する電磁力は、電流素とその点における磁界のベクトル積で与えられる。まずコイル巻線内の力に着目すると、一例としてコイル直線部の径方向(x 方向)の力についてみると同方向電流により圧縮力が作用しており、コイルの内径側では外向きに、外径側では内向きの力が作用しており、対向電流の影響を受けて断面中央よりやや外側で力の方

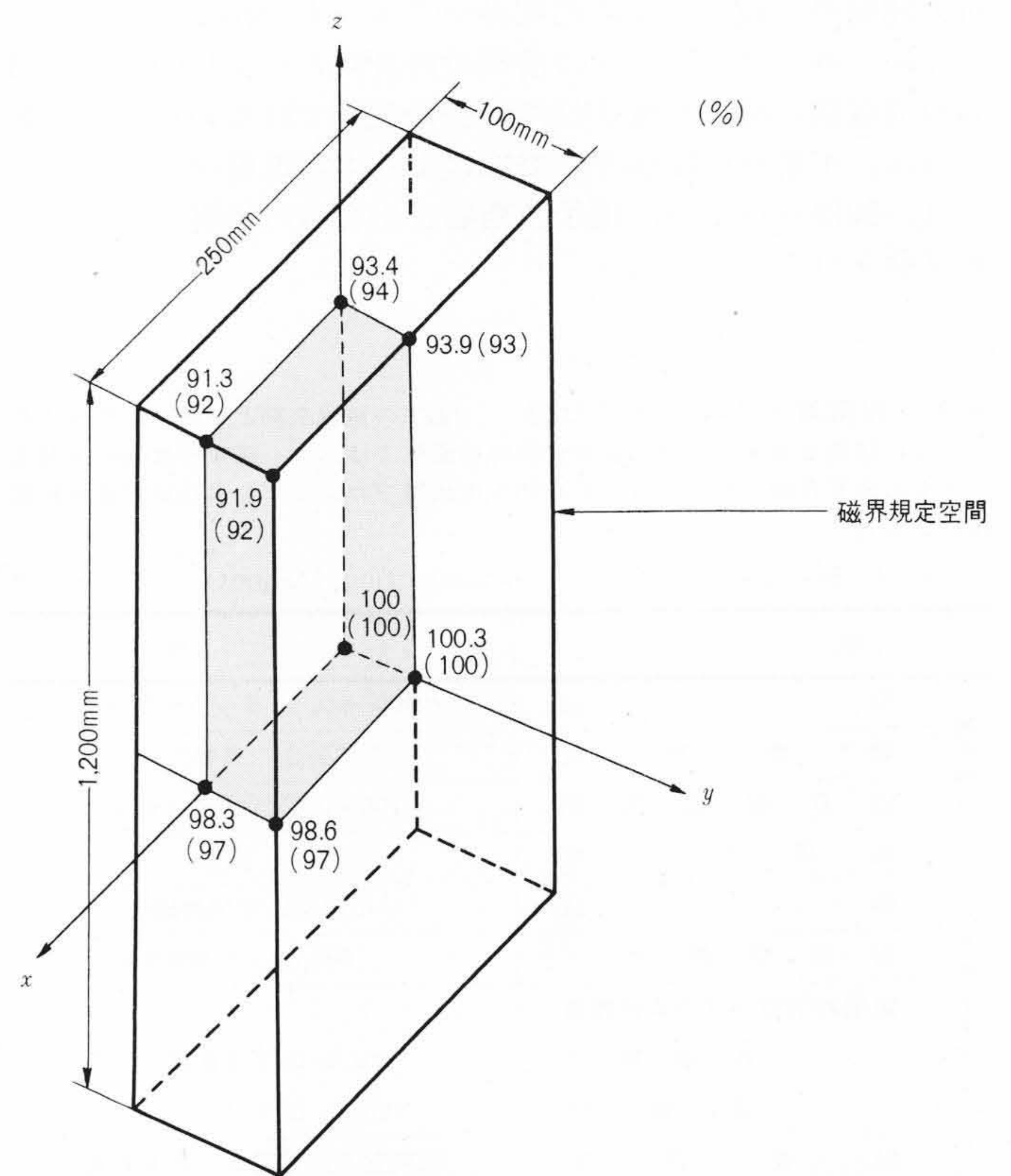


図3 規定空間の磁界分布 磁界の y 方向成分の均一度を比率表示したもので、() 内数値は、運転試験時の実測値を示す。

Fig. 3 Field Distribution in Utility Space

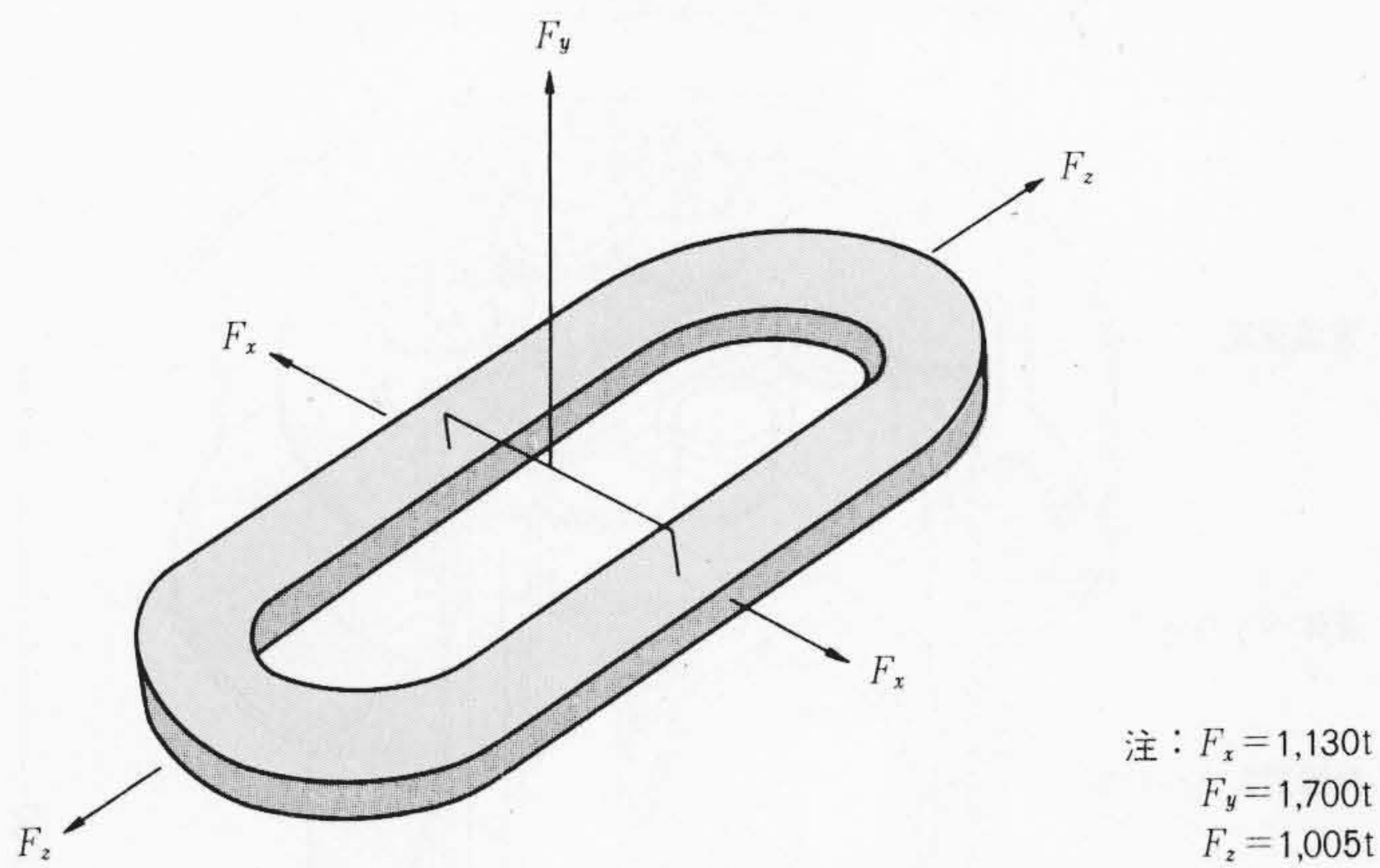


図4 コイルに作用する合成力 電流間に作用する電磁力の総和として、図のような力がコイルにかかる。
Fig. 4 Electromagnetic Forces on Coil

向が反転し、この点で最大の圧縮力を生ずる。次にコイル電流束に働く合成力についてみると図4に示すように、コイルの全周にわたり外向きの力が作用している。これらの力は、コイル形状を直接変位させるように作用するため外的支持が必要である。本装置ではF_yは対向コイル間の吸引圧縮力の形で支持し、F_xは外部サポートで、また、F_zはレーストラック形の形状を利用してコイルの張力で支持している。

3.6 超電導コイル

本装置に用いられた超電導ストリップは表2に示す4種類である。ストリップの寸法は、いずれも幅8mm、厚さ3.5mmで片面に厚さ0.4mmの絶縁テープが接着されている。

超電導ストリップは、図2中に示す区分に仕分けして使用され、端面はスペーサにより4mmのギャップを保ち、液体ヘリウムにより冷却される構造となっている。

超電導ストリップの短尺H-I_c特性と、コイルの励磁特性及び銅安定化曲線の関係は、図5に示すとおりである。

図6及び表3は超電導コイルの設計諸元を示すものである。

3.7 クライオスタット

本装置のクライオスタットの特徴の一つは、レーストラック形コイルの形状と協調して液体ヘリウム槽とコイルの電磁力サポートを共用したことである。液体ヘリウム槽は、コイルに対応して2槽から成り、デスタントプレートを介して向

表2 超電導ストリップの仕様 表記のように4種類の超電導ストリップが使用される。

項 目	超 電 導 ス ト リ ッ プ				備 考
	A-1	A-2	B-1	B-2	
超電導線組成 (a/0)	Nb-62.5Ti-2.5Zr		Nb-70Ti-2.5Zr		
最 高 磁 界 (kG)	75	65	50	40	B ₀ =50kG
臨 界 電 流 (A)	1,400	1,400	1,700	1,700	
運 転 電 流 (A)	1,150	1,150	1,415	1,415	B ₀ =45kG
素 線 数	37	25	15	15	
銅 比	6.5	10.8	17.7	22.8	
外 形 寸 法 (mm)	3.5×8	3.5×8	3.5×8	3.5×8	
絶 縁 (mm)	0.4	0.4	0.4	0.4	

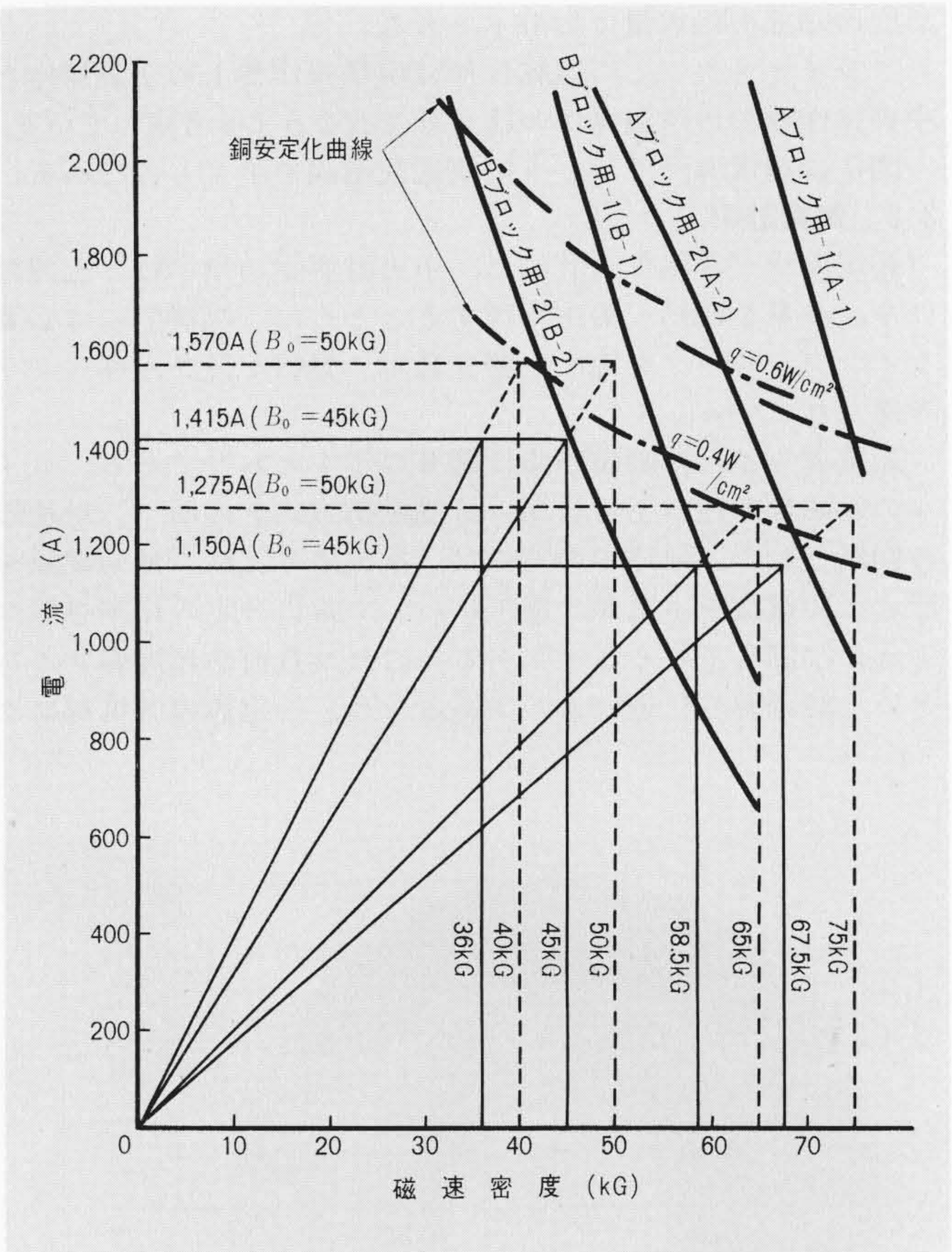


図5 超電導ストリップの短尺特性及びコイルの励磁特性 4種の超電導線の短尺特性と対応するコイルの励磁特性を示している。qは液体ヘリウムの臨界熱流束で、安定化曲線を計算する際に基準とした値が記されている。

Fig. 5 Characteristics of Superconductors and Load Lines

かい合わせに正反対の位置関係にあって、共通の輻射シールド板と真空槽がこれを包囲した構造となっている。中心部に真空槽内筒が置かれ常温空間を形成している。

クライオスタットの断熱は、従来から最も一般的な方式である液体窒素冷却シールド板を高真空断熱と組み合わせた方式を採用した。熱侵入量の計算値は液体ヘリウムの蒸発量換算で非通電時60l/h、通電時94l/hである。また液体ヘリウム

表3 超電導コイルの設計諸元 電流密度は、冷却路を含むコイル断面の平均値を示す。

項番	諸 元	数 値
1.	起磁力 (B ₀ =45kG)	
	A ブロック	4.35 × 10 ⁶ AT
	B ブロック	6.25 × 10 ⁶ AT
	計	10.6 × 10 ⁶ AT
2.	電流密度	
	A ブロック	3.0 × 10 ³ A/cm ²
	B ブロック	2.4 × 10 ³ A/cm ²
3.	インダクタンス	67 H
4.	磁気エネルギー	60 × 10 ⁶ J

温度冷却部の総重量は約48 tである。

クライオスタットの運転操作は現場操作盤上の手動操作と中央操作盤での遠隔操作の組合せで行なうよう考慮している。

図7は超電導マグネットの構造説明図を示すものである。

3.8 制御計測

超電導マグネットの計測は、中央計測室の指示計と記録計に全計測量を統括し集中管理するとともに、機器間には必要なインターロックを施し主要な表示、警報が発せられるよう考慮されている。

超電導コイルの励磁回路は図8に示すとおりである。コイルの励磁は前述の主旨に従い分割励磁方式を採用し、対称形の回路とした。回路中の特徴は、電流の分流路に補助電源を設けこの電流を主電源の電流に対して常に一定の比率を保つように制御していることである。これは負荷が超電導コイルという純誘導性に近いものであるため、一定値の低抵抗によ

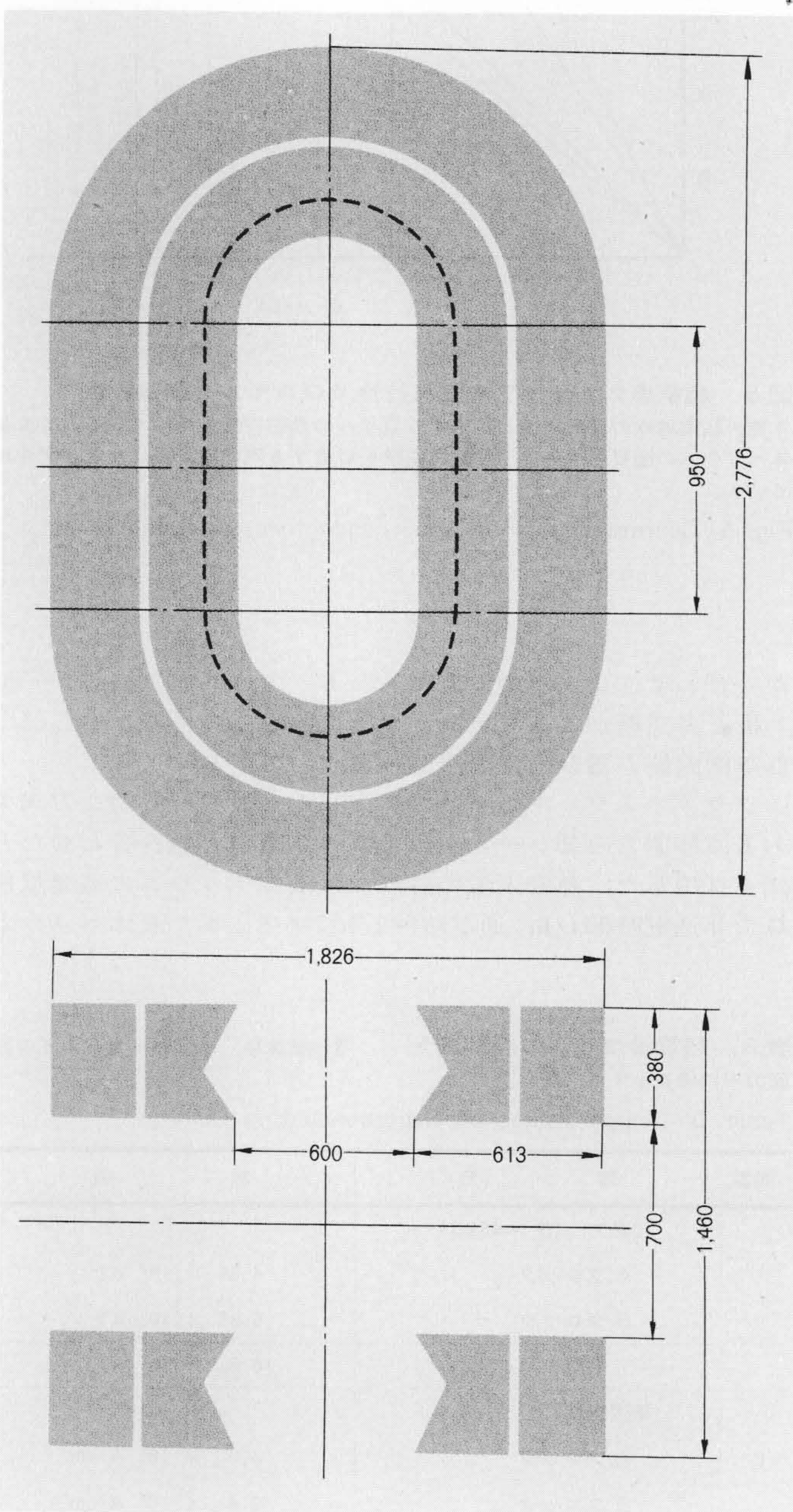


図6 超電導コイルの外形寸法 超電導コイルは、一對のレーストラック形コイルから成る。

Fig. 6 Dimension of Superconducting Coil

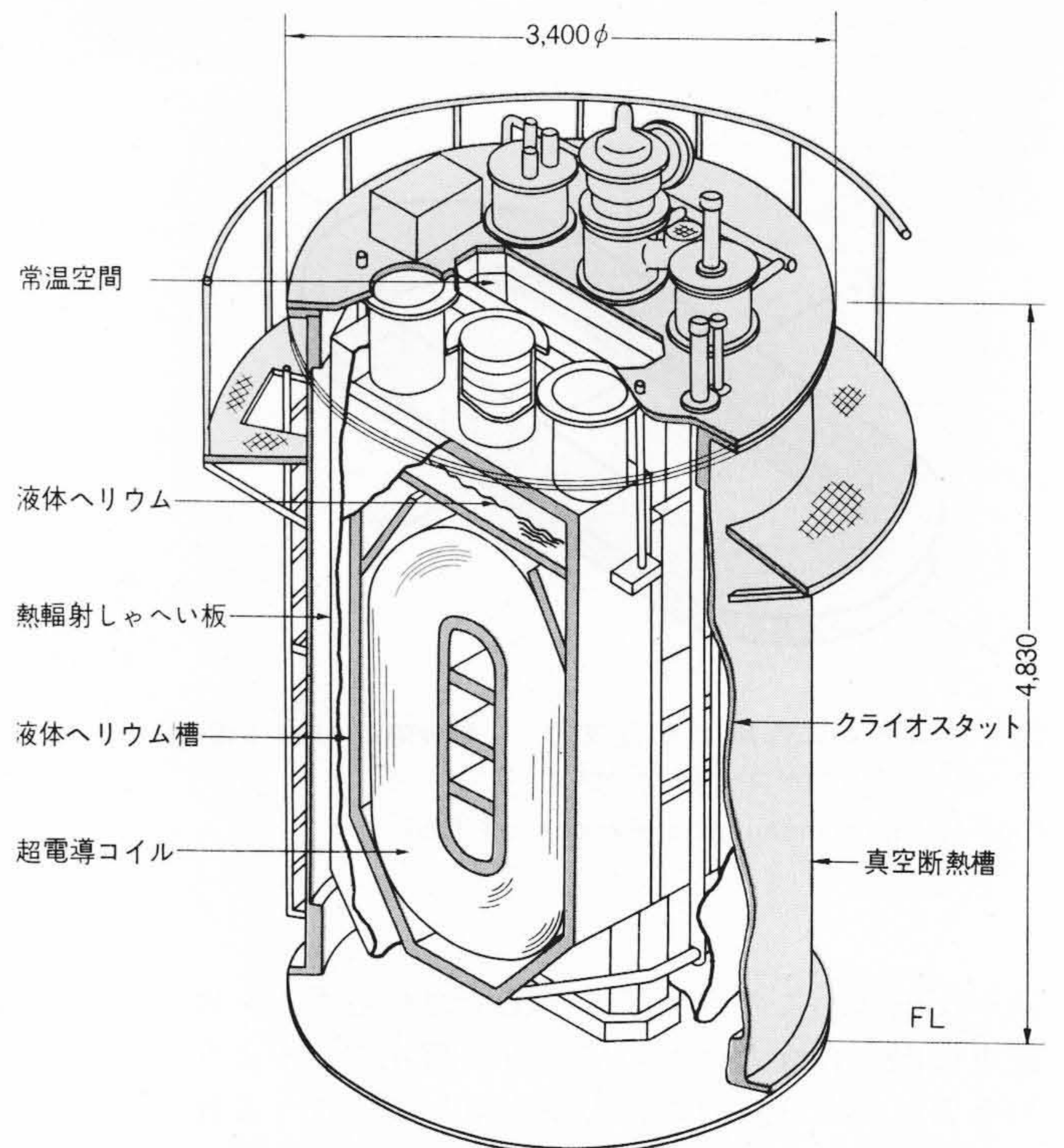


図7 超電導マグネット構造図 超電導コイルを含む低温槽が真空断熱槽中に挿入されている。

Fig. 7 Configuration of Superconducting Magnet

る分流回路では比較的速い励磁消磁の際、所定の分流比を保てないことに対処したものである。コイルと並列に設けた固定抵抗は、緊急時のエネルギー除去用でエネルギー除却率、除却時間及びコイル端子電圧との協調において選ばれる。

使用した電源はパワートランジスタ制御方式の直流安定化電源で、主電源は $\pm 30\text{V}$ 、 $1,800\text{A}$ 、補助電源は、 $\pm 30\text{V}$ 、 500A である⁽⁴⁾。

4 試験と結果

4.1 冷却

超電導マグネットの冷却は、三つの段階を経て行なわれた。すなわち、第一段階は常温から 90°K に至る液体窒素冷却のヘリウムガスを用いた冷却、第二段階は 20°K に至るヘリウム冷凍運転による冷却、そして最終は液体ヘリウムによる冷却と液の張込みである。冷却は構造物の熱ひずみを考慮し初期においては 2°deg/h を上限とし、後半は徐々に 5°deg/h 程度まで早めた。各段階に要した正味の冷却所要時間とその予想値は、表4に示すとおりである。

液体ヘリウムの張込みは送液速度 $240\sim 320\text{l/h}$ に対し、正味の貯液速度は $110\sim 200\text{l/h}$ であり、最高レベル $2,700\text{l}$ を張り込むのに約22時間を要した。この間、マグネットへの熱侵入は液体ヘリウムの蒸発量換算で $50\sim 60\text{l/h}$ であった。

4.2 励磁

超電導マグネットの励磁試験は、三つのステップで行なった。まず最初のステップで準備励磁を行ない、回路及び計器の点検を行なった。

次に中心磁束密度 20kG において磁束密度分布の測定を行なった。測定値(比率表示)は、図3に計算値と対応させて()付の数字で示した。

最大定格磁界に至る励磁は電流上昇速度 $5\sim 15\text{A/min}$ で行なった。途中、中心磁束密度 35kG で電流を保持し液体ヘリウ

表 4 超電導マグネットの冷却所要時間 超電導マグネットはヘリウム冷凍液化機により冷却される。

Table 4 Cooling Down Time of Superconducting Magnet

温度範囲 (°K)	計画時間 (h)	実施時間 (h)
300 — 90	105	104
90 — 20	30	50
20 — 4.2	12	46
液体ヘリウム張込み	24	22

ムの補給を行なった。確認電流値はAブロック 1,170 A、Bブロック 1,430 Aで、このときの中心磁束密度は、45.5kG、超電導体の最大経験磁界は68kGが観測された。この励磁点は完全安定化条件における本マグネットの設計点を達成した値であり、励磁は全過程を通じて安定に行なわれ抵抗の発生はみられなかった。

4.3 過負荷励磁

定格磁界に達した後、引き続いて中心磁束密度50kGを目標とした過負荷励磁試験を行なった。励磁開始後しばらくして、わずかではあるが抵抗の発生が検知されたので、電流上昇を停止し下降操作に移った。この操作により抵抗は一度完全に消滅した。この間、最高磁界は中心の値で47.5kGに達した。

電流の降下を実施中、中心磁界約39kGにおいて初回とは別の場所に抵抗が発生し、クライオスタットの圧力が上昇した。このため、安全弁を開くとともに電源をブレーカで切り離し、コイルの磁気エネルギーを固定抵抗に吸収した。コイル電流は指数関数的に減少し、約15分で電流をゼロにすることができた。この間に蒸発した液体ヘリウムは多く見積っても約1,000 l程度でほぼ同量の液体ヘリウムがクライオスタット中に残存していた。緊急エネルギー除去に伴うコイルの損傷は全くなく、約44MJの磁気エネルギーを安全に放出することができた。エネルギー除去の様子は図9に示すとおりである。

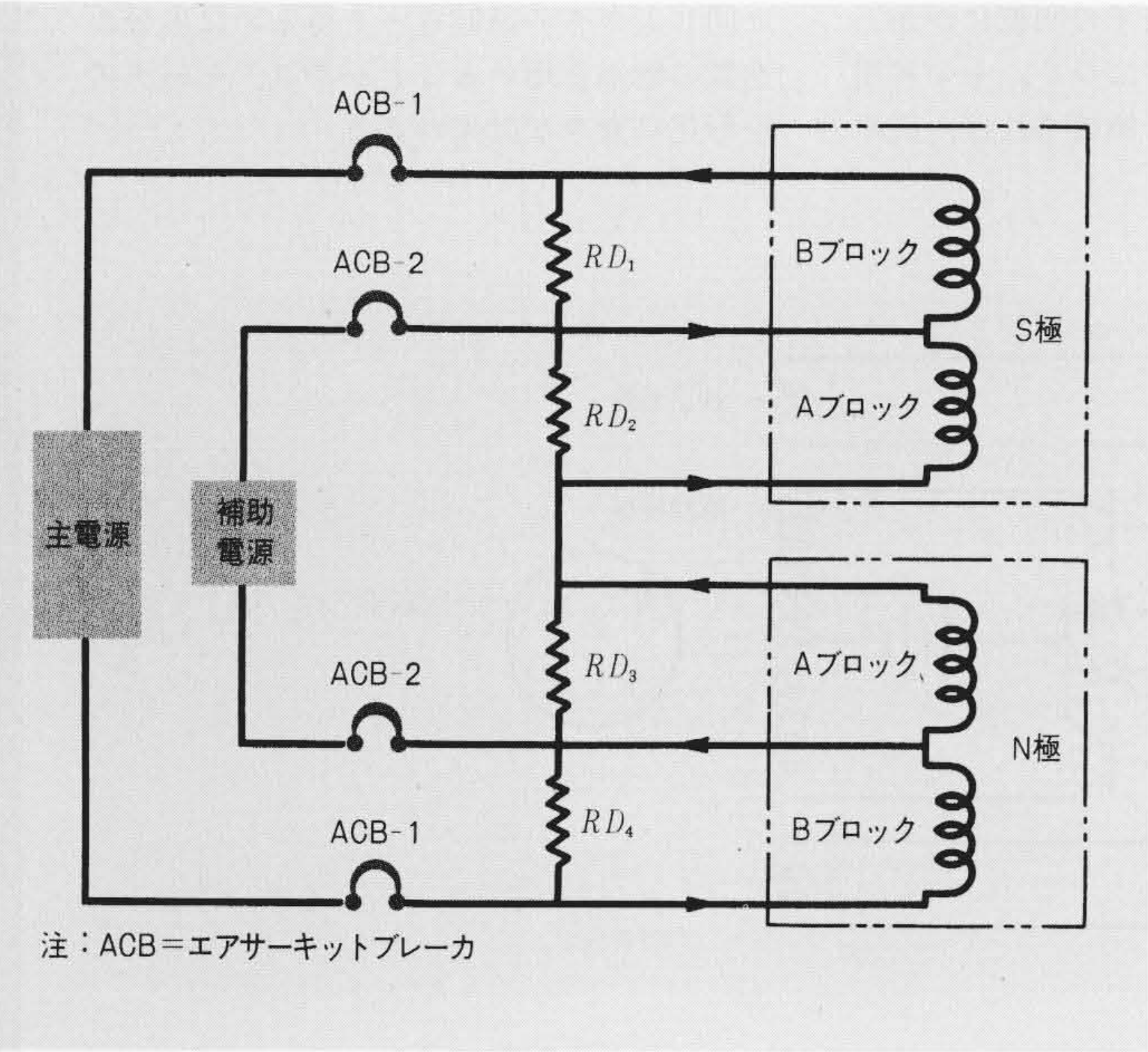


図 8 励磁回路 主電源と補助電源は連動し A、Bブロックの電流比を一定に保つ。RD₁～RD₄はエネルギー除去抵抗である。

Fig. 8 Exciting Circuit

5 検 討

本実験の過程と結果に関し、着目すべき事項について触れてみよう。

定常非通電時及び中心磁界40kG保持時の液体ヘリウムの蒸発量は各約60l/h及び70l/hであり、当初の目標を十分に満足した。通電時の蒸発が少なかったのは超電導ストリップの接続抵抗を十分小さくすることができたためである。液体ヘリウム蒸発に関して過渡的な現象として励磁の過程において励磁損失と呼ぶべき熱発生がみられた。これは超電導体の磁化に起因するものと考えられ、中心磁界45kGまでの励磁に対し約300 lであった。

中心磁界45.5kGに至るまでの励磁は安定であり、特筆すべき現象はみられなかった。

過負荷励磁における抵抗の発生点は中心磁界47.5kGの値を採用するなら、このときのコイル上の最高磁界は71kGであり冷却の臨界熱流束は計算上約0.43 W/cm²に相当する。本装置の設計においては、臨界熱流速値を0.4 W/cm²を基準にしており、実験結果は設計数値の妥当性をよく実証している。電流降下操作により一度消滅した抵抗が再度発生したのは、このときすでに液面が下がりコイルの上部が液面外に露出していたためと考えられる。エネルギー除去時の液体ヘリウムの損失量からクライオスタット内で吸収されたエネルギーは約3 MJ程度であり、このことはコイルの大部分が超電導状態のままであり、94%のエネルギーを外部抵抗に除去できたことを示している。10⁷ 台のエネルギーを緊急除去した実験は世界的にも報告された例はまだなく、この操作が完全に行なえたことは、超電導技術の分野に貴重な成果をもたらしたといえる。

6 結 言

1,000kW級MHD発電機への適用を目的としたレーストラック形超電導マグネットが建設され、試験は成功裏に行なわれ所期の性能が発揮された(図10)。

本マグネットの成功は、完全安定化条件において使用され

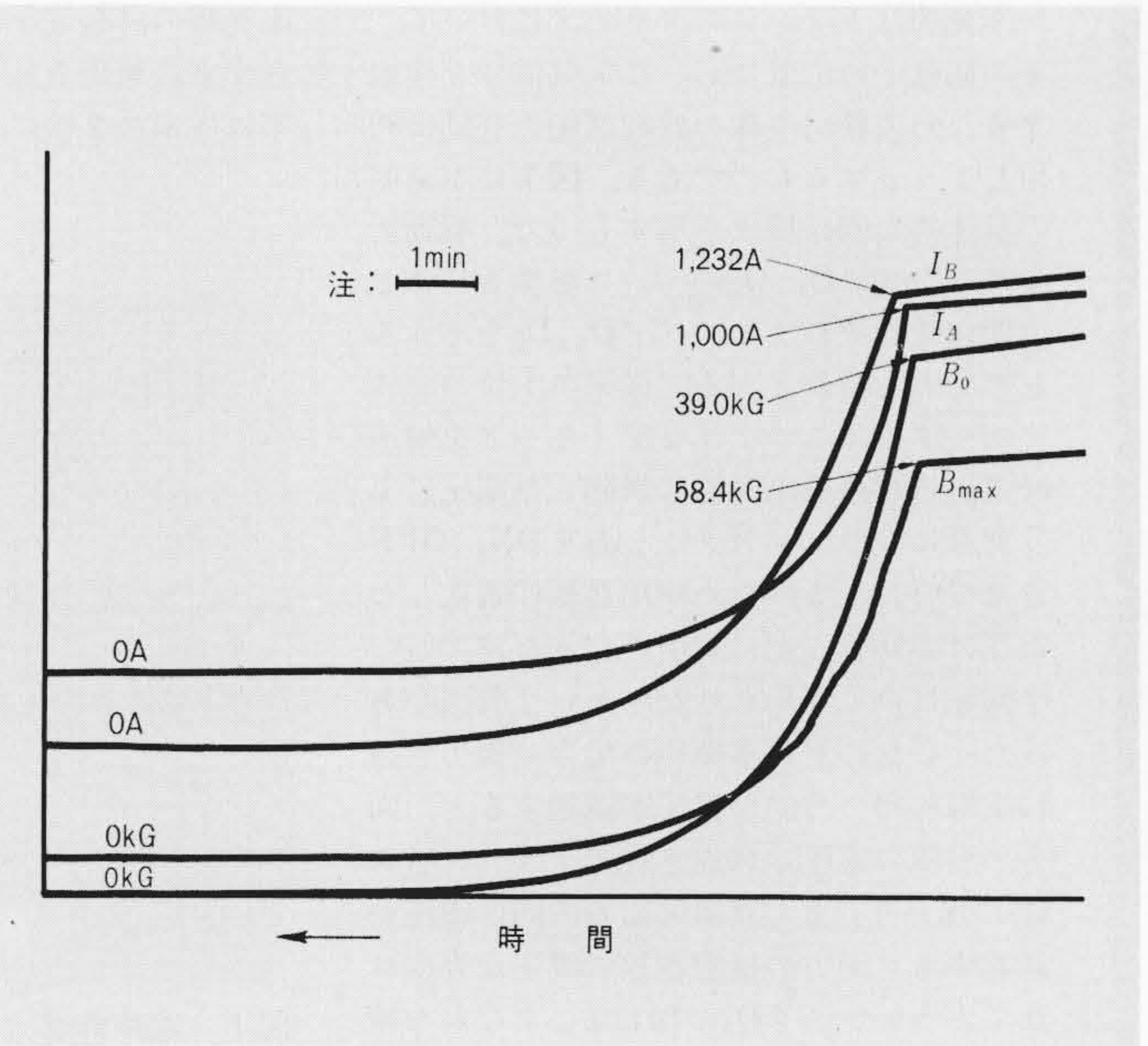


図 9 磁気エネルギーの緊急除去 約44MJのエネルギーが10分間余りで除去された。

Fig. 9 Quick Elimination of Magnetic Stored Energy

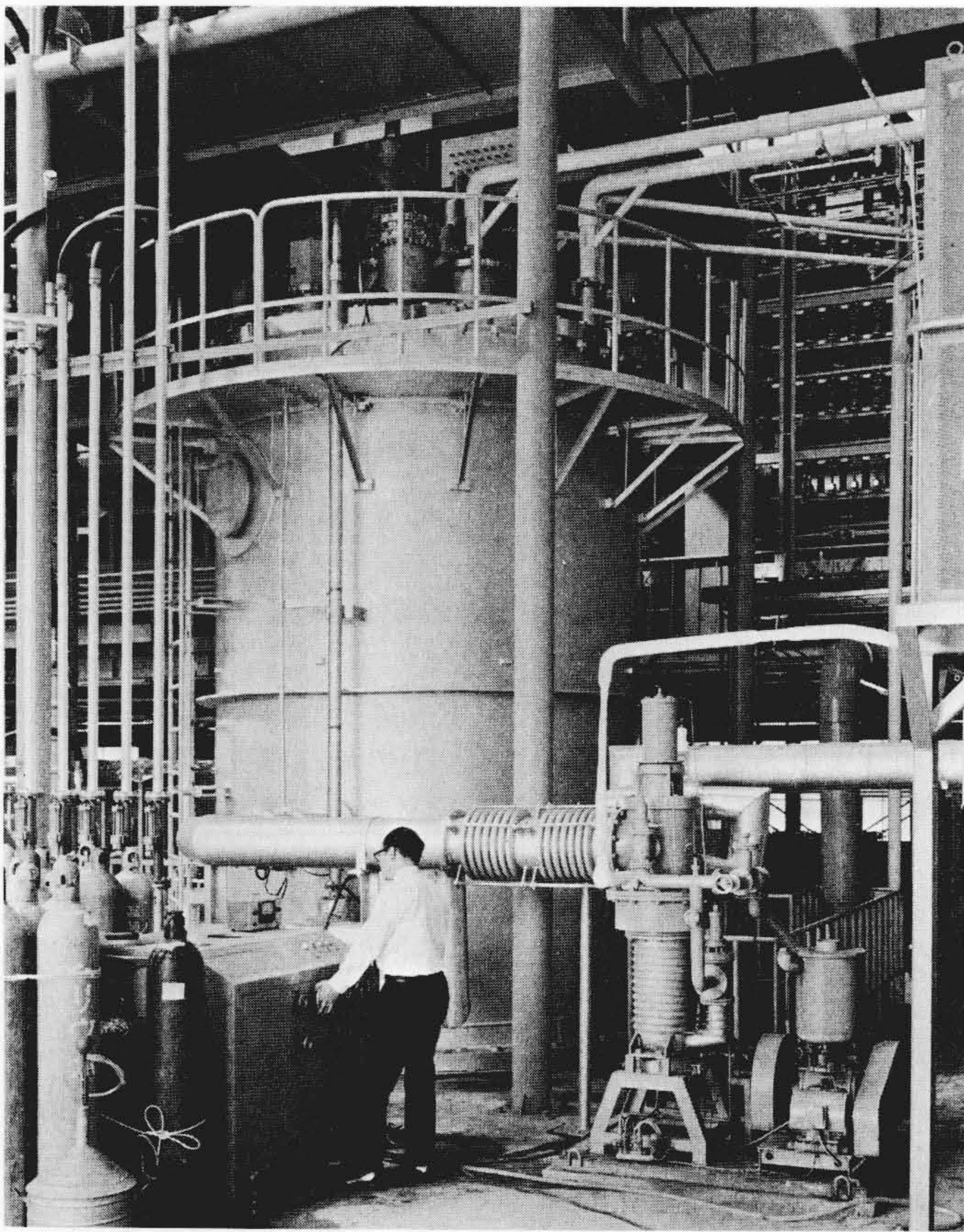


図10 超電導マグネット 試験場所に据え付けられた超電導マグネットの全景を示す。

Fig. 10 Appearance of Superconducting Magnet

る超電導マグネットの分野において超電導に固有な基本的な事象に関して考慮すべき技術的手法の基準を確立したものと評価することができ、将来の大型超電導マグネットの開発に大きく寄与するものと考ええる。

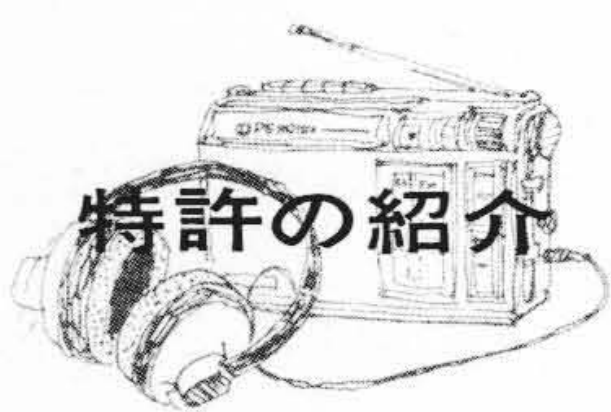
我々は今後、本マグネットを用いてのMHD発電実験の成果に期待するものである。

なお、本装置の開発に対し、第30回電気学術振興賞進歩賞が授与された。

終わりに臨み、本計画を推進された工業技術院の関係各位、及び、計画の具体的推進と指導にあたられた電子技術総合研究所エネルギー部長伏見博士、相山極限技術部長ほかの関係各位並びに学術的立場より有益な御指導を賜わった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に対してそれぞれ厚く謝意を表わす次第である。また、装置の運転に際し御協力いただいた冷凍機関係の各位及び装置の設計、製作、試験並びに運転に従事された各位に対しても併せて厚く御礼申し上げる次第である。

参考文献

- (1) 秋山、十合ほか：第10回低温工学研究発表会予稿集，BI-7，(1972)
- (2) 木村、土井ほか「45kG鞍形超電導マグネット」日立評論 53 727 (昭和46-8)
- (3) 昭和44年度大型工業技術研究開発委託研究「高電流密度くらは超電導電磁石の研究」
- (4) 電子技術総合研究所装置



トランジスタモータ

武安清雄

特許 第655680号 (特公昭43-19367号)

本発明はトランジスタモータにおいて、その回転子の位置に応じた電気信号を検出するための検出巻線の誘起電圧を有効に利用しようとするものである。図1は本発明の具体的な回路構成を示すもので、駆動用トランジスタ Q_1 、 Q_2 のベースとエミッタとの間にそれぞれダイオード D_1 、 D_2 をそう入したことを特長とする。従来のトランジスタモータではこのようなダイオードを使用せず、一対の検出巻線に誘起した電圧により交互にトランジスタ Q_1 、 Q_2 をON、OFFさせていた。このため検出巻線に誘起した電圧は半回転ごとに利用されるだけで他の半回転は全く利用されないという欠点があった。これに対し本発明の場合、検出巻線に実線矢印の方向に電圧が誘起すると、両方の巻線の電圧が合成されてトランジスタ Q_1 に加わり、また点線矢印の方向に電圧が誘起すると両方の検出巻線の電圧が合成されてトランジスタ Q_2 に加わる。すなわち検

出巻線の誘起電圧は回転子の回転にかかわらず常に利用されることになり、その利用率は従来の2倍になる。換言すれば、従来

と同じ大きさの誘起電圧を得るのに半分の巻数の巻線を用いることができ、モータの小形化に大きな効果がある。

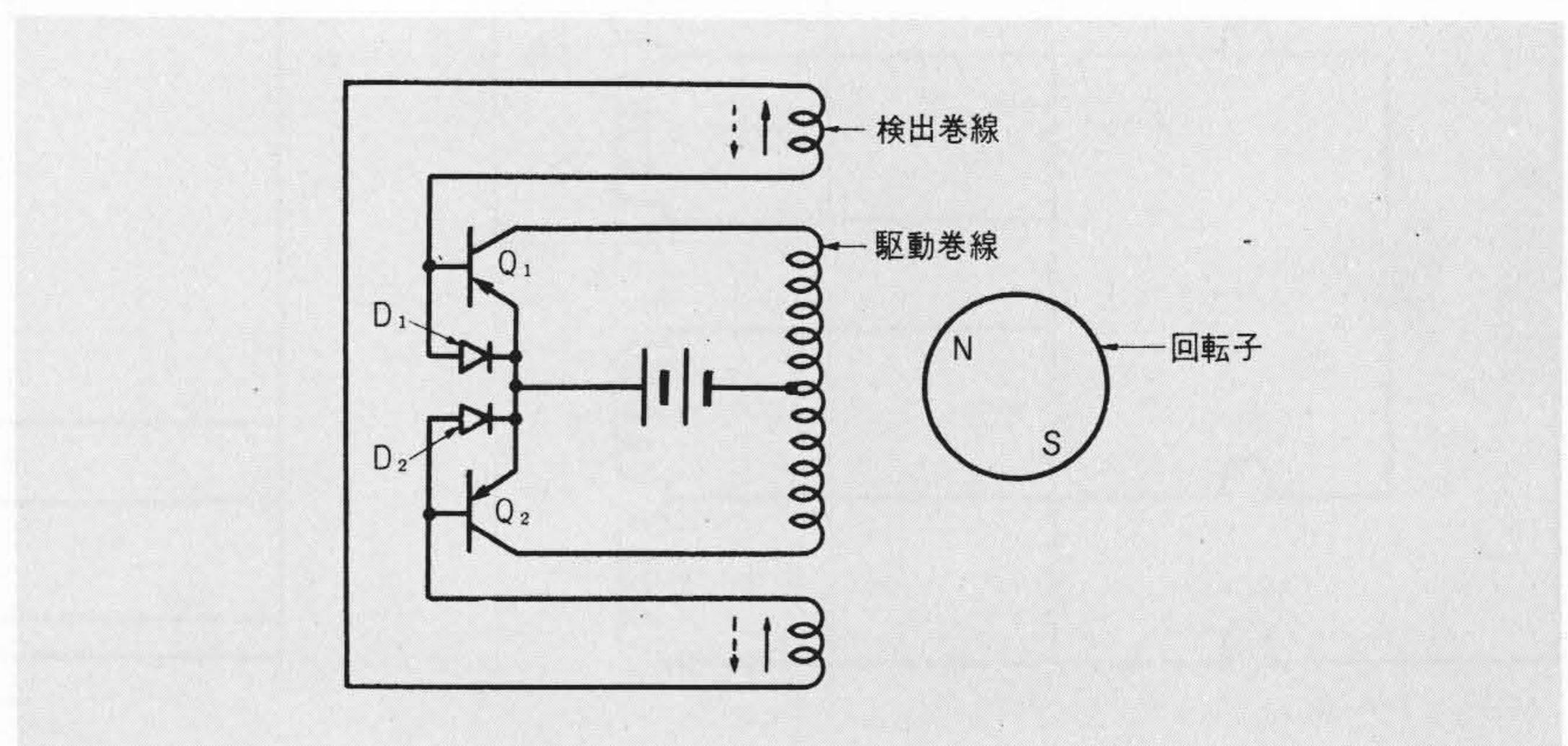


図1 回路構成