日本原子力研究所納

線形電子加速器出力荷電粒子分岐収束系

Beam Deflection and Focusing Systems for JAERI Electron Linac

加 沢 義 彰* 新 井 修*
Yoshiaki Kazawa Osamu Arai

内 容 梗 概

40 MeV 線形電子加速器(リニアック)の出力電子ビームを実験場所まで損失少なく導いたり、実験に便利な断面形状にしたり、エネルギー測定をしたりする電子ビーム分岐収束電磁石系を納入した。この種の装置は電磁石構成材料の慎重な選定、精密工作技術、高度の自動制御技術などすぐれた総合技術を必要とする。われわれば本装置の設計製作過程において各種の新技術を開発し所期の目的を達した。本文はその概要を紹介し、またこの種電磁石設計製作上の問題点について述べている。

1. 緒 言

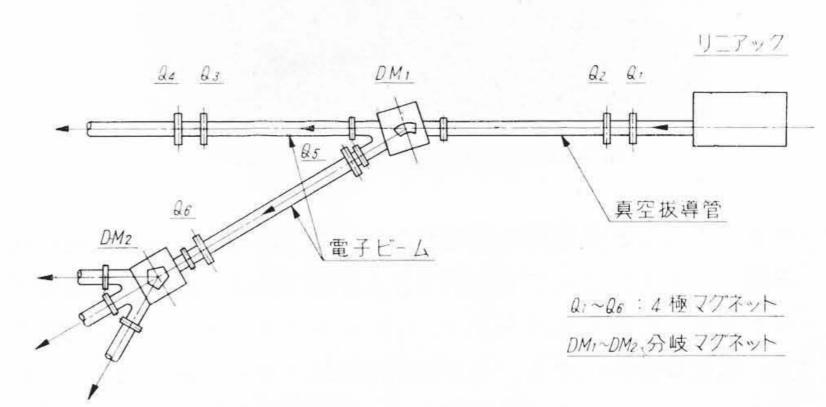
最近わが国でも各種の粒子加速器が数多く建設されているが、それに伴ってイオンや電子などの出力荷電粒子ビームを医療、高分子物質の照射、各種物理実験などの各方面に応用する研究も活発に行なわれるようになった。そのためにこれらの荷電粒子を実験場所まで損失少なく導いたり、実験に便利なビーム形状にしたり、エネルギー測定をしたりする荷電粒子の分岐収束装置、測定装置などの需要が増大しその要求性能も高度になってきている。日立製作所では各種の加速器とともにこれらの付属品を開発してきたが、その代表例として日本原子力研究所に納入したものについて紹介する。

本装置のうちビーム収束用四極電磁石は強収れんのイオンまたは電子レンズとして注目され、わが国でも数年前から使用されて効果をあげているが⁽¹⁾、本電磁石はその精度、性能とともに調整の便利さにおいてもすぐれたものである。また分岐用電磁石は磁界の一様性、安定度などにおいて記録的な超精密電磁石で温度、負荷、電源の変動などの大きな外乱に対しても十分使用に耐えるよう各種の考慮が払われている。なお 0.2~0.3 Oe 以下に消磁できる新しい消磁装置を付属させ、また核磁気共鳴吸収を利用した磁束計で磁界を精度よく測定し監視して必要に応じて磁界の直接制御を行なうこともできる。

2. 電子ビーム分岐収束系の概要

第1図にその配置を示すように、本装置は40 MeV線形電子加速器(現在増力前で20 MeV リニアックとして稼動中)からの電子ビームを発散損失を少なくして数十メートルの距離にあるターゲット室、照射実験室などに導くことを主目的にして原子力研究所リニアック建設室が計画したもので、そのほか出力電子ビームのエネルギー測定や種々の物理学上重要な興味ある実験ができるよう考慮されている。

まずリニアック本体から出てくる 40~数 MeV の電子ビームを Q_1 Q_2 2 台の四極電磁石で構成する組合電子 レンズで平行ビームに直し、遠方まで損失少なく飛行できるようにする。 Q_1Q_2 を出たビームは分岐用電磁石 DM_1 にはいるが、ビームをまっすぐに飛ばして正面の中性子発生用ウランターゲット室に導きたいときは、 DM_1 を消磁後無励磁として、 Q_3Q_4 2 台の四極電磁石から成る Q_1Q_2 と同様の組合レンズでビームを収れんさせてターゲットを強力にたたけるようにする。 DM_1 を励磁すれば電子ビームを曲げて γ 線、電子線の実験のためにあてられた区域に導くことができる。すなわち DM_1 で曲げられた電子ビームは四極電磁石 Q_5 および Q_6 によって収束され分



第1図 電子ビーム分岐収束系の配置

岐電磁石 DM_2 にはいり DM_1 と逆向きに曲げることもできる。この配置はスタンフォード大学のリニアック "mark III"のために提案されたもの (2)(3) と同様のもので、損失の少ない電子ビーム移行系としてすぐれており、実験に使用してきわめて効果的と期待される。

これら8台の電磁石は強い放射線を受けるので,運転はすべて遮 へいされた制御室から遠隔操作される。

3. 電子幾何光学系

3.1 四極磁気レンズ

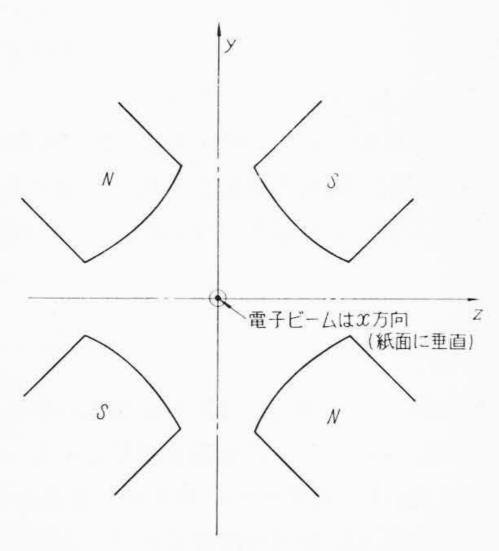
荷電粒子ビームの収束系には普通磁気レンズや静電レンズが用いられるが、最近特に強収れんの四極磁気レンズが外国で開発されてイオンまたは電子の収束用として粒子加速器や質量分析計などに付属して使用される傾向にある⁽⁴⁾⁽⁵⁾。これは強収れんレンズでありビーム強度を強くして明るさを増すことになるのでビーム損失が少なく種々の測定を容易にするとともに実験の精度向上にも役だつからである。

3.1.1 四極磁気レンズの理論(1)(4)(6)

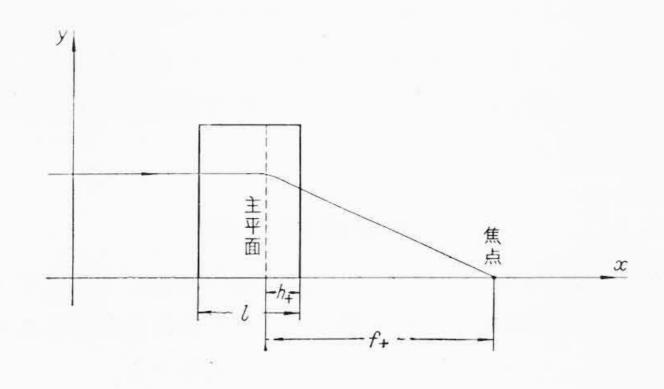
四極磁気レンズでは**第2**図のように NS 磁極を交互に軸対称に 配置し磁極面の断面を直角双曲線にして、荷電粒子の通る領域に (1)式を満足する磁界を発生する。

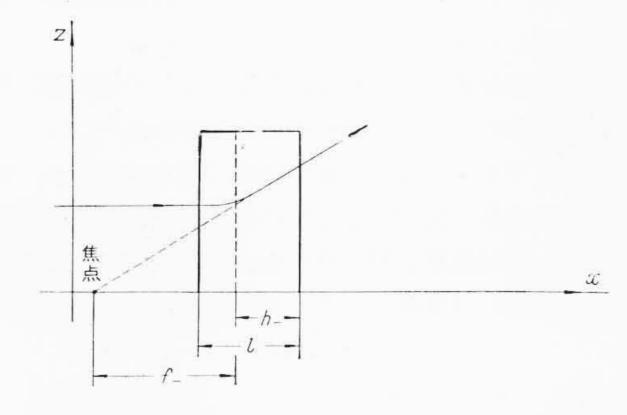
kはレンズに固有な値で第2図のように座標系を選んだ場合は正 の値となる。

^{*} 日立製作所日立工場



第2図 四極電磁石の磁極部断面





第3図 単一レンズを通過する荷電粒子の軌跡

荷電粒子の磁界における運動は一般に

ここに m: 荷電粒子の質量

V: 粒子速度

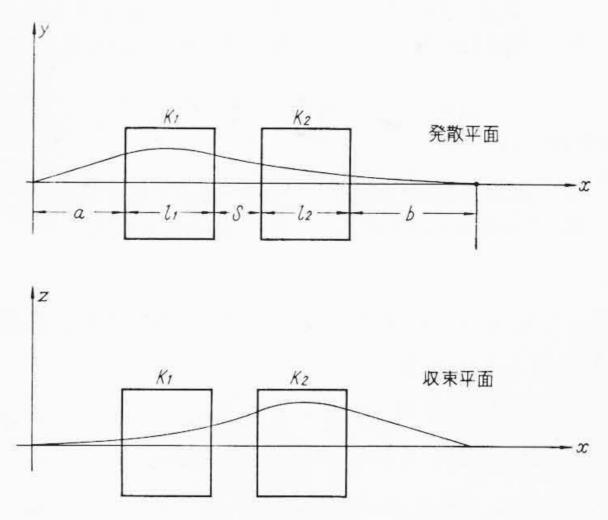
e: 荷電粒子の電荷

B: 磁束密度

加速器などにおいては実際のレンズを通過する粒子はほとんど 軸の近傍を通り、しかも軸に平行な速度成分のみに注目すればよい場合が多いから $V \simeq V_x$ 、 $V_y = V_z = 0$ と仮定し、直交座標系で考えると(2)は

ここで $B\rho$ は荷電粒子が一様磁界 B 内で回転するときの半径を ρ としたもので、 $eB\rho$ は粒子の運動量であるから周知のとおり (4)式で与えられる (e,m,u)。

$$E = \{m_0 c^2\}^2 + e^2 c^2 (B\rho)^2\}^{\frac{1}{2}} - m_0 c^2 \dots (4)$$



第4図 組合レンズを通過する荷電粒子の軌跡

ここに E: エネルギー

e: 電 荷

m₀: 静止質量

c: 光 速 度

(3)式を解くと粒子はxz平面では発散するがxy平面では収束する $^{(6)}$ 。したがって有限な長さの四極電磁石は単独にまたは組み合わせて電子またはイオンのレンズとして使用できる。すなわち第3図に示すようなレンズとして考えると主平面の位置hと焦点距離fは次式で与えられる $^{(1)}$ 。

収束平面では

$$f_{+} = \frac{1}{K \sin Kl}$$

$$h_{+} = \frac{1 - \cos Kl}{K \sin Kl}$$

$$\dots (5)$$

発散平面では

このように四極磁気レンズの性質は(3)式で与えられるKとレンズの厚みIによって決まるが、Kが与えられれば空げき部に必要な起磁力 MI_{gap} は(7)式で与えられる。

$$NI_{\text{gap}} = \frac{d^2K^2}{3.2 \ \pi B \rho} \dots (7)$$

ここで d: ポールチップ間距離

1は磁極端の漏えい磁束も考えた磁気レンズの等価有効長であり一般に(8)式のように表わされる。

ここで l_{pp} : ポールピースの実際の長さ

cf: 普通 0.3~0.6 程度

3.1.2 組合四極レンズ

前述のように単一四極レンズでは主平面の位置や焦点距離が収束平面および発散平面で異なり直交2平面で同時に収束させることはできず、一平面で収束すればこれと直交する他の平面では発散する。しかし2個以上の四極磁気レンズを組み合わせることにより、x-z、x-y両平面で同時に収束条件を満足させて二重収れんさせることができる。

第4図のように距離sを隔てて K_1 , l_1 および K_2 , l_2 の定数をもつ2個の四極レンズを組み合わせた場合のビームの収束条件は,レンズの内部における運動を規制する(3)式の解とレンズ外における直進性を考慮して求めると(9), (10)式で与えられる。

x-y 平面では

$$\frac{1}{K_1} \frac{K_1 a + \tan K_1 l_1}{K_1 a \tan K_1 l_1 - 1} = \frac{1}{K_2} \frac{K_2 b + \tanh K_2 l_2}{1 + K_2 b \tanh K_2 l_2} + s$$
.....(9)

x-z 平面では

$$\frac{1}{K_{1}} \frac{K_{1}a + \tanh K_{1}l_{1}}{1 + K_{1}a \tanh K_{1}l_{1}} = \frac{1}{K_{2}} \frac{K_{2}b + \tan K_{2}l_{2}}{K_{2}b \tan K_{2}l_{2} - 1} - s$$
.....(10)

したがってs, l_1 , l_2 , a, b が与えられれば(9)(10)を満足する K_1 , K_2 を求めることができる。

3.1.3 薄い四極レンズ

Kl が非常に小さいときには(5)(6)式は

$$f_{+} = -f_{-} \simeq \frac{1}{K^{2}l}$$

$$h_{+} = -h_{-} \simeq \frac{l}{2} \qquad (l_{1} = l_{2} = l)$$
.....(11)

のように薄いレンズとして近似できる。

また組合レンズも薄いレンズの場合は取扱いがずっと簡単になり二重収れん条件を与える(9), (10)式は

$$\frac{a}{f_1} = aK_1^2 l = \pm \sqrt{\frac{(a+l+s)(a+b+2l+s)}{(b+l+s)s}} \dots (12)$$

$$\frac{b}{f_2} = bK_2^2 l = \pm \sqrt{\frac{(b+l+s)(a+b+2l+s)}{(a+l+s)s}} \dots (13)$$

となり、a, b, sに比べてl が非常に小さいとするとさらに簡単になり、薄い組合レンズの収束条件として(14)式が得られる。

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{1 + \frac{s}{b}}{1 + \frac{s}{a}}$$

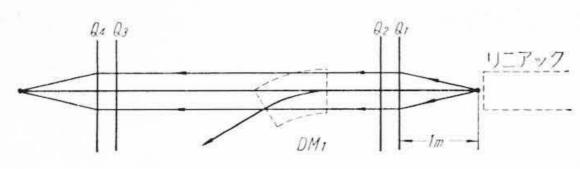
$$\frac{s^2}{f_1 f_2} = \left(1 + \frac{s}{a}\right) \left(1 + \frac{s}{b}\right) - 1$$
.....(14)

3.2 本装置の電子光学的考え方

第5図の示すようにリニアックから出た電子ビームを、断面が円形、発散角 10^{-2} rad、出口で直径 1 cm という仕様に基づき、さらに出口から 1 m の 1 点からエネルギー幅の十分小さいビームが出てくると仮定する。このビームを Q_1Q_2 で平行ビームにして飛行させ、 Q_3Q_4 の出口から 1 m の位置で 1 点に収れんさせる。

すなわち Q_1Q_2 は a=100 cm, $b=\infty$, s=30 cm, $l_1=l_2=l$ であるから収束条件の式(9), (10)から $K_1l\simeq 0.58$, $K_2l\simeq 0.52$ となる。また $l_{pp}=10$ cm, d=12 cm から磁束の漏えい効果を考え(8)式から $l\simeq 15$ cm と仮定すれば $K_1\simeq 0.039$, $K_2\simeq 0.035$ となるのでこれから Q_1Q_2 の仕様を決めることができる。 ただし第 1 表の仕様は薄いレンズとしての仮定に基づき(14)式から計算したもので,これらの仮定から生ずる誤差は四極電磁石の起磁力に余裕をもたせて補正できるようにしてある。(5)(6)(7)式から明らかなように NI を可変にしておけばフィールドパラメータ K, したがって焦点距離などのレンズ定数も簡単に可調整とすることができるからである。 Q_4 Q_3 は Q_1Q_2 とまったく同様のものでよい。

またビームを曲げるときには、 $\hat{\mathbf{m}}$ 6,7図のように \mathbf{DM}_1 を励磁して曲率半径 60 cm で 30 度に曲げ、 \mathbf{DM}_1 , \mathbf{DM}_2 の入射角または放射角を変えて \mathbf{Q}_5 , \mathbf{Q}_6 を出たビームの焦点の位置を調節して、ビーム



第5図 ビーム直進収束系

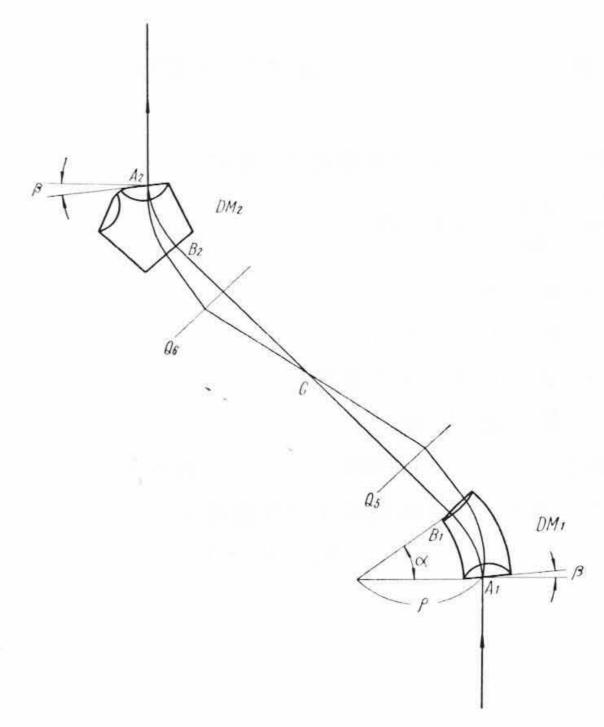
エネルギーに関係なく入射したビームの幾何学的形状を再現させる。また途中にスリットを置けばエネルギー幅を任意に制御することも可能となる。 Q_5,Q_6 は与えられた入射エネルギーのビームを水平,垂直の両平面に収束させる。垂直平面の焦点距離は DM_1,DM_2 の磁極片の一部を回転し直角入射面との角 β を変えることによって簡単に調整できる。すなわち扇形一様磁界レンズの垂直平面における焦点距離 F_s は

となる $^{(7)}$ 。 β は DM_1 による焦点が Q_5 の位置より少し先に行くように選び、さらに Q_5 で結像の位置を $\hat{\mathbf{x}}$ 6図 \mathbf{C} 点にもって行くようにする。したがって Q_5 は垂直平面が発散平面となるように設置する。 \mathbf{C} 点に将来四極電磁石 Q_7 を追加設置すれば、水平面のビームを理想的に調整することもできる。なおビームの諸元、機器の製作、据付上の設計値からのずれを補正して理想的な分岐収束系とすることができるように、 $\mathbf{8}$ 台の電磁石にはそれぞれに応じた位置、傾きなどの精密調整機構を設けてある。また分岐電磁石は電子線エネルギーの精密測定用としても使用できる。

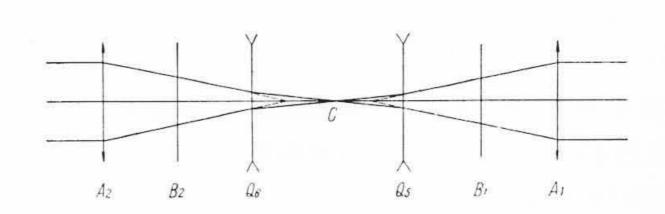
4. 主要機器詳細

以下機器詳細について述べるが設計,製作にあたっては従来の一般電気機器または理化学機器の概念をこえて特殊な考慮を必要とした事項が多かったので、そのおもなものを列挙する。

- (1) 工作精度,据付調整精度,電源などの自動制御系の精度として非常にきびしい値が要求される。
- (2) 機器はX線などの二次放射線を受けるので特に電気絶縁物などは放射線損傷の少ないものを選ぶ必要がある⁽⁸⁾。このため綿、テフロン、コンパウンドなどは使用せず、ポリエステル、テリレン、マイラなどを多く使用するなどの考慮を払った。そのため電磁石励磁コイルなどは温度上昇の点からはA種絶縁で十分であるにもかかわらず結果的にはB種としても十分使用に耐える絶縁となっている。



第6図 ビーム分岐系(水平平面)

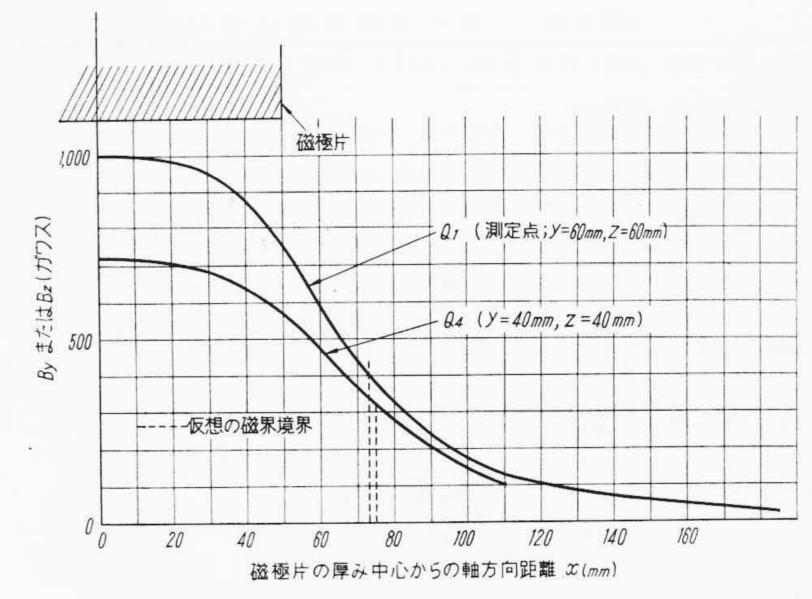


第7図 ビーム分岐系(垂直平面)

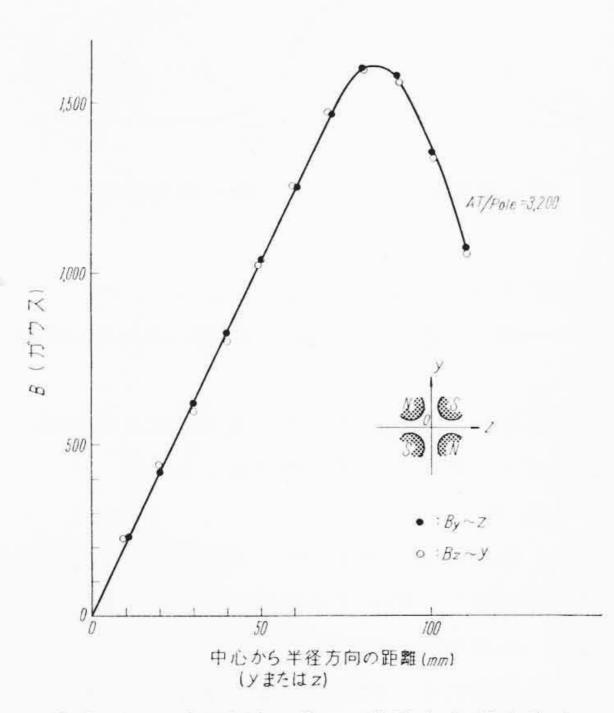
第1表 四極電磁石の主要仕様

共通	$\# - \mathcal{N} = \partial B_y/\partial z, \ \partial B_z$	エネルギー範囲 ギ ャ ッ プ /∂yの直線性 の 長 さ	40~5 MeV 120 mm 中心から半径 40mm の円内で 1 % 以下 100 mm				
	焦点距離 (mm)	$\int_{0}^{\infty} \frac{\partial B_{z}}{\partial y} dx$ (G-cm)	調整範囲,精度,その他				
Q_1	480	2.8×10 ³	(Q1 と Q2)および(Q3 と Q4)は同形同容量と 中心距離 300mm として 2 台ずつ 1 個の台に取り				
Q_2	630	2.2×10 ³	ける。 調整範囲 前 後 ±50mm 精度 1mm				
Q_3	630	2.2×10^{3}	以下,左右 ±20mm 精度 1mm				
Q4	480	2.8×10 ³	ビームに垂直な面に対する傾き±2度 精度 0.1 ビームを軸とした回転 ±2度 精度 0.1				
Q5	800	7 ×10 ²	調整範囲 前 後 ±150mm 精度 1mm 上下,左右 ± 50mm 精度 1mm				
Qв	800	7 ×10 ²	上下,左右 ± 50mm 精度 1mm 傾 き 上記 2 方向で ±2度 精度 0.11				

注記 上表は薄いレンズとして計算した数値を示している。



第9図 四極電磁石の x 方向磁束分布



第8図 四極電磁石 Q₁ の半径方向磁束分布

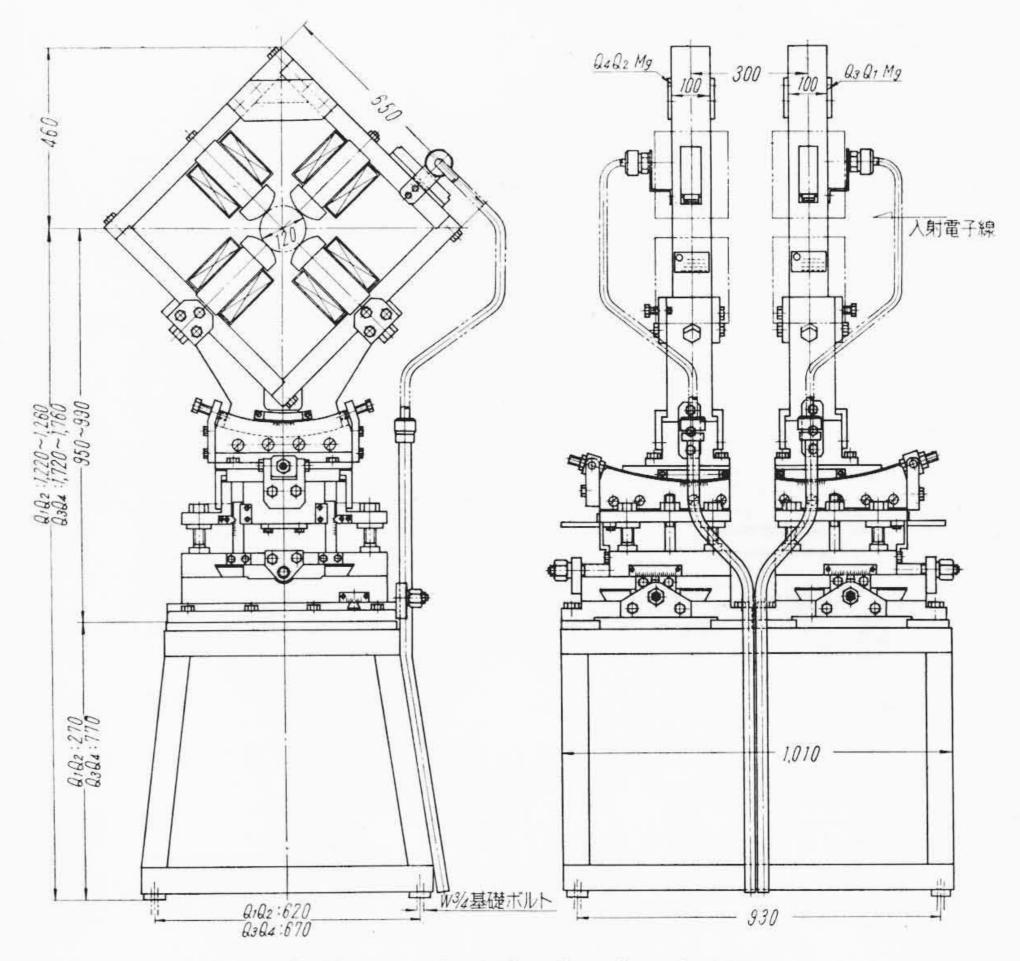
(3) 磁界分布精度を良くするために磁極片の工作精度をきびしく押えたがさらに磁性材料は透磁率とその温度係数,保磁力,さび止めメッキ処理による磁性の変化などまで吟味して慎重に選ぶ必要があった。

4.1 四極電磁石

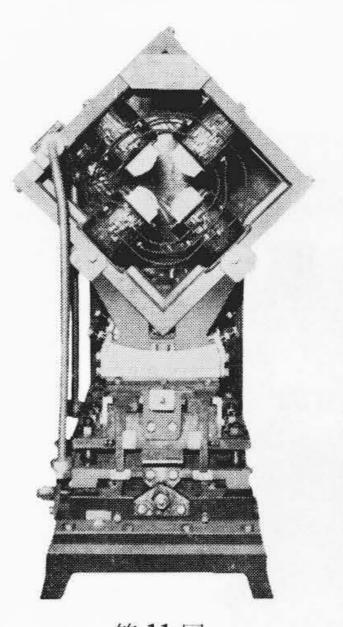
主要仕様を第1表にあげたがこれらの仕様を満足するにあたり第 一に問題になるのは、 $\partial B_y/\partial z = \partial B_z/\partial y$ を広い範囲にわたり一定と し、磁界の直線性を保つことである。このためには $zy=12^2/8$ (単位 cm) によって与えられる磁極片の直角双曲線面の仕上げおよび組立 精度が問題となる。双曲面の精度の良い工作には相当の困難が伴う ので,四極電磁石の磁極断面として双曲線に近似した円弧を採用し て効果をあげた例も発表されているが(1)(9), われわれは理想的な磁 界分布をうるために厳密な公差と精密な特殊治具の使用によって精 度の良い双曲線面の工作,組立てを行ない,第8図に示すように広 範囲にわたりきわめて良い磁界分布の直線性が得られた。測定はホ ール効果を利用した磁束計を, NMR 式磁束計で較正して行なった。 また第9図に示すx方向磁束分布から等価四極レンズの厚み 1は, 設計時の推定値 150 mm に対して 146~150 mm と, 比較的よく合 っており、この程度の四極電磁石では $l \simeq l_{pp} + 0.4d$ 程度として設 計して大きな誤差が生じないことを示している。第10~12図に構 造および写真を示す。

4.2 分岐用電磁石

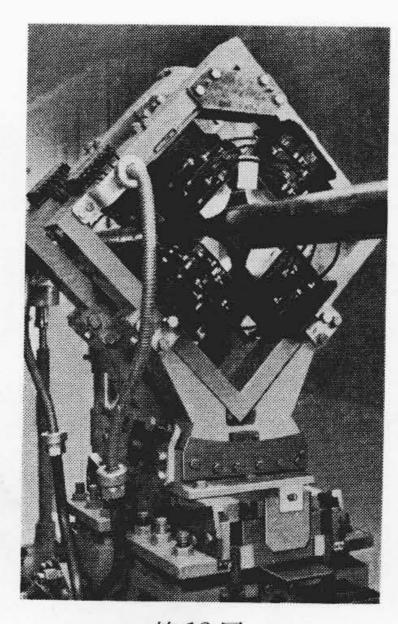
おもな仕様を第2表に、組立図および外観図を第13~14図に示



第10図 四極電磁石 Q₁~Q₄の組立図



第11 図 単一四極磁気レンズ



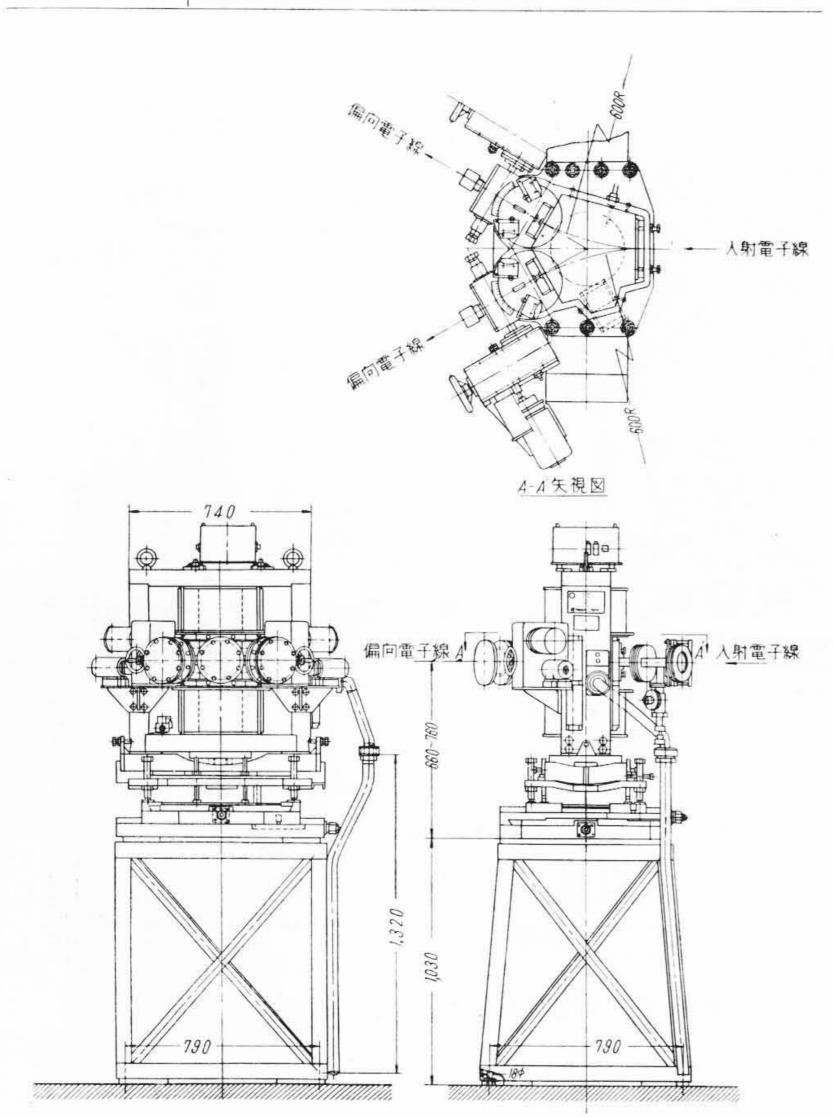
第 12 図 組合四極磁気レンズ

す。この精密電磁石の設計製作上の問題点を列挙しその各項につい

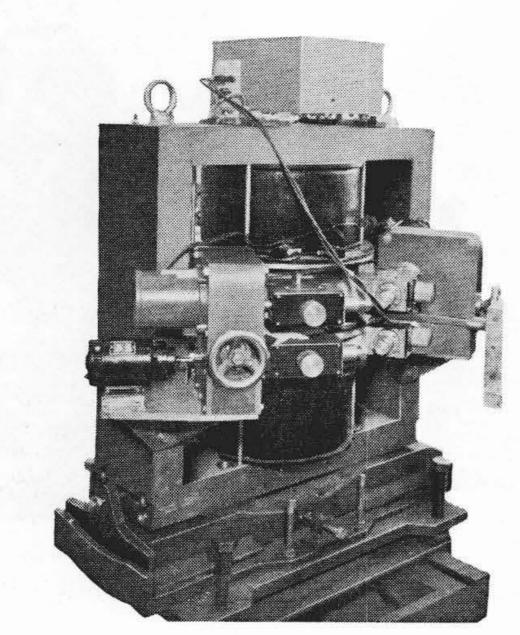
日

第2表 分岐用電磁石の仕様

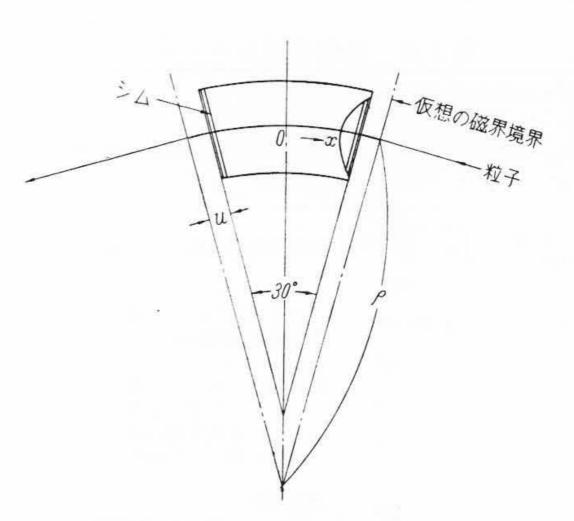
偏 向 角	0度,30度(ただしDM2は-30度も可能とする)
中心曲率半径	600mm
ポールギャップ	35mm
中心磁束密度	2,250~300G (電子エネルギー: 40~5 MeV)
磁界均一度	ビームの中心線に沿い ±15mm 幅十分な長さ (漏え い 磁束の影響 を無視できる領域) にわたり 半径方向 1×10-4 以下 角度方向 3×10-4 以下
磁極片の回転部	DM_1 にはビームの入口側に 1 個 DM_2 には出口側に 2 個設ける。回転は手動およびリモートコントロールを併用し、いずれの場合にも ± 0.1 度 の精度で読めること。回転範囲は ± 30 度
磁界の安定度	磁極片の温度上昇による磁界変化 (励磁一定) は 10-4 以下。 励磁電流の安定度は十分大きな外乱に対して 3×10-4 以下。
調整範囲	前 後 ±100mm 精 度 1 mm 左 右 ± 50mm 精 度 0.5mm 上 下 ± 50mm 精 度 0.5mm 水平面内回転 ± 5 度 精 度 0.1 度 ビームに平行および垂直な軸についての傾き ±2度 精度 0.1度
消 磁	消磁後の磁界が10e以下でそのバラッキは0.20e以下



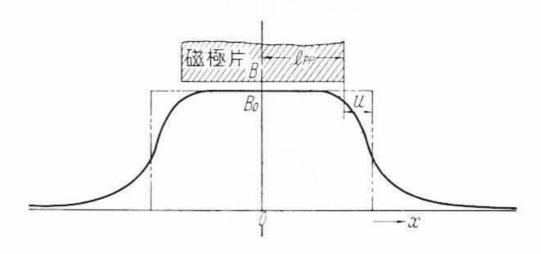
第13図 分岐用電磁石 DM2 の組立図



第14図 分岐用電磁石 DM2(単独試験中)



第15図 扇形電磁石と荷電粒子の軌道



第16図 平行電磁石ギャップ中心面の磁束分布

て述べる。

- (1) 漏えい磁束の正確なは握が必要なこと。
- (2) 磁界分布の一様性がきびしく規定されているために種々の 考慮を要すること。
- (3) 磁界安定度がきびしく規定されているために、制御系のほか電磁石の構造などにも特殊な考慮を要すること。

4.2.1 漏えい磁束

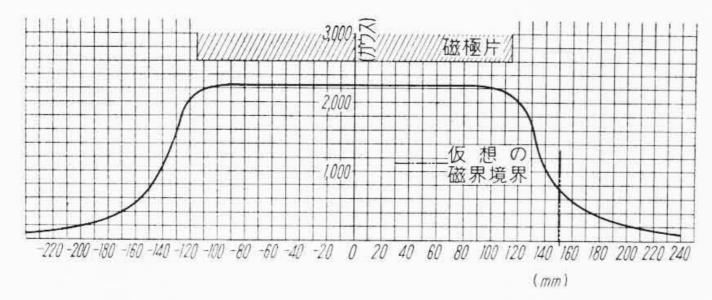
分岐電磁石は中心曲率半径を600 mm と規定されているため漏えい磁東量をは握し磁極片を補正する必要がある。磁極片が無限の大きさを有しないかぎり必ず磁極端効果として漏えい磁界ができてその領域を通る荷電粒子の軌跡に影響を与える。計算上の取扱いを簡単にするために、普通この荷電粒子の軌道に沿って磁界を積分してこれを中心磁界に置き換え、これ以前は磁界の効果はなくこれより磁界の効果が始まるという仮想境界を考えてこれを"仮想の磁界境界(Virtual magnetic field boundary)"という。すなわち便宜上第15~16 図に示すように荷電粒子の中心軌道 xに沿って磁界を積分し、(14)式によって与えられるように磁界が外側に u だけ広がっており、それ以遠には磁束の漏えいはないと考え直して荷電粒子の運動を追跡する。

ここで s: 荷電粒子源の位置

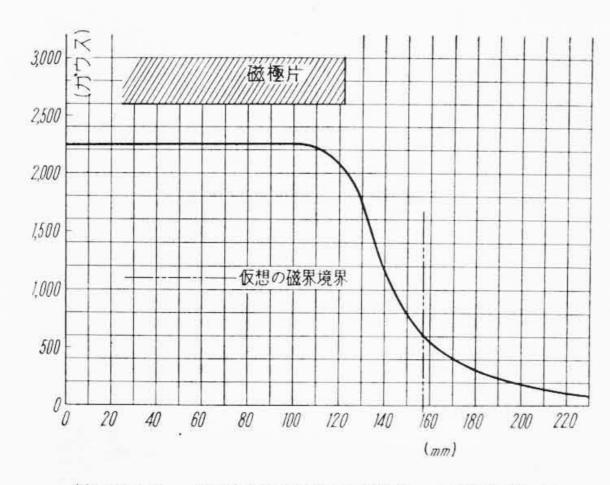
この取扱いによって軌跡は厳密には実際と一致しないが⁽¹⁰⁾,実用上あまり問題ない場合が多い。

uをは握しないと曲率半径 ρ が決定されないので,Bと ρ が規定されている場合はuの推定が重要になる。uは最終的には磁束分布を測定して決定されるが,磁界分布の描写法や,Schwarz-christoffel 変換などを用いて計算⁽¹⁰⁾ してある程度の精度で推定することもできる。

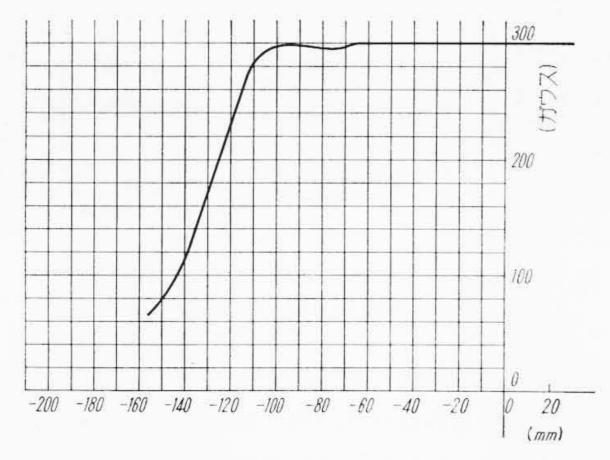
本電磁石の設計にあたっては概略の磁束量およびその分布状態は磁界描写法によって推定したが、uの推定は過去における類似の電磁石の実測結果の集積から得られた経験上の数値によった。なお設計値と実測値の食い違いを補正するために、第15図に示すようにシムを取り付けてuの実測値に応じて ρ を可調整とした。実測結果は第17~18図の磁界分布曲線から $u \simeq 1.0$ となっており、これは設計値と比較的よく一致していたが、2~3 mm 程度の



第17図 分岐用電磁石 DM₁の磁束分布



第18図 分岐用電磁石 DM2の磁束分布



第19図 分岐用電磁石 DM2 の磁極片表面に沿う磁束分布

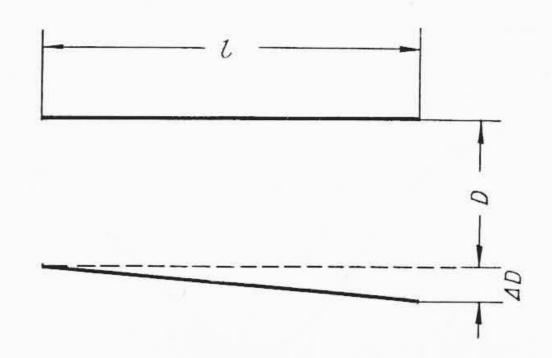
シム補正を行ない軌道半径の設定に厳密を期した。

4.2.2 磁界分布の一様性

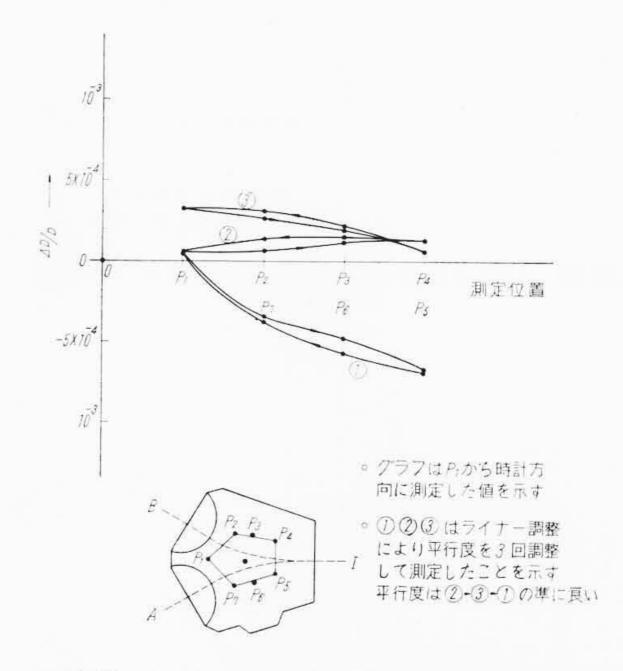
本電磁石では第2表にあるように、磁界均一度が 1×10^{-4} 以下にきびしく規定されている。平行形電磁石空げき部における磁界の 10^{-4} 程度の一様性(均一度)に対して問題になる事項について述べる。

(1) 磁極端における磁束の漏えい効果

4.2.1 では主として漏えい全磁束量と磁極面から外側に広がる 漏えい磁束について述べたが,磁極端効果が磁極の内面のどれだ けの位置まで及ぶかが、磁界の一様性を問題にするときに重要と なる。前述の磁界の描写法や計算法, あるいはアナログ式解析 法(11)(12)などでもせいぜい 10-2 程度の精度がぎりぎりであり、正 確に計算する方法はまだ一般化されていない。核磁気共鳴用磁石 などにおいて局部的な小範囲(数 cm² 程度)で 10⁻⁵~10⁻⁶ 程度の 均一度を得た製作例は比較的多いが,広範囲にわたり 10-4 程度の 一様性を問題にする場合の設計法は確立されていない。たとえば 磁極表面に密接した面で磁界の分布を測ると, 空げき中心面での 分布と著しく異なって第19回に示すようにこう配の向きが逆転 することが多い。また磁界の調整範囲が広いと、強磁界と弱磁界 で磁極各部の飽和効果が異なり磁界分布が10-4以上のオーダー で相異してくることもあり,一様性の良い磁石を設計することは 非常にむずかしい。本電磁石で問題になるのは、電子ビームの収 れん性とエネルギー分析に使用する場合の分解能などのためもあ るが、特に 5×10⁻⁵ の測定精度を要求される NMR 式磁束計の機



第20図 磁極面の平行度の説明



第21図 分岐用電磁石 DM2の磁極面平行度

能であろう。NMR 式磁束計では磁界の安定度とともに磁界の強さの低下および均一性が低下すると、共振点の測定が困難となり測定精度が制限される。この測定のため高度の一様性を要求される空間は、試料の置かれる数cm³程度の小部分であるから磁極端効果の影響が最も心配になる。この影響を緩和するために、磁極片の形状に特殊な考慮を払って好結果を得た。

(2) 磁極面の平行度,平滑度

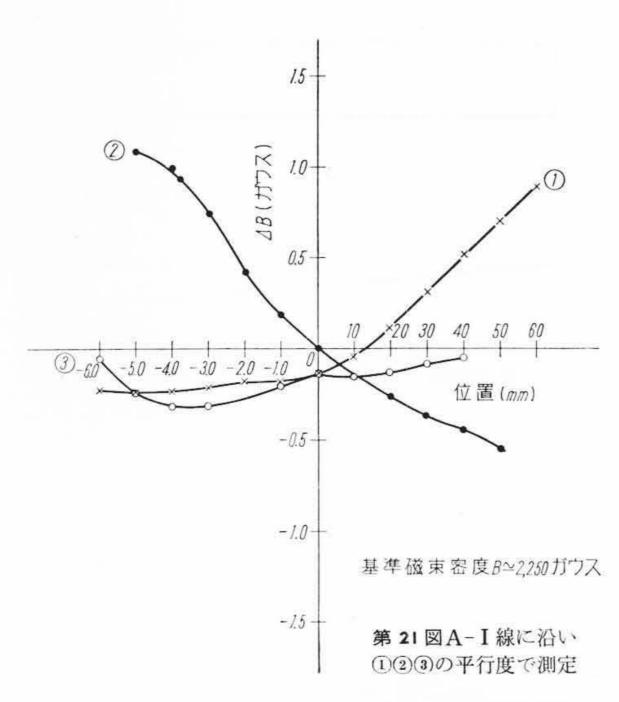
いま簡単のため鉄心の磁気抵抗および他の種々の因子を無視して、1/Aの一様磁界を生成する場合の平行度について考える。第 20 図において

$$\frac{\Delta B}{B_0}\Big|_{\text{max}} = \frac{\Delta D}{D} \le \frac{1}{A}$$

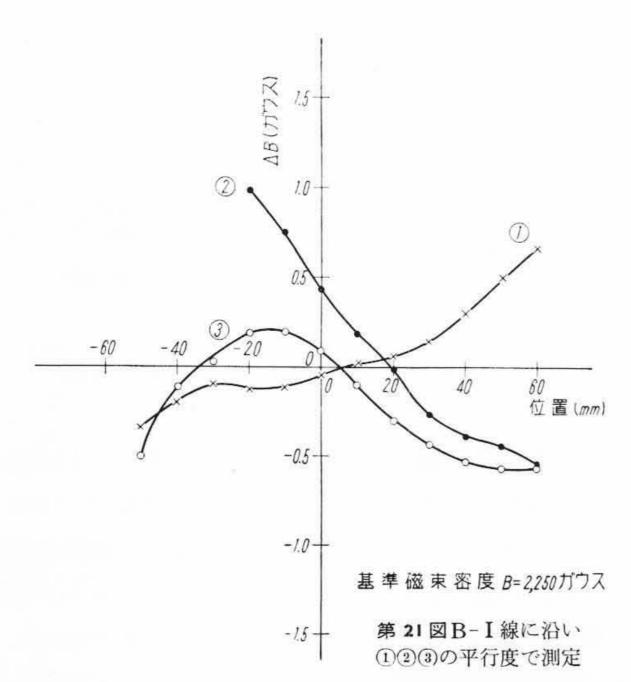
$$\frac{\Delta D}{l} \le \frac{D}{l} \times \frac{1}{A}$$
.....(15)

本電磁石では角度方向に要求される均一度 $1/A \leq 3 \times 10^{-4}$, $D=35\,\mathrm{mm}$, 磁極端漏えい効果が磁極片の端からDだけ内側まであると仮定して $l=220\,\mathrm{mm}$ であるから $\Delta D/l \lesssim 5 \times 10^{-5}$, $\Delta D \lesssim 1 \times 10^{-2}\,\mathrm{mm}$ となり 5×10^{-5} 以上の平行度が要求される。製作誤差と鉄心を形成する $3 - 2 \times 10^{-6}$ 以上の平行度が要求される。製作誤差と鉄心を形成する $3 - 2 \times 10^{-6}$ 以上の平行度が要求される。製作誤差と鉄心を形成する $3 - 2 \times 10^{-6}$ 以上の平行度が要求される。製作誤差とよいを形成する $3 - 2 \times 10^{-6}$ 以上の平行度が要求される。製作誤差と大きに保力には相当むずかしいので、われわれは空げき長Dを精度良く仕上げた数本の非磁性デスタントピースで保持する構造として高精度の平行度を得た。この構造によると薄い調整ライナーをそう入して製作誤差を簡単に補正できる。また他の種々の因子を考えると平行度と磁界の均一度は必ずしも単調な関数関係にないので、磁界分布を実測後一様性を補正するのに役だつ。第21~23 図は測定後この方法で磁界の均一度を向上させうることを示している。またデスタントピースを正確に押えても磁極面のウネリ(waveness)が問題になるが、磁極面を合わせ仕上げし規定の平行度をうることができた。

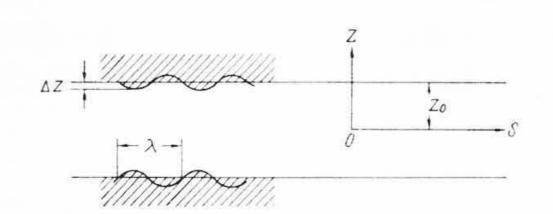
H



第22図 分岐用電磁石 DM2の高精度磁束分布曲線



第23図 分岐用電磁石 DM2の高精度磁束分布曲線



第24図 磁 極 面 の 凹 凸

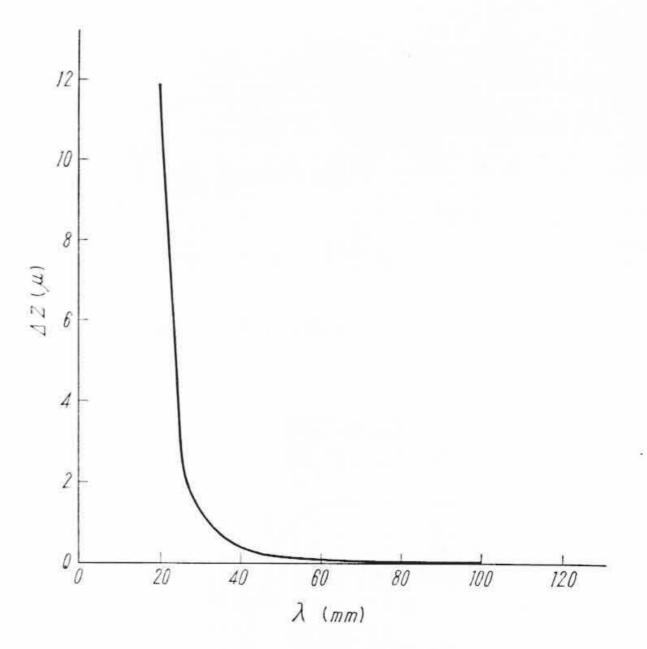
巨視的な大きいウネリは前述の平行度によって規制されるが比較的狭い面の凹凸すなわち面のあらさの影響については次の計算式⁽¹³⁾によって検討した。すなわち**第24**図において

$$B_{z} = B_{0} \{1 + \zeta \cos b_{0}X\} \qquad b_{0} = \frac{2 \pi}{\lambda}$$

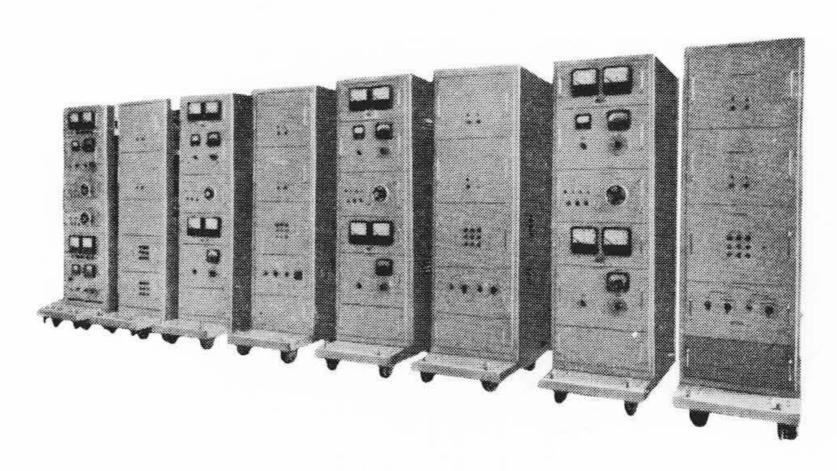
$$\zeta = \frac{\Delta z}{z_{0}} \frac{b_{0}z_{0}}{\sinh (b_{0}z_{0})} \cosh (b_{0}z_{0})$$

$$\zeta_{z=0} = \frac{\Delta z}{z_{0}} \frac{b_{0}z_{0}}{\sinh (b_{0}z_{0})}$$
(16)

この電磁石では $\zeta \le 1 \times 10^{-4}$ としなければならないが,この条件から λ と Δz の関係を計算したものを $\hat{\mathbf{x}}$ 25 図に示す。 $\hat{\mathbf{x}}$ 25 図から面のあらさを規制する仕上の程度には特に技術的困難はないが,前述の"ウネリ"については製作にあたり十分な考慮を要することがわかる。



第25図 分岐用電磁石磁極面の凹凸の影響



第26図 電磁石励磁電源

(3) 材料の磁気特性とその均一性

磁極片を構成する各部材料の特性およびそのバラッキも考慮しなければならない。われわれは日立金属工業株式会社製電磁軟鋼の透磁率、保磁力などの慎重な特性試験を行ない JIS 第1種以上の合格品のみを使用し、またメッキや機械加工に至るまで磁性を劣化しないよう慎重に検討して製作した。

(4) 外部じょう乱磁界の重畳

問題になる外部じょう乱磁界としてはまず地磁気が考えられる。これに対しては磁気シールドをする方法やデガウシング用コイルを使用する方法があるが、われわれは磁極片とヨークを地磁気に対する磁気シールドが良好となる形状として、この影響を押えた。また温度変化は磁界の安定度を乱す大きな原因となるから、コイルと鉄心の間に通風用空げきを設けて、コイルの温度が直接鉄心に伝わる影響を減少させた。

4.3 励磁電源

4.3.1 構 成

以上に述べた精密直流電磁石に使用する励磁電源装置の仕様は 第3表で、特に下記の条件が要求される。

- (1) 5時間以上の長時間にわたり 10⁻⁴ 程度の高安定度を保つこと。
- (2) 電流の可変範囲が広く、かつ連続的に設定でき、どの出力電流値でも高安定度を保つこと。
- (3) 核磁気共鳴磁界測定装置からの信号で電流を制御すること。

装置の外観を第26回に、回路系統を第27回に示す。誤差検出部で検出された誤差信号は、増幅されて電流制御の直列制御管に加えられる。なお電圧電流出力の指示、出力電流記録監視用高インピーダンス測定端子、磁界測定信号による電流制御回路、停電

および盤間接続不良や負荷切断に対する保護など各種インターロックが設けられてある。

4.3.2 直列制御部と整流電圧調整部

本装置の制御電流の可変範囲は非常に広いので、もし陽極電源 電圧が高いまま制御電流を絞ってゆくと、負荷コイルの電圧降下 が小さくなり、その分の電圧が直列制御管の管内に移ることにな る。この値が直列制御管の耐圧限界を越さないように、また最大 陽極損失を越さないように保護するとともに、最適動作点で使用 するよう整流部電圧を調整する必要がある。

本装置は電流設定に速応性を要求しないので直列制御管のプレート電圧またはそれに代る電圧を測定して、手動で整流部電圧を調整する方法を採用したが、誤操作を防ぐため直列制御管の陽極と陰極の間に、使用範囲を色別した電圧計と高周波式無接点継電器を組み合わせたメータリレーを入れ、陽極電圧の指示と最適動作範囲からはずれたときの警報を行なっている。

4.3.3 検 出 部

一般に磁界を一定に保つための自動制御装置には磁界直接制御 方式と、定電流制御方式とがある。

磁界直接制御の場合は、回転式磁束計、ホール効果法、ピーキングストリップ法や核磁気共鳴法などにより磁界を検出し、磁界の変化を補正する電流を定電流電源出力電流に重畳するか、別に補償用補助励磁コイルを設けて変化分の補償を行なう方法が考えられる。検出精度の点では核磁気共鳴法が最も良い(14)。また定電流制御方式の場合は、高度に安定した電流は得られるが電磁石鉄心の幾何学的変形、材料の磁気特性に変化を生ずると一定磁界をうることはできない。

しかしながら 10⁻⁴ 程度の安定度を要求する磁界 直接制御に適当な核磁気共鳴検出を行なうと,大き なじょう乱があって一時的に磁界が共振点から大き くはずれたとき,制御系をもどす適当な方法がない ことと,500 ガウス以下には適当でないこと,およ び磁界を連続的に比較的速い速度で増減させること ができないなどの欠点がある。本装置ではこれらの 欠点を補なうため定電流制御方式を採用し,核磁気

共鳴検出制御および温度補償電流制御を併用できるようにした。 温度補償電流制御は鉄心の温度を検出し、その変化に応じた電流を、主励磁コイルのほかに設けた補助コイルに流して補償する 方法である。この方法では簡単な制御装置で、長時間にわたり1× 10⁻⁴ オーダーに容易にもち込める。

定電流方式の検出用基準抵抗にはAA 級マンガニン線を使用した。そしてジュール熱の影響を少なくするため容量を十分大きくとり、さらに絶縁油を満したタンクに入れて外部の急激な温度変化を受けないようにし、また接続部分の熱起電力や切替接点の接触抵抗の変化の影響を少なくするよう対策し、この部分の検出端に換算したドリフトを 1×10^{-4} 以下に押えた。

比較用基準電源には水銀電池を採用した。水銀電池は小形で容量が大きく、放電特性が良好で温度係数も常温で4.2×10⁻⁵/°Cと比較的小さい。しかし定電流装置の基準用としては要求安定度の少なくも10倍の安定度をもつ必要があるので恒温化する必要がある。電気的な恒温槽では制御電流によるドリフトを受けるので、0°C付近でも比較的特性の良い点を利用し、氷水を入れた特殊な魔法びんに入れて温度によるドリフトがほとんどないようにした。

第3表 励磁電源の仕様

装 置 名	台 数	出力	電 流 (連続可変)	電 圧	安定度(5時間)	設定精度	
偏向用DM形	2台	200W	1 ~0.26A	$200\mathrm{V}$	3×10-4 以下	5×10-4 以下	
収束用 Q1 形	2台	450W	1.8~0.26A	230 V	1×10-8 以下	1×10-8 以下	
収束用 Q2 形	2台	350W	1.6~0.2 A	210 V	1×10-3 以下	1×10-3 以下	
収束用 Q5 形	2台	300W	1.3~0.19A	$230\mathrm{V}$	1×10-3 以下	1×10-8 以下	

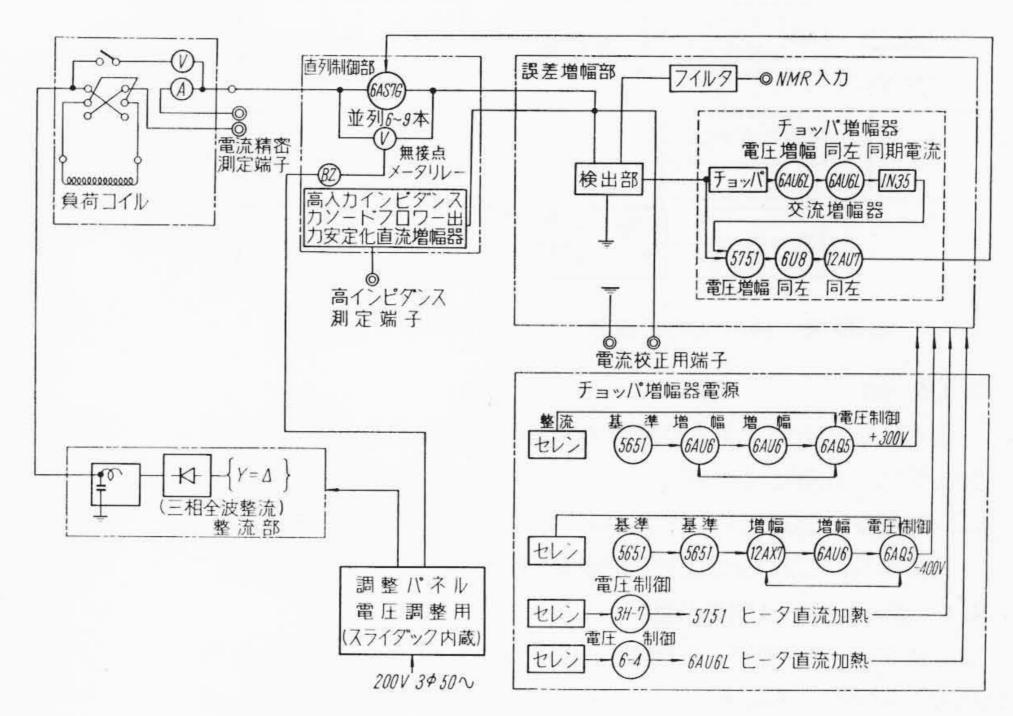
電源変動に対する回復時間 0.1 s 以内

上記仕様は下記条件下において

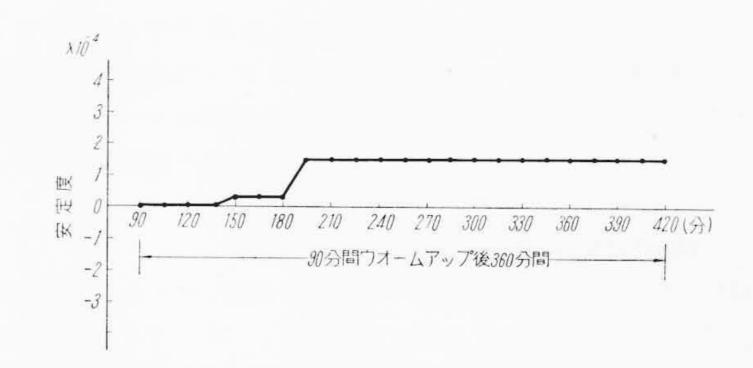
- (1) 電源電圧変動 $\pm 5\%$ 周波数変動 +1 -2 c/s
- (2) 負荷変動 ±20%
- (3) 使用周囲温度 0~40℃
- (4) 使用中の周囲温度変化 5時間運転中 5℃ 以内
- (5) ウォームアップ 90分

第4表 DM₁ 形分岐電磁石用電源の試験結果

変	動	部	分	安	定	度		復	時	間
電源	電圧	+	5%	4×10-5 以下			50m s			
電源	電圧	_	5 %	4×10-5 以下			40m s			
負荷	抵抗	+:	20%	4>	×10-5 以	下	30m s			
負荷	抵抗	-5	20%	4×10 ⁻⁵ 以下 30m s						



第27図 励 磁 電 源 装 置 系 統 図



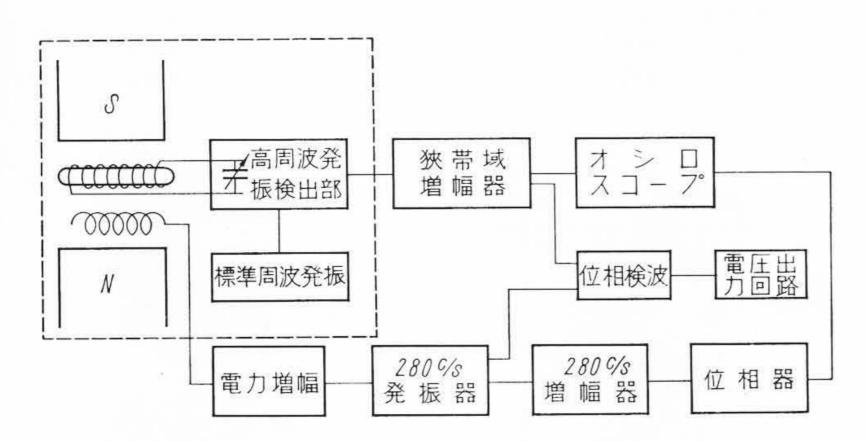
於負荷 272 H, 176 Ω,電流 1 A,気温 5~10℃,電源電圧変動 ± 5%程度 第 28 図 DM 形分岐用電磁石電源装置ドリフト試験結果

4.3.4 誤差增幅器

検出抵抗に生ずる電圧と基準電圧との誤差電圧を、数 μ V程度まで高利得直流増幅器で増幅し、直列制御管の格子を制御する本増幅器は、信頼性がありかつ零点の移動などがなく安定に動作するものでなければならない。われわれは真空管式直結形とメカニカルチョッパ式変調形を組み合わせて、相互の利点を生かした低ドリフト高利得広帯域の複合形増幅器を用いた。これは利得が直結部と変調部の利得の和となり、ドリフトは変調部の利得分だけ改善される。

昭和37年7月

第29図 入放射角調節制御装置



第30図 核磁気共鳴磁界測定装置ブロック線図

4.3.5 結果

最も安定度を要求する DM 形の試験結果を述べる。電源電圧変動 $\pm 5\%$, 負荷変動 $\pm 20\%$ に対する安定度と回復時間は 第4表に、連続 5 時間運転したときのドリフト試験結果は 第28 図に示されており、これらは要求安定度 3×10^{-4} を十分満足している。

4.4 ポールピース制御装置

ポールピース制御装置は DM_1 , DM_2 電磁石の電子ビーム入射角を遠方より制御する部分と、ポールピース温度の測定部分とから成る。温度測定装置では DM_1 , DM_2 形分岐電磁石の鉄心の温度を数点切り換えて測定できる。

ポールピースの入射角調節制御装置は 第 29 図 で押ボタンスイッチにより DM_1 と DM_2 の入射角 ± 30 度をそれぞれ遠方操作で調節でき、角度は読取精度 10^{-3} で指示される。なお押ボタン操作回路にキースイッチを設け、入射角設定ののち関係者以外操作できないようになっている。

4.5 核磁気共鳴磁界測定装置

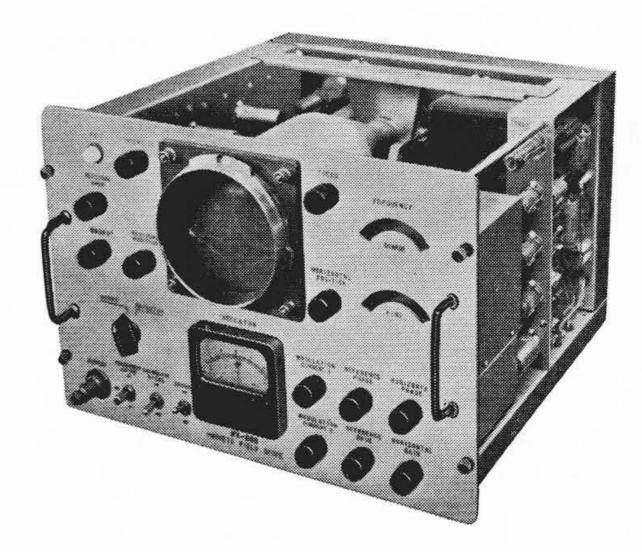
磁界を測定する実用的な方法のうち 500~数万ガウス 程度の磁界に対しては核磁気共鳴方式が最も精度が良く、 10^{-5} 程度の測定精度を有する。核磁気共鳴法は、原子核がその核に固有の角運動量と磁気モーメントをもっているので、静磁界H内におかれるとその回りにラーモア歳差運動を行ない、その周波数fはその原子核に固有な常数 γ (gyromagnetic ratio) によって

$$f = \frac{\gamma}{2\pi} H$$

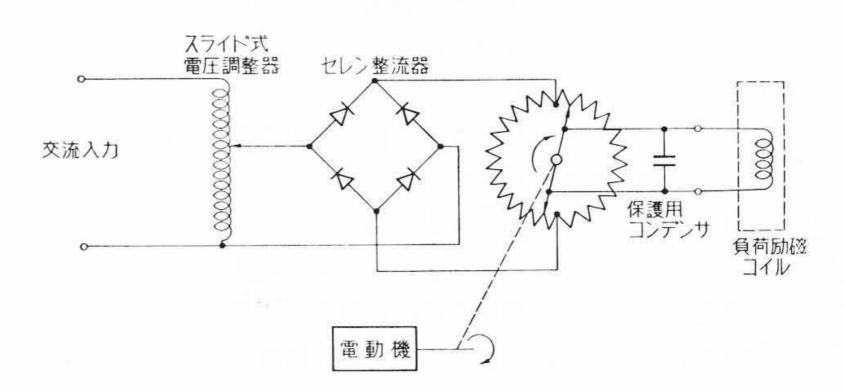
と表わせることを利用したものである。本装置では陽子を使用したが、この場合fをキロサイクル(kc)、磁界をガウス(G)とすると

$$\frac{\gamma}{2\pi} \simeq 4.2577 \text{ kc/G} \dots (17)$$

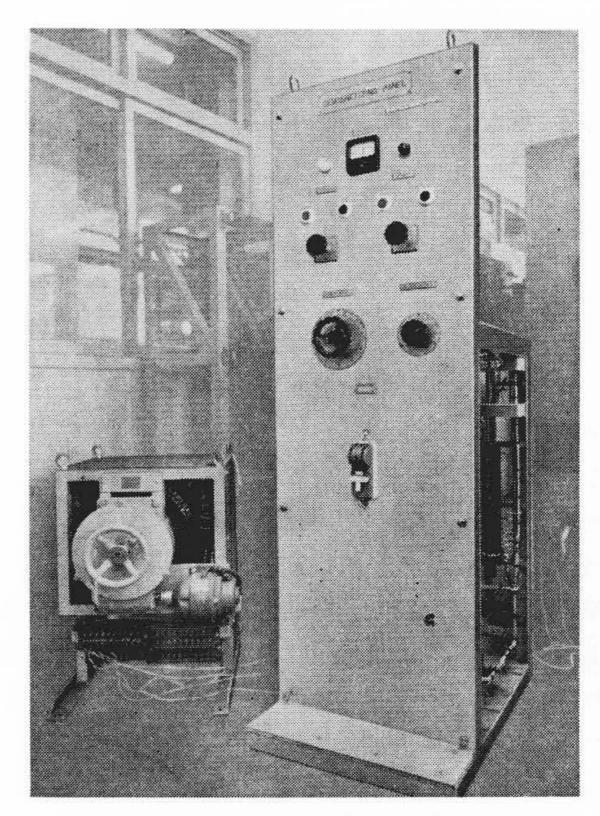
となり、この周波数fの電磁波を与えて共振したときの周波数を測定して磁界を測定することができる。本装置のブロック線図を $\hat{\mathbf{x}}$ 30



第31図 核磁気共鳴式磁束計指示部



第32図 消磁装置の原理図



第33図 消 磁 装 置

図に、外観を第31図に示す。本装置は200Gの低磁界まで測定できるようにしたことと、検出部と測定操作部を30メートルほど離して遠方操作をしたことが大きな特長である。

4.6 消 磁 装 置

分岐用電磁石は電子ビームの分岐を行なわない場合,残留磁界を 少なくしてビームが曲らないようにしなければならない。許容残留 磁界はビームの行程とエネルギーによって違うが,本分岐用電磁石 では第2表に示すように1G以下を要求する。従来の消磁方法は直 流電流を正逆に切り換えてヒステリシス曲線を描かせ,しだいに電 流値を減少せしめる方法などがとられていたが残留磁界が大きいう え,バラツキが大きく不具合である。

本消磁装置は第32図のような原理で超低周波正弦波電流を発生

させ、その波高値をしだいに減少せしめて消極するようにした。その結果残留磁界は 0.3 G 以下でバラッキは 0.1 G 以下の好結果をうることができた。

外観を第33図に示す。

5. 結 言

最近国内でも各種の粒子加速器が続々建設されているが、これらの加速器を能率良く使用するために必要なビーム分岐収束系の代表例として幾多の新技術を開発して完成した原子力研究所納の四極電磁石および扇形電磁石の概要を紹介したが、この製作経験はメーカーとして貴重であった。この種電磁石の設計製作にはまだ幾多の技術的問題が残されているが、これらの問題に取り組んでおられる諸氏のご参考に供したい意図をもって本文は起草されたものである。

本設備の設計を行なうにあたり,種々のご指導をいただいた日本原子力研究所平川氏(現東大助教授)をはじめリニアック建設室の皆さま,NMR 式磁束計の製作を担当された沖電気株式会社仲矢氏,励磁電源の製作を担当された日立製作所小金井分室の西村氏,さらに種々の助言をいただいた日立製作所日立工場田附部長,逸見課

長,西課長,日立研究所佐々木氏,機械系の設計を担当した山岡氏, 測定に協力いただいた千葉氏などの諸氏に厚くお礼申しあげる。

参考文献

- (1) Kazuhisa Matsuda et al.: INSJ-14 (Jan. 1959)
- (2) W. K. H. Panofsky et al.: R. S. I. 25, 287 (Mar. 1954)
- (3) K. L. Brown: R. S. I. 27, 959 (Nov. 1956)
- (4) E. D. Couran et al.: Phys. Rev. 88, 1190 (Dec. 1952)
- (5) P. J. Lynch et al.: AEC-Report ISC-927 (Aug. 1957)
- (6) H. A. Enge: R. S. I. 30, 248 (Apr. 1959)
- (7) たとえばK. T. Bainbridge: Experimental nuclear physics Vol. 1, p. 578 (1953)
- (8) たとえば宗像元介ほか: 電試調査報告第146号
- (9) I. E. Dayton et al.: R. S. I. 25, 485 (May. 1954)
- (10) たとえば N. D. Coggeshall: J. of App. Phys. 18,855 (Oct. 1947)
- (11) 加沢ほか: "磁場コイルの設計" 電学会核融合専門委資料 (昭 35-3)
- (12) H. Diggle: P. I. E. E. 101, II, 349 (1954)
- (13) 能谷寬夫: 物理学会誌, 14, 162 (昭 34-4)
- (14) H. A. Thomas: Electronics 114 (Jan. 1952)



特 許 第 285621 号

特 許 と 新 案



建 脇 勉

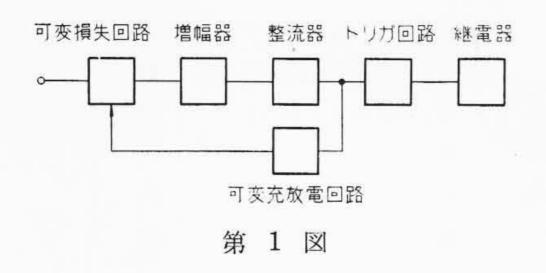
信 号 受 信 器

近年増々、テレメータ、テレコントロールおよび印刷電信などの搬送電信回線が増加しているが、このような搬送電信に用いられる信号波断続によるAM信号波形は、受信側における入力レベル変動によって大きな信号ひずみを受け、したがってレベル変動に強い信号受信器が必要とされている。

この発明は入力波形をその前部において伸長し、かつ後部において圧縮して得られた出力波形を一定のレベルで切り取る波形修正により、レベル変動に対して強い信号受信器を得られ、たとえば入力レベルが30dBの変化をしても信号ひずみは精々5%以内におさめることが可能である。

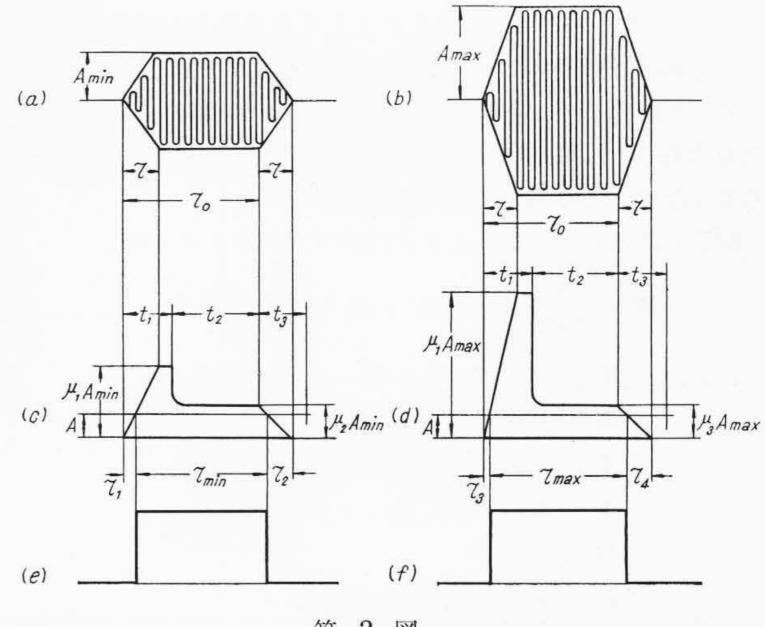
入力信号がaおよびbにて示す最低レベル A_{min} および最高レベル A_{max} のようなレベル変化をすると,入力波形は送受信の電信路にそう入された濾波器を通過するために τ 時間の遅れを生じ,既に長方形波ではなくなっている。 τ_0 は原波形の持続時間である。このような波形の入力信号を整流して得られた長方形パルスは,最低レベルの場合と最高レベルの場合とではパルスの幅が異なり,使用に耐えない程度の信号ひずみを生む原因となる。

この発明は可変損失回路を制御して、入力信号パルスの立ち上がり時より一定時間 t_1 の間は、その損失を小さくして波形を十分伸長させ、それ以後は、上記可変損失回路を制御し、その損失を増大して、波形を圧縮する。したがって整流器の出力波形は、最低レベル A_{\min} および最高レベル A_{\max} の入力信号に対して、c 、d にて示す波形となる。可変損失回路は、無信号時には損失が少なくなっていて入力信号が到来し、整流器よりの出力の一部が可変充放電回路に充電されるまでの時定数 t_1 の間続いており、このため入力信号は最初の中は可変損失回路をほとんど損失なしに通過し、増幅器によっ



て十分増幅されて整流器より取り出される。しかし t_1 時間を経過すれば充放電回路の出力は可変損失回路を制御することとなり、この可変損失回路は入力レベルに対応した損失に増加される。この状態は、入力波形が下がり始めるまでの t_2 時間の間持続し、更に入力波形の下がり始めより可変充放電回路の放電時間 t_3 の間、保持されている。その結果入力波形の後半は入力レベルに応じて有効に圧縮される。

このようにして、入力波形を前半は伸長し後半は圧縮してc、 d に示した修正波を作り、これをトリガするものであるから、従来の方法のように入力波形をそのまま整流してトリガするものと比較すれば、 τ_1 をより短かく、また τ_2 をより長くすることができ、原波形にきわめて類似した位置に、かつほぼ同一の持続時間をもって再現できる。



第 2 図