## 東 北 大 学 納

# 広範囲磁気反応粒子分析器

Broad-range Magnetic Spectrometer delivered to Tohoku University

加 沢 義 彰\* 三 沢 通 宏\* 橋 本 宏\* Yoshiaki Kazawa Michihiro Misawa Hiroshi Hashimoto

要

核反応粒子のエネルギー,強度,角度分布を広いエネルギー範囲で同時に測定できる広範囲磁気粒子分析器 を製作し,東北大学に納入した。本器には各種の新技術が試みられているが,特に非対称性電磁石の磁界均一 度調整法,新しいタイプのプレートホルダによる粒子検出方式,トランジスタ式定電流励磁電源(ドリフト 10<sup>-5</sup>/h以下)などに進歩があった。本文はその概要を紹介したものである。

旨

### 1. 緒 言

加速器の出力荷電粒子ビームを利用して各種の原子核実験が行な われるが,最近の実験装置では入射粒子分析装置<sup>(1)</sup>とこれに続く反 応粒子分析装置で構成する散乱系が重要な役割を占める<sup>(2)</sup>。後者に 属する測定器として加速器から出るイオンまたは電子をターゲット に衝突させて,発生する各種の核反応荷電粒子のエネルギースペク トルを磁界の偏向作用を利用して測定する磁気反応粒子分析器



(Magnetic Particle-analyzer) は古くから使用されてきた。これは 測定が簡単で精度が高く電磁石をターゲットのまわりに回転するこ とによって角度分布も測定できるなどの特長があり現在でも有力な 核実験手段となっている。最近,この磁界の形を工夫してスペクト ルを広いエネルギー範囲で同時に測定できる広範囲磁気反応粒子分 析器 (Broad Range Magnetic Spectrometer) が開発され<sup>(3)(4)</sup>,そ の有用性,能率性が認められ各地で建設されるようになった<sup>(2)(5)</sup>。 われわれが製作したものは東北大学において5 MeV ファンデグラ フ<sup>(6)</sup>と組み合わせて使用されるもので、本器の設計に際しては主と して東京大学原子核研究所のもの<sup>(2)(7)</sup>を参考にし、これに各種の新 しい技術をとり入れ大幅な改良を試みた。そのおもな仕様は**表1**に 示すとおりである。

### 2. 理 論

基本的には MIT 形<sup>(4)</sup>であり東大核研の装置<sup>(2)(7)</sup>と同様に横形と し水平方向(r方向すなわち xy 方向)および垂直方向(z方向)の2重 収れんとするために磁極の入口部分に回転シムを取り付けて斜入射 形とした(図1)。

イオン光学の理論で周知のように、いま偏向磁東密度Bのとき、 電荷q運動量pの荷電粒子が入射すると磁界内で半径r=p/qBの 円周上を運動しA点から磁界境界に直角に放射してF(x, y)点に像 を結ぶ(単位 CGS emu)。F点の座標は図を参照して計算すると次 式で与えられる。

$$x = \frac{(1 - \alpha^2) (2 \alpha + \beta)}{(1 - \alpha^2) (\alpha + \beta) + 2 \alpha} R_0$$
  

$$y = \frac{2 \alpha (2 \alpha + \beta)}{(1 - \alpha^2) (\alpha + \beta) + 2 \alpha} R_0$$
 .....(1)

図1 イオン光学系説明図

一方 z 方向の収れん性は磁界入口境界付近の磁界分布によるから 薄いレンズとして考えると z 方向焦点距離 F<sub>z</sub>(cm) は次式で与えら れる<sup>(8)</sup>。

また磁界の出口側仮想境界から収れん点までの距離 L"(cm) はイオン光学の式<sup>(8)</sup>から

 $(R_0 - F_z) \{l_z'' - (F_z - \phi r)\} = F_z^2$ .....(4) ここで、  $\phi$ : 偏 向 角 (rad) の関係があるので、(3)(4)から次式で与えられる。

単一荷電粒子が一様磁界内で回転するとき q Br は粒子の運動量 であるから、これに対応する粒子の運動エネルギーEは周知のよう に次式で与えられる。(CGS emu)

 $E = \{ (m_0 c^2)^2 + q^2 c^2 (Br)^2 \}^{1/2} - m_0 c^2 \dots (6)$ ここで、 m<sub>0</sub>: 粒子の静止質量

### c: 光 の 速 度

粒子がプロトンの場合,相対論効果が無視できる領域では Br≒144 √E .....(7)

ここで、 $r, x, y, R_0$ : cm  $\alpha \equiv \frac{r}{R_0}$ ,  $\beta \equiv \tan \varepsilon$ これが x-y 平面上の収れん点の位置である。 また電磁石出口側の "仮想の磁界境界<sup>(1)</sup>"から x-y 平面上の収 れん点Fまでの距離  $l_i''$ (cm)は次式で与えられる。 \* 日立製作所日立工場 ここで、 B: (G) r: (cm) E: (eV) となる。 したがって(1)(2)(6)から、x-y 平面上の収れん点の位置を荷 電粒子検出器 (たとえば原子核乾板,半導体検出器など)で知れば 反応粒子のエネルギーを知ることができる。電磁石の磁界を変えて

252昭和41年2月

立. H

評 論

第 48 巻 第 2 号

			第1表	おもな仕様
	形	式		均一磁界への斜入射による2重収れん方式横形
運	動量分	析範	囲	陽子で E=15 MeV~1 MeV だだし E~0.6E は同時測定
空	げき部	3 磁	界	10,000 ~ 3,300 ガウス可変
真	空排	気	系	6 ′′ Dp, 2 ′′ Dp トラップ付 到達真空度 1×10 <sup>-5</sup> mm Hg
励	磁	電	源	3 kW, 60 V, 50 A トランジスタ式 安 定 度 1×10 <sup>-4</sup> /0.5h, 5×10 <sup>-4</sup> /5h







図2 収れん点の計算と実測



エネルギースペクトルが得られ、また反応粒子源(ターゲット)を 中心に電磁石および検出器を回転させて角度分布も測定できる。

立体角すなわちスペクトロメータの明るさを増すために斜入射に よる2重収れん形としたがこのタイプでは z 収れん点と x y 収れん 点 (r収れん点) が重なるいわゆる立体収れんは, 一つの軌道でしか 成立しない。そこで基本的には次の考え方で設計される。

- (i) r方向収れんに重点をおき、しかもz方向収れんもきくよ うにする。
- (ii) 測定範囲のどの領域(どの偏向半径)でも発散しないよう にする。

 $\varepsilon = 45 度のとき(2) 式 で l," \geq 0 のとき \alpha \geq 1/3 となる。 すなわち$ ここで実像が磁界の仮想境界の外で結ばれることを示す。

z方向では(5)式から同様にして、 $0.54 < \alpha < 1$ で収れんする。し たがって, 0.55 < α < 1 (エネルギー範囲にして約 0.3:1) で使用す れば前述の基本条件は満たされる。ただし z 方向収れん性は予測し たより弱いことが知られている(7)から,領域は少しずれるであろう。 これらのことも検討し、同時測定範囲は表1のように決められた。 粒子の偏向半径 r (またはエネルギー)に対応する焦点を(1)によ り計算し、実測値と比較したものを図2に示す。 測定は  $P_0^{210}$  5.3 MeV α線源をターゲットの位置に置き7mm<sup>2</sup>の半導体検出器を用 いて分解能が最良となる点を求めた。また(2)(5)からαすなわち エネルギーに関する r 方向および z 方向収れん点の関係を計算した のが図3である。 実際には前述のように z 方向 収れん性が弱いの でし"の曲線は上方にずれる。 検出器の位置(r 収れん点)における z 方向の幅  $Z_F(cm)$ の概略値

4 極磁気レンズ 义 7

は次式から求められる(図4参照)。

ここで、 lg: 偏向室内高さ。本器では電磁石のギャップ (cm) 図5はこの計算値である。

### 3. 装置の構成

#### 3.1 概 要

イオンビーム測定系を図6に示す。5 MeV ファンデグラフ<sup>(6)</sup> からの垂直方向出力イオンビームを90度偏向磁石で水平ビームと し、振り分け電磁石で30度偏向し反応粒子測定系に導く。振り分 け電磁石と反応粒子分析器の間に同時に納入した4極磁気レンズ

(図7)を設置し、イオンビームの焦点が本器のターゲット上に結ぶ ようにする。 図8は本器の外観を示したものである。 ターゲットチャンバ (散乱槽)の中心にターゲットを置き、イオンビームの衝突で生じた 核反応粒子はターゲットチャンバの窓からスルースバルブ(粒子シ ャッタと兼用)および可変スリットを通り電磁石に入射される。電 磁石で偏向された反応粒子は検出器箱内に装着されたプレートホル



図8 スペクトロメータ





図10 ライナー挿入位置

描写法, Shwartz-christoffel 変換を用いての計算<sup>(9)(10)</sup>のほか過 去における類似電磁石の実測結果を参考にして磁極端から1ギャ ップ長だけ外にとった。磁極端部分の磁界分布は図9に示すとお りである。入放射面以外の磁極端効果が粒子軌道に与える影響を 防ぐために, r<sub>max</sub> および r<sub>min</sub> の外側に約2 ギャップ長の余裕をと ってポールピース面の寸法は図2のように決められた。

### 3.2.2 磁界の均一度

NMR, ESR, あるいはサイクロトロン用などの電磁石のように





ダ上の検出器面のエネルギーに応じた位置に像を結び計数または撮影される。

電磁石,検出器箱,真空排気装置などは電動台車上に載せられ, ターゲットの位置を中心に、ターゲットチャンバ窓のすべり膜部で 真空シールしながらビーム方向に対し-10度から+150度まで回 転できる。台車の回転はベースのレール部に設けられた角度設定用 リミットスイッチを任意の角度に設定し、近くに置かれた台車制御 盤上のボタンを押すことにより制御されるので、角度分布は能率的 に測定できる。

電磁石励磁電源, NMR 式磁束計指示部, 真空計指示部, 粒子シャッタ操作回路などは放射線に対して遮へいされた制御室に置かれ, 遠方から制御, 監視される。

3.2 電 磁 石

3.2.1 概 要

ヨーク,磁極には低炭素鋼(C:0.2%程度)ポールピースには 磁気特性の良い電磁軟鋼(JIS SUY-1)を使用した。コイルはパワ ートランジスタによる励磁を考え低インピーダンス形とし,冷却 は上下コイルを10個に分割しその間に銅パイプをロー付けした 冷却フィンをはさみ水冷する方式とした。また NMR 式磁束計を 利用して磁界の直接制御を行なえるよう補助コイルを設けた。

本器は収れん性の検討結果から $r=R_0$ に対応する粒子エネルギーが $E_0$ なるとき、同時測定範囲が $0.9 E_0 \sim 0.54 E_0$ (すなわち $E \sim$ 

ポールピースが円形の場合,あるいは比較的対称性の良い形状の 場合でも3×3 cm 以上の範囲にわたって10<sup>-4</sup>~10<sup>-5</sup> 程度の磁界 均一度を持たせることは簡単ではない<sup>(1)(11)~(13)</sup>。まして本器のよ うな非対称ポールピースの電磁石ではこれはきわめて困難なこと である<sup>(7)</sup>。

磁界の均一度を乱す原因としては主として次の事項が考えられる<sup>(1)</sup>。

(i) 磁束の漏えい効果

(ii) 磁極面の平行度, 平滑度

- (iii) 材料(特にポールピース材料)の磁気特性とその均一性
- (iv) 非対称性を含めたポールピース,磁極,およびヨークの形 状,寸法とこれらに基づく磁気飽和,ヒステリシスの相違
- (v) コイルの配置

— 19 —

(vi) 外部じょう乱磁界の重畳

これらの一つ一つの因子は定性的には議論できても定量的に取 り扱うことはむずかしいものが多いから,設計時10-4程度の精 度で磁界の均一度を予測することは不可能に近い。したがってあ る程度の荒っぽい仮定および経験、実績に基づいて設計し、実測 後多少の調整ができるよう考慮しておくのが普通である。本器の 場合,結果的に見て主として(i)および(iv)の影響のため,均一 度調整に努力を要した。幸い新しい調整法により、大幅な均一度 の向上が得られ,ほぼ所期の目的を達した。すなわち,従来磁界 分布の調整法としては、(1) ギャップの平行度調整法(1)、(2) ローズシム<sup>(14)</sup>その他シムによる方法<sup>(1)(10)</sup>, (3) 電流シムによる 方法(12)(15),(4) コイルの配置または起磁力分布変化法などが行 なわれてきたが、われわれは(1)の方法のほか、図10に示すよ うに、ポールとポールピース間に薄いライナ(磁界の強い部分には 非磁性体,低い部分に磁性体)をそう入して大きな成果を得た。 磁界分布を測定するには NMR 式磁束計を使用し、ポールピー ス上に図11のように3×3cmのます目を描いた紙をはり、その 交点で測定した。 磁束計プローブを所定の位置に持って行く位 置精度は±2mm以下に押えられた。均一度調整前および調整後 の測定結果は図12~13に示すとおりである。またほぼ軌道方 向にプロットしたのが図14~16である。 これらの図で曲線は

0.6 *E*)となるよう設計された。最大磁東密度は 10,000 (G) である から 0.9  $E_0$ =15 (MeV)とすると  $E_0$ =16.7 (MeV)となる。したが って磁界の半径  $R_0$ は(7)式から59 cmとなる。最大軌道半径  $r_{max}$ は 55.8 cm,最小軌道半径  $r_{min}$ は 43.4 cmとなる。最小磁東密度 は 1 MeV プロトンの軌道が  $r_{min}$ となる約 3,330 (G)となる。ポー ルピースの寸法はこのほか,磁極端効果が粒子の軌道に与える影 響を考えて決められる<sup>(1)</sup>。本器では仮想の磁界境界は磁界分布の



(調 整 後)

(調 整 後)

図13 磁界の均一度(その2)

なるべく平坦で,線群は接近しているほうが均一度が良いといえる。

図17に示すように磁界を3,300(G),7,000(G),9,000(G), 10,000(G)のように変えると分布が相当変化する。測定の結果, 電磁力の変化によるギャップ寸法の変化はほとんど認められなか 図16 磁 界 分 布 (その3) った。この主因としては磁気回路の形状,寸法のために鉄心内が B均一形となっていないので磁気飽和とそれに基づく漏えい磁束 の変化などが考えられる。 特に9,000(G)以上で均一度が悪化する。磁界調整範囲の全域 にわたって均一度が最良の状態となるよう調整することは,この



ような非対称ポールピースの場合はきわめて困難で ある。たとえば9,000 (G) 付近で最良の磁界分布と なるよう調整した場合, 3,300(G)付近では必ずしも 最良の磁界分布とはならない。本器では最もひん度 が高いと思われる 7,000 (G) 付近で最良の分布と なるようにした。 その結果図 15 および図 17 に示 すようにこの付近では非常に良い分布となってい る。

反応粒子入口側で均一度が乱れているが、これは 前記形状のほか,入射角調整用回転シムの滑動面の ギャップによる磁気抵抗の増大が原因と考えられ る。この付近の均一度はシムを設けないで一体とす ればさらに大幅に改善できると予想される。





3.3 ターゲットチャンバ

図8のようにベース上に固定され、その中心にタ -ゲットが設けられた。 ターゲットホルダは図18の ように2種類のターゲットが真空を破らずにセットで きるようにした。 チャンバ内に半導体検出器のアタッチメントを 設け、それがターゲットのまわりに 360 度回転できるようになって いる。反応粒子出口側の窓はスルースバルブ側に固定されたすべり 膜によりシールされ真空を破らずに電磁石および検出器箱をイオン ビームに対して -10~+150 度回転できる構造になっている。この すべり膜シール部は東京大学原子核研究所の散乱槽(17)(18)を参考に して設計されたが構造上,最も考慮を要した部分の一つである。す べり膜は、材質としてステンレス鋼、燐青銅を、厚みとしては 0.1~ 0.5mmの各種のものを実験的に比較検討し,最適な厚さのバネ用燐 青銅を選定した。

3.4 粒子シャッタおよびスリット

図19は粒子シャッタおよびスリットの外観を示したものであ る。粒子シャッタは電動機駆動の特殊な真空スルースバルブで兼用 し、制御室で開閉できるようにした。

スリットの調整範囲は高さ方向が 0~30 mm, 幅方向が 0~28 mm になっている。

#### 向 室

着する。半導体検出器は75 cm の焦点線上の任意の位置に最大39 される構造である。このため必要な立体角(明るさ)に対し経済的な 個まで並べられ、全長1mの焦点線の1/4の距離を真空中で電動に 電磁石となっている。偏向室は構造上電磁石のギャップを決めるデ より移動できる。したがって最低4個の検出器を並べ25 cm 移動す スタントピースの役割も果たしているのでその高さは高精度で仕上 ることで1mの全収れん線上の位置が測定できる。 げられ,7t以上の電磁力でも変形が問題とならないように設計さ それぞれの検出器の位置は外部のスケールで指示されるほか、リ れた。側壁には磁束計プローブのそう入口を設けてある。 ミットスイッチのストライカーを2cm 間隔で検出器箱内面に設置 3.6 検 出 器 箱 する方法により制御室で制御記録ができるようになっている。 検出器箱はまず試験用のものを製作し焦点線を測定して (図2)か 実際の使用に際してはまず半導体検出器で反応粒子スペクトルの ら設計した。図20にその構造を示す。側壁には真空引口が設けら だいたいの様子を調べ,それから乾板撮影する方法がとられるが, れ内部にはプレートホルダが装着されている。

			<u>B</u> -	-B断面図	11		
1	チ	ヤ	v	15	甲 ⑤ ソリッドカウンタホルダ	(9)	ロッド
2	フ	ラ	2	2	⑥ ターゲットホルダ部	(10)	ハンドル
3	7	ラ	$\sim$	9	⑦マドガラス	(11)	クランプネジ
4	膜				⑧ デテクターフランジ	(12)	目 盛 部
				図 18	ターゲッドチャッ	15	



図19 シャッタおよびスリット

プレートホルダは6面体で中心を軸として各面が収れん線上にく 3.5 偏 る。5面には原子核乾板を装着し残りの1面には半導体検出器を装 偏向室は非磁性ステンレス鋼製で上下ぶたはポールピースで兼用

④ ソリッドカウンター

(10)

目

盛

棒

論

A 1 Autorite 6 98 A (13) (15) (17) (16) Fal Ea <u>
E-F天視図</u>
③ソリッドカウンター取付状態図 3(2) (14) A~A矢視図 ① ディテクタボックス ⑦ カウンター取付金具 (13) ス ② プレートホルダ オクリネジ リークバルブ (14) ③ 乾 板 ④ オクリナット 20 マーカー作動ハンドル

(16) コネクタプレート

半導体検出器による測定のみでデータを得る場合もある。

収れん線に沿って数百個の検出器を 並べて測定を能率化しようとする方法 も考えられているが<sup>(7)</sup>これは数百個の 検出器とそれに対応する数の計数回路 が必要なので多額の費用を要する。本 器の方法は最低4個の検出器と計数回 路だけで比較的能率的に全範囲を測定 することができるので,予算に応じて 簡単に検出器の個数を増加しさらに能 率化することができる。

乾板による測定に際してエネルギー を決めるための較正用マークを乾板上 に 5 cm 間隔に刻印するマーカが設け られている。

3.7 電磁石励磁電源

3.7.1 制 御 方 式

本器は 0.1% の分解能を目標とし ているから励磁電源には表1に示 すようにそれより1けた良い精度が 要求される。安定度 10<sup>-4</sup> 程度の定 電流電源は従来,電子管回路を主体



 $|(\pm 1.5 \text{mV})|$ 

として構成されていた<sup>(1)</sup>が最近パワ ートランジスタがこれに代わるよう になった<sup>(10)(19)</sup>。小形で信頼性が高 く保守も簡単であるなどの理由から である。しかし,従来は半導体化さ れたものでも(1)基準電圧(Refer ence Voltage)源として水銀電池が 使用されており,この寿命が数個月 程度である。(2)初段誤差増幅器 としてはドリフトなどの点ですぐれ たチョッパー増幅器を使用していた が機械的振動部分を持つのでトラブ ルが多い。などが信頼性,保守上の

問題として残っていた。

本器では 図 21 に示すようにパワ ートランジスタの直列制御方式と しほとんど全素子を半導体で構成 し,基準電圧回路には電池を使用し ないで日立製温度補償形ツエナーダ

イオード TRR-9 を使用した。誤差増幅器はチョッパ を使用しない直流差動増幅器になっている。これはチ ョッパ増幅器に比べて信頼性,保守の点ですぐれてい るほか,応答速度が非常に速いので電流リップルまで も制御できて平滑回路が簡単になるなどの利点があ る。

電流可変範囲が5~50A (対応する出力電圧6~60V) と広いので 2 SB 332×12 の許容コレクタ損失内で制



御しきれない。そのためエミッタ・コレクタ間の電圧 を6V一定となるようサーボモータを回転させてしゅ う動変圧器を調整する。この積分制御系の追加により トランジスタを保護するとともに大きい外乱はこのサ ーボ系で補償して制御系の性能向上に役だたせてい る。

図22 電流ドリフト

東北大学納広範囲磁気反応粒子分析器



4. 結 言

広範囲磁気粒子分析器は国内ではまだ1~2台を数えるに過ぎな いが今後各所で建設されるであろう。この製作経験はメーカーとし て貴重であった。特に非対称性の大きい電磁石の均一度調整法,プ レートホルダ,低ドリフト(10<sup>-5</sup>~10<sup>-6</sup>/h)の定電流電源などで成果 があったと思う。分解能などの最終性能は東北大学において現在調 整中であるが,ほぼ予想どおりの性能が確認されている<sup>(20)</sup>。しか しこの種装置の製作にはまだ幾多の技術的問題が残されているが, 本文が今後類似装置を建設する場合の参考になれば幸いである。

257



応答時間: 14 ms 過渡偏差: 22 mV (1.3×10<sup>-3</sup>)

図24 定電流制御系の応答時間

### 3.7.2 定電流制御系の特性測定

電流ドリフトの測定結果を 図 22 に示す。 起動後十分な時間を 経て落着いてからは 1×10<sup>-5</sup>/h 以下の低ドリフトである。

測定精度 10<sup>-6</sup> 程度と言われる NMR 式磁束計で磁界のドリフ トを測定した結果を図 23 に示す。 スイッチ投入後 2 h でほぼ完 全に安定し磁界のドリフトは 1×10<sup>-6</sup>/h 程度になっている。電源 電圧を 5% 急変させたときの制御系の応答を 図 24 に示す。 応答 時間は約 14 ms である。電流の変化分がもっと大きい外乱がはい るとサーボモータ系の時定数がきいて応答時間を引き延ばす傾向 にある。

電源電圧,負荷抵抗などの外乱がはいったときの定常偏差はほ とんど零である。

### 3.8 真空排気装置

排気系の構成を図25に示す。到達真空度はトラップを使用しないで1×10<sup>-5</sup> mmHg である。 安全装置としては油拡散ポンプ冷却水の断水警報リレーを設け、 停電や油回転ポンプ停止事故などのときはまず拡散ポンプ大気側の

最後に本器の設計製作に当たり,貴重なご助言とご指導をいただ きデータの一部をご提供願った東北大学理学部森田教授,藤平助教 授および励磁電源の製作を担当された日立電子株式会社の高橋氏ほ か,日立製作所笠原課長ほか関係者諸氏に厚くお礼申し上げる。

### 参考文献

(1)	たとえば,加沢ほか:日立評論 44,982 (昭 37-7)	
(2)	たとえば,東大核研報告: INS-TL-27 (May. 1956)	
(3)	W. W. Buechner et al: Phys. Rev. 101 188 (Jan. 1956	5)
(4)	C. P. Browne et al: R. S. I. 27, 899 (Nov. 1956)	
(5)	H. A. Enge: R. S. I. 29, 885 (1958)	
(6)	末松ほか: 日立評論 原子力論文集 101 (昭 37-8)	
(7)	東大核研報告: INS-TL-57	
(8)	K. T. BainBridge: Experimental Nuclear Physics V	ol. 1
	578 (1953)	
(9)	L. J. Lasllet: MURA-567 (Apr. 1960)	
(10)	池上ほか: 日立評論 46, 623 (昭 39-4)	
(11)	松田: 物理学会誌 14, 168 (昭 34-4)	
(12)	柿内ほか: 物理学会誌 14, 172 (昭 34-4)	
(13)	伊藤: 物理学会誌 14, 175 (昭 34-4)	
(14)	Rose: Phys. Rev. 53, 715 (1938)	
(15)	H. Kumagai et al: INSJ-2 (1957)	
(16)	"熊谷: 物理学会誌 14, 162 (昭 34-4)	
(17)	真田ほか: 原子核研究 7, 334 (1962-9)	

(18) 松田ほか: 東大核研報告 INS-TL-67 (1963-9)

(19) たとえば, R. L. Garwin et al: RSI 30, 105 (1959)
(20) 森田,藤平,加沢ほか: 物理学会第19回年会予稿集 No.2 33 (1964)