

JAERI-Research

97-063



磁場を用いた高速中性子エネルギー  
スペクトロメータの実現性の検討

1997年9月

山岸秀志・荒 克之

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 株原子力資料サービス

磁場を用いた高速中性子エネルギースペクトロメータの実現性の検討

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部  
山岸 秀志・荒 克之

(1997年8月26日受理)

エネルギー計測レンジが3桁で、計測可能なエネルギー範囲が8桁以上を有する高速中性子エネルギースペクトロメータ（NES）を開発するため、磁場を利用したNESの可能性について検討した。これは中性子による反跳陽子を利用したスペクトロメータの一つで、反跳陽子ラジエータ、磁場及びスクリーンによって構成される。磁場に入射した荷電粒子（反跳陽子）は飛行速度、即ちエネルギーにより異なった軌道偏向を受け、荷電粒子検出用のスクリーンに到達する。それぞれの荷電粒子のエネルギーはスクリーン上の衝突位置によって計測される。

ここでは、NES構造の最適化設計について述べ、最適設計されたNESは3桁のエネルギー計測レンジを有し、±9%以下のエネルギー計測誤差を与えることを示した。また、磁場強度を選定することによって、0.1eV～100MeVまでの9桁のエネルギーをカバーするNESの実現の可能性を示した。

**Feasibility Study of Fast Neutron Energy Spectrometer  
Using Magnetic Field**

Hideshi YAMAGISHI and Katsuyuki ARA

Department of Reactor Engineering  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 26, 1997)

A feasibility study of a fast neutron energy spectrometer (NES) using magnetic field was performed for development of a spectrometer having a measuring range of 3 decades and a covered energy range of 8 decades. The NES that is a kind of proton recoil spectrometer consists of a proton radiator, a magnet and a screen to detect protons. The pass of each charge particle flying into the magnetic field is deflected with a certain angle depending on the velocity of the particle, and it reaches the screen of charged particle detection after passing through the magnetic field. The energy of the particle is measured from the position on the screen at which the particle collided with.

In this paper, optimization of the magnet geometry and the magnetic field intensity of the NES are discussed. The NES that is designed with the optimized geometry provides the measuring range of 3 decades with an energy measuring error of less than  $\pm 9\%$ . A neutron energy range of 9 decades from 0.1 [eV] to 100 [MeV] is covered by adjusting the magnetic flux density.

**Keywords:** Fast Neutrons, Spectrometers, Neutron Energy, Proton Recoil, Neutron Detectors, Magnetic Field, Magnet, Charge Particles, Neutron

## 目 次

1. 序 論 .....	1
2. 磁場を用いたエネルギースペクトロメータの作動原理 .....	2
3. 磁場断面形状及びスクリーン配置の違いによる特性の比較 .....	4
3.1 磁場断面を矩形状にして、垂直スクリーンを配置 .....	4
3.2 磁場断面を円形状にして、角度を付けてスクリーンを配置 .....	6
3.3 磁場断面を放物線形状にして、角度を付けてスクリーンを配置 .....	9
3.4 磁場強度とエネルギー計測レンジの関係 .....	13
4. 計算結果の評価 .....	15
5. 結 論 .....	16
謝 辞 .....	16
参考文献 .....	17

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Principle of the Energy Spectrometer Using Magnetic Field.....	2
3. Comparison among Performances Caused by Changing Magnetic Field and Positioning of Screen .....	4
3.1 Magnetic Field with a Cross Section of Rectangular Shape and a Right Angled Screen .....	4
3.2 Magnetic Field with a Cross Section of Circular Shape and an Angled Screen .....	6
3.3 Magnetic Field with a Cross Section of Parabola-curve Shape and an Angled Screen .....	9
3.4 Relation between Magnetic Flux Density and Measuring Range .....	13
4. Valuation of Calculation Results.....	15
5. Conclusion .....	16
Acknowledgment .....	16
References .....	17

## 1. 序 論

これまでに高速中性子エネルギースペクトロメータに関する研究は数多くなされており、それらの代表的な計測方法については、①反跳陽子の飛行時間計測法による計測装置の開発と実験結果<sup>1), 2), 3), 4)</sup>、②陽子反跳テレスコープを用いた測定結果<sup>5)</sup>、③比例計数管及びシンチレーションカウンターを用いた計測装置の開発<sup>6), 7)</sup>として報告されている。これらスペクトロメータの多くのものにおいては、一つの計測システムでカバー可能な中性子エネルギーレンジは1桁または2桁程度である。計測レンジが2桁以上で、±10%以下の高いエネルギー分解能を有するスペクトロメータ<sup>2)</sup>では、計測装置の大きさが十数メートルになるものもある。

そこで、シンプルな構造、且つ比較的コンパクトな装置で3桁以上の広いエネルギー計測レンジを有する高速中性子エネルギースペクトロメータ(NES)の開発を目指し、反跳陽子を磁場で偏向する原理に基づくNESの実現性について検討した。目標としたNESの性能は、エネルギー計測レンジが3桁以上、全計測範囲においてエネルギー計測誤差が±10%以下とした。また、装置のレンジ設定変更によりカバー可能なエネルギーを1eV～100MeVの8桁以上とした。このNESの開発により、研究用原子炉における中性子照射場及び加速器等から発生される高エネルギー、高密度中性子による中性子場のエネルギースペクトルを現場で簡便に測定できる計測装置を実現するものである。

検討したNESは、高速中性子によって発生した反跳陽子を利用するスペクトロメータの一種であり、反跳陽子を磁場で偏向して、その変位からエネルギースペクトルを計測する原理に基づくものである。このため、NESは高速中性子により反跳陽子を発生させるラジエータ、磁場を与える電磁石、偏向された反跳陽子の変位を計測するためのスクリーン及びこれらを収納する真空チャンバから構成される。ここでは、反跳陽子を偏向する磁場断面の形状と磁束密度及びスクリーンの配置方法について検討を行った。そして、それぞれの条件の下で、最適な構造設計を行うと共にエネルギー計測レンジとエネルギー計測誤差を計算し、比較した。解析結果から、目標としたNESの実現性について評価した。

## 2. 磁場を用いたエネルギースペクトロメータの作動原理

検討したNESは、ラジエータに入射した中性子による反跳陽子を軌道偏向用の磁場に導き、反跳陽子のエネルギーに依存した軌道変位から中性子のエネルギースペクトルを計測する原理に基づくものである。Fig.2.1に、収納容器である真空チャンバ及びラジエータを除いたNESの作動原理図を示す。NESは、真空チャンバに配置されたラジエータ、電磁石及びスクリーンから構成される。ラジエータから叩き出された反跳陽子は、入射中性子のエネルギーに比例した運動エネルギーをもって、磁場に導かれる。磁場の強さを適切に設計すると、陽子のエネルギー即ち入射速度に依存した軌道角度が得られる。従って、スクリーン上の陽子衝突位置 $y_s$ を計測することにより、陽子のエネルギー即ち中性子のエネルギースペクトルが測定可能である。陽子衝突位置 $y_s$ と陽子速度の関係は下式で表される。

$$y_s = r + \frac{w \cdot d_s - r^2 + w^2}{\sqrt{r^2 - w^2}} \quad \cdots (2.1)$$

$$r = \frac{mv}{qB} \quad \cdots (2.2)$$

ここで、 $r[m]$ は、速度 $v[m/s]$ で飛行する質量 $m[kg]$ 、電荷 $q[C]$ の荷電粒子が磁界 $B[T]$ で偏向されたときの曲率半径である。 $w[m]$ は磁場断面の幅である。また、 $v$ と荷電粒子の運動エネルギー $E$ の関係は、

$$v = c \sqrt{1 - \left( \frac{mc^2}{E + mc^2} \right)^2} \quad \cdots (2.3)$$

ここで $Mc^2$ は陽子の静止エネルギーである。これらの関係は非相対性理論の式では

$$v = c \sqrt{\frac{2E}{mc^2}} \quad \cdots (2.4)$$

で表される。Fig.2.2に示すように、非相対性理論の式を用いて計算した場合の陽子

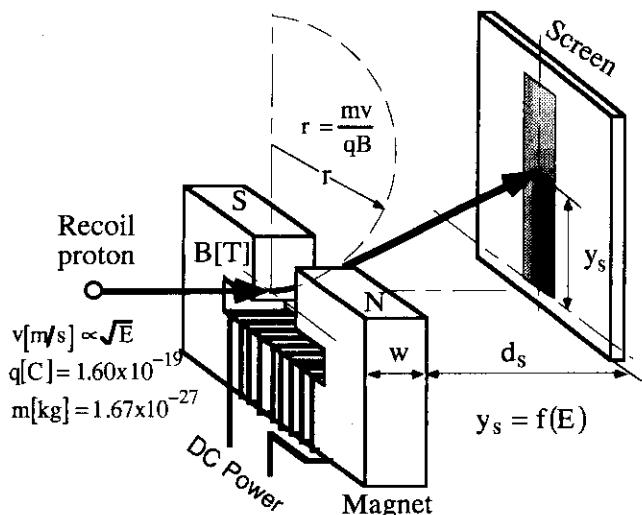


Fig. 2.1 Principle of neutron energy spectrometer consisting of a magnet and a screen

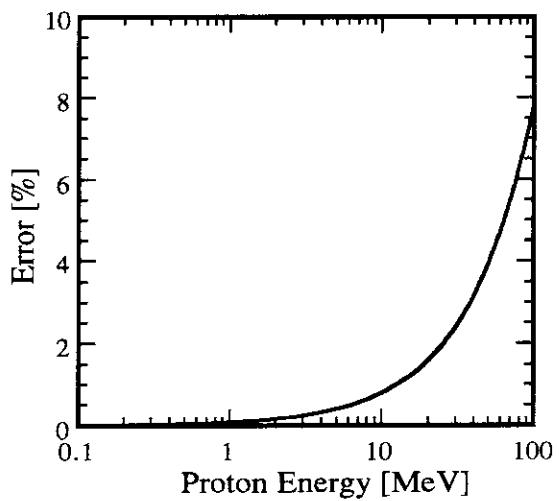


Fig. 2.2 Error in calculated velocity of proton using the theory of non-relativity

速度の誤差は、陽子の運動エネルギーが 10MeV 以下においては 1% 以下である。磁場で偏向される曲率半径  $r$  は、2.2 式が示すように、陽子速度に比例する。また、速度  $v$  は、2.4 式からエネルギーの  $1/2$  乗に比例する。このことから、磁場型 NES は比較的短いスクリーン長で広範囲のエネルギーを計測可能であることがわかる。

この検出方式では、入射荷電粒子の磁力線に対する垂直方向の広がりは、そのエネルギー計測精度を決定する。エネルギー計測レンジを広く設定するほど、この入射荷電粒子の広がりによる影響は顕著になる。従って、磁場に入射する荷電粒子は充分収束されることが必要であるが、入射窓口の大きさは検出感度を左右するため、本検討においては入射窓口として幅 10 × 高さ 5mm を採用した。

### 3. 磁場断面形状及びスクリーン配置の違いによる特性の比較

#### 3.1 磁場断面を矩形状にして、垂直にスクリーンを配置

Fig.3.1 に示すような磁場断面形状が矩形で、スクリーンを陽子入射方向に対して垂直、即ち  $\theta=0^\circ$  に配置した場合のスクリーン上距離  $y_s$  と陽子エネルギーの関係を計算した。陽子の入射位置を  $y$  軸上の  $c_1=-2.5\text{mm}$ 、 $c_2=0\text{mm}$ 、 $c_3=2.5\text{mm}$  で比較した。計算条件はマグネット幅  $w=40\text{mm}$ 、磁束密度  $B=0.1[\text{T}]$ 、磁場からスクリーンまでの距離  $d_s=300\text{mm}$  とした。これらの条件は陽子のエネルギー範囲をおおよそ  $0.001\sim1[\text{MeV}]$  になるように選んだ。

Fig.3.2 に計算結果を示す。スクリーン上のエネルギー scales は、 $y_s$  が 0 に近

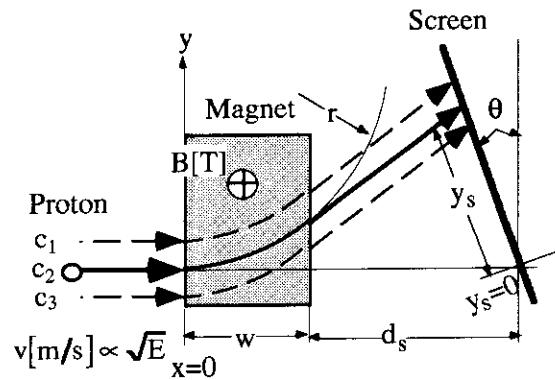


Fig. 3.1 Schematic diagram of NES consisting of a magnet with a cross section of rectangular shape and an angled screen

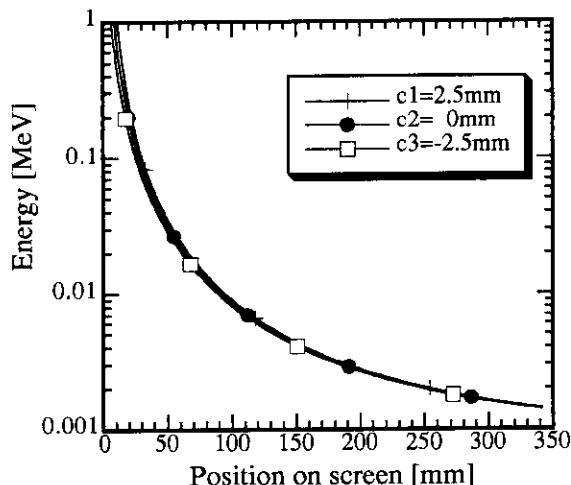


Fig.3.2 Energy scales on the screen in the NES consisting of a magnet with a cross section of rectangular shape and a right angled screen

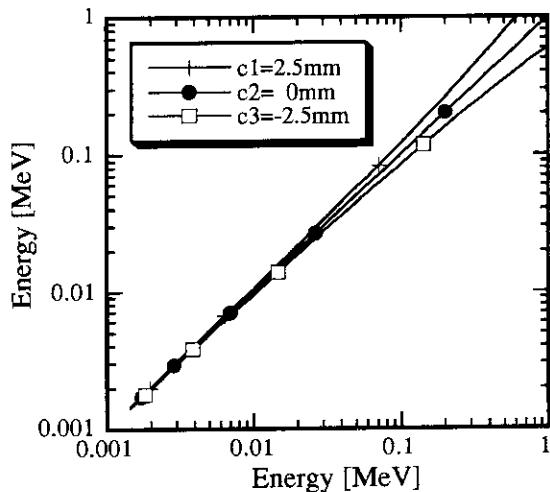


Fig.3.3 Indication accuracy of the NES consisting of a magnet with a cross section of rectangular shape and a right angled screen

づくに従って、急激にエネルギー指示値が高くなること、スクリーン位置が  $300\text{mm}$  以上では殆どエネルギー値は変わらないことを示している。また、入射位置のずれによる特性曲線の違いは、グラフ上では顕著に現れていない。

Fig.3.3 は磁場に入射する陽子の位置ずれから生じる NES スクリーン上のエネルギー誤差幅を計算した結果である。この計算では、陽子入射位置がゼロ、Fig.3.1 で示す  $c_2$  位置の場合を基準にして、入射位置が  $c_1$  又は  $c_3$  にずれた場合のエネルギー計測誤差幅を評価している。入射位置のずれはスクリーン上にそのまま現れる結果、エネルギーが大きく

なるに従って、エネルギーの計測誤差幅も急激に増大することを示している。

Fig.3.4 は陽子の入射位置ずれから生じるNESのエネルギー誤差幅をスクリーン上距離を基準にして示したものである。計算結果からエネルギー計測誤差は、スクリーン上距離が 50 mm から下で急激に増大することを示している。

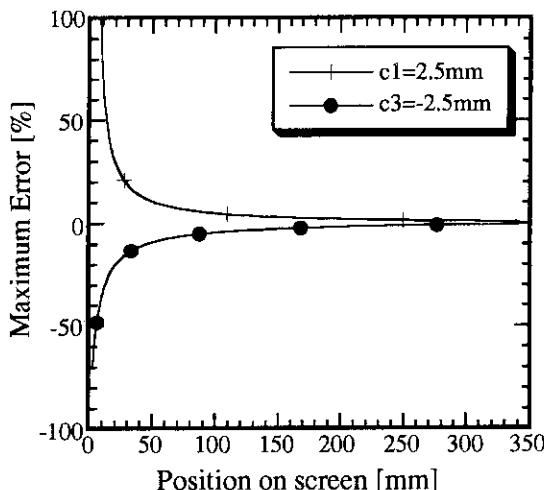


Fig.3.4 Indication errors of the NES consisting of a magnet with a cross section of rectangular shape and a right angled screen

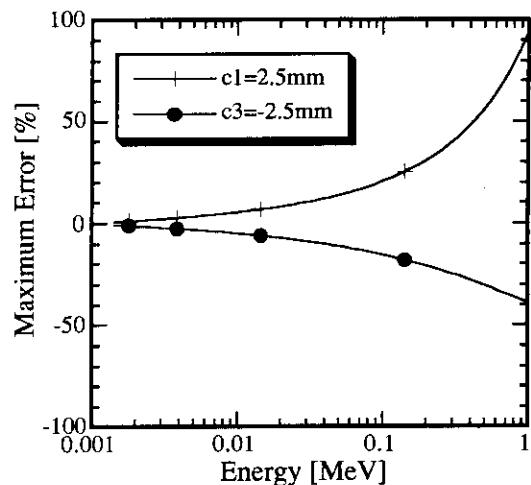


Fig.3.5 Indication errors of the NES consisting of a magnet with a cross section of rectangular section and a right angled screen

Fig.3.5 は陽子の入射位置ずれから生じる誤差幅を計測エネルギーを基準にして示したものである。計算結果からエネルギー計測誤差は、計測エネルギーの下限値で極小となり、エネルギーが高くなるに従って急激に増大することを示している。

Fig.3.5.1 はスクリーンの角度  $\theta$  を  $60^\circ$  にした場合の最大の計測誤差幅を角度  $\theta$  が  $0^\circ$  の場合と比較した図である。この計算結果では、 $\theta=60^\circ$  の場合の誤差の方が少し大きくなっていますが、角度を付けても計測誤差に改善がないことを示している。

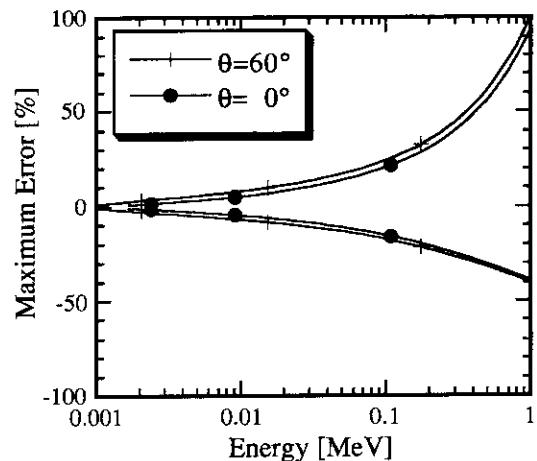


Fig.3.5.1 Comparision of measuring errors between screen angles

### 3.2 磁場断面を円形状にして、角度を付けてスクリーンを配置

Fig.3.6に示すように、磁場断面を半径 $L_m$ の円形に設計し、スクリーンに角度 $\theta$ を付けた場合のNESの特性について検討した。このような設計条件では、円形磁場断面は3.1式で、y軸方向 $c_i$ 点で水平に入射した反跳陽子の磁場内の軌道は3.2式で表される。但し、 $a_2$ 及び $b_2$ は反跳陽子が磁場に入射した位置の座標点( $a_2, b_2$ )である。 $r$ は磁場で偏向される反跳陽子の軌道半径である。

$$x^2 + y^2 = L_m^2 \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

$$(x - a_2)^2 + (y - b_2)^2 = r^2 \quad \dots \dots \dots (3.2)$$

$$\therefore r = \frac{mv}{qB}, \quad a_2 = -\sqrt{L_m^2 - c_i^2}, \quad b_2 = c_i + r$$

ここで、 $m$ 、 $v$ 及び $q$ は反跳陽子の質量、速度及び電荷で、 $B$ は磁場の磁束密度である。

磁場から脱出した反跳陽子の軌道を3.3式で表すと、 $a_3$ 及び $b_3$ は3.4及び3.5式で与えられる。

$$y = a_3 x + b_3 \quad \dots \dots \dots (3.3)$$

$$a_3 = \frac{d_o + \sqrt{L_m^2 - c_i^2}}{\sqrt{r^2 - (d_o + \sqrt{L_m^2 - c_i^2})^2}} \quad \dots \dots \dots (3.4)$$

$$b_3 = r + c_i - \sqrt{r^2 - (d_o + \sqrt{L_m^2 - c_i^2})^2} - \frac{d_o + \sqrt{L_m^2 - c_i^2}}{\sqrt{r^2 - (d_o + \sqrt{L_m^2 - c_i^2})^2}} d_o \quad \dots \dots \dots (3.5)$$

ここで $d_o$ は反跳陽子が磁場から脱出する点、即ち、偏向された陽子の軌道と円形磁場外輪との交点をx軸距離で表した値である。

$$d_o = \frac{a_2^2 b_2^2 + b_2^2 G + a_2 \sqrt{-b_2^2 (a_2^4 + b_2^4 - 2b_2^2 M + W^2 + 2a_2^2 Z)}}{2b_2(a_2^2 + b_2^2)}$$

但し、 $G$ 、 $M$ 、 $Z$ 及び $W$ はそれぞれ下式のように表すものとする。

$$G = (b_2^2 - r^2 + L_m^2), \quad M = (r^2 + L_m^2), \quad Z = (b_2^2 - r^2 - L_m^2), \quad W = (r^2 - L_m^2)$$

角度 $\theta$ を付けて配置されたスクリーンは3.6式で表される。

$$y = -a_4 x + b_4 \quad \dots \dots \dots (3.6)$$

但し、 $a_4$ 及び $b_4$ は、 $a_4 = 1/\tan\theta$ 及び $b_4 = a_4(L_m + d_s)$ である。従って、反跳陽子とスクリーンとの衝突点 $y_s$ は3.3と3.6式から導かれ、3.7式で与えられる。

$$y_s = \frac{a_3(L_m + d_s) + b_3}{a_3 \sin\theta + \cos\theta} \quad \dots \dots \dots (3.7)$$

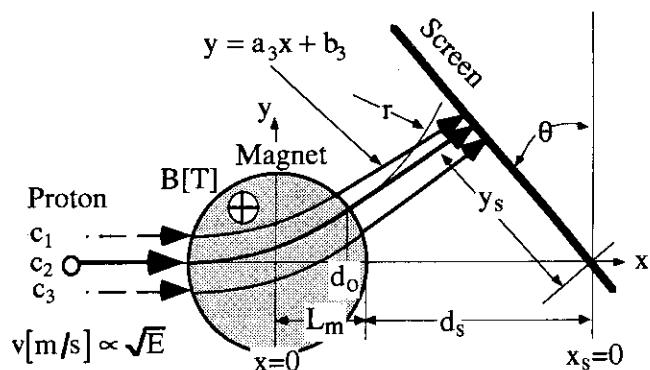


Fig. 3.6 Schematic diagram of NES consisting of a magnet with a cross section of circular shape and an angled screen

前記の式を用い、反跳陽子の入射位置3点について、スクリーン上のエネルギーを計算し、Fig.3.7に比較して示した。反跳陽子の入射位置はFig.3.6に示すy軸スケールの値で0、-2.5及び-5mmとした。

計算条件は、円形磁場断面の半径  $L_m=40\text{mm}$ 、磁束密度  $B=0.1[\text{T}]$ 、磁場断面中心からスクリーンのゼロ点までの距離  $(L_m+d_s)=390\text{mm}$  及びスクリーン角度  $\theta=45^\circ$  である。この計算結果から、スクリーンの30~460mmの範囲で反跳陽子エネルギーがおよそ0.001から1MeVの約3桁を計測可能であることがわかる。

Fig.3.8は反跳陽子がNESに設定された中心(y軸で-2.5mm位置)に入射した場合と、それぞれ上下2.5mmずれた場合のスクリーン上におけるエネルギーの最大の計測誤差幅を計算した結果である。上記のようなNESの設定条件では、エネルギーが0.01MeV近傍が最も誤差幅が小さく、エネルギーが高くなるに従って、誤差幅が増大することを示している。

Fig.3.9はスクリーン上各点で誤差幅がどのように変わるかを計算した結果である。スクリーン上距離が200mmの位置で、エネルギー計測誤差はほぼゼロになり、これよりスクリーン上距離が大きくなるに従って徐々に誤差幅が大きくなること、そして、距離が50mm以下では急激に誤差幅が増大することを表している。

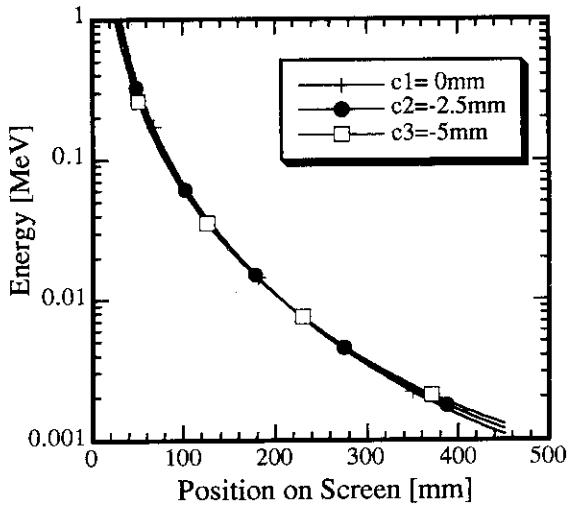


Fig.3.7 Energy scales on the screen in the NES consisting of a magnet with a cross section of circular shape and an angled screen

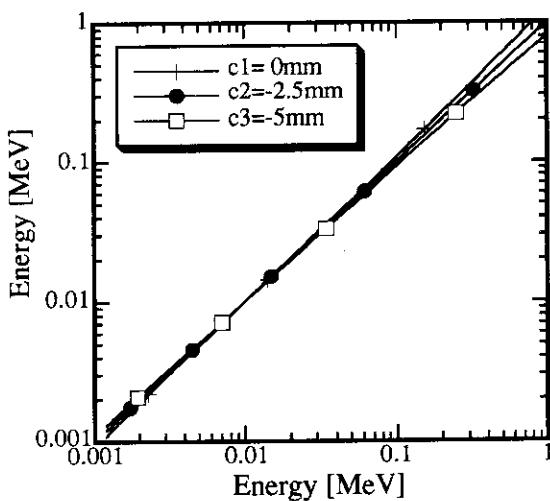


Fig.3.8 Indication accuracy of the NES consisting of a magnet with a cross section of circular section and an angled screen

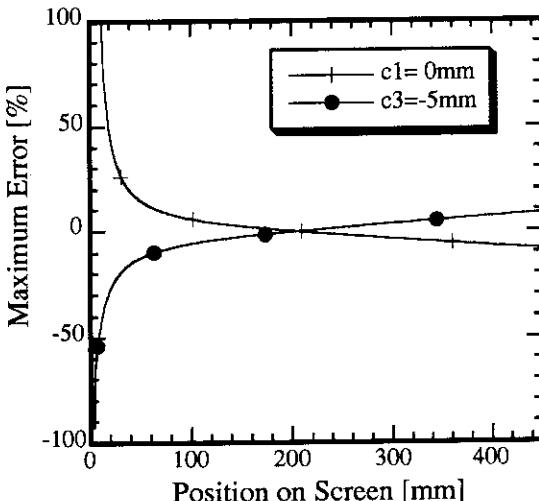


Fig.3.9 Indication errors of the NES consisting of a magnet with a cross section of circular shape and an angled screen

Fig.3.10 は計測エネルギーによる誤差幅の変化を計算した結果である。計算結果では、計測誤差幅はエネルギーが 0.001MeV で±10%、0.01MeV 近傍においてはほぼゼロ、そして 1MeV では-20%~25%程度になること示した。

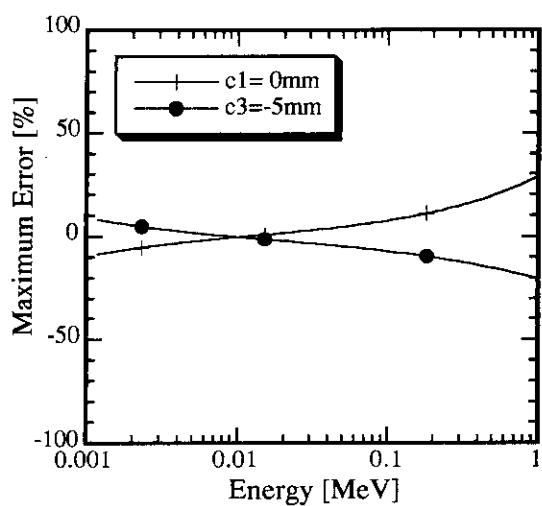


Fig.3.10 Indication errors of the NES consisting of a magnet with a cross section of circular shape and an angled screen

### 3.3 磁場断面を放物線形状にして、角度を付けてスクリーンを配置

Fig.3.11 に示すように、磁場断面を  $y = -(4a_p)^{-1}x^2$  で表される放物線形状(ここでは  $y = -a_1x^2 + b_1$  の式を用い、 $a_1 = 1/4a_p$  で表した)にした場合の NES の特性について調べた。スクリーンには角度  $\theta$  を付けた。このような設計条件では、磁場断面形状は 3.8 式で、 $y$  軸方向  $c_i$  点で水平に入射した反跳陽子の磁場内の軌道は 3.9 式で表される。但し、 $b_1$  は磁場断面の頂点を  $y$  軸上の距離で表した値である。

$$y = -a_1x^2 + b_1 \quad \dots \dots \dots (3.8)$$

$$(x - a_2)^2 + (y - b_2)^2 = r^2 \quad \dots \dots \dots (3.9)$$

上式のそれぞれの係数は右式で表される。

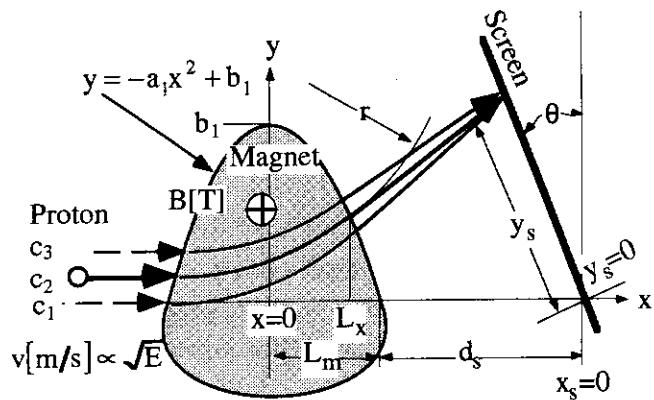


Fig. 3.11 Schematic diagram of the NES consisting of a magnet with a cross section of parabola-shape and an angled screen

$$b_1 = a_1 L_m^2, \quad a_2 = -\sqrt{L_m^2 - \frac{c_i}{a_1}}$$

$$b_2 = r + c_i, \quad r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$$

入射反跳陽子のエネルギーに対して、磁場の大きさ及び磁束密度を適切に設計すると、Fig.3.11 に示すように反跳陽子は磁場で偏向された後、脱出し、スクリーン方向に飛行する。磁場を脱出した後の反跳陽子の軌道は 3.10 式で表される。

$$y = a_3 x + b_3 \quad \dots \dots \dots (3.10)$$

$$a_3 = \frac{L_x - a_2}{\sqrt{r^2 - (L_x - a_2)^2}}$$

$$b_3 = -a_1 L_x^2 - a_3 L_x + b_1$$

上式で各係数は右式で表される。

ここで、 $L_x$  は反跳陽子が磁場を脱出する点の  $x$  軸距離であり、下記のようになる。

$$L_x = -\frac{1}{2} \sqrt{-\frac{2k_1}{3a_1^2} + \left(\frac{k_8}{32a_1^6}\right)^{1/3}} + k_9 \\ + \frac{1}{2} \sqrt{-\frac{4k_1}{3a_1^2} - \frac{k_7}{3a_1^4} \left(\frac{2a_1^6}{k_8}\right)^{1/3} - \left(\frac{k_8}{32a_1^6}\right)^{1/3} - \frac{4a_2}{a_1^2 \sqrt{-\frac{2k_1}{3a_1^2} + \left(\frac{k_8}{32a_1^6}\right)^{1/3}} + k_9}}$$

但し、上式中の  $k_1$ 、 $k_7$ 、 $k_8$  及び  $k_9$  は  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $a_2$ 、 $b_2$  及び  $r$  の関数で、下式で表される。

$$k_1 = 1 + 2a_1(b_2 - b_1), \quad k_2 = a_2^2 + (b_2 - b_1)^2 - r^2, \quad k_3 = (k_1^2 + 12a_1^2 k_2)^3$$

$$k_4 = (108a_2^2 a_1^2 + 2k_1^3 - 72a_1^2 k_1 k_2), \quad k_5 = k_4^2, \quad k_6 = \sqrt{-4k_3 + k_5}$$

$$k_7 = k_1^2 + 12a_1^2 k_2, \quad k_8 = k_4 + k_6, \quad k_9 = \frac{k_7}{3a_1^4} \left(\frac{2a_1^6}{k_8}\right)^{1/3}$$

スクリーンの配置を磁場断面が円形の時と同様に角度  $\theta$  を付けると、スクリーンは3.11式で表される。

$$y = -a_4 x + b_4 \quad \dots \dots \dots (3.11)$$

但し、各係数は下記のように与えられる。

$$a_4 = 1/\tan \theta, \quad b_4 = a_4(L_m + d_s)$$

反跳陽子のスクリーン上の衝突点の位置  $y_s$  は、3.10 と 3.11 式から導かれ、3.12 式で与えられる。

$$y_s = \frac{a_3(L_m + d_s) + b_3}{a_3 \sin \theta + \cos \theta} \quad \dots \dots \dots (3.12)$$

NES の最適設計を行うため、反跳陽子エネルギーの計測範囲を 0.001~1MeV に設定して、設計条件を計算した。最初の計算では、スクリーンの角度  $\theta$  を変えた場合に、最大の計測誤差及び必要なスクリーン長さがどのように変化するかを調べた。

この計算では、3.8 式で示す磁場条件を  $a_1=25/4 \text{ m}^{-1}$ 、 $b_1=0.04 \text{ m}$ 、 $L_m=0.08 \text{ m}$  及び磁束密度  $B=0.06 \text{ [T]}$  とし、また、3.11 式で示すスクリーンの配置条件  $d_s$  を 0.790m に固定して、スクリーン角度  $\theta$  を変えた場合に、最大の計測誤差及び必要なスクリーン長がどのように変化するかを計算した。

Fig.3.12 に計算結果を示す。

計算結果は、スクリーン角度  $\theta$  が  $0^\circ$  から  $60^\circ$  程度までは、計測誤差の変化は極めて小さいが、しかし、エネルギーの低い領域、例えば 0.001MeV においては、角度  $\theta$  が大きくなるに従って、スクリーン長が急激に短くなることを示した。そして、角度  $\theta$  が  $70^\circ$  以上においては、1MeV のような高エネルギーでの計測誤差は少々増加するが、0.1MeV 以下の計測誤差は減少することを示した。角度  $\theta$  が  $60^\circ$

以上では、スクリーン長は全

てのエネルギー領域において増加傾向を示した。但し、0.001~1MeV の 3 桁のエネルギーを計測するのに必要なスクリーンの全長は、Fig.3.12 に示す 0.001MeV の時のスクリーン長と 1MeV の時のスクリーン長の差である。計算結果が示すように、計測誤差及び必要スクリーン長の両条件からスクリーン角度  $\theta$  は  $80^\circ$  程度が適当であることがわかった。この条件では、0.001~1MeV の 3 桁のエネルギーを計測するのに必要なスクリーン全長は約 650mm であり、そして、最大の計測誤差は  $\pm 9\%$  以下であった。

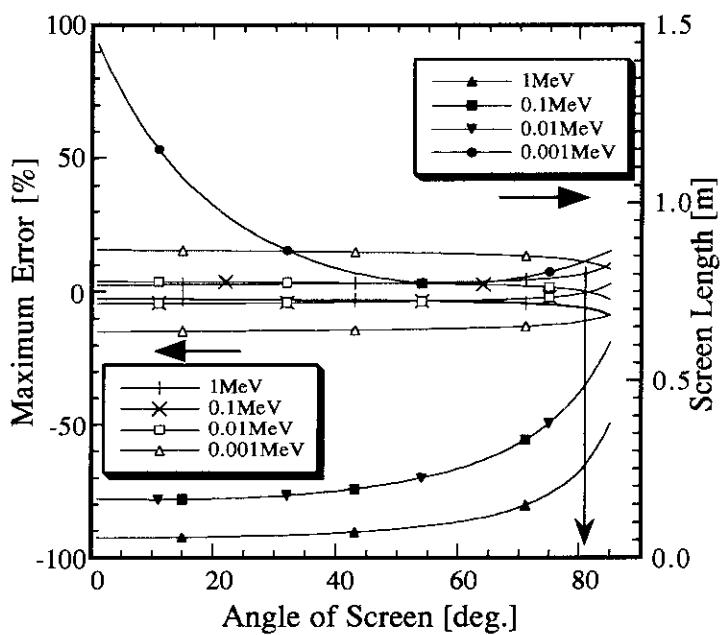


Fig.3.12 Indication errors and screen lengths depended on the angle of screen in the NES having a magnet with a cross section of parabola shape

設計条件決定のための2番目の計算では、反跳陽子を偏向する磁場断面の形状により最大の計測誤差がどのように変化するかを調べた。磁場断面の形状は  $y = -a_1 x^2 + b_1$  で表される放物線形状であるが、計算では磁場断面中央の半幅  $L_m$  と磁場断面高さ  $b_1$  の比  $L_m/b_1$  を変えた場合の最大計測誤差の変化を評価した。計算では、 $L_m$  を 80mm に固定し、磁場断面高さ  $b_1$  を変えて計測誤差の変化を調べた。その他の計算条件は、束密度  $B=0.06$  [T]、スクリーンの配置位置  $d_s$  を 0.790m とした。スクリーン角度  $\theta$  は Fig.3.12 の計算結果から  $80.2^\circ$  とした。計算結果を Fig.3.13 に示す。この図では横軸を磁場断面の横幅と高さの比率( $L_m/b_1$ )で示している。計算では、横幅を固定した条件としているため、この比率が大きくなるに従って、磁場断面はより扁平な形状となる。計算結果から、0.001~1MeV の3桁のエネルギーを計測するには、 $L_m/b_1$  の比率が 1.5 程度が最も計測誤差幅が小さいことがわかった。

以上の計算結果から最適設計条件として、磁場条件を  $a_1=25/4$   $m^{-1}$ 、 $b_1=0.08/1.5$  m、 $L_m=0.08$  m 及び磁束密度  $B=0.06$  [T]とした。また、スクリーン配置条件の角度と距離をそれぞれ  $\theta=80.2^\circ$  及び  $d_s=0.790$  m とした。上記の設計条件の下で、反跳陽子の入射位置を Fig.3.11 の y 軸スケールでそれぞれ 0, 2.5 及び 5mm の3点であるとして、スクリーン上のエネルギースケールを計算評価した。Fig.3.14 に計算結果を比較して示した。この計算結果から、0.001から 1MeV の約3桁のエネルギーの反跳陽子を、スクリーン上距離 250~860mm の範囲で計測可能であることがわかる。入射位置がずれてもエネルギー指示値の変動が小さいことを示している。

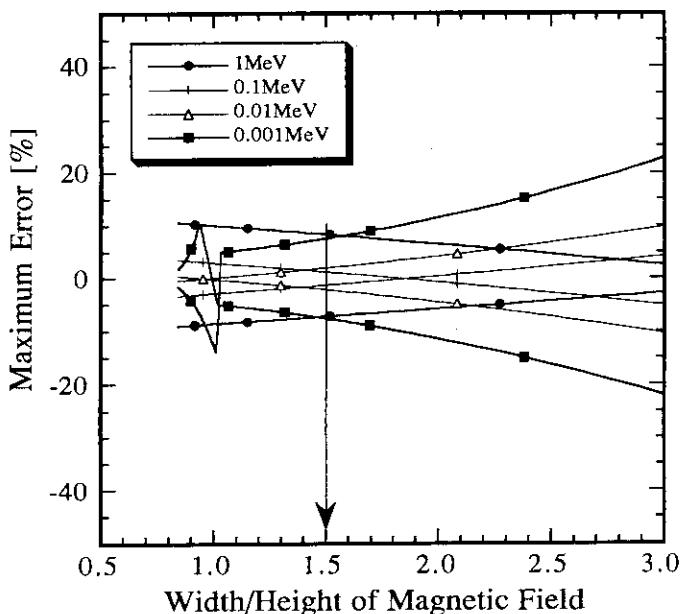


Fig.3.13 Indication errors depended on the ratio of half width and height at center of the cross section of magnetic field

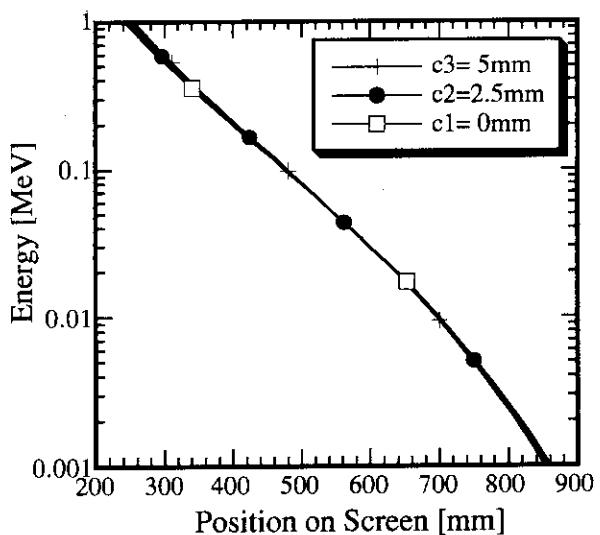


Fig.3.14 Energy scales on the screen in the NES consisting of a magnet with a parabola shape and an angled screen

– 11 –

Fig.3.15 は、計測エネルギーの違いによって、計測精度がどのようになるかを計算評価した結果である。入射位置が基準点から  $\pm 2.5\text{mm}$  ずれた場合でも、 $0.001\sim 1\text{MeV}$  の全計測範囲でエネルギーのばらつき幅は非常に小さいことを示している。この結果から、最適設計を行うことにより NES は、 $0.001\sim 1\text{MeV}$  の 3 枝のエネルギー範囲において、良好なエネルギー直線性を示すことがわかった。

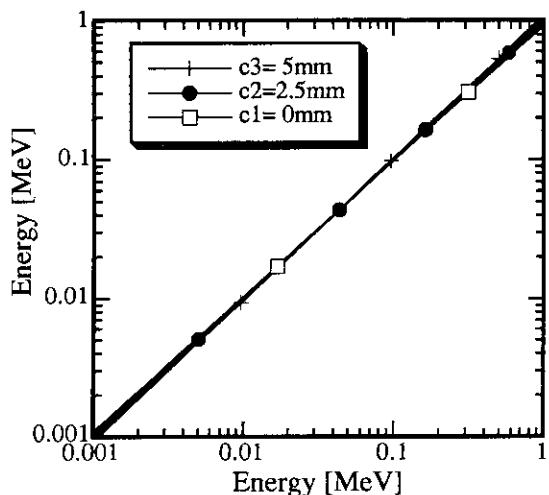


Fig.3.15 Indication accuracy of the NES consisting of a magnet of parabola shape and an angled screen

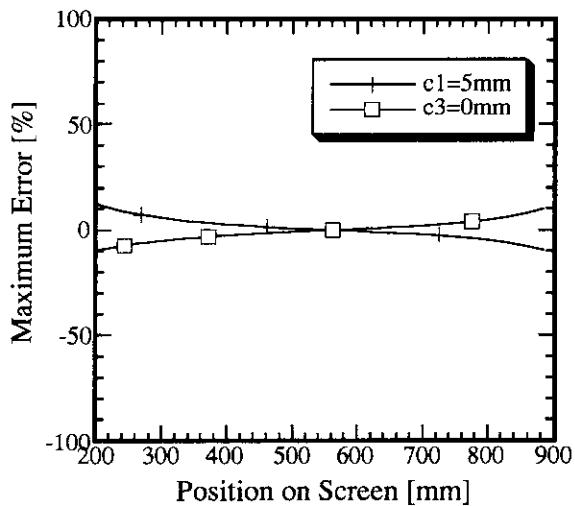


Fig.3.16 Indication errors of the NES consisting of a magnet with a cross section of parabola shape and an angled screen

Fig.3.17 は計測エネルギーに対する最大計測誤差を計算評価した結果である。エネルギーの最大の計測誤差は、 $0.001$  から  $1\text{MeV}$  の約 3 枝の計測範囲で、 $\pm 9\%$  以下となった。上記の計算評価の結果は、入射位置の  $\pm 2.5\text{mm}$  のずれによっても、最大計測誤差が  $\pm 9\%$  以下であることを示している。

Fig.3.16 は反跳陽子の入射位置のずれによって生じるスクリーン上の各点の最大計測誤差、即ち基準計測エネルギーに対して何%の誤差が生じるかを示したものである。スクリーン上距離  $200\text{mm}$  で最大計測誤差は  $\pm 12\%$ 、おおよそスクリーン中央  $580\text{mm}$  で  $0\%$ 、 $900\text{mm}$  で  $\pm 10\%$  程度であった。

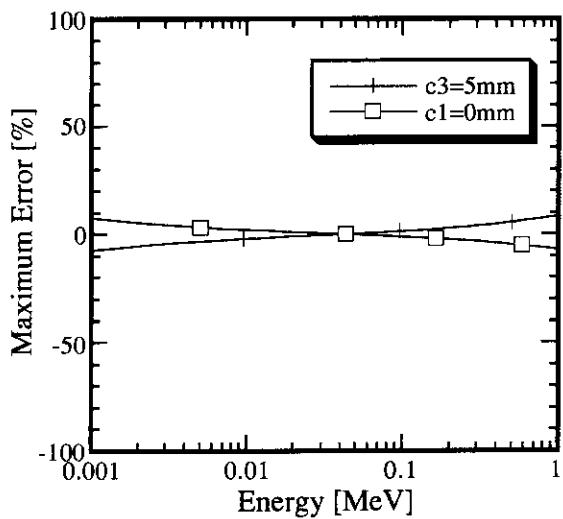


Fig.3.17 Indication errors of the NES consisting of a magnet with a cross section of parabola and an angled screen

### 3.4 磁場強度とエネルギー計測レンジの関係

磁場断面を放物線形状にしたNESにおいて、磁場強度と計測レンジの関係について検討した。ここでは、磁場断面形状、寸法及びスクリーン配置を全く変更することなく、電磁石の電流を変化させて磁場強度のみを変えることによって、計測レンジ及び計測誤差がどのように変わるかを調べた。

Fig.3.18 は、3.3 項で設定した磁場強度 0.06[T]をその 1/10 の 0.006[T]に変更した場合のスクリーン上のエネルギー scales を計算した結果である。陽子の入射位置は Fig.3.11 に示した y 軸で 0、2.5 及び 5mm の 3 点とし、中央 2.5mm を基準の入射位置として計算した。

Fig.3.19 は基準入射位置におけるエネルギー scales を x 軸にとって、それぞれの入射位置のエネルギー scales を比較したグラフである。

これらの計算結果と磁場強度が 0.06 [T] の場合の計算結果 (Fig.3.14 及び Fig.3.15) とを比較すると、磁場強度が 0.06[T] の場合のエネルギーレンジが 0.001 ~ 1[MeV] であるのに対して、磁場強度が 0.006[T] の場合では  $10^{-5} \sim 10^{-2}$ [MeV] となつた。

Fig.3.20 はスクリーン上の各点における最大の計測誤差を計算した結果である。また、Fig.3.21 は、計測エネルギーを基準に最大の計測誤差を計算した結果である。これらの計算結果は、Fig.3.16 及び Fig.3.17 と比較してみると、エネルギーレンジが異なる以外、全く変わっていない。

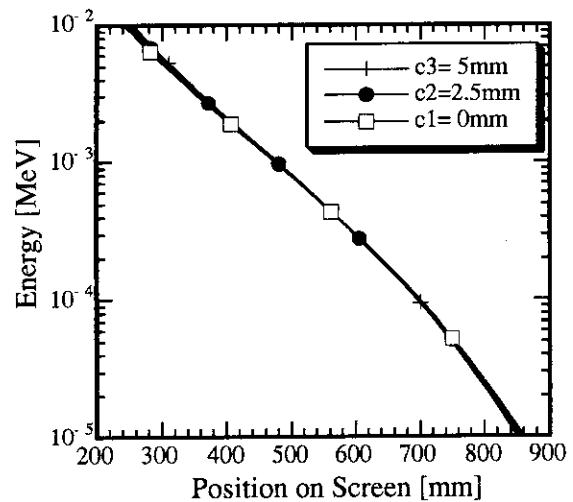


Fig.3.18 Energy scales on the screen in the NES consisting of a magnet with a cross section of parabola shape and an angled screen

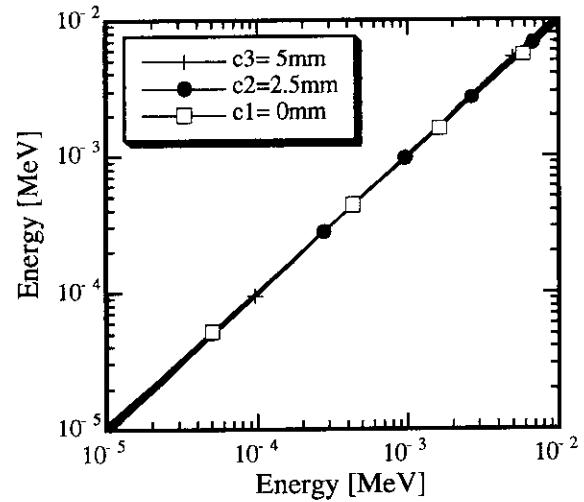


Fig.3.19 Indication accuracy of the NES consisting of a magnet with a cross section of parabola shape section and an angled screen

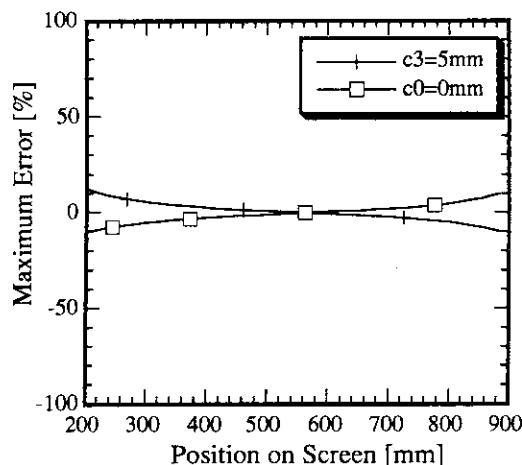


Fig.3.20 Indication errors of the NES consisting of a magnet with a cross section of parabola shape and an angled screen

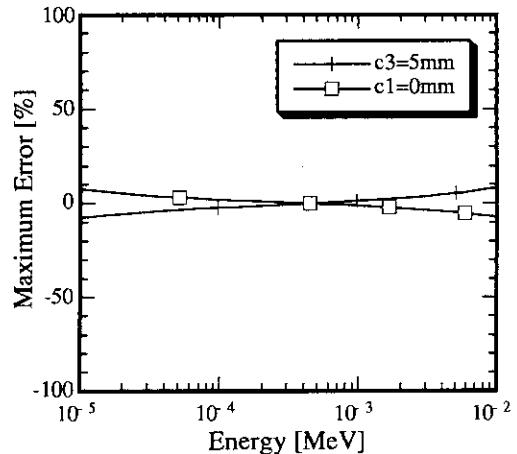


Fig.3.21 Indication errors of the NES consisting of a magnet with a cross section of parabola shape and an angled screen

以上のことから、磁場強度を1桁下げたことによってエネルギーレンジは2桁下がるが、それ以外の特性には全く変化のないことがわかった。

Fig.3.22は磁場強度と計測レンジの関係を計算した結果である。上限及び下限は、計測誤差が $\pm 9\%$ 以内になるエネルギー値とした。磁場強度を $6 \times 10^{-4} \sim 0.6$ [T]の3桁変化させた場合の計測レンジは、上限 $10^{-4}$ MeVで下限 $10^{-7}$ MeVの計測レンジから上限100MeVで下限0.1MeVの計測レンジまでの9桁のエネルギー範囲を自由に変化させることができある。このことは、磁場強度が $6 \times 10^{-4}$ [T]、 $1.897 \times 10^{-2}$ [T]及び0.6[T]のNESを用意するならば、エネルギーが0.1eV～100MeVの9桁の計測範囲を有するNESの実現の可能性を示している。

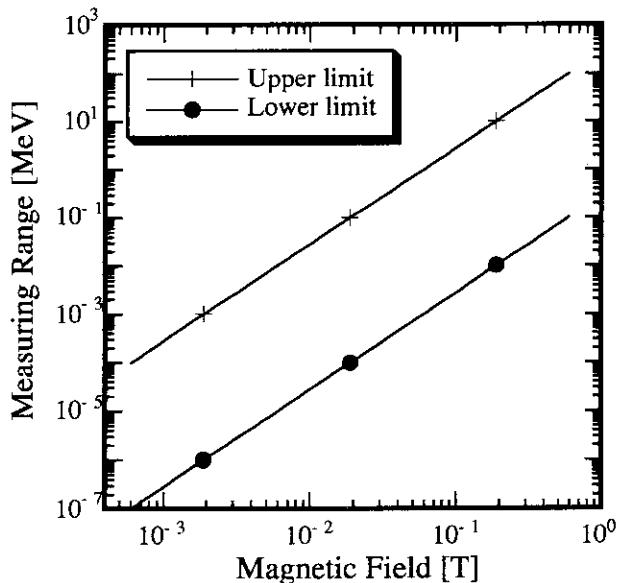


Fig.3.22 Relation between Measuring range and magnetic flux density

#### 4. 計算結果の評価

今回検討した磁場断面形状は矩形、円形および放物線形状の3形状であり、それぞれの形状でどの程度のエネルギー計測精度及びエネルギー計測レンジが得られるかを計算し、比較評価した。計算では、入射する反跳陽子は充分にコリメートされるものとして、入射窓寸法には $10 \times 5\text{ mm}$ の値を用いた。

検討の結果、磁場断面形状が矩形の場合、計測レンジの下限付近においては計測誤差幅が充分小さいが、エネルギーが大きくなるに従って、計測誤差幅が急激に拡大する。計測レンジ上限では、計測誤差幅は $+90\%$ ,  $-45\%$ に達した。また、スクリーンの角度を変えて、計測誤差幅の改善は望めないことがわかった。

磁場断面形状を円形にした場合、計測誤差は、エネルギーが $0.01\text{ [MeV]}$ 程度、即ち計測レンジの下限から1桁上近傍で極小になり改善が見られた。しかし、計測エネルギーがそれよりも低くなってしまっても、また、高くなってしまっても誤差幅は徐々に増大すること、更に、計測レンジの上限では誤差幅は約 $\pm 28\%$ に増大することがわかった。

磁場断面を放物線形状、即ち磁場断面の横軸幅を $W$ としたとき、放物線の頂点と焦点間の距離 $a_p$ を $a_p = W/4$ の放物線形状として最適設計することによって、計測誤差は計測レンジのほぼ中央で極小になり、また、その上下においても急激な増大を押さえられることがわかった。更に、スクリーン角度を $80^\circ$ 以上にとることによって、実際に必要なスクリーン長を $650\text{ mm}$ 以下にできた。大きなスクリーン角度は、NES構成部品を収納する真空チャンバをより小さくできることからも好都合である。

磁場強度と計測レンジの検討結果から、1つの磁場強度の設定では3桁のエネルギー計測レンジであるが、磁場強度を調節することによって、エネルギー計測精度を変えることなく、3桁の計測レンジを任意のエネルギーに設定可能であることもわかった。即ち、磁場強度を $6 \times 10^{-4} \sim 0.6\text{ [T]}$ の3桁の範囲で変化又は走査させた場合には、 $10^{-7}$ から $100\text{ [MeV]}$ の9桁のエネルギー範囲を自由に変化させることが可能である。このことは、磁場強度が $6 \times 10^{-4}\text{ [T]}$ 、 $1.897 \times 10^{-2}\text{ [T]}$ 及び $0.6\text{ [T]}$ の3個のNESを用意するならば、 $0.1\text{ [eV]} \sim 100\text{ [MeV]}$ の9桁のエネルギーをカバーできることを示している。

## 5. 結 論

本研究では、反跳陽子の軌道を磁場で偏向する方式の高速中性子エネルギースペクトロメータ（N E S）を実現するため、磁場型N E Sの構造設計を行うと共に、その特性について計算評価した。設計条件として、エネルギー計測レンジを3桁及びエネルギー計測誤差を±10%以下に設定して、N E S主要構造である磁場断面の形状、磁場強度及びスクリーンの配置位置と角度等の最適設計値を求めた。計算結果から、磁場を用いたN E Sの開発においては、磁場断面を放物線形状に設計、80°以上の大きな角度を付けてスクリーンを配置し、磁場強度を $6 \times 10^{-4} \sim 0.6$  [T] の範囲で適當な値に設定することが、有効であることがわかった。今回の解析評価により、エネルギー計測範囲が最大9桁で、エネルギー誤差が全計測範囲において±9%以下の性能を有し、構造が電磁石とスクリーンで構成されてシンプルで且つ装置全長が約1mでコンパクトなN E Sの実現の可能性を示すことができた。

今回の評価計算では、電磁コイルコア一間キャップの磁束は、等密度で且つコア一断面の形状で発生されるものとして扱い、簡単なモデルで計算した。しかし、電磁コイルを用いた実際の磁場では、磁場内の位置によって磁場断面形状及び磁束密度は当然変化することが予想される。このため、今後は、磁場解析計算コードを用いる等して磁場条件を詳細に計算解析して、一層精度の高いN E Sの性能評価を進めていく必要がある。

## 謝 辞

本研究課題である磁場を用いた高速中性子エネルギースペクトロメータの設計と性能評価を進める当たって、磁場構造の設計法及び計測精度の評価計算法について御指導・ご助言を戴いた五藤博氏に厚くお礼申し上げます。

## 5. 結 論

本研究では、反跳陽子の軌道を磁場で偏向する方式の高速中性子エネルギースペクトロメータ（N E S）を実現するため、磁場型N E Sの構造設計を行うと共に、その特性について計算評価した。設計条件として、エネルギー計測レンジを3桁及びエネルギー計測誤差を±10%以下に設定して、N E S主要構造である磁場断面の形状、磁場強度及びスクリーンの配置位置と角度等の最適設計値を求めた。計算結果から、磁場を用いたN E Sの開発においては、磁場断面を放物線形状に設計、80°以上の大きな角度を付けてスクリーンを配置し、磁場強度を $6 \times 10^{-4} \sim 0.6$  [T] の範囲で適當な値に設定することが、有効であることがわかった。今回の解析評価により、エネルギー計測範囲が最大9桁で、エネルギー誤差が全計測範囲において±9%以下の性能を有し、構造が電磁石とスクリーンで構成されてシンプルで且つ装置全長が約1mでコンパクトなN E Sの実現の可能性を示すことができた。

今回の評価計算では、電磁コイルコア一間キャップの磁束は、等密度で且つコア一断面の形状で発生されるものとして扱い、簡単なモデルで計算した。しかし、電磁コイルを用いた実際の磁場では、磁場内の位置によって磁場断面形状及び磁束密度は当然変化することが予想される。このため、今後は、磁場解析計算コードを用いる等して磁場条件を詳細に計算解析して、一層精度の高いN E Sの性能評価を進めていく必要がある。

## 謝 辞

本研究課題である磁場を用いた高速中性子エネルギースペクトロメータの設計と性能評価を進める当たって、磁場構造の設計法及び計測精度の評価計算法について御指導・ご助言を戴いた五藤博氏に厚くお礼申し上げます。

参考文献

1. Martinez, E., Thun, J., Patin, Y., et al.; " Spallation neutron spectra measurements. Pt. II. Proton recoil spectrometer" ; Nucle. Instru. and Methods in Physics Research, Section A. v.385 (2) p. 345-353./ 21 Jan. 1997.
2. Martinez, e., Thun, J., Patin, Y., et al.; " Spallation neutron spectra measurements. Pt. I. Time-of-flight technique" ; Nucle. Instru. and Methods in Physics Research, Section A. v.385 (2) p. 339-344./ 21 Jan. 1997.
3. C.Manduchi; C.Ciricillo; E.Milli; S.Salviato; " Performance of an isochronous flight path neutron spectrometer" , Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. v. 361 (3) p.548-553./ 15 Jul. 1995.
4. Wollnik, H.Wouters, J.M., Vieira, D.J.; " An isochronous time-of-flight mass spectrometer" ; Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. v. 258 (3) p.331-334./ 15 Aug 1987.
5. M. Folkard, G. Makrigiorgos, M.J. Roper, et al.; " Mesurement of Neutron Energy Using a Recil-Proton Telescope and a High-Pressure Ionization Chamber" ; Radiation Research 118, p.37-45/ Apr. 1989.
6. J.H. Osborne, J.L. Romero, F.P. Brady, et al.; " A compact system with live converter for neutron spectrum measurements" ; Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. v. 345 (2) p.308-312./ 15 Jun 1994.
7. Kaellne, J.and Enge, H.; " Magnetic proton recoil spectrometer for fusion plasma neutrons" ; Nucle. Instru. and Methods in Physics Research, Section A. v. 311 (3) p. 595-602./15 Jan 1992.