

高エネルギー線による被曝線量当量  
評価法に関する調査

(動力炉・核燃料開発事業団 委託調査成果報告書)

1991年3月

日本原子力研究所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical  
Evaluation and Patent Office, Power Reactor and Nuclear Fuel Development  
Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development  
Corporation)

PNC TJ1500 91-003

1 9 9 1 年 3 月

## 高エネルギー $\gamma$ 線による被曝線量当量評価法に関する調査

南 賢太郎\*・吉澤 道夫\*・鈴木 明\*・上沢 輝夫\*  
村上 博幸\*・清水 澄\*・押野 昌夫\*\*

高速炉等の施設では中性子捕獲  $\gamma$  線等により高エネルギー  $\gamma$  線が存在する。これによる被曝線量の測定・評価を目的として、サーベイメータ、エリアモニタ及び個人被曝線量計の高エネルギー(6 MeV)を含めたエネルギー特性を調査・検討した。高エネルギー  $\gamma$  線の照射には JRR-4 に設置されている  $^{16}\text{N}$ - $\gamma$  線照射装置を利用した。

また、動燃、大洗工学センターにある DCA 周辺の線量を  $3''\phi\text{NaI(Tl)}$  検出器を用いた G(E) 関数法で測定し、照射線量から 1 cm 線量当量への換算係数を評価した。

---

本報告書は、日本原子力研究所が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号: 020 D 0023

事業団担当部課室および担当者: 安全管理部 放射線管理課 飛田和則

\*: 保健物理部 線量計測課

\*\*: 保健物理部

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 現用測定器の $\gamma$ 線エネルギー特性調査・検討及び1cm線量当量対応型との特性の比較・検討 .....	2
2.1 試験対象機器 .....	2
2.2 エネルギー特性試験方法 .....	3
2.2.1 試験エネルギー .....	3
2.2.2 X線及び $\gamma$ 線照射 .....	3
2.2.3 $^{16}\text{N}$ - $\gamma$ 線照射試験 .....	3
2.3 結果及び検討 .....	5
2.3.1 サーベイメータ .....	5
2.3.2 エリアモニタ .....	6
2.4 高エネルギー電子の影響 .....	6
2.4.1 試験方法 .....	6
2.4.2 結 果 .....	7
3. 現用個人線量計の $\gamma$ 線エネルギー特性調査・検討 .....	7
3.1 目的及び概要 .....	7
3.2 試験対象の個人線量計 .....	7
3.3 ばらつき試験 .....	8
3.4 エネルギー特性試験 .....	8
3.4.1 $^{16}\text{N}$ - $\gamma$ 線照射試験 .....	8
3.4.2 基準線量の測定 .....	8
3.4.3 $^{137}\text{Cs}$ , $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 線照射試験 .....	9
3.5 結果及び考察 .....	9
4. 現用測定器による現場測定値に対する1cm線量当量換算係数の調査・検討 .....	10
4.1 調査地点 .....	10
4.2 調査方法 .....	10
4.2.1 測定方法 .....	10
4.2.2 解析方法 .....	11
4.3 調査結果及び検討 .....	12
4.3.1 照射線量率, 1cm線量当量率及び照射線量 - 1cm線量当量換算係数 .....	12
4.3.2 電離箱式サーベイメータによる測定結果との比較 .....	13
5. 本調査のまとめ .....	13
謝 辞 .....	14
参考文献 .....	14

## 1. 緒 言

本報告書は、動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センターより受託した調査項目「高エネルギー $\gamma$ 線による被曝線量当量評価法に関する調査」に関する成果を記載したものである。以下に、契約の概要を示す。

### 1) 題 目

高エネルギー $\gamma$ 線による被曝線量当量評価法に関する調査

### 2) 調査項目

実験炉「常陽」などの高速炉施設では高エネルギー $\gamma$ 線が存在する。これによる被曝線量の測定・評価を目的とし、サーベイメータ等の放射線測定器の高エネルギー $\gamma$ 線に対する応答を調査・検討するとともに、現用測定器の1cm線量当量に対する測定精度について検討する。

### 3) 調査範囲

- (1) 現用測定器の $\gamma$ 線エネルギー特性調査・検討及び1cm線量当量対応型との特性の比較・検討
- (2) 現用個人線量計の $\gamma$ 線エネルギー特性調査・検討
- (3) 現用測定器による現場測定値に対する1cm線量当量換算係数の調査・検討

### 4) 調査内容

- (1) 現用測定器の $\gamma$ 線エネルギー特性調査・検討及び1cm線量当量対応型との特性の比較・検討

現用 $\gamma$ 線サーベイメータ及びエリアモニタの高エネルギー $\gamma$ 線( $^{16}\text{N}$ : 6 MeV)に対するエネルギー特性を調査するとともに、1cm線量当量対応型サーベイメータとのエネルギー特性の比較・検討を行う。

- (2) 現用個人線量計の $\gamma$ 線エネルギー特性調査・検討

現用個人線量計の高エネルギー $\gamma$ 線( $^{16}\text{N}$ : 6 MeV)に対するファントム上における応答特性を調査する。

- (3) 現用測定器による現場測定値に対する1cm線量当量換算係数の調査・検討

照射線量率を測定対象としていた現用測定器の測定結果から新しく導入された1cm線量当量率を得るために必要な換算係数について、調査された $\gamma$ 線エネルギー特性をもとに検討する。

### (4) 成果の報告

上記(1)から(3)について得られた成果をまとめて報告する。

### 5) 契約期間

平成2年7月20日より平成3年3月31日

### 6) 実施場所

日本原子力研究所東海研究所・保健物理部・線量計測課

動力炉・核燃料開発事業団（以下、動燃と略す）にある実験炉「常陽」等の高速炉をはじめとする原子炉、核燃料施設では、中性子捕獲 $\gamma$ 線等による2 MeV以上の高エネルギー $\gamma$ 線が存在する。これによる被曝線量の測定・評価においては、放射線測定器の高エネルギー $\gamma$ 線に対するエネルギー特性を把握する必要がある。また、放射線障害予防法令の改正により $\gamma$ 線のモニタリング量が従来の照射線量から1 cm 線量当量に変わったため、現在モニタリングに使用されている測定器には、従来の照射線量対応のものと新しい1 cm 線量当量対応のものの両方が混在している。そこで、本調査では、現在動燃で使用されているサーベイメータ、エリアモニタ及び個人被曝線量計のエネルギー特性を原研 JRR-4 に設置されている $^{16}\text{N}$ - $\gamma$ 線照射装置を用いて 6 MeV を中心に調査するとともに、照射線量対応のものと 1 cm 線量当量対応のものの比較・検討を行った。

さらに、動燃・大洗工学センターにある DCA 周辺において、照射線量率を測定対象としていた現用測定器の測定結果から新しく導入された 1 cm 線量当量率を得るために必要な換算係数を、NaI (Tl) 検出器を用いた G (E) 関数法により測定した。

以下、これらについて報告する。

## 2. 現用測定器の $\gamma$ 線エネルギー特性調査・検討及び 1 cm 線量当量対応型との特性の比較・検討

平成元年より施行された改正法令で 1 cm 線量当量がモニタリング量として導入されたため、現在使用されているサーベイメータ等には、従来の照射線量対応のものと 1 cm 線量当量対応のものが存在する。これらの現用放射線測定器（サーベイメータ、エリアモニタ等）のエネルギー特性は通常 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 線（1.25 MeV）が最高エネルギーである。しかし、高エネルギー $\gamma$ 線の被曝評価のためには、それ以上のエネルギーにおける応答が重要であり、現状ではその情報は不十分であるため、調査を行う必要がある。

また、照射線量対応のものと新しく導入された 1 cm 線量当量に対応したサーベイメータ等が混在している現在、両者の比較・検討を行うことが重要である。そこで、本調査においては、現在動燃で使用されているサーベイメータ、エリアモニタの 1 cm 線量当量に対するエネルギー特性を、原研 JRR-4 に設置されている $^{16}\text{N}$ - $\gamma$ 線照射装置を用いて 6 MeV を中心に調査するとともに、照射線量率対応のものと 1 cm 線量当量率対応のものとの比較・検討を行った。

### 2.1 試験対象機器

エネルギー特性試験は、サーベイメータとエリアモニタについて実施した。サーベイメータは、動燃で実際に使用されている、電離箱式と 1 cm 線量当量対応シンチレーション式の 2 種類を対象とした。電離箱式の内訳は、照射線量対応のもの 3 機種、1 cm 線量当量対応のもの 3 機種であり、1 cm 線量当量対応シンチレーション式はエネルギー補償型のもの 1 機種である。サーベイ

メータは各機種について2台測定することとした。エリアモニタについても、動燃で使用されている電離箱式の機種（照射線量対応）について1台実施した。表2-1に具体的な機種リストを示す。

## 2.2 エネルギー特性試験方法

### 2.2.1 試験エネルギー

エネルギー特性試験を実施したエネルギーは、シンチレーション式サーベイメータを除き、X線で4点(48.6, 80.0, 119, 161 keV)<sup>\*1</sup>, γ線では662 keV (<sup>137</sup>Cs), 1250 keV<sup>\*1</sup> (<sup>60</sup>Co), 6130 keV<sup>\*1</sup> (<sup>16</sup>N)の3点である。X線の試験においては、狭スペクトルシリーズ(Q.I.<sup>\*2</sup>=0.8)の条件で行った。

シンチレーション式サーベイメータについては、X線発生装置では線量率が高すぎるため、γ線源により122 keV (<sup>57</sup>Co), 320 keV (<sup>51</sup>Cr)の2点について試験した。他のエネルギー(662 keV, 1250 keV<sup>\*1</sup>, 6130 keV<sup>\*1</sup>)は上記と同じである。

### 2.2.2 X線及びγ線照射試験

X線及びγ線照射は、原研 放射線標準施設棟において行った。

X線照射には、校正用X線発生装置(英国PANTAX社製: HF-420)を用い、置換法により照射した。サーベイメータ等を距離2mのところにセットし、広がり角15°のコリメートビームを照射した。基準線量は、1次基準線量計であるラドコン線量計(プローブ: 330 cc)を用いて照射線量率を測定し、各実効エネルギーにおける換算係数を用いて1cm線量当量率を求めた。各エネルギーにおける付加フィルタ等の照射条件及び照射線量-1cm線量当量換算係数を表2-2に示す。

指示値は、レコーダ出力を記録して平均値を読み取って求めた。この際、メータ指示値とレコーダ出力から求めた値が一致することを予め確認した。

γ線照射は、基準線量率が1次基準線量計(ラドコン線量計)により測定されているγ線源を用いて照射した。基準1cm線量当量率は、予め測定された基準照射線量率を半減期補正をして得た値から、換算係数を用いて求めた。

サーベイメータの指示値は、X線と同様レコーダ出力から読み取ったが、エリアモニタについては、メータ指示値を直接読み取った。

### 2.2.3 <sup>16</sup>N-γ線照射試験

#### (i) <sup>16</sup>N-γ線照射装置<sup>①</sup>

<sup>16</sup>N(半減期: 7.13秒、実効エネルギー: 6.13 MeV)は、原子炉の冷却水中に酸素の(n, p)反応により生成される。本試験に使用した<sup>16</sup>N-γ線照射装置は、原研JRR-4に設置されてい

\*1 実効エネルギーである。

\*2 Q.I.=実効エネルギー/管電圧

る冷却水小循環ループを利用するものである。図2-1に冷却水小循環ループを、図2-2に<sup>16</sup>N-γ線照射装置配置図を示す。線源部は、<sup>16</sup>Nから放出される電子及び線源部配管壁より発生する二次電子の影響を排除するため、厚さ2.36 g/cm<sup>2</sup>のアクリル樹脂製の管で覆われている。本装置により得られる照射線量率は、流量35 l/minで、約7.1 mR/h（距離1m）である。

#### (ii) 試験方法

基準1cm線量当量率は、一次基準線量計（ラドコン線量計）により基準照射線量率を測定し、実効エネルギー6.13 MeVにおける換算係数9.60 mSv/Rを乗じて求めた。照射線量率の測定には、厚さ3.78 g/cm<sup>2</sup>のアクリル製ビルドアップキャップを付けたラドコン線量計を用いた。その指示値から照射線量率を、次式により求めた<sup>1)</sup>。

$$X = X_{eq} \cdot K_{TP} \cdot \frac{1}{B} \cdot \text{EXP}[\mu \cdot t_{eq}]$$

$$B = \frac{S_A(E)}{S_w(E)} \cdot \frac{\mu_{en, W}}{\mu_{en, A}}$$

ここで、X : 基準照射線量率 [mR/h]

X<sub>eq</sub> : 電離箱壁厚t<sub>eq</sub> (3.95 g/cm<sup>2</sup>) のときの線量計指示値 [mR/h]

K<sub>TP</sub> : 22°C, 1気圧への温度・気圧補正係数

μ : <sup>16</sup>N-γ線に対する電離箱壁の質量減衰係数 (0.026 cm<sup>2</sup>/g)

B : 質量阻止能と質量エネルギー吸収係数の補正係数

S<sub>A</sub>(E) : 電子に対する空気の阻止能 (1.868 MeV · cm<sup>2</sup>/g)

S<sub>w</sub>(E) : 電子に対する電離箱壁材の阻止能 (1.873 MeV · cm<sup>2</sup>/g)

μ<sub>en, A</sub> : 6MeVγ線に対する空気の質量エネルギー吸収係数(0.0164cm<sup>2</sup>/g)

μ<sub>en, W</sub> : 6MeVγ線に対する電離箱壁材の質量エネルギー吸収係数(0.0172cm<sup>2</sup>/g)

NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータの場合、流量35 l/minの条件では線量率が高すぎるため、ポンプの流量を絞って線量率を測定可能な範囲まで下げた。この場合、ラドコン線量計では、精度のよい測定は困難である。そこで、線源部の近くにモニタ用の電離箱式サーベイメータを置き、その指示値の比から流量を下げた場合の基準照射線量率を次式により求めた。

$$X = X_0 \cdot \frac{M}{M_0}$$

ここで、X : 流量を絞った時の基準照射線量率 [mR/h]

X<sub>0</sub> : 流量35 l/min時の基準照射線量率 [mR/h]

M : 流量を絞った時のモニタ用サーベイメータの指示値

M<sub>0</sub> : 流量35 l/min時のモニタ用サーベイメータの指示値

電離箱式サーベイメータの指示値はメータを直接読み取り、シンチレーション式の指示値は、ディジタル表示値の10回読み取りの平均値とした。また、エリアモニタの指示値は、レコーダ出力の電圧値を指示値に換算して求めた。

照射距離は、電離箱式サーベイメータについては70cm、シンチレーション式サーベイメータについては1.5m、エリアモニタについて1mである。

基準線量測定の様子及びモニタ用サーベイメータの配置を写真2-1に、エネルギー特性試験の一例としてエリアモニタの試験の様子を写真2-2に示す。

## 2.3 結果及び検討

### 2.3.1 サーベイメータ

以上の方針によって得られたサーベイメータの1cm線量当量に対するエネルギー特性を、表2-3から表2-9に、 $^{137}\text{Cs}$ (662 keV)のレスポンスで規格化したグラフを図2-3から図2-9に示す。ここで示した値は、2台のサーベイメータについて得られた値の平均値である。このうち、表2-3から表2-5及び図2-3から図2-5が照射線量率対応、残りが1cm線量当量率対応である。

これらから、以下のことが明らかになった。

#### (1) 6 MeVにおけるレスポンス

電離箱式サーベイメータについては、照射線量率対応のものも1cm線量当量率対応のものも大きな差異はなく、共に10～20%過大なレスポンスを示した。これは、電離箱の壁厚が電子過剰な高エネルギー線場に対しては薄いためであると考えられる。高エネルギー線場の特徴である高エネルギー電子の影響については、別に試験を行った(2.4節参照)。

これに対し、NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータ(Aloka; TCS-161)は、30%過小となっている。このTCS-161は、パルス波高に応じたディスクリレベルを持たせたエネルギー補償型であるが、このエネルギー補償は3 MeVまでしか対応しておらず、また、6 MeVでは增幅回路も飽和している。従って、6 MeVのパルスは3 MeVのパルスとして計数される。このサーベイメータに使用されている $1''\phi \times 1''\text{NaI(Tl)}$ 検出器の光子に対する検出効率<sup>3)</sup>及び単位1cm線量当量率当りの光子フルエンス率から計算した6 MeVのレスポンスは、3 MeVのものより約50%低く、上記の結果とほぼ一致している。

#### (2) 照射線量率対応と1cm線量当量率対応との比較

照射線量率対応のものと、1cm線量当量率対応のものとを比較すると、662 keV( $^{137}\text{Cs}$ )以上のエネルギーではそのレスポンスに大きな違いが見られないが、200 keV以下の部分で差異が見られる。今回試験を実施した照射線量率対応の電離箱式サーベイメータは、従来の照射線量に対するエネルギー特性が良好だった機種であるため、必然的に1cm線量当量率に対するエネルギー特性は200 keV以下で過小となる。そのため、試験結果でも、照射線量率対応のもののレスポンスは、161 keVで約-10%，照射線量と1cm線量当量との差が最も大きくなる80 keV付近では約-30%となっており、低エネルギーほどレスポンスが下がる結果となっている。この結果をJIS Z 4333の基準と比較すると、電離箱式線量当量サーベイメータのエネルギー依存性の許容範囲は、0.8～1.2<sup>\*1</sup>であり、今回試験したサーベイメータでこの許容範囲に適合するエネルギーはおよそ150 keV以上であることがわかる。

一方、1cm線量当量率対応の電離箱式サーベイメータのエネルギー特性は、AE-133 A<sub>1</sub>及

\* 1 規定されたエネルギー範囲は、30 keVから1.5 MeVである。

び ICS-311 で 10 ~ 15% 高くなっていることからわかるように、照射線量率対応のものとは逆に 100 keV 以下で高くなる傾向を示した。今回試験した機種は、上に示した JIS の許容範囲にすべて適合している。このうち、1 cm 線量当量率に対する最も良好なエネルギー特性を有する機種は AE-133 HA<sub>1</sub>, 6 MeV を除くエネルギー範囲で ± 5 % に入っている。

シンチレーション式サーベイメータについて、試験エネルギー点が少なく詳細は明らかではないが、6 MeV を除いて、従来のエネルギー補償がされていないタイプと比較して良好なエネルギー特性を有しているようである。今後、高エネルギーにも対応する工夫がなされれば、線量率が低いところではエネルギー補償型の NaI (Tl) シンチレーション式サーベイメータも有効であると考えられる。

### 2.3.2 エリアモニタ

エリアモニタの 1 cm 線量当量率に対するエネルギー特性試験結果を表 2-10 に、<sup>137</sup>Cs (662 keV) のレスポンスで規格化したグラフを図 2-10 に示す。

このエリアモニタは、照射線量率対応の電離箱式であるため、その傾向は同じタイプのサーベイメータと同様である。そのレスポンスは、6 MeV では 10% 高く、200 keV 以下ではエネルギーとともに下がる傾向にある。ここで特徴的なのは、80 keV における応答である。161 keV 以下でレスポンスが下がっていく傾向にある中で、このエネルギーではレスポンスが高い。この原因は、電離箱に巻かれているフィルタ中の鉛の特性 X 線によるものと考えられる。

今回の試験から、このエリアモニタのエネルギー特性が JIS Z 4324 に規定されたエネルギー特性の許容範囲 ± 25% (II 級) に入るエネルギー範囲は、およそ 150 keV 以上であることが明らかになった。

## 2.4 高エネルギー電子の影響

2.2.3 で述べたように、高エネルギー  $\gamma$  線の場には、常に高いエネルギーの電子が付随している。高エネルギー  $\gamma$  線の評価においては、この高エネルギー電子の影響を受けることが予想される。そこで、本試験では、<sup>16</sup>N- $\gamma$  線照射装置を用いて、サーベイメータ及びエリアモニタが高エネルギー電子の影響をどの程度受けるかを調査した。

### 2.4.1 試験方法

2.2.3 で述べたように、<sup>16</sup>N- $\gamma$  線照射装置の線源部は、通常、<sup>16</sup>N から放出される電子及び線源部配管壁より発生する二次電子の影響を排除するため、厚さ 2.36 g/cm<sup>2</sup> のアクリル樹脂製のカバーで覆われている。本試験では、電子の影響を調査するために、線源部のアクリルカバーを取り外した状態で測定をおこない、カバーを付けた状態 (6 MeV のレスポンスを測定した状態) との比較を行った。

写真 2-3 及び 2-4 にアクリルカバーを取り外した状態での測定の様子を示す。

#### 2.4.2 結 果

表2-11に得られた結果を示す。ここでは、2台の指示値の平均で処理するとバラツキが大きくなるため、各測定器について得られた結果をそのまま示した。これを見ると、電離箱式サーベイメータは、アクリルカバーを外した場合、指示値が30～60%増加し、電子の影響を強く受けることがわかる。特に、エネルギー特性が最も良好であったAE-133 H $\Lambda_1$ の影響が大きい(60%指示値増加)。これに対して、NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータとエリアモニタは4～6%の増加である。アクリルカバーによる $^{16}\text{N}$ - $\gamma$ 線の減弱は約6%<sup>1)</sup>であるから、NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータとエリアモニタは電子の影響を受けていないと結論できる。

従って、電離箱式サーベイメータで高エネルギー $\gamma$ 線場を測定する場合、電子の影響を受けて過大評価になることが予想されるため、注意が必要である。

### 3. 現用個人線量計の $\gamma$ 線エネルギー特性の調査・検討

#### 3.1 目的および概要

サーベイメータなど場の線量率に対する測定器同様に、個人線量計においても通常 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 線(1.25 MeV)までのエネルギー領域については、その応答特性が調べられ、実際の測定値に適用されている。しかし、現在までのところ、それ以上の高エネルギー $\gamma$ 線に対してはその応答特性が詳しく調べられていない。

しかし、高速増殖炉など高エネルギー $\gamma$ 線が十分に遮蔽できない区域では、作業者がその区域に入り作業をする場合を考えられ、個人線量計に対しても高エネルギー領域における応答特性の知見を得ておくことが必要である。

そこで、今回、2 MeV以上の高エネルギー $\gamma$ 線のうち重要な線源の一つである $^{16}\text{N}$ - $\gamma$ 線(6.13 MeV)を利用し、個人線量計についてのエネルギー応答特性を調査・検討することを目的に試験を行った。

試験は、現在動燃で使用されている主な個人線量計6種類を対象に、日本原子力研究所JRR-4の $^{16}\text{N}$ - $\gamma$ 線照射場において実施した。照射場および照射装置についての詳しい説明は、第2章で述べているのでここでは省略する。

#### 3.2 試験対象の個人線量計

試験の対象とした個人線量計は、TLD(熱ルミネッセンス線量計)、PD(ポケット線量計)、APD(警報付ポケット線量計)について、それぞれ2種類、計6種類である。それらの線量計は、動燃で主に使用されている線量計であるが、動燃型バッジを除いて、他の放射線関連施設でも利用されている汎用の個人線量計である。

$^{16}\text{N}$ - $\gamma$ 線試験の対象とした個人線量計の種類と形名、および個数を表3-1に示す。なお、表3-1には、動燃より提供された個数も併記してある。

### 3.3 ばらつき試験

各種の個人線量計に対するばらつき試験は、TLD以外の線量計について、動燃より提供された全数に対して、 $^{137}\text{Cs}$ - $\gamma$ 線を用いて行った。その結果は、表3-2に示されている。各種の線量計に対して、基準線量を1とした時の指示値の全個平均、およびJISで定められた方式に従う変動係数を併せて示す。この表から、APDのレムマスターQに対する変動係数が6.1%とわずかに大きな値を示しているほかは、残りの5種類の個人線量計とも、5%以下の小さなばらつきの範囲内にあることがわかる。

一方、指示値の基準線量との比較において、動燃型バッジに対しては1.12、レムマスターQに対しては1.14と、10%以上の過大な応答を示している。また、照射線量対応型のレムマスターSについては、全個平均で約14%の基準線量より高い値を、1cm線量当量対応型のレムマスターQについては、対照的に基準線量よりも平均感度で約7%ほど低い値を示している。これらの原因については、現在のところ明確に判明できていない。

### 3.4 エネルギー特性試験

#### 3.4.1 $^{16}\text{N}$ - $\gamma$ 線照射試験

個人線量計は、作業者の外部被曝線量を推定するため、人体前面に装着した状態で使用するものであり、エネルギー特性試験の際にも人体を模擬したファントムに取付け、その応答特性を調査する必要がある。今回の $^{16}\text{N}$ - $\gamma$ 線照射試験では、JISで定められた40(cm)縦×40(cm)横×15(cm)厚のアクリルファントムを使用した。

また、線源から線量計までの距離については、線源部がある程度の大きさをもっているため、その中心の位置から線量計までの距離を各測定ごとに再現し照射を行った。試験時の距離は、線源部の中心からファントム表面の中心位置に取り付けた線量計の検出部まで1mとした。

照射試験は、各種の線量計ごとに、近傍においていた線量計による散乱線の影響が無視できる程度の間隔をとり、3～10個ずつファントム表面に固定したまま、4～5時間連続して照射を行った。この間の出力変動はモニター用サーベイメータの指示値を同時にモニターし、それを記録計に記録することで、照射後に補正を行った。この出力変動補正については次項で詳しく述べる。測定結果は表3-3～表3-8および図3-1～図3-6に示している。

#### 3.4.2 基準線量の測定

前述したように、基準線量は、2.2.3(ii)で示した方法により照射前に測定された基準線量率に照射時間を乗じて得られた積算線量を、照射時間中に同時モニターしていたサーベイメータの指示値をもとに、出力変動の補正を行って求めた。補正は、記録計に残された出力変動の描く軌跡の面積積分値として求めた。なお参考までに、補正に用いた係数は、照射開始時の線量率と照射時

間の積を1とした場合、最小0.97～最大1.05の範囲内であった。

### 3.4.3 $^{137}\text{Cs}$ および $^{60}\text{Co}-\gamma$ 線照射試験

同一の個人線量計に対し、エネルギー特性試験ならびに校正が実施されている $^{137}\text{Cs}$ および $^{60}\text{Co}-\gamma$ 線での応答特性についても確認が必要である。そこで、今回、日本原子力研究所の放射線標準施設棟において $^{137}\text{Cs}$ および $^{60}\text{Co}-\gamma$ 線に対するエネルギー応答特性を調べた。ただし、2種類のTLDについては、 $^{137}\text{Cs}-\gamma$ 線についてのみエネルギー特性を調べた。それらの結果を、 $^{16}\text{N}-\gamma$ 線に対する結果とともに表3-3～表3-8および図3-1～図3-6に示す。

## 3.5 結果および考察

ここでは、 $^{16}\text{N}-\gamma$ 線照射試験と $^{137}\text{Cs}$ および $^{60}\text{Co}-\gamma$ 線試験の全体を通じて、各種の線量計ごとに測定結果およびそれに対する簡単な考察を述べる。

### (1) TLD(熱ルミネッセンス線量計)

TLDについては、 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 線に対するエネルギー特性試験を行っていないが、 $^{137}\text{Cs}-\gamma$ 線に対する応答とほぼ同様であると推察される。まず、動燃型バッジは、 $^{137}\text{Cs}$ を基準とした $^{16}\text{N}-\gamma$ 線に対する応答が約10%低いものの、測定誤差を考え現状の校正により十分対応できる範囲内であると考えられる。

一方、UD-200 Sについては、 $^{137}\text{Cs}$ を基準値としたときの $^{16}\text{N}-\gamma$ 線に対する応答が約2.5倍と極めて高い応答特性を示している。これは、現時点で明確な判断は出来ないものの、高エネルギー $\gamma$ 線の場合には無視できない次の理由によるものと思われる。つまり、UD-200 Sではニードル状のTLD素子をカバーするキャップの内面に、エネルギー補償用特性シールドと呼ばれる合金線が構造材として使われているが、その金属部分において、入射する高エネルギー $\gamma$ 線の電子・陽電子対生成反応およびコンプトン散乱反応が起こる。そして、これらの反応により生成される2次電子が、さらにTLD素子を照射した可能性が充分に考えられるからである。

以上のこととは、第2章でも議論された $^{16}\text{N}$ の崩壊に伴い放出される高エネルギー $\beta$ 線の影響や電子・陽電子対生成反応に引き続いで起こる対消滅反応の $\gamma$ 線の影響などとともに、今後考慮されねばならない重要な課題といえる。

### (2) PD(ポケット線量計)

PDについては、いずれも $^{16}\text{N}-\gamma$ 線照射試験とともに $^{137}\text{Cs}$ および $^{60}\text{Co}-\gamma$ 線についても試験を行った。

まず、SEQ-5については、 $^{16}\text{N}-\gamma$ 線に対して $^{137}\text{Cs}$ および $^{60}\text{Co}-\gamma$ 線の約1.3倍の応答特性を示している。この点についても、明確な判断は出来ないが、前述のUD-200 S同様に、検出部の周囲を構成している金属部分の影響が現れていることが予想される。しかし、UD-200 Sに比べるとその影響は小さく、その応答特性を十分把握している限り、使用に差し支えないと思われる。

一方、MY DOSEについては、試験を実施した3つのエネルギーに対して、ほぼ同様の応答

特性を示しており、少なくともこのエネルギー範囲においては、固有の応答係数を考える必要はないと思われる。また、構造材も主な部分はプラスチックなど実効原子番号の小さい材質であることから、上述した対消滅 $\gamma$ 線や高エネルギー $\beta$ 線など他の要因を考慮する必要は少ないと思われる。

### (3) APD (警報付ポケット線量計)

APDについては、2種のいずれも $^{16}\text{N}$ - $\gamma$ 線照射試験とともに $^{137}\text{Cs}$ および $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 線の試験を行った。 $^{16}\text{N}$ - $\gamma$ 線照射試験では、照射線量対応型レムマスターSと1cm線量当量対応型のレムマスターQで対照的な応答特性を示した。

まず、レムマスターSでは、 $^{16}\text{N}$ - $\gamma$ 線に対して $^{137}\text{Cs}$ - $\gamma$ 線の約0.8倍の応答を示した。一方、レムマスターQでは、逆に、 $^{137}\text{Cs}$ - $\gamma$ 線の約1.3倍の応答を示した。どちらも $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 線のエネルギー領域までは、ほぼ同じ応答特性を示すシリコン半導体検出器であることから、 $^{16}\text{N}$ - $\gamma$ 線に対して、なぜこのような違いが生じたのか、現時点では判明できていない。

## 4. 現用測定器による現場測定値に対する1cm線量当量換算係数の調査・検討

放射線障害予防法令の改正により $\gamma$ 線のモニタリング量が従来の照射線量から1cm線量当量に変わったため、従来の照射線量対応の測定器の指示値(照射線量)を1cm線量当量に換算する必要がある。そこで、本調査では、NaI(Tl)シンチレーション検出器を用いて $\gamma$ 線スペクトルを測定し、G(E)関数法(スペクトル線量変換演算子法)により照射線量率及び1cm線量当量率を同時に評価して、照射線量から1cm線量当量を得るために必要な換算係数を求めた。また、得られた1cm線量当量率を電離箱式サーベイメータの結果と比較した。

### 4.1 調査地点

本調査における測定対象として、動燃 大洗工学センター DCA周辺を選んだ。この選択に際しては、高エネルギー $\gamma$ 線が存在すること、及び、使用する3"φ球形NaI(Tl)シンチレーション検出器でも十分に測定できる線量率レベルであること(1mR/h以下)を考慮した。DCA周辺の測定地点は、DCA南側の軽水・ガス系室のシャッター表面を距離0mとして、0m, 5m, 10m及び15mの4点である。測定した高さは地上から約1mである。図4-1に測定地点を示す。

### 4.2 調査方法

#### 4.2.1 測定方法

検出器には方向特性の優れた3"φ球形NaI(Tl)シンチレーション検出器(応用光研: SP-20)を用い、パルス波高スペクトルはポータブル波高分析器(D. S. Davidson: Model 2056-4

K-A) を用い、1024 チャンネル（以下 ch. と表す）で測定した。1 ch.あたり 5 keV（上限エネルギー約 5 MeV）の測定を 0 m から 15 m の 4 点で、1 ch.あたり 10 keV（上限エネルギー約 10 MeV）の測定を 0 m と 10 m の 2 点で行った。

測定は、DCA 500 W 運転時と停止時（B.G.）で測定した。運転時の測定においては、電離箱式サーベイメータ（応用技研：AE-133 A<sub>1</sub>）でも同時に測定を行った。

#### 4.2.2 解析方法

本調査においては、NaI (Tl) シンチレーション検出器により測定された波高スペクトルから G (E) 関数法（スペクトル一線量変換演算子法）<sup>4), 5), 6)</sup> を用いて照射線量率と 1 cm 線量当量率を同時に計算し、照射線量 - 1 cm 線量当量換算係数（以下、換算係数と略す）を求めた。

G (E) 関数法では次式により線量率を求める。

$$D = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} N(E) \cdot G(E) dE$$

ここで、D : 線量率（この場合、照射線量率または 1 cm 線量当量率）

N(E) : パルス波高スペクトル

G(E) : パルス波高 - 線量変換演算子

E<sub>min</sub> :  $\gamma$  線波高スペクトルの下限値

E<sub>max</sub> :  $\gamma$  線波高スペクトルの上限値

実際には、パルス波高スペクトルは波高分析器（MCA）で測定されるため、次式で計算することになる。

$$D = \sum_{p=1}^n N_p(E) \cdot G_p(E)$$

ここで、N<sub>p</sub>(E) : チャンネル p (エネルギー E<sub>p-1</sub> から E<sub>p</sub> まで) の計数率

G<sub>p</sub>(E) : エネルギー E<sub>p-1/2</sub> における G (E) 値

NaI (Tl) 検出器は入射エネルギーと発光量に比例関係がないため、観測パルスに直接作用させる回路用 G (E) 関数と、エネルギーによる発光効率の違いを補正したパルス波高スペクトルに作用させるスペクトル用 G (E) 関数の 2 種類がある。本調査では、3"φ 球形 NaI (Tl) 検出器に対する、最大エネルギー 10 MeV の照射線量率用 G (E) 関数<sup>7)</sup>と 1 cm 線量当量率用 G (E) 関数 - 最大エネルギー 3 MeV までの回路用 1 cm 線量当量率用 G (E) 関数<sup>6)</sup>を発光効率データ<sup>8)</sup>を用いてスペクトル用に変換し、さらに 3 MeV から 10 MeV の値を最大エネルギー 10 MeV の照射線量率用 G (E) 関数<sup>7)</sup>をもとに、ICRP Publ. 51<sup>2)</sup> の換算係数から計算して、10 MeV まで拡張したもの（いずれもスペクトル用）を用いた。解析に使用した照射線量率及び 1 cm 線量当量率用の G (E) 関数を、図 4-2 及び図 4-3 に示す。

照射線量 - 1 cm 線量当量換算係数 [μSv/mR] は、上記の方法で同じスペクトルから得られた 1 cm 線量当量率 [μSv/h] と照射線量率 [mR/h] の比として求めた。

### 4.3 調査結果及び検討

#### 4.3.1 照射線量率、1 cm 線量当量率及び照射線量 - 1 cm 線量当量換算係数

DCA 軽水・ガス系室シャッター表面 (0 m) 及びこの点から 10 m の地点で得られた運転時の NaI (Tl) 検出器による  $\gamma$  線スペクトルを図 4-4 及び図 4-5 に、また、10 m 地点の B. G. のスペクトルを図 4-6 に示す。運転時のスペクトルは 1 ch.あたり 10 keV である。これにより、運転時には、DCA 周辺に最大エネルギー 8 MeV の  $\gamma$  線が存在することがわかる。

これらのスペクトルから 0 m, 5 m, 10 m 及び 15 m の地点の照射線量率及び 1 cm 線量当量率を求めた。このとき、運転時の値は、パルス波高スペクトルを上限エネルギー 5 MeV で測定したデータを、0 m 及び 10 m の地点で測定した上限エネルギー 10 MeV のデータを用いて外挿して求めた。0 m 及び 10 m の地点の値を上限エネルギー 10 MeV の波高スペクトルから直接求めなかったのは、波高スペクトルの下限エネルギーが 120 keV と G (E) 関数の下限エネルギー 40 keV より高かったためである。外挿は次式を用いて行った。

$$\begin{aligned} D &= D_{0.5\text{MeV}} \cdot [1 + (D_2/D_1)_{10\text{MeV}} \cdot (D_1/D_0)_{5\text{MeV}}] \\ &= D_{0.5\text{MeV}} \cdot F \end{aligned}$$

ここで、D : 照射線量率または 1 cm 線量当量率

$D_0$  : 0 MeV から 5 MeV の範囲で計算した  $\sum N_p(E) \cdot G_p(E)$

$D_1$  : 3 MeV から 5 MeV の範囲で計算した  $\sum N_p(E) \cdot G_p(E)$

$D_2$  : 5 MeV から 10 MeV の範囲で計算した  $\sum N_p(E) \cdot G_p(E)$

であり、添え字 5 MeV, 10 MeV は、それぞれ、測定データの上限エネルギーを示す。この式により求めた理由は、 $(D_2/D_1)_{10\text{MeV}}$  が 0 m 地点と 10 m 地点とで 2 % しか違わなかったため、どの地点でも一定であると考えられるからである（表 4-1 参照）。計算にあたって使用した  $(D_2/D_1)_{10\text{MeV}}$  は、0 m 地点と 10 m 地点の平均値（照射線量率に対して 0.709, 1 cm 線量当量率に対して 0.701）を用いた。各地点で得られた  $D_{0.5\text{MeV}}$ ,  $(D_2/D_1)_{10\text{MeV}}$ ,  $(D_1/D_0)_{5\text{MeV}}$  及び F の値を表 4-1 に示す。

B. G. 時には 5 MeV 以上の  $\gamma$  線が存在しないため、上限エネルギー 5 MeV の測定データから直接求めた。

得られた各地点の照射線量率、1 cm 線量当量率及び照射線量 - 1 cm 線量当量換算係数を表 4-2 に示す。これを見ると、500 W 運転時には、B. G. の 10 倍から 50 倍線量率が増加することがわかる。また、運転時には線量率が大きく変化し、10 m 地点で線量率が最大になることがわかる。この 10 m 地点で線量率が最大になるのは、建屋上部の遮蔽が薄いことによるスカイシャインの影響が大きいと考えられるが、高エネルギー成分については、上で示したように 3 MeV 以上のスペクトルの形が 0 m と 10 m あまり変わらないこと、天井面を線源として見たとき上部側壁の遮蔽が薄くなる部分を通して天井全体が見える地点が約 10 m 付近であることから、エネルギーの高い中性子捕獲  $\gamma$  線の漏洩による寄与も検討する必要があるのではないかと考えられる。

次に、照射線量 - 1 cm 線量当量換算係数について見てみると、これは B. G. 時、運転時ともに場所によらず一定である。その値は、B. G. 時には 10.5 [ $\mu\text{Sv}/\text{mR}$ ], 運転時には 10.2 [ $\mu\text{Sv}/\text{mR}$ ]

であり、運転時の方が $\gamma$ 線エネルギーが高いため、換算係数が小さくなっている。いずれにしても、照射線量率を単位換算して求めた1cm線量当量率との差は、運転時で2%，B.G.時で5%と僅かであり、通常のモニタリングにおいては、照射線量率対応の測定器による指示値を単に単位換算して1cm線量当量率を求めて問題がないことがわかる。

#### 4.3.2 電離箱式サーベイメータによる測定結果との比較

4.3.1で得られた運転時の1cm線量当量率の値と同時に測定した電離箱式サーベイメータ(AE-133  $\Lambda_1$ )の値との比較を表4-3に示す。これを見ると、一律30%電離箱式サーベイメータの値が高いことがわかる。第2章のエネルギー特性調査で明らかになったように、AE-133  $\Lambda_1$ の6MeVにおけるレスポンスは約20%高い。この地点も最大エネルギー8MeVと $\gamma$ 線エネルギーの高い場所であるため、電離箱式サーベイメータの指示値が高くなったものと考えられる。従って、高エネルギー $\gamma$ 線場を電離箱式サーベイメータで測定する場合、アクリル樹脂等で電離箱を覆い、過大レスポンスを補正すること等を検討する必要があろう。

## 5. 本調査のまとめ

今回の調査で明らかになったことを以下にまとめる。

1. 現用測定器(サーベイメータ、エリアモニタ)の1cm線量当量エネルギー特性を $^{16}\text{N}$ (6MeV)を中心に調査した。その結果、以下のことが明らかになった。
  - ① 電離箱式サーベイメータは、高エネルギー(6MeV)で10~20%過大評価する。
  - ② 今回試験を実施した照射線量率対応の電離箱式サーベイメータが±20%の範囲で1cm線量当量率を測定できるのは、約150keV以上のエネルギーである。
  - ③ 今回試験を実施した1cm線量当量率対応の電離箱式サーベイメータは、50keVから6MeVの範囲を±15%で測定可能である(最もエネルギー特性が良好な機種はAE-133  $\Lambda_1$ であった)。
  - ④ 1cm線量当量率対応シンチレーション式サーベイメータ(Aloka; TCS-161)は、增幅回路及びエネルギー補償回路が3MeVまでしか対応していないため、高エネルギーで過小評価する(6MeVでは30%過小評価)。
  - ⑤ 今回試験を実施した電離箱式エリアモニタは、6MeVで約10%過大なレスポンスを示した。また、±25%の精度で測定可能なエネルギーは約150keV以上である。
2. 高エネルギー $\gamma$ 線場に付随する高エネルギー電子の影響を調査し、以下の結果を得た。
  - ① 電離箱式サーベイメータは影響が大きく、今回の試験では30%程度指示値が増加した。
  - ② シンチレーション式サーベイメータ及びエリアモニタは影響が無かった。
3. 現用個人被曝線量計のエネルギー特性を $^{16}\text{N}-\gamma$ 線(6.13MeV)を中心に調査した。その結果、 $^{137}\text{Cs}-\gamma$ 線(662keV)に対する応答との比較により、以下のことが明らかになった。

① TLD

動燃型バッジについては、約10%の過小評価であった。一方、TLD素子周囲のカバーにエネルギー補償用の特性シールドとして金属を配置するUD-200Sについては2.5倍もの過大評価となった。

② ポケット線量計

SEQ-5については、約33%の過大評価となった。他方、半導体検出器のMY DOSEに対しては、約5%の過小評価であったが、誤差の範囲内に含まれるものと考えられる。

③ アラームメータ

照射線量対応型のレムマスターSに対しては、約22%の過小評価であった。しかし、1cm線量当量対応型のレムマスターQに対しては、約26%の過大評価となった。

4. 動燃 大洗工学センターDCA周辺の線量率及び1cm線量当量換算係数を、NaI(Tl)検出器を用いたG(E)関数法により測定した。その結果、以下のことが明らかになった。

① 運転時には最高 $\gamma$ 線エネルギー8MeVの漏洩がある。

② 1cm線量当量換算係数については、B.G.時で10.5、運転時10.2 [ $\mu\text{Sv}/\text{mR}$ ]であり、照射線量を単に単位変換するだけで1cm線量当量とすることができる。

③ 電離箱式サーベイメータの測定値は、その高エネルギー $\gamma$ 線に対するエネルギー特性から、NaI(Tl)検出器による測定値より30%高い。

## 謝 辞

本報告書をまとめるにあたって、動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター、安全管理部、中田 啓部長、放射線管理課 桜井直行課長、飛田和則係長、野崎達夫係員に終始懇切な御助言を頂きました。また、DCA周辺の現場測定においては飛田和則係長、野崎達夫係員に御協力を頂き、G(E)関数を用いた解析にあたっては、環境放射線物理研究室、斎藤公明研究員ならびに堤正博研究員に終始懇切な御助言を頂きました。謹んで謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 神之浦文三、南賢太郎、放射線測定器校正のための $^{16}\text{N}$ 高エネルギー $\gamma$ 線照射場の特性：保健物理、Vol. 23, pp. 27 - 33 (1988)
- 2) ICRP, Data for Use in Protection Against External Radiation : Annals of the ICRP, Vol. 17, No. 2 / 3 (ICRP Publication 51) (1987)
- 3) 斎藤公明、森内 茂、モンテカルロ計算によるNaI(Tl)シンチレーション検出器ガンマ線応答関数のデータカタログ：JAERI 1306 (1987)

- 4) 森内 茂, スペクトル荷重関数方式による環境 $\gamma$ 線線量測定器に関する研究: JAERI-M 7066 (1977)
- 5) 森内 茂, スペクトル線量変換演算子による線量評価法とその演算子の決定: JAERI 1209 (1971)
- 6) 堤 正博, 森内 茂, 斎藤公明, 3"φ球形 NaI (Tl) シンチレーション検出器の実効線量当量評価用 G (E) 関数 (スペクトル線量変換演算子): JAERI-M 89 - 196, (1989)
- 7) 堤 正博, 斎藤公明: 私信 (1991)

表2-1 エネルギー特性試験対象機器リスト

測定器の種類	形 名	機 器 No.	台 数
<サーベイメータ>			
電離箱式			
照射線量率対応	NESCO : 808A 応用技研: AE-133 " : AE-133H	ICD-32, ICD-35 ICI-09, ICI-14 ICJ-16, ICJ-20	2 2 2
1cm線量当量率対応	応用技研: AE-133A <sub>1</sub> " : AE-133HA <sub>1</sub> Aloka : ICS-311	2211254, 2211259 2211251, 2211252 ICF-03, ICF-06	2 2 2
シンチレーション式			
1cm線量当量率対応	Aloka : TCS-161	96R3778, 96R3779	2
<エリアモニタ>			
電離箱式			
照射線量率対応	富士電機: NDC2	8M3512	1

表2-2 エネルギー特性試験に使用したX線の線質条件

実効 エネルギー [keV]	管電圧 [kV]	付加フィルター	換算係数 [mSv/R]
48.6	60	Cu: 1.00mm	13.6
80.0	100	Cu: 3.51mm	14.5
119	150	Cu: 7.07mm	13.4
161	200	Pb: 0.52mm Sn: 1.01mm	12.5

表2-3 サーベイメータエネルギー特性(その1)

形式 NESCO 808A

線種	エネルギー (keV)	基準1cm線量		レスポンス	相対レスポンス ( $^{137}\text{Cs}$ 基準)
		当量率 (mSv/h)	指示値 , (mSv/h)		
	48.6	5.65	3.80	0.67	0.74
X線	80.0	5.58	3.73	0.67	0.74
(QI=0.8)	119	4.57	3.35	0.73	0.80
	161	8.08	6.30	0.78	0.86
$^{137}\text{Cs}$	662	8.00	7.30	0.91	1.00
$^{60}\text{Co}$	1250	8.00	7.28	0.91	1.00
$^{16}\text{N}$	6130	0.151	0.150	0.99	1.09

表2-4 サーベイメータエネルギー特性(その2)

形式 AE-133

線種	エネルギー (keV)	基準1cm線量		レスpsonス	相対レスポンス ( $^{137}\text{Cs}$ 基準)
		当量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	指示値 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )		
	48.6	893	705	0.79	0.76
X線 (QI=0.8)	80.0	891	688	0.77	0.74
	119	897	770	0.86	0.83
	161	733	680	0.93	0.89
$^{137}\text{Cs}$	662	700	728	1.04	1.00
$^{60}\text{Co}$	1250	700	773	1.10	1.06
$^{16}\text{N}$	6130	151	176	1.17	1.13

表2-5 サーベイメータエネルギー特性(その3)

形式 AE-133H

線種	エネルギー (keV)	基準1cm線量		レスポンス	相対レスポンス ( $^{137}\text{Cs}$ 基準)
		当量率 (mSv/h)	指示値 , (mSv/h)		
	48.6	10.50	7.9	0.75	0.70
X線 (QI=0.8)	80.0	11.34	8.8	0.78	0.73
	119	9.17	8.2	0.89	0.83
	161	8.08	7.5	0.93	0.87
$^{137}\text{Cs}$	662	15.0	16.1	1.07	1.00
$^{60}\text{Co}$	1250	15.0	17.0	1.13	1.06
$^{16}\text{N}$	6130	0.151	0.178	1.18	1.10

表2-6 サーベイメータエネルギー特性(その4)

形式 AE-133A<sub>1</sub>

線種	エネルギー (keV)	基準1cm線量		レスポンス	相対レスポンス ( <sup>137</sup> Cs基準)
		当量率 ( $\mu$ Sv/h)	指示値 ( $\mu$ Sv/h)		
	48.6	893	1050	1.18	1.13
X線	80.0	891	1030	1.16	1.12
(QI=0.8)	119	897	960	1.07	1.03
	161	733	730	1.00	0.96
<sup>137</sup> Cs	662	700	725	1.04	1.00
<sup>60</sup> Co	1250	700	740	1.06	1.02
<sup>16</sup> N	6130	151	183	1.21	1.16

表2-7 サーベイメータエネルギー特性(その5)

形式 AE-133H $\Delta_1$ 

線種	エネルギー (keV)	基準1cm線量		レスポンス	相対レスポンス ( $^{137}\text{Cs}$ 基準)
		当量率 (mSv/h)	指示値 , (mSv/h)		
	48.6	10.50	11.5	1.10	1.01
X線 (QI=0.8)	80.0	11.34	12.3	1.08	0.99
	119	9.17	9.78	1.07	0.98
	161	8.08	8.40	1.04	0.95
$^{137}\text{Cs}$	662	15.0	16.4	1.09	1.00
$^{60}\text{Co}$	1250	17.1	16.9	1.14	1.04
$^{16}\text{N}$	6130	0.151	0.184	1.22	1.13

表2-8 サーベイメータエネルギー特性(その6)

形式 ICS-311

線種	エネルギー (keV)	基準1cm線量		レスポンス	相対レスポンス ( $^{137}\text{Cs}$ 基準)
		当量率 (mSv/h)	指示値 (mSv/h)		
X線 (QI=0.8)	48.6	5.65	5.58	0.99	0.97
	80.0	5.58	6.58	1.18	1.16
	119	4.57	5.11	1.12	1.10
	161	8.08	8.35	1.03	1.01
$^{137}\text{Cs}$	662	7.00	7.13	1.02	1.00
$^{60}\text{Co}$	1250	7.00	7.53	1.08	1.06
$^{16}\text{N}$	6130	0.151	0.173	1.15	1.13

表2-9 サーベイメータエネルギー特性(その7)

形式 TCS-161

線種	エネルギー (keV)	基準1cm線量			相対レスポンス ( $^{137}\text{Cs}$ 基準)
		当量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	指示値 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	レスポンス	
$^{57}\text{Co}$	122	18.9	16.4	0.87	0.87
$^{51}\text{Cr}$	320	27.8	30.5	1.09	1.08
$^{137}\text{Cs}$	662	20.0	19.9	1.00	1.00
$^{60}\text{Co}$	1250	19.8	19.0	0.96	0.96
$^{16}\text{N}$	6130	20.0	13.9	0.70	0.70

表2-10 エリアモニタエネルギー特性

形式 NDC2

線種	エネルギー (keV)	基準1cm線量		レスpsons	相対レスポンス ( $^{137}\text{Cs}$ 基準)
		当量率 (mSv/h)	指示値 , (mSv/h)		
	48.6	0.974	0.108	0.11	0.11
X線 (QI=0.8)	80.0	0.868	0.643	0.74	0.76
	119	0.974	0.620	0.64	0.65
	161	0.684	0.545	0.80	0.82
$^{137}\text{Cs}$	662	1.00	0.980	0.98	1.00
$^{60}\text{Co}$	1250	0.50	0.500	1.00	1.02
$^{16}\text{N}$	6130	0.0733	0.080	1.09	1.11

表2-11  $^{16}\text{N}-\gamma$  線照射時の線源部アクリルカバーの有無による差

タイプ	機器No.	指 示 値		アクリル無し アクリル有り
		アクリル有り	アクリル無し	
<電離箱式サーベイメータ>				
照 射	AE-133	IC1-09	167 $\mu\text{Sv/h}$	270 $\mu\text{Sv/h}$ 1.46
		IC1-14	170 " "	240 " 1.41
線 量	AE-133H	ICJ-16	0.187mSv/h	0.230mSv/h 1.35
		ICJ-20	0.193 " "	0.260 " 1.35
対 応	NESCO-808A	ICD-32	172 $\mu\text{Sv/h}$	234 $\mu\text{Sv/h}$ 1.36
		ICD-35	192 " "	264 " 1.38
cm	ICS-311	ICF-03	188 $\mu\text{Sv/h}$	258 $\mu\text{Sv/h}$ 1.37
		ICF-06	176 " "	243 " 1.38
線 量	AE-133A <sub>1</sub>	2211254	185 $\mu\text{Sv/h}$	260 $\mu\text{Sv/h}$ 1.41
		2211259	185 " "	260 " 1.41
当 量	AE-133HA <sub>1</sub>	2211251	0.185mSv/h	0.300mSv/h 1.62
		2211252	0.187 " "	0.300 " 1.60
<シンチレーション式サーベイメータ>				
	ICS-161	96R3778	14.3 $\mu\text{Sv/h}$	15.1 $\mu\text{Sv/h}$ 1.06
		96R3779	13.9 " "	14.4 " 1.04
<電離箱式エリアモニタ>				
照 射	FUJI NDC2	8M3512	92.9 $\mu\text{Sv/h}$	96.4 $\mu\text{Sv/h}$ 1.04

表3-1  $^{16}\text{N}-\gamma$  線試験対象の個人線量計の種類と個数

線量計の種類と形名	動燃より提供 された個数	$^{16}\text{N}$ 試験の 対象個数
<b>TLD (熱ルミネッセンス線量計)</b>		
・動燃型バッジ	25	4
・UD-200S	30	9
<b>PD (ポケット線量計)</b>		
・SEQ-5	10	10
・MY DOSE	8	4
<b>APD (警報付ポケット線量計)</b>		
・FUJI レムマスター-S	10	3
・FUJI レムマスター-Q	10	3

表3-2 個人線量計ばらつき試験の結果

線量計の種類と形名	ばらつき試験 の対象個数	指示値の平均 ／基準線量	変動係数 (%)
<b>TLD (熱ルミネッセンス線量計)</b>			
・動燃型バッジ	8	1.12	4.5
・UD-200S	30	0.99	2.6
<b>PD (ポケット線量計)</b>			
・SEQ-5	10	1.02	3.9
・MY DOSE	10	0.98	1.8
<b>APD (警報付ポケット線量計)</b>			
・FUJI レムマスター-S	9	1.14	2.1
・FUJI レムマスター-Q	10	0.93	6.1

\*1 動燃側読み取り

表3-3 個人線量計エネルギー特性(その1)

形式：動燃型バッジ < TLD >

線種	実効 エネルギー	1cm線量 当量値 (keV)	指示値 (mSv)	レスポンス (mSv)	相対 レスポンス ( <sup>137</sup> Cs基準)
<sup>137</sup> Cs	662	0.50	0.565	1.13	1.00
<sup>60</sup> Co	1250				
<sup>15</sup> N	6130	0.37	0.386	1.04	0.90

表3-4 個人線量計エネルギー特性（その2）

形式：UD-200S &lt;TL D&gt;

線種	実効 エネルギー	1cm線量 当量値 (keV)	指示値 (mSv)	レスポンス	相対 レスポンス ( <sup>137</sup> Cs基準)
<sup>137</sup> Cs	662	0.50	0.555	1.11	1.00
<sup>60</sup> Co	1250				
<sup>16</sup> N	6130	0.40	1.107	2.77	2.49

表3-5 個人線量計エネルギー特性(その3)

形式：SEQ-5 <PD>

線種	実効 エネルギー	1cm線量 当量値 (keV)	指示値 (mSv)	レスポンス	相対 レスポンス ( <sup>137</sup> Cs基準)
<sup>137</sup> Cs	662	1.55	1.55	1.00	1.00
<sup>60</sup> Co	1250	1.59	1.62	1.02	1.02
<sup>16</sup> N	6130	0.40	0.54	1.33	1.33

表3-6 個人線量計エネルギー特性(その4)

形式: MY DOSE &lt;PD&gt;

線種	実効 エネルギー	1cm線量 当量値 (keV)	指示値 (mSv)	レスポンス	相対 レスポンス ( <sup>137</sup> Cs基準)
<sup>137</sup> Cs	662	2.00	1.964	0.98	1.00
<sup>60</sup> Co	1250	2.00	1.820	0.91	0.93
<sup>16</sup> N	6130	0.40	1.107	0.93	0.95

表3-7 個人線量計エネルギー特性(その5)

形式: レムマスター-S &lt;APD&gt;

線種	実効 エネルギー	1cm線量 当量値 (keV)	指示値 (mSv)	レスポンス	相対 レスポンス ( <sup>137</sup> Cs基準)
<sup>137</sup> Cs	662	2.06	2.64	1.28	1.00
<sup>60</sup> Co	1250	1.59	1.65	1.04	0.81
<sup>16</sup> N	6130	0.34	0.34	1.00	0.78

表3-8 個人線量計エネルギー特性(その6)

形式：レムマスター-Q < A P D >

線種	実効 エネルギー	1cm線量 当量値 (keV)	指示値 (mSv)	レスポンス	相対 レスポンス ( $^{137}\text{Cs}$ 基準)
$^{137}\text{Cs}$	662	2.06	2.08	1.01	1.00
$^{60}\text{Co}$	1250	1.59	1.67	1.05	1.04
$^{16}\text{N}$	6130	0.34	0.43	1.27	1.26

表4-1 運転時の線量率計算に用いたデータ

測定位置 <sup>*1</sup>	$D_{\theta, 5\text{MeV}}$	$(D_2/D_1)_{10\text{MeV}}$	$(D_1/D_{\theta})_{5\text{MeV}}$	$F^{*2}$
<b>照射線量率: [mR/h]</b>				
0 m	$3.74 \times 10^{-2}$	0.702	$2.10 \times 10^{-1}$	1.15
5 m	$1.13 \times 10^{-1}$	*****	$2.32 \times 10^{-1}$	1.17
10 m	$2.69 \times 10^{-1}$	0.717	$2.83 \times 10^{-1}$	1.20
15 m	$2.38 \times 10^{-1}$	*****	$2.78 \times 10^{-1}$	1.20
<b>1cm線量当量率: [<math>\mu\text{Sv}/\text{h}</math>]</b>				
0 m	$3.85 \times 10^{-1}$	0.694	$1.98 \times 10^{-1}$	1.14
5 m	1.17	*****	$2.19 \times 10^{-1}$	1.15
10 m	2.73	0.708	$2.71 \times 10^{-1}$	1.19
15 m	2.41	*****	$2.66 \times 10^{-1}$	1.19

\*1 軽水・ガス系室からの距離である。

\*2  $F = [1 + (D_2/D_1)_{10\text{MeV}} \cdot (D_1/D_{\theta})_{5\text{MeV}}]$  であり、計算に使用した  $(D_2/D_1)_{10\text{MeV}}$  の値は、照射線量率に対して0.709、1cm線量当量率に対して0.701である。

表4-2 NaI(Tl)シンチレーション検出器によるDCA周辺線量率測定結果

測定 位置 <sup>*1</sup>		照射線量率 [mR/h]	1 cm線量当量率	1 cm線量当量率
			[μSv/h]	照射線量率 [μSv/mR]
0 m	500W時	$4.30 \times 10^{-2}$	$4.39 \times 10^{-1}$	10.2
	B.G	$6.10 \times 10^{-3}$	$6.39 \times 10^{-2}$	10.5
5 m	500W時	$1.32 \times 10^{-1}$	1.35	10.2
	B.G	$6.84 \times 10^{-3}$	$7.19 \times 10^{-2}$	10.5
10 m	500W時	$3.23 \times 10^{-1}$	3.25	10.1
	B.G	$6.91 \times 10^{-3}$	$7.26 \times 10^{-2}$	10.5
15 m	500W時	$2.85 \times 10^{-1}$	2.86	10.1
	B.G	$7.29 \times 10^{-3}$	$7.67 \times 10^{-2}$	10.5

\*1 軽水・ガス系室のシャッター表面からの距離である。

表4-3 NaI(Tl) 検出器と電離箱式サーベイメータによる測定結果の比較

測定位置 <sup>①</sup>	1 cm線量当量率		電離箱 NaI(Tl)
	NaI(Tl)検出器 [ $\mu$ Sv/h]	電離箱式サーベイメータ <sup>②</sup> [ $\mu$ Sv/h]	
0 m	$4.39 \times 10^{-1}$	$6 \times 10^{-1}$	1.4
5 m	1.35	1.7	1.26
10 m	3.25	4.2	1.29
15 m	2.86	3.5	1.22

\*1 軽水・ガス系室のシャッター表面からの距離である。

\*2 使用したサーベイメータは、応用技研 AE-133A<sub>1</sub> である。

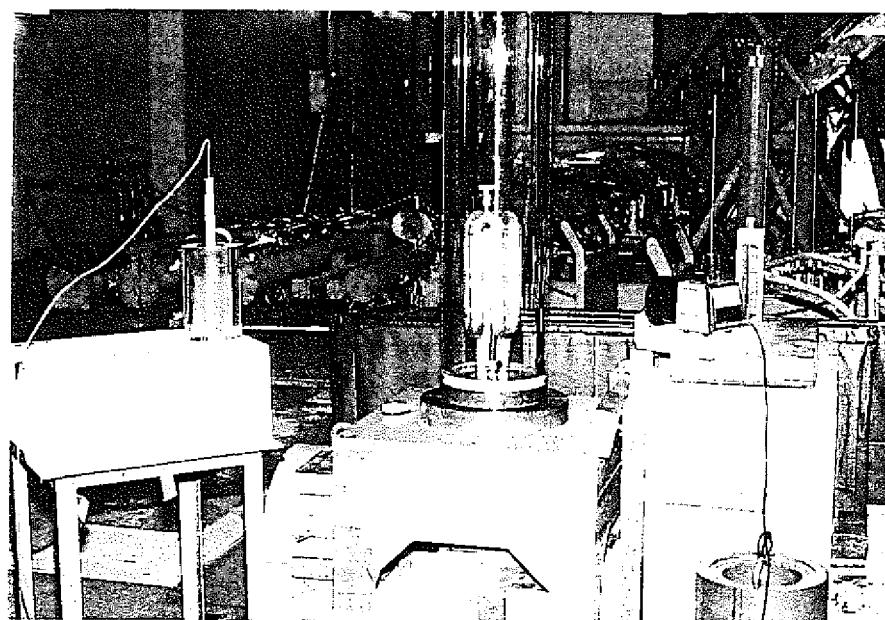


写真 2-1  $^{16}\text{N}-\gamma$  線照射時の基準線量測定の様子  
(モニタ用サーベイメータの配置)

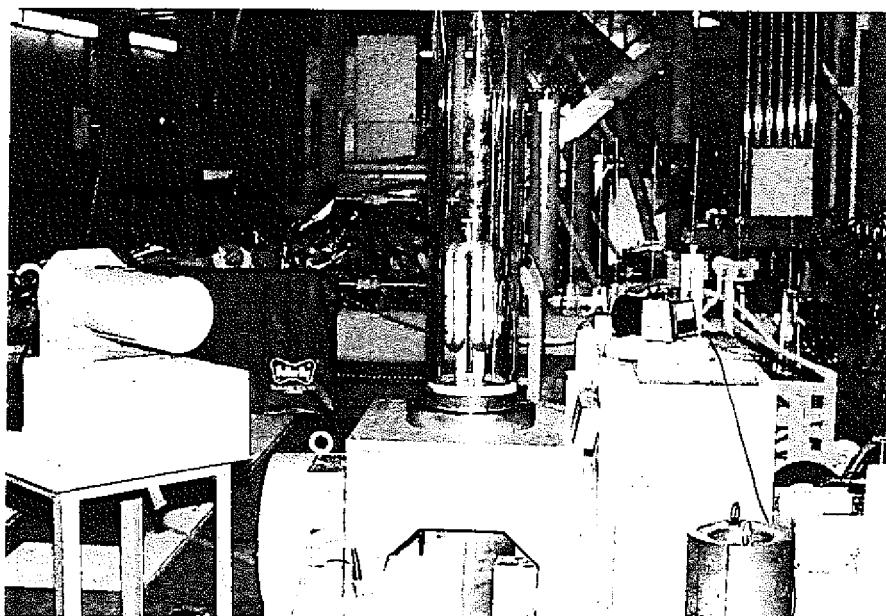


写真 2-2  $^{16}\text{N}$  照射装置によるエネルギー特性試験の様子  
(エリアモニタ試験時)

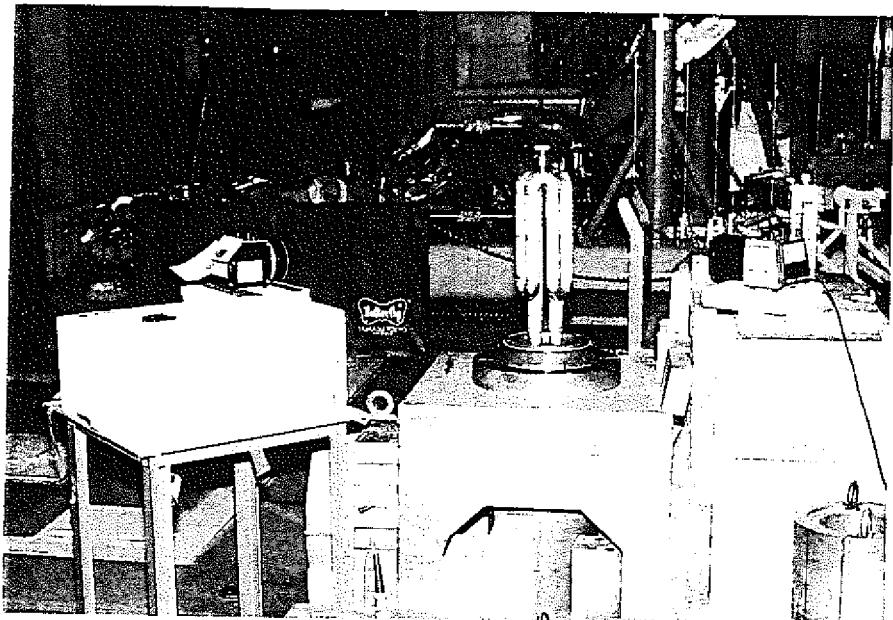


写真2-3 高エネルギー電子の影響調査の様子（対象機器：AE-133）  
—線源部のアクリルカバーを外した状態での照射—

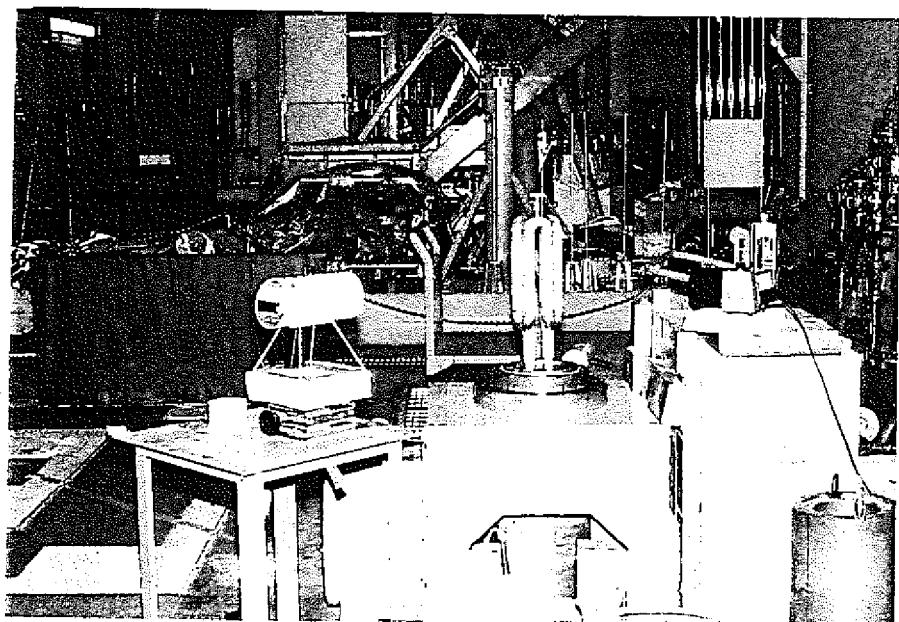


写真2-4 高エネルギー電子の影響調査の様子（対象機器：NESCO 808 A）  
—線源部のアクリルカバーを外した状態での照射—

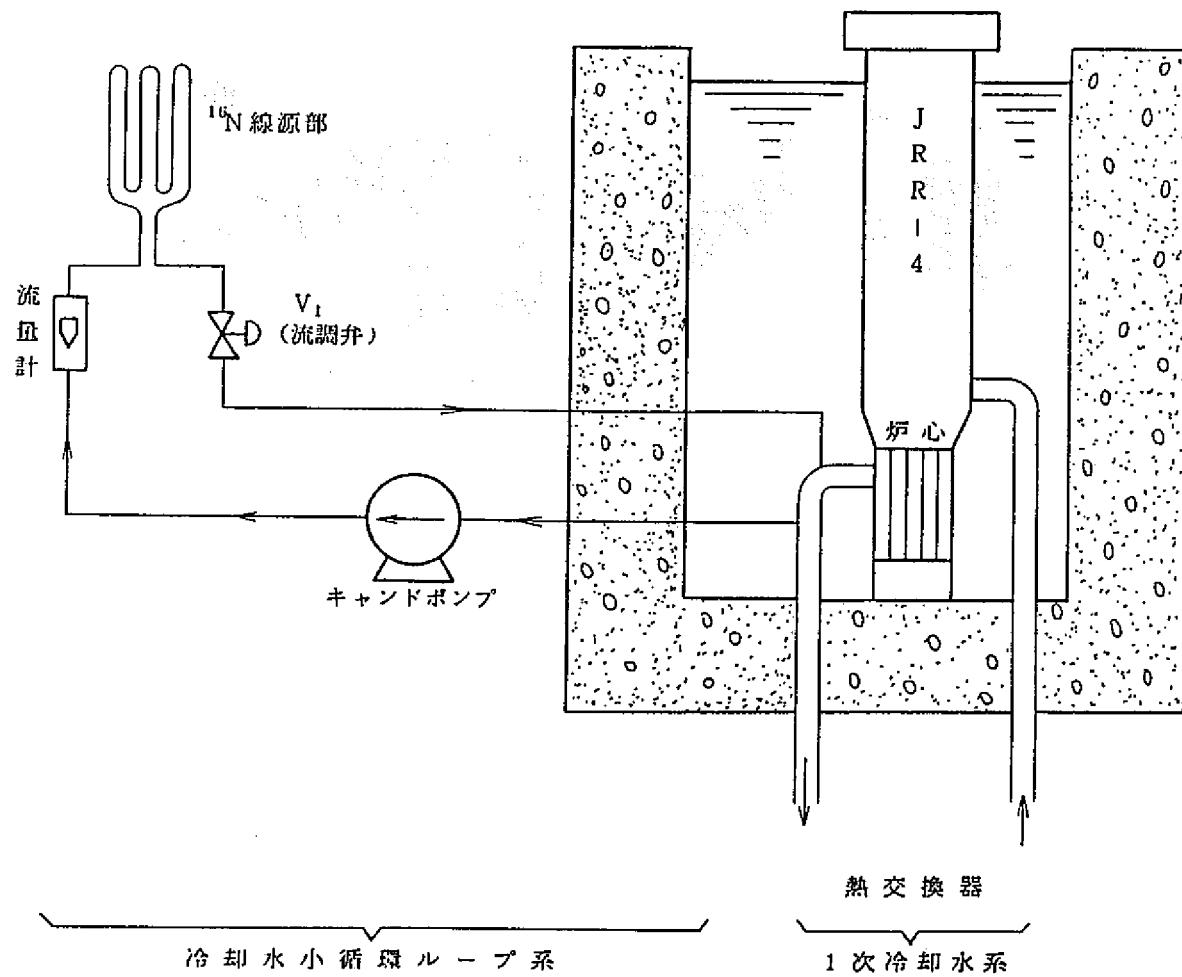


図 2-1 <sup>16</sup>N-γ線照射装置 (JRR-4 冷却水小循環ループ)

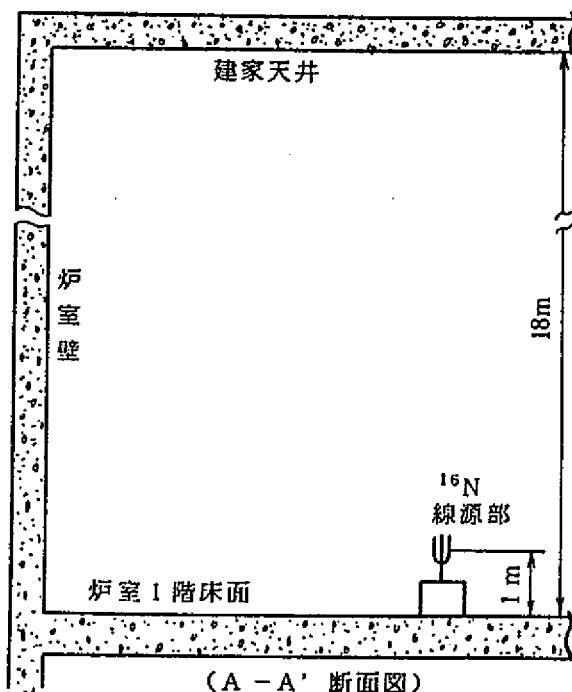
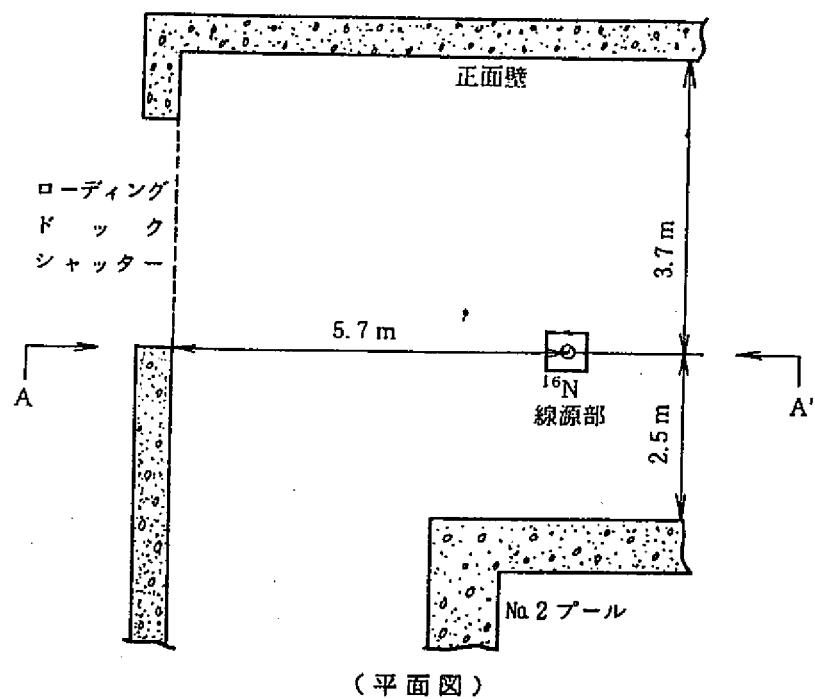


図 2-2  $^{16}\text{N}-\gamma$  線照射装置配置図

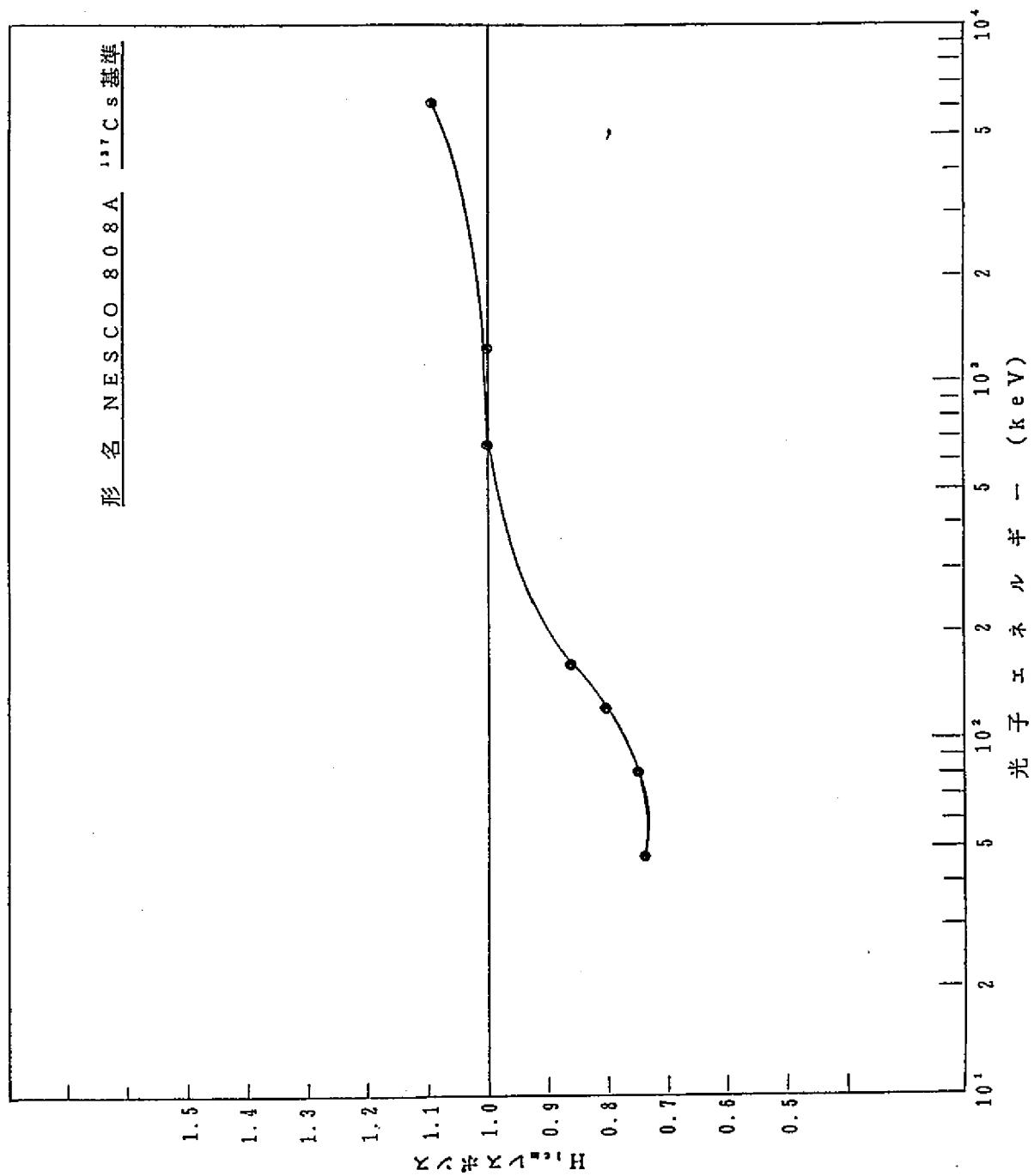


図2-3 サーベイメータエネルギー特性(その1)

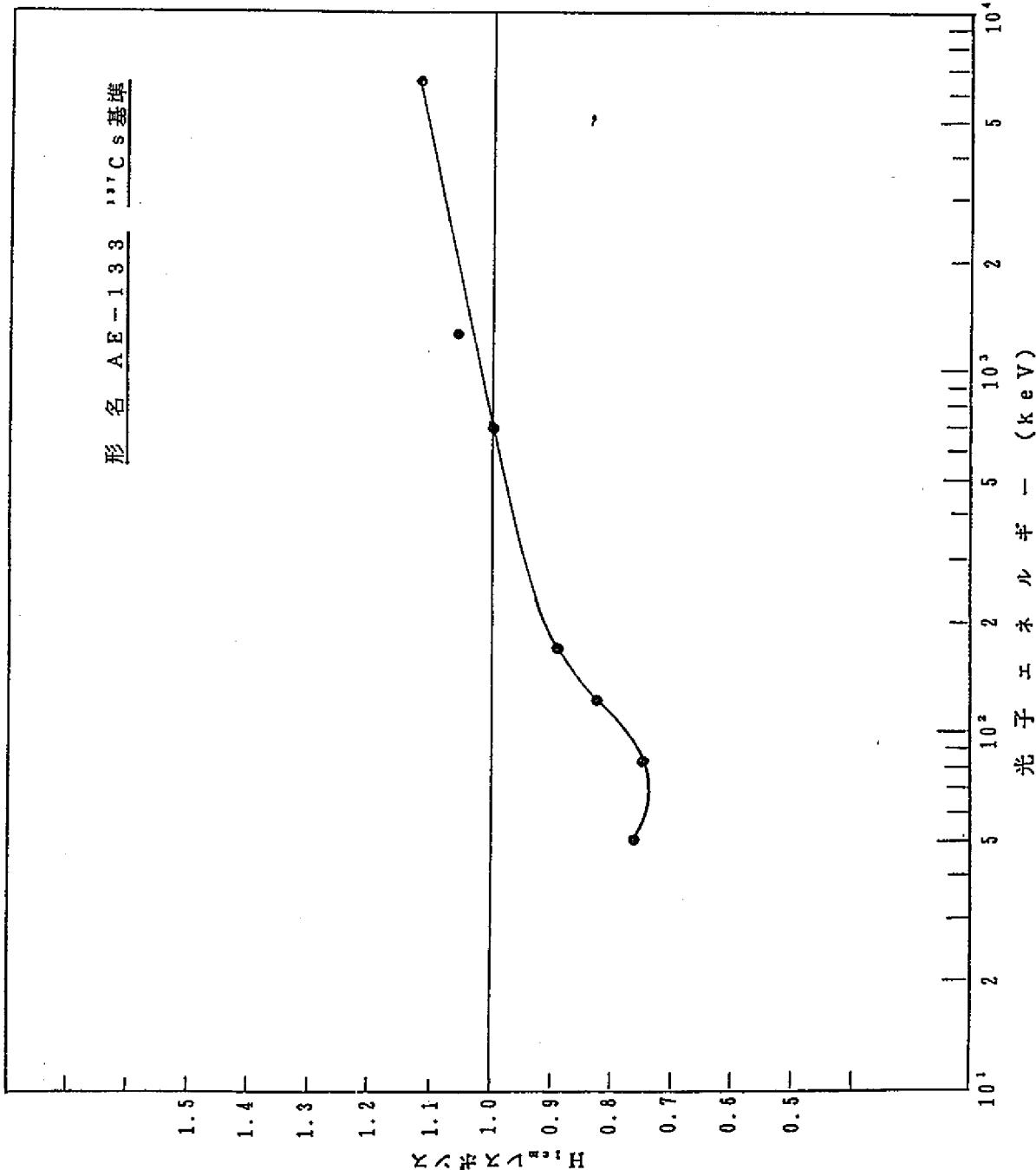


図2-4 サーベイメータエネルギー特性(その2)

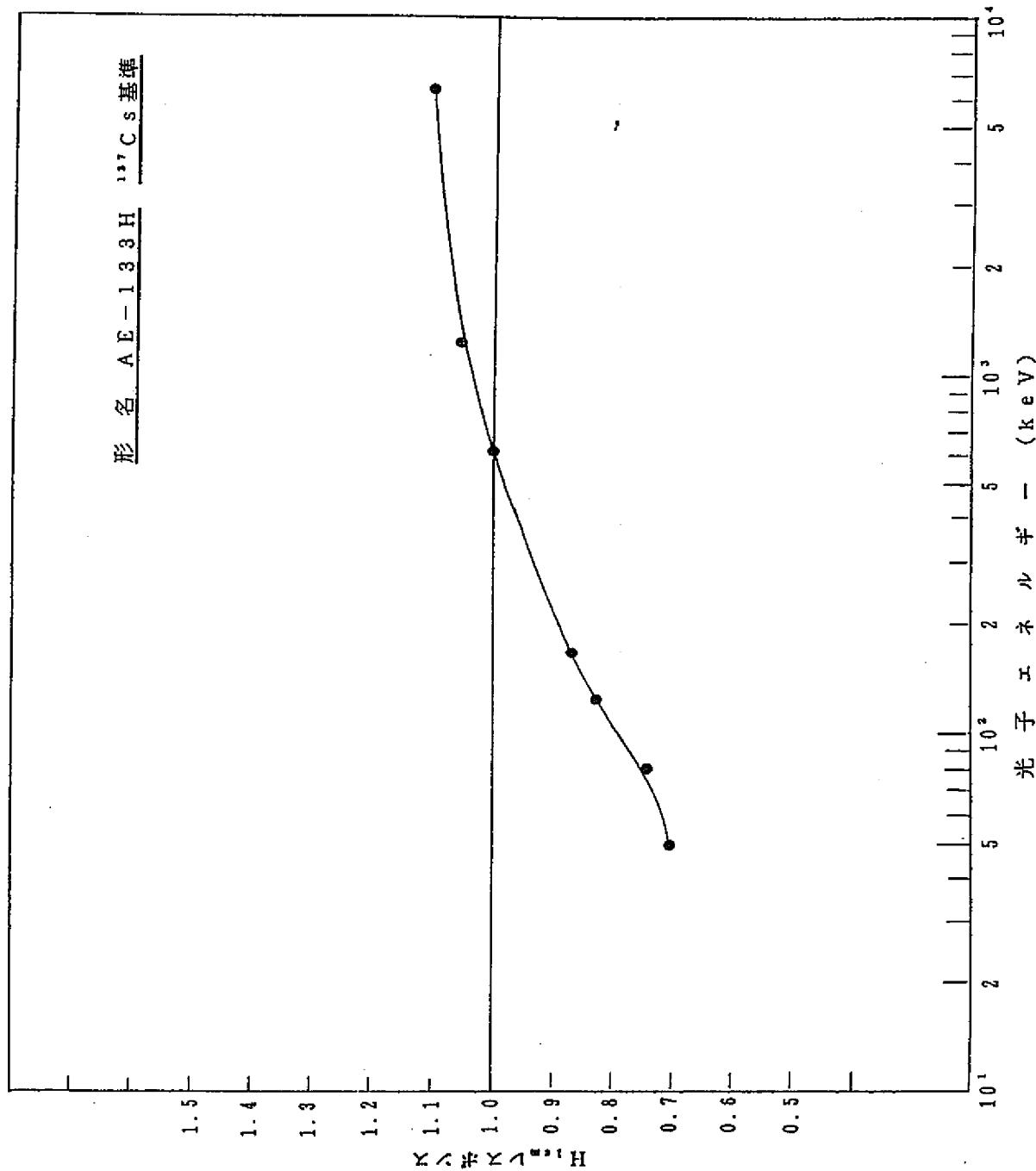


図2-5 サーベイメータエネルギー特性(その3)

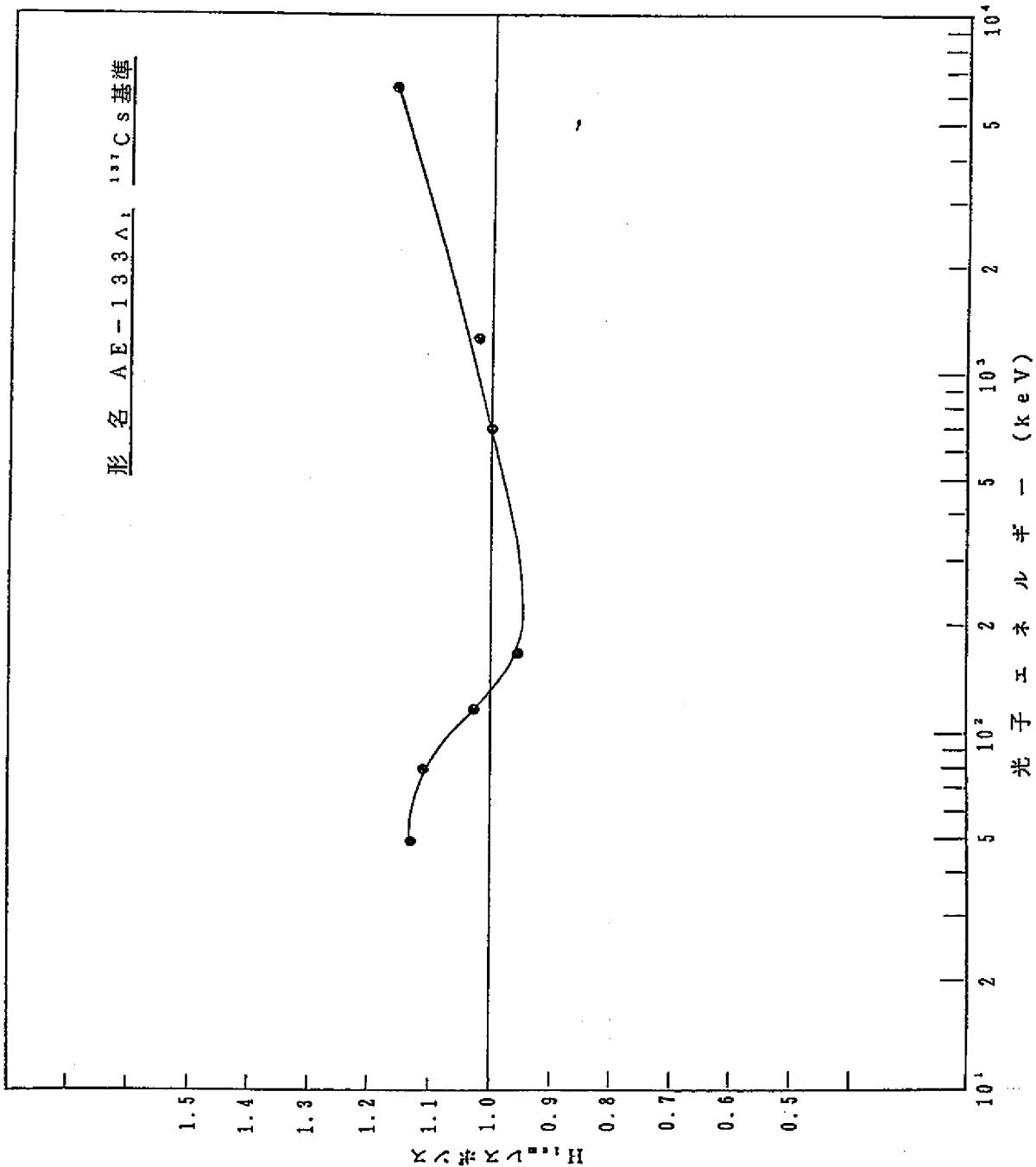


図2-6 サーベイメータエネルギー特性(その4)

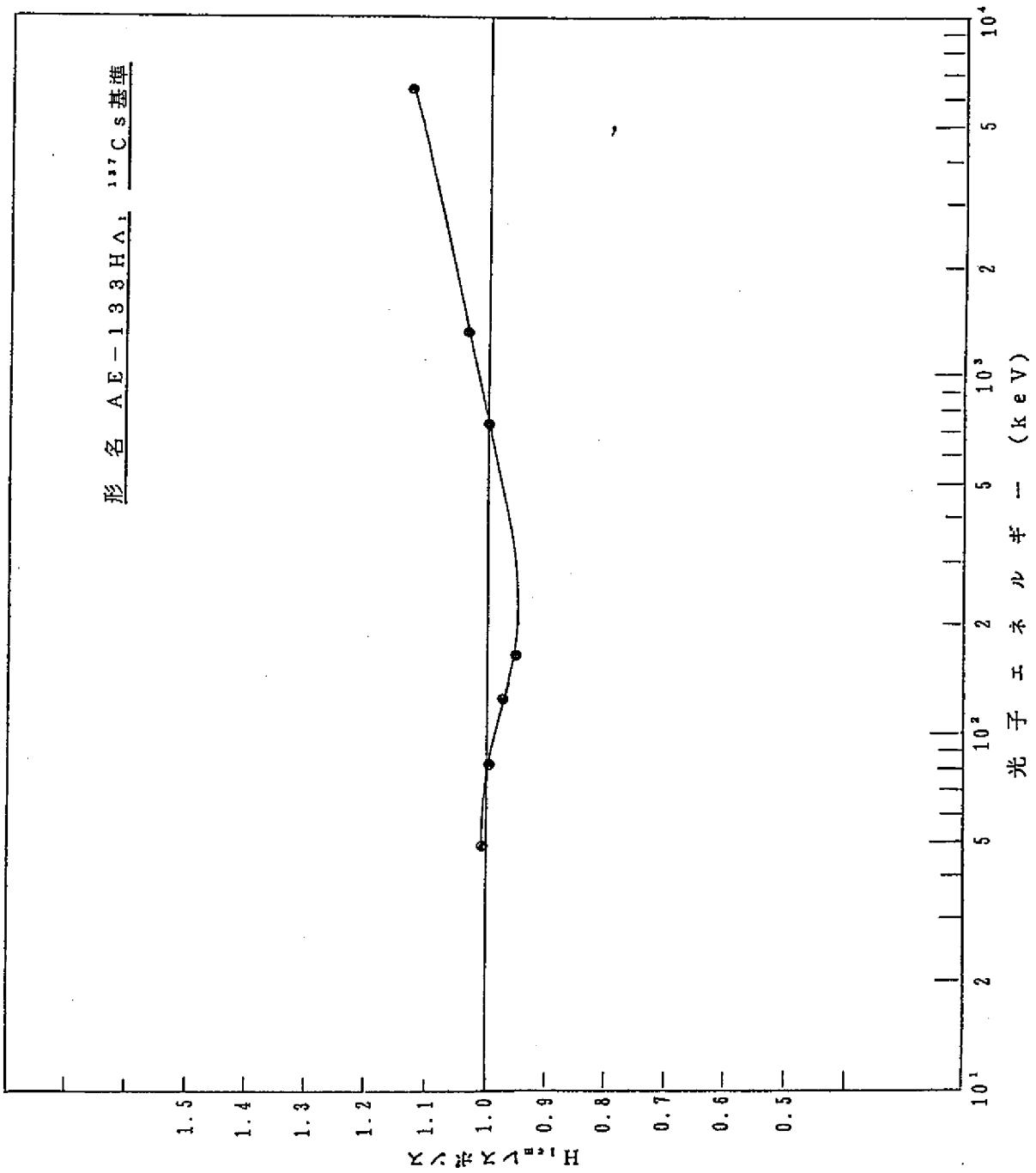


図2-7 サーベイメータエネルギー特性(その5)

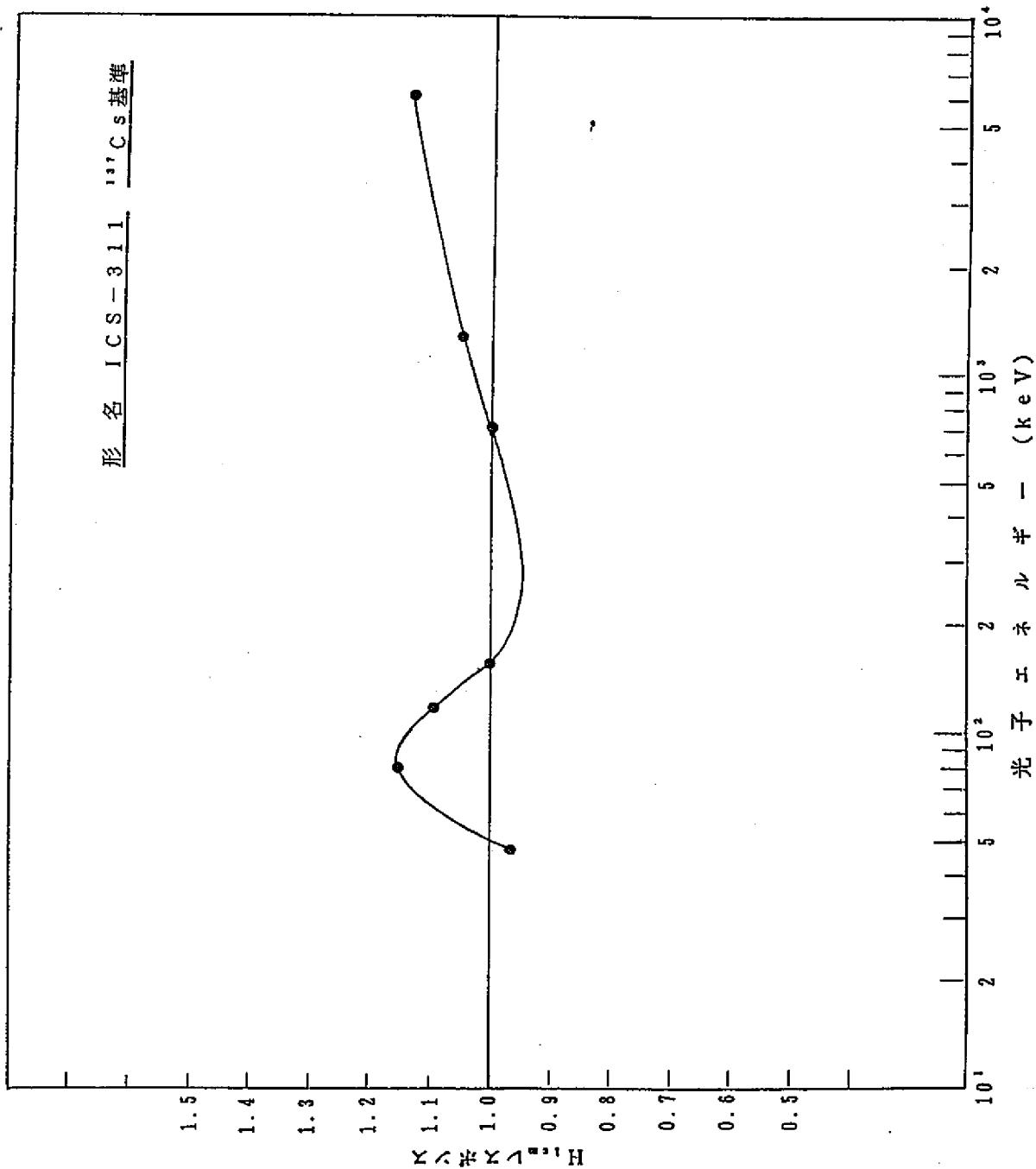


図2-8 サーベイメータエネルギー特性(その6)

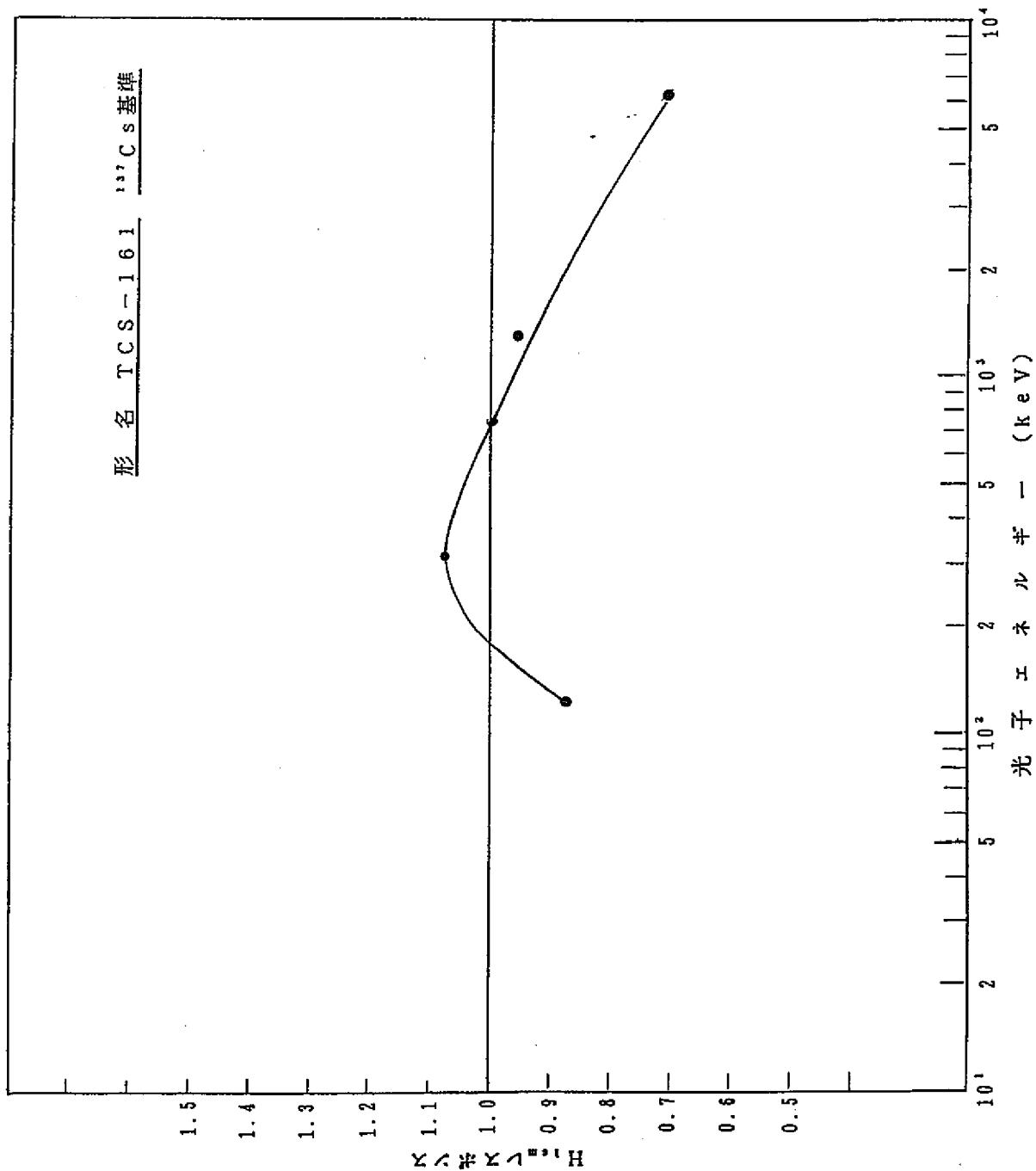


図2-9 サーベイメータエネルギー特性(その7)

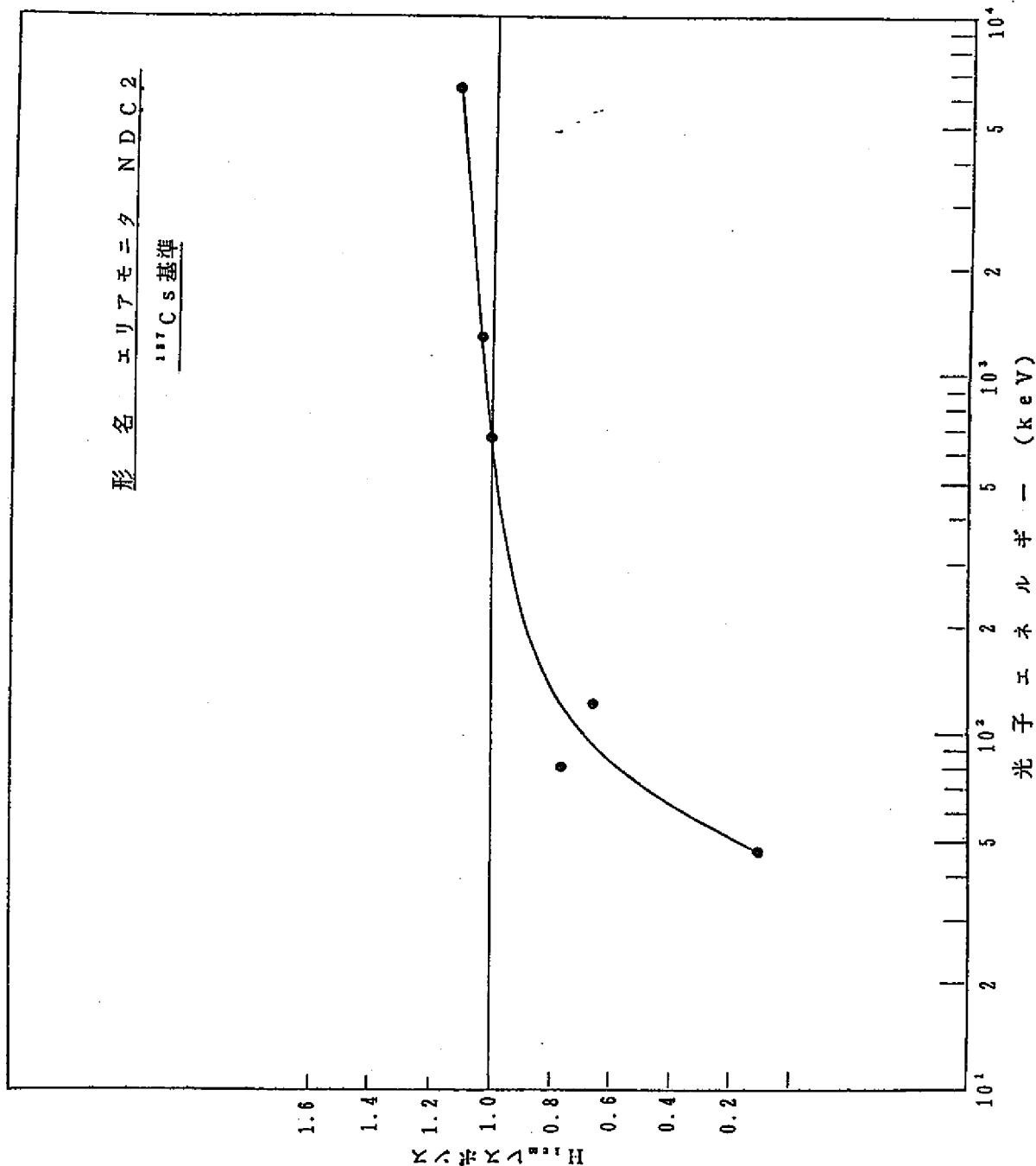


図2-10 エリヤモニタエネルギー特性

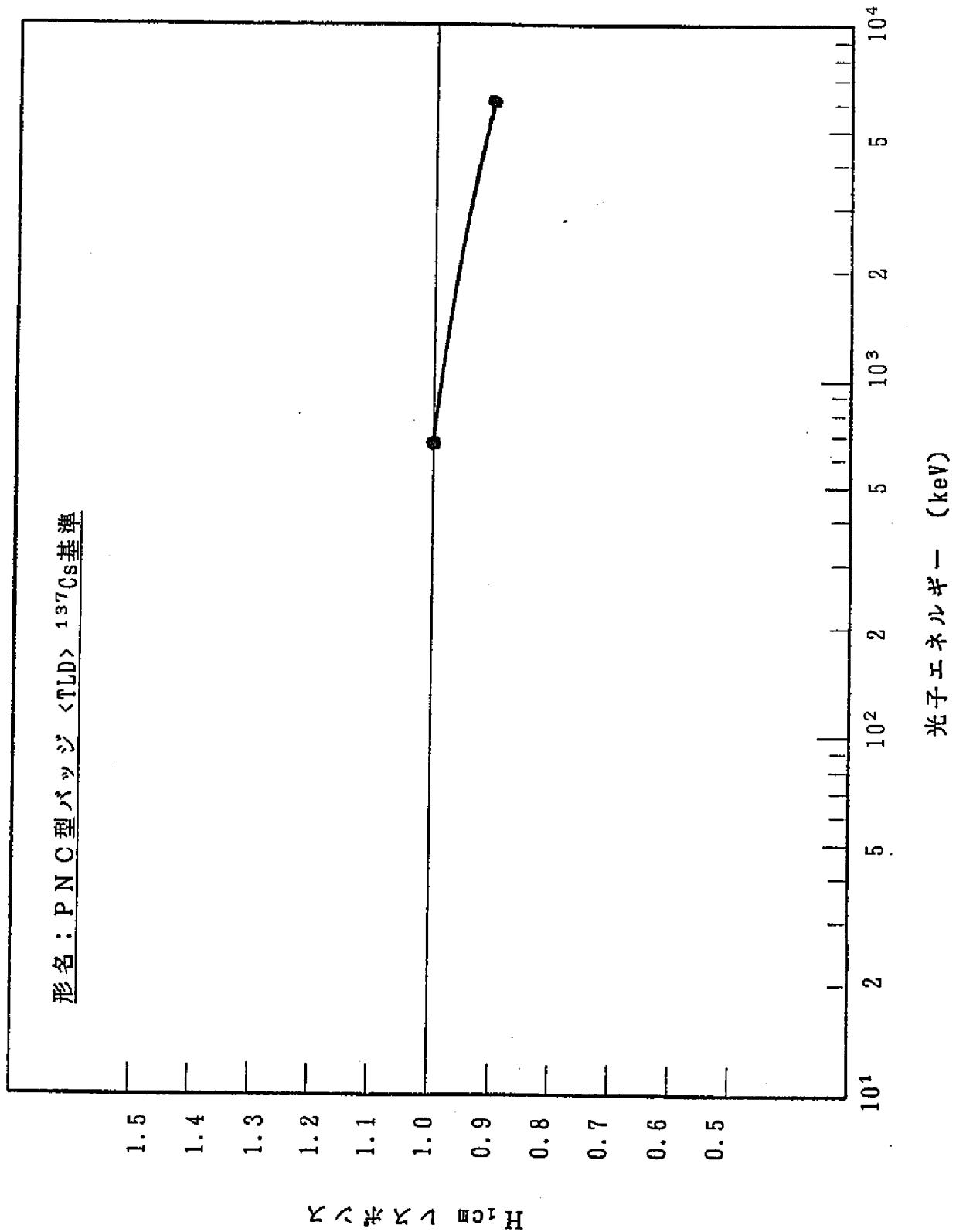


図3-1 個人線量計エネルギー特性（その1）

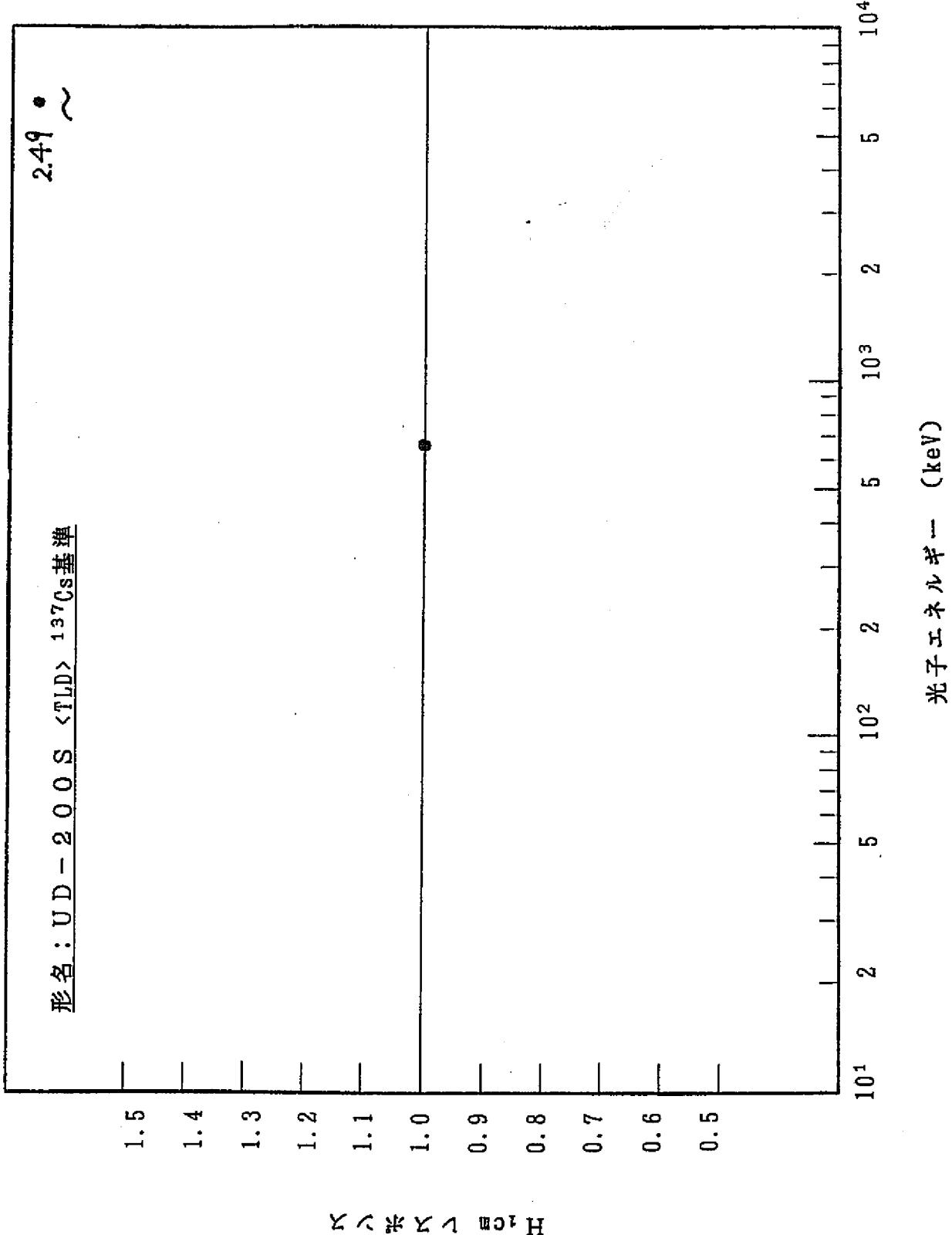


図3-2 個人線量計エネルギー特性(その2)

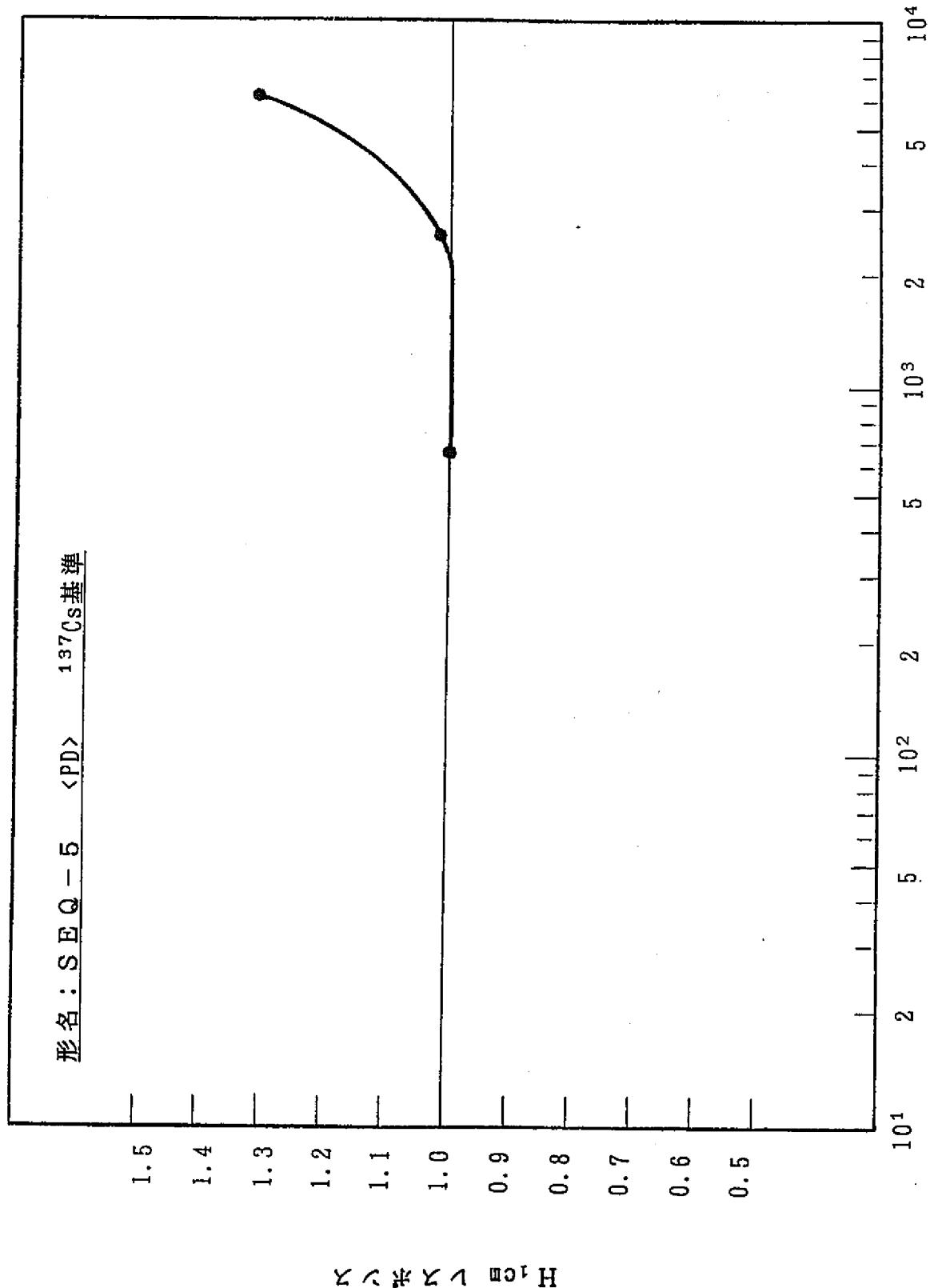
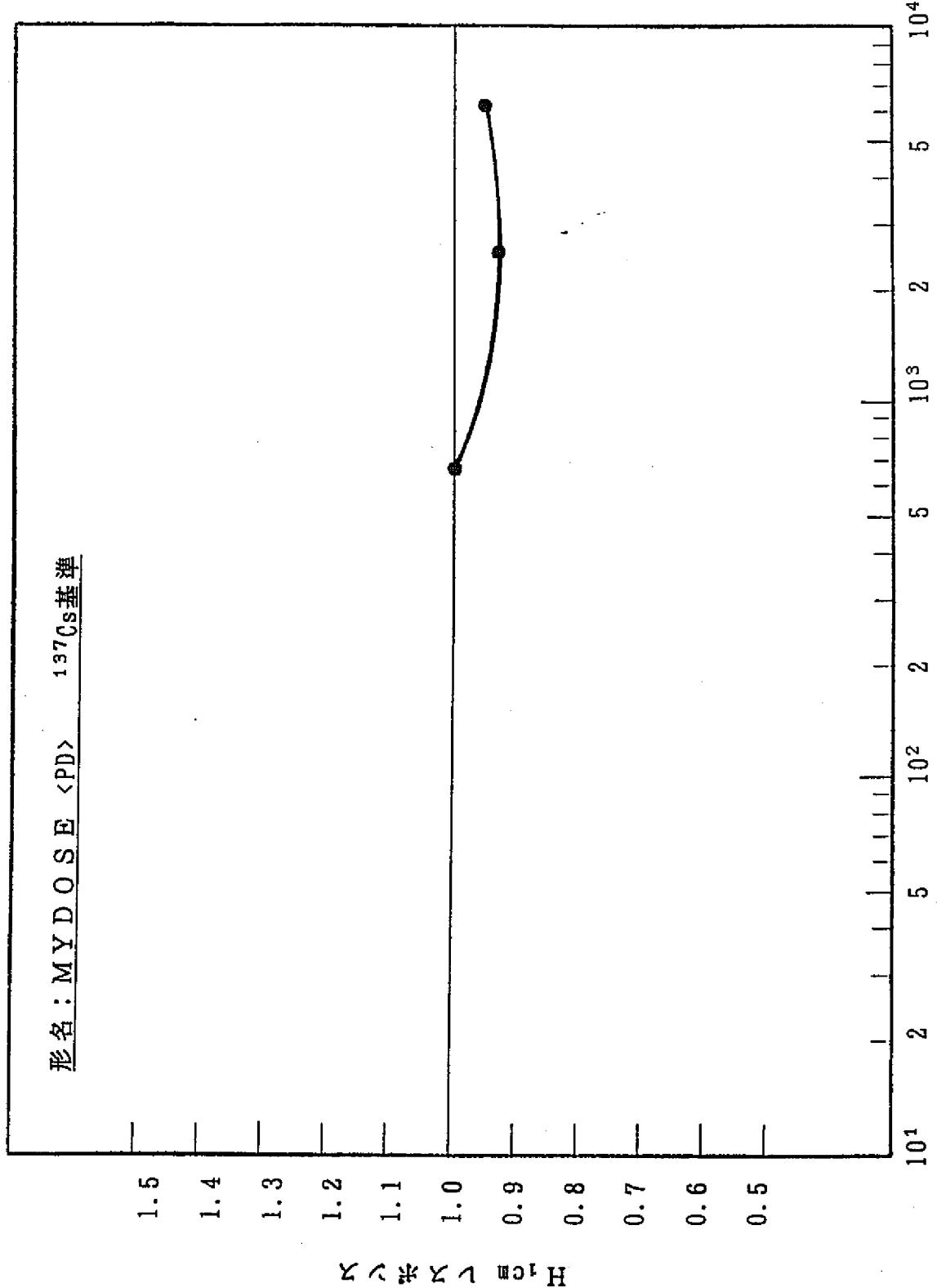
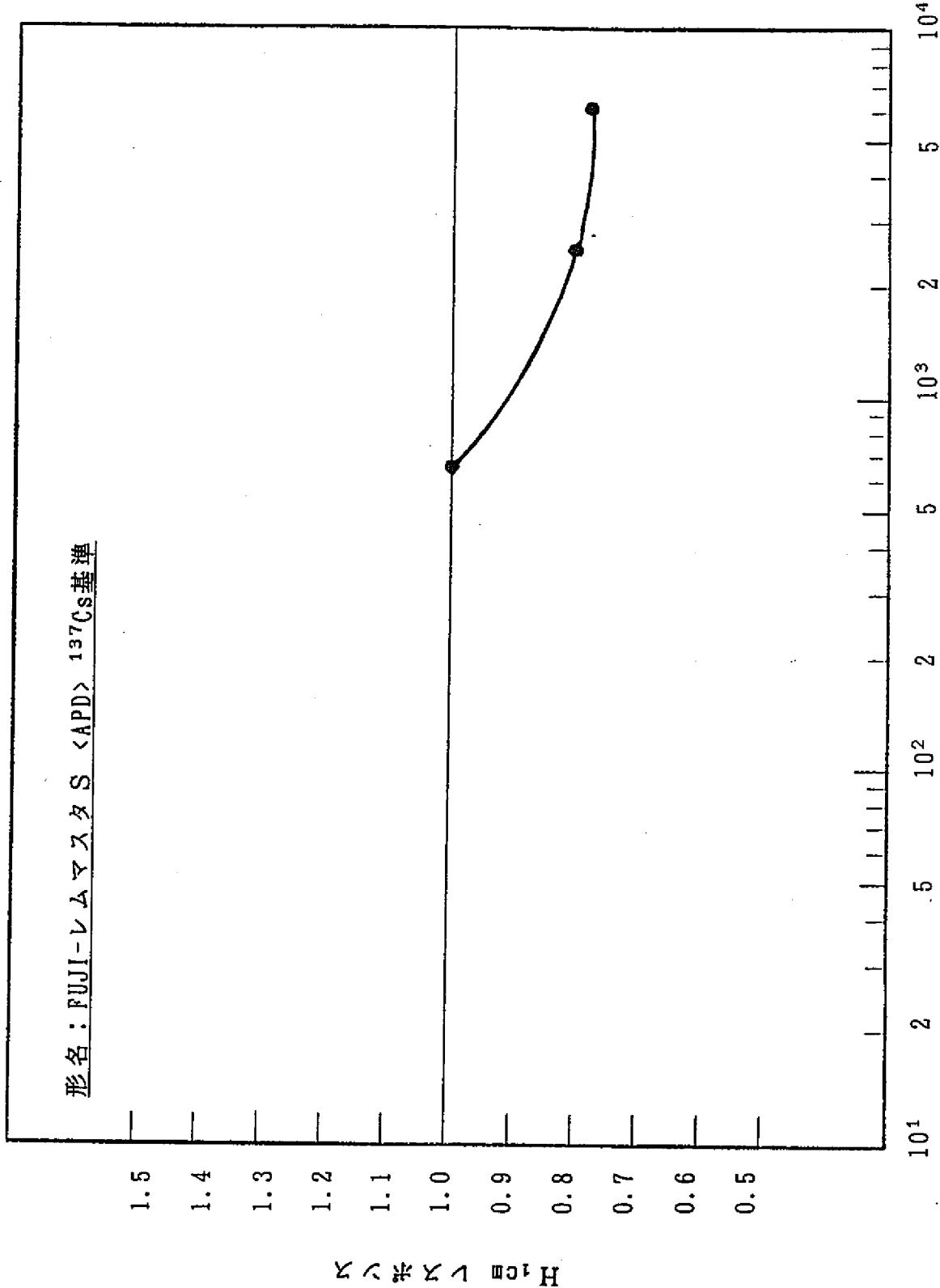


図3-3 個人線量計エネルギー特性(その3)



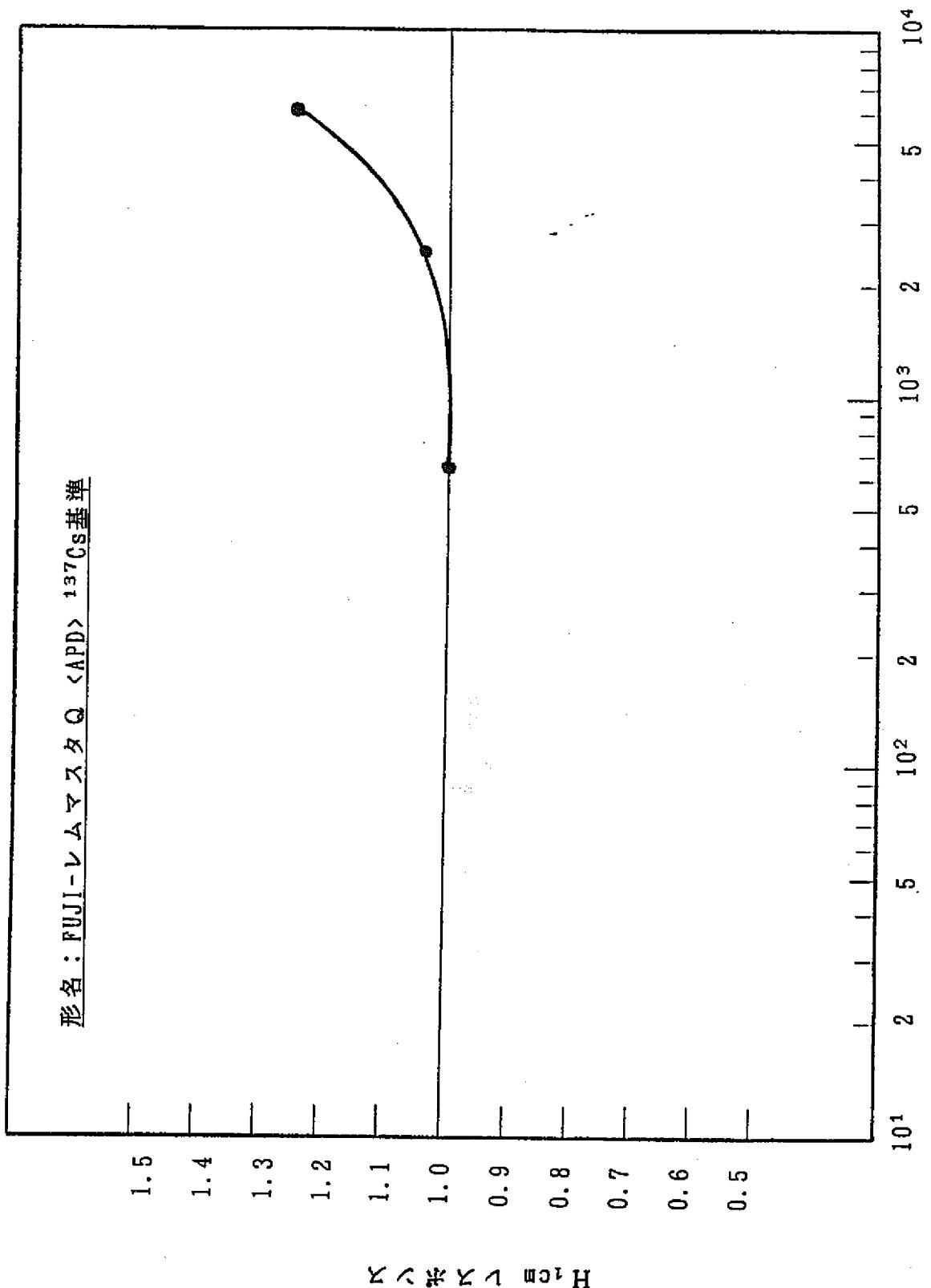
光子エネルギー (keV)

図3-4 個人線量計エネルギー特性(その4)



光子エネルギー特性 (その5)

図3-5 個人線量計エネルギー特性 (その5)



光子エネルギー (keV)

図3-6 個人線量計エネルギー特性（その6）

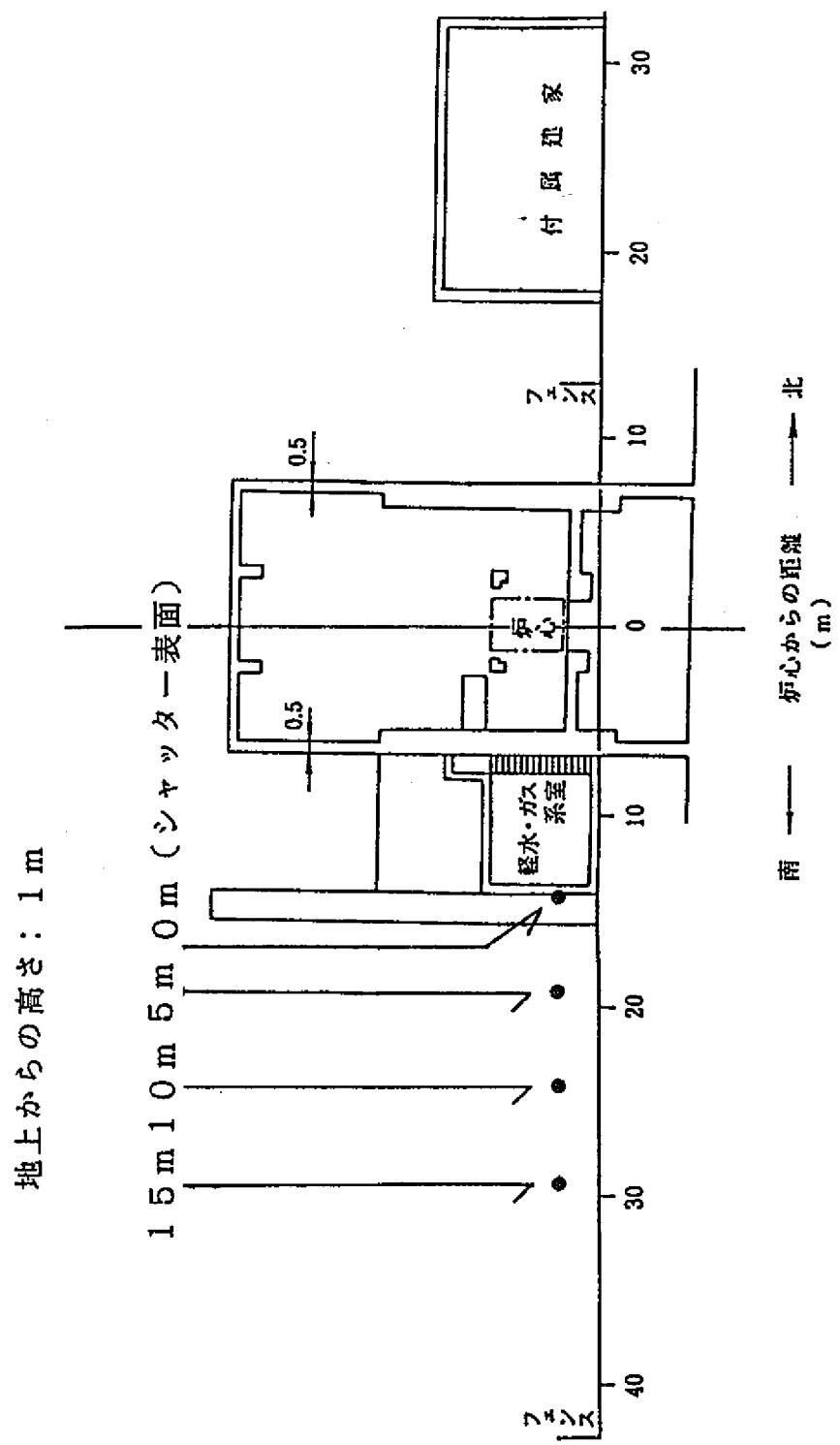


図4-1 DCA 500W 運転時線量率測定地点

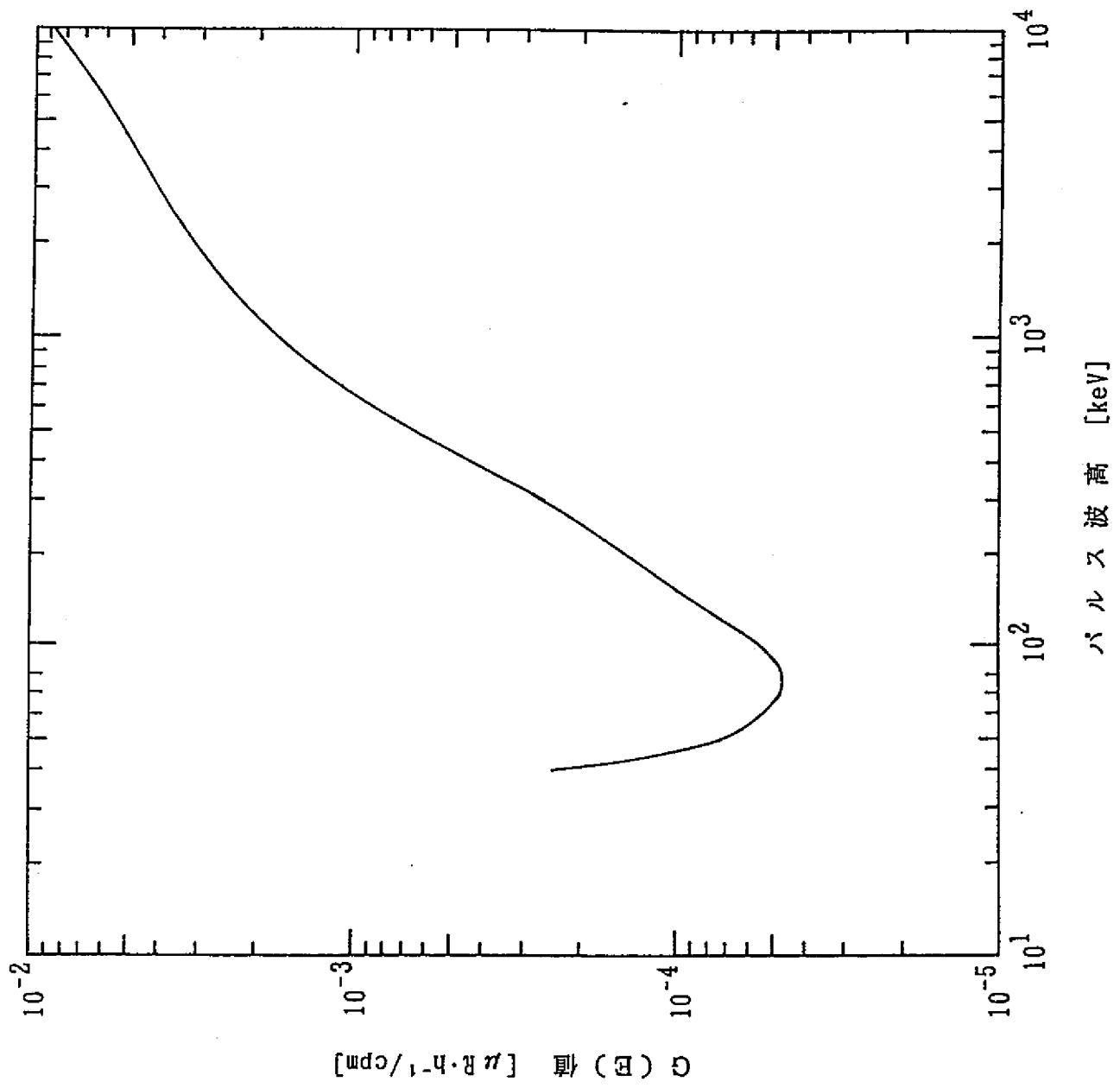


図 4-2 照射線量率用  $G(E)$  関数

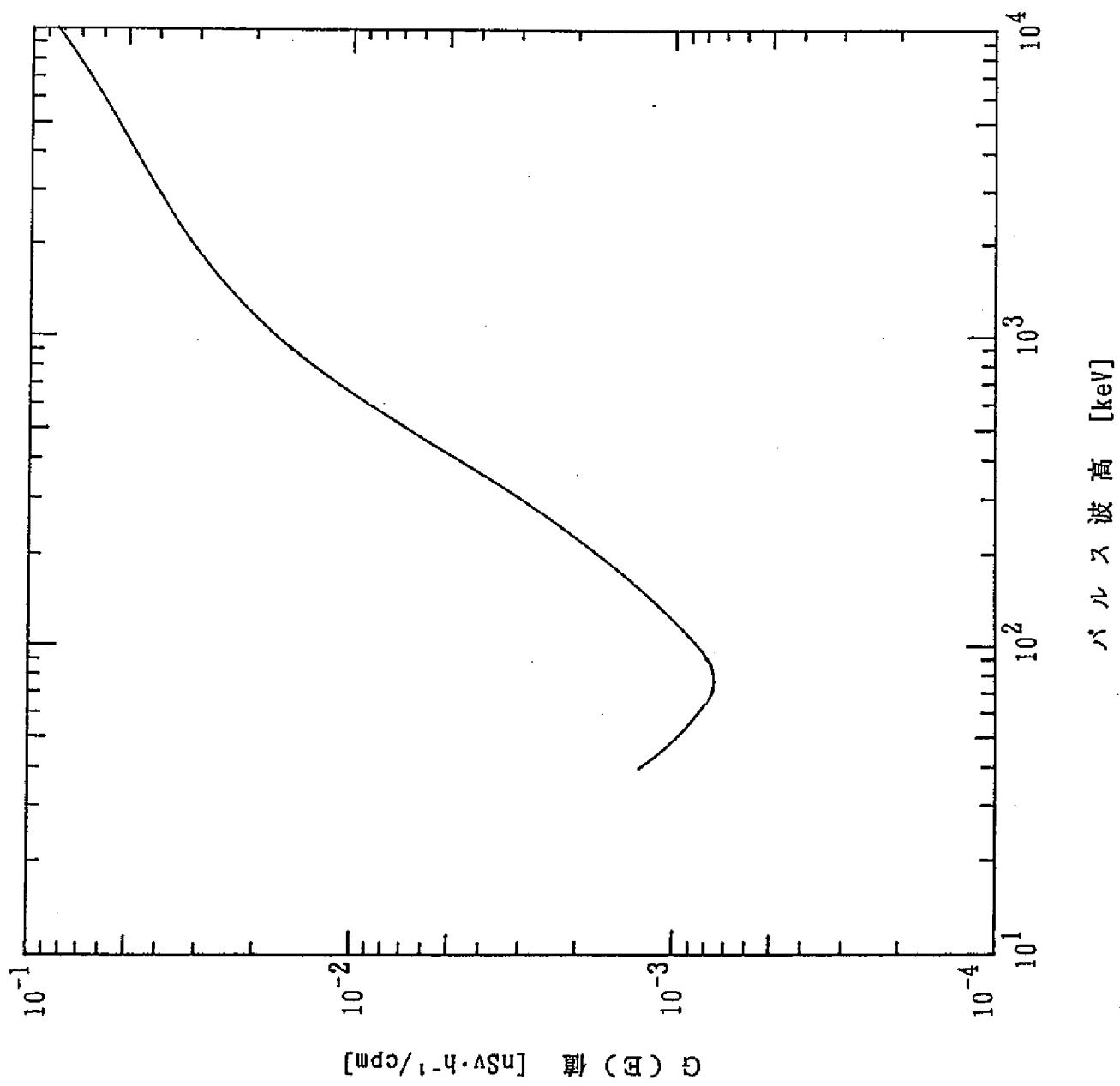


図 4-3 1 cm 線量当量率用  $G(E)$  関数

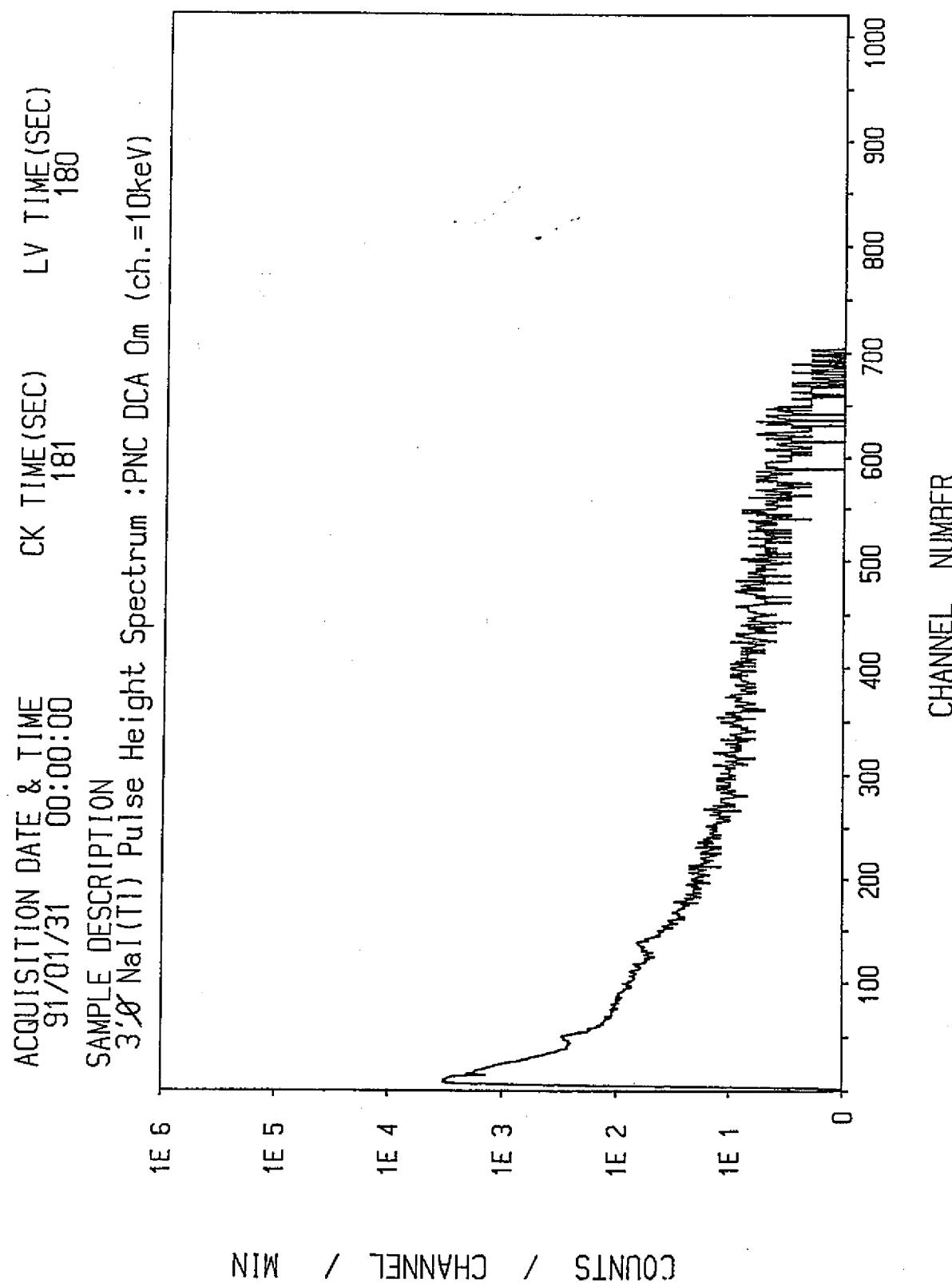


図 4-4 NaI (Tl) 検出器による  $\gamma$  線スペクトル (500 W 運転時)  
(測定点: 0 m, ch. 幅: 10 keV)

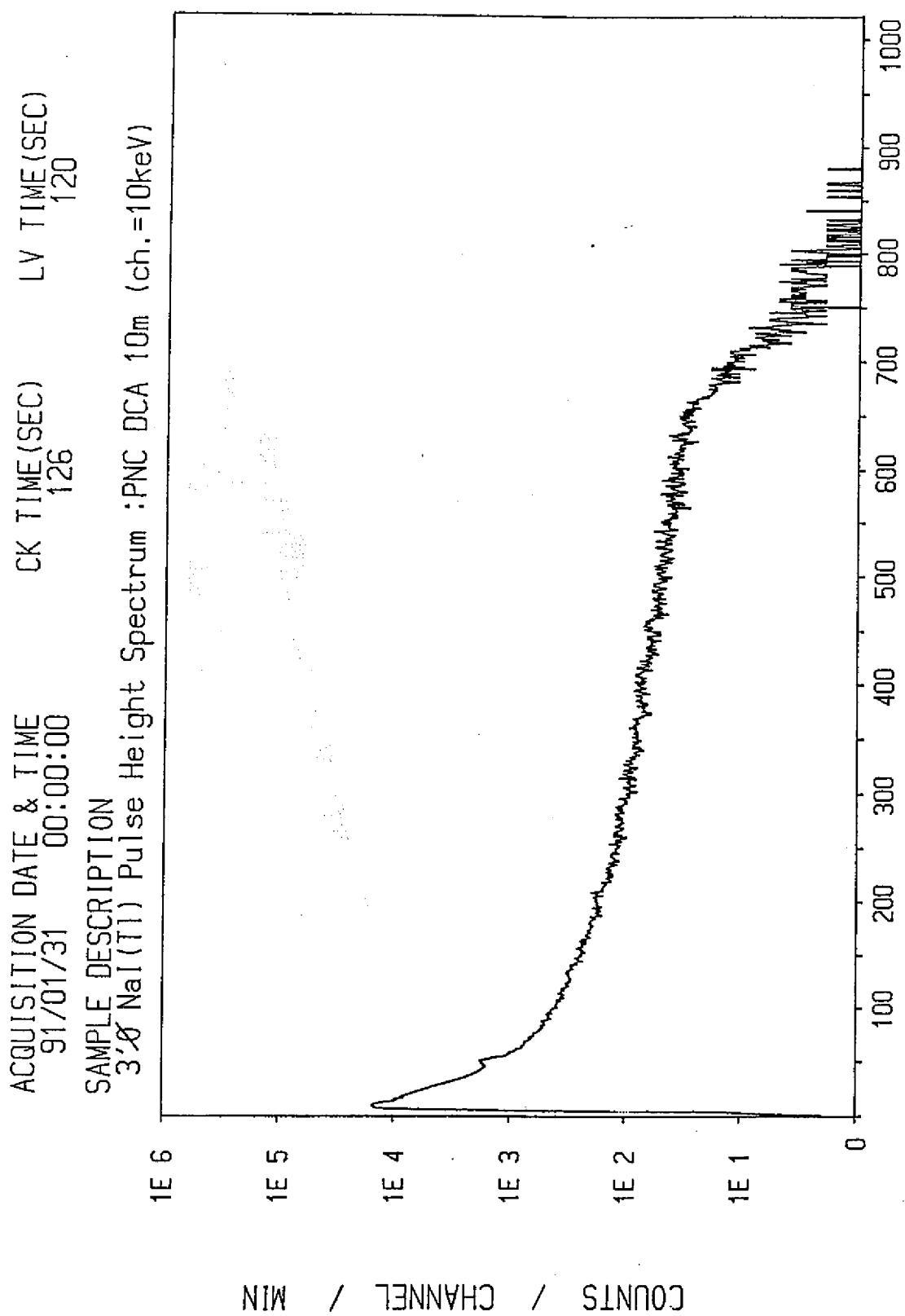


図4-5 NaI(Tl)検出器によるγ線スペクトル (500 W 運転時)  
(測定点: 10 m, ch.幅: 10 keV)

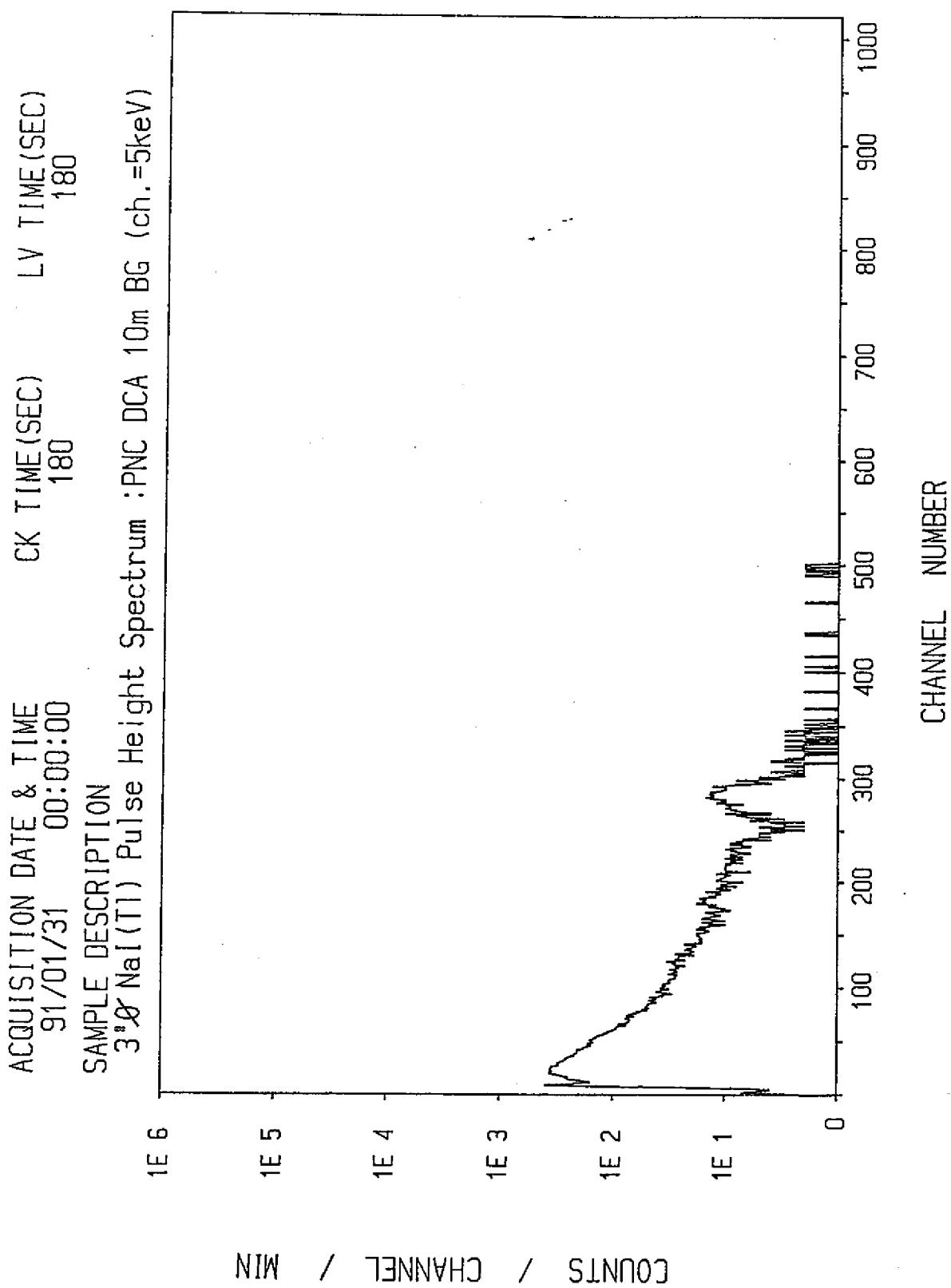


図 4-6 NaI (Tl) 検出器による  $\gamma$  線スペクトル (B.G.)  
(測定点: 10 m, ch. 幅: 5 keV)