

# 中性子個人被曝線量測定・評価技術の高度化研究

東北大学—動力炉・核燃料開発事業団 共同研究成果報告書

1994年1月

東北大学サイクロtron・ラジオアイソトープセンター  
動力炉・核燃料開発事業団

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。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 技術開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

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

## 中性子個人被曝線量測定・評価技術の高度化研究 東北大学－動力炉・核燃料開発事業団 共同研究成果報告書

東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター

中村 尚司、辻村 憲雄\*、中尾 徳晶

動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所安全管理部

百瀬 琢磨、伴 信彦\*\*、榊山 寿子

二之宮和重、野村 保

### 要 旨

平成2年度から3年間余りにわたって、現在市販されている中性子個人被曝線量計（フィルムバッジ、固体飛跡検出器、TLDアルベド線量計、バブル線量計）及び本研究グループを中心にして新たに開発している線量計（シリコン半導体線量計、高感度型TLD線量計）についてその特性評価を行うとともに、これらの線量計の較正方法について研究を行ってきた。

線量計の較正場として使用すべき中性子場とそれに使用すべきファントムについて考察し、中性子場として $^{252}\text{Cf}$ 中性子源とその減速場が簡便でよいこと、ファントムとしては水ファントムがよいことを明らかにした。また線量計としては、積算線量を測定する日常モニタリングには現行の単一の線量計でなく、例えばTLDと固体飛跡検出器の組合せ線量計が適し、作業中の線量を測定する作業モニタリング、緊急時等の特殊モニタリングには直読式のシリコン半導体線量計が適していることを明らかにした。さらに実際の中性子場として核燃料取扱施設を取り上げ、MOX燃料とその周辺環境における中性子スペクトルを測定し、その環境における中性子個人線量計の評価を行った。

---

\* 現在 動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所安全管理部

\*\* 現在 東京大学医学部 放射線健康管理学教室

## 目 次

第1章	はじめに .....	1
第2章	線量の定義と測定法 .....	2
2.1	線量当量の定義 .....	2
2.2	個人線量当量の測定法 .....	6
第3章	中性子個人線量計の現状 .....	10
3.1	中性子個人線量計の特徴 .....	10
(1)	フィルムバッジ .....	10
(2)	TLDおよびアルベド線量計 .....	11
(3)	固体飛跡検出器 .....	12
(4)	バブル線量計 .....	12
(5)	シリコン半導体線量計 .....	12
3.2	中性子個人線量計の特性評価 .....	14
(1)	フィルムバッジ (高速中性子用フィルム) .....	15
(2)	固体飛跡検出器 .....	20
(3)	TLDアルベド線量計 .....	28
(4)	高感度型TLD .....	29
(5)	バブル線量計 .....	35
(6)	シリコン半導体線量計 .....	43
(7)	まとめ .....	46
第4章	中性子個人線量計の較正法 .....	56
4.1	種々の較正用ファントム上におけるTLDアルベドレスポンスの変化 .....	56
4.2	較正用中性子場と較正法 .....	68
(1)	単色中性子場 .....	68
(2)	熱中性子場 .....	69
(3)	密封中性子線源とその減速場 .....	69
(4)	較正法 .....	70
(5)	まとめ .....	71

第5章 核燃料取扱施設における中性子線量評価 .....	75
5.1 核燃料取扱施設における中性子個人被曝管理の現状 .....	75
(1) プルトニウム燃料製造施設 .....	75
(2) その他の核燃料物質取扱い施設 .....	75
5.2 MOX燃料周辺環境における中性子スペクトルと線量当量の測定 .....	76
5.3 MOX燃料周辺環境での中性子個人線量計の特性評価 .....	86
(1) TLDバッジ .....	90
(2) 固体飛跡検出器 .....	91
(3) シリコン半導体式線量計 .....	91
(4) まとめ .....	91
第6章 おわりに .....	95
謝辞 .....	98
参考文献 .....	99

## 第1章 はじめに

中性子個人被曝線量の測定と評価に関する本研究は、平成2年度から3年間余りにわたって、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター放射線管理研究部と動力炉・核燃料開発事業団東海事業所安全管理部との共同研究として行われてきた。

中性子個人被曝線量の測定は、そもそも放射線障害防止法の規定する実効線量当量を如何に測るかということからしてははっきりしないのに加えて、現在一般に使用されているフィルムバッジ、固体飛跡検出器、TLD アルベド線量計などがいずれも測定エネルギー範囲に限界があること、その較正法が確立していないことなどの問題点を抱えている。最近になって、新しい中性子線量計としてバブル線量計やシリコン半導体線量計が開発されたことや、中性子個人線量測定法を標準化しようとの動きを受けて、本研究においては、標準中性子場を用いたこれらの様々な中性子個人線量計の特性測定とその較正方法について、技術の高度化を進めてきた。さらに中性子被曝が問題となる主要な施設の一つである核燃料取扱施設を取り上げ、核燃料から放出される中性子スペクトルの測定を行うとともに、その環境中での中性子線量評価について検討した。

本報告はその研究成果をまとめたものであり、現在六ヶ所村で建設が進められている核燃料取扱施設を始めとして、加速器施設など様々な中性子発生施設における中性子個人線量の測定評価に役立つことを期待している。

## 第2章 線量の定義と測定法

### 2.1 線量当量の定義

1977年ICRPは、体内の特定臓器・器官の被曝に伴う確率的影響（発癌や遺伝的影響）のリスクを重み付けした線量当量の加重和として、次式で定義される実効線量当量(effective dose equivalent) $H_E$ を導入した。[2-1]

$$H_E = \sum_T W_T \cdot H_T \quad (2-1)$$

ここで $W_T$ は全身が均等に照射されたとき、臓器・組織Tの照射による確率的影響リスクのリスク全体に対する割合、 $H_T$ は臓器・組織Tの線量当量である。ICRPはこの実効線量当量を用いて、全身や目の水晶体、皮膚といった特定の臓器・組織についての線量当量の限度値を定め、現在世界各国でその限度値との比較を基本とした放射線被曝管理が要求されている。

空間内にかなりの容積を占める人体に対して、線量当量としてただ一つの量を導入するという試みであったが、残念ながらこの実効線量当量は実測不可能な量である。

このため、実効線量当量に直接関連付けられた放射線防護のための‘実用線量’が必要になり1985年国際放射線単位計測委員会(ICRU)は、ICRPの1977年勧告を踏まえて以下のような4種類の新しい放射線モニタリング量を導入した。[2-2、2-3]

- (1) 周辺線量当量 (Ambient Dose Equivalent)、
- (2) 方向性線量当量 (Directional Dose Equivalent)、
- (3) 透過性個人線量当量 (Personal Dose Equivalent, Penetrating)、
- (4) 表層部個人線量当量 (Personal Dose Equivalent, Superficial)、

(1)(2)は環境モニタリング、(3)(4)は個人モニタリング量である。これらの量はいずれも現状の測定器で測定可能で、実効線量当量よりも過大（つまり安全側）になるように定められた量であり、あくまでも放射線防護上の便宜的な量にすぎない。

以下(1)~(4)について簡単に説明する。

#### (1) 周辺線量当量、 $H^*(d)$

周辺線量当量は、拡張化（着目した点を含む空間内のどの点の線量（率）も全て等しいとする）、整列化（全ての放射線を一方向に揃える）された放射線場を仮定し、そこに置かれたICRU球（軟組織等価成分からなる密度 $1.0\text{g/cm}^3$ 、直径30cmの球）からの後方散乱の

影響を繰込んで評価した量であり、入射方向に対向する半径上で表面から深さ  $d$  cmでの線量当量で定義される。

$\gamma$ 線や中性子線のような強透過性放射線にあてはまる概念であり、ICRPによって  $d = 10\text{mm}$ が推奨されている。等方かつ $H^*(d)$ と同じ様な応答特性をもつ測定器（例えばレムカウンターなど）を用いることによって直接測定可能である。

## (2) 方向性線量当量、 $H'(d)$

(1)と同様に放射線場にICRU球を置いたとき（ただし(1)と異なり拡張化だけを仮定する）、特定の方向の半径上の深さ  $d$  cmでの線量当量で定義される。主に $\beta$ 線などの透過性の弱い放射線に用いられ、 $d = 0.07\text{mm}$ が推奨されている。また面平行入射の放射線に対しては方向性線量当量は周辺線量当量と同じ値になる。放射線の入射方向と着目した点から球中心に伸びる半径軸とのなす角 $\alpha$ を用いて $H'(d, \alpha)$ と表現することもある。

## (3)(4) 個人線量当量、 $H_p(d)$ 、 $H_s(d)$

個人線量当量はICRU球ではなく現実の放射線場における人体組織そのものの線量当量である。強透過性放射線に対して透過性個人線量当量 $H_p(d)$ 、弱透過性放射線に対して表層部個人線量当量 $H_s(d)$ が定義されており、それぞれICRPの推奨する $d$ の深さは体表面から $10\text{mm}$ 、 $0.07\text{mm}$ である。

これらの個人線量当量は人体という有限の領域における線量を、体表面に装着した個人線量計の指示値で代表させたものであり、(1)(2)の環境モニタリング量とは本質的に大きな違いがある。個人線量当量は周辺線量当量 $H^*(d)$ と異なり、放射線場の状況や作業者の体格、動き等に大きく依存する量である。

図2-1に周辺線量当量 $H^*(d)$ 、方向性線量当量 $H'(d, \alpha)$ 、個人線量当量 $H_p(d)$ の概念図を示す。

これらのうち本研究で必要となるのは中性子線用のモニタリング量である周辺線量当量 $H^*(10)$ 、方向性線量当量 $H'(10)$ 、さらに中性子個人線量計が本来測定すべき透過性個人線量当量 $H_p(10)$ である。（以後、 $d = 10\text{mm}$ と記述する）

周辺線量当量 $H^*(10)$ は、簡略化したジオメトリーで定義した値であるため計算や実験による評価が容易であり、現在ICRPによってカーマ、あるいはフルエンスとの関係が実効線量当量とともにデータ集（以後、ICRP51）のかたちで出版されている。[2-4] また、方向性線量当量 $H'(10)$ についてはICRPの公式な勧告がなされていないものの、幾つかの研究グループによる実験・計算結果が報告されている。[2-5、2-6]



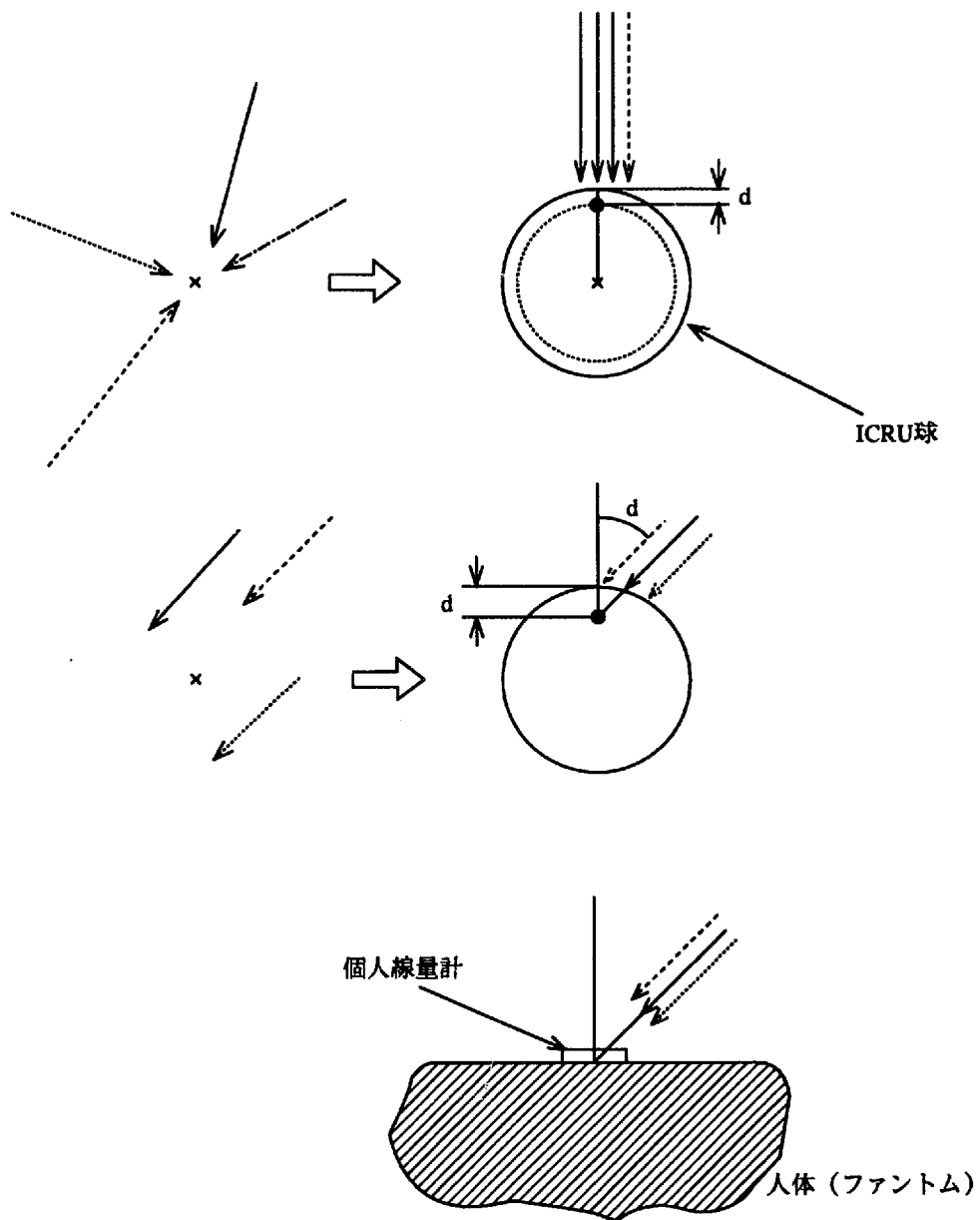


図 2 - 1 (上) 周辺線量当量  $H^*(d)$   
 (中) 方向性線量当量  $H'(d, \alpha)$   
 (下) 個人線量当量  $H_p(d)$

しかし、個人線量当量 $H_p(10)$ に関しては、ICRPが人体の形状や照射方向分布について何の規定もせず定義だけを与えたため様々な混乱を引き起こした。ICRPは $H^*(10)$ や $H'(10)$ といった環境モニタリング量と $H_p(10)$ などの個人モニタリング量とが、ある特定の放射線場におかれた場合にのみ関連付けられることを示し、個人線量計の較正法について言及しているが[2-7]、その方法の詳細については様々な議論がなされており現在まだ統一されていない。

ICRPが導入した実用線量体系の基本構成を図2-2に示す。

一方、我が国ではICRP1977年勧告を取り入れるかたちで放射線障害防止法が改正され、1988年4月1日から施行された。この中で、放射線被曝を実効線量当量と組織線量当量により規制し、外部放射線被曝に関して1cm線量当量、3mm線量当量、及び70 $\mu$ m線量当量なる量を用いて管理する体系を導入している。[2-8]

しかし、法令で導入したモニタリング量には明確な定義がなされていない。法令告示別表第5に記載されている空気衝突カーマ及びフルエンスとモニタリング量（1cm線量当量など）との関係が、ICRP51の推奨した値と同じであることから、導入した1cm線量当量などのモニタリング量はICRP1977年勧告の周辺線量当量を指したものと推定されている。[2-9] また、法令では環境モニタリング量と個人モニタリング量を区別しておらず、法令改正にともなって発行された解説書でも両者を同一のものとする記述があるが[2-10]、この2つは前述したようにICRUの定義からすると本質的には全く異なる量でなければならない。

放射線防護の  
基本量

放射線防護の  
ための実用線量

測定器

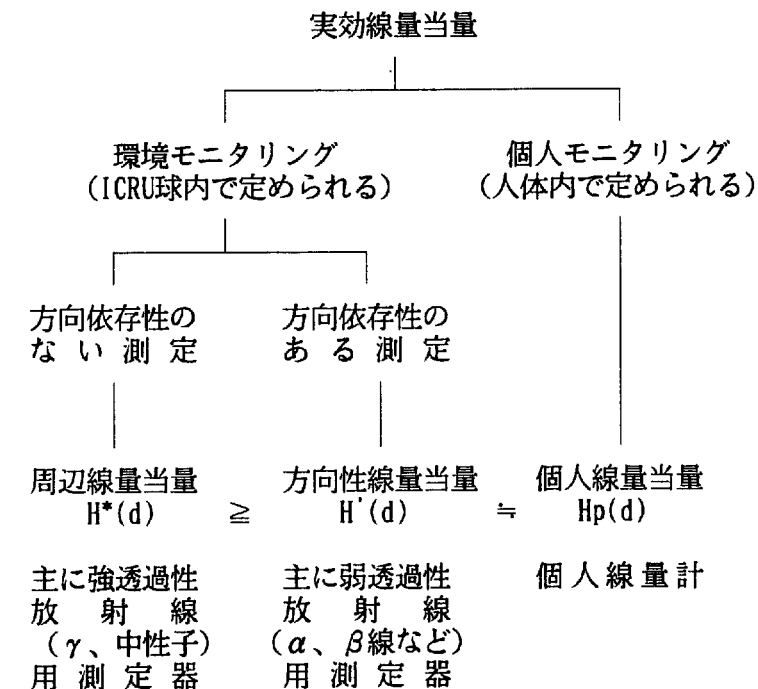


図2-2 実用線量体系の基本構成

## 2.2 個人線量当量の測定法[2-11]

上述したように、個人被曝線量評価においては個人線量当量を測定しなければならない。従って個人線量計を較正する際の較正基準量は、ICRP勧告の定義からすると基本的には個人線量当量でなければならない。しかし個人線量当量はその人個人によって異なり、また測定点や放射線場の状況によっても値が変化するため較正基準量としては不適當である。

そこでICRUは、人体の模擬したMIRDの数学ファントムを用いて計算した個人線量当量 $H_p(10)$ はICRU球で定義した方向性線量当量 $H'(10)$ とがほとんど同じような値であり、かつ両者の値は実効線量当量よりも安全側の値を与えるという事実を示し、個人線量当量に代えて方向性線量当量を較正基準量（近似値ではあるが）として採用するという見解を示した。[2-7] 従って、このような較正法を用いた場合、面平行ビームによる照射条件下では方向性線量当量は周辺線量当量と一致し、環境モニタリング用の測定器と同一の基準量によって個人線量計を較正することができる。

図2-3に、ICRP51から引用した面平行入射に対する実効線量当量 $H_E$ と周辺線量当量 $H^*(10)$ のフルエンス当りのエネルギー依存性を比較して示している。 $H^*(10)$ が $H_E$ の安全側の評価を与えることが分かる。面平行入射の場合、 $H^*(10)$ と方向性線量当量 $H'(10, \alpha = 0)$ は等しい。図2-4に Siebertらによる[2-6]、各角度 $\alpha$ に対する $H'(10, \alpha)$ のエネルギー依存性

$$f(\alpha) = \frac{H'(10, \alpha)}{H^*(10)}$$

を示す。中性子エネルギー1MeV以上では等方、1MeV以下ではコサイン状の方向依存性を持っている。個人線量当量 $H_p(10)$ として方向性線量当量 $H'(10, \alpha)$ を測定するという立場からすると、個人線量計としては、次の2つの条件を満たすことが望まれる。

- (1) 面平行照射条件下における線量計のエネルギー応答特性が周辺線量当量 $H^*(10)$ のそれに近いこと。
- (2) (1)の条件を満足した上で、線量計の方向依存性が方向性線量当量と周辺線量当量の比 $f(E, \alpha)$ と同じような依存性をもつこと。

個人線量計は体表面に装着して使用するため、較正の際には人体と同じような成分をもつ非等方散乱体の役目をするファントムの使用が絶対条件になる。

ファントム上に装着した個人線量計の指示値、 $R$ 、方向性線量当量 $H'(10, \alpha)$ 、較正定数 $K$ としたとき、これらの関係は

$$K = H'(10, \alpha) / R \quad (2-2)$$

となり、面平行ビームによる照射条件下では(1-4)式は、

$$K=H'(10, \alpha=0) / R=H^*(10) / R \quad (2-3)$$

となる。(2-3)式の面平行ビームによる較正は現在世界的に用いられている方法であり、国内で使用されているフィルムバッジ、固体飛跡検出器などにもこの較正法が採られている。このとき使用される中性子源は $^{252}\text{Cf}$ や $^{241}\text{Am-Be}$ などであるが、用いるファントムについては様々な議論があり統一されていない。ICRUでは、ICRU球を線量計較正用ファントムにするべきとの見解を示しているが、取扱いが面倒で一度に複数の線量計の照射がおこなえない球形ファントムは較正用としては明らかに不適當である。

また、(2-2)式の方向性線量当量を基準とした較正法は現在まだ世界の共通認識にはなっていない。しかしこの方法を採用する方向が進みつつあり、その場合には中性子個人線量計には方向依存性がある方がよいということになる。

$^{252}\text{Cf}$  中性子源などを用いた(2-3)式のような較正法は、「較正場での中性子個人線量計の較正」であり、いわば中性子スペクトルが既知で面平行入射という「特殊な条件下」での単なる値合わせである。しかし、実際に中性子個人線量計を使用する作業環境中の中性子場は多様なエネルギー分布と入射方向を持っている。さらに線量計の応答特性が中性子エネルギーと入射方向に依存するため、較正場で定めた較正定数Kは多くの場合現場では適用し得ない。ここから様々な混乱が生じてくる。

較正場で定めた較正定数が現場では適用しないという事実から、次のような考えが生まれる。実際の作業環境を代表するような場での較正をおこない、中性子標準線源などを用いた較正場での較正との対応関係を予めおさえておくという方法である。

現場での最適な較正定数 $K'$ は、現場での線量計の応答 $R_m$ 、なんらかの方法によって測定された現場の基準となる線量当量 $H_m$ を用いて次式で表わされる。

$$K' = H_m / R_m \quad (2-4) \text{式}$$

従って較正場で較正した中性子個人線量計が現場でも正しい被曝線量を示すようにするには、較正場と現場での較正定数の比

$$N = K' / K \quad (2-5) \text{式}$$

を較正定数Kの修正係数として使用すればよい。あらかじめ現場と同じ様なエネルギー分布と方向性を持つ較正場で較正定数Kを定めておけば修正係数 $N \approx 1$ となる。

ただし、このとき(2-4)式の現場の基準となる線量当量 $H_m$ に如何なる量を用いるのかという問題が生じてくる。ICRPの定義に従えばそれは個人線量当量(近似値としての方向性

線量当量)であり、国内の法令では1cm線量当量なる名称の周辺線量当量だが、両者の値は面平行入射の場合にしか一致しない。

例えば、Hmに周辺線量当量を用いたとき、それはレムカウンターやスペクトロメーターで測定することができるが、これは本来環境モニタリング量であって個人モニタリング量ではない。入射方向によって線量計の応答が変わる(低下する)にも関わらず、レムカウンターのような方向依存性のない検出器で測定した線量当量で線量計を校正することは、安全側の校正という解釈は成り立つ。しかしこの方法は中性子場のエネルギー分布や方向性などの情報とは全く無関係に線量計を値づけすることであり、測定結果の解釈を困難にするだけでなく、体表面に装着して使用する中性子個人線量計の測定限界を越えた性能を要求することにも繋がる。

また、Hmに方向性線量当量と用いた場合は、個人モニタリング量と環境モニタリング量とが異なるというICRPの基本方針に沿った方法であり、線量計測定結果の解釈という点ではHmに周辺線量当量を用いる場合よりも優れている。しかし、方向性線量当量はレムカウンターなどでは測定不可能な量であり、それを求めるにはなんらかの数値計算に頼らざるを得ない。

国内の法令では個人線量当量と周辺線量当量を同一のものとしているため、法令に準拠したJIS規格の「高速中性子用フィルムバッジによる線量当量算出方法」では、線量当量の算出の際、方向特性補正係数をもってフィルムバッジの方向依存性を補正するよう定めている。[2-12] しかし多様な中性子場に対応して個々に補正係数を求めるのは困難であるという以前に不可能であり、実際にはなんら補正もおこなわれていない。

このように、現在の中性子個人線量計とその校正体系では、校正場での校正と現場での測定結果との間に大きな隔たりがある。たとえ、作業場所における作業者の行動と放射線場の関係を十分代表するような照射・校正をおこなったとしても、複雑な実際の放射線場における‘真の個人線量当量’と線量計測定値とを関連付けることは困難であり、もちろん、そこには‘真の個人線量当量’を如何ようにして求めるかという問題も含まれる。

ただ一個の個人線量計を用いた個人モニタリング手法を正当化するためにはある程度の‘割り切り’が必要となり、ICRUは「ある定められた校正の体系において、然るべき性能をもつことが確認された線量計を用いて測定した場合、その測定値を無条件にその着用者の被曝線量とする」という考えを示し、この測定値に「記録用個人線量当量」(Individual Dose Equivalent for Recording)という呼称を与えた。[2-7]

これは結局、上で述べたような‘関連付けができない’という事実が、線量計測定値の解釈の段階に‘しわよせ’となって表れた考え方であり、個人モニタリング発祥以来の暗黙の了解でもある。[2-13]

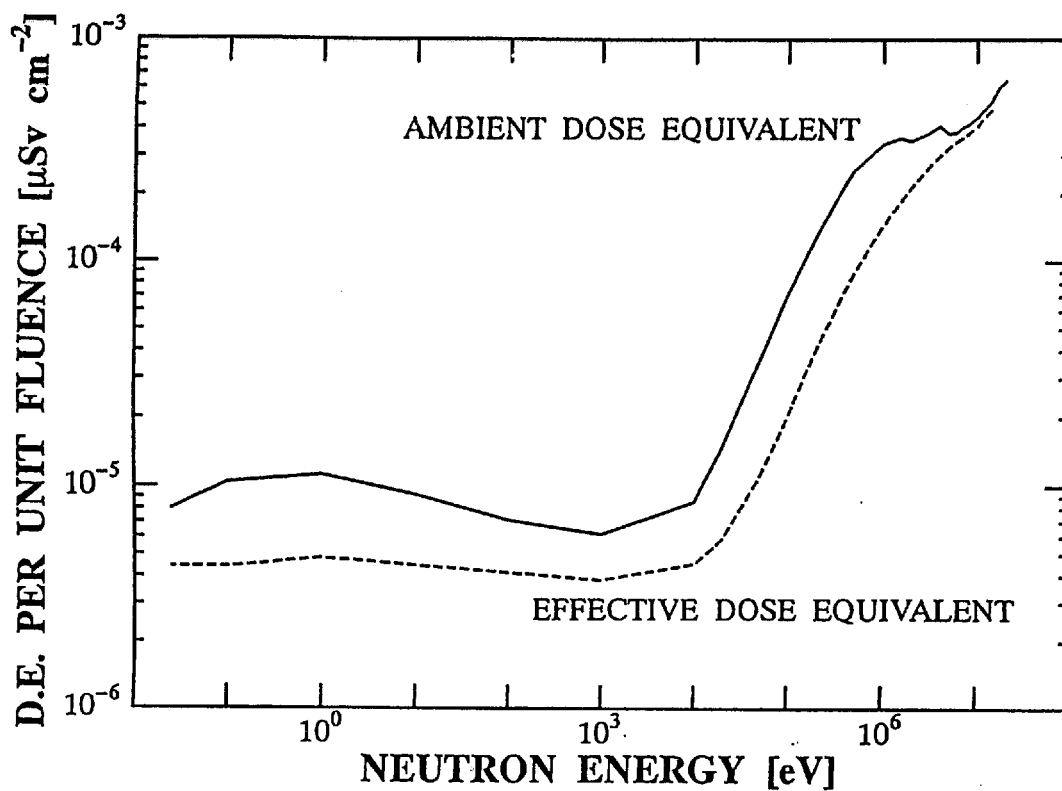


図 2 - 3 単位フルエンス当りの周辺線量当量及び実効線量当量 (面平行入射)、[2-4]

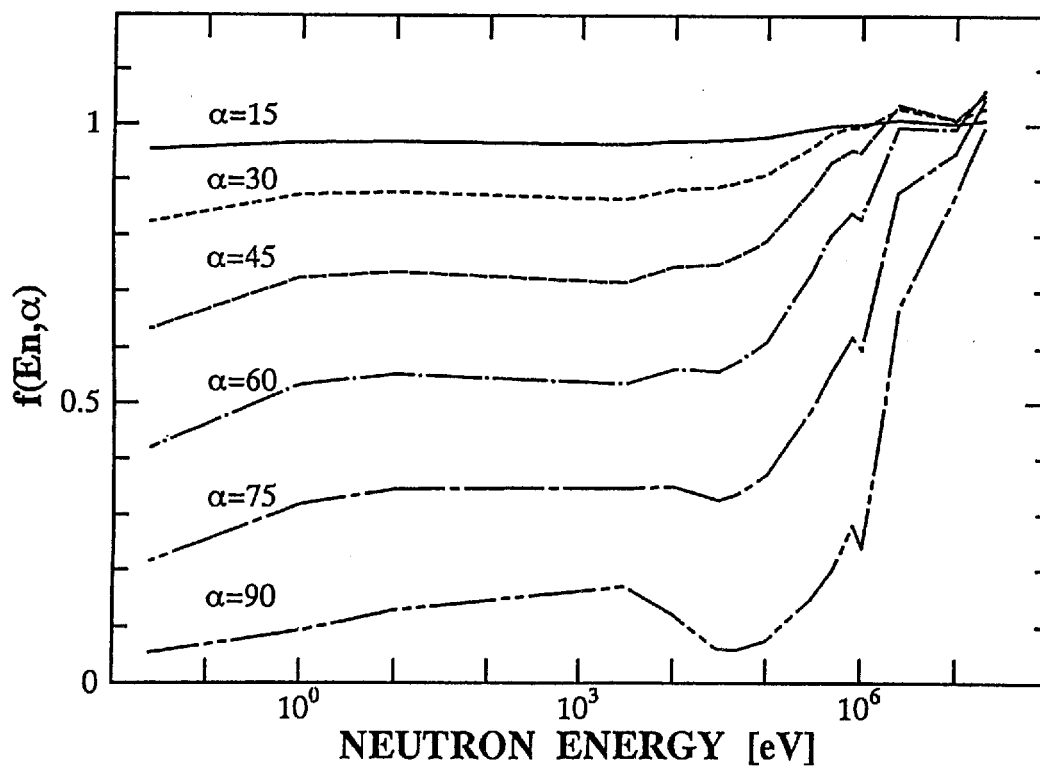


図 2 - 4 方向性線量当量と周辺線量当量の比)、[2-6]

### 第3章 中性子個人線量計の現状

個人線量計が「人体に装着して、なおかつ作業の妨げにならない程度の大きさでなければならない」という前提条件があるため、低感度、測定エネルギー範囲の限定といった問題点の改善は技術的な困難を伴う。中性子を検出するにはなんらかの（荷電粒子を放出するような）核反応が利用されるが、通常中性子個人被曝の対象となる熱中性子～20MeV までの広いエネルギー範囲に亘って、測定すべき‘真の被曝線量’と1：1の対応をもつ応答を実現できるような反応は存在しない。

ICRPは個人モニタリングをおこなう放射線場のレベルに応じて、その種類を日常モニタリング、作業モニタリング、特殊モニタリングとに分けてそれぞれ目的に適した線量計を用いるよう勧告している。[3-1] この勧告は合理的な考え方であり、例えば日常モニタリングは作業者個人について規則的に繰り返しておこなわれる測定の中で、「一定期間中の積算線量の推定値」が定められた限度値を越えないように監視することを目的としている。そのため線量計が必ずしも直読式である必要はない。

しかし、作業モニタリング（特定の作業などにおける短期間の被曝線量の推定）、特殊モニタリング（事故処理などによる比較的大量被曝線量の推定）のような場合、感度が低く、直読式でない線量計は‘被曝線量の推定’ ‘作業者の安全防護’といった目的に即したものではない。事実ICRPはこのようなモニタリングの場合には警報機能をもつ線量計が望まれるとしている。[3-1]

#### 3.1 中性子個人線量計の特徴

現在使用されている中性子用個人被曝線量計であるフィルバッジ、TLD およびアルベド線量計、固体飛跡検出器および最近市販されたバブル線量計に加えて、著者らが現在開発しているシリコン半導体線量計について、そのエネルギー特性を含む特徴についてまとめると次のようになる。[3-2、3-3]

##### (1) フィルムバッジ

フィルムバッジは、プラスチック（セルロースアセテート）のベースの両面または片面に、ハロゲン化銀（主としてAgBr）結晶粒子を塗布したものである。このフィルムに放射線を照射すると、AgBrのイオン結晶から銀粒子が析出して潜像を形成する。この潜像をフィルムの現像処理により黒化させて、その黒化度を測定することによって、被曝線量を測定するものである。

熱中性子の測定は、熱中性子捕獲断面積の大きいCdフィルターと、 $\gamma$ 線に対する透過率などがほぼ同じで捕獲断面積の小さいSnフィルターを組合せて、2つのフィルターの下のフィルムの黒化度の差を利用して行っている。

高速中性子の測定は、厚く塗った乳剤やフィルム包装材料中での中性子の弾性散乱による反跳陽子の作る飛跡を計数して求めている。

熱中性子用フィルムバッジと高速中性子用フィルムバッジがあり、熱中性子用に $\gamma$ 線用フィルムバッジを利用することができ、手軽に使用できて記録の保存性がよい利点がある。図3-1 [3-4]にそのエネルギー応答特性を示すが、前者は熱中性子(0.4eV以下)にのみ感度をもち、後者は約500KeV以上で感度をもつが、そのエネルギー応答特性がICRP(ICRP-21または51)あるいは告示別表第5の与えるフルエンス-線量当量換算係数(いわゆるレムレスポンスで、図3-1にICRP-21の数値を点線として示している)に一致するのは1~15MeVのエネルギー領域である。0.4eV~1MeVの間のエネルギー領域の中性子に対してはほとんど感度をもたないので、おもにこの領域の中性子が発生する施設でフィルムバッジのみを個人線量計に使用して管理していると、中性子被曝があってもまったく検出しないか、検出しても非常に過少評価することがあるのでとくに注意が必要である。

## (2) TLDおよびアルベド線量計

ある結晶性の固体物質(蛍光体)に放射線を照射し、その後に熱を加えると微弱な光を放出する(熱蛍光現象)。この光の量は、照射した放射線の量に比例するので、放出された光量を測定することによって、被曝線量を評価するものである。

TLDによる熱中性子の測定は、蛍光体中に熱中性子と反応して荷電粒子( $\alpha$ 線など)を放出する物質( ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{10}\text{B}$ など)を混入し、その荷電粒子による蛍光作用を利用して行う。周辺 $\gamma$ 線量の補正は、フィルムバッジ同様に、 $\gamma$ 線に対する特性が同じで、熱中性子に対する特性の違う物質(例えば、 ${}^6\text{LiF}$ と ${}^7\text{LiF}$ ,  ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7$ と ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$ )を組合せて使用して、両者の発光量の差から熱中性子だけの線量を評価する。

人体に、高速中性子線が入射すると、身体組織中の水素原子などと衝突し、一部は減速されて体外に飛び出す現象(アルベド効果)がある。この減速された熱中性子線をTLD素子を用いて測定するのが、TLDアルベド線量計である。

図3-1にそのエネルギー応答特性を示す。アルベド線量計はフィルムバッジではまったく検出できないエネルギー領域(eV~keV)に感度をもつ大きな利点があるが、10keV以上で感度が減少して、徐々にレムレスポンスから大きくはずれてくる。しかもTLDを装着する位置と身体表面との距離によるアルベド量に変化して感度が変わることや、測定値から線量を評価するのに用いる式にいろいろなファクターが入って、専門職員のいる大きな施設でないと実際には使いこなすのがむずかしい。



### (3) 固体飛跡検出器

これは重荷電粒子が絶縁性固体中を通過する際、その通路近傍に生成する飛跡を化学的に腐食（エッチング）させ、光学顕微鏡で計数するという原理を用いている。飛跡検出用の固体として用いられるのは、以前は雲母、水晶、ポリカーボネイトなどであったが、現在主流になりつつあるのはCR-39(商品名)と呼ばれるプラスチック板である。中性子は検出器の前においたポリエチレンラジエータからの反跳陽子やボロンなどからのアルファ粒子による飛跡から検知する。

CR-39を用いた線量計が市販されており、そのエネルギー応答特性を図3-1に示す。これは150keV以上で感度を持ち、その特性もレムレスポンスに近く、高速中性子(150keV～15MeV)を検出するのに用いられる。ただし中性子のエネルギーが高くなると感度がだんだん下がってきて、±50%のエネルギー特性の範囲は150keVから6MeVである。また50～150keV以下にはまったく感度がないので、TLD アルベド線量計と組み合わせる方式を用いると、図3-1に示すようによいレスポンスをもつことがわかる。

### (4) バブル線量計

1984年に Ingの開発したバブル線量計(Bubble-damage polymer detector)は常温よりも沸点の低いフロン12( $\text{CCl}_2\text{F}_2$ )やフロン114( $\text{C}_2\text{Cl}_2\text{F}_2$ )などを過熱状態にし高分子化合物(アクリルアミド)に混合させたものである。[3-5、3-6] 通常は周囲の圧力差によってフロン液滴が過熱状態にとどまっているが、中性子が入射するとフロンを構成するC、F、Cl原子核が反跳され液滴中にエネルギーを付与する。このとき付与したエネルギーが、準安定状態にある液滴が安定な気体状態に移行するのに必要なエネルギー以上の場合、過熱液滴は気化し周囲の高分子化合物にトラップされるという原理を用いている。

1979年にApfelの発表した“SDD: Superheated drop detector”は、Ingのバブル線量計と同様の原理を用いた中性子検出器/線量計である。[3-7] Ingの開発したタイプとの大きな相違は高分子化合物ではなくグリセリンのような粘性をもった物質中にフロン12過熱液滴を混合させた点にある。

これらは最近市販された直読式線量計で目視や音で気泡の数を数えるものであり、そのエネルギー特性を図3-1に示す。これも100keV以上で感度を持ち、数100keV以上でレムレスポンスによく一致している。100keV以下でも感度はもつが、低すぎる。温度に敏感なので温度補償がなされた型のものもある。

### (5) シリコン半導体線量計

$\gamma$ 線検出用シリコン半導体素子の前に中性子との核反応で荷電粒子を生成するラジエー

タを置き、その荷電粒子を検出するものであり、直読式のリアルタイム（電子式）線量計である。

1つの素子の表面に熱中性子と反応し荷電粒子を放出する物質( $^{10}\text{B}$ など)を置き、さらにこの素子の直前に高速中性子と反応し、反跳陽子発生用のラジエータを配置した検出器を使用している方法のものが市販されている。

しかしこの方式はエネルギー特性が悪いので、低速中性子用素子と高速中性子用素子を用いて、エネルギー特性を改善し検出感度を高くした線量計が著者らのグループで開発され、近く市販される。[3-4、2-11、3-8]

低速中性子用素子と高速中性子用素子を組み合わせたタイプのもは、図3-1に示すように熱中性子から高速中性子まで測定可能な広帯域の直読式線量計で、 $\gamma$ 線も同時に測定できる。他の線量計と違って15MeV以上の中性子に対しても感度が高く、よく高エネルギーまで測定可能である。10keV~1MeVの間のエネルギーに対しては感度の落ち込みがあるが、その点をカバーする方法が開発された。

以上に記述した各種線量計の特徴をまとめると、表3-1のようになる。

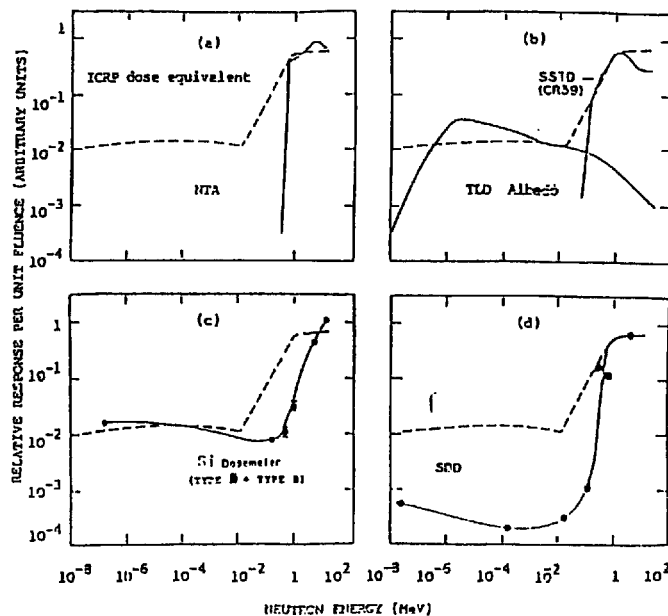


図3-1 種々の中性子個人被曝線量計のエネルギー特性とフルエンス-線量当量換算係数の比較[3-4]

表 3 - 1 代表的な中性子個人線量計の特性

特 性	フ ィ ル ム バ ッ ジ (NTA)	アルベド TLD	個人飛跡 検 出 器 (CR-39)	バ ブ ル 線 量 計 (BD-100R)	シリコン 半 導 体 式 (富士電機)
測定エネルギー 範 囲	0.025eV~0.6eV 1MeV~15MeV	0.025eV ~100keV	100keV ~15MeV	0.025eV ~15MeV	0.025eV ~15MeV
測定線量範囲	0.1mSv~2mSv 0.2mSv~60mSv	0.2mSv ~10 <sup>4</sup> mSv	0.1mSv ~10mSv	<0.01mSv ~1mSv	0.01mSv ~10 <sup>3</sup> mSv
エネルギー 依 存 性	中	大	小	小	中
γ 線 感 度	中	大	小	小	小
再 使 用 性	不可	可	不可	制限あり	可
読 取 り	直読不可	リーダ ーで読取り 直読不可	直読不可	目 視 直 読	デジタル 表示直読
記 録 保 存 性	良 好	不 可	良 好	読取り後 リセット される。	読取り後 リセット ただしコン ピュータに よる記録可
利 用 目 的	日常管理	日常管理	日常管理	作業管理	作業管理 (日常管理)

### 3.2 中性子個人線量計の特性評価

現在原子力施設の中性子個人被曝管理で最も一般的に使用されているフィルムバッジ（高速中性子用フィルム）、個体飛跡検出器、TLDアルベド線量計及び近年開発されたバブル線量計、シリコン半導体線量計について、中性子エネルギー依存性の観点からその特性を調べた。[2-11]

実験は東北大学工学部高速中性子実験室(FNL)で行った。ダイナミトロン加速器で陽子、重陽子を加速し、<sup>7</sup>Li(p, n)、T(p, n)、D(d, n)、T(d, n) 反応によって生じる単色中性子(0.2MeV ~15.0MeV)を利用した。また熱中性子については、放射線計測協会の熱中性子場を利用し、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター(CYRIC) に設置されている<sup>252</sup>Cf 中性子源とその減速型校正場も利用した。これらの中性子場については第4.2節に説明する。

バブル線量計以外の線量計については水ファントム（美和医療電機株式会社製）に装着し、中性子の発生するターゲットから30~50cm離れたビーム軸上に線量計中心が位置するよ

うに水ファントムを設置した。また、バブル線量計についてはターゲットから100cm 離れた自由空間中で照射を行った。実験配置を図3.2に示す。

FNLにおける中性子エネルギーは飛行時間法によって測定した。線量計位置での入射中性子束の決定には核分裂計数管を利用し、相対中性子束モニターとして球形水素反跳陽子比例計数管を用いた。入射中性子束の不確かさは約5%程度である。

また、中性子束から線量当量の換算には、告示別表第5のH1cm換算係数[2-8]を用いた。

#### (1) フィルムバッジ（高速中性子用フィルム）

千代田保安用品株式会社と長瀬ランダウア株式会社から市販されているフィルムバッジを購入し、FNLで単色中性子を照射後（エネルギー、フルエンスなどはブラインド）、業者に測定を依頼した。両者のフィルムバッジはコダック社のNTAフィルムを使用している。バッジケースの両面にCdカバーを取り付けているため、高速中性子用フィルムに対する熱中性子の寄与はない。

水ファントム上に両社のフィルムバッジを2個ずつ装着し、ファントム-線量計間は1.0cm離れた。照射条件を図3-3に示す。

表3.2、表3.3に照射した中性子束、線量当量及び業者による線量当量測定（評価）結果を示す。千代田保安用品(株)の高速中性子用フィルムは、15、5 MeV（約20mSvの照射）では測定（評価）限界以上であった。また、0.22MeV(2.5mSvの照射)では両社ともに検出限界未満であった。

フィルムの絶対感度は分からないので、図3.4に中性子束当りの相対線量当量感度をSayedらの実験値[3-9]と比較して示した。本実験結果はSayedらの実験値とよく一致している。

図3.5に（業者による線量当量評価値/照射した線量当量）比を示す。長瀬ランダウア(株)の高速中性子用フィルムは、1~15MeVのエネルギー範囲ではほぼファクター2の正しさで線量当量を評価することができる。また、千代田保安用品(株)の高速中性子用フィルムは長瀬ランダウア社のものに比べるとエネルギー依存性が大きい。

またフィルムは約500keV以下では全く感度を持たず、使用可能なエネルギー領域は1MeV以上である。

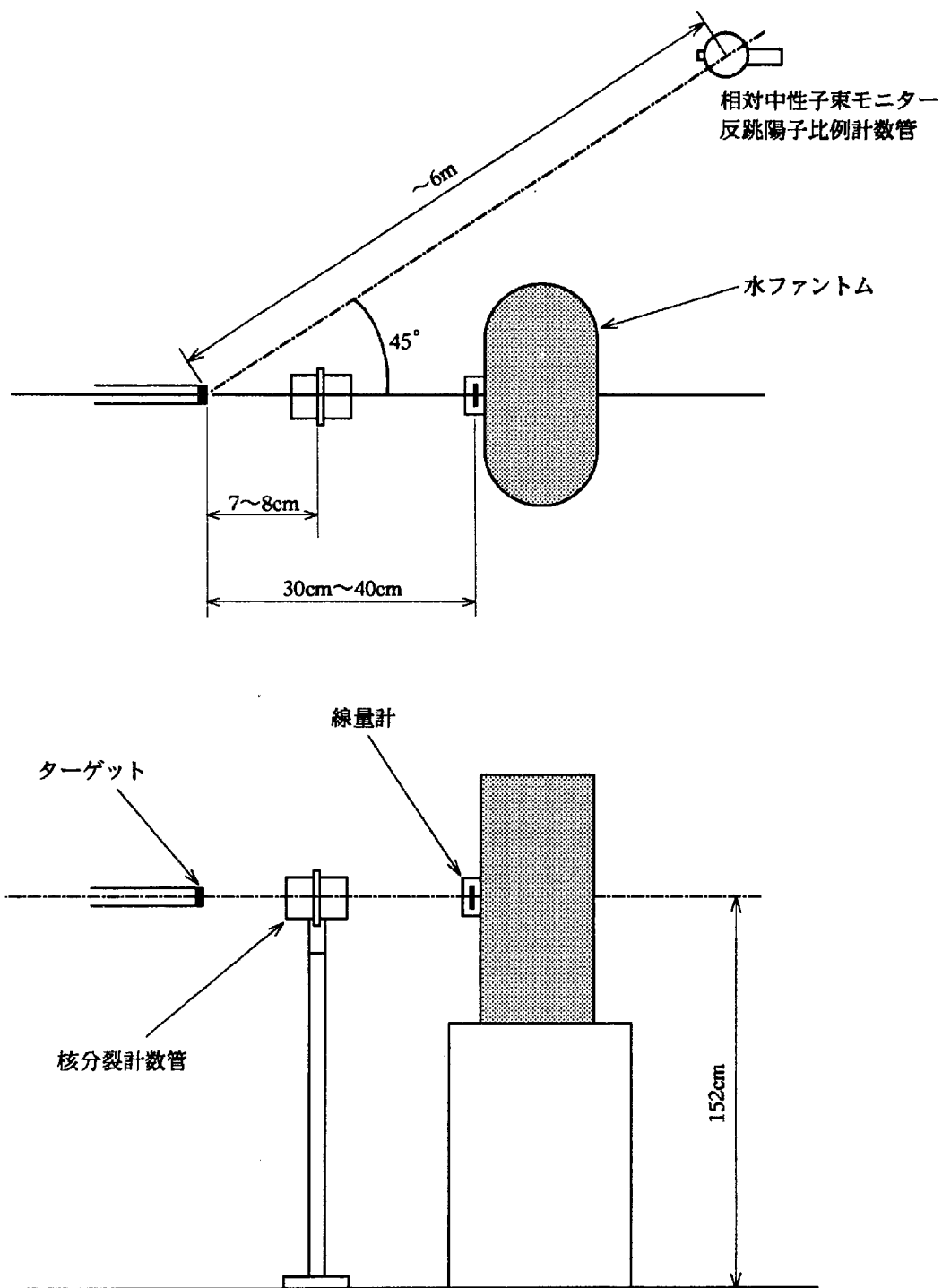


図3-2 高速中性子実験室 (FNL) での実験配置



図3-3 FNLでのフィルムバッジ照射条件

表3.2 千代田保安用品(株)の高速中性子用フィルムの実験結果

NEUTRON ENERGY [MeV]	NEUTRON FLUENCE [n/cm <sup>2</sup> ]	DELIVERED DOSE <sup>1)</sup> [mSv]	ESTIMATED DOSE <sup>2)</sup> [mSv]	ESTIMATED/DELIVERED
15.0	4.08E+7	22.5	60 + <sup>3)</sup>	2.67
			60 +	2.67
5.11	6.41E+7	24.3	57.6	2.37
			60 +	2.47
2.0	1.49E+7	5.26	4.8	0.91
			5.2	0.99
1.02	1.69E+7	5.75	1.3	0.23
			1.8	0.31
0.58	1.54E+7	4.21	X <sup>4)</sup>	X
			X	X
0.22	1.90E+7	2.56	X	X
			X	X

<sup>1)</sup> H1cm線量当量 (=H\*(10))、フルエンスから計算

<sup>2)</sup> 業者による測定結果

<sup>3)</sup> +は超過の意

<sup>4)</sup> 検出限界未満

表3.3 長瀬ランダウア(株)の高速中性子用フィルムの実験結果

NEUTRON ENERGY [MeV]	NEUTRON FLUENCE [n/cm <sup>2</sup> ]	DELIVERED DOSE <sup>1)</sup> [mSv]	ESTIMATED DOSE <sup>2)</sup> [mSv]	ESTIMATED/DELIVERED
15.0	4.08E+7	22.5	35.3	1.57
			31.7	1.41
5.11	6.41E+7	24.3	25.3	1.04
			32.5	1.34
1.02	1.69E+7	5.75	2.3	0.40
			2.3	0.40
0.22	1.90E+7	2.56	X <sup>3)</sup>	X
			X	X

<sup>1)</sup> H1cm線量当量 (=H\*(10))、フルエンスから計算

<sup>2)</sup> 業者による測定結果

<sup>3)</sup> 検出限界未満

(注：長瀬のフィルムバッジは2.0MeV、580keV照射をおこなっていない)

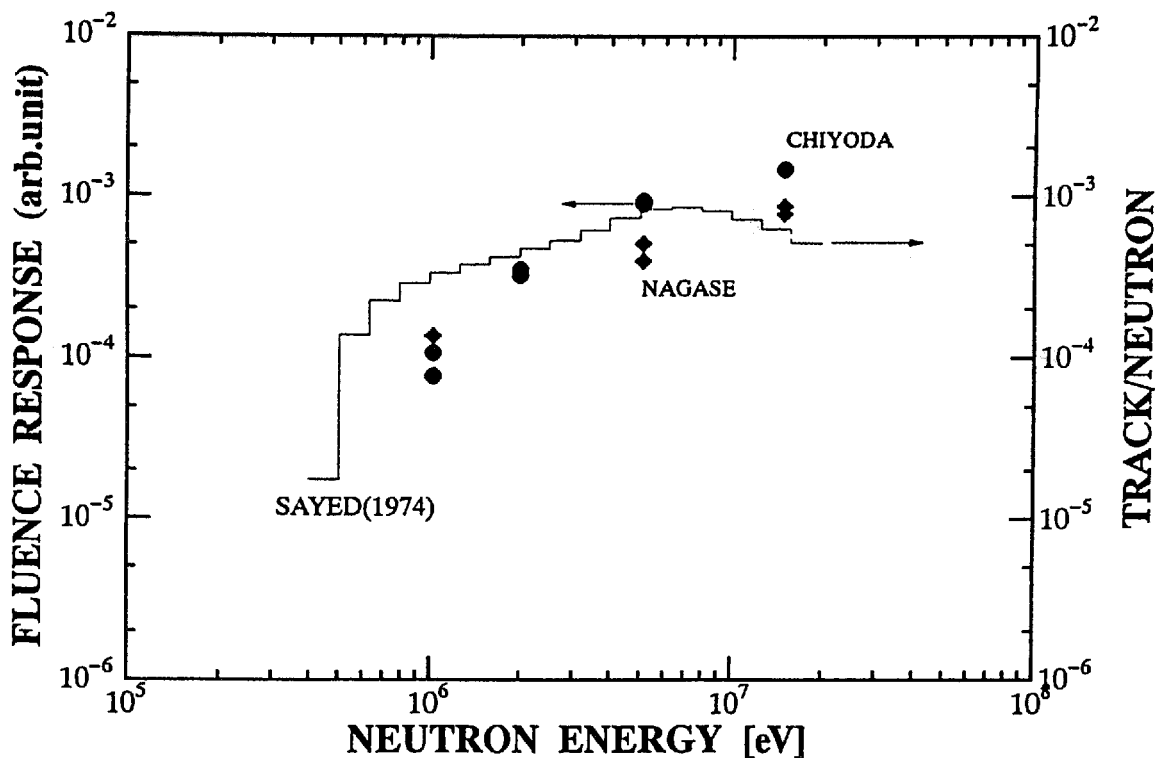


図3-4 高速中性子用フィルムの単位フルエンス当りの相対感度

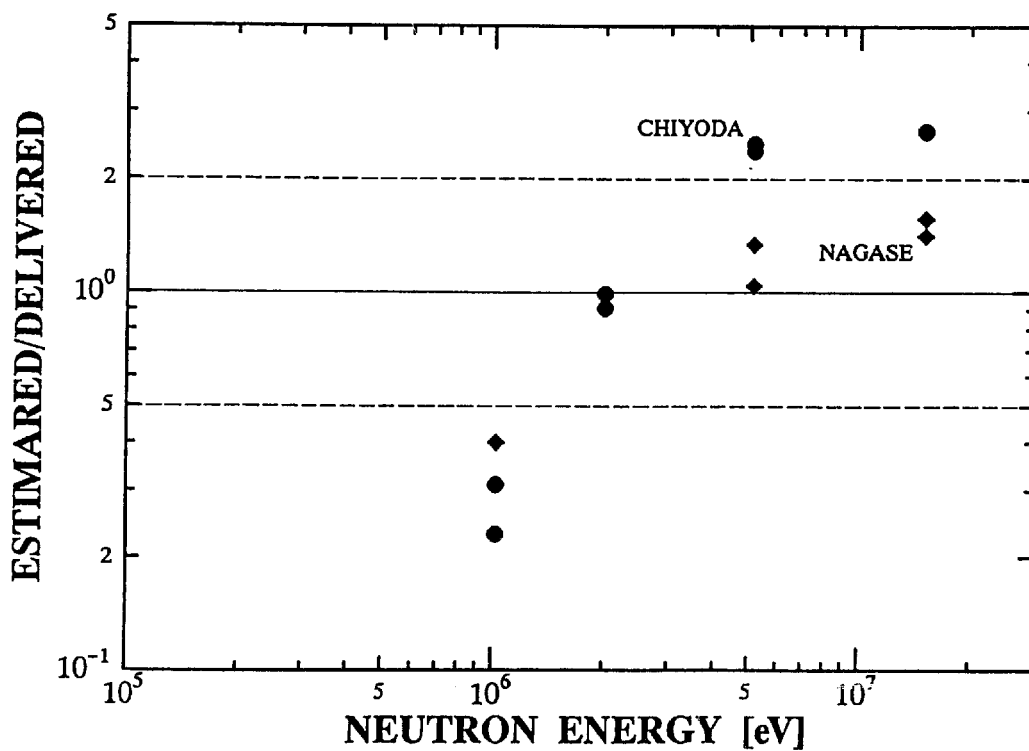


図3-5 フィルムバッジの線量当量感度特性  
—線量当量指示値と照射した真値との比



## (2) 固体飛跡検出器

今回の実験では、商品名CR-39として販売されている素子の中で日本製のTS-16及びBaryotrackを使用した。

使用した長瀬ランダウア(株)のBaryotrack及びTS-16は、図3-6に示したように検出素子及びラジエータの2つの部分からなる。素子は、厚さが1mm、大きさは $5 \times 10$ mmの保護膜付の板状の形状である。さらに中性子に対する感度を増大させるためのラジエータは、厚さ1mmの高密度ポリエチレン( $0.096\text{g/cm}^2$ )であり、検出器は高密度ポリエチレンを中性子の入射面に密着した形状のものである。

この実験では、線量計をTLD バッジ内に取り付け、そのバッジを種々のファントムに装着させて照射を行った。使用したファントムは水ファントム、中空水ファントム、アクリルファントムの3種類である。これについては第4.1節に説明する。

種々のファントム上におけるフルエンス当たりの感度特性を図3-7~3-9に示す。ここでは、BaryotrackとTS-16との比較を行った。

中性子エネルギー0.2、0.545、0.96MeVの3点については、両者の感度にほとんど差異はなく、5、15MeVでは、Baryotrackの方が、水ファントムで約30%、中空水ファントムで約10~25%、アクリルファントムで約25%程度感度が高い。

又、水ファントムに装着した時のBaryotrackの単位フルエンス当たりの感度は500keVから5MeVの間で $\pm 22.5\%$ と平坦であり、15MeVでもそれほど感度は落ちていない。中空水ファントムでは、15MeVで比較的感度が落ちている以外は水ファントムと同様の傾向を示している。

アクリルファントムでは、500keVから15MeVの間で約 $\pm 50\%$ と比較的平坦であり、200keVでは検出限界値(140keV)に近い感度が下がっている。500keV~5MeVまでは、3種類のファントムにほとんど差異は見られない。

もともと固体飛跡検出器は100keV以上の中性子にしか感度がないので、表3.4と図3-10に示すようにファントムの有無による感度変化自身も小さい。これは低エネルギー中性子に感度を持つ線量計、特にアルベド線量計と大きく異っている。

長瀬ランダウアのニュートラックバッジを水ファントムに装着した場合について、表3.5に照射した中性子束、線量当量及び業者による線量当量測定(評価)結果を示す。

業者の測定結果は飛跡数ではなく飛跡数から求めた線量当量値であるため、ニュートラック・バッジの絶対感度(単位中性子束当たりの飛跡数)は不明であり、相対的な特性のみが得られた。

図3-11に実験で得た相対感度を示す。また参考のためHankinsらのCR-39実験結果[3-10]、木村のCR-39実験結果(ポリエチレン・ラジエータ $0.071\text{g/cm}^2$ )[3-11]も同図に示した。

業者から送付されてきた測定結果は、エッチピットの形状から入射中性子のエネルギーを推定し、補正を加えた線量当量値と推定されるため、今回の実験データは厳密な意味で単位フルエンス当りの（相対）感度ではない。実際には木村の実験結果とほぼ同じ特性を持つと考えられる。

図3-12に（線量計評価値／照射した線量当量）比を示す。線量計の示した値は照射した値と±40%以内で一致している。実効的な絶対感度は $10^{-4} \times$ （飛跡検出面積[ $\text{cm}^2$ ]）（ $\text{track} \cdot \text{cm}^2$ ）程度であり、検出できる中性子は約100keV以上である。参考のため、図3-12にニュートラックバッジの線量当量当りのトラック数も図示した。線量当量当りのトラック数とブラインド照射試験結果とでは、5～15MeVの範囲でのエネルギー特性が異なっており、高エネルギー中性子に対してはエッチピット形状などからその入射中性子エネルギーを推定し、線量当量評価の際に補正を加えていることが伺える。

現在、東北大学と千代田保安用品(株)との共同で熱中性子から MeV領域まで検出できる広帯域固体飛跡検出器を開発している。

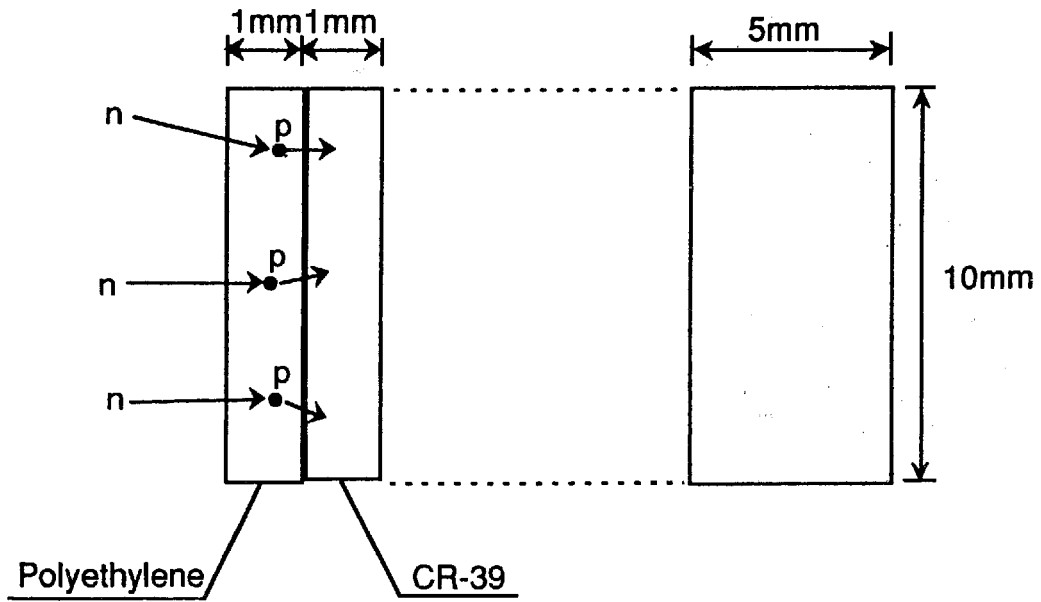


図3-6 固体飛跡検出器の構造

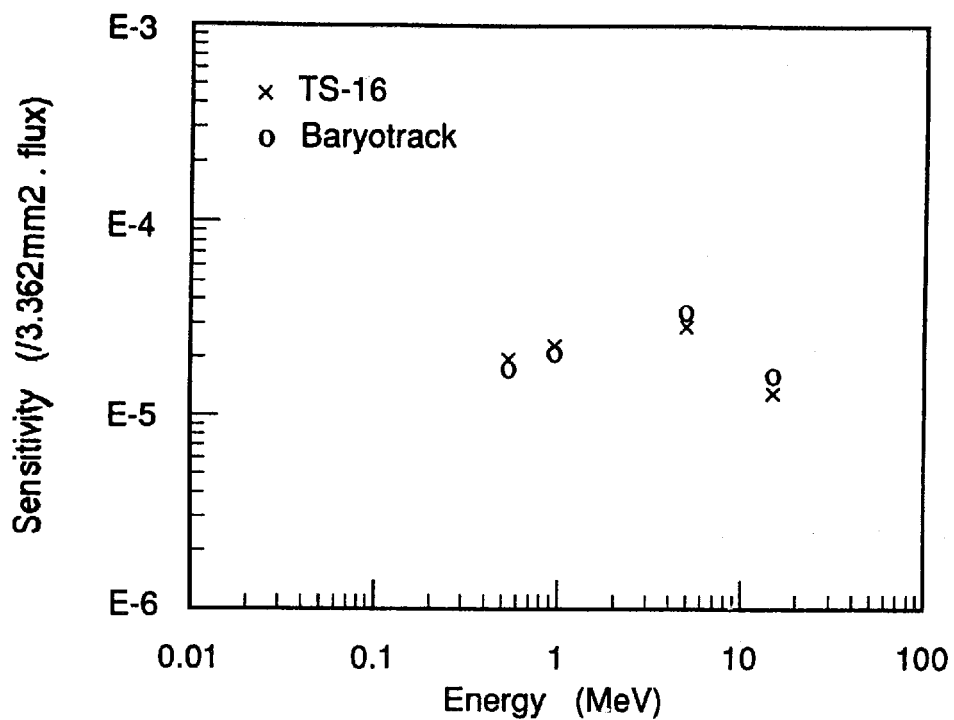


図3-7 水ファントム上でのフルエンス当りのTS-16とBaryotrackの感度比較

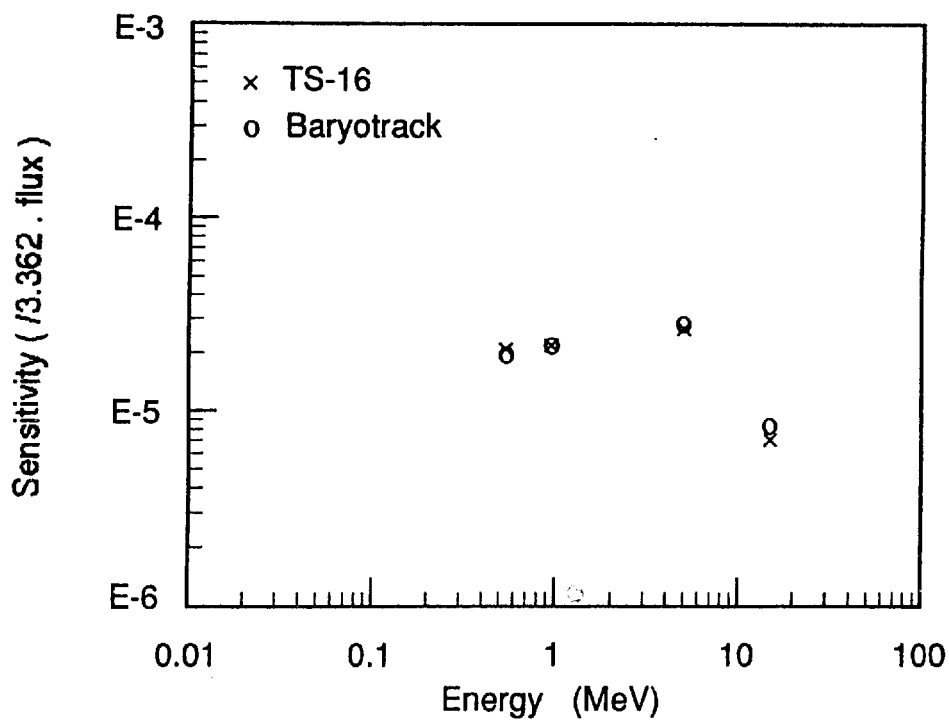


図3-8 中空水ファントム上でのフルエンス当りのTS-16とBaryotrackの感度比較

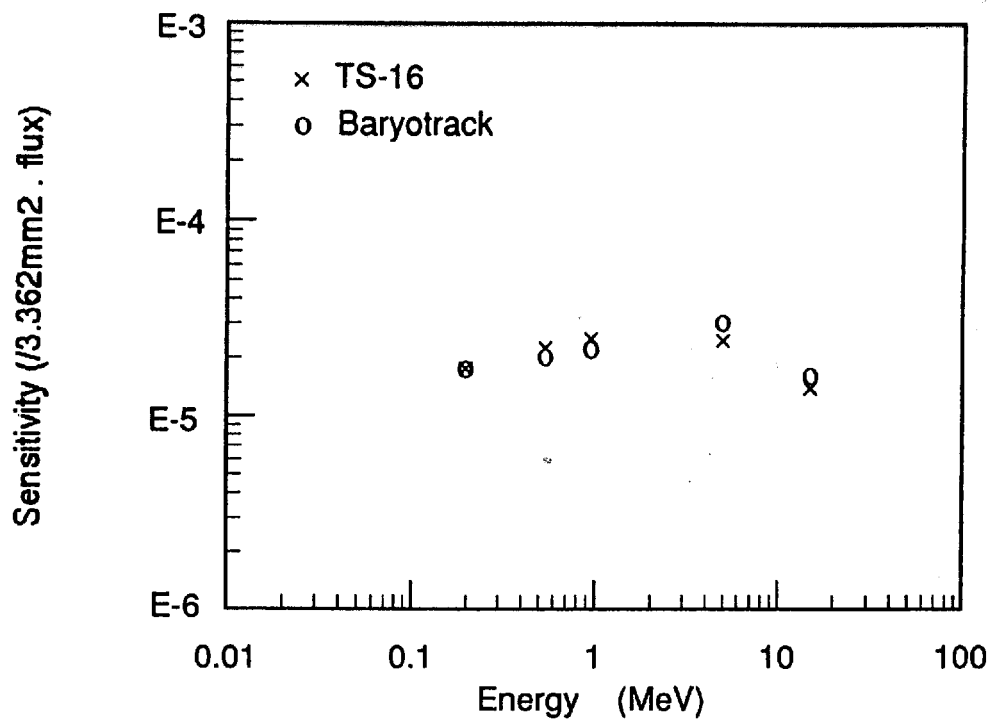


図3-9 アクリルファントム上でのフルエンス当りのTS-16とBaryotrackの感度比較

表3.4 バリオトラックの単位フルエンス、線量当量当りのトラック数

NEUTRON ENERGY [MeV]	ON WATER PHANTOM		IN FREE-AIR	
	[ $10^{-5}$ T · cm <sup>2</sup> ]	[T/mSv]	[ $10^{-5}$ T · cm <sup>2</sup> ]	[T/mSv]
15.0	1.04±0.10	19.0±1.8	0.93±0.05	16.9± 0.9
6.0	3.66±0.10	95.6±2.7	3.29±0.38	85.9±10.0
5.0	3.63±0.09	96.1±2.5	3.30±0.16	87.4± 4.2
2.0	2.82±0.04	80.1±1.2	2.59±0.05	73.6± 1.5
1.02	2.30±0.06	67.5±1.8	2.17±0.10	63.6± 2.8
0.55	2.08±0.09	78.2±3.2	2.13±0.02	80.1± 0.7
0.21	1.45±0.08	111.2±6.1	1.42±0.14	109.1±10.6
0.10	1.39±0.06	196.6±8.5	1.17±0.05	165.0± 6.9

T=tracks/3.363mm<sup>2</sup>

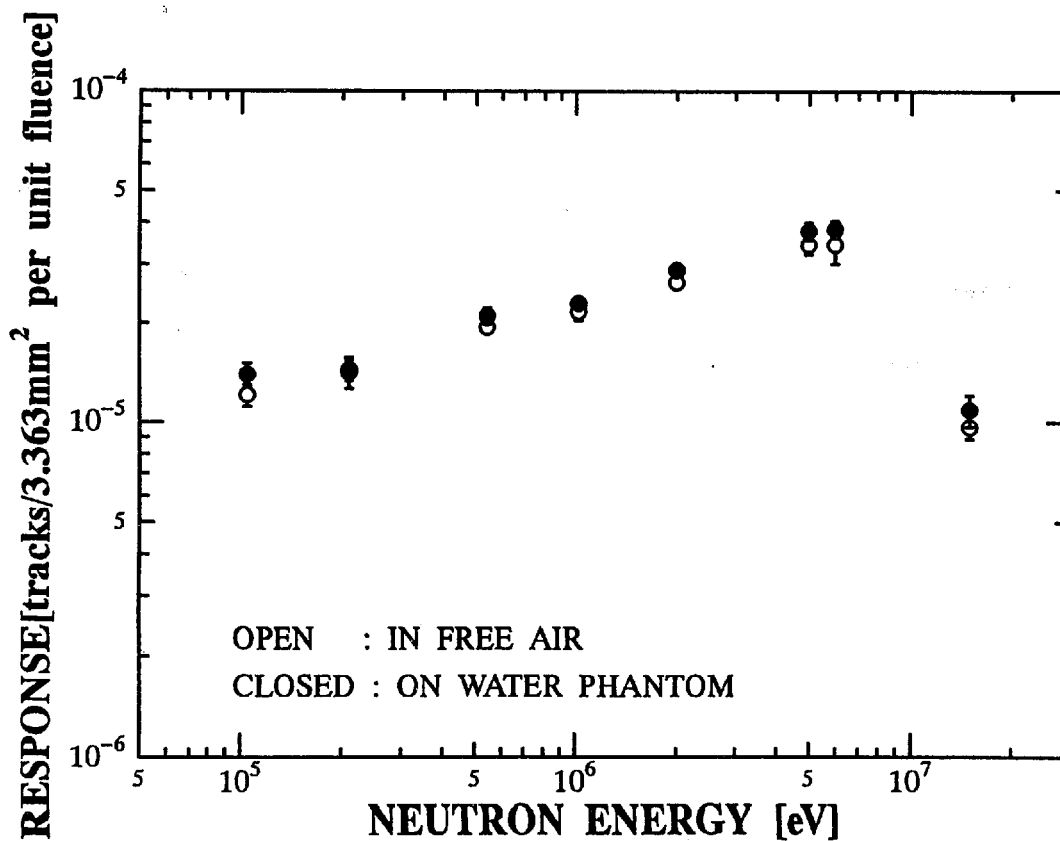


図3-10 バリオトラックの自由空間中と水ファントム上でのフルエンス当りの感度特性

表3.5 長瀬ランダウア(株)の固体飛跡検出器の実験結果

NEUTRON ENERGY [MeV]	NEUTRON FLUENCE [n/cm <sup>2</sup> ]	DELIVERED DOSE <sup>1)</sup> [mSv]	ESTIMATED DOSE <sup>2)</sup> [mSv]	ESTIMATED/DELIVERED
15.0	4.08E+7	22.5	31.6	1.40
			29.4	1.31
5.11	6.41E+7	24.3	20.4	0.84
			16.0	0.66
1.02	1.69E+7	5.75	6.2	1.08
			6.1	1.06
0.22	1.90E+7	2.56	2.0	0.78
			2.1	0.82

<sup>1)</sup> H1cm線量当量 (=H\*(10))、フルエンスから計算

<sup>2)</sup> 業者による測定結果

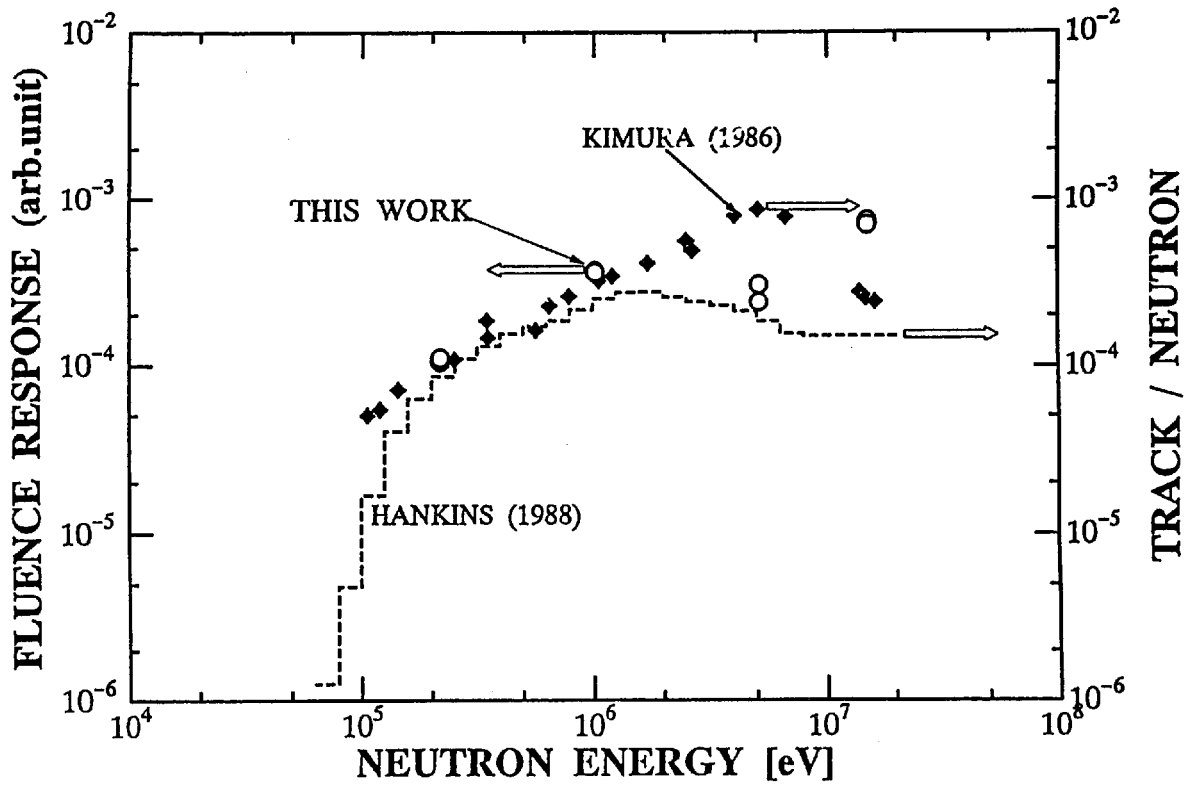


図3-11 固体飛跡検出器の単位フルエンス当りの相対感度

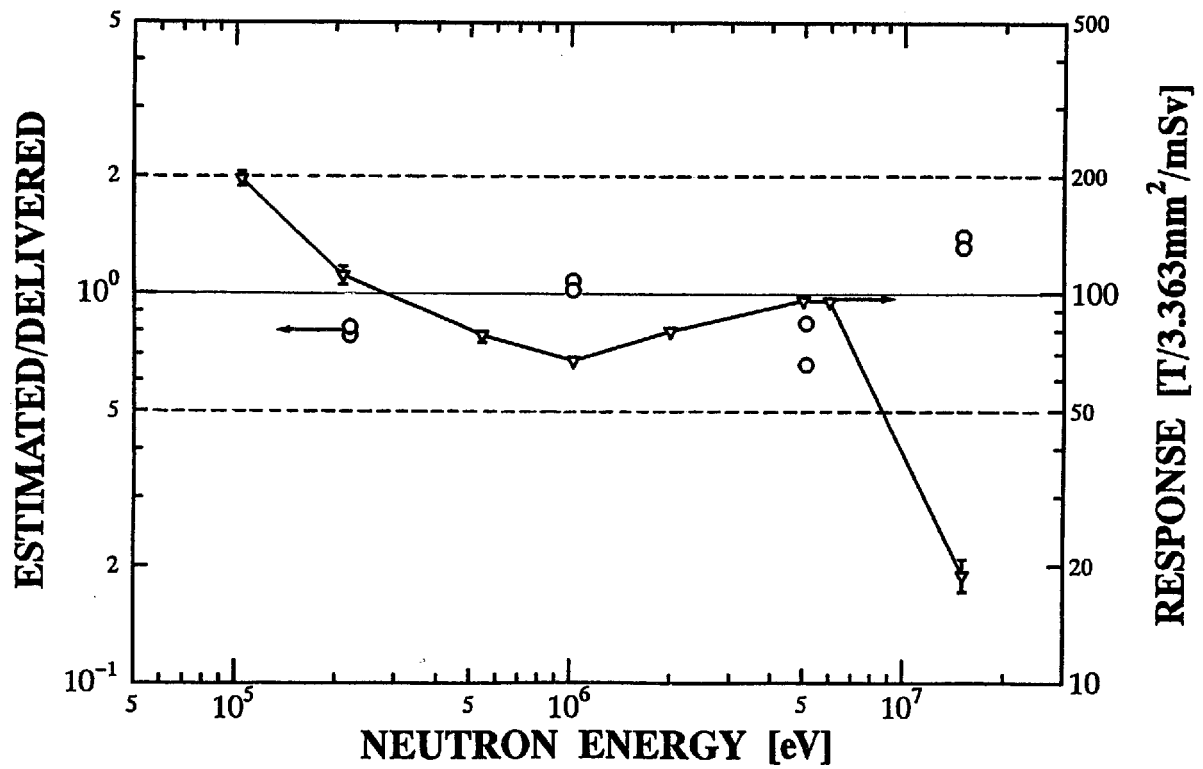


図3-12 ニュートラックバッジの線量当量感度特性  
 —指示値と真値の比—、ブラインド照射試験結果 (○)  
 も参考に示す。



## (3) TLDアルベド線量計

松下産業機器のTLD UD-137N及びUD-136N(それぞれTLD素子は $\text{CsSO}_4(\text{Tm}) \cdot ^7\text{LiF}$ ,  $\text{CaSO}_4(\text{Tm}) \cdot ^6\text{LiF}$ )を2個ずつ水ファントムに装着し、中性子を照射後、リーダー(UD-512P)で測定した。UD-136Nのリーダー読取り値からUD-137Nの読取り値を差し引いたものが、中性子線正味の読取り値である。

ただし、リーダーがアルベド法によって線量当量を求めるように校正されていないため実験で得られた値は相対的な特性である。

照射した中性子フルエンス、線量当量、TLDの正味読取り値を表3.6に示す。

図3.13に単位フルエンス当りの応答特性を示す。図にはモンテカルロ計算から求めた水ファントム上での中性子エネルギー分布と $^6\text{LiF}$ の自由空間中の応答関数〔3-12〕から計算した結果も示した。比較のため熱中性子感度の実験値に計算値を規格化した。実験値と計算値は非常に良く一致している。アルベド線量計の場合、ファントムの種類によっても感度は多少変化するが、図の曲線がアルベド型線量計の基本特性といえるだろう。固体飛跡検出器にみられるしきいエネルギーは存在しないが、フルエンス感度にして1桁のエネルギー依存性を持っている。また、図3.14に線量当量当りの応答特性を示す。エネルギー依存性はさらに大きく、個人線量計として実用するには測定・評価すべきエネルギー範囲を限定せざるを得ない。

表3.6 UD-136NのTLD実験結果

NEUTRON ENERGY [MeV]	NEUTRON FLUENCE [ $\text{n}/\text{cm}^2$ ]	DELIVERED DOSE <sup>1)</sup> [mSv]	READ VALUE <sup>2)</sup> [mSv]	DOSE EQUIVALENT RESPONSE <sup>3)</sup> [/mSv]
15.0	4.09E+7	22.5	0.55±0.36	0.04±0.03
5.11	4.47E+7	16.9	0.71±0.03	0.07±0.00
2.00	1.43E+7	5.04	0.49±0.04	0.15±0.01
1.02	1.09E+7	3.71	0.56±0.11	0.24±0.05
0.58	8.85E+6	2.42	0.54±0.08	0.35±0.05
0.22	1.56E+7	2.10	1.09±0.17	0.82±0.13
thermal <sup>4)</sup>	2.06E+6	0.017	1.04±0.03	100. ±2.9
	2.50E+6	0.020	1.54±0.01	122. ±1.1

<sup>1)</sup> H1cm線量当量 (=H\*(10))、フルエンスから計算

<sup>2)</sup> リーダー読取り値、単位[mSv] は見かけの値

<sup>3)</sup> 線量当量当りの感度 (熱中性子感度を100に規格化)

<sup>4)</sup> 放射線計測協会の熱中性子基準場

動力炉・核燃料開発事業団で使用している TLDバッジは、図3-15に示すように4個の中性子用 TLD素子から構成されている。そのうち素子1 (#1)は $^7\text{Li}_2\text{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ で $\gamma$ 線

補償用であり、素子2-4（#2-#4）は ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ である。このバッジのうち、素子2と4のフルエンス当りの感度特性を図3-16に示す。これは水ファントム装着時のデータである。

素子4は人体側の一部を除いて周囲をカドミウムで覆っているため熱中性子感度が大きく下がっており、主に熱外～速中性子線量当量の評価に用いられる。また、素子2は熱中性子線の線量当量の評価に用いる。

また、中性子線量当量をTLDで評価する際に $\gamma$ 線補償の問題がある。現在、動燃のプルトニウム取扱施設での外部被ばくの主因は、 ${}^{241}\text{Am}$ （ $\gamma$ 線）と核分裂中性子によるものであり、それらの混在場における $\gamma$ 線／中性子線の分離評価精度を定量的に把握する必要があった。

そこで、 ${}^{241}\text{Am}$ と ${}^{252}\text{Cf}$ の混合照射をおこない、その $\gamma$ 線と中性子線の線量当量比（混合割合）を変化させた時の中性子線量当量の評価精度を調べた。結果を図3.17に示す。横軸は、線量当量の混合割合（ $\gamma/n$ 比）、縦軸は照射した中性子線量当量に対する評価値の比である。図からも明らかなように、 $\gamma/n=0.2\sim 5.0$ の範囲内で良好な分離評価ができることがわかった。

#### (4) 高感度型TLD

現在動燃事業団では高感度型TLDバッジの開発に取り組んでおり、従来のTLD素子に比べて高感度なTLD素子及び中性子と同時に発生する $\gamma$ 線による発光量を低下させるために試作されたGd添加TLD素子の特性試験を行った。

図3-13に示す4個の素子（#1-#4）に対する $\gamma$ 線（#1のみ）、中性子（#2-#4）のフルエンス当りのエネルギー応答特性を測定した。

##### 1) #1の $\gamma$ 線エネルギー特性

水ファントム上のエネルギー応答特性を図3-18に示す。約数MeVのところでは感度が低下する傾向があるが、高感度型素子とGd添加素子との間に顕著な差は見られない。素子間のばらつきは高感度型素子で最大30%、平均14%、Gd添加素子で最大20%、平均11%である。

##### 2) #2-#4の中性子エネルギー応答特性

#2-#4の水ファントム上のエネルギー応答特性を図3-19～3-21に示す。これら2種類の素子の特性は従来の素子の特性とほぼ同じ傾向を持っていて、1MeV付近から感度が急激に低下している。Gd添加素子は、#2、#3でそのばらつきが最大百数10%、平均50数%、#4では最大40%、平均23%であり、高感度型素子は、#2、#3で最大70%内外、平均20数%、#4で最大15%、平均10%である。

従来の素子の感度と比べると、高感度型素子は図3-16にも示したように平均して

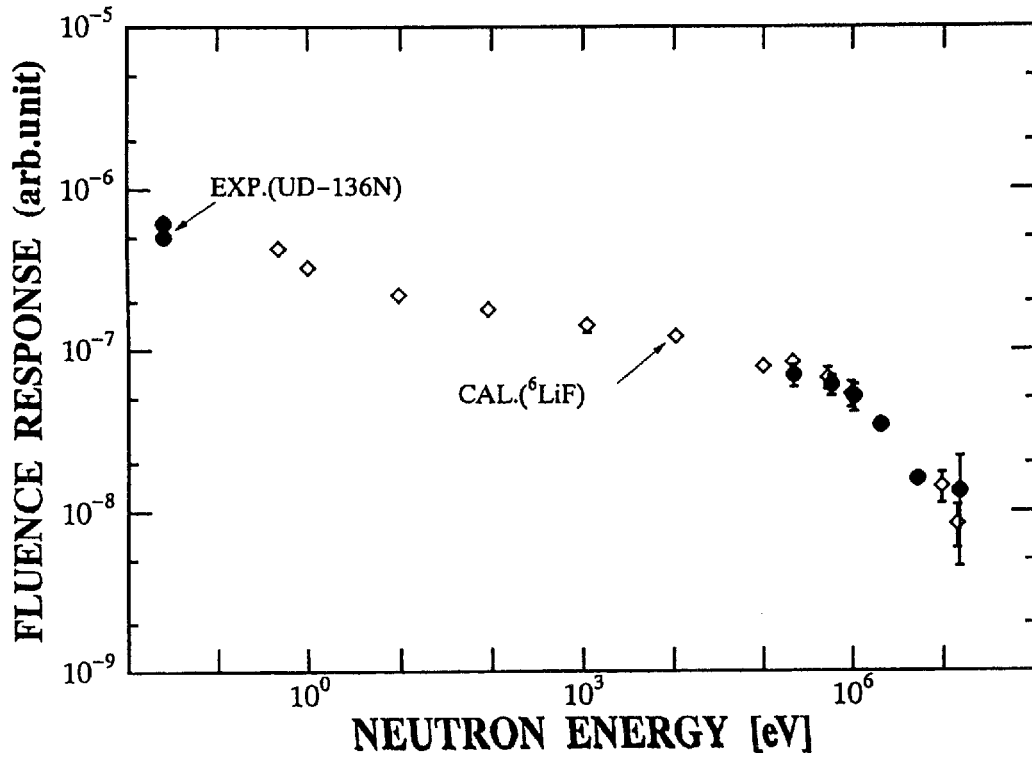


図3-13 UD-136Nの単位フルエンス当りの相対感度及び計算値との比較

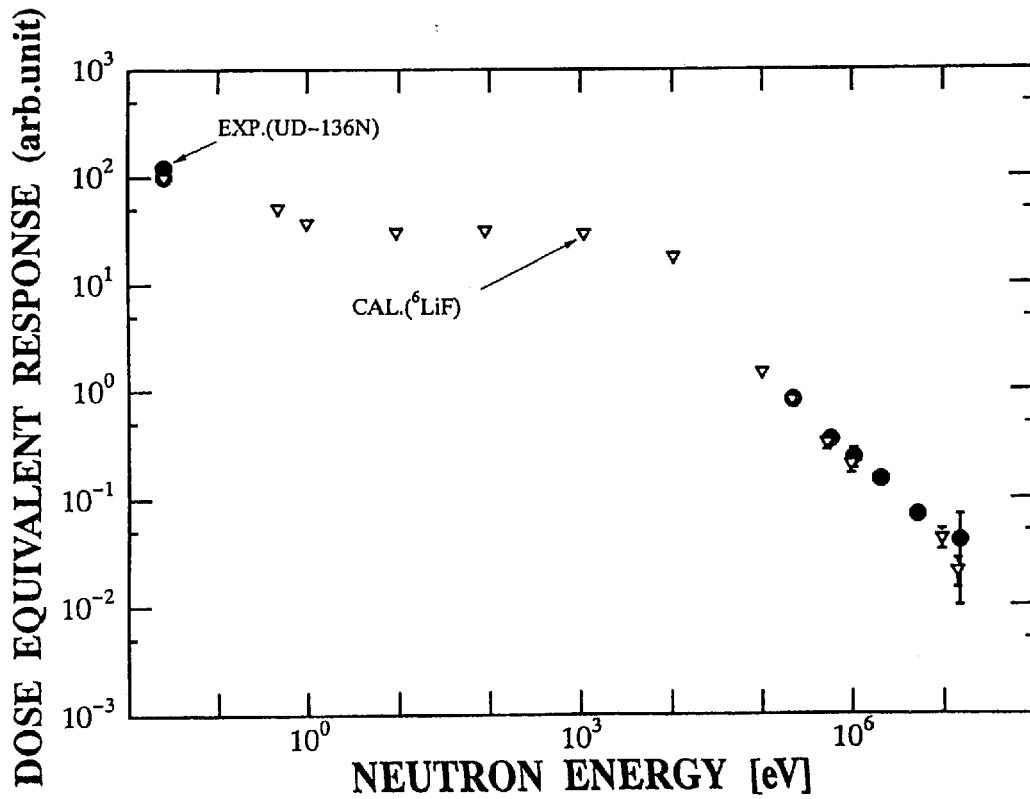


図3-14 UD-136Nの線量当量感度特性

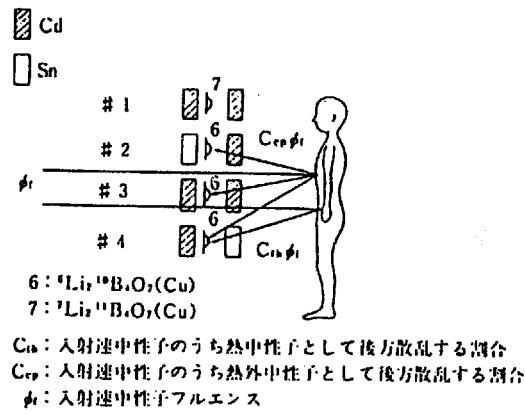


図3-15 動燃で使用しているTLDバッジの  
中性子用素子及びシールドの構成

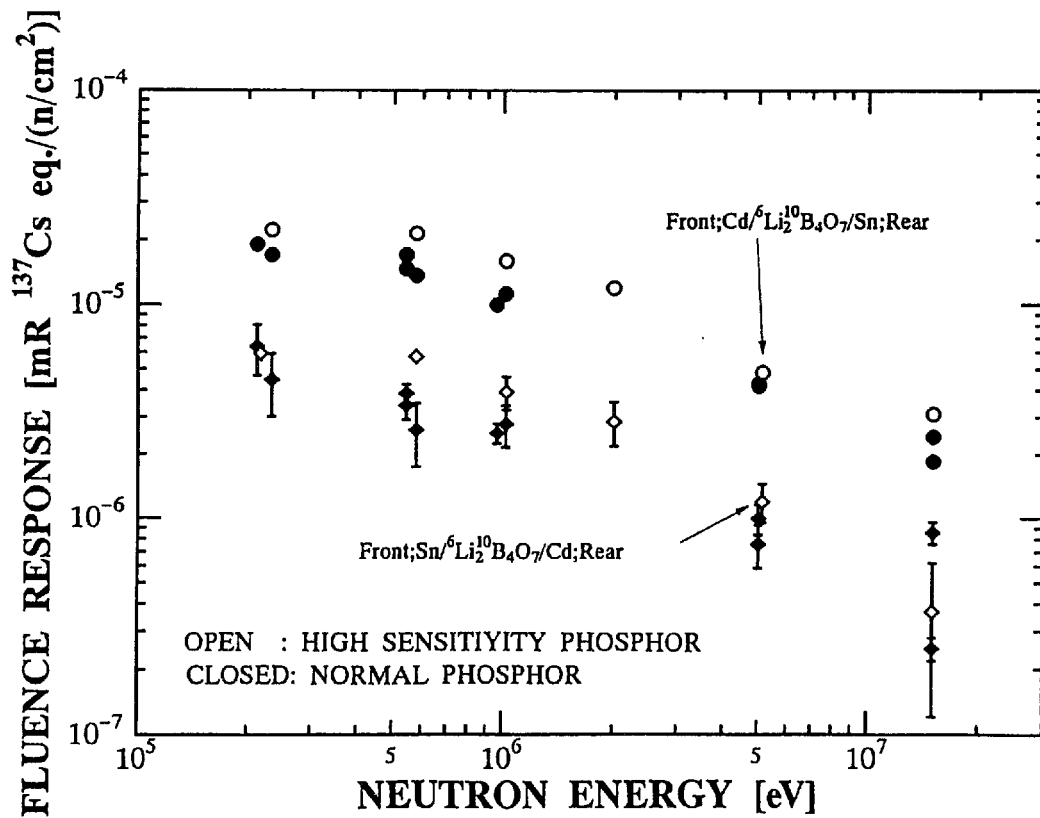


図3-16 動燃TLDバッジ(#2と#4)のフルエンス当りの感度特性  
—高感度TLD素子との比較を示す。

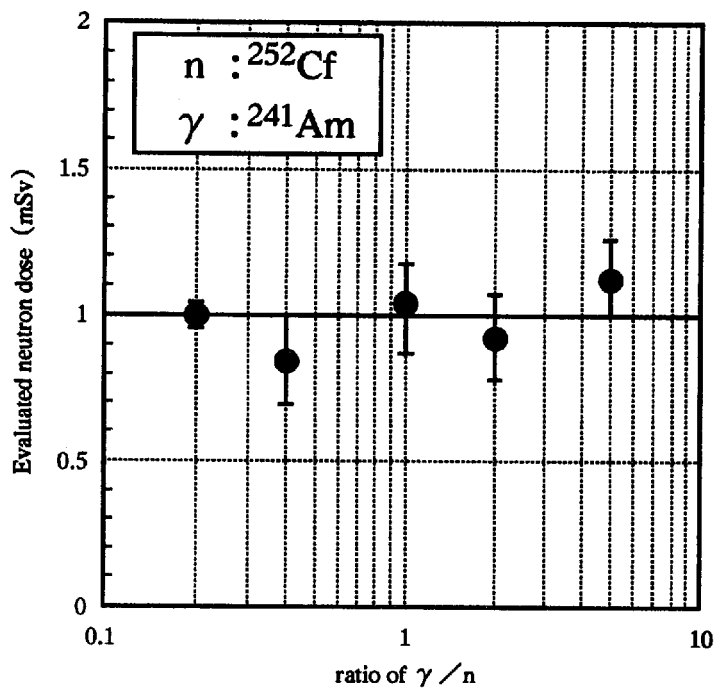


図 3-17  $^{252}\text{Cf}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 混合照射時における  $n/\gamma$  混合比に対する  
中性子線量当量評価精度  
(照射した中性子線量当量は1.0mSv)

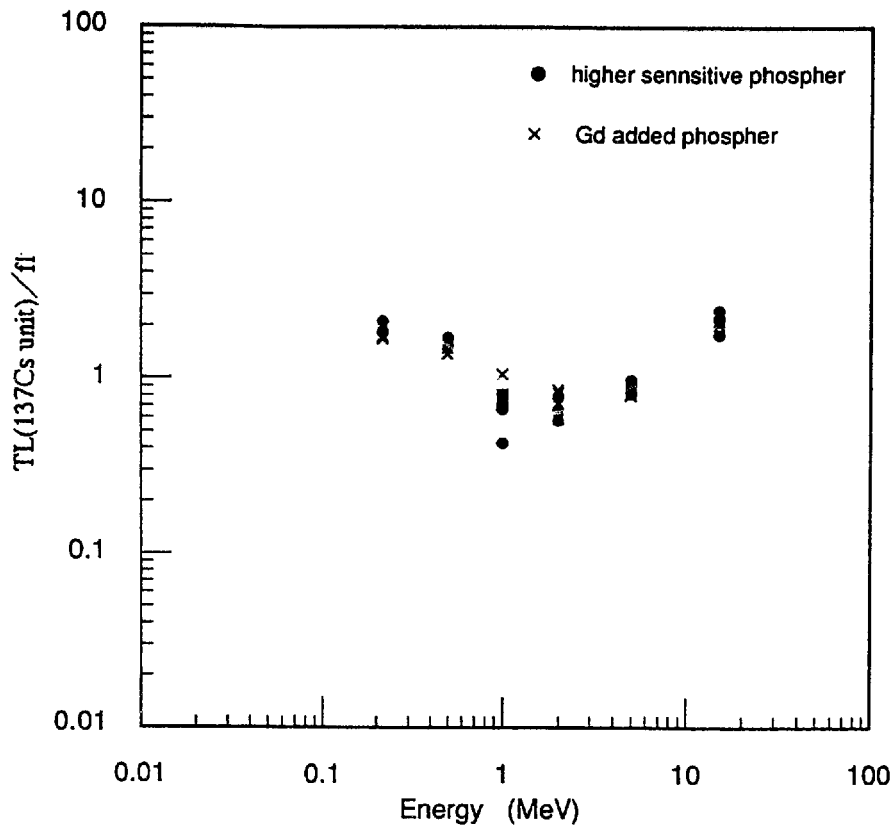


図3-18 高感度型素子、Gd添加素子#1のフルエンス当り感度

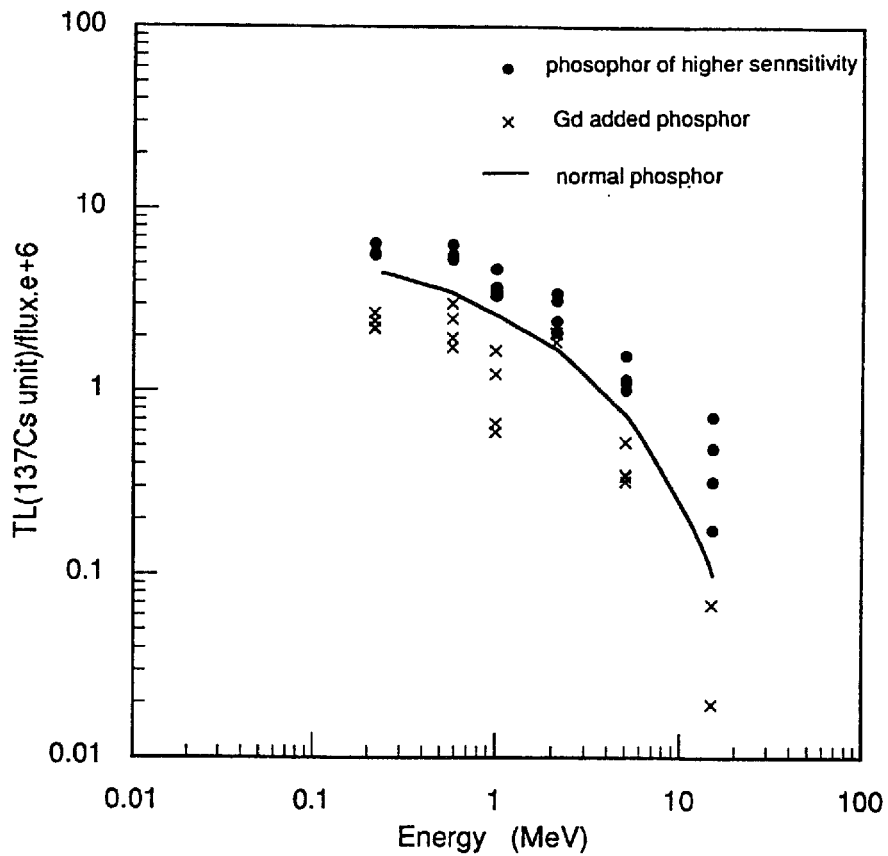


図3-19 高感度型素子、Gd添加素子#2のフルエンス当り感度

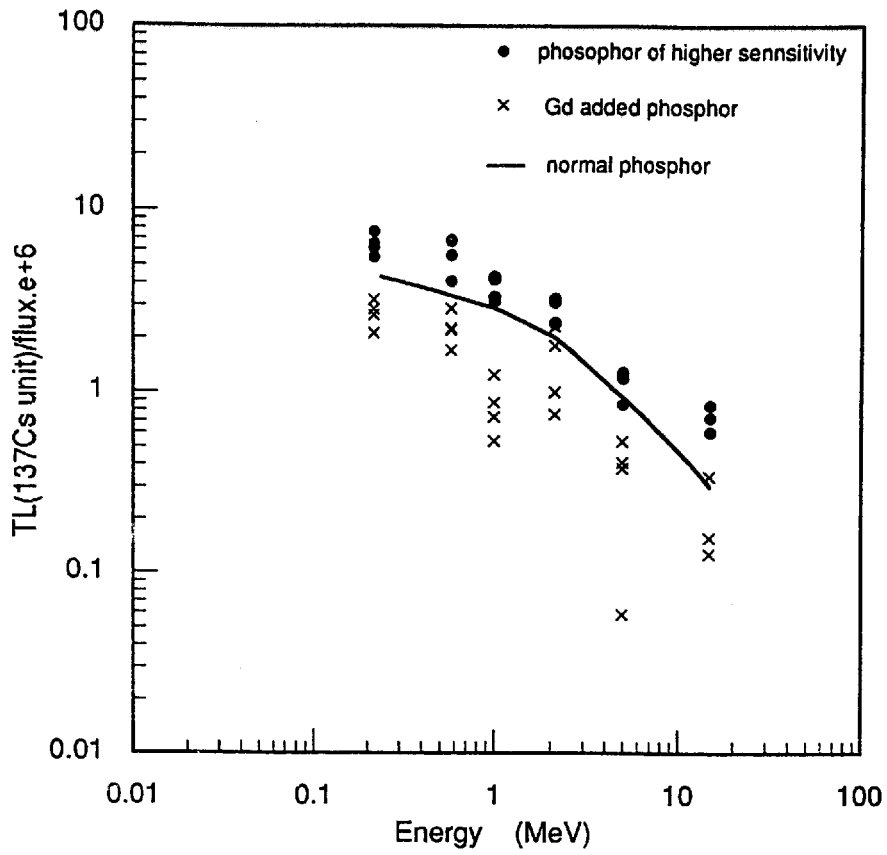


図3-20 高感度型素子、Gd添加素子#3のフルエンス当り感度

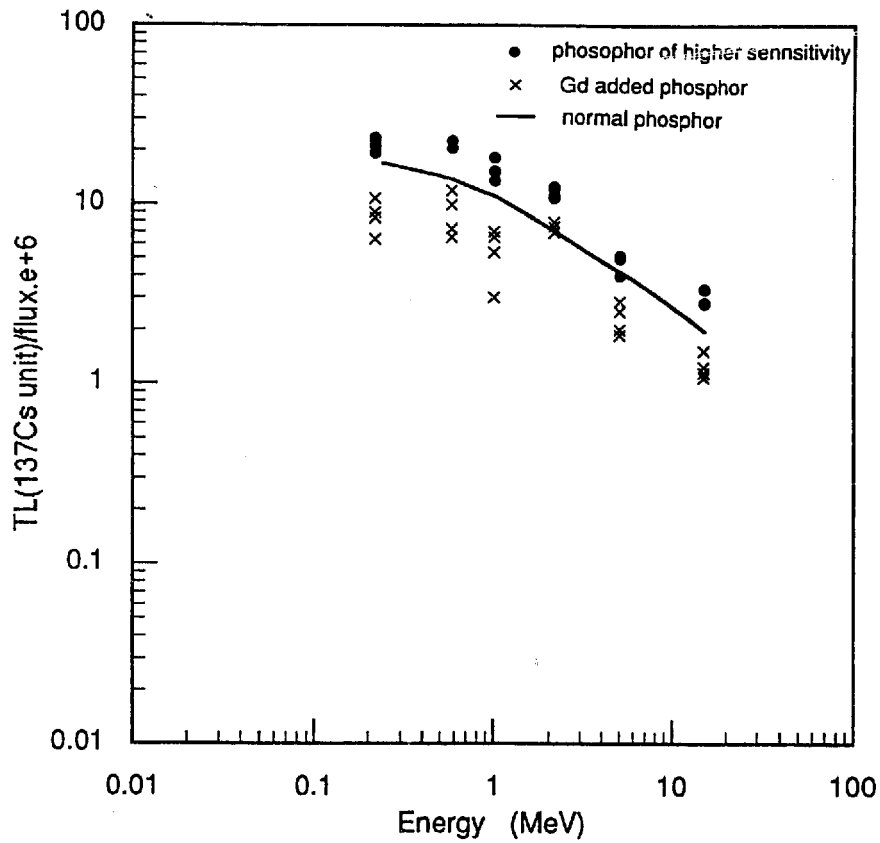


図3-21 高感度型素子、Gd添加素子#4のフルエンス当り感度

1.6 倍高い感度を持ち、Gd添加素子は逆に感度が半分以下に低下している。絶対感度の向上にともない、 $\gamma$ 線対中性子の分離評価精度もさらに改善するものと期待される。

#### (5) バブル線量計

##### i) BTI製BD-100R

BTI社から市販されているバブル線量計 (BD-100R) の基礎特性試験を行った。

線量計の外観図を図3-22に示す。直径16mm、高さ70mmの円筒形透明バイアルに過熱液滴、高分子化合物が混合・充填されており、発生した気泡 (直径1~2mm) 数を目読することによって中性子被曝量を知ることができる。

FNL で単色中性子、放射線計測協会の熱中性子基準場及び東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターに設置された $^{252}\text{Cf}$ の減速型校正場で2~4本のBD-100Rを同時に自由空間中で照射し、発生した気泡数を目視計数した。BD-100R 感度は過熱液滴の添加量によって変化するため、ラベルに表示されたメーター指示較正值 ( $^{241}\text{Am-Be}$  中性子源で照射した際にmrem当りに発生する気泡数、2.7~27[bubble/mrem])で規格化した。

また、BD-100Rの感度は温度に依存するが、本実験ではBTI社の実験データ(図3-23)を基に温度補正を行った。その際、補正量の不確かさとして10%誤差を見込んでいる。現在温度依存性が無視できるほど小さいタイプのものも開発されている。

表3.7、図3-24に自由空間中での単位フルエンス当りの感度を示す。我々の測定値はLiu[3-13]による実験値とよく一致している。

中性子エネルギー2.1MeVのプロットは $^{252}\text{Cf}$ 線源を用いた照射結果である。200keV以上で中性子エネルギーに依存しないほぼ平坦な感度を持っている。また熱中性子に対しても僅かに感度を持っているが、これは $^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}(Q = 0.62\text{MeV})$ 反応による反跳 $^{35}\text{S}$ イオンによるものと思われる。(このときCd差法によって熱外中性子の寄与を差し引いている) また、図3-25に自由空間中での線量当量当りの感度を示す。

表3.8は東北大学CYRIC $^{252}\text{Cf}$ 簡易型校正場での試験結果であり、先の単色中性子に対する試験結果とあわせて、ファクター2以内の確度で線量当量を評価できる。また、BD-100Rはその幾何学的形状から水平方向に対しては方向依存性がないことも特徴である。

この線量計は100keV以上で使用可能である。直読式である大きな利点を持つが、線量計の耐用期間が短い欠点がある。



## ii) Apfel製APD[3-14]

Apfel Enterprise社から市販されているバブル線量計Active Personnel Detector/Dosimeter の実験も行った。BTI社のBD-100Rとの相違点は、気泡が生じる際の‘音’を圧電素子で検出し、カウンターで計数するという手法をとっている点にある。目視に伴う数え落としなどが無いため、その測定レンジは飛躍的に向上する。

APDとSDDカートリッジの外観を図3-26に示す。SDDカートリッジは4mlのガラス製容器に過熱液滴（3～4万個）とグリセリンを混合したものでAPD内部のカートリッジ・ホルダーに装填して使用する。SDDカートリッジは再使用ができず使い捨てである。

APDの使用説明書によると計数値Cから線量当量Hdetは次式で求めることができる。これは $^{241}\text{Am}$ -Be中性子源を用いた較正結果である。

$$\text{Hdet}[\mu\text{Sv}] = 0.395 \cdot (1 + 1.51 \times 10^{-4} \cdot C) \quad \text{for } T = 20^\circ\text{C} \quad (3-1)$$

また、温度 $20^\circ\text{C}$ を基準として、次のようにして計数値の温度補正をおこなう。

$$\Delta T = |T - 20|$$

$$C' = C \div (1.055)^T \quad (T > 20^\circ\text{C})$$

$$= C \times (1.055)^T \quad (T < 20^\circ\text{C})$$

上記の較正式の括弧内は、気泡生成にともなう過熱液滴数の減少による感度低下の補正項である。

$^{252}\text{Cf}$  中性子源を用い、カウント数-照射した線量当量の直線性を調べた。線量当量率は、0.05, 0.2, 0.5mSv/hである。実験結果をApfel社のマニュアルに記載されている較正曲線とともに図3-27に示す。1000カウントまでは直線性は良好である。

次にFNLで行った実験結果を表3.9に示す。単位フルエンス当りの応答特性を図3-28に示す。

また、図3-29にカウント数から求めた線量計指示値（(3.1)式より計算）と照射した線量当量の比を示す。ほぼ、BD-100Rと同じ特性であり、ファクター2以内で線量当量を測定できる。

表3.7 BD-100Rの実験結果

NEUTRON ENERGY [MeV]	ENUTRON FLUENCE [n/cm <sup>2</sup> ]	DELIVERED DOSE <sup>1)</sup> [ $\mu$ Sv]	NUMBER OF BUBBLES <sup>2)</sup> [bu.]	FLUENCE RESPONSE [ $\times 10^{-5}$ bu. $\cdot$ cm <sup>2</sup> ]
15.0	8.33E+5	458.	37.8 $\pm$ 5.3	4.54 $\pm$ 0.68
15.0	8.33E+5	458.	35.3 $\pm$ 7.0	4.23 $\pm$ 0.90
15.0	3.54E+5	195.	21.8 $\pm$ 3.7	6.17 $\pm$ 1.13
15.0	1.42E+5	78.3	6.4 $\pm$ 0.6	4.50 $\pm$ 0.57
5.00	8.88E+5	338.	22.6 $\pm$ 4.2	2.55 $\pm$ 0.48
5.00	1.83E+5	69.5	7.2 $\pm$ 0.8	3.91 $\pm$ 0.50
2.3 <sup>3)</sup>	4.36E+5	145.	21.2 $\pm$ 3.6	4.85 $\pm$ 0.84
2.3 <sup>3)</sup>	6.08E+5	202.	23.7 $\pm$ 4.6	3.90 $\pm$ 0.74
0.99	2.93E+5	98.6	14.9 $\pm$ 2.0	5.10 $\pm$ 0.73
0.99	9.39E+4	31.7	5.7 $\pm$ 0.7	6.07 $\pm$ 0.85
0.96	3.20E+5	107.	15.2 $\pm$ 3.2	4.73 $\pm$ 1.03
0.96	3.20E+5	107.	20.5 $\pm$ 3.0	6.38 $\pm$ 0.99
0.58	2.14E+5	58.5	12.9 $\pm$ 2.9	6.06 $\pm$ 1.38
0.58	5.98E+4	16.4	4.5 $\pm$ 0.8	7.57 $\pm$ 1.40
0.55	1.25E+5	33.3	9.2 $\pm$ 1.0	7.36 $\pm$ 0.85
0.55	1.86E+5	49.7	13.4 $\pm$ 1.4	7.19 $\pm$ 0.84
0.21	1.62E+5	21.3	4.4 $\pm$ 0.6	2.69 $\pm$ 0.40
0.21	1.06E+5	13.8	3.2 $\pm$ 0.6	3.03 $\pm$ 0.64
thermal <sup>4)</sup>	5.83E+6		0.74 $\pm$ 0.21	0.013 $\pm$ 0.004

<sup>1)</sup> H1cm線量当量 (=H\*(10))、フルエンスから計算

<sup>2)</sup> 目視したバブル数 (感度1[bu./mrem]に規格化、温度補正済)

<sup>3)</sup> <sup>252</sup>Cf線源 (東北大学CYRIC校正室)

<sup>4)</sup> 放射線計測協会の熱中性子基準場

表3.8 <sup>252</sup>Cf校正場でのBD-100R試験結果

SOURCE/MODERATOR	DELIVERED DOSE [uSv]	ESTIMATED DOSE	ESTIMATED DELIVERED
<sup>252</sup> Cf	145.	211. $\pm$ 36.	1.45 $\pm$ 0.25
	202.	237. $\pm$ 45.	1.18 $\pm$ 0.22
	153.	152. $\pm$ 26. *)	0.99 $\pm$ 0.17
<sup>252</sup> Cf/IRON <sup>1)</sup>	158.	107. $\pm$ 23.3	0.68 $\pm$ 0.15
	71.7	58.8 $\pm$ 6.5	0.82 $\pm$ 0.09
<sup>252</sup> Cf/POLYETHYLENE <sup>2)</sup>	49.5	45.7 $\pm$ 12.6	0.92 $\pm$ 0.25

<sup>1)</sup> IRON SPHERE (R=10.0cm)

<sup>2)</sup> POLYETHYLENE SPHERE(R=17.5cm)

\*) 水ファントム上

## BD 100R



### FEATURES:

- Ultra High Sensitivity ( $<0.5\mu\text{Sv}$ )
- Real Time Immediate Response
- Tissue Equivalent Response
- Completely Passive Operation
- Flat Energy Response (200keV to 14MeV)
- Insensitive to Gamma Rays
- Inherently Isotropic Response
- Compact, Lightweight
- High Strength Plastic Construction

図 3-22 BD-100Rの外観

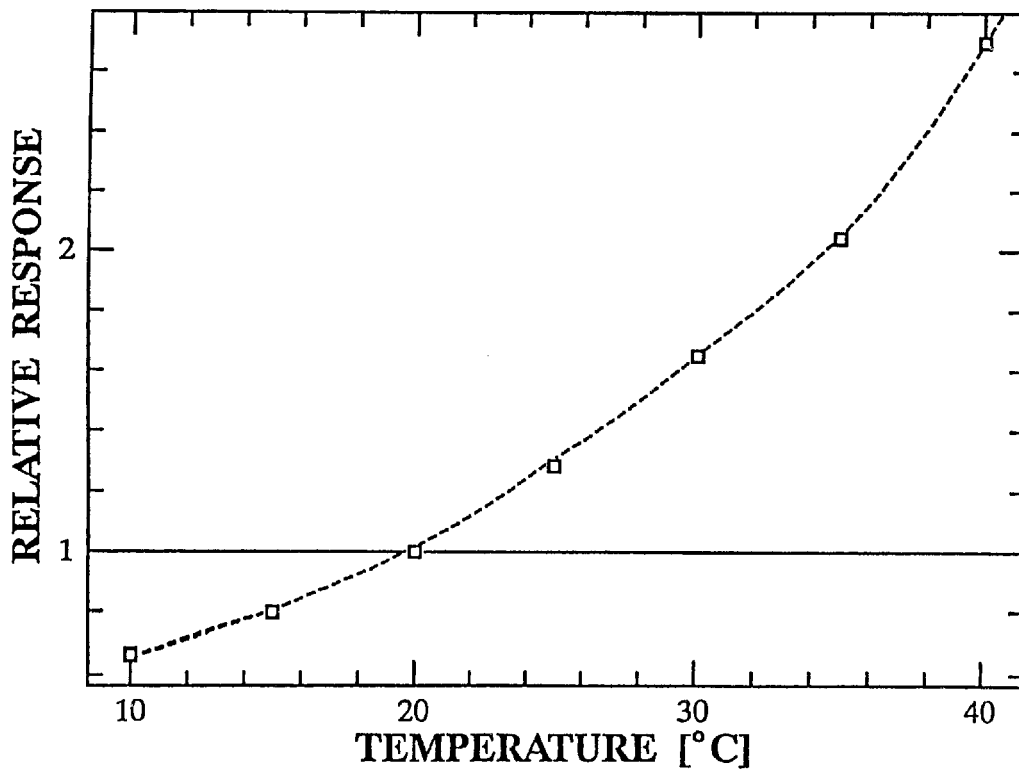


図 3-23 BD-100R (温度非補償型) の温度依存性 (BTI社の資料より)

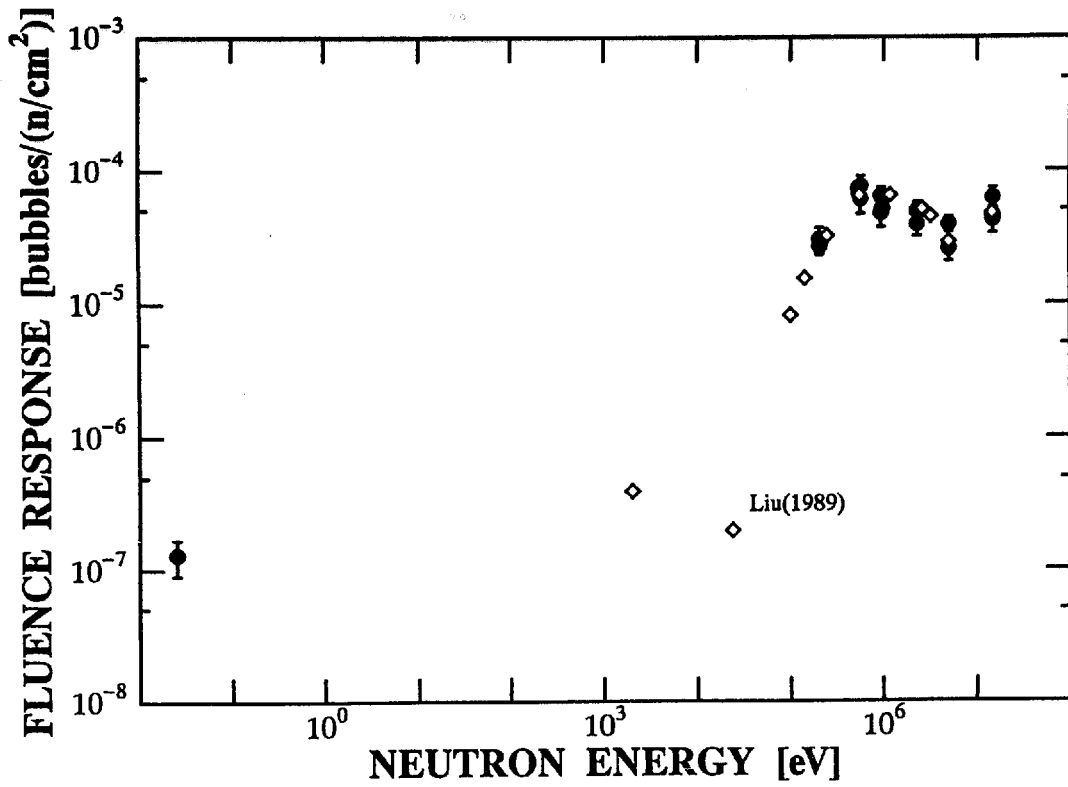


図3-24 BD-100Rの自由空間中でのフルエンス当りの感度 (1.0 bubble/mrem に規格化した) Liu[3-13]による結果も示す。

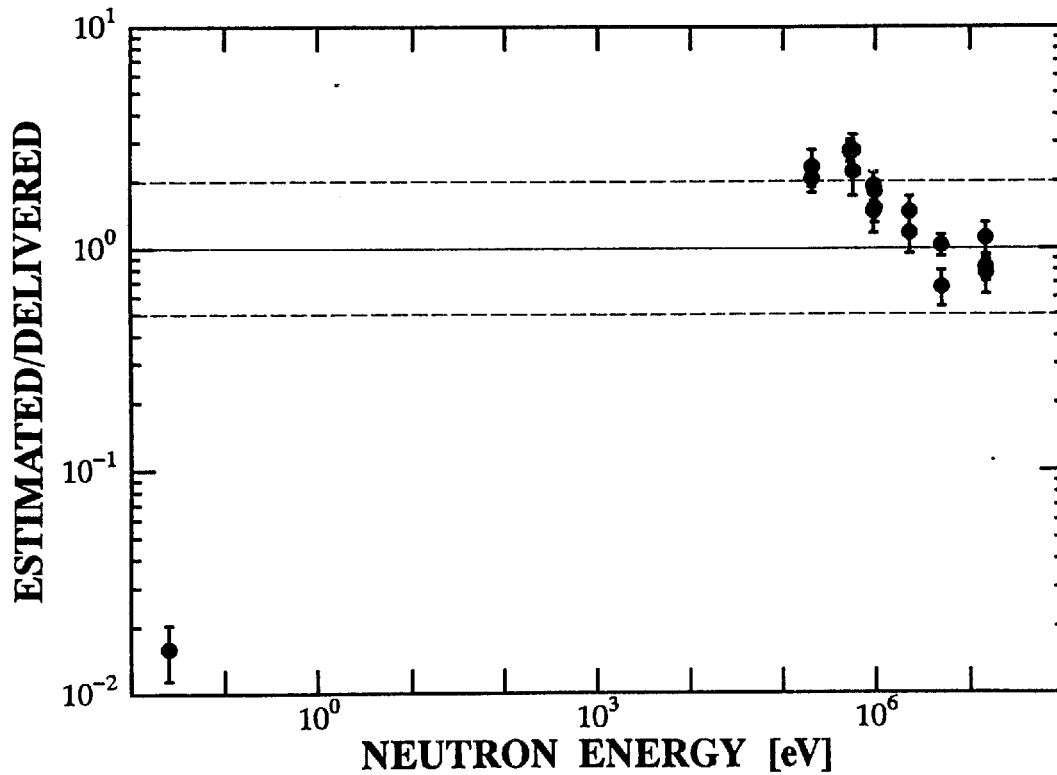


図3-25 BD-100Rの自由空間中での線量当量感度 - 指示値と真の線量当量の比

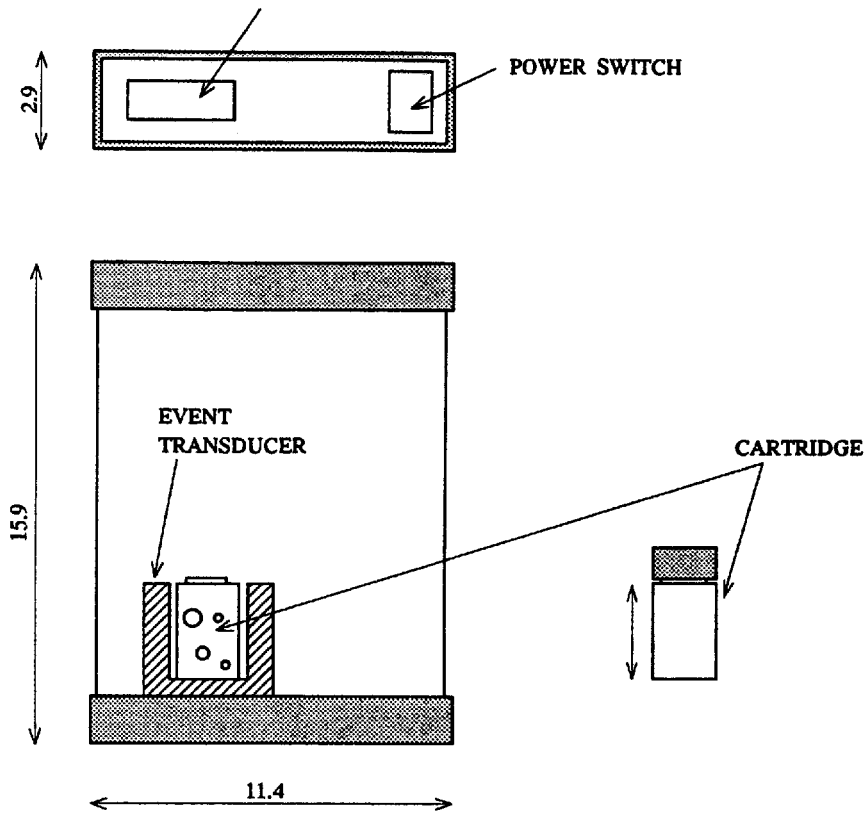


図 3 - 26 APDの外観図、単位cm

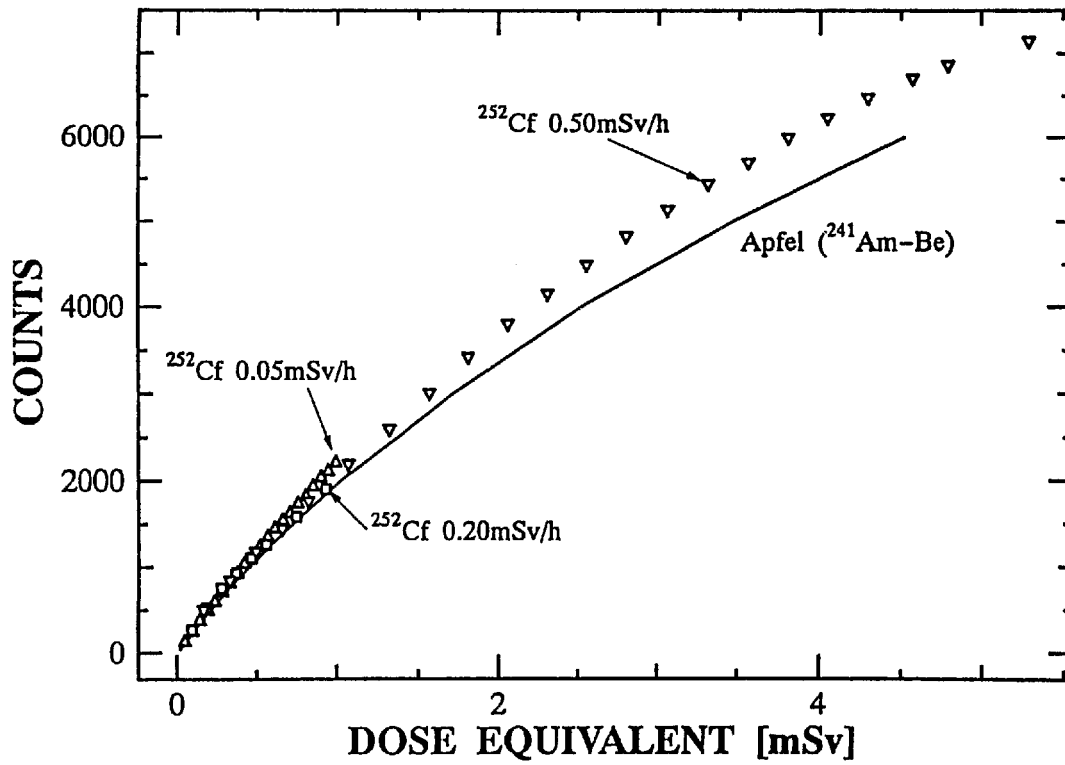


図 3 - 27 APDの線量当量に対する計数値の直線性

表3.9 Apfel社のバブル線量計APDの実験結果

NEUTRON ENERGY [MeV]	COUNTS <sup>1)</sup>	NEUTRON FLUENCE [n/cm <sup>2</sup> ]	DELIVERED DOSE <sup>2)</sup> [mSv]	FLUENCE RESPONSE [counts · cm <sup>2</sup> ]
15.0	716.	5.14 × 10 <sup>5</sup>	283	1.39 ± 0.09 × 10 <sup>-3</sup>
	1321.	1.06 × 10 <sup>6</sup>	581	1.25 ± 0.07 × 10 <sup>-3</sup>
	2002.	1.67 × 10 <sup>6</sup>	921	1.20 ± 0.07 × 10 <sup>-3</sup>
5.0	1143.	7.60 × 10 <sup>5</sup>	289	1.50 ± 0.08 × 10 <sup>-3</sup>
	2204.	1.49 × 10 <sup>6</sup>	569	1.48 ± 0.07 × 10 <sup>-3</sup>
	3095.	2.19 × 10 <sup>6</sup>	833	1.41 ± 0.06 × 10 <sup>-3</sup>
2.0	620.	3.06 × 10 <sup>5</sup>	108	2.04 ± 0.15 × 10 <sup>-3</sup>
	1968.	9.97 × 10 <sup>5</sup>	352	1.97 ± 0.10 × 10 <sup>-3</sup>
0.96	826.	4.24 × 10 <sup>5</sup>	142	1.95 ± 0.11 × 10 <sup>-3</sup>
	1491.	9.16 × 10 <sup>5</sup>	306	1.63 ± 0.08 × 10 <sup>-3</sup>
	1980.	1.49 × 10 <sup>6</sup>	497	1.33 ± 0.06 × 10 <sup>-3</sup>
0.545	213.	1.28 × 10 <sup>5</sup>	34.2	1.67 ± 0.14 × 10 <sup>-3</sup>
	444.	2.86 × 10 <sup>5</sup>	76.4	1.55 ± 0.10 × 10 <sup>-3</sup>
	916.	6.84 × 10 <sup>5</sup>	183	1.34 ± 0.07 × 10 <sup>-3</sup>
0.213	46.7	6.94 × 10 <sup>4</sup>	9.2	6.73 ± 1.04 × 10 <sup>-4</sup>
	71.9	1.48 × 10 <sup>5</sup>	19.5	4.86 ± 0.61 × 10 <sup>-4</sup>

<sup>1)</sup> 温度補正後のカウント数

<sup>2)</sup> H1cm線量当量 (=H\*(10))、フルエンスから計算

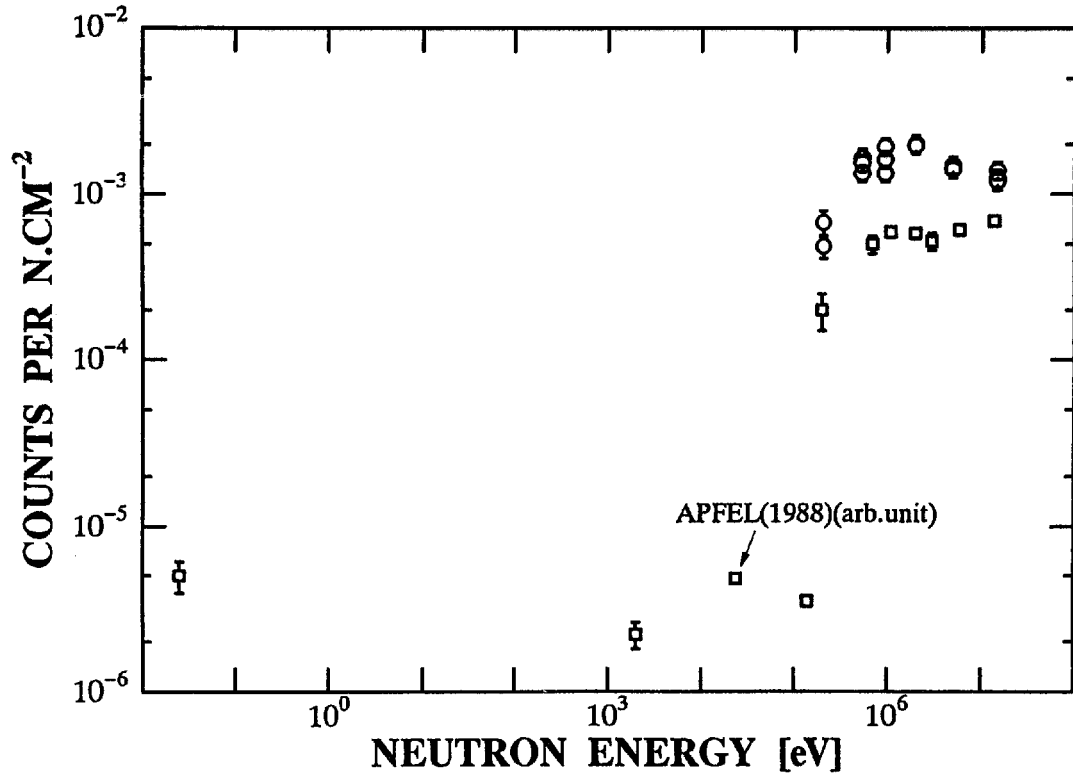


図3-28 Apple社APDの単位フルエンス当りの感度

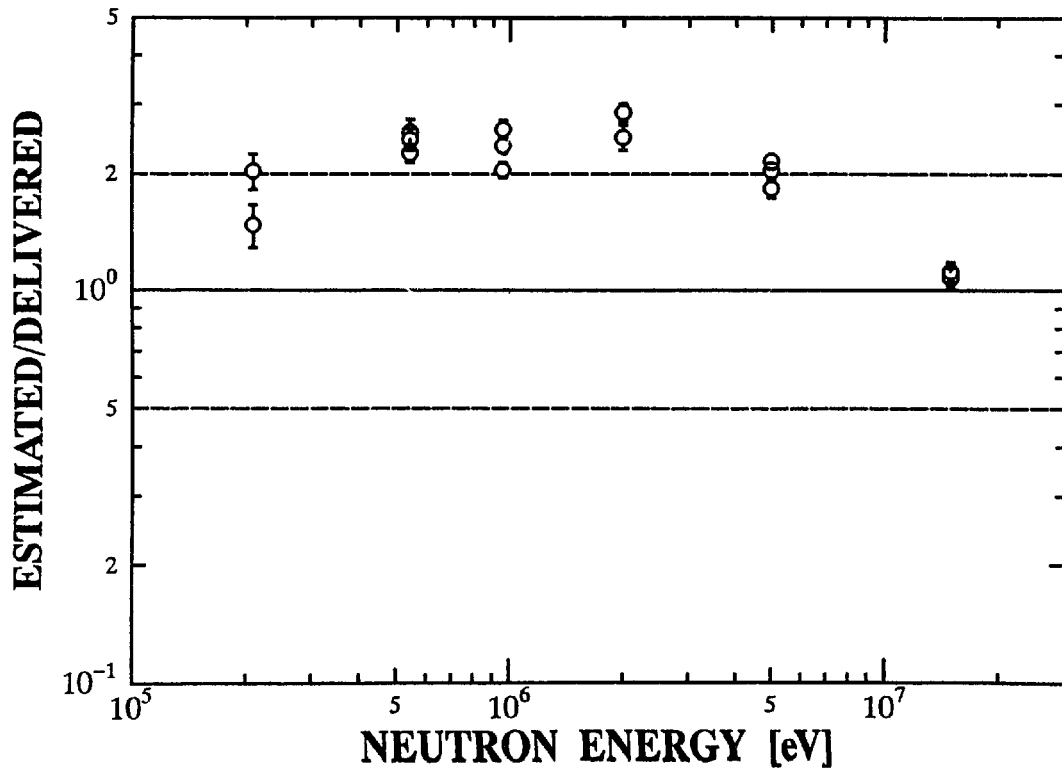


図3-29 Apple社APDの線量当量感度  
-指示値と真値との比

## (6) シリコン半導体線量計

## i) アロカ製PDM-303

シリコン半導体線量計としてアロカ(株)からPDM-303が市販された。これはシリコン素子1個を使用し、その前にLiFラジエータを置いて ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応により熱中性子に対する感度を持たせ、またポリエチレンラジエータも置いて速中性子にも感度を持たせ、それ全体をCdカバーで囲った構造を持つものと推定される。この線量計のエネルギー特性をFNLの単色中性子場、放射線計測協会の熱中性子場、CYRICの ${}^{252}\text{Cf}$ 及びその減速中性子場でそれぞれ照射して測定した。線量計は水ファントム上に装着した状態で、他の線量計と同じ条件で照射した。

測定結果を表3-10にまとめて示す。H1cm線量当量(mSv)はスペクトロメータやフルエンスモニタから求めた中性子フルエンスからの計算値であり、線量計の表示値(mSv)との比も表に示した。

この比の値を図3-30に示す。この線量計はAm-Be中性子源(平均エネルギー4.5MeV)に対して校正して値付けがなされているため、基準線量値と比べて、 ${}^{252}\text{Cf}$ に対しては0.4弱と相当大きな過少評価となっており、また8 keVでは50倍以上の過大評価となっている。この素子は次の富士電機製の線量計と違って素子を1個しか使用せず、しかも熱中性子の感度だけをCdカバーで低くしているため、熱中性子の所と200~500keV及びAm-Be近辺(2.5~6MeV)だけはファクター2以内の精度で線量を与えるが、500keV~2.5MeVで0.3の過少評価、それ以外で過大評価となり、特にeV~数10keVの領域で10倍~数10倍の過大評価となる。

## ii) 富士電気製APD

東北大学と富士電機(株)の共同で中性子検出用として、低速中性子検出素子と高速中性子検出素子の2種類のシリコン半導体素子を用いた中性子個人線量計が開発された[3-15]。近く市販される予定である。

低速中性子素子は、1 cm角のn型シリコン基板の表面に94%以上に濃縮した ${}^{10}\text{B}$ をプラズマCVD法により蒸着した(厚さは約 $1\ \mu\text{m}$ )ものであり、 ${}^{10}\text{B}$ と中性子の ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 反応で生じるアルファ線と ${}^7\text{Li}$ 原子核を検知するものである[3-16]。また、高速中性子にも感度を持たせるために、素子の直前に $\text{H}(n, n)\text{p}$ 反応による反跳陽子発生用の厚さ数 $10\ \mu\text{m}$ 程度の薄いポリエチレンフィルムを配置し、反跳陽子の検知も行っている。このため、この素子は熱中性子から1MeVまでの低速中性子を測定するために用いられる。さらに、熱中性子に対する感度を下げてエネルギー特性を改善するために、ポリエチレンフィルムの前に約0.5mm厚のカドミウム板を置いたテストも行った。この素子はボロンを蒸着しているために結合が強固であり、ボロンやリチウムを素子の上に塗布



したり貼り付けたりする方式に比べて、剝離する恐れはなく、はるかに安定に長期使用に耐える。

高速中性子素子は、アモルファスシリコンをデポジットした1 cm角のp形シリコン基板の直前に、低速中性子素子と同様のポリエチレンフィルムを配置したものであり、高速の中性子（1MeV以上）のみを検出するものである。それぞれの検出素子の構造図を図3-31に示す。

これらの半導体素子は、数Vの低いバイアス電圧で動作させているために空乏層の厚さが数10 $\mu$ m程度と薄く、ガンマ線入射に対してはエネルギー吸収量がごく小さいのに反して、アルファ線や反跳陽子などの重荷電粒子の入射に対しては十分なエネルギー吸収が可能な設計となっている。したがって、ガンマ線入射による出力パルス波高と、中性子入射による出力パルス波高を簡単に弁別することができる。後に述べるように、この波高弁別により、500mSv/hのガンマ線混在場においてもガンマ線による線量寄与分を1%以下とすることができる。

この線量計の水ファントムに装着した状態でのエネルギー特性を同じ中性子校正場で照射して測定した。

これらの測定によって得られた低速中性子素子の単位中性子束当りの感度（counts/(n/cm<sup>2</sup>))を中性子エネルギーの関数として図3-32に示す。実験値は熱中性子と200 keV以上のエネルギーに限られているので、中間のエネルギーに対する感度はモンテカルロコードによる計算から求めた[2-11、3-8]。

実験値と計算値は熱中性子から5MeVまでの領域で非常によく一致しているが、5MeV以上では実験値が徐々に大きくなっている。これはシリコン素子自体や素子周りの物質と中性子との核反応で生成された荷電粒子の影響である。

図には比較のために、ICRP-51[2-4]に与えられたフルエンスー周辺線量当量換算係数も示している。線量当量換算係数に線量計のエネルギー特性をできるだけ一致させるために、高速中性子素子の感度は低速中性子素子の感度の約20倍にしている。この2つの素子の感度の和は線量当量換算係数の曲線に10keV以下と2MeV以上でかなりよく一致しているが、数10keV-1MeVの領域では感度が大きく低下している。

図3-33にはこの2つの素子の感度を線量当量 $\mu$ Sv当りで示したが、この図では高速中性子素子の感度は実測値そのままである。図から明らかなように、この線量計のエネルギー特性は線量当量換算係数に対し、数10keVから数100keVのエネルギー領域で一定値から大きくずれている。したがって、線量当量の評価は低速中性子素子による熱中性子から1MeVまでの中性子線量当量 $H_s$ と高速中性子素子による1MeV以上の中性子線量当量 $H_f$ の2群に分けて次式により行う。

$$H_t = H_f + H_s = a \cdot C_f + b \cdot C_s \quad (3-2)$$

ここで、 $C_f$ 、 $C_s$ は各々高速および低速中性子素子のカウント数であり、線量当量換算定数  $a$ 、 $b$ は

$$a = \int_{1\text{MeV}} h^*(10;E) \phi(E) dE / \int_{1\text{MeV}} R_f(E) \phi(E) dE \quad (3-3)$$

$$b = \int_{\text{thermal}}^{1\text{MeV}} h^*(10;E) \phi(E) dE / \int_{\text{thermal}}^{1\text{MeV}} R_s(E) \phi(E) dE \quad (3-4)$$

で与えられる。この式で $R_f(E)$ 、 $R_s(E)$ は図3-32に示した高速及び低速中性子素子の感度 ( $\text{counts}/(\text{n}/\text{cm}^2)$ )、 $h^*(10;E)$ はICRP-51に与えられるフルエンス-周辺線量当量換算係数 ( $\mu\text{Sv}/(\text{n}/\text{cm}^2)$ )である。高速中性子素子および低速中性子素子の換算定数  $a$ 、 $b$ を求めるためのスペクトル重み関数  $\phi(E)$ としては、それぞれ現実に最もよく存在する放射線場のスペクトルに近い $^{252}\text{Cf}$ 核分裂スペクトルおよび1/E型ポリエチレン減速 $^{252}\text{Cf}$ スペクトルを用いた。これらのスペクトルについては文献[3-17、3-18]に中性子校正場として与えられている。求めた $a$ 、 $b$ の値(逆数)が図3-33に示されているが、低速中性子で $1\mu\text{Sv}$ 当り10カウント、高速中性子素子で $1\mu\text{Sv}$ 当り0.5カウントとなっている。これはいままでの中性子個人線量計に比べて約10倍の高感度となっている。また、(3-2)式の線量評価法はカウント数の和の形になっているので、例えば、アルベドTLD線量計のように差をとる方式に比べ統計精度がはるかに高い利点を持っている。

(3-2)式により求められる線量当量の測定値が、実際の様々の放射線場においてどの位の精度を持つかをフィールド試験により評価した。フィールド試験には、中性子スペクトルが既知の場で、しかも原子炉施設、加速器施設、核融合実験施設、核燃料取扱施設などを代表する次の7つの中性子場を選んだ。

- 1) 高速中性子源炉「弥生」高速中性子柱 (YAYOI)
- 2) 高速実験炉「常陽」作業エリア (JOYO)
- 3) MOX燃料取扱施設内燃料周辺 (MOX)
- 4) 35MeV陽子加速器本体室および迷路内 (CYRIC-MAZE)
- 5) 15MeV d-T中性子のコンクリート遮蔽体透過場 (FNL-CONCRETE)
- 6) 1GeV電子シンクロトロン周辺場 (INS-ES)
- 7) 12GeV陽子シンクロトロン周辺場 (KEK-PS)

これらの場の線量当量の基準値としては、同時に使用した中性子線量当量計 (Studsvik製 2202D、富士電機製 NSN1) および中性子スペクトロメータによる実測値を用いた。

フィールド試験の詳細は別に報告するので[2-11]、ここでは個人線量計による実測値を基準値（周辺線量当量  $H^*(10)$ ）との比として図3-34に示す。この図の横軸は図中に記号で示した各中性子場の線量当量で重み付けした平均エネルギーであり、50keV から20MeVと3桁近くも変化している。

定数  $a$ 、 $b$  はもともと核分裂スペクトルと  $1/E$  型スペクトルに合うように決めているので、それに近いスペクトル場である弥生(YAYOI)、MOX燃料、FNL-CONCRETEでは、この線量計で得られた線量当量は20%以内で基準線量当量とよく一致している。それに比べずっと軟らかいスペクトルを持つJOYOでも本線量計は50%以内の精度で線量当量を与えている。CYRICの迷路実験においても、加速器に近い位置では50%以内の精度で一致しているが、熱中性子束成分が全中性子束の50%を越えるような迷路内の深い位置では、熱中性子線量の過大評価により全中性子線量当量を7倍程過大評価している。しかし、図に示したように低速中性子素子にカドミウムカバーをすることによって、この過大評価を3倍強程度に抑えることが出来る。また、10MeV以上の高エネルギー中性子成分が全線量の30%以上を占めるINS-ESの場では、2倍程度の線量当量の過大評価を与えている。

以上の結果から、この個人線量計は熱中性子束が全中性子束の50%を越えるような場を除いて、中性子線量当量をファクター2以内の精度で与えることが分かった。さらに、熱中性子が多い場すなわち、この2つの素子のカウント数の比、 $C_s/C_f$ がある数字（例えば100）を越える場でも、(3-2)式の線量当量換算定数  $b$  を少し変更することによってファクター2よりも充分よい精度で線量当量を評価できる。高エネルギー中性子成分が多い加速器の場においても、(3-2)式の定数  $a$  を変えることによって、同様にファクター2よりももっとよい精度で線量当量を求めることが出来る。 $a$ 、 $b$ の標準値はあらかじめ設定されるが、使用する放射線場に応じてユーザーがその値を変更することを可能にして、多様な使用状況に対応できるようにしている。

さらにこの線量計の試作器2台(NRN1, NRN2)の性能テストをエネルギー依存検出感度に関して行った。この試作器では、高速中性子用素子は2個ついているので感度が2倍になっている。テスト結果を表3-11にまとめて示す。

図3-35に、試作器の外形図を示す。寸法は、縦105mm×横60mm×奥行200mm、質量は約170gであり、容易に作業着のポケット内に携行することが可能である。

## (7) まとめ

以上の特性評価の結果をまとめると次のようになる。

### ○パッシブ型（非電子式）線量計

#### i) フィルムバッジ

実用可能なエネルギー領域は熱中性子用では熱中性子のみ、高速中性子用では約

1 MeV以上で、その間のエネルギーには感度がない。逆に15MeVでは感度が上昇している。検出感度も低く、今後使用されなくなるであろう。

#### ii) 固体飛跡検出器

約100keV以上の中性子検出が可能で線量応答特性もよいが、フィルムバッジと逆に15MeVで感度がやや減少している。100keV以下の中性子に対する感度がないのでTLDアルベド線量計との組合せ線量計で全エネルギー範囲をカバーする方向もある。またラジエータを工夫して全エネルギー範囲をカバーする固体飛跡検出器の開発も現在進められている。今後フィルムバッジに代わって主力となるであろうが素子の安定供給が重要である。

#### iii) TLDアルベド線量計

アルベドを利用しているためエネルギーと共に感度が減少し、特に約100keV以上では極端に感度が落ち、線量応答特性が悪い。 ${}^6\text{LiF}$ と ${}^7\text{LiF}$ のように2つの素子の指示値を差し引いて中性子線量を求めているために測定誤差が大きく、またアルベドを用いているので、素子と人体との距離依存性も大きい。このためその使用には十分な注意が必要で、また較正も難しいため特定の事業所でしか使用できないであろう。

#### iv) バブル線量計

約100keV以上の中性子検出が可能で、固体飛跡検出器と同様人体と似た有機物質で構成されているため、線量応答特性もよい。大きな利点は気泡の形で目で見えたり、音で聞こえたりすることであり、感度も高いので線量計として優れている。しかし温度依存性があること—最近では温度補償型のものもあるが—が問題であり、しかも価格が高いわりに使用できる耐用期間が短く、交換しなければならない欠点がある。

### ○アクティブ（リアルタイム）型（電子式）線量計

#### v) シリコン半導体線量計

唯一電子式でデジタルに線量が直読できる線量計で、熱中性子から高速中性子まで全エネルギー範囲がカバーできる。しかしシリコンを使用しているため、10keV～1MeVの領域での感度の落ち込みが大きい欠点がある。この欠点を保証するために富士電機製のは低速中性子素子と高速中性子素子の2つを使って種々の中性子場において線量をよい精度（ファクタ2以内）で与える工夫をしている。（特許申請中）この線量計はアラームメータとしても使用でき、作業管理用に有用であり、今後大いに活用すべきであろう。

表3-10 アロカ(株)PDM-303の実験結果

エネルギー (MeV)	フルエンス (n/cm <sup>2</sup> )	線量 <sup>1)</sup> (mSv)	表示 <sup>2)</sup> (mSv)	表示/照射	
2.50E-08		0.017	0.040	2.353 JIS PTM	HKK(放計協)
8.00E-03	3.73E+05	0.003	0.170	54.662	FNL
2.20E-01	6.97E+06	0.937	1.230	1.313	FNL
2.50E-01	1.85E+06	0.278	0.420	1.511	FNL
5.50E-01	3.81E+06	1.020	0.610	0.598	FNL
5.60E-01	3.07E+06	0.829	0.260	0.314	FNL
9.60E-01	3.17E+06	1.060	0.300	0.283	FNL
9.60E-01	3.03E+06	1.010	0.360	0.356	FNL
1.00E+00	9.09E+06	3.090	0.850	0.275	FNL
2.00E+00	1.99E+06	0.701	0.250	0.357	FNL
2.00E+00	4.20E+06	1.480	0.420	0.284	FNL
2.40E+00	ポリ減速	0.065	0.070	1.077	CYRIC
2.40E+00	鉄減速	0.29	0.090	0.310	CYRIC
2.40E+00	裸体系	0.16	0.060	0.375	CYRIC
2.40E+00	裸体系	0.962	0.500	0.520 JIS PTM	HKK
5.00E+00	2.78E+06	1.050	1.330	1.267	FNL
5.00E+00	1.53E+06	0.578	0.990	1.713	FNL
1.50E+01	3.78E+06	2.080	7.680	3.692	FNL
1.50E+01	9.95E+05	0.541	1.840	3.401	FNL

<sup>1)</sup> H1cm線量当量 (=H\*(10))、フルエンスから計算

<sup>2)</sup> 線量計指示値

<sup>3)</sup> <sup>252</sup>Cf線源(東北大学CYRIC校正室)、表の線量当量は直接線のみの値

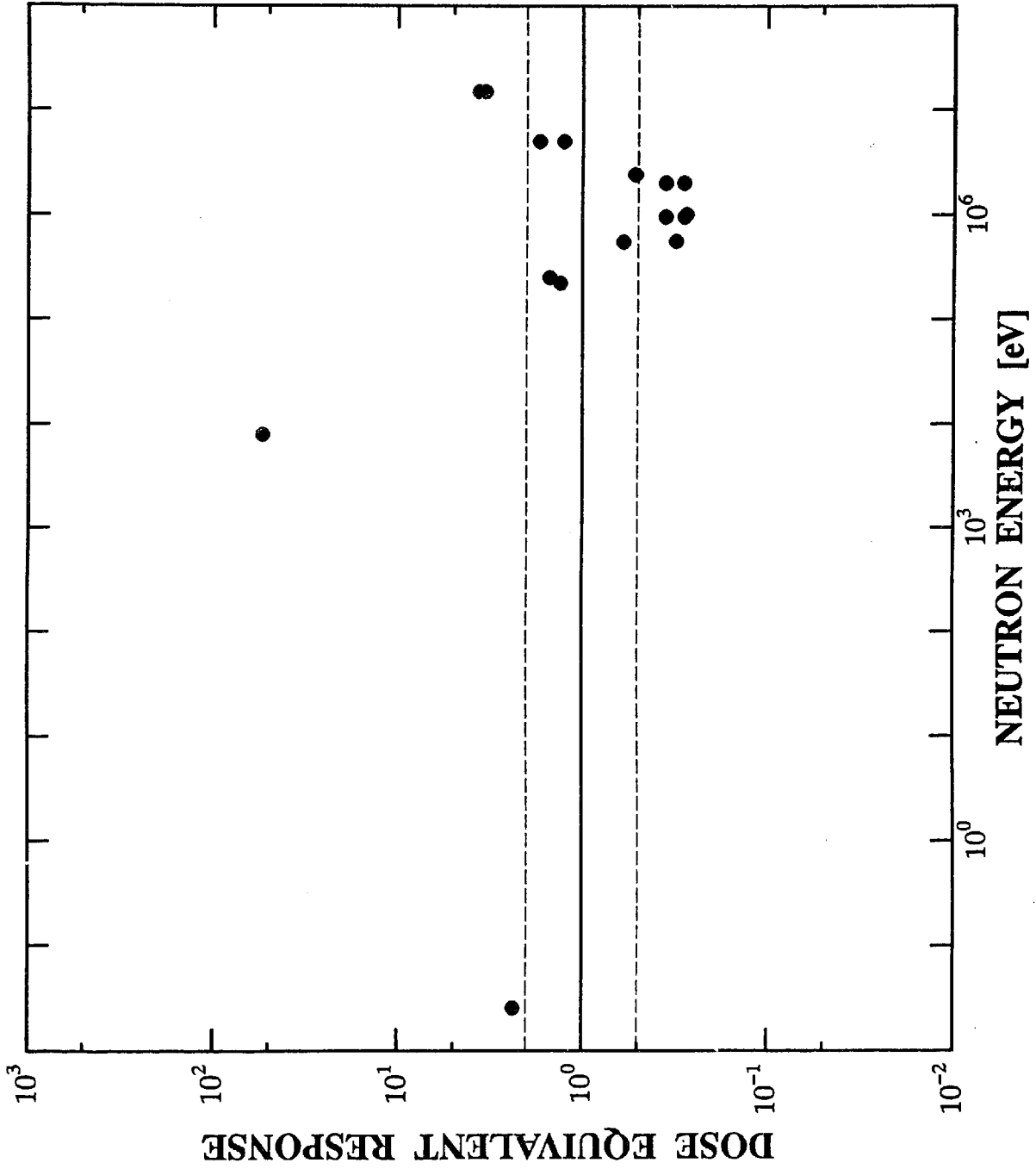


図3-30 アロカPDM-303の線量当量感度特性  
—指示値と真値との比

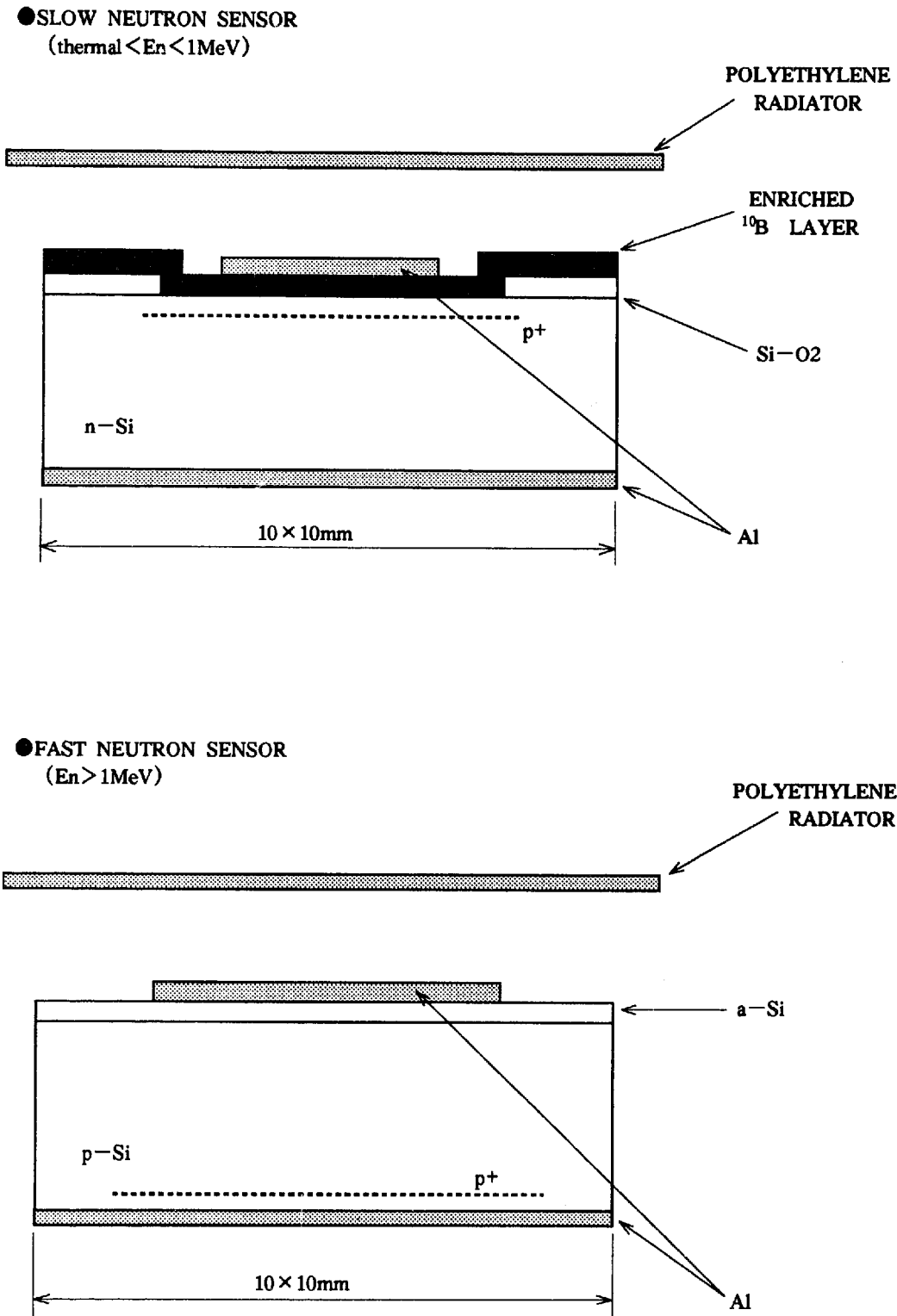


図 3 - 31 低速及び高速中性子素子の構造図

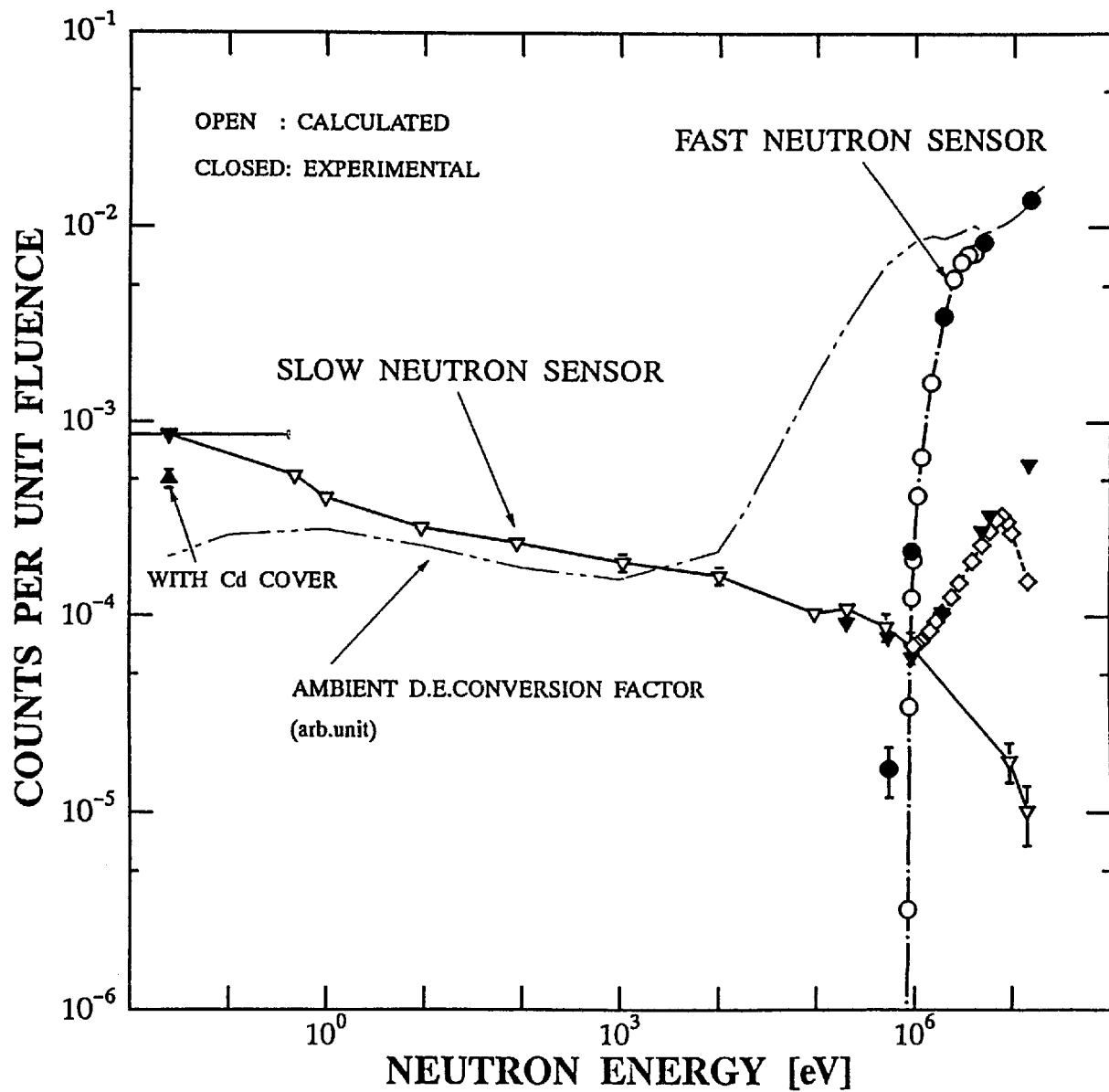


図3-32 低速及び高速中性子素子の単位フルエンス当りの感度



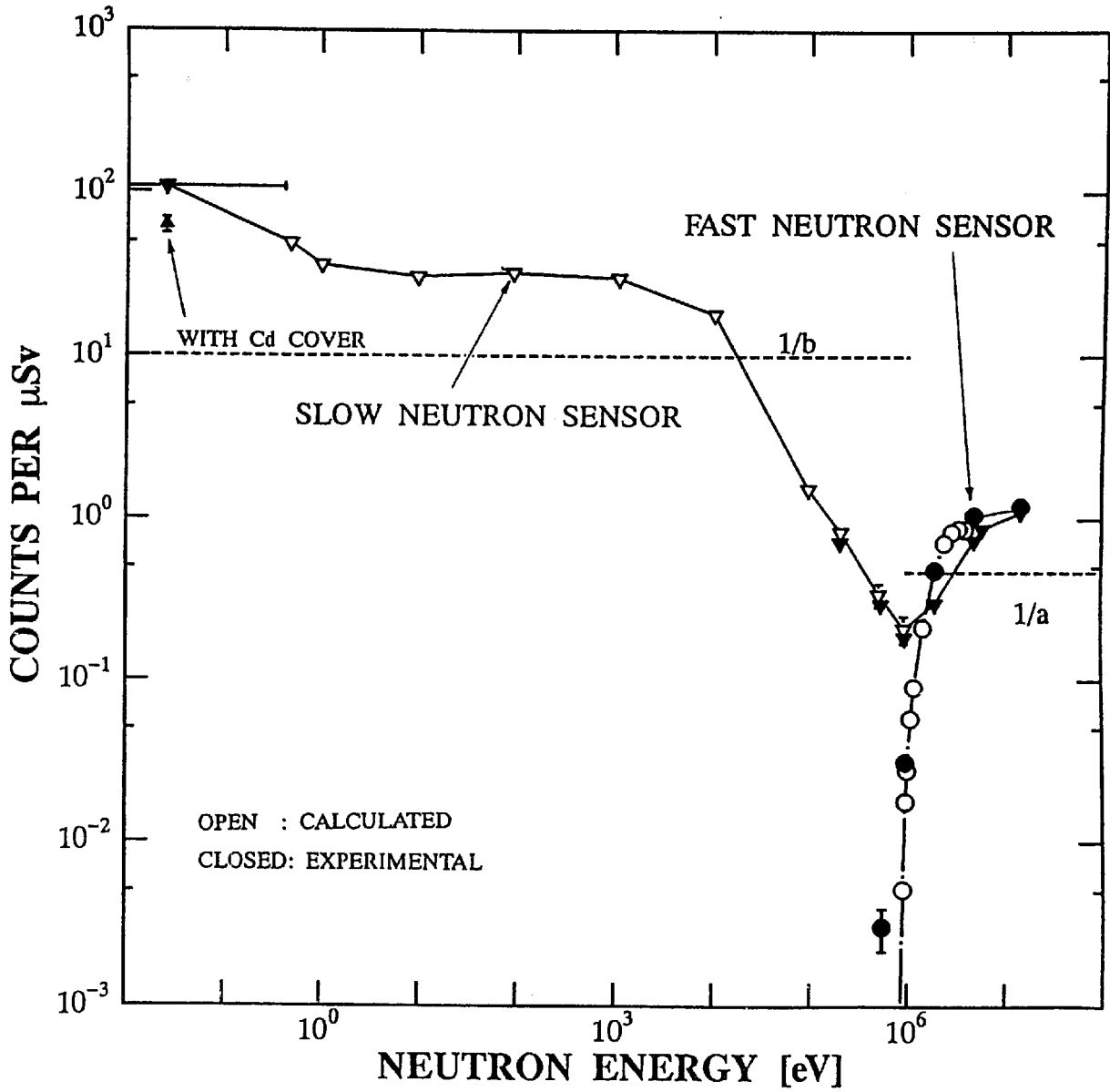


図 3 - 33 低速及び高速中性子素子の線量当量感度特性

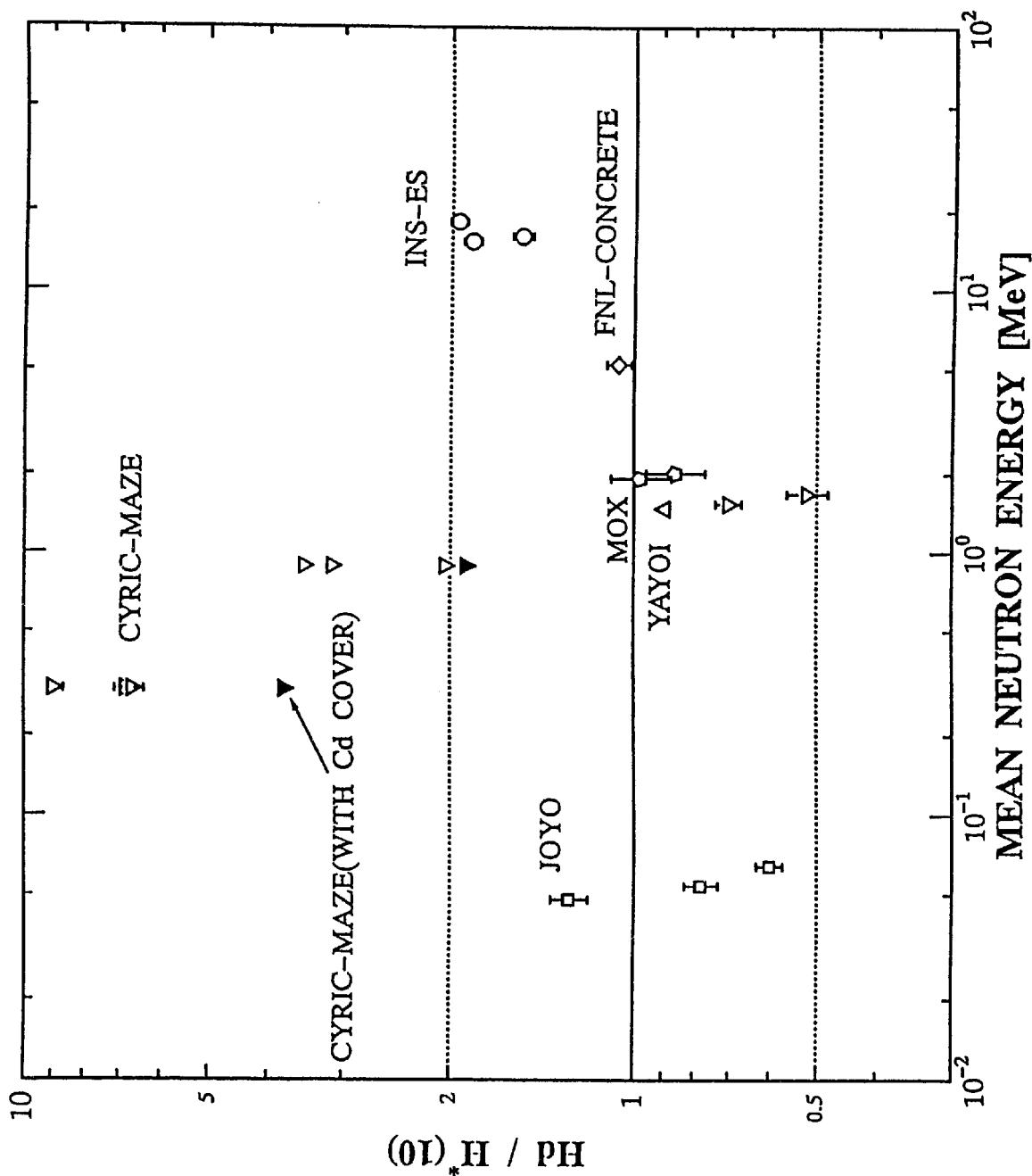


図3-34 富士電機(株)シリコン半導体線量計の各種の施設の中性子場における線量指示値と基準値 ( $H^*(10)$ ) との比

表3-11 富士電機(株) 試作器の低速及び高速中性子素子の実験結果

I 種キ - (MeV)	7M17X (ncm2)	N-RES3		NRN1, NRN2		線量		時間 (s)	高速トヤ		熱トヤ		感度	
		NRN1	NRN2	(mSv)	(Cntr/ncm2)	(Cntr)	(cps/mSv/h)		(Cntr/ncm2)	(Cntr)	(cps/mSv/h)	(Cntr/ncm2)	(Cntr/ncm2)	
2.50E-08	0.00655	1800	2	0.085	305.3	I7-	831	35.242	126870.2	I7-	831	35.242	126870.2	I7-
8.00E-03	3.73E+05	0.003	1	0.089	321.5	2.68E-06	147	13.130	47266.9	3.94E-04	147	13.130	47266.9	3.94E-04
2.50E-01	1.85E+06	0.278	30	0.030	107.9	1.62E-05	209	0.209	751.8	1.13E-04	209	0.209	751.8	1.13E-04
5.60E-01	3.07E+06	0.829	8	0.003	9.7	2.60E-06	348	0.117	419.8	1.13E-04	348	0.117	419.8	1.13E-04
1.00E+00	9.09E+06	3.090	105	0.009	34.0	1.16E-05	553	0.050	179.0	6.08E-05	553	0.050	179.0	6.08E-05
2.00E+00	4.20E+06	1.480	1648	0.309	1113.5	3.92E-04	258	0.048	174.3	6.14E-05	258	0.048	174.3	6.14E-05
2.40E+00	0.962	3600	1431	0.413	1487.5	I7-	494	0.143	513.5	I7-	494	0.143	513.5	I7-
5.00E+00	1.53E+06	0.578	3829	1.840	6624.6	2.50E-03	54	0.026	93.4	3.53E-05	54	0.026	93.4	3.53E-05
1.50E+01	9.95E+05	0.541	2309	1.186	4268.0	2.32E-03	233	0.120	430.7	2.34E-04	233	0.120	430.7	2.34E-04
2.50E-08	0.00655	1800	12	0.509	1832.1	I7-	893	37.871	136335.9	I7-	893	37.871	136335.9	I7-
8.00E-03	3.73E+05	0.003	5	0.447	1607.7	1.34E-05	130	11.611	41800.6	3.48E-04	130	11.611	41800.6	3.48E-04
2.50E-01	1.85E+06	0.278	6	0.006	21.6	3.24E-06	387	0.387	1392.1	2.09E-04	387	0.387	1392.1	2.09E-04
5.60E-01	2.98E+06	0.804	1	0.000	1.2	3.36E-07	186	0.064	231.3	6.24E-05	186	0.064	231.3	6.24E-05
1.00E+00	9.09E+06	3.090	223	0.020	72.2	2.45E-05	1019	0.092	329.8	1.12E-04	1019	0.092	329.8	1.12E-04
2.00E+00	4.20E+06	1.480	2384	0.447	1610.8	5.67E-04	617	0.116	416.9	1.47E-04	617	0.116	416.9	1.47E-04
2.40E+00	0.962	3600	1576	0.455	1638.3	I7-	529	0.153	549.9	I7-	529	0.153	549.9	I7-
5.00E+00	1.53E+06	0.578	3864	1.857	6685.1	2.53E-03	449	0.216	776.8	2.93E-04	449	0.216	776.8	2.93E-04
1.50E+01	9.95E+05	0.541	2690	1.381	4972.3	2.70E-03	376	0.193	695.0	3.78E-04	376	0.193	695.0	3.78E-04

Nf: 93-7-5  
Cf: 93-9-3  
Nth: 93-9-3

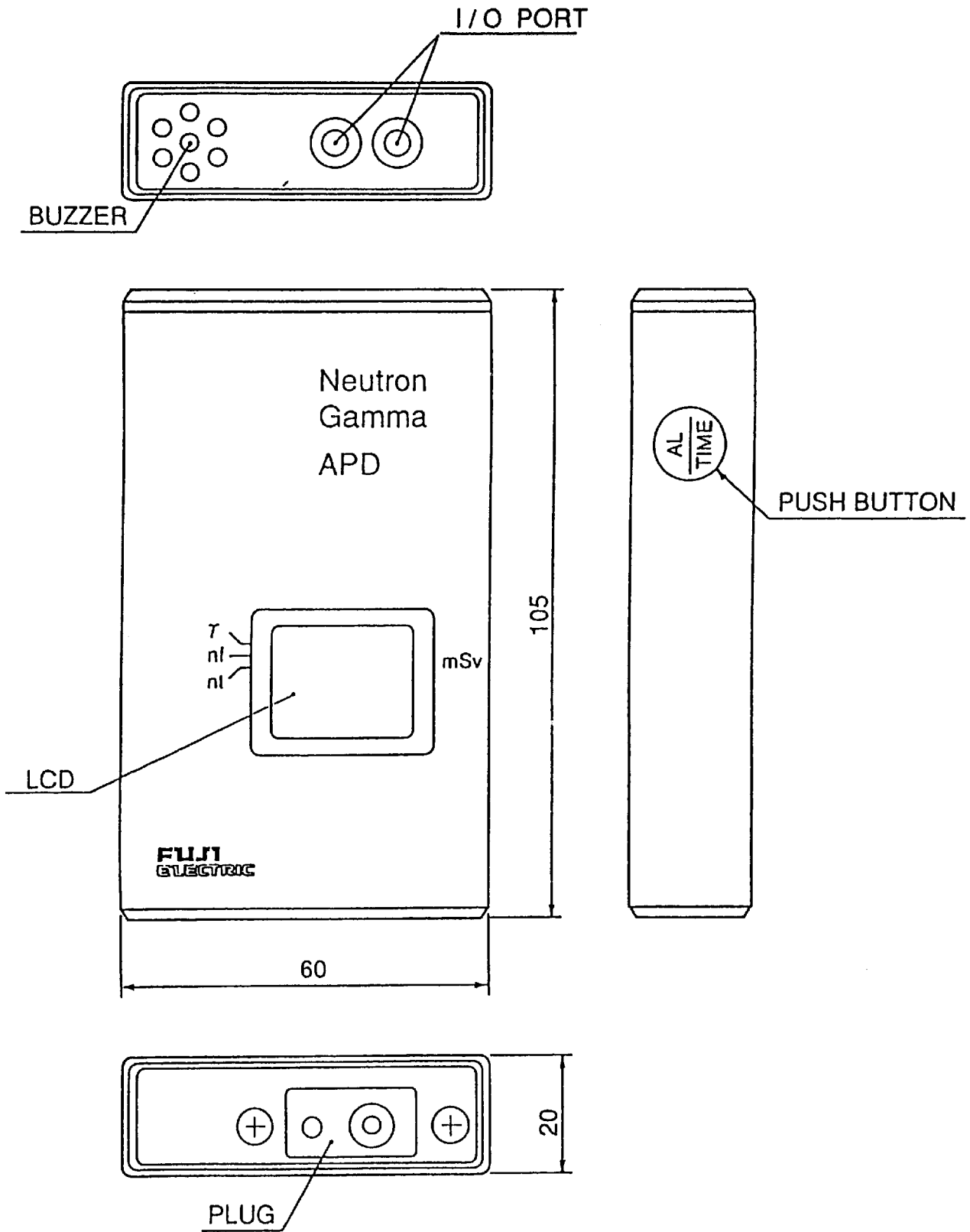


図 3-35 富士電機 (株) シリコン半導体線量計の試作器外観図

## 第4章 中性子個人線量計の較正法

中性子線量計の較正は

- 1) 手軽に利用できる単色中性子源がないこと
- 2) 検出感度 $S$  (count per  $n \cdot \text{cm}^{-2}$ ) と換算係数 $K$  ( $\mu\text{Sv per } n \cdot \text{cm}^{-2}$ ) が完全には一致しないこと、特に図3-1に示したように個人線量計の場合にはこのずれが大きいこと
- 3) 検出すべき中性子エネルギー範囲が熱エネルギー0.025eVから15MeV、高エネルギー加速器施設では数10~100MeVまでと非常に広いこと

の3つの理由から、ガンマ線の線量計の較正よりはるかに難しい。一版に広く用いられるのは $^{241}\text{Am}$ -Be中性子源と $^{252}\text{Cf}$ 中性子源を用いる較正であるが、この両者は連続エネルギー分布を持ち、そのエネルギー分布の形も違っているのでどちらを用いて較正したかによって較正值が違ってくるので注意する必要がある。

また個人線量計の場合の較正は人体を模擬したファントムに装着した状態で行わなければならないが、このファントムについても、ガンマ線の場合はアクリル製平板ファントム(40cm×40cm×15cm厚)がJISにより標準化されているが、中性子に対して標準化されたものはない。

この章では、中性子線量計の較正に用いるべき中性子場及びファントムと較正方法について述べる。

### 4.1 種々の校正用ファントム上におけるTLDアルベドレスポンスの変化

中性子個人線量計として広く用いられているアルベド型 TLDは、人体で散乱されたアルベド中性子を検出するために、入射中性子のエネルギー及び人体における中性子のアルベド率に関する情報が重要である。

一方、人体におけるアルベド率に関する文献は極めて少ない。校正用ファントムを標準化する観点からは、校正用ファントムの種類と線量計の感度関係、人体と校正用ファントムの特性の違い等を明らかにすることが必要である。そこで本研究では、種々のファントム上での TLDのエネルギー特性及び方向特性を実験で求めた。

#### (1) 線量計

実験に用いた線量計の素子構成を模式的に図4-1に示す。この線量計は、表4-1に示すように、4個のTLD素子と、Cd、Snフィルタの組合せによって、熱中性子及び速中性子をそれぞれ評価できるように設計されている [4-1]。中性子の線量評価に用いる式は以下の通りである。

$$\left. \begin{aligned} H_f &= C_f(T_4 - T_1 - C_{t,h}'(T_2 - T_3)) \\ H_{t,h} &= C_{t,h}(T_2 - T_3) \end{aligned} \right\} (4-1)$$

ここで、

- $H_f$  : 速中性子線量当量
- $H_{t,h}$  : 熱中性子線量当量
- $C_f$  : 素子4の発光量から速中性子線量当量を求める換算係数
- $C_{t,h}$  : 素子2と素子3の発光量の差から熱中性子線量当量を求める換算係数
- $T_1 \sim T_4$  : TLD素子1～素子4の発光量 (TLDの読取り値)
- $C_{t,h}'$  : 素子4の熱中性子に対する感度を  $(T_2 - T_3)$  の項で補正する係数

本評価式において $C_f$ の値は、ファントムのアルベド率に強く依存する。このため校正に用いるファントムは人体に近いアルベド特性を有するものがよい。本実験ではこの $C_f$ の値に着目してファントムの特性を判断した。

## (2) 実験方法

実験に用いたファントムは、一般性及び校正のし易さを考慮して、パラフィンファントム、平板アクリルファントム (JISファントム)、水ファントム及び中空水ファントムである。また、作業者が線量計を実際に着用している状態を再現するため、新しくヒューマノイドファントムを製作した。ヒューマノイドファントムは、図4-2に示すように、骨格、肺及びその他の組織からなり、日本人成年男子の標準的な体系である [4-2]。人体からのアルベド中性子をできるだけ精密に模擬するため、各部位には、元素組成及び密度が実際の組織に近い特殊な組織等価材料 [4-3] を使用した。これらのファントムの仕様を表4-2に示す。

エネルギー特性の実験は、東北大学ダイナミトン加速器を用いて行った。照射した単色中性子のエネルギーは、210keV、560keV (以上Li(p,n)反応)、1.1MeV (T(p,n)反応)、5.0MeV (D(d,n)反応)、14.9MeV (T(d,n)反応)であった。中性子エネルギーの測定は飛行時間法による。中性子照射量の測定には絶対中性子束モニターとして $^{235}\text{U}$ 核分裂計数管を用い、相対中性子束モニターとして反跳陽子比例計数管を用いた。また、方向特性の実験には、動燃東海計測機器校正施設の $^{252}\text{Cf}$ 線源を用いた。

## (3) 結果

平板アクリルファントム、パラフィンファントムとヒューマノイドファントム上の TLD のエネルギーレスポンスを比較した結果を図4-3に示す。素子4と素子2、3の感度差

は人体側のCdフィルタの効果によるものである。パラフィンファントムでは約1MeVより高いエネルギー範囲で、ヒューマノイドファントムに比べ、感度が約40%高くなった。JISファントムでは、実験したすべてのエネルギーで、ヒューマノイドファントムに比べ、感度が最大約50%高くなった。また、水ファントム、中空水ファントムとヒューマノイドファントムの比較結果を図4-4に示す。素子2、3の感度は3種類のファントムで顕著な差はなかった。素子4の感度は水ファントムがヒューマノイドファントムと良く一致し、中空ファントムがヒューマノイドファントムより約-20%程度低くなった。

パラフィンファントム上のTLDのエネルギーレスポンスは、以前宮部らが行った電総研における実験結果[4-4] (図4-5に示す) 及び他のアルベド型TLDを用いたPieschらの実験結果[4-5] (図4-6に示す) と良く一致した。

種々のファントム上のTLDの方向特性の比較結果を図4-7に示す。中空水ファントムの特性はヒューマノイドと良く一致した。水ファントムは後方からの入射に対して著しい差を生じた。また、アクリルファントムも最大-60%の差を生じた。

#### (4) 考察

1MeV以上のエネルギーにおいてパラフィンファントムのアルベド率がヒューマノイドファントムと一致しない理由として、次の2つが考えられる。一つは、ファントムに含まれる減速体の密度と量が異なることである。即ち、速中性子を熱中性子まで減速するには、そのエネルギーに応じて一定量の減速体が必要であると考えられるが、密度が低い肺を内蔵するヒューマノイドファントムと、密度が一樣なパラフィンファントムでは、減速体の量が異なるので減速効果に差があり、その結果アルベド率が異なるということである。もう一つは、ファントムを構成する元素組成の違いである。即ち、パラフィンは、水素と炭素から構成されており、その原子数の比はほぼ2:1である。これに対してヒューマノイドファントム (または人体組織) は大部分が水素と酸素から構成されており、その原子数の比は2:1である。1MeVより高いエネルギーでは水素の散乱断面積が急速に低下するため、炭素及び酸素の散乱効果が相対的に顕著になるが、酸素に比べて炭素は中性子の減速効果が大きいので、その差によってアルベド率が異なるということである。それらの寄与の大きさについてはさらに実験と計算で確認していく必要がある。

アクリルファントムがヒューマノイドファントムと異なる理由は、アクリルファントムの密度が $1.19\text{g}/\text{cm}^3$ と他より大きく、また $40\text{cm}\times 40\text{cm}$ の比較的大きな範囲にわたって $15\text{cm}$ の厚さであることから、中性子の散乱が他のファントムより多く生ずるためと考えられる。中空水ファントムのエネルギー特性がヒューマノイドファントムと一致しない理由は、中空水ファントムの重量が約 $1.5\text{kg}$ で、ヒューマノイドファントムの胸部及び腹部を合計した重量の約半分程度であることから、中空部分が大きすぎて十分に中性子が減速・

反射されないためと考えられる。

(5) 結論

本実験の結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 校正用ファントムの種類はアルベド線量計の校正の結果の大きな影響を及ぼす。
- (2) JIS でX・ $\gamma$ 線用個人線量計校正用ファントムとして規定されている平板アクリルファントムは、アルベド線量計の校正には適さない。
- (3) パラフィンファントムのアルベド率は、1MeV以上ではヒューマノイドファントムと異なり、2MeVにおいてはその差はファクター1.5である。
- (4) エネルギー特性の観点からは水ファントムが人体に良く一致する。
- (5) 方向特性の観点からは、中空水ファントムが人体に最も近い。

本研究では、以上のように校正用ファントムの種類と線量計の感度の関係、人体と校正用ファントムの特性の違い等を明らかにした。校正用の標準ファントムには、エネルギー特性及び方向特性ができるだけ人体に近いものが選ばれるべきである。その意味では材質として水を選ぶのが現時点では最も適切であると考えられるが、その構造については全体の大きさや肺の取扱いも含めて今後の検討課題である。



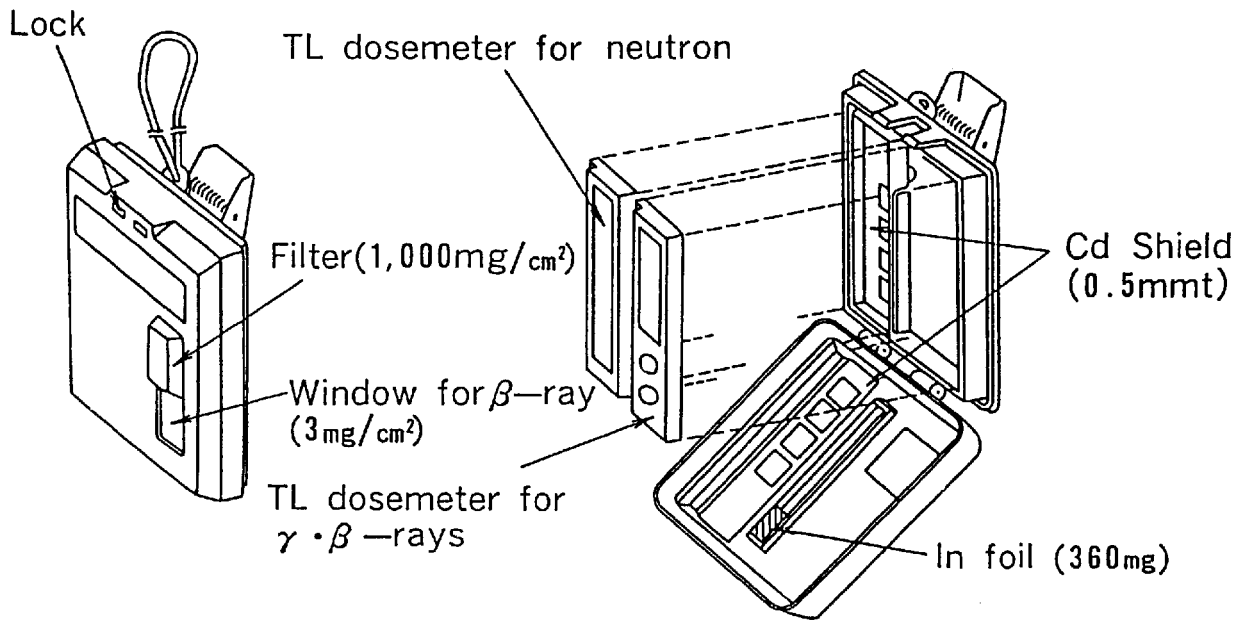


図4-1 動燃のTLDバッジの構造

表4-1 動燃のTLDバッジの素子構造

Dosimeter	Object	Element	TLD Element and Filter
$\gamma$ - $\beta$ Dosimeter	$\gamma$ -ray	T <sub>4</sub>	${}^7\text{Li}_2\text{{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu}) + 1000\text{mg}/\text{cm}^2$ plastic filter
		T <sub>3</sub>	$\text{CaSO}_4(\text{Tm}) + 1000\text{mg}/\text{cm}^2$ plastic filter
	$\beta$ -ray	T <sub>1</sub>	${}^7\text{Li}_2\text{{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu}) + 17\text{mg}/\text{cm}^2$ plastic filter
		T <sub>2</sub>	${}^7\text{Li}_2\text{{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu}) + 63\text{mg}/\text{cm}^2$ plastic filter
n Dosimeter	Neutron	T <sub>1</sub>	(Front) $\text{Cd}/{}^7\text{Li}_2\text{{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})/\text{Cd}$ (Rear)
		T <sub>2</sub>	$\text{Sn}/{}^6\text{Li}_2\text{{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})/\text{Cd}$
		T <sub>3</sub>	$\text{Cd}/{}^6\text{Li}_2\text{{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})/\text{Cd}$
		T <sub>4</sub>	$\text{Cd}/{}^6\text{Li}_2\text{{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})/\text{Sn}$

表4-2 実験に使用したファントムの仕様

Type of Phantom	General Usage	Shape, Size	Material	Remark
Paraffin Phantom	Calibration of Personal Dosimeters	Capsular Cylinder 40X30X20cm	Paraffin 0.9g/cm <sup>3</sup>	
Acrylate Slab	Calibration of Personal X, $\gamma$ Dosimeters	Slab 40X40X15cm	Methyl Methacrylate Resin (JIS K6718) 1.19g/cm <sup>3</sup>	JIS Z4331
Water Phantom	Test of X ray tube for Diagnosis	Elliptical Cylinder 46X30X20cm	Water	JIS Z4915
Cavity Water Phantom	Test of X ray tube for Diagnosis	Elliptical Cylinder 46X30X20cm	Water	JIS Z4915
Anthropomorphic Phantom	Test of Personal Neutron Dosimeters	Average Japanese Man	Tissue:ICRU solution Lung:Kyoto Kagaku LP-430 Bone:Kyoto Kagaku BE-204	

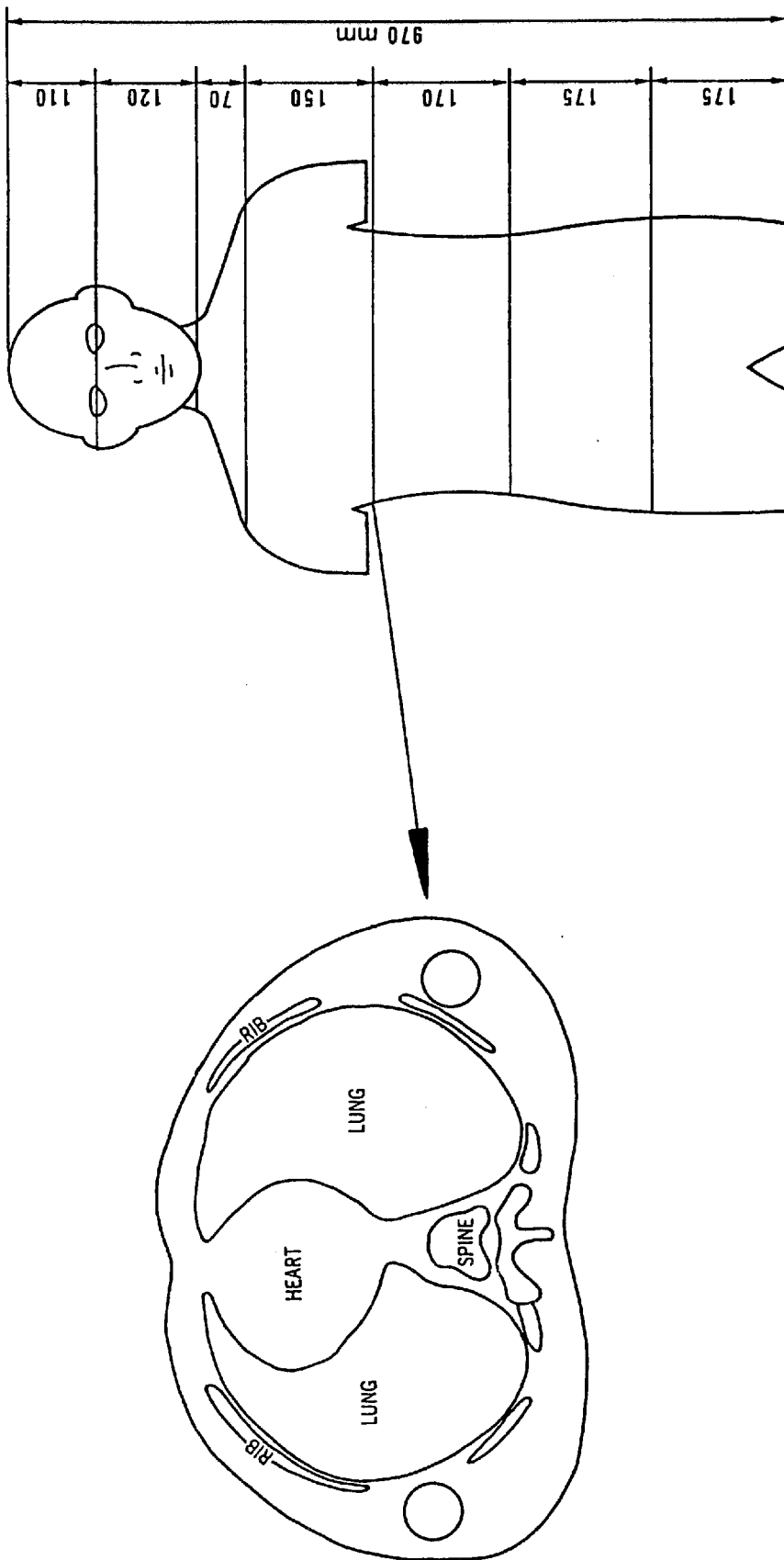


図4-2 ヒューマノイド(人体模倣)ファントムの構造

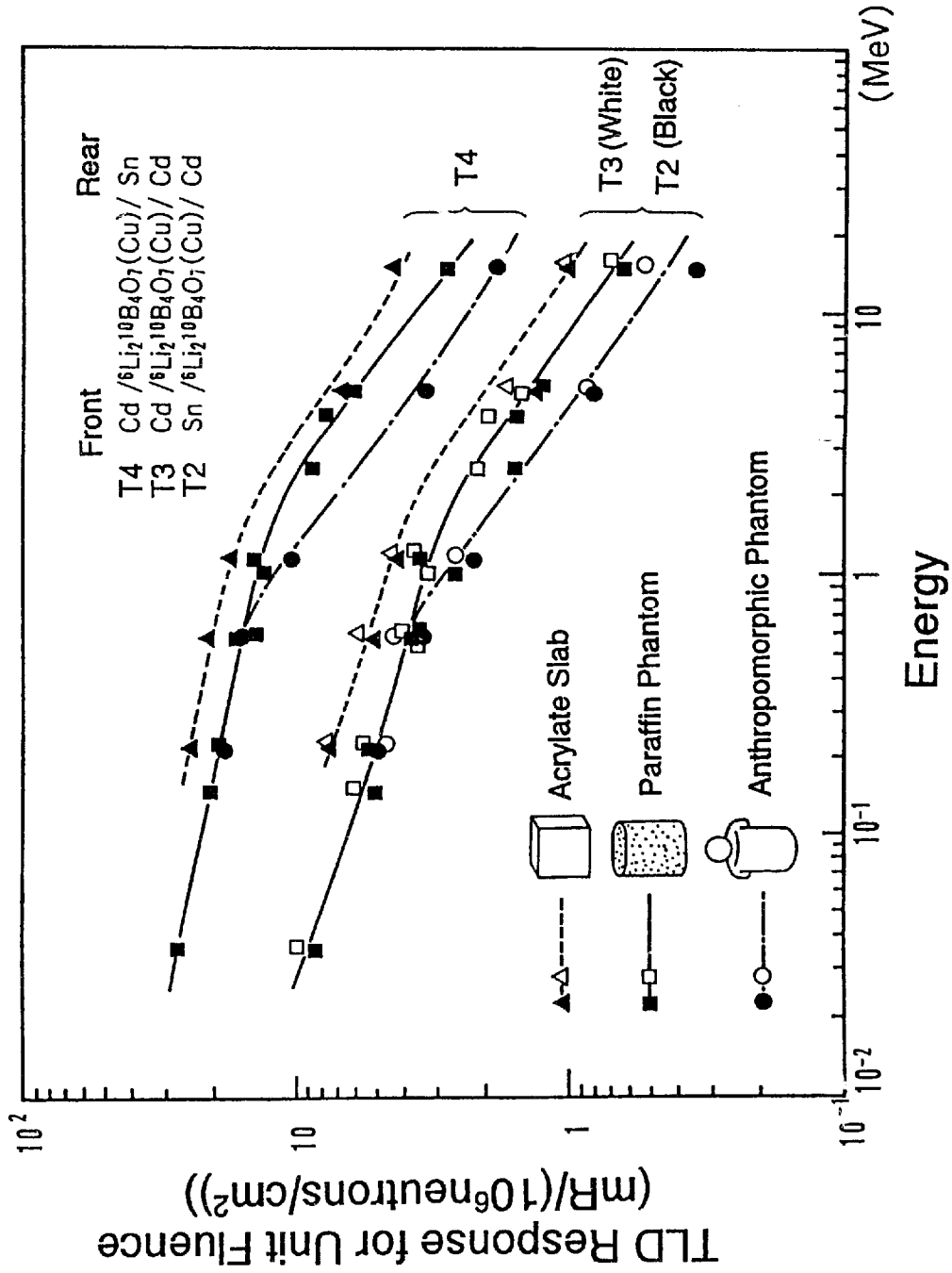


図4-3 アクリル、パラフィン、ヒューマノイド各ファントム上での TLDのフルエンス当り感度特性

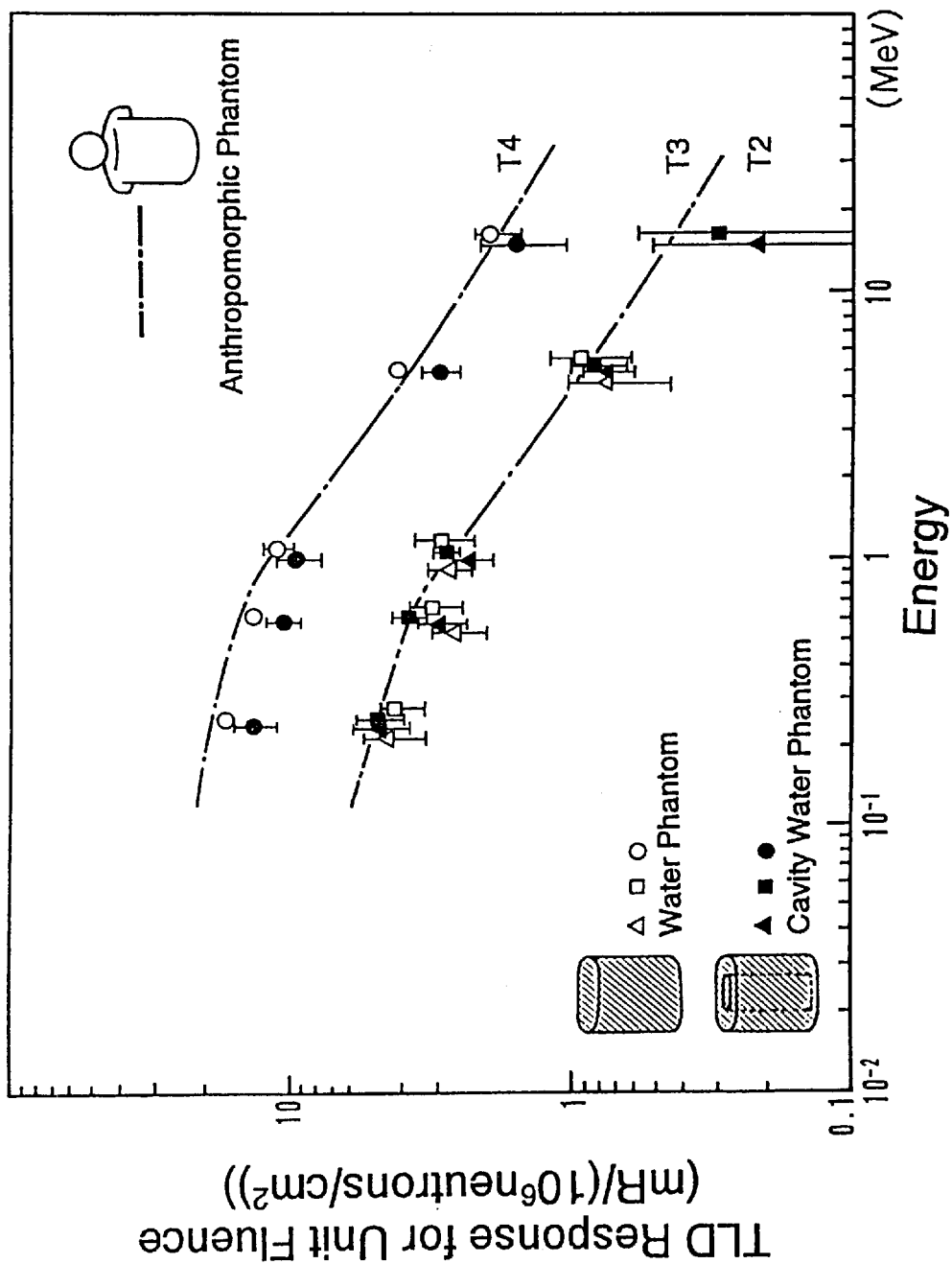


図4-4 水、中空水、ヒューマノイド各ファントム上でのTLDのフルエンス当り感度特性

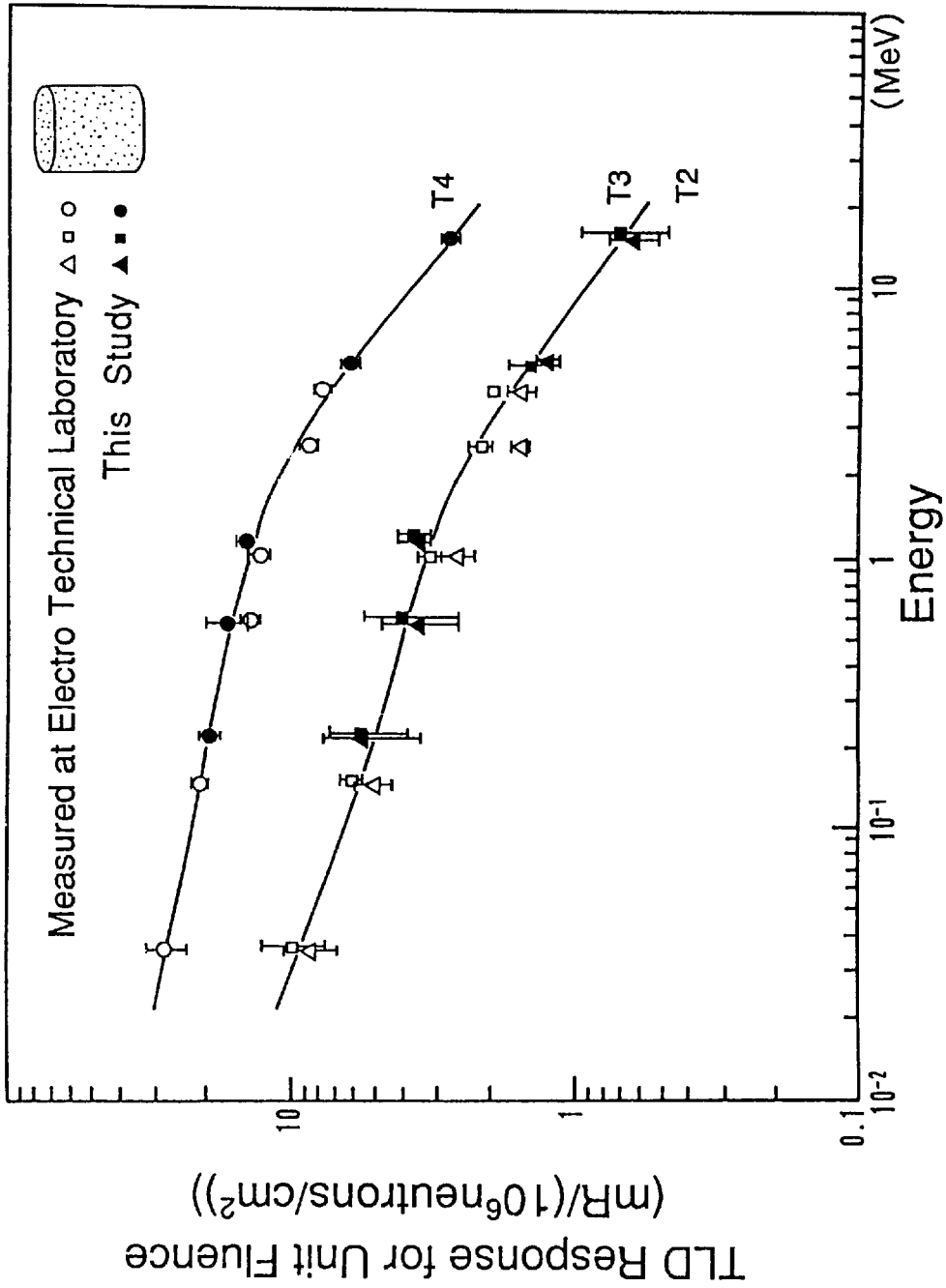


図4-5 パラフィンファントム上のTLDのフルエンス当り感度特性比較 [4-4]

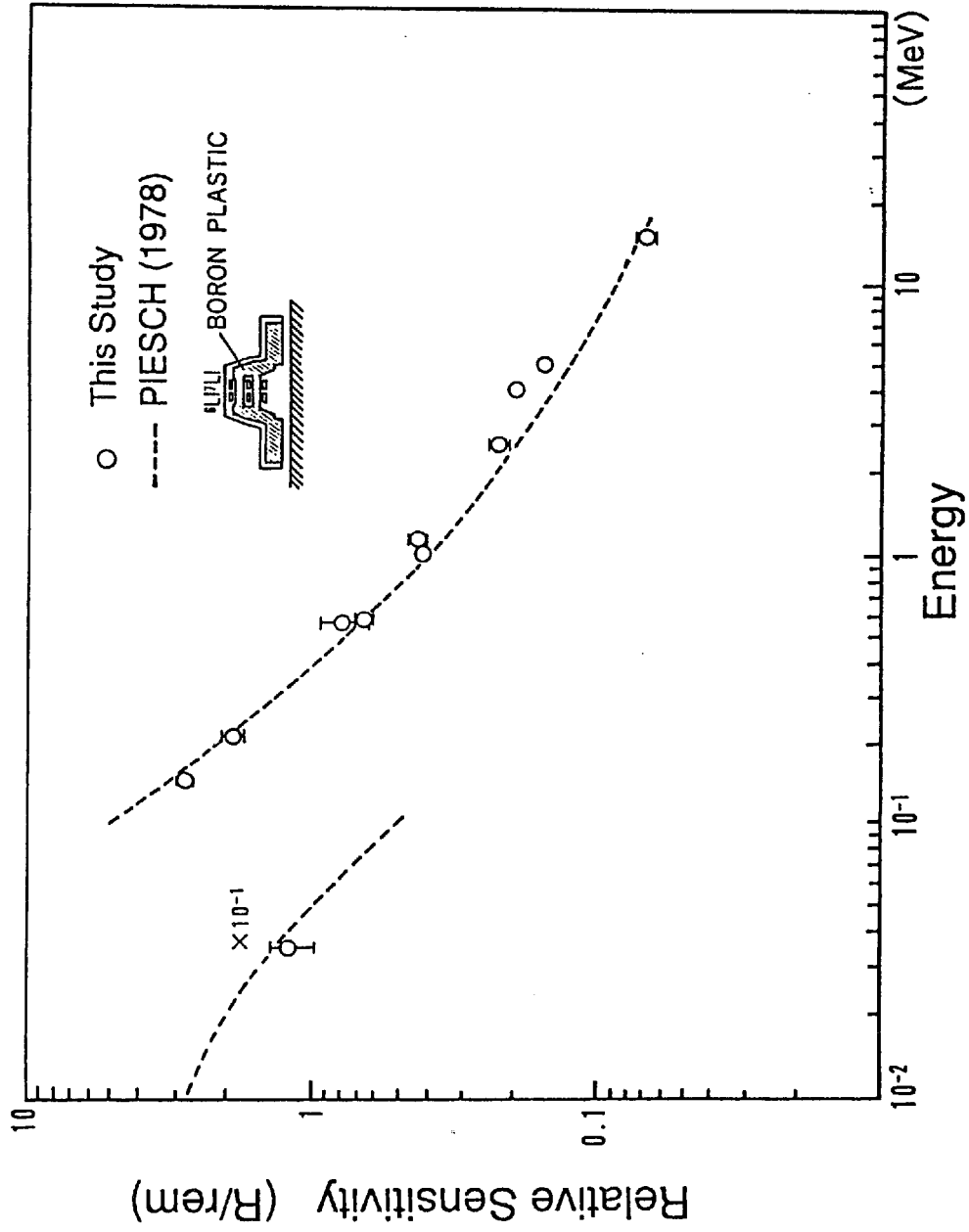


図4-6 他のアルベドTLDの実験 [4-5]との比較

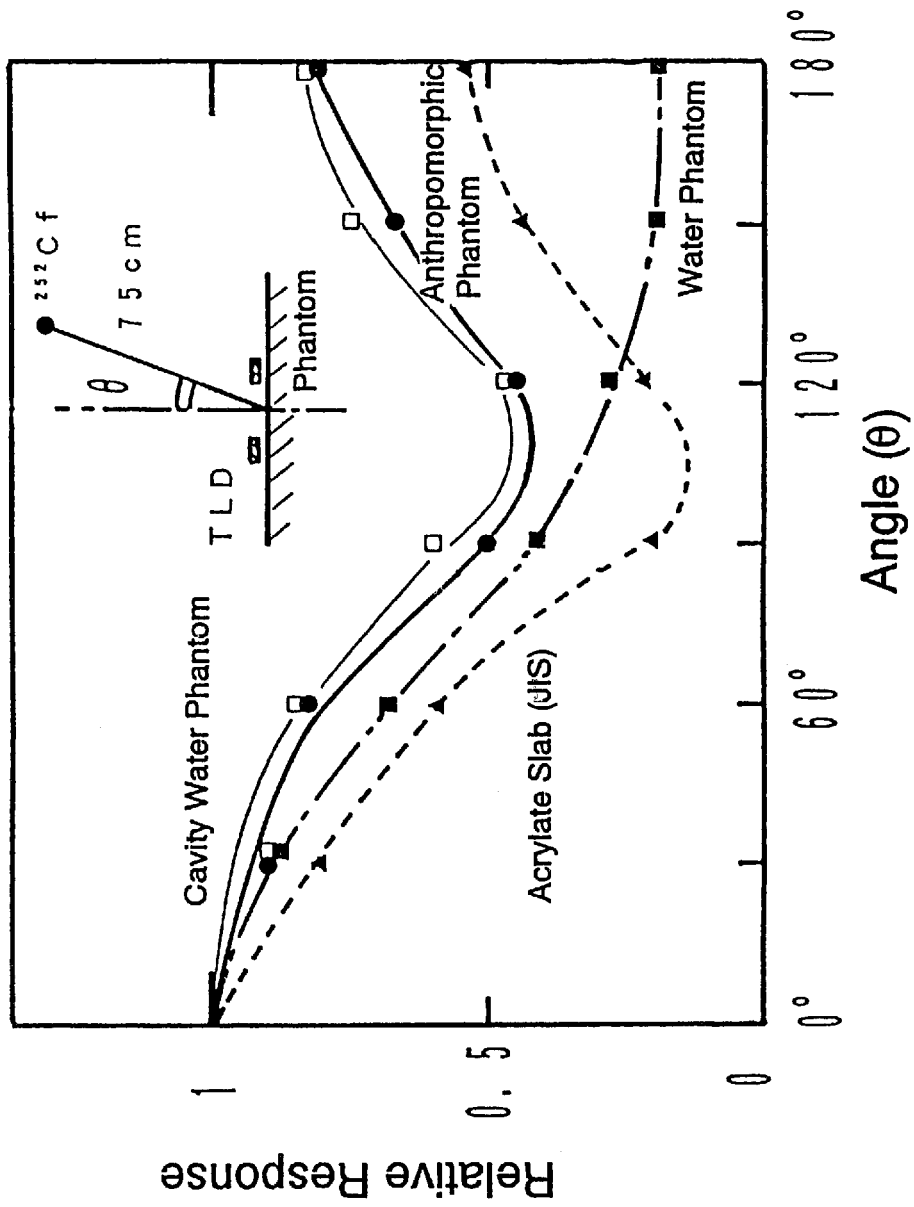


図4-7 種々のファントム上のTLD感度の方向依存性



## 4.2 較正中性子場と較正法

現在、一般的には、中性子個人被曝線量計の較正は、中性子放出率のわかった $^{252}\text{Cf}$ 、 $^{241}\text{Am}$ -Be中性子線源を用いて行われている。しかし、以上述べてきたように、実際の現場でのスペクトルに近い中性子場での較正も行うのが望ましい。この現場のスペクトルを模擬する中性子検出器の較正場としては

- 1) 加速器を使用した単色中性子場
- 2) 原子炉を用いた連続スペクトル中性子場
- 3) 中性子源を用いた減速中性子場

がある。原子炉を用いた連続スペクトル中性子場にはオークリッジ国立研究所のHPRR (Health Physics Research Reactor) があり、裸の原子炉の周りを鉄、ルサイト、コンクリートで取り巻いた減速場である [4-6]。これは原子炉施設周辺を模擬する場として適しており、これを用いた中性子個人被曝線量計の国際的な相互比較が行われている [4-7]。中性子源を用いた減速中性子場としては、 $^{252}\text{Cf}$ を  $\text{D}_2\text{O}$ 球で減速した場がNBS (現在のNIST) で作られ、 $1/E$ 型スペクトルを与える場として国際的に広く用いられている。加速器を使用した場は、検出器のエネルギー応答特性を求める場として標準場が各国において確立されている。この場は主に100keV～15MeVの中性子が得られるので、それより低いエネルギーの単色中性子はフィルタービームを用いて作られていることが多い。

日本における上記のような較正場としては

1) の加速器を用いた単一エネルギー中性子に対しては、電総研に国家1次標準場があるが、事実上その使用が限定されており、現在東北大学工学部の高速中性子実験室に作られたものが実際利用できる唯一の場であるといえよう。

2) の原子炉を用いた中性子場としては、立教大学原子力研究所の熱中性子場位しかない(武蔵工大の原子炉は現在運転休止中)。

3) の中性子源を用いた減速中性子場には、黒鉛パイル中に $^{241}\text{Am}$ -Beなどの線源を入れた熱中性子標準較正場が電総研と放計協(放射線計測協会)にあり、また $^{252}\text{Cf}$ をポリエチレン、鉄、グラファイト球の中に入れた較正場が東大核研で開発され[3-18]、同じものが動燃事業団や東北大学サイクロトロン・RIセンターにも設置されている。

### (1) 単色中性子場

電総研に国家1次標準場があるが、事実上その使用が限定されている。現在、ダイナミトロン加速器を用いて8 keVから15MeVにわたる単色中性子場が東北大学工学部高速中性子実験室において作成され、またサイクロトロン加速器を用いて22.5、32.5MeV及び40.5、64.5MeVの準単色中性子場が、前者は東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター、後者は原子力研究所高崎研究所 AVFサイクロトロン施設において作成されている。

これらの中性子場の特性は表4-3に示す。

単色中性子場は手軽に利用できるものではないので、新しく検出器を開発するなどして、その応答特性を求める必要があるときに使用される。

## (2) 熱中性子場

原子炉を用いた熱中性子場は、よく熱化されていてCd比が大きくてよいが、簡単に利用できない。一般的には、 $^{241}\text{Am}$ -Beなどの中性子源を黒鉛パイル中に入れた熱中性子源が用いられる。黒鉛熱中性子場としては、電総研と放射線計測協会（放計協）に標準校正場があるが、原子炉熱中性子場よりもCd比が小さく熱外中性子の割合が多く、放計協の場は黒鉛の大きさが電総研の場より小さいためにCd比がさらに小さくなっている。従って一口に熱中性子場といってもCd比が違っているとそのエネルギースペクトル従って平均エネルギーも異なっていることを決して忘れてはならない。

## (3) 密封中性子線源とその減速場

$^{241}\text{Am}$ -Be、 $^{252}\text{Cf}$ などのRI中性子源を用いるものである。これには次の2通りのやり方がある。

(1) 中性子放出率 ( $n/s$ ) の分かった基準線源を用いる方法

(2) すでに校正がなされて検出感度 [ $\text{cps}/(n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ ] または [ $\text{cps}/(\mu\text{Sv/h})$ ] の分かった基準検出器と比較測定する方法で、この場合は線源の中性子放出率は分からなくてもよい。

基準線源の値付けは、最も望ましいのは電総研の国家一次標準線源を用いて行うことである。しかしそれが簡単にできない時は、近くの二次標準線源との比較により行うことができる。値付けした線源を更新する時にはもう一度値付けをやり直すのがいいが、基準線源を校正済の検出器（例えばレムカウンタ）で測定しておいて、同じ実験配置で更新した線源を測定して、その相対値から値付けするのも簡便な方法である。

$^{241}\text{Am}$ -Be中性子源と $^{252}\text{Cf}$ 中性子源の特性とスペクトルを各々表4-4、図4-8に示す。

通常の間量計校正にはこの線源を用いるのが最も一般的であるが、 $^{241}\text{Am}$ -Be中性子はその平均エネルギーが4.5MeVでしかもMeV領域にしかエネルギーを持たないのに対し、 $^{252}\text{Cf}$ 中性子は核分裂スペクトルを持ち、平均エネルギーが2.35MeVと少し低くkeV以下の領域まで広がっている。

実際の中性子発生施設の作業環境においては、原子炉・核燃料施設では核分裂中性子が主な線源であり、加速器施設においても蒸発過程で放出され、核分裂スペクトルに近いマクスウェル型のエネルギー分布を持つ中性子が大部分を占める。このことから線量計の較

正には、半減期が2.7年と短い欠点はあるが、 $^{252}\text{Cf}$ 中性子源を使用するのが最も望ましいことが分かる。さらに室内散乱や遮蔽体透過、迷路漏洩など様々に変化する作業環境中の中性子スペクトルに、より近い較正場として $^{252}\text{Cf}$ を鉄、ポリエチレン、アルミニウム、重水(D<sub>2</sub>O)、黒鉛などの減速材で囲んだ減速場がある。

前に述べたように、中性子線量計の較正は実際に使用する場にできるだけ近いスペクトルを持つ場で行うことが望ましいことから、 $^{252}\text{Cf}$ の線源だけを用いた較正に加えて、この減速場による較正をあわせ行うのがよいであろう。

図4-9に $^{252}\text{Cf}$ 中性子源を用いた減速較正場(ポリエチレン減速場と鉄減速場)のスペクトルを示す。中性子発生施設のコンクリート建屋内外においてはその中性子スペクトルはほぼこのポリエチレン減速場で近似でき、中性子発生源周辺に鉄のような重い物質しかない時はほぼこの鉄減速場で近似できる。

#### (4) 較正法

個人線量計の較正は、中性子フルエンス率( $\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )や線量当量率( $\mu\text{Sv/h}$ )の既知の場に於て、ファントムの前面に装着して行う。

この場合、ファントムに垂直に平行な中性子ビームが前面入射する条件で行うのが望ましい。この場合は第2章で述べたように、個人線量当量 $H_p(10)$ と周辺線量当量 $H^*(10)$ がほぼ等しくなる。較正場においては、線量当量はそもそも $H^*(10)$ として値づけされているので、これにより精度のよい較正を行うことが出来る。このためにはファントムに大きさがあるため、 $^{252}\text{Cf}$ のような点等方線源の場合やエネルギーの角度依存性の大きいp-T、P-Li単色中性子源の場合は、線源からファントムを1m程度、少なくとも50cm程度は離して較正するのが望ましい。しかし、一つには室内散乱線の寄与が増えることと、二つには個人線量計の感度が一般に空間線量計の感度に比べて低いので較正に時間がかかること、の二つの問題が生じる。一方、減速型較正場の場合は、較正点の位置が近すぎるとファントムとの間の相互干渉(散乱)が生じることがある。したがって、この二つの相互する事象を考慮して較正点の位置を決めなければならない。ただし、室内散乱線の寄与の問題は、それを含めた中性子スペクトル、フルエンス率、線量当量率が分かっていたら回避することができる。

室内散乱線の評価は、空間線量計の場合次の二つの方法で行うことができる。ただし、個人線量計の場合はファントムに装着しているいるのでこの方法を実施するのは簡単ではない。

一つは図4-10に示したようにシャドーコーンを利用して直接線を遮蔽することによって散乱中性子成分を評価し、シャドーコーンの無い時と有る時の2回の測定値の差を求めて直接線だけを評価する方法である。シャドーコーンは電子技術総合研究所においては鉄

20cm+ホウ素入りパラフィン30cmのものが用いられている。他の一つは測定を距離を変えて行い、逆二乗法則にのるかどうかを判定して直接線の評価する方法である。散乱線は線源からの距離にほとんど依存せず空間中に大体一様に分布するので、測定値を逆二乗則にフィットさせると直接線が評価できる。測定した計数率をC、散乱成分をaとすると、

$$C = \frac{b}{(\chi + d)^2} + a \quad (4-2)$$

となる。ここで $\chi$ は線源から検出器前面までの距離、dは検出器の実効中心から検出器前面までの距離である。線源からの距離が大きくなるほど散乱線の寄与が増えるので較正は線源に近い場所で行うのがよいが、一方では線源に近くなると上式において検出器の実効中心dの大きさが問題となる。減速材付検出器の場合、その実効中心を精度よく求めるのは難しい。一般に実効中心は幾何学的中心より前方にずれ、しかも入射する中性子エネルギーに依存することが知られている。実効中心を求めるためには、線源からの距離 $\chi$ を変えた測定をシャドーコーンの有る時と無い時の2回行って散乱成分aを各距離において評価し、直接成分 $C_{net} = C - a$ を求め、(4-2)式を変形して

$$\sqrt{\frac{1}{C_{net}}} = \frac{1}{\sqrt{b}} (\chi + d) \quad (4-3)$$

からdを推定できる。

##### (5) まとめ

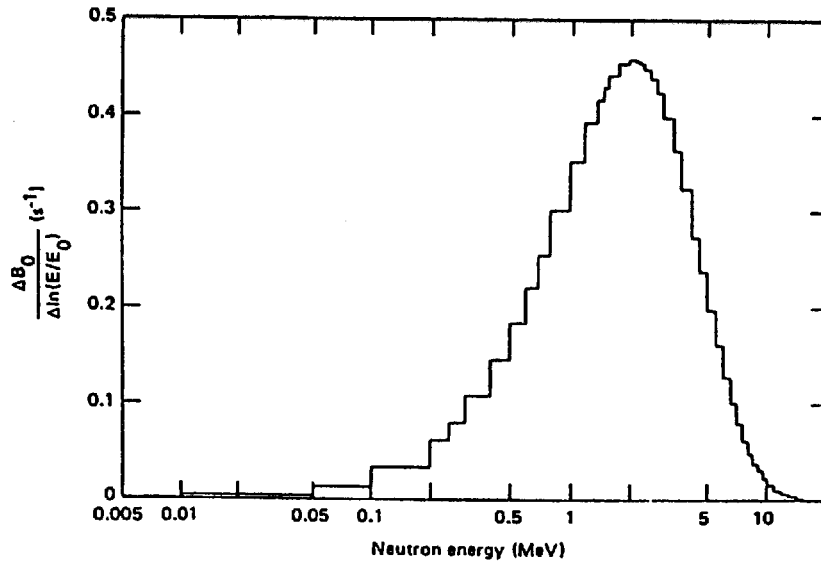
以上のことから線量計のエネルギー特性の測定には加速器を用いた単色中性子場が必要であるが、通常の線量計較正には

- i) 熱中性子に対しては、黒鉛パイルを用いた較正場
- ii) 速中性子に対しては $^{252}\text{Cf}$ 中性子源
- iii) 実際の作業環境を模擬した場として $^{252}\text{Cf}$ 中性子源のポリエチレン減速場  
--重水でもいいが高価である--及び必要に応じて鉄減速場

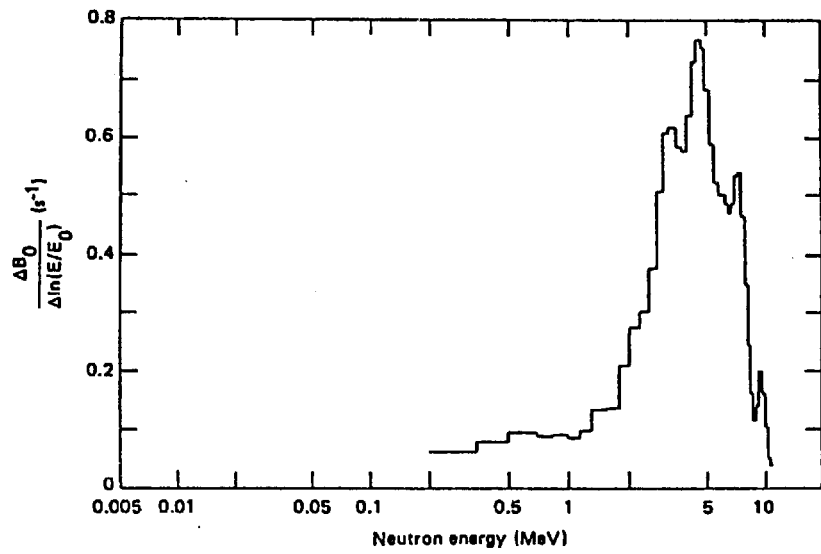
を使用するのが現在最も適当な較正法と考える。

表 4 - 3 中性子単色場の特性

	reaction	Neutron Energy	Neutron Fluence(n/cm <sup>2</sup> /μC)
原研高崎TIARA	<sup>7</sup> Li(p, n)	64. 0MeV	1. 63×10 <sup>4</sup> (546cm, 0deg. )
AVFサイクロ	<sup>7</sup> Li(p, n)	40. 5MeV	1. 35×10 <sup>4</sup> (554cm, 0deg. )
東北大学CYRIC	<sup>7</sup> Li(p, n)	32. 5MeV	1. 28×10 <sup>3</sup> (1000cm, 10deg. )
AVFサイクロ	<sup>7</sup> Li(p, n)	25. 5MeV	8. 35×10 <sup>2</sup> (1000cm, 10deg. )
東北大学 工学部 FNL ダイナミトロン	<sup>3</sup> T(d, n)	15MeV	1 ×10 <sup>5</sup> ( 8 cm, 0deg. )
	<sup>2</sup> D(d, n)	5 MeV	5 ×10 <sup>5</sup> ( 8 cm, 0deg. )
	<sup>3</sup> T(p, n)	2 MeV	2 ×10 <sup>5</sup> ( 8 cm, 0deg. )
	<sup>3</sup> T(p, n)	1 MeV	1 ×10 <sup>5</sup> ( 8 cm, 0deg. )
	<sup>7</sup> Li(p, n)	550keV	5 ×10 <sup>4</sup> ( 8 cm, 0deg. )
	<sup>7</sup> Li(p, n)	250keV	
	<sup>45</sup> Sc(p, n)	27. 5keV	~ 1 ×10 <sup>3</sup> ( 8 cm, 0deg. )
	<sup>45</sup> Sc(p, n)	16. 8keV	
<sup>45</sup> Sc(p, n)	8 keV		



(a)  $^{252}\text{Cf}$ 中性子源



(b)  $^{241}\text{Am-Be}$ 中性子源

図 4-8 中性子源のスペクトル—レサジ—当り中性子数 [4-8]

表 4 - 4  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{241}\text{Am-Be}$ 中性子源の特性 [ 3 - 2 ]

比較対照項目		$^{252}\text{Cf}$		$^{241}\text{Am-Be}$	
壊変形式	$\alpha$ 壊変	96.9	%	} $^9\text{Be} + \alpha \rightarrow ^{12}\text{C} + n + 5.71\text{MeV}$	432年
	自発核分裂	3.1	%		
半減期	$\alpha$ 壊変	$2.731 \pm 0.007$	年	} 432年	432年
	自発核分裂	$85.5 \pm 0.5$	年		
比放射能	実効半減期	$2.646 \pm 0.004$	年		
	$\alpha$ 壊変	$5.405 \times 10^4$	$\mu\text{Ci} / \mu\text{g}$		
		$1.850 \times 10^{-3}$	$\mu\text{g} / \mu\text{Ci}$		
	自発核分裂	$1.675 \times 10$	$\mu\text{Ci} / \mu\text{g}$		
		$5.972 \times 10^{-2}$	$\mu\text{g} / \mu\text{Ci}$		
中性子放出率		$2.34 \times 10^8$	$n / (s \cdot \mu\text{g})$	} $\sim 2.2 \times 10^6 n / (s \cdot \text{Ci})$	
		$4.33 \times 10^3$	$n / (s \cdot \mu\text{Ci})$		
	$\bar{\nu}$	3.76	$n / \text{SF}$		
$\gamma$ 線放出率		$1.3 \times 10^7$	photons / $(s \cdot \mu\text{g})$		
$\alpha$ 線エネルギー		6.118 (81%)	MeV	} 5.486 (86%) MeV	5.443 (13%) MeV
		6.075 (15%)	MeV		
中性子平均エネルギー		2.35	MeV		$\sim 4.5\text{MeV}$
1 m距離での線量率	中性子	1.86*	mrem / $(h \cdot \mu\text{g})$		2.2mrem / $(h \cdot \text{Ci})$
	$\gamma$ 線	0.16	mrads / $(h \cdot \mu\text{g})$		$\sim 2.5\text{mR} / (h \cdot \text{Ci})$

\* ICRP Publ. 21の中性子線量換算係数<sup>1)</sup>より求めた。(1Bq=27.0pCi, 1Gy=100rad)

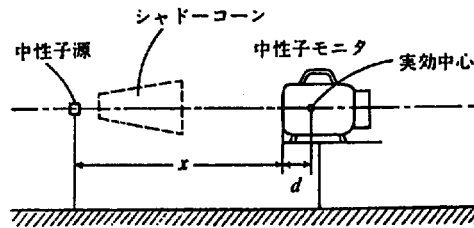


図 4 - 10 中性子サーベイメータのRI中性子源による感度校正の実験配置図

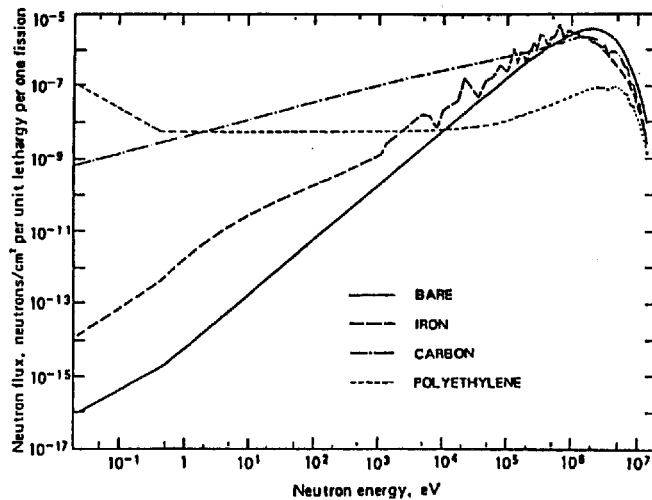


図 4 - 9  $^{252}\text{Cf}$  中性子源を用いた校正場のスペクトル (線源から 1 m地点) [3-18]  
 Bare: 減速材なし、Iron: 厚さ10cmの鉄球、  
 Carbon: 厚さ15cmの黒鉛球、Polyethylene: 厚さ  
 22.5cmのポリエチレン球。

## 第5章 核燃料取扱施設における中性子線量評価

### 5.1 核燃料取扱施設における中性子個人被曝管理の現状〔3-3〕

#### (1) プルトニウム燃料製造施設

高速増殖炉の燃料を製造しているプルトニウム燃料取扱施設では、プルトニウム-241の娘核種であるアメリシウム-241から放出される約60KeVの $\gamma$ 線による被曝管理とともに、プルトニウムの自発核分裂、およびプルトニウムの $\alpha$ 線とPuO<sub>2</sub>の酸素との( $\alpha$ , n)反応によって発生する中性子による被曝の管理が実施されている。

作業環境の中性子線量率測定は、通常レムカウンターを用いて行われている。

中性子個人被曝管理はアルベド型TLDが使用されている。測定・評価は事業体内部で実施されている。

アルベド型TLDは、<sup>6</sup>Li<sub>2</sub><sup>10</sup>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>などの、もともと熱中性子に高い感度をもったTLDと、その前後にカドミウムまたは錫のフィルターを配置したケースとの組合せからなっている。熱中性子はケースの前方から、速中性子は人体で熱化して反射した熱中性子をケースの後ろ側から検出できるように工夫したものである。

グローブボックス表面の $\gamma$ 線線量当量と中性子線量当量の比率は、遮蔽の条件によっても異なるが、大体1:1である。

グローブボックスの遮蔽対策として、アメリシウム-241の $\gamma$ 線は鉛ガラスなどによって比較的簡単に遮蔽できるのに対して、中性子はアクリル板などを用いて遮蔽してもこれによる被曝低減化には限界がある。原子炉での燃料の高燃焼度化により、再処理後のプルトニウム-238の割合が増加し、このため中性子の放出割合が増加するのに備えて、新しい燃料製造施設では積極的な自動化・遠隔化が取り入れられてきている。

プルトニウム取扱施設における中性子個人被曝管理の特殊なものとして、臨界事故時に備え、金、銅、インジウムおよびイオウなどの、しきい検出器を備えている場合もある。

#### (2) その他の核燃料物質取扱施設

プルトニウム燃料取扱施設の核燃料物質を取り扱う施設として、ウラン鉱石の採鉱、鉱石の精錬と処理、ウラン濃縮施設、軽水型原子炉用ウラン燃料加工施設、照射後燃料試験施設、および廃棄物の処理施設などがある。

これらの施設においては、通常は $\gamma$ 線および $\beta$ 線の個人被曝管理が行われている。使用済燃料の再処理施設では、プルトニウムが分離されるため、その作業環境においては中性子の被曝の可能性のある場合には、上に述べたアルベド型TLDが用いられている。



またプルトニウムを含む廃棄物処理施設においても、アルベド型TLDが用いられている。アルベド型TLD以外の中性子個人被曝測定器としては、固体飛跡検出器(CR-39)などが使われ、バブル線量計が試験的に利用されている段階である。

## 5.2 MOX燃料周辺環境における中性子スペクトルと線量当量の測定

### (1) 概要

MOX 燃料スペクトルの測定例は極めて少なく、最近では動力炉核燃料開発事業団においてボナーシリンダー (円筒形多減速材付<sup>3</sup>He型スペクトロメータ)を用いてグローブボックス越しに測定された例[5-1]がある程度である。

本研究では転換の後、加工の前段階にあるPuO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub>混合粉末燃料が充填されているMOX缶、及び実際の作業場のグローブボックスを模擬して含鉛アクリル遮蔽体(35mm厚)でMOX缶を囲んだものから放出される中性子エネルギースペクトルをNE-213有機シンチレータ、反跳陽子比例係数管、ボナーボール(球形多減速材付<sup>3</sup>He型スペクトロメータ)の3種の検出器により精度よく測定した。また、測定された結果をモンテカルロ法による輸送計算の結果と比較した。さらに、得られたエネルギースペクトルから線量当量率を計算し、レムカウンターによる測定値との比較を行なった。[5-2]

表5-1に燃料の重量を、表5-2に燃料の同位体組成比を示す。この数値は、PuO<sub>2</sub>粉末とUO<sub>2</sub>粉末を混合した当時(90.9.14)のデータ(表5-2)から、測定時における重量および同位体の組成を算出したものである。

用いた燃料缶は2缶(MOX缶A、MOX缶B)あり、MOX缶Bは、2本同時に測定するときのみに用いた。

PuおよびUは、 $\alpha$ 崩壊、自発核分裂を起こす。中性子のみに着目すると、自発核分裂による中性子のほかに、酸素の( $\alpha$ , n)反応、Pu及びUの(n, fission)つまり誘発核分裂による中性子が含まれる。

### (2) 使用した測定器

#### 1. ボナーボール(球形多減速材付<sup>3</sup>He型スペクトロメータ)

この検出器は、エネルギー測定範囲が熱中性子から15MeVまでの中性子スペクトロメータとして開発されたもので、球形の<sup>3</sup>He比例計数管と4種類の厚さの高密度ポリエチレン減速材の組み合わせにより構成される。

<sup>3</sup>He比例計数管(0.1atm)は、LND社製で外径2インチ(5.08cm)、厚さ0.02インチ(0.0508cm)の球形ステンレススチール製で、<sup>3</sup>Heガス(0.1atm)、CO<sub>2</sub>ガス(0.04737atm)、Krガス(1.5atm)が充填されている。ポリエチレン減速材は、厚さが1.5cm、3.0cm、5.0cm、9.0cmの4種類で、密度は0.95g/cm<sup>3</sup>である。外部から入射する散乱熱中性子の寄与

を除くために、ポリエチレンの外側表面は、熱中性子の吸収材として1.0mm厚さのカドミウムカバーで覆われている。

今回用いたボナーボール検出器の応答関数は、以前にANISNを用いて計算したDLC-37タイプの100群応答関数[5-1]をINS-21タイプ[3-18]の21群に縮約したものである。このデータは、すべてCdカバーなしの5種類の検出器の応答関数である。しかし、ポリエチレン減速材付の4種類の検出器には、Cdカバーがあるので熱群の感度はゼロとした。測定計数率からSAND-IIコード[5-3]を用いてアンフォールディング法により中性子スペクトルを求めた。

## 2. 反跳陽子比例計数管 (Proton Recoil Proportional Counter, PRC)

この検出器は、keVからMeV領域の中性子スペクトロメータとして用いた。γ線による出力パルスは中性子による出力パルスより波高が比較的lowく、低エネルギー側をカットすることによりγ線を除去した。

本研究で用いたものは、日本放射線エンジニアリング製の球形水素比例計数管である。ガス圧が、1.2気圧 ( $H_2:1.08\text{atm}$ ,  $CH_4:0.12\text{atm}$ )と5気圧 ( $H_2:4.5\text{atm}$ ,  $CH_4:0.5\text{atm}$ )の2種類で、半径はどちらも3.5cmである。内部には $H_2$ 、 $CH_4$ ガスの他に、 $^3He$ ガスがエネルギー較正用に微量 (oil柱6mm) 含まれている。

反跳陽子比例計数管の応答関数は、東北大学の高木が、ダイナミトロン型加速器 (東北大学工学部高速中性子実験室、FNL)を用いた単色中性子による実験値に基づき、SNIDOWコード[5-4]を一部修正したコードの計算値により作成したものである[5-5]。

このデータの解析にはFERDORコード[5-6]を用いた。

## 3. NE-213有機液体シンチレータ

この検出器は、MeV領域の中性子エネルギースペクトルをボナーボールより精度よく測定するために用いた。今回用いたNE-213は、8LA8型で直径2インチ、長さ2インチの円筒形である。光電子増倍管は浜松ホトニクス製の7696型、ベースは浜松ホトニクス製のE934である。出力パルスをマルチモードアンプ (応用光研製 704-3B) で増幅し、立上り時間差による波形弁別回路 (応用光研製 723-1B) を用いて中性子とγ線を弁別し、波高と立上り時間の2次元測定をデュアルパラメータMCA (SEIKO EG&G製 DS-1010-H) を用いた行った。

また、このNE-213の応答関数としては、東京大学原子炉核研究所の上養らが当研究所のAVFサイクロトロンにおける測定値に基づき作成したもの[5-7]を用いた。測定は高・低2つのゲインで行ったでまとめてFERDOUコード[5-8]を用いてアンフォールディングを行った。

## 4. 中性子レムカウンタ（線量当量率計）

中性子の線量当量率を直接求めるために、次の2つのレムカウンタを使用した。

## ① Studsvik社製2202D

円柱状BF<sub>3</sub>比例計数管がポリエチレンとボロン入りプラスチックで包んである。ポリエチレン減速材の中間に孔あきボロン入りプラスチックの熱中性子吸収層がある。中性子感度は、約3.3(cps per mrem/h)である。

## ② 富士電気製NSN1

構造はStudsvik社製とほぼ同じであるが、球形<sup>3</sup>He比例計数管(直径2インチ、ガス圧5気圧)を用い熱中性子吸収材としては孔あきボロン入りシリコンゴムを用いている。中性子感度は、約50(cps per mrem/h)であり、Studsvik社製に比べ15倍と高い。

## (3) 中性子スペクトルの測定

図5-1に測定体系を示す。線源と検出器のそれぞれの実効中心の距離75cmとし、MOX缶は床上90cmの面に置き、検出器は実効中心が床上100cmになるように配置した。

MOX缶A、Bは、中にPu<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub>粉末状燃料の入ったアルミニウム缶である。MOX缶2本ときは、 $\gamma$ 線強度が高く、n- $\gamma$ 弁別が困難であったため、鉛遮蔽体(3mm厚さ)を用いて $\gamma$ 線を抑えた。この鉛遮蔽体による中性子スペクトルへの影響は無視できるものと考えられる。含鉛アクリル遮蔽体は、密度1.60g/cm<sup>3</sup>、肉厚35mm、高さ50.2cm、内径24.3cmの中空円筒状のもので、組成は表5-3の通りである。

測定体系のうちMOX缶A(E-1)及び含鉛アクリル遮蔽体透過(E-3)について、3つの検出器により求めたスペクトルを1つのグラフにまとめ、比べたものを図5-2、図5-3に示す。(NE-231と反跳陽子比例計数管による測定値には測定誤差(統計誤差、アンフォールディング誤差)も示しているが、SAND-IIコード[5-3]は誤差を与えないのでボナーボールの測定値には誤差を示していない。下段の図で、10<sup>-4</sup>eVから100MeVの範囲でスペクトルを示し、上段の図で0.1MeVから20MeVの範囲を拡大して示している。それぞれの検出器によるスペクトルは、全体的によく一致しているといえる。

ボナーボールにより測定されたスペクトルは10<sup>-4</sup>eVから20MeVまでを表示している。MOX缶のスペクトルは、数MeV付近にピークを持つ典型的な核分裂スペクトルに似た形となった。低エネルギー領域の中性子は、室内散乱線によるものと思われる。含鉛アクリル遮蔽体を透過したスペクトルはかなり減速され、やわらかいスペクトルになっている。

反跳陽子比例計数管により測定されたスペクトルは、約200keVから2MeVまでである。5気圧の反跳陽子比例計数管は、1.2気圧のものとはほぼ似たようなスペクトルを与えたので、図には5気圧のデータのみを示す。含鉛アクリル遮蔽体透過実験(E-3)では、約400keV以下においてボナーボールにより測定されたスペクトルに比べかなり低い値となってい

る。これは、この測定時において、回路系の異常なノイズが低波高に混入し、解析時に低波高領域を切り捨てたため過少評価となったものである。

NE-213により測定されたスペクトルは、MeV領域においてボナーボールにより測定されたスペクトルに比べエネルギー分解能がよい。10MeV付近はフルエンスがかなり少ないことから計算誤差が大きく、物理的に意味のない山と谷が見られる。また、どの測定体系においても、6MeV付近でスペクトルが跳ね上がっているが、後に示す線源スペクトルおよび輸送計算スペクトルにはそれが見られない。おそらく応答関数に原因があるのではないかとと思われる。

#### (4) 中性子線量評価

Ⅲに述べた2つのレムカウンタを用いて、スペクトル測定と同じ3つのケースで中性子の線量当量率の測定を行った。

レムカウンタによる測定値と比較するために、ボナーボールで算出された中性子スペクトルおよびMORSE計算によるスペクトルからも線量当量率を求めた。このとき用いた中性子線量当量換算係数はICRP51[2-4]から引用した。これらの線量当量率を比較したものを表5-4に示す。レムカウンタによる測定値の誤差評価は計数誤差のみを考慮している。

線量当量比は、ボナーボールで算出された線量当量率を1.0としたときの値である。レムカウンタ2202Dは1.2~1.3、NSN1はほぼ1.0となった。これらから、2202Dは20~30%の過大評価を与えるのに対し、NSN1はほぼ正確な線量当量率を示している。

表5-4には含鉛アクリル遮蔽体の中性子遮蔽効果を見るために、実験(E-1)と(E-3)の線量当量比が示されている。この比の値から中性子線量当量率の減衰率が20~25%であることが分かる。

#### (5) まとめ

FBR、ATRなどに使用されるMOX燃料の取扱い施設で取扱われるMOX燃料充填缶や、その取扱い作業場のグローブボックスを模擬する含鉛アクリル遮蔽体透過後の中性子スペクトルを測定した。MOX燃料からの放出中性子スペクトルの形は、核分裂中性子スペクトルと $0(\alpha, n)$ 反応中性子スペクトルを合計したものに等しく、その測定値はORIGEN-2に基いて評価した計算値によく一致した。

また、含鉛アクリル遮蔽体(35mm厚)による中性子線量当量率の減衰効果は約25%であることが分かった。これらの実験結果が核燃料施設の今後の遮蔽設計や従事者の放射線管理に役立てば幸甚である。

表5-1 MOX燃料の重量

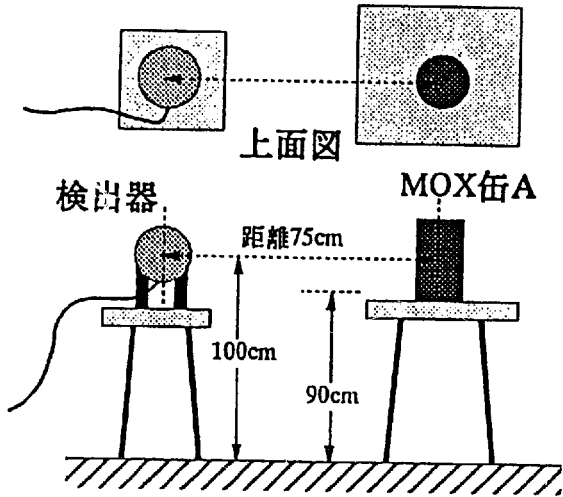
	総重量	内容量*	U, Pu
MOX缶A	5339g	3396g	2932g $\left\{ \begin{array}{l} \text{Pu} \ 1407\text{g} \\ \text{U} \ 1525\text{g} \end{array} \right.$
MOX缶B	3932g	2057g	1776g $\left\{ \begin{array}{l} \text{Pu} \ 852\text{g} \\ \text{U} \ 924\text{g} \end{array} \right.$

\* かさ密度2.2g/cm<sup>3</sup>

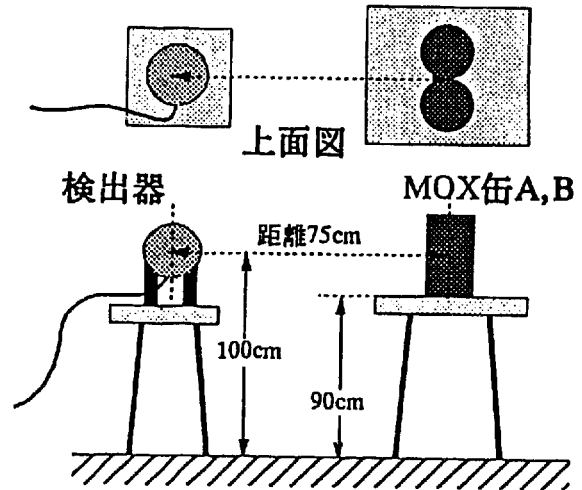
表5-2 MOX燃料の同位体組成比

同位体	重量%	
	今回 1991.9.14	組成調査日 1990.9.14
U-234	0.0259	0.0213
U-235	0.701	0.700
U-236	0.175	0.174
U-238	51.1	51.1
U-238	0.585	0.59
U-239	31.9	31.9
U-240	10.8	10.8
U-241	3.03	3.18
U-242	1.56	1.56
Am-241	0.157	0.00757

(E-1)  
MOX缶1本の測定



(E-2)  
MOX缶2本の測定



(E-3)  
MOX缶1本 + 含鉛アクリル遮蔽体の測定

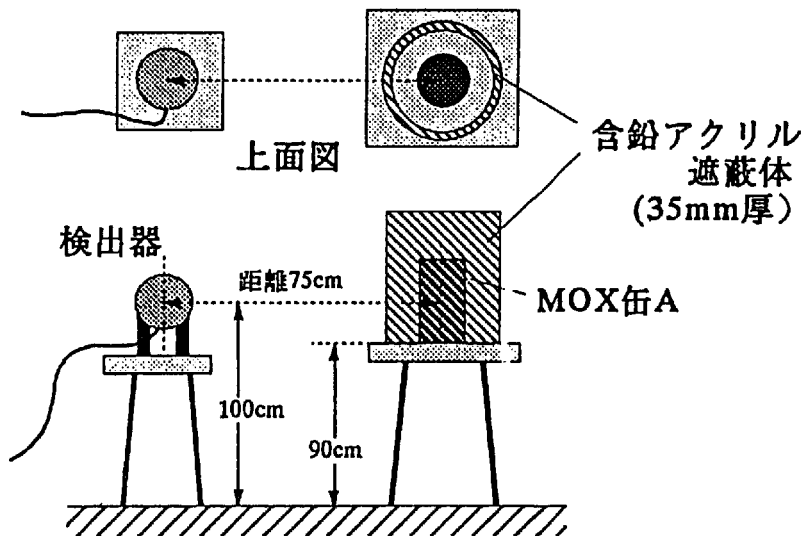


図5-1 実験配置図

表 5 - 3 実験に用いた媒質組成

媒質	核種	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	原子数密度 (10 <sup>24</sup> cm <sup>-3</sup> )
M O X 燃料	U-235	0.016	3.98E-5
	U-238	1.155	2.92E-3
	Pu-239	0.728	1.83E-3
	O (nat)	0.301	1.13E-2
	計	2.200	
含鉛アクリル 遮蔽体	H	0.0928	5.545E-2
	C	0.7008	3.514E-2
	O	0.3264	1.229E-2
	Pb	0.4800	1.395E-3
	計	1.600	

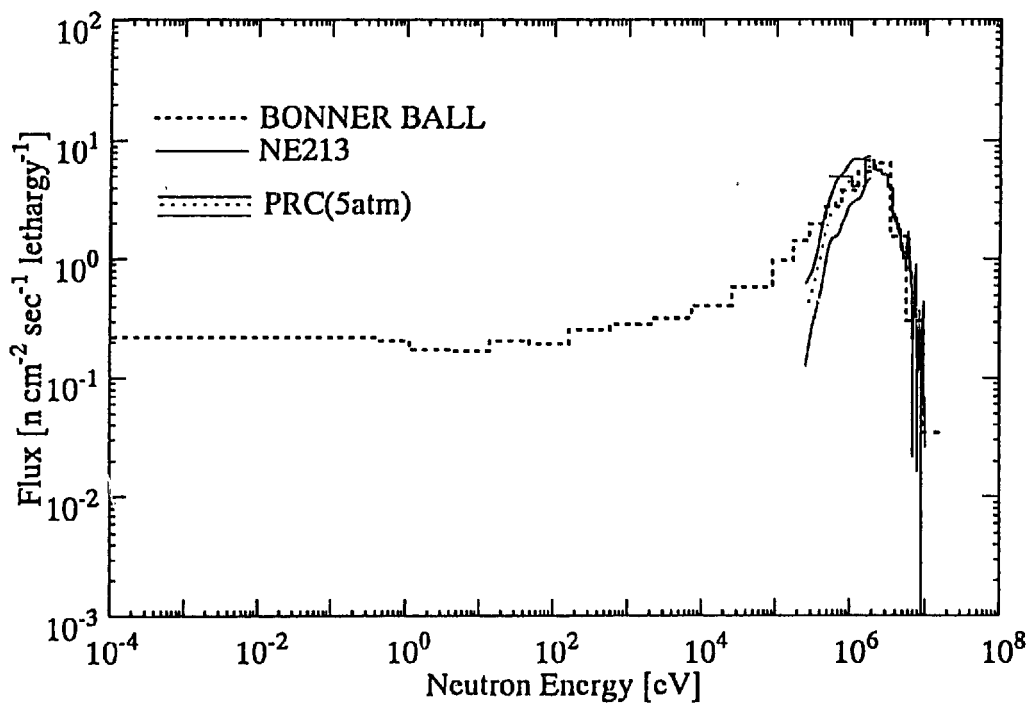
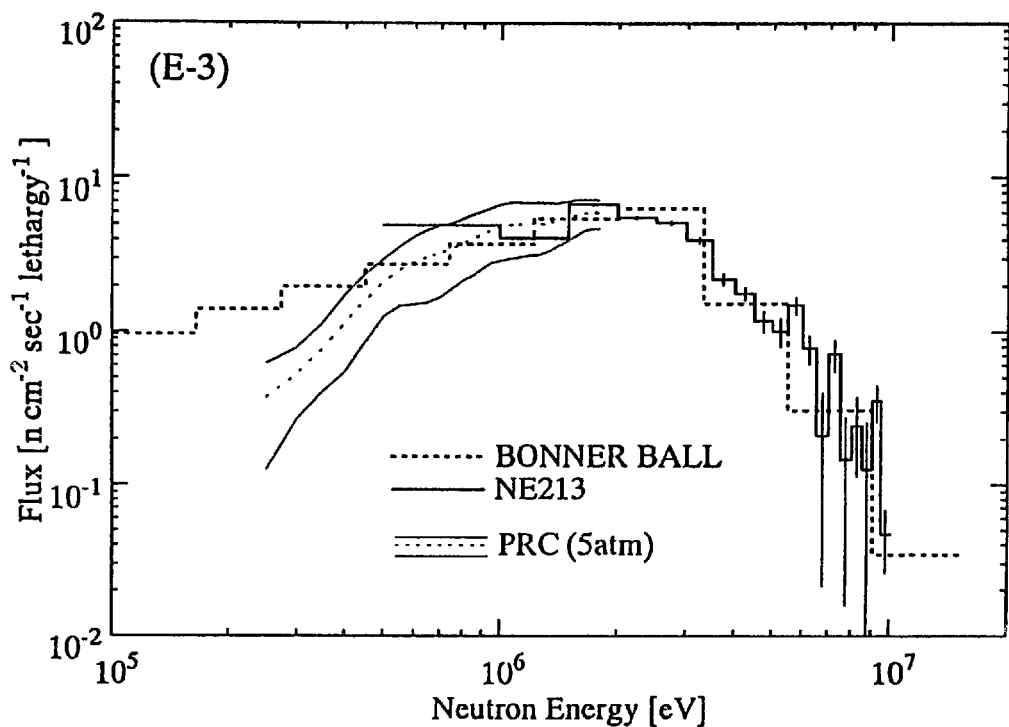


図5-3 MOX缶A含鉛アクリル遮蔽体透過後の中性子スペクトル  
 上図は100keV以上の拡大図



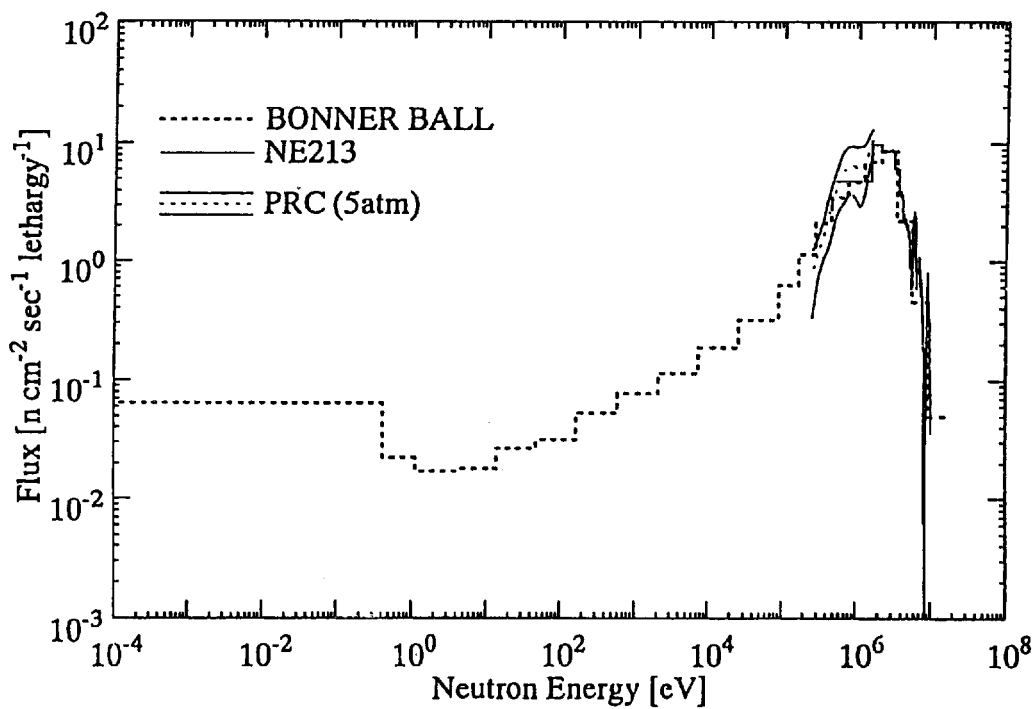
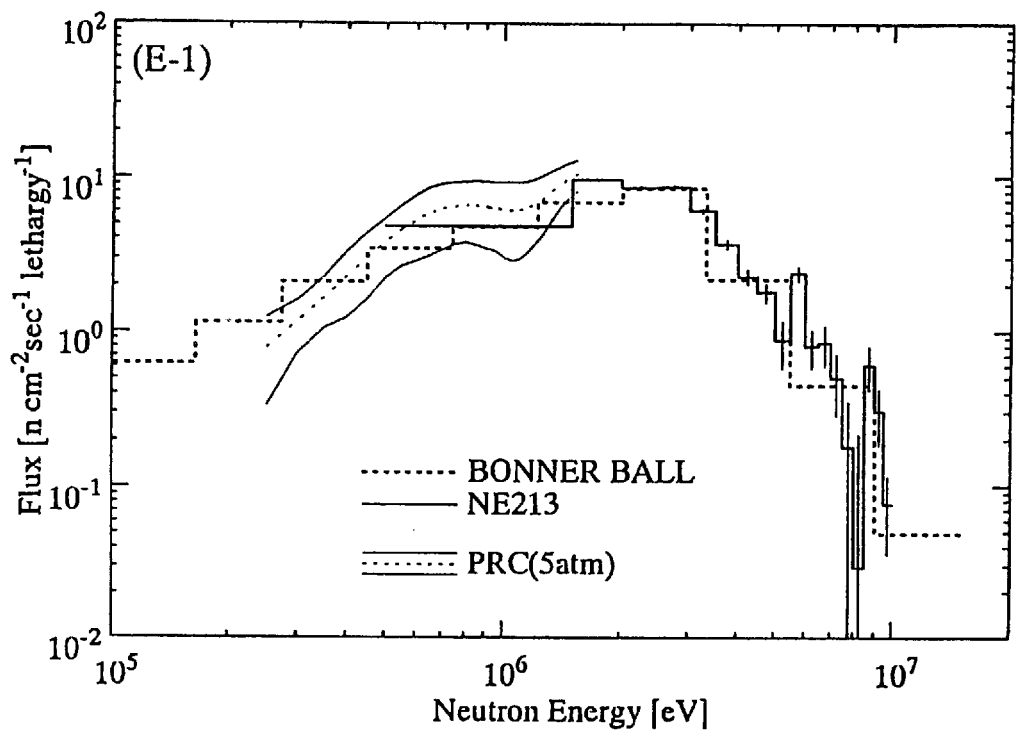


図5-2 MOX缶Aからの中性子スペクトル  
上図は100keV以上の拡大図

表5-4 線量当量率の実測値及び計算値の相互比較

		E-1	E-2	E-3	遮蔽効果 $E-3/E-1$
中性子 線量当量率 [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	① 2202D (Studsvik)	23.2 $\pm 0.7$	41.6 $\pm 0.8$	17.4 $\pm 0.4$	0.75
	② NSNI (富士電機)	(測定せず)	13.9 $\pm 0.2$	13.9 $\pm 0.2$	
	③ ボナー	17.6	13.8	13.8	0.78
	④ MORSE	16.4	11.0	11.0	0.67
中性子 線量当量比	①/③	1.32	1.32	1.26	
	②/③	—	0.94	1.01	

※ 含鉛アクリル遮蔽体による線量減衰効果がE-1とE-3の比として与えられる。

### 5.3 MOX燃料周辺環境での中性子個人線量計の特性評価

第5.2節のMOX燃料管を線源に用い、様々な中性子個人線量計を水ファントムに装着して、照射試験を行った。照射条件を表5-5、実験体系を図5-4に示す。

実験体系(I)(MOX(A)+(B))、(II)(MOX(A)+含鉛アクリル)でのアンフォールディングした中性子スペクトルをそれぞれ図5-5、5-6に示す。[5-2、5-9] 反跳陽子比例計数管(ガス圧1.2atm)による測定結果はガス圧5.0atmによるものとはほぼ同じであったため、ガス圧5.0atmのものだけを図示した。3種類のスペクトロメーターによる結果は良く一致している。

図5-5のMOX(A)+(B)燃料から放出される線源中性子スペクトルは、主に $^{238}\text{Pu}$ の自発核分裂中性子スペクトルと酸素( $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ )の( $\alpha$ , n)反応による中性子スペクトルとの重ね合わせによるものである。

また低速中性子部分は室内散乱(特に床面からの)中性子によるものである。

図5-6は含鉛アクリル透過後のスペクトルであり、アクリル中の減速によって10keV以下で1/E型になっているが、含鉛アクリルは主に $\gamma$ 線遮蔽用であり中性子の遮蔽効果は小さい。

また、 $\gamma$ 線のほとんどは $^{241}\text{Am}$ (60keV)と核分裂反応によるものだが、その線量当量率は十分低く、例え鉛板や含鉛アクリル遮蔽を外した場合でも線量計への計数寄与は皆無である。

表5-6にMOX(A)+(B)、MOX(A)+含鉛アクリル体系でのボナー球測定による平均エネルギー、中性子フルエンス率、中性子の周辺線量当量率及び $\gamma$ 線線量当量率をまとめた。ボナー球の測定結果は他のスペクトロメーターの測定結果と一致している。富士電機のレムカウンター計数率から求めた周辺線量当量率はボナー球のそれにほぼ一致したのに対し、Studsvikのレムカウンターによる値はボナー球による値に比べて15~30%の過大評価であった。

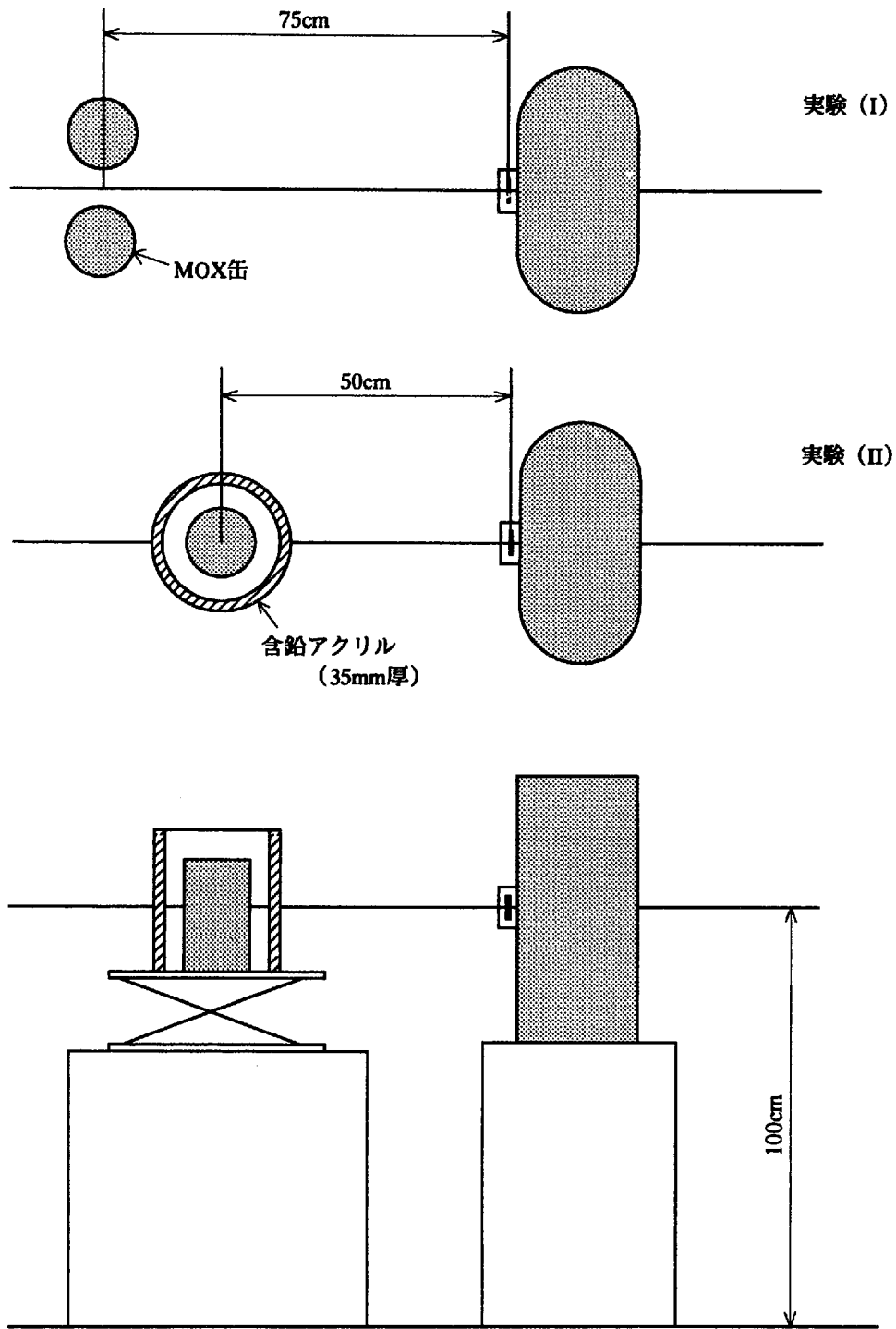


図5-4 MOX缶実験での配置

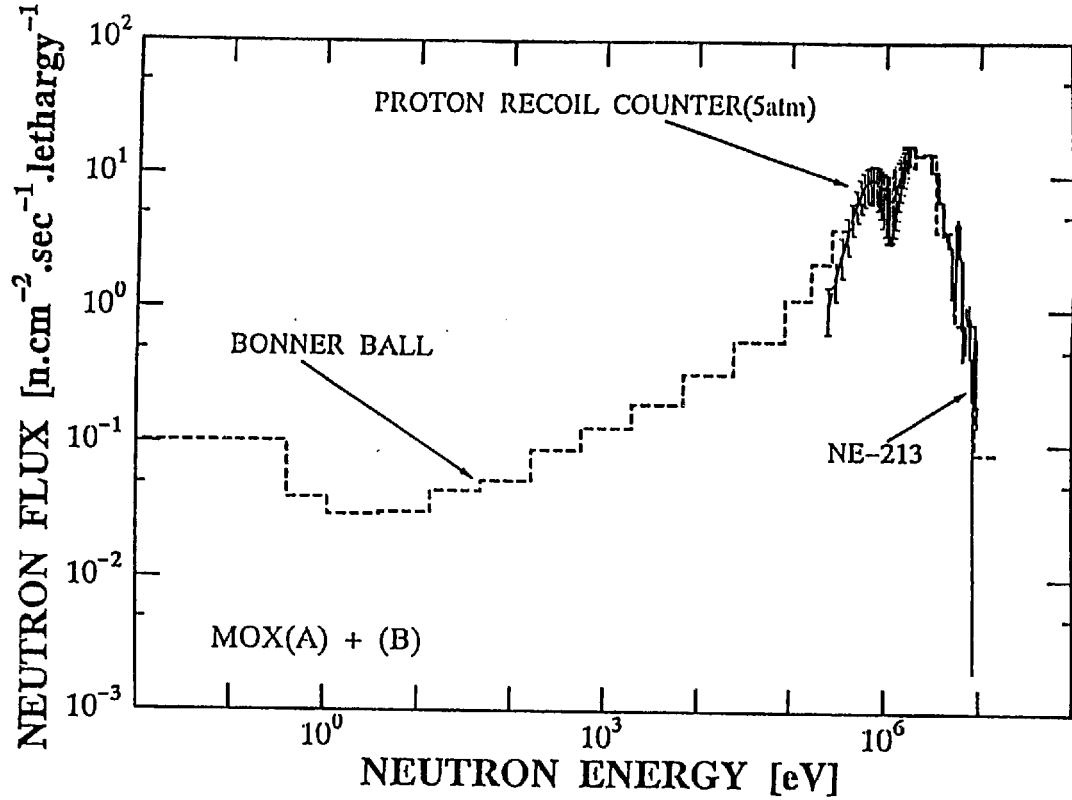


図5-5 実験体系 (I) MOX (A) 及び (B) [5-9]

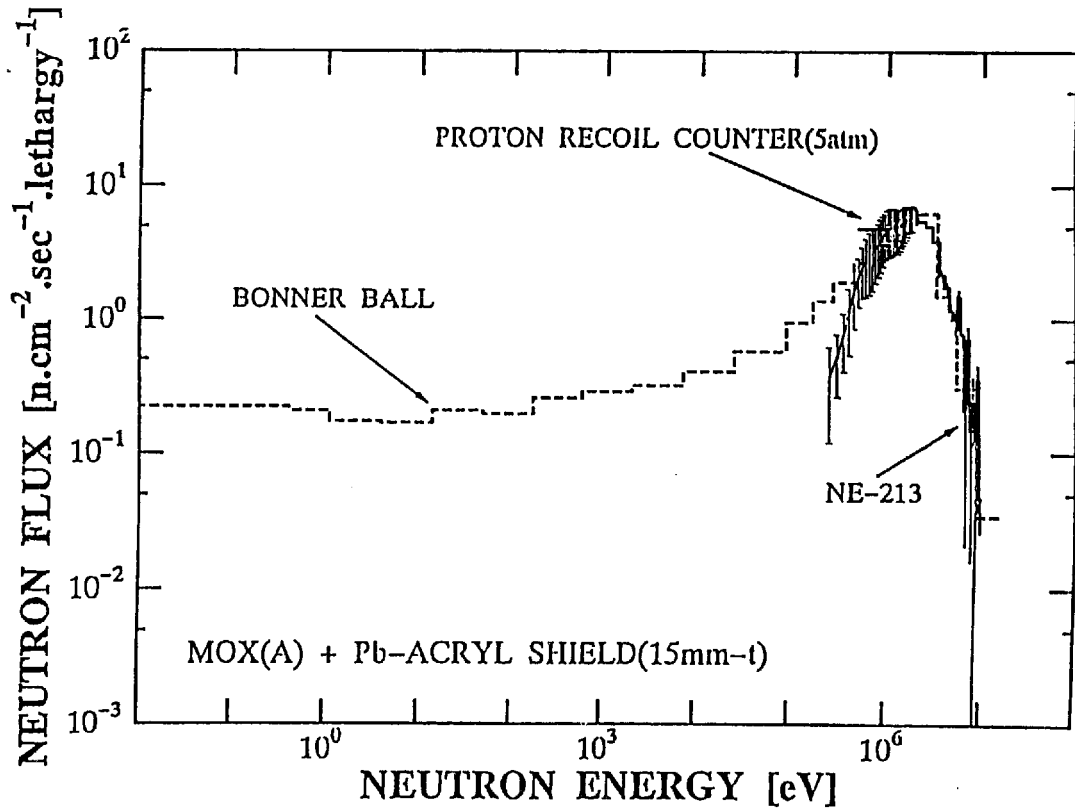


図5-6 実験体系 (II) MOX (A) 及び含鉛アクリル [5-2、5-9]

表5-5 照射条件

	1 回 目	2 回 目
実 施 日	8月22日	10月3日
試 験 場 所	Pu燃第2開発室 F-105室	Pu燃第2開発室 F-105室
試 料	MOX缶 2個	MOX缶 2個
遮 蔽	鉛板 3mm厚	鉛板アクリル 5cm厚
距 離	75 cm	50 cm
照 射 時 間	7時間	8時間24分
ファントム	水ファントム	水ファントム

表5-6 Reference neutron spectra measured with multisphere spectrometer and rem counter

距 離	MOX(A)+(B)	MOX(A)+Pb-ACRYL	
	75cm	75cm	50cm
FLUX[n/cm <sup>2</sup> /h]	1.07×10 <sup>5</sup>		1.42×10 <sup>5</sup> *
H* [μSv/h]	31.4	13.8	28.9*
REM COUNTER [μSv/h]			
Studsvik 2202D	41.6	17.4	36.4
富士電機 NSN1	29.5	13.9	—
MEAN ENERGY[MeV]	1.63(2.02)	1.18(1.93)	
H γ [μSv/h]	18(715 <sup>+</sup> )	—	30

<sup>+</sup> without Pb shield

\* ボナー球の測定は75cmでしか行っていないので、レムカウンタ(2202D)の50cmと75cmの測定値の比に等しいとして補正して求めた。

## (1) TLDバッジ

動力炉・核燃料開発事業団で使用している TLDバッジの照射試験をおこなった。4 個の TLDバッジを水ファントム上に取り付け同時照射した。

この線量計は、1個の $\gamma$ 線用素子( ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ )と3個の中性子/ $\gamma$ 線用素子( ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ )の合計4個の素子と、Cd/Snフィルターの組合わせによって熱中性子及び熱外～速中性子それぞれの線量当量を評価できるよう設計がなされている。図4.1にその構造が示されている。

中性子の線量当量評価に用いる式は以下の通りである。

$$\left. \begin{aligned} H_f &= C_1 \times (E_4 - E_1 - 0.225 \times (E_2 - E_3)) \\ H_{th} &= C_2 \times (E_2 - E_3) \end{aligned} \right\} (5.1)$$

$H_f$  : 速中性子線量当量

$H_{th}$  : 熱中性子線量当量

$E_1 \sim E_4$  : 素子1～4の読取り値

$C_1$  : 素子4の正味発光量から速中性子線量当量を求める係数

$C_2$  : 素子2と素子3の発光量の差から熱中性子線量当量を求める係数

$$C_2 = 0.098 [\mu\text{Sv/mR}^{-137}\text{Cs eq.}]$$

係数 $C_1$ は中性子エネルギー分布に大きく依存するが、今回は ${}^{252}\text{Cf}$ に対する換算係数 $C_1 = 21.6 [\mu\text{Sv/mR}^{-137}\text{Cs eq.}]$ を使用した。また、熱中性子線量当量は速中性子線量当量に比べて無視できる程度であり、今回その評価はおこなわない。

表5-7、表5-8にTLDの発光量読取り値、速中性子線量当量評価結果を示す。ならん遮蔽体の無い照射条件IではTLDバッジの評価値は50%程度のばらつきを持つが、実作業条件に比較的近い照射条件IIでは20%程度のばらつきでしかない。

表5-9にスペクトロメーターから求めた線量当量値とTLDから求めた評価結果の比較を示す。両者の値は実験条件Iではよく合っているが、実験条件IIでは約50%程度の過大評価となっている。

ただし、実際のプルトニウム燃料工場作業環境で実測した中性子エネルギー分布に比べると今回実験をおこなった場の方が硬いエネルギー分布をもっている。現在プルトニウム燃料工場作業者の被曝管理に用いている速中性子用換算係数 $C_1 = 6.4 [\mu\text{Sv/mR}^{-137}\text{Cs eq.}]$ を使用すれば、今回の実験体系での速中性子線量当量評価値は1/3程度の過小評価になることを付け加えておく。

## (2) 固体飛跡検出器

長瀬ランダウア社の固体飛跡検出器（バリオトラック）を用い、照射後、業者に測定を依頼した。ファントムは水ファントムを使用した。（固体飛跡検出器はTLDバッジのバッジケースの中にはめ込んでいる）

表5-10、5-11にトラック数及び業者による線量当量評価値を示す。表5-12に基準値との比較を示す。実験条件I、IIとも安全側の評価を与えているが、TLDと比べてIよりIIの方がよく合っている。また指示値のばらつきも20%程度とTLDより小さい。

## (3) シリコン半導体式線量計

東北大学と富士電機で共同開発した線量計について実験した。実験で得られた低速中性子用素子及び高速中性子用素子の計数率と感度、及びスペクトルと素子の応答関数から計算した値を表5-13に示す。高速中性子用素子のC/Eは0.9~1.0とよく一致している。一方低速中性子用素子の場合C/Eが1.2~1.6となった。これは床面（などからの）低速中性子の散乱成分もファントムに対して面平行に入射するとして計算したため、感度を過大評価したことによる。リアルタイム式の線量計であり、TLDや固体飛跡検出器（8時間照射）と違って、1時間の照射で誤差10%の精度で結果が得られた。

表5-14に線量計から求めた線量当量測定結果とスペクトロメータから求めた線量当量を比較している。両実験条件とも10%以内で非常によく一致しており、この3つの線量計の中で最もよい指示値を与えることが分かった。

## (4) まとめ

以上の結果から見ると、MOX燃料周辺環境での中性子個人線量計としては、富士電機製のシリコン半導体式線量計が最も精度が高い線量を与え、しかもリアルタイム式で感度が高いため、短時間でばらつきの少ない測定結果が得られることが結論づけられた。このためこの線量計はアラームメータとして作業管理に用いるのに最適である。

TLDと固体飛跡検出器の2つのパッシブ型線量計はともに使用可能な条件を満たしているが、固体飛跡検出器の方が測定精度がよく、長期間着用する積算線量計として敵している。



表 5 - 7 照射条件 I での TLD バッジの素子発光量と速中性子線量当量評価値

TLD NO.	E1	READ VALUES [mR- <sup>137</sup> Cs eq.]			ESTIMATED DOSE Hf, [mSv]
		E2	E3	E4	
1	8.6	8.5	9.4	18.4	0.21
2	10.7	17.7	9.8	22.7	0.22
3	8.2	11.5	7.3	13.9	0.10
4	6.0	19.7	13.2	26.7	0.41
AVERAGE	8.4 ±1.9	14.3 ±5.2	9.9 ±2.4	20.4 ±5.5	0.24±0.13

(unit = mR-<sup>137</sup>Cs eq.)

表 5 - 8 照射条件 II での TLD バッジの素子発光量と速中性子線量当量評価値

TLD NO.	E1	READ VALUES [mR- <sup>137</sup> Cs eq.]			ESTIMATED DOSE Hf, [mSv]
		E2	E3	E4	
1	18.3	26.9	26.5	37.5	0.41
2	16.9	24.2	18.0	30.5	0.26
3	16.4	38.8	24.4	39.0	0.42
4	18.6	31.0	23.4	34.7	0.31
AVERAGE	17.6 ±1.1	30.2 ±6.4	23.1 ±2.4	35.4 ±5.5	0.35±0.08

(unit = mR-<sup>137</sup>Cs eq.)

表 5 - 9 TLD バッジによる線量当量評価と照射した線量当量値の比較

	DELIVERED DOSE [mSv]	ESTIMATED DOSE [mSv]	ESTIMATED DELIVERED
(I) MOX(A)+(B)	0.22	0.24±0.13	1.09±0.59
(II) MOX(A)+ Pb-ACRYL	0.24	0.35±0.08	1.46±0.33

表5-10 照射条件I

	Tracks/3.363mm <sup>2</sup>	ESTIMATED DOSE <sup>1)</sup> [mSv]
1	1 5	0. 2
2	2 0	0. 3
3	1 8	0. 3
4	1 9	0. 3
5	1 7	0. 3
6	2 6	0. 4
7	2 1	0. 3
8	2 4	0. 4
9	2 2	0. 3
	20. 2±3. 5	0. 30±0. 06

<sup>1)</sup> 業者による測定結果 (<sup>252</sup>Cfで校正した値)

表5-11 照射条件II

	Tracks/3.363mm <sup>2</sup>	ESTIMATED DOSE <sup>1)</sup> [mSv]
1	1 9	0. 3
2	1 7	0. 3
3	1 6	0. 2
4	2 4	0. 4
	19. 0±3. 6	0. 30±0. 08

<sup>1)</sup> 業者による測定結果 (<sup>252</sup>Cfで校正した値)

表5-12 長瀬ランダウア、バリオトラックによる線量当量評価値と照射した線量当量値の比較

	DELIVERED DOSE [mSv]	ESTIMATED DOSE [mSv]	ESTIMATED DELIVERED
(I) MOX(A)+(B)	0. 22	0. 31±0. 06	1. 40±0. 27
(II) MOX(A)+ Pb-ACRYL	0. 24	0. 30±0. 08	1. 25±0. 33

表5-13 Count rates and sensitivities of fast and slow neutron sensor

SOURCE	COUNT RATE [cph]			SENSITIVITY [ $10^{-4}$ counts $\cdot$ cm $^2$ ]	
		FAST SENSOR	SLOW SENSOR	FAST SENSOR	SLOW SENSOR
MOX(A)+(B)	E	12.1 $\pm$ 1.36	9.6 $\pm$ 1.2	1.13 $\pm$ 0.13	0.90 $\pm$ 0.11
	C	12.7	15.1	1.18	1.40
	C/E			1.0	1.6
MOX(A)+ PB-ACRYL	E	13.2 $\pm$ 1.53	23.9 $\pm$ 1.96	0.93 $\pm$ 0.11	1.68 $\pm$ 0.14
	C	12.7	30.1	0.84	2.11
	C/E			0.9	1.2

表5-14 富士電機シリコン線量計による線量当量評価値と照射した線量当量値との比較

	DELIVERED DOSE [ $\mu$ Sv/h]	ESTIMATED DOSE [ $\mu$ Sv/h]	ESTIMATED DELIVERED
(I) MOX(A)+(B)	31.4	28.3 $\pm$ 3.1	0.90 $\pm$ 0.10
(II) MOX(A)+ Pb-ACRYL	28.9	31.6 $\pm$ 3.5	1.09 $\pm$ 0.12

## 第6章 おわりに

今までに中性子個人被曝線量の測定法と個人線量計の現状とその特性評価及び線量計の較正法について述べ、さらに実際の現場での適用例として MOX燃料周辺環境での線量測定評価について述べてきた。その研究結果に基づいて、現状で最もよいと思われる個人線量計とその較正法について提言を行った。

本研究の終わりに当って、これまでの成果を基に今後の課題と展望について一言述べておきたい。

### (1) 中性子個人線量計について

#### • TLDアルベド線量計

TLD アルベド線量計は一般に感度が低くエネルギー依存性も大きいので、きちんとした線量評価や較正を行わない限り精度の低い結果しか得られない。従って一般には使用が難しいが、動燃事業団では今後も使用する方針である。これは動燃では中性子被曝管理を必要とする作業環境が限定できるのでエネルギー依存性は余り実用上問題ならず、データの継続性という点を考慮するためである。しかし感度が低いのが問題であり、高感度型素子の開発やリーダーの検出効率上昇に取り組んでいるが、大幅な感度上昇が期待できないことも考えて、TLDの較正を個々のTLD素子毎に行って補正係数を求めることによって線量評価式の誤差伝播を低減する方法も検討している。

#### • 組合せ線量計

2種類のエネルギー依存性の異なる線量計を組合せて、熱エネルギーから15MeVに至る広帯域の中性子線量当量を得るものである。オークリッジ研究所では、バブル線量計とTLD アルベド線量計の組合せを検討し、ローレンスリバモア研究所ではトラック検出器とTLD アルベド線量計の組合せを使用している。これは図3-1に示したようにバブル及びトラック線量計で100keV以上、TLD アルベド線量計で100keV以下を測定するので、ほぼICRP-51に示す線量当量換算係数—いわゆるレムレスポンス—に近く、優れた特性を持っている。TLD が有為な発光をした場合のみトラックエッチングを行い線量評価するやり方で、手間を省く合理的方法があるけれども、一般的に見て複数の線量計を使用するのは煩わしくコストも高くなる欠点がある。

#### • 固体飛跡検出器

今後はフィルムバッジはなくなり、これに取って代わると思う。

現在東北大学と千代田保安用品とで共同開発している複合型固体飛跡検出器は熱エネル

ギーから15MeV までカバーする広帯域の線量計で、TLD アルベド線量計と組合せる必要がなく、より簡便なものになると期待される。ただし素子の長期安定供給体制を確保することが不可欠である。

- シリコン半導体線量計

唯一デジタル式で線量が直読でき、しかも東北大学と富士電機で共同開発している線量計はアラーム設定ができコンピュータ管理が行えるものであり、日常モニタリングにも使用できるが、より効力を発揮するのは作業モニタリング、特殊モニタリングである。今後中性子被曝が予想される環境での作業モニタリングに積極的に導入すべきであろう。

## (2) 線量計の較正について

- 較正場

既に述べたように、現在の個人線量計は、すべてその線量当量当り感度のエネルギー依存性がICRP-51の示す線量当量換算係数とずれているので、線量計のエネルギー依存性を明らかにすることが不可欠である。エネルギー依存性は単色中性子場での較正により得られるが、これはどこの施設でも行えるものではない。新しく線量計を開発する場合を除いて、使用している線量計の較正を行うには、 $^{252}\text{Cf}$  中性子源を用いるのが簡便で最もよいが、可能な場合には $^{252}\text{Cf}$  中性子の減速場（ポリエチレン、鉄など）を合わせ用いるのが良い。これらの場を供給するような標準較正サービス機関の充実が今後望まれる。

- ファントム

個人線量計の較正はファントムに装着して行うことになっているが、X、 $\gamma$ 線の場合のような標準ファントムが定められていない。今回の研究の結果、水ファントムが最も良いことが分かったが、そもそも個人線量当量は人体（密度が $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ で水分が $2/3$ を占める）を対象としているのであるから当然であるといえよう。しかも平板でなく人体のような楕円体の形状がより望ましいことになるから、その意味では今回使用した楕円状のファントムが適している。

ただしファントムの存在に大きくその感度が影響を受けるのは、 $100\text{keV}$ 以下の低エネルギー中性子に対して大きい感度を持つ線量計、例えばTLD アルベド線量計、シリコン半導体線量計など、であり、高速中性子だけに感度を持つ固体飛跡検出器、バブル線量計、高速中性子用フィルムなどはほとんどその影響を受けない。

- 方向依存性

この線量計の較正は、線量当量が既知の場所で行うが、この線量当量は通常空間線量である周辺線量当量 $H^*(10)$ で与えられている。第2章で述べたように、面平行ビームによる照射の下では $H^*(10)$ は方向性線量当量 $H'(10, \alpha=0)$ に等しい。ICRUのいうように個人線

量当量 $H_p(10)$ はむしろ方向性線量当量 $H'(10, \alpha)$ にほぼ等しいことから $H'(10, \alpha)$ を測定するという立場からすると、線量計はむしろこの $H'(10, \alpha)$ の方向特性に近い方向性(図2-4)を持つ方が望ましいことになる。

このことからすれば線量計は数MeV以上では等方分布に近く、それ以下ではコサイン分布に近いような方向依存性を持っているのがよく、この点からいうとバブル線量計がほぼ等方に近い方向特性を持つのに対し、その他の線量計はコサイン分布に近い方向特性を持っている。従ってこの点では余り大きな誤差を引き起こす問題はないといってもいいであろう。

## 謝 辞

本研究を遂行するに当り、次の方々から頂いた様々なご協力に対し深く感謝いたします。

- 1) 固体飛跡検出器（ニュートラックバッジ）の測定に関し、データを提供して頂いた長瀬ラ  
ンダウア(株)の安瀨四郎氏
  
- 2) FNLでの実際に際し、ダイナミトロン加速器の運転とTOFによる中性子エネルギー測定など  
様々なご協力に関し、東北大学工学部原子核工学科の馬場護、岩崎智彦、松山成男の各氏
  
- 3) FNL での実験に際し、個人線量計の測定に協力して頂いた千代田保安用品(株)の大口裕之氏  
と東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターの高田真志氏
  
- 4) シリコン半導体線量計の測定とデータ提供に協力頂いた富士電機(株)の山野俊也氏
  
- 5) MOX 燃料のスペクトル測定に際し、協力頂いた動力炉・核燃料開発事業団東海事業所安全  
管理部の小林博英、上野哲郎両氏及び同プルトリウム燃料工場の高橋三郎、松山一富両氏
  
- 6) MOX 燃料スペクトル測定データの解析に際し、指導頂いた東北大学サイクロトロン・ラジ  
オアイソトープセンターの高木俊治氏
  
- 7) 核燃料取扱施設における個人被曝管理の現状に関して教えて頂いた動力炉・核燃料開発事  
業団大洗工学センターの小泉勝三氏

## 参 考 文 献

### 第2章

- [2-1] ICRP Publication 26, RECOMMENDATIONS OF THE INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, (1977)
- [2-2] ICRU Report 33, RADIATION QUANTITIES AND UNITS, (1980)
- [2-3] ICRU Report 39, DETERMINATION OF DOSE EQUIVALENTS RESULTING FROM EXTERNAL SOURCES, (1985)
- [2-4] ICRP Publication 51, DATA FOR USE IN PROTECTION AGAINST EXTERNAL RADIATION, (1987)
- [2-5] J.R.HARVEY, THE INDIVIDUAL MONITORING QUALITY FOR NEUTRONS AND ITS RELATIONSHIP WITH FLUENCE, Radiat. Prot. Dosim., 20, 19-24, (1987)
- [2-6] B.R.L.SIEBERT AND A.MORHART, A PROPOSED PROCEDURE FOR STANDARDISING THE RELATIONSHIP BETWEEN THE DIRECTIONAL DOSE EQUIVALENT AND NEUTRON FLUENCE, Radiat. Prot. Dosim., 28, 47-51, (1989)
- [2-7] ICRU Report 43, DETERMINATION OF DOSE EQUIVALENTS RESULTING FROM EXTERNAL SOURCES - PART.2, (1988)
- [2-8] 科学技術庁原子力安全局監修、アイソトープ法令集I (1992年版)、(1992)
- [2-9] 多田順一朗、加藤和明、1 cm線量当量による実効線量当量評価の限界、Radioisotopes, 27, 293-294, (1988)
- [2-10] 外部被ばくにおける線量当量の測定・評価マニュアル、原子力安全技術センタ、(1988)
- [2-11] 辻村憲雄、東北大学大学院工学研究科原子核工学専攻修士論文 (1993)
- [2-12] ZIX Z4510 高速中性子用フィルムバッジによる線量当量算出方法、日本規格協会 (1990)
- [2-13] 村上博幸、南賢太郎、外部放射線に対する防護のための計測線量、日本原子力学会誌、33, 748-756, (1991)

### 第3章

- [3-1] ICRP Publication 35, GENERAL PRINCIPLES OF MONITORING FOR RADIATION PROTECTION FOR WORKERS, (1982)
- [3-2] 日本アイソトープ協会、「外部被曝モニタリング」、丸善株式会社 (1986)



- [3-3] 中村尚司他放射線防護計測専門研究会、中性子個人被曝管理及び中性子個人被曝線量計校正法の現状と今後の課題、保健物理、26、367-382、(1991)
- [3-4] T. NAKAMURA, M. HORIGUCHI, T. SUZUKI and T. YAMANO, Radiat. Prot. Dosim., 27, 149 (1989)
- [3-5] H. ING AND H. C. BIRNBOIM, A BUBBLE-DAMAGE POLYMER DETECTOR FOR NEUTRON, Nuclear Tracks, 8, 285-288, (1984)
- [3-6] H. ING AND H. C. BIRNBOIM, BUBBLE-DAMAGE POLYMER DETECTOR FOR NEUTRON, DOSIMETRY, PROCEEDING OF FIFTH SYMPOSIUM ON NEUTRON DOSIMETRY, (1984)
- [3-7] R. E. APFEL, THE SUPERHEATED DROP DETECTOR, Nucl. Instr. Meth., 162, 603-608 (1979)
- [3-8] 中村尚司、辻村憲雄、山野俊也、岡本俊輔、日本原子力研究学会誌、1994年4月出版予定
- [3-9] A. M. SAYED AND E. PIESCH, STUDY OF THE LATENT FADING OF NTA PERSONNEL FILM AND TRACK ETCHING DETECTORS AT VARIOUS TEMPERATURES AND HUMIDITIES, REP. KFK-2032, (1974)
- [3-10] D. E. HANKINS et al., PERSONNEL NEUTRON DOSIMETRY USING HOT, LOW FREQUENCY ELECTROCHEMICAL ETCHING, Proc. 13th Conference on Solid State Nuclear Track Detectors, Rome (1988)
- [3-11] 木村健一、修士学位論文、東北大学原子核工学科、(1986)
- [3-12] R. G. ALSMILLER Jr. AND J. BARISH, THE CALCULATED RESPONSE OF  $^6\text{LiF}$  ALBEDO DOSIMETERS TO NEUTRONS WITH ENERGIES  $\leq 400\text{MeV}$ , Health Phys., 26, 251-254 (1974)
- [3-13] J. C. LIU, THE DEVELOPMENT, CHARACTERIZATION, AND PERFORMANCE EVALUATION OF A NEW COMBINATION TYPE PERSONAL NEUTRON DOSIMETER, ORNL-6593, 1989
- [3-14] R. E. APFEL AND Y. C. LO, PRACTICAL NEUTRON DOSIMETER WITH SUPERHEATED DROPS, Health Physics, 56, 79-83, (1989)
- [3-15] 中村尚司、鈴木敏和、山野俊也、吉田義輝：特開平2-205792 (中性子個人被曝線量計)
- [3-16] Sato, N., Ishiwata, o., Seki, Y., Ueda, A. : Japanese J. Appl. Phys., 29, 2526 (1990)
- [3-17] 高木俊治：東北大学工学部原子核工学科卒業論文 (1989)
- [3-18] Iwai, S., Ohkubo, T., Hara, A., Nakamura, T. : Nucl. Instrum. Methods, A254, 159 (1987)

#### 第4章

- [4-1] 石黒秀治、武田伸荘； $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子による自動読取型個人線量計の開発(Ⅱ)、保健物理、17, 27-36 (1981)
- [4-2] 日本人の体格調査報告書、通産省工業技術院 (1984)
- [4-3] 城谷孝、他；組織等価溶液の開発、Radioisotopes (1989)
- [4-4] 宮部賢次郎、野村幸弘、石黒秀治、中田啓；PNCN841 84-48 (1984)
- [4-5] Piesch E., et al.; PNL-2807 (1978)
- [4-6] J. A. Auxier, Health Phys., 11, 89 (1965)
- [4-7] R. E. Swaja, C. S. Sims, R. T. Greene, H. Schraube and G. Burger, ORNL/TM-8697 (1983)
- [4-8] IAEA Technical Report Series, No. 252, "Neutron Monitoring for Radiological Protection", (1985)

#### 第5章

- [5-1] 百瀬琢麿、宮部賢次郎、大和愛司、岩井敏、林津雄厚；核燃料施設における中性子線量測定法の検討(Ⅰ)、(Ⅱ)、PNC TN8410 89-049, p2-14 (1989)  
百瀬琢麿、宮部賢次郎、大和愛司、岩井敏：動燃技報No.65-11, (1988)
- [5-2] 中尾徳晶、辻村憲雄、中村尚司、百瀬琢麿、二之宮和重、石黒秀治、日本原子力学会誌、35、1103-114 (1993)
- [5-3] McELROY, W. N., et. al:AWFL-TR-67-41 Vol.1~4, Air Force Weapons Laboratory, (1967)
- [5-4] SNIDOW, N. L., WARREN, H. D.:Nucl. Instr. Meth., 51, 109 (1967)
- [5-5] 高木俊治：「東北大学工学部原子核工学科卒業論文」、(1989)
- [5-6] BURRUS, W. R., VERBINSKI, V. V.:Nucl. Instr. Meth., 67, 181 (1969)
- [5-7] UWAMINO, Y., NAKAMURA, T.:Nucl. Instr. Meth., 204, 179 (1982)
- [5-8] SHIN, K., UWAMINO, Y., HYODO, T.:Nucl. Technol., 53, 78 (1981)
- [5-9] 中尾徳晶、卒業論文、東北大学工学部原子核工学科、1991