PNC TN9410 95-189

複合型中性子線量当量測定器の開発

１９９５年８月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

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ください。
〒311-13　茨城県東茨城郡大洗町成田町4002
動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター　システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

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

PNC TN9410 95-189
1 9 9 5 年 8 月

複合型中性子線量当量測定器の開発

橋本　周[1)]、鳥居建男[2)]、安藤秀樹[1)]

要　旨

ICRP1990年勧告で、被ばく評価方法について従来の線質係数に代わり新しく放射線荷重係数が導入された。この変更により、従来の中性子による線量当量の評価方法に比べて中速領域の中性子による寄与が重く評価されている。したがって、従来の勧告に基づいた中性子線量当量は、新勧告に基づいて評価した中性子線量当量に比べて過小評価となる場合があることを示唆している。

そこで、新勧告に対応した中性子線量当量率計の開発を目的として、新しい中性子検出器を試作した。検出器には、従来の中性子線量当量率計に使われていた減速型検出器ではなく、多検出器法の理論による複合型検出器を採用した。本検出器の特性を把握するために、エネルギー応答計算を行うとともに、その結果に基づく試作器について中性子線源及び加速器を用いて特性試験を実施した。エネルギー応答計算の結果からは、目的とするエネルギー範囲において多検出器法の理論を適用できることが示された。また、特性試験の結果から線量当量率計として使用しうることがわかった。さらに、特性試験の過程において、^{241}Am-Beと^{239}Pu-Beの中性子のスペクトルの違いを検出することが可能なことが示され、中速領域の中性子に対して、そのエネルギーの違いに極めて敏感であることがわかった。

今後は、より実用的な線量当量評価を行えるように改良を施すとともに、エネルギー分解能を利用した応用についても検討していく。

1)　大洗工学センター・安全管理部・放射線管理課
2)　もんじゅ建設所・安全管理課

PNC TN9410 95-189
August, 1995

Development of Compound Neutron Dose Meter

M.Hashimoto[1], T.Torii[2] and H.Ando[1]

Abstract

The new radiation weighting factors for neutron are introduced in ICRP 1990 Recommendations instead of the former quality factor. The contribution of intermediate energy neutron to the dose estimated with the new factors is more serious than with the former factors. Therefore, it indicates that the neutron dose evaluated by the former factors sometimes underestimates the dose evaluated by the new factors.

Accordingly, to develop the neutron dose meter adjusted to the new recommendations, the new neutron detector has been experimented. In this study, instead of moderated detectors usually used as a neutron dose rate meter, the compound detector based on the multidetector method was employed. To understand the characteristic of this detector, we simulated the energy response and carried out the characteristic examination with neutron sources and accelerators. As a result of energy response simulation, in the region of interest, it can apply the multidetector method. As a result of characteristic examination, the detector can be used for measuring the neutron dose. Furthermore, in processes of the examination, this detector can discriminate the average energy of neutrons of ^{241}Am-Be from that of ^{239}Pu-Be. It is very sensitive to the neutron energy difference at intermediate energy.

In future, it will be made improvement to make more practical dose estimation, and it will be made investigation to apply the ability of energy resolution.

1) Radiation Control Section, Health and Safety Division, O-arai Engineering Center
2) Health and Safety Section, Monju Construction Office

目　次

1.　はじめに ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
2.　複合型検出器の原理 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2
　2.1　従来型中性子線量当量率計の課題 ・・・・・・・・・・・・・2
　2.2　新勧告に対応できる中性子線量当量率計のために ・・・・3
　2.3　多検出器法の適用 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3
　2.4　複合型検出器 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・4
　2.5　従来型との比較 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・5
3.　検出器の設計 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・8
　3.1　概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・8
　3.2　設計 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・8
　3.3　計算体系 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・9
　3.4　(n, α)反応の計算 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・9
　3.5　(n,p)反応の計算 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・9
　3.6　計算結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・10
4.　エネルギー特性試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・21
　4.1　試験概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・21
　4.2　反応の弁別 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・21
　4.3　RIによる特性試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・22
　4.4　加速器による特性試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・23
　4.5　エネルギー特性試験結果について ・・・・・・・・・・・・23
5.　線量当量特性評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・38
　5.1　概論 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・38
　5.2　特性空間の形成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・38
　5.3　評価方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・39
　5.4　線量当量特性評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・40
6.　考察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・45
　6.1　検出器について ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・45
　6.2　スペクトル指標について ・・・・・・・・・・・・・・・・・45
　6.3　線量当量特性について ・・・・・・・・・・・・・・・・・・45
　6.4　今後の開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・47
7.　まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・50
8.　謝辞 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・50

付録　多検出器法の概論

表・図・写真目次

表3-1 検出器構成物質組成表 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 12
表3-2 エネルギー応答計算に用いたエネルギー群 ・・・・・・・・・・・・・・ 13
表3-3 複合型検出器のエネルギー応答計算結果 ・・・・・・・・・・・・・・・ 15
表4-1 RI中性子源一覧 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 29
表4-2 RI中性子源によるエネルギー特性試験結果 ・・・・・・・・・・・・・・ 30
表4-3 加速器の中性子によるエネルギー特性試験の試験条件 ・・・・・・・・ 31
表4-4 加速器の中性子によるエネルギー特性試験結果(1.5MeV近傍)・・・・・ 35
表4-5 加速器の中性子によるエネルギー特性試験結果(3.0MeV近傍)・・・・・ 36
表4-6 加速器の中性子によるエネルギー特性試験結果(5.0MeV近傍)・・・・・ 37
表5-1 RI中性子源の1cm線量当量率定数 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 42
表5-2 エネルギー特性試験結果の線量当量に関する評価と特性空間における値 43

図2-1 複合型検出器断面図及び検出原理 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 6
図2-2a 理想的な出力スペクトル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 7
図2-2b 予想される出力スペクトル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 7
図3-1 中性子スペクトロメータのエネルギー応答計算結果 ・・・・・・・・・ 11
図3-2 複合型検出器についての応答計算体系 ・・・・・・・・・・・・・・・・ 12
図3-3a エネルギー応答計算結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 19
図3-3b エネルギー応答計算結果抜粋 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 20
図4-1 複合型検出器の検出回路 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 25
図4-2 複合型検出器の出力処理 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 25
図4-3 反跳陽子のスペクトル（^{238}Pu-Beによる照射結果） ・・・・・・・・・ 26
図4-4 純熱中性子場スペクトル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 26
図4-5 RIによる検出器出力（^{241}Am-Be(1)） ・・・・・・・・・・・・・・・ 27
図4-6 RIによる検出器出力（^{241}Am-Be(2)） ・・・・・・・・・・・・・・・ 27
図4-7 RIによる検出器出力（^{252}Cf(1)） ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 28
図4-8 RIによる検出器出力（^{252}Cf(2)） ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 28
図4-9 RIによる検出器出力（^{238}Pu-Be） ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 29
図4-10 中性子平均エネルギーとスペクトル指標の関係 ・・・・・・・・・・・ 30
図4-11 加速器による特性試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 32
図4-12 単色中性子による検出器出力（0°方向，2.998MeV） ・・・・・・・・ 33
図4-13 単色中性子による検出器出力（15°方向，2.974MeV）・・・・・・・・・ 33
図4-14 単色中性子による検出器出力（30°方向，2.920MeV）・・・・・・・・・ 34
図4-15 単色中性子による検出器出力（45°方向，2.840MeV）・・・・・・・・・ 34
図4-16 中性子のエネルギーとスペクトル指標の関係(1.5MeV近傍)・・・・・・ 35

図4-17　中性子のエネルギーとスペクトル指標の関係(3.0MeV近傍)・・・・・・ 36
図4-18　中性子のエネルギーとスペクトル指標の関係(5.0MeV近傍)・・・・・・ 37
図5-1　複合型検出器の特性空間　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 42
図5-2　複合型検出器の特性空間と実験値の比較　・・・・・・・・・・・・・・ 44
図6-1　中性子のエネルギーと特性空間構成要素の関係　・・・・・・・・・・・ 49

写真1　複合型検出器外観　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 24
写真2　複合型検出器検出部　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 24
写真3　減速型中性子線量当量率計との比較　・・・・・・・・・・・・・・・・ 48

1.はじめに

ICRP Publication60において、放射線防護に関するいくつかの考え方が変更された。その中の一つに放射線による被ばくの程度の評価の変更がある。すなわち、従来の線質係数(quality factor)に代えて、放射線荷重係数(radiation weighting factor)が導入された。そのうち、中性子については、100keVから2MeVの範囲について従来の線質係数に比べて2倍の値が勧告され、また、さらに中性子のエネルギーに応じた放射線荷重係数の評価も適用できることが勧告されている。すなわち、線量への換算係数を変えるべきであることが示唆されている。

これは、今後の中性子による線量の評価に大きな影響を及ぼす。既存の中性子線量当量率計は、従来の勧告に合わせた特性をもつ検出器で構成されており、新勧告に対応できるものではない。

そこで、このような線量換算係数の変更に容易に対応できる中性子線量率計の開発を目的として中性子検出器の試作を行った。これは、従来の中性子線量当量率計のように検出器の特性により線量を評価するものではなく、検出器の出力からあらためて線量の評価を行うものである。したがって、線量換算係数の変更には出力の処理方法を変えることで対応ができるため、従来のものに比べて今後の換算係数の変更に対する柔軟な対応が可能になると考えられる。

以上の見解より、本研究では、以下の項目について検討を行った。本報告書はこれらの方法、結果をまとめたものである。

- 一つの検出器に対して多検出器法を適用することの是非
- エネルギー応答計算
- 計算結果に基づく検出器の設計、試作
- RI中性子源、加速器中性子源を用いた特性試験

2.複合型検出器の原理

2.1 従来型中性子線量当量率計の課題

中性子線量当量の測定には、減速型中性子検出器タイプの測定器が広く用いられている。これは、熱中性子に対して感度の高い検出器の周囲に適当な減速材を施すことで、検出器のエネルギー応答特性をエネルギー－線量当量特性に近似することにより、検出器の出力を直接、中性子線量当量率として読めるようにしたものである。エネルギー－線量当量特性は「レムレスポンス」とも呼ばれ、レムレスポンスを持たせた減速型中性子検出器はレムレスポンス検出器、あるいはレムカウンタと呼ばれることもある。減速材、中性子吸収材等の形状、検出器の種類は多岐に渡っており、どれも熱中性子から10MeV程度までのエネルギー範囲で線量当量率の測定ができる。たとえば、現在、大洗工学センターで広く用いられているサーベイメータ型中性子線量当量率計、Studzvik社の2202Dレムカウンタは、144keVから5MeVのエネルギー範囲で3.90[cps/(mrem/h)]±18.5%、の換算係数（メーカ推奨値）が与えられており、エネルギースペクトルの形状によってはより妥当な換算係数を与える必要はあることも示されているが、実用上十分な感度を有していることは確認されている[1]。

しかしその一方で、検出器にレムレスポンスを構造的に持たせていることは大きな欠点ともなっている。すなわち、レムレスポンスを持たせるために、通常は直径約25cmの減速材を必要としており、それが検出器を非常に重いものとしている。例えば、前述のStudzvik社の2202Dレムカウンタは約11kgである。他の製品についても同様であり、実際に現場に携行するには重すぎる。

また、線量当量への評価方法も問題となる。1990年にICRPのPublication60[2]において放射線荷重係数の導入が勧告され、今後、それに基づくエネルギー－線量当量換算係数が新たに示されることが予想される。放射線荷重係数は、従来の線質係数とほぼ同様の概念であるが、従来の値に比べて100keVから2MeVの範囲では2倍の、10keV未満及び20MeV以上の範囲では1/2の値が勧告された。これは中速領域の中性子による影響を重く見た結果である。この勧告の内容を受けたエネルギー－線量当量換算係数はICRPからはまだ示されていないが、いくつかの計算例が報告されており、それらにも、中速領域における線量当量換算係数が従来よりも大きなものとなることが示されている[3),4)]。従来の中性子線量当量率計は、従来の線質係数による線量当量換算係数に合うように設計されており、これをそのまま用いると新勧告に基づく線量当量評価に対して中速領域で過小評価を与えてしまう。新勧告に対応できる、従来と同様の中性子線量当量率計を作ろうとした場合、レムレスポンスを持たせるような設計を新たにやり直す必要がある。また、放射線荷重係数等の各種パラメータ及び線量評価手法の見直しにより、今後も線量当量への換算方法が変わる可能性は否定できないことを考慮すると、従来のように検出器自体にレムレスポンスを持たせる方法は、必ずしも有効な方法とは考えられない。

なお、Publication60では従来の線量当量（dose equivalent）に代わる値として等価線量（equivalent dose）が勧告されているが、本稿では統一して線量当量と表す。

2.2 新勧告に対応できる中性子線量当量率計のために

前項で述べた課題は、その原因が、線量当量率を測定器の指示値として直接表わそうとしたことにあると考えられる。この欠点を克服するためには、レムレスポンスにこだわらず、検出器の指示としては計数率等の線量当量評価の基準となる数値を採り、線量当量への換算はその出力から改めて評価を行う手法をとるのが有効であると考える。

線量当量を評価するにあたって物理的に有意義であり、また、有効な数値（群）は、その場のエネルギースペクトルである。線量当量への換算係数は、エネルギーの関数として与えられており、各エネルギー領域での計数、あるいはスペクトル形状を決める情報と計数に関する情報が得られれば、線量当量への換算を容易に行うことができる。

しかし、中性子のエネルギースペクトルの測定は非常に困難なものである。線量当量率計として十分な性能を有するためには、中性子有感エネルギー範囲について少なくともレムカウンタ程度の広がり（熱中性子～10数MeV）は持たなくてはならないが、そのような広い範囲について一様な感度を示す反応は存在しないため、単一の検出器の一種類の反応による出力だけでスペクトル形状を決定することはできない。このような広い中性子エネルギースペクトルの測定は、数種類の減速型の測定器の出力からアンフォールディング法によりスペクトルを推定する手法が、現在のところ唯一の手法である。すなわち、複数の検出器と複雑な出力処理が必要となってしまう。これでは、サーベイメータとして使用するには大がかりなものとなってしまい、適切ではない。

中性子線量当量を簡便に求めるには、その場のエネルギースペクトルを求める代わりに、エネルギースペクトルを端的に表す量、例えば平均エネルギーによって、近似的に評価するのは有効な手法である。検出器の直接の出力を用いて線量当量率を評価できる測定器、さらにはサーベイメータを実現するためには、より簡単な方法でその場のスペクトルを端的に表す情報を得られるようにしなければならない。

2.3 多検出器法の適用

中性子スペクトルを端的に表す情報を簡単に得られる手法として、多検出器法を採用する。中性子のスペクトル測定で広く用いられているアンフォールディング法も多検出器法の中の一手法であるが、ここで言う多検出器法はアンフォールディング法をさらに一般的に展開したものである[5)]。

多検出器法の詳細は付録の「多検出器法概論」の項にゆずるが、概要は、複数の検出器の出力について、その収束を考慮することなく直交展開し、目的とする評価量（線量当量率、平均エネルギー等）の取りうる範囲を与えるようにするものである。すなわち、中性子の測定について言えば、アンフォールディング法における中性子スペクトルの仮定をなくし、それらの出力を与えるであろうすべてのスペクトルを考慮に入れて、目的とする評価量の取りうる最大値と最小値を決めることである。これによって、アンフォールディング法の欠点であった、スペクトルの仮定を誤ると計算結果にきわめて大きな誤差を与えてしまうといった事象を避けることができる。また、多検出器法は直接に唯一の最適評価値を求める手法ではないため、処理が単純で、アンフォールディング法に比

べて出力の処理に関わる負担を少なくすることができる。

多検出器法で得られる結果は「目的とする評価量の取りうる範囲」と表現したが、ここで言う範囲は数学的に想定し得るすべての仮定による評価量の取りうる範囲であり、現実として有りえない事象（例えば、完全に単一エネルギーの中性子場は存在しない）を除くことによって値の広がりは狭くなる可能性がある。アンフォールディング法による場合のように、中性子スペクトルの形状が予測できるならば、結果の持つ広がりは大幅に抑さえられるであろう。

また、多検出器法を使うことによって、容易に広いエネルギー範囲に適用できる測定器を構成することができる。すなわち、従来のように厚い減速材を使わなくても、異なるエネルギー範囲について感度を持つ検出器を組み合わせることによって、十分に広いエネルギー範囲に対して感度を持つことになる。

2.4 複合型検出器

中性子線量当量率計に多検出器法を適用するにあたって、測定器として、一つの検出器で二種類の応答特性を持つ検出器を想定した。この、二種類の応答特性による出力を弁別し、あたかも二台の検出器による出力のように扱い、それらに多検出器法を適用する。それぞれの反応の弁別手法の問題などはあるが、サーベイメータとしての利用を想定すると、検出器部分はなるべく小さいほうがよいため、一つの検出器にまとめるのは有効である。また、一つの検出器にまとめることによって、複数の検出器を使うことによっておきる測定器ごとの測定環境の差をなくすことができるという利点もある。このような検出器を、以後、複合型検出器と呼ぶ。

今回試作した複合型検出器の断面図を図2-1に示す。測定器は、BF_3ガスを使ったアルミニウム製球形比例計数管がベースであり、この内面にポリプロピレンの層を形成し、さらに電極としてアルミニウムを蒸着したものである。ポリプロピレン層は陽子生成層として作用させる。こうすることによって、単一の検出器体に、BF_3ガス比例計数管としての性質と反跳陽子比例計数管としての性質の両方を持たせている。この検出器において予想される反応について以下に述べる。

エネルギーの低い中性子は、主にBF_3ガス中の^{10}Bと(n, α)反応を起こし、そのα線によって検出される。$^{10}B(n,\alpha)$反応は熱中性子に対しては約3827barnと大きな断面積を示すが、100keV程度より高いエネルギーではその反応断面積は急激に小さくなる。その一方で、高いエネルギーの中性子は、内張りのポリプロピレンに含まれる水素と弾性散乱して反跳陽子を放出し、それが計数管で検出される。入射中性子のエネルギーEnに対して、弾性散乱の反応断面積は、例えば標的核が水素(^1H)の場合、経験則として$En^{-1/2}$に比例して小さくなることが示されているが[6]、その一方で反跳陽子のポリプロピレン中での最大飛程は$En^{0.7}$～$En^{1.7}$に比例して大きくなるため(3.5節参照)、エネルギーが高くなるにつれて検出可能な陽子が増えてくる。このように、一つの検出器に、エネルギーが高くなると計数効率が小さくなる特性と、大きくなる特性の両方を持たせている。したがって、広いエネルギー範囲に亘って対応できる中性子検出器を構成することができる。

ここで問題となるのは二つの反応の弁別の方法である。多検出器法の理論を適用するにはこの二つの反応を弁別しなければならない。方法としては、パルス波形による弁別なども考えられるが、出力波高スペクトルで弁別する方法を採用した。$^{10}B(n,\alpha)$反応のQ値は2.31MeV(93.9%)、2.79MeV(6.1%)であり、理想的な出力波高スペクトルはそのエネルギーにピークを持つ単色のスペクトルである。一方、反跳陽子の出力波高スペクトルは、理想的な単色中性子に対して入射中性子のエネルギーを最大値とする長方形のスペクトルを形成する。したがって、検出器の出力スペクトルは図2-2aに示したようになり、両反応は容易に弁別できるはずである。実際には、中性子のエネルギースペクトルの広がり、検出器が球形であることによる電場の不均一、壁効果、ポリプロピレン中での反跳陽子の多重散乱などの影響で出力波高スペクトルになまりが生じ、図2-2bのようなものが得られることが予想される。

2.5 従来型との比較

従来型のレムレスポンス検出器による中性子線量当量率計に対して、複合型検出器を使った場合の利点と欠点を以下に示す。

利点としては

1)線量当量の評価は検出器出力の後処理で行うため、線量当量換算係数の変更に容易に対応できる。また、中性子スペクトルの変動にも敏感に対応できる。

2)厚い減速材を必用としないため、測定器を軽量にできる。

3)検出器出力は中性子場の状況に応じた出力となるため、線量当量以外の物理量、例えば平均エネルギー等についても評価することができる。

また、欠点として

1)評価結果が広がりを持った値として与えられるので、一つの数値で管理する現行の放射線管理手法との適合が難しい。

2)多検出器法の理論を適用することによって、レムレスポンス型に比べて検出器出力の後処理に関する負担が大きくなる。

ここに挙げられた欠点はいずれも、検出器出力の後処理にかかわるものであり、検出器の原理、設計、特性などにかかわることではないので、これらの対策などについては、後に考察する。

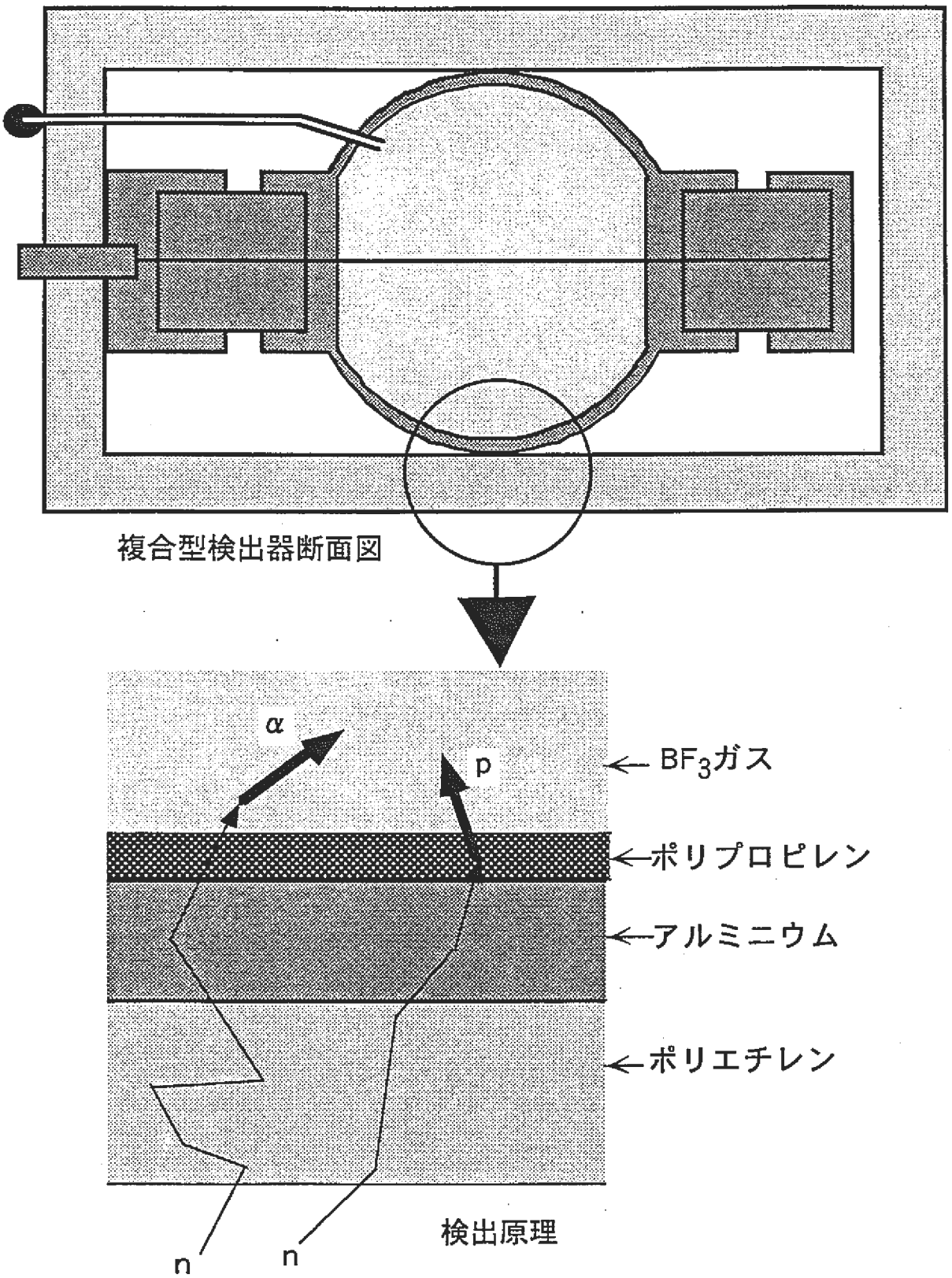
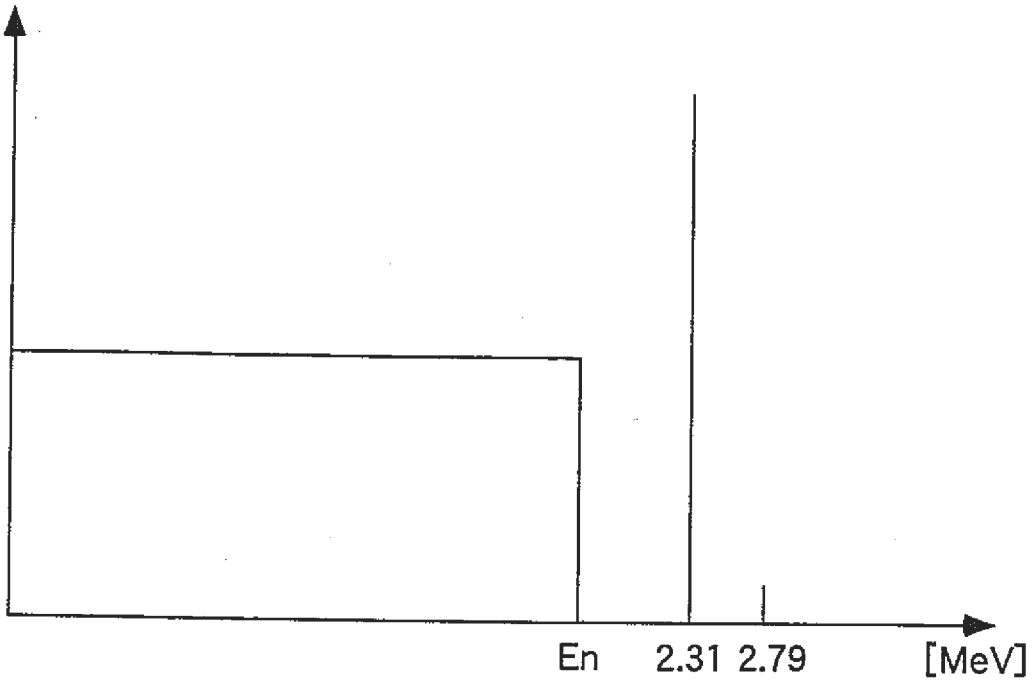


図2-1　複合型検出器断面図及び検出原理



En:入射中性子のエネルギー

図2-2a　理想的な出力スペクトル

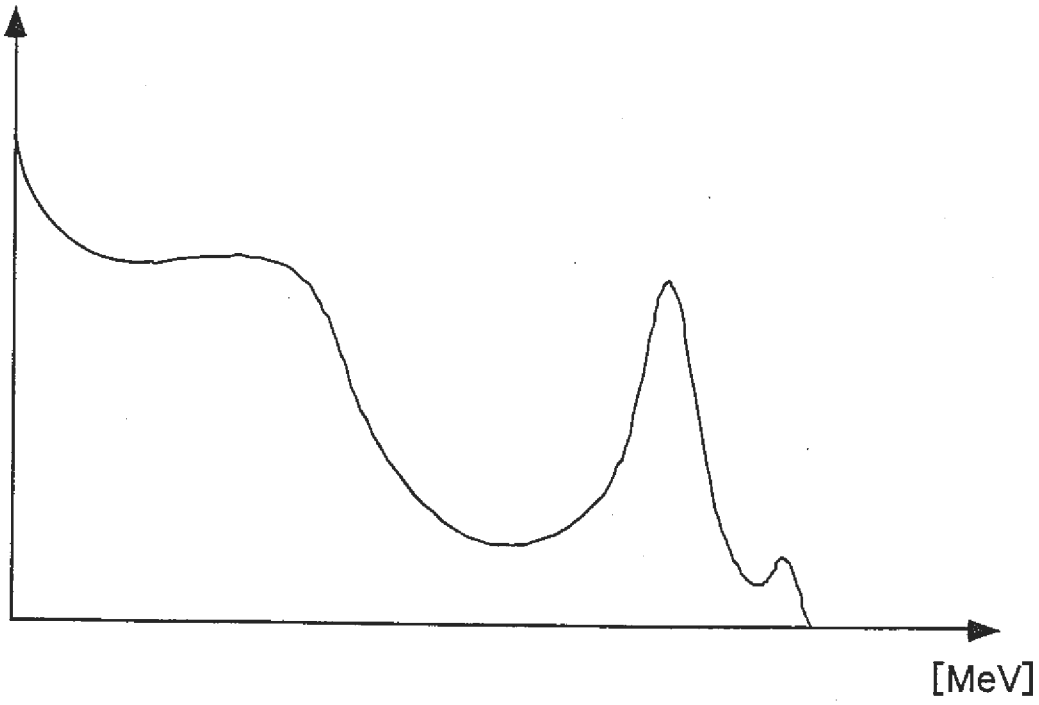


図2-2b　予想される出力スペクトル

3.検出器の設計

3.1 概要

前項で示した原理に基づき、複合型中性子検出器を設計した。設計した検出器のエネルギー応答関数を、一次元Sn輸送計算コード(ANISN)の随伴(adjoint)解で評価した。エネルギー応答関数は、適当に分割した各々のエネルギー領域における単位フラックス当りの(n, α)反応、弾性散乱のそれぞれによる計数で表す。ただし、ANISNでは反跳陽子の生成過程については計算できるが、陽子の飛程、消滅過程について直接には計算できないため、後処理を施した。以下に、その詳細について述べる。

3.2 設計

検出器の設計上の検討項目としては、以下のような項目が挙げられる。

・検出器本体の形状、大きさ
・検出器壁の厚さ、材質
・検出器内貼りの厚さ、材質
・検出器充填ガスの圧力、組成
・減速材の厚さ、材質

今回の開発の目的は、複合型検出器の検出器としての特性を知ることが大きな目的である。したがって、検出効率についての評価は重要視せず、線量当量評価上重要になる数MeV程度のエネルギー領域で(n, α)反応と弾性散乱について同程度の計数が得られることを目標とした設計を行った。

設計にあたっては、中性子スペクトロメータの設計での成果を応用した[7]。中性子スペクトロメータは、厚さ、種類の違う減速材を施したいくつかの球形のBF_3計数管を用いて、それぞれの出力からアンフォールディング法によって中性子のスペクトルを測定するためのものである。スペクトロメータの設計では、検出器は共通とし、減速材の厚さ、種類によって検出器のエネルギー特性がどう変わるかを計算する。検出器本体は複合型検出器と同じものを使うとすれば、スペクトロメータについての成果をそのまま、複合型検出器の減速材についての評価として使うことができる。その成果によると、厚さ1cmのポリエチレン減速材を使った場合に、入射中性子のエネルギーが数100keVを超えるあたりから急激に検出器の特性、すなわち、複合型検出器における(n, α)反応の特性が落ちて行くことが示されている。（図3-1参照）

一方、反跳陽子については、検出器の内張りのポリプロピレンで生成した陽子が計数管にエネルギーを付与できるかどうかが問題となる。そのためには、発生した陽子のエネルギーが大きく、ポリプロピレンの外に出ることが必要になる。陽子の飛程は、エネルギーが700keVでは1mg/cm^{2}で、それを超えるとエネルギーの約1.7乗に比例して大きくなることが示されている[8]。ポリプロピレンの密度を0.9g/cm^{3}とすると、1mg/cm^{2}はポリプロピレン中で約0.01mmに相当するが、陽子エネルギーが2.5MeVでは0.1mm、10MeVでは1mm程度になる。したがって、薄いポリプロピレンを用いれば、数100keVから数MeVの範囲において、反跳反応に対する感度が大きくなることが

見込まれる。

以上をまとめると、内面にごく薄いポリプロピレンを張ったBF_3計数管を、厚さ1cmのポリエチレンの減速材で覆うことによって、数MeV程度までは(n, α)反応として感度を持ち、それより高いエネルギーでは反跳反応が感度を持つ、さらに、数MeV程度のエネルギー範囲では両反応が共存する検出器とすることができるということになる。

3.3 計算体系

今回設計した複合型中性子検出器の検出器部分は、球形のBF_3比例計数管である(図2-1参照)。ここでは、ANISNで評価するために完全な球対称になっていると仮定し、モデル化した。計算に使用した検出器モデルを図3-2に示す。

検出器は、外径3inch、厚さ2mmのアルミニウムの球形の筐体で構成されている。これを、内のり半径3.5cm、厚さ0.2cmの球形にモデル化した。BF_3ガスは^{10}Bと^{11}Bの重量比が90:10の組成の^{10}B濃縮ガスを使うものとし、充填圧力700mmHg、温度20℃の状態にあるものとした。また、検出器の内張りに用いるポリプロピレンは密度0.9g/cm^3、厚さ0.08cmとし、検出器を覆う減速材のポリエチレンは密度0.92g/cm^3、厚さ1.0cmとした。各物質の組成を表3-1に示す。

3.4 (n, α)反応の計算

BF_3ガス中の^{10}B(n, α)反応の計算は、ANISNの随伴解を用いて計算した。

エネルギーは、表3-2に示す137群に分割した。これは熱中性子領域について細かく分割したもので、(n, α)反応について精度の高い分割方法である。

3.5 (n,p)反応の計算

ポリプロピレン中での(n,p)反応の計算は、適切な計算コードがなかったため、以下の処理を行った。

まず、ポリプロピレン中の中性子フラックスをANISNを用いて計算した。次に、そのフラックスとポリプロピレンの反応断面積、ポリプロピレン中の陽子の飛程から、BF_3ガス中に達する陽子の数を計算し、その結果をもって(n,p)反応の応答関数とした。なお、ポリプロピレン中の陽子の飛程については、入射中性子エネルギーとの関係を表すグラフ[8]から作成した以下の近似式を用いた。

$R=(2.10\times En^{1.72})/(1000\times\rho)$ (En≧0.7MeV)

$R=(1.90\times En^{1.40})/(1000\times\rho)$ (0.2MeV≦En<0.7MeV)

$R=(0.95\times En^{0.97})/(1000\times\rho)$ (0.09MeV≦En<0.2MeV)

$R=(0.51\times En^{0.71})/(1000\times\rho)$ (0.007MeV≦En<0.09MeV)

$R=(0.97\times En^{0.84})/(1000\times\rho)$ (0.007MeV<En)

ただしR:飛程[mg/cm^2]、En:入射中性子エネルギー[MeV]

ρ:媒質（ポリプロピレン）の密度（=0.9[mg/cm^3]）

また、本検出器中ではBF_3ガスでの(n, p)反応も考えられるため、(n, α)反応と同様にANISNの随伴解を用いて計算した。

3.6 計算結果

以上の計算結果を表3-3、図3-3aに示す。

結果から、BF_3ガスでの(n,p)反応は他の反応に比べて極めて反応率が低く、最大でも他の反応の一桁以上低い反応率であり、無視できることが示された。

また、1MeVから10MeVの範囲で、BF_3ガスでの$^{10}B(n,\alpha)$反応による計数とポリプロピレン中での(n,p)反応による計数が同程度の値を示している。その範囲について抜粋した結果を図3-3bに示す。これらの反応を分離して計数することができれば、複合型検出器として精度良く利用できることが見込まれた。

なお、3.2項で述べたように、計算条件では^{10}Bと^{11}Bの質量比を90：10と設定したが、実際の検出器には天然のBF_3ガスを使っており、その同位体存在比は^{10}Bと^{11}Bで約20：80（質量比で約18：82）である。したがって、$^{10}B(n,\alpha)$反応率の絶対量は計算結果に比べてやや低くなることが予想される。

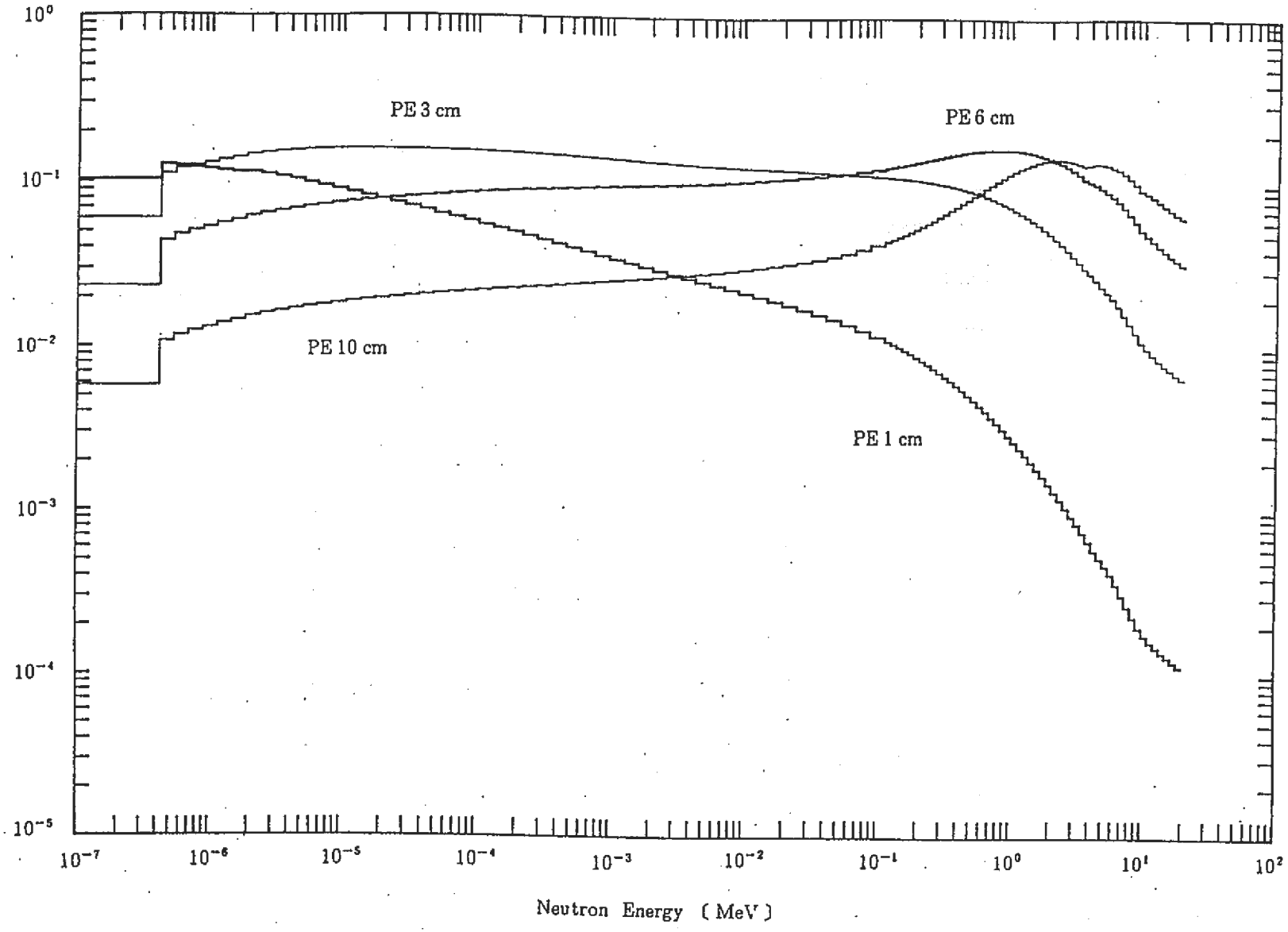


図3-1　中性子スペクトロメータのエネルギー応答計算結果

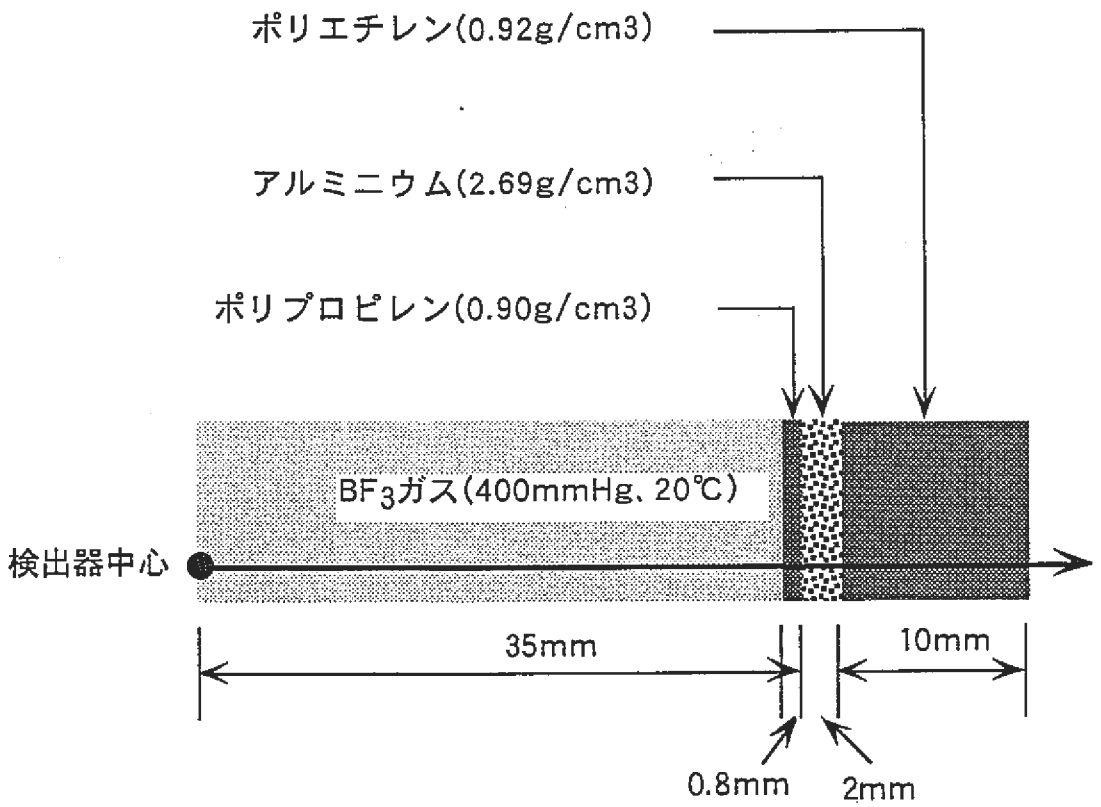


図3-2　複合型検出器についての応答計算体系

表3-1　検出器構成物質組成表

物質名	核種名	原子個数[1/(barn・cm)]	備考
BF_3ガス	^{10}B	2.0942×10^{-5}	700mmHg、20℃ ^{10}B:^{11}B=9:1（質量比）
	^{11}B	2.1163×10^{-6}	
	F	6.9715×10^{-5}	
ポリプロピレン	H	7.7279×10^{-2}	
	C	3.8640×10^{-2}	
アルミニウム	Al	6.0039×10^{-2}	
ポリエチレン	H	7.8996×10^{-2}	
	C	3.9498×10^{-2}	

表3-2　エネルギー応答計算に用いたエネルギー群（その1）

Group	Energy [eV]		Group	Energy [eV]	
	upper	lower		upper	lower
1	1.6487×10^{7}	1.4550×10^{7}	36	2.0754×10^{5}	1.8316×10^{5}
2	1.4550×10^{7}	1.2840×10^{7}	37	1.8316×10^{5}	1.6163×10^{5}
3	1.2840×10^{7}	1.1331×10^{7}	38	1.6163×10^{5}	1.4264×10^{5}
4	1.1331×10^{7}	1.0000×10^{7}	39	1.4264×10^{5}	1.2588×10^{5}
5	1.0000×10^{7}	8.8250×10^{6}	40	1.2588×10^{5}	1.1109×10^{5}
6	8.8250×10^{6}	7.7880×10^{6}	41	1.1109×10^{5}	9.8037×10^{4}
7	7.7880×10^{6}	6.8729×10^{6}	42	9.8037×10^{4}	8.6517×10^{4}
8	6.8729×10^{6}	6.0653×10^{6}	43	8.6517×10^{4}	7.6351×10^{4}
9	6.0653×10^{6}	5.3526×10^{6}	44	7.6351×10^{4}	6.7379×10^{4}
10	5.3526×10^{6}	4.7237×10^{6}	45	6.7379×10^{4}	5.9462×10^{4}
11	4.7237×10^{6}	4.1686×10^{6}	46	5.9462×10^{4}	5.2475×10^{4}
12	4.1686×10^{6}	3.6788×10^{6}	47	5.2475×10^{4}	4.6309×10^{4}
13	3.6788×10^{6}	3.2465×10^{6}	48	4.6309×10^{4}	4.0868×10^{4}
14	3.2465×10^{6}	2.8650×10^{6}	49	4.0868×10^{4}	3.6066×10^{4}
15	2.8650×10^{6}	2.5284×10^{6}	50	3.6066×10^{4}	3.1828×10^{4}
16	2.5284×10^{6}	2.2313×10^{6}	51	3.1828×10^{4}	2.8088×10^{4}
17	2.2313×10^{6}	1.9691×10^{6}	52	2.8088×10^{4}	2.4788×10^{4}
18	1.9691×10^{6}	1.7377×10^{6}	53	2.4788×10^{4}	2.1875×10^{4}
19	1.7377×10^{6}	1.5335×10^{6}	54	2.1875×10^{4}	1.9305×10^{4}
20	1.5335×10^{6}	1.3534×10^{6}	55	1.9305×10^{4}	1.7036×10^{4}
21	1.3534×10^{6}	1.1943×10^{6}	56	1.7036×10^{4}	1.5034×10^{4}
22	1.1943×10^{6}	1.0540×10^{6}	57	1.5034×10^{4}	1.1709×10^{4}
23	1.0540×10^{6}	9.3014×10^{5}	58	1.1709×10^{4}	9.1188×10^{3}
24	9.3014×10^{5}	8.2085×10^{5}	59	9.1188×10^{3}	7.1017×10^{3}
25	8.2085×10^{5}	7.2440×10^{5}	60	7.1017×10^{3}	5.5308×10^{3}
26	7.2440×10^{5}	6.3928×10^{5}	61	5.5308×10^{3}	4.3074×10^{3}
27	6.3928×10^{5}	5.6416×10^{5}	62	4.3074×10^{3}	3.3546×10^{3}
28	5.6416×10^{5}	4.9787×10^{5}	63	3.3546×10^{3}	2.6126×10^{3}
29	4.9787×10^{5}	4.3937×10^{5}	64	2.6126×10^{3}	2.0347×10^{3}
30	4.3937×10^{5}	3.8774×10^{5}	65	2.0347×10^{3}	1.5846×10^{3}
31	3.8774×10^{5}	3.4218×10^{5}	66	1.5846×10^{3}	1.2341×10^{3}
32	3.4218×10^{5}	3.0197×10^{5}	67	1.2341×10^{3}	9.6112×10^{2}
33	3.0197×10^{5}	2.6649×10^{5}	68	9.6112×10^{2}	7.4852×10^{2}
34	2.6649×10^{5}	2.3518×10^{5}	69	7.4852×10^{2}	5.8295×10^{2}
35	2.3518×10^{5}	2.0754×10^{5}	70	5.8295×10^{2}	4.5400×10^{2}

表3-2 エネルギー応答計算に用いたエネルギー群（その2）

Group	Energy [eV]		Group	Energy [eV]	
	upper	lower		upper	lower
71	4.5400×10^{2}	3.5358×10^{2}	106	3.8925×10^{-1}	3.6528×10^{-1}
72	3.5358×10^{2}	2.7536×10^{2}	107	3.6528×10^{-1}	3.4206×10^{-1}
73	2.7536×10^{2}	2.1445×10^{2}	108	3.4206×10^{-1}	3.1961×10^{-1}
74	2.1445×10^{2}	1.6702×10^{2}	109	3.1961×10^{-1}	2.9792×10^{-1}
75	1.6702×10^{2}	1.3007×10^{2}	110	2.9792×10^{-1}	2.7699×10^{-1}
76	1.3007×10^{2}	1.0130×10^{2}	111	2.7699×10^{-1}	2.5683×10^{-1}
77	1.0130×10^{2}	7.8893×10^{1}	112	2.5683×10^{-1}	2.3742×10^{-1}
78	7.8893×10^{1}	6.1442×10^{1}	113	2.3742×10^{-1}	2.1878×10^{-1}
79	6.1442×10^{1}	4.7851×10^{1}	114	2.1878×10^{-1}	2.0090×10^{-1}
80	4.7851×10^{1}	3.7267×10^{1}	115	2.0090×10^{-1}	1.8378×10^{-1}
81	3.7267×10^{1}	2.9023×10^{1}	116	1.8378×10^{-1}	1.6743×10^{-1}
82	2.9023×10^{1}	2.2603×10^{1}	117	1.6743×10^{-1}	1.5183×10^{-1}
83	2.2603×10^{1}	1.7603×10^{1}	118	1.5183×10^{-1}	1.3700×10^{-1}
84	1.7603×10^{1}	1.3710×10^{1}	119	1.3700×10^{-1}	1.2293×10^{-1}
85	1.3710×10^{1}	1.0677×10^{1}	120	1.2293×10^{-1}	1.0962×10^{-1}
86	1.0677×10^{1}	8.3153×10^{0}	121	1.0962×10^{-1}	9.7078×10^{-2}
87	8.3153×10^{0}	6.4760×10^{0}	122	9.7078×10^{-2}	8.5295×10^{-2}
88	6.4760×10^{0}	5.0435×10^{0}	123	8.5295×10^{-2}	7.4274×10^{-2}
89	5.0435×10^{0}	3.9279×10^{0}	124	7.4274×10^{-2}	6.4015×10^{-2}
90	3.9279×10^{0}	3.0590×10^{0}	125	6.4015×10^{-2}	5.4518×10^{-2}
91	3.0590×10^{0}	2.3824×10^{0}	126	5.4518×10^{-2}	4.5783×10^{-2}
92	2.3824×10^{0}	1.8554×10^{0}	127	4.5783×10^{-2}	3.7811×10^{-2}
93	1.8554×10^{0}	1.6374×10^{0}	128	3.7811×10^{-2}	3.0600×10^{-2}
94	1.6374×10^{0}	1.4450×10^{0}	129	3.0600×10^{-2}	2.4152×10^{-2}
95	1.4450×10^{0}	1.2752×10^{0}	130	2.4152×10^{-2}	1.8465×10^{-2}
96	1.2752×10^{0}	1.1254×10^{0}	131	1.8465×10^{-2}	1.3541×10^{-2}
97	1.1254×10^{0}	9.9312×10^{-1}	132	1.3541×10^{-2}	9.3792×10^{-3}
98	9.9312×10^{-1}	8.7642×10^{-1}	133	9.3792×10^{-3}	5.9793×10^{-3}
99	8.7642×10^{-1}	7.7344×10^{-1}	134	5.9793×10^{-3}	3.3414×10^{-3}
100	7.7344×10^{-1}	6.8256×10^{-1}	135	3.3414×10^{-3}	1.4657×10^{-3}
101	6.8256×10^{-1}	6.0236×10^{-1}	136	1.4657×10^{-3}	3.5209×10^{-4}
102	6.0236×10^{-1}	5.3158×10^{-1}	137	3.5209×10^{-4}	3.3066×10^{-5}
103	5.3158×10^{-1}	4.6912×10^{-1}			
104	4.6912×10^{-1}	4.1399×10^{-1}			
105	4.1399×10^{-1}	3.8925×10^{-1}			

表3-3 複合型検出器のエネルギー応答計算結果(その1)

Group	Energy [eV]		Response[cps]		
	upper	lower	$^{10}B(n-\alpha)$	$^{10}B(n-p)$	Recoil-proton
1	1.6487×10^{7}	1.4550×10^{7}	1.3022×10^{-2}	4.2304×10^{-4}	1.3168×10^{-1}
2	1.4550×10^{7}	1.2840×10^{7}	1.3260×10^{-2}	4.3116×10^{-4}	
3	1.2840×10^{7}	1.1331×10^{7}	1.4371×10^{-2}	4.5518×10^{-4}	
4	1.1331×10^{7}	1.0000×10^{7}	1.6010×10^{-2}	5.0663×10^{-4}	1.1357×10^{-1}
5	1.0000×10^{6}	8.8250×10^{6}	1.7895×10^{-2}	5.6715×10^{-4}	
6	8.8250×10^{6}	7.7880×10^{6}	2.1353×10^{-2}	5.2693×10^{-4}	
7	7.7880×10^{6}	6.8729×10^{6}	2.5308×10^{-2}	4.7549×10^{-4}	
8	6.8729×10^{6}	6.0653×10^{6}	3.0223×10^{-2}	3.6789×10^{-4}	
9	6.0653×10^{6}	5.3526×10^{6}	3.5796×10^{-2}	1.9497×10^{-4}	
10	5.3526×10^{6}	4.7237×10^{6}	4.0474×10^{-2}	1.1346×10^{-4}	5.6919×10^{-2}
11	4.7237×10^{6}	4.1686×10^{6}	4.5435×10^{-2}	7.1268×10^{-5}	
12	4.1686×10^{6}	3.6788×10^{6}	5.2624×10^{-2}	4.9030×10^{-5}	
13	3.6788×10^{6}	3.2465×10^{6}	6.0988×10^{-2}	4.1797×10^{-5}	
14	3.2465×10^{6}	2.8650×10^{6}	7.0374×10^{-2}	3.9236×10^{-5}	3.1726×10^{-2}
15	2.8650×10^{6}	2.5284×10^{6}	8.0685×10^{-2}	3.5405×10^{-5}	
16	2.5284×10^{6}	2.2313×10^{6}	9.2484×10^{-2}	3.1287×10^{-5}	
17	2.2313×10^{6}	1.9691×10^{6}	1.0586×10^{-1}	2.7059×10^{-5}	2.0280×10^{-2}
18	1.9691×10^{6}	1.7377×10^{6}	1.2109×10^{-1}	2.3100×10^{-5}	
19	1.7377×10^{6}	1.5335×10^{6}	1.3739×10^{-1}	1.8323×10^{-5}	
20	1.5335×10^{6}	1.3534×10^{6}	1.5531×10^{-1}	1.2587×10^{-5}	
21	1.3534×10^{6}	1.1943×10^{6}	1.7511×10^{-1}	7.0027×10^{-6}	
22	1.1943×10^{6}	1.0540×10^{6}	1.9645×10^{-1}	3.9473×10^{-6}	
23	1.0540×10^{6}	9.3014×10^{5}	2.1924×10^{-1}	3.2434×10^{-6}	8.2644×10^{-3}
24	9.3014×10^{5}	8.2085×10^{5}	2.4470×10^{-1}	1.3868×10^{-6}	
25	8.2085×10^{5}	7.2440×10^{5}	2.7199×10^{-1}	8.4440×10^{-7}	
26	7.2440×10^{5}	6.3928×10^{5}	3.0114×10^{-1}	5.7351×10^{-7}	
27	6.3928×10^{5}	5.6416×10^{5}	3.3210×10^{-1}	3.7469×10^{-7}	
28	5.6416×10^{5}	4.9787×10^{5}	3.6478×10^{-1}	2.7854×10^{-7}	4.3794×10^{-3}
29	4.9787×10^{5}	4.3937×10^{5}	3.9894×10^{-1}	2.1194×10^{-7}	
30	4.3937×10^{5}	3.8774×10^{5}	4.3432×10^{-1}	1.6194×10^{-7}	
31	3.8774×10^{5}	3.4218×10^{5}	4.7083×10^{-1}	1.3956×10^{-7}	
32	3.4218×10^{5}	3.0197×10^{5}	5.0903×10^{-1}	1.2789×10^{-7}	
33	3.0197×10^{5}	2.6649×10^{5}	5.4741×10^{-1}	1.1981×10^{-7}	
34	2.6649×10^{5}	2.3518×10^{5}	5.8656×10^{-1}	1.1446×10^{-7}	
35	2.3518×10^{5}	2.0754×10^{5}	6.2687×10^{-1}	1.1145×10^{-7}	

表3-3 複合型検出器のエネルギー応答計算結果(その2)

Group	Energy [eV]		Response[cps]		
	upper	lower	$^{10}B(n-\alpha)$	$^{10}B(n-p)$	Recoil-proton
36	2.0754×10^{5}	1.8316×10^{5}	6.6670×10^{-1}	1.1153×10^{-7}	
37	1.8316×10^{5}	1.6163×10^{5}	7.0726×10^{-1}	1.1490×10^{-7}	
38	1.6163×10^{5}	1.4264×10^{5}	7.4876×10^{-1}	1.1886×10^{-7}	
39	1.4264×10^{5}	1.2588×10^{5}	7.8668×10^{-1}	1.2308×10^{-7}	
40	1.2588×10^{5}	$1.1109E\times10^{5}$	8.2676×10^{-1}	1.2769×10^{-7}	
41	1.1109×10^{5}	9.8037×10^{4}	8.6655×10^{-1}	1.3256×10^{-7}	1.2018×10^{-3}
42	9.8037×10^{4}	8.6517×10^{4}	9.0759×10^{-1}	1.3794×10^{-7}	
43	8.6517×10^{4}	7.6351×10^{4}	9.4533×10^{-1}	1.4316×10^{-7}	
44	7.6351×10^{4}	6.7379×10^{4}	9.8308×10^{-1}	1.4845×10^{-7}	
45	6.7379×10^{4}	5.9462×10^{4}	1.0217×10^{0}	1.5388×10^{-7}	
46	5.9462×10^{4}	5.2475×10^{4}	1.0603×10^{0}	1.5937×10^{-7}	
47	5.2475×10^{4}	4.6309×10^{4}	1.0988×10^{0}	1.6493×10^{-7}	
48	4.6309×10^{4}	4.0868×10^{4}	1.1374×10^{0}	1.7058×10^{-7}	
49	4.0868×10^{4}	3.6066×10^{4}	1.1767×10^{0}	1.7633×10^{-7}	
50	3.6066×10^{4}	3.1828×10^{4}	1.2151×10^{0}	1.8194×10^{-7}	
51	3.1828×10^{4}	2.8088×10^{4}	1.2511×10^{0}	1.8725×10^{-7}	
52	2.8088×10^{4}	2.4788×10^{4}	1.2897×10^{0}	1.9290×10^{-7}	
53	2.4788×10^{4}	2.1875×10^{4}	1.3287×10^{0}	1.9861×10^{-7}	
54	2.1875×10^{4}	1.9305×10^{4}	1.3681×10^{0}	2.0438×10^{-7}	
55	1.9305×10^{4}	1.7036×10^{4}	1.4081×10^{0}	2.1023×10^{-7}	
56	1.7036×10^{4}	1.5034×10^{4}	1.4484×10^{0}	2.1612×10^{-7}	
57	1.5034×10^{4}	1.1709×10^{4}	1.5083×10^{0}	2.2490×10^{-7}	
58	1.1709×10^{4}	9.1188×10^{3}	1.5923×10^{0}	2.3719×10^{-7}	2.1715×10^{-4}
59	9.1188×10^{3}	7.1017×10^{3}	1.6790×10^{0}	2.4988×10^{-7}	
60	7.1017×10^{3}	5.5308×10^{3}	1.7689×10^{0}	2.6304×10^{-7}	
61	5.5308×10^{3}	4.3074×10^{3}	1.8624×10^{0}	2.7673×10^{-7}	
62	4.3074×10^{3}	3.3546×10^{3}	1.9597×10^{0}	2.9098×10^{-7}	
63	3.3546×10^{3}	2.6126×10^{3}	2.0613×10^{0}	3.0587×10^{-7}	
64	2.6126×10^{3}	2.0347×10^{3}	2.1637×10^{0}	3.2142×10^{-7}	
65	2.0347×10^{3}	1.5846×10^{3}	2.2783×10^{0}	3.3770×10^{-7}	
66	1.5846×10^{3}	1.2341×10^{3}	2.3942×10^{0}	3.5473×10^{-7}	
67	1.2341×10^{3}	9.6112×10^{2}	2.5156×10^{0}	3.7260×10^{-7}	3.4457×10^{-5}
68	9.6112×10^{2}	7.4852×10^{2}	2.6425×10^{0}	3.9134×10^{-7}	
69	7.4852×10^{2}	5.8295×10^{2}	2.7752×10^{0}	4.1098×10^{-7}	
70	5.8295×10^{2}	4.5400×10^{2}	2.9141×10^{0}	4.3154×10^{-7}	

表3-3 複合型検出器のエネルギー応答計算結果(その3)

Group	Energy [eV]		Response[cps]		
	upper	lower	$^{10}B(n-\alpha)$	$^{10}B(n-p)$	Recoil-proton
71	4.5400×10^{2}	3.5358×10^{2}	3.0596×10^{0}	4.5306×10^{-7}	
72	3.5358×10^{2}	2.7536×10^{2}	3.2116×10^{0}	4.7556×10^{-7}	
73	2.7536×10^{2}	2.1445×10^{2}	3.3706×10^{0}	4.9908×10^{-7}	
74	2.1445×10^{2}	1.6702×10^{2}	3.5366×10^{0}	5.2363×10^{-7}	
75	1.6702×10^{2}	1.3007×10^{2}	3.7098×10^{0}	5.4926×10^{-7}	
76	1.3007×10^{2}	1.0130×10^{2}	3.8902×10^{0}	5.7595×10^{-7}	
77	1.0130×10^{2}	7.8893×10^{1}	4.0782×10^{0}	6.0374×10^{-7}	
78	7.8893×10^{1}	6.1442×10^{1}	4.2735×10^{0}	6.3265×10^{-7}	
79	6.1442×10^{1}	4.7851×10^{1}	4.4763×10^{0}	6.6267×10^{-7}	
80	4.7851×10^{1}	3.7267×10^{1}	4.6867×10^{0}	6.9381×10^{-7}	
81	3.7267×10^{1}	2.9023×10^{1}	4.9045×10^{0}	7.2603×10^{-7}	
82	2.9023×10^{1}	2.2603×10^{1}	5.1291×10^{0}	7.5930×10^{-7}	
83	2.2603×10^{1}	1.7603×10^{1}	5.3606×10^{0}	7.9351×10^{-7}	
84	1.7603×10^{1}	1.3710×10^{1}	5.5979×10^{0}	8.2866×10^{-7}	
85	1.3710×10^{1}	1.0677×10^{1}	5.8402×10^{0}	8.6457×10^{-7}	
86	1.0677×10^{1}	8.3153×10^{0}	6.0866×10^{0}	9.0110×10^{-7}	
87	8.3153×10^{0}	6.4760×10^{0}	6.3353×10^{0}	9.3800×10^{-7}	
88	6.4760×10^{0}	5.0435×10^{0}	6.5844×10^{0}	9.7500×10^{-7}	
89	5.0435×10^{0}	3.9279×10^{0}	6.8312×10^{0}	1.0117×10^{-6}	
90	3.9279×10^{0}	3.0590×10^{0}	7.0728×10^{0}	1.0477×10^{-6}	
91	3.0590×10^{0}	2.3824×10^{0}	7.3029×10^{0}	1.0822×10^{-6}	
92	2.3824×10^{0}	1.8554×10^{0}	7.4679×10^{0}	1.1140×10^{-6}	
93	1.8554×10^{0}	1.6374×10^{0}	7.4314×10^{0}	1.0956×10^{-6}	
94	1.6374×10^{0}	1.4450×10^{0}	7.5297×10^{0}	1.1099×10^{-6}	
95	1.4450×10^{0}	1.2752×10^{0}	7.6235×10^{0}	1.1236×10^{-6}	
96	1.2752×10^{0}	1.1254×10^{0}	7.7062×10^{0}	1.1360×10^{-6}	
97	1.1254×10^{0}	9.9312×10^{-1}	7.7820×10^{0}	1.1472×10^{-6}	
98	9.9312×10^{-1}	8.7642×10^{-1}	7.8482×10^{0}	1.1570×10^{-6}	
99	8.7642×10^{-1}	7.7344×10^{-1}	7.9029×10^{0}	1.1650×10^{-6}	
100	7.7344×10^{-1}	6.8256×10^{-1}	7.9475×10^{0}	1.1716×10^{-6}	
101	6.8256×10^{-1}	6.0236×10^{-1}	7.9879×10^{0}	1.1775×10^{-6}	
102	6.0236×10^{-1}	5.3158×10^{-1}	8.0203×10^{0}	1.1823×10^{-6}	
103	5.3158×10^{-1}	4.6912×10^{-1}	8.0452×10^{0}	1.1859×10^{-6}	
104	4.6912×10^{-1}	4.1399×10^{-1}	8.0597×10^{0}	1.1881×10^{-6}	
105	4.1399×10^{-1}	3.8925×10^{-1}	8.0628×10^{0}	1.1885×10^{-6}	

表3-3 複合型検出器のエネルギー応答計算結果(その4)

Group	Energy [eV]		Response[cps]		
	upper	lower	$^{10}B(n-\alpha)$	$^{10}B(n-p)$	Recoil-proton
106	3.8925×10^{-1}	3.6528×10^{-1}	8.0619×10^{0}	1.1884×10^{-6}	
107	3.6528×10^{-1}	3.4206×10^{-1}	8.0566×10^{0}	1.1875×10^{-6}	
108	3.4206×10^{-1}	3.1961×10^{-1}	8.0472×10^{0}	1.1861×10^{-6}	
109	3.1961×10^{-1}	2.9792×10^{-1}	8.0290×10^{0}	1.1835×10^{-6}	
110	2.9792×10^{-1}	2.7699×10^{-1}	8.0120×10^{0}	1.1810×10^{-6}	
111	2.7699×10^{-1}	2.5683×10^{-1}	7.9915×10^{0}	1.1780×10^{-6}	
112	2.5683×10^{-1}	2.3742×10^{-1}	7.9657×10^{0}	1.1742×10^{-6}	
113	2.3742×10^{-1}	2.1878×10^{-1}	7.9320×10^{0}	1.1692×10^{-6}	
114	2.1878×10^{-1}	2.0090×10^{-1}	7.8949×10^{0}	1.1638×10^{-6}	
115	2.0090×10^{-1}	1.8378×10^{-1}	7.8545×10^{0}	1.1577×10^{-6}	
116	1.8378×10^{-1}	1.6743×10^{-1}	7.7966×10^{0}	1.1491×10^{-6}	
117	1.6743×10^{-1}	1.5183×10^{-1}	7.7224×10^{0}	1.1383×10^{-6}	
118	1.5183×10^{-1}	1.3700×10^{-1}	7.6521×10^{0}	1.1278×10^{-6}	
119	1.3700×10^{-1}	1.2293×10^{-1}	7.5852×10^{0}	1.1179×10^{-6}	
120	1.2293×10^{-1}	1.0962×10^{-1}	7.4938×10^{0}	1.1045×10^{-6}	
121	1.0962×10^{-1}	9.7078×10^{-2}	7.3593×10^{0}	1.0846×10^{-6}	
122	9.7078×10^{-2}	8.5295×10^{-2}	7.2102×10^{0}	1.0626×10^{-6}	
123	8.5295×10^{-2}	7.4274×10^{-2}	7.0958×10^{0}	1.0458×10^{-6}	
124	7.4274×10^{-2}	6.4015×10^{-2}	7.0313×10^{0}	1.0363×10^{-6}	
125	6.4015×10^{-2}	5.4518×10^{-2}	6.9566×10^{0}	1.0253×10^{-6}	
126	5.4518×10^{-2}	4.5783×10^{-2}	6.7589×10^{0}	9.9618×10^{-7}	
127	4.5783×10^{-2}	3.7811×10^{-2}	6.4159×10^{0}	9.4561×10^{-7}	
128	3.7811×10^{-2}	3.0600×10^{-2}	5.9903×10^{0}	8.8280×10^{-7}	
129	3.0600×10^{-2}	2.4152×10^{-2}	5.5517×10^{0}	8.1819×10^{-7}	
130	2.4152×10^{-2}	1.8465×10^{-2}	5.1357×10^{0}	7.5707×10^{-7}	
131	1.8465×10^{-2}	1.3541×10^{-2}	4.7583×10^{0}	7.0115×10^{-7}	
132	1.3541×10^{-2}	9.3792×10^{-3}	4.4141×10^{0}	6.5038×10^{-7}	
133	9.3792×10^{-3}	5.9793×10^{-3}	4.0958×10^{0}	6.0344×10^{-7}	
134	5.9793×10^{-3}	3.3414×10^{-3}	3.7829×10^{0}	5.5731×10^{-7}	
135	3.3414×10^{-3}	1.4657×10^{-3}	3.4409×10^{0}	5.0690×10^{-7}	
136	1.4657×10^{-3}	3.5209×10^{-4}	3.0246×10^{0}	4.4555×10^{-7}	
137	3.5209×10^{-4}	3.3066×10^{-5}	2.4741×10^{0}	3.6444×10^{-7}	

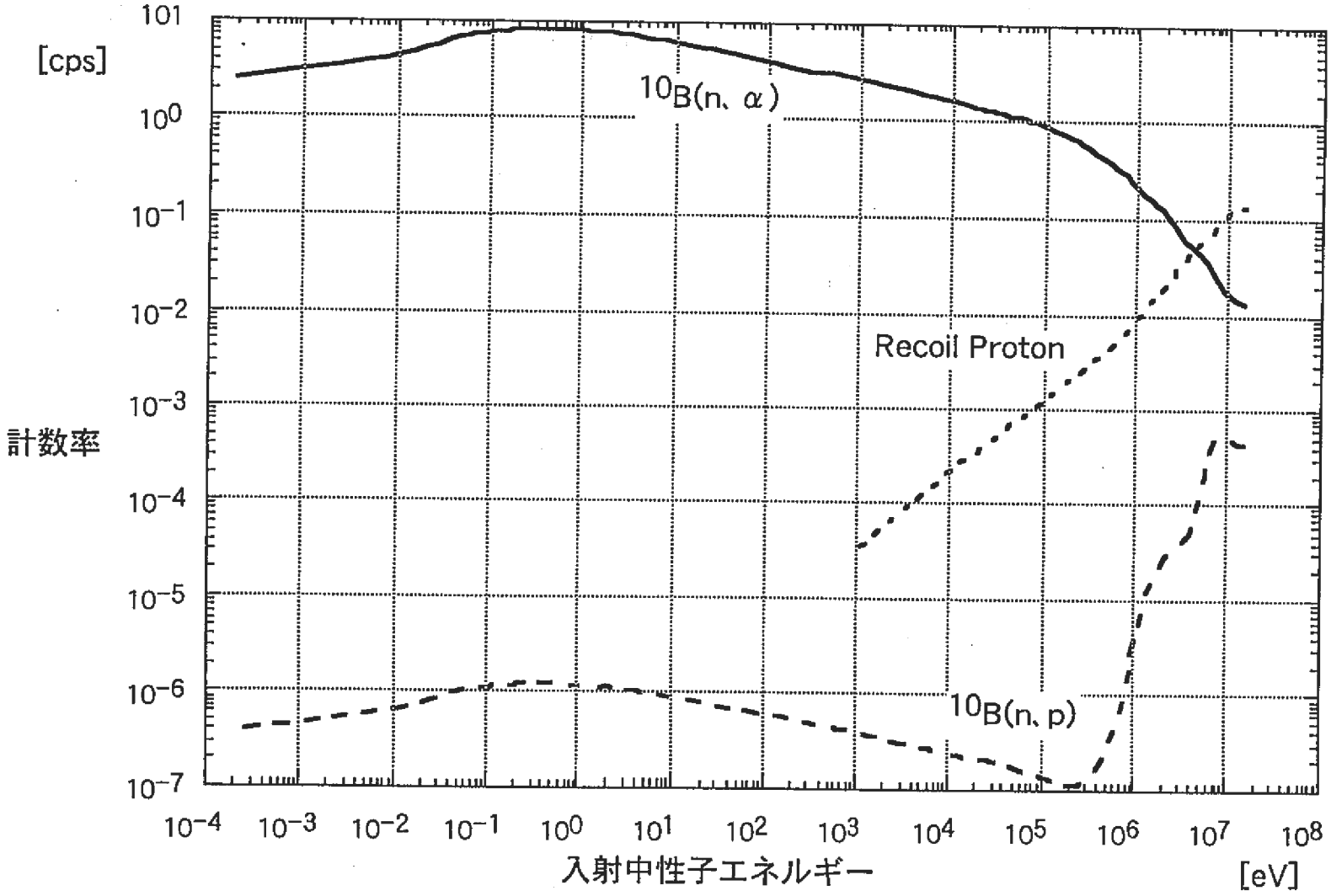


図3-3a　エネルギー応答計算結果

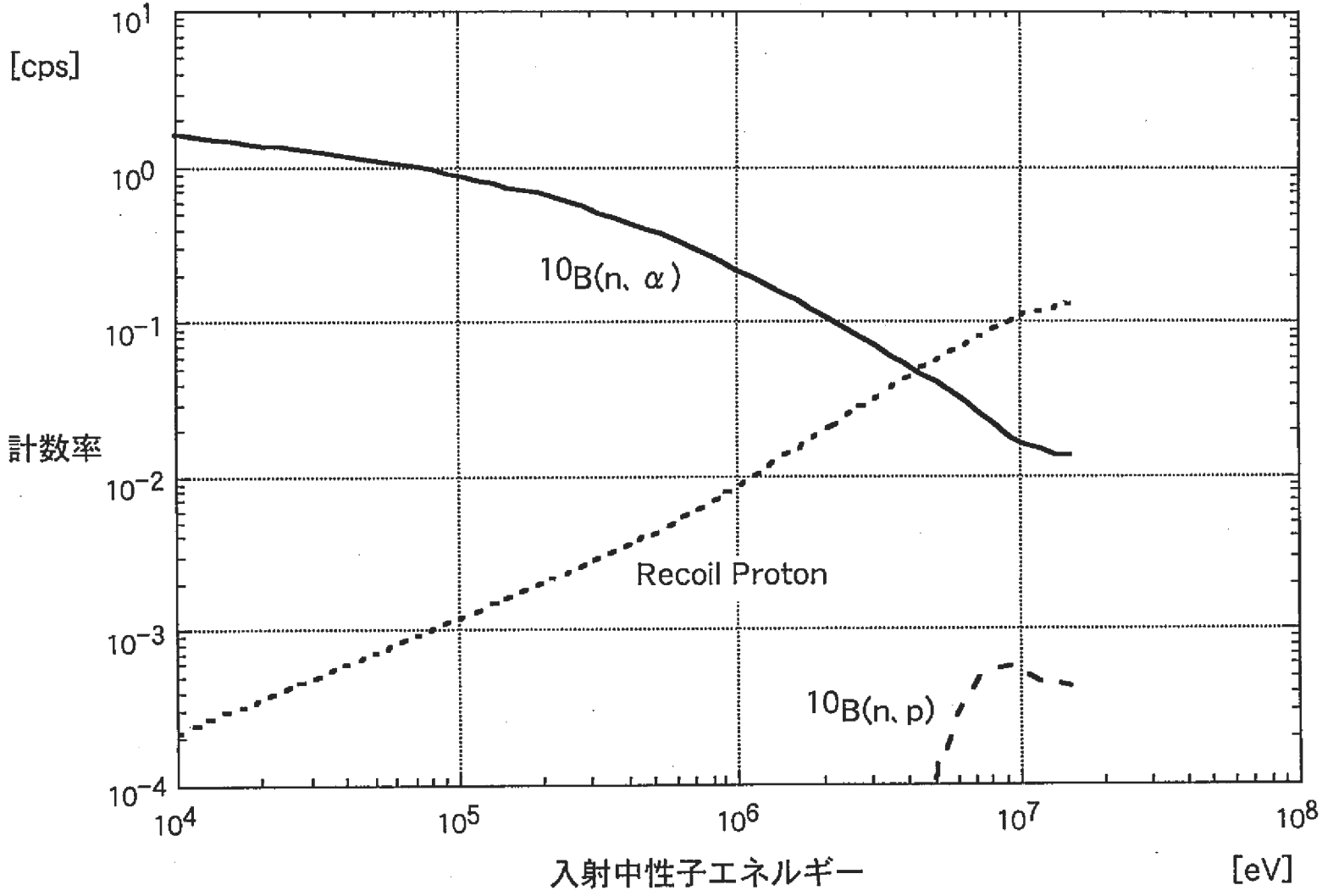


図3-3b　エネルギー応答計算結果抜粋

4.エネルギー特性試験

4.1 試験概要

前節の計算結果に基づき複合型中性子検出器を製作した。写真1に検出器本体を、写真2には減速材をはずした検出部を示す。製作したものの構造は図2-1に示したものと同じである。充填ガスには40cmHgの天然組成BF_3ガスを用いた。検出回路を図4-1に示す。

この試作器について、まずエネルギー特性試験を行った。試験の目的は、この検出器の$^{10}B(n,\alpha)$反応と弾性散乱による反跳陽子生成のそれぞれの応答特性を知ること、及び中性子場の違いに応じて検出器出力に何らかの差が現われるかどうか確認することである。試験には、RI中性子線源及び加速器による単色中性子を用いた。以下に、それらの試験の概要について示す。

4.2 反応の弁別

最初に、全ての試験について共通である$^{10}B(n,\alpha)$反応のα線による計数と弾性散乱による反跳陽子の計数との弁別について述べる。エネルギー応答特性は図3-3に示したようになるが、それによる出力波高分布は以下のように予想される。

理想的な、弾性散乱による反跳陽子のエネルギースペクトルは、入射中性子のエネルギーを最大値とする長方形のスペクトルを形成する。しかし、今回開発した検出器の場合には、2.4項で示したような理由により出力スペクトルは歪むことが予想される。実際に中性子源で照射した結果は、次項以後の試験結果に示したが、歪みを与える効果の影響が大きく、理想的な出力とは大きくかけ離れた結果を示している。すなわち、(n,α)反応の全エネルギーピークは完全に消え、また反跳陽子のスペクトルも肩が消えて、全体になめらかなスペクトルを形成している。

本検出器を複合型検出器として扱うためには、２種類の反応を弁別し、エネルギー応答特性の異なる２種類の検出器から得られたデータのように扱う必要がある。そのために、この検出器の出力スペクトルを、図4-2のように、構成要素の異なるいくつかの領域に分割する。まず検出器出力の性質を端的に表すために、(n,α)反応による計数と反跳陽子による計数の混在する領域（図4-2におけるA領域）と、(n,α)反応による計数のみの領域（図4-2におけるB領域）に分割する。この分割の方法は、２種類の反応を完全に分離したものではないことに注意するべきである。(n,α)反応による計数と反跳陽子による計数を求めるには、B領域の計数値から(n,α)反応のA領域における計数及び全計数を推定し、A領域の計数値から(n,α)反応による計数値を減算して反跳陽子による計数を算出する方法を採る。図4-2におけるC領域が反跳陽子による計数、D領域が(n,α)反応による計数に該当する。多検出器法の理論は、A領域とB領域の計数について適用することも可能ではあるが、C領域とD領域について適用するとエネルギー応答計算の結果と比較ができる。したがって、次章で述べる、線量特性についての多検出器法の適用はC領域とD領域の計数について行った。

A領域とB領域の分点は以下の方法で決定した。検出器を囲っている厚さ1cmのポリ

エチレン減速材を外し、高速中性子が直接検出器に入射するようにする。すると、入射中性子における熱中性子成分の寄与が減るので、検出器出力は反跳陽子による計数が支配的になってくる。この時に得られる出力スペクトル（図4-3参照）から、反跳陽子による計数の上限チャネルを選び、A領域の上限とする。また、B領域はそれより上の領域とする。こうすることによって、B領域には反跳陽子による計数が入らず、(n,α)反応だけの領域と見なすことができる。なお、B領域の上限は(n,α)反応の上限で、常に一定に定めることができる。また、A領域の下限については、(n,γ)反応による、あるいはバックグラウンドのγ線の影響を避けるため、適切な値に定めておくべきである。

エネルギー特性試験では、B領域の計数に対するA領域の計数の比で評価することにする。この比を、スペクトル指標と呼ぶことにする。

スペクトル指標=A領域の計数／B領域の計数

また、B領域における計数と(n,α)反応による全計数の比は、純熱中性子源による照射で得られるスペクトル（図4-4参照）から求めた。純熱中性子源としては、電総研黒鉛パイル内の中心から90cmの試験孔内を用いた。

4.3 RIによる特性試験

複合型検出器の能力を確認し、またRI中性子場における本検出器の特性を知るために、RI中性子線源による特性試験を行った。

試験に用いた線源の一覧を表4-1に示す。表中、線源種類に(1)、(2)とあるのは、同種類の線源について異なる条件下で試験を行ったことを示す。^{241}Am-Be、^{239}Pu-Be、^{238}Pu-Beについては線源－検出器間の距離を50cm、^{252}Cfについては線源－検出器間の距離を20cmで統一した。なお、それぞれの線源での特性試験の実施に先だって、前項で述べたように、反跳陽子に対する応答特性を調べて、領域の分点を定めている。出力スペクトルの例を図4-5から図4-9に、また、^{241}Am-Be、^{239}Pu-Be、^{252}Cfについての比較試験の結果を表4-2に示す。

表4-2から、線源核種によってスペクトル指標が明らかに異なっていることがわかる。^{252}Cfと^{241}Am-Beにおける差もさることながら、^{241}Am-Beと^{239}Pu-Beの差がはっきりと表れている。中性子の平均エネルギーとスペクトル指標の関係を図4-10に示す。

従来は^{241}Am-Beと^{239}Pu-Beの中性子スペクトルの間に明快な区別は与えられていなかった。しかしながら、^{241}Amのα線のエネルギーが5.486MeV(86%)、5.443MeV(12.7%)であるのに対し、^{239}Puのそれは5.155MeV(73.3%)、5.143MeV(15.1%)、5.105MeV(11.5%)なので[9]、Beとの核反応後に得られる中性子のスペクトルの平均エネルギーも異なることは予測されていた[6),10)]。しかし、既存の中性子測定手法では、数MeV程度のエネルギー領域での高々300keVの平均エネルギーの差を明確に示すことはできず、したがって^{241}Am-Beと^{239}Pu-Beの中性子スペクトルに見られるであろう平均エネルギーの差が観察されるには至らなかった。ところが、今回の複合型検出器による結果からは、^{241}Am-Beと^{239}Pu-Beの中性子スペクトルの差がスペクトル指標の差という形で明確に表れた。

この要因としては、今回開発した検出器のエネルギー特性が数MeV近傍のエネルギー

領域で大きく変化することにある。エネルギー応答特性の項で示したように、数MeVのエネルギー領域において、中性子のエネルギーが高くなるにしたがって(n, α)反応による計数は急激に減少し、反跳陽子による計数は急激に増加する。しかも、スペクトル指標はこれらの計数の比であるため、それぞれの反応単独の計数値以上にエネルギーの変化に敏感に反応する。そのため、^{241}Am-Beと^{239}Pu-Beの中性子の平均エネルギーの差を表現することができたものと思われる。

4.4 加速器による特性試験

RIによる特性試験の結果から、検出器出力のスペクトル指標は場の平均エネルギーに極めて敏感であることが示された。そこで、加速器から得られる単一エネルギーの中性子を用いて、中性子のエネルギーの変化に対してスペクトル指標が変動することを確認し、それがどう変わるのかについて試験を行った。

試験は、工業技術院電子技術総合研究所のコッククロフトーウォルトン加速器、及び東北大学のダイナミトロン加速器を用いて行った。試験条件を表4-3に、試験方法を図4-11に示す。図4-12から図4-15に約3.0MeVの中性子に対して散乱角を振ったときの検出器出力を、また1.5MeV程度、3.0MeV程度、5.0MeV程度の中性子に対する試験結果を表4-4から表4-6及び図4-11から図4-13に示す。

試験結果から、3.0MeV及び5.0MeV程度の中性子のエネルギーの変動に対してスペクトル指標が敏感に変化していることが分かる。数10MeV程度の中性子エネルギーの変動に対して、明確にスペクトル指標の差が表れている。しかし、1.5MeV程度の中性子に対しては、スペクトル指標の差は明確にはならなかった。

4.5 エネルギー特性試験結果について

RIによる特性試験、加速器の中性子による特性試験の結果から、今回開発した複合型検出器は、数MeV程度のエネルギー領域の中性子のわずかのエネルギー変動に極めて敏感であることが分かった。

従来、このエネルギー領域の中性子のエネルギー測定には、反跳陽子のスペクトルを測定し、その微分量からスペクトルを推定するか、あるいはいくつかの減速型検出器の出力からアンフォールディング法によってスペクトルを決めていた。しかし、これらの方法では数MeV程度の中性子に対して高い感度は期待できない。

その一方、複合型検出器を用いると、このエネルギー領域でのエネルギー分解能が高く、精度よく中性子エネルギー、中性子場の平均エネルギーを求められることが期待できる。また、この特性は線量当量率計以外にも応用することが期待できる。

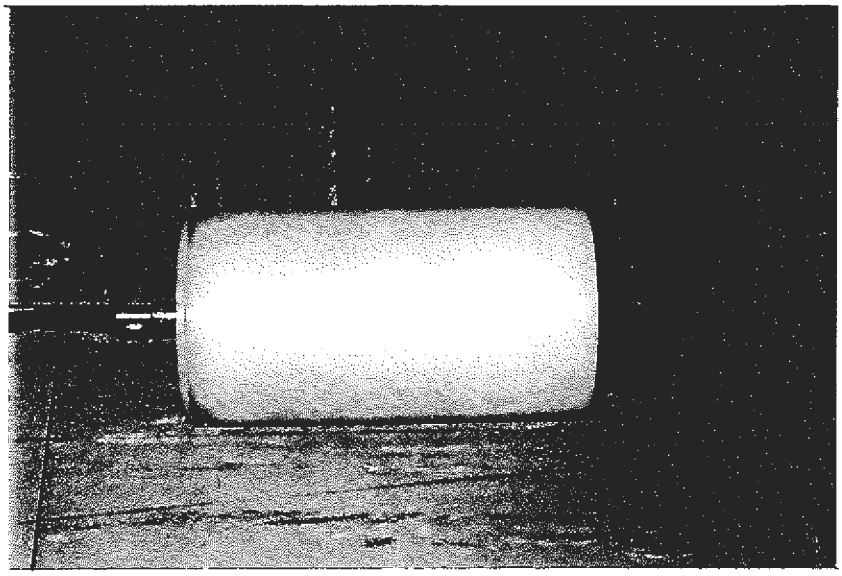


写真1.複合型検出器外観

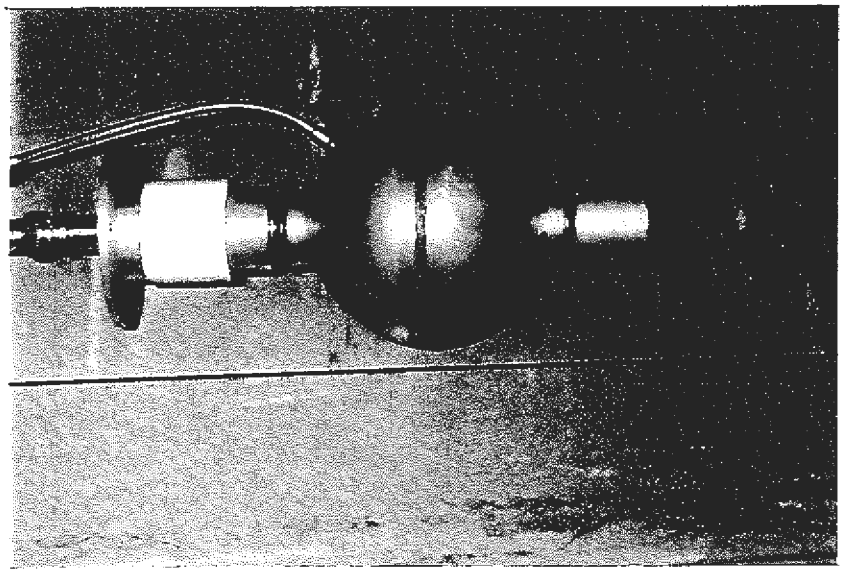


写真2.複合型検出器検出部

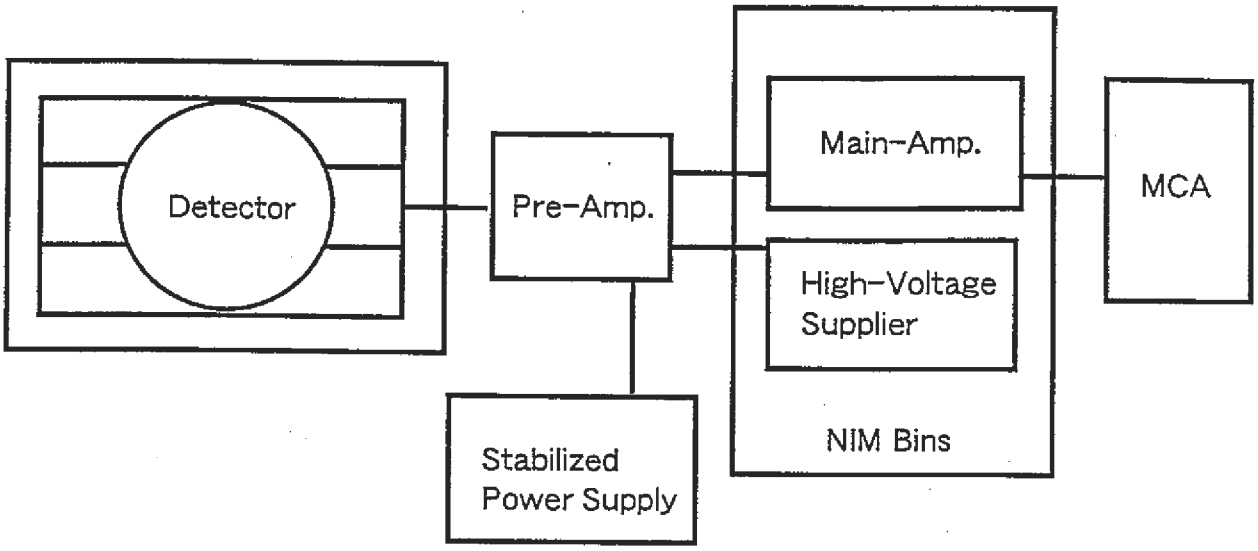


図4-1　複合型検出器の検出回路

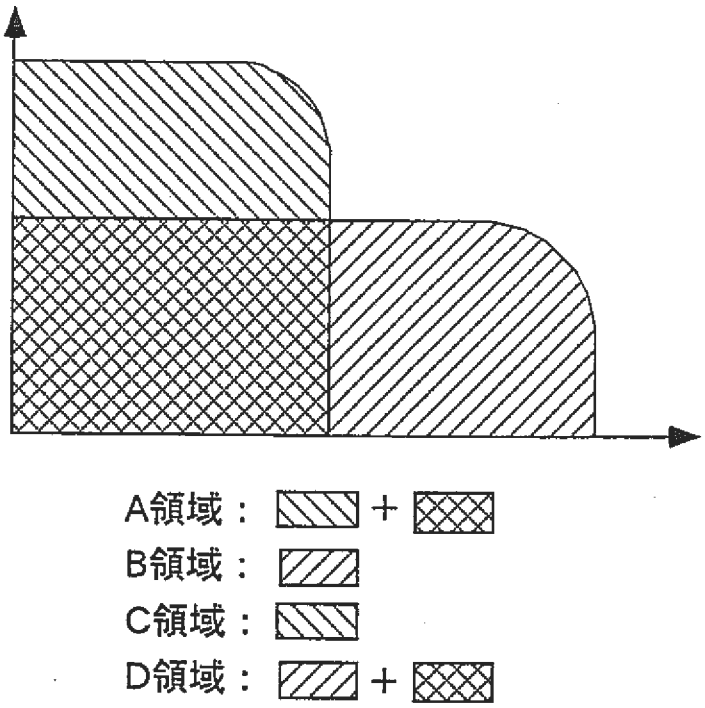


図4-2複合型検出器の出力処理

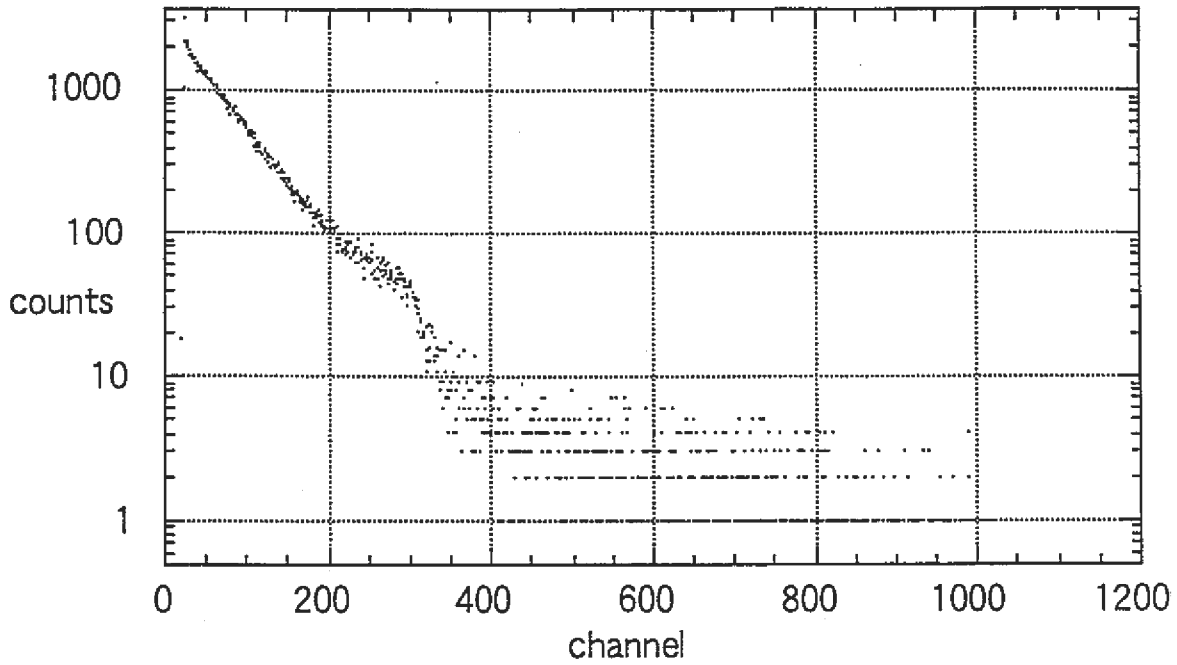


図4-3　反跳陽子のスペクトル
(^{238}Pu-Beによる照射結果)

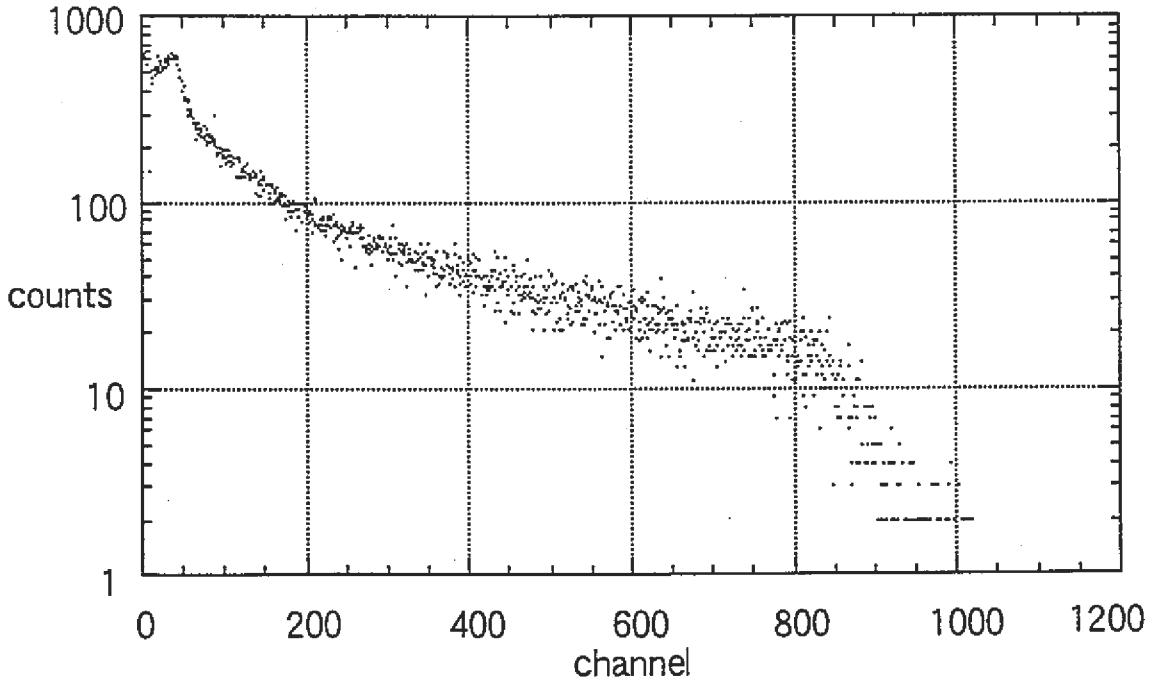


図4-4　純熱中性子場スペクトル

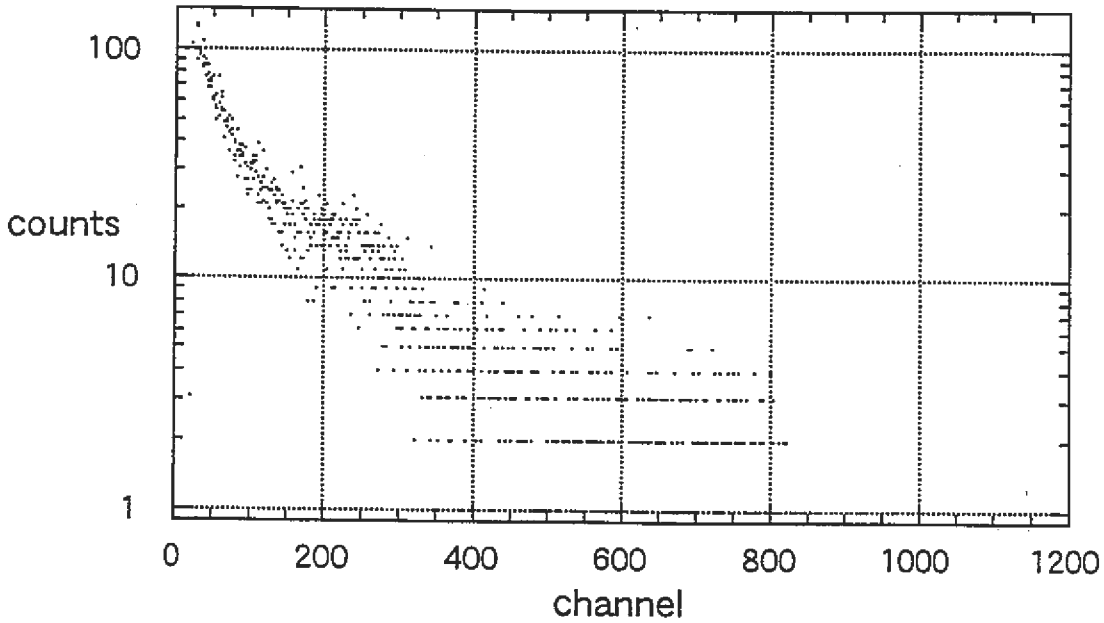


図4-5 RIによる検出器出力(^{241}Am-Be(1))

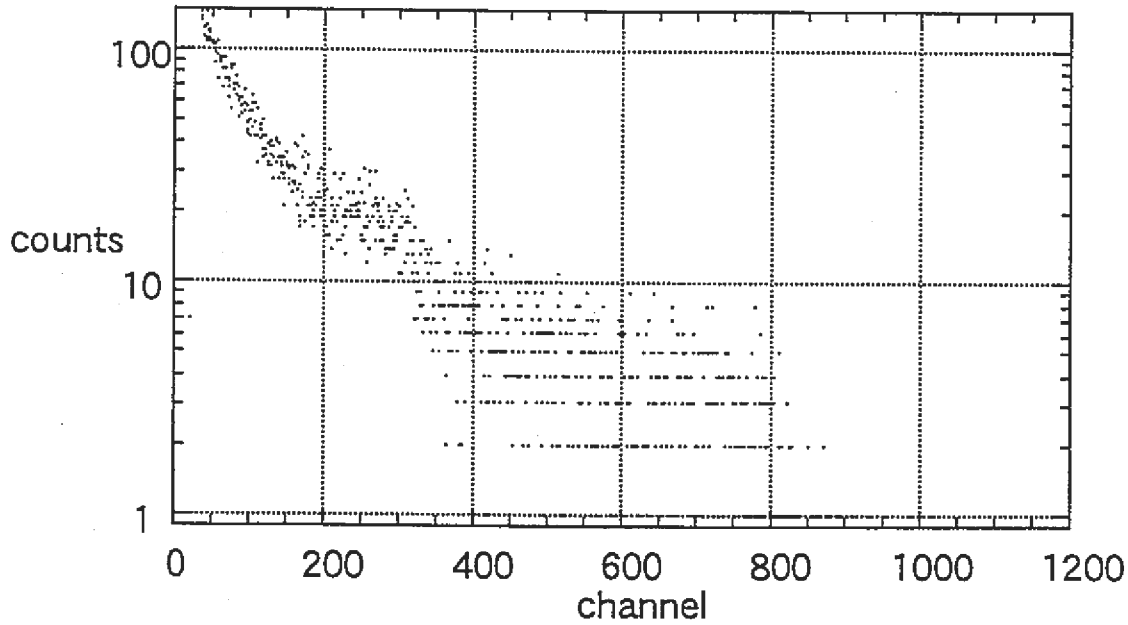


図4-6 RIによる検出器出力 (^{241}Am-Be(2))

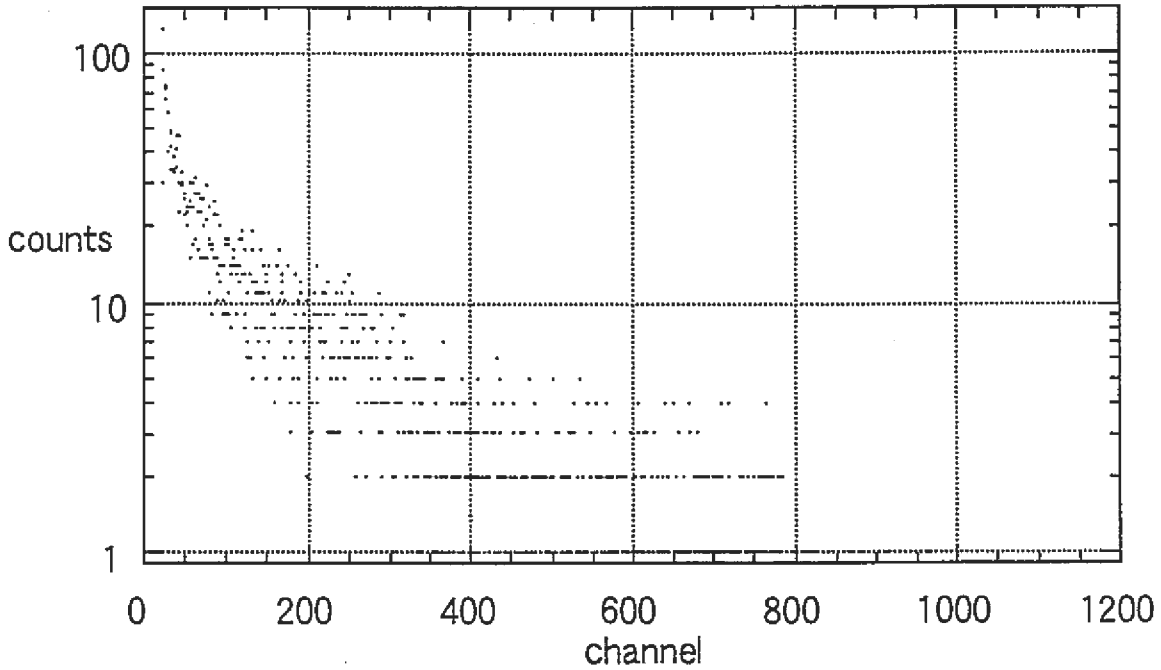


図4-7　RIによる検出器出力(^{252}Cf(1))

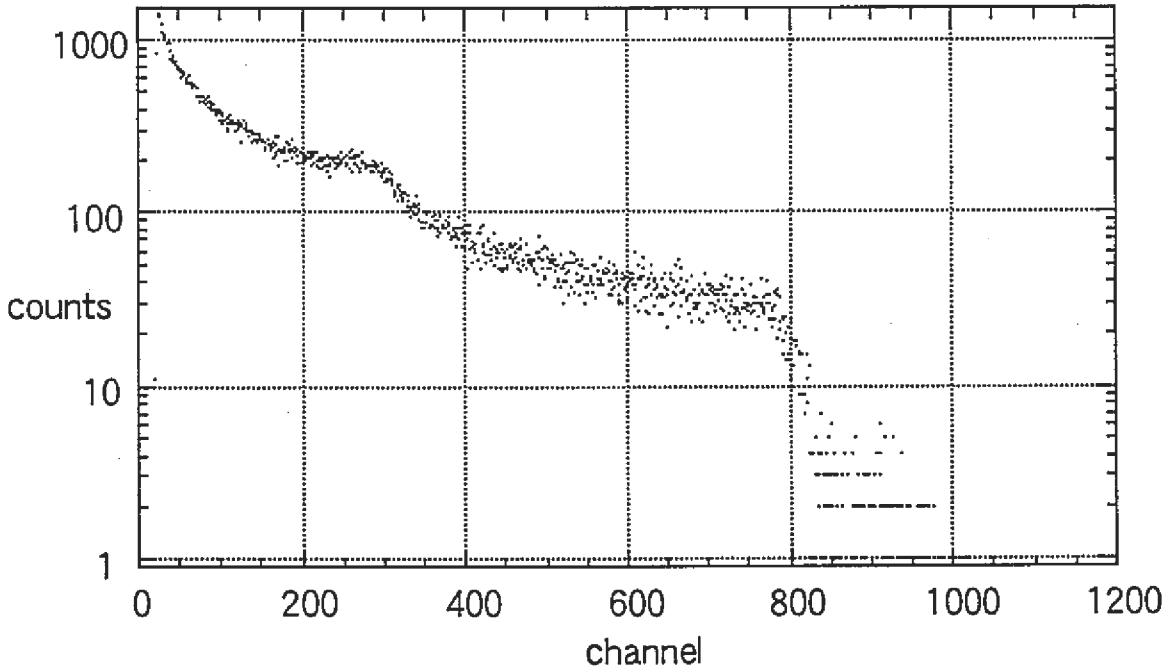


図4-8　RIによる検出器出力(^{252}Cf(2))

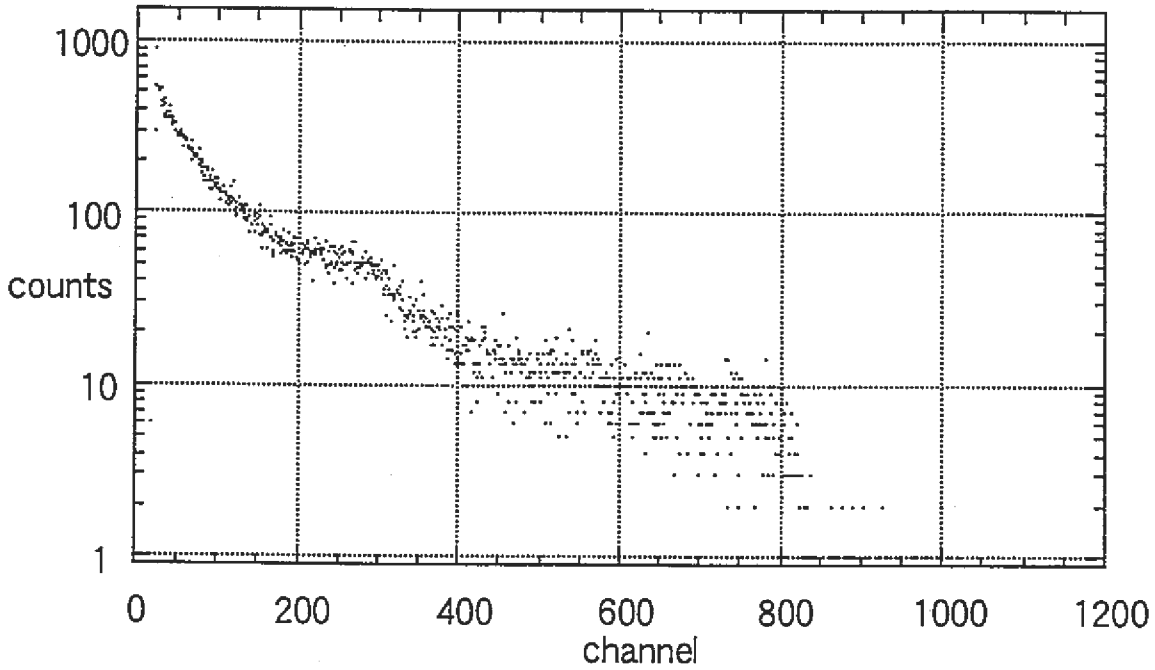


図4-9　RIによる検出器出力(^{238}Pu-Be)

表4-1　RI中性子源一覧

線源種類	中性子放出率※1 n/s	線量当量に関する平均エネルギー※2 MeV
^{241}Am-Be(1)	2.26×10^{6}	4.4
^{241}Am-Be(2)	2.26×10^{6}	4.4
^{252}Cf(1)	3.30×10^{5}	2.4
^{252}Cf(2)	2.01×10^{7}	2.4
^{238}Pu-Be	2.35×10^{7}	—
^{239}Pu-Be	4.65×10^{6}	—

※1　試験の日時で減衰補正した値
※2　ISO8529:1989(E)参照

表4-2　RI中性子源によるエネルギー特性試験結果

線源種類	スペクトル指標	中性子平均エネルギー [MeV]	主要α線エネルギー [MeV]
^{241}Am-Be	6.003±0.079	4.4	5.49
^{239}Pu-Be	5.799±0.027	4.4	5.16
^{252}Cf	3.527±0.021	2.4	――

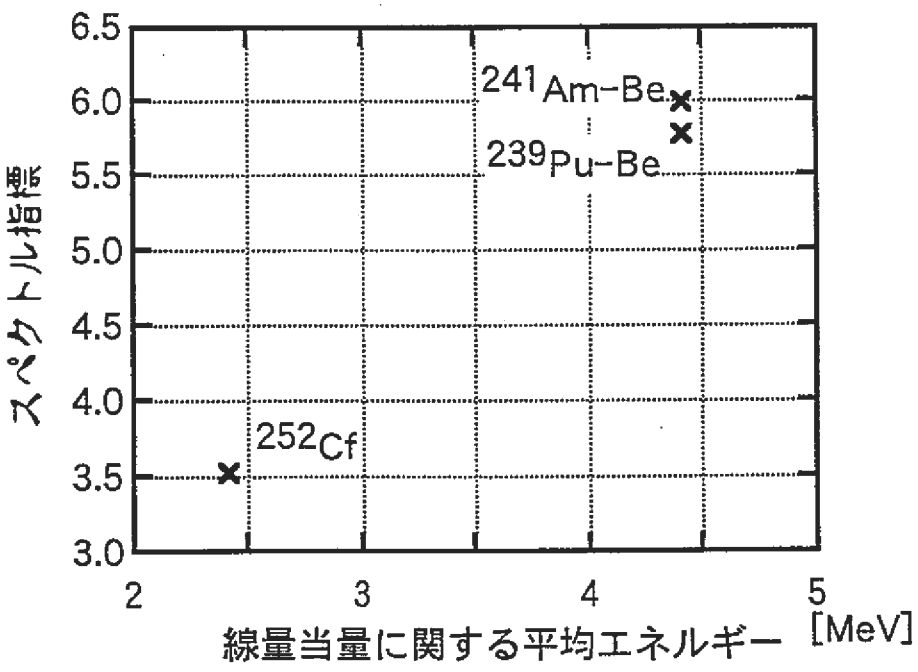


図4-10　中性子平均エネルギーと
スペクトル指標の関係

表4-3　加速器の中性子によるエネルギー特性試験の試験条件

入射ビーム	ターゲット	加速器種類	ﾀｰｹﾞｯﾄｰ検出器間距離	中性子放出角	検出器入射中性子エネルギー
p，1.5MeV	^{3}H	東北大学　工学部 高速中性子実験室 ダイナミトロン加速器	20cm	0°	1.508MeV
				10°	1.487MeV
				20°	1.428MeV
				25°	1.385MeV
				30°	1.335MeV
d，3.0MeV	^{2}H	工業技術院 電子技術総合研究所 ｺｯｸｸﾛﾌﾄ・ｳｫﾙﾄﾝ加速器	30cm	0°	2.998MeV
				15°	2.974MeV
				30°	2.920MeV
				45°	2.840MeV
d，5.0MeV	^{2}H	東北大学　工学部 高速中性子実験室 ダイナミトロン加速器	26.5cm	0°	5.028MeV
				10°	4.987MeV
				20°	4.867MeV
				25°	4.779MeV
				30°	4.676MeV

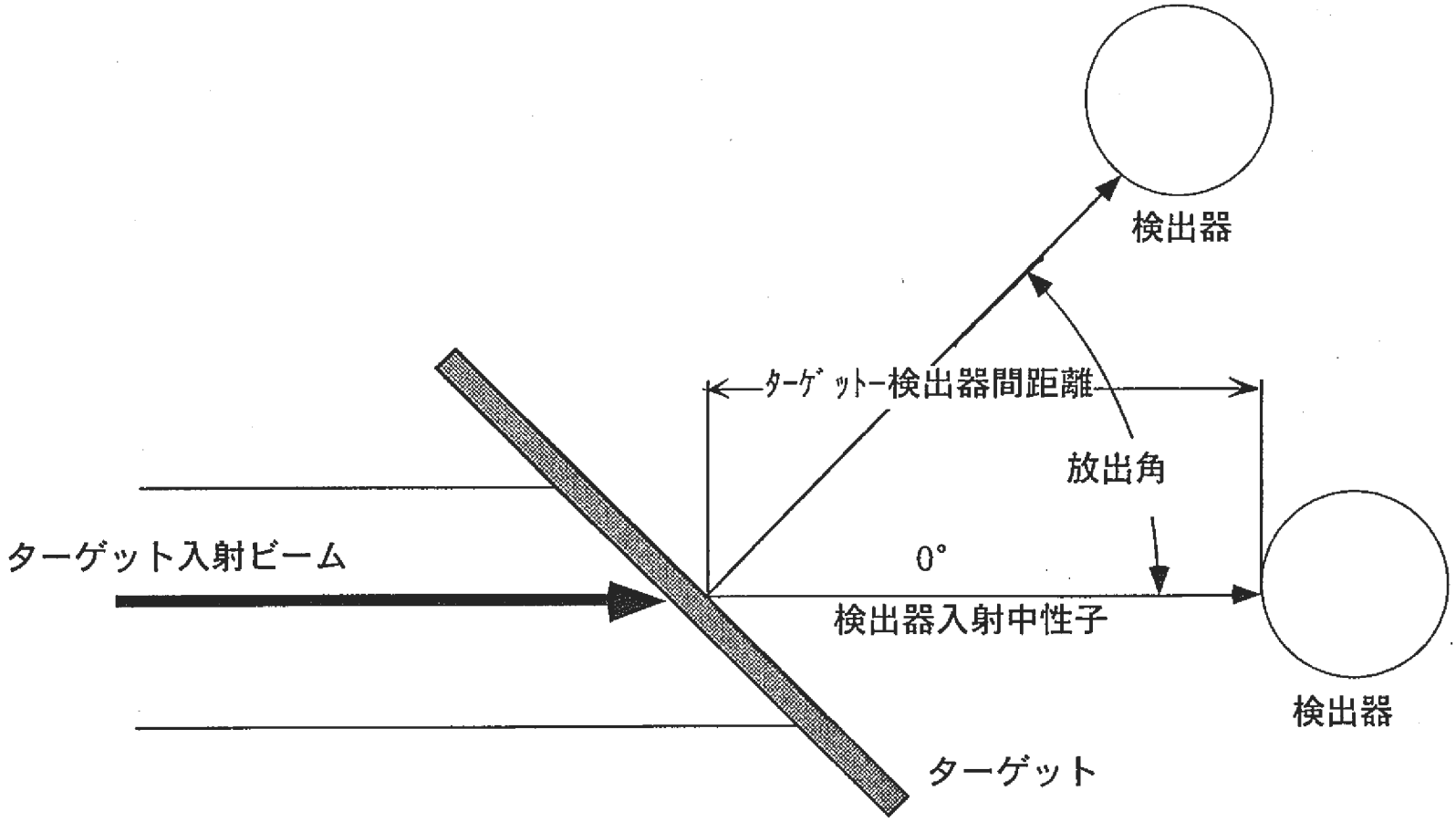


図4-11　加速器による特性試験

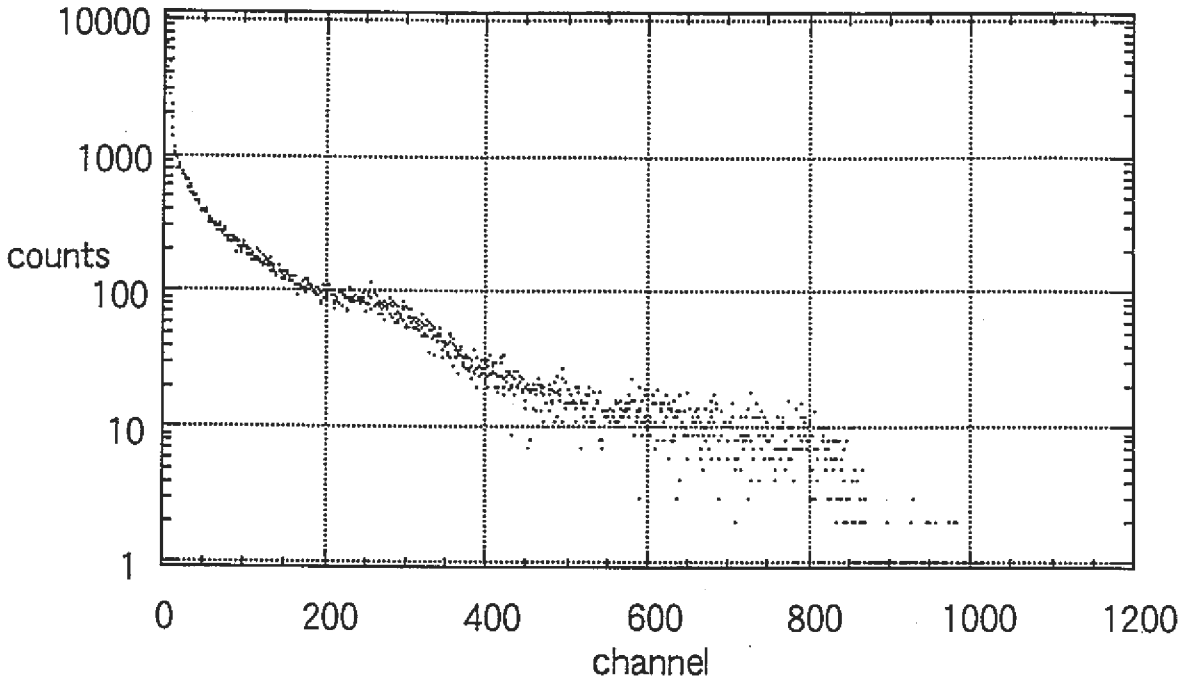


図4-12　単色中性子による検出器出力
（0°方向，2.998MeV）

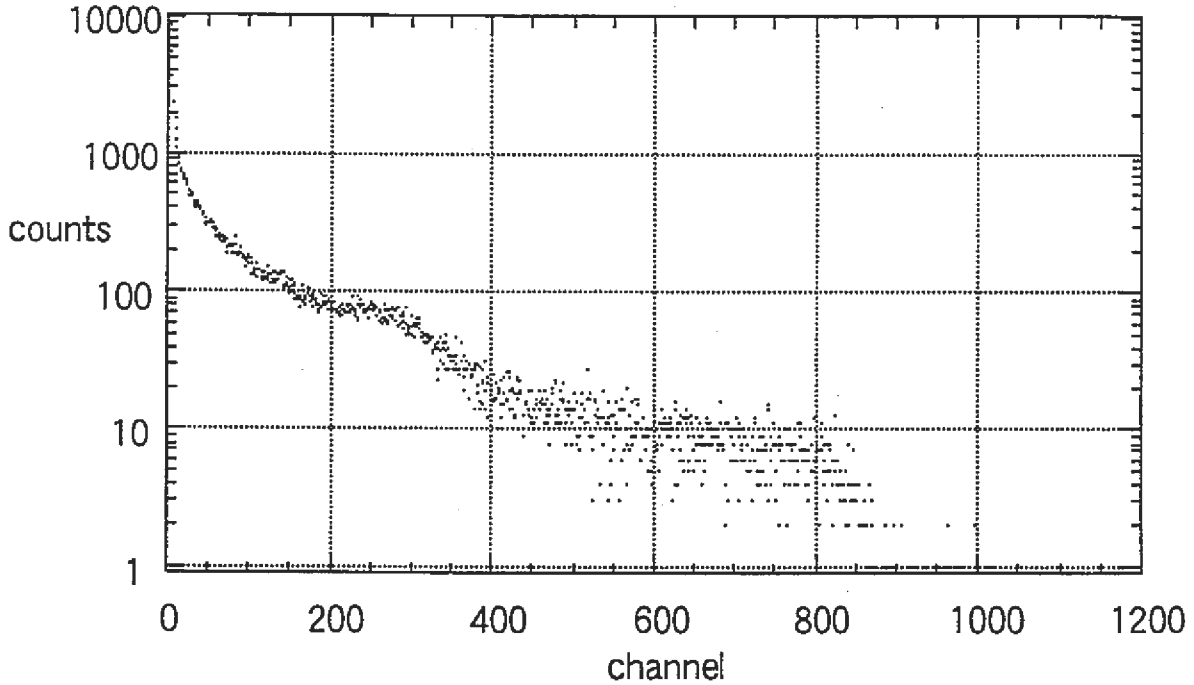


図4-13　単色中性子による検出器出力
（15°方向，2.974MeV）

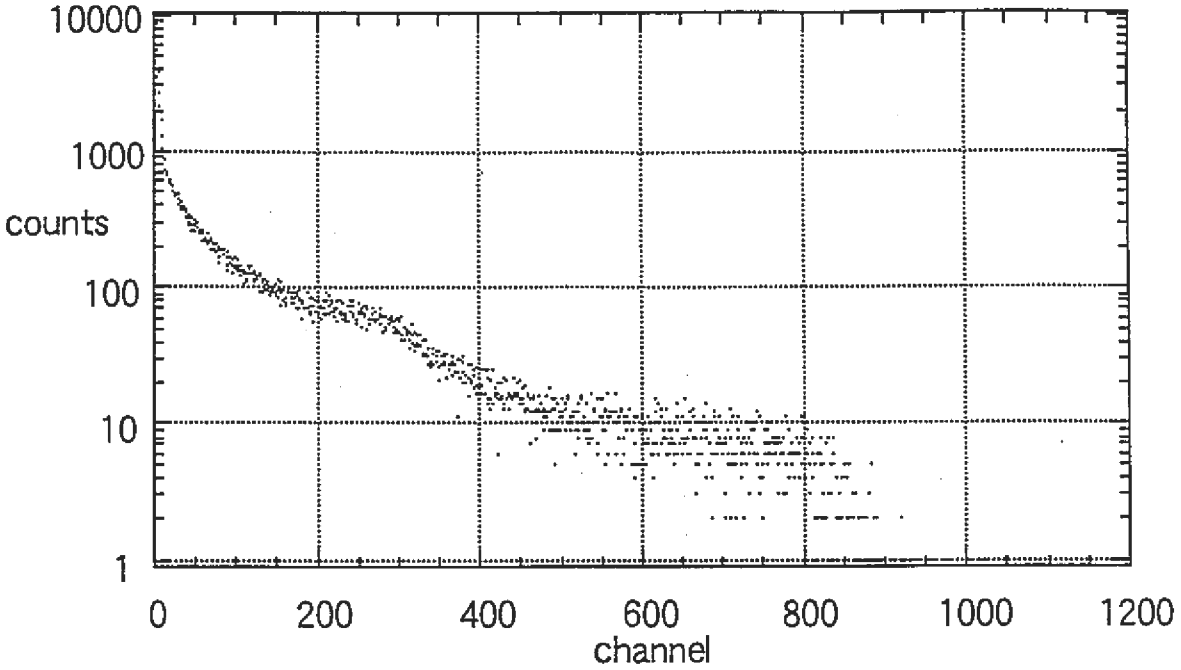


図4-14　単色中性子による検出器出力
（30°方向，2.920MeV）

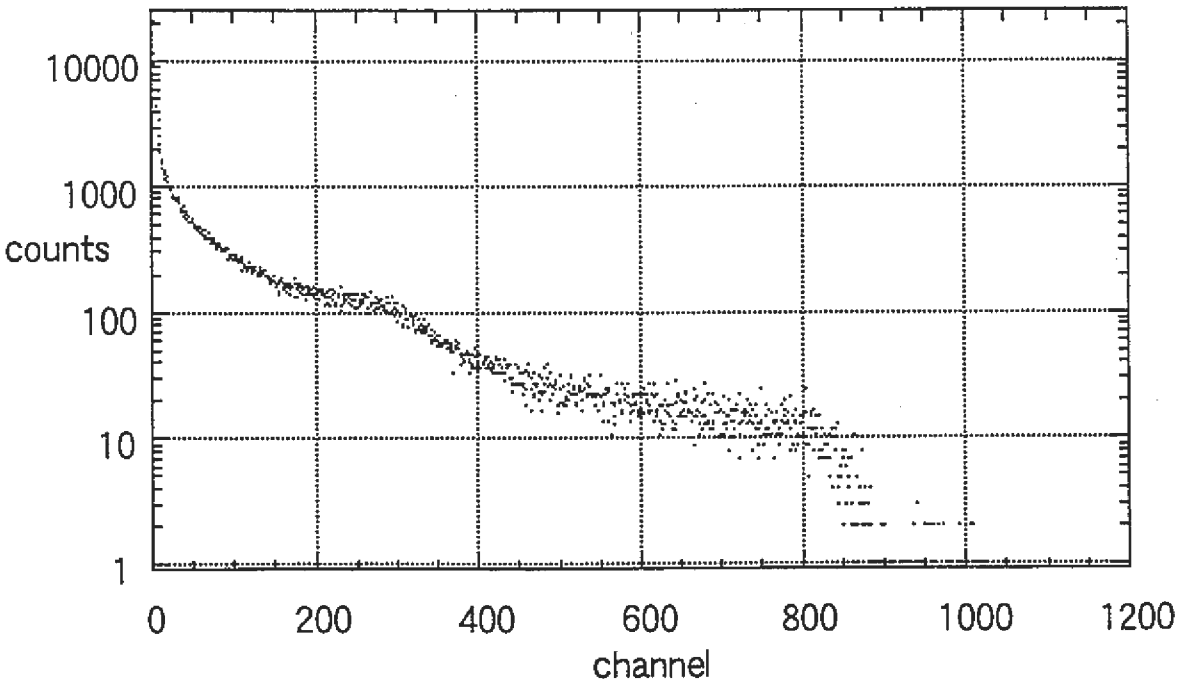


図4-15　単色中性子による検出器出力
（45°方向，2.840MeV）

表4-4　加速器の中性子によるエネルギー特性試験結果

(1.5MeV近傍)

中性子エネルギー [MeV]	スペクトル指標
1.508	3.964±0.039
1.487	3.872±0.039
1.428	3.823±0.041
1.385	3.798±0.041
1.335	3.757±0.042

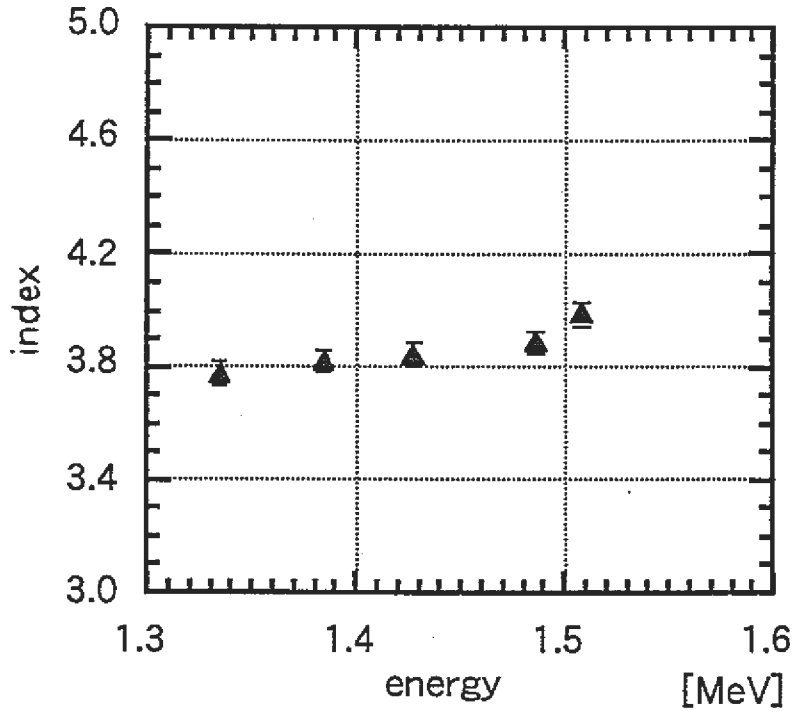


図4-16　中性子エネルギーとスペクトル指標の関係
(1.5MeV近傍)

表4-5　加速器の中性子によるエネルギー特性試験結果
(3.0MeV近傍)

中性子エネルギー [MeV]　注)	スペクトル指標
2.998	7.000±0.073
2.974	6.998±0.076
2.920	6.768±0.079
2.840	6.318±0.061

注）電総研評価値

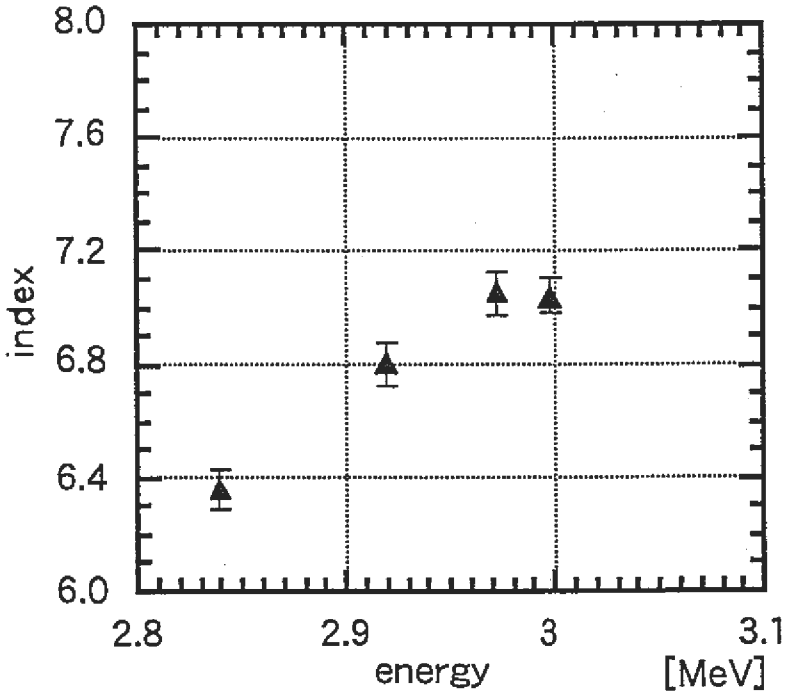


図4-17　中性子のエネルギーとスペクトル指標の関係
(3.0MeV近傍)

表4-6　加速器の中性子によるエネルギー特性試験結果
(5.0MeV近傍)

中性子エネルギー [MeV]	スペクトル指標
5.028	7.978±0.066
4.987	7.685±0.070
4.867	7.846±0.067
4.779	6.989±0.068
4.676	6.728±0.072

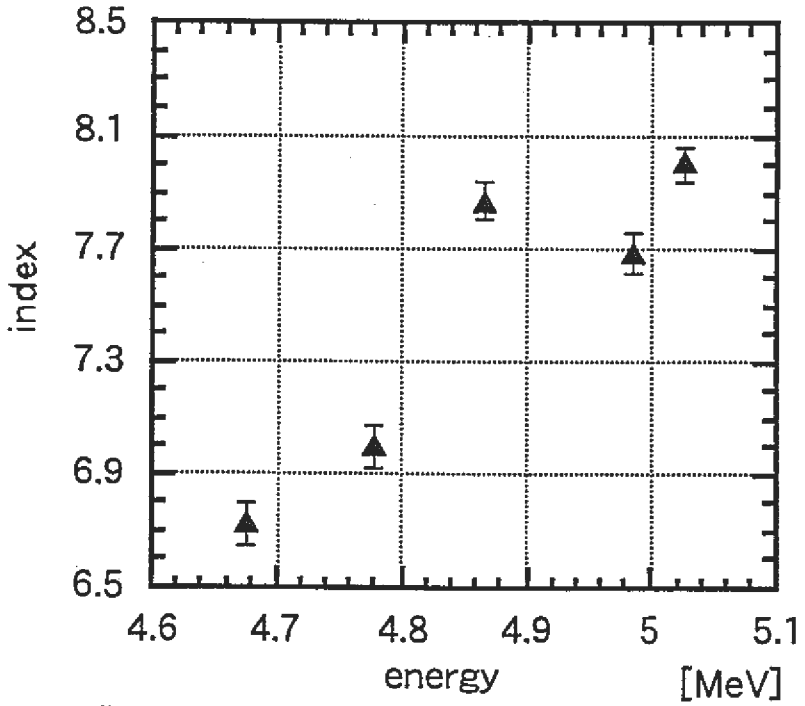


図4-18　中性子のエネルギーとスペクトル指標の関係
(5.0MeV近傍)

5.線量当量特性評価

5.1 概論

前項では、今回試作した複合型検出器が、MeV程度の中性子のエネルギー、MeV程度の中性子場の平均エネルギーについて、それらの変動に極めて敏感であることが示された。このことから、この検出器はMeV程度のエネルギーの中性子に対して敏感であることが予測される。このエネルギー領域の中性子の中性子線量当量への換算係数がほかのエネルギー領域に比べて大きいことを考慮すると、この検出器は線量当量評価を行うのに有利であることが期待できる。

この項では前項の結果を受けて、この検出器の線量当量測定器としての適性、特性について評価を行う。

5.2 特性空間の形成

複合型検出器での線量当量の評価は、前述のように多検出器法の理論に基づいて行う。多検出器法の理論によれば、目的量の評価は、特性空間内の凸集合によってなされる。そこで最初に、今回試作した複合型検出器についての特性空間と、線量当量に関する凸集合を決めた。

特性空間の座標軸には、基準検出器の出力に対する、その他の検出器の出力あるいは目的量のそれぞれとの比をもってあてる。そこで複合型検出器の場合には、まず基準となる出力を選ぶ。評価結果を妥当なものとするためには、基準出力として、十分に広いエネルギー領域について感度を持ち、かつ、十分な精度が得られるものを選ぶ必要がある。この時、すべてのエネルギー領域において一様の感度である必要はない。今回は、以上の条件を満たすものとして、(n, α)反応による出力を基準出力とした。(n, α)反応は熱中性子に対して高い反応断面積を持つだけでなく、高いエネルギー領域にもある程度の断面積を有し、しかもこの反応は核反応であるため反応生成物は一定のエネルギーの粒子であり、一定の検出効率のもとに検出される。したがって、今回の検出器が対象とするであろう全てのエネルギー領域について感度を有するといえる。一方、弾性散乱は、その反応断面積はエネルギーによらず一定であるが、反応生成物（反跳陽子）のエネルギーは入射粒子のエネルギーに依存するため、入射エネルギーが低い場合には自己しゃへい効果により検出できない場合もあることが考えられ、基準出力としては適当ではない。したがって、特性空間は(n, α)反応による出力を基準出力とし、線量当量との比を一つの軸、弾性散乱による出力との比をもう一つの軸とする二次元空間とする。

次に、この特性空間に目的量に関する凸集合を形成する。凸集合の形成には、十分な評価を行うために、なるべく広いエネルギー範囲の単色エネルギーの中性子線に対する出力が必要となる。しかし、十分に広いエネルギー範囲について隈無く単色エネルギーの中性子を得ることは非常に困難である。そこで、エネルギー応答計算の結果を用い、各エネルギー群での計算値を、そのエネルギー群の代表値の、単色エネルギーの中性子による出力とみなすようにした。(n, α)反応と弾性散乱のそれぞれの計数値は、応答計算の結果に示されている。また、線量当量については、計算結果をそれぞれのエネルギー

の中性子の単位フラックスの入射に対する出力とみなし、そのエネルギーでの線量当量換算係数によって求めた[11]。以上の結果、特性空間に単色エネルギーの中性子に対応する点を決めることができ、これらの点の集合から、目的量に関する凸集合を決めることができる。通常は、凸集合を決めるには、付録5.3項「境界平面」の方法を適用する。しかし、今回は、基準出力が全体に一つの曲線分を形成したとみなせたこと、特性空間が二次元空間であることから、特性空間上で図形的に凸集合を形成した。以上の結果、得られた特性空間と凸集合を図5-1に示す。

なお、検出器には球形の計数管を用いている。したがって電場が計数管内で不均一のため、電荷増幅率も計数管内で均一ではない。一方、エネルギー応答計算では、計数領域内に入射した目的放射線については、すべて同一条件のもとに計数されるという仮定がなされている。したがって、エネルギー応答計算の結果から得られる凸集合をそのまま実験と比較することはできない。特性空間においてこの影響が現われるのは［線量当量率／(n, α)反応の計数率］の項である。［反跳反応の計数率／(n, α)反応の計数率］は、両反応に同様の影響が及ぼされていると考えられるため、これらの比においては影響は少ない。また、BF_3ガスの組成の違いも、計算結果と試験結果の相異の要因となることが考えられる。しかし、この影響は(n, α)反応の計数率だけに及ぼすと考えられ、これは特性空間の基準出力にのみ現われる影響であるとみなせる。したがって、凸集合に及ぼす影響はない。

そこで、試験結果の評価を行う際には、［線量当量率／(n, α)反応の計数率］の項に計数管形状の影響の補正を施すようにした。補正は、単一エネルギーの中性子の照射に該当する、加速器による試験の結果と、そのエネルギーにおける応答計算の結果との比較で行う。

5.3 評価方法

線量当量特性の評価は、エネルギー特性試験の結果の線量当量評価を行い特性空間内にプロットしたものと、エネルギー応答特性計算結果から作った凸集合との比較で行った。

RI線源による試験の線量当量評価は、表5-1に示した、RI中性子源の1cm線量当量率定数として与えられている値について、線源-検出器間の距離の補正を行って、検出器位置での線量当量を評価した[12),13)]。表中では^{239}Pu-Be線源については触れていないが、この中性子スペクトルと^{241}Am-Be線源で得られる中性子のスペクトルの差は、線量当量の評価という観点では無視できるため、^{241}Am-Be線源の値を代用した。

加速器の中性子による試験の線量当量評価は、各エネルギーにおける線量当量の換算係数と検出器に入射する中性子束から評価を行った。線量当量換算係数には、ICRPのPublication51の表21に示されている値を採用した[11]。また、中性子束については、電総研から提供された値を用いた。

検出器出力から(n, α)反応と弾性散乱反応による計数を求めるのには、4.2項で示したC領域とD領域の計数を求めればよい。この計数は、熱中性子による照射試験によって、(A領域)∩(D領域)と(B領域)∩(D領域)の計数の比を確認することによって求めることが

できる。

以上によって(n, α)反応と反跳反応のそれぞれの計数、及び線量当量の評価値が求められるので、次にその結果を特性空間にプロットし、エネルギー応答計算からの評価値と比較した。試験結果の評価結果を表5-2に、図5-1に示した特性空間に試験結果をプロットしたものを図5-2に示す。参考として示した値は、エネルギー特性試験とは別に行った、加速器による照射試験の結果である。

なお、検出器の形状に関する補正は、加速器による特性試験結果を単一エネルギー中性子による出力の一つとみなし、この結果により計算結果を補正するようにした。図5-1,2はこの補正が済んだものであり、計算で求められた反応計数値を0.37倍したものである。

5.4 線量当量特性評価

図5-3から、ほとんどの試験結果は凸集合の中に包含されており、試験結果、評価結果が妥当なものであることが示された。すなわち、線量の評価にも使えることがわかった。ただし、凸集合の［線量当量率／(n, α)反応の計数率］軸方向の広がりは広いところでは約１桁あり、これは、複合型検出器の出力から線量当量を評価する場合に、線量当量評価値の取りうる範囲が約１桁あるということを示している。線量当量率計として使うには、これでは実用的でなく、今後、この凸集合の広がりを狭める対策を施す必要がある。

さらに図5-2を見ると、参考値の一つが凸集合から大きく外れている。これは5.0MeVの中性子による試験結果で、線量当量の評価の手法が原因になっていると考えられる。線量当量の評価の際には、高いチャネルで得られた計数から(n, α)反応による全計数を算出している。反跳反応の計数はさらに、(n, α)反応の全計数を計数管の全計数から減算することによって求めている。これは、陽子の付与するエネルギーの範囲と(n, α)反応の付与するエネルギーの範囲が常に変わらないという前提のもとに成り立っている。

5.0MeVの中性子の場合、ポリエチレン減速材で中性子が若干の減速を受けるものの反跳陽子のエネルギーの最大値は数MeVになる。しかし、検出器内のガスの阻止能が小さく、概算で、約2MeV以上のエネルギーの陽子は検出器を透過することが予想される。したがって、検出器には反跳陽子のエネルギーの一部しか付与されないことになる。荷電粒子の単位飛程あたりのエネルギー付与は、粒子エネルギーが大きいほど小さくなることが知られており、したがって、反跳陽子エネルギーが大きいほど検出器に付与されるエネルギーは小さくなると考えられる。出力波高スペクトルで見ると、低いチャネル側に反跳陽子によるスペクトルが片寄ってくることになる。低いチャネルの計数は、バックグラウンド計数が混在するため切り捨てていることから、陽子のエネルギーが大きいほど、切り捨てられた計数の割合は大きくなる。すなわち、入射中性子のエネルギーが大きいほど、反跳反応の計数については過小評価を与えてしまう。したがって、特性空間中で実際の値に比べて［反跳反応の計数率／(n, α)反応の計数率］軸で小の側に寄った評価が為されてしまう。同様の影響は、2.48MeVの中性子による試験結果でも若干現われていると思われる。

エネルギーの大きい中性子の線量当量への寄与は大きく、線量当量評価上重要なエネルギー領域である。今後、複合型検出器を中性子線量当量率計として用いるには、高いエネルギーの中性子に対する応答の改善が必要となる。

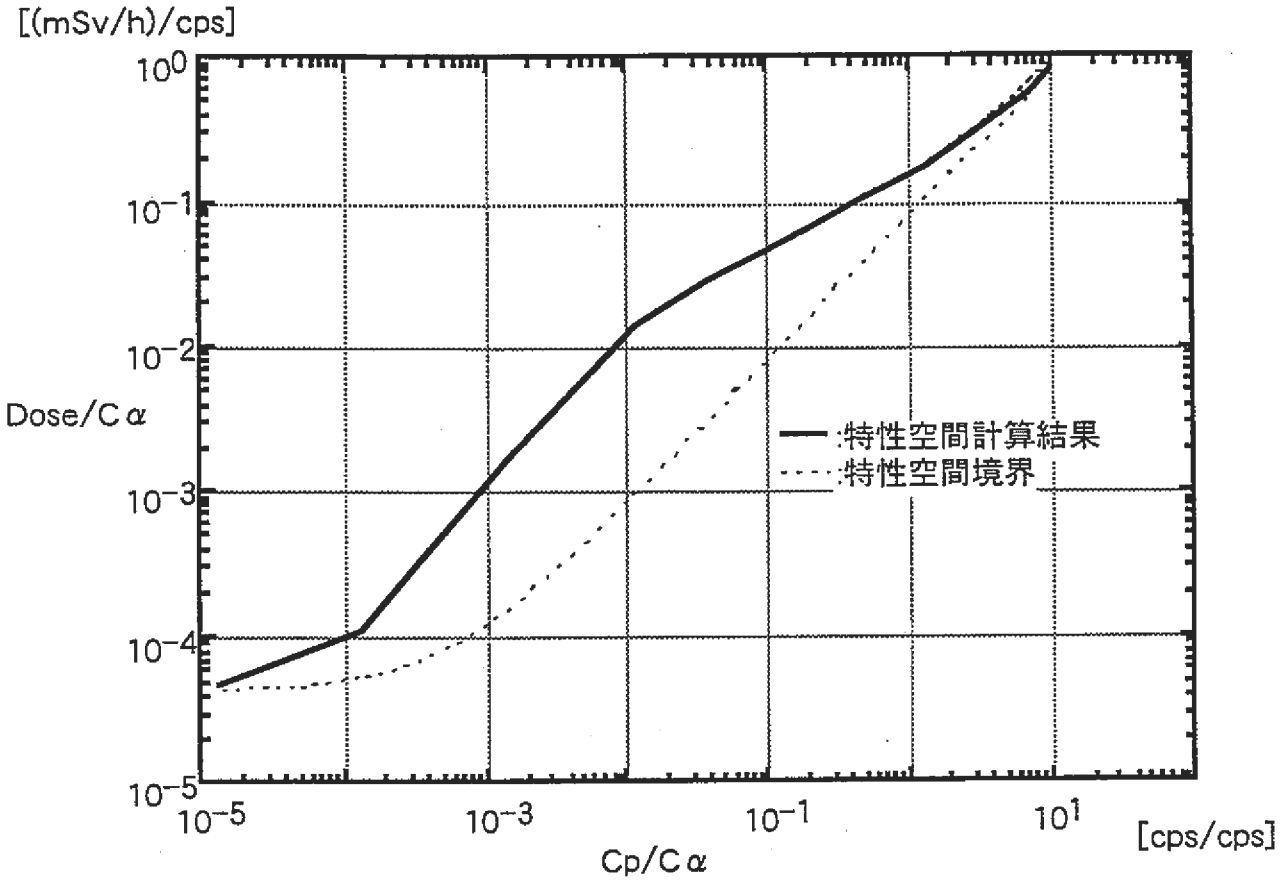


図5-1　複合型検出器の特性空間

表5-1　RI中性子源の1cm線量当量率定数

線源	1cm線量当量率定数 [(μSv・/h)/(n/(m^2・s))]
^{252}Cf	9.736×10^{-5}
^{241}Am-Be	1.115×10^{-4}

注.ISO8529:1989(E)、及び原子力安全技術センター発行
「放射線しゃへい計算マニュアルII」:1990参照

表5-2　エネルギー特性試験結果の線量当量に関する評価と特性空間における値

中性子源	試験時間［s］	(n,α)反応による計数 Cα	弾性散乱による計数 Cp	線量当量評価値［mSv/h］ Dose	特性空間における座標値 Dose/Cα	Cp/Cα
線源種類	RI中性子源による特性試験結果より					
^{241}Am-Be(1)	2000	6782.4	2451.7	4.45×10^{-2}	2.36×10^{-2}	3.61×10^{-1}
^{241}Am-Be(2)	5600	16825.9	6073.9	1.30×10^{-1}	2.79×10^{-2}	3.61×10^{-1}
^{252}Cf(1)	2000	3625	779.1	3.55×10^{-2}	3.53×10^{-2}	2.15×10^{-1}
^{252}Cf(2)	1200	369213.3	12954.4	1.30×10^{0}	1.27×10^{-2}	3.51×10^{-1}
^{238}Pu-Be	2300	68029.6	25603.8	5.33×10^{0}	2.82×10^{-2}	3.76×10^{-1}
単色中性子	加速器の中性子による特性試験結果より					
2.998MeV	4977.2	99569.7	54189.6	2.74×10^{0}	9.90×10^{-2}	5.44×10^{-1}
2.974MeV	4682.6	89671.8	50394.2	2.64×10^{0}	1.06×10^{-1}	5.62×10^{-1}
2.920MeV	4647.5	78904.6	40107.9	2.55×10^{0}	1.16×10^{-1}	5.08×10^{-1}
2.840MeV	8750	113414.4	46013	4.16×10^{0}	1.32×10^{-1}	4.06×10^{-1}
	加速器の中性子による試験結果（参考値）					
2.87MeV	377	9063	7756	2.66×10^{-1}	1.06×10^{-1}	8.56×10^{-1}
5MeV	1002	19354.6	57087	3.08×10^{0}	5.73×10^{-1}	2.95×10^{0}

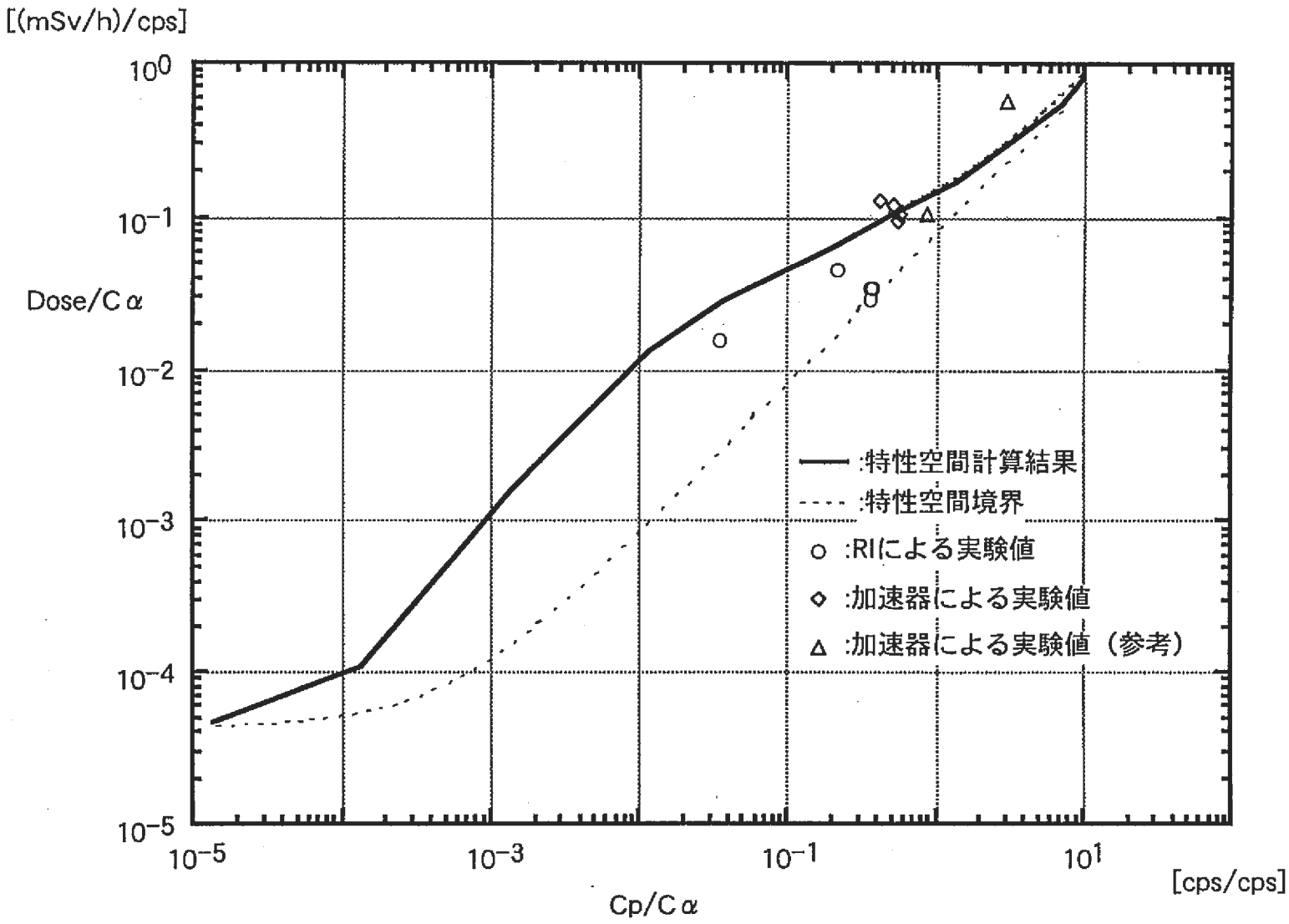


図5-2　複合型検出器の特性空間と実験値の比較

6.考察

6.1 検出器について

中性子線量当量率計の検出部に、従来の減速型に代えて複合型の検出器を用いることによって、大幅な軽量化が見込まれる。両検出器の比較を写真3に示す。現在、大洗工学センターで用いられている中性子線量当量率計が約11kgあるのに対して、今回開発した検出器は約500gである。検出効率の問題、測定回路系がついていないこと等を差し引いても中性子線量当量率測定装置としての軽量化が期待できる。

なお、今回検出器内充填ガスとして使ったBF_3ガスについては課題がある。現在、BF_3ガスは化学的毒性が強いため、入手が極めて困難な状況にある。特に、^{10}Bの含有比を90%程度に上げた濃縮BF_3は、現在、工業的に製造を行っているところがなく、その入手は不可能に近い。対策としては、Bを含む他のガス（場合によっては液体）計数管を用いるか、あるいは、中性子に対して^{3}Heが^{10}Bと似た特性を示す（熱中性子に対する核反応断面積が大きく、かつ広いエネルギー範囲の中性子に対して核反応断面積を有する）ため、BF_3計数管の代わりに^{3}He計数管を用いることが考えられる。ただし、この場合、^{3}Heの反応によりトリチウム粒子とともに陽子が生成することと、Q値が0.764MeVと小さいことから、反跳反応との弁別は^{10}Bの場合以上に困難であることが予測される。反跳反応の代わりに、その他の高速中性子に対する核反応を採用することは有効であろう。

6.2 スペクトル指標について

複合型検出器の出力を端的に評価する手法としてスペクトル指標を導入したが、これは結果として、3.0～5.0MeV程度の中性子場の平均エネルギーの変動に極めて敏感に反応する指標であることが分かった。従来の中性子検出器には、このエネルギー領域に対してそれほど敏感なものはなく、今後、本検出器によってさまざまな知見が得られることが期待できる。さらに、図4-17、図4-18より、スペクトル指標が、入射中性子エネルギーの関数で近似できるであろうことが予測される。ただし、今回は3.0MeV近傍（図4-17参照）と5.0MeV近傍（図4-18参照）の試験に実験条件の差があったため、両試験結果を総合的に比較することはできなかった。スペクトル指標と入射中性子エネルギーの関係については、今後の検討項目としたい。

^{241}Am-Beと^{239}Pu-Beで得られる中性子の平均エネルギーの差を検出できたことも、大きな成果である。同様の知見は他のTRU核種についても期待でき、スペクトル指標を利用したTRU核種の核種分析の可能性が示される。

この他にも、平均エネルギーの変動を利用したプロセスモニタや核物質移動管理用モニタ、加速器のビームモニタとしての利用も期待できる。

6.3 線量当量特性について

結果から分かるように、多検出器法を用いた線量当量の評価は、おおむね良好な結果を示した。しかし、線量当量率計として実用化するには多くの課題が残されている。主な課題とその解決案を以下に示す。

(1)適用エネルギー範囲の拡大

今回開発した複合型検出器で多検出器法の理論が適用できるのは数100keVから数MeVの範囲である。これ以外のエネルギー範囲では二種類の反応のうち一種類しか反応しない、あるいは二種類の反応が混在し弁別ができないといった状況になり、多検出器法の理論の適用が困難になる。以下にその対策として考えられることを挙げる。

まず、低エネルギー側については、反跳陽子の検出確率が極めて小さくなることが問題となるが、これは(n, α)反応による計数と線量当量率との関係を把握することによって十分に線量当量が評価できると考える。低エネルギー中性子束の線量当量への換算はエネルギー依存性が小さいため、総計数が分かれば線量当量への換算は可能である。

一方、高エネルギー側については、(n, α)反応の反応断面積が小さくなるうえ、反跳反応によるエネルギー付与が小さくなり、反跳反応について過小評価をもたらしていることが問題になる。この対策としては、減速材の厚さを増して入射中性子線のエネルギーを抑さえ、反跳陽子の最大エネルギーを小さくすることが考えられる。ただしこの場合、反跳反応による出力のしきい値が高くなることが予想され、線量当量の評価上重要なエネルギー範囲(100keV以上)において線量当量評価が確実に行なわれるよう留意する必要がある。

(2)線量当量に関する凸集合の形状の改善

今回開発した複合型検出器の特性空間内に形成した凸集合は、線量当量の評価値について、広いところでは約一桁の広がりを持っている。これは、線量当量評価を行う際に、線量当量のとりうる値として約一桁の値の広がりを与えることがあるということにほかならない。これでは線量当量率計として、とても実用的なものであるとは言えず、凸集合をより小さいものにする必要がある。

実用的な凸集合を作るのに必要なことは、凸集合内の不要な部分を取り除くことである。今回形成した凸集合は、理論凸集合であり、現実的でない中性子場の情報も含まれている(完全な単色スペクトル等)。したがって、これらを除いた凸集合(簡約凸集合、詳細は付録参照)を形成すれば、不必要な情報が除かれた、もっと狭い凸集合を形成することができる。なお、簡約凸集合を形成するには、測定対象となるほぼ全ての中性子場について試験を行い、実際に特性空間においてとりうる点の集合を与えていかなくてはならない。これは今後の課題としたい。

もう一つの方法としては、検出器の構造を見直し、凸集合の形状を改善することである。中性子のエネルギーをパラメータとし、［線量当量率／(n, α)反応の計数率］と［反跳反応の計数率／(n, α)反応の計数率］の値の変化を追うと(図6-1参照)、1MeV程度より上のエネルギーで両者の変化が違ってきていることが解る。特性空間中の値はこの両者の比であるため、この変化の相異が凸集合にも影響を及ぼしているはずである。事実、特性空間において単一エネルギースペクトルに対応する点の集合が1MeVに対応する点の辺りから傾きが緩くなっている(図5-1参照)。この原因は反跳反応をさせるためのポリプロピレン（検出器内張り）による自己しゃへいによると考えられる。低いエネルギーでおきた弾性散乱に対する自己しゃへい効果は高いエネルギーの場合に比べて大きく、それだけ計数されにくくなってしまう。これの改善策としては、内張りの厚さ、及

び材質について再検討を行うことが考えられる。

以上の改善を施すことにより、線量当量率計として十分な特性を持つ検出器が製作できると考える。

6.4 今後の開発

実用的な検出器とするには、その検出効率の問題は解決すべき課題である。線量当量率について考えると、検出器の［線量当量率／(n, α)反応の計数率］値はRI中性子源に対して3×10^{-2}[(mSv/h)/cps]程度である。現在中性子線量当量率計として一般的に使われているレムカウンタの換算計数が3×10^{-3}[(mSv/h)/cps]程度であることを考えると、これは改善されるべきである。検出効率は、その検出器の大きさによる影響が大きく、今後は効率を稼ぐために検出器の大きさをある程度大きくすることを考慮しなければならないだろう。

検出器の形状も、今後に向けての課題である。今回は球形の計数管を使った検出器について試験を行ってきたが、球形にこだわる必要はない。陽子生成反応の特性を全周方向で均一にするために球形を選択したが、むしろ円筒形などの、検出器内の電場が軸方向で均一となる形状を選んだほうが、(n, α)反応と反跳反応の弁別が容易になり、多検出器法が適用しやすくなるということも考えられる。検出器形状については今後も検討を行っていく。

線量当量の評価手法も定型化する必要がある。現状では特性空間を形成しその中の凸集合から線量当量を求めているが、線量当量率計として実用的なものであるためには、目的量の簡便な評価方法、すなわち、ある検出器出力に対して目的量のとりうる範囲がどうなるかを端的に評価する方法を決定しておくことが有効であろう。さらに、結果は線量当量の取りうる値の範囲として与えられるため、そこから最適値を求める手法についても検討を行うべきである。

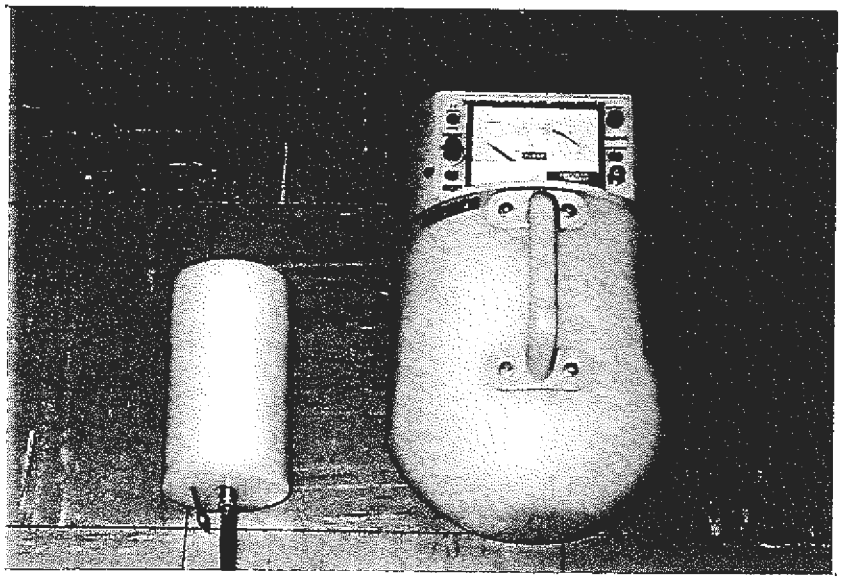


写真3.減速型中性子線量当量率計との比較

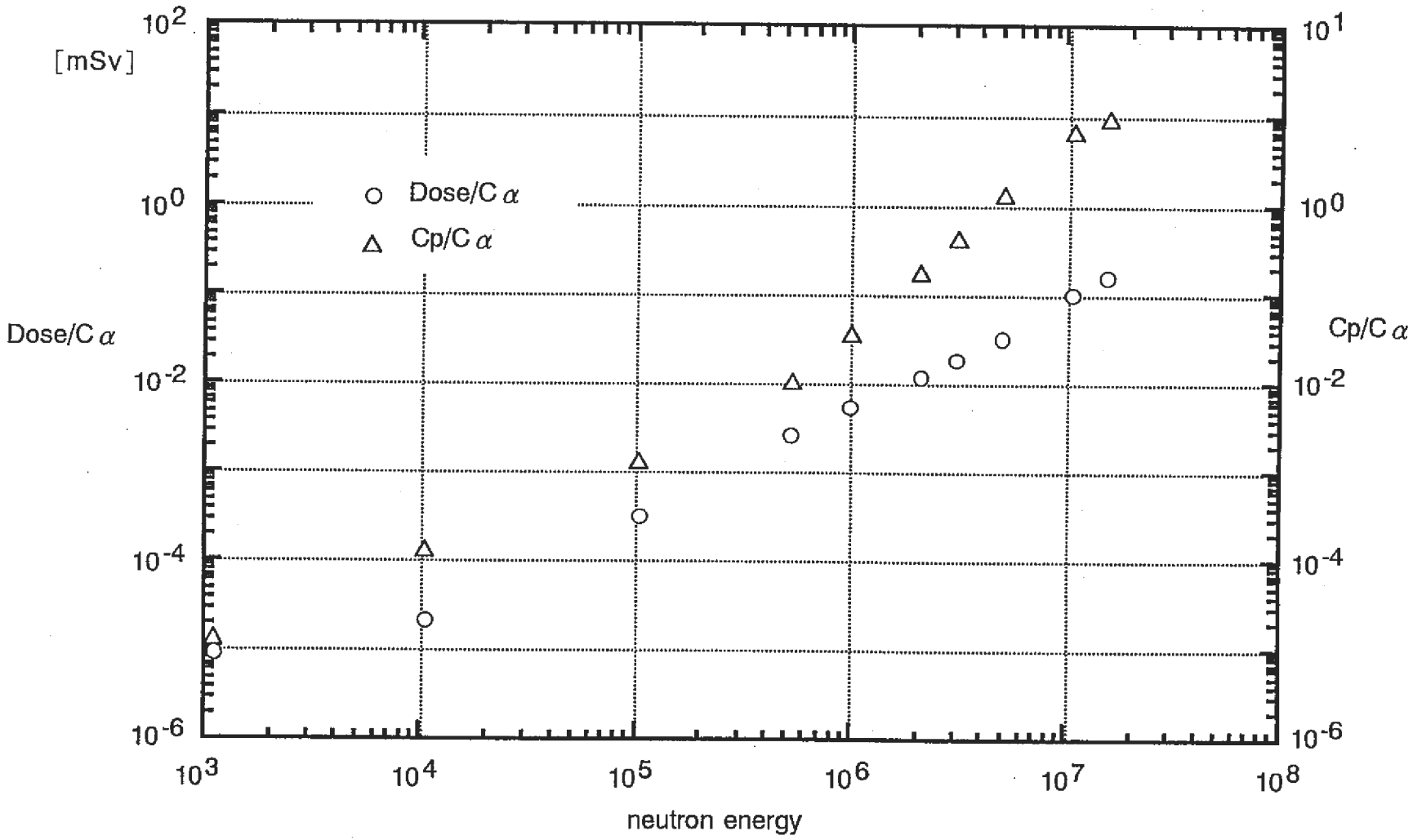


図6-1　中性子のエネルギーと特性空間構成要素の関係

7.まとめ

多検出器法を用いた中性子線量当量率計を開発した。線量当量率計としては、まだ若干の改良の余地はあるものの、RIによる中性子場、加速器で形成される単色の中性子場について、特性空間中の凸集合によって線量当量が評価できることが示された。

また、線量当量率計としてだけではなく、中性子場の平均エネルギー測定器としても有望であることが示された。特に中速領域（数100keV～数MeV）の中性子に対して、100keV未満のエネルギーの差を検出することができ、今後の応用が期待される。

今後の課題としては、線量当量率を測定できるエネルギー範囲の拡大、実用化を見込んだ線量当量評価手法の確立、BF_3ガス検出器に代わる検出器の適用、等が挙げられる。

8.謝辞

本研究を行うにあたって、日本放射線エンジニアリング（株）の道川太一氏に設計から試験、評価に亘って、多大な御支援をいただき、深謝の意を表する。

加速器の使用にあたっては、電子技術総合研究所の工藤勝久氏、武田直人氏、東北大学工学部の馬場護教授ならびに研究室の方々に多大な御協力をいただき、また、高エネルギー物理学研究所の宮島光弘助教授にも貴重な助言をいただいた。謹んで感謝する。

VICの杉田武志氏には、エネルギー応答計算で御協力をいただき、感謝の意を表する。

RI中性子源による照射試験では、大洗、東海の放射線管理課員に御助力をいただき、感謝の意を表する。

参考文献

1) 小佐古敏荘ほか5名,中速領域中性子線量測定評価に関する研究、PNC SJ160 84-04 (1984)

2) (社)日本アイソトープ協会, ICRP Publication60 国際放射線防護委員会の1990年勧告, 丸善, 東京, (1991)

3) H.Schuhmacher, B.R.L.Siebert, Quality Factors and Ambient Dose Equivalent for Neutrons Based on the New ICRP Recommendations, Radiat. Prot. Dosim., Vol.40 No.2 pp.85-89(1992)

4) G.Leuthold, et al., Calculation of the Neutron Ambient Dose Equivalent on the Basis of the ICRP Revised Quality Factors, Vol.40 No.2 pp.77-84(1992)

5) 龍福廣,中性子計測における多検出器法の応用に関する研究, JAERI-M 5875(1974)

6) G.F.Knoll, 放射線計測ハンドブック(邦訳)第2版,日刊工業新聞社,東京,(1991)

7) 鳥居建男ほか2名,中性子スペクトロメータの開発と中性子スペクトル及び線量当量の測定評価,PNC SN9410 88-118(1988)

8) H.H.Andersen, J.F.Ziegler, Stopping Powers and Ranges in All Elements, p41-57(1977)

9) C.Michael Lederer,Virginia S.Shirley,et al., Table of Isotopes,7th Edition, Wiley-Interscience, New York, (1978)

10)K .H.Beckurts, K.Wirts, Neutron Physics, Springer-Verlag, (1964)

11) (社)日本アイソトープ協会, ICRP publication51 体外放射線に対する防護のためのデータ,丸善,東京, (1988)

12) Neutron Reference Radiations for Calibrating Neutron-Measuring Devices used for Radiation Protection Purposes and for Determining Their Response as a Function of Neutron Energy,1st Edition,ISO8529(1989)

13) (財)原子力安全技術センター,放射線施設のしゃへい計算実務マニュアルII,p84～108, (1990)

付録. 多検出器法の概論

1.はじめに

多検出器法とは、一つの測定対象に対する複数の検出装置の出力から、測定対象が有する量について評価する手法である。放射線検出の場合には、特に中性子場の測定について有効であることが知られている。中性子場はたいていの場合、極めて広いエネルギー範囲を示すため、単一の検出器で評価することは困難である。しかし、多検出器法を用いれば、複数の検出器によって広いエネルギー範囲をカバーすることが可能であり、中性子場について測定を行なうことが可能になる。

一般的な多検出器法としては、直交展開法がある。直交展開法は、感度特性について、その直交関数系を組み立て、それによって適当な中性子スペクトルを展開し、計数率と中性子スペクトルとの関係を求めるものである。一般に展開項の収束が悪いため、場の中性子スペクトルを仮定し、それに応じた基底関数を選びそこから直交関数系を組み立てるが、それゆえにスペクトルの仮定を誤ると極めて大きな誤差を生じる。

そこで、何らかの仮定を与えることをせずに厳密な評価を行うことを目的に、一般的な多検出器法に関する理論が与えられている。以下に、その概論を示す。

2.基礎方程式

多検出器法によって求めるべき値として、線量当量率、エネルギー分布等がある。これらは、エネルギースペクトル$\phi(E)$を用いて、それぞれ

$$D=\int_{E_{min}}^{E_{max}} d(E)\cdot\phi(E)dE \tag{2.1}$$

$$\Phi_{\nu}=\int_{E_{min}}^{E_{max}} \theta_{\nu}(E)\cdot\phi(E)dE \qquad (\nu=1、2、3、\cdots、m) \tag{2.2}$$

と表される。ここで、D:線量当量率、d(E):エネルギーEの放射線の単位放射線束密度当りの線量当量率、Φ_{ν}:エネルギー領域(E_{min}、E_{max})をm区間に分割した時のν区間での放射線束、$\theta_{\nu}(E)$:区間($E_{\nu-1}$、E_{ν})で1、その他で0を取る関数、とする。これらを一括して

$$Q=\int_{E_{min}}^{E_{max}} q(E)\cdot\phi(E)dE \tag{2.3}$$

と表す。Qを目的量、q(E)を目的関数と呼ぶことにする。

一方、検出器の数をnとし、それぞれの感度特性を$g_i(E)$(i:検出器番号、i=1、2、3、・・・、n)とすると、それぞれの検出器の出力N_iは

$$N_i=\int_{E_{min}}^{E_{max}} g_i(E)\cdot\phi(E)dE \tag{2.4}$$

となる。ここで$\{N_i\}$がn個の独立した情報であるためには、感度特性$g_i(E)$が互いに一次独立である必要がある。

今回の目的は、出力データ{Ni}から目的量Qを求めることである。その過程では(2.3)(2.4)式が必要不可欠になる。したがって、これらを基礎方程式として導入する。

3.特性空間

3.1 特性空間の導入

検出器出力データ$\{N_i\}$と目的量Qは、式(2.3)(2.4)ではエネルギースペクトル$\phi(E)$に依存する量となっている。ところが、エネルギースペクトル$\phi(E)$は、規格化されたスペクトル$\phi'(E)$と場の強さkより

$$\phi(E)=k\cdot\phi'(E) \tag{3.1}$$

と表現される。すなわち検出器出力データ$\{N_i\}$と目的量Qは、エネルギースペクトルの形と強さに影響を受けている。N_iとQを、$\phi'(E)$とkを用いて書き直すと

$$N_i=k\int_{E_{min}}^{E_{max}} g_i(E)\cdot\phi'(E)dE \tag{3.2}$$

$$Q=k\int_{E_{min}}^{E_{max}} q(E)\cdot\phi'(E)dE \tag{3.3}$$

となり、検出器出力データ$\{N_i\}$と目的量Qは場の強さkに比例している。

場の強さに係わる事象を取り除き問題を単純にするために、以下の量を導入する。

$$P=Q/N_1 \tag{3.4}$$

$$R_i=N_i/N_1 \quad (i=2、3、4、\cdots、n) \tag{3.5}$$

ここでN_1は１番目の検出器の出力で、その検出器の感度特性$g_1(E)$が領域(E_{min}、E_{max})で十分に大きく、評価が可能な検出器出力が得られることが条件になる。この条件を満たす適当な検出器がない場合には、N_1の代わりにN_1、N_2、N_3、・・・、N_iについて適当な線形結合をとり、前記の領域内で十分な感度の出力データを形成する。これは、N_1についての十分な精度を保証するものである。

P、R_iを式(3.2)(3.3)を用いて表すと、

$$P=(k\int q(E)\cdot\phi'(E)dE)/(k\int g_1(E)\cdot\phi'(E)dE) \tag{3.6}$$

$$R_i=(k\int g_i(E)\cdot\phi'(E)dE)/(k\int g_1(E)\cdot\phi'(E)dE) \quad (i=2、3、4、\cdots、n) \tag{3.7}$$

となる。（積分の上限、下限は省略した。以後、同様とする。）それぞれにおいて場の強さkは相殺され、PとRは規格化されたスペクトルから決定される。

ここで、(P、R_2、R_3、・・・、R_n)をデカルト座標とするn次元空間を形成すると、あるスペクトル$\phi(E)$に対応する点が、同空間内にただ一点決まる。関数$\phi'(E)$からこの空間(P、R_2、R_3、・・・、R_n)への写像は（3.6）（3.7）で表される。この写像の成分のうち、q(E)は目的量

に応じてあらかじめ決まっている関数であり、この写像は検出器の感度特性$g_i(E)$に依存する。そこで、ここで導入したn次元デカルト空間を特性空間と呼ぶ。

3.2 特性空間の性質

特性空間の概念を使って目的量を求めるに先だって、(3.6)(3.7)式から導かれる特性空間の性質を以下に示す。

(1)任意のスペクトル$\phi(E)$に対して任意の定数Aを乗じて得られるスペクトル$A\cdot\phi(E)$の対応する点は、スペクトル$\phi(E)$の対応する点に一致する。

これは、(3.6)(3.7)式の定数kをAに置き換えれば、自明である。

次に、二つのスペクトル$\phi_1(E)$と$\phi_2(E)$と適当な実係数c_1、c_2によって合成されるスペクトル$\phi(E)$を考える。

$$\phi(E)=c_1\cdot\phi_1(E)+c_2\cdot\phi_2(E) \tag{3.8}$$

$\phi(E)$、$\phi_1(E)$、$\phi_2(E)$に対応する目的量をQ、Q_1、Q_2、検出器出力をN_i、N_{i1}、N_{i2}(i=2、3、・・・、n)とすると、特性空間中の各スペクトルに対応する点の座標はそれぞれ

$$P=Q/N_1、P_1=Q_1/N_{i1}、P_2=Q_2/N_{i2} \tag{3.9}$$

$$R_i=N_i/N_1、R_{i1}=N_{i1}/N_{11}、R_{i2}=N_{i2}/N_{12}\quad (i=2、3、\cdots、n) \tag{3.10}$$

と示される。式(2.3)、(2.4)より、合成スペクトルに対応する目的量、検出器出力は

$$\begin{aligned}Q&=\int q(E)\cdot(c_1\cdot\phi_1(E)+c_2\cdot\phi_2(E))dE\\&=c_1\int q(E)\cdot\phi_1(E)dE+c_2\int q(E)\cdot\phi_2(E)dE\\&=c_1\cdot Q_1+c_2\cdot Q_2\end{aligned} \tag{3.11}$$

$$N_i=c_1\cdot N_{i1}+c_2\cdot N_{i2} \tag{3.12}$$

と表せる。式(3.9)に(3.11)、(3.12)を代入すると

$$\begin{aligned}P&=(c_1\cdot Q_1+c_2\cdot Q_2)/(c_1\cdot N_{i1}+c_2\cdot N_{i2})\\&=((c_1\cdot N_{i1})/(c_1\cdot N_{i1}+c_2\cdot N_{i2}))\cdot(Q_1/N_{i1})+((c_2\cdot N_{i2})/(c_1\cdot N_{i1}+c_2\cdot N_{i2}))\cdot(Q_2/N_{i2})\\&=c\cdot P_1+(1-c)\cdot P_2\end{aligned} \tag{3.13}$$

ただし

$$c=c_1\cdot N_{i1}/(c_1\cdot N_{i1}+c_2\cdot N_{i2}) \tag{3.14}$$

同様に

$$R_i=c\cdot R_{i1}+(1-c)\cdot R_{i2} \tag{3.15}$$

となる。つまり、式(3.13)と式(3.15)は、点(P_1、R_{11}、R_{21}、・・・、R_{n1})と点(P_2、R_{12}、R_{22}、・・・、R_{n2})を通る直線の方程式を示している。

さらに、$c_1\geqq 0$、$c_2\geqq 0$であるときには、式(3.14)より$0\leqq c\leqq 1$であるため、式(3.13)、(3.15)は二点間の線分を表す。したがって、以下の性質が導かれる。

(2)二つのスペクトル$\phi_1(E)$、$\phi_2(E)$に任意の正係数c_1、c_2をそれぞれ乗じて、合成したスペクトルを$\phi(E)$とすると、特性空間中では、あらゆる$\phi(E)$に対応する点の集合は、$\phi_1(E)$、$\phi_2(E)$に対応する二点を結ぶ線分になる。

次に、任意のスペクトルの集合$\{\phi_X(E)\}$を仮定し、特性空間中でそれに対応する点の集合を考える。

二つのスペクトル$\phi_a(E)$、$\phi_b(E)$に対応する点a、bに対して、それらのスペクトルにあ

らゆる正係数を乗じて合成したスペクトル（以後、合成スペクトルと呼ぶ）$\phi_x(E)$の対応する点xが線分ab上にあることは前節で示したが、新たに第三のスペクトル$\phi_c(E)$に対応する点cを想定し、三つのスペクトルの合成スペクトル$\phi_y(E)$の対応する点をyとする。あらゆる$\phi_a(E)$、$\phi_b(E)$、$\phi_c(E)$の合成スペクトルとは、$\phi_a(E)$、$\phi_b(E)$の合成スペクトルと$\phi_c(E)$との合成スペクトルとみなせる。したがって、点yは、線分ab上のあらゆる点と点cを結ぶ線分上のあらゆる点をとりうる。つまり、点yは、点abcの形成する三角形内（あるいは辺上）に存在することになる。これを更に多数の点に対して展開していくと、$\{\phi_X(E)\}$に対応する全ての点を結ぶ線分で形成される特性空間中の領域内を、$\{\phi_X(E)\}$の要素によるあらゆる合成スペクトルの対応する点が占めることが示される。すなわち

(3)任意のスペクトルの集合$\{\phi_X(E)\}$から任意の正係数c_1、c_2をそれぞれ乗じて、合成したスペクトル$\phi(E)$とすると、特性空間中では、あらゆる$\phi(E)$に対応する点の集合は、$\{\phi_X(E)\}$に対応する点の集合を含む最小の凸集合になる。

4.基礎方程式の解

4.1　基本凸集合

2項で導入した基礎方程式(2.3)(2.4)について解き、目的量Qを検出器出力{Ni}で表すことを試みる。

今、エネルギーE_0における単一エネルギースペクトル$\phi(E)$は、δ関数を用いて

$$\phi(E)=\Phi\cdot\delta(E-E_0) \tag{4.1}$$

と表せる。Φは全放射線線束を表す。このスペクトルに対応する特性空間内の点は、式(3.6)、(3.7)を用いて

$$P=(\Phi\int q(E)\cdot\delta(E-E_0)dE)/(\Phi\int g_1(E)\cdot\delta(E-E_0)dE)$$
$$=q(E_0)/g_1(E_0) \tag{4.2}$$
$$R_i=g_i(E_0)/g_1(E_0) \qquad (i=2、3、\cdots、n) \tag{4.3}$$

と表される。したがって、全ての単一エネルギースペクトルは、そのエネルギーに応じた特性空間内のただ一点をとる。また、式(4.2)、(4.3)、あるいは特性空間の性質(1)から、放射線線束の強さには依存しない。

次に、エネルギー範囲（E_{min}、E_{max})のあらゆるスペクトル$\phi(E)$は、このエネルギー範囲の単一エネルギースペクトル$\phi(E_0)$によって、同様に

$$\phi(E)=\int_{E_{min}}^{E_{max}}\phi(E_0)\cdot\delta(E-E_0)dE_0 \tag{4.4}$$

と表される。

ここで、$\delta(E-E_0)\geqq 0$であるため、$\phi(E)$は単一エネルギースペクトルの合成スペクトルであるといえる。したがって、特性空間の性質(3)より、エネルギー範囲(Emin、Emax)のあらゆるスペクトル$\phi(E)$に対応する点の集合は、このエネルギー範囲の単一エネルギースペクトル$\phi(E_0)$に対応する点の集合を含む最小の凸集合になる。これを基本凸集合とする。

特性空間はn次元空間であるため、基本凸集合はn次元多様体になる。また、その境界は(n-1)次元多様体を形成する。この境界の方程式は、Pについて$P(R_2、R_3、・・・、R_n)$と表すことができる。仮に基本凸集合の上下限の境界を表す方程式をそれぞれP_u、P_lとおくと、基本凸集合に属する点$(P、R_2、R_3、・・・、R_n)$は

$$P_l(R_2、R_3、・・・、R_n) \leqq P \leqq P_u(R_2、R_3、・・・、R_n) \qquad (4.5)$$

と表すことができる。式(3.4)(3.5)を用いると

$$P_l(N_2/N_1、N_3/N_1、・・・、N_n/N_1) \leqq Q/N_1 \leqq P_u(N_2/N_1、N_3/N_1、・・・、N_n/N_1)$$

$$N_1 \cdot P_l(N_2/N_1、N_3/N_1、・・・、N_n/N_1) \leqq Q \leqq N_1 \cdot P_u(N_2/N_1、N_3/N_1、・・・、N_n/N_1) \quad (4.6)$$

と表される。これで、目的量Qを検出器出力{Ni}で表すことができ、基本方程式の解が与えられた。

式(4.6)に示されたように、検出器出力{Ni}に対して目的量Qはある範囲を与えられ、その範囲の中では全ての値をとりうることが示される。

4.2 簡約凸集合

前項で導入した基本凸集合は、エネルギー範囲(Emin、Emax)内のあらゆるエネルギースペクトルを対象にしている。これは、基礎条件としては十分なものだが、実際の評価に適用する場合には実際には存在しないスペクトルも含まれているため、過大な仮定となり的確ではない。

そこで、基本凸集合と同様の手法で、想定しうるスペクトルパターン$\{\phi_r(E)\}$を用い、あらゆるスペクトルはこれらの合成スペクトルであると仮定する。特性空間でのこれらの合成スペクトルの対応する点の集合は、基本凸集合の場合と同じく、特性空間の性質(3)より、$\{\phi_r(E)\}$の対応する点を含む最小の凸集合になる。これを、簡約凸集合とする。簡約凸集合においても、基本方程式の解は基本凸集合と同様に与えられる。この解は、実在しない解を除いた解と言える。

簡約凸集合は基本凸集合の部分集合である。仮に簡約凸集合に含まれないスペクトルが存在したとしても、基本凸集合には含まれるはずであり、基本凸集合に含まれないスペクトルは物理的に存在し得ない。簡約凸集合に含まれないスペクトルが存在した場合は、そのときの簡約化が不適当であったということになる。直交展開法では、基底関数の選択を誤った場合、その誤りによって目的の値が発散してしまうおそれがあるのに対し、特性空間を用いた場合(特性空間法と呼ぶ)には、目的値は少なくとも基本凸集合の範囲内で必ず収まる。特性空間法の大きな利点の一つである。

5.境界の評価

5.1 凸集合の接平面

n次元多様体である凸集合の境界面は(n-1)次元多様体である。この境界面は、ほとんどの場合、曲面になると予測される。基礎方程式の解を与えるために、境界面の方程式を知る必要があるが、曲面の方程式を解析的に与える一般的方法はない。そこで、凸集合境界を模擬する平面((n-1)次元平面、境界平面と呼ぶ)で境界面を近似する。

(n-1)次元平面の方程式は、n個の点を決めることによって数値的に与えることができる。したがって、凸集合の境界面上の適切なn個の点を決めることで、一つの平面を定義することができる。これらのうち、適当な平面を境界平面とみなし、これらを組み合わせることによって、境界面が近似され、凸集合の範囲が示されることになる。なお、境界平面で境界面を近似すると、凸集合の一部は境界平面で切断され、近似凸集合の外に出る部分ができる可能性がある。また、境界平面の数が少なすぎると、凸集合を適切に近似することができなくなる。したがって、境界平面は、適切なものを十分に多くとる必要がある。

5.2　代表点

境界平面を定義する凸集合内の点を、凸集合の代表点と呼ぶ。

代表点の選び方としてはいくつかの方法が考えられる。ここでは、それぞれの凸集合の固有の形態を的確に示す代表点を決定するために、要素スペクトル（基本凸集合であれば単一エネルギースペクトル、簡約凸集合であればそこで想定したスペクトルパターン）の対応する点の集合を、適当に分割し、あるいは適当なスペクトルを選択し、それぞれの区間の荷重平均点をとることにする。

以上の方針で決めた代表点は、以下の式で与えられる。なお、jは代表点の番号で、(j=1、2、3、・・・、λ)、λは代表点の数になる。

$$P^j=(\int q(E)\cdot\phi_j(E)dE)/(\int g_1(E)\cdot\phi_j(E)dE) \tag{5.1}$$

$$R_i^j=(\int g_i(E)\cdot\phi_j(E)dE)/(\int g_1(E)\cdot\phi_j(E)dE)$$
$$(i=2、3、4、\cdots、n) \tag{5.2}$$

5.3　境界平面

前項で決めた代表点から、境界平面の方程式を定める。代表点をS_jで、その座標を(P^j、R_2^j、R_3^j、・・・、R_n^j)で表す。また、全ての代表点は異なる座標を持つものとする。

まず、座標原点を代表点の中心に移動する。中心の座標を($\overline{P}$、$\overline{R_2}$、$\overline{R_3}$、・・・、$\overline{R_n}$)とすると、

$$\overline{P}=(\sum_{j=1}^{\lambda} Pj)/\lambda \tag{5.3}$$

$$\overline{R_i}=(\sum_{j=1}^{\lambda} Rij)/\lambda \tag{5.4}$$

と表される。これにより、各代表点の座標を次のように変換する。

$$x_1^j=P^j-\overline{P} \tag{5.5}$$

$$x_i^j=R_i^j-\overline{R_i} \tag{5.6}$$

ここで、jを変化させて、x_i^jの最大値をとり、その座標の点をS^{j1}とする。

特性空間の例としてx_1-x_2平面を考え、そこで代表点$S^1(x_1^{j1}、x_2^{j1})$と、他の任意の代表点$S^m(x_1^m、x_2^{1m})$を結ぶ直線を考える。この直線$T(x_1、x_2)$は次の式で表される。

$$T(x_1、x_2)\equiv\begin{vmatrix} x_1 & x_2 & 1 \\ x_1^{j1} & x_2^{j1} & 1 \\ x_1^{m} & x_2^{1m} & 1 \end{vmatrix}=0 \tag{5.7}$$

（証明）

S^1、S^mを結ぶ直線上の点を$S(x_1、x_2)$とすると、

$$S=cS^1+(1-c)S^m$$

$$(x_1、x_2)=c(x_1^{j1}、x_2^{j1})+(1-c)(x_1^{m}、x_2^{1m})$$

$$x_1=cx_1^{j1}+(1-c)x_1^{m}、\ x_2=cx_2^{j1}+(1-c)x_2^{m}$$

これより

$$c=(x_1-x_1^{m})/(x_1^{j1}-x_1^{m})=(x_2-x_2^{m})/(x_2^{j1}-x_2^{m})$$

$$(x_1-x_1^{m})(x_2^{j1}-x_2^{m})=(x_1^{j1}-x_1^{m})(x_2-x_2^{m})$$

$$x_1x_2^{j1}-x_1x_2^{m}-x_1^{m}x_2^{j1}+x_1^{m}x_2^{m}=x_1^{j1}x_2-x_1^{j1}x_2^{m}-x_1^{m}x_2+x_1^{m}x_2^{m}$$

$$x_1x_2^{j1}+x_1^{j1}x_2^{m}+x_1^{m}x_2-x_1x_2^{m}-x_1^{m}x_2^{j1}-x_1^{j1}x_2=0$$

この式の左辺は次の行列のノルムを表している。

$$\begin{pmatrix} x_1 & x_2 & 1 \\ x_1^{j1} & x_2^{j1} & 1 \\ x_1^{m} & x_2^{m} & 1 \end{pmatrix}$$

したがって、直線$T(x_1、x_2)$は式(5.7)のように表される。

直線$T(x_1、x_2)$に対し、S^{j1}、S^m 以外の代表点が全て原点側にあるならば、この直線は境界表面と言える。平面は直線$T(x_1、x_2)$によって、正領域と負領域に分けることができる。したがって、1、m以外の全てのjについて、

$$T(x_1^{j}、x_2^{j})\cdot T(0、0)>0 \tag{5.8}$$

ならば、この直線は境界表面と言える。また、このときS^m は境界平面を与える代表点の一つとして定まり、S^m はS^2 と置き換える。

以上で、二次元特性空間での凸集合の一つの境界平面を決定することができた。これは、三次元以上へも、拡張することができる。前記と同様の方法で、新たにS^3を定めると、平面$T(x_1、x_2、x_3)$は境界平面となる。更に帰納的にn次元空間に拡張していくと、境界平面は

$$T(x_1、x_2、x_3、\cdots、x_n)\equiv\begin{vmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \cdots & x_n & 1 \\ x_1^{j1} & x_2^{j1} & x_3^{j1} & \cdots & x_n^{j1} & 1 \\ x_1^{j2} & x_2^{j2} & x_3^{j2} & \cdots & x_n^{j2} & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_1^{j(n-1)} & x_2^{j(n-1)} & x_3^{j(n-1)} & \cdots & x_n^{j(n-1)} & 1 \\ x_1^{jn} & x_2^{jn} & x_3^{jn} & \cdots & x_n^{jn} & 1 \end{vmatrix}=0 \tag{5.9}$$

と表すことができ、この平面が境界平面である条件は$j\neq j1、j2、j3、\cdots、jn$の全てのjに対して

$$T(x_1^{j}、x_2^{j}、x_3^{j}、\cdots、、x_n^{j})\cdot T(0、0、0、\cdots、0)>0 \tag{5.10}$$

である。これで、n次元空間のある凸集合に関する一つの境界平面が決定できた。

5.4 隣接境界平面

境界平面T_1に隣接する境界平面T_{1next}は、境界平面T_1を決定する代表点S^{j1}、S^{j2}、S^{j3}、・・・、S^{jn}のうち、一点を除いた残りの(n-1)点を共有する平面である。したがって、隣接境界平面T_{1next}は全部でn個存在する。

隣接境界平面T_{1next}を決定するには、境界平面T_1を決定するのと同様の手法をとる。境界平面T_1を決定する代表点S^{j1}、S^{j2}、S^{j3}、・・・、S^{jn}のうちの一点を、別の代表点S^j($j \neq j1$、j2、・・・、jjn)に置き換える。新しい代表点S^jを含む平面T_1'が、式(5.10)に表される条件を満たすことで、平面T_1'は隣接境界平面T_{1next}の一つであることが示される。

これを繰り返すことによって、凸集合は隣接境界平面で囲まれていく。境界平面の数が増えてくると、二つ以上の境界平面と隣接する境界平面も決定されるようになってくる。順次、これらの隣接境界平面を決定していき、すべての境界平面が未決定の隣接境界平面を持たなくなったとき、全ての境界平面が決定する。

これにより、凸集合の全ての境界面が境界平面で近似され、近似凸集合が決定される。

6.最適処理法

6.1 特性空間法の最適値

４項で、特性空間法により、凸集合の範囲をもって目的値の取りうる範囲が与えられることを示した。それを受けて前項では、凸集合の境界面を近似する境界平面を導入した。ここでは、境界平面により凸集合の上下限が与えられることから、目的値の最適値を与える方法について述べる。

6.2 最小誤差近似

特性空間法では、目的量Qのとる範囲が凸集合の上限P_uと下限P_lを用いて

$$P_l(R) \leqq Q/N_1 \leqq P_u(R) \tag{6.1}$$

で示される。(式(4.5)、(4.6)参照)このように、個々の検出器の出力比Rが与えられることによって、目的量Qとある検出器の出力N_1の比の取りうる範囲が与えられる。しかし、目的量の評価のためにはこれをある適当な値に近似するのが有効である。そこで、評価値の最大誤差を最小にする近似法について検討する。

評価値の最大誤差を最小にするには、一般に

$$P_m(R)=(P_l(R)+P_u(R))/2 \tag{6.2}$$

による$P_m(R)$を与えればよい。しかし、たとえば中性子について扱う場合など$P(R)$を極めて広い範囲に適用しなければならない場合には、むしろ対数を取った場合の誤差が最小になるように$P_m(R)$を決めるほうが有効である。

そこで、

$$p_l(R)=\ln(P_l(R))$$
$$p_u(R)=\ln(P_u(R))$$

$$p_m(R)=\ln(P_m(R))$$

とし、

$$p_m(R)=(p_l(R)+p_u(R))/2 \tag{6.3}$$

で$p_m(R)$を決める。したがって、$P_m(R)$は以下のように示される。

$$\begin{aligned} P_m(R)&=\exp(p_m(R)) \\ &=\exp((p_l(R)+p_u(R))/2) \\ &=\exp((\ln(P_l(R))+\ln(P_u(R))/2) \\ &=(P_l(R)\cdot P_u(R))^{1/2} \end{aligned} \tag{6.4}$$

また最大誤差E(R)は

$$\begin{aligned} E(R)&=\exp((p_u(R)-p_l(R))/2) \\ &=\exp((\ln(P_u(R))-\ln(P_l(R))/2) \\ &=(P_u(R)/P_l(R))^{1/2} \end{aligned} \tag{6.5}$$

となる。

6.5　断片的線形近似

Rをいくつかの領域に分割し、それぞれの領域の最適値を(n-1)次元平面で近似する方法を考える。ここでは、式(6.4)を使って、最小自乗法によって近似する。これを断片的線形近似という。

Rのうちの任意のm個の点($0\leqq m\leqq n$)では式(6.4)に一致させ、それ以外の点について最小自乗法で近似する。平面の方程式を

$$P=A_1+\sum_{i=2}^{n}A_i\cdot R_i \tag{6.6}$$

とおくと、この平面が点（$P(R^j)$、R^j）($j=1、2、3、\cdots、m; m\leqq n$)を含むには、

$$P(R^j)=A_1+\sum_{i=2}^{n}A_i\cdot R_i^j \tag{6.7}$$

を満たさなければならない。式(6.6)について最小自乗処理を行う。

$$I=\sum_{j=m+1}^{n}(P(R^j)-A_1-\sum_{i=2}^{n}A_i\cdot R_i^j) \tag{6.8}$$

$\delta I/\delta A_k\fallingdotseq 0$とおいて

$$-2\sum_{j=m+1}^{n}(R_k^j(P(R^j)-\sum_{i=1}^{n}A_i\cdot R_i^j))=0 \quad (m+1\leqq k\leqq n) \tag{6.9}$$

また、式(6.7)より

$$P(R^k)-\sum_{i=1}^{n}A_i\cdot R_i^k=0 \quad (k=1、2、3、\cdots、m) \tag{6.10}$$

式(6.9)、(6.10)は連立しており、以下の行列の演算で表される。

$$\alpha \cdot \beta = \gamma \tag{6.11}$$

$$\alpha_{ki} = R_i^k \quad (1 \leqq k \leqq m、1 \leqq i \leqq n)$$

$$\alpha_{ki} = \sum_{j=m+1}^{n} R_k^j \cdot R_i^j \quad (m+1 \leqq k \leqq n、1 \leqq i \leqq n)$$

$$\beta_k = A_k \quad (1 \leqq k \leqq n)$$

$$\gamma_k = P(R^k) \quad (1 \leqq k \leqq m)$$

$$\gamma_k = \sum_{j=m+1}^{n} (R_k^j(P(R^j))) \quad (m+1 \leqq k \leqq n)$$

したがって、βは次のように表される。

$$\beta = \alpha^{-1} \cdot \gamma \tag{6.12}$$

以上により、近似平面の方程式は

$$P = \beta_1 + \sum_{i=2}^{n} \beta_i \cdot R_i \tag{6.13}$$

と表すことができる。