

閉凸空間によるデータ処理法を用いた
中性子線量の評価法とその応用に関する研究

槁本 周

閉凸空間によるデータ処理法を用いた中性子線量の評価法とその応用に関する研究

目 次

1	背景と研究の目的	
1.1	放射線防護における線量測定とその課題	1
1.2	研究の目的	5
	第1章 参考文献	6
2	閉凸空間データ処理法による線量測定の理論	
2.1	閉凸空間データ処理法の基礎理論	8
2.2	閉凸空間の評価	13
2.3	最適値の選択	18
2.4	適用の条件	19
	第2章 参考文献	21
3	放射線防護のための測定への閉凸空間データ処理法の適用	
3.1	本法の適用の概要	22
3.2	中性子線量測定への適用	
	—混合ガス比例計数管による中性子周辺線量当量測定—	23
3.2.1	中性子周辺線量当量測定への適用検討	23
3.2.1.1	適用の検討	23
3.2.1.2	測定器の選択	24
3.2.2	混合ガス比例計数管の開発	26
3.2.2.1	設計方針	26
3.2.2.2	設計要素の検討	28
3.2.2.3	応答特性試験	39
3.2.3	反応毎出力で形成する閉凸空間による線量測定	52
3.2.3.1	単色中性子に対する応答による閉凸空間の形成	54
3.2.3.2	核分裂中性子に対する応答による閉凸空間の形成	60
3.2.3.3	中性子スペクトルの実測事例に基づく検討	69
3.2.3.4	核分裂場における応答特性試験	74
3.2.4	関心領域毎出力で形成する閉凸空間による線量測定	85
3.2.4.1	核分裂中性子による閉凸空間の形成	85
3.2.4.2	核分裂場における応答特性試験	94
3.2.5	現行の中性子線量測定器との比較	97

3.2.6 混合ガス比例計数管による中性子周辺線量当量測定に関する考察	99
3.3 中性子個人線量測定への適用	
—個人線量計による中性子個人線量測定—	101
3.3.1 中性子個人線量測定への適用検討	101
3.3.2 個人線量計出力で形成する閉凸空間による線量評価	102
3.3.2.1 閉凸空間の形成	102
3.3.2.2 閉凸空間の評価	104
3.3.3 中性子個人線量測定への適用に関する考察	117
3.4 X線エネルギー分布測定への適用	
—電流モード検出器によるX線エネルギー分布測定—	120
3.4.1 X線エネルギー分布測定への適用検討	120
3.4.2 電流モード検出器出力で形成する閉凸空間法による	
X線エネルギー分布測定	124
3.4.2.1 閉凸空間の形成	124
3.4.2.2 閉凸空間の評価	133
3.4.3 閉凸空間データ処理法による	
X線エネルギー分布測定に関する考察	134
第3章 参考文献	136
4 考察	
4.1 閉凸空間データ処理法の放射線線量測定及び放射線エネルギー測定への	
適用に関する総合的な考察	139
4.1.1 測定器の組み合わせの選定	139
4.1.2 評価軸の選定	140
4.1.3 目的量評価における代表値の選定	142
4.2 高次空間への展開	143
第4章 参考文献	144
5 結論	145
6 謝辞	146
付録	
I. MCNPで計算した減速核分裂中性子のエネルギースペクトル	147
II. 核分裂中性子実測事例一覧	161

表リスト

表 3.2.1	計数ガス充填圧力に応じた混合ガス比例計数管の反応毎換算係数
表 3.2.2	混合ガス比例計数管の仕様
表 3.2.3	混合ガス比例計数管の単色中性子に対する応答の実験値と計算結果の比較
表 3.2.4	混合ガス比例計数管の単色中性子に対する応答の計算結果の概要
表 3.2.5	減速核分裂中性子に対する混合ガス比例計数管の応答の計算結果の概要
表 3.2.6	混合ガス比例計数管の原子炉施設における応答実験結果
表 3.3.1	個人線量計の組み合わせの相対内積値の一覧
表 3.4.1	transXend 検出器の各素子の組み合わせの相対内積値の一覧

図リスト

- 図 1.1 レムカウンタの線量評価傾向

- 図 2.1 閉凸空間の形成
- 図 2.2 閉凸空間データ処理法による目的量のとり得る範囲の特定
- 図 2.3 目的量評価のための理想的な閉凸空間
- 図 2.4 目的量評価のための好ましい閉凸空間
- 図 2.5 目的量評価において好ましくない閉凸空間の例
- 図 2.6 閉曲線による閉凸空間の形成

- 図 3.1 放射線防護のための測定の整理
- 図 3.2.1 球形混合ガス比例計数管と円筒形混合ガス比例計数管の出力比較
- 図 3.2.2 減速材の厚さに応じた混合ガス比例計数管の反応率の変動
- 図 3.2.3 減速材の厚さに応じた混合ガス比例計数管の ^3He の吸収反応と H の反跳反応の反応率比の変動
- 図 3.2.4 混合ガス比例計数管に使う減速材の厚さと重さ
- 図 3.2.5 計数ガスの構成比による混合ガス比例計数管の反応率の変動
- 図 3.2.6 計数ガスの構成比による混合ガス比例計数管の ^3He の吸収反応と H の反跳反応の反応率比の変動
- 図 3.2.7 計数ガスの構成比による混合ガス比例計数管の ^3He の反跳反応と H の反跳反応の反応率比の変動
- 図 3.2.8 混合ガス比例計数管の断面図
- 図 3.2.9 混合ガス比例計数管の外観
- 図 3.2.10 FRS における実験の風景
- 図 3.2.11 144keV 中性子に対する混合ガス比例計数管の出力
- 図 3.2.12 250keV 中性子に対する混合ガス比例計数管の出力
- 図 3.2.13 565keV 中性子に対する混合ガス比例計数管の出力
- 図 3.2.14 5MeV 中性子に対する混合ガス比例計数管の出力
- 図 3.2.15 14.8MeV 中性子に対する混合ガス比例計数管の出力
- 図 3.2.16 144keV 中性子線に対する混合ガス比例計数管出力の反応毎弁別
- 図 3.2.17 250keV 中性子線に対する混合ガス比例計数管出力の反応毎弁別
- 図 3.2.18 565keV 中性子線に対する混合ガス比例計数管出力の反応毎弁別
- 図 3.2.19 5MeV 中性子線に対する混合ガス比例計数管出力の反応毎弁別
- 図 3.2.20 14.8MeV 中性子線に対する混合ガス比例計数管出力の計算結果との比較
- 図 3.2.21 混合ガス比例計数管の応答計算体系

- 図 3.2.22(a) 混合ガス比例計数管の単色中性子に対する応答
- 図 3.2.22(b) 混合ガス比例計数管の単色中性子に対する応答 (拡大図)
- 図 3.2.23(a) 混合ガス比例計数管の単色中性子に対する応答で作成した閉凸空間
- 図 3.2.23(b) 混合ガス比例計数管の単色中性子に対する応答で作成した閉凸空間 (拡大図)
- 図 3.2.24 一般式で表現された核分裂中性子エネルギースペクトル
- 図 3.2.25(a) 一般式で表現される核分裂中性子に対する混合ガス比例計数管の応答で作成した閉凸空間
- 図 3.2.25(b) 一般式で表現される核分裂中性子に対する混合ガス比例計数管の応答で作成した閉凸空間 (拡大図)
- 図 3.2.26 減速核分裂中性子に対する混合ガス比例計数管の応答計算結果 (抜粋)
- 図 3.2.27(a) 核分裂中性子に対する混合ガス比例計数管の応答で作成した閉凸空間
- 図 3.2.27(b) 核分裂中性子に対する混合ガス比例計数管の応答で作成した閉凸空間 (拡大図)
- 図 3.2.28(a) 核分裂中性子に対する混合ガス比例計数管の応答の閉凸空間と実測中性子スペクトルに基づく計数管出力に対応する点
- 図 3.2.28(b) 核分裂中性子に対する混合ガス比例計数管の応答の閉凸空間と実測中性子スペクトルに基づく計数管出力に対応する点 (拡大図)
- 図 3.2.29(a) 特定の施設における混合ガス比例計数管の応答の抜粋
- 図 3.2.29(b) 特定の施設における混合ガス比例計数管の応答の抜粋 (拡大図)
- 図 3.2.30 弥生における混合ガス比例計数管の応答実験
- 図 3.2.31 弥生における混合ガス比例計数管の応答実験箇所の中性子スペクトル
- 図 3.2.32 弥生における混合ガス比例計数管の応答実験結果
- 図 3.2.33(a) 弥生での実験結果からの ^3He 吸収反応出力の分離
- 図 3.2.33(b) 弥生での実験結果からの反跳反応出力の分離
- 図 3.2.34 近大炉における混合ガス比例計数管の応答実験
- 図 3.2.35 近大炉における混合ガス比例計数管の応答実験箇所の中性子スペクトル
- 図 3.2.36 近大炉における混合ガス比例計数管の応答実験結果
- 図 3.2.37(a) 原子炉施設における混合ガス比例計数管の実験結果の図 3.2.28 に示す閉凸空間への配置
- 図 3.2.37(b) 原子炉施設における混合ガス比例計数管の実験結果の図 3.2.28 に示す閉凸空間への配置 (拡大図)
- 図 3.2.38 混合ガス比例計数管の出力の関心領域の設定
- 図 3.2.39 混合ガス比例計数管の単色中性子に対する応答の関心領域出力
- 図 3.2.40 混合ガス比例計数管の単色中性子に対する応答の関心領域出力で形成した閉凸空間
- 図 3.2.41(a) 混合ガス比例計数管の核分裂中性子に対する応答の関心領域出力で形成した

閉凸空間

- 図 3.2.41(b) 混合ガス比例計数管の核分裂中性子に対する応答の関心領域出力で形成した閉凸空間（拡大図）
- 図 3.2.42(a) 混合ガス比例計数管の実測中性子スペクトルに基づく応答の関心領域出力で形成した閉凸空間
- 図 3.2.42(b) 混合ガス比例計数管の実測中性子スペクトルに基づく応答の関心領域出力で形成した閉凸空間（拡大図）
- 図 3.2.43(a) 原子炉施設における混合ガス比例計数管の実験結果の図 3.2.42 に示す閉凸空間への配置
- 図 3.2.43(b) 原子炉施設における混合ガス比例計数管の実験結果の図 3.2.42 に示す閉凸空間への配置（拡大図）
- 図 3.2.44 混合ガス比例計数管による核分裂場の中性子線量測定値の広がり分布
- 図 3.2.45 N_F を共通分母としたときの混合ガス比例計数管の閉凸空間と線量評価

- 図 3.3.1 個人線量計の単色中性子に対する応答特性
- 図 3.3.2 個人線量計の組み合わせで作られる閉凸空間 ($H_{p,slab}(10,0^\circ)$) を測定する場合
- 図 3.3.3 個人線量計の組み合わせで作られる閉凸空間 ($H_{p,slab}(10,60^\circ)$) を測定する場合
- 図 3.3.4(a) EPD(EPD-N)に CR-39 (NRPB Dosimeter)を組み合わせた場合の閉凸空間
- 図 3.3.4(b) EPD(EPD-N)単体の場合と、CR-39(NRPB Dosimeter)と組み合わせた場合のエネルギー応答特性の比較
- 図 3.3.5(a) EPD(EPD-N)に TLD($Al_2O_3:Na$)を組み合わせた場合の閉凸空間
- 図 3.3.5(b) EPD(EPD-N)単体の場合と、TLD($Al_2O_3:Na$)と組み合わせた場合のエネルギー応答特性の比較
- 図 3.3.6(a) EPD(PDM-313)に TLD($Al_2O_3:Na$)を組み合わせた場合の閉凸空間
- 図 3.3.6(b) EPD(PDM-313)単体の場合と、TLD($Al_2O_3:Na$)と組み合わせた場合のエネルギー応答特性の比較
- 図 3.3.7(a) EPD(Saphydose-n)に TLD($Al_2O_3:Na$)を組み合わせた場合の閉凸空間
- 図 3.3.7(b) EPD(Saphydose-n)単体と、TLD($Al_2O_3:Na$)と組み合わせた場合のエネルギー応答特性の比較
- 図 3.3.8(b) EPD(EPD(NRN))単体と、TLD(LiF)と組み合わせた場合のエネルギー応答特性
- 図 3.3.9(a) TLD($CaSO_4:Dy$)に TLD($Al_2O_3:Na$)を組み合わせた場合の閉凸空間
- 図 3.3.9(b) TLD($CaSO_4:Dy$)単体と、TLD($Al_2O_3:Na$)と組み合わせた場合のエネルギー応答特性の比較
- 図 3.3.10 図 3.3.4(a)の原点付近の拡大図

- 図 3.4.1 ヨウ素層厚さの検出に使う X 線のエネルギースペクトル
- 図 3.4.2 多層型電流モード X 線検出器 transXend の概念図
- 図 3.4.3 1mm 厚シリコン検出器で構成された transXend の X 線応答特性
- 図 3.4.4 ヨウ素厚さ測定での X 線入射状況
- 図 3.4.5 図 3.4.4 の条件で検出器に入射する X 線の詳細なエネルギースペクトル
- 図 3.4.6 ヨウ素厚さ測定のための X 線に対する transXend の応答
- 図 3.4.7 ϕ_1 の導出のための閉凸空間
- 図 3.4.8 ϕ_2 の導出のための閉凸空間

1. 背景と研究の目的

1.1. 放射線防護における線量測定とその課題

放射線の防護を目的として、放射線場とそれによる被ばくを表現するためのさまざまな方法が導入されてきた。物理量としては、フルエンスやカーマ、吸収線量が該当する。一方、放射線による被ばくの評価には、防護量と実用量の 2 種類が定義されている。防護量は、ICRP（国際放射線防護委員会、The International Commission on Radiation Protection）と ICRU（国際放射線単位・測定委員会、The International Commission on Radiation Units and Measurements）によって定められた、人体のある部位、あるいは全身について特定することができる被ばくを受けた人の健康リスクに関連する量で、実効線量や等価線量が該当する。一方、実用量は、その放射線状況が、放射線の防護体系の内どのように捉えられるべきかを確認するために用いる、計測が可能な量で、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量が該当する¹⁾²⁾³⁾。防護量は実際に測定を行うことができず、物理量や実用量に基づいた適切な計算評価を必要とする。実際の日常的な放射線防護においては、実用量の計測が一般に行われている。

これらの量の評価のために、ICRP と ICRU は、物理量から防護量や実用量を算出する換算係数を提供している⁴⁾⁵⁾。これらの換算係数は、エネルギーレンジ毎の、単位フルエンスに対する諸量の比で与えられており、当該エネルギー領域におけるフルエンスが得られれば、実用量や防護量などの目的量を導出できる。実際の放射線場は、広いエネルギー範囲にわたるスペクトルを形成しており、目的量の評価においては、このエネルギー範囲で、スペクトルと換算係数の直積の積分値を求めなければならない。特に、中性子による被ばく線量については、一般的に扱われる中性子のエネルギー範囲は 8 桁を超える範囲であり、また線量諸量の換算係数もエネルギーに応じて最大で 2 桁異なるため、困難なものとなっている。

さて、実際の放射線防護で行われている中性子線量測定に目を向けてみる。防護のための線量測定では、大きく分けて空間線量の測定と個人線量の測定が行われる。空間線量の測定には、いわゆるレムカウンタやレム特性を有するエリアモニタが使われており、それらの測定器出力は周辺線量当量と関連付けられている。一方、個人線量の測定では、体表面に着ける個人線量計が広く使われており、個人線量当量に関連付けられている。これらの測定器は日常的な簡易測定を目的としており、一般に十分なエネルギー分析能力を有していない。したがって、前段で述べた換算係数を使用した詳細な線量測定の適用は難しい。通常は、これらの線量測定器の使用に当たっては、測定対象の中性子エネルギー分布を想定した校正場を用意し、その場における中性子フルエンスに対応する測定器の積分出力と、その中性子フルエンスに対応する実用量との相関を決めている。これが線量計の校正の概要で、ISO⁶⁾⁷⁾⁸⁾や JIS⁹⁾でも推奨されている方法である。校正用線源には $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$ や ^{252}Cf のような RI 中性子源を用いることが推奨されている。この相関は、それぞれの測定器に固有な値として固定的に決められているのが一般的である。このような校正が行われた測定

器によって、中性子線量を測定するのが一般的に行われている中性子線量測定である。

このような線量測定は、一意の値を決めるのが容易なために管理に適用することが容易であり、現場に浸透しているが、いくつかの課題もある。例えば、校正場の設定についての課題がある。実際の現場の中性子エネルギースペクトルが、上記の手法において設定した校正場で得られる中性子エネルギースペクトルと大きく異なる場合に、検出器出力から得られた実用量が、真値と大きく異なる場合がある。たとえば、減速が進んだ核分裂中性子場では、 $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$ で校正されたレムカウンタは数倍程度過大な値を示すことが知られている⁶⁾⁷⁾⁸⁾¹⁰⁾。Kosako らは、高速実験炉「常陽」の炉上部における中性子線量測定における過大評価を指摘した¹¹⁾。三枝らは、さまざまな中性子場におけるレムカウンタの線量評価の傾向をまとめている¹²⁾。図 1.1 は、Studsvik 社のレムカウンタで評価したレムカウンタの線量過大評価傾向を示した図である¹³⁾。過大評価を行うことは、必ずしも放射線防護において不適切な処置ではない。しかし、線量評価の信頼性としては課題がある。

さらに、これらの線量測定器を使用した一般的な線量測定においては、その場の中性子エネルギースペクトルに関連した情報を測定器出力から判断することができないため、その測定結果の信頼性を評価し難い。信頼ある測定結果を得るためには、測定対象場の中性子エネルギースペクトルに関する情報に基づき、それによって校正定数の妥当性を確認すべきであろう。しかし、実際に測定された場があらかじめ得ていた情報と合致しているかどうかを確認する術がない。これは、現行の線量計が過大な線量指示値を与える傾向のある根拠の一つでもある。例え、中性子スペクトルに関する十分な情報を得られなくとも、線量の過小評価を与えないことで、放射線防護上の安全性の保証を与えようとしている。

線量換算係数の変更への対応も、別の課題としてあげられる。ICRP は、放射線人体影響に関するさまざまな新たな知見に基づき、必要に応じて線量換算係数を見直してきた。最新の 2007 年勧告²⁾においても、中性子線質係数や組織荷重係数の見直しが行われた。これは、いずれ周辺線量当量や実効線量を求める換算係数の変更に結びつくと予想される。課題は、このような線量換算係数の見直しに対して、線量測定器が必ずしも追従できていないことである。現行の線量測定器の特性はハードウェアによって達成されているのが一般的である。換算係数の変動があった場合には、その変動に追従して線量測定器の特性を見直すべきであるが、ハードウェアでその特性が達成されている場合には、その設計から見直しが必要になるであろう。ICRP の 1990 年勧告¹⁾に基づき Publ.74⁴⁾で線量換算係数の変更が示されたときには、Publ.51¹⁴⁾の線量換算係数に則った設計の線量測定器が引き続き適用可能かどうかの検討がなされた。結果として、従来の測定器に実用上の不都合はないが、一部のエネルギー領域では実用量が防護量を上回るなど、想定的に防護量に対する余裕は減失していることが示されている。

ここまでに示したいくつかの課題に共通の要因は、中性子線量計の線量評価能力が固定的なことにあると考えられる。単一の固定された特性の検出器で、先に述べたような中性子線量評価の広いレンジと複雑さに対応するのは、やはり難しい。中性子エネルギースペ

クトルが測定できて、それに基づいて線量測定ができるのは理想的ではあるが、日常的使用において現実的ではない。とはいえ、何らかのエネルギー分布に関連した情報が得られれば、それに応じた柔軟な線量評価の適用が可能となる。

そこで、感度の異なる複数の検出器出力を使った線量測定を検討することにした。複数検出器を用いた線量測定としては、複数検出器出力の線形結合による線量測定、アンフォールディングによる線量推定等が一般的である。線形結合による線量評価は一般に次の式で表される。

$$D = \sum_i^n c_i \cdot N_i \quad (1.1)$$

ここで、 D は線量測定量、 n は検出器の数、 N_i は検出器 i の出力、 c_i は各検出器毎に与えられる線量測定のための定数である。エネルギー応答特性の異なる検出器の組み合わせでしばしば使われ、それぞれの感度の高い領域での線量評価寄与を加え合わせて、全線量を導いている。簡単な処理で広いエネルギー範囲に対応でき、個人線量計のデータ処理でしばしば使われている。しかし、依然として固定的な特性であり、エネルギー応答特性の柔軟性に欠ける。

アンフォールディングは一般に以下のように表現される。 k 個の要素で表現される目的量 Y_k を測定して、 j 個の要素で表現される測定量 I_j が得られるとき、 Y_k を測定して出力 I_j を与える応答関数 $R_{j,k}$ を用いて、この測定は次のように表現される。

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} & \cdot & \cdot & \cdot & R_{1,k} \\ R_{2,1} & \cdot & & & & \\ & & & & \cdot & \\ & & & & & R_{j,k} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ Y_k \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

アンフォールディングは、これから Y を解くことである。この応答行列の逆行列により Y を解くのがもっとも簡単な方法だが、逆行列が得られるのは稀で、最適解の推定を行うことが一般的である。放射線測定では、中性子や X 線のエネルギースペクトル測定でよく用いられている。しかし、解の収束性に課題は残っている。

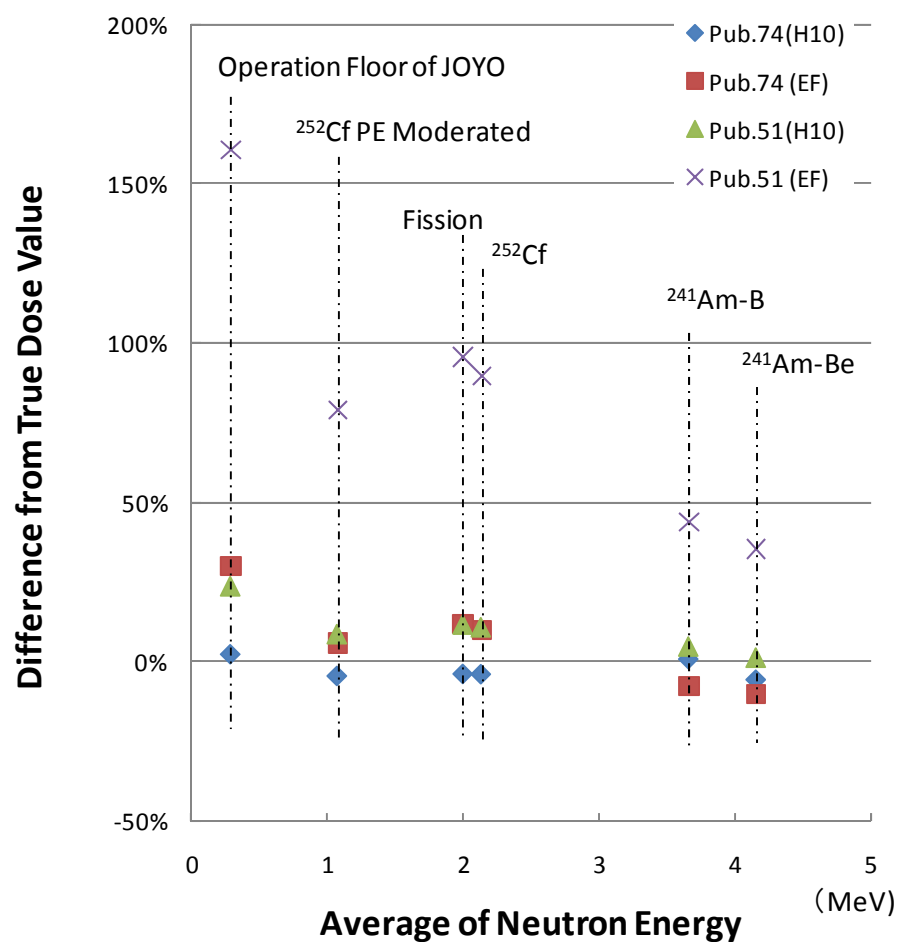


図 1.1 レムカウンタの線量評価傾向

ICRP Publication51 で示された 1cm 線量当量換算係数を用いて $^{241}\text{Am-Be}$ 場で校正された、Studzvic 社製レムカウンタ 2202D の線量評価特性を表す。横軸は各中性子場の線量換算平均エネルギーを、縦軸は真の線量値に対するレムカウンタの指示値の相対値を表す。

1.2. 研究の目的

前項で述べた 2 種類の複数検出器のデータ処理方法を踏まえて、さらに体系的に複数の検出器の出力を処理する方法として、本研究では複数検出器の出力相関を活用した線量評価法に着目した。同じ目的量を測定する独立した複数の検出器の出力に着目し、これらの相関関係から、目的量を評価しようとするものである。同じ目的量に対する複数検出器の出力の相関、及び各検出器出力と目的量の相関をベクトル化して、位相ベクトル空間を形成すると、一連の測定値は閉集合を形成することに基づいている。

この方法は、多変量解析の手法の一種で、ベクトル空間データ処理法と言われる¹³⁾¹⁴⁾。これを放射線量測定に適用する。この方法では、複数検出器の出力の相関に応じて連続的に変動する換算係数を追うことができるため、前段で提示した、中性子エネルギースペクトルの変動に追従する柔軟な換算係数を与えることができると考えられる。

この方法は、1960～70 年代に龍福によって示された¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾。これらは先駆的な研究であり、最適値の実際的な選択などに課題が残されており、その後の展開は見られていない。現在では、モンテカルロ法による放射線輸送計算と放射線検出器の応答計算の能力が大幅に向上し、複数検出器の出力相関の検討についても、具体的な数値計算を細かく実施することができるようになっている。したがって、本手法の検討に関する大幅な発展が期待できた。

ベクトル空間データ処理法の特徴は、複数検出器の出力を高次に展開することにある。そこでは、複数の検出器の個々の出力だけでなく、同一条件化で得られる各検出器の出力の相関も用いることができる。したがって、目的量の評価のために使うことができる情報は相乗的に増える。これを活用できれば、目的量評価の精度、信頼度が着実に増えていくと考えられる。例えば、最初に述べた中性子線量という広いレンジに渡る評価を必要とする量についても、少ない検出器でも評価は可能になると期待できた。これは中性子線量測定のみならず、放射線防護におけさまざまな測定を発展させ得るものである。放射線防護においては、物理的に計測することが不可能な防護量を評価するという、独特で、放射線防護上重要な測定があり、そこに大きな発展をもたらすことが期待される。

そこで、ベクトル空間データ処理法を複数検出器の出力に適用した線量評価、目的量評価とその応用に関して研究を進めた。この成果の適用は、放射線防護における日常的な測定を想定している。したがって、解析等の対象としては、普及しているシンプルな測定器を限られた数量で用いることとし、それらの出力を十分に活用して、より高度な線量評価、目的量評価を実現することを目指した。

第 1 章参考文献

1. ICRP. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1-3). 1991b.
2. ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2-4). 2007.
3. ICRU. Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry. ICRU Report 51. ICRU Publications. Bethesda, MD. 1993b.
4. ICRP. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26 (3/4). 1996b.
5. ICRU. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation. ICRU Report 57. ICRU Publications. Bethesda, MD. 1997.
6. ISO/DIS 8529-3:1996. Neutron reference radiation - Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and determination of response as a function of energy and angle of incidence.
7. ISO 12789-1:2008. Reference radiation fields - Simulated workplace neutron fields - Part 1: Characteristics and methods of production.
8. ISO 12789-2:2008. Reference radiation fields - Simulated workplace neutron fields - Part 2: Calibration fundamentals related to the basic quantities.
9. JIS Z 4521 : 2006. 中性子線量当量（率）計の校正方法.
10. Tanner, R. J.; Molinos, C.; Roberts, N.J.; Bartlett, D. T.; Hager, L. G.; Jones, L. N.; Taylor, G. C.; Thomas, D. J. Practical Implementations of Neutron Survey Instrument Performance. HPA Radiation Protection Division, 2006, HPA-RPD-016
11. Kosako, T.; Matsumoto, J.; Sekiguchi, A.; Suzuki, S.; Takeda, S.; Sato, O. Measurements and Evaluation of Neutron Dose and Spectra at the Reactor Top of the Liquid-metal Fast Breeder Reactor, JOYO. Nucl. Technol. 1987, Vol.77, 3, 279-294.
12. 三枝純、吉澤道夫、谷村嘉彦、吉田真. さまざまな中性子スペクトルに対する中性子線量計の応答評価. Radioisotopes, 2002, Vol.51, No.1, 26-33.
13. 橋本周, 齋藤圭. レムカウンタの応答シミュレーションと線量換算係数変更への対応（技術報告）. 核燃料サイクル開発機構, 2001, JNC TN9410 2001-015.
14. ICRP. Data for Use in Radiological Protection Against External Radiation. ICRP Publication 51. Ann. ICRP 17 (2/3). 1987.
15. Luenberger, D. G. Optimization by Vector Space Methods. John Wiley & Sons, Inc., 1969.
16. Boyd, S; Vandenberghe, L. Convex Optimization. Cambridge University Press,

2004.

17. Ryufuku, H. Application of different orthonormal expansion methods to neutron measurements. I. Analysis of spectra. Japan. J. Appl. Phys. 1966, 5, 903-909.
18. Ryufuku, H. Application of different orthonormal expansion methods to neutron measurements. II. Estimation of dose equivalent rates. Japan. J. Appl. Phys. 1966, 5, 910-913.
19. Ryufuku, H. Application of different orthonormal expansion methods to neutron measurements. III. Actual measurement of spectra and dose equivalent rates. Japan. J. Appl. Phys. 1966, 5, 914-917.
20. Yoshida, Y.; Tatsuta, H.; Ryufuku, H.; Kitano, K.; Fukuda, S. A practical method for evaluating the neutron dose equivalent rate. J. Nucl. Sci. Technol. 1966, 3, 473-478.
21. Ryufuku, H.; Nakayama, T. Error evaluation on multi-detector methods in neutron measurement. Japan. J. Appl. Phys. 1969, 8, 1242-1251.
22. 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. 日本原子力研究所、1974, JAERI-M-5875.

2 閉凸空間データ処理法による線量評価の理論

2.1 閉凸空間データ処理法の基礎理論

ここでは、複数の放射線検出器出力から、閉凸空間データ処理法により目的量が求まることの理論を示す。

一般に放射線測定における目的量 Q は以下の式で表される。

$$Q = a \cdot \int q(E) \cdot \phi(E) dE \quad (2.1.1)$$

ここで、 a は放射線の強度、 $q(E)$ は目的量 Q を与えるエネルギー微分換算係数、 $\phi(E)$ は規格化された入射放射線のエネルギースペクトルを示す。積分範囲は、一般に想定されるエネルギー領域全体を対象とする。

また、この目的量の測定に使われるお互いに独立な I 個の放射線検出器のうち、ある放射線検出器 i の出力 N_i は以下の式で表される。

$$N_i = a \cdot \int g_i(E) \cdot \phi(E) dE. \quad (2.1.2)$$

ここで、 $g_i(E)$ は放射線検出器 i が出力 N_i を与えるためのエネルギー微分応答関数を示す。積分範囲は入射放射線のエネルギー範囲である。

ここで、式(1)、(2)の評価において共通の変動要因となっている放射線強度を表す係数 a を相殺するために、 Q と N_j の比である線形一次分数汎関数 ${}_jK$ と、 N_i と N_j の比である線形一次分数汎関数 ${}_jR_i$ を導入する¹⁾。

$${}_jK = \frac{Q}{N_j} = \frac{a \int q(E) \phi(E) dE}{a \int g_j(E) \phi(E) dE} = \frac{\int q(E) \phi(E) dE}{\int g_j(E) \phi(E) dE}, \quad 1 \leq j \leq I. \quad (2.1.3)$$

$${}_jR_i = \frac{N_i}{N_j} = \frac{a \int g_i(E) \phi(E) dE}{a \int g_j(E) \phi(E) dE} = \frac{\int g_i(E) \phi(E) dE}{\int g_j(E) \phi(E) dE}, \quad j \neq i. \quad (2.1.4)$$

これらの式は、エネルギースペクトルが $\phi(E)$ で表現される特定の放射線の入射条件において、目的量 Q と放射線検出器 j の出力との相関、及びこの測定における放射線検出器 j の出力と任意のその他の放射線検出器出力との相関を示している。

ここで、 $q(E)$ と $g_i(E)$ はお互いに独立なため、 ${}_jK$ 、 ${}_jR_i$ はそれぞれ独立である。したがって、 $({}_jK, {}_jR_1, {}_jR_2, \dots, {}_jR_{j-1}, {}_jR_{j+1}, \dots, {}_jR_I)$ を直交座標系とする i 次元直交空間 Ω を導入することができる。この空間 Ω の性質について整理しておく。

空間 Ω では、あらゆる任意の $\phi(E)$ に対応する点 $v(\phi)$ が存在することは自明である。また、空間 Ω にある任意の部分集合 ω の共通集合は、点 $v(\phi)$ の集合で定義できるため、空間 Ω に含まれる。同様に、任意の部分集合 ω の和集合も空間 Ω に含まれる。したがって、点 $v(\phi)$ の集合は位相の公理を満たしており、空間 Ω は位相空間である。位相空間であることの意味は、複数検出器による測定結果がこの空間上の任意の点で表されることを示

す。

また、空間 Ω は以下のベクトル空間となる条件も満たしている。

- 任意の $\phi_a(E)$ と $\phi_b(E)$ について、 $\phi_a(E) + \phi_b(E)$ に対応する点 $\nu_{a+b}(\phi)$ が空間 Ω 中に存在する。
- $\phi_a(E) + \phi_b(E)$ に対応する点 $\nu_{a+b}(\phi)$ と、 $\phi_b(E) + \phi_a(E)$ に対応する点 $\nu_{b+a}(\phi)$ について、 $\nu_{a+b}(\phi) = \nu_{b+a}(\phi)$ が成立する。(加法の交換法則)
- 同じく、 $\nu_{a+(b+c)}(\phi) = \nu_{(a+b)+c}(\phi)$ が成立する。(加法の結合法則)
- $\nu_{a+0}(\phi) = \nu_a(\phi)$ と機能する $\phi_0(E)$ に相当するゼロベクトル $\nu_0(\phi)$ が存在できる。
- $\nu_{a+(-a)}(\phi) = \nu_0(\phi)$ と機能する $\phi_{(-a)}(E)$ に相当する $\nu_{(-a)}(\phi)$ が存在できる。
- $c \cdot \phi(E)$ に対応する $\nu(c\phi)$ が空間 Ω 中に存在する
- $c(d \cdot \phi(E))$ に対応する $\nu(c(d\phi))$ と $(c \cdot d)\phi(E)$ に対応する $\nu((c \cdot d)\phi)$ について、 $\nu(c(d\phi)) = \nu((c \cdot d)\phi)$ が成立する。(乗法の結合法則)
- $\nu(K\phi) = \nu(\phi)$ となる K が存在できる。
- $c(\phi_a(E) + \phi_b(E))$ に対応する点 $\nu_{(a+b)}(c\phi)$ と、 $c \cdot \phi_a(E) + c \cdot \phi_b(E)$ に対応する点 $c\nu_{a+b}(\phi)$ について、 $\nu_{(a+b)}(c\phi) = c\nu_{a+b}(\phi)$ (分配法則)
- $(c+d)\phi(E)$ に対応する点 $\nu((c+d)\phi)$ と、 $c \cdot \phi(E) + d \cdot \phi(E)$ に対応する点 $\nu(c\phi + d\phi)$ について、 $\nu((c+d)\phi) = \nu(c\phi + d\phi)$

これらは、式(3)と式(4)の展開で容易に確認できる。したがって、空間 Ω はベクトル空間でもある。ベクトル空間であることの意味は、空間 Ω 中の点を元について加法、乗法が適用できることを示す。以上より、空間 Ω は位相ベクトル空間である²³⁾。

さらに、式(3)と(4)の導入において放射線の強度に関する係数 a が相殺されていることから、エネルギースペクトル $c \cdot \phi(E)$ の入射放射線に対応するベクトル $\nu(c \cdot \phi)$ は、 $\phi(E)$ の入射放射線に対応するベクトル $\nu(\phi)$ に等しい。さらに、合成スペクトル $c_1\phi_1(E) + c_2\phi_2(E)$ に対応するベクトル $\nu(\phi_{1+2})$ は以下のように表される。

$$\nu(\phi_{1+2}) = \begin{pmatrix} {}_jK_{1+2} & \dots & {}_jR_{i,1+2} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} {}_jK_{1+2} &= \frac{Q_{1+2}}{N_{j,1+2}} = \frac{\int q(E)(c_1\phi_1(E) + c_2\phi_2(E))dE}{\int g_j(E)(c_1\phi_1(E) + c_2\phi_2(E))dE} = \frac{c_1 \int q(E)\phi_1(E)dE + c_2 \int q(E)\phi_2(E)dE}{c_1 \int g_j(E)\phi_1(E)dE + c_2 \int g_j(E)\phi_2(E)dE} \\ &= \frac{c_1Q_1 + c_2Q_2}{c_1N_{j,1} + c_2N_{j,2}} = C_j \cdot {}_jK_1 + (1 - C_j) \cdot {}_jK_2. \end{aligned}$$

$${}_jR_{1+2} = C_j \cdot {}_jR_{i,1} + (1 - C_j) \cdot {}_jR_{i,2}. \quad (2.1.5)$$

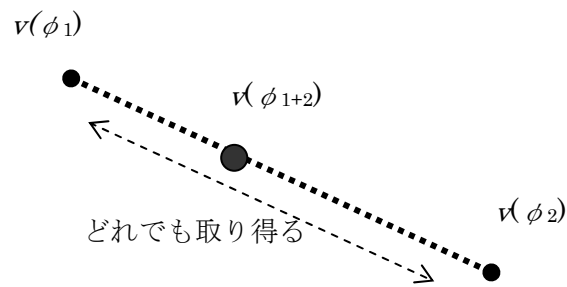
$$\text{ただし } C = \frac{c_1^1 N_j}{c_1^1 N_j + c_2^2 N_j} \leq 1.$$

以上の式から、空間 Ω 内の点 $v(\varphi_{1+2})$ は、点 $v(\varphi_1)$ と点 $v(\varphi_2)$ をつなぐ線分上にあり、またその線分は点 $v(\varphi_{1+2})$ の集合で示されることがわかる。3 つのスペクトルの合成である点 $v(\varphi_{1+2+3})$ ならば、点 $v(\varphi_{1+2+3})$ の集合は点 $v(\varphi_1)$ 、点 $v(\varphi_2)$ 、点 $v(\varphi_3)$ を頂点とする三角形（あるいは線分）を形成する。さらにこれを展開する。ここで、要素スペクトル $\varphi_e(E)$ の集合を想定し、その線形結合により任意のエネルギースペクトルを表現できるものとする。単一エネルギースペクトルは、 $\varphi_e(E)$ の典型である。このとき、空間 Ω において、任意のエネルギースペクトル $\varphi(E)$ に対応するベクトル $v(\varphi)$ は、要素スペクトル $\varphi_e(E)$ に対応する要素ベクトル $v(\varphi_e)$ の合成で表現される。この時、点 $v(\varphi)$ は、点 $v(\varphi_e)$ を頂点とする凸多角形の内に存在し、点 $v(\varphi)$ の集合はその凸多角形である。これは $v(\varphi)$ で閉じている。したがって、点 $v(\varphi)$ の集合は、点 $v(\varphi_e)$ の集合で構成できる閉凸空間 Π を形成する。（図 2.1 参照）

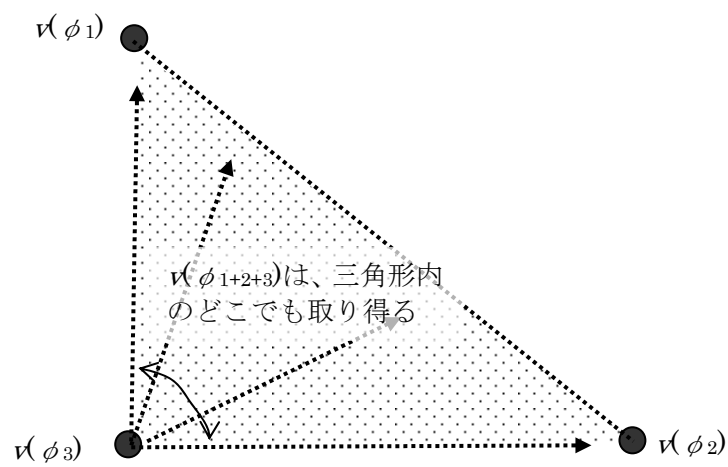
この閉凸空間 Π は、目的量 Q を求める換算係数 $q(E)$ と放射線検出器 i の応答関数 $g_i(E)$ 、及び媒介となる放射線検出器 j の選択で決まる。したがって、これらの組み合わせで行われる目的量評価の特性を示していると考えられる。

さて、目的量 Q に対応する I 個の放射線検出器の出力が得られているならば、全ての ${}_jR_i$ の値が決まる。I 次元の直交空間において、I-1 個（ ${}_jR_i$ の個数）の条件が決まるので、閉凸空間 Π から ${}_jK$ 軸に平行な一次元の弦を切り出すことができる。これは有限な線分である。図 2.2 には、3 個の検出器の場合の閉凸空間とそこから弦を切り出す場合の例を示す。この弦は閉凸空間の境界との交点を結ぶ有限の線分となる。これは、つまり全ての ${}_jR_i$ の値を決めることによって、 ${}_jK$ の範囲を決められることが示されている。したがって、 I 個の放射線検出器出力を用いて、目的量 Q を与える検出器 j についての換算係数の取り得る値の範囲が決まることになる。したがって、検出器 j の出力 N_j と掛け合わせることで、目的量 Q の取り得る範囲を決めることができる。

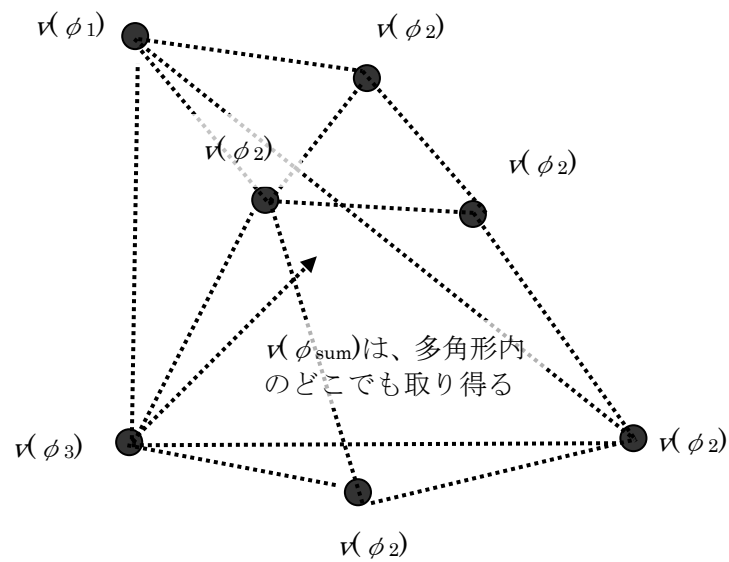
本論文で検討する閉凸空間データ処理法とは、以上の手法から目的量を評価しようとするものである。通常の測定手法とは異なり、目的量の範囲しか与えられないため、最適値の評価を行う必要がある。その一方で、複数検出器の出力を十分に活用され、結果の信憑性が的確に見える点は大きな利点になると考えられる。



(a) 2 点の合成



(b) 3 点の合成



(c) 多点の合成

図 2.1 閉凸空間の形成

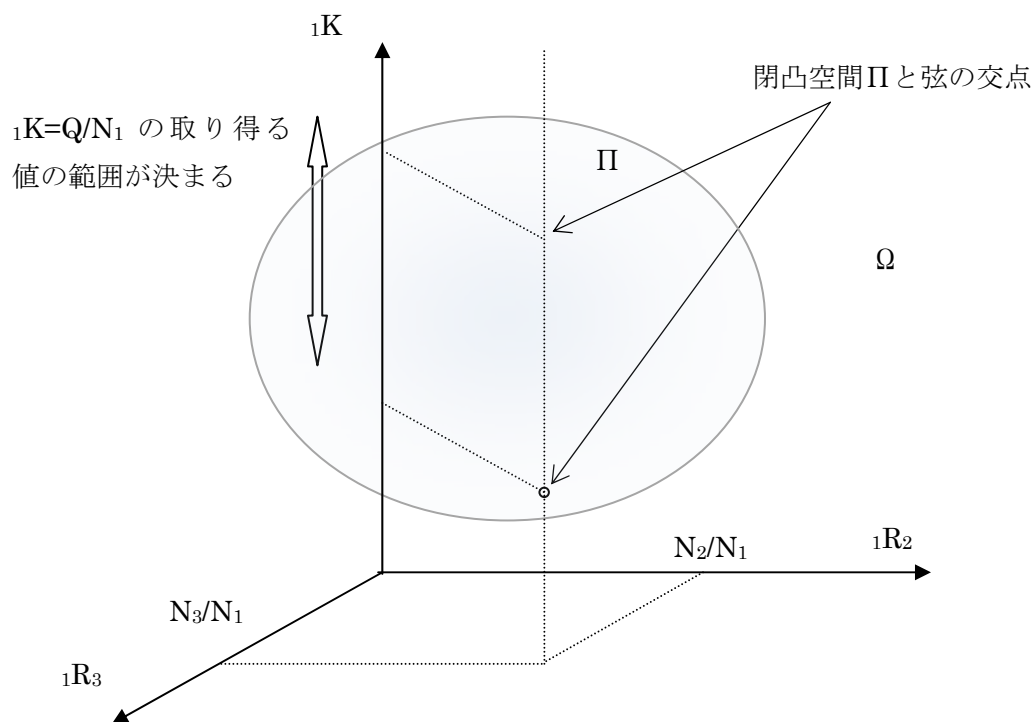


図 2.2 閉凸空間データ処理法による目的量のとり得る範囲の特定

2.2 閉凸空間の評価

閉凸空間のデータ処理の特徴を示しながら、閉凸空間の性能を定性的に評価していく。

閉凸空間では、前項にも示したように、複数検出器の出力の比から、特定検出器の出力に対する目的量の比の取り得る範囲が結果として与えられる。ところが、実際の測定においては、目的値の評価量の取り得る幅は小さいほうが望ましい。これは、単一の検出器による測定、及びそれらの線形結合による測定の場合とは様相が異なる。

単一の検出器による測定、及びそれらの線形結合による測定では、一般に唯一の測定値が与えられる。それと真値との比較により、その測定の信頼性が決まる。真値との相違の要因は、目的量の測定に使われる応答関数と目的量を求める換算係数の差と、検出器応答の統計的変動の二点にまとめられる。応答関数の相違はそれぞれの測定器の固定された特性とみなすことができ、もっぱら測定器の評価の指標になる。また、個々の測定においては、統計的変動により、測定器出力は測定条件に基づく特定の幅を持つてばらつく。その一方で、複数検出器出力に基づく閉凸空間データ処理法においては、真値との相違の要因は、複数の検出器出力の比によって決まる閉凸空間中の弦の長さで表現される広がり、それぞれの検出器における応答の統計的変動による誤差の二点となる。閉凸空間の広がりには複数検出器の応答特性の比によって決まるため、これらの検出器の組み合わせにおける固定された特性であり、その組み合わせの良否の評価の指標となる。重要な点は、この閉凸空間が常に真値に対する検出器応答で作られていることであり、したがって、常に真値に相当する値が閉凸空間中の当該の広がりの中に存在するということである。これは、単一検出器による測定とは大きく異なる。常に、真値を含む値が評価されていることは大きな利点となり得る。その一方で、それぞれの広がりの中で、特定の値を指定する必要も想定できるため、その考え方については、次項で論じる。なお、それぞれの測定器出力の統計変動は、実際の測定器出力比を閉凸空間にあてはめるときに影響を与える。

さて、閉凸空間データ処理法では、閉凸空間の広がりをその性能の評価指標とするが、この広がりについて考察する。ここからは、議論の整理のために、二次元の閉凸空間について検討する。多次元であっても状況は同様とみなすことができる。まず、この広がり、狭いほうが目的量評価においては有利である。広がりが狭いことは、目的量の評価値の不確かさが小さくできることを意味する。したがって、精度の高い目的量評価を行うことができる。理想的には、閉凸空間は直線状（一次関数形状）をとることが望ましい。（図 2.3 参照）このとき、複数検出器出力比と目的量への換算係数は 1 対 1 の対応を取り、目的量を一意に決めることができる。

常にこのような理想的な閉凸空間を作る組み合わせで目的量評価を行うことができるとは限らず、多くの場合は、要素ベクトルに対する応答の集合は曲線状の分布を形成し、それによって広がりのある閉凸空間が形成される。このとき、評価対象をむやみに広げないために、要素ベクトルの集合は一定の範囲に特定するものとする。例えば、単色エネルギースペクトルを要素スペクトルとするのなら、想定しえるエネルギー範囲を限定すべきで

ある。閉凸空間によるデータ処理においては、図 2.4 に示すような単調関数で表せる要素ベクトルの集合が好ましいと考えられる。閉凸空間内の要素ベクトルの結合に相当するベクトルの配置や分布の評価を行いやすく、特定値の選定に有利と思われる。一方、要素ベクトルの集合が周期関数や発散関数の形状をとる場合には（図 2.5 参照）、閉じた空間を評価するのが難しくなり、本法の適用は不向きであろう。また、開曲線だけでなく、閉曲線状の集合を示す場合でも閉凸空間の形成は可能である（図 2.6 参照）。ただし、要素ベクトルの合成は複雑な傾向を示すため、特定値の選定に不利益をもたらすかもしれない。

これらの閉凸空間の形状を与える要因について検討する。閉凸空間の形状は、これまでも述べてきたように、複数検出器の出力比、及び特定の検出器の出力と目的量の比によって与えられる。まず、複数検出器の出力比であるが、これは目的量換算係数の変動に応じて変化することが望ましい。ここで、各検出器の応答特性が目的量に応じた変動特性を示すことが望ましいが、必ずしも最良の応答特性を有する必要はなく、2 種類以上の検出器が相補的に機能して、目的量に対する応答を形成すれば良いことになる。裏を返せば、お互いに類似の応答特性を示す検出器の組み合わせは望ましくない、ということになる。類似の特性の検出器の組み合わせでは、入射放射線の条件が変わっても、相互の出力比が変動を示しづらいということであり、閉凸空間データ処理法を適用しづらい。本手法の特徴は、諸条件の変動に基づく目的量換算の変動を、閉凸空間における弦の変動で表すことであり、それによって柔軟な測定が行えることにある。お互いに類似の応答特性を示す検出器の組み合わせでは、この特徴を十分に発揮できない。

また、特定の検出器の出力と目的量の比も、目的量換算の変化に応じて追従させることになるが、これらの特性の直交性も高いほうが、目的量換算の変動に対する高い感度が期待できる。

以上の検討結果を踏まえて、目的量に応じて、閉凸空間を形作る検出器の種類とその組み合わせの的確な選択を検討すべきである。

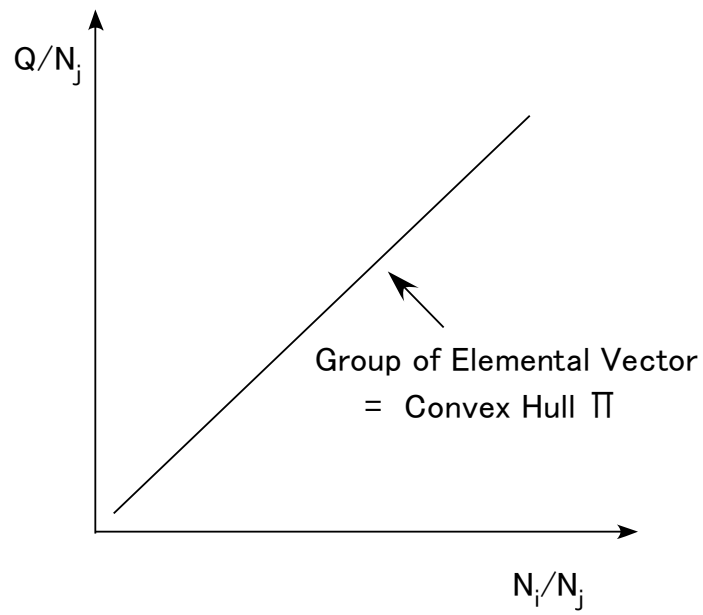


図 2.3 目的量評価のための理想的な閉凸空間

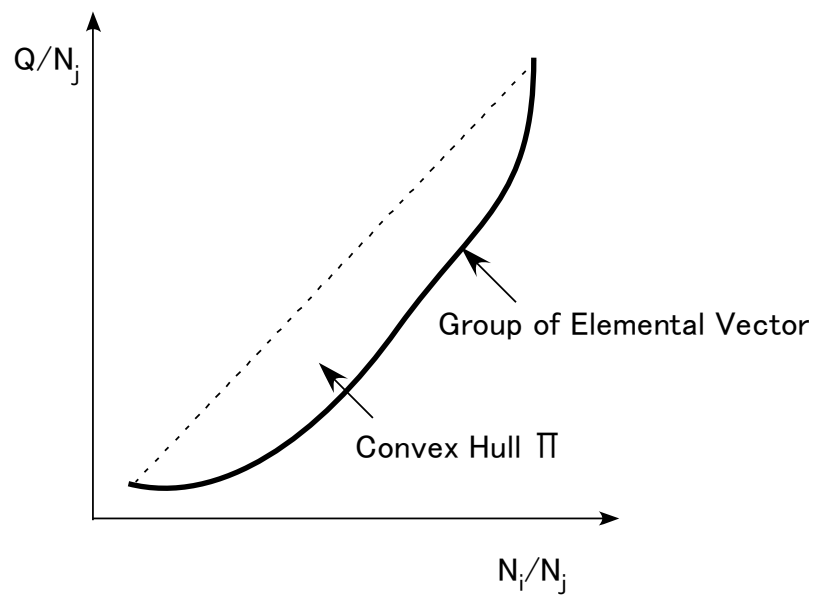


図 2.4 目的量評価のための好ましい閉凸空間

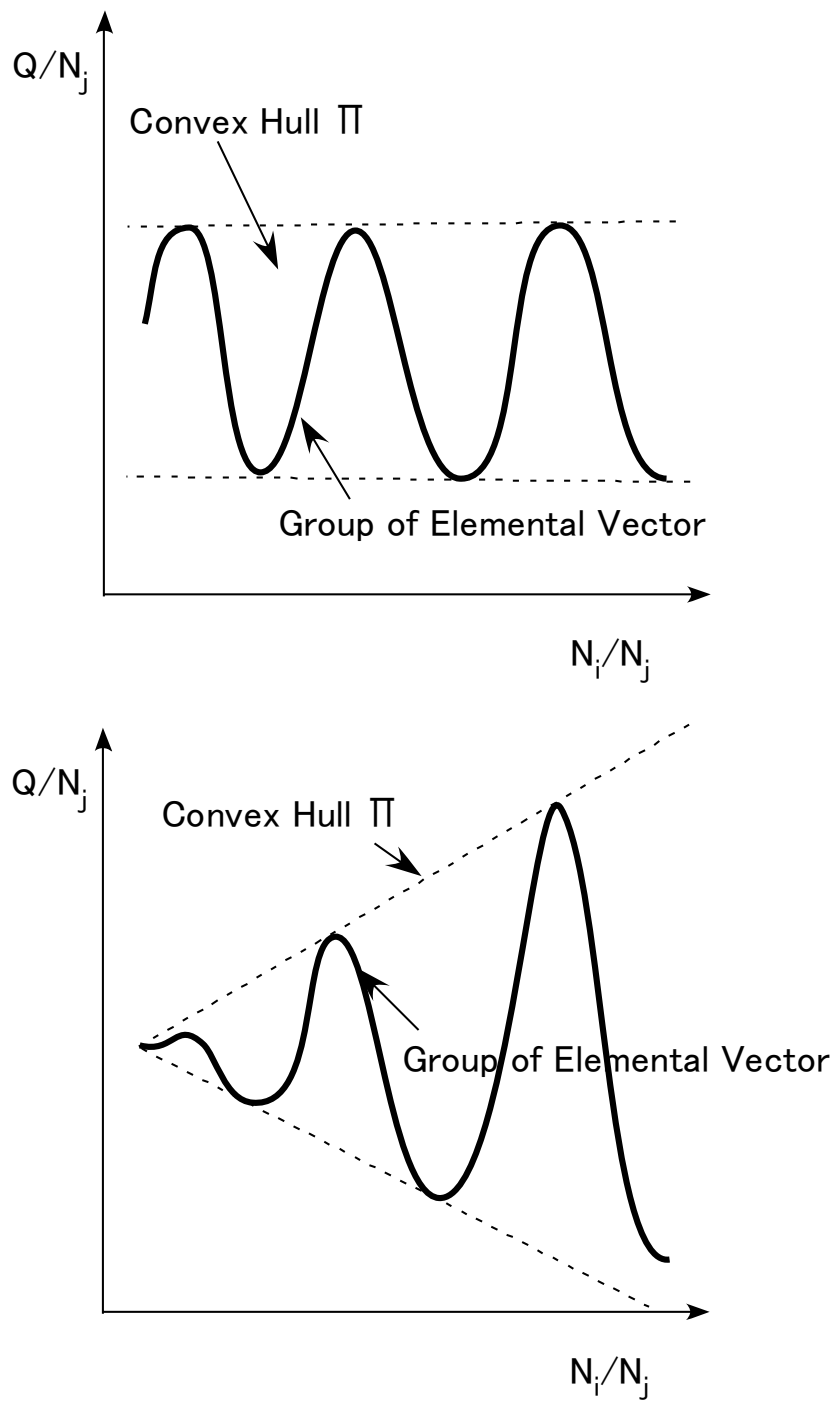


図 2.5 目的量評価において好ましくない閉凸空間の例

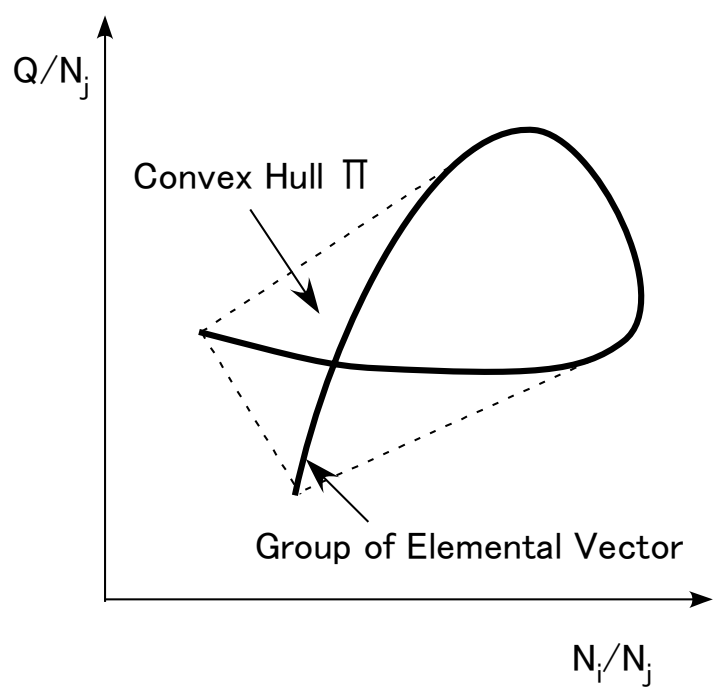
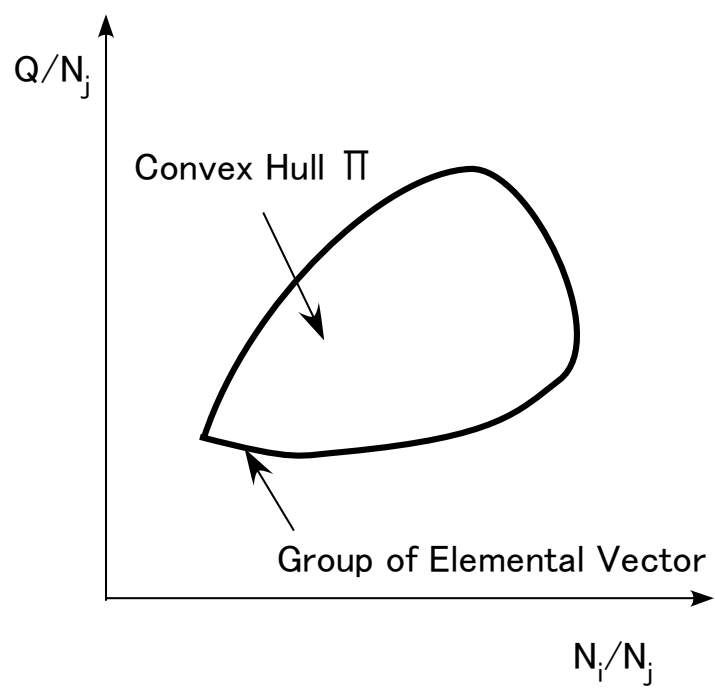


図 2.6 閉曲線による閉凸空間の形成

2.3 最適値の選択

閉凸空間データ処理法により、目的量の取り得る値の広がりを与えられる。また、前項で述べたように、そこには真の値が含まれる。しかし、閉凸空間が十分に狭く、許容できる精度で目的量換算係数を一意に決められる場合を除いて、真値を特定することは容易ではない。真値を特定するための情報量が不足している。しかし、何らかの目的で、閉凸空間中の広がりから、その測定がもたらす最適値を決める必要が生じることは容易に想定できる。ここでは、その最適値の決め方について考察する。

広がりの中で、平均値、あるいは中央値を最適値とするのは一つの方法である。この閉凸空間中において、各点と閉凸空間の距離を誤差と表現し、最大誤差が最小となる点の集合を最適値とする方法を龍福が提案した¹⁾。しかし、これらの方法は、閉凸空間中において各点が全域において同等の特定の条件の下に分布していることが前提となる。ところが、閉凸空間中における各点が位置する場所は、個々の測定条件に応じた特定の場所である。2.1 項で示したように、それらの点は、その測定条件を表現するような要素ベクトルの和で与えられる。ある種の閉凸空間では、特定の要素ベクトルの関与がないと位置し得ない場所がある、例えば、図 2.4 に示したような弓状の要素ベクトルで構成される閉凸空間では、「弦」の部分には、「弓」の両端に位置する要素ベクトルの関与がない点は存在し得ない。また、「弓」に近い部分はその近傍の要素ベクトルの影響のみを強く受ける点が存在する。あるいは、図 2.6 のような閉曲線による空間の場合にはもっとさまざまな影響を受けることになるだろう。したがって、個別のケースにおいて、測定状況を鑑みながら、閉凸空間中の測定点の分布状況を想定する必要がある。そこから、何らかの最適値を選定することになると考えられる。それは、周辺環境に基づいて推定される最尤値であるかもしれない。また、放射線防護上の最適値を適用する状況もあり得るだろう。

状況によっては、線量の過小評価を与えないことが要求される場合もあるかもしれない。その場合には、前述した固有の測定点分布との対応をとり、分布の中において、例えば 95 パーセンタイル値を取り、代表値として適用するのも一策と考えられる。

最適値選択の問題については、具体的な事例への閉凸空間データ処理法の適用を示した後、4.1.3 項で再度検討する。

2.4 適用の条件

前項までに、閉凸空間データ処理法を用いた目的量の評価の理論を示したが、これらの適用についてはいくつかの制約条件が考えられる。以下に、それぞれの条件について論じる。

第一の条件として、目的量の評価に必要なエネルギー領域全般において、各反応が感度を持つべきであることが挙げられる。不感領域があると、その領域における入射放射線情報が検出できず、したがって、そのエネルギー領域の放射線による目的量への寄与を評価することができない。

単一検出器による測定においても同様の条件は課せられていると考えるべきである。この条件を単一検出器で満足することが困難なケースを克服するために、複数検出器による測定を行ってきた経緯がある。個々の検出器が必ずしも十分に広い有感領域を持たなくても、それぞれの検出器の有感領域を適切にオーバーラップさせることにより、広いエネルギー領域に対する感度を担保させようとしてきた。ボナーボール法による中性子スペクトル測定は典型的な事例である^{4,5)}。これらのデータ処理には線形結合法やアンフォールディング法が適用されている。しかし、閉凸空間データ処理法の適用では、複数検出器出力のうち、ある検出器出力が得られていないと検出器出力比を得ることができず、閉凸空間を用いた目的量評価を行うことができない。したがって、対象エネルギー領域全般において、目的量評価に使われる測定が感度を有することが望ましい。

なお、この場合に、それぞれの検出器の目的量に対するエネルギー応答特性の直線性は必ずしも必要とはされない。むしろ重要となるのは、どのような形で、入射放射線の条件の変動に応じて出力特性が変動することである。これによって、入射放射線条件に応じた検出器出力比の変動、さらには閉凸空間を切る弦の変動につながる。

さらに第二の条件として、それぞれの検出器出力が統計的に安定している必要がある。閉凸空間の評価には検出器出力比を用いているが、検出器出力比 ${}_jR_i$ の持つ誤差 σ_i は、それぞれの検出器の標準誤差付き出力 $N_i \pm \sigma_i$ 、 $N_j \pm \sigma_j$ を用いて、誤差伝搬の公式により、一般に以下のように表現できる。

$${}_jR_i \pm {}_j\sigma_i = \frac{N_i \pm \sigma_i}{N_j \pm \sigma_j} = \frac{N_i}{N_j} \pm \frac{N_i}{N_j} \sqrt{\left(\frac{\sigma_i}{N_i}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_j}{N_j}\right)^2} = {}_jR_i \pm {}_jR_i \sqrt{\left(\frac{\sigma_i}{N_i}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_j}{N_j}\right)^2} \quad (2.4.1)$$

(2.4.1)式より、組み合わせた検出器出力の相対標準誤差が同程度であれば、双方の影響が同程度に検出器出力比の誤差に寄与することがわかる。ところが、どちらかの検出器出力の相対標準誤差が大きくなると、検出器出力比の誤差は、大きい方の相対誤差の影響をより強く受けるようになる。例えば検出器 i の相対誤差が検出器 j の 10 倍であるならば、検出器出力比 ${}_jR_i$ の相対誤差は検出器 i の相対誤差にほぼ等しい。つまり、検出器出力比の誤差は、各検出器出力の統計的収束の悪い方に依存することになる。したがって、閉凸空間データ処理法で十分な精度を持った評価を行うためには、それに適用する全ての測定におい

て、目的量の評価に必要な精度を満足するような、統計的に安定した出力を与えることが必要となる。

以上の二つの条件を勘案すると、例えば、光電効果・コンプトン効果・電子対生成の組み合わせで出力を与える無機シンチレータによる γ 線検出は、 γ 線エネルギー領域全域において十分な感度を示すために、閉凸空間データ処理法による目的量評価への適用が可能と考えられる。その一方で、例えば閾反応による放射化を用いた中性子検出は、閾値未満の入射中性子に対して十分な応答が期待できないため、2つの条件を満たすことができず、閉凸空間データ処理法の適用は好ましくないと言える。

とはいえ、例えば中性子線量評価では、広いエネルギー範囲の中性子を評価対象にしなければならないが、その全てに対応できる反応は限られており、不感領域を有する検出反応を組み合わせざるを得ないケースは容易に想像できる。対応策としては、より多くの検出器の組み合わせを与えることにより、一つの検出器の感度低下の影響を相対的に低下させることが考えられる。ただし、この場合には高次元の閉凸空間を解く必要が生じるため、数値的な取り扱いが複雑になる。もう一つの対応策としては、評価対象を限定することにより、測定が適応できるようにすることも考えられる。中性子線量評価であれば、例えば10MeVを超える高いエネルギーの中性子の存在が相対的に重要ではない状況に限定して、適用を図る方法がある。高エネルギー中性子に対する応答を省けるため、適用できる検出法の選択肢が増えると期待できる。

第 2 章参考文献

1. 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. 日本原子力研究所, 1974, JAERI-M-5875.
2. Luenberger, D. G. Optimization by Vector Space Methods. John Wiley & Sons, Inc., 1969
3. Boyd, S.; Vandenberghe, L. Convex Optimization. Cambridge University Press, 2004
4. Bramblett, R. L.; Ewing, R. I.; Bonner, T. W. A New Type of Neutron Spectrometer. Nucl. Instr. and Meth. 1960, 9, p.1-12.
5. Thomas, D. J.; Alevra, A. V. Bonner sphere spectrometers-a critical review. Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res., 2002, A476, p.12-20

3 放射線防護のための測定への閉凸空間データ処理法の適用

3.1 本法の適用の概要

本章では、閉凸空間データ処理法による二種類の放射線線量評価への適用を検討し、さらにそれを展開して放射線のエネルギー測定についても検討をする。

一般的な放射線測定は、放射線に付随するエネルギー量を検出することが目的であるが、それは大きく二つに分けることができる。第一は、線量と言われるマクロな付与エネルギー量を評価することで、一般に「線量測定」と呼ばれる。これは、さらに物質に付与されるエネルギー量の測定と、その付与されたエネルギーによる放射線影響の指標となる被ばく量の測定に分けることができる。放射線防護において測定対象とされるのは、特別な場合を除いて、被ばくの評価量で行われる。これは、さらに目的に応じて分類でき、放射線を伴う場の放射線強度を評価するための空間線量と、放射線を受ける個人の受ける被ばく量を評価する個人線量の評価に分類できる。

第二は、線量評価がマクロの評価であるのに対して、個々の放射線の有するエネルギー量をミクロの視点で分析する、放射線の「エネルギー測定」がある。放射線核種分析や、遮蔽能力評価などにおいて、個々の放射線エネルギーの分布情報が使われており、被ばく源の特定や被ばく量の評価を詳細に展開するために必用な情報となる。

以上を踏まえて、ここでは、3種類の放射線測定への閉凸空間データ処理法の適用を検討する。線量測定については、空間線量の測定事例のうち、いくつかの課題が残されている中性子線量測定を取り上げ、3.2項で検討する。次に、線量測定におけるもう一つの重要事項である個人線量の測定事例として、個人線量計を用いた中性子個人線量の測定を取り上げ、3.3項で検討する。最後に、エネルギー測定の事例として、適用が広いと思われるX線のエネルギー分布測定について、3.4項で取り上げる。

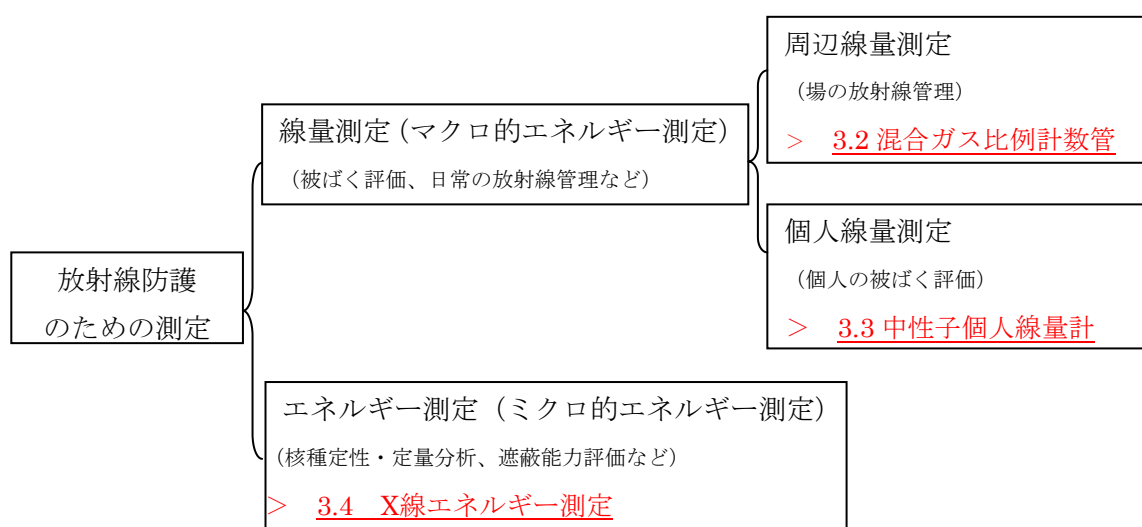


図 3.1 放射線防護のための測定の整理

3.2 中性子線量測定への適用 —混合ガス比例計数管による中性子周辺線量当量測定—

3.2.1 中性子周辺線量当量測定への適用検討

3.2.1.1 適用の検討

ベクトル空間データ処理法の放射線測定への適用について検討していく。最初は、中性子周辺線量当量測定への適用である。

中性子周辺線量の測定には、いわゆる「レムカウンタ」と呼ばれるような、中性子線量測定サーベイメータが一般に用いられている¹⁾。また、精度の高い中性子周辺線量当量を行いたい場合には、ボナーボール法²³⁾などにより、中性子のエネルギースペクトルを測定し、そこから線量評価を行う場合もある。これらに一長一短があることは、すでに第一章で指摘した。このような中性子周辺線量当量の測定に閉凸空間データ処理法に基づく測定手法を適用することの利点は以下の通りである。

まず、中性子エネルギースペクトルの状況に応じた線量測定を容易に行うことができることである。中性子線サーベイメータは、その出力からは中性子エネルギーに関する情報を取り出すことができず、適切な線量評価のためには、中性子エネルギースペクトルに関する事前情報を必要とする。一方で、中性子エネルギー測定では、多くの装置とアンフォールディング計算が不可欠であり、日常的に使用するには大掛かりな設備である。閉凸空間データ処理法はこれらの中に位置していると言えよう。アンフォールディングよりも少ない計算量で、エネルギースペクトルの変動に追従した線量測定を可能にする。情報量が必ずしも十分ではないために一意の値に線量値を決めるのは難しいが、その代わりに線量値の取り得る範囲が与えられる。これは、測定結果の信用性がどの程度あるのかの判断基準となり有効と考える。

次に、いわゆる「レムレスポンス」を持たせる必要がないため、厚い減速材が不要となることも利点である。従来の中性子線サーベイメータは、中性子線量を直読で表示するために、5~10kg 程度の減速材を必要としている。一方、閉凸空間データ処理法を適用する場合には、個別の測定器の応答は、それぞれが最良の線量応答特性を備える必要はない。線量応答特性は相互の反応率比で決めるからである。したがって、熱中性子に高感度な反応と速中性子に高感度な反応を組みあわせるなどの案が考えられるが、ここでは必ずしも厚い減速材は必要ではない。これは線量測定器の大幅な軽量化が期待できる。

以上のような特徴を持つ閉凸空間データ処理法の中性子周辺線量当量測定への具体的適用について、次に検討する。

3.2.1.2 測定器の選択

閉凸空間データ処理法を用いた中性子周辺線量当量測定に適用する検出器の組み合わせの選択を検討した。

まず、中性子測定の種類の組み合わせについては、熱中性子に代表される比較的エネルギーの低い成分の中性子を検出する測定系と、エネルギーの高い中性子に対して十分な感度を有する測定系の 2 系統の測定の組み合わせを想定した。3 系統以上でも閉凸空間データ処理法の適用は可能であり、より多い情報量の組み合わせはよりの確な線量測定に結びつくと期待できる。しかし、ここでは、むしろ単純な系で閉凸空間データ処理法の有効性を確かめる方針で検討を進める。低エネルギー有感型と高エネルギー有感型の組み合わせにより、中性子場の特徴の一つである広いエネルギー範囲に対応した線量測定を行う。

2 つの測定系統は、閉凸空間を形成するために、互いに独立である必要がある。互いに独立な複数の測定系としては、複数の検出器の組み合わせを想定するのは有効であろう。しかし、複数の検出器による測定に閉凸空間データ処理を適用する場合には、各検出器で為される測定において、測定条件の同一性を常にコントロールしなければならない。これは不可能ではないが、決して容易でもない。そこでここでは、単一の検出器が 2 種類の異なる検出過程を併せ持ち、それぞれの検出過程の出力を弁別して測定できる検出器を想定した。この検出器は、複数の検出器が時間的・空間的に同一の場にあることと同義である。これによって、複数の測定が同一条件で行われていることが保障される。不確かさの要因を減らすことができ、効果の大きい手法である。

また、サーベイメータとしての適用を目指すため、測定結果の出力の即時性も重要となる。したがって、ここでは、固体飛跡検出器や放射化箔などの、事後処理や測定を要する測定法は除外した。また、サーベイメータであるならば、持ち歩きが可能で、さらに堅牢であることも重要である。

ここで、測定器の候補としては、ガス計数管、固体シンチレータ、半導体検出器などが想定されるが、それらのうちから、ガス計数管を選択することにした。ガス計数管を選択した理由は、ガスの組成の調整により検出反応の種類や感度の調整が容易であること、また比較的大きな体積の測定器を作ることができるため大体積の平均的な空間線量当量の評価が可能であること、作製費用が安価であることなどである。ガンマ線弁別性能に優れるであろうことも選択理由としてあげられる。半導体検出器は、体積を大きくするのには向いておらず、周辺線量当量測定の特徴でもある、ある程度以上の体積の平均値で評価するという要求を満たさない。固体シンチレータについては、十分に線量計としての適用の検討に値しており、将来の検討に乗せるのは有効であろう。

計数ガスには ^3He と CH_4 の混合ガスを用いることにした。 ^3He の熱中性子吸収反応で比較的低速の中性子を検出し、一方で CH_4 に含まれる H の反跳反応を用いて比較的早い成分の中性子を検出する。 ^3He の反応出力がピーク状のエネルギースペクトルを形

成するのに対し、 H の反跳スペクトルは連続スペクトルを形成する。したがって、エネルギースペクトルの分析により両反応は容易に弁別できると期待された。また、エネルギースペクトルによる弁別を機能させるために、ガス計数管は比例領域の印加電圧で動作させるものとした。

比較的能量の低い中性子の検出する計数ガスとしては、 ^3He の他に $^{10}\text{BF}_3$ も想定できる。 ^{10}B は ^3He よりも熱中性子吸収反応の Q 値、断面積とも大きく、反応の弁別には有利である。しかし、 BF_3 ガスは化学的毒性や腐食性を有するため、速中性子検出用ガスとの混合作業に支障をきたすことから、採用しなかった。

一方、速中性子の検出については、常温で気体である H 含有化合物を検討対象とした。 H_2 は有力であるが、やはり化学的活性が高く、ガスの取り扱いが難しいため除外した。次に候補に挙げたのは、炭化水素族である。 CH_4 よりも炭素数の多い炭化水素の方が分子あたりの水素数が多くなり、 H の反跳反応の断面積が大きくなることが期待できる。その一方で、競合反応となる C の反跳や核反応の断面積も増えるため、適当ではない。さらに、化学的安定性や沸点の低さなども不適當と判断する材料となった。また、その他の、有機系ガスについては、やはり化学的安定性や N 、 O 等の競合元素の存在などが問題と考えられ、除外した。したがって、 CH_4 がこの測定器の封入ガスとして適当と判断した。

この、 ^3He と CH_4 を封入したガス計数管を、混合ガス比例計数管と呼ぶことにし、さらに検討を進める。

3.2.2 混合ガス比例計数管の開発

3.2.2.1 設計方針

閉凸空間データ処理法を適用した中性子周辺線量当量の評価に用いる混合ガス比例計数管を設計し、仕様を決定した。設計は以下の方針で行った。

設計に当たっては、中性子検出器応答計算用モンテカルロ計算コードを用いて、計数管の応答特性を計算的に評価した。計算によって定められた仕様に基づいて計数管を製作し、実際に中性子源で応答試験を行い、設計された応答を的確に示すことを確認した。

計算に使用した NRESP - ANT コードは、中性子場におけるガス比例計数管、固体検出器およびシンチレーション検出器の出力波高分布をモンテカルロ計算法で求めるシミュレーションコードである。MRESP-ANT は、NRESP-G (A Monte Carlo code Neutron RESPONSE function for Gas counters) ⁴⁾に、MCNP-ANT(MCNPTM for Accelerator Neutron Target)⁵⁾で使われた二次荷電粒子の挙動を追う ANT オプションを追加したものである。評価可能な検出器形状は円筒形と球形であり、評価可能なガスは³He、⁴He、H₂、CH₄、Kr、Ar、BF₃等で、評価できる検出器容器の材質はアルミニウムやステンレス鋼等である。また、線源の形状としては、点線源と平行ビーム線源（円形、方形）が指定でき、さらに、荷電粒子とターゲットの反応による中性子の発生を線源として評価することもできる。中性子の検出反応は、モンテカルロ法で中性子の挙動を評価できるのに加え、二次荷電粒子の挙動を、検出器の幾何形状を含め評価し、検出器に付与されるエネルギーからその波高分布を計算することが可能である。このため、壁効果の影響も評価できるようになっている。核データには ENDF/B - IV⁶⁾、ENDF/B - V⁷⁾及び ENDF/B - VI⁸⁾から編集した値を用い、荷電粒子(p、d、t、α)の阻止能データは、“Hydrogen Stopping Powers and Ranges in All Elements”(H. H. Andersen, J. F. Ziegler, 1977)⁹⁾、“Helium Stopping Powers and Ranges in All Elemental Matter”(J. F. Ziegler, 1977) ¹⁰⁾、及び“The Stopping and Range of Ions in Solids” (J. F. Ziegler, 1985) ¹¹⁾を用いている。使用している乱数は、周期の長い RANMAR 乱数である。このコードは、円筒形³He 比例計数管の応答について、その出力スペクトルを絶対値も含めて高い精度で再現できることが確認されている ⁴⁾。

計算条件については、原則として 3.2.3 項に示した条件に準じるが、それぞれの評価対象に応じて、適宜、計算条件は調整している。

これにより、混合ガス比例計数管の中性子に対する応答を計算し、設計を行った。詳細は次項で示すが、設計の方針は以下の通りとした。

- ・二種類の反応が的確に弁別できること。

単一の検出器で二種類の応答を持たせているため、二種類の応答が的確に弁別できることが必要である。

- ・二種類の反応の反応数比が的確な値をとること。

閉凸空間を形成する際に二種類の反応の反応数比をとるが、両者の計数率が違

いすぎると的確な反応数比を与え難い。一定の統計精度を担保するために、計数率の低い側に合わせた測定時間を要するため、効率的な測定を行い難い。したがって、二種類の反応数は同程度であることが望ましい。

- ・ 現行の中性子サーベイメータの線量応答感度と同程度の感度を有すること。

現行のサーベイメータでは、中性子周辺線量当量の測定下限は $1\mu\text{ Sv/h}$ を切っている。これと同程度の測定感度を目指す。

3.2.2.2 設計要素の検討

以下に、混合ガス比例計数管の設計要素の検討経緯を示す。なお、これらの検討はお互いの評価結果を互いにフィードバックさせながら進めており、各項目の評価対象以外は最適と考えられる条件で検討を行った。

(1) 形状

計数管の形状は、球形比例計数管と円筒形比例計数管の比較で決めた。他に、平行平板計数管、半円筒形計数管、マルチワイヤ計数管なども考えられたが、検出感度の等方性の点で劣ると考えられ、除外した。

球形計数管は、検出器の投影形状、減速材の厚さや有感領域の実効長など、全方向に対して検出器構造は等方性を有し、したがって中性子の入射方向に対する感度の安定性に優れている。その一方で、陽極線と陰極間の距離が均一ではないため、計数管内の信号増幅率の分布が不均一になってしまう。そのため、入射放射線の計数管付与エネルギーと計数管出力の線形性に劣り、したがって計数管出力のエネルギースペクトルから反応の弁別を行うのに不都合があるとも考えられた。この場合、陽極線の両端に備えるフィールドチューブで、計数管の増幅率の歪みを是正すること¹²⁾で対処できると想定した。フィールドチューブとは、比例計数管の陽極線の両端に設置する導体の筒で、陽極線端部に生じる電界の不均一な部分で発生した信号を除去し、均一な電界部分の信号だけを陽極線に伝える働きをする。

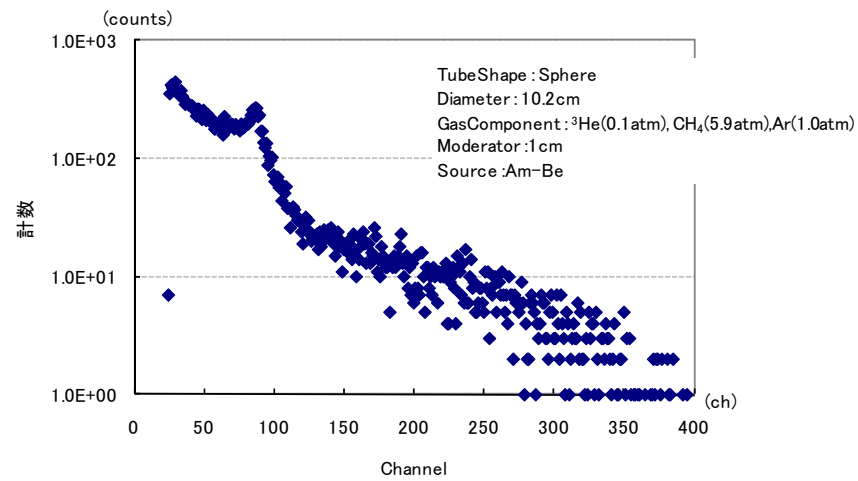
一方、円筒形計数管は、陽極線と陰極間の距離が均一で、さらにフィールドチューブで端部の増幅率歪みを補正するため、増幅率の一様性については球形より優れる。しかし、円筒の軸方向と半径方向で、検出器の投影形状や検出器内も有感領域の実効長に差があり、したがって、中性子の入射方向によって感度に差がある。

この比較は、当初 NRESP-ANT で開始したが、これをあきらめて、実験的に評価することにした。その理由は、計数管出力スペクトルの評価においてフィールドチューブによる増幅率の調整も加える必要があるが、フィールドチューブの長さが計数管毎に異なり、計数管外部から確認することもできず、評価し得ないことが分かった。そこで、円筒形計数管と球形計数管を試作し、その出力を分析することにした。それぞれの計数管を Am-Be 中性子線源で照射したときの出力を図 3.2.1 に示す。

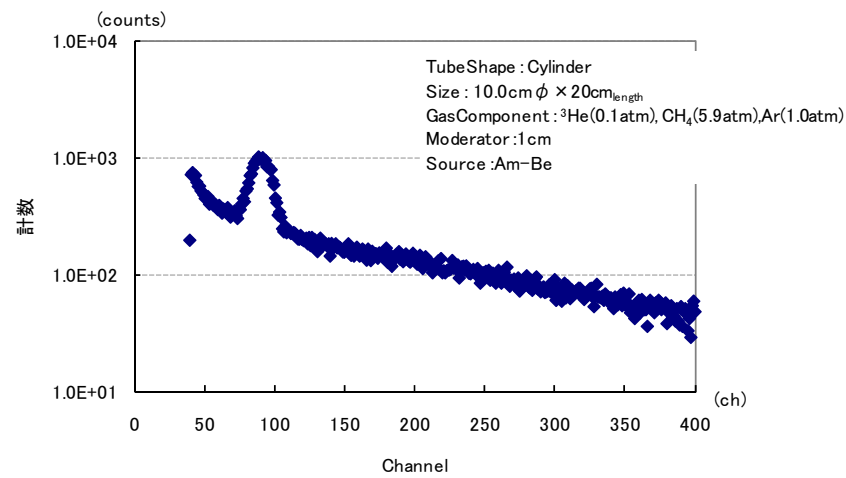
球形計数管の出力では、 ^3He 吸収反応によるピーク状出力は鈍ってしまい、反応弁別が困難であることが予想される。一方、円筒型計数管の出力はピーク状出力が明確に表れており、反跳陽子スペクトルをベースラインにとり、 ^3He 吸収反応計数を抽出することができると考えられた。

また、円筒形計数管の感度の等方性の課題については、通常の円筒型計数管では、円筒の直径が軸長に比べて十分小さく、軸方向入射の立体角は全方向に対して十分小さく保たれていることが確認された。

以上より、円筒形計数管を採用することにした。



球形混合ガス比例計数管の出力例



円筒形混合ガス比例計数管の出力例

図 3.2.1 球形混合ガス比例計数管と円筒形混合ガス比例計数管の出力比較

(2) 減速材の影響

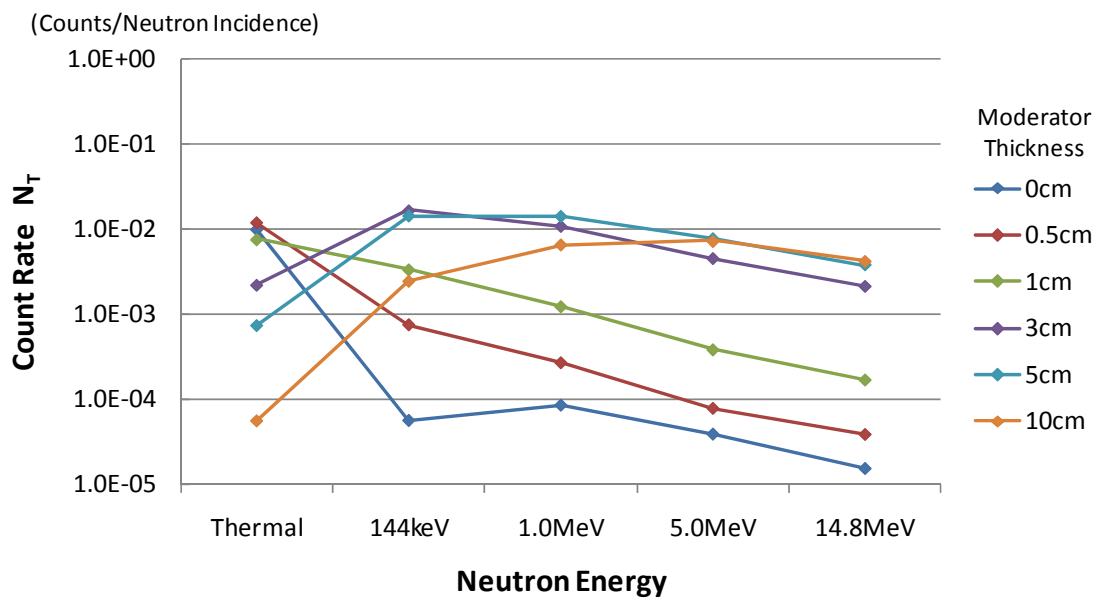
混合ガス比例計数管に減速材を備えるの検討を行った。減速材を入れる主な目的は、2種類の反応の反応量の比を調整し、広いエネルギー範囲で適切な反応量比を得られるようにするためである。熱中性子及びいくつかの単色中性子に対する円筒形混合ガス比例計数管の応答を NRESP-ANT を用いて計算し、 ^3He 吸収反応と H 反跳反応の反応率について比較した。

比例計数管のサイズは市販されている円筒形計数管から、大きめのサイズのものを選び、直径 7.2cm、長さ 17.1cm のステンレス製の計数管を使用することにした。減速材はポリエチレンとし、その厚さを 0 (減速材なし)、0.5cm、1cm、3cm、5cm、10cm と設定して、それぞれに熱中性子及び 144keV、1MeV、5MeV、14.8MeV の単色中性子を入射させた場合の 応答を計算した。計算結果から、 ^3He の中性子吸収反応による出力と H の弾性散乱による出力を抽出し、それぞれの反応率で評価した。

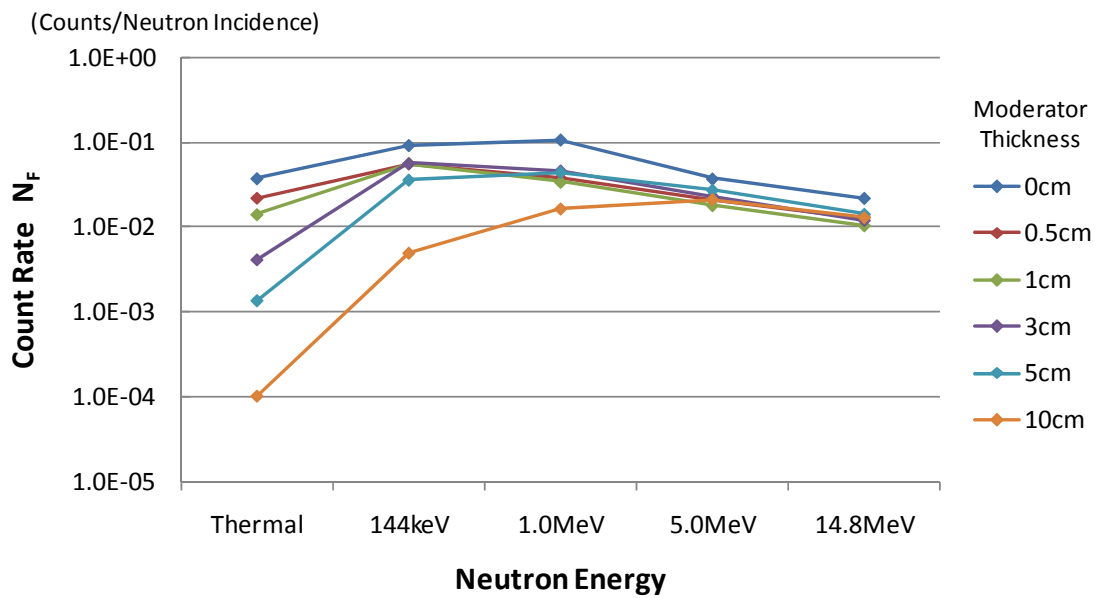
図 3.2.2 の ^3He 吸収反応の応答特性を見ると、減速材の厚さが 0.5cm から 1cm の場合には、中性子エネルギーの変動に応じて単調な変化を示すが、それより厚いと 1MeV 未満のエネルギー領域で中性子エネルギーの上昇に合わせて計数率が上昇するが、それを超えると減少に転じる傾向を示した。また減速材を入れないと単調な変動傾向を表さず、中性子エネルギーに応じた変動の観察が行いづらいことが示唆された。また、反跳反応に対する応答特性はいずれも同様の傾向を見せたが、減速材が厚いほど中性子エネルギーの変動に対する応答が顕著であった。

閉凸空間データ処理法を適用する場合には、個別の反応量だけでなく、反応数比も評価する必要がある。図 3.2.3 にその結果を示す。減速材を付けないと反応数比が安定せず、また、厚くすると反応数比の変動が抑えられてしまうことが示された。また、反応率比が大きくなるということは、両反応の反応率の差が大きいということを意味しており、前項で決めた、両反応で同程度の計数を得る、という方針に合わない。したがって、1cm が減速材厚さとして最適であると判断した。

なお、参考までに図 3.2.4 に、円筒型比例計数管をポリエチレンを減速材として覆った場合に、その厚さと重量の関係を示す。1cm ならば、減速材の重さは 500g 程度であり、許容できる重さであると言える。



(a) $^3\text{He}(n,p)\text{T}$ の計数率の変動



(b) $\text{H}(n,n)\text{p}$ の計数率の変動

図 3.2.2 減速材の厚さに応じた混合ガス比例計数管の反応率の変動

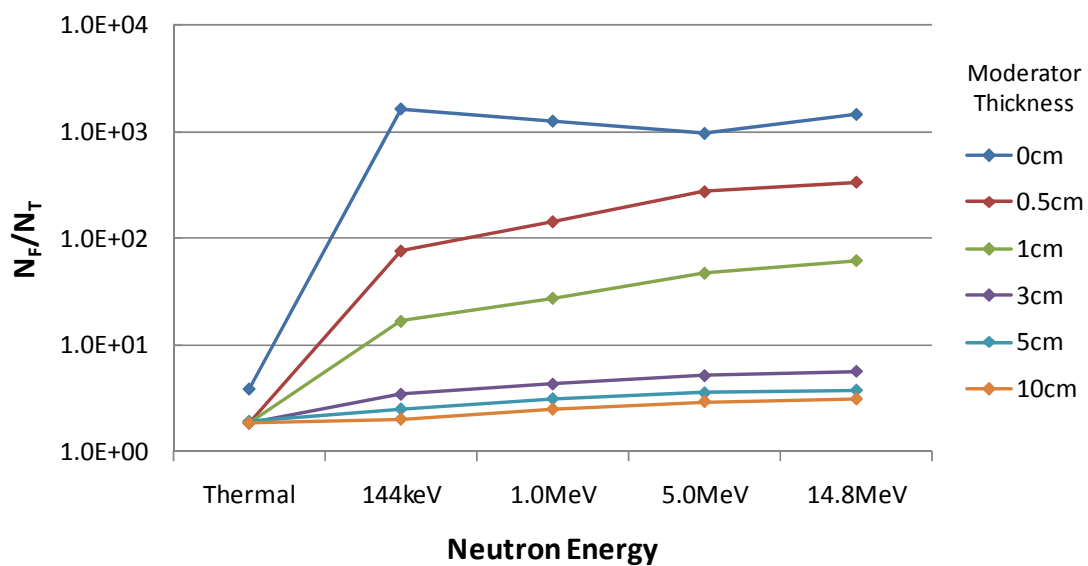


図 3.2.3 減速材の厚さに応じた混合ガス比例計数管の ^3He の吸収反応とHの反跳反応の反応率比の変動



図 3.2.4 混合ガス比例計数管に使う減速材の厚さと重さ

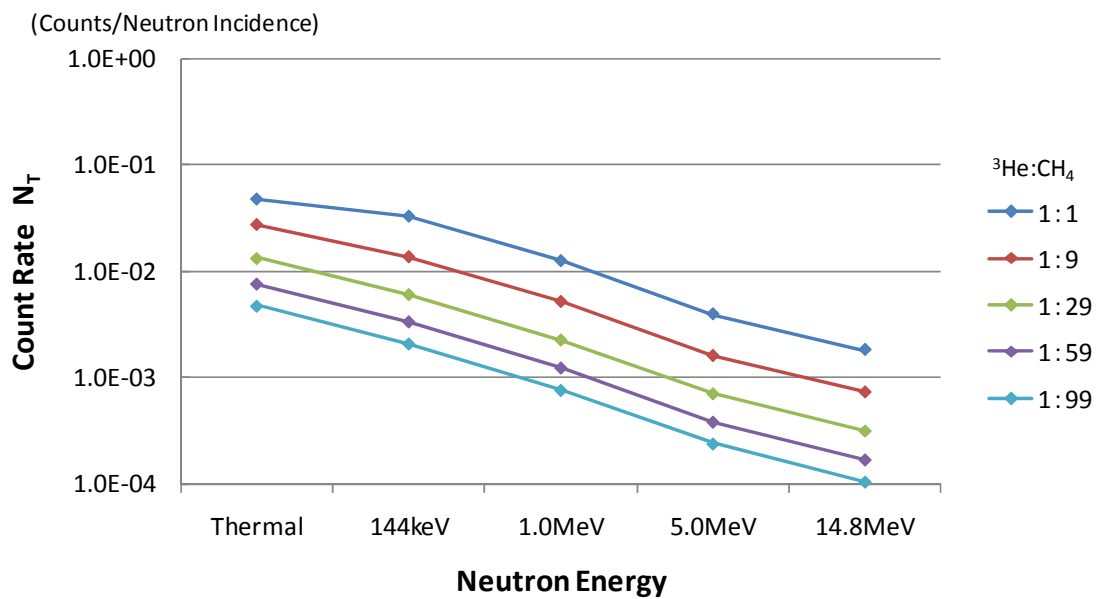
(3) ガス構成の調整

ここでは、計数ガスを構成する ^3He と CH_4 の濃度比を調整する。 ^3He の吸収反応の出力がピーク状の出力スペクトルを作るので、出力量を評価しやすいのに対し、 H の反跳反応の出力は連続スペクトルを示すため、定量化しづらいとみなすことができる。そこで、 ^3He の濃度を基準として、 CH_4 の濃度を上げる方向で検討した。 ^3He と CH_4 の濃度比がそれぞれ、1:1、1:9、1:29、1:59、1:99 であるときの円筒型混合ガス比例計数管の応答を計算した。入射中性子の条件は、減速材の厚さの評価時と同様である。

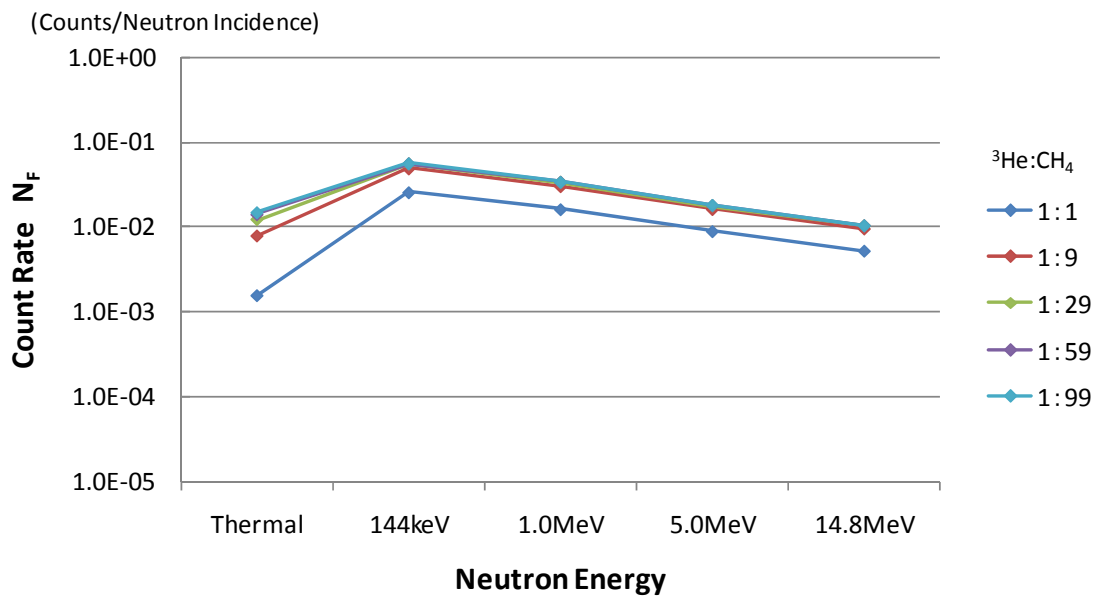
結果は、図 3.2.5 に示すように、それぞれの計数率の変動の傾向は構成比で大きく変わらないことが確認される。また図 3.2.6 に示すように出力の傾向も変わらない。しかし、係数 100 ほど出力が異なるのは、両反応で同程度の計数を得る、という方針に合わない判断した。したがって、 $^3\text{He} : \text{CH}_4$ の濃度比で 1:99 のケースは適当ではないものとした。

さらに、図 3.2.7 に示すように、 ^3He の混合比が高くなると、 ^3He の反跳反応が無視できなくなる。この反応の出力は H の反跳と区別ができないと考えられ、反応数比の評価において障害となる。 H 反跳の計数に対する He 反跳の計数の許容できる範囲を 1%未満とすると、 $^3\text{He} : \text{CH}_4$ の濃度比で 1:1、1:9 のケースは不適当である。

以上より、 $^3\text{He} : \text{CH}_4$ の濃度比で 1:29、1:59 が適当な濃度比とした。前述のように、 H の反跳反応は連続スペクトルをとるため、測定系などのノイズの影響を受ける部分もあり、検出の効率が下がる側面もあると考え、 CH_4 の濃度比の高い方を選択することにした。



(a) $^3\text{He}(\text{n},\text{p})\text{T}$ の計数率の変動



(b) $\text{H}(\text{n},\text{n})\text{p}$ の計数率の変動

図 3.2.5 計数ガスの構成比による混合ガス比例計数管の反応率の変動

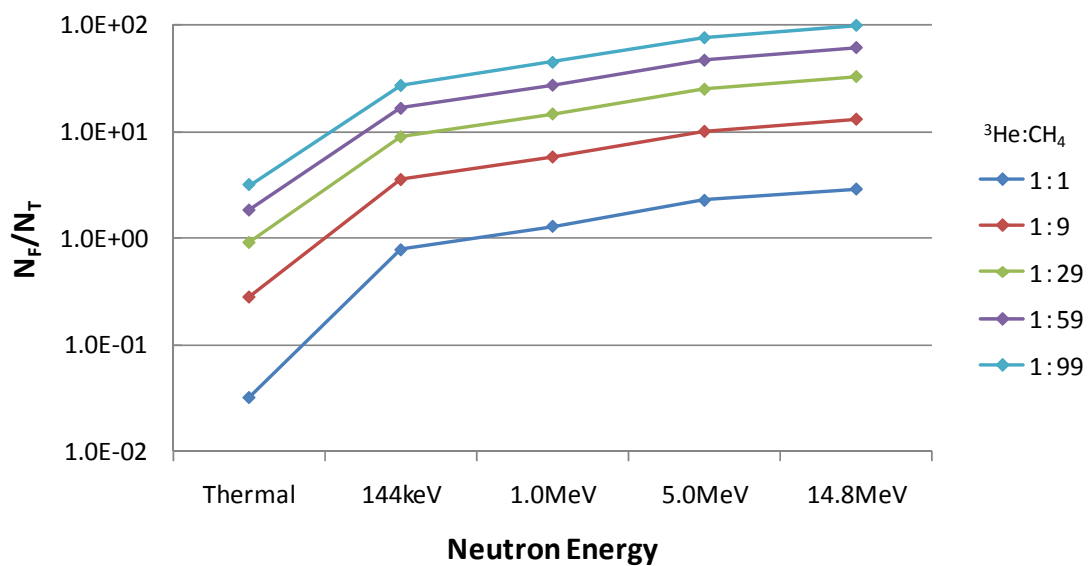


図 3.2.6 計数ガスの構成比による混合ガス比例計数管の
 ^3He の吸収反応と H の反跳反応の反応率比の変動

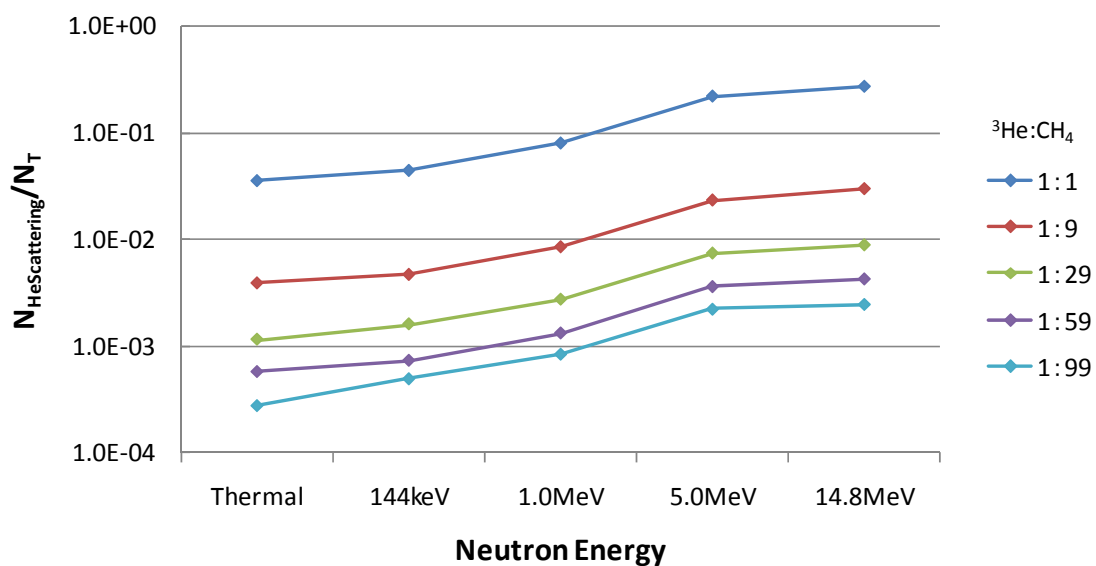


図 3.2.7 計数ガスの構成比による混合ガス比例計数管の
 ^3He の反跳反応と H の反跳反応の反応率比の変動

(4) 計数ガスの充填圧力の調整

計数ガスの充填圧力は、中性子によって生じる反応の量を左右する。反応量は検出感度に対応し、反応量が少ないと低線量時の出力が不十分になり線量評価が行いづらくなる。また、これらの設定は、反応によって生成する二次荷電粒子の飛程とも関係する。計数ガス充填圧力が小さいと、反応生成粒子が検出器の有感体積の外に達する確率が高くなる。これによって、反応生成粒子のエネルギーが検出器出力に十分に付与されず、検出器出力の反応エネルギーに対する線形性が低下する。ガス圧力は動作電圧にも利いており、圧力を上げすぎると、電極間の絶縁破壊が発生しやすくなり、計数管を的確に比例領域で動作させることが難しくなる。

ここでは、比例計数管として妥当と思われる充填圧力を想定し、各反応の計数率を計算して、線量評価に適用し得るか検討する。充填圧力は、0.1MPa（1 気圧）、0.3MPa（3 気圧）、0.6MPa（6 気圧）、1MPa（10 気圧）の 4 通りとし、充填するガスは前項で検討した構成比とする。また、これまでと同様の中性子入射条件で応答を評価するが、14.8MeV の中性子は、 ^3He 吸収反応による計数が期待できないため省略した。

結果は表 3.2.1 のとおりである。

表 3.2.1 計数ガス充填圧力に応じた混合ガス比例計数管の反応毎換算係数

中性子種類		線量換算係数 $H^*(10)$ $\mu\text{Sv cm}^2$	反応種類	ガス充填圧力			
				0.1MPa	0.3MPa	0.6MPa	1MPa
熱中性子		6.6	$^3\text{He}(\text{n,p})\text{T}$	220 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	610 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	1100 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	1800 $\text{c}/\mu\text{Sv}$
			$\text{H}(\text{n,n})\text{p}$	400 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	1100 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	2200 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	3300 $\text{c}/\mu\text{Sv}$
単色 中性子	144keV	132	$^3\text{He}(\text{n,p})\text{T}$	4.6 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	13 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	25 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	41 $\text{c}/\mu\text{Sv}$
			$\text{H}(\text{n,n})\text{p}$	71 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	210 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	430 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	710 $\text{c}/\mu\text{Sv}$
	1MeV	416	$^3\text{He}(\text{n,p})\text{T}$	0.54 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	1.5 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	3.0 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	4.8 $\text{c}/\mu\text{Sv}$
			$\text{H}(\text{n,n})\text{p}$	14 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	41 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	82 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	140 $\text{c}/\mu\text{Sv}$
	5MeV	405	$^3\text{He}(\text{n,p})\text{T}$	0.17 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	0.48 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	0.95 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	1.5 $\text{c}/\mu\text{Sv}$
			$\text{H}(\text{n,n})\text{p}$	7.5 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	22 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	45 $\text{c}/\mu\text{Sv}$	74 $\text{c}/\mu\text{Sv}$

一連のレムカウンタが数 $\text{c}/\mu\text{Sv}$ 程度で動作している¹³⁾。これと同等の感度を持つために、少なくとも、表 3.2.1 に示した条件で同程度の計数を得るべきであると考えた。したがって、0.6MPa 以上の圧力は必要であるとした。これより高い圧力の方が測定効率の面では有利であるが、当面の性能確認の間はこの圧力で動作させるものとした。

また、二次粒子の飛程を抑制するために、Ar も 0.1MPa を添加することにした。 ^3He と CH_4 のみでは、二次荷電粒子の飛程の抑制が十分ではない可能性があるためである。

以上の検討結果に基づいて決定した混合ガス比例計数管の仕様を表 3.2.2 に、また外形図と写真をそれぞれ図 3.2.8、図 3.2.9 に示す。

表 3.2.2 混合ガス比例計数管の仕様

Item	Specification
Shape	Cylinder
Dimensions	3 inch in diameter 7 inch in length
Gas Composition	^3He : 0.01Mpa CH_4 : 0.59MPa Ar : 0.1MPa
Wall Material	Stainless Steel
Moderator	1cm Polyethylene

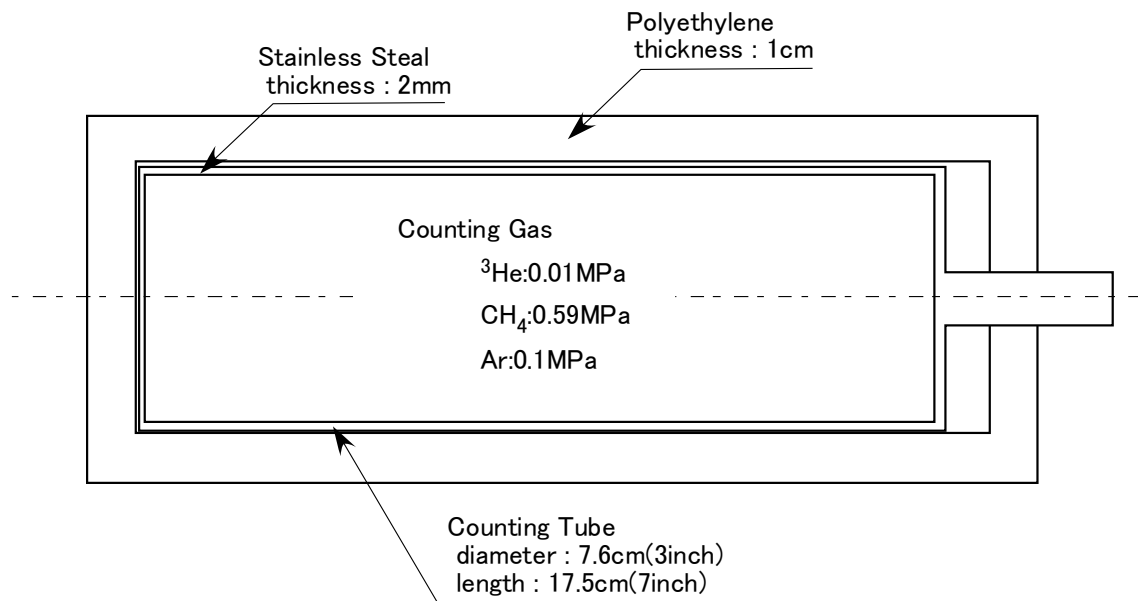


図 3.2.8 混合ガス比例計数管の断面図



図 3.2.9 混合ガス比例計数管の外観

3.2.2.3 応答特性試験

前項で決めた仕様で混合ガス比例計数管を製作し、その特性試験を行った。試験は、独立行政法人日本原子力研究開発機構原子力科学研究所放射線標準施設（FRS）で行った。加速器中性子を照射してその応答を記録し、NRESP-ANT による計算結果と比較した。試験で使用した中性子は、144keV、250keV、565keV、5MeV、14.8MeV の各エネルギーのものである。散乱中性子はシャドーコーン法により取り除いた。実験の風景を図 3.2.10 に示す。

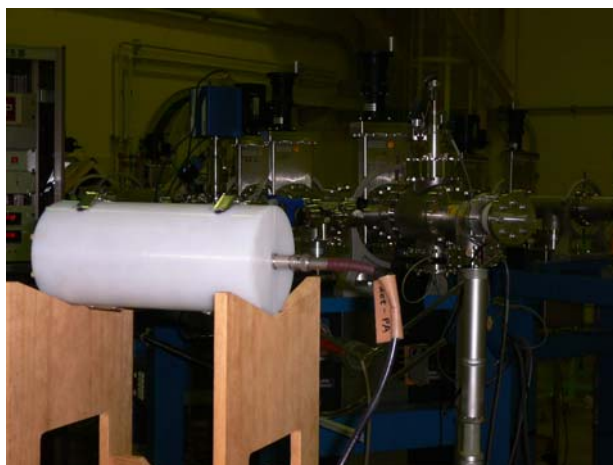


図 3.2.10 FRS における実験の風景

それぞれの実験結果を図 3.2.11～図 3.2.15 に示す。144keV、250keV、565keV の中性子に対する応答では ^3He 中性子吸収反応のピークがはっきりと見え、また反跳反応の連続スペクトルも検出された。しかし、5MeV の中性子に対する応答では ^3He 吸収反応ピークは見えづらくなっており、14.8MeV の中性子では有意な中性子吸収反応のピークは得られなかった。また、全体に ^3He 中性子吸収反応ピークは、増幅系のサーマルノイズの影響を受け、一部の成分は高エネルギー側にシフトする形になって、太目のピークを示す結果となった。なお、いずれの測定系においても、増幅系のサーマルノイズで比較的低いエネルギー範囲の反跳反応が埋もれてしまっている。

それぞれの実験結果から、2 種類の反応による計数の分離を試みた。反跳反応のスペクトルは、 ^3He の吸収反応の影響を受けていないと思われる部分の出力を抜き出して線形多項式で近似した。その際に、 ^3He 吸収反応のピーク位置を 765keV に設定して、エネルギーレンジを調整した。この近似された反跳反応スペクトルを検出器スペクトルから差し引き、これによって ^3He 吸収反応による計数を抽出した。それぞれの結果は、NRESP-ANT による計算結果と比較した。14.8MeV の中性子による出力からは ^3He 吸収反応の検出はできなかったため、反跳反応スペクトルの近似まで行っている。それぞれの処理の結果を図 3.2.16 ～図 3.2.20 に示す。また、各反応の計数の比較を表 3.2.3 に

示す。

144keV の中性子に対する応答では、 ^3He による中性子吸収反応は比較的良い一致を示すものの、検出系のサーマルノイズの影響で反跳反応の計数率は再現しきれず、反応数比も再現できていない。250keV、565keV の中性子に対する応答では、反応毎の計数率、各反応の反応率比とも、ほぼ 30%以内に収まった。シャドーコーンのサイズが大きすぎて散乱中性子を少なく評価している可能性があること、のような、実験における誤差要因を考慮すれば、妥当な評価結果を与えているといえる。なお、5MeV の中性子に対する応答からは、 ^3He の反応と思われるピーク成分は見られたが統計的に有意といえる大きさではなく、検討からはずした。

以上の結果から、計数管の性能は計算評価と比べて、反跳反応の計数の評価に課題を残すものの、二種類の反応を個別に検出するという当初の目的はおおむね達成できた。

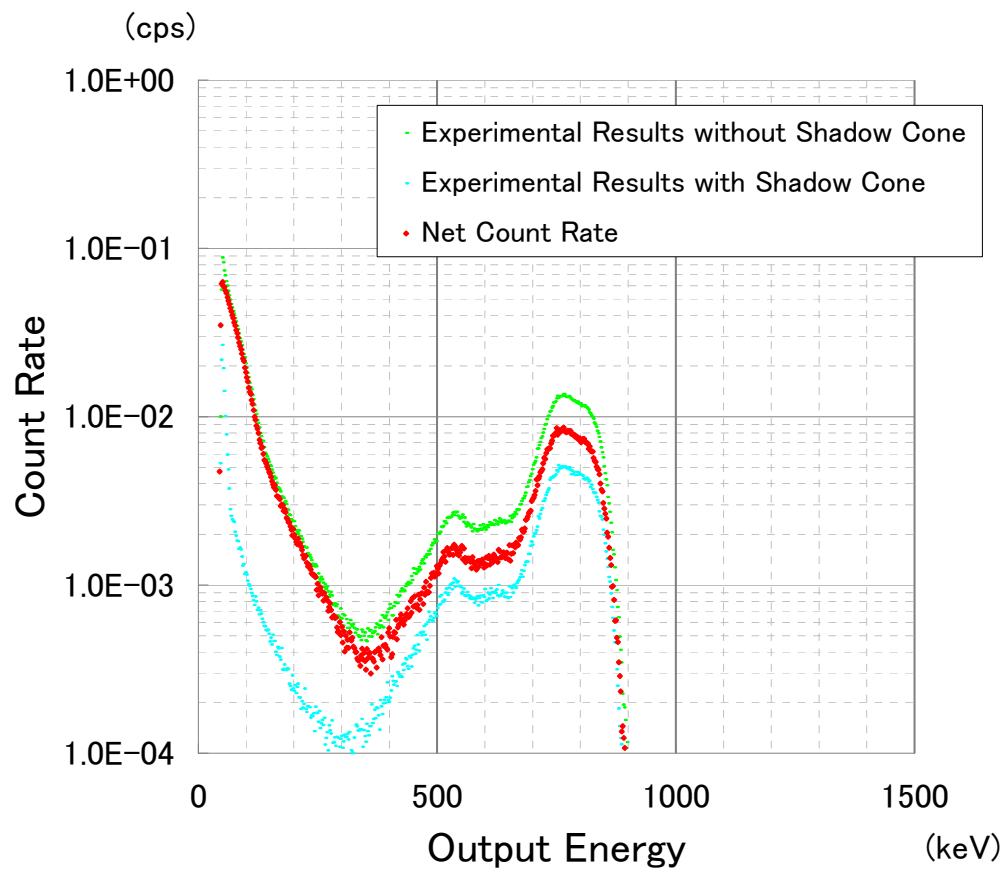


図 3.2.11 144keV 中性子に対する混合ガス比例計数管の出力

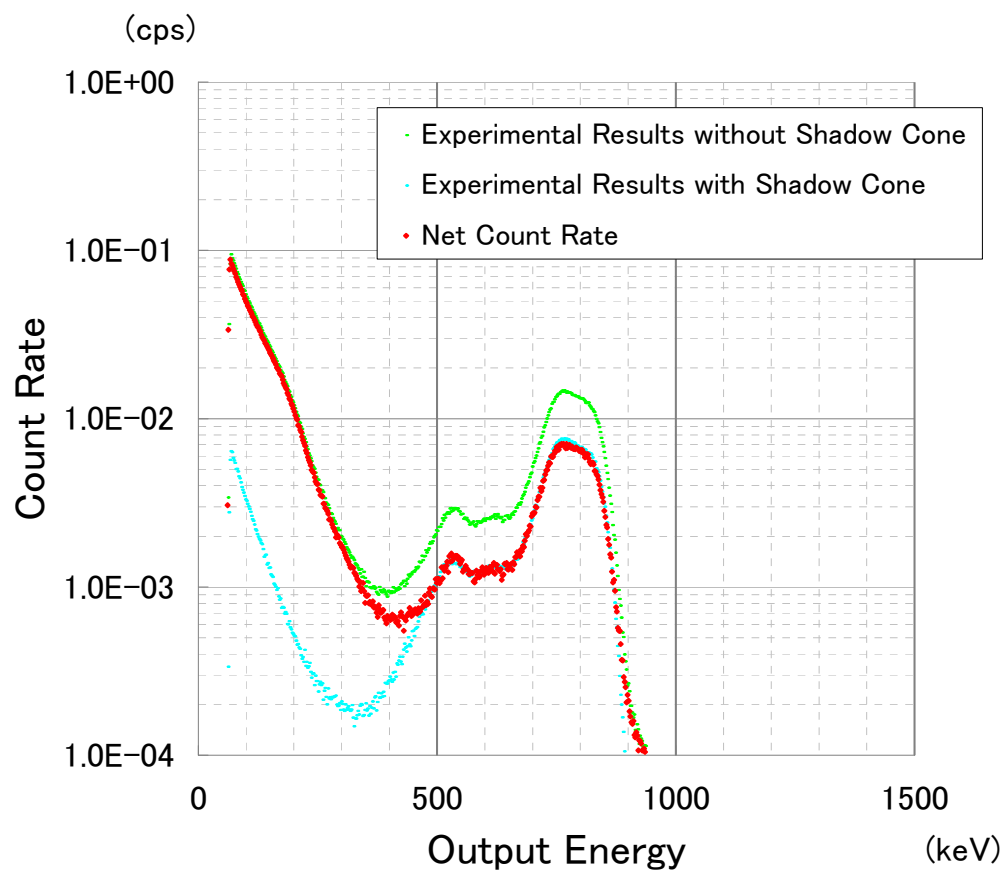


図 3.2.12 250keV 中性子に対する混合ガス比例計数管の出力

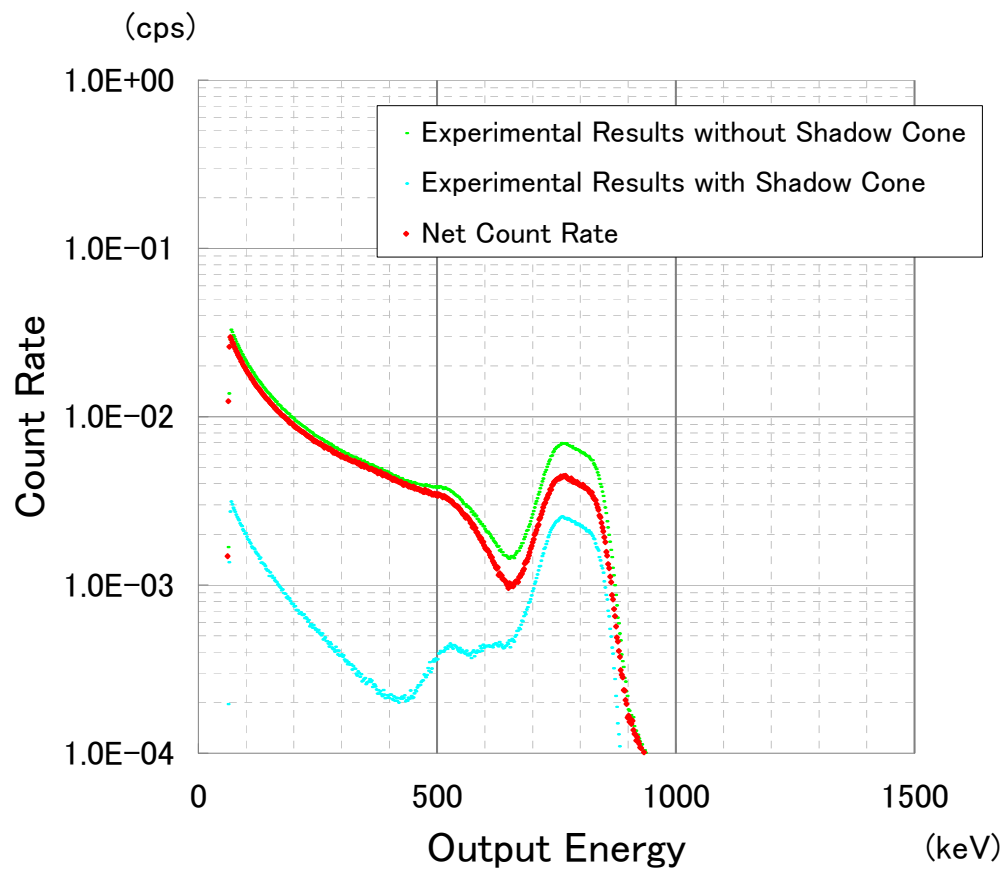


図 3.2.13 565keV 中性子に対する混合ガス比例計数管の出力

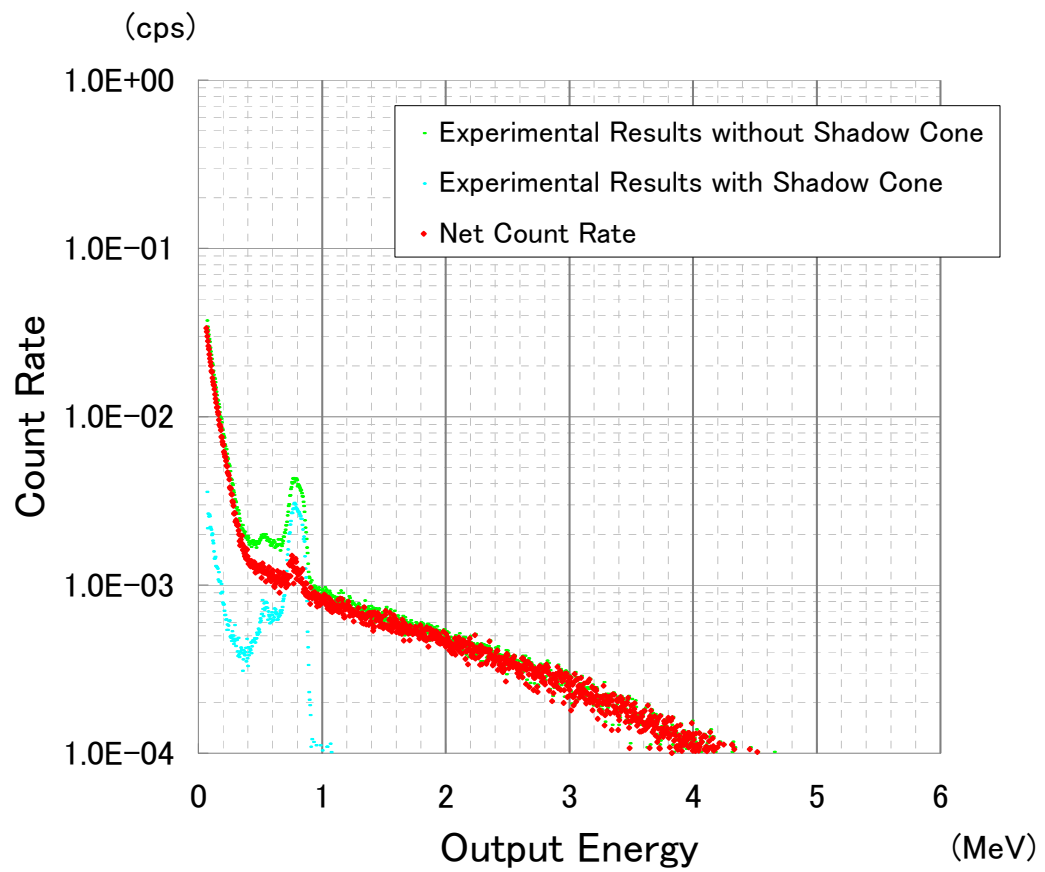


図 3.2.14 5MeV 中性子に対する混合ガス比例計数管の出力

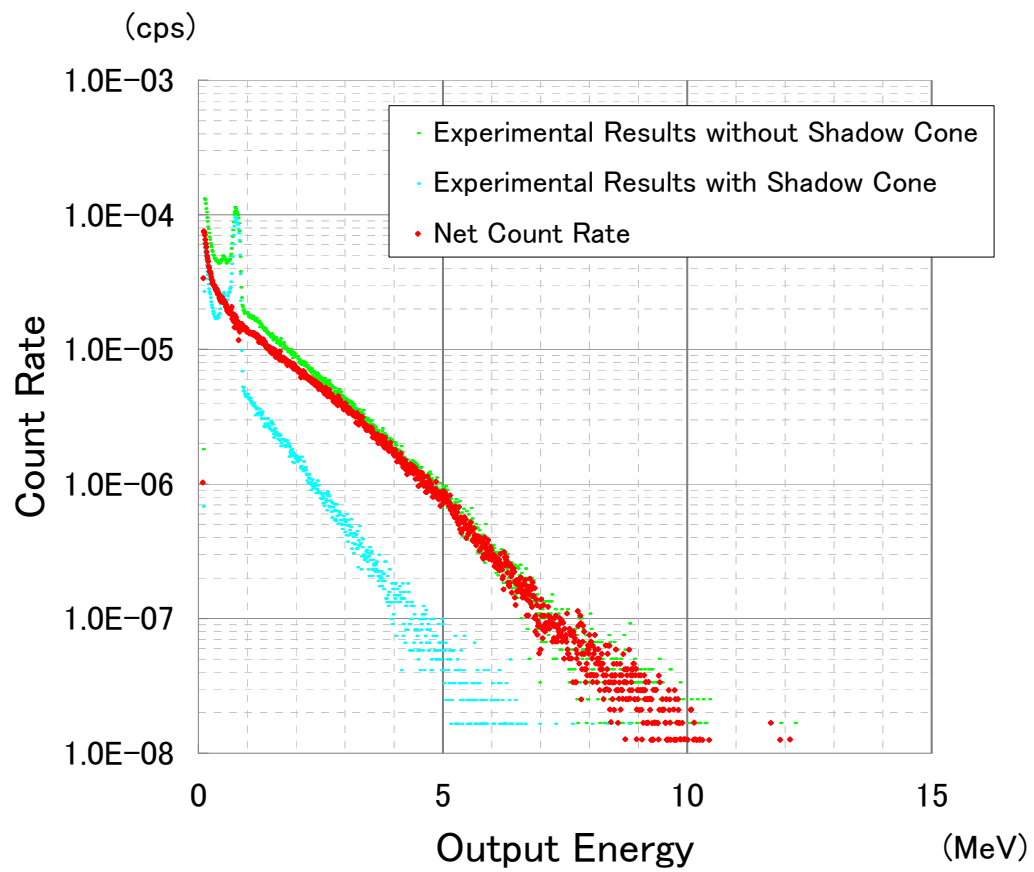


図 3.2.15 14.8MeV 中性子に対する混合ガス比例計数管の出力

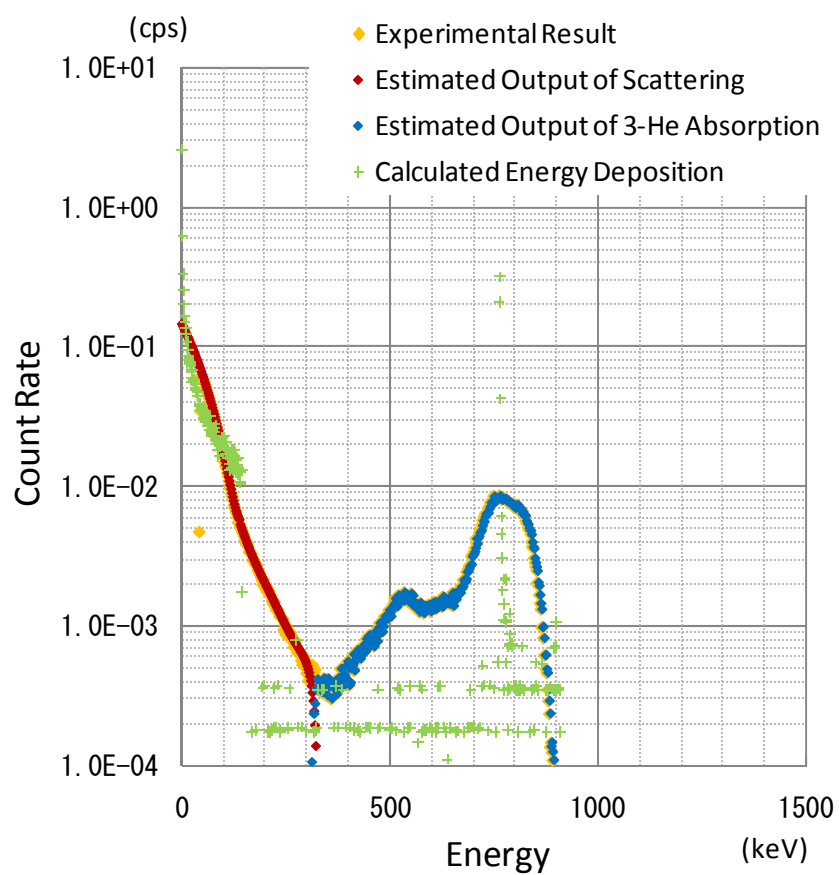


図 3.2.16 144keV 中性子線に対する混合ガス比例計数管出力の反応毎弁別

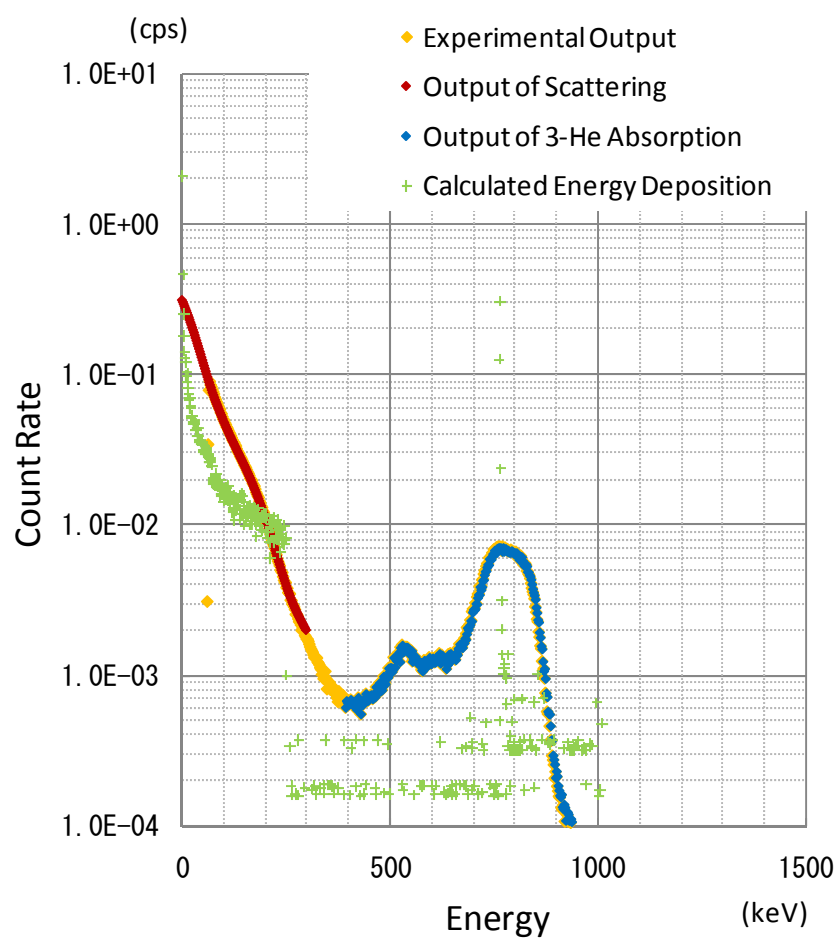


図 3.2.17 250keV 中性子線に対する混合ガス比例計数管出力の反応毎弁別

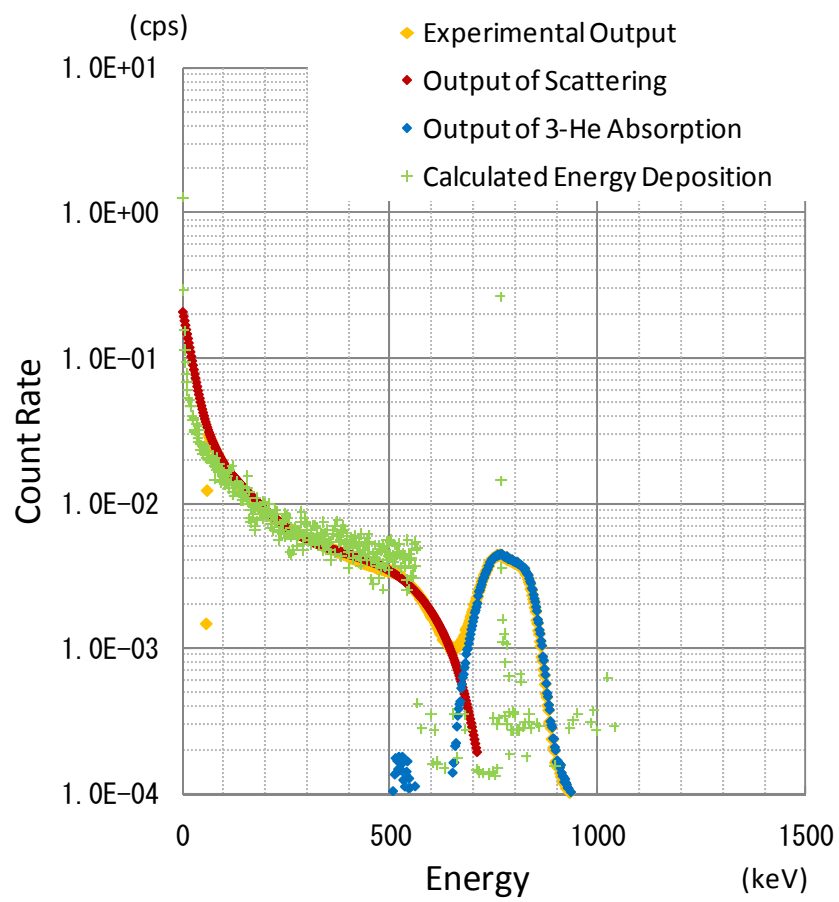


図 3.2.18 565keV 中性子線に対する混合ガス比例計数管出力の反応毎弁別

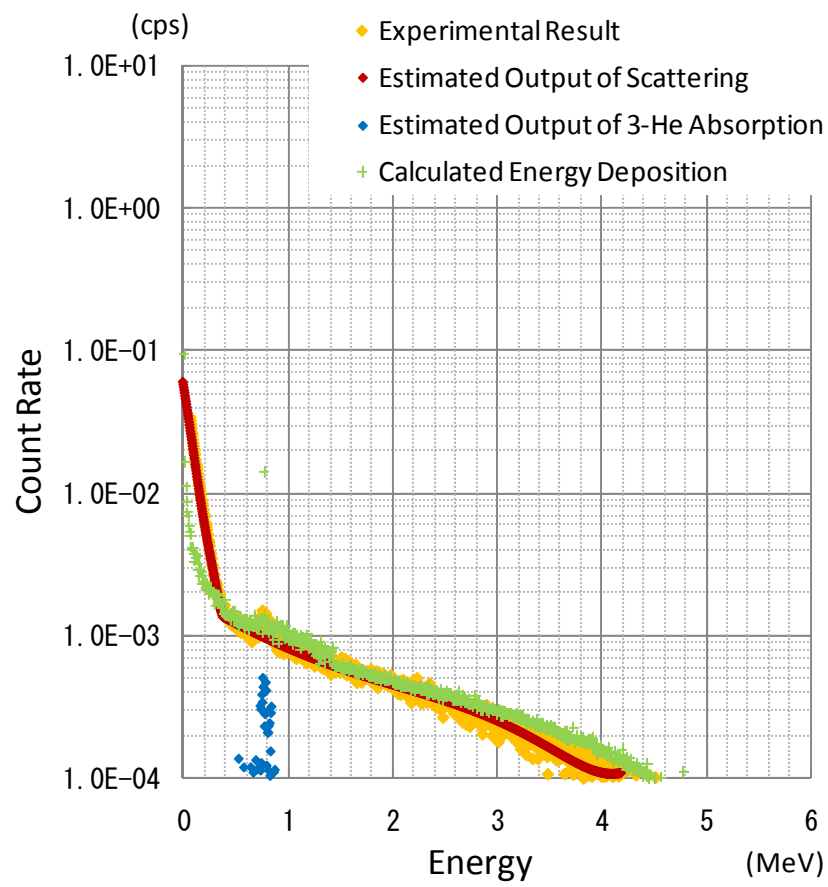


図 3.2.19 5MeV 中性子線に対する混合ガス比例計数管出力の反応毎弁別

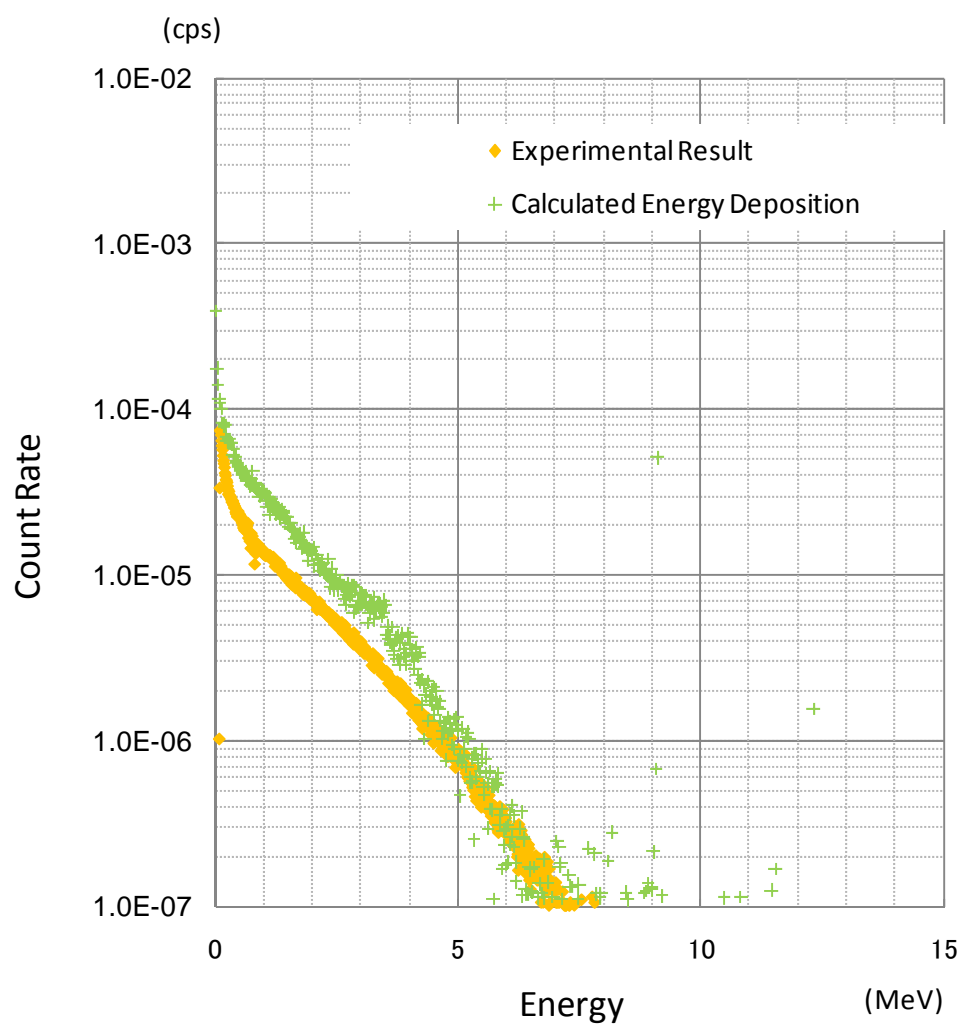


図 3.2.20 14.8MeV 中性子線に対する混合ガス比例計数管出力の計算結果との比較

表 3.2.3 混合ガス比例計数管の単色中性子に対する応答の実験値と計算結果の比較

Incident Neutron Energy	^3He Absorption (cps)			Scattering (cps)			Ratio (Scattering/ ^3He Absorption)		
	Exp	Cal	E/C	Exp	Cal	E/C	Exp	Cal	E/C
144keV	0.713	0.526	1.36	3.77	7.88	0.478	5.30	15.0	0.420
250keV	0.515	0.400	1.29	8.62	6.89	1.25	16.7	17.2	0.971
565keV	0.307	0.238	1.29	4.82	5.05	0.954	15.7	21.2	0.741

3.2.3 反応毎出力で形成する閉凸空間による線量測定

ここでは、特定のスペクトルの中性子に対する混合ガス比例計数管の応答を NRESP-ANT を使って計算し、検出器固有の応答特性を示す閉凸空間を形成してみる。これによって、中性子周辺線量当量の評価を行うための閉凸空間が形成されることを確認し、線量評価の特性の評価を行う。計算による応答評価を主とするが、原子炉施設で得た実験データによる検証も行う。

なお、NRESP-ANT による計算条件は、図 3.2.21 に示す。線源は、検出器の横面に陽極線と平行に位置する面線源とし、線源形状は減速材も含めた検出器の投影面と等しいものとする。そこから発生した中性子は、検出器に平行に入射するものとした。3.2.3 項における計算はすべて同様の条件で行った。また、NRESP-ANT では、相対的な出力エネルギースペクトルを得ることができる。この出力エネルギースペクトルの形状が安定することで計算の収束を判断した。おおむね、入射中性子束に対して相対出力で 10^{-3} を超える場合に有意な収束が得られることを目安としている。

以後の各項に示す中性子スペクトルを入力条件とし、上記の計算を行った。その結果から、この計数管の出力に対応する点を応答評価用の空間にプロットした。2 種類の反応には、 ^3He による熱中性子吸収反応と、計数ガスを構成する全元素に対する反跳反応の合計を適用した。反跳反応については、実際には衝突核種の違いを検出器出力から判断することはできないため、すべての反跳反応を一括で取り扱う。応答計算結果からそれぞれの反応による計数を抽出した。それぞれの計数を、 N_F 、 N_T と記すことにする。なお、今回の計算において最小のエネルギービンである 14.4keV 未満の出力は、放射線の輸送計算のカットオフエネルギーの前後における揺らぎの影響を強く受けられていると考えられ、計算結果の安定性に欠けているとみなし、反応量の抽出から外している。実際の応答との比較においても、ノイズレベルに相当する出力であり、支障はない。また、目的量となる線量値には、検出器位置での中性子スペクトルから計算で求められる周辺線量当量 $H^*(10)^{14)}$ を使った。これは、その位置における線量の真値として扱う。

この N_F 、 N_T 、 $H^*(10)$ から複数反応の出力比、及び特定の反応と目的量の比を与えたが、その際に、共通の分母として、計数の絶対量の評価が比較的容易な N_T を用いた。 N_F を選ぶ余地もあるが、これについては考察で検討する。

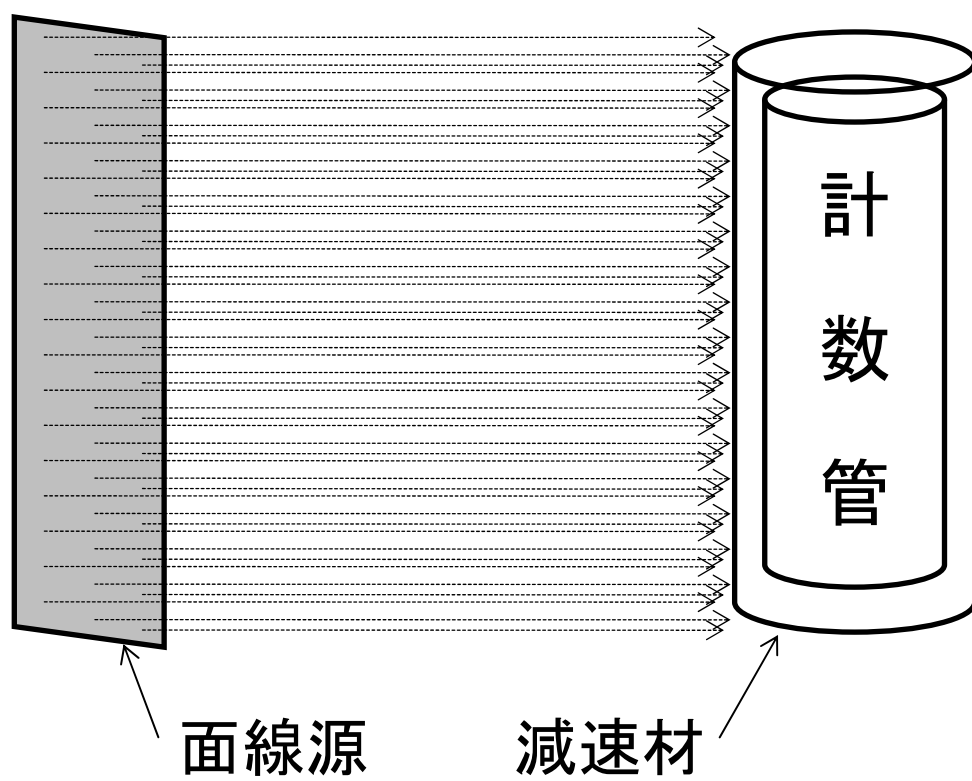


図 3.2.21 混合ガス比例計数管の応答計算体系

3.2.3.1 単色中性子に対する応答による閉凸空間の形成

ここでは単色中性子に対する応答による閉凸空間を形成する。あるエネルギー範囲で形作られる任意の中性子スペクトルは、そこに適切に分布する単色中性子の組み合わせによって表現できる。したがって、単色中性子は目的量評価のための閉凸空間を形成するための、最も汎用性の高い要素スペクトルと言える。

そこで、エネルギー範囲として熱領域から 14.8MeV までを想定し、単色中性子に対する混合ガス比例計数管の応答を計算した。計算結果の概要を表 3.2.4 に示す。同表の左欄に示すようなエネルギー幅で一様な中性子を単色中性子として扱った。実際の中性子スペクトルは一般に連続エネルギースペクトルを示すことから、単一エネルギーではなく、一定のエネルギー幅を持つ帯状のエネルギースペクトルの中性子を単色中性子として扱っている。

計算結果をベクトル空間に配置したものが図 3.2.22 である。図 3.2.22(a)は全結果を、また図 3.2.22(b)では比較的低いエネルギーの中性子に対する応答を抜粋して示す。低いエネルギーの中性子に対する応答から高いエネルギーの中性子に対する応答に向かって、各点が整然と並んでいることがわかる。ここから、閉凸空間を作成したものが図 3.2.23(a)である。図 3.2.23(b)には、その原点付近の拡大図を示す。各点を頂点とする最大面積の多角形を描き出すことで、閉凸空間を構成した。閉凸空間は弓状であった。

以上より、単色中性子に対する混合ガス比例計数管の出力により位相ベクトル空間中に閉凸空間を形成できることが確認できた。しかしながら、ここにはまだ物理的には成立しない中性子エネルギースペクトルも含まれている。そこで、非物理的な情報を削除し、物理的に有意な中性子エネルギースペクトルだけに絞り込んだ閉凸空間を形成する方法を検討した。

表 3.2.4 混合ガス比例計数管の単色中性子に対する応答の計算結果の概要

Energy (lower-upper) (eV)	N _T	N _F	N _F /N _T	H*(10)/N _T (pSv cm ²)	Energy (lower-upper) (eV)	N _T	N _F	N _F /N _T	H*(10)/N _T (pSv cm ²)
1.00×10 ⁻³ - 2.15×10 ⁻³	1.23×10 ⁴	2.40×10 ⁴	1.95×10 ⁰	2.75×10 ⁻⁴	3.98×10 ⁴ - 5.01×10 ⁴	2.42×10 ³	3.10×10 ⁴	1.28×10 ¹	7.47×10 ⁻³
2.15×10 ⁻³ - 4.64×10 ⁻³	1.36×10 ⁴	2.62×10 ⁴	1.93×10 ⁰	2.68×10 ⁻⁴	5.01×10 ⁴ - 6.31×10 ⁴	2.18×10 ³	3.04×10 ⁴	1.39×10 ¹	1.07×10 ⁻²
4.64×10 ⁻³ - 1.00×10 ⁻²	1.56×10 ⁴	3.07×10 ⁴	1.96×10 ⁰	2.66×10 ⁻⁴	6.31×10 ⁴ - 7.94×10 ⁴	2.05×10 ³	2.99×10 ⁴	1.46×10 ¹	1.48×10 ⁻²
1.00×10 ⁻² - 2.15×10 ⁻²	1.90×10 ⁴	3.75×10 ⁴	1.97×10 ⁰	2.57×10 ⁻⁴	7.94×10 ⁴ - 1.00×10 ⁵	1.90×10 ³	2.90×10 ⁴	1.53×10 ¹	2.06×10 ⁻²
2.15×10 ⁻² - 4.64×10 ⁻²	2.28×10 ⁴	4.42×10 ⁴	1.94×10 ⁰	2.32×10 ⁻⁴	1.00×10 ⁵ - 1.26×10 ⁵	1.76×10 ³	2.84×10 ⁴	1.61×10 ¹	2.81×10 ⁻²
4.64×10 ⁻² - 1.00×10 ⁻¹	2.71×10 ⁴	5.61×10 ⁴	2.07×10 ⁰	2.34×10 ⁻⁴	1.26×10 ⁵ - 1.58×10 ⁵	1.64×10 ³	2.75×10 ⁴	1.67×10 ¹	3.78×10 ⁻²
1.00×10 ⁻¹ - 2.15×10 ⁻¹	1.58×10 ⁴	3.33×10 ⁴	2.10×10 ⁰	4.23×10 ⁻⁴	1.58×10 ⁵ - 2.00×10 ⁵	1.47×10 ³	2.63×10 ⁴	1.79×10 ¹	5.25×10 ⁻²
2.15×10 ⁻¹ - 4.64×10 ⁻¹	1.63×10 ⁴	3.68×10 ⁴	2.25×10 ⁰	3.86×10 ⁻⁴	2.00×10 ⁵ - 2.51×10 ⁵	1.36×10 ³	2.54×10 ⁴	1.87×10 ¹	6.86×10 ⁻²
4.64×10 ⁻¹ - 1.00×10 ⁰	1.61×10 ⁴	3.88×10 ⁴	2.42×10 ⁰	4.08×10 ⁻⁴	2.51×10 ⁵ - 3.16×10 ⁵	1.28×10 ³	2.39×10 ⁴	1.87×10 ¹	8.65×10 ⁻²
1.00×10 ⁰ - 2.15×10 ⁰	1.50×10 ⁴	3.95×10 ⁴	2.62×10 ⁰	4.29×10 ⁻⁴	3.16×10 ⁵ - 3.98×10 ⁵	1.07×10 ³	2.26×10 ⁴	2.11×10 ¹	1.22×10 ⁻¹
2.15×10 ⁰ - 4.64×10 ⁰	1.38×10 ⁴	3.97×10 ⁴	2.87×10 ⁰	4.55×10 ⁻⁴	3.98×10 ⁵ - 5.01×10 ⁵	9.47×10 ²	2.14×10 ⁴	2.26×10 ¹	1.59×10 ⁻¹
4.64×10 ⁰ - 1.00×10 ¹	1.25×10 ⁴	3.92×10 ⁴	3.14×10 ⁰	4.65×10 ⁻⁴	5.01×10 ⁵ - 6.31×10 ⁵	8.52×10 ²	2.01×10 ⁴	2.36×10 ¹	2.01×10 ⁻¹
1.00×10 ¹ - 2.15×10 ¹	1.11×10 ⁴	3.82×10 ⁴	3.45×10 ⁰	4.96×10 ⁻⁴	6.31×10 ⁵ - 7.94×10 ⁵	7.41×10 ²	1.85×10 ⁴	2.50×10 ¹	2.54×10 ⁻¹
2.15×10 ¹ - 4.64×10 ¹	9.86×10 ³	3.76×10 ⁴	3.81×10 ⁰	5.27×10 ⁻⁴	7.94×10 ⁵ - 1.00×10 ⁶	6.53×10 ²	1.74×10 ⁴	2.66×10 ¹	3.05×10 ⁻¹
4.64×10 ¹ - 1.00×10 ²	8.66×10 ³	3.63×10 ⁴	4.19×10 ⁰	5.73×10 ⁻⁴	1.00×10 ⁶ - 1.26×10 ⁶	5.73×10 ²	1.59×10 ⁴	2.78×10 ¹	3.73×10 ⁻¹
1.00×10 ² - 2.15×10 ²	7.40×10 ³	3.54×10 ⁴	4.78×10 ⁰	6.26×10 ⁻⁴	1.26×10 ⁶ - 1.58×10 ⁶	4.94×10 ²	1.46×10 ⁴	2.95×10 ¹	4.19×10 ⁻¹
2.15×10 ² - 4.64×10 ²	6.29×10 ³	3.49×10 ⁴	5.54×10 ⁰	6.97×10 ⁻⁴	1.58×10 ⁶ - 2.00×10 ⁶	3.92×10 ²	1.55×10 ⁴	3.95×10 ¹	5.06×10 ⁻¹
4.64×10 ² - 1.00×10 ³	5.48×10 ³	3.40×10 ⁴	6.20×10 ⁰	7.52×10 ⁻⁴	2.00×10 ⁶ - 2.51×10 ⁶	3.17×10 ²	1.21×10 ⁴	3.81×10 ¹	6.51×10 ⁻¹
1.00×10 ³ - 2.15×10 ³	4.82×10 ³	3.35×10 ⁴	6.95×10 ⁰	8.14×10 ⁻⁴	2.51×10 ⁶ - 3.16×10 ⁶	2.93×10 ²	1.09×10 ⁴	3.71×10 ¹	7.05×10 ⁻¹
2.15×10 ³ - 4.64×10 ³	4.11×10 ³	3.34×10 ⁴	8.13×10 ⁰	9.71×10 ⁻⁴	3.16×10 ⁶ - 3.98×10 ⁶	2.39×10 ²	9.73×10 ³	4.07×10 ¹	8.56×10 ⁻¹
4.64×10 ³ - 1.00×10 ⁴	3.58×10 ³	3.23×10 ⁴	9.02×10 ⁰	1.21×10 ⁻³	3.98×10 ⁶ - 5.01×10 ⁶	1.63×10 ²	9.10×10 ³	5.58×10 ¹	1.25×10 ⁰
1.00×10 ⁴ - 1.26×10 ⁴	3.25×10 ³	3.22×10 ⁴	9.92×10 ⁰	1.74×10 ⁻³	5.01×10 ⁶ - 6.31×10 ⁶	1.67×10 ²	8.30×10 ³	4.97×10 ¹	1.20×10 ⁰
1.26×10 ⁴ - 1.58×10 ⁴	3.07×10 ³	3.25×10 ⁴	1.06×10 ¹	2.09×10 ⁻³	6.31×10 ⁶ - 7.94×10 ⁶	1.23×10 ²	7.51×10 ³	6.10×10 ¹	1.65×10 ⁰
1.58×10 ⁴ - 2.00×10 ⁴	2.85×10 ³	3.18×10 ⁴	1.12×10 ¹	2.65×10 ⁻³	7.94×10 ⁶ - 1.00×10 ⁷	1.20×10 ²	6.43×10 ³	5.36×10 ¹	1.74×10 ⁰
2.00×10 ⁴ - 2.51×10 ⁴	2.74×10 ³	3.21×10 ⁴	1.17×10 ¹	3.33×10 ⁻³	1.00×10 ⁷ - 1.58×10 ⁷	8.40×10 ¹	5.65×10 ³	6.72×10 ¹	2.92×10 ⁰
2.51×10 ⁴ - 3.16×10 ⁴	2.55×10 ³	3.11×10 ⁴	1.22×10 ¹	4.37×10 ⁻³	1.58×10 ⁷ - 2.51×10 ⁷	6.20×10 ¹	5.04×10 ³	8.12×10 ¹	4.81×10 ⁰
3.16×10 ⁴ - 3.98×10 ⁴	2.53×10 ³	3.12×10 ⁴	1.23×10 ¹	5.54×10 ⁻³					

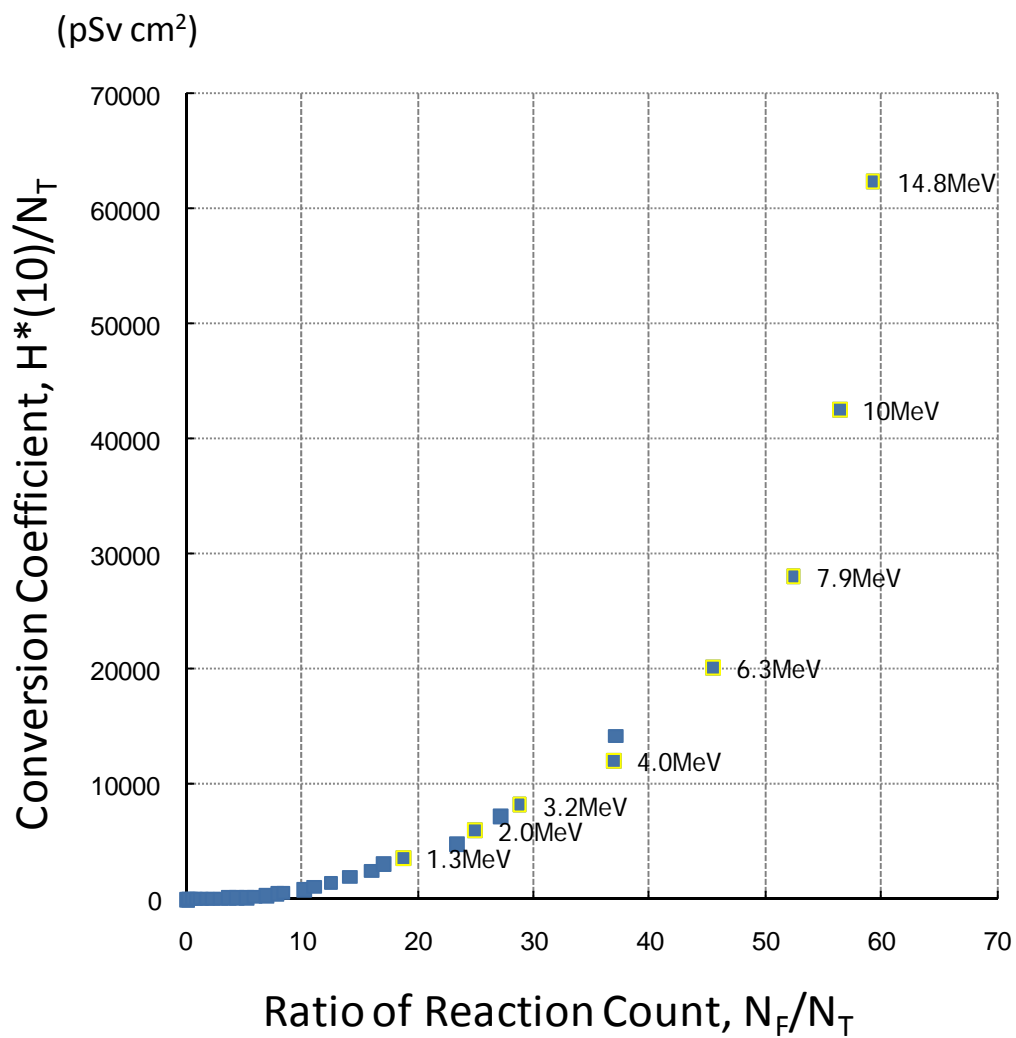
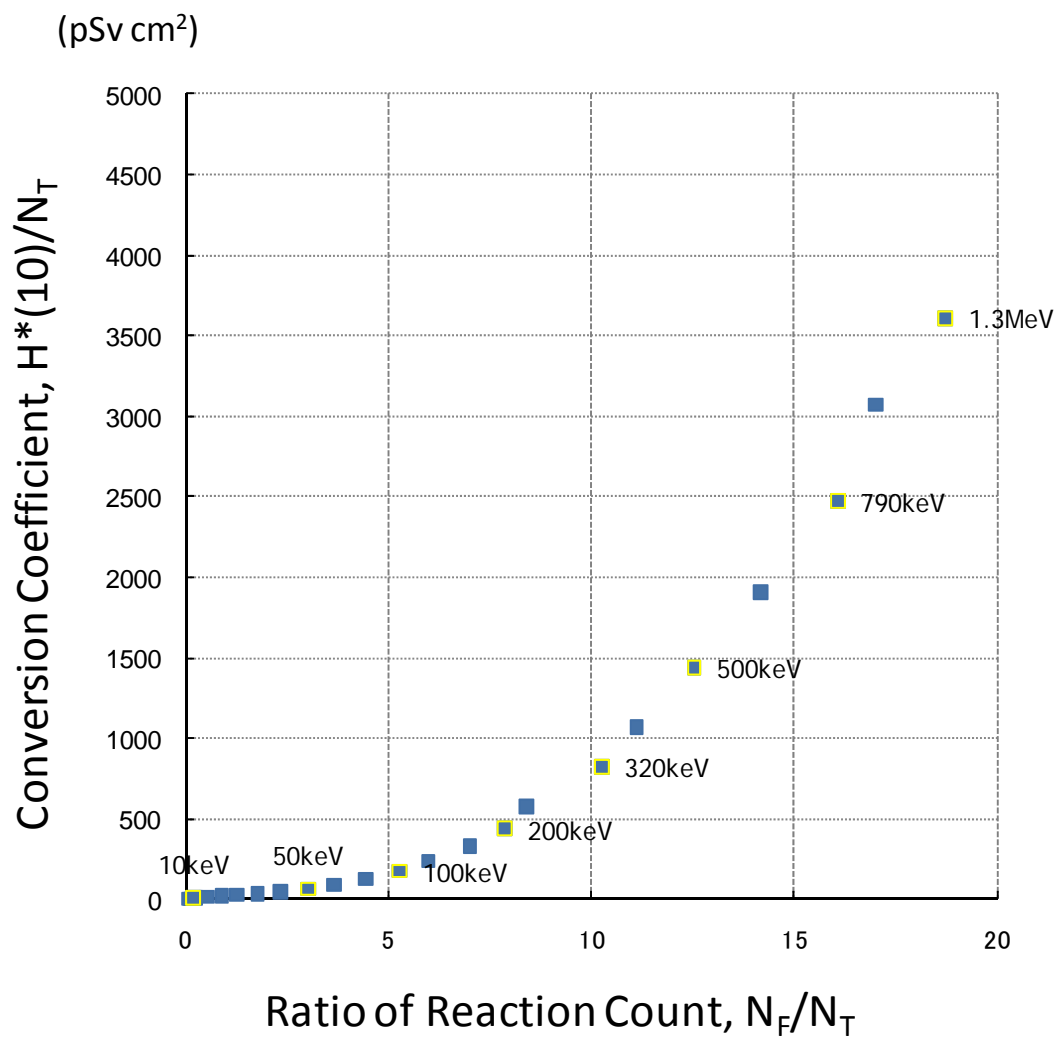


図 3.2.22(a) 混合ガス比例計数管の単色中性子に対する応答



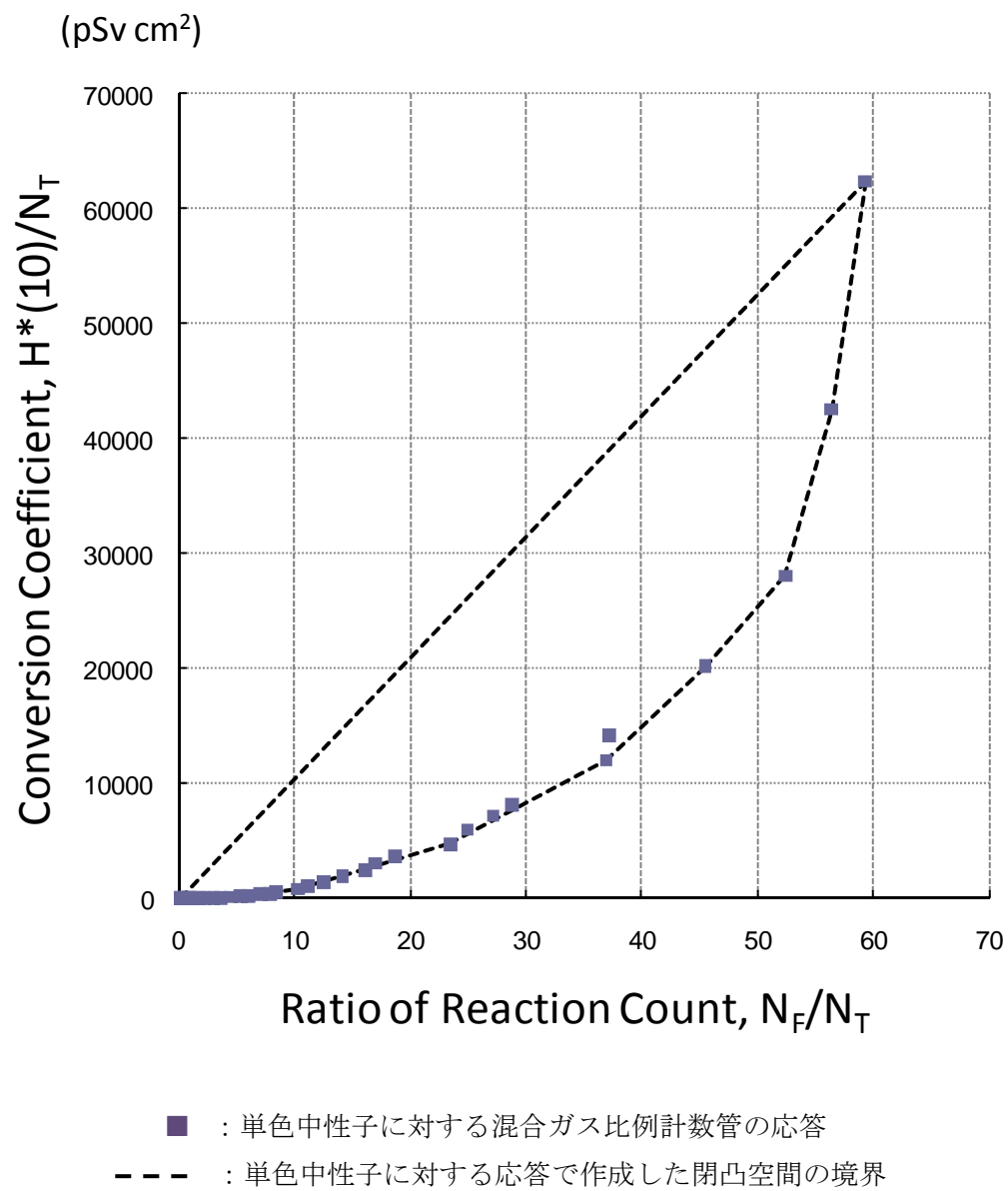
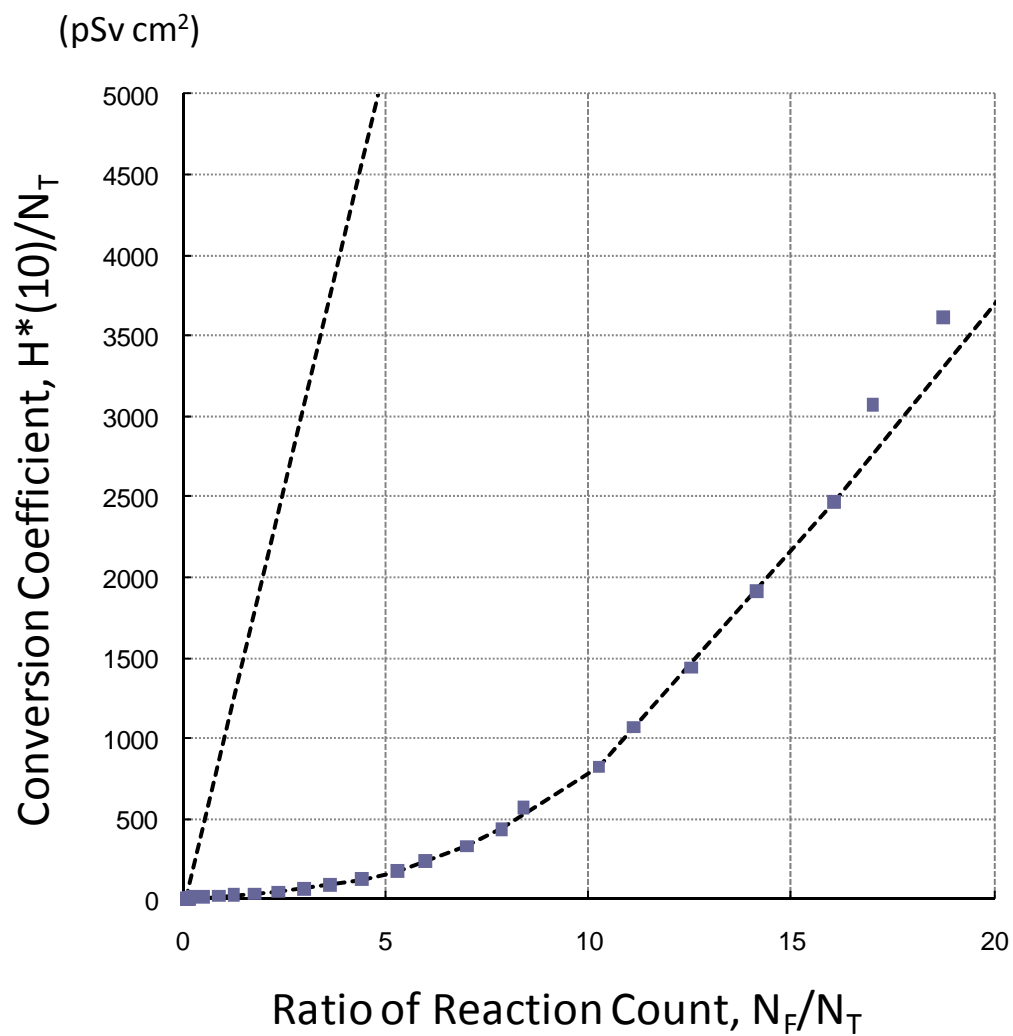


図 3.2.23(a) 混合ガス比例計数管の単色中性子に対する応答で作成した閉凸空間



- : 単色中性子に対する混合ガス比例計数管の応答
 --- : 単色中性子に対する応答で作成した閉凸空間の境界

図 3.2.23(b) 混合ガス比例計数管の単色中性子に対する応答で作成した閉凸空間 (拡大図)

3.2.3.2 核分裂中性子に対する応答による閉凸空間の形成

(1) 一般式で与えられる中性子スペクトル

物理的に有意な中性子場を想定するには、その線源を想定し、そこから出た中性子の受けるさまざまな現象を想定していくのが適切な方法である。中性子源については、主に核分裂中性子、RI 中性子、加速器中性子が想定できる。ここでは、原子力施設への適用を想定して、U の核分裂を中性子源とする多様な中性子場を想定することにした。

核分裂中性子は、線源から発生した後に、物質中で拡散、減速、散乱、消滅のような作用を受け、さらに核分裂性物質中では増倍の作用も受ける。小佐古は、このような作用を受けた核分裂中性子のエネルギースペクトルの変化について、定性的な表現を与えた¹⁵⁾。核分裂中性子が影響を受ける媒質を、非増倍系、緩い増倍系、早い増倍系の 3 種類に分けて、式 4 のように記述している。

$$F(E) = F_0 E^\delta \exp(-\alpha E^\varepsilon - \beta E^{-\gamma}). \quad (3.2.1)$$

ここで、 α は中性子源の中性子温度等で決まるスペクトルの高速部分を制御する定数、 β はスペクトルの中低速部分の減速比の大きさ、 γ はスペクトルの低速部分の減速の性質を表すパラメータ、 δ は中速部分の漏えい及び一定吸収効果のパラメータ、 ε は比弾性散乱経験時のスペクトルシフト効果を表す。詳細は、文献を参照されたい。

これから、式中の変数を適宜調整して、いくつかのリファレンススペクトルを作成した。リファレンススペクトルの一覧を図 3.2.24 に示す。このリファレンススペクトルに対応する検出器出力を計算し、その結果を位相ベクトル空間に配置した。結果を、図 3.2.25(a) に示す。また、原点付近の拡大図を図 3.2.25(b) に示す。図中には、参考として単色中性子で形成した閉凸空間も合わせて表示した。

核分裂中性子場についてのリファレンススペクトルが形成する閉凸空間は、単色中性子のそれに比べて、大幅に縮小されたことがわかる。例えば、 C_F/C_T 値が 10 の場合では、 H/C_T の範囲は 0.02 から 0.16 程度まで縮めることができた。

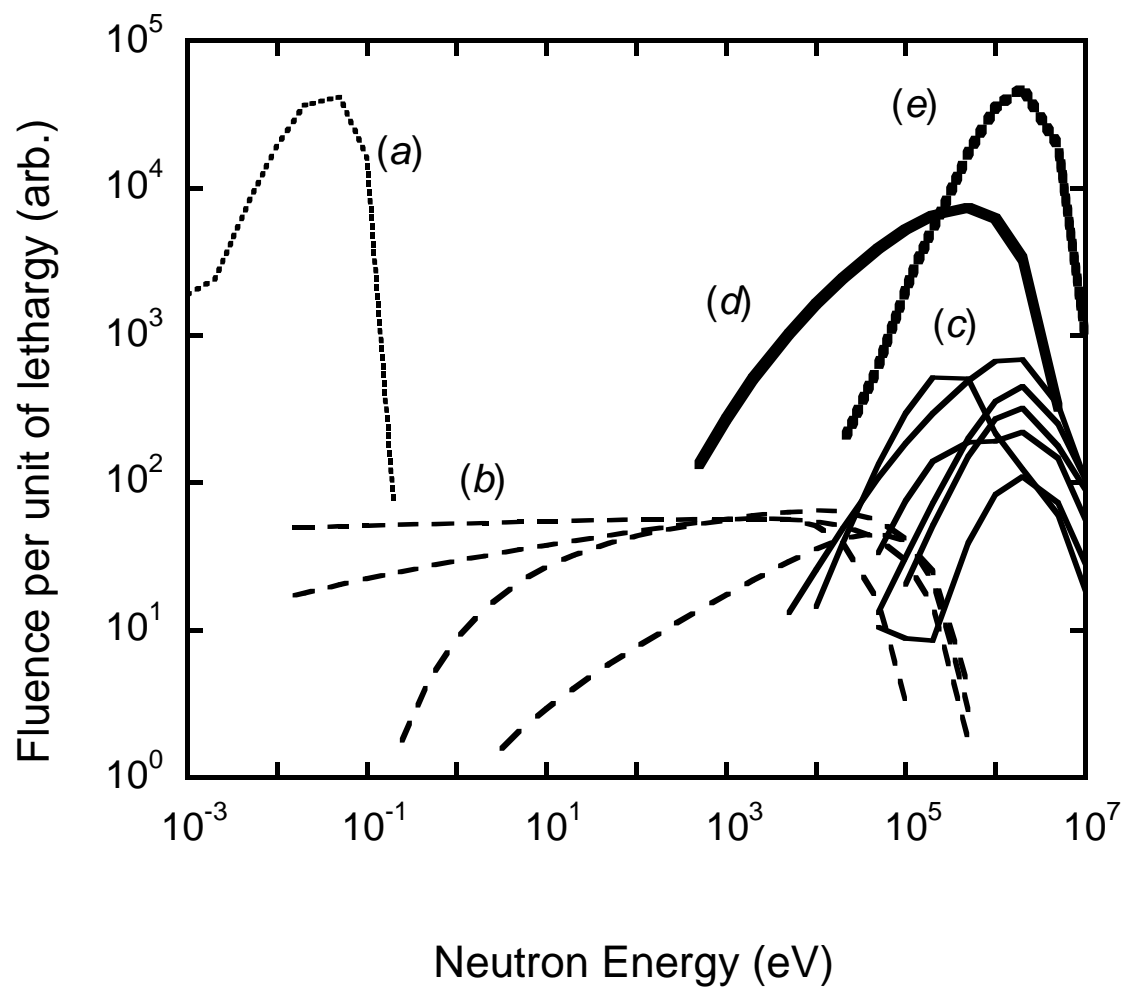
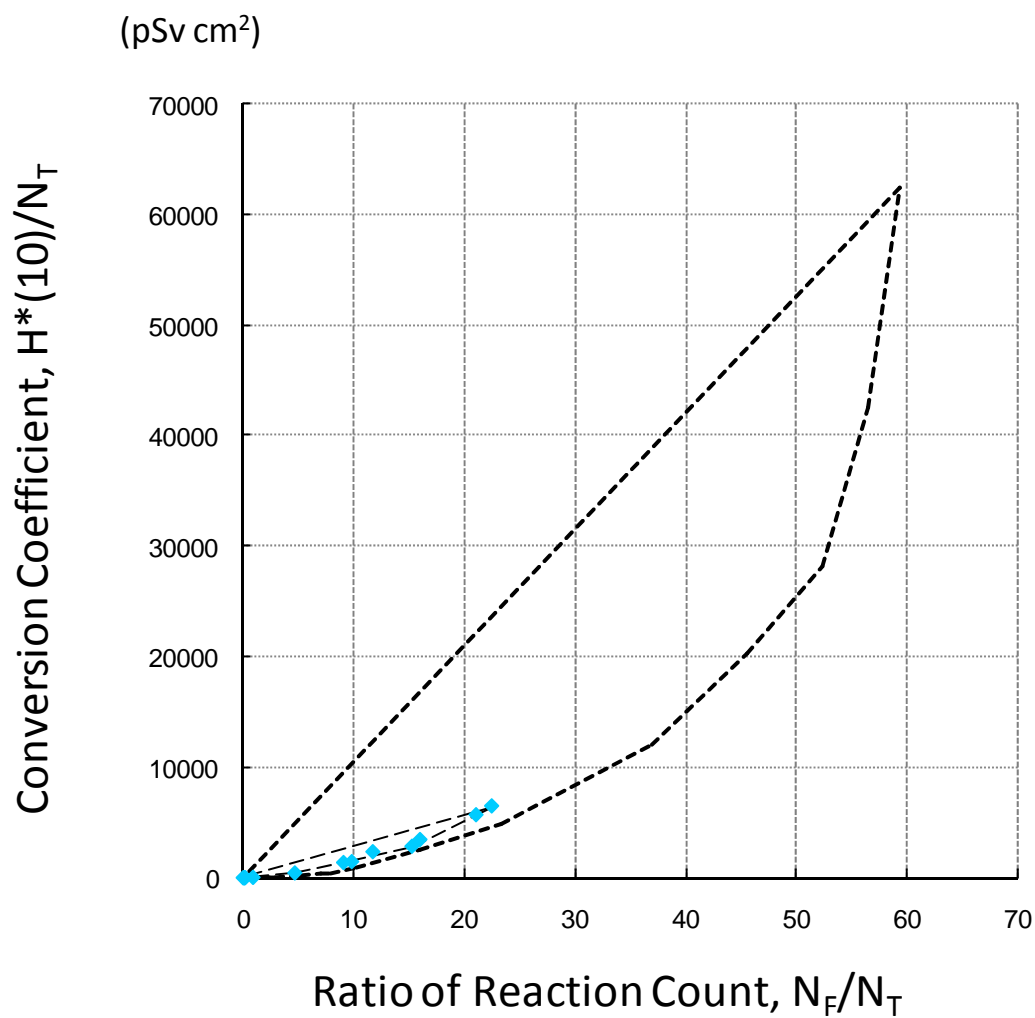
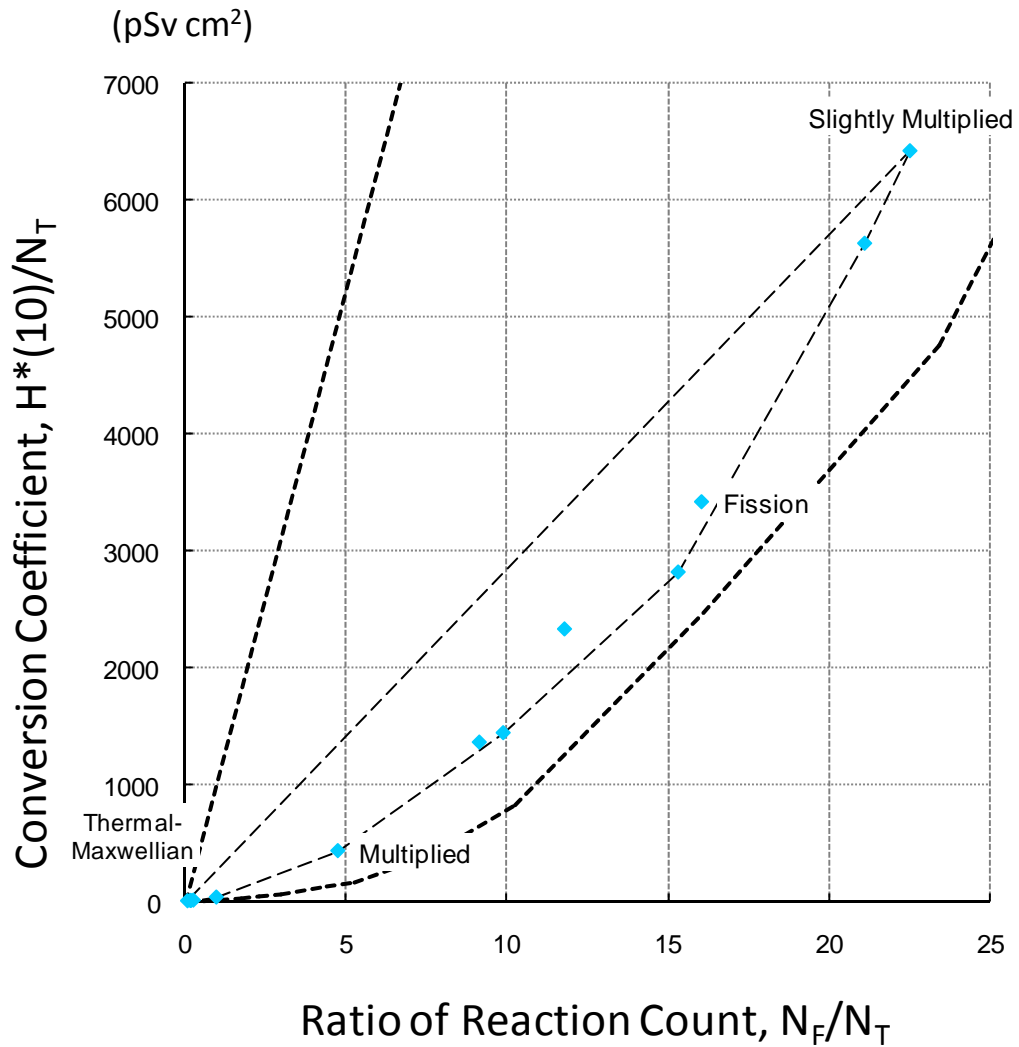


図 3.2.24 一般式で表現された核分裂中性子エネルギースペクトル
 (a)熱中性子 (b)非増倍系内 (c)微増倍系内 (d)増倍系内 (e)核分裂中性子線源



- ◆ : 一般式による核分裂中性子スペクトルに対する混合ガス比例計数管の応答
- : 単色中性子に対する応答で作成した閉凸空間の境界
- : 核分裂中性子に対する応答で作成した閉凸空間の境界

図 3.2.25(a) 一般式で表現される核分裂中性子に対する混合ガス比例計数管の応答で作成した閉凸空間



- ◆ : 一般式による核分裂中性子スペクトルに対する混合ガス比例計数管の応答
- : 単色中性子に対する応答で作成した閉凸空間の境界
- : 核分裂中性子に対する応答で作成した閉凸空間の境界

図 3.2.25(b) 一般式で表現される核分裂中性子に対する混合ガス比例計数管の応答で作成した閉凸空間 (拡大図)

(2) モンテカルロ法で計算された減速核分裂中性子スペクトル

核分裂中性子の減速の過程について、MCNP-5¹⁶⁾でも計算した。その結果で得られた中性子スペクトルを入力として、閉凸空間を作成した。

計算条件と計算結果は添付 1 に示した。これらを入力条件とした混合ガス比例計数管の応答計算結果の概要を表 3.2.5 に、また出力スペクトルの計算結果の抜粋を図 3.2.26 に示す。核分裂中性子の減速に応じて、 N_F の値が減り、 N_T の値が増加していることがわかる。

これから、閉凸空間を形成した。図 3.2.27(a)に全体図を、また図 3.2.27(b)に原点付近の拡大図を示す。計算された減速核分裂中性子に対する応答は、一連の弓状の連なりを示した。なお、MCNP の計算では増幅の影響が加味されていないので、図 3.2.25 に示した核分裂中性子に対する応答の計算結果も加味して、核分裂中性子に対する応答として集約して表現している。この減速核分裂中性子による閉凸空間は、一般式で表現された核分裂中性子に対する応答による閉凸空間を補強する機能を果たしているとみなせる。

表 3.2.5 減速核分裂中性子に対する混合ガス比例計数管の応答の計算結果の概要

Shielding Composition	N_T	N_F	N_F/N_T	$H^*(10)/\phi$ (pSv cm ²)	$H^*(10)/C_T$ (pSv cm ²)
Fe0000Con0000	1.28×10^{-1}	2.02×10^0	1.57×10^1	3.83×10^2	2.98×10^3
Fe0010Con0000	1.36×10^{-1}	2.07×10^0	1.52×10^1	3.79×10^2	2.78×10^3
Fe0015Con0000	1.44×10^{-1}	2.10×10^0	1.46×10^1	3.77×10^2	2.62×10^3
Fe0020Con0000	1.45×10^{-1}	2.12×10^0	1.46×10^1	3.75×10^2	2.59×10^3
Fe0030Con0000	1.54×10^{-1}	2.16×10^0	1.40×10^1	3.71×10^2	2.40×10^3
Fe0040Con0000	1.62×10^{-1}	2.21×10^0	1.36×10^1	3.67×10^2	2.26×10^3
Fe0050Con0000	1.72×10^{-1}	2.25×10^0	1.31×10^1	3.62×10^2	2.11×10^3
Fe0070Con0000	1.92×10^{-1}	2.33×10^0	1.22×10^1	3.52×10^2	1.84×10^3
Fe0100Con0000	2.19×10^{-1}	2.44×10^0	1.11×10^1	3.38×10^2	1.54×10^3
Fe0150Con0000	2.70×10^{-1}	2.60×10^0	9.62×10^0	3.12×10^2	1.15×10^3
Fe0200Con0000	3.14×10^{-1}	2.70×10^0	8.57×10^0	2.87×10^2	9.14×10^2
Fe0300Con0000	3.94×10^{-1}	2.75×10^0	7.00×10^0	2.45×10^2	6.22×10^2
Fe0400Con0000	4.72×10^{-1}	2.69×10^0	5.71×10^0	2.10×10^2	4.45×10^2
Fe0500Con0000	5.44×10^{-1}	2.57×10^0	4.72×10^0	1.81×10^2	3.34×10^2
Fe0600Con0000	6.11×10^{-1}	2.44×10^0	3.99×10^0	1.59×10^2	2.61×10^2
Fe0700Con0000	6.73×10^{-1}	2.30×10^0	3.42×10^0	1.42×10^2	2.11×10^2
Fe0800Con0000	7.28×10^{-1}	2.19×10^0	3.01×10^0	1.28×10^2	1.76×10^2
Fe0900Con0000	7.75×10^{-1}	2.08×10^0	2.68×10^0	1.17×10^2	1.51×10^2
Fe1000Con0000	8.10×10^{-1}	1.99×10^0	2.46×10^0	1.08×10^2	1.34×10^2
Fe1000con0010	9.32×10^{-1}	1.72×10^0	1.85×10^0	9.61×10^1	1.03×10^2
Fe1000con0015	1.01×10^0	1.60×10^0	1.59×10^0	9.00×10^1	8.96×10^1
Fe1000con0020	1.08×10^0	1.49×10^0	1.38×10^0	8.42×10^1	7.79×10^1
Fe1000con0030	1.25×10^0	1.29×10^0	1.03×10^0	7.37×10^1	5.88×10^1
Fe1000con0040	1.44×10^0	1.14×10^0	7.93×10^{-1}	6.44×10^1	4.47×10^1
Fe1000con0050	1.64×10^0	1.01×10^0	6.16×10^{-1}	5.65×10^1	3.44×10^1
Fe1000con0070	2.06×10^0	8.31×10^{-1}	4.03×10^{-1}	4.40×10^1	2.13×10^1
Fe1000con0100	2.62×10^0	6.79×10^{-1}	2.59×10^{-1}	3.19×10^1	1.22×10^1
Fe1000con0150	3.36×10^0	5.69×10^{-1}	1.69×10^{-1}	2.11×10^1	6.28×10^0
Fe1000con0200	3.83×10^0	5.18×10^{-1}	1.35×10^{-1}	1.63×10^1	4.25×10^0
Fe1000con0300	4.34×10^0	4.91×10^{-1}	1.13×10^{-1}	1.29×10^1	2.97×10^0
Fe1000con0400	4.54×10^0	4.82×10^{-1}	1.06×10^{-1}	1.20×10^1	2.65×10^0
Fe1000con0500	4.62×10^0	4.78×10^{-1}	1.03×10^{-1}	1.17×10^1	2.54×10^0
Fe1000con0700	4.65×10^0	4.72×10^{-1}	1.02×10^{-1}	1.16×10^1	2.49×10^0
Fe1000con1000	4.63×10^0	4.65×10^{-1}	1.00×10^{-1}	1.15×10^1	2.48×10^0

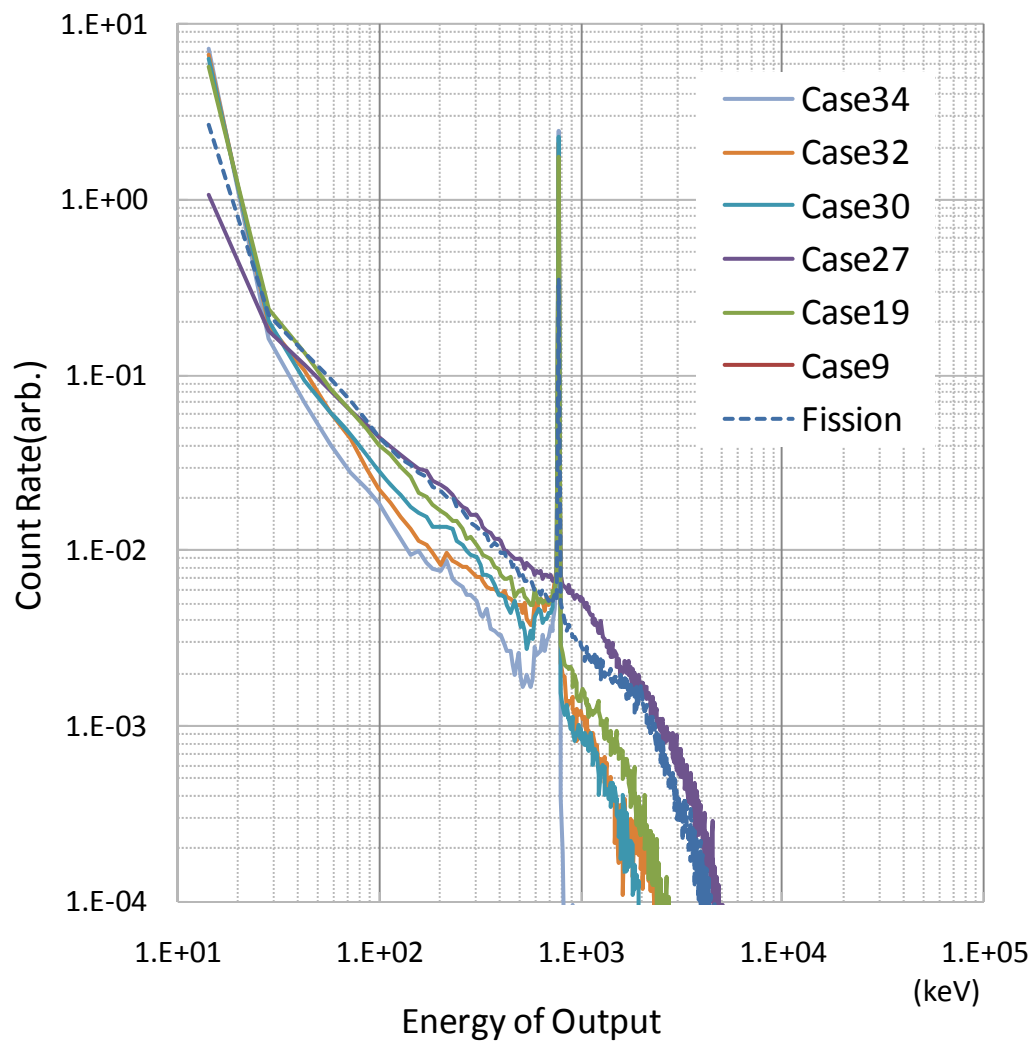
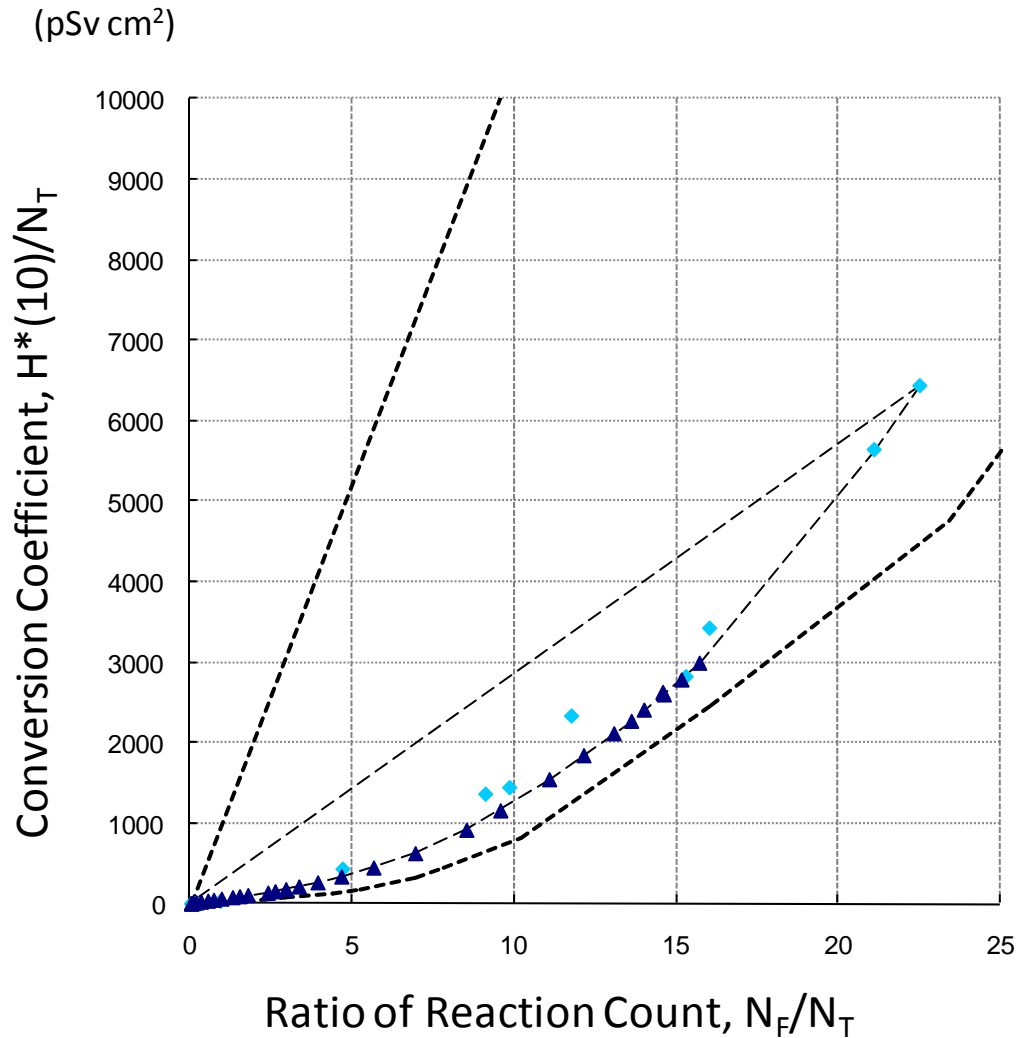
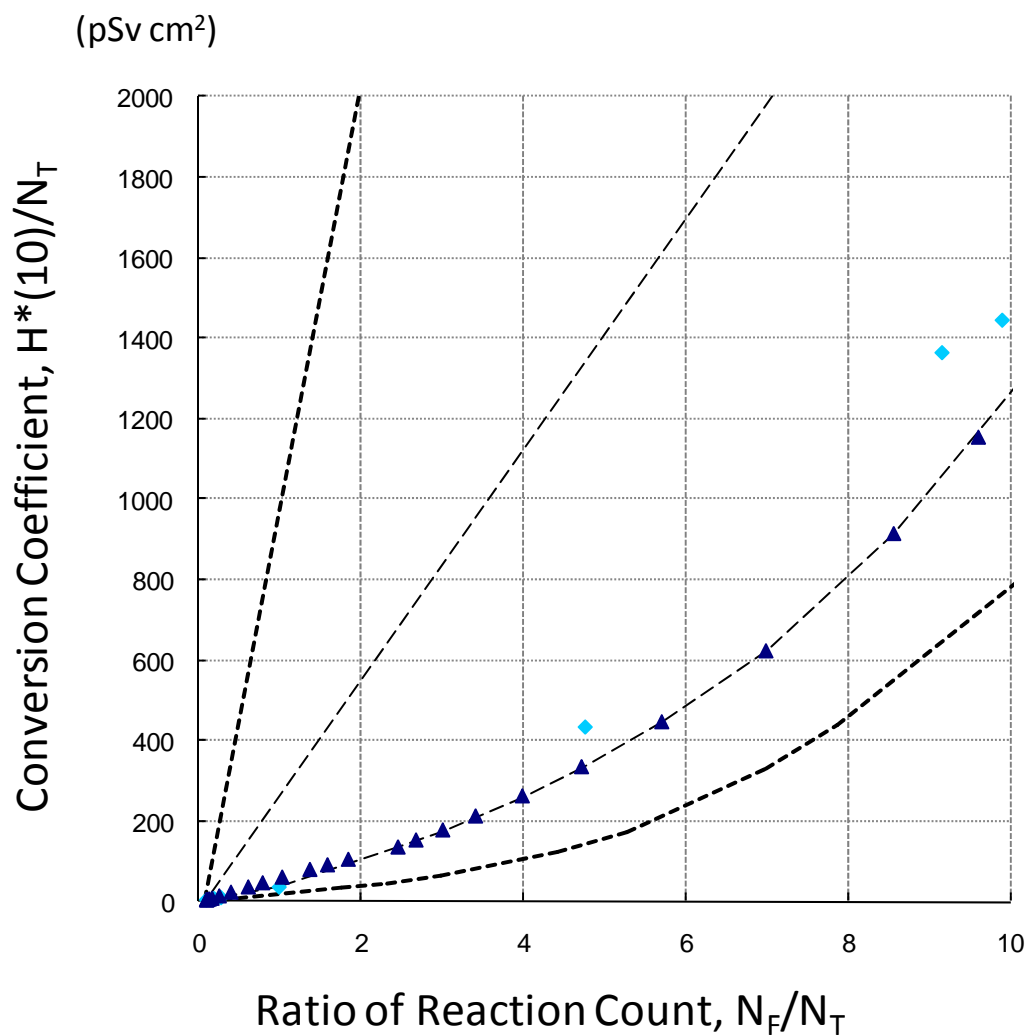


図 3.2.26 減速核分裂中性子に対する混合ガス比例計数管の応答計算結果（抜粋）



- ◆ : 一般式による核分裂中性子スペクトルに対する混合ガス比例計数管の応答
- ▲ : 減速核分裂中性子スペクトルに対する混合ガス比例計数管の応答
- : 単色中性子に対する応答で作成した閉凸空間の境界
- : 核分裂中性子に対する応答で作成した閉凸空間の境界

図 3.2.27(a) 核分裂中性子に対する混合ガス比例計数管の応答で作成した閉凸空間



- ◆ : 一般式による核分裂中性子スペクトルに対する混合ガス比例計数管の応答
- ▲ : 減速核分裂中性子スペクトルに対する混合ガス比例計数管の応答
- : 単色中性子に対する応答で作成した閉凸空間の境界
- : 核分裂中性子に対する応答で作成した閉凸空間の境界

図 3.2.27(b) 核分裂中性子に対する混合ガス比例計数管の応答で作成した閉凸空間（拡大図）

3.2.3.3 中性子スペクトルの実測事例に基づく検討

前項で示した、計算で求めた核分裂中性子に対する混合ガス比例計数管の応答による閉凸空間の性能を確認する。核分裂中性子場のエネルギースペクトルの評価の実例を用いて、それらの場における混合ガス比例計数管の出力を計算し、それらの結果を位相ベクトル空間中にあてはめてみた。核分裂中性子エネルギースペクトルの測定例については、IAEA の Technical Report Series No.403¹⁷⁾を参照し、核分裂を線源とする中性子エネルギースペクトルデータを選び出した。選出の根拠と、選んだデータの一覧は添付 2 に示す。応答計算は、やはり NRESP-ANT で行った。これらの中性子スペクトルに対する応答計算結果を図 3.2.27 の閉凸空間に配置した結果を図 3.2.28(a)に、さらに、その原点付近の拡大図を図 3.2.28(b)に、それぞれ示す。

結果として、添付 2 に示した事例に対する測定結果は、全て図 3.2.27 に示した核分裂中性子に対する閉凸空間に内包されることが示された。核分裂中性子が直接検出されているような場に対する応答は、弓状の閉凸空間の「弓」の境界の近傍に位置している。これは、その中性子スペクトルが「弓」を形成した要素スペクトルとほぼ同一であり、減速作用などほとんど受けていないため、その再現に減速核分裂中性子との合成を行う必要がほとんどないことを意味する。

また、各測定点は閉凸空間の中で均等に広がるのではなく、ある偏りを持っていることもわかる。全体の傾向として N_F/N_T が小さい側に集まる傾向が見られる。これは核分裂中性子の伴う場所では、一般に作業エリアは作業者の防護のために十分に遮蔽が施されていることによる。このような場所では中性子の減速が進んでおり、そこを計数管で測定すると N_F/N_T は小さくなる。また、各点は閉凸空間の中央付近に固まっており、閉凸空間境界の近傍にはあまり多くの点は配置されていないことも指摘できる。これは、やはり多くの物質の影響を受けてきた中性子が測定対象となっているケースが多く、多くの要素スペクトルの合成で表現されるために、「弓」から離れた点に位置する傾向があることを示している。

さらに、これらの多数の測定点の中から、いくつかの施設における測定を選びだして、その傾向を確認した。図 3.2.29 にその結果を示す。同一施設における測定結果は、直線状の相関をとるであろうことが見受けられる。これは、原子炉施設では原子炉が大きな中性子源であることが理由である。同一施設における中性子測定は、共通の中性子源に対して、遮蔽条件の異なる状況における測定と捉えることができるため、閉凸空間中においても共通した特性を示していると言える。同一施設内のデータでも少しバラつきが大きいものは、燃料再処理施設における測定結果であった。これは、燃料の溶解、濃縮、混合、分離など核燃料物質の様相がさまざまに変化するために、線源条件が変わることが理由と考えられる。

以上より、中性子スペクトル測定の実例を用いて、前項までの計算で求めた閉凸空間が十分に機能していることが示された。

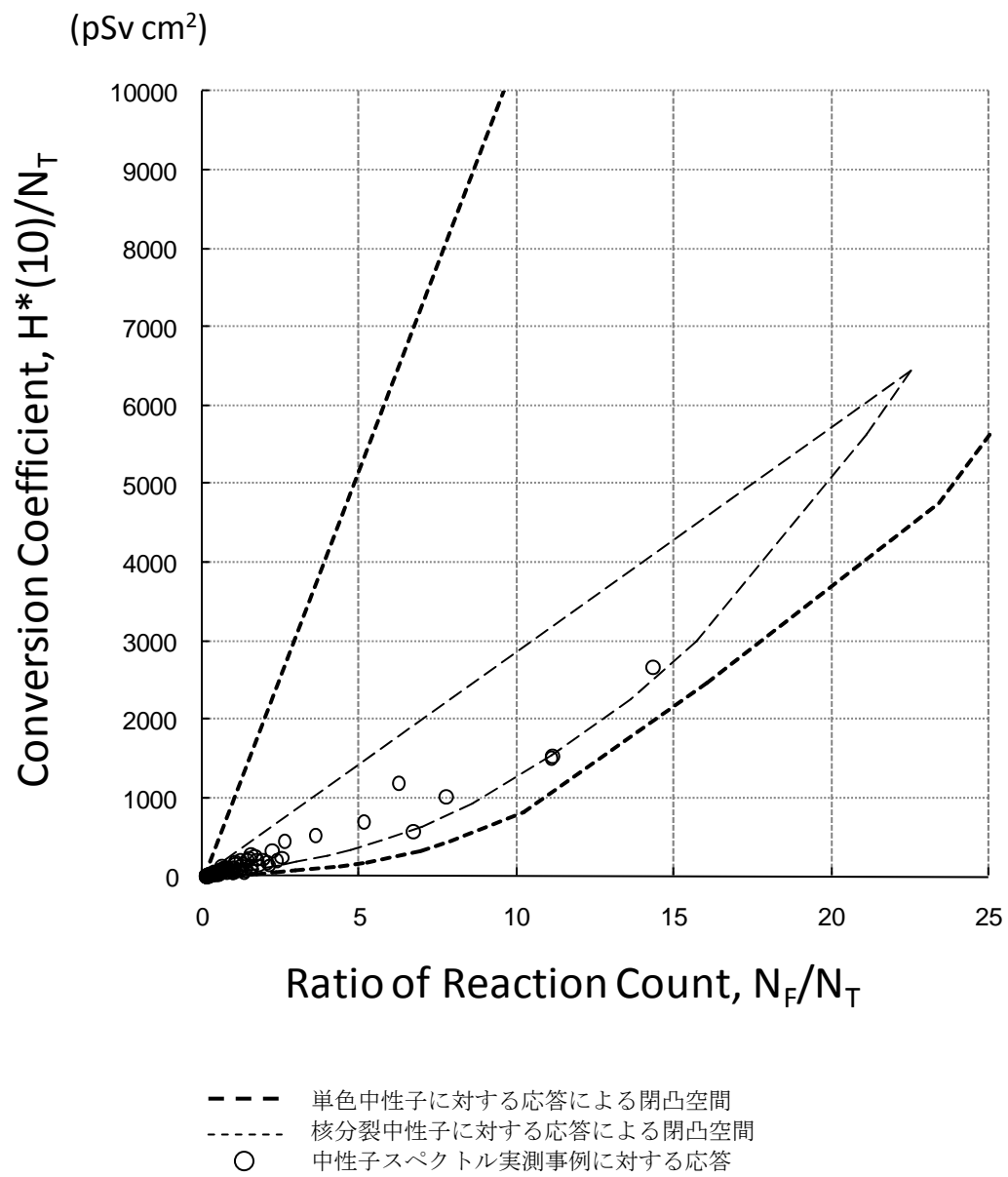


図 3.2.28(a) 核分裂中性子に対する混合ガス比例計数管の応答の閉凸空間と実測中性子スペクトルに基づく計数管出力に対応する点

(pSv cm²)

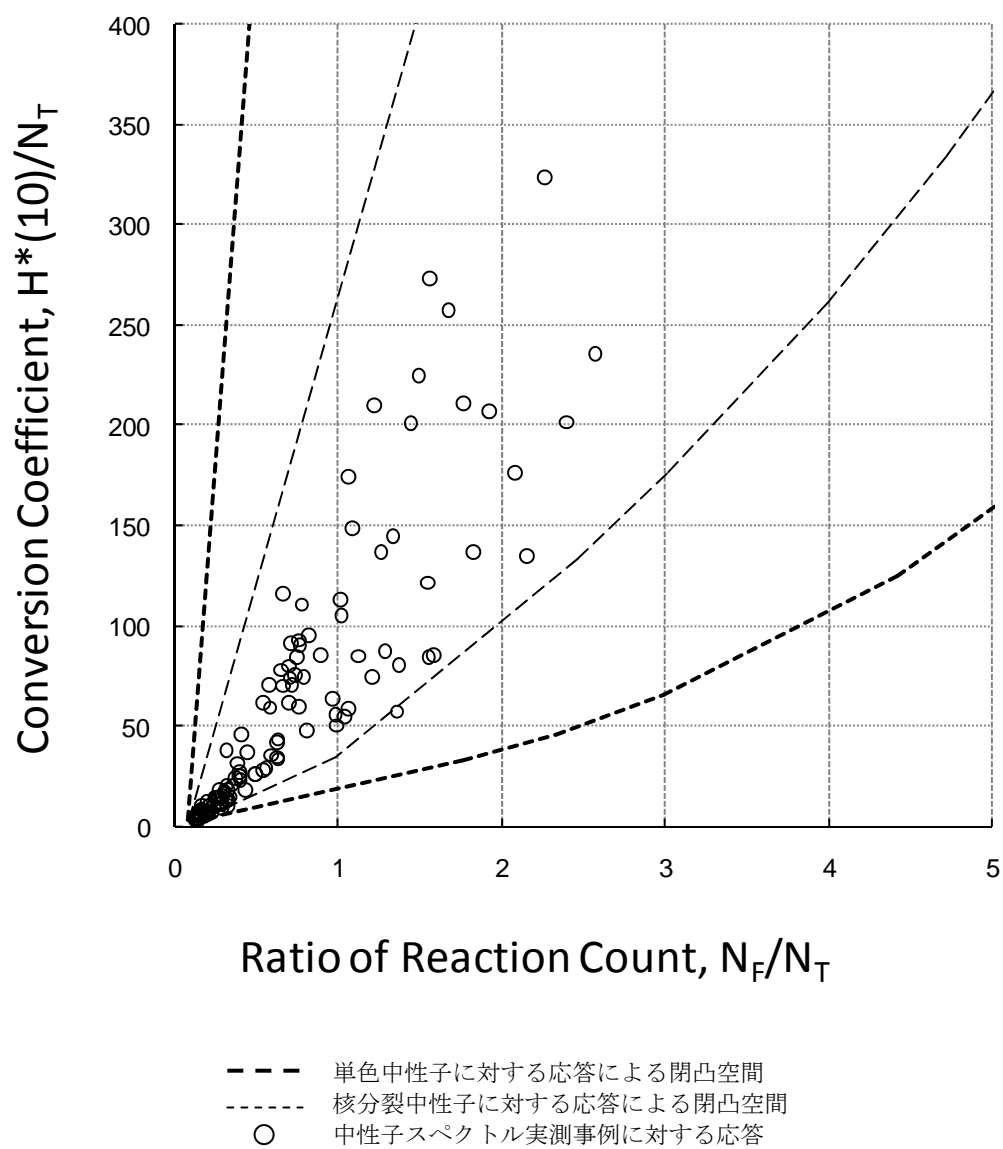
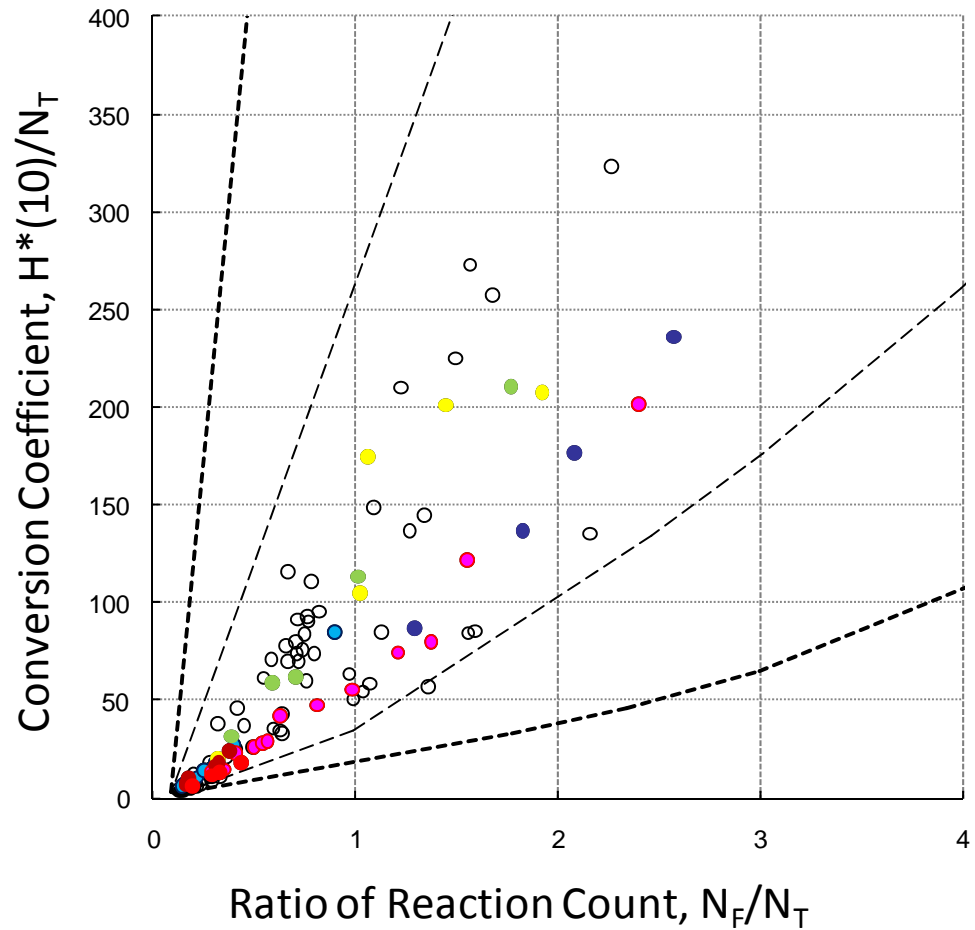


図 3.2.28(b) 核分裂中性子に対する混合ガス比例計数管の応答の閉凸空間と実測中性子スペクトルに基づく計数管出力に対応する点 (拡大図)

(pSv cm²)



- 単色中性子に対する応答による閉凸空間
- 核分裂中性子に対する応答による閉凸空間
- 中性子スペクトル実測事例に対する応答
- Caorso BWR での測定事例に対する応答
- Swiss BWR での測定事例に対する応答
- UK 再処理プラントでの測定事例に対する応答
- USA 再処理プラントでの測定事例に対する応答
- Czech PWR での測定事例に対する応答
- Swiss PWR での測定事例に対する応答
- Wolfcreek PWR での測定事例に対する応答

図 3.2.29(a) 特定の施設における混合ガス比例計数管の応答の抜粋

(pSv cm²)

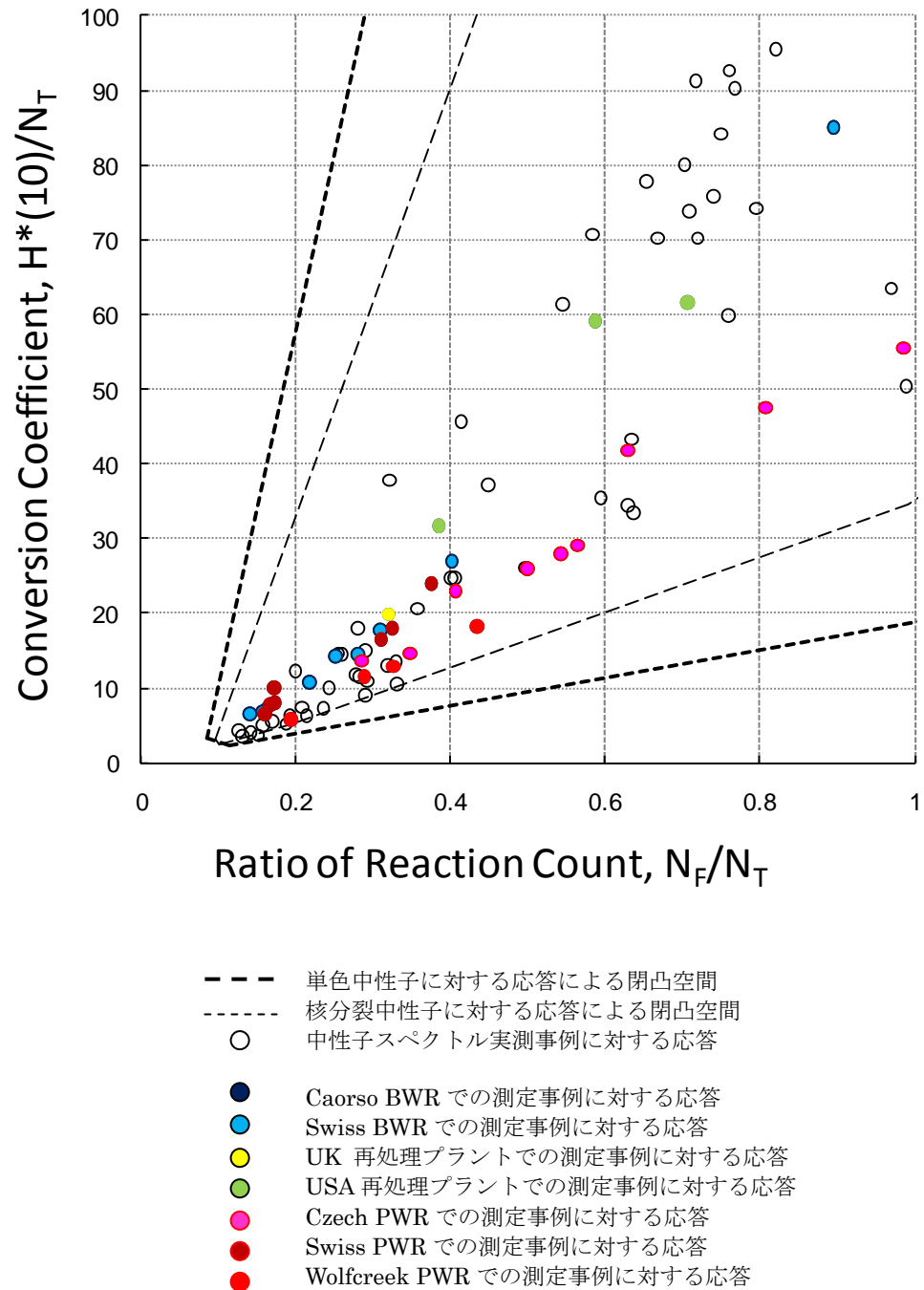


図 3.2.29(b) 特定の施設における混合ガス比例計数管の応答の抜粋 (拡大図)

3.2.3.4 核分裂場における応答特性試験

前項までの結果で、混合ガス比例計数管に閉凸空間データ処理法を適用することによる核分裂中性子の線量評価が可能であることが示された。そこで、実際に原子炉施設において応答試験を行って、閉凸空間データ処理法が機能することを確認した。

実験は、東京大学原子炉「弥生」、及び近畿大学原子炉で行った。弥生では、高速炉の特性を生かして速中性子に寄った核分裂中性子を想定し、また近大炉は熱中性子炉であるため熱化の進んだ核分裂中性子を想定した。それぞれにおける実験状況とその結果を以下に示す。

(1) 弥生での実験

弥生では、高速中性子柱設備のほぼ中央にある遮蔽扉実験孔 No.12 から高速中性子を取り出し、その延長線上 60cm 地点に検出器を置いて、測定を行った。原子炉の運転出力は 1 W である。また、測定点における中性子スペクトルは、ボナーボール法²⁾³⁾で測定した。中性子スペクトルを求めるアンフォールディングは SAND-II¹⁸⁾で行った。

実験体系の略図と写真を図 3.2.30 に示す。測定箇所の中性子スペクトルの測定結果を図 3.2.31 に示す。高速側に寄った中性子スペクトルであることがわかる。また、検出器出力を図 3.2.32 に示す。混合ガス比例計数管出力から、 ^3He 中性子吸収反応のピーク状スペクトルと反跳反応の連続スペクトルが明確に分離することができた。両反応の分離処理をした結果を図 3.2.33 に示す。

(2) 近大炉での実験結果

近大炉では、炉心を収納する生体遮蔽タンクの上部と側部（図 3.2.34 参照）の 2 か所で測定を行った。この場所の違いにより、核分裂中性子の熱化の度合いが異なることを想定した。

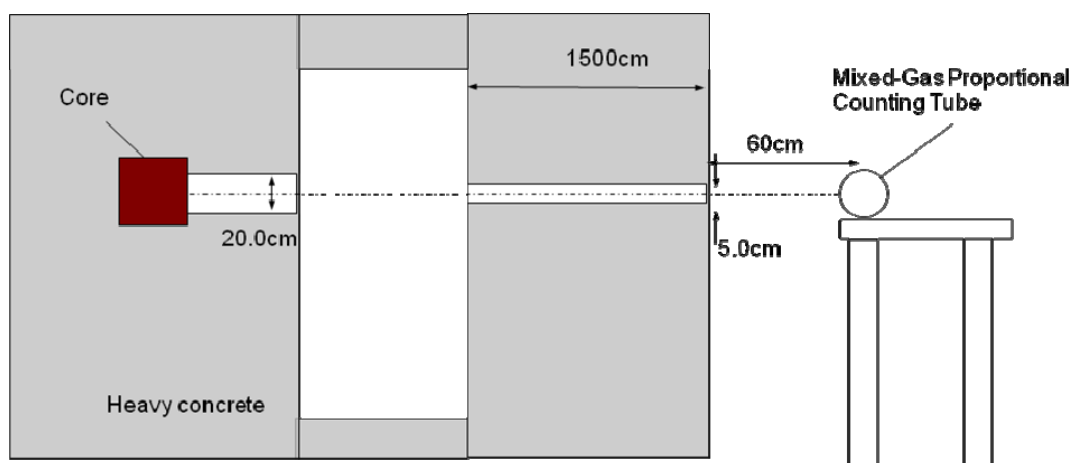
実験体系の略図と写真を図 3.2.34 に示す。測定箇所の中性子スペクトルの測定結果を図 3.2.35 に示す。Point 1 に比べて、Point2 の中性子スペクトルはやや低エネルギー側に遷移しており、Point2 の方が中性子の熱化が進んでいることが示されている。それぞれの点における検出器出力を図 3.2.36 に示す。

以上の結果から、それぞれにおいて N_T 、 N_F を抽出し、また、中性子スペクトル測定結果から導かれる、 N_F/N_T 値、 $H^*(10)/N_T$ 値を求めて、表 3.2.6 にまとめた。これを、図 3.2.28 に示した閉凸空間にあてはめると図 3.2.37 のようになる。それぞれの施設における実験結果はいずれも閉凸空間中にあてはまった。さらに、弥生のデータは減速を受けていない核分裂中性子に対する出力に近い傾向を見せた。一方で、近大炉のデータは熱中性子に対応する出力に近づく傾向を見せており、さらに、point1 より point2 の方が熱中性子に近づく傾向にあることが明白に表れた。

これにより、閉凸空間データ処理法を用いた混合ガス比例計数管による中性子線量測定が機能することが、実験的にも示された。

表 3.2.6 混合ガス比例計数管の原子炉施設における応答実験結果

		N_T	N_F	N_F/N_T	$H^*(10)/\phi$ (pSv cm ²)	$H^*(10)/N_T$ (pSv cm ²)
Yayoi		2.96×10^5	1.11×10^6	3.76	8.86×10^7	300
UTR-KINKI	point1	2.02×10^2	1.54×10^2	0.76	7.79×10^3	38.6
	Point2	7.13×10^0	1.29×10^0	0.18	6.47×10^1	9.07



(a) 実験装置の配置概略図



(b) 実験風景

図 3.2.30 弥生における混合ガス比例計数管の応答実験

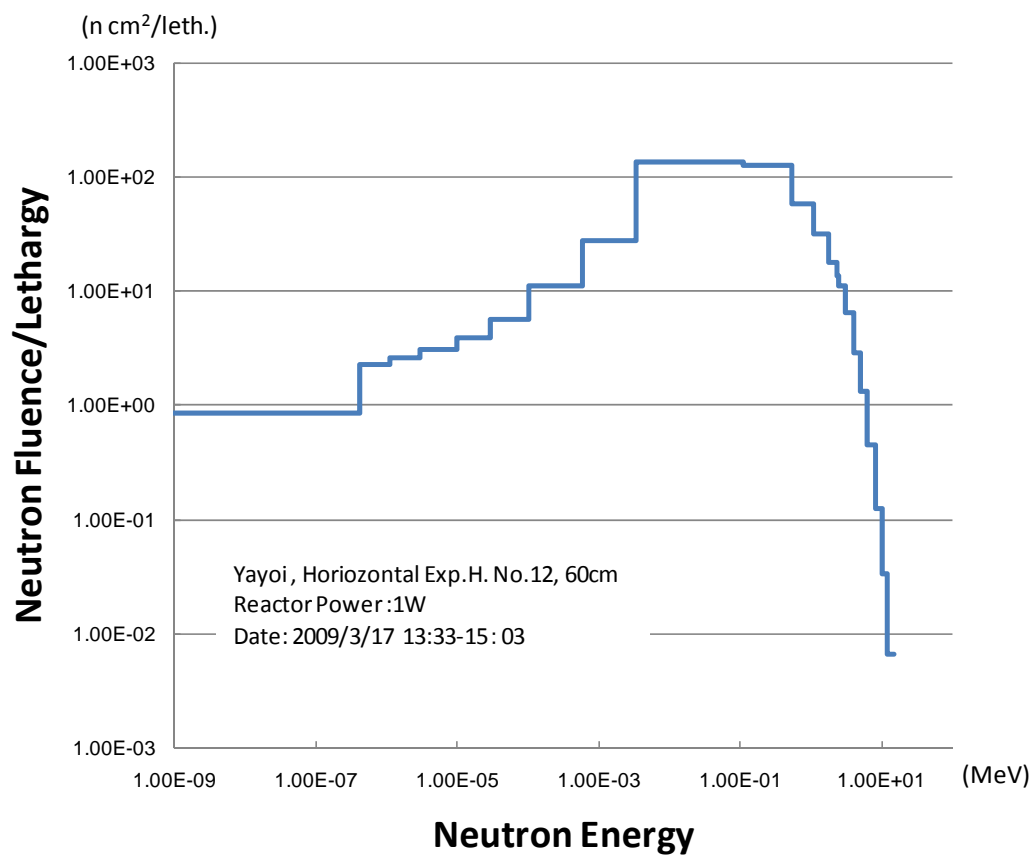


図 3.2.31 弥生における混合ガス比例計数管の応答実験箇所の中性子スペクトル

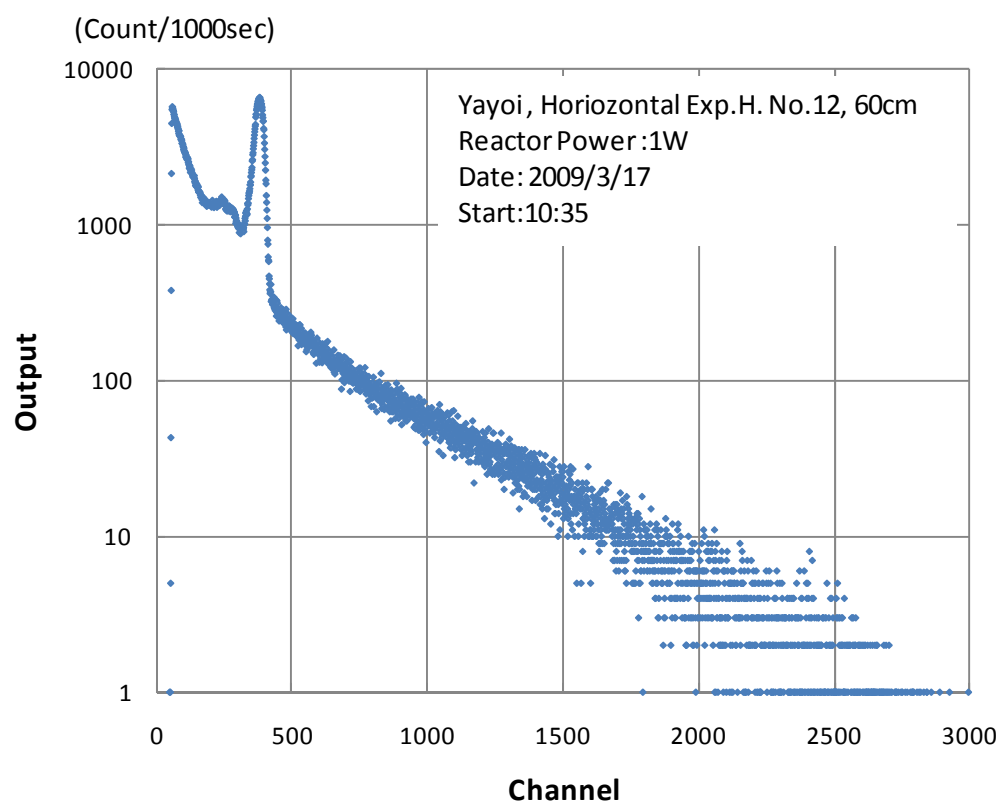


図 3.2.32 弥生における混合ガス比例計数管の応答実験結果

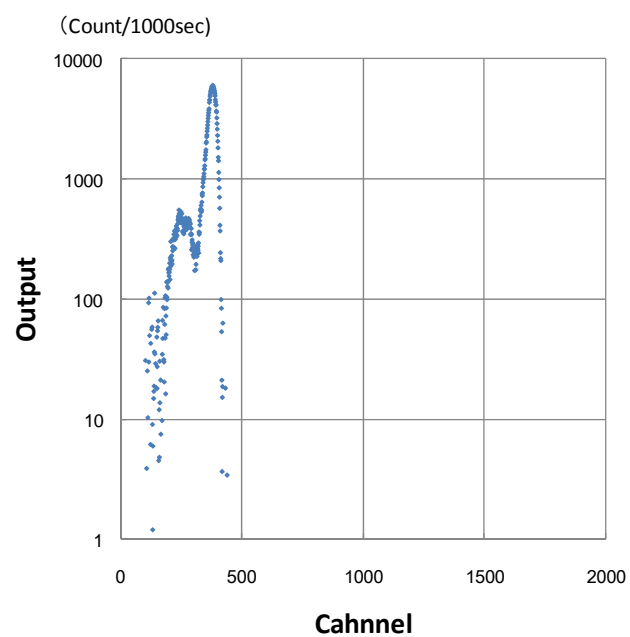


図 3.2.33(a) 弥生での実験結果からの ^3He 吸収反応出力の分離

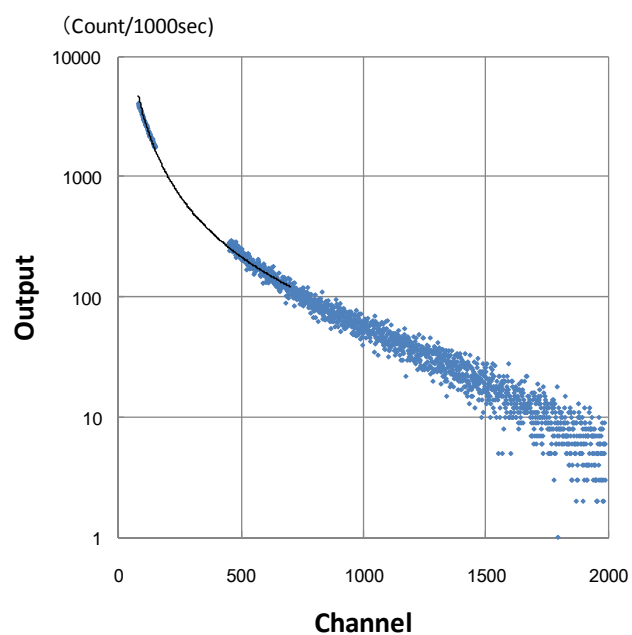
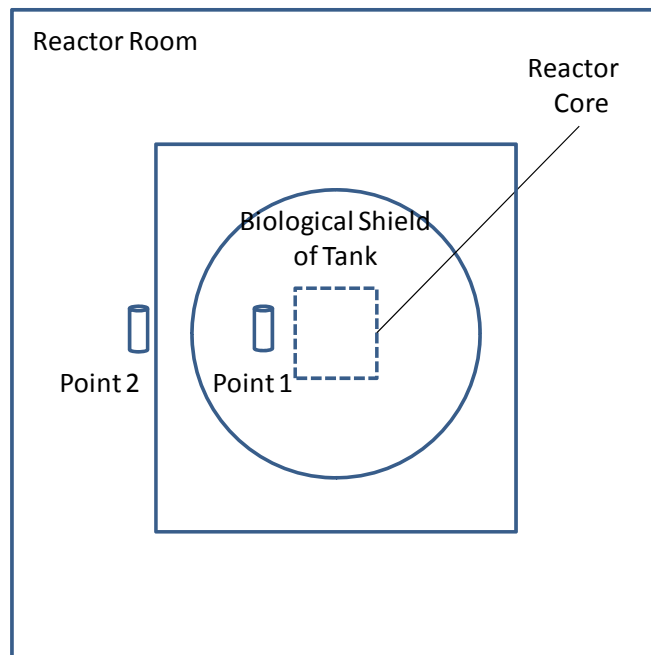
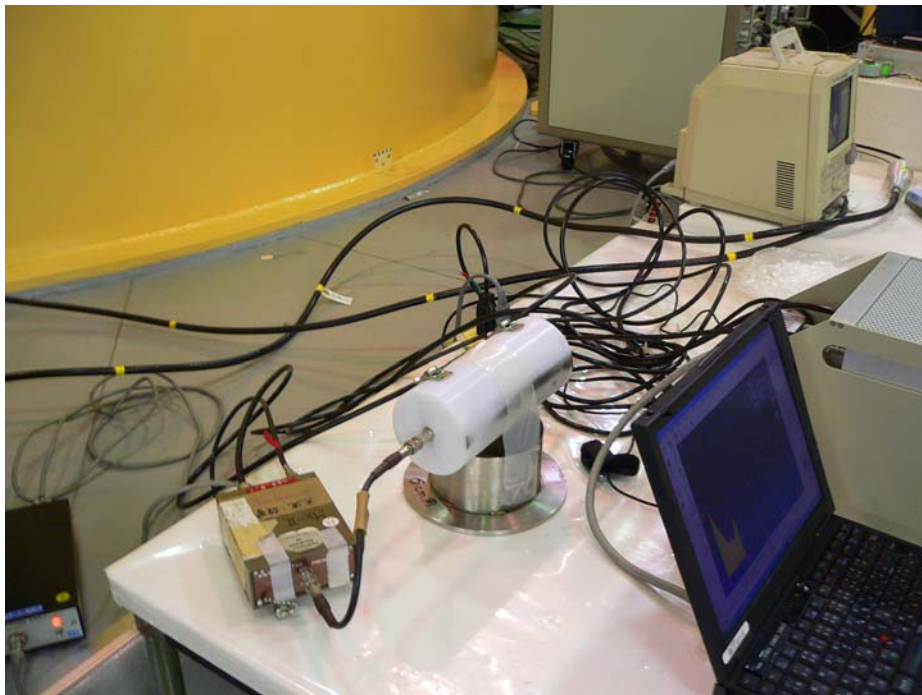


図 3.2.33(b) 弥生での実験結果からの反跳反応出力の分離



(a) 実験装置の配置概略図



(b) 実験風景

図 3.2.34 近大炉における混合ガス比例計数管の応答実験

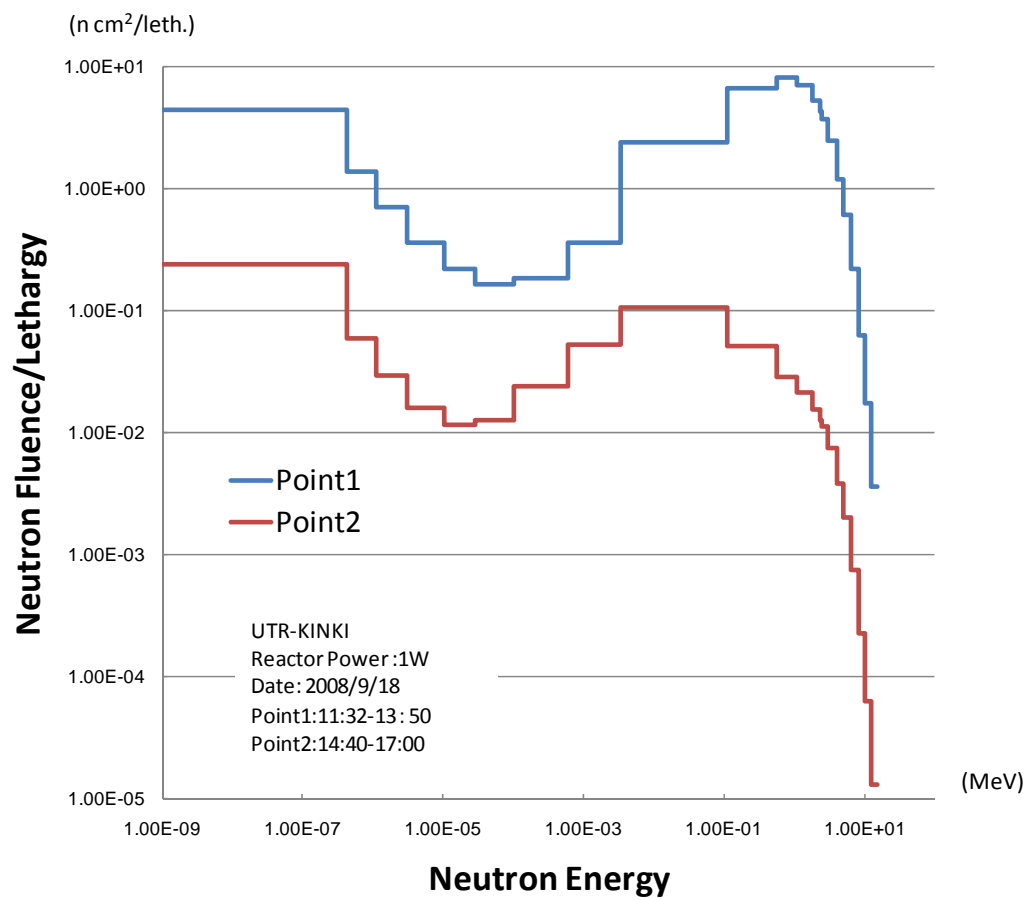


図 3.2.35 近大炉における混合ガス比例計数管の応答実験箇所の中性子スペクトル

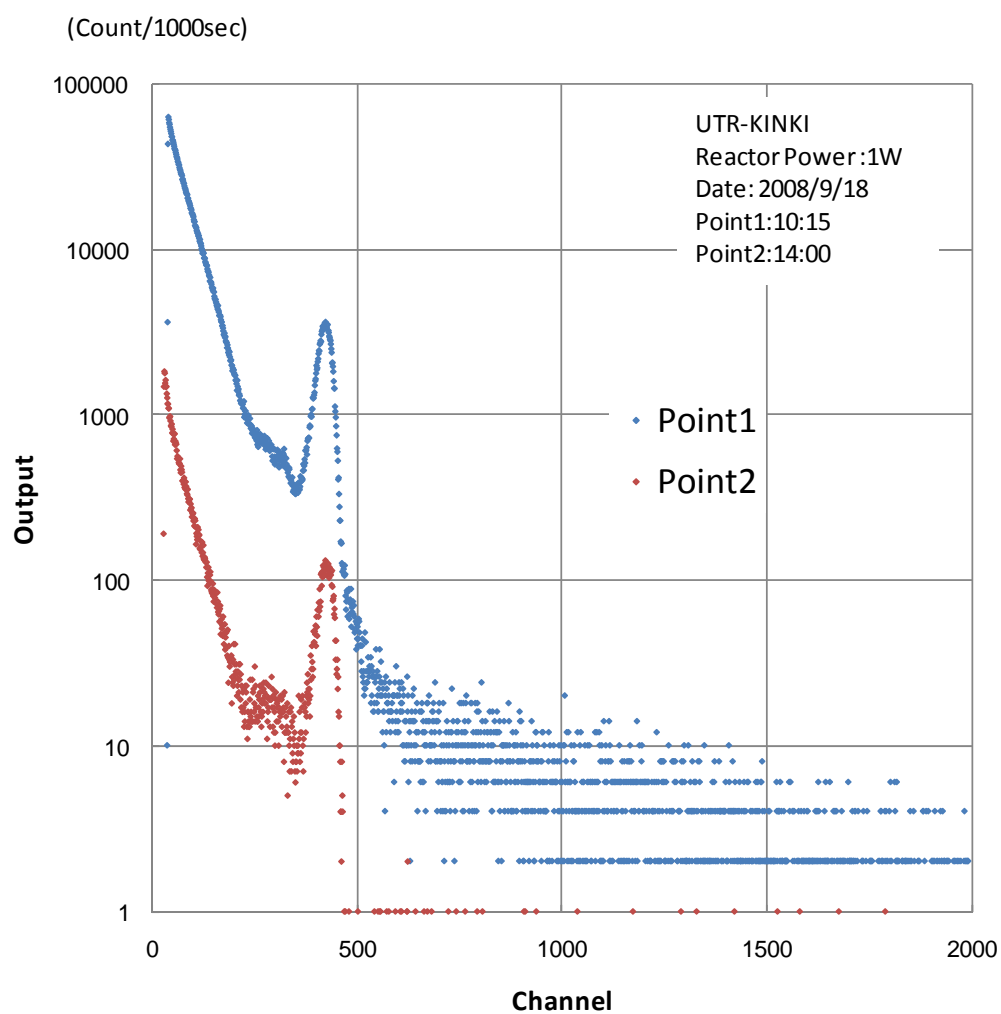


図 3.2.36 近大炉における混合ガス比例計数管の応答実験結果

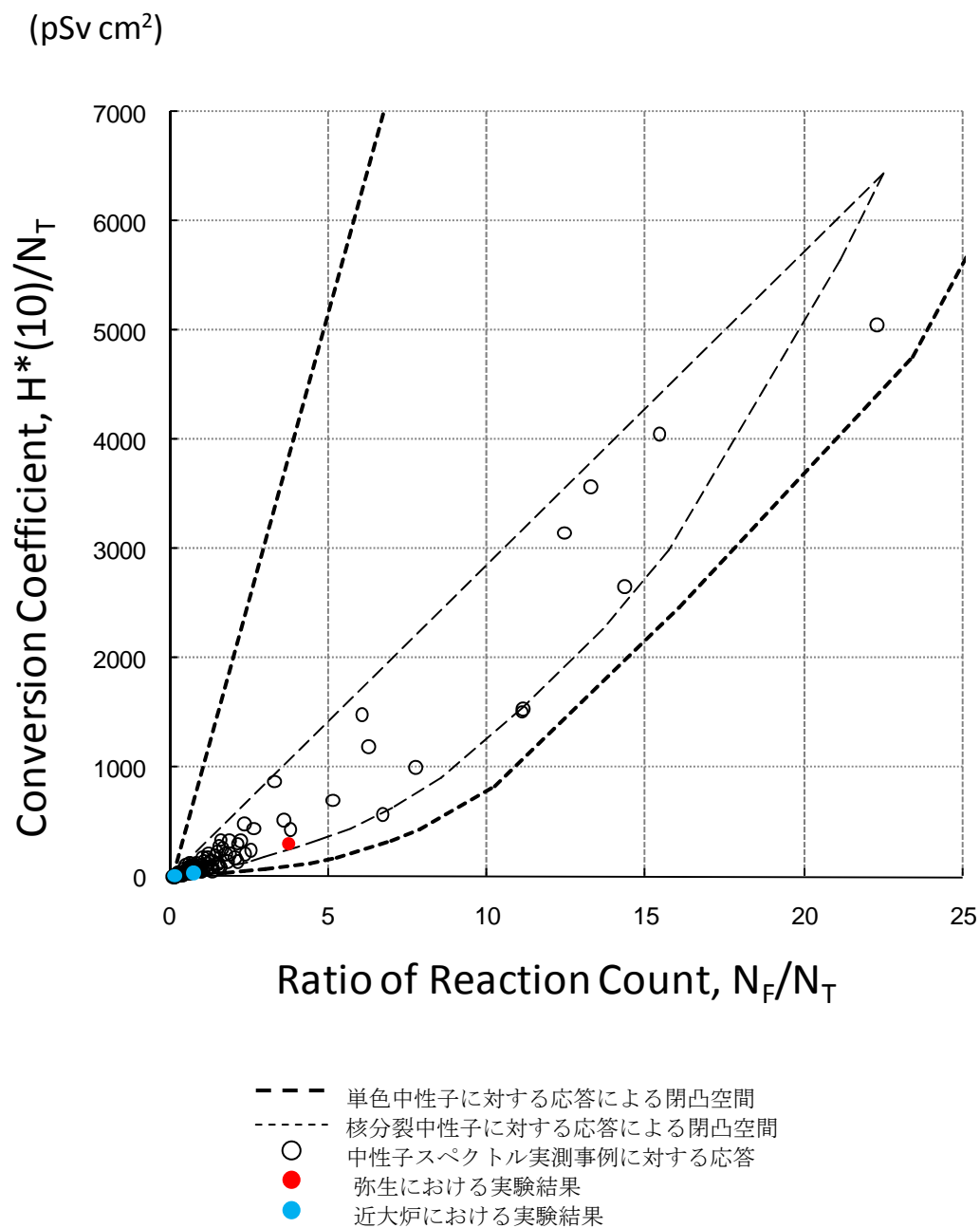


図 3.2.37(a) 原子炉施設における混合ガス比例計数管の実験結果の図 3.2.28 に示す閉凸空間への配置

(pSv cm²)

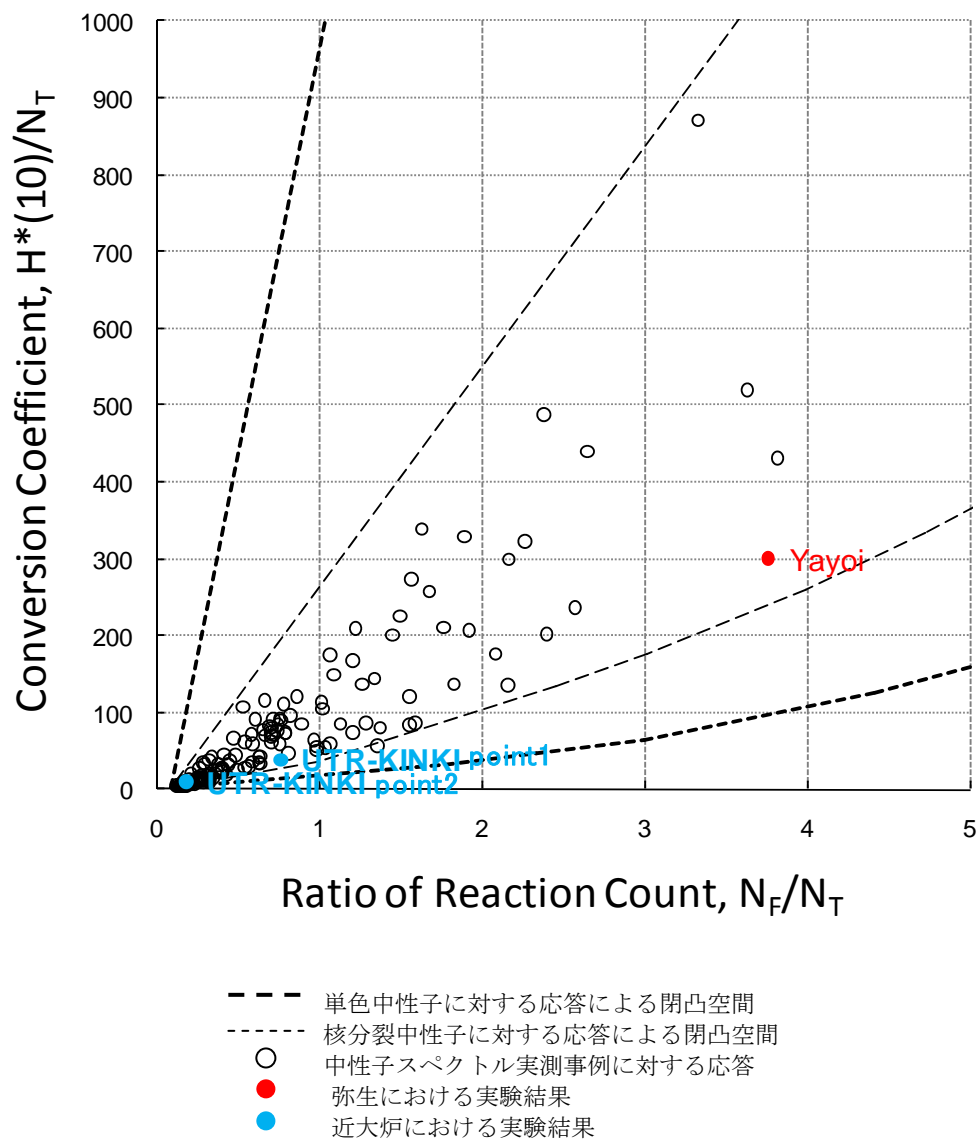


図 3.2.37(b) 原子炉施設における混合ガス比例計数管の実験結果の図 3.2.28 に示す閉凸空間への配置 (拡大図)

3.2.4 関心領域毎出力で形成する閉凸空間による線量測定

前項までは、出力スペクトルから反応種別ごとの出力を分離抽出し、それぞれの計数に基づいて閉凸空間を作成した。しかし、前項で扱った反応の弁別には、パルス波高分析とマルチチャネルデータ分析、及び反跳反応スペクトルの形状推定が不可欠である。日常的な測定への適用には、より簡易な測定系を使用することが望ましく、これらの処理はその観点では障害と言える。また、さらに両反応の弁別が常に適切に行えるわけではない点にも注意が必要である。例えば、線量率が低く、計数が十分に得られない場合には、反跳反応の連続スペクトルを満足に描き出せないだろう。

そこで、反応の弁別をせず、 ^3He 中性子吸収反応の計数が大きく表れるエネルギー領域と、反跳反応が主要な計数となっているエネルギー領域をそれぞれの関心領域として設定し、それらの計数を使った閉凸空間の形成を検討した。それぞれのエネルギー領域の計数は相互に独立であり、個別の独立な放射線検出器の出力とみなすことができ、したがって、閉凸空間データ処理法の適用が可能であると考えられる。

3.2.4.1 核分裂中性子による閉凸空間の形成

それぞれの関心領域については、弥生の実験で得られた混合ガス比例計数管の出力（図 3.2.32 参照）に基づき設定した。まず、 ^3He の吸収反応によるピーク状スペクトルが存在する領域を設定する。実験結果から、 ^3He の中性子吸収ピークは計数管のエネルギー分解能に応じた広がりを示している。また低エネルギー側には、壁効果によるテールも見える。これらが有意に存在すると思われる領域を、ROI-1 とした。ROI-1 のエネルギー範囲は、400keV～850keV である。また、反跳反応の領域には、ROI-1 より高いエネルギー側での出力だけでなく、低エネルギー側も該当する。低いエネルギーの中性子が支配的な場合には、 ^3He の吸収ピークより低いエネルギー領域で反跳反応のスペクトルが終わってしまうケースもあるからである。また、上限についても、5MeV を超えるような高いエネルギーの中性子への対応も図るべきとした。この領域を ROI-2 とした。反跳反応に着目する ROI-2 は、100keV～400keV と 900keV～8MeV の二つの領域に設定され、ROI-2 の計数は二つの領域の計数の和とした。図 3.2.38 にエネルギー領域の設定を示す。

ここから、反応毎係数の場合と同様に順に閉凸空間の状況を確認していく。

最初に、単色中性子に対する応答で評価する。計算結果から、上記の ROI に相当するエネルギー領域の出力を抽出した。ROI-1 の計数を N_1 、ROI-2 の計数を N_2 とする。これらから、 N_2/N_1 及び $H^*(10)/N_1$ の値を導き、ベクトル空間に配置して閉凸空間を形成した。図 3.2.39、図 3.2.40 に、単色中性子で形成した特性空間を示す。ROI-1 のエネルギー範囲に相当する中性子が入射する際の応答が閉凸空間に歪みを生じさせている。これは、その区間で反跳反応の計数の増加の大部分が ROI-1 の計数として数えられてしまうためである。

さらに、一般式と MCNP（別添 1 参照）による核分裂中性子スペクトルの計算結果に