よる応答を用いた、核分裂中性子による閉凸空間を形成したのが、図 3.2.41 である。単色中性子で見られた歪みによる閉凸空間の拡大は解消され、反応毎計数による閉凸空間よりは広いものの、弓状の閉凸空間を形成することができた。

これに、中性子スペクトル実測事例(別添2参照)に基づく応答を配置していったところ、図 3.2.42 に示すように、核分裂中性子による閉凸空間中に配置されることが示された。ここでも、反応毎計数で作成した閉凸空間と同様に、同じ施設における測定結果は共通の相関を示すことが示されている。

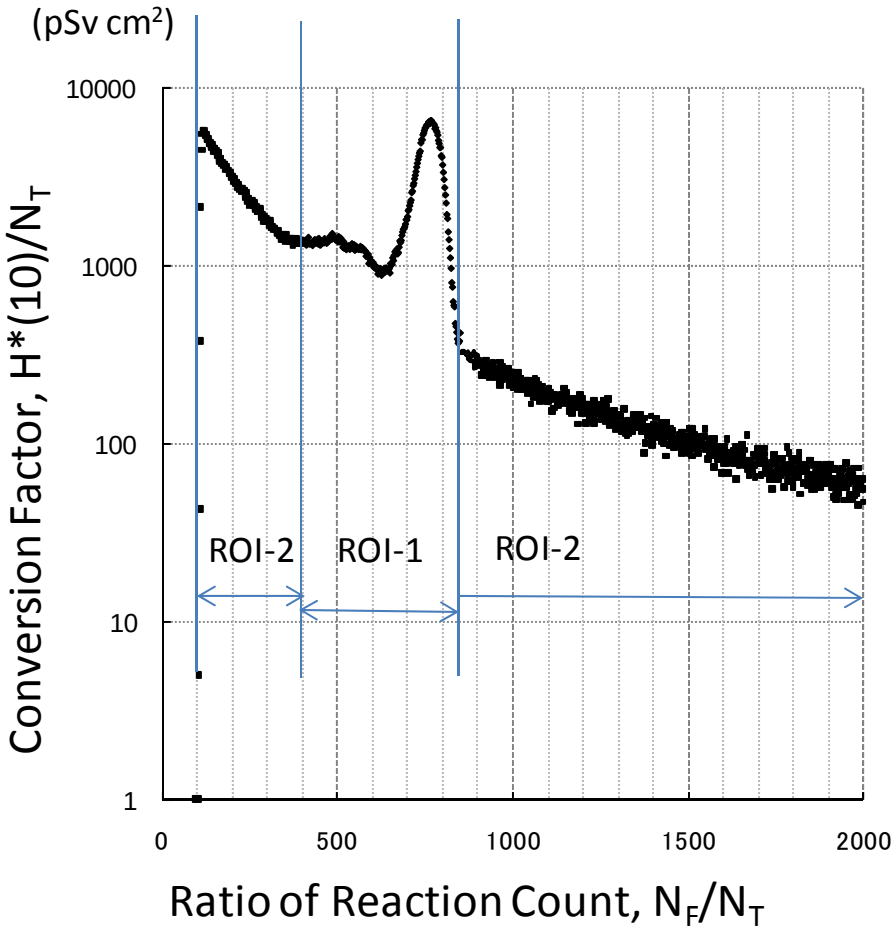
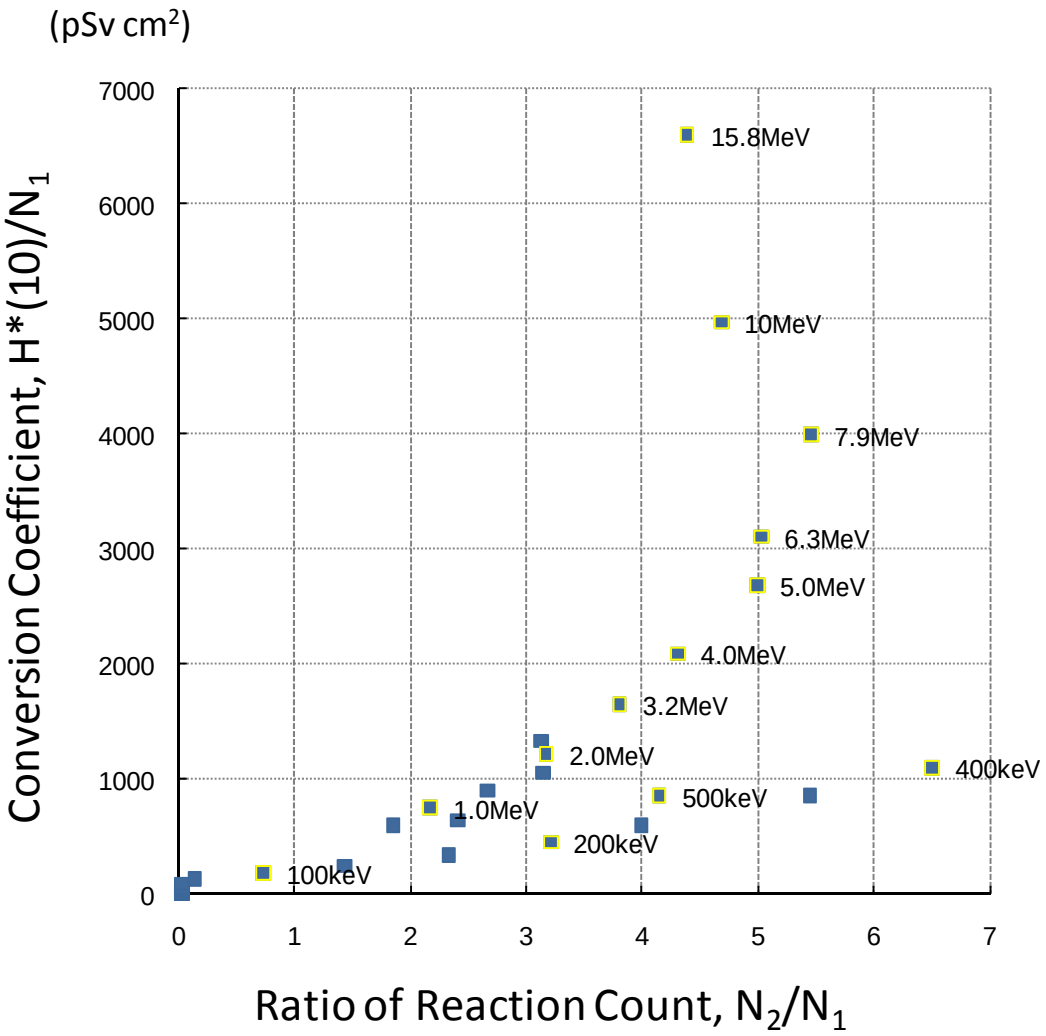
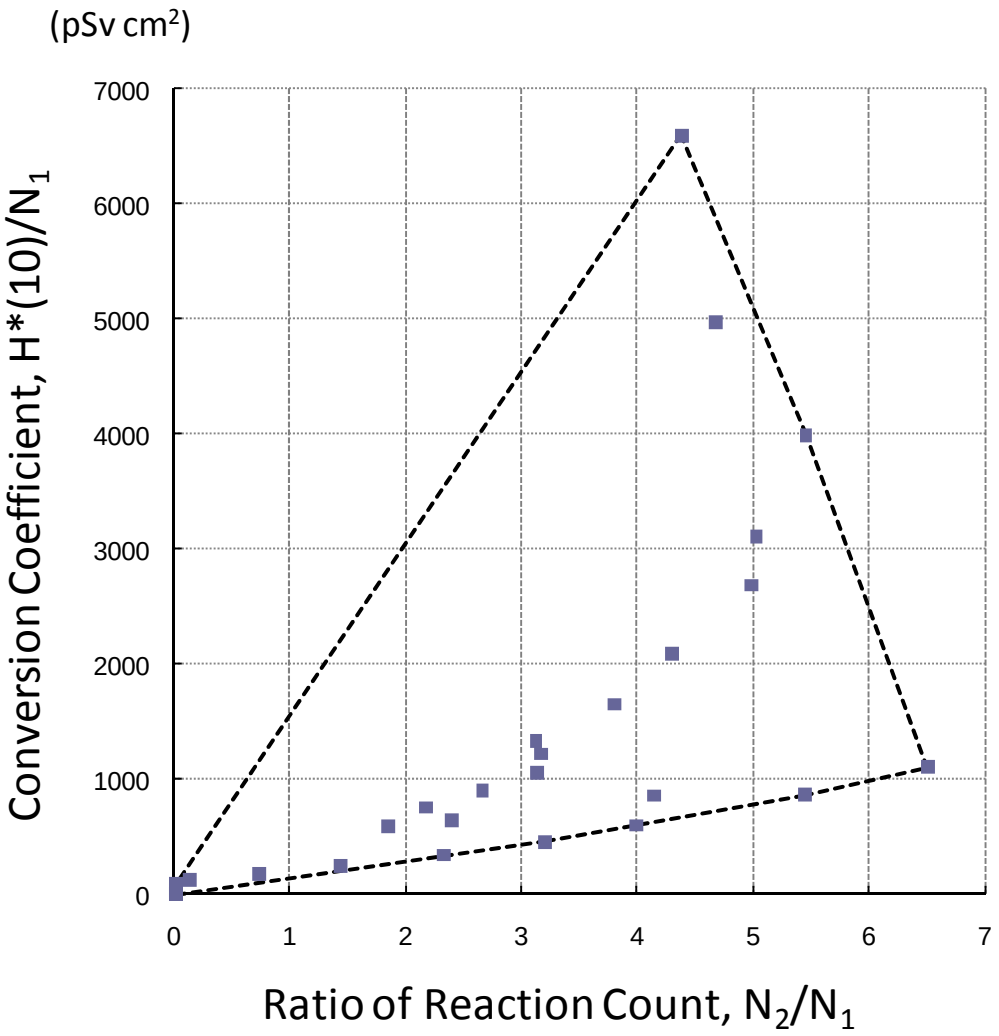


図 3.2.38　混合ガス比例計数管の出力の関心領域の設定



■：単色中性子に対する混合ガス比例計数管の応答

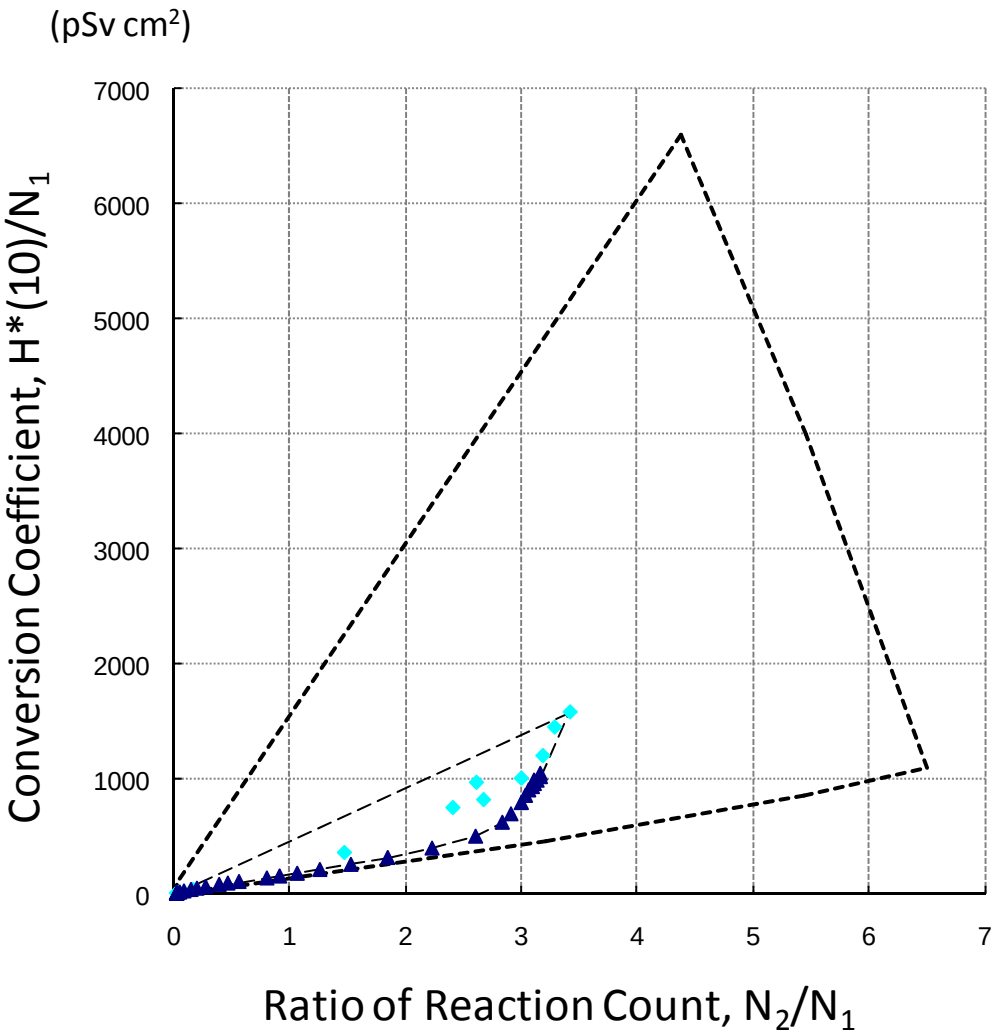
図 3.2.39　混合ガス比例計数管の単色中性子に対する応答の関心領域出力



■　：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 3.2.40　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



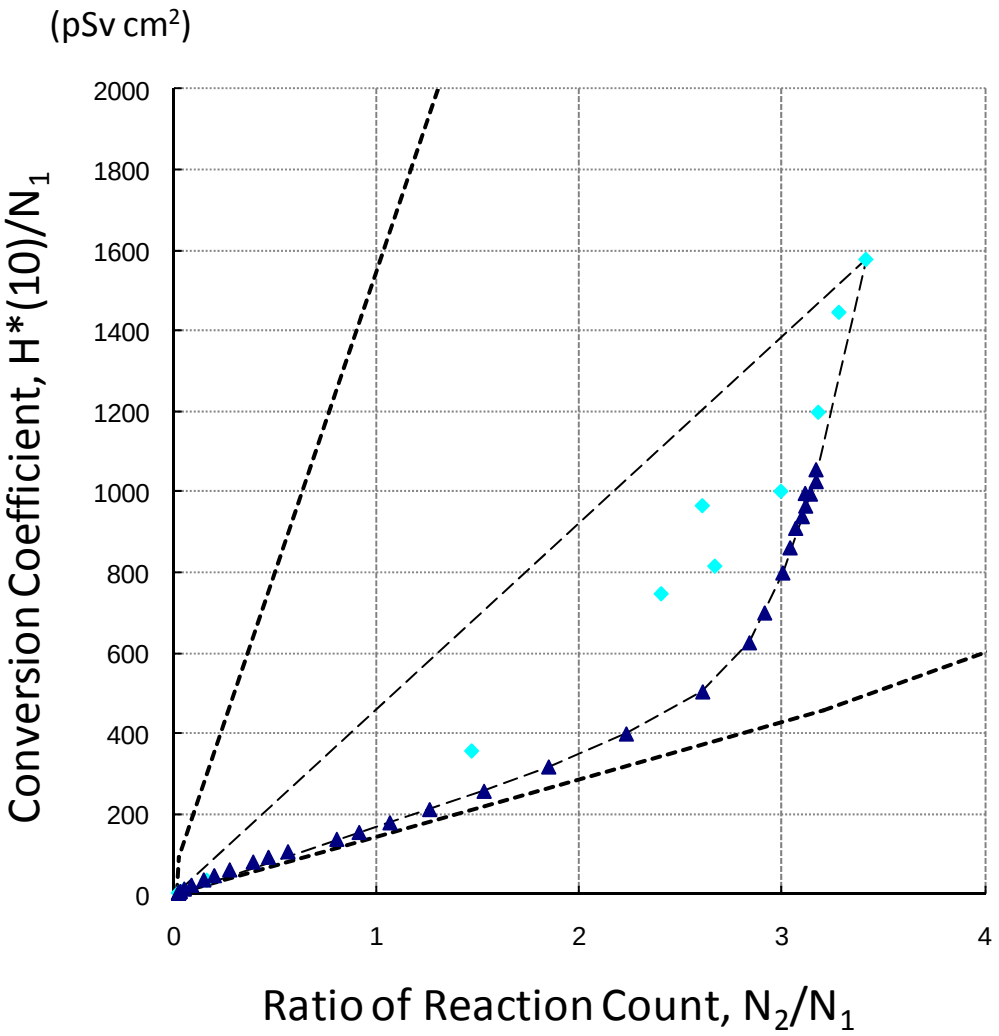
◆　：一般式による核分裂中性子スペクトルに対する混合ガス比例計数管の応答

▲　：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 3.2.41(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



◆　：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 3.2.41(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）

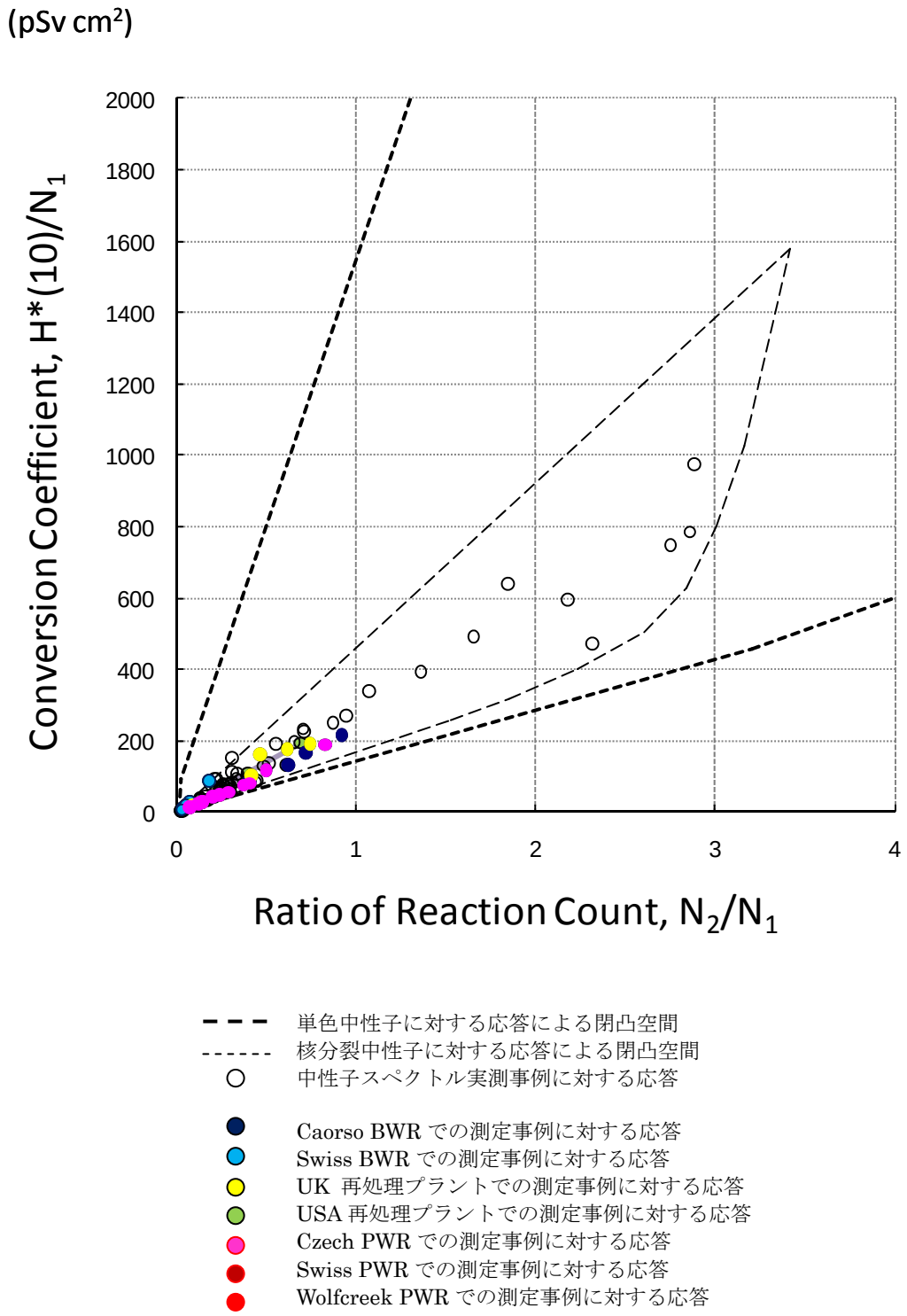


図 3.2.42(a) 混合ガス比例計数管の実測中性子スペクトルに基づく応答の関心領域出力で形成した閉凸空間

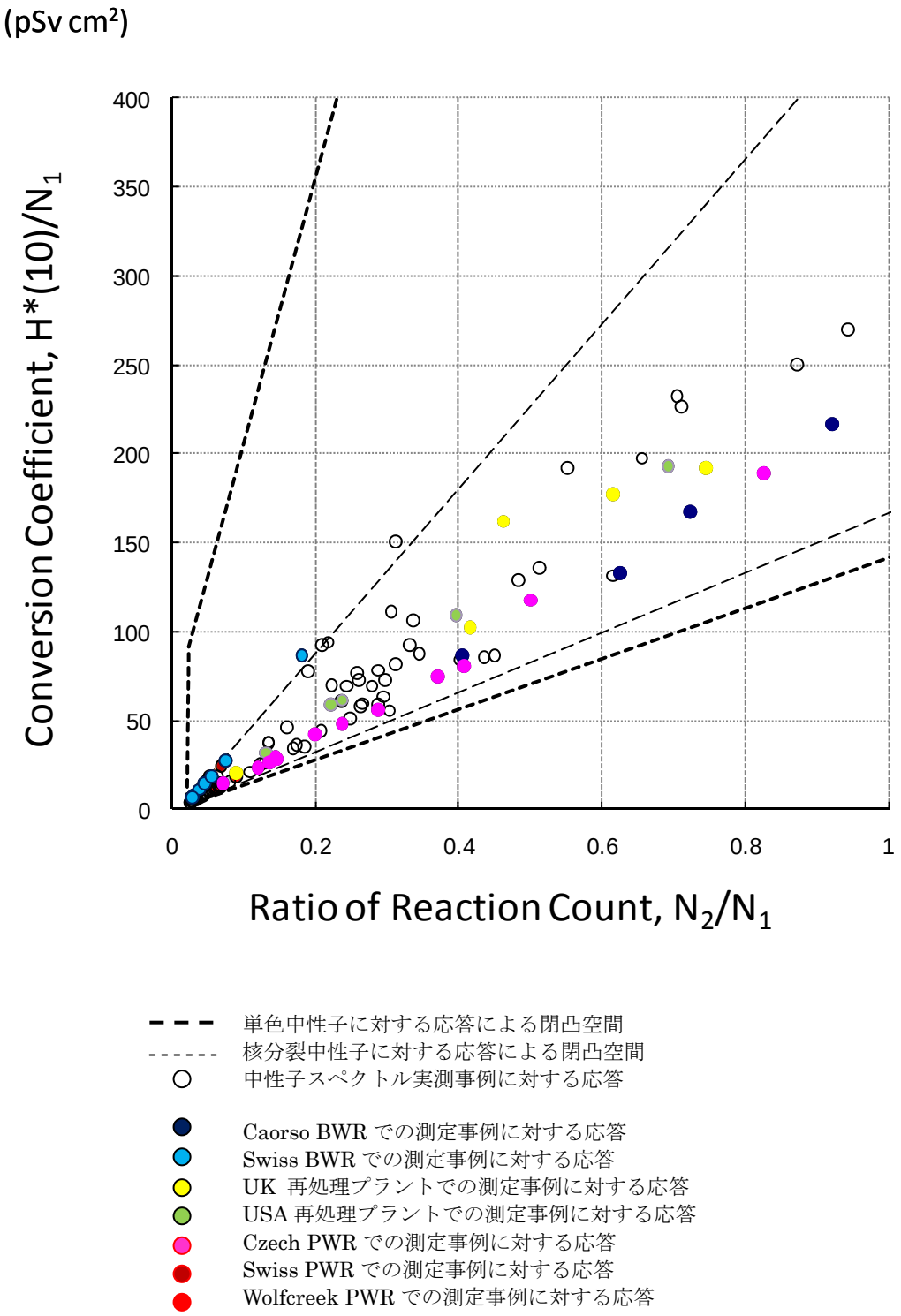


図 3.2.42(b)　混合ガス比例計数管の実測中性子スペクトルに基づく応答の関心領域出力で形成した閉凸空間（拡大図）

3.2.4.2 核分裂場における応答特性試験

次に、弥生と近大炉での実験のデータから関心領域出力を抜き出し、図 3.2.42 に示した閉凸空間にあてはめた。結果を図 3.2.43 に示す。実験結果はいずれも閉凸空間中に的確に配置されることが確認できた。

以上より、混合ガス比例計数管の関心領域出力を使った閉凸空間データ処理により、中性子周辺線量当量の評価を行えることが示された。これは、反応毎計数を使う方法に比べて、検出器出力の処理が大幅に単純化されており、日常的な測定を想定した単純な出力の処理という目的に適合している。

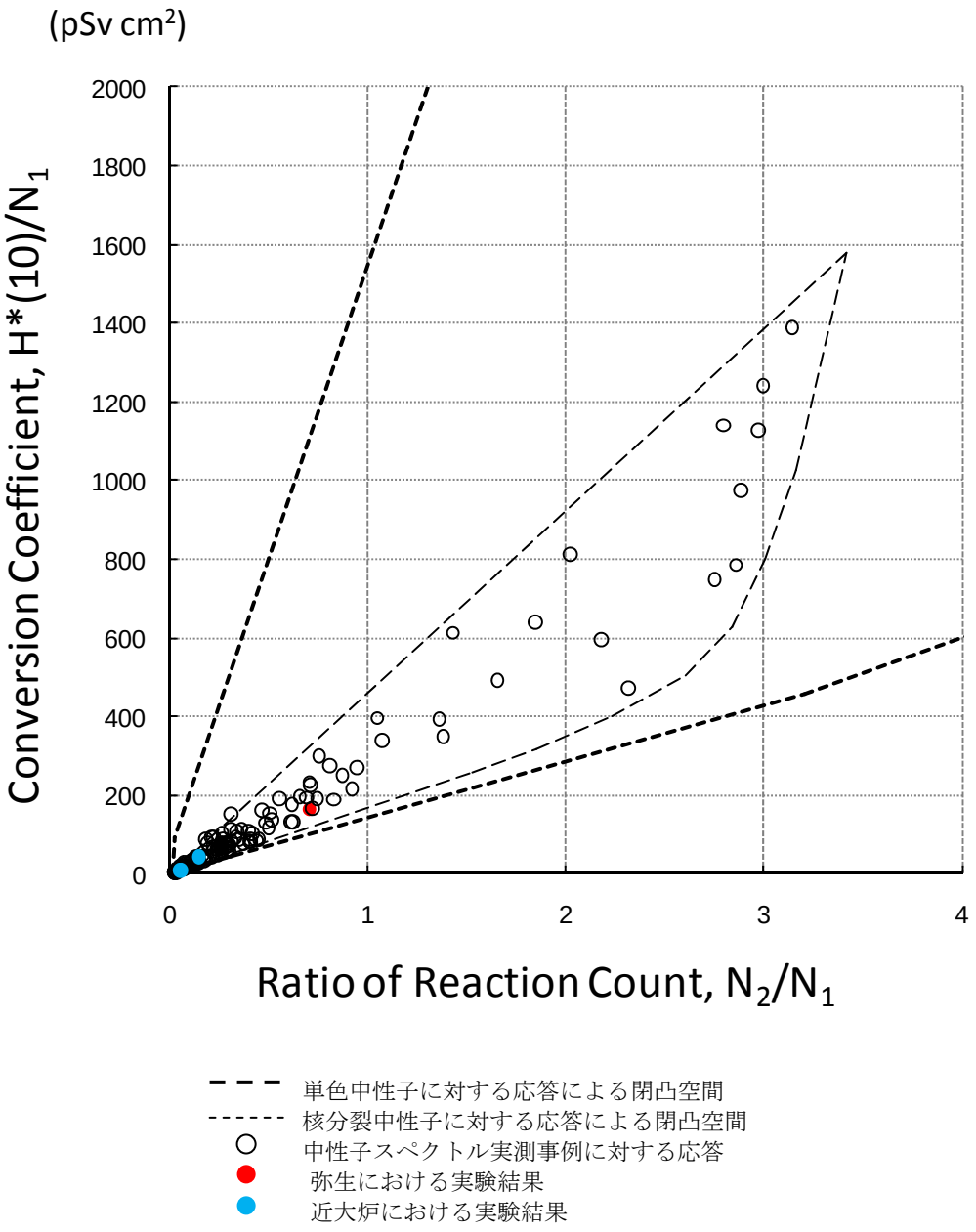


図 3.2.43(a)　原子炉施設における混合ガス比例計数管の実験結果の図 3.2.42 に示す閉凸空間への配置

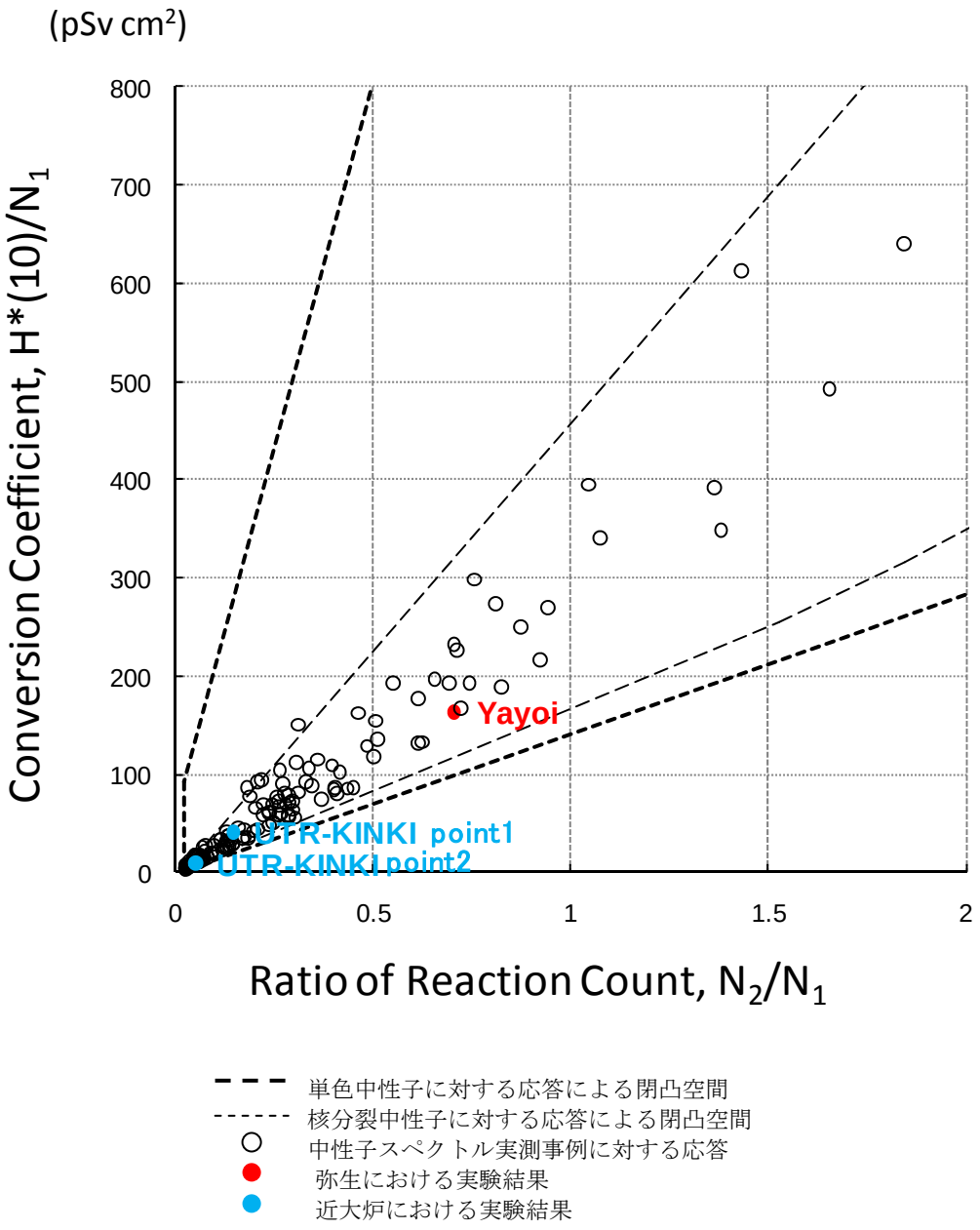


図 3.2.43(b)　原子炉施設における混合ガス比例計数管の実験結果の図 3.2.42 に示す閉凸空間への配置（拡大図）

3.2.5 現行の中性子線量測定器との比較

図 3.2.42 に示した閉凸空間を用いて、線量応答特性の評価を行う。閉凸空間データ処理法を適用したときの線量換算係数広がりの分布を図 3.2.44 に示す。横軸には、それぞれの実測事例における周辺線量当量 H*(10)換算係数をとり、縦軸は、それぞれの事例における出力で決まる弦について、真値に対して持つ広がり示す。例えば、N_2/N_1 が 1 で、線量換算係数 $H^*(10)/N_1$ の真値がおよそ 340 である測定事例では、図 3.2.27 より、閉凸空間の上限は 480、下限は 180 程度と与えられる。このとき、真値に対する広がりは、正方向に 480/340＝1.41、負方向に 180/340＝0.53 とした。正負両方向への最大の広がりは、正方向には 2.43、負方向には 0.34 であった。また正負合わせた最大の広がりは 1.54 であった。

これを、現行のレムカウンタのうち、高い評価のある Leake 型検出器と比較する[1)19)20)]。Leake 型は単一測定器で直接線量指示値を表示する形式なので、誤差の考え方は、閉凸空間データ処理法による換算係数の広がり量評価とは相容れない。とはいえ、線量の真値と指示値の間には入射中性子の条件によって相違があることが知られており、その隔たりを、混合ガス比例計数管の出力から閉凸空間データ処理法で与えた前述の線量換算係数の広がりと比較する。Leake 型検出器は、垂直入射の場合の周辺線量当量 H*(10)の指示値は真値に対して+116%から－24%であり、ほとんど過小評価は与えないことが参考文献に示されている。これと比べて、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線量評価は決定的に劣る評価を行っているわけではないと言える。課題としては、真値の 50%未満など著しい線量過小評価の可能性を有する事例が存在し、2.3 項に基づいて最適値を選択する必要がある。

閉凸空間データ処理法による線量評価では、その結果は、常に真値を含む、ある範囲を結果として与える。特定の値を決めるのには向いていないが、その一方で、この範囲のうちに必ず真値が存在することは大きな利点である。また、Leake 型検出器よりも大幅に軽量化されることが期待される。

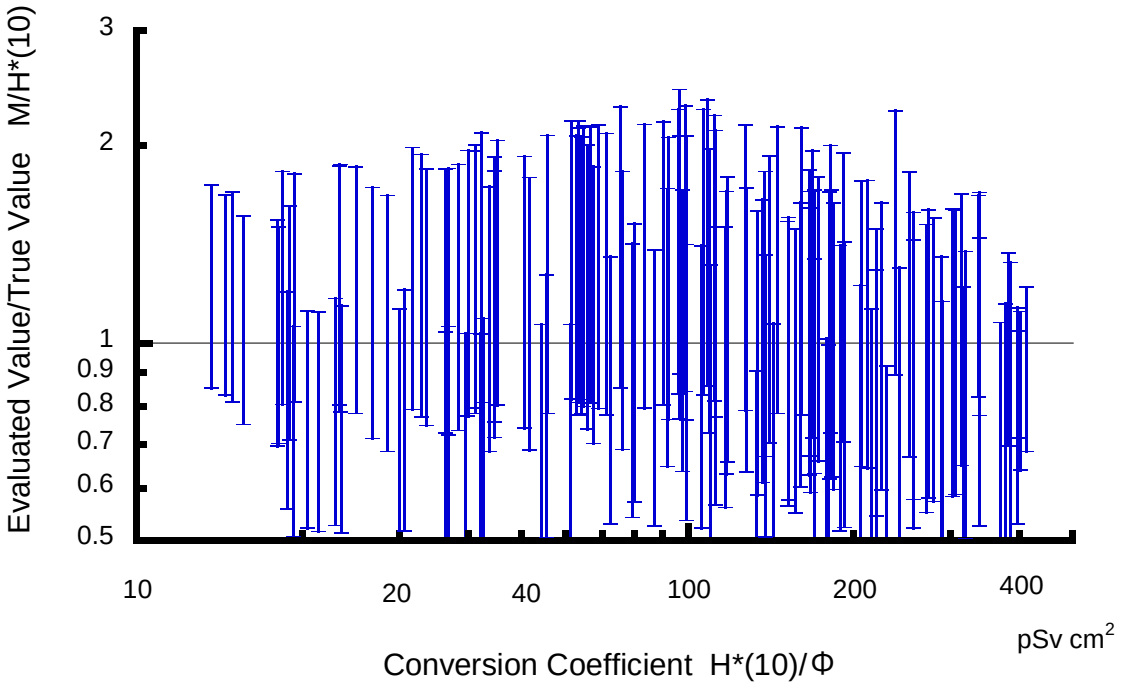


図 3.2.44　混合ガス比例計数管による核分裂場の中性子線量測定値の広がりの分布

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

混合ガス比例計数管による、閉凸空間データ処理法を用いた中性子線量評価が機能することが示された。特に、当初の設計方針を発展させ、反応毎の出力で閉凸空間を作成する方法だけでなく、関心領域出力による線量評価が機能し、さらに一定程度以上の線量評価精度を有することを示せたのは、大きな収穫であった。関心領域出力での適用は、低エネルギー側のノイズ成分に関与せずにデータ処理を行うことができ、実用を見込む上で好ましい特性である。これにより、閉凸空間データ処理法を用いて、混合ガス比例計数管が周辺線量当量の測定器として使えることを示すことができた。

混合ガス比例計数管については、今回の設計ではそれぞれの応答出力の統計精度や信号の分離能力を目安に設計条件を決めた。しかし、今後は、線量評価精度に結び付く閉凸空間の形状を考慮しながら検出器の条件を見直す余地がある。

混合ガス比例計数管の核分裂中性子による線量評価のための閉凸空間は、図 3.2.28 に示すように弓形の閉凸空間を示すが、線量評価の特性を向上させるためには、この「弦」と「弓」の隙間を狭くする必要がある。そのための方策として考えられるのは、一つは、もう少し減速材を厚くすることであるが、軽量化の要求とも相反するものでもあり、慎重な取り組みが求められる。現在よりも高いエネルギー領域でも、N_T の値が中性子エネルギーに応じて十分に変動するようなると、閉凸区間の Y 軸（線量換算係数の軸）への広がりが抑えられ、線量換算係数の広がりの抑制が期待される。

あえて閉凸空間の縮小は行わなくても、閉凸空間の広がりから最適値を選び出す方法を決めておくのは一つの方策である。3.2.3.3 項で述べたように、閉凸空間中で、施設に固有の相関が見られる。これを、それぞれの測定環境における最適値として捉えることは可能である。また、放射線防護上の要求においても、最尤値を与えることは重要であり、施設情報に基づいて最適値を決めるのは有意義である。ただし、状況によっては、広がりの最大値を代表値として、過小評価をもたらさないような処理を取ることも可能である。

なお、ここでは N_T を共通の分母として評価してきたが、N_F を共通分母とする閉凸空間も作成は可能である。図 3.2.28 のデータを N_F を分母にして再プロットしたものを、図 3.2.45 に示す。閉凸空間は、N_T を分母にしたときのような弓状ではなく、三角形に似た広い閉凸空間を形成した。線量換算係数の評価も広くなるだけでなく、複数検出器の出力比（N_T/N_F）が変動しても、線量換算計数の広がりに大きな影響を与えないような種類の閉凸空間となってしまった。この課題については、他の測定法への適用の結果も踏まえて、4.1.2 項で論じる。

最後に、ここではガス比例計数管を測定器として選定したが、シンチレータの適用も考えられる。有機シンチレータに、低速中性子反応成分を加えることで、混合ガス比例計数管と同様の効果が期待できる。ただし、シンチレータの場合は、結晶の安定性、シンチレーション光に対する透明度、ガンマ線弁別性能などの課題の解決が必要となる。

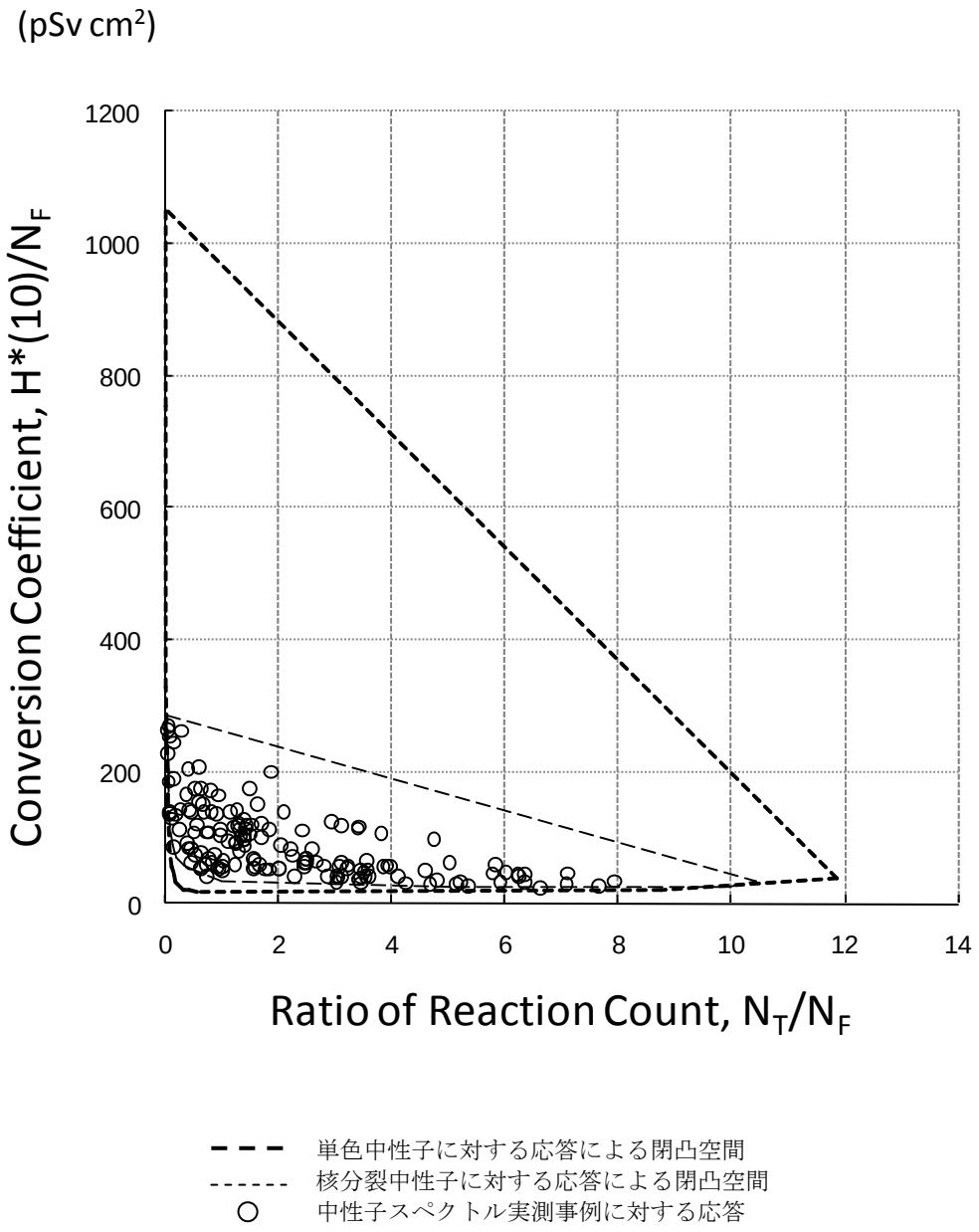


図 3.2.45　N_F を共通分母としたときの混合ガス比例計数管の閉凸空間と線量評価

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―

3.3.1 中性子個人線量測定への適用検討

中性子の取扱環境では、中性子周辺線量当量の測定と同様に、中性子個人線量当量の測定を行うことが求められる。また、精度の高い中性子個人線量当量の測定を行う場合には、ボナーボール法 [2)3)]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。しかし、作業に伴って作業者個人が被る中性子被ばくの管理の目的には、ボナーボールなどの装置ではなく、個人線量計のような身に付けるタイプの線量計が求められる。

これまでに、固体飛跡検出器、TLD、半導体検出器、バブル線量計など多くのタイプの中性子個人線量計が開発されてきた。それぞれが固有の特徴を持つが、共通の課題も有している。身につけることが前提であるため、検出素子を小さく軽くし、作業の障害とならない形状をとる必要があり、そのため、中性子線サーベイメータで用いたような減速材を用いた線量応答特性の調整が困難なことである。これを克服するために、中性子個人線量計では、複数の検出器素子自体に異なる有感エネルギー領域を示す応答特性を持たせて、その出力の線形結合により線量評価を行おうとする例が見られる。最近では、即時読み取りの要求に応えるために、中性子コンバーターを付加した半導体検出器を使った電子式個人線量計の開発が盛んに行われてきた。Nakamura、Sasaki 等は速中性子検出器と低速中性子検出器の組み合わせによる個人線量計を開発した [21)22)]。一方、Zamani 等のように、単一の半導体検出器に二種類の中性子コンバーターを付けた個人線量計も開発されている [23)]。IEC 規格 [24)]への準拠をうたう PTB で開発された SAPHYDOSE-N は、4 種類以上の中性子コンバーターが使われており、それによって中性子エネルギー分布を評価して線量評価につなげている [25)26)]。

これらは、いずれも、独立の特性を有する中性子検出器の出力に対して固有の増倍係数を与え、その線形結合を線量評価につなげている。いずれも、応答特性の異なる測定原理を組み合わせることにより、お互いに感度の低い領域を補完することで、広いエネルギー範囲で、より良い線量指示値を与えるように工夫されている。しかしながら、IEC の求める基準、（エネルギー応答特性について、0.025eV～100keV で-35%～+200%、100keV～15MeV で-35%～+122%。入射角度は 0°～60°とする。）を満足するのは困難なのが実情である [27)]。

このように中性子個人線量計による個人線量当量測定には、まだ課題がある。そこで、ここでは中性子個人線量計の組み合わせを想定し、閉凸空間データ処理法を適用して、線量評価の改善が図れるかを検討した。評価対象は、すでに使用実績のある中性子個人線量計とした。既存の測定器の出力を尊重し、活用しながら、さらに良い評価を与えることを目指すものである。

3.3.2　個人線量計の出力で形成する閉凸空間による線量評価

3.3.2.1 閉凸空間の形成

閉凸空間を作る条件について確認する。ここでは、2 種類の中性子個人線量計の組み合わせについて扱う。個別の個人線量計の出力を扱うため、互いに独立な測定であることは自明である。また、それぞれの応答関数としては、文献に示されている単色エネルギー中性子に対するレスポンスを引用した。なお、これらのレスポンス情報は、お互いに同一のエネルギー区分で与えられるように、適宜補完した。また、レスポンスとしては、放射線検出器からの出力を与えている場合と線量値が与えられている場合があるが、それぞれの線量計の出力の特徴と判断し、そのまま適用した。特に電子式個人線量計の場合は、検出素子の出力を線量に変換する過程があるが、その詳細は明かされていない例がほとんどなので、個人線量計の応答評価で使われている出力を適用することにした。また、目的量は、個人線量当量 Hp(10)[14]し、入射方向は 0°と 60°でそれぞれ評価した。

今回の評価対象とした個人線量計は以下のとおりである。なお、これらは必ずしも現行の製品ではない。

- バブル線量計[28]
- 電子式個人線量計（Aloka 製 PDM-313）[29]
- 電子式個人線量計（Siemense 製 EPD-N）[29]
- 電子式個人線量計（富士電機製 EPD(NRN)）[29]
- 電子式個人線量計（SAPHYMO 製 Saphydose-n）[29]
- TLD 素子（LiF）[30]
- TLD 素子（Ca_2SO_4-Dy）[30]
- TLD 素子（^{7}LiF）[30]
- TLD 素子（Al_2O_3:Na）[30]
- CR39[31]
- CR39（NRPB 中性子個人線量計）[32]

ぞれぞれの応答のデータは、開発者以外の第三者による実験の結果を引用した。それぞれの単色中性子に対する応答特性を、図 3.3.1 に示す。いずれも、^{252}Cf の中性子の平均エネルギーに近い、2MeV の中性子に対するレスポンスで規格化した。

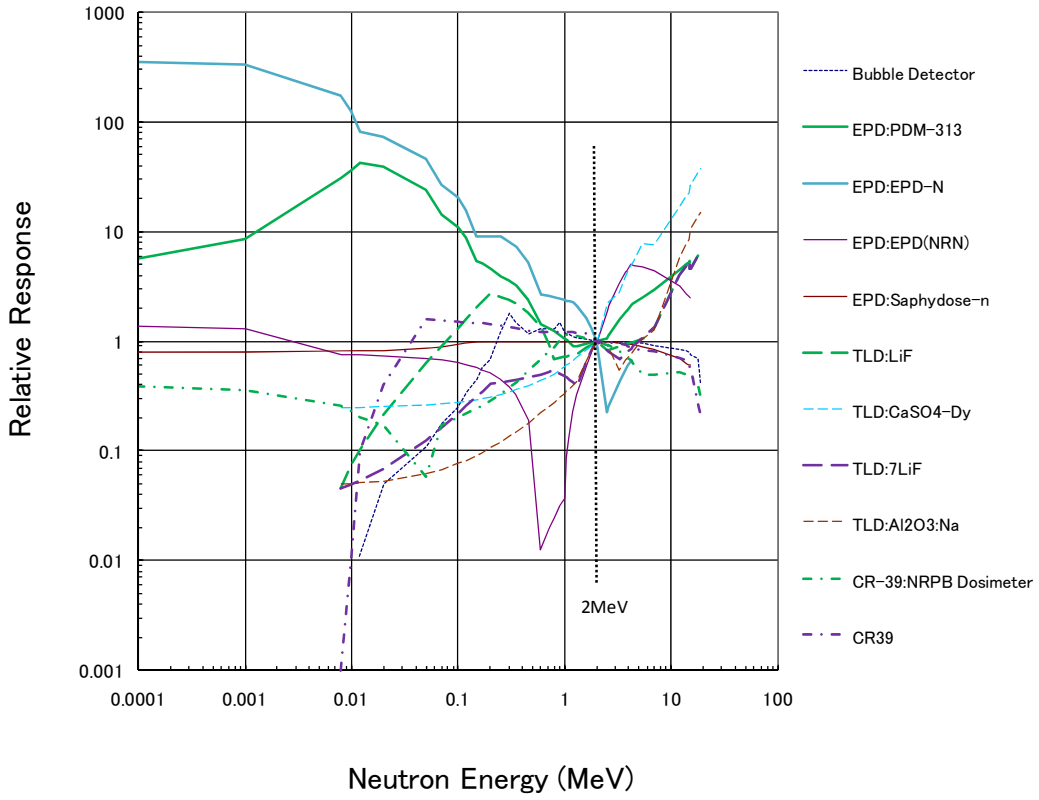


図 3.3.1　個人線量計の単色中性子に対する応答特性

2MeV の中性子に対する応答で規格化した。

3.3.2.2 閉凸空間の評価

(1) 閉凸空間の全体傾向と評価指標

前項で示した 11 種類の個人線量計の組み合わせで、110 種類の閉凸空間を作成した。閉凸空間の作成する要素スペクトルには、混合ガス比例計数管の場合でも使った、MCNP で評価した核分裂中性子の減速スペクトル群（添付 1 参照）を適用した。

目的量が Hp(10,0°)と Hp(10,60°)の場合のそれぞれの結果を図 3.3.2、図 3.3.3 に示す。目的量の違いによって、個々の閉凸空間は数値的には違いがあるものの、全体の傾向としては、良いと思われる閉凸空間を示す組み合わせは、どちらの線量の評価においても同様に良いようである。

組み合わせによって閉凸空間の形状はさまざまであることがわかる。これらの良否の判断基準を与えてみたい。第 2 章で触れたように、閉凸空間がもっともよく機能すると思われるのは、組み合わせた応答特性が互いに異なり、相互に補完的な特性を示す場合である。これは、応答特性を関数としてとらえた場合に、相互の関数の内積が、関数相互の関係を表すのに有効と想定される。

関数 f(x)≠0、g(x)≠0 について、それらの内積を以下のように定義する。

$$\langle f(x), g(x) \rangle = \int f(x) g(x) dx \qquad (3.3.1)$$

この内積が 0 の場合に、f(x)と g(x)は直交する。

今回の場合は、それぞれの応答特性を記述するエネルギー幅を統一して離散的に表現しているので、

$$\langle f(x), g(x) \rangle = \sum f(x) g(x) \qquad (3.3.2)$$

で表現できる。この時ノルム（|f(x)g(x)|）の大きさが内積値に影響するので、これを排除する。それぞれの応答特性における f(x)＝g(x)の場合（両関数が同一の場合）のノルムを指標として、それに対する相対的な内積値、相対内積値を以下の式により定義する。

$$\langle\langle f(x), g(x) \rangle\rangle = \sum \frac{f(x) g(x)}{f(x) f(x)} = \sum \frac{g(x)}{f(x)} \qquad (3.3.3)$$

相対内積値の特徴として、ノルムの評価をどちらの関数で行うかによってその値が変わることがあげられる。これは、どちらの関数を基準にして内積を評価するか、ということでもある。閉凸空間を作成する場合にどちらの関数を分母としてベクトル化したか、ということと密接につながっている。その結果、単純な内積では、ベクトル化の分母の取り方による閉凸空間の違いを表現できなかったが、相対化することで、分母の取り方の違いによる閉凸空間の違いを表現できるようになった。

この相対内積値を使って、閉凸空間の評価を試みた。11 種類の個人線量計の全組み合わせについての相対内積値の一覧を表 3.3.1 に示す。

110 種類の閉凸空間を評価した結果、もっとも相対内積値が小さくなる組み合わせは、

Siemense 製電子式線量計 EPD-N と NRPB で開発された CR39 個人線量計の組み合わせであった。（図 3.3.2 中、赤く塗った組み合わせ）　また、相対内積値が小さい組み合わせは、いずれも狭隘で線状に近い閉凸空間を形成したケースであることが確認された。上位 10 ケースを、図中にだいだい色で示した。その一方で、相対内積値が大きいケースは、換算係数を一意に決めることが困難な組み合わせが該当した。図 3.3.2 中、青色に塗った組み合わせが代表的で、いずれも縦方向に点が連なる区間があり、線量換算係数の変動があっても検出器出力比の変動が不十分な区間があることが示されている。

いくつかの組み合わせを取り出してそれぞれ論じていく。

表 3.3.1　個人線量計の組み合わせの相対内積値の一覧

	形式	型式／組成	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
A	Bubble			1149.5	19528.7	111.9	81.8	41.3	45.2	16.0	12.0	43.7	38.6
B	EPD	ALOKA:PDM-313	6.1		440.1	13.1	6.6	6.8	16.1	4.2	3.9	4.8	6.3
C		SIDEMENS:EPD-N	5.2	15.0		12.2	4.8	5.8	17.2	4.1	4.0	3.7	5.2
D		FUJI:EPD(NRN)	30.0	447.4	3544.3		38.6	38.8	26.5	13.4	8.5	21.4	37.1
E		SAPHYMO:Sphydose-n	23.9	342.8	4273.0	48.1		29.8	43.0	13.7	11.2	20.8	28.0
F	TLD	LiF	21.9	928.1	25304.0	127.3	84.0		38.5	12.5	9.9	50.7	28.2
G		$CaSO_4$-Dy	37.4	1738.9	37566.6	172.1	133.9	56.3		16.5	9.4	74.3	53.2
H		^{7}LiF	58.1	2213.0	33455.1	187.1	150.6	84.2	68.7		19.5	78.0	79.1
I		Al_2O_3:Na	104.0	4235.1	59966.9	317.6	273.8	156.3	95.4	48.2		136.5	146.9
J	CR-39	NRPB Dosimeter	40.0	748.4	7729.7	75.0	60.7	52.9	59.3	21.3	16.0		49.6
K		CR-39	23.4	969.3	25894.5	132.5	87.1	32.0	42.4	13.5	10.8	52.4	

赤字 は最小値、 赤字 は最小値から 10 件、 青字 は最大値から 10 件を示す。

全グラフ共通で、縦軸：線量換算係数(pSv cm²/count) 横軸：二台の線量計の計数比

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）

全グラフ共通で、縦軸：線量換算係数(pSv cm²/count) 横軸：二台の線量計の計数比

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）

(2)　個々の閉凸空間についての評価

(a)　電子式個人線量計（Siemens 製 EPD-N）と CR-39(NRPB 中性子個人線量計)

内積の相対値が最も小さい組み合わせによる評価事例として、図 3.3.4(a)に、電子式個人線量計（Siemens 製 EPD-N）の出力に対する、CR-39(NRPB 中性子個人線量計)の出力で描いた閉凸空間を示す。弓状に広がる閉凸空間は、どの点でも縦軸方向の切片が狭く線量換算係数の取り得る幅が小さいであろうことがわかる。

電子式個人線量計単体で線量評価を行った場合との比較を図 3.3.4(b)　に示す。MCNP で評価した減速核分裂中性子スペクトル（添付１参照）の場における、線量測定値と真の線量値の相対比で比較した。点線は電子式個人線量計 EPD-N 単体で線量評価した場合の相対線量表示で、^{252}Cf で値付けした場合と、重水減速 ^{252}Cf の値付けをした場合のそれぞれ応答を示す。実線は、閉凸空間データ処理法で評価した場合に、各スペクトルに対する検出器出力が与える線量換算係数の広がりを示す。本項以後の各組み合わせについても同様の評価を行う。

閉凸空間データ処理法によって与えられる線量換算係数の取り得る範囲は、最大で負側は-68%、正側は+400%であった。ただし、このような大きな換算係数の広がりを示すのは熱化が進んだ中性子に対してであり、線量寄与の大きい比較的速い中性子スペクトルに対しては、EPD-N 単独での測定に比べて十分に良いエネルギー応答特性を示している。閉凸空間データ処理法が有効に機能していることを意味する。

(b)　電子式個人線量計（Siemens 製 EPD-N）と TLD(Al_2O_3:Na)

同様に、内積の相対値が小さい組み合わせによる評価事例として、図 3.3.5(a)に、電子式個人線量計（Siemens 製 EPD-N）の出力に対する、TLD（Al_2O_3:Na)の出力で描いた閉凸空間を示す。弓状に広がる閉凸空間は、どの点でも縦軸方向の切片が狭く線量換算係数の取り得る幅が小さいであろうことがわかる。なお、熱化が進んだ中性子に対して TLD（Al2O3:Na）は十分なレスポンスを示さないと読めたので、評価から除外した。

図 3.3.5(b)に示したように、閉凸空間データ処理法によって与えられる線量換算係数の広がりが最も広い場合は、0%から－57%までの範囲であった。さらに、EPD-N を単独での測定に比べて十分に良いエネルギー応答特性を示している点でも、閉凸空間データ処理法が有効であることが示されている。

(c)　電子式個人線量計（Aloka 製 PDM-313）と TLD(Al_2O_3:Na)

図 3.3.6(a)に、電子式個人線量計（Aloka 社製 EPD-N）の出力に対する、TLD（Al_2O_3:Na）の出力で描いた閉凸空間を示す。やはり、弓上に閉凸空間が広がるが、図 3.3.5(a)に比べて広がりは大きい。それは、図 3.3.6(b)でも読み取れる。とは言え、この組み合わせでも PDM-313 単独での線量評価に比べてエネルギー応答特性は向上している。

(d)　電子式個人線量計（SAPHYMO 製 Saphydose-n）と TLD(Al_2O_3:Na)

図 3.3.7(a)に、電子式個人線量計（SAPHYMO 製 Saphydose-n）の出力に対する、TLD（Al_2O_3:Na）の出力で描いた閉凸空間を示す。同様の閉凸空間が広がっており、広さもさほどでもない。しかし、図 3.3.7(b)に示すように、単体での線量評価結果と比較すると、単体での線量評価に対してエネルギー応答特性は向上していない。

これは、Saphydose-n が単体で優れたエネルギー特性を示すのに対して、TLD のエネルギー特性が不十分なため、その影響を受けて特性がむしろ劣化の傾向を示してしまった。この場合は、閉凸空間データ処理法を適用するよりも、単独で使用した方が適切である事例である。

(e)　電子式個人線量計（富士電機製 EPD(NRN)）と TLD（LiF）

図 3.3.8(a)に、電子式個人線量計（富士電機製 EPD(NRN)）の出力に対する、TLD（LiF）の出力で描いた閉凸空間を示す。ここでは、輪状の特性空間が形成されている。同じ線量計の出力比に対して、2 種類の減速核分裂中性子スペクトルが対応していることを意味している。これでは、線量換算係数を絞り込むのは難しい。図 3.3.8(b)に、単体で線量評価を行った場合との比較を示す。線量換算係数の広がりが、速い中性子場では負側に、熱化した中性子場では正側に広がることがわかる。この広がり自体は非減速の ^{252}Cf で校正された EPD(NRN)単体での測定よりも狭い。しかし、図 3.3.8(a)の結果は、出力比の情報からは、中性子場が高速場なのか熱化した場なのかを判断できないことを示しており、どちらの方向に換算係数の広がりを有するのか決められず、図 3.3.8(b)に示された値以上の広がりを事実上有している。したがって、この場合も、組み合わせて閉凸空間データ処理法を適用するよりも、単独で使用した方が適切である。

(f)　TLD（$CaSO_4$-Dy）と TLD（Al_2O_3:Na）

(e)までは電子線量計を使った組み合わせについて述べたが、ここでは、積算型線量計の組み合わせについても検討した。図 3.3.9(a)に、TLD（$CaSO_4$-Dy)）の出力に対する、TLD（LiF）の出力で描いた閉凸空間を示す。図 3.3.9(b)には、単独使用の場合とのエネルギー特性の比較を示す。換算係数のとり得る値の範囲はさほど広くなく、単独使用の場合に比べてエネルギー応答特性は大幅に向上したことがわかる。

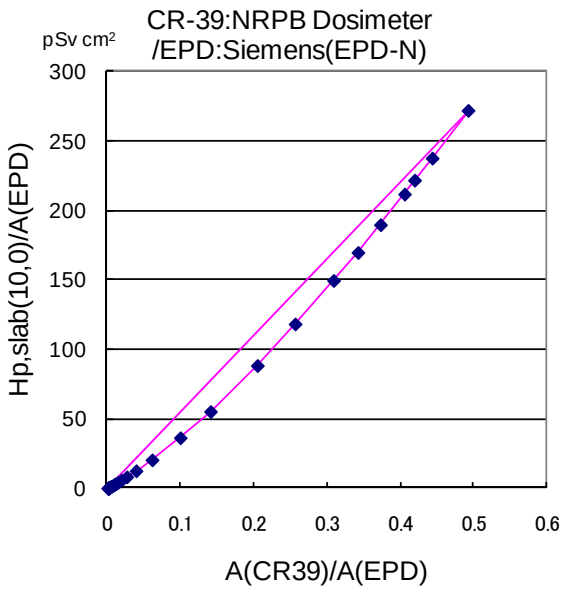


図 3.3.4(a)　EPD(EPD-N)に CR-39 (NRPB　Dosimeter)を組み合わせた場合の閉凸空間

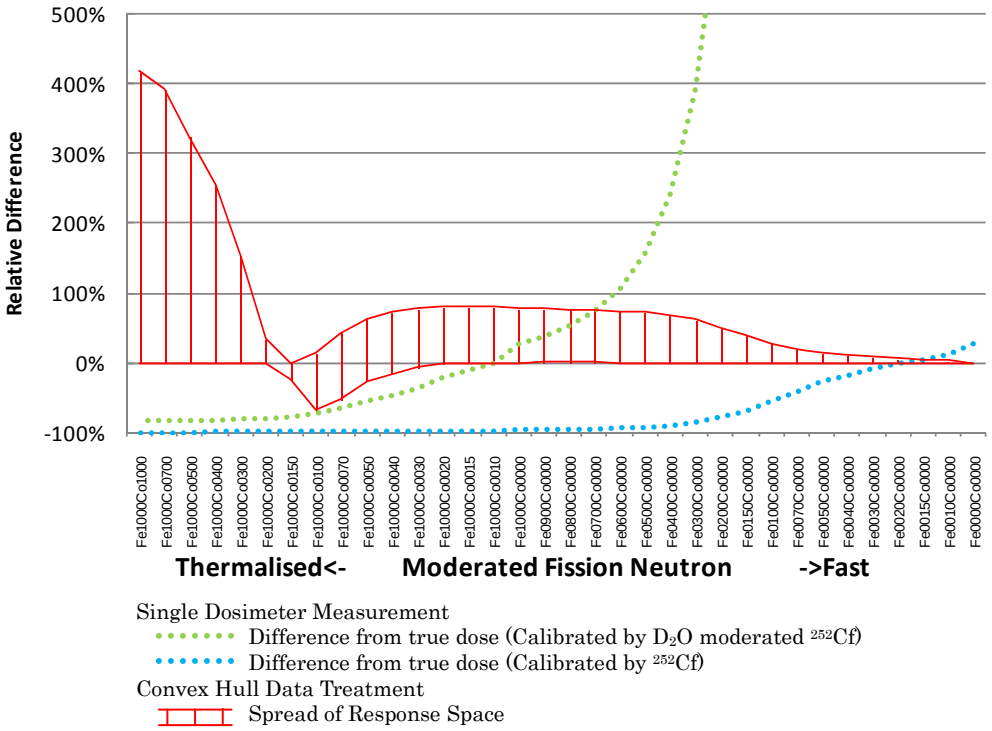


図 3.3.4(b)　EPD(EPD-N)単体の場合と、CR-39(NRPB　Dosimeter)と組み合わせた場合のエネルギー応答特性の比較

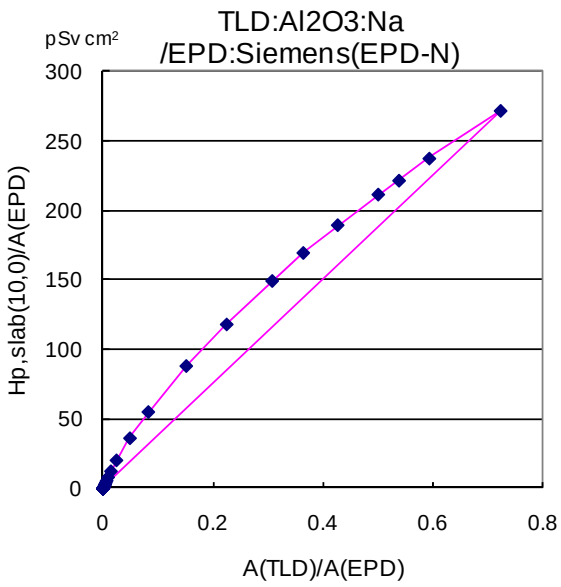


図 3.3.5(a)　EPD(EPD-N)に TLD(Al_2O_3:Na)を組み合わせた場合の閉凸空間

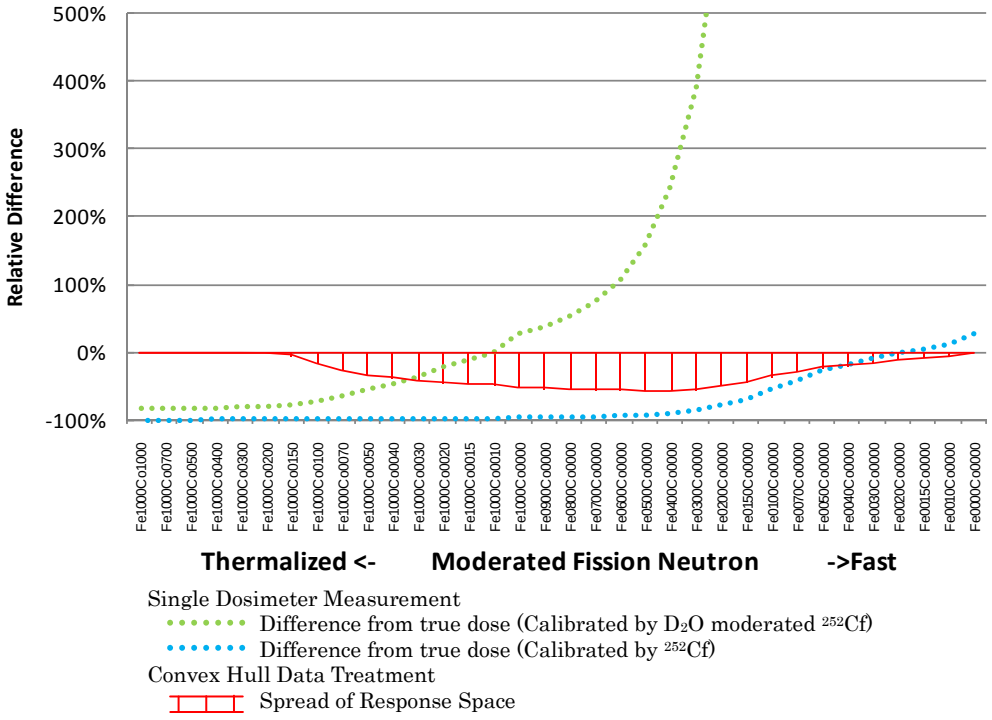


図 3.3.5(b)　EPD(EPD-N)単体の場合と、TLD(Al_2O_3:Na)と組み合わせた場合のエネルギー応答特性の比較

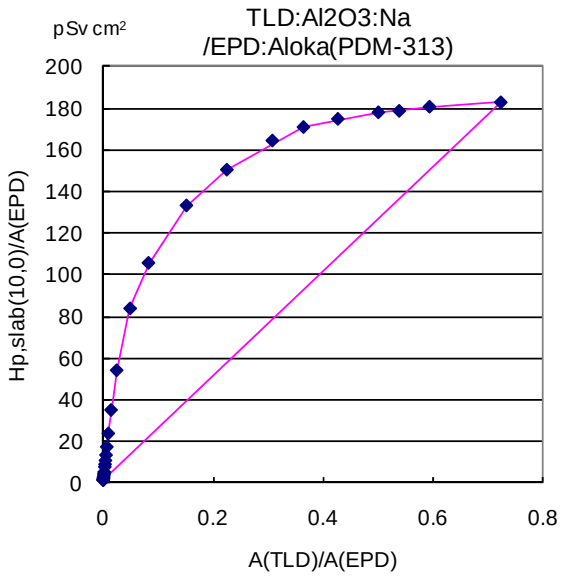


図 3.3.6(a)　EPD(PDM-313)に TLD(Al_2O_3:Na)を組み合わせた場合の閉凸空間

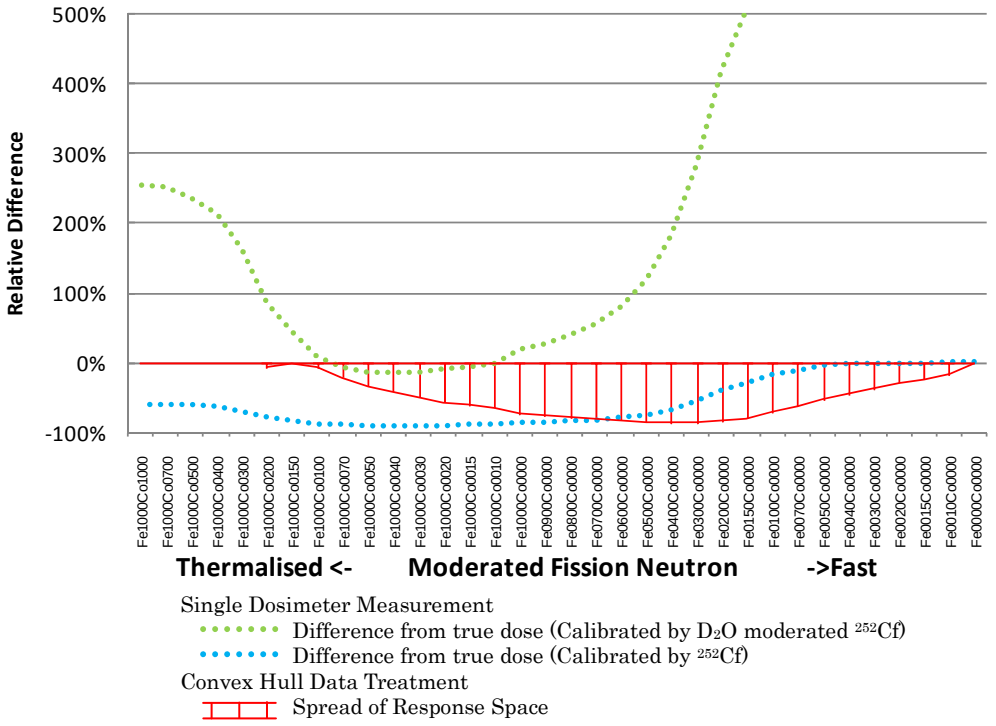


図 3.3.6(b)　EPD(PDM-313)単体の場合と、TLD(Al_2O_3:Na)と組み合わせた場合のエネルギー応答特性の比較

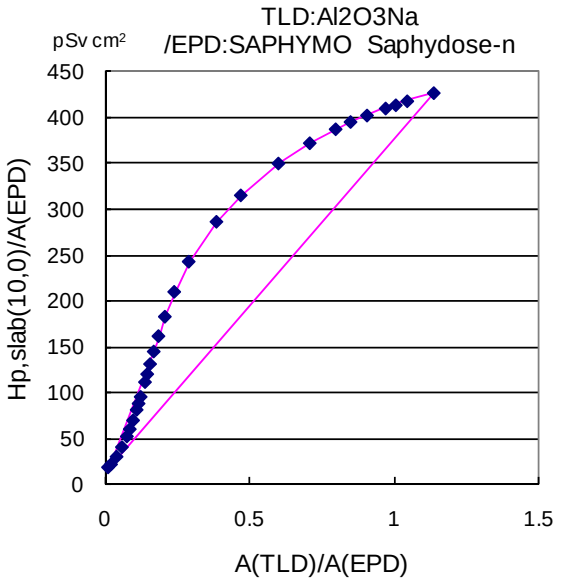


図 3.3.7(a)　EPD(Saphydose-n)に TLD(Al_2O_3:Na)を組み合わせた場合の閉凸空間

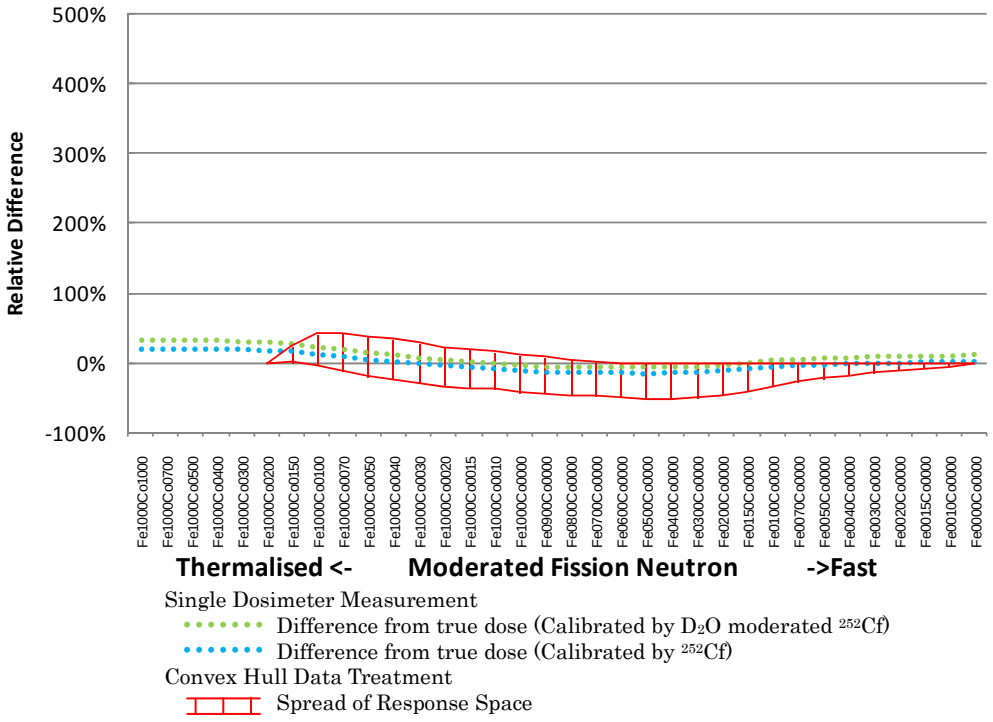


図 3.3.7(b)　EPD(Saphydose-n)単体と、TLD(Al_2O_3:Na)と組み合わせた場合のエネルギー応答特性の比較

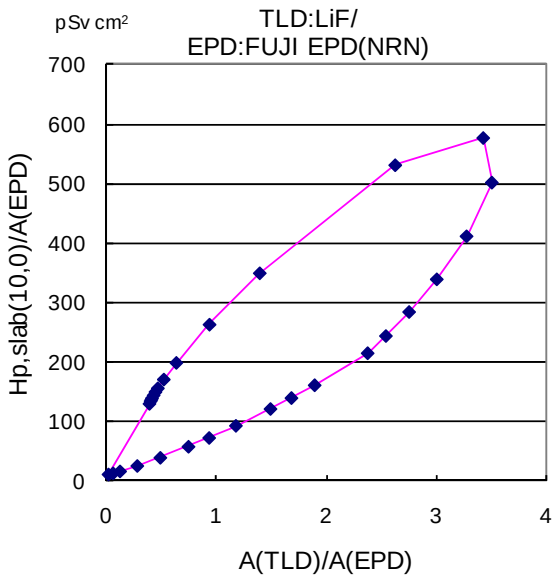


図 3.3.8(a)　EPD(EPD(NRN))に TLD(LiF)を組み合わせた場合の閉凸空間

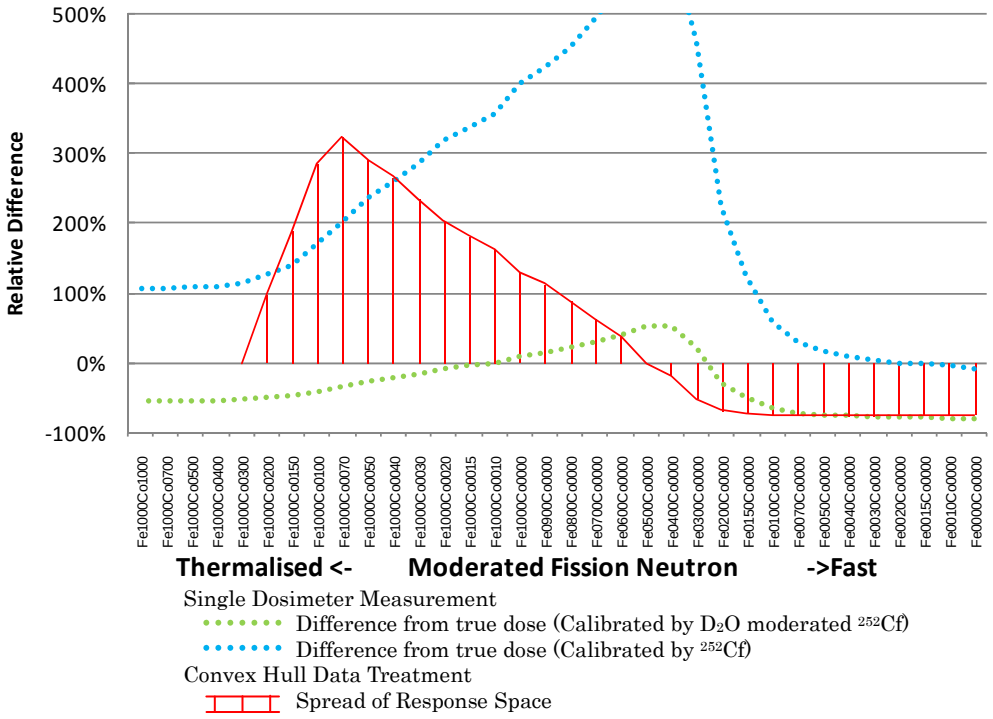


図 3.3.8(b)　EPD(EPD(NRN))単体と、TLD(LiF)と組み合わせた場合のエネルギー応答特性

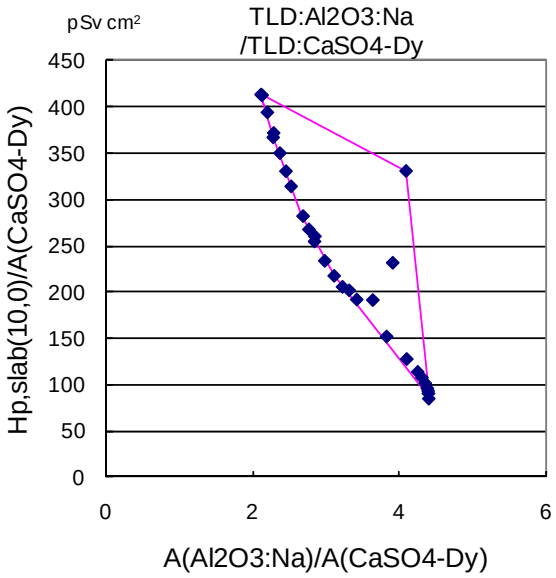


図 3.3.9(a)　TLD($CaSO_4$-Dy)に TLD(Al_2O_3:Na)を組み合わせた場合の閉凸空間

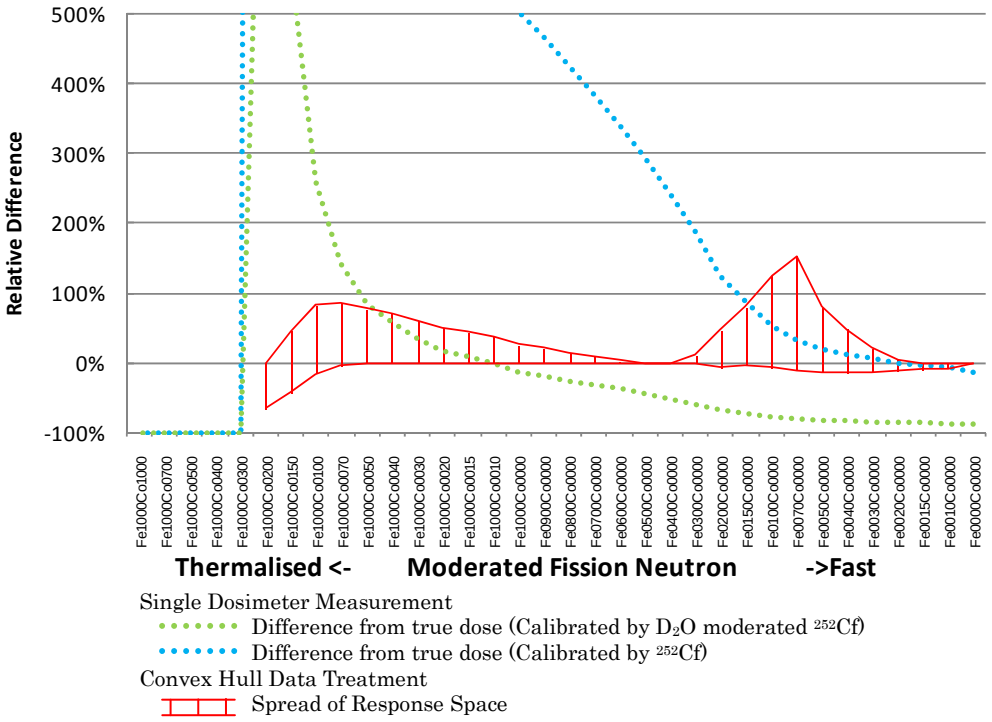


図 3.3.9(b)　TLD($CaSO_4$-Dy)単体と、TLD(Al_2O_3:Na)と組み合わせた場合のエネルギー応答特性の比較

3.3.3 中性子個人線量測定への適用に関する考察

中性子個人線量計は使用者が常時携帯できることが求められることから、その形状や大きさ、重量に制約が強い。その条件の中で、広いエネルギーレンジを有する中性子線を測定し、線量評価に結びつけることは容易ではない。全エネルギーレンジにおいて優れた特性を持つのは一部の電子式線量計のみであり、その他のタイプの線量計ではその特性を理解して使用する必要がある。しかし、その特性を把握し適切な組み合わせを与えて、閉凸空間データ処理法を適用することによって、良い線量特性を与えることが可能なことが示された。図 3.3.9 に示した例は、固体線量計の組み合わせで閉凸空間データ処理法が良好に機能した例で、特性の偏る TLD を適切に組み合わせることで、より良い線量応答特性を達成している。

一方で、閉凸空間データ処理に向かない組み合わせも存在することが示されており、この方法の適用の可否の評価が重要であることがわかる。この適用性の判断基準として、組み合わせを作るそれぞれの検出器の応答関数による相対内積値を導入した。相対内積値の小さい組み合わせは、3.3.2 項で良好事例として紹介したように、要素ベクトルの集合が単調増加に近い集合を示している。また、相対内積値が大きい組み合わせは、線量換算係数の絞込みが効いていない。図 3.3.2 で青く塗った組み合わせは代表的であるが、線量換算係数が変化しているにもかかわらず検出器出力比が変化しない例や、閉凸空間が広大な空間となってしまう例が見受けられる。したがって、それぞれの組み合わせに対して、毎回閉凸空間を形成する必要はなく、相対内積値により組合せの良否を判断することができる。多くの組み合わせを比較検討する必要がある場合に、このような閉凸空間評価は有効に機能する。

ただし、相対内積値が小さい場合に留意すべき点がある。例えば、図 3.3.4 に示した場合のように、閉凸空間が全体としては狭隘であるにも関わらず、線量換算係数の広がりは顕著である。この例では、閉凸空間の原点付近において多くの要素スペクトルが集中しており、つまり広いエネルギー範囲における複数検出器の出力比と線量換算係数の関係が、この狭い範囲で表現されていることに原因がある。添付 1 の表 I.1 に示すように、要素スペクトルは、線量換算係数で 12 から 400 までほぼ均等に分布しているが、その一方で、閉凸空間中で要素スペクトルに対応する点は均等に分布しているわけではない。図 3.3.10 にその一例を示す。図 3.3.4(a)の原点付近を拡大したものだが、この辺りでは、要素スペクトルの分布は全体像のイメージとは様相が異なり、局所的には好ましくない分布を示している。これが、図 3.3.4(b)で熱化した中性子に対して線量換算係数の広がりが極端に大きくなった理由である。このような、要素ベクトルの分布の不均一性は、応答評価用空間の各軸の共通分母となった検出器の線量応答特性に依存している。単一の測定器で線量測定する場合と異なり、むしろ線量応答特性が、中性子場の硬さに応じて変動した方が適切な評価を与える。

Siemens の EPD-N を使った組み合わせが、全般に良い線量測定に結びつく傾向が見ら

れた。その要因は、図 3.3.1 に示したように、この線量計が他と異なり低エネルギー中性子に寄った感度を持っているためである。他の線量計が、線量換算係数の大きいエネルギー帯の中性子に対する感度を意識して応答特性の設計が行われてきたであろうこととは対照的である。そのために、広いエネルギー範囲で優れた特性をもたらす組み合わせとなっており、閉凸空間データ処理法への適用に都合が良くなっている。

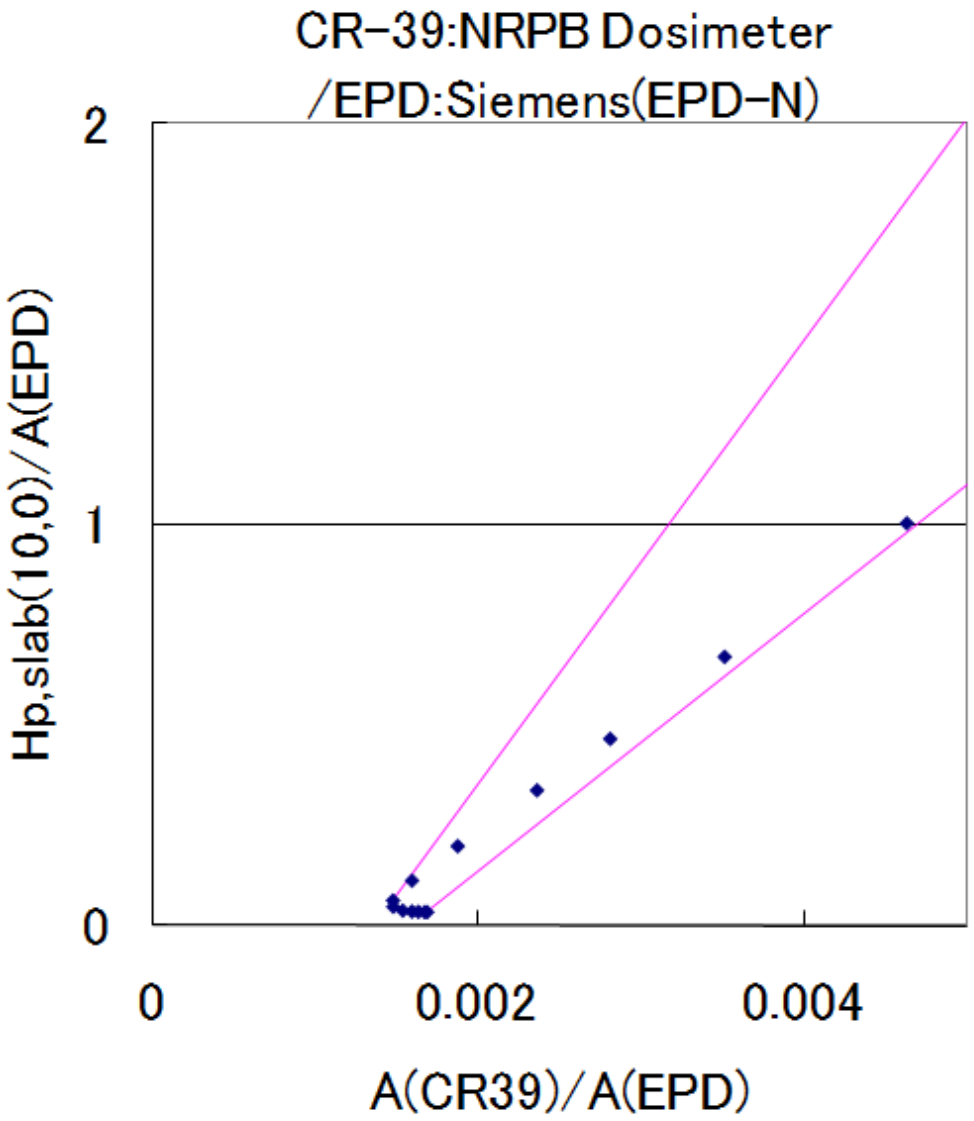


図 3.3.10　図 3.3.4(a)の原点付近の拡大図

閉凸空間の左下部分で要素スペクトルに対応する点が密集し、ほかの部分とは異なる傾向を示している。
図 3.3.4(b)において、熱化した中性子場での線量評価が十分機能していなかった原因となる部分。

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—

3.4.1　X 線エネルギー分布測定への適用検討

これまでは、放射線のマクロ的エネルギー測定の例として中性子線量評価への適用を検討してきたが、ここでは、放射線のミクロ的エネルギー測定事例である、エネルギー測定への閉凸空間データ処理法の適用を示す。放射線のエネルギー測定においては、個別の入射放射線のエネルギーを求める方法がよく知られている。その一方で、高線束の放射線場における放射線エネルギー分布測定のニーズもあるが、これは放射線入射毎のエネルギー評価が困難であり、工夫を必要とする。代表的なものは、X 線のエネルギー分布測定である。そこで、ここでは、X 線エネルギー分布測定への閉凸空間データ処理法の適用について検討する。

X 線エネルギー分布の測定を必要とする背景を紹介する。神野らによって、診療用 X 線 CT の性能向上の提案としてエネルギー差分 CT の手法が提案された[33)34)35)36)]。これは、透視対象の物質によって異なる X 線の吸収減衰の差を利用して、従来の方法よりも豊富な情報量で CT 画像を得ようとするものである。従来法よりも患者の被ばく量を抑えながら、必用な画像を得ることができ、また X 線管電圧の変動の影響を受けづらいという利点が示されている。神野らは、ヨウ素でマーキングした臓器の CT 撮影を目標とした。あらかじめランタンによる吸収（K 吸収端 39keV）を受けた X 線をヨウ素層に照射する。すると、ヨウ素の K 吸収端（33keV）による吸収も受け、その吸収の程度はヨウ素層の厚さに対応する。そこで、ヨウ素吸収端未満（28keV～33keV）とヨウ素吸収端とランタン吸収端の間（34keV～39keV）の各領域の X 線束の強度を知ることによって、ヨウ素層の厚さを推定することができる。（図 3.4.1 参照）これをまとめて、ヨウ素でマーキングされた臓器の CT 画像を得ることができる。

放射線のエネルギー分布の測定は、放射線検出器をパルスモードで動作させ、放射線の入射によって発生するパルス電荷を測定し、個別に入射放射線のエネルギーを求める方法が一般的である。しかし、CTで使われるようなX線は線束が強く、検出器出力が飽和状態になってしまい、パルス毎の電化測定ができない。そこで、図 3.4.2 に示すような、多層型電流モードX線検出器（transXend; the x-rays transfix the segment detectors, and the currents are transformed into x-ray energy distribution）が考案された[37)]。transXend 検出器では、いくつかの電流モードX線検出器が重ねられており、そこを貫くようにX線を入射させる。最前段のX線検出器には直接X線が入射するが、後段の検出器は、前段の検出器による吸収を受けた後のX線が入射する。後段に行くほど強い吸収作用を受けたX線が入射することになる。したがって、低いエネルギーのX線は前段の検出器で吸収されるが、一方で高エネルギーX線は後段の検出器でも検出される。各段の検出器の電流出力からは、アンフォールディングなどの推定手法により入射X線のエネルギー分布を求める。筆者はこれまでに、神野らと共同で、このアンフォールディング手法の研究を行ってきた。

アンフォールディング後の収束状況を適宜フィードバックさせて初期推定条件を調整しながら最適値を見つける方法やニューラルネットワークにより、入射X線のエネルギー分布を求められることを見出した。しかし、計算量が多いなど、いくつかの課題もあった[38]。このtranXend検出器の動作は、X線応答特性の異なる複数のX線検出器による出力を処理して、入射X線のエネルギー分布を求めていることになる。そこで、transXend検出器によるX線エネルギー分布測定への閉凸空間データ処理法の適用を検討した

一般に、放射線エネルギー分布は以下のように表現できる。

$$F_n = a \cdot \int \delta_n(e) \cdot \phi(e) de \qquad (3.5.1)$$

ここで、F_n：エネルギー領域 n の放射線束、a：放射線強度、$\delta_n(e)$：エネルギー領域 n の範囲内で 1、それ以外で 0 となる δ 関数、$\phi(e)$：放射線エネルギー分布　をそれぞれ示す。

また、このエネルギー分布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。

$$N_i = a \cdot \int g_i(e) \cdot \phi(e) de. \qquad (3.5.2)$$

これは、2.1 項の(2.2)式の再掲である。これから、(2.3)、(2.4)式と同様に、以下の式を導くことができる。

$$_jK = \frac{F_n}{N_j} = \frac{\int \delta_n(e)\phi(e)de}{\int g_j(e)\phi(e)de}, \qquad 1 \le j \le I. \qquad (3.5.3)$$

$$_jR_i = \frac{N_i}{N_j} = \frac{\int g_i(e)\phi(e)de}{\int g_j(e)\phi(e)de}, \qquad j \ne i. \qquad (3.5.4)$$

これらは、中性子線量評価のときと同様に閉凸空間を描き出す。したがって、それぞれのエネルギー領域における放射線束を求めることができる。これを、所要の各エネルギー領域について適用することによって、エネルギー領域ごとの放射線束、つまり放射線のエネルギー分布を求めることができる。

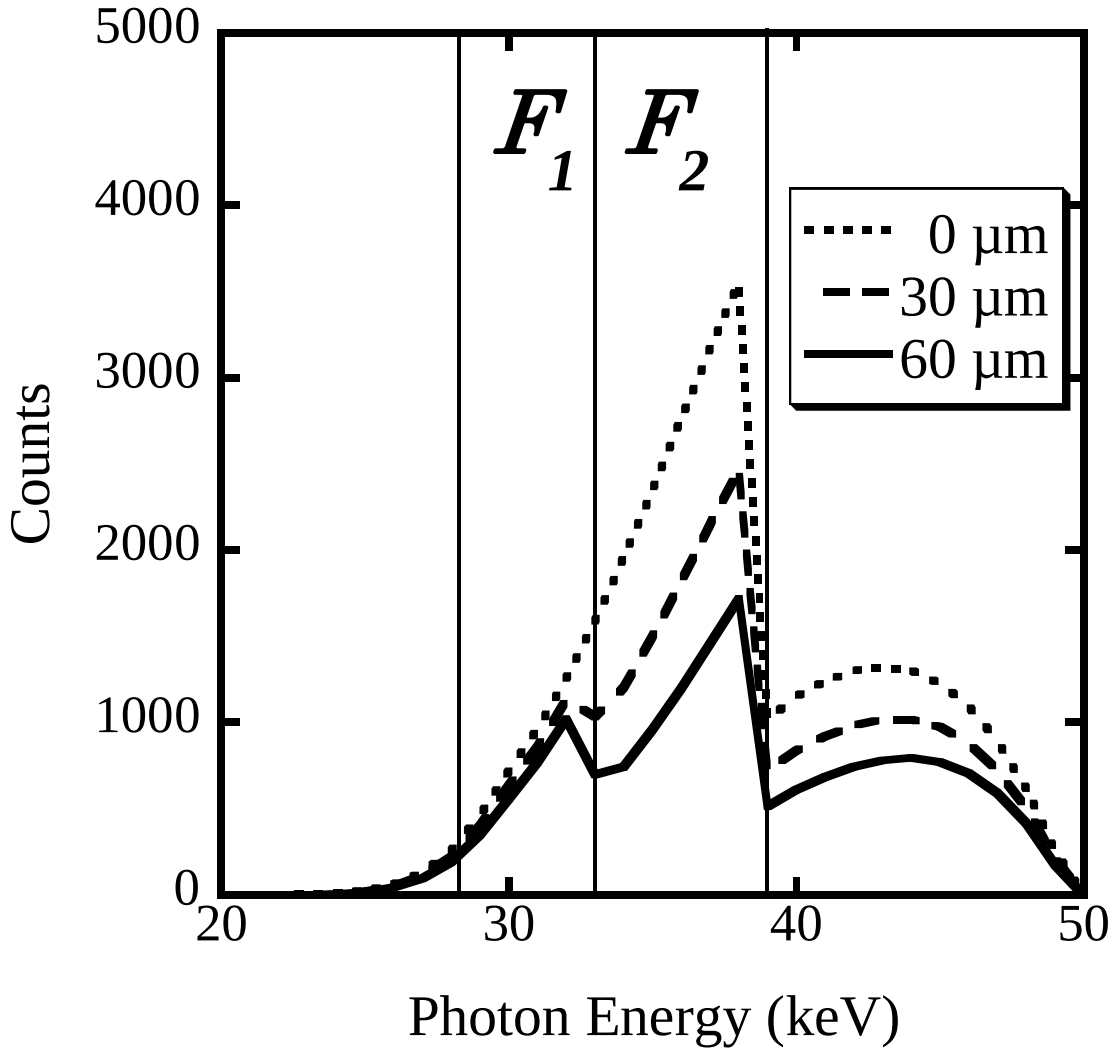


図 3.4.1　ヨウ素層厚さの検出に使う X 線のエネルギースペクトル

ϕ_1：28keV～33keV（ランタンの k 吸収端）

ϕ_2：34keV～39keV（ヨウ素の k 吸収端）

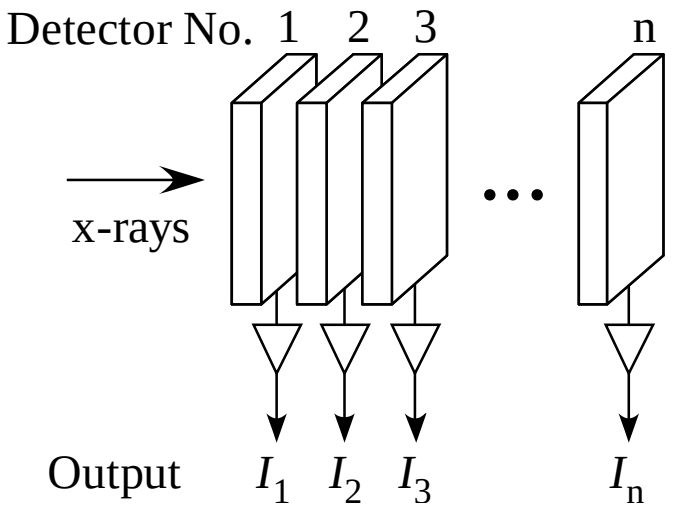


図 3.4.2　多層型電流モード X 線検出器 transXend の概念図

3.4.2　電流モード検出器出力で形成する閉凸空間によるX線エネルギー分布測定

3.4.2.1 閉凸空間の形成

実際にtransXend検出器の出力に閉凸空間データ処理法を適用して、X線エネルギー分布が評価できるかを検討した。計算により、閉凸空間を描き出し、X線エネルギー分布の評価結果がどのようになるかを示す。

最初に電流モード検出器の応答特性を、モンテカルロ輸送計算コード EGS5[39]で評価した。検出器としては、厚さ1mmのシリコン半導体検出器を6枚重ねた検出器を想定する。結果を図3.4.3に示す。検出器の番号は図2に対応している。この測定器は電流モードで動作させるので、応答特性は、それぞれのエネルギーの単位入射光子が検出器に付与する全エネルギーで示した。ただし、10keV未満のX線はあらかじめタングステンフィルタで除去してある。

この特性を有する検出器に、ヨウ素厚さを測定するためのX線を入射させた場合の応答を計算した。想定されるX線の入射状況を図3.4.4に示す。水ファントムの中央にヨウ素領域が配置されており、ヨウ素濃度を調整してヨウ素の実効厚さを決めた。検出器位置におけるX線スペクトルは、次の式で計算した[40]。

$$\Psi(E)dE = cZ\frac{E_0 - E}{E}\exp\left\{-\sum \mu_i(E)\cdot t_i\right\}dE \qquad (3.4.6)$$

ここで、ZはX線管のターゲットの原子番号、E_0はX線管の管電圧、μ_iはX線が透過する物質iの線吸収係数、t_iは同じく物質iの厚さを表す。X線管の管電圧を50kVとして、ヨウ素層の厚さを0μmから60μmまで10μm刻みで変化させたときの、X線検出器に入射するX線スペクトルを図3.4.5に示す。

このときに想定される、transXend検出器のそれぞれの検出器の出力を図3.4.6に示す。なお、出力はX線管出力で規格化した。

ここから、閉凸空間を作成する。図3.4.7、3.4.8に、全ての検出器の組み合わせによる、各エネルギー領域における線束F_1、F_2（図3.4.1参照）を評価対象とする閉凸空間を示す。各マトリクスは、基準となる検出器（各行）に対して、その他の検出器出力の比をとった場合の閉凸空間である。要素ベクトルには、いずれも図3.4.5に示した7種類のスペクトルのX線に対する応答を用いた。

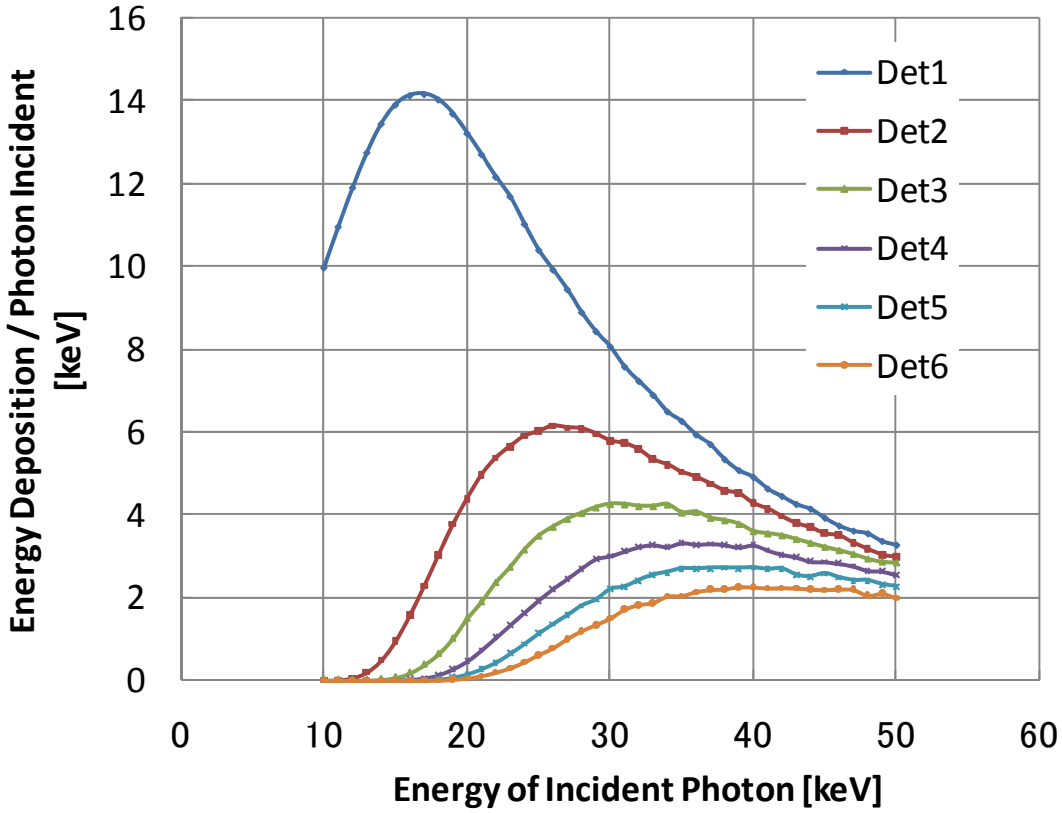


図 3.4.3　1mm 厚シリコン検出器で構成された transXend の X 線応答特性

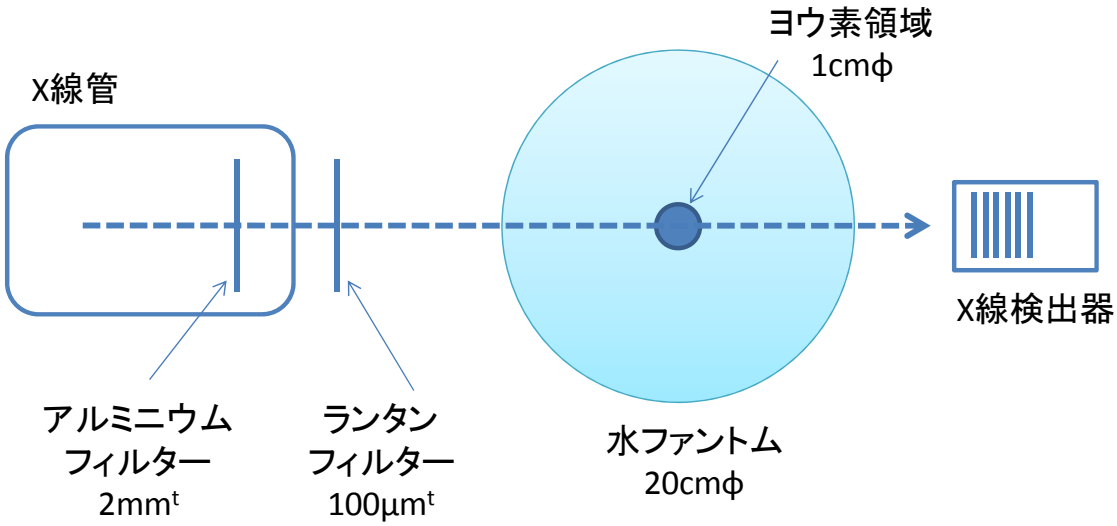


図 3.4.4　ヨウ素厚さ測定での X 線入射状況

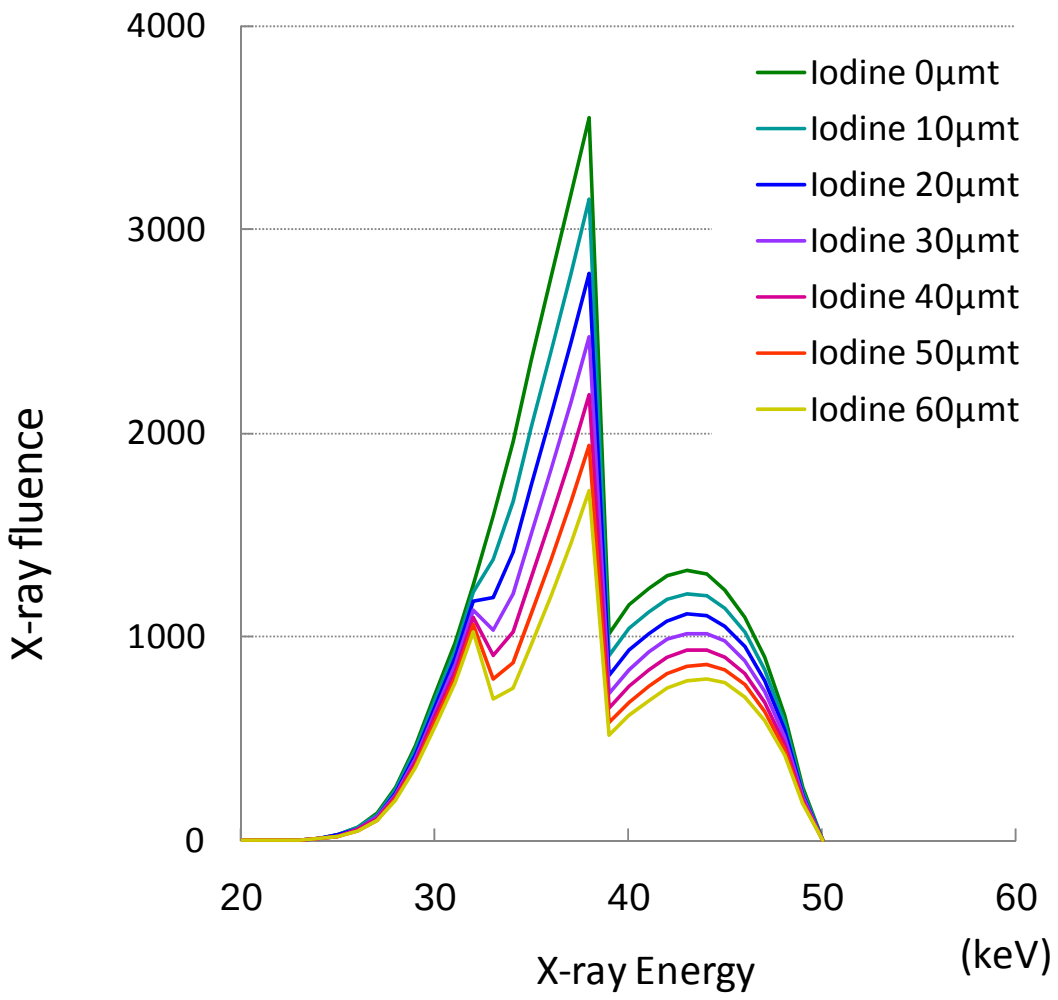


図 3.4.5　図 3.4.4 の条件で検出器に入射する X 線の詳細なエネルギースペクトル

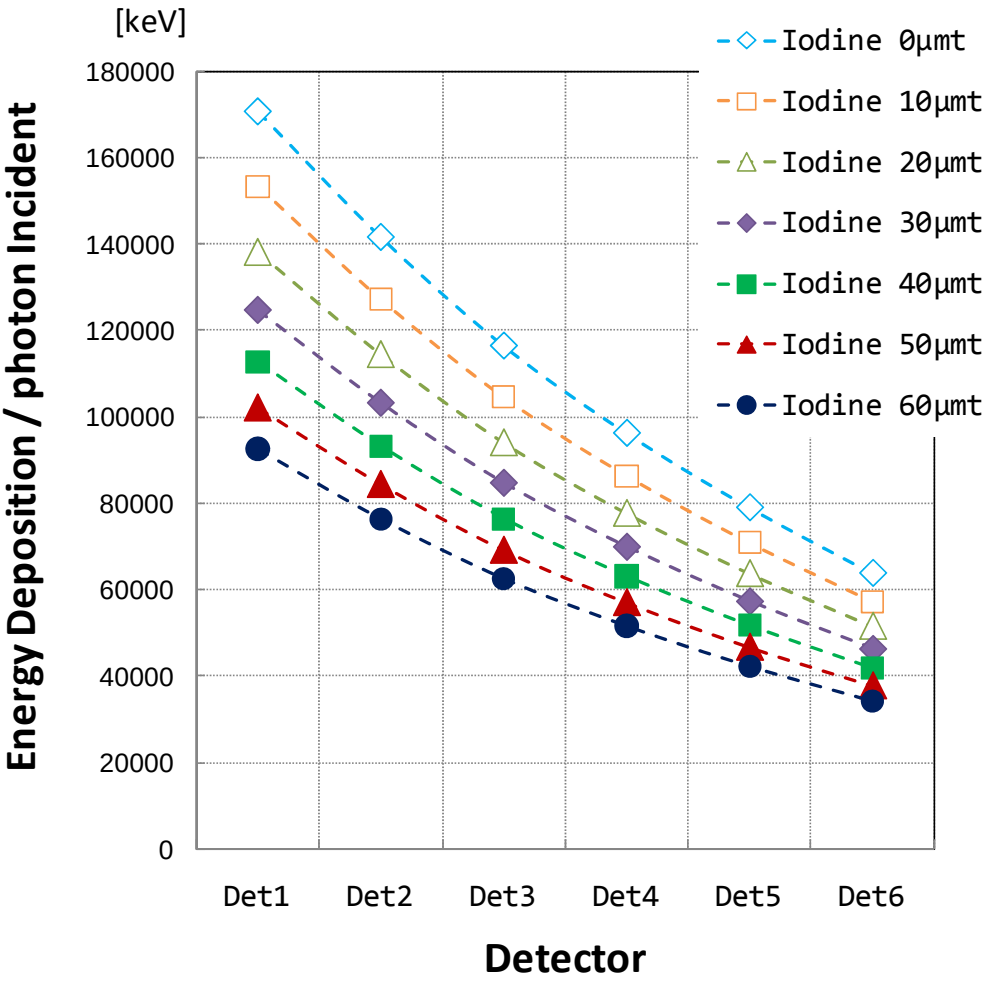


図 3.4.6　ヨウ素厚さ測定のための X 線に対する transXend の応答

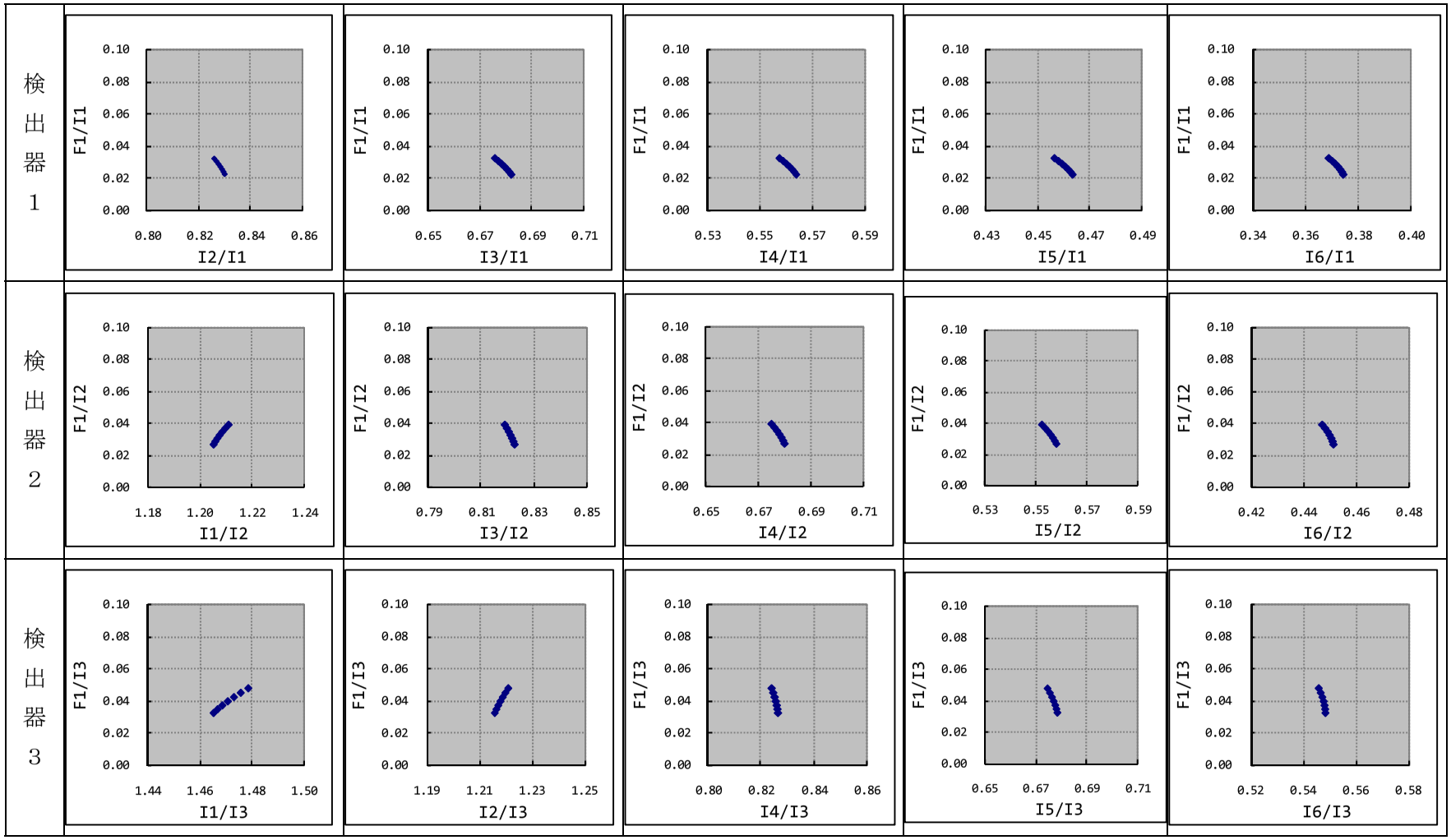


図 3.4.7　ϕ_1 の導出のための閉凸空間（その 1）

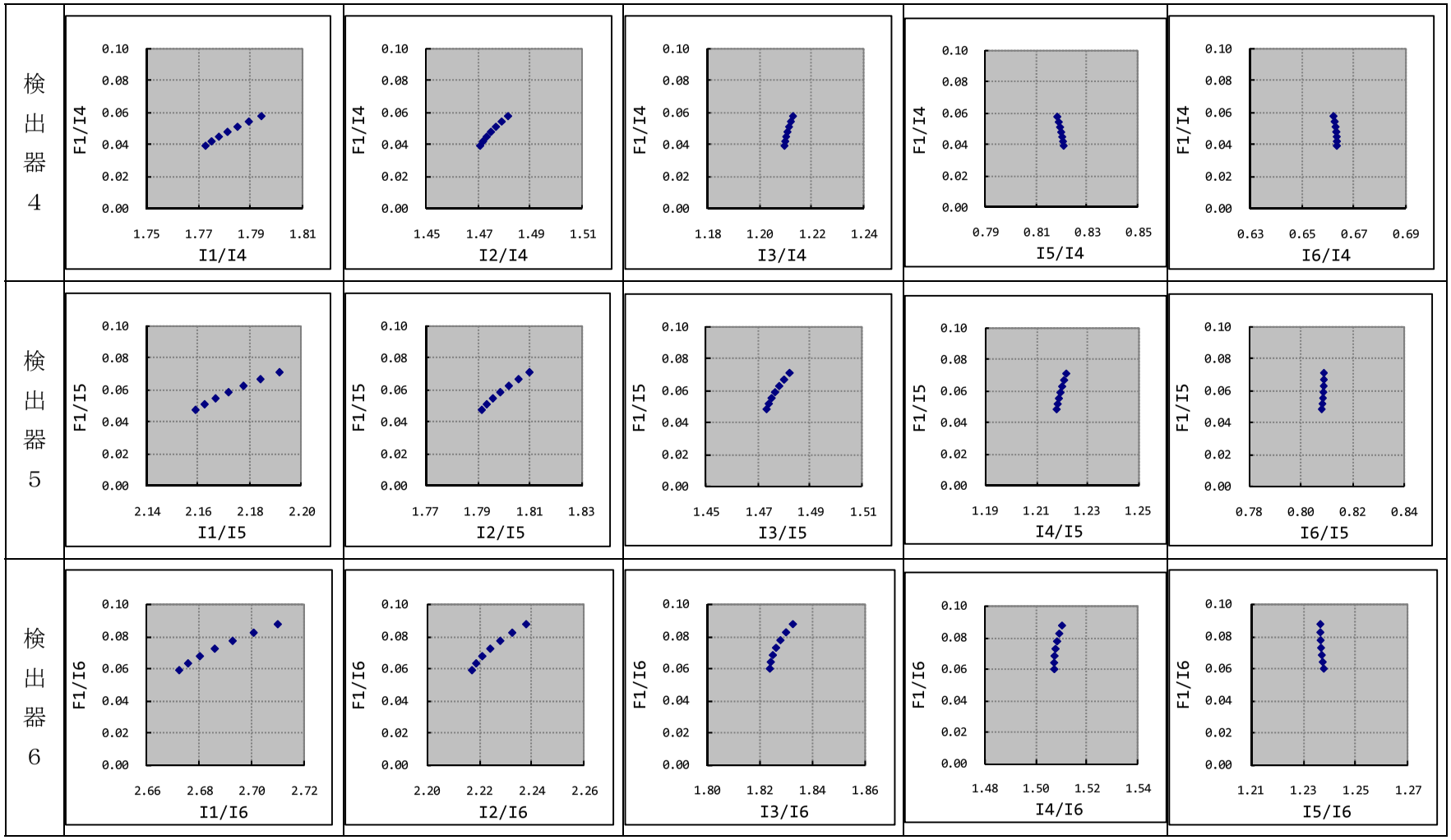


図 3.4.7　ϕ_1の導出のための閉凸空間（その２）

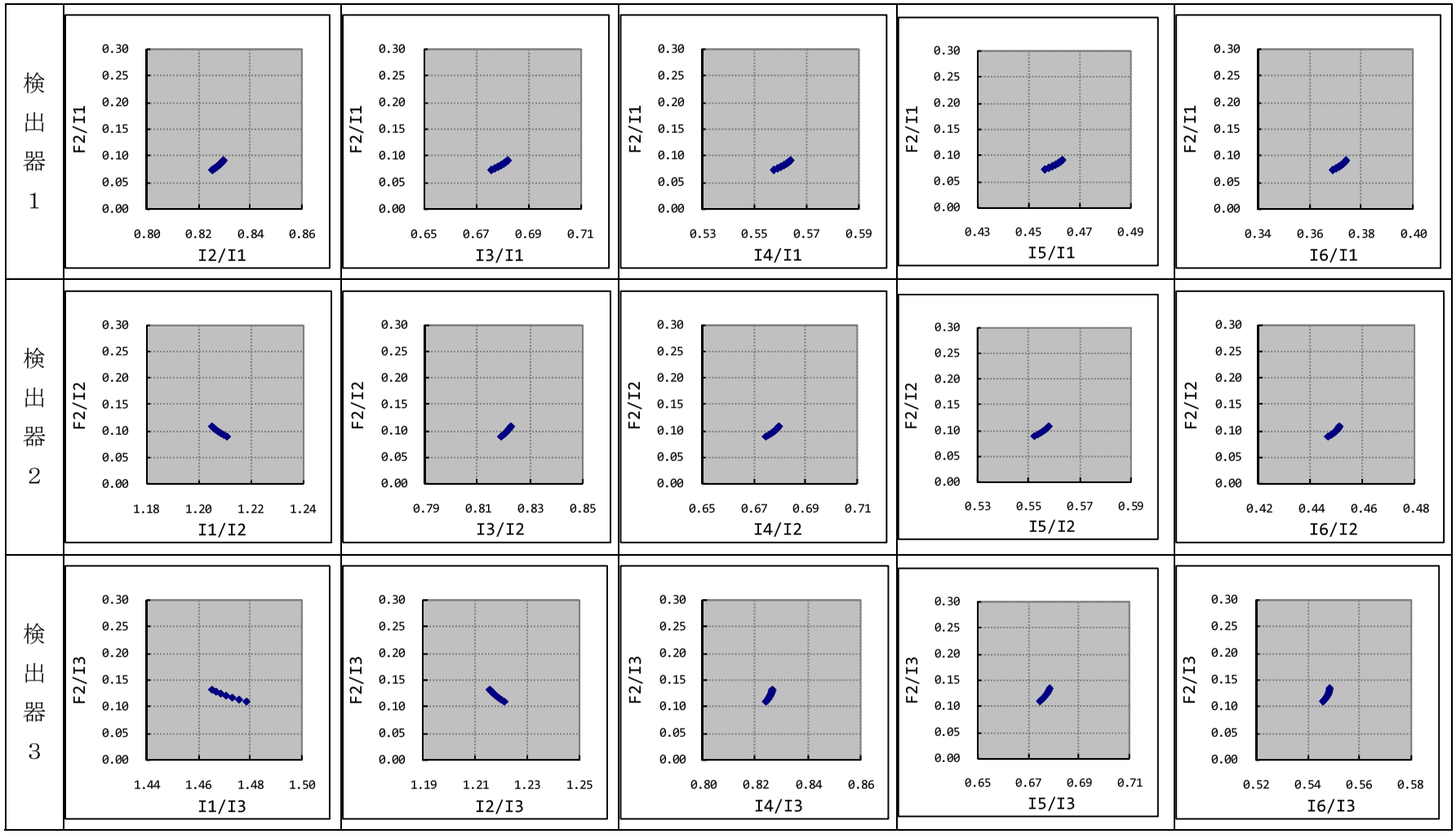


図 3.4.8　ϕ_2の導出のための閉凸空間（その１）

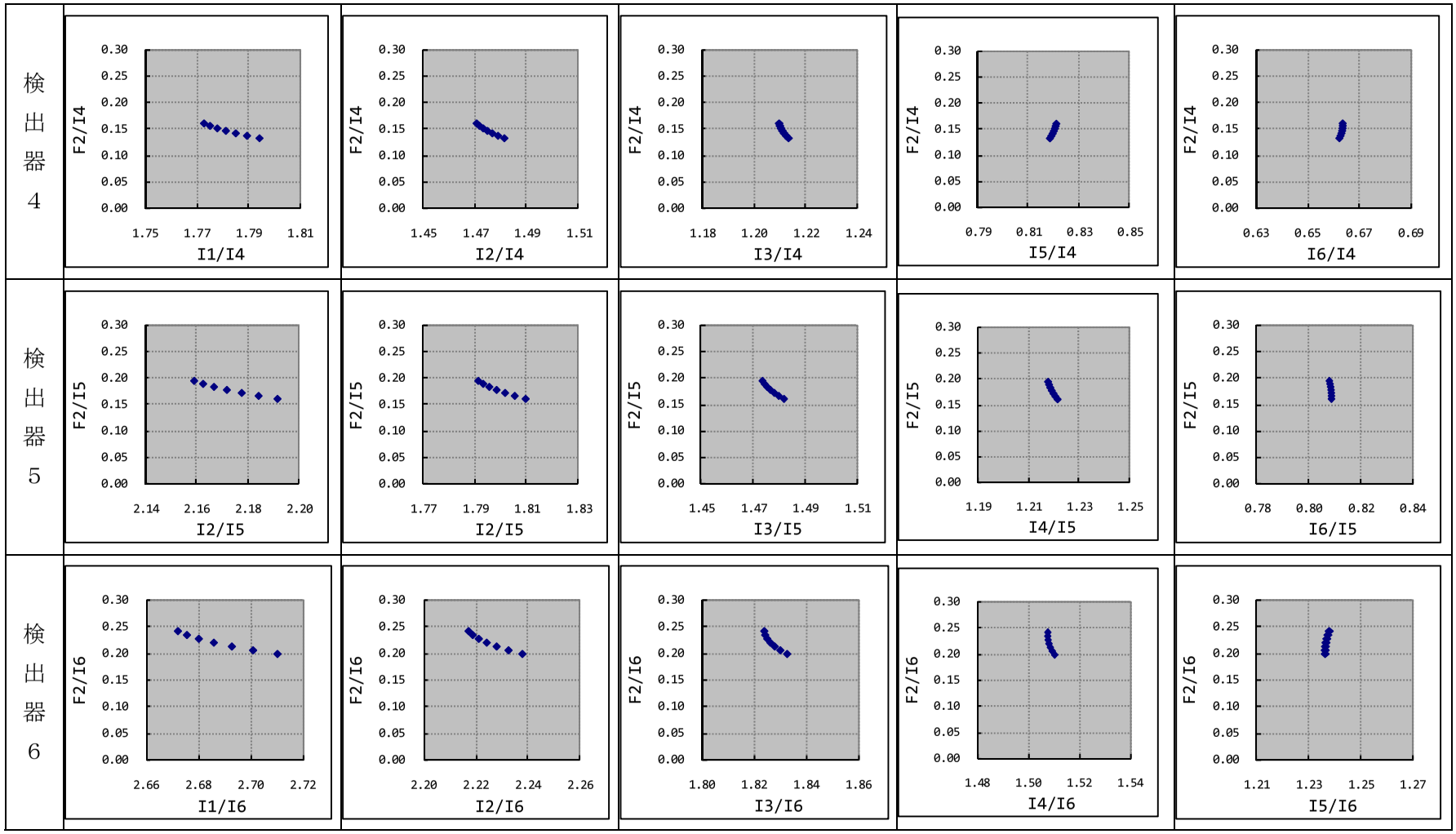


図 3.4.8　ϕ_2 の導出のための閉凸空間（その２）

3.4.2.2 閉凸空間の評価

図 3.4.7、図 3.4.8 に示した閉凸空間について検討する。今回の評価対象となる X 線スペクトルは、ヨウ素の実効厚さに応じて連続的に変動する、それぞれが独立したスペクトルと捉えることできる。図 3.4.5 に示した X 線スペクトルは、その抜粋とみなすべきである。したがって、これまでの線量の評価と異なり、要素スペクトルの合成で一連のスペクトルが表現されるわけではない。したがって、この場合、線量評価で使ったように要素ベクトルの合成である閉凸空間の中の点が測定値に対応すると扱うのではなく、要素ベクトルの集合が構成する線分上で、あらゆる想定される測定結果は連続的に分布すると捉えるべきである。したがって、図 3.4.7、図 3.4.8 は、それぞれの検出器出力の比に対する、基準となる検出器の出力と特定のエネルギー領域の線束の比を評価するための、いわば検量線が引かれていることになる。したがって、各検出器の出力比により、基準となる検出器出力から特定のエネルギー領域の線束への換算係数を一意に決めることができる。

しかしながら、一部の組み合わせでは線束を求める換算係数を一意に決めることが困難と考えられるケースも見受けられた。例えば、検出器 5 と検出器 6 の組み合わせでは、F_1、F_2 のどちらの評価においても、検出器出力の比 I_5/I_6（あるいは I_6/I_5）の変動が 10^{-3}～10^{-6} 程度と極めて小さく、線束を与える換算係数の変動の検出が困難と推測される。これは、図 3.4.3 に示された検出器 5 と検出器 6 の応答特性がほぼ同じ傾向を示しており、お互いの検出器出力の相違が顕著でないことが理由である。検出器出力比を的確に表すには、それぞれの検出器の出力が、いずれも十分な精度で与えられていることがいわば測定の前提であるが、それでも 10^{-3} を下回るごく小さい検出器出力比の変動の検知は期待できない。電流モードでの動作であれば 10^{-2} 程度までであれば、検出は可能と期待できる。図 3.4.7 及び図 3.4.8 であれば、検出器 1 や検出器 2 に関連する組み合わせで有効な検出が期待される。

以上より、シリコン多層検出器による X 線エネルギー分布の測定への閉凸空間データ処理法が適用においては、閉凸空間が検量線として作用して、各エネルギー帯における X 線束の評価を行えることが示された。

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

個人線量計と同様に、相対内積により組み合わせの良否を評価してみた。F_1とF_2の測定についての応答関数で評価した結果を表3.4.1に示す。どちらも全く同じ傾向を示した。これは、測定対象のエネルギー範囲のX線フラックスに対する各検出器の感度の相対値が変わらないことを意味している。相対内積値は検出器5に対して検出器1の組み合わせが最も小さい値を示したが、組合せごとの相違はごくわずかであり、顕著な差としては表れていない。これは、図3.4.7、図3.4.8において閉凸空間（あるいは検量線）の、位相的に異なる組合せはなく、お互いが似通っていることと整合する。

なお、3.4.2.2 項でも触れたように、各検出器出力の精度の限界で変動を検知できない場合があり得る。これらは相対内積値自体は他の組み合わせと遜色なく、中性子個人線量計の場合と同様に相対内積値が小さい場合の留意点として捉えることができる。つまり、相対内積値が小さく組合せとして優れており、その上で評価においては要素ベクトルの集合の密度分布や、検量線の傾きなどに注意する必要がある事を意味している。

閉凸空間データ処理法とその他の入力推定手法を比較してみる。これまで、電流モード検出器 transXend によるX線エネルギー測定のデータ処理は、アンフォールディング法やニューラルネットワークで行ってきた。その際に、単純に SAND-II を用いたアンフォールディングでは十分なX線エネルギー分布の再現ができず、初期推定を調整しながらアンフォールディングを繰り返し、収束度の高いケースを見つけるという、パターンマッチング的な方法を適用する必要があった[38]。これは、計算量が多くなるという課題を有しているが、推定困難な組み合わせでも、最適値にたどり着ける。しかし、初期推定やその後の推論の影響により、真値以外の値で収束している可能性や収束しない可能性を消せない。それと比較すると、閉凸空間データ処理法は測定後の計算量が格段に小さくなり、また収束の問題も伴わないため、処理は簡単になる。今回のケースでは、閉凸空間は検量線の形をとるため、線量測定で見られた閉凸空間の広がりの問題もなく、うまく適用できると考えられる。

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

(a) F_1 を測定する場合

	Det1	Det2	Det3	Det4	Det5	Det6
Det1		6.015	6.029	6.037	6.047	6.042
Det2	5.985		6.014	6.022	6.032	6.026
Det3	5.971	5.986		6.008	6.018	6.012
Det4	5.963	5.978	5.992		6.009	6.004
Det5	5.954	5.969	5.982	5.991		5.995
Det6	5.959	5.974	5.988	5.996	6.005	

(b) F_2 を測定する場合

	Det1	Det2	Det3	Det4	Det5	Det6
Det1		6.015	6.029	6.037	6.047	6.042
Det2	5.985		6.014	6.022	6.032	6.026
Det3	5.971	5.986		6.008	6.018	6.012
Det4	5.963	5.978	5.992		6.009	6.004
Det5	5.954	5.969	5.982	5.991		5.995
Det6	5.959	5.974	5.988	5.996	6.005	

第 3 章参考文献

1. 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.
2. Bramblett, R. L.; Ewing, R. I.; Bonner, T. W. A new type of neutron spectrometer. Nucl. Instr. and Meth. 1960, 9, p. 1-12.
3. Thomas, D. J.; Alevra, A. V. Bonner sphere spectrometers-a critical review. Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res., 2002, A476, p. 12-20.
4. Takeda, N.; Kudo, K.; Toyokawa, H.; Torii, T.; Hashimoto, M.; Sugita, T.; Dietze, G.; Yang, X. A development of NRESPG Monte Carlo code for the calculation of neutron response function for gas counters, Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. 1999,A422, p. 69-74.
5. Yoshizawa, M; Sugita, T; Saegusa, J; Tanimura, Y; Yoshida, M. A Monte Carlo Program for Estimating Characteristics of Neutron Calibration Field Using Pelletron Accelerator. J. Nucl. Sci. Technol. 2002, Supplement2, p.1240-1243 .
6. Magurno, B. A. ENDF/B-IV cross section measurement standards. Brookhaven National Laboratory. 1975, BNL-NCS-50464.
7. Kinsey, R. ENDF-102 Data formats and procedures for the evaluated nuclear data file, ENDF/B-V, 2nd ed. Brookhaven National Laboratory. 1979, BNL-NCS-50496(ENDF102).
8. Carlson, A. D.; Poenltz, W. P.; Hale, G. M.; Peelle, R. W.; Dodder, D. C.; Fu, C. Y.; Mannhart, W. The ENDF/B-VI Neutron cross section measurement standards. DOC. 1993, NISTIR 5177.
9. Anderson, H. H.; Ziegler, J. F. Hydrogen Stopping Powers and Ranges in All Elements Vol.3. Pergamon Press, 1977.
10. Ziegler, J. F. Helium Stopping Powers and Ranges in All Elemental Matter. Pergamon Press, 1977.
11. Ziegler, J. F. The Stopping and Range of Ions in Solids. Pergamon Press, 1985.
12. Bennette, E. F.; Yule, T. J. Techniques and analyses of fast-reactor neutron spectroscopy with proton-recoil proportional counters. Argonne National Laboratory. 1971, ANL-7763.
13. Neutron Dose Rate Meter 2202D　取り扱い説明書. Studsvic. 1991
14. ICRP. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26 (3/4). 1996b.
15. Kosako, T.; Nakazawa, M.; Wakabayashi, H.; Sekiguchi, A. Spectral

Characterization of Fast Reactor Neutron Fields. J. Fac. Eng. Univ. Tokyo (B), 1977, Vol. XXXIV, No. 2, p. 409-480.

16. Cox, Lawrence J.; Goorly, John T.; Barrett, Richard F.; Mosteller, Russel D.; Booth, Thomas E.; Forster, R. Arthur; Briesmeister, Judith F.; Post, Susan E.; Brown, Forrest B.; Prael, Richard E.; Bull, Jeffery S.; Selcow, Elizabeth C.; Giesler, Gregg C.; Sood, Avneet. MCNP Version 5. Los Alamos National Laboratory. 2002, LA-UR-02-1527.
17. IAEA, Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes. IAEA TECHNICAL REPORT SERIES No.403, 2001.
18. McElroy, W.; Berg, S.; Crocket, T.; Hawkins,G. A computer-automated iterative method for neutron flux spectra determination for foil activation. Air Force Weapons Laboratory. 1967, AFWL-TR-67-41.
19. Leake, J. W. A spherical dose equivalent neutron detector. Nucl. Instrum. Meth. 1965, 45, p. 151-156.
20. Leake, J. W. An improved spherical dose equivalent neutron detector. Nucl. Instrum. Meth. 1968, 63, p. 329-332.
21. Nakamura, T.; Tsujimura, N.; Yamano, T. Development of real time personal neutron dosimeter with two silicon detectors. Appl. Radiat. Isot. 1995, Vol.46, No.6/7, p. 469-470
22. Sasaki, M.; Nakamura, Y.; Tsujimura, N.; Ueda, O; Suzuki, T. Development and characterization of real-time personal neutron dosemeter with two silicon detectors. Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. 1998, A418, p. 465-475.
23. Zamani, M; Sampsonidis, D; Savvidis, E. An individual neutron dosemeter with (n, α) and (n,p) converters. Radiat. Meas. 1996, Vol.26, No.1, p. 87-92.
24. IEC, Radiation protection instrumentation –Measurement of personal dose equivalents Hp(10) and Hp(0,07) for X, gamma, neutron and beta radiations – Direct reading personal dose equivalent meters and monitors. IEC 61526, 2005.
25. Lahaye, T.; Cutarella, D.; Ménard, S.; Bolognese-Milstajn, T. The firstr operational dosemeter for neutrons which complies with IEC standard 1323. Radiat. Prot. Dosim. 2001, Vol.96, Nos.1-3, p. 241-244.
26. Lahaye, T.; Chau, Q.; Ménard, S.; Ndontchueng-Moyo, M.; Bolognese-Milstajn, T.; Rannou, A. Numerical and experimental results of the operational neutron dosemeter 'SAPHYDOSE-N.' Radiat. Prot. Dosim. 2004, Vol.110, Nos.1-4, p. 201-206.
27. Luszik-Bhadra, M. Compliance of electronic personal neutron dosemeters with the new international standard IEC 61526. Radiat. Prot. Dosim. 2007, Vol.125,

Nos.1-4, p. 15-18.
28. Ing, H.; Noulty, R. A.; McLean, T. D. Bubble Detectors—A maturing technology. Radiat. Meas. 1997, Vol.27, No.1, p. 1-11.
29. d'Errico, F.; Luszik-Bhadra, M.; Lahaye, T. State of the art of electronic personal dosimeters for neutrons. Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. 2003, A505, p. 411-414.
30. Spurný, F. Response of thermoluminecent detectors to charged particles and to neutrons. Radiat. Meas. 2004, 38, p. 407-412.
31. Dhairyawan, M. P.; Marathe, P. K.; Massand, O. P. Use of CR-39 solid state nuclear track detector in neutron personnel monitoring. Radiat. Meas. 2003, p. 435-438
32. Tanner, R. J.; Bartlett, D. T.; Hager, L. G. Recent enhancements to the understanding of the response of the NRPB neutron personal dosemeter. Radiat. Meas. 2001, 34, p. 457-461
33. Kanno, I; Maetaki, S.; Aoki, H.; Nomiya, S.; Onabe, H. Low exposure x-ray transmission measurements for contrast media detection with filtered x-rays. J. Nucl. Sci. Technol. 2003, 40, p. 457-463.
34. Kanno, I.; Takahashi, M.; Aoki, H.; Onabe, H. Energy subtraction method with filtered x-rays for the detection of contrast media. Nucl. Instrum. Meth. 2006, A567, p. 154-157.
35. Kanno, I.; Uesaka, A.; Nomiya, S.; Onabe, H. Comparison of current and energy x-ray measurement methods in contrast media detection. Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. 2007, A580, p. 534-536.
36. Kanno, I.; Uesaka, A.; Nomiya, S.; Onabe, H. Energy measurement of x-rays in computed tomography for detecting contrast media. J. Nucl. Sci. Technol. 2008, 45, p. 15-24.
37. Kanno, I.; Imamura, R.; Mikami, K.; Uesaka, A.; Hashimoto, M.; Ohtaka, M.; Ara, K.; Nomiya, S.; Onabe, H. A current-mode detector for unfolding X-ray energy distribution. J. Nucl. Sci. Technol. 2008, 45, p. 1165-1170.
38. Hashimoto, M.; Ohtaka, M.; Ara, K.; Kanno, I.; Imamura, R.; Mikami, K.; Nomiya, S.; Onabe, Simulation study on unfolding methods for diagnostic X-rays and mixed gamma rays. J. Nucl. Sci. Technol. 2009, 46, p. 76-82.
39. Hirayama, H.; Namito, Y.; Bielajew, A. F.; Wilderman, S. J.; Nelson, W. R. The EGS5 code system. 2005, SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005-8.
40. Storm, E. Calculated bremsstrahlung spectra from thick tungsten targets. Phys. Rev. 1972, A5, p. 2328-2338

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

混合ガス比例計数管による周辺線量当量測定、個人線量計の組み合わせによる個人線量当量測定、及び transXend 検出器による X 線エネルギー分布測定について、閉凸空間データ処理法の適用の検討を行ってきた。ここでは、全体を通じて蓄積された知見について総合的な整理検討を行う。

4.1.1 測定器の組み合わせの選定

3 種類の測定の検討を通じて、閉凸空間データ処理法を適用するための複数検出器出力を与える測定器の組み合わせについて、いくつかの共通的な知見が得られた。

第一に、測定器の組み合わせは、お互いの応答特性の傾向が異なり、相互に感度の低い部分を補完しあうような関係が望ましいことが明らかになった。類似した応答特性の検出器の組み合わせでは、特性の弱い部分を補うことが期待できない。また、閉凸空間は検出器出力の比から作成しているが、類似した特性どうしでは、その比は全体的に平板なものになってしまい、その中でお互いのわずかな応答特性の違いが強調される形となる。線量評価はマクロ的に行われるものであり、局所的な特性が強調されるのは好ましくない。また、各検出器の有感エネルギー範囲については、共通であることが望ましい。不感領域があると、閉凸空間の形成ができず、その部分は単一の検出器による線量測定に頼ることになる。もっとも、エネルギー有感領域の面でも相互に補完される形になっていれば問題ではない。

第二に、このような検出器の組み合わせの有効性の評価は、お互いの応答特性を関数とみなして、その内積によりお互いの直交性を評価することが効果的であると認められた。少なくとも、相対内積値が大きい組み合わせは、閉凸空間データ処理法を適用する検出器の組み合わせとして適当ではない。内積評価は、閉凸空間をによる目的量評価の向上が期待できない組み合わせを排除するような、スクリーニングの方法として有効である。なお、相対内積値が小さくなる組み合わせは、全般に線量測定へ適用することは効果的ではあるが、留意すべき点もある。それは、閉凸空間の微細構造が相対内積値では評価しきれないことで、局所的に線量換算係数の広がりが大きいケースが生じ得ることである。したがって、実際に閉凸空間を作成し、線量評価のエネルギー応答特性を把握する必要がある。

4.1.2 評価軸の選定

3.2.6 項で示したように、同じ検出器、あるいは反応の組み合わせでも、分母に何をとるかで閉凸空間の性質が変わる。これは、表 3.3.1 に顕著に表れている。この表において、相対内積値の小さい優れた組み合わせと、相対内積値の大きい好ましくない組み合わせが、同じ検出器の組み合わせがある。同じ検出器の組み合わせであるにもかかわらず、分母の取り方によって、相対内積値は上位になるか、下位に落ちるかに分かれた。これは閉凸空間を見ても、明確にその傾向が表れており、その線量測定の能力に差があることが見て取れる。

3.2.6 項で扱った、図 3.2.45 のケースについて検討する。この場合は、反跳反応の計数 N_F を分母にとって閉凸空間を形成した。中性子線量換算係数が大きくなるのは、比較的速い中性子に対してであるが、その時は ^{3}He の吸収反応による係数 N_T の値は小さくなり、N_F 値は大きくなる傾向にある。したがって、$H^*(10)/N_F$ の値は大きくなる傾向にあるのに対して、N_T/N_F の値が小さくなっていく。したがって、測定点の集合は、N_T/N_F が小さくなる方向で線量換算係数が立ち上がる傾向にある。この時、N_T/N_F の値の変化が小さくなったエネルギー帯で、$H^*(10)/N_F$ の値が大きく変化しているため、図 3.2.45 に示すような閉凸空間が作成される。一方、図 3.2.28 のケースでは、横軸の N_F/N_T の値の変化の大きい領域が線量換算係数の変化の大きい領域と重なっており、どちらも増加傾向を示すため、弓状に閉凸空間が伸びる結果となった。

これより、閉凸空間を形成する評価軸を選定する上で、一つの重要な判断基準が与えられる。つまり、線量換算係数が大きく、また変化率も大きいエネルギー領域において、複数検出器の出力比も変動する状況を作り出すことが、線量評価において有効であるということである。線量換算係数の変動に比べて出力比の変動が鈍ければ、線量換算の変動に対する感度が鈍いということになる。この判断基準は、選ばれた検出器の組み合わせと分母を決める材料となるだけでなく、それ以前に適用する検出器の選択においても効いてくる。出力比の変動は、いずれか、あるいは全ての検出器の応答特性の変化で与えられるため、特定のエネルギー領域における応答特性の変化を有する検出器を適用することが必要である。また、この時、線量換算係数の変化との線形性の必要性は小さく、何かしらの変化を示せば閉凸空間として処理が可能であると考えられる。

さらに、検出器比の取り方と同様に、線量換算係数と、それに対応する検出器出力の間の直交性にも着目すべきであろう。直交性が高い方が、広いエネルギー範囲において良い換算係数の変動への追随を示すに対し、直交性が低ければそれは顕著には見えなくなると考えられる。個人線量計の評価で、この傾向が確認できる。例えば、図 3.3.1 において、線量換算係数に似た特性を示すものとして $CaSO_4$-Dy の TLD を、また、それと反する傾向として電子線量計 EPD-N を選び出す。両者の組み合わせを見ると、$CaSO_4$-Dy の出力を分母にとると（図 3.3.2 中 EPD:EPD-N/TLD:$CaSO_4$-Dy の閉凸空間）、複数検出器出力比が 0 に近いところで、線量換算係数が幅広く触れていて線量評価は困難であることが分かる。

一方、EPD-N の出力を分母にとると（図 3.3.2 中 TLD:$CaSO_4$-Dy /EPD:EPD-N の閉凸空間）、好ましい閉凸空間の形状を取っている。

以上から、閉凸空間の評価軸の構成の検討には、線量評価上重要なエネルギー領域における検出器出力比の変動状況と、各軸に共通の分母となる検出器の応答特性と線量換算係数との直交性についても考慮すべきであると言える。

4.1.3 目的量評価における代表値の選定

2.3 項において、閉凸空間データ処理法の結果から最適値を選択する方法について触れたが、ここで、改めてそれぞれの測定例における最適値の選択方法について論じる。

混合ガス比例計数管による中性子線量評価では、弓状の閉凸空間が形成され、そこから線量測定の最適値を求めることになる。この場合には、図 3.2.29 や図 3.2.42 に示したように、閉凸空間の中にも、それぞれの施設に応じて何らかの有意な相関のある集合が存在しているように見える。これを活用して、最適値を与える施設毎の条件をあらかじめ決めておくのは有効であろう。

これらの情報がない場合には、弓状の閉凸空間の中での評価点の配置を考慮して、被ばくの過小評価をもたらさないように、広がりの上限をとることが勧められる。弓状の閉凸空間内の評価点の分布について、閉凸空間の成立過程に立ち戻って検討してみる。この閉凸空間は、「弓」の部分に存在する要素ベクトルの合成で定義される。したがって、「弦」の部分は「弓」の両端にあたる要素ベクトルの合成である。これは、具体的には熱中性子スペクトルと、最も速い中性子スペクトルの合成を意味し、その他の要素ベクトルの影響は受けていないとしなければならない。同様に、この閉凸空間の辺縁部はごく限られた核分裂中性子の合成でつくられる中性子スペクトルに対する応答と考えられる。これは、現実の中性子場に立ち返ると考えにくいことが分かる。現実の放射線防護の対象となる中性子場は、ほとんどの場合、多くの要因で変動した多様なスペクトルの合成でできていると考えられるからである。どちらかと言えば、「弦」に近い側のようなかけ離れた中性子場の合成ではなく、「弓」に近い側になるであろうことは予想できる。図 3.2.28 において、中性子スペクトル実測事例に基づく点は、熱中性子スペクトルに対応する原点寄りに集中し、閉凸空間内の「弓」寄りに分布しており、ここまでの推論を裏付けるものとなっている。最適値の選定に当たっては、このような分布状況を考慮すべきであろう。

個人線量計の場合には、閉凸空間の広がりが十分に狭い組み合わせがある。そこから線量換算係数の最適値を与えるに際しては、例えば中央値を与えても、顕著な問題はないだろう。過小評価を与えたくないような状況下にあるような場合には、線量換算係数の広がりの最大値を与えておく選択もあり得る。混合ガス比例計数管の場合と同様に分布を推定することも有効だが、閉曲線による閉凸空間や単調関数形状ではない閉凸空間の場合には、弓状の閉凸空間とは分布状況が異なり、絞り込むのは困難な場合も想定できる。

X 線エネルギー分布測定の場合には、閉凸空間ではなく、検量線として相互の関係が与えられたので、最適値評価は必要なく、常に一意の値を決めることができる。

このように、各測定事例において、最適値の選択の事情は異なっている。それぞれの状況に応じて適切な選定を行うべきである。

4.2　高次空間への展開

これまで、実測定への広範な適用を想定し、取り扱いが比較的容易である 2 個の検出器で検討してきたが、閉凸空間データ処理法は、3 個以上の検出器についても適用は可能である。検出器の数に応じて情報量は相乗的に増えていくので、目的量の評価において有効である場合もある。また、データの相関の良否の判断のために導入した相対内積についても、3 種類以上の応答関数についても、その相関を評価することは可能であり、相対内積値の機能も同様である。n 個の検出器出力で形成される閉凸区間の評価のための相対内積値は以下のように定義できる。

$$\langle f_1(x), f_2(x)\cdots, fn(x)\rangle = \int f_1(x) f_2(x)\cdots f_n(x)dx \qquad (4.2.1)$$

3.3.2.2 項と同様に、これを離散的に処理すると次の式で表される。

$$\langle f_1(x), f_2(x)\cdots, fn(x)\rangle = \sum f_1(x) f_2(x)\cdots f_n(x)dx \qquad (4.2.2)$$

これより、相対内積値は以下のように表現できる。

$$\langle\langle f_1(x), f_2(x)\cdots, fn(x)\rangle\rangle = \sum \frac{f_1(x) f_2(x)\cdots f_n(x)}{f_i(x)} dx \qquad i \in n \qquad (4.2.3)$$

これを用いて、2 個の検出器の場合と同様に、目的量評価のための組合せのスクリーニングを行うことができるだろう。

3 種類以上の検出器出力に基づく目的量評価に閉凸空間データ処理法が適していると判断された場合、その閉凸空間は高次凸面体になる。目的量の最適値評価を行うためには、この高次閉凸空間の数値処理が必要になる。目的量の最適値評価は閉凸空間から切り出された一本の弦の範囲を決める必要があり、それを数値的に扱うためである。高次閉凸空間の扱いについては、位相幾何学的な取り組みは多く行われているが [1)2)3)]、数値的な処理にまで落としこんだ例は先駆的な取り組みもある [4)]。将来的に、多数の測定器の出力によるデータ処理が必要になるような場合の高次閉凸空間の数値的な取り扱いは、これからの課題と考える。

第 4 章参考文献

1. Luenberger, D. G. Optimization by Vector Space Methods. John Wiley & Sons, Inc., 1969.
2. Boyd, S; Vandenverghe, L. Convex Optimization. Cambridge University Press, 2004.
3. Mount, D. M. Computational Geometry, Lecture Note of the University of Maryland. CMSC754, 2002.
4. Fukuda, K. Cdd and cddplus homepage. http://www.cs.mcgill.ca/~fukuda/soft/cdd_home/cdd.html, (accessed 2009-06-13)

5　結論

複数の放射線検出器を使った、中性子線量測定及び X 線エネルギー分布測定に閉凸空間データ処理法を適用し、目的量の評価が適切に行われることを確認した。

閉凸空間データ処理法の適用については、周辺線量当量の測定と個人線量当量の測定について、それぞれ実際の測定器の応答特性まで立ち返って検討した。空間線量については、混合ガス比例計数管を新たに開発し、それによる測定を検討した。開発された混合ガス比例計数管の性能は良好で、本法適用の検討に値するものであった。この計数管を評価対象として、単色中性子場、一般式で表現される核分裂中性子場、及び減速核分裂中性子場を想定し、閉凸空間データ処理法による線量測定の適用を検討した。その結果、核分裂中性子場における線量測定について良いエネルギー応答特性を示した。過去の核分裂中性子スペクトルの測定事例に基づく混合ガス比例計数管の応答を評価し、また原子炉施設における混合ガス比例計数管の応答実験も行い、良い線量評価特性を示すことが確認された。

中性子個人線量については、既存の中性子個人線量計の組み合わせに閉凸空間データ処理法を適用した。その結果、良好な組み合わせでは線量計を単独で使う場合よりも優れた線量測定のエネルギー応答特性を示した。組合せの良否のスクリーニングのために、各検出器のエネルギー応答特性関数の内積の相対値を用いることが可能であり、この値が大きいものは閉凸空間データ処理法の適用が向かない組み合わせであると判断できた。一方、相対内積値が小さい組み合わせは、応答関数の相互の直交性が高く、線量評価特性に優れていることが示された。ただし、相対内積値が小さい場合でも、閉凸空間の形状には留意すべきであると分かった。。

さらに、中性子線量だけでなく、X 線のエネルギー分布測定についても適用を検討した。積層シリコン検出器の電流モード測定による X 線のエネルギー分布を測定に、閉凸空間データ処理法が適用可能であることが示された。

以上より、中性子周辺線量当量測定、中性子個人線量測定、及び X 線エネルギー分布測定のいずれにおいても、閉凸空間データ処理法を適用した高度な目的量評価が可能であることが示された。簡単な検出器のシンプルな出力を使って、その組み合わせにより高度な目的量評価が可能であることを示すことができたと言える。これは、放射線防護における多くの測定に適用が可能であり、その方法論がここで確立された重要な成果である。

6　謝辞

小佐古敏荘教授には、多忙な中でも時間を割いて御指導いただき、議論を深めることができ本当にありがたく思っております。この研究は自分としては10年以上にわたり取り組んできたものですが、これまで漠としていたものをすっきりと整理していただき、おかげでこのような形にまとめ上げることができました。この経験は、何物にも代え難く、深く感謝しております。

飯本武志准教授には、このような就学の機会を与えていただき、深く感謝しております。先生のPositive Thinkingにはたくさん救われました。いろいろご負担をかけたかと思いますが、おかげで助かりました。

小池裕也助教、阿部琢也助教、廣田昌大助教には、実験や打ち合わせの設定など、さまざまな面で御世話になりました。感謝しております。

岩井敏講師には、有意義な助言をいただき感謝しております。氏の知見には、大変助かりました。

Mikhail N. Morev研究員との議論は、とても興味深いものでした。本研究の理論の部分は、氏の助力が得られなければできなかったかもしれません。深く感謝しております。

小池かおり秘書、井上純子秘書にも、研究活動、学生生活を送る上でお世話になりました。また、先生との打ち合わせのスケジュール調整では、大変お世話になりました。ありがとうございます。

そして、木村さん、林さん、今津さん、佐藤さん、鍋本さん、孫君、松本君、胡君、小宮君、小川君、嶋田和真君、鈴木さん、Prasado、Toan、Luo、Apisara、Thiem、嶋田智昌くん、Alex、瀬戸口君、谷君。いろいろと助かりました。ありがとうございます。今後も頑張ってください

混合ガス比例計数管の加速中性子に対する応答実験は、独立行政法人日本原子力研究開発機構の平成20年度施設共用制度によって行いました。近大炉における混合ガス比例計数管の応答実験は、大阪大学の平成20年度施設共同利用で行いました。また、弥生における混合ガス比例計数管の応答実験は、本学の平成20年度施設共同利用で行いました。いずれも、施設の利用にご尽力いただいた関係者各位に感謝いたします。

また、このような就学を許してくれた、原子力機構大洗安全管理部の、安藤秀樹前部長、宮部賢次郎部長、江森修一課長、相馬丞前課長、伊藤公雄課長、清水武彦課長代理、そして環境線計課の皆様、本当に感謝しております。

本当に多くの方々に助けられて、ここまで出来ました。まったく、感謝に堪えません。

ありがとうございます。

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

閉凸空間データ処理法の中性子周辺線量測定への適用（3.2 項）と、中性子個人線量測定への適用において、減速核分裂中性子場の中性子スペクトルとして共通で使ったデータを示す。核分裂中性子が発生してから、熱化するまでを 34 段階で表している。

計算条件を表 I.1 及び、図 I.1 に示す。

表 I.1　核分裂中性子減速状況の計算条件

中性子源	U-235 熱中性子核分裂線源 Watt Fission Spectrum $f(E)=C\cdot\exp(-E/a)\cdot\sinh(b\cdot E)^{1/2}$　　a=0.988　　b=2.249 出典：MCNP4A マニュアル APPENDIX H-3
形状	球体系モデル 中心部：半径 0.5cm の真空領域 鉄（7.874g/cm3）遮蔽体の内半径 0.5cm
鉄遮蔽厚(cm)	0, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100
コンクリト遮蔽厚(cm)	鉄 100cm の外側に普通コンクリート（2.2 g/cm^3）を 1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 70, 100
線源位置	原点の点線源
評価点	遮蔽の外表面

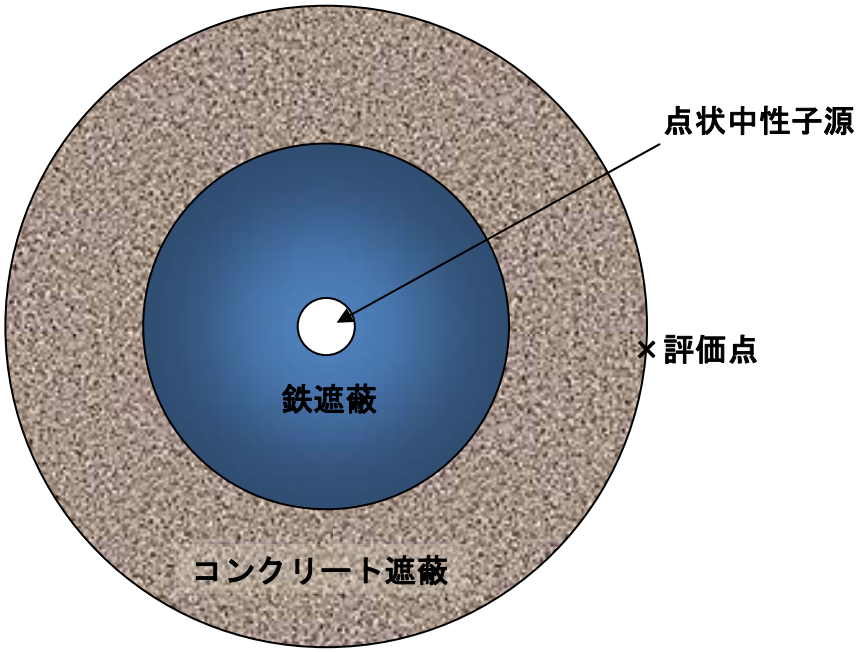


図 I.1　核分裂中性子減速状況計算体系図

計算結果のまとめを表 I.2 に示す。また、そぞれの中性子エネルギースペクトルを次ページ以降に示す。エネルギースペクトルはレサジーあたりの線束で表現する。またエネルギー値は、各エネルギー幅の最小値を示す。

表 I.2　減速核分裂中性子の計算結果一覧

データ名	遮蔽厚さ(cm)		線束		平均エネルギー	周辺線量当量換算係数 H*(10)/φ	個人線量当量換算係数 $H_{p,slab}(10,0^{\circ})/\phi$
	鉄	コンクリート					
	(cm)	(cm)	n/cm^2	error	MeV/n	pSv・cm^2	pSv・cm^2
Fe0000Con0000	0	0	3.54×10^{-02}	0.00%	$2.031\times10^{+00}$	383.00	401.84
Fe0010Con0000	1	0	3.76×10^{-02}	0.10%	$1.893\times10^{+00}$	378.80	397.64
Fe0015Con0000	1.5	0	2.16×10^{-02}	0.11%	$1.830\times10^{+00}$	376.51	395.26
Fe0020Con0000	2	0	1.40×10^{-02}	0.11%	$1.772\times10^{+00}$	374.67	394.10
Fe0030Con0000	3	0	7.38×10^{-03}	0.13%	$1.663\times10^{+00}$	370.51	390.27
Fe0040Con0000	4	0	4.57×10^{-03}	0.12%	$1.562\times10^{+00}$	366.51	386.51
Fe0050Con0000	5	0	3.13×10^{-03}	0.12%	$1.469\times10^{+00}$	362.00	381.60
Fe0070Con0000	7	0	1.74×10^{-03}	0.12%	$1.298\times10^{+00}$	352.44	371.97
Fe0100Con0000	10	0	9.21×10^{-04}	0.13%	$1.085\times10^{+00}$	337.83	357.33
Fe0150Con0000	15	0	4.39×10^{-04}	0.14%	8.199×10^{-01}	311.80	331.92
Fe0200Con0000	20	0	2.55×10^{-04}	0.14%	6.426×10^{-01}	287.27	308.33
Fe0300Con0000	30	0	1.16×10^{-04}	0.17%	4.381×10^{-01}	244.78	269.25
Fe0400Con0000	40	0	6.45×10^{-05}	0.19%	3.321×10^{-01}	210.02	236.32
Fe0500Con0000	50	0	3.97×10^{-05}	0.20%	2.665×10^{-01}	181.48	206.78
Fe0600Con0000	60	0	2.57×10^{-05}	0.21%	2.232×10^{-01}	159.33	182.73
Fe0700Con0000	70	0	1.72×10^{-05}	0.22%	1.924×10^{-01}	141.99	162.93
Fe0800Con0000	80	0	1.16×10^{-05}	0.22%	1.696×10^{-01}	128.18	146.56
Fe0900Con0000	90	0	7.92×10^{-06}	0.23%	1.522×10^{-01}	117.12	132.84
Fe1000Con0000	100	0	5.43×10^{-06}	0.23%	1.387×10^{-01}	108.34	122.29
Fe1000Con0010	100	1	5.57×10^{-06}	0.23%	1.215×10^{-01}	96.12	100.02
Fe1000Con0015	100	1.5	5.50×10^{-06}	0.23%	1.131×10^{-01}	90.03	90.43
Fe1000Con0020	100	2	5.44×10^{-06}	0.23%	1.051×10^{-01}	84.23	81.87
Fe1000Con0030	100	3	5.24×10^{-06}	0.23%	9.061×10^{-02}	73.69	67.80
Fe1000Con0040	100	4	5.06×10^{-06}	0.24%	7.784×10^{-02}	64.43	56.69
Fe1000Con0050	100	5	4.84×10^{-06}	0.23%	6.680×10^{-02}	56.48	48.03
Fe1000Con0070	100	7	4.37×10^{-06}	0.24%	4.924×10^{-02}	43.98	35.82
Fe1000Con0100	100	10	3.66×10^{-06}	0.23%	3.185×10^{-02}	31.88	25.59
Fe1000Con0150	100	15	2.61×10^{-06}	0.24%	1.579×10^{-02}	21.10	17.81
Fe1000Con0200	100	20	1.79×10^{-06}	0.24%	8.193×10^{-03}	16.29	14.85
Fe1000Con0300	100	30	7.60×10^{-07}	0.24%	2.378×10^{-03}	12.88	13.06
Fe1000Con0400	100	40	2.94×10^{-07}	0.24%	7.681×10^{-04}	12.03	12.65
Fe1000Con0500	100	50	1.06×10^{-07}	0.24%	2.635×10^{-04}	11.75	12.54
Fe1000Con0700	100	70	1.25×10^{-08}	0.13%	3.761×10^{-05}	11.56	12.46
Fe1000Con1000	100	100	4.63×10^{-10}	0.15%	2.155×10^{-06}	11.50	12.43

表 I.3　減速核分裂中性子のエネルギースペクトル（その１）

Energy[MeV]	Fe0000Con0000	Fe0010Con0000	Fe0015Con0000	Fe0020Con0000	Fe0030Con0000	Fe0040Con0000
1.00E-11	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.00E-09	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
3.16E-09	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.00E-08	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.59E-08	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2.53E-08	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
5.03E-08	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.00E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.41E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2.00E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
3.16E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
5.00E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
7.07E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.00E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.41E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2.00E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
3.16E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
5.00E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
7.07E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.00E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.41E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2.00E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
3.16E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
5.00E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
7.07E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.00E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.41E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2.00E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
3.16E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.51E-08
5.00E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.02E-08
7.07E-04	0.00E+00	3.83E-07	2.08E-07	1.31E-07	1.49E-07	7.61E-08
1.00E-03	1.06E-06	7.07E-07	5.11E-07	2.89E-07	1.48E-07	6.17E-08
1.41E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.31E-08
2.00E-03	7.07E-07	7.54E-07	4.11E-07	2.79E-07	3.07E-07	9.56E-08
3.16E-03	7.07E-07	1.51E-06	9.16E-07	5.47E-07	4.05E-07	4.63E-07
5.00E-03	3.54E-06	3.95E-06	2.71E-06	1.74E-06	1.35E-06	9.02E-07
7.07E-03	2.48E-06	5.94E-06	4.62E-06	3.61E-06	3.00E-06	2.72E-06
1.00E-02	7.43E-06	9.07E-06	6.06E-06	3.55E-06	1.28E-06	1.36E-06
1.41E-02	7.43E-06	1.04E-05	7.91E-06	6.41E-06	3.59E-06	2.72E-06
2.00E-02	1.56E-05	1.82E-05	1.15E-05	7.00E-06	4.36E-06	2.72E-06
2.45E-02	1.38E-05	1.77E-05	1.02E-05	7.28E-06	4.39E-06	4.08E-06
3.00E-02	1.84E-05	3.26E-05	1.98E-05	1.42E-05	8.56E-06	7.35E-06
3.87E-02	3.40E-05	3.84E-05	2.09E-05	1.44E-05	7.79E-06	4.27E-06
5.00E-02	4.63E-05	5.99E-05	3.62E-05	2.81E-05	1.57E-05	9.92E-06
5.92E-02	4.88E-05	5.59E-05	3.60E-05	2.19E-05	1.19E-05	7.97E-06
7.00E-02	5.55E-05	6.81E-05	4.17E-05	3.00E-05	2.00E-05	1.25E-05
8.37E-02	9.02E-05	1.25E-04	7.66E-05	5.65E-05	3.50E-05	2.34E-05
1.00E-01	1.04E-04	1.08E-04	6.63E-05	4.15E-05	2.39E-05	1.39E-05
1.23E-01	1.63E-04	1.91E-04	1.21E-04	8.07E-05	4.57E-05	3.23E-05
1.50E-01	2.21E-04	2.93E-04	1.79E-04	1.20E-04	7.03E-05	4.73E-05
1.73E-01	1.97E-04	2.22E-04	1.38E-04	9.15E-05	5.51E-05	3.64E-05
2.00E-01	2.49E-04	3.13E-04	1.92E-04	1.32E-04	7.86E-05	5.57E-05
2.45E-01	4.37E-04	5.19E-04	3.23E-04	2.17E-04	1.25E-04	8.03E-05
3.00E-01	5.75E-04	6.46E-04	3.93E-04	2.62E-04	1.47E-04	1.01E-04
3.87E-01	9.79E-04	1.25E-03	7.72E-04	5.36E-04	3.32E-04	2.30E-04
5.00E-01	1.34E-03	1.58E-03	9.26E-04	6.22E-04	3.43E-04	2.23E-04
5.92E-01	1.08E-03	1.24E-03	7.37E-04	5.03E-04	2.81E-04	1.84E-04
7.00E-01	1.33E-03	1.63E-03	1.02E-03	6.98E-04	4.15E-04	2.93E-04
7.94E-01	1.13E-03	1.37E-03	8.12E-04	5.49E-04	3.06E-04	2.06E-04
9.00E-01	1.30E-03	1.49E-03	8.81E-04	5.91E-04	3.21E-04	2.10E-04
9.49E-01	5.92E-04	6.79E-04	4.10E-04	2.65E-04	1.49E-04	9.64E-05
1.00E+00	6.30E-04	7.17E-04	4.25E-04	2.83E-04	1.64E-04	1.01E-04
1.10E+00	1.12E-03	1.26E-03	7.24E-04	4.84E-04	2.61E-04	1.66E-04
1.20E+00	1.23E-03	1.41E-03	8.28E-04	5.59E-04	3.08E-04	1.99E-04
1.55E+00	3.79E-03	4.11E-03	2.36E-03	1.53E-03	8.10E-04	4.93E-04
2.00E+00	4.20E-03	4.34E-03	2.47E-03	1.58E-03	8.14E-04	4.85E-04
2.45E+00	3.39E-03	3.48E-03	1.94E-03	1.22E-03	6.06E-04	3.56E-04
3.00E+00	3.21E-03	3.16E-03	1.75E-03	1.09E-03	5.28E-04	3.00E-04
3.46E+00	2.02E-03	1.92E-03	1.04E-03	6.40E-04	3.01E-04	1.63E-04
4.00E+00	1.75E-03	1.64E-03	8.80E-04	5.34E-04	2.49E-04	1.34E-04
4.47E+00	1.08E-03	9.91E-04	5.30E-04	3.21E-04	1.46E-04	7.92E-05
5.00E+00	8.96E-04	8.23E-04	4.35E-04	2.64E-04	1.19E-04	6.39E-05
5.48E+00	5.74E-04	5.09E-04	2.71E-04	1.64E-04	7.40E-05	3.97E-05
6.00E+00	4.55E-04	4.06E-04	2.12E-04	1.27E-04	5.97E-05	3.15E-05
6.48E+00	2.92E-04	2.66E-04	1.38E-04	8.29E-05	3.73E-05	2.00E-05
7.00E+00	2.20E-04	2.04E-04	1.14E-04	6.60E-05	3.08E-05	1.55E-05
7.48E+00	1.41E-04	1.23E-04	6.50E-05	3.91E-05	1.73E-05	9.17E-06
8.00E+00	1.06E-04	9.62E-05	5.11E-05	3.03E-05	1.41E-05	7.47E-06
8.49E+00	6.37E-05	5.44E-05	2.94E-05	1.79E-05	7.88E-06	4.85E-06
9.00E+00	5.31E-05	4.93E-05	2.65E-05	1.65E-05	7.82E-06	3.96E-06
9.49E+00	2.90E-05	2.62E-05	1.40E-05	7.93E-06	3.67E-06	1.83E-06
1.00E+01	1.41E-05	1.41E-05	7.32E-06	4.17E-06	1.99E-06	1.18E-06
1.10E+01	2.69E-05	2.54E-05	1.35E-05	8.20E-06	3.65E-06	1.93E-06
1.20E+01	1.03E-05	8.47E-06	3.98E-06	2.56E-06	1.11E-06	5.97E-07
1.30E+01	7.07E-06	6.66E-06	3.11E-06	1.85E-06	7.43E-07	5.25E-07
1.40E+01	2.48E-06	2.46E-06	1.38E-06	8.84E-07	3.86E-07	2.89E-07
1.45E+01	7.07E-07	3.54E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.50E+01	7.07E-07	7.07E-07	3.98E-07	2.55E-07	1.30E-07	7.85E-08
1.55E+01	7.07E-07	7.07E-07	3.98E-07	2.52E-07	1.27E-07	5.70E-08
1.60E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

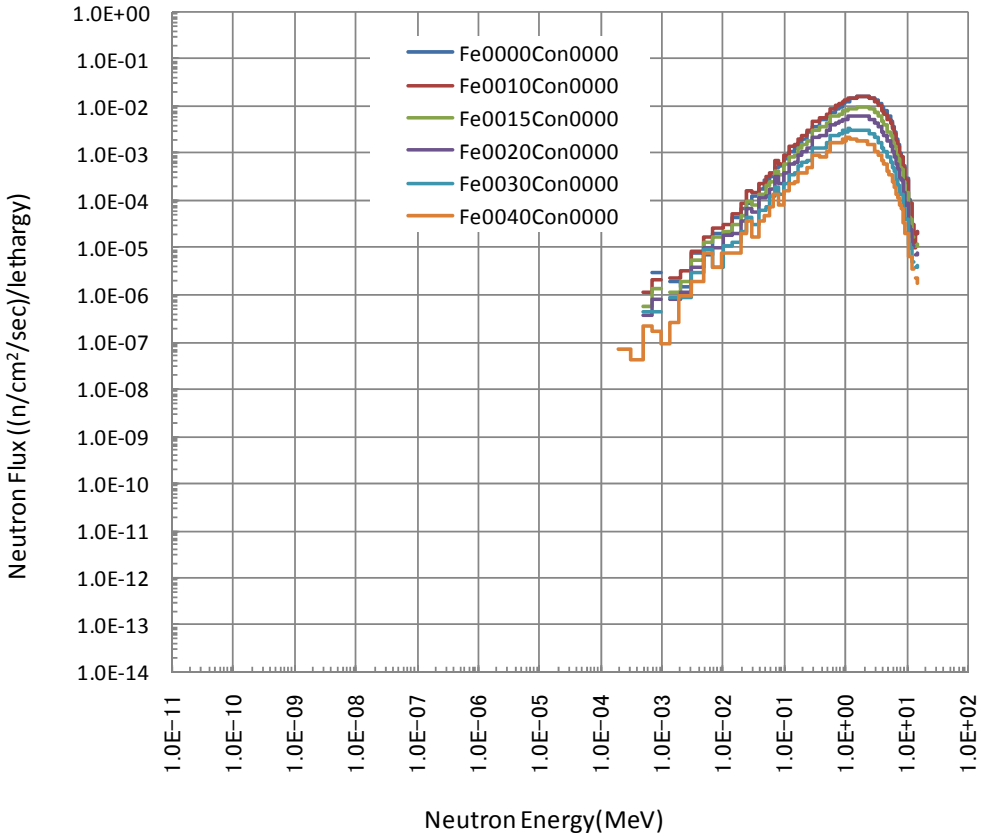


図 I.2　減速核分裂中性子のエネルギースペクトル（その１）

表 I.4　減速核分裂中性子のエネルギースペクトル（その２）

Energy[MeV]	Fe0050Con0000	Fe0070Con0000	Fe0100Con0000	Fe0150Con0000	Fe0200Con0000	Fe0300Con0000
1.00E-11	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.00E-09	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
3.16E-09	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.00E-08	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.59E-08	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2.53E-08	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
5.03E-08	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.56E-12	2.16E-12
1.00E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.76E-11	1.29E-11	4.57E-11
1.41E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.24E-11	8.69E-11
2.00E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.72E-11	6.85E-11	1.79E-10
3.16E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.19E-10	3.47E-10	5.81E-10
5.00E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.93E-10	7.47E-10	1.49E-09
7.07E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.25E-10	1.30E-09	2.20E-09
1.00E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.63E-10	1.97E-09	3.51E-09
1.41E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.15E-10	2.96E-09	4.88E-09
2.00E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	9.07E-10	4.13E-09	7.05E-09
3.16E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.15E-09	8.26E-09	1.30E-08
5.00E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.77E-09	1.17E-08	1.76E-08
7.07E-06	0.00E+00	0.00E+00	1.07E-09	3.72E-09	1.12E-08	1.66E-08
1.00E-05	0.00E+00	0.00E+00	4.32E-10	5.36E-09	1.46E-08	1.99E-08
1.41E-05	0.00E+00	0.00E+00	3.16E-09	7.16E-09	1.76E-08	2.28E-08
2.00E-05	0.00E+00	0.00E+00	1.16E-09	9.44E-09	2.14E-08	2.57E-08
3.16E-05	0.00E+00	0.00E+00	2.59E-09	1.63E-08	3.29E-08	3.90E-08
5.00E-05	0.00E+00	0.00E+00	3.69E-09	2.17E-08	3.93E-08	4.39E-08
7.07E-05	0.00E+00	6.39E-09	2.83E-09	2.28E-08	3.53E-08	3.67E-08
1.00E-04	0.00E+00	3.57E-09	1.07E-08	2.46E-08	4.04E-08	4.05E-08
1.41E-04	0.00E+00	1.82E-09	1.76E-08	3.12E-08	4.61E-08	4.39E-08
2.00E-04	0.00E+00	5.79E-09	1.01E-08	3.45E-08	5.28E-08	4.88E-08
3.16E-04	6.15E-08	6.01E-09	2.58E-08	5.40E-08	8.44E-08	6.95E-08
5.00E-04	1.00E-08	2.17E-08	3.15E-08	8.11E-08	1.06E-07	8.21E-08
7.07E-04	6.22E-08	4.75E-08	4.12E-08	8.64E-08	9.66E-08	7.27E-08
1.00E-03	3.47E-08	2.40E-08	7.01E-08	1.16E-07	1.16E-07	8.49E-08
1.41E-03	4.62E-08	4.54E-08	1.13E-07	1.64E-07	1.58E-07	1.08E-07
2.00E-03	1.98E-07	1.18E-07	2.45E-07	2.54E-07	2.12E-07	1.41E-07
3.16E-03	4.22E-07	4.71E-07	5.37E-07	5.03E-07	3.93E-07	2.50E-07
5.00E-03	1.16E-06	1.49E-06	1.06E-06	6.92E-07	4.91E-07	3.00E-07
7.07E-03	1.99E-06	1.41E-06	8.01E-07	4.47E-07	3.01E-07	1.86E-07
1.00E-02	1.04E-06	5.46E-07	3.83E-07	2.11E-07	1.43E-07	9.78E-08
1.41E-02	2.09E-06	1.32E-06	8.30E-07	4.73E-07	3.19E-07	2.35E-07
2.00E-02	2.16E-06	1.36E-06	9.24E-07	5.82E-07	4.89E-07	5.25E-07
2.45E-02	2.84E-06	2.37E-06	2.12E-06	2.26E-06	2.50E-06	2.84E-06
3.00E-02	5.45E-06	4.59E-06	3.70E-06	3.10E-06	2.83E-06	2.39E-06
3.87E-02	3.39E-06	2.11E-06	1.28E-06	7.16E-07	5.24E-07	3.20E-07
5.00E-02	7.59E-06	5.14E-06	3.00E-06	1.89E-06	1.39E-06	8.69E-07
5.92E-02	6.57E-06	4.06E-06	2.29E-06	1.54E-06	1.17E-06	7.35E-07
7.00E-02	1.05E-05	6.78E-06	5.12E-06	3.54E-06	2.70E-06	1.72E-06
8.37E-02	1.86E-05	1.24E-05	8.59E-06	6.30E-06	4.82E-06	3.29E-06
1.00E-01	1.00E-05	5.99E-06	3.37E-06	2.01E-06	1.34E-06	7.68E-07
1.23E-01	2.35E-05	1.55E-05	1.04E-05	6.67E-06	4.78E-06	2.93E-06
1.50E-01	3.67E-05	2.46E-05	1.68E-05	1.16E-05	8.91E-06	5.98E-06
1.73E-01	2.78E-05	1.85E-05	1.28E-05	8.46E-06	6.22E-06	3.74E-06
2.00E-01	4.03E-05	2.61E-05	1.70E-05	1.07E-05	7.37E-06	4.21E-06
2.45E-01	6.00E-05	3.88E-05	2.45E-05	1.44E-05	9.75E-06	5.48E-06
3.00E-01	7.36E-05	4.84E-05	3.18E-05	2.08E-05	1.53E-05	9.45E-06
3.87E-01	1.77E-04	1.21E-04	8.14E-05	5.23E-05	3.75E-05	2.12E-05
5.00E-01	1.59E-04	9.51E-05	5.44E-05	2.83E-05	1.73E-05	7.68E-06
5.92E-01	1.32E-04	8.14E-05	4.94E-05	2.79E-05	1.77E-05	7.82E-06
7.00E-01	2.17E-04	1.47E-04	9.52E-05	5.54E-05	3.45E-05	1.46E-05
7.94E-01	1.47E-04	8.88E-05	4.92E-05	2.29E-05	1.20E-05	3.71E-06
9.00E-01	1.51E-04	8.74E-05	4.81E-05	2.19E-05	1.11E-05	3.27E-06
9.49E-01	6.98E-05	4.03E-05	2.25E-05	1.04E-05	5.27E-06	1.54E-06
1.00E+00	7.23E-05	4.19E-05	2.31E-05	1.01E-05	5.04E-06	1.40E-06
1.10E+00	1.15E-04	6.29E-05	3.24E-05	1.30E-05	5.92E-06	1.41E-06
1.20E+00	1.40E-04	7.92E-05	4.15E-05	1.69E-05	7.69E-06	1.84E-06
1.55E+00	3.35E-04	1.77E-04	8.24E-05	2.89E-05	1.14E-05	2.07E-06
2.00E+00	3.16E-04	1.58E-04	6.79E-05	2.15E-05	7.64E-06	1.14E-06
2.45E+00	2.26E-04	1.08E-04	4.34E-05	1.22E-05	3.94E-06	4.86E-07
3.00E+00	1.84E-04	8.30E-05	3.12E-05	7.81E-06	2.30E-06	2.35E-07
3.46E+00	9.95E-05	4.30E-05	1.54E-05	3.58E-06	9.90E-07	9.49E-08
4.00E+00	8.17E-05	3.43E-05	1.19E-05	2.75E-06	7.46E-07	6.72E-08
4.47E+00	4.76E-05	2.01E-05	6.87E-06	1.54E-06	4.13E-07	3.73E-08
5.00E+00	3.80E-05	1.59E-05	5.30E-06	1.17E-06	3.27E-07	2.78E-08
5.48E+00	2.38E-05	1.02E-05	3.37E-06	7.47E-07	2.03E-07	1.86E-08
6.00E+00	1.88E-05	7.79E-06	2.56E-06	5.70E-07	1.52E-07	1.38E-08
6.48E+00	1.16E-05	4.74E-06	1.68E-06	3.53E-07	1.02E-07	9.57E-09
7.00E+00	8.95E-06	3.81E-06	1.25E-06	2.89E-07	7.34E-08	7.72E-09
7.48E+00	5.48E-06	2.24E-06	7.66E-07	1.66E-07	4.89E-08	4.65E-09
8.00E+00	4.51E-06	1.79E-06	6.45E-07	1.45E-07	3.93E-08	4.41E-09
8.49E+00	2.69E-06	1.14E-06	3.75E-07	9.16E-08	2.52E-08	2.99E-09
9.00E+00	2.35E-06	9.62E-07	3.32E-07	7.31E-08	2.11E-08	2.46E-09
9.49E+00	9.77E-07	4.16E-07	1.55E-07	3.60E-08	1.02E-08	9.42E-10
1.00E+01	6.94E-07	2.79E-07	9.48E-08	2.12E-08	6.23E-09	9.37E-10
1.10E+01	1.10E-06	4.51E-07	1.51E-07	3.92E-08	1.02E-08	1.01E-09
1.20E+01	3.30E-07	1.53E-07	5.23E-08	1.18E-08	4.55E-09	3.99E-10
1.30E+01	2.79E-07	1.36E-07	3.37E-08	1.02E-08	2.91E-09	2.39E-10
1.40E+01	1.49E-07	5.04E-08	1.44E-08	3.96E-09	1.54E-09	1.47E-10
1.45E+01	1.64E-08	0.00E+00	0.00E+00	1.82E-10	1.22E-10	7.82E-12
1.50E+01	1.97E-08	1.75E-08	5.16E-09	2.19E-09	4.88E-10	2.59E-11
1.55E+01	3.81E-08	2.03E-08	6.13E-09	1.15E-09	2.17E-10	3.62E-11
1.60E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

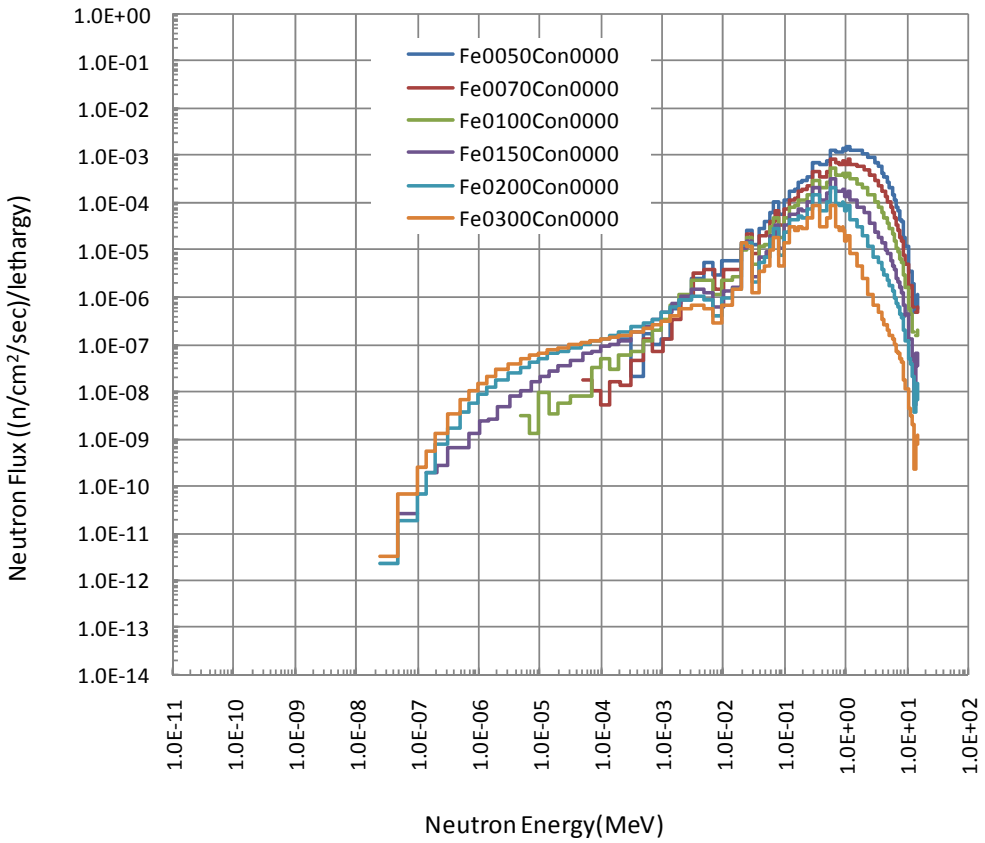


図 I.3　減速核分裂中性子のエネルギースペクトル（その２）

表 I.5　減速核分裂中性子のエネルギースペクトル（その３）

Energy[MeV]	Fe0400Con0000	Fe0500Con0000	Fe0600Con0000	Fe0700Con0000	Fe0800Con0000	Fe0900Con0000
1.00E-11	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.00E-09	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
3.16E-09	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.00E-08	0.00E+00	0.00E+00	1.49E-13	1.82E-13	1.91E-13	0.00E+00
1.59E-08	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2.53E-08	7.00E-13	2.13E-13	3.58E-13	4.54E-13	1.06E-13	1.24E-13
5.03E-08	6.23E-12	4.43E-12	5.81E-12	3.96E-12	3.71E-12	1.80E-12
1.00E-07	3.90E-11	4.00E-11	3.77E-11	3.51E-11	2.92E-11	2.39E-11
1.41E-07	7.69E-11	7.96E-11	9.47E-11	7.58E-11	5.32E-11	5.18E-11
2.00E-07	2.37E-10	2.10E-10	1.77E-10	1.74E-10	1.34E-10	1.21E-10
3.16E-07	6.98E-10	7.19E-10	6.69E-10	5.68E-10	4.72E-10	3.82E-10
5.00E-07	1.75E-09	1.67E-09	1.52E-09	1.38E-09	1.09E-09	9.08E-10
7.07E-07	2.38E-09	2.35E-09	2.20E-09	1.88E-09	1.54E-09	1.22E-09
1.00E-06	3.74E-09	3.76E-09	3.31E-09	2.92E-09	2.36E-09	1.90E-09
1.41E-06	5.51E-09	5.24E-09	4.88E-09	4.15E-09	3.40E-09	2.77E-09
2.00E-06	7.50E-09	7.15E-09	6.59E-09	5.70E-09	4.75E-09	3.78E-09
3.16E-06	1.37E-08	1.28E-08	1.17E-08	1.00E-08	8.35E-09	6.66E-09
5.00E-06	1.81E-08	1.71E-08	1.56E-08	1.33E-08	1.10E-08	8.70E-09
7.07E-06	1.71E-08	1.60E-08	1.44E-08	1.22E-08	1.01E-08	8.06E-09
1.00E-05	2.00E-08	1.85E-08	1.67E-08	1.40E-08	1.16E-08	9.21E-09
1.41E-05	2.24E-08	2.10E-08	1.89E-08	1.60E-08	1.33E-08	1.03E-08
2.00E-05	2.55E-08	2.31E-08	2.08E-08	1.78E-08	1.46E-08	1.15E-08
3.16E-05	3.70E-08	3.47E-08	3.09E-08	2.62E-08	2.15E-08	1.70E-08
5.00E-05	4.15E-08	3.87E-08	3.44E-08	2.91E-08	2.40E-08	1.89E-08
7.07E-05	3.44E-08	3.19E-08	2.83E-08	2.39E-08	1.95E-08	1.54E-08
1.00E-04	3.76E-08	3.46E-08	3.04E-08	2.56E-08	2.11E-08	1.64E-08
1.41E-04	4.02E-08	3.66E-08	3.24E-08	2.74E-08	2.25E-08	1.76E-08
2.00E-04	4.34E-08	3.98E-08	3.48E-08	2.92E-08	2.41E-08	1.89E-08
3.16E-04	6.34E-08	5.77E-08	5.09E-08	4.25E-08	3.48E-08	2.73E-08
5.00E-04	7.25E-08	6.58E-08	5.74E-08	4.82E-08	3.91E-08	3.08E-08
7.07E-04	6.29E-08	5.74E-08	5.00E-08	4.20E-08	3.39E-08	2.65E-08
1.00E-03	7.20E-08	6.63E-08	5.74E-08	4.78E-08	3.87E-08	3.05E-08
1.41E-03	9.17E-08	8.36E-08	7.23E-08	6.05E-08	4.89E-08	3.82E-08
2.00E-03	1.20E-07	1.10E-07	9.41E-08	7.80E-08	6.33E-08	4.96E-08
3.16E-03	2.11E-07	1.91E-07	1.64E-07	1.36E-07	1.09E-07	8.50E-08
5.00E-03	2.58E-07	2.30E-07	1.97E-07	1.63E-07	1.29E-07	1.01E-07
7.07E-03	1.59E-07	1.42E-07	1.22E-07	1.00E-07	7.94E-08	6.12E-08
1.00E-02	8.59E-08	7.68E-08	6.58E-08	5.38E-08	4.28E-08	3.31E-08
1.41E-02	2.28E-07	2.16E-07	1.92E-07	1.60E-07	1.29E-07	1.01E-07
2.00E-02	5.69E-07	5.60E-07	4.99E-07	4.18E-07	3.36E-07	2.63E-07
2.45E-02	2.86E-06	2.67E-06	2.30E-06	1.89E-06	1.50E-06	1.16E-06
3.00E-02	2.02E-06	1.66E-06	1.31E-06	1.01E-06	7.57E-07	5.61E-07
3.87E-02	2.16E-07	1.53E-07	1.08E-07	7.70E-08	5.40E-08	3.76E-08
5.00E-02	5.92E-07	4.20E-07	2.98E-07	2.11E-07	1.49E-07	1.04E-07
5.92E-02	5.04E-07	3.58E-07	2.53E-07	1.79E-07	1.27E-07	8.83E-08
7.00E-02	1.19E-06	8.50E-07	6.06E-07	4.29E-07	3.01E-07	2.10E-07
8.37E-02	2.45E-06	1.83E-06	1.34E-06	9.79E-07	7.03E-07	5.01E-07
1.00E-01	4.99E-07	3.38E-07	2.31E-07	1.57E-07	1.08E-07	7.33E-08
1.23E-01	1.94E-06	1.34E-06	9.20E-07	6.32E-07	4.31E-07	2.91E-07
1.50E-01	4.21E-06	3.02E-06	2.13E-06	1.51E-06	1.04E-06	7.20E-07
1.73E-01	2.44E-06	1.64E-06	1.10E-06	7.40E-07	4.93E-07	3.29E-07
2.00E-01	2.63E-06	1.73E-06	1.13E-06	7.42E-07	4.84E-07	3.15E-07
2.45E-01	3.42E-06	2.23E-06	1.45E-06	9.49E-07	6.16E-07	4.02E-07
3.00E-01	6.07E-06	3.91E-06	2.51E-06	1.61E-06	1.03E-06	6.54E-07
3.87E-01	1.26E-05	7.54E-06	4.55E-06	2.78E-06	1.70E-06	1.06E-06
5.00E-01	3.73E-06	1.84E-06	9.32E-07	4.80E-07	2.51E-07	1.33E-07
5.92E-01	3.55E-06	1.63E-06	7.54E-07	3.55E-07	1.70E-07	8.28E-08
7.00E-01	6.35E-06	2.85E-06	1.31E-06	6.28E-07	3.08E-07	1.55E-07
7.94E-01	1.29E-06	4.66E-07	1.80E-07	7.28E-08	3.04E-08	1.29E-08
9.00E-01	1.04E-06	3.43E-07	1.19E-07	4.26E-08	1.57E-08	6.12E-09
9.49E-01	4.94E-07	1.68E-07	5.92E-08	2.22E-08	8.70E-09	3.53E-09
1.00E+00	4.31E-07	1.46E-07	5.21E-08	2.00E-08	8.04E-09	3.47E-09
1.10E+00	3.72E-07	1.07E-07	3.22E-08	1.02E-08	3.27E-09	1.17E-09
1.20E+00	4.85E-07	1.38E-07	4.18E-08	1.41E-08	4.66E-09	1.82E-09
1.55E+00	4.30E-07	9.55E-08	2.35E-08	6.25E-09	1.79E-09	5.63E-10
2.00E+00	1.96E-07	3.47E-08	6.57E-09	1.24E-09	2.81E-10	6.37E-11
2.45E+00	6.73E-08	9.39E-09	1.43E-09	1.99E-10	3.32E-11	3.93E-12
3.00E+00	2.89E-08	3.36E-09	4.30E-10	5.38E-11	7.34E-12	7.57E-13
3.46E+00	1.04E-08	1.25E-09	1.22E-10	1.68E-11	7.99E-13	7.08E-13
4.00E+00	7.23E-09	8.35E-10	1.06E-10	1.67E-11	5.11E-13	2.10E-13
4.47E+00	3.99E-09	4.38E-10	3.80E-11	1.76E-12	2.31E-13	4.64E-13
5.00E+00	2.93E-09	3.18E-10	4.06E-11	2.56E-12	1.66E-13	0.00E+00
5.48E+00	1.99E-09	2.17E-10	3.13E-11	5.42E-12	2.16E-13	0.00E+00
6.00E+00	1.60E-09	1.75E-10	2.82E-11	4.81E-13	3.18E-13	0.00E+00
6.48E+00	1.13E-09	1.18E-10	2.22E-11	2.84E-12	3.65E-13	0.00E+00
7.00E+00	8.29E-10	1.26E-10	1.24E-11	3.24E-12	0.00E+00	0.00E+00
7.48E+00	5.30E-10	8.66E-11	1.32E-11	2.04E-12	1.27E-13	0.00E+00
8.00E+00	4.56E-10	7.23E-11	7.32E-12	1.28E-12	0.00E+00	0.00E+00
8.49E+00	4.08E-10	6.28E-11	7.38E-12	1.55E-12	6.37E-13	0.00E+00
9.00E+00	2.51E-10	3.71E-11	3.31E-13	1.02E-12	0.00E+00	2.60E-13
9.49E+00	1.32E-10	1.56E-11	7.77E-12	5.64E-13	0.00E+00	0.00E+00
1.00E+01	1.59E-10	1.37E-11	3.82E-12	0.00E+00	6.00E-13	0.00E+00
1.10E+01	1.03E-10	1.90E-11	7.12E-12	0.00E+00	3.32E-13	0.00E+00
1.20E+01	8.21E-11	1.09E-11	1.94E-12	0.00E+00	0.00E+00	8.46E-14
1.30E+01	4.69E-11	1.22E-11	6.27E-13	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.40E+01	2.08E-11	7.59E-12	1.71E-12	2.31E-13	0.00E+00	0.00E+00
1.45E+01	3.73E-12	4.26E-13	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.50E+01	9.93E-12	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.55E+01	7.04E-12	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.60E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

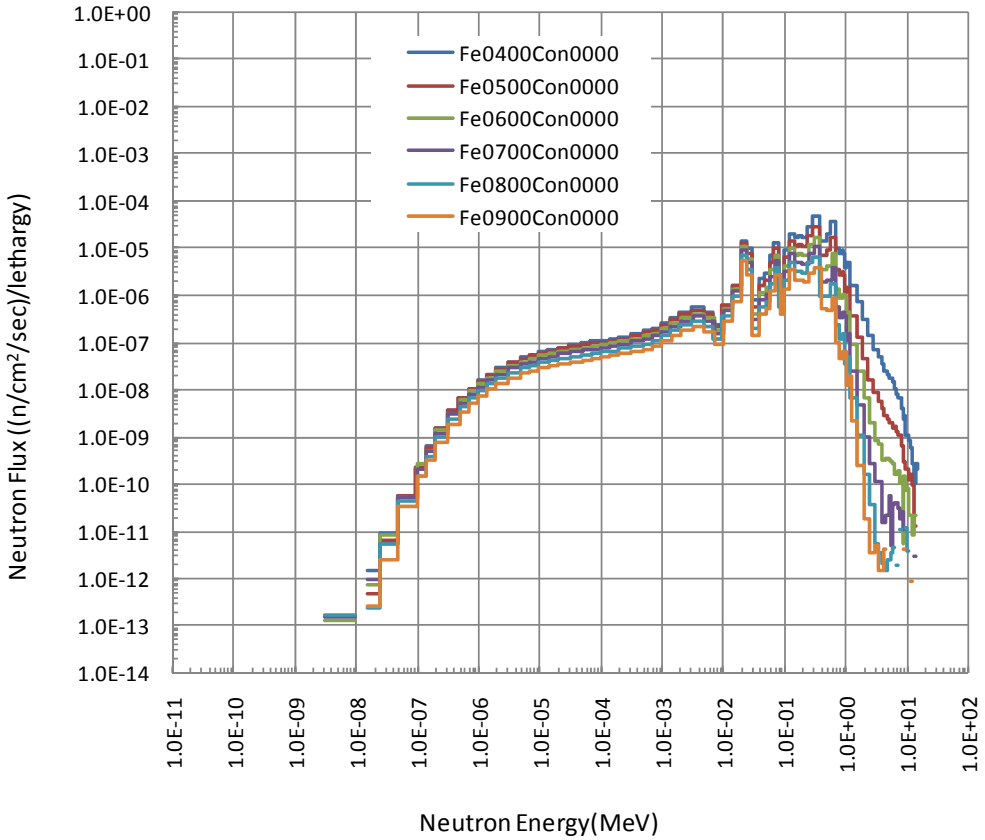


図 I.4　減速核分裂中性子のエネルギースペクトル（その３）

表 I.6　減速核分裂中性子のエネルギースペクトル（その４）

Energy[MeV]	Fe1000Con0000	Fe1000Con0010	Fe1000Con0015	Fe1000Con0020	Fe1000Con0030	Fe1000Con0040
1.00E-11	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.00E-09	0.00E+00	3.32E-14	4.14E-13	4.08E-13	2.27E-12	4.84E-12
3.16E-09	0.00E+00	1.71E-12	3.78E-12	7.84E-12	2.73E-11	7.27E-11
1.00E-08	0.00E+00	1.80E-11	4.33E-11	8.13E-11	2.48E-10	6.66E-10
1.59E-08	7.79E-14	3.24E-11	5.93E-11	1.33E-10	4.16E-10	1.07E-09
2.53E-08	8.16E-14	6.07E-11	1.37E-10	2.72E-10	8.65E-10	2.17E-09
5.03E-08	1.89E-12	2.16E-10	4.40E-10	8.90E-10	2.67E-09	6.72E-09
1.00E-07	1.86E-11	4.94E-10	9.98E-10	1.84E-09	5.25E-09	1.20E-08
1.41E-07	3.21E-11	4.45E-10	7.78E-10	1.41E-09	3.50E-09	7.38E-09
2.00E-07	9.24E-11	6.06E-10	1.06E-09	1.75E-09	4.08E-09	8.10E-09
3.16E-07	3.04E-10	1.27E-09	1.99E-09	3.07E-09	6.68E-09	1.23E-08
5.00E-07	6.87E-10	1.86E-09	2.81E-09	4.06E-09	8.23E-09	1.43E-08
7.07E-07	9.67E-10	2.07E-09	2.89E-09	4.06E-09	7.59E-09	1.27E-08
1.00E-06	1.46E-09	2.72E-09	3.67E-09	4.97E-09	8.82E-09	1.44E-08
1.41E-06	2.13E-09	3.52E-09	4.60E-09	6.03E-09	1.03E-08	1.62E-08
2.00E-06	2.89E-09	4.46E-09	5.58E-09	7.17E-09	1.18E-08	1.81E-08
3.16E-06	5.16E-09	7.41E-09	9.17E-09	1.15E-08	1.82E-08	2.72E-08
5.00E-06	6.77E-09	9.24E-09	1.12E-08	1.39E-08	2.12E-08	3.09E-08
7.07E-06	6.15E-09	8.23E-09	9.87E-09	1.21E-08	1.82E-08	2.60E-08
1.00E-05	7.15E-09	9.37E-09	1.12E-08	1.39E-08	2.05E-08	2.87E-08
1.41E-05	8.05E-09	1.05E-08	1.26E-08	1.54E-08	2.27E-08	3.14E-08
2.00E-05	8.95E-09	1.17E-08	1.40E-08	1.71E-08	2.53E-08	3.43E-08
3.16E-05	1.31E-08	1.74E-08	2.08E-08	2.55E-08	3.73E-08	5.04E-08
5.00E-05	1.44E-08	1.96E-08	2.38E-08	2.93E-08	4.25E-08	5.67E-08
7.07E-05	1.20E-08	1.66E-08	2.02E-08	2.50E-08	3.60E-08	4.72E-08
1.00E-04	1.25E-08	1.82E-08	2.26E-08	2.78E-08	3.96E-08	5.15E-08
1.41E-04	1.34E-08	2.02E-08	2.49E-08	3.11E-08	4.39E-08	5.62E-08
2.00E-04	1.44E-08	2.24E-08	2.81E-08	3.47E-08	4.84E-08	6.14E-08
3.16E-04	2.08E-08	3.37E-08	4.25E-08	5.24E-08	7.21E-08	9.00E-08
5.00E-04	2.36E-08	4.01E-08	5.03E-08	6.18E-08	8.34E-08	1.02E-07
7.07E-04	2.03E-08	3.58E-08	4.45E-08	5.42E-08	7.16E-08	8.57E-08
1.00E-03	2.33E-08	4.17E-08	5.17E-08	6.22E-08	8.04E-08	9.42E-08
1.41E-03	2.91E-08	5.09E-08	6.22E-08	7.34E-08	9.19E-08	1.05E-07
2.00E-03	3.77E-08	6.39E-08	7.66E-08	8.88E-08	1.08E-07	1.20E-07
3.16E-03	6.46E-08	9.67E-08	1.11E-07	1.23E-07	1.41E-07	1.51E-07
5.00E-03	7.68E-08	1.20E-07	1.38E-07	1.54E-07	1.75E-07	1.84E-07
7.07E-03	4.64E-08	9.58E-08	1.14E-07	1.29E-07	1.48E-07	1.57E-07
1.00E-02	2.48E-08	9.51E-08	1.19E-07	1.37E-07	1.60E-07	1.69E-07
1.41E-02	7.69E-08	1.60E-07	1.84E-07	2.01E-07	2.15E-07	2.15E-07
2.00E-02	2.00E-07	3.11E-07	3.25E-07	3.31E-07	3.17E-07	2.92E-07
2.45E-02	8.76E-07	6.88E-07	6.05E-07	5.37E-07	4.20E-07	3.31E-07
3.00E-02	4.08E-07	2.94E-07	2.56E-07	2.28E-07	1.82E-07	1.51E-07
3.87E-02	2.60E-08	6.44E-08	7.72E-08	8.72E-08	9.93E-08	1.03E-07
5.00E-02	7.17E-08	1.12E-07	1.24E-07	1.33E-07	1.39E-07	1.39E-07
5.92E-02	6.09E-08	8.98E-08	9.68E-08	1.01E-07	1.02E-07	9.78E-08
7.00E-02	1.46E-07	1.57E-07	1.56E-07	1.54E-07	1.43E-07	1.30E-07
8.37E-02	3.52E-07	3.09E-07	2.86E-07	2.65E-07	2.25E-07	1.91E-07
1.00E-01	4.94E-08	9.21E-08	1.02E-07	1.10E-07	1.13E-07	1.10E-07
1.23E-01	1.97E-07	2.32E-07	2.33E-07	2.31E-07	2.15E-07	1.94E-07
1.50E-01	4.94E-07	4.48E-07	4.16E-07	3.85E-07	3.26E-07	2.73E-07
1.73E-01	2.19E-07	2.31E-07	2.22E-07	2.12E-07	1.86E-07	1.59E-07
2.00E-01	2.05E-07	1.80E-07	1.63E-07	1.49E-07	1.21E-07	9.86E-08
2.45E-01	2.64E-07	2.69E-07	2.52E-07	2.35E-07	1.97E-07	1.62E-07
3.00E-01	4.19E-07	3.96E-07	3.61E-07	3.29E-07	2.65E-07	2.13E-07
3.87E-01	6.63E-07	5.00E-07	4.31E-07	3.74E-07	2.82E-07	2.12E-07
5.00E-01	7.21E-08	6.34E-08	5.70E-08	5.12E-08	4.03E-08	3.23E-08
5.92E-01	4.06E-08	4.07E-08	3.85E-08	3.61E-08	3.17E-08	2.75E-08
7.00E-01	7.92E-08	6.56E-08	5.83E-08	5.27E-08	4.28E-08	3.52E-08
7.94E-01	5.66E-09	4.98E-09	4.53E-09	4.13E-09	3.36E-09	2.83E-09
9.00E-01	2.39E-09	2.27E-09	2.08E-09	1.99E-09	1.65E-09	1.40E-09
9.49E-01	1.48E-09	1.26E-09	1.12E-09	1.03E-09	8.09E-10	6.51E-10
1.00E+00	1.49E-09	1.02E-09	8.98E-10	7.56E-10	5.18E-10	3.77E-10
1.10E+00	4.54E-10	3.40E-10	2.84E-10	2.81E-10	1.97E-10	1.70E-10
1.20E+00	6.65E-10	5.88E-10	5.36E-10	5.10E-10	4.23E-10	3.48E-10
1.55E+00	1.83E-10	1.51E-10	1.38E-10	1.28E-10	9.96E-11	8.87E-11
2.00E+00	1.27E-11	9.92E-12	1.14E-11	9.93E-12	6.37E-12	6.13E-12
2.45E+00	9.49E-13	3.79E-13	0.00E+00	1.85E-12	3.13E-13	1.38E-13
3.00E+00	1.22E-13	1.65E-13	9.20E-14	2.91E-13	0.00E+00	0.00E+00
3.46E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.53E-13	1.18E-13	0.00E+00	0.00E+00
4.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.36E-13	1.49E-13	0.00E+00	0.00E+00
4.47E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.45E-14	0.00E+00	0.00E+00
5.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.72E-13	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
5.48E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
6.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
6.48E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.43E-13
7.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
7.48E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
8.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
8.49E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.35E-13	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
9.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
9.49E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.00E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.10E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.20E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.30E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.40E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.45E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.50E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.55E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.60E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

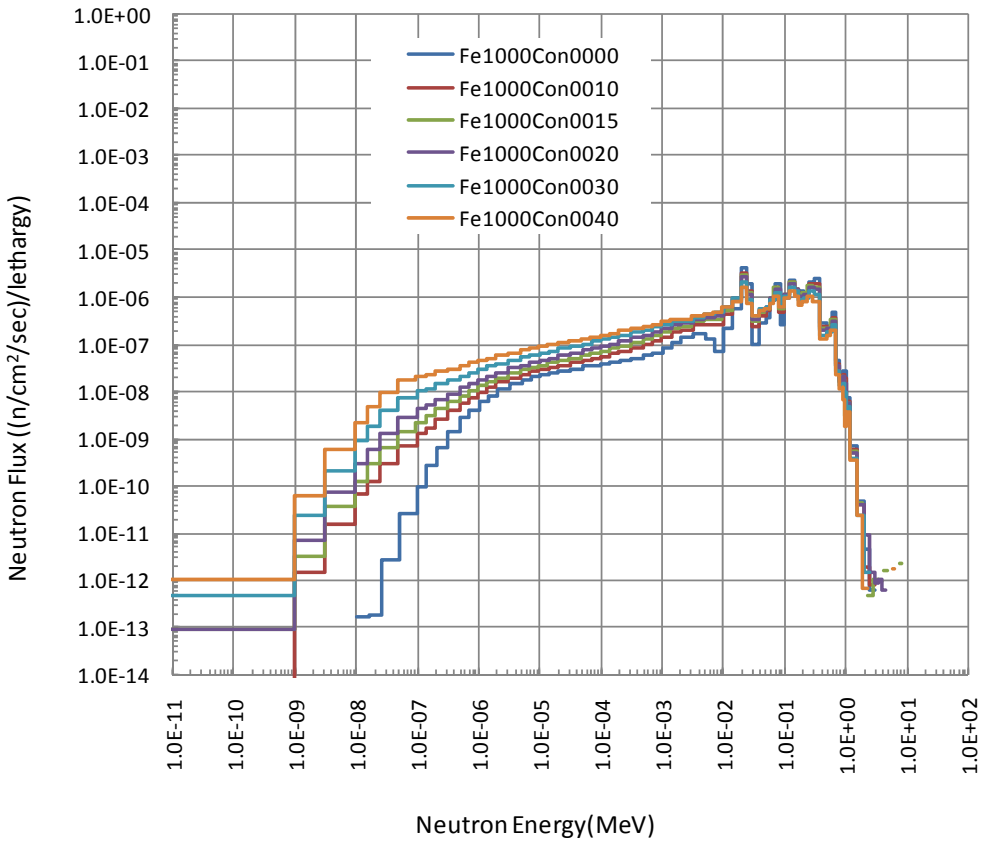


図 I.5　減速核分裂中性子のエネルギースペクトル（その４）

表 I.7　減速核分裂中性子のエネルギースペクトル（その５）

Energy[MeV]	Fe1000Con0050	Fe1000Con0070	Fe1000Con0100	Fe1000Con0150	Fe1000Con0200	Fe1000Con0300
1.00E-11	0.00E+00	0.00E+00	3.52E-14	0.00E+00	3.43E-14	0.00E+00
1.00E-09	1.15E-11	3.50E-11	7.08E-11	1.42E-10	1.56E-10	1.18E-10
3.16E-09	1.53E-10	4.12E-10	9.69E-10	1.73E-09	2.03E-09	1.46E-09
1.00E-08	1.40E-09	3.81E-09	9.19E-09	1.67E-08	1.92E-08	1.41E-08
1.59E-08	2.19E-09	6.08E-09	1.44E-08	2.62E-08	3.00E-08	2.21E-08
2.53E-08	4.52E-09	1.26E-08	2.98E-08	5.41E-08	6.23E-08	4.58E-08
5.03E-08	1.36E-08	3.69E-08	8.58E-08	1.54E-07	1.75E-07	1.28E-07
1.00E-07	2.30E-08	5.70E-08	1.22E-07	2.04E-07	2.24E-07	1.57E-07
1.41E-07	1.32E-08	2.90E-08	5.43E-08	7.91E-08	7.97E-08	5.00E-08
2.00E-07	1.36E-08	2.75E-08	4.62E-08	5.87E-08	5.32E-08	2.85E-08
3.16E-07	1.96E-08	3.64E-08	5.58E-08	6.32E-08	5.24E-08	2.33E-08
5.00E-07	2.20E-08	3.89E-08	5.66E-08	6.08E-08	4.84E-08	2.02E-08
7.07E-07	1.91E-08	3.21E-08	4.50E-08	4.67E-08	3.64E-08	1.46E-08
1.00E-06	2.11E-08	3.41E-08	4.62E-08	4.65E-08	3.56E-08	1.40E-08
1.41E-06	2.30E-08	3.59E-08	4.75E-08	4.66E-08	3.51E-08	1.33E-08
2.00E-06	2.53E-08	3.85E-08	4.94E-08	4.70E-08	3.46E-08	1.28E-08
3.16E-06	3.70E-08	5.47E-08	6.80E-08	6.29E-08	4.53E-08	1.63E-08
5.00E-06	4.11E-08	5.87E-08	7.05E-08	6.30E-08	4.45E-08	1.54E-08
7.07E-06	3.39E-08	4.70E-08	5.50E-08	4.79E-08	3.31E-08	1.10E-08
1.00E-05	3.70E-08	5.02E-08	5.73E-08	4.88E-08	3.32E-08	1.08E-08
1.41E-05	4.02E-08	5.31E-08	5.96E-08	4.96E-08	3.30E-08	1.05E-08
2.00E-05	4.31E-08	5.65E-08	6.16E-08	5.02E-08	3.29E-08	1.01E-08
3.16E-05	6.26E-08	7.97E-08	8.53E-08	6.75E-08	4.35E-08	1.28E-08
5.00E-05	6.92E-08	8.59E-08	8.94E-08	6.91E-08	4.29E-08	1.22E-08
7.07E-05	5.70E-08	6.92E-08	7.04E-08	5.27E-08	3.23E-08	8.85E-09
1.00E-04	6.14E-08	7.33E-08	7.30E-08	5.30E-08	3.20E-08	8.46E-09
1.41E-04	6.62E-08	7.71E-08	7.54E-08	5.35E-08	3.15E-08	8.06E-09
2.00E-04	7.16E-08	8.16E-08	7.78E-08	5.39E-08	3.10E-08	7.71E-09
3.16E-04	1.03E-07	1.15E-07	1.07E-07	7.16E-08	4.02E-08	9.56E-09
5.00E-04	1.14E-07	1.23E-07	1.11E-07	7.17E-08	3.92E-08	8.87E-09
7.07E-04	9.44E-08	9.94E-08	8.66E-08	5.41E-08	2.87E-08	6.25E-09
1.00E-03	1.02E-07	1.05E-07	8.92E-08	5.39E-08	2.79E-08	5.83E-09
1.41E-03	1.12E-07	1.11E-07	9.20E-08	5.38E-08	2.71E-08	5.46E-09
2.00E-03	1.25E-07	1.21E-07	9.67E-08	5.43E-08	2.67E-08	5.15E-09
3.16E-03	1.52E-07	1.40E-07	1.07E-07	5.67E-08	2.67E-08	4.89E-09
5.00E-03	1.84E-07	1.67E-07	1.25E-07	6.50E-08	3.03E-08	5.46E-09
7.07E-03	1.56E-07	1.39E-07	1.02E-07	5.17E-08	2.34E-08	4.07E-09
1.00E-02	1.67E-07	1.47E-07	1.06E-07	5.15E-08	2.28E-08	3.76E-09
1.41E-02	2.03E-07	1.69E-07	1.14E-07	5.23E-08	2.23E-08	3.60E-09
2.00E-02	2.61E-07	1.99E-07	1.23E-07	5.22E-08	2.14E-08	3.33E-09
2.45E-02	2.62E-07	1.66E-07	8.65E-08	3.20E-08	1.23E-08	1.84E-09
3.00E-02	1.27E-07	9.12E-08	5.70E-08	2.54E-08	1.08E-08	1.67E-09
3.87E-02	1.01E-07	8.74E-08	6.13E-08	2.89E-08	1.23E-08	1.84E-09
5.00E-02	1.31E-07	1.08E-07	7.28E-08	3.31E-08	1.37E-08	2.00E-09
5.92E-02	9.02E-08	7.15E-08	4.65E-08	2.00E-08	7.97E-09	1.09E-09
7.00E-02	1.16E-07	8.70E-08	5.41E-08	2.23E-08	8.68E-09	1.18E-09
8.37E-02	1.61E-07	1.13E-07	6.47E-08	2.53E-08	9.54E-09	1.22E-09
1.00E-01	1.02E-07	8.06E-08	5.13E-08	2.13E-08	8.12E-09	1.04E-09
1.23E-01	1.71E-07	1.27E-07	7.55E-08	2.95E-08	1.09E-08	1.32E-09
1.50E-01	2.27E-07	1.54E-07	8.46E-08	2.98E-08	1.02E-08	1.13E-09
1.73E-01	1.33E-07	9.13E-08	4.95E-08	1.66E-08	5.40E-09	5.41E-10
2.00E-01	7.95E-08	5.07E-08	2.56E-08	7.77E-09	2.39E-09	2.11E-10
2.45E-01	1.31E-07	8.41E-08	4.22E-08	1.26E-08	3.84E-09	3.62E-10
3.00E-01	1.68E-07	1.03E-07	4.93E-08	1.41E-08	4.11E-09	3.81E-10
3.87E-01	1.60E-07	9.14E-08	4.05E-08	1.07E-08	3.10E-09	3.00E-10
5.00E-01	2.56E-08	1.63E-08	8.65E-09	3.18E-09	1.26E-09	1.78E-10
5.92E-01	2.36E-08	1.70E-08	1.01E-08	4.02E-09	1.59E-09	2.18E-10
7.00E-01	2.87E-08	1.89E-08	1.01E-08	3.54E-09	1.25E-09	1.44E-10
7.94E-01	2.34E-09	1.60E-09	8.84E-10	3.27E-10	1.17E-10	1.61E-11
9.00E-01	1.12E-09	7.69E-10	4.32E-10	1.39E-10	4.92E-11	5.57E-12
9.49E-01	5.26E-10	3.14E-10	1.44E-10	4.35E-11	1.05E-11	7.65E-13
1.00E+00	2.66E-10	1.37E-10	5.52E-11	1.17E-11	3.66E-12	1.01E-12
1.10E+00	1.35E-10	9.15E-11	4.79E-11	2.00E-11	7.73E-12	9.44E-13
1.20E+00	3.05E-10	2.18E-10	1.27E-10	5.11E-11	2.14E-11	3.89E-12
1.55E+00	7.62E-11	4.78E-11	3.06E-11	1.06E-11	5.13E-12	1.03E-12
2.00E+00	6.61E-12	5.81E-12	3.43E-12	1.36E-12	8.50E-13	7.85E-14
2.45E+00	2.36E-13	8.21E-13	1.87E-13	1.25E-13	3.68E-14	3.30E-14
3.00E+00	0.00E+00	1.18E-13	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
3.46E+00	1.55E-13	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
4.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
4.47E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
5.00E+00	0.00E+00	3.20E-14	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
5.48E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
6.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
6.48E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
7.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
7.48E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
8.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
8.49E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
9.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
9.49E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.00E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.10E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.20E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.30E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.40E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.45E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.50E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.55E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.60E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

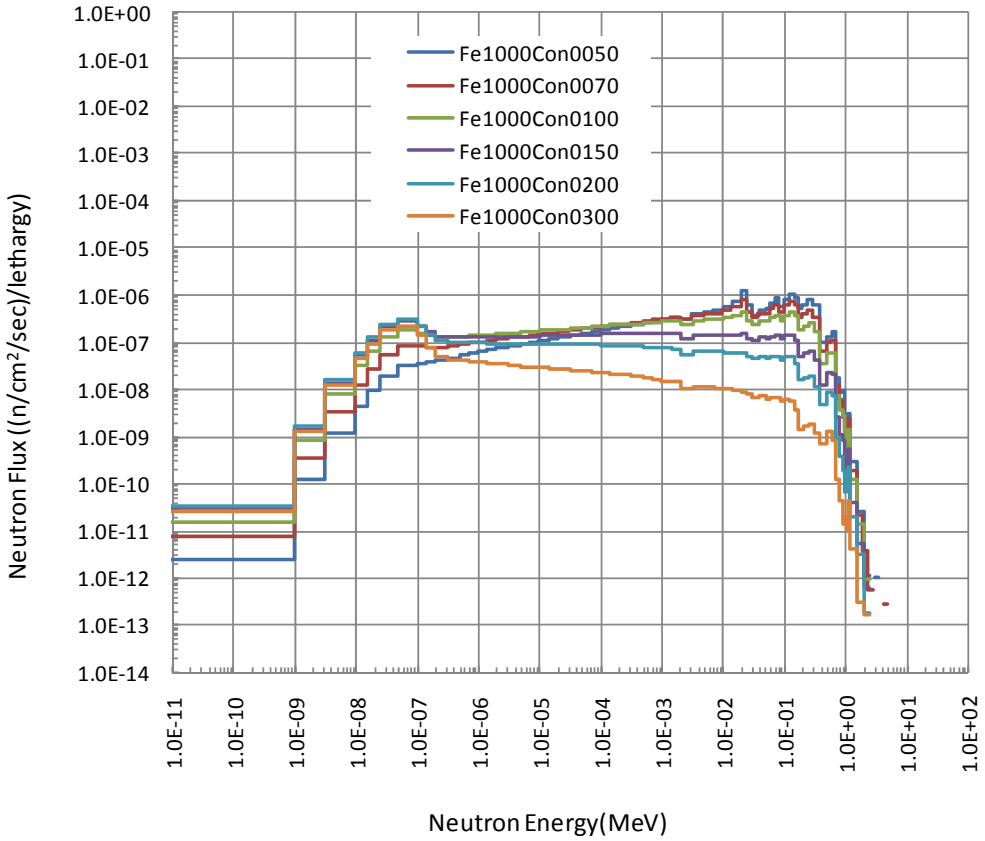


図 I.6　減速核分裂中性子のエネルギースペクトル（その５）

表 I.8　減速核分裂中性子のエネルギースペクトル（その６）

Energy[MeV]	Fe1000Con0400	Fe1000Con0500	Fe1000Con0700	Fe1000Con1000
1.00E-11	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.00E-09	5.96E-11	2.67E-11	3.64E-12	1.57E-13
3.16E-09	7.48E-10	3.14E-10	4.25E-11	1.63E-12
1.00E-08	7.19E-09	3.03E-09	4.11E-10	1.61E-11
1.59E-08	1.13E-08	4.78E-09	6.49E-10	2.52E-11
2.53E-08	2.34E-08	9.88E-09	1.35E-09	5.23E-11
5.03E-08	6.51E-08	2.74E-08	3.72E-09	1.44E-10
1.00E-07	7.77E-08	3.21E-08	4.26E-09	1.64E-10
1.41E-07	2.30E-08	8.98E-09	1.12E-09	4.15E-11
2.00E-07	1.15E-08	3.99E-09	4.15E-10	1.41E-11
3.16E-07	7.63E-09	2.07E-09	1.21E-10	2.20E-12
5.00E-07	6.15E-09	1.51E-09	6.09E-11	2.97E-13
7.07E-07	4.32E-09	1.05E-09	4.10E-11	1.36E-13
1.00E-06	4.02E-09	9.42E-10	3.49E-11	1.38E-13
1.41E-06	3.73E-09	8.68E-10	3.08E-11	1.15E-13
2.00E-06	3.51E-09	7.89E-10	2.81E-11	1.06E-13
3.16E-06	4.35E-09	9.50E-10	3.12E-11	1.00E-13
5.00E-06	3.96E-09	8.45E-10	2.66E-11	8.76E-14
7.07E-06	2.79E-09	5.79E-10	1.69E-11	4.52E-14
1.00E-05	2.66E-09	5.38E-10	1.63E-11	4.82E-14
1.41E-05	2.48E-09	4.90E-10	1.41E-11	3.95E-14
2.00E-05	2.34E-09	4.62E-10	1.25E-11	2.56E-14
3.16E-05	2.92E-09	5.60E-10	1.44E-11	3.45E-14
5.00E-05	2.68E-09	4.97E-10	1.27E-11	3.48E-14
7.07E-05	1.86E-09	3.36E-10	8.43E-12	1.38E-14
1.00E-04	1.76E-09	3.11E-10	7.29E-12	1.92E-14
1.41E-04	1.63E-09	2.80E-10	6.40E-12	1.93E-14
2.00E-04	1.51E-09	2.53E-10	5.75E-12	1.11E-14
3.16E-04	1.82E-09	3.02E-10	6.10E-12	1.55E-14
5.00E-04	1.63E-09	2.57E-10	5.16E-12	8.22E-15
7.07E-04	1.12E-09	1.71E-10	3.49E-12	4.43E-15
1.00E-03	1.01E-09	1.54E-10	2.96E-12	6.58E-15
1.41E-03	9.26E-10	1.36E-10	2.52E-12	2.94E-15
2.00E-03	8.36E-10	1.24E-10	2.15E-12	1.96E-15
3.16E-03	7.64E-10	1.07E-10	1.89E-12	3.85E-15
5.00E-03	8.41E-10	1.21E-10	1.91E-12	1.68E-15
7.07E-03	6.15E-10	8.45E-11	1.40E-12	2.92E-15
1.00E-02	5.61E-10	7.58E-11	1.23E-12	0.00E+00
1.41E-02	5.12E-10	6.79E-11	1.11E-12	5.28E-15
2.00E-02	4.71E-10	5.94E-11	8.69E-13	8.67E-16
2.45E-02	2.51E-10	3.25E-11	5.54E-13	0.00E+00
3.00E-02	2.31E-10	2.86E-11	4.06E-13	1.08E-15
3.87E-02	2.39E-10	3.05E-11	4.04E-13	1.66E-15
5.00E-02	2.55E-10	3.18E-11	3.94E-13	2.39E-15
5.92E-02	1.44E-10	1.67E-11	2.01E-13	1.02E-15
7.00E-02	1.46E-10	1.83E-11	2.75E-13	0.00E+00
8.37E-02	1.44E-10	1.56E-11	2.21E-13	0.00E+00
1.00E-01	1.23E-10	1.37E-11	1.69E-13	7.52E-16
1.23E-01	1.53E-10	1.75E-11	2.79E-13	1.57E-15
1.50E-01	1.23E-10	1.29E-11	2.26E-13	0.00E+00
1.73E-01	5.64E-11	5.60E-12	9.67E-14	1.26E-15
2.00E-01	2.24E-11	2.44E-12	8.62E-14	0.00E+00
2.45E-01	3.67E-11	4.50E-12	6.77E-14	6.66E-16
3.00E-01	3.98E-11	4.74E-12	5.23E-14	0.00E+00
3.87E-01	3.45E-11	4.67E-12	7.23E-14	0.00E+00
5.00E-01	2.64E-11	3.47E-12	6.31E-14	0.00E+00
5.92E-01	2.91E-11	3.70E-12	8.31E-14	0.00E+00
7.00E-01	1.90E-11	2.71E-12	5.04E-14	0.00E+00
7.94E-01	2.52E-12	3.44E-13	1.77E-15	0.00E+00
9.00E-01	9.57E-13	9.70E-14	1.33E-14	0.00E+00
9.49E-01	5.03E-14	1.86E-14	0.00E+00	0.00E+00
1.00E+00	8.91E-14	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.10E+00	1.40E-13	9.09E-15	0.00E+00	0.00E+00
1.20E+00	6.26E-13	7.26E-14	1.83E-15	0.00E+00
1.55E+00	6.28E-14	2.00E-14	1.83E-15	0.00E+00
2.00E+00	8.42E-14	0.00E+00	1.76E-15	0.00E+00
2.45E+00	0.00E+00	3.91E-14	1.83E-15	0.00E+00
3.00E+00	0.00E+00	6.54E-15	0.00E+00	0.00E+00
3.46E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
4.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
4.47E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
5.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
5.48E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
6.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
6.48E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
7.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
7.48E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
8.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
8.49E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
9.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
9.49E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.00E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.10E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.20E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.30E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.40E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.45E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.50E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.55E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.60E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

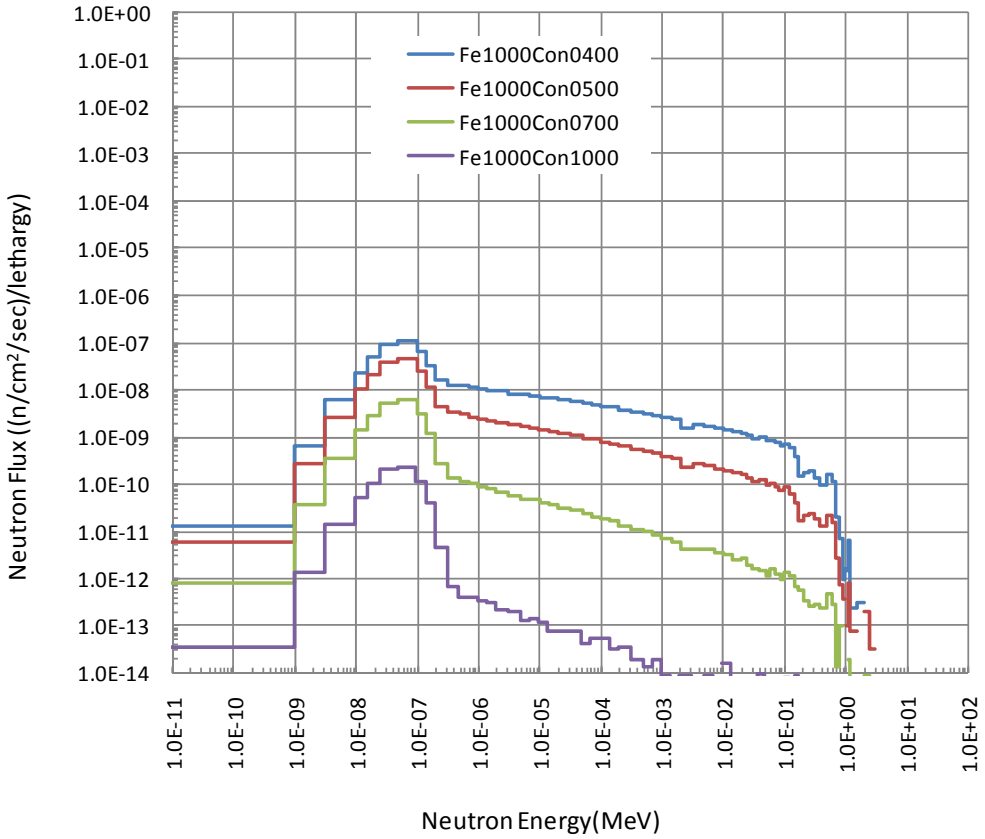


図 I.7　減速核分裂中性子のエネルギースペクトル（その６）

付録 II　核分裂中性子実測事例一覧

混合ガス比例計数管の閉凸空間の評価で使った、中性子スペクトルの実測例は、IAEAが発行した「Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes」[1)]から引用した。同書は、さまざまな中性子場における中性子線量測定法の選択の一助となることを目的としており、多くの中性子測定器の応答関数と、数百の中性子スペクトルの測定データが掲載されている。本研究では、この文献から以下の核分裂中性子を起因とする中性子スペクトルを抜粋して引用した。

・原子炉施設の中性子
・原子炉燃料取り扱い環境での中性子
・その他の核分裂に関連する中性子

「その他の核分裂に関連する中性子」とは、^{252}Cf や Pu 化合物のような自発核分裂に伴う中性子と、加速器中性子などを中性子源として核分裂中性子場を模擬しているものが含まれている。これらは、核燃料取扱環境における測定器の校正においてしばしば使われており、この評価対象に加えておくことは有効である。

本研究で使用したデータを特定するために、以下の表に、引用したデータの文献 [1)]中の表番号を明記しておく。

1. IAEA, “Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes,” TECHNICAL REPORT SERIES No.403, 2001.

表 II.1　原子炉施設の中性子スペクトル一覧

文献内の表番号	識別名
5.VIII	Caorso BWR, position 1
5.VIII	Caorso BWR, position 2
5.VIII	Caorso BWR, position 3
5.VIII	Caorso BWR, position 4
5.X	Dungeness BWR, boiler cell
5.X	Dungeness BWR, on the roof
5.X	Dungeness BWR, on the walkway
5.X	Gosgen BWR, position 1
5.X	Gosgen BWR, position 2
5.XI	Trawsfynydd, filter gallery
5.XI	Hinkley Point, pile cap
5.XI	Hinkley Point, filter gallery
5.XII	Wolf Creek PWR, Power50%, at personal hatch 2047' level
5.XII	Wolf Creek PWR, Power50%, 2m from personal hatch 2047' level
5.XII	Wolf Creek PWR, Power50%, personal hatch 2026'level by valves
5.XII	Wolf Creek PWR, Power100%, at personal hatch 2047' level
5.XII	Wolf Creek PWR, Power100%, 2026' level at loop penetration
5.XIII	Czech PWR, pump room, near cold side
5.XIII	Czech PWR, pump room, between pump and cold side
5.XIII	Czech PWR, pump room, hot side
5.XIII	Czech PWR, pump room, near entrance door
5.XIII	Czech PWR, pump room, between pumps 3 and 4
5.XIV	Czech PWR, vessel test room, under reactor, position 1,
5.XIV	Czech PWR, vessel test room, middle of room
5.XIV	Czech PWR, vessel test room, under reactor position 2
5.XIV	Czech PWR, vessel test room, corridor outside room
5.XV	Czech PWR, reactor hall, above reactor cap
5.XV	Czech PWR, vessel test room, above isolation valve
5.XV	Czech PWR, vessel test room, above steam generator
5.XV	Czech PWR, vessel test room, platform of reactor cap
5.XVI	USA PWR site 5, in containment (SPUINT code)
5.XVI	USA PWR site 6, in containment (SPUINT code)
5.XVI	USA PWR site 4, in containment (SPUINT code)
5.XVI	USA PWR site 4, in containment (YOGI code)
5.XVII	Ringhals, CLAB at point D
5.XVII	Ringhals, CLAB at point E
5.XVII	Ringhals, CLAB at point P
5.XVII	Ringhals, B4 at point L
5.XVII	Ringhals, B2 at point G
5.XVIII	Gas Cooled Reactor, position CH1
5.XVIII	Gas Cooled Reactor, position CH2
5.XVIII	Gas Cooled Reactor, filter gallery, position S3
5.XVIII	Gas Cooled Reactor, filter gallery, position S4

表 II.1　原子炉施設の中性子スペクトル一覧（続き）

文献内の表番号	識別名
5.XIX	Switzerland BWR, maze entrance
5.XIX	Switzerland BWR, first bend of maze
5.XIX	Switzerland BWR, entrance of drywell
5.XIX	Switzerland BWR, under access opening
5.XIX	Switzerland BWR, between drywell and stairwell
5.XX	Switzerland BWR, 16m level, near pump
5.XX	Switzerland BWR, 16m level, near sprinkler tap
5.XX	Switzerland BWR, containment lock, door closed
5.XX	Switzerland BWR, containment lock, door open
5.XXI	Switzerland PWR, Westinghouse, 1m from door into containment
5.XXI	Switzerland PWR, Westinghouse, in containment, 1m from platform
5.XXI	Switzerland PWR, Westinghouse, in containment, 3m from platform
5.XXI	Switzerland PWR, Westinghouse, behind steam generator
5.XXII	Switzerland PWR, Siemens KWU, 18.4m level, reactor axis
5.XXII	Switzerland PWR, Siemens KWU, reactor level, 40cm behind metal door
5.XXII	Switzerland PWR, Siemens KWU, reactor level, 33cm behind metal door

表 II.2　原子炉燃料取り扱い環境での中性子スペクトル一覧

文献内の表番号	識別名
5.XXXIV	Reactor Fuel Treatment, Cask, LK100 container, location 1
5.XXXIV	Reactor Fuel Treatment, Cask, TN12 container
5.XXXIV	Reactor Fuel Treatment, Cask, L K100 container, location 2
5.XXXIV	Reactor Fuel Treatment, Cask, PuF_4 workstation of Valduc
5.XXXV	Reactor Fuel Treatment, Cask, NTL-111 container, at 115cm
5.XXXV	Reactor Fuel Treatment, Cask, NTL-111 container, at 367cm
5.XXXV	Reactor Fuel Treatment, Cask, 1392(1)
5.XXXV	Reactor Fuel Treatment, Cask, 1392(2)
5.XXXVI	Reactor Fuel Treatment, Cask, WWER, storage hall, at 0.45m
5.XXXVI	Reactor Fuel Treatment, Cask, WWER, storage hall, at 2m
5.XXXVI	Reactor Fuel Treatment, Cask, WWER, transport wagon, corridor at 0.45m
5.XXXVI	Reactor Fuel Treatment, Cask, WWER, transport wagon, corridor at 2m
5.XXXVII	Reactor Fuel Treatment, Bare MOX fuel at 20 cm
5.XXXVII	Reactor Fuel Treatment, MOX fuel, in borated water
5.XXXVII	Reactor Fuel Treatment, MOX fuel, at storage place
5.XXXVII	Reactor Fuel Treatment, GSF MOX fuel cask, position 2
5.XXXVII	Reactor Fuel Treatment, GSF MOX fuel cask, position 3
5.XXXVIII	Reactor Fuel Treatment, Hanau fuel storage, Bonner sphere
5.XXXVIII	Reactor Fuel Treatment, Pollux container simulation, above ground
5.XXXVIII	Reactor Fuel Treatment, Pollux container simulation, underground
5.XXXIX	Reactor Fuel Treatment, Pu reprocessing plant, UK, location 1
5.XXXIX	Reactor Fuel Treatment, Pu reprocessing plant, UK, location 2
5.XXXIX	Reactor Fuel Treatment, Pu reprocessing plant, UK, location 3
5.XXXIX	Reactor Fuel Treatment, Pu reprocessing plant, UK, location 4
5.XXXIX	Reactor Fuel Treatment, Pu reprocessing plant, UK, location 5
5.XL	Reactor Fuel Treatment, Pu reprocessing plant, USA, Lightly shielded
5.XL	Reactor Fuel Treatment, Pu reprocessing plant, USA, Heavily shielded
5.XL	Reactor Fuel Treatment, Pu reprocessing plant, USA, Operator desk
5.XL	Reactor Fuel Treatment, Pu reprocessing plant, USA, At conduit exit
5.XL	Reactor Fuel Treatment, Pu reprocessing plant, USA, At glovebox

表 II.3　その他の核分裂に関連する中性子スペクトル一覧

文献内の表番号	識別名
4.VI	Bare Cf spectra, PTB, measured without shadow cone
4.VI	Bare Cf spectra, PTB, measured with shadow cone
4.VI	Bare Cf spectra, PTB, the difference
4.VII	Heavy water moderated Cf spectra, PTB, measured without shadow cone
4.VII	Heavy water moderated Cf spectra, PTB, measured with shadow cone
4.VII	Heavy water moderated Cf spectra, PTB, the difference
4.VIII	Moderated Cf spectra, Tohoku University and JINR, Fe moderated Cf
4.VIII	Moderated Cf spectra, Tohoku University and JINR, C moderated Cf
4.VIII	Moderated Cf spectra, Tohoku University and JINR, PE moderated Cf
4.VIII	Moderated Cf spectra, Tohoku University and JINR, PE moderated Cf, D=29.2cm
4.VIII	Moderated Cf spectra, Tohoku University and JINR, PE moderated Cf, D=12.7cm
4.XI	Pu spectra, PNL, Bare PuO_2, at 100cm
4.XI	Pu spectra, PNL, Bare Pu metal, at 50cm
4.XII	Pu fluoride spectra, PNL, Bare at 50cm
4.XII	Pu fluoride spectra, PNL, 1” acrylic moderated at 50cm
4.XII	Pu fluoride spectra, PNL, 2” acrylic moderated at 50cm
4.XII	Pu fluoride spectra, PNL, Bare at 100cm
4.XIII	Fe and PE moderated Cf spectra, NRI, Cf + 5cm Fe, 10cm PE
4.XIII	Fe and PE moderated Cf spectra, NRI, Cf + 25cm Fe, 10cm PE
4.XIII	Fe and PE moderated Cf spectra, NRI, Cf + 5cm Fe
4.XIII	Fe and PE moderated Cf spectra, NRI, Cf + 25cm Fe
4.XIV	Workplace simulation spectra, Cadarache spectrum 1
4.XIV	Workplace simulation spectra, Cadarache spectrum 2
4.XV	Workplace simulation spectra, GRENF, 30cm D_2O sphere
4.XV	Workplace simulation spectra, GRENF, 10cm Fe slab
4.XV	Workplace simulation spectra, GRENF, 10cm PE slab
4.XV	Workplace simulation spectra, PTB, Li(p,n)Be, 2.5MeV
4.XV	Workplace simulation spectra, PTB, Li(p,n)Be, 3.3MeV
4.XX	Stray neutron simulation fields, Silene reactor, unmoderated spectrum
4.XX	Stray neutron simulation fields, Silene reactor, Pb shield
4.XX	Stray neutron simulation fields, Silene reactor, PE shield
4.XX	Stray neutron simulation fields, Silene reactor, Steel shield
4.XXI	PWR stray neutron simulation fields, Experimental position 1
4.XXI	PWR stray neutron simulation fields, Experimental position 2
4.XXI	PWR stray neutron simulation fields, MOX element container