

本資料は 2007. 6. 6 日付けで登録区分、
変更する。

[技術情報室]

プルトニウム燃料製造施設における中性子エネルギー スペクトルの測定及び線量評価に関する検討

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

と関係者だけに配
下さい。なお、こ
です。

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

プルトニウム燃料製造施設における中性子エネルギー スペクトルの測定及び線量評価に関する検討



実施責任者 大和愛司

報告者 宮部賢次郎, 野村幸広, 小泉勝三
鳥居建男*, 瀧田昭久*

要 旨

東海事業所のプルトニウム燃料製造施設においてはPu同位体から放出される中性子に対する被曝管理が重要であり、TLDバッジによる個人被曝線量の測定及びレムカウンターによる作業環境の線量率の測定を行っている。このうち、特にTLDバッジではその感度に特有のエネルギー依存性があるため作業環境のエネルギーを考慮した線量評価が必要である。また、レムカウンターもその感度はICRPのrem曲線に全エネルギー領域において一致しているとは言えないため、中性子のエネルギーに起因する誤差が考えられる。

そこでプルトニウム取扱い施設の作業環境における中性子線量の測定評価の精度向上を目的として、

- (1) 多組減速材付BF₃型スペクトロメータによるプルトニウム燃料製造施設の代表的な作業場におけるエネルギースペクトルの測定・解析
- (2) エネルギースペクトルの測定結果に基づいたTLDバッジ及びレムカウンターによる中性子線量評価の精度についての検討

を行った。

東海事業所 安全管理部 安全対策課

* 大洗工学センター 安全管理部 放射線管理課

目 次

1. 目 的	1
2. 測定場所及び測定対象	2
3. 中性子エネルギースペクトルの測定	6
3.1 多組減速材付BF ₃ 型スペクトロメータの概要	6
3.2 Unfolding法によるスペクトル解析法	6
3.3 初期入カスペクトル	10
3.4 中性子エネルギースペクトルの測定方法	12
3.5 中性子エネルギースペクトルの測定結果	16
4. 中性子線量率測定	28
4.1 測定方法	28
(1) レムカウンター	28
(2) BF ₃ 型サーベイメータ	32
(3) TLDバッジ	33
4.2 測定結果	37
5. ま と め	46
6. 謝 辞	50
7. 参考文献	51
(付録)	
1. 中性子エネルギースペクトル及び線量当量の評価に係わる測定データ	52
2. DOT3.5コードを用いて計算した中性子エネルギースペクトルとの比較検討	62

1. 目 的

東海事業所のプルトニウム燃料製造施設、転換技術開発施設、再処理工場ではプルトニウムの取扱いに際し、プルトニウム同位体から放出される中性子による被曝管理が重要である。このため、レムカウンターによる空間線量率の測定及び個人被曝管理としてアルベド方式のTLDバッジによる被曝線量の測定を実施している。

プルトニウム同位体からの中性子は自発核分裂及び ^{16}O との (α, n) 反応について放出されるものであり、そのエネルギーは数10eV～数MeV範囲にわたる連続スペクトルと予想される。また、中性子のエネルギーは線源の組成、形状あるいは遮蔽条件によっても変化するため、作業環境のエネルギースペクトルは種々多様となっている。

一方、被曝線量の測定に使用するTLDバッジでは電子技術総合研究所の加速器を用いた照射試験の結果中性子に対して特有のエネルギー特性を有していることが確認されている⁽¹⁾。このため、実際の被曝管理ではプルトニウム燃料製造施設の代表的な作業場においてレムカウンターを用いて校正(TLD発光量からrem値を求める線量評価式を決定する)を行い、被曝線量の評価を行っている。しかし、この方式では、

- i) エネルギースペクトルを把握しない条件での校正であり、多様なスペクトル場での線量評価精度十分に把握されていない。
- ii) 作業環境における空間線量率測定や作業場におけるTLDバッジ校正時の基準線量の測定にはレムカウンターを使用しているが、レムカウンター自身も特有のエネルギーレスポンスを有しており、種々のエネルギー場での線量の測定に誤差を伴っている。

等の問題がある。

そこで、東海事業所でのプルトニウム取扱施設の作業場における中性子被曝線量の測定精度の向上を目的として、

- i) 多組減速材付BF₃スペクトロメータによるプルトニウム燃料製造施設の代表的な作業場における中性子エネルギースペクトルの測定
- ii) 実測中性子スペクトルに基づく個人線量計(TLDバッジ)及びレムカウンターによる中性子線量測定に伴う誤差の検討

を行った。

尚、中性子エネルギースペクトルの測定においては、多組減速材付BF₃スペクトロメータの測定データに対するUnfolding解析はNEUPACコードを用いて行うとともに、その初期推定値として遮蔽計算用DOT 3.5コードのデータを用いた。

2. 測定場所及び対象

東海事業所の個人被曝管理のうち、中性子による被曝管理については特にプルトニウム燃料製造施設の常陽(FBR)、ふげん(ATR)用プルトニウム-ウラン混合酸化物(MOX)燃料の製造に伴う被曝管理が重要である。そこで、今回の中性子エネルギースペクトルの測定及びそれに基づく線量評価の検討はプルトニウム燃料第2開発室の中性子作業場を対象にして実施した。

プルトニウム燃料第2開発室の管理区域内の平面図を図2-1に示す。第2開発室はFBR燃料製造工程とATR燃料製造工程に区分されている。また、両工程はPuO₂及びUO₂原料粉末から燃料ペレットを作る工程、燃料ペレットから燃料集合体を作る工程及び品質管理・分析を行う工程等からなっている。

上記の工程のうち、特に中性子被曝が問題となるのは原料粉末からのペレット製造工程及びペレット検査工程である。これらの工程はFBR燃料製造についてはF101室、F102室、F103室、ATR燃料製造についてはA101室、F102室、F103室のグローブボックス内で行われている。

プルトニウム同位体から放出される中性子は自発核分裂及び¹⁶Oとの(α, n)等反応によるものであり、そのエネルギーはほとんどが数10KeV以上の速中性子である。しかし、実際の作業場における中性子のエネルギースペクトルは線源の形状・組成、遮蔽条件等により変化する。このうち、特にここ数年中性子による被曝の低限化のためグローブボックス表面に含鉛アクリル(厚さ35mm~45mm)の遮蔽体が設けられており、遮蔽体での減速・散乱により中性子のエネルギースペクトルも遮蔽体が無い場合と変化していることが予想される。

これらをふまえ今回の中性子エネルギースペクトル測定を行う場所及び条件については、

- i) FBR燃料・ATR燃料製造を定常的に行っている工程で、且つ中性子の被曝が大きいと予想される場所
- ii) 中性子に対する遮蔽条件が異なる場所(例えばグローブボックス表面の含鉛アクリルの有る場所と無い場所)
- iii) 線源の形状が異なる場所(例えば粉末状とペレット)

等に着目し、プルトニウム燃料第2開発室のFBR・ATR燃料製造工程の中から3ヶ所において4つの測定条件(1点は同じ場所で、グローブボックス表面の含鉛アクリル板の有る場合と無い場合での2測定条件)を選んだ。

また、一方多組減材付スペクトロメータを用いて実測したエネルギースペクトルと理論計算値(DOT 3.5コードによる評価)を比較する目的で、PuO₂粉末原料缶に種々の遮蔽体を組合せた状態(4条件)での中性子エネルギースペクトル測定も行った。

以上の測定ポイント及び測定の条件を表2-1に示す。

尚、各測定条件においてはレムカウンター(studivik 2202D型)、BF₃型サーベイメー

タ（富士電気NSM-413型）を用いて中性子線量率を測定するとともに、TLDバッジをパラフィンファントムに装着して照射し、各線量計による線量評価について検討した。

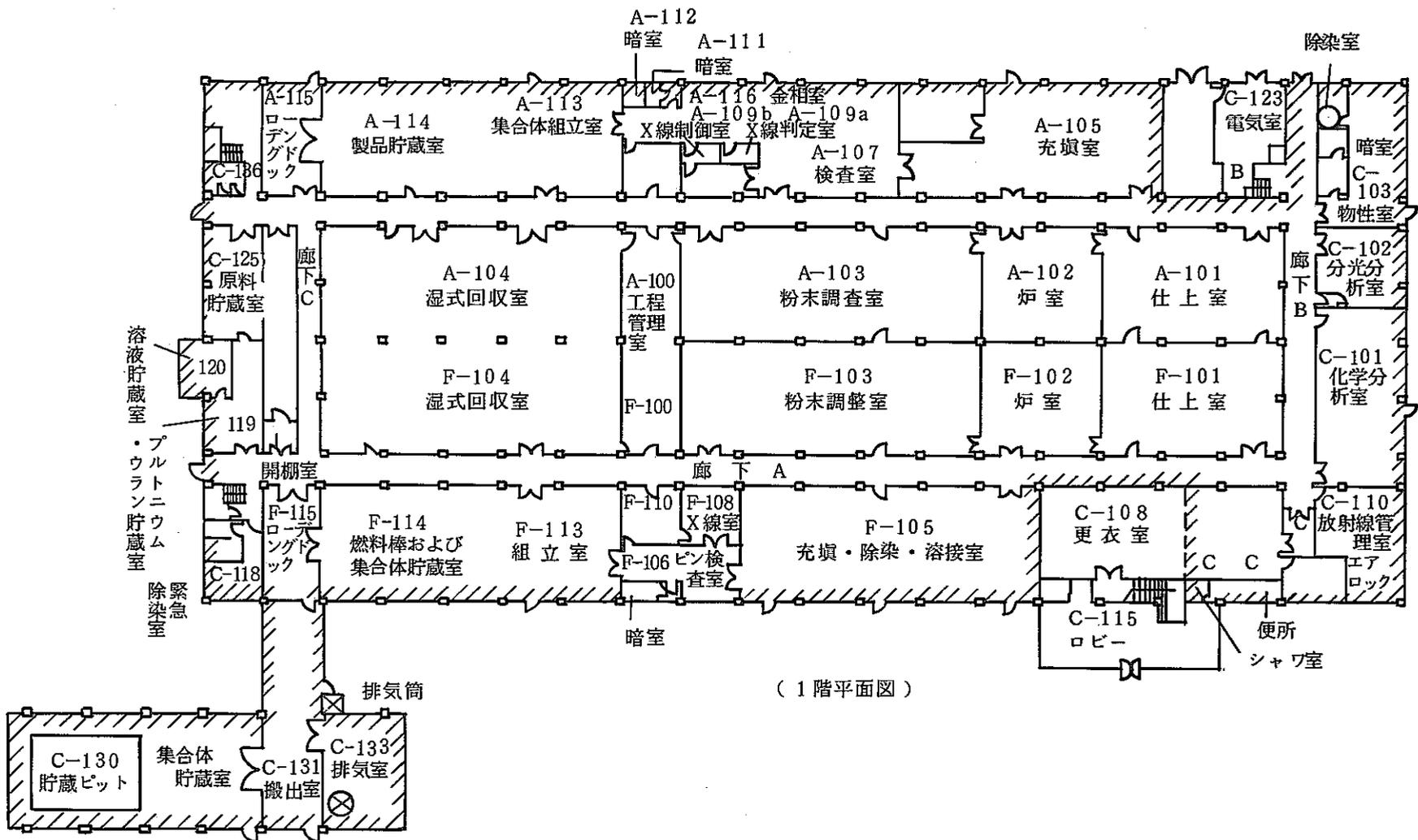


図 2-1 プルトニウム燃料第2開発室の平面図

表 2-1 中性子エネルギースペクトル測定条件一覧表

試験No	実施日	実施場所	測定対象物	遮蔽, 距離
G-1	10月29日	Pu 第2開発室 C-130 集合体貯蔵庫	PuO ₂ 原料缶 (Pu-615)	遮蔽: Pb 1mm ^t 距離: 100cm
G-2	10月29日	Pu 第2開発室 C-130 集合体貯蔵庫	PuO ₂ 原料缶 (Pu-615)	遮蔽: Pb 1mm ^t + アクリル10mm ^t 距離: 100cm
G-3	10月30日	Pu 第2開発室 C-130 集合体貯蔵庫	PuO ₂ 原料缶	遮蔽: Pb 1mm ^t + 含鉛アクリル35mm ^t 距離: 100cm
G-4	10月30日	Pu 第2開発室 C-130 集合体貯蔵庫	PuO ₂ 原料缶	遮蔽: Pb 1mm ^t + 含鉛アクリル43mm ^t 距離: 75cm
F-1	10月30日	Pu 第2開発室 F-102 D-19 box	Pu-U ペレット (焼結炉)	遮蔽: 焼結炉容器 距離: 焼結炉表面から67cm
A-1	11月6日	Pu 第2開発室 A-101 D-28 box	Pu-U ペレット	遮蔽: Glove boxパネル +含鉛アクリル35mm ^t 距離: box 表面26cm
A-2	11月6日	Pu 第2開発室 A-103 D-06 box	Pu-U ペレット	遮蔽: Glove boxパネル +含鉛アクリル35mm ^t
A-3	11月6日	Pu 第2開発室 A-103 D-06 box	Pu-U ペレット	遮蔽: Glove boxパネル

3. 中性子エネルギースペクトルの測定

3.1 多組減速材付BF₃型スペクトロメータの概要

中性子のエネルギースペクトルの測定は、円筒型のBF₃比例計数管とそれに厚さの異なる4種類^{注)}の円筒型ポリエチレン減速体を組み合わせたスペクトロメータを用いた。スペクトロメータの構造を図3-1に示す。BF₃検出器は、Harshaw社製B3-8Sで直径2.54cm、有感長20.32cmの円筒型であり、¹⁰Bが92%濃縮されたBF₃ガスが40cmHgの圧力で充填されている。ポリエチレン減速材は、厚さが1, 3, 6, 10cmの4種類で、密度は0.9234g/cm³である。BF₃検出器及び減速材の外観を図3-2, 図3-3に示す。ポリエチレンの外側表面は、熱中性子を吸収するための0.5mm厚のカドミウムでおおわれており、BF₃検出器を中央部の穴に挿入して使用する。BF₃比例計数管からのパルス出力の計数は、増幅後SCAにて波高弁別を行った後タイマースケラにて計数を行った。尚、各測定において電源系統などからのノイズ混入がないかオシロスコープ及び波高分析装置にて確認した。

中性子スペクトル及び線量当量の絶対評価については、大洗・校正室において²⁵²Cf標準線源を用いて感度校正を行い、エネルギースペクトルとしてNBS型のスペクトル表示を用いた。なお室内での散乱線については、シャドーコーン(Fe及びB入りパラフィンで作られた円錐形の遮蔽体)を用いた測定により評価した。

3.2 Unfolding 法によるスペクトル解析法

多組減速材付BF₃型スペクトロメータの測定値からデータ解析(Unfolding)して中性子束や線量率を評価するためには、

$$C_i = \int_0^{\infty} R_i(E) \phi(E) dE = \sum_{g=1}^G R_{ig} \phi_g \quad \dots\dots\dots (3-1)$$

C_i : スペクトロメータの測定値 ($i = 1, 5$)

$R_i(E)$: スペクトロメータの応答関数。 R_{ig} はそれを群定数($G = 103$)化したもの。

$\phi(E)$: 中性子束。 ϕ_g はそれを群定数化したもの。

を解き、 $\phi(E)$, (ϕ_g)を求め、線量率は

注) 今回使用したスペクトロメータは、東京大学原子核研究において開発されたものと同型で、大洗工学センター・放射線管理課が昭和58年度に東京大学へ委託研究を行った際に使用したものである。詳細は文献(2), (3)を参照のこと。

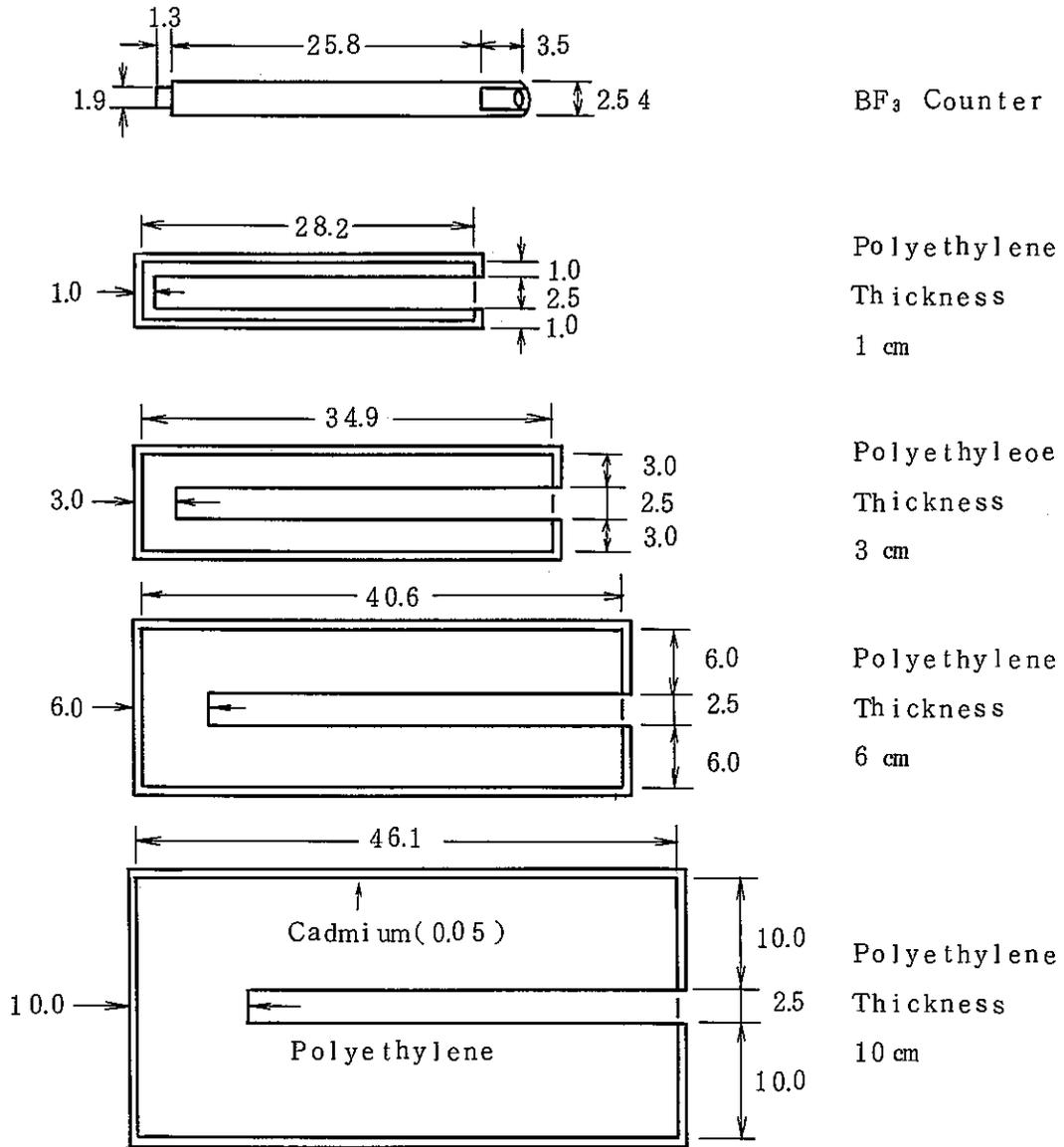


図 3 - 1 多組円筒型減速材付中性子検出器

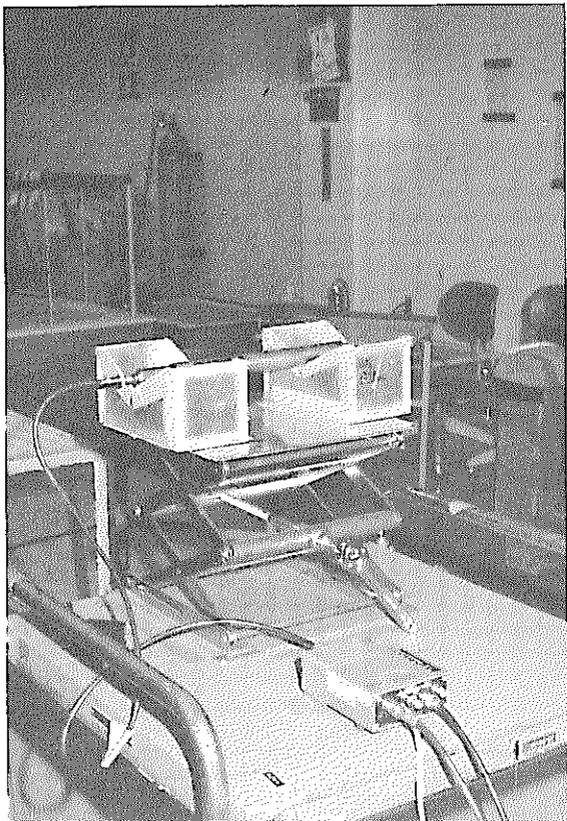


図 3-2 BF₃ 検出器の外観

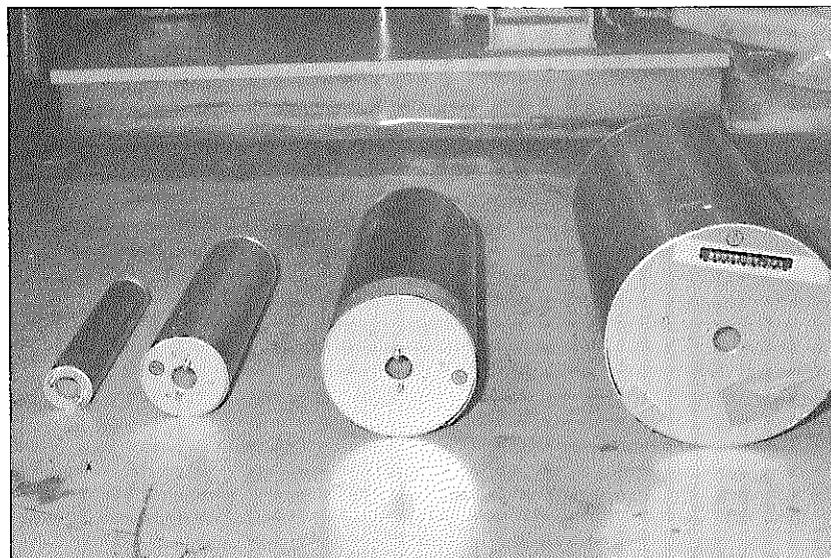


図 3-3 ポリエチレン減速体の外観

$$D = \int_0^{\infty} K(E) \phi(E) dE = \sum_{g=1}^G W_g \phi_g \dots\dots\dots (3-2)$$

D : 線量率

K(E) : レム関数

により算出される。

このUnfolding 法によるスペクトル解析を行うための計算コードが種々あり、大洗工学センターでは小佐古らにより高速実験炉「常陽」や重水臨界実験装置(DCA)の炉周辺の作業環境のスペクトルを評価するために、本スペクトロメータの測定値をSAND-IIコードを用いて解析した⁽²⁾。しかしながら、このコードは入力初期スペクトル依存性が大きいなどの点から、異なる手法を用いて解析することによってスペクトルを評価・検証するために、NEUPAC^{注)}コードを整備し、本スペクトロメータのデータ解析用に検出器のエネルギー応答関数のライブラリー作成などを行ってきた。

このNEUPACコードは解析手法として統計的推測法(Bayesの定理)と変分原理を用いている。すなわち、初期推定スペクトルとして入力した $\vec{\phi}_0$ (ϕ_{0g} ($g=1, G$) のG次元のベクトル表記)の周りに確率論的に分布する多数の推定スペクトル $\vec{\phi}$ を確率分布密度 $\pi_0(\vec{\phi})$ の形で与える(事前確率)。これらのスペクトル $\vec{\phi}$ がスペクトロメータで得られた実測値を満たす確率を $P(C|\vec{\phi})$ とする(条件確率。ここでCはスペクトロメータの実測値 C_i ($i=1, 5$)を5次元のベクトル表記したもの)。この実測値を満たすという条件の下でのスペクトル $\vec{\phi}$ の確からしさ $\pi(\vec{\phi}|C)$ (事後確率)は、

$$\pi(\vec{\phi}|C) \propto P(C|\vec{\phi}) \pi_0(\vec{\phi}) \dots\dots\dots (3-3)$$

により得られる(Bayesの定理)。この $\pi(\vec{\phi}|C)$ が求めるべきスペクトル解の確率分布密度を与えており、解の平均値及び分散は

$$\vec{\phi}_{ave} = \int \vec{\phi} \pi(\vec{\phi}|C) d\vec{\phi} \dots\dots\dots (3-4)$$

$$\overline{(\Delta\vec{\phi})^2} = \int \{\vec{\phi} - \vec{\phi}_{ave}\}^2 \pi(\vec{\phi}|C) d\vec{\phi} \dots\dots\dots (3-5)$$

により求められる。また線量率についても(3-2)式より、確率分布密度として

$$P(D|C) = \iint K(E) \vec{\phi}(E) \pi(\vec{\phi}|C) d\vec{\phi} dE \dots\dots\dots (3-6)$$

表わされ、平均値、分散がそれぞれ得られる。

注) NEUPACコードは、試料の放射化法による「常陽」炉内中性子スペクトル解析用として、動燃及び東京大学で共同開発されたUnfoldingコードである。詳細は文献(4)を参照のこと。

このBayesの定理を用いて解析するために、NEUPACコードでは最も標準的な正規分布、対数正規分布を確率分布モデルとして使用している。これを直接解くためには様々な困難があるため、本コードでは変分原理を用い、汎関数 $J(\phi)$ 分散を最小にすることにより、スペクトル及び線量(率)を求めるものである。今回の解析では、スペクトルの非負性を加味した $J-\log$ タイプ(対数正規分布を仮定)を使用した。なお、Unfolding計算するにあたって初期推定スペクトルとして、後述するように、2次元Sn輸送計算コードDOT3.5の計算結果を用いた。このコードの特徴として、線源から遠く離れた位置では放射線束の空間分布に大きなゆらぎ現象(ray-effect)を起こすことがあるため、初期推定スペクトルを測定値で規格化して計算を行った。またNEUPACコードは表3-1に示される群構造しており、103群(20MeV \sim 10³eV)で計算を行っているが、初期推定スペクトルとして用いるDOT3.5のデータが22群(14.9MeV \sim 10³eV)であるため20 \sim 14.9MeVまでのダミー3群を加え25群に縮約して入出力した。

3.3 初期入力スペクトル

前項に示したようにUnfolding計算にてスペクトル解析を行う場合には初期推定スペクトルを入力する必要がある。PuO₂原料缶を用いた実験においては、PuO₂原料缶に数種の円筒型遮蔽体を組み合わせた条件におけるエネルギースペクトルをDot3.5コードを用いて理論計算し、その結果をUnfolding計算の初期値として用いた。^{注)}

一方、プルトニウム第2開発室の作業場における測定においては、グローブボックスや内装機器及び周囲の物体からの散乱線等を含めてモデル化してDOT3.5コードを用いてスペクトルを計算にて求めることは困難である。そこで、Unfolding計算の初期値は以下のとおりとした。

1. グローブボックス表面に含鉛アクリル板(厚さ35mm t)を置いた条件での測定においては、PuO₂原料缶に35mm tの含鉛アクリルを組み合わせた条件にて、DOT3.5コードを用いて計算したスペクトルを初期値として用いた。
2. グローブボックス表面に含鉛アクリルが無い条件での測定については、PuO₂原料缶に1cmアクリル板を組み合わせた条件にてDOT3.5コードで計算したスペクトルを初期値として用いた。

DOT3.5コードは、中性子及びガンマ線の二次元輸送方程式(ボルツマン輸送方程式)をディスクリット・オーデナイト法(Sn)で解くものである。線源強度の計算は、PURSEコードを用いた。断面積ライブラリーとしては中性子22群、 γ 線18群のPSL-40を用いた。

なお、PuO₂原料缶種に数種類の厚さの円筒型含鉛アクリルを組み合わせた条件に対してDOT3.5コードを用いた計算した中性子エネルギースペクトルの結果は付録-2に示す。

注) DOT3.5コードによるスペクトル計算はプルトニウム燃料部設計開発課に依頼して行った。

表3-1 103 Energy Group Structure in Units of eV

Group	Upper	Lower	Group	Upper	Lower
1	2.0000E+07	1.8220E+07	51	1.3569E+05	1.2277E+05
2	1.8220E+07	1.6490E+07	52	1.2277E+05	1.1109E+05
3	1.6490E+07	1.4918E+07	53	1.1109E+05	8.6517E+04
4	1.4918E+07	1.3499E+07	54	8.6617E+04	6.7379E+04
5	1.3499E+07	1.2214E+07	55	6.7379E+04	5.2475E+04
6	1.2214E+07	1.1052E+07	56	5.2475E+04	4.0868E+04
7	1.1062E+07	1.0000E+07	57	4.0868E+04	3.1828E+04
8	1.0000E+07	9.0484E+06	58	3.1828E+04	2.4788E+04
9	9.0434E+06	8.1873E+06	59	2.4788E+04	1.9305E+04
10	8.1873E+06	7.4082E+06	60	1.9336E+04	1.5034E+04
11	7.4082E+06	6.7032E+06	61	1.5004E+04	1.1709E+04
12	6.7032E+06	6.0653E+06	62	1.1739E+04	9.1188E+03
13	6.0653E+06	5.4881E+06	63	9.1188E+03	7.1017E+03
14	5.4881E+06	4.9659E+06	64	7.1017E+03	5.5308E+03
15	4.9659E+06	4.4933E+06	65	5.5308E+03	4.3075E+03
16	4.4933E+06	4.0637E+06	66	4.3074E+03	3.3546E+03
17	4.0657E+06	3.6788E+06	67	3.3545E+03	2.6126E+03
18	3.6788E+06	3.3287E+06	68	2.6126E+03	2.0347E+03
19	3.3287E+06	3.0119E+06	69	2.0347E+03	1.5846E+03
20	3.0119E+06	2.7253E+06	70	1.5846E+03	1.2341E+03
21	2.7253E+06	2.4660E+06	71	1.2341E+03	9.6112E+02
22	2.4660E+06	2.2313E+06	72	9.6112E+02	7.4852E+02
23	2.2313E+06	2.0150E+06	73	7.4852E+02	5.8295E+02
24	2.0190E+06	1.8268E+06	74	5.8296E+02	4.5400E+02
25	1.8258E+06	1.6530E+06	75	4.5400E+02	3.5357E+02
26	1.6530E+06	1.4957E+06	76	3.5357E+02	2.7536E+02
27	1.4957E+06	1.3534E+06	77	2.7536E+02	2.1445E+02
28	1.3535E+06	1.2246E+06	78	2.1445E+02	1.6702E+02
29	1.2246E+06	1.1080E+06	79	1.6702E+02	1.3007E+02
30	1.1080E+06	1.0026E+06	80	1.3007E+02	1.0130E+02
31	1.0027E+06	9.0718E+05	81	1.0130E+02	7.8893E+01
32	9.0718E+05	8.2085E+05	82	7.8893E+01	6.1442E+01
33	8.2035E+05	7.4274E+05	83	6.1442E+01	4.7851E+01
34	7.4274E+05	6.7206E+05	84	4.7851E+01	3.7267E+01
35	6.7206E+05	6.0810E+05	85	3.7257E+01	2.9023E+01
36	6.0610E+05	5.5023E+05	86	2.9023E+01	2.2603E+01
37	5.5023E+05	4.9787E+05	87	2.2503E+01	1.7603E+01
38	4.9787E+05	4.5049E+05	88	1.7603E+01	1.3710E+01
39	4.5049E+05	4.0762E+05	89	1.3710E+01	1.0677E+01
40	4.0762E+05	3.6883E+05	90	1.0677E+01	8.3153E+00
41	3.6883E+05	3.3373E+05	91	8.3153E+00	6.4760E+00
42	3.3373E+05	3.0197E+05	92	6.4760E+00	5.0435E+00
43	3.0197E+05	2.7324E+05	93	5.0435E+00	3.9279E+00
44	2.7324E+05	2.4724E+05	94	3.9279E+00	3.0590E+00
45	2.4724E+05	2.2371E+05	95	3.0590E+00	2.3834E+00
46	2.2371E+05	2.0242E+05	96	2.3824E+00	1.8554E+00
47	2.0242E+05	1.8316E+05	97	1.8554E+00	1.4450E+00
48	1.8316E+05	1.6573E+05	98	1.4450E+00	1.1254E+00
49	1.6573E+05	1.4996E+05	99	1.1264E+00	8.7642E-01
50	1.4996E+05	1.3569E+05	100	8.7642E-01	6.8756E-01
			101	6.8256E-01	5.3158E-01
			102	5.3158E-01	4.1399E-01
			103	4.1399E-01	1.0000E-03

3.4 中性子エネルギースペクトルの測定方法

多組減速材付 BF₃ 型スペクトロメータにてプルトニウム燃料第2開発室の代表的な作業場及び PuO₂原料缶に数種類の厚さの円筒型含鉛アクリルを組み合わせた照射場で中性子エネルギースペクトルの測定を行った。測定方法を以下に示す。

(1) PuO₂原料缶に数種類の厚さの含鉛アクリルを組み合わせた条件での測定(4条件)

PuO₂粉末原料缶に種々の数種類の厚さの含鉛アクリルを組み合わせた場合の中性子エネルギースペクトルの測定風景を図3-4, 図3-5に示す。

測定はPu燃料第2開発室C-130で行った。測定を行った位置の中性子線量率のバックグラウンドは、レムカウンターによる測定で0.1 mrem/hr(カウンター計数値にて0.15 mrem/hr)以下であり、中性子エネルギースペクトル測定への寄与は線量当量率でほとんどない。

原料缶及び中性子スペクトル検出器は、その中心が床から109cmの高さに設定し、床からの散乱線のスペクトル分布への寄与が出来るだけ少なくなるようにするため固定台にはアルミニウム製の架台を用いた。検出器は円周軸方向に対し垂直に且つ円筒軸中心に中性子が入射するよう設定した。

<照射条件>

1. 場 所 プルトニウム第2開発室C-130

2. 線 源 PuO₂原料缶(NaPu-615)

a) Pu Fissile 75.61%

b) Pu 同位元素 w/o

Pu-238 0.54

Pu-239 68.56

Pu-240 21.53

Pu-241 6.85

Pu-242 2.52

Am-241 9400 ppm

Pu 分析日 85年3月5日

²⁴¹Am 分析日 85年3月5日

c) 重 量

Pu metal 2735.19 g

PuO₂ 3127 g

d) 密 度 (PuO₂) ρ = 1.73 g/cm³

e) 形 状

Pu粉末は100φ×230h×0.4tmmの円筒型AL缶

3. 遮蔽条件

- ① PuO_2 原料缶 + Pb 1mm t 注1)
- ② PuO_2 原料缶 + Pb 1mm t + 含鉛アクリル(35mm t) 注2)
- ③ PuO_2 原料缶 + Pb 1mm t + 含鉛アクリル(45mm t)
- ④ PuO_2 原料缶 + Pb 1mm t + アクリル板 (10mm t) 注3)

4. 線源と検出器の距離

原料缶中心とBF₃ 検出器間との距離 100cm (実験G-4は75cm)

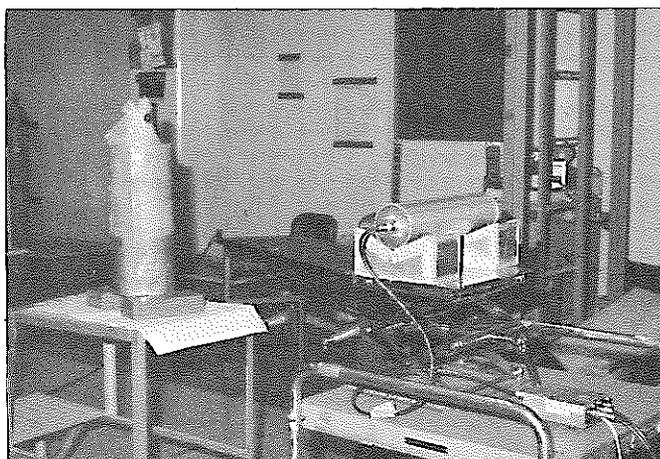


図3-4 PuO_2 原料缶の中性子エネルギースペクトル測定風景(実験G-1)
(遮蔽: Pb 1mm t)

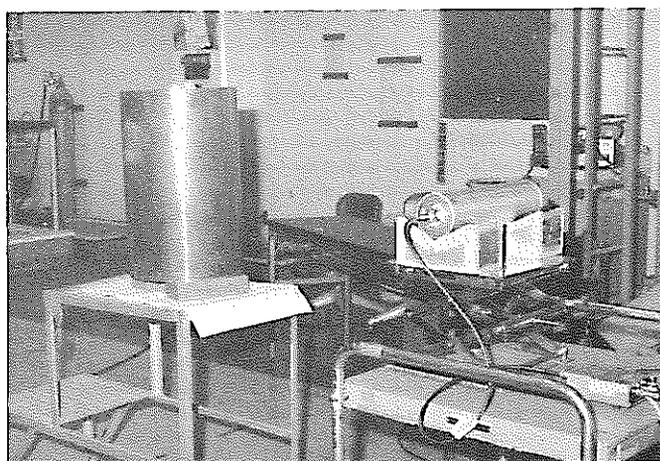


図3-5 PuO_2 原料缶の中性子エネルギースペクトル測定風景(実験G-3)
(遮蔽: Pb 1mm t + 含鉛アクリル35mm t)

注1) 測定中の被曝を低減するためのγ線遮蔽

注2) 中性子遮蔽のためグローブボックス表面に取り付けられている含鉛アクリルを模擬したもの。(測定に使用したものは同筒型)

注3) グローブボックスのパネルを模擬したもの。(平板 50cm×50cm)

(2) FBR燃料製造工程での測定(1点)

FBR燃料製造工程での中性子エネルギースペクトル測定は、工程の中でも特に中性子線量の高い場所として、F102室のグローブボックスD-06の予備焼結炉の前面において行った。焼結炉では、 $\text{PuO}_2 + \text{UO}_2$ のペレット燃料の焼結が行われている。中性子スペクトル測定は焼結炉の表面から26cm、床から120cmの高さの位置において行った。

<照射条件>

1. 場所 プルトニウム第2開発室F102
D-06 予備焼結炉前方
2. 線源 ペレット状 $\text{PuO}_2 + \text{UO}_2$
Pu重量 15kg
 $\text{PuO}_2 / (\text{PuO}_2 + \text{UO}_2) = 29.3\%$
 $\text{Pu} / \text{PuO}_2 = 0.882$
3. 遮蔽条件 予備焼結炉容器

(3) ATR燃料製造工程での測定(3点)

ATR燃料製造工程での中性子エネルギースペクトル測定は、常時作業者が立入る場所かつ中性子線量率の高い場所として、A102室のグローブボックスD-28(ペレット貯蔵)及びA103室のグローブボックスD-06(粉末乾燥)表面にて行った。また、A103室のD-103においては同じ線源及び同じ測定位置においてグローブボックス表面の35mm厚さの含鉛アクリルが有る場合と無い場合の2通りについて測定を行った。測定状況を図3-6、図3-7に示す。

中性子エネルギースペクトル測定はグローブボックス表面から26cm、床から120cmの高さの位置において行った。

<照射条件>

1. 場所 プルトニウム第2開発室
A102 D-028
A103 D-06
2. 線源 A102(D-028) ペレット状 $\text{PuO}_2 + \text{UO}_2$
A103(D-06) 粉末状 $\text{PuO}_2 + \text{UO}_2$
3. 遮蔽条件 A102(D-028) グローブボックス+含鉛アクリル(35mm^t)
A103(D-06) グローブボックスのみ
A103(D-06) グローブボックス+含鉛アクリル(35mm^t)

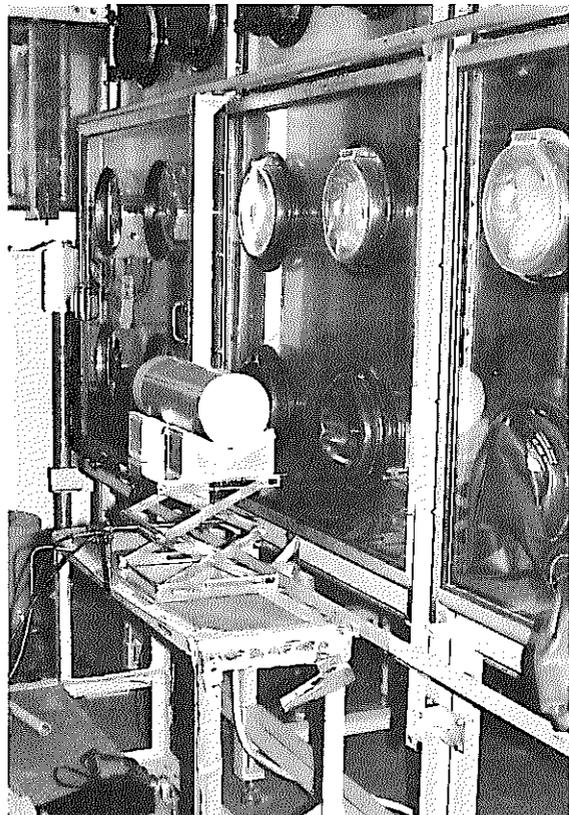


図 3-6 グローブボックス表面の中性子エネルギースペクトル
測定風景 実験 A-3 (遮へい ; G B パネル)

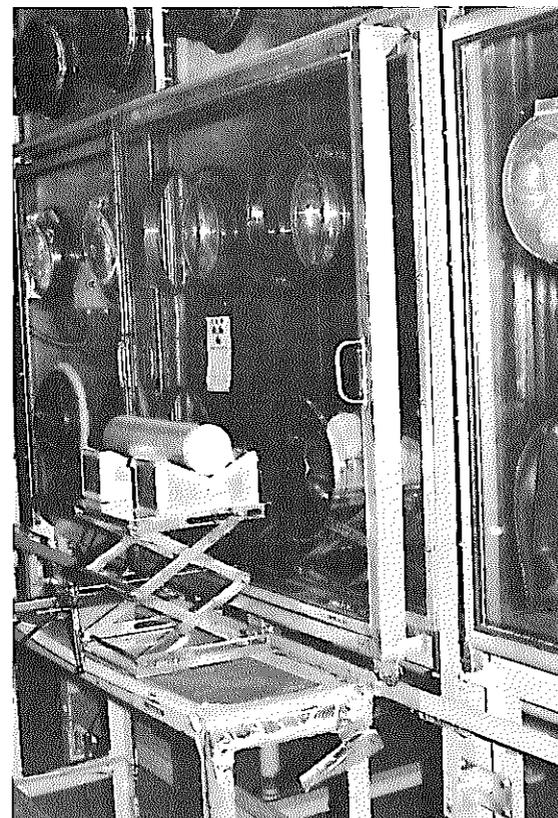


図 3-7 グローブボックス表面の中性子エネルギースペクトル
測定風景
実験 A-3 (遮へい ; G B パネル + 含鉛アクリル 3.5 mm t)

3.5 中性子エネルギースペクトルの測定結果

(1) PuO₂ 原料缶照射

PuO₂ 粉末原料缶に数種類の厚さの円筒型含鉛アクリルを組み合わせた照射条件における多組減速材付BF₃型スペクトロメータの測定値(計数值)の一覧を表3-2に示す。また、この測定値に基づいてUnfolding計算により求めた中性子フルエンスを表3-3に、中性子平均エネルギーと線量当量率を表3-4に示す。また、測定条件における中性子エネルギースペクトルを図3-8~図3-11に示す。ここで実線で書かれたスペクトルに対し、上下の破線部は測定及び解析上の誤差である。

注)

PuO₂ 原料缶を用いた測定における中性子の平均エネルギーは、

実験No.	遮蔽条件	平均エネルギー 注)
G-1	PuO ₂ 原料缶 + Pb 1mm	1.92 MeV
G-2	" + Pb 1mm + 平板アクリル (10mm t)	1.69 MeV
G-3	" + Pb 1mm + 含鉛アクリル (35mm t)	1.12 MeV
G-4	" + Pb 1mm + 含鉛アクリル (43mm t)	1.21 MeV

であった。PuO₂ 原料缶(実験G-1)だけの場合は、中性子平均エネルギーが1.92 MeVと比較的大きいが、図3-13~3-16からも判るようにアクリル遮蔽体を組み合わせるとアクリル遮蔽体中での散乱・減速により中性子の低エネルギー成分が増加し、中性子平均エネルギーも小さくなっている。但し、含鉛アクリル35mm tと43mm tの場合には、平均エネルギーは各々1.12 MeVと1.21 MeVであり43mm tの方が高めとなっている。これは、両者の測定位置(線源からの距離)が異なることが考えられる。

尚、PuO₂ 原料缶(G-1)のみの場合について、Unfolding解析の初期スペクトルとしてPuO₂ 原料缶のみの条件にて、Dot 3.5コードを用いて計算した値を入力した場合には、実験系には、周囲からの散乱線が含まれること、及び理論計算にはDOT 3.5コードのような2次元Snコードによく見られるゆらぎ現象(ray effect)のため、精度よく計算を行うことが出来なかった。そこで、今回は、PuO₂原料缶+平板アクリル(10mm t)の条件にてDOT 3.5コードで計算した計算値を初期スペクトルとして用いた。

注) 平均エネルギー(\bar{E})は次式で定義する。

$$\bar{E} = \frac{\int \phi_i(E_i) \cdot E_i dE}{\int \phi_i(E_i) dE}$$

表3-2 PuO₂原料缶の中性子エネルギー測定における多組減速材付BF₃検出器の計数值

減速材 実験No	Bare [cps]	Cd 付 [cps]	CMD 1cm [cps]	CMD 3cm [cps]	CMD 6cm [cps]	CMD 10cm [cps]
G-1	1.109±0.215	0.091±0.034	2.172±0.155	29.355±1.588	58.922±1.318	45.276±0.600
G-2	1.152±0.152	0.115±0.033	2.537±0.173	28.555±0.424	56.409±0.357	40.806±0.796
G-3	5.502±0.098	0.469±0.040	6.288±0.116	36.835±0.886	52.100±0.985	34.386±0.762
G-4	11.955±0.447	0.848±0.058	11.352±0.093	61.305±0.443	85.717±0.604	55.229±0.576
BG	3.838±0.072	0.213±0.020	2.261±0.056	7.318±0.209	5.938±0.079	2.244±0.014

表3-3 PuO₂ 原料缶の中性子フルエンス測定結果

中 性 子 エ ネ ル ギ ー			中 性 子 フ ル エ ン ス (n/cm ² ・s)			
			実 験 G-1	実 験 G-2	実 験 G-3	実 験 G-4
Group No	Energy range (MeV)	LETHGY	PuO ₂ 原料缶 遮へい; Pb 1mmt	PuO ₂ 原料缶 遮へい; Pb 1mmt +アクリル10mmt	PuO ₂ 原料缶 遮へい; Pb 1mmt +含鉛アクリル35mmt	PuO ₂ 原料缶 遮へい; Pb 1mmt +含鉛アクリル43mmt
1	2.000E+01 - 1.822E+01	9.321E-02	5.22238E-06	1.57614E-05	1.14028E-05	1.14308E-05
2	1.822E+01 - 1.649E+01	9.976E-02	5.22580E-06	1.57696E-05	1.14059E-05	1.14323E-05
3	1.649E+01 - 1.492E+01	1.002E-01	5.23181E-06	1.57842E-05	1.14114E-05	1.14352E-05
4	1.492E+01 - 1.000E+01	4.000E-01	1.77273E-02	1.00414E-02	5.65697E-03	2.83119E-02
5	1.000E+01 - 6.703E+00	4.000E-01	1.65908E-01	9.92627E-02	5.26844E-02	2.41883E-01
6	6.703E+00 - 4.966E+00	3.000E-01	6.12110E-01	3.88136E-01	1.90533E-01	7.78370E-01
7	4.966E+00 - 4.066E+00	2.000E-01	1.24314E+00	8.85062E-01	4.20386E-01	1.23770E+00
8	4.066E+00 - 3.012E+00	3.000E-01	6.53328E+00	5.23214E+00	2.30808E+00	5.66801E+00
9	3.012E+00 - 2.466E+00	2.000E-01	1.01412E+01	9.42340E+00	5.50025E+00	1.01514E+01
10	2.466E+00 - 1.827E+00	3.000E-01	7.86966E+00	7.58447E+00	7.26193E+00	1.02302E+01
11	1.827E+00 - 1.353E+00	2.999E-01	4.60141E+00	3.90103E+00	5.20894E+00	7.47608E+00
12	1.353E+00 - 9.072E-01	4.000E-01	2.65971E+00	2.03400E+00	2.99507E+00	4.93631E+00
13	9.072E-01 - 6.081E-01	4.000E-01	1.80626E+00	1.44747E+00	1.84863E+00	3.66595E+00
14	6.081E-01 - 4.076E-01	4.000E-01	1.14808E+00	1.07906E+00	1.22181E+00	2.38883E+00
15	4.076E-01 - 1.111E-01	1.300E+00	5.95212E-01	6.52929E-01	7.07464E-01	1.32604E+00
16	1.111E-01 - 1.503E-02	2.000E+00	2.00203E-01	2.47650E-01	3.13933E-01	5.83686E-01
17	1.503E-02 - 3.355E-03	1.500E+00	1.17588E-01	1.47793E-01	2.25173E-01	4.08226E-01
18	3.355E-03 - 5.829E-04	1.750E+00	8.45581E-02	1.06546E-01	2.10492E-01	3.81834E-01
19	5.829E-04 - 1.013E-04	1.750E+00	6.15084E-02	7.88500E-02	2.12136E-01	3.87726E-01
20	1.013E-04 - 2.902E-05	1.250E+00	3.60591E-02	4.76518E-02	1.53458E-01	2.77571E-01
21	2.902E-05 - 1.068E-05	1.000E+00	3.70770E-02	4.94597E-02	2.05319E-01	3.73885E-01
22	1.068E-05 - 3.059E-06	1.250E+00	2.25100E-02	3.05396E-02	1.46365E-01	2.65068E-01
23	3.059E-06 - 1.125E-06	9.999E-01	2.30636E-02	3.07067E-02	1.61551E-01	2.93722E-01
24	1.125E-06 - 4.140E-07	1.000E+00	3.44285E-02	4.28904E-02	1.53308E-01	2.93844E-01
25	4.140E-07 - 1.000E-09	6.026E+00	2.68722E-02	3.37340E-02	2.58665E-01	5.86046E-01

表 3-4 PuO₂ 原料缶を用いた照射における中性子エネルギー及び線量当量率測定結果

実験 No.	条 件	BF ₃ スペクトロメータ 測定結果		
		Total flux (n/cm ² ・s)	線量当量率 (mrem/hr)	平均エネルギー (MeV)
G-1	線 源 : PuO ₂ 原料缶 遮 蔽 : Pb 1mm ^t 距 離 : 100 cm	13.3	1.54	1.92
G-2	線 源 : PuO ₂ 原料缶 遮 蔽 : Pb 1mm ^t + 平板アクリル10mm ^t 距 離 : 100 cm	12.7	1.34	1.69
G-3	線 源 : PuO ₂ 原料缶 遮 蔽 : Pb 1mm ^t + 含鉛アクリル35mm ^t 距 離 : 100 cm	14.3	1.16	1.12
G-4	線 源 : PuO ₂ 原料缶 遮 蔽 : Pb 1mm ^t + 含鉛アクリル43mm ^t 距 離 : 75 cm	23.8	1.94	1.21

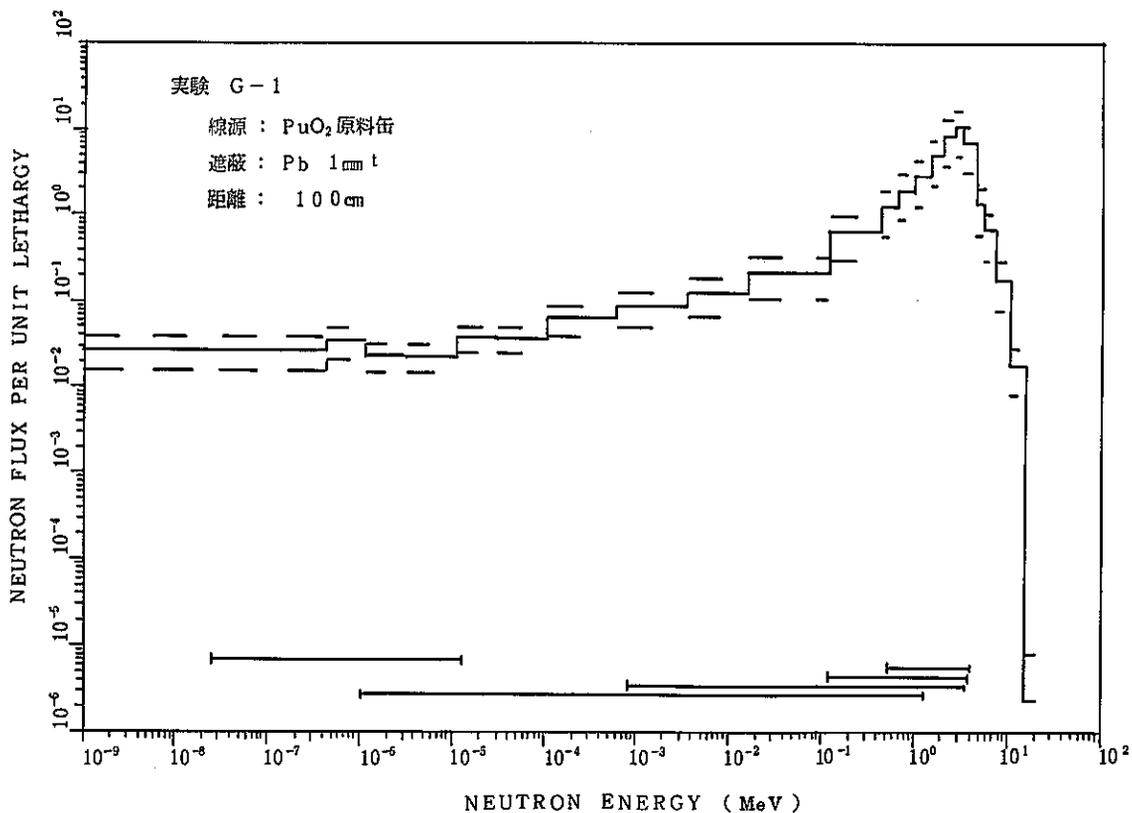


図 3-8 PuO₂ 原料(遮蔽なし)の中性子エネルギースペクトル測定結果

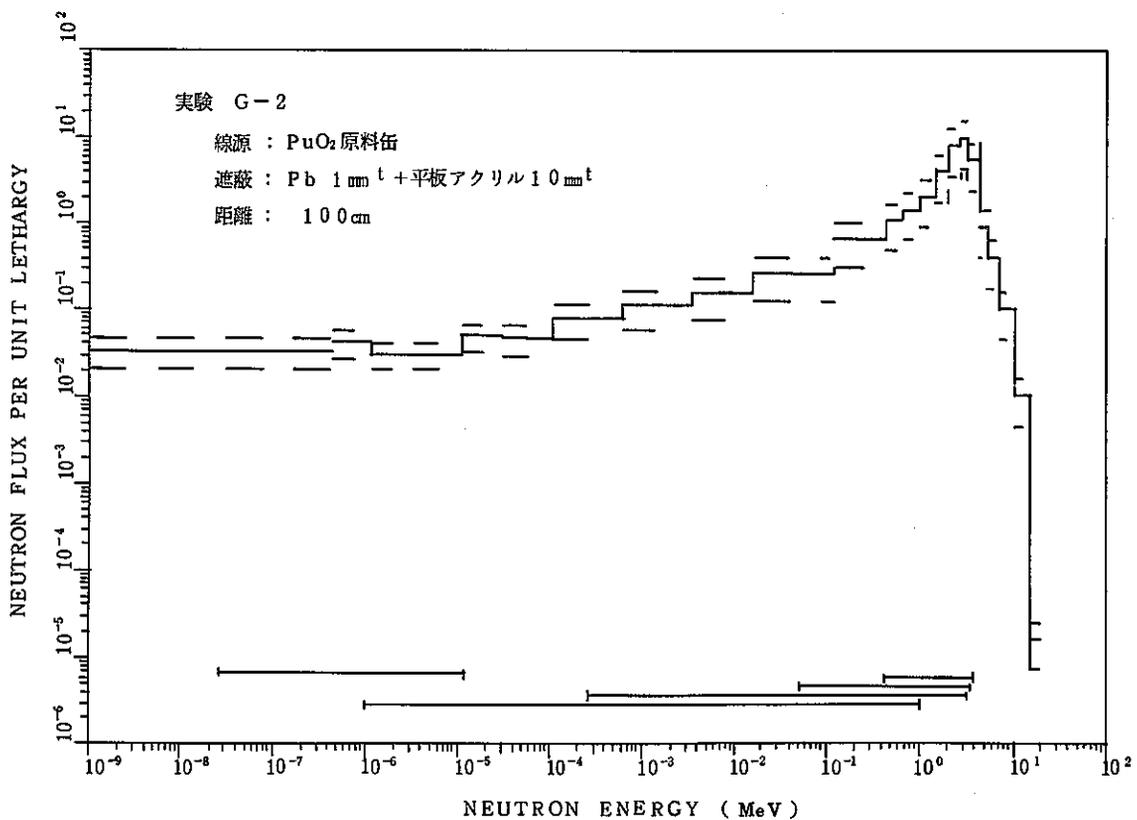


図 3-9 PuO₂ 原料缶に平板アクリル(10mm t)を組合せた場合の中性子エネルギースペクトル測定結果

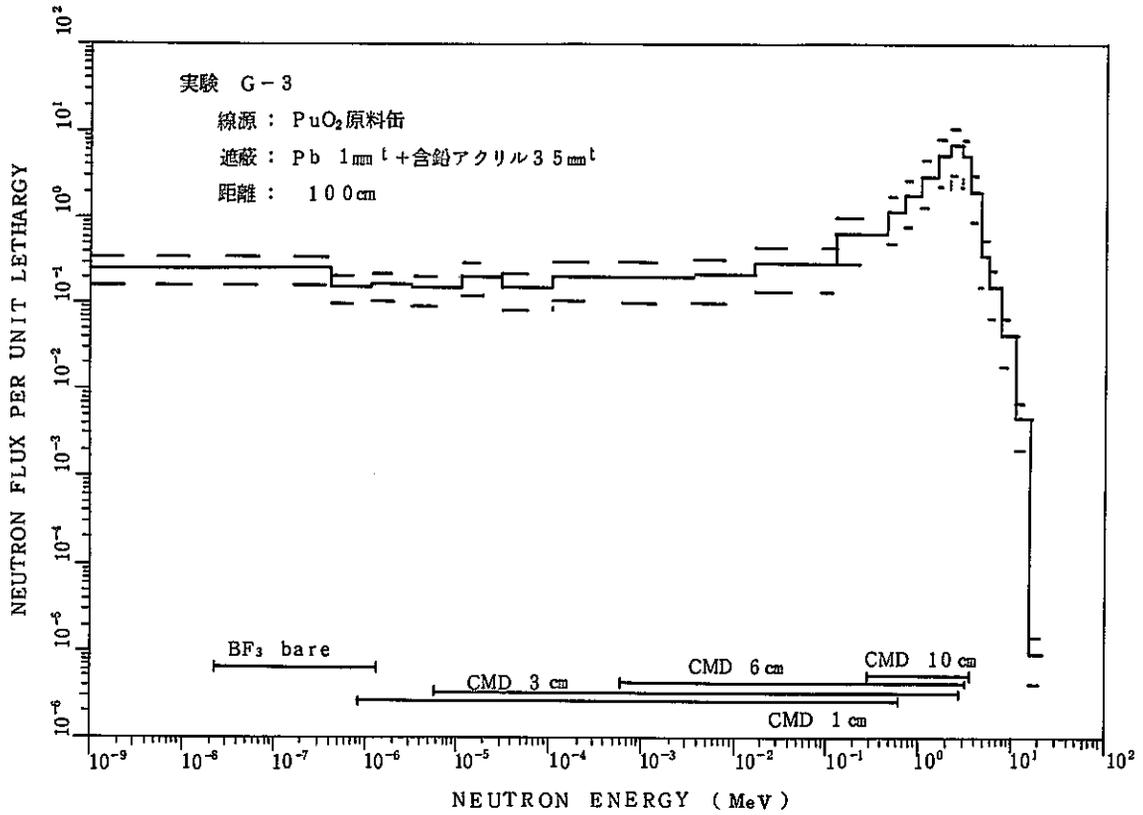


図 3-10 PuO_2 原料缶に含鉛アクリル (3.5mm t) を組合せた場合の中性子エネルギースペクトル測定結果

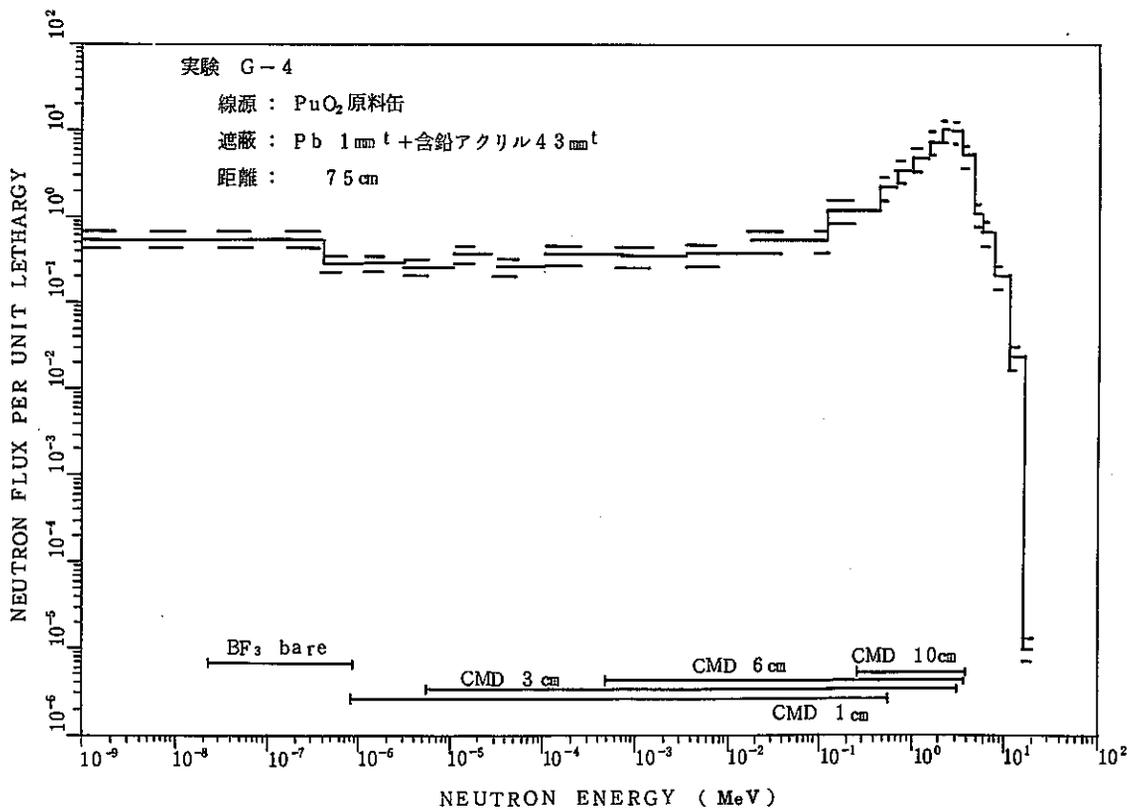


図 3-11 PuO_2 原料缶に含鉛アクリル (4.3mm t) を組合せた場合の中性子エネルギースペクトル測定結果

(2) プルトニウム第2開発室作業場での照射

プルトニウム第2開発室のFBR, ATR用MOX燃料工程の代表的な作業場における多組減速材付BF₃型検出器の測定値(計数值)の一覧を表3-5に示す。また、この測定値に基づいてUnfolding計算から求めた中性子フルエンスを表3-6に、中性子平均エネルギーと線量当量率を表3-7に示す。また、各照射条件におけるエネルギースペクトルを図3-12～図3-15に示す。

第2開発室の作業場での4つの条件における中性子の平均エネルギーは、0.86～1.26MeVであった。まず、F102室グローブボックスD-06の焼結炉前面(実験No.F-1)において、焼結炉容器(耐熱用レンガ、冷却用水パイプが存在)中での減速により中性子平均エネルギーは、1.16MeVとなっている。一方、ATR工程においては、A103室グローブボックスD-06(PuO₂-UO₂粉末)前面では、35mm^tの含鉛アクリルが無い場合(実験No.A-3)には1.26MeVで、含鉛アクリル43mm^tが有る場合(実験No.A-4)には0.96MeVであった。この場合は、グローブボックス表面の含鉛アクリルの有・無のみによるものであり、含鉛アクリルが有る場合には、その中での減速により低エネルギー成分が増加している。また、A101室グローブボックスD-28(PuO₂+UO₂ペレット有)表面で含鉛アクリルが有る条件(実験No.A-2)においては、中性子平均エネルギーが0.86MeVであり、実験No.A-4の場合と比べて平均エネルギーはほぼ等しくなっている。

中性子のエネルギースペクトルは、遮蔽条件、線源の組成や形状等により変化するが、以上の結果より特に含鉛アクリルの遮蔽の有無が大きく影響することが判った。

表3-5 プルトニウム第2開発室作業場における多組減速体付BF₃検出器の計数値

減速体 実験No.	Bare [cps]	Cd 付 [cps]	CMD 1cm [cps]	CMD 3cm [cps]	CMD 6cm [cps]	CMD 10cm [cps]
F-1	5.687±0.242	0.683±0.102	12.917±0.083	93.093±0.531	129.203±1.939	72.823±0.713
A-1	19.756±0.463	1.460±0.062	17.883±0.534	84.207±0.231	100.827±0.468	51.840±0.115
A-2	21.413±0.334	1.160±0.079	13.913±0.170	63.470±0.648	77.725±0.867	47.550±0.165
A-3	15.765±0.783	0.972±0.043	12.890±0.308	75.355±1.293	109.650±0.853	70.630±0.728

表3-6 プルトニウム第2開発室の作業場における中性子フルエンス測定結果

中性子エネルギー			中性子フルエンス ($n/cm^2 \cdot s$)			
Group No	Energy range (MeV)	LETHGY	実験 F-1	実験 A-1	実験 A-2	実験 A-3
			F102 D-13 焼結炉表面	A102 D-28 PuO ₂ +UO ₂ ペレット 遮へい: GB+含鉛アクリル	A103 D-6 PuO ₂ +UO ₂ 粉末 遮へい: GB	A103 D-6 PuO ₂ +UO ₂ 粉末 遮へい: GB+含鉛アクリル
1	2.000E+01 - 1.822E+01	9.321E-02	1.26374E-05	4.44506E-06	3.82176E-06	5.16100E-06
2	1.822E+01 - 1.649E+01	9.976E-02	1.26355E-05	4.44321E-06	3.82209E-06	5.16232E-06
3	1.649E+01 - 1.492E+01	1.002E-01	1.26323E-05	4.44005E-06	3.82267E-06	5.16461E-06
4	1.492E+01 - 1.000E+00	4.000E-01	2.96142E-02	2.86452E-02	2.48822E-02	3.37341E-02
5	1.000E+01 - 6.703E+00	4.000E-01	2.50475E-01	2.34600E-01	2.09039E-01	2.86970E-01
6	6.703E+00 - 4.966E+00	3.000E-01	7.84019E-01	6.97601E-01	6.55824E-01	9.30280E-01
7	4.966E+00 - 4.066E+00	2.000E-01	1.33803E+00	1.10110E+00	1.11265E+00	1.65991E+00
8	4.066E+00 - 3.012E+00	3.000E-01	5.71845E+00	4.18806E+00	4.63363E+00	7.42981E+00
9	3.012E+00 - 2.466E+00	2.000E-01	1.05299E+01	6.90072E+00	7.87462E+00	1.30898E+01
10	2.466E+00 - 1.827E+00	3.000E-01	1.30493E+01	8.14590E+00	8.74401E+00	1.41914E+01
11	1.827E+00 - 1.353E+00	2.999E-01	1.14240E+01	7.02966E+00	6.42945E+00	9.56585E+00
12	1.353E+00 - 9.072E-01	4.000E-01	9.42493E+00	6.34638E+00	4.75971E+00	6.38628E+00
13	9.072E-01 - 6.081E-01	4.000E-01	7.27968E+00	5.48704E+00	3.56183E+00	4.43293E+00
14	6.081E-01 - 4.076E-01	4.000E-01	4.65596E+00	3.87802E+00	2.43536E+00	2.93275E+00
15	4.076E-01 - 1.111E-01	1.300E+00	2.32832E+00	1.99927E+00	1.34015E+00	1.59090E+00
16	1.111E-01 - 1.503E-02	2.000E+00	8.82423E-01	9.20482E-01	6.19054E-01	6.78556E-01
17	1.503E-02 - 3.355E-03	1.500E+00	5.53384E-01	6.11458E-01	4.41059E-01	4.75222E-01
18	3.355E-03 - 5.829E-04	1.750E+00	4.74590E-01	5.70712E-01	4.18929E-01	4.36294E-01
19	5.829E-04 - 1.013E-04	1.750E+00	4.38417E-01	5.87895E-01	4.34402E-01	4.31373E-01
20	1.013E-04 - 2.902E-05	1.250E+00	2.92324E-01	4.20123E-01	3.18226E-01	3.07194E-01
21	2.902E-05 - 1.068E-05	1.000E+00	3.64317E-01	5.92908E-01	4.49407E-01	4.03067E-01
22	1.068E-05 - 3.059E-06	1.250E+00	2.47157E-01	4.17494E-01	3.26188E-01	2.85260E-01
23	3.059E-06 - 1.125E-06	9.999E-01	2.49790E-01	4.68382E-01	3.92253E-01	3.22141E-01
24	1.125E-06 - 4.140E-07	1.000E+00	2.02347E-01	4.84042E-01	4.62715E-01	3.65572E-01
25	4.140E-07 - 1.000E-09	6.026E+00	2.99725E-01	8.50107E-01	8.85555E-01	7.11817E-01

表 3-7 プルトニウム第2開発室の作業場における中性子エネルギー及び線量当量率測定結果

実験 No	条 件	測 定 結 果		
		Total flux ($n/cm^2 \cdot s$)	線量当量率 (mrem/hr)	平均エネルギー (MeV)
F-1	F-102 D-13 焼結炉表面 線 源 : $PuO_2 + UO_2$ ペレット 遮 蔽 : 焼結炉容器	32.0	2.74	1.16
A-1	A-102 D-28 焼結炉表面 線 源 : $PuO_2 + UO_2$ ペレット 遮 蔽 : GB+含鉛アクリル(35mm t)	30.2	1.95	0.86
A-2	A-103 D-6 GB表面 線 源 : $PuO_2 + UO_2$ 粉末 遮 蔽 : GB	30.3	2.53	1.26
A-3	A-103 D-6 GB表面 線 源 : $PuO_2 + UO_2$ 粉末 遮 蔽 : GB+含鉛アクリル(35mm t)	26.0	1.71	0.96

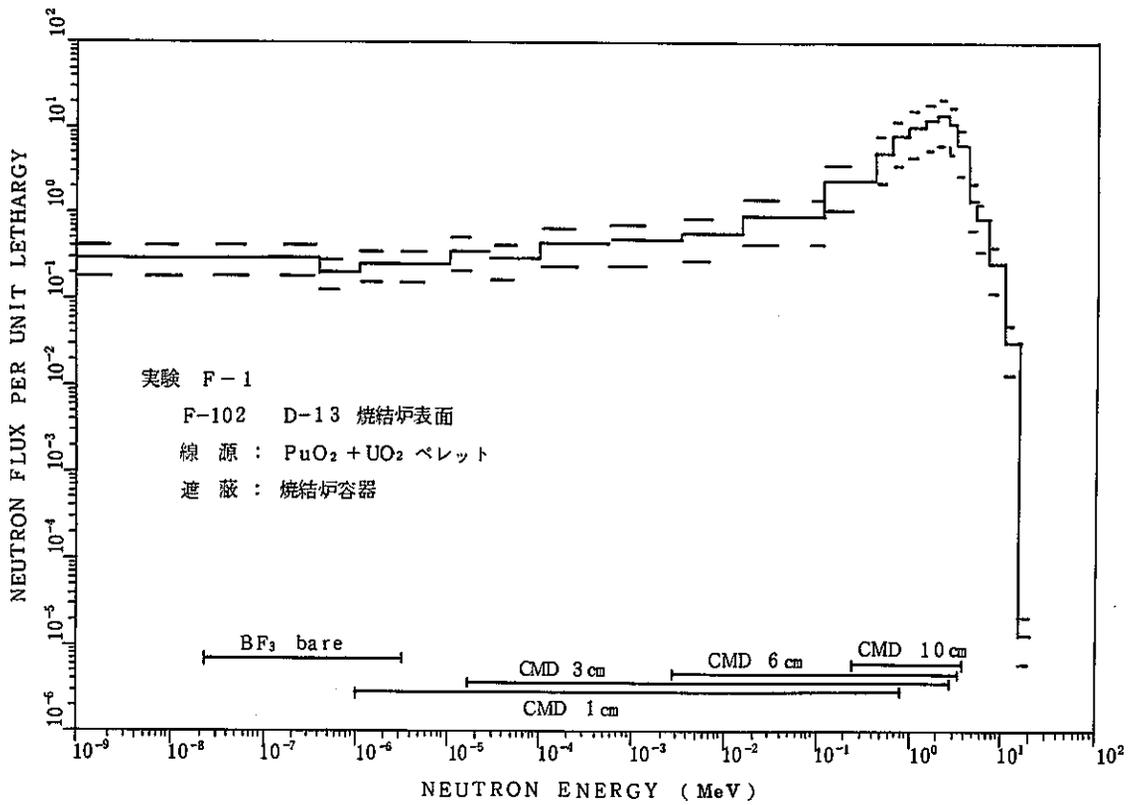


図 3-12 プルトニウム第2開発室FBR燃料製造工程に於ける中性子エネルギースペクトル測定結果(実験 F-1)

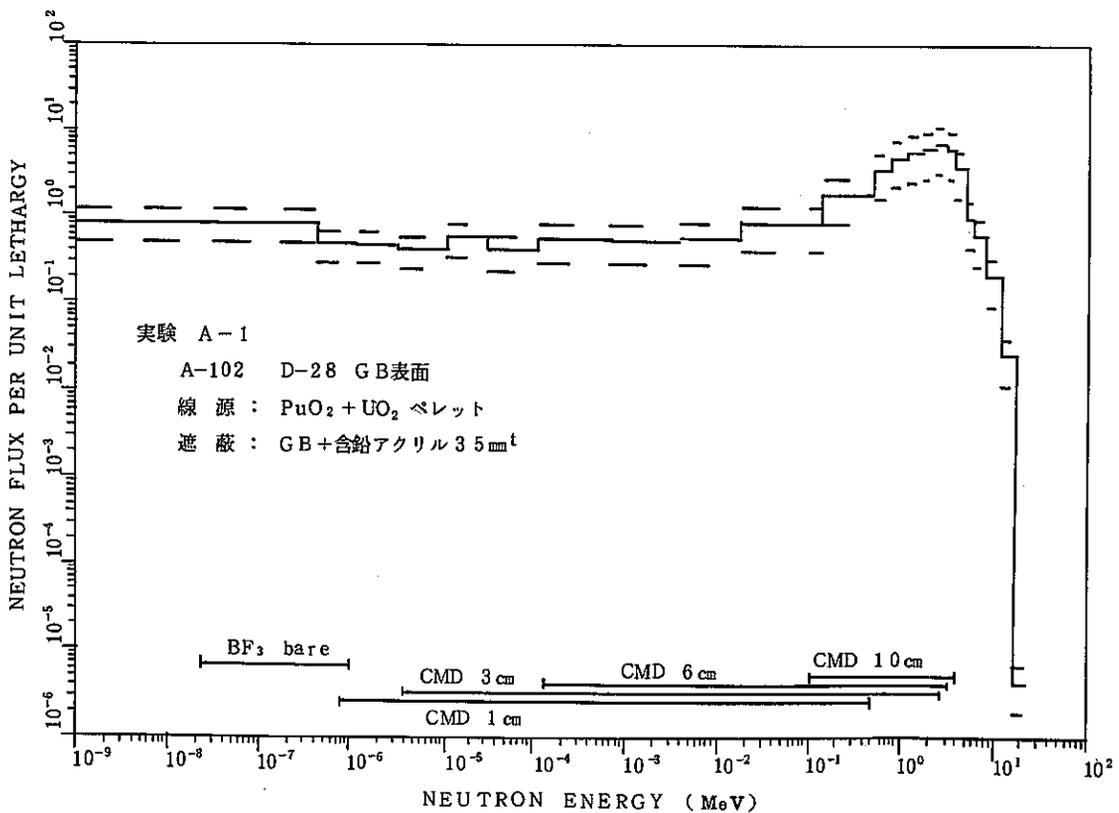


図 3-13 プルトニウム第2開発室ATR燃料製造工程に於ける中性子エネルギースペクトル測定結果(実験 A-1)

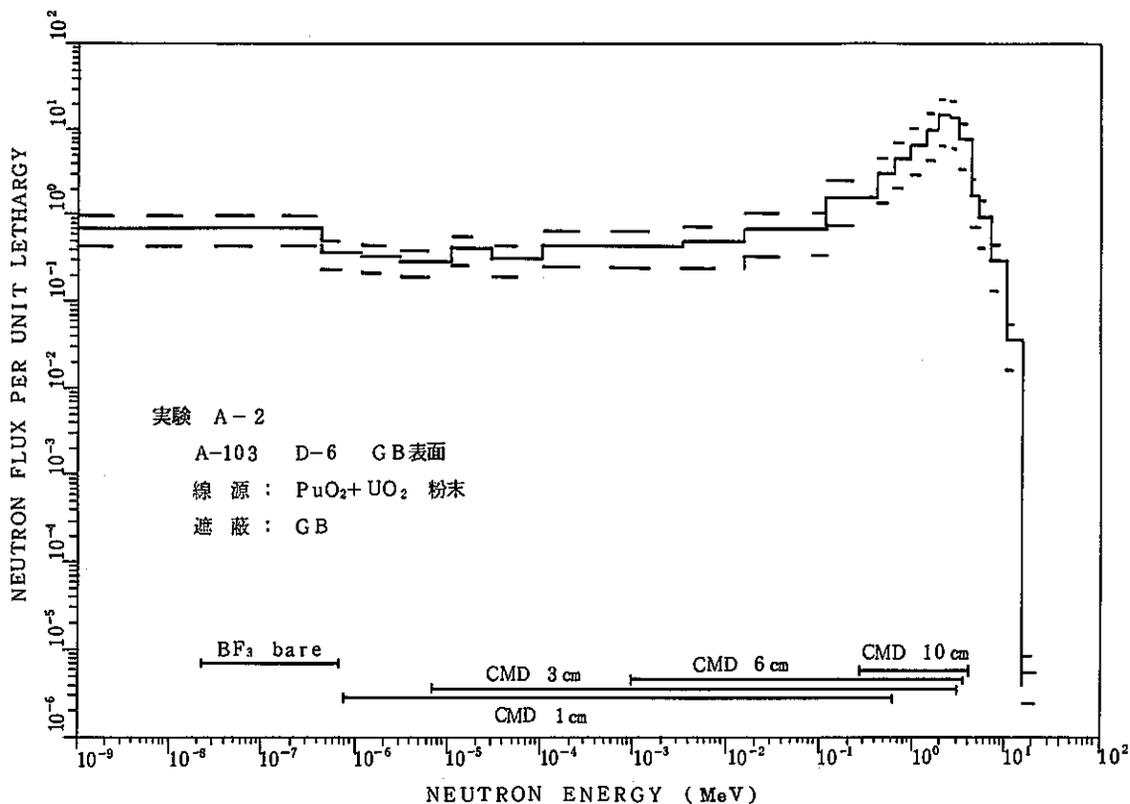


図 3-14 プルトニウム第2開発室ATR燃料製造工程における中性子エネルギースペクトル測定結果(実験 A-2)

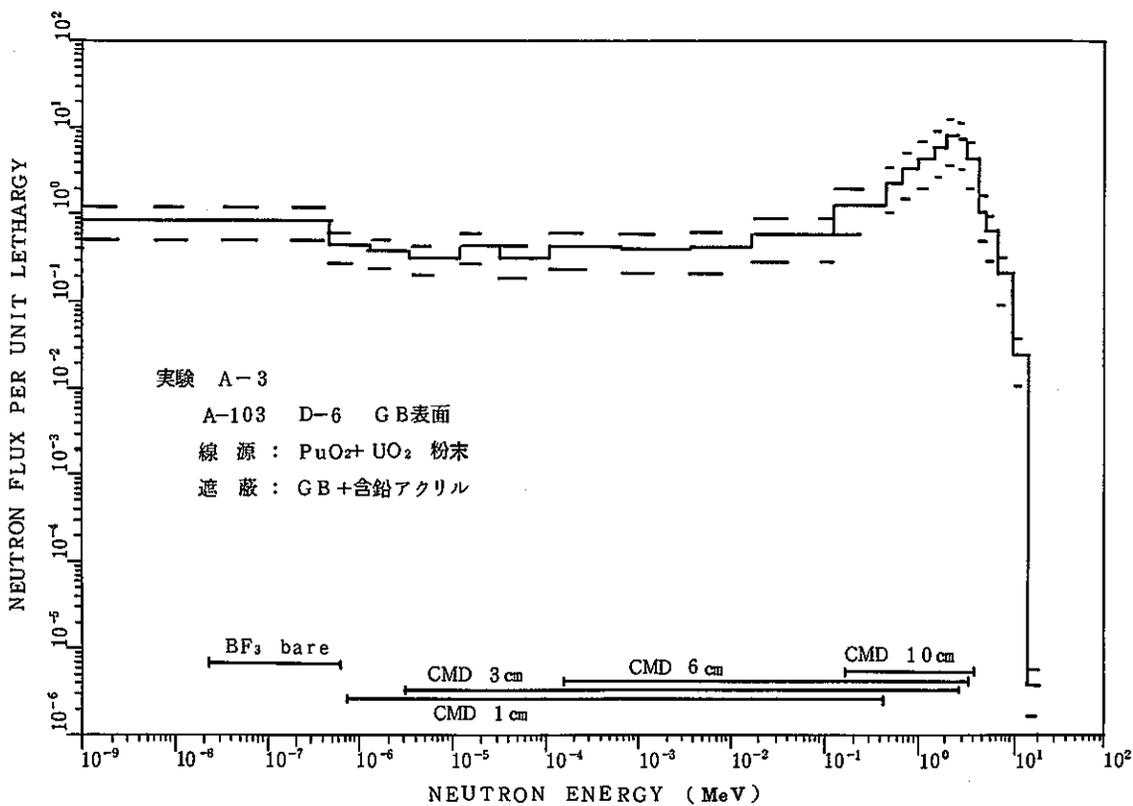


図 3-15 プルトニウム第2開発室ATR燃料製造工程における中性子エネルギースペクトル測定結果(実験 A-3)

4. 中性子線量(率)測定

東海事業所のプルトニウム燃料製造施設では、レムカウンター(Studivik製 D-0202型)及びBF₃サーベイメータ(富士電機製 NDB-4120型)を使用して、作業環境の中性子線量当量率の測定を行っている。また、TLDバッジを用いて個人被曝線量の測定評価を行っている。

これらの中性子測定器を用いて、第3章に示した中性子線源条件について線量当量(率)の測定を並行して行った。そして、多組減速材付BF₃型スペクトロメータにて測定した中性子エネルギースペクトルおよび線量当量率と、各中性子線源条件におけるTLDバッジおよびレムカウンターから求めた線量当量(率)の測定結果を比較検討をした。

4.1 測定方法

(1) レムカウンター

Studivik製 2202D型レムカウンターの構造を図4-1に示す。本測定器はAnderson型中性子サーベイメータの一種であり、検出部はBF₃比例計数管(Studivik 5203型)周囲をポリエチレンとボロン入りプラスチックで包んである。ポリエチレンは内側と外側にあり、中間にボロン入りプラスチックの層がある。2つのポリエチレンの厚さとボロン入りプラスチック層に設けられている孔の面積比により検出器の感度が図4-2に示すように近似的にICRP勧告の中性子フルエンスに対する線量当量のエネルギー曲線(rem曲線)一致するように設計されているが、実際には熱中性子から数MeVの領域においてレムカウンターのレスポンスは、線量当量のエネルギー曲線に対し-50%~+200%程度の誤差を有することも報告されている。

動燃東海事業所においては、²⁵²Cf及びAm-Be線源を用いてレムカウンターの感度校正を行っている。今回使用したレムカウンターの動燃東海事業所で行った校正結果を図4-3に示す。この校正定数を用いてプルトニウムを取扱う施設の中性子場における線量測定法を行った場合には、中性子エネルギーに対するレスポンスの相異による誤差が考えられる。

今回は、多組減速材付スペクトロメータを用いて中性子エネルギースペクトルの測定を行った各測定条件においてレムカウンターを用いて線量当量率の測定を同時に行った。

実験G-1、F-1に於るレムカウンターの測定風景を図4-4、図4-5に示す。

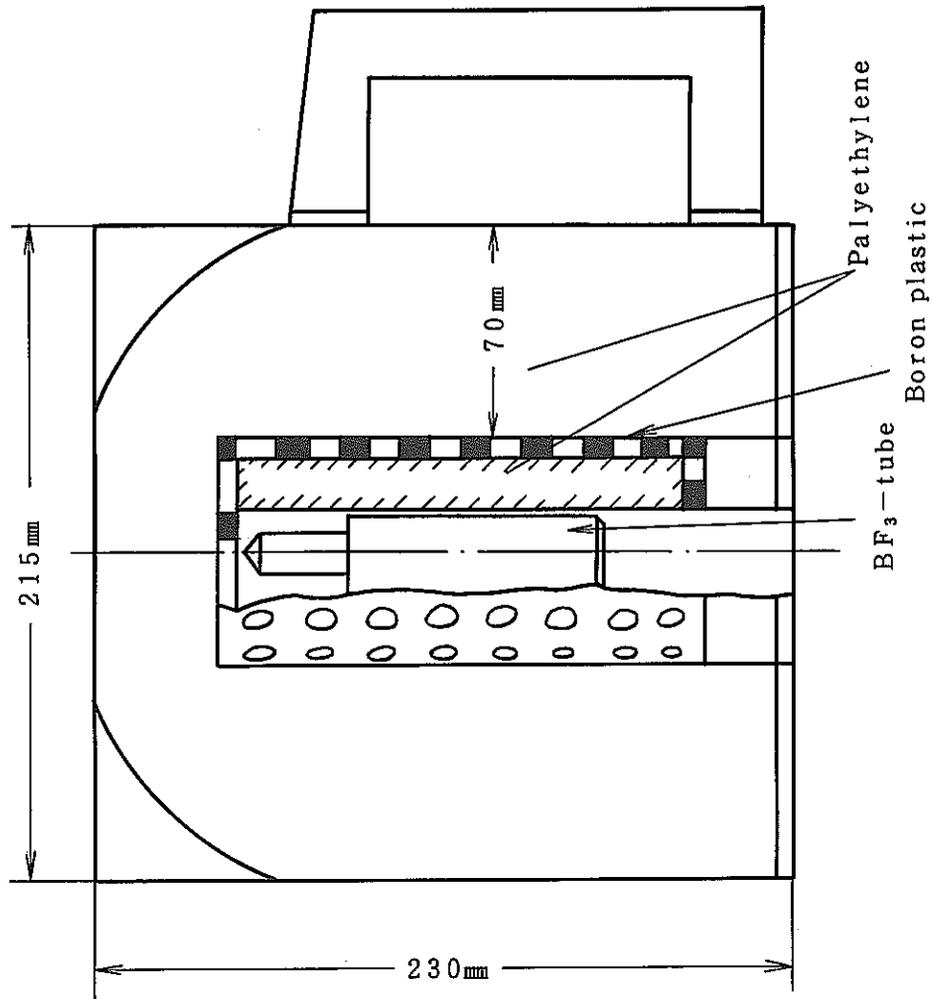


図4-1 レムカウンターの検出部構造図
(Studsvik Neutron Dose Rate Meter 2202)

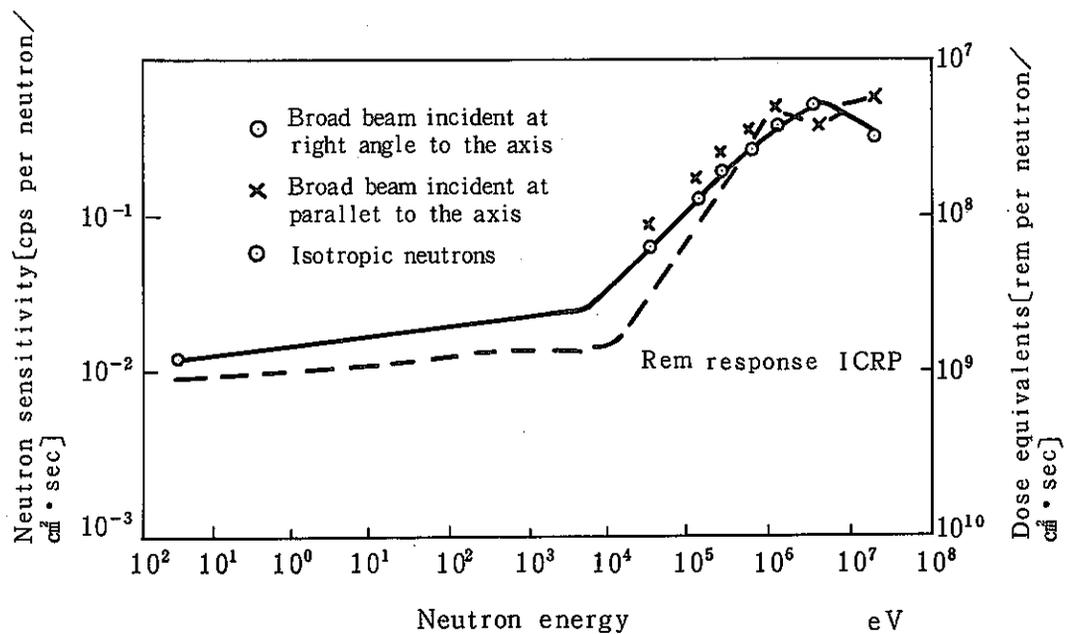


図4-2 レムカウンターの中性子エネルギーレスポンス応答

レムカウンター校正曲線

使用線源

TAG.No.25208-19

^{241}Am -Be1Ci

SER.No.8332

^{252}Cf 27mCi

校正定数(メータ指示値)1.0

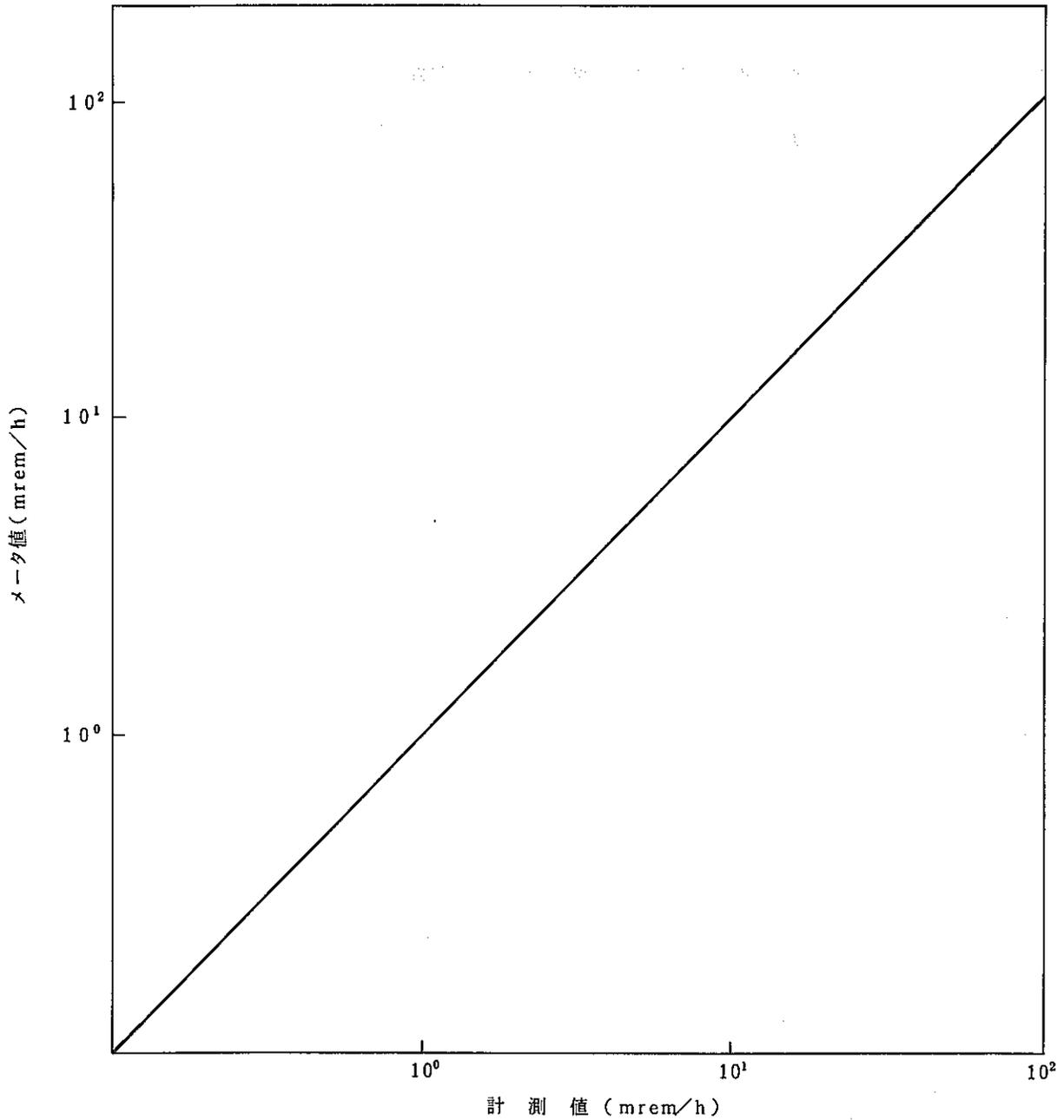


図4-3 東海事業所におけるレムカウンターの校正結果

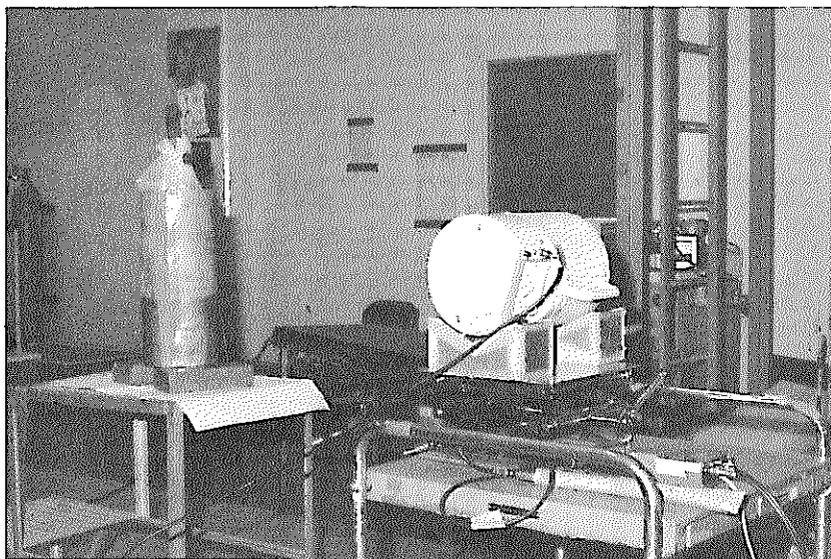


図4-4 PuO₂原料缶のレムカウンターによる中性子線量当量の測定風景(実験G-1)

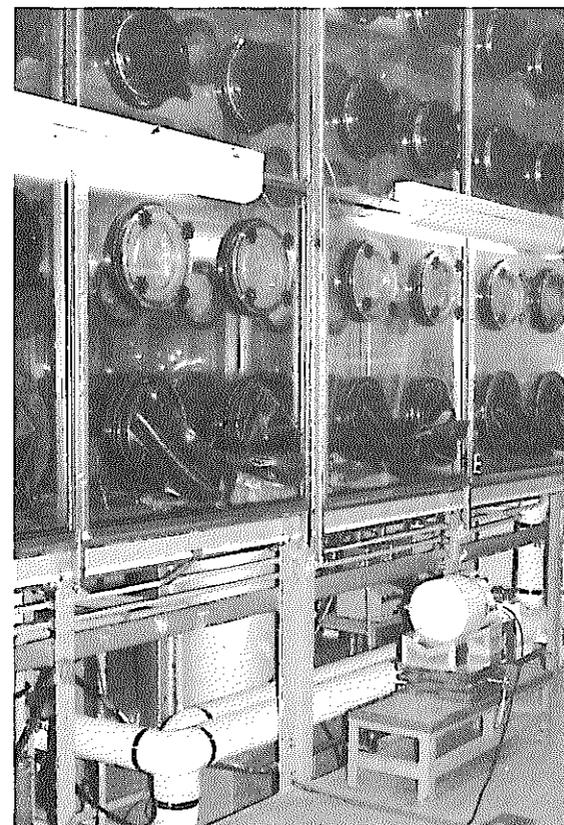


図4-5 グローブボックス表面のレムカウンターによる中性子線量当量の測定風景(実験F-1)

(2) BF₃型サーベイメータ

富士電機製NSM型サーベイメータの外観を図4-6に示す。このサーベイメータは、BF₃比例計数管(NCB 4120)に厚さが35mm及び65mmのポリエチレンの減速材を組み合わせたものであり、メータ指示値(cps)に一定の校正定数を乗じることにより、中性子の線量当量率を求めることができる。

<BF₃サーベイメータの校正定数>

検出器	動燃で求めた校正定数	メーカーの示した校正定数
BF ₃ + 35mm t	0.5 mrem/hr/cps (Am-Be) 0.4 mrem/hr/cps (²⁵² Cf)	0.11 cps/n·cm ⁻² ·s ⁻¹ (Am-Be)
BF ₃ + 65mm t	1.2 mrem/hr/cps (Am-Be) 0.7 mrem/hr/cps (²⁵² Cf)	0.31 cps/n·cm ⁻² ·s ⁻¹ (Am-Be)

また、このBF₃サーベイメータは、厚さの異なる2つの減速体を用いた場合の計数値の比から中性子のエネルギーをおおまかに推定することも可能であると言われている。

今回の実験においては、多組減速材付BF₃型検出器を用いて中性子エネルギースペクトル測定を行った各測定条件において、BF₃サーベイメータを用いた線量当量率の測定値、及び2種類の厚さの減速体条件での計数値の比と中性子平均エネルギーの関係を調べた。

測定はBF₃比例計数管の円筒軸に対し垂直の方向から中性子を入射するとともにBF₃比例計数管の中心を多減速体付BF₃スペクトルメータの中心と同じ位置に合わせて行った。

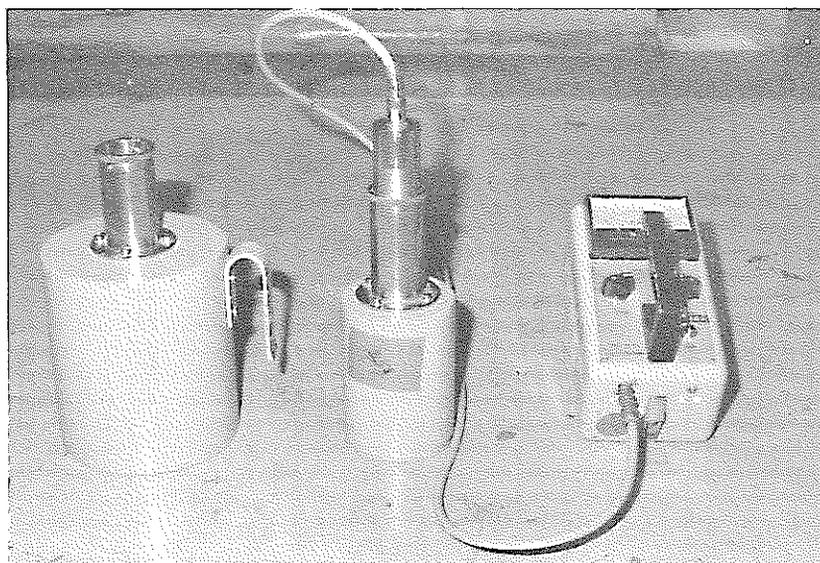


図4-6 BF₃型サーベイメータ(富士NSM-413型)の外観

(3) TLDバッジ

東海事業所の個人被曝管理に使用しているTLDバッジの外観及び全体構成を図4-7に示す。TLDバッジは2個の線量計($\gamma(X)$ ・ β 線量計及び中性子線量計)とこれらの線量計を収納するバッジケースから構成されており、 $\gamma(X)$ 線、 β 線、中性子に対して1個のバッジで線量評価を行うことができる。中性子用線量計(UD-809P型)の外観図とバッジケースを含めた断面図を図4-8に示す。ここで、今回の試験で着目する中性子用線量計については、第2、第3、第4素子(#₂、#₃、#₄)が中性子線量当量評価用であり、第1素子(#₁)は γ 線寄与(捕獲 γ 線含む)の差引用である。各TLD素子の両側には、 $7.5 \times 11 \times 0.7$ (mm)のカドミウム板または、スズ板がホルダーに貼付されている。また、周囲からの熱中性子線の回り込みを防ぐため、バッジケースの内側に厚さ0.5mmのカドミウムシールドが貼付されている。そして、3つの ${}^6\text{Li}_2$ ${}^{10}\text{B}_4\text{O}_7$ 素子に熱中性子線を遮蔽するためのカドミウム板及び γ 線の減衰に対しカドミウムとほぼ等価なスズのフィルターを組み合わせ、人体による中性子の反射・減速を利用したアルベド材により速中性子線、熱外中性子線をそれぞれ分離して測定できるようになっている。

中性子のエネルギー領域は、次のように区分している。

Nth : Thermal Neutron	0 ~ Eed (Ecd : Cd cut off energy $\simeq 0.5\text{eV}$)
: Epithermal Neutron	Eed ~ 数10eV
: Fast Neutron	数10eV 以上

実際の中性子線量評価においては、中性子の人体での後方散乱率(アルベド係数)をfluence Luminescence変換係数[$\text{mR} \cdot \text{eq} \cdot \gamma / \text{n} / \text{cm}^2$]を用いて中性子フルエンスとTLD読取値を結び付け、その読取値から線量当量を求める線量評価式の組み立てを行っている。144KeV~4MeVの単色中性線及び ${}^{252}\text{Cf}$ 、Am-Be、PuO₂線源^(注)の中性線に対して求めた線量評価式を表4-1に示す。

今回の試験においては、TLDバッジをパラフィン製の楕円柱ファントム($30 \times 20 \times 40^{\text{h}}$ cm)の表面に固定して照射を行った。但し、ファントムとTLDバッジの間の距離は、実際に作業者が着用した場合を考慮し1.5cmとした。また、TLDバッジの照射位置としては、線源からファントム表面までの距離が多組減速材付BF₃型スペクトロメータの場合の線源とBF₃比例計数管の中心との距離に同じくするようにした。照射状況を図4-9、図4-10に示す。

注) PuO₂線源に対する線量評価式は、プルトニウム第2開発室F102の中性子場において、TLDバッジをパラフィンに固定した状態でIn-Situ校正(基準の線量は、レムカウンターにて測定)を行って決定したものである。

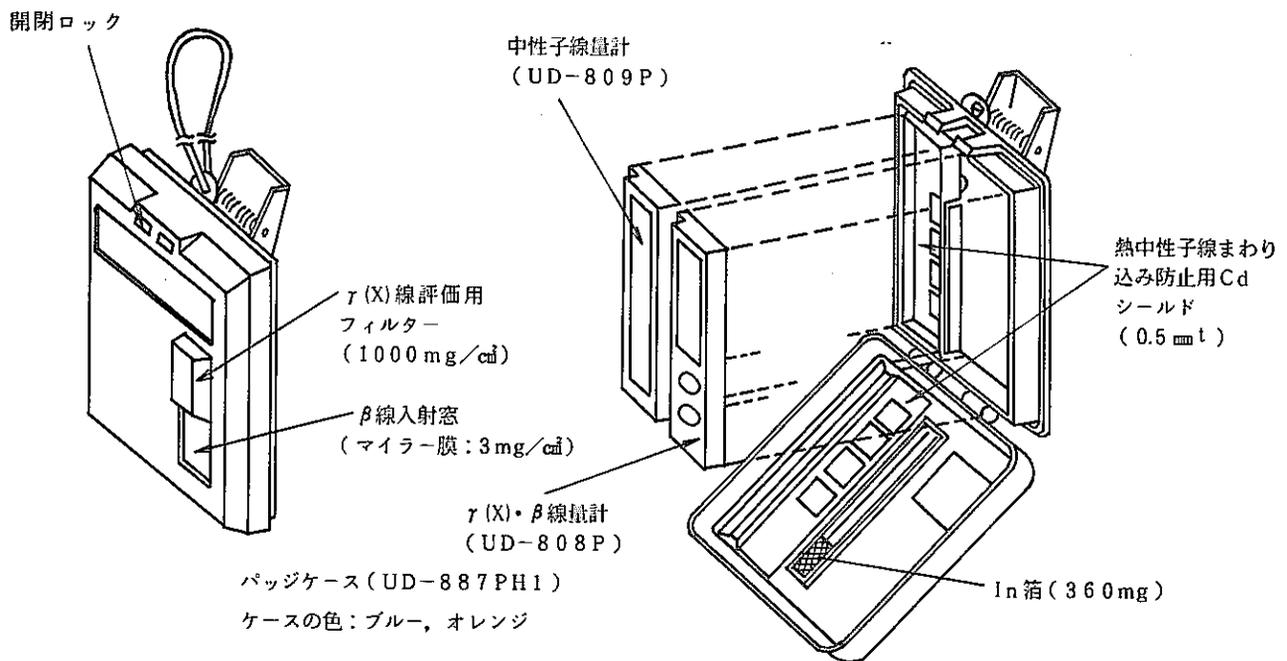
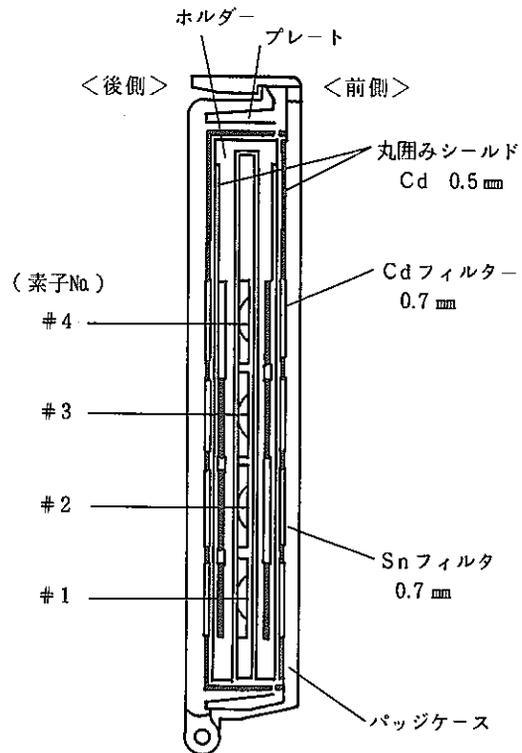


図4-7 TLDバッジの全体構成 (γ(X)・β, 中性子線評価用)

素子No.	フィルター (前)	蛍光体	フィルター (後)
#4	Cd	${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$	Sn
#3	Cd	${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$	Cd
#2	Sn	${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$	Cd
#1	Cd	${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$	Cd



(a) TLD素子の構成

(b) ケースを含めた断面図

図4-8 中性子線用線量計 (UD-809P)

表4-1 各中性子線に対して算出した中性子線量評価式

中性子線源	中性子線量当量評価式
144 KeV	$D_f = 0.60 \cdot \{ (T_4 - T_3) - 0.76(T_2 - T_3) - 0.36(T_3 - T_1) \}$
565 KeV	$D_f = 2.18 \cdot \{ (T_4 - T_3) - 0.76(T_2 - T_3) - 0.36(T_3 - T_1) \}$
1.0 MeV	$D_f = 3.40 \cdot \{ (T_4 - T_3) - 0.76(T_2 - T_3) - 0.36(T_3 - T_1) \}$
2.5 MeV	$D_f = 6.03 \cdot \{ (T_4 - T_3) - 0.76(T_2 - T_3) - 0.36(T_3 - T_1) \}$
4.0 MeV	$D_f = 7.67 \cdot \{ (T_4 - T_3) - 0.76(T_2 - T_3) - 0.36(T_3 - T_1) \}$
^{252}Cf	$D_f = 3.21 \cdot \{ (T_4 - T_3) - 0.76(T_2 - T_3) - 0.36(T_3 - T_1) \}$ $D_{ep} = 0.0094 \cdot \{ (T_3 - T_1) + 0.23(T_2 - T_3) - 0.30(T_4 - T_3) \}$ $D_{th} = 0.027(T_2 - T_3)$
$^{241}\text{Am} - \text{Be}$	$D_f = 6.12 \cdot \{ (T_4 - T_3) - 0.76(T_2 - T_3) - 0.36(T_3 - T_1) \}$ $D_{ep} = 0.0098 \cdot \{ (T_3 - T_1) + 0.29(T_2 - T_3) - 0.39(T_4 - T_3) \}$ $D_{th} = 0.027(T_2 - T_3)$
PuO_2	$D_f = 3.60 \cdot \{ (T_4 - T_3) - 0.76(T_2 - T_3) - 0.36(T_3 - T_1) \}$ $D_{ep} = 0.011 \cdot \{ (T_3 - T_1) + 0.43(T_2 - T_3) - 0.57(T_4 - T_3) \}$ $D_{th} = 0.027(T_2 - T_3)$

注) TLDバッジとPhantom間1.5 m

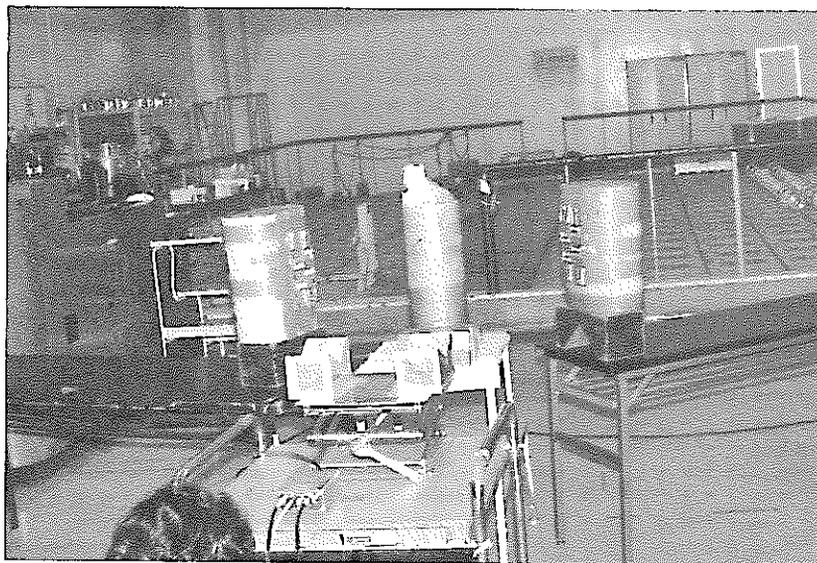


図4-9 PuO₂原料缶を用いたTLDバッジの照射風景
(実験 G-1)

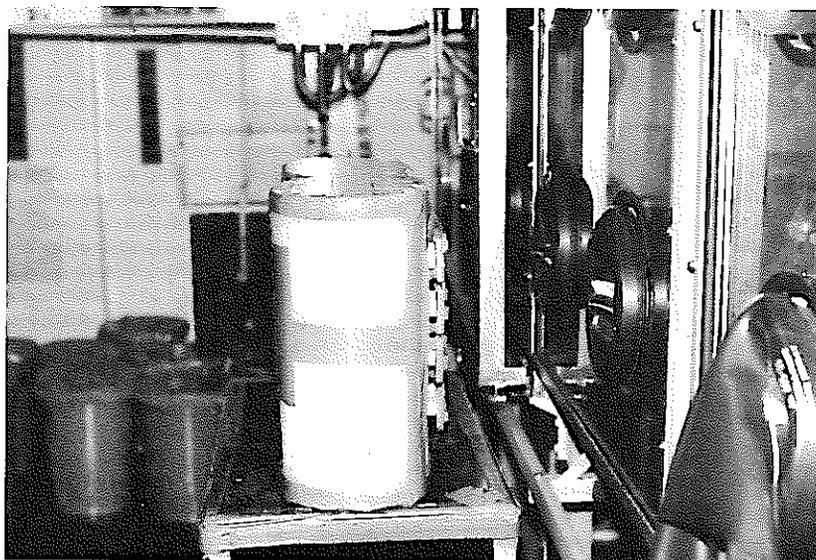


図4-10 グローブボックス表面におけるTLDバッジの
照射風景 (実験 A-3)

4.2 測定結果

(1) レムカウンター及びBF₃サーベイメータによる測定

PuO₂原料缶を用いた測定において、中性子エネルギースペクトル測定位置における線量当量率をレムカウンター及びBF₃サーベイメータにて測定した結果を表4-2に示す。また、中性子エネルギースペクトルの測定に用いた多組減速材付BF₃スペクトロメータの測定結果において各エネルギー群毎にフルエンスからremへの変換を行い線量当量率を求めた結果も同表に示す。

東海事業所においてレムカウンターは²⁵²Cf及びAm-Be線源を用いて感度校正が行われており、これらの線源から放出される中性子に対してはメータ指示値、あるいはカウンター出力計数値(cps)と変換係数(3.6cps/mrem・h⁻¹)を用いて線量当量率を求めることができる。今回の実験において多組減速材付BF₃型スペクトロメータにて求めた線量当量率に対するレムカウンター測定値の比は1.03~1.24であり、いずれもレムカウンターを用いて測定した線量当量率がやや高めであった。

BF₃サーベイメータにおいては35mmtと65mmtの2種の減速体付の各々の条件について²⁵²Cf線源を用いて変換係数(mrem・h⁻¹/cps)が求められており、サーベイメータの読取計数値(cps)にこの変換定数を乗じて線量当量率を求めることができる。PuO₂原料缶を用いた照射においては多組減速材付BF₃型スペクトロメータを用いて測定した線量当量率に対するBF₃サーベイメータを用いて測定した線量当量率の比は、35mmt減速体付の場合に1.10~1.24であり65mmt減速体付の場合には1.10~1.24であった。すなわちBF₃サーベイメータによる測定結果が35mmt減速体付の場合には30~60%程度、また65mmt減速体付の場合には10~25%高めであるとともに、その過大評価の程度は原料缶に組合わせる含鉛アクリルの厚さが増えるにつれて(即ち中性子線の平均エネルギーが低くなるにつれ)大きくなっていることが判った。

次にプルトニウム燃料第2開発室の場で中性子エネルギースペクトルの測定を行った代表的な位置で測定した中性子線量当量率の測定結果を表4-3に示す。中性子の平均エネルギーが0.83~1.16MeVの時、多減速体付BF₃スペクトロメータから求めた線量当量率に対するレムカウンターを用いて測定した線量当量率の比は0.97~1.02で、両者は良く一致していた。また、BF₃サーベイメータから求めた線量当量率の多組減速材付BF₃型スペクトロメータから求めた線量当量率に対する比は35mmt減速体付の場合には1.38~2.20、65mmt減速体付スペクトロメータの場合には1.10~1.47であり、いずれもBF₃サーベイメータを用いて測定した線量当量率の方が高めであった。

Studivik製レムカウンター(2202D型)については従来よりICRPの示すrem応答曲線に対し低エネルギー側でオーバーレスポンスであることが報告されている²⁾。今回のPuO₂原料缶を用いた照射やプルトニウム燃料第2開発室の作業場における測定では中性子線の平均

エネルギーが0.83～1.92 MeVであり、いずれもレムカウンターの校正に使用している ^{252}Cf やAm-Be線源の中性子に比べてエネルギーが低めである。このためプルトニウム取扱施設の中性子場においては真の線量当量率に対してレムカウンターの測定値は過大評価の傾向になることが考えられるが、多組減速材付BF₃型スペクトロメータを用いて測定した線量当量率と比較してレムカウンターの測定値は最大20%高めであった。レムカウンターによる中性子線量当量率の測定について小佐古らの報告においては種々の中性子場のエネルギーに応じた線量変換係数を使用する方法も示されているが、今回の測定結果ではプルトニウム燃料取扱いの中性子線場においては ^{252}Cf 及び ^{241}Am -Be線源を用いて校正したレムカウンターを使用して線量当量率の測定を行ってもそのエネルギー依存性に伴う誤差は比較的小さいことが判った。

一方、富士電機製BF₃型サーベイメータにおいては ^{252}Cf 線源を用いて校正した変換定数(mrem・h⁻¹/cps)を使用して線量当量率の測定を行った場合に、プルトニウム燃料取扱施設の中性子線場においては35mm t厚さの減速体を用いた時は30～100%、65mm t厚さの減速体を用いた時は10～50%の過大評価となることが判った。また、BF₃サーベイメータにおいては2種類の減速体を用いた時の計数量の比から中性子の平均エネルギーを大まかに推定することも可能とされているが、今回の測定では35mm tと65mm t厚さの減速体を用いた時の計数率の比1.30～1.60であるとともにその計数比と中性子平均エネルギーの相関もなく、BF₃サーベイメータのメータ指示値の読み取りでは2種類の減速体条件の計数率比から中性子の平均エネルギー情報を求めることは困難であった。

表4-2 多組減速材付BF₃型スペクトロメータから求めた中性子線量率とレムカウンターおよびBF₃サーベイメータから求めた中性子線量率の測定結果の比較(1)

実験No	条 件	多組減速材付BF ₃ スペクトロメータ		レムカウンター (2202D)	BF ₃ サーベイメータ (NSM-413)			中性子線量比		
		中性子平均エネ ルギー (MeV)	中性子線量 ^① (mrem/hr)	中性子線量 ^② (mrem/hr)*	中性子線量 ^③ (mrem/hr)**		感度比 (計数值)35 (計数值)65	②/①	③/①	
					35mm t	65mm t			35mm t	65mm t
G-1	線源: PuO 原料缶 遮蔽: Pb 1mm 距離: 100 cm	1.92	1.54	1.91±0.08	2.1	1.7	1.40	1.24	1.36	1.10
G-2	線源: PuO 原料缶 遮蔽: Pb1mm+平板アクリル10mm 距離: 100 cm	1.69	1.34	1.53±0.09	1.8	1.6	1.13	1.14	1.34	1.19
G-3	線源: PuO 原料缶 遮蔽: Pb1mm+含鉛アクリル35mm 距離: 100 cm	1.12	1.16	1.34±0.04 1.34±0.04	1.8	1.4	1.40	1.16	1.55	1.21
G-4	線源: PuO 原料缶 遮蔽: Pb1mm+含鉛アクリル43mm 距離: 75 cm	1.21	1.94	2.00±0.07	3.2	2.4	1.30	1.03	1.65	1.24

* レムカウンターの計数值(cps)に校正定数(3.6cps/mrem·h⁻¹)を乗じて求めた。

** 35mm t, 65mm tの各々の減速体条件においてAm-Be線源で求められている校正定数(mrem·h⁻¹/cps)を各々のメータ指示値(cps)に乗じて求めた。

表4-3 多組減速材付BF₃スペクトロメータから求めた中性子線量率とレムカウンターおよびBF₃サーベイメータから求めた中性子線量率の比較(2)

実験No.	条 件	多組減速材付BF ₃ スペクトロメータ		レムカウンター (2202D)	BF ₃ サーベイメータ (NSM-413)			中性子線量比		
		中性子平均エネルギー (MeV)	中性子線量 ^① (mrem/hr)	中性子線量 ^② (mrem/hr)	中性子線量 ^③ (mrem/hr)		感度比 (計数值)35 (計数值)65	②/①	③/①	
					35mm t	65mm t			35mm t	65mm t
F-1	F-102 D-13 焼結炉表面 線源: PuO ₂ +UO ₂ ペレット 遮蔽: 焼結炉容器	1.16	2.74	2.71±0.02	4.1	3.6	1.31	0.99	1.50	1.31
A-1	A-102 D-28 GB表面 線源: PuO ₂ +UO ₂ ペレット 遮蔽: GBパネル+含鉛アクリル35mm t	0.83	1.95	1.89	4.2	2.8	1.17	0.97	2.2	1.47
A-2	A-103 D-6 GB表面 線源: PuO ₂ +UO ₂ 粉末 遮蔽: GBパネル	1.13	2.53	2.58	3.5	2.8	1.40	1.02	1.38	1.11
A-3	A-103 D-6 GB表面 線源: PuO ₂ +UO ₂ 粉末 遮蔽: GBパネル+含鉛アクリル35mm t	0.91	1.71	1.71	2.9	2.2	1.29	1.00	1.70	1.29

(2) TLDバッジによる線量当量率の評価

PuO₂原料缶による中性子線場、FBR及びATR燃料構造工程の代表的な中性子線場においてTLDバッジをパラフィン製楕円柱ファントムの表面に固定して照射した場合のTLDバッジの測定結果を表4-4に示す。またこのTLDバッジを用いて評価した中性子線量当量と多減速付BF₃型スペクトロメータ及びレムカウンターを用いて測定した線量当量との関係を表4-5に示す。なお、比較のために多減速材付BF₃型スペクトロメータ及びレムカウンターの測定結果についてはTLDバッジの照射時間に換算した線量当量を示した。

TLDバッジは人体で減速、後方散乱した中性子線検出する方法(アルベト法)を採用しているが、人体で中性子が後方散乱する割合は入射中性子のエネルギーにより変化するためTLDバッジの感度は中性子のエネルギーに依存して変化する。電子技術総合研究所のペレトロン型加速器を用いた照射試験では3.5MeV～4MeVの単色速中性子に対して図4-11に示すようなエネルギー依存性が得られている⁽¹⁾。このようなTLDバッジのエネルギー特性をふまえ東海事業所においてはプルトニウム燃料第2開発室の作業環境にてIn-situ校正を行い下記に示すような中性子線量評価式を決定し実際の被曝管理においてこの評価式を一律に使用している。表4-4、4-5においてもこの線量当量評価式を用いて速中性子線の線量当量を算出した。

＜中性子線量評価式＞

$$H_f = 3.6 \{ (T_4 - T_3) - 0.76 (T_2 - T_3) - 0.36 (T_3 - T_1) \} \dots\dots\dots (4.1)$$

$$H_{th} = 0.027 (T_2 - T_3) \dots\dots\dots (4.2)$$

H_f : 速中性子線量

H_{th} : 熱中性子線量

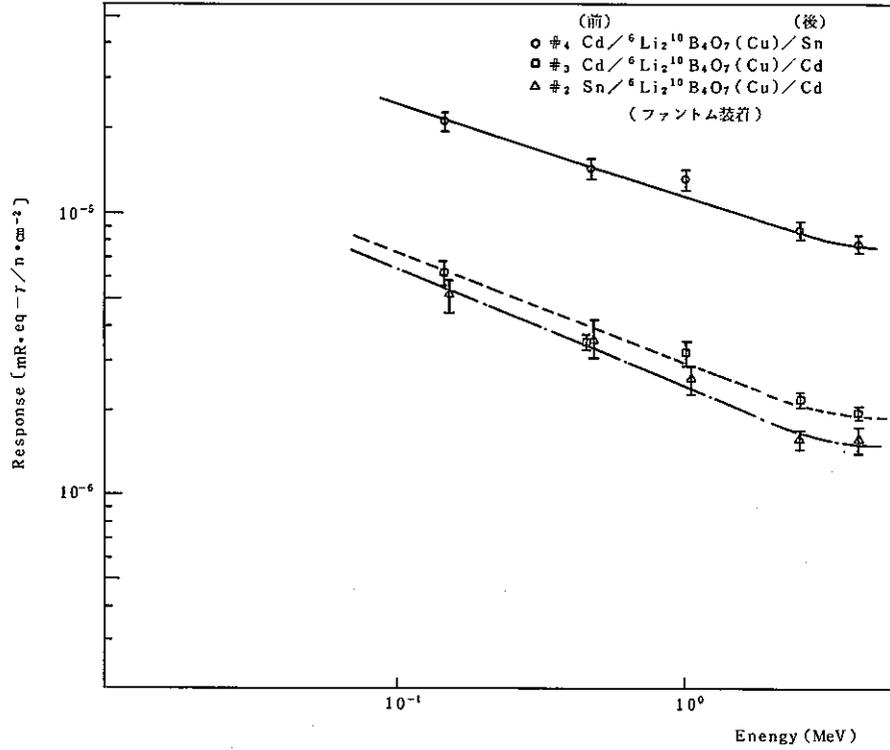
T_n : TLD素子#1～#4の発光量(mR・eq-γ)

今回照射を行った平均エネルギーが0.78～1.72MeVの中性子線場において、レムカウンターを用いて測定した線量当量に対するTLDバッジから評価した速中性子線量の比は0.78～1.72であり、中性子平均エネルギーが大きくなるにつれこの比は小さくなっている。この理由としては、従来から実際の被曝管理に適用している線量当量評価式(4.1)はFBR工程F102室のグローブボックスD-12の表面(含鉛アクリルの遮へい体が無い状態)でのIn-situ校正によって決定されたものであるため、これより低エネルギー成分の多いと考えられる場(例えば実験A-3, A103室, グローブボックスD-6含鉛アクリル35mm^tの遮へい体が有る状態)ではTLDバッジの感度が大きいためTLDから評価した中性子線量当量値が過大評価となっている。一方、遮へいが無く低エネルギー成分の少ない場(例えば、実験G-

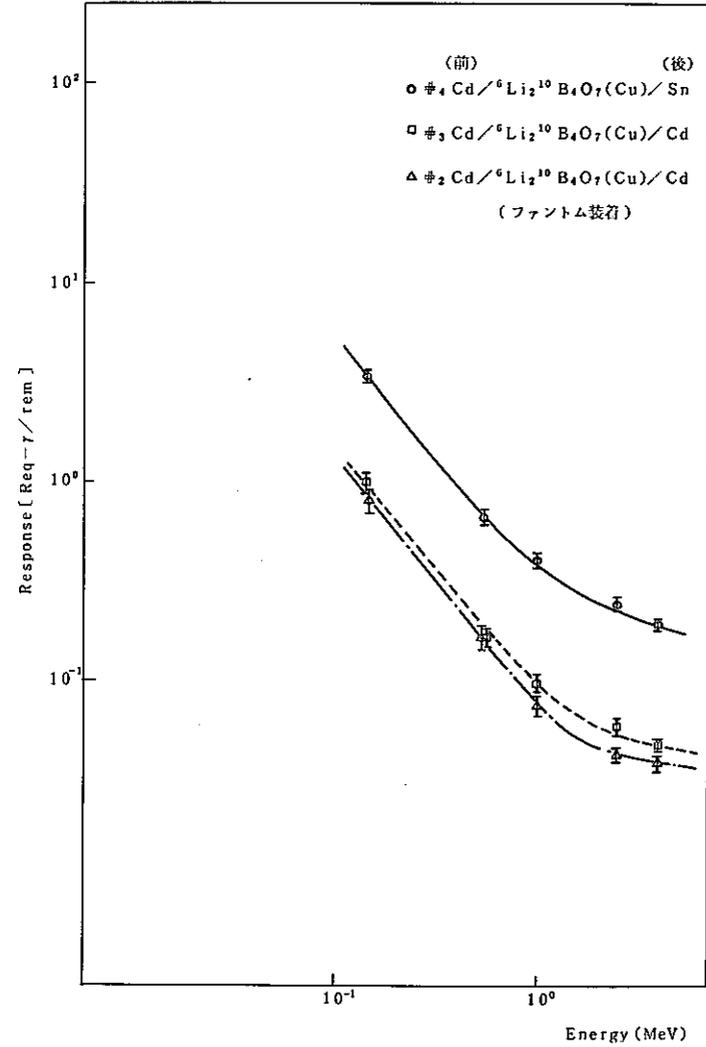
1, PuO_2 原料缶 + $\text{Pb}1\text{mm}^t$) では TLD バッジの感度が小さいため評価線量当量値は過少評価となっている。

次に TLD バッジの測定結果において、TLD バッジに含まれる 4 つの TLD 素子間の発光量の大小関係について検討した。TLD 素子のうち #₂ が前方から入射するエネルギー中性子 (主に熱中性子) に対して感度を持っており、この #₂ 素子の発光量 T_2 と #₃ 素子 (前後とも Cd で囲まれ熱中性子の寄与をうけない) の発光量 T_3 との比は表 4-4 から判るように 1.0~2.2 の間で変化している。特に実験 A-3 のように含鉛アクリルの遮へい体による散乱・減速によって低エネルギー成分が多い場合には T_2 が大きくなり $(T_2 - T_1) / (T_3 - T_1)$ 比が大きくなる。このように TLD 素子間の発光量の大小関係から中性子の平均エネルギーを大まかに推定することができる。

実際の被曝管理でプルトニウム燃料製造施設の全域において個々の作業者についてその立入場所、作業状況 (中性子線の平均エネルギー) を把握して被曝線量の評価を行うことは不可能であり、管理上はプルトニウム燃料製造施設全域で 1 つの線量評価式を用いることが合理的である。今回の試験結果からプルトニウム取扱施設の中性子場においては線量評価式 (4.1) を用いて評価した中性子線量当量はレムカウンターを用いて測定した線量当量に対し -30%~+70% の範囲である。このように TLD バッジのエネルギー特性に起因する誤差は -30%~+70% 程度あるものの F101 室~103 室, A101 室~103 室の FBR, ATR 燃料製造工程においては安全側の評価であることが判った。なお、TLD バッジ中の素子間の発光量の比から中性子の平均エネルギー (散乱等による低エネルギー成分の割合が多いか少ないかなど) を大まかに推定することも可能であり、必要に応じこれらの比を用いて線量評価を補正することもできる。



(a) 単位フルエンス当り



(b) 単位 rem 当り

図 4-11 TLDバッジの単色中性子に対するエネルギーレスポンス

表4-4 プルトニウムの中性子場で照射したTLDバッジの測定結果

実験No.	条 件	中性子平均 エネルギー (MeV)	T L D 素 子 発 光 量 (mR \cdot eq \cdot r)				発光量比 $\left(\frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_1}\right)$	TLDバッジによる 中性子線量当量 評価値 (mrem)
			T ₁	T ₂	T ₃	T ₄		
G-1	線源：PuO ₂ 原料缶 遮蔽：Pb 1mm 距離：100cm	1.79	15.7 \pm 0.7	21.5 \pm 1.1	21.5 \pm 3.0	28.8 \pm 1.6	1.00	18 \pm 6
F-1	線源：PuO ₂ 原料缶 遮蔽：Pb 1mm+平板アクリル10mm 距離：100cm	1.16	17.3 \pm 9.2	36.4 \pm 4.0	35.4 \pm 6.1	68.5 \pm 4.6	1.06	93 \pm 14
A-2	線源：PuO ₂ 原料缶 遮蔽：Pb 1mm+含鉛アクリル35mm 距離：100cm	1.13	20.7 \pm 2.3	43.7 \pm 7.1	33.8 \pm 3.3	57.4 \pm 8.0	1.78	57 \pm 8
A-3	線源：PuO ₂ 原料缶 遮蔽：Pb 1mm+含鉛アクリル43mm 距離：75cm	0.91	31.1 \pm 3.0	96.2 \pm 11.3	59.7 \pm 6.0	110 \pm 8.7	2.21	110 \pm 9

表4-5 プルトニウムの中性子場で照射したTLDバッジの測定結果

実験No.	条 件	多減速材的BF ₃ スペクトロメータ		レムカウンター	TLDバッジ	中性子線量比 ($\frac{\text{TLDバッジ}}{\text{レムカウンター}}$)
		中性子平均エネルギー (MeV)	中 性 子 線 量 (mrem)	中 性 子 線 量 (mrem)	中 性 子 線 量 ^{注1)} (mrem)	
G-1	線源: PuO ₂ 原料缶 遮蔽: Pb 1mm 距離: 100cm	1.92	—	13.8 T/cm ² 23	18 ± 6.0	0.78
F-1	F-102 D-13 焼結炉表面 線源: PuO ₂ +UO ₂ ペレット	1.16	43	42	56 ± 2.2	1.33
	遮蔽: 焼結炉容器	1.16	—	82	93 ± 1.3	1.13
A-2	A-103 D-6 GB表面 線源: PuO ₂ +UO ₂ 粉末 遮蔽: GBパネル	1.26	40	19 T/cm ² 38	57 ± 8.0	1.50
A-3	A-103 D-6 GB表面 線源: PuO ₂ +UO ₂ 粉末 遮蔽: GBパネル+含鉛アクリル35mmt	0.96	—	22.9 T/cm ² 64	110 ± 8.7	1.72

注1) 下記の線量評価式にて算出した。

$$Df = 3.6 \{ (T_4 - T_3) - 0.76 (T_2 - T_3) - 0.36 (T_3 - T_1) \}$$

5. ま と め

プルトニウム製造施設における中性子場として、 PuO_2 原料缶に数種類の厚さの異なる含鉛アクリルを組み合わせた条件での測定と、第2開発室の代表的な中性子場での測定を、多組減速材付 BF_3 型スペクトロメータを用いて行いこのスペクトロメータから求めた中性子エネルギースペクトルおよび中性子線量当量に基づきレムカウンターおよびTLDバッジを用いた中性子線量測定評価法について検討した。この結果、以下の結論が得られた。

(1) 中性子平均エネルギーの測定

- ① PuO_2 粉末原料缶にPb(1mm t)、アクリル(10mm t)、含鉛アクリル(35mm t、43mm t)の遮蔽体を組み合わせた場合に、線源から100mの位置(含鉛アクリル43mm tの場合は、75cm)において中性子の平均エネルギーは1.12~1.92MeVであった。即ち、Pu原料缶にPb1mm tを組み合わせた条件では、中性子の平均エネルギーは1.92MeV、これに含鉛アクリル35mm tを付加した条件では1.12MeVであり、遮蔽体が厚くなるにつれて中性子の低エネルギー成分が増加し、中性子の平均エネルギーも小さくなることが判った。
- ② プルトニウム第2開発室のFBR、ATR燃料製造工程の代表的な作業場4点において測定した中性子の平均エネルギーは0.86~1.26MeVであった。また、作業場において中性子のエネルギースペクトルは、グローブボックス表面に中性子遮蔽用として設けられている含鉛アクリルの有無によって大きく変化することが判った。(含鉛アクリルが有る場合には、中性子の平均エネルギーが約0.9MeV、含鉛アクリルが無くグローブボックスの1cm厚さのアクリルパネルのみでは、約1.25MeVであった。)また、F102室焼結炉周辺での平均エネルギーは、1.22MeVであり実験A-2(含鉛アクリルが無くグローブボックスアクリルパネルだけの場合)と同程度であった。
- ③ 中性子エネルギー群毎にフェンスを線量当量へ変換した場合に全線量当量率の中で100eV以上の中性子線の寄与割合は、実験G-1(PuO_2 原料缶+Pb1mm t; $E_{\text{Ave}} = 1.92\text{MeV}$)と、実験A-2(A102, $\text{PuO}_2 + \text{UO}_2$ ペレットGB+含鉛アクリル35mm t; $E_{\text{Ave}} = 0.83\text{MeV}$)の場合も0.1%以下であった。この結果、プルトニウム燃料製造施設の作業場においては、100eV以上の速中性子線の寄与が大部分であり、熱・熱外中性子線の線量当量への寄与は、無視できることが判った。

(2) 中性子線量当量の測定

① レムカウンターによる線量当量率の測定

作業環境の中性子線量測定に用いられているstudiv製レムカウンター(2022D型)は、 ^{252}Cf 、 $^{241}\text{Am-Be}$ 線源を用いて校正が行われているが、これらの線源から求めた校正定数をそのまま一律使用してプルトニウム取扱施設の作業場の線量当量率の測定を行った場合には、多組減速材付 BF_3 型スペクトロメータから測定した線量当量率に対するレムカウンターから求

めた線量当量率の誤差は0～+20%となる。

② BF₃サーベイメータによる線量当量率の測定

2種類の厚さの異なる減速体を組み合わせて使用するBF₃サーベイメータ（富士電機NSM 413）は、²⁵²Cf、及び²⁴¹Am-Be線源を用いて校正が行われているが、この校正定数を一律使用してプルトニウム取扱施設の中性子場で線量当量率を測定を行った場合には、多組減速材付BF₃型スペクトロメータから求めた測定結果に比べて、10～40%の過大評価になっていることが判った。また、中性子の平均エネルギーが0.86～1.92MeVの中性子場においては、2種類の減速体のみ数年はほぼ一定であり、その比から中性子の平均エネルギーを推定することは不可能であった。

③ TLDバッジによる線量評価

個人被曝線量の測定に使用しているTLDバッジにおいて、従来から用いている線量評価式を用いて求めた線量当量は、多組減速材付BF₃スペクトロメータを用いて測定した線量当量に比べて、-30～+70%の誤差であった。即ち、PuO₂原料缶+Pb1mm^tの条件のように中性子線の平均エネルギーが1.92MeVと比較的高めであり高エネルギー成分が多い場合には過少評価となり、一方、GBに含鉛アクリル35mm^tを組み合せた条件（例えば、実験A-2；中性子の平均エネルギー0.86MeV）では低エネルギー成分が多いため過大評価となっている。

実際の被曝管理において個々の作業者の作業区域や作業条件を把握し、エネルギースペクトル情報を考慮した線量評価を行うことは不可能である。このため、プルトニウム燃料製造全体で1つの線量評価式を用いて線量評価を行うことになるが、この場合にはTLDバッジの中性子エネルギー依存性に起因して、-30～+70%の誤差を生じることになる。このことは、特にグローブボックス表面に含鉛アクリルの遮蔽体を置いた場合に、作業環境の線量当量率は減少するが、遮蔽体中での減速により低エネルギー成分が増加し、TLDバッジは低エネルギー成分がある場合には感度が高くなる特性を持っているためTLDバッジの評価線量としては、遮蔽体による中性子線量の減衰ほどは中性子線量評価結果が小さくならない場合もあるため実際の管理においては、特に作業場の中性子スペクトル変化に十分に注意する必要がある。

一方、個人線量計による中性子被曝線量の評価やレムカウンターによる作業環境の中性子線量率の測定をさらに精度よく行うためには、今後、以下のような項目にはさらに検討する必要がある。

(1) 中性子エネルギースペクトル測定技術の開発

今回の試験では、大洗工学センター安全管理部の所有する多組減速材付BF₃型（円筒型）スペクトロメータを使用して中性子エネルギーの測定解析を行った。今後、プルトニウム燃料製造施設の加工工程や回収工程、貯蔵庫再処理工場の湿式工程転換技術開発施設の転換工程など種々

の中性子場においても中性子のエネルギースペクトルを把握する必要がある。また、遮蔽状況により中性子のエネルギースペクトルは変化するため同一場所においても定期的にエネルギースペクトルを測定する必要があること等の理由により、東海事業所においても独自にスペクトル測定技術確立することが必要である。そこで、東海事業所において昭和61年度に多組減速材付⁸He型(球型)スペクトロメータによる中性子エネルギースペクトル測定技術の開発を行い、種々の中性子場のエネルギースペクトル測定及び中性子線量評価についての検討する予定である。

(3) TLDバッジ、レムカウンターによる中性子線量評価

今回の実験では、プルトニウム取扱施設の代表的な中性子場で平均エネルギー0.82~1.92MeVの中性子線に対し、TLDバッジ及びレムカウンターによる線量当量の測定について中性子のエネルギーの違いに基づく誤差について検討を行った。今後、さらに、プルトニウム燃料製造施設の加工工程、回収工程再処理工場、転換技術開発施設も含め燃料集合体や溶液系のプルトニウムを取扱う作業環境や遮蔽条件が異なる種々の中性子場においても中性子エネルギースペクトルの測定並びにスペクトル測定結果に基づいたTLDバッジやレムカウンターによる線量評価について検討する必要がある。

(4) 中性子エネルギー依存性の少ない個人線量計の開発

TLDバッジは、その感度が人体へ入射する中性子のエネルギーにより大きく変化するため、プルトニウム中性子場での線量評価においても中性子エネルギースペクトルに起因する誤差を計っている。

ここ3年程前から、CR-39等を用いた固体飛跡検出器による新しい中性子測定法が開発され、一部実用化も行われている。固体飛跡検出器は、測定対象中性子エネルギーが数10keV~数MeVとプルトニウム取扱施設の作業環境の中性子エネルギーに適合しており、また、このエネルギー領域での感度変化もかなり小さい。今後、このようなエネルギーの少ない個人線量計について検討を行う必要がある。

(5) その他(遮蔽計算コードの検証への適用)

中性子のエネルギースペクトルを実測する目的として放射線管理上の線量評価精度の向上に資するだけでなく、中性子の遮蔽計算コードのベンチマーク試験に利用することも可能である。今回の測定においては、PuO₂原料缶に種々の遮蔽体を組み合わせた条件について遮蔽計算コードによる計算値と実験値の比較を試みた。(付録2) DOT3.5コードによる計算値と実験値を比較した場合に、距離100cm以上の測定点ではエネルギー群毎のフルエンスでは、最大100%の誤差がある。また、線量当量については、DOT3.5コードによる計算データがやや低めであった。これはDOT3.5のような2次元Snコードによく見られるray effectの影響であり、今回の測定では線源からの距離が1mで行ったG-1, G-2, G-3の実験において顕著であった。

今後、核燃料製造施設安全研究テーマの一環としても、より精度の高い中性子エネルギースペクトル測定技術を開発し、この結果を遮蔽計算コードのベンチマーク試験へ反映させることが重要である。

6. 謝 辞

多組減速材付BF₃型スペクトロメータを用いた中性子測定結果をもとにUnfolding計算を行う場合に、Unfolding解析の初期値としてDOT 3.5 計算コードを使用して求めた中性子エネルギースペクトルを利用した。このDOT3.5 計算コードを使用した中性子エネルギースペクトルの計算及び今回の実験データの解析について御協力いただいたプルトニウム燃料部設計開発課鹿倉栄課長代理、出口守一主査、山本衛政氏に、また、原料缶および作業環境の中性子エネルギースペクトル測定に際し御協力いただいた大洗工学センター安全管理部千場英明氏、野村紀男氏並びにプルトニウム燃料部管理課計量係松山一富氏、製造第2課照沼直利係長に感謝致します。

7. 参考文献

- (1) 宮部, 石黒, 他, 「 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 蛍光体を利用したTLDバッジによる中性子線量評価に関する検討」, PNC N841 84-48
- (2) 小佐古, 松本, 他, 「中速領域中性子線量測定評価に関する研究」, PNC SJ160 84-04
- (3) 小佐古, 中村, 他, 「減速材付中性子検出器の応答関数の評価と環境中性子計測への応用」, INS-TS-23
- (4) (a) 関口, 中沢他: 「高速炉ドシメトリー手法に関する研究」(昭和59年1月, 東京大学)
(b) 関口, 中沢他: 「高速炉ドシメトリー手法に関する研究」 NEUPACコード開発研究Ⅲ (PNC J260 85-01, 東京大学)
(c) 鳥居, 「Joyo 炉上部における中性子スペクトル解析結果について」(放管課メモ)
- (5) 横内, 出口, 他「プルトニウム燃料の遮蔽解析コードシステムの検証と評価I」, PNC SN841 85-08
- (6) 笹島, 出口, 他「二次元輸送計算コードDOT 3.5使用マニュアル」, PNC N852-83-02

付録1 中性子エネルギー・スペクトル及び線量当量の評価に係
る測定データ

中性子エネルギースペクトル評価における測定データ

		試験 No	B.G				
測定年月日	昭和60年10月29日		測定者	小泉, 宮部, 鳥居, 干場			
測定場所	Pu第2開発室 C-130 (集合体貯蔵庫)						
測定対象	BG値測定						
遮蔽, 距離							
線量率測定結果	n線量率	レムカウンター	メータ読値	0.1 mrem/hr			
			カウンター計数值	1回目293カウント/10 min 2回目345カウント/10 min 3回目318カウント/10 min Ave 0.53 cps (0.15 mrem/hr)			
	BF ₃ 型サーベイメータ	メータ読値	a. 35mm t減速体 — b. 65mm t減速体 —				
	γ線量率	電離箱サーベイメータ	メータ読値	0.1mR/h以下			
スペクトル測定データ	減速体	bare	Cd(1mm)	ポリエチレン(10mm厚)	ポリエチレン(30mm厚)	ポリエチレン(60mm厚)	ポリエチレン(100mm厚)
	計数(cps)	0.384±0.072	0.2113±0.020	2.261±0.056	7.318±0.209	5.938±0.079	2.244±0.014
測定状況	<p style="text-align: center;">BF₃ Al製台 109 (cm)</p>						

中性子エネルギースペクトル評価における測定データ

		試験 No.	G-1				
測定年月日	昭和60年10月29日		測定者	小泉, 宮部, 鳥居, 干場			
測定場所	Pu第2開発室 C-130 (集合体貯蔵庫)						
測定対象	PuO ₂ 原料缶 (Pu-615)						
遮蔽, 距離	遮蔽: Pb 1mmt, 距離 原料缶中心から100cm						
線量率測定結果	n線量率	レムカウンター	メータ読値	1.5 mrem/hr			
			カウンター計数值	1回目1389カウント / 3 min 2回目1281カウント / 3 min 3回目1326カウント / 3 min Ave 7.4 cps (2.1 mrem/hr)			
		BF ₃ 型サーベイメータ	メータ読値	a. 35mm t 減速体 3.0 cps (3.0 cps * 0.7 = 2.1 mrem/h) b. 65mm t 減速体 4.2 cps (4.2 cps * 0.4 = 1.7 mrem/h) c. 60mm t / 30mm t 比 計数率比 = 1.40			
	γ線量率	電離箱サーベイメータ	メータ読値	0.8 mrem/hr			
スペクトル測定データ	減速体	bare	Cd(1mm)	ポリエチレン (10mm厚)	ポリエチレン (30mm厚)	ポリエチレン (60mm厚)	ポリエチレン (100mm厚)
	計数(cps)	1.109±0.215	0.091±0.034	2.171±0.155	29.335±0.588	58.922±1.318	45.276±0.600
測定状況	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>(側面図)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>(上面図)</p> </div> </div>						

中性子エネルギースペクトル評価における測定データ

				試験 No	G-2		
測定年月日	昭和60年10月29日			測定者	小泉, 宮部, 鳥居, 干場		
測定場所	Pu第2開発室 C-130 (集合体貯蔵庫)						
測定対象	PuO ₂ 原料缶 (Pu-615)						
遮蔽, 距離	遮蔽: Pb 1mm t + 平板アクリル (1cm t), 距離: 原料缶中心から100cm						
線量率測定結果	n線量率	レムカウンター	メータ読値	mrem/hr			
			カウンター計数值	1回目1114カウント / 3 min 2回目1023カウント / 3 min 3回目1125カウント / 3 min Ave 6.0 cps (1.7 mrem/hr)			
	BF ₃ 型サーベイメータ	メータ読値	a. 35mm 減速体 2.5 cps (2.5 cps * 0.7 = 1.8 mrem/h) b. 65mm t 減速体 4.0 cps (4.0 cps * 0.4 = 1.6 mrem/h) c. 65mm φ / 35mm φ 計数率比 = 1.6				
γ線量率	電離箱サーベイメータ	メータ読値	0.72 mR/hr				
スペクトル測定データ	減速体	bare	Cd(1mm)	ポリエチレン (10mm厚)	ポリエチレン (30mm厚)	ポリエチレン (60mm厚)	ポリエチレン (100mm厚)
	計数(cps)	1.152 ± 0.152	20.115 ± 0.033	2537 ± 0.173	28.555 ± 0.424	56.409 ± 0.357	40.806 ± 0.796
測定状況	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>(側面図)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>(上面図)</p> </div> </div>						

中性子エネルギースペクトル評価における測定データ

		試験No	G-3				
測定年月日	昭和60年10月29日		測定者	小泉, 宮部, 鳥居, 干場			
測定場所	Pu第2開発室 C-130 (集合体貯蔵庫)						
測定対象	PuO ₂ 原料缶 (Pu-615)						
遮蔽, 距離	遮蔽: Pb 1mm + 含鉛アクリル (35mm t) 距離: 原料缶中心から100cm						
線量率測定結果	n線量率	レムカウンター	メータ読値	0.8 mrem/hr			
			カウンター計数值	1回目 954カウント / 3 min 2回目 992カウント / 3 min 3回目 947カウント / 3 min Ave 5.4 cps (1.5 mrem/hr)			
		BF ₃ 型サーベイメータ	メータ読値	a. 35mm t 減速体 2.5 cps (2.5 cps * 0.7 = 1.8 mrem/h) b. 65mm t 減速体 3.5 cps (3.5 cps * 0.4 = 1.4 mrem/h) c. 35mm t / 65mm t 比 計数率比 = 1.4			
	γ線量率	電離箱サーベイメータ	メータ読値	0.4 mR/hr			
スペクトル測定データ	減速体	bare	Cd (1mm)	ポリエチレン (10mm厚)	ポリエチレン (30mm厚)	ポリエチレン (60mm厚)	ポリエチレン (100mm厚)
	計数(cps)	5.303±0.098	0.469±0.040	6.288±0.116	36.835±0.886	52.100±0.985	34.386±0.762
測定状況	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>(側面図)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>(上面図)</p> </div> </div>						

中性子エネルギースペクトル評価における測定データ

		試験No		G-4			
測定年月日		昭和60年10月29日		測定者		小泉, 宮部, 鳥居, 干場	
測定場所		Pu第2開発室 C-130 (集合体貯蔵庫)					
測定対象		PuO ₂ 原料缶 (Pu-615)					
遮蔽, 距離		遮蔽: Pb 1mm + 含鉛アクリル (43mm t) 距離: 原料缶中心から75cm					
線量率測定結果	n線量率	レムカウンター		メータ読値	1.6 mrem/hr		
				カウンター計数值	1回目1343カウント / 3 min 2回目1424カウント / 3 min 3回目1413カウント / 3 min Ave 7.7 cps (2.2 mrem/hr)		
	BF ₃ 型サーベイメータ		メータ読値		a. 35mm t 減速体 4.5 cps (4.5 cps * 0.7 = 3.2 mrem/h) b. 65mm t 減速体 6.0 cps (6.0 cps * 0.4 = 2.4 mrem/h) c. 65mm t / 35mm t 比 計数率比 = 1.3		
	γ線量率	電離箱サーベイメータ		メータ読値		0.58 mR/hr	
スペクトル測定データ	減速体	bare	Cd(1mm)	ポリエチレン (10mm厚)	ポリエチレン (30mm厚)	ポリエチレン (60mm厚)	ポリエチレン (100mm厚)
	計数(cps)	11955±0.447	0.848±0.058	11352±0.093	61.305±0.443	85.717±0.604	55.229±0.576
測定状況	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>(側面図)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>(上面図)</p> <p>(cm)</p> </div> </div>						

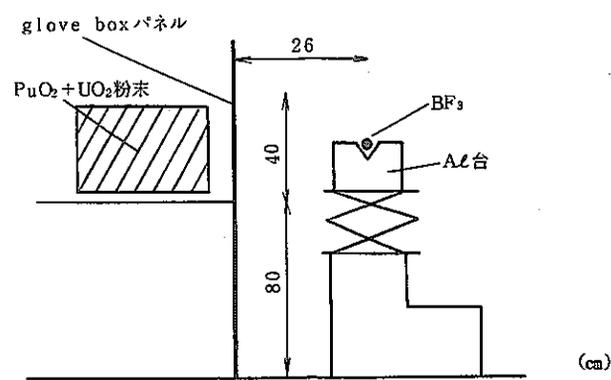
中性子エネルギースペクトル評価における測定データ

					試験No.	F-1		
測定年月日		昭和60年10月29日			測定者	小泉, 宮部, 鳥居, 干場		
測定場所		Pu第2開発室 GB D-19						
測定対象		焼結炉中PuO ₂ + UO ₂ ペレット						
遮蔽, 距離		遮蔽: 焼結炉容器, 距離: 焼結炉表面から66cm						
線量率測定結果	n線量率	レムカウンター		メータ読値	2.7 mrem/hr			
				カウンター計数值	1回目1772カウント / 3 min 2回目1741カウント / 3 min 3回目1762カウント / 3 min Ave 9.76 ± 0.07 cps (2.71 ± 0.02 mrem/hr)			
		BF ₃ 型サーベイメータ		メータ読値	a. 35mm t 減速体 5.8 cps (5.8 cps * 0.7 = 4.1 mrem/h) b. 65mm t 減速体 7.6 cps (7.6 cps * 0.4 = 3.0 mrem/h) c. 65mm t / 35mm t 比 計数率比 = 1.31			
	γ線量率	電離箱サーベイメータ		メータ読値	0.36 mR/hr			
スペクトル測定データ	減速体	bare	Cd(1mm)	ポリエチレン(10mm厚)	ポリエチレン(30mm厚)	ポリエチレン(60mm厚)	ポリエチレン(100mm厚)	
	計数(cps)	5687 ± 0.242	0.683 ± 0.102	62.917 ± 0.083	93.093 ± 0.531	129.203 ± 1.939	72.823 ± 0.713	
測定状況	<p>The diagram illustrates the experimental setup. A rectangular container labeled 'GB D-06' houses a '焼結炉' (sintering furnace). To the right of the container, a 'BF₃' detector is mounted on a stand. A horizontal arrow indicates a distance of '66 cm' between the side of the container and the detector.</p>							

中性子エネルギースペクトル評価における測定データ

				試験No.	A-1		
測定年月日		昭和60年10月29日		測定者	小泉, 宮部, 鳥居, 干場		
測定場所		Pu第2開発室(A102); D-028(ペレット貯蔵GB)表面					
測定対象		PuO ₂ + U ₃ O ₈ ペレット (GB内)					
遮蔽, 距離		遮蔽: glove boxパネル + 含鉛アクリル35mm t 距離: 含鉛アクリル表面から100cm					
線量率測定結果	n線量率	レムカウンター		メータ読値	1.2 mrem/hr		
				カウンター計数值	1回目1999カウント / 3 min 2回目2087カウント / 3 min 3回目2023カウント / 3 min Ave 113 cps (3.1 mrem/hr)		
	BF ₃ 型サーベイメータ		メータ読値		a. 35mm t 減速体 6.0 cps (6.0 cps * 0.7 = 4.2 mrem/h) b. 65mm t 減速体 7.0 cps (7.0 cps * 0.4 = 2.8 mrem/h) c. 65mm t / 35mm t 比 比 = 1.17		
	γ線量率	電離箱サーベイメータ		メータ読値	1.2 mR/hr		
スペクトル測定データ	減速体	bare	Cd(1mm)	ポリエチレン(10mm厚)	ポリエチレン(30mm厚)	ポリエチレン(60mm厚)	ポリエチレン(100mm厚)
	計数(cps)	19.756 ± 0.463	1.460 ± 0.062	17.883 ± 0.534	84.207 ± 0.231	100.827 ± 0.468	51.840 ± 0.115
測定状況							

中性子エネルギースペクトル評価における測定データ

				試験No	A-2		
測定年月日	昭和60年10月29日			測定者	小泉, 宮部, 鳥居, 干場		
測定場所	Pu第2開発室(A103):D-06(粉末乾燥GB)表面						
測定対象	PuO ₂ +UO ₂ 粉末(GB内)						
遮蔽, 距離	遮蔽: GBパネル, 距離: GB表面から26cm						
線量率測定結果	n線量率	レムカウンター	メータ読値	2.5 mrem/hr			
			カウンター計数值	1回目 2789カウント / 300sec 2回目 カウント / 3 min 3回目 カウント / 3 min Ave 9.30 cps (2.58 mrem/hr)			
	BF ₃ 型サーベイメータ	メータ読値	a. 35mm t 減速体 5.0 cps (5.0 cps * 0.7 = 3.5 mrem/h) b. 65mm t 減速体 7.0 cps (7.0 cps * 0.4 = 2.8 mrem/h) c. 65mm t / 35mm t 比 計数率比 = 1.40				
γ線量率	電離箱サーベイメータ	メータ読値	1.6 mR/hr				
スペクトル測定データ	減速体	bare	Cd(1mm)	ポリエチレン(10mm厚)	ポリエチレン(30mm厚)	ポリエチレン(60mm厚)	ポリエチレン(100mm厚)
	計数(cps)	21.413±0.334	1.160±0.079	13.913±0.170	63.476±0.648	77.725±0.867	47.550±0.165
測定状況							

中性子エネルギースペクトル評価における測定データ

				試験 No	A-3		
測定年月日	昭和60年11月6日			測定者	小泉, 宮部, 鳥居, 野村 紀		
測定場所	Pu第2開発室(A103):D-06(粉末乾燥GB)表面						
測定対象	PuO ₂ +U ₃ O ₈ 粉末(GB内)						
遮蔽, 距離	遮蔽: glove boxパネル+含鉛アクリル35mm t, 距離: 含鉛アクリル表面から15cm						
線量率測定結果	n線量率	レムカウンター		メータ読値	1.3 mrem/hr		
		レムカウンター		カウンター計数值	1回目 3078カウント/500min 2回目 カウント/ min 3回目 カウント/ min Ave 6.2 (1.2 mrem/hr)		
	γ線量率	BF ₃ 型サーベイメータ		メータ読値	a. 35mm t減速体 4.2 cps (4.2 cps * 0.7 = 2.9 mrem/h) b. 65mm t減速体 5.4 cps (5.4 cps * 0.4 = 2.2 mrem/h) c. 65mm t / 35mm t 比 比 = 1.29		
		電離箱サーベイメータ		メータ読値	1.1 mR/hr		
スペクトル測定データ	減速体	bare	Cd(1mm)	ポリエチレン(10mm厚)	ポリエチレン(30mm厚)	ポリエチレン(60mm厚)	ポリエチレン(100mm厚)
	計数(cps)	15.765±0.783	0.972±0.043	12.890±0.308	75.355±1.293	109.650±0.853	70.630±0.928
測定状況							

付録-2 DOT3.5 コードにより計算した中性子エネルギースペクトルとの比較検討

付録2. DOT3.5コードにより計算した中性子エネルギースペクトルとの比較検討

1. 目的

今回の試験においてはPuO₂原料缶に種々の遮へいを組合せた条件(実験G-1, 2, 3, 4)に対し, DOT 3.5コードにてエネルギースペクトルを計算にて求め, その結果をUnfoldig計算の初期推定スペクトルとして使用した。

そこで, 多組減速材付スペクトロメータによる実測スペクトルをDOT 3.5コードにより計算にて求めたスペクトルとの比較検討を行った。

2. 計算条件

<計算コード>

- 使用コード DOT3.5コード
- 使用ライブラリー PSL-40
- 角度分点 160 (S₁₆)
- ルジャンドル展開次数 3

<計算ケース>

エネルギースペクトルの計算は以下に示す4つの実験条件に対して行った。尚, 原料缶表面からの距離は75, 100, 150cmとした。

実験 No.	対 象
実験G-1	PuO ₂ 原料缶+Pb 1mm ^t
実験G-2	PuO ₂ 原料缶+Pb 1mm ^t +平板アクリル(10mm ^t)
実験G-3	PuO ₂ 原料缶+Pb 1mm ^t +含鉛アクリル(35mm ^t)
実験G-4	PuO ₂ 原料缶+Pb 1mm ^t +含鉛アクリル(43mm ^t)

<線源条件>

今回の照射試験に使用したPuO₂原料缶の概要を以下に示す。

- 組 成 PuO₂
- 密 度 1.73 g/cm³
- 同位体比 Pu-238: 0.54w/o
 Pu-239: 68.56
 Pu-240: 21.53

Pu-241 : 6.85

Pu-242 : 2.52

Am-241 : 9400 ppm Am, Puの分析日 : '85年3月5日

• 重量 Pu metal : 2735.19 g

PuO₂ : 3127 g

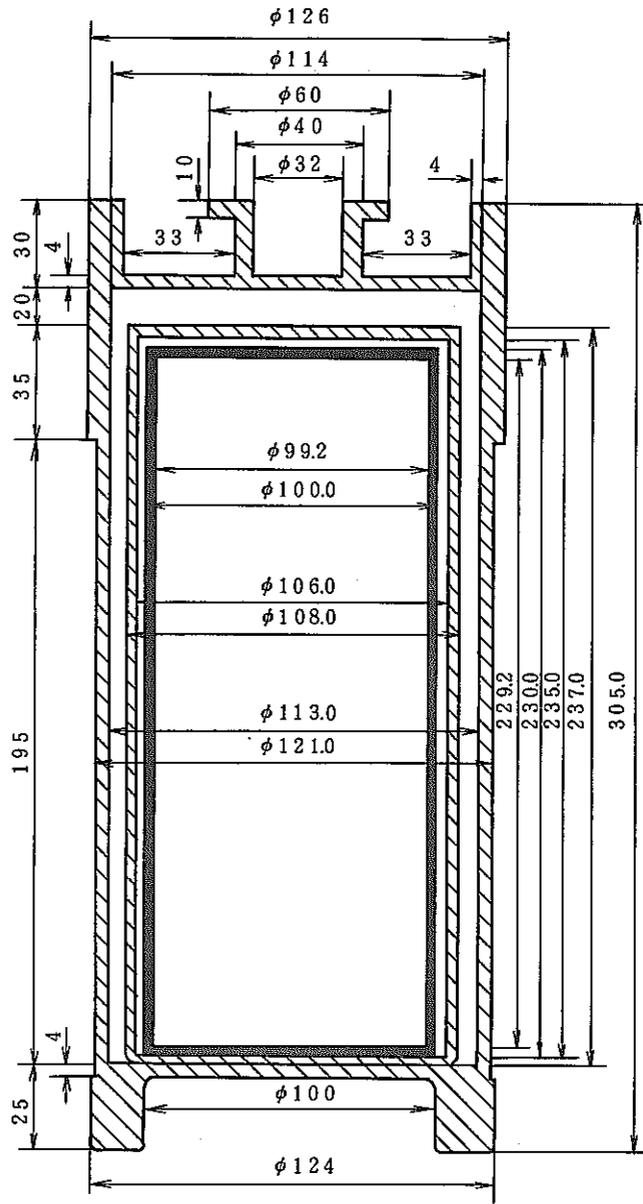
尚, DOT 3.5コードによるスペクトル計算に必要な線源強度に関するデータを表(付)-1に示すが, これは, PURSEコードにて求めたものを用いた。

また, PuO₂原料缶の断面図を図(付)-1に示す。

<計算モデル>

実験A-1, A-2, G-3, G-4に対してDOT 3.5コードにてエネルギースペクトルの計算は図(付)-2~図(付)-5に示すようなモデル化を行って実施した。

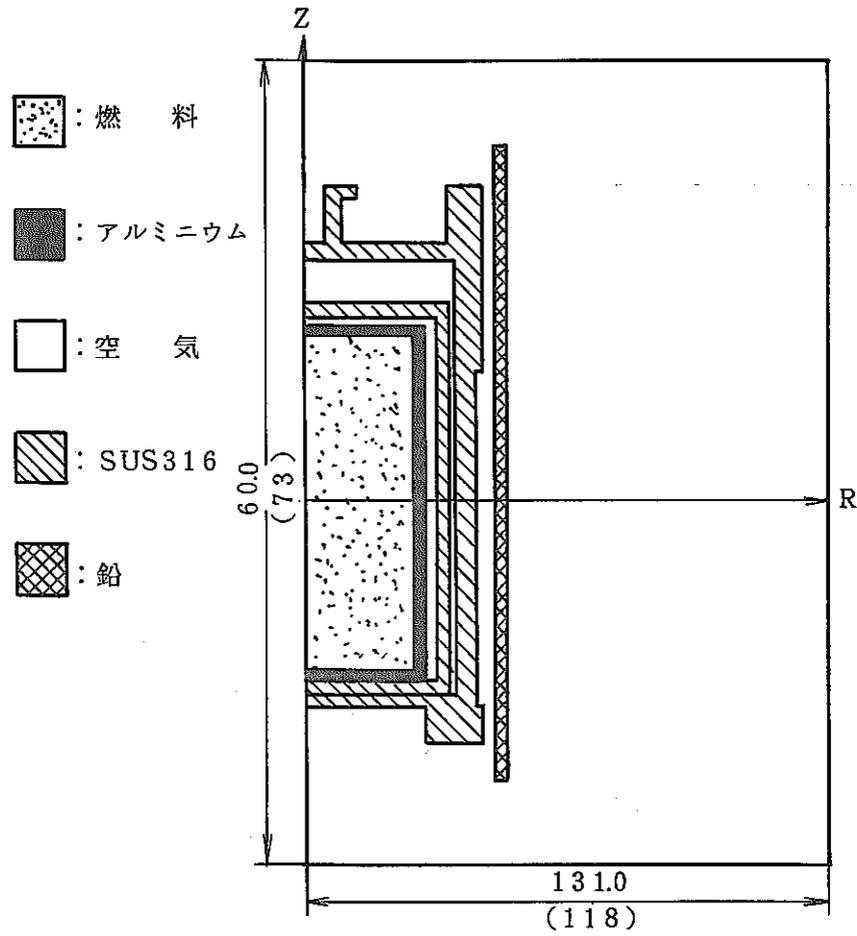
また, 原料缶及び遮へい体に関する元素構成及び原子数密度に関するデータを表(付)-2に示す。



図(付)-1 Pu 密封缶

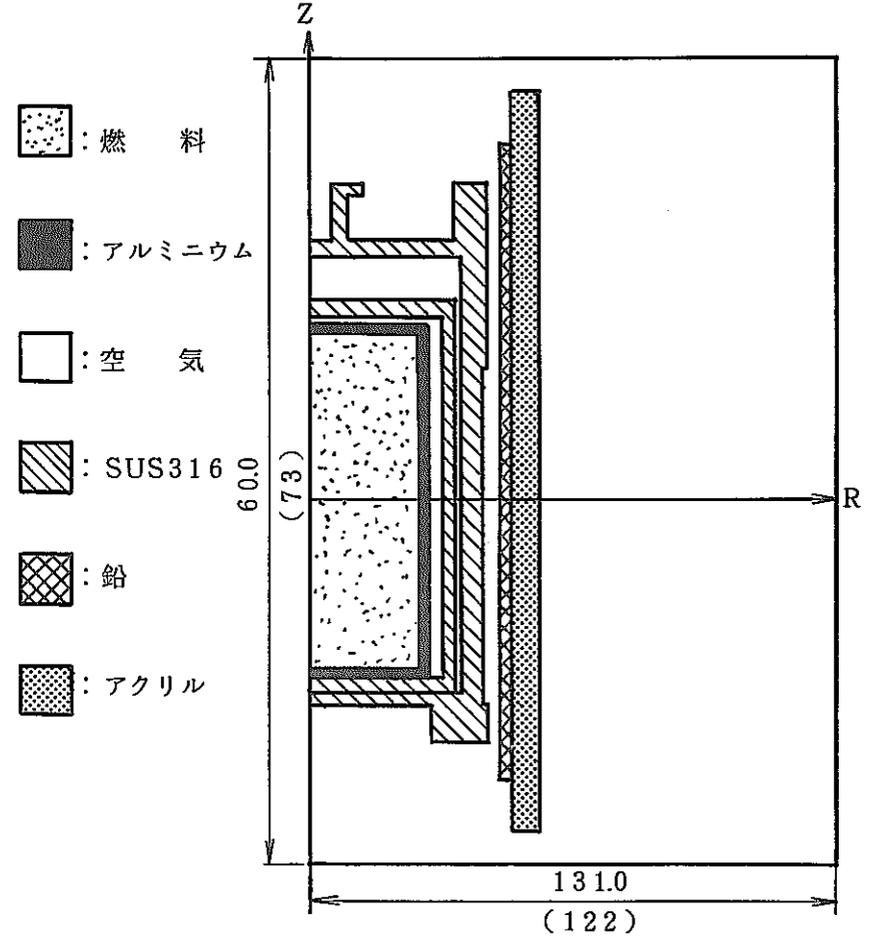
表(付)-1 線源強度

エネルギー群 No	中性子 n/sec·cm ²	γ線 photon/sec·cm ²
1	7.207-1	0.0
2	6.396	0.0
3	1.570+1	0.0
4	1.832+1	6.29-5
5	1.394+2	2.43-4
6	1.375+2	9.18+1
7	1.943+2	8.34+3
8	1.483+2	1.21+4
9	1.282+2	3.08+5
10	7.277+1	8.17+4
11	3.995+1	3.00+6
12	3.962+1	4.64+6
13	6.074	4.14+6
14	2.245-1	7.97+8
15	0.0	5.49+6
16	0.0	2.07+5
17	0.0	0.0
18	0.0	0.0
19~22	0.0	



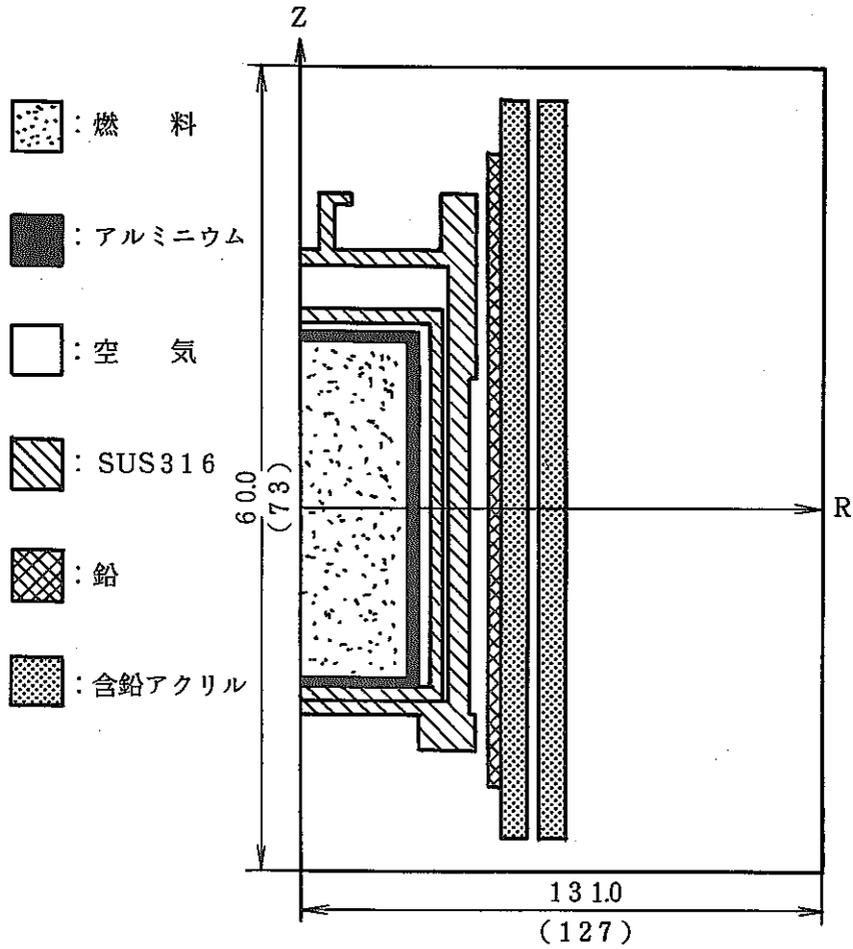
単位：cm
 () 内総メッシュ数

図(付)-2 実験G-1解析モデル



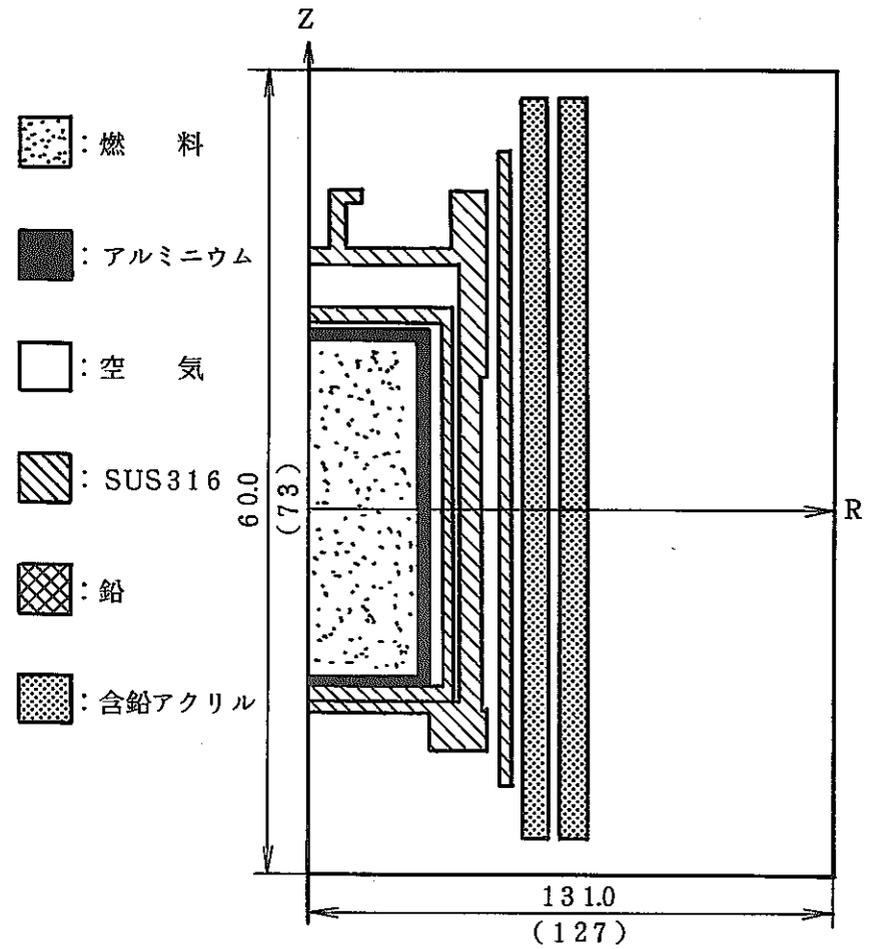
単位：cm
 () 内総メッシュ数

図(付)-3 実験G-2 (アクリル板1mm^t)解析モデル



単位：cm
()内総メッシュ数

図(付)-4 実験G-3(含鉛アクリル3.5mm^t)解析モデル



単位：cm
()内総メッシュ数

図(付)-5 実験G-4(含鉛アクリル4.3mm^t)解析モデル

表(付)-2 物質の原子数密度

物質名	核種	重量比	比重量 (g/cm ³)	原子数密度 ($\times 10^{24}$ n/cm ³)
線源	O	0.1180	0.2041	7.674-3
	Pu238	0.0047	0.0081	2.054-5
	Pu239	0.5991	1.0364	2.611-3
	Pu240	0.1881	0.3254	8.162-4
	Pu241	0.0580	0.1003	2.509-4
	Pu242	0.0220	0.0381	9.477-5
	Am241	0.0101	0.0175	4.333-5
	(密度)	1.73 (g/cm ³)		
アルミニウム	Al	1.0	2.699	6.024-2
	(密度)	2.699 (g/cm ³)		
空気	N	0.7551	9.763-4	4.198-5
	O	0.2304	2.979-4	1.121-5
	(密度)	1.293 $\times 10^{-3}$ (g/cm ³)		
SUS316	C	0.00080	0.0063	3.1729-4
	Si	0.01000	0.0791	1.6962-3
	P	0.00045	0.0036	6.9211-5
	S	0.00030	0.0024	4.1572-5
	Cr	0.17000	1.3447	1.5575-2
	Mn	0.02000	0.1582	1.7343-3
	Fe	0.65345	5.6888	5.5740-2
	Ni	0.12000	0.9492	9.7339-3
	Mo	0.02500	0.1978	1.2421-3
	(密度)	7.91 (g/cm ³)		
鉛	Pb	1.0	11.34	3.296-2
	(密度)	11.34 (g/cm ³)		
アクリル	H	0.080	0.0952	5.688-2
	C	0.600	0.7140	3.580-2
	O	0.320	0.3808	1.434-2
	(密度)	1.19 (g/cm ³)		
含鉛アクリル	H	0.0580	0.0928	5.545-2
	C	0.4380	0.7008	3.514-2
	O	0.2040	0.3264	1.229-2
	Pb	0.3000	0.4800	1.395-3
	(密度)	1.60 (g/cm ³)		

3. 計算結果

PuO₂原料缶中心から30, 50, 75, 100cmの位置における単位レサジー当りの中性子フルエンスを下記の式にて求めた。

$$\phi'_n = \frac{\phi_n}{\ell_n (E_n / E_{n-1})}$$

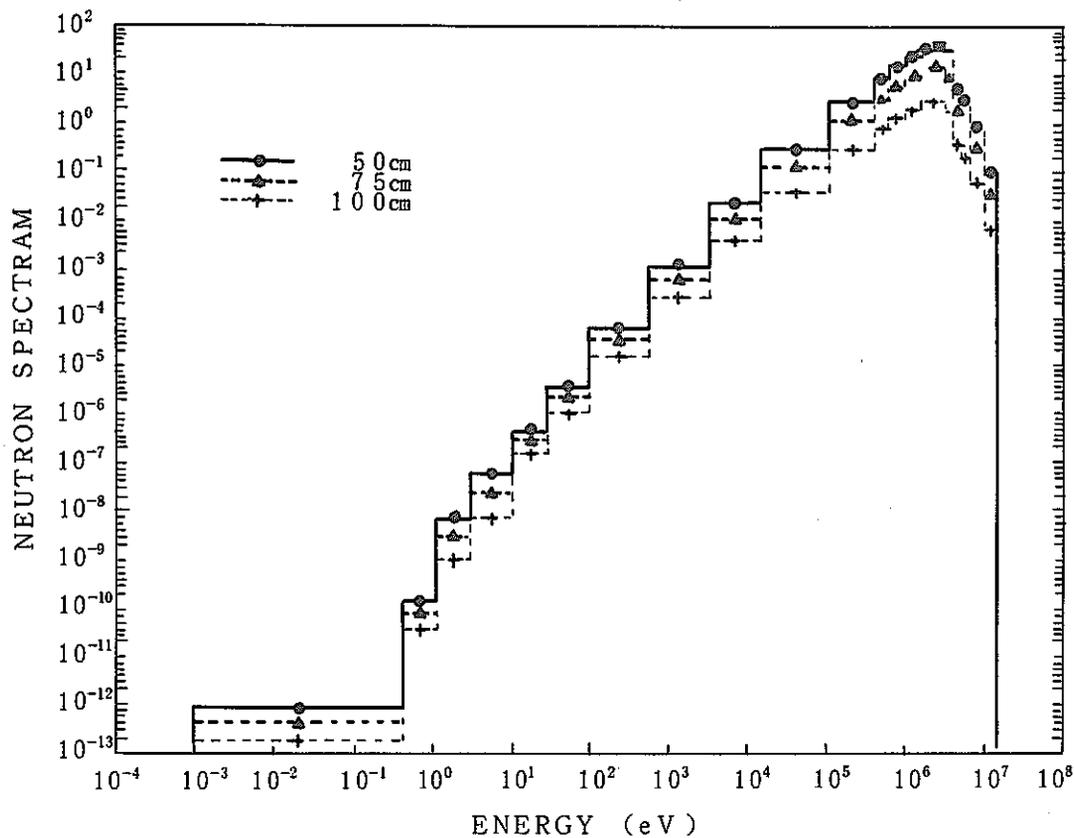
ϕ'_n : n群の単位レサジー当りのflux

ϕ_n : n群のflux

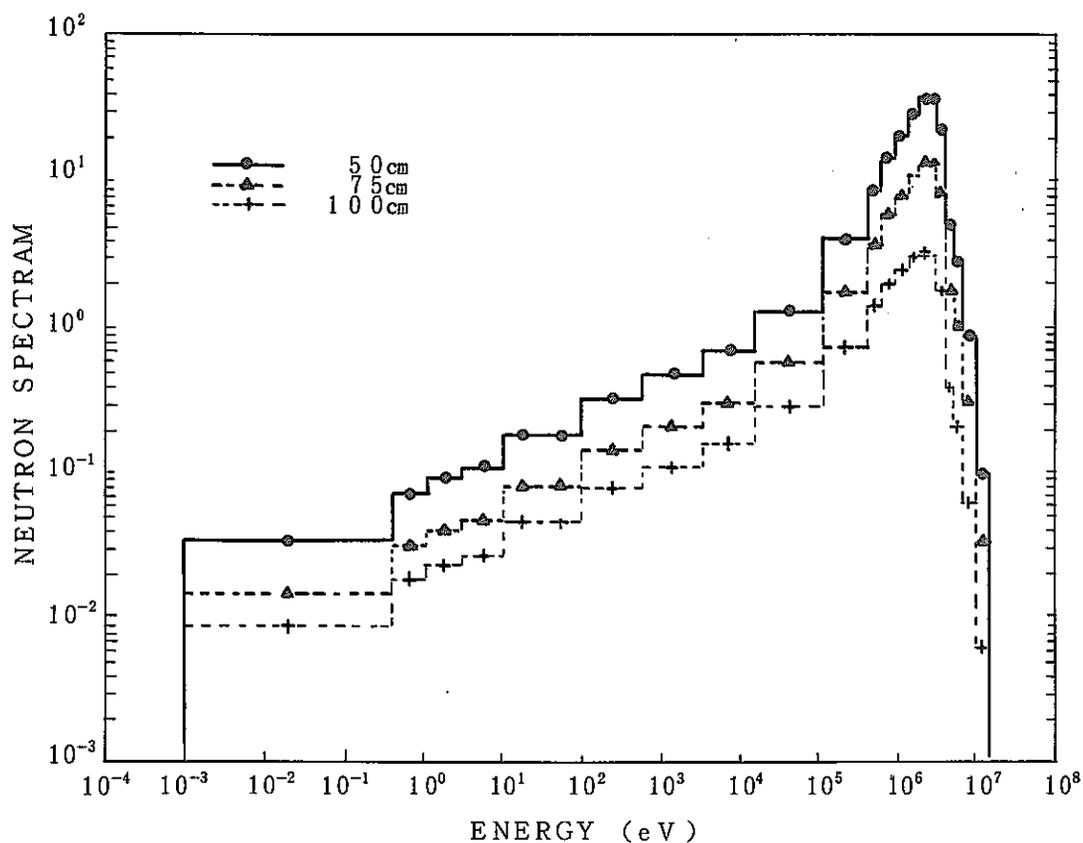
E_n : n群の上限エネルギー

E_{n-1} : n群の下限エネルギー

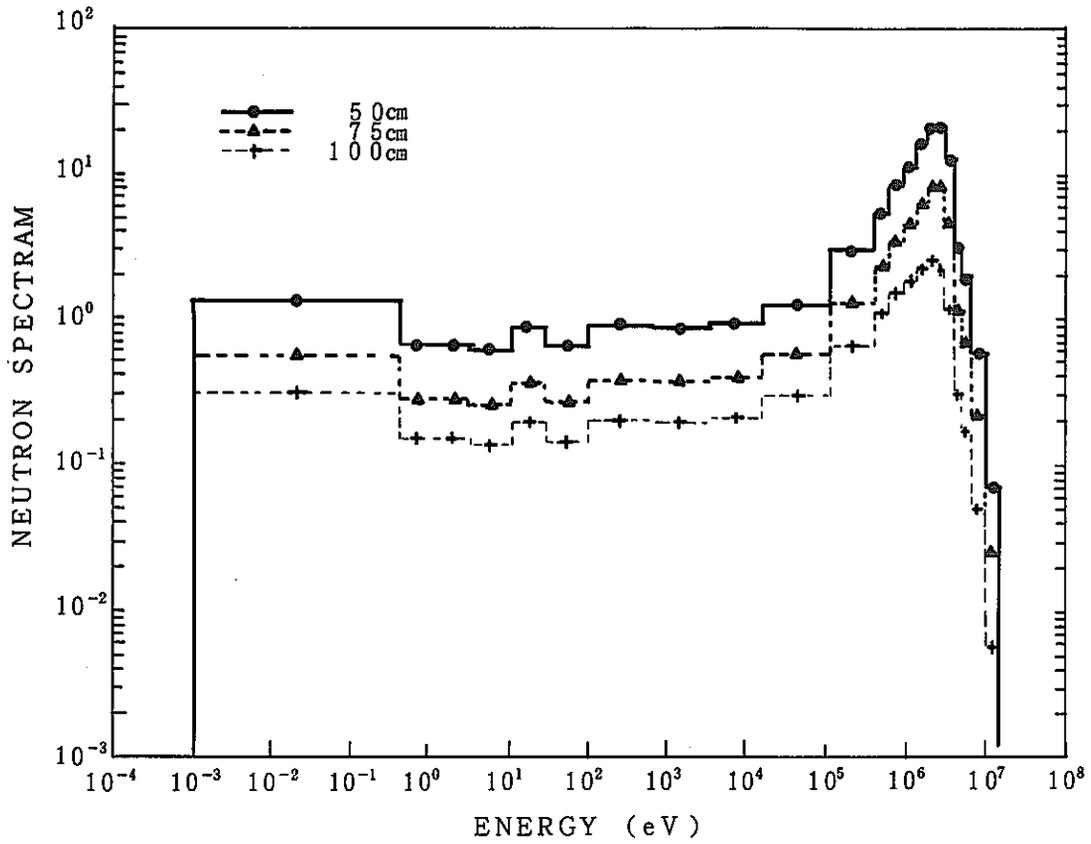
上式で単位レサジー当りの中性子フルエンスを図にしたものを図(付)-6, 7, 8, 9に示す。



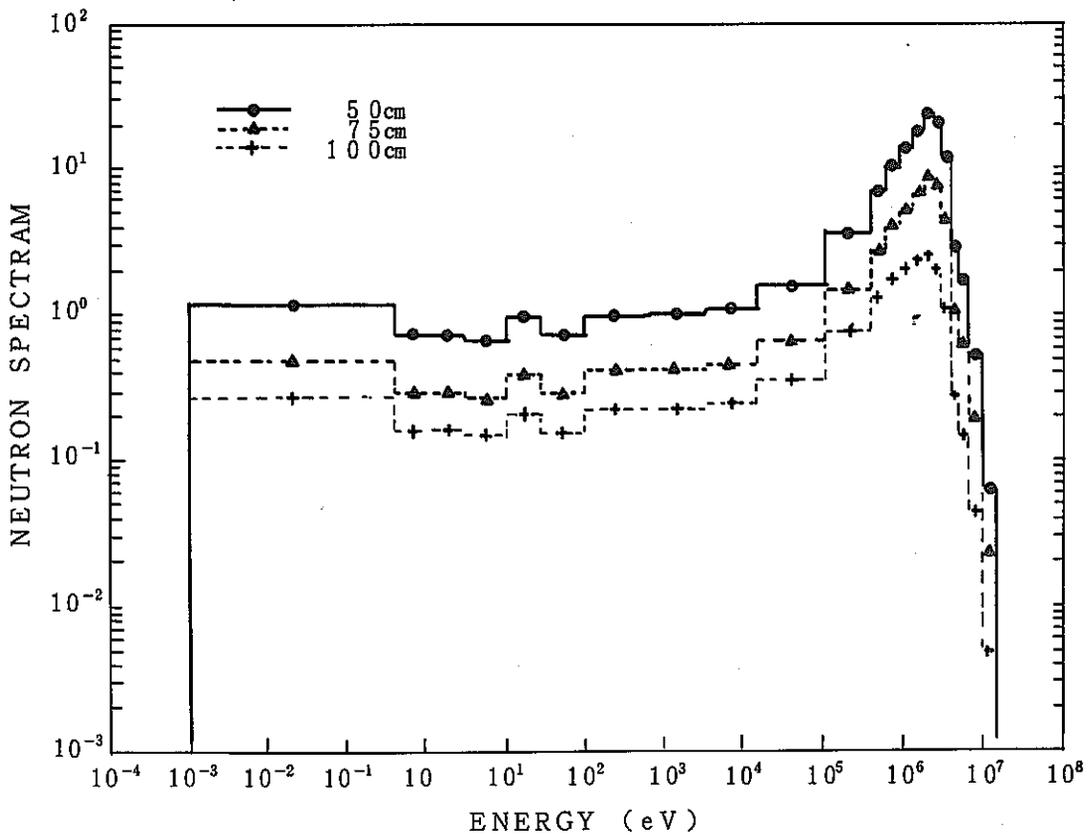
図(付)-6 単位レサージ当りのスペクトル(実験G-1)



図(付)-7 単位レサージ当りのスペクトル(実験G-2)



図(付)-8 単位レサージ当りのスペクトル(実験G-3)



図(付)-9 単位レサージ当りのスペクトル(実験G-4)

4. 中性子スペクトルの計算値と実測値の比較

1) 各エネルギー郡の中性子フルエンスについて、DOT 3.5コードによる計算値と多組減速材付BF₃型スペクトロメータによる実測値を比較して図にしたものを図(付)-10, 11, 12に示す。

尚実験G-1(PuO₂原料缶+Pb 1mm^t)についてはDOT 3.5コードによる計算スペクトルを初期値としてUnfolding解析した場合にはスペクトル評価の精度が悪いので、初期値としては実験G-2(PuO₂原料缶+Pb 1mm^t+平板アクリル1mm^t)の計算スペクトル値を規格化して入力した。このため実験G-1については計算スペクトルと実測スペクトルの直接的な比較はできなかった。

計算スペクトルと実測スペクトルを比較した結果、

- ① 実測スペクトルに対する計算スペクトルの比は約0.4～2.1の範囲であった。
- ② 実験G-3において実測スペクトルに対する計算スペクトルの比は熱中性子～300 KeVの領域では0.9～1.2の範囲であり、それ以外の領域では計算スペクトルが小さめであった。
- ③ 実験G-4において実測スペクトルに対する計算スペクトルの比は熱中性子～約300 KeVの領域では0.90～1.00でほぼ一致しているが、それ以上のエネルギーでは計算スペクトルが小さくなっていた。

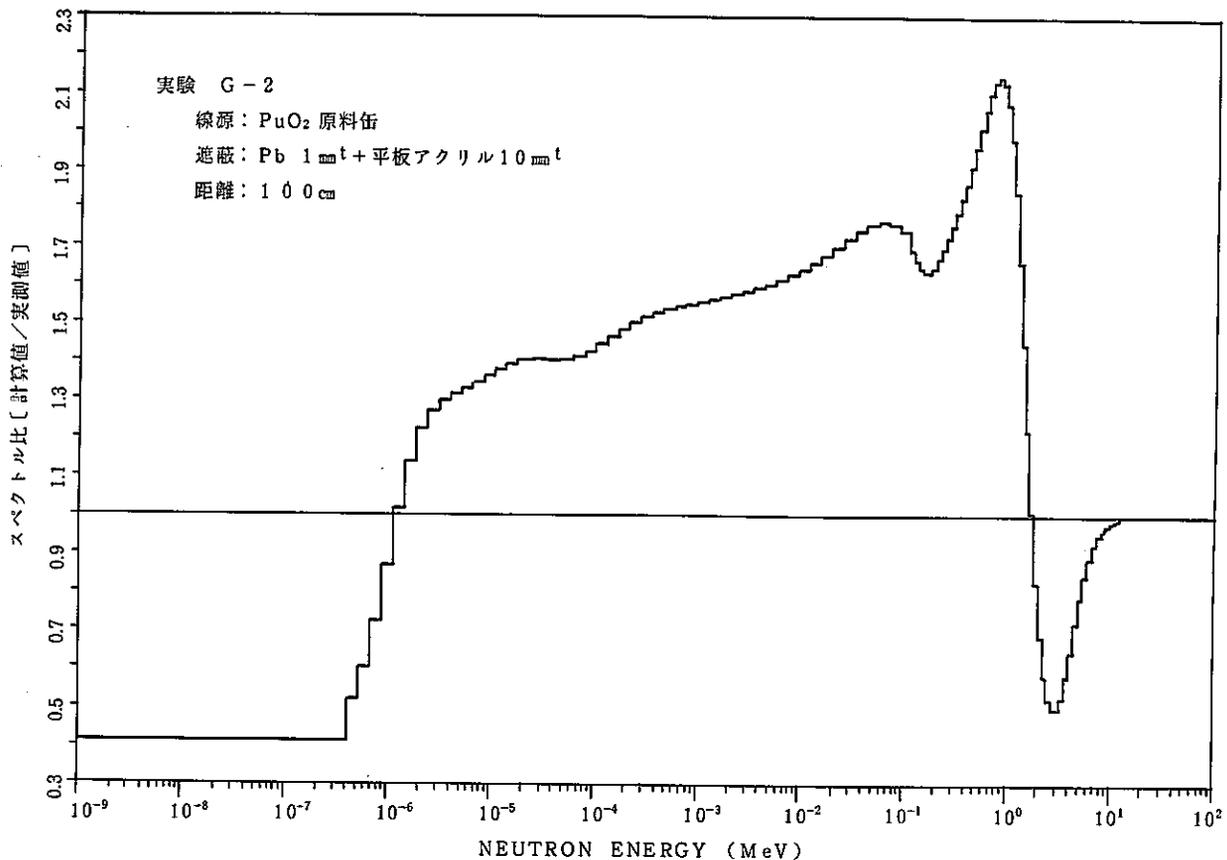
2) 中性子の平均エネルギーと線量当量率について、DOT 3.5コードによる計算値から求めた結果とスペクトロメータの実測値から求めた結果を比較したものを表(付)-12に示した。

線量当量率についてはDOT 3.5コードの計算によるものが60～20%小さめであった。

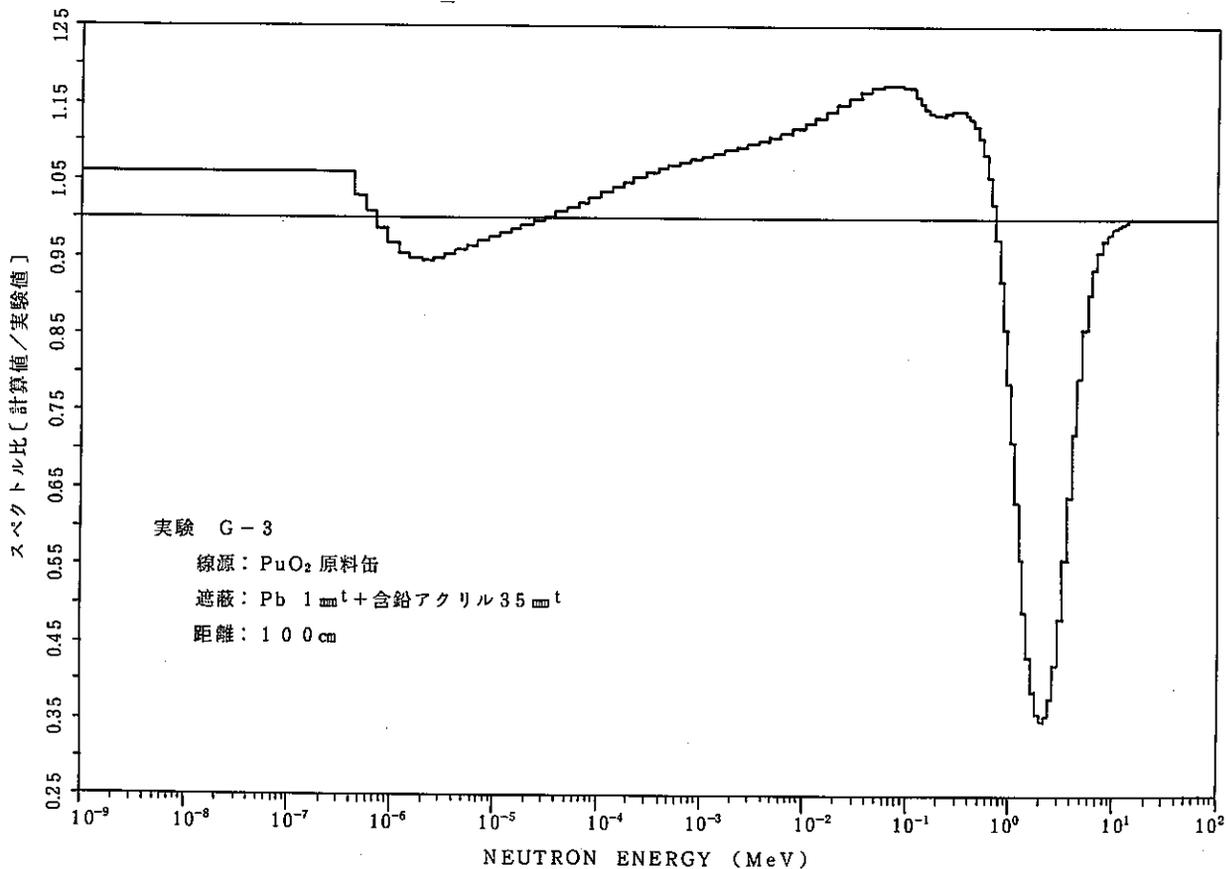
この理由としては

- ① DOT 3.5コードに於いて遮へい体が無い条件では線源からの距離が大きくなるにつれray-effectの効果による誤差が生じる。
実験G-1に於る原料缶周辺の中性子線量率の分布を図(付)-12に示すが、原料缶の真正面方向で距離が80cm以上になるとray-effectのため線量率は急激に小さくなっている。
- ② DOT 3.5コードによる計算スペクトルには周囲の物体等からの散乱線は考慮されていないが、実測スペクトルには線源からの直接のみならず散乱線も含まれている。

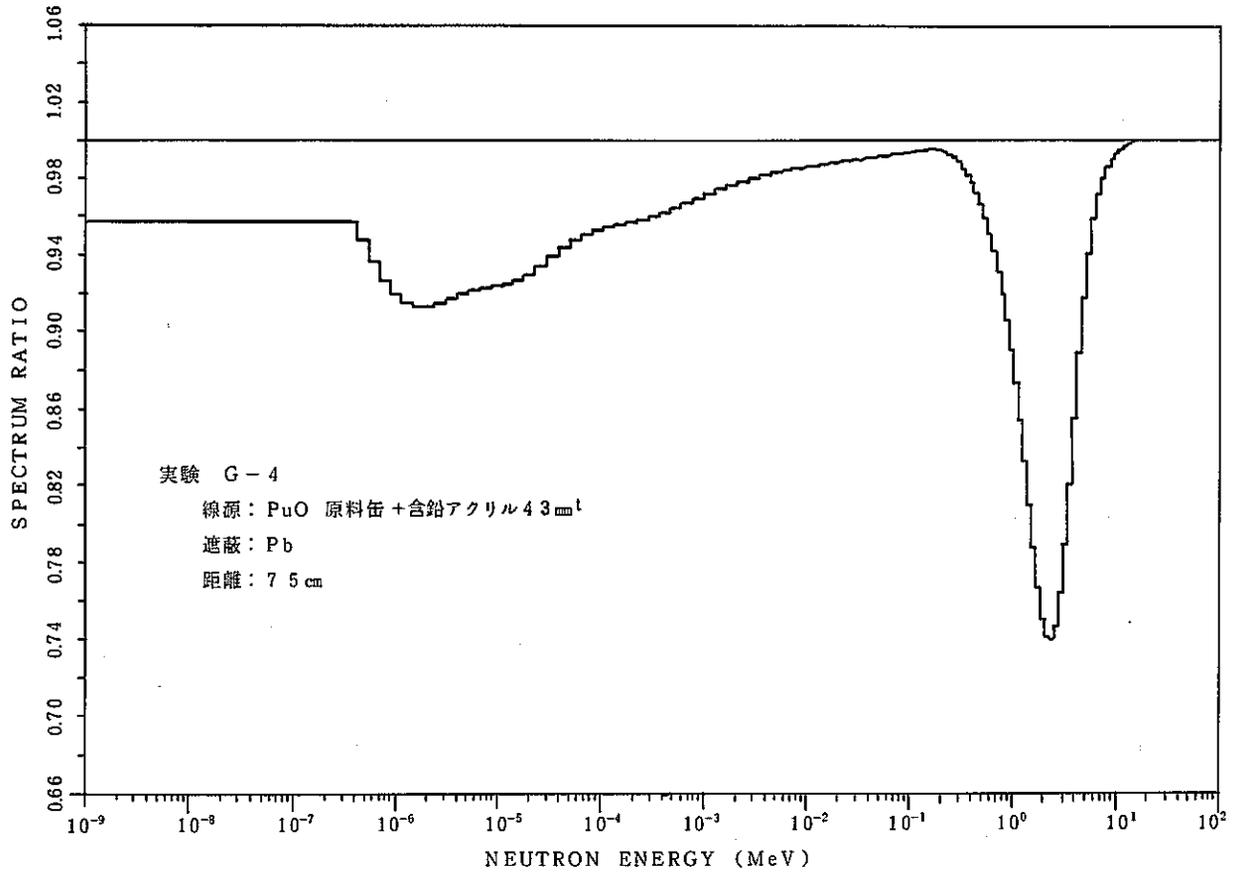
今後、さらに多減速体付検出器による中性子スペクトル技術の精度向上を図るとともに、今回のような照射試験を行い、遮へい計算コードの検証へも反映させる必要がある。



図(付)-10 実測スペクトルと DOT 3.5 コードによる計算スペクトルとの比較(実験G-2)



図(付)-11 実測スペクトルと DOT 3.5 コードによる計算スペクトルとの比較(実験G-3)

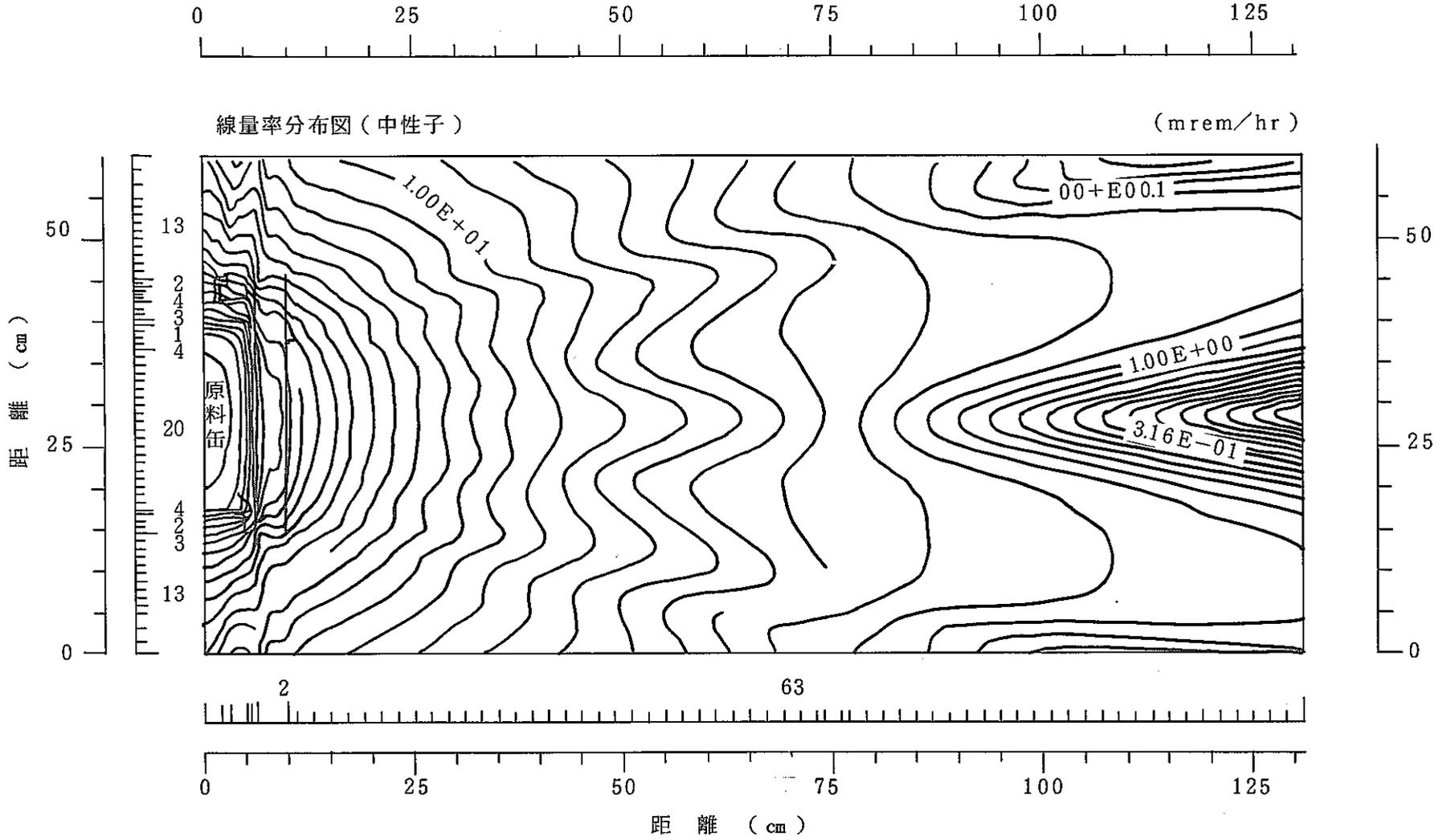


図(付)-12 DOT3.5コードによる計算スペクトルの比較(実験 G-4)

表(付)-12 Dot 3.5コードによる計算値とスペクトロメータによる測定値の比較

実験No	条 件	中性子線量当量率 (mrem/hr)			中性子平均エネルギー (MeV)		
		Dot 3.5 コー ド計算値	スペクトロメ ータ実測値	計 算 値 実 測 値	DOT3.5 コー ド計算値	スペクトロメ ータ実測値	計 算 値 実 測 値
G-1	線源: PuO ₂ 原料缶 遮蔽: Pb 1mm ^t 距離: 100cm	0.63	1.54	0.41	1.79	1.92	0.93
G-2	線源: PuO ₂ 原料缶 遮蔽: Pb 1mm ^t +平板アクリル10mm ^t 距離: 100cm	0.72	1.34	0.53	1.30	1.69	0.77
G-3	線源: PuO ₂ 原料缶 遮蔽: Pb 1mm ^t +含鉛アクリル35mm ^t 距離: 100cm	0.60	1.16	0.52	0.79	1.02	0.71
G-4	線源: PuO ₂ 原料缶 遮蔽: Pb 1mm ^t +含鉛アクリル43mm ^t 距離: 75cm	1.58	1.94	0.81	1.12	1.21	0.93

• 推定スペクトル評価位置



図(付)-13 PuO₂原料缶(実験G-1)に於る中性子線量分布図(Dot 3.5コードによる計算)