

プルトニウム燃料製造施設におけるTLDバッジと
固体飛跡検出器の相関関係

1995年9月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical Information Office, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome , Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, JAPAN

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13
動力炉・核燃料開発事業団
技術協力部 技術情報室

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

プルトニウム燃料製造施設における TLD バッジと固体飛跡検出器の相関関係

辻村憲雄¹⁾、有澤潤²⁾、百瀬琢磨¹⁾、篠原邦彦¹⁾、野村保¹⁾³⁾

要旨

現在、動力炉・核燃料開発事業団東海事業所では、放射線業務従事者の被ばく線量当量の評価に TLD バッジ (TLD アルベド線量計) を使用しているが、TLD バッジによる高速中性子線の線量当量の評価精度の検証を目的に、主にプルトニウム燃料製造施設で作業する放射線業務従事者の一部は固体飛跡検出器も同時着用している。

本研究では、平成 5 年 4 月から一年間にわたって、プルトニウム燃料製造施設で作業する放射線業務従事者の被ばくデータのうち中性子線による被ばくが有意であると判定されるデータを抽出し、中性子エネルギー応答特性等が全く異なるこれら二種類の線量計の応答間の関係を調べた。

その結果、TLD バッジと固体飛跡検出器からそれぞれ算定した中性子線量当量の値はほぼ一致し、しかも良好な直線関係にあることがわかった。この事実は、プルトニウム燃料製造施設において作業者が恒常的に中性子線による被ばくを受けるような条件下では、作業環境中の中性子エネルギー分布等が比較的一定であり、TLD バッジの応答は作業場所にあまり依存しないことを示している。また、TLD バッジの各 TLD 素子の発光関係や TLD の発光量と固体飛跡検出器のエッチピット数の関係などから得られる情報及びプルトニウム燃料第三開発室で実施したフィールド照射試験の結果から、作業環境中の放射線場に関する情報と現在個人被ばく管理業務で使用している TLD バッジの換算係数が十分に妥当であるとの結論が得られた。さらに、固体飛跡検出器を仲介とした TLD バッジのフィールド校正手法について提案した。

1) 安全管理部安全対策課 2) 日本原燃株式会社 3) 現在、本社安全部

目次

第1章	本研究の目的	1
第2章	東海事業所における中性子個人被ばく線量当量測定の現状	4
2-1	TLDバッジによる中性子個人被ばく線量当量測定の現状	4
2-2	固体飛跡検出器による中性子個人被ばく線量当量測定の現状	16
第3章	データ解析方法	21
第4章	解析結果	29
4-1	TLDバッジのTLD素子間の発光関係	29
4-2	TLDバッジと固体飛跡検出器の応答の関係	33
4-3	γ 線及び中性子線のエネルギー分布の推定	42
4-4	γ 線、中性子線の1cm線量当量の関係	48
4-5	まとめ	56
第5章	フィールド照射試験	57
5-1	実験方法	57
5-2	実験結果と検討	58
第6章	考察	73
第7章	結論	84
	謝辞	86
	参考文献	87
補遺A	個人線量計の評価の対象とする線量当量に関する一考察	90
補遺B	TS-16Nとバリオトラックの感度比較	92
補遺C	アクリル遮蔽体厚さとTLDバッジ、固体飛跡検出器の応答の関係	107
補遺D	線量当量の人数割合の分布	110
補遺E	過去のTLDバッジのフィールド照射試験例	112
補遺F	個人線量計による中性子スペクトルの定量に関する基礎的検討	117
補遺G	平成3～6年度のTLDバッジと固体飛跡検出器の応答の関係	126

第1章 本研究の目的

動力炉・核燃料開発事業団東海事業所では、昭和57年度より放射線業務従事者（以下「作業員」と言う）の個人被ばく線量当量の算定にTLDバッジを使用している[1]。TLDバッジは、 β 線、 γ 線、中性子線の線量当量の分離評価が可能で、自動読取りによって迅速に被ばく線量当量を算定することができる個人線量計であるが、幾つかの原理的な問題点もある。具体的には、

- (1) γ 線の線量当量当たりの感度に比べて、高速中性子線に対する感度が低いこと
- (2) TLDバッジの高速中性子線に対する応答特性は中性子エネルギーと入射方向に大きく依存すること
- (3) TLDは中性子線と γ 線の両者に感度を有するため、中性子/ γ 線混在場ではそれらの分離性能が低下すること

などが挙げられ、これらは高速中性子線の線量当量評価値の確度や精度の低下を招くことになる。このうち(1)については、TLDそのものの本質的な問題であるが、平成5年度に実施した研究の成果から従来のTLDに比べて感度が約5倍高いTLDシステムの実用が可能となり[2][3]、主に精度面での向上が期待される。

一方の(2)(3)であるが、これらはTLDを用いて中性子線（線量当量）を測定するという手法そのものが元来有する問題点であり、第2章で詳しく説明するが抜本的な解決策は無い。特に、(2)のエネルギー依存性が大きいという問題は、TLDバッジから求めた中性子線量当量の確度に極めて大きな影響を与える。ただし、TLDバッジを使用する放射線場の中性子エネルギー分布等の情報とTLDバッジの応答との関連性を定量的に把握していれば、このエネルギー依存性の問題はそれほど困難なものにはならない。例えば、ある限定された放射線場の状況とリニアな応答を持ってさえいれば、ある定められた定数をTLDバッジの応答に乗じることによって被ばく線量当量を、許容される誤差の範囲内で評価することも十分に可能となる。

東海事業所では、中性子線による被ばくを受ける可能性の高い作業区域は、主にプルトニウム燃料を取扱う施設であり、ここでは主に ^{240}Pu の自発核分裂による中性子線、 ^{238}Pu や ^{241}Am などから放出される α 線と酸素(^{17}O 、 ^{18}O)との(α , n)反応によって生じる中性子線が、その被ばくの主要因になっている[4]。これら線源の中性子線は平均エネルギーが約2MeVと比較的高いエネルギーを持つが、実際の作業条件下では周囲の遮蔽状況等によってそのエネルギー分布が変化するため、応答特性が中性子エネルギーに依存するTLDバッジの応答も作業場所によって変化することが幾つかのフィールド照射試験[5]から明らかになっている。また、作業環境中の中性子エネルギー分布の測定結果を用いてTLDバッジの応答等の計算がなされており、ここでも中性子エネ

ルギー分布に依存した応答の変化が指摘されている[6]。

現在、東海事業所では作業場所（放射線場）に関係なく一定のTLD応答一線量当量換算係数を用いてTLDバッジの応答から個人の中性子線量当量を算定しているが、これまでに実施した実験や計算から求めた換算係数の値は、ある特定の作業場所あるいは特定の条件での結果であり、プルトニウム燃料を取扱う施設の作業環境中の平均的な放射線場に対する現行の換算係数の適合性については十分な議論が行なわれていない。

また、 γ 線については ^{241}Am の γ 線(59.5keV)による被ばくが大半を占めると一般に言われているが、実際にはこれも中性子線と同様に周囲の遮蔽状況によって大きく変化すると考えられる[7]。TLDバッジの中性子線と γ 線の分離性能を議論するとき、 γ 線のエネルギー分布と中性子線/ γ 線の混在割合といった情報は不可欠といえるが、実作業環境における特に前者に関する情報は極めて少ない。

一方、1980年代から国内で使用され始めた固体飛跡検出器（線量計）は、その応答の中性子エネルギー依存性が、しきい中性子エネルギーである約100keV以上では小さいことが知られている[8]。東海事業所では昭和60年度から、TLDバッジによる高速中性子線量当量の評価精度を検証する目的で、プルトニウム燃料製造施設で作業する一部の作業者を対象として、固体飛跡検出器の同時着用試験を実施してきた。この線量計は、中性子エネルギー依存性が小さいという点で他の個人線量計に比べて高速中性子線による線量当量を評価するのに適している反面、被ばく線量当量を算定するまでにやや時間がかかるため、迅速かつ大量な個人線量計の取扱いが要求される現在の個人被ばく管理には実務的に適用し難い面がある。

本研究では、平成5年4月から一年間にわたって主にプルトニウム燃料製造施設で作業を行った作業者が実際に着用したTLDバッジと固体飛跡検出器のデータを収集し、中性子エネルギー応答特性などが全く異なるこれら2つの線量計の応答を比較することによって、放射線場の状況等を推定することを試みた。本研究の目的を以下に列挙する。

- (1) それぞれ固有の応答特性を持つTLDバッジの各TLD素子間の発光関係、さらにそれらTLDと固体飛跡検出器から得られる情報とを総合的に分析して、実作業環境下の放射線場の状況を推定するとともに、その放射線場との関連性を定性的に調べる。
- (2) TLDバッジと固体飛跡検出器の応答の相互関係及び実作業環境でのフィールド照射試験の結果から、本来中性子線のエネルギーや方向分布に大きく依存するTLDバッジの高速中性子線量当量換算係数の値の妥当性及び適合性について定量的

な検討を行う。

(3) 固体飛跡検出器を仲介とするTLDバッジのフィールド校正法の一手法を提案する。

第2章で、TLDバッジと固体飛跡検出器の概要と現在東海事業所で実施している中性子個人被ばく線量当量の算定手法について説明する。第3章では、個人線量計のデータの解析手法について述べ、第4章で解析した結果を示す。第5章は、プルトニウム燃料第3開発室で実施したTLDバッジのフィールド照射試験の結果である。第6、7章はそれぞれ考察及び結論である。

第2章 東海事業所における中性子個人被ばく線量当量測定の実況

2-1 TLDバッジによる中性子個人被ばく線量当量測定の実況

(1) TLDバッジの仕様

TLDバッジは、 β/γ 線用TLD線量計(UD-808P)、中性子線用TLD線量計(UD-809P)及び専用バッジケース(UD-887PH1)から構成される。それぞれの線量計のTLD素子構成を表2-1、2-2に、TLDバッジの外観図[1]を図2-1に示す。

β/γ 線用であるUD-808P型線量計は、 ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ が3個、 $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$ が1個、合計4個のTLD素子とその前面に配置した樹脂フィルターから成る。エレメントG1、G2、G4は、 ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ を蛍光体に使用したTLD素子であり、これは実効原子番号が生体組織のそれとほとんど同じ値であるため、所定の厚さのフィルター直下の β/γ 線による線量当量(組織吸収線量)の近似値を与える。また、エレメントG3は $\text{CaSO}_4(\text{Tm})$ を蛍光体に使用したTLD素子であり、これは100keV以下の低エネルギー γ 線に対して特に高い感度を有し、入射 γ 線のエネルギーの推定等に使用する。

一方、中性子線用であるUD-809P型線量計は、 γ 線用TLDが1個、中性子線用TLDが3個の合計4個のTLD素子とその前後に配置したCd及びSnの金属フィルターから構成される。エレメントN1は γ 線用、N2~N4が γ 線及び中性子線用であり、それぞれ蛍光体に ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 、 ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ を用いている。中性子線用である ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ は γ 線に対しても感度を有するので、中性子線のみによる応答を得るために、 γ 線用TLDである ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ を γ 線寄与分の補償用のTLD素子として用いる。なお、CdとSnは γ 線に対する質量減弱係数がほとんど同じであり、また密度も同程度なので金属フィルターの組み合わせの違いによる各エレメントの γ 線感度の相違は極めて小さい。

中性子線の測定には、人体からの後方散乱中性子線を介して直接入射中性子線に関する情報を推定する、いわゆるアルベド方式を採用している。TLD素子の前後に配置したCd/Snの金属フィルターとの組み合わせによってそれぞれのエレメントの測定対象とする中性子線のエネルギー範囲が異なり、エレメントN2、N3はそれぞれ主に直接入射熱中性子線、直接入射熱外中性子線を測定し、エレメントN4は、人体からの後方散乱中性子線を測定することによって、熱外~MeV領域のエネルギーを持つ直接入射中性子線に関する情報を推定する。 γ 線用であるエレメントN1を含めたこれら4個のTLD素子を用いて適切な評価式を組み立てることで、熱中性子線量当量、高速中性子線量当量*を分離して算定することが可能である。

*本文中では、0.4eV以上のエネルギーを持つ中性子線を“高速”中性子線と総称する。

表2-1 β/γ 線用TLD線量計のTLD蛍光体とフィルター構成

エレメント	TLD蛍光体及びフィルター	目的
G1	${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ + 樹脂 17mg/cm ²	β 線70 μm 線量当量評価用
G2	${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ + 樹脂 64mg/cm ²	β 線エネルギー評価用
G3	$\text{CaSO}_4(\text{Tm})$ + 樹脂 1000mg/cm ²	γ 線エネルギー評価用
G4	${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ + 樹脂 1000mg/cm ²	γ 線 1cm線量当量評価用

表2-2 中性子線用TLD線量計のTLD蛍光体と金属シールド構成

エレメント	TLD蛍光体及び金属シールド*	目的
N1	前;Cd/ ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ /Cd;後	γ 線補償用
N2	Sn/ ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ /Cd	直接入射熱中性子線測定用
N3	Cd/ ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ /Cd	主に直接入射熱外中性子線用
N4	Cd/ ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ /Sn	アルベド中性子線測定用

*TLD蛍光体前後に配置した金属シールドの厚さは、Cd、Snともに 0.7mmである。

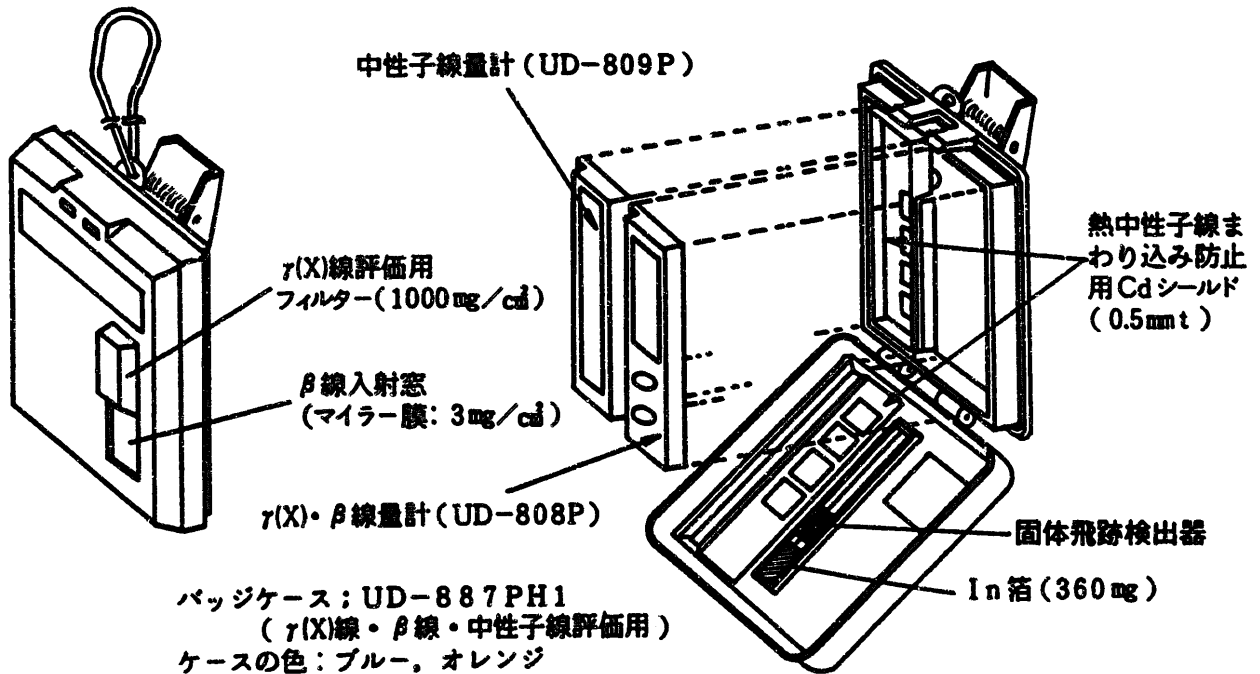


図2-1 TLDバッジの外観図[1]

(2) TLDによる中性子線量当量測定の問題

TLDバッジは、生体組織と実効原子番号が等価な物質である $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ を線量当量評価用のTLD素子として利用しており、測定対象が β/γ 線の場合にはTLD中での光子及び(二次)電子との相互作用の結果生じる熱蛍光の測定量は当該部位での組織吸収線量にほぼ比例する。これは、 β/γ 線を測定するための手段とその結果得られる情報とが組織吸収線量の定義と合致しているという理由による。このとき β/γ 線の線質係数はエネルギーに関係なく1であるから、TLDで測定値から線量当量への変換は極めて容易であり、特別な補正を必要としない。

一方、中性子線については、 β/γ 線の場合とは異なり、TLDによる測定手段及びその結果得られる情報と組織吸収線量の間には直接的な比例関係がない。

中性子線による生体組織中の吸収線量は、主として生体組織中の水素との弾性散乱によって生じる反跳陽子、水素や窒素の中性子吸収反応によって発生する γ 線(その結果として生じる2次電子)や陽子などに起因している。しかし、TLDを用いて中性子線を検出する場合には、線量の"量"に最も関係する水素原子を結晶中に含むような熱蛍光物質が存在しないので、TLDバッジに使用している $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 蛍光体のように ^{10}B や ^6Li などの中性子との衝突によって α 粒子を放出するような物質で蛍光体そのものを構成するか、あるいはその物質を別の種類の蛍光体に混合させるという方法が取られる。ただし、このとき大きな問題となるのは、 ^{10}B 、 ^6Li などの荷電粒子生成断面積と水素の(n,n)、(n, γ)反応断面積とでは、図2-2 [9]に示すようにその中性子エネルギー依存性が全く異なるという点にある。

加えて、吸収線量から線量当量を導出する際に必要となる線質係数は、中性子と生体組織との核反応の結果生じる荷電粒子のLET(Linear Energy Transfer)とその分布に依存して変化する。図2-3にSchuhmacherらが計算によって求めた実効的な(LET分布で加重平均した)線質係数[10]の値を中性子エネルギーの関数として示すが、熱中性子領域と1MeV近傍では約5倍も値が異なっている。TLDの測定量からはこのような線質係数の定量は不可能であり、またTLDに限らず他の通常の中性子検出器についても同様のことが言えるので、中性子線による吸収線量並びに線量当量の直接測定は極めて難しい。

以上述べたように、TLDが測定している"量"は線量当量の"量"に直接関係したものであるのではないので、TLDを用いて中性子線量当量を厳密に算定するには、TLDの測定量と線量当量とを関連づけるための段階的かつ複雑な補正を行わざるを得ず、またその補正を行うにはTLDでは定量できない中性子エネルギーに関する情報が別途必要となる。

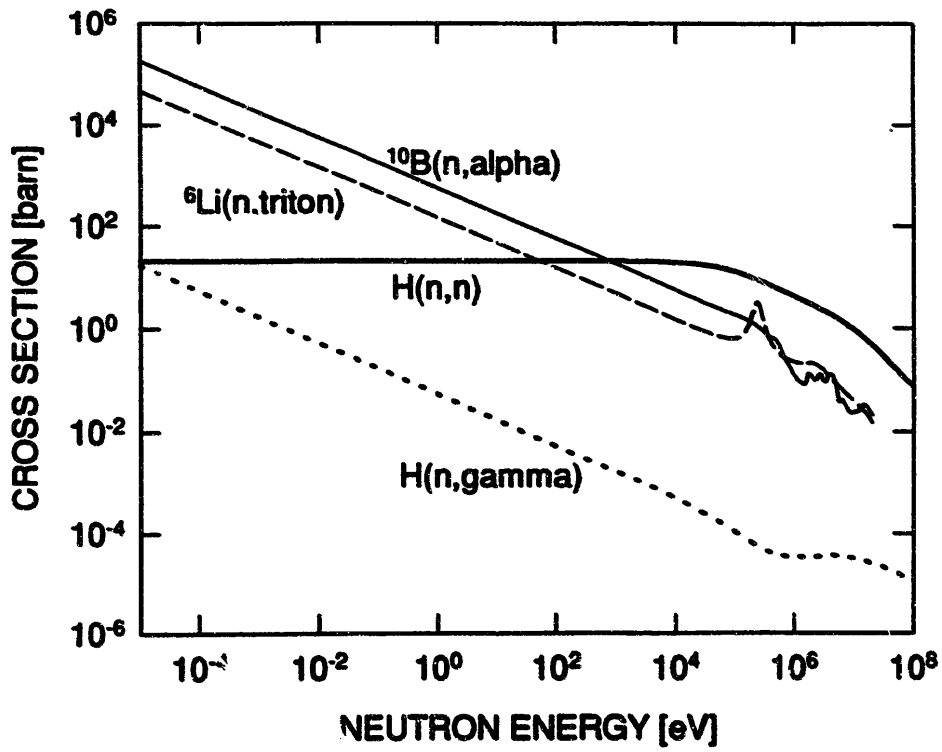


図2-2 中性子検出に用いられる種々の反応の断面積[9]

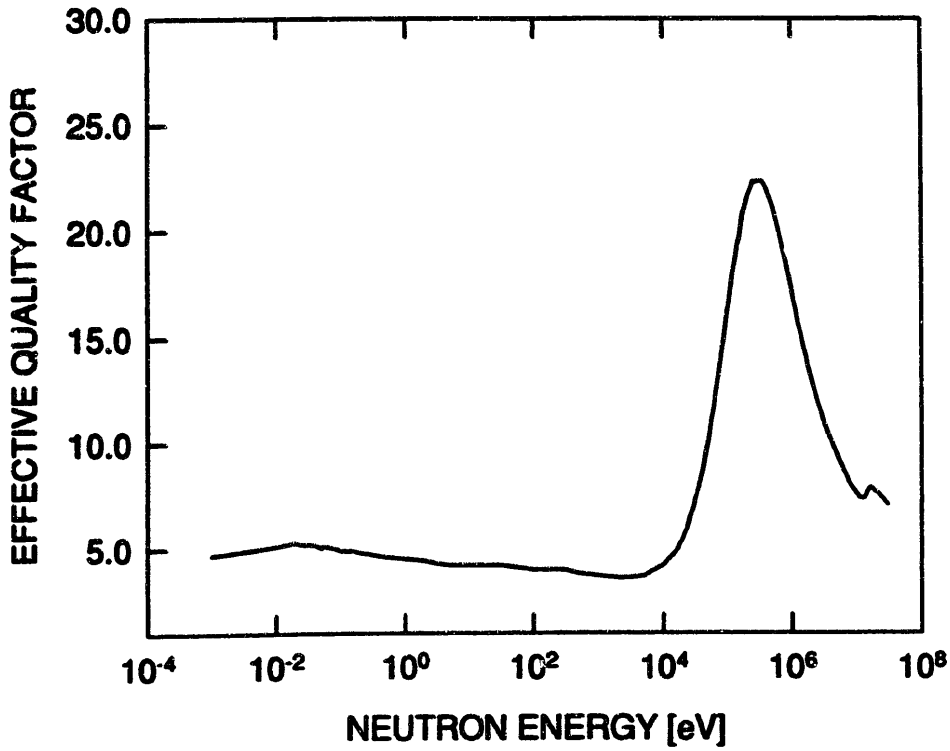


図2-3 中性子の実効線質係数 (ICRU球の深さ10mmでの計算値) [10]

(3) 中性子線量当量評価式の現状

個人線量計による評価の対象としての線量当量は、放射線障害防止法令（以下、「法令」と言う）に示される 1cm線量当量であり[11]、中性子線の場合、自由空間中の単位フルエンス当たりの量としてエネルギーの関数の形で与えられている。放射線防護のための最も基本的な量である実効線量当量の代用量の一種であり、ある特定した条件においてはICRUの定義する周辺線量当量[12]と等価な量である。

現在使用しているTLDバッジによる中性子線量当量の評価式を(2-1)(2-2)式に示す。測定の対象とする中性子線のエネルギー領域を幾つかの群に分割して、それぞれのエネルギー領域の中性子線の測定量に換算係数を乗じることによって線量当量を計算する。TLDバッジの開発当初は、エネルギー領域を三群に分けた三群評価式[1]を使用していたが、誤差の伝播が大きいなどの理由により昭和63年頃から線量当量評価式の再検討を開始し、ICRPの1977年勧告の取り入れに伴う法令改正のあった平成元年度より次式に示す二群評価式を使用している。

$$H_f = K_f \cdot R_f = K_f \cdot \{(N_4 - N_1) - C_{TR} \cdot (N_2 - N_3)\} \quad \dots (2-1)$$

$$H_{th} = K_{th} \cdot R_{th} = K_{th} \cdot (N_2 - N_3) \quad \dots (2-2)$$

H_f : 高速中性子線量当量 (中性子エネルギー0.4eV以上) [μSv]

H_{th} : 熱中性子線量当量 (中性子エネルギー0.4eV未満) [μSv]

K_f : 高速中性子読取り線量-高速中性子線量当量換算係数

6.4 [$\mu\text{Sv/mR } ^{137}\text{Cs eq.}$] (1993年12月現在)

K_{th} : 熱中性子読取り線量-熱中性子線量当量換算係数

0.098 [$\mu\text{Sv/mR } ^{137}\text{Cs eq.}$] (1993年12月現在)

$N_1 \sim N_4$: エレメント $N_1 \sim N_4$ の読取り値 [$\text{mR } ^{137}\text{Cs eq.}$]

R_f : 高速中性子読取り線量 (エレメント N_4 の0.4eV以上のエネルギーを持つ直接入射中性子線に対する正味の応答) [$\text{mR } ^{137}\text{Cs eq.}$]

R_{th} : 熱中性子読取り線量 (エレメント N_2 の直接入射熱中性子線に対する正味の応答) [$\text{mR } ^{137}\text{Cs eq.}$]

C_{TR} : 直接入射熱中性子線のエレメント N_4 への回り込み入射を補正する係数

$C_{TR}=0.225$ (1993月12現在)

本来、二群評価式で用いる換算係数の値は表2-3に示すような種々の要因に依存して変化し、特に中性子線のエネルギー分布や入射方向に大きく依存する。従って、これら種々の条件による換算係数の値の変動を予め把握しておく必要があるが、作業区域や作業内容が異なる作業者に対して、個々にこれらの要因の影響を厳密に求め、それを反映して個人毎に換算係数を決定するという方法は現実的ではなく、事実上不可能であるため、現在東海事業所では作業場所等とは関係なく一定の換算係数を用いて線量当量の算定を行っている。高速中性子線、熱中性子線に対する換算係数 K_f, K_{th} の値はそれぞれ 6.4, 0.098 [$\mu\text{Sv/mR } ^{137}\text{Cs eq.}$][13]である。

表2-3 換算係数の値に影響を与える条件

要因	変動
中性子線のエネルギーと入射方向 (中性子線のエネルギー)	-30~+70% ^a ±30% ^b
(中性子線の入射方向)	±30% ^c
着用の条件 (体表面と線量計間の距離等)	0~ -20% ^d
着用者の体格の個人差	- ^e
フェーディング	0~ -10% ^f

- a. Kf のみに影響を与える。以下、b~dも同じ。宮部らのフィールド照射試験の結果より[5]
 b. Kf のみ。作業環境の中性子スペクトル測定値を用いて百瀬らが計算した結果 [6]
 c. Kf のみ。入射角が60° 以内の場合 (^{252}Cf を用いた実験値) [1]
 d. Kf のみ。体表面-線量計間距離が4cm以内の場合 (^{252}Cf を用いた実験値) [1]
 e. 定量されていないが、他の条件と比較すると極めて小さい。
 f. γ 線の場合 (着用期間は一ヵ月) [1]

このうち、熱中性子線量当量換算係数の値 $Kf_{th} = 0.098 [\mu\text{Sv/mR } ^{137}\text{Cs eq.}]$ 及び直接入射熱中性子線のエレメントN4への回り込みの補正係数 $C_{TR} = 0.225$ については、1993年に工業技術院電子技術総合研究所の熱中性子標準場で安野らが実施した試験の結果[14]から決定した。熱中性子線の場合は、そのエネルギー分布を常温状態でのマクスウェル分布と特定することができるため、エネルギー分布の違いによるTLDの応答の変化はほぼ無視でき、熱中性子線量当量換算係数と回り込み補正係数の値を定数としている。また、方向依存性については考慮していない。

一方、高速中性子線量当量換算係数 Kf は、表2-3に示したように中性子エネルギーと入射方向に特に依存し、何らかの条件を設定しなければ一義的には決定できない値である。図2-4に、岩井が計算した人体ファントムに面平行に入射する単位中性子フルエンス当りのエレメントN2~N4の応答特性[15]と単位中性子フルエンス当りの1cm線量当量のエネルギー依存性[11]の比較を示す。主に高速中性子線を検出するエレメントN4と1cm線量当量の曲線は、 $10^5 \sim 10^6 \text{eV}$ の領域でそのエネルギー依存性が大きく異なるので、それらの比で定義される高速中性子線量当量換算係数 Kf も必然的に直接入射中性子エネルギー分布に依存することになる。さらに各エレメントの応答は中性子の入射方向にも依存するため、換算係数 Kf を決定する際には中性子エネルギーと入射方向の2つの影響を予め考慮する必要があり、それはむしろ実際に作業を行う際の中性子場、あるいはそれを十分に模擬できるような中性子場を想定したものでなければならない。

(4) 線量当量換算係数の決定方法の現状

個人線量計の換算係数を得るため行われる方法としては、実際の作業条件で個人線量計の照射試験を行う「フィールド校正」が最も一般的である。ただし、実際の作業環境下の複雑な中性子場において、個人線量計の最適な換算係数（校正定数とも言う）を決定する方法として、国際的に合意された標準的な方法は現在まだ無い。

まず、根本的な問題として「多方向からの中性子の入射があり得る実際の作業環境下で、個人線量計の評価の対象量として如何なる線量当量を考えるか」という問題について国際的な同意が得られていない。例えばフィールド校正を実施したとしても、個人線量計の応答と比較するための基準量がはっきりしない、あるいは仮に何らかの量が定義されたとしてもその実測や計算などによる定量的な評価が不十分であれば、得られた換算係数の値もある程度の不確かさを持つのは避けられない。

なお、国内法令の場合には、1cm線量当量が基準量とされているが、多方向からの中性子の入射があるような条件下では1cm線量当量は個人線量計の評価の対象量としては物理的に矛盾があり、受け入れられない。詳しい説明は、補遺Aで述べるが、本稿では個人線量計の評価の対象である中性子線量当量の定義を、体表面（一般に胸部）に装着した個人線量計を用いて個人モニタリングを行うことを前提として、以下の通りとする。

「個人線量計が評価すべき線量当量とは、個人線量計の装着面に対向して入射する中性子フルエンスに法令告示別表第5の単位フルエンス-1cm線量当量換算係数を乗じた量」

実際の作業環境でのTLDバッジの高速中性子線量当量換算係数を得るために、これまでに東海事業所では幾つかのフィールド照射試験や計算が行われてきており、ここではその方法について簡単に説明する。

a) 実作業環境下での照射試験による方法

中性子エネルギー分布などの微分量ではなく、積分量としての線量当量とTLDの応答から換算係数を求める方法であり、放射線場の高速中性子線量当量を H_f 、人体（人体を模擬できるファントム）に装着したTLDの高速中性子腕取り線量を R_f としたとき、高速中性子線量当量換算係数は、

$$K_f = \frac{H_f}{R_f} \quad \dots (2-3)$$

で表される。中性子線のエネルギー分布情報は必ずしも必要なく、例えばレムカウンターなどで測定した線量当量の値を H_f に使用しても良いが、比較的高い精度で線量当量を得るため中性子スペクトロメーターによる中性子スペクトル測定値に単位フル

エンス-1cm線量当量換算係数[11]を乗じて線量当量を求める場合の方が多い。これまで東海事業所で実施されたTLDバッジのフィールド照射試験では全てこの方法が用いられている[5]。

TLDバッジのファントム装着面に対して入射する中性子線の前方性が十分に強く、面平行入射条件に近い場合には、(2-3)の H_f は1cm線量当量（あるいは量的に等価である周辺線量当量）に相当し、前述した個人線量計の評価対象としての線量当量の定義に矛盾しない。しかし、多方向入射、特に背面方向からの中性子の入射がある場合には、(2-3)式から得られる換算係数の値は過大なものとなり、安全側の係数であるとの解釈もできなくはないが、個人線量計の測定量と線量当量とを直接に関係づけるべき換算係数としては不合理である。

また、Piessらの球形ファントムを用いた"Single Sphere Albedo Technique"[16]もこうした校正方法の一例と言える。彼らの方法の場合には中性子線の入射方向に関する制限はないものの、評価対象としての線量当量の定義にはやや曖昧な点がある。

b) 中性子束分布をもとに計算によって求める方法

中性子のエネルギー及び方向分布の情報から、個人線量計の応答関数を用いて計算によって換算係数を求める方法であるが、実際の作業環境中での中性子の方向分布の定量は容易ではないので、面平行入射あるいはその条件に極めて近い条件が成立する場合にのみ行われる。

空間中の任意の点 r （位置ベクトル）において、エネルギー E 、方向ベクトル Ω を持った中性子束を考える。ここで、方向ベクトル Ω が、人体あるいはファントムに対して鉛直に入射する成分しか持たない場合には、換算係数の計算は中性子エネルギーだけの積分（厳密には、人体に対して鉛直に入射する場合のみ1となる δ 関数を間に挟んだ方向積分もある）となり、

$$K_f = \frac{\int_{0.4} dE \phi(r, E) \cdot h_{1cm}(E)}{\int_{0.4} dE \phi(r, E) \cdot R_{NA}(r', E)} = \frac{\overline{h_{1cm}}}{R_{NA}} \quad \dots (2-4)$$

ここで、

$$\overline{h_{1cm}} = \frac{\int_{0.4} dE \phi(r, E) \cdot h_{1cm}(E)}{\int_{0.4} dE \phi(r, E)} \quad \dots (2-5)$$

$$\overline{R_{N4}} = \frac{\int_{0.4} dE \phi(r, E) \cdot R_{N4}(r', E)}{\int_{0.4} dE \phi(r, E)} \quad \dots (2-6)$$

$\phi(r, E)$: 中性子エネルギースペクトル [$n/cm^2/eV$]

$h_{1cm}(E)$: 単位中性子フルエンス-1cm線量当量換算係数 [$Sv/(n/cm^2)$] [11]

$R_{N4}(E)$: 人体に面平行に中性子が入射する場合のエレメントN4の単位中性子フルエンス当たりの応答 [$mR \text{ }^{137}\text{Cs eq.}/(n/cm^2)$]

で表される。ここで、中性子エネルギーの積分範囲は0.4eV以上である。(2-4)式から得られる換算係数 Kf の値は、計算と同一条件で照射試験を行った場合に(2-3)式から求められる換算係数と同じ値になる。

換算係数 Kf は、その中性子場での単位フルエンス当たりの平均的なエレメントN4の応答関数 $\overline{R_{N4}}$ に対する、平均的なフルエンス-1cm線量当量換算係数 $\overline{h_{1cm}}$ の比と考えるのも良い。中性子スペクトルが既知で、TLDバッジの応答関数が精度良く分かっている場合に有効な方法であるが、このように人体に対して面平行に中性子が入射するような状況は、実際の作業条件下では極めて少ない。

そこで、多様な入射方向を持った中性子場におけるTLDバッジの換算係数の計算方法について、前述した「個人線量計の評価対象とする線量当量」の定義に従い、(2-4)式を拡張することを考える。

人体に装着したTLDバッジのエレメントN4は、 ^{252}Cf 線源に対して図2-5に示すような(水平方向の)方向特性を持っていることが百瀬らの実験[17]から判明している。前方方向から入射する場合にはコサイン曲線よりも緩やかな特性であり、また背面入射に対してもある程度の感度を有しているが、その感度は中性子エネルギーに大きく依存して変化し、低エネルギー中性子線の場合にはほとんど感度を持たない。

図2-5に示したエレメントN4の方向特性を、個人線量計の装着面の法線と入射する中性子の方向ベクトルのなす角 θ の余弦 $\mu (= \cos \theta)$ の多項式によって数式表現すると、

$$R_{N4}(E, \mu) = R_{N4}(E, \mu=1) \cdot \sum_l a_l \cdot P_l(\mu) \quad \dots (2-7)$$

$R_{N4}(E, \mu=1)$: 人体に対して面平行入射の場合の単位フルエンス当たりのエレメントN4の応答 [$mR \text{ }^{137}\text{Cs eq.}/(n/cm^2)$]

$P_l(\mu)$: ルジャンドル多項式 ($l=3$)

となる。エレメントN4の応答関数は、エネルギー依存の項と方向依存の項とに厳密には分離できないが、ここでは前方入射の場合しか考慮しないので、中性子エネルギーに依存した方向特性の変化は無視できると仮定する。また、水平方向から入射する場合と垂直方向から入射する場合とでは、人体形状が非対称であるため方向特性に違い

が生じるが、ここでは入射角（ θ に相当）だけでその方向依存性を表現できると仮定する。

(2-7)式を用いると、このような場におけるTLDバッジの高速中性子線量当量換算係数 K_f' は、

$$K_f' = \frac{\int_{0.4} dE \phi'(r, E) \cdot h_{1cm}(E)}{\int_{0.4} dE \int_{2\pi} d\phi \int_0^1 d\mu \phi(r, E, \mu) \cdot RN_4(r', E, \mu=1) \cdot P_l(\mu)} = C_D \cdot \frac{\overline{h_{1cm}}}{RN_4} = C_D \cdot K_f \quad \dots(2-8)$$

ここで、

$$\phi'(r, E) = \int_{2\pi} d\Omega \phi(r, E, \Omega) \quad [n/cm^2/eV] \quad \dots(2-9)$$

$$C_D = \frac{\int_0^1 d\mu \phi(r, E, \mu)}{\int_0^1 d\mu \phi(r, E, \mu) \cdot P_l(\mu)} \quad \dots(2-10)$$

と表すことができる。(2-8)式は(2-4)式とほぼ同様であり、ただTLDバッジの方向依存性を考慮しているかどうかだけが異なる。

(2-10)式の係数 C_D は、面平行入射条件での換算係数 K_f に対する方向依存の補正係数であり、面平行入射条件の場合には1、また一様な角度フルエンスを持つような中性子場を想定すれば、(2-7)式のような方向依存性を持つTLDバッジについては1.3、コサイン型の方向依存性を持つ個人線量計については2.0という値となる。

ただし、実作業環境における中性子線の入射方向分布の実測は容易ではないので、何らかの数値計算を行って詳細な方向分布を求めない限り、(2-8)式による換算係数、あるいは(2-10)式による方向依存性の補正係数の導出は極めて困難と言える。

なお、入射方向不明の中性子エネルギー分布の測定値を人体（ファントム）面に面平行に入射すると仮定して計算して換算係数を求めている例[6]もある。この方法は、あくまでもその中性子場での個人線量計の平均的な換算係数の値の変動の傾向を調べるにすぎず、またそのような方法で計算した換算係数の値は必ずしも正しいものになるとは限らない。

以上、TLDバッジの換算係数 K_f を求める方法について述べてきたが、中性子線の入射方向という極めてその定量が難しく、また換算係数の値に変動を与える条件が入ってくるため、(a)(b)いずれの方法も一長一短がある。

現時点で最も有効な方法は、「プルトニウム燃料工場などの中性子線を被ばくする可能性の高い作業区域を対象に、作業条件や作業環境のできる限り詳細な中性子線分布情報を調べ、その情報を基にして上述した2つの方法から得られる多種多様な換算係数の値の中から、作業環境を最も代表するような中性子場を選定して高速中性子線量当量換算係数を決定する」ことであると考えられるが、以下に示すような理由からこの手法は実用に至っていない。

- 1) 岩井が計算した応答関数は単色中性子照射試験で得られた値と比べて最大ファクター2程度異なること。
- 2) 連続中性子スペクトル場における(積分の)TLDレスポンスを考えた場合に、岩井が計算した応答関数の精度の積分的検証を行ったり、また(2-3)式を用いて換算係数を決定したりすることのできる中性子標準校正場(特に減速場)が現時点で確立していないこと。
- 3) 実作業環境の中性子場でのフィールド試験例が極めて少なく、換算係数の決定に反映するに足るだけのデータがないこと。

現在、作業者の個人被ばく線量当量の評価に使用している高速中性子線量当量換算係数 $6.4[\mu\text{Sv/mR }^{137}\text{Cs eq.}]$ の値は、プルトニウム燃料工場の作業者が同時着用する固体飛跡検出器から求めた線量当量の値とTLDバッジの高速中性子線レスポンス Rf とがほぼ1対1になるように経験的に定めたものである。これは、次節で詳しく説明するが、100keV以上の中性子線に対するエネルギー応答特性だけから見れば、TLDバッジよりも固体飛跡検出器の方が優れているという理由による。

第6、7章で詳しい議論を行うが、結論から先に述べれば、このような方法で定めた換算係数 $Kf = 6.4[\mu\text{Sv/mR }^{137}\text{Cs eq.}]$ の値は、あくまでも放射線防護の目的としての作業者の中性子被ばく線量当量を推定・評価するという意味においては十分に合理的な値であると考えている。ただし、実作業環境における中性子線分布とTLDの応答特性の関係とは全く無関係に(あるいは関係を把握することなく)定めた値であり、作業者の中性子被ばく線量当量の算定に使用していたにもかかわらず、その値の定量的な面ではやや不十分な点があったことは否定できない。

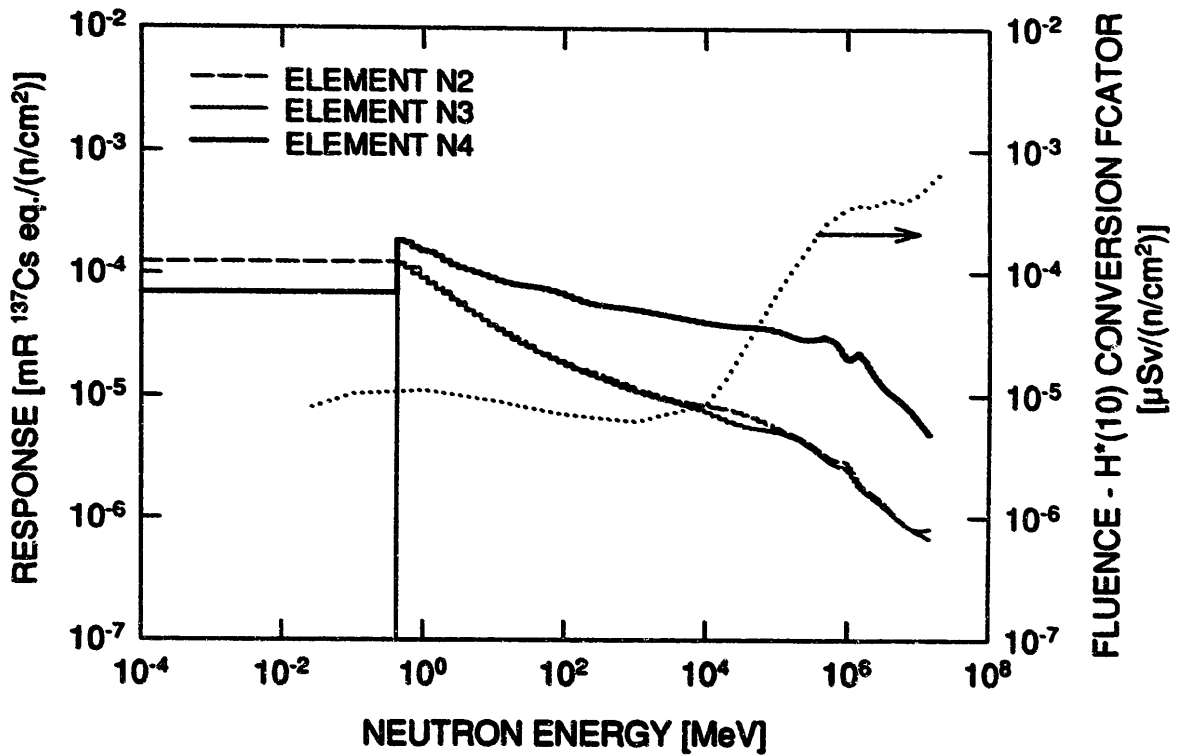


図2-4 単位中性子フルエンス当たりのTLDバッジのエレメントN2~N4の
 応答関数（面平行入射条件）[15]と1cm線量当量換算係数[11]の比較

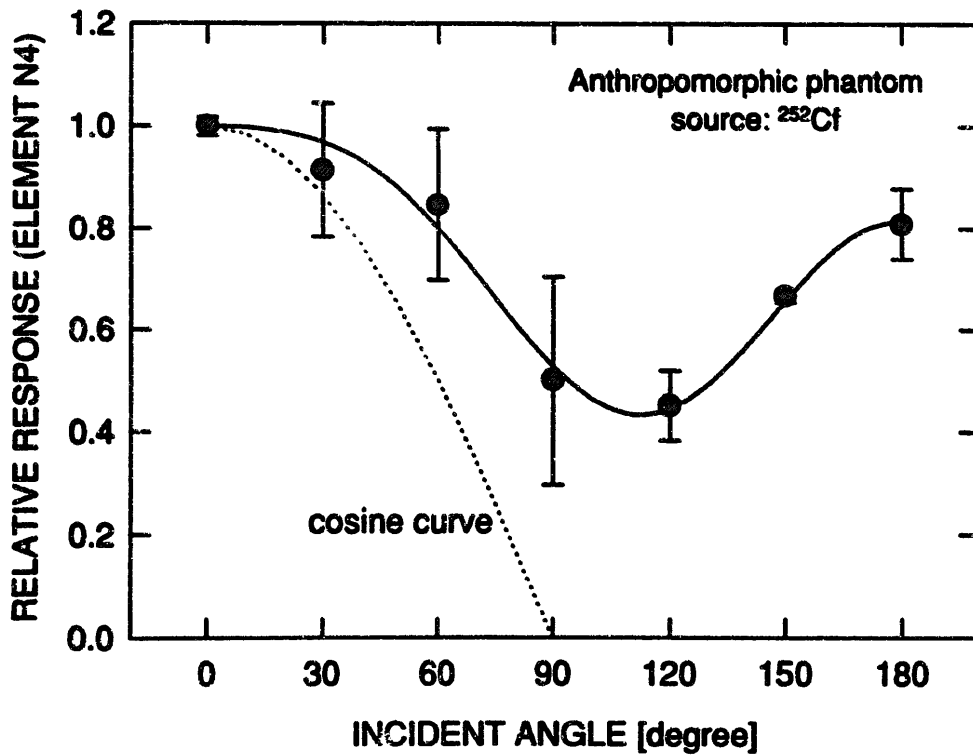


図2-5 TLDバッジのエレメントN4の方向特性（²⁵²Cf線源、人体形状ファントム
 の場合）、実線はルジャンドル関数によるフィッティング結果

2-2 固体飛跡検出器による中性子個人被ばく線量当量測定の実況

(1) 固体飛跡検出器の仕様とその使用状況

東海事業所では、昭和60年頃より固体飛跡検出器に関する調査・研究に着手するとともに、プルトニウム燃料第二開発室で作業する放射線作業従事者のうち中性子線による被ばくの可能性の高い作業者を対象にTLDバッジとの同時着用試験を開始した。現在ではプルトニウム燃料製造施設の作業者を中心に100名/1ヵ月、70名/3ヵ月に使用している。現在の使用状況を表2-4に示す。

表2-4 ニュートラックバッジの使用状況（平成5年度）

部課室	1ヵ月管理対象者(人)	3ヵ月管理対象者(人)
Pu燃料工場		
管理課	2	2
設備課	-	3
検査課	3	17
転換課	10	6
製造課	80	10
加工課	-	19
核燃料技術開発部		
Pu燃料開発室	2	6
転換技術開発室	3	7
合計	100	70

使用している固体飛跡検出器は長瀬ランダウア社(株)のニュートラックバッジであり、その構造の模式図[18]を図2-6に示す。ニュートラックバッジは、特殊プラスチック板と高密度ポリエチレンフィルムを密着させたものであり、中性子との弾性散乱によって主にポリエチレンフィルムから発生する反跳陽子（水素原子核）がプラスチック板に入射して損傷（飛跡）を形成するという原理を用いることによって中性子線を検出する。その損傷（飛跡）を化学処理によって拡大させ、その数を計数することによって中性子線量当量を算定する。これらの一連の作業は全て長瀬ランダウア社(株)の測定サービスを利用している。

(2) 線量当量評価法

固体飛跡検出器は、中性子線の検出に水素原子核の反跳を利用しており、また検出器そのものの組成も生体組織に近いため、線量当量の定義に比較的忠実であり、TLDバッジと比べたとき、特に100keV以上の中性子線に対する応答特性が優れている。

東北大学工学部高速中性子実験室のダイナミトロン加速を用いて安淵[19]、百瀬

ら[20]が実施したニュートラックバッジの中性子エネルギー応答特性の試験結果と1cm線量当量の比較を図2-7に示す。図に示したように、単位フルエンス当たりのニュートラックバッジのエッチピット数密度（標準計数視野 3.363mm²当たりのエッチピット数、以後単に「エッチピット数」と言う）は中性子エネルギーにあまり依存せず、また1cm線量当量当たりのエッチピット数も中性子エネルギー 0.5~2.5MeVの範囲では 15~20[(#/3.363mm²)/ μ Sv]とほぼ一定である。

ただし、約100keV以下のエネルギーを持つ中性子線に対しては感度を持たないこと、図2-8に示すように方向特性がほぼコサイン関数型であり入射角60°では面平行入射に比べて約半分の感度となるなど[21]、線量当量を算定する際にその補正を必要とする場合もある。

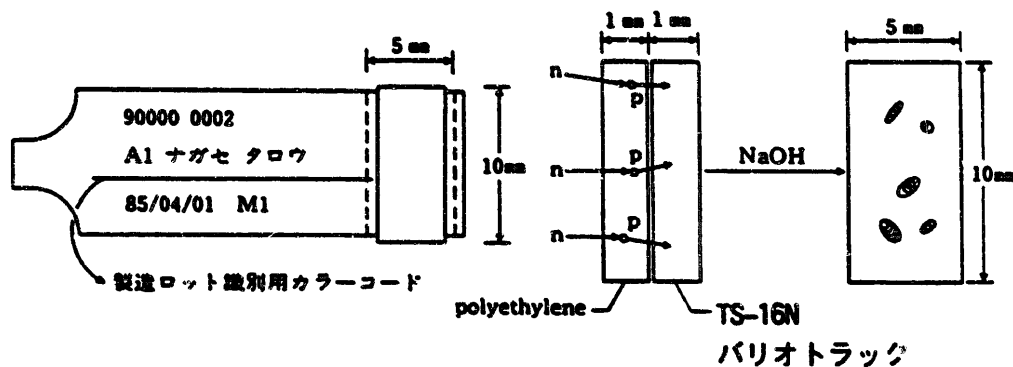


図2-6 ニュートラックバッジの構造図[18]

長瀬ランダウア社(株)から報告される測定結果は、バックグラウンド放射線によるエッチピット数を差し引いた中性子線正味のエッチピット数とそのエッチピット数から算定した ^{252}Cf の中性子線に対する見かけの中性子線量当量でありJIS Z4510[22]に基づき次式で求められる。

$$H_{td} = \frac{T \cdot F_E \cdot F_D \cdot F_T \cdot h_{1cm}}{K_d(^{252}\text{Cf})} \quad \dots(2-11)$$

- $K_d(^{252}\text{Cf})$:面平行入射条件での ^{252}Cf に対する自由空間中の単位フルエンス当りの固体飛跡検出器のエッチピット数 $[(\#/3.363\text{mm}^2)/(n/\text{cm}^2)]$
 T :固体飛跡検出器のエッチピット数 $[\#/3.363\text{mm}^2]$
 F_E :エネルギー依存性の補正係数
 F_D :方向依存性の補正係数
 F_T :照射時の温度依存性の補正係数
 h_{1cm} : ^{252}Cf の中性子エネルギー分布で重み平均をとった自由空間中の単位中性子フルエンス-1cm深部線量当量換算係数* $[\text{Sv}/(n/\text{cm}^2)]$

長瀬ランダウア社(株)の様な線量測定サービス業者が線量当量を算定する場合には、作業環境の中性子線分布などに依存する補正係数 F_E 、 F_D 、 F_T の値は不明な場合がほとんどであり、通常その補正は行われぬ。従って、(2-11)式は簡単となり

$$H_{td} = K_{td} \cdot T = \frac{h_{1cm}}{K_d(^{252}\text{Cf})} \cdot T \quad \dots(2-11')$$

となる。ここで $K_{td}=h_{1cm}/K_d(^{252}\text{Cf})$ の値が、エッチピット数から線量当量への換算係数に相当し、特殊プラスチック板の製造ロットによっても若干変化するが、約15 $[\mu\text{Sv}/(\#/3.363\text{mm}^2)]$ である。また、その最小検出下限はバックグラウンドの飛跡数や中性子エネルギー依存性などを考慮し、0.2mSvとしている[18]。

一方、動燃事業団では、プルトニウム燃料製造施設の中性子エネルギー分布等に応じた換算係数を用いて、報告されたエッチピット数から中性子線量当量を独自に算定している。計算式を次式に示す。

$$H_{td} = 22.0 \cdot T \quad \dots(2-12)$$

ここで使用する換算係数22.0 $[\mu\text{Sv}/(\#/3.363\text{mm}^2)]$ は、1986年に小泉らが実際のプルトニウム燃料を取扱うグローブボックス周辺で、ニュートラックバッジを楕円柱パラフィンファントム(30×40×20cm)上に装着して測定したエッチピット数とアンダーソンブラウン型レムカウンター(Studsvik 2202D)の計数率からメーカーの推奨する換算係数0.33 $[\text{cps}/(\mu\text{Sv}/\text{h})]$ を用いて求めた中性子線量当量とを比較して求めた値で

ある[21]。 ^{252}Cf に対する換算係数に、グローブボックス周辺の典型的な中性子線の方向分布などによる種々の補正係数を掛けた値でもある。

なお、長瀬ランダウア社(株)が、ニュートラックバッジに使用していた特殊プラスチック板は徳山曹達(株)が製造していた「TS-16N」という製品であったが、原材料供給上の問題から1992年より(株)フクビ工業の製造する「バリオトラック(BARYOTRAK)」に変更している。小泉らの求めた換算係数は、TS-16Nについてのデータであるが、単色中性子の照射試験(図2-7、2-8はTS-16Nとバリオトラックの比較結果)及びTS-16Nとバリオトラックをそれぞれを使用したニュートラックバッジのプルトニウム燃料工場での同時着用試験等から、核分裂中性子エネルギー附近における両者の基本特性に変化がないことを確認している。これらの実験の詳細については補遺Bに記した。

(3) 固体飛跡検出器の位置付け

TLDバッジと固体飛跡検出器の同時着用を開始した当初の目的は、固体飛跡検出器による中性子線量当量評価値とTLDバッジによる中性子被ばく線量当量評価値との比較が主であり、あくまでもTLDバッジによる中性子線量当量評価値の確度と精度の検証にあった。また、その当時から固体飛跡検出器の応答特性の中性子エネルギー依存性がアルベド型TLDに比べて遙かに小さい点や γ 線に対して感度を持たない点などに注目し、いずれは中性子個人モニタリングへの適用の検討などもなされていたようである。

固体飛跡検出器の個人被ばく線量評価上の位置づけについては、1993年12月に改訂した「個人被ばく管理マニュアル(外部被ばく管理)」で初めて公式に言及されており、「固体飛跡検出器による線量当量の算定結果はあくまでも参考値であるが、基本的にはTLDバッジによる算定結果を比べて高い値を採用する」旨が記載されている。[13] しかし、1993年12月以降、実際にはTLDバッジの各TLDエレメントの発光関係に明らかに異常(放射線によるものではない発光)があると認められた場合を除いて、全ての作業者の中性子被ばく線量当量の算定は(2-2)式に示したTLDバッジによる二群評価式から得られた値を採用しており、個人被ばく管理業務には固体飛跡検出器による結果は使用していない。

* 長瀬ランダウア社(株)の報告する中性子線量当量は、厳密には1cm線量当量ではなく、ICRP21に示される1cm深部線量当量である。ただし、 ^{252}Cf に対する線量当量の値はほぼ同じである。

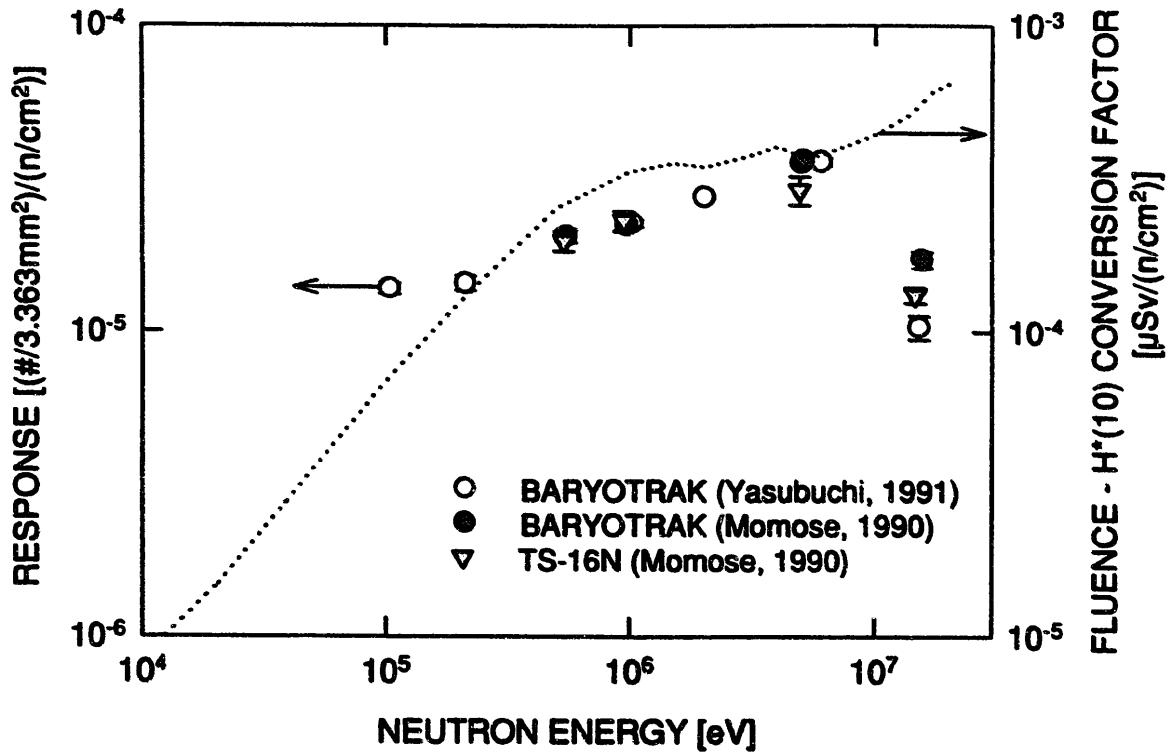


図2-7 単位中性子フルエンス当たりの固体飛跡検出器（ニュートラックバッジ）の応答特性[19][20]と1cm線量当量換算係数[11]の比較

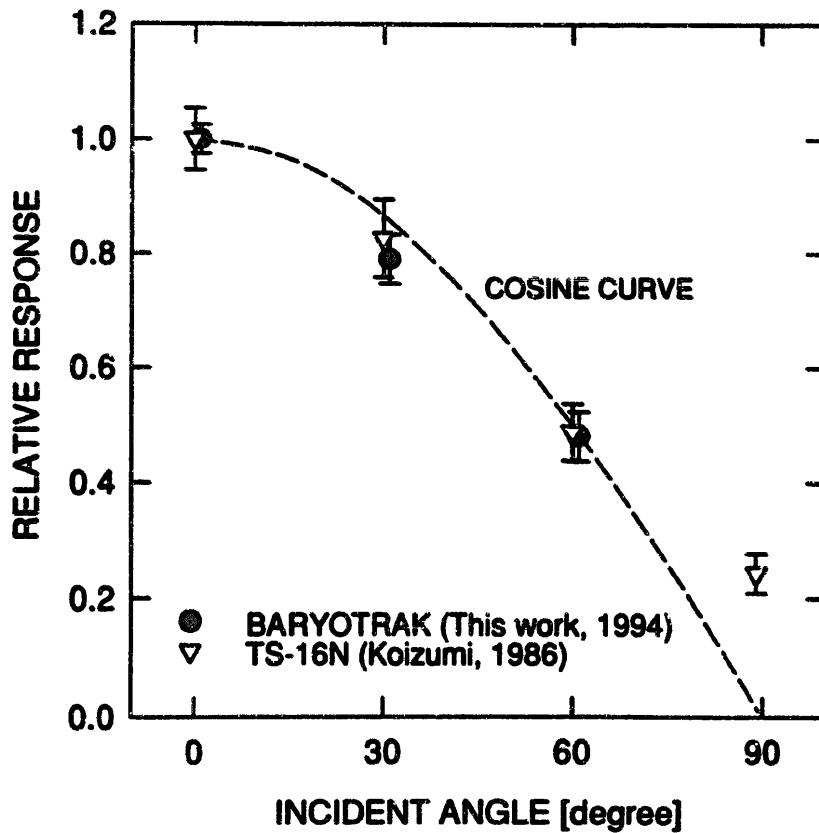


図2-8 固体飛跡検出器（ニュートラックバッジ）の方向特性（ ^{252}Cf 線源）[21]

第3章 データ解析方法

3-1 データ解析の対象者

本研究では、平成5年4月～平成6年3月の期間に、プルトニウム燃料を取り扱う施設（プルトニウム燃料第二、第三開発室及びプルトニウム転換技術開発施設）にて放射線作業に従事した作業者のうち、被ばく管理期間が一ヵ月間であるものについてデータ解析を行った。延べ人数約6,000人分のデータの中から、TLDバッジと固体飛跡検出器のどちらか一方の線量計から算定された中性子線量当量が有意値（0.2mSv以上）であった者を抽出した。

上記条件の該当者数を所属する部課室、管理期間別に表3-1（TLDバッジ）、3-2（固体飛跡検出器）に示す。TLDバッジ、固体飛跡検出器から算定された中性子線量当量が有意であった者の総数は、それぞれ606*、328名であり、両線量計共に有意値として算定された者は257名であった。

所属部課室毎では、転換技術開発室に所属する作業者が僅かに含まれているが、ほぼプルトニウム燃料工場に所属する作業者、特に製造加工部製造課の作業者が大部分を占めている。また、月別の有意者数の変動を見ると、平成5年7～9月にかけて中性子線量当量が有意値と算定された人数が減少しているが、これはプルトニウム燃料第三開発室において、ペレットを焼き固める連続焼結炉が故障し、その補修作業を約3ヵ月間にわたって行っていたためである[23]。

本解析を行った期間中の、製造課に所属する作業者の主な放射線作業の内容は、FBR燃料製造作業（プルトニウム燃料第三開発室）、ATR燃料製造作業（プルトニウム燃料第二開発室）である**。これらの作業は大きく原料調整工程、粉末調整工程、ペレット調整・検査工程に区分されるが、いずれの工程も大型グローブボックスにより燃料を取り扱っている。

なお、不均等被ばく管理用TLDバッジ、作業モニタリング用TLDバッジ及び指リング線量計については解析の対象からは除外した。

* 「個人被ばく管理マニュアル（外部被ばく管理）」の改訂により、平成5年12月以降と以前とでは中性子線量当量評価式中の係数が一部異なっている。今回の解析では、その前後における中性子線量当量評価値の整合を取るため、マニュアル改正以前のものについても新しい評価式を用いて計算し直しており、有意者数や集団線量当量などは国等への報告とは異なる場合がある。

** 本解析で抽出した作業者がどちらの施設の作業に従事していたかは不明である。

表3-1 データ解析の対象者数 (TLDバッジ)

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	小計
管理課			1/1a				1/1						2/2
検査課	2/2						0/1		2/3		2/2	3/4	9/12
転換課	9/9	3/3	8/10	1/3	9/12	1/1	12/13	8/8	7/8	6/6	21/21	18/18	103/112
製造課	70/75	66/69	33/49b	13/18	18/22	17/20	60/64c	79/81d	37/39	29/37	42/46	26/35	490/555
転換技術開発室					1/1	1/2							2/3
小計	81/86	69/72	42/60	14/21	28/35	19/23	73/79	87/89	46/50	35/43	65/69	47/57	606/684

a. 斜線上部は有意者数、下部は抽出条件該当者数 b. 臨時測定者21名含む c. 臨時測定者 1名含む d. 臨時測定者23名含む

表3-2 データ解析の対象者数 (固体飛跡検出器)

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	小計
管理課			0/0a				0/0						0/0
検査課	0/0						1/1		3/3		0/0	2/2	6/6
転換課	4/5	2/2	5/5	3/3	7/8	0/1	1/3	0/2	1/2	0/0	2/4	1/3	26/38
製造課	51/52	47/50	19/22	8/13	11/20	12/15	42/50	28/32	14/27	18/27	23/32	22/26	295/366
転換技術開発室					0/1	1/2							1/3
小計	55/57	49/52	24/27	11/16	18/29	13/18	44/54	28/34	18/32	18/27	25/36	25/31	328/413

a. 斜線上部は有意者数、下部は抽出条件該当者数

3-2 データ解析に用いた諸量

本データ解析で用いた量は、TLDバッジ、固体飛跡検出器の測定値及びそれら測定値から二次的に算出される量（線量当量等）である。表3-3にデータ解析に用いた諸量をまとめた。解析で用いる量は斜体にて記述を統一する。

本解析では、表3-3に示した諸量について主に2変量解析による相関などを調べた。

(1) γ 線に関する量

γ 線については、UD-808P型線量計のエレメントG3とG4及びUD-809P型線量計のエレメントN1の読取り値からバックグラウンド線量を差し引いた値をそれぞれG3, G4, N1とする。G4は1cm線量当量の近似量であるが、G3, N1は蛍光体の種類の違いや蛍光体前面部に配置した金属フィルターの遮蔽効果によってG4とは異なった γ 線エネルギー依存性を有している。図3-1にG3/G4, N1/G4比を γ 線のエネルギーの関数として示す。G3/G4で定義される γ 線エネルギー指標は入射 γ 線の実効的なエネルギーの推定に利用する。

また、 γ 線による1cm線量当量 H_g は次式を用いて計算する。記録レベル上の検出下限は0.1mSvであり、また体表面側に対しては方向依存性は比較的小さい[1]。

$$H_g = K_g \cdot G4 \quad \dots(3-1)$$

K_g : γ 線 1cm線量当量換算係数 [$\mu\text{Sv/mR } ^{137}\text{Cs eq.}$]
(通常は10.0、ただしG3/G4 ≥ 2.0 の場合のみ11.5を使用する。)

(2) 中性子線に関する量

中性子線については、UD-809P型線量計のエレメントN2~N4の読取り値から γ 線による発光の寄与分（エレメントN1の読取り値）を差し引いた値、すなわち中性子線に対する正味の測定量をそれぞれN2~N4とする。また熱中性子、高速中性子線に対する正味の測定量をそれぞれRth, Rf、1cm線量当量をそれぞれHth, Hfとする。Hth, Hfの記録レベル上の検出下限は共に0.2mSvであるが、実際には熱中性子線については2~5 μSv 程度まで評価可能とされている[1]。なお、Rf, Rth, Hf, Hthの計算方法については第2章の(2-1)(2-2)式を参照されたい。

固体飛跡検出器については、エッチピット数をT、エッチピット数から(2-12)式を用いて算定された高速中性子線の1cm線量当量をHtdとする。記録レベル上の検出下限は0.2mSvであり、これはエッチピット数10[#/3.363mm²]に相当する。なお長瀬ランダウア社(株)から報告されるエッチピット数は予めバックグラウンド中性子線によるエッチピット数を差し引いた値である。

表 3-3 データ解析に用いた諸量

線量計の種類	解析対象量 (記号)	単位	定義	計算方法
UD-808P	G3	mR ¹³⁷ Cs eq.	エレメントG3のγ線正味の読取り値	G3-BG ^a
UD-808P	G4	mR ¹³⁷ Cs eq.	エレメントG4のγ線正味の読取り値	G4-BG
UD-809P	N1	mR ¹³⁷ Cs eq.	エレメントN1のγ線正味の読取り値	N1-BG
UD-809P	N2	mR ¹³⁷ Cs eq.	エレメントN2の中性子線正味の読取り値 (主に熱中性子)	N2-N1
UD-809P	N3	mR ¹³⁷ Cs eq.	エレメントN3の中性子線正味の読取り値 (主に熱外中性子)	N3-N1
UD-809P	N4	mR ¹³⁷ Cs eq.	エレメントN4の中性子線正味の読取り値 (主に高速中性子)	N4-N1
UD-808P	G3/G4	-	γ線エネルギー指標	(G3-BG)/(G4-BG)
UD-809P	Rth	mR ¹³⁷ Cs eq.	熱中性子線に対する応答	N2-N3
UD-809P	Rf	mR ¹³⁷ Cs eq.	高速中性子線に対する応答	N4-N1-0.225·(N2-N3)
UD-808P	Hg	mR ¹³⁷ Cs eq.	γ線 1cm線量当量	Kg·(G4-BG) ^b
UD-809P	Hth	mSv	熱中性子線 1cm線量当量	0.098·(N2-N3)
UD-809P	Hf	mSv	高速中性子線 1cm線量当量(≥0.4eV)	6.4·{N4-N1-0.225·(N2-N3)}
固体飛跡検出器	T	#/3.363mm ²	エッチビット数 (業者からの報告値)	-
固体飛跡検出器	Htd	mSv	高速中性子線 1cm線量当量(≥約0.1MeV)	22.0·T

a. BG=バックグラウンド線量 (0.28×日数)

b. Kgは、エレメントG4の読取り値からγ線の線量当量を算出する係数であり、G3/G4 ≥2.0の場合は Kg=11.5[μSv/mR ¹³⁷Cs eq.]、それ以外では 10.0[μSv/mR ¹³⁷Cs eq.]を使用する。

また、本解析では、TLDバッジの高速中性子線に対する読取り線量 R_f と固体飛跡検出器のエッチピット数 T の比である、 T/R_f の値に特に注目した。

T/R_f は、中性子エネルギー分布や、中性子エネルギーが不明な場合の(2-1)式における高速中性子線量当量換算係数 K_f の値を、推定することが可能な指標となることが判明している[24]。

図3-2に単色中性子、 ^{252}Cf 等の中性子源（及びその減速場）の照射試験によって得られた T/R_f の値をその中性子場の平均中性子エネルギーの関数として示す。プロットは実験データ、破線は単色中性子に対する T/R_f の依存性を計算値などを基に推定した結果であり、共に面平行入射条件での値である。

^{252}Cf 及びその減速場等のように連続的な分布を持っている中性子の場合には、 T/R_f は単色中性子の場合に比べると小さな値となるが、プルトニウム燃料を取り扱う施設においてはむしろ前者の ^{252}Cf 及びその減速場の条件に近いと考えて良い。従って、作業環境の遮蔽状況によっても変化するが、作業者が着用したTLDバッジから得られる T/R_f の値の変化の幅は0.3~2.0の間と予想される。

また、図3-3は、 T/R_f とTLDバッジの高速中性子線量当量換算係数 K_f の関係であるが、 K_f は T/R_f のべき乗で近似できることが図から分かる。唯一直線から外れている点は単色中性子15MeVの照射試験の結果であるが、プルトニウム燃料を取り扱う施設の場合にはこの付近のエネルギー領域は無視して良い。平均エネルギー0.55MeV(^{252}Cf の半径30cmの重水球減速場)から単色中性子5.0MeVまでの試験結果についてフィッティングを行った結果、次のような関係が得られた。

$$K_f = 13.66 \cdot (T/R_f)^{0.923} \quad [\mu\text{Sv/mR } ^{137}\text{Cs eq.}] \quad \dots(3-2)$$

Hankinsは、9/3インチ比（直径3インチと9インチの含水素減速材で覆われた熱中性子検出器の応答の比）とアルベド線量計の換算係数とが直線関係になることを利用し、簡便にアルベド線量計の換算係数を得る方法[25]について報告している。 T/R_f を用いた(3-2)式による手法もそれとほぼ同様の考え方と言えるが、個人線量計の応答のみから、他の検出器を介在させることなく、アルベド線量計の換算係数を得ることができるという点でHankinsの方法とは異なっており、より直接的な方法と言える。

なお、固体飛跡検出器の感度は100keV付近から急激に低下するため、 T/R_f を用いた中性子エネルギー分布の硬さと換算係数 K_f の値を推定する方法には、自ずと適用範囲に限界が生じる。核燃料施設のように数MeV領域の中性子線とその減速成分が混在するような条件では十分な適用性があると思われるが、数MeV領域の中性子線がほとんど存在せず、平均エネルギーが数10keV程度である「常陽」周辺場[26]などでは適用できない。

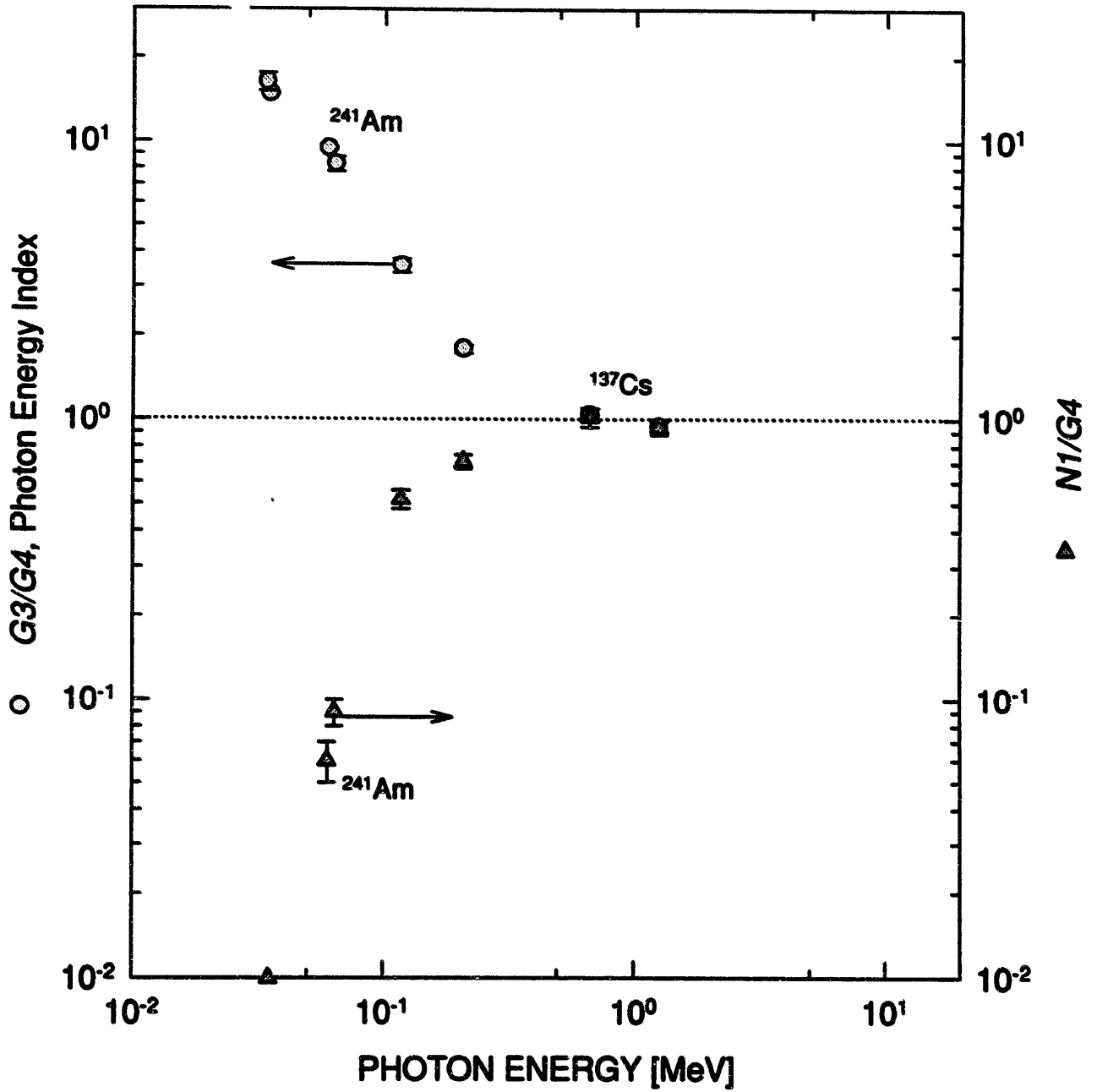


図3-1 TLDバッジの $G3/G4$ 比 (γ 線エネルギー指標) と $N1/G4$ 比の
 γ 線エネルギー依存性

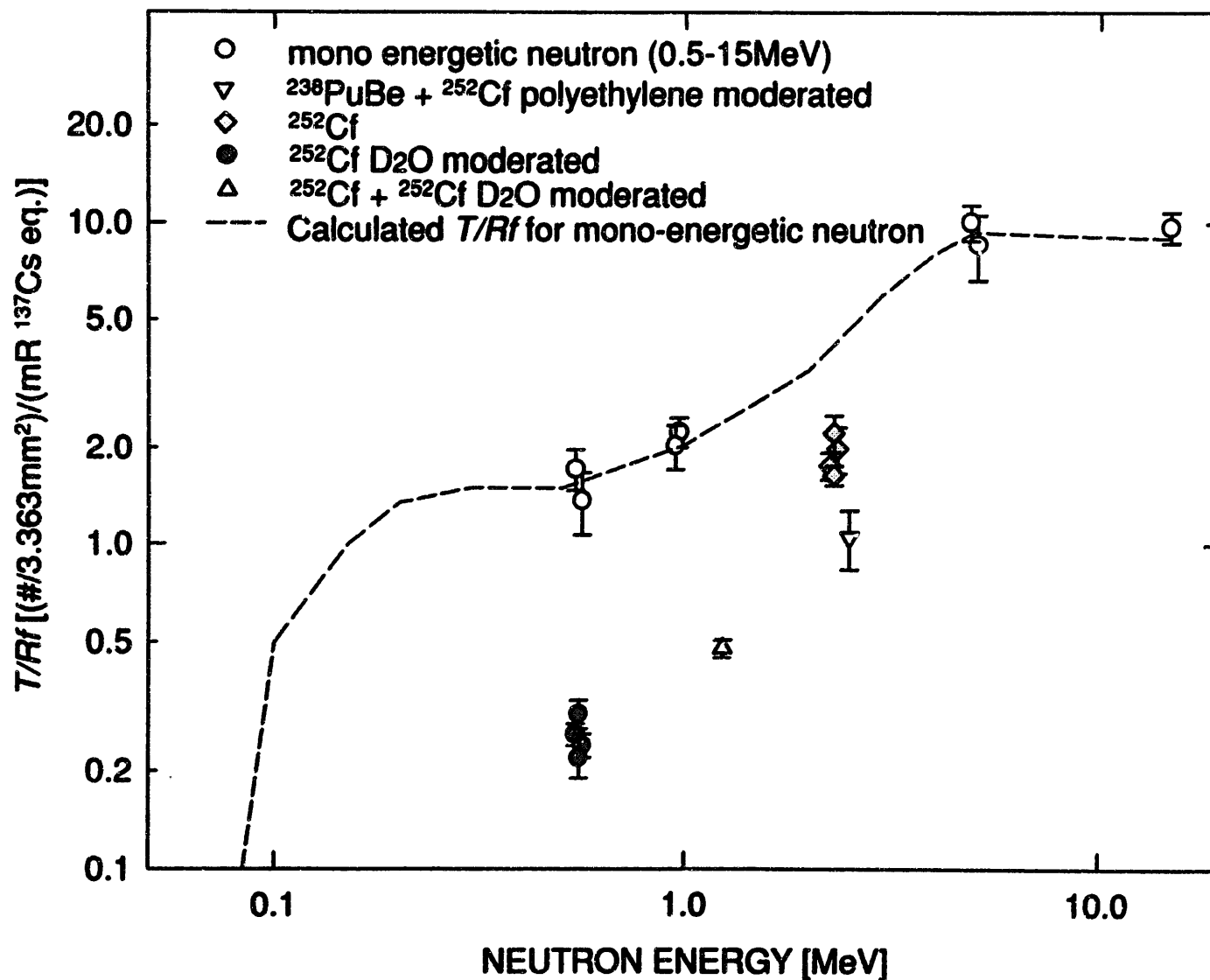


図3-2 種々の中性子場における *T/Rf* と平均中性子エネルギーの関係

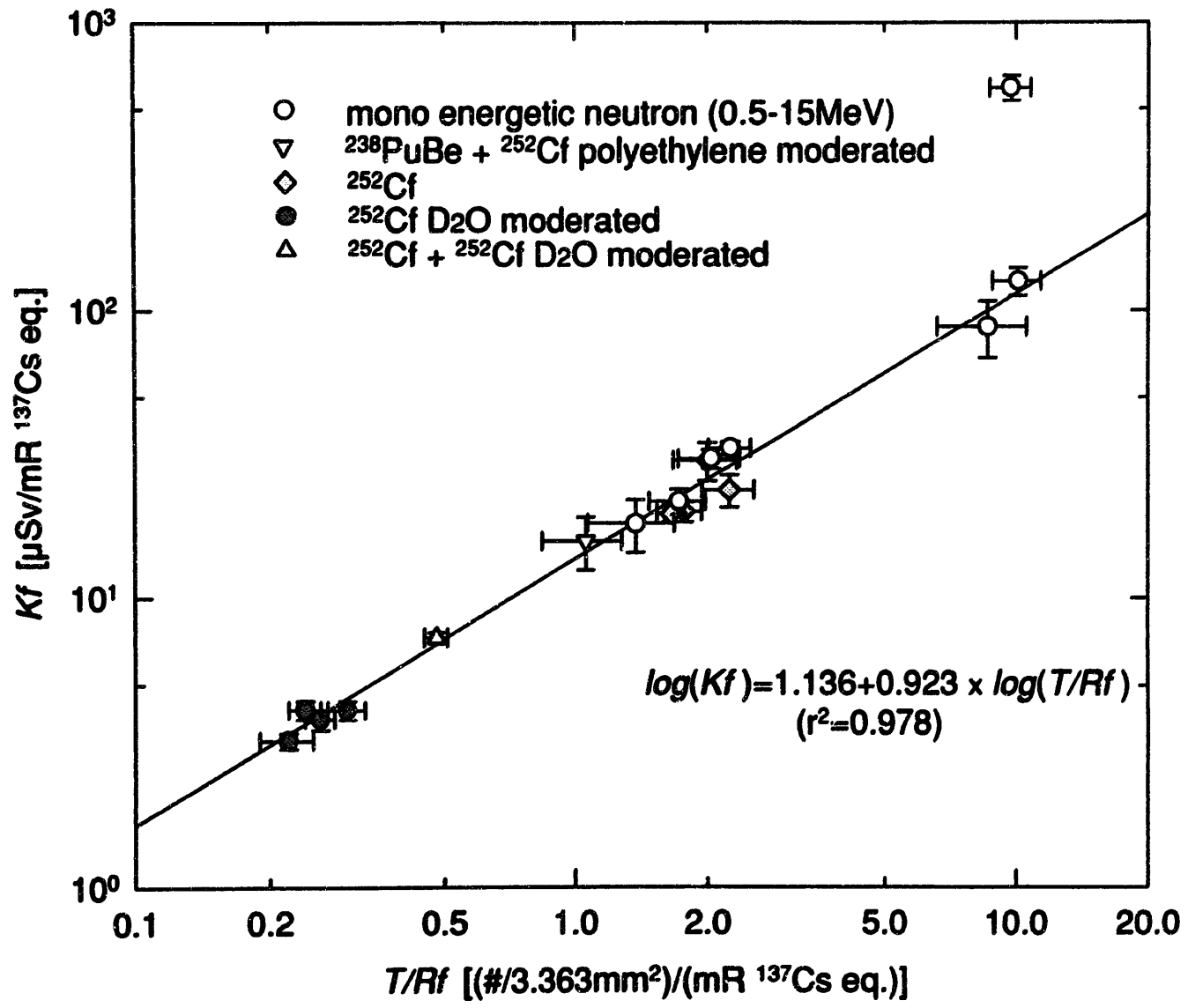


図3-3 種々の中性子場における T/Rf とTLDバッジの高速中性子線量当量換算係数 Kf の関係

第4章 解析結果

4-1 TLDバッジのTLD素子間の発光関係

(1) γ 線の関係

今回解析を行った全数のデータについてG3とG4の関係を図4-1示す。傾きは γ 線エネルギー指標に相当し、傾きが大きいほど γ 線の実効的なエネルギーが低いことを示している。分布は傾き約2~10の間に広がっており、点線で示した ^{241}Am による59.5keVの γ 線及び実効エネルギー208keVのフィルターX線の照射によって得られたG3とG4関係の範囲内に、ほとんど全てのデータが入っていることがわかる。

点線で示した208keVでのG3/G4は ^{241}Pu の α 崩壊で生じる ^{237}U の放出する γ 線208keV(放出比20.2%)による発光比にほぼ相当する。グローブボックス遮蔽や防護衣(鉛エプロン等)の低エネルギー γ 線の遮蔽効果等によってG3/G4は変化するが、作業環境の γ 線場は主に ^{241}Am と ^{237}U による γ 線の混在場であると推定される[7]。また作業区域によるG3/G4の相違については4-3節で述べる。

図4-2はG4とN1の関係であり、図4-1と同様に γ 線エネルギー59.5keV、208keVのデータを点線で示した。一般にN1はG4よりも小さく、 ^{241}Am による γ 線のみを被ばくしていると見られる作業者も僅かに存在する。平均的にはN1はG4の0.7倍であった。

(2) 中性子線

図4-3は、N2、N3とN4の比較である。直線性は良好であり、N2とN3をN4で規格化した場合、それぞれ0.94、0.38倍という結果が得られた。図2-4に示したようにエレメントN2~N4の中性子エネルギー応答特性は異なっており、特に熱中性子線、高速中性子線をそれぞれ主に検出するN2とN4の間に良好な直線関係が見られたことは興味深い。

表4-1に全数及び比較的データ数の多い製造課、転換課のN2、N3、N4間の相関式を示す。転換課はデータ数が少ないこともあり、製造課との有意な相違は認められない。

表4-1 N2, N3, N4の相関

所属部課室	データ数	相関式	相関係数(r^2)
全数	684	$N2 = 0.942 \times N4$	0.87
		$N3 = 0.382 \times N4$	0.69
製造課	555	$N2 = 0.955 \times N4$	0.87
		$N3 = 0.377 \times N4$	0.71
転換課	112	$N2 = 0.815 \times N4$	0.57
		$N3 = 0.423 \times N4$	0.42

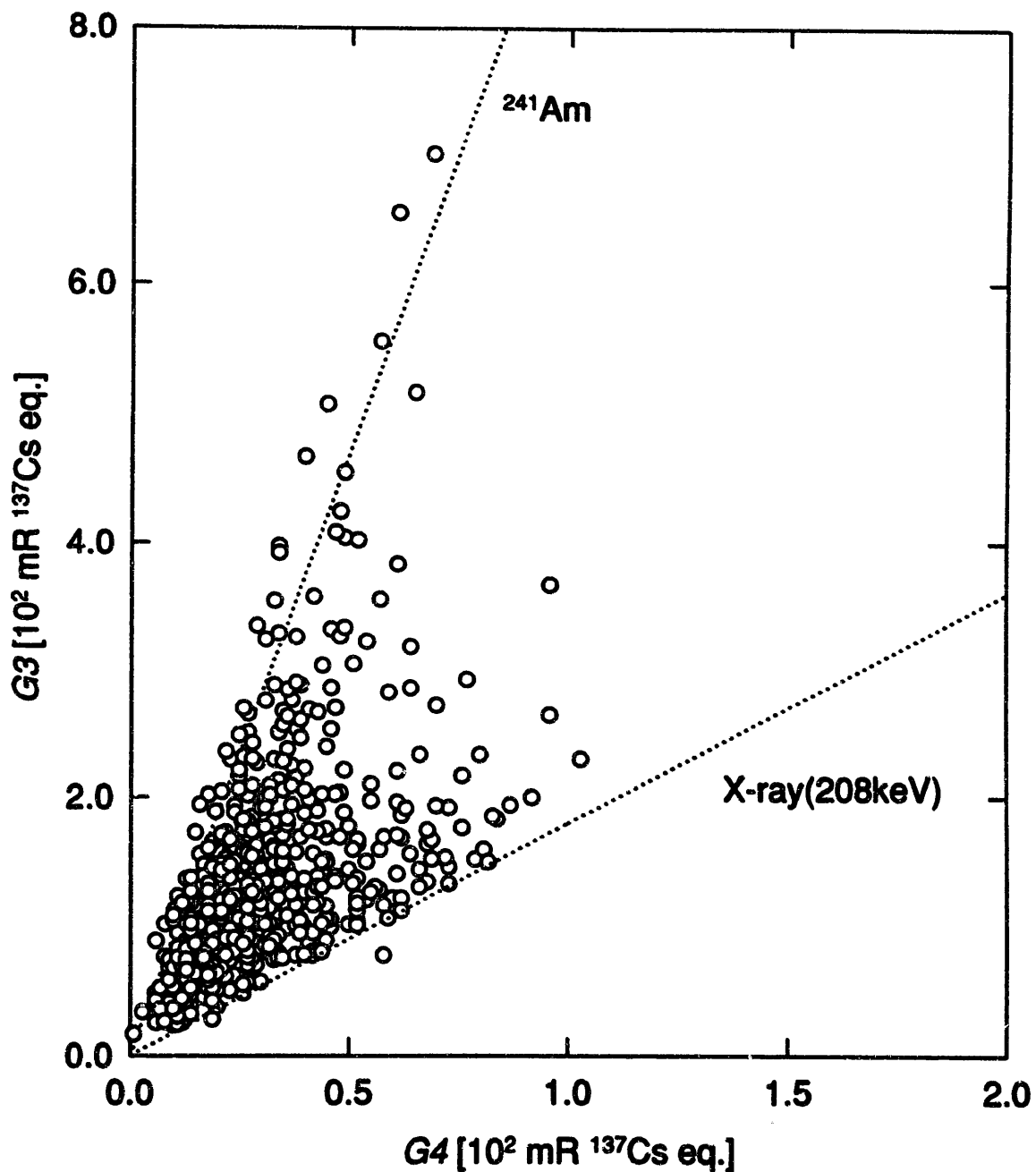


図4-1 作業者の着用したTLDバッジのTLD測定量 $G4$ と $G3$ の関係 (平成5年度)
 (破線は ^{241}Am 線源、実効エネルギー208keVのX線を照射した場合の実験値)

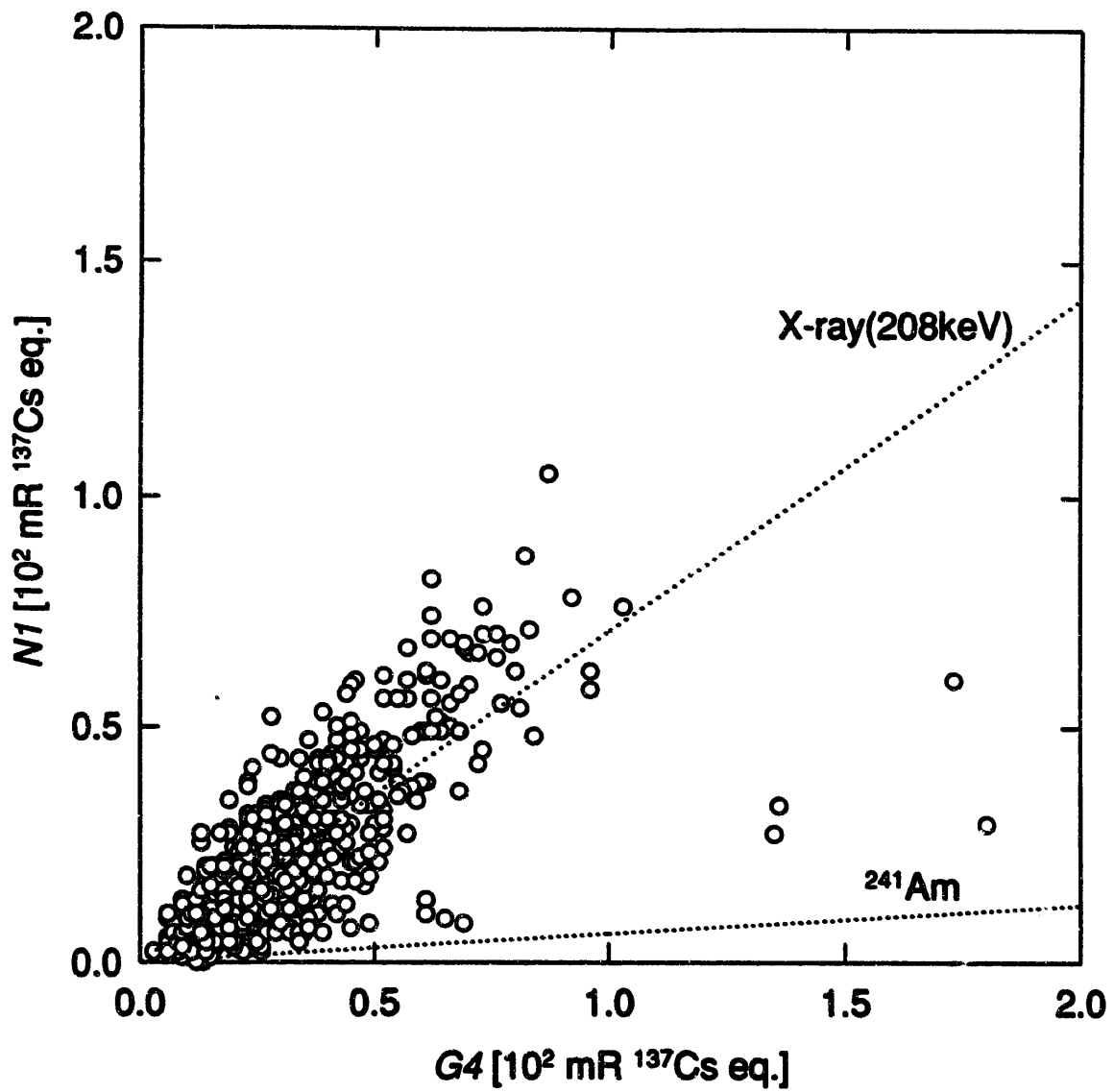


図4-2 作業者の着用したTLDバッジのTLD測定量 $G4$ と $N1$ の関係 (平成5年度)
 (破線は ^{241}Am 線源、実効エネルギー208keVのX線を照射した場合の実験値)

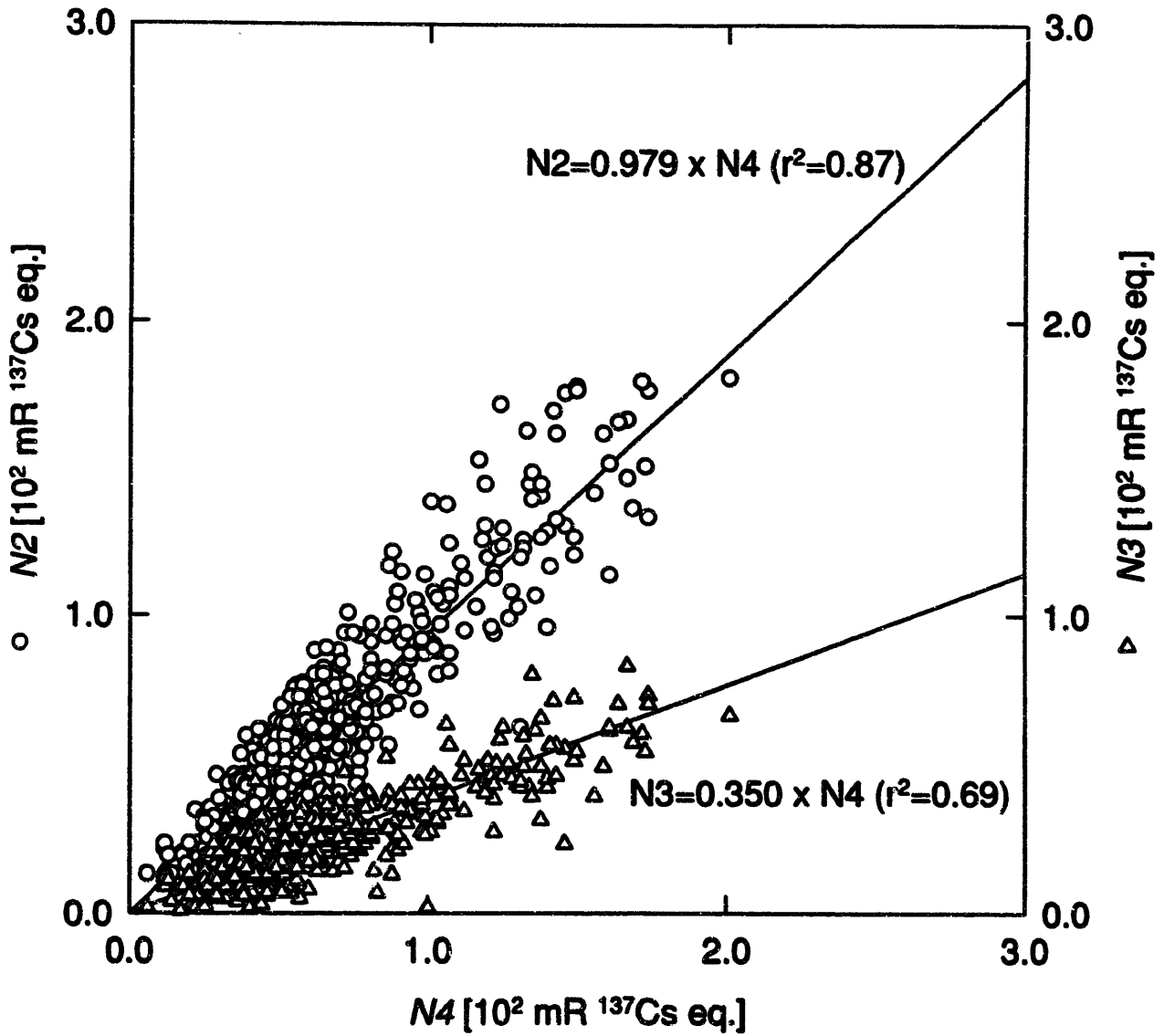


図4-3 作業者の着用したTLDバッジのTLD測定量 $N2$ 、 $N3$ 及び $N4$ の関係 (平成5年度)

4-2 TLDバッジと固体飛跡検出器の応答の関係

図4-4 (a)~(c)に $N2, N3, N4$ と T の関係をそれぞれ示す。エッチピット数の少ない側及びTLDの読取り値の小さい側では、統計変動によってデータが若干の広がりを見せているものの、全体的には T はいずれのエレメントの応答とも直線的な関係にあることがわかる。表4-2に解析を行ったデータのうち、全数、製造課及び転換課について $N2, N3, N4$ と T の相関式を示す。転換課については、製造課に比べると低線量で統計変動の影響が大きいため、相関の有無は分からない。

$N2, N3, N4$ は熱中性子から核分裂中性子(平均約2.3MeV)にわたる幅広いエネルギー範囲での積分的な量でしかなく、それらから得られる中性子エネルギー情報には限界がある。そこでそれぞれ中性子エネルギー0.4eV以下、0.4eV以上でのTLDの測定量に相当する Rth, Rf の関係、及び Rth, Rf と T との関係調べた。

図4-5に Rf と Rth の関係を示す。やや分布は広がっているが、 Rth の値は Rf の約0.6倍である。また図4-6に Rth と T 、図4-7に Rf と T の関係を示す。熱中性子線の測定量でしかない Rth と約100keV以上のエネルギーを持つ中性子線の測定量である T とが、ある程度の広がりを持ちつつも直線的な関係にあるという事実は驚くべきことである。また、測定対象とする中性子エネルギー範囲や中性子エネルギー応答特性が大きく異なる Rf と T についても同様に直線的な関係が得られており、作業場所の中性子線エネルギー分布によっては Rf と T の関係が大きく変化するだろうという予想は覆された。 T/Rf の平均値は0.28であった。

表4-2 $N2, N3, N4$ と T 、 Rth, Rf と T の相関

所属部課室	データ数	相関式	相関係数(r^2)
全数	413	$T = 0.250 \times N2$	0.68
		$T = 0.595 \times N3$	0.48
		$T = 0.241 \times N4$	0.69
		$T = 0.391 \times Rth$	0.62
		$T = 0.275 \times Rf$	0.66
製造課	366	$T = 0.248 \times N2$	0.69
		$T = 0.598 \times N3$	0.49
		$T = 0.241 \times N4$	0.70
		$T = 0.387 \times Rth$	0.64
		$T = 0.276 \times Rf$	0.67
転換課	38	$T = 0.302 \times N2$	0.10
		$T = 0.522 \times N3$	0.12
		$T = 0.238 \times N4$	0.24
		$T = 0.592 \times Rth$	0.02
		$T = 0.257 \times Rf$	0.25

Rf の値を指標とした場合の T/Rf の人数の分布を表 4-3 にまとめた。TLD バッジ、固体飛跡検出器ともに有意と算定された 257 人中 80% 以上のデータが 0.2~0.4 の範囲内に入っていることが分かる。また、それぞれの作業者の被ばくデータから得られた T/Rf の値の平均値 (=0.28) からの偏差を図 4-8 に示す。 Rf と T の値が小さい側では主に統計変動によって分布が広がっており、いわゆるトランペットカーブになっている。一方、統計的な変動が比較的小さいの範囲 (Rf の値が 50 [mR ^{137}Cs eq.] 以上) での標準偏差は約 30% であった。

表 4-3 T/Rf の人数の分布 (括弧内は一方の線量計による中性子線量当量が有意値に満たないもの)

Rf [mR ^{137}Cs eq.]	T/Rf [(#/3.363mm ²)/mR ^{137}Cs eq.]							小計
	0.2未満	0.2 ^a ~0.4	0.4 ~0.6	0.6 ~0.8	0.8 ~1.0	1.0 ~1.2	1.2以上	
170-180 ^b	0	1	0	0	0	0	0	1
160-170	0	1	0	0	0	0	0	1
150-160	0	1	0	0	0	0	0	1
140-150	0	6	0	0	0	0	0	6
130-140	0	3	0	0	0	0	0	3
120-130	3	6	0	0	0	0	0	9
110-120	3	7	2	0	0	0	0	12
100-110	0	7	0	0	0	0	0	7
90-100	1	5	4	0	0	0	0	10
80- 90	0	8	1	0	0	0	0	9
70- 80	0	18	0	0	0	0	0	18
60- 70	5 (3)	14	3	0	0	0	0	22 (3)
50- 60	6 (14)	37	1	0	0	0	0	44 (14)
40- 50	0 (18)	65 (9)	5	0	0	0	0	70 (27)
30- 40	0 (20)	31 (30)	11 (2)	2	0	0	0	44 (52)
20- 30	(1)	(10)	(31)	(3)	0	0	0	(45)
10- 20	0	0	(4)	(8)	(5)	(1)	0	(18)
10未満	0	0	0	0	0	0	(3)	(3)
小計	18 (50)	210 (49)	27 (37)	2 (11)	0 (5)	0 (1)	0 (3)	257 (156)

a. 0.2以上、0.4未満 b. 170以上、180未満

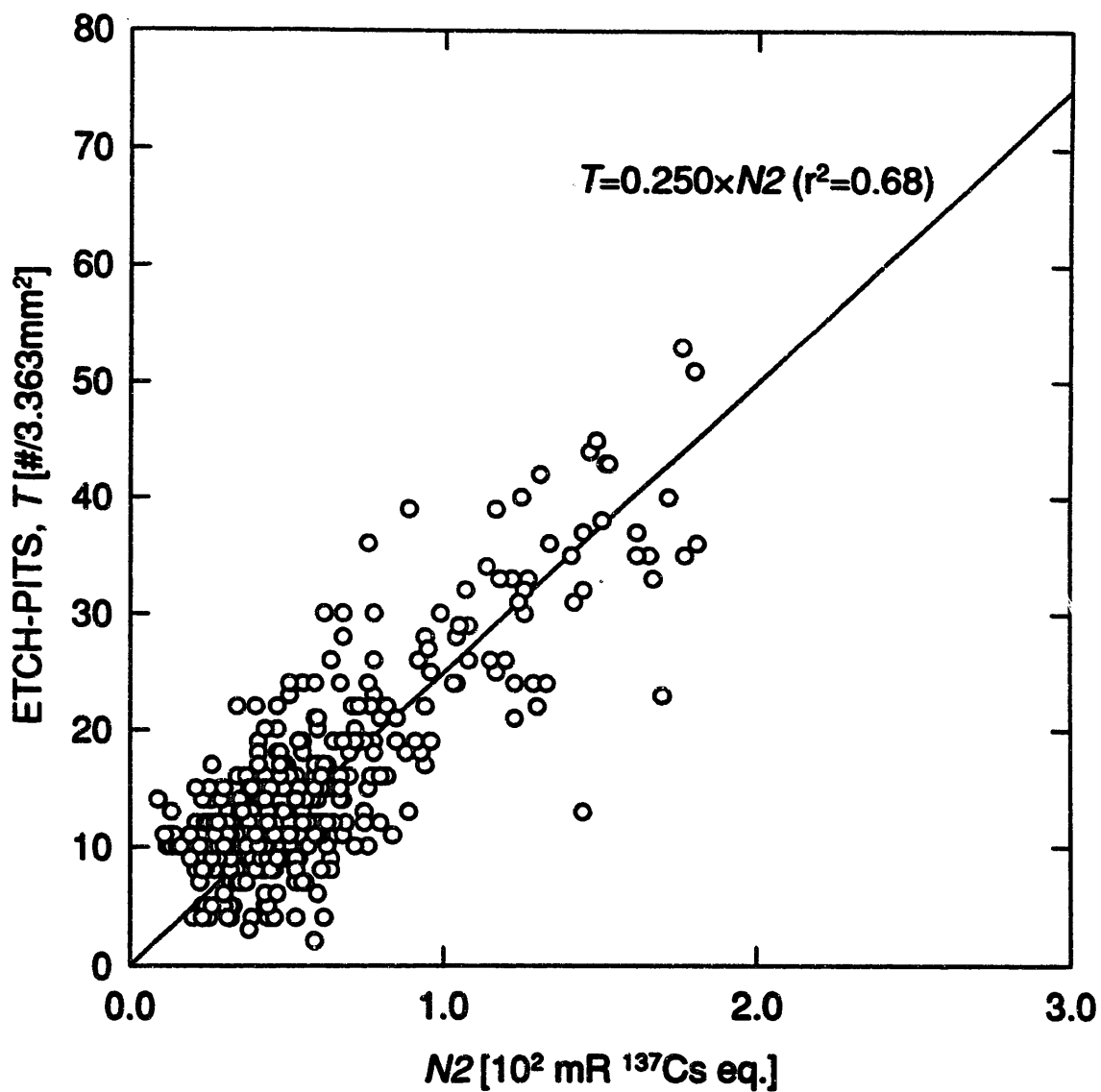


図 4-4 (a) 作業者の着用したTLDバッジのTLD測定量 $N2$ と
固体飛跡検出器のエッチピット数 T の関係 (平成5年度)

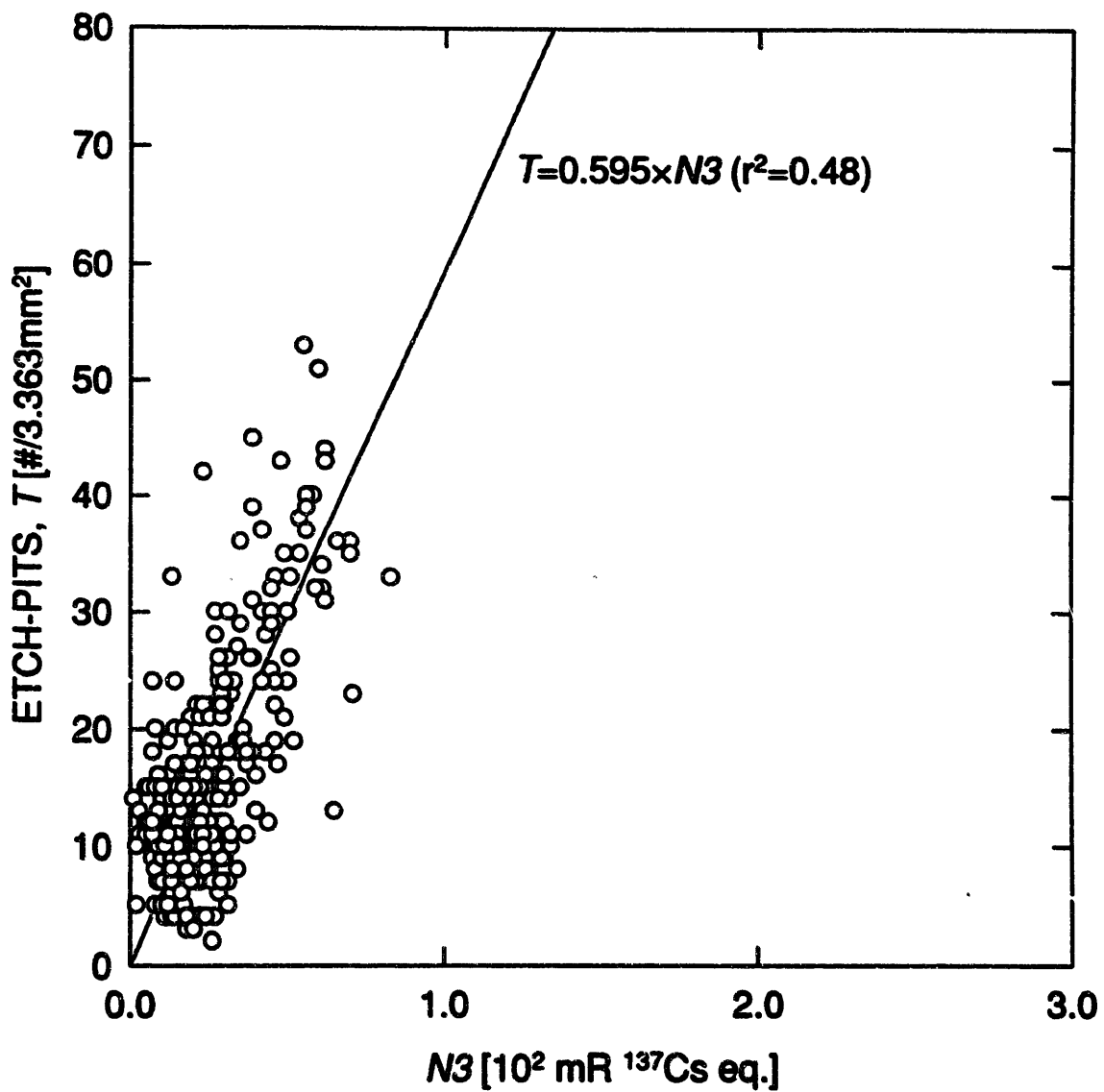


図4-4 (b) 作業者の着用したTLDバッジのTLD測定量 $N3$ と
固体飛跡検出器のエッチピット数 T の関係 (平成5年度)

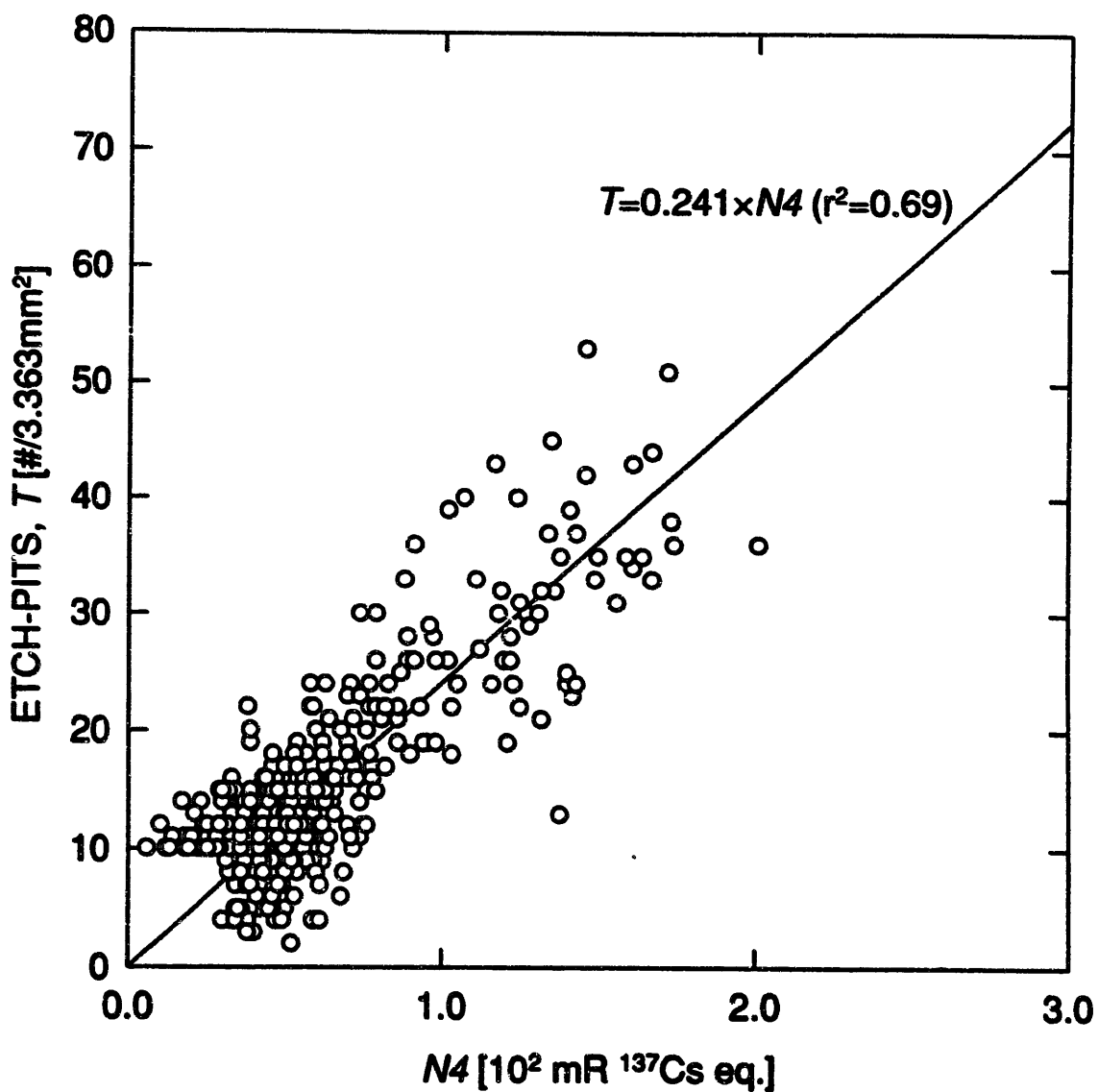


図4-4(c) 作業者の着用したTLDバッジのTLD測定量 $N4$ と
固体飛跡検出器のエッチピット数 T の関係 (平成5年度)

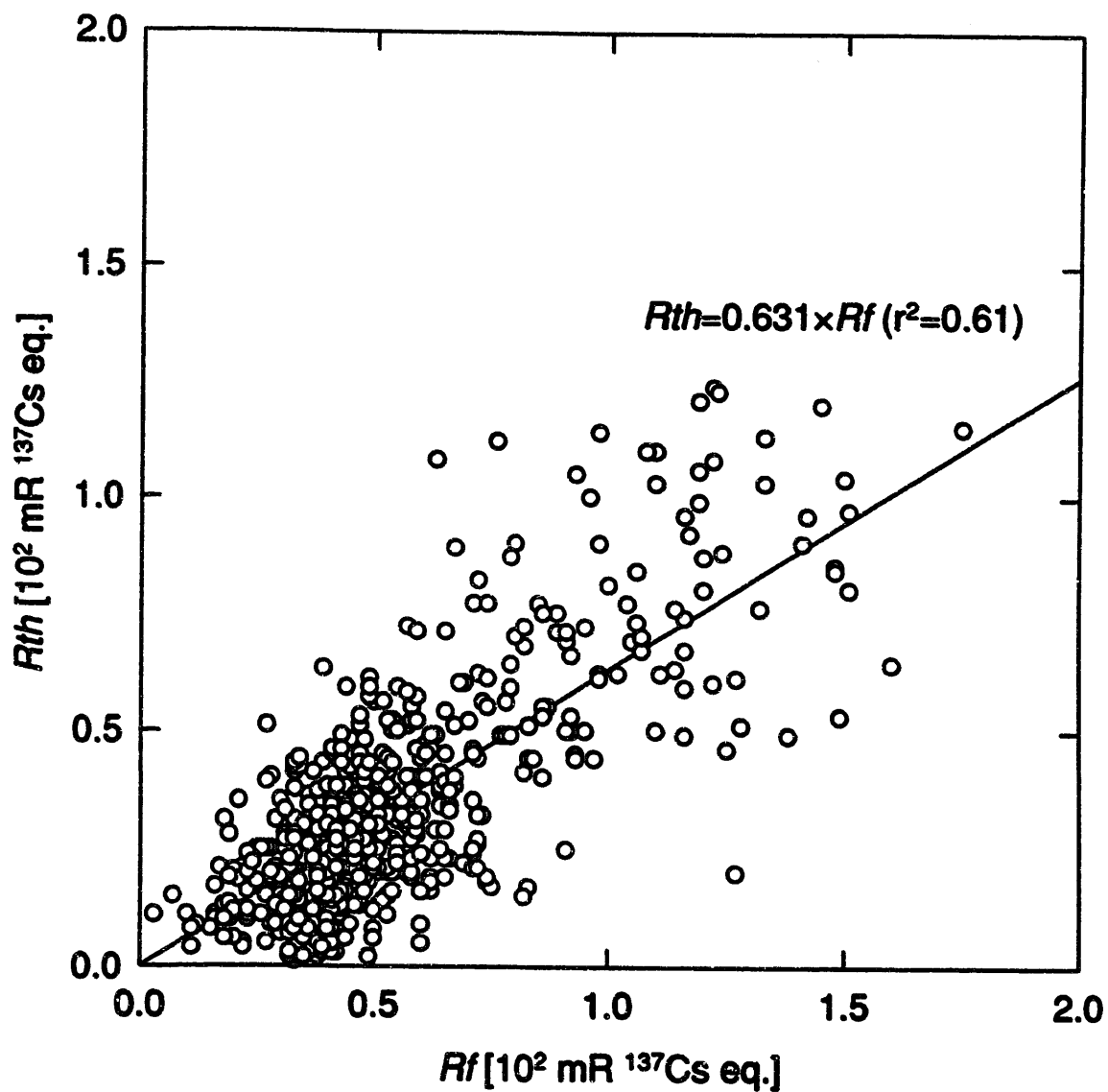


図4-5 作業者の着用したTLDバッジの高速中性子読取り線量 R_f と熱中性子読取り線量 R_{th} の関係(平成5年度)

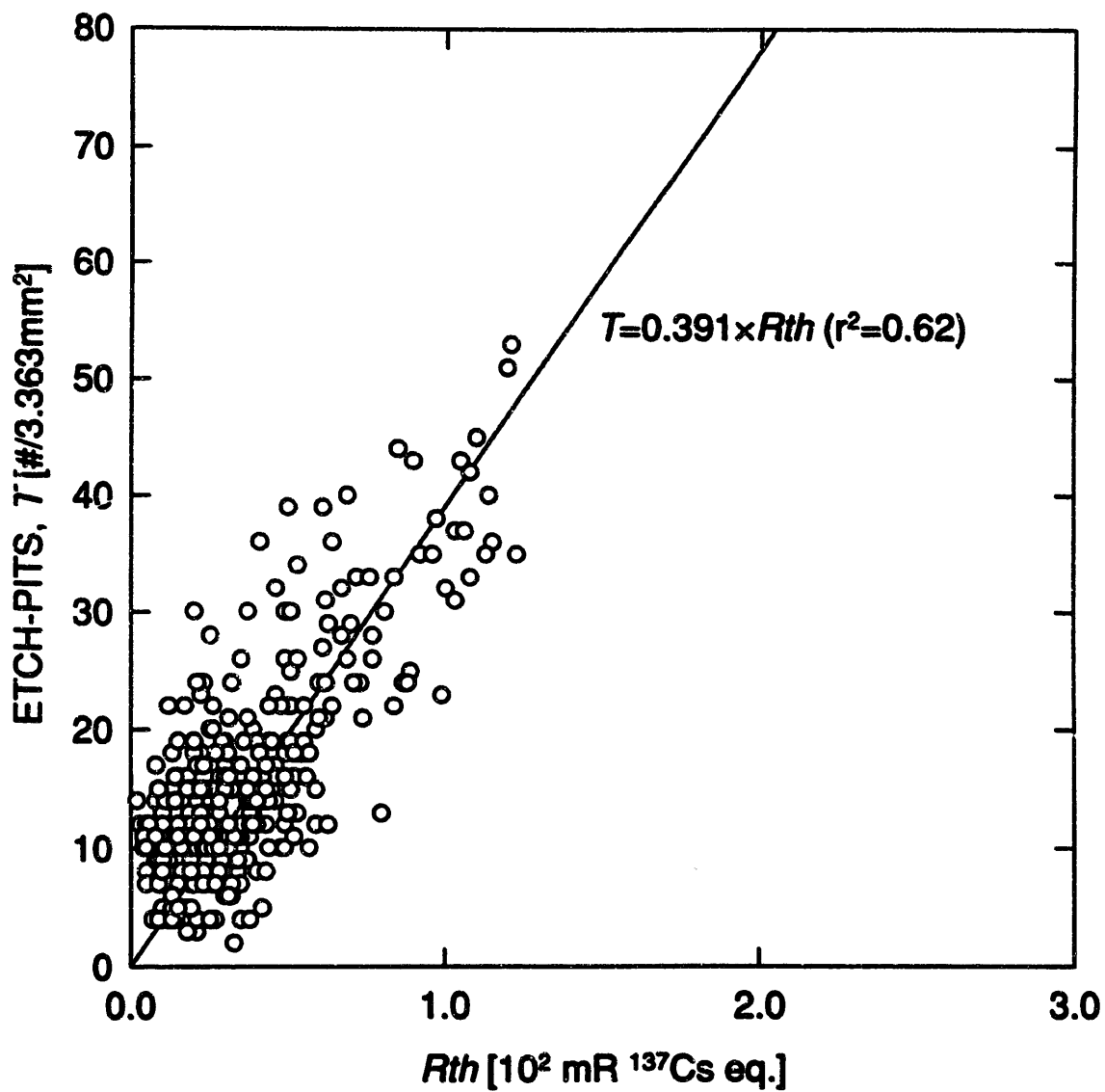


図4-6 作業者の着用したTLDバッジの熱中性子読みより線量Rthと固体飛跡検出器のエッチピット数Tの関係(平成5年度)

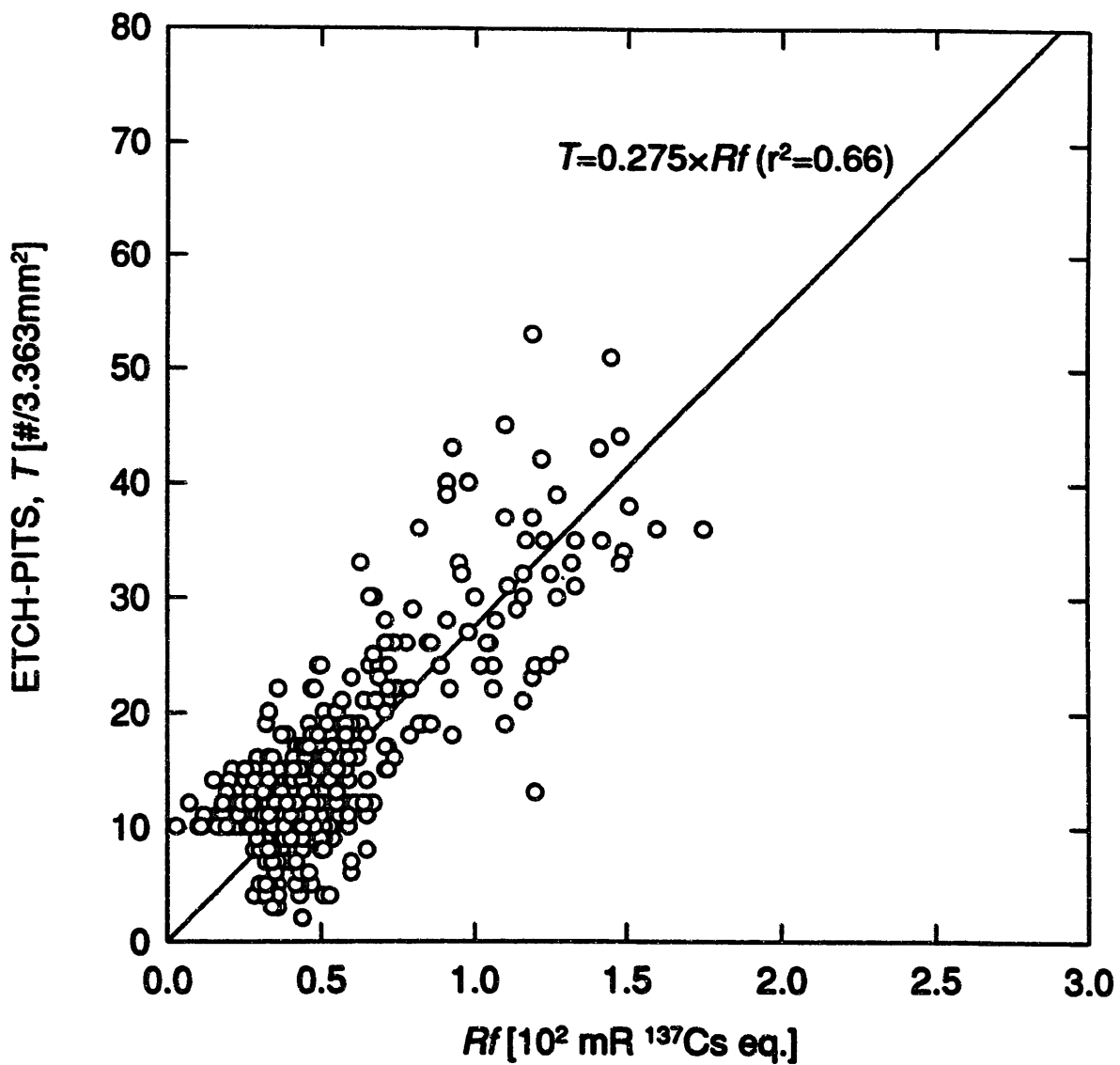


図4-7 作業者の着用したTLDバッジの高速中性子読取り線量Rfと
固体飛跡検出器のエッチピット数Tの関係（平成5年度）

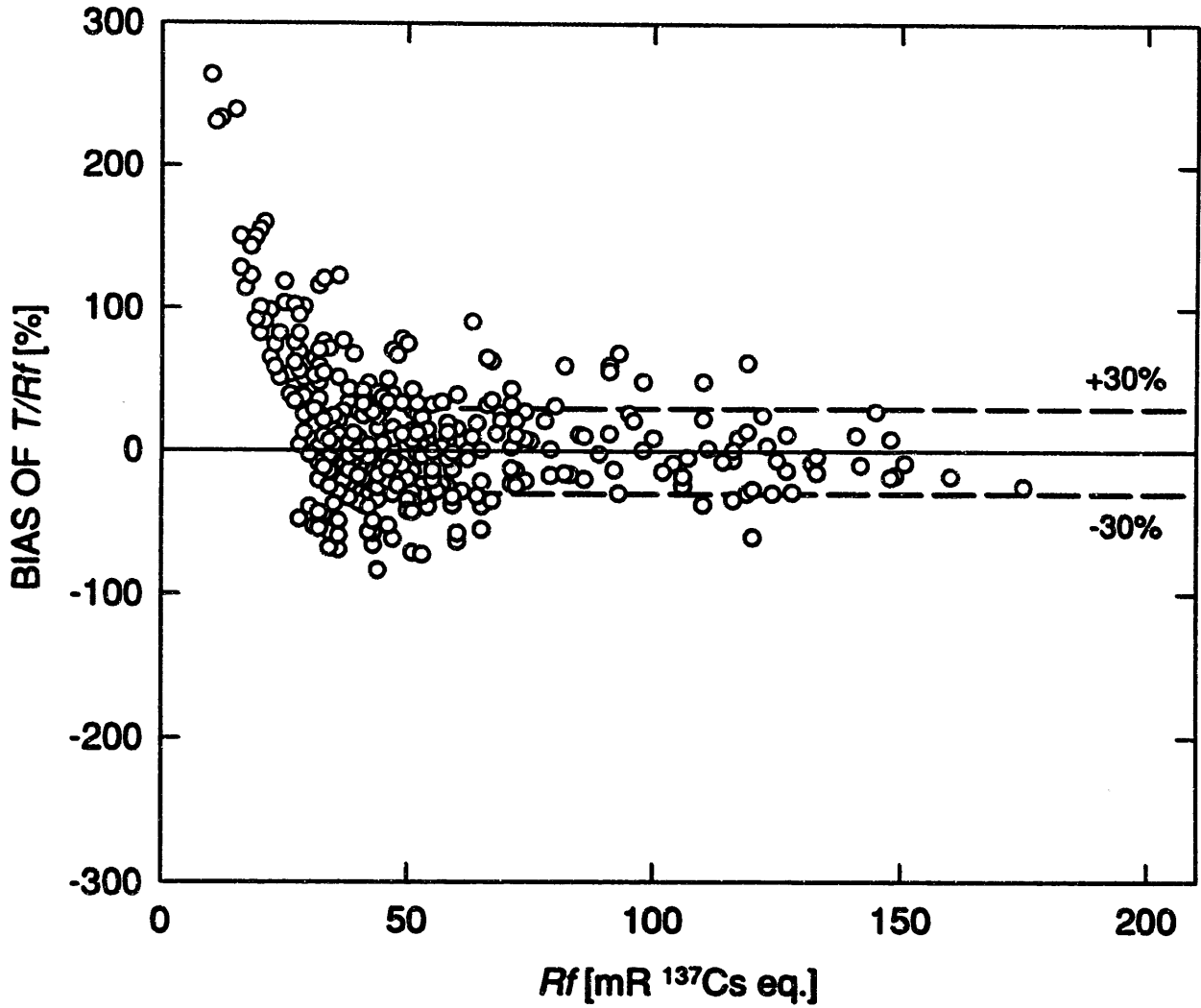


図4-8 T/Rf の値の平均値からの偏差と高速中性子読取り線量 Rf の関係 (平成5年度)

4-3 γ 線及び中性子線のエネルギー分布の推定

(1) γ 線

γ 線の1cm線量当量 Hg 及び高速中性子線の1cm線量当量 Hf を指標とした場合の $G3/G4$ の人数分布をそれぞれ表 4-4、4-5 に示す。約150keVのエネルギーを持つ γ 線を主に被ばくする作業者が全体の約40%程度を占め、さらに被ばく線量が増えるほどそのエネルギー領域の被ばくを受ける割合が増加する傾向にある。これは、防護衣の着用やグローブボックス遮蔽などによる被ばく低減（特に ^{241}Am の59.5keVの γ 線に対する）の効果を如実に反映しているものと考えて良い。

また、図 4-9 に Hg が有意値であった者の $G3/G4$ の人数割合を、全体、製造課、転換課別に示した。製造課に比べると転換課は $G3/G4$ が大きい者の割合が圧倒的に多く、製造課に比べるとエネルギーの低い γ 線を被ばくしている。これは、転換施設では鉛入りグローブは使用しておらず、鉛手袋を用いてグローブボックス作業を行っているためと考えられる。

(2) 中性子線

宮部らは、プルトニウム燃料第二開発室でのフィールド試験から $N2/N3$ を用いて中性子エネルギー分布を大まかに推定する方法について検討している[5]。しかし、TLDバッジは熱中性子線と0.4eV以上のエネルギーを持つ全ての中性子線との分離評価性能しか持たないため、 $N2/N3$ も低エネルギー散乱中性子線などの混在割合を表す指標にはなり得るけれども、作業者の被ばく線量当量、あるいはTLDバッジの高速中性子線量当量換算係数の値に最も影響を与える中～高エネルギー側での中性子エネルギー分布を示す指標にはならない。

そこで、本報告では第3章で述べたように約100keV以上の中性子線の測定量であるエッチピット数 T と0.4eV以上の中性子線の測定量である Rf の比を、中性子エネルギー分布の“硬さ”を表す指標として利用することについて検討した。

作業者が実際に着用した個人線量計から得られた T/Rf は約0.28であり、図 3-2 に示した多様な中性子場における T/Rf と中性子エネルギーの関係と比較すると、 ^{252}Cf の重水球減速場（平均エネルギー 0.55MeV）の条件が最も近い値を示している。参考のため図 4-10 に ^{252}Cf の重水球減速場の中性子エネルギースペクトル[27]を示す。100 keV以下の中性子線が全中性子束の70%を占め、かなり減速された場ではあるが、アクリルなどの含水素物質によって遮蔽された場合に見られる $1/E$ 型のエネルギー分布とはかなり異なっており、同図に示した作業環境中の中性子スペクトル測定値（平均エネルギー 0.96MeV）[5]とは明らかに相違が見られる。従って、 T/Rf の値が ^{252}Cf の重水球減速場と同じ程度になったからとは言え、作業環境の平均エネルギーも ^{252}Cf の重水球減速場のそれと同程度であるとは考えにくい。

参考までに ^{252}Cf 線源を厚さを変えたアクリル平板で遮蔽し、グローブボックス近傍での中性子場を模擬した条件下で、 T/Rf と $N2, N3, N4$ の関係を調べた結果をそれぞれ図4-11、4-12に示す。なお、この実験の詳細については補遺Cに示した。

アクリル遮蔽体を厚くしていくにつれて T/Rf の値は小さくなるが、アクリル板の厚さが80mmの場合でも T/Rf の値は0.8程度であり、作業者の被ばくデータの解析結果である0.28まで小さな値にならない。一方、 $N2, N3$ と $N4$ を比較した図4-12では、アクリル板の厚さが50mm程度のとき、作業者の被ばくデータから得られた発光の関係を良く再現している。実際のグローブボックスの遮蔽の状況は、通常グローブボックスのパネル（アクリル10mm）と含鉛アクリル35mm程度であり[27]、図4-11、4-12に示した Rf と T 、 $N2, N3$ と $N4$ の関係と今回の作業者の被ばくデータの解析から得られた結果とはやや矛盾する点が見受けられる。従って、 T/Rf を用いて中性子エネルギー分布の硬さの推定するという方法と T/Rf が0.28程度まで小さな値になることの定量的な意味合いについては、実際の作業環境でフィールド照射試験を実施し、確認を行う必要がある。

表4-4 胸部の γ 線1cm線量当量を指標とした場合の γ 線エネルギー指標の人数分布

γ 線 1cm線量当量 H_g [mSv]	G3/G4 の人数分布					小計
	2.0未満 (200keV以上)	2.0~4.0a (約150keV)	4.0~6.0 (約80keV)	6.0~8.0 (約70keV)	8.0以上 (約60keV)	
1.5以上	0	0	0	0	4	4
1.4~1.5b	0	0	0	0	0	0
1.3~1.4	0	0	0	0	0	0
1.2~1.3	0	0	0	0	0	0
1.1~1.2	0	3	0	0	0	3
1.0~1.1	0	2	0	0	0	2
0.9~1.0	0	3	0	0	0	3
0.8~0.9	2	9	0	0	0	11
0.7~0.8	3	14	2	2	2	23
0.6~0.7	5	14	2	2	0	24
0.5~0.6	3	26	9	5	5	48
0.4~0.5	6	38	25	16	4	89
0.3~0.4	1	72	56	22	13	164
0.2~0.3	2	64	70	34	15	185
0.1~0.2	1	20	38	32	24	115
0.1未満	(0)	(2)	(1)	(5)	(5)	(13)
小計	23 (3.4%)	265 (39.5%)	202 (30.1%)	113 (16.8%)	68 (10.1%)	671

a. 2.0以上、4.0未満 b. 1.4以上、1.5未満

表4-5 胸部の中性子線1cm線量当量を指標とした場合の γ 線エネルギー指標の人数分布

中性子線 1cm線量当量 H_f [mSv]	G3/G4 の人数分布					小計
	2.0未満 (200keV以上)	2.0~4.0a (約150keV)	4.0~6.0 (約150keV)	6.0~8.0 (約150keV)	8.0以上 (約150keV)	
1.3以上	0	0	0	0	0	0
1.1~1.2b	0	1	0	0	0	1
1.0~1.1	0	1	0	0	0	1
0.9~1.0	2	6	1	0	0	9
0.8~0.9	0	7	0	1	0	8
0.7~0.8	6	15	1	0	0	22
0.6~0.7	4	11	3	0	0	18
0.5~0.6	2	27	4	0	0	33
0.4~0.5	1	35	20	5	0	61
0.3~0.4	4	70	49	19	9	151
0.2~0.3	4	88	96	70	44	302
0.2未満	(0)	(6)	(29)	(23)	(20)	(78)
小計 (%)	23 (3.8%)	261 (43.1%)	174 (28.7%)	95 (15.7%)	53 (8.7%)	606

a. 2.0以上、4.0未満 b. 1.1以上、1.2未満

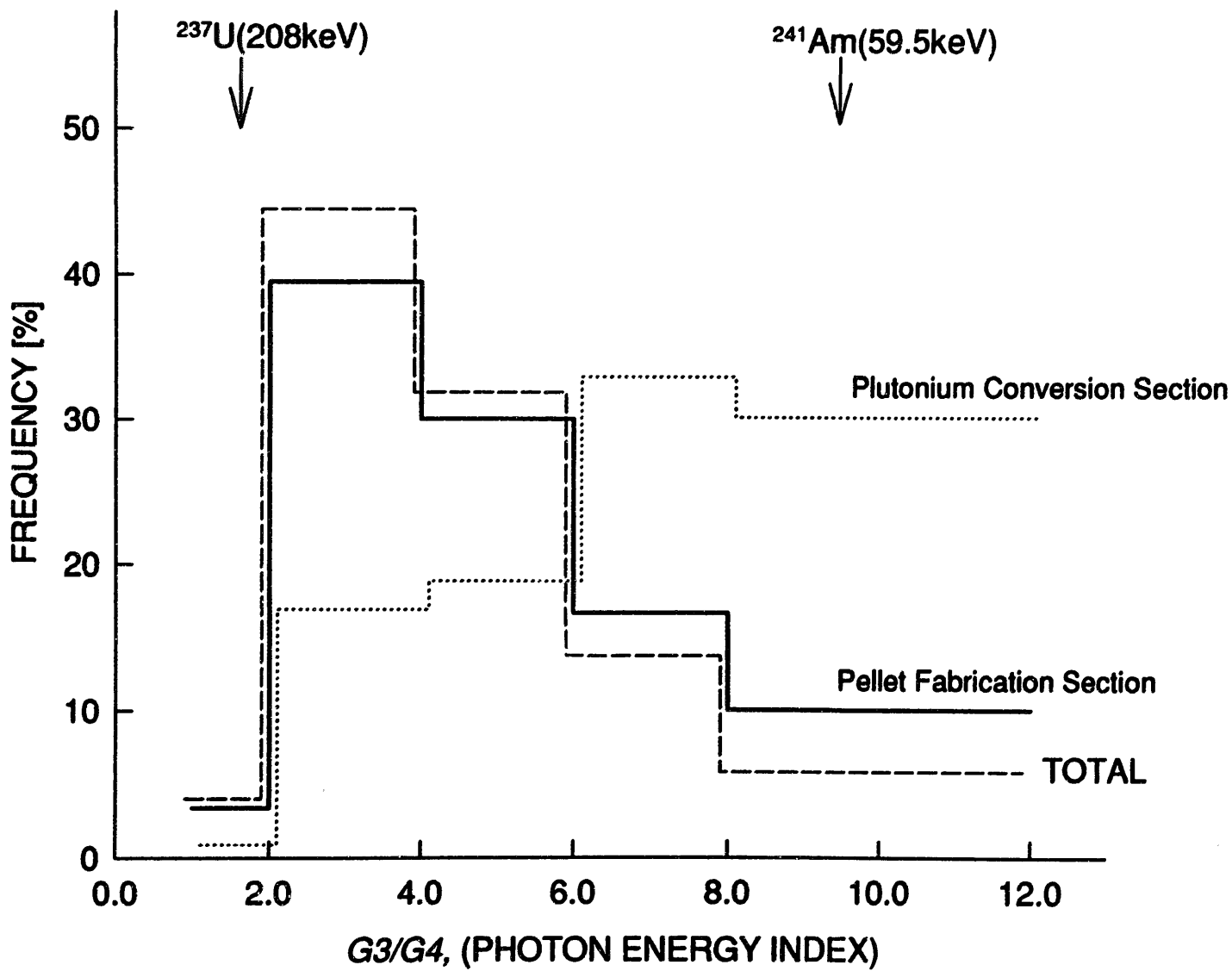


図4-9 G3/G4 比 (γ線エネルギー指標) の人数分布
(破線: 全数、実線: 製造課、点線: 転換課)

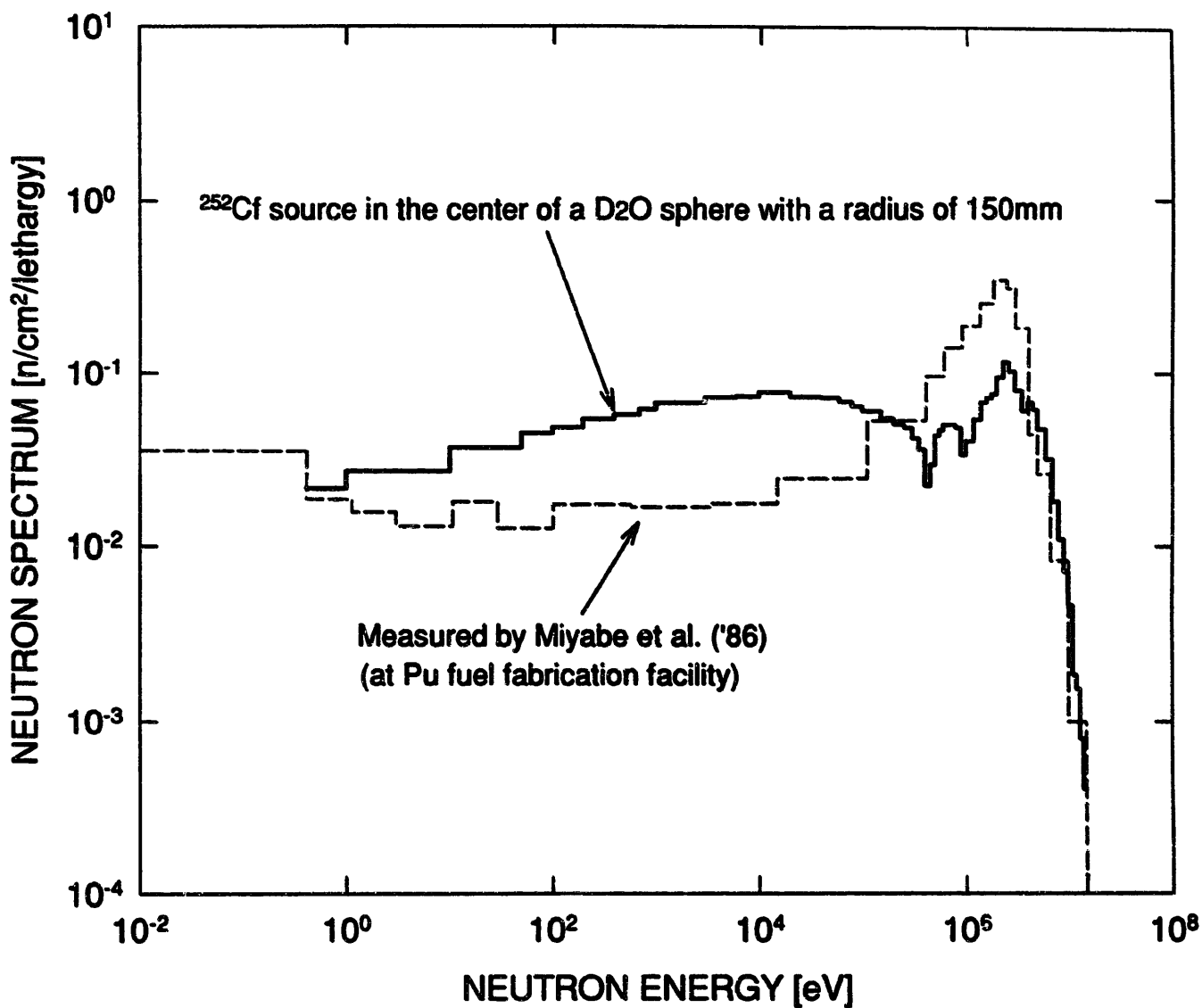


図4-10 ²⁵²Cfの半径15cmの重水球減速場[27]とプルトニウム燃料製造施設の中性子スペクトル(実測値[5])の比較

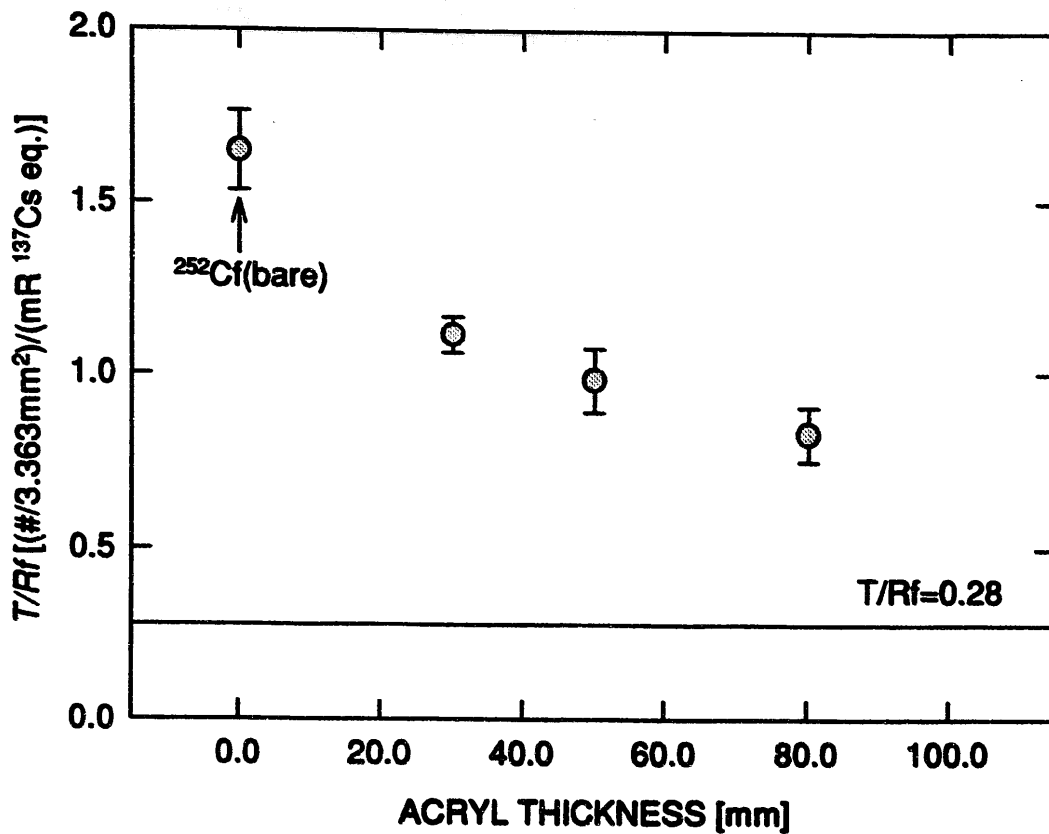


図 4-1 1 ^{252}Cf をアクリル平板で遮蔽した場における T/R_f 比と遮蔽体の厚さの関係

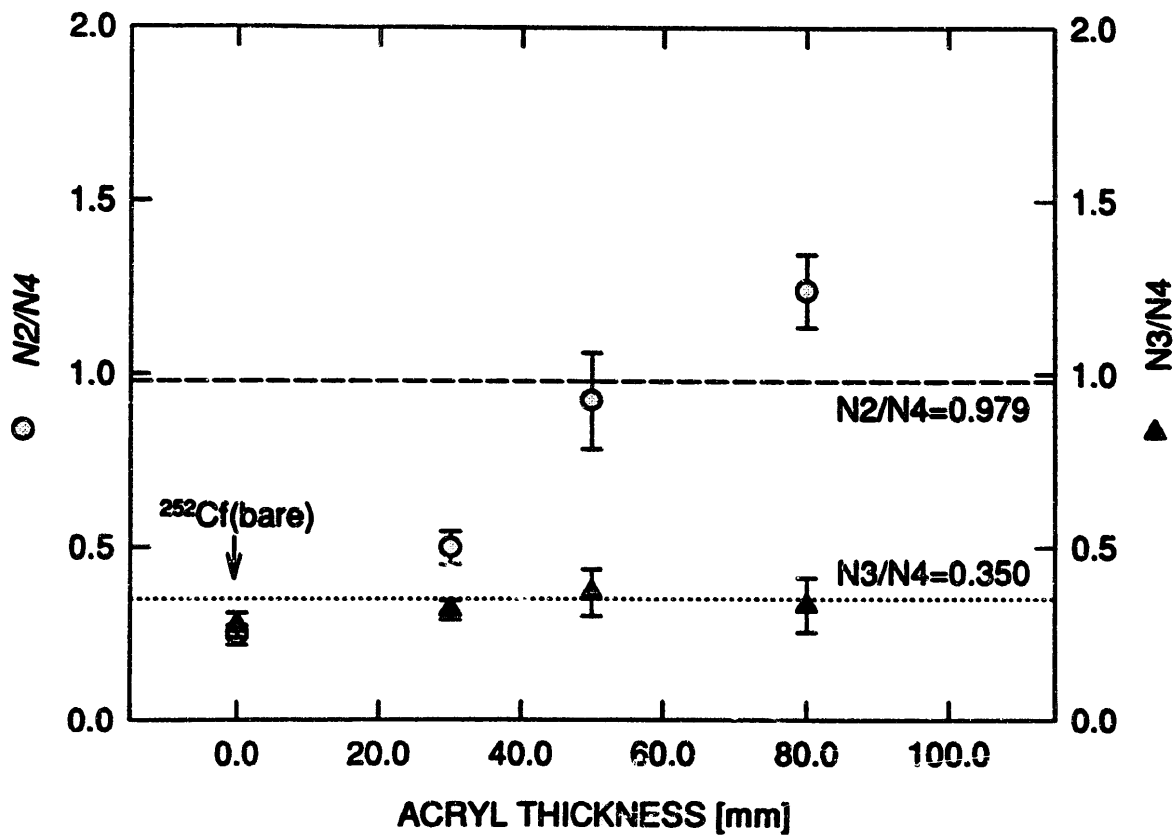


図 4-1 2 ^{252}Cf をアクリル平板で遮蔽した場における N_2/N_4 , N_3/N_4 比と遮蔽体の厚さの関係

4-4 γ 線、中性子線の1cm線量当量の関係

(1) γ 線と中性子線の1cm線量当量の関係

図4-13、表4-6にTLDバッジから求めた γ 線による1cm線量当量 H_g 、と高速中性子線量当量 H_f との関係を示す。 H_g と H_f はほぼ1:1である。一部 H_g の方が極めて値が大きいデータがあるが、それらのデータの $G3/G4$ から判断すると ^{241}Am による59.5 keVの γ 線を直接に被ばくしている場合のものと考えられる。

H_g と H_f の相関式を表4-7に示す。上述した H_g の方が極めて値が大きなデータは、転換課に所属する作業者のものであり、転換課の場合 H_g と H_f の関係には、ほぼ1:1であるものと、 H_g の方が極めて大きいものの2つのパターンが見られた。

(2) 熱中性子線と高速中性子線の1cm線量当量の関係

熱中性子線と高速中性子線の1cm線量当量、それぞれ H_{th} 、 H_f の比較を図4-14に示す。今回の解析例では H_{th} は全て0.2mSv未満であり、記録上は検出限界未満と取り扱われるが、実際には数 μSv までは十分に評価可能であり、作業環境中における熱中性子線の混在の割合を示すデータとしては十分に価値がある。

図の結果からも明らかなように H_f と H_{th} は直線的な関係を持ち、 H_{th} は H_f の約1%程度である。

(3) 固体飛跡検出器とTLDバッジから求めた高速中性子線の1cm線量当量の関係

固体飛跡検出器とTLDバッジからそれぞれ求めた高速中性子線の1cm線量当量 H_{td} 、 H_f の比較を図4-15、 H_{td} と H_f の相関式を表4-8に示す。両線量計から求めた高速中性子線量当量の値の間には良好な直線関係が見られ、さらに値もほぼ一致していることが分かる。

表4-9(a)(b)に、 H_f を指標とした場合の H_{td}/H_f の人数分布を示す。表(a)は、固体飛跡検出器とTLDバッジから求めた高速中性子線量当量のどちらか一方でも有意値であった場合、表(b)はともに有意値であった場合である。表4-9の結果を頻度分布にしたものを図4-16に示す。±50%の範囲内に表(a)で約80%、表(b)で約90%が該当し、さらに±30%の範囲内では、表(a)(b)それぞれの条件で約50%、約80%が該当する。なお、参考までに、表4-9の累積分布を正規確率紙にプロットしたものを図4-17に示す。

表4-6 γ 線に対する中性子線の1cm線量当量の比の分布

γ 線 1cm線量当量 H_g [mSv]	H_f/H_g						
	0.5未満	0.5 ~1.0a	1.0 ~1.5	1.5 ~2.0	2.0 ~2.5	2.5 ~3.0	3.0以上
1.5以上	4	0	0	0	0	0	0
1.4~1.5b	0	0	0	0	0	0	0
1.3~1.4	0	0	0	0	0	0	0
1.2~1.3	0	0	0	0	0	0	0
1.1~1.2	0	3	0	0	0	0	0
1.0~1.1	0	2	0	0	0	0	0
0.9~1.0	0	2	1	0	0	0	0
0.8~0.9	0	6	5	0	0	0	0
0.7~0.8	4	11	8	0	0	0	0
0.6~0.7	1(1)	12	10	0	0	0	0
0.5~0.6	7(5)	26	10	0	0	0	0
0.4~0.5	7(8)	51	18	4	1	0	0
0.3~0.4	0(15)	88	59	2	0	0	0
0.2~0.3	(28)	48	92	17	0	0	0
0.1~0.2	(21)	-	35	33	19	6	1
小計	23(78)	249	238	56	20	6	1

a. 0.5以上、1.0未満 b. 1.4以上、1.5未満

表4-7 H_g と H_f の関係

所属部課室	データ数	相関式	相関係数(r^2)
全体	684	$H_g = 1.013 \times H_f$	0.37
製造課	555	$H_g = 0.993 \times H_f$	0.60
転換課	112	$H_g = 1.217 \times H_f$	-

表4-8 H_{td} と H_f の関係

所属部課室	データ数	相関式	相関係数(r^2)
全体	413	$H_{td} = 0.953 \times H_f$	0.66
製造課	366	$H_{td} = 0.955 \times H_f$	0.67
転換課	38	$H_{td} = 0.891 \times H_f$	0.26

表4-9 (a) TLDバッジと固体飛跡検出器から算定した中性子線 1cm線量当量の比較
(固体飛跡検出器を着用している者)

中性子線 1cm線量当量 Hf [mSv]	Htd/Hf							小計
	0.50 未満	0.50 ~0.75a	0.75 ~1.00	1.00 ~1.25	1.25 ~1.50	1.50 ~2.00	2.00 以上	
1.2以上	0	0	0	0	0	0	0	0
1.1~1.2b	0	1	0	0	0	0	0	1
1.0~1.1	0	0	1	0	0	0	0	1
0.9~1.0	0	0	4	3	0	0	0	7
0.8~0.9	0	1	5	1	0	0	0	7
0.7~0.8	1	5	5	4	1	1	0	17
0.6~0.7	0	1	6	3	1	1	0	12
0.5~0.6	0	1	8	4	2	2	0	17
0.4~0.5	1	8	7	12	4	3	0	35
0.3~0.4	5	21	27	19	5	4	0	81
0.2~0.3	17	26	59	32	15	6	3	158
0.2未満	2	1	2	8	19	24	21	77
小計 (%)	26 (6.3)	65 (15.7)	124 (30.0)	86 (20.8)	47 (11.4)	41 (9.9)	24 (5.9)	413

a. 0.50以上、0.75未満 b. 1.1以上、1.2未満

表4-9 (b) TLDバッジと固体飛跡検出器から算定した中性子線 1cm線量当量の比較
(TLDバッジ、固体飛跡検出器から算定した中性子線 1cm線量当量が共に有意な者)

中性子線 1cm線量当量 Hf [mSv]	Htd/Hf							小計
	0.50 未満	0.50 ~0.75a	0.75 ~1.00	1.00 ~1.25	1.25 ~1.50	1.50 ~2.00	2.00 以上	
1.2以上	0	0	0	0	0	0	0	0
1.1~1.2b	0	1	0	0	0	0	0	1
1.0~1.1	0	0	1	0	0	0	0	1
0.9~1.0	0	0	4	3	0	0	0	7
0.8~0.9	0	1	5	1	0	0	0	7
0.7~0.8	1	5	5	4	1	1	0	17
0.6~0.7	0	1	6	3	1	1	0	12
0.5~0.6	0	1	8	4	2	2	0	17
0.4~0.5	0	8	7	12	4	3	0	35
0.3~0.4	0	13	27	19	5	4	0	68
0.2~0.3	0	0	37	32	15	6	3	93
小計 (%)	1 (0.4)	30 (11.7)	100 (38.9)	78 (30.4)	28 (10.9)	17 (6.6)	3 (1.2)	257

a. 0.50以上、0.75未満 b. 1.1以上、1.2未満

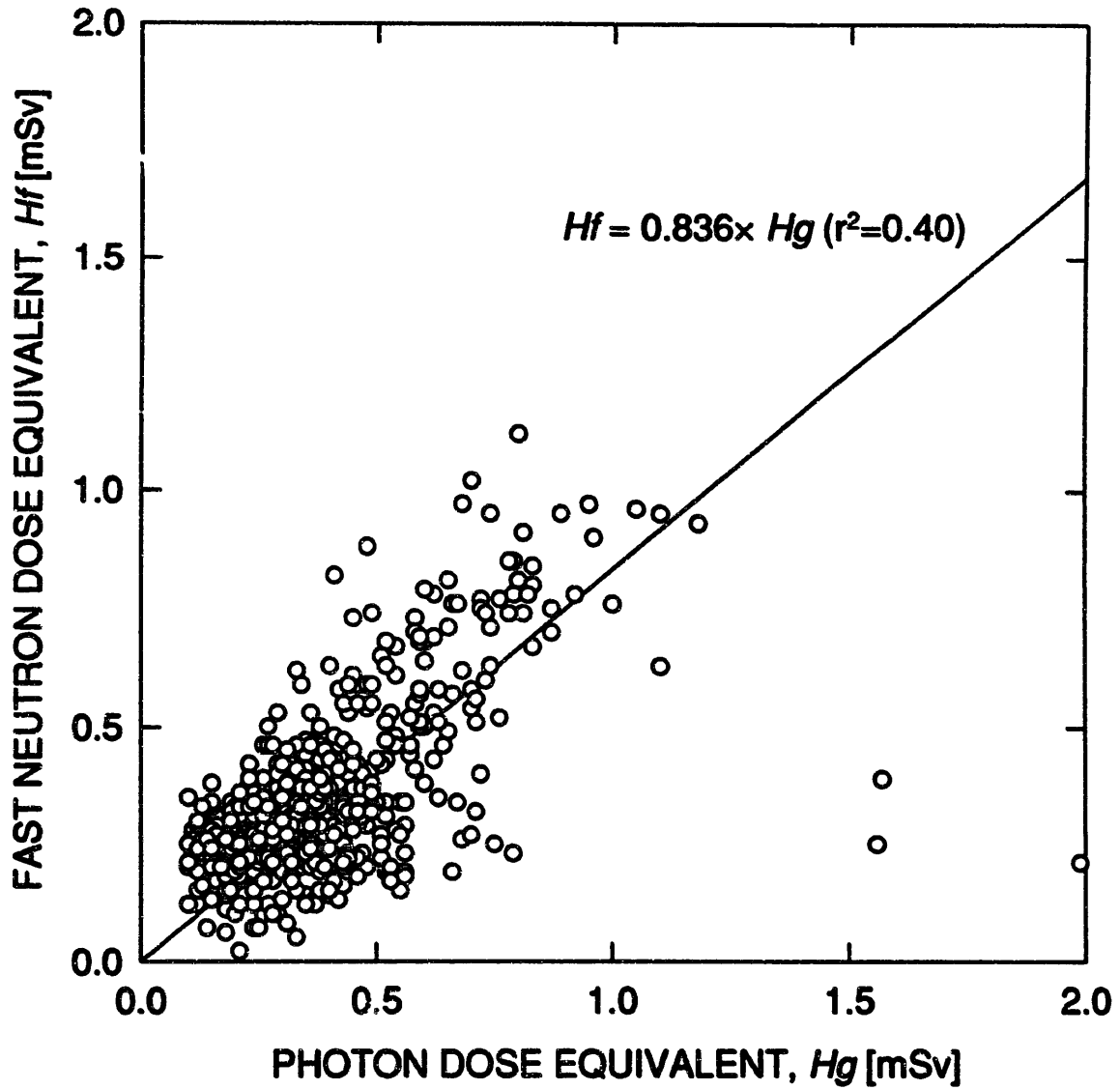


図4-13 作業者の被ばくした胸部のγ線1cm線量当量 H_g と高速中性子線1cm線量当量 H_f の比較(平成5年度)

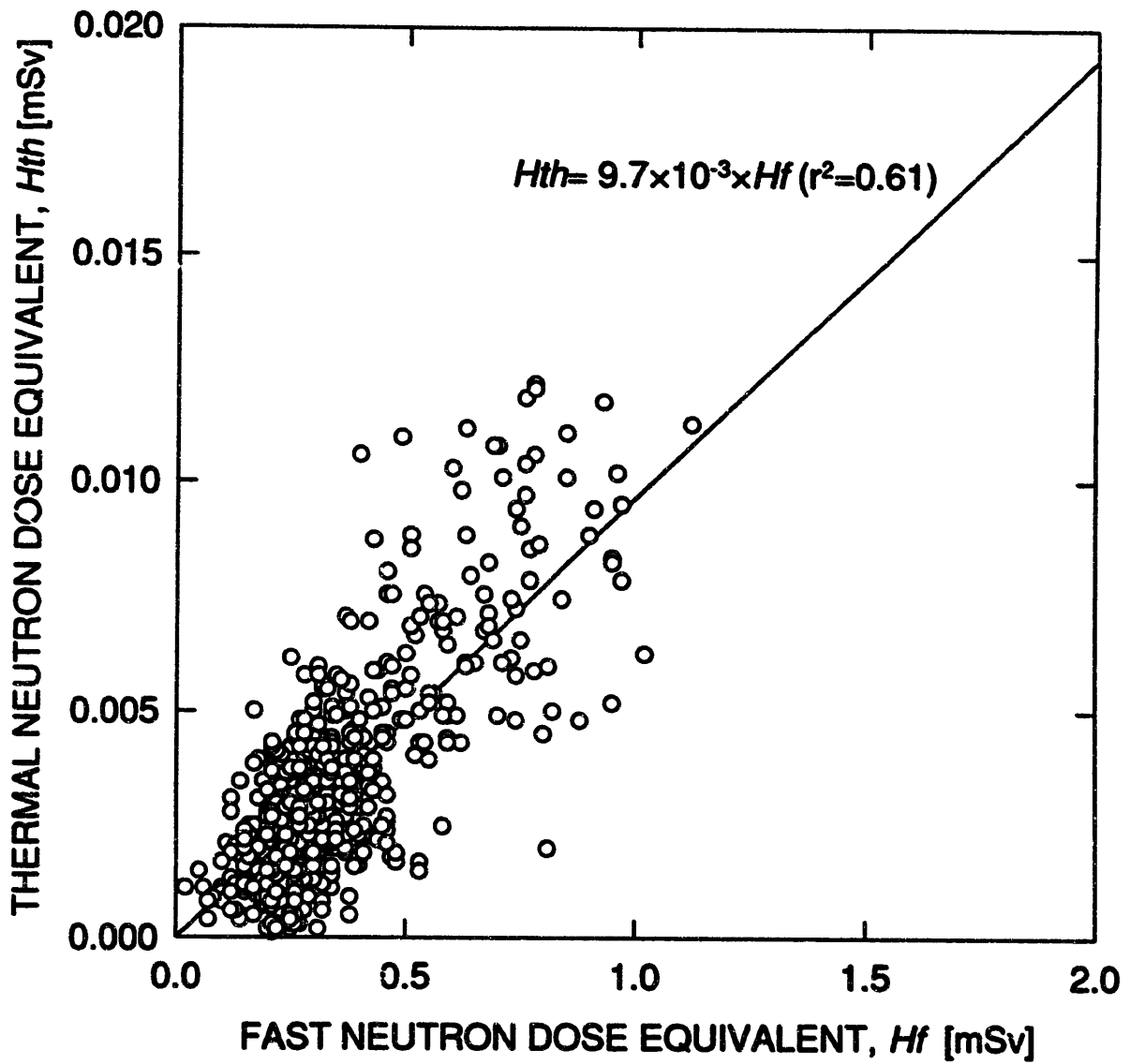


図4-14 作業者の被ばくした高速中性子線1cm線量当量 H_f と熱中性子線1cm線量当量 H_{th} の比較(平成5年度)

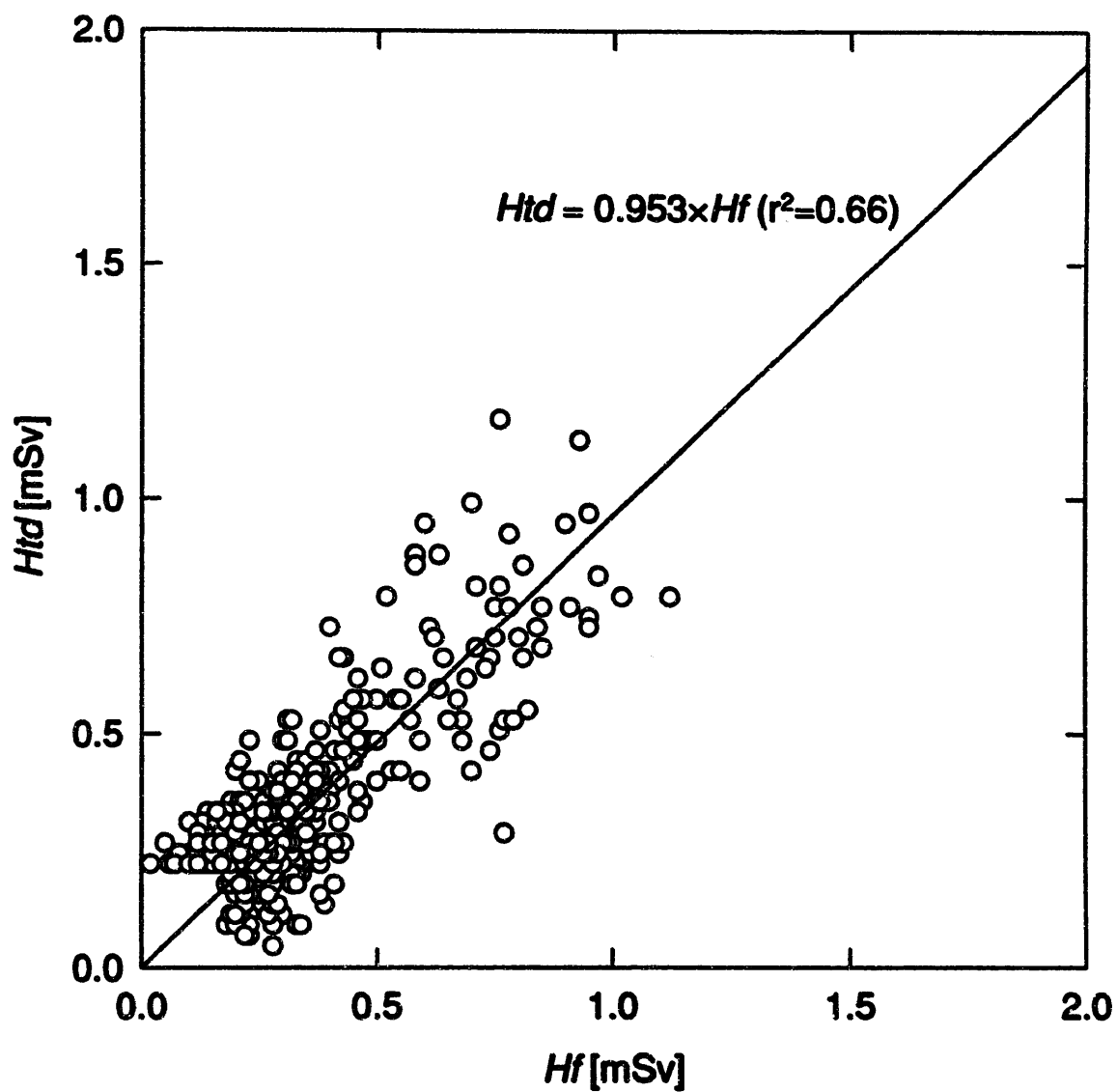


図4-15 TLDバッジと固体飛跡検出器から求めた高速中性子1cm線量当量の比較
(平成5年度)

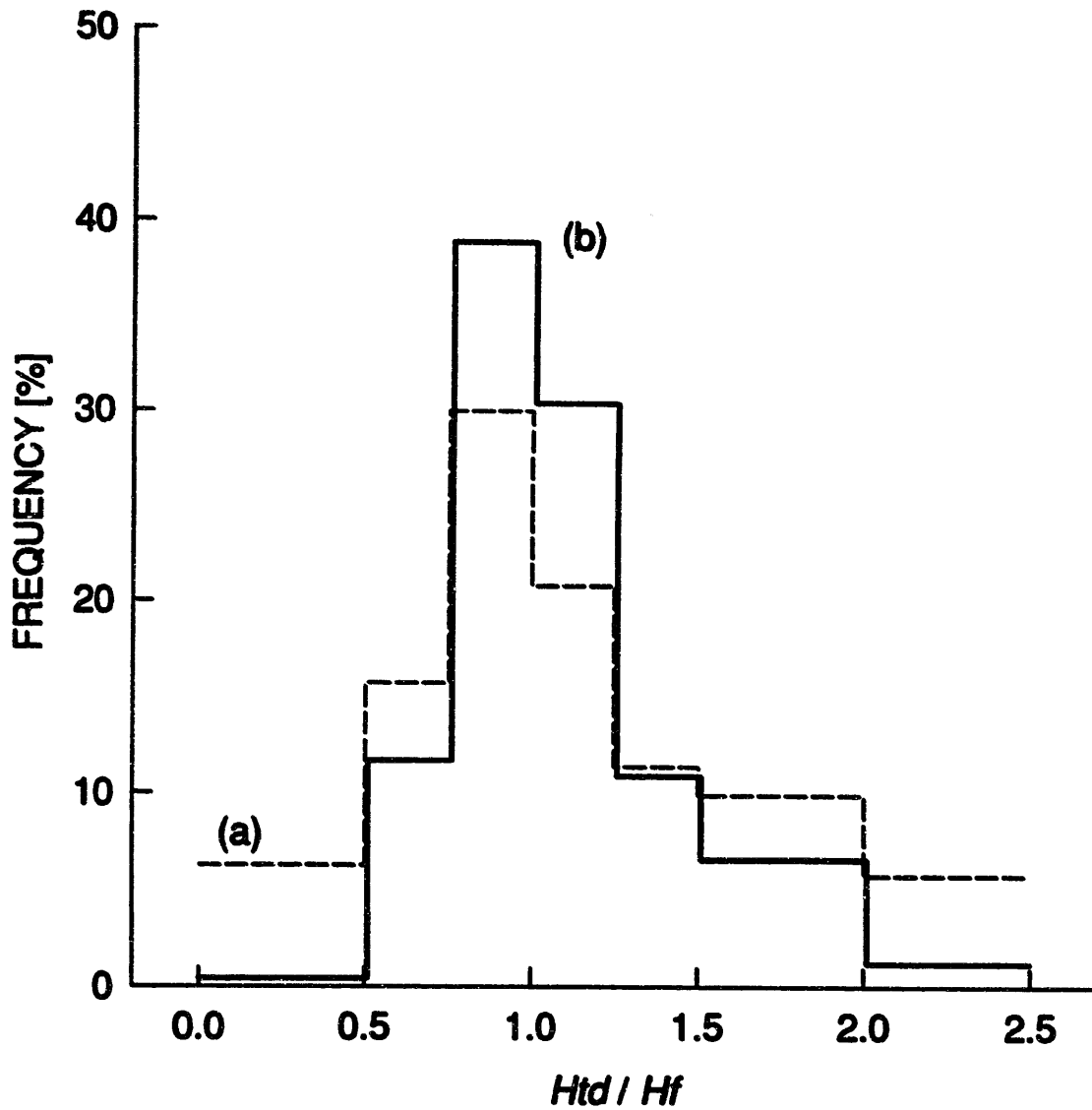


図4-16 固体飛跡検出器から求めた高速中性子1cm線量当量 H_{td} に対する
 TLDバッジから求めた高速中性子1cm線量当量 H_f の比の分布(平成5年度)
 (a) TLDバッジ、固体飛跡検出器の一方が有意値であるもの
 (b) TLDバッジ、固体飛跡検出器共に有意値であるもの

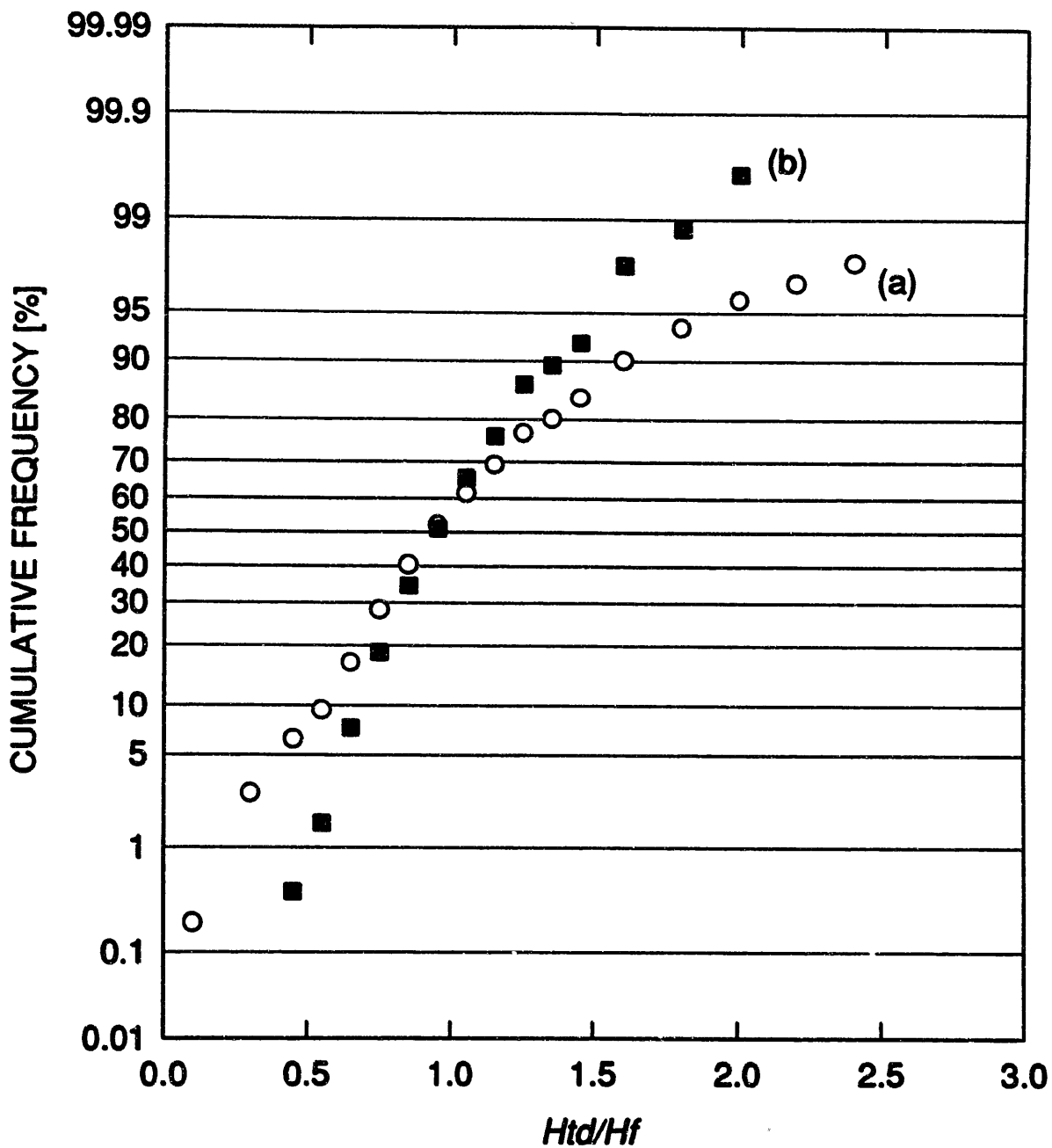


図4-17 Htd/Hf 比の累積分布

(a) TLDバッジ、固体飛跡検出器の一方が有意値であるもの

(b) TLDバッジ、固体飛跡検出器共に有意値であるもの

4-5 まとめ

主にプルトニウム燃料工場製造課に所属する作業者が実際に着用した個人線量計の解析結果から、以下のことが判明した。

- (1) 作業者が被ばくする γ 線のエネルギーは 60keV~200keVの範囲に集中していること。また転換課の場合は、60keV付近に集中していること。
- (2) $N1$ の値は、 γ 線の1cm線量当量と比べると 0.6~0.8倍程度であること。
- (3) 作業者が被ばくする γ 線と中性子線の1cm線量当量の比はほぼ 1 : 1 であること。
(胸部の線量当量の場合)
- (4) 中性子線に対する応答特性が全く異なる $N2, N3, N4$ 及び T の間に良好な直線関係が見られたこと。
- (5) 応答特性が全く異なるにも関わらず、固体飛跡検出器とTLDバッジによる中性子線の1cm線量当量がほぼ一致したこと。

中性子エネルギー応答特性の全く異なる $N2, N3, N4, T$ の間に直線的な関係が得られたという事実は、作業者の被ばくする中性子のエネルギー分布等が作業場所や作業内容に依らずほぼ一定であることを示している。

また、作業者の被ばくデータから $T/Rf = 0.28$ という関係が得られており、これは作業環境の中性子エネルギー分布の硬さとその分布が作業場所に依らないことを証明する十分な根拠になりうると思われるが、中性子エネルギー分布とその値との関連性については現時点では説明ができない。前述したように、 ^{252}Cf 線源をアクリル板で遮蔽した実験の結果からは、 $T/Rf = 0.28$ を再現しなかった。実際の作業環境の中性子場と ^{252}Cf 線源を用いて模擬した場の中性子線のエネルギー分布や方向分布等の違いによる影響について検討する必要がある。

さらに、(3-2)式と本解析で得られた $T/Rf = 0.28$ を用いてTLDバッジの高速中性子線量当量換算係数 Kf を試算すると、 $4.2[\mu\text{Sv/mR } ^{137}\text{Cs eq.}]$ が得られた。これは現在使用している値 $6.4[\mu\text{Sv/mR } ^{137}\text{Cs eq.}]$ と比べると約35%小さな値である。固体飛跡検出器とTLDバッジから求めた高速中性子線の1cm線量当量はほぼ一致しているが、それらの値が正しいかどうか、すなわち現在使用している換算係数 Kf の値が妥当かどうかについては本解析結果からは判断できない。本章の内容はあくまでも定性的な議論であって定量性についてはさらに議論を要する。

なお、今回の解析から得られた γ 線、高速中性子線、熱中性子線による 1cm線量当量の人数分布を補遺Dにまとめた。

第5章 フィールド照射試験

第4章で示したプルトニウム燃料取扱施設の作業者が実際に着用した個人線量計から得られた結果及び現行の換算係数の妥当性を定量的に検証するため、実作業環境下でTLDバッジ及び固体飛跡検出器のフィールド照射試験を実施した。

5-1 実験方法

実験は、プルトニウム燃料第3開発室の粉末調整室(FP-101)、グローブボックスFPG-11C(成型・整列設備工程、グローブ番号E-303、E-304)にて行った。実験を実施した期間は平成6年8月23～26日である。

グローブボックスFPG-11Cは顆粒状MOX燃料粉末をペレット型に充填し、加圧によってペレットに成型する工程であるが、実験を行った期間は工程内残留核物質の回収作業を行うため、MOX燃料ペレット製造用の原料粉はグローブボックス内には入っておらず、グローブボックス内側のパネル面や機器類に付着したMOX粉末が線源となっている。グローブボックス面の遮蔽はパネル(アクリル10mm)及び含鉛アクリル(35mm)であり、またグローブ未使用時にはポート部分にカバーを取り付けているが、本実験では人体に対面し、両腕をグローブボックス内に差し込む位置(E-303、E-304)のみカバーを取り外した。

実験に使用した個人線量計はTLDバッジ、固体飛跡検出器及び電子式 γ 線用個人線量計(アロカ社製PDM101、以下「マイドーズ」と言う)の3種類である。固体飛跡検出器はTLDバッジのバッジケース内に2個ずつ挿入した。

個人線量計は、TLDバッジのエネルギー応答特性が人体のそれに最も似ていると報告されている[17]楕円柱水ファントム上に設置し、照射を行った。このとき実際の作業状況を模擬するため、鉛エプロン(鉛当量厚さ0.35mm)でファントムのグローブボックス側前面部分を覆った。それぞれ人体の胸部(鉛エプロン内側)、頸部(鉛エプロン外側)及び背面部に相当する位置に、TLDバッジをそれぞれ4、2、4個設置し、マイドーズは胸部と頸部に相当する位置に1個ずつ設置した。

実験配置及び個人線量計のファントムへの装着条件を図5-1、図5-2にそれぞれ示す。TLDバッジの中心はグローブボックス面から距離35cm、高さ130cmの位置となるように配置した。個人線量計の照射時間は70時間である。

自由空間中での線量当量率の測定には、アンダーソンブラウン型レムカウンター(AInor 2202D)、電離箱サーベイメーター(AE-133)を使用し、また中性子エネルギースペクトルの測定には東京大学原子核研究所(以下「核研」と言う)型球形多減速材付き ^3He 検出器[29](以下「ボナー球」と言う)を用いた。このとき検出器の実効

中心がファントム胸部に取り付けたTLDバッジの中心と同じ位置となるよう配置した。また、電離箱サーベイメーターによる線量当量率の測定の際には、鉛エプロンで前面を覆った場合と、鉛エプロン無しの場合の2回測定を行った。

5-2 実験結果と検討

(1) 中性子エネルギースペクトル、1cm線量当量率測定結果

レムカウンター、電離箱サーベイメーターによる線量当量率及びボナー球の計数率の測定結果を表5-1に示す。

ボナー球の計数率からアンフォールディング法を用いて求めた中性子スペクトルを図5-3、表5-2に示す。ボナー球の応答関数は岩井によって計算・評価がなされた100群構造のもの[30]を簡単のため核研型21群構造[29]に縮約して使用した。アンフォールディング計算にはSAND-IIコード[31]、初期推定スペクトルには宮部らの測定結果[5]を用いた。

アンフォールディング計算によって求めた中性子スペクトルから単位中性子フルエンス-1cm線量当量換算係数[11]を用いて計算した中性子線1cm線量当量率も表5-1に示す。ボナー球は等方な応答を持つので、ここで示した1cm線量当量は周辺線量当量と同じ値になる。またメーカーの推奨する換算係数(0.33[cps/(μ Sv/h)])を用いてレムカウンター計数率から計算した値はボナー球から求めた値とはほぼ一致しているが、レムカウンターのメーター指示値の場合は線量当量率を15%程度過小評価している。

図5-4は、中性子フルエンスと1cm線量当量の累積分布であり、横軸は熱中性子領域から積分した場合の区間の上限である。この結果から100keV以上の高エネルギー中性子線は全フルエンスの約50%、それによる線量当量が全体の95%程度を占めていることがわかる。

また、平均中性子エネルギーはフルエンス重み付け、1cm線量当量重み付けそれぞれ0.75、1.84 [MeV]であり、岩井らがプルトニウム燃料第2開発室及びプルトニウム転換技術開発施設で実施した中性子スペクトルの測定結果[30][15]、吉田らがプルトニウム燃料第3開発室で実施している中性子スペクトルの測定結果[32]と大きな相違はなかった。

(2) 個人線量計の測定結果： γ 線

1. TLDの発光関係

表5-3にTLDバッジ(UD-808P型線量計)の各エレメントの測定結果、 γ 線1cm線量当量の評価結果を示す。ここで示した値は感度補正係数を用いて個々のTLDの感度の個体差を補正した後の結果である。胸部、頸部及び背面部に装着したTLDバッジから得られた $G3/G4$ の値は、2.5~8.3と装着部位によって大きく変化し、それぞれ90、60、150 keV程度のエネルギーを持つ γ 線に相当する。これらは鉛エプロンも含めた作業環境周

辺の γ 線遮蔽状況に依存しており、鉛エプロンの外側である頸部に装着したTLDバッジの場合はグローブ開口部からの ^{241}Am の γ 線(59.5keV)による発光である。また背面方向については含鉛アクリル付加遮蔽体及びポートカバーによって背面側のグローブボックス表面全体の十分な γ 線遮蔽対策が施されているため ^{241}Am などの低エネルギー γ 線はほぼ遮られ、比較的高いエネルギーを持つ ^{237}U の208keVなどの γ 線が発光に寄与していると考えられる。また、胸部については ^{241}Am や ^{237}U などの γ 線が混在した条件であり両者の平均的なエネルギーになっている。

今回のフィールド試験で得られた胸部、頸部、背面部でのG3とG4の関係と第4章の作業者の被ばくデータの解析から得られた関係の比較を図5-5に示す。本試験で得られた発光の関係(実線)は、作業者の被ばくデータの解析結果を良く再現している。

またUD-808P型線量計から求めた γ 線の1cm線量当量 H_g とUD-809P型線量計のエレメントN1の読取り値の比較を表5-3に示す。表に示した各部位の $N1/H_g$ はG3/G4から推定した γ 線エネルギーが下がるほどその値が小さくなっているが、これは前述したようにエレメントN1の前面に配置しているCd板(0.7mm)による低エネルギー γ 線の遮蔽効果によるものである。比較的 γ 線エネルギーが高い背面部については $N1$ と H_g の値はほぼ同程度であるのに対して、 ^{241}Am による59.5keVの γ 線が支配的な頸部の場合は $N1$ は H_g に比べて30%程度の値であり、また ^{241}Am と ^{237}U の γ 線の混在条件である胸部の場合には60%程度の値となる。TLDバッジは中性子線と γ 線の混在場では、その分離評価性能が低下することが実験的に判明しているが[33][34]、 ^{241}Am 、 ^{237}U のように比較的エネルギーの低い γ 線による被ばくが支配的なプルトニウム燃料の取扱施設の場合には、中性子/ γ 線の分離評価性能上は極めて有利な条件と言える。

図5-6に、本フィールド試験の結果と作業者の被ばくデータの解析から得られた結果の比較を示す。図の上軸には γ 線による線量当量を示した。フィールド試験で得られた $N1$ とG4の関係は、作業者の被ばくデータから得られた関係の広がり良く再現している。ただし、作業者の被ばくデータの解析結果では、 $N1$ とG4が同等の発光のものが存在しており、このような発光比は γ 線のエネルギーが約300keV以上の場合に相当するが、実作業環境中ではそのような比較的高エネルギーの γ 線の混在割合は極めて少ない。エレメントN1とエレメントG4の感度の不一致(エレメントN1の方がやや感度が高い)が原因ではないかと考えられ、TLDバッジの品質管理試験の結果からも同様なことが指摘されている[34]。

2. γ 線 1cm線量当量

表5-4に、TLDバッジ、マイドーズ及び電離箱サーベイメーターによる γ 線1cm線量当量の測定結果の比較を示す。電離箱サーベイメーターによる鉛エプロン有り・無し測定値がそれぞれ胸部、頸部の γ 線1cm線量当量に相当すると考えれば、胸部と頸部

につけたTLDバッジ、マイドーズから求めた線量当量率は電離箱サーベイメーターから求めた値と良く一致している。胸部に装着したマイドーズの値はTLDバッジに比べてやや大きめであるが、マイドーズの装着位置がTLDバッジと比べてグローブ開口部に近い位置であったためと考えられる。

また、TLDバッジの頸部/胸部の γ 線1cm線量当量比は2.3であり、いわゆる“不均等被ばく”の条件に該当する。TLDバッジ、マイドーズ及び電離箱サーベイメーターの測定値から不均等被ばく時の実効線量当量を計算した結果についても同表に示す。これら3つの線量計/検出器から求めた不均等被ばく時実効線量当量の値はほぼ一致しており、特に電離箱サーベイメーターから求めた値はTLDバッジの値と良く一致した。電離箱サーベイメーターと鉛エプロンを用いる方法は、簡便であり、作業現場で迅速に不均等被ばく時の実効線量当量を得るのに有効であることが確かめられた。なお、今回のフィールド試験で得られた頸部と胸部の γ 線のエネルギー、 γ 線1cm線量当量の関係は、文献[7]の結果と同様であった。

(3) 個人線量計の測定結果：中性子線

1. TLDの発光関係と固体飛跡検出器との関係

UD-809P型線量計の各エレメントの読取り値、高速及び熱中性子レスポンスと固体飛跡検出器のエッチピッチ数の測定結果を表5-5に示す。各部位に装着したTLDバッジの数は表5-3と同じ、固体飛跡検出器は胸部と背面部についてはそれぞれ8個、頸部は4個である。

本フィールド試験で得られた N_2, N_3, N_4 の発光関係と第4章で解析した作業者の被ばくデータとを比較した結果を図5-7に示す。線量計の着用部位に依らずフィールド試験の結果は一定の発光関係であり、また作業者の被ばくデータの解析結果とほぼ一致した。

同様にフィールド試験で得られた R_f と R_{th} の関係、 T と R_f の関係を作業者の被ばくデータの解析結果と比較したものをそれぞれ図5-8、図5-9に示す。

TLDバッジの R_{th}/R_f は熱中性子線の混在割合を示す一つの指標と考えることができ、室内散乱線の寄与がより大きいと考えられる背面部では胸部や頸部での値に比べるとかなり比の値が大きくなっている。本フィールド試験の結果は作業者の被ばくデータの解析結果よりも R_{th}/R_f が小さく、特に胸部のように中性子線による被ばく線量が多い側でその傾向が顕著である。熱中性子線の混在割合は作業者の位置情報などとも関連してくるので、現時点では本フィールド試験と作業者の被ばくデータの解析から得られた結果との相違に関する説明は難しい。

また中性子エネルギー分布の硬さを表す指標である T/R_f についてであるが、表5-5に示したように各部位ともにほぼ同じ値であった。背面部の方が胸部よりもやや T/R_f の値が小さいが、これは室内散乱線等の寄与によって背面側に入射する中性子の

方がエネルギー分布が軟らかいためと考えられ、背面部の R_{th}/R_f が値が胸部よりも大きいことから説明できると考えられる。作業者の被ばくデータの解析結果とフィールド照射試験の結果の比較である図5-9には、フィールド照射試験で得られた実験値の誤差も含めた最大値（頸部 $T/R_f = 0.38$ ）と最小値（背面部 $T/R_f = 0.21$ ）のみを実線で示した。作業者の被ばくデータのプロットは平均値を中心として±30%程度の広がりを持っているが、本フィールド試験の結果はその広がりを再現している。従って、今回フィールド試験を実施した放射線場はやや熱中性子線の混在割合が少ないものの、プルトニウム取扱施設の作業者（特に製造課に所属する者）が放射線作業を行っている放射線場を十分に代表していると結論付けられる。

2. 中性子線 1cm線量当量

TLDバッジから求めた高速中性子、熱中性子の1cm線量当量（それぞれ H_f, H_{th} ）、固体飛跡検出器から求めた高速中性子の1cm線量当量 H_{td} 、及びボナー球から求めた中性子線の1cm線量当量とを比較した結果を表5-6に示す。

ボナー球から求めた線量当量は、ICRUが定義した環境モニタリング用の周辺線量当量に相当し、 4π 方向から入射する中性子全てに対する量である。従って、第2章、あるいは補遺Aでも述べたように、個人線量計の本来の評価対象量である“個人の線量当量”とは直接に比較できる量ではない。ただし、現時点では個人線量計の本来の評価対象である線量当量の定量的な評価が困難であるため、ここではボナー球から求めた線量当量の値を、

- (1) 個人線量計による評価値よりも安全側であれば、定義的には矛盾しない。
- (2) ただし、今回試験を行った場のように比較的前方方向から入射する中性子線が多い条件の下では、個人線量計による評価値と極端な相違があってはならない。

という目安として用いる。

上記の考え方によると、胸部及び頸部に装着した個人線量計から求めた線量当量評価値は、ボナー球から求めた値よりも僅か15%小さい程度であり、TLDバッジの現行の高速中性子線量当量換算係数 $K_f = 6.4 [\mu\text{Sv/mR } ^{137}\text{Cs eq.}]$ は十分に妥当な値であると結論づけることができるだろう。換算係数 K_f の定量に関するさらに詳細な議論は次章で述べることにする。

なお、胸部と頸部の高速中性子線の1cm線量当量の値はほぼ同じであるので、 γ 線の場合とは異なり体幹部が前方方向から受ける中性子線については均一（少なくとも過小評価することがない程度）な被ばく条件であるといえる。

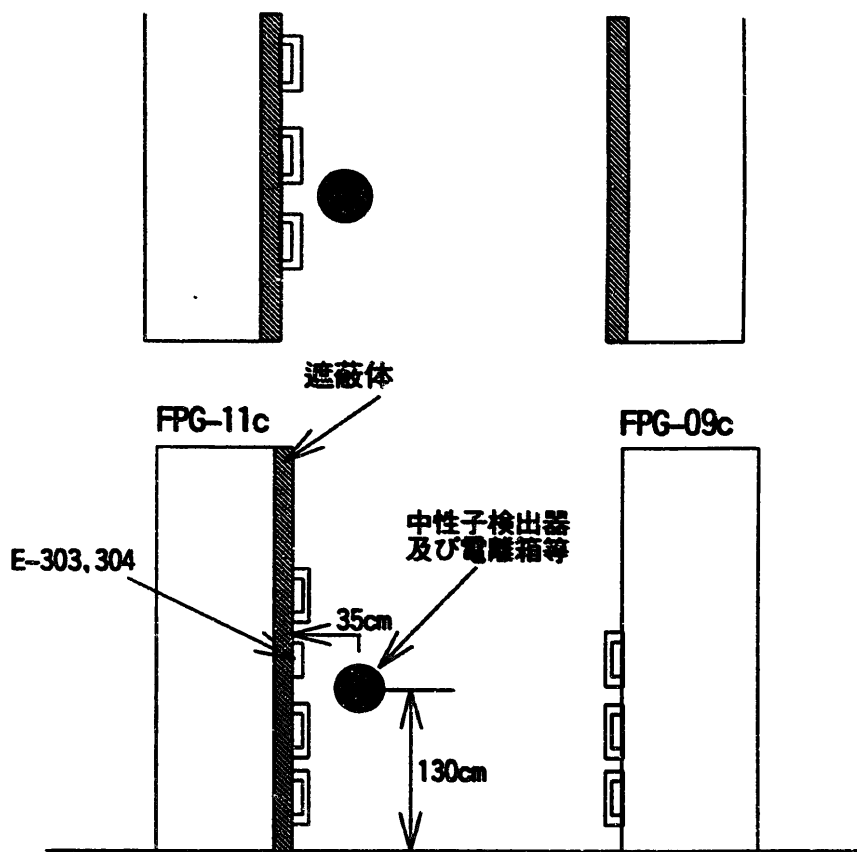


図5-1 グローブボックス FPG-11cでの実験配置 (上; 上面図、下; 側面図)

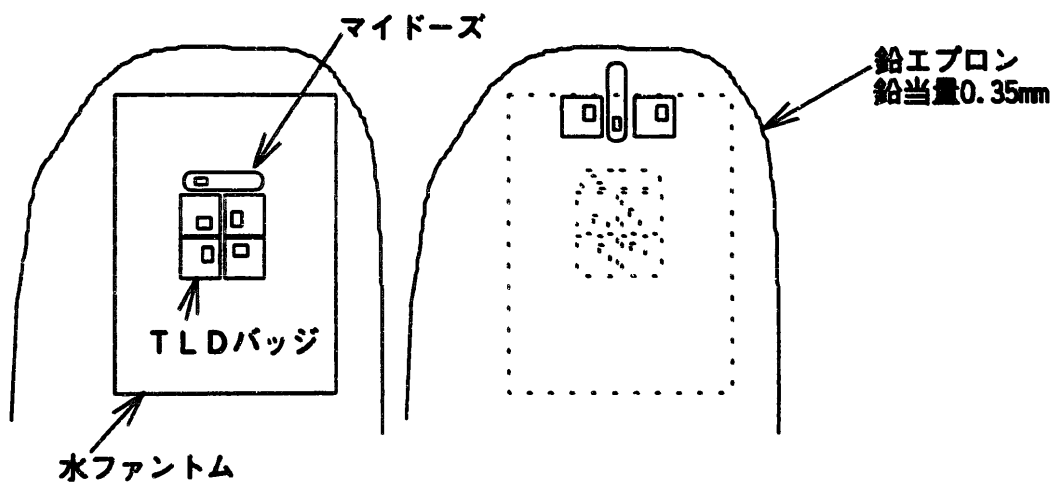


図5-2 ファントム表面 (胸部) 及び鉛エプロン表面部 (頸部) に装着した個人線量計の配置

表5-1 レムカウンター、電離箱サーベイメーター、ボナー球測定結果

実験年月日	平成 6年 8月23日～ 8月26日					
実験場所	Pu燃料第 3開発室 粉末調整室(FP-101) グローブボックス FPG-11C (グローブ番号 E-303,E-304)					
実験者	百瀬、辻村、有澤、吉田、遠藤					
線源	PuO ₂ -UO ₂ 粉 (工程内残留核物質)					
遮蔽条件	グローブボックスパネル 含鉛アクリル付加遮蔽体 (ポートカバー外す)					
中性子線 線量当量率	レムカウンター (Alnor 2202D)	45 μSv/h (メーター読取り値) 52.5 μSv/h (計数率 5195/300cpsから換算)				
γ線 線量当量率	電離箱 サーベイメーター (AE-133 λ1)	75 μSv/h (遮蔽なし) 40 μSv/h (0.35mm鉛当量エプロンにて電離箱 前面を遮蔽)				
多減速材付き ³ Heスペクトロメーター(5.0気圧)測定結果						
減速材	なし	Cd 1.0mm	PE 1.5cm	PE 3.0cm	PE 5.0cm	PE 9.0cm
計数 [counts]	112523	11963	62583	112984	134703	94489
測定時間 [sec]	300	300	300	300	300	300
計数率 [cps]	375.1	39.9	208.6	376.6	449.0	315.0
多減速材付き ³ Heスペクトロメーター(5.0気圧)解析結果						
平均中性子エネルギー 0.75[MeV] 1.84[MeV] (1cm線量当量で重みづけした場合)						
全体	中性子フルエンス 3.48E+05[n/cm ² /h]			中性子1cm線量当量*		
160keV以上	43.0%			51.1[μSv/h]		
0.414eV以上,160keV未満	29.9%			94.3%		
0.414eV未満(熱中性子)	27.1%			4.2%		
				1.5%		

* 法令告示別表第5の中性子フルエンス-1cm線量当量換算係数[11]を用いて計算した。

表5-2 中性子スペクトル計算結果 (ボナー球の測定値から)

GROUP No.	UPPER ENERGY [eV]	LOWER ENERGY [eV]	NEUTRON FLUX [n/cm ² /s/lethargy]	NEUTRON FLUX [n/cm ² /s]
1	1.492E+07	9.048E+06	9.521E-02	4.760E-02
2	9.048E+06	5.488E+06	9.860E-01	4.930E-01
3	5.488E+06	3.329E+06	5.675E+00	2.837E+00
4	3.329E+06	2.019E+06	2.128E+01	1.064E+01
5	2.019E+06	1.225E+06	1.910E+01	9.551E+00
6	1.225E+06	7.427E+05	1.346E+01	6.732E+00
7	7.427E+05	4.050E+05	9.749E+00	4.874E+00
8	4.050E+05	2.732E+05	7.165E+00	3.582E+00
9	2.732E+05	1.647E+05	5.559E+00	2.813E+00
10	1.647E+05	8.652E+04	4.529E+00	2.916E+00
11	8.652E+04	2.479E+04	3.178E+00	3.972E+00
12	2.479E+04	7.102E+03	2.403E+00	3.004E+00
13	7.102E+03	2.035E+03	2.118E+00	2.647E+00
14	2.035E+03	5.830E+02	2.076E+00	2.595E+00
15	5.830E+02	1.670E+02	2.099E+00	2.624E+00
16	1.670E+02	4.785E+01	1.731E+00	2.164E+00
17	4.785E+01	1.371E+01	1.921E+00	2.401E+00
18	1.371E+01	3.928E+00	1.720E+00	2.150E+00
19	3.928E+00	1.125E+00	1.809E+00	2.261E+00
20	1.125E+00	4.140E-01	2.139E+00	2.139E+00
21	4.140E-01	1.000E-04	3.140E+00	2.615E+01
TOTAL FLUENCE [n/cm ² /s]			9.659E+01	

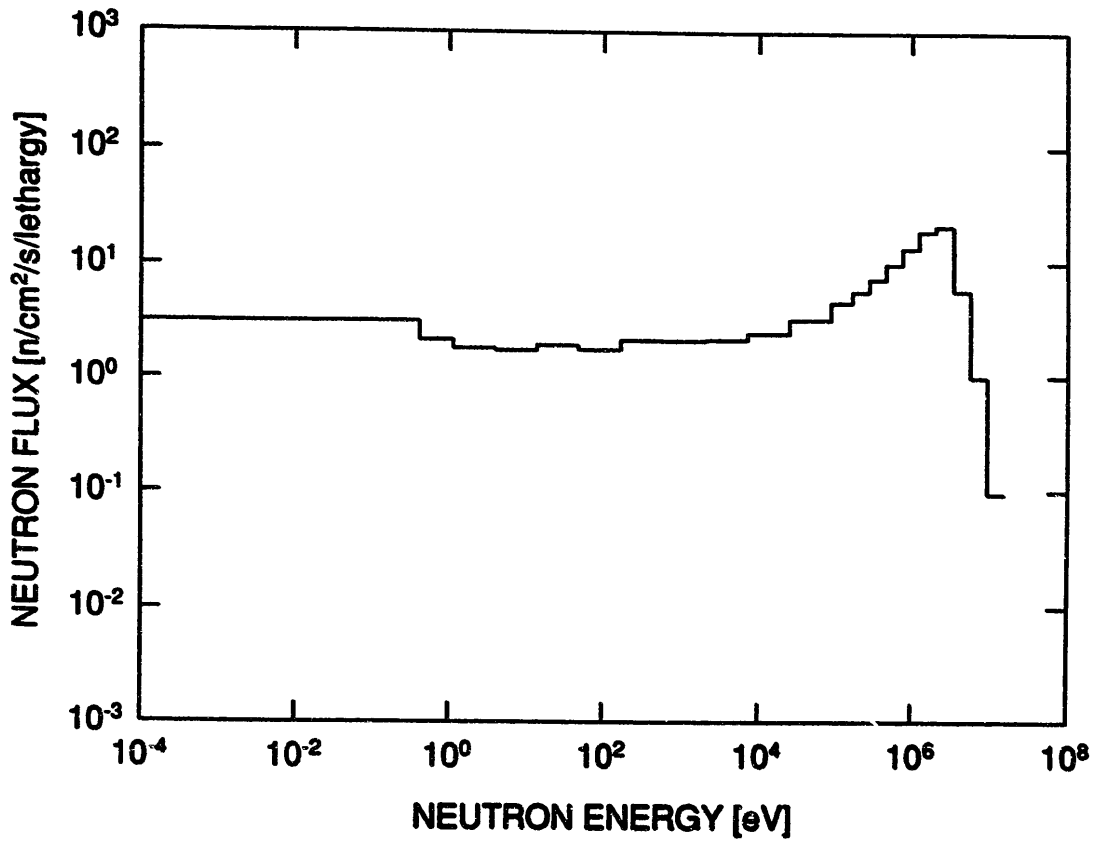


図5-3 ボナー球から求めた中性子スペクトル

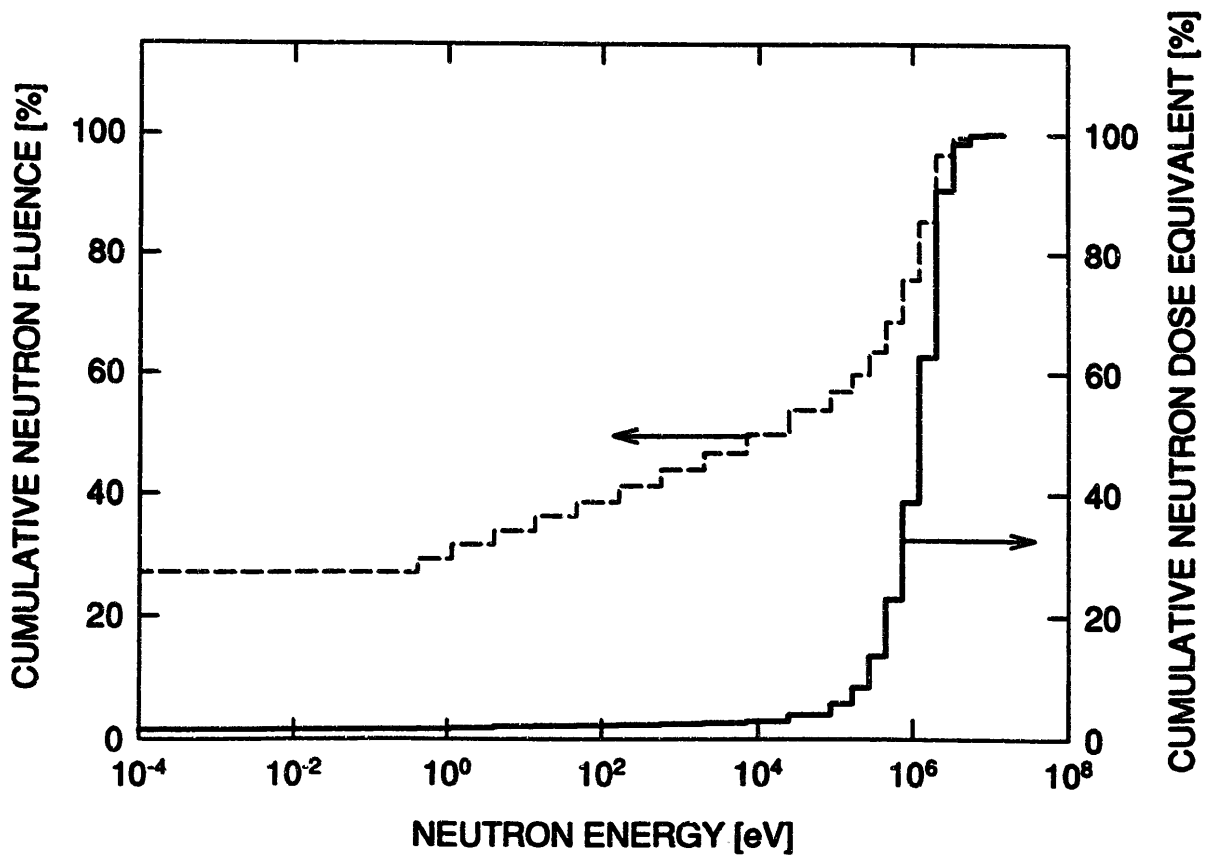


図5-4 中性子フルエンス、線量当量の累積分布 (ボナー球測定値)

表5-3 TLDバッジの測定結果 (γ 線)

着用部位	TLD バッジ数	G3 [mR ^{137}Cs eq.]	G4 [mR ^{137}Cs eq.]	G3/G4 (約90keV)	Hg [mSv]	N1 [mR ^{137}Cs eq.]	N1/G4 (15.7)	N1/Hg [10 ⁻² mR ^{137}Cs eq./mSv]
胸部	4	967.1±159.7 (16.5%)	240.2±34.6 (14.4)	4.0±0.2 (約90keV)	2.76±0.40	166.9±10.3 (6.2)	0.70±0.11 (15.7)	0.60±0.09 (15.7)
頸部	2	4661±35.7 (0.8)	559.7±35.7 (1.5)	8.3±0.2 (約60keV)	6.43±0.09	192.0±12.3 (6.4)	0.34±0.02 (6.6)	0.30±0.02 (6.6)
背面部	4	199.6±23.8 (11.9)	79.0±10.6 (13.4)	2.5±0.2 (約150keV)	0.91±0.12	72.4±9.4 (13.0)	0.92±0.17 (18.7)	0.80±0.15 (18.7)

表5-4 TLDバッジ、マイドーズミニ、電離箱サーベイメーターによる
 γ 線1cm線量当量 (不均等被ばく時の実効線量当量) の比較

着用部位	TLDバッジ[mSv]	TLDバッジ (比)	マイドーズ[mSv]	電離箱[mSv]
胸部	2.76±0.40	1.00	3.94	3.08 ^a
頸部	6.43±0.09	2.33±0.34	5.72	6.04 ^b
背面部	0.91±0.12	0.33±0.06	-	-
不均等被ばく ^c	4.05±0.26	1.47±0.13	4.56	4.12

a. 鉛エプロンで覆った場合、メーター値×照射時間×校正定数=40[$\mu\text{Sv/h}$]×70[h]×1.1b. 鉛エプロン無しの場合、メーター値×照射時間×校正定数=75[$\mu\text{Sv/h}$]×70[h]×1.1

c. 不均等被ばく時の実効線量当量=0.65×(胸部の線量当量)+0.35×(頸部の線量当量)

表5-5 TLDバッジ、固体飛跡検出器の測定結果（中性子線）

着用部位	<i>N2</i> [mR ¹³⁷ Cs eq.]	<i>N3</i> [mR ¹³⁷ Cs eq.]	<i>N4</i> [mR ¹³⁷ Cs eq.]	<i>Rth</i> [mR ¹³⁷ Cs eq.]	<i>Rf</i> [mR ¹³⁷ Cs eq.]	<i>Rth/Rf</i>	<i>T</i> [#/3.363mm ²]	<i>T/Rf</i> [#/3.363mm ² /mR ¹³⁷ Cs eq.]
胸部	459.6±17.0 (3.7%)	295.1±13.3 (4.5)	508.5±24.4 (4.8)	164.5±11.5 (7.0)	471.5±26.2 (5.6)	0.35±0.03 (9.0)	150.1±9.2 (6.1)	0.32±0.03 (8.2)
頸部	399.6±8.8 (2.2)	306.1±23.7 (7.7)	459.7±9.1 (2.0)	93.6±32.5 (34.8)	438.7±1.8 (0.4)	0.21±0.07 (34.8)	148.3±15.6 (10.5)	0.34±0.04 (10.5)
背面部	191.9±9.4 (4.6)	111.0±6.7 (6.1)	177.5±9.2 (5.2)	80.9±9.3 (11.6)	159.3±7.9 (5.0)	0.51±0.06 (12.6)	43.5±8.7 (19.9)	0.27±0.06 (20.5)

表5-6 TLDバッジ及び固体飛跡検出器から求めた中性子線量当量とボナー球の結果との比較

着用部位	高速中性子線量当量 (0.4eV以上)				熱中性子線量当量 (0.4eV以下)			
	TLDバッジ <i>Hf</i> [mSv]	TLDバッジ (相対比)	固体飛跡検出器 <i>Htd</i> [mSv]	固体飛跡検出器 (相対比)	ボナー球 [mSv]	TLDバッジ <i>Hth</i> [μSv]	TLDバッジ (相対比)	ボナー球 [μSv]
胸部	3.02±0.17 (5.6%)	1.00	3.30±0.20 ^a (6.1)	1.00		16.1±1.1	1.00	
頸部	2.81±0.01 (0.4)	0.93±0.05	3.26±0.34 (10.5)	0.99±0.12	3.52	9.2±3.2	0.57±0.20	52.7
背面部	1.02±0.05 (5.0)	0.34±0.03	0.96±0.19 (19.9)	0.29±0.06		7.9±0.9	0.49±0.07	

a. $H = 0.022 \times T$ (PNC)、b. $H = 0.015 \times T$ (長瀬ランダウア(株)、²⁵²Cf校正)

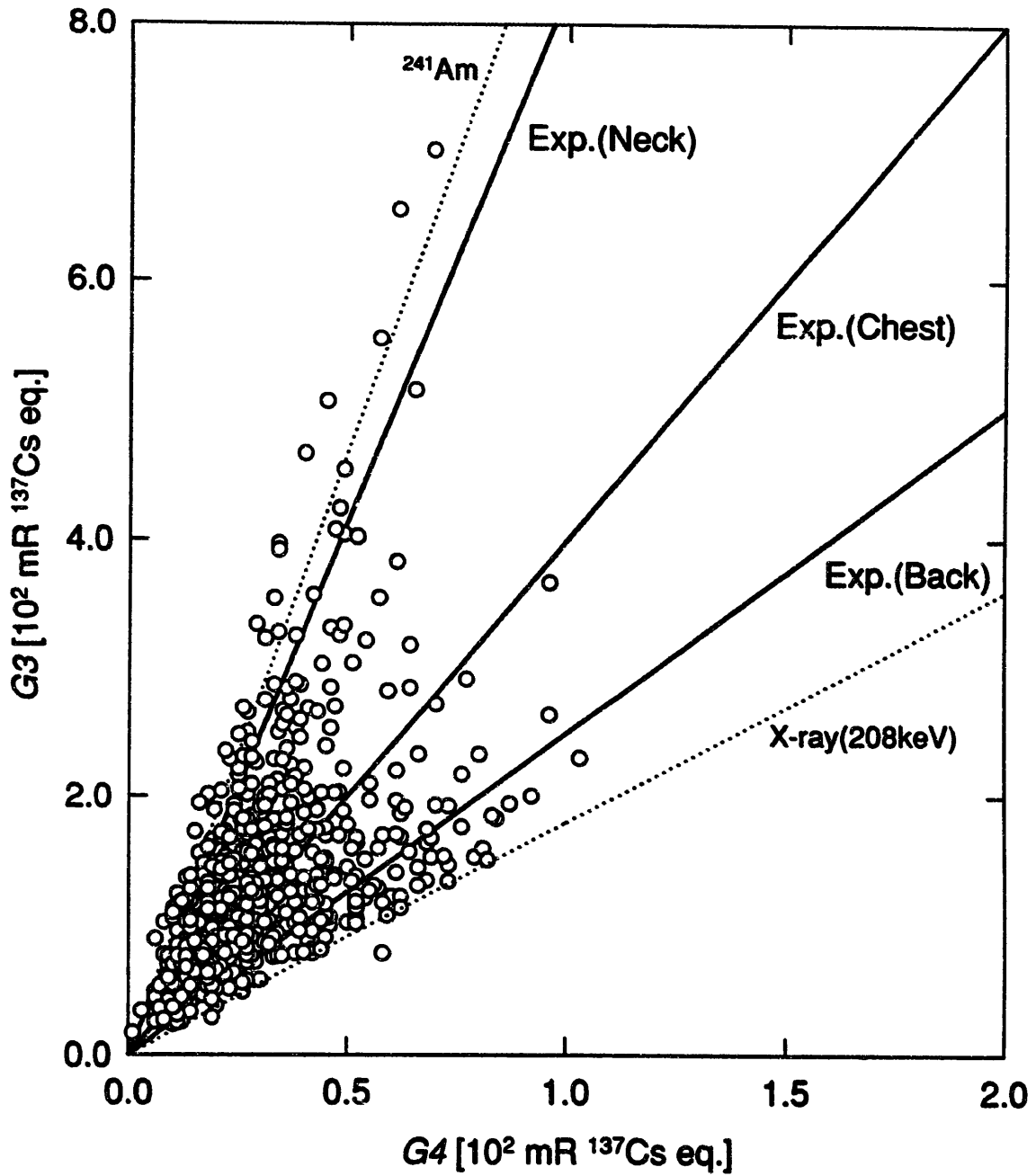


図5-5 フィールド照射試験で得られたTLDバッジのTLD測定量 $G3$ と $G4$ の関係 (実線) と作業者の被ばくデータの比較 (点線は ^{241}Am 、208keVのX線)

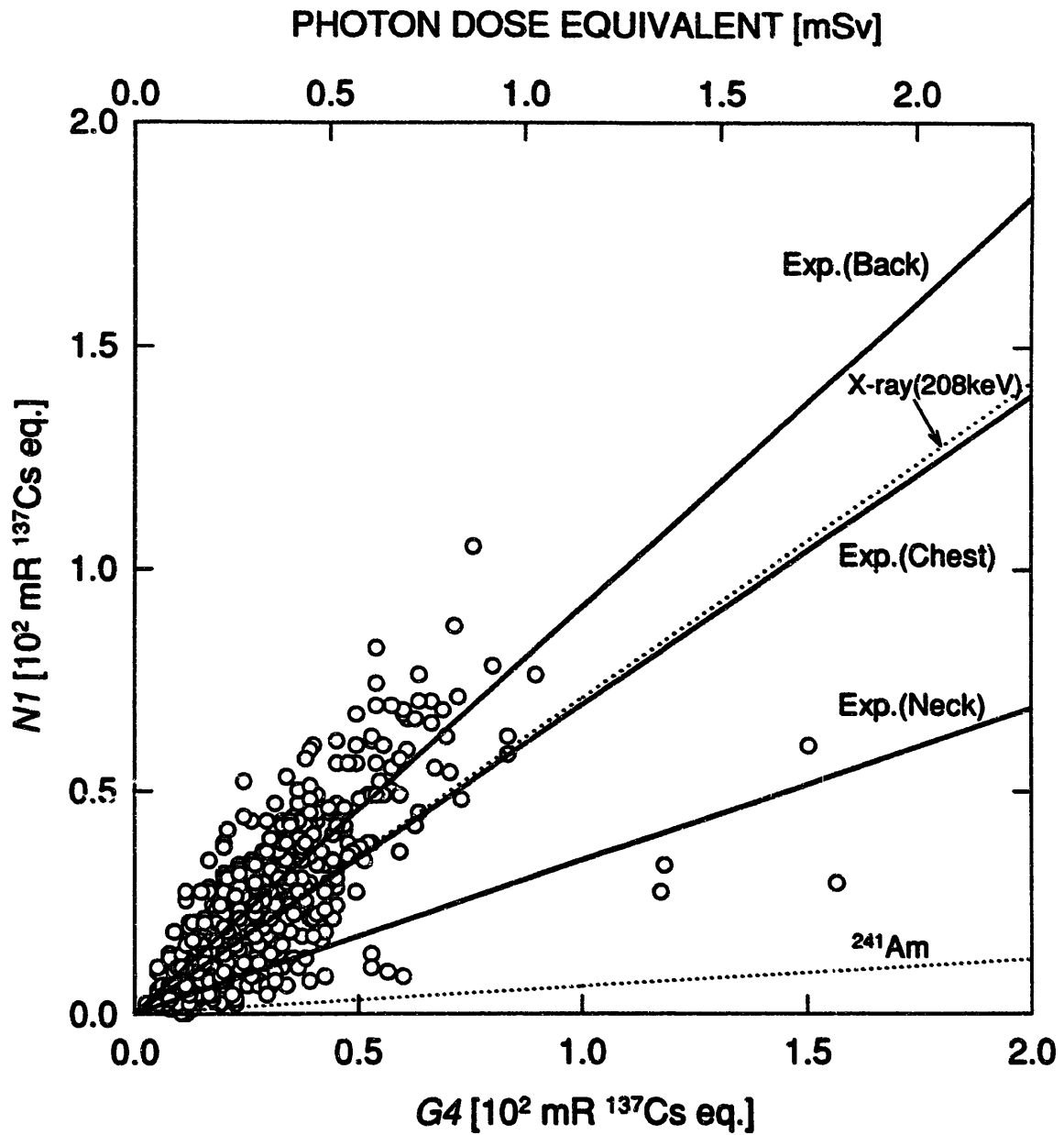


図5-6 フィールド照射試験で得られたTLDバッジのTLD測定量 G_4 と N_1 の関係 (実線) と作業者の被ばくデータの比較 (点線は²⁴¹Am、208keVのX線)

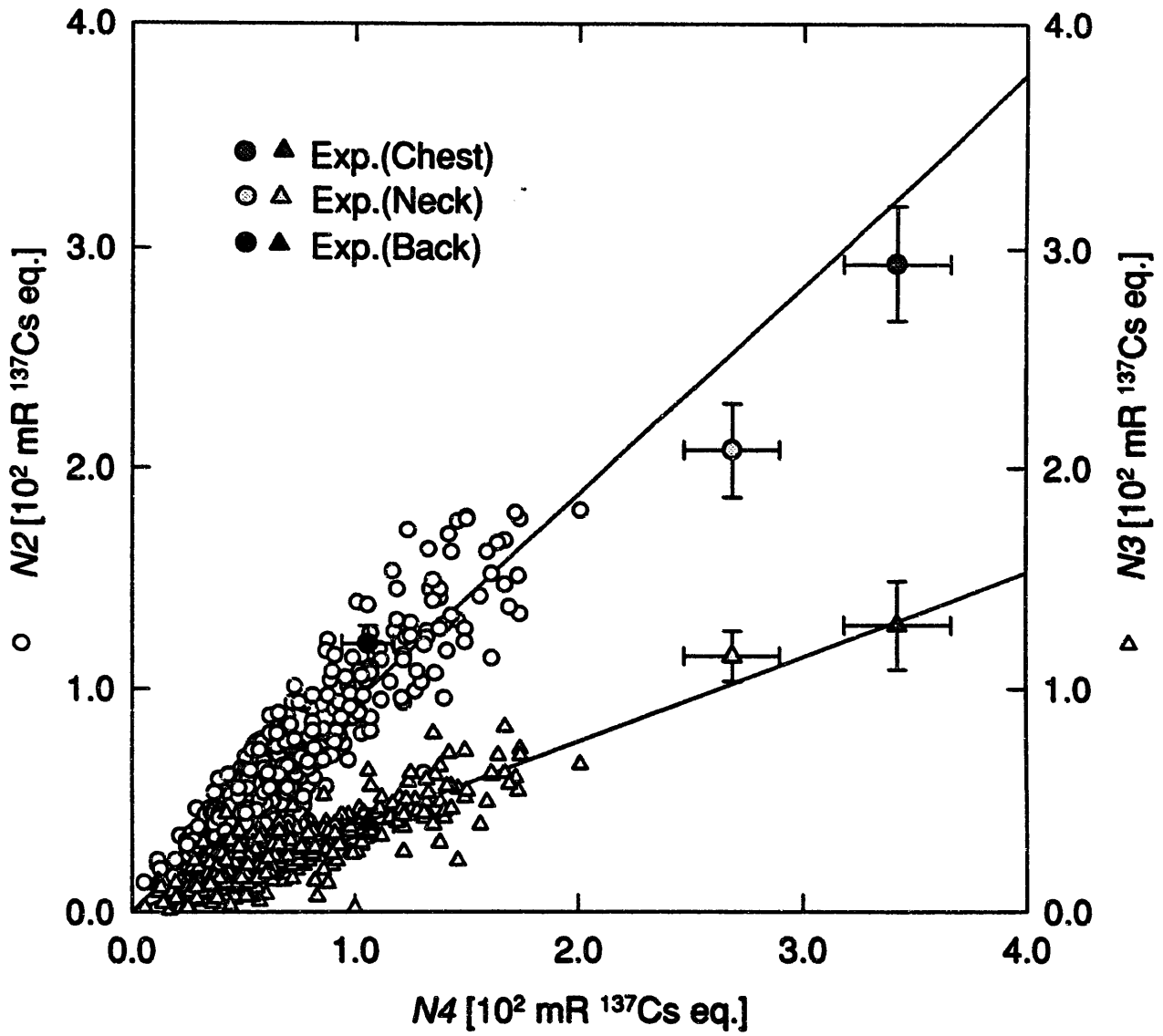


図5-7 フィールド照射試験で得られたTLDバッジのTLD測定量 $N2$ 、 $N3$ 及び $N4$ の関係と作業者の被ばくデータの比較

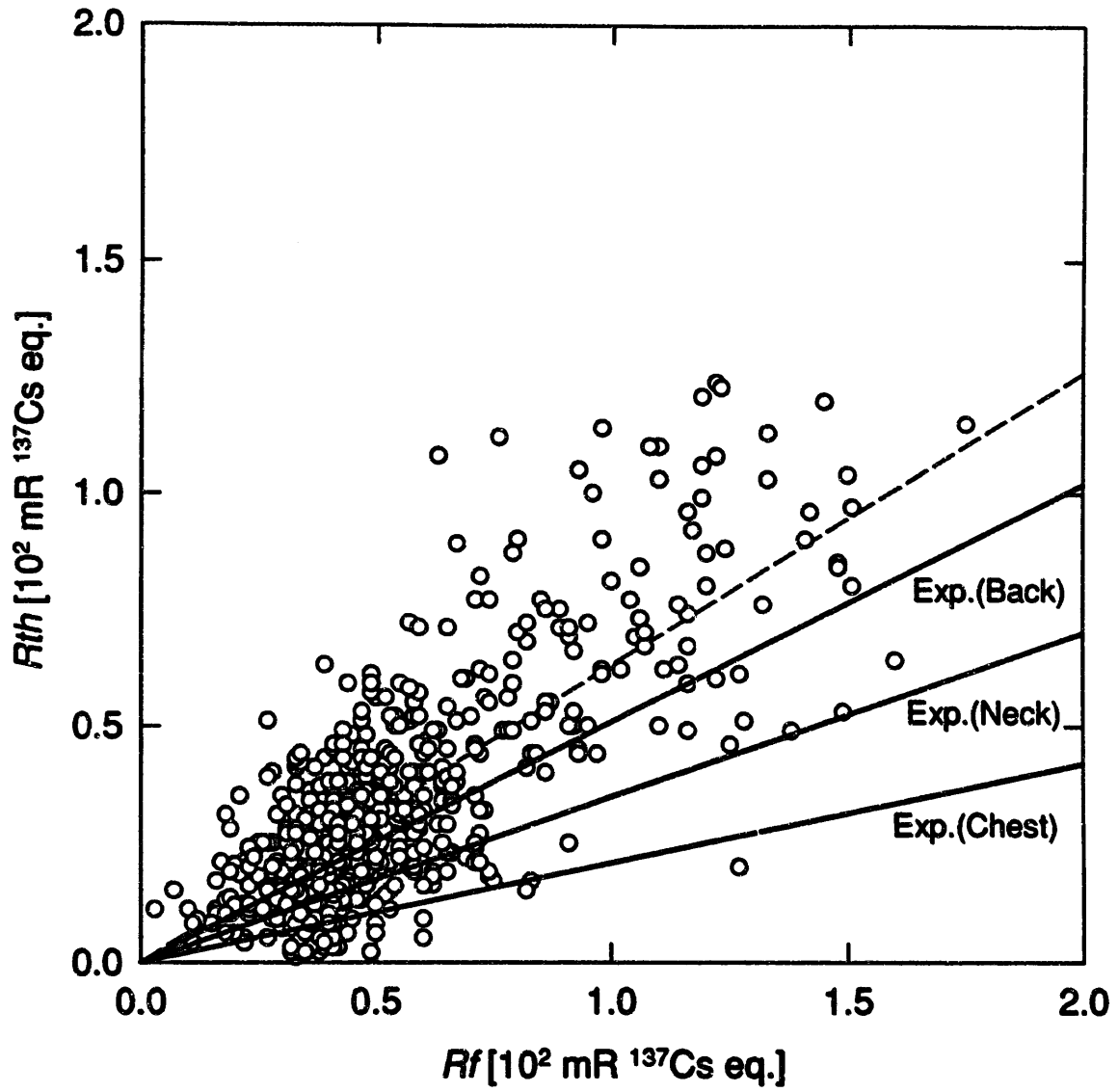


図5-8 フィールド照射試験で得られたTLDバッジの高速中性子線量 R_f と熱中性子線量 R_{th} の関係(実線)と作業者の被ばくデータの比較

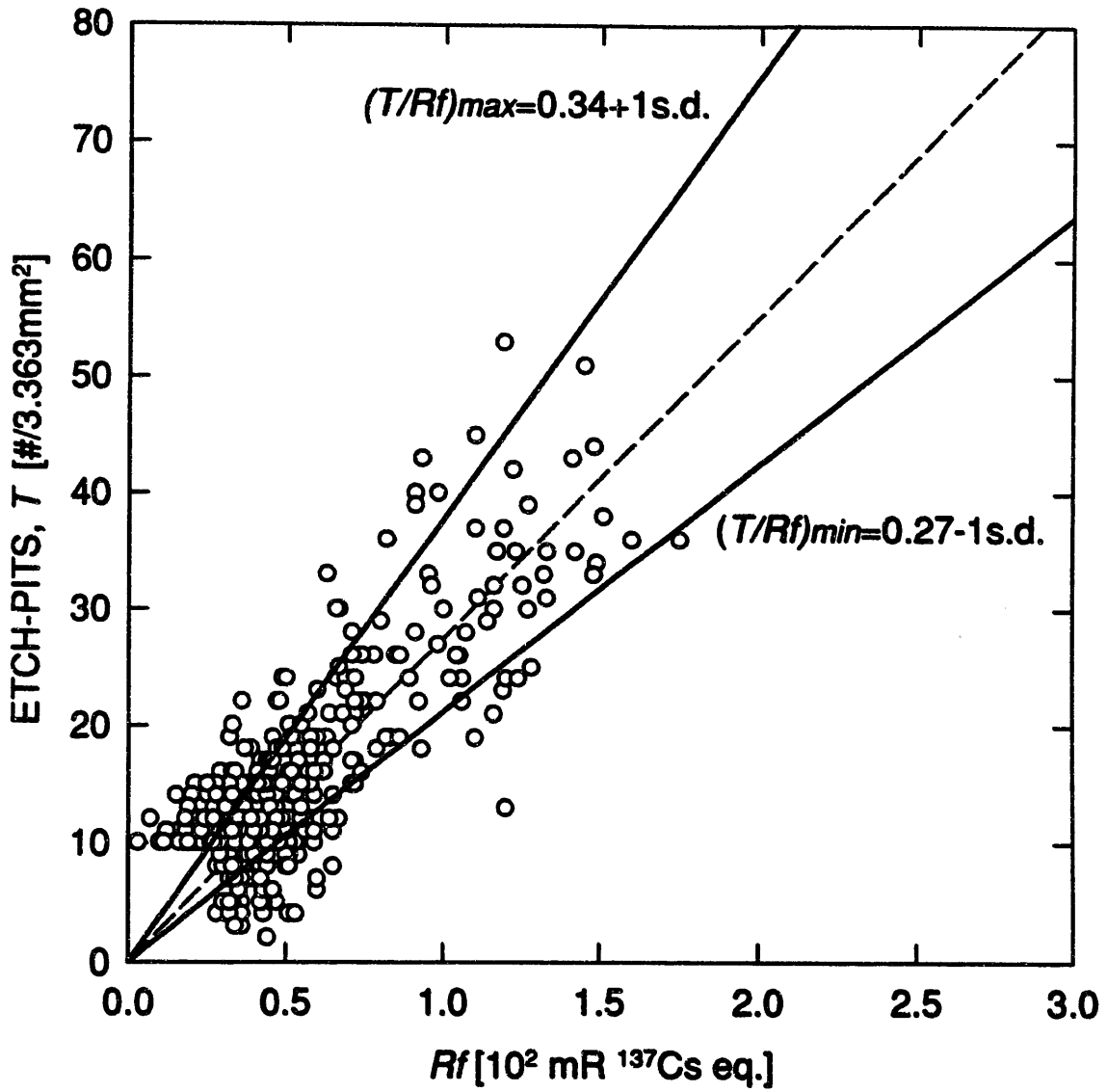


図5-9 フィールド照射試験で得られた Rf/T 比の実験誤差を含めた最大値と最小値(実線)と作業者の被ばくデータの比較

第6章 考察

第4章で示した作業者の被ばくデータの解析結果と第5章のフィールド試験で得られた結果を比較した結果について考察する。

(1) TLDバッジの発光関係、固体飛跡検出器の応答の関係

フィールド試験によって得られたTLDバッジの各エレメント間の発光関係、及びTLDバッジと固体飛跡検出器の相互関係は、第4章の作業者の被ばくデータの解析結果とほぼ一致した。このことは、フィールド試験を実施した場所の放射線場が、作業者が通常作業を行っているような場所の放射線場を十分に代表していることを示しており、逆にフィールド試験で得られた種々の知見が他の区域での放射線作業にも適用することが可能であることを示唆している。

また作業者の被ばくデータの解析結果及びフィールド照射試験で得られた T/Rf が約0.3程度になるということの量的な意味についてであるが、第4章でも述べたように ^{252}Cf 線源をアクリル平板(30~80mm)で遮蔽して行った実験では作業者の被ばくデータの解析結果、あるいはフィールド照射試験で得られた値を再現しなかった。これは ^{252}Cf 線源をアクリル板で遮蔽した場と、実際の作業環境下の中性子エネルギー分布の違いよりもむしろ方向分布の違いの方が主要な原因であり、実作業環境の放射線場の場合には様々な方向から中性子線が入射するため固体飛跡検出器の方向依存性によって T の値が減少し、さらに室内散乱線の寄与によって Rf の値が増加することで定性的には説明できると考えられる。

^{252}Cf 線源と簡単な遮蔽体とを組み合わせた場を用いて中性子の入射方向による T/Rf の値の変化の傾向を調べたり、モンテカルロ輸送計算コード等を用いてグローブボックス近傍での放射線場の詳細な分布等を計算し、実験から得られる情報との比較を行うなど、 T/Rf の値の定量的な説明を今後行う必要がある。

また、第4章の作業者の被ばくデータの解析で用いたデータは、そのほとんどが製造課に所属する作業者のものであり、他の部署に所属する作業者の被ばくデータ数は圧倒的に少ない。そのため、製造課とそれ以外の部署の被ばくデータの解析から得られる情報が一致するかどうかについては、今回の解析結果だけでは明確なことは言えない。

中性子線による被ばく低減対策について検討するとき、作業環境の遮蔽の状況、中性子エネルギー分布などの情報と、TLDバッジによる線量当量評価値との直接の関連づけは不可欠であり、他の部署や作業区域でも同様のフィールド照射試験を行い、 T/Rf の値の作業場所などによる変化等を調べていく必要がある。

(2) 換算係数 K_f の値の定量性に関する議論

TLDバッジの高速中性子線量当量換算係数の値の妥当性について検討した結果、あくまでもボナー球から求めた周辺線量当量との比較ではあるが、現行の換算係数 $K_f = 6.4$ は周辺線量当量を極端に過小評価することなく、特にMOX燃料製造工程では個人の線量当量として十分に妥当な線量当量を評価することができる値であるとした。ただし、その係数の値の定量的な面ではやや議論が不十分であったため、さらに検討を行った。

今回フィールド試験を行った場に対する換算係数 K_f の値を、第2章で示した換算係数 K_f の2種類の計算方法を用いて試算した。ただし、これらの方法の前提条件である“面平行入射あるいは中性子線の前方性が十分に強いこと”は今回の試験では満足されておらず、それを無視した計算結果であるため、ここで求めた値にはかなりの不確かさが含まれている。

また、(2-3)式を一部修正した(2-3')式による計算も今回試みた。胸部と背面部に装着した個人線量計へ入射する中性子線の応答への寄与と、それぞれの部位での線量当量とが比例関係にあるという仮定を用いた計算である。

$$K_f' = \frac{H_f'}{R_f(\text{chest}) + R_f(\text{back})} \quad \dots(2-3')$$

$R_f(\text{chest})$: 胸部に装着したTLDバッジから得られる高速中性子線取り線量

$R_f(\text{back})$: 背面部に装着したTLDバッジから得られる高速中性子線取り線量

計算結果を表6-1に示す。胸部に装着したTLDバッジの測定量と周辺線量当量から(2-3)式を用いた計算結果は、現行の換算係数よりもやや大きめの値を与えている。これは、背面から入射する中性子線の線量当量への寄与分も含めた形で換算係数を求めているためであり、このようにして求めた換算係数の値は実験的に得られる値の上限に相当すると考えて良い。また、(2-3')式による計算結果では、逆に現行の換算係数よりもやや小さな値となった。ファントムに対して前方と後方から入射する中性子線がそれぞれの部位でのTLDの応答と線量当量に同等の寄与を与える、と言う仮定を行った計算であるが、5-2節で述べたように背面部から入射する中性子線の方がややスペクトルが軟らかいと予想されるので、その影響を受けた形でこの場合はやや小さな値となっている考えられる。

おそらく個人の線量当量を求めるための真の換算係数の値は、(2-3)式と(2-3')式から求めた値の中間的な値になると考えられ、現行の換算係数の値の妥当性を裏付ける結果になっている。

一方、(2-4)式を用いて、実測した中性子スペクトルがファントムに面平行に入射す

るという仮定を行って求めた換算係数の値は4.9と現行の値6.4よりも小さい。ただし、そもそも計算に用いたTLDバッジの応答関数[15]は単色中性子照射実験の値との比較からファクター2程度異なっていること[17]、面平行入射でないにも関わらず面平行入射を仮定して計算をするという方法論に定量的な意味を見いだせないこと、など現行の換算係数の値との相違を議論するにはあまりに不確定な要素が多く、従ってここでは定量的な議論は行わない。

また、 T/Rf の値だけから簡便に換算係数を求める方法である(3-2)式についても検討を行っており、表6-1に同様にその計算結果を示した。この方法は表に示したように、他の検出器による測定値（線量当量や中性子スペクトル）を介在させたりする必要のない換算係数の計算方法であるが、胸部、背面部ともに現行の換算係数の値よりも約30%小さな値となった。この理由として、(3-2)式は中性子線が面平行に入射するという条件でもともと定めたものであり、前述したように実際の作業環境下では多方向からの中性子線の入射により、面平行入射条件に比べて T/Rf の値が小さくなっているため、と考えられる。

表6-1 換算係数 Kf の試算結果

計算方法	換算係数 Kf [$\mu\text{Sv/mR } ^{137}\text{Cs eq.}$]	前提条件
(2-3)式 胸部 (背面部)	7.5 (22.1)	あくまでも周辺線量当量との比較
(2-3')式	5.4	胸部・背面部のTLDバッジの応答とその部位での線量当量が比例
(2-4)式	4.9	面平行入射を仮定
(3-2)式 胸部 背面部	4.8 4.1	なし

参考までに図6-1に、これまでに実施したフィールド試験から実験的に得られた換算係数（すなわち(2-3)式を利用）と計算によって求められた換算係数（(2-4)式を利用）、及び本フィールド試験の結果得られた値を中性子場の平均エネルギーの関数として示す。ここで使用したデータは、宮部らがプルトニウム第二開発室で実施した試験(●印)[5]、東北大学-動燃事業団の共同研究によってプルトニウム第二開発室で実施した試験(▲印)[20]、及び岩井らがプルトニウム第二開発室及びプルトニウム転換技術開発施設で測定した中性子スペクトルを用いて、百瀬らが(2-4)式から計算した結

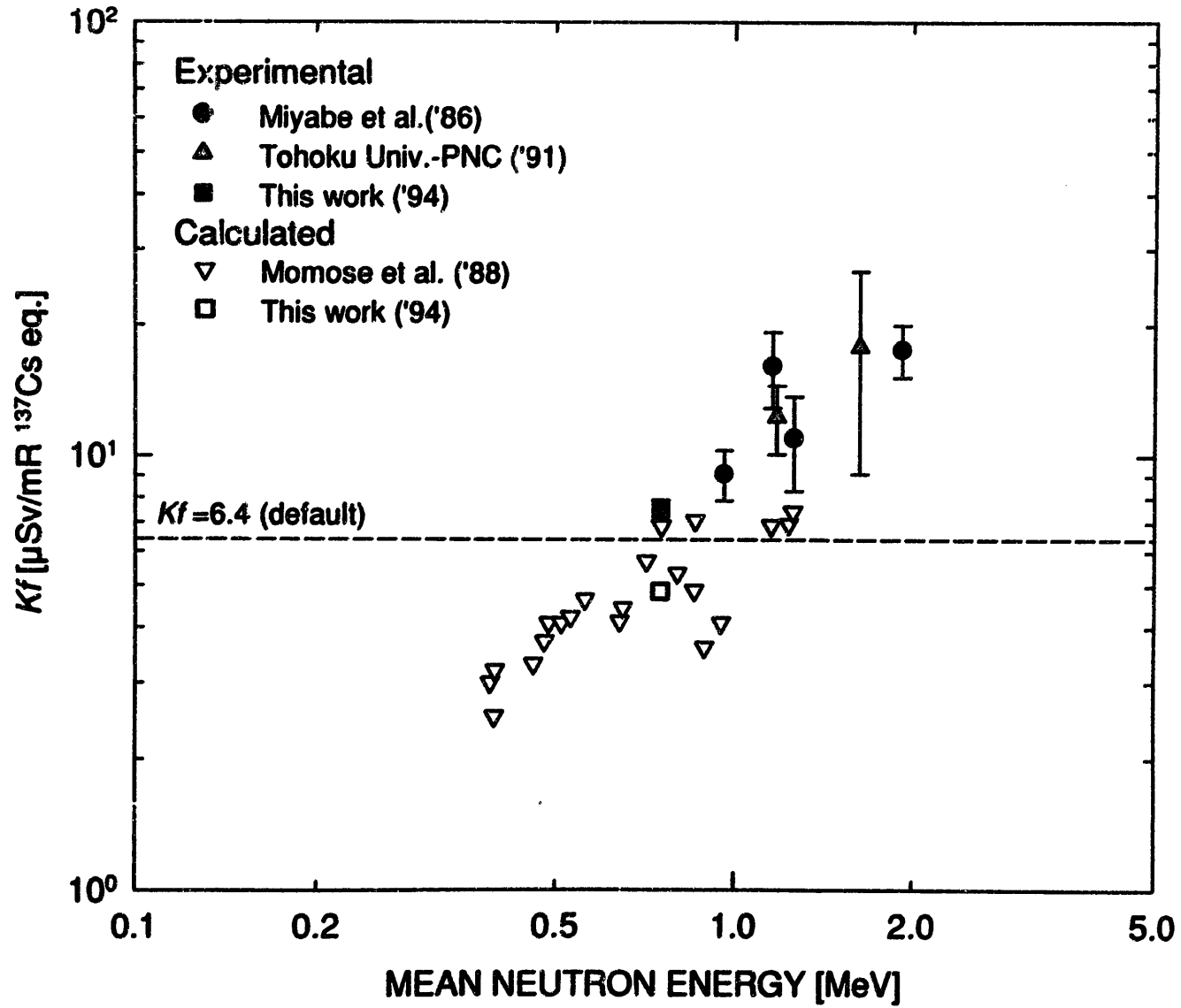


図6-1 これまでに実施したフィールド照射試験及び計算によって求められたTLDバッジの高速中性子線量当量換算係数の値と中性子場の平均エネルギーの関係

果（▽印、ただし入射方向不明の中性子が人体に対して面平行に入射することを仮定）[6]である。これら結果のうち、フィールド試験の結果については補遺Eにまとめた。

宮部らが行った実験値のうち平均エネルギーが高い側の3点、及び東北大学と動燃事業団の共同実験（2点）は、含鉛アクリルなどの遮蔽が施された、いわゆる通常のグローブボックス近傍で実施した試験の結果ではなく、むしろ遮蔽が薄い場所で実施したものであり、現行の換算係数よりも値が大きくなっているのは中性子線のエネルギー分布の違いによるものである。

また、実測した中性子スペクトルが面平行にファントムに入射するとして百瀬が計算した値は、現行の換算係数よりも小さな値となっている。今回のフィールド試験で測定した中性子スペクトルを用いて同様の方法で計算して求めた換算係数の値（□印）が、フィールド試験で得られた値（■印）よりもかなり小さな値になっていることを考慮すると、百瀬の計算値は全体的にやや過小評価であり、中性子線の方向分布を考慮すれば現行の換算係数と同程度の値になると予想される。

（3）換算係数の方向依存性の補正の考え方に関する議論

表5-6には、 ^{252}Cf による面平行ビームで校正した場合の固体飛跡検出器による高速中性子線1cm線量当量の値も括弧書きで示したが、胸部と頸部につけた固体飛跡検出器の値はボナー球の値の約2/3であり、TLDバッジの場合に比べるとやや極端な過小評価である。本フィールド試験を実施した場合は、100keV以上の中性子線が線量当量の90%以上を占めており、固体飛跡検出器が感度を有しない熱外～100keV領域の中性子線による影響とは考えられない。背面部に装着した固体飛跡検出器にもある程度のエッチビット数が検出されたといえることなどから、固体飛跡検出器の方向依存性が線量当量の過小評価の原因と考えられる。

現在動燃が独自に使用している固体飛跡検出器の換算係数は、 ^{252}Cf の面平行入射条件で校正した値の約1.5倍であり、もともと固体飛跡検出器の方向依存性の補正も含んだ値として設定している。図4-15に示したようにTLDバッジと固体飛跡検出器による中性子線量当量評価値はほぼ一致しているので、同様にTLDバッジの高速中性子線量当量換算係数 K_f の中にもTLD固有の方向依存性の補正が含まれているものと考えて良い。TLDバッジの方向依存性による換算係数の補正量の値を厳密に求めることは難しいが、図2-5に示すようにTLDバッジは固体飛跡検出器ほど方向依存性は大きくはないので、1.5よりも小さい。

個人線量計の評価対象として如何なる線量当量を想定するのかにもよるが、第2章で述べた「個人線量当量の評価対象としての線量当量」の定義を考えたとき、中性子線の入射方向が不明な場における個人線量計の方向依存性の補正のための約1.5（TLD

バッジの場合はそれよりもやや小さい) という係数は、安全側の係数ではあるが、安全すぎる値ではなく、妥当な値と考えると良いと考えられる。

(4) 換算係数 K_f の放射線場の違い等による変動

作業者の被ばくデータの解析結果から、 T/Rf の値が±30%以内でほぼ一定であることが判明しているが、これは作業環境の中性子線のエネルギー分布などが作業場所に依らず一定であること、また仮に局所的にエネルギー分布に変化があったとしても、それは現行の換算係数の値を著しく変えなければならない程度ではないことを示している。このことに関しては、今後さらにフィールド試験等を実施し確認を行っていく必要があるが、図3-3に示すように T/Rf と換算係数 K_f は良好な比例関係にあるので、 T/Rf の値の変化量とTLDバッジの換算係数の値の変化量とは1:1の対応を持つと考えて良く、プルトニウム燃料を取り扱う施設(特にMOX燃料製造工程)の場合、作業場所の放射線場の状況等に依存して変化する換算係数 K_f の値の不確かさは±30%と程度と予想される。

(5) 着用条件及びフェーディングによる換算係数 K_f への影響

TLDバッジは、着用条件(体表面からの距離や傾き等)の違いや、またフェーディングの影響などにより、応答が変化することが分かっている[1]。一方、固体飛跡検出器の場合、TLDバッジと異なり着用条件やフェーディング等の影響などによりその応答が変化することはほとんどない[21]。第4章で示した作業者の被ばくデータの解析結果では T/Rf がほぼ一定であることが判明しており、このことから着用条件やフェーディングによるTLDバッジの応答の変化(特に変化の個人差)は比較的小さいと考えられ、仮に変化があったとしてもそれはほぼ一定の割合の変化量であると考えられる。

図4-8に示した T/Rf の分布の広がり(±30%)は、前述したように中性子エネルギー分布や方向分布等の違いによる変動と、着用条件やフェーディング等による変動の両者を含んだものであるが、それらを分離して厳密に評価することは極めて困難である。ただし、 T/Rf と換算係数 K_f の値とが線形の対応を持っていること、表2-3から中性子エネルギー分布等の方が着用条件やフェーディングによるものよりも K_f の値の変化に影響することなどを考慮すると、着用条件やフェーディングによる影響を含めた上で換算係数 K_f の不確かさは±30%程度と考えると良いであろう。

ただし、今回の被ばくデータの解析では一ヵ月管理の作業者についてのみ実施しているが、よりフェーディングの影響が大きいと予想される三ヵ月管理の作業者についても同様な解析を行ってみる必要があるだろう。

(6) エリア情報との関連性

今回のフィールド試験では、自由空間中での線量当量率の測定に電離箱サーベイメーター及びレムカウンターを使用した。レムカウンターの計数率から求めた中性子線の線量当量率はボナー球による値とほぼ一致し、またTLDバッジによる中性子線量当量ともほぼ一致したが、 γ 線の場合には鉛エプロンの効果等を考慮に入れた上で、TLDバッジから求めた線量当量値と比較する必要がある。本試験では、電離箱サーベイメーターを鉛エプロンで覆った場合と覆わない場合とを、それぞれ胸部と頸部の線量当量率とみなして不均等被ばく時の実効線量当量を評価する方法について検討を行った。表5-4に示したようにTLDバッジ及び電離箱サーベイメーターから求めた不均等被ばく時の実効線量当量の値は極めて良く一致した。

また、電離箱サーベイメーターやレムカウンターなどから得られる作業環境中での中性子線と γ 線の1cm線量当量の比は、表6-2に示したように鉛エプロンの外側に装着したTLDバッジから求めた γ 線の1cm線量当量と鉛エプロンの内側（あるいは外側でも良い）に装着したTLDバッジから求めた中性子線の1cm線量当量の比に近い結果となった。本結果については、個人線量計とサーベイメーターなどのエネルギー特性や方向特性等の違い、あるいは評価対象量の定義の違いなどによってそれら値が一致しない場合もあると考えられるが、少なくともエリアの情報と個人の被ばく状況や個人線量計による線量当量評価値とを関連づける一つの目安になると考えられる。

第4章の作業者の被ばくデータの解析では、不均等被ばく管理用のTLDバッジについては解析の対象外としたため、エリア情報と直接比較できるような中性子線/ γ 線の線量当量比は不明である。参考までに平成3年度から平成6年度までにTLDバッジの臨時測定を行った作業者（製造課72人、転換課4人）について胸部の中性子線1cm線量当量と胸部及び頸部の γ 線1cm線量当量とを比較した結果を図6-2に示す。胸部の γ 線と中性子線の線量当量はほぼ同程度であるが、胸部の中性子線1cm線量当量に対する頸部の γ 線1cm線量当量の比は約2~6と広がっていることが分かる。なお、ここで示した臨時測定を行った作業者が着用したTLDバッジのN2, N3, N4の関係は、図4-3に示した全作業者に対する関係と一致していることを予め確認している。

表6-2 中性子/ γ 線量当量比におけるTLDバッジとサーベイメーターの比較

Hf/Hg の評価部位	Hf/Hg (TLDバッジ)	ボナー球/電離箱サーベイメーター	
		(鉛エプロン無し)	(鉛エプロン有り)
胸部/胸部	1.01±0.17		
頸部/頸部	0.44±0.01	0.68	1.28
胸部/頸部	0.47±0.03		

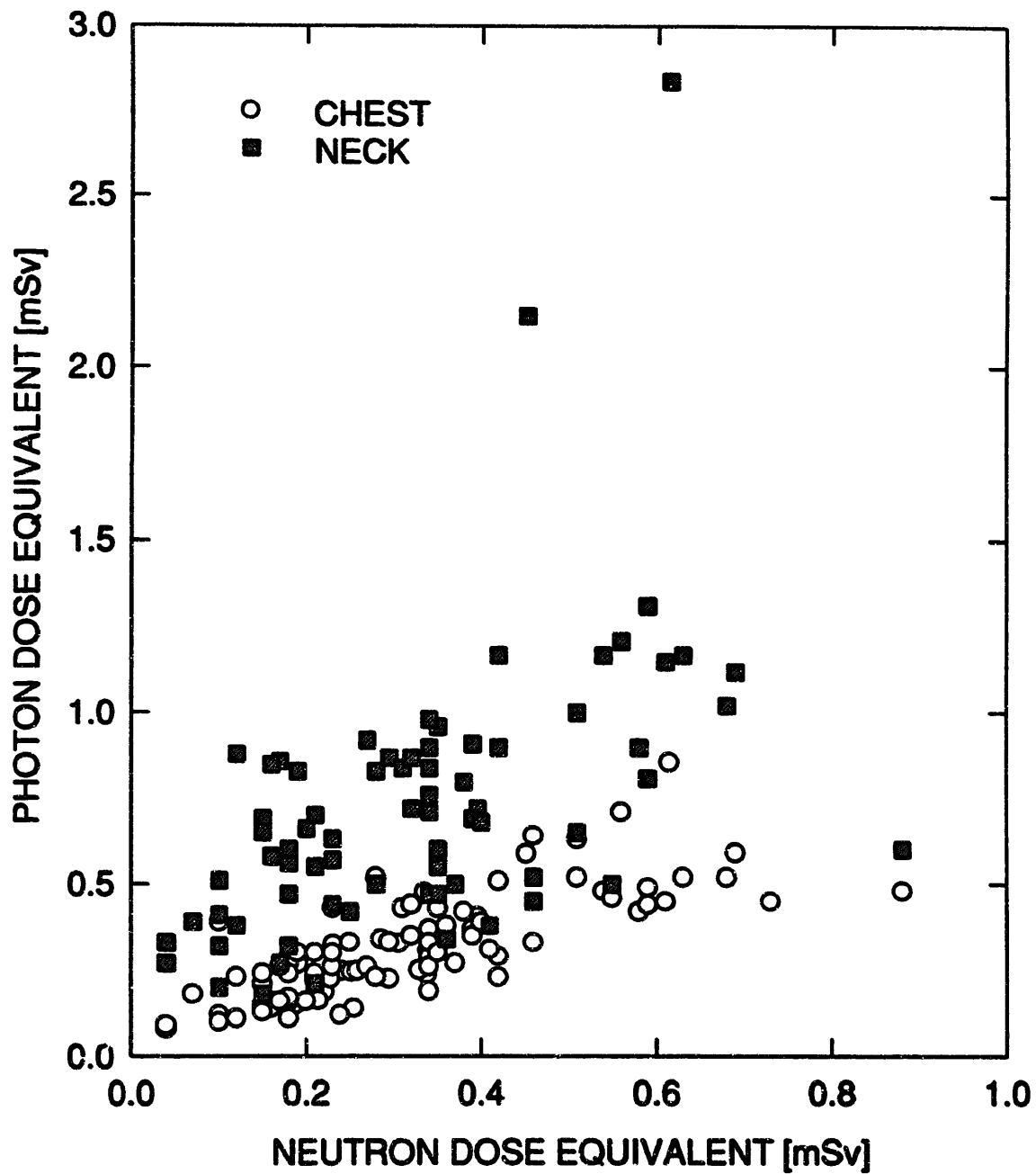


図6-2 胸部の高速中性子線1cm線量当量と胸部・頸部の γ 線の1cm線量当量の関係
(平成3年から平成6年に臨時測定を行った者のデータ)

(7) 背面部被ばくに関する検討

胸部と背面部を比較したとき、背面部の1cm線量当量は γ 線、中性子線共に胸部のそれの約30%であり、その割合はTLDバッジ、固体飛跡検出器ともに同様であった。

特に中性子線については、 T/Rf 及び $N2, N3, N4$ の発光関係には胸部と背面部で大きな違いが見られないこと等から、ファントムに対して前方から入射する成分と後方から入射する成分では中性子エネルギー分布に極端な相違が無いこと（ただし、背面入射成分の方がやや軟らかい分布を持つ）、また前方から入射した中性子がファントム中で減速され透過した成分は背面部に装着したTLDの応答にあまり寄与していないことなど、が推定できる*。

また、今回フィールド試験を実施した場所のように、大型グローブボックスが連立して設置されているような作業条件では、背面部からの被ばくについてどのように考えるかを今後議論する必要がある。

草間らは、原子力発電所の定期検査期間中に作業者が被ばくした胸部と背面部の線量の関係について調査を行い、身体前面に対する身体後面の γ 線の線量当量の比は0.31~1.34（平均0.85）であったと報告している[35]。

今回のフィールド試験結果は背面部/胸部の線量当量比は約0.3であり、草間らの報告ほど背面部の被ばくは大きくない。ただし、このような被ばくの形態は、一種の“不均等な被ばく”の条件にも該当すると考えられ、鉛エプロン等防護衣の着用に伴って体幹部が“不均等な被ばく”を受けた場合の個人モニタリングの方法と同様に、胸部に装着した個人線量計による線量当量評価値が十分に実効線量当量よりも安全側であるか否かが最も重要な論点になる。（草間らの報告では、身体前面と同程度の身体後面の被ばくがあった場合の、個人の線量当量のモニタリング方法については論じていない。）

ただし、背面部/胸部の線量当量比が0.3程度であれば、現在の胸部に付けた個人線量計を用いて、その着用者の被ばく線量当量を評価したとしても著しく過小な評価にはならないと考える。むしろ、これには定量的な説明が必要となるわけであるが、作業区域と作業内容を類型化をするなどして作業者の胸部と背面部などの被ばく状況に関する調査を行い、実効線量当量を過小評価することがないように換算係数を設定（あるいは個人線量計の着用基準）するための方法論を確立する必要があるだろう。

なお、こうした被ばく形態での実効線量当量の定量法について、補遺Fで一部新しい試みを行った。

* ファントム中を透過した成分が背面部のTLDバッジに与える影響の割合については、ファントムの種類に依存することが百瀬らの実験[17]から判明しており、従ってファントムの種類によっては実験結果が変わってくる可能性がある。ただし、作業者の被ばくデータの解析結果では T/Rf がほぼ一定であることから、個人線量計の着用面の反対側から入射する中性子線によるTLDバッジへの応答への影響は小さいと言える。

(8) 固体飛跡検出器の運用方法

平成5年度のプルトニウム燃料施設の作業者の被ばくデータの解析結果からTLDバッジと固体飛跡検出器からそれぞれ求めた高速中性子線の1cm線量当量はほぼ一致しており、TLDバッジによる高速中性子線量当量の評価精度の検証のためという固体飛跡検出器の当初の使用目的は十分に果たしたと考える。

Los Alamos国立研究所では、TLDアルベド線量計を用いて作業者の被ばくする中性子線量当量の評価を行っているが、ここ10年間にわたるグローブボックス遮蔽の強化によって作業環境の中性子エネルギー分布が大きく変化し、線量計の換算係数の値を大幅に変えざるを得なくなった[36]と報告している。動燃事業団においても、今後高次化プルトニウム燃料の利用やそれによる被ばく低減のための遮蔽の強化などによって、作業環境の中性子のエネルギー分布等が変化することが十分に予想され、現在使用している換算係数の値が妥当なものであるかどうかを日々確認していくことが必要となるであろう。作業環境の放射線場の状況が変わる都度、フィールド照射試験を実施するなどして、換算係数を再決定することも重要であるが、本研究結果から T/Rf が中性子のエネルギー分布と換算係数の値の変化を表す良い指標となることが判明している。

固体飛跡検出器の今後の運用方法を

- (1) TLDバッジとのを同時着用を継続して行い、
 - (2) T/Rf が一定の値に保たれているかどうかを確認するための、
 - (3) 相対モニターとして使用する
- ことを提案する。

こうした運用の方法は、TLDアルベド線量計と固体飛跡検出器を組み合わせた一種の複合型個人線量計と言えなくもない。複合型線量計は、熱中性子から数MeVまでの幅広いエネルギー領域にわたって、線量当量に対して比較的平坦な応答を持つ線量計であるが、二種類の個人線量計を取り扱うため管理業務が複雑化すること、個人線量計の単価が高くなること、固体飛跡検出器の場合線量当量を算定するまでにやや時間がかかること、線量計の変更に伴う個人被ばく管理システム全体の見直しが必要となること、など多くの問題点がある。

一方、固体飛跡検出器を個人線量計としてではなく相対モニターとして運用する方法の場合は、同時着用はあくまでも一部の作業者についてであり個人線量計の単価はそれほど高額にはならず、また個人被ばく管理業務とは全く別個に運用することができるので、上述した種々の問題は生じない。現在の個人線量計の管理や運用の形態を変更することなく、中性子エネルギー依存性が大きいというTLDバッジの欠点を補うこ

とが可能であり、通常の複合型個人線量計とは全く異なる運用の方法と言える。

なお、固体飛跡検出器を相対モニターとして利用するには、その製造ロット間の感度差が小さいことを確認しておく必要がある。そのため、現在同時着用している固体飛跡検出器の一部について、 ^{252}Cf 線源などを用いた品質管理のための照射試験を平成7年10月より開始した。

(9) 個人被ばくデータの長期的解析

本報告書で示したように、作業者の被ばくデータを用いて、統計的な種々の解析を行う方法は、作業内容に応じて被ばく形態を類型化したり、長期間にわたる作業環境中の放射線場の定性的な変動の傾向等を知る上で極めて有効な方法である。

補遺Gに平成3～6年度に作業者が実際に着用した個人線量計から得られるデータを用いて、 T/Rf の関係等の推移をまとめた。今後、こうした解析を継続して行い、また放射線管理部門等に随時報告していく予定である。

第7章 結論

プルトニウム燃料取扱施設（特に製造工程）で放射線作業を行う作業者が実際に着用したTLDバッジと固体飛跡検出器の応答を用いて解析した結果（統計解析手法）と、実際の作業環境で実施した個人線量計のフィールド照射試験の結果（実験手法）を結びつけるという、従来に無い全く新しい方法から、次のような結論が得られた。

- (1) 中性子エネルギー応答特性等が全く異なるTLDバッジと固体飛跡検出器の応答の間には極めて良好な直線関係があり、作業環境中の中性子エネルギー分布は作業場所に依らず比較的一定と考えられる。
- (2) 固体飛跡検出器のエッチピット数 T と、TLDバッジの高速中性子線に対する測定量である Rf の比である T/Rf が±30%の範囲内で一定である。
- (3) T/Rf は、作業環境の中性子エネルギー分布の硬さとTLDバッジの高速中性子線量当量換算係数 Kf を推定するための良い指標となる。
- (4) 実作業環境で、ファントムを用いたTLDバッジと固体飛跡検出器のフィールド照射試験を行った結果、現行の換算係数 Kf （ $=6.4 \mu\text{Sv/mR } ^{137}\text{Cs eq.}$ ）は妥当な値であり、また実効線量当量を十分に安全側に評価できる係数であることが確認された。
- (5) 換算係数 Kf は、作業環境の中性子エネルギー分布に応じて $6.4 \mu\text{Sv/mR } ^{137}\text{Cs eq.}$ を中心にある程度変化するが、その変化量は T/Rf の変化量とほぼ等価であり、従って換算係数 Kf の不確かさが±30%と見積もられる。
- (6) 固体飛跡検出器の同時着用は今後も継続して行うが、その運用法は相対モニタリング的なものとする。

TLDを用いたアルベド線量計の最大の欠点と一般に言われる、「中性子エネルギー依存性が大きいこと」は、取り扱う線源や周囲の遮蔽状況、作業形態などがある程度限定された動燃東海事業所の場合、それほど大きな問題にはならないと考えられる。ただし、今回解析に用いた被ばくデータの大部分はプルトニウム燃料工場製造課に所属する作業者のものであり、またフィールド照射試験も粉末調整工程だけでしか実施していないため、今後は他の部署あるいは作業区域でも同様なフィールド照射試験等を行い、TLDバッジの換算係数の値の妥当性等を調べていく必要がある。

また、本報告で実施した、「実際の作業者の被ばくデータの統計解析から得られる定性的な情報とフィールド試験で得られる定量的な情報とを組み合わせ、個人線量計による個人モニタリング手法のロジックを構築していく」という方法論は、個人線量計を用いる側にとって一つの理想的な運用形態と言える。今後は、TLDバッジと固体飛跡検出器の比較だけに留まらず、体幹部の不均等被ばく管理用のTLDバッジや指リン

グ線量計などのデータも含めて多様な解析を行うとともに、作業環境中の線量当量率、中性子/ γ 線混在比等のエリア情報との相互の比較を行っていくことも必要である。

今後ICRP1990年勧告による中性子線の放射線荷重係数の上昇と被ばく限度の引き下げ[37]によってより高いレベルでの線量当量評価精度、あるいは厳しい被ばく管理が要求される。また事業団内でも高次化プルトニウム燃料の使用に伴う中性子線による被ばくの増加が予想される中、作業者の被ばくする線量当量を評価・確認するためだけではない、作業者の被ばく低減あるいは防護の最適化に結びくような個人線量計の積極的な活用の方法を検討していくことは極めて重要と言えよう。

謝辞

ニュートラックバッジの測定に関して長瀬ランダウア株式会社の安淵四郎氏に多大な協力を頂きましたことを深く感謝します。

プルトニウム燃料第3開発室での実験におきまして、放射線管理第一課の吉田健一研究員、遠藤邦明研究員（現在、人形峠事業所安全管理課）他の方々、平成3～4年度及び6年度分のTLDバッジと固体飛跡検出器のデータを取りまとめる際に、線量計測係の椿谷美由研究員、斎藤祐介氏に多大な協力を頂きました。

また、MCNPによる計算で、東北大学CYRICの高田昌志氏に協力を頂きました。深く感謝します。

参考文献

- [1] 中田啓、石黒秀治、宮部賢次郎、野村幸広
「 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 蛍光体を利用した自動読取型TLDバッジの性能・評価」、
PNC N841-83-84、1983
- [2] 野村保、辻村憲雄、二之宮和重、空増昇
「TLDバッジ用素子の改良に関する研究」、PNC ZN8410 94-247、1994
- [3] 辻村憲雄、百瀬琢麿、野村保、空増昇
「改良型ホウ酸リチウムTLDの特性試験」、PNC ZN8410 94-401、1994
- [4] 中尾徳晶、辻村憲雄、中村尚司、百瀬琢麿、二之宮和重、石黒秀治
「 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 混合燃料および含鉛アクリル遮蔽体透過後の中性子スペクトル測定」、
日本原子力学会誌、12、57-68、1993
- [5] 大和愛司、宮部賢次郎、野村幸広、小泉勝三、鳥居建男、瀧田昭久
「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」、PNC SN8410 86-08、1986
- [6] 百瀬琢麿、伴信彦、二之宮和重、R.Choatcharoenrat
「中性子エネルギースペクトル及び線量測定法の確立」、
昭和63年度安全管理部研究開発成果報告書、PNC TN8410 89-050、1989
- [7] 辻村憲雄、百瀬琢麿、野村保
「東海事業所における体幹部不均等被ばく及び局部被ばく事例の解析」、
PNC ZN8410 94-337、1994
- [8] 例えば、L.Tommasino and K.G.Harrison
"DAMAGE TRACK DETECTORS FOR NEUTRON DOSIMETRY : 1. REGISTRATION AND
COUNTING METHODS", Radiat.Prot.Dosim., 10, 1-4, 207-217, 1985
- [9] P.F.Rose and C.L.Dunford(Ed.),
"ENDF102 DATA FORMATS AND PROCEDURES FOR THE EVALUATED NUCLEAR DATA FILE
ENDF/B-VI", BNL-NCS-44945, 1990
- [10] H.Schuhmacher and R.L.Siebert,
"QUALITY FACTORS AND AMBIENT DOSE EQUIVALENT FOR NEUTRONS BASED ON THE NEW
ICRU RECOMMENDATIONS", Radiat.Prot.Dosim., 40, 2, 85-89, 1992
- [11] 94年版原子力規制関係法令集、科学技術庁原子力安全局監修、大成出版
- [12] ICRU REPORT 33, "RADIATION QUANTITIES AND UNITS", 1980
- [13] 「個人被ばく管理マニュアル（外部被ばく管理）」、PNC PN8520 94-001、1993
- [14] 「平成4年度軽水炉改良技術確証試験等（日本型軽水炉確立調査（個人被ばく線
量測定方法等標準化に関するもの））に関する調査研究委託成果報告書」、日本保
安協会、1993

- [15] 岩井敏、林津雄厚
 「中性子エネルギースペクトル及び実効線量当量評価法の確立に関する研究」、
 PNC SJ1214 88-001、1988年
- [16] B.Burgkhardt and E.Piesh
 "FIELD CALIBRATION TECHNIQUE FOR ALBEDO NEUTRON DOSEMETERS"
 Proceeding of Sixth Symposium on Neutron Dosimetry, Neuherberg, 1987
- [17] 百瀬琢麿、伴信彦、二之宮和重、石黒秀治、中村尚司
 「校正用ファントムにおけるTLDアルベドレスポンスの測定」、
 動燃技報、81、46-49、1992
- [18] ニュートラックバッジサービス技術案内資料、長瀬ランダウア株式会社、1987
- [19] 安淵四郎；私信、1991
- [20] 中村尚司、辻村憲雄、中尾徳晶、百瀬琢麿、伴信彦、樹山寿子、二之宮和重、野村保
 「中性子個人被ばく線量測定・評価技術の高度化研究 東北大学-動力炉・核燃料開発
 事業団共同研究成果報告書」、PNC PY8601 94-001、1994
- [21] 大和愛司、小泉勝三、宮部賢次郎、井上誠、野村幸広
 「固体飛跡検出器による中性子線量測定法の開発(1)」、PNC SN8410 86-12、1986
- [22] JIS Z4510、「高速中性子用フィルムバッジによる線量当量算出方法」、1989
- [23] 江花稔、根本典雄、遠藤邦明
 「もんじゅ初装荷燃料製造に伴う被ばく実績と考察」、PNC ZN8410 94-307、1994
- [24] 百瀬琢麿、伴信彦、二之宮和重、石黒秀治；「個人線量計相互比較研究につい
 て」、動燃技報、81、50-53、1992
 「ORNL個人線量計相互比較研究の結果」（非公開）
- [25] D.E.Hankins
 "STUDIES OF NEUTRON DOSIMETRY AT THE LAWRENCE LIVERMORE LABORATORY",
 Proceeding of 5th ERDA Workshop on Personal Dosimetry, Washington, 1975
- [26] 鳥居建男、遠藤清志、桜井直之
 「中性子スペクトロメータの開発と中性子スペクトル及び線量当量の測定評価」
 PNC SN9410 88-118、1988
- [27] ISO 8529, "NEUTRON REFERENCE RADIATIONS FOR CALIBRATIONS FOR CALIBRATING
 NEUTRON-MEASURING DEVICES USED FOR RADIATION PROTECTION PURPOSES AND FOR
 DETERMINING THEIR RESPONSE AS A FUNCTION OF NEUTRON ENERGY", 1989
- [28] 中性子被ばく低減化検討ワーキンググループ（主査：都所昭雄）
 「中性子被ばく低減化検討結果報告書」、PNC ZN8410 91-077、1991
- [29] 中村尚司他；「遮蔽性能の実験的研究」、PNCT J2602 87-001、1986
- [30] 岩井敏、林津雄厚
 「中性子エネルギースペクトル評価法の開発」、PNC SJ1214 87-001、1987年

- [31] W.N. McElroy, S.berg, T.Crockett and R.G.Hawkins
"A COMPUTER AUTOMATED ITERATIVE METHOD FOR NEUTRON FLUX SPECTRA
DETERMINATION BY FOIL ACTIVATION", AFWL-TR-67-41, 1-4, 1967
- [32] 吉田健一、遠藤邦明、百瀬琢麿、松本盛雄、江花稔
「核燃料施設における中性子エネルギー評価法の確立(II) — Pu取扱施設における中
性子スペクトルの測定—」、
平成5年度安全管理部研究開発成果報告書、PNC PN8410 94-141、1994
- [33] 樹山寿子、伴信彦、二之宮和重、野村保、中村尚司、辻村憲雄
「TLDアルベド線量計のn/γ分離性能の評価」、日本保健物理学会第28回研究発表会
要旨集B-33、1993
- [34] 辻村憲雄、有澤潤、百瀬琢麿、篠原邦彦、野村保
「TLDバッジのn/γ分離性能と中性子線量当量評価値の誤差の定量に関する検討」、
(社内資料登録中)、1995
- [35] 草間朋子、福井徹、太田勝正、加藤命久、中野健二
「原子力発電所作業者を対象とした個人モニタの装着基準に関する実験的考察」
保健物理、22、259-264、1987
- [36] W.F.Harvey, J.M.Hoffman, J.L.Bliss and R.J.Brake
"PERSONNEL NEUTRON DOSIMETRY IMPROVEMENTS AT LOS ALAMOS NATIONAL
LABORATORY", LA-UR-92-2243, 1992
- [37] ICRP Publication 60, "RECOMMENDATIONS OF THE INTERNATIONAL COMMISSION
ON RADIOLOGICAL PROTECTION", 1990

補遺A 個人線量計の評価の対象とする線量当量に関する一考察

ICRUは、ICRPの1977年勧告を踏まえて放射線モニタリングに用いられる線量当量の体系を整理し、環境モニタリング用として周辺線量当量 $H^*(10)$ 及び方向性線量当量 $H'(10)$ ¹⁾、個人モニタリング用として透過性個人線量当量 $H_p(10)$ を定義した。

これらのうち周辺線量当量と方向性線量当量については、照射条件及びレセプター（ファントム）が厳密に定義され、これまで報告された計算例の一部がICRPによってデータ集としてまとめられている。一方、透過性個人線量当量（以下「個人線量当量」と言う）については、ICRUは「体表面から深さ10mmの点で定義される」としているだけで詳しい照射条件や人体形状等には言及していない。これは、個人線量当量はその人の体格などに値が依存するため、一義的な量として取って規定しなかった、あるいはできなかったためと考えられ、むしろ個人線量計による評価の目標量としての意味合いが強いように思われる。

国内では1987年に放射線による障害の防止に関わる諸法令が改正され、その中で中性子線などの強透過性放射線に対する環境モニタリング及び個人モニタリングのためのモニタリング量として1cm線量当量を規定しているが、本文中でも述べたように1cm線量当量はICRUの定義した周辺線量当量と量的に等価な量である。周辺線量当量（1cm線量当量）は、拡張・整列場という仮想的（計算するにあたって理想的）な放射線場で定義した量であり、本来は環境モニタリングにのみ適用される。一方、個人線量計の場合には、体表面のある一点に装着され、かつ多様な方向から放射線が入射する放射線場で使用されるため、周辺線量当量を定義する際の条件である拡張・整列場のうち、少なくとも整列場という概念は、個人線量計の測定対象量としてのモニタリング量を議論する上では適切ではない。より明瞭な表現をすれば、整列場以外での個人線量計による周辺線量当量の測定は、個人線量計のエネルギー応答特性等が理想的であるかどうか以前に物理的に不可能²⁾である。

しかし、国内法令では1cm線量当量をモニタリングの基準量としており、さらにその値を自由空間中の単位中性子フルエンス当たりの関数（数値表）で示している。物理的に測定が可能であるかどうかは別問題として名目上はそれを使わざるを得ないので、法令で言う1cm線量当量の意味を残しつつ、個人線量計による実測が可能（あるいは個人線量計による評価量が如何なる量に相当するかを説明できる）個人モニタリング量の定義を考える必要がある。

このとき条件として、

- 1) 1cm線量当量は中性子フルエンスに直接関連づけられた量であること。（法令告示別表第五の中性子フルエンス-1cm線量当量換算係数を用いること）

2) 法令改正に伴って発行された解説書（外部被ばくにおける線量当量の測定・評価マニュアル、原子力安全技術センター）に、「恒常的に背面が前面より明らかに多く（放射線に）照射される場合には背面に（個人線量計を）装着する..」と言う記述があること。

が挙げられるので、個人線量計の評価対象量である1cm線量当量とは、

「個人線量計の装着位置（面）に対向して入射する中性子フルエンスに法令告示別表第五の中性子フルエンス-1cm線量当量換算係数を乗じて求めた量」

以外の定義は考えにくい。3)

また、現在では、拡張場のみで定義される個人モニタリング量（方向性線量当量、あるいはICRU組成の平板ファントムで定義される線量当量）を個人線量計の評価対象量及び校正基準量として用いるという提案もなされてきており、今後こうした量が個人モニタリングに利用される方向に進むことが予想される。上記の定義による個人モニタリング量は、個人線量計の評価対象量が明確に定義されるまでの暫定的なものと言える。

表A-1 個人線量計の評価対象量としてあげられる種々のモニタリング量

	周辺線量当量 $H^*(10)$ (1cm線量当量)	方向性線量当量 $H'(10, \alpha)$	校正用の 個人線量当量 $H_{slab}(10, \alpha)$	個人線量当量 $H_p(10)$
放射線場	拡張・整列場	拡張場	拡張場	(拡張場a)
レセプター	ICRU球	ICRU球	ICRU組成の 平板ファントム	人体
線量当量を 定義する点	拡張・整列場で 入射方向に対向 する半径上で表面 から深さ10mmの点	半径上で表面から 深さ10mmの点	表面から深さ 10mmの点	個人線量計を装着 した部位の深さ 10mmの点
計算例	ICRP51	Siebert et al.	Siebert et al.	-
モニタリングの 用途	環境用	環境用b 個人用	個人用	個人用

a. 必ずしも拡張場とは言えない場合もある。

b. 測定対象量が中性子線の場合は個人モニタリング用である場合が一般的である。

1) ICRU33(1985年)では、方向性線量当量 $H'(d, \alpha)$ を提案しているが、当時は主に β 線等の弱透過性放射線を対象としており、その定義される深さ d を0.07mmとしている。

2) レセプター上のある一点に装着した個人線量計の単位中性子フルエンス当たりの応答が、中性子のレセプター入射位置に関係なく一定である必要がある。これは明らかに不可能である。

3) 上記の定義はこれまでに明文化されていないが、暗黙の了解事項であったと思う。

補遺 B TS-16N とバリオトラックの感度比較

1986年頃から東海事業所では、長瀬ランダウア社(株)の固体飛跡検出器(ニュートラックバッジ)を一部の作業者の中性子被ばく線量当量評価に試験的に使用してきた。長瀬ランダウア社(株)ではニュートラックバッジの飛跡検出用プラスチック板として徳山曹達社製の「TS-16N」を使用してきたが、プラスチック板の原材料供給上の問題により、1990年半ばからフクビ工業社製の「バリオトラック(BARYOTRAK)」に切り替えている。そのため、両者の中性子線に対する感度の違いを実験的に把握する必要が生じた。

飛跡検出用プラスチック板として TS-16N とバリオトラックを使用した固体飛跡検出器について、加速器を用いた単色中性子照射試験及びプルトニウム燃料取扱施設での同時着用試験を実施し、プラスチック板の違いによる感度の変化を調べた。また、 ^{252}Cf 線源を用いてバリオトラックを用いた固体飛跡検出器について、その方向特性や照射量に依存したエッチピット数の統計変動について調べた。

B-1 単色中性子の照射試験*

(1) 実験方法

実験は東北大学工学部高速中性子実験室(FNL; Fast Neutron Laboratory)のダイナミトロン加速器を用いて行われた。照射した中性子エネルギーは、0.213、0.545、0.96、5.0及び15.0[MeV]の5点であり、そのエネルギーは飛行時間法によって決定した。固体飛跡検出器位置での中性子フルエンスは、 ^{235}U 核分裂計数管による絶対測定値に距離の逆自乗補正を加えて求めた。

各エネルギー点につき8個(TS-16Nとバリオトラックそれぞれ4個)の固体飛跡検出器を用い、TLDバッジケース内の臨界事故用インジウム片挿入スペース部分に2種類の固体飛跡検出器を1個ずつはめ込んだものをファントム表面から1.5cmに離れた位置に固定した。このとき使用したファントムは、PMMA平板ファントム(15×30×30cm)、楕円柱水ファントム(20×30×45cm)及び中空楕円柱水ファントム(外側20×30×45cm、内側10×20×40cm)の3種類である。ただし、中性子エネルギー0.213MeVではPMMA平板ファントムの場合しか照射を行っていない。

(2) 実験結果

表B-1(a)(b)に、それぞれTS-16N、バリオトラックを用いた固体飛跡検出器の3.363mm²当たりのエッチピット数、単位フルエンス当たりのエッチピット数及びエッチピット数-線量当量換算係数を記す。ここでの線量当量は、中性子フルエンスと法令

* 1990年12月に実施した。実験者：百瀬、伴、二之宮(安全対策課線量計測係)

表B-1(a) TS-16Nを用いた固体飛跡検出器の単色中性子に対する感度

NEUTRON ENERGY [MeV]	NEUTRON FLUENCE [n/cm^2]	DOSE EQUIVALENT [mSv]	PHANTOM	DETECTOR TYPE	NUMBER OF ETCH-PITS, T [$\#/3.363mm^2$]	AVERAGE NUMBER OF ETCH-PITS	ETCH-PITS PER UNIT FLUENCE [$T/(10^5n/cm^2)$]	ETCH-PITS TO D. E. CONVERSION FACTOR [$\mu Sv/T$]
0.213	1.26E+7	1.66	PMMA	TS-16N	233 216 230 220	225 \pm 8.1	1.78 \pm 0.06	7.4 \pm 0.3
0.545	2.09E+7	5.78	PMMA	TS-16N	445 482 498 483	477 \pm 22.6	2.33 \pm 0.11	12.1 \pm 0.6
0.545	2.24E+7	6.19	CAVITY WATER	TS-16N	507 436 518 457	480 \pm 39.3	2.14 \pm 0.18	12.9 \pm 1.1
0.545	2.22E+7	6.14	FULL WATER	TS-16N	423 413 487 454	444 \pm 33.4	2.00 \pm 0.15	13.6 \pm 1.0
0.96	1.89E+7	6.30	PMMA	TS-16N	471 494 508 455	482 \pm 23.6	2.55 \pm 1.25	13.1 \pm 0.6
0.96	1.26E+7	6.54	CAVITY WATER	TS-16N	391 486 473 410	440 \pm 46.6	2.25 \pm 0.24	14.9 \pm 1.6
0.96	1.90E+7	6.34	FULL WATER	TS-16N	403 475 471 432	445 \pm 34.2	2.34 \pm 0.18	14.2 \pm 1.1

表B-1(a) 続き

NEUTRON ENERGY [MeV]	FLUENCE [n/cm^2]	DOSE EQUIVALENT [mSv]	PHANTOM	DETECTOR TYPE	NUMBER OF ETCH-PITS , T [$\#/3.363mm^2$]	AVERAGE NUMBER OF ETCH-PITS	ETCH-PITS PER UNIT FLUENCE [$T/(10^5n/cm^2)$]	ETCH-PITS TO D.E. CONVERSION FACTOR [$\mu Sv/T$]
5.0	1.87E+7	7.07	PMMA	TS-16N	620 770	695±150	3.72±1.41	10.2±2.2
5.0	1.77E+7	6.69	CAVITY WATER	TS-16N	432 565 490 436	481±62.1	2.72±0.35	13.9±1.8
5.0	1.33E+7	5.03	FULL WATER	TS-16N	359 450 405 363	394±42.6	2.97±0.32	12.8±1.4
15.0	5.28E+7	29.0	PMMA	TS-16N	744 750 740 758	748± 7.8	1.42±0.01	38.8±0.4
15.0	6.42E+6	35.3	CAVITY WATER	TS-16N	439 498 447 472	461±32.0	7.19±0.50	76.5±5.3
15.0	3.32E+7	18.3	FULL WATER	TS-16N	452 475 427 418	443±25.7	1.33±0.08	41.2±2.4

表B-1 (b) バリオトラックを用いた固体飛跡検出器の単色中性子に対する感度

NEUTRON ENERGY [MeV]	FLUENCE [n/cm^2]	DOSE EQUIVALENT [mSv]	PHANTOM	DETECTOR TYPE	NUMBER OF ETCH-PITS ,T [# / 3.363mm ²]	AVERAGE NUMBER OF ETCH-PITS	ETCH-PITS PER UNIT FLUENCE [T / (10 ⁵ n/cm ²)]	ETCH-PITS TO D. E. CONVERSION FACTOR [$\mu Sv/T$]
0.213	1.26E+7	1.66	PMMA	BARYOTRAK	242 265 208 226	235±24.2	1.87±0.20	7.1±0.7
0.545	2.09E+7	5.78	PMMA	BARYOTRAK	482 479 375 475	453±51.9	2.17±0.25	12.8±1.5
0.545	2.24E+7	6.19	CAVITY WATER	BARYOTRAK	511 484 404 499	475±48.3	2.12±0.22	13.1±1.3
0.545	2.22E+7	6.14	FULL WATER	BARYOTRAK	465 484 399 438	447±37.6	2.01±0.17	13.7±1.2
0.96	1.89E+7	6.30	PMMA	BARYOTRAK	478 430 434 439	445±22.1	2.36±0.12	14.2±0.7
0.96	1.26E+7	6.54	CAVITY WATER	BARYOTRAK	450 503 437 457	462±28.7	2.36±0.15	14.2±0.9
0.96	1.90E+7	6.34	FULL WATER	BARYOTRAK	437 427 410 444	586±41.5	3.13±0.22	12.1±0.9

表B-1 (b) 続き

NEUTRON ENERGY [MeV]	FLUENCE [n/cm^2]	DOSE EQUIVALENT [mSv]	PHANTOM	DETECTOR TYPE	NUMBER OF ETCH-PITS , T [# / 3.363mm ²]	AVERAGE NUMBER OF ETCH-PITS	ETCH-PITS PER UNIT FLUENCE [$T / (10^5 n/cm^2)$]	ETCH-PITS TO D. E. CONVERSION FACTOR [$\mu Sv/T$]
5.0	1.87E+7	7.07	PMMA	BARYOTRAK	577 635 595 535	586±41.5	3.13±0.22	12.1±0.9
5.0	1.77E+7	6.69	CAVITY WATER	BARYOTRAK	483 556 551 551	535±34.9	3.02±0.20	12.5±0.8
5.0	1.33E+7	5.03	FULL WATER	BARYOTRAK	477 509 471 512	492±21.3	3.70±0.16	10.2±0.4
15.0	5.28E+7	29.0	PMMA	BARYOTRAK	924 927 966 856	918±45.7	1.74±0.09	31.6±1.6
15.0	6.42E+6	35.3	CAVITY WATER	BARYOTRAK	598 590 599 538	581±29.1	9.06±0.45	60.7±3.0
15.0	3.32E+7	18.3	FULL WATER	BARYOTRAK	526 583 602 597	577±34.9	1.74±0.11	31.7±1.9

告示別表第5の単位フルエンス-1cm線量当量換算係数から計算した値である。

本文中の図2-7は、TS-16Nとバリオトラックを用いた固体飛跡検出器の単位フルエンス当たりのエッチピット数を比較した結果であり、水ファントム上に設置した場合のものである。中性子エネルギー15MeVでの百瀬と安淵の実験値の相違（約1.5倍）は、エッチング条件等が同一であるとするれば、中性子フルエンスの定量の違い、あるいは百瀬の実験では固体飛跡検出器をバッジケースの内部に入れているためケース材自体からの反跳陽子を検出しているためと考えられる。

TS-16Nとバリオトラックの感度を比較した結果を表B-2に示す。中性子エネルギー0.2~5MeVの範囲でファントムの種類によらず2つの固体飛跡検出器はほぼ同じ感度を持っていることがわかる。従って、平均中性子エネルギーが1~2MeV付近であるプルトリウム取扱施設作業環境においても、2つの固体飛跡検出器はほぼ同じ感度を持つと言える。

また、この実験ではTLDバッジの照射も同時に行っており、本文中で中性子エネルギー分布の硬いとTLDバッジの換算係数を推定するための目安として使用している T/Rf の値の中性子エネルギー依存性を表B-3に示した。

表B-2 TS-16Nに対するバリオトラックの感度の比

NEUTRON ENERGY [MeV]	RATIO OF ETCH-PITS (BARYOTRAK/TS-16N)		
	PMMA	CAVITY WATER	FULL WATER
0.213	1.05±0.11	-	-
0.545	0.95±0.12	0.99±0.13	1.01±0.11
0.96	0.92±0.06	1.05±0.13	0.96±0.08
5.0	0.84±0.19	1.11±0.16	1.25±0.15
15	1.23±0.06	1.25±0.10	1.30±0.11

表B-3 バリオトラックのエッチピット数とTLDバッジの高速中性子レスポンスの比

NEUTRON ENERGY [MeV]	T/Rf [(#/3.363mm ²)/(mR ¹³⁷ Cs eq.)]		
	PMMA	CAVITY WATER	FULL WATER
0.213	1.57±0.27	-	-
0.545	1.30±0.19	1.72±0.25	1.37±0.31
0.96	1.79±0.15	2.05±0.32	2.26±0.24
5.0	6.39±1.46	10.1 ±1.3	8.61±1.97
15	6.08±0.33	9.74±0.57	7.16±1.23

B-2 TS-16Nとバリオトラックの同時着用試験（プルトニウム燃料第二開発室）

(1) 実験方法

1990年12月～1991年1月の二ヵ月間にわたって、プルトニウム燃料第2開発室で作業する一ヵ月被ばく管理対象者（のべ100名）のTLDバッジにTS-16Nとバリオトラックそれぞれを飛跡検出用プラスチック板に使用した固体飛跡検出器を1個ずつ入れ、作業終了後、両者のエッチピット数の測定を行い、比較した。

(2) 実験結果

表B-4 (a) (b)にそれぞれ1990年12月、1991年1月の期間でのバリオトラックとTS-16Nのエッチピット数を示す。表の第7列は、TS-16Nに対するバリオトラックのエッチピット数の比である。どちらか一方でもエッチピット数が10個以上のもの（検出下限に相当、表中で太字で示した）についてのみ、以下議論を行う。

1990年12月期、1991年1月期におけるバリオトラック/TS-16Nエッチピット数の比は、それぞれ 0.8 ± 0.4 、 1.1 ± 0.6 となった。図B-1に2つの固体飛跡検出器のエッチピット数の比較を示すが、その直線性は決して良くない*。前節で記した単色中性子照射試験の結果から、バリオトラックとTS-16Nの中性子応答特性に大きな違いが無いことが判明しているため、今回の同時着用試験における2つの固体飛跡検出器のエッチピット数の相違は統計誤差などがその主要因と考えられる。従って、フィールド試験によって以前に定めたプルトニウム燃料製造施設用のTS-16Nの高速中性子線量当量換算係数の値 $22.0 [\mu\text{Sv}/(\#/3.363\text{mm}^2)]$ を、そのままにバリオトラック対しても継続して使用することは可能であると考えられる。

*、長瀬ランダウア社では、BARYOTRAKとTS-16Nのエッチピット数の相違が±30%を超えるものだけについて、エッチピット数の再計数を行っており、その計数値と比較結果（表の第7列の括弧中の値）も表B-4に示す。

「再計数を行った結果、±30%以内にはほとんど全て入った。」との報告を長瀬ランダウア社から受けているが、これは元来合わないものだけを作意的に抽出し、評価し直した結果に過ぎない。エッチピット数の統計誤差や計数時における数え落としによって、検出限界近傍での線量当量評価値が1.5～2倍程度変動する可能性があることを図らずもこの再計数の結果は示している。

表B-4(a) TS-16Nとバリオトラックの同時着用試験(1990年12月)

BARYOTRAK			TS-16N			[A]/[B]
NO.	COUNTED ETCH-PITS [A]	RE-COUNTED ETCH-PITS	NO.	COUNTED ETCH-PITS [B]	RE-COUNTED ETCH-PITS	
1	6		16	6		1.0
2	15		17	6	16	2.5(0.9)
3	7		20	3	8	2.3(0.9)
4	10		21	10		1.0
5	9		23	10		0.9
6	6		26	8		0.8
7	12		29	12		1.0
8	10		30	9		1.1
9	11		32	8	10	1.4(1.1)
10	2	4	33	6		0.3(0.7)
11	8	9	36	12		0.7(0.8)
12	8		37	11		0.7
13	2	4	39	5		0.4(0.8)
14	9		43	9		1.0
15	10	16	44	21		0.5(0.8)
16	6	8	45	9		0.7(0.9)
17	15		46	17		0.9
18	9		48	11		0.8
19	7	11	51	15		0.5(0.7)
20	4	9	52	12		0.3(0.8)
21	5	10	54	14		0.4(0.7)
22	3	7	56	8		0.4(0.9)
23	4	9	57	12		0.3(0.8)
24	5	10	59	11		0.5(0.9)
25	12		60	13		0.9
26	10		62	13		0.7
27	2	7	63	8		0.3(0.9)
28	12		64	16		0.8
29	12		65	11		1.1
30	13		66	11		1.2
31	10		67	14		0.7
32	6	11	68	10		0.6(1.1)
33	4		69	4		1.0
34	4	8	70	11		0.4(0.7)
35	4	9	71	13		0.3(0.7)
36	7	11	72	12		0.6(0.9)
37	15		73	13		1.2
38	12		76	8	13	1.5(0.9)

(continued)

BARYOTRAK			TS-16N			[A]/[B]
BARYOTRAK NO.	COUNTED ETCH-PITS [A]	RE-COUNTED ETCH-PITS	TS-16N NO.	COUNTED ETCH-PITS [B]	RE-COUNTED ETCH-PITS	
39	15	19	77	22		0.7(0.9)
40	14		78	17		0.8
41	9		80	12		0.8
42	4	7	82	11		0.4(0.6)
43	8		83	10		0.8
44	12		84	12		1.0
45	9	17	85	17		0.5(1.0)
46	14		96	17		0.8
47	8	11	92	14		0.6(0.8)
48	6	10	93	14		0.4(0.7)
49	9	14	94	17		0.5(0.8)
50	10		96	10		1.0
BARYOTRAK RE-COUNTED/COUNTED			TS-16N RE-COUNTED/COUNTED			[A]/[B] AVERAGE
1.7±0.3*			1.9±0.7*			0.8±0.4

(太字は、BARYOTRAKとTS-16Nの一回目の計数値のうち、どちらか一方でもエッチピット数10個以上であるものを対象とした。)

* 一回目と二回目の計数のうち、どちらか一方でもエッチピット数が10個以上である場合の比

表B-4 (b) TS-16Nとバリオトラックの同時着用試験 (1991年1月)

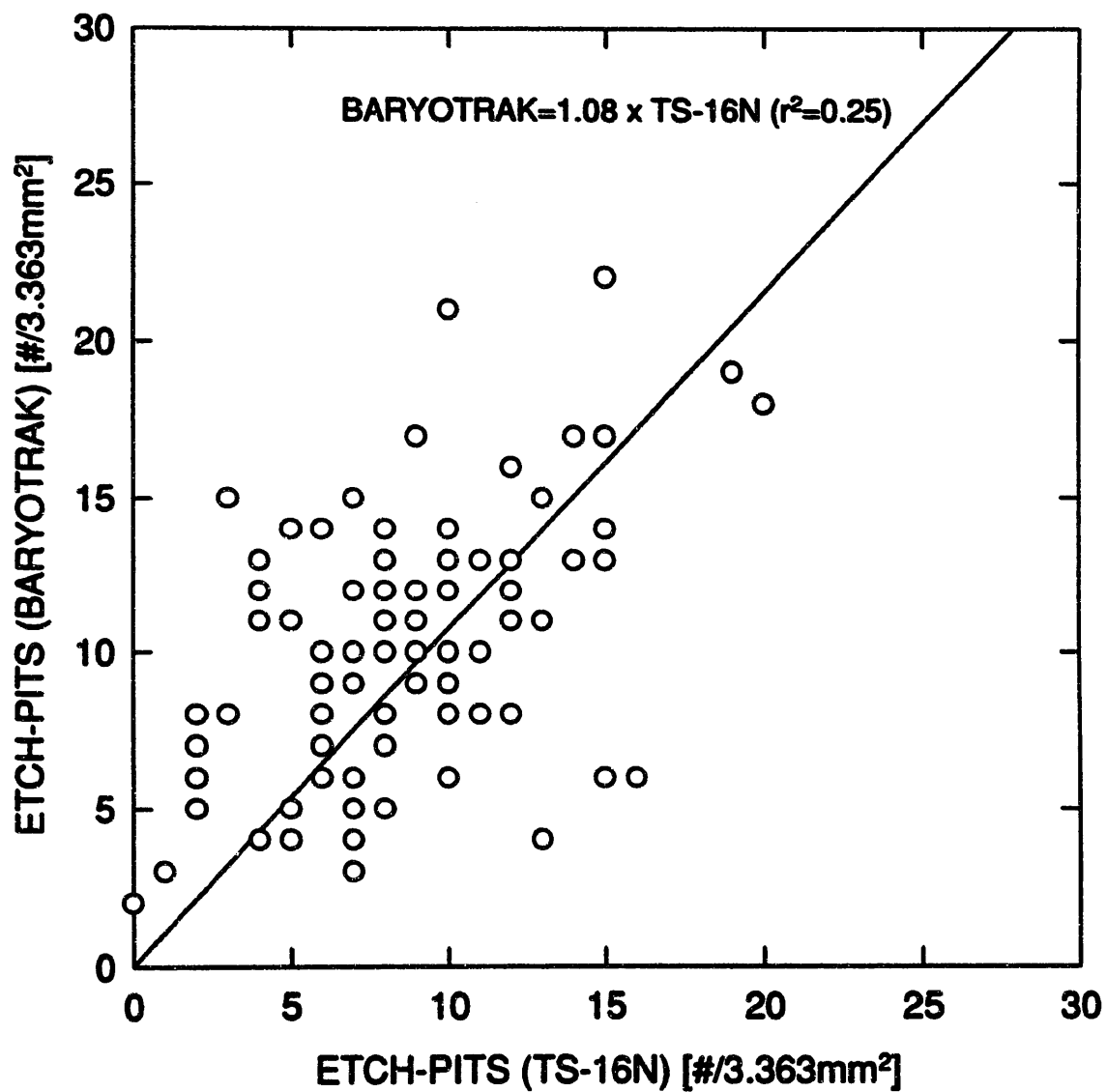
BARYOTRAK			TS-16N			[A]/[B]
BARYOTRAK NO.	COUNTED ETCH-PITS [A]	RE-COUNTED ETCH-PITS	TS-16N NO.	COUNTED ETCH-PITS [B]	RE-COUNTED ETCH-PITS	
1	7		14	4	10	1.8(0.7)
2	11		15	10		1.1
3	7		18	6		1.2
4	16		19	6	13	2.7(1.2)
5	10		21	12		0.8
6	14		24	13		1.1
7	12		27	12		1.0
8	8	11	28	12		0.7(0.9)
9	5		31	4		1.3
10	12		32	13		0.9
11	4		35	4		1.0
12	6	12	36	10		0.6(1.2)
13	1		38	3		0.3
14	6		42	6		1.0
15	11		43	10		1.1
16	7		44	5	8	1.4(0.9)
17	11		45	10		1.1
18	7		47	10		0.7
19	10		50	10		1.0
20	6		51	7		0.9
21	10		53	12		0.8
22	6		55	8		0.8
23	7	10	56	12		0.6(0.8)
24	5		59	5		1.0
25	5		60	5		1.0
26	7		62	6		1.2
27	11		63	8	13	1.4(0.9)
28	15		64	14	16	1.1(0.9)
29	8		65	12	12	0.7(1.0)
30	10		66	9		1.1
31	8		67	5	11	1.6(0.7)
32	10		68	6	9	1.7(1.1)
33	10		69	8		1.3
34	7		70	9		0.8
35	3	6	71	15		0.2(0.4)
36	20		72	18		1.1
37	8	13	73	13		0.6(1.0)
38	10		76	10		1.0

(continued)

BARYOTRAK			TS-16N			[A]/[B]
BARYOTRAK NO.	COUNTED ETCH-PITS [A]	RE-COUNTED ETCH-PITS	TS-16N NO.	COUNTED ETCH-PITS [B]	RE-COUNTED ETCH-PITS	
39	10		77	10		1.0
40	19		78	19		1.0
41	2	8	80	7		0.3(1.1)
42	10		82	6	10	1.7(1.0)
43	8		83	7		1.1
44	8		84	8		1.0
45	13		85	15		0.9
46	11		96	13		0.9
47	6		92	6		1.0
48	0		93	2		0.0
49	9		94	9		1.0
50	13		96	4	10	3.3(1.3)
BARYOTRAK RE-COUNTED/COUNTED			TS-16N RE-COUNTED/COUNTED			[A]/[B] AVERAGE
1.6±0.3			2.0±0.5			1.1±0.6

(太字は、BARYOTRAKとTS-16Nの一回目の計数値のうち、どちらか一方でもエッチピット数10個以上であるものを対象とした。)

* 一回目と二回目の計数のうち、どちらか一方でもエッチピット数が10個以上である場合の比



図B-1 バリオトラックとTS-16Nの同時着用試験の結果
(1990年12月～1991年1月、プルトニウム燃料第二開発室)

B-3 ^{252}Cf の中性子照射試験

計測機器校正施設において、バリオトラックを飛跡検出用プラスチック板に用いた固体飛跡検出器に ^{252}Cf 線源による中性子線を照射し、中性子フルエンスとエッチビット数の変動の関係、方向特性について調べた。実験は、使用した ^{252}Cf 線源の中性子放出率は $1.051(\pm 0.6\%) \times 10^8 [\text{n/s}]$ (1994年2月21日、National Physical Laboratoryにて絶対校正) である。

(1) エッチビット数の統計変動

一照射につき15個の固体飛跡検出器を用いて、照射したフルエンスとそれら15個の固体飛跡検出器のエッチビット数のばらつきを調べた。

固体飛跡検出器はTLDバッジのケースの中に組み込み、水ファントム上に設置して照射を行った。このときの線源-線量計間の距離は100cmである。中性子フルエンス率は、NPLの絶対測定による中性子放出率に半減期と距離の補正を加えて求めた。また中性子フルエンスから1cm線量当量への換算には $3.32 \times 10^{-4} [\mu\text{Sv} \cdot \text{cm}^2]$ を使用した。この値は、単位中性子フルエンス-1cm線量当量換算係数の値に ^{252}Cf の中性子スペクトルを重み付けして平均化したものであるが、国際的な合意の得られた値ではないことを明記しておく*。

なお、照射装置及び空気中での中性子の減衰、室内散乱線等の影響については考慮していない。

実験結果を図B-2、表B-5に示す。図は15個の固体飛跡検出器の平均エッチビット数とその標準偏差の関係を示したものであり、参考のため小泉らがTS-16Nについて行った同様な試験の結果[21]についても示した。バリオトラックのエッチビット数の変動は、ほぼ平均エッチビット数の平方根に逆比例している。この変動の中には、それぞれの固体飛跡検出器の感度の個体差やバックグラウンド放射線によるエッチビット数の影響によるものも含まれると考えられるが、ポワソン分布を用いた統計モデルでその変動を十分に説明できると思われる。

またTS-16Nの結果についても同様な傾向が見られるが、バリオトラックに比べると変動が大きい。この理由はエッチビット数の計数方法などの違いによるものであろう**。

なお、バリオトラックについて回帰計算より面平行入射条件における ^{252}Cf の単位中性子フルエンス当たりのエッチビット数は $2.94 \times 10^{-5} [(\#/3.363\text{mm}^2) \cdot \text{cm}^2]$ 、エッチビット数から1cm線量当量への換算係数は $11.3 [\mu\text{Sv}/(\#/3.363\text{mm}^2)]$ という値が得られた。長瀬ランダウア社(株)が使用している換算係数約 $15 [\mu\text{Sv}/(\#/3.363\text{mm}^2)]$ に比べるとやや小さい。

(2) 方向特性

固体飛跡検出器をTLDバッジのケース内に組み込みんだ状態で精円柱水ファントムに設置し、ファントムごと水平方向に回転させた場合の、固体飛跡検出器の感度の変化を調べた。

^{252}Cf 線源と線量計間距離を75cmとし、(1)と同様な方法でフルエンス率、1cm線量当量率を計算した。実験結果を表B-6(本文中の図2-8)に示す。図には以前に実施したTS-16Nについての試験の結果も示した。図の結果からも明らかなように、固体飛跡検出器はコサイン関数型の方向依存性を持っており、バリオトラックとTS-16Nの間には有意な違いは見られない。

表B-5 照射した中性子フルエンスとエッチピット数の変動との関係

中性子フルエンス [n/cm ²]	1cm線量当量 [mSv]	照射 個数	エッチピット 数 [#/3.363mm ²]	単位フルエンス当り のエッチピット数 [(#/3.363mm ²)·cm ²]	エッチピット数-1cm 線量当量換算係数 [μSv/(#/3.363mm ²)]
6.01×10 ⁶	2.00	15	176.5±9.5	2.94(±0.16)×10 ⁻⁵	11.3±0.6
3.00×10 ⁶	1.00	15	89.5±7.1	2.98(±0.24)×10 ⁻⁵	11.2±0.9
1.20×10 ⁶	0.40	15	37.1±4.1	3.09(±0.34)×10 ⁻⁵	10.8±1.2
6.01×10 ⁵	0.20	15	20.7±3.2	3.44(±0.54)×10 ⁻⁵	9.7±1.5
3.00×10 ⁵	0.10	15	9.7±2.2	3.22(±0.73)×10 ⁻⁵	10.3±2.3

(実験日'94/8/29での中性子放出率は 9.18×10⁷[n/s]である。)

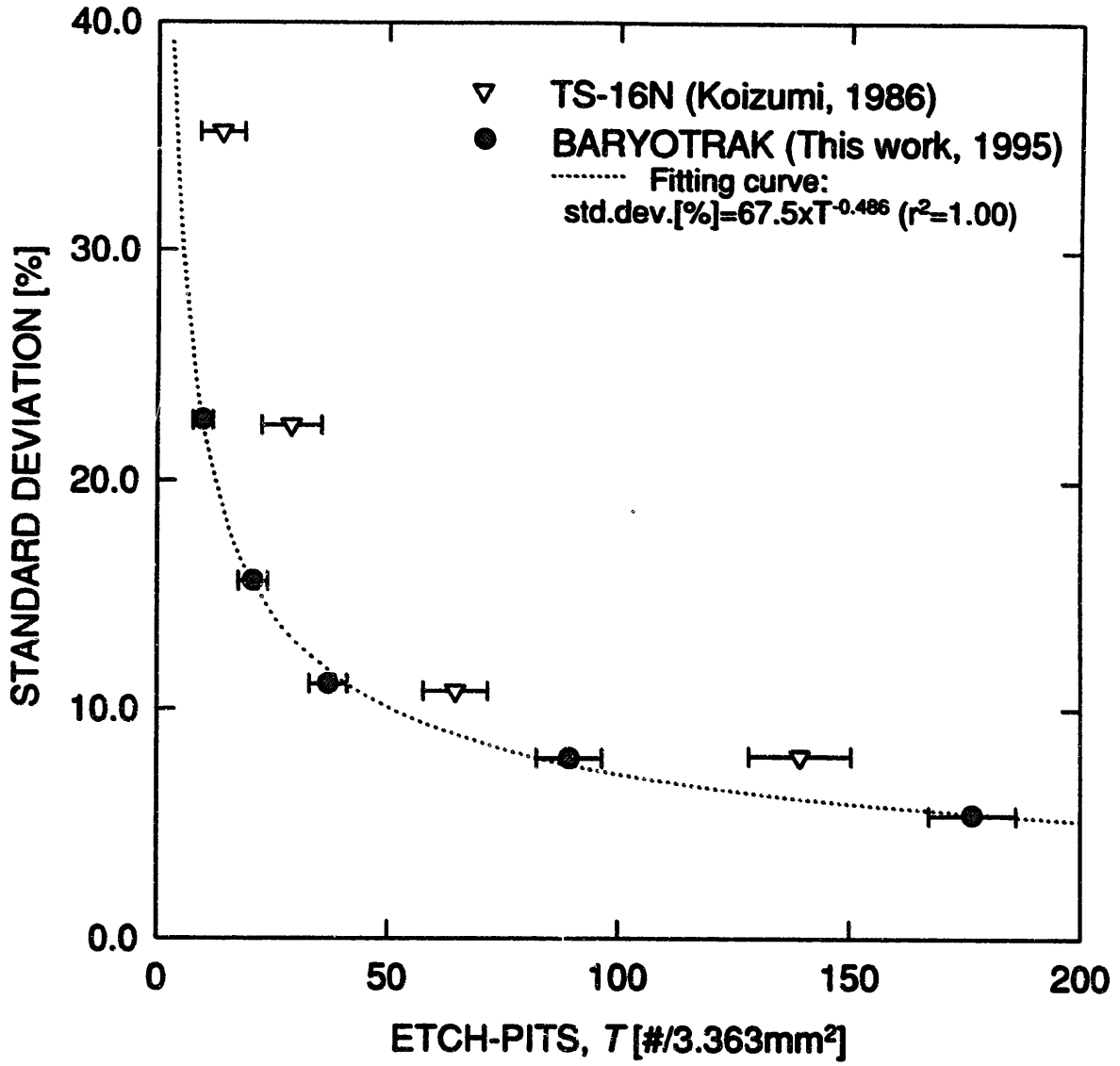
表B-6 方向特性試験の結果

入射角 [°]	中性子フルエンス [n/cm ²]	中性子1cm線量当量 [mSv]	照射 個数	エッチピット 数 [#/3.363mm ²]	単位フルエンス当り のエッチピット数 [(#/3.363mm ²)·cm ²]	相対感度 (0°に規格化)
0	3.01×10 ⁶	1.00	6	94.2±2.3	3.13(±0.08)×10 ⁻⁵	1.00±0.02
30	3.01×10 ⁶	1.00	6	74.5±3.7	2.48(±0.12)×10 ⁻⁵	0.79±0.04
60	3.01×10 ⁶	1.00	6	44.8±3.9	1.49(±0.13)×10 ⁻⁵	0.48±0.04

(実験日'94/8/30での中性子放出率は 9.17×10⁷[n/s]である。)

* 国際的な合意の得られた値はない。JIS4510に3.4×10⁻¹⁰[Sv·cm²]という値があるが出典が明らかでない。また、3.34×10⁻¹⁰[Sv·cm²]という値の報告例がある。

** 現在報告を受けているバリオトラックのエッチピット数とは、1視野(0.1734mm²)当たりのエッチピット数を36視野について平均したものを3.363mm²あたりに規格化した値である。小泉らがTS-16Nについて実験を行った当時のエッチピット数の計数方法は不明である。



図B-2 固体飛跡検出器のエッチピット数と統計変動の関係[21]

補遺C アクリル遮蔽体厚さとTLDバッジ、固体飛跡検出器の応答の関係

^{252}Cf 線源を含鉛アクリル板を用いて遮蔽して、グローブボックス周辺の中性子エネルギー分布を模擬した中性子場を作成し、TLDバッジと固体飛跡検出器の照射試験を実施した。

アクリル板遮蔽の厚さを0～80mmと変えたときの両線量計の応答と換算係数の値の変化を調べた。

(1) 実験方法

実験は計測機器校正施設で行った。実験配置を図C-1に示す。TLDバッジと固体飛跡検出器それぞれ4個（固体飛跡検出器はTLDバッジのケースの中に入れた）を楕円柱型水ファントムに設置し、線源-線量計間の距離を69.0cmとした。

線量計位置での中性子エネルギー分布（ファントムが無い状態での）は、遮蔽体無し照射条件では文献[B1]に示される値に距離の補正を加えて求め、遮蔽体を設置した照射条件では連続エネルギー・モンテカルロ・コード MCNP[B2]を用いて計算した。図C-2に、 ^{252}Cf の線源強度で規格化した場合の中性子エネルギー分布の計算結果を示す。

線量計位置での中性子線量当量は、計算した中性子エネルギー分布と法令告示別表第五の中性子フルエンス-1cm線量当量換算係数を用いて算出した。なお、実験を行った当時の ^{252}Cf 線源の中性子放出率は $7.98 \times 10^7 [\text{n/s}]$ である。

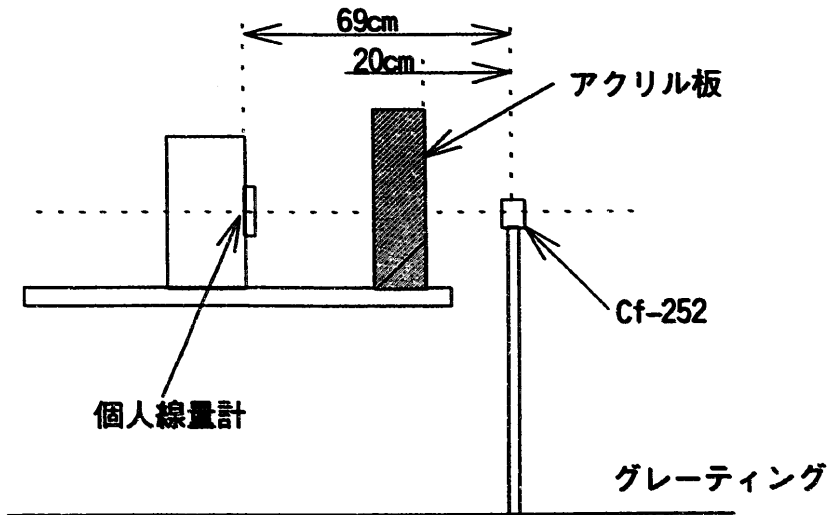
(2) 実験結果

実験結果を表C-1に示す。本文中で示した作業者の被ばくデータの解析結果と比べたとき、エレメントN2,N3,N4の発光の相互関係はアクリル板50.0mmで遮蔽した場合に近い。ただし、固体飛跡検出器とのエッチビット数 T とTLDバッジの高速中性子線の測定量である Rf の比 T/Rf の値は、アクリル板30.0～80.0mmで遮蔽した場合では1.1～0.8の範囲であり、作業者の被ばくデータの統計解析結果から得られた約0.3までは下らない。実作業環境の場合、低エネルギー室内散乱線の混在があり本実験体系よりもさらに中性子エネルギー分布が軟らかいこと、個人線量計に対して多方向から中性子線が入射するため個人線量計（特に固体飛跡検出器）が本実験体系のような前方入射条件に比べると応答が過小評価となること、が挙げられる。

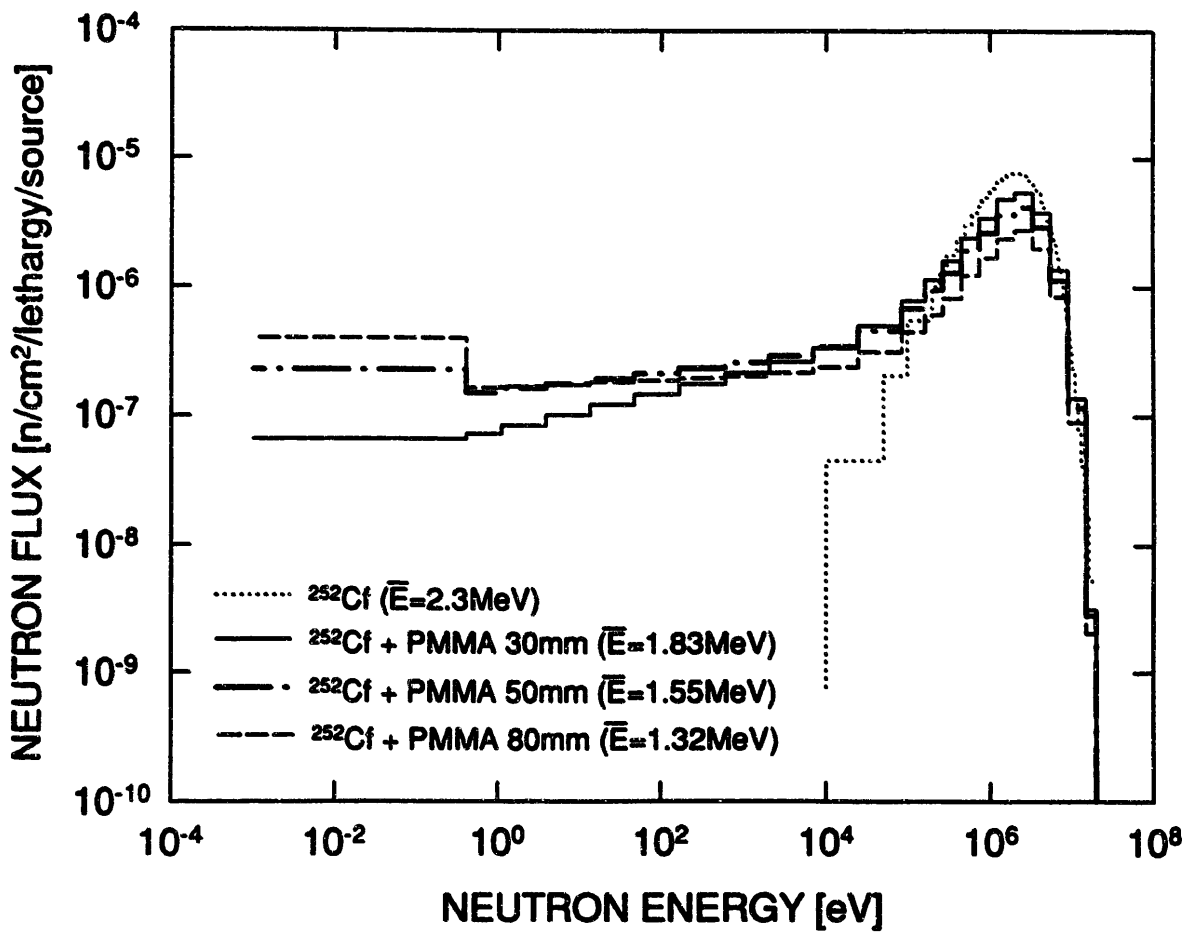
参考文献

[B1] ISO8529

[B2] J.F.Briesmeister(Ed.), "MCNP - A GENERAL MONTE CARLO N-PARTICLE TRANSPORT CODE Ver.4A", CCC-200,1993



図C-1 実験配置



図C-2 中性子スペクトル計算結果
(遮蔽体無しは文献値[B1]、遮蔽体有りは計算値)

表C-1 ^{252}Cf をアクリル板で遮蔽した場合のTLDバッジと固体飛跡検出器の応答の変化

照射条件 アクリル厚さ [mm]	平均 エネルギー	中性子線量 当量 [mSv]	UD-809P [mR ^{137}Cs eq.]		UD-809P [mR ^{137}Cs eq.]			
			G3	G1, G2, G4	N1	N2	N3	N4
0.0	2.3MeV	2.39	20.0±1.2 (6.0%)	19.5±2.2 (11.3)	18.9±2.2 (11.9)	48.5±2.6 (5.3)	52.0±3.6 (6.9)	140.3±8.3 (5.9)
30.0	1.83 ^a	1.80 ^a	18.4±1.3 (6.8)	19.1±2.1 (11.1)	21.4±0.6 (2.7)	84.5±5.3 (6.3)	61.7±3.6 (5.8)	148.2±4.7 (3.2)
50.0	1.55 ^a	1.40 ^a	18.4±1.0 (5.2)	19.8±2.8 (14.1)	20.1±1.4 (6.8)	129.8±14.9 (11.5)	63.7±6.2 (9.7)	138.8±7.3 (5.3)
80.0	1.32 ^a	0.94 ^a	15.4±0.5 (3.3)	15.8±2.4 (15.1)	19.9±2.5 (12.8)	138.7±4.3 (3.1)	51.6±4.9 (9.5)	115.6±8.7 (7.5)

a. MCNPによる計算値

(continued)

照射条件 アクリル厚さ [mm]	Rth [mR eq.]	Rf [mR eq.]	Rth/Rf	Kf [$\mu\text{Sv}/\text{mR eq.}$]	T [#/ 3.363mm^2]	T/Rf	Kf' (Calc.) ^b [$\mu\text{Sv}/\text{mR eq.}$]
0.0	-	121.4±8.0 (6.6)	-	19.7±1.3 (6.6)	200.3±4.7 (2.4)	1.65±0.12 (7.0)	21.7
30.0	22.8±8.6 (37.8)	121.6±5.3 (4.4)	0.19±0.08 (40.8)	14.7±0.6 (4.4)	135.3±2.2 (1.6)	1.11±0.05 (4.7)	15.0
50.0	66.1±16.5 (25.0)	103.8±5.3 (4.4)	0.64±0.17 (26.6)	13.5±0.6 (4.4)	102.0±4.8 (4.7)	0.98±0.09 (9.2)	13.4
80.0	87.1±7.7 (8.9)	76.1±6.7 (8.8)	1.15±0.11 (9.4)	12.4±1.1 (8.8)	63.0±2.0 (3.2)	0.83±0.08 (9.4)	11.5

b. (3-2)式、 $Kf = 13.66 \times (T/Rf)^{0.923}$ を用いて計算した場合。

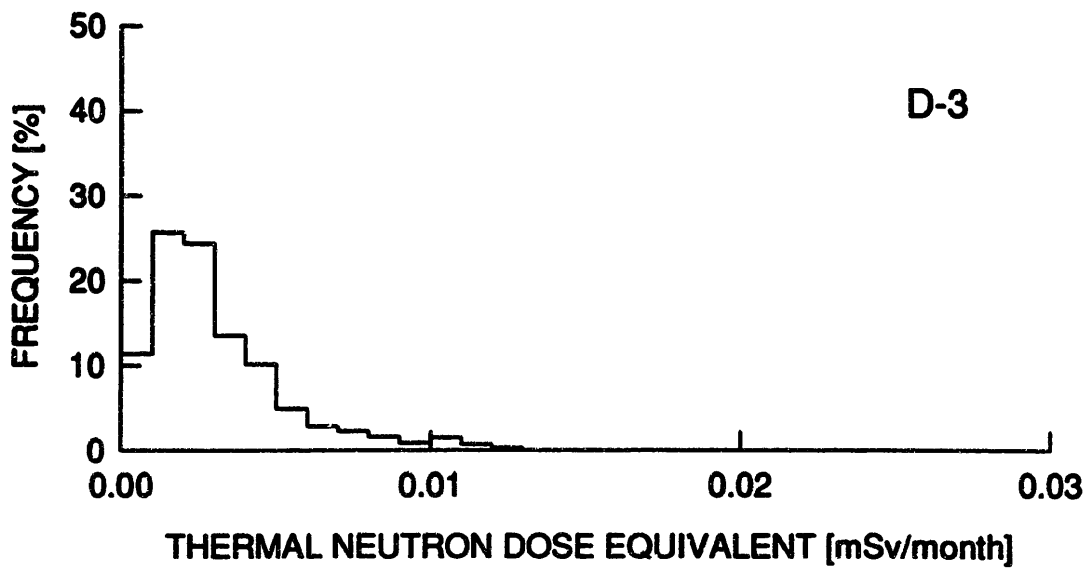
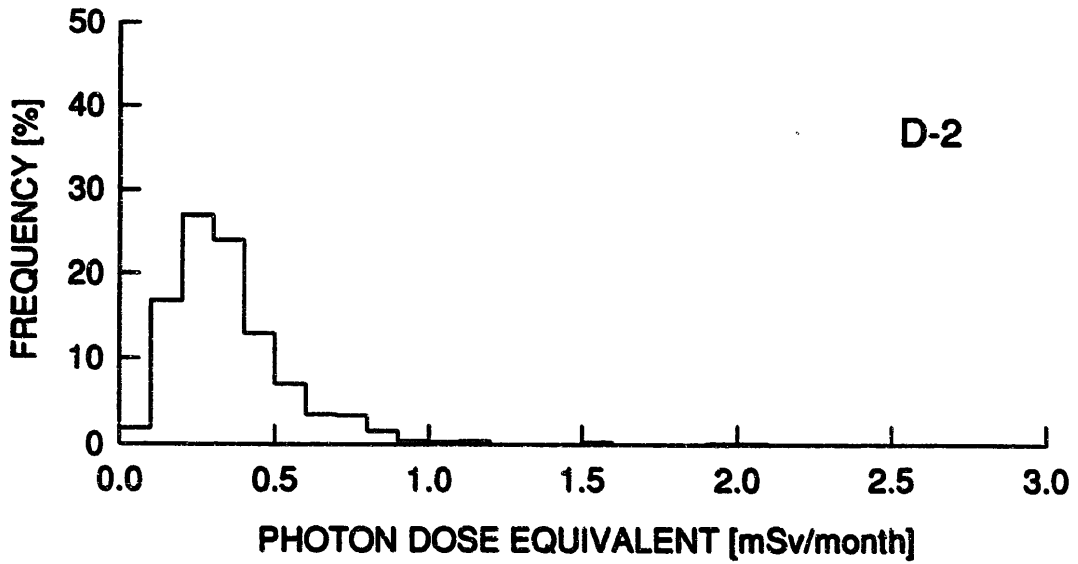
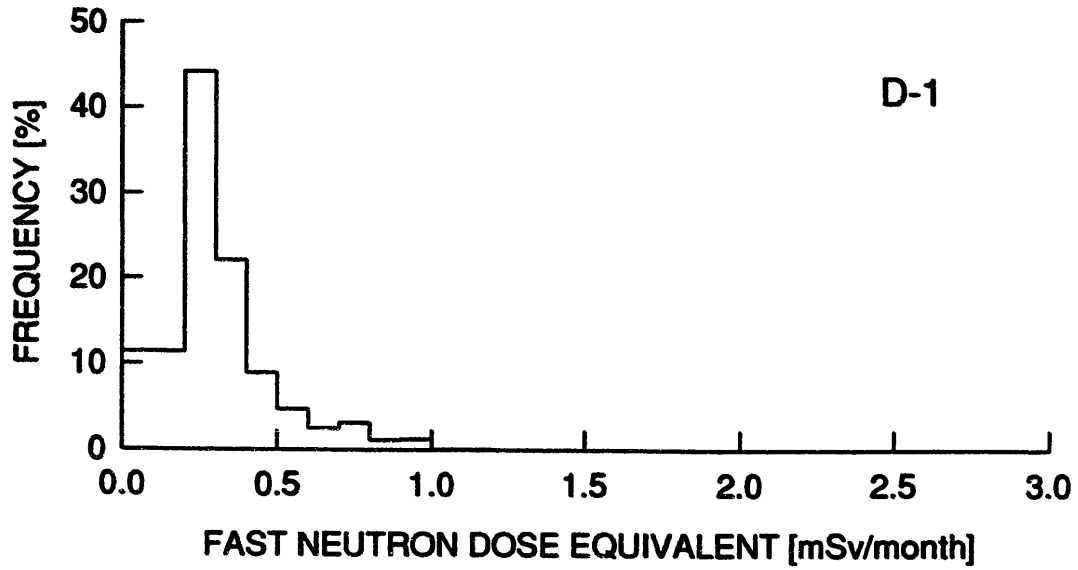
補遺D 線量当量の人数割合の分布

第4章で、平成5年度にプルトニウム燃料を取扱う施設で放射線作業を行った全作業員（ただし、一ヵ月管理のもの）の被ばくデータの解析を行った結果、一ヵ月当たり被ばくした線量当量の値の詳細な人数割合の分布が得られた。（ただし、解析結果はのべ人数に対してであり、同一作業員の年間を通しての被ばく線量当量の合計値ではない。）

図D-1に、高速中性子線による線量当量の人数割合の分布を示す。熱中性子線の線量当量は全て記録レベル未満であったため、図に示した分布が、平成5年度の中性子線による線量当量の人数割合の分布に相当する。なお、今回のデータ抽出の条件は、TLDバッジによる高速中性子線量当量が有意であったものである。

図D-2に γ 線による線量当量の人数分布、図D-3に熱中性子線による線量当量の人数割合の分布をそれぞれ参考までに示す。

図D-2は、胸部のTLDバッジから求めた γ 線の線量当量の分布であるが、鉛エプロンの着用による体幹部の不均衡な被ばくについては考慮しておらず、またデータ解析の際の抽出条件があくまでも中性子線による被ばくが有意であったものであるため、平成5年度中に（不均衡被ばくも含めて） γ 線による線量当量が有意値として記録されたもの全員についての結果ではないことを明記しておく。



- (上) 図D-1 高速中性子線1cm線量当量の人数分布 (平成5年度)
- (中) 図D-2 胸部のγ線1cm線量当量の人数分布 (平成5年度)
- (下) 図D-3 熱中性子線1cm線量当量の人数分布 (平成5年度)

補遺 E 過去の TLD バッジのフィールド照射試験例

プルトニウム燃料を取扱う施設でこれまでに実施された TLD バッジのフィールド照射試験の結果をまとめた。これらの試験結果の中には既に報告書としてまとめられているものもあるが、現在個人被ばく管理業務に使用している二群評価式用 ((2-1) 式) に改めてデータを編集し直した。また、TLD バッジの高速中性子線量当量換算係数 K_f についても同様に計算を行い、換算係数の導出は (2-3) 式を用いた。

(1) プルトニウム燃料第二開発室 F-102 (1985年) *

実験はプルトニウム第二開発室 F-102 の D-19 グローブボックスと同部屋の焼結炉周辺で行った。このときの線源周辺の遮蔽条件や線量計の位置等は明らかにされていない。楕円柱パラフィンファントム上に TLD バッジとニュートラックバッジ (TS-16N 使用) をそれぞれ 4 個取り付け、グローブボックスと焼結炉周辺について場所を変えてそれぞれ 2 点で照射試験を行った。中性子線量当量は、アンダーソンブラウン型レムカウンター (Studsvik 2202D) の計数率からメーカーの推奨する換算係数 0.33 [$\text{cps}/(\mu\text{Sv/h})$] を用いて求めた。

実験結果を表 E-1 に示す。上段に UD-808P、UD-809P 各元素の平均発光量、下段に γ 線エネルギー指標、高速中性子線レスポンス R_f 、高速中性子線量当量換算係数 K_f 、ニュートラックバッジの平均エッチピット数及びエッチピット数と TLD の高速中性子レスポンスの比である T/R_f を示した。

グローブボックス表面 (B) 点で行った実験データは、TLD 素子間の発光関係 (γ 線エネルギー指標から推定される γ 線エネルギーが 200keV 程度であること、直接入射熱中性子線成分の割合が多いことなど) が、本文第 4 章の被ばくデータの解析結果とほぼ同様であり、実験から得られた高速中性子線量当量換算係数の値も、現行の換算係数 6.4 [$\mu\text{Sv/mR } ^{137}\text{Cs eq.}$] と誤差範囲内で一致している。

また、 T/R_f の値からもわかるように、焼結炉周辺は比較的硬い中性子スペクトルを持つ場であると考えられ、実験で得られた換算係数は現行のその 4~5 倍の値である。

(2) プルトニウム燃料第二開発室 F-102, A-102, A103 (1985年)

実験はプルトニウム燃料第二開発室の以下の 4 点で行った。

- (1) F-102、PuO₂原料缶、鉛板 (1.0mm)
- (2) A-102、PuO₂-UO₂ペレット貯蔵庫
- (3) A-103、PuO₂-UO₂粉末+グローブボックスパネル
- (4) A-103、PuO₂-UO₂粉末+グローブボックスパネル+含鉛アクリル遮蔽体 (35mm)

* 固体飛跡検出器に関する特性試験として本来実施されたものであるが、実験の際には TLD バッジも同時照射しており、後者のデータはこれまで資料化されていなかった。実験者：小泉

この実験では、固体飛跡検出器とUD-808P線量計は使用しておらず、UD-809P線量計のみを用いた。各実験点につき4個のTLDバッジを使用し、楕円柱パラフィンファントムに装着した。また、中性子線量当量の測定には、アンダーソンブラウン型レムカウンター(Sudsvik 2202D)と円筒型多減速材付きBF₃スペクトロメーターを使用し、両者の値がほぼ一致しているのここではレムカウンターの値を基準とした。なお、実験配置等の詳細や中性子スペクトル測定結果については文献[5]を参照されたい。

実験結果を表E-2に示す。表には円筒型多減速材付きBF₃スペクトロメーターから求めた平均中性子エネルギーも記した。グローブボックスパネルに含鉛アクリル遮蔽体(35mm)を付加した条件で行った実験でのTLDの発光関係は、プルトニウム燃料工場作業員の装着するTLDバッジの典型的な発光関係に近いものの、その条件での換算係数の値は、現行の換算係数の約2倍である。

(3) MOX燃料缶と含鉛アクリル遮蔽体(1991年)

本実験は、プルトニウム燃料工場内の実作業環境ではなく、作業で用いるUO₂-PuO₂混合粉末燃料(MOX燃料; Mixed Oxide)の入った原料缶を中性子源に用いて作成した場で行った。線源及びその遮蔽条件を下に示す。

- (1) MOX燃料缶2本を平行に配置+鉛板 3.0mm
- (2) MOX燃料缶1本+中空円筒型の含鉛アクリル(厚さ 35.0mm)

TLDバッジとニュートラックバッジ(飛跡検出用プラスチック板にバリオトラック使用)それぞれ4個(実験条件1ではニュートラックバッジを8個)を、楕円柱水ファントムに装着した。中性子線量当量は、球形多減速材付き³Heスペクトロメーターによる中性子スペクトル測定値と法令告示別表第5の中性子フルエンス-1cm線量当量換算係数から計算した。なお、実験配置等の詳細や中性子スペクトル測定結果については文献[4][20]を参照されたい。

実験結果を表E-3に示す。表に示したTLD読取り値は感度補正係数を用いて個々のTLDの持つ感度のばらつき補正後の結果である。

T/Rf の値が大きいことから分かるように、中性子のエネルギー分布が硬い場であり、求めた換算係数の値は現行のものよりもかなり大きい。

表E-1 プルトニウム燃料第二開発室F-102(1985年)でのフィールド試験結果

照射条件	中性子線量 当量 ^a [mSv]	UD-808P [mR ¹³⁷ Cs eq.]				UD-809P [mR ¹³⁷ Cs eq.]			
		G1	G2	G3	G4	N1	N2	N3	N4
焼結炉表面 (A)	2.08	46.7±6.6 (14.2%)	47.6±2.2 (4.6)	53.0±1.7 (3.3)	45.2±3.5 (7.8)	49.3±2.0 (4.0)	70.0±8.0 (11.4)	71.1±4.6 (6.5)	123±19.1 (15.5)
焼結炉表面 (B)	1.02	28.8±1.8 (6.4)	23.8±3.1 (10.8)	32.8±1.1 (3.5)	28.1±2.5 (8.9)	31.2±49.1 (10.8)	43.5±2.7 (10.4)	76.8±7.1 (6.3)	45.5±9.4 (9.2)
グローブボック ス表面(A)	0.68	37.0±6.4 (17.3)	32.9±3.9 (11.4)	109±17.1 (15.6)	35.2±2.7 (7.5)	27.2±2.1 (7.6)	40.1±1.0 (2.6)	39.3±3.3 (8.3)	62.6±1.9 (3.1)
グローブボック ス表面(B)	1.56	88.5±15.4 (17.3)	90.8±12.0 (13.2)	234±55.9 (23.9)	87.8±8.8 (10.0)	86.7±5.4 (6.3)	187±9.6 (5.1)	140±8.5 (6.1)	229±18.9 (8.2)

a. レムカウンター(Studsvik 2202D)による。

(continued)

	G3/G4 [-]	N4-N1 [mR eq.]	N2-N3 [mR eq.]	Rf [mR eq.]	Kf [μSv/mR eq.]	T [#/3.363mm ²]	T/Rf
焼結炉表面 (A)	1.18±0.09 (7.3)	73.8±19.1 (15.5)	-	73.8±19.1 (27.4)	30.0±8.5 (28.4)	92.8±5.9 (6.4)	1.26±0.36 (28.1)
焼結炉表面 (B)	1.18±0.15 (13.1)	45.5±9.4 (20.6)	-	45.5±9.4 (20.6)	23.7±2.4 (18.0)	49.8±2.9 (5.8)	1.09±0.24 (21.2)
グローブボック ス表面(A)	3.1±0.4 (12.2)	35.4±3.4 (9.6)	-	35.4±3.4 (9.6)	19.4±2.0 (10.3)	24.8±1.3 (5.1)	0.70±0.08 (11.8)
グローブボック ス表面(B)	2.64±0.40 (15.0)	143±24.1 (16.9)	46.8±15.7 (33.5)	132±27.0 (20.5)	7.3±1.2 (16.8)	73.3±5.3 (7.2)	0.55±0.12 (21.7)

表 E-2 プルトニウム燃料第二開発室F-102, A-102, A-103(1985年)でのフィールド試験の結果

照射条件	中性子線量 当量 ^a [mSv]	UD-809P [mR ¹³⁷ Cs eq.]				N4-N1 [mR eq.]	N2-N3 [mR eq.]	Rf [mR eq.]	Kf [μ Sv/mR eq]
		N1	N2	N3	N4				
PuO ₂ 原料缶 鉛板 1mm	0.23 ^a (1.92MeV ^b)	15.7±0.7 (4.5%)	21.5±1.1 (5.1)	21.5±3.0 (14.0)	28.8±1.6 (5.6)	13.1±1.7 (13.3)	-	13.1±1.8 (13.8)	17.6±2.4 (13.8)
PuO ₂ -UO ₂ ペレット貯蔵庫	0.82 (1.16MeV)	17.3±9.2 (53.2)	36.4±4.0 (11.0)	35.4±6.1 (17.2)	68.5±4.6 (6.7)	51.2±10.3 (20.1)	-	51.0±10.3 (20.2)	16.1±3.2 (20.2)
PuO ₂ -UO ₂ 粉末 GBパネル	0.38 (1.26MeV)	20.7±2.3 (11.1)	43.7±7.1 (16.2)	33.8±3.3 (9.8)	57.4±8.0 (13.9)	36.7±8.3 (22.7)	9.9±4.2 (42.5)	34.5±8.4 (24.3)	11.0±2.7 (24.3)
PuO ₂ -UO ₂ 粉末 GBパネル+ 含鉛アクリル35mm	0.64 (0.96MeV)	31.1±3.0 (9.6)	96.2±11.3 (11.3)	59.7±6.0 (6.0)	110±8.7 (8.7)	78.9±9.2 (11.7)	36.5±6.1 (16.8)	70.7±9.3 (13.2)	9.1±1.2 (13.2)

a. レムカウンター(Studsvik 2202D)

b. 円筒型多減速材付きBF₃スペクトロメーターから計算した平均エネルギー。

表 E-3 MOX燃料缶と含鉛アクリル遮蔽体を用いた場で実施したフィールド試験の結果

照射条件	中性子線量 当量[mSv]	UD-808Pa [mR ¹³⁷ Cs eq.]				UD-809Pa [mR ¹³⁷ Cs eq.]			
		G1	G2	G3	G4	N1	N2	N3	N4
MOX燃料缶×2 鉛板 3mm	0.22 ^b (1.63MeV ^c)	17.0±1.3 (7.7%)	15.0±1.6 (10.7)	31.1±0.7 (2.2)	15.0±2.2 (15.0)	11.8±1.9 (16.1)	17.9±5.2 (29.1)	15.2±2.4 (16.0)	24.9±5.5 (22.2)
MOX燃料缶×1 含鉛アクリル35mm	0.24 (1.18MeV)	25.9±1.8 (7.1)	24.8±2.9 (11.8)	31.4±0.3 (1.1)	21.5±2.5 (11.5)	18.8±1.1 (5.8)	33.5±6.4 (19.0)	27.5±3.6 (13.2)	40.2±3.7 (9.3)

(continued)

	G3/G4	N4-N1	N2-N3	Rf	Kf [μSv/mR eq]	T [#/3.363mm ²]	T/Rf
MOX燃料缶×2 鉛板 3mm	2.04±0.31 (15.2)	13.0±6.3 (48.4)	3.3±2.7 (80.6)	12.3±6.0 (49.1)	17.9±8.8 (49.1)	20.2±3.5 ^d (17.2)	1.6±0.9 (52.1)
MOX燃料缶×1 含鉛アクリル35mm	1.46±0.17 (11.5)	21.5±3.9 (18.0)	6.2±5.5 (88.4)	20.1±3.5 (17.3)	12.3±2.2 (17.3)	19.0±3.6 (18.7)	0.95±0.24 (25.5)

a. 感度補正係数を用いてTLDの感度の個体差を補正した値。

b.c. 核研型ボナーボールの測定による。

d. このデータのみ固体飛跡検出器は8個使用。

補遺 F 個人線量計による中性子スペクトルの定量に関する基礎的検討

個人線量計の応答から、その装着部位に入射する中性子線のエネルギー分布と積分フルエンスを定量する方法について検討した。また、胸部と背面部に入射する中性子スペクトルから着用者の受ける実効線量当量を推定することを試みた。

(1) 個人線量計による中性子スペクトルアンフォールディング

ボナー球の解析で用いたアンフォールディング法を用いて、TLDバッジと固体飛跡検出器の応答から中性子スペクトルを求めた。ボナー球の場合、サイズの異なるポリエチレン減速材と ^3He 比例計数管の組み合わせによる数個の検出器の応答関数とその積分的な応答から中性子スペクトルを求めているが、ここでは替わりにTLDバッジの元素N2, N3, N4及び固体飛跡検出器の単位フルエンス当たりの感度と、補遺Cの実験及びフィールド試験で得られたそれぞれの積分的な応答を用いる。以前に、電力中央研究所で $^6\text{LiF}/^7\text{LiF}$ のTLD、高速中性子用フィルム（NTAフィルム）及び固体飛跡検出器を用いた複合型個人線量計を試作し、同様な手法による中性子スペクトルの定量を試みている[F1]。

アンフォールディング計算に使用したコードはボナー球の解析と同様にSAND-II [31]、個人線量計の応答関数はTLDバッジについては岩井の計算値[15]、固体飛跡検出器については実験データ[19]を用いた。初期推定スペクトルは、補遺Cの実験（ ^{252}Cf をアクリル板で遮蔽した条件）ではMCNPによる計算値、フィールド試験ではボナー球の解析と同じものを使用した。なお、TLDバッジの応答関数については実験値を用いて一部計算値を修正した。計算に使用したTLDバッジの各元素及び固体飛跡検出器のレスポンスマトリクスを表F-1に示す。

^{252}Cf をアクリル板で遮蔽して照射した実験で個人線量計から計算した中性子スペクトルを図F-1(a)～(c)に示す。図中に破線で示したMCNPによる計算値と個人線量計から求めた中性子スペクトルは良く一致し、表F-2に示す積分フルエンスの値も計算値と良く一致した。

フィールド試験の結果についてアンフォールディング計算から得られた中性子スペクトルを図F-2、積分フルエンスの値を表F-2に示す。図中にはボナー球から求めた中性子スペクトルも破線で示しているが、分布の形状などはほぼ同じである。ただしフィールド試験の場合、表F-2に示すように積分フルエンスの値のみが違っている。この理由は、今回行った個人線量計によるアンフォールディング計算の方法では、個人線量計の方向依存性を考慮に入れていないためと考えられる。個人線量計から求めた中性子の積分フルエンスは、ボナー球のその0.63倍であり、これは第6章(3)

で述べた換算係数を決定する際の個人線量計の方向依存性の補正係数 1.5のほぼ逆数に相当する。

(2) 多方向入射条件下での実効線量当量の評価

(1) で求めた中性子スペクトル計算結果を用いて、多方向入射条件下における実効線量当量を推定する方法について述べる。面平行入射条件に近い、 ^{252}Cf をアクリル板で遮蔽した実験の結果についてはここでは触れず、フィールド試験の結果のみ取り扱う。

人体（ただし、*reference man*）に対して前方及び後方から面平行に中性子線が入射する場合のフルエンス-実効線量当量換算係数は、ICRP51 [F2]にデータ集の形でまとめられており、その換算係数と中性子スペクトルから次式を用いて実効線量当量 H_E を計算する。

$$H_E = C \cdot \left(\int_{\text{thermal}} h_E(E, AP) \cdot \phi_d(E, AP) dE + \int_{\text{thermal}} h_E(E, PA) \cdot \phi_d(E, PA) dE \right) \quad \dots(F-1)$$

H_E : 実効線量当量

$h_E(E, AP), h_E(E, PA)$: それぞれ前方、後方から面平行に入射する場合の単位中性子フルエンス-実効線量当量換算係数 [$\text{Sv} \cdot \text{cm}^2$]

$\phi_d(E, AP), \phi_d(E, PA)$: それぞれ胸部、背面部に装着した個人線量計から求めた中性子スペクトル [$\text{n}/\text{cm}^2/\text{eV}$]

ここで、係数 C は、個人線量計から求めた積分中性子フルエンスとボナー球から求めた値との不一致を補正する係数であり（表F-2のボナー球と個人線量計から求めた積分フルエンスの値の比(=0.63)の逆数に相当する）、

$$C = \frac{\int_{\text{thermal}} \phi_s(E) dE}{\int_{\text{thermal}} \phi_d(E, AP) dE + \int_{\text{thermal}} \phi_d(E, PA) dE} \quad \dots(F-2)$$

$\phi_s(E)$: ボナー球から求めた中性子スペクトル [$\text{n}/\text{cm}^2/\text{eV}$]

と定義する。係数 C は個人線量計の方向依存性の補正係数であり、第2章(2-10)式の係数 Q とほぼ同様な意味を持つ係数と考えることができる。

第5章のフィールド実験ではファントムの前面と背面がグローブボックスと向かい合うように設置しており、側面方向からの入射する中性子線は多くないと予想される。

また、仮に側面方向からの入射成分があったとしても、人体に側面方向から入射する中性子線による実効線量当量への寄与は前方・後方入射の場合よりも小さいこと[F2]を考えると、今回のケースは実効線量当量を計算する上ではかなり安全側の係数が得られる条件と言える。

実効線量当量の計算結果を表F-3に示す。TLDバッジと固体飛跡検出器の組み合わせから求めた実効線量当量の値は2.04[mSv]であり、胸部のTLDバッジのみから現行の換算係数を用いて評価した値3.03[mSv]に比べるとかなり小さい。実効線量当量を計算する際に用いた個人線量計の方向依存性を補正する係数 C がやや大きめの値であると予想されることなどを考慮すると、胸部のTLDバッジから求めた線量当量は実効線量当量に対してかなり安全側の評価であるといえる。これは、もともと周辺線量当量は、中性子エネルギー100keV~1MeVの領域で実効線量当量よりも安全側の値になるよう設定されているためである[F2]。

従って、今回フィールド試験を実施した中性子場のように、胸部に対する背面部の線量当量の比が0.3程度の条件であれば、胸部に着用したTLDバッジ及び現行の換算係数から実効線量当量を過小評価することなく、着用者の被ばくする中性子線量当量を評価できると考えられる。

(3) 多方向入射条件下での周辺線量当量及びTLDバッジの換算係数の評価

実効線量当量の計算と同様の手法で、ただし(F-1)式の換算係数に単位フルエンス-周辺線量当量換算係数(単位フルエンス-1cm線量当量換算係数と同値)を用いて求めた周辺線量当量を計算した結果を表F-3に示す。計算した周辺線量当量の3.98[mSv]と、フィールド実験で胸部と背面部のそれぞれに装着したTLDバッジから得られた線量当量を単純に合算した値4.06[mSv]がほぼ一致した。このことから現行の換算係数を用いてTLDバッジが評価している線量当量とは、第2章で述べた個人線量計の評価対象とする線量当量の定義(TLDバッジに対向して入射する中性子フルエンスに1cm線量当量換算係数を乗じた量)が適切であったことを裏付ける結果と言える。

また、(F-2)式から求めた係数 C は、個人線量計の換算係数を求める際の方向依存の補正係数 Q (2-10式)として利用できる可能性がある。

胸部と背面部に入射する中性子スペクトルと、実験的に得られたそれぞれの部位でのTLDバッジの高速中性子読取り線量 $Rf(chest)$ 、 $Rf(back)$ 及び単位フルエンス-1cm線量当量換算係数 $h_{1cm}(E)$ を用いて、各部位でのTLDバッジの換算係数を次式を用いて計算すると、

$$K_f(\text{chest}) = \frac{C \cdot \int dE \phi(E, AP) \cdot h_{1cm}(E)}{R_f(\text{chest})} \quad \dots (F-3)$$

$$K_f(\text{back}) = \frac{C \cdot \int dE \phi(E, PA) \cdot h_{1cm}(E)}{R_f(\text{back})} \quad \dots (F-4)$$

胸部、背面部に対してそれぞれ 6.5、5.6 [$\mu\text{Sv/mR } ^{137}\text{Cs eq.}$] という値が得られ、現行の換算係数 6.4 とほぼ一致した。(F-3)(F-4) 式の分子は、ボナー球から求めた周辺線量当量の値を、中性子フルエンスの測定値を介して前方入射と後方入射分に分割した値と考えることができ、(2-3) 式の換算係数の計算方法の前提条件である”前方性が十分強いこと”を忠実に守った方法と言える。

また、 T/R_f のみから簡便に換算係数 K_f を求める方法である(3-2)式についても、同様に補正係数 C を用いて次式の様に変形し、

$$K_f = C \cdot 13.66 \cdot (T/R_f)^{0.923} \quad \dots (F-5)$$

換算係数を計算すると、胸部、頸部に対してそれぞれ 7.6、6.5 [$\mu\text{Sv/mR } ^{137}\text{Cs eq.}$] という値が得られる。この値も現行の換算係数とほぼ一致している。

(4) 今後の課題

今回検討した個人線量計による中性子スペクトルの定量法、及びそれを利用した実効線量当量の評価法には、まだまだ議論するべき点が多い。第一に、前述したように計算に使用したTLDバッジの応答関数はあまり精度の良いものではないこと、第二にTLDバッジと固体飛跡検出器の組み合わせはアンフォールディング計算を行うのに適した応答関数を持っているとは言えず、その方法から得られる結果の精度には自ずと限界があると考えられる。また、個人線量計の方向依存性の補正係数として用いた C についてさらに定量的な説明を行う必要があるなど、の点について今後十分な検討を行う必要がある。

なお、参考のため、図F-3に胸部に装着した個人線量計からアンフォールディングして求めた中性子スペクトルと個人線量計の応答関数との積分計算によって得られたそれぞれの線量計の応答の累積分布を示す。図F-3の横軸は図5-4と同様に熱中性子領域から積分した場合の積分区間の上限に相当する。図からも明らかのように、TLDバッジの応答の80%程度は中性子エネルギー100keV以下の成分によるものである。一方、中性子線量当量の場合は、図5-4に示すように100keV以上の成分によるものが全体の90%以上を占めており、TLDバッジは100keV以下のエネルギーを持つ中性子を測定しつ

つ、100keV以上の高エネルギー中性子による線量当量を評価していることになる。

補遺Fの参考文献

[F1] 高野研一、石田健二

「個人用広範囲中性子個人線量計の試作と性能評価」

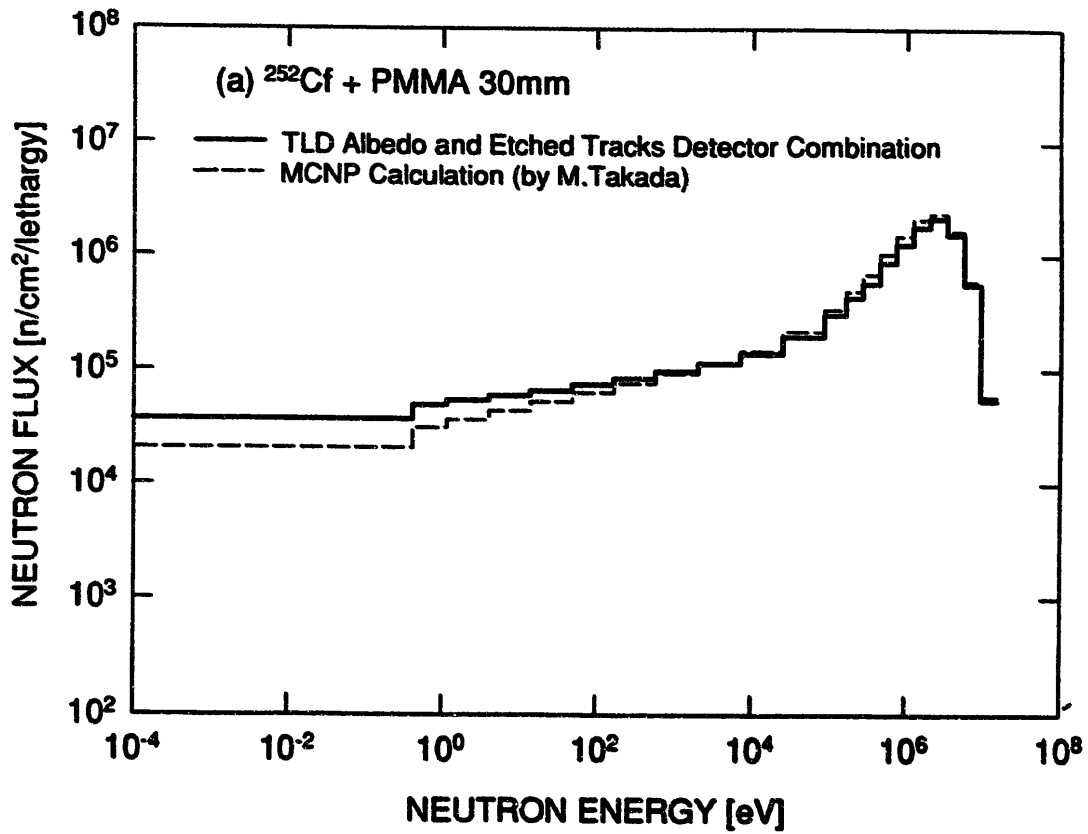
電力中央研究所報告 研究報告：284018、1984

[F2] ICRP Publication 51, "DATA FOR USE IN PROTECTION AGAINST EXTERNAL RADIATION", 1987

表F-1 アンフォールディング計算に用いたレスポンスマトリクス

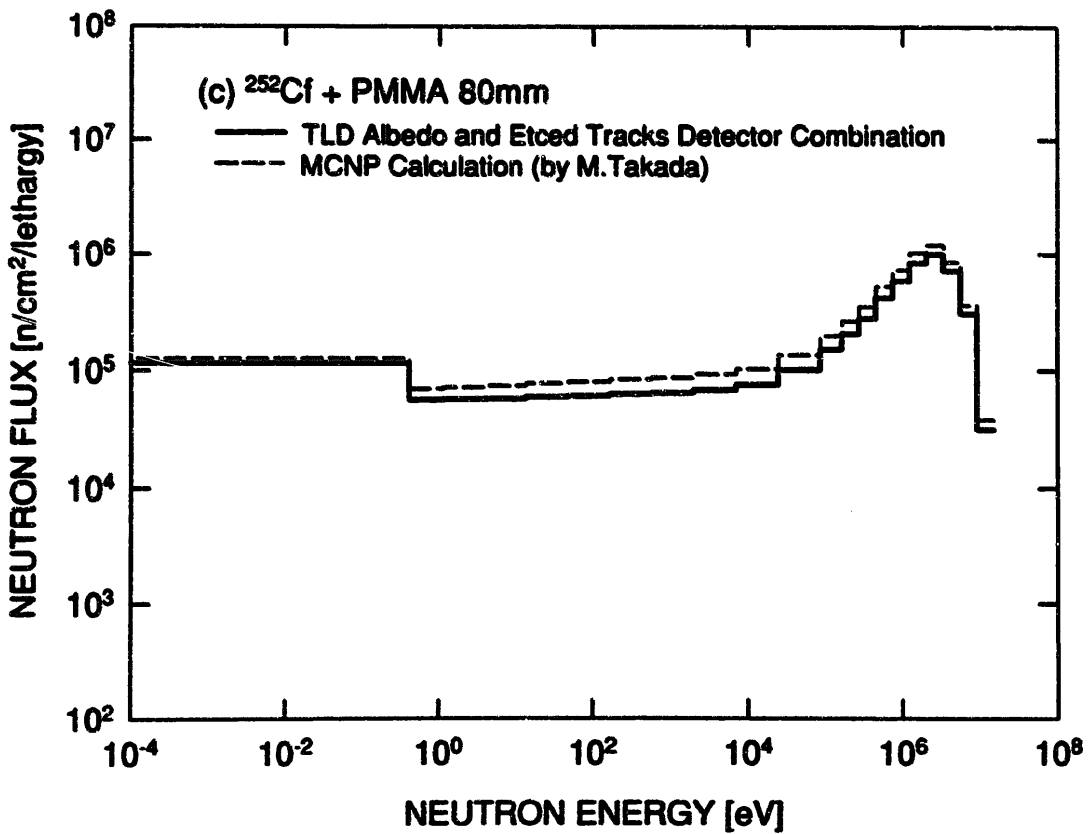
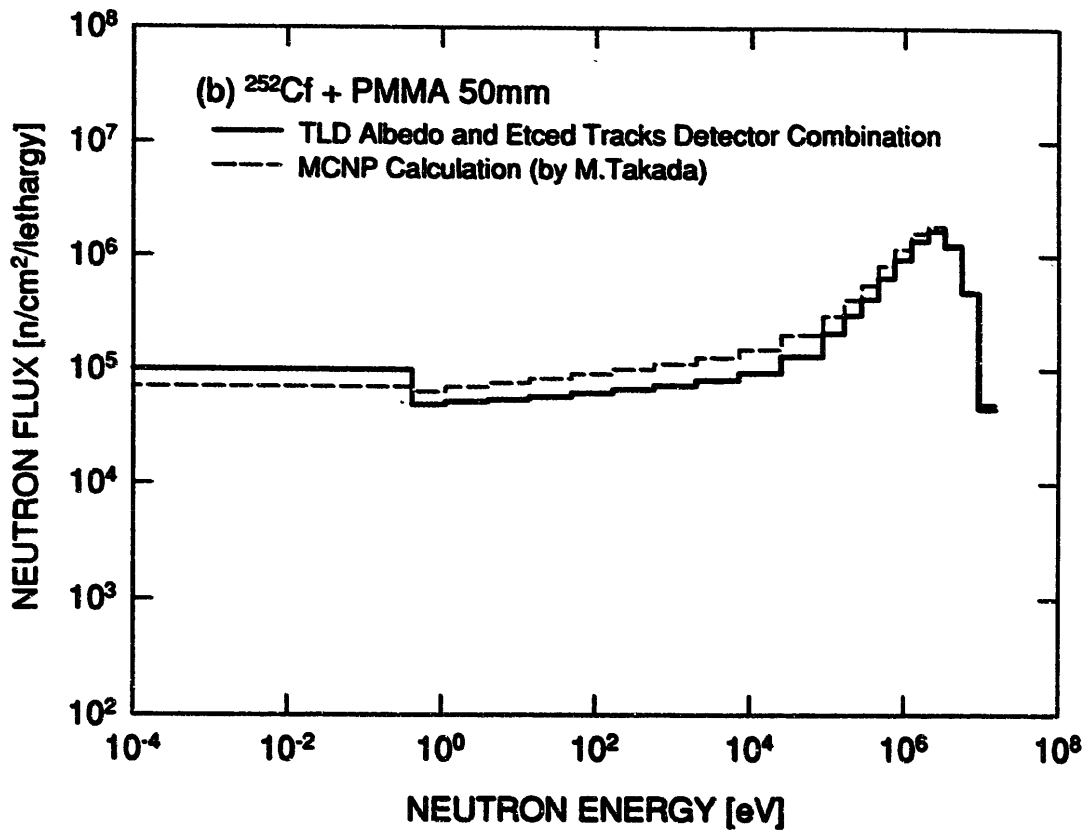
NEUTRON ENERGY [eV]		TLD BADGE[mR ¹³⁷ Cs eq./ (n/cm ²)]			BARYOTRAK
UPPER	LOWER	N2	N3	N4	[T/(n/cm ²)]
1.492E+07	9.048E+06	7.95E-07	7.45E-07	6.13E-06	1.58E-05
9.048E+06	5.488E+06	8.80E-07	8.76E-07	8.25E-06	3.09E-05
5.488E+06	3.329E+06	1.13E-06	1.09E-06	1.04E-05	3.60E-05
3.329E+06	2.019E+06	1.48E-06	1.39E-06	1.38E-05	3.11E-05
2.019E+06	1.225E+06	1.87E-06	1.75E-06	2.01E-05	2.67E-05
1.225E+06	7.427E+05	2.72E-06	2.46E-06	2.11E-05	2.29E-05
7.427E+05	4.505E+05	3.09E-06	2.86E-06	2.81E-05	2.14E-05
4.505E+05	2.732E+05	3.79E-06	3.57E-06	2.88E-05	1.84E-05
2.732E+05	1.647E+05	4.52E-06	4.31E-06	2.92E-05	1.49E-05
1.647E+05	8.652E+04	5.25E-06	4.92E-06	3.25E-05	1.13E-05
8.652E+04	2.479E+04	6.68E-06	5.53E-06	3.58E-05	0.00
2.479E+04	7.102E+03	8.14E-06	7.00E-06	3.83E-05	0.00
7.102E+03	2.035E+03	9.30E-06	8.89E-06	4.34E-05	0.00
2.035E+03	5.830E+02	1.15E-05	1.09E-05	4.94E-05	0.00
5.830E+02	1.670E+02	1.49E-05	1.41E-05	5.49E-05	0.00
1.670E+02	4.785E+01	1.95E-05	1.89E-05	6.81E-05	0.00
4.785E+01	1.371E+01	2.77E-05	2.67E-05	7.93E-05	0.00
1.371E+01	3.928E+00	4.18E-05	4.10E-05	9.65E-05	0.00
3.928E+00	1.125E+00	7.01E-05	6.74E-05	1.28E-04	0.00
1.125E+00	4.140E-01	1.09E-04	1.04E-04	1.70E-04	0.00
4.140E-01	1.000E-04	8.90E-05*	4.86E-06*	5.70E-06*	0.00

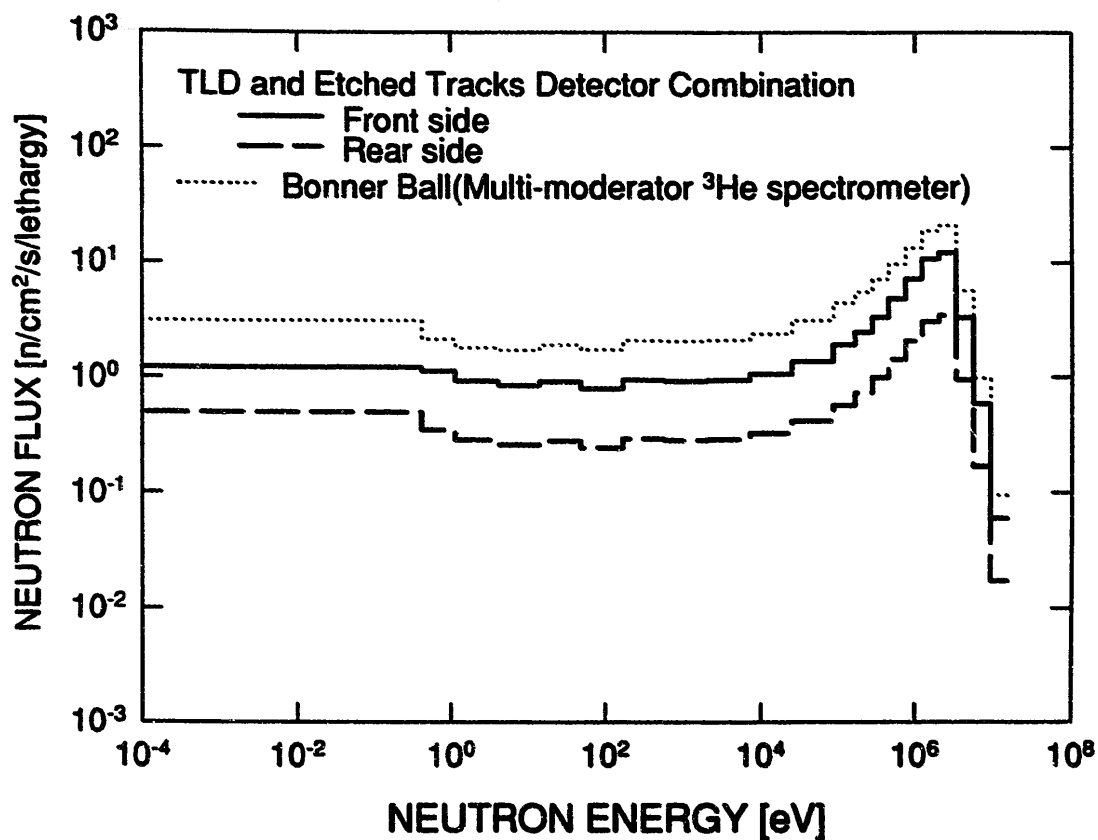
* 実験値 (本文の参考文献[14]から引用)



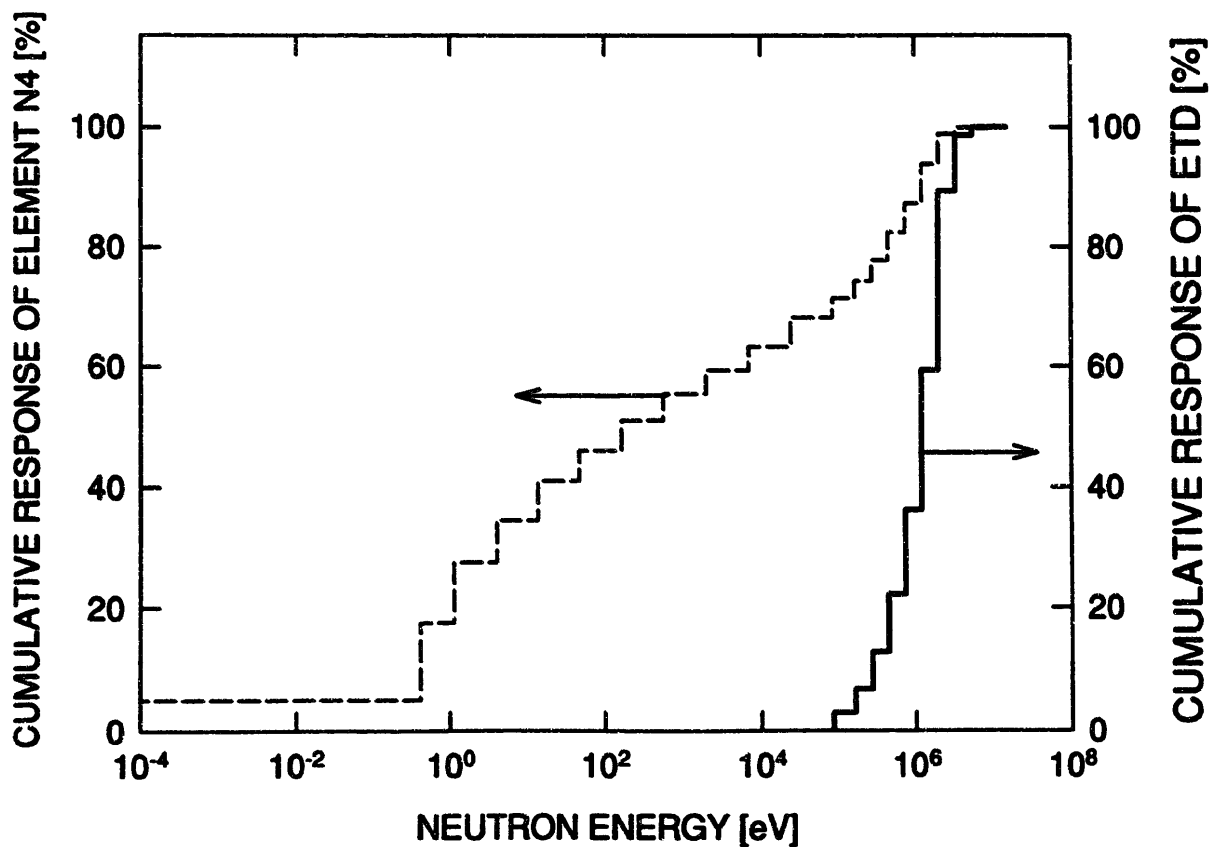
図F-1 TLDバッジと固体飛跡検出器の応答から計算した中性子スペクトル
(²⁵²Cfをアクリル平板で遮蔽した場)

- (a) ²⁵²Cf + PMMA 30mm
- (b) ²⁵²Cf + PMMA 50mm
- (c) ²⁵²Cf + PMMA 80mm





図F-2 TLDバッジと固体飛跡検出器の応答から計算した中性子スペクトル (Pu燃料第三開発室でのフィールド照射試験)



図F-3 TLDバッジと固体飛跡検出器の応答の累積分布 (胸部に装着した場合)

表F-2 積分中性子フルエンスの比較

	TLDバッジ+固体飛跡検出器[n/cm ² /s]			基準値a [n/cm ² /s]	相対比 合計/基準値
	胸部	背面部	合計		
252Cf アクリル30mm	1153	-	1153	1241	0.93
252Cf アクリル50mm	991	-	991	1143	0.87
252Cf アクリル80mm	755	-	755	919	0.82
フィールド試験	45.8	14.8	60.6	96.6	0.63

a Cf-252のアクリル遮蔽場ではMCNPの計算値、フィールド試験はボナー球の結果。

表F-3 個人線量計（フィールド試験）から求めた実効線量当量と
TLDバッジ、ボナー球から求めた線量当量との比較（照射時間で規格化）

	胸部(入射)	背面部(入射)	合計	合計(×C)
TLDバッジから求めた 線量当量(実験値) ^a [mSv]	3.03±0.17	1.03±0.05	4.06±0.17	-
アンフォールディング計算 による実効線量当量[mSv]	(1.12)	(0.17)	1.29	2.04
アンフォールディング計算 による周辺線量当量[mSv]	(1.93)	(0.56)	2.50	3.98
周辺線量当量[mSv] (ボナー球、実験値)	-	-	3.52	-
実効線量当量[mSv] (ボナー球、参考値)	1.92 ^b	1.05 ^c	-	-

a. 高速中性子線と熱中性子線の1cm線量当量評価値の和

b. ボナー球から求めた中性子スペクトルが全て前方から入射すると仮定した計算値
(様々な照射条件での実効線量当量のうち最大値に相当する)

c. ボナー球から求めた中性子スペクトルが全て後方から入射すると仮定した計算値

補遺G 平成3～6年度のTLDバッジと固体飛跡検出器の応答の関係

第3章で説明した方法を用いて、平成3～6年度までの期間にプルトニウム燃料工場及び核燃料技術開発部に所属する作業者が着用したTLDバッジと固体飛跡検出器の応答間関係を調べた。

第4章で示した平成5年度分のデータ解析では、胸部に装着したTLDバッジと固体飛跡検出器のどちらか一方でも中性子線量当量が有意値となるものを抽出したが、ここでは、

平成3、4年度 …固体飛跡検出器のエッチピット数が10[#/3.363mm²]以上

平成6年度 …固体飛跡検出器を着用したものの全数

について解析を行った。表G-1に、解析に使用したデータ数を示す。

表G-1 データ解析に使用したデータ数

個人線量計の種類	平成3年度	平成4年度	平成5年度	平成6年度
TLDバッジ (有意者数/解析対象者数)	443/563	508/612	606/684	290/1173
固体飛跡検出器 (有意者数/解析対象者数)	563/563	612/612	328/413	369/1173

(1) TLDバッジのエレメントG3とG4の関係

図G-1に胸部に装着したTLDバッジのエレメントG3とG4の関係を示す。図(a)～(d)は、それぞれ平成3、4、5年度及び平成6年度の結果である。

主にもんじゅ初装荷燃料の製造を行っていた平成3～5年度の解析結果を比較すると、次第にG3/G4比が小さな、すなわち比較的高エネルギーのγ線を被ばくしている集団の割合が増えていることが分かる。これは取り扱うMOX燃料の組成(237Uの含有割合)や周囲の遮蔽状況・防護衣等による被ばく低減の効果による変化と考えられる。

また、平成6年度はG3/G4比が大きいものが多い。平成6年6～9月にかけて、プルトニウム燃料工場製造課に所属する作業者の内、プルトニウム燃料第三開発室で作業を行う作業者が、工程内滞留核物質のクリーンアウト作業を実施しており、グローブボックス内に滞留していた²⁴¹Amの含有割合の多いMOX粉末を取扱うなど作業内容が平成3～5年度の作業内容に比べて変わっている[7]。また、平成6年10月以降に再開したFBR燃料製造作業においても、海外から返還されたプルトニウムの一部利用に伴い、燃料の同位体組成が平成5年度以前とやや変化していることなどが、G3/G4の発光比の変化の理由であろう。

(2) TLDバッジのエLEMENT N2, N3, N4の関係

図G-2 (a)~(d)に、TLDバッジのエLEMENT N2、N3、N4の関係を示す。

表G-2に、平成3~6年度それぞれの期間の $N2/N4$ 比、 $N3/N4$ 比とその相関係数を示すが、各ELEMENT間の発光関係には有意な相違は見られない。

表G-2 ELEMENT N2, N3, N4の関係

	人数	$N2/N4$	相関係数(r^2)	$N3/N4$	相関係数(r^2)
平成3年度	563	0.90	0.84	0.41	0.67
平成4年度	612	0.97	0.86	0.40	0.69
平成5年度	684	0.98	0.87	0.35	0.69
平成6年度	1173	0.92	0.85	0.40	0.68

(3) TLDバッジと固体飛跡検出器の応答の関係

TLDバッジの高速中性子線の測定量である Rf と、固体飛跡検出器のエッチピット数 T の関係を図G-3 (a)~(d)に示す。

平成3年度の結果(図(a))は、平成4年度以降の結果と比べる直線性が良くない。特にTLDの発光量やエッチピット数が同程度である平成6年度の結果と比べると、その分布が広がっていることが明確に分かる。平成3年~4年にかけては、丁度長瀬ランダウア社(株)がTS-16Nからバリオトラックに切り替えた時期にあたる。補遺Bでも示したようにTS-16Nはバリオトラックに比べると低線量側での統計変動がかなり大きいため、平成3年度の解析結果の直線性が良くなかったのであろう。

表G-3 T と Rf の関係

	人数	T/Rf	相関係数(r^2)
平成3年度	563	0.26	-
平成4年度	612	0.28	-
平成5年度	328	0.28	0.66
平成6年度	369	0.32	0.58

(4) TLDバッジによる γ 線と中性子線の1cm線量当量の関係

図G-4 (a)~(d)は、胸部に装着したTLDバッジから求めた γ 線と中性子線による線量当量の関係である。平成3~5年度は、 γ 線と中性子線の線量当量はほぼ1:1である。また、平成6年度については、平成5年度以前に比べると被ばくした線量当量の値が全般的に小さいので統計的な変動が大きいため、あまり明確ではないものの、

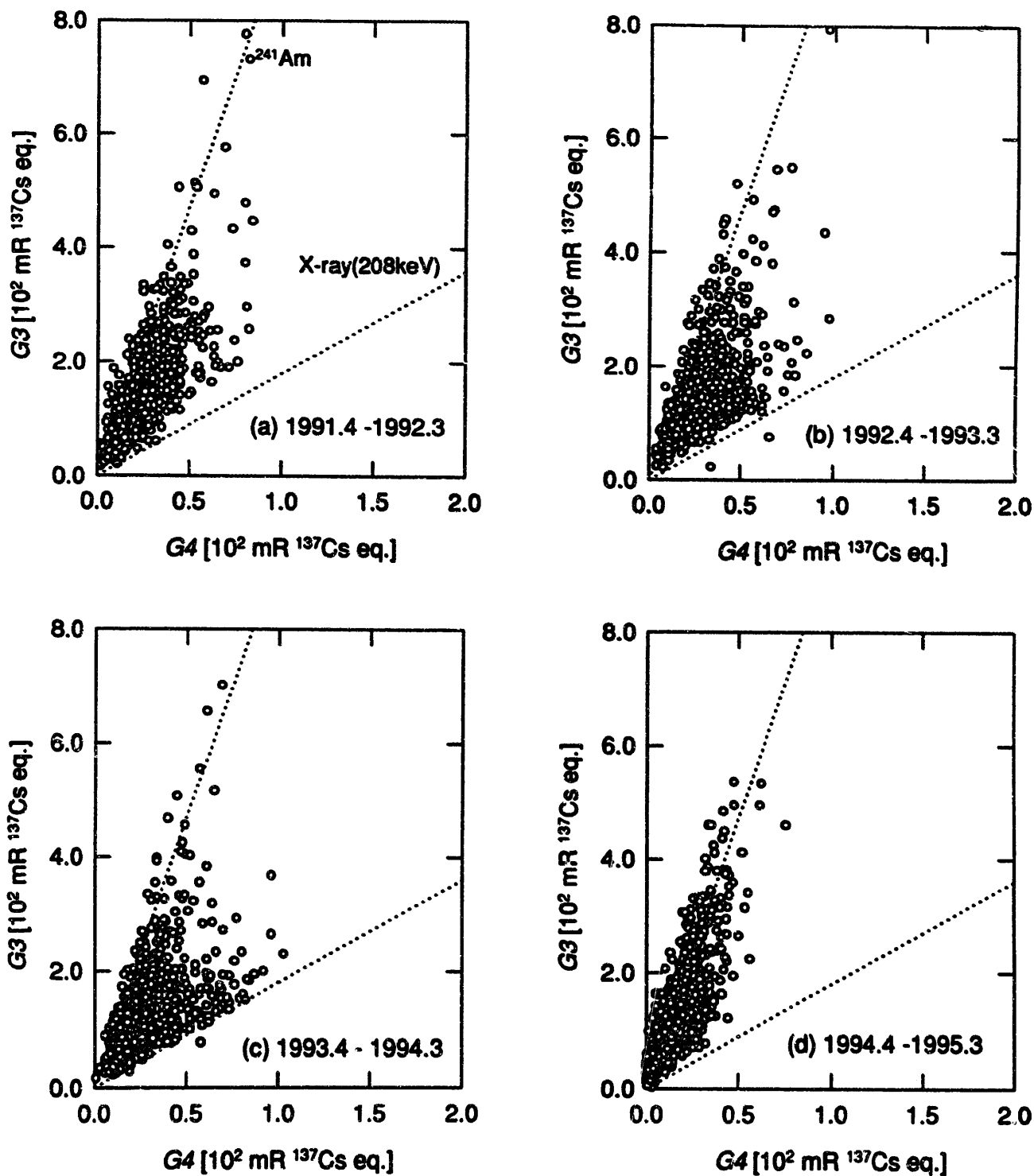
平成5年度以前と比べてやや γ 線による線量当量の値の方が大きい傾向がある。

前述した作業内容や線源組成の違いによるものと考えられるが、同一の作業を行っている小グループ毎に分類するなどしてさらに詳細な解析を行う必要がある。

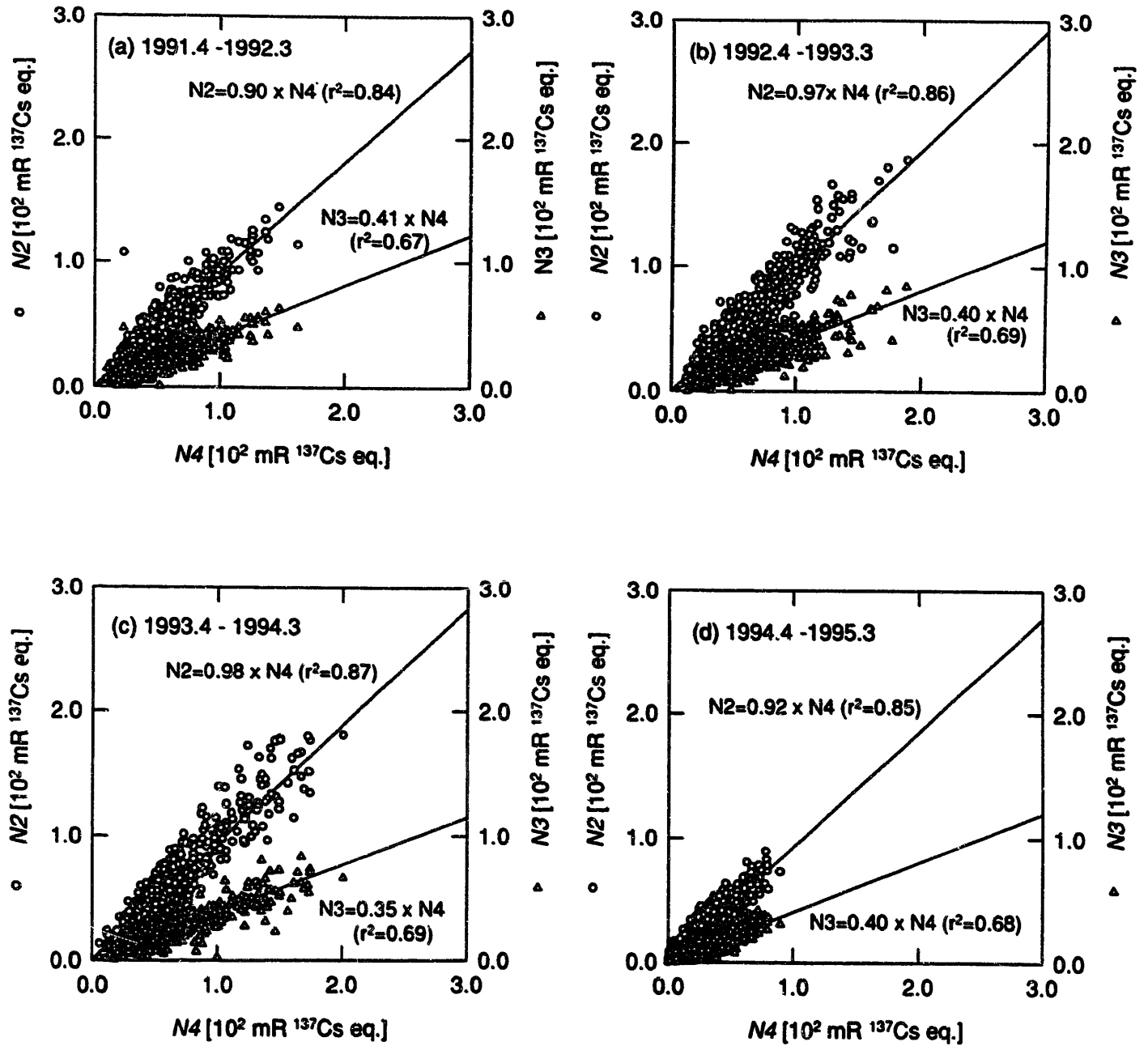
(5) 今後の課題

作業者の被ばくデータの統計解析を行い、年度毎の傾向の推移を調べていくという方法は、作業環境の放射線場の状況を把握したり、被ばく低減化対策の効果を確認することができるなど、その用途は多岐にわたり、こうした統計解析的手法の重要性が今後ますます高まると考えられる。

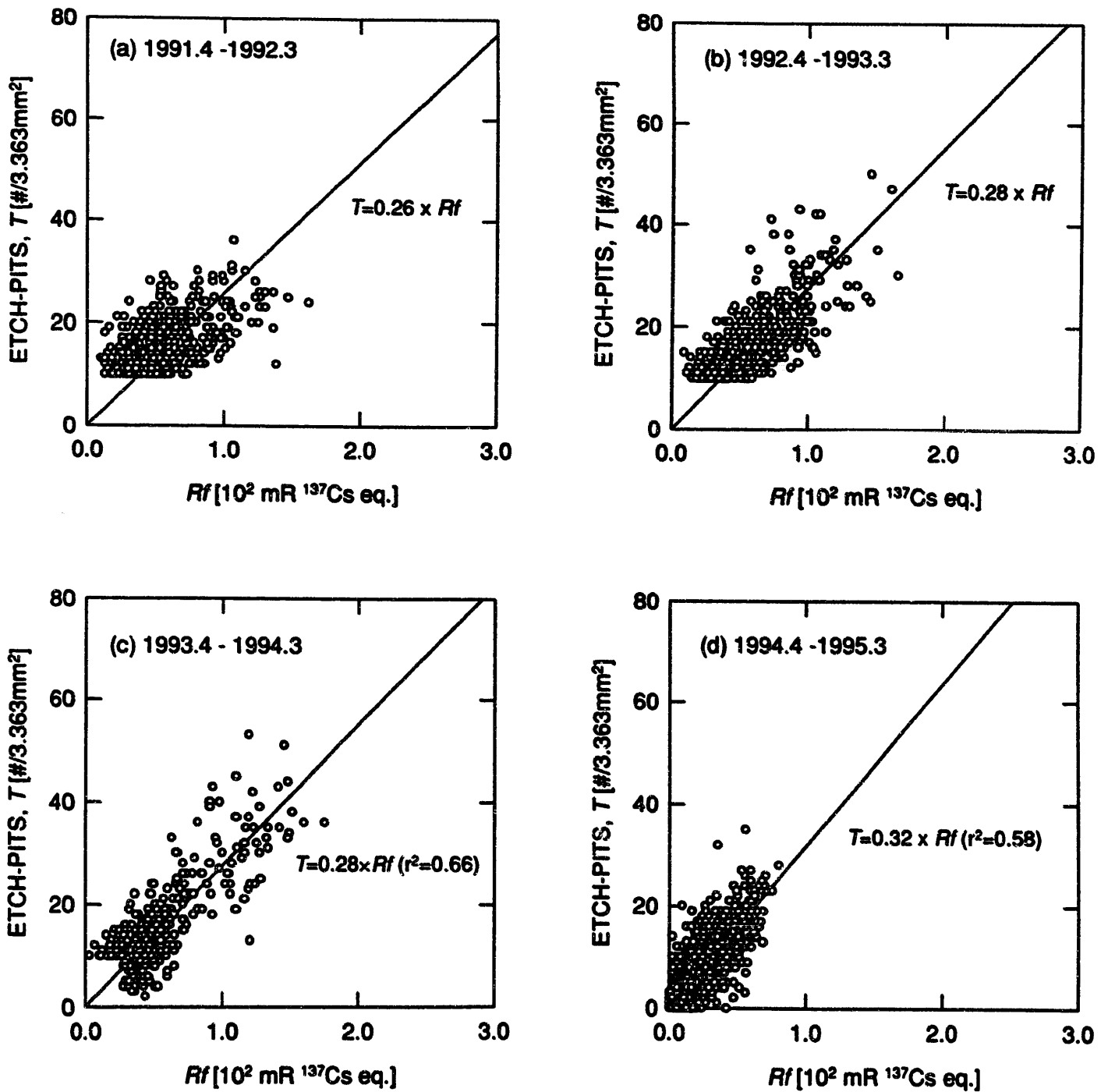
こうした解析を行うには、個人線量計の測定データの精度が高いことが大前提であり、個人線量計の品質管理やTLDリーダーの校正精度などを常に高い水準で維持していく必要があるし、また今回の解析ではデータ抽出の条件が、平成3～4年度、平成5年度、平成6年度とで別々であり、年度毎の被ばく傾向の推移を調べるという目的からも今後条件を統一していく必要がある。



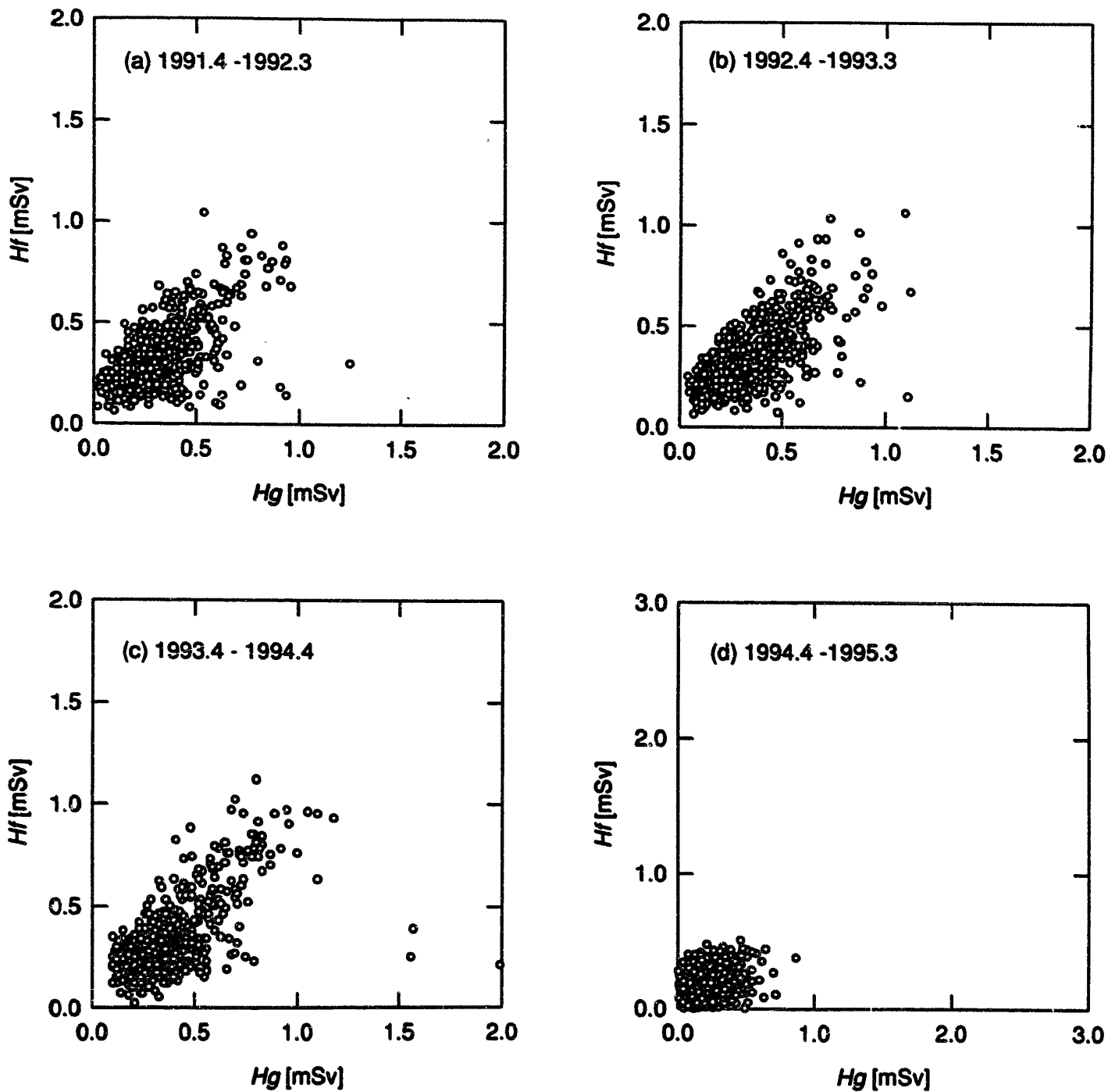
図G-1 作業者の着用したTLDバッジのTLD測定量 G_4 と G_3 の関係
 ((a)平成3年度、(b)平成4年度、(c)平成5年度、(d)平成6年度)



図G-2 作業者の着用したTLDバッジのTLD測定量 $N2$ 、 $N3$ 及び $N4$ の関係
 ((a)平成3年度、(b)平成4年度、(c)平成5年度、(d)平成6年度)



図G-3 作業者の着用したTLDバッジの高速中性子読取り線量 Rf と
 固体飛跡検出器のエッチピット数 T の関係
 ((a)平成3年度、(b)平成4年度、(c)平成5年度、(d)平成6年度)



図G-4 作業者の被ばくした胸部の γ 線1cm線量当量 H_g と
高速中性子線1cm線量当量 H_f の関係
(a)平成3年度、(b)平成4年度、(c)平成5年度、(d)平成6年度