

TLD測定値の信頼性の向上に関する検討(Ⅱ)

— 感度補正係数の実務適用に関する基礎的検討 —

1996年12月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

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下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 技術開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

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

TLD測定値の信頼性の向上に関する検討（Ⅱ）

－ 感度補正係数の実務適用に関する基礎的検討 －

辻村憲雄¹⁾、江尻明¹⁾、小松崎賢治¹⁾、百瀬琢磨¹⁾、篠原邦彦¹⁾

要旨

動燃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の個人被ばく管理にTLDバッジを使用しており、現在、約13,000個のTLD線量計を保有している。

これら保有する全てのTLD線量計について、年一回の感度試験並びにゼロ点確認試験等を行いTLDの品質管理を行っているが、全てのTLDの感度は等しく揃っているわけではないため、ホウ酸リチウム系のTLDで約 8%、硫酸カルシウムTLDでは約 5%の感度の個体差を有しており、より精度の高い線量評価を行うにはTLDの感度の個体差を極力小さくする必要がある。

本報告では、個々のTLDについて感度の個体差を補正する係数（感度補正係数）を実験的にあらかじめ定めておき、線量評価の段階で補正を加えることによって、線量評価精度を向上させる手法について検討した。その結果、ホウ酸リチウム系のTLDについては約 5%、硫酸カルシウムTLDについては約 2%まで、感度の個体差を低減させることが可能であることが判明した。また、現在実施しているTLD品質管理方法に関する問題点を摘出し、今後の検討課題としてとりまとめた。

1) 安全管理部安全対策課

目次

第1章	緒言	1
第2章	TLD品質管理の問題	3
2-1	TLD品質管理の現状	3
2-2	TLD品質管理に関わる問題点の摘出	5
第3章	感度補正係数 (ECF) の運用方法	6
3-1	ECFの適用例	6
3-2	ECFの決定法	7
第4章	感度補正係数 (ECF) の適用検討	11
4-1	ECFの効果確認試験	11
4-2	ECFの長期運用及びリーダー互換性確認試験	21
第5章	まとめ	29
参考文献		30
付録A	TLD自動照射装置の照射線量率の値付け	31
付録B	ECF適用実験の結果	32

第1章 緒言

現在、動力炉・核燃料開発事業団東海事業所では、公式個人線量計であるTLDバッジに使用するTLD線量計を約13,000個保有しており、保有するこれら全線量計について年一回の品質管理試験（感度試験、ゼロ点確認試験、外観検査等）を行い、TLDの品質の確保と線量評価精度の向上に努めている。特にTLDの感度試験は、より高い水準での被ばく線量評価精度を維持する上で極めて重要であるため、東海事業所ではTLDの感度の合格基準[1]を±20%の感度差までとしている。

一方、ICRP Publication 35 [2] では、個人モニタリングに要求される正確さとして、次の事項を提言している。

- (1) 評価された年線量が年間の被ばく限度（50mSv）と同じ桁である場合は、不確かさは95%の信頼度で係数1.5を超えるべきではない。
- (2) 評価された年線量が10mSvに達しない場合には、95%の信頼度で係数2の不確かさが容認できる。

東海事業所の場合、年間の個人被ばく線量の最大値は10数mSv程度であるので、(1)項に該当する。そこで、評価した線量値の真値からの偏差を B 、評価値の標準偏差を σ とし、(1)項の内容を数式表現すると、

$$|B| + 2\sigma \leq 0.50 \quad (B > 0.0) \quad \dots (1-1) \text{ 式}$$

$$|B| + 2\sigma \leq 0.33 \quad (B < 0.0) \quad \dots (1-2) \text{ 式}$$

ここで、

$$B = \frac{\text{estimated dose} - \text{true dose}}{\text{true dose}} \quad \dots (1-3) \text{ 式}$$

と表すことができ、これらの式から導出される σ の最大許容値は 0.17～0.25（百分率標準偏差で17～25%）であることが分かる。

東海事業所のTLDの感度試験の合格基準は±20%以内であるが、感度分布の幅はその基準より狭く最大でも10%程度[3]であることが判明しており、これはICRP Publication 35で勧告された個人線量計による線量当量評価精度の最大許容値 $\sigma=25\%$ よりも、より厳しく、東海事業所の基準によって品質が一様に管理されたTLDによる個人線量当量評価値の精度は、十分に(1)項の条件を満足すると考えられる。

ただし、ICRPはICRP Publication 35で「年線量の評価値の不確かさは、合理的に達成できるかぎり引き下げるべきである」と勧告[2]していること、また、ICRPの1990年勧告(ICRP Publication 60)[4]で放射線業務従事者の被ばく限度が現在の50mSv/年から100mSv/5年（単純計算で20mSv/年）に引き下げられたため、個人被ばく管理業務において今後より高い線量評価精度が要求されること等から、現在実施しているTLD

の感度試験の合格基準の見直し、あるいは、よりTLDの感度の一様性を確保する手法の適用によってTLDバッチによる線量評価精度を向上させる必要がある。

そこで、本研究では、TLD一個一個について感度の大小を補正する係数（感度補正係数、ECF; Efficiency Correction Factor）を実験的に別途定めておき、線量評価の段階で補正を加えるという手法を適用することによって、TLDの感度の個体差を低減させることを検討した。本手法は、既到大洗工学センター等で実務適用されている方法であり、既存のTLD線量計に適用可能であること、経済的負担が小さいこと、といった利点がある。本稿では、感度補正係数を現在の個人被ばく管理業務に適用するための事前準備として、比較的少数個のTLDを用いて感度補正係数の決定方法、その効果を調べるとともに、現在実施しているTLDの品質管理方法の問題点を摘出し、今後の検討課題としてとりまとめた。

第2章 TLD品質管理の問題

2-1 TLD品質管理の現状

現在、TLDバッジに使用するTLD線量計（ β/γ 線用 UD-808P、中性子線用 UD-809P）について、新規購入時と年1回の定期検査時に、外観検査、感度検査、残線量検査（未照射時の読取り値）を実施している。試験の項目と品質管理試験の流れをそれぞれ表2-1、図2-1に示す。また、保有するTLD線量計は、ID番号が奇数のものと偶数のものの2グループに分け、表2-2に示すスケジュールで運用している。

表2-1 UD-808P、UD-809P線量計の品質管理試験の項目 [1]

区分	目的	実施項目	内容・方法	実施頻度 対象
購入時 受け入れ 検査	TLDバッジ購入時のTLDバッジとバッジケースの健全性を確認する。	外観検査	バッジケース及びTLD素子の外観、形状、構造、構成に異常のないことを目視で確認する。	全数 TLDの 購入時
		リーダーとの適合性確認	TLD自動リーダーでの自動測定が可能であることを確認する。	
		残線量確認	アニール処理後、TLD素子の発光量が以下の基準内であることを確認する。 ホウ酸リチウム系TLD 5mR以下 硫酸カルシウムTLD 1mR以下	
		感度確認	安全管理別棟のTLD照射用 γ 線自動照射装置にてCs-137で約160mRの照射を行い、TLDの感度が下記の基準内であることを確認する。 (1) 各エレメント毎の百分率標準偏差が、 ホウ酸リチウム系TLD 6%以下 硫酸カルシウムTLD 5%以下 (2) 各エレメントの読取り値が、読取り値の平均に対して $\pm 15\%$ 以内であること (3) 各エレメントの平均読取り値が、事業団所有の基準TLDに対して $\pm 5\%$ 以内であること (4) 同一線量計上の同一種類のTLDの感度の横並びが $\pm 10\%$ 以内であること	
定期 検査	TLDバッジの使用に伴うTLD素子、バッジケースの損傷、性能劣化の有無を確認する。	外観検査	TLDバッジ及びグレートの汚れ、傷、歪み等の有無を目視で確認する。	全数 1回/年
		残線量確認	購入時受け入れ検査と同じ	
		感度確認	安全管理別棟のTLD自動照射装置にてCs-137で約160mRの照射を行い、TLDの感度が下記の基準内であることを確認する。 (1) 各TLDの読取り値が、基準線量（計）に対して $\pm 20\%$ 以内であること	

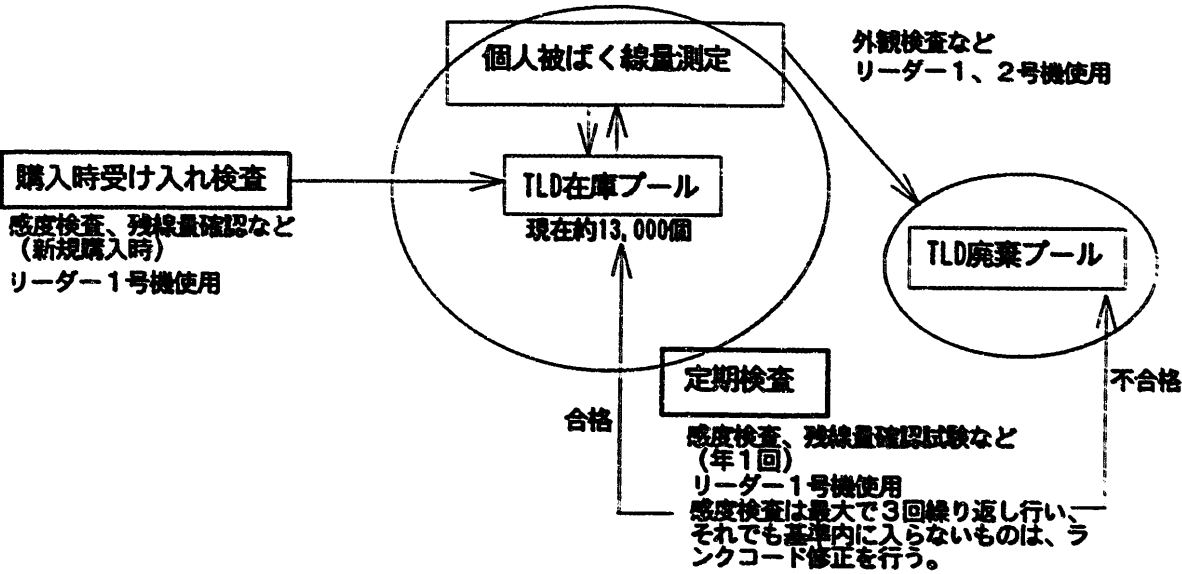


図2-1 TLD品質管理の流れ

表2-2 TLD品質管理定期検査の年間スケジュール

四半期	月	一ヵ月管理者	三ヵ月管理者	次期分準備*	定期検査
1	4	奇数	奇数	-	偶数
	5	偶数	↓	-	↓ (再試験含む)
	6	奇数	↓	偶数7ニ-ル	←
2	7	偶数	偶数	-	奇数
	8	奇数	↓	-	↓ (再試験含む)
	9	偶数	↓	奇数7ニ-ル	←
3	10	奇数	奇数	-	偶数**、試験漏れ
	11	偶数	↓	-	↓ (再試験含む)
	12	奇数	↓	偶数7ニ-ル	←
4	1	偶数	偶数	-	試験漏れ (予備)
	2	奇数	↓	-	
	3	偶数	↓	奇数7ニ-ル	

* 表中には、3ヵ月管理者の場合のみ示した。

** 1ヵ月管理者用の偶数番号のTLD線量計は、第1四半期の定期検査で感度検査が実施できないため、第3四半期に行う。

2-2 TLD品質管理に関わる問題点の抽出

現在のTLDの品質管理に関わる問題点を抽出し、表2-3にまとめた。

表2-3 TLD品質管理の問題点

項目	問題点	対策
TLDの感度の個体差 (エレメント毎)	各エレメントについて±20%までを許容している。	感度補正係数 (ECF) の適用 ECFの自動計算ソフトの開発
TLDの感度の個体差 (4個のTLD/線量計)	1個の線量計上の、同種類の3個のTLDについては横並び±10%の基準があるが、残り1個のTLDに対する制限がない。	
TLDの感度の個体差 (ランクコードの修正)	感度検査で基準外のTLDについては一部ランクコードの修正によって基準内の感度を持たせることができるが、その処理は手動で手間がかかる。	
製造ロット毎の感度差	±5%までを許容しているが、新規に購入する都度、TLD全体の感度分布が歪み、その幅が広がる。	
リーダーの測定処理時間	定期検査と定常の個人被ばく管理用の測定が重なった場合、2つの業務間のスケジュール調整が難しく、個人被ばく管理用のTLDの測定に支障をきたす恐れがある。	品質管理試験あるいは7-2用専用の自動リーダーを確保する。
リーダーの加熱調整	加熱チェック用TLDを用い、ブリード・ズ、メイ・ド・ズ、ポスト・ド・ズの相互関係より加熱状態を確認しているが、加熱状態の良否が多分に経験的なものになっている。	グロ-曲線による判定、あるいは加熱ランプの加熱特性をモニターする機能を用いた自動調整方法を開発する。
統計処理 (定期検査時の感度試験)	既存のパソコン及び統計処理ソフトの処理能力、機能が貧弱であり、ロット別、年度別に統計処理や分析ができない。	大容量の記録媒体と演算能力を備えたパソコンを用い、新規に新たな機能を盛り込んだ統計処理ソフトを開発する。
統計処理 (残線量確認試験)	既存のソフトには残線量のデータベースがない。	
TLD使用履歴管理	長期間の使用に伴う性能劣化に関するデータベースが無く、計画的なTLDの廃棄・補充ができない。	TLDの使用履歴を管理するソフトを新規開発する。
TLD線量計の在庫管理	放射線業務従事者の増加に伴い、不足がちである。特に、10月期の再処理工場従事者の一斉解除により表2-2のスケジュール通りの運用ができなくなっている。	TLD補充に関する計画の必要。 在庫管理データベースの機能拡充。 奇数・偶数の2グループを、10月期再処理工場従事者の一斉解除分も含めて3グループ化する。
廃棄TLDの管理	データベースが無い。	廃棄TLDのID番号、原因、廃棄年度を記録するデータベースを作成する。
外観検査の自動化	目視点検のため時間がかかる。	CCDカメラ等を用いた自動外観検査装置を開発する。
異常測定値の判定	誤信号による異常測定値の判定が難しい。	グロ-曲線を用いた自動判定機能を既存のシステムに増設する。

第3章 感度補正係数 (ECF) の運用方法

感度補正係数 (ECF) の決定方法について文献調査などを行い、その結果をもとに東海事業所で実施するECFの決定方法について検討した。

3-1 ECFの適用例

(1) PlatoとMiklosの方法

TLDのECFを決定する方法の代表的な例としては、PlatoとMiklosの提案する方法[5]がある。彼らは、3,000個のTLD（松下産業機器株式会社製のUD-800シリーズ）について、表3-1に示す10ステップからなるECF決定法の適用を検討し、大規模な個人被ばく管理に極めて有効であることを示している。

表3-1 PlatoとMiklosの提案するECF決定方法[5]

(1)	3,000個のTLDの中から約200個程度のTLDを無作為に抽出し、これを基準用TLDとする。抽出した基準用TLDに ^{137}Cs による γ 線を照射（500mR）し、リーダーで測定する。
(2)	基準用TLDの読取り線量の全体平均を求める。
(3)	読取り線量の全体平均に規格化するように、それぞれの基準用TLDのECFを決定する。
(4)	(1)～(3)の手順を数回繰り返す。
(5)	(4)の手順で得られたECFの平均値を定める。
(6)	基準用TLDのECFの平均値、その変動係数の統計解析を行う。
(7)	基準用TLDとして抽出した以外の残りのTLDを個人管理用TLDとする。個人管理用TLDを500個程度の小グループに分け、基準用TLDから抽出した50個程度の小グループとともに照射（ ^{137}Cs 、500mR）、測定する。
(8)	同時照射した基準用TLDのECF補正後の平均読取り線量を求める。
(9)	(8)の平均読取り線量の値に規格化するように、それぞれの個人管理用TLDのECFを決定する。
(10)	個人管理用TLDのECFの統計解析を行う。

(2) 大洗工学センターの方法

大洗工学センターでは、昭和63年度よりTLDバッジによる線量評価にECFを導入している[6]。各TLD線量計につき年1回、自由空間中で1.0mSv（ ^{137}Cs の γ 線）照射し、以下に示す式よりECFを決定する。ECFの決定方法に関する基本的な考え方は、Platoらの手法とほぼ同様である。

$$F_i = \frac{\sum_{n=1}^N F_{i,n}}{N} \quad \dots (3-1)$$

$$F_{i,n} = \frac{E_{i,n}}{\overline{E_s}} \quad \dots (3-2)$$

- F_i : 各プレートのエLEMENT i ($i=1\sim4$) の感度補正係数 (最終決定値)
 N : 測定回数 ($N \leq 3$)
 $F_{i,n}$: n 回目の照射におけるELEMENT i の感度補正係数
 $E_{i,n}$: n 回目の照射におけるELEMENT i の読取り値
 $\overline{E_s}$: 基準TLD素子の各ELEMENTの総平均読取り値

(3) その他の例

線量測定サービス会社である千代田保安用品株式会社 (平成8年4月より千代田テクノルと社名を変更) では、個人被ばく管理汎用TLD線量計「CAROT」及び不均等被ばく管理用TLD線量計「Duet」について、 ^{60}Co 線源による標準照射試験を行い、ECFを決定している [7]。また、カールスルーエ原子力研究所では同研究所で使用するTLD線量計 (Harshaw社製 TLD600及びTLD700) のECFを決定する際、 γ 線10mSvの照射を行っている [8]。

3-2 ECFの決定法

前節の調査結果を基に、東海事業所で実施可能なECFの決定方法を具体的に検討した。

(1) 照射装置

ECFの決定に使用する照射装置としては、計測機器校正施設の ^{137}Cs γ 線照射装置と安全管理別棟のTLD用 γ 線自動照射装置 (以下、「TLD自動照射装置」と記す) の2つの選択肢があり、表3-2に、2つの照射装置の特徴をまとめた。計測機器校正施設の ^{137}Cs γ 線照射装置は国家標準場と直接のトレーサビリティを持ち、東海事業所の基準線源でもあるが、エリアモニター等の校正がその主要業務であり、数多くのTLDの照射のための使用には時間的な制限がある。一方、安全管理別棟に設置したTLD自動照射装置は、ベルトコンベアにより自動に、かつ連続的に数多くのTLD線量計を照射することが可能であること、使用に時間的な制限がないこと、計測機器校正施設の ^{137}Cs γ 線照射装置に対して3%程度の精度で照射線量率の値付けがなされていること、などの点からECFの決定には安全管理別棟に設置したTLD自動照射装置の方が適していると考えられる。

表3-2 計測機器校正施設の ^{137}Cs γ 線照射装置と
安全管理別棟のTLD照射用 γ 線自動照射装置の比較

	計測機器校正施設 ^{137}Cs γ 線照射装置	安全管理別棟 TLD自動照射装置
線源	^{137}Cs (1.11TBq、昭和61年 2月現在)	$^{137}\text{Cs} \times 2$ 個 (7.4GBq/個、昭和58年9月現在)
トレーサビリティ	国家標準場との直接の トレーサビリティを持つ	計測機器校正施設 ^{137}Cs γ 線 照射装置との比較による値付け
照射線率 (平成8年12月)	100mR/12.5分 (線源-線量計距離 4.0mの場合)	100mR/1.9分 (ベルトスピード2の場合)
精度	国家標準場に対して $\pm 4\%$	計測機器校正施設 ^{137}Cs γ 線 照射装置に対して $\pm 3\%$
個数/一回照射	約100個	連続照射 (回転ベルトによる)
使用の制限	施設の使用状況による	無し (年間を通して連日可)
備考	専用照射板にTLD線量計を セットする必要がある	マガジンチェンジャーによる 自動供給

(2) 照射回数

PlatoとMiklosの提案する方法では、ECFを決定する際、数回 (通常は3回程度) の照射を行うとしており、大洗工学センターでもほぼ同様である。ただし、前述したように、現在実施している年一回のTLDの感度検査にしても、通常の個人被ばく管理業務と同一のTLD自動リーダーを用い、かつ個人被ばく管理業務としてのTLDの測定と並行して行っているため、二つの業務間でTLD自動リーダーを使用する時間の調整が困難な場合がある。例えばTLD自動リーダーで感度検査用のTLDを測定している間は、指定解除等に伴うTLDの測定ができず、個人の被ばく線量を評価するという最も主要な業務が滞ることがあるなど、現在保有するTLD自動リーダーの台数と測定処理能力ではECF決定のための複数回の照射の実施は極めて難しい。

また、複数回の照射を行い決定したECFと、ただ一回の照射によって決定したECFとで、どちらの方法がどれだけ効果があるかを確認した上で照射回数を設定する必要がある。二種類の方法により決定したECFの効果に大きな差が無ければ、時間も手間もかかる複数回の照射を行う必要はないので、複数回の照射を行うかどうかについては実験的な確認が必要であろう。

(3) 照射する線量レベル

ECFを決定する際に照射する線量のレベルは、PlatoとMiklosの提案する方法では500mR、大洗工学センターでは約100mR (1.0mSv)、カールスルーエ原子力研究所では1000mR (10mSv)である。これらの線量を照射した場合のTLDの測定値の統計変動は、ホウ酸リチウム系TLDの場合それぞれ約2.0%、約4.5%、約1.4% (硫酸カルシウムTLDの場合は発光効率が高いため全ての条件で1%未満である。)である。仮にECF決定のための照射を複数回実施しないとすると、ECFを精度良く決定するためには、1回の照射で得られる測定値の統計変動をできる限り小さくすることが望ましい。

安全管理別棟のTLD自動照射装置を用いてECFを決定した場合、その照射線量は約160mRであるので、ホウ酸リチウム系TLDの測定値の統計変動は3.5%である。ただし、現在検討しているTLD自動リーダーの改良によって、これまでのリーダーに比べてTLDの熱蛍光の検出効率が2～3倍程度まで増大するため[9]、同程度の照射量であってもホウ酸リチウム系TLDの測定値の統計変動は約2%程度まで改善することできる。従って、将来的にはTLD自動照射装置による約160mRの照射でも十分な精度でECFを決定できると考えられる。

(4) ECF決定の際の規格化基準量

ECFを決定する際の規格化基準 (TLDの感度を揃える際を中心) は、照射装置により与えられる照射線量とする場合と、保有するTLD線量計約13,000個から特別に抽出した数100個程度のTLD線量計 (基準TLD) の平均読取り値とする場合の二種類の方法が考えられ、PlatoとMiklosの提案する方法、大洗工学センターの方法は共に後者の考え方である。

表3-3に、ECF決定の際の規格化基準量を、照射装置による照射線量とする場合と、基準TLDの平均読取り値とする場合の長所・短所をまとめた。現在の品質管理試験における感度検査の考え方を踏襲できるという点で、照射線量を規格化基準量とする方法の方が簡便であり、現時点では妥当と考える。

以上の検討結果から、本報告では次の方法よりECFを決定し、その効果を調べることとした。

照射装置	: 安全管理別棟設置のTLD自動照射装置
照射回数	: 1～3回 (実験的な確認を行う)
線量レベル	: 約160mR
規格化基準量	: TLD自動照射装置による照射線量

表3-3 ECF決定の際の規格化基準量

	照射線量	基準TLDの読取り値
前提条件	・ TLD自動リーダ-の測定条件（加熱タイム、読取りパラメータ等）を常に一定に維持する必要がある。	・ 基準TLDとECFを決定するTLDとを同時に照射・測定。 ・ 基準TLDとリーダ-校正用TLDに同一のTLDを用いる。もしくは両者の感度の相互関係を把握しておき、自動リーダ-の校正の際に確実に反映させること。
長所	・ TLD自動照射装置を使用すれば年間を通じて一定量の照射が確実に行え、基準量としての普遍性がある。 ・ パソコンによるデータ処理が極めて簡便。	・ 自動リーダ-の測定条件の変動と読取り値の変動とが相殺されるため、自動リーダ-の測定条件がECF決定に影響しない。
短所	・ 加熱ランプの交換によって加熱状態が変わる可能性有り。	・ 照射・測定の都度、限られた個数しかない基準TLDを使用しなければならないため、スケジュール調整が難しい上、準備と測定に手間がかかる。 ・ 基準TLDの使用頻度が高い。

第4章 感度補正係数（ECF）の適用検討

4-1 ECFの効果確認試験

1 回照射及び複数回照射によって決定したECFの効果を調べるため次のような実験を行った。

- (1) 表4-1に示すグループ A～Fの線量計について、計測機器校正施設の ^{137}Cs γ 線照射装置を用いて、100mR（空気吸収線量で 0.86mGy）の照射を行う。
- (2) リーダー1号機で測定する。
- (3) 同じ線量計について、安全管理別棟のTLD照射用 γ 線自動照射装置で約160mRの照射及びリーダー1号機による測定を3回繰り返し行う。
- (4) (3)の読取り値から、次式を用いてECFを定める。

$$F_{i,j,k} = \frac{X}{E_{i,j,k}} \quad \dots (4-1)$$

$$\overline{F}_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^3 F_{i,j,k}}{3} \quad \dots (4-2)$$

$E_{i,j,k}$: k 回目の照射におけるTLD線量計 i のエLEMENT j の読取り値

X : 照射線量 (約160mR、補遺の(1)式より算出)

$F_{i,j,k}$: k 回目の照射におけるTLD線量計 i のエLEMENT j のECF

$\overline{F}_{i,j}$: $F_{i,j,k}$ の3回の平均

- (5) (2)の結果と、(4)の(4-1)、(4-2)式で定めたECFを(2)に適用した場合の結果とを比較し、TLDの感度の個体差の変化を調べる。

実験では、20～25個のTLD線量計を一つのグループとし、表4-1に示す計6グループのTLD線量計を用いた。ここではグループ毎に4-1表に示すように記号A～Fを付番する。なお、本実験で使用したTLD線量計は、個人被ばく管理業務に使用するTLD線量計の中から無作為に抽出したものである。

表4-1 ECFの効果確認試験に使用したTLD線量計

グループ	線量計の種類	個数	$^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ エレメント数	$^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ エレメント数	$\text{CaSO}_4(\text{Tm})$ エレメント数
A	UD-808P	20	60	-	20
B	UD-808P	20	60	-	20
C	UD-808P	25	75	-	25
D	UD-809P	20	20	60	-
E	UD-809P	20	20	60	-
F	UD-809P	25	25	75	-

グループA～Fの実験結果をそれぞれ図4-1 (a)～(f)、付録Bの表1 (a)～(f)に示す。

図は、左側のプロットから、計測機器校正施設で100mRの照射を行ったときの平均読取り値と標準偏差、続いて安全管理別棟のTLD自動照射装置で約160mR照射したときの平均読取り値からECF ((4-1)式による)を定め、計測機器校正施設の照射結果にECFを適用した場合の結果、さらに3回の照射による平均のECF ((4-2)式による)を適用した場合の結果である。

図の結果からも明らかなように、ECFを適用することによって、TLDの感度の個体差はホウ酸リチウム系TLD、硫酸カルシウムTLD共に小さくなるとともに、それぞれグループの平均読取り値も照射した線量100mRとほぼ同じ値を示すようになることが分かる。

表4-2に、ECFを使用しない場合とECFを使用した場合の、グループ毎のTLD感度のばらつきの比較を示す。グループ毎に見るとTLDの感度の個体差はホウ酸リチウム系TLD、硫酸カルシウムTLDそれぞれ約5%、2%未満まで小さくなる。また、同表には各グループの平均読取り値のグループ間のばらつきも示しているが、何れの種類のTLDについてもECFの適用によって、グループ間の感度差が極めて小さくなっていることが分かる。

一方、1回照射により決定したECFと3回照射により決定したECFの効果の比較では、3回照射の方がTLDの感度の個体差をより小さくするが、1回照射と比べて極めて効果があると言えるほどではなく、総数約13,000個のTLD線量計について3回の繰り返し照射を行うための膨大な手間と時間を考えると1回の照射によるECFでも十分な感度の個体差の補正効果が得られる。

また、TLDによる線量評価式は、1個の線量計上の4個のTLD素子の感度が揃っていることを前提として構築されているため、線量評価精度を向上させるには、同一線量計上にある4個のTLD素子の感度差ができる限り小さくする必要があり、その感度差は特に中性子線量当量の評価精度に大きく影響することがこれまでに分かっている[3]。図4-2に、線量計一個あたりに内蔵される4個のTLD素子の感度のばらつきの、グループ平均をプロットした結果を示す。図(a)(b)それぞれUD-808P、UD-809P線量計の結果である。ECFの適用によって、UD-808P、UD-809Pそれぞれ約4%、約5%まで、同一線量計上にある4個のTLD素子の感度差が小さくなり、一様な横並びの感度を持たせることが可能になる。

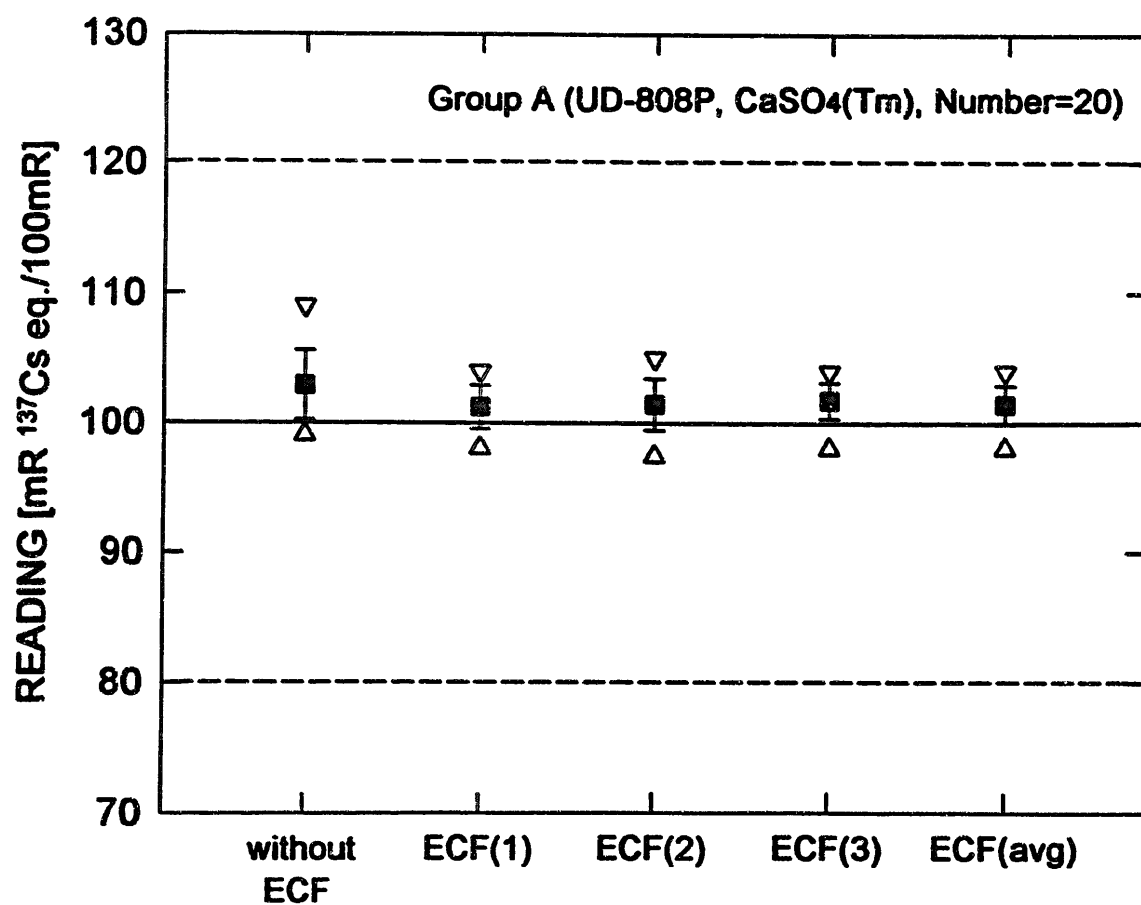
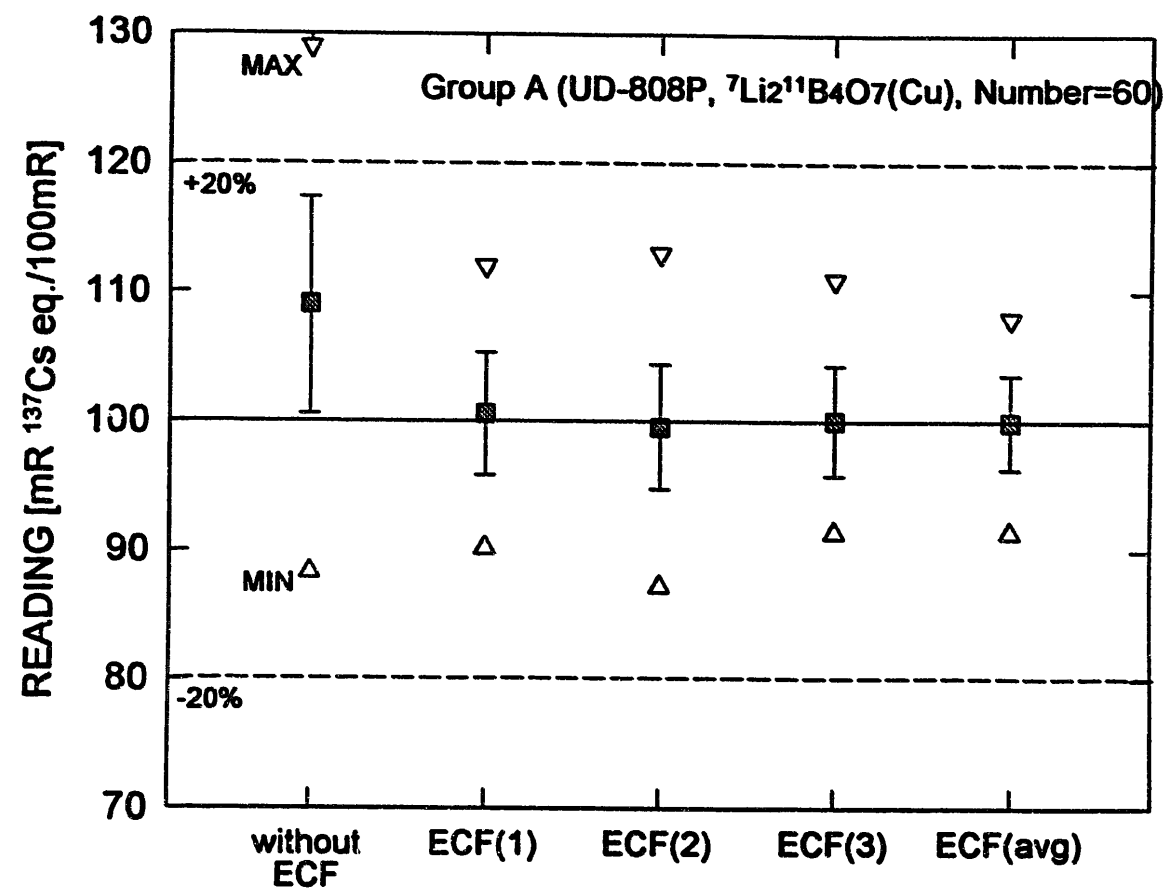


図4-1 (a) UD-808P線量計 (グループA) のECF適用効果

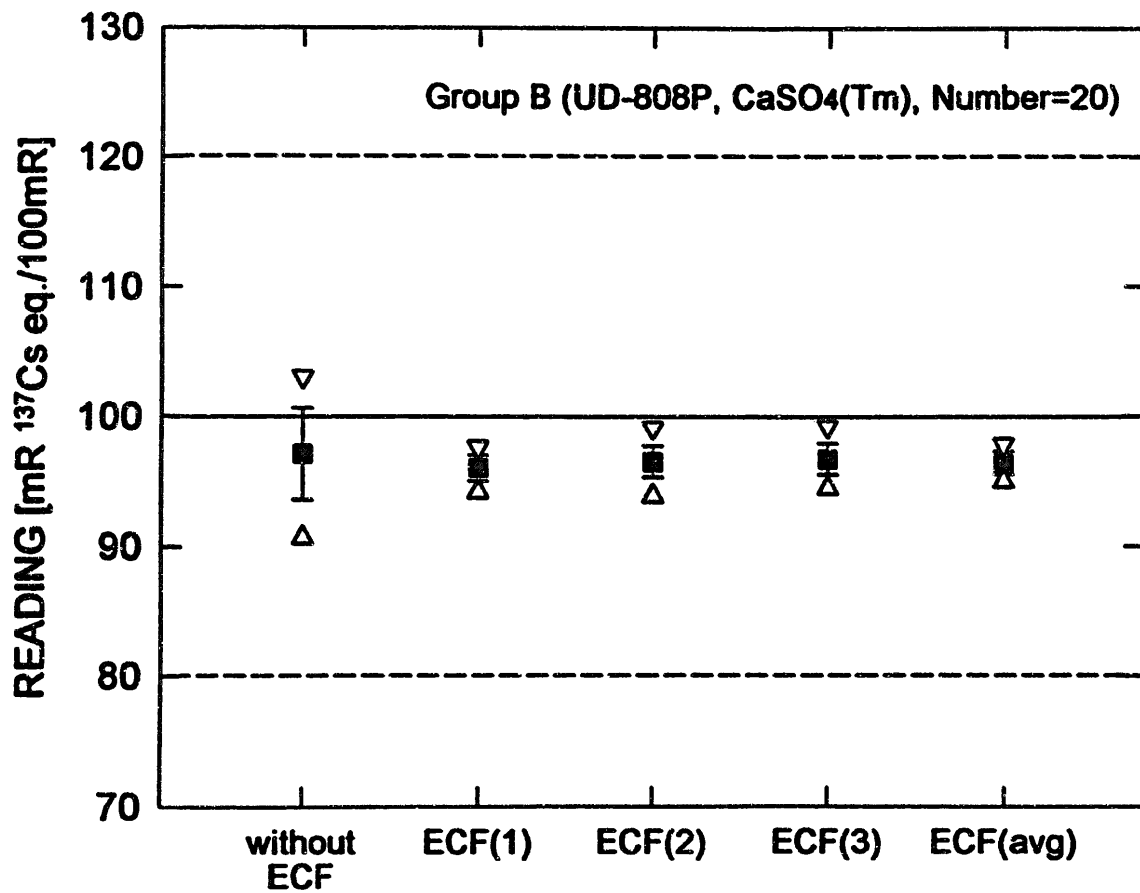
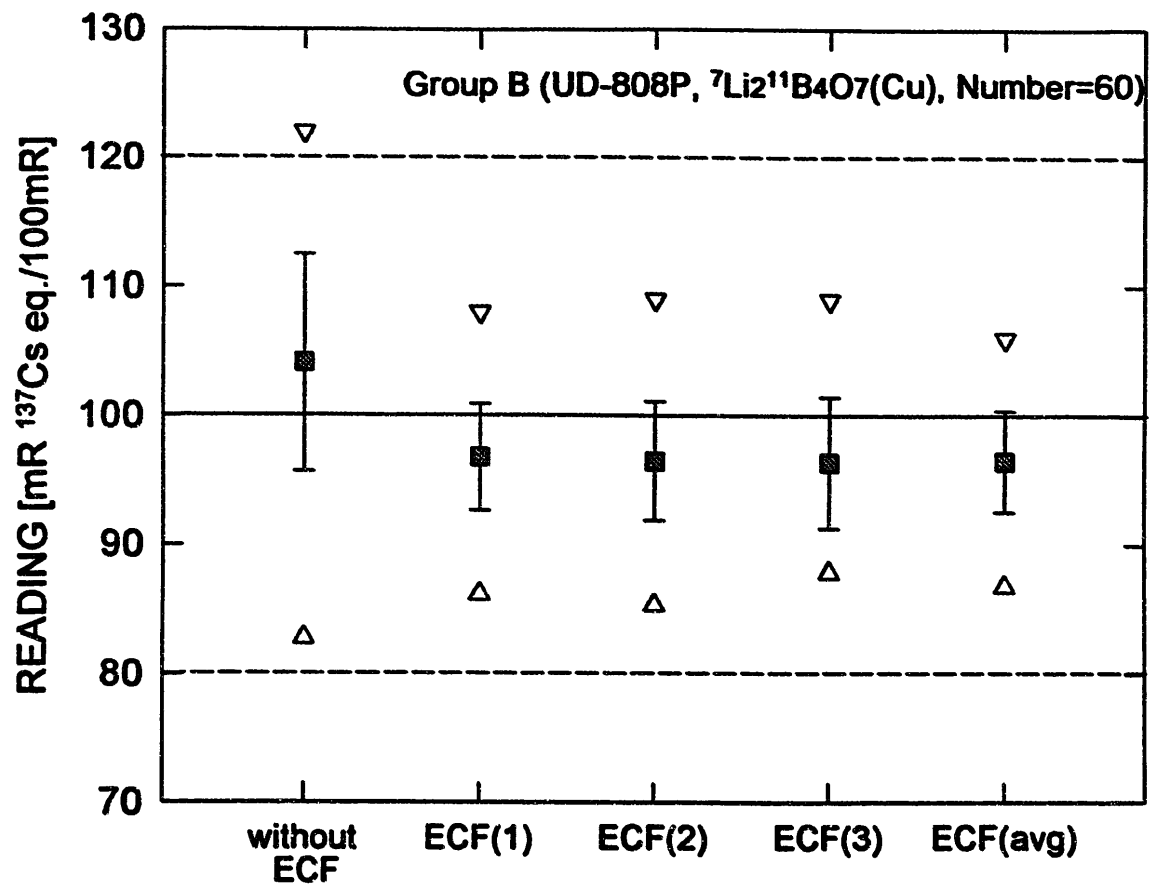


図4-1 (b) UD-808P線量計 (グループB) のECF適用効果

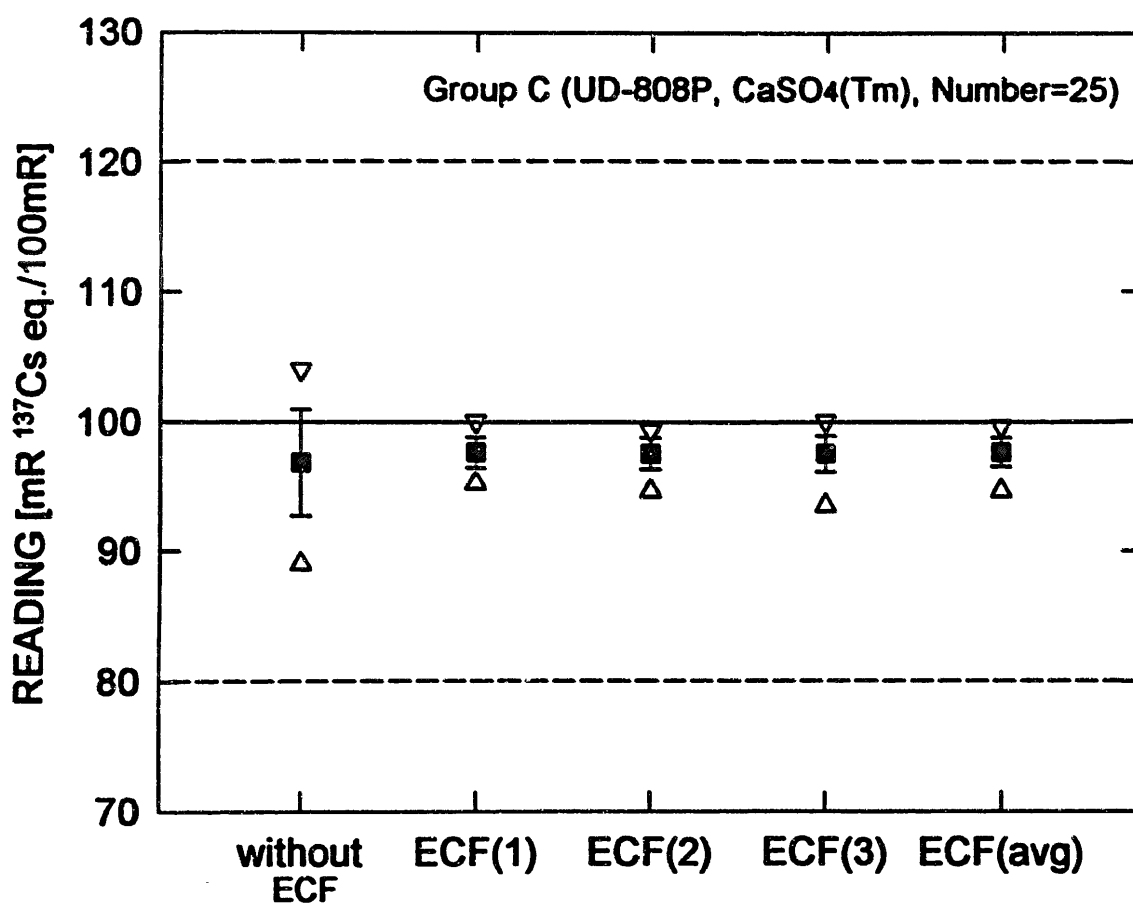
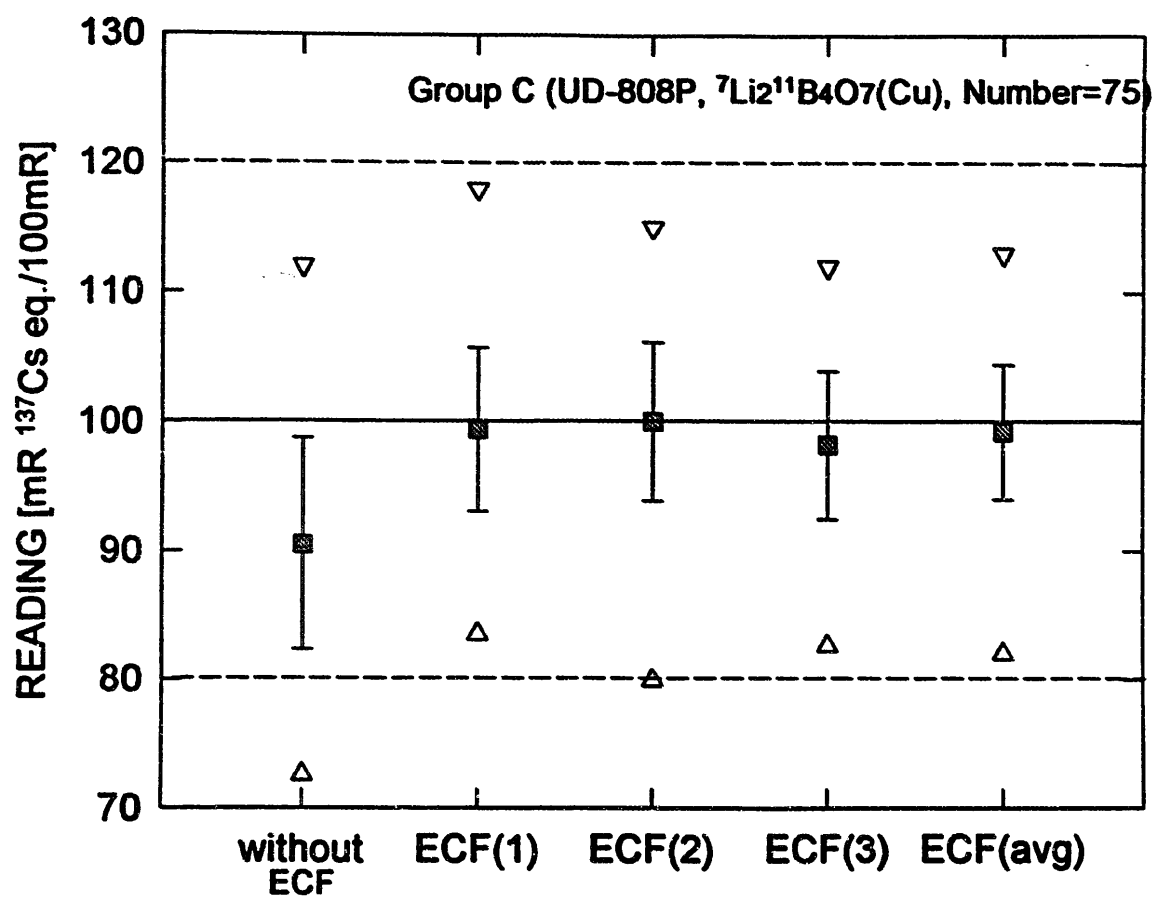


図4-1 (c) UD-808P線量計 (グループC) のECF適用効果

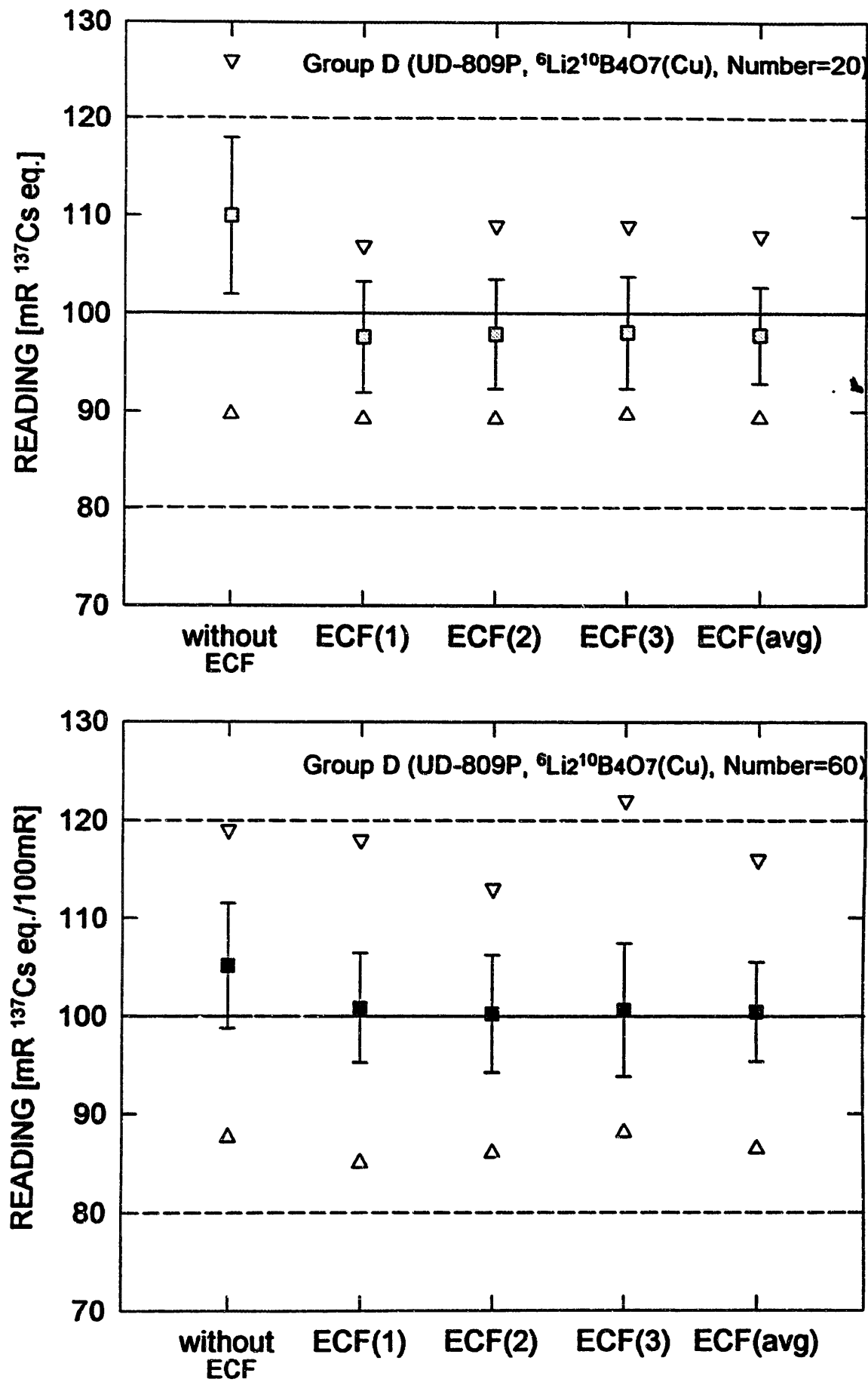


図4-1 (d) UD-809P線量計 (グループD) のECF適用効果

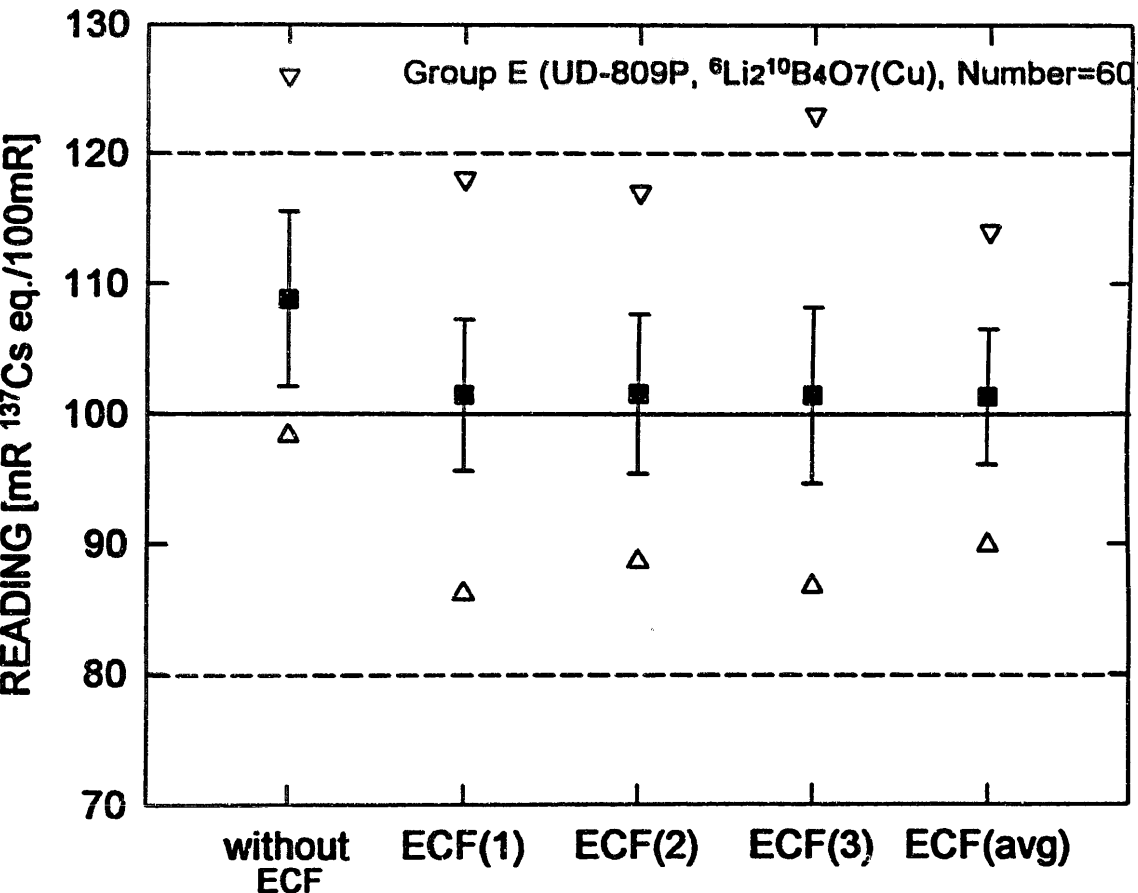
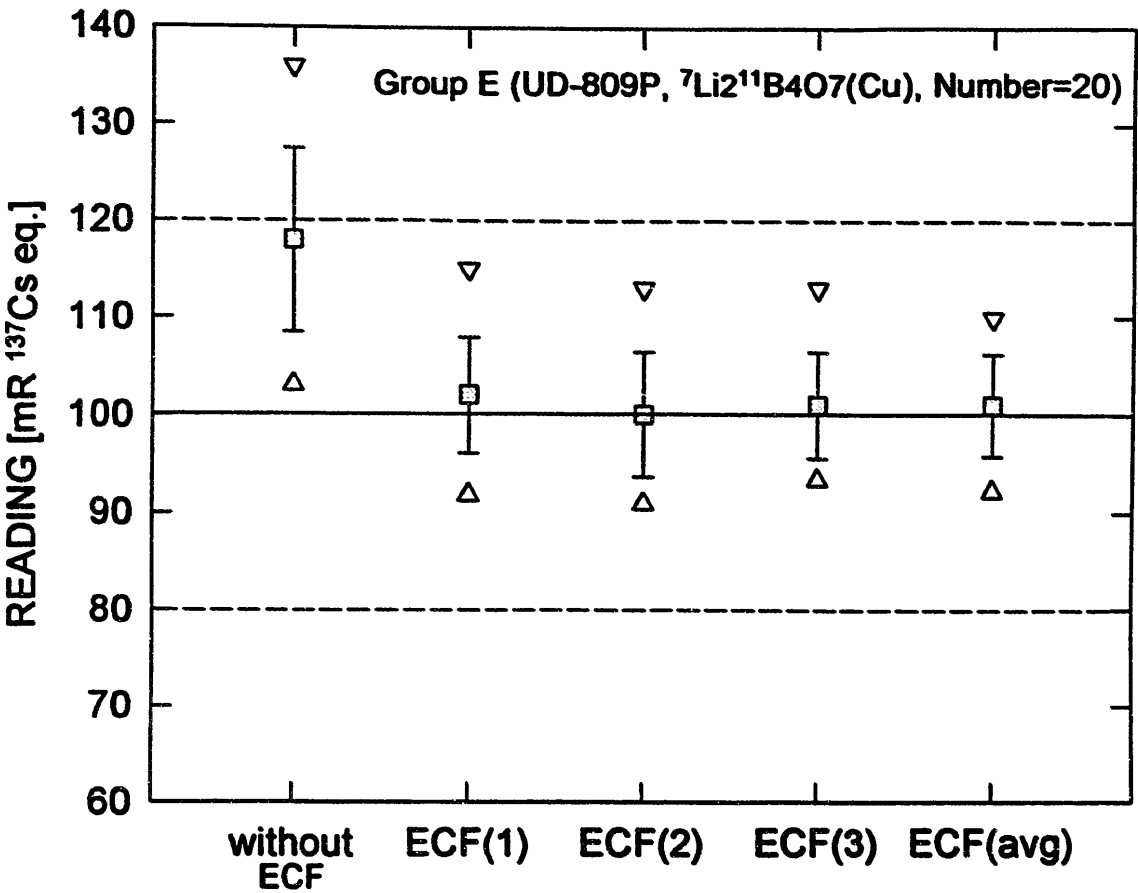


図4-1 (e) UD-809P線量計 (グループE) のECF適用効果

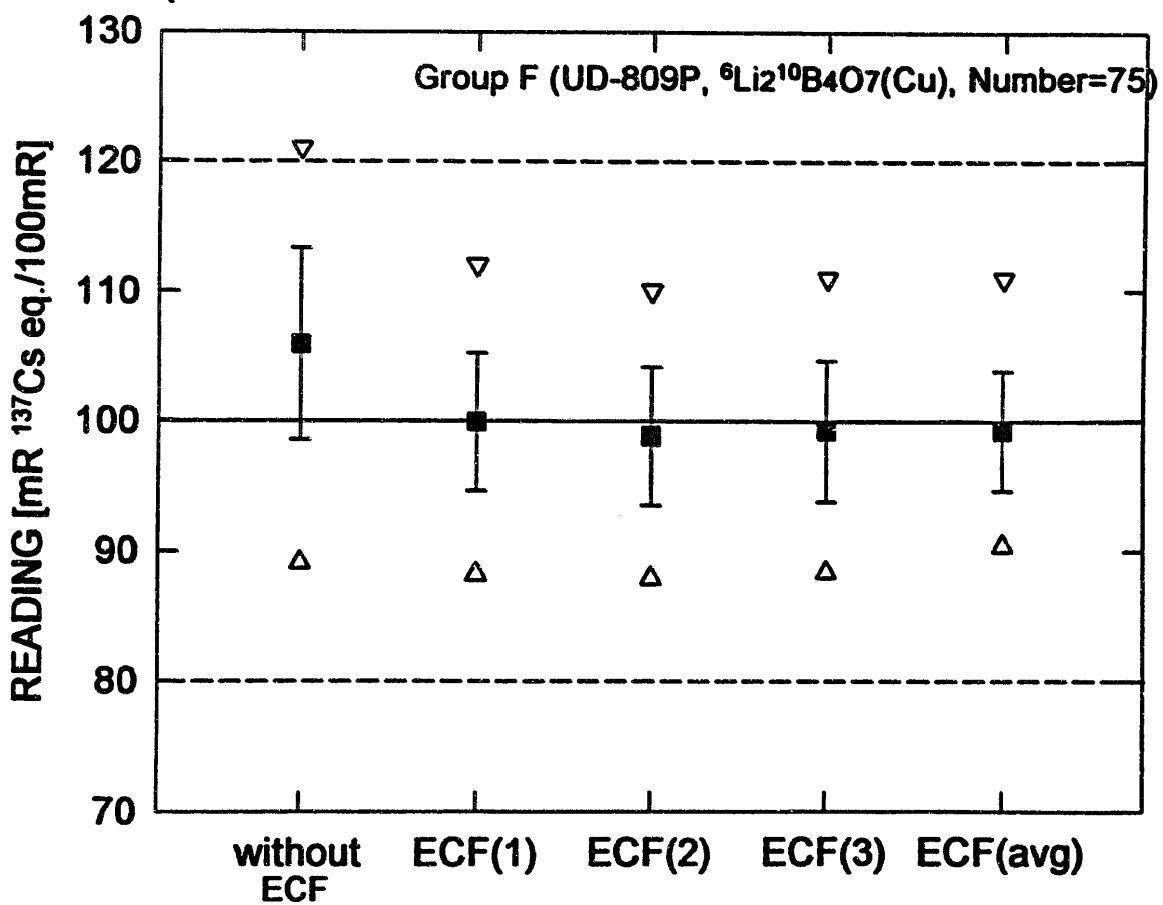
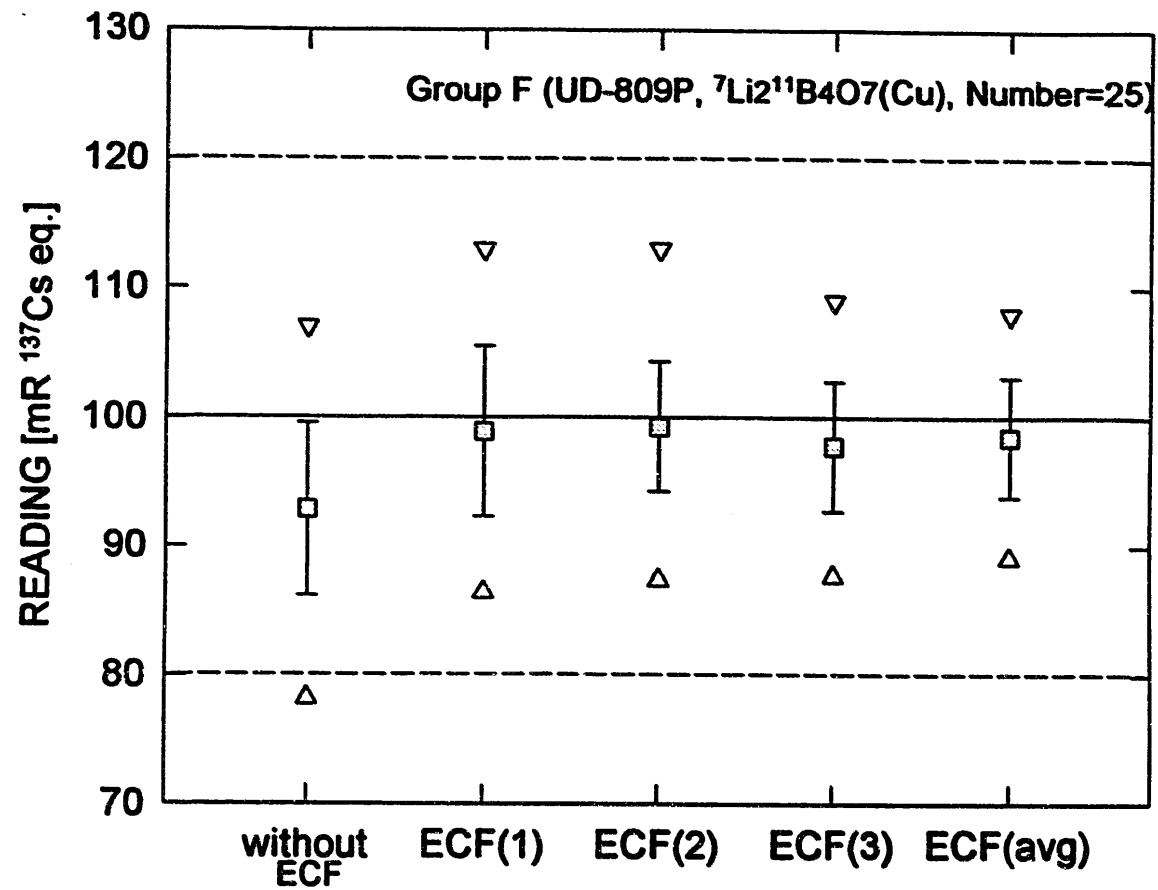


図4-1 (f) UD-809P線量計 (グループF) のECF適用効果

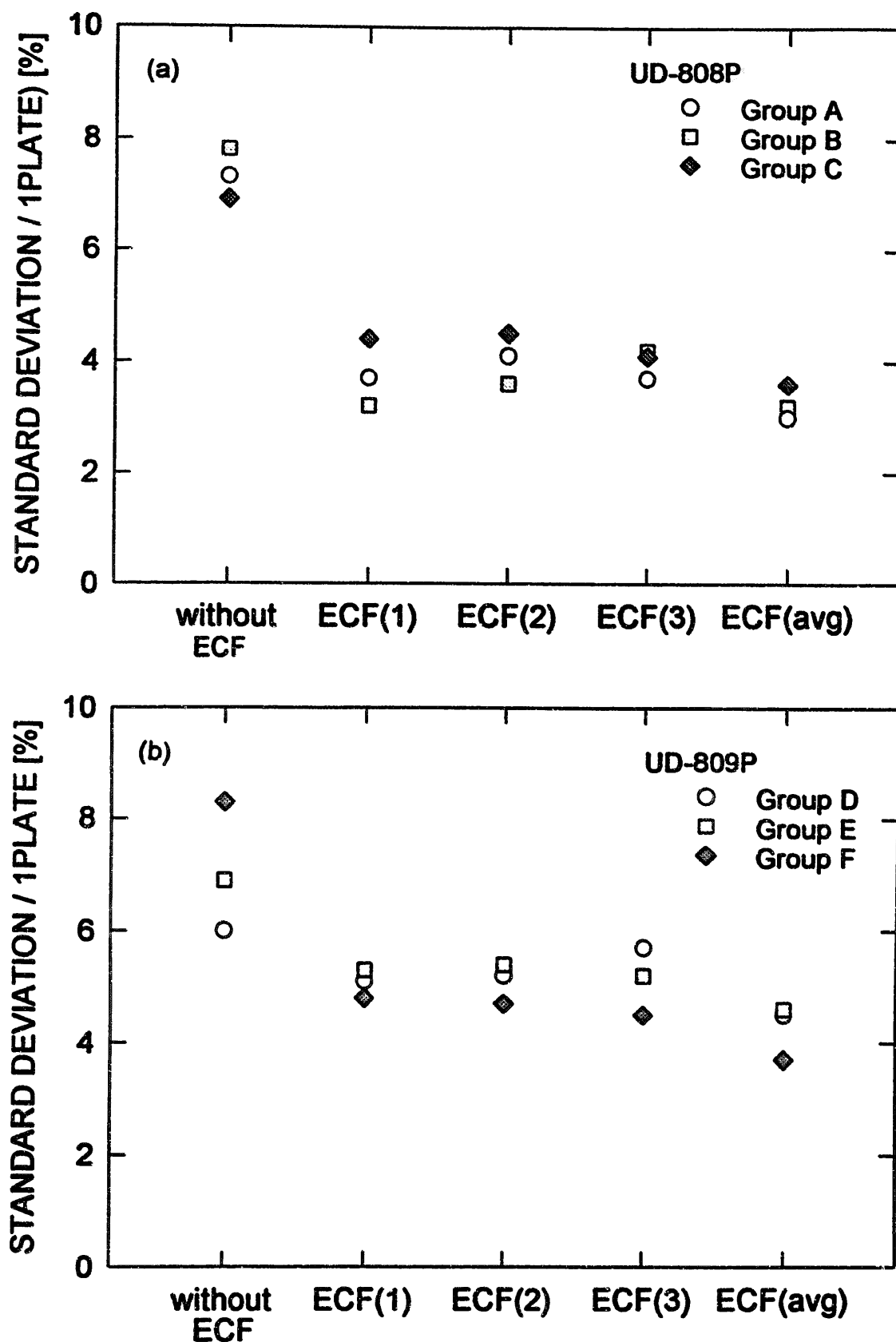


図4-2 同一線量計上の4個のTLD素子のばらつきに対するECF適用効果

表4-2 ECFによるTLD感度の個体差の低減効果

グループ	TLD種類	個数	読取り値の百分率標準偏差 [%]		
			ECF無し	ECF有り (1回照射)	ECF有り (3回平均)
A	$^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$	60	7.7	4.6 ± 0.4	3.6
B		60	8.4	4.6 ± 0.5	4.1
C		75	9.1	6.1 ± 0.3	5.3
D		20	7.3	5.8 ± 0.1	5.0
E		20	8.0	5.8 ± 0.5	5.2
F		25	7.2	5.6 ± 0.9	4.6
A~F*		260	10.2	1.7 ± 0.3	1.6
A	$\text{CaSO}_4(\text{Tm})$	20	2.7	1.7 ± 0.3	1.5
B		20	3.6	1.2 ± 0.1	1.0
C		25	4.3	1.3 ± 0.2	1.1
A~C*		65	3.5	2.6 ± 0.3	2.4
D	$^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$	60	6.1	6.1 ± 0.6	5.1
E		60	6.1	6.1 ± 0.5	5.1
F		75	7.0	5.3 ± 0.1	4.6
D~F*		195	2.0	0.9 ± 0.3	0.9

* グループ毎の平均読取り値のグループ間のばらつき

4-2 ECFの長期運用及びリーダー互換性確認試験

安全管理別棟のTLD自動照射装置の1回照射により一旦定めたECFが長期に亘って適用可能かどうか、またリーダー1号機で決定したECFが、リーダー2号機の測定値に適用可能かどうかを調べるため、次の実験を行った。

- (1) 表4-3に示すグループG～Lの線量計について、安全管理別棟のTLD自動照射装置で約160mR照射する。
- (2) リーダー1号機で測定し、(4-1)式よりECFを決定する。
- (3) 同じ線量計について、安全管理別棟のTLD自動照射装置で約160mRの照射を行いリーダーで測定する。このときグループG、Jについては1号機で測定、グループH、Kについてはリーダー2号機、グループI、Lについてはリーダー1号機、2号機で交互に測定する。
- (4) (3)の読取り値に、(2)で定めたECFを適用する。
- (5) (3)～(4)を繰り返す。

表4-3 ECFの長期運用及びリーダー互換性確認試験に使用したTLD線量計

グループ*	線量計の 種類	個数	$^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ エレメント数	$^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ エレメント数	$\text{CaSO}_4(\text{Tm})$ エレメント数
G	UD-808P	15	45	-	15
H	UD-808P	15	45	-	15
I	UD-808P	15	45	-	15
J	UD-809P	15	15	45	-
K	UD-809P	15	15	45	-
L	UD-809P	15	15	45	-

* グループG、H、I及びグループJ、K、Lは、ECFを適用しない状態でのグループ間の平均感度の差が2%以内になるようにTLDを選別し構成した。

試験結果を図4-3(a)～(f)、付録Bの表2に示す。図は平成7年12月から平成8年2月までの約3ヵ月間に6回の照射・測定を行った結果である。

ECFの決定に用いたリーダーと同一のリーダーで測定したグループG、JのTLDについては、ECF補正後の平均読取り値は安定して約160mRを示しており、その読取り値のばらつきもECF補正無しと比べて小さくなっている。しかし、リーダー2号機で測定したグループH、KのTLDについてはECF補正によるばらつきの低減効果は前節の試験結果から期待されるほどではなく、特にホウ酸リチウム系TLDの場合はECF補正無しの場合と同等のばらつきを示しているものもある。さらにリーダー1号機と2号機で交互に測定したグループI、LのTLDについては、ECF補正後の平均読取り値は、実際の照射量である160mRに近づく傾向はあるものの、測定に使用したリーダー機種によってや

や増減が見られ、またばらつきもリーダー1号機の測定では小さく、リーダー2号機の測定では1号機と比べてやや大きめとなるなど、リーダー1、2号機間でのECFの互換性はあまり良くないという結果となった。なお、6回の繰り返し照射の際のグループ毎の平均読取り値の再現性を表4-4に示す。再現性は約1～2%程度であり、試験期間を通じて照射量やリーダーの測定条件等がほぼ一定の条件に保たれていたことが分かる。

個々のTLDの発光効率の大小を揃えるというECFの本来の効果から考えると、本試験から得られた「ECFがリーダー1号機と2号機とで同様な効果を示さない」という結果は、TLDの測定条件がリーダー1号機と2号機とで厳密に同一ではないことを意味する。すなわち両リーダーの加熱特性に微妙な違いがあり、TLDの昇温特性とカウンターのゲートを開くタイミングがリーダー間で同じ条件になっていなかった可能性が高い。

現在、リーダーの加熱条件の設定は、加熱チェック用のTLD素子（蛍光体の種類は硫酸カルシウム）のグロー曲線*から決定しているが、加熱状態の良否の判断基準にはかなりの裕度があり、加熱条件を設定する際には複数リーダー間の測定条件を同一にすることを目的とするよりも、単一のリーダーについてその加熱状態がTLDの測定に支障をきたさないようにすることを主眼にしている。このため、リーダーの月例点検等においてもリーダー間の加熱状態が同様な状態であるかどうかの確認等は現時点でなされていない。リーダー1号機で決定したECFをリーダー2号機でも適用可能にするには、両リーダーの加熱状態をより合致させる必要があると考えられ、加熱状態の設定基準の見直しが今後必要になるだろう。

表4-4 6回の平均読取り値の再現性

グループ	G	H	I	J	K	L
リーダー	1号機	2号機	1/2号機	1号機	2号機	1/2号機
$^7\text{Li}^{11}\text{B}4\text{O}7(\text{Cu})$	2.1%	1.5	2.3	1.9	2.2	2.3
$^6\text{Li}^{10}\text{B}4\text{O}7(\text{Cu})$	-	-	-	2.2	2.0	2.3
$\text{CaSO}_4(\text{Tm})$	0.8	1.4	1.3	-	-	-

* ブリドーズ、メインドーズ、ポストドーズの3領域からなる極めて大雑把なグロー曲線

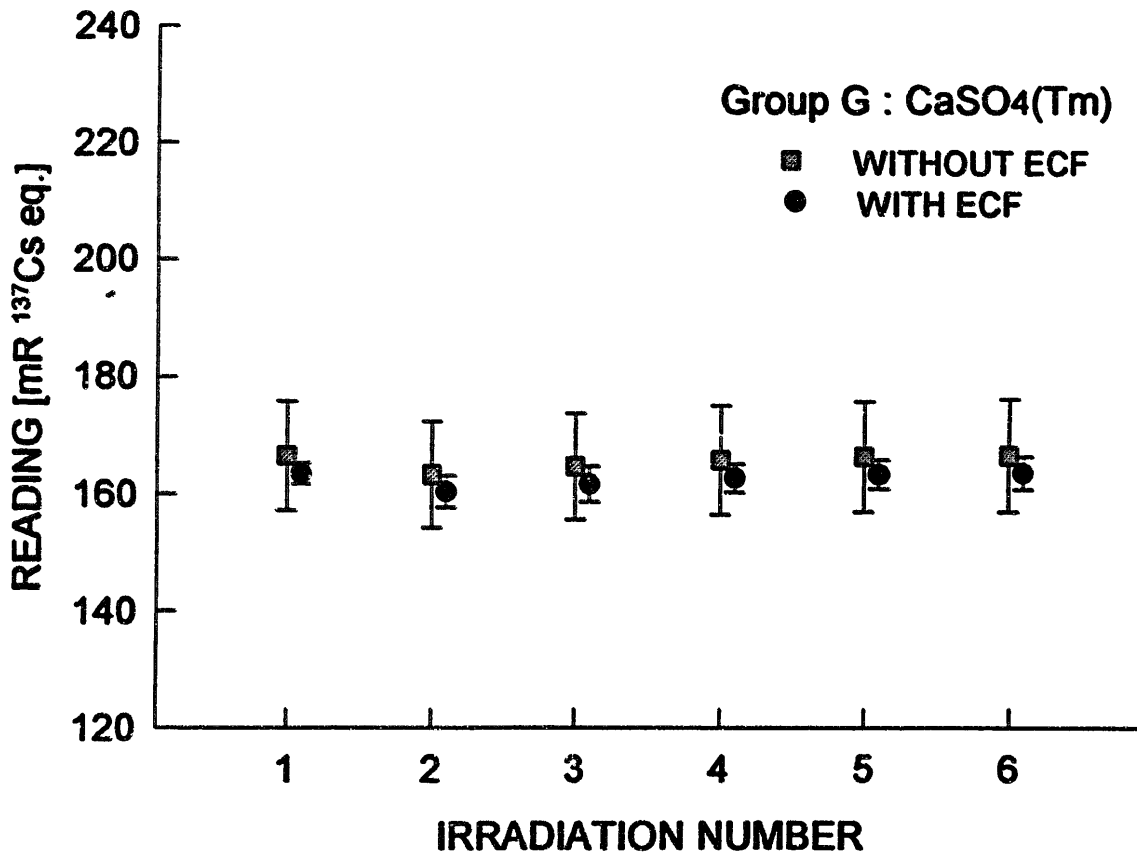
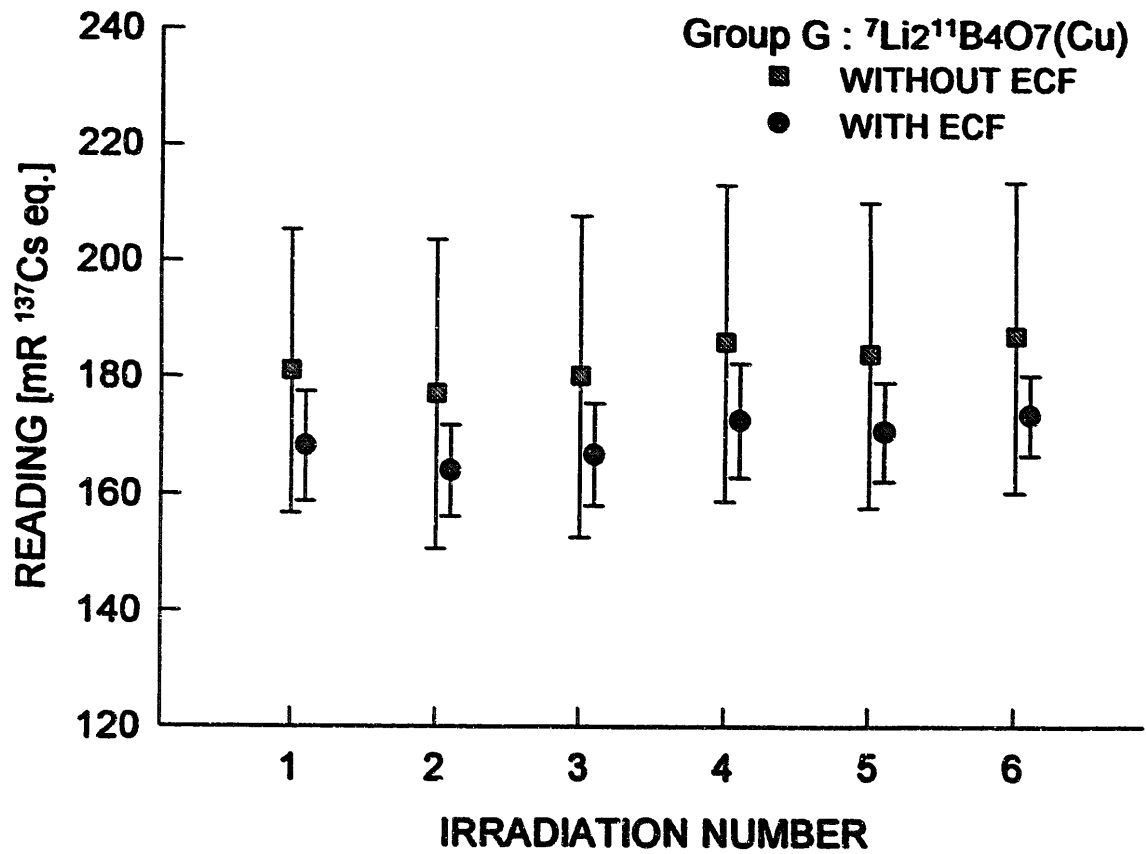


図4-3 (a) UD-808P線量計 (グループG) の長期間のECF適用効果
(リーダー1号機でECF決定、1号機の測定値に適用した場合)

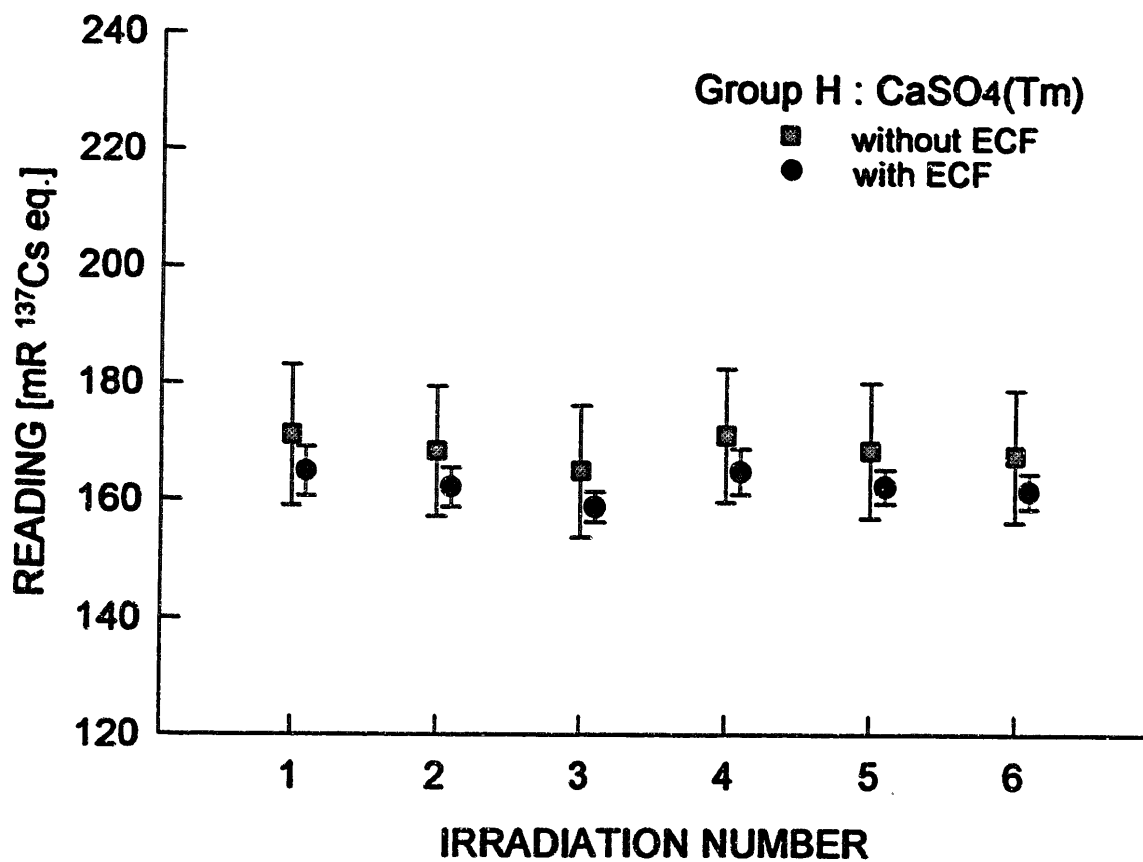
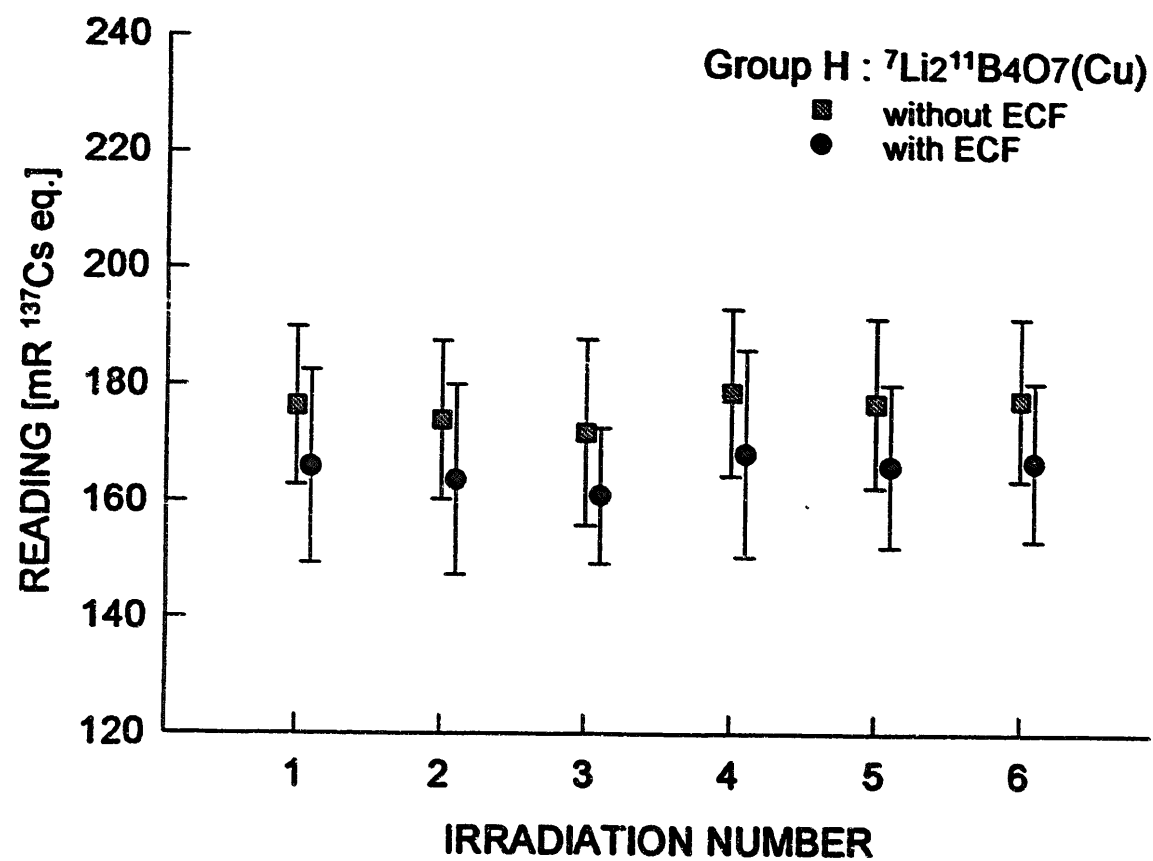


図4-3 (b) UD-808P線量計 (グループH) の長期間のECF適用効果
(リーダー1号機でECF決定、2号機の測定値に適用した場合)

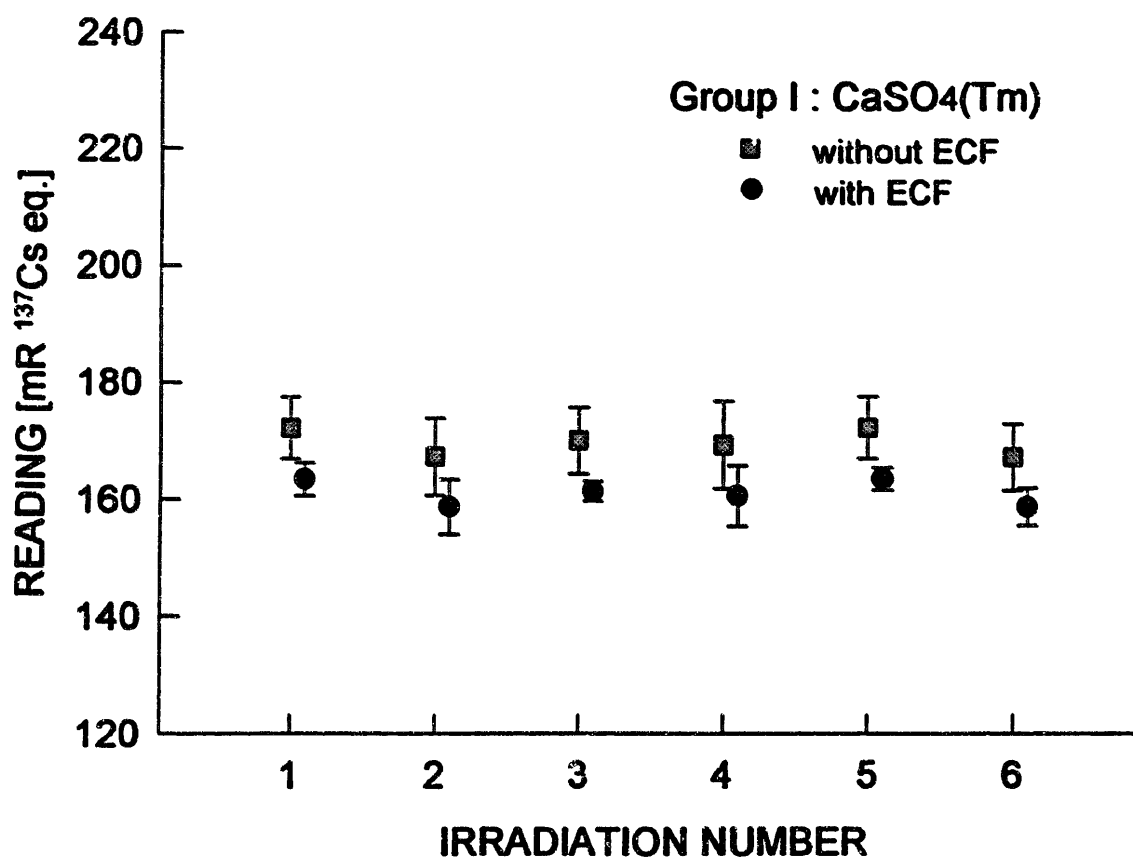
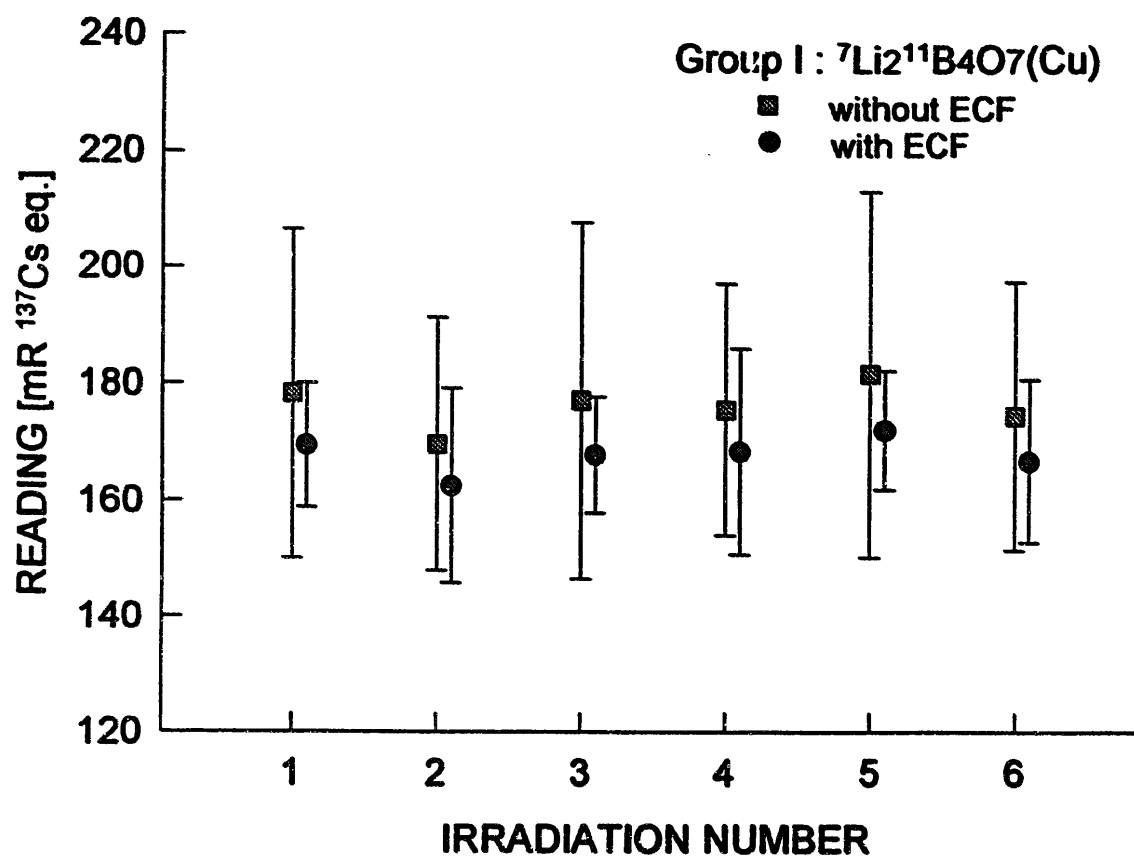


図4-3(c) UD-808P線量計(グループI)の長期間のECF適用効果
(リーダー1号機でECF決定、1・2号機の測定値に適用した場合)

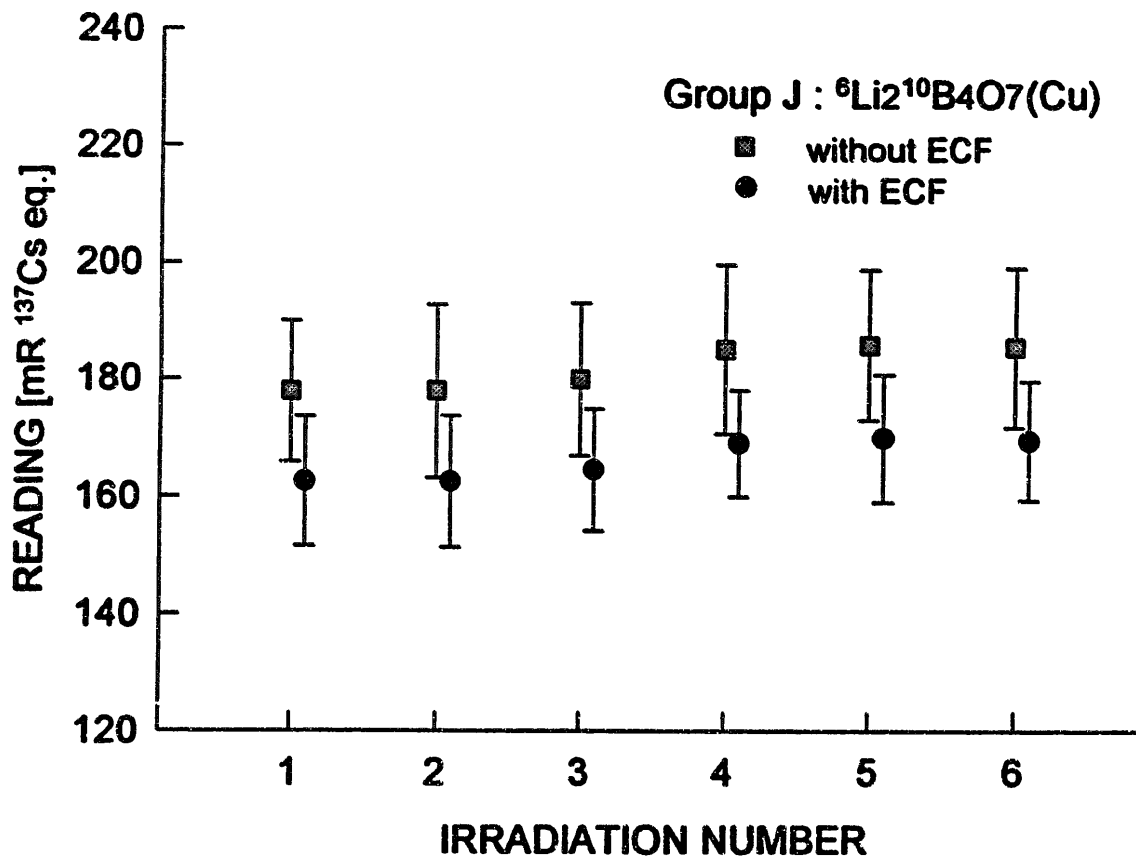
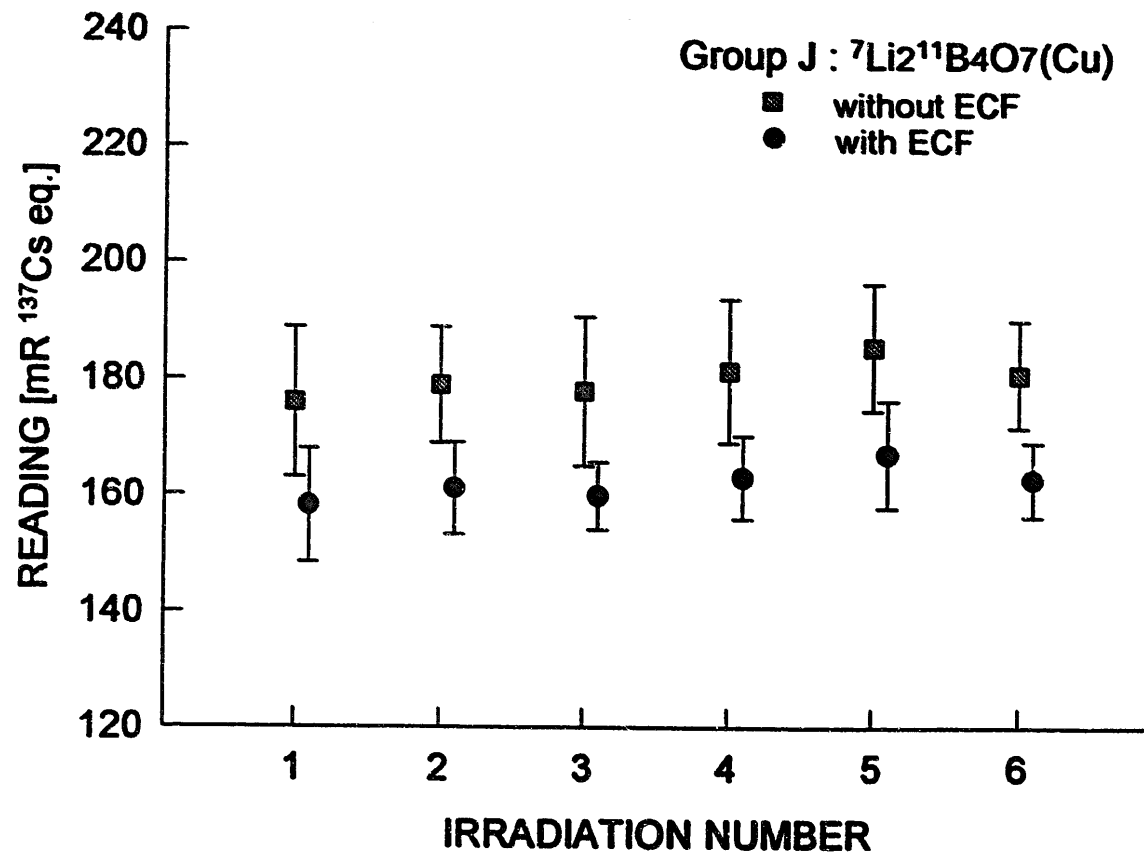


図4-3 (d) UD-809P線量計 (グループJ) の長期間のECF適用効果
(リーダー1号機でECF決定、1号機の測定値に適用した場合)

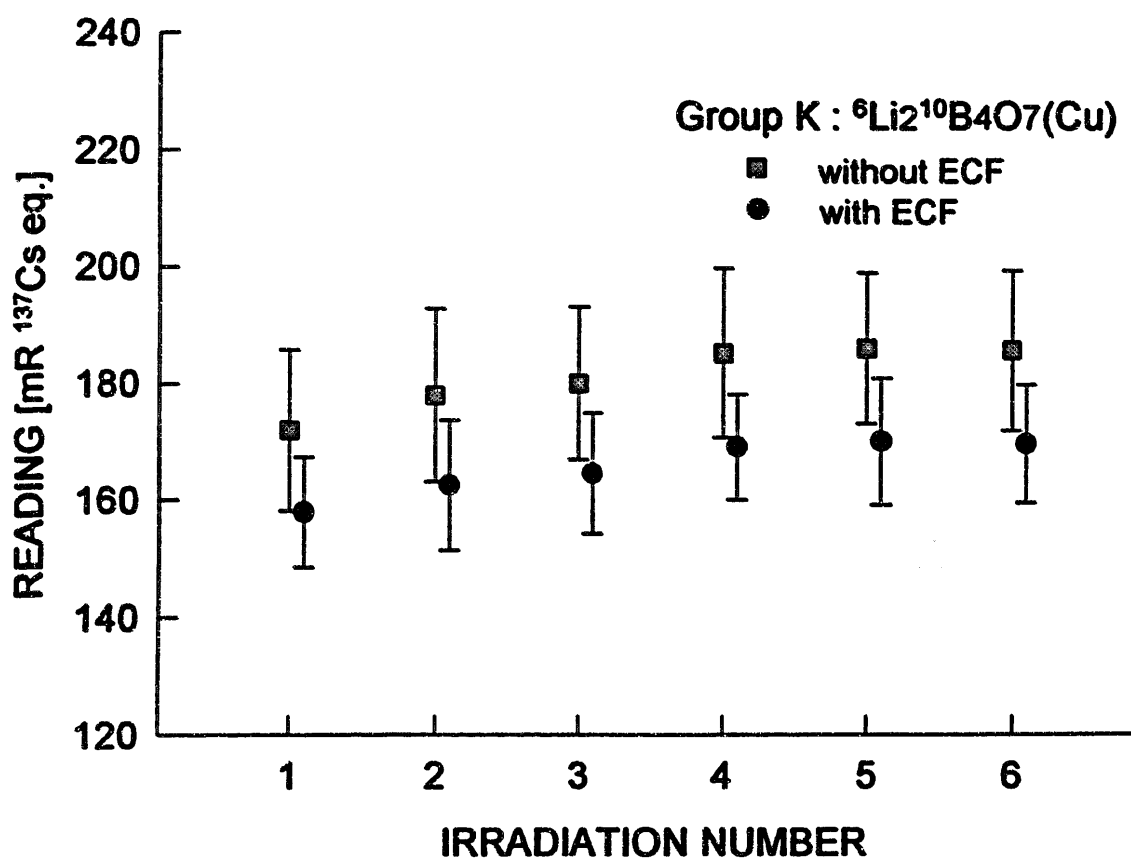
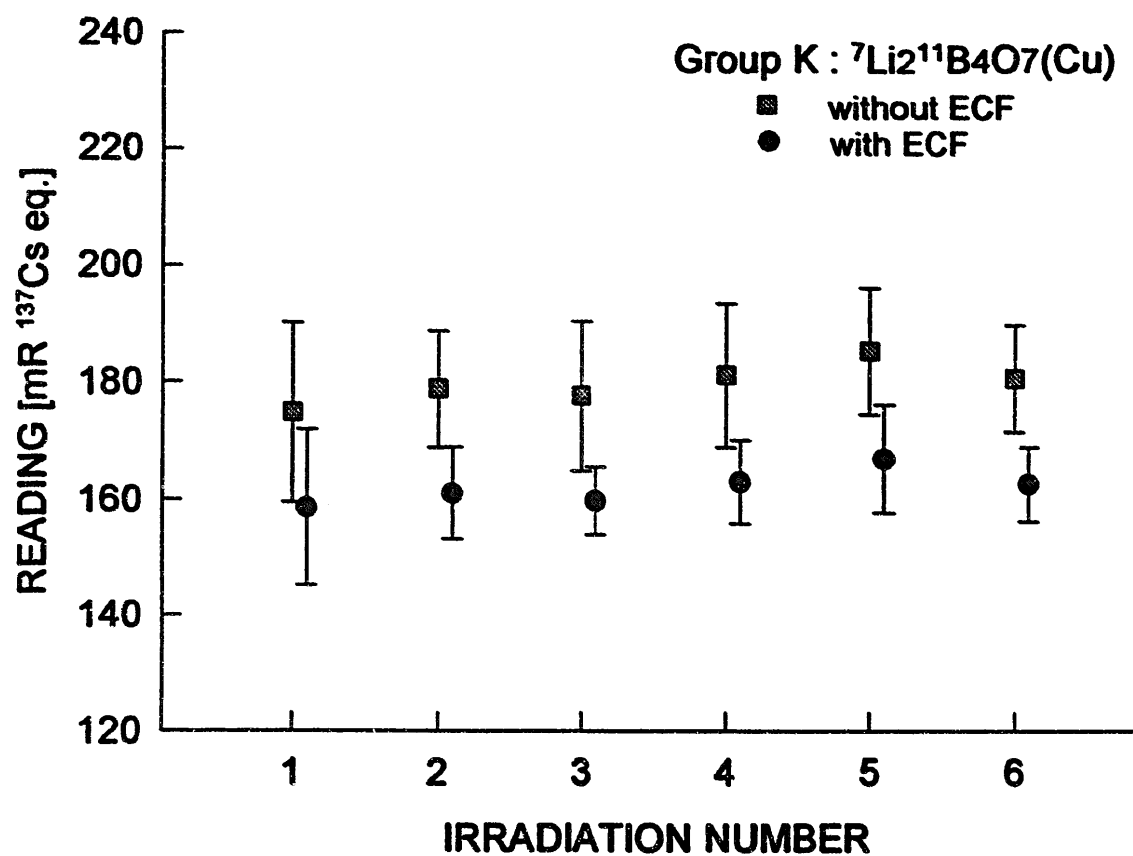


図4-3 (e) UD-809P線量計 (グループK) の長期間のECF適用効果
(リーダー1号機でECF決定、2号機の測定値に適用した場合)

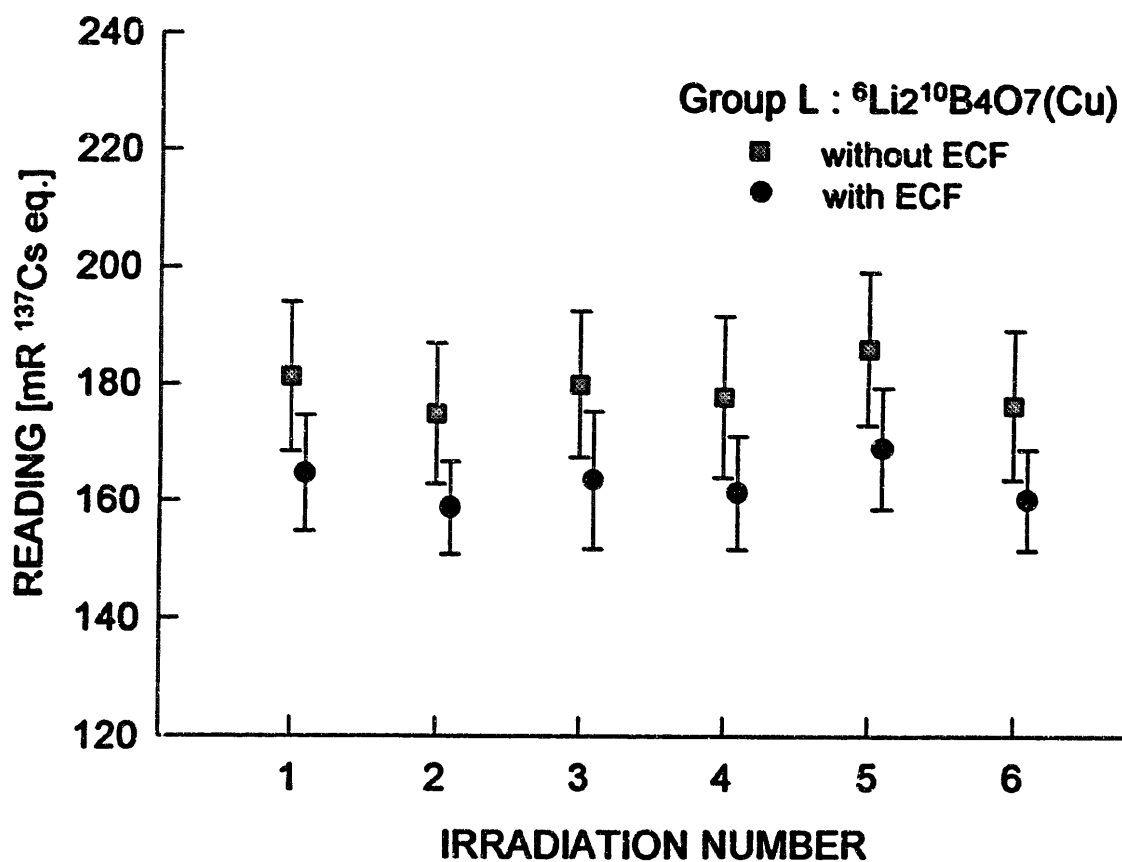
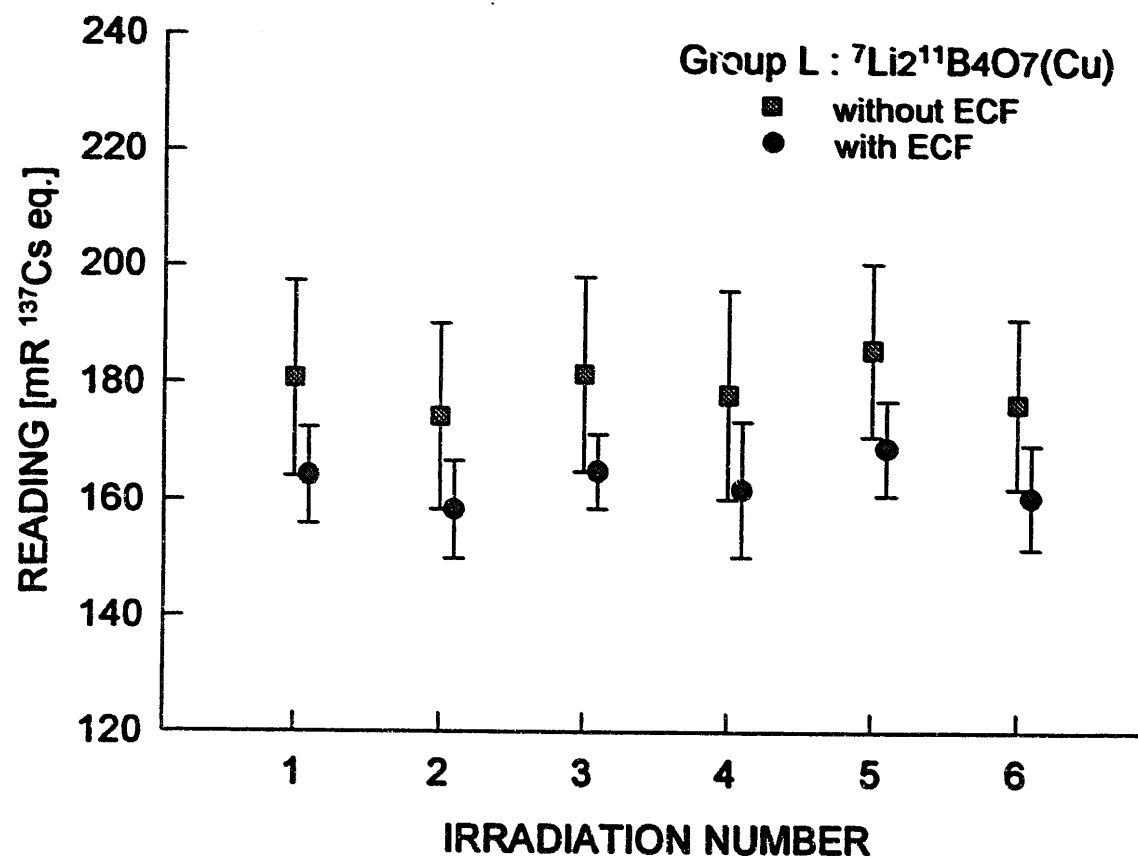


図4-3 (f) UD-809P線量計 (グループL) の長期間のECF適用効果
(リーダー1号機でECF決定、1・2号機の測定値に適用した場合)

第5章 まとめ

TLDの感度の個体差を低減させるため、感度補正係数 (ECF) の適用を検討した結果、以下の事柄が分かった。

- (1) 安全管理別棟に設置しているTLD自動照射装置による1回の照射（約160mR）で ECFを決定することができる。従って、年一回の品質管理試験における感度試験データをECF決定用に転用できると考えられる。
- (2) (1) で決定したECFを用いることで、ホウ酸リチウム系TLDについてはその感度の個体差を約 5%、硫酸カルシウムTLDについては約 2%まで小さくすることができる。また、同一線量計上にある4個のTLD素子の横並びの感度のばらつきも5%程度になる。
- (3) ECFの決定は、照射線量を基準とする(4-1)式が、現時点では簡便であり、長期的な適用も可能である。
- (4) リーダー1号機で決定したECFを、リーダー2号機の測定値に適用した場合、補正後の読取り値は真値に近づくが、ばらつきはあまり低減しない。

また、今後の課題として次に挙げる項目を検討する必要がある。

- (1) リーダー1号機と2号機の加熱状態を揃え、ECFの適用試験を継続し、ECFの両リーダーでの互換性を確認する。
- (2) リーダーの加熱ランプの交換前後におけるECFの適用試験を実施する。
- (3) 過去数年分の定期感度検査のデータを利用して、ECFデータベースを作成する。

なお、本報告の試験結果は、平成7年度上半期及び下半期の安全管理部小集団活動の一環として行った活動の成果をまとめたものである。

参考文献

- [1] 野村保、二之宮和重、小松崎謙治、江尻明、磯野矢一、高安哲也
「TLD及びTLD読取り装置の品質管理マニュアル」、PNC PN8520 93-002、1993
- [2] ICRP Publication 35,
"General Principles of Monitoring for Radiation Protection of Workers", 1982
- [3] 辻村憲雄、百瀬琢麿、篠原邦彦
「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」、
PNC ZN8410 96-402、1996
- [4] ICRP Publication 60,
"Recommendation of the International Commission on Radiological Protection". 1990
- [5] P.Plato and J.Miklos
"Production of Element Correction Factors for Thermoluminescent Dosimeters",
Health Physics, 49, 873-881, 1985
- [6] 「個人被ばく管理マニュアル」(大洗工学センター)、PNC PN9520 93-007、1993
- [7] 「個人線量計技術説明書」、千代田保安用品株式会社、1993
- [8] B.Burgkhardt and E.Piesch
"A Computer Assisted Evaluation Technique for Albedo Thermoluminescence Dosemeters"
Radiat.Prot.Dosim., 2, 4. 221-230. 1982
- [9] 野村保、辻村憲雄、二之宮和重、空増昇
「TLDバッジ素子の改良に関する研究」、PNC ZN8410 94-247、1994

付録A TLD自動照射装置の照射線量率の値付け

TLDの品質管理試験は安全管理別棟に設置されているTLD自動照射装置 (^{137}Cs 7.4 GBq×2、昭和58年9月現在)で行われる。

回転ベルトの速度を選択することによって、照射線量を約80mR～約1600mRまで変えることが可能であり、通常TLDバッジに用いるTLDの感度検査では、ベルトスピード2（ベルトの始点から終点までの時間が3分、照射線量で約160mRの場合）を選択する。照射線量の値付けは、計測機器校正施設に設置される ^{137}Cs 照射装置による照射線量とのTLD線量計を用いた相対校正によって年一回行われている。

TLD自動照射装置を使用する際に、使用時の正確な照射線量を簡便に導出することを目的に、これまでに実施したTLD自動照射装置の照射線量の値付け結果に、線源の減衰補正の理論式を当てはめ、次式を求めた。

$$X = 183.07 \cdot (0.5)^{\frac{d}{30 \cdot 365}} \quad \dots (1)$$

d: 1990年4月16日からの経過日数

実験値と(1)式による計算値の比較を下表に示すが、実験値と計算値の相違は僅か 0.0 ± 1.0 [mR/3分] であり、最大でも 0.7%程度の違いでしかない。

表 TLDによる照射線量率の値付け結果と(1)式による計算値の比較

値付け日	経過日数	TLDによる 照射線量率 [mR/3分]	(1)式による 計算値 [mR/3分]	実験－計算 [mR/3分]
90/ 4/16	0	190.0±3.5	-	-
91/ 4/22	371	180.0±4.1	178.8	+1.2
92/ 4/15	730	174.6±4.1	174.8	-0.2
93/ 4/16	1096	170.0±3.1	170.8	-0.8
94/ 4/20	1465	165.7±3.9	166.9	-1.2
95/ 4/20	1830	164.0±2.8	163.0	+0.9
				平均 0.0 ± 1.0

付録B ECF適用実験の結果

表1に4-1節の「ECFの効果確認試験」、表2に4-2節の「ECFの長期運用及びリーダー互換性確認試験」の結果をそれぞれまとめた。

表1、表2の記号G1～G4、N1～N4は、それぞれUD-808P、UD-809P線量計のエレメント番号である。また、計測機器校正施設、安全管理別棟をそれぞれ「校正室」、「F棟」と表記した。なお、TLD測定値の単位は照射線量相当[mR ^{137}Cs eq.]である。

表1に示した数値データの意味は、下表に示した例を参照のこと。

(例)

		Li ₂ B ₄ O ₇ (Cu)				CaSO ₄ (Tm)	Sp [%]
		G1	G2	G4	G1, G2, G4	G3	
校正室	100mR	115±6.5 ← 100mR照射したときの平均読取り値 [mR ^{137}Cs eq.]					7.3±2.9
	MAX/MIN	← グループ中の最大/最小読取り値			129/88.3	109/99.0	↑
	B	← 平均読取り値の照射量からの偏差			+9.0	+2.9	4素子/線量計 のばらつき の平均 ↓
	S	← グループのばらつき ($S \times 100$ [%])			7.7	2.7	
	B +S	← Bの絶対値とSの和			16.7	5.5	
	R	← 最大値-最小値			40.7	10.0	
F棟 1回目	163mR	188±12.2 ← F棟で約163mR照射したときの平均読取り値					7.6±3.0
	100mR補正	100±3.9 ← 校正室の結果に、F棟での1回の照射結果から 定めたECFを適用した場合の平均読取り値					3.7±1.5
F棟 平均	163mR	188±9.1 ← エレメント毎にF棟での3回の照射結果の平均を求め、 そのグループ平均をとった値					7.1±2.2
	再現性 [%]	3回のF棟照射における →			3.0	0.9	-
		個々のTLD毎の変動係数の平均 グループ全体の平均読取り値の → 3回の平均			1.0	1.0	
	100mR補正	100±3.4 ← 校正室の結果に、F棟の照射結果から定めた3回 平均のECFを適用した場合の平均読取り値					3.0±1.3

表1 (a) グループAの試験結果

		Li ₂ B ₄ O ₇ (Cu)				CaSO ₄ (Tm)	Sp [%]
		G1	G2	G4	G1, G2, G4	G3	
校正室	100mR	115±6.5	112±4.8	100±4.2	109±8.4	103±2.7	7.3±2.9
	MAX/MIN	-			129/88.3	109/99.0	-
	B	-			+9.0	+2.9	
	S	-			7.7	2.7	
	B +S	-			16.7	5.5	
	R	-			40.7	10.0	
F棟 1回目	163mR	188±12.2	180±9.8	163±6.9	177±14.4	166±4.4	7.6±3.0
	100mR補正	100±3.9	102±4.9	100±4.8	101±4.7	101±1.7	3.7±1.5
	MAX/MIN	-			112/90.2	104/98.0	-
	B	-			+0.6	+1.2	
	S	-			4.6	1.7	
	B +S	-			5.2	2.9	
	R	-			21.6	6.4	
F棟 2回目	163mR	188±7.9	181±9.9	167±8.8	178±12.5	165±4.2	6.9±2.6
	100mR補正	100±4.6	101±5.0	97.9±4.4	99.6±4.8	101±2.0	4.1±1.9
	MAX/MIN	-			113/87.2	105/97.4	-
	B	-			-0.4	+1.4	
	S	-			4.9	2.0	
	B +S	-			5.3	3.4	
	R	-			25.3	7.5	
F棟 3回目	163mR	189±9.4	180±9.4	164±8.3	178±13.7	165±3.9	7.6±2.6
	100mR補正	99.4±4.1	101±4.5	99.4±3.6	100±4.2	102±1.4	3.7±1.0
	MAX/MIN	-			111/91.4	104/98.0	-
	B	-			+0.1	+1.7	
	S	-			4.2	1.4	
	B +S	-			4.3	3.1	
	R	-			19.9	5.8	
F棟 平均	163mR	188±9.1	180±8.2	165±6.8	178±12.6	165±4.0	7.1±2.2
	再現性 [%]	-			3.0 0.7	0.9 0.6	-
	100mR補正	100±3.4	101±3.7	99.1±3.3	100±3.6	101±1.5	3.0±1.3
	MAX/MIN	-			108/91.4	104/98.0	-
	B	-			+0.0	+1.4	
	S	-			3.6	1.5	
	B +S	-			3.6	2.9	
	R	-			16.7	5.6	

表1 (b) グループBの試験結果

		Li ₂ B ₄ O ₇ (Cu)				CaSO ₄ (Tm)	SP [%]
		G1	G2	G4	G1, G2, G4	G3	
校正室	100mR	110±6.6	106±5.7	96.1±5.0	104±8.4	97.1±3.5	7.8±2.9
	MAX/MIN	-			122/82.8	103/90.7	-
	B	-			+4.1	-2.9	
	S	-			8.4	3.6	
	B +S	-			12.5	6.5	
	R	-			39.2	12.3	
F棟 1回目	163mR	186±12.2	179±9.7	162±7.4	176±14.2	165±6.7	7.6±2.6
	100mR補正	97.1±4.7	96.5±3.7	96.8±3.6	96.8±4.1	96.0±1.0	3.2±1.3
	MAX/MIN	-			108/86.2	97.6/94.2	-
	B	-			-3.2	-4.0	
	S	-			4.2	1.1	
	B +S	-			7.4	5.1	
	R	-			21.8	3.4	
F棟 2回目	163mR	186±14.3	180±9.2	163±9.7	176±15.0	164±6.9	8.2±1.9
	100mR補正	97.1±5.7	96.0±2.8	96.2±2.8	96.5±4.6	96.5±1.2	3.6±2.0
	MAX/MIN	-			109/85.4	99.1/93.9	-
	B	-			-3.5	-3.5	
	S	-			4.6	1.3	
	B +S	-			8.1	4.8	
	R	-			23.8	5.1	
F棟 3回目	163mR	186±14.6	180±10.2	163±9.5	176±15.5	164±6.7	8.0±3.1
	100mR補正	96.8±5.3	96.0±4.0	96.5±5.7	96.4±5.1	96.7±1.2	4.2±1.7
	MAX/MIN	-			109/87.9	99.2/94.5	-
	B	-			-3.6	-3.3	
	S	-			5.1	1.2	
	B +S	-			8.6	4.5	
	R	-			21.2	4.8	
F棟 平均	161.4mR	186±13.6	180±8.8	163±8.0	176±14.3	164±6.9	7.7±2.4
	再現性 [%]	-			2.6 0.2	0.8 0.4	-
	100mR補正	97.0±4.8	96.1±2.5	96.4±3.9	96.5±3.9	96.4±0.9	3.2±1.5
	MAX/MIN	-			106/86.8	97.8/95.0	-
	B	-			-3.5	-3.6	
	S	-			4.1	1.0	
	B +S	-			7.5	4.6	
	R	-			18.7	2.8	

表1 (c) グループCの試験結果

		Li ₂ B ₄ O ₇ (Cu)				CaSO ₄ (Tm)	Sp [%]
		G1	G2	G4	G1, G2, G4	G3	
校正室	100mR	87.4±7.0	90.9±6.0	93.1±10.0	90.5±8.2	96.8±4.1	6.9±2.9
	MAX/MIN	-			112/72.6	104/89.0	-
	B	-			-9.5	-3.2	
	S	-			9.1	4.3	
	B +S	-			18.6	7.4	
	R	-			39.4	15.0	
F棟 1回目	163mR	146±12.8	149±13.5	152±15.7	149±14.4	162±6.9	7.1±3.2
	100mR補正	97.9±5.2	99.9±7.1	100±6.0	99.4±6.3	97.6±1.2	4.4±2.0
	MAX/MIN	-			118/83.5	100/95.2	-
	B	-			-0.6	-2.4	
	S	-			6.3	1.2	
	B +S	-			7.0	3.6	
	R	-			34.8	5.2	
F棟 2回目	163mR	142±13.0	150±13.2	150±15.4	147±14.5	162±6.9	7.7±3.7
	100mR補正	100±5.6	99.2±6.3	101±6.0	100±6.1	97.5±1.2	4.5±1.8
	MAX/MIN	-			115/79.9	99.3/94.6	-
	B	-			+0.3	-2.5	
	S	-			6.1	1.2	
	B +S	-			6.3	3.7	
	R	-			35.2	4.7	
F棟 3回目	163mR	146±11.9	150±10.6	155±14.7	150±13.1	162±7.5	6.6±2.9
	100mR補正	97.8±4.8	98.7±5.7	99.1±6.2	98.2±5.7	97.5±1.4	4.1±1.9
	MAX/MIN	-			112/82.6	100/93.5	-
	B	-			-1.8	-2.5	
	S	-			5.8	1.5	
	B +S	-			7.6	3.9	
	R	-			28.9	6.8	
F棟 平均	163mR	145±11.8	150±11.8	152±14.7	149±13.3	162±7.1	6.6±3.3
	再現性 [%]	-			3.4 0.9	0.7 0.1	-
	100mR補正	98.6±4.3	99.2±5.7	100±5.3	99.2±5.2	97.6±1.1	3.6±1.7
	MAX/MIN	-			113/82.0	99.6/94.6	-
	B	-			-0.8	-2.4	
	S	-			5.3	1.1	
	B +S	-			6.1	3.6	
	R	-			31.1	5.0	

表1 (d) グループDの試験結果

		Li ₂ B ₄ O ₇ (Cu)					Sp [%]
		N1	N2	N3	N4	N2, N3, N4	
校正室	100mR	110±8.0	105±7.0	105±6.1	106±6.3	105±6.4	6.0±2.2
	MAX/MIN	126/89.7	-			119/87.6	-
	B	+10.0	-			+5.1	
	S	7.3	-			6.1	
	B +S	17.3	-			11.2	
	R	36.3	-			31.4	
F棟 1回目	163mR	184±11.4	172±7.5	170±9.1	168±7.8	170±8.3	6.0±2.6
	100mR補正	97.6±5.7	98.9±4.6	101±5.0	103±6.5	101±5.6	5.1±2.2
	MAX/MIN	107/89.2	-			118/85.0	-
	B	-2.4	-			+0.8	
	S	5.8	-			5.6	
	B +S	8.3	-			6.4	
	R	17.8	-			32.9	
F棟 2回目	163mR	183±11.5	170±8.0	173±7.7	170±7.3	171±7.7	5.8±1.9
	100mR補正	97.9±5.6	101±6.7	98.7±5.0	101±6.0	100±6.0	5.2±2.0
	MAX/MIN	109/89.2	-			113/86.0	-
	B	-2.1	-			+0.2	
	S	5.7	-			5.9	
	B +S	7.6	-			6.1	
	R	20.1	-			27.1	
F棟 3回目	163mR	183±11.1	171±11.1	171±9.7	170±9.5	171±10.0	6.2±2.7
	100mR補正	98.1±5.7	100±5.4	100±6.7	102±8.3	101±6.8	5.7±3.2
	MAX/MIN	109/89.7	-			122/88.1	-
	B	-1.9	-			+0.6	
	S	5.8	-			6.8	
	B +S	7.6	-			7.3	
	R	19.5	-			33.6	
F棟 平均	163mR	183±10.1	171±7.1	172±6.0	169±6.9	171±6.6	5.4±1.8
	再現性 [%]	2.9	-			3.5	-
		0.3				0.3	
	100mR補正	97.8±4.9	99.7±4.6	99.6±3.9	102±6.4	100±5.1	4.5±2.2
	MAX/MIN	108/89.3	-			116/86.4	-
	B	-2.2	-			+0.4	
	S	5.0	-			5.1	
	B +S	7.2	-			5.5	
	R	19.1	-			29.6	

表1 (e) グループEの試験結果

		Li ₂ B ₄ O ₇ (Cu)					Sp [%]
		N1	N2	N3	N4	N2, N3, N4	
校正室	100mR	118±9.5	110±6.5	107±7.0	110±6.4	109±6.7	6.9±2.6
	MAX/MIN	136/103	-			126/98.3	-
	B	+18.0	-			+8.8	
	S	8.0	-			6.1	
	B +S	26.1	-			14.9	
	R	33.0	-			27.7	
F棟 1回目	163mR	189±13.3	178±10.6	172±8.0	175±9.5	175±9.7	6.1±2.2
	100mR補正	102±5.9	101±5.4	102±6.0	102±6.2	101±5.8	5.3±2.5
	MAX/MIN	115/91.8	-			118/86.1	-
	B	+1.8	-			+1.4	
	S	5.8	-			5.7	
	B +S	7.5	-			7.2	
	R	23.4	-			32.0	
F棟 2回目	163mR	192±15.3	178±11.8	172±8.8	174±6.5	175±9.5	6.6±2.8
	100mR補正	100±6.4	101±4.4	101±7.0	103±6.6	101±6.1	5.4±2.3
	MAX/MIN	113/90.9	-			117/88.6	-
	B	+0.4	-			+1.5	
	S	6.3	-			6.0	
	B +S	6.7	-			7.5	
	R	21.9	-			28.8	
F棟 3回目	163mR	190±12.3	175±12.2	173±10.4	178±8.2	175±10.4	6.0±2.4
	100mR補正	101±5.4	103±7.3	101±7.1	101±6.0	101±6.8	5.2±2.6
	MAX/MIN	113/93.4	-			123/86.7	-
	B	+1.1	-			+1.4	
	S	5.3	-			6.7	
	B +S	6.5	-			8.1	
	R	19.6	-			36.1	
F棟 平均	163mR	191±12.7	177±9.3	172±7.2	176±6.7	175±7.9	5.5±2.2
	再現性 [%]	2.7 0.7	-			3.6 0.1	-
	100mR補正	101±5.2	101±4.1	101±5.8	102±5.6	101±5.2	4.6±1.7
	MAX/MIN	110/92.2	-			114/89.9	-
	B	+1.0	-			+1.3	
	S	5.2	-			5.1	
	B +S	6.2	-			6.4	
	R	18.3	-			24.4	

表 1 (f) グループFの試験結果

		Li ₂ B ₄ O ₇ (Cu)					SP [%]
		N1	N2	N3	N4	N2, N3, N4	
校正室	100mR	92.9±6.7	108±7.3	104±6.6	105±8.2	106±7.4	8.3±3.5
	MAX/MIN	107/78.2	-			121/89.1	-
	B	-7.1	-			+5.9	
	S	7.2	-			7.0	
	B +S	14.3	-			13.0	
	R	28.8	-			31.9	
F棟 1回目	163mR	154±12.8	177±15.8	170±12.6	172±11.6	173±13.6	8.2±4.0
	100mR補正	98.9±6.6	99.6±5.4	100±5.3	99.9±5.4	99.9±5.3	4.8±2.0
	MAX/MIN	113/86.4	-			112/88.2	-
	B	-1.1	-			-0.1	
	S	6.7	-			5.3	
	B +S	7.8	-			5.4	
	R	26.6	-			23.9	
F棟 2回目	163mR	152±11.4	180±12.2	173±12.7	171±12.9	175±13.0	9.0±3.4
	100mR補正	99.3±5.0	97.7±5.1	98.5±6.1	100±4.4	98.8±5.3	4.7±1.6
	MAX/MIN	113/87.4	-			110/87.9	-
	B	-0.7	-			-1.2	
	S	5.1	-			5.3	
	B +S	5.8	-			6.5	
	R	25.6	-			22.3	
F棟 3回目	163mR	155±11.2	179±14.3	171±11.8	174±14.4	174±13.8	8.1±2.9
	100mR補正	97.8±5.0	98.8±5.7	100±4.9	98.9±5.8	99.2±5.4	4.5±1.8
	MAX/MIN	109/87.7	-			111/88.4	-
	B	-2.2	-			-0.8	
	S	5.1	-			5.4	
	B +S	7.3	-			6.2	
	R	20.9	-			23.0	
F棟 平均	163mR	154±10.7	179±13.3	171±11.5	172±12.0	174±12.6	8.0±3.2
	再現性 [%]	3.3 0.7	-			3.1 0.5	-
	100mR補正	98.5±4.6	98.6±4.7	99.5±4.8	99.6±4.4	99.2±4.6	3.7±1.8
	MAX/MIN	108/89.1	-			111/90.4	-
	B	-1.5	-			-0.8	
	S	4.6	-			4.6	
	B +S	6.1	-			5.4	
	R	18.7	-			20.5	

表 2 (a) UD-808Pの試験結果

	照射日 測定日	ECF補正	Group G (1号機測定)			Group H (1号機測定)			Group I (1号機測定)			
			G1, G2, G4	G3	バラツキ	G1, G2, G4	G3	バラツキ	号機	G1, G2, G4	G3	バラツキ
ECF決定 用照射	95/12/14	なし	173.5±25.2	163.6±9.8	8.6%	172.0±17.6	166.8±11.8	7.9	1	170.1±31.1	169.3±5.4	10.8
	95/12/14		14.5%	6.0		10.2	7.1			18.3	3.2	
照射 番号	照射日 測定日	ECF補正	Group G (1号機測定)			Group H (2号機測定)			Group I (1/2号機交互に測定)			
			G1, G2, G4	G3	バラツキ	G1, G2, G4	G3	バラツキ	号機	G1, G2, G4	G3	バラツキ
1	12/18 12/22	なし	181.1±24.3	166.5±9.3	7.7	176.4±13.5	171.1±12.1	5.9	1	178.3±28.2	172.2±5.3	9.6
		あり	13.3	5.6		7.6	7.1			15.8	3.1	
		あり	168.2±9.3	163.5±1.8	4.7	166.0±16.6	164.8±4.2	5.9		169.5±10.6	163.4±2.8	5.0
			5.5	1.1		10.0	2.5			6.2	1.7	
2	1/18 1/19	なし	177.2±26.5	163.3±9.1	9.4	174.0±13.6	168.3±11.1	6.4	2	169.6±21.7	167.3±6.6	8.4
		あり	15.0	5.6		7.8	6.6			12.8	3.9	
		あり	164.0±7.7	160.4±2.7	3.8	163.7±16.4	162.1±3.3	5.8		162.5±16.7	158.7±4.7	5.8
			4.7	1.7		10.0	2.0			10.3	2.9	
3	1/26 1/29	なし	180.2±27.5	164.8±9.1	9.1	171.8±16.0	164.9±11.2	7.7	1	177.1±30.6	170.1±5.7	10.9
		あり	15.3	5.5		9.3	6.8			17.3	3.4	
		あり	166.8±8.7	161.8±3.1	4.7	161.0±11.7	158.8±2.5	4.8		167.8±9.9	161.4±1.7	5.2
			5.2	1.9		7.2	1.6			5.9	1.0	
4	2/ 7 2/ 7	なし	186.1±27.2	165.9±9.3	9.0	178.8±14.3	171.1±11.5	6.0	2	175.6±21.6	169.4±7.5	8.8
		あり	14.6	5.6		8.0	6.7			12.3	4.4	
		あり	172.6±9.7	162.9±2.4	5.3	168.3±17.8	164.9±3.9	6.2		168.4±17.7	160.7±5.2	5.9
			5.6	1.4		10.6	2.3			10.5	3.3	
5	2/14 2/15	なし	184.1±26.2	166.5±9.4	9.1	177.1±14.5	168.6±11.6	6.9	1	181.8±31.5	172.4±5.3	10.4
		あり	14.2	5.7		8.2	6.9			17.3	3.1	
		あり	170.8±8.4	163.5±2.5	4.7	166.3±14.0	162.4±2.9	4.9		172.2±10.2	163.6±1.9	5.9
			4.9	1.5		8.4	1.8			5.9	1.2	
6	2/22 2/23	なし	187.2±26.8	166.7±9.6	9.0	177.7±13.9	167.7±11.3	6.8	2	174.6±23.1	167.3±5.7	8.6
		あり	14.3	5.8		7.8	6.7			13.2	3.4	
		あり	173.5±6.8	163.7±2.8	4.5	167.0±13.6	161.6±3.0	5.1		166.9±14.0	158.8±3.2	5.6
			3.9	1.7		8.1	1.9			8.4	2.0	

表 2 (b) UD-809Pの試験結果

	照射日 測定日	ECF補正	Group J (1号機測定)			Group K (1号機測定)			Group L (1号機測定)			
			N1	N2, N3, N4	バラツキ	N1	N2, N3, N4	バラツキ	号機	N1	N2, N3, N4	バラツキ
ECF決定 用照射	95/12/11	なし	178.7±10.7	176.2±13.7	5.7%	177.5±14.8	175.3±15.5	5.3	1	176.8±15.1	177.3±14.9	5.5
	95/12/14		6.0%	7.8		8.3	8.8			8.5	8.4	
照射 番号	照射日 測定日	ECF補正	Group J (1号機測定)			Group K (2号機測定)			Group L (1/2号機交互に測定)			
			N1	N2, N3, N4	バラツキ	N1	N2, N3, N4	バラツキ	号機	N1	N2, N3, N4	バラツキ
1	12/18 12/22	なし	175.9±12.9	177.9±12.1	5.4	174.9±15.4	171.9±13.8	5.8	1	180.7±16.7	181.3±12.8	5.9
		あり	7.3	6.8		8.8	8.0			9.3	7.1	
		あり	158.2±9.7	162.6±11.0	5.7	158.6±13.4	157.9±9.4	6.0		164.2±8.2	164.7±9.9	5.2
			6.1	6.8		8.4	5.9			5.0	6.0	
2	1/18 1/19	なし	178.9±10.0	178.0±14.8	5.7	172.9±15.0	173.0±14.0	5.8	2	174.3±15.9	175.0±12.1	5.5
		あり	5.6	8.3		8.7	8.1			9.1	6.9	
		あり	161.1±7.9	162.6±11.2	6.0	156.7±11.0	158.9±10.4	5.6		158.4±8.4	158.9±7.9	4.9
			4.9	6.9		7.0	6.6			5.3	5.0	
3	1/26 1/29	なし	177.8±12.8	180.1±13.1	5.5	169.4±11.5	170.0±14.5	5.6	1	181.6±16.6	180.1±12.5	6.2
		あり	7.2	7.2		6.8	8.6			9.1	7.0	
		あり	159.8±5.8	164.6±10.4	5.0	153.6±8.0	156.0±9.0	5.0		165.0±6.3	163.7±11.8	6.0
			3.6	6.3		5.2	5.8			3.8	7.2	
4	2/ 6 2/ 7	なし	181.4±12.4	185.3±14.5	5.9	179.3±12.2	178.4±14.5	5.8	2	178.1±17.8	178.0±13.8	5.5
		あり	6.8	7.8		6.8	8.1			10.0	7.7	
		あり	163.1±7.2	169.2±9.1	4.7	162.7±11.9	163.8±9.8	5.9		162.0±11.6	161.6±9.7	5.9
			4.4	5.4		7.3	6.0			7.2	6.0	
5	2/14 2/15	なし	185.6±10.9	186.1±12.9	4.6	178.3±10.5	178.0±15.5	6.3	1	185.9±14.8	186.6±13.1	6.0
		あり	5.9	6.9		5.9	8.7			7.9	7.0	
		あり	167.1±9.3	170.1±10.9	5.7	161.9±11.0	163.4±9.2	5.4		169.1±8.1	169.2±10.4	5.1
			5.6	6.4		6.8	5.6			4.8	6.2	
6	2/22 2/23	なし	180.9±9.2	185.7±13.7	5.0	178.0±14.7	176.5±12.4	5.1	2	176.7±14.4	176.6±12.8	4.9
		あり	5.1	7.4		8.3	7.0			8.1	7.3	
		あり	162.8±6.4	169.7±10.2	4.9	161.3±9.3	162.2±10.1	5.4		160.8±8.9	160.4±8.9	4.9
			3.9	6.0		5.8	6.2			5.5	5.3	