

TLDを用いたSILENEとTRACYにおける 臨界事故状況時線量測定の再評価

Re-evaluation of Dose Measurements under Criticality Accident Conditions
at SILENE and TRACY Using TLDs

村崎 穂 外池 幸太郎 内山 軍藏

Minoru MURAZAKI, Kotaro TONOIKE and Gunzo UCHIYAMA

安全研究センター
原子力エネルギー関連施設安全評価研究ユニット

Nuclear Facility Safety Research Unit
Nuclear Safety Research Center

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（<http://www.jaea.go.jp>）
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

TLD を用いた SILENE と TRACY における臨界事故状況時線量測定の再評価

日本原子力研究開発機構 安全研究センター
原子力エネルギー関連施設安全評価研究ユニット

村崎 穢※、外池 幸太郎、内山 軍藏

(2009年3月18日 受理)

SILENE における中性子用 TLD 及び γ 線用 TLD を用いた測定、及び TRACY における中性子用 TLD を用いた測定を再評価した。中性子用 TLD を用いた測定については、測定データの処理に必要な係数を見直すことで再評価した。SILENE における再評価された中性子用 TLD の測定結果は、IRSN が公表した参考値と 10%以内で一致した。TRACY における再評価された中性子用 TLD の測定結果は、アラニン線量計や著者等による中性子用 TLD の測定結果に対して 50%前後の過大評価となったものの、再評価により、再評価前の値と炉心タンクからの距離の関係に存在する矛盾が解消された。SILENE における γ 線用 TLD による測定については、測定データの処理方法を見直すことで再評価した。 γ 線用 TLD の再評価された結果は、再評価前の値と 1%程度の違いとなった。再評価の結果、本報告書に記述した中性子用 TLD 及び γ 線用 TLD の測定データ処理方法が有効であることを確認した。

原子力科学研究所（駐在）：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

※ 技術開発協力員（東京ニュークリア・サービス（株））

Re-evaluation of Dose Measurements under Criticality Accident Conditions at SILENE and TRACY Using TLDs

Minoru MURAZAKI[※], Kotaro TONOIKE and Gunzo UCHIYAMA

Nuclear Facility Safety Research Unit

Nuclear Safety Research Center

Japan Atomic Energy Agency

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 18, 2009)

We have re-evaluated the dose measurements at Source d'Irradiation à Libre Evolution Neutronique (SILENE) with thermoluminescence dosimeters (TLDs) for neutrons and with TLDs for gamma rays, and at Transient Experiment Critical Facility (TRACY) with TLDs for neutrons. The measurements with TLDs for neutrons were re-evaluated by revising factors used for calculation of doses from measured data. The re-evaluated results of TLDs for neutrons at SILENE agreed with the reference value given by Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) within 10%. The re-evaluated results of TLDs for neutrons at TRACY are consistent with dose and distance from the surface of the core tank, while the results before re-evaluation are inconsistent with the relation. The re-evaluated results at TRACY were about 50% larger than results of polymer-alanine dosimeters and those of TLDs for neutrons measured by the authors. The measurements at SILENE with TLDs for gamma rays were re-evaluated by revising the method for obtaining doses from measurement data. The difference between the re-evaluated results of TLDs for gamma rays and the results before re-evaluation were about only 1%. By the re-evaluation, it was confirmed that the methods described in the present report are valid for processing measured data of TLDs for neutrons and those for gamma rays.

Keywords: TLD, Dosimetry, Criticality Accident, SILENE, TRACY, Neutron Dose, Gamma Ray Dose, MCNP

[※] Collaborating Engineer (Tokyo Nuclear Services, Co. Ltd.)

目次

1. 緒言	1
2. 照射に使用した施設	2
2.1 SILENEについて	2
2.1.1 概要	2
2.1.2 運転モード	3
2.2 TRACYについて	4
2.2.1 概要	4
2.2.2 運転モード	5
3. 使用された線量測定器について	6
3.1 中性子用 TLD	6
3.1.1 中性子用 TLD の構成	6
3.1.2 中性子用 TLD の応答	7
3.1.3 中性子用 TLD の校正	8
3.1.4 TLD 素子のフェーディング	8
3.2 γ 線用 TLD	9
3.2.1 γ 線用 TLD の構成	9
3.2.2 γ 線用 TLD の応答	9
3.2.3 γ 線用 TLD の校正	9
3.3 TLD リーダー	11
3.3.1 使用した TLD リーダー	11
3.3.2 TLD リーダーの校正	11
3.3.3 光学フィルター付きと光学フィルターなしの TLD リーダーの感度比	12
4. 線量測定データの処理方法	14
4.1 中性子用 TLD の測定データ処理方法	14
4.1.1 線量換算係数	14
4.1.2 応答補正係数	15
4.2 γ 線用 TLD の測定データ処理方法	16
5. SILENEにおける線量測定実験の再評価	17
5.1 実験概要	17
5.2 TLD 設置位置	17
5.3 中性子用 TLD の測定値の処理に必要な係数の算出	18
5.4 再評価結果	22
5.4.1 再評価された測定結果	22
5.4.2 再評価された測定結果と IRSN が公開した参考値の比較	23
5.4.3 照射位置による中性子カーマの違いの検証	24
5.4.4 MCNP 計算値と測定値の比較	25

5.5 再評価された SILENE における測定についてのまとめ	26
6. TRACY における線量測定実験の再評価.....	27
6.1 実験概要.....	27
6.2 中性子用 TLD 設置位置	27
6.3 中性子用 TLD の測定値の処理に必要な係数の算出	29
6.4 再評価結果.....	31
6.4.1 再評価された測定結果	31
6.4.2 再評価された結果と MCNP5 計算値の比較	31
6.4.3 再評価された結果とアラニン線量計による測定値の比較.....	32
6.4.4 再評価された結果と著者等による中性子用 TLD 測定値の比較	34
6.5 再評価された TRACY における線量測定についてのまとめ	35
7. 結論	36
謝辞	37
参考文献	37
付録	39
A SILENE の計算モデルにおいて使用した原子個数密度	39
B TRACY の計算モデルにおいて使用した原子個数密度	41
C 中性子用 TLD の応答補正の計算に用いた原子個数密度	47
D SILENE に対する再評価結果と旧評価結果の比較	48
E TRACY に対する再評価結果と旧評価結果の比較	49

Contents

1.	Introduction.....
2.	The facilities used for irradiation
2.1	SILENE.....
2.1.1	Outline.....
2.1.2	Operation modes.....
2.2	TRACY.....
2.2.1	Outline.....
2.2.2	Operation modes.....
3.	Dosimeters used for measurements.....
3.1	The TLD for neutrons.....
3.1.1	Structure of the TLD for neutrons
3.1.2	The response of the TLD for neutrons.....
3.1.3	Calibration of the TLD for neutrons.....
3.1.4	Fading of the TL element.....
3.2	The TLD for gamma rays.....
3.2.1	Structure of the TLD for gamma rays.....
3.2.2	The response of the TLD for gamma rays.....
3.2.3	Calibration of the TLD for gamma rays.....
3.3	The TLD readers.....
3.3.1	The TLD readers used for measurements.....
3.3.2	Calibration of the TLD readers
3.3.3	The ratio of the sensitivity of a TLD reader without the optical filter to one with the filter.....
4.	The method for processing measured data.....
4.1	The method for processing the measured data of the TLDs for neutrons.....
4.1.1	Dose conversion factors.....
4.1.2	Response correction factors.....
4.2	The method for processing the measured data of the TLDs for gamma rays.....
5.	Re-evaluation of dose measurement at SILENE.....
5.1	Outline of the experiments.....
5.2	Positions of the TLDs.....
5.3	Calculation of factors used to obtain doses from measured data of TLDs for neutrons.....
5.4	Results of re-evaluation.....
5.4.1	Re-evaluated measurement results.....
5.4.2	Comparison of the re-evaluated results with the reference values given by IRSN.....
5.4.3	Verification of the difference between neutron kerma values irradiated at different positions.....

5.4.4 Comparison of the re-evaluated results with the MCNP calculation results	25
5.5 Summary of re-evaluation of dose measurement at SILENE.....	26
6. Re-evaluation of dose measurements at TRACY	27
6.1 Outline of the experiments	27
6.2 Positions of TLDs for neutrons	27
6.3 Calculation of factors used to obtain doses from measured data of TLDs for neutrons.....	29
6.4 Results of re-evaluation.....	31
6.4.1 Re-evaluated measurement results	31
6.4.2 Comparison of re-evaluated results with MCNP5 calculation results.....	31
6.4.3 Comparison of re-evaluated results with measured results of the polymer-alanine dosimeters ..	32
6.4.4 Comparison of re-evaluated results with results of the TLDs for neutrons measured by the authors	34
6.5 Summary of re-evaluation of measurement results at TRACY	35
7. Conclusion.....	36
Acknowledgments	37
References	37
Appendix	39
A Number densities used for the calculation model of SILENE	39
B Number densities used for the calculation model of TRACY	41
C Number densities used for the calculation model of TLDs for neutrons	47
D Comparisons between results of re-evaluation and before re-evaluation at SILENE.....	48
E Comparisons between results of re-evaluation and before re-evaluation at TRACY	49

1. 緒言

臨界事故が起こると、1秒以下のごく短時間に大線量の中性子及び γ 線が、事故の原因となつた核分裂性物質から放出される。この大線量の放射線により、事故現場に居る作業員は、生死に関わるような被ばくをする恐れがある。このような事故時において、被ばく線量の評価は、主として、被ばくした作業員を適切に治療するための方針を定めるために必要である¹⁾。

臨界事故時のための線量計は、上記のような短時間における大線量の測定をする必要があるため、通常の被ばく管理用のものとは異なる。このような臨界事故時用の線量計の性能を相互に比較するための試験が、2002年6月にフランス原子力庁(CEA)のValduc研究所内に設置されている原子炉SILENEにおいて行われた。この試験には24カ国からの参加があり、当時の日本原子力研究所(以下、原研)からも参加している。この試験において原研がSILENEに持ち込んだ線量測定器は、中性子用及び γ 線用の熱ルミネセンス線量計(TLD)である。このSILENEにおけるような臨界事故状況下の線量測定では、Gy単位の吸収線量あるいは組織カーマが要求される。このため、TLDをTLDリーダーで測定して得られるSv単位の値からGy単位への換算を行う必要がある。この単位換算を含めたこれらのTLDの測定データ処理(以下、旧データ処理法)については文献2に、測定結果(以下、SILENE旧評価結果)については、文献2及び3に記述されている。また、中性子用TLDの測定データ処理方法を検証するため、日本原子力研究開発機構の燃料サイクル安全工学研究施設NUCEFの過渡臨界実験装置TRACYにおいても中性子線量測定が行われた。この結果(以下、TRACY旧評価結果)についても、これら2つの文献にまとめられている。

著者等は、TRACYにおいて、上記と同じ中性子用TLDを用いて、TRACY旧評価結果^{2,3)}に記載されたものとは別の実験において中性子線量測定を行い、その結果をまとめた⁴⁾。この測定では、旧データ処理法²⁾を参考にしたが、このデータ処理に用いる係数のうち、校正用線源と測定場のスペクトルの違いに起因するTLDの応答を補正するものについては、別な方法で求めた。著者等が用いた方法では、この係数が旧データ処理法の値²⁾に対して約2倍となり、これは結果として得られる線量値が約2倍になることを意味する。このため、著者等が行った方法でSILENE及びTRACY旧評価結果^{2,3)}の測定に対する再評価をする必要が生じた。

本報告書の構成は、次のとおりである。第2章では、照射に使用したSILENEとTRACYについて説明し、第3章では、使用したTLDについて説明した。第4章では、TLDの測定データから線量を算出するまでの処理方法を記述した。この章では、旧データ処理法²⁾及び著者等が文献4において用いた方法を説明した。第5章には、SILENE旧評価結果^{2,3)}の測定データを第4章の方法で処理した結果を記述し、この結果と、文献2の出版時には未発表であった、フランス放射線防護・原子力安全研究所(IRSN)によるSILENEの参考線量値の比較、また参考線量と同時に公表された照射時におけるSILENEの核分裂数を用いて規格化したMCNPによる線量計算値の比較についても記述した。これらの比較により、本報告書の線量評価手法が正しいことを確認した。第6章では、TRACY旧評価結果^{2,3)}の中性子用TLD測定データを第4章の方法で処理した結果を示した。第7章には、本レポートのまとめを記述した。

2. 照射に使用した施設

線量計の照射は、SILENE と TRACY において行われた。これらの施設は、いずれも硝酸ウラニル溶液を用いて臨界事故時の状況を再現できる原子炉である。

2.1 SILENE⁵⁾について

2.1.1 概要

SILENE の炉心は、図 2.1 に示すように、中心に直径 7cm の制御棒案内管（AXIAL CHANNEL）を持った外径 36cm のステンレス鋼製の環状容器内に硝酸ウラニル溶液燃料が入ったものである。定格のウラン濃度 71g/L (U-235 濃縮度 93 %) において、臨界体積は約 38 L である。いくつかのタイプの制御棒が利用可能であり、反応度は 7.3 \$まで添加可能である。臨界超過状態は、制御棒を前もって決定された速さで引き抜くことにより達成される。通常使用される 2 種類の制御棒（ボロンとカドミウム）には、照射試験カプセルのための空洞がある。また、炉心タンクには、鉛、コンクリート、鉄、ポリエチレンの各遮へい体を取り付けることができ、これにより、漏洩放射線の特性、特に γ/h 線量比を変えることができる。

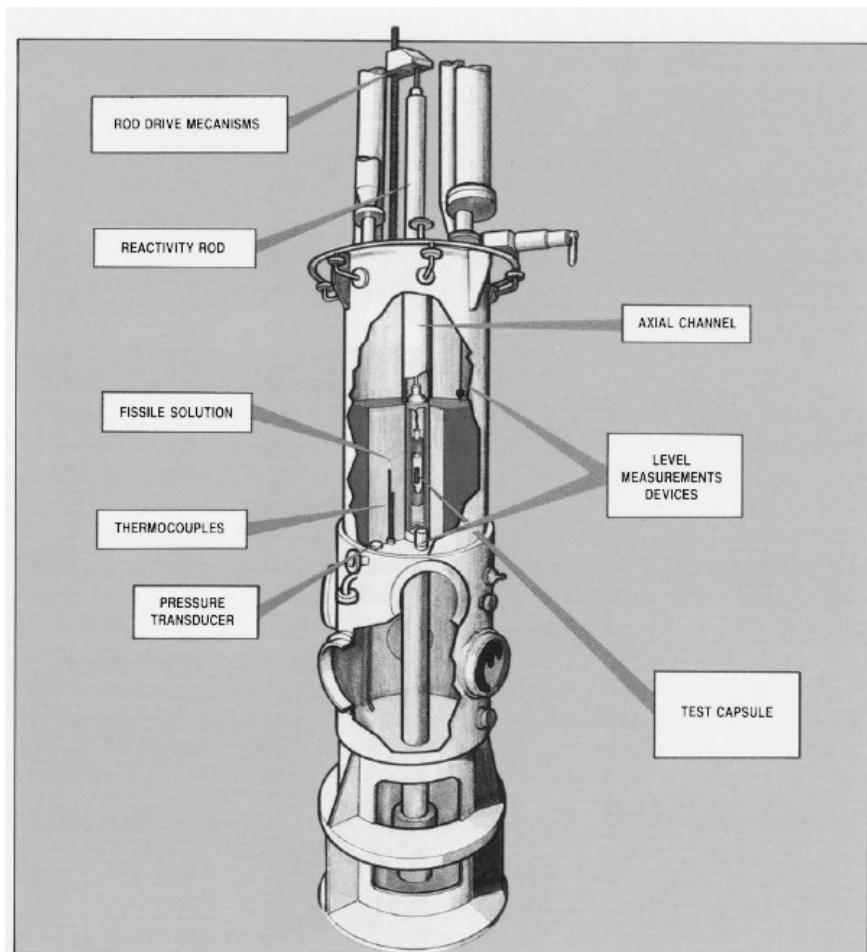


図 2.1 SILENE 炉心タンクの概略図⁵⁾

2.1.2 運転モード

SILENE は、添加反応度、制御棒の引き抜き速度、外部中性子線源の有無により、3つの異なるモードで運転されるように設計されている。

- パルスモード

非常に高出力のピークを非常に短い時間内に得るためのモードである(数 msec 以内に最大 1000 MW)。このモードは、外部中性子源ありまたはなしで、制御棒の急速な引き抜き(0.2 m/sec あるいは 2 m/sec)により運転される。反応度は 2.8 \$までに制限される。

- フリーエボリューションモード

このモードは、外部中性子源ありの状態で制御棒を約 1cm/sec でゆっくりと引き抜くことにより運転される。通常の運転では、反応度は 3.8 \$までに制限されるが、燃料溶液沸騰実験では 7.3 \$まで添加できる。

- 定常モード

このモードでは、前もって決められた定常出力レベルに保つため、外部中性子源ありの状態において、非常にゆっくりとした引き抜き速度(約 1 mm/sec)による制御棒位置の自動制御により運転される。

上記 3 種類の運転モードにおける出力の時間変化の典型例を図 2.2 に示す。

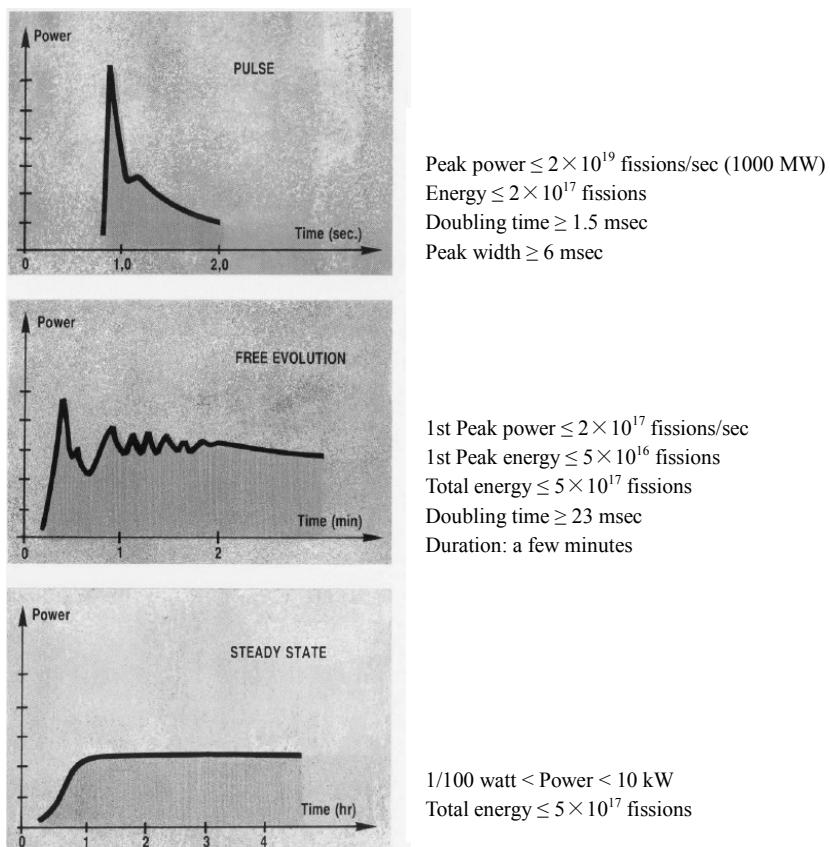


図 2.2 SILENE の各運転モードにおける出力の時間変化の典型例⁵⁾

2.2 TRACYについて⁶⁾

2.2.1 概要

TRACY は ^{235}U 濃縮度約 10%、ウラン濃度 500g/L 以下の硝酸ウラニル溶液を燃料とするパルス炉であり、SILENE と類似した施設である。炉心タンクは直径 50cm の環状であり、中心に直径 6.9cm のガイドチューブがあり、反応度を添加するための B_4C ペレットが詰められた調整トランジエント棒が出し入れできるようになっている。TRACY についての詳しい説明は、文献 6 に記載されている。

TRACY の仕様を表 2.1 に示す。

表 2.1 TRACY の仕様²⁾

熱出力	最大熱出力	10kW (定出力運転時) 5000MW (過渡出力運転時)
	最大積分出力	32MW · s
	最大週間積算出力	18kW · h
	最大年間積算出力	230kW · h
	使用燃料	硝酸ウラニル水溶液
燃料	ウラン濃縮度	約 10 wt%
	ウラン濃度	500 gU/L 以下
	核的制限値	最大過剰反応度 0.8 \$ (定出力運転時) 3 \$ (過剰出力運転時、T50 炉心)
核的制限値	定出力運転時の反応度添加率	3 ¢ /s 以下
	原子炉停止余裕	$k_{\text{eff}}=0.985$ 以下
	ワンロッドスタッフマージン	$k_{\text{eff}}=0.995$ 以下
	停止方法	通常停止 溶液燃料の排液 緊急停止 安全棒及び調整トランジエント棒の自由落下、溶液燃料の排液
制御方式	反応度制御方式	溶液燃料の給排液 (定出力運転時) 調整トランジエント棒の圧空駆動及び電動駆動、溶液燃料の給排液 (過渡出力運転時)
炉心	炉心形状	環状円筒
	炉心寸法	内径 : 7.6cm 外形 : 50cm 燃料高さ : 40cm~100cm
炉心タンク	設計圧力	880kPa
反射体	反射体	裸、水

2.2.2 運転モード

TRACY の運転モードは、3つの過渡運転モード（パルス引き抜き、ランプ引き抜き、ランプ給液）と定常運転モードの合計4つである。

1) パルス引き抜き

調整トランジエント棒を圧縮空気で急速に引き抜く。

2) ランプ引き抜き

調整トランジエント棒を電動駆動により一定速度で引き抜く。

3) ランプ給液

炉心タンク内に臨界量以上の燃料を給液する。

4) 定常運転

炉心タンク内に臨界量の燃料を給液する。

3. 使用された線量測定器について

本章では、SILENE 及び TRACY において使用された線量測定器である中性子用 TLD と γ 線用 TLD、またこれらの TLD の測定に使用された TLD リーダーについて述べる。ここでは、中性子用 TLD の校正定数の誤差、 γ 線用 TLD の校正定数及びその誤差、また TLD リーダーの光学フィルターの有無による感度比を再評価している。中性子用 TLD の校正定数については、SILENE 及び TRACY 旧評価結果^{2,3)}で用いられた値を再評価においてもそのまま用いている。

3.1 中性子用 TLD

3.1.1 中性子用 TLD の構成

SILENE 及び TRACY において用いられた中性子用 TLD は、もともと線量率の変動が大きい加速器周辺において、ある一定期間の積算線量当量を測定するために開発されたものであり⁷⁾、パナソニック製の TLD バッジ UD-813PQ4 とそれを入れる同社製のモニターケース UDS893-P1 から構成される。モニターケースは、一辺が約 22cm のポリエチレン製の立方体であり、その内部には短冊状のカドミウム板が配置され、中央には 2 つの TLD バッジが入るようにくぼみが付けられた一辺約 7cm の鉛の立方体が組み込まれている。モニターケースは、上記の大きさの他、重量が約 15 kg あるため、人体への装着には適さない。このため、この測定器はエリアモニターとして使用される。モニターケースの外観を図 3.1 に、またモニターケースのふたをはずした様子を図 3.2 に示す。

TLD バッジ UD-813PQ4 は 4 つの素子を持ち、素子 1 と 2 が中性子と γ 線の両方に感度を持つ⁶ $\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ であり、残りの素子 3 と 4 が γ 線のみの感度を持つ⁷ $\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ である。

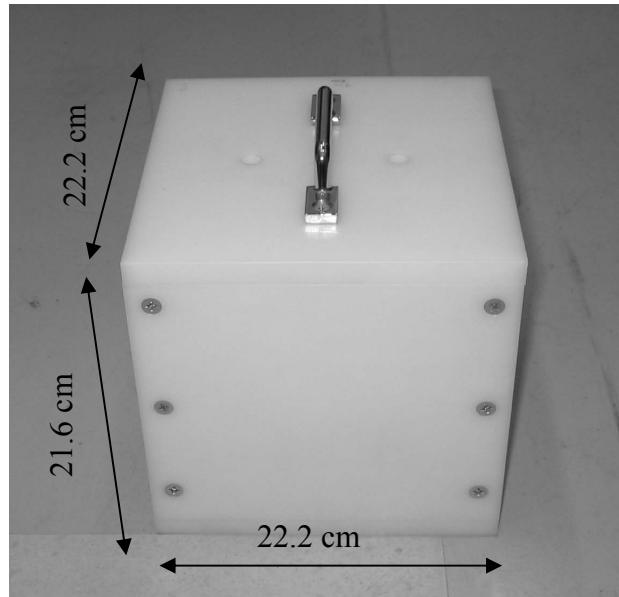


図 3.1 モニターケース外観

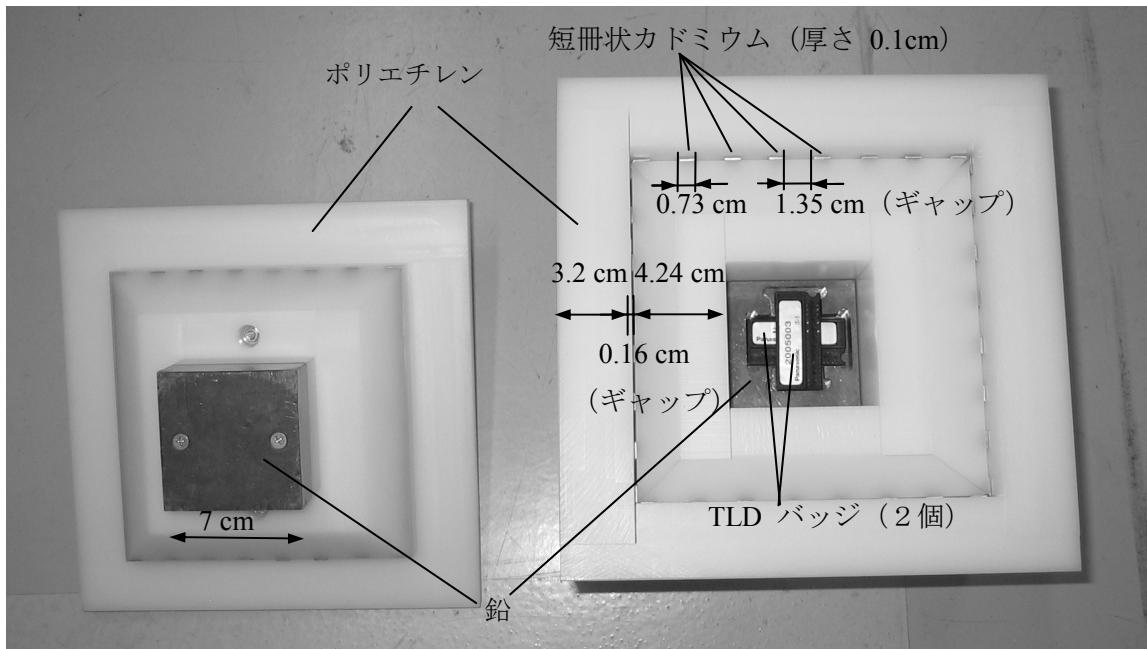


図 3.2 モニタークースのふたをはずした様子

3.1.2 中性子用 TLD の応答

中性子用 TLD の応答は、いくつかのエネルギー点で測定されている⁷⁾。この応答を中性子フルエンスから周辺線量当量への換算係数⁸⁾と重ねて図 3.3 に示す。また、この図には、MCNP5 と JENDL-3.3 により、正確にモデル化されたモニタークースの中心に置かれたホウ酸リチウム素子の中性子吸收反応率を求めた結果も示した。MCNP5 による計算結果は、中性子エネルギー 3 MeVにおいて、周辺線量当量への換算係数に規格化されている。

この図 3.3 から、MCNP5 により計算された中性子用 TLD の応答は、測定値と良く一致していることが分かる。また、この計算された応答は、特に 0.1 MeV～10 MeV のエネルギー範囲において、周辺線量当量への換算係数と良く一致している。これにより、中性子用 TLD は、補正なしで周辺線量当量を大まかに評価できることが予想される。実際、校正場において、²⁵²Cf 線源で校正された中性子用 TLD により、1.35 cm～7.75 cm の厚さの鉛含有アクリルで減速された²⁵²Cf 線源や、減速材なしの²⁴¹Am-Be 線源からの中性子線量を ±10% 以内の正確さで測定できることが示されている⁹⁾。この文献の結果から、測定場と校正場のスペクトルの違いによる TLD の応答を補正する係数（応答補正係数）は、10% 前後の補正を与える値、つまり 0.9～1.1 程度であることが予想される。また、この文献に記載された値から、応答補正係数は、²⁵²Cf の核分裂スペクトルよりも軟らかいスペクトルに対しては 1.0 以下、逆に硬いスペクトル (²⁴¹Am-Be) に対しては 1.0 以上となる。これは、図 3.3 から予想されるものである。

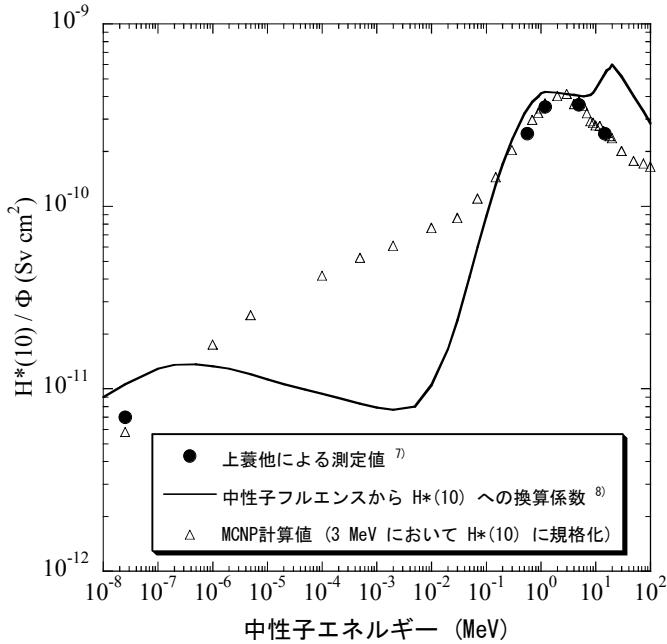


図 3.3 中性子用 TLD の応答

3.1.3 中性子用 TLD の校正

中性子用 TLD は、原研の放射線標準施設 (FRS) において、²⁵²Cf 線源により 5 mSv の周辺線量当量を照射することにより校正された。校正定数 C は、エレメント i の TLD リーダー表示値 d_i を用いて、以下の関係から求めることができる。

$$D_{ADE} = \frac{C}{2} (d_1 + d_2 - d_3 - d_4) \quad (1)$$

ここで、 D_{ADE} は周辺線量当量である。これは、校正における線量が周辺線量当量単位であるためである。この校正により求められた校正定数は表 3.1 に示す値であり、これは SILENE 及び TRACY 旧評価結果²⁾において使用されたものである。本報告書の再評価においても、この校正定数を使用した。校正定数の誤差は、文献 2 には記載されていないため、本報告書では、これを TLD リーダーの読み取り誤差 (5%) から算出した。この校正定数を使用して求められた線量は、校正線源である ²⁵²Cf 線源と同じスペクトルの場における測定に対してのみ有効である。測定対象場と校正線源のスペクトルが異なる場合には、それに伴う TLD の応答の違いを補正する必要がある。なお、TLD リーダーは、¹³⁷Cs 線源により照射された γ 線用 TLD の校正定数が 1 になるように、すなわち 1 mSv を照射された γ 線用 TLD を測定したときに 1 mSv と表示されるように校正されている。

3.1.4 TLD 素子のフェーディング

中性子用 TLD に用いた TLD バッジの素子であるホウ酸リチウムのフェーディングには、短期と長期のものがある。短期フェーディングは、素子の測定時の発光量が、照射直後に対して、照射の 1 日後に約 30% 減少する現象である¹⁰⁾。長期フェーディングは、素子の測定時の発光量が、照射 1 日後に対して、その後の 2 ヶ月でさらに約 10% 減少する現象である¹⁰⁾。このため、TLD バッジの TLD リーダーによる測定は、照射後少なくとも 1 日経過してから行う必要がある。校正及び

測定場での照射後 1 日以上経過してから TLD バッジを TLD リーダーで測定すれば、このフェイディングに伴う誤差を無視することができる。なお、SILENEにおいて用いられた γ 線用 TLD の素子も同じホウ酸リチウムであるため、 γ 線用 TLD の測定についても、同様に照射後 1 日以上経過してから行う必要がある。

表 3.1 中性子用 TLD の校正定数²⁾

^{252}Cf 線源による 5 mSv(H*(10))照射。2002 年 6 月 6 日測定

TLD バッジ No.	校正定数*	TLD バッジ No.	校正定数*
1	0.245 ± 0.009	14	0.273 ± 0.010
2	0.234 ± 0.008	15	0.300 ± 0.011
3	0.221 ± 0.008	16	0.323 ± 0.012
4	0.237 ± 0.008	17	0.242 ± 0.009
5	0.208 ± 0.007	18	0.304 ± 0.011
11	0.301 ± 0.011	19	0.247 ± 0.009
12	0.269 ± 0.010	20	0.297 ± 0.011
13	0.325 ± 0.012		

* 誤差は TLD リーダーの読み取り誤差 5%から求めた。

3.2 γ 線用 TLD

3.2.1 γ 線用 TLD の構成

γ 線用 TLD としては、パナソニック製の UD-808PQ が用いられた。この TLD バッジは 4 つの素子を持ち、素子 1, 2, 4 がホウ酸リチウム ($^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$) であり、素子 3 が硫酸カルシウムである。線量測定には素子 4 が用いられた。なお、文献 2 には、素子 4 の樹脂シールドが 1000 mg/cm² と記載されているが、実際は 160 mg/cm² である。この TLD バッジを TLD ハンガーと呼ばれるケースに入れた場合には、樹脂シールドが 1000 mg/cm² となるが、SILENE における照射では TLD ハンガーは用いられていない。

3.2.2 γ 線用 TLD の応答

γ 線用 TLD の素子であるホウ酸リチウムは、図 3.4 に示すように ICRU 軟組織とほぼ同じカーマへの換算係数を持つ。このため、ホウ酸リチウム素子による γ 線吸収線量は、そのまま組織吸収線量とすることができる。これらの換算係数は、質量エネルギー吸収係数¹¹⁾から求めた。

3.2.3 γ 線用 TLD の校正

旧データ処理法²⁾では、 γ 線用 TLD の校正定数として、SILENE の国際比較試験において、 ^{60}Co 線源により 1 Gy を照射された 3 つの TLD の校正定数を平均した値を、他の 12 個すべての TLD に対して使用している。本来は、TLD の素子の量はバッジ毎に多少のばらつきがあるため、各バッジで個々の校正定数を使用すべきである。しかし、他に利用可能なデータがないため、本報告書

においても、同様のデータを使用せざるを得ない。

本報告書では、旧データ処理法²⁾とは異なる方法により校正定数を求めた。図3.4に示すように、ホウ酸リチウム素子とICRU軟組織のカーマ係数はほぼ等しい。このため、ホウ酸リチウム素子を用いたTLDは、組織等価な線量計である。この特性を利用し、⁶⁰Co線源で照射された3つのTLDに対して、校正定数は単純に（照射線量(Gy)）／（TLDリーダー表示値(Sv)）として求めることができる。このようにして求めた校正定数を平均し、その他の γ 線用TLDの校正定数とした。この校正定数は1.02(Gy/Sv)となった。この算出に用いた値を表3.2に示す。なお、校正定数の誤差は、TLDリーダーの読み取り誤差(5%)から算出した。

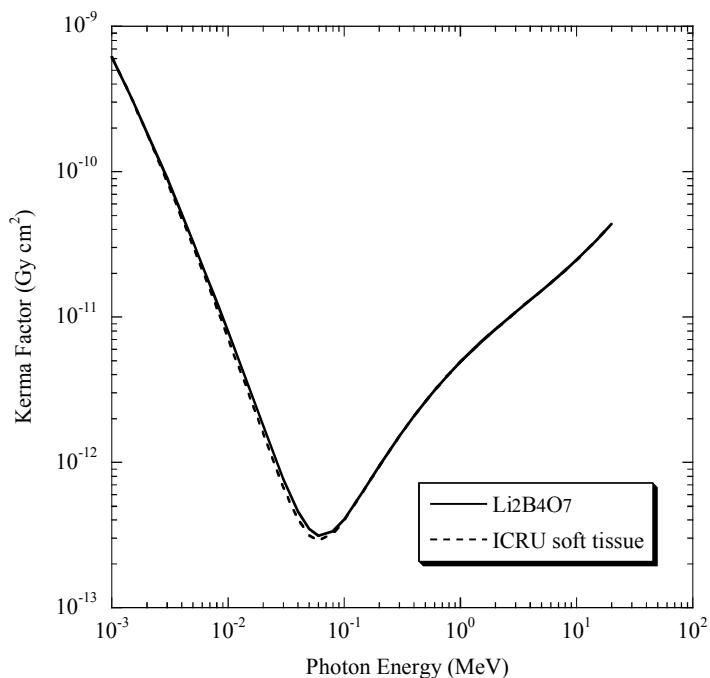


図3.4 γ 線用TLD素子のホウ酸リチウム($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$)とICRU軟組織の光子に対するカーマ係数

表3.2 γ 線用TLDの校正定数算出に用いた値

(⁶⁰Co線源による1Gy照射。2002年6月24日測定)

TLDバッジ No.	BG線量 ²⁾ (μ Sv)	TLDリーダー 表示値 ²⁾ (Sv)	正味の線量* (Sv)	校正定数* (Gy/Sv)	校正定数* 平均値(Gy/Sv)
1	71	0.924	0.924 ± 0.046	1.08 ± 0.047	1.02 ± 0.03
2	57	1.04	1.04 ± 0.05	0.962 ± 0.053	
3	26	0.979	0.979 ± 0.049	1.02 ± 0.05	

* 誤差はTLDリーダーの読み取り誤差(5%)から求めた。

3.3 TLD リーダー

3.3.1 使用した TLD リーダー

TLD リーダーとして、2台のパナソニック製 UD-706P が用いられた。1台は通常の TLD リーダーであり、校正照射された中性子用 TLD、また γ 線用 TLD（校正照射と SILENE 照射の両方）の測定に用いられた。もう1台は、TL 素子からの発光を減弱させる光学フィルターが取り付けられた TLD リーダーであり、これは SILENE 及び TRACY で照射された中性子用 TLD を測定する場合に用いられた。光学フィルター付きの TLD リーダーが用いられた理由は、SILENE や TRACY で照射された中性子用 TLD を光学フィルターなしの通常の TLD リーダーで測定すると、TL 素子の発光量が測定可能な範囲を超える可能性があるためである。なお、FRSにおいて校正照射された中性子用 TLD の測定では、照射可能な線量が小さいため、光学フィルターなしの TLD リーダーを用いる必要がある。このように、中性子用 TLD については、校正と線量測定で別の TLD リーダーが用いられたため、2台の TLD リーダーの感度比を求めておく必要がある。

3.3.2 TLD リーダーの校正

TLD リーダーは、長期間使用していると感度が変化するため、通常は約1年毎に校正を行う。この校正により、 γ 線用 TLD の校正定数が1に近くなるように、TLD リーダーの感度が調整される。この調整後、各 TLD バッジの校正定数は、校正施設において照射を行って求め直す必要がある。なお、TLD リーダーの感度は、校正が行われたあと次の校正までは変化していないとすることができる。これは、TLD バッジの測定前に TLD リーダー内蔵の校正用光源の測定を行って、TLD リーダー校正時における校正用光源測定値に対する補正係数を求めておくことにより、TLD リーダーの感度が校正時の値に補正されるためである。

本報告書で扱うデータの測定期間前後における TLD リーダーの校正日を表 3.3 に示す。表 3.3 に示すように、光学フィルターなしの TLD リーダーを用いた測定については、TLD リーダーの校正を 2002 年 5 月に行い、その後 2003 年 3 月に再度校正されるまでの間に、校正照射された中性子用 TLD と SILENE で照射された γ 線用 TLD（校正照射を含む）の測定が行われており、特に問題になることはない。一方、光学フィルター付き TLD リーダーを用いた測定についても、2000 年に TLD リーダーの校正を行ってから 2003 年 10 月に再度校正されるまでの間に、SILENE 及び TRACY で照射された中性子用 TLD の測定が行われている。光学フィルター付きの TLD リーダーを用いた測定では、校正照射された TLD の測定時における光学フィルターなしの TLD リーダーとの感度比を用いる必要がある。この感度比は、光学フィルターなしの TLD リーダーの校正が行われた 2003 年 3 月以降においても、2002 年における値を用いる必要がある。これは、表 3.3 に示すように、校正照射された中性子用 TLD の測定が 2002 年 6 月に行われており、感度比は、この時点の光学フィルターなし TLD リーダーに対するものでなければならないためである。

表 3.3 TLD リーダー校正時期と TLD バッジ測定時期

年	TLD リーダー校正時期		TLD バッジ測定時期	
	光学フィルターなし	光学フィルター付き	光学フィルターなし	光学フィルター付き
2000	—	10月	—	—
2002	5月	—	6月：中性子用 TLD 校正 6月：SILENE で照射した中性子用 TLD ^{2,3)} た γ 線用 TLD (γ 線用 TLD 校正を含む)	6月：SILENE で照射した中性子用 TLD ^{2,3)} 11月：TRACY の R232 で照射した中性子用 TLD ²⁾
2003	3月 10月	10月	—	7月～9月：TRACY の R249～R257 において照射された中性子用 TLD ³⁾

3.3.3 光学フィルター付きと光学フィルターなしの TLD リーダーの感度比

2台の TLD リーダー（光学フィルター付きと光学フィルターなし）の感度比は、10個前後の γ 線用 TLD を校正照射して一方の TLD リーダーで測定し、再度同じ線量を校正照射してもう一方の TLD リーダーで測定して、各 TLD バッジの表示値の比（光学フィルター付き／光学フィルターなし）を平均して求めるべきである。しかし、旧データ処理法^{2,3)}では、 γ 線用 TLD の感度の個体差は小さく無視できるという仮定のもと、SILENE 及び TRACY における照射時に、最大4個の γ 線用 TLD を炉室内の同じ位置に置き、それぞれの TLD リーダーで1個ずつあるいは2個ずつ測定することにより求められている。

旧データ処理法²⁾では、TLD リーダー感度比（光学フィルターなし／光学フィルター付き）として、SILENE 測定時には 857、TRACY 測定時（Run 232）には 733 が使用されている。しかし、以下の理由から、感度比がこれほど変化していた可能性は非常に小さいと考えられる。この理由は、SILENE 測定が 2002 年 6 月に行われ、TRACY 測定が同年 11 月に行われており、この間はわずか 5 ヶ月程度であること、またこの間には TLD リーダーの校正は行われておらず、TL 素子の発光量と TLD リーダー表示値の関係は変わっていないことである。また、SILENE 測定時における感度比の算出においては、光学フィルター付き TLD リーダーで測定した線量の処理に問題がある。この問題とは、光学フィルター付き TLD リーダーで測定した照射後の線量読み値から、光学フィルターなしの TLD リーダーで測定したバックグラウンド線量を差し引いていることである。これにより、バックグラウンド線量が過大に評価されるため、光学フィルター付き TLD リーダーによる正味の線量が過小に評価され、結果として TLD リーダー感度比が過大に評価される。これに対して、TRACY 測定時における感度比算出では、照射前のバックグラウンド測定と照射後の測定で一貫して同じ TLD リーダー（光学フィルター付きあるいは光学フィルターなし）が用いられているため、感度比としては TRACY 測定時のものが確からしいと言える。このため、本報告書では、TLD リーダーの感度比として、TRACY 測定時の値を使用する。旧データ処理法の記述²⁾においては、感度比算出の元データは示されていないため、表 3.4 にそのデータを示す。また、

感度比を算出するための元データの数が多ければ、より精度のよい感度比を得ることができるため、TRACY 測定において同時期に取られた値も採用し、感度比として 730 という値を得た。これらの値を表 3.4 に示す。感度比の誤差としては、TLD リーダーの読み取り誤差 5%のみを考慮した。

TRACY の R249～R257 におけるデータ処理³⁾においては、TLD リーダー感度比として、810～836 の値が各実験で用いられており、これらは 2003 年 7 月～9 月の各実験時において 2 台の TLD リーダーにより、TRACY 炉室内の同じ位置で照射された各 1 個の γ 線用 TLD を測定して求められた値である。しかし、表 3.3 に示すように、光学フィルターなしの TLD リーダーは、2003 年 3 月に校正されているため、この R249～R257 におけるデータ処理³⁾における感度比は、中性子用 TLD の校正測定時（2002 年 6 月）の TLD リーダー感度とは無関係であり、使用できない。よって、本報告書では、これらの測定に対しても、表 3.4 に示した TLD リーダー感度比を使用する。

表 3.4 光学フィルター付きと光学フィルターなしの TLD リーダーの感度比を求めるための γ 線用 TLD 測定データ

Run No.	バッジ No.	光学 フィルター	BG 線量 (mSv)	TLD リーダー 表示値 (Sv)	正味線量値 (Sv)	実験毎 感度比	感度比 平均値
R231	4	なし	1.56	5.33	5.33	726 ±36	730 ± 26
	5		1.55	5.30	5.30		
	6	あり	0.006	7.38E-03	7.37E-03		
	7		0.006	7.27E-03	7.26E-03		
R232	10	なし	0.255	1.51	1.51	733 ±37	
	11		0.199	1.54	1.54		
	12	あり	0.006	2.11E-03	2.10E-03		
	13		0.006	2.06E-03	2.05E-03		

4. 線量測定データの処理方法

本章では、中性子用 TLD 及び γ 線量 TLD の測定データから線量を算出する方法について記述する。SILENE における国際比較試験では、線量測定値を線量当量ではなく、Gy 単位（吸収線量あるいはカーマ）で報告することが要求されていた。これは、臨界事故のような短時間における大線量の被ばくでは、線量当量において用いられる線質係数が無効であり、線量として、人体への最大吸収線量かフリーエア中における組織カーマが要求されるためである¹²⁾。TRACY における測定においても、同様に Gy 単位で線量を求める。中性子用 TLD 及び γ 線用 TLD は、共にフリーエアの条件で照射されたため、これらの TLD から得られたデータは、組織カーマへと換算する必要がある。なお、本報告書では、中性子用 TLD の測定データ処理に用いる線量換算係数及び応答補正係数を本章の方法で求めており、旧データ処理法^{2),3)}の値は使用しない。また、 γ 線用 TLD の測定データ処理については、前章に示した校正定数を用い、旧データ処理法²⁾は使用しない。

4.1 中性子用 TLD の測定データ処理方法

中性子組織カーマ D_{TK} は、以下の式で求められる^{2,3)}。

$$D_{TK} = D_{ADE} R k \quad (2)$$

ここで、 D_{ADE} は(1)式により求められる周辺線量当量単位の TLD 測定値、 R は周辺線量当量から組織カーマへの線量換算係数、 k は校正に用いられた²⁵²Cf 線源と測定場のスペクトルの違いに起因する中性子用 TLD の応答を補正する係数である。 R と k の算出方法については、以下で説明する。なお、旧データ処理法^{2,3)}では、 R と k はそれぞれ K/H 、 cf と表記されている。

4.1.1 線量換算係数

線量換算係数 R は、中性子用 TLD 測定値の周辺線量当量を組織カーマへ換算するためのものである。この係数は、以下に示すように、TLD 設置位置における周辺線量当量と組織カーマの計算値の比を取ることにより求められる。

$$R = \frac{D_k (\text{Gy})}{D_h (\text{Sv})} \quad (3)$$

ここで、 D_k は組織カーマ計算値、 D_h は周辺線量当量計算値である。これらの線量の値は、連続エネルギーモンテカルロコード MCNP5¹³⁾を用いた固有値計算により、SILENE と TRACY それぞれの体系について、TLD 設置位置における中性子スペクトルを点検出器タリーで求め、これにフルエンスから周辺線量当量を求める換算係数⁸⁾、あるいは組織カーマを求める換算係数¹⁴⁾を適用することにより求められる。なお、旧データ処理法^{2,3)}では、中性子用 TLD の測定結果の換算において、組織カーマへの換算係数ではなく、水カーマへの換算係数¹⁵⁾を用いている。

この線量換算係数を求める際には、TLD 設置位置の中性子スペクトルを正確に求める必要がある。なお、照射位置における中性子フルエンスは、(3)式の D_k と D_h で約分されるため、正確に求める必要はない。

4.1.2 応答補正係数

応答補正係数 k は、校正に用いた ^{252}Cf 線源の核分裂スペクトルと、SILENE あるいは TRACY の TLD 設置位置における中性子スペクトルに対する TLD の応答の違いを補正するためのものである。これにより、線量測定値は、 ^{252}Cf 線源の核分裂スペクトルに対する値から TLD 設置位置の中性子スペクトルに対する値に補正される。この応答補正係数は、本報告書の中性子用 TLD を用いた測定の再評価において、最も重要なものであり、以下の ICRU レポート 66 に記載の式¹⁶⁾により求められる。

$$k = \frac{\int h_\Phi(E)\Phi_{E,r}dE}{\int R_\Phi(E)\Phi_{E,r}dE} \frac{\int R_\Phi(E)\Phi_{E,c}dE}{\int h_\Phi(E)\Phi_{E,c}dE} \quad (4)$$

ここで、 $h_\Phi(E)$ はエネルギー E に対するフルエンスから周辺線量当量への換算係数、 $R_\Phi(E)$ はエネルギー E に対する中性子用 TLD の応答関数、 Φ_E は中性子スペクトルであり、添字 c と r はそれぞれ校正場と測定場を示す。(4)式の応答に関する 2 つの積分 $\int R_\Phi(E)\Phi_{E,r}dE$ と $\int R_\Phi(E)\Phi_{E,c}dE$ は、それぞれ測定場と校正場のスペクトルに対する TLD 素子 ($^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7$) の中性子吸収反応率で置き換えることが可能である。この反応率は、MCNP5 を用いた固定源計算により求めることができる。この固定源計算では、線源を校正に用いた ^{252}Cf 線源の核分裂スペクトルか、測定場である SILENE あるいは TRACY における TLD 設置位置のスペクトルとし、正確にモデル化されたモニターケースの中心に置かれた TLD の素子の中性子吸収反応率を求める。校正場のスペクトルとしては、文献値¹⁷⁾を使用し、測定場のスペクトルとしては、前節の線量換算係数を求めるときに計算されたものを使用する。線源の形状は、実際の照射を考慮し、校正用の ^{252}Cf 線源は等方点線源、測定場の SILENE あるいは TRACY は平面線源とする。線源形状の違いによる結果の差を補正するため、減速材容器に入射する中性子数の比（点線源／面線源）を面線源の結果に適用する。

旧データ処理法³⁾には、応答補正係数について以下の式が示されている。なお、旧データ処理法^{2,3)}では、上記のとおり、応答補正係数は cf と表記されている。

$$cf = \frac{L_{\text{mes}}}{L_{\text{Cf-252}}}$$

ここで、 L_{mes} 、 $L_{\text{Cf-252}}$ はそれぞれ測定場のスペクトル及び校正に使用した ^{252}Cf のスペクトルに対する TLD 素子 $^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7$ の発光量とされている。旧データ処理法^{2,3)}には明確な記述はないが、この cf の値は、以下の式により求められている。

$$cf = \frac{\int R_\Phi(E)\Phi_{E,r}dE}{\int R_\Phi(E)\Phi_{E,c}dE} \quad (5)$$

(4)式と(5)式を比較すると、(4)式の校正場と測定場に対する線量当量が(5)式ではなく、さらに応答（反応率）は、(4)式では分子に校正場のスペクトルに対する値、分母に測定場に対する値となっているが、(5)式では逆になっていることが分かる。このように、(4)式は測定場と校正場に対する TLD 素子の単位反応あたりの線量の比であるが、(5)式では単に測定場と校正場のスペクトルに対する反応率の比となっており、線量とは無関係である。このため、(5)式は線量の補正をするための

係数とはならない。したがって、応答補正係数は、(4)式を用いて求めるべきである。なお、(5)式を用いて求められた応答補正係数の値は、旧データ処理法²⁾の説明に記載されており、その値は鉛遮へい付き SILENE に対して 0.66、TRACY の 1.7 m 位置及び 3.83 m 位置に対して 0.41 である。TRACY の 4 m 位置に対する応答補正係数は、旧データ処理法³⁾には記載されていないが、0.71 が使用されている。これらの値は、校正場における測定結果⁹⁾から予想される 1.0 前後の値からは大きくかけ離れている。

4.2 γ 線用 TLD の測定データ処理方法

第 3.2.3 節に記述したとおり、 γ 線用 TLD の校正においては、素子であるホウ酸リチウムの応答特性を利用して、TLD リーダー表示値を直接 ICRU 軟組織カーマへ換算する校正定数を求めている。このため、 γ 線用 TLD の測定データ処理は、単にバックグラウンド線量を差し引いた TLD リーダー表示値に校正定数を乗算するのみである。これにより、 γ 線の組織カーマが得られる。

旧データ処理法²⁾では、TLD の素子に 1000 mg/cm^2 のシールドを付け、さらに TLD をファントムに装着した状態の TLD の応答が、1 cm 線量当量に近いという特性を利用してデータを処理している。しかし、第 3.2.3 節に記述したとおり、TLD のシールドは 160 mg/cm^2 であり、また TLD はフリーエアの条件で照射されているため、旧データ処理法²⁾において前提としている応答特性は利用できない。このため、 γ 線用 TLD の測定データの処理には、第 3.2.3 節に記述したとおり、校正定数として Gy/Sv 単位の値を求めておき、これを測定データに適用するという単純な方法を使用すべきである。

5. SILENEにおける線量測定実験の再評価

本章では、SILENEにおける中性子用 TLD 及び γ 線用 TLD の測定を再評価した。中性子用 TLD の測定データ処理に必要な線量換算係数と応答補正係数については、第4章に記述した方法で求めた値を使用し、旧データ処理法²⁾において使用された値は使用しない。また、 γ 線用 TLD の測定データ処理では、第4章に記載した校正定数を用い、旧データ処理法²⁾は使用しない。

5.1 実験概要²⁾

臨界事故時用線量計の国際比較試験では、表5.1に示すように、SILENEは3回運転され、各参加者が持ち込んだ線量計が照射された。

原研が持ち込んだ線量計の照射状況は、以下のとおりである。

- シナリオ 1
 - 中性子用 TLD : 照射されず（郵送が間に合わなかったため）
 - γ 線用 TLD : 4m 位置で 4 個照射
- シナリオ 2 及び 3
 - 中性子用 TLD : 2m 位置と 4m 位置のそれぞれにおいて 1 個照射
 - γ 線用 TLD : 4m 位置で 4 個（シナリオ 2）あるいは 3 個（シナリオ 3）照射

なお、この試験では、燃料溶液のウラン濃度や液位等の運転条件は公開されていない。

表 5.1 国際比較試験における SILENE の運転内容

シナリオ	運転モード	遮へい	最大線量率 (Gy/sec)	4m 位置における線量 (中性子 + γ 線)	吸収線量比 (γ /中性子)
1	Free evolution	なし	4	4 Gy (3 分以内)	1.2
2	Free evolution	鉛	2	2 Gy (3 分以内)	0.2
3	Steady state	鉛	0.004	1 Gy (約 30 分以内)	0.2

5.2 TLD 設置位置

中性子用 TLD は、図5.1に示すように、炉心タンク中心から 2m 及び 4m 離れた位置に設置された。この位置は、文献¹⁸⁾の写真から推定したものである。 γ 線用 TLD は、炉心タンク中心から 4m 離れた位置に設置された¹⁹⁾。図中の γ 線用 TLD が設置された 4m 位置は、「リファレンス位置」とされており、この位置を含み、図に示された 4m 位置の 45° から 150° の範囲は、測定により、中性子と γ 線が完全に均一であることが確かめられている²⁰⁾。中性子用 TLD が設置された位置は、この範囲から外れている。中性子用 TLD 設置位置とリファレンス位置の線量の計算による比較については、後述の節において説明する。

5.3 中性子用 TLD の測定値の処理に必要な係数の算出

前章に記述したように、中性子用 TLD の測定値に対しては、線量換算係数と応答補正係数を用いて処理し、組織カーマを算出することが必要である。以下にこれらの係数の算出条件を示す。線量換算係数の計算においては、図 5.2 に示した鉛遮へい付き SILENE をモデル化しているが、この鉛遮へいの幾何形状は、公開の文献からは見つけられなかつたため、IRSN の Duluc 氏からの情報²¹⁾に基づいている。また、第 5.1 節に記述したとおり、この試験における燃料溶液のウラン濃度や液位等の条件は公開されていないため、OECD/NEA のベンチマークの仕様書²²⁾に記載されている値を使用した。炉心タンクや炉室コンクリートの原子個数密度も、この文書に記載されている値を使用した。なお、計算コードとライブラリは、すべて MCNP5 1.40 と JENDL-3.3²³⁾に基づく FSXLIB-J33 ライブラリ²⁴⁾を用いた。

- 線量換算係数の計算条件

- 計算モード：臨界計算
- 計算モデル：図 5.1 及び図 5.2 参照
- 燃料溶液、炉心タンク、炉室コンクリート等の原子個数密度：付録 A の表を参照
- 燃料液位：40.96 cm²²⁾
- タリー種類：点検出器 (F5)
- タリー位置：(0, 200, 16.4)、(0, 400, 16.4)
原点は、炉心タンク中心の液位 0 cm としている。このため、z=16.4 cm は、床から 120 cm の高さとなる。
- タリーのエネルギー群：MGCL-137 群構造
- ヒストリー数：50,000 ヒストリー × 420 サイクル（最初の 20 サイクルをスキップ）

- 応答補正係数の計算条件

- 計算モード：固定源
- 計算モデル：図 3.1 及び図 3.2 のモニターケースをモデル化したもの
- 原子個数密度：付録 C の表を参照
- 線源：上記のタリー結果と校正に用いた²⁵²Cf の核分裂スペクトル¹⁷⁾
- タリー種類：飛程長 (F4)
- タリー乗数：⁶Li(n, abs), ¹⁰B(n, abs) (TL 素子の中性子吸収反応断面積)
- ヒストリー数：一億
- 分散低減：ウェイトウィンドウを使用

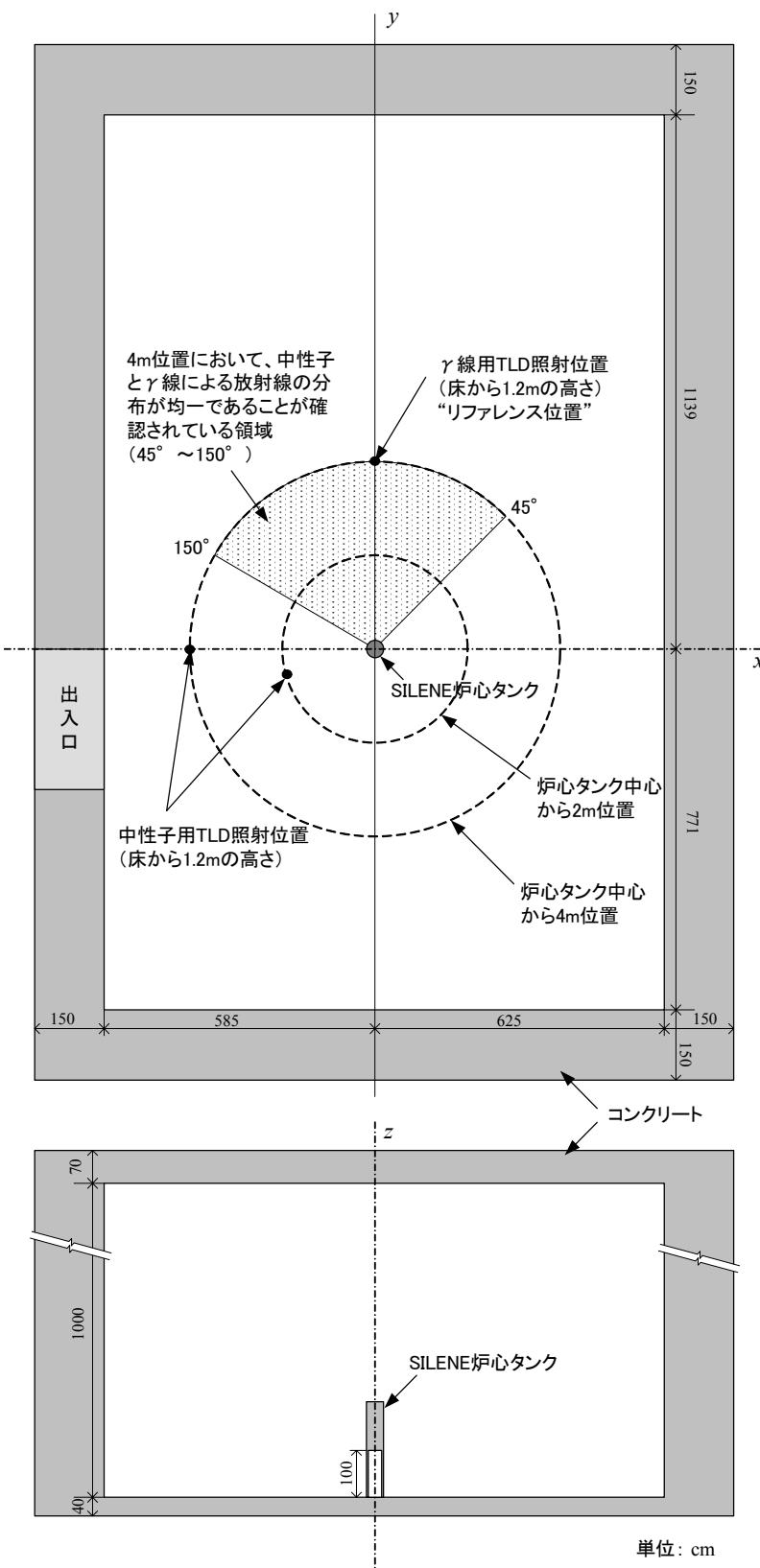
これらの条件により求めた線量換算係数と応答補正係数を表 5.2 に示す。係数の誤差は、MCNP 計算結果の統計誤差から求めている。

表 5.2 鉛遮へい付き SILENE における中性子用 TLD の線量換算係数と応答補正係数

照射位置	線量換算係数 R^* (Gy/Sv)	応答補正係数 k
2m	0.0619 ± 0.0001	0.962 ± 0.002
4m	0.0600 ± 0.0001	0.933 ± 0.003

* 周辺線量当量から組織カーマへの換算係数

上記の表に示すように、応答補正係数は 1 に近い値となっている。これは、 ^{252}Cf 線源で校正された中性子用 TLD が、アクリル減速材付き ^{252}Cf 線源による線量を不確かさ 10%以下で測定可能という校正場における測定結果⁹⁾と同じ傾向である。参考のため、線量換算係数算出のための SILENE 体系での臨界計算における TLD 設置位置の中性子スペクトル計算結果を図 5.3 に示す。

図 5.1 SILENE 炉室内における中性子用 TLD 及び γ 線用 TLD 設置位置

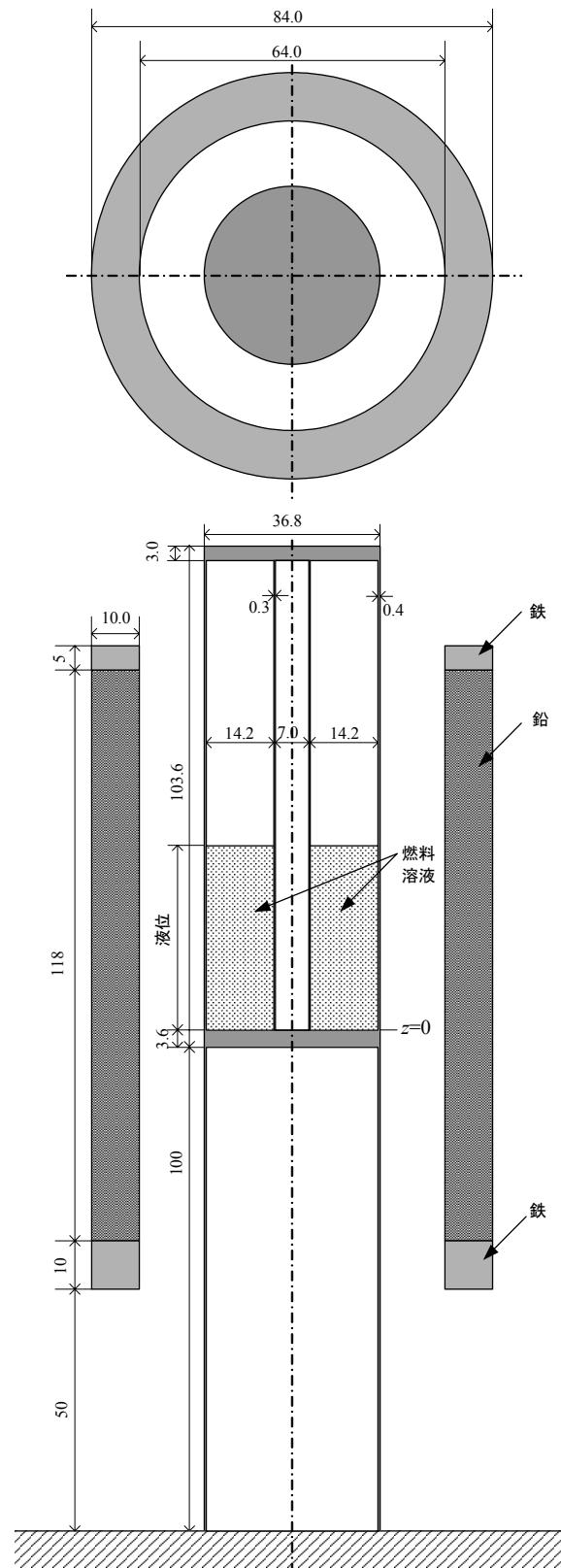


図 5.2 鉛遮へい体付き SILENE 炉心タンク計算モデル²¹⁾ (単位 : cm)

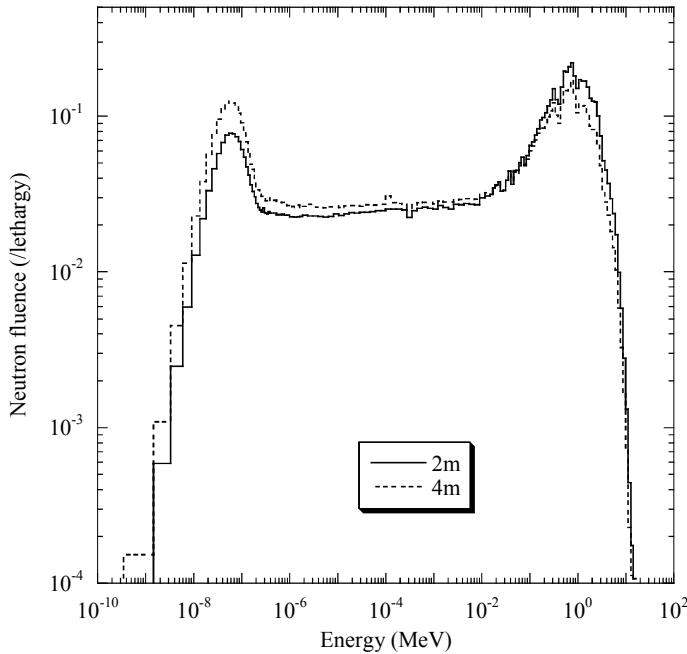


図 5.3 中性子用 TLD 設置位置における鉛遮へい付き SILENE の中性子スペクトル計算結果
使用コード : MCNP5、ライブラリ : FSXLIB-J33
(2m、4m 共にフルエンスは 1 に規格化されている。)

5.4 再評価結果

5.4.1 再評価された測定結果

SILENE における中性子用 TLD 及び γ 線用 TLD の測定結果をそれぞれ表 5.3 及び表 5.4 に示す。表 5.3 に示した中性子用 TLD 測定結果について、各シナリオにおける 2 m 位置 / 4 m 位置の比を取ると、シナリオ 2 と 3 でそれぞれ 3.43、3.40 となり、2 つのシナリオでほぼ同じ値となった。これは、2 つのシナリオにおいて、中性子線量測定値は、2 つの位置の相対比としては問題ないことを示している。なお、再評価された測定結果と旧評価結果^{2,3)}の比較は、付録 D に記載した。

表 5.3 及び表 5.4 に示した測定結果の誤差としては、以下のものを考慮した。

- TLD リーダーの読み取り誤差 (5%)
 - 各 TLD バッジの線量表示値
 - TLD リーダー感度比 (中性子用 TLD のみ)
 - 校正定数
- 中性子用 TLD のデータ処理において用いる MCNP5 により求めた値の統計誤差
 - 応答補正係数 k
 - 線量換算係数 R

表 5.3 再評価された SILENE における中性子用 TLD の測定結果

シナリオ	設置位置	バッジ No.	BG 線量 ²⁾ (μ Sv)				表示値 ^{2)*} (mSv)				校正定数 ²⁾	中性子組織カーマ (Gy)
			EL.1	EL.2	EL.3	EL.4	EL.1	EL.2	EL.3	EL.4		
2	2m	15	0	0	0	0	430	406	4.15	3.90	0.300	5.18 ± 0.21
		16	0	0	0	0	341	378	5.11	5.33	0.323	
	4m	17	0	0	0	0	147	139	1.52	1.42	0.242	1.51 ± 0.06
		18	0	0	4	0	134	128	1.52	1.32	0.304	
3	2m	11	0	4	0	0	216	218	2.17	2.14	0.301	2.60 ± 0.10
		12	0	5	7	7	203	211	2.41	2.62	0.269	
	4m	13	0	0	0	4	68.9	63.8	0.646	0.693	0.325	0.765 ± 0.031
		14	7	4	0	6	57.0	62.7	0.705	0.750	0.273	

* 光学フィルター付きの TLD リーダーで測定している。

表 5.4 再評価された SILENE における γ 線用 TLD の測定結果

設置位置 : 4m、全 TLD バッジの校正定数 : 1.02 (Gy/Sv)

シナリオ	バッジ No.	BG 線量 ²⁾ (μ Sv)	表示値 ²⁾ (Sv)	ICRU 軟組織カーマ (Gy)
1	4	32	2.49	2.45 ± 0.07
	5	48	2.42	
	6	15	2.34	
	7	49	2.44	
2	10	57	0.610	0.638 ± 0.018
	11	24	0.628	
	12	44	0.646	
	13	36	0.620	
3	8	40	0.174	0.178 ± 0.007
	9	34	0.176	

5.4.2 再評価された測定結果と IRSN が公開した参考値の比較

本章で再評価した値と、IRSN が公開した SILENE の参考線量値²⁰⁾の比較を、中性子カーマについては表 5.5 に、 γ 線量については表 5.6 にそれぞれ示す。中性子及び γ 線の参考線量値は、SILENE 炉心タンク中心から 4 m 離れた位置における値であり、図 5.1 の γ 線用 TLD が照射された位置(リフレンス位置)で評価されたものである。

表 5.5 に示すように、本報告書の再評価された中性子カーマは、SILENE の参考値と約 10%以内で一致している。これは、本報告書に示した中性子用 TLD の測定データ処理方法に問題がないことを示している。

表 5.6 に示すように、本報告書の再評価された γ 線カーマは、SILENE 参考値に対して、シナリ

オ1では2%以下の非常に良い一致をしているが、シナリオ2では2倍以上、シナリオ3では27%の過大評価となった。この原因としては、TLDの素子であるホウ酸リチウム($^7\text{Li}_{11}\text{B}_4\text{O}_7$)に0.01%の ^{6}Li と0.35%の ^{10}B が含まれており²⁵⁾、これらが中性子と反応してTLDバッジの測定時に発光し、 γ 線量に寄与したことが考えられる。この寄与は、 γ 線量に対してシナリオ2と3で等しい割合となるはずである。しかし、上記のとおり、シナリオ2では参考値の2倍以上の過大評価であるため、これ以外にも原因があると考えられる。現状ではこの原因は不明である。この寄与はシナリオ1においても存在するが、このシナリオでは遮へい体なしの炉心であるため、照射される γ 線量が大きく、測定結果にはほとんど影響しなかったと考えられる。なお、付録Dの表D.3に示すように、 γ 線用TLDの再評価結果は、SILENE旧評価結果^{2,3)}と1%以内で一致した。

表5.5 SILENEにおける中性子組織カーマ再評価値と参考値²⁰⁾の比較(4m位置)

シナリオ	中性子組織カーマ(Gy)		SILENE参考値に対する比
	再評価値	SILENE参考値 ²⁰⁾	
1	—	1.65 ± 0.17	—
2	1.51 ± 0.06	1.68 ± 0.17	0.896 ± 0.098
3	0.765 ± 0.031	0.79 ± 0.08	0.969 ± 0.106

表5.6 SILENEにおける再評価された γ 線カーマと参考値²⁰⁾の比較(4m位置)

シナリオ	γ 線カーマ(Gy)		SILENE参考値に対する比
	再評価値	SILENE参考値 ²⁰⁾	
1	2.45 ± 0.07	2.49 ± 0.25	0.984 ± 0.103
2	0.638 ± 0.018	0.30 ± 0.03	2.13 ± 0.22
3	0.178 ± 0.007	0.14 ± 0.01	1.27 ± 0.10

5.4.3 照射位置による中性子カーマの違いの検証

中性子用TLDは、図5.1に示したように、線量が均一である範囲から外れた位置で照射された。このため、中性子組織カーマの位置による違いを評価する必要がある。この検証のため、MCNP5コードとFSXLIB-J33ライブラリを用いて、第5.3節の線量換算係数を求めた条件で、タリ一位置をリファレンス位置とした計算を行い、その結果をTLD照射位置のものと比較した。その結果を表5.7に示す。表5.7に示すように、鉛遮へいの有無に関わらず、TLD設置位置の中性子組織カーマは、リファレンス位置に対して6%大きくなった。これは、TLD設置位置が炉室の壁に近いため、この位置における壁からの反射成分による中性子カーマへの寄与が、リファレンス位置よりも大きいことが原因であると考えられる。この結果を考慮すると、中性子用TLDがリファレンス位置において照射された場合、表5.5の本報告書の中性子組織カーマ測定値は、約6%小さくなることが予想される。したがって、照射位置の違いのため、中性子用TLD測定値は、SILENE参考値との差が大きくなる傾向にある。

表 5.7 SILENE 炉室内の照射位置による 1 核分裂中性子あたりの中性子組織カーマの違い
(MCNP5 計算値による比較。炉心タンク中心から 4 m 位置。)

シナリオ	遮へい	リファレンス位置 (Gy) [A]	TLD 設置位置 (Gy) [B]	[B] / [A]
1	なし	5.440E-18 ± 0.08%	5.769E-18 ± 0.08%	1.060 ± 0.001
2, 3	鉛	3.967E-18 ± 0.10%	4.203E-18 ± 0.10%	1.060 ± 0.001

5.4.4 MCNP 計算値と測定値の比較

文献²⁰⁾には、各シナリオにおける核分裂数と、4 m 位置（リファレンス位置）における MCNP による 10^{17} 個の核分裂に対する中性子組織カーマが示されている。この MCNP による中性子組織カーマを各シナリオの核分裂数に合わせた値と本報告書の測定値を比較した結果を表 5.8 に示す。表 5.8 に示すように、MCNP 参考値と中性子用 TLD 測定値は 10% 以内で一致した。しかし、表 5.7 に示したリファレンス位置の中性子組織カーマの計算結果は、中性子用 TLD 設置位置の結果よりも 6% 小さいため、この差を考慮すると、C/E は表 5.8 の値よりも大きくなる傾向にある。

表 5.8 には、本報告書の値として、MCNP5 と FSXLIB-J33 ライブラリの組み合わせによる、リファレンス位置と TLD 設置位置における計算結果も示している。表 5.8 に示すように、本報告書の MCNP5 による計算値は、測定値と 8% 以内で一致した。

2 m 位置における中性子用 TLD 測定値と MCNP5 計算値の比較を表 5.9 に示す。表 5.9 に示すように、MCNP5 計算値は、測定値と 8% 以内で一致した。

表 5.8 SILENE 炉心タンクから 4 m 位置における MCNP 参考値、MCNP5 計算値と測定値に対する比（中性子組織カーマ）

シナリオ	核分裂数 ($\times 10^{17}$) ²⁰⁾	MCNP 計算値 (Gy)			TLD 測定値に対する比 (C/E)		
		参考値* ²⁰⁾	本報告書*	本報告書**	参考値* ²⁰⁾	本報告書*	本報告書**
1	1.25 ± 0.06	1.66 ± 0.08	1.74 ± 0.08	1.85 ± 0.09	—	—	—
2	1.54 ± 0.08	1.66 ± 0.09	1.50 ± 0.08	1.59 ± 0.08	1.10 ± 0.07	1.00 ± 0.07	1.06 ± 0.07
3	0.72 ± 0.04	0.78 ± 0.04	0.70 ± 0.04	0.75 ± 0.04	1.02 ± 0.07	0.92 ± 0.06	0.97 ± 0.06

* リファレンス位置における値

** 中性子用 TLD 設置位置（図 5.1 参照）における値

表 5.9 SILENE 炉心タンクから 2 m 位置における MCNP5 計算値と測定値の比較（中性子組織カーマ）

シナリオ	中性子組織カーマ (Gy)		C/E
	測定値	MCNP5	
2	5.18 ± 0.21	5.13 ± 0.27	0.99 ± 0.06
3	2.60 ± 0.10	2.40 ± 0.13	0.92 ± 0.06

5.5 再評価された SILENE における測定についてのまとめ

中性子用 TLD は、SILENE 炉心タンク中心から 2 m 及び 4 m 離れた位置で照射された。この位置は、測定によって線量が均一であることが確認された範囲から外れている。中性子用 TLD の測定データを第 4 章に記述した方法で処理し、中性子組織カーマの値を算出した。4 m 位置の中性子組織カーマは、IRSN が公表した参考値に対して、約 10% 以内で一致した。これは、本報告書に記述した中性子用 TLD の測定値処理方法が有効であることを示している。なお、MCNP5 により求めた照射位置の違いに伴う線量の違いを考慮すると、中性子用 TLD の測定結果は、参考値との差がさらに 6% 程度大きくなる可能性がある。2 m 位置の中性子用 TLD 測定結果については、参考値がないため比較はできないが、MCNP5 の計算値とは 8% 以内で一致した。

γ 線用 TLD は、SILENE 炉心タンク中心から 4 m 離れた位置で照射された。測定値は、IRSN の参考値に対して、シナリオ 1（遮へいなし）ではほぼ一致したものの、シナリオ 2 と 3 では、過大評価となった。この過大評価の原因としては、TLD の素子であるホウ酸リチウム ($^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7$) に含まれる 0.01% の ^6Li と 0.35% の ^{10}B が中性子と反応して TLD バッジの測定時に発光し、 γ 線量に寄与したことが考えられる。しかし、シナリオ 2 の測定値は、参考値の約 2 倍にもなるため、他にも原因があると考えられるが、現状では不明である。

6. TRACYにおける線量測定実験の再評価

本章では、中性子用 TLD による TRACY 旧評価結果^{2,3)}の測定を再評価した。前章と同様に、中性子用 TLD の測定データ処理に必要な線量換算係数と応答補正係数については、第 4 章に記述した方法で求めた値を使用し、旧データ処理法²⁾の値は使用しない。

6.1 実験概要

TRACY 旧評価結果^{2,3)}として、全部で 7 回の実験における値が記載されている。これらの測定における TRACY の運転条件を表 6.1 に示す。すべての実験は、反射体無しの炉心である。なお、表 6.1 に示した積分出力は、運転後に燃料溶液から採取されたサンプルを分析し、含まれている核分裂生成物の量から求められた値である。これらの値は、TRACY 旧評価結果^{2,3)}の値とは異なっているが、本報告書では表 6.1 の値を正とする。この積分出力の誤差は、6%以下²⁶⁾である。

表 6.1 中性子用 TLD 照射時における TRACY の運転条件

Run no.	運転モード*	積分出力 (MJ)	添加反応度 (\$)	燃料液位 (cm)	ウラン濃度 **(g/L)	硝酸濃度 (mol/L)	燃料溶液密度 (g/cm ³)
R232	PW	7.30	1.5	52.58	405.2	0.63	1.56189
R249	RW	10.3	2.64	56.28	400.3	0.58	1.55432
R251	S	8.77	—	47.96	399.5	0.60	1.55447
R252	RW	10.8	2.75	56.57	399.4	0.57	1.55466
R253	PW	19.4	2.4	55.27	400.3	0.59	1.55477
R255	PW	14.7	1.8	53.09	401.3	0.51	1.55514
R257	S	9.54	—	47.83	401.8	0.59	1.55525

* 運転モードの略語の意味は以下のとおり。

PW : パルス引き抜き、RW : ランプ引き抜き、S : 定常

** ウランの同位体組成 (wt%) は以下のとおり。

U-234: 0.08, U-235: 9.98, U-236: 0.01, U-238: 89.93

6.2 中性子用 TLD 設置位置

中性子用 TLD は、TRACY 炉室内において、R232 のみ炉心タンク表面から 1.7 m 及び 3.83 m の 2箇所、その他は炉心タンク表面から 4 m 位置に設置された。中性子用 TLD の設置位置を図 6.1 に示す。図中の P1、P2、P3 の各点は、それぞれ炉心タンク表面から 1.7 m、3.83 m、4 m における中性子用 TLD の設置位置を示す。なお、各点における座標は、TRACY 旧評価結果^{2,3)}には大まかな図が示されているのみであるため、推定したものである。

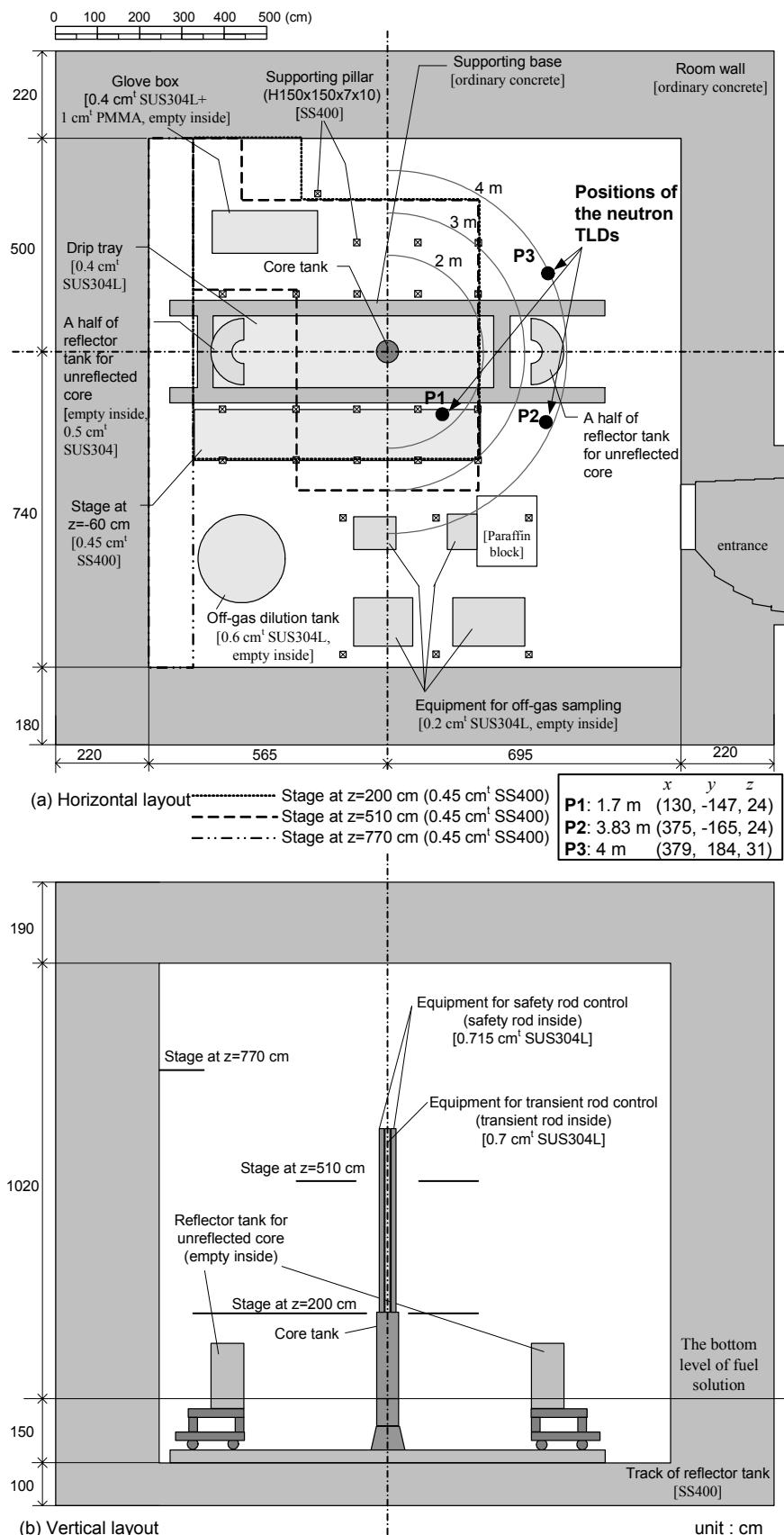


図 6.1 TRACY 炉室内における中性子用 TLD 設置位置

[]内に書かれた SUS, SS400 は、JIS 規格のステンレス及び鉄の材料名を示す。

6.3 中性子用 TLD の測定値の処理に必要な係数の算出

中性子用 TLD の測定値に対しては、第 4 章に記述したように、線量換算係数及び応答補正係数を用いて処理し、組織カーマを算出することが必要である。以下にこれらの係数の算出条件を示す。なお、計算コードとライブラリは、すべて MCNP5 1.40 と FSXLIB-J33 を用いた。

- 線量換算係数の計算条件 (R232 及び R249 の条件を使用)
 - 計算モード：臨界計算
 - 計算モデル：図 6.1 及び図 6.2 参照
 - 燃料溶液、炉心タンク、炉室コンクリート等の原子個数密度：付録 B の表を参照
 - 燃料液位：表 6.1 参照
 - タリー種類：点検出器 (F5)
 - タリー位置：R232 : 1.7 m (130, -147, 24)、3.83 m (375, -165, 24)
R249 : 4 m (379, 184, 31)
 - タリーのエネルギー群：MGCL-137 群構造
 - ヒストリー数：50,000 ヒストリー × 420 サイクル(最初の 20 サイクルをスキップ)
- 応答補正係数の計算条件
 - 計算モード：固定源
 - 計算モデル：図 3.1 及び図 3.2 のモニターケースをモデル化したもの
 - 原子個数密度：付録 C の表を参照
 - 線源：上記のタリー結果と校正に用いた ^{252}Cf の核分裂スペクトル¹⁷⁾
 - タリー種類：飛程長 (F4)
 - タリ一乗数： $^6\text{Li}(n, \text{abs})$, $^{10}\text{B}(n, \text{abs})$ (TL 素子の中性子吸収反応断面積)
 - ヒストリー数：一億
 - 分散低減：ウェイトウインドウを使用

これらの条件により求めた線量換算係数と応答補正係数を表 6.2 に示す。これらの係数の誤差は、MCNP 計算結果の統計誤差から求めている。表 6.2 の応答補正係数は、SILENE に対する表 5.2 の値 (2 m : 0.962、4 m : 0.933) とほとんど同じであり、これは中性子用 TLD の応答のスペクトル依存性が小さいことを示している。参考のため、中性子用 TLD 設置位置における中性子スペクトルの計算結果を図 6.3 に示す。

表 6.2 TRACY における中性子用 TLD の線量換算係数と応答補正係数

照射位置*	線量換算係数 R ** (Gy/Sv)	応答補正係数 k
1.7 m	0.0678 ± 0.0001	0.960 ± 0.002
3.83 m	0.0649 ± 0.0001	0.940 ± 0.003
4 m	0.0637 ± 0.0001	0.938 ± 0.003

* 1.7 m 及び 3.83 m 位置は R232 の条件、4 m 位置は R249 の条件で求めている。

** 周辺線量当量から組織カーマへの換算係数

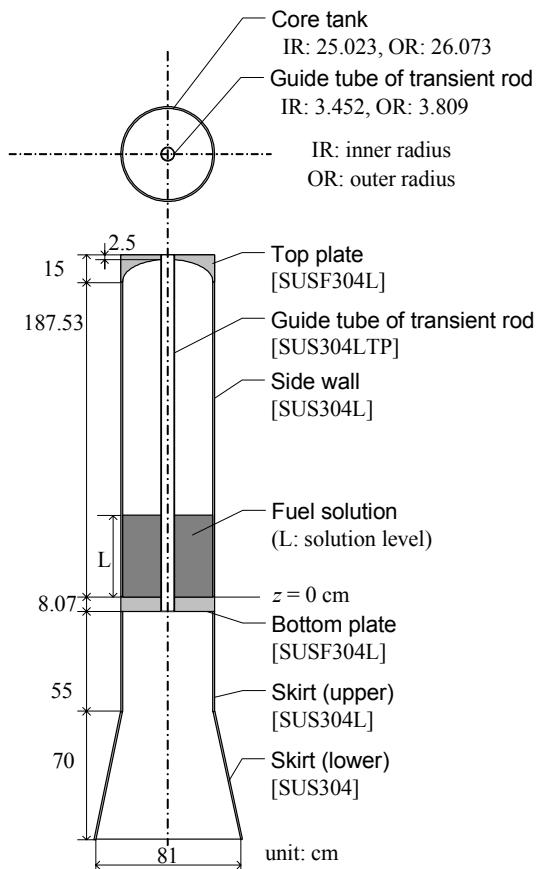


図 6.2 TRACY 炉心タンク

[]内に書かれた SUS は、JIS 規格のステンレスの材料名を示す。

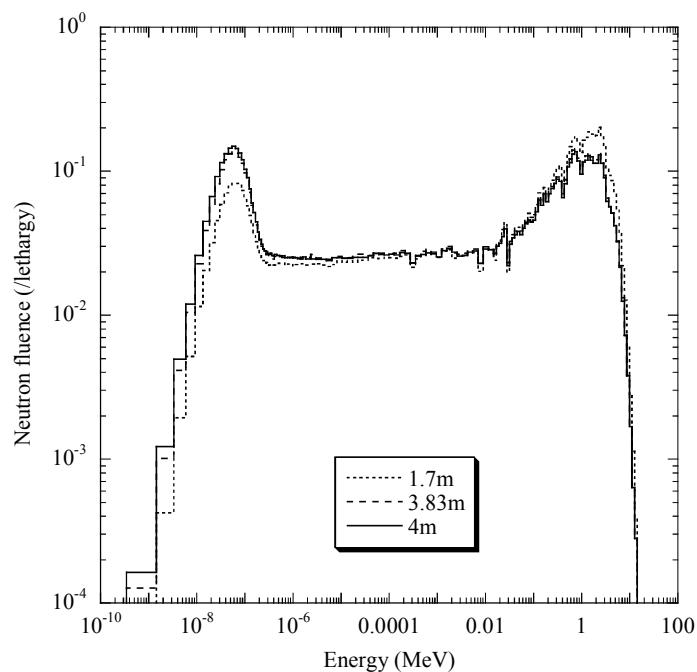


図 6.3 中性子用 TLD 設置位置における反射体無し TRACY の中性子スペクトル計算結果
使用コード : MCNP5、ライブラリ : FSXLIB-J33（フルエンスは 1 に規格化されている。）

6.4 再評価結果

6.4.1 再評価された測定結果

中性子用 TLD の測定結果を表 6.3 に示す。なお、再評価された測定結果と旧評価結果^{2,3)}の比較は、付録 E に記載した。測定結果の誤差として、以下のものを考慮した。

- TLD リーダーの読み取り誤差 (5%)
 - 各 TLD バッジの線量表示値
 - TLD リーダー感度比
 - 校正定数
- 中性子用 TLD のデータ処理において用いる MCNP5 により求めた値の統計誤差
 - 応答補正係数 k
 - 線量換算係数 R

表 6.3 再評価された TRACY における中性子用 TLD の測定結果

Run No.	バッジ No.	BG 線量 ²⁾ (μSv)				TLD リーダー表示値 ²⁾ (mSv)				校正定数	組織カーマ (Gy)
		EL. 1	EL. 2	EL. 3	EL. 4	EL. 1	EL. 2	EL. 3	EL. 4		
R232 1.7 m	3	0	0	0	0	651	613	9.33	9.74	0.221	7.36 ± 0.29
	4	7	0	5	0	773	699	10.9	10.4	0.237	
R232 3.83 m	1	11	7	10	5	181	201	4.02	3.99	0.245	2.12 ± 0.09
	2	11	0	0	13	205	228	4.39	4.88	0.234	
R249 4 m	3	257	204	8	20	296	273	4.04	4.01	0.221	4.65 ± 0.12
	4	363	318	11	8	358	305	4.85	4.24	0.237	
R251 4 m	3	248	208	0	14	258	243	3.55	3.63	0.221	4.37 ± 0.10
	4	346	334	0	8	255	238	4.67	4.34	0.237	
R252 4 m	3	310	371	11	8	330	302	4.59	4.68	0.221	4.74 ± 0.13
	4	314	416	20	14	374	320	4.64	4.74	0.237	
R253 4 m	3	322	306	0	0	627	566	8.36	8.93	0.221	4.60 ± 0.23
	4	338	314	5	14	588	536	9.09	9.44	0.237	
R255 4 m	3	449	453	14	8	472	439	6.51	6.45	0.221	5.01 ± 0.19
	4	538	477	14	14	540	457	7.25	6.93	0.237	
R257 4 m	3	432	408	0	0	278	255	3.68	4.07	0.221	4.53 ± 0.11
	4	346	461	5	0	315	268	3.98	3.53	0.237	

6.4.2 再評価された結果と MCNP5 計算値の比較

表 6.4 に、本章で再評価した線量と MCNP5 計算値の比較を示す。なお、この表では積分出力 1MJ あたりの線量を示している。この表に示すように、再評価された 3.83 m 位置と 4 m 位置の値はほぼ同じとなっており、距離と線量の関係に矛盾はない。しかし、旧評価結果^{2,3)}においては、

この 3.83 m 位置と 4 m 位置の値の間に矛盾があった（付録 E を参照）。表 6.4 に示すように、本報告書の再評価された測定結果に対する MCNP5 による計算値の比 C/E は、ばらつきが大きく、R232 や R251 のように比が 1 に近いものがある一方で、R255 のように約 20% の差があるものがある。

表 6.4 TRACY における再評価された値と MCNP5 計算値の比較

Run No.	TLD 設置位置	積分出力 (MJ)	中性子組織カーマ(Gy/MJ)		C/E
			再評価値	MCNP5	
R232	1.7 m	7.30	1.01±0.07	0.945±0.0010	0.938±0.068
	3.83 m		0.291±0.021	0.274±0.0010	0.941±0.069
R249	4 m	10.3	0.296±0.021	0.254±0.0004	0.858±0.062
R251	4 m	8.77	0.278±0.020	0.266±0.0004	0.955±0.069
R252	4 m	10.8	0.302±0.022	0.252±0.0003	0.835±0.060
R253	4 m	19.4	0.293±0.021	0.254±0.0003	0.867±0.063
R255	4 m	14.7	0.319±0.023	0.257±0.0004	0.806±0.058
R257	4 m	9.54	0.288±0.021	0.266±0.0003	0.924±0.067

6.4.3 再評価された結果とアラニン線量計による測定値の比較

TRACYにおいては、アラニン線量計を用いた中性子線量測定が行われている²⁷⁾。アラニン線量計は、その応答が中性子及び γ 線の双方に対して組織等価であるという優れた特性を持つ。アラニン線量計を用いて中性子線量を測定する場合は、アラニン線量計と同じ位置に組織等価な γ 線量計を設置して照射し、アラニン線量計の線量測定値から、 γ 線量計による測定値を差し引く必要がある。文献 27 では、 γ 線量計としてホウ酸リチウム素子の TLD が用いられている。

このアラニン線量計による中性子線量測定値を本報告書の中性子用 TLD 測定値と比較するため、MCNP5 により、アラニン設置位置におけるアラニンカーマから組織カーマへの換算係数を求め、アラニン線量計測定値に適用した。この計算条件を以下に示す。計算コードとライブラリには、MCNP5 1.40 と FSXLIB-J33 を用い、照射条件として、R249 のものを使用した。またアラニンのカーマ係数として、文献 28 の値を用いた。

- アラニンカーマから組織カーマへの換算係数の計算条件
 - 計算モード：臨界計算
 - 計算モデル：図 6.1 及び図 6.2 参照
 - 燃料溶液、炉心タンク、炉室コンクリート等の原子個数密度：付録の表 B を参照
 - 燃料液位：表 6.1 参照
 - タリー種類：点検出器 (F5)
 - タリー位置：1 m: (126, 0, 25), 1.87 m: (171, 128, 25), 4 m: (385, 188, 25)
 - タリーのエネルギー群：MGCL-137 群構造
 - ヒストリー数：50,000 ヒストリー × 420 サイクル(最初の 20 サイクルをスキップ)

上記の条件で求めたアラニン線量計照射位置におけるアラニンカーマと組織カーマ、これらから求めた換算係数を表 6.5 に示す。またアラニン線量計の測定平均値とこれに換算係数を適用した値を表 6.6 に示す。また、表 6.7 には、4 m 位置における再評価された中性子用 TLD 測定値のアラニン線量計測定値に対する比を示す。表 6.7 に示すように、中性子用 TLD の再評価値は、アラニン線量計の値に対して 50%前後の過大評価となっている。ただし、4 m 位置におけるアラニン線量計の測定値は 3~10 Gy 程度であるため、同線量計で測定可能な下限値である数 Gy に近く、誤差が大きい。このため、C/E の誤差も大きく、この誤差を考慮すると、アラニン線量計の測定値は、中性子用 TLD の測定値と近くなる。

表 6.5 TRACY 炉心タンク表面からの各位置における、MCNP5 により求めた 1 核分裂中性子あたりのアラニンカーマと組織カーマ、アラニンカーマから組織カーマへの換算係数

位置	座標	アラニンカーマ (Gy)	組織カーマ (Gy)	線量換算係数*
1 m	(126, 0, 25)	2.322E-17 ± 0.10%	2.786E-17 ± 0.10%	1.200 ± 0.002
1.87 m	(171, 128, 25)	8.962E-18 ± 0.11%	1.077E-17 ± 0.11%	1.202 ± 0.002
4 m	(385, 188, 25)	2.766E-18 ± 0.12%	3.331E-18 ± 0.12%	1.204 ± 0.002

* アラニンカーマから組織カーマへの換算係数

表 6.6 TRACY 炉心タンク表面からの各位置における、アラニン線量計の中性子線量平均測定値²⁷⁾と表 6.5 の換算係数を適用した組織カーマ相当の値

位置	中性子線量平均測定値 (Gy)	組織カーマ相当の値 (Gy)
1 m	1.56 ± 0.25	1.87 ± 0.30
1.87 m	0.59 ± 0.14	0.71 ± 0.16
4 m	0.16 ± 0.05	0.19 ± 0.06

表 6.7 TRACY 炉心タンク表面から 4 m 位置における中性子用 TLD 測定値のアラニン線量計測定値 (0.19 ± 0.06 Gy/MJ) に対する比

Run No.	中性子用 TLD 測定値*(Gy/MJ)	アラニン線量計測定値に対する比
R249	0.296 ± 0.021	1.54 ± 0.47
R251	0.278 ± 0.020	1.44 ± 0.45
R252	0.302 ± 0.022	1.57 ± 0.48
R253	0.293 ± 0.021	1.52 ± 0.47
R255	0.319 ± 0.023	1.66 ± 0.51
R257	0.288 ± 0.021	1.50 ± 0.46

* 組織カーマ

6.4.4 再評価された結果と著者等による中性子用 TLD 測定値の比較

著者等による同じ中性子用 TLD を用いた TRACY における中性子線量測定結果が、論文にまとめられている⁴⁾。この測定結果は、本報告書の表 6.1 に示した条件とは別の実験において測定されたものである。また、著者等による測定データ⁴⁾は、本報告書の第 4 章に記述した方法で処理されている。この文献から引用した測定結果を表 6.8 に示す。測定位置は、炉心タンク表面から、2 m、3 m、4 m の 3箇所である。

表 6.8 に示した値は、表 6.4 の再評価結果及び表 6.6 のアラニン線量計測定結果を組織カーマ相當に換算した値とともに図 6.4 にプロットされている。この図から、本報告書で再評価した中性子用 TLD 測定値は、著者等による測定結果に対して過大評価であることが分かる。この原因としては、中性子用 TLD の設置位置による線量の違いが考えられる。図 6.1 に示したように、TRACY 炉室内には鉄骨の柱が炉心タンクの周囲に一定の間隔で存在しており、これらの柱が遮へいとなり、中性子用 TLD 設置位置における線量に影響している可能性がある。これを確かめるため、MCNP5 と FSXLIB-J33 の組み合わせにより、本報告書の R249 の条件を使用して、表 6.8 の 4 m 位置の座標 (374, 202, 34) における中性子組織カーマを求め、本報告書における 4 m 位置の座標における値と比較した。この結果を表 6.9 に示す。表 6.9 に示すように、本報告書の座標では、著者等の座標⁴⁾に対して、計算値では 5%程度大きくなることが分かる。この差はわずかであるため、表 6.8 の値と本報告書の値との差を説明することはできない。この他には、測定値の処理に用いた校正定数や TLD リーダー感度比の値も過大評価の原因となる可能性がある。しかし、これらは SILENE における測定で用いられており、参考値との比較から問題ないと判断できる。以上から、本報告書の中性子用 TLD による線量測定結果が、表 6.8 の値に対して過大評価となる原因は不明である。

表 6.8 著者等による TRACY における中性子用 TLD の測定結果⁴⁾

(測定位置のカッコ内の数値は、中性子用 TLD 設置位置の座標を示す。)

Run no.	中性子組織カーマ (Gy/MJ)		
	2 m (160, -163, 24)	3 m (313, 96, 34)	4 m (374, 202, 34)
R287	0.648 ± 0.037	0.306 ± 0.017	0.182 ± 0.010
R288	0.649 ± 0.037	0.324 ± 0.019	—
R289	0.626 ± 0.036	0.318 ± 0.018	0.190 ± 0.011
R290	0.629 ± 0.036	0.324 ± 0.019	0.208 ± 0.012
R317	0.662 ± 0.038	0.361 ± 0.021	0.189 ± 0.011
R318	0.692 ± 0.040	0.380 ± 0.022	0.204 ± 0.012
R319	0.603 ± 0.035	0.340 ± 0.019	0.197 ± 0.011
R321	0.612 ± 0.035	0.343 ± 0.020	0.198 ± 0.011
R322	0.592 ± 0.034	0.336 ± 0.019	0.193 ± 0.011
R324	0.650 ± 0.037	0.369 ± 0.021	0.196 ± 0.011

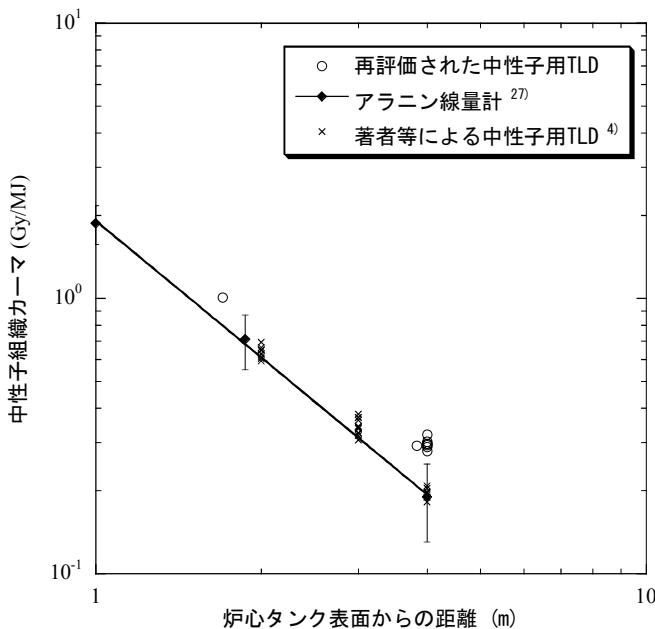


図 6.4 TRACY における再評価された中性子用 TLD 測定結果とアラニン線量計測定結果²⁷⁾、著者等による中性子用 TLD 測定結果⁴⁾の比較

表 6.9 MCNP5 による TRACY 炉心タンク表面から 4 m 位置における 1 核分裂中性子あたりの組織カーマの比較（計算条件：R249）

計算位置の座標	組織カーマ (Gy/1 fission neutron)	文献 4／本報告書
本報告書 (379.0, 184.0, 31.0)	3.431E-18 ± 0.0016	0.951 ± 0.002
文献 4 (374.0, 202.0, 34.0)	3.264E-18 ± 0.0011	—

6.5 再評価された TRACY における線量測定についてのまとめ

本章では、第 4 章に記述した方法を用いて、中性子用 TLD による TRACY 旧評価結果^{2,3)}の測定データを処理し、再評価値として組織カーマを算出した。再評価値は、照射距離が近い 3.83 m 位置と 4 m 位置の値がほぼ同じになっており、旧評価結果^{2,3)}に存在した炉心タンクからの距離と線量の関係の矛盾が解消された。また、再評価結果は、MCNP5 の計算値と 20% 以内で一致した。再評価値は、アラニン線量計や著者等による中性子用 TLD 測定結果に対して過大評価となつたが、この原因を特定することはできなかった。

7. 結論

本報告書では、SILENE 及び TRACY における中性子用 TLD 測定データ^{2,3)}及び SILENE における γ 線用 TLD の測定データ^{2,3)}を、処理の過程を詳細に記述して再評価した。この再評価においては、中性子用 TLD の測定データ処理に用いる応答補正係数の算出に、旧データ処理法²⁾とは異なり、著者等が TRACY において行った測定で用いた方法を採用した。 γ 線用 TLD のデータ処理については、TLD 素子の応答特性を利用した方法を記述した。

SILENE における中性子用 TLD の測定値は、再評価により、IRSN が公表した参考値と約 10% 以内で一致したが、TRACY における値は、アラニン線量計測定値や著者等による中性子用 TLD 測定値に対して 50% 前後の過大評価となった。この TRACY における過大評価の原因は特定することができなかった。しかし、TRACY 旧評価結果^{2,3)}の測定データを一貫した方法で処理したことにより、旧評価結果^{2,3)}に存在した照射距離と線量の関係間の矛盾が解消された。これらの結果から、本報告書の中性子用 TLD のデータ処理方法が有効であることが確認できた。

SILENE における γ 線用 TLD の測定値は、再評価前後での変化は 1%程度であり、再評価による値の変化はほとんどない。しかし、旧データ処理法²⁾において前提としている TLD のシールドと照射の条件が実際とは異なるため、データ処理には、本報告書の方法を用いるべきである。

謝辞

核燃料サイクル工学研究所放射線管理部の辻村憲雄副主幹には、本報告書の閲読をしていただき、有益なコメントをいただいた。ここに記して謝辞とする。

参考文献

- 1) H. J. Delafield, "Nuclear accident dosimetry – an overview," *Radiat. Prot. Dosim.*, **23**, p.143 (1988).
- 2) 中村剛実、外池幸太郎、三好慶典、“SILENE における臨界事故時線量評価解析（受託研究）”, JAERI-Tech 2003-031 (2003).
- 3) T. Nakamura, K. Tonoike and Y. Miyoshi, "Dose evaluation in criticality accident conditions using transient critical facilities fueled with a fissile solution," *Radiat. Prot. Dosim.*, **110**, p.483 (2004).
- 4) M. Murazaki, K. Tonoike and G. Uchiyama, "Measurement of Neutron Dose under Criticality Accident Conditions at TRACY Using TLDs," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **46**, No.2, p.193 (2009).
- 5) CEA, "SILENE Reference radiation source" (パンフレット) .
- 6) H. Yanagisawa, K. Nakajima, K. Ogawa *et al.*, "Experiments on transient behavior of a low-enriched uranyl-nitrate solution system with TRACY to study hypothetical criticality accidents in reprocessing plants," *Proc. 6th Int. Conf. Nuclear Criticality Safety (ICNC '99)*, Versailles, France, September 20-24, 1999, Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, Vol. II, p.900 (1999).
- 7) 上蓑義朋、大久保徹、“TLB 内蔵線量当量計”、保健物理、**33**, p.141 (1998).
- 8) 国際放射線防護委員会 (The International Commission on Radiological Protection, ICRP)、日本アイソトープ協会訳、“外部放射線に対する放射線防護に用いるための換算係数”、ICRP Publication 74 (1998).
- 9) 辻村憲雄、金井克太、百瀬琢磨、林直美、陳二虎、“Preliminary Characterization of the Passive Neutron Dose Equivalent Monitor with TLDs”, JNC TN8400 2001-004 (2001).
- 10) 藤村亮一郎、山下忠興、“放射線による固体現象と線量測定”、養賢堂、東京、p.193 (1985).
- 11) J. H. Hubbel, "Photon Mass Attenuation and Energy-absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV," *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* **33**, p.1269 (1982).
- 12) International Atomic Energy Agency (IAEA), "Dosimetry for Criticality Accidents – A Manual," Technical Reports Series No. 211 (1982).
- 13) X-5 Monte Carlo Team, *MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 5 Volume I, Overview and Theory*, LA-UR-03-1987 (2003).
- 14) R. S. Caswell, J. J. Coyne and M. L. Randolph, "Kerma factors for neutron energies below 30 MeV," *Radiat. Res.*, **83**, p.217 (1980).
- 15) International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), "Photon, Electron, Proton and Neutron Interaction Data for Body Tissues," ICRU Report 46 (1992).

- 16) ICRU, Determination of operational dose equivalent quantities for neutrons, ICRU Report 66, (2001).
- 17) The International Organization for Standardization (ISO), Neutron reference radiations for calibrating neutron-measuring devices used for radiation protection purposes and for determining their response as a function of neutron energy, ISO-8529 (1989).
- 18) R. Médioni, B. Asseleau, B. Verrey, F. Trompier, C. Itié, C. C. Texier, H. Muller, G. Pelcot, I. Clairand, X. Jacquet and J. L. Pochat, "Criticality accident dosimetry systems: An international intercomparison at the SILENE reactor in 2002," NEUDOS 9, Delft (2003) (口頭発表のスライド) .
- 19) R. Médioni, B. Asseleau, B. Verrey, F. Trompier, C. Itié, C. C. Texier, H. Muller, G. Pelcot, I. Clairand, X. Jacquet and J. L. Pochat, "CRITICALITY ACCIDENT DOSIMETRY SYSTEMS: AN INTERNATIONAL INTERCOMPARISON AT THE SILENE REACTOR IN 2002," Radiat. Prot. Dosim. vol. 110, Nos 1-4, pp. 429-436 (2004).
- 20) B. Asselineau, F. Trompier, C. Texier, C. Itié, R. Médioni, D. Tikunov, H. Muller and G. Pelcot, "REFERENCE DOSIMETRY MEASUREMENTS FOR THE INTERNATIONAL INTERCOMPARISON OF CRITICALITY ACCIDENT DOSIMETRY SILENE 9-21 JUNE 2002," Radiat. Prot. Dosim. vol. 110, Nos 1-4, pp. 459-464 (2004).
- 21) M.Duluc, 私信.
- 22) CEA/DAM, "OECD/NEA EXPERT GROUP ON CRITICALITY ACCIDENT ANALYSIS, SILENE PULSED EXPERIMENTS, SILENE-HEU-SOL-STEP, S1-300 / S2-300 / S3-300", available from
http://www.nea.fr/html/science/wpnics/excursions/benchmarks/silene_step_specifications.pdf
 (accessed February 2, 2009).
- 23) K. Shibata, T. Kawano, T. Nakagawa *et al.*, "Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-3: JENDL-3.3," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **39**, p.1125 (2002).
- 24) K. Kosako, N. Yamano, T. Fukahori *et al.*, "The libraries FSXLIB and MATXSLIB based on JENDL-3.3," JAERI-Data/Code 2003-011 (2003).
- 25) 石黒秀治、武田伸莊、"Li₂B₄O₇(Cu)素子による自動読取型個人被曝線量計の開発 (I)"、保健物理、**16**, p.305 (1981).
- 26) 會澤栄寿、小川和彦、櫻庭耕一、塚本導雄、菅原進、竹内真樹、宮内正勝、柳澤宏司、大野秋男、"TRACY の運転記録"、JAERI-Tech 2002-031 (2002).
- 27) H. Sono, H. Yanagisawa, A. Ohno *et al.*, "Measurement of neutron and gamma-ray absorbed doses under criticality accident conditions at TRACY using tissue-equivalent dosimeters," *Nucl. Sci. Eng.*, **139**, p.209 (2001).
- 28) R. S. Caswell et. al., "Kerma Factors of Elements and Compounds for Neutron Energies below 30MeV," *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* **33**, p.1227(1982).

付録

A SILENE の計算モデルにおいて使用した原子個数密度²²⁾

表 A.1 SILENE 燃料溶液の原子個数密度

硝酸ウラニル溶液パラメータ

ウラン濃度 : 70.78 g/L

硝酸濃度 : 2.0 mol/L

溶液密度 : 1.1588 g/cm³

核種	原子個数密度 (atoms/barn/cm)
H	6.23810E-02
N-14	1.56682E-03
O-16	3.56511E-02
U-234	1.03811E-06 (0.57 wt%)
U-235	1.68181E-04 (92.74 wt%)
U-236	4.51443E-07 (0.25 wt%)
U-238	1.15312E-05 (6.44 wt%)

表 A.2 SILENE 炉心タンク (Z2 CN 18-10 ステンレス) 組成と原子個数密度

密度 : 7.9 g/cm³

元素	重量比 (%)	原子個数密度 (atoms/barn/cm)
Fe	68.9	5.86940E-02
Cr	18	1.64690E-02
Ni	10	8.10610E-03
Mg	2	1.73190E-03
Si	1	1.69390E-03
P	0.04	6.14380E-05
S	0.03	4.46400E-05
C	0.03	1.18830E-04

表 A.3 炉室コンクリートの組成と原子個数密度

密度 : 2.4013 g/cm³

元素	重量比 (%)	原子個数密度 (atoms/barn/cm)
H	0.721	1.035E-02
B-10	0.001	1.602E-06
O-16	48.094	4.347E-02
Al	2.916	1.563E-03
Si	27.520	1.417E-02
Ca	17.804	6.424E-03
Fe	2.943	7.621E-04

B TRACY の計算モデルにおいて使用した主な原子個数密度

表 B.1 硝酸ウラニル溶液の原子個数密度 (R232 及び R249)

核種	原子個数密度 (atoms/barn/cm)	
	R232	R249
H	5.7280E-02	5.7497E-02
N-14	2.4322E-03	2.3772E-03
O-16	3.7800E-02	3.7734E-02
U-234	8.3410E-07	8.2401E-07
U-235	1.0361E-04	1.0236E-04
U-236	1.0338E-07	1.0213E-07
U-238	9.2183E-04	9.1069E-04

表 B.2 TRACY 炉心タンクの組成と原子個数密度 (SUS304L) 密度 7.93 g/cm³

元素	存在比 (wt%)	核種	原子個数密度(atoms/barn/cm)
C	0.011	C-12	4.37367E-05
Si	0.7	Si-28	1.09776E-03
		Si-29	5.57416E-05
		Si-30	3.67453E-05
Mn	0.95	Mn-55	8.25794E-04
P	0.021	P-31	3.23777E-05
S	0.002	S-32	2.82755E-06
		S-33	2.26371E-08
		S-34	1.27780E-07
		S-36	5.95712E-10
Fe	70.086	Fe-54	3.50310E-03
		Fe-56	5.49912E-02
		Fe-57	1.26999E-03
		Fe-58	1.69012E-04
Ni	10.07	Ni-58	5.57778E-03
		Ni-60	2.14855E-03
		Ni-61	9.33960E-05
		Ni-62	2.97787E-04
		Ni-64	7.58376E-05
Cr	18.13	Cr-50	7.23499E-04
		Cr-52	1.39520E-02
		Cr-53	1.58204E-03
		Cr-54	3.93803E-04
Co	0.03	Co-59	2.43099E-05

表 B.3 ガイドチューブの組成と原子個数密度 (SUS 304L) 密度 7.93 g/cm³

元素	存在比 (wt%)	核種	原子個数密度(atoms/barn/cm)
C	0.008	C-12	3.18085E-05
Si	0.49	Si-28	7.68433E-04
		Si-29	3.90191E-05
		Si-30	2.57217E-05
Mn	1.54	Mn-55	1.33865E-03
P	0.02	P-31	3.08359E-05
S	0.001	S-32	1.41377E-06
		S-33	1.13185E-08
		S-34	6.38901E-08
		S-36	2.97856E-10
Fe	68.171	Fe-54	3.40738E-03
		Fe-56	5.34886E-02
		Fe-57	1.23529E-03
		Fe-58	1.64394E-04
Ni	11.5	Ni-58	6.36985E-03
		Ni-60	2.45366E-03
		Ni-61	1.06659E-04
		Ni-62	3.40075E-04
		Ni-64	8.66070E-05
Cr	18.22	Cr-50	7.27091E-04
		Cr-52	1.40212E-02
		Cr-53	1.58989E-03
		Cr-54	3.95758E-04
Co	0.05	Co-59	4.05164E-05

表 B.4 TRACY 炉心タンク底板の組成と原子個数密度 (SUS 304L) 密度 7.93 g/cm³

元素	存在比 (wt%)	核種	原子個数密度(atoms/barn/cm)
C	0.02	C-12	7.95212E-05
Si	0.68	Si-28	1.06640E-03
		Si-29	5.41490E-05
		Si-30	3.56954E-05
Mn	1.58	Mn-55	1.37343E-03
P	0.029	P-31	4.47121E-05
S	0.002	S-32	2.82755E-06
		S-33	2.26371E-08
		S-34	1.27780E-07
		S-36	5.95712E-10
Fe	69.239	Fe-54	3.46077E-03
		Fe-56	5.43266E-02
		Fe-57	1.25464E-03
		Fe-58	1.66969E-04
Ni	10.2	Ni-58	5.64978E-03
		Ni-60	2.17629E-03
		Ni-61	9.46017E-05
		Ni-62	3.01632E-04
		Ni-64	7.68167E-05
Cr	18.23	Cr-50	7.27490E-04
		Cr-52	1.40289E-02
		Cr-53	1.59077E-03
		Cr-54	3.95975E-04
Co	0.02	Co-59	1.62066E-05

表 B.5 TRACY 炉心タンク下部スカートの組成と原子個数密度 (SUS-304) 密度 7.93 g/cm³

元素	存在比 (wt%)	核種	原子個数密度(atoms/barn/cm)
C	0.05	C-12	1.98803E-04
Si	0.67	Si-28	1.05071E-03
		Si-29	5.33527E-05
		Si-30	3.51705E-05
Mn	1.14	Mn-55	9.90952E-04
P	0.33	P-31	5.08793E-04
S	0.002	S-32	2.82755E-06
		S-33	2.26371E-08
		S-34	1.27780E-07
		S-36	5.95712E-10
Fe	70.938	Fe-54	3.54569E-03
		Fe-56	5.56597E-02
		Fe-57	1.28543E-03
		Fe-58	1.71066E-04
Ni	8.76	Ni-58	4.85217E-03
		Ni-60	1.86905E-03
		Ni-61	8.12461E-05
		Ni-62	2.59048E-04
		Ni-64	6.59720E-05
Cr	18.11	Cr-50	7.22701E-04
		Cr-52	1.39366E-02
		Cr-53	1.58029E-03
		Cr-54	3.93369E-04

表 B.6 炉室コンクリートの組成*と原子個数密度 密度 2.292 g/cm³ (実測値の平均**)

元素	存在比 (wt%)	核種	原子個数密度(atoms/barn/cm)
H	0.999	H-1	1.3685E-02
O	52.997	O-16	4.5729E-02
C	0.10	C-12	1.1484E-04
Na	1.599	Na-23	9.5996E-04
Mg	0.217	Mg-24	9.7451E-05
		Mg-25	1.2337E-05
		Mg-26	1.3583E-05
Al	3.388	Al-27	1.7337E-03
Si	33.666	Si-28	1.5263E-02
		Si-29	7.7500E-04
		Si-30	5.1089E-04
K	1.299	K-39	4.2770E-04
		K-40	5.3659E-08
		K-41	3.0866E-05
Ca	4.344	Ca-40	1.4506E-03
		Ca-42	9.6814E-06
		Ca-43	2.0201E-06
		Ca-44	3.1214E-05
		Ca-46	5.9854E-08
		Ca-48	2.7982E-06
Fe	1.390	Fe-54	2.0086E-05
		Fe-56	3.1530E-04
		Fe-57	7.2818E-06
		Fe-58	9.6907E-07

* 科学技術庁原子力安全局核燃料規制課編、“臨界安全ハンドブック・データ集”、p. 15、にかかる書房 (1988)

** コンクリートの打ち込み時に採取されたサンプルから測定された密度の平均値

表 B.7 TRACY 炉室ステージの組成と原子個数密度 (SS-400) 密度 : 7.85 g/cm³

元素	存在比 (wt%)	核種	原子個数密度(atoms/barn/cm)
C	0.06	C-12	2.36157E-04
Si	0.2	Si-28	3.10482E-04
		Si-29	1.57655E-05
		Si-30	1.03927E-05
Mn	0.51	Mn-55	4.38848E-04
P	0.012	P-31	1.83149E-05
S	0.015	S-32	2.09927E-05
		S-33	1.68065E-07
		S-34	9.48684E-07
		S-36	4.42277E-09
Fe	99.203	Fe-54	4.90843E-03
		Fe-56	7.70519E-02
		Fe-57	1.77946E-03
		Fe-58	2.36814E-04

C 中性子用 TLD の応答補正の計算に用いた原子個数密度

表 C.1 ホウ酸リチウム (${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7$) の原子個数密度 密度* : 2.3 g/cm³

核種	原子個数密度 (atoms/barn/cm)
Li-6	1.68832E-02
B-10	3.37665E-02
O-16	5.90914E-02

* 藤村亮一郎、山下忠興、“放射線による固体現象と線量測定”、養賢堂、東京、p. 192 (1985).

表 C.2 鉛の原子個数密度 密度 : 11.342 g/cm³

核種	存在比 (at %)	原子個数密度 (atoms/barn/cm)
Pb-204	1.4	4.6150E-04
Pb-206	24.1	7.9445E-03
Pb-207	22.1	7.2852E-03
Pb-208	52.4	1.7273E-02

表 C.3 カドミウムの原子個数密度 密度 : 8.69 g/cm³

核種	存在比 (at %)	原子個数密度 (atoms/barn/cm)
Cd-106	1.25	5.81928E-04
Cd-108	0.89	4.14332E-04
Cd-110	12.49	5.81462E-03
Cd-111	12.8	5.95894E-03
Cd-112	24.13	1.12335E-02
Cd-113	12.22	5.68892E-03
Cd-114	28.73	1.33750E-02
Cd-116	7.49	3.48691E-03

表 C.4 ポリエチレンの原子個数密度 密度 : 0.96 g/cm³

核種	原子個数密度 (atoms/barn/cm)
H	8.24310E-02
O-16	4.12155E-02

D SILENEに対する再評価結果と旧評価結果^{2,3)}の比較

表 D.1 SILENEにおける中性子カーマ再評価値と、参考値²⁰⁾及び旧評価結果^{2,3)}の比較(4m位置)

シナリオ	中性子カーマ (Gy)			SILENE 参考値に対する比	
	本報告書 (再評価値)	SILENE 参考値 ²⁰⁾	SILENE 旧評価 結果* ^{2,3)}	本報告書 (再評価値)	SILENE 旧評価 結果 ^{2,3)}
1	—	1.65 ± 0.17	—	—	—
2	1.51 ± 0.06	1.68 ± 0.17	1.47	0.896 ± 0.098	0.874
3	0.765 ± 0.031	0.79 ± 0.08	0.75	0.969 ± 0.106	0.945

* 本報告書は組織カーマ、旧評価結果^{2,3)}は水カーマである。また、旧評価結果^{2,3)}には、測定値の誤差は記載されていない。

表 D.2 SILENEにおける中性子カーマ再評価値と旧評価結果²⁾の比較(2m位置)

シナリオ	中性子カーマ (Gy)		[B] / [A]
	本報告書 (再評価値) [A]	SILENE 旧評価結果* ²⁾ [B]	
2	5.18 ± 0.21	4.76	0.919
3	2.60 ± 0.10	2.39	0.919

* 本報告書は組織カーマ、旧評価結果^{2,3)}は水カーマである。また、旧評価結果²⁾には、測定値の誤差は記載されていない。

表 D.3 SILENEにおける再評価された γ 線量と参考値²⁰⁾、旧評価結果^{2,3)}の γ 線量の比較(4m位置)

シナリオ	γ 線カーマ (Gy)			SILENE 参考値に対する比	
	本報告書 (再評価値)	SILENE 参考値 ²⁰⁾	SILENE 旧評価 結果 ^{2,3)}	本報告書 (再評価値)	SILENE 旧評価 結果 ^{2,3)}
1	2.45 ± 0.07	2.49 ± 0.25	2.47	0.984 ± 0.103	0.992
2	0.638 ± 0.018	0.30 ± 0.03	0.64	2.13 ± 0.22	2.13
3	0.178 ± 0.007	0.14 ± 0.01	0.18	1.27 ± 0.10	1.29

E TRACYに対する再評価結果と旧評価結果^{2,3)}の比較

表 E.1 TRACYにおける再評価された値と旧評価結果^{2,3)}及びMCNP5計算値との比較

Run No.	TLD 設置位置	積分出力 (MJ)	中性子カーマ* (Gy/MJ)			比	
			本報告書 [A]	旧評価結果 ^{2,3)} [B]	MCNP5 [C]	[B] / [A]	[C] / [A]
R232	1.7 m	7.30	1.01±0.07	0.534 ²⁾	0.945±0.0010	0.530	0.938±0.068
	3.83 m		0.291±0.021	0.156 ²⁾	0.274±0.0010	0.537	0.941±0.069
R249	4 m	10.3	0.296±0.021	0.346 ³⁾	0.254±0.0004	1.17	0.858±0.062
R251	4 m	8.77	0.278±0.020	0.231 ³⁾	0.266±0.0004	0.830	0.955±0.069
R252	4 m	10.8	0.302±0.022	0.305 ³⁾	0.252±0.0003	1.01	0.835±0.060
R253	4 m	19.4	0.293±0.021	0.266 ³⁾	0.254±0.0003	0.907	0.867±0.063
R255	4 m	14.7	0.319±0.023	0.293 ³⁾	0.257±0.0004	0.918	0.806±0.058
R257	4 m	9.54	0.288±0.021	0.254 ³⁾	0.266±0.0003	0.881	0.924±0.067

* 本報告書は組織カーマ、旧評価結果^{2,3)}は水カーマである。また、旧評価結果^{2,3)}には、測定値の誤差は記載されていない。

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位
名称	記号
面積	平方メートル
体積	立方メートル
速度	メートル毎秒
加速度	メートル毎秒毎秒
波数	毎メートル
密度、質量密度	キログラム毎立方メートル
面積密度	キログラム毎平方メートル
比體積	立方メートル毎キログラム
電流密度	アンペア毎平方メートル
磁界強さ	アンペア毎メートル
質量濃度 ^(a)	モル毎立方メートル
質量濃度 ^(b)	キログラム毎立方メートル
輝度	カンデラ毎平方メートル
屈折率 ^(b)	cd/m ²
比透磁率 ^(b)	1
(数字の)	1
(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	1

(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度(substance concentration)ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	m^2/m^2
力	ニュートン	N	s^{-1}
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N\cdot m$
仕事率、工率、放射束	ワット	W	J/s
電荷、電気量	クーロン	C	$m^2 kg s^{-3}$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
静電容量	ファラード	F	$m^2 kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	$m^2 kg^{-1} s^3 A^2$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
磁束度	ウェーバ	Wb	$kg^{-2} A^{-1}$
インダクタンス	スヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C	K
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	lm/m^2
吸収線量、比エネルギー分与、カーマ	グレイ	Gy	$m^2 s^{-2}$
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg
酸素活性	カタール	kat	$m^2 s^{-2}$
			$s^{-1} mol$

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもやはコピートレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。

(g) 単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘度	バスカル秒	Pa s	$m^{-1} kg s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2 kg s^2$
表面張力	ニュートン每メートル	N/m	$kg s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m^{-1} s^{-1} = s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	$m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	$kg s^{-3}$
熱容量、エンタロピー	ジユール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^2 K^{-1}$
比熱容量、比エンタロピー	ジユール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^3 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジユール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^{-2}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m kg s^{-3} K^{-1}$
体積エネルギー	ジユール毎立方メートル	J/m ³	$m^{-1} kg s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$kg s^{-3} A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	$m^3 sA$
表面電荷密度	クーロン毎平方メートル	C/m ²	$m^2 sA$
電束密度、電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	$m^2 sA$
誘電率	ファラード毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m kg s^{-2} A^{-2}$
モルエネルギー	ジユール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^{-2} mol^{-1}$
モルエントロピー、モル熱容量	ジユール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} sA$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^3 s^{-3}$
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m ² sr)	$m^2 m^{-2} kg s^{-3} = kg s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^3 s^{-1} mol$

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180) rad$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) rad$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) rad$
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4 m^2$
リットル	L	$1L=1l=1dm^3=10^3 cm^3=10^{-3} m^3$
トン	t	$1t=10^3 kg$

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602 176 53(14)\times 10^{-19} J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660 538 86(28)\times 10^{-27} kg$
統一原子質量単位	u	$1u=1 Da$
天文単位	ua	$1ua=1.495 978 706 91(6)\times 10^{11} m$

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	$1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10^5 Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	$1 mmHg=133.322 Pa$
オングストローム	Å	$1 \text{ \AA}=0.1 nm=100 pm=10^{-10} m$
海里	M	$1 M=1852 m$
バーン	b	$1 b=100 fm^2=(10^{-12} cm)^2=10^{-28} m^2$
ノット	kn	$1 kn=(1852/3600)m/s$
ネーベル	Np	SI 単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
デジベル	dB	

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「▲」は対応関係を示すものである。

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7} J$
ダイニン	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ボアズ	P	$1 P=1 dyn s cm^{-2}=0.1 Pa s$
ストークス	St	$1 St=1 cm^2 s^{-1}=10^4 m^2 s^{-1}$
スチルブ	sb	$1 sb=1 cd cm^{-2}=10^4 cd m^{-2}$
フォント	ph	$1 ph=1 cd sr cm^{-2} 10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1 cm s^{-2}=10^3 ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1 Mx=1 G cm^{-2}=10^8 Wh$
ガウス	G	$1 G=1 Mx cm^{-2}=10^4 T$
エルステッド	Oe	$1 Oe \triangleq (10^3/4\pi)nA m^{-1}$

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7\times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58\times 10^4 C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1 cGy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 nT=10^{-9} T$
フェルミ	fm	$1 \text{ フェルミ}=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット		$1 \text{ メートル系カラット}=200 mg=2\times 10^{-4} kg$
トル	Torr	$1 Torr=(101 325/760) Pa$
標準大気圧	atm	$1 atm=101 325 Pa$
カロリ	cal	$1 cal=4.1858 J ([15^\circ C] \text{ カロリー}) , 4.1868 J ([IT] \text{ カロリー}) , 4.184 J ([熱化学] \text{ カロリー})$
ミクロ	μ	$1 \mu=1 \mu m=10^{-6} m$

