ISSN 1881-7297

日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ

Vol.3 No.1

中性子校正技術の標準化検討専門研究会

2005 年 6 月

日本保健物理学会

日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ　　ISSN 1881-7297
Vol.3, No.1,中性子校正技術の標準化検討専門研究会

2005年6月

発行者　　日本保健物理学会企画委員会
発行所　　日本保健物理学会
〒160-0023 東京都新宿区西新宿3-3-11 杉本ビル3F
NPO事務センター内 日本保健物理学会事務局
TEL：03-5339-7286
FAX：03-5339-7285
E-mail：jhps@wwwsocnii.ac.jp
http://wwwsoc.nii.ac.jp/jhps/index.html

中性子校正技術の標準化検討専門研究会
報告書

平成１７年６月

日本保健物理学会

目次及び執筆分担

１.緒　言

１.１ 研究会設立の背景と目的

現在、我が国には中性子線量計の校正方法に関する標準化された規格がない。一方で、中性子線量計の JIS 策定も進んできている。したがって、中性子線量計校正方法の標準化が必要である。中性子線量計の校正方法については、既に国際規格(ISO 8529 part 1～part 3)が策定されており、現在、これに沿って中性子線量計の校正方法に関する JIS 原案が策定されつつある。しかし、この国際規格 ISO 8529 シリーズでは、複雑なものから単純なものまで複数の校正手法が並列的に示されているため、それらの長所・短所、適用範囲等を明らかにしておく必要がある。また、ISO 8529 シリーズは、標準研究所や専門の中性子校正機関を対象としたものであり、ユーザレベルの校正は規格の範囲外である。

このような状況を踏まえ、ISO 8529 シリーズが示す種々の校正方法について検討を行うとともに、ユーザレベルを含めた校正の階層化等の提言を行い、JIS 原案策定に資することを目的として、日本保健物理学会に「中性子校正技術の標準化検討専門研究会」が設置された。

本専門研究会では、これまで産業技術総合研究所、日本原子力研究所及び核燃料サイクル開発機構で行われた中性子校正技術に関する研究成果をもとに、種々の校正方法について比較検討を行うとともに、エンドユーザにおける校正について検討を進めた。なお、加速器を用いた単色中性子校正場については、その校正場を有する機関が極めて限られていることから、対象は RI 中性子源を用いた校正場に限って検討した。

１.２ 研究会のメンバーと検討経緯

１.２.１ メンバー

本専門研究会のメンバーは以下のとおりである。

主査	工藤勝久（産業技術総合研究所）
委員	石川正純（東京大学原子力研究総合センター）
〃	瓜谷　章（産業技術総合研究所）（平成 16 年 4 月から）
〃	遠藤　章（日本原子力研究所）（担当企画委員）
〃	梶本与一（日本原子力研究所）
〃	三枝　純（日本原子力研究所）
〃	寿藤紀道（株式会社千代田テクノル）
〃	谷口和史（日本原子力発電株式会社）
〃	辻村憲雄（核燃料サイクル開発機構）
〃	中岡　弘（アロカ株式会社）（平成 16 年 3 月まで）
〃	中尾徳晶（高エネルギー加速器研究機構）（平成 16 年 3 月まで）
〃	布宮智也（富士電機システムズ株式会社）
〃	根本　久（放射線計測協会）
〃	山野俊也（アロカ株式会社）（平成 16 年 4 月から）
〃	吉田忠義（核燃料サイクル開発機構）（平成 16 年 4 月から）
幹事	吉澤道夫（日本原子力研究所）（兼会計担当）

１.２.２ 検討経緯

本専門研究会の会合及び内容は以下のとおりである。

○第１回会合（平成 15 年 8 月 11 日　日本原子力研究所東海研究所）

(1)専門研究会の設置主旨及び目的について：　吉澤（原研）

(2)中性子線量計校正に関する国際規格(ISO 8529-1～3)の要点：　工藤（産総研）

(3)中性子線量計等に関する JIS の現状と今後の予定：　辻村（サイクル機構）

(4)中性子校正場に関するアンケートの結果について：　根本（放計協）

(5)ISO 8529 の問題点と校正方法標準化に向けての検討課題：　吉澤（原研）

(6)検討課題・進め方に関する討論と役割分担

○第２回会合（平成 15 年 12 月 4 日　日本原子力研究所東海研究所）

(1)中性子線量計測国際シンポジウム(NEUDOS9)等の参加報告：　布宮（富士電機）

(2)アンケートの結果について：　根本（放計協）

(3)レムカウンタの散乱線の補正方法：　辻村（サイクル機構）

(4)不確かさの評価について：　瓜谷（産総研）

○第３回会合（平成 16 年 3 月 11 日　産業技術総合研究所）

(1)個人線量計の校正と散乱線の影響等について：　辻村（サイクル機構）

(2)個人線量計校正用ファントムの違いが校正結果に与える影響について：　三枝（原研）

(3)PTB における中性子校正に関する研究報告：　高橋（原研）

○第４回会合（平成 16 年 7 月 14 日　日本原子力研究所東海研究所）

(1)原研速中性子校正場における散乱線評価：　吉澤（原研）

(2)標準中性子線源の周辺構造による中性子フルエンスの非等方性：　吉田（サイクル機構）

(3)計算シミュレーションによる散乱線の影響に関する基礎データ：　三枝（原研）

(4)中性子線量計の実用的な校正について：　辻村（サイクル機構）

○第５回会合（平成 16 年 9 月 21 日　日本原子力研究所東海研究所）

(1)中性子線源を用いる線量計等の校正における不確かさの評価：　瓜谷（産総研）

(2)実用校正について：　辻村（サイクル機構）

(3)報告書及び成果発表会について：　遠藤（担当企画委員）、吉澤（幹事）

○第６回会合（平成 16 年 12 月 10 日　核燃料サイクル開発機構東海事業所）

(1)成果報告会について：　吉澤（幹事）及び遠藤（担当企画委員）

(2)報告書について：　各担当者

(3)校正の階層化について：　辻村（サイクル機構）

○成果報告会（保物学会企画行事　平成 17 年 2 月 28 日文京区シビックホール）

シンポジウム「中性子線量計の校正について考える－校正技術の標準化と国際規格－」

(1)専門研究会の目的と活動概要について　主査　工藤勝久　（産総研）
(2)中性子校正方法に関する国際規格と JIS 化の現状　吉澤道夫（原研）
(3)中性子線量計の校正方法　吉田忠義（サイクル機構）
(4)ユーザ（原子力発電所）における中性子校正の現状　谷口和史（原電）
(5)中性子線量計の校正方法の階層化　辻村憲雄（サイクル機構）
(6)総合討論　中性子線量測定の信頼性を確立するために
司会：　中村尚司（東北大学大学院）
コメント　標準供給の立場から　瓜谷　章（産総研）
測定器メーカの対応　布宮智也（富士電機）
個人線量計測定サービス機関の対応　寿藤紀道（千代田テクノル）
全体討論

１.３ 本報告書の構成

本報告書は、専門研究会委員が分担して執筆し（分担については目次参照）、国内の中性子校正場の現状調査、関連する国内・国際規格の現状と問題点、中性子線量計の校正方法及び散乱線の補正方法に関する検討結果、並びに中性子校正方法の階層化の提言をまとめた。第２章及び第３章は、中性子校正場及び校正方法の現状のまとめである。第４章と第５章が中性子線量計の校正方法、特に散乱線の補正方法に関する種々の方法について比較検討した結果であり、国内の中性子校正機関に有効な手法を提言するとともに散乱線評価に有効なデータを示した。第６章はユーザレベルの校正方法についての検討結果であり、国内におけるユーザレベルの実用的な校正の現状を踏まえた校正の階層化の提言を行っている。第７章は、これらの結果のまとめと残された課題を述べている。

２. 中性子校正場の現状

２.１ 校正場に関するアンケート

２.１.１ 目的及び調査範囲

専門研究会では、中性子線量計の校正方法に関する規格化に当たり、国内の研究機関、校正機関、大学及び民間企業の各機関を対象に、所有する中性子校正場についてのアンケート調査を行うこととした。調査の結果、17 の事業所より協力を得、貴重な情報を得ることができた。配布したアンケート用紙を**付録 1** に示す。

２.１.２ 中性子校正場について

中性子校正場の種類及び目的ごとの件数にて集計を行った結果を下記に示す。

（１） 校正場の種類

- RI 中性子場（速中性子照射）： 15 件
- 加速器中性子場 5 件
- 熱中性子場： 6 件
- 減速中性子場： 4 件

（２） 校正場の位置付け及び利用方法

- 機関内部機器の校正： 13 件
- 外部への校正サービス： 5 件
- 研究・開発用の照射場： 6 件

２.１.３ RI 中性子場について

中性子線源を用いた校正場の詳細について項目別に集計した結果を下記に示す。

（１） 使用線源

- ^{241}Am－Be： 12 件 （200 MBq～185 GBq）
- ^{252}Cf： 13 件 （19.8 MBq～2 GBq）
- ^{239}Pu－Be： 1 件 （37 GBq）

（２） 照射室のサイズ・構造

ａ．サイズ

- 最大： 2250 m^3 （縦： 15 m 横： 15 m 高さ： 10 m）
- 最小： 13.8 m^3 （縦： 2.4 m 横： 2.4 m 高さ： 2.4 m）

ｂ．床の構造

- グレーチング： 7 件

（３） 照射方法

ａ．線源のセット方法

- 突き上げ式： 3 件
- 圧搾空気式： 4 件
- トング使用： 6 件

ｂ．コリメータの使用

・有り：　　1　件

・無し：　　12　件

（４）線源カプセル（オリジナル密封カプセル）

・ 無し：　　6　件

・ 有り：　　9　件　（材質：SUS　厚さ：1.4 mm～ 6.0 mm）

（５）トレーサビリティの取り方

・中性子放出率の値付け：　10　件（校正頻度：不定期）

（産総研： 7 件、英国物理研究所 NPL： 2 件）

・実用測定器による比較：　4　件（校正頻度：定期）

（６）基準フルエンス・線量当量（率）の出し方

ａ．基準フルエンス

・$\Phi = S / 4\pi r^2$：　4　件

・スペクトル評価：　2　件

ｂ．線量当量（率）

・H*(10)：　6　件

・$H_p(10)$：　5　件

注）線量当量換算係数は、ISO 8529-3 に基づく値を使用。ただし、独自にスペクトルを用いて計算しているところは、ICRP Publ. 74 に基づく値を使用。

ｃ．線源スペクトル

・ISO 8529-1：　8　件

・その他の文献：　0　件

・独自に評価：　2　件

（７）散乱線の補正方法

・有り：　7　件

（シャドーコーン法： 6 件 、 多項式フィット法： 2 件）

・無し：　6　件

（８）不確かさの評価

・未評価：　12　件

・評価済み：　2　件

（評価因子：室内散乱、空気散乱、距離）

（モンテカルロ計算に付随する誤差、実験誤差）

２.１.４ 中性子校正に関する課題及び疑問

中性子源により校正を行う上で、日頃、疑問に思っていることや、問題点等についてもアンケート調査を行い、校正方法、設備、精度等に関する意見が出された。

・ 校正法の規格化が必要。その際は、研究機関向け（放出率での校正）と原子力事業者向け（置換法での校正）の２段階の規格を整備するなどの配慮が必要。

・ 線源強度が弱く、十分な校正距離が取れない。

・ 精度向上のため、独自に校正点のスペクトル測定や線量率の値付けをする必要がある。

・GUM による不確かさの表現の導入等が必要。

・中性子標準場の研究に従事する研究者の養成が必要。

２.１.５ アンケート集計表

今回のアンケート調査で得た情報をまとめたものを**付録 2 表 1** に示す。

２.１.６ 中性子線源等の所有状況

国内の中性子線源を所有している事業所の概数（日本アイソトープ協会から 1995 年以降に出荷された RI 線源により集計、校正以外の用途で中性子線源を所有している事業所も含む。）及び大学が所有している主要な加速器中性子線源について下記に示す。なお、下記のデータは調査の範囲が限られていることから、あくまでも参考データである。

（１） 中性子線源使用事業所数

・^{252}Cf 使用事業所： 84 事業所
（3.7MBq 超：27 事業所、 3.7MBq 以下：60 事業所）

・^{241}Am-Be 使用事業所： 16 事業所
（3.7MBq 超： 9 事業所、 3.7MBq 以下： 7 事業所）

付録 2 表 2 に「国内の中性子線源所有状況（参考）（放射能 3.7MBq 超）」を示す。

（２） 大学所有の主要な加速器中性子線源

・ライナック： 2 施設
・バンデグラフ： 3 施設
・コッククロフト： 4 施設
・サイクロトロン： 1 施設
・変圧型静電加速器： 1 施設

付録 2 表 3 に「大学所有の主要な加速器中性子線源」を示す。

２.１.７ 考察

中性子校正場に関するアンケート調査の結果、17 機関から回答があり、その内容を整理した結果、以下のことが明らかになった。

1） 大部分の機関では、機関内部の校正・研究開発に利用されており、外部への校正サービスを実施しているのは 4 機関（産総研、原研／放計協、千代田テクノル、東北大）である。
2） 保有している中性子線源は、ほとんどが ^{252}Cf と ^{241}Am-Be である。
3） 照射室のサイズ及び構造が施設によって大きく異なり、散乱線低減のための格子状床構造（グレーチング）を有する機関は 1 割にも満たない。
4） 線源やハンドリング用線源カプセルの形状及び材質、並びに照射装置についても各機関で独自の構造のものを使用している。
5） 散乱線の評価については校正を専門に行っている機関では実施されているが、その他の機関ではほとんど未評価の状態で使用されている。
6） 散乱線の補正を行っている機関では、シャドーコーン法が多く用いられている。
7） 不確かさを評価しているのは産総研のみである。

8） 校正に関して、精密な校正方法と実用校正の２種類の規定を望む声が多い。

また、国内の中性子線源の所有状況に関する限定的な調査（日本アイソトープ協会から 1995 年以降に出荷された RI 線源により集計）の結果、各事業所が所有し使用している中性子線源のほとんどが、^{252}Cf 線源であり、^{241}Am-Be 線源を所有している事業所は全体の 2 割程度であることが分かった。

これらのことから、中性子線量計の校正方法の標準化に対するニーズが多いと言える。

２.２ 主要な校正機関の現状

２.２.１ 中性子量の国家標準

中性子諸量（中性子放出率、速中性子フルエンス、熱中性子フルエンス率）の国家標準は、独立行政法人産業技術総合研究所（以下産総研）において維持、供給が行われている。**表 2.2－1** に、産総研において供給を行っている中性子諸量の、校正範囲と最高測定能力を示す。最高測定能力は、校正を行う際の不確かさの最小値であり、包含係数 *k=2* はこの不確かさが標準不確かさの２倍であることを示している。産総研では、これらの項目、範囲、最高測定能力について、ASNITE－NMI プログラム [1)]に基づき、2004 年に ISO17025（試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項）の認定を受けた。

産総研では、中性子放出率については、以前はマンガンバス法による絶対測定により一次標準を維持していたが、人員、維持コストの面から暫時この維持を休止し、現在は英国の国立物理研究所(NPL)より標準供給を受けている。産総研における中性子線源の中性子放出率の校正は、標準線源に対する相対比較法により行われる。まず、黒鉛パイル（寸法 1.9m×1.9m×2.3m の直方体）中央に、中性子放出率が校正された標準中性子線源を置き、定位置においた ^{3}He 比例計数管の計数率を測定する。次に被校正線源に置き換えて同様に計数率を測定し、これらの計数率比から中性子放出率を校正する。

速中性子フルエンス標準は、バンデグラフ型又はコッククロフト型加速器を用いて、144 keV、565 keV については ^{7}Li(p, n)^{7}Be、5.0 MeV については D(d, n)^{3}He、 14.8 MeV については T(d, n)^{4}He の核反応を用いて単色中性子を発生させ、11.5×11.5×11.5 m^{3} の照射室において、これを供給している。これらの中性子フルエンスについては 2001～2002 年に行われた速中性子フルエンスに関する国際基幹比較 CCRI(III) K-10 [2)] において、産総研が供給する標準の妥当性が確認されている。

熱中性子フルエンス率は、前出の黒鉛パイルの中央部に ^{241}Am-Be を置き、黒鉛パイル内外に生成される熱中性子場を用いて校正を行っている。熱中性子フルエンス率の絶対値は、金箔の放射化法により測定されている。熱中性子フルエンス率に関する国際基幹比較は 1960 年代以降行われていないが、CCRI(III) K-8[2)] が近々行われる予定である。

２.２.２ 国内の主要な校正機関

表 2.2－2 に国内の校正機関が所有する中性子校正施設の概要を示す。このうち財団法人放射線計測協会と株式会社千代田テクノルが、国内ユーザへの校正サービスを行っている。これらの機関では、産総研又は NPL において中性子放出率が値付けされた中性子線源を中性子線量当量の校正サービスに使用しており、国家標準とのトレーサビリティが保たれている。中性子フルエンスについては仲介標準器を用いた標準移行により、熱中性子フルエンス率については金箔の放射化法を

用いた相互比較により、国家標準とのトレーサビリティが保たれている。減速中性子場については、中性子エネルギースペクトル評価に用いるボナー球の応答関数評価等を通して、トレーサビリティをとることが試みられつつある。将来的には、これらの中性子量について、JCSS 制度[3)]に基づいたトレーサビリティの確立が期待される。

ここで挙げた機関以外にも、共同研究等により使用可能な中性子校正施設を有する大学等の機関があるが、これらについては参考文献[4, 5)]を参照されたい。

表 2.2－1 独立行政法人産業技術総合研究所で供給している中性子標準

項目	範囲	最高測定能力 (包含係数 k=2)
中性子放出率 (^{252}Cf)	1×10^{3} s^{-1}～1×10^{7} s^{-1}	3.2%
中性子放出率 (^{241}Am-Be)	1×10^{3} s^{-1}～1×10^{7} s^{-1}	3.0%
熱中性子フルエンス率	5×10 cm^{-2}・s^{-1}～1×10^{4} cm^{-2}・s^{-1}	2.8%
速中性子フルエンス (144 keV)	1×10^{3} cm^{-2}～1×10^{7} cm^{-2}	4.4%
速中性子フルエンス (565 keV)	1×10^{3} cm^{-2}～1×10^{7} cm^{-2}	4.4%
速中性子フルエンス (5.0 MeV)	1×10^{3} cm^{-2}～1×10^{7} cm^{-2}	6.2%
速中性子フルエンス (14.8 MeV)	1×10^{3} cm^{-2}～1×10^{7} cm^{-2}	3.2%
速中性子フルエンス (連続スペクトル：^{252}Cf)	1×10^{3} cm^{-2}～1×10^{7} cm^{-2}	3.6%
速中性子フルエンス (連続スペクトル：^{241}Am-Be)	1×10^{3} cm^{-2}～1×10^{7} cm^{-2}	2.8%

(2005 年 5 月現在)

表 2.2－2 国内の主な中性子校正施設の概要

校正機関名	項目	主な中性子線源、中性子場又は中性子発生装置	備考
日本原子力研究所 (財団法人放射線計測協会)	中性子線量当量	^{241}Am-Be、^{252}Cf	校正業務
		黒鉛パイル熱中性子場	
		コンクリート減速中性子場	
日本原子力研究所	速中性子フルエンス	バンデグラフ型加速器 (144 keV、250 keV、565 keV、5.0 MeV)	研究所内校正 受託研究等
核燃料サイクル開発機構	中性子線量当量	^{241}Am-Be、^{252}Cf	事業所内校正
		^{252}Cf 減速中性子場	
株式会社千代田テクノル	中性子線量当量	^{241}Am-Be	校正業務

(2005 年 5 月現在)

【参考文献】

1) http://www.nite.go.jp/asse/asnite/gaiyou/asnite_nmi.html.

2) http://kcdb.bipm.org/default.asp, (to be uploaded).

3) http://www.nite.go.jp/asse/jcss/.

4) 工藤勝久、中村尚司:保健物理 **31**(3), 361-367 (1996).

5) 中村尚司、馬場護、他:日本原子力学会誌 **40**(3), 192-206 (1998).

３. JIS 規格と国際規格の現状

３.１ 中性子線量計に関する JIS 規格の現状

中性子線量計に関する JIS は、国際規格との対比、国際規格に一致した規格の作成を念頭に審議、制定（審議中、制定予定、改正予定を含む）されている。

以下に、

・ 能動形線量計
・ 受動形線量計
・ サーベイメータ

の３つに分類して概略を述べる。

まず、能動形線量計については、IEC 61526:1998、IEC 61525：1996 を翻訳、編集した「X線、γ線、β線及び中性子用電子式個人線量（率）計 : JIS Z 4312:2002」が 2002 年に制定されている。この JIS は、「X線及びγ線用個人警報線量計 JIS Z 4312-2001」を改正、置き換えたものである。

受動形線量計としては、「広範囲用フィルムバッジ : JIS Z 4323:2002」、「中性子用固体飛跡個人線量計：現在審議中」、「高速中性子用フィルムバッジによる線量当量算出方法：JIS Z 4510:1997」の３つが挙げられる。このうち、「広範囲用フィルムバッジ」は ISO 1757:1980 を翻訳し、JIS Z 4323:1997 を改正、置き換えたものである。「中性子用固体飛跡個人線量計」は、ISO/DIS 21909:2000 を基礎として用い、新規に制定予定のものである。

サーベイメータとしては、IEC 61005:2003 を翻訳した「中性子用線量当量(率)サーベイメータ：現在審議中」が、新規に制定予定である。

これらの一覧表を**表 3.1－1** に示す。

なお、「照射線量測定器及び線量当量測定器の校正方法 : JIS Z 4511:1999」に示されるような校正方法そのものに関する JIS 規格については、ISO8529-1:2001、ISO 8529-2:2000、ISO 8529-3:1998 を基礎として用いた原案策定作業が平成 16 年度に行われたところである。

表 3.1－1　中性子線量計に関する JIS 一覧

規格番号		JIS Z 4312	JIS Z 4323	JIS Z 4416	JIS Z 4510	JIS Z 番号未定
制定年月日		1986/2/1	1974/2/1	1975/7/1	1986/2/1	現在審議中
最新改正年月日		2002/3/20	2002/2/20	現在審議中	2001/4/20	-
規格名称		X線、γ線、β線及び中性子用 電子式個人線量（率）計	広範囲用フィルムバッジ	中性子用固体飛跡個人線量計	高速中性子用フィルムバッジ による線量当量算出方法	中性子用線量当量（率） サーベイメータ
準拠している国際規格		IEC 61526:1998 IEC 61525:1996	ISO 1757:1980	ISO/DIS 21909:2002	-	IEC 61005:2003
1．試験条件	標準中性子線源 又は基準中性子	^{241}Am-Be （線源の設定及び使用は、 ISO8529-1、-2、-3に対応）	減速材中に生じた熱中性子 （フルエンス率について トレーサビリティ要）	^{241}Am-Be 又は^{252}Cf （線源の設定及び使用は ISO8529-1、2、3に対応したものに することが望ましい）	^{241}Am-Be ^{252}Cf 加速器 （いずれもトレーサビリティ要）	^{241}Am-Be ^{252}Cf 又はD(d, n)^{3}He （使用条件はISO8529-1、2、3に従わなければならない）
	基準線量の不確かさ	±10%以内	－	－	－	±10%
	散乱線の影響	－	－	－	－	適切に補正。
	バックグラウンド	無視できるレベル	－ （コントロールフィルム により補正）	1cm周辺線量当量率≦0.1μSv/h	－ （コントロールフィルム により補正）	－
	放射性物質による汚染	無視できるレベル		無視できるレベル		無視できるレベル
2．エネルギー特性試験	中性子エネルギー範囲	熱中性子 ^{252}Cf ^{241}Am-Be	－	熱中性子 ^{252}Cf ^{241}Am-Be	^{252}Cf ^{241}Am-Be	熱中性子 1～50keV 50～600keV 1～5MeV 13.5～15MeV
	レスポンス基準	^{241}Am-Be（又は^{252}Cf）	－	各線量	^{241}Am-Be	標準中性子線源
3．方向特性試験	線源	^{241}Am-Be（又は^{252}Cf）	－	^{241}Am-Be又は^{252}Cf	^{241}Am-Be	^{241}Am-Be ^{252}Cf 又はD(d, n)^{3}He
	入射方向	0°、±15°、±30°、 ±45°、±60°、±75°	－	0°、15°、45°、60°	0°、30°、60°	0°～±180°
	ステップ	－	－	－	－	30°
	校正距離	－	－	－	－	検出器最大寸法＋線源最大寸法の 3倍以上
	散乱線の影響	－	－	－	－	散乱線寄与が直接線の20%を越えないこと。
	角度依存係数	補正する。 附属書１表６	－	補正する。 附属書１付表２	－	－

注：－は該当項目なし（記載なし）を示す

３.２ 中性子校正方法に関する国際規格の概要と問題点

３.２.１ 中性子線量計校正の規格の前提条件

Ｘ・γ線に関しては線量計の校正方法が JIS Z4511 で体系化され定着していることから、中性子も横並びで考えられる場合がある。しかし、中性子線量計の校正を考えるに当たっては、以下の点がＸ・γ線の場合と大きく異なることを認識しておく必要がある。

① 熱領域(meV)から速(MeV)領域まで約 10 桁にわたる広いエネルギー範囲が対象となる。
② 通常校正に用いる RI 中性子線源は、エネルギー分布（スペクトル）を有する。
③ 中性子線量計のエネルギー特性は、Ｘ・γ線に比べて、一般に良好ではない。
④ 校正場には必ず散乱線が存在し（コリメータの使用は難しい）、線量計の特性によってその影響は異なる。
⑤ 線量当量標準測定器は存在しない。

上記の理由で、中性子のトレーサビリティの移行方法や線量計の校正方法はＸ・γ線とは大きく異なる。中性子線量計の特性試験のようにレスポンスを正確に求め、相互の性能を比較するためには、使用する中性子線源とスペクトルを同じにする必要があるとともに、散乱線の寄与を補正することが必須である。中性子校正方法の規格は、上記のことを前提として策定されている。

３.２.２ 中性子線量計の校正方法に関する国際規格

中性子校正に関する国際規格（ISO）には以下のものがある。

(1) ISO 8529： Reference neutron radiations :
Part 1 (2001)： Characteristics and methods of production.
Part 2 (2000)： Calibration fundamentals of radiation protection devices related to the basic quantities characterizing the radiation field.
Part 3 (1998)： Calibration of area and personal dosimeters and determining of their response as a function of neutron energy and angle of incidence.
(2) ISO 10647 (1996)： Procedures for calibrating and determining the response of neutron-measuring devices for radiation protection purposes. (Withdrawn)

ISO 10647 は ISO 8529-2 に改定の上移行した。ここでは、ISO 8529 シリーズの要点をまとめる。

３.２.３ ISO 8529 Part 1 の概要

主に校正で使用する中性子線源及びその特性（スペクトル等）を定めている。校正用標準中性子線源として、
①RI 中性子線源（減速材付を含む）
②加速器を用いた中性子線源
③原子炉を用いた中性子線源
が規定されている。①として規定されているものを**表 3.2－1** に示す。②及び③は、主にエネルギー特性試験を行うために用いられる。

表 3.2－1　中性子測定器を校正するための標準 RI 中性子線源(ISO 8529-1)

線源	半減期(年)	フルエンス平均エネルギー(MeV)	線量当量平均エネルギー(MeV)	比線源強度*1	線量当量率比(光子/中性子) *1
D_2O 減速 ^{252}Cf *2	2.65	0.55	2.1	2.1×10^{15} ($s^{-1}\cdot kg^{-1}$)	0.18
^{252}Cf	2.65	2.13	2.3	2.4×10^{15} ($s^{-1}\cdot kg^{-1}$)	0.05*3
^{241}Am-B(α, n)	432	2.72	2.8	1.6×10^{-5} ($s^{-1}\cdot Bq^{-1}$)	＜0.20*4
^{241}Am-Be(α, n)	432	4.16	4.4	6.6×10^{-5} ($s^{-1}\cdot Bq^{-1}$)	＜0.05*4

*1 典型値
*2 直径 300 mm の重水球を厚さ 1 mm のカドミウム(Cd)で覆ったもの。
*3 約 2.5 mm 厚の鉄製カプセルに封入されている線源に対する値。
*4 約 1 mm 厚の鉛遮へいで覆われた線源に対する値。

附属書では、**表 3.2－1** に示す線源の標準スペクトルが示されている（**図 3.2－1～図 3.2－4**）。これらのスペクトルは線源を覆うカプセルが軽く薄い場合である。カプセルが重く厚い場合は、スペクトルが標準スペクトルとは異なる可能性があるため、独自に評価しなければならない。また、円筒形カプセルの場合、中性子の放出に非等方性があることが分かっているため、その角度分布を測定評価するとともに、変化が少ない軸に垂直な方向（90°方向）を使用すべきとされている。^{252}Cf 及び ^{241}Am-Be の中性子線源強度（放出率）の校正頻度は５年が推奨されている。

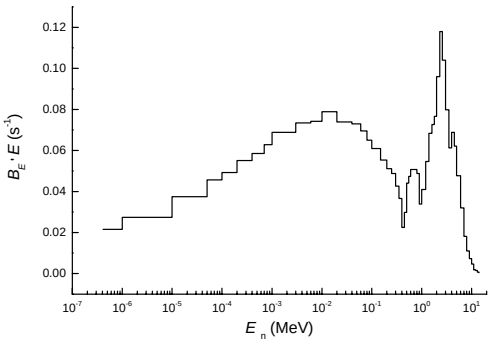


図 3.2－1　D_2O 減速 ^{252}Cf 線源のスペクトル

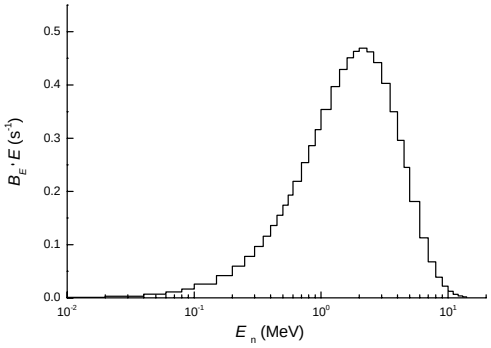


図 3.2－2　^{252}Cf 線源のスペクトル

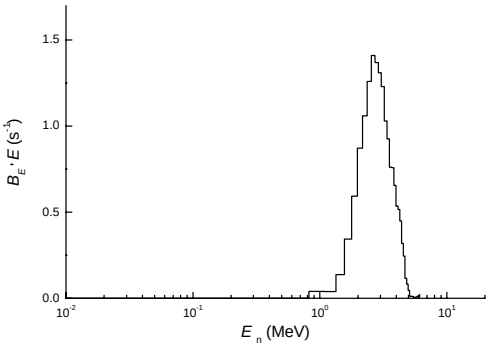


図 3.2－3　^{241}Am-B(α, n)線源のスペクトル

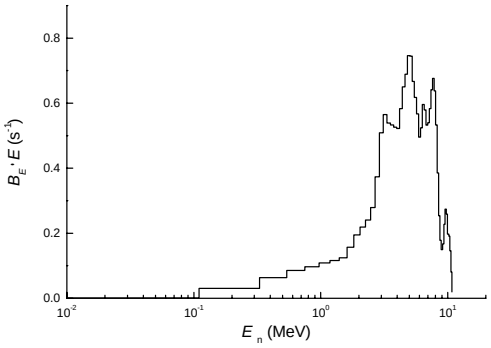


図 3.2－4　^{241}Am-Be(α, n)線源のスペクトル

３.２.４　ISO 8529 Part 2 の概要

校正方法の中心となるパートであり、フルエンスに対するレスポンスを正確に求めることに主眼がおかれている。中心は RI 中性子線源を用いた校正であるが、加速器・原子炉を使用する校正についても記述している。以下に RI 中性子線源を用いた校正の要点をまとめる。

（１）　基本原則

中性子線量計のレスポンスは線量計固有なものであり、校正室のサイズ、線源－測定器間距離（校正距離）が違っていても、線源が同じであれば同じ結果が得られなければならない。これを達成するためには、中性子線源強度の校正（トレーサビリティの確保を含む）と特性評価、照射時の幾何学的な補正、壁・床・空気等からの散乱線の補正を行う必要がある。

（２）　校正室の要件

広い方がよい。散乱線が指示値に与える影響は 40%までとするのが望ましいとされている。

（３）　散乱線の補正方法

主たる散乱線の発生源は、①室内散乱（壁、床等）、②空気（散乱による減弱と散乱された中性子が校正点に入射する成分の両方）及び③支持構造物である。

これらの散乱線の補正方法として、ISO 8529-2 は以下の４つを規定している。

①　シャドーコーン法
②　一般化フィット法
③　半経験法
④　縮約フィッティング法

これらの方法の原理や詳細は第４章で述べる。

（４）　個人線量計の校正について

個人線量計の校正に関して詳しいことは述べておらず、①ファントム上で校正すること、②線源中心からファントム表面までの距離 75 cm での校正を推奨することが書かれている。75 cm と

いう距離は、ファントムが一様に照射されること（遠い方がよい）と散乱線の影響（近い方がよい）のトレードオフから得られた値である。

（５） 不確かさ

RI 中性子線源を用いた校正における不確かさの評価で考慮すべき要因は、①中性子線源強度、②線源の非等方係数、③校正距離、④幾何学的補正係数、⑤散乱線補正、⑥線量計指示値、⑦照射時間（積算線量計の場合）、⑧スペクトル平均したフルエンスー線量当量換算係数である。不確かさの評価は、BIPM/ISO 等の「計測における不確かさの表現ガイド（GUM）」にしたがって行う必要がある。

３.２.５ ISO 8529 Part 3 の概要

中性子線量計の具体的な校正方法が、サーベイメータ・エリアモニタと個人線量計とに分けて記述されている。サーベイメータ・エリアモニタと個人線量計では、基準となる線量当量が異なる（サーベイメータ・エリアモニタは周辺線量当量 $H^*(10)$、個人線量計は個人線量当量 $H_p(10)$）ため、それぞれに対する線量換算係数が規定されている。また、校正方法を次の３つに分類している。

① あらかじめ校正点の基準線量当量率が分かっている場で校正する方法
② 標準測定器を用いて基準フルエンス率を測定し、線量当量率に換算して校正する方法
③ モニタ用測定器を用いてフルエンス率の時間変動を補正して校正する方法

①が RI 中性子源を用いる場合、②及び③は加速器や原子炉を用いる場合に該当する。さらに、個人線量計の校正には、ISO 水スラブファントム (30 cm×30 cm×15 cm、アクリル壁の厚み：前面 0.25 mm、他 10 mm)を使用するものとし、複数同時に照射する場合は、センサが中心から半径 15 cm を出ない範囲の円状に配置しなければならないとしている。

３.２.６ ISO 8529 の問題点

ISO 8529 には種々の問題点があるが、特に重要なものとして以下の点があげられる。

１）散乱線の補正方法として、複雑なものから単純なものまで複数の校正手法が並列的に示されており、その比較検討が必要である。
２）中性子サーベイメータ及びモニタを主たる校正対象としており、個人線量計の校正については内容が不十分である。
３）中性子校正施設では、中性子線源の周りにハンドリング用のカプセルや線源固定用の周辺構造材がある場合が多く、これによる線源中性子の非等方性をどう扱えばよいかが不明である。
４）標準研究所や専門の中性子校正機関を対象としたものであり、ユーザレベルの実用的な校正は規格の範囲外である。

４. 中性子線量計の校正方法

４.１ はじめに

ISO8529-1、ISO8529-2 及び ISO8529-3（以下、「ISO8529 三部作」と記す。）では、中性子線量計の校正に関する標準化された方法を指定している。その内容は、

- 線源（RI 中性子線源、加速器中性子及び原子炉中性子）
- 配置（個人線量計の場合はファントム）
- 中性子フルエンスー線量当量換算係数
- 校正手順
- 不確かさの評価

であり、校正場の中性子フルエンス率が国家（国際）計量標準に対してトレーサビリティを有していることを前提に、校正手順における室内散乱線による被校正器の指示値への寄与の補正方法等について特別の重点を置いていることが特徴である。この目的は、事業者によらない「校正（結果）」の斉一化であり、以下に示す ISO8529-2 に記されている「校正の原則」からもそれがよく分かる。

「中性子測定器のレスポンス及び校正定数は測定器の形式で決まる特性であり、線量当量率、中性子線源スペクトル又は中性子の入射角度に依存する場合はあるが、校正施設の特性や使用する校正技術に左右されない方がよい。ここでは、校正技術、測定器－線源距離又は校正室の寸法といった諸要因に校正の結果が依存しないことを保証する中性子測定器の校正についての詳細な手順を規定する。」（ISO8529-2 から）

本章では、ISO8529 三部作が規定する中性子線量計の校正方法について RI 中性子線源を中心に概説するとともに、その適用に当たっての問題点などを紹介する。なお、基準実用測定器（実用基準測定器）との比較校正に基づくより実用的な校正と、作業場所のスペクトルなどに対応した特別の校正については６章で述べる。

４.２ 中性子サーベイメータの校正

RI 中性子源を用いた中性子周辺線量当量率サーベイメータ（以下、中性子サーベイメータ）の校正は以下に示す手順で行う。

(1)RI 中性子線源の中性子放出率から校正距離におけるフルエンス率を算出する。

(2)算出した中性子フルエンス率にスペクトル平均フルエンスー周辺線量当量換算係数を乗じ、周辺線量当量（1cm 線量当量）率を求める。

(3)その位置に中性子サーベイメータの基準点（実効中心）をおき、指示値を得る。

(4)得られた指示値に対して、主として室内散乱線による寄与などの補正を行う。

(5)補正後の指示値と基準となる周辺線量当量率を比較し、校正定数又は換算係数を決定する。

上記手順のうち、基準となる線量当量率をあらかじめ設定しておき、その位置における被校正器の指示値を得るという流れについては、光子線量計などの校正手順と全く同様である。ただし、(4)にあげた「室内散乱線による指示値への寄与の補正」は、光子線量計の校正手順では一般に必要ない場合が多く（例えば、線源からの一次線が十分にコリメートされている場合）、中性子につ

いてだけの特別の手順である。ISO8529-2 では、こうした室内散乱線による指示値への影響の補正について詳細な方法を規定しており、ここではその方法を中心に説明を行う。

４.２.１ 中性子フルエンス率と線量当量率の算出

RI 中性子線源の中性子線源強度（中性子放出率）を B、線源から試験点までの距離を l としたとき、試験点における自由空間中での中性子フルエンス率は次式から計算される。

$$\phi = \frac{B}{4\pi l^2} \cdot F_S(\theta) \tag{4.1}$$

ここに、$F_S(\theta)$は、線源非等方性補正係数(source anisotropy correction factor)であり、中性子線源から 4π に放出される中性子の等方的なフルエンス分布からの偏りを補正するものである。中性子線源（^{252}Cf、^{241}Am-Be）は一般に円筒形であり、ISO8529-1 では円筒軸に垂直な方向（θ=90°）に被校正器が置くことが望ましいとされている。$F_S(\theta=90°)$は線源の種類、線源物質を封じているカプセルの形状に依存し、AEA Technology QSA 社が製作している中性子標準線源の場合、^{252}Cf（X1 カプセル）で約 1.01、^{241}Am-Be（X3 カプセル）で約 1.03 という報告 [1)]がある。なお、上記の中性子線源をハンドリング用の金属性ホルダなどに封じた場合の非等方性補正係数については、本報告書の第５章で幾つかの評価例が紹介されている。

また、周辺線量当量率 H^*は、(4.1)式とスペクトル平均したフルエンスー周辺線量当量換算係数 h^*_ϕから次式

$$H^* = h^*_\phi \times \phi \tag{4.2}$$

で計算される。ISO8529-1 で RI 基準中性子線源として指定されている ^{252}Cf、^{252}Cf 重水球減速、^{241}Am-Be 及び ^{241}Am-B についての換算係数 h^*_ϕを**表 4.2－1** に示す。

表 4.2－1　標準 RI 中性子線源(ISO 8529-1)の中性子フルエンスー周辺線量当量換算係数

線源	周辺線量当量換算係数 $h^*(10)$ (pSv･cm^2)
D_2O 減速 ^{252}Cf	105
^{252}Cf	385
^{241}Am-B(α, n)	408
^{241}Am-Be(α, n)	391

４.２.２ 幾何学補正

例えば、高線量率照射の目的で中性子線源とサーベイメータなど被校正器を近接させて照射する場合があるが、こうした照射条件では、被校正器に対して入射する中性子のフルエンス率に勾配が生じ平行ビームでの照射条件と比べて被校正器の指示値が変化する。これを平行ビーム条件での指示値に変換するため補正を、幾何学補正(geometry correction)と呼ぶ。

幾何学補正は、線源と被校正器の寸法と距離の相対関係によって表すことができ、 ISO8529-2 では幾つかの幾何学補正係数の導出式が紹介されている。次式は、点線源（^{252}Cf でも ^{241}Am-Be でもよい）と球形測定器の場合に使用される最も単純な式であり、

$$F_1(l) = 1 + \delta \times \left(\frac{r_D}{2l}\right)^2, \quad (l / r_D > 2) \tag{4.3}$$

ここで、r_Dは、検出器半径、lは、線源から検出器実効中心までの距離であり、パラメータδの推奨値は 0.5±0.1 である。幾何学補正はこの係数で被校正器の指示値(M_T)を除することによってなされる。

図 4.2－1 に、半径 r_D=10cm の測定器についての幾何学補正係数を、線源－検出器実効中心間距離の関数として例示した。一般に、幾何学補正は、線源に被校正器を接近させる場合に特に補正が必要であるが、50cm 以遠であれば 1%以下であり無視できる。

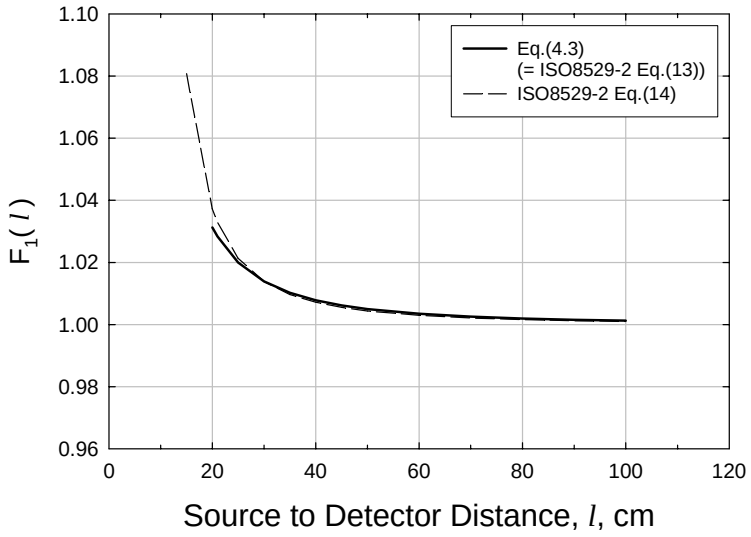


図 4.2－1　点線源に対する半径 10cm の中性子測定器についての幾何学補正係数（図には、(4.3)式（ISO8529-2 では(13)式）のほか、ISO8529-2 の(14)式による幾何学補正係数も破線で示した。適用可能距離の範囲がわずかに異なるが、ほぼ同じ幾何学補正係数を与えることが分かる。）

４.２.３ 室内散乱線補正

中性子線量（率）計の校正における室内散乱線よる指示値への影響は不可避であり、必ずこれを補正しなければならない。散乱中性子の発生源としては、

- 照射室内の床、壁及び天井
- 空気
- 支持テーブル

などがあり、例えば、照射室の寸法を大きくし、かつ中性子線源を室内中央に設置すること、グレーチング床といった特別の室内構造をとること、また支持テーブルについては極力軽量化することなどの処置によってある程度まではその影響を低減することができるが、完全なものではない。室内散乱線による被測定器の指示値に対する影響は、照射室の寸法、形状及び構造に応じて変化するため、ISO8529-2 では、校正場（校正事業者）に依存しない校正方法の確立を目的に標準化された以下の４種類の補正方法が規定されている。

(1) シャドーコーン法(shadow cone method)
(2) 半経験法(semi-empirical method)
(3) 一般化フィット法(generalized-fit method)

(4) 縮約フィッティング法(reduced fitting method)

ここでは、これらの方法のうち、一般に使用されている(1)、(2)並びに(3)の方法を紹介する。

（１） シャドーコーン法

シャドーコーン法は、中性子線源と被校正器の間に鉄とボロン入りポリエチレンからなる円錐形（円錐台形）の遮へいを置いたときと置かないときの指示値の差分を取ることによって、散乱線による寄与を補正するものである。

$M_S(l)$及び$M_T(l)$を、それぞれ線源と検出器の間にシャドーコーンを置いた場合、置かない場合に得られた被校正器の読取値とすると、そのフルエンスレスポンスR_ϕは次式で表すことができる。

$$\left[M_T(l) - M_S(l)\right] \times F_A(l) = R_\phi \times \phi \qquad (4.4)$$

ここで、$F_A(l)$は、空気減衰（又は空気による外散乱(outscatter)）係数であり、主要な RI 中性子線源についての空気の平均線減衰係数の推奨値が ISO8529-2 に与えられている。なお、シャドーコーンは直接線を遮ることが目的であるので、それ自身によって室内散乱線をも遮ることのないよう配置を工夫する必要がある。このため、ISO8529-2 では、シャドーコーンを使用する場合の注意事項として、「線源から見たシャドーコーンの円錐角は、線源から被校正器を見込む立体角よりも大きく、かつ 2 倍を超えないようにすること」が規定されている。また、線源－被校正器間距離は、一般にシャドーコーン全長の約 2 倍以上にする。

（２） 半経験法

半経験法は、散乱中性子による寄与が被校正器の読取値に占める割合が、逆二乗則からの読取値の偏りから推定できるという仮定に基づいたものである。様々な散乱寄与が、室内散乱線による距離 l に無関係の成分と、空気散乱によって距離につれて直線的に減少する成分とによって特徴づけられる。線源からの直接線と散乱線の合計による被測定器の読取値 $M_T(l)$は、次式のように距離 l の関数としてフルエンスレスポンス R_ϕと関係付けられる。

$$\frac{M_T(l)}{\phi \times F_1(l) \times (1 + A \times l)} = R_\phi (1 + S \times l^2) \qquad (4.5)$$

ここで、S は、単位校正距離における室内散乱寄与の割合である。全空気散乱補正（inscatter から outscatter を差し引いたもの）は$(1+A\times l)$項で与えられており、係数 A の計算値が ISO8529-2 に与えられている。

この方法では、シャドーコーン法と異なり、まず距離 l を変えて $M_T(l)$を何点か得る。(4.5)式の左辺と l^2 のプロットはほぼ直線を示し、最小二乗法によって切片を求め、これをフルエンスレスポンス R_ϕとする。また、このときの直線の勾配は、室内散乱線の相対的な寄与割合 S を与えることになる。

（３） 一般化フィット法

(4.5)式を変形し、l^3 の項を無視すれば、

$$\frac{M_{\mathrm{T}}(l)}{\phi \times F_1(l)} = R_\phi(1 + x \cdot l + y \cdot l^2) \qquad (4.6)$$

が得られる。ここで x 及び y は(4.5)式における A 及び S と形式的（あるいは数値的にも）に同じように見えるが、ここではあくまでもフィッティングパラメータとしてのみ取り扱う。(4.6)式は多項式フィット法(Polynomial-fit method)と呼ばれる方法であり、散乱中性子による寄与が被校正器の読取値に占める割合を、距離 l の二次多項式で表現したものである。ISO8529-2 の前規格であった ISO10647 で規定されていた方法であり、幾何学補正 $F_1(l)$が無視できるような距離においてはフィッティング処理がしやすく、パラメータ x と y を決めることでフルエンスレスポンス R_ϕを決定できる。

一方、(4.6)式を一般化したものが、ISO8529-2 で規定されている一般化フィット法である。

$$\frac{M_{\mathrm{T}}(l)}{\phi} = R_\phi\left(\frac{F_1(l)}{F_{\mathrm{A}}(l)} + A' \cdot l + s \cdot l^2\right) \qquad (4.7)$$

基本的には多項式フィット法と同様の考え方に基づいているが、幾何学補正 $F_1(l)$を含めた形式で最小二乗曲線を当てはめる点が大きな違いである。線源に極めて近接した距離から適用することが可能である反面、距離 l を変えて $M_{\mathrm{T}}(l)$を取得する際に 30 点もの距離で測定を行う必要がある。フィッティングパラメータである A' と s を決めることでフルエンスレスポンス R_ϕを決定できる。

（4） それぞれの方法の特徴

前述した散乱線補正方法の特徴を**表 4.2－2** にとりまとめた。

これらの散乱線補正方法は、いずれも、「室内散乱線による寄与を含めた測定値を線源－測定器間距離の関数として表現するための基礎データ」を必要とする。この基礎データの取得は、ある特定の種類（機種）の測定器について一度なされておけば、同種の測定器が校正される毎に繰り返す必要はなく、例えば半経験法等については距離を変えた数点の測定値からフルエンスレスポンスを決定することができる。

なお、適用に当たっての注意事項として

- 散乱線による寄与が 40%以上の測定器読取値の増加を引き起こすことは好ましくない。そのため、適用可能な距離は、照射室の寸法や構造に依存することとなる。
- いずれの方法を適用する場合でも、散乱線補正関数又は補正係数を決定する場合、複数の方法を試し、それらの結果を照合しておくこと。3～4%程度の系統的なずれが生じる場合がある。
- 散乱線補正関数又は補正係数は、被校正器の種類（形式）毎に評価しておくこと。
- 半経験法や一般化フィット法を使用する場合は、距離の変化に伴い線量率も変化するため、データ取得に当たって被校正器の直線性に注意すること。

が挙げられる。また、散乱線補正関数又は補正係数は、照射室に依存する変数であるため、その構造、配置などが変更された場合は再評価を必要とする。こうした再評価の作業は、校正場のコンディションがある一定条件に維持されていることの確認を意味するので、定期的に実施することが望ましい。なお、加速器による単色中性子校正場においても同様の手法が適用できる。

表 4.2－2　ISO 8529-2 で示されている散乱線の補正方法の比較

<table>
<tr><th>方法</th><th>原理</th><th>特徴</th><th>留意点</th></tr>
<tr><td>シャドーコーン法</td><td>一次線を遮へいして散乱線を評価</td><td>• 散乱線の寄与を直接測定</td><td>• 校正距離が必要（シャドーコーン全長の 2 倍以上）。
• シャドーコーンは検出器のサイズに応じて複数必要。</td></tr>
<tr><td>一般化フィット法</td><td rowspan="3">距離によるレスポンス（指示値／フルエンス）の変化を関数フィッティングして散乱線を評価</td><td>• 散乱線の量は距離の関数とする。
• 幾何学補正を含めたすべての補正をフィッティングにより評価。</td><td>• 距離を変えた多数の測定が必要（特に近接させる場合）。
• 球形検出器の場合は、線源に近接させることが可能。</td></tr>
<tr><td>半経験法</td><td>• 散乱線の量は距離によらず一定とする。
• 幾何学補正等の散乱線以外の要素は別途評価。</td><td>• 距離を変えた測定が必要。
• 校正室が立方体に近く、壁床等からの室内散乱が支配的である場合に限定される。</td></tr>
<tr><td>縮約フィッティング法</td><td>• 散乱線の量は距離によらず一定とする。
• その他は検出器の実効中心と幾何学中心とのずれのパラメータで表す。</td><td>• 使用可能な距離範囲が狭い。
• 散乱線の正確な評価ができない。</td></tr>
</table>

（５） 適用例

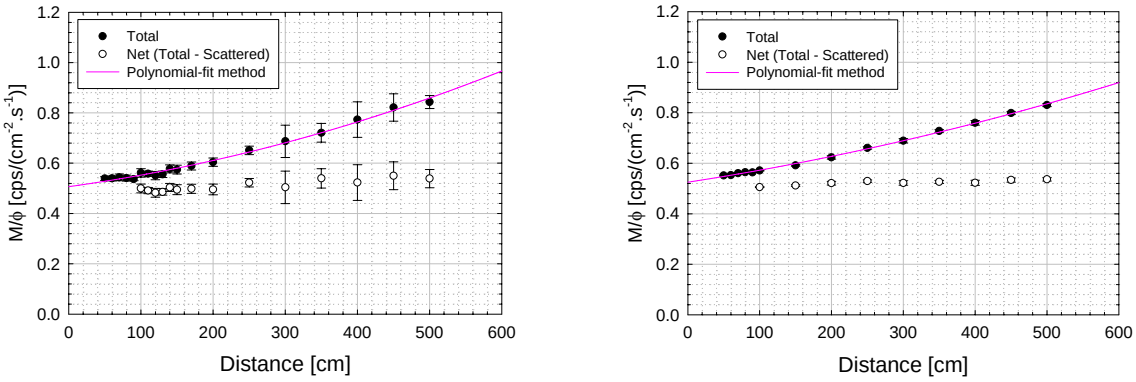
前述した手法を、核燃料サイクル機構及び日本原子力研究所の校正施設で ^{252}Cf や ^{241}Am-Be 線源を用いた中性子サーベイメータの校正に適用した結果が幾つか報告されている [2), 3)]。ここではその一例を紹介する。

核燃料サイクル開発機構東海事業所の校正室において、Studsvik 2202D 中性子線量当量率サーベイメータに対して、シャドーコーン法と多項式フィット法を適用した結果を**図 4.2－2** に示す。ここで用いた線源－検出器間距離 l は、シャドーコーン法ではシャドーコーンの全長（55cm）の約 2 倍である 100cm 以上、多項式フィットでは幾何学補正による影響の生じにくい 50cm 以上である。**図 4.2－2** は、各距離で得られた計数率を自由空間中でのフルエンス率 ϕ（＝$B/4\pi l^2$）で除した“見かけのフルエンスレスポンス”と距離の関係を図示したものである。図中の●プロットは、室内散乱線による計数への寄与を含めたデータ、○プロットは、シャドーコーン法を用いて室内散乱線による計数寄与を補正したデータ、実線は、室内散乱線による計数寄与を含めたデータ（●プロット）に対して多項式フィット法（すなわち(4.6)式）を当てはめたフィッティングカーブである。室内散乱線による寄与がまったく無い理想的な条件の場合、フルエンスレスポンスは距離に関係なく一定になるはずである、しかし、実際には散乱線の寄与があるため、図に示したように、距離が離れるにつれてフルエンスレスポンスが見かけ上増加する。すなわち逆二乗則からの偏りが生じる。一方、シャドーコーン法によって散乱線を補正した場合、フルエンスレスポンスは、線源－検出器間距離に依存せず、ほぼ一定である[注]。多項式フィット法による散乱線影

[注] シャドーコーン法を適用した場合についても、線源－検出器間距離が離れるにつれてフルエンスレスポンスがわずかに増加している。これは、シャドーコーン設置時における“オーバーシャドー”によって、検出器の周囲の空気からの inscater が減少し、(4.4)式で得られる正味の指示値が増加するためと考えられる。

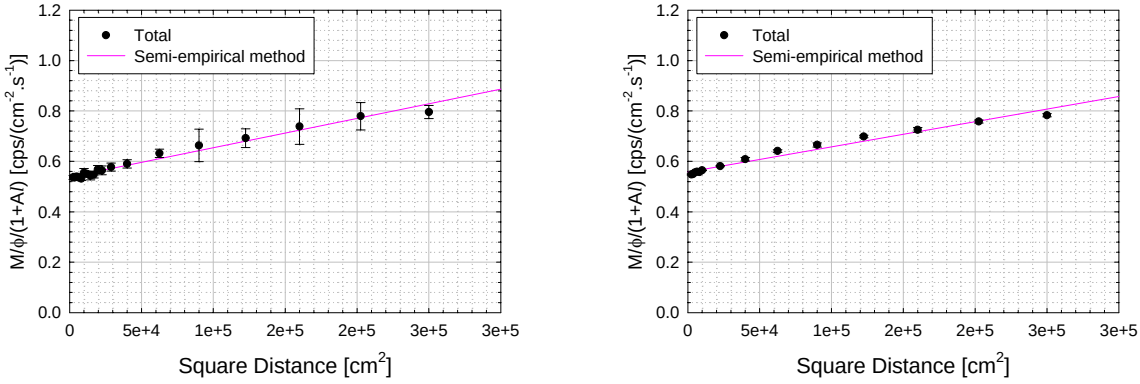
響の補正では、前述したようにフィッティングカーブの y 切片が散乱線補正後のフルエンスレスポンスに相当し、図からも明らかなように、シャドーコーン法によって得られたフルエンスレスポンスにほぼ一致していることが分かる。また、同じデータに対して半経験法を適用した結果を**図 4.2－3** に示す。この方法では、距離の二乗を横軸に、“見かけのフルエンスレスポンス”（ただし全空気散乱補正後）を縦軸にとり、(4.5)式で直線フィッティングを行うことによってフルエンスレスポンス（y 切片に相当）を得る。

シャドーコーン法、多項式フィット法及び半経験法によって得られたフルエンスレスポンスを比較した結果を**表 4.2－3** に示す。いずれの散乱線補正法についても、得られたフルエンスレスポンスは概ね一致している。



(a) ^{241}Am-Be　　(b) ^{252}Cf

図 4.2－2　Studsvik 2202D 中性子線量当量率サーベイメータに対してシャドーコーン法と多項式フィット法を適用した結果（サイクル機構東海事業所の例）



(a) ^{241}Am-Be　　(b) ^{252}Cf

図 4.2－3　Studsvik2202D 中性子線量当量率サーベイメータに対して半経験式法を適用した結果（サイクル機構東海事業所の例）

表 4.2－3　様々な散乱線補正法を適用して得られた Studsvik 2202D 中性子線量当量率サーベイメータのフルエンスレスポンスの比較

機種	線源	フルエンスレスポンス (cm^2)		
		シャドーコーン法	多項式フィット法	半経験法
Studsvik 2202D	^{241}Am-Be	0.49	0.51	0.54
	^{252}Cf	0.51	0.53	0.56

これらの検討の結果、得られた結論をまとめる。

1)　シャドーコーン法は、散乱線を直接測定で評価でき、基本的手法として他の手法の妥当性確認などに有効である。ただし、シャドーする立体角に注意が必要であり、複数のシャドーコーンを使い分ける必要がある。

2)　一般化フィット法は、適用対象が球形測定器に限定されるため、高線量率照射が必要などの理由で線源に近づける必要がある場合を除いては、幾何学補正が必要のない距離（50 cm 以上）で用いる（この場合を多項式フィット法という）を用いる方がよい。

3)　多項式フィット法は、照射室の大きさによらず、またレムカウンタの形状（球形又は円筒型）によらず適用可能であり、簡便で汎用性が高い。シャドーコーン法との一致もよい。

４.３ 個人線量計の校正

個人線量計の校正手順は、4.2 で示した中性子サーベイメータの校正手順と基本的に同じであるが、主たる相違点は、

・中性子フルエンス率から個人線量当量（率）を算出する際、**表 4.3－1** に示す中性子フルエンスー個人線量当量換算係数 $h_p(10)$を用いること、

・ファントムを使用すること、

・室内散乱線による寄与の補正について特別の考慮をはらう必要があること、

である。ここでは、ファントムと散乱線補正方法について述べる。

表 4.3－1　標準 RI 中性子線源の中性子フルエンスー個人線量当量換算係数

換算係数 / 線源	個人線量当量換算係数 $h_p(10)$ (pSv･cm^2)					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°
D_2O 減速 ^{252}Cf	110	109	109	102	87.4	56.1
^{252}Cf	400	397	409	389	346	230
^{241}Am-Be	426	424	443	431	399	289
^{241}Am-B	411	409	424	415	389	293

４.３.１ ファントム

中性子個人線量計の校正で使用するファントムは、ISO8529-3 に規定される ISO 水ファントムであり、近く改訂版が発行される JIS Z4311:2005 個人線量計校正用ファントムでもそのファント

ムが「PW ファントム」という名称で採用されている。ISO 水ファントム/PW ファントムは、外寸 30cm×30cm×15cm の水槽であり、個人線量計を設置する面が厚さ 2.5mm、それ以外の面が厚さ 10mm の PMMA（メタクリル樹脂）製である。ファントムへの個人線量計の設置に当たっては、その有感部分を直径 15cm の円内に置かなければならない。

４.３.２ 室内散乱線補正

（１） ISO8529 三部作の内容

ISO8529 三部作では、中性子個人線量計についても中性子サーベイメータと同様の散乱線補正方法が適用可能としているが、以下にあげる理由によって、その適用においては少なからず技術的な制約を受けることになる。

(a) 個人線量計を装着するファントムを必要とし、ファントムをも含めた体系が“個人線量計”として扱われる。

(b) 中性子線量当量率サーベイメータと異なり一般に感度が低く、またパッシブ線量計のものが多いため距離を変えた多点測定は非現実的である（また、パッシブ線量計の場合、低線量率で照射するというニーズがそもそもない）。

例えば、(a)については、ファントムまでをカバーする寸法のシャドーコーンが必要であるし、また(b)については、一般化フィット法等で必要となる距離を変えた多点計測の適用は極めて困難である。このため、ISO8529-2 では、実際的な方法として、直接線に対する散乱線の寄与の低減（距離が近ければ近いほどよい）と照射野の均一性の確保等（距離が遠ければ遠いほどよい）のトレードオフによって、線源中心からファントムまでの距離を一定（75cm）とすることを容認している。ただし、線源－ファントム表面間距離を 75cm にしたとしても散乱線による寄与がゼロになるわけではなく、またその寄与の程度も照射室の寸法等に依存するため、基本的な考えとしては、室内散乱線の相対的な寄与の小さい比較的大きな照射室で校正を行うことを暗黙の前提にしている。

（２） 能動型検出器（比例計数管）を用いた散乱線寄与の測定評価

中性子個人線量計の指示値に対する室内散乱線による寄与を調査した結果が報告されている [4)] ので紹介する。ここで紹介する方法は、中性子に対する感度の低い中性子個人線量計の代用として、中性子個人線量計と中性子検出原理を等しくする能動(アクティブ)型の中性子検出器をファントム上に設置し、室内散乱線による影響を線源－ファントム間距離の関数として評価したものである。

アルベド式、反跳陽子検出式中性子個人線量計の代用として、それぞれ ^{3}He 比例計数管、水素比例計数管を使用し、これを ISO 水ファントム（以下、PW ファントム）に設置した状態で、^{252}Cf 線源－ファントム表面間距離を 30cm～400cm まで変えて室内散乱線による計数率の変化を調べた結果を、^{3}He 比例計数管、水素比例計数管それぞれについて**図 4.3－1**、**図 4.3－2** に示す。図には、シャドーコーン法によって得られた計数率及び多項式フィット法から得られたフィッティング曲線のほか、アルベド TLD 及び反跳陽子を検出する電子式個人線量計のデータも比較のため示している。反跳陽子検出式個人線量計の代用である水素比例計数管については、シャドーコーン法と多項式フィット法による散乱線による指示値への寄与の補正結果はほぼ一致している。また、アルベド式線量計の代用である ^{3}He 比例計数管については、線源からの距離 70cm 以遠では、両

補正手法による散乱線による指示値への寄与の補正結果はほぼ一致しているものの、70cm よりも線源に近い距離においては、点線源とファントムとの幾何学的な関係によって、多項式フィット法から予想される指示値に比べて測定される指示値は減少すること、そのため線源に近接させた条件で照射する場合には適切な幾何学補正が必要であることを示している。この結果は、前節で示した、ISO8529-2 で推奨されている実際的な方法、すなわち「直接線に対する散乱線の寄与の低減と照射野の均一性の確保等とのトレードオフによって、線源中心からファントムまでの距離を一定（75cm）とする」ことを再現した結果であるとも言えるが、同時に、中性子個人線量計に対する散乱線による影響を、任意の線源－ファントム間距離において、以下に示す方法によって評価できる可能性を示している。

（例）アルベド式線量計の場合

(1) 校正の対象とする中性子個人線量計（以下、被校正器）の代用として、^{3}He 比例計数管等を使用して散乱線による指示値の変化傾向を線源－ファントム間距離の関数として評価する。
(2) 次に、被校正器について、ある固定した距離（例えば 1m）における室内散乱線による指示値の増量値を、シャドーコーン法を用いて評価する。
(3) (1)の結果を(2)で規格化し、任意の距離（例えばシャドーコーン法が適用し得ない 100cm 以下の距離）における、被校正器についての室内散乱線影響の補正データを得る。

なお、**図 4.3－3** に、アルベド式線量計（^{3}He 比例計数管を PW ファントムに設置）、反跳陽子検出式線量計（水素比例計数管を PW ファントムに設置）及び中性子線量当量率サーベイメータ（レムカウンタ）についての散乱線による寄与を比較した結果を示す。散乱線によるアルベド式線量計への影響は、レムカウンタに対する影響に比べて大きいので、アルベド式線量計を校正する校正事業者は、仮に ISO8529-2 で推奨する距離 75cm で校正する場合であっても、上述した方法又は計算等によって、その距離における散乱線による影響を評価しておくことが望ましい。

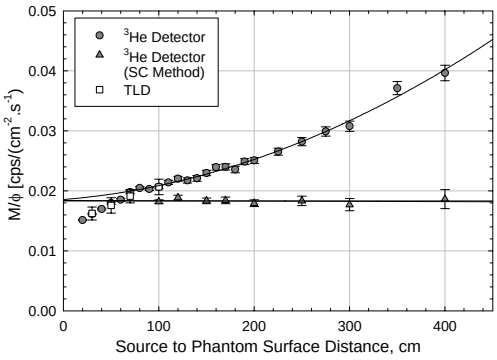


図 4.3－1　アルベド式線量計のフルエンスレスポンスの距離依存性（シャドーコーン法と多項式フィット法の比較）

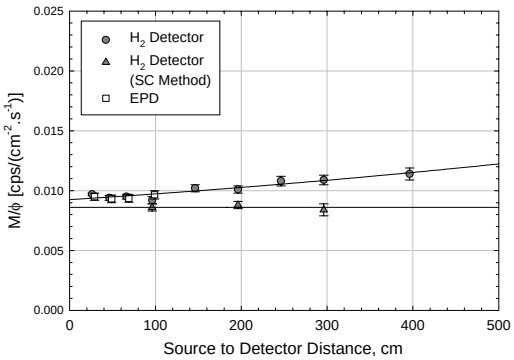


図 4.3－2　反跳陽子検出式線量計のフルエンスレスポンスの距離依存性（シャドーコーン法と多項式フィット法の比較）

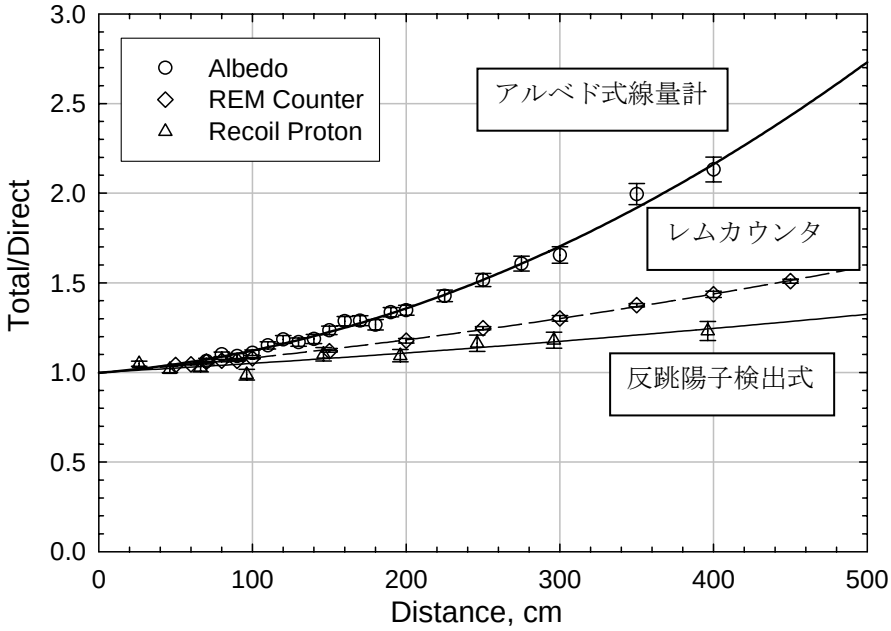


図 4.3－3　アルベド式線量計（^{3}He 比例計数管を PW ファントムに設置）、反跳陽子検出式線量計（水素比例計数管を PW ファントムに設置）及び中性子線量当量率サーベイメータ（レムカウンタ）の散乱線による指示値の変化

４.４ 不確かさの評価

４.４.１ はじめに

不確かさの評価は、校正の質、信頼性にかかわるものであるので､極めて重要である。また、トレーサビリティとは､「不確かさがすべて表記された切れ目のない比較の連鎖を通じて、通常は国家標準又は国際標準である決められた標準に関連づけられ得る測定結果又は標準の値の性質を言う[5)]」とあるように、トレーサビリティを論じる上で、不確かさの評価は必要不可欠である。不確かさの評価方法、表現方法については､BIPM が他の国際機関と協力して Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM)[6)] を発行している。校正機関が行う校正における不確かさの評価、表現は GUM に基づいて行う必要がある。また、中性子校正については、不確かさ評価において考慮すべき具体的事項が ISO 8529-2 に記されているので、これに従って評価することが望ましい。

４.４.２ GUM の特徴

GUM では、不確かさの評価方法、表現方法が具体的な例を交えて丁寧に記述されているが、その特徴として以下の４点が挙げられる[5)]。

1)　計測の質の表現法として「誤差」ではなく、「不確かさ」を用いること。

「測定された値と真の値との差」として定義される誤差に替えて、「測定結果のばらつきを数値で表したもの」として表現される不確かさの使用を求めている。

2)　不確かさの成分をその評価方法により分類した。

一連の測定値の統計的解析により評価できる A タイプ評価と、統計的解析以外の方法により評価できる B タイプ評価に分類した。

3)　不確かさの成分の合成方法を、その伝播則による二乗和方式に限定した。

従来は、代数和方式と、代数和と二乗和方式を併用する混合方式とが用いられることもあったが、これらの使用をやめ、二乗和方式に限定することを求めている。

4)　測定値のばらつきの範囲を「拡張不確かさ」によって示すこととした。

不確かさは、標準不確かさよりはむしろ、それに包含係数(通常 k)を掛けた拡張不確かさにより表現することを求めている。この際、k の値（通常 2～3）を明記する必要がある。

４.４.３　GUM に基づく不確かさ評価の実際

GUM に基づき不確かさを評価、表記するには、次のような手順による。

1)　各入力量 X_i と測定量 Y の関係を数学的に表現し、測定の手順、測定量 Y の定義を明確にする。すなわち $Y=f(X_1, X_2, \cdot \cdot \cdot, X_n)$のように定式化する。

2)　各入力量に対する標準不確かさを評価する。この際、各入力量の種類に応じて、A タイプの評価、B タイプの評価を使い分ける。

3)　二乗和方式に基づく不確かさの伝播則に基づき、関数 f と、各入力量の標準不確かさとから、合成標準不確かさを算出する。この際、必要に応じて不確かさのバジェット表を作成する。

4)　測定量に不確かさを付して表記する。この際、拡張不確かさを用いる場合には、包含係数 k の値を明記する。

４.４.４　不確かさ評価の例

ここで、一例として RI 中性子源を用いた中性子線量率計の校正における不確かさの評価を紹介する。RI 中性子源を用いた中性子線量率計の校正で、散乱中性子の影響をシャドーコーン法により評価する場合、測定量であるレスポンス R_H は次式で表される。

$$R_H = \frac{h_\Phi B F_1(\theta) F_1(l)}{4\pi l^2 F_A(l)\{M_T(l) - M_S(l)\}}$$

$M_T(l)$：　被校正器の読取値
$Ms(l)$：　シャドーコーン設置時の被校正器の読取値
h_Φ：　フルエンス－線量当量換算係数
B：　中性子源強度
$F_1(\theta)$：　中性子放出率の非等方性補正係数
l　：　線源中心と被校正器の基準位置間の距離
$F_1(l)$：　幾何学係数
$F_A(l)$：空気散乱(Outscatter)補正係数

ただし、ここでは線量率計に非直線性がないものとしている。非直線性がある場合の補正につい

てはISO 8529-2を参照されたい。また、それぞれの入力量の物理的な意味についてはISO 8529を参照されたい。ここで挙げた項目のほかにも、被校正器や校正方法に応じてさらに不確かさの評価が必要となる要因が増える場合もありうるので、注意が必要である。

さて、上式に基づき校正を行い、レスポンスR_Hとその不確かさを評価するわけであるが、以下各入力量の標準不確かさの評価について記すこととする。

（1） 被校正器の読取値

デジタル信号出力が可能な計数型の線量率計については、ポアソン統計を用いて標準不確かさを評価する。アナログ型のものについては、その針の振れを観察し、95 %の読取値を包含する針の変動幅から包含係数2の不確かさを決定し、その後、この値を2で除して包含係数1の標準不確かさを得るよう ISO8529-2 では推奨されている。しかしながらこの方法では、特に低線量率領域で主観が入りやすくなるので、アナログ外部出力があるならばこれをデジタルレコーダ等で記録し、適当なデータ処理を行うことが望ましい。

（2） フルエンスー線量当量換算係数

^{241}Am-Be、 ^{241}Am-B、^{252}Cf及びD_2O減速^{252}Cfについては、ISO 8529-3にそれぞれのフルエンスー線量当量換算係数が与えられている。そしてその不確かさとしては、フルエンススペクトルに含まれる不確かさを考慮するために、^{252}Cfについては1 %、他の線源（D_2O減速^{252}Cf、^{241}Am-Be及び^{241}Am-B）については4 %の相対的な不確かさが妥当であるとしている。しかし、特殊な線源ホルダや厚いカプセルを用いている場合には、スペクトル変化が生じ、換算係数に大きな不確かさをもたらすことになるので、このような場合には独自の評価が必要となる。

（3） 中性子源強度

中性子源の中性子放出率については、しかるべき標準機関（産総研、NPL 等）に校正を依頼し、その校正証明書に記載されている不確かさを用いる。

（4） 中性子放出率の非等方性補正係数

この補正係数は線源ごとに実験、又は計算により評価することが望ましいが、それができない場合にはISO 8529-1に掲載されている例や文献などを参考にして、評価する必要がある。

（5） 線源中心と被校正器の基準位置間の距離

ISO 8529-2では、距離については、1mm以下の不確かさで測定するよう推奨されている。

（6） 幾何学係数

ISO 8529-2では$|F_1(l)-1|$の値の相対不確かさとして20%を使用することを推奨している。ただし、線源と被校正器間の距離を大きくとることにより、幾何学係数は1に十分近くなるので、この不確かさが校正結果に及ぼす影響を極めて小さくすることができる。

（7） 空気散乱(Outscatter)補正係数

前述の4種類の中性子線源から放出される中性子の空気に対する線減弱係数は、ISO 8529-2に

示されており、係数自身が有する標準不確かさは 1.5%となっている。その値を用いて、実際に$F_A(l)$を評価すると、$F_A(l)$が持つ不確かさは現実的な校正条件においては無視できる程度の大きさとなることが分かる。

４.４.５ 不確かさバジェット表の作成例

表 4.4－1 にバジェット表の一例を示す。バジェット表には、入力量、入力量の値、入力量の不確かさ、タイプ、測定量とその合成標準不確かさ、そして必要に応じて Sensitivity、 Contribution、Index、合成標準不確かさ(Combined Standard Uncertainty)などを記載する。ここで Sensitivity、Contribution、 Index 及び合成標準不確かさは以下のように定義される。

$$\text{Sensitivity} \equiv \left|\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}\right|$$

$$\text{Contribution} \equiv \left|\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}\right| \cdot \sigma_{X_i}$$

$$\text{Index} \equiv \frac{\left|\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}\right|^2 \cdot \sigma_{X_i}{}^2}{\sum_i \left|\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}\right|^2 \cdot \sigma_{X_i}{}^2}$$

$$\text{Combined Standard Uncertainty} \equiv \sqrt{\sum_i \left|\frac{\partial f}{\partial X_{\mathrm{i}}}\right|^2 \cdot \sigma_{X_i}{}^2}$$

但しσ_{X_i}はi番目の入力量の標準不確かさである。

各入力量について見ていくと、まず中性子源強度は値、不確かさともに校正証明書の記載値を使用したものとしている。したがって不確かさのタイプは B である。非等方性補正係数は、独自で測定したものを使用しているので、不確かさのタイプは A である。線源中心と被校正器の基準位置間の距離は実際に測定するわけであるが、この不確かさは繰り返し測定により統計的に処理できる場合と、デジタル測距計などのようにその読み取り精度で不確かさが決定される場合とがあり、不確かさのタイプは A、B のいずれか、あるいはそれらの混合したものとなる。幾何学係数、空気散乱補正係数の不確かさは、前述したとおり十分小さいので、合成不確かさには影響を及ぼさない。読取値は、デジタルレコーダで記録してデータ処理を行った場合を想定しており、タイプとしては A となる。フルエンスー線量当量換算係数は値、不確かさともに ISO8529-2 の推奨値を用いており、タイプとしては B となる。これらの値、不確かさを用いてそれぞれの Sensitivity、Contribution、 Index、及び合成標準不確かさを計算する。また、Contribution を二乗和した後に平方根をとることにより、合成標準不確かさが得られる。この表のように Contribution や Index を記しておくと、どの入力量が合成標準不確かさに大きな影響を及ぼしているかが一目瞭然となるので、その後の最高測定能力の改善等に役に立つ。

【参考文献】

1) Eisenhauer, C. M., *et al*.: *Calibration techniques for neutron personal dosimetry*, Radiat. Prot. Dosim., **10**(1/4), 43-57 (1985).

2) 吉田忠義，辻村憲雄，他：異なる中性子校正場におけるレムカウンタの校正結果の比較，日本保健物理学会第 38 回研究発表会要旨集，A-15 (2004). 及び
核燃料サイクル開発機構公開資料：平成 15 年度放射線安全部年報，TN8440 2004-011, pp.73-74 (2004)

3) 梶本与一，川崎朋克，他：原研中性子校正場における中性子サーベイメータへの散乱線影響の評価，日本保健物理学会第 36 回研究発表会要旨集，A-13 (2002)

4) 吉田忠義，辻村憲雄：中性子個人線量計の校正における室内散乱線及びジオメトリ効果による影響，保健物理，**40**(1), 37-42 (2005)

5）飯塚幸三監修「計測における不確かさの表現のガイド」日本規格協会，pp.219 (1996), ISBN 4-542-40163-4.

6）BIPM ほか：”Guide to the expression of Uncertainty in Measurement” (1995), ISBN 92-67-10188-9.

表 4.4－1 バジェット表の例

入力量	値	不確かさ	タイプ	Sensitivity	Contribution	Index (%)
中性子源強度 B [s^{-1}]	9.04×10^{6}	0.06×10^{6}	B	1.16×10^{-7}	0.007	2.2
非等方性補正係数 $F_1(\theta)$	1.04	0.01	A	1.01	0.010	4.6
校正距離 l [cm]	100	0.1	A and/or B	0.021	0.002	0.2
幾何学補正係数 $F_1(l)$	1.002	negligible	B	0.0	0.0	0.0
空気散乱(Outscatter)補正係数 $F_A(l)$	1.01	negligible	B	0.0	0.0	0.0
シャドーコーン設置時の読取値 $M_S(l)$ [$\mu Sv\cdot h^{-1}$]	30	0.2	A	0.010	0.002	0.2
読取値 $M_T(l)$ [μSv/h]	130	0.65	A	0.010	0.007	2.1
フルエンス－線量当量換算係数 h_Φ [$\mu Sv\cdot cm^2\cdot h^{-1}$]	1.41	0.06	B	0.74	0.045	90.7
レスポンス R_H	1.05	0.05 (k=1)				

５.計算シミュレーションによる散乱線評価

５.１ はじめに

中性子校正場で生ずる散乱線は、「線源散乱（Source-scatter）」、「室内散乱(Room-scatter)」及び「空気散乱(Air-scatter)」の３つに大別される。

「線源散乱」は、中性子と線源物質やそれを密封する線源カプセル等の物質との相互作用によって生じる散乱であり、線源から放出される中性子のフルエンス分布（等方性）に影響を与える。ISO8529-1[1)]では、形状の異なる２種類の中性子線源について、高精度ロングカウンタを用いてこの中性子フルエンス分布について測定を行った例が紹介されている。線源の周辺構造等の影響によってフルエンス分布に角度依存が生じる場合、その影響を非等方性補正係数 $F_S(\theta)$として求め、基準線量率等を導出する際に補正する必要がある。

「室内散乱」は、照射室の床、壁及び天井の構造体との相互作用によって生じる散乱であり、中性子線量計の校正において最も大きな影響を与える。室内散乱は、室内の大きさ及び形状によってその影響の度合いが変化する。ISO8529-2 [2)]では、室内散乱線の指示値への寄与が 40％を超えない範囲で校正を行うことが定められており、線源-検出器間距離 L_C=75cm における室内散乱線が40％に達する照射室サイズについて、室内形状ごとに紹介している。

また、「空気散乱」は、照射室内中に存在する空気による散乱であり、線源から検出器方向に放出された中性子が空気によって散乱され減弱する外散乱（out-scatter）と、検出器と別方向に放出された中性子が空気により散乱されて検出器に達する内散乱（in-scatter）の成分がある。

これらの散乱線については、専ら測定によって評価される場合が多いが、近年の計算シミュレーション技術の発展はめざましく、日本国内においても計算シミュレーションによる散乱線の評価が行われている。この章では、照射室及び線源カプセルの形状について系統的にパラメータを変化させた計算を行い、それらの違いによる散乱線影響の変化について検討した例と、現実に存在する中性子校正場における計算シミュレーションの実例について紹介する。

５.２ 照射室及び線源カプセル形状の違いによる影響

中性子校正場における散乱線の特性は、照射室及び線源カプセルの形状によって大きく異なる。そこで、様々な形状の照射室において、校正点に混入する散乱線の割合をモンテカルロ計算により評価した。また、線源から放出された中性子が、線源カプセルを通過する際にどの程度の影響を受けるか調べた。

計算には MCNP-4C コード [3)]を用いた。照射室を模擬した計算では、いずれも ^{252}Cf 線源を部屋の中央に配置し、検出器（点検出器）、床、壁及び天井（普通コンクリート）までの距離を変化させた。コンクリートの厚みはいずれの場合も 1 m とした。これは、上記線源条件の場合にコンクリートの厚みが 60 cm 以上になると、厚みによらず散乱線の割合がほぼ一定となるためである（**図 5.2－1**）。線源カプセルに関する計算では、球形の線源カプセル（内径 2 cm）を想定し、空洞内の中央に点状線源を配置した。線源カプセルの材質と厚みを変化させた場合に、カプセル通過後の中性子スペクトルがどのように変化するかを調べた。

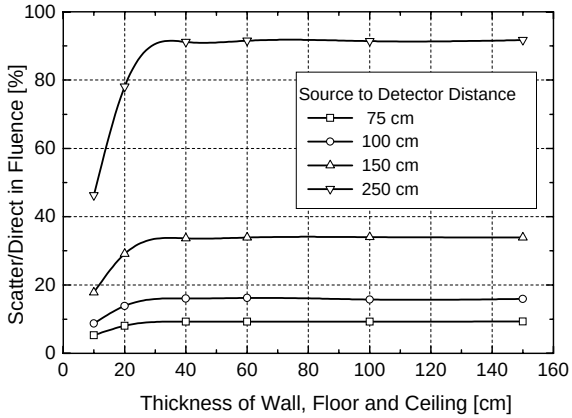


図 5.2－1　照射室の壁厚と室内散乱線の関係
（照射室寸法：1222×1222×1222 cm^3、　中性子線源：^{252}Cf を室内中央に配置）

５.２.１　線源－検出器間の距離と散乱線の寄与

図 5.2－2 に、一辺の長さ（内寸）が 1222 cm の立方体形状の照射室において、線源－検出器間の距離を変化させた際の、校正点における散乱線の寄与割合(=散乱線/直接線)を示す。照射室内の空気の存在によりわずかに散乱割合が増え、その割合は距離とともに増していることが分かる。線源－検出器間の距離が 1 m のとき、散乱線の寄与割合はフルエンスで 15%程度である。同じ距離において散乱線の寄与割合を周辺線量当量率（*H**(10)）を指標として評価すると約 7%となる。これは、散乱によりフルエンス平均エネルギーが低エネルギー側にシフトしたためである。中性子サーベイメータ（Studsvik 2202D）は、フルエンスから *H**(10)への換算係数のエネルギー依存性と似た特性を有しているため、散乱線が計数に寄与する割合は *H**(10)の場合とほとんど変わっていない。

なお、距離の増加とともに、直接線に対する散乱線の相対的な割合が増加するが、散乱線自体の量は距離にかかわらずほぼ一定である。これは、(4.6)式及び(4.7)式で、室内散乱による影響が距離の二乗の項で近似的に表現できることを示すものである。

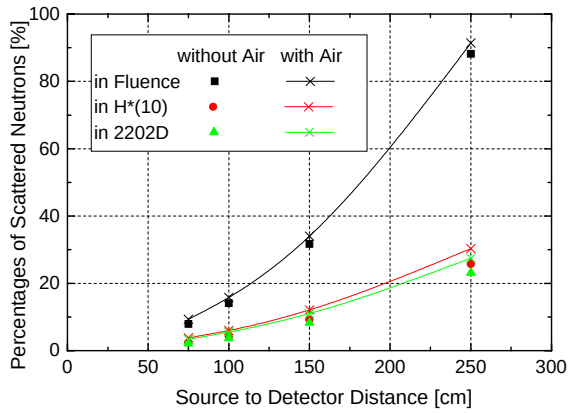


図 5.2－2　線源－検出器間距離と散乱線の寄与割合との関係
（照射室寸法：1222×1222×1222 cm^3、　中性子線源：^{252}Cf を室内中央に配置）

５.２.２ 照射室の大きさと散乱線の寄与

照射室の一辺の長さを 222 cm～2022 cm の範囲で変化させたときの校正点における散乱線の寄与割合（*H**(10)）を**図 5.2－3** に示す。ISO8529-2 Annex B [2)]には、線源－検出器間の距離が 75 cm のとき､線量計の指示値に対する散乱線の寄与割合が 40%になる照射室の寸法が例示されており、中性子サーベイメータの場合は 3 m とされている。今回のモンテカルロ計算の結果はこれを裏付ける結果であった。

一連の計算から、空気による散乱の影響を除けば、照射室の一辺の長さと線源－検出器間の距離の比が一定のとき、散乱線の寄与割合は一定であることが分かった。

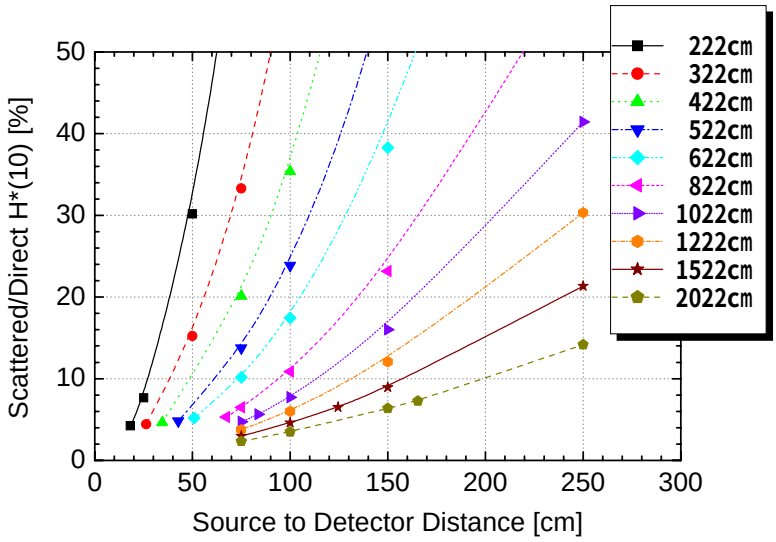


図 5.2－3 照射室（立方体）のサイズと散乱中性子の寄与割合との関係
（中性子線源：^{252}Cf を室内中央に配置）.

５.２.３ 照射室の形状と散乱線の寄与

図 5.2－4 に照射室の内容積を一定（1,825 m^3、立方体では一辺が 1,222 cm に相当）とし、形状を立方体、直方体、円柱、球と変化させたときの散乱線の寄与割合（*H**(10)）を示す。横軸は照射室の表面積である。線源－検出器間の距離はいずれも 100 cm であり、検出器は直方体の場合、照射室中央（線源）を起点とする３軸方向に、円柱の場合、軸方向と半径方向にそれぞれ設定した。

照射室の形状が球と立方体の場合では散乱線の寄与割合にほとんど変わりないが、直方体及び円柱の場合には照射室の表面積の増加とともに概ね比例して増加している。しかし増加の割合は大きくなく、表面積が 700 m^2（半径 7.6 m の球）から 1,000 m^2（8.5 m×8.5 m×25 m の直方体）の範囲では 1%程度の差異にとどまっている。また、直方体及び円柱形状の照射室内においては、散乱線の寄与割合は検出器の軸位置（検出器の壁との距離）に大きく依存していないことが分かる。このことは５.２.１で述べたとおり、同一照射室内において、散乱線の量そのものは線源－検出器間の距離にかかわらずほぼ一定であることを示す。

これらのことから、照射室の内容積がある程度大きく、よほど扁平していなければ、散乱線の寄与割合は照射室形状の違いに大きく依存されないといえる。

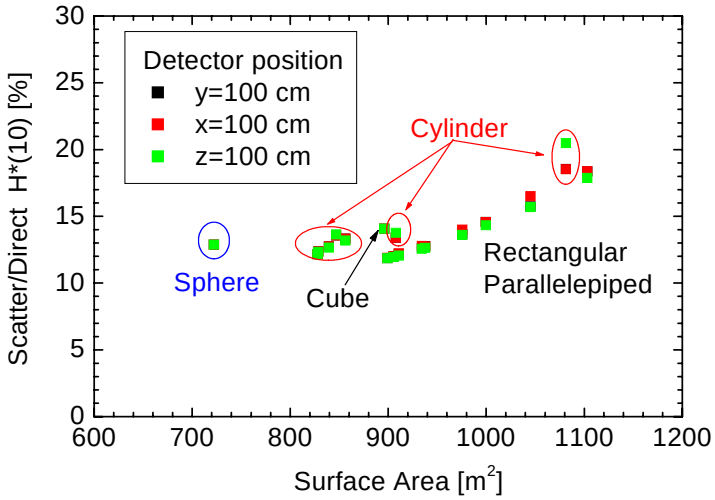


図 5.2－4　照射室の内容積を一定としたときの照射室表面積と散乱線の寄与割合との関係（照射室内容積：1,825m^3.）

５.２.４　線源カプセルによる散乱線の寄与

図 5.2－5 に、点状の ^{252}Cf 線源及び ^{241}Am-Be 線源から、材質及び厚みの異なる球殻状線源カプセルを介して検出器に到達した中性子について *H**(10)を評価した結果を示す。材質が SUS で、線源カプセル厚みが 10 mm のとき、*H**(10)の減少は、^{252}Cf 線源の場合 1.0%、^{241}Am-Be 線源の場合 1.2%である。一方、後述する原研放射線標準施設棟の線源及び線源ホルダについて、非等方性に基づく *H**(10)の増加はそれぞれ 6.1%、2.5%程度である（線源自身の非等方性による影響も含む）。このことから、一般に線源カプセルによる散乱のうちスペクトル変化による影響は非等方性による影響に比べて小さいと予想されるが、肉厚の厚い線源カプセルを使用する場合には、減少分を補正又は不確かさとして扱うなどの取り扱いが必要となる。

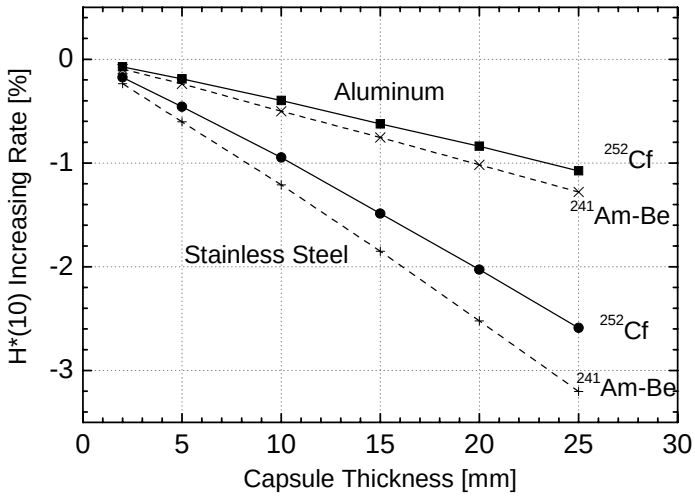
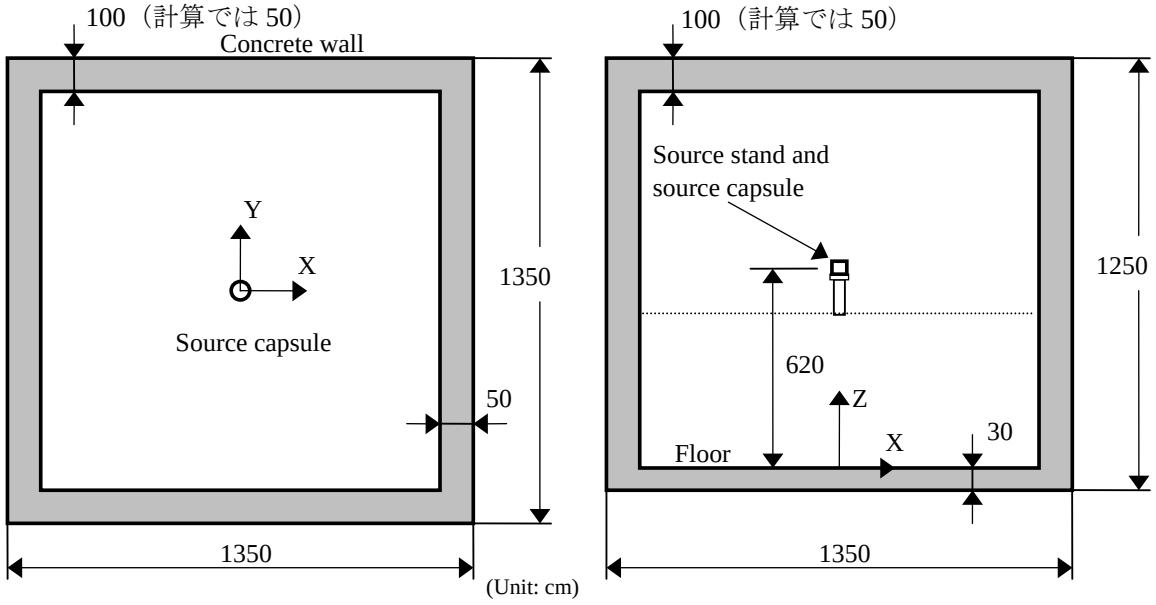


図 5.2－5　球殻状線源カプセルの厚さと周辺線量当量 *H**(10) の関係

５.３　実例１　日本原子力研究所放射線標準施設棟の場合

日本原子力研究所東海研究所放射線標準施設棟(Facility of Radiation Standard: FRS)[4)]は、^{252}Cf 線源又は ^{241}Am-Be 線源を用いた中性子校正場を有している。**図 5.3－1** に示すように、照射室（第 4 照射室）の大きさは 1250 cm×1250 cm×1170 cm であり、部屋のほぼ中央に中性子線源を設置することによって速中性子校正場を得ている。床からの散乱の影響を低減させるために、床から 520 cm の高さに鉄製のグレーチング床が設置されている。中性子線源はグレーチング床から 100 cm の高さに設置される。照射室の壁及び天井は厚さ 100 cm のコンクリートであり、床は厚さ 30 cm のコンクリートである。



(Top view)　　(Side view)

図 5.3－1　放射線標準施設棟(FRS)第 4 照射室

校正点には、線源から直達する中性子に加え、室内空気、壁、床及び天井などによって散乱された中性子が混入する。線源の近傍には、線源のハンドリングを容易にするためのステンレス製の線源ホルダ†（**図 5.3－2**）と、線源ホルダを設置するためのスタンドが存在するため、線源から放出された中性子の一部は散乱される。そこで、校正点における散乱線の寄与を、

(1)線源ホルダ及びスタンドによるもの

(2)室内空気によるもの

(3)壁、床及び天井によるもの

の３つの成分に区分し、モンテカルロ計算（MCNP-4A コード）[5)]により散乱線の割合を成分別に評価した[6)]。計算では、線源ホルダ及びスタンドについては実際の構造を忠実に模擬した。ただし、線源からの中性子放出は等方とした。照射室の大きさは実際の寸法通りとしたが、壁及び天井の厚さについては、計算効率向上の観点から 50 cm とした。また、グレーチング床の影響は小

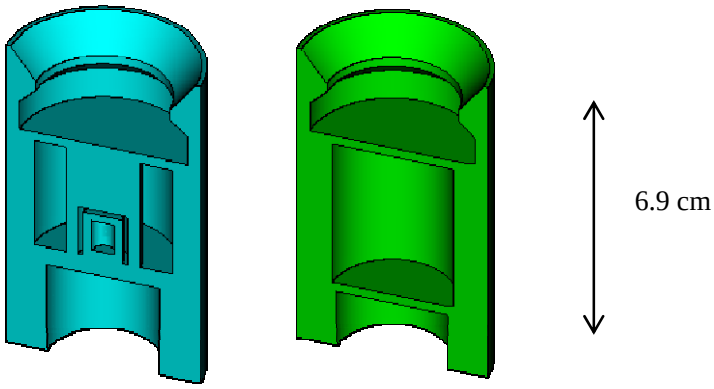
† 参考文献 6)では、これもカプセルと表記しているが、本報告書では他との並びでホルダと記す。

さいと考え、計算上は無視した。^{252}Cf 線源及び ^{241}Am-Be 線源のスペクトルは ISO 8529-1 [1)]に示されたデータを用いた。検出器（校正点）は線源と同じ高さに幾つか設置し、線源－検出器間の距離によって散乱線の寄与がどの程度変化するか調べた。散乱線の寄与割合は以下の式で評価した。

$$\text{散乱線寄与割合} = \frac{\text{散乱成分を含んだフルエンス} - \text{直達線のフルエンス}}{\text{直達線のフルエンス}} \times 100\ (\%)$$

これは、フルエンスの場合であるが、周辺線量当量 $H^*(10)$の場合はフルエンスを $H^*(10)$に置き換えて計算した。得られた散乱線寄与割合の距離による変化を**表 5.3－1** に示す。

また､ハンドリング用線源ホルダを透過したスペクトルの計算値から求めた ^{252}Cf 及び ^{241}Am-Be 線源の平均エネルギー及びフルエンス－周辺線量当量 $H^*(10)$への換算係数 $h^*(10)$を**表 5.3－2** に示す。



(a) ^{252}Cf 線源用　　(b) ^{241}Am-Be 線源用

図 5.3－2　ハンドリング用線源ホルダの断面図

表 5.3－1　放射線標準施設棟第 4 照射室における $H^*(10)$への散乱線寄与割合の距離による変化（MCNP による計算結果）

線源、線源－検出器間距離(cm)	線量当量 $H^*(10)$及びフルエンス（括弧内）への寄与割合 [%]			
	線源ホルダ	ホルダ＋スタンド	ホルダ＋スタンド＋空気	ホルダ＋スタンド＋空気＋壁・床・天井
^{252}Cf				
40	6.1 (7.4)	8.9 (10.6)	9.4 (11.2)	9.9 (13.2)
100	6.1 (7.4)	9.0 (10.7)	9.9 (11.8)	13.8 (25.4)
200	6.1 (7.4)	9.0 (10.7)	10.6 (12.6)	26.2 (67.0)
^{241}Am-Be				
40	2.4 (3.4)	5.2 (6.4)	5.5 (6.8)	6.2 (8.8)
100	2.5 (3.4)	5.2 (6.5)	6.0 (7.5)	10.0 (19.3)
200	2.5 (3.4)	5.2 (6.5)	6.4 (7.9)	21.2 (54.2)

表 5.3－2　線源ホルダ及びスタンドを考慮した場合の平均エネルギー及び線量当量換算係数

	^{252}Cf			^{241}Am-Be		
	計算値	ISO8529	偏差	計算値	ISO8529	偏差
フルエンス平均エネルギーE_{ϕ}、(MeV)	2.05	2.13	-3.8%	3.84	4.16	-7.7%
線量当量平均エネルギーE_H、(MeV)	2.21	2.3	-3.9%	4.04	4.4	-8.2%
線量当量換算係数 h*(10) (pSv･cm^2)	378	385	-1.8%	387	391	-1.0%

５.３.１　線源ホルダ及びスタンドによる散乱

表 5.3－1 から、線源ホルダ及びスタンドによるフルエンスの寄与は距離によらず一定であり、^{252}Cf 線源の場合 11%、^{241}Am-Be 線源の場合 7%であることが分かる。^{252}Cf 線源の方が ^{241}Am-Be 線源の場合に比べて寄与割合が大きい理由は、線源ホルダの厚みが ^{241}Am-Be 線源のものに比べて大きいためである。H*(10)でみた場合の寄与割合はフルエンスよりも小さくなり、^{252}Cf 線源の場合 9%、^{241}Am-Be 線源の場合 5%程度となる。**表 5.3－2** から、線源ホルダとスタンドの存在により、スペクトル平均エネルギーは、^{252}Cf 線源の場合 4%、^{241}Am-Be 線源の場合 8%低下する。しかし、線量換算係数への影響は小さく、標準スペクトルに対する ISO 8529 の値との差は 1～2%である。

５.３.２　室内空気による散乱

空気による散乱の寄与割合は、線源からの距離が増加するにつれ、ほぼ比例して大きくなる。しかし、その影響は他の散乱源に比べてかなり小さく、100 cm より短い距離では散乱寄与割合は 1%以下である。スペクトルのシフトも小さく、平均エネルギーは 0.5%程度の変化である。ISO 8529-2 Annex C [2)]では、^{252}Cf 線源及び ^{241}Am-Be 線源に対する空気減弱補正係数を、それぞれ 1055、890 (×10^{-7} cm^{-1})としている。これらの線源を**図 5.3－2** に示した線源ホルダに装着した場合の空気減弱補正係数は、それぞれ 1088、922 (×10^{-7} cm^{-1})と、3%程度大きくなる。

５.３.３　壁、床及び天井による散乱

壁等による散乱線の寄与割合は、^{252}Cf 線源の場合、距離 100 cm ではフルエンスで 14%、H*(10)で 4%、^{241}Am-Be 線源の場合、距離 100 cm ではフルエンスで 12%、H*(10)で 4%である（**表 5.3－1**）。散乱線の寄与割合は、線源との距離が増すと、距離の二乗に比例して増加する。これは壁等からの散乱線のフルエンスが距離によらず一定であるためである。**図 5.3－3** に、^{252}Cf 線源から 75、100、150 及び 250 cm 離れた位置における中性子スペクトルを示す。壁等からの散乱線のスペクトルは、熱領域から MeV 領域までの広いエネルギー領域にわたっており、熱中性子の割合が大きい。このため、どちらの線源の場合でもフルエンス平均エネルギーは 10%程度、線量当量平均エネルギーは 10～11%程度下がる。

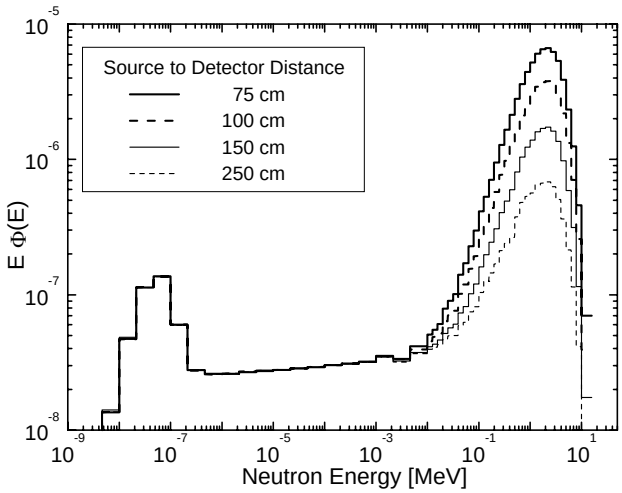


図 5.3－3　放射線標準施設棟第４照射室における中性子スペクトルの距離による変化
（中性子線源： ^{252}Cf)

５.３.４　まとめ

以上をまとめると、FRS 第４照射室における散乱線の特性として、以下の点が明らかになった。

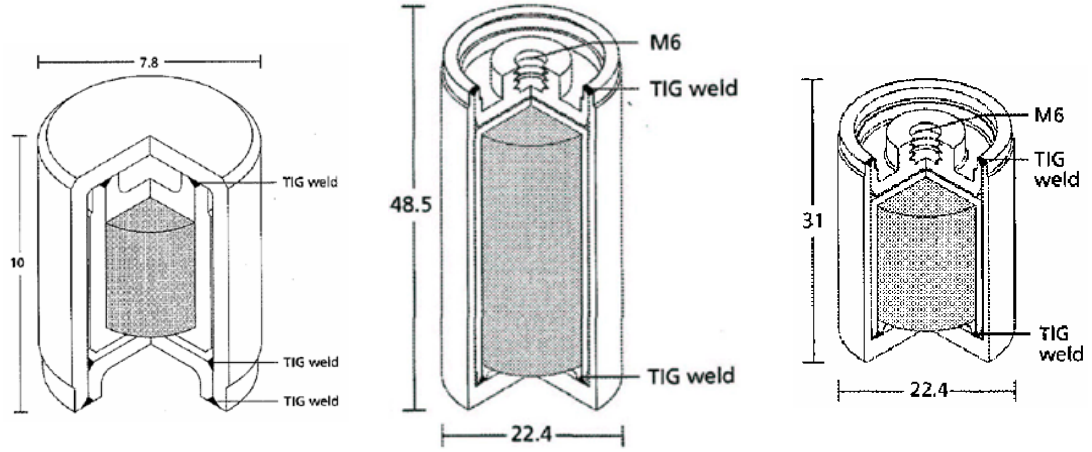
1)　線源との距離が 120 cm までは、線源ホルダ及びスタンドによる寄与が支配的であるが、これ以上の距離になると壁、床、天井からの散乱の寄与が支配的になる。空気の散乱による影響はわずかである。

2)　線源ホルダ及びスタンドによる散乱線の寄与割合はどの距離でも同じである。室内空気による散乱線の寄与割合は距離にほぼ比例して増える。壁、床、天井による散乱線の量は距離によらずほぼ一定である。

3)　線源ホルダ、スタンド及び空気の散乱線のスペクトルは、数 keV 以上が支配的であるのに対し、壁等からの散乱線は熱中性子領域が支配的である。

５.４　実例２　核燃料サイクル開発機構計測機器校正施設の場合

サイクル機構東海事業所の計測機器校正施設では標準中性子線源として ^{252}Cf(999MBq)及び ^{241}Am-Be(111GBq)を用いた中性子校正場を整備している。両線源は、AEA Technology QSA (旧 Amersham)製であり、ステンレス鋼の二重構造からなる X1(外形 7.8mmϕ×10mm)及び X4(外形 22.4mmϕ×48.5mm)カプセルにそれぞれ ^{252}Cf、^{241}Am-Be が封入されている。**図 5.4-1** に断面図を示す。円筒部分のステンレス鋼の厚さは、X1 カプセルが 1.6mm、X4 カプセルが 2.4mm である。



a) X1 カプセル（^{252}Cf）　b) X4 カプセル（^{241}Am-Be）　参考) X3 カプセル（^{241}Am-Be）

図 5.4-1 線源カプセルの断面図（メーカカタログ [7]より抜粋）

これらの線源は通常、照射室の地下 4m に設置された格納容器内に格納されており、使用時には圧縮空気で線源を案内管に通して床上 126cm まで射出し、案内管上端に取り付けられた電磁石を用いて保持する構造となっている。このため、X1 及び X4 カプセルは、磁性を有する SUS430 等からなる線源ホルダ内に収納している。また、案内管上端部には電磁石のほか、衝撃を吸収する緩衝部や線源位置センサ、線源の視認用窓等を有しており、複雑な構造となっている。一方、照射室は、床面積 12.5m×13m、天井高 5.3m であり、さらに部屋中央に深さ 2.0m のピットを配し、床面はグレーチング構造である。壁二面と天井は厚さ 10cm の軽量コンクリート製であり、室内散乱線を極力低減させる構造となっている。これらの構造体との相互作用によって生じる散乱線の影響をモンテカルロ計算コード MCNP-4B [8]（ENDF/B-Ⅵ）を用いて評価した例について紹介する。

計算するに当たり、線源カプセル、線源ホルダ、電磁石を含む案内管等、線源周辺の構造物について、製作図面等を参考に可能な限り忠実にモデル化した。また、室内構造についても、床、壁、天井に加えて柱、梁、窓といった主要な構造はすべて含めた。照射室の概略図と計算体系を**図 5.4-2**、^{252}Cf 線源の周辺構造物の外観と計算体系を**図 5.4-3** に示す。

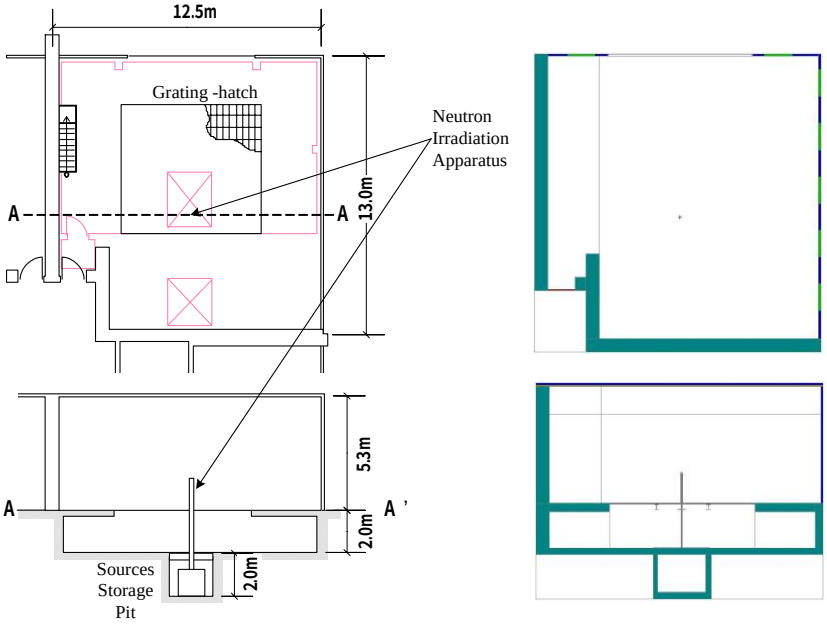


図 5.4-2 中性子照射室(照射室(B))の概略図と計算体系

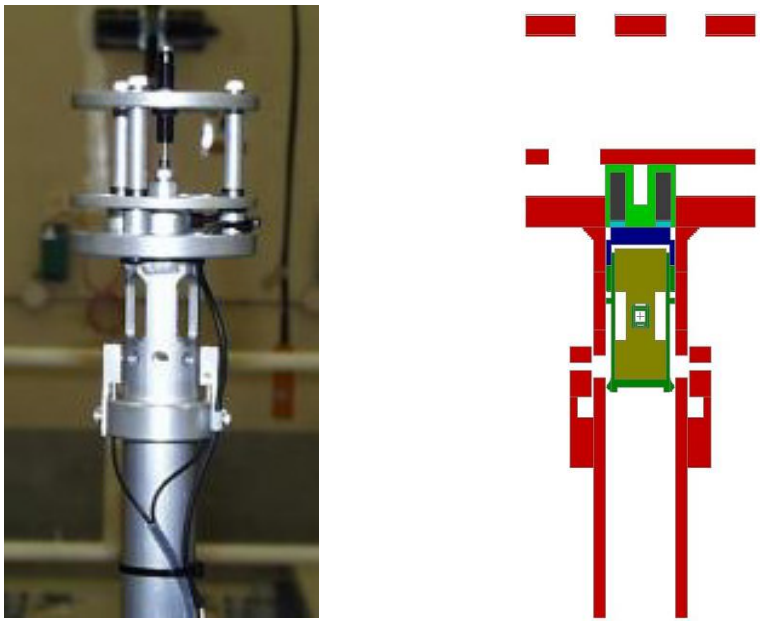


図 5.4-3 線源案内管の外観と計算体系（^{252}Cf 線源の場合）

５.４.１ 線源散乱

（１） 線源周辺の構造体による中性子フルエンス角度分布の変化

線源散乱による中性子フルエンス角度分布の変化を評価するため、^{252}Cf 線源について、線源のみ、線源を線源ホルダに収納した状態、及び実際の線源の使用条件である照射装置を用いた状態のそれぞれについて計算を行った [9]。^{252}Cf 線源を中心とした半径 1m の球面検出器を立体角が等しくなる計 16 個のセグメントに分割した場合のフルエンス角度分布を**図 5.4-4** に示す。縦軸は等

方点線源によるフルエンスに対する比で表しており、非等方性補正係数 $F_S(\theta)$に相当する。また、図では天頂方向を 0°として示しており、線源中心と同一水平面上のθ=90°の方向に、中性子測定器を配置する。線源周辺の構造物の影響によって、上下方向（θ=0°、180°）の中性子フルエンスが減少、被校正器を設置するθ=90°の方向における中性子フルエンスが増加しており、周辺構造物の量が増すにつれその傾向が顕著になっていることが分かる。

また、**図 5.4-5** 及び**図 5.4-6** に、MCNP による計算の結果を実験により検証した結果の一例を示す。**図 5.4-5** は、^{252}Cf(999MBq)線源と同様の線源カプセル構造を持つ 3.7MBq の ^{252}Cf 線源を SUS 製線源ホルダに収納し、それを回転させることによって、フルエンスの相対強度がどのように変化するかをボナー球測定器で測定した結果である。ここで、測定値はθ=90°の計算値で規格化している。上下方向でフルエンスが減少し、90°方向でフルエンスが逆に増加している傾向が、計算と実験により再現されている。一方、**図 5.4-6** は、**図 5.4-3** に示した線源案内管における水平方向のフルエンスの角度分布を測定した結果である。計算では、線源から 1 m の位置に点検出器を配置し、一方、実験では、反跳陽子を検出するタイプの中性子測定器（EJ-410）などを用いて、案内管そのものを回転させることによってフルエンスの相対強度を測定した。測定値は、α=0°における計算値で規格化している。肉厚 5mm の案内管の窓構造によって、α=45°方向でフルエンスが増加している。これらについても、計算値は実験によって良く再現されていることが分かる。

なお、メーカから市販されている標準線源について、ホルダ等の周辺構造のない状態での非等方性を計算した結果を、文献値（いずれもロングカウンタによる測定値）と比較したものを**表 5.4-1** に示す。^{252}Cf 等で一般的な X1 カプセルの場合、本計算から得られた非等方性補正係数 $F_S(\theta=90°)$は 1.012±0.06%であり、文献値と一致した。また、^{241}Am-Be によく使用される X3 及び X4 カプセルのうち、X3 カプセルについては、計算値（1.030±0.06%）は文献値と一致しているが、X4 カプセルについては、計算値は文献値をやや下回る値となった。ここで示した計算では、カプセル内部の線源物質をボイド（一様分布線源）として取り扱っているが、カプセル構造のうち直径と高さがほぼ等しい X1 カプセルや X3 カプセルの場合には、中性子と線源物質との散乱は、無視できる（又は散乱による影響が相殺される）のに対し、直径と高さが大きく異なる X4 カプセルの場合には、それが無視し得ないためである可能性がある。^{241}Am-Be のようなα放射体と Be を混合した線源の場合は、Be による散乱を計算シミュレーションの中で考慮する必要があると思われる。

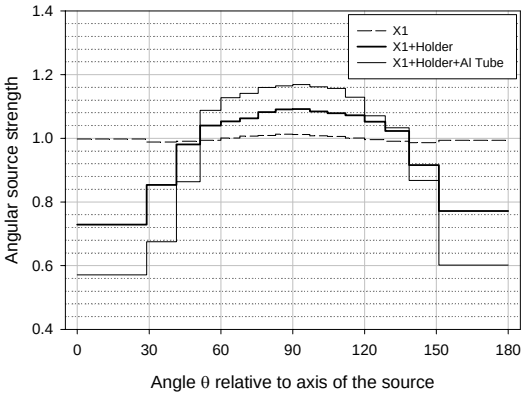


図 5.4-4 ^{252}Cf 線源におけるフルエンスの角度分布

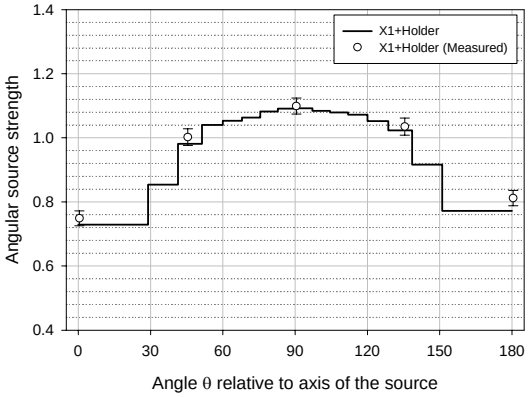
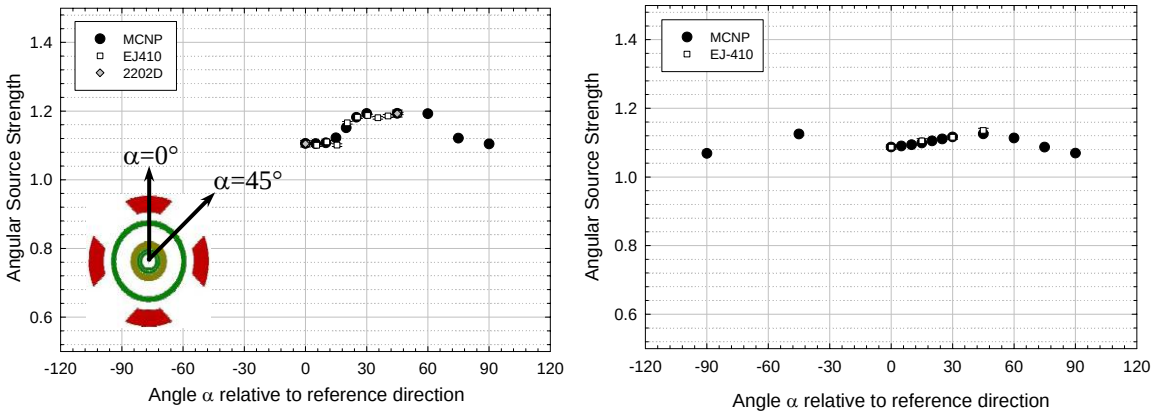


図 5.4-5 線源ホルダ収納時のフルエンスの角度分布（計算値と測定値の比較）



a) ^{252}Cf　　b) ^{241}Am-Be

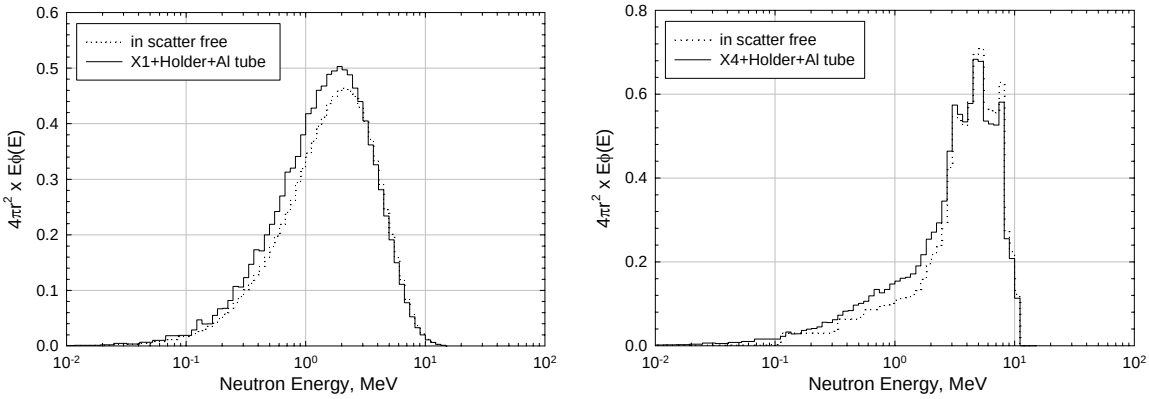
図 5.4-6 水平方向のフルエンス角度分布

表 5.4-1　中性子線源の非等方性補正係数の計算値の比較

中性子線源	$F_S(\theta=90°)$	
	計算値	文献値
^{252}Cf (X1 Capsule)	1.012	1.012 [10)]
^{241}Am-Be (X3 Capsule)	1.030	1.030 [10)]
^{241}Am-Be (X4 Capsule)	1.025	1.04 [11)]

（2） 中性子スペクトルの変化

前述した線源散乱は、放出される中性子スペクトルにも影響を与える。**図 5.4-7** に照射装置を用いたときの ^{252}Cf 線源及び ^{241}Am-Be 線源から距離 100cm における θ=90°での中性子スペクトルを示す。図には散乱なしの条件での線源スペクトル(ISO 8529-1)[1)]も示した。図からも明らかなように、線源スペクトルに比べると本校正場における中性子スペクトルは、周辺構造との散乱によるエネルギーの低い成分が加わるため、全体的に低エネルギー側へわずかにシフトしている。**表 5.4-2** に計算によって求められた ^{252}Cf 及び ^{241}Am-Be 線源の $F_S(\theta)$、平均エネルギー及び線量当量換算係数を示す。ICRP Publication 74 [12)]の中性子フルエンス－周辺線量当量換算係数 $h^*(10)$から求めたスペクトル荷重平均線量当量換算係数の変化は、ISO8529-3 [13)]に示されるデフォルト値に対して 1.6%及び 0.5%と小さな値であった。これは、デフォルト値の不確かさが ^{252}Cf で 1%、^{241}Am-Be で 4%であることから考えても、大きな変化ではない。



a) ^{252}Cf　　b) ^{241}Am-Be

図 5.4-7 照射装置（案内管）による中性子スペクトルの変化

表 5.4-2　^{252}Cf 及び ^{241}Am-Be 線源の $F_S(\theta)$、平均エネルギー及び線量当量換算係数

	^{252}Cf			^{241}Am-Be		
	計算値	ISO8529	偏差	計算値	ISO8529	偏差
非等方性補正係数 $F_s(\theta)$	1.113	－	－	1.087	－	－
フルエンス平均エネルギーE_ϕ、(MeV)	1.96	2.13	-7.5%	3.82	4.16	-8.2%
線量当量平均エネルギーE_H、(MeV)	2.11	2.3	-8.3%	4.02	4.4	-8.6%
線量当量換算係数 $h^*(10)$ (pSv･cm^2)	379	385	-1.6%	389	391	-0.5%

（３） 非等方性補正係数 $F_S(\theta)$の適用例

サイクル機構では、機構内の 3 箇所の校正場（東海、もんじゅ及び大洗）で同一のレムカウンタに対する相互比較校正を実施 [14]し、各事業所の中性子校正場について計算によってそれぞれ求めた $F_S(\theta)$による補正の効果を調べた。線源には、各校正室が保有する ^{241}Am-Be（公称放射能 37GBq、東海のみ 111GBq も併せて使用）を使用し、各校正場ともに多項式フィット法による室内散乱線補正を行った。**図 5.4-8** に各校正場で得られたレムカウンタのフルエンスレスポンスを示す。$F_S(\theta)$による補正を行わない場合、校正場ごとに若干のばらつきが見られるが、補正を行うことで不確かさの範囲内で一致する結果が得られた。

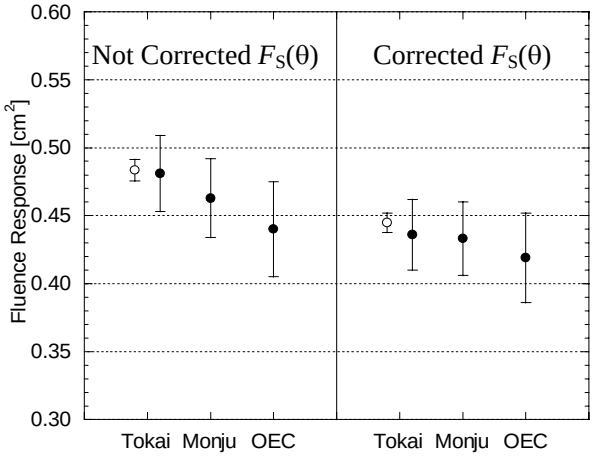


図 5.4-8 各校正場で得られたフルエンスレスポンスの比較
（白丸は 111GBq による結果。誤差棒は拡張不確かさ(k=2)で示し、線源の中性子放出率及びフィッティング誤差から算出した。）

5.4.2 空気散乱

前述のとおり、線源散乱によって放出される中性子スペクトルはわずかに変化しているため、それによる空気散乱への影響についても ISO 推奨値とは異なる変化が生じる可能性がある。そこで ^{252}Cf 線源を用いたときの空気散乱によるフルエンスの正味増加量（内散乱－外散乱）と減衰量（外散乱）を、MCNP（点検出器）により計算した。

計算結果を**図 5.4-9** 及び**図 5.4-10** に示す。減衰量には、ISO8529-2 Annex C [2)]に示される ^{252}Cf の線減弱係数から導き出される結果も併せて示す。空気散乱による正味増加量は、線源-検出器間距離（SDD）が離れるほど比例して増加している。また、空気による内散乱を含めない減衰量から求められた ^{252}Cf の線減弱係数は 1064×10^{-7}cm^{-1} で、ISO のデフォルト値に対して 0.9%の差である。しかし、これはデフォルト値の不確かさ 1.5%の範囲内でしかない

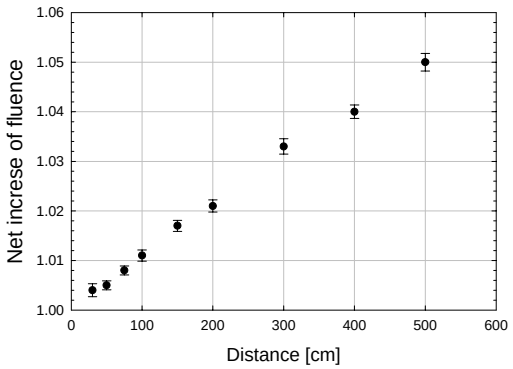


図 5.4-9 空気散乱による中性子フルエンスの正味増量値の変化

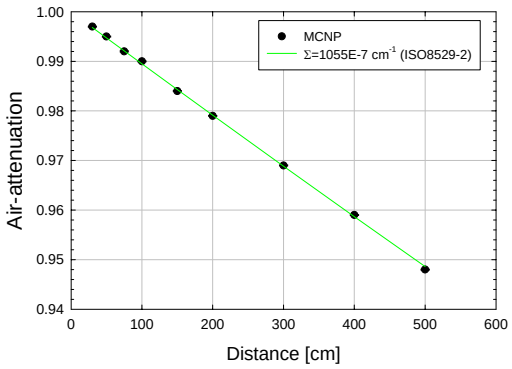


図 5.4-10 空気散乱による中性子フルエンスの減衰量の変化

5.4.3 室内散乱

室内体系をすべて入れた条件で SDD を変えたときの ^{252}Cf の中性子スペクトルの変化を**図 5.4-11**

に示す。図には、自由空間中における SDD=100cm のスペクトルも示す。また、ボナー球スペクトロメータで測定した結果との比較を**図 5.4-12** に示す。SDD の増加とともに速中性子成分は、逆二乗に従って減少するのに対し、低エネルギー成分は距離にほぼ依存せずに一定である。また、計算値と測定値はよく一致している。

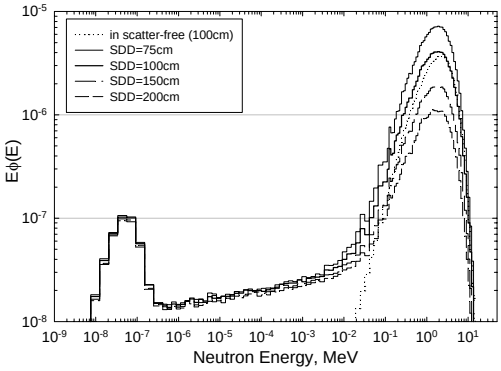


図 5.4-11 距離ごとの中性子スペクトルの変化

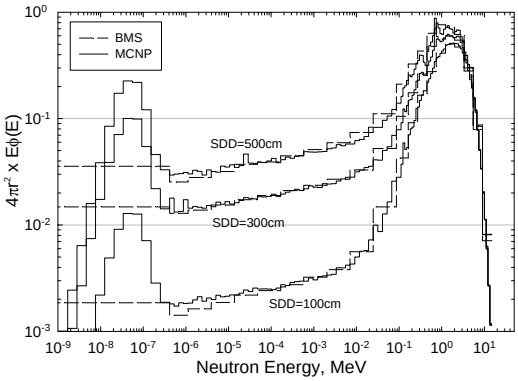


図 5.4-12 ボナー球スペクトロメータによる測定値との比較

５.４.４ まとめ

核燃料サイクル開発機構計測機器校正施設の中性子校正場について計算シミュレーションを行い、得られた知見について以下に示す。

1) 線源周辺の構造体形状が複雑になるほどフルエンスの角度分布が複雑となることから、非等方性の評価が重要になる。
2) モンテカルロ計算によって得られた非等方性補正係数の計算値と測定値とはよく一致し、計算シミュレーションの有効性が確認された。ただし、精度の高い評価を要求する場合には、線源本体の構造（カプセル、線源物質の組成、分布等）が無視できない可能性がある。
3) 中性子線量当量率サーベイメータの校正結果を他の校正場の結果と比較したところ、各校正場の非等方性補正係数を適用することにより結果の一致がよくなることから、非等方性補正係数の評価及び適用が重要であることが分かった。
4) 計算シミュレーションを用いて非等方性補正係数等の評価を行う場合、そこに含まれる不確かさの評価を行う方法について、検討が必要である。

【参考文献】

1） ISO: *Reference neutron radiations - part 1: Characteristics and methods of production*. ISO 8529-1 (Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization) (2001).

2） ISO: *Reference neutron radiations - part 2: Calibration fundamentals of radiation protection devices related to the basic quantities characterizing the radiation field*. ISO 8529-2. (Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization) (2000).

3） Briesmeister J.F. (Ed.): *MCNP - A General Monte Carlo Code for N-Particle Transport code, Version 4C*. LA-13709-M, (New Mexico, USA: Los Alamos National Laboratory) (2000).

4） Yoshizawa, M., *et al*.: *Present Status of Calibration Facility of JAERI -Facility of Radiation Standards*, Full papers of IRPA-11, 3b46, CD-ROM (2004).

5） Briesmeister J.F. (Ed.): *MCNP - A General Monte Carlo Code for N-Particle Transport code, Version 4A*. LA-12625-M, (New Mexico, USA: Los Alamos National Laboratory) (1993).

6） Dumais, J. R.，吉澤道夫，山口恭弘 : ^{252}Cf 及び ^{241}Am-Be 中性子源を用いた速中性子校正場の散乱線評価, JAERI-Tech 98-005，日本原子力研究所 (1998).

7） AEA Technology QSA: Radiation sources for industrial gauging and analytical instrumentation，メーカカタログ.

8） Briesmeister J.F. (Ed.): *MCNP - A General Monte Carlo Code for N-Particle Transport code, Version 4B*. LA-12625-M, (New Mexico, USA: Los Alamos National Laboratory) (1997).

9） 吉田忠義，辻村憲雄：標準中性子線源の周辺構造による中性子フルエンスの非等方性，第 41 回理工学における同位元素･放射線研究発表会要旨集，2a-Ⅱ-3 (2004).

10） Eisenhauer, C. M., *et al*.: *Calibration techniques for neutron personal dosimetry*, Radiat. Prot. Dosim., **10**(1/4), 43-57 (1985).

11） Kim, B.H., *et al*.: *Characteristics of the KAERI neutron reference fields for the calibration of neutron monitoring instruments*, J. Korean Association for Rad. Prot., **26**(3), 243-248 (2001).

12） ICRP: *Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation*. ICRP Publication 74. Annals of the ICRP, 27(4) (1997).

13） ISO: *Reference Neutron Radiations – Part 3: Calibration of Area and Personal Dosimeters and Determination of Response as a Function of Energy and Angle of Incidence*、 ISO 8529-3、 (Geneva、Switzerland: International Organization for Standardization) (1998).

14） 吉田忠義，辻村憲雄，他 : 異なる中性子校正場におけるレムカウンタの校正結果の比較，日本保健物理学会第 38 回研究発表会要旨集，A-15 (2004). 及び
核燃料サイクル開発機構公開資料 : 平成 15 年度放射線安全部年報, TN8440 2004-011, pp.73-74 (2004)

６．中性子線量計の校正体系

６.１　ユーザにおける実用的な中性子校正の現状

６.１.１　原子力発電所における電子式個人線量計の中性子校正

（１） はじめに

原子力発電所では、ADC プラスチック(CR-39)を中性子検出用素子として組み込んだガラスバッジを中性子用個人線量計として主に使用しているが、近年、高性能、高機能の中性子用電子式個人線量計が開発され、原子力発電所でも使用が拡大しつつある。日本原子力発電株式会社（日本原電）では東海・東海第二発電所構内の校正施設で電子式個人線量計専用の校正装置を用いて大量の個人線量計の校正を行っている。

（２） 原子力発電所の放射線環境

国内の原子力発電所では､長年にわたる運転経験と放射線モニタリングによるデータの蓄積の結果、発電所内に存在する放射線の種類やその強さは場所ごとに十分に把握されている。

原子力発電所での中性子は、主として原子燃料中の核分裂性物質が核分裂する際に放出されるものであり、したがって、中性子の大部分は原子炉周辺に存在している※1。

中性子の発生源である原子燃料は原子炉圧力容器内に閉じ込められ、原子炉圧力容器は原子炉格納容器内に設置されている。原子炉格納容器内は､運転中は人の立入りが大幅に制限されており※2、そのため、原子力発電所では中性子による被ばくはほとんどない。また、原子力発電所ではγ線の線量当量率の高いエリアや機器は施錠管理や線量当量率表示を積極的に行うことで人の接近を防止しており、運転中のγ線による被ばくも少ない。

※1　沸騰水型原子力発電所（BWR）の場合は、原子炉内で生成された ^{17}N が主蒸気に移行するため、タービン側にもわずかであるが中性子が存在する。

※2　BWR では､運転中原子炉格納容器内は窒素を封入するため人の立入りはできない。一方、加圧水型原子力発電所（PWR）では、原子炉格納容器は厳重に施錠管理しており、許可された者のみ立入りが可能など厳しく制限している。

（３） 日本原電で使用する中性子用電子式個人線量計

原子力発電所では、中性子個人線量計として固体飛跡線量計が広く用いられている。一方、電子式個人線量計については、高性能、高機能で信頼性も高い線量計が国内外で開発され、2002 年には JIS 規格が制定され（3.1 参照）、着実に実用化が進んでいる。

日本原電では**図 6.1－1** に示すように､JIS Z4312:2002 に基づくγ線専用の電子式個人線量計（カード型 EPD）とγ線・β線及び中性子用の電子式個人線量計（多機能型 EPD）２種類を使用している。中性子は運転中の極めて限られた場所にのみ存在するため、このような場所に立ち入る際に多機能型線量計を着用することとしている。電子式線量計での測定結果は、平成 12 年度より評価線量として国等への報告に使用している。

日本原電で使用している中性子用電子式個人線量計は、富士電機システムズ株式会社製で、低速中性子センサと高速中性子センサの２種類のセンサを採用している。低速中性子センサは p 型 Si 基板面に ^{10}B を蒸着したもので、$^{10}B(n, \alpha)^{7}Li$ 反応で生じるα線を検知するものである。高速中性子センサは、p 型 Si 基板面の直前にポリエチレンフィルムを配置し、反跳陽子を検知するもの

である。**図 6.1－2** に各センサの概念図を、**図 6.1－3** に ^{252}Cf ポリエチレン減速場で照射した場合の各センサの出力波高スペクトルの一例を示す。γ線との信号を弁別するために、各センサには Cut-off level が設定され、この位置を越えた信号のみが計数値として利用される。

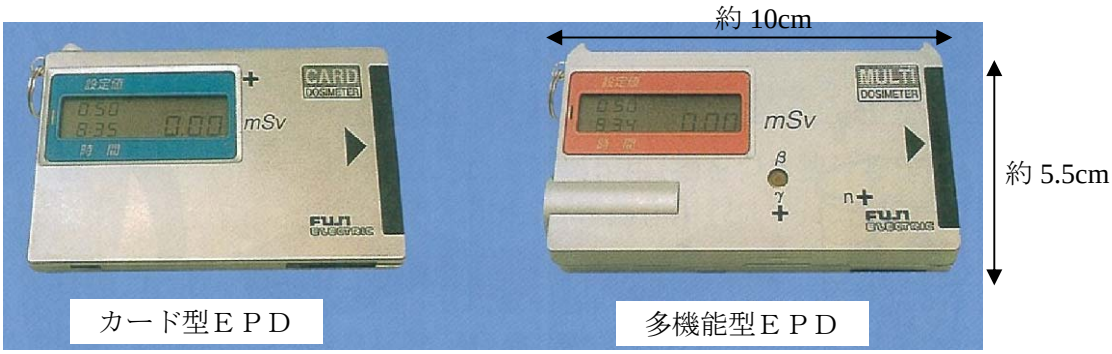
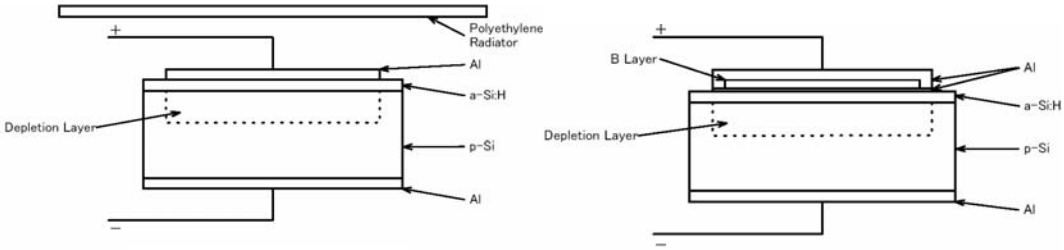


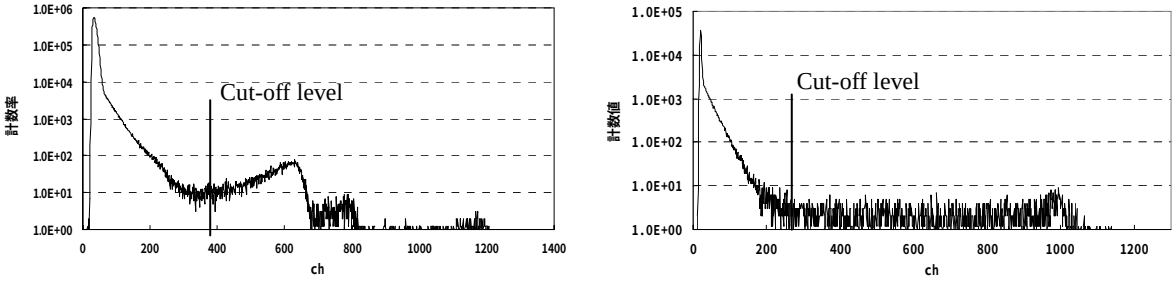
図 6.1－1　日本原電で使用している電子式個人線量計（EPD）



Fast neutron sensor
(1MeV < E_n)

Slow neutron sensor
(thermal < E_n < 1MeV)

図 6.1－2　中性子センサの概念図



Slow neutron sensor　　Fast neutron sensor

図 6.1－3　中性子センサの出力波高図 (^{252}Cf ポリエチレン減速場)

高速中性子センサ及び低速中性子センサで得られる計数値は、下式によって線量当量に変換される。

$$Ｈｔ ＝ Ｈｆ ＋ Ｈｓ ＝ ａ･Ｃｆ×(換算定数)ｆ ＋ ｂ･Ｃｓ×(換算定数)ｓ$$

ここで、Ｈｔは中性子の 1cm 線量当量、Ｈｆ、Ｈｓはそれぞれ高速中性子線量当量、熱中性子線量当量であり、Cf、Ｃｓはそれぞれ高速中性子センサ、低速中性子センサでの計数値である。また、ａ、ｂはそれぞれ ^{252}Cf、黒鉛減速場における中性子感度から与えられる係数であり、(換算定数)ｆ、(換算定数)ｓは、線量当量へ換算するための定数であり、いわゆる校正定数はこの（換算定数）ｆ、（換算定数）ｓにそれぞれ含まれている。Ｃｆ、Ｃｓ及び(換算定数)ｆ、(換算定数)ｓは、（財）放射線計測協会に依頼して原研放射線標準施設棟(FRS)の ^{252}Cf、黒鉛減速場で基準照射試験を行い、決定している。

（４） 日本原電での中性子用電子式個人線量計の校正

個人線量計の校正方法は、JIS Z4511:1999 に記載されているが、本 JIS は光子エネルギー10keV から 3MeV の照射線量測定器及び線量当量測定器について規定したものである。本 JIS では、同一形式、同一仕様の大量の個人線量計を迅速に校正するために、照射線源と個人線量計の配置関係、散乱の影響などの幾何学的条件を一定にした特定の照射装置による方法、いわゆる置換法による実用校正も記述されており、この方法はγ線だけでなく中性子にも適用可能と考えられる。日本原電では、この考え方に基づき富士電機システムズ（株）が開発した ^{252}Cf を校正線源とした専用の校正装置を東海・東海第二発電所の放射線計測器校正施設内に設置した。**図 6.1－4** に校正装置の概観及び付属機構の概要を示す。

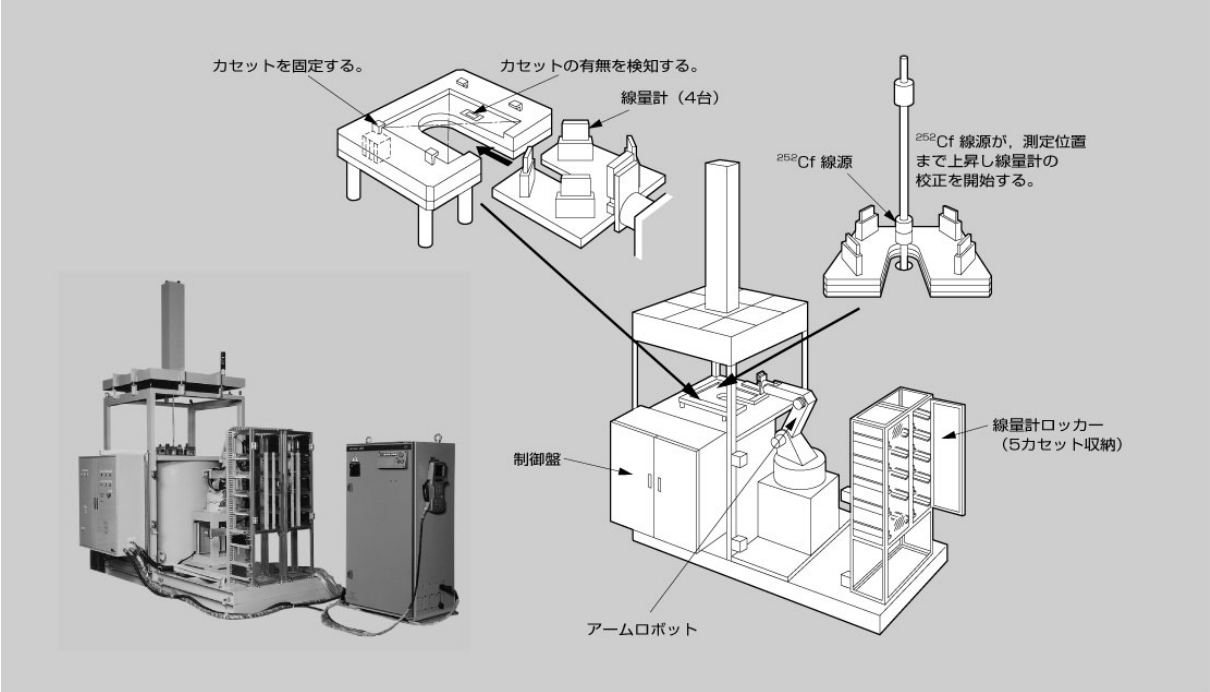


図 6.1－4　中性子専用校正装置及び付属機構の概要

幾何学的条件を固定するためのカセットの所定の位置に実用基準測定器あるいは個々の個人線

量計を配置し、規定の時間照射し、両者の指示値を比較し、校正を行う。校正は原則として全数年１回行っている。

図 6.1－5 に日本原電での校正体系の考え方を示す。実用基準測定器は、実際の実用測定に供している線量計から選定し、専門の校正機関（放射線計測協会）で基準校正した特定の線量計である。なお、実用基準測定器として１台を選定すればよいが、不測の事態に備えて３台選定している。

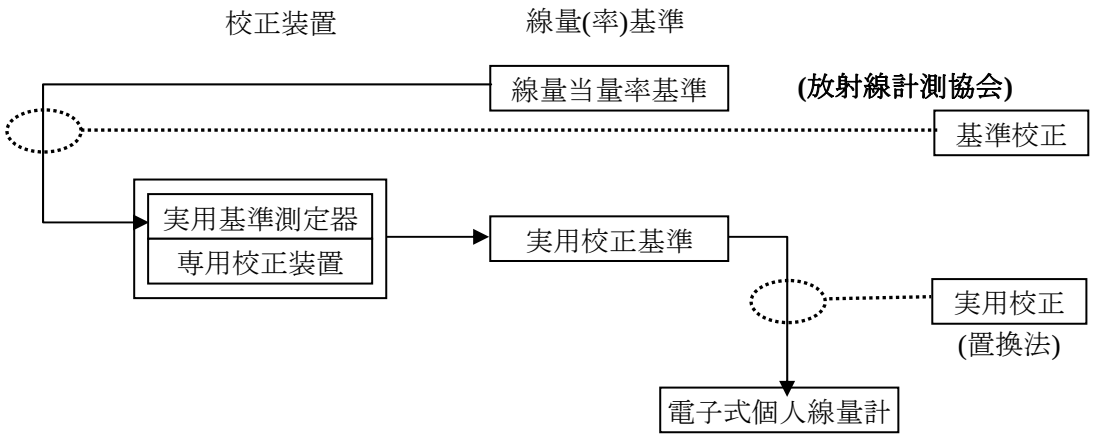


図 6.1－5　日本原電での中性子校正の体系

（５） 中性子用個人線量計の校正方法の標準化について

３.１に記述されているように、中性子線量当量（率）計の校正方法に関する JIS 原案が国際規格(ISO8529-1~3)を基に作成されているが、本 JIS は校正事業者など専門の機関が行う校正方法（6.2.3 で示す「基準校正」）の規格と考えるべきである。原子力発電所のように大量の個人線量計を迅速に校正する必要のある場合には、日本原電で実施しているような専用の中性子校正装置による「実用基準測定器を用いた置換法による実用校正」が最も現実的であり、有効な手段である。今後、ユーザ自身が行う実用校正に関する規格が制定されることを期待したい。

６.１.２　　個人線量測定サービス機関における個人線量計の中性子校正

（１） はじめに

現在、個人線量測定サービス機関が中性子を測定対象として提供している個人線量計は、主に ADC プラスチック(CR-39)を検出素子として利用した中性子用固体飛跡線量計である。この個人線量計は 20 年ほど前から実用化され、中性子用フィルムバッジに替わるものとして徐々に利用されてきたが、平成 13 年の放射線防護関連法令改正と時期を同じくして飛躍的に利用度が増した。この個人線量計は、中性子との相互作用で発生した反跳陽子やα粒子等の荷電粒子の飛跡を ADC プラスチックに記録し、アルカリ溶液によるエッチング処理で拡大した後にその飛跡(エッチピット)密度等を光学顕微鏡で計測することで入射した中性子線量を求める。したがって、中性子線量測定の信頼性を確立するためには、使用する検出素子の中性子感度を把握すること(検出素子の感度校正)はもとより、化学処理(エッチング)の安定性、光学顕微鏡及び画像解析の安定性(読取装置としての校正) 、並びに適正な線量算出アルゴリズムなどが必要となる。中性子用固体飛跡線量

計として満たすべき基本性能は、ISO/DIS 21909:2002 に準拠した新たな JIS 規格が現在審議中であるが、ここでは主に中性子に対する検出素子の感度校正及び線量算出アルゴリズムの構築等の観点から、現時点における測定サービス機関の対応について記述する。

（２） 中性子用固体飛跡線量計の概要

中性子用固体飛跡線量計の構成例として、株式会社千代田テクノル(CTC)が提供しているワイドレンジニュービット(WNP)の構造を**図 6.1－6** に示す。この個人線量計は、入射した中性子との相互作用によって荷電粒子を発生させるために窒化ボロンと高密度ポリエチレンの２種類のコンバータを備えており、これらから発生したα粒子及び反跳陽子の飛跡密度などから、熱中性子から速中性子までの広いエネルギー範囲の中性子の線量測定を可能にしている。

WNP では、各コンバータ位置の検出素子から計測したエッチピット密度(荷電粒子の飛跡密度)に基づき、次式を基本として中性子の個人線量当量($H_p(10)$)を算出する。

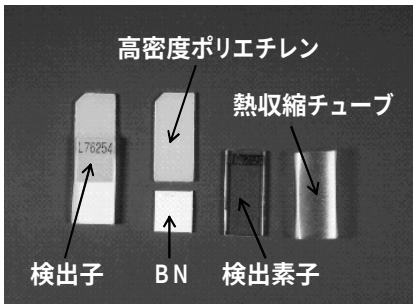


図 6.1－6　ワイドニュービットの構造

$$H_p(10) = P\phi \times Cp + B\phi \times Cb$$

$P\phi$　　:高密度ポリエチレン位置のエッチピット密度

$B\phi$　　:BN 位置のエッチピット密度

Cp、 Cb : 換算係数(constant)

なお、上式における Cp、 Cb の各換算係数は、検出素子自身の荷電粒子検出感度をはじめ、各コンバータの荷電粒子発生効率、化学エッチングにおけるエッチピット生成率、計測システムにおけるエッチピット計数効率及び中性子フルエンスから線量当量への換算係数などを複合したものとなっている。

したがって、この個人線量計を用いて中性子線量を求めるためには、検出素子自身の感度(中性子との相互作用で生じる荷電粒子に対する感度)をはじめ、コンバータからの荷電粒子発生率、化学エッチングによるエッチピット生成率、光学顕微鏡(及び画像解析)によるエッチピット計数効率など、種々の条件を適切に管理することが必要となる。

（３） 中性子用固体飛跡線量計の校正

中性子用固体飛跡線量計における校正は、単に基準とする中性子に対する応答確認(校正定数の設定)にとどまらず、各処理工程等における効率の設定・確認等多岐にわたる。基本的に、コンバータからの荷電粒子発生率、化学エッチングによるエッチピット生成率、光学顕微鏡(及び画像解析)によるエッチピット計数効率は、中性子用固体飛跡線量計の設計・製造段階における中性子照射試験及びシミュレーションなどにより確認して適切な補正係数等を設定し、これらに基づき線量算出アルゴリズムの各換算係数を決定する。

この段階における中性子照射試験では、熱中性子をはじめ、加速器を利用した単色エネルギーの中性子及び ^{252}Cf、^{241}Am-Be 線源による中性子等、各種の中性子を使用する必要がある。CTC では、中性子放出率について校正された ^{241}Am-Be 線源による中性子照射施設（**図 6.1－7** 参照）を

はじめ、（財）放射線計測器協会及び加速器を有する施設において試験を実施している。また、この線量計は個人線量計として使用するため、中性子の照射は線量計をファントム上に設置した状態で行い、ファントムからのアルベド中性子を含めた状態で基本となるデータを取得する。中性子用固体飛跡線量計の基本性能は、主にこれらの照射試験によって確立されることになり、これが中性子用固体飛跡線量計の校正のひとつとなる。

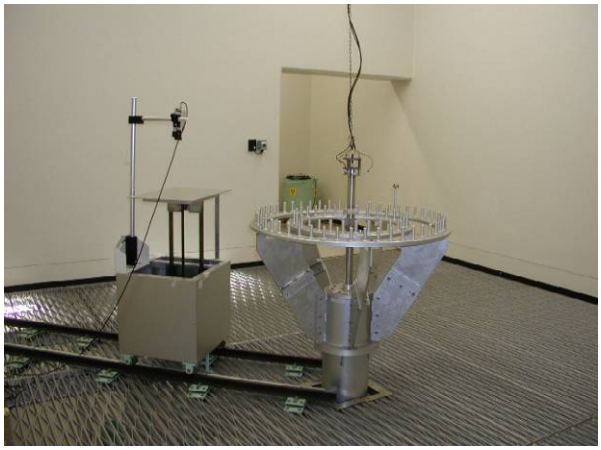


図 6.1－7 ^{241}Am-Be 線源による中性子照射施設

また、中性子用固体飛跡線量計に使用する検出素子は測定毎に新たに製造されたものを使用するため、検出素子の感度は製造単位毎に基準とする中性子を照射して求める必要があり、これが中性子用固体飛跡線量計における感度校正に相当する。これらの検出素子に対する感度は、先に述べた中性子用固体飛跡線量計の設計・製造段階における各中性子照射試験に使用した検出素子感度との相対感度を維持することが重要となり、その製造ロットごとに CTC の ^{241}Am-Be 線源による中性子照射施設における in air 中の照射によって得ている。

なお、測定サービスとして実施している日々の測定時においては、化学エッチング及びエッチピット計測など、各工程における処理効率を安定化させるために使用機器等を管理するとともに、処理ごとの変動を確認(及び補正)する目的のため一定線量の中性子を照射した標準試料を処理工程に含める。これらの標準試料は、検出素子の感度校正と同様に、CTC の ^{241}Am-Be 線源による中性子照射施設における in air 中の照射によって得ている。

（４） 校正に係る注意点と標準化

中性子用固体飛跡線量計は、熱中性子から速中性子までの広いエネルギー範囲にわたる中性子に対する感度を有している。したがって、各エネルギーの中性子に係る基本特性(感度等)を取得する際は、線量としての信頼度を確保するとともに、照射室内における散乱中性子の割合や補正方法等を標準化しておくことが重要となる。これらの照射試験では、ファントムからのアルベド中性子に対する応答も考慮してデータを取得するため、特に注意が必要となる。また、個々の検出素子に係る感度の取得に当たっては、線量としての信頼度を確保するとともに、線量計の設計・製造時に使用した標準検出素子の感度取得時と同じエネルギースペクトル分布の確保が重要となり、常に同じ照射条件が維持できるように注意する。検出素子の感度取得は、常に同一の照射条件(照射量、照射距離、照射治具等)において実施している。

なお、３.１に記述されているように、平成 16 年度に中性子線量当量（率）計の校正方法に関する JIS 原案が国際規格(ISO8529-1~3)を基に新たに作成されており、これが制定されることにより先に述べた標準化が期待される。

（５） 中性子用固体飛跡線量計の測定精度の維持・確認

現在、測定サービスに使用する中性子用固体飛跡線量計は、上述したような中性子照射試験並び

にモンテカルロシミュレーションに基づいてその基本性能を確保している。また、日常の測定サービス業務に係る測定精度の維持・確認については、定期的なブラインド照射試験を実施するなどの方法によって確認し、中性子線量測定に係る測定サービスの信頼度を確保している。参考として、個人線量測定機関協議会で実施した平成 15、16 年度ブラインド照射試験における中性子用固体飛跡線量計の試験結果の例として、CTC の WNP の結果を**図 6.1－8** に示す。

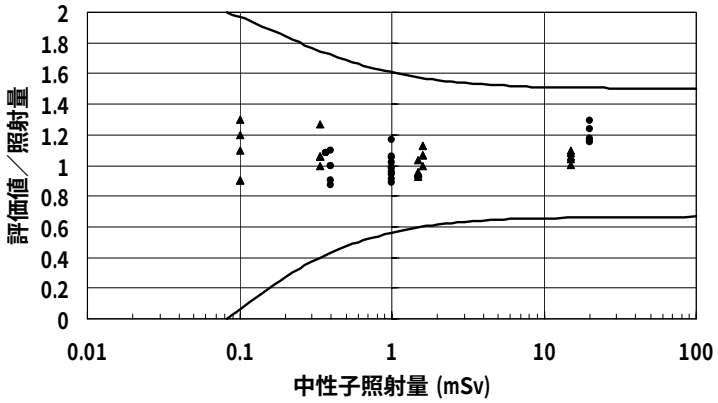


図 6.1－8　中性子用固体飛跡線量計（CTC:WNP）のブラインド照射試験結果

６.２ 校正の体系化

４.で概説したように、ISO8529 シリーズで規定されている中性子線量計の校正は、

- 指定された基準中性子線源（RI 中性子線源や代表的な加速器中性子線源）を用い
- 指定されたファントム、換算係数を使用し、
- 室内散乱線等による寄与を指定された手順で補正する。

であり、校正場（事業者）に依存しない校正の斉一化を目的としたものである。^{252}Cf や ^{241}Am-Be といった RI 中性子線源は、中性子線量計の規格・仕様において、エネルギー特性の規格化点（代表点）における線量当量（率）感度を決定する目的で一般に使用されるものであるため、こうした校正手順の標準化は極めて重要である。同様に、例えば製品開発の段階で測定器のエネルギー特性を評価するため単色中性子場を使用する場合も原則的に ISO8529 シリーズに準拠した手順で校正を行う必要がある。

そうした一方で、

- ISO8529 シリーズで規定される散乱線評価の手法は、校正事業者等の専門機関が行う校正の標準化を目的としたものであり、標準研究所等で適用かつ実証されてきた複雑な手順であり、かつ比較的大きな寸法の照射室での使用を前提としていること、
- JIS Z4511「照射線量測定器、空気カーマ測定器、空気吸収線量測定器及び線量当量測定器の校正方法」で展開されているような、校正事業者だけでなくユーザ自らが実施する校正方法までが包含されていないこと。

といった問題が指摘されている。このため、中性子線量計の校正実務の観点にたったより実用的な校正方法とそれらを包含した校正の体系を考える必要がある。

６.２.１　「線源」による分類

まず、中性子個人線量計の校正定数を決定するにいたるまでのプロセスについて考えてみたい。それに当たって、ICRU Report 66 “Determination of Occupational Dose Equivalent Quantities for

Neutrons”で示されている、中性子線量計の校正フローをここで取り上げる。**図 6.2－1** に示したフロー図は、作業場所において中性子線量当量（率）を評価するまでの過程で必要とされる“情報”や“技術”を整理したものである。図の中で、中性子線量評価において直接的にかかわる情報は、

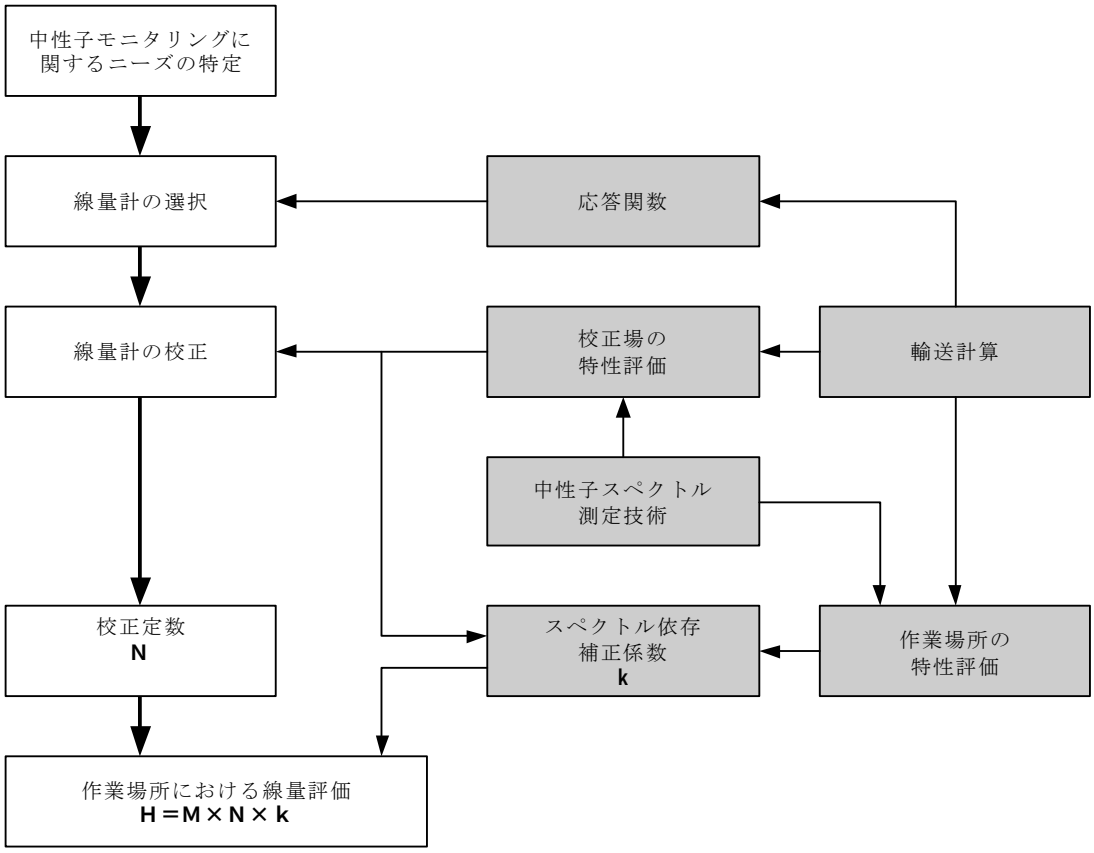
① 校正定数 N

② スペクトル依存補正係数 k

であり、校正定数 N 並びにスペクトル依存補正係数 k の決定において前提条件として必要になる情報が、

③ 応答関数（エネルギー特性等）

である。これらは、「線源」又は「中性子エネルギー」による校正の分類ということができる。このうち、校正定数 N は、エネルギー特性が既に評価された線量計について、その応答関数（レスポンス関数）を代表する特定のエネルギー点で、線量計の読取値/指示値を中性子線量当量（率）に変換する係数であり、その決定に当たっては一般に RI 中性子線源が使用される。一方、スペクトル依存補正係数 k は、校正定数を決定するのに使用した RI 中性子線源の中性子エネルギー分布と作業環境の中性子エネルギー分布とが大きく異なり、一律の校正定数 N では、中性子線量当量（率）の系統的な過大/過少評価をもたらす（例えば、線量計のエネルギー特性が作業環境の中性子エネルギー分布に適切ではない）ような場合にのみ使用される係数であり、一般に校正定数 N に対する無次元の補正係数として取り扱われる。



M：線量計の読取値

図 6.2－1　中性子線量評価のフロー（ICRU Report 66 から）

ISO8529 三部作で展開されている校正方法は、主として図中で言う校正定数 N を決定することを意図したものである。校正定数 N は、中性子線量計による中性子線量評価において最も基本かつトレーサビリティの拠所となるものであり、中性子線量計の長期にわたる使用において周期的な再校正等の実施によって維持されるべき係数と言える。また、スペクトル依存補正係数については、６.３で述べる。

６.２.２　検査項目としての校正の位置付けによる分類

中性子線量計の性能試験やその維持における検査項目としての校正の占める位置付けは大きい。ここでは中性子線量計の性能に係る検査の項目を整理してみた。**図 6.2－2** に、ISO8529-2 の前規格にあたる ISO10647: Procedures for Calibrating and Determining the Response of Neutron-measuring Devices Used for Radiation Protection Purposes から引用した検査項目の分類を示す。

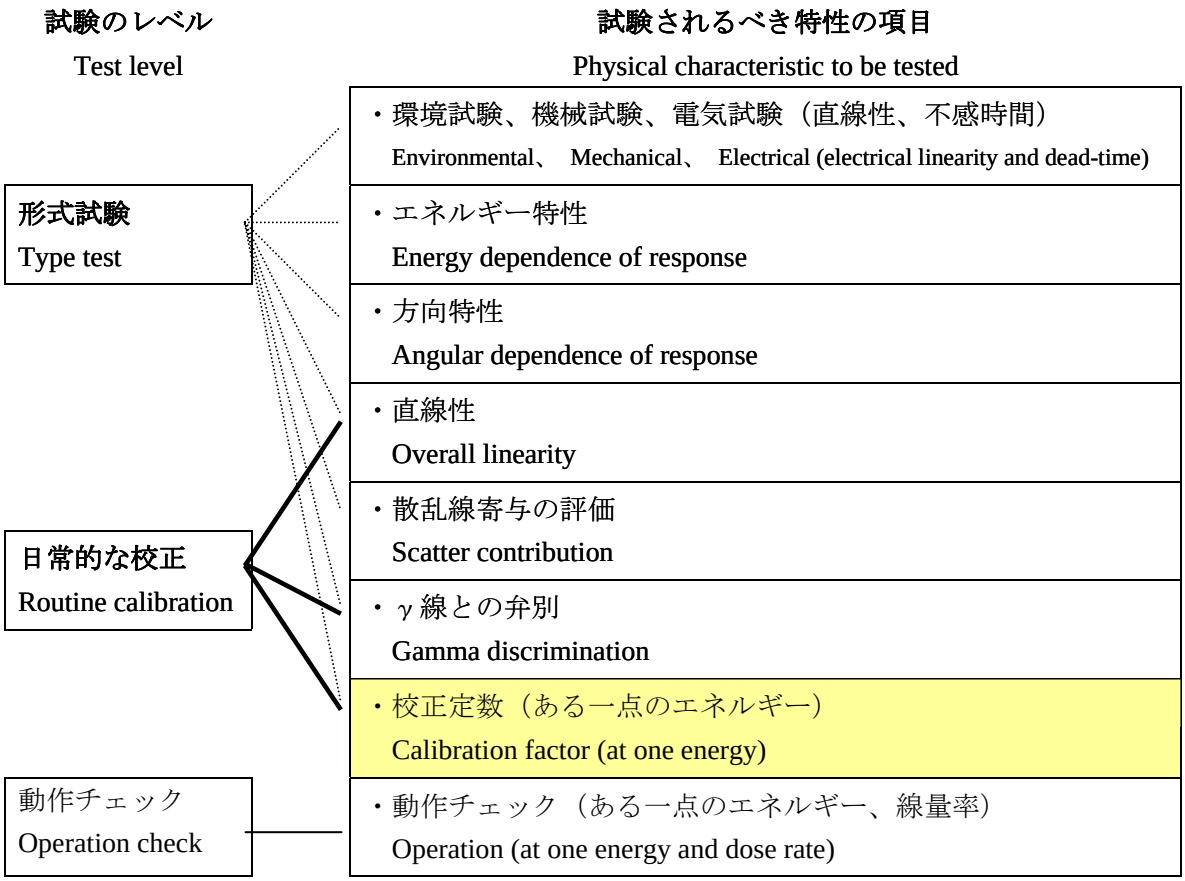


図 6.2－2　中性子線量計の性能に係る検査の項目（ISO10647 から）

図では、試験のレベルとして、「形式試験」、「(日常的な）校正」、「動作チェック」に分類されており、その中の試験項目が整理されている。これらの分類は、それぞれ「製造者が行う試験」、「使用者が行う保守・校正」、「使用者が行う動作確認（例えば使用の都度あるいは校正と校正の間に)」と解釈することができる。また、図では、校正定数の決定が「形式試験」と「(日常的な)校正」の両者に重複しているが、これは前者が「製造者が出荷時に行う校正」、後者は「使用者が

線量計を長期にわたって使用し続ける際に周期的に行う校正（再校正）」という意味に取ることができる。

また、参考までに、使用者による放射線測定器の保守・校正に係る諸活動のフロー図を**図 6.2－3** に紹介する。図は、IEEE N323B : American National Standards for Radiation Protection Instrumentation、 Test and Calibration、 Portable Survey Instruments for Near Background Operation から引用したものである。図 6.2－2 に示した、主として使用者が行う校正（再校正）と動作チェックとがフロー図に示されている。なお、IEEE 323B では、再校正の頻度として 1 年ごとを推奨している。

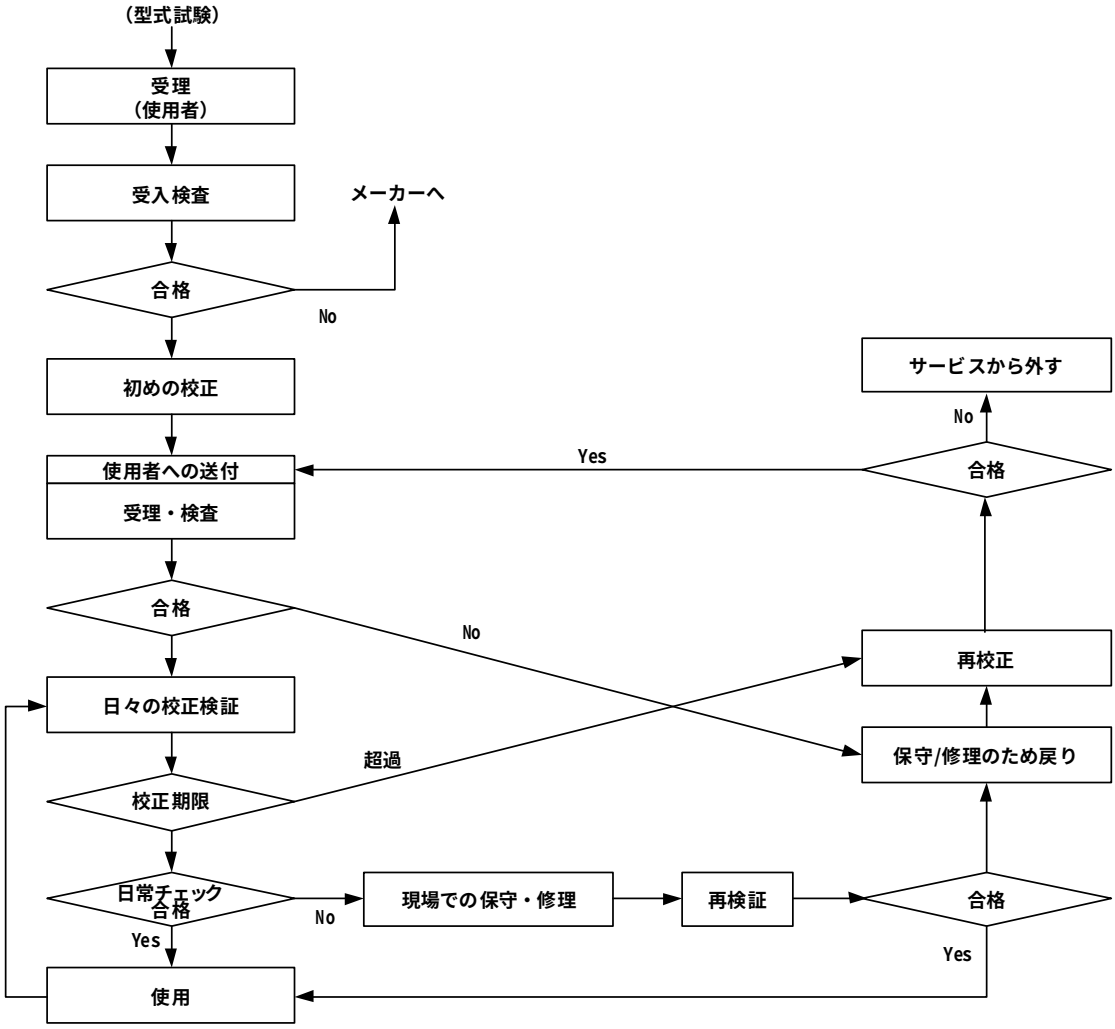


図 6.2－3　使用者による放射線測定器の保守・校正に係る諸活動のフロー図例
（IEEE 323B から）

６.２.３　校正の体系化と実用的な校正

前節において、それぞれ校正の「線源による分類」と「検査項目としての校正の位置付けによる分類」の例を示し、その中で、中性子線量計の校正定数 N を決定し、それを長期にわたって周期的に再校正等を実施し維持することが、校正事業者による校正、使用者による校正を問わず、必須であることを示した。ただし、一旦決定した校正定数 N を維持し続けるための具体的な手順

については、元来それが規格の範囲外である ISO8529 三部作にも、例えば前述した IEEE323B にも何ら言及されていない。そこで、「周期的な再校正によって校正定数 N を決定することを目的とした、実用的かつ具体的な校正の方法」について整理・検討した。

整理・検討に当たって、光子線量計の校正方法に関する日本工業規格である JIS Z4511「照射線量測定器、空気カーマ測定器、空気吸収線量測定器及び線量当量測定器の校正方法」を参考とした。JIS Z4511 では、光子線量当量測定器の校正を次のように体系化している。

・基準校正：線量当量（率）基準が設定された（上位の）場で線量当量実用基準測定器を校正すること。

・実用校正：線量当量（率）基準が設定された（上位の）場で、線量当量実用測定器を校正すること。又は、線量当量実用測定器である被校正器と同一形式の検出部を有する測定器を線量当量（率）基準が設定された（上位の）場で校正し、それとの置換法によって被校正器を校正すること。

ここで、実用基準測定器、実用測定器は、それぞれ実用校正をしようとしている特定の測定器と同一形式の検出部を有する測定器、実用に供する測定器である。

JIS Z4511 で言う「基準校正」は、線量（率）基準の不確かさの水準によって校正結果が変化する場合はあるけれども光子線量計を校正するという方法論において上位の（トレーサビリティ経路で見たとき計量標準に近い）校正の方法と考えることができる。一方、「実用校正」は、上記説明中の下線部に着目すれば、同一形式（あるいは同一モデル）の測定器間における指示値の単純な比較（置換法＝同一条件の照射場に基準となる測定器と被校正器を交互に置き換える）である。

ISO8529 三部作で規定する中性子線量計の校正方法を踏まえつつ、上記 Z4511 の考え方を中性子線量当量測定器の校正にまで展開すると次のような階層化が可能であろう。

① ISO8529 三部作に準拠した校正

指定された中性子線源（RI 中性子線源や代表的な加速器中性子線源等）を使用し、指定されたファントムや換算係数を使用し、室内散乱線等の望まれない成分による寄与を指定された手順で補正する方法。（“基準”校正）

② ①の方法で校正された中性子測定器を基準測定器として使用する校正

①で校正された中性子測定器を実用基準測定器（“基準”実用測定器の方が日本語としては正しいと思われる）として位置付け、線源から同一の配置で実用基準測定器と被校正器を置き（又は置き換え）、実用基準測定器の指示値と被校正器の指示値との直接比較によって被校正器を校正する方法。（“実用”校正）

ここで、①の方法の場合は、使用する中性子線源の中性子放出率又はフルエンス率が国家/国際計量標準にトレーサブルである必要があるが、②の方法については、 線源の中性子放出率は必ずしも必須の条件ではなく、また校正を実施する照射室の寸法等に関する制限はない。ただし、同一条件での照射が可能なよう線源と被校正器の配置は確実に再現できること、基準となる測定器と被測定器は同じ型式であること、さらに基準となる測定器は適切に維持・管理されなければならないことといった必要条件がある。

なお、これら①、②のほかに、例えばチェッキング線源等を使用して校正と校正の間に、測定器の動作が正常であることを保証し確認するために使用者が実施する“動作チェック”があるが、「校正」というよりは「確認」としての意味合いが強い。

６.２.４　実用校正の具体的な例

（１） 中性子線量当量率サーベイメータ

①の方法で校正定数 N が決定された実用測定器を実用基準測定器と位置付け、被校正器と、同一の配置で照射する。このとき、

実用基準測定器の読取値　M

被校正器の読取値　　M’

としたとき、被校正器の校正定数 N’は、

N’＝N×（M’/M）

で得られる。各スケール（あるいは対数目盛りであれば各デカード）について校正を行う場合は、線源強度を変えるか、線源－測定器間距離を変える必要がある。また、この方法の室内散乱線寄与を補正する必要はないので、例えば、比較的寸法が小さく室内散乱線寄与の大きい校正場において、散乱線による寄与を含めた条件で校正を行ってもよい。また、校正定数 N を決定するのに使用した線源と同じ種類の線源である必要もない。

（２） 個人線量計

上記サーベイメータと同じ考え方が適用できる。受動型線量計の場合は、統計的な変動を受けない（受けにくい）適当な線量レベルの１点で校正するのが一般的である。

(a) アルベド式線量計

^{10}B(n, α)又は ^{6}Li(n, α)反応を用いて中性子を検出する、市販の線量計（シリコン半導体又は固体飛跡検出器）については、測定の対象とする中性子スペクトル（又はエネルギー領域）が固定されている場合が一般的であり、そのスペクトルに対応した校正定数が製品出荷時の段階で決定されている。例えば、熱中性子をターゲットにしている線量計についてであれば、①に則った方法（黒鉛パイル減速熱中性子場を使用したファントム上での照射）によって校正定数 N が決定された線量計を基準線量計とし、別の中性子線源を用いて、基準線量計と被校正線量計を同一配置で照射する。ここで、

基準線量計の読取値　　M

被校正線量計の読取値　　M’

であるとき、被校正線量計の校正定数 N’は

N’＝N×（M’/M）

で得られる。ファントムは必ずしも必要ではないが、使用する線源によっては減速材を使用して中性子スペクトルを減速させ熱中性子が混在している条件を作り出す必要がある。

(b) 反跳陽子検出式線量計

水素と中性子との弾性散乱によって生じる反跳陽子を検出する線量計（シリコン半導体又は固体飛跡検出器）の校正には、一般に ^{252}Cf 又は ^{241}Am-Be 線源からの速中性子が使用されている。(a)と同様に、^{252}Cf や ^{241}Am-Be を使用し、①に則った方法で校正定数 N が決定された線量計を“基準”線量計とし、別の中性子線源を用いて、基準線量計と被校正線量計を同一配置で照射する。ここで、

基準線量計の読取値　　M

被校正線量計の読取値　　M’

であるとき、被校正線量計の校正定数 N’は

N’＝N×（M’/M）

で得られる。ファントムは必ずしも必要ではない。

６.３ スペクトル依存補正係数を決定するための校正

６.２.１でも述べたように、校正定数 N は、線量計のエネルギー特性が既に評価されていることを前提に、RI 中性子線源を用いて一般に決定されている。むろん、これで十分な精度で中性子線量を評価できる場合はあるが、中性子線量計の種類によっては作業場所の中性子スペクトルによって過大又は過少応答するものもあり、このような場合は中性子スペクトルに応じた適切な補正係数（スペクトル依存補正係数）が必要である。

こうした「スペクトル依存補正係数」を決定する方法として、近年、作業場模擬中性子場（Simulated Workplace Neutron Field、例えば ISO12789）を使用した校正が提案されている。作業場模擬中性子場は、RI 中性子線源と減速材等を組み合わせることによって作業場所の中性子スペクトルを模擬した中性子スペクトル場を生成する試みであり、国内では、古くは東京大学原子核研究所/東北大学 CYRIC の ^{252}Cf の鉄、ポリエチレン及び黒鉛球減速場があり、また、現時点で「実働中」の校正場としては、原研東海研の ^{241}Am-Be をコンクリートブロックで囲まれた閉空間で使用する「コンクリート減速場」、サイクル機構東海の ^{252}Cf を鉄、PMMA 減速材で覆った「MOX 燃料施設模擬減速場」などがある。これらの校正場は、RI 中性子源による校正だけでは実作業環境で精度よく中性子線量当量（率）を評価できない場合にスペクトル依存補正係数 k を決定したり、あるいは測定器の性能評価（実証）試験をしたりするのに有用である。なお、スペクトル依存補正係数を決定する「校正」の場合、その位置付けは、^{252}Cf 等の基準中性子に対して決定された校正定数 N に対する無次元の補正係数と考えれば、６.２で述べた基準校正、実用校正などの体系とは矛盾しない。また、スペクトル依存補正係数は、校正定数 N に対する相対的な係数であるため、一度決定されれば、作業環境の諸条件に変化がなく、かつ再校正によって校正定数 N が維持され続けていれば、継続して使用し続けることができる。

７.まとめと今後の課題

７.１ まとめ

本専門研究会では、まず国内の中性子校正場を有している主な機関に対して保有している中性子線源、照射室の大きさ、校正方法等に関するアンケート調査を行うなど、中性子校正場の現状の把握を行った。次に、既に策定済みの国際規格 ISO 8529 part 1～part 3 の内容を分析し、問題点を明らかにした上で、これまで産業技術総合研究所（産総研）、日本原子力研究所及び核燃料サイクル開発機構で行われた中性子校正技術に関する研究成果を基に種々の校正方法について比較検討を行った。さらに、エンドユーザにおける実用的な校正の現状を踏まえて、中性子線量計の校正体系を検討した。それらの結果をまとめる。

７.１.１　中性子校正場に関するアンケート調査

中性子校正場等に関するアンケート調査の結果、17 機関から回答があった。その内容を整理した結果、以下のことが明らかになった。

1）大部分の機関では、機関内部の校正・研究開発に利用されており、外部への校正サービスを実施しているのは限られている。保有している中性子線源は、ほとんどが ^{252}Cf と ^{241}Am-Be である。
2）照射室のサイズ及び構造が施設によって大きく異なり、散乱線低減のための格子状床構造（グレーチング）を有する機関は１割にも満たない。また、線源や線源カプセルの形状や材質及び照射装置についても各機関で独自の構造のものを使用している。
3）散乱線の評価については校正を専門に行っている機関では実施されているが、その他の機関ではほとんど未評価の状態で使用されている。散乱線の補正を行っている機関では、シャドーコーン法が多く用いられている。
4）不確かさを評価しているのは産総研のみである。
5）校正に関して、精密な校正方法と実用校正の２種類の規定を望む声が多い。

以上から、中性子線量計の校正方法の標準化に対するニーズが多いことが明らかになった。

７.１.２　中性子標準の供給と校正機関の現状

国家標準の供給状況及び主な校正機関における中性子線量計の校正の現状を調査した結果、以下のことが分かった。

1）国家標準である産総研からは、中性子に関して、中性子放出率、速中性子フルエンス、熱中性子フルエンス率の３つの物理量の標準供給が行われており、ISO17025（試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項）の認定を受けている。
2）産総研以外で中性子線量計の校正を専門に行っているのは、日本原子力研究所東海研究所（外部へのサービスは財団法人放射線計測協会が実施）、核燃料サイクル開発機構東海事業所及び株式会社千代田テクノルである。

７.１.３　JIS 規格と国際規格の現状

中性子線量計に関する JIS が既に策定済みなのは、電子式個人線量（率）計、フィルムバッジのみである。また、原案が審議中なのは、中性子用固体飛跡個人線量計及び中性子用線量当量(率)サーベイメータである。このため、校正方法に関する JIS 策定が必要な状況にあり、平成 16 年度

に中性子線量当量（率）計の校正方法の JIS 原案策定が行われた。

中性子線量計の校正方法については、ISO 8529 part 1～3 が策定済みである。近年、JIS は国際規格との整合が求められていることから、JIS 原案策定は ISO 8529-1～3 をもとに行われるが、ISO 8529-1～3 の内容を検討した結果、以下の問題点があることが明らかになった。

1) 散乱線の補正方法として、複雑なものから単純なものまで複数の校正手法が並列的に示されており、その比較検討が必要である。
2) 中性子サーベイメータ及びモニタを主たる校正対象としており、個人線量計の校正については内容が不十分である。
3) 中性子校正施設では、中性子線源の周りにハンドリング用の線源ホルダや線源固定用の周辺構造材がある場合が多く、これによる線源中性子の非等方性をどう扱えばよいかが不明である。
4) 標準研究所や専門の中性子校正機関を対象としたものであり、ユーザレベルの実用的な校正は規格の範囲外である。

７.１.４　中性子線量計の校正方法

ISO 8529 に記されている校正の原則は、“中性子測定器のレスポンス及び校正は測定器の形式で決まるものであり、線源と線量計が同じであれば、照射室の大きさや校正手法に左右されないこと”である。これを達成するためには散乱線の補正が重要である。ISO 8529-2 では、①シャドーコーン法、②一般化フィット法、③半経験法及び④縮約フィッティング法の 4 つが示されている。①は、一次線を遮へいして散乱線を直接的に測定する手法である。一方、②～④は、距離による指示値の変化を測定し、見かけのレスポンス（各距離において指示値を基準フルエンスで除した値）の散乱線による逆二乗則からのずれを距離の関数（あるいは定数項）として表すやり方である。④は国内ではほとんど使われていない。そこで、①～③の手法を核燃料サイクル機構の寸法の異なる複数の校正室及び日本原子力研究所の校正施設で中性子サーベイメータの校正に適用した結果を検討した。その結果得られた結論をまとめる。

1) シャドーコーン法は、散乱線を直接測定で評価でき、基本的手法として他の手法の妥当性確認などに有効である。ただし、シャドーする立体角に注意が必要であり、複数のシャドーコーンを使い分ける必要がある。
2) 一般化フィット法は、適用対象が球形測定器に限定されるため、高線量率照射が必要などの理由で線源に近づける必要がある場合を除いては、幾何学補正が必要のない距離（50 cm 以上）で用いる（この場合を多項式フィット法という）方がよい。
3) 多項式フィット法は、照射室の大きさによらず、またレムカウンタの形状（球形又は円筒型）によらず適用可能であり、簡便で汎用性が高い。シャドーコーン法との一致もよい。

中性子個人線量計の校正については ISO 8529 では、ISO 水ファントム（JIS の PW ファントム）を使用することと、散乱線の寄与の低減（距離が近いほどよい）と照射野の均一性（距離が遠いほどよい）のトレードオフとして距離 75cm が適当ということしか記述されていない。このため、個人線量計の校正方法について検討した結果、以下の結論を得た。

1) 中性子サーベイメータに対する散乱線補正法は個人線量計に対しても一応適用可能である。しかし、実際の個人線量計を用いて散乱線補正を行うことは、多大な照射時間を要するため現実的ではない。このため、シャドーコーン法で散乱線の影響を決定した上で、その影響が

比較的小さく、かつ幾何学効果の影響が無視できる距離に固定して校正を行うことが現実的である。

2) 校正に適切な距離の決定には、個人線量計の代用として熱中性子(^{3}He)検出器や反跳陽子比例計数管をファントムの前に設置した体系での実験が有効である。

また、不確かさの評価は、校正の質、信頼性にかかわるものであるとともに、トレーサビリティを論じる上で極めて重要である。不確かさの評価は、BIPM が他の国際機関と協力して発行した「計測における不確かさの表現のガイド(Guide to the expression of Uncertainty in Measurement, GUM)」に従って評価する必要がある。GUM では、不確かさの評価を一連の測定値の統計的解析により評価できる A タイプ評価と、統計的解析以外の方法により評価できる B タイプ評価に分類している。そして、ISO 8529-2 では、不確かさを評価する項目とその評価の指針を示しており、これにしたがって評価することが望ましい。評価においては、バジェット表を作成し、Contribution や Index を記しておくと、どの入力量が合成標準不確かさに大きな影響を及ぼしているかが一目瞭然となるので、その後の最高測定能力の改善等に役に立つ。

７.１.５　計算シミュレーションによる散乱線評価

近年計算シミュレーション技術の発展とともに MCNP コードを用いた散乱線等の解析が広く行われるようになってきた。そこで、校正室の設計、校正に用いる距離などの検討に有益なデータを提供することを目的として、MCNP コードを用い、照射室の寸法及び形状によって散乱線の寄与及びそのスペクトルがどのように変化するかを計算した。その結果、以下のことが分かった。

1) 照射室形状が立方体の場合の、照射室の大きさと距離による散乱線寄与の定量的関係を明らかにした。その結果、ISO 8529 で示された距離 75cm において散乱線寄与が 40%となる照射室の寸法と一致した。
2) 距離の増加とともに、直達線に対する散乱線の相対的な割合が増加するが、散乱線自体の量は距離によらずほぼ一定である。
3) 空気による散乱線の影響（寄与は小さくほぼ距離に比例する）を除けば、照射室の形状が立方体の場合、照射室の一辺の長さと線源－検出器間距離の比が一定のとき、散乱線の寄与割合は一定となる。
4) 照射室の形状が異なっていても、内容積がある程度大きく、よほど扁平していなければ、散乱線の寄与割合は照射室形状の違いに大きく依存しない。

さらに、原研放射線標準施設棟及びサイクル機構計測機器校正施設における適用例を検討し、以下のことを明らかにした。

1) 線源ホルダ（元々の線源カプセルをハンドリング等のために納める容器）及び線源周辺構造体による中性子スペクトルの変化及びフルエンスの分布の詳細な解析に計算シミュレーションが有効である。正確な非等方補正を計算シミュレーションで行うためには、元々の線源カプセル内の構造が無視できない可能性がある。
2) 線源ホルダ等による中性子放出の非等方性の補正を行うと、異なる校正施設における校正結果の一致がよくなることから、非等方補正係数は重要である。

７.１.６　中性子線量計の校正体系

まず中性子線量計のユーザ（原子力発電所）及び個人線量測定サービス機関における校正の実

態を調査した。その結果、次のような現状が明らかになった。

1) 原子力発電所では、中性子は運転中の極めて限られた場所にのみ存在するため、このような場所に立ち入る際の中性子を測定するために中性子専用の個人線量計（ガラスバッジ、電子式線量計）を着用することとしている。
2) これらの電子式線量計は、専用の校正装置を用い、専門の校正機関（放射線計測協会）で校正した特定の線量計を基準測定器とした、いわゆる置換法による実用校正で校正している。
3) 大量の個人線量計を迅速に校正する必要のある場合には、上記のような「実用基準測定器を用いた置換法による実用校正」が最も現実的であり、有効な手段である。ISO 8529 は実用校正が規格の範囲外であり、ユーザ自身が行う実用校正に関する規格の制定が必要である。
4) 個人線量測定サービス機関では、熱中性子から速中性子までの広いエネルギー範囲の測定が可能な固体飛跡線量計を使用している。これらの線量計の感度校正及び線量算出アルゴリズムの構築において、校正及び特性試験が必須であり、校正方法の標準化は重要である。

上記の現状及び ISO、ICRU 等の関連文献を踏まえて、実用的な校正方法について検討した結果、中性子線量計の校正体系として、次の２つに分類することを提言する。

①ISO8529 三部作に準拠した校正（基準校正）

指定された中性子線源（RI 中性子線源や代表的な加速器中性子線源等）を使用し、指定されたファントムや換算係数を使用し、室内散乱線等の望まれない成分による寄与を指定された手順で補正する方法。

② 基準校正された中性子測定器を実用基準測定器として使用する校正（実用校正）

①で校正された中性子測定器を実用基準測定器として位置付け、線源から同一の配置で実用基準測定器と被校正器を置き（又は置き換え）、実用基準測定器の指示値と被校正器の指示値との直接比較によって被校正器を校正する方法。ここで、実用基準測定器、実用測定器は、それぞれ実用校正をしようとしている特定の測定器と同一形式の検出部を有する測定器、実用に供する測定器である。

②の実用校正では、中性子線源と校正器を固定された幾何学条件下で配置すればよく、中性子線源の放出率の校正や散乱線の補正を必要としないため、専門の中性子校正施設を有していなくても校正ができる。したがって、実用校正を進めることで中性子線量測定の信頼性の確保が達成できると考えられる。

７.２ 今後の課題

上記のように、本専門研究会では、ISO 8529 三部作を我が国の中性子線量計の標準校正方法として導入する場合の問題点を明らかにし、これらを解決するための基礎データ及び提言をまとめた。これらの成果は、既に中性子線量計の校正方法に関する JIS 原案策定作業に反映されており、本専門研究会は中性子線量計校正方法の標準化に大いに貢献したと評価できる。

しかし、ユーザレベルで行う実用校正については、校正体系として整理はできたが、それ以上の検討を行う時間がなく、具体的な方法の標準化の提言までにはいたらなかった。専門研究会としては、ここで活動を終了するが、実用校正の標準化については、改めて関係メンバーで検討し、マニュアル等にまとめる必要がある。

付録１　中性子校正場に関するアンケート調査の内容

保健物理学会「中性子校正技術の標準化検討専門研究会」によるアンケート調査

平成 15 年 7 月 14 日
専門研究会事務局

調査票ご記入にあたってのお願い

〇目　　的　　専門研究会を始めるに当たって、各機関が有する校正場について調査したいと思います。つきましては、お忙しいところお手数ですがご協力をお願いいたします。

〇締め切り　　ご記入頂きました調査票は、期間が短くて恐縮ですができるだけ**平成 15 年 7 月 25 日まで**にご返信下さいますようお願いいたします。

〇お問合せ先　ご不明な点につきましては、下記にお問合せください。

日本原子力研究所　東海研究所　保健物理部
線量計測技術開発室　　吉澤 道夫
TEL　029-282-5205　FAX　029-282-6063
E-mail：m-yoshi@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

〇回答者の所属記入欄

貴機関・会社名　：
所　　在　　地　：〒
電話・FAX 番号　：TEL　　／FAX
Ｅ－ｍａｉｌ　　：

（追伸）校正場について参考となる文献・パンフレット等が御座いましたら、お送り頂けると助かります

０．回答対象機関名

（例）日本原子力研究所東海研究所

１．中性子校正場について

１．１校正場の種類

（１）☐ RI 中性子場（^{252}Cf、^{241}Am-Be 等を用いた速中性子照射）

使用線源：

（２）加速器中性子場

加速器の種類　☐ バンデグラフ　（エネルギー：　　）

☐ コッククロフト（エネルギー：　　）

☐ そ　の　他　（　　）

照射可能なエネルギー（　　keV、　　MeV）

利用可能な核反応　（　　）

（３）熱中性子場

☐ 黒鉛パイル（使用線源：　　）

☐ 原子炉

☐ その他　（　　）

（４）減速中性子場

☐ $D_2O-^{252}Cf$

☐ その他

（その他の場合その概要）

１．２ 上記校正場の位置付け及び利用方法等

上記校正場は、どのように利用していますか。

☐ 機関内部機器の校正

☐ 外部への校正サービス

☐ 研究・開発用の照射場

２．RI 中性子場について

RI 中性子場について、詳しい内容を教えてください。

（１） 使用線源

☐：^{241}Am－Be　☐：^{252}Cf　☐：その他（　　）

強　度：＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿、中性子放出率：＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿
強　度：＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿、中性子放出率：＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿
強　度：＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿、中性子放出率：＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

（２）照射室のサイズ・構造

・サイズ

縦：＿＿＿＿＿m　　横：＿＿＿＿m　　高さ：＿＿＿＿m

・床の構造

□：コンクリート床　　□：グレーチング（床面より＿＿＿m）

・構造物の材質

□ 普通コンクリート

□ そ　の　他　（　　）

（３）照射方法

・　線源のセット方法：（例．圧空による移送、電磁石による固定、線源をカプセルに入れ棒で突き上げる、ワイヤーにより吊り上げ等）

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

・校　正　距　離　　：＿＿＿＿m～＿＿＿＿m

・高さ（床面より）　：＿＿＿＿m

・コリメータの使用　　□　有り　　□　無し

（４）線源容器

オリジナルの密封カプセル（例．アマシャムＸ１）以外に独自の線源容器に入れて照射していますか。

□　容器無し

□　容器有り

（有りの場合、厚さ、材質等の構造）

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

（５）トレーサビリティの取り方

・基　　準　　□　中性子放出率　　□　その他（　　）

・校正機関　　□　産総研（電総研）　□　その他（　　）

・校正の頻度　＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

（６）基準フルエンス・線量当量（率）の出し方

・基準フルエンス　：　例．$\Phi = S / 4\pi r^2$

注）上記式に補正を行っている場合は、補正についてのご説明をお願いいたします。

・線量当量（率）（使用しているフルエンス・線量当量換算係数）

例．ICRP Publication 74 を用いてスペクトルから計算
ISO 8529 part 3 (1998)の値を使用

供給している線量当量の種類

☐　H^*（１０）　　☐　H_p（１０）

・線源スペクトル

☐　ISO 8529-1
☐　その他の文献
☐　独自に評価
（概要：例．MCNP による計算）

（７）散乱線の補正方法

☐：補正無し
☐：補正有り
補正の方法：　例．シャドーコーン、ISO 等の多項式法

（８）不確かさの評価

☐：未 評 価
☐：評価済み
評価内容：　評価因子の記入をお願いします。

（９）日頃感じている、中性子校正に関する課題・疑問が有りましたら自由にお書き下さい。

質問は以上です。
ご協力ありがとうございました。

付録２　アンケート調査の結果

表1　　保健物理学会「中性子校正技術の標準化検討専門研究会」によるアンケート調査集計結果

（1／4）

貴機関 会社名	校 正 場	RI 中 性 子 場								
		使用線源	照射室の サイズ･構造	照射方法	線源容器	ﾄﾚｰｻﾋﾞﾘﾃｨ	基準ﾌﾙｴﾝｽ･ 線量当量（率）	散乱線の 補正方法	不確かさの 評　　価	課題 疑問
産業技術 総合研究所 計測標準研 究部門	･^{252}Cf ･Am-Be ･加速器 ･熱中性子 ･減速中性子場 （D_2O-^{252}Cf）	Am-Be：148GBq×1 8.9E+6(s-$^{-1}$) ^{252}Cf：203.5MBq×1 2.4E+7(s-$^{-1}$)	･11.5×11.5×11.5 m ･ｺﾝｸﾘｰﾄ床 （普通ｺﾝｸﾘｰﾄ） ･ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ （床より 4m）	電動トローリーにより所定の位置まで移動 ･照射距離： 0.5～5 m ･高 さ ： 5.5 m ･ｺﾘﾒｰﾀ ： 無し	･容 器 ： 無し	･基 準 ：中性子放出率 ･校正機関 ：産総研 （ﾏﾝｶﾞﾝﾊﾞｽ法）	･ISO 8529 part 3 （1998）	･補 正 ： 有り （ｼｬﾄﾞｰｺｰﾝ）	･評価済み 部屋等からの散乱、線源と校正用検出器間の空気散乱、距離	
日本原子力 研 究 所	･^{252}Cf ･Am-Be ･加速器 ･熱中性子 ･減速中性子場 （D_2O-^{252}Cf） （ｺﾝｸﾘｰﾄ減速場）	^{252}Cf：2GBq×1 2.52E+8(s-$^{-1}$) Am-Be：37GBq×1 2.41E+6(s-$^{-1}$)	･12.5×12.5×11.7 m ･ｺﾝｸﾘｰﾄ床 （普通ｺﾝｸﾘｰﾄ） ･ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ （床より5.2m） （ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ：鉄）	自動線源移動･昇降装置及びﾄﾝｸﾞにてｽﾀﾝﾄﾞ上にｾｯﾄ。 ･照射距離： 0.4m～1.5m ･高 さ ： 1m ･ｺﾘﾒｰﾀ ： 無し	･ＳＵＳ容器 ･側面厚さ Cf用： 2.5mm+6.0mm Am-Be用： 7.5mm	･基 準： 中性子放出率 ･校正機関： 産総研 （電総研）	･ 式 ： $\phi=S/4\pi r^2$ ･補 正 ： 無し ･ISO 8529 part 1, 3 （1998） $H^*(10)$, $H_p(10)$	研究開発時には、ｼｬﾄﾞｰｺｰﾝ法を使用	･未評価	
核燃料ｻｲｸﾙ 開発機構 (東海事業所)	･^{252}Cf ･Am-Be ･減速中性子場	^{252}Cf：999MBq×1 7.21E+7(s-$^{-1}$) Am-Be：37GBq×1 2.32E+6(s-$^{-1}$)	･13.0×12.5×5.3 （ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞから）m ･ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ （床より2.0 m） （床面の一部をｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞとして2m掘り下げている。） ･材質 ：外壁2面及び天井は10cm厚軽量気泡ｺﾝｸﾘｰﾄ。遮蔽壁2面は、60～80cm厚普通ｺﾝｸﾘｰﾄ。	･地下格納容器から、圧搾空気により線源を案内管に沿って射出し、照射管上端の電磁石で固定する。 ･照射距離 ： 0.5～2.5 m ･高さ ：1.26 m ･ｺﾘﾒｰﾀ ： 無し	･照射方向肉厚1.25mm，上下方向7.0mmのSUS製ｶﾌﾟｾﾙ ･側面･底面はSUS304， 上面はSUS430 ･ｵﾘｼﾞﾅﾙｶﾌﾟｾﾙ中心位置調整のためAl製ｽﾍﾟｰｻを内部に配置	･基 準 ：中性子放出率 ･校正機関 Am-Be：産総研 （昭和 52年） ^{252}Cf：ＮＰＬ （平成 13年）	･ICRP Publication 74 を用いてｽﾍﾟｸﾄﾙから計算。 $H^*(10)$, $H_p(10)$ ･ISO 8529 part 1 を基に、線源周りの構造体（線源ｶﾌﾟｾﾙ，照射筒等）との散乱によるｽﾍﾟｸﾄﾙ変化をMCNPで計算。実験値との比較検証の結果、計算値を採用。	･多項式ﾌｨｯﾄ法 （定常校正業務） ･ｼｬﾄﾞｰｺｰﾝ法	･未評価	
核燃料ｻｲｸﾙ 開発機構 (大洗工学ｾﾝﾀｰ)	･^{252}Cf ･Am-Be	^{252}Cf：40MBq×1 （^{252}Cf：12.6GBq×1） 現在：1.51E+6(s-$^{-1}$) Am-Be：37GBq×1 （Am-Be：35.8GBq×1） 現在：2.23E+6(s-$^{-1}$)	･13.2×5.0×3.9 m ･ｺﾝｸﾘｰﾄ床 （普通ｺﾝｸﾘｰﾄ）	･線源を収納ﾎﾙﾀﾞｰから取り出し、1mのﾄﾝｸﾞで線源台に載せる。 ･照射距離 ： 1～2.5 m ･高さ ：1～1.3 m ･ｺﾘﾒｰﾀ ： 無し	･^{252}Cf：容器無し ･Am-Be ：容器有り （RI協会製）	･基 準 ：中性子放出率 ･校正機関 ：NPL	･ISO 8529 part 3 （1998） $H^*(10)$	･多項式ﾌｨｯﾄ法 （定常校正業務） ･ｼｬﾄﾞｰｺｰﾝ法	･未評価	

貴機関 会社名	校正場	RⅠ中性子場								
		使用線源	照射室の サイズ・構造	照射方法	線源容器	トレーサビリティ	基準フルエンス・ 線量当量（率）	散乱線の 補正方法	不確かさの 評価	課題 疑問
核燃料サイクル 開発機構 （ふげん発電所）	・Am-Be	Am-Be：3.7GBq×1	・7.9×4.8～6.3×5.3 m ・コンクリート床 （普通コンクリート）	・手作業にて照射台に固定。 ・照射距離： 0～0.15 m ・高さ：1.15 m ・コリメータ：無し	・容器：無し	・基準中性子レムカウンタとの比較校正用としている。 ・基準中性子レムカウンタ校正 ：放計協		・補正：無し	・未評価	
核燃料サイクル 開発機構 （高速増殖炉もんじゅ建設所）	・^{252}Cf ・Am-Be	^{252}Cf：40MBq×1 2.83E+6(S^{-1}) Am-Be：37GBq×1 2.25E+6(s^{-1}) Am-Be：11.1GBq×1 6.36E+5(s^{-1})	・9.0×5.5×2.7 m ・コンクリート床 （普通コンクリート）	・線源（カプセル状）をトングを用いて線源台車の線源固定台に設置する。 ・照射距離： 0.3～2.0 m ・高さ：1.3 m ・コリメータ：無し	・厚さ2mm、直径30mm、高さ30mmの円筒形のSUS304の容器	・基準 ：中性子放出率 ・校正機関 ：NPL	・ISO 8529 part 3(1998)から、ICRP Pub.74のフルエンスH*(10)換算係数及びフルエンスH_p(10)換算係数を用いて算出した値。 H*(10), H_p(10)	・中性子サーベイメータ点検時のみシャドーコーンを使用	・未評価	
高エネルギー加速器研究機構	・^{252}Cf ・Am-Be ・加速器 ・熱中性子	^{252}Cf：3.7GBq×1 2.39E+7(s^{-1}) （1996/6/6測定） Am-Be：185GBq×1 9.98E+6(s^{-1}) （1996/6/4測定） Am-Be：200MBq×1 2.47E+6(s^{-1}) （1999/11/30測定）	・13×10×5 m ・コンクリート床 （普通コンクリート） ・グレーチング （床より2.15m）	・線源カプセルニ入れ棒で突き上げる ・照射距離： 2～3 m ・高さ：2.15 m (コンクリート床より2.15m) ・コリメータ：無し	・^{252}Cf ：SUS 1.4mm厚 ・Am-Be ：SUS 1.6mm厚	・基準 ：中性子放出率 ・校正機関 ：産総研(電総研)	・式： $\phi=S/4\pi r^2$ ・施設側で線量換算係数は用いていない。	・補正：有り （シャドーコーン）	・未評価	
原電事業（株） （日本原電）	・^{252}Cf	^{252}Cf：200MBq×1	・3.1×4.0×7.0 m ・コンクリート床 （普通コンクリート）	・圧搾空気により線源カプセルのロッドを引き上げる。 ・照射距離 ：8 cm 固定 ・高さ：1.5m ・コリメータ：無し	・SUS 303 容器 φ：20 mm t：6 mm	・基準 ：基準EPDによる比較測定 ・EPD校正 ：放計協(年1回)		・補正：無し	・未評価	
中部電力 （株）	・^{252}Cf ・熱中性子	^{252}Cf：200MBq×1		・照射距離：0.1 m （固定）	・容器：有り 硬質アルマイト線源ホルダ（2～5 mmt）	・実用基準測定器による置換測定。 ・校正機関 ：放計協 ・1回／3年		・補正：無し	・未評価	

貴機関 会社名	校正場	RI中性子場								
		使用線源	照射室の サイズ・構造	照射方法	線源容器	トレーサビリティ	基準フルエンス・ 線量当量（率）	散乱線の 補正方法	不確かさの 評価	課題 疑問
（株）千代田 テクノル 大洗研究所	・Am-Be	Am-Be：185GBq×1 1.15E+7(s-^{1})	・6×6×6 m ・コンクリート床 （普通コンクリート） ・グレーチング （床より1.8m）	圧搾空気による移送、電磁石により固定 ・照射距離： 0.3～2.0 m ・高さ：1.2 m ・コリメータ：無し	・容器：有り ・材質：SUS ・厚さ：3.5mm	・基準 ：中性子放出率 ・校正機関 ：産総研(電総研) ・校正頻度 ：レムカウンタ等による群管理(1回/年)	DE=(ϕ_0/4πd^2)×h$_\phi$×3600×10^3(mSv/h) H*(10), H$_p$(10) ・ISO 8529 part 3 （1998）	・補正：有り （シャドーコーン）	・未評価	
日本原燃（株）	・^{252}Cf ・Am-Be	Am-Be：37GBq×1 2.18E+6(s-^{1}) ^{252}Cf：200MBq×1 2.636E+6(s-^{1}) ^{252}Cf：2GBq×1 9.839E+7(s-^{1})	・10.4×8.6×4.81 m ・コンクリート床 （普通コンクリート） ・グレーチング （床より2.0m）	・地下格納容器から、圧搾空気により線源を案内管に沿って射出し、照射管上端に移送、圧搾空気の連続吹き上げにより固定する。 ・照射距離： 1.3～3.0 m ・高さ：1.5 m (コンクリート床より3.5m) ・コリメータ：無し	・照射方向肉厚3.7mm，上方向8.0mm，下方向4.8mmのSUS製カプセル（アマシャムX3収納用寸法） ・材質SUS403 ・^{252}Cf線源（アマシャムX1）においては、オリジナルカプセル中心位置調整のためAl製スペーサを内部に配置	・実用基準測定器による置換測定。 中性子レムカウンタ 電子式ポケット線量計 校正機関 ：千代田テクノル	・ISO 8529 part 3 （1998）	・補正：無し	・未評価	
ハザマ 技術研究所		・252Cf：3.7GBq 4.74E+8(s-^{1}) ・252Cf：5.55MBq 6.7E+5(s-^{1})	・5.8×4.0×2.7 m ・コンクリート床 （普通コンクリート）	・手動 (ワイヤー吊り上げ) ・コリメータ：無し	・容器：有り Al：30φ×48mm	・基準 ：中性子放出率 ・校正機関 ：産総研 ・校正：年1回	・H*(10) （ICRP 74を用いたスペクトル計算） ・線源スペクトル (MCNP内蔵のwatt spectrumで計算)	・補正：有り （シャドーコーン）	・未評価	
京都大学	・^{252}Cf ・加速器 ・熱中性子 ・減速中性子場	^{252}Cf	・2.4×2.4×2.4 m ・コンクリート床 （普通コンクリート） （ホウ素系吸収版）	・手動でセット ・照射距離： 0～1.0 m ・高さ：0.1～1 m ・コリメータ：有り （自由設定）	・容器：無し	・基準 ：中性子放出率 ・未校正		・補正：有り （シャドーコーン）	・評価済み モンテカルロ計算に付随する誤差、実験上の誤差	

貴機関 会社名	校 正 場	RⅠ 中 性 子 場								
		使用線源	照射室の サイズ･構造	照射方法	線源容器	ﾄﾚｰｻﾋﾞﾘﾃｨ	基準ﾌﾙｴﾝｽ･ 線量当量（率）	散乱線の 補正方法	不確かさの 評　　価	課題 疑問
東北大学	(･^{252}Cｆ) (･Am-Be) ･加速器	^{252}Cｆ:　？ 3.84E+6(s-^{1}) Am-Be:　？ 9.98E+6(s-^{1})	･6×9×3 m ･ｺﾝｸﾘｰﾄ床 （普通ｺﾝｸﾘｰﾄ） ･ｸﾞﾚｰﾁﾝｸﾞ （床より0.5m）	･照射距離: 0～3 m ･高 さ：1.5 m ･ｺﾘﾒｰﾀ：無し	･容 器：無し （購入時のﾍﾟﾚｯﾄ状のまま使用）	･基　準 ：中性子放出率 ･校正機関 ：産総研(電総研) ･購入時1回校正のみ	･ISO 8529 part 3 (1998) を使用。 （利用者が決定する。） ･線源ｽﾍﾟｸﾄﾙ ：独自評価 （理論的なMaxwell分布を使用し、散乱線の評価なし）	･補 正：無し	･未評価	
東京大学 原子力研究 総合ｾﾝﾀｰ	･^{252}Cｆ ･Am-Be ･熱中性子	^{252}Cｆ:19.8MBq×1 2.3E+6(s-^{1}) ^{239}Pu-Be:37GBq×5 9.5E+6(s-^{1}) Am-Be:111GBq×1 7.2E+6(s^{-1})	･15×15×10 m ･ｺﾝｸﾘｰﾄ床 （普通ｺﾝｸﾘｰﾄ）	ﾄﾝｸﾞで所定の位置に設置。 ･照射距離: 0m～10m ･高 さ：1m ･ｺﾘﾒｰﾀ：無し	･容 器：無し	･基　準: 中性子放出率 ･校正機関: 産総研 （電総研）	･ 式： $\phi=S/4\pi r^2$ ･補　正：無し ･ICRP Publication 74 を用いてｽﾍﾟｸﾄﾙから MCNP で計算予定。 $H^*(10)$, $H_p(10)$ ･線源ｽﾍﾟｸﾄﾙ評価: 独自評価 ^{252}Cｆ の場合 MCNP Fission Spectrum	･補 正：無し	･未評価	
近畿大学原子力研究所	･^{239}Pu-Be ･熱中性子場	･^{239}Pu-Be:37GBq 2E+6(s-^{1})	･2.7×2.4×2.3 m ･ｺﾝｸﾘｰﾄ床 （普通ｺﾝｸﾘｰﾄ）	･手動でセット ･照射距離: 0.3～0.8 m ･高 さ：0.8 m ･ｺﾘﾒｰﾀ：無し	･容 器：無し	･基　準 ：中性子放出率 ･未校正	･ 式： $\phi=S/4\pi r^2$ ･ 線量当量率: 法令（告示別表）の値を使用 ･線源スペクトル: 単色(5MeV)として計算	･補 正：無し	･未評価	
大阪大学	(･^{252}Cｆ) (･Am-Be) ･加速器	^{252}Cｆ 1 E+5(s-^{1}) Am-Be 1 E+6(s-^{1})	･ｺﾝｸﾘｰﾄ床							

表2　　国内の中性子線源所有状況（参考）（放射能3.7ＭＢｑ超）

北海道地区　0 施設

数量	放射能(MBq)	核種名

東北地区　2 施設

数量	放射能(MBq)	核種名
7	223	Cf-252
1	40	Cf-252

関東地区　21 施設

数量	放射能(MBq)	核種名
3	99,900	Am-241/Be
1	74,000	Am-241/Be
4	44,415	Am-241/Be
1	18,500	Am-241/Be
1	3,700	Am-241/Be
1	3,700	Am-241/Be
1	1,850	Am-241/Be
3	62,340	Cf-252
1	38,000	Cf-252
1	15,700	Cf-252
6	1,920	Cf-252
2	400	Cf-252
2	720	Cf-252
2	400	Cf-252
8	58	Cf-252
3	32	Cf-252
7	4,701	Cf-252
1	999	Cf-252
3	33,300	Cf-252
1	200	Cf-252
2	2,500	Cf-252

北陸地区　6 施設

数量	放射能(MBq)	核種名
1	37,000	Am-241/Be
1	10	Cf-252
1	40	Cf-252

中部地区　1 施設

数量	放射能(MBq)	核種名
1	200	Cf-252

関西地区　6 施設

数量	放射能(MBq)	核種名
1	1,480	Am-241/Be
483	5,156	Cf-252
788	9,866	Cf-252
421	4,390	Cf-252
4	59	Cf-252
3	52	Cf-252

中国地区　1 施設

数量	放射能(MBq)	核種名
1	71,410	Cf-252

四国地区　2 施設

数量	放射能(MBq)	核種名
1	2.34	Cf-252
1	0.85	Cf-252

九州地区　0 施設

数量	放射能(MBq)	核種名

※日本アイソトープ協会から1995年以降に出荷されたＲＩ線源

表3　大学所有の主要な加速器中性子線源

大　学　名	部　局　等	加速器の種類	加速エネルギー	ビーム電流	設置年
北海道大学	工学研究科 ・工学部	ライナック	45 MeV	60μA	1974
東北大学	サイクロトロン ・RIセンター	AVFサイクロトロン	10～90 MeV	50～300μA	1998
東京大学	原子力研究 総合センター	バンデグラフ	3.75 MeV		1984
東京工業大学	理工学研究科	バンデグラフ	3.2 MeV		1976
	工学研究科	バンデグラフ	3.75 MeV	0.1～100μA	1967
京都大学	原子炉実験所	ライナック	46 MeV	500mA	1965
	原子炉実験所	変圧型静電 加速器	300 kV	5mA	1976
大阪大学	工学研究科	コッククロフト	300 kV	20mA	1981
近畿大学	原子力研究所	コッククロフト	150 kV		1962
広島大学	原爆放射線 医科学研究所	コッククロフト	3 MeV	1mA	1992

中性子校正技術の標準化検討専門研究会報告書

2005 年 6 月

日本保健物理学会

本報告書に関する問い合わせ先：
日本原子力研究所　保健物理部　吉澤道夫
m-yoshi@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

（2005 年 10 月 1 日以降：日本原子力研究開発機構東海研究開発センター
原子力科学研究所放射線管理部　yoshizawa.michio@jaea.go.jp）