資料番号：16－7

技術報告

中性子校正場における室内散乱線の詳細評価

吉田　忠義　　辻村　憲雄　　大柳　勝美*

東海事業所 放射線安全部
*日本放射線エンジニアリング株式会社

Evaluation of Room-Scattered Neutrons at the JNC Tokai Neutron Reference Field

Tadayoshi YOSHIDA　Norio TSUJIMURA　Katsumi OYANAGI*

Radiation Protection Division, Tokai Works
*Japan Radiation Engineering Co.,Ltd.

東海事業所計測機器校正施設には，中性子線サーベイメータや中性子線エリアモニタ等の校正を行うために，^{241}Am-Be及び^{252}Cfの中性子校正場を整備している。この校正場は，直接線と併せて，線源周辺の構造材や，壁，床及び天井等からの散乱線が含まれている。したがって，校正位置における室内散乱線の分布とエネルギースペクトルについて評価する必要がある。そこで球形多減速材付き^{3}He比例計数管式スペクトロメータを用いてそれらを評価した。その結果，直接線成分を精度よく測定し，室内散乱線成分との相対関係を把握することができた。さらに，ISO10647:1996で示されているシャドーコーン法（Shadow-cone technique）並びに多項式フィット法（Polynomial fit method）を用いて，中性子線サーベイメータの室内散乱線の補正方法について評価を行った。その結果，両者の方法によって与えられる補正結果の差は3.3%以内であった。本手法を適用することによって，定期的な校正作業において簡便に中性子サーベイメータ等の室内散乱線補正を実施できることが実証された。

Neutron reference fields for calibrating neutron-measuring devices in JNC Tokai Works are produced by using radionuclide neutron sources, ^{241}Am-Be and ^{252}Cf sources. The reference field for calibration includes scattered neutrons from the material surrounding sources, wall, floor and ceiling of the irradiation room. It is, therefore, necessary to evaluate the scattered neutrons contribution and their energy spectra at reference points. Spectral measurements were performed with a set of Bonner multi-sphere spectrometers and the reference fields were characterized in terms of spectral composition and the fractions of room-scattered neutrons.

In addition, two techniques stated in ISO 10647, the shadow-cone method and the polynomial fit method, for correcting the contributions from the room-scattered neutrons to the readings of neutron survey instruments were compared. It was found that the two methods gave an equivalent result within a deviation of 3.3% at a source-to-detector distance from 50cm to 500cm.

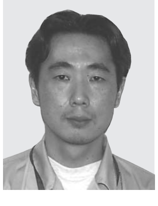
キーワード

中性子校正場，中性子サーベイメータ，室内散乱線，シャドーコーン法，多項式フィット法，中性子スペクトル，校正，球形多減速材付きスペクトロメータ，^{252}Cf，^{241}Am-Be

Neutron Reference Field, Neutron Survey Instruments, Room-Scattered Neutrons, Shadow-Cone Technique, Polynomial Fit Method, Neutron Spectra, Calibration, Bonner Sphere Spectrometer, ^{252}Cf, ^{241}Am-Be

吉田　忠義
線量計測課　標準・校正チーム所属
研究員
放射線測定器等の校正に用いる放射線（能）標準の維持，開発業務に従事
第1種放射線取扱主任者

辻村　憲雄
線量計測課　標準・校正チーム所属
チームリーダ，副主任研究員
放射線測定器等の校正に用いる放射線（能）標準の維持，開発業務に従事



大柳　勝美
線量計測課　標準・校正チーム所属
放射線測定器等の校正に用いる放射線（能）標準の維持業務に従事

１．はじめに

MOX燃料施設の放射線管理では，（α，n）反応や自発核分裂により発生する中性子による被ばく管理が重要であり，その測定には，携帯型の中性子サーベイメータや固定型の中性子エリアモニタが使用されている。

これらの中性子モニタの校正には，当事業所では^{241}Am-Beや^{252}Cfといった中性子線源が使用されており，国家標準とのトレーサビリティは単位時間あたりの中性子放出数で確保されている。線源からの直接成分による線量当量率は，中性子放出率から校正地点における中性子フルエンス率を計算し，その値にISO 8529-3[1]等で与えられている中性子フルエンス－線量当量換算係数を乗じることで，比較的容易に得ることができる。

しかし，現実の校正業務においては，照射室が有限のサイズであるため，照射室の床，壁，天井，さらに周辺の構造物等からの散乱線寄与があり，直接線に対するその割合は照射室の幾何学的条件や構造によって大きく変化する。このため，中性子モニタを校正する事業者は，こうした散乱線寄与をあらかじめ正確に把握し，照射室の幾何学的条件などに応じた適切な補正を行う必要がある[2]。

しかし，現状としては，国内規格（JIS）において中性子測定器の校正方法についての規定もなく，実務レベルにおいて中性子の散乱線の補正を行っている旨の報告や実例もあまり見当たらない。

本稿では，東海事業所計測機器校正施設の中性子校正場における室内散乱線の状況を精度良く評価し，室内散乱線の影響に左右されない中性子サーベイメータ等の校正方法について検討した結果について述べる。

２．中性子校正場の概要

(1)　線源及び中性子照射装置

東海事業所の中性子校正場では，^{241}Am-Beと^{252}Cfの２種類のRI中性子源を中性子モニタ等の校正に使用している。前者は，米国NEUMEC社製で旧電子技術総合研究所（現在，産業技術総合研究所）によって，同研究所の所有する基準中性子源との比較測定によって中性子放出率が定量されている。2002年４月１日の中性子放出率は2.33（±５%）×10^6［s^{-1}］である。一方，後者の^{252}Cfは，英国AEA Technology社製のもので，中性子放出率は英国National Physical Laboratoryにてマンガンバス法で定量されている。2002年４月１日の中性子放出率は1.000（±0.6%）×10^8［s^{-1}］である。両線源共に二重構造のステンレスカプセルに封入されている。

これらの中性子線源は，照射室の地下約４ｍに設置された線源格納容器に保管されており，使用時には，圧縮空気によって線源案内管に沿って地上高1.2ｍまで線源を射出し，照射筒上端の電磁石で線源を固定する方式を採用している。図１に照射装置の外観写真を示す。

図１　中性子照射装置の照射筒の外観

(2)　照射室の幾何学的配置

中性子照射装置を設置している照射室の平面図並びに断面図を図２に示す。照射室は，床面積が13×13m，天井高5.3mであり，部屋の中央に深さ２mの地下ピットを配している。中性子照射装置の本体は，このピットからさらに深さ２mの場所に設置している。線源案内管，照射筒は室内のほぼ中央に配置している。

この照射室は，隣接する別の照射室との境界壁が厚さ60cmの普通コンクリート製であるが，建屋の外に面した壁（２面）は厚さ10cmの軽量発泡コンクリート製，天井は断熱材であるグラスウール及び軽量発泡コンクリート製であり，中性子を建屋外に逃がすことによって室内散乱線を極力低減させる設計になっている。このため，建屋の外側も管理区域とし，建屋を取り囲むよう配置された周囲の土手で放射線を遮蔽するという極めて特徴的な構造を有している。

３．中性子校正場における中性子スペクトル

中性子校正場における室内散乱線の状況を調べるため，中性子サーベイメータの校正位置における中性子スペクトル，中性子フルエンス（率），周辺線量当量（率）［JISにおける場所にかかわる１cm線量当量（率）］について中性子スペクトロメータを用いて評価した。

(1)　中性子スペクトロメータ

使用した中性子スペクトロメータは，旧東京大学原子核研究所で開発された球形多減速材付き^{3}He比例計数管[3]とほぼ同一の型式のものであり，４種類の球形ポリエチレン減速材（直径231mm，151mm，111mm及び81mm）とその中心に設置する直径51mmの米国LND社製球形^{3}He比例計数管（5.0気圧）からなる。本中性子スペクトロメータの応答関数はANISNのAdjoint計算によるほか，単色中性子場での照射実験によって検証されている。

^{241}Am-Be及び^{252}Cf中性子線源について，それぞ

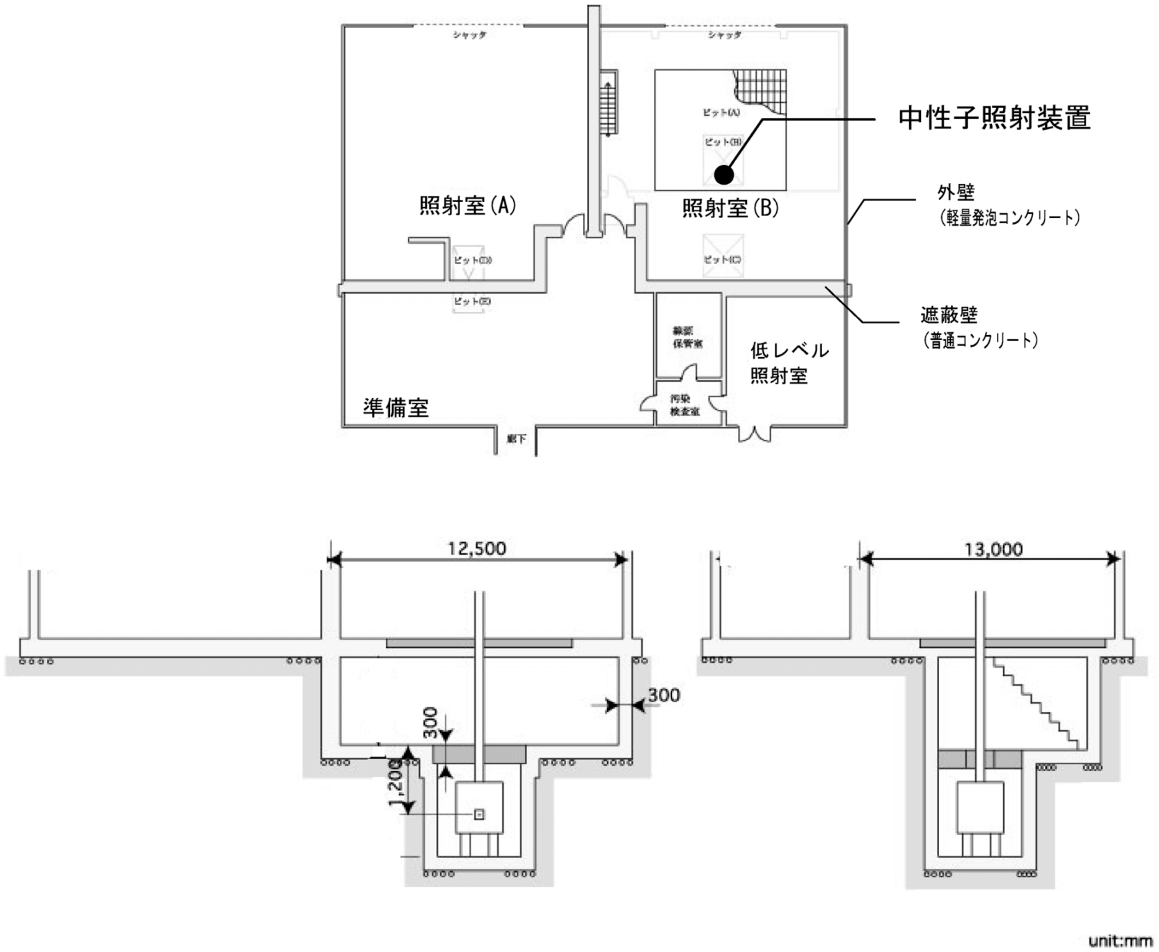


図２　照射室（B）の平面図及び断面図

れ線源から1.0，1.5，2.0，3.0，4.0及び5.0mの６地点において中性子を測定し，^{3}He比例計数管の計数率並びに応答関数からアンフォールディング法を用いて中性子スペクトルを求めた。測定にあたっては，線源とスペクトロメータの間に鉄とホウ素入りポリエチレンからなる円錐形のシャドーコーンを設置し，直接線と散乱線とを分離した測定も行った。つまり散乱線はシャドーコーンを設置した時の測定値から得られ，直接線はシャドーコーンがない時の測定値からある時の測定値を差し引いた値から得られる。アンフォールディング計算にはSAND-II[4)]，初期推定スペクトルには室内構造を模擬したモンテカルロ計算による結果を用いた。

(2) 中性子スペクトルの変化

図３に，1.0m地点における^{241}Am-Beの中性子スペクトル測定結果を示す。図には，室内散乱成分を含んだスペクトル，直接成分（ただし照射筒による減速含む）のスペクトル，さらに減速や散乱線寄与などの全く無い理想化された条件でのスペクトルを示している。直接成分のスペクトルは，照射筒によるわずかなスペクトル変化が見られるものの，理想的なスペクトルに良く一致している。一方，室内散乱線を含んだものについては，理想的なスペクトルに比べエネルギーが下がるにしたがってフラックスが増えていることが分かる。

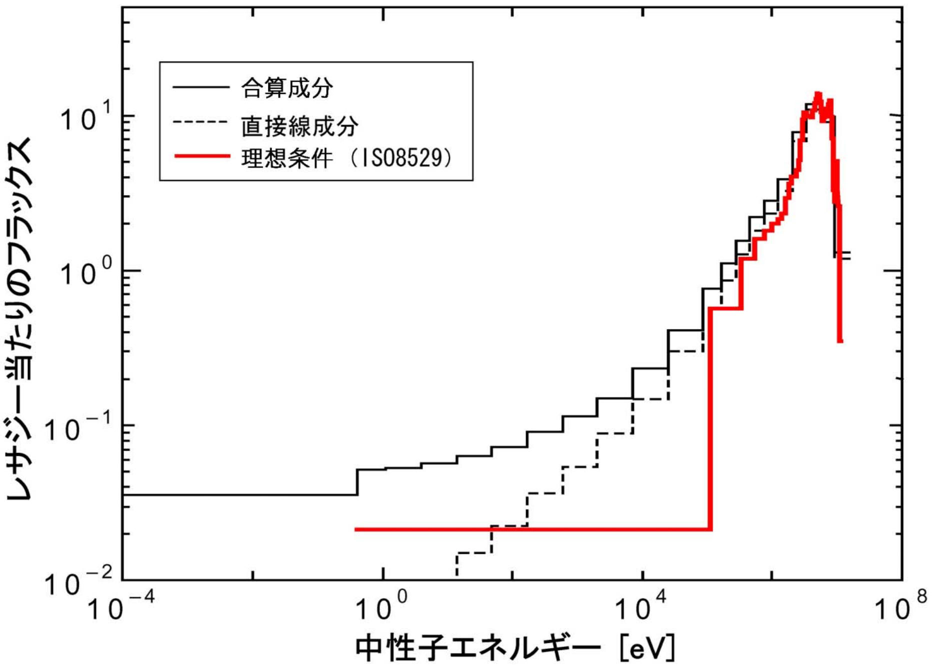
図４に，1.0～5.0mの範囲の６地点における^{241}Am-Beの室内散乱線寄与を含んだ中性子スペクトル測定結果を示す。線源からの距離が離れるにつれて，高エネルギー成分はほぼ逆二乗に比例して減少するのに対し，室内散乱線による低エネルギー成分については距離にあまり依存していないことが分かる。

また，^{252}Cfについては，^{241}Am-Beとスペクトル形状は異なるものの，室内散乱線による寄与は同様の傾向であった。

(3) 平均エネルギー，フルエンス率及び周辺線量当量率の変化

表１に，^{241}Am-Beについて，平均エネルギー，中性子フルエンス率及び周辺線量当量率の距離依存性を取りまとめた結果を示す。ここでは，中性子フルエンス率と周辺線量当量率に距離の二乗を乗じた値として示している。

散乱線を含まない成分については，平均エネルギーは距離にほとんど依存せず，また中性子フルエンス率，周辺線量当量率共に逆二乗にほぼ比例していることが分かる。一方，室内散乱線を含んだ成分については，距離による平均エネルギーの



実線は室内散乱線を含んだスペクトル，点線は直接線によるスペクトルである。また，赤実線は散乱のない理想的条件下におけるスペクトル（ISO8529から引用）である。

図３　1.0m地点における^{241}Am-Beの中性子スペクトル

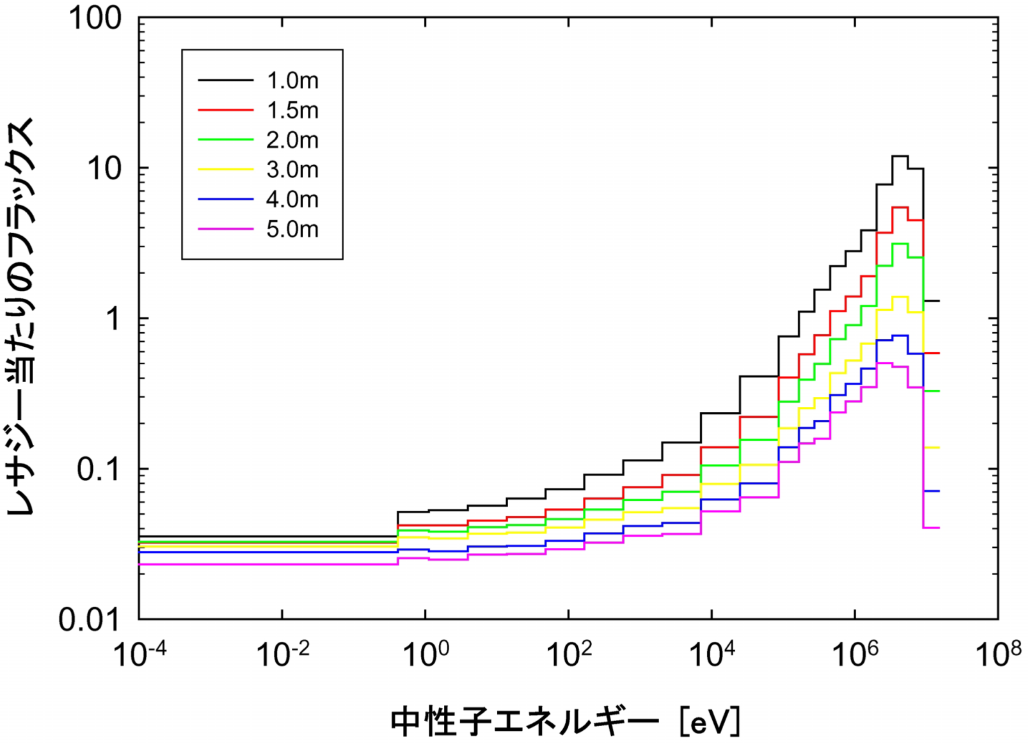


図４　距離1.0～1.5mにおける^{241}Am-Beのスペクトル（室内散乱線を含む）

表１　^{241}Am-Be中性子校正場における平均エネルギー，中性子フルエンス率及び周辺線量当量率の，線源−被校正器間距離による変化

距　離 ℓ [m]	室内散乱線含む			室内散乱線含まず		
	MeV	$\phi(\ell)\times\ell^2$ (m^2.cm^{-2}s^{-1})	$H^*(\ell)\times\ell^2$ (m^2. μ Sv.h^{-1})	MeV	$\phi(\ell)\times\ell^2$ (m^2.cm^{-2}s^{-1})	$H^*(\ell)\times\ell^2$ (m^2. μ Sv.h^{-1})
1.0	3.6	23.6 (1.00)	30.5 (1.00)	3.8	19.9 (1.00)	26.9 (1.00)
1.5	3.4	25.9 (1.10)	32.4 (1.06)	3.9	20.4 (1.02)	27.7 (1.03)
2.0	3.1	28.9 (1.23)	34.3 (1.13)	3.9	20.7 (1.04)	28.1 (1.04)
3.0	2.6	35.8 (1.52)	38.3 (1.25)	3.9	20.9 (1.05)	27.9 (1.04)
4.0	2.2	42.7 (1.81)	41.9 (1.37)	3.9	20.7 (1.04)	28.4 (1.05)
5.0	1.9	49.3 (2.09)	45.3 (1.48)	4.0	20.8 (1.05)	28.1 (1.04)

中性子放出率＝2.33E＋6　[s^{-1}]

変化が著しく，またフルエンス率，周辺線量当量率共に逆二乗則から大きく外れることが分かる。線源からの距離１m地点における全フルエンスに対する室内散乱フルエンスの割合は約16%，全線量当量に対する室内散乱線による周辺線量当量は約12%であった。また，距離５mの場合は，それぞれ約60%，約40%であった。

４．中性子サーベイメータの校正方法

中性子サーベイメータ等の校正は一般に次のような手順で行われる。

校正対象とするサーベイメータ（以下，被校正器と記す）を線源から適当な距離 ℓ に設置し，中性子を照射する。被校正器の指示値をM，基準とする線量をHとしたとき，校正定数Kは次式で与えられる。

$$K=\frac{H(\ell)}{M} \qquad \cdots\cdots(1)$$

このとき，室内散乱線の寄与が全く無視できるほど広い校正場であれば，線量Hは，線源の中性

子放出率 B とフルエンス−線量当量換算係数 h_Φ を用いて次式から計算できる。

$$H(\ell) = h_\Phi \frac{B}{4\pi\ell^2} \quad \cdots\cdots(2)$$

しかし，実際の校正場は有限のサイズであるため,散乱線による寄与を無視することはできない。前節でも示したように，線源からの距離が離れるにつれ，スペクトル形状（平均エネルギー）が大きく変化するため，線源のスペクトル形状が変わらない条件のもとで算出された h_Φ を用いて，中性子サーベイメータを校正する任意の距離における線量基準値を (2) 式から算出することは不可能である。

このため，通常，中性子サーベイメータの校正においては，被校正器について，まず室内散乱線による寄与分を補正し，次にその補正した指示値と (2) 式から算出した線量基準値とを比較するという手法がとられる。こうした室内散乱線の補正については幾つかの方法が提案されており，ISO 10647[5] にはShadow-cone technique（以下「シャドーコーン法」と示す）とPolynomial fit method（以下「多項式フィット法」と示す）等が推奨されている。

(1)　シャドーコーン法

シャドーコーン法は，シャドーコーンと呼ばれる主に鉄鋼とホウ素入りポリエチレンからなる円錐形の中性子遮蔽材を用いて，室内散乱線の影響を評価する方法である。

シャドーコーンのない状態での被校正器の指示値を M_T，シャドーコーンを線源−被校正器間の直線上に設置した状態での指示値を M_S，空気による減衰補正を F_A とすると，次式が成り立つ。

$$[M_T(\ell) - M_S(\ell)]F_A(\ell) = R_\Phi \phi \quad \cdots\cdots(3)$$

R_Φ は被校正器のフルエンスレスポンスであり，ϕ は中性子フルエンスである。通常，空気による減衰の影響は小さいので F_A は１として取り扱っても差し支えない。

シャドーコーン法の利点は，室内散乱線による影響を実験的に直接的に測定できる点にある。一方，適用できる線源−被校正器間距離に制約があること，被校正器や線源の体積が大きいと適用できないといった制約がある。

(2)　多項式フィット法

多項式フィット法は，任意の距離で室内散乱線も含んだ状態で測定を行い，そのデータをもとに距離と指示値との関係について，２次の多項式によるフィット関数により得るものである。以下に２次多項式を示す。

$$\frac{M_T(\ell)}{\phi F_I(\ell)} = R_\Phi(1 + x\ell + y\ell^2) \quad \cdots\cdots(4)$$

ここで，x，y はフィッティングパラメータである。F_I は線源及び被校正器の検出器の体積によるジオメトリ補正であるが，被校正器が線源から十分に離れた場合，あるいは線源が点線源とみなせる場合は無視（$F_I(\ell) \cong 1$）しても良い。

多項式フィット法の利点は，制約条件が最も少なく，被校正器の形状（大体積の検出器や数種で組合せた検出器，ファントムを用いた個人線量計の校正等）によらず適用できる点にある。また，あらかじめ校正対象とする機器について，距離の関数としてフィッティングカーブを得ておけば，シャドーコーンのような特別な機材を用いることなく室内散乱線の補正ができる。

一方，多項式フィット法で得られるパラメータ x，y には，厳密には物理的意義が含まれていないため，得られた関数に測定に伴う系統的な誤差を含んでしまう可能性がある。

５．中性子サーベイメータの校正における室内散乱線の補正

東海事業所で使用している２種類の中性子サーベイメータについて，前述した２種類の手法を用いた散乱線補正方法の適用の是非並びにその効果について検討した。使用したサーベイメータは，Studsvik製2202Dと富士電機製NSNであり，いずれも東海事業所で中性子モニタリングに使用されているものである。

(1) 実験方法

実験では，中性子線源に ^{241}Am-Be（3.7GBq）及び ^{252}Cf（999MBq）を使用し，シャドーコーンを設置した場合と設置しない場合について，線源からの距離50cm～５mの範囲でそれぞれのサーベイメータの計数率を調べた。なお，^{252}Cfを使用した場合，NSN型は線源近傍で高計数率に伴う数え

落としが見られたため，3.7MBqのチェッキング線源を用いて，1.5mの地点で規格化したデータを用いた。

(2) 実験結果

2202D型中性子サーベイメータについて，計数率と線源－検出器間の距離との関係を調べた結果を図5（^{241}Am-Be），図6（^{252}Cf）に示す。同様に，NSN型について図7（^{241}Am-Be），図8（^{252}Cf）に示す。ここで縦軸は，計数率に距離の二乗を乗じ，中性子放出率で規格化した値である。ディメンジョンとしては，フルエンス当たりの計数率に相当し，y切片は（3）式及び（4）式のパラメータR_Φ（直接入射フルエンス当たりの計数率，いわゆるフルエンスレスポンス）に対応している。

室内散乱線の寄与が完全に無視できる場合，計数率は距離の逆二乗に比例するので距離に依存しない一定の値が得られるはずであり，シャドーコーン法による測定結果は，その傾向が見られる。一方，室内散乱線による寄与を含んだ場合，図からも明らかなように線源からの距離が離れるにつれ指示値に距離の二乗を乗じた値は単調に増加している。これは，室内散乱線による計数寄与が相対的に増加することを示している。

また，図には，シャドーコーン法の有効範囲での平均値及び多項式フィットの結果も実線で示した。実験データとフィッティングカーブは良く合致している。

(3) 室内散乱線の補正効果の検討

シャドーコーン法及び多項式フィット法によって得られた，2種類の中性子サーベイメータの直接入射フルエンスに対するレスポンスR_Φ，を比較した結果を表2に示す。両手法から得られたR_Φの

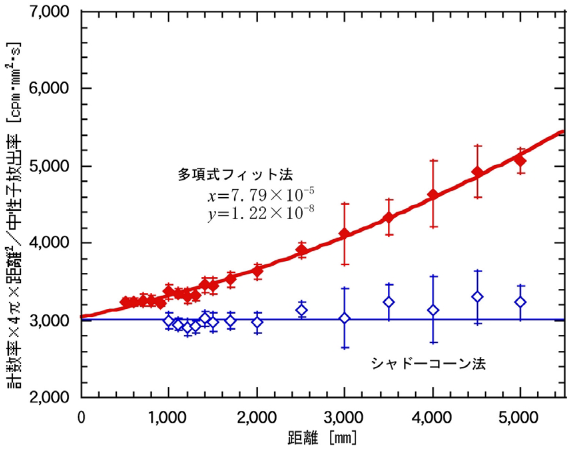


図5　2202D（^{241}Am-Be）における距離とレスポンスの関係

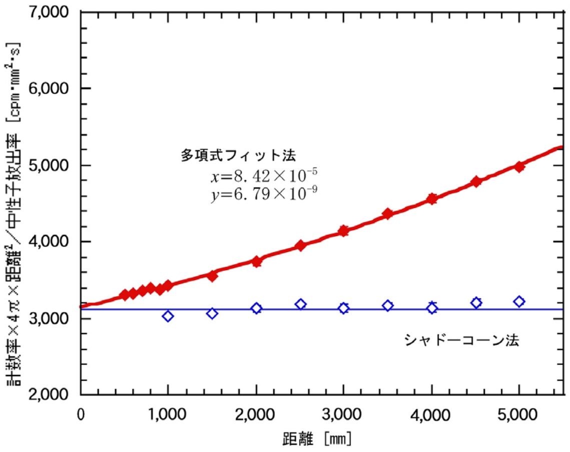


図6　2202D（^{252}Cf）における距離とレスポンスの関係

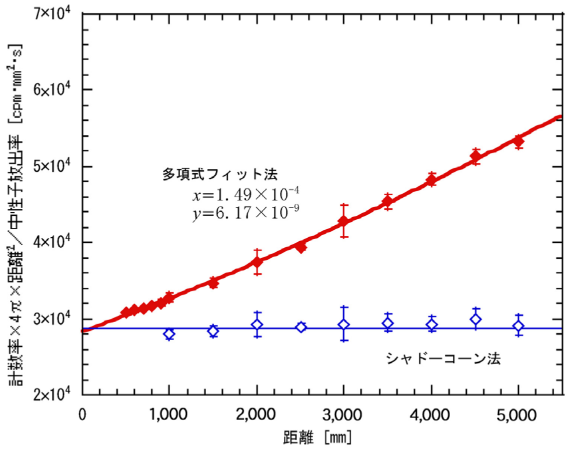


図7　NSN（^{241}Am-Be）における距離とレスポンスの関係

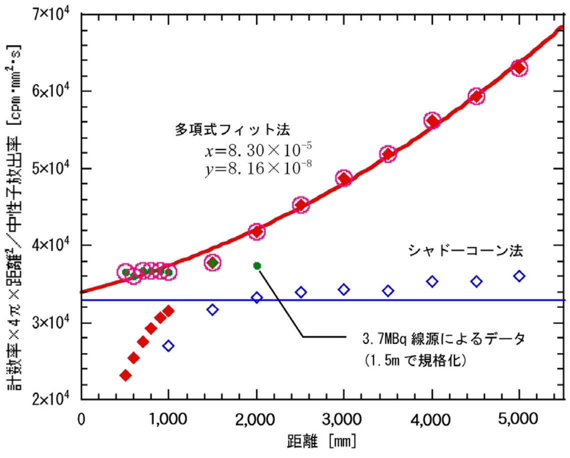


図8　NSN（^{252}Cf）における距離とレスポンスの関係

表２　各手法によって求めたフルエンスレスポンスR_Φの比較結果

手　　法		シャドーコーン法（S）(cpm・mm²・sec)[(counts/cm⁻²)]	多項式フィット法（P）[cpm・mm²・sec][(counts/cm⁻²)]	P/S-1
2202D	^{241}Am-Be	3010［0.502］	3040［0.507］	+1.00%
	^{252}Cf	3140［0.524］	3150［0.525］	+0.32%
NSN	^{241}Am-Be	28700［4.78］	28300［4.72］	−1.39%
	^{252}Cf	32900［5.48］	34000［5.66］	+3.34%

値は−1.4～+3.3%以内で一致した。

したがって，本実験から得られた多項式フィットの結果を適用することで，任意の距離における中性子サーベイメータの指示値に対し，室内散乱線による寄与分を補正することが可能であることが実証できた。

６．おわりに

中性子校正場における室内散乱線による影響を，中性子スペクトロメータによる実測によって評価した。さらに，代表的な中性子サーベイメータについて，本校正場における室内散乱線による計数率への影響を調べ，その補正方法について検討した。シャドーコーン法及び多項式フィット法を用いた室内散乱線の補正方法を比較した結果，両方法によって補正された中性子サーベイメータの指示値は−1.4%～3.3%の範囲で一致することが分かった。後者の多項式フィット法は，あらかじめ被校正器あるいは線源の種類ごとに指示値を距離の関数として表しておくことで，任意の位置においても室内散乱線の影響を除外した指示値を得ることができるため，定型化された校正作業において簡便に中性子サーベイメータ等の室内散乱線補正を行うことができる。

なお，今回，実験により得られた室内散乱線補正のフィッティングカーブは，あくまでも校正場に特有のものであり，東海事業所の中性子校正場でしか適用できない。今後は，異なる構造の校正場に対しても同様の室内散乱線補正法を適用し，事業所あるいは事業者間で，系統的な誤差が生じない中性子サーベイメータの校正方法を展開していく必要がある。そしてそれらの知見を元に国内規格制定への提言を行っていく必要がある。

参考文献

１）ISO 8529-３:“Reference neutron radiations-Part ３: Calibration of area and personal dosimeters and determination of their response as a function of neutron energy and angle of incidence”,（1998）
２）例えば，原子力安全技術センター：被ばく線量の測定・評価マニュアル，（2000）
３）Y. Uwamino, T. Nakamura et al.：Nucl. Instr. Meth., A239 pp299-309,（1985）
４）W. N. Mcelroy et al., AWFL-TR-67-41,（1969）
５）ISO 10647:“Procedures for calibrating and determining the response of neutron-measuring devices used for radiation protection purposes”,（1996）