

中性子線量の計測技術と標準供給に関する調査研究

増田明彦*

(平成21年11月27日受理)

A survey on neutron measurement techniques and providing neutron national standards

Akihiko MASUDA

Abstract

Issues on neutron standards to be currently addressed fall in two major categories. One is regarding the extension to higher energy region, which are in increasing demand in industries with respect to the investigation of the effects of high-energy neutrons induced by cosmic rays on human bodies and semiconductor devices as well as the radiation protection in large scale accelerator facilities. We are developing a monoenergetic neutron standard at 19.0 MeV. Development is also in progress on measurement techniques specialized for higher energies. The other comes from the fact that conventional neutron dosimeters, even if calibrated properly, do not always show correct values in the neutron field such as workplaces in nuclear industries where neutron spectra are broad, intrinsic and different from those of the neutron sources normally used in calibrations. Various simulated work fields have been developed for calibrations of dosimeters to overcome the situation, where ongoing discussions exist at domestic and international levels concerning traceabilities to national standards. NMIJ/AIST also joins these discussions and schedules to start with the standardization of the D₂O moderated ²⁵²Cf calibration field.

1. はじめに

現代において、中性子は多くの産業、科学、医療等の場面で利用されている。例えば、原子力発電では中性子が核燃料の核分裂連鎖反応の主役であり、発電所や関連施設を含む原子力産業の現場においては常に中性子被ばくへの対策が必要とされている。また、中性子を利用した医療としてはBNCT (boron neutron capture therapy, ホウ素中性子捕捉療法) が実用化されており、ガン細胞への正確な中性子照射や放射線防護が不可欠である。また、各種科学分析のための中性子利用や、高エネルギー物理実験を行うための加速器施設等の現場においても、発生する中性子による被ばくは正確に管理されなくてはならない。また、これらは基本的に人工的に発生させた中性子場であるが、地球上には絶えず宇宙から降り注ぐ高エネルギー宇宙線に由来する中性子も存在しており、これが人体や半導体機器に及ぼす影響についても正確な

評価が必要とされている。

このような中性子利用現場の需要に対し、産総研では現在表1の標準を供給している。校正用中性子場は主に²⁴¹Am-Be線源、²⁵²Cf線源、中性子減速用黒鉛パイル、ファン・デ・グラーフ加速器及びコッククロフト・ウォルトン加速器によって実現している。また、これらの設備で実現した各種中性子標準は、図1に示す体系に則って中性子利用現場の中性子測定機器に対する標準供給に役立っている。

しかし、中性子標準の現状には大きく分けて2つの課題が存在している。1つめは、未整備のエネルギー領域の存在である。表1に示したように、現在産総研で供給している中性子フルエンス(率)のエネルギー範囲は熱中性子から14.8 MeVまでである。冒頭に挙げた宇宙線由来の中性子や高エネルギー加速器施設で発生する中性子のエネルギーは、高くは数100 MeVからGeV領域にまで達しており、これらの高エネルギー中性子にも対応する標準の整備が必要とされている。2つめは、エネルギー

* 計測標準研究部門 量子放射科 放射能中性子標準研究室

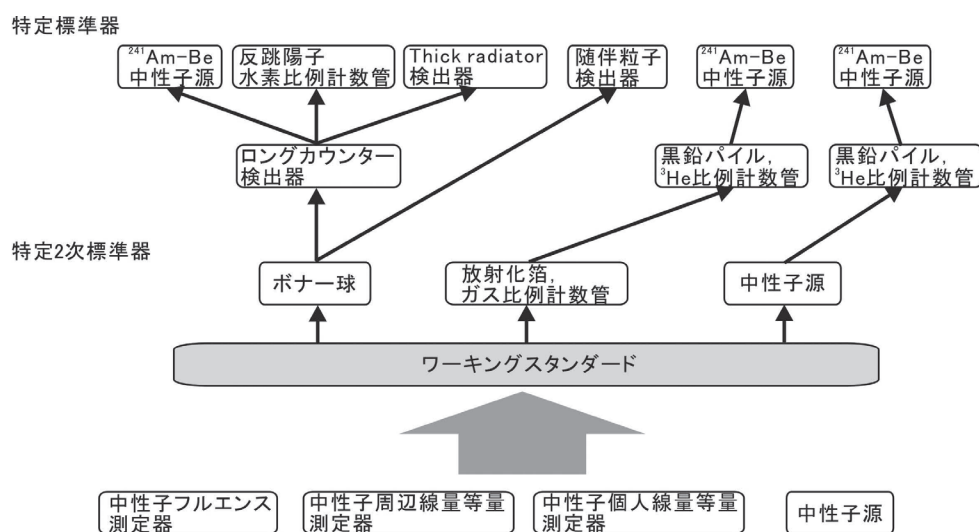


図1 中性子標準の国内トレーサビリティ体系

表1 産総研が供給している中性子標準項目

熱中性子フルエンス (率)	$^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$, ^{252}Cf
中性子個人線量当量率, 周辺線量当量率	$^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$, ^{252}Cf
速中性子フルエンス (率)	24 keV, 144 keV, 565 keV, 2.5 MeV, 5.0 MeV, 8.0 MeV, 14.8 MeV, $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$, ^{252}Cf

ギー範囲としては現在の供給標準項目の範疇にあるものの、各現場に固有な連続中性子スペクトルに対して、単色ないし特定の線源スペクトルの標準では十分な対応ができない場合が多いという問題で、中性子線量評価の精度の低さにつながっている。本稿では、これら2つの視点で現在の中性子標準の課題を捉え、背景と解決に向けた国内外の動向の調査結果及び産総研としての取り組みの概要について報告する。

2. エネルギー範囲の拡大：高エネルギー中性子標準

2.1 背景

2.1.1 宇宙線に起因する高エネルギー中性子

高エネルギー中性子標準が望まれる領域として、宇宙線由来の放射線が人体や半導体機器に及ぼす影響の管理や評価がある。地球では、地球の磁気圏の影響により地上に到達する宇宙線粒子の量は抑えられている（磁気バ

リア）が、一部の高エネルギー宇宙線粒子はそのまま大気圏に突入し、大気を構成する原子、原子核と相互作用することで2次粒子を生成し、その2次粒子がさらなる相互作用で粒子生成を連鎖的に繰り返すカスケード反応と呼ばれる現象が発生する（図2）。地上にはカスケード反応で生成された2次粒子の一部が到達し、その線量は世界平均で年間0.4 mSvであるが、高地や航空機高度ではその放射線量はさらに多い。この高エネルギー宇宙線由来の放射線量のうち、例えば民間の国際線航空機高度では約6割が中性子であり、そのスペクトルは主に数100 MeVの高エネルギー中性子からなることが明らかにされている¹⁾。この宇宙線起因の高エネルギー中性子が引き起こす問題として、航空機乗務員の被ばく管理や、半導体ソフトエラー評価が挙げられる。

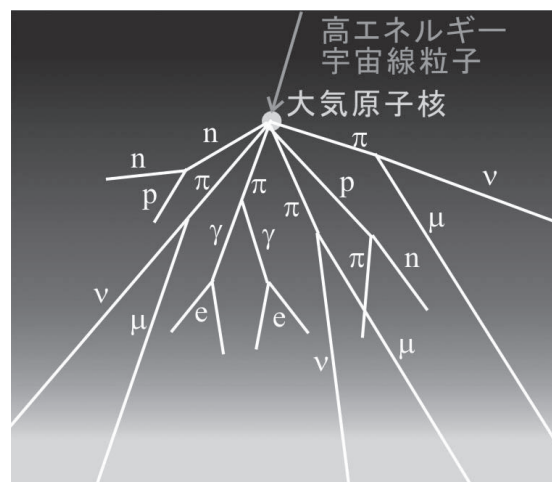


図2 高エネルギー宇宙線粒子によるカスケード反応

(1) 航空機乗務員の被ばく管理

航空機乗務員の搭乗業務中の被ばく量は、例えば東京－ニューヨーク間往復（約25時間）でおよそ0.2 mSvである。年間300－900時間程度の搭乗業務を仮定すると、最大で年間7 mSvの被ばく線量が見積もられる。これは放射線障害防止法で放射線業務従事者に定められている実効線量限度の年間50 mSv、5年間100 mSvには満たないが、同法で一般公衆に対して定められている実効線量限度の年間1 mSvを大きく上回っている。日本国内の航空会社所属で国際線に乗務する乗務員は、運行乗務員と客室乗務員を合わせておよそ16,000人である²⁾。また客室乗務員には妊娠の可能性がある女性の割合が多いことも、被ばく管理の重要性を考える上で大切な要素であろう。わが国では、文部科学省放射線審議会によって『航空機乗務員の宇宙線被ばく管理に関するガイドライン』が定められ、航空事業者が自主的な取り組みとして実施すべき対応として、

- ・年間5 mSvを管理目標値とした被ばく線量を抑える自主的な努力
- ・被ばく線量の十分な精度の計算と、必要に応じ実測による評価
- ・乗務員個人毎の被ばく線量管理

を定めており、2006年に国内の航空会社に通達されている。計算による評価としては、放射線医学総合研究所によるJISCARD（Japanese Internet System for Calculation of Aviation Route Doses, 航空線量計算システム）³⁾等が開発されている。実測では、国内外で航空機を利用した航空機高度での中性子線量測定手法・測定装置の研究開発が行われている^{1),4)}。航空機における被ばくは、突発的な太陽活動等による例外を除けば、前述の通達にもあるように、航路、高度、太陽活動サイクルを考慮した計算によって日常的な被ばく管理は可能とされている。しかしその計算手法や条件は常に実測による検証を受けている必要があり、その実測に用いる測定機器を通して国家標準へのトレーサビリティが確保される必要がある。

(2) 半導体ソフトウェア

半導体ソフトウェアとは、半導体デバイスに数10 MeV以上の中性子が入射するとSi等の原子核と核反応を起こし、生じたイオンの飛跡に沿って電荷対が生成され（図3）、メモリ情報（0,1）を反転させてしまうことによる誤動作である。ソフトウェア対策技術の向上の一方で、半導体デバイスの微細化が進みソフトウェアの発生率は年々大きくなってきている⁵⁾。ソフトウェアはデバイスそのものが損傷を受けるのではなく、放射線によって生成した電荷が情報を乱すだけであるから、ソフ

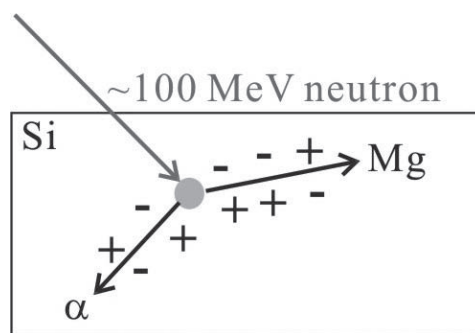


図3 高エネルギー中性子による半導体物質内での電荷生成

トエラーを検出するための信号を同時に流すことによって検出し訂正することが可能であるが、その分処理及び転送速度が損なわれコスト増につながる。そのため半導体機器にはソフトウェアへの耐性を試験することが求められている。

ソフトウェアの原因となる宇宙線起因の放射線のうち、アルファ粒子と熱中性子に対しては、材料の純度の向上によって対処されており、現在では高エネルギー中性子への対策が主な課題とされている。そこで用いられる高エネルギー中性子の照射試験は、かつてはLANL（Los Alamos National Laboratory）の中性子照射設備における白色高エネルギー中性子照射試験のみが国際的に認められているJEDEC（Joint Electron Device Engineering Council）に認定されていたが、日本の企業が開発した準単色法がJEDECに採択され⁶⁾、東北大学FNL（Fast Neutron Laboratory, 高速中性子実験室）、CYRIC（Cyclotron and Radioisotope Center, サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター）、大阪大学RCNP（Research Center for Nuclear Physics, 核物理研究センター）、JAEA（Japan Atomic Energy Agency, 独立行政法人日本原子力研究開発機構）、TIARA（Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application, 高崎量子応用研究所イオン照射研究施設）が校正施設として認定されるなど、国内の高エネルギー中性子発生施設を活用する下地が整っており、これらの信頼性を担保するために数100 MeVまでの高エネルギー中性子標準が必要とされている。

2.1.2 大型加速器施設の遮へい問題

各種研究用途で建設されている先端的な大型加速器では、エネルギーフロンティア・強度フロンティアの追求が進んでいる。最近までは1 TeVまでの陽子加速が可能でフェルミ国立加速器研究所のTevatronが世界最大の加速器であった。以降、CERN（European Organization for Nuclear Research）では2008年に世界最高の加速エネル

ギー（陽子を7 TeVまで加速）による高エネルギー物理実験を目的としたLHC（Large Hadron Collider）が稼働を開始した。日本では、2008年に世界最高クラスの大強度陽子ビーム加速器とそれを利用する実験施設を備えたJAEA/KEK（高エネルギー加速器研究機構）のJ-PARC（Japan Proton Accelerator Research Complex, 大強度陽子加速器施設）が運転を開始している。こういった大型加速器での加速粒子によって発生した2次中性子は、遮へい体を透過し屋外に漏洩するとともに、遮へい構造物を放射化する。遮へい体の内外の中性子のエネルギースペクトルは運転条件等によっても変化するためひとつに決められるものではないが、数100 MeVまでの高エネルギー中性子を含んでいる⁷⁾。施設内の従事者及び施設周辺の放射線防護の最適化を図るためには、現在14.8 MeVまでしか整備されていない単色中性子フルエンス（率）標準をさらに高エネルギーへ拡張することが必要とされている。

2.2 測定手法

2.2.1 高エネルギー中性子のフルエンス測定法

高エネルギー中性子のフルエンスを精度良く測定するには、反跳陽子カウンターテレスコープが有用である。反跳陽子カウンターテレスコープでは、図4に示すように、高エネルギー中性子をポリエチレンのラジエータに入射させてポリエチレン中の水素原子核と弾性散乱を起こさせ、反跳された水素原子核（反跳陽子）を検出するものである。利点としては、中性子と水素の弾性散乱断面積の信頼性が良く、検出効率の不確かさが小さいものが得られる。難点としては、検出器構造材との非弾性散乱による2次粒子の影響の評価が困難であることや、半

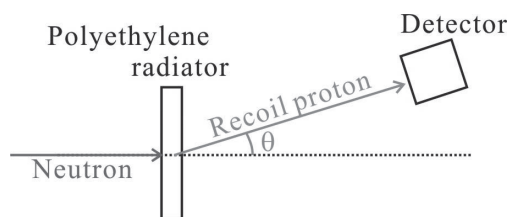


図4 反跳陽子カウンターテレスコープによる測定原理

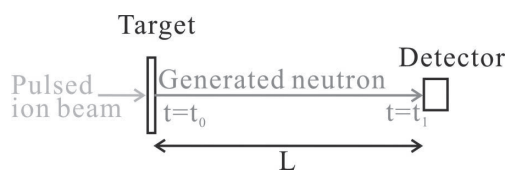


図5 TOF法による中性子スペクトル測定原理

導体検出器を反跳陽子検出器に用いた場合には放射線損傷に注意しなければならないこと等が挙げられる。

2.2.2 高エネルギー中性子のエネルギースペクトル測定法

中性子のエネルギースペクトル測定として最も信頼性が得られるのはTOF（Time of flight）法である。これは、図5に示すように、中性子が一定の距離 L を通過するのにかかった時間 $t_1 - t_0$ を測定することによってその運動エネルギー E_n を次式から決定するものである。

$$E_n = \frac{m_n v_n^2}{2} = \frac{m_n L^2}{2(t_1 - t_0)^2}$$

ここで、 m_n 、 v_n は中性子の質量及び速度である。TOF法はシンプルかつ精度の良い測定であり、またエネルギースペクトルの一括取得が可能であることが大きな利点である。一方で、中性子源がパルス運転でなければならないという制約もある。パルス運転ができない中性子源の場合のエネルギー測定には、反跳陽子測定法が用いられる。これは反跳陽子カウンターテレスコープと同じ原理の測定器で、反跳陽子のエネルギー E_p と反跳角 θ を測定することで運動学的に入射中性子のエネルギー E_n を求めるものである。この方法には、ポリエチレンラジエータ内での反跳陽子のエネルギー損失や反跳陽子検出器のもつ立体角により精度が制約されるという欠点があるが、産総研では、これまでに位置敏感型比例計数管とSi(Li)半導体検出器を組み合わせ、これらの問題を改善した反跳陽子測定法を実現する複合型スペクトロメータを開発している⁸⁾。

2.3 高エネルギー中性子標準への取り組み

2.3.1 19.0 MeV単色中性子フルエンス（率）標準

現在の産総研の単色中性子標準（14.8 MeVまで）よりも高いエネルギーでISOに規格が存在するのは19.0 MeVのみである。19.0 MeV単色中性子フルエンス標準について、現在BIPM（Bureau International des Poids et Mesures, 国際度量衡局）のKCDB（Key Comparison Data Base, 基幹比較データベース）にCMC（Calibration and Measurement Capabilities）登録されているのはドイツのPTB（Physikalisch-Technische Bundesanstalt）のみであるが、英国のNPL（National Physical Laboratory）、フランスのIRSN（Institut de Radioprotection et de Surete Nucleaire）も標準場を完成させている。

産総研でも、高エネルギー中性子標準の第一歩として、2005年から19.0 MeV中性子フルエンス（率）標準

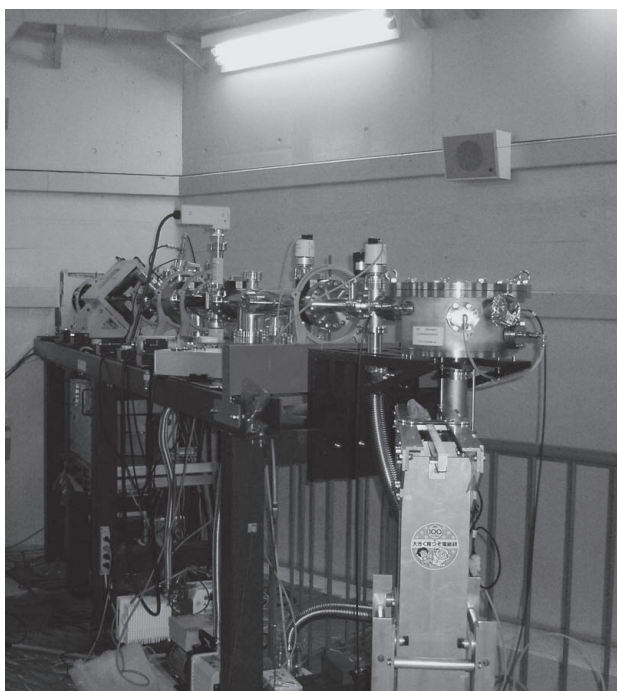


図6 現在構築中の19.0 MeV単色速中性子フルエンス（率）標準用ビームライン

の開発に取り組んでおり（図6）、2010年に立ち上げ・供給開始する予定である。中性子源としては、現在稼働中のファン・デ・グラーフ加速器からの重水素ビームと銅板に蒸着したチタンに吸蔵させたトリチウムターゲットによる ${}^3\text{T}(d,n){}^4\text{He}$ 反応を用い、検出器としては反跳陽子カウンターテレスコープを用いる予定である。

2.3.2 20 MeV以上の高エネルギー中性子標準

20 MeV以上の高エネルギー中性子標準を確立するための要件としては、高エネルギー中性子測定技術そのものの発展とともに、これを支持するための核データの充実が必要である⁹⁾。また、高エネルギー中性子発生施設の建設に要する莫大なコストも大きな障壁となっている。しかし、日本にはTIARA, CYRIC, RCNPといった高エネルギー中性子を発生することのできる施設が世界的に見ても集中的に存在しており、高エネルギー中性子標準を開発する下地の整った環境といえよう。20 MeV以上の高エネルギー標準のために産総研において新たな大規模加速器施設を建設するのは現実的でないため、国内の加速器施設を利用した高エネルギー中性子標準の確立を検討している。現在はTIARAやCYRICを中心に高エネルギー中性子場の特性評価・相互比較や検出器の開発に取り組んでいる。

3. 作業場における中性子計測

近年、放射線作業場での中性子計測における標準供給のあり方が問題となっている。ここで問題とする作業場とは、原子力発電所、中性子源工場、使用済み核燃料貯蔵施設、再処理工場など原子力産業に関わる施設が中心であるが、前節で取り上げた加速器施設周辺や高高度航空機内も含まれる¹⁰⁾。これらの作業場での線量測定が正確でないと、被ばく線量を過小評価した場合には業務従事者や周辺住民の健康被害はもとより、コンプライアンスや安全安心の観点で大きな過失を犯すことになり、被ばく線量を過大評価した場合には安全性は保たれるものの、作業効率の悪化や人件費の増大、遮へい対策等で本来必要のないコストを課すことになり関連産業の生産性を不必要に低下させてしまう。そのため、国家標準にトレーサブルで国内外において信頼の得られる正確な線量測定が必要とされている。

ここに挙げた作業場での中性子線量評価の問題点は、それぞれの作業場に固有で、熱中性子から数100 MeVに渡る幅広い中性子スペクトルが存在していることである。例えば、文献¹¹⁾ではスロベニアのKrsko原子力発電所で原子炉格納容器の前と蒸気発生機の建屋内のある地点のスペクトルが、文献¹²⁾ではチェコのDukovany原子力発電所の使用済み核燃料貯蔵庫内でキャスク（格納容器）の隙間とキャスクの上方での中性子スペクトルが明らかにされている。このように原子力関連現場の中性子スペクトルは施設によっても、また同じ施設内でも場所によって全く異なり、校正用中性子源の中性子スペクトルと異なることが知られている。一方で、通常の線量計は中性子のエネルギーにより応答が異なり¹³⁾、さらにフルエンスから線量当量を求める換算係数にもエネルギー依存性がある。このような測定対象中性子場の特性と線量計の特性の組み合わせによる測定結果の差異について、2001年から欧州各国の計量標準機関を集めてECのサポートによりEVIDOS（Evaluation of Individual Dosimetry in Mixed Neutron and Photon Radiation Fields）という評価プロジェクトが進められ¹⁴⁾、PTBやIRSNのスペクトロメータで綿密なスペクトル評価をし直した結果、市販のエリアモニタや個人線量計が数10%過小または過大な表示をすることが実証されている。IRSNのSIGMAと呼ばれる模擬場での実験においては、代表的な線量計が過大または過小な線量を表示したことが報告されている¹⁵⁾。さらに、例えばKrummel原子炉の炉心近傍のような頭上方向からの中性子線量の多い場では、一般的な胴体に装着するタイプの個人線量計は42%も過小評価

するような事象も確認されている。また、2003年にはIAEA (International Atomic Energy Agency, 国際原子力機関) によっても線量計評価や模擬場に関する国際比較が行われている¹⁶⁾。

3.1 連続スペクトル中性子場における線量当量の算出

放射線防護で用いられる線量当量とは、人体組織に対しどれだけのエネルギー付与があったかを示す量であり、中性子に関しては照射された中性子スペクトラルフルエンス $\Phi(E)$ に対し、中性子のエネルギーによる生物効果の差異を勘案してエネルギー毎に定められている換算係数 $h^*_\phi(E)$ を乗じることによって求められる。従って、算出されるべき線量当量は

$$\int_E h^*_\phi(E)\Phi(E)dE$$

であるが、現実的には全スペクトラルフルエンスに乗じるだけで線量当量を算出できる平均換算係数

$$\langle h^*_\phi \rangle = \frac{\int_E h^*_\phi(E)\Phi(E)dE}{\int_E \Phi(E)dE}$$

を算出し利用する。実際には線量計の応答にもエネルギー依存性があるため、真のスペクトラルフルエンスは $\Phi(E)=n(E)\Phi_R(E)$ であり、 $(\Phi_R(E))$ はある条件で校正された線量計の計数結果から、線量計の応答のエネルギー依存性を考慮せずに導出されるフルエンス、 $n(E)$ は線量計に固有な係数、平均換算係数の決定には各線量計の応答曲線と測定対象となる作業場のスペクトルを把握する必要がある。そのため、測定対象となる作業場と線量計の組み合わせに対して固有な換算係数を設定しなければならない。

この課題に対し、作業場の測定に用いられる中性子測定器の校正方法として、次の選択肢が挙げられる：

1. 測定対象となる作業場のスペクトルをその都度測定する。得られたスペクトルと線量計の応答曲線によって検出器の読み値から真の線量当量を得るための係数を導出する。
2. 作業場と同様のスペクトルを持つ線量既知の校正用模擬場を構築する。模擬場に線量計を持ち込み、その模擬場に与えられている既知の線量と検出器の読み値を比較することで、検出器の読み値から真の線量当量を得るための係数を導出する。

1つめの方法は、チェコの家計量標準機関であるCMI (Czech Metrology Institute) が採用しており、PTBで校正されたスペクトロメーターを用いた周辺線量測定としてCMCにも登録されている¹⁷⁾。その一方で多くの

計量標準機関は2つめの手法を採用しており、ISO 12789によって模擬作業場の構築^{18),19)}と校正の手続き²⁰⁾に関する指針がまとめられている。

3.2 模擬作業環境場

本節では、ISO 12789で定められている模擬作業場への要求事項について、既の実現している模擬作業場の実例を交えながらまとめる。模擬作業場スペクトルのための中性子源としては、放射性核種による線源、加速器駆動による線源、原子炉による線源の3種類がある。これらの線源が生成する初期スペクトルに対し、減速材によるスペクトル変調を加え、目的の中性子スペクトルを再現する。また特別な例として、大型加速器施設を用いた高エネルギーに対応した模擬場についても触れる。

3.2.1 放射性核種を使った模擬場

一般的な中性子線源である²⁴¹Am-Beや²⁵²Cf線源に、スペクトルを変調させるための減速材としてポリエチレン、コンクリート、金属、重水などを組み合わせる。放射性核種中性子源と減速材という構造自体、実際の原子力産業の作業場の中性子源と同一の構成である点で好ましいとされている。また、測定時間内における中性子放出率の変動がなく、半減期による線源強度の補正を行うだけで良いことも利点である。ただし、得られる中性子フルエンス率が小さいこと、比較的強度の得られる²⁵²Cf線源では半減期が2.65年と短く、頻繁な線源交換が必要となってしまうことなどが難点である。現在運用されている放射性核種を用いた模擬作業場の例としては、PTBにおいて²⁵²Cf線源と重水(D₂O)減速材を組み合わせ、コンクリート壁に囲まれた中規模照射室において構築されたものがある²¹⁾。

3.2.2 加速器を使った模擬場

放射性核種を利用する場合と同様に、加速器で発生したイオンビームを入射して、中性子を発生するためのターゲットの周りにスペクトル形状を変調するための減速材を設置して構築する。減速材に加えて核分裂物質を設置し、その2次中性子を利用することもある。この形式のメリットは、加速器のビーム電流量を調節することにより、照射室内の体系に手を加えることなく中性子場の強度が可変なことである。しかし一方で、加速器を新設するような場合には高いコストがかかるのが難点である。また、加速器は出力に不安定性があるため、随伴粒子検出器などを用いたアクティブ同時モニタリングが照射時間を通して必要である²²⁾。

加速器駆動の中性子線源を用いた模擬作業場の例としては、ISPN-CEA (Institute de Protection et de Sureté Nucléaire - French Atomic Energy Commission) の Cadarache Laboratory の模擬場^{23),24)}がある。ここでは、³Hターゲットでの³H(d,n)反応による14 MeV中性子源を用い、直後に劣化ウランのシェルを設置し、そこで生成される2次中性子に対し、さらに鉄及び重水減速材を置いてスペクトルの変調を行っている。この施設ではEURADOS (the European Radiation Dosimetry Group) Working Group 7²⁵⁾やEUROMET (European Collaboration on Measurement Standards) project No.670²⁶⁾などによる国際比較も行われている。

3.2.3 原子炉を使った模擬場

原子炉を中性子源とする場合には、原子炉から照射室へ中性子を導くビームポート内外に減速材を設置する。加速器と同じく、照射時間を通してのアクティブ同時モニタリングが必要であり、原子炉出力とモニタ検出器によるクロスチェックがISO 12789-2で推奨されている。原子炉を線源とする模擬場は、その強度を生かして臨界事故等を想定した、緊急被ばく時の線量計の挙動までを評価することができるのが大きな利点であるが、放射線防護や運転・管理上の負担が大きく、採用例は少ない。

具体例としては、ISPN-CEAにてSILENEと呼ばれる研究用原子炉を用いた模擬場が構成されている。EU (EC) の支援を受けた国際比較も行われており²⁷⁾、1999年に日本で発生したJCO臨界事故を受けて、2002年に行われた臨界事故時の緊急被ばくを模した中性子場による国際比較には、日本からも核燃料サイクル開発機構及び日本原子力研究所(ともに当時名、現・日本原子力研究開発機構)が参加した²⁸⁾。

3.2.4 高エネルギー中性子源を用いた模擬場

高エネルギー中性子を対象とする模擬作業場の構築には、大規模加速器施設を利用する。具体例としては、CERNにて数100 GeVのハドロンビームとの銅ターゲットへの入射によって90°方向に生成し、コンクリート及び鉄のシールドを抜けた高エネルギー中性子を用いた模擬場CERF (the CERN-EU high-energy Reference Field)²⁹⁾⁻³¹⁾が1992年に構築されており、加速器周辺の作業環境測定手法に関する研究が行われ^{32),33)}、国際比較も実施された実績を持つ。さらに、CERFのコンクリート防護屋根の外での中性子スペクトルが、航空機内の宇宙線中性子スペクトルと酷似していることが立証され、航空機乗務員の被ばく管理を目的とした線量計評価への応用

も進められており³⁴⁾、その高度化研究にも利用されている³⁵⁾。また、放射線治療のための高エネルギー加速器施設においても、照射室内外に生成される中性子場の測定が必要とされている。GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH) では、400 MeV炭素イオンビーム治療施設の照射室を利用して国際比較も行われている³⁶⁾⁻³⁸⁾。

3.3 模擬作業環境中性子場のトレーサビリティ

作業場の中性子線量測定に関する校正では、既述の通り、目的のスペクトル分布を正しく再現し、適切な平均換算係数を設定することが重要であるから、スペクトル分布測定に対するトレーサビリティを備えることが必要である。ISO 12789でも、計量標準機関において校正されたスペクトル分布測定装置を用いてのみ、トレーサビリティが確保されるものと規定している²⁰⁾。

しかしながら、国内の校正機関で構築されている模擬作業場では、中性子線源の放出率に国家標準のトレーサビリティが与えられているにとどまっており、線源に減速材を組み合わせることで生成された作業場スペクトルに対する直接のトレーサビリティが確保されていないのが現状である³⁹⁾。単色ないし線源スペクトルで供給している中性子国家標準と、現場で利用される量である中性子線量の間をつなぐトレーサビリティの確立が求められている状況である。

3.4 産総研の取り組み

3.4.1 重水減速²⁵²Cf中性子場の構築

現在産総研では、作業場測定に対してトレーサビリティを供給するための中性子標準の一つとして、重水減速²⁵²Cf中性子校正場の構築を計画している。これは、²⁵²Cf線源を球状の重水タンクの中央に設置したもので、ISO 8529でも単体の²⁴¹Am-Be、²⁵²Cf線源に次ぐ3番目の校正用線源として規定されている。²⁵²Cf線源放出スペクトルに対し重水による減速効果で変調を与えることで、図10から分かるように、²⁴¹Am-Be線源、²⁵²Cf線源を単体で使用した場合に比べ、一般的な原子炉である軽水炉付近で見られるような低エネルギー成分の多い中性子スペクトル(平均エネルギー0.55 MeV)が得られる。ここで減速材として通常の水(軽水)ではなく重水を用いるのは、軽水と比べ中性子の吸収が少なく大きなフルエンスが得られるためである。これでも各作業場で異なる中性子スペクトルの全てに適した校正を行うことはできないが、非常に需要の多い原子炉付近に近いスペクトルを比較的簡便に得られるとして、ISO 8529に規定されている重水減速場を整備することは大変重要であり、作業

場の線量測定に対するトレーサビリティの充実を目指す上での第一歩となる。

3.4.2 模擬場へのトレーサビリティの実現に向けた取り組み

模擬作業場に対するトレーサビリティのあり方については、既に紹介したように国内の校正機関からも議論、方針の策定への要求がある。また、国際的にも、BIPM/CCRI (Consultative Committee for Ionizing Radiation) (III) において“Special Issue of METROLOGIA on: Neutron Metrology – Simulated Workplace Neutron Fields”として、模擬作業場に対してどのようにトレーサビリティを与えていくべきかの指針を打ち出すための協議が行われている状況にある。このようなことから分かるように、これは世界中で未だ模索されている状態であり、産総研としては国内の校正機関や作業場のユーザの意見を広く取り入れつつ、国際的な場での検討に積極的に加わっていくべきであると考えられる。

4. 結論

現在、産総研の中性子国家標準が抱える課題について、エネルギー領域の拡大と、作業場の中性子線量測定へのトレーサビリティの確立との2つの側面から調査と考察を行った。

エネルギー領域の拡大に関しては、航空機乗務員の被ばく管理、ソフトウェア評価試験、大規模加速器施設の放射線管理等の現場で数100 MeVまでの中性子標準の供給が期待されていることを述べた。これに応じて、産総研では現在単色中性子フルエンス(率)標準の19.0 MeVへの拡張を進めると同時に、国内の高エネルギー加速器施設を利用し、標準場構築の検討と測定技術の開発を進めている。

作業場の中性子線量測定へのトレーサビリティ確立に関しては、原子力関連産業を中心とした現場において、固有かつ広範囲なエネルギースペクトルが存在し、現在の方法で校正された線量計では数10%のオーダーで過小または過大に評価されるため、世界的に問題視されていることを紹介した。また、線量計により高精度な校正をするための模擬校正場の構築方法をまとめた。国家標準から作業場へのトレーサビリティを確立するための方法がBIPM/CCRI(III)でも議論されており、産総研としては国内の校正事業者や線量測定現場の現状をふまえ、国際的な議論に加わっていく必要性を認識した。

謝辞

本調査研究を行うに当たりご指導・ご助言を頂きました。量子放射科科長松野良穂博士、放射能中性子標準研究室室長柚木彰博士、中性子標準グループ原野英樹博士、松本哲郎博士、及び量子放射科の皆様にご感謝申し上げます。

参考文献

- 1) P. Goldhagen, J. M. Clem and J. W. Wilson: The energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons measured on an airplane over a wide range of altitude and latitude, *Radiat. Prot. Dosim.* 110 (2004) 387-392.
- 2) 文部科学省, 放射線安全規制討論会, 航空機乗務員等の宇宙線被ばくに関する検討ワーキンググループ, 資料第4-3号
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyu-tu/004/006/shiryo/04121401/002.htm
- 3) <http://www.nirs.go.jp/research/jiscard/index.shtml>
- 4) H. Yasuda and K. Fujitaka: Cosmic radiation protection dosimetry using the electronic personal dosimeter (EPD) in selatec international flight, *J. Rad. Res.* 42 (2001) 57.
- 5) A. Dixit, R. Heald and A. Wood: Trends from ten years of soft error experimentation, *Proc. of 2009 IEEE workshop on silicon errors in logic – system efforts (SELSE5)*, to be published.
- 6) JEDEC JESD89A, Measurement and Reporting of Alpha particle and Terrestrial Cosmic Ray – Induced Soft Errors in Semiconductor Devices, Solid State Technology Association (2006).
- 7) 中島宏: 高エネルギー粒子加速器施設の遮蔽設計法の現状とその精度評価, *RIST ニュース* 47 (2009) 3-14.
- 8) T. Matsumoto, H. Harano, A. Uritani and K. Kudo: Fast neutron spectrometer composed of PSPCs and Si(Li)-SSDs with excellent energy resolution and detection efficiency, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 52 (2005) 2923.
- 9) H. Schuhmacher: Neutron calibration facilities, *Radiat. Prot. Dosim.* 110 (2004) 33-42.
- 10) P. Bilski, J. Blomgren, F. d’Errico, A. Esposito, G. Fehrenbacher, F. Fernandez, A. Fuchs, N. Golnik, V. Lacoste, A. Leuschner, S. Sandri, M. Silari, F. Spurny, B. Wiegel and P. Wright: The problems associated with the monitoring of complex workplace radiation fields at European high-en-

- ergy accelerators and thermonuclear fusion facilities, Radiat. Prot. Dosim. 126 (2007) 491-496.
- 11) B. Breznik, J. L. Pochat, H. Muller, B. Asselineau and M. Pavlin: Characterization of neutron field in a NPP workplace, Radiat. Prot. Dosim. 125 (2007) 376-378.
 - 12) M. Kralik, V. Kulich, J. Studeny and P. Pokorny: Dosimetry at an interim storage for spent nuclear fuel, Radiat. Prot. Dosim. 126 (2007) 549-554.
 - 13) J. Saegusa, M. Yoshizawa, Y. Tanimura, M. Yoshida, T. Yamano and H. Nakaoka: Evaluation of energy responses for neutron dose-equivalent meters made in Japan, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 516 (2004) 193-202.
 - 14) T. Bolognese-Milsztajn, D. Bartlett, M. Boschung, M. Coeck, G. Curzio, F. d' Errico, A. Fiechtner, V. Giusti, V. Gressier, J. Kyllonen, V. Lacoste, L. Lindborg, M. Luszik-Bhadra, C. Molinos, G. Pelcot, M. Reginatto, H. Schuhmacher, R. Tanner, F. Vanhavere and D. Derdau: Individual neutron monitoring in workplaces with mixed neutron/photon radiation, Radiat. Prot. Dosim. 110 (2004) 753-758.
 - 15) R. J. Tanner, T. Bolognese-Milsztajn, M. Boschung, M. Coeck, G. Curzio, F. d' Errico, A. Fiechtner, J. -E. Lillhok, V. Lacoste, L. Lindborg, M. Luszik-Bhadra, M. Reginatto, H. Schuhmacher and F. Vanhavere: Achievements in workplace neutron dosimetry in the last decade: Lessons learned from the EVIDOS project, Radiat. Prot. Dosim. 126 (2007) 471-476.
 - 16) R. Cruz Suarez, H. Schuhmacher, J. L. Pochat, A. Zimbal and K. Mrabit: Intercomparison on measurements of the quantity personal dose equivalent Hp(d) in mixed (neutron-gamma) fields - An IAEA project, Radiat. Prot. Dosim. 125 (2007) 61-18.
 - 17) The BIPM key comparison database, Calibration and measurement capabilities, Ionizing Radiation, Neutron Measurements, Czech Republic, May 2005.
 - 18) ISO 12789-1, Reference radiation fields - Simulated workplace neutron fields- Part1: Characteristics and methods of production, International Organization for Standardization (2008).
 - 19) J. C. McDonald, W. G. Alberts, D. T. Bartlett, J. -L. Chartier, C. M. Eisenhauer, H. Schraube, R. B. Schwartz and D. J. Thomas: Current status of an ISO working document on reference radiations: Characteristics and methods of production of simulated practical neutron fields, Radiat. Prot. Dosim. 70 (1997) 323-325.
 - 20) ISO 12789-2, Reference radiation fields - Simulated workplace neutron fields- Part2: Calibration fundamentals related to the basic quantities, International Organization for Standardization (2008).
 - 21) H. Kluge, A. V. Alevra, S. Jetzke, K. Knauf, M. Matzke, K. Weise and J. Wittstock: Scattered neutron reference fields produced by radionuclide sources, Radiat. Prot. Dosim. 70 (197) 327-330.
 - 22) N. E. Hertel and B. W. Wehring: Absolute monitoring of DD and DT neutron fluences using the associated-particle technique, Nucl. Instr. Meth. 172 (1980) 501-506.
 - 23) J. L. Chartier, F. Posny and M. Buxerolle: Experimental assembly for the simulation of realistic neutron spectra, Radiat. Prot. Dosim. 44 (1992) 125-130.
 - 24) J. L. Chartier, B. Jansky, H. Kluge, H. Schraube and B. Wiegel: Recent developments in the specification and achievement of realistic neutron calibration fields, Radiat. Prot. Dosim. 70 (1997) 305-312.
 - 25) D. J. Thomas, J. -L. Chartier, H. Klein, O. F. Naismith, F. Posny and G. C. Taylor: Results of a large scale neutron spectrometry and dosimetry comparison exercise at the Cadarache moderator assembly, Radiat. Prot. Dosim. 70 (1997) 313-322.
 - 26) V. Gressier, V. Lacoste, L. Lebreton, H. Muller, G. Pelcot, M. Bakali, F. Fernandez, M. Tomas, N. J. Roberts, D. J. Thomas, M. Reginatto, B. Wiegel and J. Wittstock: Characterisation of the CANLET/T400 facility producing realistic neutron fields for calibration and test purposes, Radiat. Prot. Dosim. 110 (2004) 523-527.
 - 27) R. Medioni, B. Asselineau, B. Verrey, F. Trompier, C. Texier, H. Muller, G. Pelcot, I. Clairand, X. Jacquet and J. L. Pochat: Criticality accident dosimetry systems: An international intersomparison at the SILENE reactor in 2002, Radiat. Prot. Dosim. 110 (2004) 429-436.
 - 28) 三上智：臨界事故時の被ばく線量評価に関する国際相互比較試験，保健物理，37 (3) (2002) 176-178.
 - 29) A. Aroua, M. Hoefert, A. V. Sannikov and G. Stevenson: Reference high energy neutron fields at CERN, CERN Report CERN/TIS-RP/TM/94-12 (1994).
 - 30) C. Birattari, A. Ferrari, M. Hoefert, T. Otto, T. Rancati and M. Silari: Recent results at the CERN-EC high energy reference foels facility, Proc. of Third Specialists Meeting on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities, (Sendai, Japan, May 1997) 219-234.
 - 31) H. Schraube, V. Mares, S. Roesler and W. Heinrich: Experimental verification and calculation of route doses, Ra-

- diat. Prot. Dosim. 86 (1999) 309–315.
- 32) M. Silari: Workplace characterisation in mixed neutron–gamma fields, specific requirements and available methods at high–energy accelerators, *Radiat. Prot. Dosim.* 124 (2007) 230–244.
- 33) S. Mayer, D. Forkel–Wirth, M. Fuerstner, H. G. Menzel, M. J. Mueller, D. Perrin, C. Theis and H. Vincke: Response of neutron detectors to high–energy mixed radiation fields, *Radiat. Prot. Dosim.* 125 (2007) 289–292.
- 34) A. Mitaroff and M. Silari: The CERN–EU high–energy reference field (CERF) facility for dosimetry at commercial flight attitudes and in space, *Radiat. Prot. Dosim.* 102 (2002) 7–22.
- 35) M. Luszik–Bhadra: Electronic personal neutron dosimeters for high energies: Measurements, new developments and further needs, *Radiat. Prot. Dosim.* 126 (2007) 487–490.
- 36) S. Rollet, S. Agosteo, G. Fehrenbacher, C. Hranitzky, T. Radon and M. Wind, Intercomparison of radiation protection devices in a high–energy stray neutron field, Part I: MonteCarlo simulations, *Radiat. Meas.* 44 (2009) 649–659.
- 37) B. Wiegel, S. Agosteo, R. Bedogni, M. Caresana, A. Esposito, G. Fehrenbacher, M. Ferrarini, E. Hohmann, C. Hranitzky, A. Kasper, S. Khurana, V. Mares, M. Reginatto, S. Rollet, W. Ruhm, D. Schardt, M. Silari, G. Simmer and E. Weitzenegger: Intercomparison of radiation protection devices in a high–energy stray neutron field, Part II: Bonner sphere spectrometry, *Radiat. Meas.* 44 (2009) 660–672.
- 38) M. Silari, S. Agosteo, P. Beck, R. Bedogni, E. Cale, M. Caresana, C. Domingo, L. Donadille, N. Dubourg, A. Esposito, G. Fehrenbacher, F. Fernandez, M. Ferrarini, A. Fiechtner, A. Fuchs, M. J. Garcia, N. Golnik, F. Guterath, S. Khurana, Th. Klages, M. Latocha, V. Mares, S. Mayer, T. Radon, H. Reithmeier, S. Rollet, H. Roos, W. Ruhm, S. Sandri, D. Schardt, G. Simmer, F. Spurny, F. Trompier, C. Villa–Grasa, E. Weitzenegger, B. Wiegel, M. Wielunski, F. Wissmann, A. Zechner and M. Zielczynski: Intercomparison of radiation protection devices in a high–energy stray neutron field, Part III: Instrument response, *Radiat. Meas.* 44 (2009) 673–691.
- 39) 谷村嘉彦 : JAEA 原子力科学研究所における中性子校正場の現状, NMIJ 計測クラブ, 放射線・放射能計測クラブ第3回研究会(2006.10.25).