

RI を代替する小型加速器を用いた 模擬 γ 線線量校正場の開発



石井 隼也
Ishii Junya



佐藤 大輔
Satoh Daisuke



藤原 健
Fujiwara Takeshi



田中 真人
Tanaka Masahito



加藤 昌弘
Kato Masahiro



黒澤 忠弘
Kurosawa Tadahiro

1 はじめに

セシウム 137 (^{137}Cs) やコバルト 60 (^{60}Co) 等の放射性同位体 (RI; Radioisotope) は、多くの有用な用途があるにもかかわらず、使用に伴う固有のリスクが存在する。これらの物質は、放射性物質散布装置、つまり「ダーティー・ボム」にも使用される可能性がある。日本では、国際原子力機関 (IAEA) による核セキュリティ勧告等の国際的な動向を踏まえた法改正により 2019 年 9 月 1 日に施行された「放射性同位元素等の規制に関する法律」では、特定放射性同位元素として指定される高強度の RI 線源 (100 GBq 以上の密封された ^{137}Cs 等) は、盗取からの防護のためのセキュリティについて厳しい規定が定められた。これに伴い、その防護要件を満たすための管理費用が増加しており、近年の RI 線源の価格高騰と併せて、放射線施設の維持が困難となっている。

現在は技術が進歩し、特定の分野においては、機

械式線源による RI 代替手法が確立している。代表的な例として、輸血前に問題のある細胞を不活性化する血液照射では、従来線源として利用されてきた ^{137}Cs を使用せずに同じ結果を X 線管ベースの照射装置で達成できることが分かっており、近年はそのような X 線照射装置へ移行が進められている。

機械式線源装置による RI 代替の動きは、米国で活発であり、米国エネルギー省 / 国家核安全保障局 (DOE/NNSA) の放射線安全保障局 (ORS) は、2014 年にセシウム照射装置交換プロジェクト (CIRP; Cesium Irradiator Replacement Project) を開始し、国立研究所等と連携して、セシウムベースの血液照射装置の所有者が X 線照射装置等の非放射性代替装置に移行する際の支援を提供している¹⁾。具体的には、新しい装置にインセンティブを提供し、古い装置の無償回収を行っている。また、2019 年の国防権限法により、CIRP への追加支援が行われ、自主的なプログラムを通じて 2027 年末までにすべてのセシウム血液照射装置を交換するという目標も

設定されている。

血液照射以外でも、不妊昆虫技術（SIT）や医療機器滅菌等で、機械式線源装置を用いた代替技術の可能な範囲での採用が成功している。しかし、放射線モニタリング装置や線量計の校正システムは、実行可能な代替手段が未だ確立されていない²⁾。これは2021年6月に開催された国際度量衡委員会（CIPM）の放射線量に関わるX線・γ線技術委員会（CCRI(I)）でも議論され、世界的な問題になっている。校正システムは、既知の強度の放射線場を生成し、線量計を認められた標準に校正するために使用される。現状、日本国内及び国際的なプロトコルや推奨事項は、機器の校正に¹³⁷Cs-γ線照射装置を使用することに依存している。校正システムで用いられる線源の放射能は、数百MBqから最大で数百TBqの広い範囲にわたる。

2 小型加速器による模擬¹³⁷Cs-γ線場の開発

日本の産業技術総合研究所（以降、産総研）では、従来のRI線源による線量計校正場の代替技術の開発を進めている。産総研は独自に開発した小型線形加速器を用いて、¹³⁷Csからのγ線場を模擬する線量計応答校正用のX線場を開発した³⁾。

X線校正場構築に使用した小型加速器を図1に示す。加速器内の高周波（5.3 GHz）により1 MeV弱まで加速した電子線を金属ターゲットに衝突させる（実際には、原子核によって生成される強い電界の近くで電子が急速に減速又は偏向する）ことで発生する制動X線を利用する。このX線はそのままでは、最大加速エネルギーからほぼ0 keV付近まで連続的に広く分布したエネルギーを持つが、適当な厚さや材質の異なる複数の金属フィルタに通すことで、低エネルギー成分を優先的に排除できるため、高エネルギー成分の割合を大きくできる。この金属フィルタによるエネルギー調整により、¹³⁷Csからの特定のエネルギーを持つγ線と実効的なエネルギーの面で同等とみなせるX線場を構築した。図2に¹³⁷Csからのγ線のエネルギーごとの放出率と開発した加速器X線による放射線場のエネルギー分布のシミュレーション計算結果を示す。エネルギー分布の計算には電子光子輸送のモンテカルロ計算コードであるEGS5を使用した⁴⁾。開発したX線場は¹³⁷Cs-γ線場

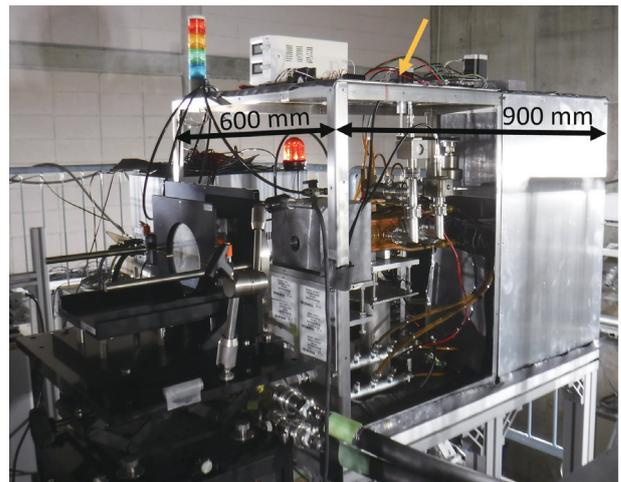


図1 小型線形加速器による模擬¹³⁷Cs-γ線校正システム

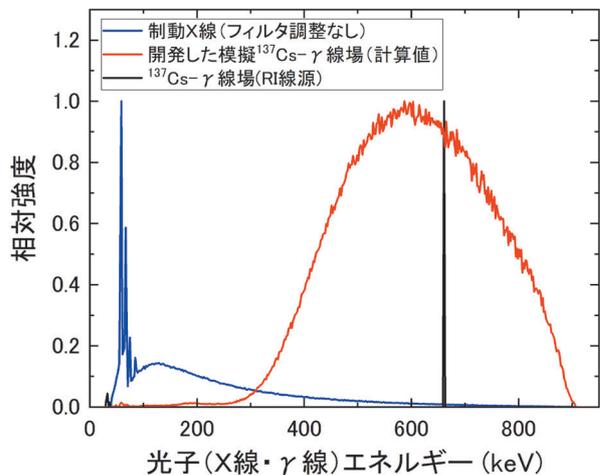


図2 ¹³⁷Cs-γ線及び開発した模擬¹³⁷Cs-γ線のエネルギースペクトルの比較

よりも明らかに広いエネルギー分布を持つ。しかし、物質中の放射線の相互作用（減弱等）が同等となるよう加速器X線のエネルギー分布を調整すれば、被ばく管理を行う線量計に対して、開発した加速器X線は¹³⁷Csからのγ線と実効エネルギー的に同等とみなすことができる。高線量率のX線場での正確なエネルギースペクトルの実測は測定器の都合上難しいため、X線のエネルギーの測定には、一般的に純金属板中での減弱測定法（半価層測定）がよく利用される。図3に示すように、開発した加速器X線は、純銅板を用いた際に¹³⁷Csからのγ線と同様な減弱であるため、エネルギー分布は異なるが、実効的にはほとんど同一のエネルギーとなる。

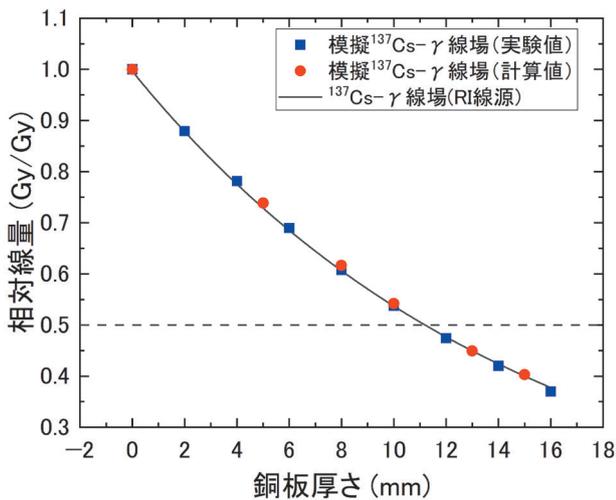


図3 ^{137}Cs - γ 線及び開発した模擬 ^{137}Cs - γ 線の銅板による強度の減弱の比較

3 線量の絶対測定と線量計の応答試験

加速器 X 線場の基準位置（ターゲット表面から 1.5 m）における線量率（空気カーマ率）を、現在の γ 線線量の一次標準器であるグラファイト壁空洞電離箱を用いた産総研の線量絶対測定技術により決定した。グラファイト壁空洞電離箱へ照射された X 線量に伴う積算電荷 (Q) が計測され、次の式により、空気カーマ (K_{air}) が求められる⁵⁾。

$$K_{\text{air}} = \frac{Q}{m_{\text{air}}} \left(\frac{W_{\text{air}}}{e} \right) \frac{1}{1 - \bar{g}_{\text{air}}} \left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_{\text{air,g}}^{\text{air}} S_{\text{g,air}} \prod_i k_i$$

m_{air} は空洞内空気質量、 W_{air} は電子-イオン対生成に必要なエネルギー (W 値)、 \bar{g}_{air} は空気中で放射へ寄与する割合の平均値、 $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air,g}}^{\text{air}}$ は空気とグラファイトの平均質量エネルギー吸収係数比、 $S_{\text{g,air}}$ は平均制限質量電子的阻止能比、 $\prod_i k_i$ は壁中の放射線の減弱補正等の空気カーマを定義どおりに求めるための各補正係数の積である。

空気カーマの正確な測定には、電離箱の有感体積まわりに二次荷電粒子の最大飛程以上の厚さの空気層を確保する必要がある。しかし、400 keV 以上の光子エネルギーに対しては、必要とされる空気層の厚さは 1 m 以上となり、そのような大型な自由空気電離箱による計測は物理的に難しい。グラファイト壁空洞電離箱は、空気よりも 1000 倍以上の密度を持つグラファイトの壁を必要な空気層の代わりとし

ている。グラファイトは空気と平均原子番号も近く、X 線に対する相互作用も空気と似ている。しかし、前記で示した空気カーマの計算式のとおり、高精度な測定においては多くの補正が必要となる。空気とグラファイトの X 線相互作用の違いは、エネルギーによって異なるため、正確な X 線のエネルギー分布の取得が重要である。現状、空気カーマ決定のための各補正係数の値を計算するのに必要な光子場のエネルギー分布は、加速器内部のターゲット周辺を詳細に模擬したジオメトリを用いた数値シミュレーション (EGS5) で計算されたものを使用している。実測によるエネルギー分布の取得も試みているが、線形加速器による X 線は短い時間 ($\sim 2 \mu\text{s}$) に高強度の放射線を周期的に繰り返すパルス放射線であるため、検出器を用いた波高分析では、高速応答のシンチレーション式検出器を利用するか、コリメータを用いて検出器に入射する X 線を低減させるか、又は、その両方を適用する必要がある。現状、1 cm 角の結晶サイズを持つ GAGG シンチレータと直径 5 mm のピンホールコリメータを用いた測定を行い、数値シミュレーションで計算したエネルギー分布と比較し、大きく変わらないことが確かめられている。しかし、2 光子以上の同時検出イベントの観測等の影響で、検出器の応答関数を用いたカウントからフルエンスへのスペクトルアンフォールディングが十分な精度で実行できていないため、今後はより高計数率に対応できる検出器を適応する予定である。前述したとおり、エネルギー分布は数値シミュレーションで計算できるが、照射時のエネルギー分布の変化のモニタリングや加速器ビーム出力の長期的な品質管理において、検出器を用いた実測は重要であり、その測定手法の開発も今後必要となる。

開発した X 線場による線量計校正を従来 ^{137}Cs - γ 線場と比較するため、一般商用の線量計として空洞体積や壁材質の異なる 2 種類の空洞電離箱 (Standard Imaging 社 製 Exradin A5, PTW Freiburg 社 製 TN32005) についての校正を行い、線量計応答をテストした。従来 RI 校正場での校正定数 (N_K) は次の式により求められる。

$$N_K = K_{\text{air}}/Q_{\text{tr}}$$

K_{air} は基準位置における空気カーマ、 Q_{tr} は線量

計の指示値である。

一方、開発した模擬¹³⁷Cs-γ線場は加速器の時間的な出力の変化が年単位の半減期を持つRIと比べると変化が大きい。そのため、加速器の照射口に透過型電離箱を設置し、X線出力をモニタし、次の式のように標準器と被校正器の測定結果(K_{air} , Q_{tr})をそれぞれの測定時のモニタ指示値(M , M')に対する値として用いることで、この加速器出力変化の影響を考慮できる。

$$N_K = \left(\frac{K_{air}}{M} \right) / \left(\frac{Q_{tr}}{M'} \right)$$

表1に従来Cs-γ線場との線量計応答試験結果の比較を示す。校正結果の差は0.4%以下であり、従来¹³⁷Cs-γ線場における線量計校正の相対拡張不確かさが0.84% ($k=2$)である為、ほとんど同等とみなせる線量計応答を得ることに成功した。

図4に、産総研の保有する各エネルギーの基準光子場での校正により得られたExradin A5のエネルギー特性を示す。従来の¹³⁷Cs-γ線場での校正定数に対し、よりエネルギーの低いX線標準(450 keVまでのX線管を線源とする場)とよりエネルギーの高い⁶⁰Co-γ線場での校正定数の値は小さくなって

表1 開発した模擬¹³⁷Cs-γ線場における校正結果の従来RI校正場との比較

線量計	校正定数の相対値	相対拡張不確かさ ($k=2$)
Exradin A5	0.9973	1.7%
TN32005	0.9964	1.8%

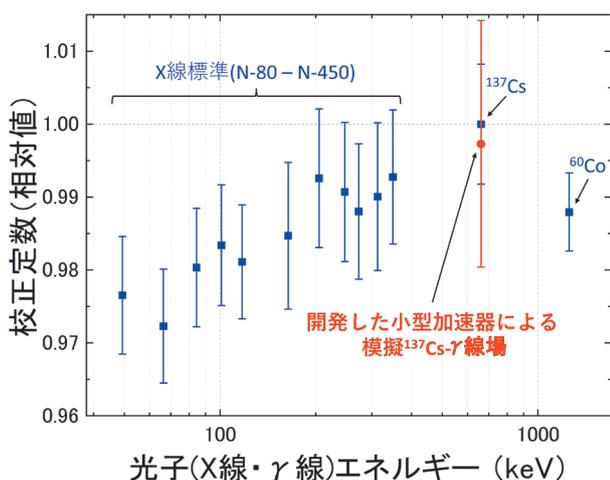


図4 空洞電離箱(Exradin A5)の各光子場における校正結果

いることが分かる。開発した模擬¹³⁷Cs-γ線場はエネルギー分布を狭くするように調整しているものの、従来のγ線場と比較し広がった分布を持つため、校正定数は従来¹³⁷Cs-γ線場よりも小さくなったと考えられ、結果は妥当と言える。

しかし、従来のRIγ線場と比べ、校正における不確かさが2倍近く大きい。これは、加速器出力の安定性の影響もあるが、空気カーマ計算のための補正係数の不確かさを実際の加速器X線場のエネルギー分布と数値シミュレーションで得られたものの差を考慮し、多少大きめに評価していることが影響している。今後、光子場のエネルギー分布測定の高精度化と併せて、機械式線源へ代替を行っていく上で標準供給におけるトレーサビリティ確保の面で必要な不確かさについても検討していく予定である。

4 おわりに

本研究では、世界的に廃絶が望まれている高強度な¹³⁷Cs線源による線量計校正の代替技術として、最大エネルギー1 MeV弱の小型線形加速器とフィルタを用いて、従来γ線場と同程度の実効エネルギーを持つX線場を開発した。開発した模擬¹³⁷Cs-γ線校正場の構築に利用した小型加速器の最大定格出力(100 W)における基準位置の空気カーマ率は約26 mGy/hだった。現在、産総研の¹³⁷Cs-γ線場で校正可能な線量率は最大で約1 Gy/hである為、加速器の電源を4 kW以上に増強すれば同様な線量率での照射が可能となる。

今後、加速器の最大エネルギーとフィルタの厚さの調整を行うことで、より狭いエネルギー分布を作成することも可能であるが、単色に近づくにつれ、フィルタは厚くなるため、線量率は減少してしまう。電源の増強により加速器のパワーを増加させることも可能であるが、ターゲットの冷却能力も上げる必要があり、総じて加速器が大型化・高コスト化となってしまう。これでは高騰しているRIの代替線源装置にはならず、本末転倒である。しかしながら、今回試験したような高線量率での校正を必要とする電離箱式の線量計に対しては、壁厚さの設計等により¹³⁷Cs-γ線エネルギーの前後200 keVにおいて応答の変化は小さい(1%以下)。したがって、開発した小型加速器によるX線校正場のような多少広がったエ

エネルギー分布であっても従来の ^{137}Cs - γ 線場の十分な代替となる。

今後は、実際的な従来 RI 校正システムの代替を目指し、電源の増強による高線量率化とこれまで ^{60}Co - γ 線場で試験していたエネルギー特性試験ができるように加速器の高エネルギー化を行っていく予定である。

参考文献

- 1) National Academies of Sciences Engineering and Medicine, *The National Academies Press* (2021)
- 2) S. Goodwin, *et al.*, *INMM* (2023)
- 3) J. Ishii, *et al.*, *Metrologia*, **60**, 042101 (2023)
- 4) L. V. Spencer and F H Attix, *Radiat. Res.*, **3**, 239-358 (1955)
- 5) H. Hirayama, *et al.*, *KEK Report*, **2005-8** (2005)

(産業技術総合研究所 計量標準総合センター 分析計測標準研究部門)