総 説

放射線標準[†]

鈴木良穂

独立行政法人 産業技術総合研究所 計測標準研究部門 量子放射科
305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1

Key Words : primary standard, calibration, traceability, ionizing radiation, X ray, gamma ray, radioactivity, neutron fluence, primary standard equipment, standard irradiation field

1. はじめに

独立行政法人産業技術総合研究所（産総研）は、計量標準に関して国家標準を維持する役割を持っており、様々な標準の確立とトレーサビリティ体系の整備を行っている。放射線の分野においても、X線・ γ 線の照射線量と空気カーマ（率）、放射能濃度、 γ 線放出率、荷電粒子放出率、放射能面密度、中性子放出率、熱中性子及び速中性子フルエンス（率）などの放射線関連量の標準確立と、依頼試験や認定事業者を通して標準の供給を実施している。これまでも、機会あるごとに現状紹介^{1)~5)}を行ってきたが、総説としてまとめる機会を得たので、これまでに確立した一次標準の現状と、産総研で用いられている、いわゆる「特定標準器」としての測定機器、そして、校正された機器や線源の供給体制に関して、放射線標準全般の現状について紹介する。

2. 標準確立用の測定機器と校正法

2.1 X線標準

産総研では現在、10 kV ~ 50 kV の軟 X 線用と 50 kV ~ 250 kV の中硬 X 線用の 2 台の照射装置と、それぞれ専用の平行平板型自由空気電離箱によって標準場を設定している。軟 X 線標準の 10 kV では、 QI （管電圧に対応する X 線の最大エネルギーと実効エネルギーの比） $= 0.8$ 、それ以外の 40 kV までは $QI = 0.5$ 、一方、中硬 X 線標準の 50 kV ~ 250 kV については $QI = 0.4 \sim 0.9$ と、国際度量衡局（Bureau International des Poids et Mesures, BIPM）シリーズの線質と同じ X 線の標準場を設定し、校正を実施している⁶⁾。

図 1 に産総研が中硬 X 線標準（X 線エネルギー 30 keV ~ 200 keV、管電圧では 50 kV ~ 250 kV）に使用している、平行平板型自由空気電離箱の断面図を示す。

平行平板型電離箱の内部構造は極めて単純で、2 枚の金属板に高い電圧をかけて、電極間で電離された電荷を収集するものである。この写真の電離箱の場合は、200 keV の X 線による 2 次電子の飛程は約 10 cm であることから、電極の間隔を 24 cm とし、中央に幅 10 cm、高さ 23 cm の高純度アルミ製の集電極が配置され、約 5 kV の電圧が印加する仕組みになっている。更に、電界を平行に、且つ勾配を一様に

[†] Standardization of Ionizing Radiation.

Yoshio HINO: NMIJ/AIST (National Metrology Institute of Japan/National Institute of Advanced Industrial Science and Technology) Radiation and Neutron Standard Section, Quantum Radiation Division, 1-1-1, Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki Pref. 305-8658, Japan.

図1 産総研の中硬 X 線標準場の測定に用いられている平行平板型自由空気電離箱。70 cm(w) × 70 cm(d) × 50 cm(h) の 5 mm 厚の鉄製の容器内に、上下に 24 cm の間隔を持たせた集電極板が配置されている。総重量約 300 kg。昭和 39 年に製造され、当時の米国 NBS (現在 NIST) との国際比較が行われた⁷⁾。最近では、2000 ~ 2003 年にかけて、アジア地区 11 か国の標準研究機関による国際比較が行われ、良好な一致が見られている⁸⁾。

するガード電極が配置されているため、このように大きなものとなっているが、入射窓の絞り直径を 1 cm としたときの有感部の体積は、わずかに 7.8477 cm^3 である。

もともと、この装置は X 線の照射線量がレントゲンの単位 (R) で与えられた当時で作成されたもので⁷⁾、既に 40 年以上も現役を勤めている。電流計は更新されているが、現在でもバックグラウンドの漏洩電流は 10^{-15} A 以下で、通常の測定領域の 10^{-12} A を 0.1% 以下の再現性で測定可能である。

実際の校正は、このような特定標準器によって空気カーマ率の値が設定された X 線標準場に、校正器物の検出部を設置して出力を測定して被測定器の校正値を得る、いわゆる「置換法」により、基準器と被校正測定器を交互に置き換えて校正が行われる。

一方、フィルムバッジ等、受動型の検出素子の場合は、電圧測定に用いるデジタルマルチメータの測定時間間隔あるいは X 線シャッター

図2 大線量標準用 γ 線源。右の円筒状容器に 148 TBq の ^{60}Co 線源が収納されており、その左側の遮蔽を隔てて、 ^{137}Cs 線源容器が配置されている。特に、この ^{60}Co 線源は、線源が遮蔽容器から 50 cm 前方に突きだし、 4π 照射が可能な設計になっている¹⁰⁾。

の開閉タイマーにより照射時間を設定する。また、空気カーマ率が低い場合の校正で、特定標準器で場の値を直接値付けすることが困難な場合には、感度の高い (有効体積の大きい) 適当な電離箱を仲介器 (ワーキングスタンダード) として用い、仲介器の測定結果を被校正器物の測定結果と比較することにより、校正定数を得ている。このとき、測定時の照射室内の気温、気圧、湿度を測定し、基準の温度、気圧との差に対する補正を行う。湿度に対しては特段の補正は行わず、単に測定時の湿度 (%) と、その条件を結果に付記している。

現在、産総研の X 線標準場の不確かさは、軟 X 線の 10 kV で 2% (包含計数 $k=2$) 程度で、中硬 X 線においては、線量率が $9 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ Gy/s}$ の範囲において 1.2% ($k=2$)、 $9 \times 10^{-9} \sim 7 \times 10^{-8} \text{ Gy/s}$ の範囲においては 1.5% ($k=2$) 程度と見積もっている⁹⁾。最終的に与えられる校正定数の不確かさは、これらの標準場の不確かさに、校正器物の出力の変動による不確かさ、設定位置に起因する不確かさ、温度と気圧の不確かさを自乗和しその平方根として求めている。

図3 産総研が γ 線標準用に使用している円筒形の空洞電離箱の断面図。通常、この図にあるように、 γ 線の入射方向から 45° 傾けて測定することにより、円筒形の測定器が持つ形状的な欠点を無くしている¹¹⁾。これは、内部の有効体積を精度良く計測するため、完全な円筒形状としたことに起因する問題で、一般に市販されている指頭型や球形の電離箱では、あまり問題とならない

2.2 γ 線標準

一方、 γ 線標準のため、産総研には148 TBqの ^{60}Co と34 TBqの ^{137}Cs を備えた大線量標準室と、数百GBq程度の ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{241}Am 及び ^{226}Ra 線源の照射装置を備えた γ 線標準室があり、広い範囲の標準場を設定している。図2に大線量標準用の ^{60}Co と ^{137}Cs 線源を示す。

標準場の空気カーマあるいは照射線量の絶対値の測定には、電離体積 6 cm^3 と 60 cm^3 の円筒形グラファイト空洞電離箱を特定標準器として使用している。すなわち、大線量標準用に 6 cm^3 、防護レベルの γ 線標準には 60 cm^3 のタイプが用いられている。

これらの空洞電離箱は、壁が高品位のグラファイト（密度 1.71 g/cm^3 ）で、円筒形に加工され、内部の体積は3次元測定器により0.1%以下の不確かさで求められている。また、グラファイト壁の吸収と2次電子の効果を評価するため、それぞれのタイプに、壁厚の異なるチェンバーを多数作成し、評価している。通常は、 ^{60}Co に3 mmの壁厚タイプ、 ^{137}Cs には2 mm

の壁厚のチェンバーを使用している。グラファイト3 mm (0.51 g/cm^2)は、 ^{60}Co の発生する2次電子の最大飛程 (0.54 g/cm^2)にやや及ばないが、産総研では、電離箱の配置を図3に示すように、 γ 線入射方向に 45° 傾けた配置をしているため、正面方向（最大エネルギーの2次電子の進行方向）の実質的な厚さは十分に厚く、また、4 mm壁厚タイプとの測定結果に差がないことが確認されていることから、必要最小限の壁厚タイプを選定し、標準供給に使用している¹¹⁾。

2.3 β 線吸収線量標準

β 線は医学的治療、ライフサイエンス分野でよく取り扱われおり、正確な線量評価のために線量標準の整備が求められている。また原子力関連施設では放射線被曝に対する安全管理の観点から、その標準へのニーズは大きい。産総研では、現在まだ供給開始にいたっていないが、 β 線の吸収線量標準を準備中である¹²⁾。線源は既にAEA Technology社製の ^{147}Pm 3.7 GBq、 ^{85}Kr 3.7 GBq、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 460 MBqの線源を照射装置に組み込んだ線源セットを購入し、別途作成した外挿電離箱により β 線の組織吸収線量標準の供給を目指している。図4に16年度に製作した β 線標準用外挿電離箱の構造を示す¹²⁾。

放射線防護用個人線量計の β 線エネルギー特性に関する校正を行うには、今回整備した3核種によるエネルギー点だけでは不十分で、更に多くのエネルギー点が必要である。しかし、線源の供給は限られており、一方、エネルギー吸収板を置く手法では線源強度の問題があるため、広範囲のエネルギー点における β 線標準場の設定は、今後の課題のひとつである¹²⁾。

2.4 γ 線核種放射能標準

γ 線放出核種の放射能標準は、 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 同時測定装置を基に、加圧型電離箱や高純度Ge γ 線スペクトル測定装置などの放射能絶対測定装

図4 産総研で新たに導入した β 線標準用外挿電離箱。 ^{147}Pm , ^{85}Kr , $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ の線源を組み込んだ照射装置も同時に導入しており、今後PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt ドイツ連邦物理・技術研究所) などとの国際比較を経て、標準供給が開始される予定である

置群により、校正された標準線源を仲介として標準の供給が行われている^{1), 4), 5)}。

$4\pi\beta\text{-}\gamma$ 同時測定装置は β 線と γ 線、あるいは α 線と γ 線を同時に放出する核種の放射能を絶対測定する装置で、多くの核種では崩壊に伴い、荷電粒子と同時に γ 線が放出されることに着目したものである。具体的には、放射性の溶液を非常に薄い膜(約 $20\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 程度)の上に少量(20～50 mg)滴下、乾燥させ、線源を作成する。この線源をガスフロー型の $4\pi\beta$ 比例計数管に入れて、 β 線の数 N_β を測定する。一方、比例計数管の直近に NaI(Tl) 検出器などの γ 線検出器を配置し、 γ 線の数 N_γ と、 β 線と γ 線が同時に検出される数 N_c を測定する。これらの N_β , N_γ , N_c を独立して求めることができれば、検出器の効率をそれぞれ ε_β , ε_γ とすると、

$$N_\beta = N_0 \times \varepsilon_\beta \quad (1)$$

$$N_\gamma = N_0 \times \varepsilon_\gamma \quad (2)$$

$$N_c = N_0 \times \varepsilon_\beta \times \varepsilon_\gamma \quad (3)$$

であるから、求める放射能 N_0 は、

$$N_0 = N_\beta \times N_\gamma / N_c \quad (4)$$

として、核データ等の他の情報に一切頼ることなく、独立に放射能の値付けが行われる¹³⁾。ただし、 γ 線が β 検出器につかまる確率など、種々の妨害事象に対して適切な補正を行うことが必要である。産総研では個々の核種毎に必要な補正を行い、絶対放射能を導いている。

図5に、産総研が放射能の絶対測定に使用している $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 同時測定装置の写真を示す。

但し、この方法が厳密に適用できる核種は限られており、また、放射能濃度にしても、滴下乾燥させた線源が、概ね数kBqであることが望ましいため、あまり測定に広がりを持たせることは不可能である。そこで、産総研ではMBq/g以上のレベルの放射能は加圧型電離箱¹⁴⁾で、kBq/g以下は高純度Ge検出器による相対測定で範囲の拡張を行っている。

放射能測定用の加圧型電離箱は、中空円筒状(ウェル型)の容器に、窒素やアルゴン等の安定したガスを加圧して封じ切ったもので、この電離箱の中心部に γ 線源を挿入し、電離電流を測定する。

図5 産総研の放射能絶対測定用の $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 同時測定装置。中心部に $4\pi\beta$ 検出器があり、その上下に $3''\times 3''$ のNaI(Tl)検出器が配置されている

このような、封じ切りタイプの電離箱は本来安定であるが、産総研では特定標準器及び特定二次標準器として、より一層の安定性を確保するため、半減期が1200年の ^{166}mHo の密封線源を作成し、核種ごとの校正値は、全てこの ^{166}mHo 線源との相対値として校正している。図6に、産総研が作成した特定標準器用電離箱の断面図と、図7に標準線源として用いている ^{166}mHo 線源を示す。

一方、比較的低濃度の放射能線源校正には、高純度Ge検出器が、密封小線源と希釈した体積線源の校正に用いられている。

この他、特殊なものとして、 ^{152}Eu や ^{192}Ir などの複雑な崩壊をする核種で、多数の γ 線を放出する核種を効率よく校正するため、 $5''\times 5''$ の井戸型NaI(Tl)検出器、サムピークでの測定が行われる ^{125}I 専用の小型井戸型NaI(Tl)検出

図6 産総研の放射能標準供給に使用している加圧型電離箱。中央部に、アンプルに一定量の放射能溶液を入れた線源を置き、線源から放出される γ 線により電離される電流を測定する

図7 電離箱の出力の安定性を確認するための ^{166}mHo 密封線源。 ^{166}mHo は、半減期約1200年で β 崩壊し、多くの γ 線を放出する。全 γ 線エネルギーは ^{226}Ra (系列核を含む)線源と同等の1.75 MeV/decayであるが、単純な β 線核種で、最大の γ 線エネルギーが830 keV程度と、取り扱いに便利である。産総研では、様々な核種の単位放射能あたりの出力(pA/MBq)を、この ^{166}mHo 線源の出力電流に対する相対値とすることにより、電離箱のガス圧の変化や温度変化などの影響をキャンセルし、特定標準器としての長期安定性を保たせている¹⁴⁾

図8 面線源からの荷電粒子放出率を測定するための2 π ガスフロー比例計数装置

器等が一次標準測定用に用いられている。

2.5 純 α/β 核種放射能標準

純 α 、 β 又はX線核種の放射能は、国際比較などにおいて、最高校正精度を必要とする場合には ^{60}Co などの γ 線核種と混合し、4 $\pi\beta\text{-}\gamma$ 同時測定装置を用いた効率トレーサ法による絶対測定が行われる。一般的には、液体シンチレーションカウンタを用いて、あらかじめ校正してある ^3H 又は ^{14}C のn-ヘキサデカン標準線源との混合による内部標準法でクエンチ度を決定し、校正を行っている。エネルギーの高い核種については、単純な効率トレーサ法や積分パイアス法による測定も行われる。

一方、近年3本の光電管を用いて、3本と2本の光電管の同時測定の計数率を求め、効率100%に外挿した点をその放射能とする手法が、TDCR (Triple-Double Counting Rate) 法として、液体シンチレーションカウンタによる純 β 核種放射能の絶対測定法として注目されている。この手法は、特に ^3H や ^{63}Ni などの低エネルギーの β 線核種や ^{55}Fe のような、これまで困難とされてきた核種に有効である。但し、このような装置は特殊なものであるため、市販されていない。産総研では、3本の光電管を持つカウンタの試作機を導入し、従来の手法による結果との比較を行っている。近い将来、純 β 線核

種の一次標準はTDCR法により値付けられる見込みである。

2.6 放射能面密度及び荷電粒子放出率標準

ハンドフット・クロスモニタや汚染検査用サーベイメータの校正に大面積の面線源が用いられる。この面線源は、荷電粒子放出率によりトレーサビリティが繋がっており、2 π ガスフロー比例計数装置や表面障壁型検出器により校正が行われている。

産総研が標準供給に使用している2 π ガスフロー比例計数装置は、窓なしのマルチワイヤ式比例計数装置で、最大20 cm $\times$ 25 cmまでの大面積線源が測定可能である。図8に産総研の2 π ガスフロー比例計数装置を示す。

2.7 中性子放出率

中性子放出率は、マンガンバス法により正確に放出率を求めたAm-Be線源を基準として、標準黒鉛パイルで比較測定を行い校正される¹⁵⁾。

マンガンバスとは、大きな容器に一定濃度の硫酸マンガンを充填し、中心に中性子源を置き、中性子により放射化された ^{56}Mn (半減期2.57 h, Mnは ^{55}Mn が100%で、その中性子捕獲反応による)の放射能から中性子放出率を求める装置である。産総研では、直径1.2 mの球形の容器と硫酸マンガンの循環装置を組み合わせ、大型のNaI(Tl)検出器で放射化された ^{56}Mn を測定してきた。しかしながら、硫酸マンガンを一定濃度に保ち、且つ循環装置を維持するには多大の労力を要する。一方、Am-Be線源と標準黒鉛パイルによる熱中性子場は十分に安定であることから、一次標準としてのAm-Be線源は英国のNPLでその放出率を校正し、産総研では以下に述べる標準黒鉛パイルの標準場で比較測定を行うことにより、中性子放出率の標準供給を行っている。このときの不確かさはAm-Be線源で3.0% ($k=2$)、 ^{252}Cf については、若干放出スペクトルが異なることを考慮して、3.2% ($k=2$)である。

図9 産総研の中性子放出率と熱中性子標準用黒鉛パイル

2・8 熱中性子フルエンス率

産総研の標準黒鉛パイルは、10 cm×10 cm×90 cm（又は120 cm）の原子炉級黒鉛ブロックを幅230 cm×奥行き190 cm×高さ190 cmに積み上げたものである。中性子放出率を測定する場合は、この黒鉛パイルの中心に中性子源を挿入し、水平横方向に90 cm離れた位置で、減速された熱中性子を ^3He 比例計数管で測定する¹⁶⁾。

一方、熱中性子フルエンス率は、黒鉛パイルの中心に中性子源を挿入し、パイル正面の中心から10, 30, 50, 70, 90 cmの位置に設けられた挿入孔に測定器物を挿入する。このとき、それぞれの位置における熱中性子フルエンス率は、あらかじめ、金箔の放射化により熱中性子フルエンス率が絶対校正がされており、不確かさは2.8% ($k=2$) と見積もられている。図9に、産総研の黒鉛パイルの熱中性子標準場を示す。

2・9 速中性子フルエンス

産総研には、300 kVのコッククロフト・ウ

図10 14.8 MeV 中性子発生用ターゲットチェンバー。Si 表面障壁型検出器による α 線の計数効率はほぼ100%であり、一定の立体角に放出される α 線を測定することにより、これに対応する立体角の中性子束が正確に求められる

ォルトン型加速器と4 MVのバンデグラーフ型加速器があり、単色中性子を発生し、速中性子フルエンス標準を供給している。また、Am-Beなどの中性子線源からの連続スペクトルの中性子フルエンス標準の供給も実施している。

300 kV コッククロフト・ウォルトン型加速器では、 T(d,n)He 反応により14.8 MeVの中性子が発生できる。このとき、発生する中性子は、随伴粒子を測定することにより精度良く求められる。随伴粒子とは、 T(d,n)He 反応により発生する α 線で、中子と1対1の関係にある。そこで、産総研では、Tをチタンに吸蔵させたターゲットと、Si 表面障壁型検出器を図10のように配置したチェンバーで14.8 MeV 中性子を発生し、中子に随伴して発生する α 粒子をモニタして中性子フルエンス率を求めている^{17), 18)}。

一方、バンデグラフ型加速器により発生可能な単色の中性子エネルギーは、 Li(p,n) による100～600 keVと D(d,n) による2～5 MeVの範囲の中性子である。このうち、 Li(p,n) の代表点である144 keVと565 keVのエネルギー点は、水素やメタンの比例計数管¹⁹⁾、In 箔放射化により定量され、国際比較により検証されている²⁰⁾。また、5.0 MeVではポリエチレンの

図 11 産総研の速中性子フルエンス場。中央の白い円筒状のものが、ポリエチレンロングカウンタである。速中性子標準においては、中性子の散乱成分をいかに評価するかが重要な問題で、産総研では、この散乱成分を減ずるため、加速器のビームラインを 12 m 立方の部屋の中心に設置し、床から 4.5 m の高さにアルミメッシュの中二階の床を張った構造としている

膜で Si 表面障壁型検出器をカバーしたテレスコープカウンタにより校正され、他のエネルギー点と同様に、国際比較により測定値の検証が行われている。これらの測定値は、産総研のワーキングスタンダードであるポリエチレンロングカウンタ (PLC) に移されており、通常はこのロングカウンタとの比較測定により、一般の測定機器が校正される。このとき、中性子の散乱を評価するため、シャドウコーンを測定機器と中性子ターゲットの間に置き、PLC をモニタとして、一定量の標準照射を行い、散乱中性子の効果を評価している。図 11 に産総研の速中性子フルエンス場を示す。

これら加速器以外に、中性子放出率の校正された Am-Be 中性子線源、あるいは ^{252}Cf 中性子線源を直接使用する場合もある。このとき、中性子エネルギーは、線源固有の連続スペクトルであり、中性子発生率は既知であるので、線源からの距離の逆二乗則を適用して校正を行っている。

図 12 JCSS トレーサビリティ制度の仕組み

3. 放射線標準の供給体制

現在、産総研の標準供給は、計量法の校正事業者認定制度 JCSS (Japan Calibration Service System) に沿って行われている。この JCSS 制度は、国家計量標準として、産総研が特定標準器を所有し、これとの比較により、認定事業者の持つ特定二次標準器、あるいは常用参照標準器を校正し、認定事業者が一般ユーザーの測定機器を校正する、といった校正の連鎖である。図 12 にそのブロック図を示す。

現在、放射線関係では、特定二次標準器を持つ認定事業者として、X 線標準に(財)日本品質保証機構、 γ 線に(株)千代田テクノ大洗研究所、X 線と γ 線に(財)放射線計測協会、X 線、 γ 線そして放射能に、(社)日本アイソトープ協会が登録されている。今のところ、常用参照標準のみの認定事業者は登録されていないが、今後、JCSS 制度の弾力的な運用が検討されていると

表1 ASNITE より, ISO17025 適合認証を受けた γ 線空気カーマの校正範囲と最高測定能力 (最小の不確かさ)

校正対象	校正範囲		校正・測定能力 ($k=2$)
	線 源	校正範囲	
γ 線空気 カーマ	^{137}Cs γ 線 空気カーマ	$2.80 \times 10^{-5} \text{ Gy} \sim 1.19 \times 10^{-1} \text{ Gy}$	0.54 %
		$3.79 \times 10^{-7} \text{ Gy} \sim 2.80 \times 10^{-5} \text{ Gy}$	1.5 %
		$2.26 \times 10^{-8} \text{ Gy} \sim 3.79 \times 10^{-7} \text{ Gy}$	2.0 %
		$2.81 \times 10^{-9} \text{ Gy} \sim 2.26 \times 10^{-8} \text{ Gy}$	2.4 %
	^{60}Co γ 線 空気カーマ	$2.38 \times 10^{-2} \text{ Gy} \sim 2.68 \times 10^{-3} \text{ Gy}$	0.88 %
		$3.88 \times 10^{-4} \text{ Gy} \sim 2.38 \times 10^{-2} \text{ Gy}$	0.72 %
		$9.48 \times 10^{-7} \text{ Gy} \sim 3.88 \times 10^{-4} \text{ Gy}$	0.80 %
		$2.81 \times 10^{-7} \text{ Gy} \sim 9.48 \times 10^{-7} \text{ Gy}$	1.1 %
		$5.41 \times 10^{-8} \text{ Gy} \sim 2.81 \times 10^{-7} \text{ Gy}$	1.2 %
		$9.66 \times 10^{-9} \text{ Gy} \sim 5.41 \times 10^{-8} \text{ Gy}$	1.6 %
γ 線空気 カーマ率	^{137}Cs γ 線 空気カーマ率	$2.80 \times 10^{-6} \text{ Gy/s} \sim 6.63 \times 10^{-4} \text{ Gy/s}$	0.54 %
		$3.79 \times 10^{-8} \text{ Gy/s} \sim 2.80 \times 10^{-6} \text{ Gy/s}$	1.5 %
		$2.26 \times 10^{-9} \text{ Gy/s} \sim 3.79 \times 10^{-8} \text{ Gy/s}$	2.0 %
		$2.81 \times 10^{-10} \text{ Gy/s} \sim 2.26 \times 10^{-9} \text{ Gy/s}$	2.4 %
	^{60}Co γ 線 空気カーマ率	$1.32 \times 10^{-2} \text{ Gy/s} \sim 1.49 \times 10^{-1} \text{ Gy/s}$	0.88 %
		$3.88 \times 10^{-5} \text{ Gy/s} \sim 1.32 \times 10^{-2} \text{ Gy/s}$	0.72 %
		$9.48 \times 10^{-8} \text{ Gy/s} \sim 3.88 \times 10^{-5} \text{ Gy/s}$	0.80 %
		$5.41 \times 10^{-8} \text{ Gy/s} \sim 9.48 \times 10^{-8} \text{ Gy/s}$	1.1 %
		$5.35 \times 10^{-9} \text{ Gy/s} \sim 5.41 \times 10^{-8} \text{ Gy/s}$	1.2 %
		$9.66 \times 10^{-10} \text{ Gy/s} \sim 5.35 \times 10^{-9} \text{ Gy/s}$	1.6 %

ころでもあり, 多くの事業者が参加してくれることを期待している。

一方, 産総研は, 国家標準の維持のため, 国際的な一次標準の整合性が求められている。このため, 相互の国家標準を承認する協定 MRA (Mutual Recognition Arrangement) に調印した。その結果, 国際度量衡局 (BIPM) に BIPM key comparison database (KCDB) なるデータベースを構築し, そこに各国の標準供給項目, 不確かさ, 測定手法などを記した一覧表 (Calibration and Measurement Capability (CMC) list) と, 各国がこれまで参加した国際比較の結果を公表することになった。既に, 放射能に

関しての CMC リストが公表されている。

<http://www.bipm.org/en/committees/cc/ccri/> から, KCDB に入れば, 検索欄が現れ, 誰でも自由に各国の現状を見ることが可能である。

更に, 各国の標準機関は, 校正を行う機関として, ISO17025 の基準に適合していることが求められており, 産総研もこれに従って, 我が国の認定機関である(株)製品評価技術基盤機構 (NITE) より, 供給項目と不確かさの妥当性に関する製品評価技術基盤機構認定制度 (ASNITE) の評価を受け, 認証された。一例に, γ 線標準に関して, 評価を受けた項目と不確かさを表 1 に示す。

4. 放射線標準の今後の課題と展望

これまで、一通り産総研が扱っている放射線関係の一次標準とそれらの供給に用いられている測定機器に関して説明した。現在、一次標準として準備中であるものは、 β 線の吸収線量やX線、 γ 線の大線量に関する部分である。 β 線については、既に照射装置、線源、測定器が揃っており、今後国際比較などを経て、ASNITE認証を得て、jcssによる供給が開始される予定である。大線量に関しては、仲介検出器用のアラニン線量計は準備されているが、肝心の一次標準が、線源強度の関係からせいぜい治療レベル程度しかカバーできていない。今後、小型の電子加速器と水カロリメータの組み合わせなど、最適な条件が得られる体制を整えることが望まれている。

一方、近年治療用に密封小線源や放射性核種が用いられるケースが増えており、これらは、治療効果の検証のため、正確さと国際的な整合性が厳しく求められている。現状では、これらの要求に十分応えることができない状況で、医療用の短半減期核種についても、早急な標準整備が必要である。

更に、放射線関係の利用に対し、厳しい管理が求められており、安全対策上、現場測定機器へのトレーサビリティ波及も急務である。今後、これらの要求に応えるべく、標準供給体制の整備を行いたいと考えている。

5. おわりに

産総研は、これまでも計量法に基づく標準の維持と供給を行って来たが、近年のトレーサビリティへの要望の拡大と、国際的な計測標準に関する整合性の対処に、完全に対応しきれないでいるのが現状である。これは、人的・予算的な制約の上から、やむを得ないものでもあるが、今後JCSS制度のより弾力的な運用や、海外の標準機関とより密接な連携により、対処していきたいと考えている。

このとき、整備すべきトレーサビリティ体系とは、最終的にユーザーが必要とする不確かさを、必要十分の信頼性を持って上位の標準に連鎖させ、最終的に国家標準あるいはSIの定義に結びつかせることである。過剰な縛りをできるだけ排除し、何が必要で、どこまで押さえれば十分と言えるかを、それぞれの量毎に、きちんと吟味する必要がある。各方面の関係者各位から、ご意見を頂戴できれば誠に幸いである。

文 献

- 1) 松野良穂, 放射能の標準とトレーサビリティ, フィルムバジニュース, 254, 1-6(1998)
- 2) 高田信久, 黒澤忠弘, 放射線関連量—吸収線量とフルエンス, 放射線, 26(4), 59-66(2000)
- 3) 高田信久, 小山保二, 黒澤忠弘, 空気カーマ標準の設定, 医用標準線量, 6(1), 1-5(2001)
- 4) 山田崇裕, 松野良穂, 計量法に基づく放射能標準のトランスファ, RADIOISOTOPES, 52(2), 98-110(2003)
- 5) 松野良穂, 高田信久, 実用測定器校正の現状と今後の展開, I. 放射線・放射能標準のトレーサビリティ, RADIOISOTOPES, 53(2), 107-113(2004)
- 6) 松本 健, 直井次郎, 中硬X線照射線量標準の再設定, 電子技術総合研究所彙報, 47(9,10), 822-845(1983)
- 7) 松本 健, 加藤 朗, 中硬X線照射線量標準, 電子技術総合研究所彙報, 38(6,7), 251-263(1974)
- 8) Lee, J. H., Hwang, W. S., Kotler, L. H., Webb, D. V., Büermann, L., Takeyeddin, M., Takata, N., Shaha, V. V., Mostert, J., Srimanoroth, S., Meghzifene, A., Hah, S. H., Chun, K. J. and Kadni, T. B., APMP RI (I)-K3 comparison report
- 9) 納富昭弘, 軟X線標準場の概要と高品質化に関する調査研究, 産総研計量標準報告, 2(4), 627-632(2004)
- 10) 加藤 朗, 山地 磐, 高強度 γ 線照射線量標準の設定, 電子技術総合研究所彙報, 47(9,10), 846-861(1983)
- 11) 加藤 朗, 山地 磐, γ 線照射線量率絶対測定値の照射角度による変化, 電子技術総合研究所彙報, 47(9,10), 862-869(1983)
- 12) 加藤晶弘, β 線吸収線量標準の開発と設定に関

- する調査研究, 産総研計量標準報告, 3(4), 633-641(2005)
- 13) 河田 燕, 由良 治, 放射能標準の現状と今後の課題, 電子技術総合研究所彙報, 47(9, 10), 797-814(1983)
- 14) 桒野良穂, 松井 真, 山田崇裕, 竹内紀男, 小野間克行, 岩本清吉, 木暮広人, 大久保昌武, 加圧型電離箱による γ 核種放射能二次標準の確立, 電子技術総合研究所彙報, 62(9), 399-405(1998)
- 15) 工藤勝久, 循環式マンガバス法による ^{252}Cf 中性子源放出率の絶対測定, 電子技術総合研究所研究報告, 第 825 号, 第 4 章, 36-54(1982)
- 16) 道川太一, 標準黒鉛パイルの中性子源較正への応用, 電子技術総合研究所彙報, 47(9, 10), 928-933(1983)
- 17) 工藤勝久, 14 MeV 中性子標準場の確立と $^{56}\text{Fe}(\text{n}, \text{p})^{56}\text{Mn}$ 標準反応断面積の測定, 電子技術総合研究所研究報告, 第 825 号, 第 2 章, 6-21(1982)
- 18) 工藤勝久, 河田 燕, 道川太一, 木下民祥, 随伴粒子法を用いた 14 MeV 中性子フルエンス標準とその $^{56}\text{Fe}(\text{n}, \text{p})^{56}\text{Mn}$ 断面積測定への応用, 電子技術総合研究所彙報, 47(9, 10), 923-927(1983)
- 19) 小林直人, 木下民祥, 道川太一, モンテカルロ法による速中性子検出器の特性評価, 電子技術総合研究所彙報, 47(9, 10), 934-950(1983)
- 20) Hino, Y., Michikawa, T., Kinoshita, T., Kudo, K. and Kawada, Y., Absolute Cross Section Measurement of $^{115}\text{In}(\text{n}, \gamma)^{116\text{m}}\text{In}$ Reaction in Connection with the International Intercomparison of Fast Neutron Fluence Standards, *Bul. Electrotech. Lab.*, 49(10), 759-766(1985)
-