



2. 作業環境の監視に係わる技術小論

(5) 1 cm線量当量測定用 γ 線スペクトロメータの開発

古田 定昭 小野 高行

人形峠事業所安全管理課

資料番号：81-14

2. Development of Technology on Radiation Monitoring of Working Environment

(5) Development of a Gamma-ray Spectrometer for Measurement of 1cm Dose Equivalent

Sadaaki Furuta Takayuki Ono

(Health and Safety Section, Ningyo-Toge Works)

ICRP Publication 26の国内法令導入に伴い、管理区域内の γ 線測定には、従来の照射線量の代わりに1 cm線量当量が採用された。1 cm線量当量はエネルギーの関数になっており、精密な線量評価のために γ 線のスペクトロメータを製作し、作業環境の γ 線スペクトルを測定した。この結果、本スペクトロメータが測定場での γ 線エネルギーとそのフラックス分布の収集に優れた性能を有し、また、現場の線量当量率測定、実効 γ 線エネルギー評価に有効であることが確認できた。

1. はじめに

1977年にICRP Publication 26が発表され、放射線に関するリスク評価に基づく実効線量当量等の線量制限体系が勧告された¹⁾。その後、ICRP Publication 51において外部放射線に係わる様々な概念が明らかにされるとともに、外部放射線を管理するために70 μ m線量当量(H70 μ m)、3 mm線量当量(H 3 mm)および1 cm線量当量(H 1 cm)がエネルギーの関数とともに示された²⁾。わが国の放射線防護に関する法令もICRPの勧告にしたがって改正されている。

1 cm線量当量はエネルギーの関数になっており、その精密な線量評価には γ 線のスペクトルを知ることが重要である。さらに、スペクトルの情報を基に作業者を仮定し照射方向を決めれば、実効線量当量まで算出することが可能である。このようにスペクトル情報は放射線管理を行う上で重要なものであるが、100 μ Sv/h程度の線量当量率が存在する作業環境中でのスペクトル測定は計数率が高く困難となっている。そのような作業環境で使うことを目的に小型 γ 線スペクトロメータを制作し、1 cm線量当量を測定した。また、本スペクトロメータは1 cm線量当量とともに照射線量も結果として出力されるので1

cm線量当量と照射線量の比(「単位変換係数」という。)からICRP Publication 51データを利用して各測定場所の実効的な γ 線エネルギーを調査した。

2. 測定装置

2.1 装置の概要

スペクトロメータの検出器は一般に線量評価を目的とした γ 線スペクトル測定によく用いられるNaI (TI)シンチレーション検出器を用いた。シンチレータは低エネルギーにおける方向特性を良好にするため直径1インチの球形(1" ϕ)を使用した。図-1にスペクトル測定システムの構成を、図-2に検出

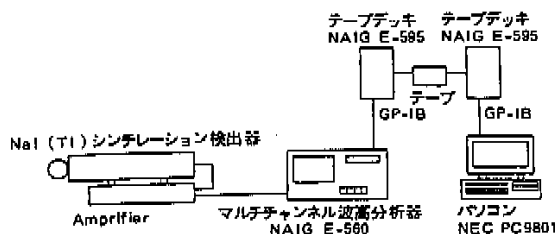


図-1 スペクトル測定システム構成図

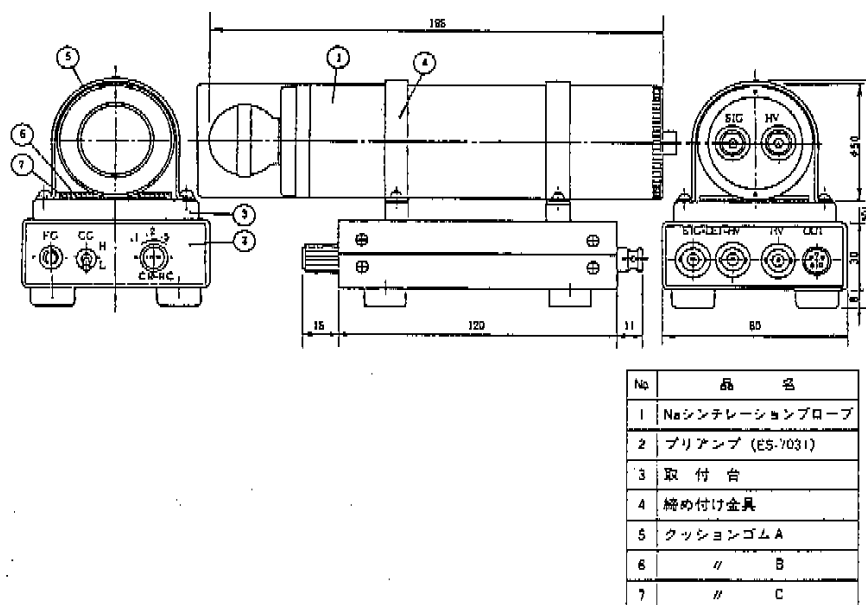


図-2 γ線スペクトロメータ検出器外観図

器の外観を示す。マルチチャンネル波高分析器(MCA)のメモリーに蓄積された波高分布はカセットテープを仲介に用いてパーソナルコンピュータへ転送し、γ線スペクトルおよび1cm線量当量の解析を行った。

測定対象となる作業環境の線量率は $\sim 100 \mu\text{Sv/h}$ 程度であるため、計数率が高く、電子回路のバイルアップが問題となり従来の方法では正確なスペクトル測定ができない。そのため、以下のような対策を行った。

(1) 高速回路の採用

バイルアップ率を少なくするためには、できるだけパルスの立ち上がりの速い ($0.1 \mu\text{s}$ 以下) 回路を使用する必要がある。しかしながらNaI(Tl)シンチレータ中の光パルスの減衰時間は $0.23 \mu\text{s}$ であるため、むやみに速い回路を使用することは適当でない。そこでチャージセンシティブアンプに $0.1, 0.2, 0.5 \mu\text{s}$ の3つのパルス幅切り替えレンジを設けた結果から通常 $0.2 \mu\text{s}$ を用いることとした。

(2) 小型シンチレータの採用

NaI(Tl)検出器の計数率は近似式として次式を用いることができる³⁾。

$$nu = 3600 \cdot \phi u \cdot s \cdot (1 - e^{-nc \cdot \tau}) \quad (1)$$

nu : 単位1cm線量当量当たりの計数率(cps/Sv/h)

ϕu : 単位1cm線量当量当たりのフルエンス ($\text{Sv/h} \cdot \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$)

s : シンチレータの断面積 (cm^2)

μ : NaI(Tl)のγ線に対する吸収係数(cm^2/g)

ρ : NaI(Tl)の密度(g/cm^3)

t : シンチレータの長さ (cm)

上式において1"φ、2"φ、3"φの3種類の大きさのシンチレータを用いた場合、60keV、600keV、6 MeVのエネルギーについて、単位線量当たりの係数率を推定すると表-1が得られる。60keV付近は単位線量当たりの係数率が大きいため3種類の大きさのシンチレータについて次式で表されるバイルアップ率について評価した。

$$W = 1 - e^{-nc \cdot \tau} \quad (2)$$

W : バイルアップ率

nc : 係数率(cps)

τ : パルス幅(s)

表-1 シンチレータの大きさと単位線量率当たりの計数率予測(cps/Sv/h)

エネルギー (MeV)	NaI(Tl)シンチレータの直径		
	1 inch	2 inch	3 inch
0.06	2.3×10^3	9.2×10^3	2.1×10^4
0.6	6.7×10^3	1.1×10^4	2.9×10^4
6	1.6×10^7	1.6×10^7	3.5×10^7

表-2 シンチレータの大きさとバイルアップ率の予測

H 1cm ($\mu\text{Sv/h}$)	NaI(Tl)シンチレータの直径		
	1 inch	2 inch	3 inch
10	0.011	0.045	0.10
50	0.056	0.21	0.41
100	0.11	0.37	0.65

1 cm線量当量を $10\mu\text{Sv/h}$ 、 $50\mu\text{Sv/h}$ 、 $100\mu\text{Sv/h}$ と変えて照射した場合、検出器のバイルアップ率を算出した結果を表-2に示す。この表よりバイルアップ率の上限は10%と仮定すれば $100\mu\text{Sv/h}$ まで測定可能なシンチレータサイズは1"以下となる。また、測定下限は測定時間と統計誤差の関係で決まり、測定時間10分間、統計誤差10%とすれば最も計数率の低いシンチレータサイズ1"φ、6 MeVの場合では $1 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$ となり、通常の自然放射線のレベルの測定が可能である。よって、シンチレータサイズとして1"φを採用すれば、測定対象とした $\sim 100 \mu\text{Sv/h}$ まで十分測定可能と判断された。

2.2 測定原理

通常スペクトロメータによりMCAで得られた波高分布はスペクトロメータの検出器自身の特性を反映した吸収エネルギー分布であり、真の γ 線スペクトルではない。そのため単色 γ 線による波高分布、すなわち検出器のレスポンスを用いて測定された波高分布を γ 線スペクトルに変換（アンフォールディング）することが必要である。波高分布は以下のように表される。

$$C(E) = \int_0^{\infty} R(E', E) \cdot N(E) dE' \quad (3)$$

$C(E)$: 測定波高分布

$R(E', E)$: 検出器のレスポンス関数（エネルギー E を持った入射 γ 線エネルギー E' のバリスを生じさせる確率）

$N(E)$: 検出器に入射する γ 線スペクトル

この(3)式は計算を容易にするため次のようにマトリックスを用いて書き直すことができる。

$$C = R \times N$$

$$= |c| = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1k} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \dots & r_{2k} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & \dots & r_{3k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{1k} & r_{2k} & r_{3k} & \dots & r_{kk} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ \dots \\ n_k \end{vmatrix} \quad (4)$$

k : エネルギー区分

未知スペクトル N は(4)式において R の逆マトリックスを乗ずることにより求められるが、この手法は

ピークを持つスペクトルに対しては振動をあたえたり負の解を与えたりするため適当ではない。そこで、本研究では逐次近似法を用いて解析を行うこととした¹⁾。入射 γ 線スペクトル N において逐次回 j 後の i 番目のエネルギーをもつ要素は以下のように与えられる。

$$n_i^{(j)} = n_i^{(j-1)} \cdot c_i^{(0)} / c_i^{(j-1)} \quad (5)$$

ここで、

$n_i^{(j)}$: 入射 γ 線スペクトル N において逐次回 j 後のエネルギー i 番目の要素

$c_i^{(0)}$: 測定波高分布のエネルギー i 番目の要素

$c_i^{(j-1)}$: 式(4)で算出されたスペクトル c の逐次回 $j-i$ 回目の要素

ここで計算には初期スペクトルとして $N^{(0)}$ が必要であるが、測定波高分布 $C^{(0)}$ を用いた。本研究ではエネルギー区分として0.02 MeVから10 MeVまでを対数表示とし1デカド10等分割し、27群として計算を行い、1 cm線量当量を精度よく求めるよう工夫した。すなわちベクトル C と N のディメンションは27、 R は 27×27 となる。また、逐回数としては50回を使用した。なお、本研究で使用したレスポンス関数については後述する。

1 cm線量当量率および3 cm線量当量率等は以下のように算出した。

$$H_{1\text{cm}, 3\text{mm}, 70\mu\text{m}} = \frac{3,600 \cdot L \cdot \sum K_{i1\text{cm}, 3\text{mm}, 70\mu\text{m}} \cdot n_i}{V \cdot T} \quad (6)$$

ここで、

$H_{1\text{cm}, 3\text{mm}, 70\mu\text{m}}$: 1 cm線量当量率、3 mm線量当量率、 $70\mu\text{m}$ 線量当量率($\mu\text{Sv/h}$)

$K_{i1\text{cm}, 3\text{mm}, 70\mu\text{m}}$: i 番目のエネルギーにおける1 cm線量当量率、3 mm線量当量率、 $70\mu\text{m}$ 線量当量率への変換係数($\text{Sv} \cdot \text{cm}^2$)

n_i : i 番目のエネルギーを持ったシンチレータへの入射 γ 線の数

L : シンチレータの実効長 (cm)

V : シンチレータの体積 (cm^3)

T : 測定時間(s)

2.3 レスポンス関数

波高分布のアンフォールディングを行いスペクトルを得るためには検出器のレスポンス関数が必要である。精度の良いレスポンス関数を必要とするため、NaI(Tl)検出器用レスポンス作成計算コードMARTHA⁵⁾を使用した。代表的なNaI(Tl)シンチレータについては、すでにMARTHAの結果がカタログとして公表されている⁶⁾。しかし、本研究で使用した1"φ球形シンチレータについては記載されていないため、コードを入手し計算を行った。

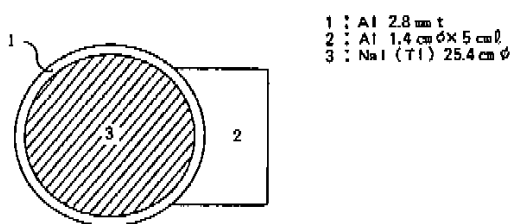


図-3 MARTHA入力用幾何学的条件

MARTHAコードは、シンチレータおよびその周囲の構造材中の光子の相互作用をモンテカルロ法により光子および電子について追跡し、シンチレータ内における吸収エネルギー分布を与えるものである。本研究で用いたMARTHA入力データ用の幾何学的条件を図-3に示す。乱数による光子発生数（ヒストリー）は統計的変動を少なくするために10,000を用いた。

2.4 特性試験

(1) 角度依存性

本スペクトロメータの角度依存性を ^{137}Cs 線源および ^{241}Am 線源を用いて測定した結果を図-4に示す。検出器前方の軸方向からの照射を1としその相対計数率で角度依存性を測定した。 ^{241}Am 線源において検出器の軸方向から 120° 付近より極端に角度依存性が大きくなっているが、球形のシンチレータを使用していることにより角度依存性は比較的小さいといえる。

(2) 線量率依存性

線量率依存性を校正室 ^{137}Cs 線源を用いて測定した結果を図-5に示す。照射線量率にして20mR/h程度までは、測定可能であることがわかる。測定はすべてマルチチャンネル波高分析器でLive Timeによる測定を行っているため、数え落としは補正されている。しかし、高線量率ではパイルアップによる計数の減少、検出器からの出力パルスがアンダーシュート上に乗り低エネルギー側にシフトする現象等により結果が小さくなっている。パイルアップリジェクタを通せばさらに高線量率まで測定可能と思われるが、付属装置を増やすと作業現場での可操作性が損なわれる可能性がある。

3. 実作業場での測定

3.1 測定場所

大洗工学センターには、原子炉施設として「常

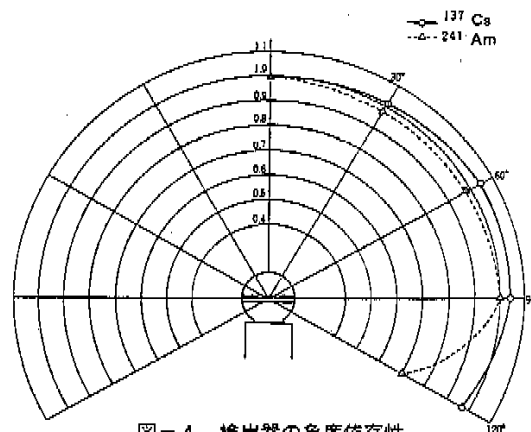


図-4 検出器の角度依存性

陽」、重水臨界実験装置「DCA」が、また、核燃料取扱施設として照射燃料集合体試験施設「FMF」、照射燃料試験施設「AGF」、照射材料試験施設「MMF」およびセンター内で発生する固体廃棄物の前処理を行う施設として固体廃棄物処理施設「WDF」があり、これらがセンター内での主要な管理区域保有施設である。

これらの施設の管理区域の内測定対象とする場所は、被ばくの比較的多い施設については過去5年間の被ばく実績を参考に選定し、また、被ばくの少ない施設については過去5年間の放射線作業から被ばくの恐れがありかつ立ち入り頻度の多い場所を選定した。各施設の作業場所別被ばく割合を表-3に、また、DCA, WDAの作業場所使用率を表-4に示

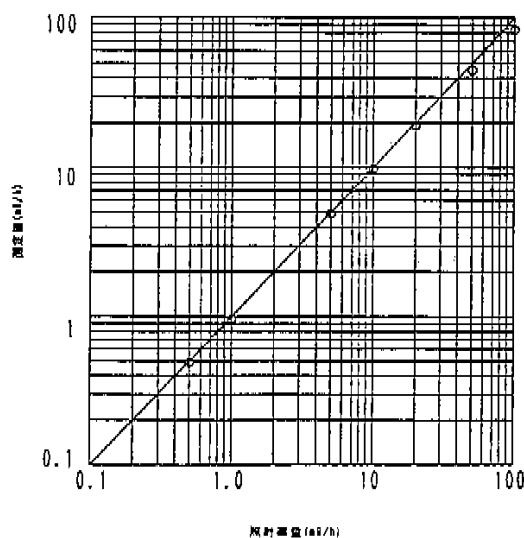


図-5 線量率依存性

表-3 各施設の作業場所別被ばく割合

単位: %				
施設	格納容器床下	付属建家	処理建家	その他
格納容器床下	53.8	12.5	17.5	6.2
Na洗浄室	55.7	20.2	18.6	3.7
廃液タンク室	55.7	20.2	18.6	3.7
サーベリエリア	62.8	26.8	9.2	1.2
燃料関係セル	65.1	22.2	8.5	0.2

す。

表-3、表-4の結果を基に各施設の代表的な管理区域を測定した。なお、セル内は立ち入りが不可能であり、かつ線量率が高く装置の特性上測定できないため、セル内線量の影響を受けない場所あるいはセルと直結したグローブボックス表面での測定で代用した。また、個人に対する被ばくには直接関係しないが、放射線測定機器の線源校正の場である安全管理棟校正室についても、散乱線の実効γ線エネルギーへの影響を調査するため測定場所として選定した。各施設の測定場所を表-5に示す。

4. 実効γ線エネルギーの評価

各施設の測定データ(1cm線量当量率(μ Sv/h)と照射線量率の比(mR/h))から得られる単位変換係数とICRP Publication 51データを用いて実効γ線エネルギーの評価を行った。

表-5に各測定場所の評価結果を示すとともに各施設毎の評価を以下に述べる。

「常陽」全体としては、廃棄物処理建家で450keVという比較的低い実効γ線エネルギーも確認されたが、この処理建家も含め全体として実際の放射線管理を行う上では特に従来型の電離箱サーベイメータの指示値をそのまま単位変換しH1cmとしても問題のないことが確認された。また、今回の炉上部の測定で、原子炉運転中の中性子捕獲γ線が実効エネルギーにどの程度寄与するかの確認もできた。

DCA全体としては、運転後の炉室作業では従来の電離箱サーベイメータによる照射線量率をそのまま単位変換のみでH1cmとしても問題ないが、燃料(特にプルトニウム燃料)取扱作業の場合は単位変換とともに数値を15%高くしないと、実際のH1cmの値にならないため、旧型サーベイメータを使用する場合には注意が必要である。

FMF全体としては、各階毎のそれぞれの設備の違いによってγ線スペクトル(主なγ線ピークの値)に差が見られる。しかし、実効γ線エネルギーについて考察した場合は550keV~750keVの範囲に

表-4 DCA、WDAの作業場所使用率

単位: %				
施設	炉室	燃料取扱室	U燃料貯蔵	Pu燃料貯蔵
DCA	36.0	28.0	12.0	11.0
WDA	38.5	20.5	12.5	6.5

入っており、単位変換係数の最大値も10.5であり、FMF内においても従来の電離箱サーベイメータ指示値を単位変換するだけでH1cmに読み替えても問題ないと考ええる。

AGF全体としては、AGFの施設そのものが使用済燃料の取扱施設であるためγ線の主はやはりFPである ^{137}Cs となり、また、フード等では ^{241}Am の影響も大きくなってしまふ。そのため、実効エネルギーもCPの主要核種である ^{60}Co や ^{54}Mn が存在する他の施設に比べて低くなっている。なお、単位変換係数も平均11.0となり、従来の電離箱サーベイメータを用いる場合に単位変換する際には、値を10%高くする必要がある。

MMF全体としては、実効エネルギーは燃料取扱系の場所では500keV前後、その他の材料取扱系の場所では660keV前後であった。単位変換係数は10.6が最高で従来の電離箱サーベイメータ指示値を単位変換しH1cmに読み替えても特に問題はないと考える。

WDF全体としては、α廃棄物のみを取り扱って

表-5 測定結果

施設	測定場所	スペクトル解析結果			単位変換係数 ($\mu\text{Sv/h mR/h}$)	実効γ線エネルギー (KeV)
		主要核種 (占有割合)	照射線量率 (mR/h)	H1cm ($\mu\text{Sv/h}$)		
常陽	格納容器内炉上部	捕獲γ線	0.115	1.13	9.8	2000
	格納容器内床下	^{54}Mn (15%)	38.7	407	10.5	550
	付属建家タンク室	^{60}Co (30%)	6.34	65.5	10.3	880
	廃液処理建家1階	^{60}Co (20%)	1.75	18.8	10.7	450
	メンテナンス室1階	^{60}Co (40%)	0.317	3.26	10.3	660
DCA	運転後、炉室	—	8.22	85.7	10.4	600
	Pu燃料貯蔵庫	^{241}Am (20%)	1.58	16.3	11.5	260
	U燃料貯蔵庫	^{238}Pu	0.91	9.72	10.7	450
FMF	廃液タンク室	^{60}Co (30%)	1.83	19.0	10.4	600
	Na洗浄室	^{60}Co	0.307	3.19	10.4	600
	金格セルサーベリエリア	^{137}Cs (20%)	0.55	5.60	10.2	750
	3階フロッドマン準備室	^{54}Mn , ^{60}Co	0.90	9.45	10.5	550
AGF	化学室	^{137}Cs (20%)	0.15	1.70	11.3	290
	除染室	^{137}Cs (30%)	0.36	3.90	10.8	400
	サーベリエリア	^{137}Cs (30%)	0.46	5.10	11.1	330
	α-γグローブボックス	^{137}Cs (45%)	0.77	8.18	10.6	500
MMF	β-γグローブボックス	^{60}Co (30%)	0.79	8.12	10.3	660
	Na洗セルグローブボックス	^{137}Cs (40%)	0.69	7.31	10.6	500
	サーベリエリアA	^{60}Co , ^{137}Cs	0.081	0.84	10.4	600
WDA	フロッドマン準備室	^{137}Cs (24%)	0.067	0.71	10.6	500
	セル補機室	^{60}Co , ^{137}Cs	8.22	85.7	10.4	600
安全管理棟機器校正室 (^{137}Cs 線源で照射)		過剰使用位置	18.8	197	10.48	560
		貯蔵最高位置	9.93	105	10.58	510

いる場所では ^{137}Cs の寄与が大きいが、その他の場所では ^{60}Co と ^{137}Cs がほとんどを占めている。WDFでは、各場所での実効 γ 線エネルギーはほぼ同じで、単位変換係数の場所による違いはセンター内で最も小さいことが確認された。なお、WDFにおいても従来の電離箱サーベイメータ値を単位変換のみでH 1 cmに読み替えても特に問題はないと考える。

校正室は、放射線管理課員が使用するサーベイメータあるいはエリアモニタ等の測定器の線源校正を実施している施設である。今後、測定器の校正に放射線のエネルギーを考慮する必要がある場合、校正室内の散乱によるエネルギー低下を前もって知る必要がある。そこで、この機会に本スペクトロメータを使用して散乱線を受けた場合の真の実効 γ 線エネルギーを調査した。その結果、散乱が最大と予想される位置（壁に一番近い所）では実効 γ 線エネルギーは510keVとなり、 ^{137}Cs の662keVに対して23%低下していることが確認された。また、通常の使用位置では、560keVと17%の低下率であった。

5. まとめ

今回の測定によって、大洗工学センターでのH 1 cmに対する実効 γ 線エネルギーは、最低がDCAのプルトニウム燃料貯蔵庫の260keV、最高が「常陽」の運転中格納容器内での2.0MeVという結果が得られた。しかし、これら最低、最高の値は今回の測定対象としては極端な例であり、ほとんどの施設では実効 γ 線エネルギーは500keV前後であることが確認された。また、実効 γ 線エネルギーが主要核

種の γ 線エネルギーよりもかなり低くなっていたことから、実際の作業場所では、実効 γ 線エネルギーを低下させる要因である散乱がかなりあることも今回の測定で明かとなった。したがって、今後の放射線管理の実務面では、燃料取扱系の作業場所においては約10%程度従来の照射線量よりH 1 cmが高くなることを念頭において作業管理をすれば、従来のサーベイメータの使用については特別に係数を設ける等の必要はなく、単位を変換するのみでそのまま使用できるものと考えられる。

一方、今回の測定によって本スペクトロメータが測定場での γ 線エネルギーとそのフラックス分布の収集に対して優れた性能を有し、本スペクトロメータの利用方法として現場の線量当量率測定、実効 γ 線エネルギー評価に有効であることが確認できたが、今後はさらに、プラントの遮蔽設計バックデータとしての利用、施設管理における遮蔽計算への利用、校正場における基準値への適用等について検討を進め、本方法の利用の拡大を図っていく予定である。

参考文献

- 1) 国際放射線防護委員会；国際放射線防護委員会勧告（1977）、ICRP Publication 26、日本アイソトープ協会（1987）
- 2) 国際放射線防護委員会；放射線源に対する防護のためのデータ、日本アイソトープ協会（1987）
- 3) プライス；放射線計測、コロナ社
- 4) 天道秀彦； γ 線スペクトルの解析法、Radioisotopes Vol.12, No.2, 200-206
- 5) Kimiaki Saito and Shigeru Moriuchi；Monte Carlo Calculation of Accurate Response Function for a NaI(Tl) Detector for Gamma Rays, Nucl. Instr. and Meth. (1991) 199-308
- 6) 斉藤公明、森内正；モンテカルロ計算によるNaI(Tl)シンチレーション検出器ガンマ線応答関数のデータカタログ、JAERI 1306（1987）