

70 マイクロメートル線量当量率を用いた $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 汚染密度推定法

平山 英夫*¹, 近藤 健次郎*¹

(2015年8月10日受理)

(2015年10月5日再受理)

Method to Estimate $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ Contamination Density using 70- μm Dose Equivalent Rate

Hideo HIRAYAMA*¹ and Kenjiro KONDO*¹

A method was developed to estimate ^{90}Sr contamination density on a concrete surface or on the surface of soil or water within 1 g/cm² using 70- μm dose equivalent rates. The 70- μm dose equivalent rates from contaminated areas of various sizes were calculated at heights of 3.0, 5.0, 10.0, and 50.0 cm using egs5 Monte Carlo code. The ratio between the measured 70- μm dose equivalent rate ratio at 50 cm and that at 3.0, 5.0, or 10 cm can be used to estimate the effective radius of the contaminated area by using the calculation results. The contaminated density is obtained from the measured 70- μm dose equivalent rate with the calculated radially dependent conversion factor.

KEY WORDS: surface concentration, ^{90}Sr , 70- μm dose equivalent rate, β -ray, egs5.

I 緒 論

福島第一原子力発電所（以下、「1F 発電所」という。）では、高濃度の $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ を主要な放射性核種として含むセシウム除去装置（サリー）等により Cs を除去した RO 濃縮水を保管している初期のフランジ型タンク等からトラブルにより汚染水が漏れた場合に、それに伴う汚染の状況を速やかに評価することが求められている。非密封放射性同位元素を扱う管理区域では、床などには滑らかな塗装がされており、スミア法により汚染状況を評価することが可能である。しかしながら、1F 発電所の場合は、汚染の場所が、タンク表面、コンクリート面、土壌やたまり水等で、スミア法による測定が難しい環境である。また、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ が主たる放射性核種であるため、 β 線が測定の対象になる。このため、汚染密度等の定量には γ 線測定より多くの時間を要する。このような状況

と表面汚染の測定で一般的に行われている端窓 GM 計数管式サーベイメータによる直接測定では、高線量当量率のため計数率が大きくなりすぎることから、1F 発電所では、シャロー型電離箱（(株) 応用技研：AE-133B または AE-133BH¹⁾）により測定した 70 マイクロメートル線量当量率を汚染の状況を示す情報として示していた。70 マイクロメートル線量当量率は、 β 線等による皮膚の被ばく線量管理に使われる線量であり、作業者の被ばく管理の上では重要なものであるが、周辺線量当量率と同じシーベルト単位であることから、汚染の状況を伝えるという観点からは、誤解を生む可能性があるものと言える。

本論文で提案する手法は、電磁カスケードモンテカルロ計算コード egs5²⁾ を使用して、一様な密度の汚染面の中心から 3.0, 5.0 または 10 cm と 50 cm 高さでの $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ の β 線による 70 マイクロメートル線量当量率を計算し、50 cm での線量当量率と 3.0, 5.0 または 10 cm での線量当量率の比から汚染領域の広さを求め、汚染領域の広さに対応した 70 マイクロメートル線量当量率から表面汚染密度 (Bq/cm² または Bq/g) への換算係数を使って表面汚染密度を求めるものである。 β 線の飛程が短い

*¹ 高エネルギー加速器研究機構放射線科学センター；茨城県つくば市大穂 1-1 (〒305-0801)
Radiation Science Center, High Energy Accelerator Research Organization; 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-0801, Japan.
E-mail: hideo.hirayama@kek.jp

ことから、あくまでコンクリート、土壌や水の表面における汚染密度の情報ではあるが、汚染の状況という観点からはより実態に近いものである。

以下では、egs5 による 70 マイクロメートル線量当量率計算の概要と、得られた 70 マイクロメートル線量当量率比と汚染領域の広さ及び汚染の広さに対応した 70 マイクロメートル線量当量率から表面汚染密度 (Bq/cm²) への換算係数、汚染水面上での測定値と評価値の比較及び実際の現場への適用時の留意点を示す。

II egs5 による ⁹⁰Sr/⁹⁰Y β 線による 70 マイクロメートル線量当量率の計算

1. 計算方法の概要

汚染面から放出される ⁹⁰Sr/⁹⁰Y からの β 線による 70 マイクロメートル線量当量率の汚染面からの高さを変えた計算を効率的に行うために、コンクリート表面に、1 Bq/cm² の汚染密度で様に汚染している面源面の中心から、3.0, 5.0, 10 及び 50 cm 高さでの空気中の角度依存の電子スペクトルを計算し、電子のエネルギー・角度依存の 70 マイクロメートル線量当量換算係数を用いて 1 Bq/cm² の汚染密度の場合の 70 マイクロメートル線量当量率を計算した。土壌または水中に ⁹⁰Sr/⁹⁰Y がある場合には、その濃度が均一であると仮定し、1 Bq/g の場合について同様の計算を行った。β 線のスペクトルとしては、ICRU Report 56³⁾ のデータを使用した。

面または円筒線源からの電子スペクトルの計算では、

計算効率をあげるために、「面等方線源からのガンマ線束を点等方線源と面検出器に置き換える手法⁴⁾」を使用した。この手法では、面検出器の大きさが、面線源の広さに対応するので、スコアする面検出器の大きさを変えることにより、さまざまな広さの面線源の計算を一度に行うことが出来る。空気中で後方散乱された電子は、人体表面での 70 マイクロメートル線量当量には寄与しないので、電子スペクトルには含めない計算を行った。

電子のエネルギー・角度依存の 70 マイクロメートル線量当量換算係数は、平山が egs4 で計算した人体等価平板ファントムでの換算係数⁵⁾を使用した。換算係数は、エネルギーと角度について離散的なので、エネルギーと角度について直線内挿した値を適用した。

2. 汚染面上での 70 マイクロメートル線量当量率

コンクリート表面に ⁹⁰Sr/⁹⁰Y が 1 Bq/cm² の密度で分布しているとして、汚染面の中心で、表面から 3.0, 5.0, 10 及び 50 cm 高さでの 70 マイクロメートル線量当量率の計算結果を Table 1 に示す。表中の誤差は、計算の統計誤差 (Fractional standard deviation) である。Table 1 には、汚染領域の半径を 1.0 cm から 20 m まで変化させた時の、50 cm 高さでの線量当量率と 3.0, 5.0 または 10 cm での線量当量率の比及び 3.0, 5.0 または 10 cm 高さでの 70 マイクロメートル線量当量率から表面汚染密度 (Bq/cm²) への換算係数を併せて示す。

⁹⁰Sr/⁹⁰Y の面線源からの 70 マイクロメートル線量当量

Table 1 70- μ m dose equivalent rate at height of 3.0, 5.0, 10, and 50 cm from a circular source of ⁹⁰Sr/⁹⁰Y (1 Bq/cm²) on concrete as a function of source radius together with dose ratio and conversion coefficient.

radius (cm)	mSv/h per Bq/cm ²			
	at 3.0 cm	at 5.0 cm	at 10 cm	at 50 cm
1.0	1.44E-04 ± 2.2E-07	5.28E-05 ± 1.4E-07	1.25E-05 ± 6.50E-08	2.98E-07 ± 9.5E-09
5.0	1.69E-03 ± 7.0E-07	8.89E-04 ± 5.3E-07	2.69E-04 ± 2.97E-07	7.50E-06 ± 4.8E-08
10	2.75E-03 ± 8.4E-07	1.91E-03 ± 7.3E-07	8.12E-04 ± 5.01E-07	2.91E-05 ± 9.4E-08
50	3.72E-03 ± 9.4E-07	3.36E-03 ± 9.1E-07	2.63E-03 ± 8.32E-07	4.61E-04 ± 3.7E-07
100	3.84E-03 ± 9.8E-07	3.51E-03 ± 9.4E-07	2.90E-03 ± 8.72E-07	9.08E-04 ± 5.0E-07
200	3.91E-03 ± 1.0E-06	3.60E-03 ± 9.8E-07	3.01E-03 ± 9.07E-07	1.24E-03 ± 5.8E-07
500	3.97E-03 ± 1.0E-06	3.66E-03 ± 1.0E-06	3.08E-03 ± 9.38E-07	1.38E-03 ± 6.3E-07
1,000	3.97E-03 ± 1.0E-06	3.66E-03 ± 1.0E-06	3.08E-03 ± 9.40E-07	1.38E-03 ± 6.4E-07
2,000	3.97E-03 ± 1.0E-06	3.66E-03 ± 1.0E-06	3.08E-03 ± 9.40E-07	1.38E-03 ± 6.4E-07

radius (cm)	Dose ratio			Bq/cm ² per mSv/h		
	at 50 cm/ at 3.0 cm	at 50 cm/ at 5.0 cm	at 50 cm/ at 10 cm	at 3.0 cm	at 5.0 cm	at 10 cm
1.0	2.06E-03	5.63E-03	2.39E-02	6.93E+03	1.89E+04	8.02E+04
5.0	4.44E-03	8.44E-03	2.79E-02	5.92E+02	1.13E+03	3.72E+03
10	1.06E-02	1.53E-02	3.59E-02	3.64E+02	5.25E+02	1.23E+03
50	1.24E-01	1.37E-01	1.75E-01	2.69E+02	2.98E+02	3.81E+02
100	2.37E-01	2.58E-01	3.13E-01	2.61E+02	2.85E+02	3.45E+02
200	3.16E-01	3.43E-01	4.10E-01	2.56E+02	2.78E+02	3.32E+02
500	3.47E-01	3.76E-01	4.47E-01	2.52E+02	2.74E+02	3.25E+02
1,000	3.48E-01	3.78E-01	4.49E-01	2.52E+02	2.73E+02	3.24E+02
2,000	3.48E-01	3.78E-01	4.49E-01	2.52E+02	2.73E+02	3.24E+02

率の半径及び高さ依存性について比較出来るデータとしては、龍福等による「点積分核法によるβ線皮膚線量の評価⁶⁾」がある。70マイクロメートル線量当量率に対応する値は、7mg/cm²の皮膚(水で近似)を不感層として計算した結果である。mGy/hに単位を変換し、1Sv=1Gyを適用することにより、Table 1の結果と比較できる。本計算では、コンクリート上に線源があるとしているが、文献6の計算では、線源は空気中にあるとしている。Table 2に両者の比較を示す。全体的に良く一致していると言えるが、文献6の結果は線源の半径が小さい場合には40%程度過小評価で、過小評価の割合は線源の面積が大きくなるに伴い小さくなる傾向があ

る。両者の違いの要因は、コンクリートによる後方散乱による寄与と均一無限媒質中の計算結果を基にした点積分計算と電子の輸送を含めたモンテカルロ計算の違いによると考えられる。

土壌の場合には、土壌の状況などにより異なるが、比較的早く内部に浸透することが考えられる。浸透した⁹⁰Sr/⁹⁰Yのβ線も地表面上の70マイクロメートル線量当量率に寄与するが、エネルギーが高い⁹⁰Yのβ線の最大飛程が1g/cm²程度なので、1g/cm²の深さまでを対象とし、1Bq/gの密度の場合について計算を行った。土壌中の減衰は、土壌の密度の影響を受けるが、汚染密度を重量当たりとすることにより、対象とする領域を土壌の密

Table 2 Comparison of 70-μm dose equivalent rate between Ref. 6 and this work.

Height (cm)	Source radius (cm)								
	1.0 cm			5.0 cm			10 cm		
	Ref. 6 (A)	this work (B)	(A)/(B)	Ref. 6 (A)	this work (B)	(A)/(B)	Ref. 6 (A)	this work (B)	(A)/(B)
3.0	8.71E-05	1.44E-04	0.604	1.02E-03	1.69E-03	0.604	1.82E-03	2.75E-03	0.663
5.0	3.11E-05	5.28E-05	0.588	5.27E-04	8.89E-04	0.593	1.18E-03	1.91E-03	0.618
10	7.12E-06	1.25E-05	0.571	1.60E-04	2.69E-04	0.596	4.96E-04	8.12E-04	0.611
50	1.85E-07	2.98E-07	0.622	4.60E-06	7.50E-06	0.614	1.81E-05	2.91E-05	0.621
Height (cm)	Source radius (cm)								
	50 cm			∞					
	Ref. 6 (A)	this work (B)	(A)/(B)	Ref. 6 (A)	this work (B)	(A)/(B)			
3.0	3.20E-03	3.72E-03	0.861	3.68E-03	3.97E-03	0.928			
5.0	2.69E-03	3.36E-03	0.801	3.34E-03	3.66E-03	0.913			
10	1.91E-03	2.63E-03	0.726	2.75E-03	3.08E-03	0.892			
50	2.88E-04	4.61E-04	0.625	1.13E-03	1.38E-03	0.817			

Table 3 70-μm dose equivalent rate at height of 3.0, 5.0, 10, and 50 cm from a cylinder source of ⁹⁰Sr/⁹⁰Y (1 Bq/g) on soil as a function of source radius together with dose ratio and conversion coefficient.

radius (cm)	mSv/h per Bq/g			
	at 3.0 cm	at 5.0 cm	at 10 cm	at 50 cm
1.0	2.04E-05 ± 7.1E-08	7.64E-06 ± 4.3E-08	1.88E-06 ± 2.1E-08	6.49E-08 ± 3.8E-09
5.0	1.91E-04 ± 2.3E-07	1.16E-04 ± 1.7E-07	4.10E-05 ± 1.0E-07	1.56E-06 ± 1.9E-08
10	2.56E-04 ± 2.8E-07	2.10E-04 ± 2.5E-07	1.12E-04 ± 1.7E-07	6.11E-06 ± 3.8E-08
50	2.87E-04 ± 3.1E-07	2.77E-04 ± 3.0E-07	2.51E-04 ± 2.8E-07	8.85E-05 ± 1.5E-07
100	2.93E-04 ± 3.2E-07	2.84E-04 ± 3.1E-07	2.63E-04 ± 3.0E-07	1.49E-04 ± 2.1E-07
200	2.98E-04 ± 3.3E-07	2.90E-04 ± 3.2E-07	2.71E-04 ± 3.1E-07	1.78E-04 ± 2.4E-07
500	3.02E-04 ± 3.4E-07	2.94E-04 ± 3.3E-07	2.76E-04 ± 3.2E-07	1.88E-04 ± 2.6E-07
1,000	3.02E-04 ± 3.4E-07	2.94E-04 ± 3.3E-07	2.76E-04 ± 3.2E-07	1.88E-04 ± 2.6E-07
2,000	3.02E-04 ± 3.4E-07	2.94E-04 ± 3.3E-07	2.76E-04 ± 3.2E-07	1.88E-04 ± 2.6E-07

radius (cm)	Dose ratio			Bq/cm ² per mSv/h		
	at 50 cm/ at 3.0 cm	at 50 cm/ at 5.0 cm	at 50 cm/ at 10 cm	at 3.0 cm	at 5 cm	at 10 cm
1.0	3.18E-03	8.49E-03	3.44E-02	4.90E+04	1.31E+05	5.31E+05
5.0	8.17E-03	1.34E-02	3.81E-02	5.24E+03	8.61E+03	2.44E+04
10	2.39E-02	2.92E-02	5.45E-02	3.90E+03	4.77E+03	8.92E+03
50	3.08E-01	3.20E-01	3.52E-01	3.49E+03	3.61E+03	3.98E+03
100	5.09E-01	5.26E-01	5.66E-01	3.41E+03	3.52E+03	3.80E+03
200	5.96E-01	6.14E-01	6.56E-01	3.35E+03	3.45E+03	3.69E+03
500	6.22E-01	6.40E-01	6.82E-01	3.31E+03	3.40E+03	3.63E+03
1,000	6.23E-01	6.40E-01	6.83E-01	3.31E+03	3.40E+03	3.63E+03
2,000	6.23E-01	6.40E-01	6.83E-01	3.31E+03	3.40E+03	3.63E+03

度に関係なく設定することができる。結果を Table 3 に示す。

水中に漏れた場合には、漏れた周辺における濃度は、ほぼ一様であるとして扱うことができる。水中の $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ の β 線の影響は、土壌の場合と同様に 1 g/cm^2 の領域だけである。土壌との違いは、得られた濃度が水中の濃度に対応していることである。結果を Table 4 に示す。

3. 70 マイクロメートル線量当量率比の比較

50 cm 高さとして 3.0, 5.0 または 10 cm での 70 マイクロメートル線量当量率比の $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ の汚染領域の半径による変化を Fig. 1 に示す。いずれのケースの場合も、汚染領域が 2 m 以上で線量当量率比はほぼ一定になる。 β 線の最大飛程は、 ^{90}Sr では 0.18, ^{90}Y では 1.02 g/cm^2 である。この様に、 β 線の飛程が短いことから、2 m 以上の領域からの β 線は、70 マイクロメートル線量当量率にほとんど寄与していない。土壌と水の場合、線量当量率比はほとんど同じであるが、コンクリートの場合は土壌や水よりも小さな値になっている。この傾向は、空気中での距離による減衰が、コンクリートの方が大きい事を示している。この様な傾向になる原因を調べるために、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ が無限に広い場合の汚染面から 3.0 cm 高さでの電子スペクトルの比較を Fig. 2 に示す。土壌と水の場合、

スペクトルはほとんど同じで、コンクリートと比較すると、 ^{90}Sr からの β 線に対応するエネルギー領域が少ないことが判る。これは、土壌と水の場合、 β 線の発生位置から表面に出るまでに最大エネルギーが 0.546 MeV と低い ^{90}Sr の β 線の大部分が吸収されるためである。この結果、空気中に出た時点での電子の平均エネルギーが土壌と水の場合には高くなり、線量当量率比の値に影響したことが判る。

4. 70 マイクロメートル線量当量率から汚染密度への換算係数

3 cm または 10 cm での 70 マイクロメートル線量当量率から汚染密度への換算係数を $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ の実効汚染半径の関数として Fig. 3 に示す。Fig. 1 から明らかなように、実効的な汚染領域の半径が 2 m から変化は小さくなり、5 m 以上では換算係数は一定となっている。

III 現場への適用

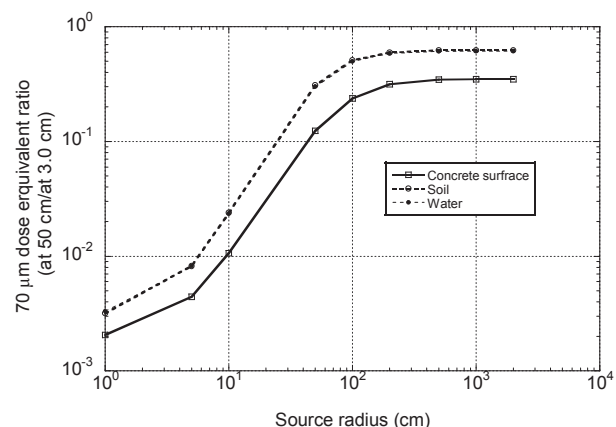
1. $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β 線による 70 マイクロメートル線量当量率の測定

本手法は、 β 線の主要な線源が $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ である状況下で、70 マイクロメートル線量当量率を測定できる線量計であれば、どの様な線量計でも適用可能であるが、線量計への光子の寄与を除外する必要がある。例えば、

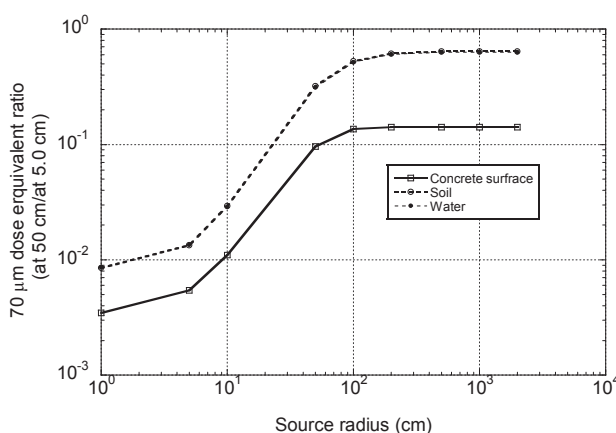
Table 4 70- μm dose equivalent rate at height of 3.0, 5.0, 10, and 50 cm from a cylinder source of $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (1 Bq/g) on water as a function of source radius together with dose ratio and conversion coefficient.

radius (cm)	mSv/h per Bq/g			
	at 3.0 cm	at 5.0 cm	at 10 cm	at 50 cm
1.0	$1.82\text{E-}05 \pm 6.7\text{E-}08$	$6.99\text{E-}06 \pm 4.1\text{E-}08$	$1.78\text{E-}06 \pm 2.1\text{E-}08$	$6.04\text{E-}08 \pm 3.7\text{E-}09$
5.0	$1.77\text{E-}04 \pm 2.2\text{E-}07$	$1.07\text{E-}04 \pm 1.7\text{E-}07$	$3.77\text{E-}05 \pm 9.7\text{E-}08$	$1.44\text{E-}06 \pm 1.9\text{E-}08$
10	$2.38\text{E-}04 \pm 2.7\text{E-}07$	$1.94\text{E-}04 \pm 2.4\text{E-}07$	$1.04\text{E-}04 \pm 1.6\text{E-}07$	$5.61\text{E-}06 \pm 3.7\text{E-}08$
50	$2.67\text{E-}04 \pm 3.0\text{E-}07$	$2.57\text{E-}04 \pm 2.9\text{E-}07$	$2.33\text{E-}04 \pm 2.7\text{E-}07$	$8.02\text{E-}05 \pm 1.5\text{E-}07$
100	$2.72\text{E-}04 \pm 3.1\text{E-}07$	$2.63\text{E-}04 \pm 3.0\text{E-}07$	$2.44\text{E-}04 \pm 2.9\text{E-}07$	$1.36\text{E-}04 \pm 2.0\text{E-}07$
200	$2.76\text{E-}04 \pm 3.2\text{E-}07$	$2.68\text{E-}04 \pm 3.1\text{E-}07$	$2.50\text{E-}04 \pm 3.0\text{E-}07$	$1.62\text{E-}04 \pm 2.3\text{E-}07$
500	$2.79\text{E-}04 \pm 3.2\text{E-}07$	$2.71\text{E-}04 \pm 3.2\text{E-}07$	$2.54\text{E-}04 \pm 3.0\text{E-}07$	$1.71\text{E-}04 \pm 2.5\text{E-}07$
1,000	$2.79\text{E-}04 \pm 3.2\text{E-}07$	$2.71\text{E-}04 \pm 3.2\text{E-}07$	$2.54\text{E-}04 \pm 3.0\text{E-}07$	$1.71\text{E-}04 \pm 2.5\text{E-}07$
2,000	$2.79\text{E-}04 \pm 3.2\text{E-}07$	$2.71\text{E-}04 \pm 3.2\text{E-}07$	$2.54\text{E-}04 \pm 3.0\text{E-}07$	$1.71\text{E-}04 \pm 2.5\text{E-}07$

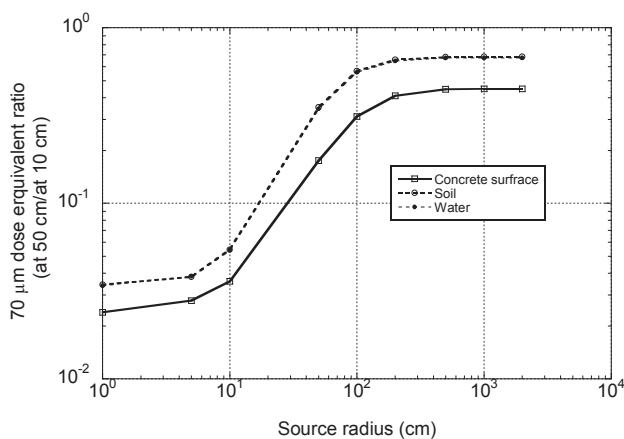
radius (cm)	Dose ratio			Bq/cm ² per mSv/h		
	at 50 cm/ at 3.0 cm	at 50 cm/ at 5.0 cm	at 50 cm/ at 10 cm	at 3.0 cm	at 5.0 cm	at 10 cm
1.0	$3.31\text{E-}03$	$8.63\text{E-}03$	$3.39\text{E-}02$	$5.49\text{E+}04$	$1.43\text{E+}05$	$5.62\text{E+}05$
5.0	$8.18\text{E-}03$	$1.35\text{E-}02$	$3.84\text{E-}02$	$5.66\text{E+}03$	$9.34\text{E+}03$	$2.66\text{E+}04$
10	$2.35\text{E-}02$	$2.89\text{E-}02$	$5.42\text{E-}02$	$4.19\text{E+}03$	$5.15\text{E+}03$	$9.66\text{E+}03$
50	$3.00\text{E-}01$	$3.12\text{E-}01$	$3.45\text{E-}01$	$3.74\text{E+}03$	$3.89\text{E+}03$	$4.29\text{E+}03$
100	$4.99\text{E-}01$	$5.16\text{E-}01$	$5.57\text{E-}01$	$3.68\text{E+}03$	$3.80\text{E+}03$	$4.10\text{E+}03$
200	$5.86\text{E-}01$	$6.04\text{E-}01$	$6.47\text{E-}01$	$3.62\text{E+}03$	$3.73\text{E+}03$	$4.00\text{E+}03$
500	$6.12\text{E-}01$	$6.30\text{E-}01$	$6.73\text{E-}01$	$3.59\text{E+}03$	$3.69\text{E+}03$	$3.94\text{E+}03$
1,000	$6.13\text{E-}01$	$6.31\text{E-}01$	$6.73\text{E-}01$	$3.58\text{E+}03$	$3.69\text{E+}03$	$3.94\text{E+}03$
2,000	$6.13\text{E-}01$	$6.31\text{E-}01$	$6.73\text{E-}01$	$3.58\text{E+}03$	$3.69\text{E+}03$	$3.94\text{E+}03$



(a) between 50 cm and 3.0 cm



(b) between 50 cm and 5.0 cm



(c) between 50 cm and 10 cm

Fig. 1 Ratio of 70- μm dose equivalent rates as a function of contaminated radius of $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$.

(a) between 50 cm and 3.0 cm, (b) between 50 cm and 5.0 cm, (c) between 50 cm and 10 cm.

1F 発電所での汚染現場が高濃度の $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ を含むタンクの外側の場合、タンク中で発生した制動放射 X 線の影響を除く必要がある。光子の寄与は、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ の β 線が透過出来ず、光子の減衰が少ない 1 cm のアクリル等

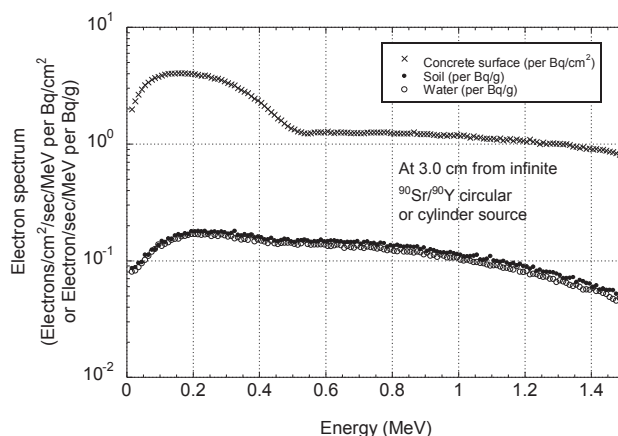


Fig. 2 Electron spectra at a height of 3.0 cm from an infinite contaminated area of $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ on concrete, soil, and water.

1 g/cm² 程度の厚みを持つプラスチックで検出器面をカバーしたときの計数値を差し引きことにより除くことが出来る。

β 線用の電離箱式サーベイメータは、電離箱の実効中心ではなく、 β 線入射窓の表面で校正されるのが普通であるので、測定高さとしては、実効中心までの距離ではなく、検出器表面までの距離を用いる。

2. 具体的な適用方法

本手法を現場に適用する手順を、以下に示す。

(1) 汚染領域の広さを推定

汚染の領域の広さが不明の場合には、汚染の中心と思われる場所で、汚染面から 3.0, 5.0 または 10 cm と 50 cm において、70 マイクロメートル線量当量率を測定し、**Fig. 1** から、実効的な汚染領域を推定する。汚染面に近い高さの選定は、測定場所の状況により、測定しやすい高さとする。汚染領域が 2 m 以上あることが判っている場合には、2 か所の測定は必要ないが、念のために測定し、**Fig. 1** の 2 m 以上の値と対応していることを確認する方が良い。

(2) 汚染密度の推定

汚染領域の実効的な広さが得られたら、3.0, 5.0 または 10 cm での 70 マイクロメートル線量当量率と換算係数を用いて汚染密度を求める。

3. 本手法の検証

コンクリートや土壌の場合には、汚染密度の測定が困難であるが、水の場合には、水中の $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 濃度そのものを測定することが可能である。1F 発電所で、2013 年 11

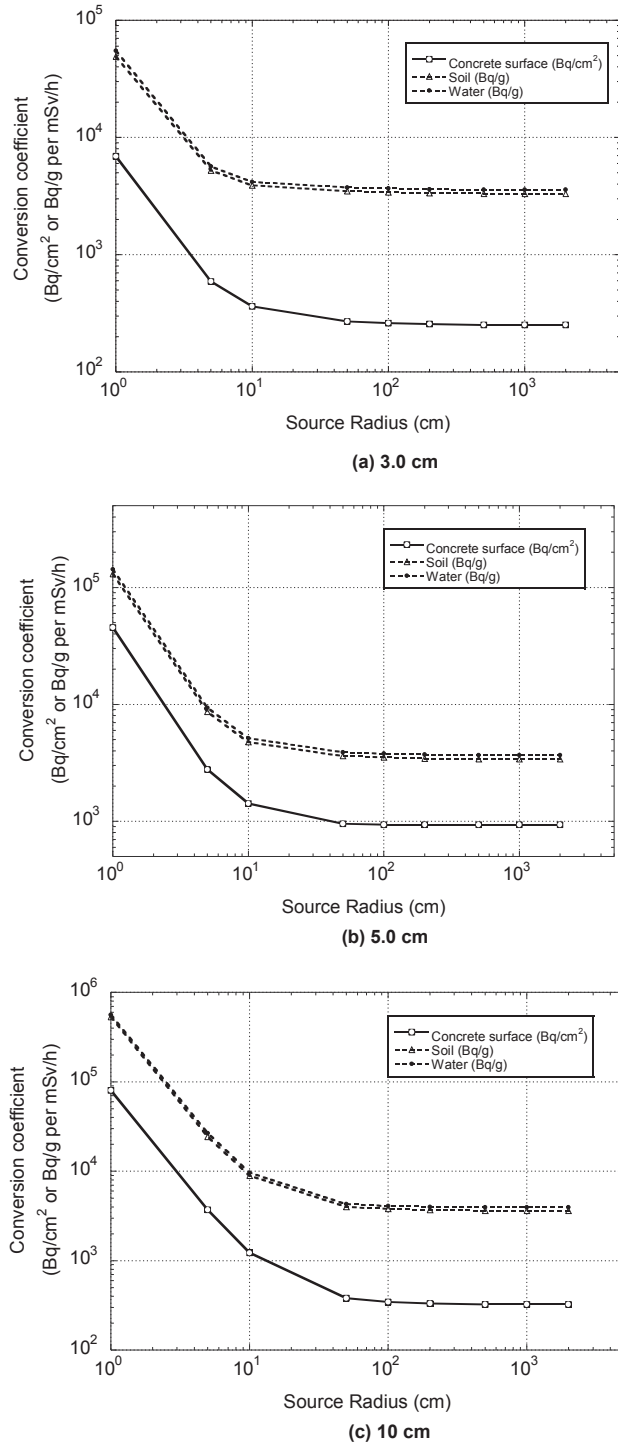


Fig. 3 Conversion coefficient from 70- μ m dose equivalent rate (mSv/h) to contamination density (Bq/cm² or Bq/g), at heights of (a) 3.0 cm, (b) 5.0 cm, (c) 10 cm.

月 19 日に、H4 タンクエリアで行われたサーベイ結果⁷⁾と比較することにより、本手法を検証した。

汚染水中の ⁹⁰Sr/⁹⁰Y 濃度は、490 Bq/cm³ で、水面から 1.0, 3.0, 5.0, 10, 20, 50 及び 100 cm の高さで、シャロー

型電離箱サーベイメータにより、ビルドアップキャップ無し/有りの測定が行われている。⁹⁰Sr/⁹⁰Y を含む水面の広さは半径 2 m より広いことが確認されている。計算結果と、測定結果との比較を **Table 5** に示す。**Table 1, 3** 及び **4** では、3.0, 5.0, 10 及び 50 cm での計算値のみを示しているが、**Table 5** では、実効半径を 5 m とした場合の測定値がある高さでの計算結果をすべて示している。この手法で評価した濃度は、測定値より 4-17% 大きいがおおむね良く一致しており、egs5 の計算に基づく本手法が妥当であることが確認できる。

4. コンクリート表面汚染への適用

2014 年 9 月 5 日の平成 25 年度第 21 回原子力規制委員会配付資料 3 の参考 2⁸⁾ に掲載されている汚染されたコンクリート表面の汚染密度を推定した。参考 2 では、約 20 cm × 20 cm の領域が変色しているという記述があるので、この領域に一樣に ⁹⁰Sr/⁹⁰Y が分布していると仮定する。II と同じ方法で計算した 20 cm × 20 cm の領域の中心で、表面から 5 cm 位置での 70 マイクロメートル線量当量率は、2.07E-03 mSv/h per Bq/cm² であり、換算係数は、

$$483 \text{ Bq/cm}^2 \text{ per mSv/h}$$

となる。参考 2 では、5 cm 位置での 70 マイクロメートル線量当量率が 230 mSv/h と報告されているので、汚染密度は、1.11E+05 Bq/cm² となる。汚染領域での総量は、変色したコンクリート表面全体では 4.44E+07 Bq であると推定される。漏れ水の全ベータ値は、3.0E+05 Bq/cm³ と報告されているので、⁹⁰Sr/⁹⁰Y 以外の β 線が無視でき、⁹⁰Sr と ⁹⁰Y の β 線の検出効率が同じと仮定すると、⁹⁰Sr/⁹⁰Y の濃度は、1.5E+05 Bq/cm³ となる。漏れた水が、すべて 20 cm × 20 cm の表面に付着したとすると、漏れた汚染水は 150 cm³ 程度となる。

5. 現場へ適用する際の留意点

本手法を現場へ適用する場合には、以下の点に留意する必要がある。

- (1) egs5 で計算した 70 マイクロメートル線量当量率比及び 70 マイクロメートル線量当量率から汚染密度 (Bq/cm² または Bq/g) への換算係数は、汚染が表面または、表面から 1 g/cm² までの領域で一樣であると仮定している。したがって、得られた密度は、対象となる領域での平均的な密度である。
- (2) β 線の飛程の影響で、2 m 以上の領域からの 70 マイ

Table 5 Comparison between measured and estimated $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ concentration in water using egs5 calculation results.

	Height from water surface (cm)							at 50 cm/ at 3.0 cm	at 50 cm/ at 10 cm
	1.0 cm	3.0 cm	5.0 cm	10 cm	20 cm	50 cm	100 cm		
	70 μm dose equivalent rate, mSv/h per Bq/g (for 5 m radius source)								
Calculated	2.87E-04	2.79E-04	2.71E-04	2.54E-04	2.26E-04	1.71E-04	1.16E-04	6.12E-01	6.73E-01
	70 μm dose equivalent rate (mSv/h)								
Measured	0.165	0.155	0.155	0.145	0.115	0.095	0.065	6.13E-01	6.55E-01
	Concentration in water (Bq/g)								
Estimated (A)	5.74E+02	5.56E+02	5.72E+02	5.71E+02	5.09E+02	5.57E+02	5.60E+02		
Measured (B)	490								
(A)/(B)	1.17	1.13	1.17	1.17	1.04	1.14	1.14		

クロメートル線量当量率への寄与は無視できる。このことは、実効的な汚染領域の半径が2 m以内であれば、70マイクロメートル線量当量率比から汚染領域の広さを推定することができること、2 mを超えていることが確認できれば、領域の広さに関係ない一定の換算係数を用いることができることを意味している。

- (3) 土壌中の $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ の分布は複雑であると思われる。本手法で得られる情報は、あくまで表面の $1\text{g}/\text{cm}^2$ までの領域での平均的な汚染密度である。対象が土壌である場合には、このことに留意して、深部までの状況を把握することが必要である。
- (4) 汚染領域の広さ及び汚染面からの高さにより異なるが、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の β 線による70マイクロメートル線量当量率は、同じ密度の $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ の β 線による70マイクロメートル線量当量率より小さく、コンクリート表面汚染の場合には、0.1–0.5、土壌または水の場合には、0.02–0.16である。汚染水中の ^{134}Cs 及び ^{137}Cs 濃度は、ほとんどの場合 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 濃度の1/100以下と考えられるが、状況によっては、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs 濃度が $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 濃度の1/100以上の場合もあり得る。このような場合には、70マイクロメートル線量当量率に ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の β 線が加わるため、本手法による結果は過大評価となる。
- (5) 本手法は、汚染密度が汚染領域内でほぼ一様であることを前提としている。汚染領域の中に、局所的に高濃度の汚染がある場合には、1 cmのアクリル製のコーリメータを用いた測定等を併用して、平均的な汚染密度と分けて評価することが必要である。
- (6) 当然の事ながら、本手法で測定できるような状況では、70マイクロメートル線量当量率が高いので、測定や作業に当たっては、過剰な被ばくをしないように十分配慮する必要がある。
- (7) 本手法は、高濃度の汚染を対象としたものである。 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 濃度の測定下限は、光子の寄与により大き

く依存する。光子による寄与が、影響を差し引いた70マイクロメートル線量当量率と同程度以上の場合には適用は難しい。

IV 結 論

高濃度の $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ を主要な放射性核種として含む汚染水により周辺のコンクリート、土壌あるいは水が汚染された場合に、70マイクロメートル線量当量率から、表面または表面近く ($1\text{g}/\text{cm}^2$) での汚染密度を求める手法を開発した。egs5コードにより一様な汚染面上部での70マイクロメートル線量当量率を計算し、3.0、5.0または10 cm高さと50 cmでの線量当量の比から、実効的な汚染領域の広さを求め、汚染領域の広さに対応した70マイクロメートル線量当量率から汚染密度への換算係数を用いて、汚染密度を求める方法である。汚染領域の実効的な半径が2 m以上では、換算係数はほとんど変化しないので、汚染領域の広さに関係なく一定の換算係数となる。

本手法は、汚染領域内の汚染密度がほぼ一様であることを前提としており、推定した汚染密度は、汚染領域での表面または表面から $1\text{g}/\text{cm}^2$ の領域の平均値である。

参 考 文 献

- 1) (株) 応用技研電離箱サーベイメータ AE-133 シリーズ. Available at: <<http://www.o-yo-giken.co.jp/133series.html>> 閲覧 2015年10月5日.
- 2) H. HIRAYAMA Y. NAMITO, A. F. BIELAJEW, S. J. WILDERMAN and W. R. NELSON; The EGS5 Code System, SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005–8 (2005).
- 3) International Commission on Radiation Units and Measurements; Dosimetry of External Beta Rays for Radiation Protection, ICRU Report 56 (2002).
- 4) Y. NAMITO, H. NAKAMURA, A. TOYODA, K. IJIMA, H. IWASE, S. BAN and H. HIRAYAMA; Transformation of a system consisting of plane isotropic source and unit sphere

detector into a system consisting of point isotropic source and plane detector in Monte Carlo calculation, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **49**, 167–172 (2012).

- 5) H. HIRAYAMA; Calculation of absorbed dose at 0.07, 3.0 and 10.0 mm depth in a slab phantom for monoenergetic electrons, *Radiat. Prot. Dosi.*, **51**, 107–124 (1994).
- 6) H. RYUFUKU, K. NAKATO, K. BINGO, H. TATSUTA, S. FUKUDA and K. MINAMI; Evaluation of β -ray skin-doses based on point kernel method, JAERI-M 7354 (1977).
- 7) 私信.
- 8) 平成 25 年度第 21 回原子力規制委員会配付資料 3. Available at: <<https://www.nsr.go.jp/data/000047642.pdf>> 閲覧 2015 年 10 月 5 日.



平山 英夫 (ひらやま ひでお)

1973 年京都大学工学研究科博士課程中退。その後、高エネルギー物理学研究所 (現高エネルギー加速器研究機構) において、電磁カスケードモンテカルロ計算コード egs の改良・普及並びに egs を使った研究と高エネルギー加速器施設の遮蔽に関する研究等に従事。

E-mail: hideo.hirayama@kek.jp



近藤 健次郎 (こんどう けんじろう)

1969 年東北大理学研究科博士課程修了 (理学博士)。その後、東北大学理学部附属原子核理学研究施設及び高エネルギー加速器研究機構において放射線安全管理に関する研究・業務に従事。専門分野：放射線防護, 放射化学, 放射線化学。趣味：庭いじり。