サーバイメータによる放射化鋼材の放射能濃度の推定

神永博史*¹, 大久保勝一*², 須賀新一*¹, 梶本与一*¹

(1977年 11 月 14 日受理)

Estimation of Radioactive Concentration in the
Activated Steel by Survey MetersHiroshi KAMINAGA,*¹ Katsuichi OHKUBO,*² Shinichi SUGA*¹ and Yoichi KAJIMOTO*¹

KEY WORDS: solid waste, neutron activation, radioactive concentration, carbon steel, stainless steel, survey meter, conversion factor, detectable limit, Geiger-Mueller counter, ionization chamber, scintillation counter

I はじめに

原子炉に設置した各種の実験装置, ラジオアイソトープ生産用の照射設備や原子炉施設等の解体, 改造などともなつて放射化した固体廃棄物が生じる。これらの廃棄物は, 一般に鋼, ステンレス鋼, アルミニウム, コンクリート, プラスチック, 黒鉛などであり, その形状や寸法もさまざまである。

これらの放射化物は放射性核種, 放射能, 線量率, 表面汚染密度などの測定結果にもとづいて分類され, 形状や材質などの状況に応じた処理がなされる。その場合, サーバイメータによって放射能濃度を簡単に評価できれば, 廃棄物の重量から放射能を容易に求めることができる。しかし, 実際には廃棄物の形状や大きさ, 材質が異なるため複雑である。

放射化物の放射能または放射能濃度(以下, 濃度という)を評価する場合, その形状が単純であれば計算によって検出器の指示値と放射能または濃度の関係を求めることができるが, 実際には検出器の構造や特性を計算の中に考慮することは困難なため, 計算結果の妥当性を確認できないことが多い。

ここでは, サーバイメータを用いて放射化物の濃度を簡単に評価する目的で, 原子炉で放射化した模擬試料を用いて測定実験を行ない, 測定値から濃度への換算係数(以下, 換算係数という)を求めた。また, その結果から検出限界濃度を計算によって求めた。模擬試料の形状, 材質, 組成として種々のものが考えられるが, ここでは簡単のために鋼の円盤とステンレス鋼管を用いた。また, 放射化物からの外部被曝線量を評価することと, 濃度が高いため密着条件で測定できない場合に濃度を評価するため, 試料と検出器間の距離による測定値の変化を測定した。

II 実験方法

1. 模擬試料の調製

鋼の円盤(以下, 鋼円盤という)として JIS 規格鋼板(SS-41)¹⁾を用いた。直径 10, 20, 30cm, 厚さ 0.9cm の切片を各 3 枚ずつ(同径の 3 枚を, それぞれ A, B, C と名付ける)準備し, 照射後, 同径のものを重ね合わせて厚さを変えた模擬試料とした。ステンレス鋼管¹⁾(以下, SUS 管という)としては JIS 規格 SUS-304 の外径 2.5cm, 肉厚 0.2cm, 長さ 50cm のものを 1 本, 照射して用いた。放射化される試料の濃度測定と核種の同定をするため, 同一材料でつくったテストピースをあらかじめ試料に取付けて照射した。鋼円盤用テストピースは直径 2.5cm, 厚さ 0.1cm の円盤(重量約 4 g)で, 試料の表裏両面の中央に各 1 個ずつテストピースを

*¹ 日本原子力研究所東海研究所保健物理部; 茨城県那珂郡東海村(〒319-11)

Division of Health Physics, Japan Atomic Energy Research Institute; Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken.

*² 現在, 原子力環境整備センターへ出向中

Table 1 The steel samples for neutron activation.

	Diameter (cm)	Thickness (cm)	Weight (kg)
Steel disk	10	0.94	0.58
[SS 41] ¹⁾	20	0.93	2.3
	30	0.92	5.1
Stainless steel pipe*[SUS 304] ¹⁾	2.5**	0.2***	0.57

* Length, 50cm. ** Outside diameter.

*** Wall thickness.

取付けて照射した。SUS 管用のテストピースは同じ管を 0.1cm の幅で切断した円環 (重量約 1.1g) で、試料の中央および両端部に 2 個ずつ、計 6 個取付けて照射した。実験に用いた模擬試料の概要を **Table 1** に示す。

試料はスイミングプール型原子炉 (JRR-4, 最大熱出力 2.5 MW) の炉心外側のプール水中で照射して放射化した。実験に用いるサーベイメータの測定範囲, 計数効率および測定の幾何学的効率を考慮して鋼円盤については $10^{-2}\mu\text{Ci/g}$ の濃度となるよう, SUS 管については, 主な生成核種である ^{51}Cr の γ 線放射率を考慮して $10^{-1}\mu\text{Ci/g}$ の濃度となるよう照射計画をたてた。すなわち, プール水中における熱中性子分布²⁾ および速中性子による核反応率³⁾ の測定結果を用いて, 試料の濃度が計画した値となるよう照射位置と照射時間を決定した。試料は炉心タンク外壁から 20cm 離れた水中でタンクに平行に保持し, 鋼円盤は約 1.5 時間, SUS 管は 0.5 時間照射した。

テストピースの放射性核種の同定と放射能の測定には計数効率が既知の NaI (TI) シンチレーション検出器

(5 in. ϕ $\times$ 4 in.) とパルス波高分析器を用いた。 γ 線エネルギーの接近した放射性核種については Ge(Li) 半導体検出器を用いて核種分析をした。テストピース内部での γ 線自己吸収, 散乱等は, その厚さ (約 0.1cm) から判断して無視できるため, 放射能測定結果に対して補正しなかった。核種ごとの濃度は, 核種ごとに決定した放射能をテストピースの重量で除して求め, 全濃度は, その和として求めた。

鋼円盤の濃度は, その表裏両面につけたテストピースの濃度の平均値とした。SUS 管は濃度が位置によって異なったため (後述), テストピースを取付けた位置ごとに平均濃度を求めた。放射化した試料中に生成される主な放射性核種, 放射化反応⁴⁾, 生成核種の半減期, 放出放射線のエネルギー⁵⁾などを **Table 2** に示す。

2. 検出器および測定器

実験には放射線管理用として市販されている β 線汚染検査用 GM サーベイメータ (2 種類), $\beta\gamma$ 線用 GM サーベイメータ, 電離箱サーベイメータおよび γ 線用 NaI (TI) シンチレーションサーベイメータを用いた。パルス型検出器を用いたプローブは計数率を正確に測定する目的でサーベイメータ本体と同じ測定条件に設定した計数装置で計数した。 γ 線線量率測定用検出器は前述の方法で計数した場合のほかには専用のサーベイメータ本体に接続して測定した。この場合, ^{226}Ra - γ 線を用い, 照射線量率 (mR/h) 単位でメータの目盛校正をしたものを用いた。実験に使用したサーベイメータおよび検出部の概要と性能を **Table 3** に示す。

3. 測定方法

放射化した模擬試料の測定実験は 2 回行なった。第 1 回の実験は放射化された直後の放射性核種の濃度比率に

Table 2 Principal radionuclides produced in the steel samples by neutron activation.⁵⁾

Radionuclide	Reaction	Half-life	Type of decay, energy: MeV and intensities*(%)
^{59}Fe	$^{58}\text{Fe}(n, \gamma)$	45.1 d	β^- : 0.271 (46), 0.462 (54), 1.560 (0.3) γ : 0.191 (2.8), 1.098 (57), 1.289 (43)
^{54}Mn	$^{54}\text{Fe}(n, p)$	291 d	electron capture γ : 0.84 (100)
^{51}Cr	$^{50}\text{Cr}(n, \gamma)$	27.8 d	electron capture γ : 0.325 (9)
^{60}Co	$^{59}\text{Co}(n, \gamma)$	5.24 y	β^- : 0.312 (~ 100), 1.478 (0.01) γ : 1.173 (~ 100), 1.333 (~ 100)
^{58}Co	$^{58}\text{Ni}(n, p)$	71.3 d	β^+ 0.472 (15), electron capture (85) γ : 0.81 (100)

* Numbers in parentheses.

Table 3 Descriptions of the survey meter probes used for the experiment.

Type of probes	GM type for β ray		GM type for β, γ rays	Ionization chamber	NaI (TI) scintillation
	5cm ϕ probe type	2.5cm ϕ probe type			
Model No. (manufacturer)	TGS-103 B (Aloka)		NSM-I50 (Fuji)	NDR-I3101 (Fuji)	TCS-121 (Aloka)
Detector	end window GM -tube	end window GM -tube	end window GM -tube	cylindrical ionization chamber dia. 7cm	NaI (TI) cristal (1" ϕ $\times$ 1")
	GM-5004 window dia. 5cm thickness 2.3mg/cm ²	GM-2501 window dia. 2.5cm thickness 1.4mg/cm ²	NGM-H9212-4 window dia. 1.8cm thickness 2.9mg/cm ²	wall thickness 0.3cm volume 610cm ³	
Probe material and window protector	mesh (10 mesh, 0.5mm ϕ SUS wire)	brass	aluminium, aluminium cap (0.2cm thick.)	bakelite, bakelite window (0.3cm thick.)	brass (0.8mm thick.)
Sensitivity for ²²⁶ Ra- γ ray	7.5 $\frac{\text{cpm}}{\mu\text{R/h}}$	1.8 $\frac{\text{cpm}}{\mu\text{R/h}}$	4.5 $\frac{\text{cpm}}{\mu\text{R/h}}$	—	170 $\frac{\text{cpm}}{\mu\text{R/h}}$
Calibration const.	3.7 $\frac{\text{dpm}}{\text{cpm}}$	4.9 $\frac{\text{dpm}}{\text{cpm}}$	1.0 in exposure unit	1.0 in exposure unit	1.0 in exposure unit
Radiation source	U ₃ O ₈ β ray disk source	U ₃ O ₈ β ray disk source	²²⁶ Ra- γ ray needle source	²²⁶ Ra- γ ray needle source	²²⁶ Ra- γ ray needle source
Dead time (μsec)	120	60	200	—	—

対応する換算係数を求める目的で、照射の5日後から開始した。第2回の測定実験は、放射化した廃棄物は、一般に、かなりの期間冷却してから処分されることを想定して、照射の95日後から開始した。

検出器と試料の測定配置は次のようにした。鋼円盤の場合、検出器を、その中央表面に直角に保持して密着して測定した。ただし、 $\beta\gamma$ 線用GMプローブは、横方向から放射線を照射して校正されているため、その側面を試料面に密着して測定した。SUS管の場合、管の中央および両端の各部について検出器を管に直角に保持して密着して測定した。 $\beta\gamma$ 線用GMプローブは管に平行に保持し密着して測定した。

模擬試料の濃度を求める換算係数は測定した計数率または照射線量率あたりの試料の濃度として $\mu\text{Ci/g}\cdot\text{cpm}$ または $\mu\text{Ci}\cdot\text{h/g}\cdot\text{mR}$ 単位で示した。

各直径 10, 20, 30cm の鋼円盤 A, B, C について、個々の鋼円盤の両面を測定し、その平均計数率とテストピースの測定値から計算された鋼円盤の濃度から換算係数を求めた。さらに、個々の同径3枚の平均換算係数を厚さ 0.9cm の鋼円盤に対する換算係数とした。また、鋼円盤を A, B および A, B, C の順に重ねて厚さ 1.8cm および 2.7cm の鋼円盤とし換算係数を求めた。

SUS 管については、その中央および両端の3カ所について求めた換算係数の平均値を SUS 管に付する換算係数とした。

GM管検出器を計数装置で計数した場合、得られた計数値に対して数え落し補正をして真の計数率を求めた。検出器をサーベイメータ本体に接続して測定した場合、数え落し補正をしなかった。また、照射線量率単位でメータの目盛校正をしたものは測定値を ^{226}Ra - γ 線の照射線量率に換算した。

模擬試料の表面からの距離を変えた場合の測定値の変化は第1回測定実験時にのみ測定した。検出器を試料の中央表面に密着した場合の計数率または照射線量率を基準にして、その相対値として求めた。

III 実験結果と検討

放射化した鋼円盤の主な生成放射性核種は ^{59}Fe , ^{54}Mn であり、その他に ^{60}Co , ^{51}Cr などが微量存在した。第1回実験時の ^{59}Fe と ^{54}Cr の濃度比率は約 6 : 1 ~ 9 : 1 であった。SUS 管では ^{51}Cr が大部分を占め、その他に ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{58}Co , ^{54}Mn が微量存在した。 ^{51}Cr と、その他の核種の濃度比率は約 27 : 1 であった。

鋼円盤の炉心側の中央表面につけたテストピースの濃度を基準にして、反対側のそれは平均約 80% であった。

また、半径方向の濃度変化をみるため直径 30cm の鋼円盤の炉心側面の左右両端につけたテストピースの濃度を比較した結果、中央につけたものの濃度を基準にすると両端では $\pm 30\%$ 以内の差異が認められた。

SUS 管の場合、試料が長いため均一な濃度が得られず、濃度の最大と最小の比率は約 3.6 : 1 であった。

テストピースの核種別の濃度は第1回および第2回の測定実験時に測定した。核種ごとの濃度測定結果は時間経過による減衰の補正をして比較した結果、約 10% 以内の誤差で一致した。放射化した模擬試料の生成核種、平均濃度および試料1個あたりの放射能を **Table 4** に示す。

鋼円盤および SUS 管に対するサーベイメータ検出器の換算係数を **Table 5** に示す。第1回測定実験では、試料の濃度が高すぎたため NaI(Tl) シンチレーション検出器による測定ができなかった。鋼円盤に対する各検出器の換算係数は第1回と第2回の測定実験で ^{59}Fe と ^{54}Mn の濃度比率が変化した (**Table 4** 参照) にもかかわらず相対的に約 10% 以内の差異で一致した。

SUS 管に対する第1回測定実験時の換算係数は、すべての検出器について鋼円盤に対する値の約 100 倍である。これは、測定の幾何学的効率が悪いこと、支配的な放射性核種である ^{51}Cr の γ 線放射率が 9% であること、 ^{51}Cr の γ 線エネルギーが比較的低いため試料内での自己吸収が多いことなどによると考えられる。また、第1回測定実験時の換算係数にくらべて第2回の値は約 1/4 になった。これは、 ^{51}Cr が約 1/9 に減衰したことにより、その寄与が減少したためである。

NaI(Tl) シンチレーション検出器を計数装置で測定した場合の換算係数は GM 管式の検出器にくらべて約 1/100 であった。

放射化した鋼材等で十分に冷却されたものは ^{60}Co などの長半減期核種のみが残る。このようなものに対する換算係数は次の理由によって、第1回測定実験で得られた換算係数を 0.5 倍して近似することができる。

(1) ^{59}Fe と ^{60}Co は γ 線および β 線エネルギーが類似しており、 ^{60}Co の γ 線放射率は ^{59}Fe の 2 倍である。

(2) 第1回測定実験時の鋼円盤中の放射性核種は ^{59}Fe が支配的 (約 90%) である。第1回と第2回測定実験で得られた換算係数値は ^{59}Fe と ^{54}Mn の濃度比率が変化したにもかかわらず 10% 以内の差異で一致したことから、第1回測定実験で得られた換算係数におよぼす ^{54}Mn (約 10%) の影響は ^{59}Fe と同等であるとみなせる。

放射化物の濃度測定において、その最小検出限界値を知ることは測定器の選択や放射化物の処理作業等の安全

Table 4 Radionuclides, radioactive concentration and activity in the steel samples.

Case (decay time after activation)		Case 1 (5 days)		Case 2 (95 days)	
Sample	radionuclides	concentration ($\mu\text{Ci/g}$)	activity (μCi)	concentration ($\mu\text{Ci/g}$)	activity (μCi)
Steel disk (dia. 10cm thickness 0.9cm)	^{59}Fe	$7.5\text{E}-3$		$1.9\text{E}-3$	
	^{54}Mn	$1.2\text{E}-3$		$8.9\text{E}-4$	
	^{60}Co	—		$8.7\text{E}-5$	
	total	$8.7\text{E}-3$	$5.0\text{E}+0$	$2.9\text{E}-3$	$1.7\text{E}+0$
Steel disk (dia. 20cm thickness 0.9cm)	^{59}Fe	$2.1\text{E}-2$		$5.1\text{E}-3$	
	^{54}Mn	$2.6\text{E}-3$		$1.9\text{E}-3$	
	^{60}Co	—		$2.2\text{E}-4$	
	total	$2.4\text{E}-2$	$5.5\text{E}+1$	$7.2\text{E}-3$	$1.7\text{E}+1$
Steel disk (dia. 30cm thickness 0.9cm)	^{59}Fe	$1.9\text{E}-2$		$4.7\text{E}-3$	
	^{54}Mn	$2.3\text{E}-3$		$1.6\text{E}-3$	
	^{60}Co	—		$1.9\text{E}-4$	
	total	$2.1\text{E}-2$	$1.1\text{E}+2$	$6.5\text{E}-3$	$3.3\text{E}+1$
Stainless steel pipe (outside dia. 2.5cm wall thickness 0.2cm length 50cm)	^{51}Cr	$2.7\text{E}-1$		$3.0\text{E}-2$	
	^{59}Fe	$4.6\text{E}-3$		$1.3\text{E}-3$	
	^{60}Co	$3.3\text{E}-3$		$2.9\text{E}-3$	
	^{58}Co	$1.8\text{E}-3$		$8.6\text{E}-4$	
	^{54}Mn	$2.9\text{E}-4$		$2.1\text{E}-4$	
	total	$2.8\text{E}-1$	$1.6\text{E}+2$	$3.5\text{E}-2$	$2.0\text{E}+1$

— ; None detected. Numerical figures are in scientific notation (e.g. $7.5\text{E}-3$ indicates 7.5×10^{-3})

評価をする上で重要である。パルス型検出器の検出限界計数率 n は、試料を測定した時の正味計数率の標準偏差の2倍として、以下の式で計算した。ただし、試料およびバックグラウンドの測定時間および計数率計の時定数は同一であるとした。

〔計数装置で測定した場合〕

$$n = 2 (\delta_s^2 + \delta_B^2)^{1/2} = 2 \left(\frac{n_s}{t} + \frac{n_B}{t} \right)^{1/2}$$

ここで $n_s = n_B$ とすると

$$n = 2 \left(\frac{2n_B}{t} \right)^{1/2} \quad (1)$$

〔計数率計で測定した場合〕

$$n = 2 (\delta_s^2 + \delta_B^2)^{1/2} = 2 \left(\frac{n_s}{2\tau} + \frac{n_B}{2\tau} \right)^{1/2}$$

ここで $n_s = n_B$ とすると

$$n = 2 \left(\frac{n_B}{\tau} \right)^{1/2} \quad (2)$$

ここで n_s , δ_s ; 試料の計数率および標準偏差値

n_B , δ_B ; バックグラウンド計数率および標準偏差値

t ; 計数装置による測定時間

τ ; 計数率計の時定数

バックグラウンド計数率は **Table 6** に示した値を用いて計算した。 γ 線検出器の検出限界線量率は上述の式で求めた検出限界計数率を ^{226}Ra - γ 線の照射線量率に対する感度 ($\text{cpm} \cdot \text{h/mR}$) で除して求めた (**Table 3** 参照)。電離箱サーベイメータの検出限界線量率は最小測定レンジのメータ目盛の5%値とした。計数装置による測定時間は1分とした。

濃度の検出限界値は、検出限界計数率または線量率と、それに対応する換算係数の積として求めた。各検出器のバックグラウンド計数率、検出限界値と鋼円盤、SUS管について求めた検出限界濃度を **Table 6** に示す。

実験に用いた検出器のうち、検出限界濃度が最も低いのは NaI(Tl) シンチレーションプローブであり、次の

Table 5 Conversion factors for exposure rate or count rate to radioactive concentration in the steel samples.

Case (decay time after activation)		Case 1 (5 days)				Case 2 (95 days)						
Type of probes	Sample	GM type for β ray 5cm ϕ 2.5cm ϕ probe		GM type for $\beta\gamma$ rays		Ionization chamber		GM type for $\beta\gamma$ rays		Ionization NaI(Tl) chamber scinti.		
		μCi g·cpm	μCi g·cpm	μCi g·cpm	$\mu\text{Ci}\cdot\text{h}$ g·mR	$\mu\text{Ci}\cdot\text{h}$ g·mR	μCi g·cpm	μCi g·cpm	μCi g·cpm	$\mu\text{Ci}\cdot\text{h}$ g·mR	$\mu\text{Ci}\cdot\text{h}$ g·mR	
Steel disk dia. 10cm	0.9cm t	6.4E-7	2.4E-6	1.2E-6	5.1E-3	1.2E-2	6.4E-7	2.4E-6	1.1E-6	5.1E-3	1.5E-2	7.3E-3
	1.8	4.6E-7	1.7E-6	7.8E-7	3.5E-3	8.5E-3	4.4E-7	1.8E-6	8.5E-7	3.7E-3	8.8E-3	4.1E-3
	2.7	4.0E-7	1.3E-6	6.7E-7	2.6E-3	6.6E-3	3.7E-7	1.5E-6	6.7E-7	3.2E-3	7.0E-3	3.4E-3
Steel disk dia. 20cm	0.9cm t	5.5E-7	2.1E-6	7.8E-7	3.4E-3	6.3E-3	5.2E-7	2.0E-6	7.4E-7	2.8E-3	6.6E-3	5.1E-3
	1.8	3.8E-7	1.4E-6	5.1E-7	2.4E-3	3.9E-3	3.6E-7	1.4E-6	4.8E-7	1.9E-3	4.0E-3	3.2E-3
	2.7	3.3E-7	1.2E-6	4.3E-7	2.2E-3	3.6E-3	3.0E-7	1.2E-6	4.1E-7	1.6E-3	3.1E-3	2.6E-3
Steel disk dia. 30cm	0.9cm t	4.6E-7	2.0E-6	6.9E-7	3.1E-3	4.8E-3	4.8E-7	1.9E-6	6.7E-7	2.5E-3	5.0E-3	4.3E-3
	1.8	3.9E-7	1.3E-6	4.7E-7	2.2E-3	2.9E-3	3.3E-7	1.3E-6	4.3E-7	1.8E-3	2.9E-3	2.7E-3
	2.7	2.9E-7	1.1E-6	3.8E-7	2.0E-3	2.3E-3	2.7E-7	1.0E-6	3.6E-7	1.4E-3	2.4E-3	2.2E-3
SUS pipe		3.3E-5	1.3E-4	6.1E-5	2.2E-1	6.5E-1	9.7E-6	3.3E-5	1.3E-5	5.6E-2	1.8E-1	1.1E-1

Numerical figures are in scientific notation (e.g. 6.4E-7 indicates 6.4×10^{-7}).

Table 6 Minimum detectable concentration* for steel samples with various survey meter
(decay time after activation : 95 days).

Type of probes	GM type for β ray				GM type for $\beta\gamma$ rays		Ionization chamber	NaI(Tl) scintillation ($1''\phi\times1''$)
	5cm ϕ probe		2.5cm ϕ probe					
counting instrument	scaler	survey meter	scaler	survey meter	scaler	survey meter	survey meter	survey meter
time constant (τ) and counting time (t)	$t=1$ min	$\tau=10$ sec	$t=1$ min	$\tau=10$ sec	$t=1$ min	$\tau=10$ sec	—	$\tau=10$ sec
back ground level	26 cpm	80 cpm	16 cpm	30 cpm	70 cpm	1.6×10^{-2} mR/h	—	9.0×10^{-3} mR/h
MDL** (2σ)								
steel disk	0.9cm t	1.7E-5 μ Ci/g	2.7E-5 μ Ci/g	3.9E-5 μ Ci/g	2.7E-5 μ Ci/g	4.6E-5 μ Ci/g	1.8E-3 μ Ci/g	8.0E-6 μ Ci/g
dia. 10cm	1.8	1.2E-5	2.1E-5	2.8E-5	5.0E-5	3.4E-5	1.1E-3	4.5E-6
	2.7	9.7E-6	1.7E-5	2.4E-5	4.1E-5	2.9E-5	8.8E-4	3.7E-6
steel disk	0.9cm t	1.4E-5 μ Ci/g	2.4E-5 μ Ci/g	3.2E-5 μ Ci/g	5.4E-5 μ Ci/g	2.6E-5 μ Ci/g	8.2E-4 μ Ci/g	5.6E-6 μ Ci/g
dia. 20cm	1.8	9.4E-6	1.7E-5	2.2E-5	3.9E-5	1.7E-5	5.0E-4	3.5E-6
	2.7	7.9E-6	1.5E-5	1.9E-5	3.2E-5	1.5E-5	3.9E-4	2.8E-6
steel disk	0.9cm t	1.3E-5 μ Ci/g	2.2E-5 μ Ci/g	3.0E-5 μ Ci/g	5.3E-5 μ Ci/g	2.3E-5 μ Ci/g	6.2E-4 μ Ci/g	4.7E-6 μ Ci/g
dia. 30cm	1.8	8.6E-6	1.6E-5	2.1E-5	3.5E-5	1.7E-5	3.7E-4	3.0E-6
	2.7	7.1E-6	1.3E-5	1.7E-5	3.0E-5	1.3E-5	3.0E-4	2.5E-6
SUS pipe		2.5E-4 μ Ci/g	4.4E-4 μ Ci/g	5.3E-4 μ Ci/g	1.1E-3 μ Ci/g	5.1E-2 μ Ci/g	2.2E-2 μ Ci/g	1.2E-5 μ Ci/g

* Numerical figures are in scientific notation (e.g. 1.7E-5 indicates 1.7×10^{-5}).

** MDL means minimum detectable limits.

で β 線汚染検査用GMプローブ (5cm ϕ), $\beta\gamma$ 線用GMプローブの順であった。鋼円盤に対する検出限界濃度は電離箱サーベイメータで約 10^{-3} ($\mu\text{Ci/g}$), その他のサーベイメータで約 3×10^{-5} ($\mu\text{Ci/g}$) である。

鋼円盤について ^{59}Fe の β 線が測定値におよぼす影響を調べるため, 検出器と鋼円盤の間に β 線を遮蔽するプラスチック板 (厚さ 0.3cm) を挿入して計数率を比較した。その結果, β 線に対する感度が最もよい β 線汚染検査用GMプローブ (5cm ϕ) では, 全計数率のうち β 線による寄与は 10% 程度であった。

鋼円盤および SUS 管の表面と検出器間の距離の変化による相対指示値の変化の測定結果を β 線汚染検査用GMプローブ (5cm ϕ) と $\beta\gamma$ 線用GMプローブについて, それぞれ Fig. 1 および 2 に示す。図に示した曲線は厚さ 0.9cm の鋼円盤について測定したものである。厚さ 1.8cm, 2.7cm の試料に対する距離による相対指示値の変化は, 厚さ 0.9cm の値の $\pm 30\%$ 以内の差異で一致した。相対指示値の変化は厚さによる効果よりも直径による効果が大きかった。相対指示値の変化の曲線を用いれば, 試料の表面では測定できない高濃度の試料の濃度を離れた位置から測定することができる。また, 放射化物からの外部被曝線量の評価にも応用することができる。

Fig. 1 Relative count rate vs. distance between the steel sample and the detector for 5cm dia. end-window GM probe of TGS-103B.

Fig. 2 Relative count rate vs. distance between the steel sample and the detector for 1.8 cm dia. end-window GM probe of NSM-150.

本実験の結果を, 他の放射化した鋼材に適用する場合, 放射化核種, 鋼材の形状および測定の幾何学的効率などを考慮する必要がある。ステンレス鋼は比重, 質量-エネルギー吸収係数が鉄と, ほぼ同じであるため, 放射化核種からの放出 γ 線による線量率の相違を補正すれば鋼円盤に対する本実験の結果を近似的に用いることができる。大きな鋼材等で, 測定の幾何学的効率が実験条件と違う場合, 鉛レンガ等の遮蔽物によって測定の有効面積を本実験と同じように限定し, 近接している放射化部分からの影響を除けば, 実用上, 十分な精度で濃度評価ができる。

本実験で用いた鋼円盤と同じ直径, 厚さの鋼中に ^{59}Fe (放出 γ 線の平均エネルギー, 約 1.25 MeV) のみが存在すると仮定して計算によって換算係数を求めた。計算では円筒体積線源の中心軸上で線源の上面から 2cm の位置における γ 線束密度を求め⁶⁾, さらに, γ 線束密度と線量率の関係⁷⁾を用いて, その位置の線量率に換算した。この場合, 体積線源内での線量ビルドアップ係数は 1.0 と仮定した。

円筒体積線源からの線量率を求める計算では, その幾何学的形状によって, 上限と下限の値が求められるものであるため, その算術平均を計算値とした。

この計算結果を、 $\beta\gamma$ 線用GMプローブ（鋼円盤表面から検出器の実効中心までの距離は約2cm）による実測値と比較すると、計算による換算係数を基準にして $+5.4$
 -2.4 %以内の相違で一致した。この相違は計算で求めた上限と下限の範囲（最大 $\pm 37\%$ ）以内である。

同様に、 β 線汚染検査用の直径5cm 端窓型GMプローブ（鋼円盤表面から検出器の実効中心までの距離は約2cm）について、 $^{226}\text{Ra}-\gamma$ 線に対する感度（Table 3 参照）を用いて換算すると、計算による換算係数を基準にして実測値は $+39$
 -13 %以内である。このことから、換算係数は計算で求めることができ、 ^{59}Fe 以外の核種についても検出器の γ 線エネルギー感度を補正すれば、より良い近似をすると考えられる。

IV お わ り に

放射化物の濃度は、対象物から切片を採取すれば測定できるが、その作業にともなう空気汚染、作業区域汚染の防止対策、作業者の汚染防護、放射線モニタリングなど煩雑な場合が多く、測定結果が迅速に得られない。一方、日常の放射線管理に用いられているサーベイメータについて、濃度を評価するための換算係数を求めておけば、容易かつ迅速に評価できる。本実験の結果を、他の材質、または放射性核種が含まれるものに適用するにあたっては質量エネルギー吸収係数、比重、 γ 線放出率、単位光子束あたりの線量率などの補正をすれば、より広い適用ができるであろう。また、計算によって求めた換算係数は実測値と約 $+39$
 -24 %以内で一致し、計算による上限と下限の範囲（最大 $\pm 37\%$ ）以内であるといえる。このことから、計算によって換算係数を求めても、実用

上、十分であると考えられる。

NaI(Tl) シンチレーションサーベイメータや β 線汚染検査用の直径5cm 端窓型GM管を用いたサーベイメータなど、感度のすぐれたものでは「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」で定義された放射性同位元素の濃度（ $2 \times 10^{-3} \mu\text{Ci/g}$ ）の約1/100の濃度を検出することができる。

本報告をまとめるにあたり、多くの援助と有益な助言をいただいた日本原子力研究所保健物理部の吉田芳和博士、矢部明、沼宮内弼雄、山本峯澄、渡部孝三の各位に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) JIS ハンドブック鉄鋼編；日本規格協会発行（1970）.
- 2) 新藤満夫編；JRR-4 遮蔽実験設備の特性試験，JAERI-1120（1966）.
- 3) T. Miura, A. Yamaji and K. Takeuchi; A Two-Dimensional Benchmark Experiment for Neutron Transport in Water, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **14**, No. 12, 878（1977）.
- 4) 木村健二郎編；放射線データブック，pp. 22—23, p. 101, 地人書館発行（1958）.
- 5) Radiological Health Handbook; pp. 244—250（1960）
- 6) Reactor Shielding Design Manual; pp. 345—423, 432, ed. by T.R. Rockwell III（1956）.
- 7) ICRP Publication 21; p. 59（1973）.