論文　イメージングプレートを用いた Cs-137 と Sr-90 の判別定量の基礎実験

大澤　紀久[*1]・山田　一夫[*2]・竹内　幸生[*3]・五十嵐　豪[*4]

要旨：コンクリートが放射性 Cs（Cs-137）と放射性 Sr（Sr-90）により汚染した場合を想定し，両者の分布を分別し，判別定量評価する手法を検討した。両者は放出するβ線のエネルギーが異なるため，遮蔽の有無で分離できると考えられる。そこで，Cs-137 と Sr-90 を添加し，種々の比放射能に調製した標準試料を作製し，切断面に対しイメージングプレート（IP）を用いてβ線を計数し，アルミニウム板（Al 板）を用いて両者を分別した。この結果に基づき，評価対象として，セメントペースト試料を Al 板の有無による，IP で測定したβ線の計数率の違いから，Cs-137 と Sr-90 の判別定量マッピングの可能性を示し，課題も提示した。

キーワード：判別定量，放射性 Cs (Cs-137)，放射性 Sr (Sr-90)，イメージングプレート，β線，計数率

1. はじめに

2011 年の東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所事故により，各種放射性物質が放出され，原子炉関連施設と広範囲な環境の汚染が生じた。今後の廃炉やオンサイトの除染を考えると，量が多いコンクリートの汚染範囲と特性を理解しておくことが重要である。

オフサイトのコンクリートの汚染状況は筆者らも報告しているが [1)]，現在でも炉心部とその周囲の鉄筋コンクリート構造部は高線量下にあり，その詳細状況は把握できていない [2)]。また，現在のオフサイトでの主な線源は Cs-137 であるが，オンサイトでは Sr-90 も重要である。

コンクリートの汚染範囲評価に必要な Cs-137 および Sr-90 の分布分析は，これらを含有したセメント固化体からの溶出挙動に関する報告はあるものの [3)]，これらの放射性核種に汚染されたコンクリート表層およびより深層部における浸透挙動は解明されていない部分も多い。そもそも，Sr-90 はβ線しか放出しないため，その比放射能（Bq/kg）を定量分析するにも，多大な労力を要する。

木下らは，様々な核種が浸透したコンクリートにおける各元素の深度分布の推定を行うために，モルタル粉末試料および骨材粉末試料による検討を行った [4)]。しかし，この検討では，実際のコンクリートにおける，セメントペースト（以下，ペースト）硬化体部分の C-S-H の特性変化を考慮していないことや，安定核種が一定量含まれた試薬を使用し，濃度の影響が不明であることから，実系の再現実験と考えるには課題が数多く残っている。

コンクリートの汚染深さを評価する従来の技術として，コア試料を表面から一定の厚さごとに切断し粉末化の後に，あるいは研削した粉末の放射能分析を行う方法がある [5),6)]。しかし，この方法では，分解能に限界があり，空間的な放射性核種の分布も十分に表現できない。

一方，イメージングプレート（以下，IP）を用いたオートラジオグラフによる汚染深さ評価では，空間高分解能（たとえば 50 μm）で放射性核種の空間的な分布データがより簡便に得られるものの，比放射能に対する定量評価となっておらず，核種毎に分別されていないことが問題として挙げられる [7)]。

ここで，Cs-137 と Sr-90 は放出するβ線のエネルギーが異なり（それぞれ最大 0.512 MeV，2.28MeV），遮蔽効率も異なるため，IP 測定の際に，適切な遮蔽体を用いて，遮蔽の有無で計数率を比較することで，Cs-137 と Sr-90 を分別定量できることが示されている [8)]。そこで，本研究では，コンクリート中における Cs-137，Sr-90 の分布分析に関する基礎的検討として，判別定量マッピングの可能性を探り，その課題の明確化を目的とした。上記核種それぞれの比放射能を変化させた標準ペースト試料を作製し，切断後に各試料表面からのβ線強度と Al 板の遮蔽効果を，サーベイメータおよび IP を用いて評価した。その結果を解析し，IP 測定から標準試料中の上記核種の判別定量分析および 3D マッピングを試みた。

2. 実験

2.1 概要

Cs-137 と Sr-90 によるβ線の飛程は mm オーダー以下と短いものの，コンクリート断面のように深さ方向に同濃度で連続して存在する場合と，ごく表面にのみ存在する場合では，計数率に差が生じる可能性がある。また，Cs-137 はγ線を放出し，あわせて周辺物質や遮蔽体によ

*1 東北大学大学院　工学研究科　都市・建築学専攻　(学生会員)
*2 国立環境研究所　福島支部　主任研究員　博士（工学）　(正会員)
*3 国立環境研究所　資源循環・廃棄物研究センター　高度技能専門員　理学修士（非会員）
*4 東北大学大学院　工学研究科　都市・建築学専攻　助教　博士（工学）　(正会員)

り特性／制動 X 線を発する。主にβ線を検出する機器においても，γ線と X 線の影響を一定程度受け，その程度は用いる機器によっても異なると予想される。以上より，今回の実験において，セメント種類と骨材の有無によるバックグラウンド効果と試料厚さの影響を考慮する。

コンクリートはペーストと骨材からなり，外部からの Cs-137 と Sr-90 の浸透は，ひび割れ，遷移体やペースト部分により生じると考えられる。本研究では，ペースト部分の浸透に着目し，試料は骨材を除いたペーストとした。セメント種類による程度の密度差はほとんど放射線測定に影響しない可能性が高いが，今後予定している放射性核種の溶出実験を考え，ペーストをフライアッシュで 30 %置換した系も加えた。

遮蔽体としては，制動 X 線発生を抑制するために低密度のプラスチック板が有効であると考えられるが [8]，厚さが大きくなると IP 測定面と測定試料の距離が離れ，空間分解能が低下すると考えられるため，厚さの選択肢がより多いアルミニウム板を用いて実験を行った。

2.2 使用材料および調合

使用材料は，標準的なコンクリート部材のペースト部分を想定し，結合材として普通ポルトランドセメント（記号 OPC，密度 3.16 g/cm^3）およびフライアッシュ（記号 FA，II種，密度：2.37 g/cm^3）を，細骨材は豊浦産標準砂（平均粒径：0.234 mm[9]，密度：2.63 g/cm^3）を，ペーストの分離を防ぐため増粘剤（花王社製，ビスコトップ 200LS-2，密度：1.05 g/cm^3）を使用した。使用した Cs-137 および Sr-90 は，日本アイソトープ協会から購入した，それぞれ 1.00×10^6 Bq/5 mL の原液を希釈調製し，各試料の比放射能が 1.00×10^2 Bq/kg，1.00×10^4 Bq/kg，1.00×10^6 Bq/kg となるよう練混ぜ水に添加した。

なお，前述の原液は 0.05 mg/g の安定同位体塩化物を含有し，0.1 mol/L の HCl 水溶液に調製されている。

なお，各標準試料は，放射性核種の使用量および放射性廃棄物量を最低限に抑えるため，1 試料あたり 35 cm^3 となるように，**表－1** の調合で作製した。

2.2 標準試料の作製

各標準試料は，プラスチック製カップおよびプラスチック製スパチュラを使用して，手練りで作製し，内径 20 mm×高さ 100 mm の塩化ビニル管の底面に，塩化ビニル板を接着した円柱型枠に打ち込み，20.5~25.7 °C，74.3~86.7 % RH の実験室に静置した。

各標準試料は，材齢 3 日で非水溶性潤滑剤（Buehler 社製，IsoCut Fluid）を使用し，ダイヤモンドブレードを装備した切断機（Buehler 社製，IsoMet Low Speed Saw）で，17 mm，27 mm，50 mm に型枠ごと湿式切断した。切断後，各試料は，アセトンで潤滑剤を洗い落とし，17 mm 試料は，打設面は Al 箔テープ（ニトムズ社製，光沢アルミテープまたは防水アルミテープ，Al 厚さ 0.05 mm）で封緘し，切断面は表面が露呈した状態で，ポリエチレン袋で二重に密封した。27 mm 試料は，2 つの切断面のうち，両面を Al 箔テープで封緘し，上記と同様に密封した。50 mm 試料は，切断面は表面が露呈した状態で，上記と同様に密封した。

2.3 測定

(1) 使用機器と特徴

β線測定には，β線用のサーベイメータと IP の二種類の機器を用いた。使用機器毎に考慮すべき影響因子には，測定器それぞれの異なる感度，測定器と試料との距離，γ線や X 線の影響に関わる因子（試料厚さ，Cs-137 の割合，自己遮蔽，遮蔽体），IP の信号の退行現象（放射線

表－1　標準試料調合表

No.	シリーズ	W/B	1 試料あたりの質量 (g/35 cm^3)						
			水 (W)	結合材 (B)		細骨材	増粘剤	放射性核種 (Bq/kg)	
				OPC	FA			Cs-137	Sr-90
1.	OPC-Blank	0.5	20	40	0	0	2	0	0
2.	OPC-Cs100	0.5	20	40	0	0	2	1.00×10^2	0
3.	OPC-Cs10k	0.5	20	40	0	0	2	1.00×10^4	0
4.	OPC-Cs1M	0.5	20	40	0	0	2	1.00×10^6	0
5.	OPC-Sr100	0.5	20	40	0	0	2	0	1.00×10^2
6.	OPC-Sr10k	0.5	20	40	0	0	2	0	1.00×10^4
7.	OPC-Sr1M	0.5	20	40	0	0	2	0	1.00×10^6
8.	OPC-Cs100+Sr100	0.5	20	40	0	0	2	1.00×10^2	1.00×10^2
9.	OPC-Cs10k+Sr10k	0.5	20	40	0	0	2	1.00×10^4	1.00×10^4
10.	OPC-Cs1M+Sr100	0.5	20	40	0	0	2	1.00×10^6	1.00×10^6
11.	OPC-Cs1M+Sr10k	0.5	20	40	0	0	2	1.00×10^6	1.00×10^6
12.	OPC-Cs1M+Sr1M	0.5	20	40	0	0	2	1.00×10^6	1.00×10^6
13.	FAC-Blank	0.5	19.3	27	11.6	0	2	0	0
14.	FAC-Cs10k	0.5	19.3	27	11.6	0	2	1.00×10^4	0
15.	Mortar-Blank	0.5	9.5	19	0	50.7	0.6	0	0
16.	Mortar-Sr10k	0.5	9.5	19	0	50.7	0.6	0	1.00×10^4
17.	Mortar-Cs10k+Sr10k	0.5	9.5	19	0	50.7	0.6	1.00×10^4	1.00×10^4

による輝尽性蛍光体の励起エネルギーの経時的減少，その温度依存性）などがある。これらを**表－2**にまとめる。

表－2　測定機器ごとの考慮すべき影響因子

影響因子	サーベイメータ	IP
測定機器種類・個体差	重要	重要
相対感度・計数範囲	低・狭	高・広
周辺環境（遮光など）	弱	重要
空間分解能	Φ 50 mm	< 50 μm
試料との距離	重要	重要
γ線，特性・制動 X 線 Cs-137 の割合，試料厚さ，遮蔽体密度	無視可能	弱
退行現象：時間，温度	なし	補正可能
測定機器の使用履歴	なし	低計数率で重要

(2) サーベイメータによるβ線測定

作製した各標準試料は，材齢 2～3 週において，ラギッドシンチレーションサーベイメータ（日立アロカメディカル社製，TCS-319H）を用いてβ線線量率（counts）を測定した。各標準試料は，2 重のポリエチレン袋から取り出し，1 重として検出器に密着させ，1 試料あたり 2 分で測定し，実験室内のバックグラウンドを補正した。

(3) IP によるβ線測定

測定は，型枠を保持したままの各標準試料をポリエチレン袋から取り出してから，ポリエチレン製シート（厚さ 0.04 mm）を敷いた IP（富士フィルム社製, BAS-SR2040 および BAS-MS2040）上に一定時間静置し，β線に暴露させた後，IP 読み取り機（GE Healthcare 社製 Typhoon FLA 7000 IP）を用いて，1 pixel 当たり 50 μm の読出し分解能で，測定面における QL（Quantum Level）値を取得した。遮蔽は，0.6 mm 厚さの Al 板を用いた。得られた QL 値から，以下の変換式(1)に基づいて [10]，PSL（Photo-Stimulated Luminescence）値を算出した。

$$PSL = \left(\frac{P_{\mathrm{Size}}}{100}\right)^2 \cdot \frac{4000}{\mathrm{S}} \cdot 10^{\mathrm{L}\cdot\left(\frac{QL}{2^{\mathrm{B}}}-\frac{1}{2}\right)} \qquad (1)$$

ここで，PSL：算出した PSL 値（PSL/px）
QL：取得した QL 値（QL/px）
P_{size}：1 pixel のサイズ（μm）
S：IP の感度（-）
L：1 pixel のダイナミックレンジ（-）
B：濃度階調（bit）

3. 実験結果および考察

3.1 サーベイメータによるβ線測定結果からの定量分析

実測した計数率と，各標準試料の比放射能を対応させるために，以下の関係式(2)を測定値に当てはめ，補正係数 A および B を回帰計算により決定した。

$$C_{\mathrm{total}} = C_{\mathrm{Cs}} + C_{\mathrm{Sr}} = \mathrm{A}\cdot S_{\mathrm{Cs}} + \mathrm{B}\cdot S_{\mathrm{Sr}} \qquad (2)$$

ここで，C_{total}：試料全体の計数率（cpm），
C_{Cs}：Cs-137 由来の試料の計数率（cpm），
C_{Sr}：Sr-90 由来の試料の計数率（cpm），
S_{Cs}：試料内の Cs-137 による比放射能（Bq/kg），
S_{Sr}：試料内の Sr-90 による比放射能（Bq/kg）

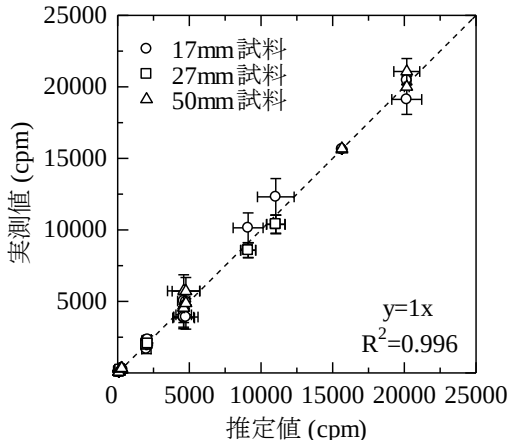
また，補正係数 A および B については，サーベイメータの検出効率，Al 箔テープによる遮蔽の有無を考慮して，以下の関係式(3)，(4)に基づいて算出した。

$$\mathrm{A} = \mathrm{A_{SM}}\cdot\mathrm{A_{Al}} \qquad (3)$$

$$\mathrm{B} = \mathrm{B_{SM}}\cdot\mathrm{B_{Al}} \qquad (4)$$

ここで，A_{SM}：Cs-137 に対する検出効率補正係数
A_{Al}：Cs-137 の Al 箔テープによる補正係数
B_{SM}：Sr-90 に対する検出効率補正係数
B_{Al}：Sr-90 の Al 箔テープによる補正係数

図－1に，作製した全ての標準試料について，サーベイメータによる実測の計数率と，含有する比放射能から回帰式により求めた推定の計数率との関係，および推定値に対する推定誤差（1 σ）の関係を示す。



図－1　実測値と推定値の回帰結果と推定誤差

図－1より，推定値と実測値は 1:1 の直線上にばらつきが小さく対応していることが分かり，関係式(2)により実測値を高精度で推定できた。計数率が小さくなると推定値に対する相対推定誤差は大きくなるが，5,000 cpm（Cs-137 濃度 1.00×10^6 Bq/kg に対応）では 25 %以内であった。**図－1**では試料厚さにより分類して表示したが，厚さごとの分布を比べると，推定値と実測値の関

係に差異は認められなかった。この結果から，試料厚さは回帰計算による補正係数の決定に影響を及ぼさず，本検討における実験条件の範囲においては，考慮する必要の無い因子であることが確認された。

また，回帰結果に基づく，標準試料のサーベイメータによる補正係数を**表－3** に示す。

表－3　標準試料のサーベイメータによる補正係数

	Al 遮蔽なし	Al 遮蔽あり
A	4.53×10^{-3}	1.93×10^{-4}
A_{SM}	4.53×10^{-3}	4.53×10^{-3}
A_{Al}	1	4.26×10^{-1}
B	1.56×10^{-2}	9.05×10^{-3}
B_{SM}	1.56×10^{-2}	1.56×10^{-2}
B_{Al}	1	5.80×10^{-1}

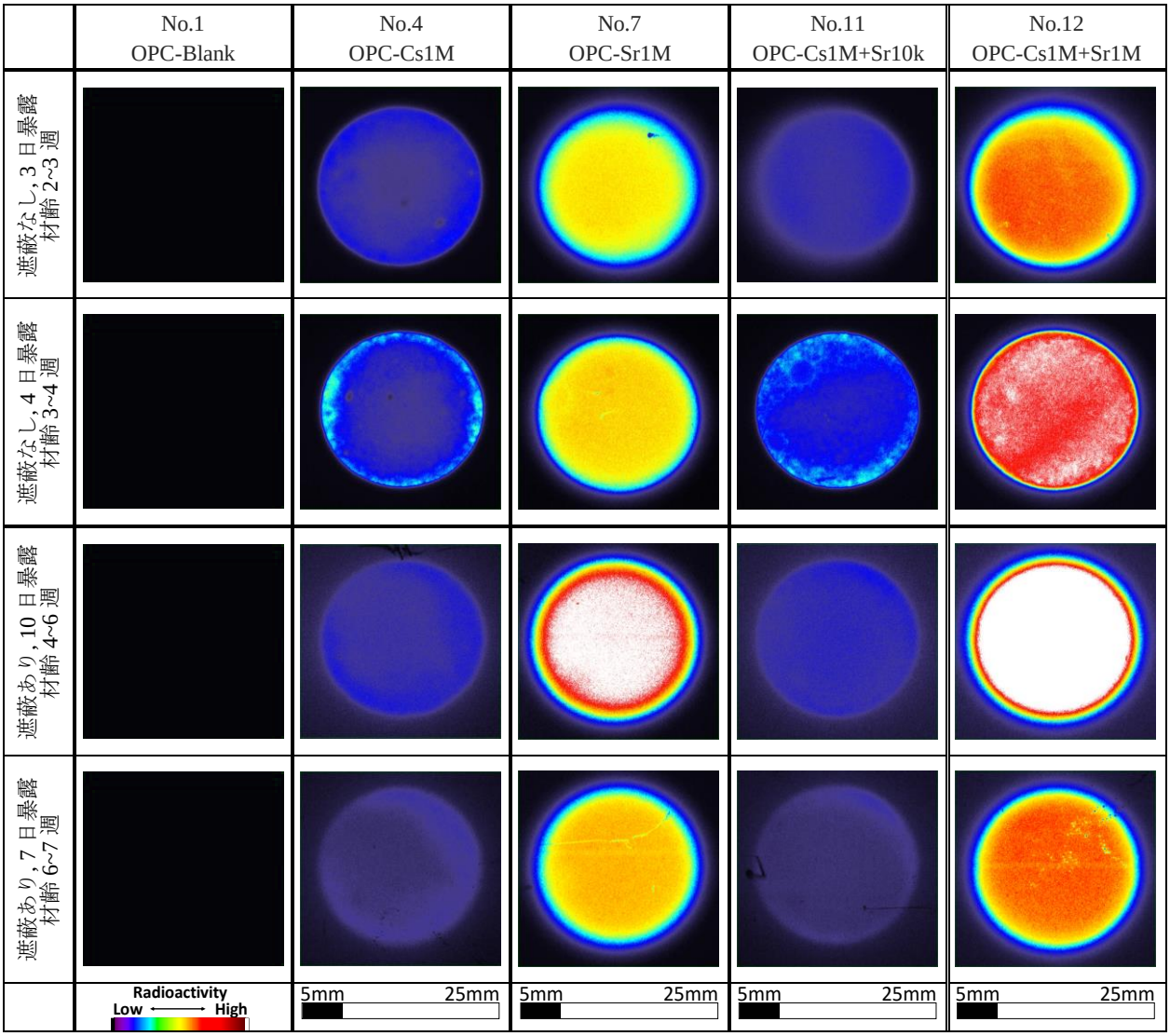
Cs-137 および Sr-90 の検出効率補正係数，Al 箔テープによる遮蔽の補正係数の回帰結果を A，B で比較すると，Cs-137 より Sr-90 の方がそれぞれ，2.9 倍，4.7 倍大きくなった。これは Cs-137 より Sr-90 の方が β 線のエネルギーが高く，遮蔽効率がより小さいためである。

3.2 IP による β 線測定

(1) IP での測定結果の経時変化

厚さ 17mm の円柱上に切断した各標準試料において，同型番の IP 2 枚（BAS-SR2040 : No.2，No.3）を用いて測定を行い，取得した 2D 画像データを，Al 板による遮蔽の有無，試料の材齢に着目して分類した結果を**図－2** に示す。なお，この図中における色調は，IP の測定値を相対的に画像化したもので，色調は測定バッチごとに任意に設定しており，横方向の各測定バッチ内では相対比較が可能だが，縦方向の測定バッチ間は比較できない。

図－2 より，材齢 2～3 週から 3～4 週における，Cs-137 を主に含有する標準試料（No.4, No.11）の外周部（型枠近傍）で濃度が増加していた。一方，Sr-90 のみを含有する標準試料（No.7）では，材齢の経過に伴う濃度分布の変化はなかった。また，No.12 に代表される，両核種を同量含む標準試料の場合，遮蔽により濃度分布は見えにくくなっており，遮蔽されやすい核種，つまり Cs-137 によ



図－2　IP（BAS-SR2040）による 17mm 標準試料の 2D 放射線強度分布

るものと推定できる。この現象は，Gashier らの報告 [11] や，Atkinson らの報告 [12]にある，セメント水和物内の Cs-137 は Sr-90 よりも収着されにくく，アルカリイオンとして水とともに移動しやすいという事実を踏まえると，「型枠を保持した各標準試料の材齢経過に伴い，試料中央部が乾燥し，Cs-137 が液相に伴い型枠近傍に移動した一方で，Sr-90 はセメント内部で難溶性の水酸化物を形成しており，移動しなかった」と考えると，上手く説明できる。なお，全ての標準試料において，Cs-137 の濃度分布が型枠近傍で経時的に増加した。以上より，標準試料内では，Cs-137 は材齢経過に伴い濃度分布に変化が生じるが，Sr-90 は濃度分布がほぼ均一であると考えられる。

(2) IP の測定結果からの定量分析

変換式(1)によって得られた実測値である PSL 値と，各標準試料の比放射能を対応させるために，以下の関係式(5)における補正係数 X, Y を，回帰計算により決定した。

$$S_{total} = S_{Cs} + S_{Sr} = X \cdot I_{Cs} + Y \cdot I_{Sr} \quad (5)$$

ここで，S_{total}：試料全体の PSL 値（PSL/px/cm^2/day）
S_{Cs}：Cs-137 由来の試料の PSL 値（PSL/px/cm^2/day）
S_{Sr}：Sr-90 由来の試料の PSL 値（PSL/px/cm^2/day）
I_{Cs}：試料の Cs-137 による比放射能（Bq/kg）
I_{Sr}：試料の Sr-90 による比放射能（Bq/kg）

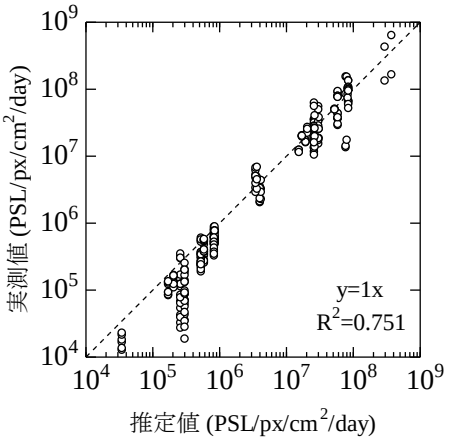
また，補正係数 X および Y については，IP の種類毎の検出効率，Al 板（厚さ 0.6 mm）による遮蔽の有無を考慮して，以下の関係式(6)，(7)に基づいて算出した。

$$X = X_{IP} \cdot X_{Al} \quad (6)$$
$$Y = Y_{IP} \cdot Y_{Al} \quad (7)$$

ここで，X_{IP}：Cs-137 に対する IP の検出効率補正係数
X_{Al}：Cs-137 の Al 板遮蔽による補正係数
Y_{IP}：Sr-90 に対する IP の検出効率補正係数
Y_{Al}：Sr-90 の Al 板遮蔽による補正係数

IP は計数範囲が広く高感度であるが，低係数値領域では測定誤差が大きくなるため，厚さ 17 mm および 50 mm の標準試料のうち，放射性核種を 1.00×10^4 Bq/kg 以上含有する全ての標準試料に限定し，IP による実測値と実測値による回帰計算を行った推定値の関係を**図－3** に示す。

図－3 より，サーベイメータと IP による定量精度を比較すると，IP による定量精度は低下している。これは，標準試料の材齢経過による，Cs-137 の移動に伴う濃度分布の不均一化が原因であると推察された。なお，この検討では，IP ごとの感度差と，Al 板による遮蔽の影響を考慮し，回帰計算を行った結果であるが，Cs-137 の分布の経時変化，IP 暴露時間の延長による PSL 積算値の退行現象，Al 板による遮蔽で生じた特性／制動 X 線といった影響 [13]を無視している。今後，これらの影響を考慮した追加実験に基づき，関係式(6)，(7)に補正係数を追加し回帰計算を行うことで，これらの影響を補正し，より高精度に分別定量可能であると考えられる。



図－3　実測値と推定値の回帰結果

回帰結果に基づく，IP（BAS-SR2040：No.3）における標準試料の補正係数を，**表－4** に示す。Cs-137 および Sr-90 の検出効率補正係数，Al 板による遮蔽の補正係数の比較結果は，サーベイメータによる測定による補正係数の比較結果と同様，Cs-137 より Sr-90 の方がそれぞれ 2.3 倍，5.0 倍大きく（X と Y の比較），両核種の β 線エネルギー差を反映した結果となった。

表－4　標準試料への IP の補正係数（BAS-SR2040）

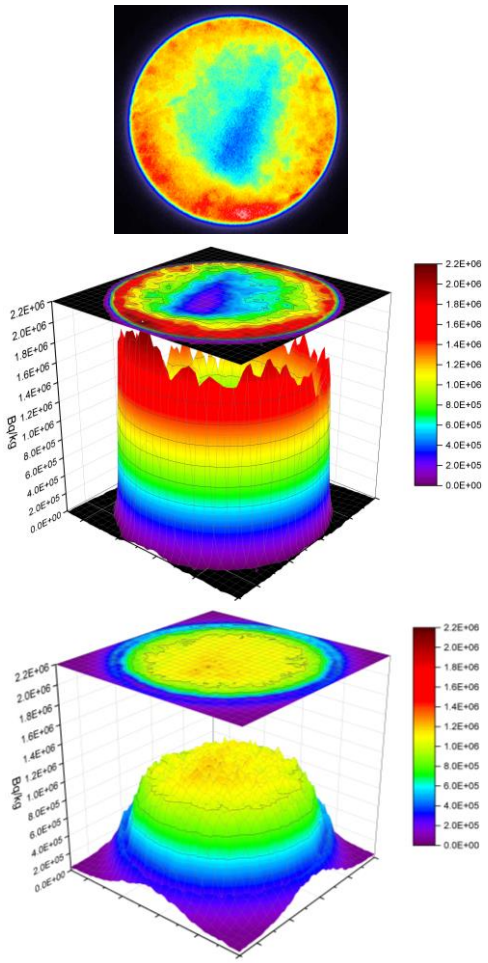
	Al 遮蔽なし	Al 遮蔽あり
X	2.62×10^1	3.48×10^0
$X_{IP\text{-}BAS\text{-}SR2040\ No.3}$	2.62×10^1	2.62×10^1
X_{Al}	1	1.33×10^{-1}
Y	5.92×10^1	1.73×10^1
$Y_{IP\text{-}BAS\text{-}SR2040\ No.3}$	5.92×10^1	5.92×10^1
Y_{Al}	1	2.92×10^{-1}

3.3 Cs-137 と Sr-90 の判別定量

前節の結果を踏まえ，Cs-137 が移動したと考えられる試料（材齢 19～20 週の 17mm の標準試料 No.12）について，Cs-137 と Sr-90 の判別定量マッピングを試みた。それぞれの核種の分布結果を，比放射能を Z 軸として 3D マッピングしたものを，**図－4** に示す。

図－3 では，この水準の標準試料の放射線強度分布は比較的均一であるが，Cs-137 と Sr-90 を分離表現した**図－4** の結果では，材齢の進行に伴い**図－2** よりもさらに不均一となり，Cs-137 が明瞭な濃度分布を生じていることが再現できた。なお，今回の検討における，IP の

検出限界および定量精度，Cs-137 と Sr-90 が共存する場合に関する，両核種の分別能力限界については，今後更に検討すべき，重要な課題であると考えられる。



図－4　17mm 厚さの No.12 標準試料の IP による 2D 放射線強度分布（上）と Cs-137/Sr-90 の比放射能の 3D マッピング（それぞれ中，下）

4. まとめ

コンクリート中における Cs-137 と Sr-90 の分布を分別・定量マッピングするための基礎的な検討として，上記の核種を含む標準試料を作製し，判別定量の課題を明確化することを目的とし，β 線の測定，分析を行った。

1) 種々の比放射能の Cs-137 と Sr-90 を含有する標準試料からの β 線を，ラギッドシンチレーションサーベイメータと IP で計数し，Al 箔・Al 板による遮蔽効率を評価した。この結果より，未知コンクリート試料中の両核種による比放射能を，遮蔽の有無による計数から推定し，判別・分別定量する手法を提案した。
2) 今回の手法では，定量精度に大きく影響する要因として，Cs-137 の経時的移動による濃度分布の変化や，退行現象が考えられ，標準試料中の Cs-137 を測定する際は，切断加工後の Cs-137 の経時的移動を抑制する方法の検討，対策が重要であることが示唆された。
3) 今回の検討における，IP の検出限界および定量精度，Cs-137 と Sr-90 が共存する場合に関する，両核種の分別能力限界については，今後検討すべき重要な課題であると考えられ，併せて，本研究で未検討の特性／制動 X 線の影響についても，今後適切に評価・検討する必要がある。

参考文献

1) 山田一夫，大迫政浩：環境省事業へのセメント・コンクリート技術の貢献：除染と放射性物質で汚染した廃棄物の処理・処分，コンクリート工学，Vol.51，No.1，pp.52-55，2015.1
2) 東京電力ホールディングス㈱　福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン 2017：http://www.dd.ndf.go.jp/jp/strategic-plan/book/20170831_SP2017FT.pdf
3) 寺島泰，青山勲，岩井重久，井上頼輝：セメント固化体中 ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{60}Co の溶出機構について，土木学会論文報告集，No.201，pp.51-60，1972.5
4) 木下哲一ほか：様々な核種が浸透したコンクリートにおける各元素の深度分布の推定，日本放射線安全管理学会誌，Vol.15，No.1，pp.46-51，2016
5) Farfán, E.B. et al.: Assessment of ^{90}Sr and ^{137}Cs penetration into reinforced concrete (extent of "deepening") under natural atmospheric conditions, Health physics, Vol.101, No.3, pp. 311-320, Sep. 2011
6) 佐藤義行ほか：福島第一原子力発電所において採取した瓦礫試料の放射化学分析，日本保健物理学会誌，Vol.51，No.4，pp.209-217，2016
7) Maeda, K. et al.: Distribution of radioactive nuclides of boring core samples extracted from concrete structures of reactor buildings in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.51, Nos.7-8, pp.1006-1023, Jul./Aug. 2014
8) 大橋改ほか：イメージングプレートを用いた Cs-137 と Sr-90 の識別，神戸大学大学院海事科学研究科紀要，Vol. 11, pp.39-44, 2014
9) 細野康代，吉嶺充俊：豊浦砂の粒度分布，土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集，Vol.3，No.168，pp.335-336，2009.9
10) 高崎浩司ほか：イメージングプレートによるプルトニウム試料の画像解析法の開発，JAEA Technology，No.36000901，2008.3
11) Gashier, W., Miura, T., Hashimoto, K. et al.: Leaching behaviour of cementitious nuclear waste forms containing caesium and strontium, Advances in Applied Ceramics, No.113, Vol.8, pp.447-452, Mar. 2014
12) Atkinson, A and Nickerson K., A.: Diffusion and Sorption of Cesium, Strontium, and Iodine in Water-Saturated Cement, Nuclear Technology, Vol.81, No.1, pp. 100-113, Apr. 1988
13) 山寺亮：バイオサイエンスのためのアイソトープ測定機器:第三シリーズ ラジオルミノグラフィ(RLG,放射線測定ルミネッセンス輝尽性発光技術) 13.イメージングプレートの放射線管理への応用，RADIOISOTOPES，Vol.49，No.1，2000.1