

論文 イメージングプレートを用いた Cs-137 と Sr-90 の判別定量に関する検討

大澤 紀久*1・山田 一夫*2・五十嵐 豪*3・富田 さゆり*4

要旨: イメージングプレート (IP) を用い、Cs-137 と Sr-90 の判別定量マッピングを行う手法の基礎検討を行った。Sr-90 の IP 像は娘核種の Y-90 による可能性が疑われたが、モルタルへの Y の拡散は認められず、IP 像は Sr-90 の移動を表すことが分かった。Cs-137 の濃度分布は、乾燥試料を用いた EPMA 分析でも IP と同等であり、Cs-137 を均質に練り混ぜたペースト断面の IP 像で認められた輝度分布は、乾燥に伴い自由水による遮蔽効果が減少している部分が生じている可能性が示唆された。そこで、厚さ 1.6mm の薄片を用いることで、乾燥影響を排除でき、一定の測定再現性と判別定量マッピングが可能であることを示した。

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, 浸透プロファイル

1. はじめに

2011 年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る各種放射性物質の放出により、オンサイト、オフサイトを問わず広範囲な汚染が発生した。オンサイトでは、廃炉の最終段階で膨大な量のコンクリートを処理・処分しなければならない。この課題に対応するため、筆者らを含むグループは放射性物質によるコンクリートの汚染の機構解明と汚染分布推定に関する研究を行っている¹⁾。この際、多様な核分裂生成物が問題となるが、特に数十年の範囲での線量率の観点からは Cs-137 と Sr-90 が問題となる。現在の汚染範囲と今後の変化についての予測が必要である。オフサイトでは、Cs-137 が主体で、Sr-90 の存在比率は 1/1000 程度とされており、特に廃棄物処分段階で鉄筋コンクリート造処分場を用いるとすると、コンクリートへの浸透予測が求められる。

Cs-137 と Sr-90 のコンクリートへの浸透を考えた時、いくつかの影響因子が想定できる。一つは、極めて低濃度であるということである。事故直後の反応容器内では Cs-137, Sr-90 は 1 μ M オーダーの濃度であった。オフサイトの比較的高い汚染レベルとして、1 $\times 10^5$ Bq/kg があるが、これは 31 ppt に相当する。拡散現象にどの程度の濃度依存性があるのか検討する必要がある。また、Cs-137 と Sr-90 の共存は相互に拡散に影響するのか不明である。さらに、それぞれがセメント水和物や粘土鉱物などどのような相互作用をするのかも、高イオン強度環境では単体での評価とは異なることが十分に考えられる。これらの影響を調べるには、Cs-137 と Sr-90 を同時にコンクリートへ浸透させ、その浸透プロファイルを観察することが必要である。イメージングプレート (IP) は放射性

同位元素 (RI) に対して高感度であり、低濃度での分析が期待できる。

このような背景のもと、筆者らは IP を用い、コンクリート断面における Cs-137 と Sr-90 の判別定量マッピングの可能性に関する基礎的検討を実施している²⁾。Cs-137 と Sr-90 は、発生する β 線のエネルギーが異なるため、遮蔽体による減衰が異なる。この特性を用い、両者を判別し、定量し、空間分布として表示することができる。

ただし、課題として、試料切断後の Cs-137 強度の変化、IP からの信号の曝露時間依存性、空間分解能や精度の確認、特性 X 線の影響の確認などが残されている。また、両放射性核種の壊変の娘核種の移動という問題もある。

本研究では、上記の課題についてさらなる検討を加え、IP による Cs-137 と Sr-90 の判別定量マッピングの標準化を試みた。

2. 娘核種の移動の影響

2.1 Cs-137 と Sr-90 の放射壊変

Cs-137 は、半減期 30 年の β 壊変により 95 % が 0.51 MeV の β 線を放出し Ba-137m に変化し、Ba-137m は半減期 2.6 分の γ 崩壊により 0.66 MeV の γ 線を放出し安定な Ba-137 となる。よって、Cs-137 のコンクリートへの浸透現象を IP で評価する場合には、数分の時間差は問題にならないので、娘核種の影響を考慮する必要はない。

Sr-90 は、半減期 29 年のベータ崩壊により 0.55 MeV の β 線を放出し Y-90 に変化し、Y-90 は半減期 64 時間のベータ崩壊により 2.3 MeV の β 線を放出し安定な Zr-90 に変化する。Sr-90 がコンクリートに浸透することを考えると、Sr-90 が浸透した位置で Y-90 となり、その Y-90 が

*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 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)

*4 (株) 太平洋コンサルタント 電力・原子力技術部 研究グループ (非会員)

数日間にわたり放出するβ線を検出することになる。

もし、Y-90がSr-90よりも早く移動する場合、Sr-90の移動をIPでは評価していないことになる。したがって、IPによるSr-90の移動評価の基礎情報として、コンクリート中でのYの移動を調べておく必要がある。

2.2 Yの移動特性評価の方法

Cs, Sr, およびYの移動の基礎情報を得るため、濃厚ではあるが、0.1 mol/Lのそれぞれの塩化物溶液(CsCl, SrCl₂, YCl₃)を用い、水セメント比0.55、砂セメント比2.39のモルタルへの浸透試験を行った。上記のモルタルにおいて、セメントは普通ポルトランドセメント(密度: 3.16 g/cm³)、砂は洗浄した石灰石砕砂(密度: 2.64 g/cm³)、練混ぜ水は上水を用いて作製し、40℃環境で1ヶ月湿空養生後に試験を行った。なお、浸透は、50×50×20 mmの直方体モルタルの浸透面1面(50×20 mm)以外を全てエポキシ樹脂塗装し、精製水を減圧吸水させたのち(図-1)、常圧の室温条件で浸透面1面を対象に28日間行った。後述する分析との比較のため、同環境の暗室でIP測定(IPへの曝露時間: 4日、読み出し分解能: 50 μm, PMT: 500 V, 読み出し波長: 635 nm)も実施した。IP測定には、667 Bq/ccのCs-137で浸漬溶液をラベリングして用いた。IP測定には、CsCl, SrCl₂溶液のほか両者を混合した溶液も用いた。なお、安定同位体Cs-133と放射性同位体Cs-137の化学的挙動は同一である。

昨年の検討から、IP測定では、乾燥に伴い強度が増加する現象が認められたため、浸透後、試料を切断し(図-2上)、表面をプラスチックフィルムで覆い、乾燥を防止した。ただし、電子プローブ微小部分分析(EPMA)には、試料を真空乾燥し、樹脂を圧入した後、再研磨した。

封止条件で測定するため、マイクロフォーカス蛍光X線分析(XRF)も用いた。照射X線径は30 μmである。測定は、表面を厚さ15 μmのポリエステルフィルムで被覆し、大気圧下で実施した。IPは、GE Healthcare社製BAS IPMS 2025を用い、データを取得した(図-2下)。

3 測定結果

3.1 XRF/EPMA結果とIP結果の比較

図-3にマイクロフォーカスXRFによる浸透プロファイルの分析結果を示す。Srのマッピング像からは骨材を回避してSrが浸透している様子が分かる。Yは試料表面にのみ存在している。データ取得が、試料表面と完全に平行にならなかったため、片側のみが明るくなっている。浸透プロファイルから、Yは2 mm以下の浸透であるが、これは試料が傾斜していたためであり、ほぼ浸透していない。Srは4 mm程度までの浸透が認められる。Csは測定範囲の15 mm程度まで浸透していた。Srの表面近傍での鋭いピークは表層に沈殿した炭酸Srの

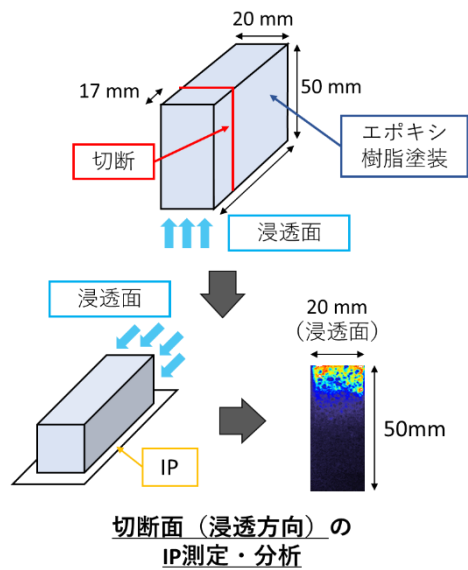
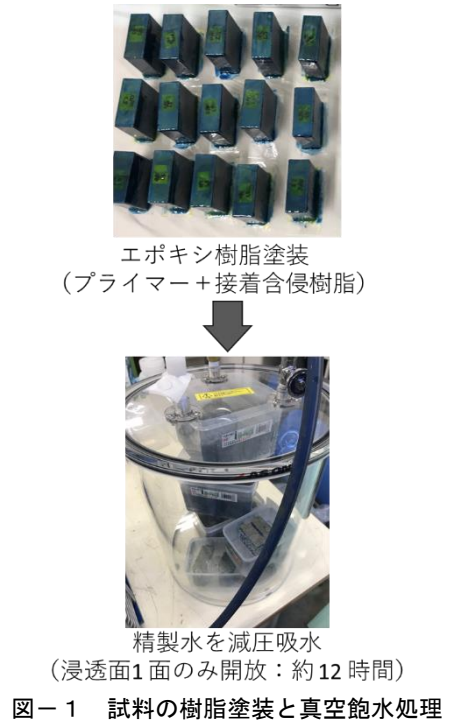


図-2 試料の切断とIP測定

影響と推定している。XRFはCsには感度が低いため、バラツキの大きなプロファイルとなっている。

図-4にEPMAによる浸透プロファイルを示す。マイクロフォーカスXRFによる結果と同様に、Yは表層のみに存在、Srは2 mm程度まで浸透、Csは15 mm程度まで浸透していた。Csはより深くまで浸透している可能性もあるが、感度の問題から15 mmが浸透フロントと判断される。Cl濃度プロファイルは、浸透深さはカチオン種類によらず約25 mmであり、濃度は溶液のCl濃度と対応し、CsCl, SrCl₂, YCl₃の順に高くなった。バックグラウンドを考慮しても、モル濃度に比例してコンクリート中の全Cl濃度は高くないが、序列は一致した。

興味深い点は、セメント水和物と相互作用しないCsの浸透深さが、フリーデル氏塩として相当量が固相に固定されるClよりも小さいことである。濃度は固定化により高まるものの、浸透深さには固定化は関与しないという結果である。この結果は、一般に拡散には濃度依存性があり、低濃度になれば浸透深さは小さいと想定される一方で、浸透深さの濃度依存性は小さい可能性を示唆している。また、カチオンは種類により全く異なる浸透挙動を示すが、Clはカチオン種類に依存しない結果となり、水溶液中で電荷バランスは保たれているはずなので、Clはカチオンと帯同して移動するのではなく、水中の別のアニオン、おそらくは水酸化物イオンと交換することにより内部へ移動している³⁾と考えるのが妥当である。

本項の目的に立ち返れば、これらの結果からYはコンクリートへの浸透を示さず、Sr-90の浸透性状の把握には、Yのコンクリート中での移動を考慮する必要はなく、IP像はSr-90の浸透を表すことが分かった。

図-5にIPにより、Cs-137および/またはSr-90でラベリングした結果を示す。併せて、図-5には、Cs、Sr単体での測定結果を合算し合成した結果も比較して示す。Srの浸透深さは2mm、Csの浸透深さは10mm以上であった。CsとSrの混合溶液の浸透プロファイルと、それぞれ単独での浸透プロファイルを合算したものは良い一致を示し、モルタル中での両元素の移動には相互作用がないと考えられる。

EPMAの結果はカチオンとアニオンが独立して移動することを示すものであったが、この結果はCsとSrも独立してコンクリート中を移動する可能性を示唆している。この情報はこれらの元素の移動を相平衡多元素移動モデルで記述する際、固相とこれらのイオンの相互作用をいかにモデル化するかに関係しており、今後の解明が必要である。また、表面乾燥を防いだマイクロフォーカスXRFおよびIPの結果と、試料を乾燥後に測定したEPMAの結果は同等であり、乾燥により元素が移動するわけではないことが分かった。

3.2 Cs-137のIP像への乾燥影響

著者らは、既報において、Cs-137を均質に練り混ぜたセメントペースト切断面内で乾燥によりCs-137の強度分布が変化することを確認している²⁾。図-6に一例を示す。コントラストは適宜調整してあるので、絶対値を示すわけではない。封止が良好な状態では、得られた強度は均一であるが、封止の一部が欠損(図-6右上部)すると、Cs-137の局所的強度の増加が認められる。

Sr-90にはこのような影響は認められない。この原因として、既報における考察では、白華現象からの類推として、乾燥に伴うCsの移動と濃集を類推していた。しかし、本検討におけるEPMAの結果からは、乾燥後の試

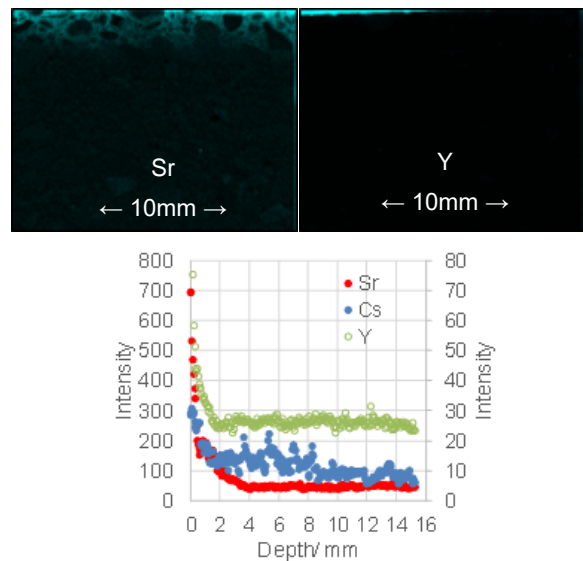


図-3 マイクロフォーカスXRFによる各元素のマッピング(上)と浸透プロファイル(下)
(SrおよびY:左軸, Cs:右軸)

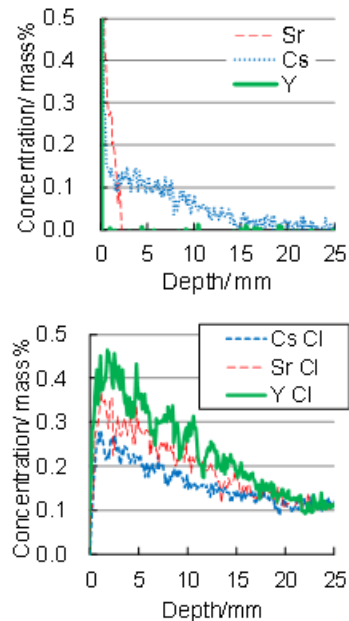


図-4 EPMAによる各元素の浸透プロファイル
(上:カチオン, 下:塩素)

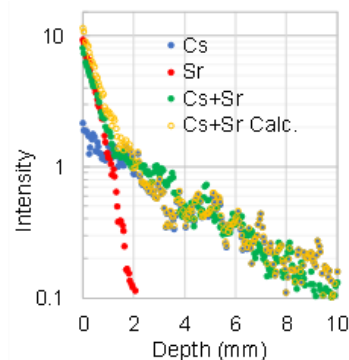


図-5 IPによるCsとSrの浸透プロファイル

料においても特に Cs の濃縮は認められていないことが確認された。

他の可能性として、IP 像撮影の特性から考えて、試料の含水状態により、内部に存在する Cs-137 からの β 線の遮蔽の程度が異なるとも考えられる。水セメント比 0.55 のセメントペーストには、体積で考えると 40 vol. % 程度の空隙があり、ここが水で充填される場合と空隙になる場合では、水による遮蔽効果が相当に異なると考えられる。つまり、局部的強度の増加は、Cs-137 の移動ではなく、水分による Cs-137 から放出される β 線の遮蔽効果の減少が原因である可能性が考えられる。

輝度分布の影響が Cs-137 において顕著に表れたのは、Cs-137 と Sr-90 では、放出する β 線のエネルギーが相当に異なるため、Cs-137 はより強い影響を受け、Sr-90 はより弱い影響と考えると矛盾なく説明可能である。

3.3 薄片試料による測定再現性の確認

乾燥による IP の強度変化は Cs の移動によるものではなく、水の不均一分布によるものであるとするならば、測定再現性の観点から、試料乾燥後に IP 測定するのが望ましいことになる。そこで、Cs-137 もしくは Sr-90 を含有した 17×17 mm 断面の角柱セメントペースト標準濃度試料を作製した。標準濃度試料は、練り混ぜ総量を 1 試料あたり 60 g とし、水セメント比 0.5、普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm³）を 40 g、増粘剤（花王社製、ビスコトップ 200LS-2、密度：1.05 g/cm³）を 1.6 g、消泡剤（花王社製、アンチフォーム E-20、密度：1.01 g/cm³）を 0.2 g 添加して作製した。なお、Cs-137 は 1.0 MBq/kg、Sr-90 は 0.33 MBq/kg の含有量とするため、それぞれの塩化物溶液を練混ぜ水（精製水）に混合した。この試料から、材齢 56 日経過後に厚さ 1.6 mm の薄片を切り出し、40 °C 減圧下にて 12 時間乾燥後に IP 像を取得した。その結果、Cs-137 も Sr-90 も両者混合の場合も濃度分布は認められなかった。

試料乾燥を抑制しようとして、封止が不完全な場合には IP に強度分布が認められたが、完全に乾燥することで強度分布が認められなくなった。

図-7 に、材齢 56 日経過後に厚さ 1.6 mm と約 6 mm に切断した標準濃度試料の IP 分析の結果を示す。試料厚さが大きい場合は、強度が 10~20% 高くなった。これは 1.6 mm では IP で計測される放射線の遮蔽が不十分であり、より深い位置からの影響が存在することを示している。また、試料厚さの違いは、試料周辺部のテールの引き方の違いに現れている。試料厚さが大きい場合、バックグラウンドに落ちていく曲線が途中から緩やかになる。この原因は、厚い試料の側面から放出された放射線により、試料周辺部分でより広い範囲の IP が感光したものと考えられる。

乾燥によるCs-137遮蔽効果の減少

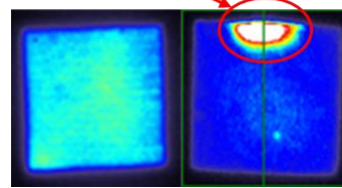


図-6 Cs-137 含有セメントペースト（17mm 角）の IP 測定例（左：良好な封止、右：上部の封止欠損）

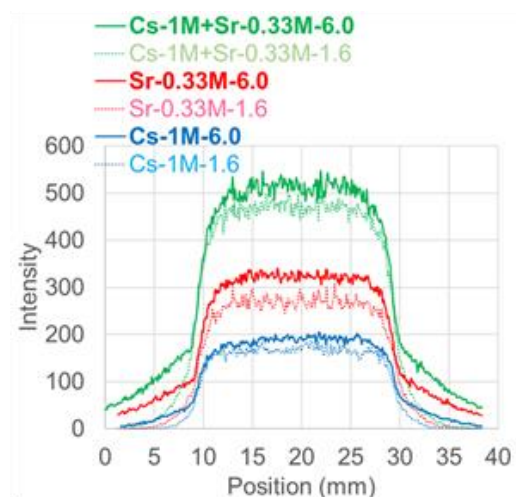


図-7 異なる厚さのセメントペースト薄片（17mm 四角）の IP 分析結果
凡例：元素-放射能濃度 (Bq/kg) - 試料厚さ (mm)



図-8 セメントペースト薄片（17mm 角）の IP 像（各右半分のみ 0.5mm 厚さのプラスチック板で遮蔽）
左：Cs-137-1MBq/kg、中央：Sr-90-0.33MBq/kg、
右：Cs-137-1MBq/kg + Sr-90-0.33MBq/kg 混合

以上より、乾燥影響を除去し、より高分解能の IP 像を得るには、薄片試料に加工し、乾燥後に IP に曝露するのが好ましい。なお、IP 計測の一般論として、試料厚さを揃え、曝露温度、読取までの時間を一定にすることが要点である。また、IP の固体間誤差、前回の曝露信号消去の程度、および曝露時間補正については、試料と同時に標準濃度試料を計測し行う方法が考えられる。

3.4 薄片試料による判別定量マッピング

ここまでの検討結果を踏まえ、単純形状の試料を用いた判別定量マッピングの可能性を再検証した。17×17 mm 角の試料を、厚さを 1.6 mm に加工し、3 種類の試料（Cs-137 を 1.0 MBq/kg 含有、Sr-90 を 0.33 MBq/kg 含有、両者を混合）について、遮蔽の有無による（試料の半分、8.5×17 mm の領域を遮蔽）IP からの信号（PSL 値）を測定し（曝露 4 日）、判別定量の精度を確認した（図-8）。

ここで用いた PSL 値は試料面で均一と思われる範囲を積算したものである。他の測定への応用には、単位面積当たりの数値に換算して用いることになる。

表-1 に遮蔽の有無による PSL 値を示す。遮蔽無の場合でも、IP 保護のため、厚さ 15 μm の PET フィルムを敷いて測定した。遮蔽には特性 X 線の発生しにくい物質として、厚さ 0.5mm の PET 製の平板を用いた。

遮蔽無し状態で、Cs-137 単体と Sr-90 単体の計数値を合算したものは、両者を混合して測定した計数値と 7% の差であり、これがこの測定法の誤差の指標である。PET 製の平板で遮蔽した際の差は 3% であった。遮蔽による減衰は、Cs-137 で 25%，Sr-90 で 65% であった。

この結果をもとに、判別定量のための換算係数を求める。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(1)における補正係数 X 、 Y を実測値により決定した。

$$S_{total} = S_{Cs} + S_{Sr} = X \cdot I_{Cs} + Y \cdot I_{Sr} \quad (1)$$

ここで、 S_{total} : 試料全体の PSL 値 (PSL)

S_{Cs} : Cs-137 由来の試料の PSL 値 (PSL)

S_{Sr} : Sr-90 由来の試料の PSL 値 (PSL)

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、厚さ 0.5 mm の PET 製の平板による遮蔽の有無を考慮して、以下の関係式(2)、(3)に基づいて算出した。

$$X = X_{IP} \cdot X_{Pla} \quad (2)$$

$$Y = Y_{MS} \cdot Y_{Pla} \quad (3)$$

ここで、 X_{IP} : Cs-137 に対する IP の検出効率補正係数

X_{Pla} : Cs-137 のプラスチック板遮蔽補正係数

Y_{IP} : Sr-90 に対する IP の検出効率補正係数

Y_{Pla} : Sr-90 のプラスチック板遮蔽補正係数

IP (BAS-IP-MS) における標準試料の補正係数を、表-2 に示す。この数値を用い、Cs-137 と Sr-90 を同時に含有する試料の遮蔽の有無による計数値から、含有 Cs-137 と Sr-90 を推定した結果を表-3 に示す。Cs-137 濃度は設計値に比べ 19% 超過したが、Sr-90 濃度は設計値の 99% と一致した。これが本方法の判別定量の精度の一つの目安である。

上記の情報をもとに、Cs-137 と Sr-90 を同時に含有した試料に関して、判別定量マッピングした 3D 像を図-9 に示す。両元素ともに、一定のばらつきはあるが、設計値に近い値が再現でき、空間分布を表示できることが分かった。なお、本判別定量マッピングは遮蔽板を挟ん

表-1 IP によるセメントペーストの測定結果

Bq/kg	Cs-137Bq/kg	Sr-90Bq/kg	Cs+Sr	Cs+Sr Cal	Meas/Cal
Mylar film	1.27×10 ⁶	2.01×10 ⁶	3.52×10 ⁶	3.28×10 ⁶	1.07
+PET Plate	3.11×10 ⁵	1.30×10 ⁶	1.67×10 ⁶	1.61×10 ⁶	1.03
減衰割合	0.25	0.65	0.47	0.49	

表-2 標準試料への IP の補正係数 (IP-BAS-MS)

	No shield	Plastic plate shield
X	1.27×10 ⁶	3.11×10 ⁵
X_{IP}	1.27×10 ⁶	1.27×10 ⁶
X_{Pla}	1	2.45×10 ⁻¹
Y	2.01×10 ⁶	1.30×10 ⁶
Y_{IP}	2.01×10 ⁶	2.01×10 ⁶
Y_{Pla}	1	6.46×10 ⁻¹

表-3 判別定量結果

Bq/kg	Cs-137	Sr-90
理論値	1.0×10 ⁶	3.3×10 ⁵
実測値	1.19×10 ⁶	3.28×10 ⁵
理論値と実測値との比	1.19	0.99

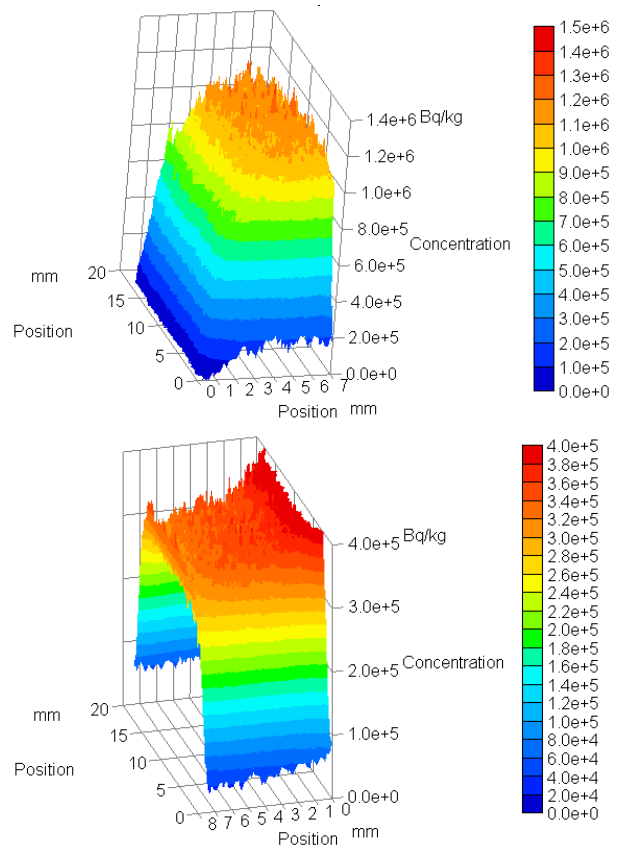


図-9 Cs-137 と Sr-90 が混在する試料からの両者の判別定量マッピング (上 : Cs-137, 下 : Sr-90)

だ両側の領域を比較することで行ったため、遮蔽板の影響を受けていると考えられ、特に Sr-90 は x 軸 (図-9 左→右) 方向に濃度勾配を持つ計算結果となった。

3.5 Cs-137 と Sr-90 混合溶液からの判別定量マッピング

2.2 節で作製したモルタル試料 (曝露面 20×50 mm, 試料高さ 50 mm) を Cs-137 でラベリングした 25 μmol/L の CsCl と、Sr-90 でラベリングした 10 μmol/L の SrCl₂

の混合水溶液に 20℃ で 53 日間浸漬後、1.6 mm 厚さの薄片に切出し、乾燥後、IP に 5 日間曝露し、読出し分解能 50 μm で IP データを取得した。この際、遮蔽する水準は厚さ 0.5 mm の PET 製の平板を用いた。

図-10 に測定結果を示す。IP 像は、浸透が見えるようにコントラストを調整してある。骨材部分を避け、セメントペースト部を浸透していること、局所的に強度が強い明るいスポットが生成していることが分かる。

次に、Cs-137 と Sr-90 の判別定量マッピングを行った。この際、IP 像は 50 μm の空間分解能を有するが、データ処理ソフトの制約から、20×50 mm を 50×125 ピクセルの分解能でデータを読み出して使用した。計算は、4 章で求めた係数を用い、遮蔽の有無の計数値から Cs-137 と Sr-90 の濃度を算出し、面的に再現した。この結果、Cs-137 は 10 mm 程度の浸透深さを示し、Sr-90 は 2-3 mm のみであり、前述の結果とも整合した。

4. まとめ

コンクリート中における Cs-137 と Sr-90 の分布を、イメージングプレートを用い、遮蔽効率の違いを利用し、判別・定量マッピングするための基礎的な検討として、各種要因の影響を明らかにした。

- 1) Sr-90 の娘核種である Y-90 はコンクリート中で移動しないため、IP による測定結果は Sr-90 の移動を評価しているとみなせる。
- 2) 0.1 mol/L の CsCl 溶液浸漬による浸透プロファイルを、乾燥を防止したマイクロフォーカス XRF により測定した結果は、乾燥後試料を用いた EPMA による結果と同一であり、Cs-137 強度の局所的増加は Cs の移動の影響ではなく、水による放射線の遮蔽の効果であると考えられた。
- 3) IP による Cs-137, Sr-90 単独での浸透プロファイルを合算したものが、混合溶液の浸透プロファイルと一致することから、両者のコンクリートへの浸透には相互作用がないと推定された。
- 4) 乾燥による Cs の移動がないと推定されたことから、1.6 mm の薄片を乾燥させて IP 測定したところ、Cs-137 も Sr-90 も均一な分布を示し推定が正しいことが示唆された。
- 5) 1.6 mm 厚さの試料を用い検討したところ、10%以内の Cs-137 と Sr-90 の信号の加成性が得られ、判別・定量分析は 20%以内の精度で行うことができた。マッピング像の再現もできた。
- 6) モルタルへの Cs-137 と Sr-90 の同時浸透を、遮蔽の有無の条件で IP によりデータ取得し、別途求めた両者を判別する係数を用い、判別定量マッピングすることができた。

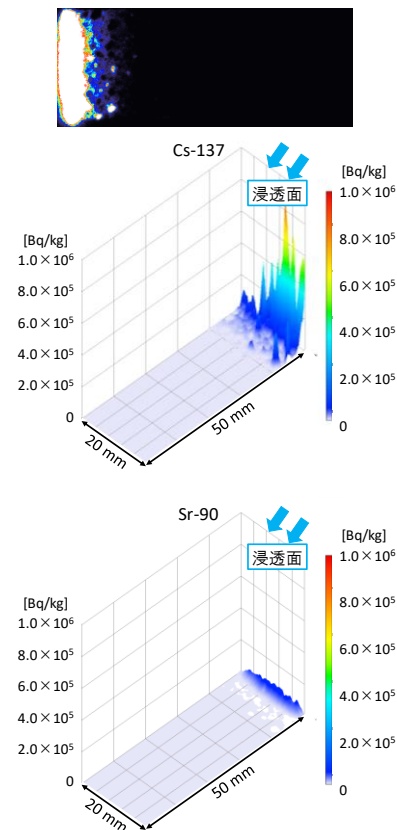


図-10 Cs-137 と Sr-90 の混合溶液に浸漬したモルタル試料中への両元素の浸透の IP 像 (上) と判別定量マッピング (中 : Cs-137, 下 : Sr-90)

謝辞 本研究の一部は、文部科学省の国家課題対応型研究開発推進事業「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」・「放射性物質によるコンクリート汚染の機構解明と汚染分布推定に関する研究」(平成 29～31 年度)、および、科学研究費補助金 (No. 16H04393) の助成を受けて行ったものである。

参考文献

- 1) 名古屋大学, 放射性物質によるコンクリート汚染の機構解明と汚染分布推定に関する研究, 平成 29 年度文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業, 2018.3
- 2) 大澤紀久, 山田一夫, 竹内幸生, 五十嵐豪: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 1, pp. 63-68, 2018
- 3) B. Johannesson, K. Yamada, L-O. Nilsson, Y. Hosokawa: Multi-species ionic diffusion in concrete with account to interaction between ions in the pore solution and the cement hydrates, Material and Structures, Vol. 40, No.7, pp. 651-665, 2007
- 4) 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