

報告 ウォータージェットによるコンクリートへの Cs 浸透深さ測定

山田 一夫*1・高井 伸一郎*2・大迫 政浩*3

要旨：福島第一原子力発電所の事故により放射性 Cs が環境中に放出され放射能汚染が広がった。コンクリートにも放射性 Cs は浸透し汚染されている。コンクリートを除染することを目的に、その基礎データとなる浸透深さの測定をウォータージェットによりコンクリートを表面から研削することで行い、除染の基本条件を探った。飯館村での調査では空間線量率と比例してコンクリートの表面線量率も高まった。汚染はこれまで報告されているとおり、飯館村でも表面 1mm 以下の表面に集中し、浸透深さは 0.1～数mmであることが分かった。コンクリートの研削しやすい低強度と考えられるものほど深く浸透していた。

キーワード：原子力発電所事故、放射性 Cs、放射能汚染、浸透深さ、ウォータージェット

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所の事故により、放射性 Cs が環境中に放出され、環境、各種材料、廃棄物などに放射性物質による汚染(放射能汚染)が広まった。高度に放射能汚染された地域では立ち入り制限がなされている。住民の帰還には環境の空間線量率を低減することが求められているが、そのためには環境の除染が必要であり、環境省により除染技術の実証試験が行われてきている¹⁾。

環境の放射能汚染は土壌や草木に由来するものが主体であるがコンクリートも汚染されている。コンクリートの除染に関しても、高圧水洗浄による除染効果は限定的であるが、コンクリートを研削する超高圧水やショットブラストによる方法では効果があることが示されている。しかし、具体的な浸透深さや汚染レベルの影響に関する情報は限定的である。チェルノブイリの事故の事例では、Cs-137 と Sr-90 は少なくとも 50mm までは浸透していたが、5mm までに 70% が存在するとされている。

今回の事故により放出された放射性核種で現在特に問題となるのは半減期の関係から上記の 2 種類であるが、Cs-137 に比較し Sr-90 はおよそ 1/1000 程度の濃度である場合が多く³⁾、実質的には放射性 Cs のみを考慮すればよい。なお、半減期が約 2 年の Cs-134 も現時点では環境放射能への影響は、半減期が約 30 年の Cs-137 に比較すれば長期的影響は弱いと言えるが今なお重要である。

このような状況から、福島県の異なる汚染度の地点からサンプルを採取し、空間線量率と汚染の程度を調査することにした。また採取したサンプルはウォータージェットにより表面からコンクリートを研削することで放射性 Cs の浸透深さを調査した。本稿ではこれらの結果を報告する。

2. サンプリングと評価条件

2.1 採取場所

サンプルの採取場所は、図-1に示す福島県相馬郡飯館村の国道 399 号線沿いの居住制限区域であり、帰還困難区域の直前である。サンプル採取は 2 か所で行った。北側のより空間線量率が低い 2.7～2.8μSv/hr の地域における擁壁からの直径 10cm のコンクリートコアを採取した。採取後はモルタルにて補修した。南側のより空間線量率が高い約 7μSv/hr の地域における道路側溝から蓋(JIS A 5345 道路用側溝蓋 3 種蓋 412*95*500mm)を採取した。採取後は新品と取り替えた。

2.2 測定

測定には NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータ(以下、NaI シンチレータ)および GM 計数管式サーベイメータ(以下、GM 管)を用い、表面位置で測定した。

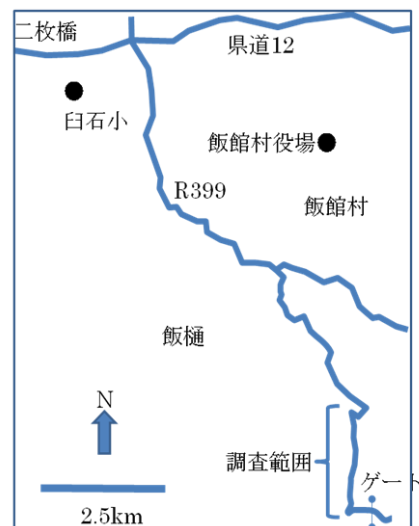


図-1 サンプリング位置

*1 (独)国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センターフェロー 工博 (正会員)

*2 村本建設(株) 技術グループ 工修 (正会員)

*3 (独)国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター長 工博 (非会員)



図－２ ウォータージェット

2.3 ウォータージェット

コンクリート蓋はまず 3MPa 程度の高圧水洗浄を行った。その後、一部を切断し 410mm×300mm 程度の大きさとした。図－２に示すウォータージェット(水圧：150MPa, ノズル：径 0.1mm×7 個, 噴射流量：5.58L/min, 噴射反力：50.9N)により手動で研削した。ノズルは回転しながら約 5cm 程度の範囲を研削する。コンクリート蓋を 10 秒程度のサイクルで全体に平均的にウォータージェットが当たるように配慮し研削した。コンクリートコアについては面積がコンクリート蓋の 1/15 と小さすぎるため、ウォータージェット噴射時間の均一性の観点のから最低時間を 5 秒の研削とした。

3. サンプル採取場所の特徴

サンプルはコンクリートであるが、サンプリング場所近傍での線量率測定の状態を説明する。図－１の北部に位置する白石小学校付近西側のコンクリート橋において測定を実施した。

欄干下部のコンクリートでは、NaI シンチレータによると、平滑部で 2.4 μ Sv/hr, 細骨材が露出している部分で 3.3 μ Sv/hr であった。この値は環境の放射能の影響を受けているものと考えられる。そこで、円筒形の鉛製の遮蔽体(コリメータ)を設置した測定したところ、それぞれ 1.2 μ Sv/hr および 1.8 μ Sv/hr となった。図－３に測定の様子を示す。さらにワイヤーブラシで色が変わる程度に 30 秒程度研削したところ、0.1 μ Sv/hr の低下があった。セメントペーストが残留し表面が平滑である部分には Cs の存在量はより少なく、セメントペーストが失われ細骨材が露出するようになるとより多くなると考えられる。浸透深さはワイヤーブラシで削り取れるようなごく表層ではなく一定の深さに達している。

図－３に見られるコケの 1 cm 上方では 5.2 μ Sv/hr(コリメータなし), アスファルト面では 3.8 μ Sv/hr(コリメータ



図－３ コリメータを使用した NaI シンチレーション式サーベイメータによる測定状況

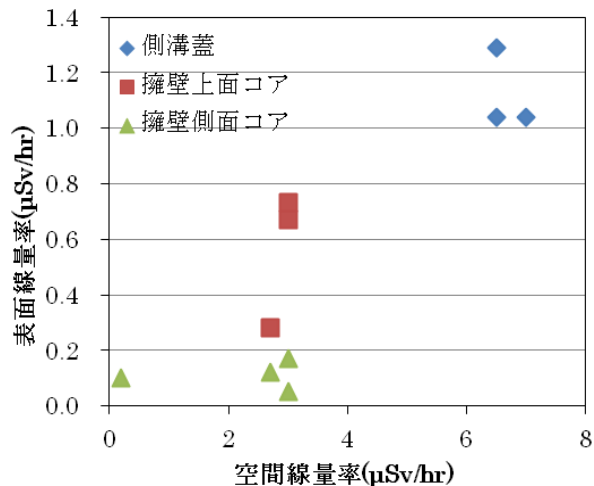


図－４ 帰宅困難区域直前のサンプリング場所

なし)とより高かった。車道との境界のコンクリートブロックでは 1.3 μ Sv/hr と同等であった。凍結融解が認められた部位もあったが値は変わらなかった。このように放射能汚染のレベルは土壌を含む植生の部分で高く、コンクリート面ではより低い。

さらに空間線量率が 7 μ Sv/hr と高い帰宅困難区域直前でのサンプリング場所を図－４に示す。法面の植生に近づくと空間線量率は 20～30 μ Sv/hr と 3～4 倍に高くなる。この地点近傍の空間線量率は文部科学省の航空機モニタリングでは 10 μ Sv/hr であり⁵⁾、現地測定と整合的であるものの、実際には詳細な位置により相当に放射能レベルは異なる。これは放射性 Cs が降雨により地表にもたらされた後、一部は植生に吸収され枯葉として現在も残存しており、また一部は土壌に含まれる特定の粘土鉱物に強固に固着され移動せずに現在も存在していることを反映しているものと考えられる。

図－５に空間線量率とコンクリートの表面線量率の関係を示す。コンクリートの表面線量率は原位置ではなく、空間線量率が 0.21 μ Sv/hr の環境で行い、バックグラ



図ー5 空間線量率とコンクリートの表面線量率の関係
(最も低線量率のデータは文献 4)

ンドを引いた値である。空間線量率が高まるに従いコンクリートの放射能汚染レベルも高まることが分かる。ただし、前述のように空間線量率の測定は測定場所の 10cm 単位の位置の違いに依存するので、相当の不確かさを含んだ値と考えるべきである。擁壁のコアに着目すると、明らかに上面のほうが側面よりも高い表面線量率を示す。放射性 Cs は降雨によりもたらされたものと考えられるが、雨水の滞留時間が汚染レベルに影響しているものと考えられる。また、降雨時の風向きにより南東側に開いた壁面のほうが、南東方向にある福島第一原子力発電所から飛来する放射性 Cs にさらされる可能性が高いなどの影響もあると推定できる。コンクリート品質の影響も考えられるが、管理者に確認したところ擁壁の施工時期や配合は不明である。

今回サンプリングしたもっとも高い空間線量率の地域は、文部科学省によるデータではおよそ 3000kBq/m² (300Bq/cm²) の Cs-137 と Cs-137 の沈着量である⁹⁾。GM 管によるとこの地域で採取したコンクリート蓋の表面線量率は部位によりばらつくが 5000～10,000cpm 程度であった。使用機器諸元(機器効率：51.8%，汚染の染源効率：

表ー1 コンクリートコアのウォータージェットによる研削時間と表面線量率変化(μSv/hr)

サンプル	採取後	高圧水	ウォータージェットによる研削時間/s	
			5	10
BG	0.21	0.16	0.16	0.16
コア 1 上面	0.44	0.41	0.19	0.18
コア 1 側面	0.28	0.25	0.16	0.16
コア 2 上面	0.83	0.70	0.20	0.17
コア 2 側面	0.21	0.21	0.16	0.16
コア 3 上面	0.91	0.72	0.17	－
コア 3 側面	0.33	0.33	0.16	－

0.5，入射面積：19.6cm²)による換算式(1)

$$\text{Bq/cm}^2 = \text{cpm} / (60 \times 0.518 \times 0.5 \times 19.6) \quad (1)$$

によると、1 万 cpm は 33Bq/cm² となる。文部科学省のデータと比較すると、コンクリートには降下した Cs の約 1/10 程度が残存し、土壌を含む植生には 1/3 程度が残存していると推定できる。

3. ウォータージェットによる研削結果

3.1 コンクリートコアの表面汚染

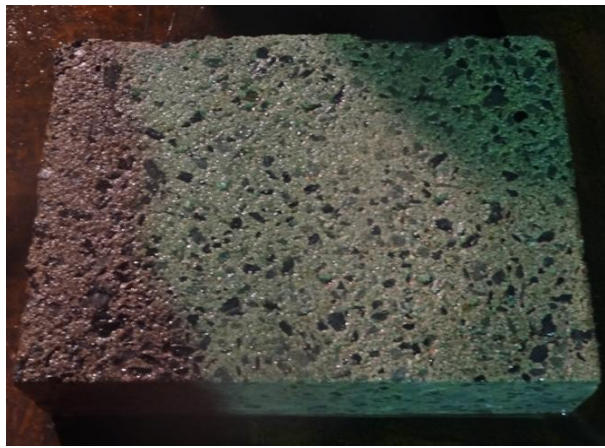
擁壁から採取したコンクリートコアの試験結果を表ー1 に示す。測定は NaI シンチレータを用いた。コアのサンプリング時に行ったフェノールフタレインによる中性化深さの測定では、側面からのコアで 5～10mm，上面からのコアでは 0～1mm と差があった。

コンクリートコアをウォータージェットで研削する前に高圧水洗浄し、付着している泥などを除去した。コンクリートコアの場合、高圧水洗浄の影響は比較的小さく、ほとんど影響がないものから最大でも 2 割程度の低減であった。放射性 Cs は内部へ浸透している。

擁壁の上面と側面では明らかに側面の放射能レベルが数分の 1 程度に低い。部位によってはバックグラウンドと比較し有意な放射能汚染が検知できないものもあった。

表ー2 コンクリート蓋のウォータージェットによる研削時間と表面線量率変化(μSv/hr)

サンプル	採取後	高圧水洗浄	ウォータージェットによる研削時間/s							
			30	60	90	120	180	210	240	330
BG	0.21	0.26	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
蓋 4 表面	1.20	0.70	－	0.29	－	0.22	0.20	－	0.19	－
蓋 4 裏面	－	0.26	－	－	－	－	－	－	－	－
蓋 5 表面 1	1.20	0.60	0.31	－	0.21	－	－	0.19	－	0.18
蓋 5 表面 2	－	0.90	0.43	－	0.27	－	－	0.20	－	0.19
蓋 5 裏面	－	0.26	－	－	－	－	－	－	－	－
蓋 6 表面 1	1.45	0.90	0.34	－	0.21	－	－	0.18	－	－
蓋 6 表面 2	－	0.86	0.30	－	0.19	－	－	0.17	－	－
蓋 6 裏面	－	0.26	－	－	－	－	－	－	－	－



図－6 除染による蓋 4 の表面状態変化
(上：0 秒，中：60 秒，下 240 秒)

コア上面をウォータージェットにより研削したところ、表面積が小さいこともあり 5 秒でほぼバックグラウンドレベルに低下した。

3.2 コンクリート蓋の表面汚染

コンクリート蓋に関する研削結果を表－2 に示す。

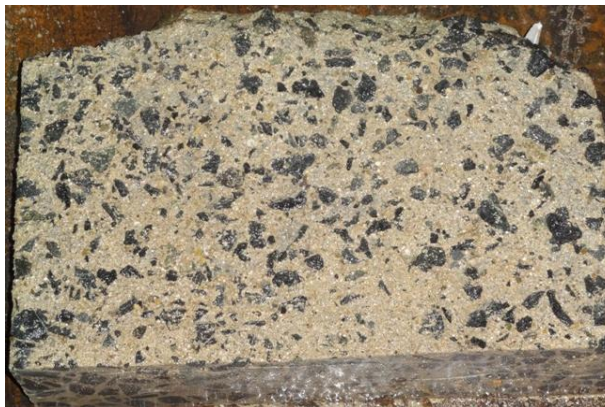
擁壁からのコンクリートコアと異なり、高圧水洗浄でコンクリート蓋の表面線量率は 3～4 割減少した。これはコンクリート蓋が地表面にあり、ほこりなどをより多く付着していたためと考えられる。

蓋の裏面にも泥が付着していることが予想されたた



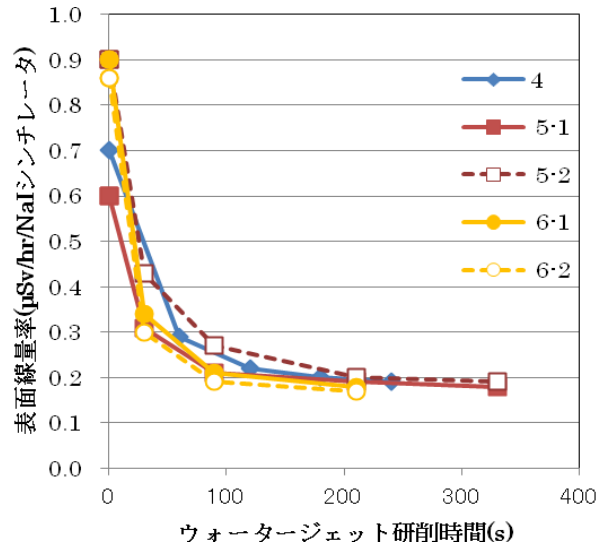
図－7 除染による蓋 5 の表面状態変化
(上：0 秒，中：30 秒，下 330 秒)

め、あらかじめ高圧水洗浄を行ったところ、ほぼバックグラウンドレベルまで表面線量率は低下した。表面のドロには付着していたかもしれないが、コンクリート内部への二次的浸透は限定的であると考えられる。これは蓋の表面には降雨が直接当たるものの、裏面には一度、側溝に溜まった泥が跳ね返り付着することから、放射性 Cs



図－８ 除染による蓋 6 の表面状態変化
(上：0 秒，中：30 秒，下 210 秒)

はすでに粘土鉱物に吸着されていたため、コンクリートにはあまり移行しなかった可能性がある。また、放射性 Cs は降雨によってもたらされたと考えられるが、気象庁の気象統計情報によると、放射性 Cs が漏れ出した 2011 年 3 月 12 日から 14 日までは降雨がなく西風が卓越し、15 日になって東風に変わり夕方になり数 mm の雨が降った。このことから乾いたコンクリートが放射性 Cs を含有した雨水を吸水したと考えられる。天候が回復すると西風が卓越し、放射性 Cs の飛来はなくなり、コンクリートは乾く。再度天候が崩れ放射性 Cs が供給されると



図－９ 研削時間と表面線量率の関係

いう過程が、放射性物質の漏洩が抑制されるまで数回繰り返されたと考えられる。その後、雨水により流出・再移動した結果、現在の汚染状況になったのであろう。

蓋の複数の位置を測定したところ、蓋 5 では測定値に 50% と大きな差が認められた。この現象をコンクリートの表層組織との関係から考える。

図－6～8 にそれぞれ、蓋 4～6 の研削に伴う表面状態の変化を示す。研削時間が長くなるに従いそれぞれモルタル部分が削り取られ、粗骨材が露出していく状況が分かる。蓋 5 がもっとも緻密で粗骨材は最後まで露出しない。蓋 4 がそれに続き、蓋 6 は短時間にモルタル部分が深く削り取られた。

蓋 5 に着目すると左側のセメントペーストが覆っており灰色に見える部分(表面 1)と、右側のセメントペーストが欠如し黒い粗骨材が見えるようになっている部分(表面 2)とがあることが分かる。セメントペーストで覆われており比較的平坦な部分には放射性 Cs の浸透はより少なく、表面が荒れてきた場合により浸透量が多くなると考えられる。

3.3 コンクリート蓋の汚染プロファイル

コンクリート蓋の研削時間と表面線量率変化の関係を図－9 に示す。表面線量率はセメントペーストがしっかりしている蓋 5 の表面 1 で最も低く、表面が最も荒れていた蓋 6 で最も高かったが、研削時間と表面線量率変化の関係に大きな違いはなかった。

研削前後の供試体質量を測定し、差を求めた。この差が研削時間中に均一にモルタルが除去されたものと対応するとして、モルタル密度を 2.06g/cm^3 と仮定し、それぞれの研削時間における除去深さを推定し、表面線量率との関係を図－10 に再表示する。

図－10 からは蓋ごとに表面線量率プロファイル、すな

わち放射性 Cs の浸透プロファイルが異なることが分かる。蓋 5 では 0.2～0.3mm 程度、蓋 4 では 1mm 程度、蓋 6 では 1.5～2mm 程度浸透していた。空間線量率がほぼ同じ地域であり、もたらされた放射性 Cs に大差ないとすれば、プロファイルの差はコンクリートの品質に依存するものと考えられる。これは先に説明したように乾いた表面に降雨により放射性 Cs がアルカリイオンとしてもたらされたとするならば、拡散ではなく吸水に伴いコンクリート中に放射性 Cs は移動したものと考えられる。したがって、表面が緻密なほどコンクリートは吸水による Cs 汚染の程度が小さくなり、図-10 に示す結果となったと考えられる。

一方、除染ということを考えれば空間線量率が類似で類似した量の放射性 Cs がもたらされたとすれば、除染のためにウォータージェットで研削する時間はほぼ一定でよい可能性がある。空間線量率 $7\mu\text{Sv/hr}$ の環境では、 $40\times 30\text{cm}$ を 30 秒(250s/m^2)研削すれば 65～80%の削減効果が見込め、90 秒(750s/m^2)研削すれば 85～95%の削減効果が見込まれる。ただし今回の研削条件はプロファイル測定を精度を上げるために穏やかに設定したものであり、ウォータージェットの水压を高め数倍の効率を得ることは可能である。

今回の測定では、空間線量が一定の条件でのみ浸透プロファイルが得られたが、ウォータージェットによる必要な除染時間は環境の汚染レベルによっても変化する可能性が考えられ、今後の更なる検討が必要である。

4. まとめ

放射性 Cs に汚染されたコンクリートの除染の基礎データをを得ることを目的に、汚染コンクリートをウォータージェットにより研削し、汚染深さに関する情報を得た。

- 1) 空間線量率と比例的にコンクリートの表面線量率も増加した。
- 2) 擁壁のコンクリートは上面の汚染度が高く、側面の汚染度は数分の 1 程度である。
- 3) 側溝のコンクリート蓋にはほこりなどとして放射性 Cs が付着している割合が 3～4 割であった。
- 4) 放射性 Cs の浸透深さは類似の環境でもコンクリート品質により異なり、0.2～1.5mm 程度浸透していた。
- 5) コンクリート品質が異なってもウォータージェットによる除染時間は一定となる可能性があり、空間線量率 $7\mu\text{Sv/hr}$ の環境において今回の研削条件では、 250s/m^2 の研削で 5～80%、 750s/m^2 の研削で 85～95% の削減効果が見込まれる。

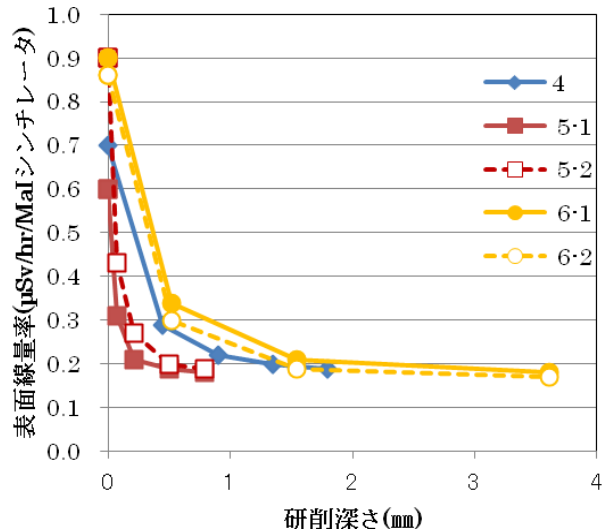


図-10 推定研削深さと表面線量率の関係

謝辞

サンプリングにあたっては福島県相双建設事務所の協力を得た。ウォータージェットによる研削には(株)久野製作所(福島県二本松市)の協力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) <http://www.jaea.go.jp/fukushima/index.html>
- 2) 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, 2011
- 3) http://radioactivity.mext.go.jp/ja/contents/7000/6213/24/338_0912_18_rev0914.pdf 文部科学省による、①ガンマ線放出核種の分析結果、及び②ストロンチウム 89, 90 の分析結果(第 2 次分布状況調査)について
- 4) http://www.jaea.go.jp/fukushima/techdemo/h23/appendix_2.pdf 独立行政法人日本原子力研究開発機構 福島技術本部平成 23 年度除染技術実証事業(環境省受託事業) 報告書付録 2: 個別試験結果と評価詳細, 付録 2-2-1-12
- 5) <http://ramap.jmc.or.jp/map/map.html> 文部科学省放射線量等分布マップ拡大サイト, 平成 24 年 6 月 28 日時点, 空間線量率
- 6) 同, セシウム 134+137 の合計