

論文 放射性焼却灰管理用鉄筋コンクリート製容器の基礎的研究

飯塚 豊^{*1}・岡野 素之^{*2}・森田 俊哉^{*3}・辻 幸和^{*4}

要旨: 放射性焼却灰を最終処分までの期間管理するための容器を開発するため、試験片と鉄筋コンクリート製容器を製作し放射線遮蔽効果ならびに除染の処理方法を検討した。基本性能としての遮蔽性能試験ではフェロニッケルスラグ、鉛ガラスカレット、および普通骨材による試験片で、 γ 線透過率は厚さ 15cm の場合で概ね 15%であった。壁厚を 15 cm で試作した実物大容器においても、曲げひび割れの影響は少なく、外面の放射線量が内側の 15%程度に低減された。そして、表面の塗装処理により、容器に付着した放射能の除染が容易になることが確かめられた。

キーワード: 放射性焼却灰, 遮蔽効果, フェロニッケルスラグ, 鉛ガラス, 除染

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、津波により東京電力福島第一原子力発電所に甚大な被害が発生し、東北地方、関東一円に放射性物質が拡散した。この放射性物質は地表に降り注ぎ地面や建物、動植物などに付着し除染が行われている。一方下水道には除染時の水や廃棄物が流入し汚泥が汚染されるため、その焼却灰は放射性物質が濃縮される。某下水処理場における焼却灰にはセシウム同位体を中心とした放射性廃棄物が混入し、事故発生後1年現在で放射性焼却灰が毎日1~1.5トン排出され、保管量は最大1000トン程度まで増える模様である。この内8000Bq/kgを超える廃棄物は国の最終処分場に処分し、それ以下の廃棄物は各自治体に処分が任されている。しかし各自治体では処分場の目途が立たず、最長で数十年間保管することも考えられる。現在焼却灰は大型の合成繊維製の袋に詰められ保管庫に保存(写真-1)されているが、やがて袋が破損すると被爆の問題から扱いが難しくなるため、安全に保管し必要な時期に運搬できる容器が必要となっている。



写真-1 焼却灰の保管例



写真-2 実物大容器

そこで、耐久性が高く放射線遮蔽効果のあるコンクリートで長期保存の可能な容器を製作することにより、処分場の準備が整うまでの間、焼却灰を容器内部に保管することにより安全に管理でき、処分場への運搬時に安全に処理できると考えられる。

本研究は上記性能を満たす鉄筋コンクリート(以下RCと呼ぶ)製容器(写真-2)を開発することを最終的な目的とする。そのためには、コンクリート材料の選定、基本的な遮蔽効果の確認、特にひび割れを有する場合の遮蔽効果、密閉方法、表面の処理、管理方法などを検討する必要がある。本報告では、これらのうち遮蔽性能試

験の結果と、表面処理の除染効果について述べる。

2. コンクリートの遮蔽性能試験

2.1 試験パラメーターと配合

パラメーターは骨材の種類とコンクリートの厚さとした。試験片は全て幅、高さとも15cmで、厚さを10, 15, 20cmに変化させた。骨材には普通骨材以外にフェロニッケルスラグと鉛ガラスカレット¹⁾を用いた。フェロニッ

*1 カイエー共和コンクリート(株)技術部製品開発室長(正会員)

*2 前橋工科大学 社会環境工学科教授 博士(工学)(正会員)

*3 カイエー共和コンクリート(株)常務取締役技術部長 博士(工学)(正会員)

*4 前橋工科大学 学長 工博(正会員)

表-1 コンクリートの配合と強度

配合	粗骨材の最大寸法 (mm)	目 標 スランプ (cm)	目 標 空気量 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量(kg/m ³)								圧縮強度 材齢14日 (N/mm ²)		
						水	セメント	細骨材			粗骨材		膨張材		フライ アッシュ	高性能 減水剤
								砂	FNS5	GC5-0	砕石	GC13-5				
1	20	8	4.5	42.0	40	153	364	711	—	—	1086	—	25	—	0.9	37.3
2	20	8	4.5	42.0	40	150	357	358	408	—	1094	—	25	—	0.9	31.4
3	20	8	4.5	42.0	40	148	352	—	820	—	1099	—	25	—	0.9	33.5
4	20	8	4.5	43.0	46	153	356	396	—	453	331	681	25	57	1.6	25.9

配合No.	
1 普通骨材	FNS5：フェロニッケルスラグ5mm以下
2 細骨材の50%をフェロニッケルスラグに置換	GC5-0：鉛ガラス細骨材5mm以下
3 細骨材の全てをフェロニッケルスラグに置換	GC13-5：鉛ガラス粗骨材13mm～5mm
4 鉛ガラスカレット	

ケルスラグは密度が大きく、また鉛ガラスカレットは家庭用テレビのブラウン管の破棄物で鉛を含むため、ともに遮蔽効果が高いことが報告されている。またひび割れの発生を抑制するため、膨張コンクリートとした。膨張材にはエトリンガイド系添加剤を用いた。コンクリートの配合と強度の一覧を表-1に示す。

2.2 試験方法

試験はコバルト 60 を線源としたγ線を試験片に照射し、線源と裏面(透過面)での空間線量率(Gy/h)を測定することで行った。線源の放射能は6×10¹⁴Bqで、線源中心から1780mmの位置(空間線量率37Gy/h)に電離箱(応用技研 C-111F#1105)を設置し、コンクリート試験片を透過した放射線量の変化から遮蔽性能を観測した。なお1水準で3試験片とした。計測に用いた電位計は、応用技研 AE-1110a#4103550であり、測定領域は0.1Gy/hから最大2×10⁵Gy/hである。

2.3 試験結果と考察

試験結果の一覧を表-2に、平均値を図-1にそれぞれ示す。各水準での透過率(透過した線量の照射線量に対する比)のばらつきは極めて小さい。コンクリート構造体における遮蔽の信頼性が高いことがうかがわれる。

厚さの違いによる透過率の変化は、厚さ(t)10cmで0.27～0.28、t=15cmで0.15、t=20cmで0.09であり、大きな遮蔽効果があること、また20cmより厚くても大幅な遮蔽効果は望めないことが推定される。

骨材の種類で比較すると以下の通りである。普通骨材に比較してフェロニッケルスラグの方が透過率は低い傾向があるが明確でない。またフェロニッケルスラグの異なる配合は透過率に影響しない。鉛ガラスカレットの場合、他に比較し圧縮強度が低いにもかかわらず、透過率は他の骨材に比較して低い傾向がある。

表-2 遮蔽性能試験結果の一覧

骨材	厚さ (cm)	試験片	空間線量率 (Gy/h)	平均 (Gy/h)	透過率	
(照射線量)	0		36.6	36.6	1.00	
普通骨材 配合1	10	1	10.1	10.1	0.28	
		2	10.1			
		3	10.1			
	15	1	5.6	5.6	0.15	
		2	5.6			
		3	5.6			
	20	1	3.2	3.2	0.09	
		2	3.2			
		3	3.3			
10		1	9.9	9.9		0.27
		2	9.9			
		3	10.0			
フェロニッケル スラグ 配合2	15	1	5.4	5.4	0.15	
		2	5.4			
		3	5.5			
	20	1	3.2	3.2	0.09	
		2	3.2			
		3	3.2			
フェロニッケル スラグ 配合3	15	1	5.4	5.4	0.15	
		2	5.4			
		3	5.3			
鉛ガラス カレット 配合4	15	1	5.0	5.1	0.14	
		2	5.1			
		3	5.1			

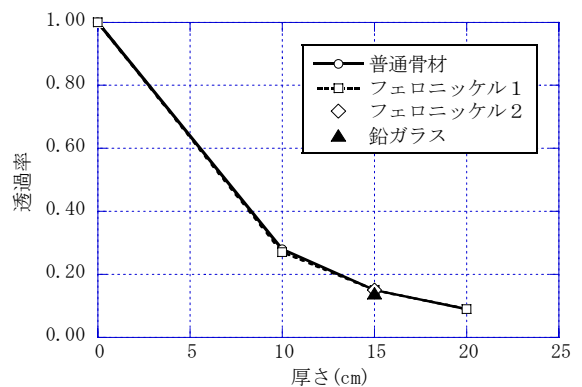


図-1 コンクリート厚さと透過率の関係

3. 実物大容器による遮蔽性能試験

3.1 試験の概要

(1) 実物大試験体

実物大容器を写真-2に示した。本容器は外面一辺が160cmの立方体で、壁、底板、蓋の厚さはともに15cm

とした。配筋は、それぞれの部材を4辺固定(底板)、4辺支持(蓋)および3辺固定(壁)として、内部に焼却灰が容量100%まで入った状態での応力に耐えられ、かつ最低鉄筋量(引張鉄筋比0.2%)以上となるように設計

した。形状・寸法と配筋を図-2 に示す。試験体は同一の形状・配筋で、ひび割れの有無と内面処理をパラメーターとした4体である。試験体の一覧を表-3 に示す。

ひび割れは、あらかじめ壁の1面（A面）中央上端を側壁外側から水平方向に載荷して曲げにより発生させ、幅0.2mmの残留ひび割れとなるように管理した。ひび割れ発生面が容器の設計方向と逆であるが、ここでは単にひび割れの有無に着目した。ひび割れ発生状況を写真-3 に示す。塗装剤は高分子系のエポキシ樹脂（サンガードEP）、ポリウレタン樹脂（サンガードPU）である。塗装の目的は、放射性物質の付着回避、およびひび割れ時の水密性確保である。容器上端と蓋の接合面はスポンジ状の止水パッキンを用いボルトで固定した。

(2) 使用材料

コンクリートは表-1 に示した配合2 と同一とした。材齢 14 日の圧縮強度は 34.2N/mm²であった。鉄筋の引張試験結果を表-4 に示す。

(3) 放射性焼却灰

焼却灰は3種類を用いて、袋ごと容器に格納した。これらの放射性物質の濃度は平均で約 4600Bq/kg である。袋詰めされた焼却灰は大きさが容器内法より 10~20cm 程度小さいので、容器のA面壁に接して設置した。

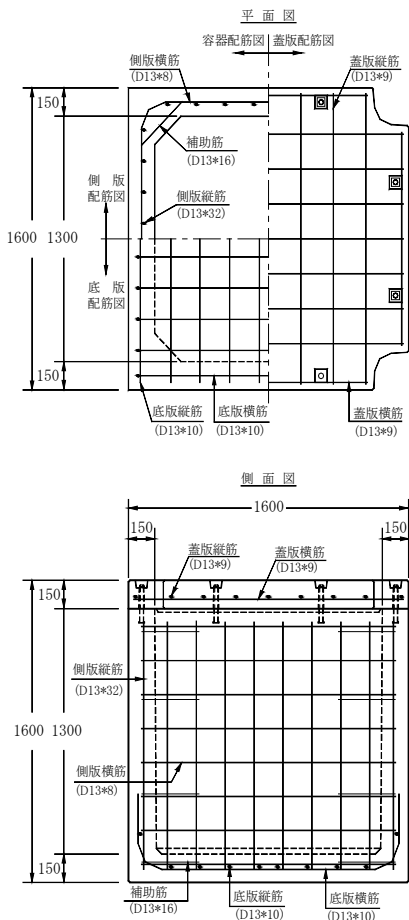


図-2 試験体の形状・寸法と配筋

表-3 試験体の一覧

試験体	ひび割れ	内面塗装	焼却灰の重量 kg	着目点
No.1	なし	なし	613	遮蔽効果, 距離減衰
No.2	なし	エポキシ樹脂	581	除染対応
No.3	幅0.2mm残留	なし	574	ひび割れの影響
No.4	幅0.2mm残留	ウレタン樹脂		ひび割れ追随樹脂

表-4 鉄筋の引張試験結果

鉄筋径	材質	降伏点 N/mm ²	引張強さ N/mm ²
D13	SD345	397	556

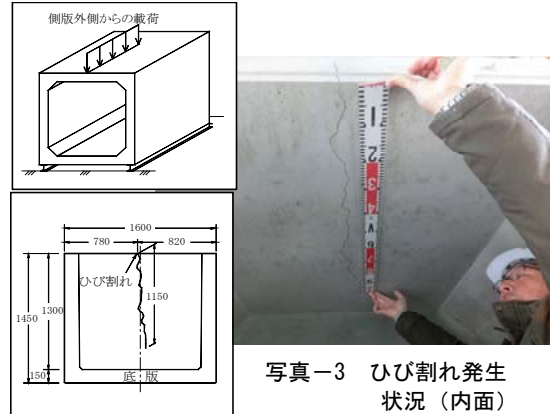


写真-3 ひび割れ発生状況（内面）

(4) 空間線量の計測

空間線量率の計測位置を図-3 に示す。No.1 試験体は水平4方向と上方で距離 1.0mまで、接合面, 上端部 4隅で, No.2 試験体はA面の外面で, No.3, 4 試験体はA・B両面の外面で測定した。それぞれ高さ 0.5, 1.0m, 壁中央と左右端部である。計測に用いた線量計は, 高感度型 ALOKA PDR-111 である。各計測点で 30 秒計測して最大値を記録する作業を 5 回繰り返し, それらの平均値を計測値の代表とした。なお, 焼却灰設置前の計測ヤードの線量率は, 0.037~0.061(平均 0.047) μSv/h であった。

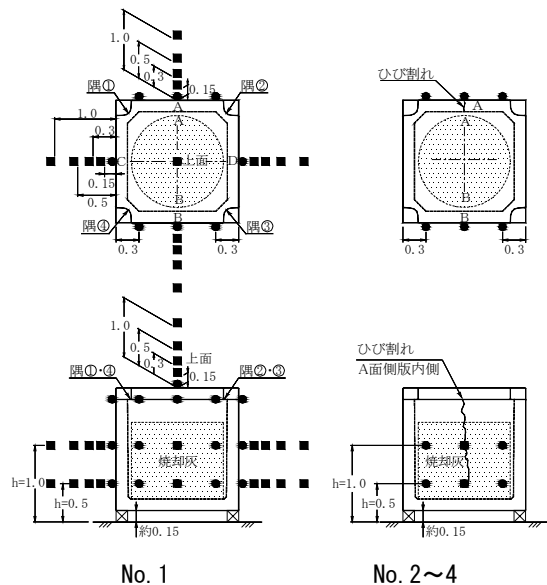


図-3 空間線量計測位置

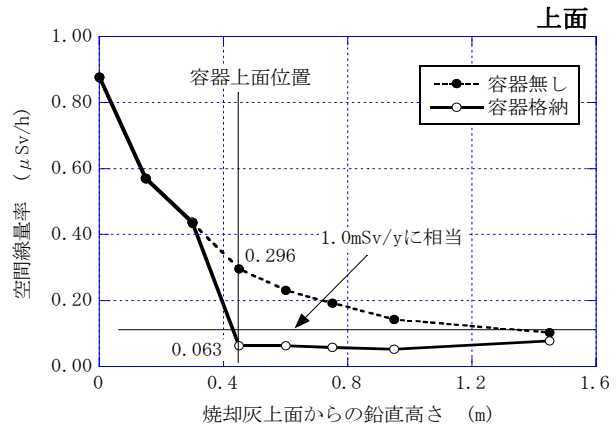
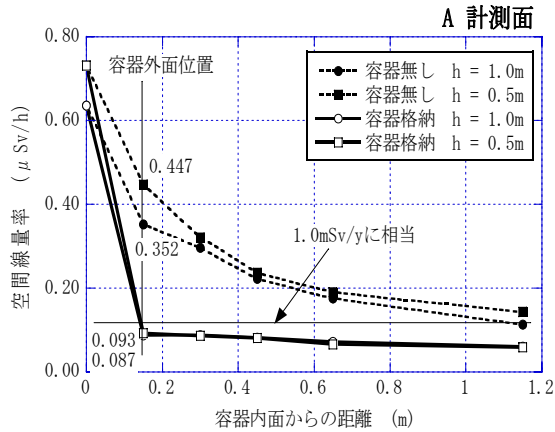


図-5 空間線量率と高さとの関係

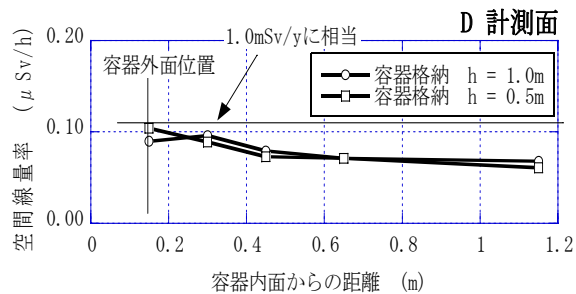
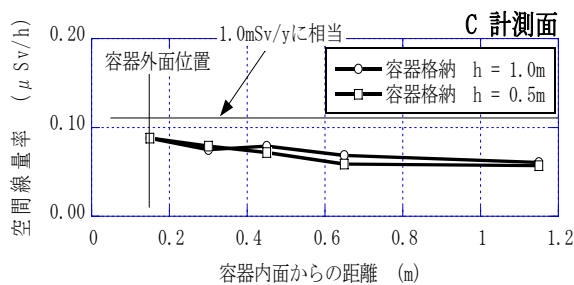
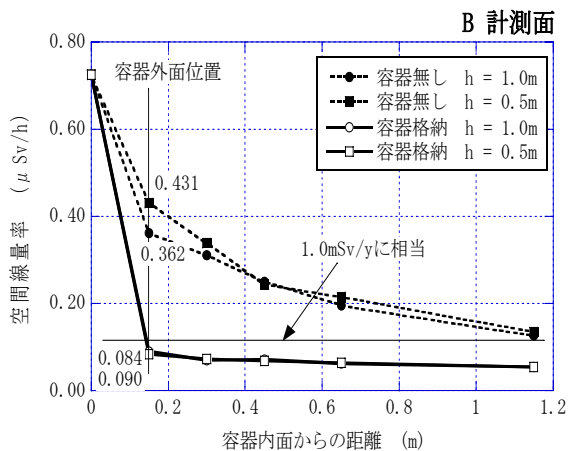


図-4 空間線量と距離の関係

3.2 測定結果

(1) 健全断面における遮蔽効果

No.1 試験体における、水平方向の各計測面 (A, B, C, D 面) の空間線量率と距離との関係を図-4 に示す。A, B 計測面はともに、容器無しの場合 (点線) に比較して、容器格納した場合 (実線) は外面位置で大きく線量率が低下し、その後の低下はわずかである。C, D 計測面はこの方向の容器無しの計測値がないため、格納した場合のみ示したが、同様に低い計測結果となっている。

A, B 面での外面位置での線量率は $0.084 \sim 0.093 \mu\text{Sv/h}$ であり、内面の線量率 ($0.352 \sim 0.447 \mu\text{Sv/h}$) に比較して 19.5~24.8% に低減した。2章で実施した結果の透過率 15% に比較して高い傾向があるのは、ヤード自体の空間線量率 (前述、平均 $0.047 \mu\text{Sv/h}$) も含めて測定しているため、この影響を除外すると、外面位置で線量率は $0.037 \sim 0.046 \mu\text{Sv/h}$ であり、容器無しの場合の線量率に比較して 9.6~13.6% に低減したことになる。

上面 (鉛直方向) の場合の、空間線量率と高さの関係を図-5 に示す。水平方向と同様に、容器上面位置で線量率が 0.296 から $0.063 \mu\text{Sv/h}$ まで大幅に低下し、透過率は 21.3% であった。上記と同様にヤード自体の空間線量率の影響を除外すると透過率は 6.4% となる。

以上から、実物大容器の場合も試験片で得られた遮蔽効果を満足していると判断できる。

法令では事業所の境界 (即ち一般市民が自由に接することのできる場所) で3カ月あたり $250 \mu\text{Sv}$ を線量率の限度²⁾と規定しており、年間に換算すると 1.0mSv/y 、時間あたりでは $0.114 \mu\text{Sv/h}$ となる。各図の中にこれに相当する線量率を示した。各面での計測値を比較すると、ヤード自体の空間線量率を考慮しても規定値を大幅に下回ることが分かる。

(2) ひび割れの遮蔽効果への影響

鉄筋コンクリートはひび割れが避けられない構造であり、ひび割れの発生時を想定し遮蔽効果への影響を調べておく必要がある。この計測では曲げひび割れを壁の中間部内側、左右両端部外側に発生させた。ただし左右両端のひび割れは明確ではなかった。各試験体における、ひび割れ発生位置の外側（A計測面、1面あたり6点計測）での空間線量率を図-6に示す。No.3, 4の試験体にはひび割れがあるが、この図から、 $h=1.0, 0.5m$ の中央（中で記述）部でやや高い傾向があるものの、ひび割れのない他の2体（No.1, 2）との明確な差は見られない。今回のひび割れは曲げによるため圧縮側は閉じており、その場合一般的な管理基準値である $0.2mm^3$ 程度の残留ひび割れでは遮蔽効果に著しく影響しないものと考えられる。

(3) 接合部の遮蔽効果への影響

今回用いた容器は上部をRCの蓋で覆い、ボルトで止めるのでRC相互の接合部が存在し、その部分で線量が大きくなる可能性がある。そこで、No.1試験体において接合部付近の空間線量率を計測した。結果を図-7に示す。ここでは、A, B, C, D各面の接合部および隅角部4点の結果である。空間線量率は $0.058\sim 0.084\mu Sv/h$ の範囲であり、若干隅角部の方が高い傾向だが、その理由としてこの部分の壁の厚さが $15cm$ 以下になる部分があることが考えられる。しかしながら、図-6と比較すれば接合部で線量率が高くなるとは言えない。

4. 放射性物質ふきとり試験

4.1 試験の目的とパラメーター

放射性焼却灰をコンクリート製容器に格納した場合、コンクリート表面に焼却灰が付着し、取り出した後容器自体が放射性廃棄物になる可能性がある。しかしコンクリートは基本的にポーラスであるため除染が困難である。そこで、樹脂塗装により除染効果を高めることが提案できる。本試験では実物大容器に用いた樹脂塗装の除染効果の目安を得ることを目的としてふきとり試験を行った。

試験のパラメーターは、コンクリートの表面処理方法とし、処理なしと塗装材料（2種類）である。表-5に試験の一覧を結果とともに示す。

4.2 試験方法

試料は大きさ $100\times 100\times 30mm$ で、図-8に示すようにセシウム137溶液（塩化セシウム溶液）を5滴滴下し、1週間後にふきとり処理を行い、その都度試料表面から $5cm$ の距離で β 線のカウント数を測定器（AROKA TGS-133）で計測し表面線量の目安とした。ふきとりは、紙製品によるからぶき2回、水ふき5回、1M-HCL溶液ふきとり3回の順に行った。一部の試料では、HCL溶液

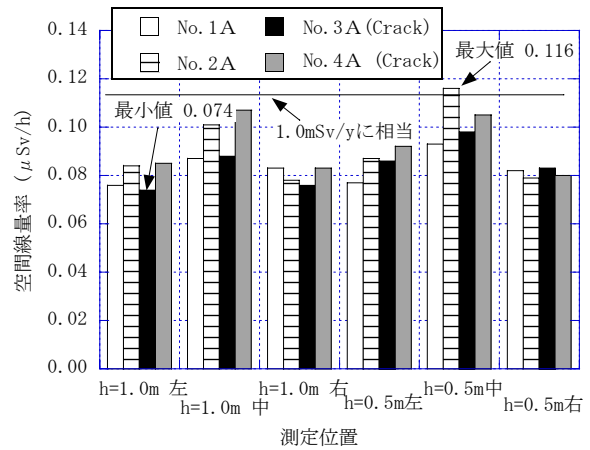


図-6 ひび割れ位置での空間線量率

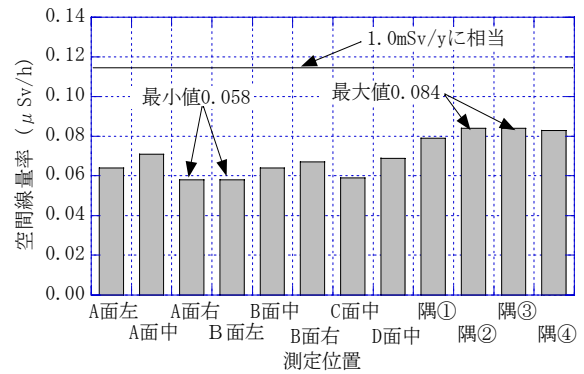


図-7 接合部の空間線量率

表-5 ふきとり試験結果の一覧

表面処理	試料	滴下1週間後	からぶき	水ぶき	HCL液ふきとり	残存率 (%)
なし	1	5500	5500	5500	5300	96.4
	2	5000	5000	5000	5000	100.0
	3	5200	5200	5200	5200	100.0
	平均	5233	5233	5233	5167	98.7
ポリウレタン樹脂塗装	1*	5000	2700	1400	350	7.0
	2	5000	2800	1000	580	11.6
	3	4700	1700	240	130	2.8
	平均	4900	2400	880	353	7.2
エポキシ樹脂塗装	1*	5300	1900	200	120	2.3
	2	5000	1000	140	120	2.4
	3	5000	1200	400	130	2.6
	平均	5100	1367	247	123	2.4

単位: count

*: HNO3液ふきとり後、HCL液ふきとり

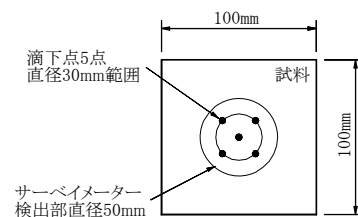


図-8 Cs-137 溶液滴下点と計測範囲

の前に 0.1M-HNO₃ で3回ふきとりを行った。用いた溶液は、日本アイソトープ協会製造の CS010 (放射能濃度 1.008MBq/g) を原液 (0.060ml) とし、0.01M-HCL 溶液 (4.0ml) を混合し試験用溶液とした。滴下した5滴 (合計 0.2ml) の放射エネルギーは 2956Bq となる。これは 8000Bq/kg の放射性焼却灰 0.37kg の放射エネルギーに相当する。実際には焼却灰を対象としているのに対し、本試験では浸潤性のある溶液を用いており、焼却灰に比較しより厳しい試験と考えられる。なお、試料に用いたコンクリートは、すべて表-1 に示した配合 2 と同一配合で、試験片と同時に製作したものである。

4.3 試験結果

表-5 と図-9 に試験結果を示した。コンクリートの表面処理をしていない試料は最終的に残存率が平均 98.7% で、今回行ったどのふきとりに対しても明らかに除染効果がなく、コンクリート表面に直接付着した放射性物質は取り除くことが困難であることがわかる。

これに対して、樹脂塗装した試料では除染効果が明らかであった。ポリウレタン樹脂の場合のカウント数は、からぶきで平均 4900 から 2400 まで減少し残存率が 49.0% であり、水ぶきでは 880 まで減少し同 18.0% となり、同様に HCL 溶液ぶきでは 353 まで減少し同 7.2% となっている。一方、エポキシ樹脂の場合のカウント数は、からぶきで平均 5100 から 1367 まで減少し残存率が 26.8% となり、水ぶきでは 247 まで減少し同 4.8% となり、同様に HCL 溶液ぶきでは 123 まで減少し同 2.4% となっている。本試験結果ではポリウレタン樹脂塗装においてばらつきがみられる。ふきとり作業に不確定な部分があることも一因と考えられ、今後実用化に当たっては標準化する必要がある。

5. まとめ

放射性焼却灰を安全に保管・運搬することを目的とし鉄筋コンクリート製容器の遮蔽効果、除染の可能性に関する試験を実施した。本試験の範囲で以下の知見を得た。

- 1) コンクリートは遮蔽効果があり、 γ 線透過率は、厚さ 15cm で 15%、厚さ 20cm で 9% 程度である。
- 2) 骨材にフェロニッケルスラグ、鉛ガラスカレットを用いた場合、普通骨材に比較して遮蔽効果が大きい傾向はあるが明確ではない。
- 3) コンクリートの遮蔽効果のばらつきは小さい。
- 4) 実物大容器は 4600Bq/kg の放射性物質濃度の焼却灰約 600kg を格納した場合、外面での空間線量率は試験ヤードの平均空間線量率 (0.047 μ Sv/h) を含んだ状態で、ほとんどの測点で年間 1.0mSv 未満であり法令の基準値以下であった。

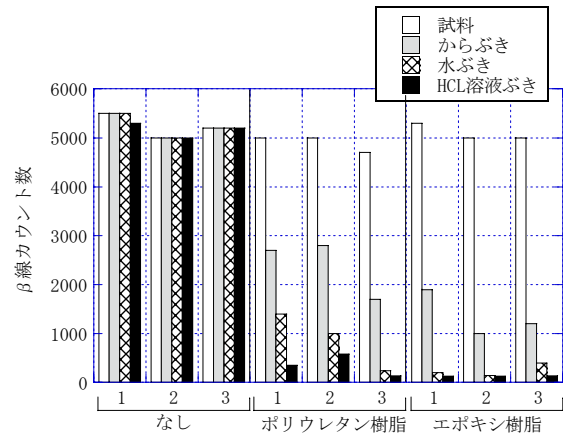


図-9 表面処理とβ線カウント数の関係

- 5) 実物大容器において、幅 0.2 mm 程度の曲げひび割れが存在する場合も健全な部位と比較して外面の空間線量率に差は見られない。
- 6) 実物大容器において、蓋と容器の間の接合部外面の空間線量率は、他の健全な部位に比較して差は見られない。
- 7) コンクリートの表面は、液状の放射性物質が付着すると除染が困難である。
- 8) 樹脂の塗装により、液状の放射性物質が付着してもふきとりにより除染が可能である。
- 9) 樹脂で塗装した場合、残存率は、からぶきで 26.8 ~ 49.0%、水ぶきで 4.8 ~ 18.0%、HCL 溶液ぶきでは 2.4 ~ 7.2% であり、特に HCL 溶液を用いると除染の効果は高い。
- 10) 本試験で用いた樹脂では、ポリウレタン樹脂よりもエポキシ樹脂の方が除染効果は高かった。

謝辞

鉛ガラスカレットを用いたコンクリートの配合設計に関しまして、清水建設株式会社の浦野真次博士にご指導いただきました。また樹脂材料ではサンユレック(株)殿、フェロニッケルスラグに関しては大平洋金属(株)殿のご協力を得ました。本研究は、前橋市公募型共同研究事業 (2012 年度) の援助を受けて実施しました。ここに記して深謝します。

参考文献

- 1) 独立行政法人物質・材料研究機構：プレス資料「テレビ用ブラウン管ガラスの廃材に高い放射線遮蔽能力」、2011.7.25
- 2) 平成 12 年科学技術庁告示第 10 号第 2 号
- 3) 国土交通省：土木工事施工管理基準及び規格値 (案) 平成 23 年 3 月