

# 論文 プレキャスト部材による放射性除染廃棄物管理用大型ヤードの接合部に関する基礎的研究

飯塚 豊<sup>\*1</sup>・岡野 素之<sup>\*2</sup>・森田 俊哉<sup>\*3</sup>・辻 幸和<sup>\*4</sup>

**要旨:** 放射性除染廃棄物を最終処分までの期間管理する大型管理ヤードを構築するために、プレキャスト部材と場所打ちコンクリートを併用する構造を提案する。その基礎的研究として、ひび割れ試験片による遮蔽性能試験と大型管理ヤードの接合部をモデル化したコンクリート製容器による遮蔽性能試験を実施した。その結果、厚さ 15cm のコンクリート試験片による照射試験では、幅 2mm の貫通ひび割れが存在してもγ線透過率には影響しないことが確かめられた。また、放射性焼却灰を格納した壁厚が 15cm の容器の外面上において、接合部の目地幅が 1cm 程度までは空間線量率に差が生じないことが確かめられた。

**キーワード:** 放射性除染廃棄物, 遮蔽効果, プレキャスト部材, ひび割れ

## 1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所の事故に由来する放射性物質を含む廃棄物の内、放射能濃度が 8000 Bq/kg を超えるものについては、国の管理により処理することが決められている。最終処分場の選定に関する議論が行われているが処分場の選定には至っておらず、各施設等に仮保管されている。

8000 Bq/kg 以下の廃棄物については、特定一般廃棄物・特定産業廃棄物として各自治体に処分が任されており、放射性物質汚染対処特措法<sup>1)</sup>に基づき従来と同様の処理が可能である。しかし処理場周辺地域の理解が得られないことや、廃棄物処理業者や各自治体独自の基準の設定などにより処理が進まず、保管量が増加している自治体もある。また除染作業に伴う放射性廃棄物が増加しており、大量かつ安全に保管できる大型管理ヤードが必要となる。

大量の廃棄物を保管する大型管理ヤードは、プレキャストコンクリート製（以下 PCa と呼ぶ）部材と場所打ちコンクリートを併用して構築（写真-1）する構造が提案できる。この場合に PCa 部材同士の接合部や PCa 部材と場所打ちコンクリートの打継ぎ部が発生する。長期的な保管も考えられることから、これらの接合部における遮蔽性能に対する安全性を検証しておく必要がある。また構造物の大型化に伴う維持管理の困難さからも、コンクリートのひび割れによる遮蔽性能への影響について検証しておく必要がある。

本文では、基礎的研究としてひび割れに対する遮蔽性能評価、PCa 部材同士の接合部および PCa 部材と場所打ちコンクリートの打継ぎ部の遮蔽性能評価を行い、安全

に保管することができる大型管理ヤードの構築方法について提案する。



写真-1 大型管理ヤードの構築例

## 2. ひび割れ試験片による遮蔽性能試験

### 2.1 試験の概要

#### (1) 試験の目的とパラメーター

鉄筋コンクリート構造物はひび割れが避けられない構造である。一般的な管理基準値である 0.2mm<sup>2)</sup> 程度の曲げによる残留ひび割れでは、遮蔽効果に著しく影響しないことを確認した<sup>3)</sup>。本試験では、注入工法等の一般的な工法により補修することが可能なひび割れ<sup>4)</sup>に対する遮蔽性能評価を得ることを目的とする。

試験のパラメーターは、ひび割れのパターンとひび割れ幅および鋼材との組み合わせとした。ひび割れのパターンは曲げひび割れと貫通ひび割れとし、幅はそれぞれ 0.2, 0.4, 0.8mm と 0.3, 1.0, 2.0mm とした。鋼材の種類は鉛板と一般構造用圧延鋼材（以下鋼板と呼ぶ）とし、厚さはそれぞれ 6, 12, 19mm とした。コンクリート試験片の背面に鋼材を重ね合わせた試験は、鉛板と貫通ひび割れ、鋼板と曲げひび割れの組み合わせとし、それぞれ最大ひび割れ幅の試験片とした。

\*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）代表取締役 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)	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					圧縮強度 (材齢) (N/mm <sup>2</sup> )	養生方法
						水	セメント	細骨材	粗骨材	高性能減水剤		
PCa部	20	18	4.5	45.7	40	175	383	723	1020	1.7	38.4(7日)	蒸気養生
打継ぎ部	20	15	4.5	48.0	41	165	344	731	1073	1.5	32.0(28日)	一般養生

(2)コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-1に示す。試験片の配合は表-1中におけるPCa部の配合である。

(3)試験片

コンクリート試験片は全て幅、高さ、厚さとも15cmとした。鋼材は幅、高さを15cmとし厚さは3種類とした。コンクリート試験片の一例を写真-2に示す。写真は照射面に対し側面からの状況である。

曲げひび割れ試験片は、15cm×15cm×156cmの鉄筋コンクリート梁を作製し、荷重スパンを76cmとした2点中央集中荷重により曲げひび割れを発生させ、残留ひび割れ幅を管理した。梁試験体の荷重スパン内にあらかじめ一辺3mmの三角目地を15cm間隔で4箇所設けておき、目地部から曲げひび割れを発生させた。梁試験体を15cm間隔で切断し、試験片の中央付近に曲げひび割れを発生させた試験片を採取した。曲げひび割れ無しの試験片も同じ鉄筋量の鉄筋コンクリート試験片であり、引張側、圧縮側ともD10の主鉄筋を各2本配置した。

貫通ひび割れ試験片は、15cm×15cm×50cmの無筋コンクリート梁を作製し、1点中央集中荷重により梁試験体を曲げ破壊させた。そして破壊面を中央とし2片に分割された試験片の両端を切断し、破壊面同士を突き合わせることで幅15cmの試験片を作製した。2片に分割した試験片を突き合わせ、試験片の両端外周を粘着テープで固定した。その際の粘着テープの締付け力を調整し、ひび割れ幅の管理を行った。貫通ひび割れ無しの試験片も同様に無筋コンクリート試験片である。

2.2 試験方法

試験はコバルト60を線源としたγ線を試験片に対し同心円状に照射し、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。試験状況を写真-3に示す。線源の放射能は約1.2PBqで、線源中心から

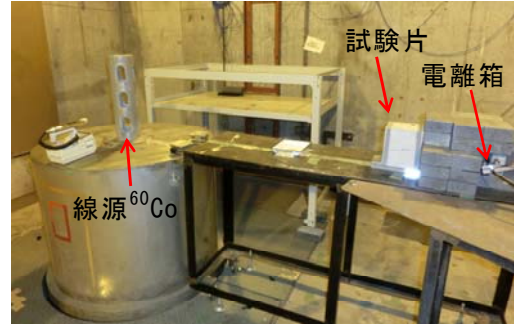
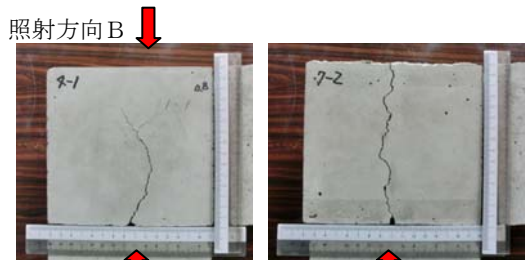


写真-3 照射試験の状況

表-2 遮蔽性能試験結果の一覧

タイプ	ひび割れ幅 (鋼材厚)	試験片	照射方向	線量率 (Gy/h)	平均 (Gy/h)	平均透過率
(照射線量)		無し	—	83.8	83.8	1.00
曲げひび割れ	無し	1	—	13.0	12.8	0.15
		2		12.8		
		3		12.7		
	0.2mm	1	A	12.9	12.9	0.15
		2		12.9		
		3		13.0		
	0.4mm	1	B	12.9	13.0	0.15
		2		12.9		
		3		13.1		
	0.8mm	1	A	13.0	12.9	0.15
		2		12.9		
		3		12.9		
貫通ひび割れ	無し	1	—	13.4	13.4	0.16
		2		13.3		
		3		13.5		
	0.3mm	1	—	13.6	13.6	0.16
		2		13.6		
		3		13.6		
1.0mm	1	—	13.8	13.5	0.16	
	2		13.5			
	3		13.3			
2.0mm	1	—	13.7	13.8	0.16	
	2		13.9			
	3		13.7			
曲げ+鋼板ひび割れ	0.8mm (6mm)	1	A	10.7	10.6	0.13
		2		10.6		
		3		10.4		
	0.8mm (12mm)	1	A	8.8	8.7	0.10
		2		8.7		
		3		8.6		
0.8mm (19mm)	1	A	7.1	7.0	0.08	
	2		7.0			
	3		6.9			
貫通+鉛板	2.0mm (6mm)	1	—	9.7	9.7	0.12
		2		9.8		
		3		9.7		
	2.0mm (12mm)	1	—	7.1	7.2	0.09
		2		7.3		
		3		7.2		
2.0mm (19mm)	1	—	5.2	5.2	0.06	
	2		5.3			
	3		5.2			
鉛板	(6mm)	1	—	53.5	53.5	0.64
	(12mm)	2		36.4	36.4	0.43
	(19mm)	3		23.7	23.7	0.28
鋼板	(6mm)	1	—	65.6	65.6	0.78
	(12mm)	2		51.0	51.0	0.61
	(19mm)	3		38.5	38.5	0.46
参考文献3)より引用：試験片15cm厚の試験結果						0.15



照射方向A ↑      照射方向B ↓  
 曲げひび割れ：幅0.8mm      貫通ひび割れ：幅1.0mm

写真-2 ひび割れ試験片

1860mm の位置（空間線量率 83.8Gy/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および鋼材を透過した放射線量の変化から遮蔽性能を観測した。コンクリート試験片は、1水準で3試験片とした。また曲げひび割れ試験片については、ひび割れ発生面からの照射（照射方向A）と反対側（照射方向B）からの照射も行った。鋼材単体の基本性能は1水準で1試験片とし、鋼材とコンクリート試験片の組み合わせは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  $2 \times 10^5$  Gy/h、精度は  $\pm (0.1\% \text{ of rdg} + 1\text{digit})$  である。

### 2.3 試験結果と考察

試験結果の一覧を表-2に、曲げひび割れと貫通ひび割れ試験片の平均値を図-1に示す。各水準での透過率（透過した線量の照射線量に対する比）のばらつきはなかった。

曲げひび割れの幅の違いによる透過率の変化は、ひび割れ幅が 0.2mm~0.8mm の範囲においてなく、照射方向によっても差がない。いずれも透過率は 0.15 であり、ひび割れ無しの試験片と同じ遮蔽効果がある。

貫通ひび割れ幅の違いによる透過率の変化は、ひび割れ幅が 0.3mm~2.0mm の範囲において差がない。いずれも透過率は 0.16 であり、ひび割れ無しの試験片と同じ遮蔽効果がある。

空間線量率の実測値に対し計測器の精度を考慮して透過率を算出すると、曲げひび割れ試験片の 0.15 に対し 0.15~0.16、貫通ひび割れ試験片の 0.16 に対し 0.16~0.17 の範囲となる。このように計測器の精度を考慮すると、曲げひび割れ試験片と貫通ひび割れ試験片の透過率には明確な差はなく、コンクリート面として透過率を捉えることで、コンクリートにひび割れが存在した場合でも透過率に影響しないと言える。

鋼材単体と鋼材をコンクリート試験片と重ねた場合の透過率の関係を図-2に示す。鋼材単体の基本性能として、透過率が厚さ 6, 12, 19mm に対し鉛板で 0.64, 0.43, 0.28 あり、鋼板で 0.78, 0.61, 0.46 である。鋼材の遮蔽効果としてコンクリート試験片と重ねた場合の透過率を比較する。鉛板と貫通ひび割れ試験片の組み合わせでは、鉛板無しの 0.16 に対し、厚さ 6mm で 0.12, 12mm で 0.09, 19mm で 0.06 である。鋼板と曲げひび割れ試験片の組み合わせでは、鋼板無しの 0.15 に対し同じく 0.13, 0.10, 0.08 であり、いずれも透過率が大きく低減される。

## 3. 大型管理ヤードをモデル化した容器による接合部の遮蔽性能試験

### 3.1 試験の概要

#### (1) 試験体容器

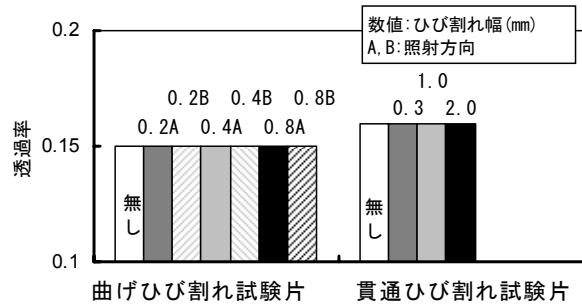


図-1 ひび割れ幅と透過率の関係

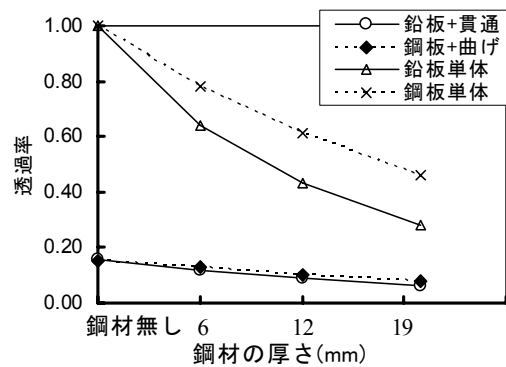


図-2 鋼材厚と透過率の関係

試験体は PCa 部材同士の接合部を有する試験体と、PCa 部材と場所打ちコンクリートの打継ぎ部を想定した新旧打継ぎ部を有する試験体を作製した。試験体容器を写真-4に、試験体の一覧を表-3示す。壁厚は全て 15 cm とし、2分割の PCa 部材を組み合わせることで、側壁 4面と底版 1面を有する容器状の試験体とした。外



写真-4 モデル化した試験体容器

表-3 試験体の一覧

試験体	側壁接合面形状		着目点
	A面	B面	
	底版打継ぎ面形状		
	打継ぎ左	打継ぎ右	
No. 1	フラット	ソケット	PCa同士の接合面形状 鋼材の有無, 距離減衰
	打継ぎ無し		
No. 2	フラット	フラット	打継ぎ面の形状と接着剤の有無
	フラット	ソケット	
No. 3	フラット	フラット	No. 2: 接着剤無し No. 3: 接着剤あり
	フラット	ソケット	

形寸法は全て同じとし、接合面の形状と打継ぎ用接着剤の有無をパラメーターとした3体である。

試験体容器の形状・寸法と配筋を図-3に、接合部の詳細を図-4に示す。PCa部材同士の接合面は、フラット面の突合せ形状(A面)と段差を設けたソケット形状(B面)の2種類とした。いずれの接合面にも止水性を考慮し、スポンジパッキンを貼付した。接合面の目地幅は1mm程度であった。

また試験体容器の側壁外面に鋼材を取り付け、鋼材による遮蔽効果を検証した。鋼材の種類は鉛板と鋼板であり、幅200mm、高さ1080mmは共通とし、壁接合面を全て覆うように設置した。厚さは鉛板で6mmと12mm、鋼板は6、12、19mmである。

打継ぎ部の接合面は、PCa部材をフラット面とした形状と段差を設けた形状の2種類とした。打継ぎ部の接合面は打継ぎコンクリートを打ち込む前に、PCa部材の打継ぎ面に接着剤を塗布した試験体と塗布しない試験体の2種類とした。接着剤は、無溶剤型の2液性エポキシ樹脂(SL-7703)である。

PCa部材の鉄筋量と材質、コンクリート強度、養生方法は、実製品と同様とした。打継ぎ部は無筋コンクリートとし、2分割のPCa部材を組み立てた後に打設した。コンクリートの配合と強度試験結果は表-1に示した。

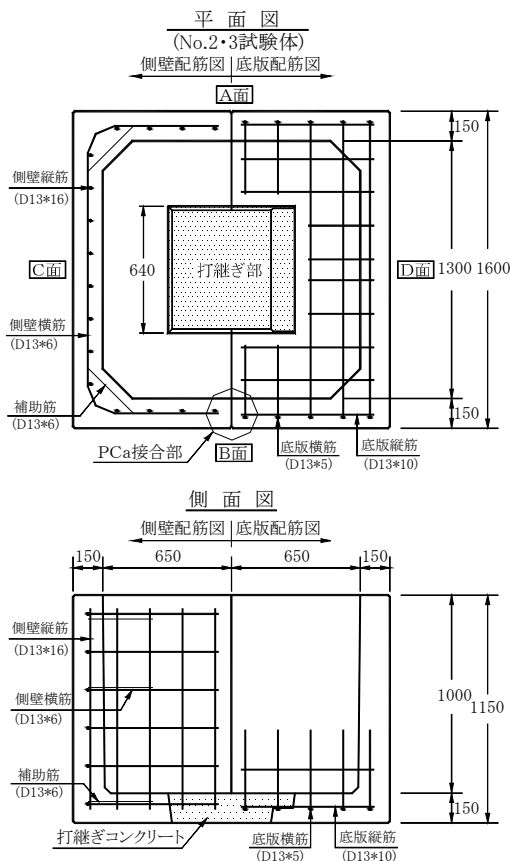


図-3 試験体の形状・寸法と配筋

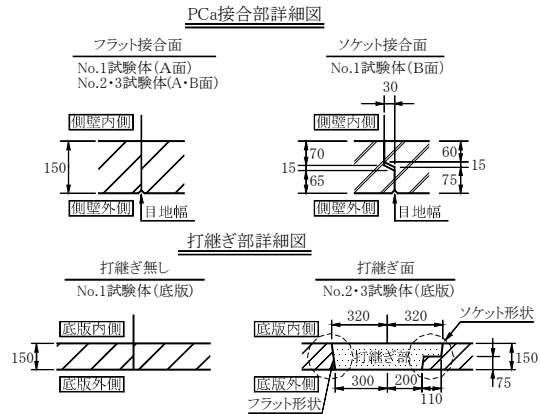


図-4 接合部の詳細

## (2) 放射性焼却灰

実験には放射性下水汚泥焼却灰を用いた。1袋約600kgの焼却灰をフレキシブルコンテナごと、試験体容器に格納した。放射能濃度は約4600Bq/kgである。使用した焼却灰は1種類であり、それぞれの計測面ごとに試験体容器の内側面に接するように設置した。そして試験体容器側面の計測時には、それぞれの計測面に対し焼却灰の接する面が同じ面になるように設置した。

## (3) 空間線量率の計測

空間線量率の計測位置を図-5に示す。No.1試験体は水平4方向で距離1.0mまでと底版下面の3箇所を測定した。水平方向は高さ1.0mで、壁中央のA面とB面の接合部、壁中央のC面とD面である。A、B、C面は、容器の側壁外面に鋼材を取り付けた状態でも、同様に外面位置での測定をした。No.2、3試験体は底版下面の3箇所であり、打継ぎ面2箇所と打継ぎ部の中央1箇所を測定した。No.1試験体の底版下面の計測箇所も同じ位置である。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回繰り返して、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空間線量率は、0.041~0.051(平均0.047)  $\mu$  Sv/hであった。

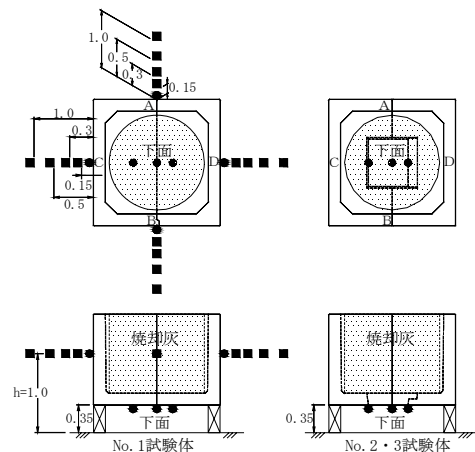


図-5 空間線量率の計測位置

### 3.2 測定結果と考察

#### (1) PCa部材同士の接合部における遮蔽性能

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-6に示す。各計測面の外側位置における空間線量率は、A面で  $0.108 \mu\text{Sv/h}$ 、B面で  $0.102 \mu\text{Sv/h}$ 、C面で  $0.098 \mu\text{Sv/h}$ 、D面で  $0.102 \mu\text{Sv/h}$  であり、ヤード自体の空間線量率（前述、平均  $0.047 \mu\text{Sv/h}$ ）を除外すると  $0.051 \sim 0.061 \mu\text{Sv/h}$  となる。ヤード自体の空間線量率を除外した容器無しの場合の  $0.341 \mu\text{Sv/h}$  と比較して 15.0~17.9%まで、大きく低減したことになる。

A, B面は接合面であるが一体面のC, D面との差は明確ではない。またA, B面の値は距離減衰も含めて差は小さく、形状の違いによる影響は少ないと言える。

A, B面における接合面の目地幅と外面位置での空間線量率の関係を図-7に示す。A, B面とも目地幅が1cmでは空間線量率の増加は見られないが、その後目地幅の増加とともに空間線量率も増加する。A面に対しB面の空間線量率が低い傾向ではあるが明確ではない。

#### (2) 鋼材の遮蔽効果

No.1 試験体におけるA, B, C面の容器外面に対し、鋼材の取り付け有無による空間線量率の関係を図-8に示す。鋼材を取り付けた時の空間線量率は、A面で  $0.042 \sim 0.085 \mu\text{Sv/h}$ 、B面で  $0.047 \sim 0.082 \mu\text{Sv/h}$ 、C面で  $0.046 \sim 0.072 \mu\text{Sv/h}$  に低減している。

鋼材ごとの遮蔽効果としては、鉛板の6, 12mmを取り付けることにより、ヤード自体の空間線量率まで低減される。鋼板では容器無しの場合と比較すると、各計測面の平均値では6mmで9.6%, 12mmで5.3%, 19mmで2.5%まで大きく低減する。接合面の形状が異なるA, B面、および一部部のC面の差は明確ではない。

#### (3) PCa部材と場所打ちの接合部における遮蔽性能

各試験体における底版下面の空間線量率を図-9に示す。計測箇所は下面中央、下面左側（打継ぎフラット面）、下面右側（打継ぎソケット面）である。

No.1 試験体の下面左側と右側の平均値は  $0.114 \mu\text{Sv/h}$  であり、PCa部材の一部部における計測値である。打継ぎ面における空間線量率は、接着剤無しのNo.2試験体では、フラット面で  $0.119 \mu\text{Sv/h}$ 、ソケット面で  $0.113 \mu\text{Sv/h}$ 、接着剤を打継ぎ面に塗布したNo.3試験体では、同じく  $0.108 \mu\text{Sv/h}$ 、 $0.112 \mu\text{Sv/h}$  である。容器無しの場合と比較してヤード自体の空間線量率を除外すると、12.6~14.9%まで低減したことになる。

各打継ぎ面での比較では、一部部に対して打継ぎ面で遮蔽効果が低減することはない、打継ぎ面の形状および接着剤の有無による遮蔽性能の差も認められない。

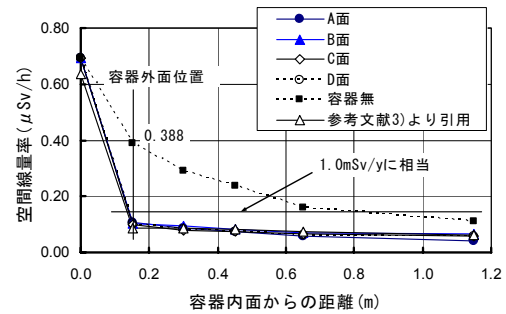


図-6 空間線量率と距離の関係

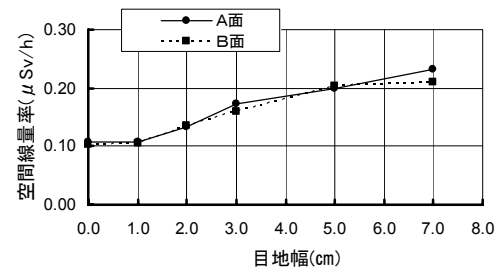


図-7 空間線量率と目地幅の関係

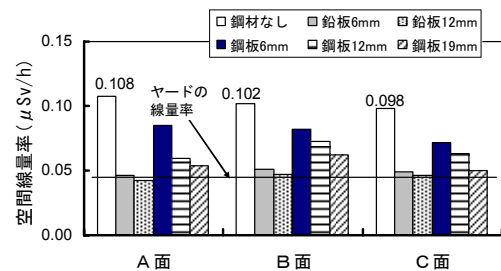


図-8 空間線量率と鋼材の関係

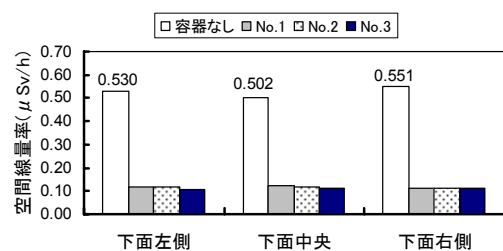


図-9 底版下面の空間線量率

### 4. 大型管理ヤードの提案

鉄筋コンクリート製容器の遮蔽性能と高分子材料の除染性能については、評価試験をしてきた<sup>3)</sup>。また本研究では、コンクリートのひび割れと遮蔽性能の関係、鉄筋コンクリート部材同士の接合部における遮蔽性能評価をした。これらの評価試験結果を基に、放射性除染廃棄物を保管するための大型管理ヤードを提案する。

提案する大型管理ヤードは高さ1m~6m、長さ2mのL型PCa部材を設置し、底版部は場所打ちコンクリート

を併用して構築する。提案する大型管理ヤードの例を図-10に示す。ヤードの短辺が5m程度までは、長さ1mのPCa蓋版で覆うことが可能である。

ヤードを構築する部材の寸法誤差・施工時の施工誤差等により、5mm程度までの目地幅は考慮しておく必要がある。本研究の範囲では目地幅1cmまでの遮蔽性能は確認した。しかし降雨等で除染廃棄物に水分が浸入すると放射性物質の流出が考えられるため、接合部における止水対策は必要となる。止水対策として、PCa部材同士の接合面はスポンジパッキンあるいはシリコーン樹脂によるシーリングを行う。底版部のコンクリート打継ぎ面は、打継ぎ用エポキシ樹脂接着剤で一体化を図る。

水分を含む廃棄物は、コンクリートに放射性物質が吸着することが考えられる。内面にエポキシ樹脂あるいはポリウレタン樹脂を塗装することで、吸着を防ぎ、除染を行うことが可能となる。また底版部については維持管理が困難である。ひび割れ追従性のあるポリウレタン樹脂材料を塗布することにより、放射性物質の流出対策効果が得られる。

除染廃棄物の処理についてはガイドライン<sup>5)</sup>が策定されているため、管理基準については準拠する必要がある。

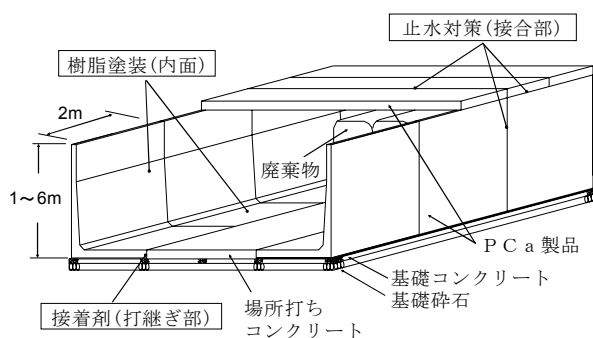


図-10 大型管理ヤードの提案例

## 5. まとめ

放射性除染廃棄物を安全に大量保管するためには、PCa部材と場所打ちコンクリート併用した大型管理ヤードが提案できる。PCa部材同士の接合部とPCa部材と場所打ちコンクリートの打継ぎ部の遮蔽性能、ひび割れに対する遮蔽性能試験を実施した。本研究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、 $\gamma$ 線透過率は厚さ15cmで15%程度である。
- 2) 幅0.2mm~0.8mm程度の曲げひび割れが存在する場合も健全な部材と比較して $\gamma$ 線透過率に差は見られず、照射方向の違いによる影響も受けない。
- 3) 幅0.3mm~2.0mm程度の貫通ひび割れが存在する場合も健全な部材と比較して $\gamma$ 線透過率に差は見

られない。

- 4) 鉛板は遮蔽効果があり、幅2.0mmの貫通ひび割れが存在する厚さ15cmのコンクリートと重ね合わせることで、 $\gamma$ 線透過率は厚さ6mmで12%、12mmで9%、19mmで6%である。
- 5) 鋼板は遮蔽効果があり、幅0.8mmの曲げひび割れが存在する厚さ15cmのコンクリートと重ね合わせることで、 $\gamma$ 線透過率は厚さ6mmで13%、12mmで10%、19mmで8%である。
- 6) 厚さ15cmの試験体容器では、4600Bq/kgの放射能濃度の焼却灰約600kgを格納した場合、外面での空間線量率はPCa部材同士の接合面の形状、接合面の有無による差はなく、目地幅が1cm程度であれば目地が無い場合と差は見られない。
- 7) 試験体容器において、PCa部材と打継ぎコンクリートとの打継ぎ面の外側の空間線量率は、打継ぎ面が健全な状態であれば打継ぎ面の形状、打継ぎ面の接着剤の有無に影響を受けない。
- 8) 試験体容器において、外面での空間線量率は、PCa部材同士の接合面およびPCa部材と打継ぎコンクリートとの打継ぎ面では、試験ヤードの空間線量率(平均0.047 $\mu$ 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<sup>6)</sup>の基準値以下であった。

## 謝辞

実験計画ではRSC研究会員社殿のご協力をいただき、また樹脂材料ではサンユレック(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(2013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) 平成23年法律第110号:平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法
- 2) 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
- 3) 飯塚 豊, 岡野 素之, 森田 俊哉, 辻 幸和: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, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.475-480, 2013.7
- 4) 日本コンクリート工学会:コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針-2013-, pp.115-142
- 5) 環境省:除染関係ガイドライン, 平成25年5月 第2版
- 6) 平成12年科学技術庁告示第10号第2号