

事故由来放射性物質に汚染された一般廃棄物の飛灰封込固形化実証試験

資源循環・廃棄物研究センター

1. 背景と目的

福島第一原発事故に伴って放出された放射性物質に汚染された廃棄物を焼却や熔融処理することにより、焼却や熔融飛灰の放射性物質濃度が 8,000 Bq/kg を超える事態が発生しており、これまでと同様の埋立処分ができない状況にある。埋め立てることができない飛灰は、フレキシブルコンテナに収納されて、施設内に保管されているが、数か月間の保管によって飛灰自体が固化してきている。平成 23 年 8 月 31 日に「8,000Bq/kg を超え 100,000Bq/kg 以下の焼却灰等の処分方法に関する方針について（環廃対発第 110831001 号、環廃産発第 110831001 号）」が環境省より発出されたが、8,000 Bq/kg を超過する焼却灰等の処分方法では、セメントで均質に混合し焼却灰が容易に崩れないように固化（以後、重金属等溶出抑制のためのセメント添加（一般的に固化と呼ばれているもの）と区別するため、「セメント固形化」とする）することが記されているが、数か月間フレキシブルコンテナ内で保管されている飛灰を均質に混合することができない状況にある。先の発出文には、セメント固形化と同等の接触や溶出防止効果のある他の方法であってもよい、とも述べられていることから、接触防止と溶出防止という観点から、フレキシブルコンテナを開封することなく、リース可能な設備投入によって、飛灰の入ったフレキシブルコンテナを、卵の殻のように封じ込めて固形化する手法について検討を行った。

本手法は、セメント固形化物の代替手法として現時点で認可されていないが、プラントを建設する必要がなく、小規模のセメントミルク打設設備と、固形化養生の場所を確保するのみで実施可能なことから、今後、ニーズが高まる可能性があるかと判断し、公表するものである。

2. 実証試験概要

(1) セメント固形化に求められる条件

放射性物質の濃度が 8,000 Bq/kg を超え 100,000 Bq/kg 以下の焼却灰等を固形化する理由として、従来のセメント固化やキレート処理では放射性物質の溶出抑制を図れないことから、セメント固形化することにより、

- ・ 焼却灰等と水との接触面積を低減させること
- ・ 焼却灰等からの放射性物質の溶出を抑制すること
- ・ 焼却灰等のセメント固形化物が容易に崩れないこと

を目的としている。これは、土壌汚染等に用いられる固化処理（Solidification / Stabilization treatment: SS treatment）と同様の考え方である。

(2) セメント封込固化化のイメージ

卵の殻のように封込固化化した飛灰入りのフレキシブルコンテナのイメージを図 1 に示す。飛灰入りのフレキシブルコンテナを開封すること無しにセメント固化化できることから、作業員や周辺環境に対する安全性を確保しながらの作業が可能となる。また、注入ポンプや仮設テント等への放射性物質の付着の心配が無いことから、設備についてもリリースが可能である。

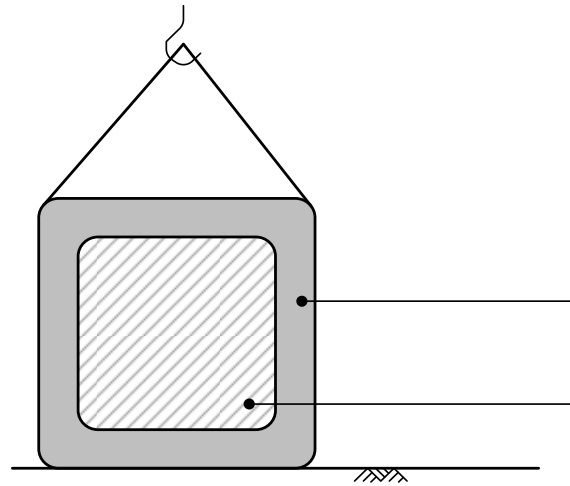


図 1：飛灰入りフレキシブルコンテナのセメント封込固化化のイメージ

(3) 使用固化材

本実証試験では、使用固化材として、セメント 300 kg を添加したセメントベントナイトモルタル（以下、CB300 とする）、セメント 500 kg を添加した CB500、急速固化材としてソイルサポート（以下、SS とする）の 3 種類を使用した。それぞれの固化材の硬化時間と 28 日養生後の一軸圧縮強度を表 1 に示す。また、固化材の配合を表 2 に示す。固化材 SS の硬化時間は短く、打設後、直ぐに移動させることが可能であるが、3 種の固化材の内、最もコストが高い。固化材として、CB を用いた理由は、固化化体に少しでも甚性を持たせて、塑性破壊によるクラックの発生を抑制することが目的である。

先に示した発出文章では、セメント固化化体の一軸圧縮強度が 0.98 MPa を閾値として、隔離層の設置方法が異なることになる。0.98 MPa はセメント固化化体としては大きな強度ではないことから、できる限り固化化体の強度を 0.98 MPa 以上とし、埋立時の作業負荷を軽減させることが望ましいことから、本実証試験でも一軸圧縮強度は 0.98 MPa 以上となることを前提として実施した。

表 1：固化材 3 種の硬化時間と一軸圧縮強度

固化材名	硬化時間	一軸圧縮強度 (28 日養生)
CB300	1 日以上	1.28 MPa
CB500	1 日以上	2.61 MPa
SS	1～5 分程度	2.50 MPa

固化材の比重は、CB300が1.258、CB500が1.370、SSが1.166であった。

表2：固化材3種の材料配合一覧

CB300	CB500	SS	
セメント 300 kg ベントナイト 90 kg 水 868 L (合計 1,000 L)	セメント 500 kg ベントナイト 50 kg 水 820 L (合計 1,000 L)	A液： 主材 L 187.5 kg 促進剤 15.0 kg 添加剤 1.0 L 水 428 L (合計 500 L)	B液： 硬化剤 110 L 水 390 L + 500

(4) セメント封込固形化プラントの使用機材

実証試験での設備配置図を図2に、試験状況を写真1に示す。また、使用機械の一覧を表3に示す。配置図における必要スペースは、固形化体3個分の打設スペースを含んで約100 m²程度である。この必要スペースは、固形化体を同時に作成する個数に依存する。固形化へのセメントミルク注入は、ポンプの性能に依存することから、1日に20体程度の打設までは容易と思われる。仮置きされている飛灰入りフレキシブルコンテナが無ければ、1日の飛灰排出量は1~4トン程度であることが推定されるため、仮置きされたフレキシブルコンテナの処理が終われば、作業スペースとしては、100 m²程度で処理可能となる。

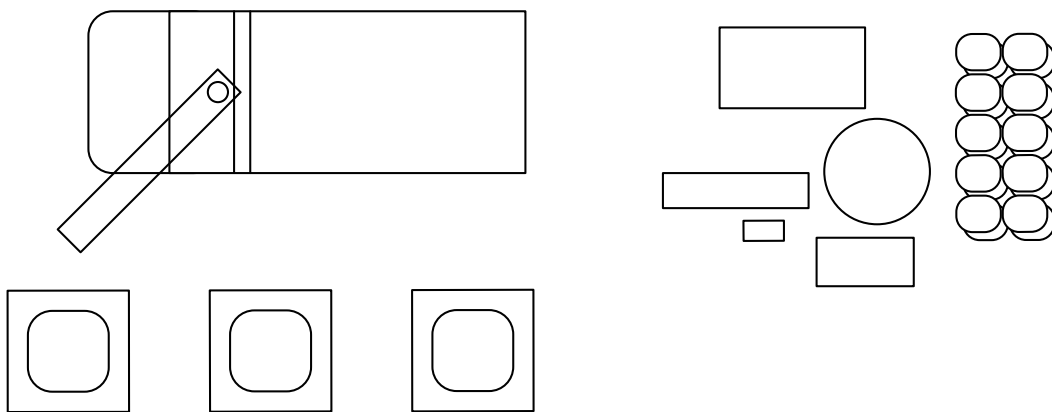


図2：設備配置図

表 3：セメント封込固化化の実証試験に用いた使用機械

機械名称	型 式	仕 様	出 力
注入ポンプ	CPW-5		3.7 kW
攪拌ミキサーA	MVM-5	セメント攪拌用	2.2 kW
攪拌ミキサーB	単槽ミキサー	硬化材攪拌用	1.5 kW
流量計	EK-26S	充填量確認記録計	1.0 kW



(a) 使用機器設備



(b) 固化化体の状況

写真 1：試験状況

3. 試験手順

以下に実証試験で実施した試験手順を示す。

- ① 外枠を組み立てる。浮き上がり防止用の鋼材を設置する。
- ② 遮水性の高いフレキシブルコンテナ（ライナータイプ）を外枠に設置し、外部フレキシブルコンテナのたるみを防止するため、吊り帯を上部につり上げ固定し、外部フレキシブルコンテナの底部に底敷き部材を設置する。
- ③ 外部フレキシブルコンテナ内に、飛灰入りフレキシブルコンテナを挿入する。
- ④ 飛灰入りフレキシブルコンテナよりも比重の大きいセメントミルクを充填するため、飛灰フレキシブルコンテナに浮力が働くことが懸念されるため、浮き上がり防止措置を講じる。
- ⑤ 固化材であるセメントミルク等を注入し、静置養生する。
- ⑥ 固化材の硬化を確認後、移動処理する。

本実証試験では、封込固化化による空間線量率の低減効果についても検証しているが、これは、固化材注入後に実施した。空間線量率は、遮蔽材料の密度と厚さに依存するが、打設直後であっても、養生後であっても密度に大きな差違は無いと判断されたことから、打設後 1 日での測定を行った。

4. 実験結果

(1) 空間線量率

飛灰入りフレキシブルコンテナ直近、外部フレキシブルコンテナ直近（固化材注入前と注入後）にて空間線量率の測定を行った。測定位置図を図3、測定結果を表4に示す。この時の飛灰の放射性物質濃度は、13,000 Bq/kgであった。飛灰フレキシブルコンテナから5 m離れた位置での空間線量率の測定も実施した。固化材の注入前では、0.33 μ Sv/hであったが、固化材注入後は0.18 μ Sv/hとなった。当該地域の空間線量率は、0.12~0.15 μ Sv/hである。

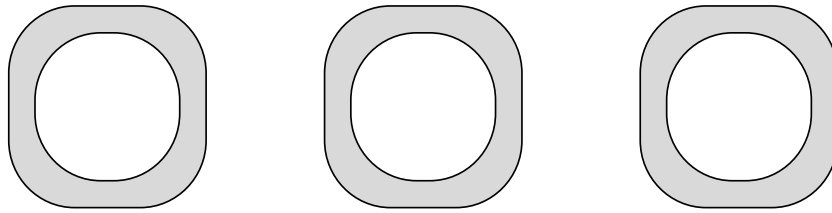


図3：空間線量率の測定位置図（平面図）

表4：空間線量率測定結果

位置	CB300			CB500			SS		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
注入前	1.79	2.05	1.85	1.95	2.70	2.30	1.73	3.00	2.30
注入後	0.95	0.90	0.71	0.28	0.68	0.72	0.67	0.66	0.74
減衰率	64 %	56 %	61 %	89 %	74 %	68 %	74 %	78 %	67 %
飛灰直近	2.65			2.54			2.63		

(2) 一軸圧縮強度試験結果

モールド缶にて養生した固化材の一軸圧縮強度の試験結果を表5に示す。CB300では、セメント量が300 kgと少ないため、7日養生強度で0.98 MPa以上の強度が得られない結果となったが、CB500に比較してベントナイト量が相対的に多くなるため、ブリージング率が少なかった。CB500のセメント添加量は500 kgであるため、3日養生強度で0.98 MPaを超過する結果を得ることができた。SSでは、3日養生強度で0.98 MPa以上を確保することができたが、本来の設計ゲルタイムである1~5分程度では硬化しなかった。これは、水温・気温による影響と考えられる。

28日養生の試験結果は現在、測定待ちの状況であるが、CB500、SSについては、7日養生強度で0.98 MPaを超えていることから、7日養生にて型枠の解体と埋立処分が可能となっている。

表 5：固化材毎の一軸圧縮試験強度結果（単位は MPa）

養生日数	CB300		CB500		SS	
	圧縮強度	平均値	圧縮強度	平均値	圧縮強度	平均値
3 日	0.17	0.14	1.07	1.12	1.57	1.42
	0.13		1.12		1.39	
	0.13		1.17		1.30	
7 日	0.25	0.27	2.40	2.20	1.94	2.12
	0.31		2.32		2.06	
	0.26		1.89		2.35	
28 日	測定中		測定中		測定中	
	測定中		測定中		測定中	
	測定中		測定中		測定中	

5. 考察

(1) 固形化体の養生後の状態と固化材の選定

打設 7 日後では、CB300 と CB500 の表面に薄い剥離層の存在が確認されたが、それ以深ではクラック等は確認できていない。CB モルタルは、セメント量の増加で強度が得られ、ベントナイト量の増加でブリージング率を減少させることができることが分かった。SS では、表面全体にクラックが生じ、硬化が不十分となることが観察された。SS の固形化失敗は、打設時の水温の影響と考えられ、急速固化材の設計ゲルタイムを決める際に、水温の調整が必要であることが明らかとなった。

固化材 3 種共に、飛灰入りフレキシブルコンテナの内部に予想以上に固化材が浸潤し、設計数量以上の打設量が必要であった。逆に、飛灰入りのフレキシブルコンテナへのセメントミルク直接注入では、予想以上に固化材が浸潤しないことが試験的に求められていたが、これは、飛灰入りフレキシブルコンテナ内への注入速度に依存している可能性が高い。今回の実証試験のように、飛灰フレキシブルコンテナの外側に固化材と注入すると、フレキシブルコンテナ内の空気が浮力によって抜けてくるが、その速度であれば、フレキシブルコンテナ内にセメントミルクを注入することが可能と考えられる。よって、セメントミルクを外側フレキシブルコンテナ内に注入すると同時に、飛灰フレキシブルコンテナ内にもセメントミルクをゆっくりと注入していくことが必要と考えられる。

(2) 外側フレキシブルコンテナの要求性能

実証試験では、外側フレコンとして 1.4 m 直径のライナータイプのフレキシブルコンテナ (ST バック) を用いた。写真 2 に飛灰フレコンの設置状況を示す。実際、外側フレキシブルコンテナと飛灰フレキシブルコンテナのクリアランスを保つのが難しく、打設途中の浮力と外力によってクリアランスが不均一となる減少が確認された。今回は、ガイドとして円形塩ビパイプを用いたが、より強度の強い溶接金網等の材料によってクリアランスを保つようにすることが必要と考えられる。



写真2：飛灰フレキシブルコンテナの設置状況

外側フレキシブルコンテナは、打設途中の固化材の漏洩を防止することも目的として挙げられる。今回使用した ST バックは、ライナータイプであることから、固化材の漏洩は確認されず、良好な打設を行うことが可能であった。また、固化材硬化後の外側フレキシブルコンテナの役割として、二重遮水としての役割も考えられる。ただし、打設した固化材の品質が良好であり、十分な強度も有する場合、外側フレキシブルコンテナには、特に遮水の品質を要求しなくても良い可能性がある。ライナー式のフレキシブルコンテナは高価であるため、その利用方法については、経済性と安全性の観点から、より慎重な選択が必要と考えられる。

最終処分場に埋め立てられることを考えた時、外側フレキシブルコンテナの形状は、矩形である方が望ましい。本実証試験では、型枠を用いずに円形のまま打設したが、きれいな円形となってしまったことから、埋立時には余分な隙間ができてしまうことが懸念される。ただし、埋立時のフレキシブルコンテナの隙間は、放射性物質に汚染されていない土壌等を充填することになっているため、隙間が小さすぎても埋立時の土壌充填の施工性が悪くなることも考えられる。このことから、外側フレキシブルコンテナの形状は、埋立時の空隙充填材料とその施工方法を考慮しながら決定する必要がある。

6. 実用化に向けた提案

今回の実証より得られた知見を以下に述べる。

- ・ 外側フレキシブルコンテナは、直径 1,300～1,400 mm 程度、高さ 1,200～1,300 mm 程度の大きさの遮水性能（固化材の漏洩防止）を有するものを用いることで封込固化化を行うことが可能である。
- ・ 型枠を用いて、外側フレキシブルコンテナを固定することで、容易に飛灰フレキシブルコンテナの設置（挿入）が可能である。
- ・ 上述の外側フレキシブルコンテナを用い、適切なクリアランスを確保するガイドを設置することで、100～200 mm 程度の厚さで固化材を注入硬化することが可能である。
- ・ 固化材には CB モルタルを用い、硬化時間を 2 分程度にする促進剤等を利用することで、養生期間を短くすることが可能である。短い養生期間によって、ある期間中に固化できる封込固化化体の数量が決まり、必要ヤードスペースにも影響することから、固化時間

と強度、ブリージング率、甚性、施工性に考慮した固化材の設計が必要である。

- ・ 今回の実証試験における CB500 では、クリアランスの改善方法等を実施したとして、1 体当たり、80,000 円程度のコストが必要であることが算定されたが、セメント固化プラントを設置して固化体を作成するよりも安価な結果となった。
- ・ CB500 のセメント封込固化体は、1,300 mm の矩形型枠を使用したとしても 1 体当たり 2.5 トン前後となり、通常の重機による吊り上げと移動が可能な重量となった。ただし、外側フレキシブルコンテナも 2.5 トン対応の強度が必要であることから、フレキシブルコンテナとその重量には注意が必要である。
- ・ 封込固化化によって、空間線量率を 70% 前後減少させることが可能であり、作業時の被曝量や、埋立後の空間線量率への影響を最小限に抑えることが可能である。
- ・ 固化プラント設備は、車上プラントサイズで対応可能であり、小中規模である数百体程度の固化化では、費用対効果が良いことが想定される。

以上のことから、いくつかの確認点や追加試験の必要性は感じられたものの、セメント封込固化の実用性が確認され、即時的な対応が可能な固化技術であるといえる。改善点等も考慮したセメント封込固化の作業フローについて図 4 に示す。

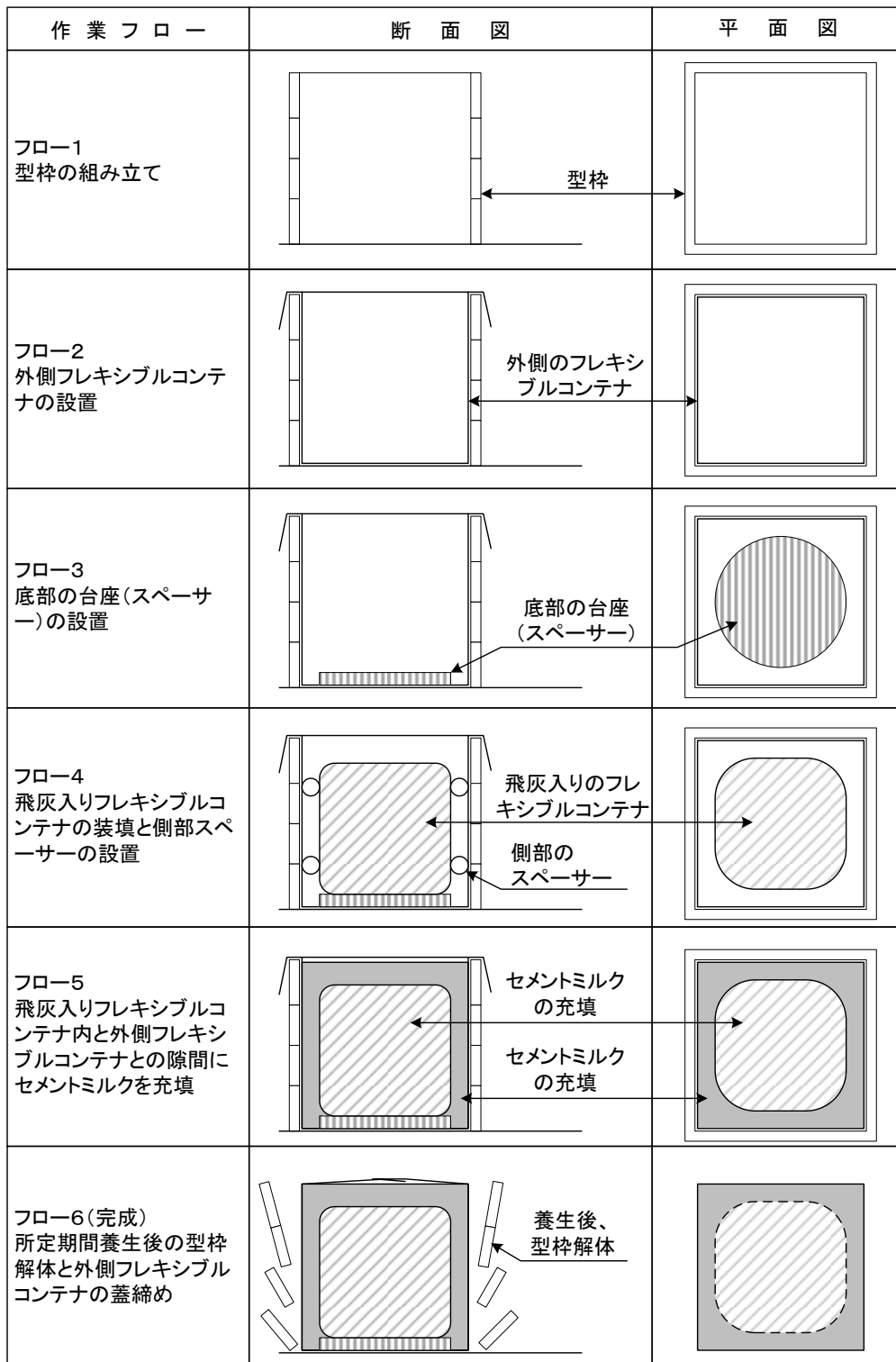


図4：飛灰フレキシブルコンテナのセメント封込固形化の作業フロー