

均質又は均一固化体等の製作事例について

2021年3月

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

目 次

第1章 背景及び目的.....	1-1
第2章 均質又は均一固化体の製作の概要.....	2-1
2.1 均質又は均一固化体に求められる要件.....	2-1
2.1.1 技術基準からの要件.....	2-1
2.1.2 埋設施設の受入要件.....	2-1
2.1.3 廃棄体輸送上の要件.....	2-2
2.2 均質又は均一固化体の対象廃棄物と固型化方式.....	2-2
2.2.1 均質又は均一固化体の対象廃棄物.....	2-2
2.2.2 均質又は均一固化体の固型化方式.....	2-3
2.3 均質又は均一固化体の製作工程.....	2-5
2.3.1 セメント固化.....	2-5
(1) インドラムミキシング方式.....	2-5
(2) アウトドラムミキシング方式.....	2-6
(3) 真空注入混合方式.....	2-8
(4) ペレット注入混合方式.....	2-8
2.3.2 アスファルト固化.....	2-10
(1) サーマルプロセッサ方式（混和機方式）.....	2-10
(2) 薄膜蒸発缶方式.....	2-11
2.4 均質又は均一固化体の製作において管理する要件.....	2-12
2.4.1 セメントによる固型化の場合.....	2-12
(1) 固型化材料等.....	2-12
(2) 配合比（廃棄物／固型化材料等 など）.....	2-12
(3) 廃棄物／固型化材料等の投入順序.....	2-12
(4) 練混ぜ方法（固型化材料等の練混ぜ速度及び練混ぜ時間）.....	2-12
(5) 混合方法.....	2-12
(6) 注入速度.....	2-13
(7) 容器の上部空隙.....	2-13
(8) 養生（室温及び期間）.....	2-13
(9) 蓋の取り付け.....	2-13
2.4.2 アスファルトによる固型化の場合.....	2-13
(1) 固型化材料等.....	2-13
(2) 配合比（廃棄物中の固形分／アスファルト）.....	2-13
(3) 廃棄物／固型化材料等の投入順序.....	2-13
(4) 練混ぜ方法（廃液の供給速度、練混ぜ温度及び練混ぜ速度）.....	2-13
(5) 容器の上部空隙.....	2-14
(6) 蓋の取り付け.....	2-14

第3章 均質又は均一固化体の製作方法にかかる事例.....	3-1
3.1 廃棄体の製作における適切な運転条件に関わる事例.....	3-1
3.1.1 セメント固化.....	3-1
(1) インドラムミキシング方式 ^[2]	3-1
(2) アウトドラムミキシング方式 ^[3]	3-2
(3) 真空注入混合方式 ^[2]	3-3
(4) ペレット注入混合方式 ^{[4][5]}	3-4
3.1.2 アスファルト固化.....	3-7
(1) サーマルプロセッサ方式（混和機方式） ^[2]	3-7
(2) 薄膜蒸発缶方式 ^[2]	3-8
3.2 製作したセメント固化体の一軸圧縮強度に関わる事例.....	3-10
3.2.1 インドラムミキシング方式及びアウトドラムミキシング方式 ^[2]	3-10
(1) 一軸圧縮強度と超音波伝播速度の関係.....	3-10
(2) 一軸圧縮強度と配合の関係.....	3-11
(3) 適切な練り混ぜを行った廃棄体の一軸圧縮強度.....	3-13
3.2.2 真空注入混合方式 ^[2]	3-14
(1) 一軸圧縮強度と超音波伝播速度の関係.....	3-14
(2) 一軸圧縮強度と配合の関係.....	3-15
(3) 適切な混合を行った廃棄体の一軸圧縮強度.....	3-16
3.2.3 ペレット注入混合方式 ^{[5][6]}	3-17
(1) セメントガラス固化体の一軸圧縮強度と超音波伝播速度の関係.....	3-17
(2) ペレット強度とセメントガラス固化体の一軸圧縮強度との関係.....	3-17
(3) セメントガラス固化体の一軸圧縮強度.....	3-18
3.3 廃棄体の輸送に係る廃棄体条件 ^{[7][13]}	3-21
3.3.1 廃棄体を輸送する場合の輸送物に係る基準.....	3-21
3.3.2 輸送容器を使用して廃棄体を輸送する場合の廃棄体の管理.....	3-21
(1) 廃棄体の表面線量当量率管理の目安.....	3-21
(2) 廃棄体種類に関する管理.....	3-22
(3) 外運搬規則 第九条第1項に適合した輸送容器に収納する廃棄体の重量管理の目安.....	3-22
第4章 セメント固化体破砕物充填固化体の製作方法にかかる事例.....	4-1
4.1 セメント固化体破砕物充填固化体の製作方法 ^[14]	4-1
4.1.1 セメント固化体破砕物充填固化体の製作事例 ^[15]	4-1
(1) セメント破砕物の吸水率の測定.....	4-1
(2) 破砕物充填固化体の製作.....	4-2
(3) セメント破砕物充填固化体の製作結果.....	4-5
(4) 模擬固化体断面の観察結果.....	4-6
(5) セメント破砕物充填固化体の圧縮強度.....	4-7
第5章 参考文献.....	5-1

目 次

図 2-1	インドラムミキシング方式による固型化のフロー	2-5
図 2-2	インドラムミキシング方式のセメント固化装置の一例 ^[1]	2-6
図 2-3	アウトドラムミキシング方式による固型化のフロー	2-7
図 2-4	アウトドラムミキシング方式のセメント固化装置の一例 ^[1]	2-7
図 2-5	真空注入混合方式による固型化のフロー	2-8
図 2-6	真空注入混合方式のセメント固化装置の一例 ^[1]	2-8
図 2-7	ペレット注入混合方式による固型化のフロー	2-9
図 2-8	ペレット注入混合方式のセメント固化装置の一例	2-9
図 2-9	サーマルプロセッサ方式（混和機方式）による固型化のフロー	2-10
図 2-10	サーマルプロセッサ方式（混和機方式）のセメント固化装置の一例 ^[1]	2-10
図 2-11	薄膜蒸発缶方式による固型化のフロー	2-11
図 2-12	薄膜蒸発缶方式のセメント固化装置の一例 ^[1]	2-11
図 3-1	インドラムミキシング方式のセメント固化装置の攪拌装置の形状	3-1
図 3-2	セメント固化体の均一性の試験結果：真空注入混合方式 ^[12]	3-14
図 3-3	ペレット充填率及び空隙率の関係	3-5
図 3-4	空隙の大きさと注入時間、速度の関係	3-5
図 3-5	セメントガラス固化体からのコアサンプリング箇所	3-6
図 3-6	超音波伝播速度と一軸圧縮強度の関係（ミキシング方式）	3-11
図 3-7	セメント／廃液比と一軸圧縮強度の関係（ミキシング方式、濃縮廃液）	3-12
図 3-8	セメント／水比と一軸圧縮強度の関係（ミキシング方式、フィルタスラッジ）	3-12
図 3-9	セメント／水比と一軸圧縮強度の関係（ミキシング方式、使用済樹脂）	3-13
図 3-10	一軸圧縮強度の頻度分布（ミキシング方式、濃縮廃液）	3-13
図 3-11	一軸圧縮強度の頻度分布（ミキシング方式、フィルタスラッジ）	3-14
図 3-12	一軸圧縮強度の頻度分布（ミキシング方式、使用済樹脂）	3-14
図 3-13	超音波伝播速度と一軸圧縮強度の関係（真空注入混合方式）	3-15
図 3-14	セメント／廃液比と一軸圧縮強度の関係（真空注入混合方式）	3-16
図 3-15	一軸圧縮強度の頻度分布（真空注入混合方式）	3-16
図 3-16	セメントガラス固化体の超音波伝播速度と一軸圧縮強度の関係	3-17
図 3-17	バインダ添加率と一軸圧縮強度（既往例）	3-18
図 3-18	水／セメントガラス比による一軸圧縮強度の変化	3-19
図 3-19	ペレット長さによる一軸圧縮強度の変化	3-19
図 4-1	セメント破砕物充填固化体の製作方法	4-1
図 4-2	吸水率の経時変化	4-2
図 4-3	破砕物の質量別のヒストグラム	4-4
図 4-4	破砕物の収納状況	4-4
図 4-5	切断面の状態	4-7

表 目 次

表 2-1	均質又は均一固化体の対象廃棄物.....	2-2
表 2-2	ドラム缶廃棄体製作検査標準の適用範囲とされている対象廃棄物ごとの均質又は均一固化体の固型化方式.....	2-4
表 3-1	A タイプの攪拌装置の関連試験データ ^[8]	3-2
表 3-2	A タイプの攪拌装置の試験条件 ^[8]	3-2
表 3-3	D タイプの攪拌装置の関連試験データ.....	3-2
表 3-4	D タイプの攪拌装置の試験条件.....	3-2
表 3-5	アウトドラムミキシング方式の固型化に関する試験条件.....	3-2
表 3-6	コアサンプルの密度の試験結果.....	3-3
表 3-7	真空注入混合方式のセメント固化装置の運転条件.....	3-3
表 3-8	模擬廃棄物種類と形状.....	3-4
表 3-9	セメントガラス固化体の均一性確認試験の試験条件.....	3-6
表 3-10	セメントガラス固化体の比重及び硬度の分布の測定結果.....	3-6
表 3-11	アスファルト中への廃棄物混合限度.....	3-7
表 3-12	サーマルプロセッサ方式（混和機方式）によるアスファルト固化体の関連データ... 3-7	3-7
表 3-13	アスファルト固化体の均質性（硫酸ナトリウム）.....	3-9
表 3-14	アスファルト固化体の均質性（ほう酸ナトリウム）.....	3-9
表 3-15	アスファルト固化体の均質性（硫酸ナトリウム） ^[11]	3-9
表 3-16	セメントガラス固化体の製作条件.....	3-18
表 3-17	セメントガラス固化体の一軸圧縮強度測定結果.....	3-20
表 3-18	遮蔽なし輸送容器に収納する廃棄体の表面線量当量率の目安の例.....	3-21
表 3-19	輸送容器に収納する廃棄体重量の管理の目安の例.....	3-22
表 4-1	破砕物の大きさ、数量、質量などの一覧.....	4-3
表 4-2	模擬固化体製作記録.....	4-6
表 4-3	セメント破砕物充填固化体の圧縮強度.....	4-7

第1章 背景及び目的

日本原燃株式会社の六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターは、1992年（平成4年）に、原子力発電所の運転に伴い発生した低レベル放射性廃棄物で、濃縮廃液、使用済樹脂、焼却灰などをセメント、アスファルト、プラスチックを用いてドラム缶に固型化した廃棄体（均質又は均一固化体）を受け入れる1号埋設施設の操業を開始している。これに先立ち、電気事業者等においては、廃棄体の製作性や技術基準への適合性を確認するための各種試験が実施されているが、それらは1970年代から1980年代に実施されたものが多く、得られた技術知見は、各検討機関において保管されている状況にある。

一方、2000年（平成12年）に操業を開始した2号埋設施設に埋設処分する金属類やプラスチックなどをセメント系充填材（モルタル）で一体となるように固型化した廃棄体（充填固化体）については、電気事業者において廃棄体の製作性や技術基準への適合性を確認するための各種試験結果等を「充填固化体の標準的な製作方法」という技術図書として取りまとめた上で公開し、新知見が得られれば、これを適宜改訂していく運用が実施されている。

このような状況を踏まえ、貴重な技術知見が散逸することのないように、均質又は均一固化体についての技術知見についても、技術図書として体系的に取りまとめたものである。

第2章 均質又は均一固化体の製作の概要

ここでは、均質又は均一固化体の製作方法にかかる事例の記述に先立ち、均質又は均一固化体の製作の概要を示す。

2.1 均質又は均一固化体に求められる要件

原子力発電所から発生する低レベル放射性廃棄物を廃棄体として埋設処分するためには、“核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則” 第八条に掲げる技術上の基準（以下、「技術基準」という）に適合した廃棄体を製作する必要がある。また、技術基準のほかに、埋設施設の受入要件や廃棄体輸送上の要件にも適合している必要がある。

2.1.1 技術基準からの要件

技術基準から導き出される廃棄体製作上の要件及び廃棄体検査上の要件は、以下のとおりである。

- ・ 放射性廃棄物を固型化することによって「容易に漏えいしない」性状とする*1)
- ・ 放射性物質が廃棄体から「容易に飛散しない」ように容器に固型化する*2)
- ・ 放射能濃度が埋設事業許可申請書等に記載した最大放射能濃度を超えない
- ・ 表面の放射性物質の密度が表面汚染密度限度の十分の一を超えない
- ・ 廃棄体容器への収納に制限を受ける物質を含まない
- ・ 耐埋設荷重強度をもたせる
- ・ 放射性廃棄物を示す標識を表示する
- ・ 廃棄体整理番号と記録とのトレーサビリティを確保する

なお、*1)及び*2)の要件に対応することで、落下事故を踏まえても、飛散又は漏えいする放射性物質の量は極めて少なくなると考えられる。

2.1.2 埋設施設の受入要件

埋設施設の設計条件及び埋設事業許可申請書等の前提とした均質又は均一固化体への要求事項は、以下のとおりである。

- ・ 廃棄体質量が規定値以下
- ・ 廃棄体表面線量当量率が規定値以下
- ・ 廃棄体内の空隙が規定値以下
- ・ 廃棄体の分配係数が規定値以上

- ・ 化学的安定性がある
- ・ 放射性廃棄物の発生などからの経過期間が規定値以上
- ・ 廃棄体種類の割合が規定値以上
- ・ 廃棄体からの飛散率が規定値以下
- ・ 著しい破損がない

2.1.3 廃棄体輸送上の要件

輸送からの均質又は均一固化体への要求事項は、以下のとおりである。

- ・ 輸送物の放射能濃度及び放射エネルギーが規定値以下
- ・ 輸送物の線量当量率が規定値以下
- ・ 輸送物の総質量が設計条件以下

2.2 均質又は均一固化体の対象廃棄物と固型化方式

2.2.1 均質又は均一固化体の対象廃棄物

均質又は均一固化体の対象廃棄物は、表 2-1 のとおりである。

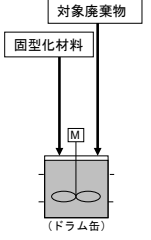
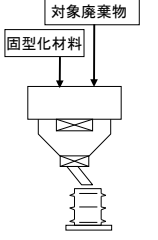
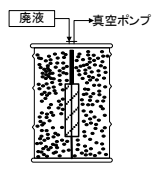
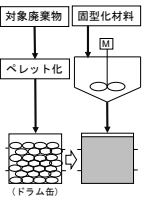
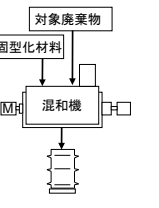
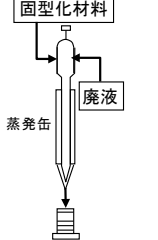
表 2-1 均質又は均一固化体の対象廃棄物

廃棄物区分	主な放射性廃棄物の種類	原廃棄物の性状又は詳細	前処理、固型化 (前処理は必要に応じて適用)
液体状の放射性廃棄物	濃縮廃液	ホウ酸、硫酸などを含む廃液を中和処理し、蒸発濃縮した廃液	前処理：蒸発処理など 固型化：セメント固化、アスファルト固化など
粉体状又は粒状の放射性廃棄物	使用済樹脂など	系統水の浄化系から発生するイオン交換樹脂、フィルタスラッジなど	前処理：湿式分解、焼却処理など 固型化：セメント固化
	ペレット	濃縮廃液を乾燥粉体化し、圧縮成型したペレット	前処理：乾燥、成型処理など 固型化：セメント固化
	焼却灰	可燃物又は難燃物を焼却処理した灰	前処理：破碎など 固型化：セメント固化

2.2.2 均質又は均一固化体の固型化方式

ドラム缶廃棄体製作検査標準の適用範囲とされている対象廃棄物ごとの均質又は均一固化体の固型化方式は、表 2-2 のとおりである。なお、この他にも、濃縮廃液を乾燥した上でプラスチックと練り混ぜて均質に固型化した廃棄体などがあるが、これらは、既に埋設処分が終わっている廃棄体、又は発生数量が少ない廃棄体であることから、ドラム缶廃棄体製作検査標準の適用範囲からは除外されている。

表 2-2 ドラム缶廃棄体製作検査標準の適用範囲とされている対象廃棄物ごとの均質又は均一固化体の固化方式

廃棄体区分		均質又は均一固化体					
固化方法		セメント固化				アスファルト固化	
方式		インドラム ミキシング方式	アウトドラム ミキシング方式	真空注入 混合方式	ペレット注入 混合方式	サーマルプロ セッサ方式	薄膜蒸発缶 方式
放射性 廃棄物の 区分など	主な 放射性廃棄物 の種類など						
液体状の 放射性廃棄物	濃縮廃液 ^{a)}	●	●	●	—	●	●
粉体状又は 粒状の 放射性廃棄物	使用済樹脂など	●	—	—	—	—	—
	ペレット (破碎後)	●	—	—	●	—	—
	焼却灰	—	●	—	—	—	—
記号説明		●：ドラム缶廃棄体製作検査標準の適用対象範囲のもの。 —：現段階において、廃棄体の製作の実績又は実績があっても今後の製作計画がないため、廃棄体の製作方法に関しては適用範囲外のもの。					
注^{a)}		蒸発固化体などを破碎したものを水に溶かした放射性廃棄物を含む。					

2.3 均質又は均一固化体の製作工程

均質又は均一固化体とするための基本的な廃棄体の製作工程は、以下のとおりである。

- ・ 貯蔵設備からの放射性廃棄物の抽出し
- ・ 前処理（必要に応じて、中和処理など）
- ・ 固型化（練り混ぜなど及び養生）

2.3.1 セメント固化

(1) インドラムミキシング方式

インドラムミキシング方式による固型化のフローを、図 2-1 に示す。インドラムミキシング方式は、図 2-2 に示す固化装置によって、容器内にて廃棄物と固型化材料等（セメント）とを練り混ぜ、廃棄物を、セメントが水和反応によって硬化する性質を利用して固型化する方式である。インドラムミキシング方式の運転工程は、次に示す 3 段階の工程からなるバッチプロセスである。

- ・ 廃棄物などの投入
- ・ セメントなどの投入
- ・ 練り混ぜ

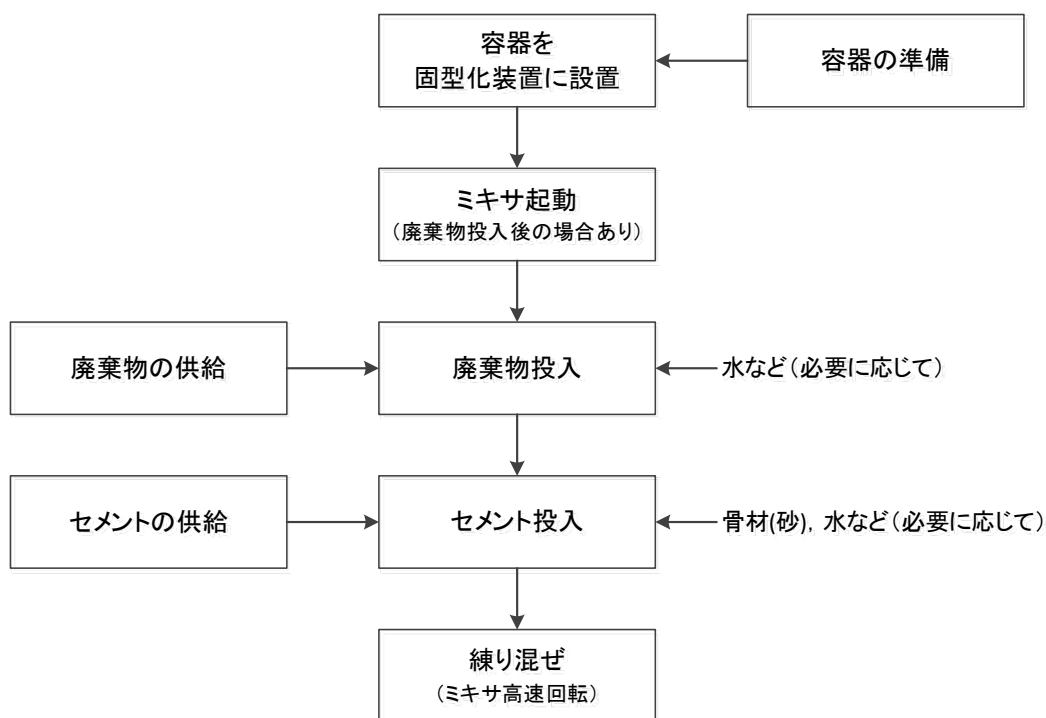


図 2-1 インドラムミキシング方式による固型化のフロー

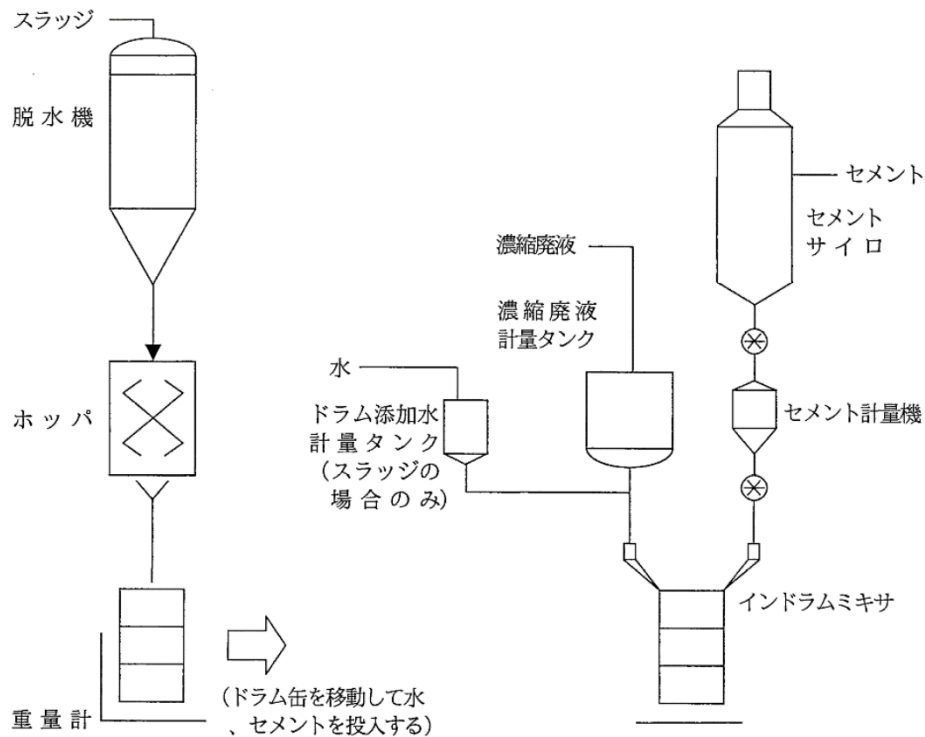


図 2-2 インドラムミキシング方式のセメント固化装置の一例¹⁾

(2) アウトドラムミキシング方式

アウトドラムミキシング方式による固型化のフローを、図 2-3 に示す。アウトドラムミキシング方式は、図 2-4 に示す固化装置によって、廃棄物と固型化材料等（セメント）とを練り混ぜた後に容器に排出し、セメントが水和反応によって硬化する性質を利用して、廃棄物を固型化する方式である。アウトドラムミキシング方式の運転工程は、次に示す 3 段階の工程からなるバッチプロセスである。

- ・ 廃棄物及びセメントの投入
- ・ 練り混ぜ
- ・ 容器に排出

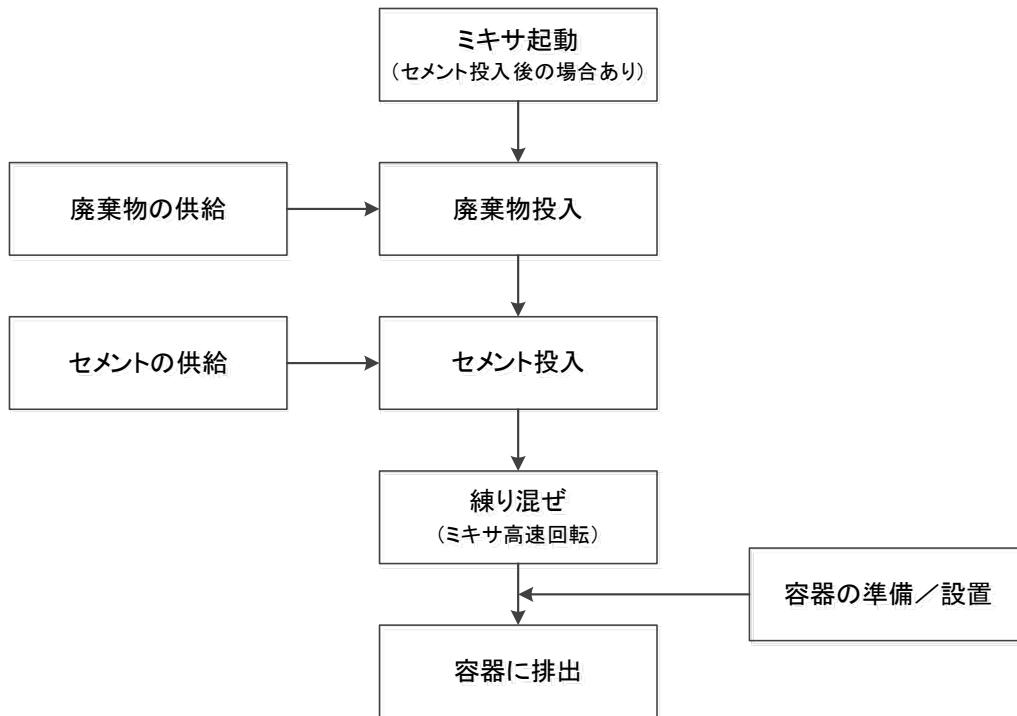


図 2-3 アウトドラムミキシング方式による固型化のフロー

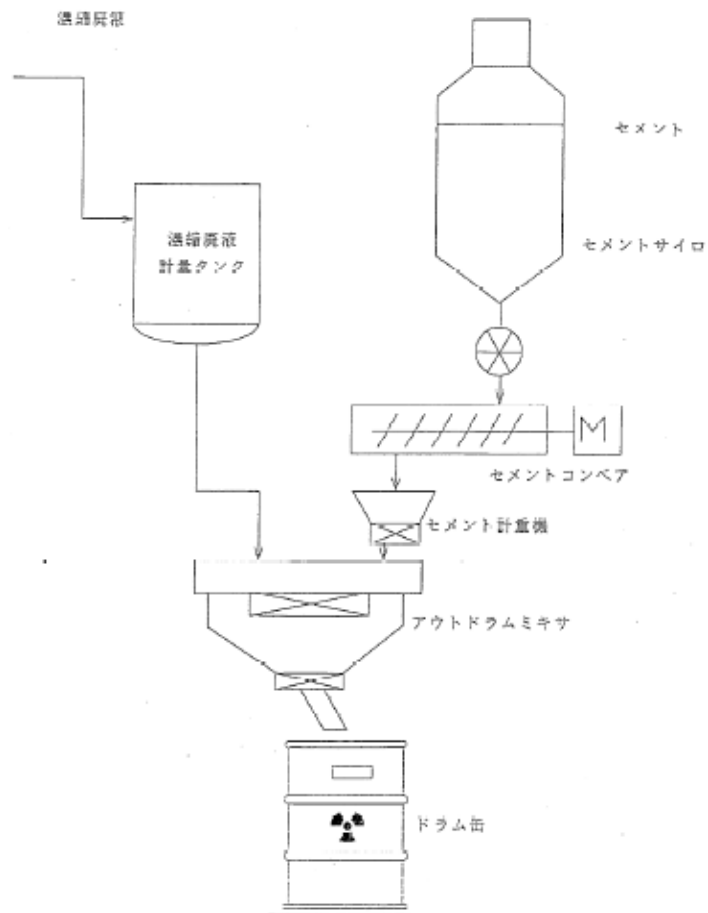


図 2-4 アウトドラムミキシング方式のセメント固型化装置の一例^[1]

(3) 真空注入混合方式

真空注入混合方式による固型化のフローを、図 2-5 に示す。真空注入混合方式は、図 2-6 に示す固型化装置によって、あらかじめパーミキュライトとセメントとを混合した固型化材料等を投入した容器を減圧した後、廃液を容器に供給して固型化材料等と混合し、廃棄物を固型化する方式である。真空注入混合方式の運転工程は、次に示す 3 段階の工程からなるバッチプロセスである。

- ・ 固型化材料等の容器への投入
- ・ 容器の減圧
- ・ 廃液と固型化材料等との混合

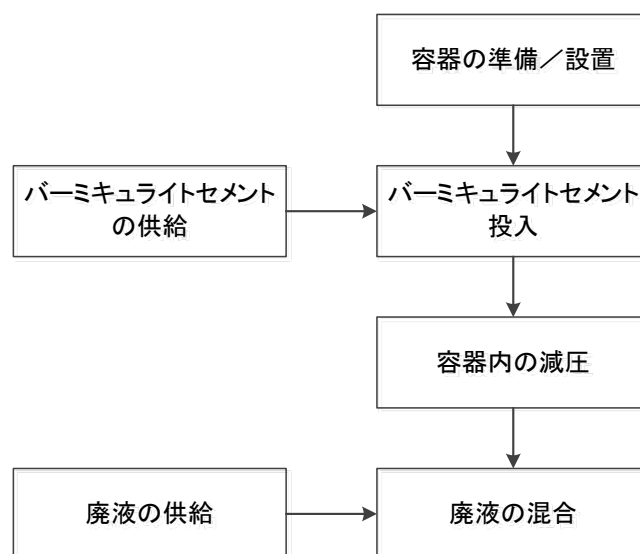


図 2-5 真空注入混合方式による固型化のフロー

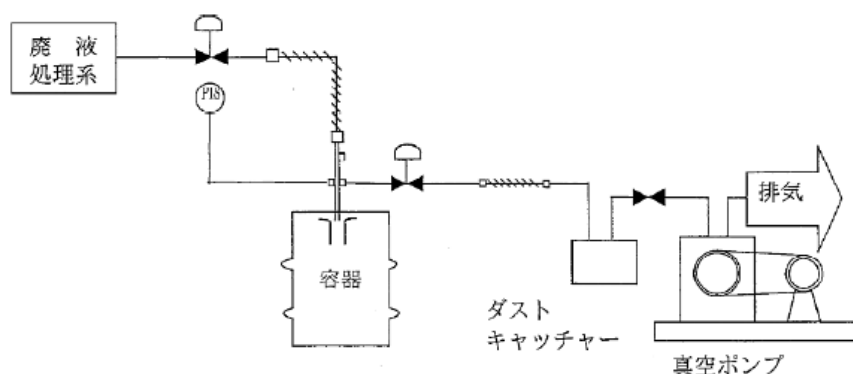


図 2-6 真空注入混合方式のセメント固型化装置の一例^[1]

(4) ペレット注入混合方式

ペレット注入混合方式による固型化のフローを、図 2-7 に示す。ペレット注入混合方式は、図 2-8 に示す固型化装置によって、廃棄物を蒸発／乾燥して粉体としたものを圧縮造粒したペレットを容器に投入した後に、容器の上部から、練り混ぜた固型化材料等（セメントガラス）を注入し、廃棄物を固型化する方式である。ペレット注入混合方式の運転工程は、次に示す 3 段階の工程からなるバッチプロセスである。

- ・ 廃棄物のペレット造粒及び容器への投入
- ・ 練り混ぜ
- ・ 容器への固型化材料等の注入及び混合

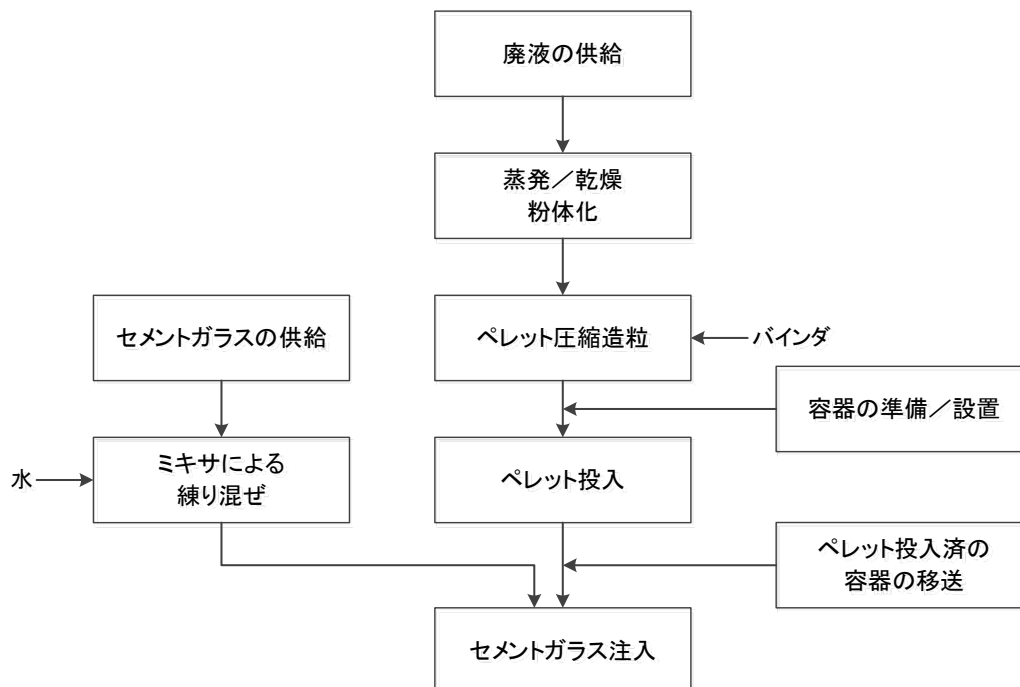


図 2-7 ペレット注入混合方式による固型化のフロー

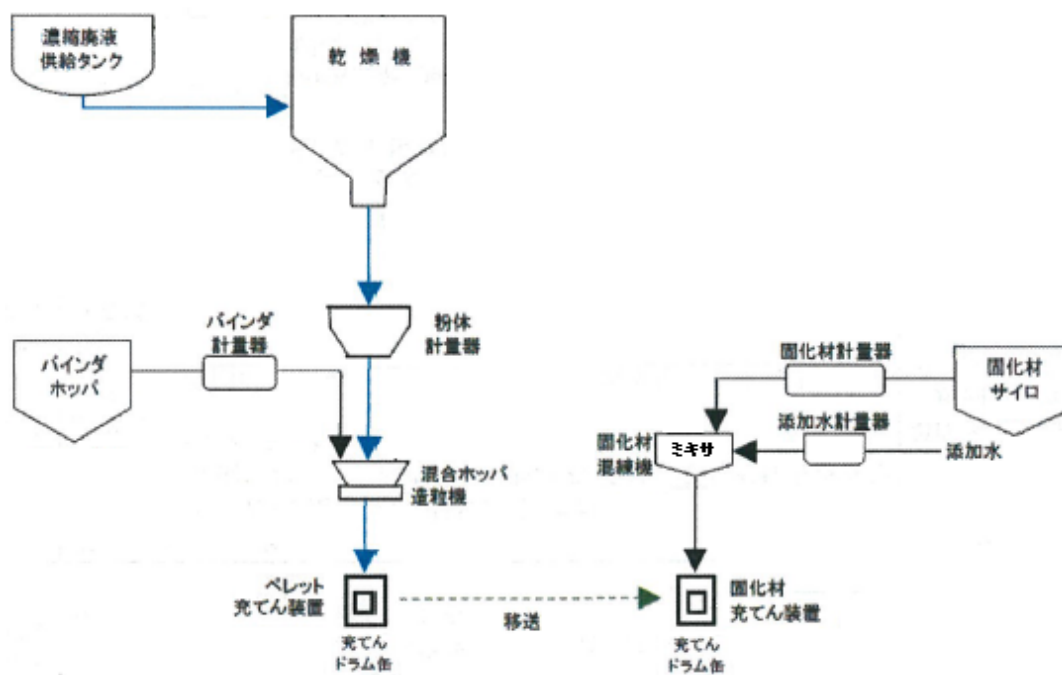


図 2-8 ペレット注入混合方式のセメント固化装置の一例

2.3.2 アスファルト固化

(1) サーマルプロセッサ方式（混和機方式）

サーマルプロセッサ方式（混和機方式）による固型化のフローを、図 2-9 に示す。サーマルプロセッサ方式（混和機方式）は、図 2-10 に示す固化装置によって、廃液とアスファルトとを練り混ぜるものである。サーマルプロセッサ方式（混和機方式）の運転工程は、次に示す 3 段階の工程からなるバッチプロセスである。

- ・ アスファルトの供給及び昇温
- ・ 廃液供給及び練り混ぜ
- ・ 冷却及び容器への排出

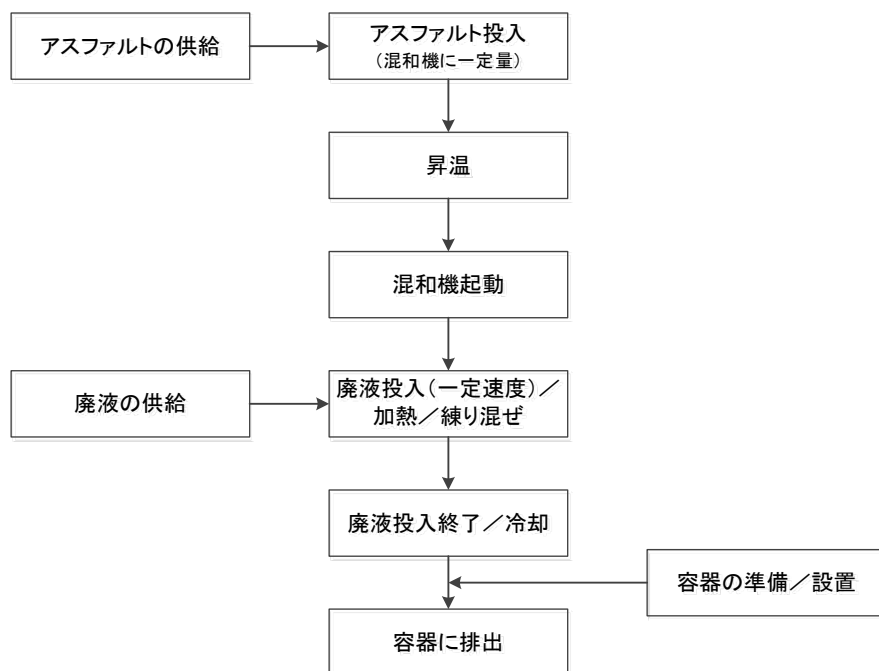


図 2-9 サーマルプロセッサ方式（混和機方式）による固型化のフロー

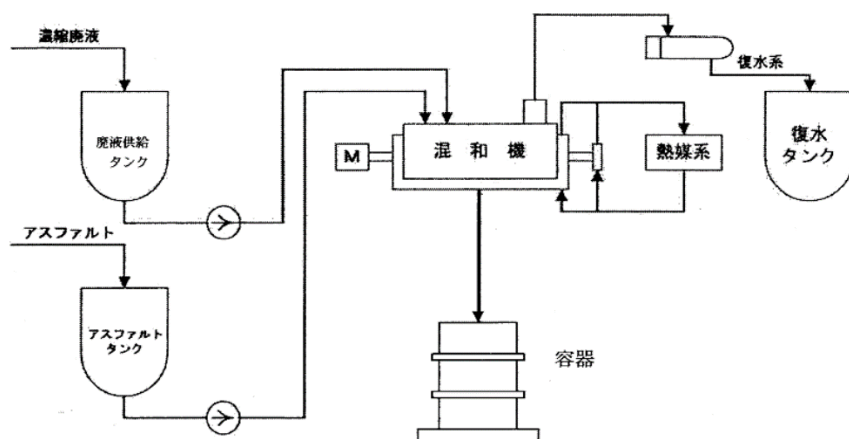


図 2-10 サーマルプロセッサ方式（混和機方式）のセメント固化装置の一例¹⁾

(2) 薄膜蒸発缶方式

薄膜蒸発缶方式による固型化のフローを、図 2-11 に示す。薄膜蒸発缶方式は、図 2-12 に示す固型化装置によって、廃液とアスファルトとを固型化するものである。薄膜蒸発缶方式の運転工程は、次に示す工程からなる連続処理プロセスである。

- ・ アスファルトの供給及び昇温
- ・ 廃液供給及び練り混ぜ
- ・ 排出及び運転停止

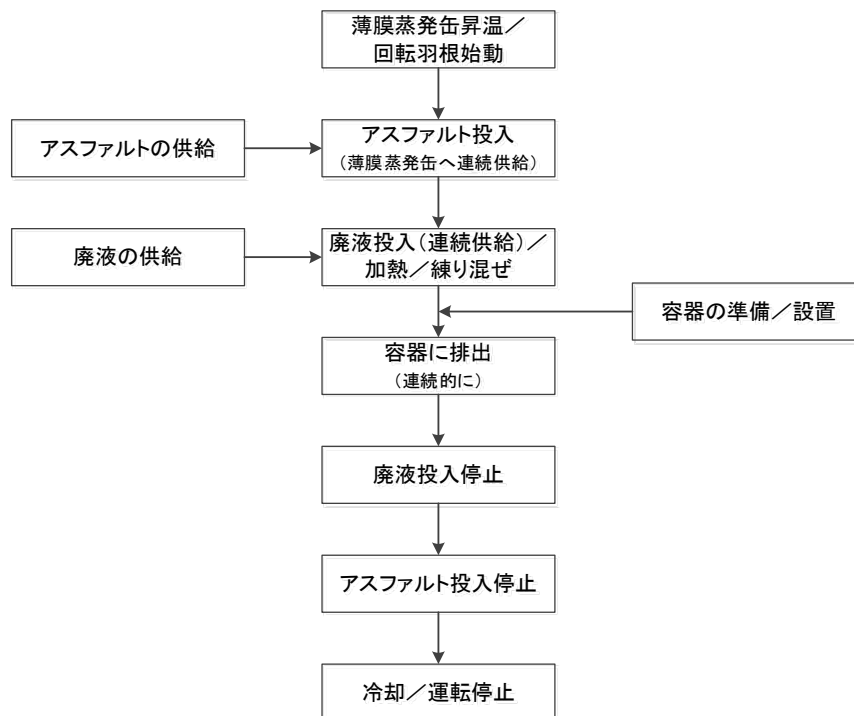


図 2-11 薄膜蒸発缶方式による固型化のフロー

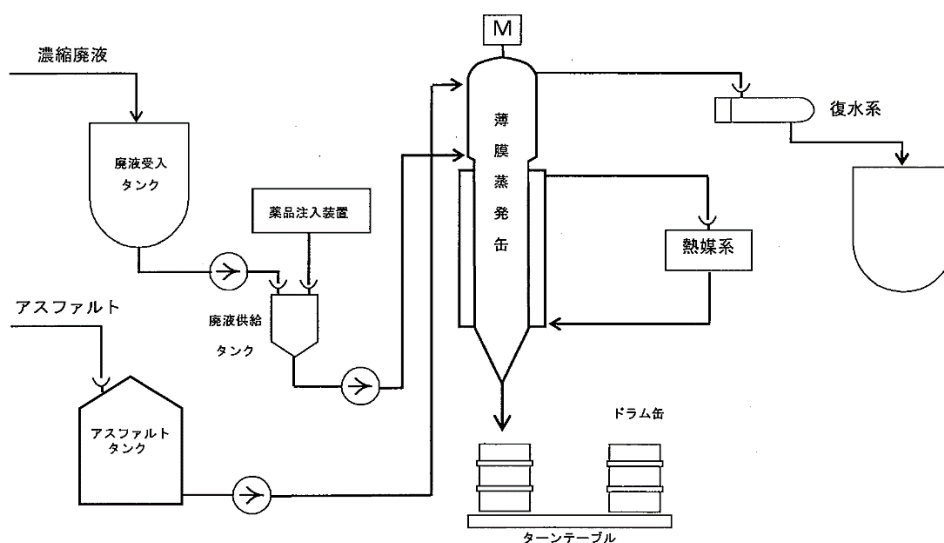


図 2-12 薄膜蒸発缶方式のセメント固型化装置の一例^[1]

2.4 均質又は均一固化体の製作において管理する要件

2.4.1 セメントによる固型化の場合

(1) 固型化材料等

固型化材料は、JIS R 5210 又は JIS R 5211 に定めるセメント、もしくはそれらと同等以上の品質をもつセメントを用いる。固型化材料及び骨材は、湿気の影響を受けないように貯蔵する。また、混和材料は、不純物の混入、凍結などによって性能の低下が生じないように貯蔵する。長期間貯蔵したセメントは、これを使用する前に試験をして、品質を確かめる。

(2) 配合比（廃棄物／固型化材料等 など）

放射性廃棄物と固型化材料等との配合比の管理範囲を、あらかじめ試験によって定め、固型化を行う。この試験は、次の項目に関して行う。なお、その他の項目で評価する場合は、評価項目の適性を示す。

- ・ 固化体の強度（一軸圧縮強度が 1.47 MPa 以上）
- ・ 固化体の均一性

本項目に関わる試験事例を、3.1.1 及び 3.2 にて後述する。

(3) 廃棄物／固型化材料等の投入順序

液体状の放射性廃棄物（廃液）又は粉体状の放射性廃棄物、及び固型化材料等の投入順序を試験によって定め、この投入順序で固型化を行う。

本項目に関わる試験事例を、3.1.1 及び 3.2 にて後述する。

(4) 練混ぜ方法（固型化材料等の練混ぜ速度及び練混ぜ時間）

インドラムミキシング方式及びアウトドラムミキシング方式は、使用する固型化装置などであらかじめ練混ぜ速度、練混ぜ時間を評価し固型化を行う。又は、練混ぜ試験に基づいて設定してもよい。

本項目に関わる試験事例を、3.1.1 及び 3.2 にて後述する。

(5) 混合方法

真空注入混合方式は、使用する固型化装置などで、あらかじめ放射性廃棄物を注入する前のドラム缶内の所定の真空度を評価し、所定の真空度にて注入、混合を行う。又は、既往の知見に基づいて設定してもよい。

なお、ペレット注入混合方式は、注入する固型化材料等を練り混ぜる固型化装置で、あらかじめ練混ぜ速度、練混ぜ時間を評価し、設定する。

本項目に関わる試験事例を、3.1.1 及び 3.2 にて後述する。

(6) 注入速度

ペレット注入混合方式に関しては、練り混ぜた固型化材料等の適切な流動性及び注入速度を試験によって定め、固型化する。

本項目に関わる試験事例を、3.1.1 及び 3.2 にて後述する。

(7) 容器の上部空隙

放射性廃棄物埋設施設の安全評価の前提とした空隙率以下とする。

(8) 養生（室温及び期間）

固型化したセメント固化体は、次の事項が守れる管理条件（養生環境の温度など）及び養生期間を設定し養生する。なお、養生期間は、養生する環境及び温度に応じた試験などによって事前に定める。

- ・ 固化体の上部にブリージング水がない
- ・ 固化体が上記(2)に示した強度をもつ

(9) 蓋の取り付け

蓋は、所定の締付け管理によって取り付ける。

2.4.2 アスファルトによる固型化の場合

(1) 固型化材料等

固型化材料は、JIS K 2207 に示される「ストレートアスファルト 40～60」を標準とする。これ以外のアスファルトを使用する場合には、試験又は評価した上で使用する。貯蔵はアスファルト用タンクにて行う。長期間貯蔵したアスファルトは、これを使用する前に試験をして、針入度を確かめる。

(2) 配合比（廃棄物中の固形分／アスファルト）

固型化する放射性廃棄物の質量とアスファルトの質量との合計質量に対して、アスファルトの質量が 50%以上となることを計量管理する。また、固型化に適用する配合比は、あらかじめ試験によって評価しておく。

本項目に関わる試験事例を、3.1.2 にて後述する。

(3) 廃棄物／固型化材料等の投入順序

アスファルトを投入後、混和機又は蒸発缶を所定の温度まで昇温させた上で液体状の放射性廃棄物（廃液）の投入を行う。

本項目に関わる試験事例を、3.1.2 にて後述する。

(4) 練混ぜ方法（廃液の供給速度、練混ぜ温度及び練混ぜ速度）

標準とする廃液の供給速度、練混ぜ温度及び練混ぜ速度にて固型化を行う。又は、既往の知見

に基づいて設定してもよい。

本項目に関わる試験事例を、3.1.2にて後述する。

(5) 容器の上部空隙

放射性廃棄物埋設施設の安全評価の前提とした空隙率以下とする。

(6) 蓋の取り付け

蓋は、所定の締付け管理によって取り付ける。

第3章 均質又は均一固化体の製作方法にかかる事例

3.1 廃棄体の製作における適切な運転条件に関わる事例

3.1.1 セメント固化

(1) インドラムミキシング方式^[2]

原子力発電所に設置されたインドラムミキシング方式のセメント固化装置の攪拌装置の形状としては、図 3-1 に示したような 4 種類のものがある（検討当時）。いずれの攪拌装置についても、その練混ぜ性能は、第三者の試験あるいは試運転で確認されており、良好な練混ぜ性能を持つ装置である。例として、A タイプの攪拌装置の関連試験データを表 3-1 に、その試験条件を表 3-2 に、それぞれ示す。D タイプの攪拌装置の関連試験データを表 3-3 に、その試験条件を表 3-4 に、それぞれ示す。

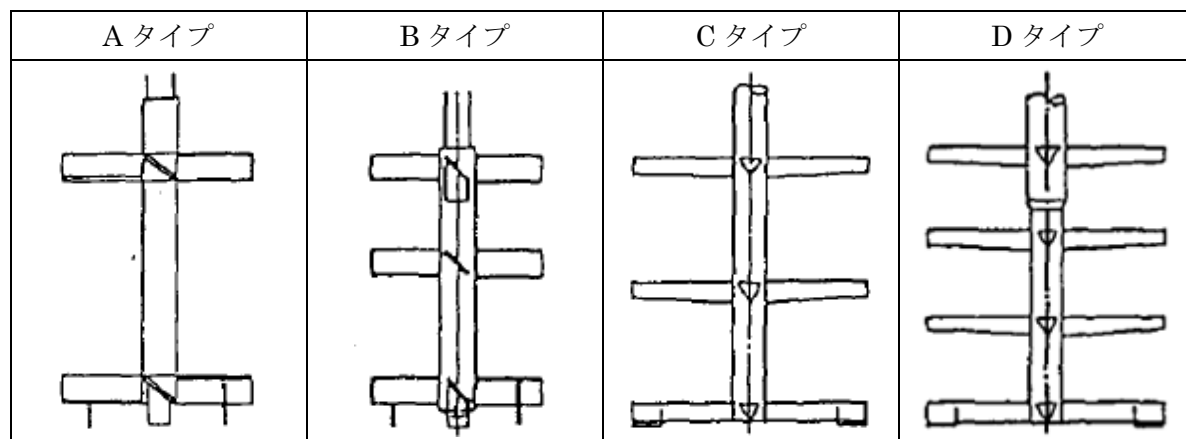


図 3-1 インドラムミキシング方式のセメント固化装置の攪拌装置の形状

表 3-1 A タイプの攪拌装置の関連試験データ^[8]

固化体番号	比重（－）		
	位置 1	位置 2	位置 3
1-1	1.88	1.87	1.87
1-2	1.88	1.87	1.87
2-1	1.89	1.89	1.88
2-2	1.89	1.87	1.86
2-3	1.88	—	1.86
3-1	1.84	1.8	1.81
3-2	1.83	1.83	1.82
3-3	1.84	1.80	1.80

表 3-2 A タイプの攪拌装置の試験条件^[8]

対象 廃棄物	配合比 (質量又は質量分率)	投入順序	練混ぜ速度	練混ぜ時間
模擬廃液	セメント：230 kg 水：130 kg 硫酸ソーダ：20 %	1) 硫酸ソーダ 2) 水 3) セメント	330 rpm 外周速度 8.6 m/s	2 分

表 3-3 D タイプの攪拌装置の関連試験データ

対象 廃棄物	固化体 番号	一軸圧縮強度 (kg/cm ²)		
		位置 1	位置 2	位置 3
濃縮廃液	1	315	374	292
	2	384	340	364
	3	374	390	361
ろ過助剤	1	184	166	179
	2	187	206	189
	3	182	186	204

表 3-4 D タイプの攪拌装置の試験条件

対象 廃棄物	セメントと廃棄物等の 投入割合 (重量比)	廃棄物等の 投入順序	練り混ぜ回転数	練り混ぜ時間
濃縮廃液	セメント／廃液：2.2	1) 濃縮廃液 2) セメント	150 rpm (約 3 分) 66 rpm (約 1 分)	全材料投入後 3.5 分
フィルタ スラッジ	セメント／水：1.6 セメント／廃棄物：11	1) 廃棄物 2) 水 3) セメント	150 rpm (約 5 分) 66 rpm (約 3 分)	全材料投入後 約 8 分

(2) アウトドラムミキシング方式^[3]

今後の均一・均質固型化方法の標準化に際して必要となる、各サイトにおける固型化方法の詳細（試験・記録）を調査している。このうち、アウトドラムミキシング方式の固型化方法に関する調査結果は以下のとおりである。

試験条件

- ・試験条件は表 3-5 のとおりである。

表 3-5 アウトドラムミキシング方式の固型化に関する試験条件

項目	条件
配合比	液分割合：約 35% (標準)、約 27% (固め)
投入順序	セメントと廃棄物等を投入した後に、ミキサを回転させて、セメントと廃棄物等を均質に練り混ぜる。
混練速度	回転速度 100rpm (外周速度約 5 m/s)
混練時間	10 分間程度

試験結果

- ・液分が少ない固めの混練物でも十分な練り混ぜができる。
- ・高さ方向にサンプル点を変えて（上中下）採取したコアサンプルの密度は表 3-6 のとおりである。

る。

- ・一軸圧縮強度は 80 kg/cm² 以上

表 3-6 コアサンプルの密度の試験結果

密度 (g/cm ³)	固化体 No.	上	中	下
	1	1.86	1.87	1.87
	2	1.82	1.83	1.83
	3	1.84	1.83	1.82
	4	1.80	1.78	1.79
	5	1.80	1.77	1.79
	6	1.83	1.77	1.79
	7	1.82	1.80	1.79
	8	1.68	1.73	1.76
	9	1.66	1.67	1.61
	10	1.67	1.69	1.68
	11	1.75	1.72	1.74
	12	1.69	1.70	1.74
	13	1.69	1.78	1.79

(3) 真空注入混合方式^[2]

原子力発電所に設置された真空注入混合方式のセメント固化装置の運転条件を表 3-7 に示す。バーミキュライトの混合は、空隙部確保による廃液の均等分散と注入時間の短縮を目的とする。そのため、真空注入混合方式ではバーミキュライト/セメントを 1/8（重量比）としている。これにより、バーミキュライトとセメントの体積比がほぼ同等となっており、この時の注入所要時間は約 10 分程度である。

また、製作した固化体から採取したサンプルの圧縮強度の試験結果は、図 3-2 に示すとおりである。なお、機械的な安定性の目標値（例 一軸圧縮強度 1.47 MPa）を大きく上回っており、均質性の指標とした強度のばらつきは、目標性能に影響を与えるものではない。

表 3-7 真空注入混合方式のセメント固化装置の運転条件

項目		条件
対象廃棄物		濃縮廃液
セメントと廃棄物等の投入割合（重量比）	バーミキュライト・セメント混合割合	1 : 8
	廃液混合割合	0.45~0.8
廃棄物等の投入順序		1) バーミキュライト・セメント 2) 廃棄物
真空度	注入開始	- 560 mmHg~- 600 mmHg
	注入完了	- 100 mmHg

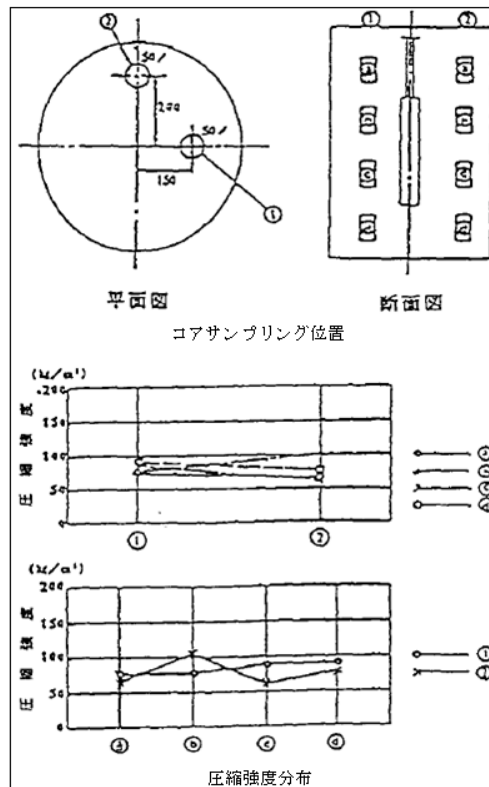


図 3-2 セメント固化体の均一性の試験結果：真空注入混合方式^[12]

(4) ペレット注入混合方式^{[4][5]}

1) 注入性の確認試験

ペレット注入混合方式の注入性の確認として、模擬廃棄物を用いた 200L 規模の注入固化試験を実施している。試験に用いた模擬廃棄物（粉体及び雑固体）の種類とそれをペレット化したもの（雑固体はそのまま）の形状を表 3-8 に示す。

表 3-8 模擬廃棄物種類と形状

廃棄物種類		発生プラント		廃棄物形状
		PWR	BWR	
BWR 濃縮廃液			○	アーモンド型 30L×20W×10H
PWR 濃縮廃液		○		円筒型 28φ×28t
樹脂	熱処理なし	○	○	アーモンド型 25L×17W×8H
	300℃熱処理			円筒型 28φ×14t
焼却灰		○	○	円筒型 28φ×14t
雑固体		○	○	不定形

ペレット注入試験におけるペレット充填率及び空隙率の関係を図 3-3 に、試験結果より得られた空隙の大きさと注入時間、速度の関係を図 3-4 に、それぞれ示す。これらの結果から、以下のことがわかった。

- ・ ペレット間隙へセメントガラスペーストを注入する場合、注入速度を支配する要因は、廃

棄物種類、空隙率ではなく、ペレット周辺に存在する空隙の大きさ、すなわちペレット 1 個あたりの空隙 $v \text{ ml}$ であることがわかった。

- 最も注入時間の長いものでも約 20 分で注入作業が完了しており、ペースト粘度が 10,000 cP 以下であれば注入作業は可能である。

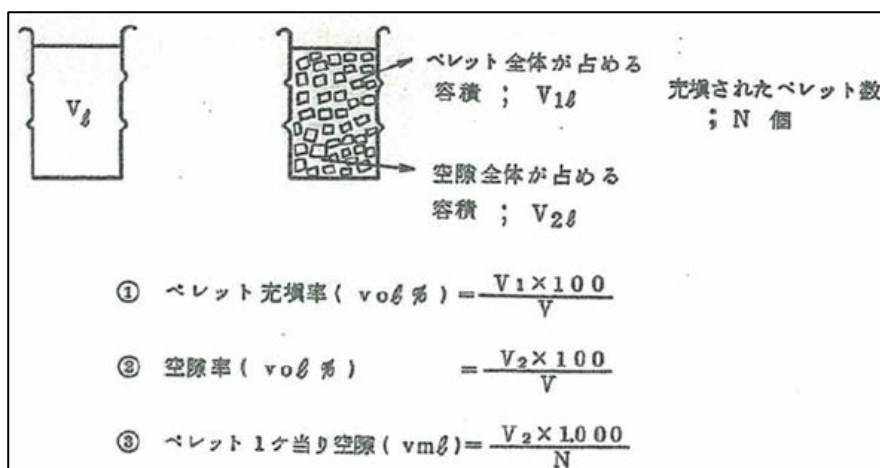


図 3-3 ペレット充填率及び空隙率の関係

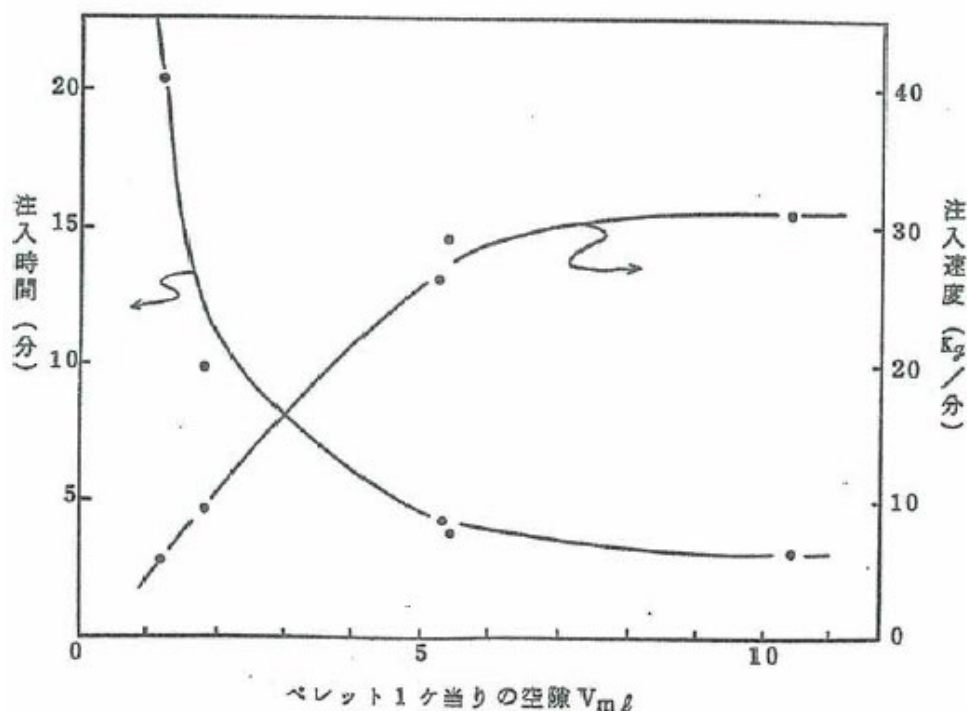


図 3-4 空隙の大きさと注入時間、速度の関係

2) 均一性確認試験

セメントガラス固化体の均一性 (固型化材注入性) への影響因子は、水/セメントガラス比である。実機運転上、固型化材の流動性が最も悪くなると予想されるのは、実運転変動範囲と運転管理値を考慮すれば水/セメントガラス比が 0.30 の条件となる。これらのことから、セメント

ガラス固化体の均一性確認試験では、水/セメントガラス比を 0.30 とし、他の条件は標準として模擬廃棄体を製作し、均一性を確認している。セメントガラス固化体の均一性確認試験の試験条件を表 3-9 に示す。

表 3-9 セメントガラス固化体の均一性確認試験の試験条件

項目	条件
水/セメントガラス比	0.30
ペレット長さ (mm)	28 (造粒機設定値)
バインダー添加 (wt%)	7 (KC フロック 5%+ステアリン酸ナトリウム 2%)
ペレット充填量	最大充填量
試験体規模 (mm)	200 L ドラム缶 (15 mm 内張り)
試験体製作数	1

セメントガラス固化体の比重及び硬度の分布測定では、表 3-9 に示した条件で作成したセメントガラス固化体を半割りにした後、図 3-5 に示すように、中心部と側面部からそれぞれ上中下段の 3 箇所からコアサンプリングを行い、それぞれの比重及び硬度 (ショア硬度) を測定している。測定結果を表 3-10 に示す。

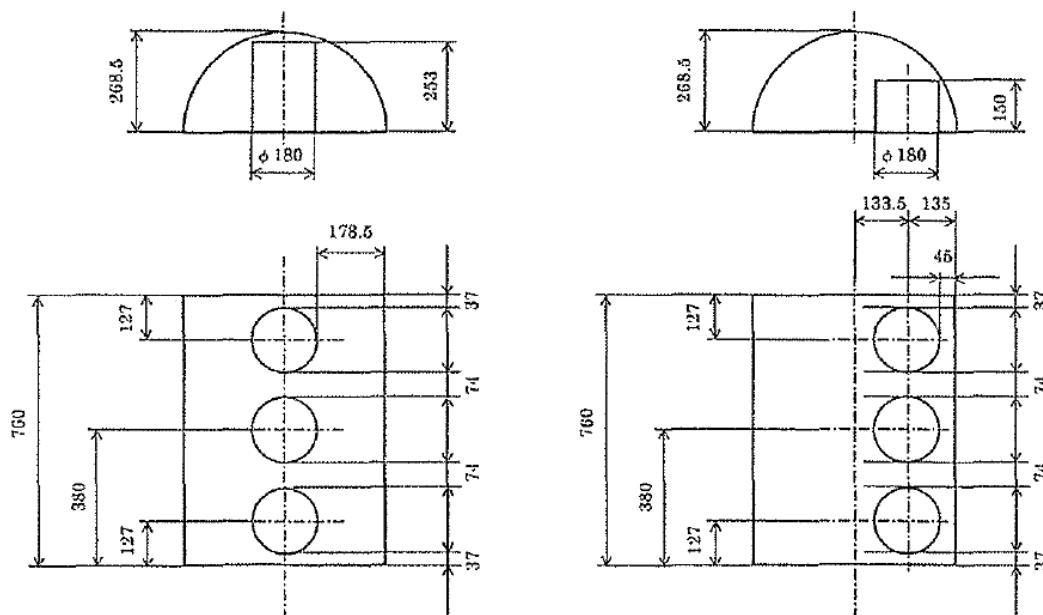


図 3-5 セメントガラス固化体からのコアサンプリング箇所

表 3-10 セメントガラス固化体の比重及び硬度の分布の測定結果

		上	中	下
比重	中心	1.65	1.59	1.61
	側面	1.66	1.61	1.63
硬度 (ショア硬度)	中心	77.1	78.5	79.5
	側面	81.7	77.6	77.7

3.1.2 アスファルト固化

(1) サーマルプロセッサ方式（混和機方式）^[2]

1) 配合比

サーマルプロセッサ方式（混和機方式）のアスファルト固化装置は、各原子力発電所ともアスファルト／(廃棄物固形分+アスファルト)の配合比が 50 以上となるように設定されている。配合比の設定根拠及び妥当性は以下のとおりである。

①電中研報告^[9]によれば、アスファルト中への廃棄物混合限度（40～60 ストレートアスファルト）は表 3-11 のとおりである。

混合限度は、容器中においてアスファルト固化体と廃棄物の混合が均一に行われ、かつ、混合物が順調に排出できる廃棄物の最高混入量と定義されている。

表 3-11 アスファルト中への廃棄物混合限度

種類		混合限度 (wt%)
濃縮廃液	硫酸ナトリウム	70
	ホウ酸－塩化ナトリウム	60
	ホウ酸	70

②電中研報告^[10]によれば、配合比 50～60 % (=アスファルト／(廃棄物固形分+アスファルト)) の範囲内で作成されたアスファルト固化体の比重のばらつきは、表 3-12 のとおりであり、代表サンプルに対して±0.4%の範囲内にあり、極めて均質である。

また、代表サンプルの配合比のばらつきは、設定混合比に対して±3.1 %以内であり、固化体内の混合比のばらつきは代表サンプルの混合比の± 2.5%以内であると報告されている。

表 3-12 サーマルプロセッサ方式（混和機方式）によるアスファルト固化体の関連データ

	配合比 (wt%)				比重 (g/cm ³)			
	上部	中部	下部	偏差係数(%)	上部	中部	下部	偏差係数(%)
サンプル 1	60.1	59.0	61.9	2.0	1.31	1.30	1.31	0.4
サンプル 2	57.3	58.9	58.2	1.1	1.32	1.32	1.31	0.4
サンプル 3	59.7	59.1	60.4	0.9	1.31	1.31	1.31	0.0
サンプル 4	57.7	57.6	59.1	1.2	1.31	1.31	1.31	0.0

2) 廃棄物等の供給速度

サーマルプロセッサ方式（混和機方式）のアスファルト固化装置における廃棄物等の供給速度の設定値は 140 L/h である。設定値の許容範囲の考え方は以下のとおりである。

①廃液供給速度が低い場合には混和機の伝熱面が汚れている恐れがあり、高い場合には蒸発蒸気に飛沫同伴が多くなるため、プロセス上 130～170 L/h の範囲にて運転されるよう設計されている。但し、本項目は固化体の練り混ぜ性よりも装置保守に重点をおいて設定したものである。

②電中研報告^[10]に基づけば、廃液供給速度 140～160 L/h の範囲にて作成された固化体はいずれ

も良好である。

- ③上記範囲を超えた場合には警報等を発信するように設定されていることから、この範囲を超えて運転されることはない。

3) 練り混ぜ温度

サーマルプロセッサ方式（混和機方式）のアスファルト固化装置における練り混ぜ温度の設定値は 180℃である。設定値の許容範囲の考え方は以下のとおりである。

- ①160℃以下では、混和機の伝熱係数が大幅に低下し、蒸発能力が低下する。また、190℃以上では発泡現象等を生じ、蒸発能力が低下するため、プロセス上の適切な温度範囲は 160℃～190℃である。
- ②電中研報告^[9]に基づけば、「150～180℃に加熱すれば、廃棄物種類にかかわらず、攪拌により支障なく混合分散され、均質な固化体となった」と報告されている。
- ③電中研報告^[9]に基づけば、「アスファルト及び固化体の引火点は 280～350℃の範囲にあることから、アスファルト固化処理の加熱上限温度は 240～250℃である」とされている。

4) 練り混ぜ回転数

サーマルプロセッサ方式（混和機方式）のアスファルト固化装置における練り混ぜ回転数の設定値は 60 rpm である。設定値の許容範囲の考え方は以下のとおりである。

- ①練り混ぜ回転数と蒸発能力の試験結果から、60 rpm 以上であれば蒸発量がほぼ飽和するため、これを採用している。
- ②電中研報告^[10]及びメーカー試験結果における練り混ぜ回転数は、60 rpm に統一されており、当該条件下において固化体の均質性が確認されていることから、当該数値は適切であると考えられる。
- ③機械的に設定しているため、本設定値は変動しない。

(2) 薄膜蒸発缶方式^[2]

1) 配合比

薄膜蒸発缶方式のアスファルト固化装置は、各原子力発電所ともアスファルト／(アスファルト＋固形分)の配合比が 50 以上となるように設定されている。配合比の設定根拠及び妥当性は以下のとおりである。

- ①電中研報告^[9]によれば、アスファルト中への廃棄物混合限度（40～60 ストレートアスファルト）は表 3-11 のとおりである。
- ②昭和 53 年 7 月に、硫酸ナトリウムの模擬廃液を用いてアスファルト固化試験を行い、固化体を製作した。その際、得られた固化体によりサンプルを採取し、上、中、下の各位置の固形分濃度を分析した（四温化炭素抽出法による）。その結果を表 3-13 に示す。分析の結果から十分均質であることがわかった。

表 3-13 アスファルト固化体の均質性 (硫酸ナトリウム)

サンプル 採取位置	配合比			
	固化体 A	固化体 B	固化体 C	固化体 D
上	58.4	60.5	61.1	61.7
中	59.7	61.7	59.7	62.9
下	58.3	61.1	59.1	60.8
平均	58.8	61.1	60.0	61.8
変動係数(%)	1.1	0.8	1.4	1.4

- ・ 上、中、下は固化体の上部、中部、下部位置を示す。
- ・ 変動係数は標準偏差／平均値

③昭和 53 年 10 月～11 月に、ホウ酸ナトリウムの模擬廃液を用いてアスファルト固化試験を行い、固化体を作製した。その際得られた固化体よりサンプルを採取し、上、中、下の各位置の固形分濃度を分析した（四塩化炭素抽出法による）。その結果を表 3-14 に示す。分析の結果から十分均質であることがわかった。

表 3-14 アスファルト固化体の均質性 (ほう酸ナトリウム)

サンプル 採取位置	配合比			
	固化体 A	固化体 B	固化体 C	固化体 D
上	60.7	60.2	60.7	59.9
中	61.0	61.5	61.3	60.8
下	59.5	60.9	60.0	60.4
平均	60.4	60.9	60.7	60.4
変動係数(%)	1.1	0.9	0.9	0.6

④配合比 40%を目標に作製したアスファルト固化体の均質性に関して、固化体物性の一つである比重を分析した結果を表 3-15 に示す。比重分析の結果からも十分均質であることがわかった。

表 3-15 アスファルト固化体の均質性 (硫酸ナトリウム) [11]

サンプル 採取位置	比重			
	固化体 3	固化体 4	固化体 10	固化体 16
上	1.35	1.33	1.31	1.34
中	1.35	1.37	1.34	1.34
下	1.37	1.46	1.41	1.35
平均	1.36	1.39	1.35	1.34
変動係数(%)	0.85	4.80	3.80	0.43

2) 廃液供給速度

薄膜蒸発缶方式のアスファルト固化装置における廃液供給速度の設定値は上限 220 L/h である。設定値の許容範囲の考え方は以下のとおりである。

- ①廃液中に含まれる固形分の種類により、蒸発性に若干の差があり、必要に応じて廃液量を加減する場合がある。
- ②本装置の標準最大廃液供給量は 220 L/h である。この上限値を越えると製品の品質が低下することがある。
- ③電中研報告^[11]に基づけば、廃液供給量 220 L/h 以下（水分蒸発量換算で 190 kg/h 以下）の範囲にて作成された固化体はいずれも良好である。

3) 練り混ぜ温度

薄膜蒸発缶方式のアスファルト固化装置における熱媒ヒータ出口温度（蒸発缶入口温度）の設定値は 240℃である。設定値の許容範囲の考え方は以下のとおりである。

- ①水分の蒸発に必要な熱量を供給すると同時に生成したプロダクトの排出性を向上させる。
- ②プロセス上の適切な温度範囲を 230～250℃としている。
- ③電中研報告^[9]に基づけば、「アスファルト及び固化体の引火点は 280～350℃の範囲にあることから、アスファルト固化処理の加熱上限温度は 230～250℃である」とされている。

4) 練り混ぜ回転数

薄膜蒸発缶方式のアスファルト固化装置における練り混ぜ回転数の設定値は、A 型が 700 rpm、B 型が 490 rpm である。設定値の許容範囲の考え方は以下のとおりである。

- ①A 型と B 型ではロータの径が異なるため回転数を変えているが、ロータ端の周速は同じにしている。
- ②電中研報告^[11]に基づけば試験における練り混ぜ回転数は上記設定値及びそれ以下で行っている。生成したアスファルト固化体の物性試験の結果均質であることが確認されていることから、当該数値は適切であると考えられる。

3.2 製作したセメント固化体の一軸圧縮強度に関わる事例

3.2.1 インドラムミキシング方式及びアウトドラムミキシング方式^[2]

(1) 一軸圧縮強度と超音波伝播速度の関係

ミキシング方式（インドラムミキシング方式又はアウトドラムミキシング方式）で製作された廃棄体の一軸圧縮強度を超音波伝播速度で評価するために、両者の関係について検討を実施している。検討対象は、以下に示す、各発電所で製作された実廃棄体である。

- ・濃縮廃液：159 本
- ・フィルタスラッジ：42 本
- ・使用済樹脂：21 本

測定された一軸圧縮強度と超音波伝播速度の関係を図 3-6 に示す。図 3-6 より、一軸圧縮強度は超音波伝播速度に対してかなりのばらつきをもつため、超音波伝播速度から一軸圧縮強度を評価する場合には、安全側の余裕を考慮する必要があることが示唆される。このため、データの回帰曲線より最も下側にはずれたデータを基準として、安全側余裕を設定している。この方法で判断基準を定めると、15 kg/cm² を下回る超音波伝播速度は、1.508 km/s であり、判断基準値は安全側に余裕をとった 1.6 km/s としている。

安全側余裕を考慮した一軸圧縮強度と超音波伝播速度の関係を図 3-6 に併せて示す。また、安全側余裕を考慮した一軸圧縮強度と超音波伝播速度の関係式を下記に示す。

$$\sigma = 10^{0.68} V^{2.80}$$

ここで、 σ ：一軸圧縮強度 (kg/cm²)

v ：超音波伝播速度 (km/s)

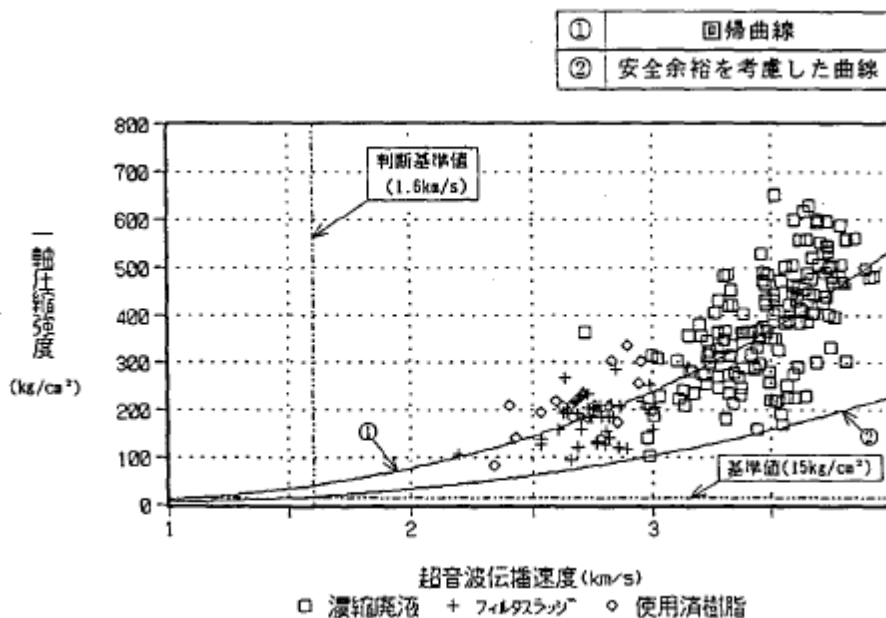


図 3-6 超音波伝播速度と一軸圧縮強度の関係 (ミキシング方式)

(2) 一軸圧縮強度と配合の関係

ミキシング方式 (インドラムミキシング方式又はアウトドラムミキシング方式) で製作された廃棄体の一軸圧縮強度をセメントと廃棄物等の配合で評価するために、両者の関係について検討を実施している。検討対象は、以下に示す、各発電所で製作された実廃棄体及び電力中央研究所が試験で製作したセメント固化体である。

- ・濃縮廃液：112 本
- ・フィルタスラッジ：47 本
- ・使用済樹脂：29 本

セメント業界では、一般的に、一軸圧縮強度はセメントと水の割合と相関関係があり、セメン

トの割合が大きいほど、一軸圧縮強度が高くなるとされている。このため、一軸圧縮強度 15 kg/cm²を満足する、セメント/水（廃液）比の下限値について検討を行っている。実際に発電所で製作されたセメント固化体及び電力中央研究所が試験で製作したセメント固化体の一軸圧縮強度とセメント/水（廃液）比の関係を、廃棄物ごとに、図 3-7～図 3-9 に示す。図 3-7～図 3-9 より、廃棄物ごとに、下記のセメント/水（廃液）の範囲で一軸圧縮強度 15 kg/cm²を満足している。

- ・濃縮廃液：1.2 以上
- ・フィルタスラッジ：1.0 以上
- ・使用済樹脂：0.64 以上

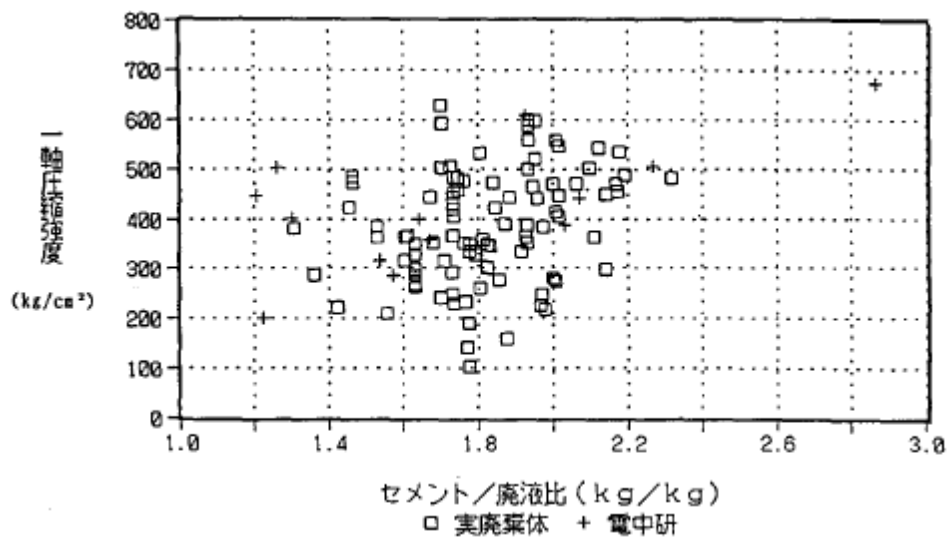


図 3-7 セメント/廃液比と一軸圧縮強度の関係（ミキシング方式、濃縮廃液）

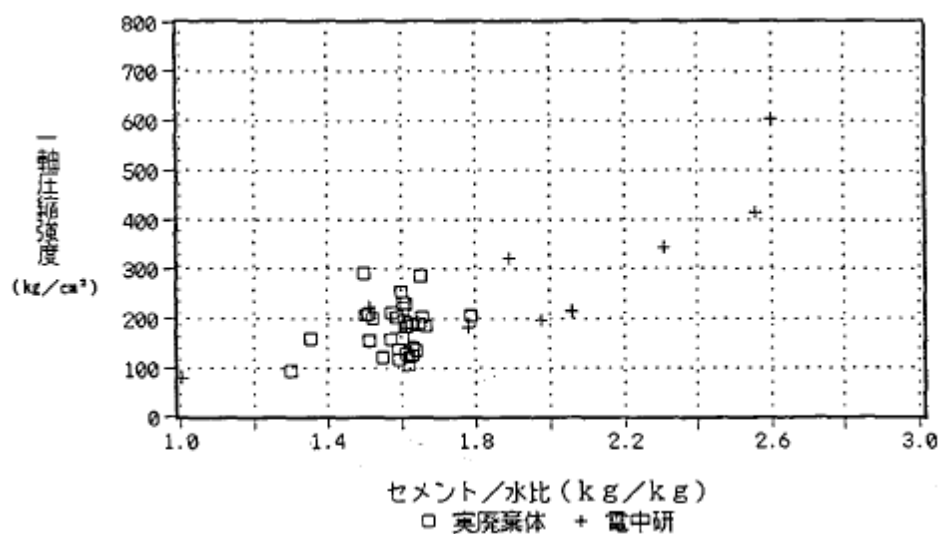


図 3-8 セメント/水比と一軸圧縮強度の関係（ミキシング方式、フィルタスラッジ）

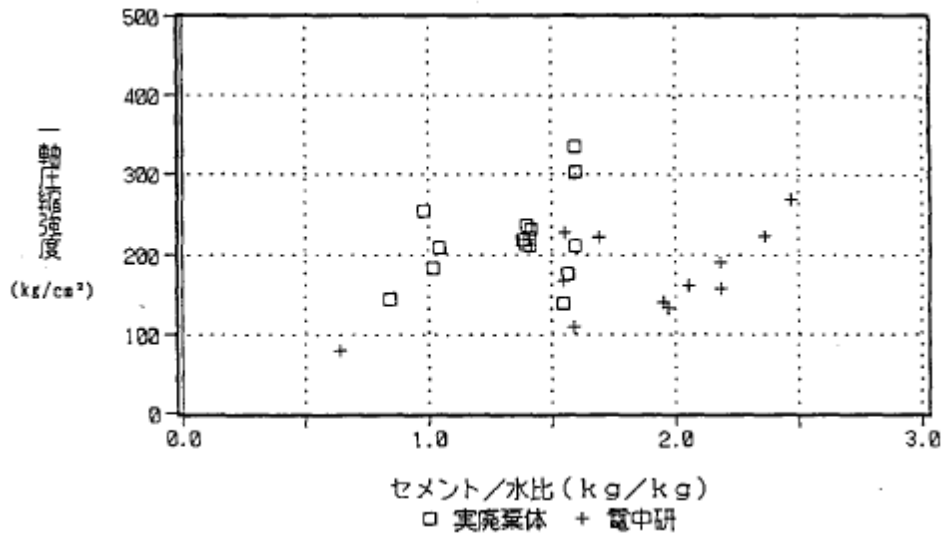


図 3-9 セメント/水比と一軸圧縮強度の関係 (ミキシング方式、使用済樹脂)

(3) 適切な練り混ぜを行った廃棄体の一軸圧縮強度

ミキシング方式 (インドラムミキシング方式又はアウトドラムミキシング方式) で製作されたセメント固化体は、セメントと廃棄物等が練り混ぜられて、はじめて所定の強度が出現し固化する。このため、所定の強度が得られているセメント固化体は、適切な「練り混ぜ」が行われたものと判断することができる。この基本的な考え方から、電力中央研究所の試験結果より適切な練り混ぜを行ったと判断できる実セメント固化体と電力中央研究所が試験で製作したセメント固化体について、一軸圧縮強度を調査している。調査したデータは、以下に示すセメント固化体に基づくものであり、その一軸圧縮強度の調査結果を図 3-10～図 3-12 に示す。

- ・濃縮廃液 : 111 本
- ・フィルタスラッジ : 42 本
- ・使用済樹脂 : 27 本

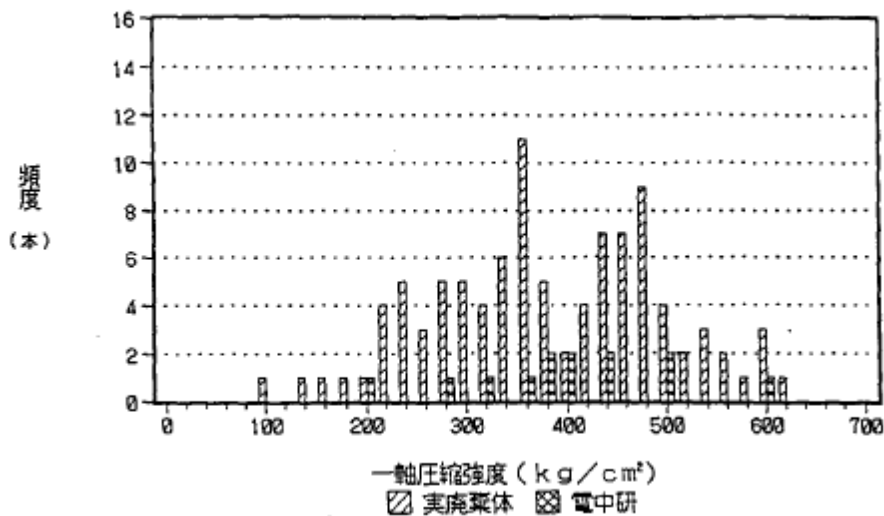


図 3-10 一軸圧縮強度の頻度分布 (ミキシング方式、濃縮廃液)

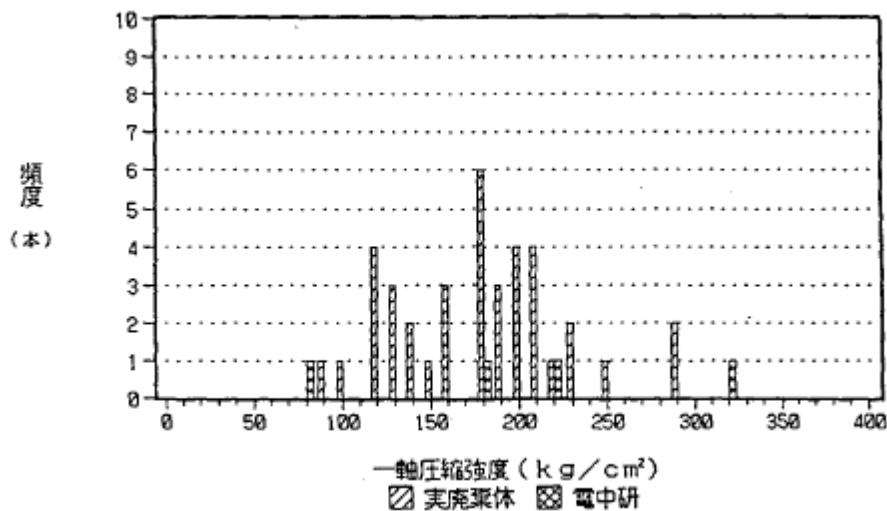


図 3-11 一軸圧縮強度の頻度分布 (ミキシング方式、フィルタスラッジ)

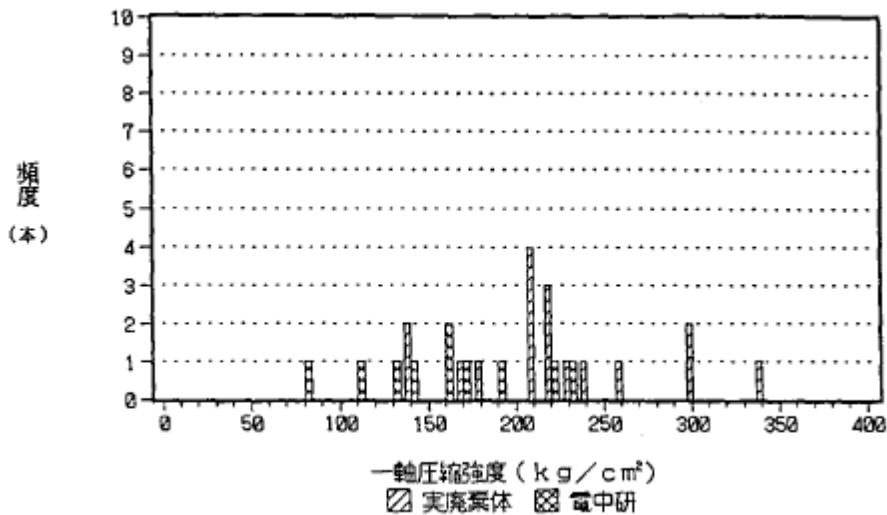


図 3-12 一軸圧縮強度の頻度分布 (ミキシング方式、使用済樹脂)

3.2.2 真空注入混合方式^[2]

(1) 一軸圧縮強度と超音波伝播速度の関係

真空注入混合方式で製作された廃棄体の一軸圧縮強度を超音波伝播速度で評価するために、両者の関係について検討を実施している。検討対象は、各発電所で製作された廃棄体 48 本である。測定された一軸圧縮強度と超音波伝播速度の関係を図 3-13 に示す。図 3-13 より、一軸圧縮強度は超音波伝播速度に対してかなりのばらつきをもつため、超音波伝播速度から一軸圧縮強度を評価する場合には、安全側の余裕を考慮する必要があることが示唆される。このため、データの回帰曲線より最も下側にはずれたデータを基準として、安全側余裕を設定している。この方法で判断基準を定めると、15 kg/cm² を下回る超音波伝播速度は、1.680 km/s であり、判断基準値は安

全側に余裕をとった 1.7 km/s としている。

安全側余裕を考慮した一軸圧縮強度と超音波伝播速度の関係を図 3-14 に併せて示す。また、安全余裕を考慮した一軸圧縮強度と超音波伝播速度の関係式を下記に示す。

$$\sigma = 10^{0.87} V^{1.36}$$

ここで、 σ ：一軸圧縮強度 (kg/cm²)

v ：超音波伝播速度 (km/s)

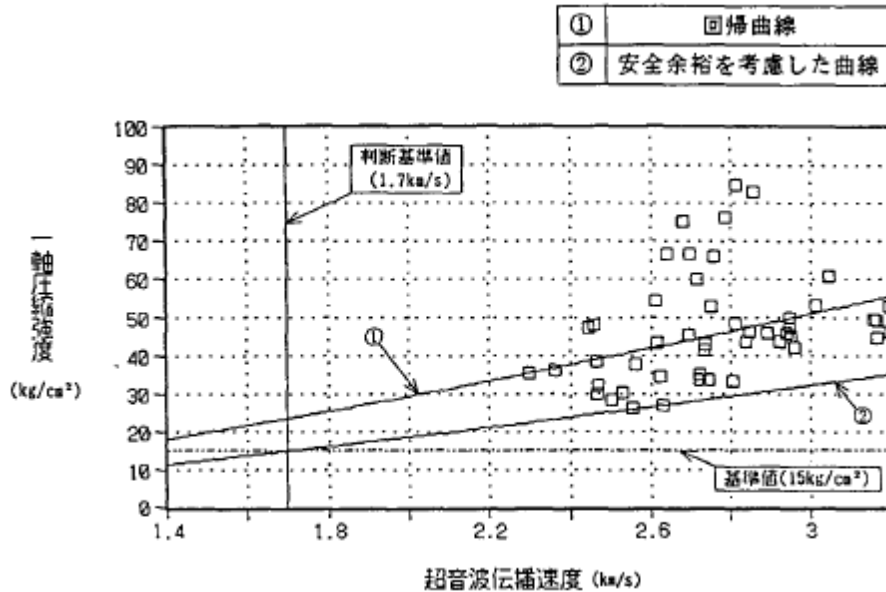


図 3-13 超音波伝播速度と一軸圧縮強度の関係 (真空注入混合方式)

(2) 一軸圧縮強度と配合の関係

真空注入混合方式で製作された廃棄体の一軸圧縮強度をセメントと廃棄物等の配合で評価するために、両者の関係について検討を実施している。検討対象は、発電所で製作された廃棄体及び電力中央研究所が試験で製作したセメント固化体の合計 14 本である。

セメント業界では、一般的に、一軸圧縮強度はセメントと水の割合と相関関係があり、セメントの割合が大きいほど、一軸圧縮強度が高くなるとされている。ただし、真空注入混合方式ではバーミキュライトを混和材としているため、明確な相関はなく、セメントと水の割合がある範囲のとき一軸圧縮強度がほぼ同一となる^[12]。このため、一軸圧縮強度 15 kg/cm²を満足する、セメント/廃液比の上限値と下限値について検討を行っている。実際に発電所で製作されたセメント固化体及び電力中央研究所が試験で製作したセメント固化体の一軸圧縮強度とセメント/廃液比の関係を図 3-14 に示す。図 3-14 より、セメント/廃液比 1.2~2.3 の範囲で一軸圧縮強度 15 kg/cm²を満足している。

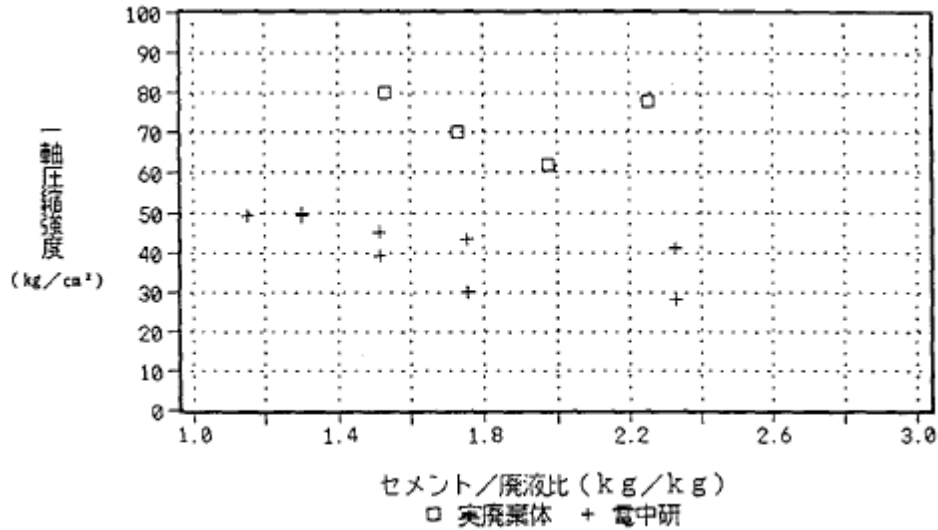


図 3-14 セメント/廃液比と一軸圧縮強度の関係 (真空注入混合方式)

(3) 適切な混合を行った廃棄体の一軸圧縮強度

真空注入混合方式で製作されたセメント固化体は、廃液がバーミキュライトセメントの空隙に行き渡って、はじめて所定の強度が出現し固化する。このため、所定の強度が得られているセメント固化体は、適切な「混合」が行われたものと判断することができる。この基本的な考え方から、電力中央研究所の試験結果より適切な混合を行ったと判断できる実セメント固化体と電力中央研究所が試験で製作したセメント固化体について、一軸圧縮強度を調査している。調査したデータは、58本のセメント固化体に基づくものであり、その一軸圧縮強度の調査結果を図 3-15 に示す。

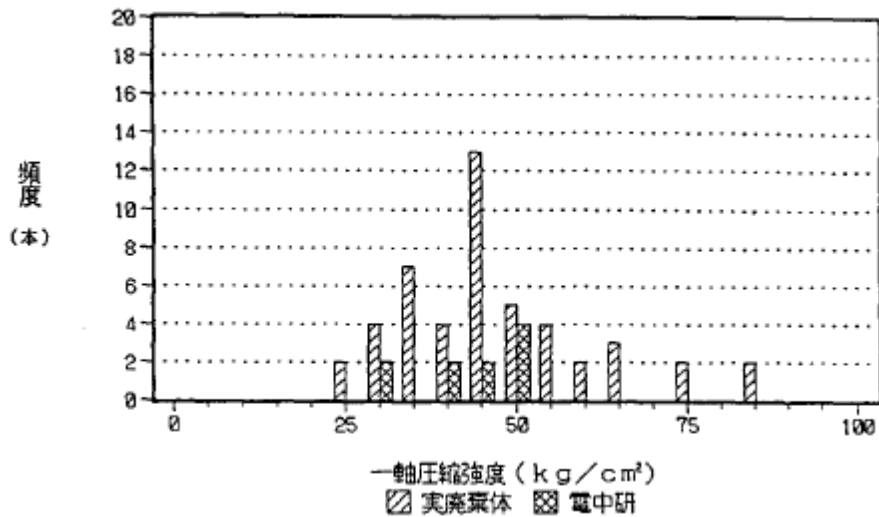


図 3-15 一軸圧縮強度の頻度分布 (真空注入混合方式)

3.2.3 ペレット注入混合方式^{[5][6]}

(1) セメントガラス固化体の一軸圧縮強度と超音波伝播速度の関係

一軸圧縮強度と超音波伝播速度の関係式は、模擬固化体での調査結果から設定している関係式を採用する。関係式を採用するに際しては、従来のセメント固化体での考え方と同様に、データの回線曲線よりも最も下側に外れたデータを基準として安全余裕を見込んで設定する。具体的な評価式は下記とする。なお、評価式とデータの関係は図 3-16 に示す。

$$\sigma = 0.001 \times V^{7.6084}$$

σ : 一軸圧縮強度 (MPa)

V : 超音波伝播速度 (km/s)

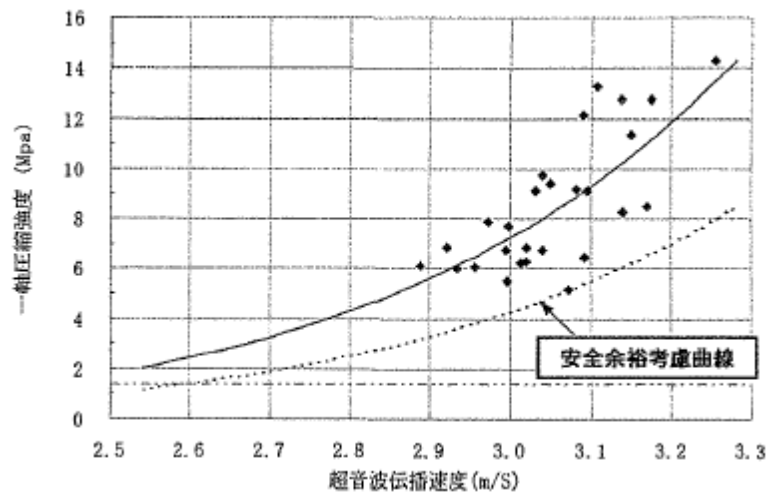


図 3-16 セメントガラス固化体の超音波伝播速度と一軸圧縮強度の関係

(2) ペレット強度とセメントガラス固化体の一軸圧縮強度との関係

コンクリートの強度は、低強度の骨材を用いると著しく低下する。セメントガラス固化体の場合、充填されるペレットが骨材に位置付けられ、ペレット強度の低下が、セメントガラス固化体の強度の低下に繋がる懸念される。製作プロセス上で、ペレット強度に影響を与える要因としては、バインダ添加率と造粒圧力が挙げられる。

バインダ添加率は、設定値 7 wt% に対し、実運転範囲は 8~16 wt% であり、変動幅は大きい。模擬 BWR セメントガラス固化体による既往の知見 (図 3-17) では、バインダ添加率による一軸圧縮強度への影響はほとんどないことが確認されている。

一方、造粒圧力と一軸圧縮強度の関係は確認していないが、実機の造粒圧力は 1.5 t/cm² に設定されて一定運転しているため、実機で製作されるペレットの強度は一定であるといえる。

以上のことから、実機で製作されるセメントガラス固化体の一軸圧縮強度はほとんど一定であると考えられる。

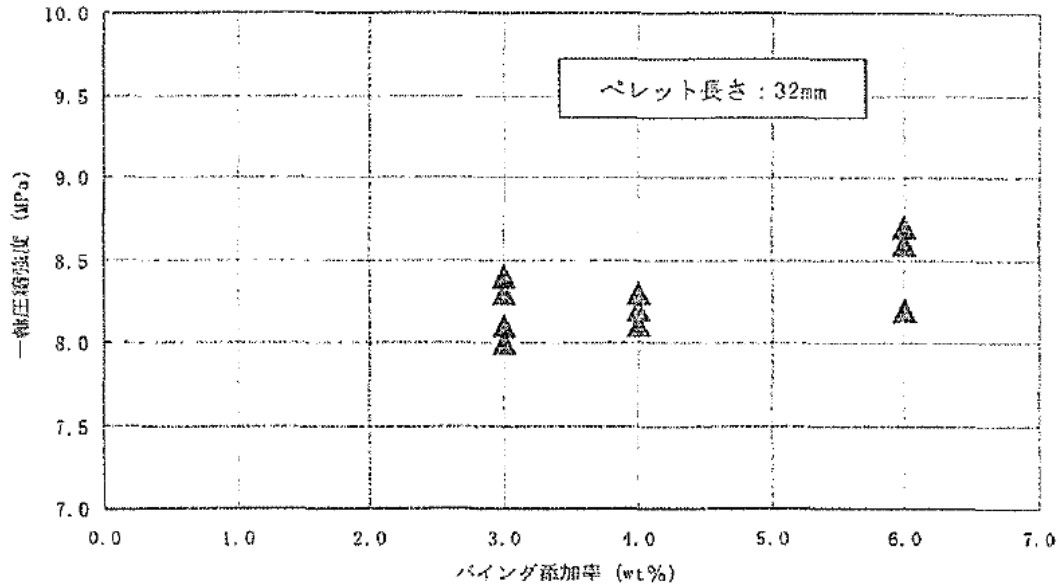


図 3-17 バインダ添加率と一軸圧縮強度 (既往例)

(3) セメントガラス固化体の一軸圧縮強度

セメントガラス固化体の一軸圧縮強度を圧縮試験機を用いて測定した。測定に供したセメントガラス固化体の製作条件を表 3-16 に、測定結果を図 3-18、図 3-19、及び表 3-17 に示す。セメントガラス固化体の一軸圧縮強度は、以下に示す傾向が確認された。

- ・ 水/セメントガラス比が小さいと一軸圧縮強度は大きくなり、水/セメントガラス比が大きいと一軸圧縮強度は小さくなる。
- ・ ペレット長さの違いによる一軸圧縮強度への影響はほとんどない。

表 3-16 セメントガラス固化体の製作条件

	ケース 1			ケース 2			ケース 3		
水/セメントガラス比	0.30			0.33			0.36		
ペレット長さ (mm)	20	28	35	20	28	35	20	28	35
バインダ添加率 (wt%)	7 (KC ブロック 5% + ステアリン酸ナトリウム 2%)								
ペレット充填量	最大充填量								
試験体規模 (mm)	φ 150 × 300								
試験点数	3	3	3	3	3	3	3	3	3

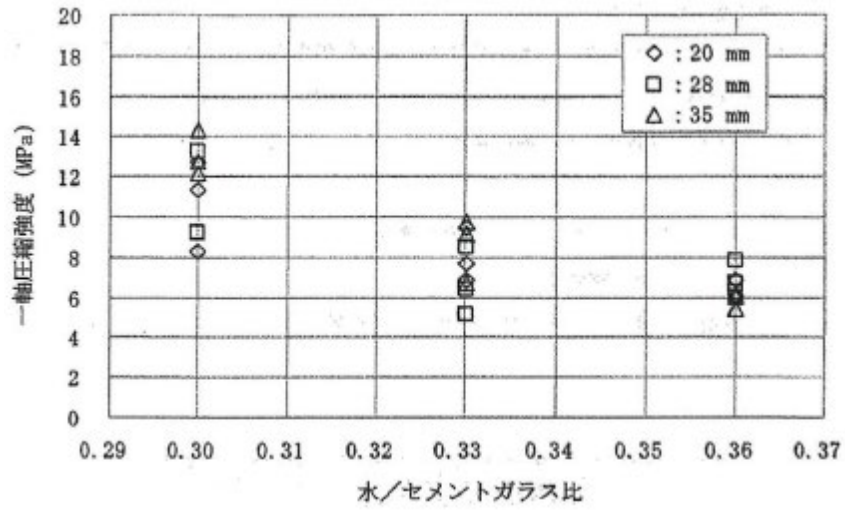


図 3-18 水/セメントガラス比による一軸圧縮強度の変化

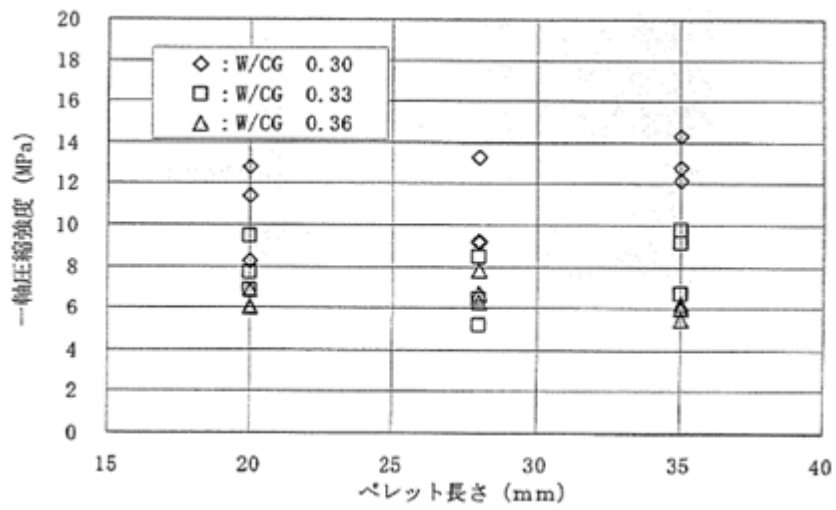


図 3-19 ペレット長さによる一軸圧縮強度の変化

表 3-17 セメントガラス固化体の一軸圧縮強度測定結果

水/セメント ガラス比	ペレット長さ (mm)	一軸圧縮強度 (MPa)	
		各データ	平均
0.30	20	12.8	10.8
		11.4	
		8.3	
	28	9.2	10.6
		13.3	
		9.2	
	35	12.2	13.1
		14.3	
		12.8	
0.33	20	7.7	8.0
		9.4	
		6.8	
	28	6.4	6.7
		5.1	
		8.5	
	35	6.7	8.6
		9.2	
		9.8	
0.36	20	6.8	6.3
		6.0	
		6.1	
	28	6.7	7.0
		7.9	
		6.3	
	35	5.5	5.9
		6.0	
		6.2	

3.3 廃棄体の輸送に係る廃棄体条件^{[7][13]}

3.3.1 廃棄体を輸送する場合の輸送物に係る基準

廃棄体を事業所外に輸送する場合の基準は、“核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則”（以下、外運搬規則という）及び“危険物船舶運搬及び貯蔵規則”並びに関連告示に定められた技術基準に適合する輸送物として輸送される。

廃棄体を専用の輸送容器に収納して輸送する場合は、輸送物の技術上の基準は基本的には輸送容器によって担保するが、廃棄体の製作に当たっても輸送に係る技術上の基準を考慮する必要がある内容もある。

なお、放射能が廃棄物全体に分布し、その平均放射能濃度が 1g 当たり A_2 値の 1/10 000 以下である低比放射性物質に相当するドラム缶形態の廃棄体を収納した輸送物は、これまでの実績として、次の何れかの輸送容器を用いた IP-2 型輸送物として輸送されている。

- － 外運搬規則 第九条第 1 項に適合した輸送容器
- － 外運搬規則 第九条第 2 項に適合した輸送容器

3.3.2 輸送容器を使用して廃棄体を輸送する場合の廃棄体の管理

外運搬規則などに従い、輸送容器を使用して廃棄体を輸送する場合、いくつかの廃棄体に関する管理（例 線量率、質量など）が必要であり、その管理の目安の例について、次に示す。

(1) 廃棄体の表面線量当量率管理の目安

IP-2 型輸送物として輸送する場合、輸送物の最大線量当量率を遵守する必要があることから、この基準を満たすように廃棄体を輸送容器に収納する必要がある。このため、輸送容器に遮蔽がない場合の廃棄体の表面線量当量率又は放射能量は、表 3-18 に示す目安の例を踏まえて収納することが望ましい。

表 3-18 遮蔽なし輸送容器に収納する廃棄体の表面線量当量率の目安の例

廃棄体種類等	目安線量当量率 (mSv/h)	ドラム缶内の Co-60 推定値 (Bq)
A 廃棄体（側面の表面線量当量率）	0.56	6.0E+8
B 廃棄体（側面の表面線量当量率）	0.50	4.7E+8
溶融体（底面の表面線量当量率）	0.61	1.3E+9
均質又は均一固化体（側面）	0.61	3.8E+8

A 廃棄体：固体状の放射性廃棄物の強度が高い廃棄物を収納した廃棄体

B 廃棄体：固体状の放射性廃棄物の強度が低い廃棄物を収納した廃棄体

注記 上記の廃棄体表面の目安線量当量率は、輸送容器に廃棄体を 8 体する場合において、収納配置によらず輸送容器 at1m で 0.1mSv/h の制限を満足できるように計算した結果^[13]である。

(2) 廃棄体種類に関する管理

均質又は均一固化体と充填固化体は同一容器に混載しない。

(3) 外運搬規則 第九条第 1 項に適合した輸送容器に収納する廃棄体の重量管理の目安

外運搬規則 第九条第 1 項に適合した輸送容器を使用して IP-2 型輸送物を輸送する場合は、最大 8t、かつ、2 個の輸送物で 15t 未満となるように、収納する廃棄体の重量を管理する必要があるため、表 3-19 に示す輸送容器へ収納する廃棄体の重量ごとに収納位置の制限の目安を踏まえて収納することが望ましい。

表 3-19 輸送容器に収納する廃棄体重量の管理の目安の例

	輸送容器総重量	収納位置制約	各廃棄体重量
①	5 トン未満	中央部 4 箇所	700 kg 未満
		端部 4 箇所	500 kg 未満
②	5 トン以上*	なし	800 kg 未満
③	5 トン以上*	中央部 4 箇所	1000 kg 未満
		端部 4 箇所	600 kg 未満

*必ず輸送容器総重量は 5 トン以上であること。

第4章 セメント固化体破砕物充填固化体の製作方法にかかる事例

4.1 セメント固化体破砕物充填固化体の製作方法^[14]

容器が劣化しているなどの理由によって、均質又は均一固化体を破砕し、新たな容器に再収納して、固型化材料等を注入することによって、セメント破砕物充填固化体を製作する方法としては、図 4-1 に示す 3 種類の方法がある。

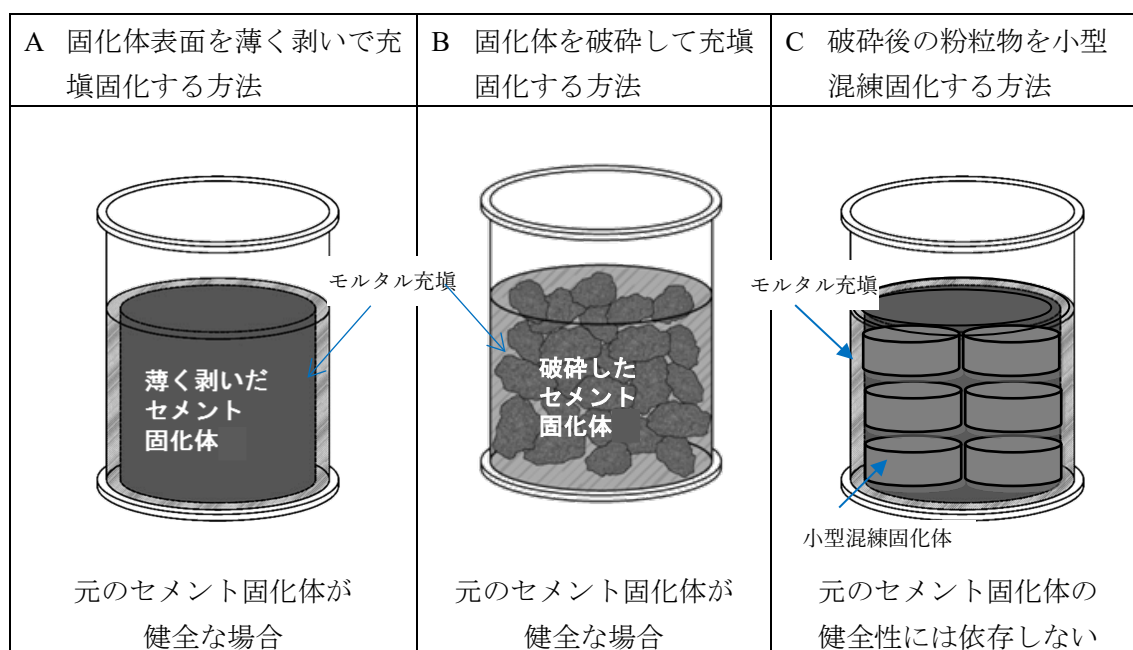


図 4-1 セメント破砕物充填固化体の製作方法

4.1.1 セメント固化体破砕物充填固化体の製作事例^[15]

図 4-1 に示す“B 固化体を破砕して充填固化する方法”の適用性については、実規模大の試験系において、固化体破砕物の吸水性、質量分布及び固型化材料の充填性に関するデータが取得されている。

(1) セメント破砕物の吸水率の測定

1) 吸水率測定方法

破砕片の吸水率を、次の 2 種類の方法で確認した。

- － 自然吸水法：水中に破砕片を浸漬し、定期的に破砕片の質量を測定することで吸水率を測定する方法。
- － 真空吸水法：水中に破砕片を沈めて、これを真空デシケーター内に設置し、1 時間真空引きした後、大気開放し、水を破砕片内の空隙に吸水させた後の質量を測定し、吸水率を求める方法。

なお、真空吸水法で吸水させた破砕片については、水中への浸漬を継続し、浸漬日数の経過に伴う破砕片の質量変化を確認した。

2) 吸水率測定結果

吸水率の経時変化を、図 4-2 に示す。浸漬日数の経過に伴い吸水率は増加し、30 日から 50 日経過後には、おおむね一定の吸水率となった。このことから、ドラム缶に収納する破砕物の吸水量は、収納質量の数%程度と想定しておくのがよい。

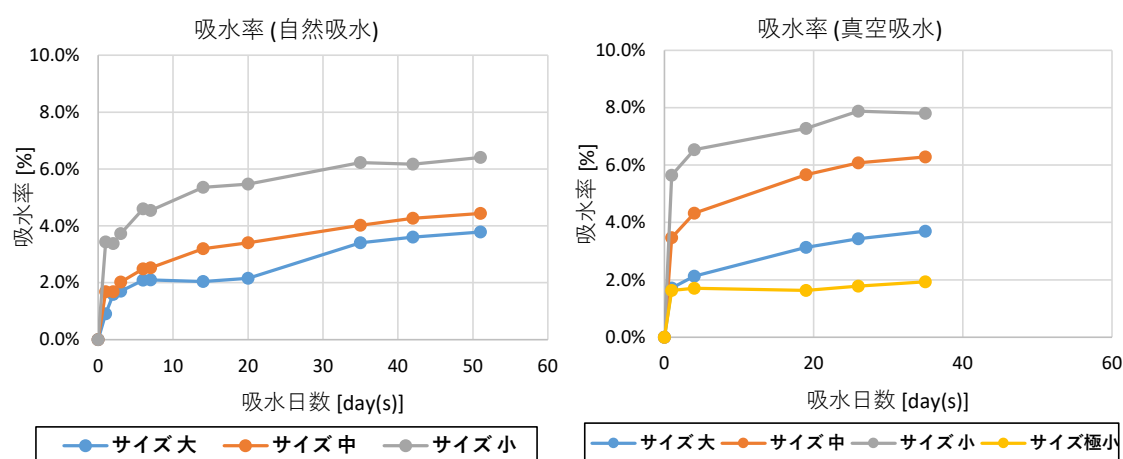


図 4-2 吸水率の経時変化

(2) 破砕物充填固化体の製作

1) セメント破砕物の質量分布

実規模大の模擬セメント固化体を、静的破砕剤を用いて破砕し、ドラム缶に充填しやすいように、さらにボールなどで破砕し、ドラム缶に収納した。ドラム缶内を 3 層に分けて、各層に収納した破砕物の大きさ、数量、質量及び破砕物を球体と仮定した場合の直径の一覧表を表 4-1 に、質量別のヒストグラムを図 4-3 に、破砕物の収納状況を図 4-4 に示す

表 4-1 破砕物の大きさ、数量、質量などの一覧

破砕物	No.	体積 (L)	質量 (kg)	層別割合 (wt %)	球体と仮定し た場合の直径 (cm)	備考
破砕片	1	9.6	13.48	40.9	26.3	第 1 層 ドリルとパールとで破砕
	2	9.3	13.12		26.1	
	3	10.1	14.20		26.8	
	4	9.6	13.52		26.4	
	5	10.6	14.98		27.3	
	6	9.6	13.50		26.3	
	7	9.5	13.44		26.3	
	8	4.7	6.58	41.3	20.7	第 2 層 ドリルとパールとで破砕
	9	4.4	6.15		20.3	
	10	4.0	5.60		19.7	
	11	4.2	5.88		20.0	
	12	3.9	5.52		19.6	
	13	4.3	6.05		20.2	
	14	4.0	5.67		19.7	
	15	4.0	5.58		19.6	
	16	4.4	6.20		20.3	
	17	5.0	7.10		21.3	
	18	4.5	6.28		20.4	
	19	4.6	6.54		20.7	
	20	4.3	6.02		20.1	
	21	4.5	6.40		20.5	
	22	3.8	5.29		19.3	
	23	4.5	6.37	20.5		
	24	5.1	7.16	6.5	21.3	第 3 層 ノミ、金づちで破砕
	25	2.7	3.84		17.3	
	26	3.0	4.28		18.0	
小片		1.4	1.96	0.8	—	大きさは数 cm オーダ
粉粒物		17.5	24.62	10.5	—	大きさは 15 mm 未満。ほぼ 全量がドリルの穴あけによ って生じたもの。
破砕物の合計			235.33	100.0	—	—

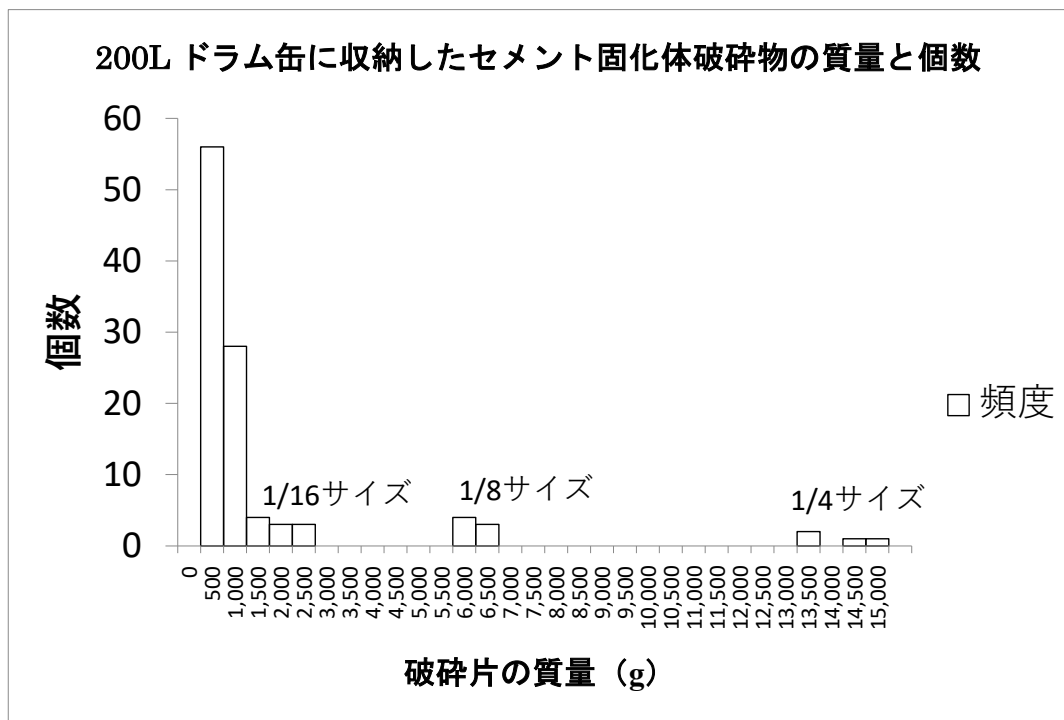


図 4-3 破砕物の質量別のヒストグラム

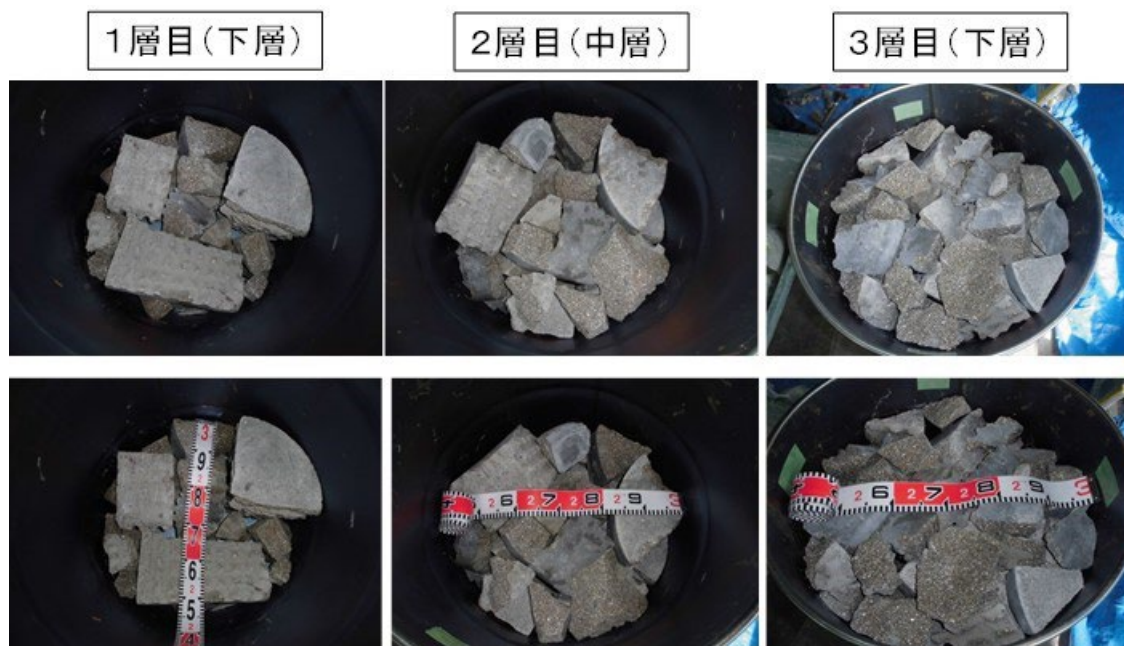


図 4-4 破砕物の収納状況

2) 模擬固化体の製作

破砕片の隙間に注入する充填モルタルは、充填固化体製作時に用いているモルタルの仕様に準じた普通ポルトランドセメント（以下、**OPC** という。）モルタルを用いた。また、模擬固化体の製作及び測定の手順は、次のとおりである。

- ① ドラム缶の内寸（内径 2 か所、深さ 1 か所）と質量とを測定する。内径は直交する 2 方向を測定、深さは中央部を測定する。
- ② 収納する破砕片の質量を確認し、ドラム缶に収納する。破砕片の収納高さは、容器上面から深さ 10 cm 程度の位置までとする。
- ③ 破砕した時、発生する粒径 15 mm 未満の破砕片（粉粒物）については、あらかじめ取り除かれていることを確認する。
- ④ 破砕片を収納後、ドラム缶全体の質量を確認する。
- ⑤ ドラム缶内に浮上防止枠を設置し、全体質量を測定する。
- ⑥ OPC モルタルを混練し、練上り温度、流動性（P ロート流下時間）、密度を確認する。練上り温度については、現場環境において制御することが難しいため、特に定めない。
- ⑦ OPC モルタルが所定の性状（P ロート流下時間 16～50 秒）であることを確認後、OPC モルタルをモルタルポンプでドラム缶に注入する。注入速度は、モルタルポンプの吐出量の 20 L/分程度とし、容器上面からの距離 5 cm 程度の位置まで OPC モルタルを充填する。充填作業時には、8)～10)の項目を確認するとともに、充填作業中に OPC モルタルの流動性に変化がないことなどを確認する。
- ⑧ OPC モルタルの充填完了後、OPC モルタル上面に変化などが生じていないかを確認する。
- ⑨ 翌日、充填した OPC モルタル上面の状態（ブリーディングの有無など）を確認する。
- ⑩ 翌日、固化体上面の観察を行い、ドラム缶上端から固化体上面との距離を確認する。その後、20℃程度に設定した室内に移動し、切断作業まで養生を継続する。

(3) セメント破砕物充填固化体の製作結果

廃棄体の製作時に確認及び計測した各種寸法、質量、計測結果などを、表 4-2 に示す。表 4-2 に示すように、破砕片の収納量は、103 L であり、ドラム缶内容積に対する充填率は 48 %であった。調整した OPC モルタルの練上り条件及び注入条件を、次に示す。

- － 練上り温度： あらかじめ、材料を 20℃設定の室内で保管していたため 20.3℃となった。
- － P ロート流下時間： 30.5 秒であり、目標値（16 秒～50 秒）の範囲内であった。
- － 注入速度： 充填に要した時間、充填量、密度から計算すると 19.5 L/分となり、計画していた注入速度（20 L/分）に近かった。

充填した OPC モルタルが硬化した後、ドラム缶上端から硬化した OPC モルタル上面までの距離を計測し、上部空隙量を計算した結果、上部空隙率は 8.4%であった。

“充填固化体の標準的な製作方法”では、充填モルタルの注入速度が、25 L/分以下、上部空隙は、蓋を締めた状態で蓋の下面から充填固化体上面までの空隙が、容器内容積に対して約 10 %以下まで充填することとなっており、製作した充填固化体は、いずれの点も満たしていることから、

問題なく充填固化体を製作できたといえる。また、内部空隙率は0.15%であり、モルタルは、内部まで十分充填されている。

表 4-2 模擬固化体製作記録

No.	項目	測定結果など
1	ドラム缶の容積	216.4 L
2	ドラム缶質量（蓋及び本体）	22.7 kg
3	模擬セメント固化体破砕片の収納量	146.5 kg
4	模擬セメント固化体破砕片の密度	1.41 g/cm ³
5	模擬セメント固化体破砕片の充填率（ドラム缶容積に対して）	48.0 %
6	充填モルタル練上り温度	20.3℃
7	P ロート流下時間	30.5 秒
8	充填モルタル注入時間	5.13 分
9	充填モルタル注入速度	19.5 L/分
10	模擬廃棄体質量（モルタル硬化後）	378.6 kg
11	上部空隙量	18.20 L
12	上部空隙率	8.4%
13	注入した充填モルタル質量	207.7 kg
14	硬化後の充填モルタルの密度	2.20 g/cm ³
15	模擬セメント破砕物充填固化体中の内部空隙量	0.30 L
16	模擬セメント破砕物充填固化体中の内部空隙率	0.15 %

(4) 模擬固化体断面の観察結果

OPC モルタル充填から 15 日後に、模擬固化体をダイヤモンドワイヤーで切断し、切断面の観察を行った。図 4-5 に切断面の状態を示す。切断面を確認した結果、OPC モルタルは、収納した破砕物間の隙間に十分に行きわたっており、破砕片と OPC モルタルとが一体化されていることから、モルタル充填性は、良好であるといえる

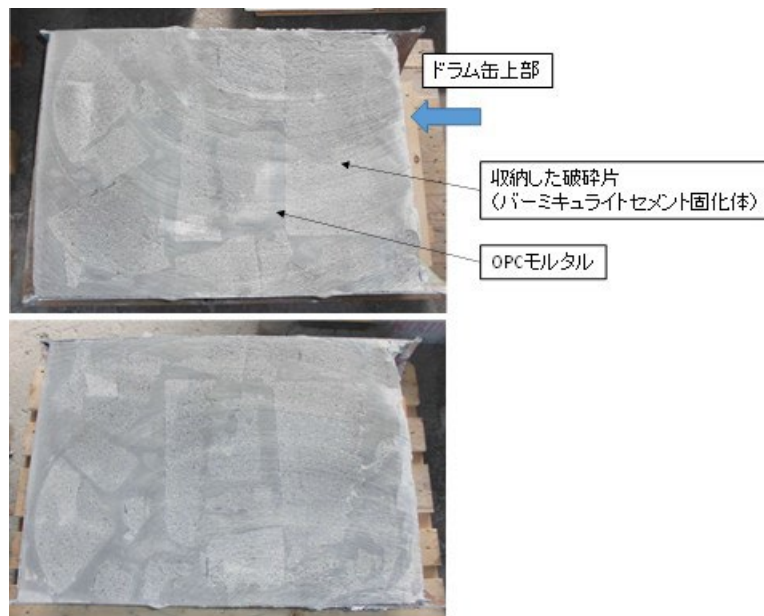


図 4-5 切断面の状態

(5) セメント破砕物充填固化体の圧縮強度

製作したセメント破砕物充填固化体の圧縮強度を、表 4-3 に示す。圧縮強度の測定は、3 か所をコア抜きして測定し、30.0 MPa、13.8 MPa、24.8 MPa であった

表 4-3 セメント破砕物充填固化体の圧縮強度

試料	材齢 (日)	供試体 No.	質量 (g)	最大荷重 (kN)	圧縮強度 (N/mm ²)
セメント破砕物 充填固化体採取 コア	52	1	1 355.1	131.0	30.0
		2	1 169.9	60.0	13.8
		3	1 241.1	108.4	24.8

第5章 参考文献

- [1] 日本原燃株式会社 六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センター 廃棄物埋設確認申請書（廃棄体用）
- [2] 廃棄体製作に係わる説明書
- [3] 均質均一／充填固化体の標準的な製作方法及び確認方法の標準化に関する調査 平成 23 年度報告書 平成 24 年 3 月 一般社団法人 日本原子力技術協会
- [4] 共同研究報告書 昭和 61 年 3 月 “放射性廃棄物の無機固化処理技術の開発に関する研究” 昭和 60 年度 下半期（最終報告書）、関西電力(株)、北海道電力(株)、東北電力(株)、東京電力(株)、中部電力(株)、北陸電力(株)、中国電力(株)、四国電力(株)、九州電力(株)、日本原子力発電(株)、(株)日立製作所
- [5] (株)日立製作所 セメントガラス固化体の埋設基準適合性に関する調査（step2） 平成 15 年度（平成 15 年度最終報告書） 関西電力(株)、北陸電力(株)受託研究報告書 平成 16 年 3 月
- [6] (株)関西総合環境センター、(株)日立製作所 セメントガラス固化体の埋設基準適合性に関する調査（step1） 平成 15 年度（平成 15 年度報告書） 関西電力(株)受託研究報告書 平成 16 年 3 月
- [7] 低レベル放射性廃棄物運用マニュアル
- [8] 電力中央研究所報告 依頼報告：72596 昭和 48 年 6 月 “敦賀原子力発電所の模擬廃液のドラム缶容器詰めセメント固化体の高水圧実験”
- [9] 電力中央研究所報告 研究報告：73111 昭和 49 年 7 月 「放射性廃棄物のアスファルト固化（その 1）－模擬廃棄物とアスファルトの混合特性－」
- [10] 電力中央研究所報告 依頼報告：U89507 平成元年 7 月 「泊原子力発電所アスファルト固化体およびセメント固化体の健全性評価」
- [11] 電力中央研究所報告 依頼報告：381516 昭和 56 年 8 月 「敦賀発電所放射性廃棄物ビチューメンパッケージの高水圧実験と落下衝撃試験」

- [12] 電力中央研究所報告 依頼報告：U90523 平成3年5月「PWR原子力発電所廃棄物の真空注入セメント固化に関する検討」
- [13] 電共研報告書 雑固体廃棄物の輸送に関する研究（平成9年度）
- [14] 未搬出状態にあるセメント固化体の標準的な廃棄体製作方法及び確認方法 2019年10月
北海道電力(株), 東北電力(株), 東京電力ホールディングス(株), 中部電力(株), 北陸電力(株),
関西電力(株), 中国電力(株), 四国電力(株), 九州電力(株), 日本原子力発電(株)
- [15] 廃棄物処理対象物の拡大、および固型化等処理技術拡大に向けた検討 2020年3月 関西
電力(株)