

技術レポート

(改訂1)

低レベル放射性廃棄物処分用
廃棄体製作技術について
(各種固体状廃棄物)

平成10年3月

財団法人 原子力環境整備センター

目 次

1. はじめに	1
2. 固体状廃棄物の開缶調査	2
2.1 開缶調査対象	2
(1) 固体状廃棄物ドラム缶の保管状況	2
(2) 開缶調査対象の選定	3
2.2 分別除去の調査	9
(1) 分別除去対象	9
(2) 分別除去方法	9
(3) 除去結果	10
2.3 標準的な模擬廃棄物の選定	12
(1) 標準的な廃棄物組成の選定	12
(2) 模擬廃棄物種類の選定	12
(3) 模擬廃棄物寸法の設定	12
(4) 第二次調査による標準的な廃棄物組成への影響について	13
3. 廃棄体製作に関する基礎的な検討	19
3.1 切断処理の方法	19
(1) 対象となる廃棄物	19
(2) 処理方法	20
(3) 試験結果	20
(4) 処理基準	22
3.2 圧縮処理の方法	23
(1) 対象となる廃棄物	23
(2) 処理方法	23
(3) 試験結果	23

3.3	固型化材料等の注入方法	32
3.4	廃棄体強度の向上方法	32
4.	実大模擬廃棄体の製作実証試験	42
4.1	実大模擬廃棄体の製作	43
	(1) 実大模擬廃棄体の製作方法	43
	(2) 実大模擬廃棄体の製作結果	44
4.2	廃棄体の残留空隙量	52
	(1) 水置換による評価	52
	(2) X線CT (Computed Tomography)による評価	53
	(3) 切断による断面確認	54
	(4) まとめ	54
4.3	廃棄体の有する強度	72
	(1) 試験方法	72
	(2) 荷重試験結果	73
5.	まとめ	82
Appendix-1	金属廃棄物の表面積について	83
Appendix-2	固型化材料等の性能維持に関する検討	86
Appendix-3	高周波溶融処理の性能管理に関する検討	101
Appendix-4	廃棄体の残存空隙に関する検討	123
Appendix-5	実大模擬廃棄体の製作に供した溶融体の製作条件について	138

1. はじめに

わが国の原子力発電所から発生する低レベル放射性廃棄物の処分については、1992年12月より青森県六ヶ所村の低レベル放射性廃棄物埋設センターで浅地層埋設処分が実施されている。

当初の埋設対象は、主として発電所のプロセスから定常的に発生する濃縮廃液、樹脂等とセメント、アスファルト、プラスチック等の固型化材料を200 ℓドラム缶に均質に練り混ぜ又は均一に混合する事により固型化した廃棄体（均質・均一固化体）に限定されていた。

発電所の定期検査や改良工事等に伴い発生する交換部品や工事用資材等の不燃性の廃棄物（以下本報告においては固体状廃棄物と呼ぶ）については、1994年9月に「核燃料物質等の埋設に関する措置等に係る技術的細目を定める告示」が改定され、埋設処分のための固型化方法が定められた。

固体状廃棄物については、その形状、材質等が多岐に渡り、埋設のための技術基準に適應する廃棄体となるように固型化するための技術的事項を検討する必要がある。

また固体状廃棄物の廃棄体の物性は、固体状廃棄物の物性に影響されることが考えられるため、影響されうる要因について整理し検討する必要がある。

これらの技術的課題を解決するため、まず、現在発電所に保管されている廃棄物の実態を把握して全発電所を代表できる廃棄物組成を定義し、これを基に廃棄物の物性に応じた廃棄体製作の方法を確立し、全ての廃棄体が技術基準に適合する性能を有し、埋設処分出来る廃棄体であることを実証する必要がある。

本報告は固体状廃棄物の固型化に関する調査研究の成果を纏めたもので、今後各発電所での廃棄体製作に際し、廃棄体の性能と品質の維持に寄与するものと考えられる。

2. 固体状廃棄物の開缶調査

原子力発電所に保管されている固体状廃棄物の開缶調査を以下の目的で実施した。

- ① 廃棄体の製作に必要な分別除去対象物の除去結果の把握
- ② 廃棄体性能評価のための標準廃棄物の設定

開缶調査は、主に②を目的とした第一次調査（平成5～6年度）と、第一次調査結果に基づく実大模擬廃棄体製作実証試験（4.で後述）と並行して開缶調査データの精度向上のため参考的に追加実施した第二次調査（平成7年度）がある。

また、①については、第一次、第二次の双方で調査している。

2.1 開缶調査対象

開缶調査するドラム缶の選定にあたっては、調査の代表性を確保する観点から以下の検討を行った。

(1) 固体状廃棄物ドラム缶の保管状況

固体状廃棄物は、保管容器（200 ℓドラム缶又は大型金属容器）に収納され、容器単位で所定の管理データを付して固体廃棄物貯蔵庫に保管されており、保管容器毎に6分類程度の分類がなされている。（主たる内容物で区分されているため、可燃物や他品目の廃棄物が混入している場合がある。）

平成4年度末の全国の原子力発電所で保管されている固体状廃棄物の量は、200 ℓドラム缶換算で約30万本である。そのドラム缶分類を表2.1-1に示す。

なお、平成6年度末においても、構成比率は平成4年度とほぼ同様である。

表2.1-1 全国の原子力発電所の固体状廃棄物保管量（200 ℓドラム缶換算）

ドラム缶分類	累積保管量（本）	構成比率（％）
金属類	138,035	47
塩ビ・ゴム類	36,492	12
保温材	36,194	12
フィルター	30,474	10
コンクリート/ガラス類	13,050	4
その他	43,875	15
合計	298,120	100

(2) 開缶調査対象の選定

廃棄物の実態調査において、サンプル（ドラム缶単位）の代表性を確保するため、次の点に留意して対象発電所及び調査ドラム缶を選定することとした。

- ① 廃棄物保管量が多く、ドラム缶分類の構成比が全国の発電所平均に近似している発電所を選定すること
- ② 調査対象廃棄物の発生時期が特定の時期に偏ることなく選定すること
- ③ 金属類のドラム缶については重量のばらつきが比較的大きいので、全発電所の重量分布にほぼ対応させて選定すること

具体的な選定にあたっての考え方を以下に示す。

a. 調査対象炉型

発電所で使用されている材料等は同一炉型であれば大きな違いはなく、発生する廃棄物もその炉で使用されている材料と同様の材料であることから、BWR及びPWRの炉型別に調査を実施した。

b. 調査対象発電所

調査対象発電所は、運転、定期検査、改良工事を全般にわたって経験し、そこで保管されている廃棄物ドラム缶の分類毎の構成比は全BWR及び全PWRの構成比とほぼ等しいことが望ましい。この点を考慮して、BWR及びPWRそれぞれの炉型で一発電所を選定した。（図2.1-1）

c. 調査対象廃棄物ドラム缶の種類

対象発電所の廃棄物ドラム缶の選定に当たっては、調査対象とする廃棄物に偏りが生じないように、全国のBWR及びPWR発電所に貯蔵されている廃棄物ドラム缶分類毎の貯蔵割合を考慮した。（図2.1-2にはBWR、PWR合わせた合計で全国との比較を記載）

d. 金属類ドラム缶の重量分布

金属類ドラム缶の選定に当たっては、全国の原子力発電所に貯蔵されている金属類廃棄物ドラム缶の重量分布に類似するように選定した。（図2.1-3）

e. 発生年代

調査対象廃棄物の発生年代は、運転や定期検査の年代による影響がないよう広範囲の年代から選定した。ただしサンプリングに際しては、廃棄物保管庫の構造上搬出順位の制約を考慮する必要があり、任意・無条件抽出は困難であった。

BWR及びPWR各発電所でサンプリングした廃棄物ドラム缶の発生年度別分布を図2.1-4に示す。

調査対象発電所及び廃棄物の選定に当たっての考え方を示したが、以上は、第一次調査の実施に際し検討したもので、この第一次調査のデータに基づいて2.3で述べる「標準的な模擬廃棄物の選定」を行っている。参考的に実施した第二次調査でも調査対象選定の考え方は同様であり、第二次調査の結果を加えて標準廃棄物の評価をしても、選定結果は第一次調査のみによるものと大きく異なることはなかった。(2.3(4)参照)

なお、第一次調査と第二次調査を合わせた最終的なサンプリングドラム缶本数は、各炉型の廃棄物発生量割合を考慮して、BWRから104本、PWRから50本とした。

サンプリングされた154本のドラム缶の分類別廃棄物総重量は表2.1-2の通りとなった。

表2.1-2 調査ドラム缶分類別廃棄物総重量

ドラム缶分類	ドラム缶数量(本)	総重量(kg)	構成比率(%)
金属類	90	12,225	79
塩ビ・ゴム類	24	1,100	7
保温材	24	863	6
廃フィルタ	10	257	2
コンクリート/ガラス	6	867	6
合計	154	15,312	100

(廃フィルタは気体系、液体系を含む)

(注)重量は廃棄物収納状態での計量値であり、ポリエチレン袋や可燃物等埋設対象物も含まれている。

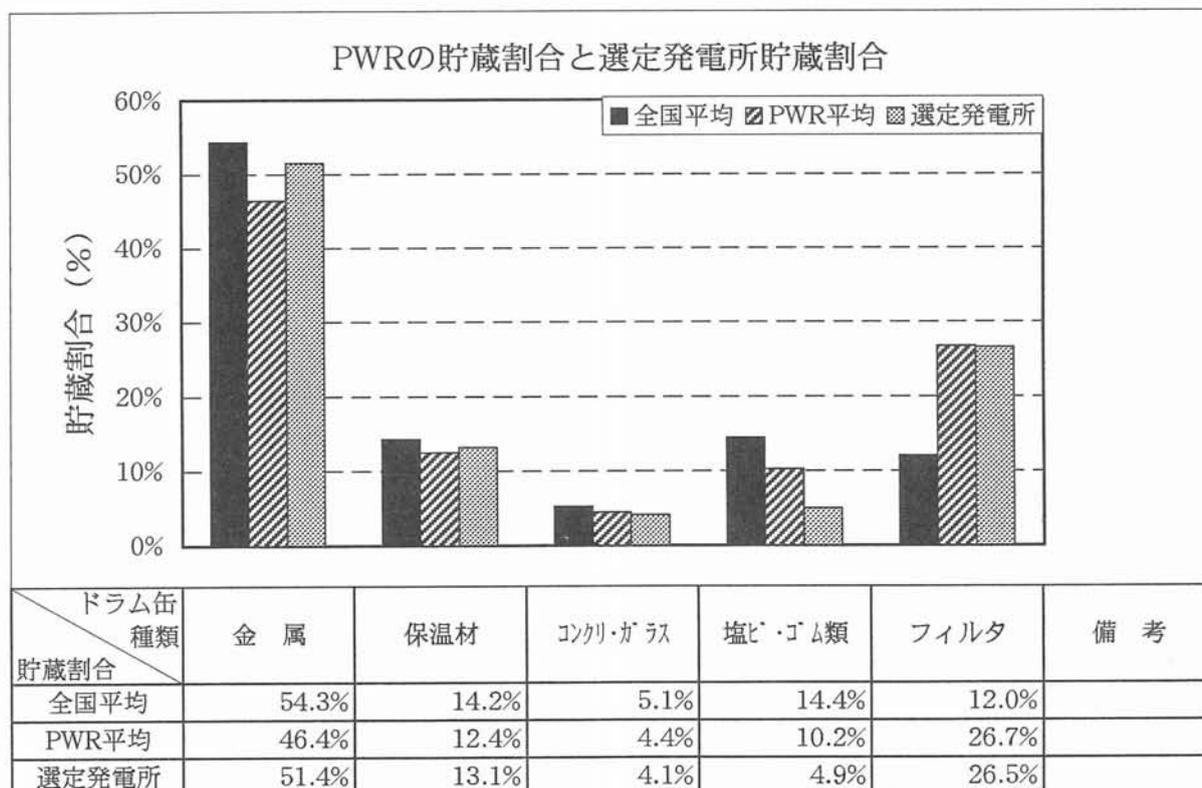
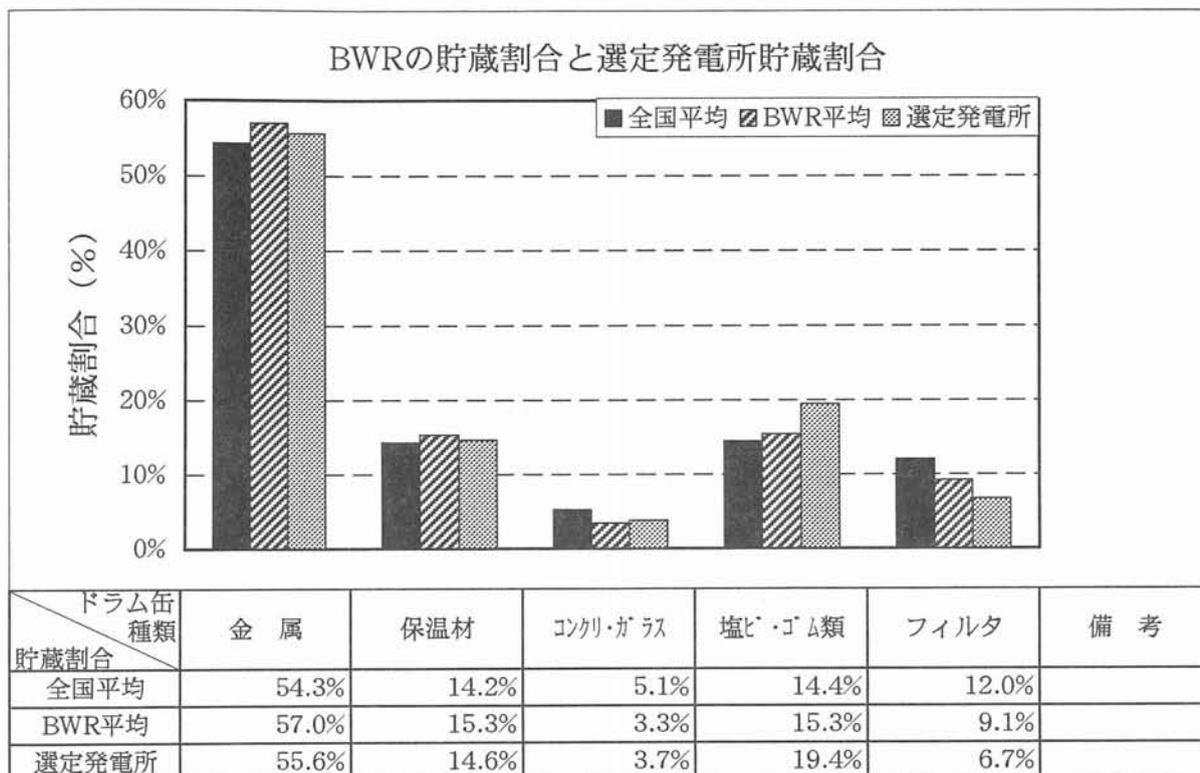


図2. 1-1 全国貯蔵割合と発電所別貯蔵割合

(注) 全国平均値は、表2. 1-1で"その他"に分類されるドラム缶を除いた各ドラム缶種類の構成比率である。

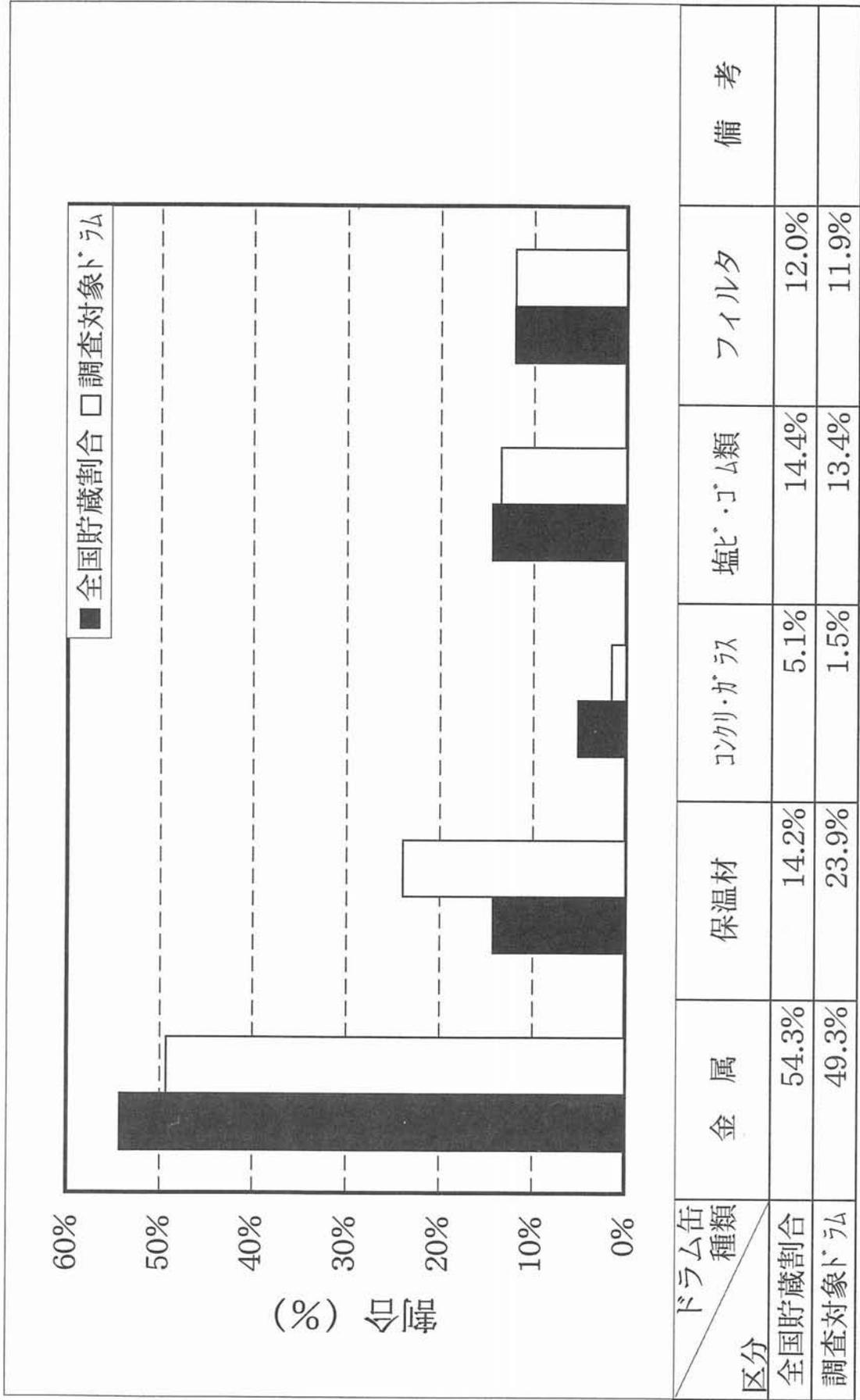


図2. 1-2 全国貯蔵割合と調査対象ドラム缶

(注) 全国平均値は、表2. 1-1で"その他"に分類されるドラム缶を除いた各ドラム缶種類の構成比率である。

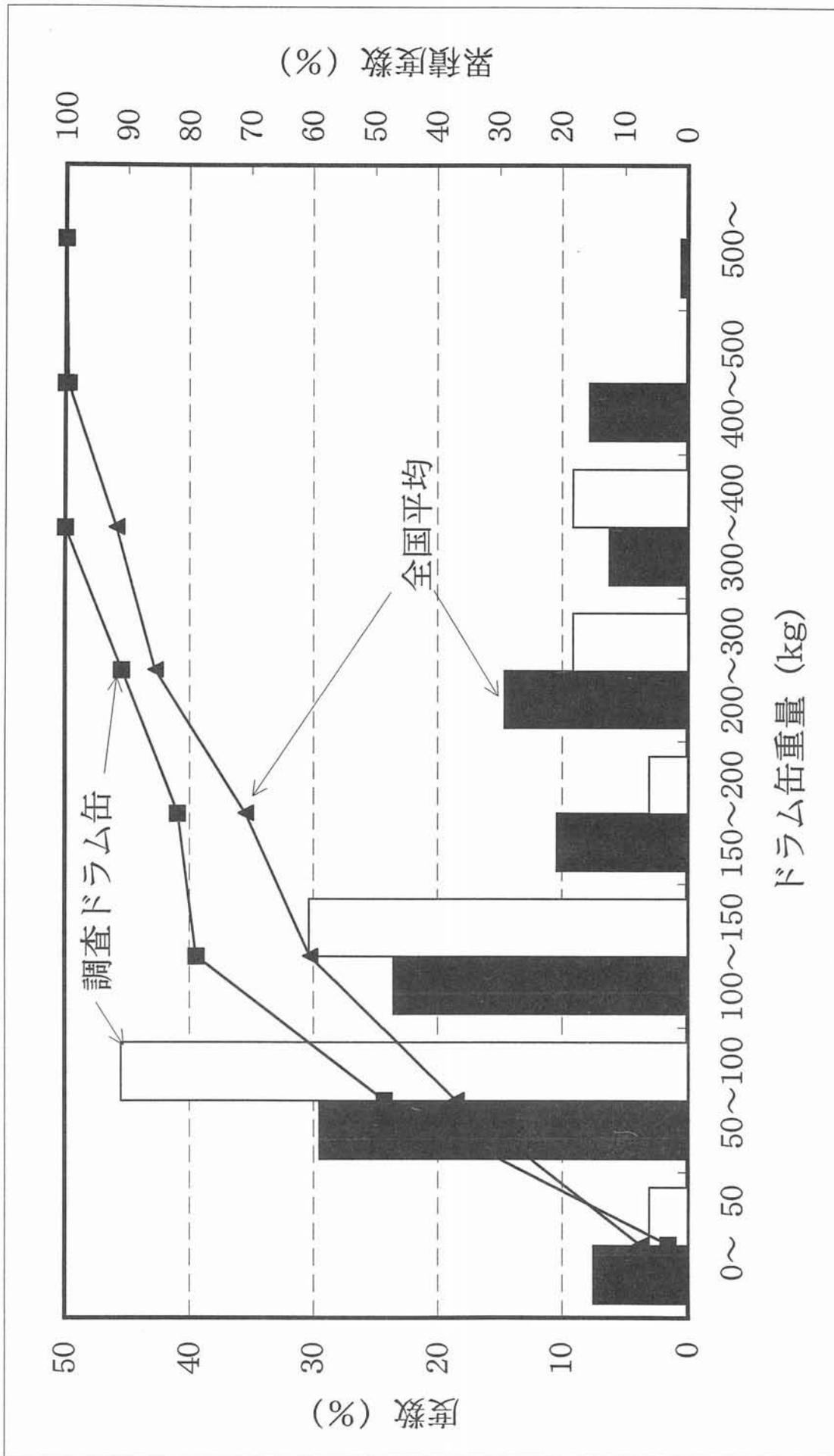
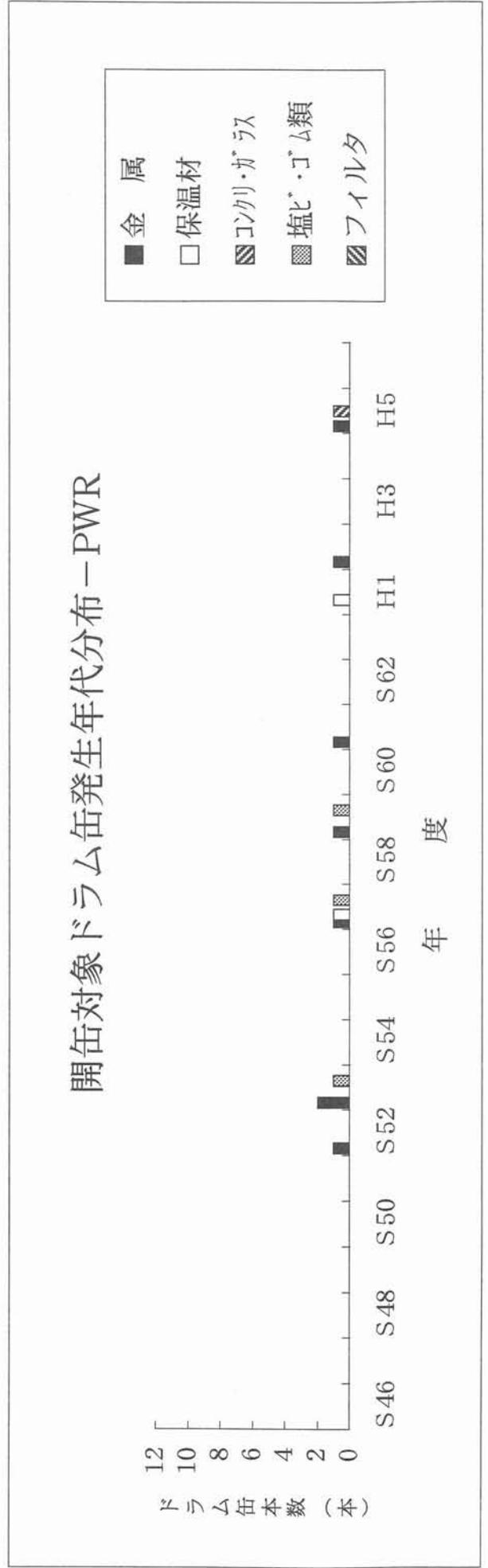
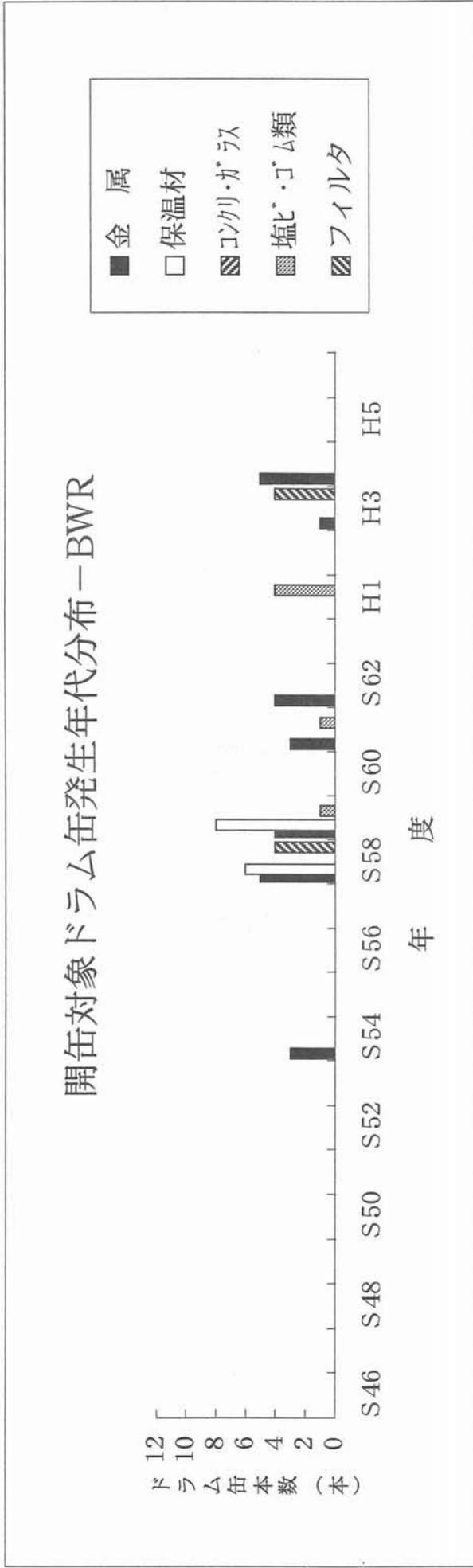


図2.1-3 金属類ドラム缶重量分布…全国平均対調査ドラム缶

図2.1-4 開缶調査対象ドラム缶発生年代分布



2.2 分別除去の調査

種々の固体状廃棄物の中には、廃棄体製作を行う前にあらかじめ分別除去し、固型化の対象物としない方が良いものがある。ここでは開缶した固体状廃棄物（第一次調査と第二次調査）を用いた分別調査の結果を以下に示す。

(1) 分別除去対象

分別除去対象としたものは以下の通りである。

- ・可燃物（セルロース系天然有機物、イソプレン系天然有機物）

埋設処分する廃棄物量をできるだけ低減すること等を目的に、焼却炉で焼却できる可燃物は、分別除去対象とした。

- ・アルミニウム製品

アルミニウムはセメント系充填材中のアルカリ環境で反応してガスを発生し、多量存在すれば固型化等を阻害する可能性があるため、分別除去対象とした。

- ・廃棄体の健全性を損なうおそれのある物質

「廃棄体の健全性を損なうおそれのある物質」に該当するおそれのあるものとして、多量の油類及び多量の有機溶剤（浸透探傷検査用スプレー缶（通称：PT缶）等に残留しているもの）があり、これを分別除去対象とした。

- ・鉛製品

鉛製品とは大部分がしゃへい材として使用されていたものであり、再利用が可能であることから分別除去対象とした。

- ・液状物質

液状物質は固型化材料等と一体的に充填して固型化できないことから、容器内に多量に含まれる液状物質を分別除去対象とした。

(2) 分別除去方法

上記の分別除去対象を以下の要領で除去した。

① 除去対象物品

○単一物品

- ・木材、紙、布、革で構成される製品（セルロース系天然有機物）
- ・ゴム手、長ぐつ等の天然ゴム製品（イソプレン系天然有機物）

- ・一片が手のひらサイズ（約15cm）程度以上で次のようなアルミニウム製品
 - ・アルミのみでできているもの
 - ・大半がアルミでできているもの
- ・鉛毛マット及びしゃへい鉛等の鉛製品

○特定物品

HEPAフィルタ、アルミ製電動工具

○油類、有機溶剤等の容器内に多量に含まれる液状物質

② 分別方法

- ・廃棄物をドラムより取出し、養生袋を破袋し、分別用バケツに収納する。
- ・廃棄物を目視により確認し、除去対象物品を取り除く。
- ・特定物品と思われるものは手に持って裏面も確認する。

③ 作業員への指示方法

分別作業を行う作業員に対する作業方法の指示は、除去対象物品について簡単な口頭説明により実施した。なお、特定物品は、当該物品の写真を示した。

(3) 除去結果

① 除去重量

セルロース系天然有機物、イソプレン系天然有機物、アルミニウム製品等を上記(2)のように除去した結果を表2.2-1に示す。

表2.2-1 分別除去結果

該当物質	除去前該当物質重量 (g/本)	除去後該当物質重量*1(g/本)	除去率*2 (%)	含有率*3 (g/kg)
セルロース系天然有機物	2,413	145	94.0	1.6
イソプレン系天然有機物	432	7	98.4	0.1
アルミニウム	3,770	109	97.1	1.2
鉛製品	3,095	0 *4	100	0
多量の油類、多量の有機溶剤	0	—	—	—
液状物質	149	3	97.8	0.0

- *1 不燃物に付着していたり、含まれていたりするため分別除去されずに残留する該当物質の量
- *2 除去後該当物質重量／除去前該当物質重量
- *3 除去後該当物質の総重量／埋設対象となる廃棄物総重量（13,595kg）
（注）分母の重量には埋設対象物中への埋設対象外物質の残留量をふくむ。
- *4 除去前の廃棄物中には、下記のようなものが混入していたが、鉛は比重が大きいこと等から容易に分別除去できた。
 - ・鉛毛マット、しゃへい鉛、鉛板、鉛毛、鉛粒、鉛チューブ等

② 金属廃棄物の表面積

埋設処分環境では、埋設施設への地下水の浸入が緩慢であることから、セメント系材料によってアルカリ環境が長く維持されるとともに、溶存酸素が消費され、アルミニウムがアルカリ腐食したり、鉄が嫌気性腐食したりして、微量ではあるが継続的にガスが発生することが考えられる。

このため、上記(2)のように除去した後の廃棄物について、主要なガス発生源となる残留アルミニウム及び鉄の金属廃棄物の表面積を算定した。その結果をAppendix - 1 にまとめて示す。

2.3 標準的な模擬廃棄物の選定

4.章で記述する製作実証試験に用いる模擬廃棄物は、組成、形態等が実態に則したものである必要があり、この選定を固体状廃棄物の第一次開缶調査結果に基づき以下の(1)～(3)の手順で実施した。

標準模擬廃棄物選定フローを図2.3-1に、また、選定した模擬廃棄物を表2.3-1に示す。

(1) 標準的な廃棄物組成の選定

埋設する充填廃棄体を代表できる標準的な廃棄物組成を選定する。選定手法は以下の通りである。

- ①実際に固型化する廃棄物は、廃棄物の分類（4.章に記述する）に適合するよう分別して固型化されたため、各分類を代表する廃棄物とする。
- ②廃棄物の形状、材質によって、固型化材料等の充填性が異なるため、各廃棄物の分類毎（図2.3-1及び表2.3-1では廃棄体型式と表現している。）に形状、材質を代表できる廃棄物とする。
- ③上記①②において「代表する廃棄物」とは、当該廃棄物の残存割合が多い廃棄物とする。
- ④存在割合から代表性を判断する際には、廃棄物品目の多様性を考慮し、「廃棄物単品の存在割合」と、「その割合の多い順に累積した場合の累積割合」の両方から判断した。ここでは具体的には、
 - ・廃棄物単品の重量割合が1%以上の廃棄物
 - ・廃棄物の累計重量割合が90%を占める廃棄物とした。

(2) 模擬廃棄物種類の選定

上記により選定された代表廃棄物の中から絞り込んで製作実証試験に供する模擬廃棄物種類とする。これは選定された代表廃棄物が多岐にわたっているため、試験結果に影響を与えない範囲で類似した性状の廃棄物品目に絞り込んで、固型化試験に注入性が非保守的な評価とならないよう設定した。

(3) 模擬廃棄物寸法の設定

模擬廃棄物の寸法は、開缶調査結果から得られた実際の廃棄物の代表寸法とすることを基本に、切断や圧縮処理が行われることも踏まえて、廃棄体製作時に注入性が非保守的な評価とならないよう設定した。

(4) 第二次開缶調査による標準的な廃棄物組成への影響について

参考的に追加して実施した第二次の開缶調査結果のデータを加えて、上記と同様な手順で選定した廃棄物種類、割合が、第一次開缶調査データに基づいて選定した標準的な条件からどの程度変動するのかについて検討した。

表2.3-2 に、第二次開缶調査結果も踏まえて選定した廃棄物組成との比較を示す。表2.3-2 によれば、A廃棄物（4.章で記述する）では金属片、板類の割合が相対的に増加し、B廃棄物（4.章で記述する）では管類や片・板類の割合が増加している。管類の増加は充填性のよい大口径の管類の増加によるものであることから、第二次の開缶調査結果を加えて選定した廃棄物は標準廃棄物より充填しやすくなっていると考えられる。

なお念のために、この第二次開缶調査結果も加えて選定した廃棄物を用いて水置換による充填性試験を実施し（試験方法は4.章で記述する）、4.章で示す試験結果と比較した結果、両者に相違は認められなかった。

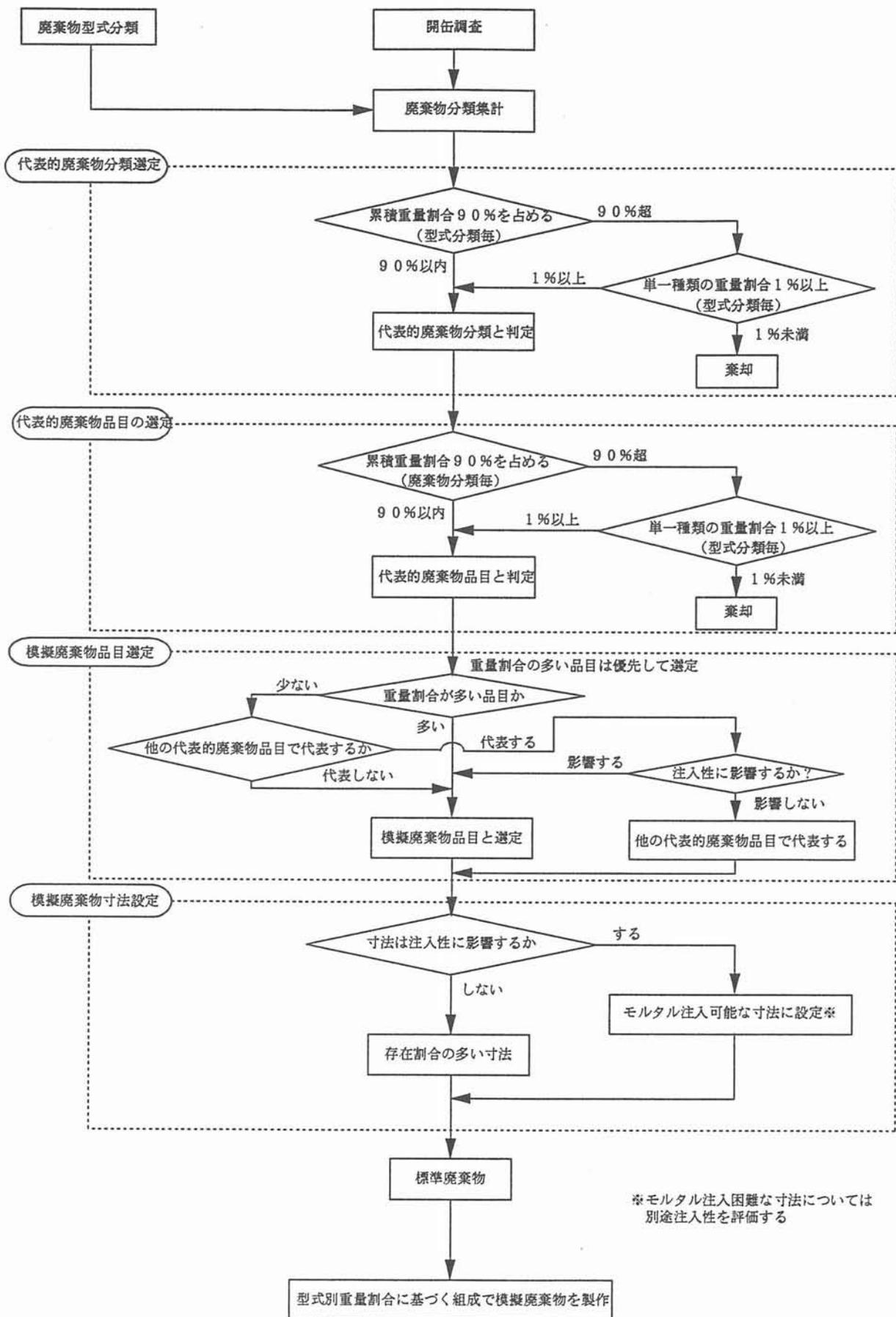


図2.3-1(1) 標準模擬廃棄物選定フロー (1/2…非圧縮物)

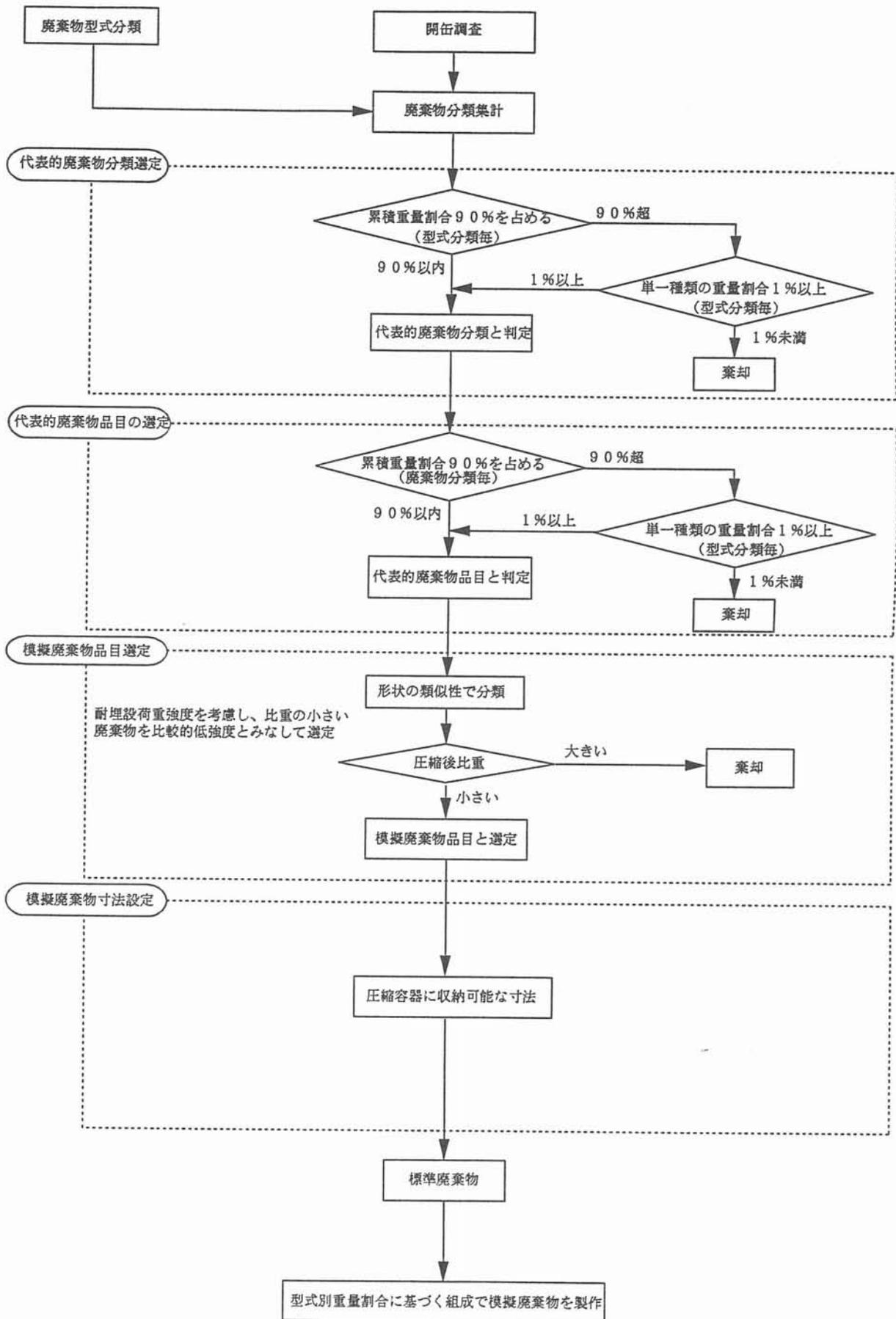


図2.3-1(2) 標準模擬廃棄物選定フロー (2/2…圧縮物)

表 2. 3 - 1 模擬廃棄物の選定 (2 / 2 ... B 型廃棄物)

廃棄物分類	廃棄物重量割合 (%)	累積重量 (%)	具体的廃棄物品名			判定	代表模擬廃棄物品目
			具 体 的 廃 棄 物 名	重量割合 (%)	累積重量割合 (%)		
B 1	管 類	47.5	耐圧塩ビホース	61.9	29.4	◎	耐圧塩ビホース
			塩ビホース	25.9	87.8	◎	塩ビホース
			ダクトホース	11.3	99.1	◎	ダクトホース
			ケーブリング	90.9	90.9	◎	ケーブリング
			コード	8.7	99.6	◎	ケーブリング
			ヘルメット	24.8	24.8	◎	ヘルメット
			ガスケット	23.0	47.9	◎	ガスケット
			ポリバケツ	21.8	69.6	◎	ポリバケツ
			プラスチック塊	5.3	74.9	◎	ポリバケツ
			プラスチック片	4.3	79.3	◎	ポリバケツ
B 2	管 類	89.1	カップラ	2.7	81.9	◎	ポリバケツ
			スライチギヤ	2.3	84.2	◎	ポリバケツ
			ドライバ	2.2	86.5	◎	ポリバケツ
			アスファルト	2.0	88.4	◎	ポリバケツ
			スノコ	1.6	90.0	◎	ポリバケツ
			ゴムパッキン	1.4	91.4	◎	ポリバケツ
			テロイドフィルム	1.0	92.3	◎	ポリバケツ
			コネクタ	1.0	93.3	◎	ポリバケツ
			ポリ容器	44.9	44.9	◎	ポリバケツ
			計器	17.2	62.1	◎	ポリバケツ
B 3	管 類	100.0	プレーカー	16.1	78.3	◎	ポリバケツ
			検出器	6.8	85.1	◎	ポリバケツ
			分配器	4.7	89.7	◎	ポリバケツ
			マイクログリフ	4.5	94.2	◎	ポリバケツ
			プラスチックボルト	3.4	97.6	◎	ポリバケツ
			ポリ片	2.4	100.0	◎	ポリバケツ
			ガラスクロス	38.2	38.2	◎	ガラスクロス
			ケイ酸カルシウム	26.8	65.0	◎	ケイ酸カルシウム
			断熱布	14.7	79.7	◎	ガラスクロス
			ロックウール	6.6	86.3	◎	ガラスクロス
B 4	管 類	82.0	ガラスウール	5.3	91.7	◎	ガラスクロス
			シリカライト	2.9	94.6	◎	ケイ酸カルシウム
			ガラス繊維	2.1	96.7	◎	ガラスクロス
			石綿	1.5	98.2	◎	ガラスクロス
			ポリウレタン	1.0	99.2	◎	ガラスクロス
			バグフィルター	46.8	46.8	◎	バグフィルター
			ロールフィルター	37.1	83.9	◎	ロールフィルター
			プレフィルター	12.6	96.4	◎	プレフィルター
			トラバロンフィルム	2.4	98.9	◎	プレフィルター
			HEPAフィルター	1.1	100.0	◎	プレフィルター
B 5	管 類	100.0	防炎シート	90.4	90.4	◎	防炎シート
			ビニールシート	5.1	95.5	◎	防炎シート
			酢ビシート	3.2	98.6	◎	防炎シート
			ガラスクロス	20.7	20.7	◎	ガラスクロス
			ケイ酸カルシウム	14.5	35.2	◎	ケイ酸カルシウム
			ガラスクロス	8.0	43.2	◎	ガラスクロス
			ガラスクロス	3.6	46.8	◎	ガラスクロス
			ガラスクロス	2.9	49.7	◎	ガラスクロス
			ケイ酸カルシウム	1.6	51.3	◎	ケイ酸カルシウム
			ガラスクロス	1.1	52.4	◎	ガラスクロス
B 6	管 類	18.0	バグフィルター	13.0	13.0	◎	バグフィルター
			ロールフィルター	10.3	23.3	◎	ロールフィルター
			プレフィルター	3.5	26.8	◎	プレフィルター
			防炎シート	0.3	27.1	◎	防炎シート
			防炎シート	16.3	43.4	◎	防炎シート
			ビニールシート	0.9	44.3	◎	防炎シート
			酢ビシート	0.6	44.9	◎	防炎シート
			ガラスクロス	20.7	65.6	◎	ガラスクロス
			ケイ酸カルシウム	14.5	80.1	◎	ケイ酸カルシウム
			ガラスクロス	8.0	88.1	◎	ガラスクロス
B 7	管 類	17	耐圧塩ビホース	15.0	15.0	◎	耐圧塩ビホース
			塩ビホース	12.3	27.3	◎	塩ビホース
			ダクトホース	5.4	32.7	◎	ダクトホース
			ケーブリング	37.8	70.5	◎	ケーブリング
			コード	3.6	74.1	◎	ケーブリング
			ヘルメット	2.5	76.6	◎	ヘルメット
			ガスケット	2.3	78.9	◎	ガスケット
			ポリバケツ	2.2	81.1	◎	ポリバケツ
			プラスチック塊	0.5	81.6	◎	ポリバケツ
			プラスチック片	0.4	82.0	◎	ポリバケツ
B 8	管 類	43	耐圧塩ビホース	15.0	15.0	◎	耐圧塩ビホース
			塩ビホース	12.3	27.3	◎	塩ビホース
			ダクトホース	5.4	32.7	◎	ダクトホース
			ケーブリング	37.8	70.5	◎	ケーブリング
			コード	3.6	74.1	◎	ケーブリング
			ヘルメット	2.5	76.6	◎	ヘルメット
			ガスケット	2.3	78.9	◎	ガスケット
			ポリバケツ	2.2	81.1	◎	ポリバケツ
			プラスチック塊	0.5	81.6	◎	ポリバケツ
			プラスチック片	0.4	82.0	◎	ポリバケツ
B 9	管 類	3	耐圧塩ビホース	15.0	15.0	◎	耐圧塩ビホース
			塩ビホース	12.3	27.3	◎	塩ビホース
			ダクトホース	5.4	32.7	◎	ダクトホース
			ケーブリング	37.8	70.5	◎	ケーブリング
			コード	3.6	74.1	◎	ケーブリング
			ヘルメット	2.5	76.6	◎	ヘルメット
			ガスケット	2.3	78.9	◎	ガスケット
			ポリバケツ	2.2	81.1	◎	ポリバケツ
			プラスチック塊	0.5	81.6	◎	ポリバケツ
			プラスチック片	0.4	82.0	◎	ポリバケツ
B 10	管 類	22	耐圧塩ビホース	15.0	15.0	◎	耐圧塩ビホース
			塩ビホース	12.3	27.3	◎	塩ビホース
			ダクトホース	5.4	32.7	◎	ダクトホース
			ケーブリング	37.8	70.5	◎	ケーブリング
			コード	3.6	74.1	◎	ケーブリング
			ヘルメット	2.5	76.6	◎	ヘルメット
			ガスケット	2.3	78.9	◎	ガスケット
			ポリバケツ	2.2	81.1	◎	ポリバケツ
			プラスチック塊	0.5	81.6	◎	ポリバケツ
			プラスチック片	0.4	82.0	◎	ポリバケツ
B 11	管 類	15	耐圧塩ビホース	15.0	15.0	◎	耐圧塩ビホース
			塩ビホース	12.3	27.3	◎	塩ビホース
			ダクトホース	5.4	32.7	◎	ダクトホース
			ケーブリング	37.8	70.5	◎	ケーブリング
			コード	3.6	74.1	◎	ケーブリング
			ヘルメット	2.5	76.6	◎	ヘルメット
			ガスケット	2.3	78.9	◎	ガスケット
			ポリバケツ	2.2	81.1	◎	ポリバケツ
			プラスチック塊	0.5	81.6	◎	ポリバケツ
			プラスチック片	0.4	82.0	◎	ポリバケツ
B 12	管 類	18	耐圧塩ビホース	15.0	15.0	◎	耐圧塩ビホース
			塩ビホース	12.3	27.3	◎	塩ビホース
			ダクトホース	5.4	32.7	◎	ダクトホース
			ケーブリング	37.8	70.5	◎	ケーブリング
			コード	3.6	74.1	◎	ケーブリング
			ヘルメット	2.5	76.6	◎	ヘルメット
			ガスケット	2.3	78.9	◎	ガスケット
			ポリバケツ	2.2	81.1	◎	ポリバケツ
			プラスチック塊	0.5	81.6	◎	ポリバケツ
			プラスチック片	0.4	82.0	◎	ポリバケツ
B 13	管 類	14	耐圧塩ビホース	15.0	15.0	◎	耐圧塩ビホース
			塩ビホース	12.3	27.3	◎	塩ビホース
			ダクトホース	5.4	32.7	◎	ダクトホース
			ケーブリング	37.8	70.5	◎	ケーブリング
			コード	3.6	74.1	◎	ケーブリング
			ヘルメット	2.5	76.6	◎	ヘルメット
			ガスケット	2.3	78.9	◎	ガスケット
			ポリバケツ	2.2	81.1	◎	ポリバケツ
			プラスチック塊	0.5	81.6	◎	ポリバケツ
			プラスチック片	0.4	82.0	◎	ポリバケツ
B 14	管 類	14	耐圧塩ビホース	15.0	15.0	◎	耐圧塩ビホース
			塩ビホース	12.3	27.3	◎	塩ビホース
			ダクトホース	5.4	32.7	◎	ダクトホース
			ケーブリング	37.8	70.5	◎	ケーブリング
			コード	3.6	74.1	◎	ケーブリング
			ヘルメット	2.5	76.6	◎	ヘルメット
			ガスケット	2.3	78.9	◎	ガスケット
			ポリバケツ	2.2	81.1	◎	ポリバケツ
			プラスチック塊	0.5	81.6	◎	ポリバケツ
			プラスチック片	0.4	82.0	◎	ポリバケツ
B 15	管 類	17	耐圧塩ビホース	15.0	15.0	◎	耐圧塩ビホース
			塩ビホース	12.3	27.3	◎	塩ビホース
			ダクトホース	5.4	32.7	◎	ダクトホース
			ケーブリング	37.8	70.5	◎	ケーブリング
			コード	3.6	74.1	◎	ケーブリング
			ヘルメット	2.5	76.6	◎	ヘルメット
			ガスケット	2.3	78.9	◎	ガスケット
			ポリバケツ	2.2	81.1	◎	ポリバケツ
			プラスチック塊	0.5	81.6	◎	ポリバケツ
			プラスチック片	0.4	82.0	◎	ポリバケツ

注) 開缶調査結果の集約と選定した代表廃棄物 (網かけで示す)

表2. 3-2 標準廃棄物と追加調査データの組成割合

単位 [w t %]

	標準廃棄物* ¹		追加調査データ* ²	
A 廃棄物 (非圧縮)	金属片・板類	40.6	金属片・板類	46.5
	金属配管類	29.4	金属配管類	20.7
	塊状金属類	19.8	塊状金属類	15.8
	コンクリート・ガラス類	4.0	コンクリート・ガラス類	5.8
	小物金属類	2.6	小物金属類	2.5
	番線類	2.3	番線類	6.9
	屑	0.3	屑	0.4
	計器類	1.0	計器類	1.4
	小計	100.0	小計	100.0
A 廃棄物 (圧縮)	缶類	100.0	缶類	100.0
	小計	100.0	小計	100.0
B 廃棄物 (非圧縮)	管類	47.5	管類	53.6
	線類	41.6	線類	19.7
	片・板類	10.0	片・板類	24.6
	容器類	0.9	容器類	2.1
	小計	100.0	小計	100.0
B 廃棄物 (圧縮)	保温材	54.1	保温材	49.4
	シート類	27.9	シート類	26.6
	フィルタ類	18.0	フィルタ類	23.9
	小計	100.0	小計	100.0

*1 第一次調査

*2 第一次調査と第二次調査を加算

は存在割合1%以上の代表廃棄物

3. 廃棄体製作に関する基礎的な検討

充填廃棄体の実証試験を実施する前に、廃棄体製作に関する基礎的な検討を次の2つの観点から実施した。

①廃棄体内部の残留空隙を低減する。

②廃棄体の強度を向上する。

ここでは、充填廃棄体の製作に係わる基本的な方法について、基礎試験結果等を基に設定した標準的な条件を検討した。

上記①の廃棄体内部の残留空隙低減のためには、固体状廃棄物の形状に応じて適切な処理を施すこと及び、適切な固型化材料等（セメント及び骨材並びに添加剤等の混和材料）を用い適切な注入方法で固型化を行うことにより対応できると考えられる。

すなわち、形状の観点から下表のように分類された固体状廃棄物の「形状分類2」について、熔融処理を行わない場合の適切な処理方法（切断、圧縮）を3.1及び3.2で検討する。

分 類		固体状廃棄物の性状
形状分類*	1	固型化材料等が内部に充填し易いもの
	2	固型化材料等が内部に充填し難いもの

* 固体状廃棄物の収納効率の向上等のための減容を目的に切断又は圧縮処理を行うことにより、「形状分類2」とするものもある。

また、固型化材料等の注入方法を3.3で検討する。

なお、固型化材料等の管理方法及び熔融（高周波）処理の方法及び根拠については、Appendix-2及びAppendix-3に示す。

上記②の廃棄体強度の向上については3.4で検討する。

3.1 切断処理の方法

(1) 対象となる廃棄物

切断処理の対象となる可能性のある廃棄物は、主に配管・ホース類や、弁等の塊状金属類であり、前述の開缶調査によるとこれらの廃棄物のうち廃棄物保管割合の多い配管・ホース類の内径別の分布は図3.1-1の通りとなっている。

(2) 処理方法

はさみ、回転カッター等の一般的な切断機器で切断する。

(3) 試験結果

a. 試験の目的

切断処理の対象となる可能性のある廃棄物のうち、最も発生量が多くかつ内部空隙の生じやすい廃棄物と考えられる配管・ホース類について、固型化材料等の充填性を確認する。

b. 試験条件

(a)使用廃棄物（表3.1-1）

- ①配管類（A廃棄物） 炭素鋼配管
- ②ホース類（B廃棄物） 軟質塩ビホース

(b)収納条件

- ・使用容器：平型バット（縦650mm ×横500mm ×高さ280mm）
- ・収納本数：3本
- ・収納方法：配管・ホースを底部に水平に設置し、ホースについては浮上防止のために粘着テープで中央部に固定した。
なお、内径10mmの配管類については、縦方向に10度、20度傾斜させた状態でも設置した。

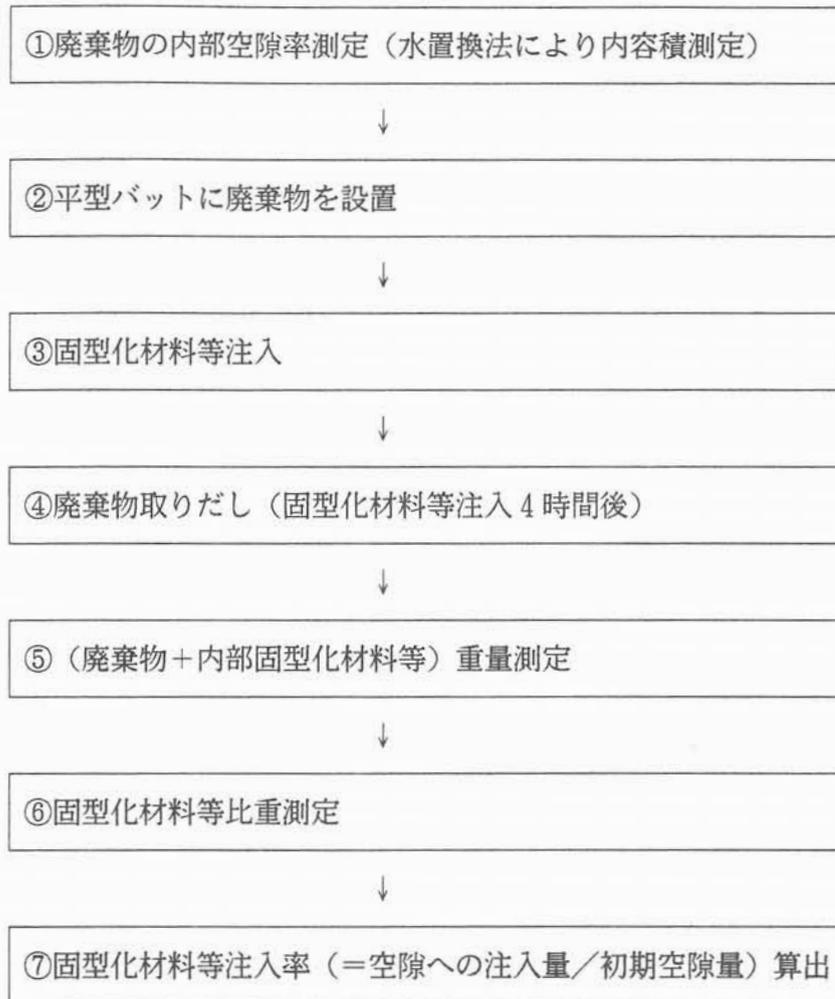
(c)固型化条件

固型化条件は、現在適用を検討している条件の内最も充填性が悪いと考えられる以下の条件に設定した。（Appendix-2 参照）

- ・Pロート流下時間：50秒
- ・注入速度：ドラム缶注入速度25ℓ／分相当
（界面上昇速度 130mm／分を目安）

c. 試験方法

試験手順は次の通り。



d. 試験結果

(a)水平設置条件

固型化材料等が最も充填されにくいと考えられる水平設置時における、内径別の固型化材料等の充填率を測定した結果を図3.1-2に示す。図3.1-2より、内径が22.8mm以上の配管・ホースについては90%以上の注入率が得られているが、内径10mmのホースについては24%の注入率にとどまった。

内径10mmのホースについて、長さをパラメータとして固型化材料等の注入率の変化を確認した結果を図3.1-3及び写真3.1-3に示す。図3.1-3より、長さが長くなるにつれて注入率は悪くなる傾向にあり、長さ20cm以上では注入率が50%未満となった。

(b)傾斜設置条件

(a)で固型化材料等が最も注入されにくかった内径10mmのホースについて、軸方向

に傾けた場合の注入率の変化を確認した結果を図3.1-3、写真3.1-1に示す。

傾斜させることによる注入率向上の効果は著しく、傾斜確度が10度、20度のいずれの場合でも100%近い注入率が得られている。

さらに、傾斜確度が10度の条件で配管長さをもっと長くして試験を行ったところ長さ1mにおいても100%近い注入率が得られている。

(a)と(b)の試験結果から、90%以上の固型化材料等の注入率が得られる配管口径と長さの関係については図3.1-4のようにまとめることができる。なお、配管とホースについて、図3.1-2に示すように注入性にほとんど差異が認められなかったことから、図3.1-4では配管・ホース類として一括して扱った。

(4) 処理基準

(3)で実施した試験結果を基に、廃棄物発生量の多い配管・ホース類の標準的な切断処理の基準を以下のとおり設定できる。

a. 配管類

図3.1-1に示すように、配管類の内径分布は、20mm以上が80%以上、10mm以上が95%以上であり、また、ドラム缶に収納されることを考えれば、60cm以上の配管が水平に収納される可能性はない。図3.1-4に示すように、内径が20mm以上で長さが60cm未満の配管は水平収納の状態でも90%以上の注入率を得ることができる。

また、内径が10mmの配管については10度以上傾けることにより90%以上の注入率を得ることができるので、実際の廃棄物収納状況から考えれば、実態的には内径10mm以上の配管に対して固型化材料等が十分注入されると考えられる。

内径が10mm未満の配管への注入性については、今回の試験では言及することはできないが、その配管全体に占める割合が5%以下であることから、その内部空隙が固型化材料等によって全く注入されないとしても、廃棄体全体としての空隙率に大きな影響を与えることはないと考えられる。

したがって、配管の処理基準としては、「ドラム缶に収納できる長さに切断すれば良い」と言える。

b. ホース類

図3.1-1に示すように、ホース類も内径20mm以上が80%以上、内径10mm以上が95

%以上であり、配管とほぼ同様の内径分布となっている。また、(3)でも述べたように配管とホースの注入性については差異がないと考えられることから、ホース類についても配管類同様の処理基準が適用されるものと考えられる。しかし、ホースは配管と比較すれば湾曲しやすいものが多く、著しく湾曲した状態では固型化材料等が注入されにくくなる可能性が高い。したがって、湾曲しないよう束ねて処理するか、湾曲しにくい長さまで切断しておくことが望ましい。ホースは内籠あるいは内張りドラムに収納されることを考慮すれば、この湾曲しにくい長さの目安としては50cm程度が適切であると考えられる。

なお、配管と同様に内径10mm未満のホースについては、そのホース全体に占める割合が5%以下であることから、その内部空隙に固型化材料等が全く注入されなかったとしても、廃棄体全体としての空隙量に大きな影響を与えることはないと考えられる。

したがって、ホースの処理基準としては、「50cm以下に切断する」こととする。また、束ねる等の措置をとり、湾曲しにくくした場合は、配管の処理方法に準じることができる。

なお、内径10mm未満のホースについては切断を行わない。

3.2 圧縮処理の方法

(1) 対象となる廃棄物

圧縮処理の対象となる可能性のある廃棄物は、主に缶類、シート類、保温材類等である。これらについては、最終的に埋設する廃棄物の減容の観点からも、圧縮しておくほうが望ましいと考えられる。

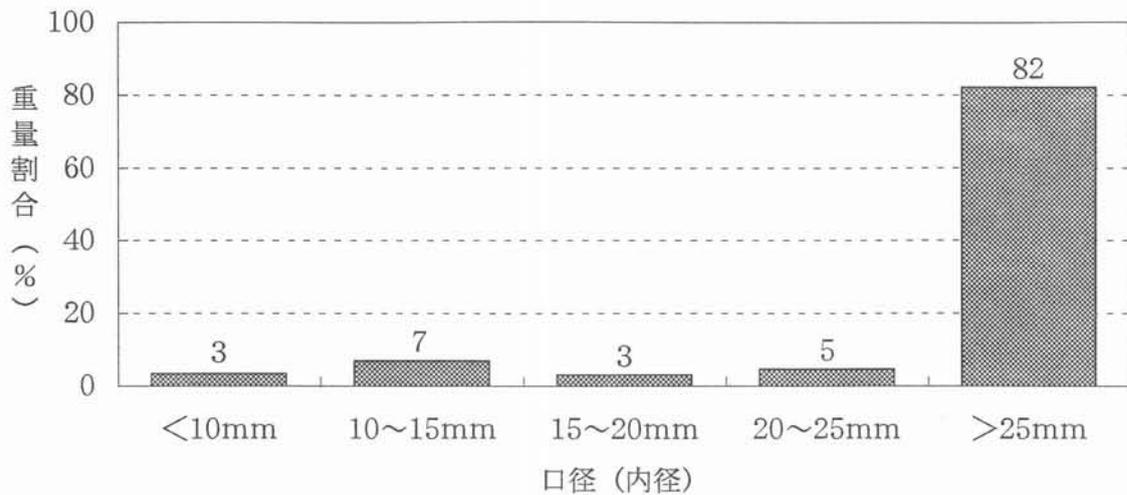
(2) 処理方法

圧縮後の形状維持等のために、所定の圧縮用容器に収納して一定以上の圧縮圧力で容器毎圧縮する。なお、缶類等で圧縮後の形状維持の必要がないものについては圧縮用容器を使わないことも可能である。

(3) 試験結果

a. 試験目的

A型廃棄物：配管類



B型廃棄物：ホース類

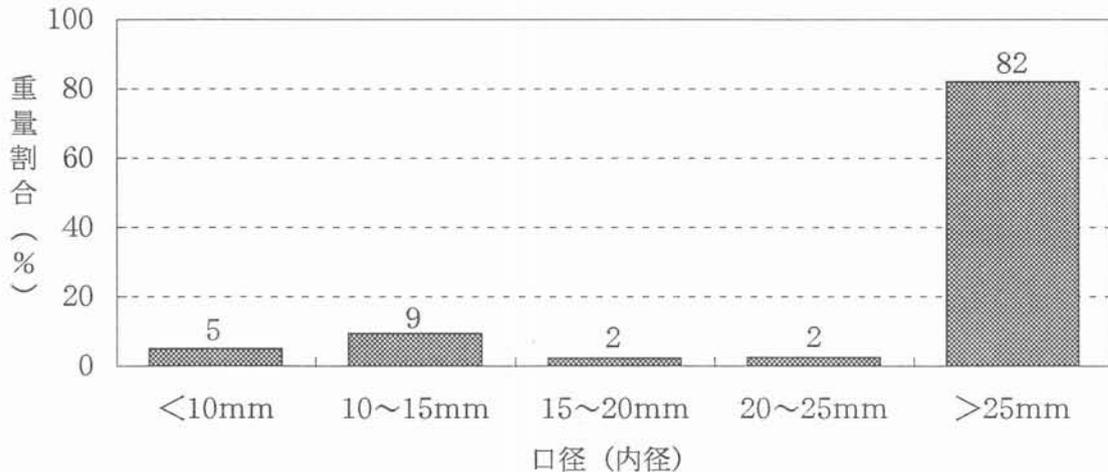


図3.1-1 配管・ホースの内径別重量分布

注. 本分布は、原子力発電所で実施した雑固体廃棄物の開缶調査結果に基づく。開缶調査の実施に当たっては、BWR、PWRからそれぞれ調査対象プラントを選定し、以下の本数を調査した。

BWR (福島第一) ……………104本

PWR (高浜・大飯) …………… 50本

また、代表性確保の観点から、具体的なドラム缶の選定については以下の点に留意した。

①廃棄物の種類について、調査発電所及び全国の種類別廃棄物保管割合を考慮した。

②廃棄物の発生年代について、広範囲に割り振った。

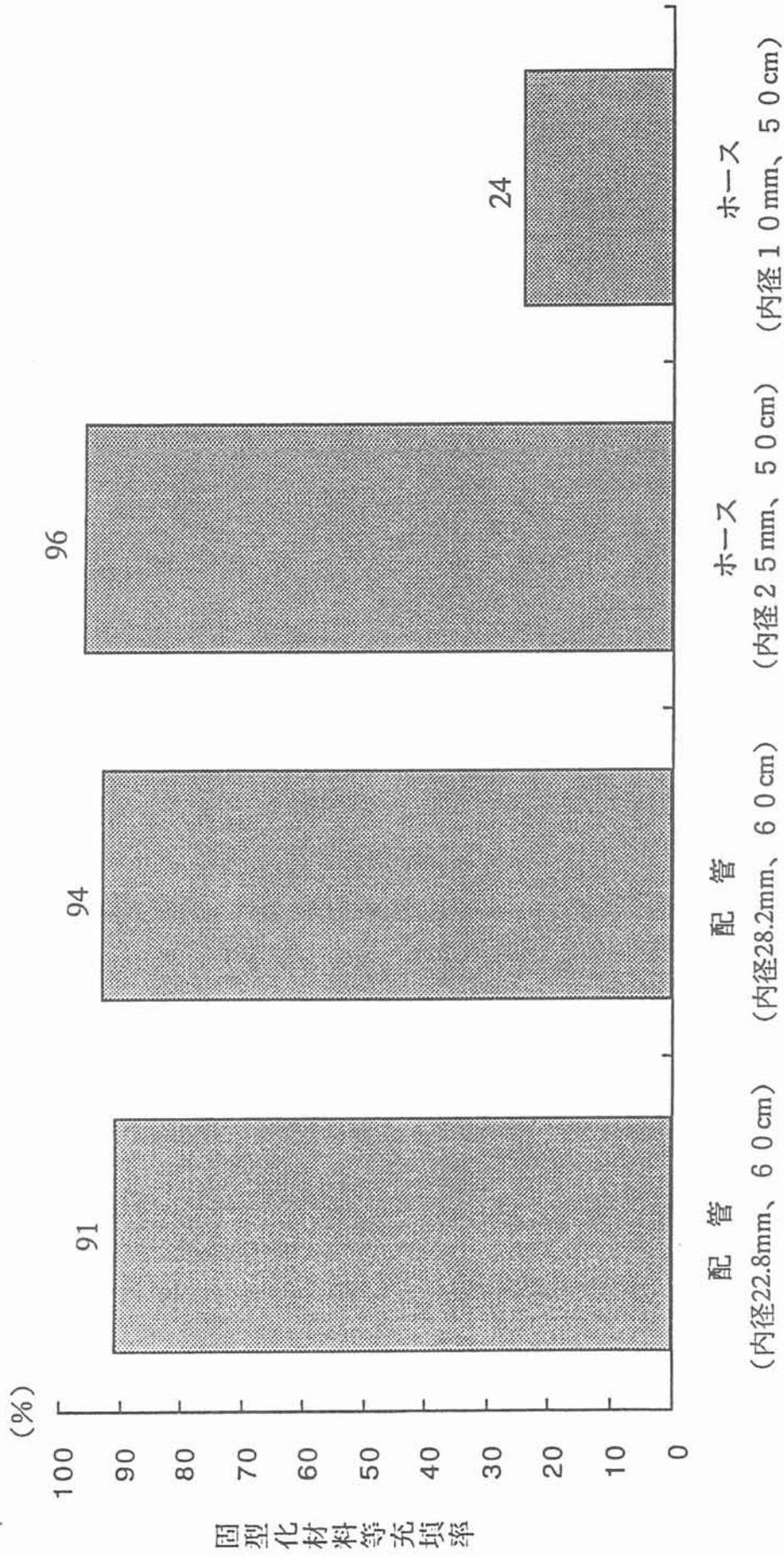


図 3.1 - 2 内径別の固型化材料等充填率 (水平設置)

* 固型化材料等充填率 = (廃棄物内への固型化材料等注入容量 / 廃棄物内容積) × 100

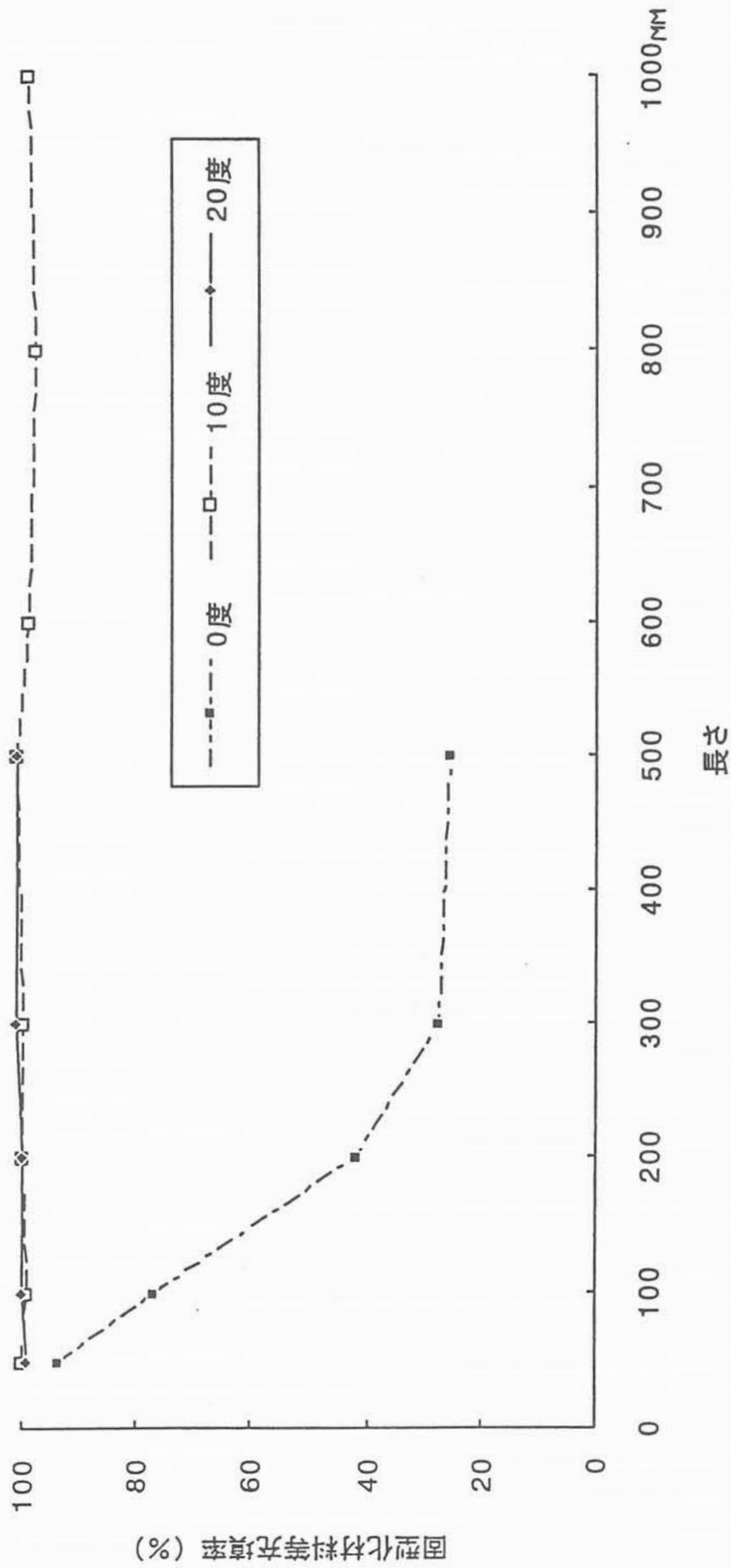


図3.1-3 ホース (内径10mm) の長さ、設置角度別固化材料等注入率

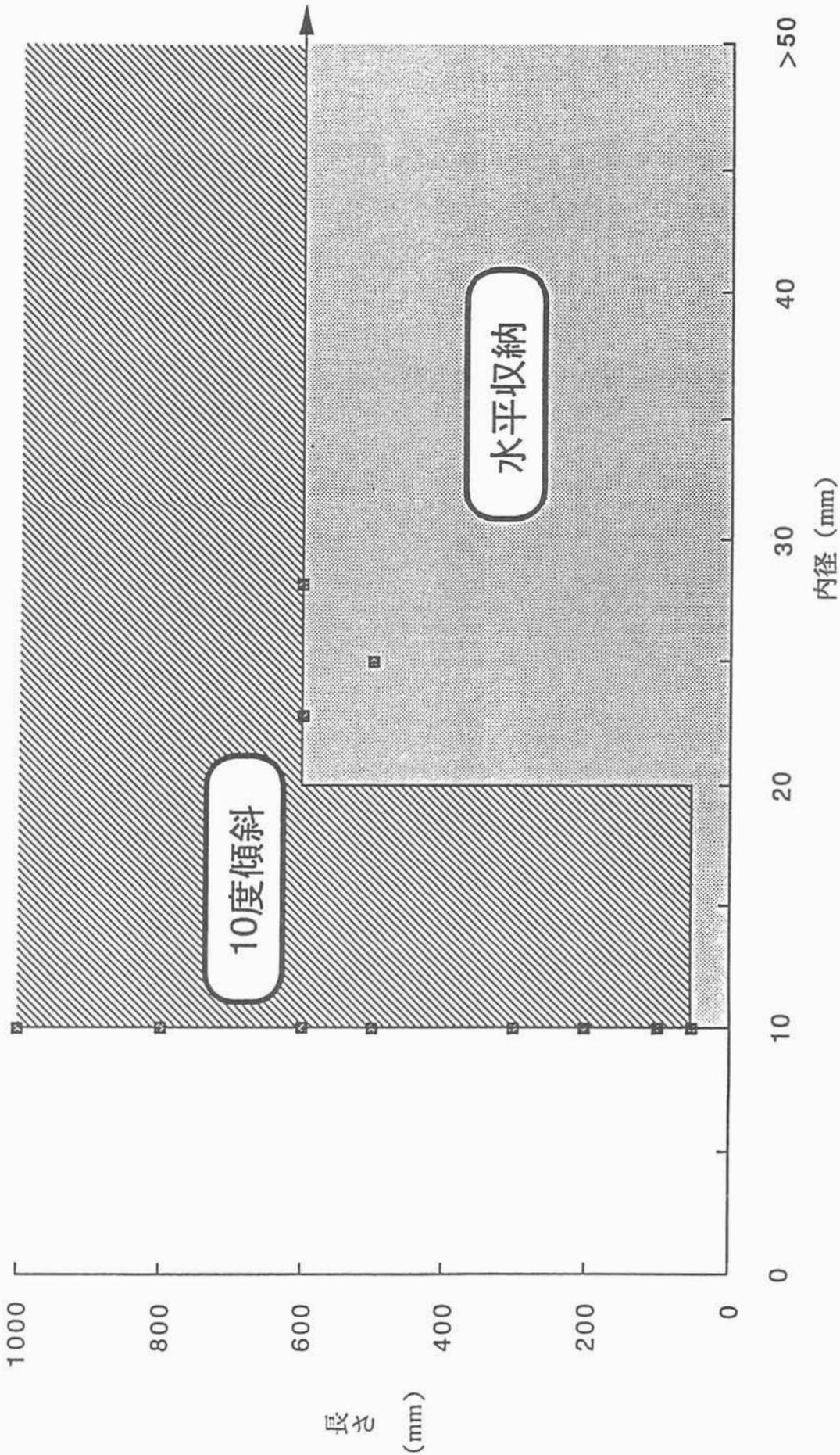
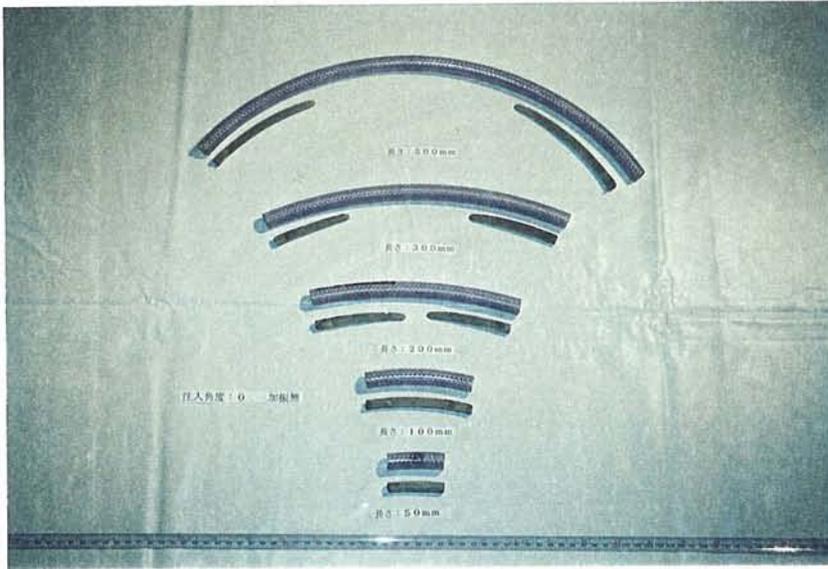


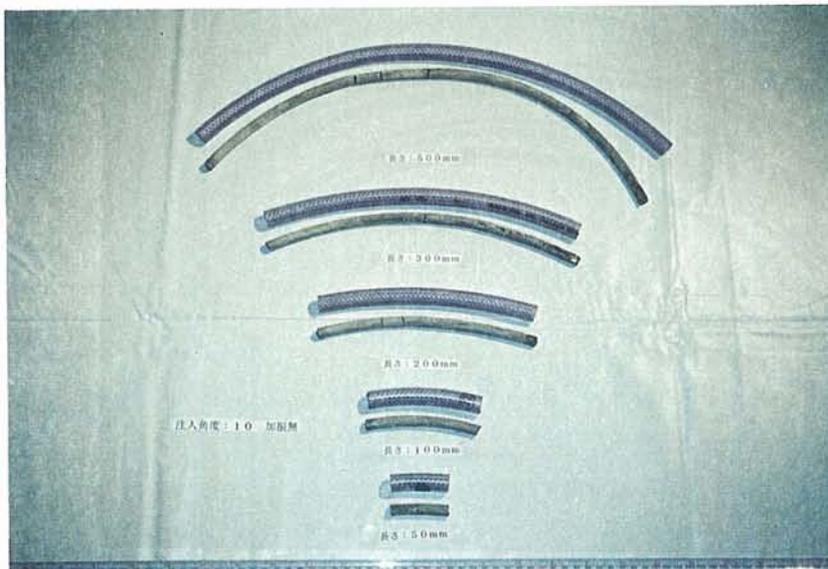
図3.1-4 90%以上の固型化材料等注入率が得られる内径、長さの範囲
(配管、ホース類)

表3.1-1 実験に使用した廃棄物の内径、長さ

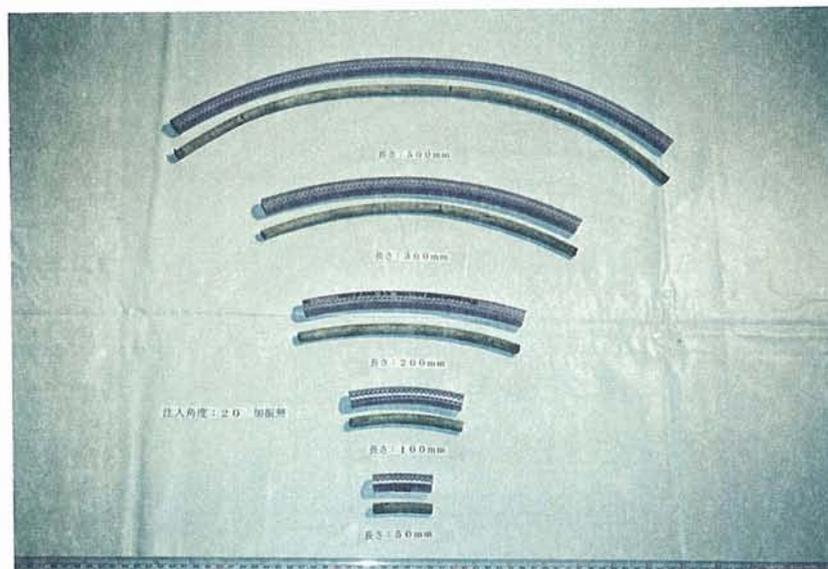
	1	2	3	4	5	6	7
廃棄物種類	配管		ホース				
内径 (口径)	22.8mm (20A)	28.2mm (25A)	25mm	10mm			
配管長さ	60 cm		50 cm	5, 10, 20, 30, 50 cm		60, 80, 100 cm	
傾斜角度	0度 (水平設置)			10度	20度	10度	



傾斜角度 0 度

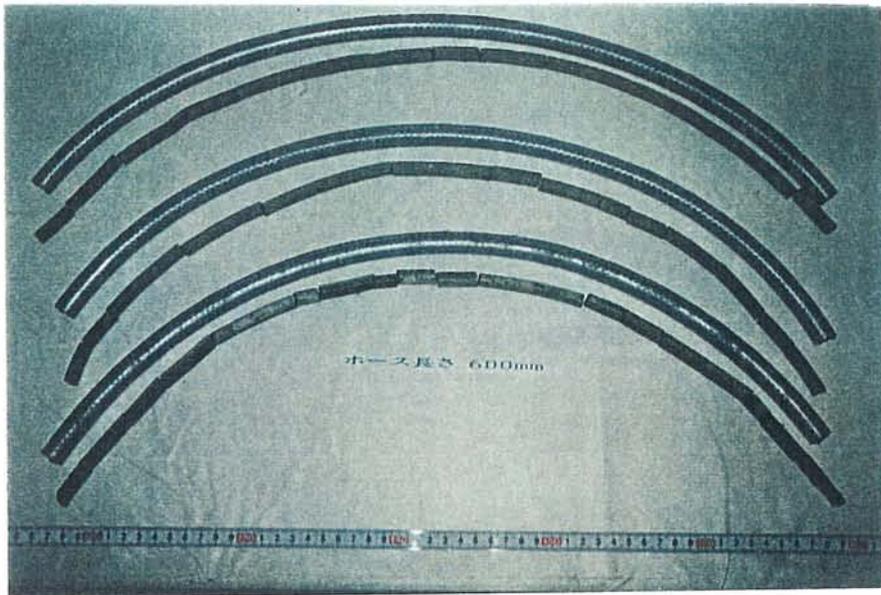


傾斜角度 10 度

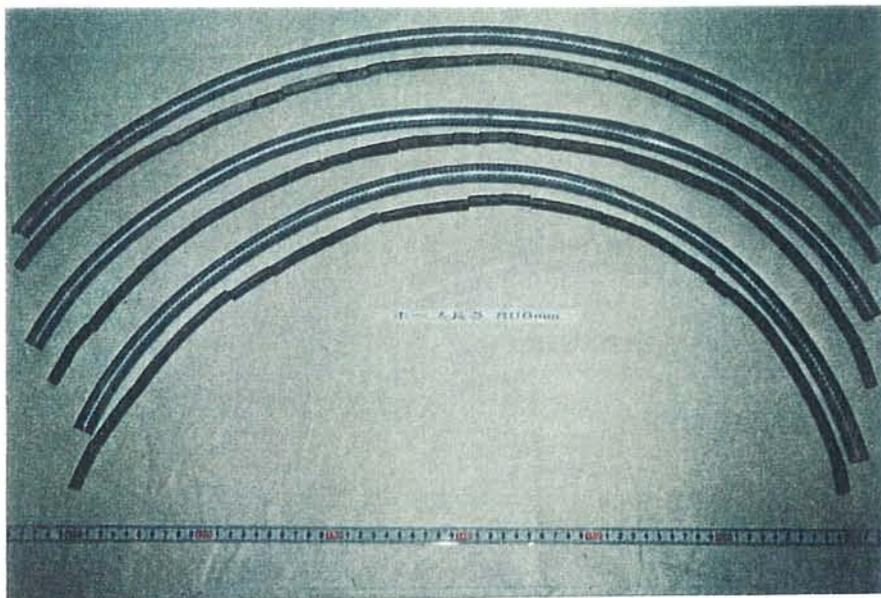


傾斜角度 20 度

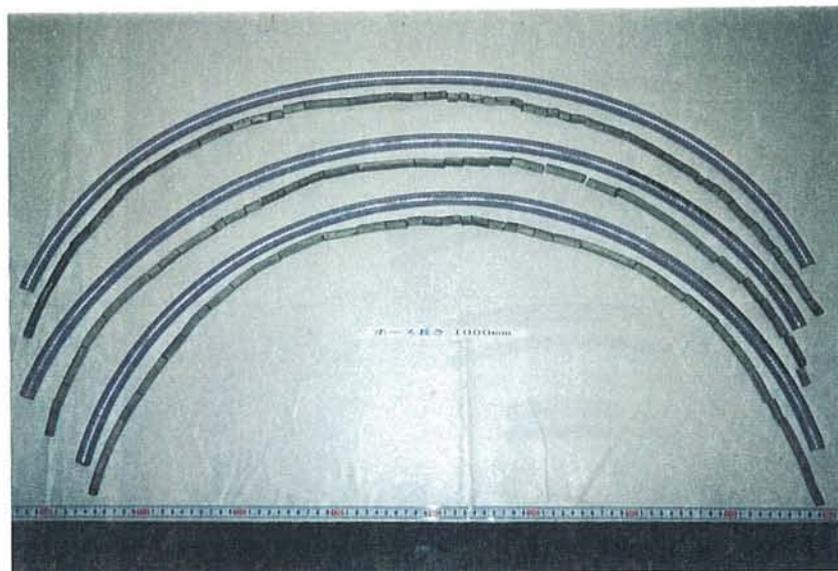
写真 3.1-1 内径 10 mm ホースの固化材料等注入状況 (1 / 2)



ホース長さ 600mm
(傾斜角度 10度)



ホース長さ 800mm
(傾斜角度 10度)



ホース長さ 1000mm
(傾斜角度 10度)

写真 3.1-1 内径 10 mm ホースの固化材料等注入状況 (2 / 2)

減容性の観点から適切な圧縮圧力について設定すると共に、圧縮した廃棄物の内部状態を確認する。

b. 試験条件

(a)使用廃棄物

- ①保温材（珪酸カルシウム、グラスウール、ガラスクロス、ロックウール）
- ②フィルタ類（プレフィルタ、HEPAフィルタ、バグフィルタ）
- ③シート類（防災シート、塩ビシート）
- ④缶類（ペール缶、スプレー缶）

(b)圧縮用容器

50ℓ、120ℓドラム缶（一部の廃棄物のみ）

(c)圧縮圧力

2.5～30kgf/cm²

c. 試験方法

圧縮用容器に廃棄物を収納して、容器毎圧縮し、圧縮圧力毎に減容比を確認する。
50ℓ容器を用いた圧縮体については、圧縮後に切断し、断面を観察する。

d. 試験結果

圧縮圧力と減容比の関係を図3.3-1、3.3-2に、圧縮体の切断面を写真3.3-1に示す。図3.3-1、3.3-2に示すように、圧縮用容器に収納して容器毎圧縮した場合、30kgf/cm²程度の圧縮力があれば空隙の除去及び減容性の観点から十分であることが分かる。また、この30kgf/cm²という圧力は、廃棄体を埋設し、覆土した後に廃棄体にかかる圧力と比較しても十分大きく、耐埋設の強度の点からも問題がないと考えられる。

缶類については空隙が認められたが、発電所における開缶調査によれば缶類の割合は全廃棄物の約1%と十分小さく、廃棄体全体としての空隙量に大きな影響を与えることはないと考えられる。

したがって、標準的な圧縮処理の基準として、30kgf/cm²以上の圧縮圧力で圧縮するのが適当である。

3.3 固型化材料等の注入方法

Appendix-2で示す固型化材料等の条件で、固体状廃棄物の固型化に適用するのに適切な固型化材料等の注入速度について、実大規模での基礎試験により確認・評価した。

a. 試験方法

標準廃棄物組成に類似した模擬廃棄物を200 ℓアクリル製透明容器に密収納（4.1に後述する）し、水置換法により空隙量を評価し、水を抜いた後、Pロート50秒前後の固型化材料を注入速度15、25及び40 ℓ／分で注入し、重量法により固型化材料の充填量を評価した。なお、注入は上部より、注入時の加振は無しとした。

b. 試験結果

試験結果を表3.3-1に示すが、いずれの注入条件に対しても、固型化材料等の充填率はほぼ100%であり固体廃棄物に十分適用できる見通しを得た。

したがって、注入速度は実設備に求められる処理容量等を考慮して25 ℓ／分を標準条件とする。

3.4 廃棄体強度の向上方法

下表のように強度分類された固体状廃棄物の内、強度が低い分類Bのものについては、熔融処理を行わない場合、廃棄体強度向上のため、強度対策を施した容器に廃棄物を収納して固型化する事が考えられる。

分 類		固体状廃棄物の性状
強度分類	A	固体状廃棄物の強度が高いもの
	B	固体状廃棄物の強度が低いもの

容器の強度対策は、収納する固体状廃棄物と容器内周との間に固型化材料等による内張り層を設けることが考えられ、具体的には、廃棄物を内籠や内張り容器に収納することで対応出来る。

従って、処理を行った後の廃棄物の強度分類（AまたはB）に応じて、容器に収納する区分は以下の通りとする。

固 型 化 対 象 廃 棄 物		収 納	
強度分類	種 類	区 分	収 納 方 法
A (強度が 高い)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 溶融体 ・ 圧縮体* ・ 金属、コンクリート、ガラス 	直接 収納	所定の容器に固型化対象物を直接 収納する
B (強度が 低い)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 塩ビ・プラスチック、ゴム 	内籠 収納	所定の容器にセットされた所定の 内籠に固型化対象物を収納する
		内張り容 器収納	所定の内張り容器に固型化対象物 を収納する

* 圧縮用容器に入れて圧縮した場合、強度分類Aとなる。(4.3参照)

なお、内張り層に使用する固型化材料等は以下の仕様を標準的な条件として考えた。

- ・ 内周層：施工性等を考慮して30mm以上
- ・ 固型化材料等の圧縮強度：通常達成される300kgf/cm² 以上

上記の妥当性は4.3章で検討する。

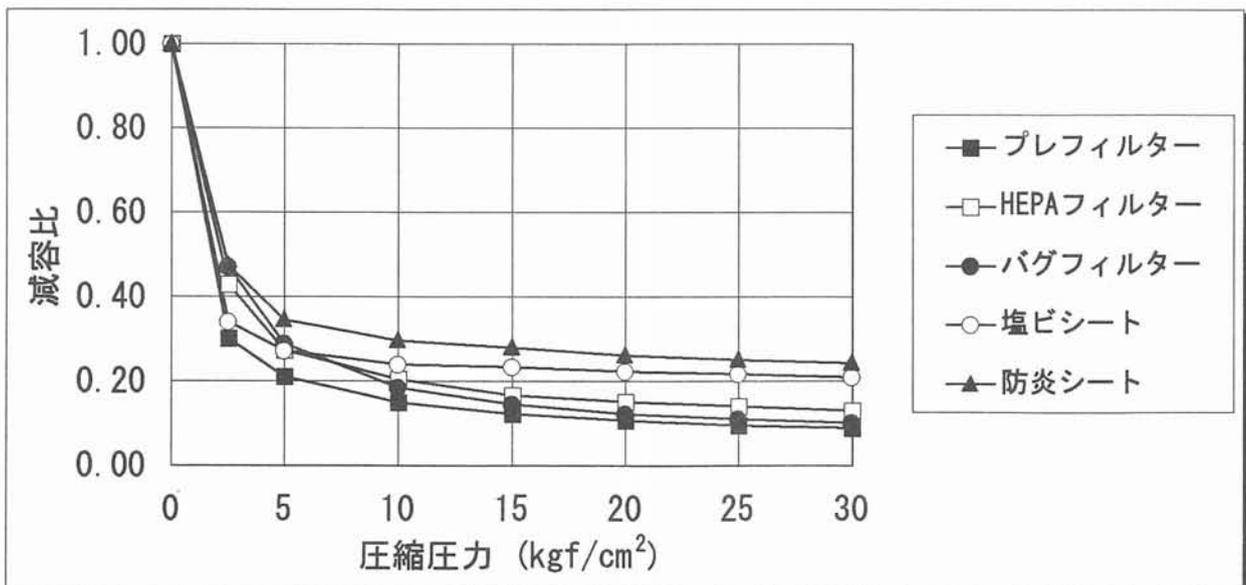
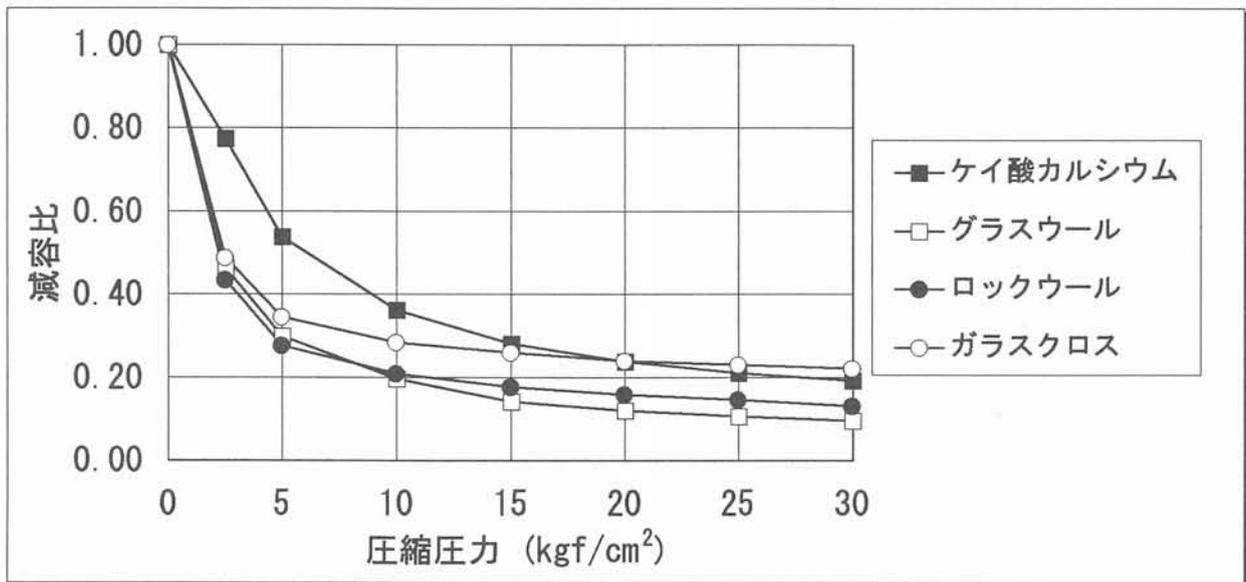
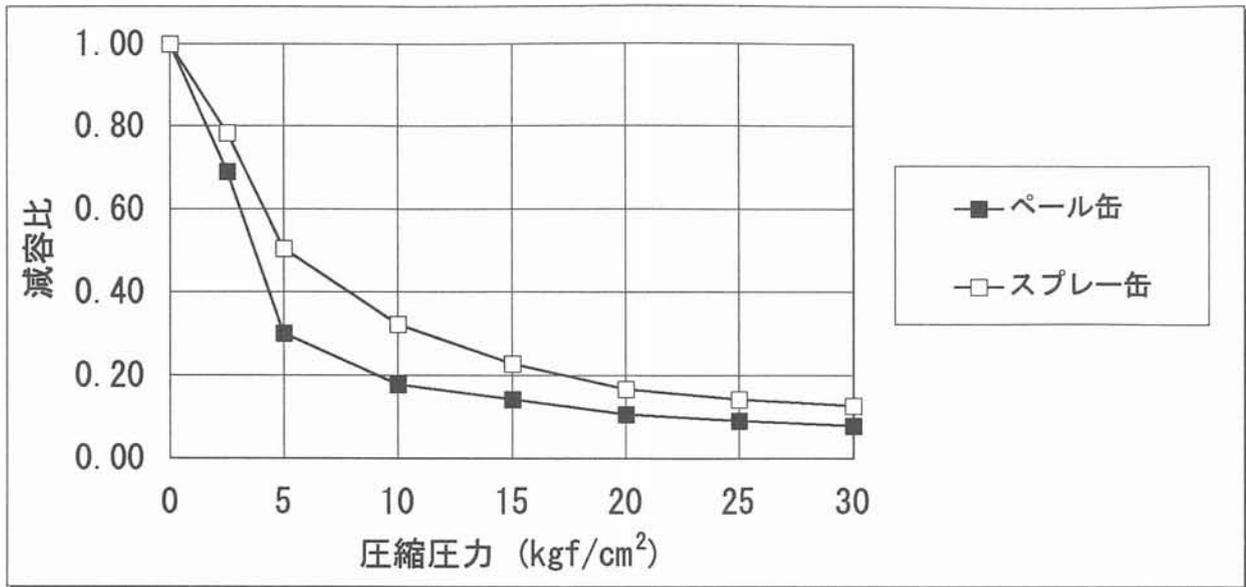


図3. 3-1 圧縮圧力と減容比の関係 (50Lドラム缶)

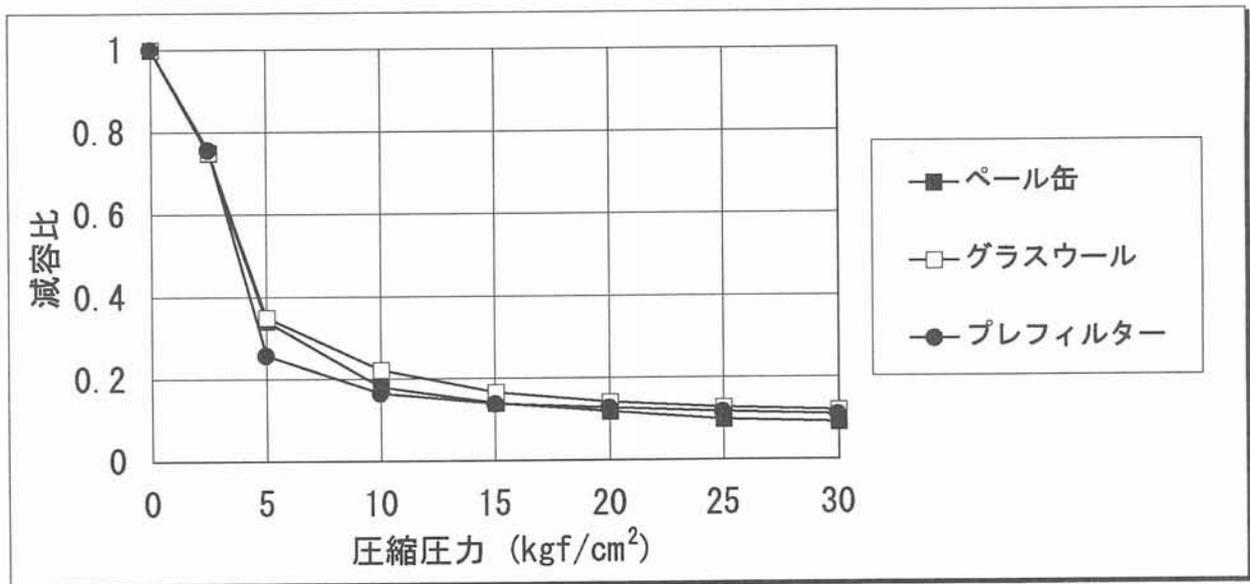
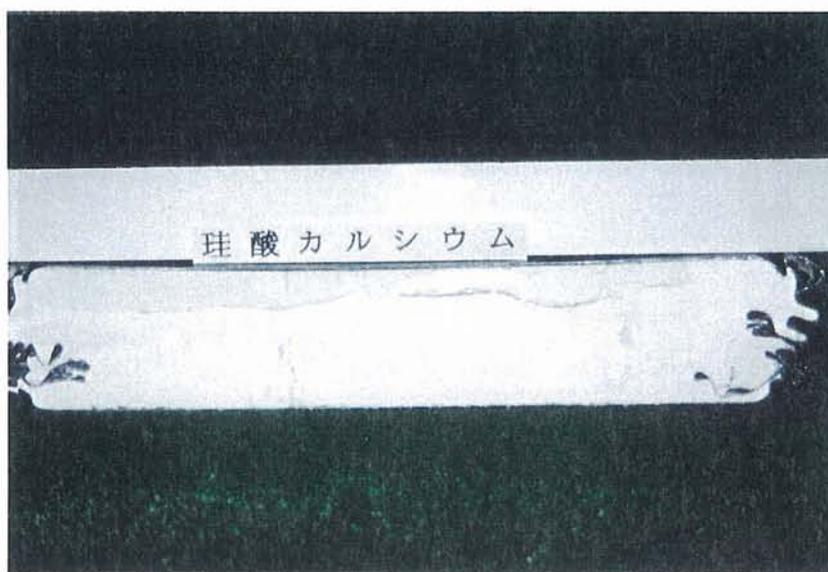


図3. 3-2 圧縮圧力と減容比の関係 (120Lドラム缶)

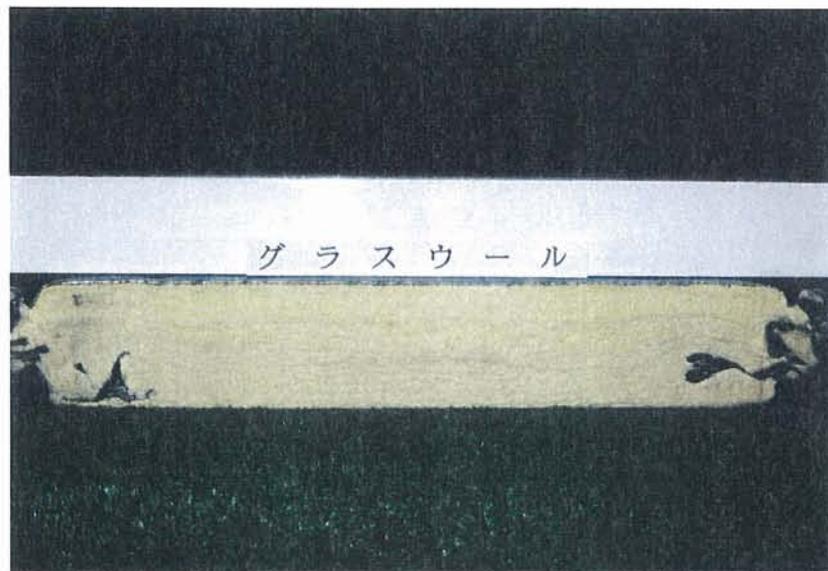
表 3.3 - 1 模擬廃棄物への注入試験結果

	No.	Pポート流下時間 (秒)	注入速度 (l/min)	注入前空隙量 (ℓ)	固型化材料注入量 (ℓ)	廃棄体空隙率 (%)
A 廃棄物 (非圧縮)	1	52	15	157	157	0
	2	51	25	164	161	2
	3	52	40	169	169	0
	4	68	25	167	167	0
	5	19*	25	169	168	1
A 廃棄物 (非圧縮 + 圧縮体)	6	47	25	153	153	0
B 廃棄物 (非圧縮)	7	50	25	177	172	3
B 廃棄物 (非圧縮 + 圧縮体)	8	48	25	92	92	0

* No.5 以外は高性能減水剤を添加している。



珪酸カルシウム

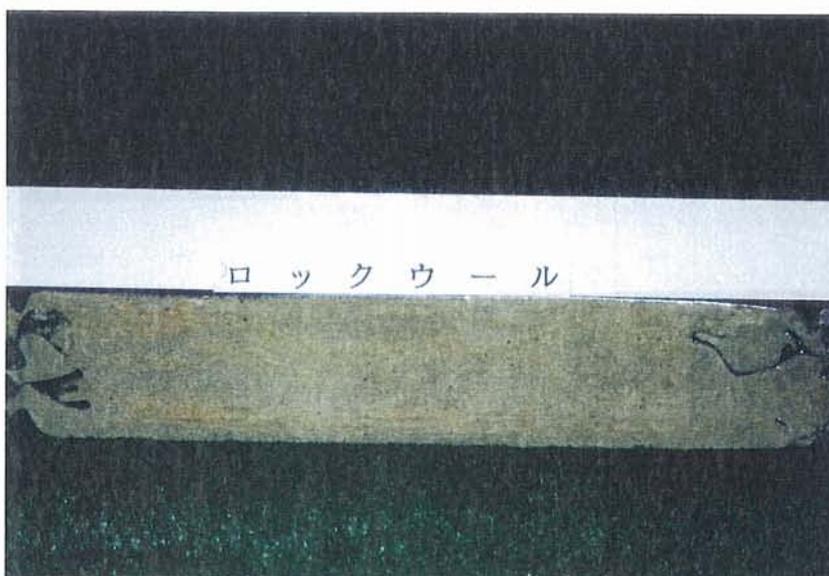


グラスウール

写真3.3-1 (1/5) 圧縮体 (50 l) の断面図

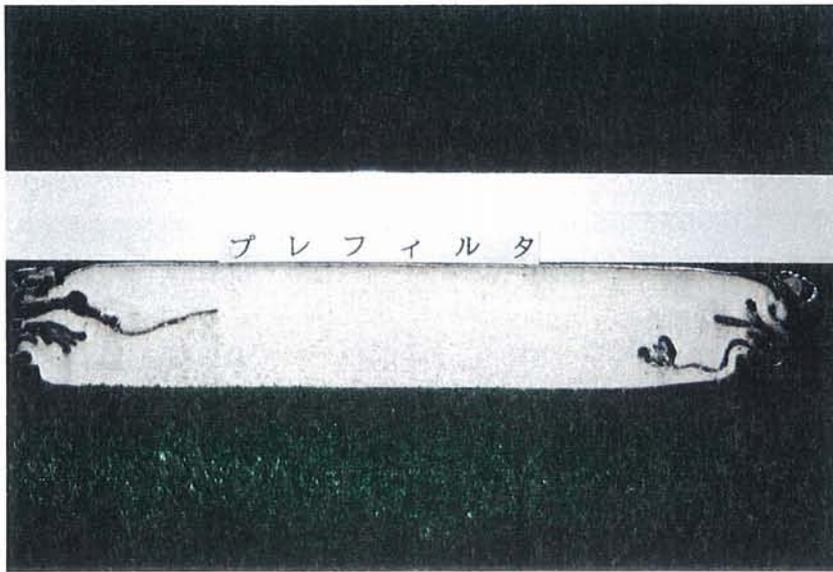


ガラスクロス



ロックウール

写真3.3-1 (2/5) 圧縮体 (50ℓ) の断面図
図 圧縮体(50L)の切断面 (2/5)

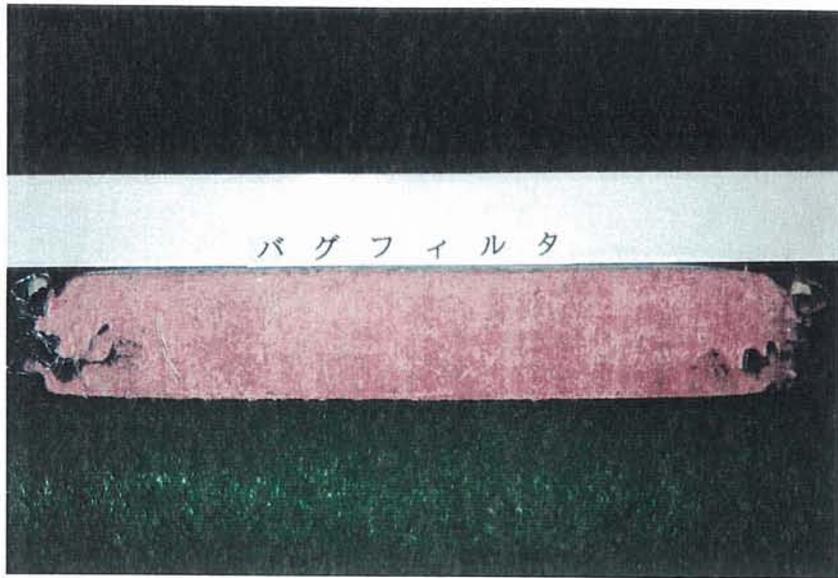


プレフィルタ

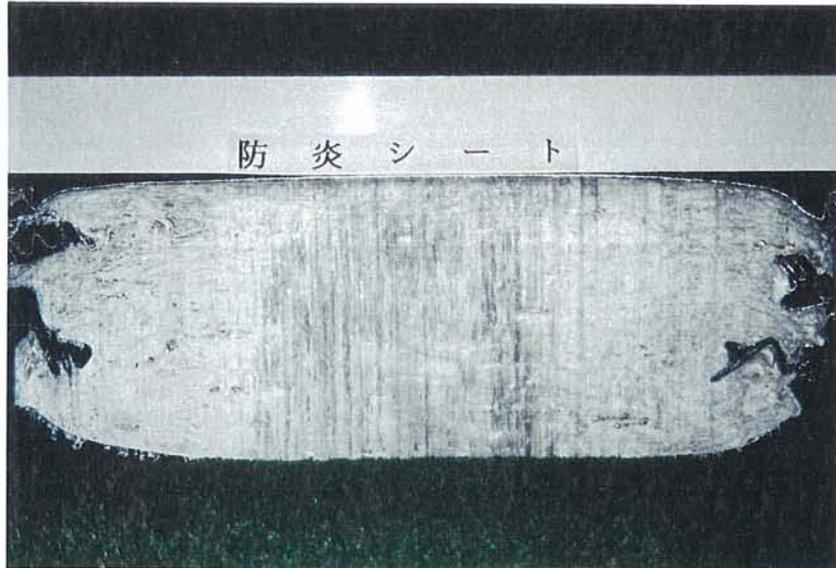


HEPAフィルタ

写真3.3-1 (3/5) 圧縮体 (50ℓ) の断面図

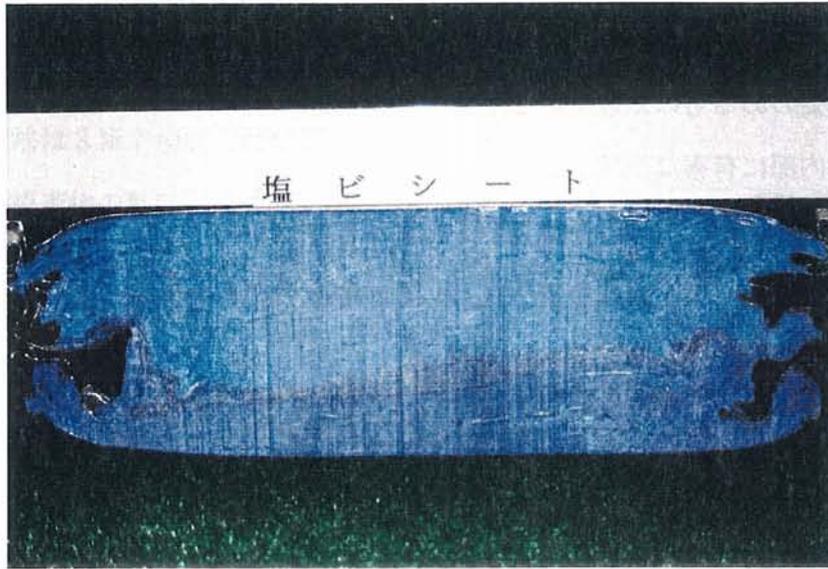


バグフィルタ



防炎シート

写真3.3-1 (4/5) 圧縮体 (50ℓ) の断面図



塩ビシート



ペール缶

写真3.3-1 (5/5) 圧縮体 (50ℓ) の断面図

4. 実大模擬廃棄体の製作実証試験

固体状廃棄物を埋設処分するためには、国が定めた技術基準に適合する廃棄体を製作する必要がある。これらの中で、固体状廃棄物の廃棄体性能に関するもので、試験により確認する必要があるものは以下の2点である。

- ① 廃棄体内部に有害な空隙がないこと
- ② 埋設された場合の耐埋設荷重強度を有すること

ここでは、製作した実大模擬廃棄体について廃棄体内部の残留空隙量及び耐埋設荷重強度を評価した。

なお、製作実証試験は、収納条件や収納状況が大幅に異なる固体状廃棄物の強度分類と圧縮性等に応じて、廃棄物を次のように分類して実施した。

廃棄物分類		固体状廃棄物の性状	
非 溶 融 体	強度分類	A	固体状廃棄物の強度が高いもの
		B	固体状廃棄物の強度が低いもの
	圧縮性	圧縮	圧縮性の固体状廃棄物を圧縮したもの
		非圧縮	非圧縮性の固体状廃棄物
溶融体		溶融したもの	

注1) 固体状廃棄物を処理する段階では、廃棄物の形状分類に応じて、1、2、と分類していたが、固型化する段階では処理した後の廃棄物の形状として非圧縮、圧縮、溶融体に分類している。

注2) 本書では、強度分類に応じてA廃棄物とB廃棄物というように表現している。

4.1 実大模擬廃棄体の製作

(1) 実大模擬廃棄体の製作方法

実大模擬廃棄体の製作は、以下のとおりに実施した。なお、廃棄体製作上の基本的な方法は3章で検討した結果に従っている。

a. 模擬廃棄物の種類と組成

実大模擬廃棄体の製作に使用した各廃棄物分類毎の模擬廃棄物の仕様は、2.3で述べた通りである。

この内、圧縮性廃棄物は、120ℓドラム缶に収納し20～30Kgf/cm²で容器ごと圧縮し、圧縮体を廃棄体容器に収納した。

b. 模擬廃棄物の廃棄体容器への収納

収納方法は、実際の発電所での作業を考慮して、無作為に収納した状態（以下、普通収納）と、なるべく収納効率が上がるように配列させて収納した状態（以下、密収納）の2種類が考えられる。

模擬廃棄物の内、非圧縮物については密収納及び普通収納の2方法により、A廃棄物は直接ドラム缶に、B廃棄物は内張容器又は内籠容器に収納した。

また、圧縮体（缶類）の発生比率は小さいので圧縮体（缶類）単体の収納は行わずA廃棄物（非圧縮）と混合して収納した。

圧縮体については、A廃棄物の圧縮体はドラム缶に、B廃棄物の圧縮体は内張容器又は内籠容器に、共に容器中央に水平に積み重ねるが、特別に製作するB廃棄物の圧縮体の直接ドラム缶収納廃棄体（耐埋設荷重強度試験用）は、圧縮体がドラム缶内面に接触するよう偏心させて収納した。

また、溶融体はドラム缶に収納した。

更に、圧縮体と非圧縮物の組み合わせ収納の場合は、浮上防止の観点から圧縮体を容器底部に置く。

廃棄物が収納された状態を写真4.1-1に示す。（本試験ではドラム缶に収納しているが、ここでは普通収納、密収納の状態について分かりやすく示すために、別途透明アクリル容器に収納した時の試験状況の写真を添付している。）

なお収納量の変動性については、収納試験を繰り返し3回実施した結果を図4.1-1に示すが、3回ともほぼ同じ値になっている。

c. 固型化

設定した固型化条件を以下に示す。

なお、Pロート流下時間は、規準範囲（Appendix-2 参照）の上限である50秒程度に設定することにより、充填性について保守的条件とした。

○Pロート流下時間：50秒程度

・水／セメント比（W／C）	：	33 %
・砂／セメント比（S／C）	：	82 %
・混和剤（高性能減水剤）／セメント比	：	1.2 %

○注入速度：25ℓ／分

固型化材料は、JIS に規定される普通ポルトランドセメント及び高炉セメント、細骨材、高性能減水剤並びに上水道水を使用した。配合は表4.1-1 の通りである。

また、固型化の手順を図4.1-2 に、混練機及び注入器の仕様を表4.1-2 に、固型化材料の注入レベル（目標値）を図4.1-3 に示す。

なお、固型化材料注入後、養生エリアで養生を実施した。

(2) 実大模擬廃棄体の製作結果

廃棄体製作結果として、収納廃棄物重量、廃棄体の全重量、固型化材料等の充填体積を表4.1-3 に示す。また表4.1-3 には、4.2 及び4.3 の試験実施状況を合わせて示す。

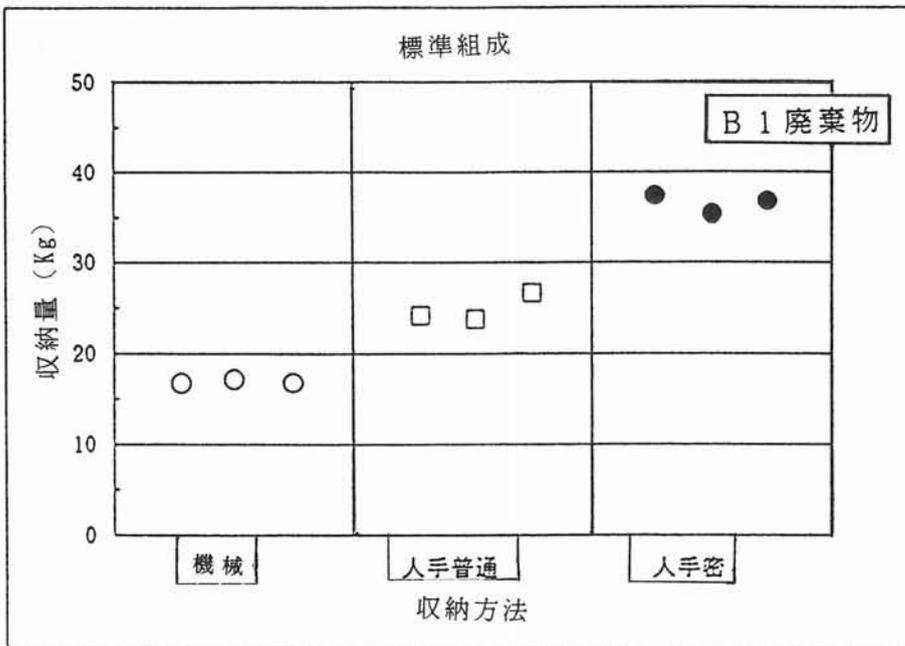
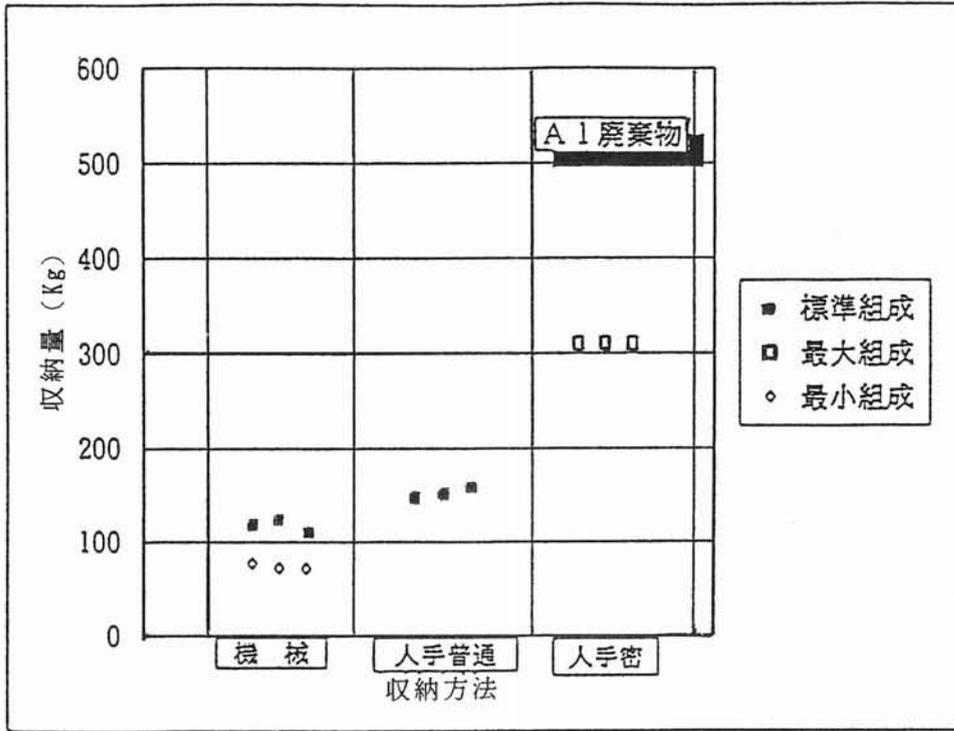


圖 4.1 - 1 收納試驗結果

A 1 廃棄物



密収納



普通収納

写真 4.1-1(1/3)

B 1 廃棄物



密収納



普通収納

写真 4.1-1(2 / 3)

B 2 廃棄物



写真 4.1-1(3 / 3)

表 4.1 - 1 固型化材料の配合

項目	固型化材料の配合	
	注入性試験/落下試験*1 Pポート流下時間：約 50 秒 (強度：普通)	耐埋設荷重試験*2 (強度：低強度)
水/セメント比	非圧縮、圧縮：0.33 溶融体：0.31	0.60
砂/セメント比	0.82	1.5
減水剤/セメント比	0.012	—

注 1) セメントには高炉セメントを用いた。

注 2) セメントには、高炉スラグと普通ポルトランドセメントを重量比 75:25 で混合したものを用いた。

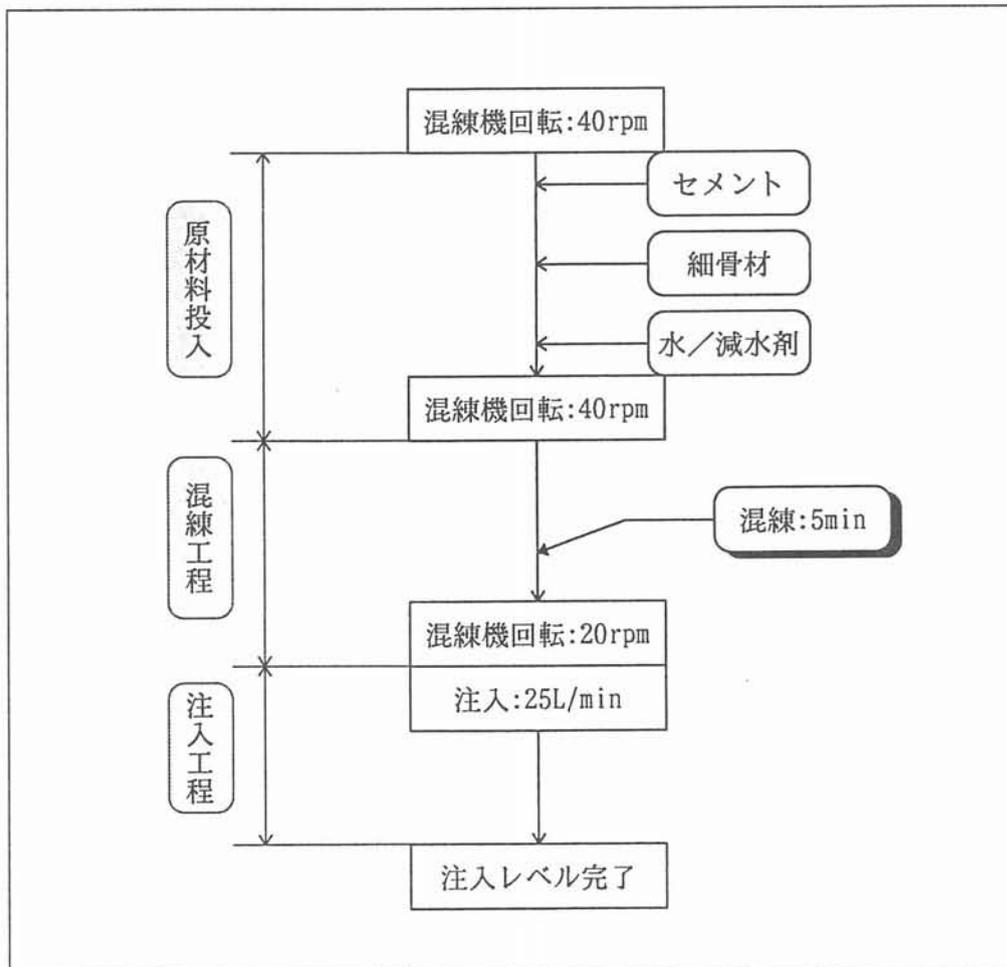


図 4.1 - 2 固型化手順

表 4.1 - 2 混練機及び注入器の仕様

機 器 名	仕 様
混練機	<ul style="list-style-type: none"> ・型 式 : 強制練りパン型混練機 ・混 練 量 : 250L ・混練用羽根 : 4本 ・回 転 数 : MAX44rpm ・寸 法 : ϕ 1400×500H
注入器	<ul style="list-style-type: none"> ・型 式 : スクイズ式 ・容 量 : 4~40L/min ・伝動方式 : 減速機 減速ローター

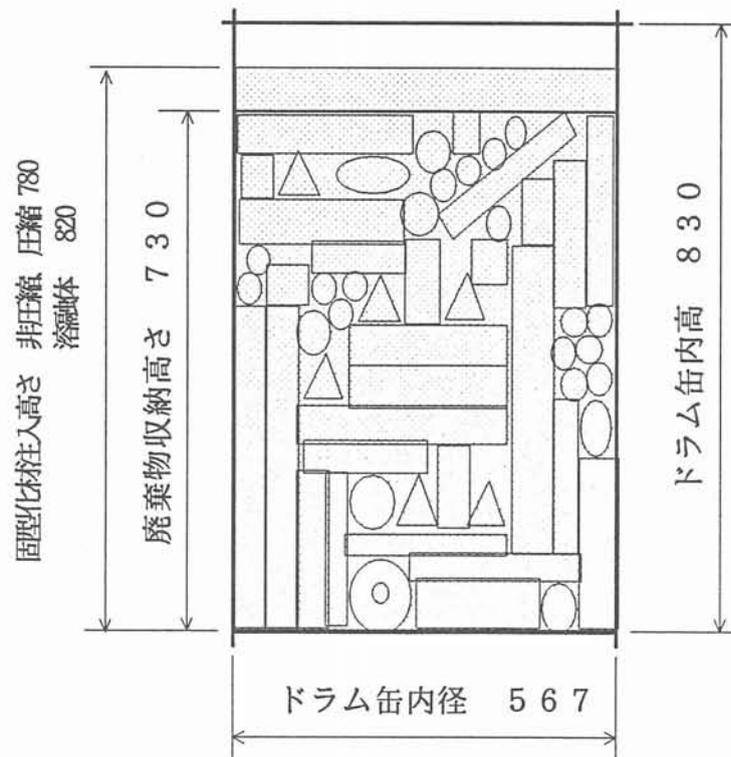


図 4.1 - 3 固型化材注入高さ

表 4.1 - 3 廃棄体の収納状態、重量及び試験実施状況

試験No.	廃棄物分類	収納方法	収納容器	収納重量 (kg)	廃棄体重量 (kg)	固化材料等の充填体積 (ℓ)	水置換	X線CT測定断面数	切断	載荷試験用
1	A 廃棄物 (非圧縮)	密	ドラム缶	305	694	165	○	9	○	×
2	A 廃棄物 (非圧縮)	普通	ドラム缶	151	583	186	○	9	×	×
3	A 廃棄物 (非圧縮)	普通	ドラム缶	154	586	185	○	3	○	×
4	B 廃棄物 (非圧縮)	密	内張容器	36	446	135	○	9	○	×
5	B 廃棄物 (非圧縮)	密	内籠	40	484	175	○	3	○	×
6	B 廃棄物 (非圧縮)	普通	内張容器	23	449	143	○	3	○	×
7	B 廃棄物 (非圧縮)	普通	内籠	23	494	190	○	3	○	×
8	B 廃棄物 (圧縮体) (保温材等)	-	内張容器	94	348	63	○	9	○	×
9	B 廃棄物 (圧縮体) (保温材等)	-	内籠	94	389	107	○	3	×	×
10	A 廃棄物 (非圧縮) + 圧縮体 (缶類)	密	ドラム缶	323	675	151	○	9	○	×
11	B 廃棄物 (非圧縮) + 圧縮体 (保温材等)	密	内張容器	67	396	98	○	3	○	×
12	A 廃棄物 (非圧縮)	密	ドラム缶	301	662	163	○	×	×	○
13	A 廃棄物 (非圧縮)	普通	ドラム缶	152	559	186	○	×	×	○
14	B 廃棄物 (非圧縮)	密	内籠	36	462	179	○	×	×	○
15	A 廃棄物 (圧縮体)	-	ドラム缶	178	401	86	○	×	×	○
16	B 廃棄物 (圧縮体) (保温材等)	-	内張容器	94	368	103	○	×	×	○
17	B 廃棄物 (圧縮体) (保温材等)	偏心	ドラム缶	94	350	102	○	×	×	○
18	溶融体	-	ドラム缶	742	878	50	○	9	×	×
19	溶融体	-	ドラム缶	736	873	51	○	3	×	○
20	溶融体	-	ドラム缶	735	867	53	○	×	×	×

注：溶融体は外觀形状から廃棄物体積を求めた。

表中で○は実施、×は実施せず。

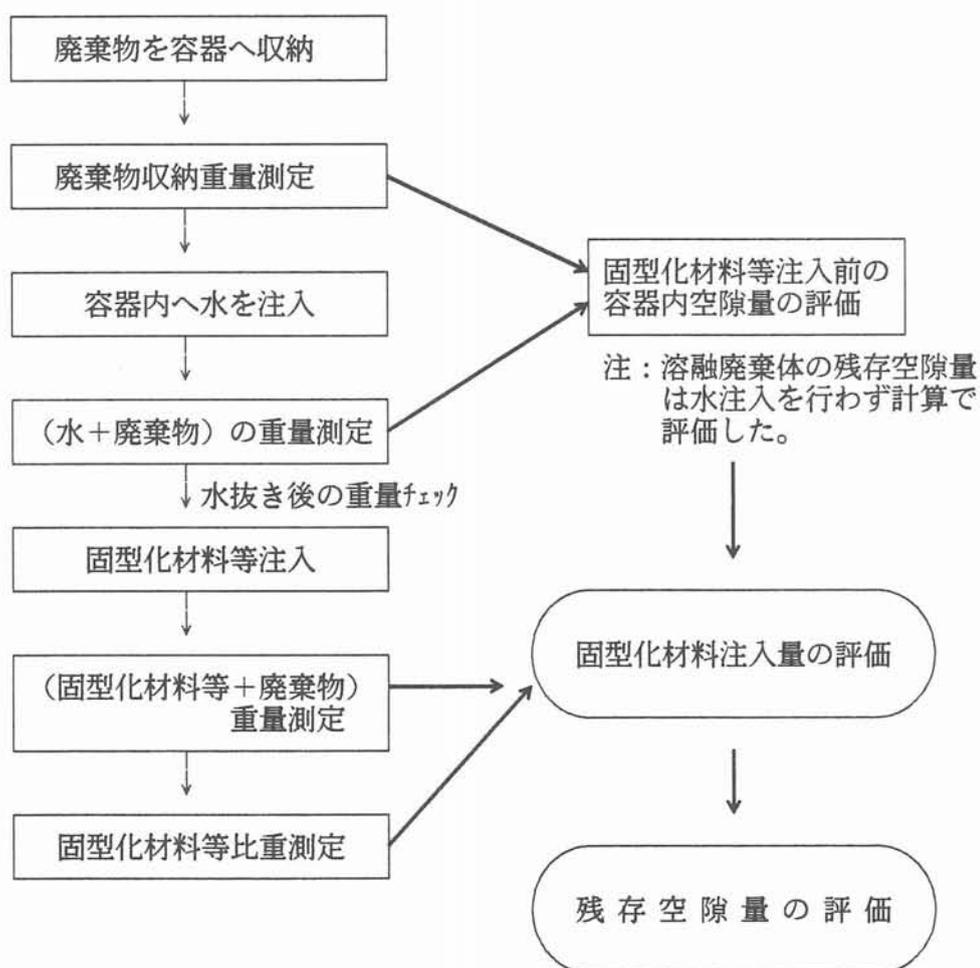
4.2 廃棄体内の残留空隙量

充填廃棄体が平均的に有する残留空隙量を把握するため、埋設される廃棄体を代表できると考えられる実規模模擬充填廃棄体を作製し、残存空隙量を測定した。なお、測定には①水置換、②X線CT及び③切断による断面確認の3手法を用いた。

(1) 水置換による評価

a. 方法

試験は下記の手順で実施した。



b. 結果

評価結果を表4.2-1に示す。表4.2-1からもわかるように、廃棄体内部の固型化容積（廃棄体内部のうち上部空隙を除く容積）に対する残存空隙量の比率は多くの廃棄体で0～1%、高くても2%であった。

(2) X線CT (Computed Tomography)による評価

a. 方法

①基本原理

図4.2-1 にX線CT装置の基本構成を示す。X線源（加速器）から発生する広角X線ビームと複数個の検出器を使用し、被検体を並進、回転走査し、あらゆる方向からX線透過データを収集する。このX線透過データを基に、コンピューターにて像構成演算を行い、断面像を作成する。

②装置仕様

メッシュ分割幅：約1mm
総メッシュ数：約30万
断面高さ：約1mm

③測定廃棄体

水置換による評価を行った13体のうち、充填性の観点から特徴的と考えられる6体については充填廃棄体1体につき9断面の測定を行い、残りの充填廃棄体については充填廃棄体1体につき3断面の測定を行った。表4.2-2 に各廃棄体の測定断面数、図4.2-3 に9断面と3断面の場合の断面観察位置を示す。

b. 結果

評価結果を表4.2-2 に、また各充填廃棄体のCT画像の一部を写真4.2-1に示す。画像において空隙と判断された箇所については白抜きで示してある。

なお、溶融体（金属層）及びA（非圧縮）密収納の充填廃棄体については、密度が高く測定はできなかった。

- ・ A廃棄物（非圧縮）の充填廃棄体においては、弁体内部に一部充填されない空隙が認められたものの、いずれの断面においても1%程度以下の空隙率と評価された。
- ・ B廃棄物（非圧縮）の充填廃棄体については5～6%程度の空隙率を有する断面が認められたが、これは折り畳まれたダクトホースの外縁部に固型化材料等が充填されなかったことによるものであると考えられる。ただし、これらの空隙のひとつひとつは微細なものであって、ひとかたまりの空隙では無いことがわかる。
- ・ 圧縮体（保温材等）の充填廃棄体には、圧縮容器周辺部に10%程度の空隙率と評価される断面が一部に認められた。

- ・ A（非圧縮+圧縮体）廃棄体において、圧縮体（缶類）が存在している断面は30％程度の空隙率と評価されたが、圧縮体の高さを考慮すれば廃棄体全体では5％程度の空隙率と評価される。

全ての断面を測定できた充填廃棄体について9断面（または3断面）の空隙量の平均値は圧縮体のみの充填廃棄体を除けば1～3％程度であり、圧縮体のみの充填廃棄体では3～6％となった。

(3) 切断による断面確認

a. 方法

充填廃棄体を縦方向に2分割切断し、切断面から固型化材料等の充填状況を確認する。なお、試験装置の仕様は以下のとおり。

方式 : ダイヤモンドワイヤーソー

ワイヤー移動速度 : 30mm/min

切断速度 : 約2mm/min

水置換による充填試験を行った13体のうち9体を切断した。

b. 結果

切断した廃棄体の外観を写真4.2-2に示す。充填廃棄体の中に顕著な空隙は認められず、固型化材料等が良好に充填されていることが分かる。なおB非圧縮物と圧縮体については、モルタル中での浮力によって廃棄物が若干上面に片寄って存在しているものが認められた。

また、圧縮体（保温材等）の切断面の拡大写真を写真4.2-3に示すが、X線CTで圧縮体（保温材等）の内部に認められた空隙は、ほとんどが被圧縮物と圧縮用容器との間隙に生じている圧縮体内部の空隙であり、廃棄体と容器の間隙については良好に充填されていたことがわかった。

(4) まとめ

以上に示した試験結果をまとめると以下のとおりである。

①A廃棄物（非圧縮）の充填廃棄体

水置換、X線CT共に1％未満の空隙しか認められなかった。

②B廃棄物（非圧縮）の充填廃棄体

水置換、X線CT共に1～2%の空隙が認められた。

③溶融体の充填廃棄体

水置換により1%未満の空隙しか認められなかった。

④圧縮体の充填廃棄体

圧縮体（保温材等）のみの充填廃棄体については、水置換試験では0～2%程度、X線CTでは3～6%程度の空隙率が認められた。切断試験によって当該充填廃棄体にふくまれる空隙はほとんどが圧縮体内部の空隙であり、このことが測定手法による空隙率の差異の原因となっていることがわかった。

圧縮体（缶類）はその存在比率が極めて少ないことから、A廃棄物（非圧縮）と混合した充填廃棄体を製作した。X線CTからは、圧縮体断面部分の空隙率は30%程度であったが、廃棄体に占める圧縮体の容積率を考慮すると、廃棄体全体では5%程度の空隙率と評価できる。圧縮体（缶類）は基礎試験等でも内部に空隙が確認されており、このことが水置換による評価（0%）との差異になっている。

なお、圧縮体そのものは埋設後に廃棄体を受ける上載荷重以上の圧力で圧縮したものであり、これら圧縮体内部の空隙は解放された空間に生じている空隙とは区別されるべきと考えられる。

発電所で実際に製作される充填廃棄体においては、これらの値に上部空隙量を加えたものが廃棄体に平均的に残存する空隙量となる。

上部空隙量は、固型化材料を充填する際のオーバーフロー防止という観点からドラム缶上端面よりある一定の裕度をもって充填されることによって生じる。必要となる裕度は固型化システムによって異なると考えられ、一概に設定することはできないが、10%程度の空隙量（ドラム缶閉蓋した際に、蓋の下面から充填面までの約8cm）には抑えられると考える。

表 4. 2 - 1 水置換による残存空隙量比率

試験No.	廃棄物分類	収納状態	収納容器	空隙率(%)
1	A廃棄物(非圧縮)	密	ドラム缶	0
2	A廃棄物(非圧縮)	普通	ドラム缶	0
3	A廃棄物(非圧縮)	普通	ドラム缶	0
4	B廃棄物(非圧縮)	密	内張容器	0.5
5	B廃棄物(非圧縮)	密	内籠	1.0
6	B廃棄物(非圧縮)	普通	内張容器	1.5
7	B廃棄物(非圧縮)	普通	内籠	0.5
8	B廃棄物(圧縮体)(保温材等)	—	内張容器	2.0
9	B廃棄物(圧縮体)(保温材等)	—	内籠	0
10	A廃棄物(非圧縮)+圧縮体(缶類)	密	ドラム缶	0
11	B廃棄物(非圧縮)+圧縮体(保温材等)	密	内張容器	2.0
12	A廃棄物(非圧縮)	密	ドラム缶	0.5
13	A廃棄物(非圧縮)	普通	ドラム缶	0
14	B廃棄物(非圧縮)	密	内籠	0
15	A廃棄物(圧縮体)	—	ドラム缶	0
16	B廃棄物(圧縮体)(保温材等)	—	内張容器	0
17	B廃棄物(圧縮体)(保温材等)	偏心	ドラム缶	0
18	溶融体	—	ドラム缶	0
19	溶融体	—	ドラム缶	0
20	溶融体	—	ドラム缶	0

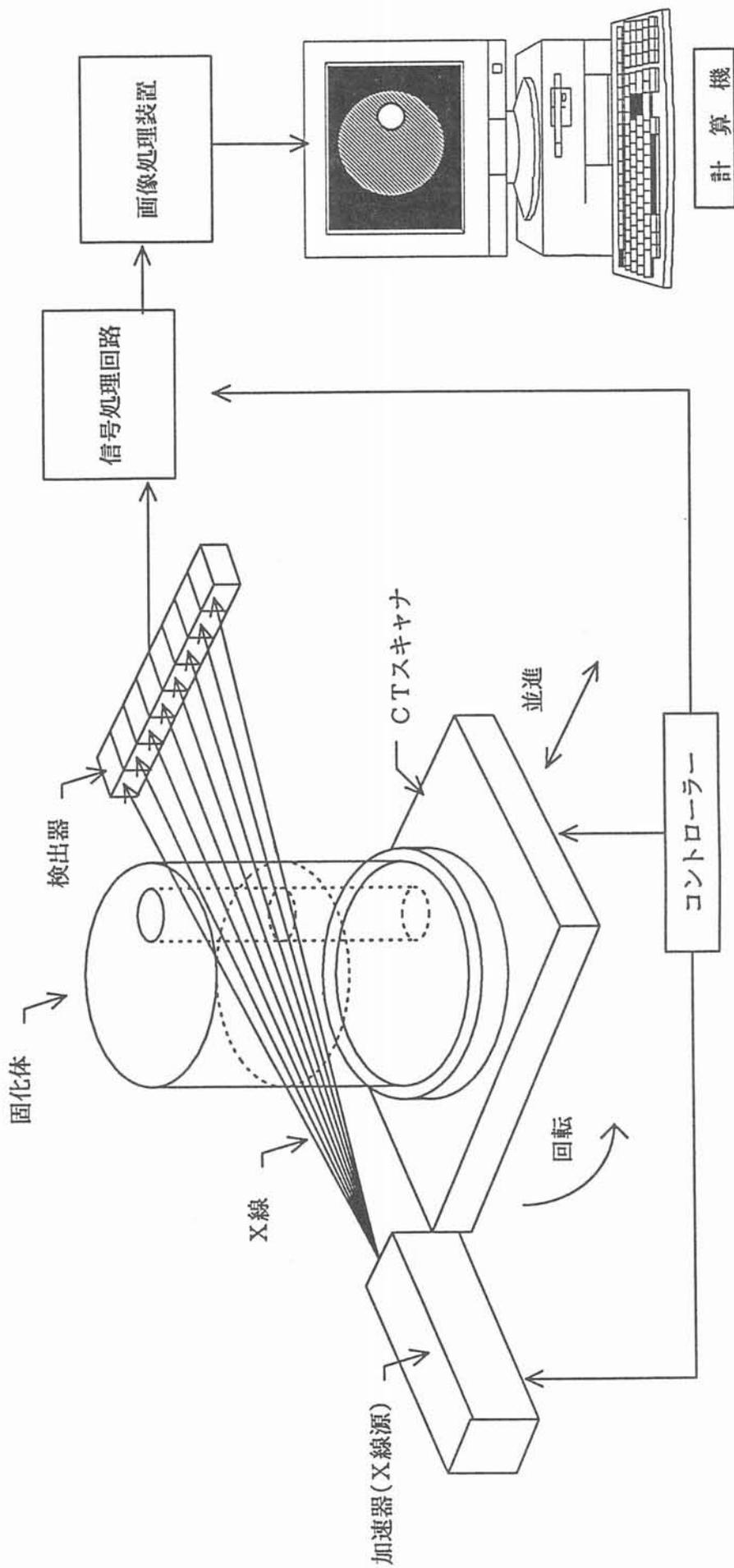


表4.2-2 X線CTの測定位置における廃棄体空隙率評価結果

【9スライスの結果】

試験No.	廃棄物分類	収納状態	収納容器	X線CTの測定位置								平均値			
				78mm	156mm	234mm	312mm	390mm	486mm	546mm	624mm		702mm		
1	A廃棄物(非圧縮)	密	ドラム缶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.36	0.20	-
2	A廃棄物(非圧縮)	普通	ドラム缶	0.07	2.04	0.87	0.93	0.63	0.35	0.26	0.47	0.23	0.65		
4	B廃棄物(非圧縮)	密	内張容器	3.2	5.86	5.47	1.78	0.01	2.00	0.05	0.05	0.01	2.05		
8	B廃棄物(圧縮体)(保温材等)	-	内張容器	0.01	1.34	3.69	0.33	9.37	0.05	5.83	0.14	9.13	3.32		
10	A廃棄物(非圧縮)+圧縮体(缶類)	密	ドラム缶	32.02	-	-	-	-	-	-	1.13	0.18	-		
18	溶融体	-	ドラム缶	-	-	-	-	-	-	1.35	0.63	0.08	-		

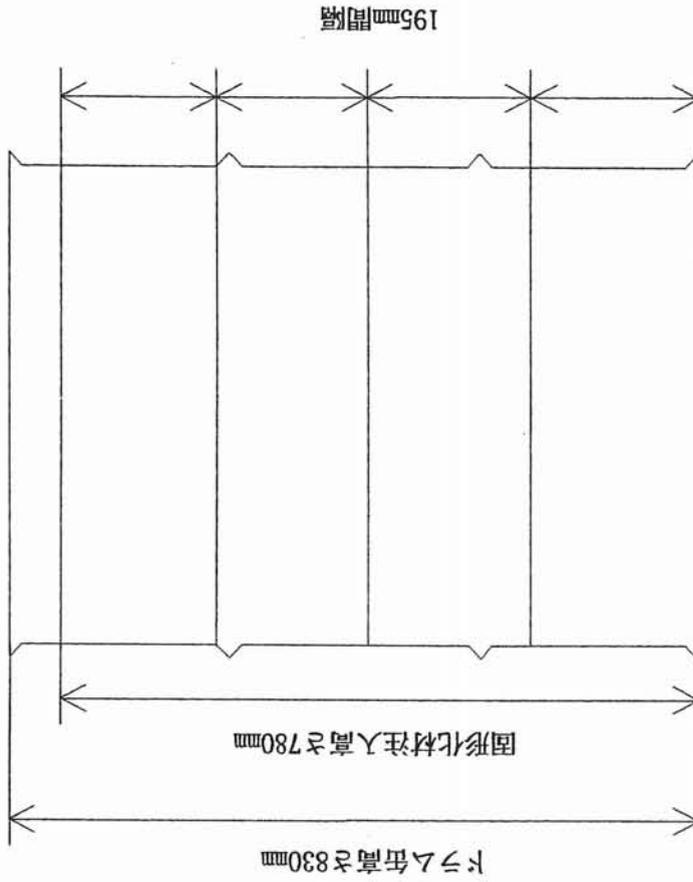
注：・空隙率の値はパーセント(%)

・空隙率の欄が「-」の断面は高密度のために測定不可

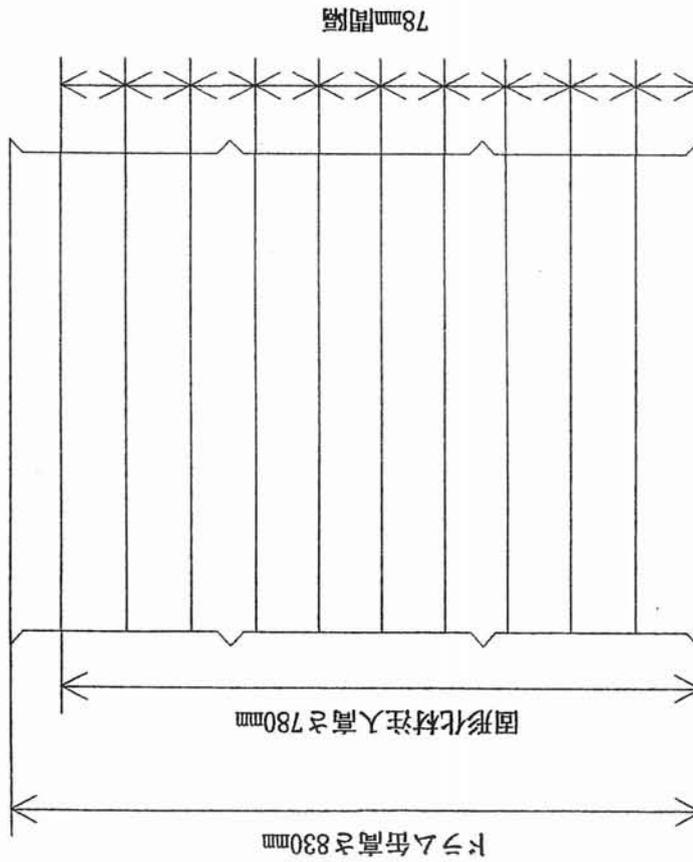
・X線CTの測定位置はドラム缶下面からの高さ

【3スライスの結果】

試験No.	廃棄物分類	収納状態	収納容器	X線CTの測定位置			平均値
				195mm	390mm	585mm	
3	A廃棄物(非圧縮)	普通	ドラム缶	0.91	0.46	0.27	0.55
5	B廃棄物(非圧縮)	密	内籠	6.43	0.72	0.04	2.40
6	B廃棄物(非圧縮)	普通	内張容器	0.77	4.83	0.78	2.13
7	B廃棄物(非圧縮)	普通	内籠	0.65	4.30	0.08	1.68
9	B廃棄物(圧縮体)(保温材等)	-	内籠	9.76	7.97	0.61	6.11
11	B廃棄物(非圧縮)+圧縮体(保温材等)	密	内張容器	4.83	0.04	5.46	3.44
19	溶融体	-	ドラム缶	-	-	0.52	-

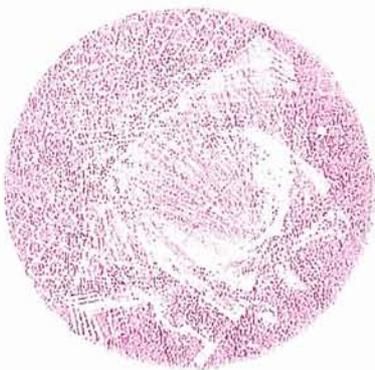


3スライス測定廃棄体

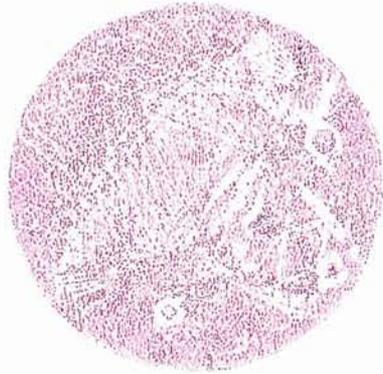


9スライス測定廃棄体

図 4. 2 - 3 断面測定位置



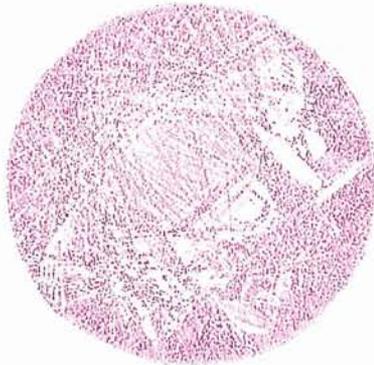
1. ドラム缶底部より78mm (空隙率測定不可)



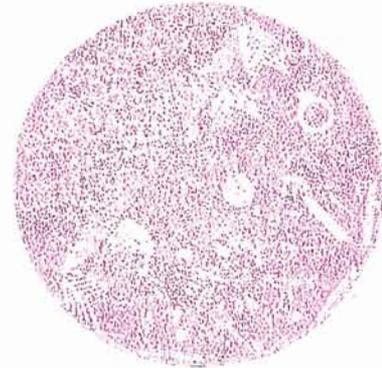
4. ドラム缶底部より312mm (空隙率測定不可)



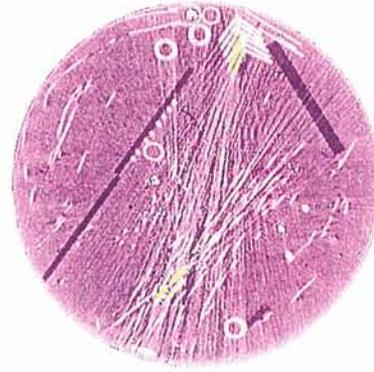
7. ドラム缶底部より546mm (空隙率測定不可)



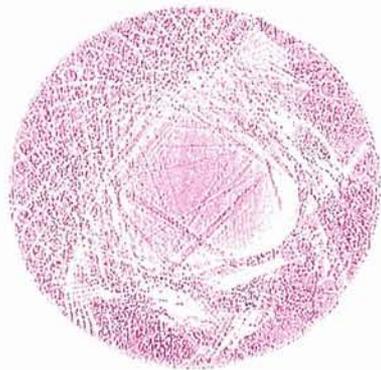
2. ドラム缶底部より156mm (空隙率測定不可)



5. ドラム缶底部より390mm (空隙率測定不可)



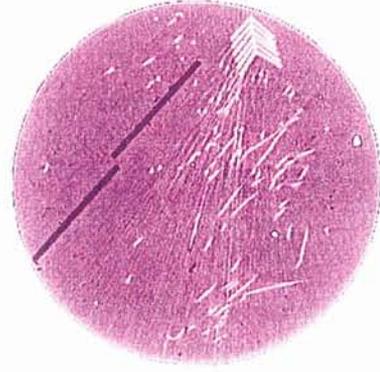
8. ドラム缶底部より624mm



3. ドラム缶底部より234mm (空隙率測定不可)

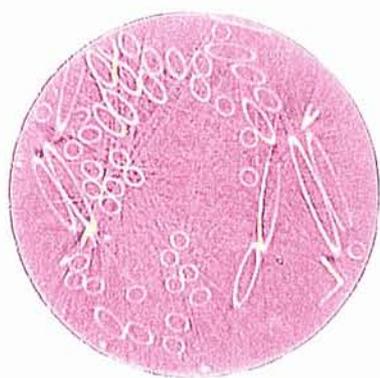


6. ドラム缶底部より468mm (空隙率測定不可)

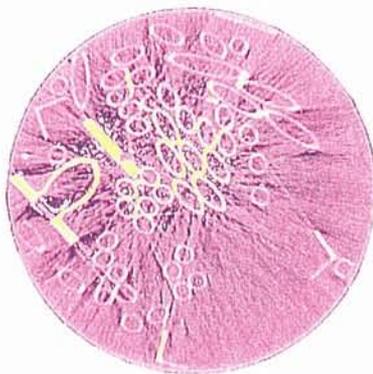


9. ドラム缶底部より702mm

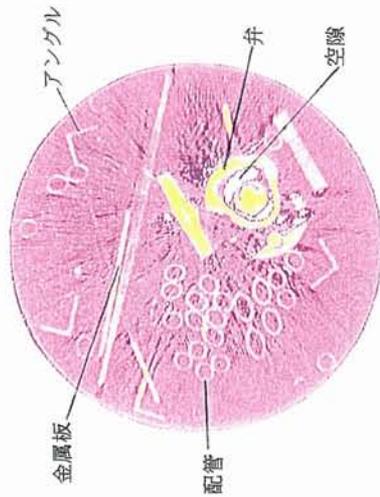
写真4.2-1 (1/6) X線CT画像 (A非圧縮、密収納)



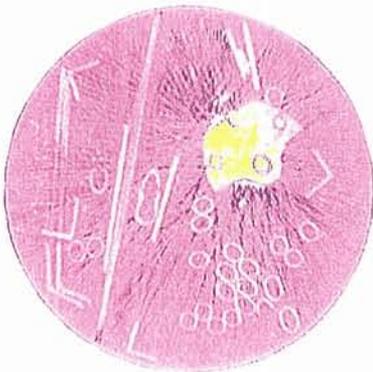
1. ドラム缶底部より78mm



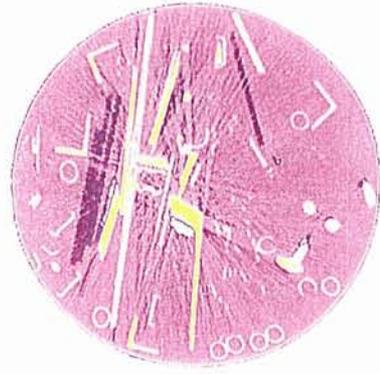
2. ドラム缶底部より156mm



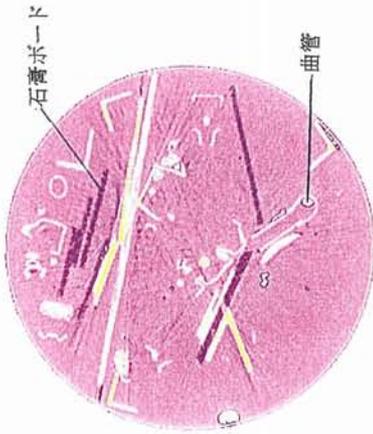
4. ドラム缶底部より312mm



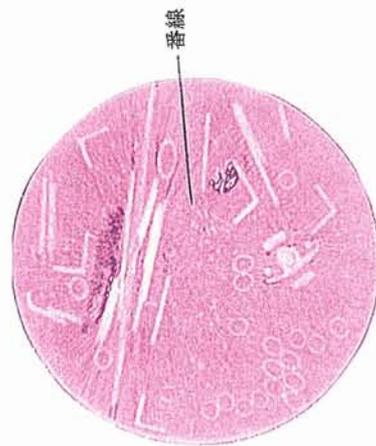
5. ドラム缶底部より390mm



7. ドラム缶底部より546mm



8. ドラム缶底部より624mm



6. ドラム缶底部より468mm

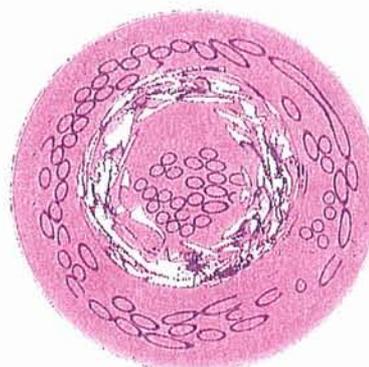


9. ドラム缶底部より702mm

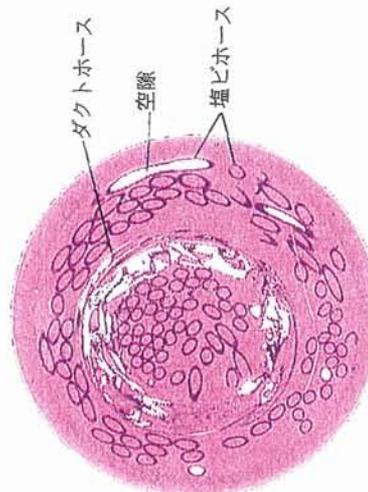
写真4.2-1 (2/6) X線CT画像 (A非圧縮、普通収納)



1. ドラム缶底部より78mm



2. ドラム缶底部より156mm



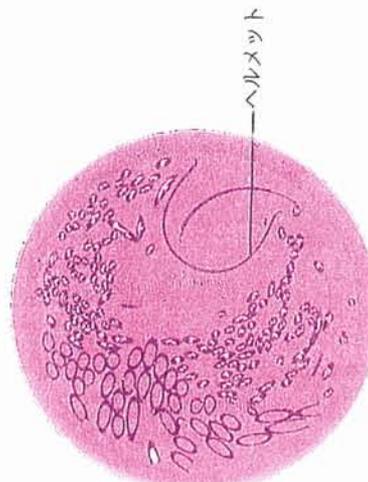
3. ドラム缶底部より234mm



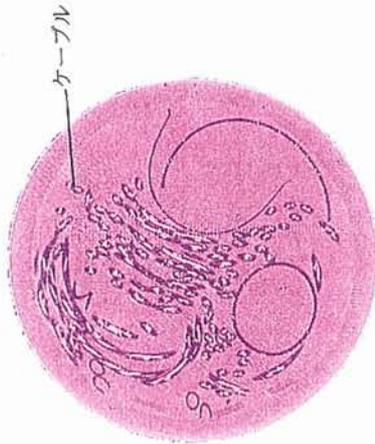
4. ドラム缶底部より312mm



5. ドラム缶底部より390mm



6. ドラム缶底部より468mm



7. ドラム缶底部より546mm



8. ドラム缶底部より624mm



9. ドラム缶底部より702mm

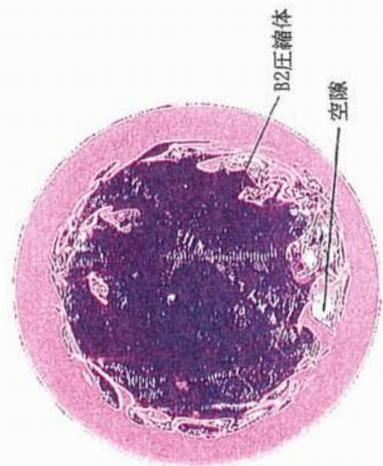
写真4.2-1 (8/6) X線CT画像 (B非圧縮、密収納)



1. ドラム缶底部より78mm



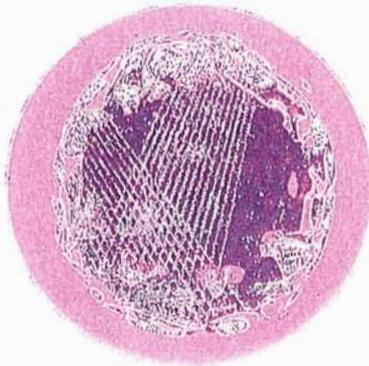
2. ドラム缶底部より156mm



3. ドラム缶底部より234mm



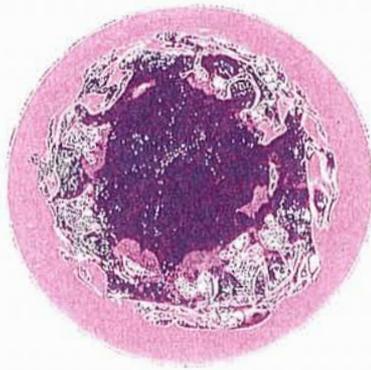
4. ドラム缶底部より312mm



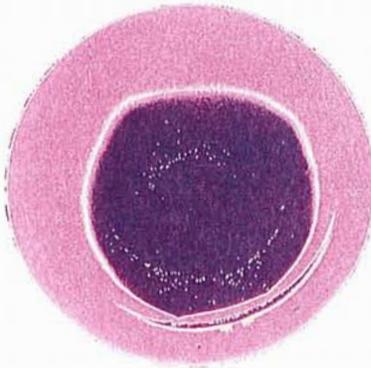
5. ドラム缶底部より390mm



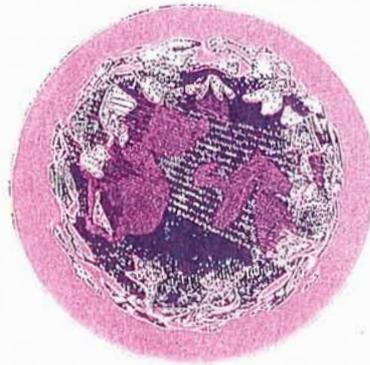
6. ドラム缶底部より468mm



7. ドラム缶底部より546mm

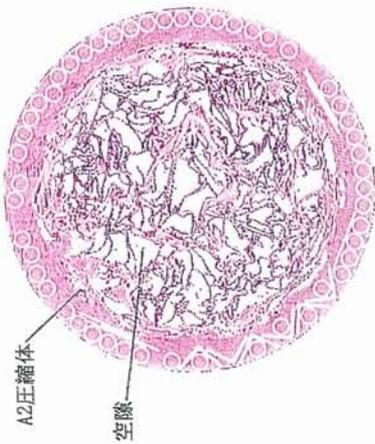


8. ドラム缶底部より624mm

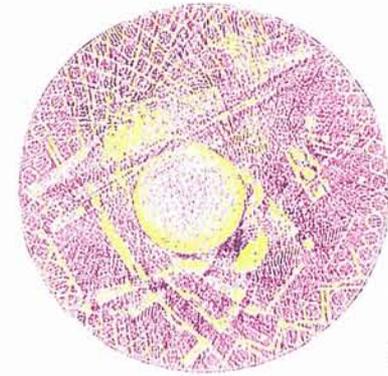


9. ドラム缶底部より702mm

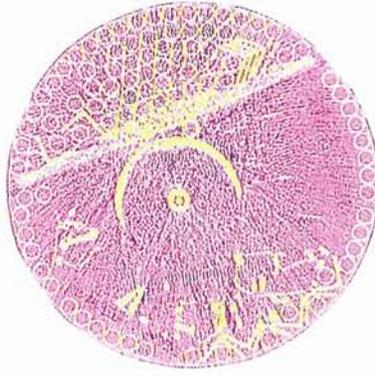
写真4.2-1 (4/6) X線CT画像 (B圧縮)



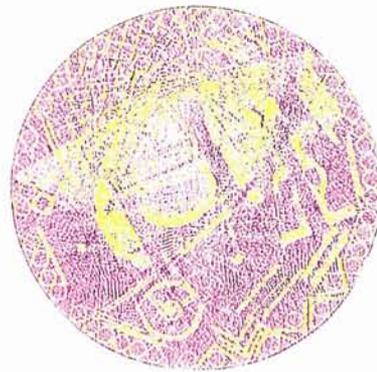
1. ドラム缶底部より78mm



4. ドラム缶底部より312mm (空隙率測定不可)



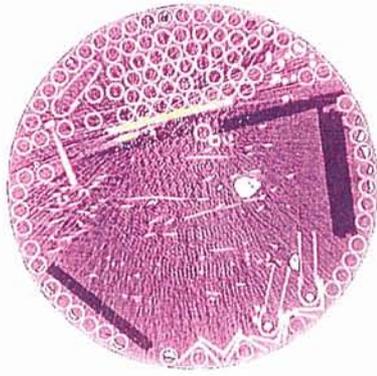
7. ドラム缶底部より546mm (空隙率測定不可)



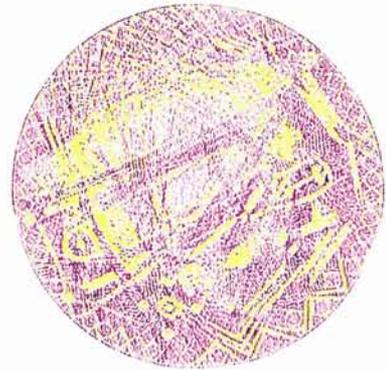
2. ドラム缶底部より156mm (空隙率測定不可)



5. ドラム缶底部より390mm (空隙率測定不可)



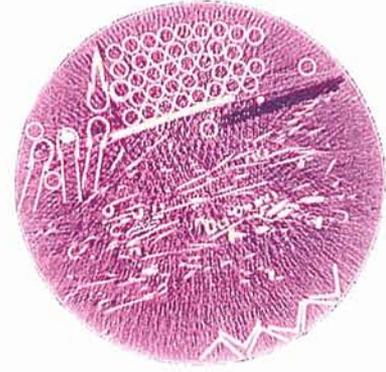
8. ドラム缶底部より624mm



3. ドラム缶底部より234mm (空隙率測定不可)



6. ドラム缶底部より468mm (空隙率測定不可)

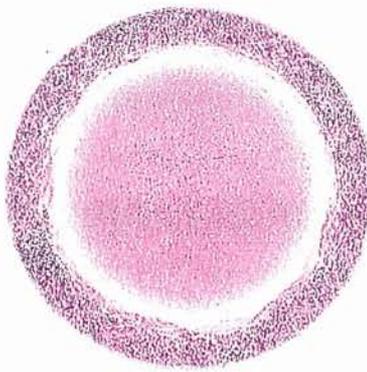


9. ドラム缶底部より702mm

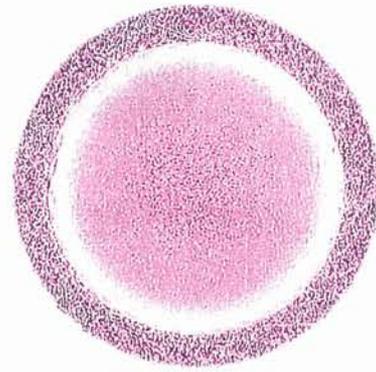
写真4.2-1 (5/6) X線CT画像 (A非圧縮+圧縮、密収納)



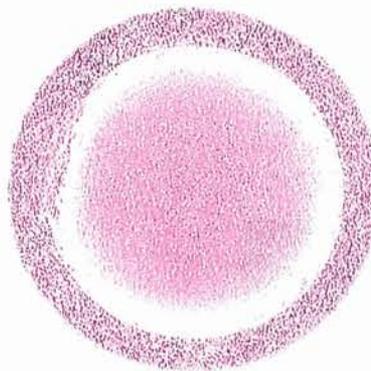
1. ドラム缶底部より78mm



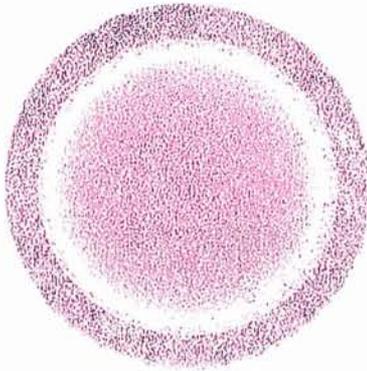
2. ドラム缶底部より156mm



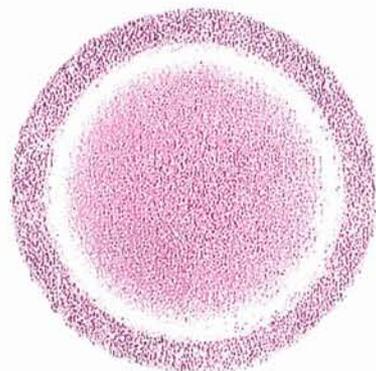
3. ドラム缶底部より234mm



4. ドラム缶底部より312mm



5. ドラム缶底部より390mm



6. ドラム缶底部より468mm



7. ドラム缶底部より546mm



8. ドラム缶底部より624mm



9. ドラム缶底部より702mm

写真4.2-1 (6/6) X線CT画像 (A溶融体)



写真4.2-2 (1/9) 切断廃棄体の外観 (A非圧縮、密収納)

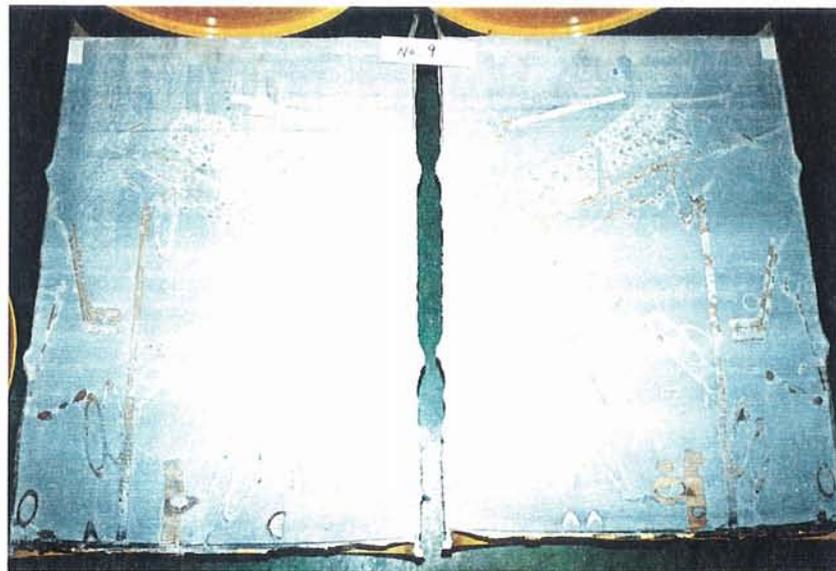


写真4.2-2 (2/9) 切断廃棄体の外観 (A非圧縮、普通収納)

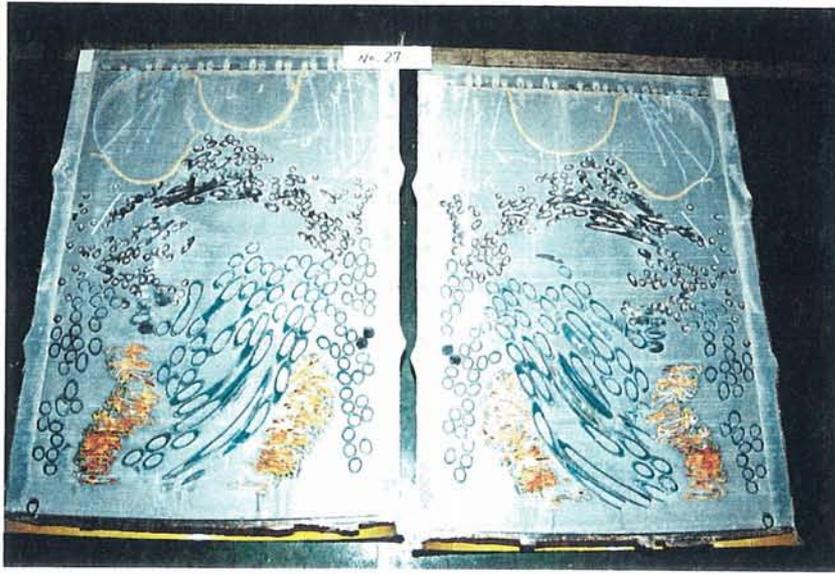


写真4.2-2 (3/9) 切断廃棄体の外観 (B非圧縮、密収納、内張容器)

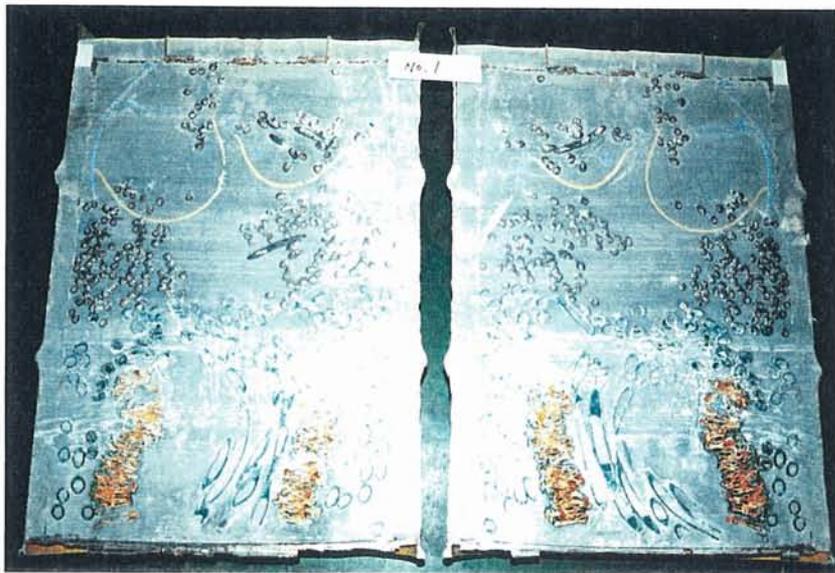


写真4.2-2 (4/9) 切断廃棄体の外観 (B非圧縮、密収納、内籠容器)

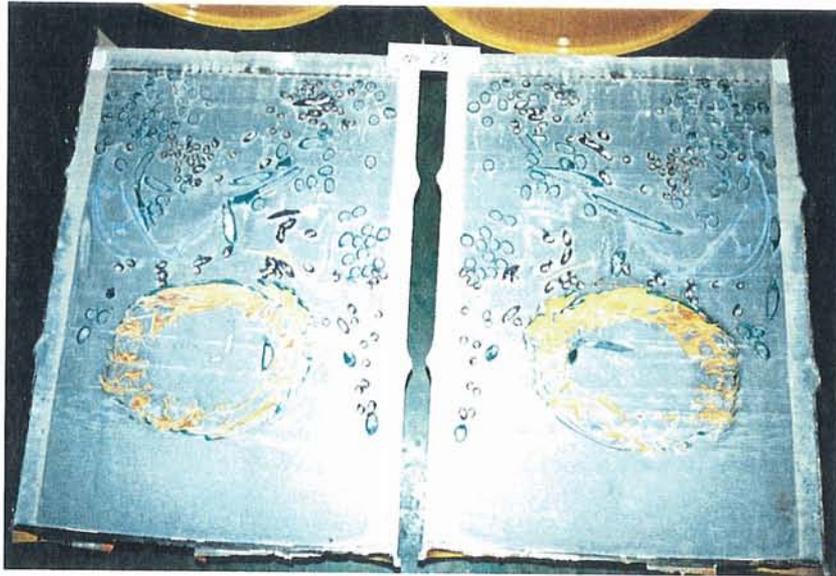


写真4.2-2 (5/9) 切断廃棄体の外観 (B非圧縮、普通収納、内張容器)

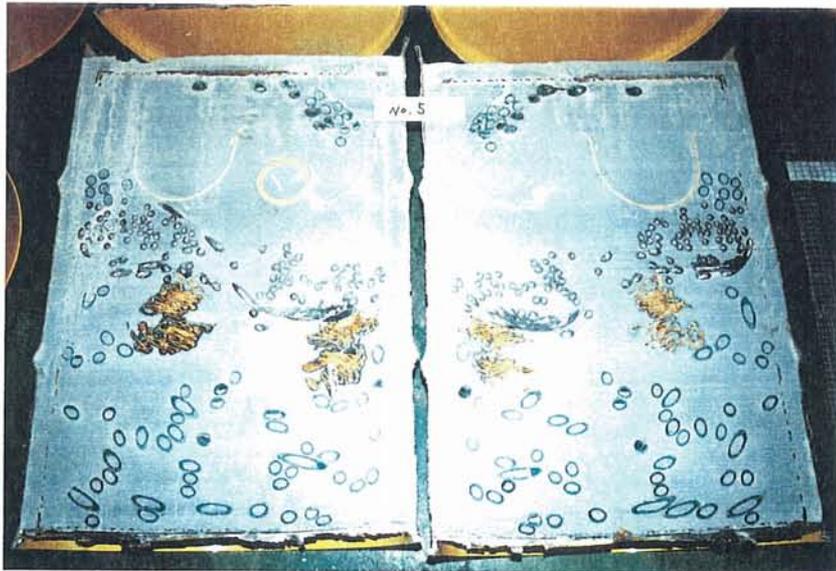


写真4.2-2 (6/9) 切断廃棄体の外観 (B非圧縮、普通収納、内籠容器)

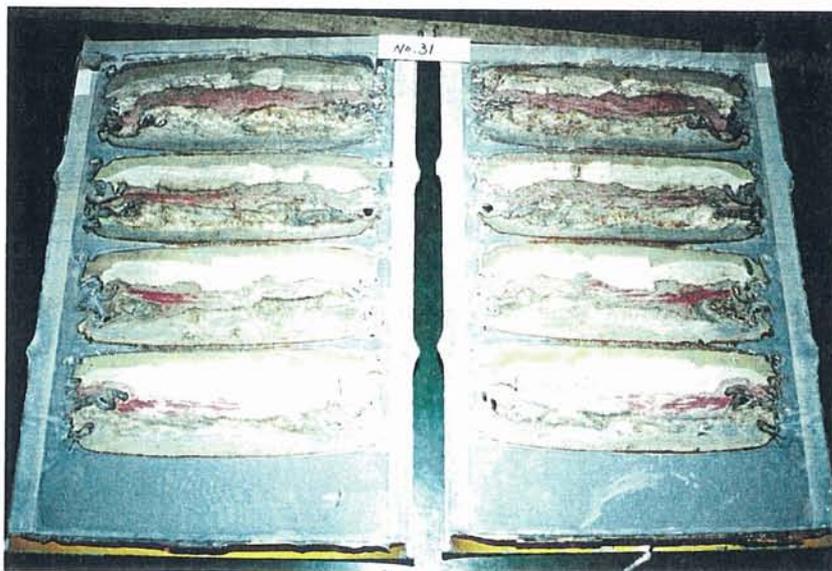


写真4.2-2 (7/9) 切断廃棄体の外観 (B圧縮、内張容器)



写真4.2-2 (8/9) 切断廃棄体の外観 (A非圧縮+圧縮)



写真4.2-2 (9/9) 切断廃棄体の外観 (B非圧縮+圧縮、内張容器)

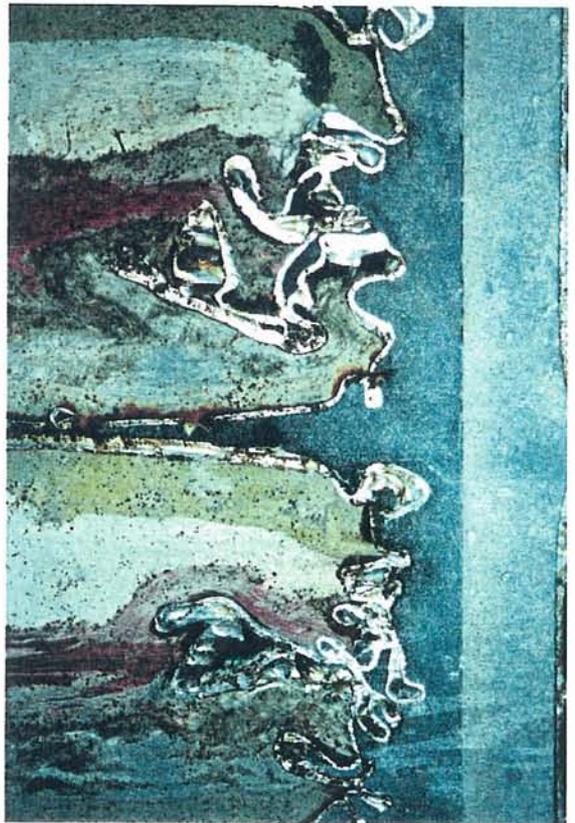
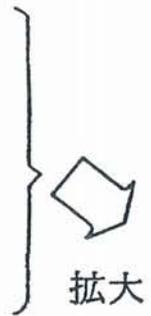


写真4.2-3 圧縮体断面の拡大写真

4.3 廃棄体の有する強度

(1) 試験方法

製作された実大模擬廃棄体を用いて、下記のと通りの荷重試験を実施した。なお、荷重方法は埋設処分において廃棄体を受ける荷重を想定して設定している。

a. 試験装置

試験装置は、図4.3-1 に示すように、H型鋼で構成した加力フレーム、ドラムを模擬した加力治具（上下部）、载荷のための油圧ジャッキ及び荷重を測定するロードセルからなる。

b. 载荷方法

载荷試験では、上部加力治具（1.25トン）を载荷後、油圧ジャッキで制御しながら0.5 トン単位で増加していくが、最大荷重付近及び変形が大きく変化する付近では、より細かいステップで荷重を増加する。なお、载荷試験における最大荷重は試験装置の限度の30トンまでとする。

c. 測定方法

測定方法は、载荷荷重及び試験用廃棄体全体の鉛直方向の変位量（D 1～D 4）をリアルタイムで測定する。試験は、変位が進まなくなった時点で終了することとし、その際の荷重を試験用廃棄体の耐埋設荷重とする。

変位の測定位置を図4.3-2 に示す。

d. 試験用廃棄体

試験用廃棄体の製作においては、廃棄物の強度が高いものと低いものに区分し、強度の高いものは直接ドラム缶に収納して固型化し、強度の低いものは、廃棄体に強度を持たせるためにドラム缶の内側にモルタル（以下、内張容器）又は内籠（以下、内籠容器）による内周層30mmを設け固型化した。

また、これら試験用廃棄体の製作に用いたモルタルは、保守的に全て300 kgf/cm²程度の低強度のものを使用した。

なお圧縮体（保温材等）の廃棄体は、廃棄物があらかじめ圧縮処理されているため

強度が高いと思われるが、念のために、圧縮体を偏心させてドラム缶に直接収納した場合についてもその強度を確認した。

強度区分	廃棄体分類	収納	容器	本数
強度があるもの	A型非圧縮物	密	ドラム缶	1体
		普通	ドラム缶	1体
	圧縮体（缶類）	—	ドラム缶	1体
	溶融体	—	ドラム缶	1体
強度が無いもの	B型非圧縮物	密	内籠容器	1体
		—	内籠容器	1体
	圧縮体（保温材等）	偏心	ドラム缶	1体
	廃棄物なし	—	内籠容器	2体

(2) 荷重試験結果

荷重試験の結果を表4.3-1に示す。廃棄体分類や廃棄体の収納状態に拘らず、容器とモルタルを含む廃棄体全体では、試験装置の最大荷重である30トンでも破壊しないことが確認できた。また、低強度のモルタルを使用した内張容器については、内張容器だけ（廃棄物なし）でも約18トンの荷重に耐えることが確認できた。なお、荷重試験の状況を写真4.3-1に、荷重試験後の廃棄体状態を写真4.3-2に示す。

表 4. 3 - 1 載荷試験結果のまとめ

原廃棄物の強度分類	廃棄物の処理	収納条件		破壊荷重	載荷時平均変位量 (mm)		載荷試験終了時の廃棄体観察結果	モルタル圧縮強度* (Kgf/cm ²)
		収納状態	収納容器		10トン載荷時	30トン載荷時		
A	非圧縮	密	ドラム缶	30トン以上	3.01	5.99	異常無し	278
A	非圧縮	普通	ドラム缶	30トン以上	2.85	5.50	異常無し	295
B	非圧縮	密	内籠容器	30トン以上	2.94	5.49	異常無し	304
A	圧縮	-	ドラム缶	30トン以上	2.92	5.82	異常無し	316
B	圧縮	-	内籠容器	30トン以上	3.07	5.34	異常無し	305
B	圧縮	偏心	ドラム缶	30トン以上	3.12	6.12	異常無し	316
-	溶融	中心	ドラム缶	30トン以上	3.43	8.86	異常無し	321
廃棄物の収納なし (内張容器のみ)				18.3トン	5.71	-	モルタルの剥離有り	236
廃棄物の収納なし (内張容器のみ)				18.6トン	5.50	-	モルタルの剥離有り	235

* 28日強度

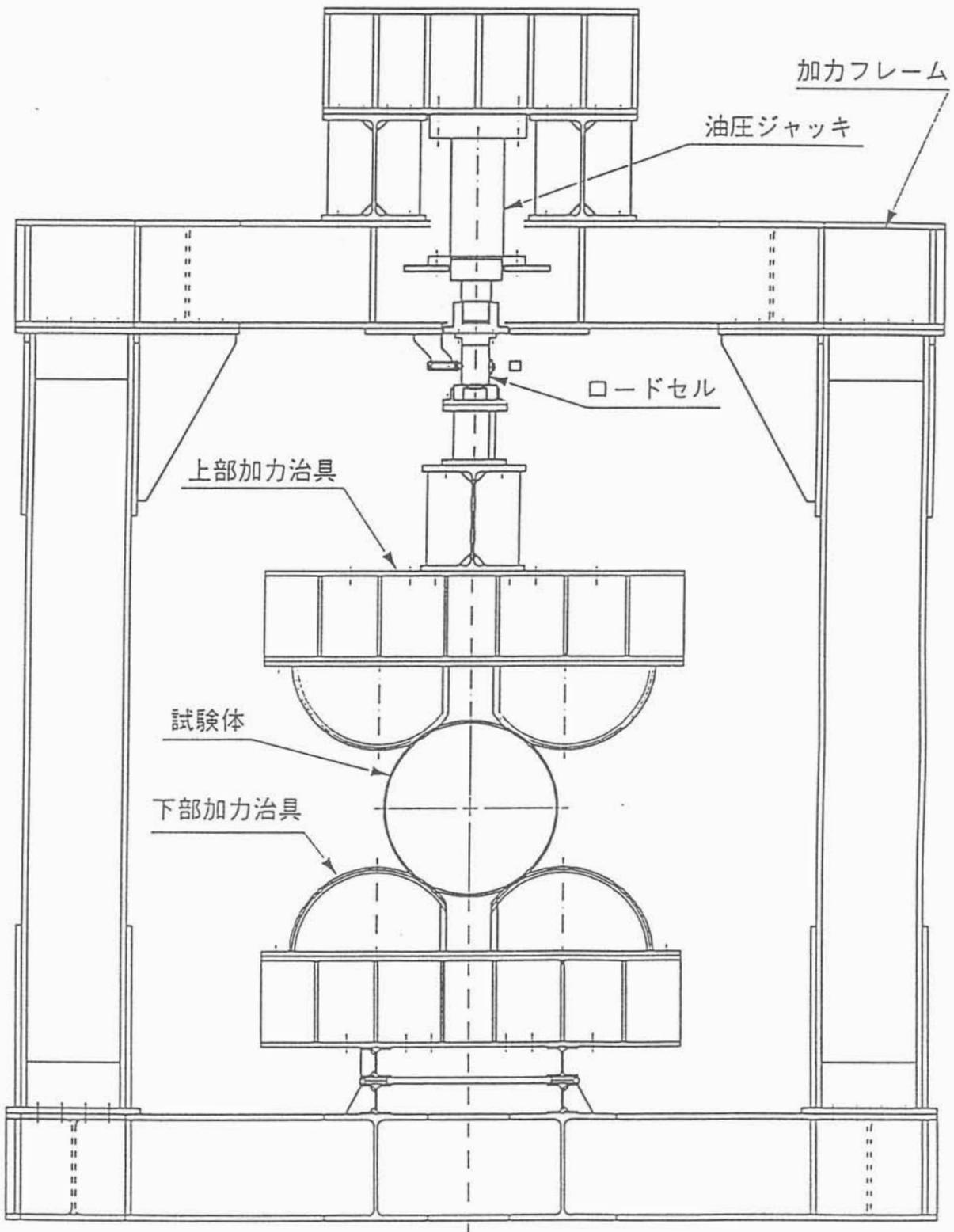


図4.3-1 試験装置概念図

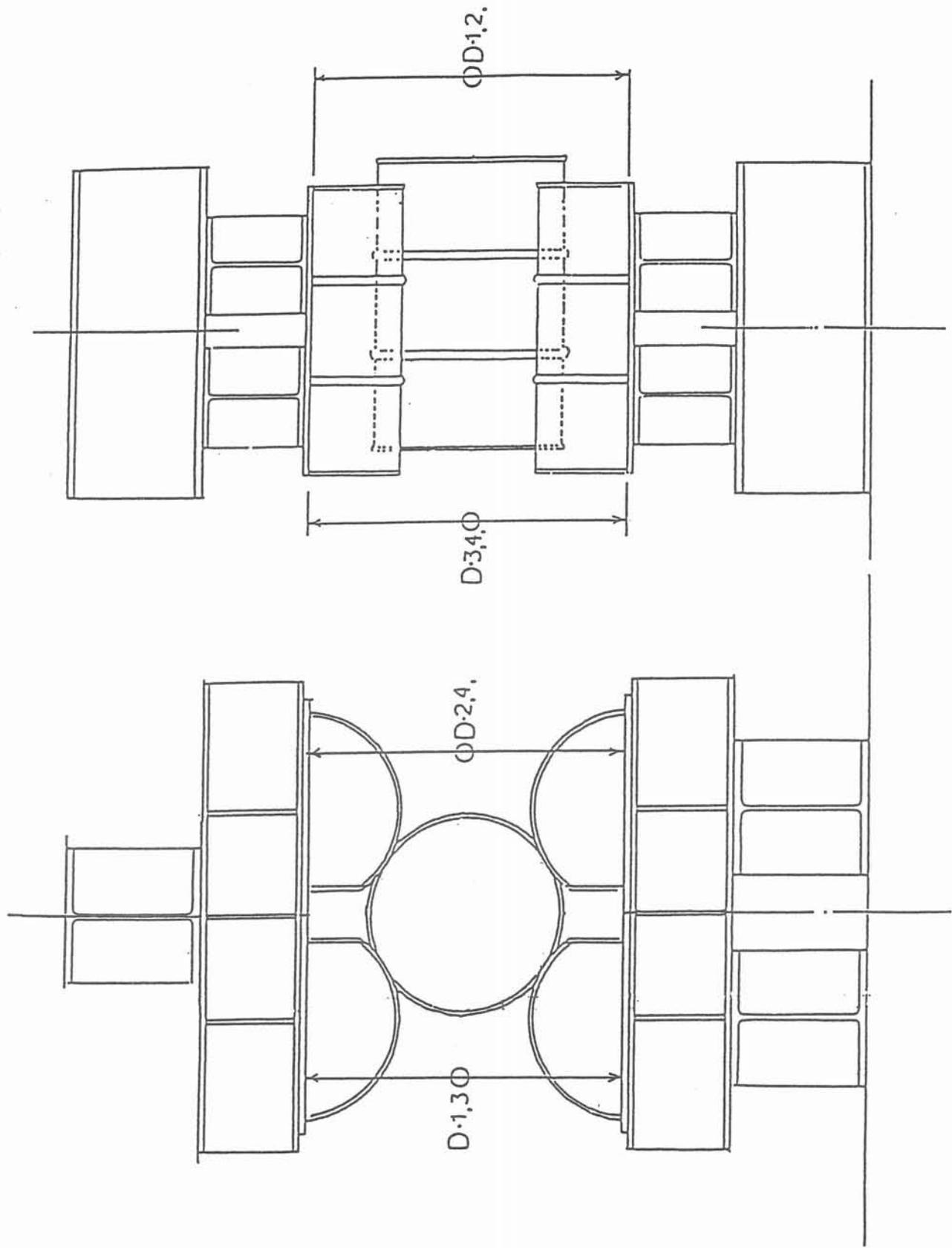


図 4.3-2 試験用廃棄体の変位測定位置

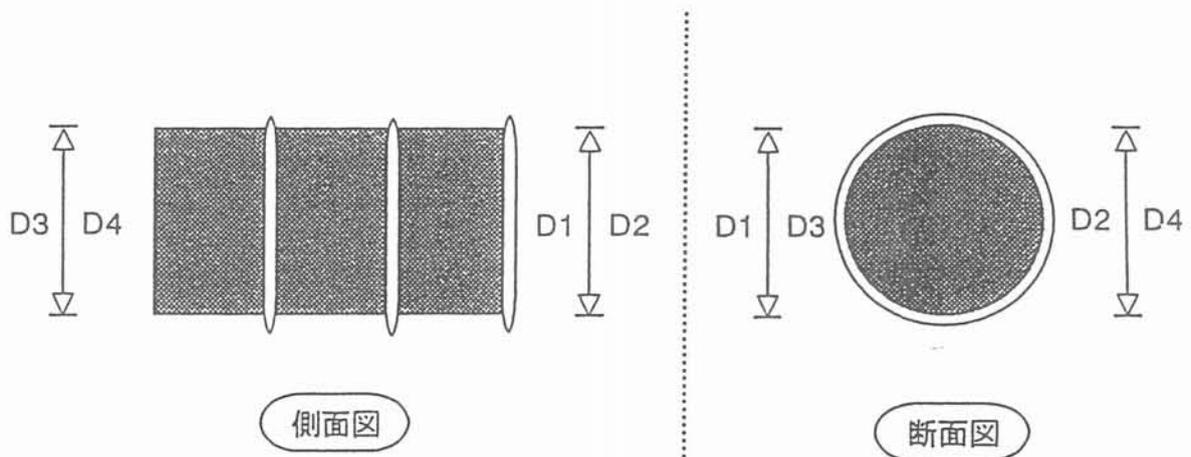
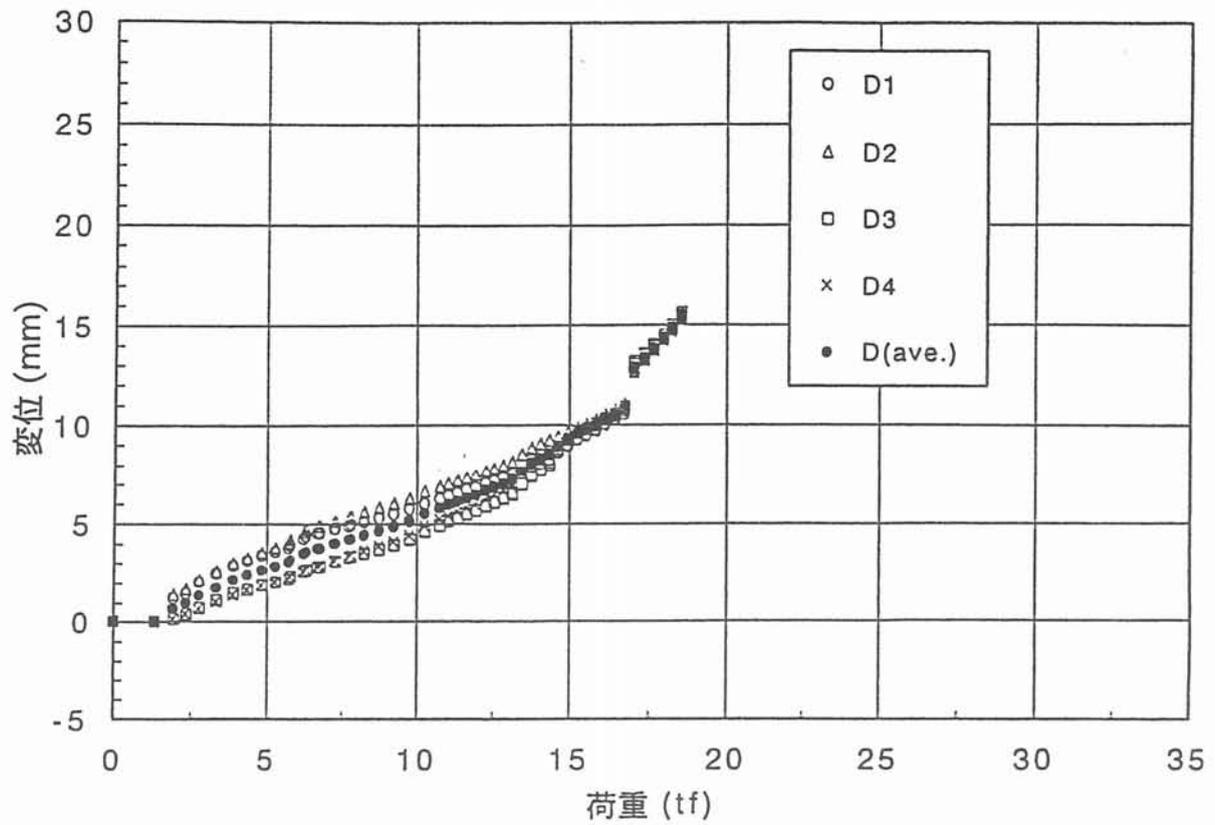


図4.3-3 (1/2) 供試体の荷重変形曲線 (供試体: 内張容器のみ)

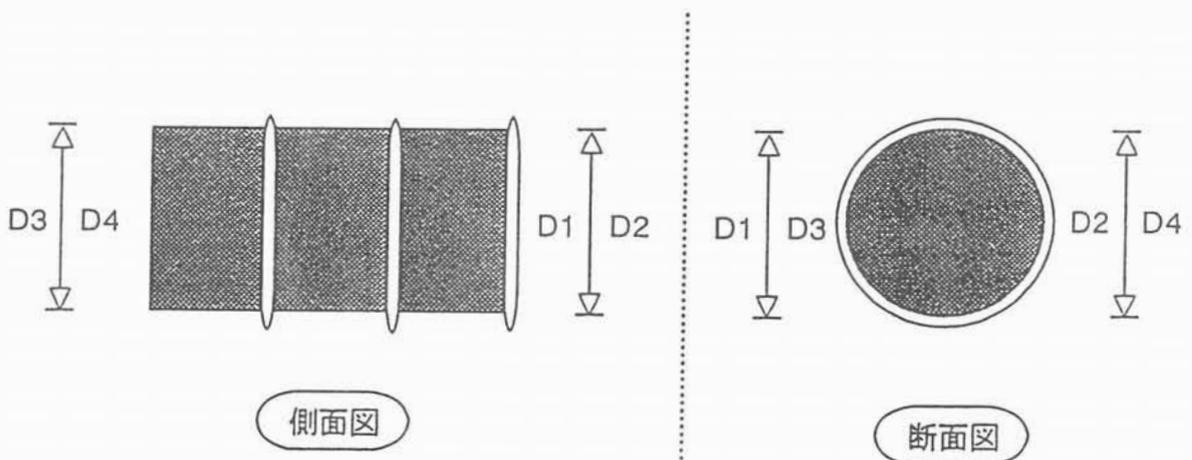
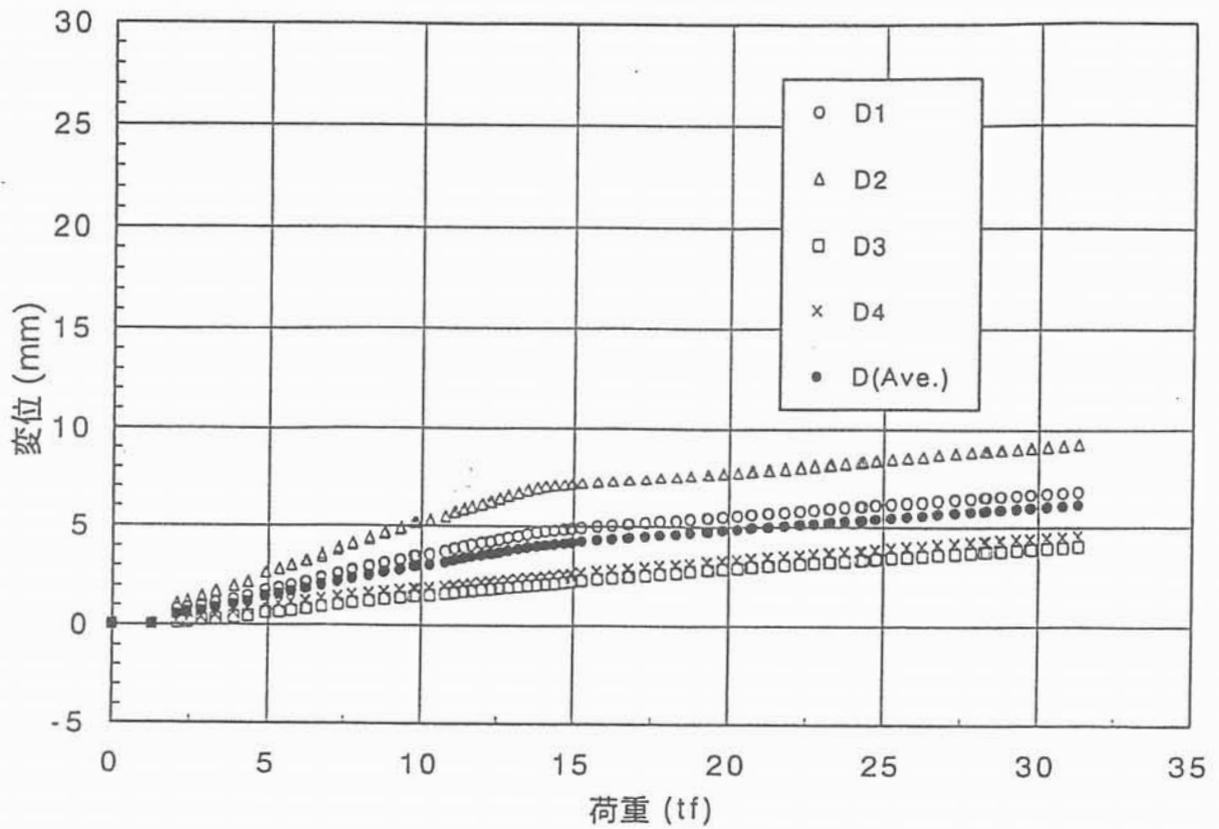


図4.3-3 (2/2) 供試体の荷重変形曲線 (供試体: A廃棄体、非圧縮、密収納)

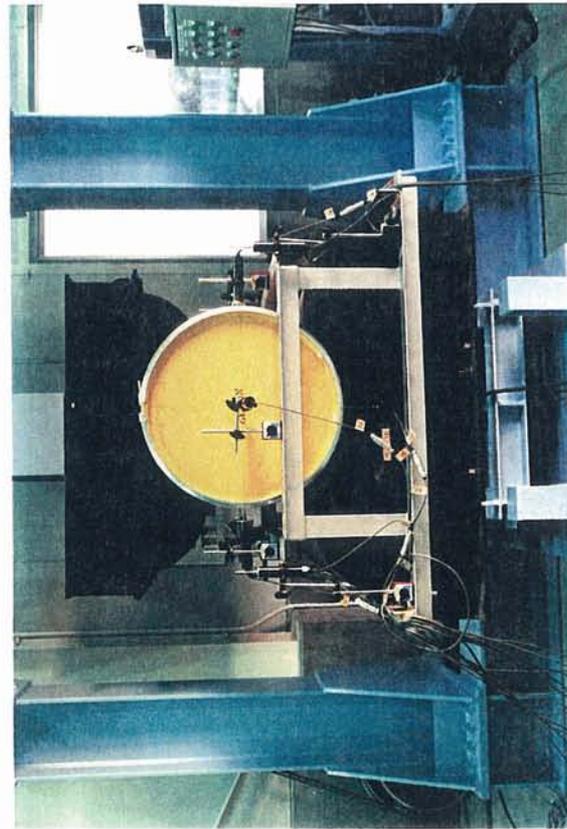
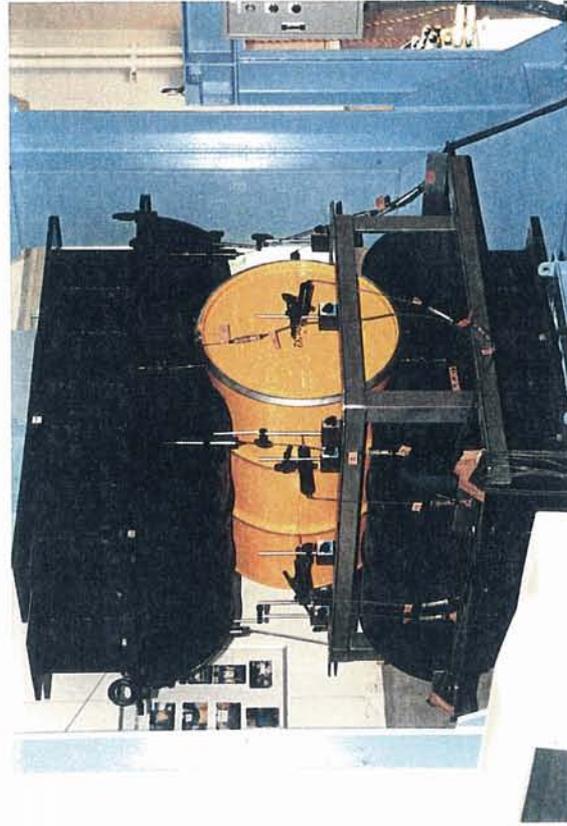
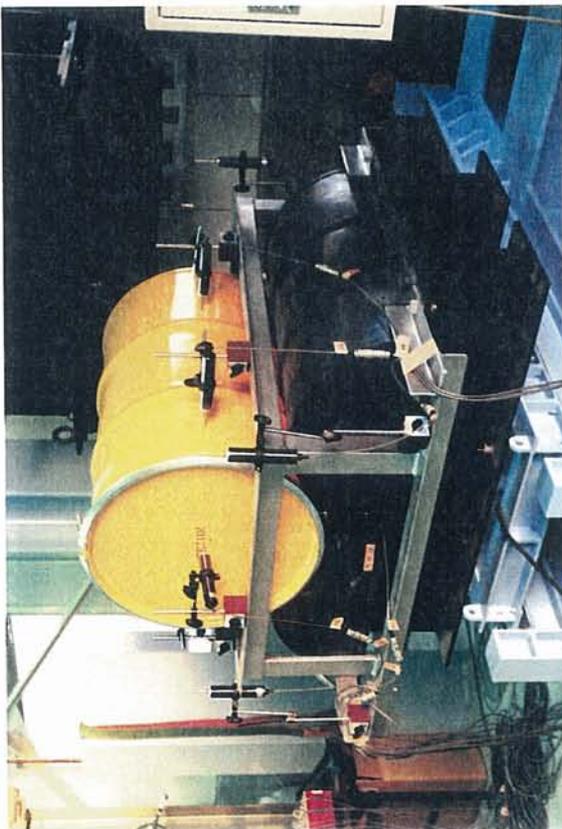
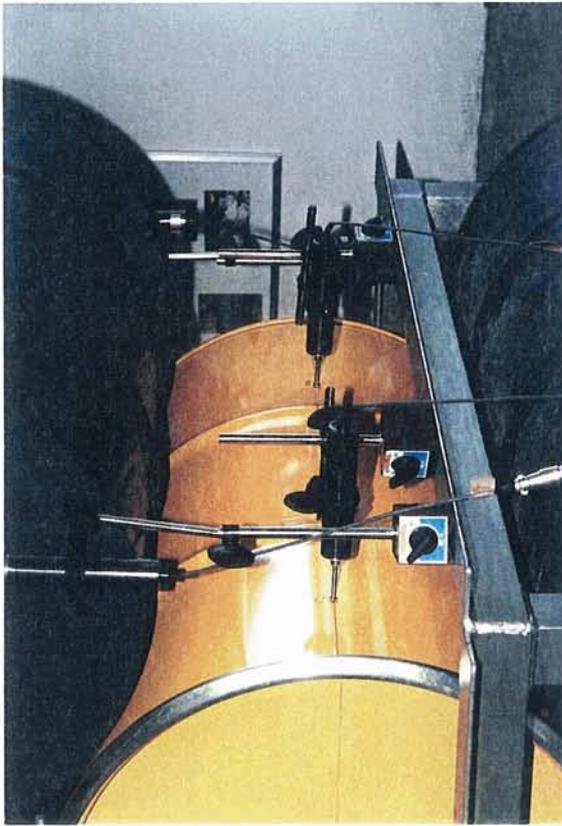


写真4.3-1 荷重試験の状況

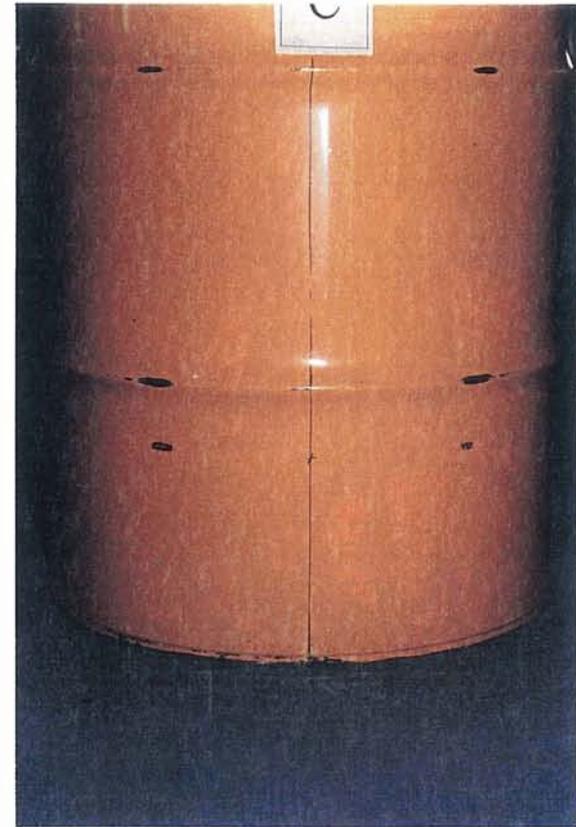
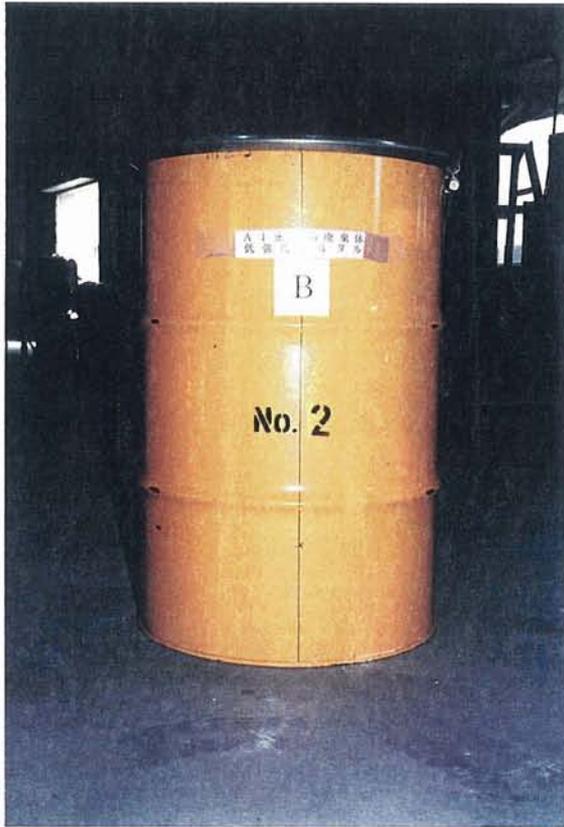
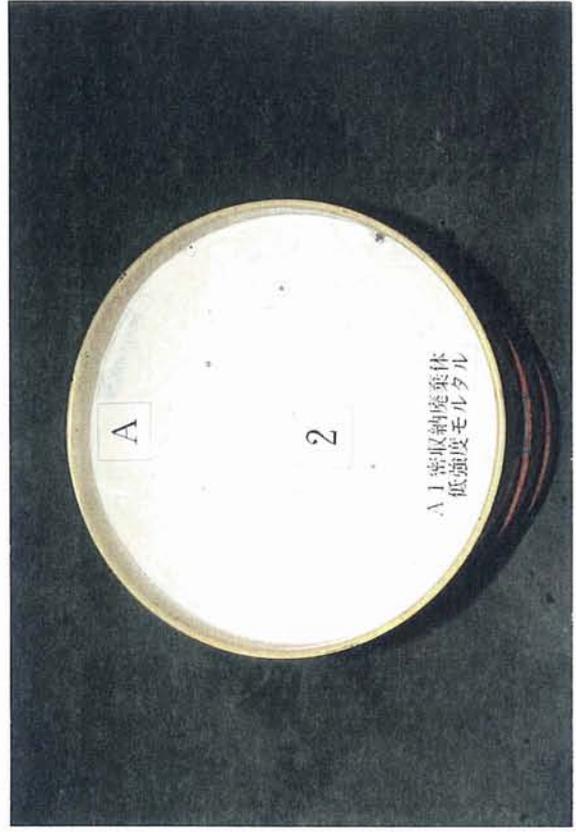


写真4.3-2 (1/2) 荷重試験後の廃棄体状態 (A非圧縮、密収納)

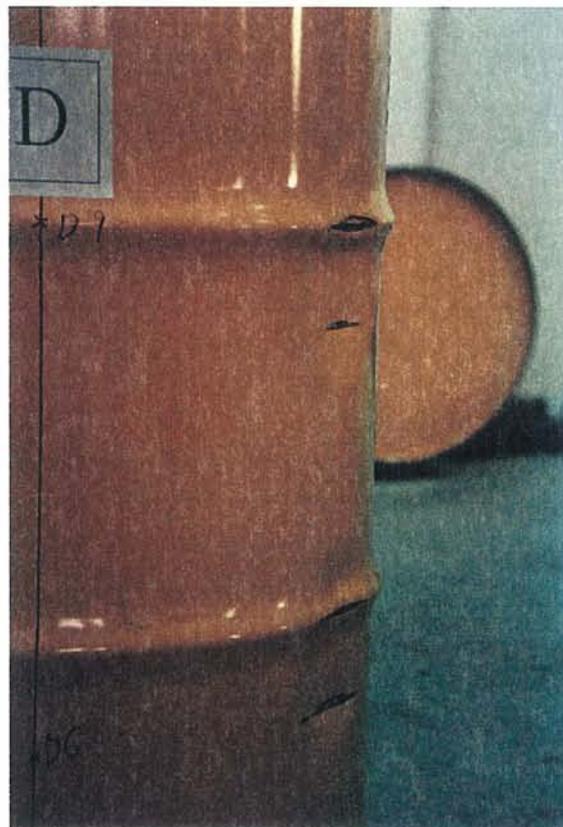
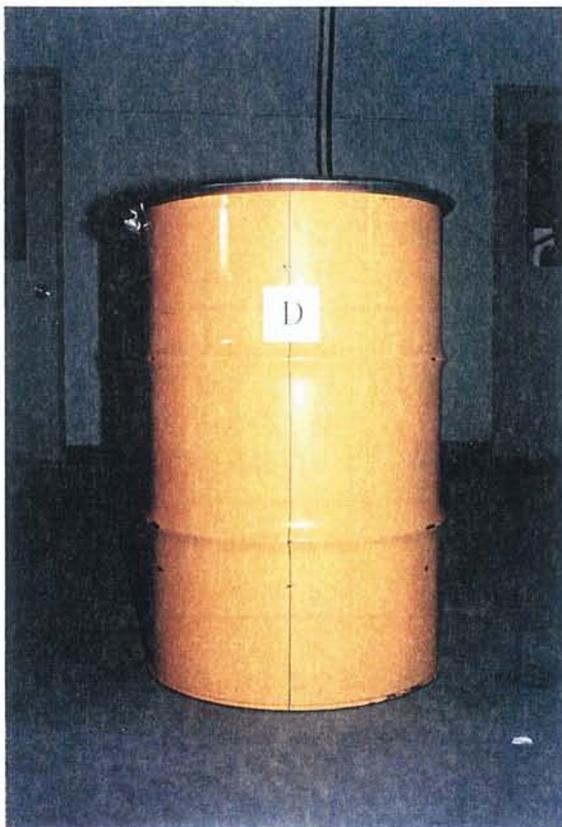
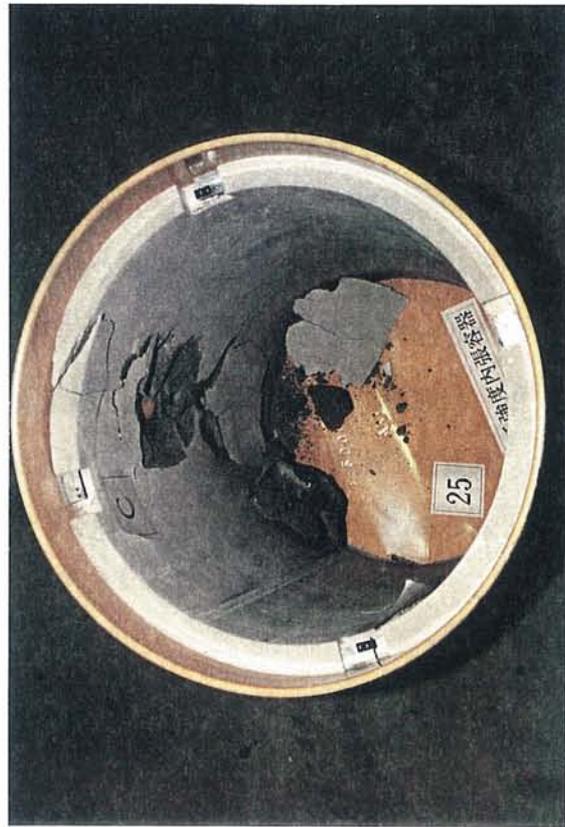
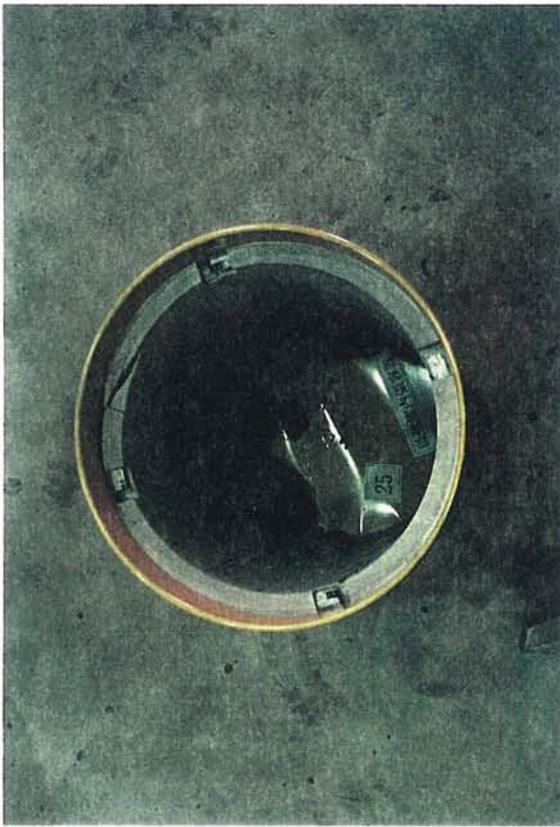


写真4.3-2 (2/2) 荷重試験後の状態 (内張容器のみ)

5. まとめ

発電所実廃棄物の開缶調査データに基づいて選定した模擬廃棄物を用い、廃棄体製作の基礎的な検討結果に基づき、実大模擬廃棄体を製作し、その空隙率及び耐埋設荷重強度を測定した。概要は次の通りである。

- ① 空隙率は、水置換法及びX線CT法により評価した。その結果、いずれの方法においても、廃棄体空隙率は多く見積もって2～3%程度であり、良好なモルタル注入が出来ることが分かった。
- ② 耐埋設荷重強度は、実大模擬廃棄体と内張容器で試験した。その結果、実大模擬廃棄体の耐埋設荷重強度はいずれも30トン以上であった。また、厚さ30mmの内張容器のみの耐埋設荷重強度は約18トンであった。

金属廃棄物の表面積について

1. 調査項目

金属廃棄物からのガス発生量を推定するためには、廃棄体に含まれる金属廃棄物（アルミニウム、鉄系金属）の表面積を把握する必要がある。しかしながら、廃棄体に収納する廃棄物量は1体ごとに異なると考えられるので、廃棄物の単位重量当たりに含まれる金属廃棄物の表面積（ m^2/kg ）を調査し、廃棄物の収納重量から金属の表面積（ $\text{m}^2/\text{本}$ ）を算出できるようにした。

また、アルミニウム廃棄物については、薄い物が多く腐食によって消滅してしまうと考えられるので、厚さごとに分類して表面積の割合を調査した。

2. 調査結果

廃棄物を強度及び形状に基づいて分類し、調査結果を整理した。

(1) アルミニウム

分別除去後に残留していたアルミニウムは厚さ0.02mm程度のアルミ箔やアルミクロスのような極薄いもの、厚さ0.2mm から1mm 未満の薄板がほとんどであった。表1に残留アルミニウムの種類とその厚さを示す。なお、8mmを超えるものはなかった。

表1 残留アルミニウムとその厚さ

廃棄物	アルミ箔、アルミクロス（グラスウール等の保温材の外装材）	アルミの薄板（保温材の外装材、治具類）	アルミ板（アルミケース、アルミ製枠等）	機器に付随するアルミ部品、アルミダイキャスト品）
厚さ	～0.2mm	0.2 ～0.8mm	0.8 ～2.0mm	2.0 ～8.0mm

残留アルミニウム表面積の調査結果を表2に示す。

アルミニウムの厚さ区分については $0.1\text{mm}/\text{y}$ ¹⁾の速度で両面から腐食するとき厚さ0.2mm 以下のものが極めて短期間に消滅するのでこれを極く薄いものと設定し、その他は上記の実態に則した。極く薄いものの表面積は厚さ0.2mm のアルミ板とし、重量測定値から次式を用いて表面積を算出した。

なお、厚さごとの残留アルミニウムの表面積割合を表3に示す。

$$S = 2 \times W / (\rho \times 0.02)$$

S : 表裏を考慮して2倍に換算した表面積 (cm²)

W : 重量 (g)

ρ : 密度 (2.7g/cm³)

0.02 : 厚さ (cm)

表2 残留アルミニウムの表面積

発電所 炉型式	分類	アルミニウム 総表面積 m ²	廃棄物総重量 kg	表面積* m ² /kg
BWR	A	3.16	6310	5.0×10 ⁻⁴
	B1	1.11	480	2.3×10 ⁻³
	B2	23.27	1020	2.3×10 ⁻²
PWR	A	3.28	4870	6.7×10 ⁻⁴
	B1	0.66	350	1.9×10 ⁻³
	B2	4.38	940	4.7×10 ⁻³

* 廃棄物単位重量当たりの金属表面積 (m²/kg)

=金属総表面積 (m²) / 廃棄物総重量 (kg)

A : A廃棄物、B1 : 廃棄物 (非圧縮)、B2 : B廃棄物 (圧縮)

表3 残留アルミニウムの表面積割合

炉 厚さ 分類 mm	BWR				PWR			
	~0.2	~0.8	~2.0	~8.0	~0.2	~0.8	~2.0	~8.0
A	6%	48%	18%	28%	16%	80%	4%	0%
B1	86%	3%	7%	4%	92%	8%	0%	0%
B2	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%

(2) 鉄系金属

鉄系金属表面積の調査結果を表4に示す。

鉄系金属は金属片、配管、管、番線類等の代表的な廃棄物ごとに分類することができた。そこで、代表的な廃棄物の重量値及び表面積測定値から比表面積（鉄系金属の重量当たりの表面積）を算出し、これに全鉄系金属の代表的廃棄物ごとの総重量を乗じて、鉄系金属の表面積を算出した。

$$S = W \times r$$

S : 表面積 (m²)

W : 重量 (g)

t : 比表面積 (m²/kg)

表4 鉄系金属の表面積

発電所 炉型式	分類	鉄系金属 総表面積 m ²	廃棄物総重量 kg	表面積 * m ² /kg
BWR	A	497.73	6310	7.9×10 ⁻²
PWR	A	430.30	4870	8.8×10 ⁻²

* 廃棄物単位重量当たりの金属表面積 (m²/kg)
= 金属総表面積 (m²) / 廃棄物総重量 (kg)

(参考文献)

- 1) 藤澤、他：日本原子力学会「1996年春の年会」、M41

固型化材料等の性能維持に関する検討

1. はじめに

「核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の廃棄物埋設の事業に関する規則」によると、固体状の放射性廃棄物と一体となるように充填して容器に固型化（以下、固型化されたものを充填固化体と略す）する際に用いる材料は、セメント、又はセメント及び骨材、添加剤等の混和材料（以下、固型化材料等と略す）である。

ここでは、適切な充填固化体を作製する上で必要な品質管理手法として、標準的な固型化材料等に対する一例を検討した。

2. 必要な品質

充填固化体製作に用いる固型化材料等（セメント、細骨材、水、混和材料を練り混ぜたもの）には以下のような品質が必要である。

①固型化材料等の流動性の目標値が下表のようになること。（添付－1参照）

固型化材料等の種類	Pロートによる流下時間 目標値	
	上限値	下限値
高性能減水剤を使用したもの*2	50秒	16秒*1
上記以外	20秒	16秒*1

*1 下限値を超える場合は、材料分離が著しく生じないことを事前に確認する。

*2 高性能AE減水剤を含む。

②硬化した後の固型化材料等の圧縮強度が約30MPa（300kgf/cm²）以上であること（JIS A 1108の試験により、材令28日後の強度）。これは、充填固化体の強度確保より設定されている。

これらの2つの指標を適切な頻度で測定して確認することもできるが、事前に妥当性を確認した製作時の管理によって確認することもできる。以下に、後者の管理方法について検討した。

3. 基本的な品質管理方針

基本的な品質管理方針は以下の通りである。

- ①固型化材料等の流動性が上記の目標範囲に入るように廃棄体製作において、品質管理を行う。なお、初期の配合条件を適切に設定すれば、流動性の管理を行うことにより、圧縮強度は自ずと上記の管理範囲内に入る。
 - ②廃棄体製作での品質管理の妥当性を確認するため、1回／年程度の固型化設備の定期検査に合わせて、固型化材料等の流動性を測定し、上記の目標範囲内であることを確認する。
- 上記方針に基づく具体的な品質管理方法、及びその妥当性を4.章以降で検討する。

4. 固型化材料等の流動性に関する品質管理方法

(1) 品質管理方法

固型化材料等の流動性を所定の範囲に維持するための品質管理方法を以下に示す。

- ①固型化材料等の流動性に影響を与える主要因子は、図-1に示すように、各原材料の品質、細骨材の粒径と含水率、各原材料の投入量、練り混ぜ方法、練り混ぜ後の経過時間、固型化材料等の温度がある。
- ②各原材料の品質：品質の変動を小さくするため、J I S規格品又はこれに相当するものを購入し、購入後、変質又は吸湿が生じないように保管する。なお、品質に関する記録については、セメント及び混和材料については購入の都度、細骨材については種類、産地及び購入先を変更する都度採取するものとする。
- ③細骨材の粒径と含水率：粒径は2.5mm以下、粗粒率（粒径分布を表す指標）は所定の流動性が得られる範囲とする。細骨材の含水率については、乾燥状態の細骨材を購入することにより管理することとする。
- ④各原材料の投入量：計量器により投入量を管理する。なお、原則として、各計量器の計量誤差の相乗効果を考慮しても、固型化材料等の流動性が所定の範囲内となるように管理する。
- ⑤練り混ぜ方法：技術基準に従い、十分均質な練り混ぜを行うことのできる混練機を使用する。
- ⑥練り混ぜ後の経過時間：流動性の変動が小さいことを事前に検査・確認した範囲内とする。
- ⑦固型化材料等の温度：水の比熱は他の原材料よりも大きいことから、これが支配因子となる。流動性の変動が小さいことを事前に検査・確認した範囲内とするが、こ

れを超える場合は必要に応じて配合の修正を行う。

(2) 計量管理の許容誤差について

上記④で示した各原材料の計量器に許容される計量誤差は、使用する原材料の種類等によっても相違するため、計量誤差の設定にあたっては固型化設備を導入する各発電所において流動性が目標値の範囲を満たすための計量誤差を確認しておくことが必要である。一例を添付-2に示す。

5. 硬化後強度に関する品質管理方法

硬化後の圧縮強度は水/セメント比に対して最も依存し、文献等によると通常の固型化材料等にて水/セメント比を0.5としても、圧縮強度が約30MPa(300kgf/cm²)を下回ることはない(添付-3参照)。したがって、例えば、水/セメント比を0.45以下で配合を設定すれば、水及びセメントの計量誤差が1割程度変動しても、圧縮強度の管理幅である約30MPa(300kgf/cm²)以上は確保され、上記の流動性の管理範囲に十分包含される。

硬化後の圧縮強度に関して流動性と独立する影響因子として、養生中の雰囲気温度がある。すなわち、初期強度が発現する前に、凍結すると、圧縮強度として300kgf/cm²以上は確保されない可能性がある。建築学会JASS 5を参考にすると、2℃以上で五日間以上養生すれば良い。

6. 参考：凍結条件

固型化材料等が凝結に要する時間は、使用する原材料により依存するが、文献等から一例を示すと、養生温度20℃で約12～15時間程度である。

すなわち、通常の室温条件では、一晩以上養生すれば、凝結は終了する。

7. まとめ

固型化工程での管理内容と管理頻度の考え方について整理したものを表-1に示す。特に、原材料の計量値は固型化バッチ毎に許容範囲内であることを確認することが適切である。また、固型化材料等の配合設計を変更した場合には、流動性及び硬化後強度について確認することが適切である。

8. 参考文献

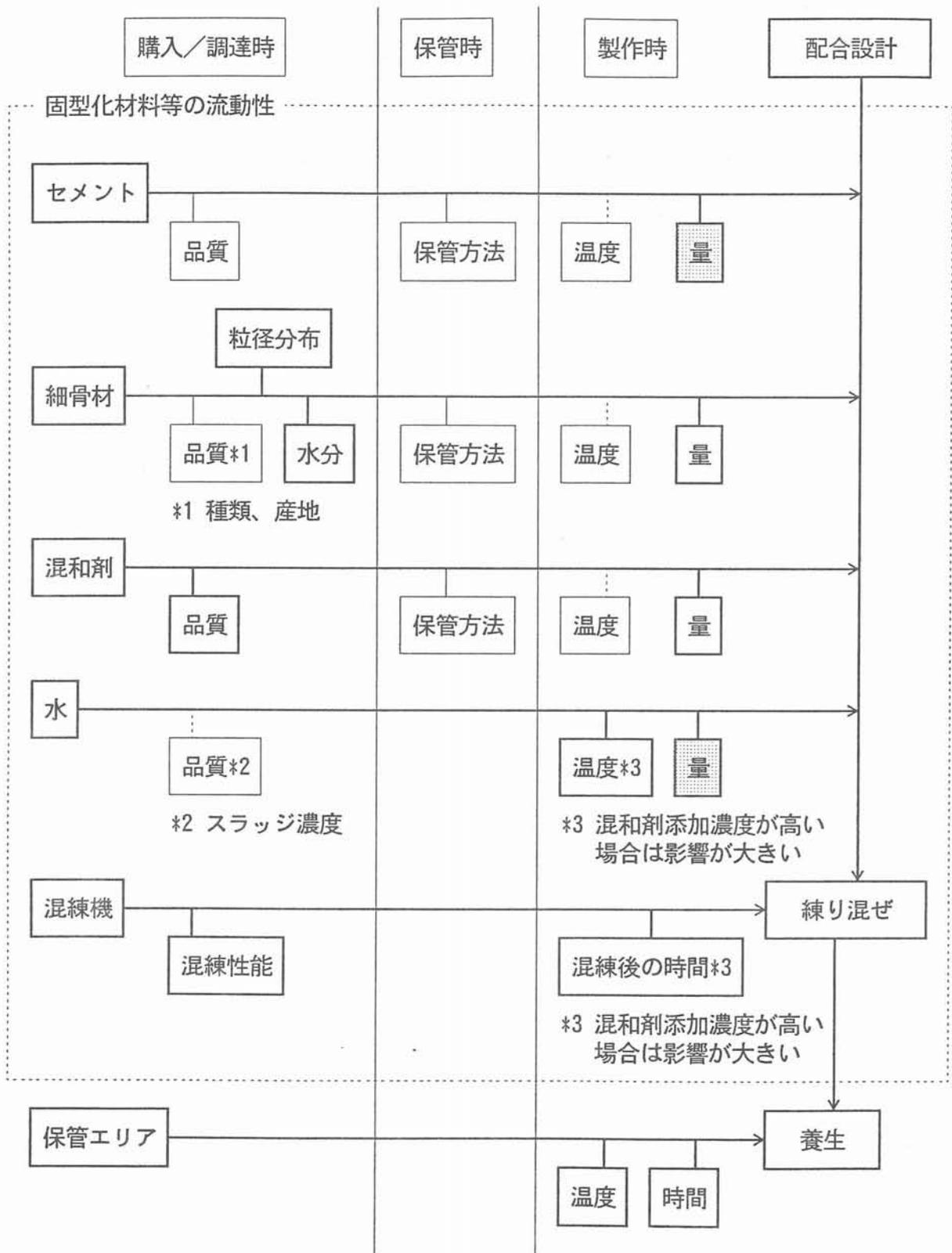
文献1：土木学会：コンクリート標準示方書 施工編 平成6年度版

文献2：武革恵之助：プレパックドコンクリートの施工法に関する研究

清水建設研究所研究報告 昭和51年8月 第8号

文献3：建築学会：JASS 5

以上



図－1 固型化材料等の流動性及び硬化後強度に対する品質管理フロー

表 - 1 固型化工程の管理頻度

管理項目	固型化材料等の品質管理要領（充填固化体製作の場合）		
	管理する内容	管理要領	管理頻度
原材料の計量値	水 : 設定値±2 %以内 セメント : 設定値±3.5 %以内 細骨材 : 設定値±3.5 %以内 混和剤 : 設定値±5 %以内 (一例、添付-2参照)	計量器の指示値による	1回/固型化バッチ
計量器の動荷重誤差	同上 ただし、計量値が一定になるまで静置して確認する。	検査等による	1回/6月
計量器の静荷重誤差	計量法による使用公差	検査による	1回/年
混練機の練り混ぜ性能	JIS A 1119にて試験し、モルタルの単位容積質量差が0.8 %以下であること	検査による	試運転時又は購入時
固型化材料等の流動性	Pロート流下時間が所定の範囲内であること	検査による	1回/年 又は配合設計を変更した場合
固型化材料等の硬化後強度	JIS A 1108にて試験し、圧縮強度が所定の範囲以上であること	検査による	試運転時又は購入時 又は配合設計を変更した場合

添付－1 充填廃棄体の固型化材料等に係わる流動性について

固体状廃棄物の固型化に当たって、告示に定める廃棄体の技術基準に適合させるために、固型化材料の流動性を以下のようにすることを考えている。

1. 固型化方法の考え方

固体状の放射性廃棄物の固型化方法については、告示に次のように定めている。

固型化に当たっては、あらかじめ均質に練混ぜた固型化材料若しくは固型化材料および混和材料を容器内の放射性廃棄物と一体となるように充填すること。
この場合において、容器内に有害な空隙が残らないようにすること。

すなわち、

- ① 廃棄物が入った容器の固型化材料等を充填する方法で固型化すること
- ② 廃棄物と一体となるように充填すること
- ③ 有害な空隙が残らないようにすること

を規定している。

この様な、固体状のものにモルタルを充填して構造体とする一般的な工法としては、土木学会コンクリート標準示方書に記載されているプレパックスドコンクリート工法がある。このプレパックスド工法は、特定の粒度をもつ粗骨材を型枠に詰め、その空隙に流動性が大きいモルタルを注入して造るコンクリート工法である。

告示に定める技術基準を満足させるために、固体状廃棄物の固型化に当たっては、この示方書のプレパックスド工法におけるモルタルの流動性等の規定を参考にし、固体状廃棄物に適合した固型化材料の流動性等の確保を図ることとした。

2. プレパックスドコンクリートの流動性

示方書においては、通常のプレパックスドコンクリートの場合と高強度プレパックスドコンクリートの場合におけるモルタルの流動性について、次のように記載している。

(1) (通常) プレパックスドコンクリートの場合

- ① P ロートによる流下時間は 1.6 ～ 2.0 秒を標準とすること

②この流下時間は一般的な標準を示すものであって、この範囲に入らないモルタルでも注入が十分行える場合もある。

③流下時間が15秒以下では品質の低いモルタルになりやすい。

(2) 高強度プレパックドコンクリートの場合

①高強度プレパックドコンクリートとは、高性能減水剤を用いて流動性を改善させ、注入モルタルの水/セメント比を40%以下とすることにより強度を高くしたものである。

②Pロートによる流下時間は25～50秒にあるものを標準とする。

③流下時間が20秒程度のモルタルで、材料分離が認められない場合は、これを使用してもよい。

④流下時間が25秒以下の場合、材料分離する傾向にあり、50秒を超えると注入性が乏しくなる。

これらの示方書に示された各コンクリートの場合の流動性の記述を勘案し、固体状廃棄物の固型化に適用することとした。

3. 固体状廃棄物への適用

示方書に示すプレパックドコンクリートの流下時間を固体状廃棄物の充填に適用するにあたって、示方書の規定と充填廃棄体に要求される性能および、より流動性を確保することを考慮して固型化材料等のPロートの流下時間の目標を以下のように設定した。

固型化材料等の種類	Pロートによる流下時間目標値	
	上限値	下限値
高性能減水剤を使用したもの*2	50秒	16秒*1
上記以外	20秒	16秒*1

*1 下限値を超える場合は、材料分離が著しく超えないことを事前に確認する。

*2 高性能A E減水剤を含む。

すなわち、高性能減水剤を使用したものに対しては、示方書の高強度プレパックドコンクリートの25～50秒の規定に加え、16～24秒も許容できるとした。また、高性能減水剤を使用しないものに対しては、示方書の通常のプレパックドコンクリートの16～20秒を適用した。その理由は以下の通りである。

(1) 流下時間の上限値

示方書に記載されている上限値を超えると、固型化材料であるモルタルの注入性が低下し、良好な充填が出来なくなる可能性が高い。そのため、固体状廃棄物の固型化についても上限値は示方書記載の通りとした。

(2) 流下時間の下限値

高強度プレパックドコンクリートは高強度にするために、水/セメント比を40%以下としているが、充填廃棄体は高強度とする必要がないことから、必ずしも水/セメント比を40%以下とする必要はない。このため、材料分離によるモルタルの品質低下のないことを確認することにより、流下時間を25秒より少なく設定できる。これは、示方書に示す通常のプレパックドコンクリートと同じ性能を有するコンクリートとなることを意味する。

具体的には、高性能減水剤を使用したものは25～50秒の範囲に加え、通常のプレパックドコンクリートの基準である16～20秒の範囲まで広げることが可能である。

高性能減水剤を使用しないものについては、15秒以下では材料分離の可能性が高いことから、示方書の通常のプレパックドコンクリート工法通り16秒とした。

4. 水/セメント比と流下時間

高性能減水剤を使用した場合のモルタルの流下時間を16～50秒に拡大しても問題のないことを示す試験を行った。

試験では、高性能減水剤を添加し、使用した砂以外の条件をほぼ同一にして、水/セメント比と流下時間の関係を調べた。試験の結果を参考図-1に示す。

その結果、高性能減水剤を使用した場合、流下時間の値は水/セメント比に対して連続的につながっていること、流下時間が16秒程度では通常のプレパックドコンクリートの領域に入るだけで材料の品質には特に問題は生じていないことを確認した。

したがって、高性能減水剤の使用を前提とすると固体状廃棄物の固型化にあたっては、固型化材料の流下時間を16秒～50秒として管理しても問題ないといえる。

また、示方書にも記載されている通り、ここで示す流下時間の範囲は標準値であり、通常の運用では、概ね範囲内にあることを管理することが適切である。

5. 流動性以外に示方書から参考にすべき因子

固型化材料等の充填性に関して、固型化材料等の流動性以外に、標準示方書のプレパックドコンクリートから参考にすべき因子を以下に示す。

(1) セメントの品質

J I S規格のセメントとすること。

(2) 骨材の品質

粒径を2.5 mm以下とする。

粗粒率は、示方書では、1.4 ～2.2 の範囲とすることとされているが、この理由である材料分離の防止や適切な水／セメント比の設定を別途考慮すれば、特にこの範囲に限定する必要はないと考える。

(3) 固体状廃棄物の形状

切断により1.5 mm以下のものを多量に発生させないこと。

示方書では、プレパックドコンクリートの充填対象である粗骨材の粒径を1.5 mm以上とすることが記載されているため、これを参考にす。なお、元々の固体状廃棄物の寸法は大部分が1.5 mm以上なので、処理の際に留意すれば良いと考える。

(4) 水の品質

示方書のプレパックドコンクリートでは、特に水の品質については記述されていないが、使用する原材料の前提として、水道水程度の水質とし、スラッジ固形分を含まない上澄水とすることが適切と考える。

(5) 固型化材料等の注入方法

固体状廃棄物の充填とプレパックドコンクリートを比較すると、以下の点で前者の方が注入し易い状況にある。

- ・後者の注入規模が大幅に大きいこと
- ・注入対象（固体状廃棄物／粗骨材）の間隙が、後者の方が一般に小さいこと。
- ・後者の工法は一般に水中で行われるため、注入中に粗骨材の間隙水を押し出す必

要があること。

以上より、固型化材料等の注入方法は、プレパックドコンクリート工法に取って代わる必要はなく、別途試験等により確認することを前提に、充填廃棄体の製作の観点から、合理的な方法（上部注入、注入速度）を採用することができると思われる。

添付－2 固型化材料の計量管理について

1. はじめに

固型化材料の各原材料の計量器に許容される計量誤差は、使用する原材料の種類等によっても相違するため、固型化設備を導入する各発電所において流動性が目標値の範囲を満たすための計量誤差の範囲をあらかじめ設定しておく必要がある。ここでは一般的な固型化材料等を用いる充填固化体の固型化設備を想定し、計量誤差の与える影響について検討した。

2. 各原材料の計量誤差による影響

固型化材料等に使用する各原材料の計量誤差が変動した場合の流動性への影響（流動性が減少すると、Pロート流下時間は増加する）をまとめると以下の通りである。

原材料の種類	流動性への影響傾向	参考図
水	計量値が増加⇒水／セメント比が増加⇒流下時間が減少	参考図－1
セメント	計量値が増加⇒水／セメント比が減少⇒流下時間が増加	参考図－1
細骨材	計量値が増加⇒砂／セメント比が増加⇒流下時間が増加	参考図－2
混和材料	計量値が増加⇒混和材料の濃度が増加⇒流下時間が減少	参考図－3

3. 計量誤差の複合効果

各原材料の計量誤差の複合効果による影響を確認した。確認に当たっては、以下の①～③に示すような条件を一例として設定した。

①各原材料の配合比：固型化材料等のPロート流下時間が2.6秒程度となるような配合とした。ここで検討の対象とした固型化材料等は以下の通りである。

原材料	種類	配合比 *1
水	上水道水	～0.41
セメント	普通ポルトランドセメント（JIS規格品）	—
細骨材	珪砂（乾燥状態、粒径<2.5mm、粗粒率2.0）	～0.8
混和剤	ナフタリン系高性能減水剤*2	～0.009

*1 セメントを1となるようにした場合の重量比

②各計量器の計量誤差：次の範囲内となるように仮定した。

水：±2%、セメント：±3.5%、細骨材：±3.5%、混和剤：±5%

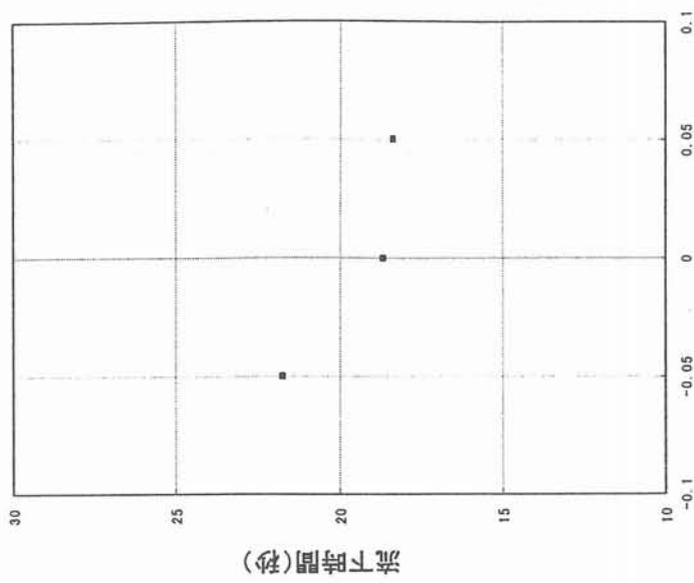
③試験条件：混練器：JIS R 5201に規定される自動公転式モルタルミキサ

混練時間：3分、水の温度：20℃

標準条件及び各原材料の計量誤差の複合効果が最も大きく働く場合の試験を行った。結果は以下の通り流下時間の目標範囲である16～50秒に入っている。したがって、本条件であれば②に示す計量誤差が許容範囲として設定できることになる。

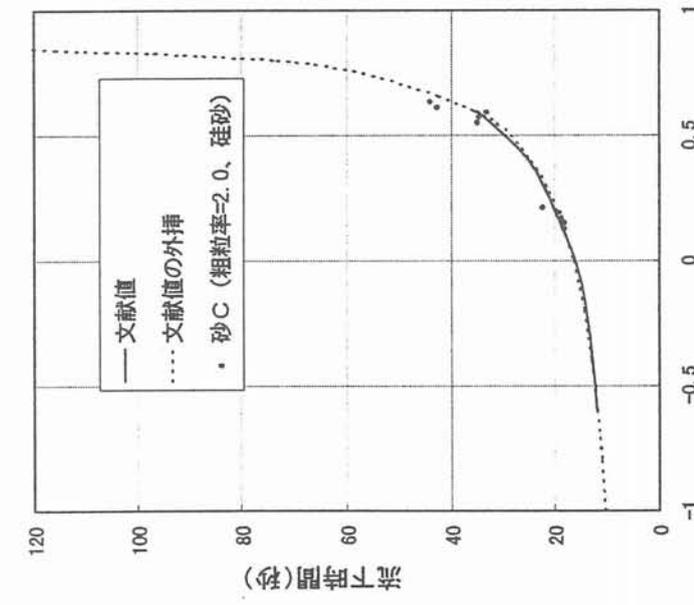
条 件	計量誤差				Pロート 流下時間 〔秒〕
	水	セメント	細骨材	混和剤	
標準条件	0%	0%	0%	0%	26.4
流下時間が最大となる条件	-2%	+3.5%	+3.5%	-5%	48.7
流下時間が最小となる条件	+2%	-3.5%	-3.5%	+5%	16.9

以 上



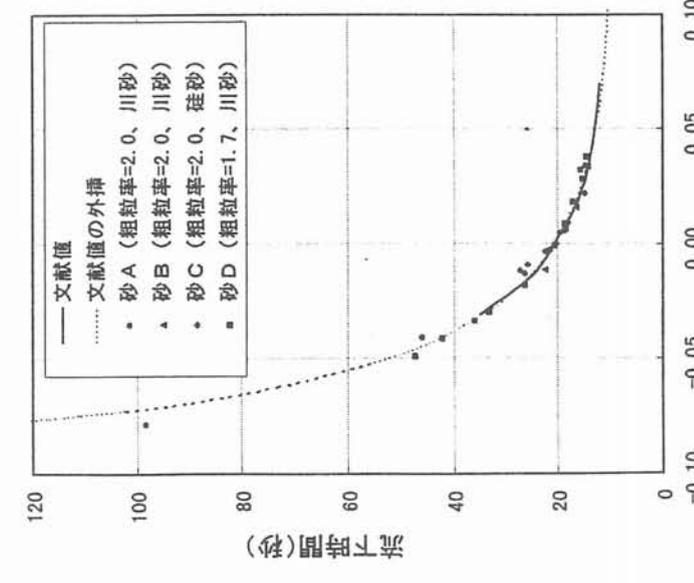
減水剤の変動割合

参考図-3 減水剤の計量誤差と
流下時間の変動性



砂/セメント比の変動割合

参考図-2 砂/セメント比と流下時間の関係



水/セメント比の変動割合

参考図-1 水/セメント比と流下時間の関係

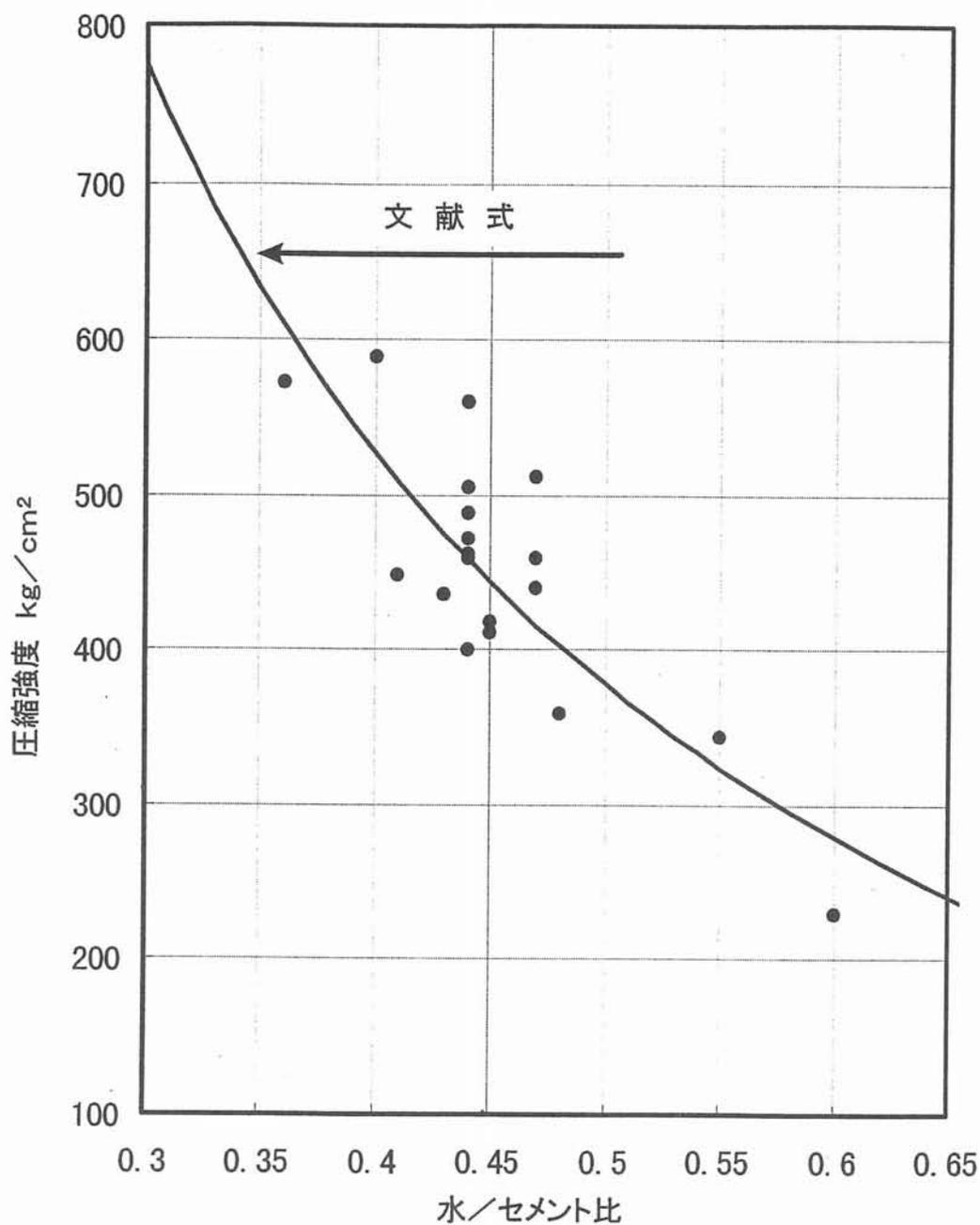
●: 実験点

(出典: 平成8年7月 財団法人 原子力環境整備センター、「低レベル放射性廃棄物処分 廃棄体製作技術について(各種固体状廃棄物)」)

文献式: 圧縮強度 = 298 / (水/セメント比) - 218

(出典: 昭和51年8月 清水建設研究所研究報告 「プレパックドコンクリートの施工法に関する研究」)

添付-3 水/セメント比と圧縮強度の関係



(出典:平成8年7月 財団法人 原子力環境整備センター、
「低レベル放射性廃棄物処分用 廃棄体製作技術について(各種固体状廃棄物)」)

文献式: $\text{圧縮強度} = 298 / (\text{水/セメント比}) - 218$

(出典:昭和51年8月 清水建設研究所研究報告
「プレパックドコンクリートの施工法に関する研究」)

高周波溶融処理の性能管理に関する検討

1. はじめに

高周波誘導加熱方式による溶融処理の性能管理方法について、以下に検討した。

2. 廃棄物の調整：難溶融物／無機廃棄物、難溶融物／溶融助剤の混合割合

本章は、難溶融物の固体状廃棄物と無機廃棄物及び溶融助剤との混合溶融条件の設定について検討した。

2.1 条件設定の考え方

混合溶融条件は、以下の順序で設定した。

- ①状態図を用いた混合割合の設定
- ②小規模試験での条件の確認と絞り込み
- ③実規模大試験での条件の確認

ここで、小規模の試験では溶融体のサイズは以下の通りである。

- ・小規模試験：直径45mm、高さ数10mm
- ・実規模試験：直径 480mm、高さ数 600mm

運転温度はいずれの条件でも、1500℃とし、溶融後の温度保持時間は小規模試験で1時間、実規模大試験で30分とした。

また、小規模試験では装置の構造上の制約から、加熱開始前に試料全量をキャニスタにセットし、実規模試験では溶融しながらキャニスタに追加して投入した。追加投入では、難溶融物と保温材または溶融助剤を交互に投入した。

2.2 雑固体廃棄物との混合溶融試験

(1) 状態図を用いた混合割合の推定

混合する雑固体廃棄物は、ケイ酸カルシウム保温材を用いた。難溶融物との混合割合は、保温材の成分の大部分を占める SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 の状態図を基にして、融点が1500℃となる割合を求めた。混合割合の推定に用いた状態図の例として、土砂+保温材の場合を図2-1に示す。

求めた保温材の混合割合は、土砂で60wt%、セラミックフィルターで数wt%であった。

なお、セラミックフィルターでは構成粒子を溶湯で包み込む方法で溶融するため、実際には保温材の混合割合が更に多いと予想された。

(2) 小規模試験

①条件

土砂と保温材の混合割合は状態図から求めた値を基にして、また、セラミックフィルターと保温材の混合割合は保温材20wt%を起点として表2-1に示す条件とした。また、難溶融物はセラミック層を形成するのでセラミック層を観察しやすくするように、金属層は全体の約1割の体積を占めるように作製した。

②結果

土砂の場合、保温材の混合割合60wt%以上であれば、溶け残りなく溶融したことを確認した。これは状態図を用いた混合割合の推定結果と一致した。

セラミックフィルターの場合、保温材の混合割合40wt%以上であれば、溶け残りなく溶融したことを確認した。

(3) 実規模試験

①条件

土砂と保温材の混合割合は小規模試験の結果を基にして、保温材の混合割合60wt%とした。参考として40wt%についても確認した。

セラミックフィルターと保温材の混合割合は小規模試験の結果を基にして保温材の混合割合40wt%について確認を行った。

土砂、セラミックフィルターとも、小規模試験と同様の考えで、金属層は全体の約1割の体積を占めるように作製した。

②結果

土砂について、外観上溶け残りが認められなかった。またセラミック層から（上、中、下）×（外周部、中間部、中心部）の9個所をサンプリングし、Si濃度の変動係数を評価したところ、表2-2に示す通り、変動係数が小さく、均一であった。

これらのことから、土砂の混合割合として、土砂40wt%、保温材60wt%は適切と

考えた。

セラミックフィルターについても外観上溶け残りは認められず、Si 濃度の変動係数は表 2-3 に示す通り、小さく均一であった。

(4) 混合割合の設定

試験結果から、以下の値を設定した。

- ①無機廃棄物/土砂は1.5 以上（重量割合60/40以上）
- ②無機廃棄物/セラミックフィルターは0.67以上（重量割合 40/60以上）

2.3 溶融助剤との混合溶融試験

(1) 状態図を用いた混合割合の推定

溶融助剤には、容易に入手可能であり、取扱いも容易な $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 及び CaO (50wt%) + Na_2O (50wt%) の2種類を用いた。

溶融助剤の混合割合を状態図を用いて融点が、 1500°C となる点として推定した結果は以下の通りであった。用いた状態図の系を併記する。

- ①土砂90wt%以上、 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 10wt%以下 : $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ 系
- ②土砂82.6wt%以上、 $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}$ 17.4wt% : $\text{SiO}_2\text{-CaO-Na}_2\text{O}$ 系
- ③セラミックフィルター-89wt%、 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 11wt% : $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ 系
- ④セラミックフィルター-94wt%、 $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}$ 6wt% : $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ 系

(2) 小規模試験

①条件

混合割合は状態図から求めた値を基にして、表 2-4 に示す条件とした。

②結果

断面を観察した結果、以下の条件では溶融可能であることを確認した。

- ①土砂 90wt%、 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 10wt%
- ②土砂 70wt%、 $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}$ 30wt%
- ③セラミックフィルター 70wt%、 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 30wt%
- ④セラミックフィルター 60wt%以下、 $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}$ 40wt%以上

土砂の場合には状態図による推定結果とおおむね一致し、セラミックフィルター

の場合には助剤の混合割合が大きな結果であった。これはセラミックフィルターの場合には構成粒子を溶湯で包み込む必要があるためと考えられる。

なお、 $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}$ は $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ に対して混合割合が多いためメリットが無いと判断し、助剤としての適用を行わないこととした。

(3) 実規模試験

①条件

土砂と $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ の混合割合は、小規模試験の結果を基にして、 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ の混合割合10wt%とした。またセラミックフィルターと $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ の混合割合は、30wt%とした。土砂、セラミックフィルターとも、金属層が全体の約1割を占めるように作製した。

②結果

土砂について、外観上溶け残りが認められなかった。またセラミック層から（上、中、下）×（外周部、中間部、中心部）の9箇所をサンプリングし、Si濃度の変動係数を評価した結果、表2-5に示す通り、変動係数が小さく均一であった。セラミックフィルターについても、外観上溶け残りは認められず、Siの分布状況も変動係数が小さく、均一であった。

これらのことから、土砂の混合割合として、土砂90wt%、 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 10wt%、セラミックフィルターの混合割合として、セラミックフィルター70wt%、 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 30wt%は適切と考えた。

(4) 混合割合の設定

試験結果を基に、難溶融物と $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ との混合割合を設定した。

① $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ /土砂は0.11以上（重量割合 10/90以上）

② $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ /セラミックフィルターは0.43以上（重量割合 30/70以上）

以上、難溶融物と雑固体廃棄物または溶融助剤との混合溶融条件をまとめ、表2-6に示す。

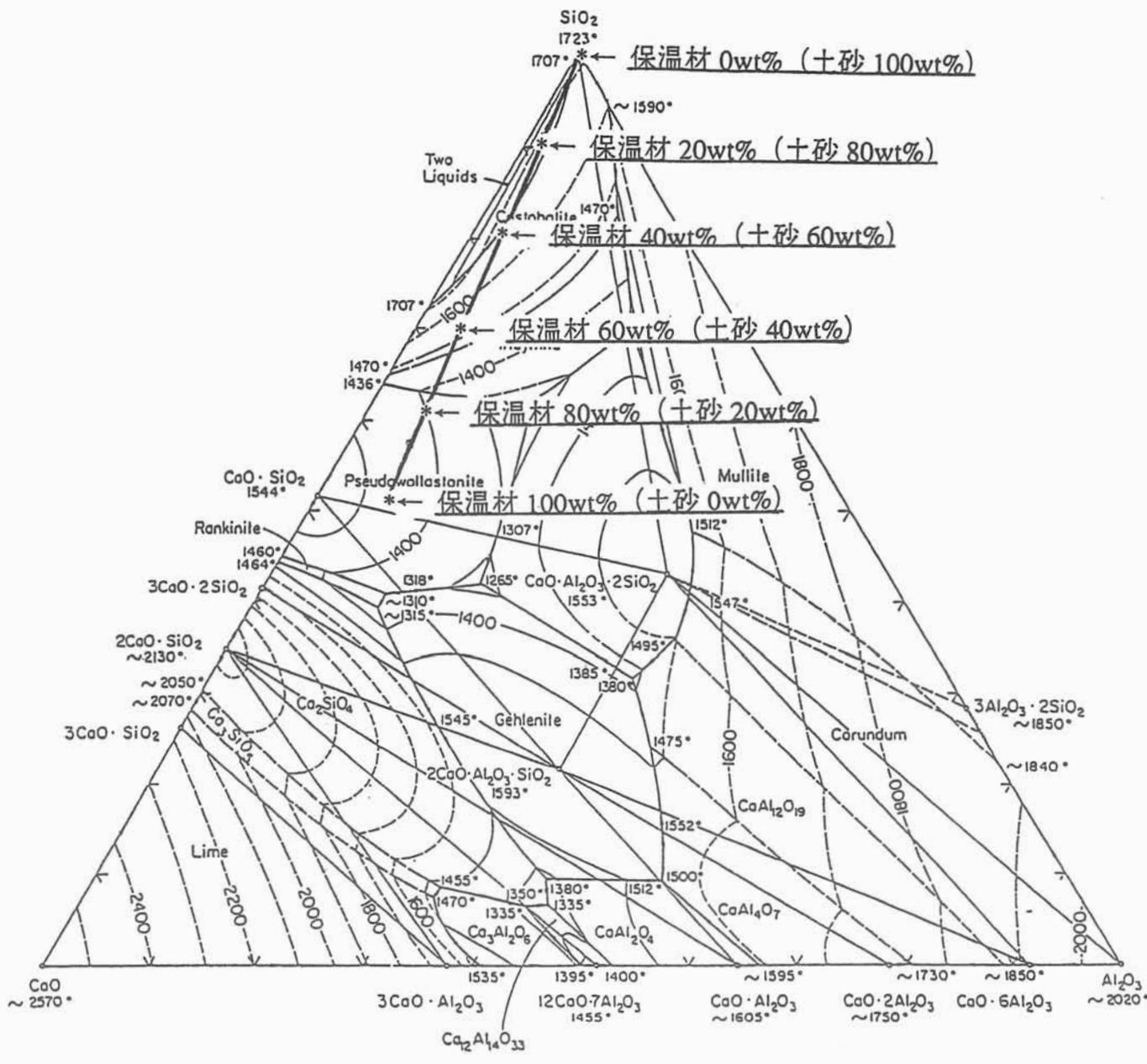


図 2 - 1 SiO₂-Al₂O₃-CaO系状態図 (土砂+保温材混合熔融の場合)

表 2 - 1 難溶融物の保温材混合溶融試験条件

難溶融物	スケール	保温材混合割合 (wt%)
土 砂	小規模	50
		60
		70
		80
		90
	実規模	60
セラミックフィルター	小規模	20
		30
		40
	実規模	40

表 2 - 2 Si 濃度の変動係数 (土砂)

混合割合 (wt%)		変動係数 (%)
土 砂	保温材	
40	60	0.25

表 2 - 3 Si 濃度の変動係数 (セラミックフィルター)

混合割合 (wt%)		変動係数 (%)
セラミックフィルター	保温材	
60	40	0.32

表 2 - 4 難溶融物の溶融助剤との混合溶融試験条件

難溶融物	溶融助剤	スケール	助剤混合割合 (wt%)
土 砂	Na ₂ B ₄ O ₇	小規模	5 10
		実規模大	10
	CaO+Na ₂ O	小規模	17.4 25 30
セラミックフィルター	Na ₂ B ₄ O ₇	小規模	11 20 30 40
		実規模大	30
	CaO+Na ₂ O	小規模	20 40

表 2 - 5 難溶融物+Na₂B₄O₇ 溶融体の S i 濃度の変動係数

難溶融物	変動係数 (%)
土 砂	0.89
セラミックフィルター	0.78

表 2 - 6 難溶融物の混合条件

	難溶融剤	雑固体廃棄物
土 砂	Na ₂ B ₄ O ₇ /土砂混合比は 0.11 (10/90)以上	無機廃棄物/土砂混合比は 1.5 (60/40)以上
セラミックフィルター	Na ₂ B ₄ O ₇ /セラミックフィルター-混合比は 0.43 (30/70)以上	無機廃棄物/セラミックフィルター-混合 比は 0.67 (40/60)以上

3. 廃棄物の調整：塊状アルミニウム／鉄系金属の混合割合

アルミニウムは、高pHの環境における腐食によって水素ガスを発生する事が知られている。しかしながら、固体状廃棄物として発生するアルミニウムについては、金属廃棄物である鉄と混合し溶融処理することでガス発生を抑制する効果が認められる。

本章は、固体状廃棄物の溶融処理を行う場合のアルミニウムの混合割合について検討した。

3.1 アルミニウム含有率とガス発生

(1) 鉄アルミ合金の組織

鉄とアルミニウムの2元素状態図を図3-1に示す。状態図から、アルミニウム混合率と組織の関係を表3-1に示す。

組織からは、アルミニウム混合率34 wt%までの合金は、鉄主体の母相と考えられる。また、34 wt%から48 wt%の合金は、金属間化合物である FeAl_2 を含む母相となっている。48 wt%以上では、基本的に鉄とアルミニウムの金属間化合物であり、62 wt%以上ではアルミニウム主体の母相となっている。

(2) 鉄アルミの合金の組織と自然浸漬電位

金属の腐食のし易さは溶液中の自然浸漬電位に現れるが、合金を考えた場合、より電位が貴な金属に卑な金属を添加していくと、電位は貴な金属の電位で推移し、金属間化合物が生じる近辺で電位が卑な方向に移行することが知られている¹⁾。鉄はアルミニウム含有率34 wt%までは鉄と同様の腐食挙動を示す。

図3-2に、セメント平行水中における鉄アルミ合金の自然浸漬電位の測定結果を示す。アルミニウム含有率が、40 wt%までは電位が鉄と同じであることを確認した。

したがって、アルミニウム含有率が40 wt%以下の範囲ではガス発生挙動は鉄と同等と考えられる。これは、この含有率付近で電位の変化が生じるものの、40 wt%では鉄の影響が大きいことが考えられる。

金属間化合物やアルミニウムの影響が大きくなる60 wt%、80 wt%では、アルミニウム単体の電位に近づき、腐食によるガス発生挙動もアルミニウムに近いものとなる。

(3) アルミニウム含有率とガス発生

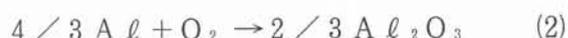
以上の検討の結果、アルミニウム含有率40wt%までは、鉄と同等レベルのガス発生挙動を示す。

3.2 H E P A フィルター溶融時のアルミニウムセパレーターの挙動

ここでは、H E P A フィルターを溶融処理した場合に、セパレータとして含まれる薄膜状のアルミニウムの挙動を述べる。

(1) 溶湯中でのアルミニウム挙動

溶湯に投入されたアルミニウムは、まずセラミック層溶湯に浸漬した形となる。この時、まず溶湯中では溶湯に多く含まれる S i と A l の酸化反応のうち、生じ易い反応が優先的に生じる。



1500℃における、(1)の生成自由エネルギーは $-5.91 \times 10^{-5} (\text{J/mol})$ 、(2)の生成自由エネルギーは $-7.36 \times 10^{-5} (\text{J/mol})$ であるので、溶湯の温度である1500℃付近では、アルミニウムの酸化反応が優先的に生じることがわかる。これは金属層の成分である F e に対しても同様である。

したがって、アルミニウムは基本的には酸化されてセラミック層に含まれることがわかる。

ただし、塊状のアルミニウムについては、溶湯への投入時に金属溶湯に含まれ、全量の酸化に至る前に合金化して金属層に含まれる場合がある。

(2) 試験

H E P A フィルターに含まれる薄膜状のアルミニウムセパレーターが、溶融時に酸化されセラミック層に含まれることを確認するために、下記の模擬廃棄物を実規模大高周波溶融試験装置で溶融し溶融体を製作した。なお、運転温度は1500℃、温度保持時間は30分とした。

- ・炭素鋼 : 135kg
- ・ケイ酸カルシウム系保温材 : 154kg

- ・ H E P A フィルター : 67kg (4個。金枠40kg、セパレーター 11.4kg
メディア 5.6kg、他シーラント、ガスケット)

この場合、アルミニウム重量は11.4kgである。

ここで、アルミニウムがすべて金属層に含まれた場合の金属層中の Al 濃度は約 6 wt%となる。

また、アルミニウムがすべて酸化されてセラミック層に含まれた場合のセラミック層中の Al₂O₃ 濃度は、約18wt%である。但し、保温材や H E P A フィルターメディアの化学組成に数%の変動がある。

作製した溶融体について、金属層及びセラミック層のアルミニウム含有量を測定した。結果を表 3-1、表 3-2 に示す。

測定結果から、金属層への H E P A セパレーターのアルミニウム移行割合は 0.015 % であり、また、セラミック層中の Al の Al₂O₃ 換算濃度は約 19wt% であり、予想される値とほぼ一致した。

(3) まとめ

アルミニウムセパレーターを含む H E P A フィルターを溶融した場合、平衡論的にはアルミニウムは酸化されてセラミック層に含まれること、また実規模大試験装置を用いた試験においては金属層へのアルミニウムの移行は 0.015 % とわずかであり、セラミック層に含まれていることを確認した。

したがって、H E P A フィルターを溶融処理した場合、アルミニウムセパレーターは酸化してセラミック層に含まれ、金属層には含まれないことを確認した。

3.3 アルミニウムの混合割合

以上の検討から、固体状廃棄物の溶融処理においては、鉄に対するアルミニウムの混合割合を 40wt% 以下と設定した。

(参考文献)

- 1) 腐食科学と防食技術、伊藤伍郎、コロナ社 (1979)

以 上

表3-1 金属層中のアルミニウム濃度と金属層への移行割合

	中央、上部	中央、上部	中央、上部	中央、上部
Al濃度	0.001 wt%	0.001 wt%	0.001 wt%	0.001 wt%
金属層重量	175kg			
Al重量	1.75kg(0.001wt%×175kg ÷100)			
金属層への移行割合	0.015 %			

表3-2 セラミック層中のAl₂O₃濃度

	中央、上部	中央、中部	中央、下部	周辺、上部	周辺、中部	周辺、下部
Al ₂ O ₃ 濃度	19.1wt%	18.6wt%	18.5wt%	18.5wt%	18.9wt%	18.8wt%

4. 運転管理：溶融処理の運転温度

本章は、高周波誘導加熱方式による溶融処理の運転温度について述べるものである。

4.1 雑固体廃棄物の融点

発電所から発生する雑固体廃棄物の融点を表4-1に示す。セラミックフィルター、土砂といった難溶融物以外の廃棄物の融点は、1500℃程度以下である。したがって、運転温度は1500℃を含む範囲で設定することが妥当と考えられる。

4.2 運転温度設定の考え方

廃棄物を溶融処理して作製した溶融体は、金属層とセラミック層で形成され、各層の核種分布は均一である。したがって、運転温度は各層が均一である事を確認した温度以上とした。

また、溶融処理を行った場合、廃棄物中に含まれたCs-137は一部が揮発するが、廃棄物の非破壊による放射能測定を行う場合、その揮発率が一定以上の値である事が望ましい。したがって、Cs-137の残存率が比較的安定した温度範囲を基に運転温度の上限値を設定した。

4.3 核種分布の均一性

核種分布の均一性に関して、実規模大の試験装置を用いてコールドトレーサーを用いた試験を実施した。試験条件を表4-2に示す。なお、トレーサーには、溶融体の金属層に分布する核種としてコバルト、セラミック層に分布する核種としてセシウムを用いた。

分布の均一性は、作製した溶融体の金属層のセラミック層からそれぞれ9箇所をサンプリングしてトレーサー濃度の変動係数で確認した。サンプリング箇所と、変動係数の定義は以下の通りである。

- ・サンプリング箇所：（上部、中部、下部）×（外周部、中間部、中心部）
- ・変動係数（%）：
$$\left(\frac{9 \text{ ヲ所のトレーサー濃度の標準偏差}}{9 \text{ 箇所のトレーサー濃度の平均値}} \right) \times 100$$

試験結果を表4-3に示す。試験の結果、運転温度1450℃から1550℃におけるトレーサー濃度の変動係数は数%以下であり、均一性が高く溶融されている事を確認した。

したがって、運転温度1450℃以上で均一性の高い溶融体を得られる事を確認した。

4.4 セシウムの残存率

セシウムの残存率については、以下の3つの試験を実施した。試験条件をまとめて表4-4に示す。また、試験で得たセシウムの残存率の測定結果を表4-5に示す。なお、得られた試験結果から、運転温度以外の条件の合ったものを図4-1に示す。

- ・ R I を用いたラボスケール試験
- ・ コールド実規模大試験
- ・ 実廃棄物を用いたラボスケール試験

試験の結果より得たセシウムの残存率は、運転温度1550℃以下の範囲で50%以上の値で安定したものであった。

したがって、運転温度を1550℃以下でセシウムの残存率が50%以上に安定した溶融体を得られることを確認した。

4.5 運転温度範囲の設定

以上の溶融体中の核種濃度の均一性及びセシウムの残存率の観点から、以下の運転温度範囲を設定した。

- ・ 運転温度：1450℃以上、1550℃以下

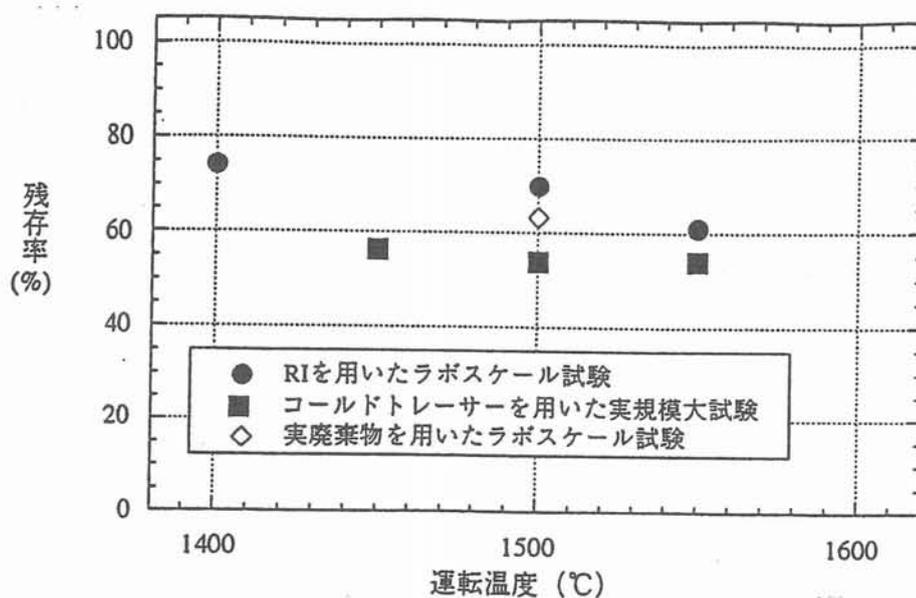


図4-1 セシウム残存率の温度依存性
(温度以外の条件の比較的揃ったものを記載)

表4-1 雑固体廃棄物の融点

分類	物品	融点(°C)
金属	炭素鋼、ステンレス鋼	約1400～約1500
	アルミニウム	660
保温材類	ケイ酸カルシウム、グラウール等	約700～1500
フィルタ類	ラフフィルタ、HEPAフィルタ、バグフィルタ等	約700
コンクリート、ガラス類	コンクリート	約1350
	ガラス	約600～900
その他	セラミックフィルタ	>2700
	土砂	約1700

表 4 - 2 核種分布の均一性に関する試験条件

項 目	条 件
運転温度	1450～1550℃
温度保持時間*1	15～30分
模擬廃棄物	炭素鋼、保温材
金属層／セラミック層体積比	5/5
トレーサー	C o、C s

*1 廃棄物溶融（最終の廃棄物投入）後の温度保持時間

表 4 - 3 トレーサー濃度の変動係数

ト レ ー サ ー	変 動 係 数 (%)
コバルト（金属層）	0.7～2.5
セシウム（セラミック層）	0.1～3.8

表 4 - 4 セシウムの残存率に関する試験条件

項 目	条 件
運転温度	1450～1550℃
温度保持時間*1	15分～2時間
金属層／セラミック層体積比	1/9～9/1
模擬廃棄物 （R Iを用いた試験、コールド試験）	炭素鋼、保温材（一部コンクリート）
廃棄物（実廃棄物を用いた試験）	HEPAフィルターメディア SUS製溶液サンプリングチューブ

*1 廃棄物溶融（最終の廃棄物投入）後の温度保持時間

表 4 - 5 セシウムの残存率測定結果

試験方法	RIを用いた ラボスケール試験	コールド実模擬大 試験	実廃棄物を用いた ラボスケール試験
残存率 (%)	55~96* ¹	51~56	63

*1 コンクリートの場合

5. 運転管理：溶融処理の運転時間

本章は、高周波誘導加熱方式による溶融処理の運転時間について述べるものである。

5.1 運転時間の考え方

高周波誘導加熱方式による溶融処理においては、廃棄物をキャニスタ中に一度に投入するのではなく、溶融を継続しながら追加投入を行う。したがって、溶融中の溶湯の表面には加熱中の廃棄物で覆われ温度も低い状態にある。

したがって、溶融体の均一性、あるいはセシウムの残存率を確保する観点からは、廃棄物の追加投入を行っている時間は影響が無く、廃棄物の投入が終了してからの温度保持時間を設定することが必要である。

5.2 温度保持時間設定の考え方

廃棄物を溶融処理して作製した溶融体は、金属層とセラミック層で形成され、各層の核種分布は均一である。したがって、温度保持時間は各層が均一であることを確認した時間以上とした。

また、溶融処理を行った場合、廃棄物中に含まれたCs-137は一部が揮発するが、廃棄体の非破壊による放射能測定を行う場合、その揮発率が一定以上の値であることが望ましい。したがって、Cs-137の残存率が比較的安定した温度保持時間の範囲から上限を設定した。

5.3 核種分布の均一性

核種分布の均一性に関して、実規模大の試験装置を用いてコールドトレーサーを用いた試験を実施した。試験条件を表5-1に示す。なお、トレーサーには、溶融体の金属層に分布する核種としてコバルト、セラミック層に分布する核種としてセシウムを用いた。

分布の均一性は、作製した溶融体の金属層とセラミック層からそれぞれ9箇所をサンプリングしてトレーサー濃度の変動係数で確認した。サンプリング箇所と、変動係数の定義は以下の通りである。

- ・サンプリング箇所：（上部、中部、下部）×（外周部、中間部、中心部）

$$\cdot \text{変動係数 (\%)} = (\text{9箇所}の\text{トレーサー濃度の標準偏差}) / (\text{9箇所}の\text{トレーサー濃度の平均値}) \times 100$$

試験結果を表5-2に示す。試験の結果、温度保持時間15分以上におけるトレーサー濃度の変動係数は数%以下であり、均一性が高く溶融されていることを確認した。

したがって、温度保持時間は15分以上で均一性の高い溶融体を得られることを確認した。

5.4 セシウムの残存率

セシウムの残存率については、以下の2つの試験を実施した。試験条件をまとめて表5-3に示す。また、試験で得たセシウムの残存率の測定結果を図5-1、表5-4に示す。

- ・ R I を用いたラボスケール試験
- ・ コールド実規模大試験

試験の結果得たセシウムの残存率は、温度保持時間2時間以内の範囲で50%以上の値で安定したものであった。

したがって、温度保持時間2時間以内でCsの残存率が50%以上に安定した溶融体を得られることを確認した。

5.5 温度保持時間範囲の設定

以上の、溶融体中の核種濃度の均一性及びセシウムの残存率の観点から以下の廃棄物投入終了後の温度保持時間範囲を設定した。

- ・ 温度保持時間：15分以上、2時間以内

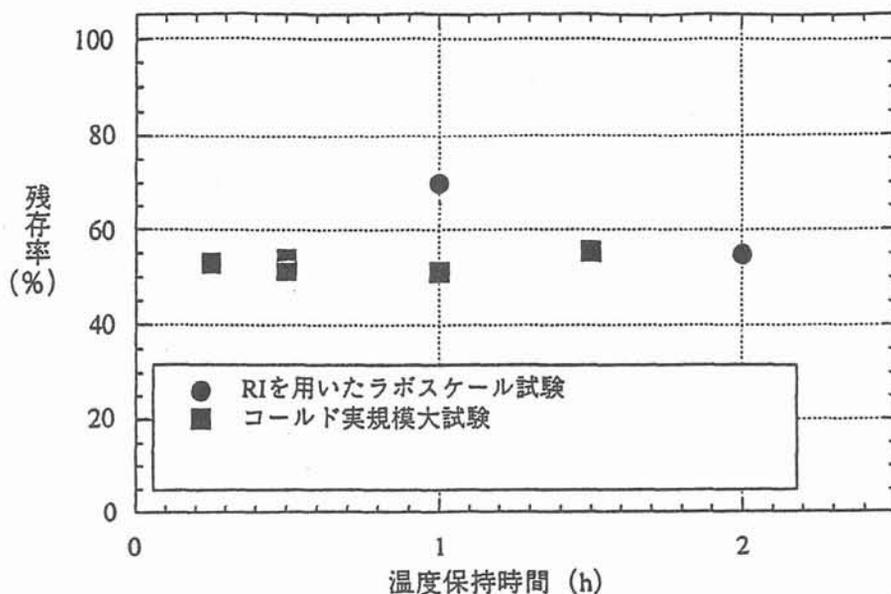


図5-1 セシウム残存率の温度保持時間依存性

表5-1 核種分布の均一性に関する試験条件

項 目	条 件
運転温度	1500℃
温度保持時間*1	15~90分
模擬廃棄物	炭素鋼、保温材
金属層/セラミック層体積比	5/5
トレーサー	Co、Cs

*1 廃棄物溶融（最終の廃棄物投入）後の温度保持時間

表5-2 トレーサー濃度の変動係数

ト レ ー サ ー	変 動 係 数 (%)
コバルト（金属層）	0.6~2.5
セシウム（セラミック層）	2.3~3.8

表5-3 セシウムの残存率に関する試験条件

項 目	条 件
運転温度	1500℃
温度保持時間*1	15分～2時間
金属層/セラミック層体積比	5/5
模擬廃棄物	炭素鋼、保温材

*1 廃棄物溶融（最終の廃棄物投入）後の温度保持時間

表5-4 セシウムの残存率測定結果

試験方法	R I を用いたラボスケール試験	コールド実模擬大試験
残存率 (%)	55.8 ～70.0	51.1 ～55.6

6. 溶融処理の金属、無機物混合割合

本章は、高周波誘導加熱方式による溶融処理の、金属、無機物混合割合について述べるものである。

6.1 金属、無機物混合割合の考え方

高周波誘導加熱方式による溶融処理においては、廃棄物を内容積130 リットルのキャニスタ内で溶融し、金属層とセラミック層の2層構造から成る約100 リットル程度の溶融体とする。

放射能測定上重要なCo-60 及びCs-137は、Co-60 は金属層にCs-137はセラミック層に分布^{1) 2) 3)} することが知られており、核種分布を安定にする上で、金属層とセラミック層の両層が存在することが必要である。また、放射能測定の精度の観点からは、各層が各々全体の1割以上の体積を持つことが望ましいと考えられる。

したがって、金属と無機物の混合割合は、各層がおのおの13リットル以上の体積を持つこととして設定した。

6.2 混合割合設定の考え方

溶融した廃棄物の体積を評価する上では、必要な体積を、廃棄物の溶融時の密度を基に重量に換算して用いることが理解し易いと考えられる。

金属層は炭素鋼、ステンレス鋼等から形成され、これらの密度は最大で8 kg/cm³あるので、13リットルの金属層を得るための重量は104kgである。したがって、金属廃棄物の混合重量は、105kg以上とした。なお、鉄系金属以外の金属廃棄物にはアルミニウム等があるが、アルミニウムの密度は鉄系金属に比べて低く、重量当たりの体積が大きいことから問題とはならない。

セラミック層は無機廃棄物から形成され、その溶融時の密度を化学組成を基に計算⁴⁾ すると表6-1の様な値が得られる。また、測定によっても同程度の値を確認している。このことから、セラミック層の密度は大きい場合には3 kg/cm³程度とみなす事ができる。この場合、13リットルの体積を得るための無機廃棄物の重量は39kgであるので、無機廃棄物の混合重量は40kg以上とした。

6.3 混合割合範囲の設定

以上の考え方で、溶融体作製時の炭素鋼等の金属廃棄物と保温材等の無機廃棄物の混合割合を設定した。

- ・混合割合：金属廃棄物：105kg 以上、無機廃棄物40kg以上

表6-1 セラミック層を構成した場合の密度（計算値）

分類	品名	密度算定結果 (g/cm ³)
フィルター類	ラフフィルター、HEPA フィルター、バグフィルター	2.46 ~ 2.49
保温材類	珪酸カルシウム保温材	2.71 ~ 2.86
	ロックウール	2.65
	グラスウール	2.47 ~ 2.55
	石綿保温材	2.50 ~ 2.65
コンクリート・ ガラス類	コンクリート	2.57 ~ 2.72
	ガラス（板ガラス、蛍光灯）	2.38 ~ 2.45

（参考文献）

- 1) 中村、金沢、他、"放射性金属の溶融基礎試験"、Journal of the RANDEC, No.9, 41-50, 1993
- 2) M. Osaki, S. Yoshii, "Behavior of radionuclides during the melting of non-combustible solid waste", Scientific Basis for Nuclear Waste Management, 595-600, 1982
- 3) m. Obata, T. Teshima "Radionuclides behavior in melting process and its products of non-combustible waste by induction heat melting", 1995 International Conference on Nuclear Waste Management and Environmental Remediation, Vol.2, 1071-1076, 1995
- 4) ガラス工学、成瀬 省、共立出版株式会社(1958)

廃棄体の残存空隙に関する検討

1. はじめに

ここでは、充填固化体の固型化方法について均質・均一固化体との比較を踏まえて整理し、充填固化体内部に残存する空隙量の評価結果等に基づき、個々の廃棄体に対する「有害な空隙」の考え方について検討した。

2. 残存空隙低減の観点からの固型化方法について

充填固化体については、以下のような固型化を行うことにより、空隙を低減することができると考える。

(1) 上部空隙

固型化材料等の充填レベルを管理できる範囲で、上部空隙をできる限り低減する。具体的には、上部空隙が5%程度となるように固型化材料等の注入レベルを設定し、養生終了後でも、上部空隙が約10%以下であることを管理する。

(2) 内部空隙

固型化材料等の流動性と注入速度を適切に設定することで廃棄物間の空隙を低減する。また、廃棄物の減容や収納効率の向上を目指して行う廃棄物の切断、圧縮、溶融処理を行うことにより廃棄物内の空隙は更に低減される。

「均質・均一固化体」と「充填固化体」について、残存空隙の観点から固型化方法を比較したものについて表-1に示す。表-1より廃棄体の残存空隙について、以下のような特徴があることが分かる。

- ・上部空隙については、その量について直接管理できる。
- ・内部空隙については、均質・均一固化体の場合には「均質な練り混ぜ、又は均質な混合」、充填固化体の場合には基本的に「一体となるように充填」を行えるように管理することで低減される（均質・均一固化体の場合には明らかに空隙が残らなくなり、充填固化体の場合は後述のように評価される）。

ちなみに、均質・均一固化体では、既に廃棄体が製作されていたため、安全評価の前提とした平均で30%の上部空隙に基づいて、これを超えないものは少なくとも「有害な空隙」に当たらないと解釈されている。

3. 充填固化体の残存空隙評価

3.1 廃棄物間空隙

「一体となるような充填」が達成されていることを確認するために、廃棄物間空隙が極端に狭くなるような以下の2つのケースについて、廃棄物間空隙の残存量を評価した。

①小口径配管のみを容器に収納

②小粒径の塊状廃棄物のみを容器に収納

評価方法及び評価結果を添付-1に示す。添付-1より廃棄物間空隙が極端に狭くなる条件である①及び②のケースでも廃棄物間空隙の残存空隙率は7%未満となっている。また、一般的な収納方法では、上記収納条件より廃棄物間空隙が広くなり、残存空隙率はより小さくなると期待される。したがって、廃棄物の形状及び収納条件によらず、廃棄物1体毎の廃棄物間空隙は十分に小さくなり、必ず「一体となるような充填」となると考えられる。

3.2 廃棄体の残存空隙

外周仕切設備を有する埋設施設においては、廃棄体内部の空隙の存在が直ちに施設の陥没にむすびつくような事象は考えにくく、著しい空隙が残存した廃棄体が多量に埋設されない限り、「有害な空隙」には該当しないと考えられる。ここでは、廃棄体個々の残存空隙について、この「有害な空隙」の観点から検討した。

(1) 平均的な残存空隙

a. 標準廃棄物を用いた実規模充填性試験

標準的な方法で固型化された充填固化体が平均的に有する残存空隙率に関しては、本書本文に実証試験結果を報告した。標準的な廃棄物組成による実規模大の充填性試験により得られた残存空隙率を表-2に示す。表-2より、上部空隙を除く残存空隙率は水置換法による評価では全ての廃棄体に対し2%以下であり、X線CTによる評価では圧縮体みの廃棄体では3~6%程度、それ以外の廃棄体では1~2%程度であった（X線CTで測定できなかった廃棄体は除く）。

b. 埋設される廃棄体に残存する空隙量の保守的評価

各廃棄物種類毎の基礎データと上記の試験結果に基づき保守的に空隙率を設定し、型式別の廃棄体残存空隙率及び埋設される廃棄体全体（溶融体の廃棄体を除く）の残存空隙率を評価した。評価結果を表-3に示す。また、計算方法については添付-2

に示す。

表-3に示すように、埋設される廃棄体全体の平均的な残存空隙率は、保守的に見積もっても12%程度である。この値は、均質・均一固化体において判断根拠とされた30%と比較しても十分小さい。

(2) 個々の廃棄体の残存空隙

(1)で検討した廃棄体は、標準的な廃棄物組成に基づく評価結果であり、ほとんどの廃棄体において、残存空隙率は上記評価結果に近い値を示すと考えられる。しかし、ここでは個々の廃棄体における残存空隙率のばらつきの範囲について評価するため、廃棄物内の空隙が充填されにくい以下の廃棄物のみが1つの廃棄体にまとまって収納されるような極端な条件について、残存空隙率を評価した。

- ① 小口径配管のみの廃棄体
- ② バルブのみの廃棄体
- ③ A廃棄物の圧縮体のみの廃棄体

評価方法及び評価結果を表-4に示す。なお、表-4においては、上部空隙を管理上限である10%と仮定している。

表-4より、①の水平収納の場合と③において廃棄体1体毎の空隙率が30%を超過している。しかし、①、③の廃棄物の存在量は、発電所廃棄物の開缶調査結果（本文2章参照）に基づけば、体積割合で6%程度であり、他の廃棄物の廃棄体の残存空隙率が10%程度であることを考慮すれば、このような廃棄物が仮に製作されたとしても、それらがひとかたまりになり埋設設備における有意なブロック（例えば1埋設施設（2号埋設施設の場合、約1.3万本））に対し、均質・均一固化体において判断根拠とされた30%以上の残存空隙率を示すようになるとは考えにくい。

4. 「有害な空隙」に関する廃棄体毎の管理方法について

充填固化体中に残存する空隙の内、上部空隙については廃棄体1体毎に直接管理可能であり、一般的には遠隔操作で固型化材料等の充填が行われることを考慮すれば10%程度の空隙量を上限として管理することが妥当と考えられる。

さらに、これまでの検討によれば、上部空隙の上限を10%として管理し、本書で示した方法で製作した場合、上部空隙を含めた充填固化体中の平均的な残存空隙は、均質

・均一固化体の廃棄体確認において判断根拠とされた30%を十分下回ると評価でき、「有害な空隙」には該当しないものと考えられる。

したがって、充填固化体が「有害な空隙」を有しないことについては、廃棄体1体毎の上部空隙の測定記録と、充填固化体の製作が本書で示した方法に従って実施されていることを示す記録で管理し得ると考えられる。

具体的な記録及び判断基準について以下に示す。また、これらの記録により管理す根拠を表-5に示す。

	記 録	確 認 単 位	判 断 基 準
1	上部空隙の測定記録	1体毎	10%を超えないこと
2	原材料の計量記録	固型化バッチ毎	固型化材料等の流動性が適切な範囲に維持されるよう設定された配合の範囲内であること
3	製作マニュアル等の品質保証記録	搬出バッチ毎	作業が適切に管理され、設備が適切に維持されていること

表 - 1 固型化方法による残存空隙の比較

固型化方法	均質・均一な練り混ぜによる固型化	充填による固型化	
対象廃棄物	液体状・粉体状廃棄物	固体状廃棄物	
告示に示される固型化の方法	<p>①固型化材料等と廃棄物を均質に練り混ぜること、又はあらかじめ均質に練り混ぜた固型化材料等を廃棄物と均一に混合すること。</p> <p>②この場合において、容器内に有害な空隙が残らないようにすること。</p>	<p>①あらかじめ均質に練り混ぜた固型化材料等を容器内の廃棄物と一体となるように充填する。</p> <p>②この場合において、容器内に有害な空隙が残らないようにすること。</p>	
上記から要求される固型化の目標性能	<p>①固型化材料等と廃棄物を偏在することなく一様にして、廃棄物を容器内に固定化すること。</p> <p>②固型化を行う際に、技術上達成される範囲内で空隙（上部）を低減すること。</p>	<p>①固型化材料等を廃棄物間空隙に浸透させて、廃棄物を容器内に固定化すること。</p> <p>②固型化を行う際に、技術上達成される範囲内で空隙（上部、内部）を低減すること。</p>	
残存空隙の低減方法	上部空隙	<ul style="list-style-type: none"> ・固型化の目標性能②により低減することが要求される。 ・固型化材料等と廃棄物の混合物としての投入量を管理する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・固型化の目標性能②により低減することが要求される。 ・固型化材料等の注入レベルで管理する。
	固化体内空隙	<ul style="list-style-type: none"> ・固型化の目標性能①を満たすような固型化を行うことにより空隙は残存することはない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・固型化の目標性能を①、②を満たすような固型化を行うことにより低減することが要求される。具体的には、固型化材料等の流動性、注入速度等を管理する。 ・適切な切断、圧縮、熔融処理を行う。
残存空隙の実際	<ul style="list-style-type: none"> ・実際に製作された廃棄体の空隙は上部空隙のみであり、廃棄体確認申請データに基づき評価した結果より <p style="text-align: center;">12%程度</p> <p>(但し、上記評価は廃棄体重量からの推定評価である。)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・実規模固型化試験結果等の空隙量から保守的に設定した空隙を用いて、標準廃棄物組成での廃棄体内の平均的空隙量を評価した結果より <p style="text-align: center;">12%程度</p>	

表-2 実規模大試験の残存空隙率測定結果

収納廃棄物				残存空隙率〔%〕	
強度	型式分類	収納物品	収納方法	水置換法	X線CT法
高い	A型式	非圧縮物	密	0～1	注参照
			普通	0	～1
		圧縮体	—	2	注参照
		溶融体	—	0	注参照
低い	B型式	非圧縮物	密	0～1	～2
			普通	1～2	～2
	A型式	圧縮体	—	0～2	3～6

注：廃棄物の密度が高いため、有意な指示値が得られなかった。

表-3 残存空隙率の評価結果

廃棄物種類	廃棄物種類	空	除	内容物種類	全割	積合	型式別	型式別	型式別	単位：%																
										重量割合	空隙率															
A 廃棄物種類	A 廃棄物種類	A 廃棄物種類	上部空隙部	—	—	—	—	—	—	—	7.00	7.00														
											硬質配管	内径>20mm,長さ<60cm	—	64.64	1.29											
											硬質配管	内径10~20mm,長さ<60cm	—	4.34	0.24											
											硬質配管	長さ<60cm	—	0.74	0.53											
											硬質配管	曲管	—	0.80	0.57											
											硬質配管	—	—	0.25	0.19											
											金属塊の一部	バルブ	—	1.79	1.30											
											金属塊の一部	ポンプ	—	0.80	0.53											
											金属塊の一部	シリンダ	—	1.24	0.75											
											金属塊の一部	モータ	—	0.53	0.32											
											金属塊の一部	スチームトラップ	—	0.33	0.24											
											金属塊の一部	ギヤボックス	—	0.15	0.09											
											計	器類	—	0.23	0.42											
計	上記以外の廃棄物	—	34.61	19.63																						
合計	—	—	100.00	100.00	9.94																					
B 廃棄物種類	B 廃棄物種類	B 廃棄物種類	上部空隙部	—	—	—	—	—	—	—	7.00	7.00														
											軟質配管	内径>20mm	—	32.23	0.64											
											軟質配管	長さ<50cm	—	50.14	51.05											
											軟質配管	上記以外	—	100.00	58.69											
											軟質配管	内径10~20mm,長さ<50cm	—	—	—											
											軟質配管	内径<10mm	—	—	—											
											計	器類	—	0.25	1.65											
											計	上記以外の廃棄物	—	94.62	5.81											
											合計	—	—	100.00	100.00	12.07										
											A 廃棄物種類	A 廃棄物種類	A 廃棄物種類	上部空隙部	—	—	—	—	—	—	—	7.00	7.00			
																						融体	—	—	47.04	0.94
																						融体	—	—	28.75	5.58
																						融体	—	—	100.00	13.52
融体	—	—	—	7.00																						
融体	—	—	23.62	0.47																						
融体	—	—	69.38	0.00																						
合計	—	—	100.00	7.47																						
平均	平均	平均	平均	—	—	—	—	—	—	—												—	12.43			

注：「全体積割合」とは、平成5～7年度に実施した発電所廃棄物の開缶調査結果を平成6年度末の全国の原子力発電所の種類別の廃棄物保管量割合で補正し、充填固化体本数に換算したものである。
なお、ここでは、残存空隙率評価が保守的となるように、残存空隙率が小さい溶融体は発生しないと仮定している。

表-4 廃棄体全体の残存空隙の評価結果（廃棄物内空隙を有する固体状廃棄物）

	想定ケース	評価方法	評価結果 (上部空隙として10%の空隙を含む)	備考
①	小口径配管のみを容器に収納	外径17.3mmの小口径配管を水平、斜め及び垂直方向に密に配列し、モルタル材を注入した場合の廃棄物（配管）部、廃棄物間空隙と廃棄物内空隙に対する充填部と残存空隙の各体積率を水置換法により測定した。	水平収納：39～52% 斜め収納：10% 垂直収納：17%	添付 - 1
②	バルブのみを容器に収納*	口径1Bのバルブのみを容器内に収納する場合を想定した。 口径1Bのバルブの重量、体積、空隙体積を測定した結果、各々3.2kg、440ml、70mlであった。容器内の廃棄物と廃棄物間空隙の体積割合は1：1と仮定した。	18%	
③	A廃棄物の圧縮体のみを容器に収納	薄肉金属（ペール缶等）の廃棄物の圧縮体のみを容器に収納した場合を想定して評価した。	62%	表-3

*：ポンプ、モータ、計器類のような物品は、その発生状況から、廃棄物として固まって廃棄されることはないと考えられる。このため、機器類、計器類の代表として、バルブを想定した。

表－5 有害な空隙に関する管理方法

空 隙	管 理 方 法	管 理 記 録
上部空隙	<p>廃棄体1体毎の測定記録を確認する。 <u>ただし、技術的に達成される範囲である</u> 「10%を超えないこと」を判断値とする。</p>	<p>上部空隙測定値 (1体毎)</p>
廃棄物間空隙	<p>「一体となるような充填」から廃棄体1 体毎に低減されることが必要である。 これについては、<u>充填性を保証する個々</u> <u>の原材料の配合及び廃棄体の製作方法を</u> <u>確認することにより、廃棄物の形状及び</u> <u>収納条件によらず十分低減される。</u></p>	<p>原材料の計量記録 (固型化バッチ毎) 廃棄体の製作記録</p>
廃棄体の平均的な 残存空隙	<p>廃棄体の集合体の平均として低減される ことが必要である。 充填固化体が標準的な製作方法に従って 製作されていることを確認することによ って、「有害な空隙」には該当しないと 考えられる。</p>	<p>廃棄体の製作記録</p>

1. はじめに

「一体となるような充填」が成立するためには、充填固化体中において廃棄物の見かけ体積が占めない部分である「廃棄物間空隙」が、固型化材料によって十分満たされることが必要である。

ここでは、「廃棄物間空隙」が極端に狭くなる以下の2つのケースについて、「廃棄物間空隙」の残存量を評価した。

- ① 小口径配管のみを容器に収納した場合
- ② 小粒径の塊状廃棄物のみを容器に収納した場合

2. 試験方法

(1) 小口径配管のみを容器に収納した場合

径方向について、200ℓドラム缶を模擬した容器に、小口径の配管（外径17.3mm、内径12.7mm）を水平、斜め及び垂直方向に密に配列（図－1参照）したものについて、水置換法で空隙率を求める（固型化条件は、Pロート流下時間50秒程度、注入速度25ℓ/分）。

なお、小口径配管は内部空隙を有するので、あらかじめ内部空隙を閉塞させた条件と内部空隙を開放した条件で試験を行い、廃棄物間と廃棄物内の残存空隙を求めた。

(2) 小粒径の塊状廃棄物のみを容器に収納した場合

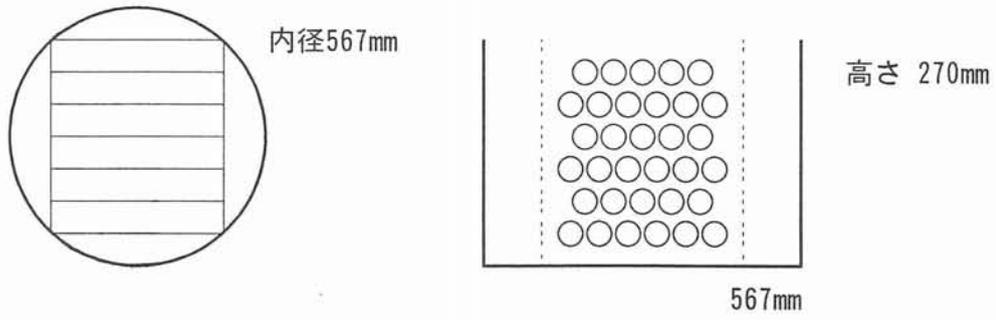
200ℓドラム缶内に外径15mm以上の粗骨材のみを収納したものについて、水置換法で空隙率を求める（固型化条件は(1)と同じ）。

3. 試験結果

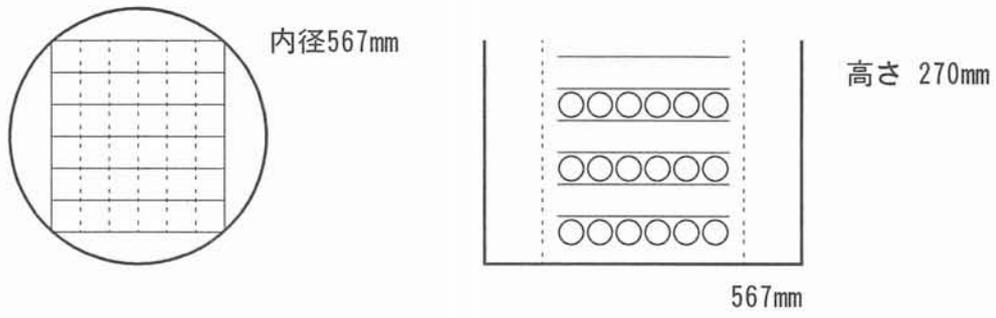
試験結果を表－1に示す。

以 上

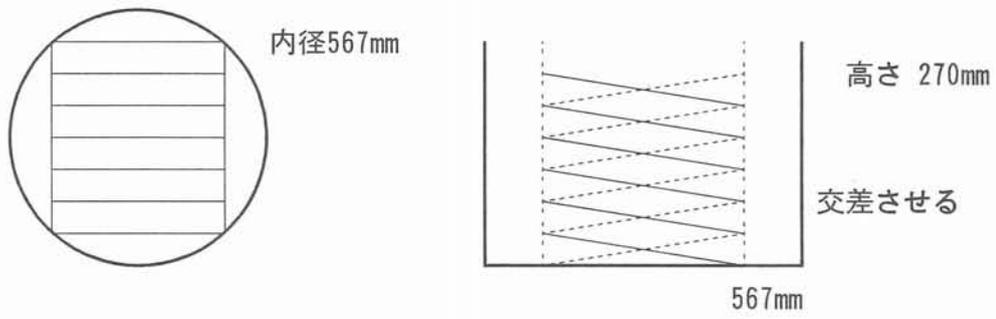
格子状密充填



交差状密充填



斜め密充填



格子状密充填 (縦詰め)

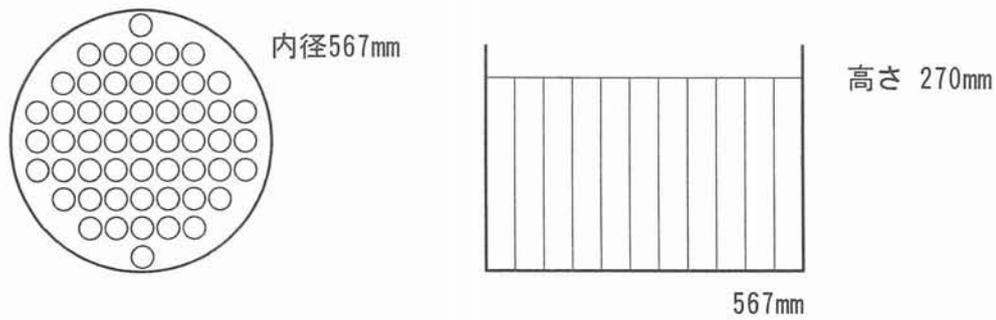


図-1 金属配管による基礎試験-収納図-

表-1 小口径配管／粗骨材を収納した場合の体積割合測定結果

収納条件		体 積 割 合 [%]				
収納の配列	廃棄物部	廃棄間空隙		廃棄物内空隙		
		充填部	残存空隙	充填部	残存空隙	
小口径配管	水平収納 格子状密充填	27.6	29.0*	3.9	1.5	38.0
	水平収納 交差状密充填	27.2	38.4*	1.4	5.5	27.4
	斜め収納	14.4	65.9*	0.0	19.7	0.0
	垂直収納 格子状密充填	35.6	9.1	6.7	48.7	0.0
粗骨材		55.5	38.3	6.2	—	—

充填部：固型化前の空隙のうち、固型化材料等が充填された部分

廃棄物収納部とドラム缶の間にできる半月状の空間（図-1参照）は除いて評価しているため、これを含めると廃棄物間空隙の充填部が占める割合はもっと大きくなる。

本文表－3に示す型式別空隙率の計算方法は以下のとおり。なお、試算のフローについて図－1に示す。

- ①固体状廃棄物の開缶調査と充填性実証試験の結果から、各型式毎に標準廃棄物組成における各種類の廃棄物と充填材の重量割合を設定する。
- ②上記重量割合と表－1に示す廃棄物種類毎の見かけ比重の設定値に基づき、各種類の廃棄物の見かけ体積、廃棄物間部の体積を算出し、廃棄体中に占めるこれら体積の割合を算出する。この際、上部空隙の体積については別途設定する。
また、廃棄物間部の体積は充填材の重量割合と比重を用いて算出するが、充填材の重量には各廃棄物の内部空隙に充填された充填材の重量を含んでいるために、表－1に示す各種類の廃棄物の充填可能空隙率を用いて充填された充填材の体積を差し引いた上で廃棄物間部の体積を算出している。
なお、表－1の見かけ比重及び空隙率の設定値は、該当する代表的な廃棄物を想定し、形状からの計算（本書3.章を参照）、図面類からの評価、模擬廃棄物による実測等により決定している。
- ③各種類の廃棄物と廃棄物間部の体積割合と表－1に示したそれらの充填不可空隙率から、各型式毎の残存空隙率を算出する。
- ④型式毎の全体積割合で残存空隙率の平均を求める。なお、型式毎の全体積割合は、発電所廃棄物の開缶調査結果を平成6年度末の全国の原子力発電所の種類別の廃棄物保管重量割合で補正し、充填固化体本数に換算したものである。

参考（用語の定義）

固型化体積：充填固化体の内部体積から上部空隙部分を除いたもの

見かけ体積：廃棄物の外観形状が占める体積。配管形状を例にとれば、円筒とみなした場合の体積

見かけ比重：廃棄物の重量／廃棄物の見かけ体積

廃棄物部：固型化体積内で廃棄物の見かけ体積が占める部分

廃棄物間部：固型化体積内で廃棄物の見かけ体積が占めない部分

充填可能空隙率：試験により充填材が充填されることが確認された廃棄物中の空隙の体積／廃棄物の見かけ体積

充填不可空隙率：試験により充填材が充填されなかった廃棄物中の空隙の体積／廃棄物の見かけ体積

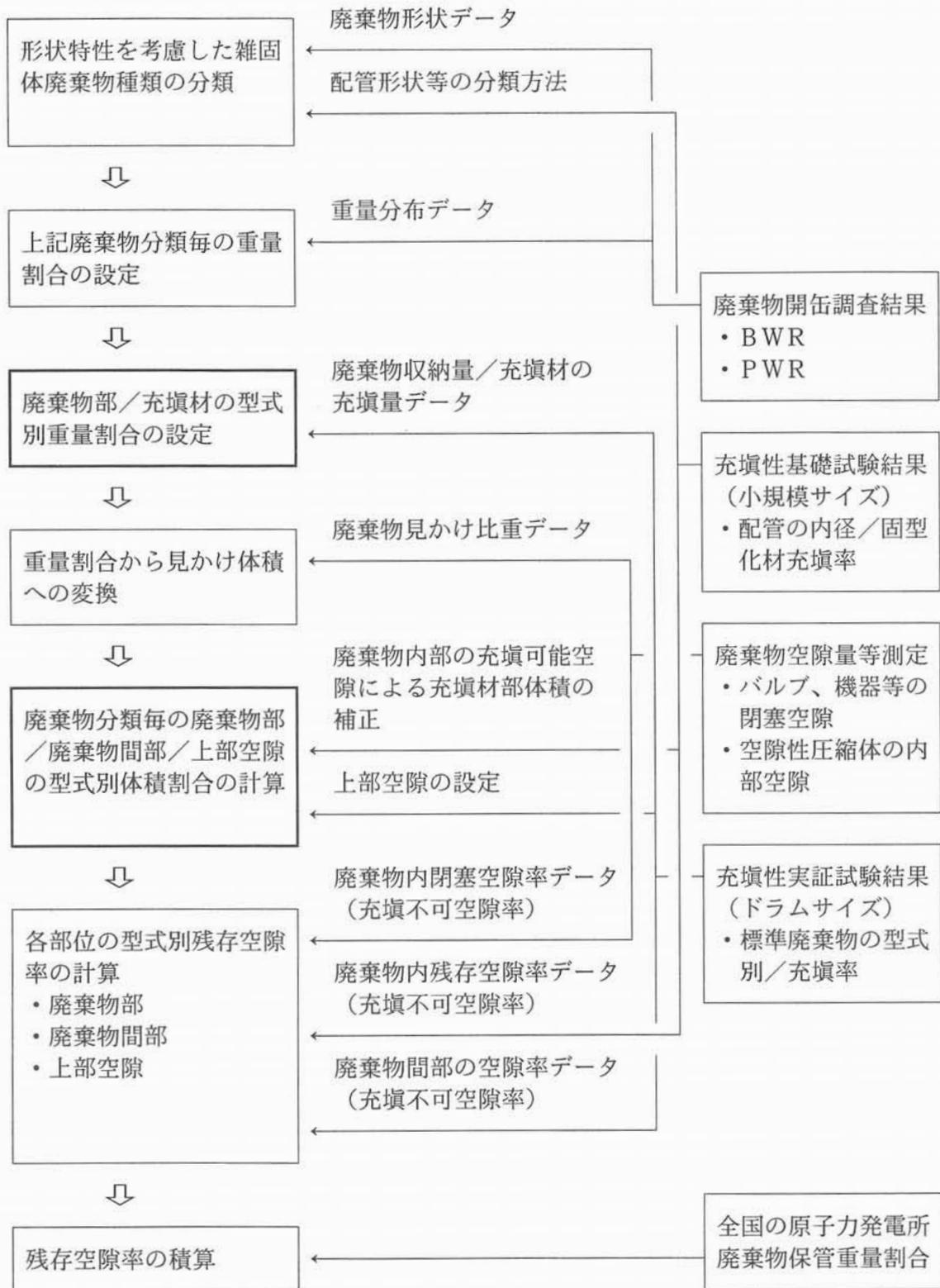


図-1 残存空隙率の試算フロー

表 - 1 見かけ比重と残存空隙率の設定値

部位	廃棄物種類		見かけ比重	充填可能空隙率	充填不可空隙率	備考	
廃棄物部	硬質配管類	内径mm	長さcm	—	—	—	≥ 60cm 斜め収納 < 60cm 水平収納
		≥ 20	≥ 60	3.0	62%	0%	
			< 60				
		≥ 10 ~ < 20	≥ 60	3.7	53%	0%	
			< 60		0%	53%	
			曲管		0%	53%	
		< 10	< 60	3.5	0%	56%	
	軟質配管類	内径mm	長さcm	—	—	—	内径10mm以上 は50cm以下に 切断
		≥ 20	< 50	0.5	52%	6%	
		≥ 10 ~ < 20	< 50	0.5	0%	56%	
		< 10		0.6	0%	51%	
		じばらダクトホース		0.9	0%	50%	
	機器類	バルブ		3.6	40%	10%	
		ポンプ		4.0	35%	10%	
		シリンダ		4.3	25%	15%	
		モータ		4.3	10%	30%	
		スチームトラップ類		3.6	40%	10%	
		ギヤボックス類		4.3	25%	15%	
	計器類	金属類		1.4	10%	70%	
		プラスチック類		0.2	10%	70%	
圧縮体	缶類		1.1	0%	84%	空隙は圧縮物 と圧縮容器の 隙間	
	保温材、フィルタ類		0.8	0%	6% (／固 型化体積)		
	塩ビシート類		0.9	0%			
上記 以外*2	金属系の材質		7.2	0%	0%		
	無機系の材質		2.1				
	有機系の材質		1.2				
廃棄物間部				0%	2% (／廃 棄物間部)		
上部空隙				0%	7% (／全 体積)	注入バル: 5% 管理値 :10%	

*1: 保守的に考えて設定する。 *2: 塊状の廃棄物 (溶融体を含む)

実大模擬廃棄体の製作に供した溶融体の製作条件について

ここでは、本書4.章の試験に用いた溶融体の製作条件を示す。

1. 模擬廃棄物組成

溶融体製作に用いる模擬廃棄物の種類、具体的な品目、及び比率は、表-1の通りとした。

表-1 溶融体製作に使用する模擬廃棄物比率

廃棄物種類	具体的品目	比率wt%
保温材	珪酸カルシウム、ガラスクロス	10
気体フィルタ	HEPAフィルタ、バグフィルタ	10
コンクリート類	コンクリート	5
金属類	炭素鋼（配管、板、アングル）	75

2. 溶融方法

(1) 試験装置

溶融体の製作には高周波溶融炉モックアッププラントを用いた。

本装置は、誘導コイル内に設置した導電性セラミックキャニスタを誘導発熱させ、キャニスタからの伝熱等（金属は直接誘導も含む）により雑固体廃棄物を加熱・溶融するものである。

(2) 溶融方法

模擬廃棄物をキャニスタに投入し、所定の運転温度で溶融した後、キャニスタ毎冷却して溶融体を製作した。溶融条件は以下の通りとした。

運転温度：1,500℃

運転時間：昇温から保持終了まで約4時間