

原子力発電所雑固体廃棄物の廃棄体製作技術と課題[†]松村勝秀^{††}平井輝幸^{††}北島英明^{†††}林 勝^{††††}金川 裕^{††††}谷口俊夫^{††††}岡本道明^{††††}

原子力発電所から発生する低レベル放射性廃棄物のうち、固体状の廃棄物は、気体、液体系の廃棄フィルタ、取り換え消耗器材、定期点検、改良工事に伴う各種廃材、消耗資材等からなり、その材質、構造、形態、放射性汚染条件等が広範にわたるので、一義的に定義することが難しい。これを埋設処分するためには、その発生実態、廃棄物の物理化学的特性をよく把握して、合理的に廃棄体を製作する技術の確立が必要である。ここでは、保管廃棄物の代表性を考慮した実廃棄物サンプリング調査、その分別確認試験と代表的模擬廃棄物の設定、埋設規則技術基準への適用、合理的な廃棄体形態の考え方、実大模擬廃棄体試作による製作方法の確証試験、廃棄体の非破壊放射能測定法の適用性について体系的に調査研究を実施したので、その概要を紹介する。

Low level radioactive solid wastes generating from nuclear power plant are classified into air and liquid-filter, articles of consumption, various parts of replacement and consumption materials generating during periodical inspections, and so on. Therefore it is difficult to define such wastes univocally, because waste forms and contamination conditions are different respectively.

In order to bury these wastes into a shallow land disposal site, it is necessary to understand waste properties, and to establish reasonable fabrication technology of waste package.

We sampled and discriminated representative wastes at the power plants, and determined specifications of simulative wastes. Then we made confirmation test of fabrication technology of waste package through making full-scale simulative packages experimentally on the basis of reasonable waste package classification in consideration of conformity to technical criteria, and we examined non-destructive radioactivity measurement for waste packages. This report describes the outline of these studies.

1. 雑固体廃棄物の組成と特徴

1.1 はじめに

原子力発電所の放射性廃棄物は、基本的に気体、液体、固体の3形態で発生する。

固体廃棄物には、液体廃棄物の処理に伴い派生する液状、スラリー状の二次廃棄物をセメント、アスファルト、プラスチック等で容器に均

質・均一に固型化した固化体と気体廃棄物の処理に伴う廃フィルタおよび取替配管等固体状で発生する廃棄物がある。ここでは、前者を均質・均一固化体、後者を雑固体廃棄物と呼ぶこととする。また、雑固体廃棄物を容器に封入し固型化処理した廃棄物は、その形態で浅地層埋設処分の対象となる“廃棄体”として定義することとする。

均質・均一固化体については、平成4年度から六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターでの埋設処分が実施されており、現在までに処分された数量は0.2 m³ドラム缶で50,000本を超えている。均質・均一固化体に引き続いて雑固体廃棄物を安全に埋設処分するための廃棄体に係る国の技術基準細目(告示)も制定され、これに準拠した廃棄体の製作技術の開発研究が進められているのでここに報告する。

[†]A Study on Fabrication Technology of Waste Package for Non-combustible Miscellaneous Solid Waste from Nuclear Power Plant, by Katsuhide Matsumura, Teruyuki Hirai, Hideaki Kitajima, Masaru Hayashi, Yutaka Kanagawa, Toshio Taniguchi and Michiaki Okamoto

^{††}東京電力株式会社原子力発電部 Nuclear Power Generation Department, Tokyo Electric Power Company

^{†††}中部電力株式会社原子力管理部 Nuclear Power Operations Department, Chubu Electric Power Company

^{††††}財団法人原子力環境整備センター研究第一部 First Research Division, Radioactive Waste Management Center

1.2 雑固体廃棄物の発生と保管管理の実態

原子力発電所の運転に伴い、種々雑多な雑固体廃棄物が発生する。配管、弁、保温材、フィルタ等発電所を構成する部材は当該箇所の取り替え作業に伴い発生し、工具類、足場材、ホース、ゴム手袋等作業に使用する資材も作業に伴う放射性物質による汚染により廃棄物となる。発生時期は、作業が集中する定期検査期間中が大部分を占め、運転期間中の廃棄物発生量は少ない。最新の発電所では、改良標準化により廃棄物低減を推進していることに加え、工事量が少ないこともあり、その発生量がかなり低減されている。

これらの雑固体廃棄物は通常、20～30 dm³程度のポリエチレン袋で梱包した上で0.2 m³ドラム缶（一部角型金属容器で保管する場合もある）に数袋～10数袋程度詰めて密封保管されている。雑固体廃棄物が収納された0.2 m³ドラム缶等の保管容器には管理番号が付されており、主な内容物（金属、保温材等）、発生日、表面線量当量率等の廃棄物管理データは、保管庫における保管位置を含めて保管容器の単位で電算機に登録・管理されている。

原子力発電所に保管されている雑固体廃棄物は不燃・難燃性のものと可燃性のものに大別されており、不燃・難燃性の雑固体廃棄物は平成

4年度末現在全国で0.2 m³ドラム缶換算で約30万本に達している。これを発電所でドラム缶ごとに記録されている主な内容物別に集計すると図1に示すとおり、金属類が約5割を占め、塩ビ・ゴム類、保温材類の順となっている。

この集計に用いたドラム缶の主な内容物は、便宜上6種類程度に分類されているが、必ずしも同一品種が厳密に分別収納されているわけではなく、複数品種が混入している場合もある。

1.3 廃棄体製作上の課題

廃棄体の技術的要件については、2章「廃棄体製作の技術要件」以降で詳細に述べるが、ここでは、雑固体廃棄物の保管状況から考察した廃棄体製作上の課題について触れておくこととする。

廃棄体製作に係わる技術的要件のうち、廃棄物自体の物理的・化学的性状を考慮することは当然であるが、さらに次の点を考慮する必要がある。

- ①容器内に収納した廃棄物と一体となるように固型化材料を充填し、容器内に有害な空隙が残らないようにすること。
- ②埋設された場合において受ける最大荷重に耐える強度（耐埋設荷重強度）を有すること。

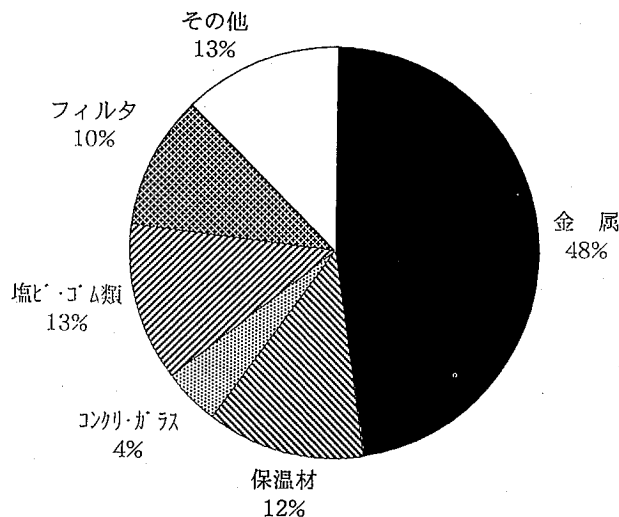


図1 内容物別保管数量割合

①については、雑固体廃棄物がポリエチレン袋等により梱包されてドラム缶内に収納されていること、また、固型化材料が充填されにくい形状の廃棄物も存在していることから、一体的な固型化、有害な空隙の排除の点で必ずしも好ましい保管状況にはないものと思われる。

②については、金属等の廃棄物は鉄筋コンクリート構造の鉄筋と同様に補強材となり、かなりの強度が期待できるが、保温材、フィルタ等の廃棄物については単純に固型化材料を注入しても廃棄体として十分な強度が得られない可能性がある。

一方、均質・均一固化体となる液体状、スラリー状の廃棄物は、適切に固型化材料と練り混ぜることにより、固型化材料中によく分散し、適切な固化強度を発現するとともに、容器に固型化された廃棄体は、均質・均一とみなせた。このことは、廃棄体の物性、放射能量（または放射能濃度）を評価するうえで極めて都合が良く、小規模な試験体の評価データをもとに精度良く実大廃棄体を推定評価することを可能としてきた。これに対し、雑固体廃棄物の固型化に際しては、廃棄物と固型化材料を直接練り混ぜることは困難であり、あらかじめ容器に廃棄物を収納し、固型化材料を注入して固定化するこ

とになる。この廃棄体は、不均質な形態となるため、その評価を行ううえで以下の配慮が必要と考えられる。

- 廃棄物の代表性
- 廃棄体種類の多様性
- 廃棄体強度の担保
- 廃棄体重量の変動幅
- 廃棄体放射能濃度の評価方法
- 廃棄体中の放射能の偏在

注) 廃棄体重量の変動幅は、3章「固体廃棄物の廃棄体の製作技術の確立と廃棄体性能評価」、廃棄体放射能濃度の評価方法と廃棄体中の放射能の偏在は、4章「廃棄体放射能評価」で説明。

これらの廃棄体製作上の課題や廃棄体性能評価上の課題を解決していくためには、多種多様な廃棄物から組成・性状を代表できる廃棄物を適切に選定して実大模擬廃棄体を製作し、技術的検証を行うとともに、技術的要件を満足させるための具体的な対応策を確立していく必要がある。

1.4 保管廃棄物の実態調査

前述の実大模擬廃棄体を製作するために適切な代表廃棄物を選定することを目的として保管

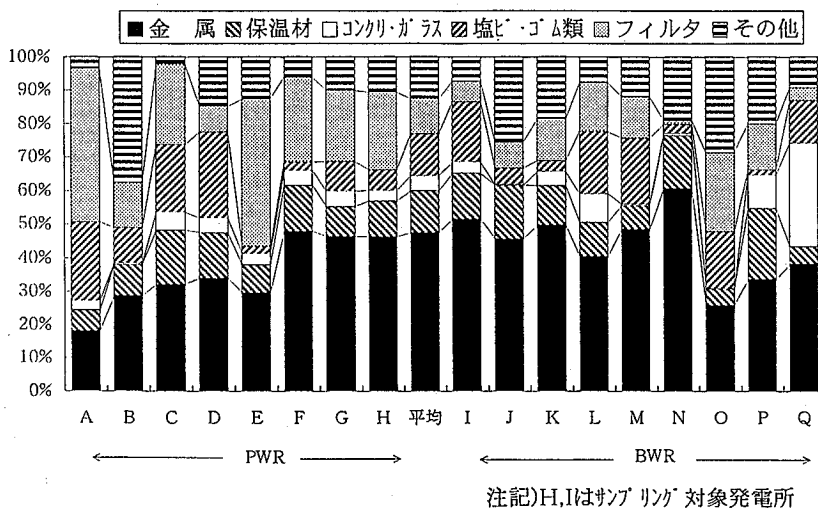


図2 内容物別保管数量割合

庫に保管されているドラム缶詰雑固体廃棄物を取り出し、開缶して、収納されている廃棄物の確認、分類調査を実施した。

1.4.1 サンプルング

開缶調査の対象発電所の選定は、全国の発電所の雑固体廃棄物の保管状況をもとに、BWR、PWR 発電所各 1 発電所ずつを選定した。

図 2 に稼働中の BWR、PWR 発電所の雑固体廃棄物の保管ドラム缶数量を全発電所につい

て調査し、内容物別の保管比率を示す。選定した発電所において適切なサンプルングを実施することにより、全発電所の廃棄物組成を把握することができるものと考えられる。

サンプルング対象廃棄物の選定（ドラム缶単位）に当たっては、図 3 に示すように全国保管ドラム缶の内容物別の保管割合とおおむね一致するように選定した。この際、廃棄物の発生年度が極端に偏らないこと、および金属廃棄物を収納したドラム缶については重量分布がほぼ全

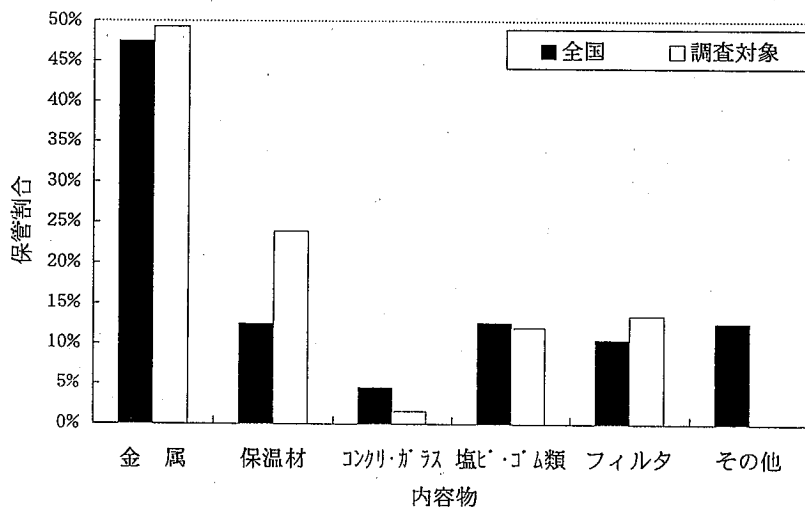


図 3 全国保管ドラム缶と調査対象ドラム缶

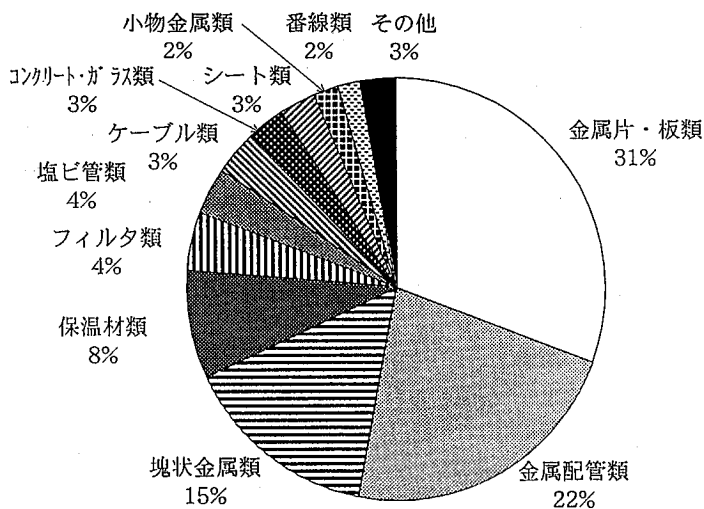


図 4 開缶調査結果（重量割合）一廃棄物分類一

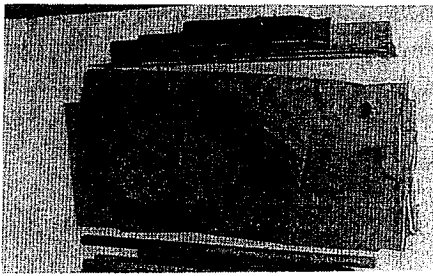


図5 金属片・板類 (例: 金属板)

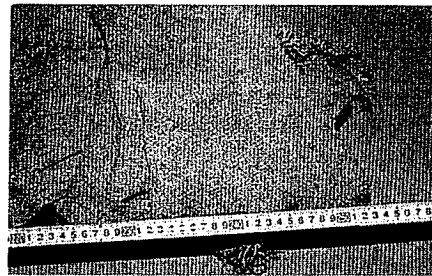


図8 保温材類 (例: ガラスクロス)

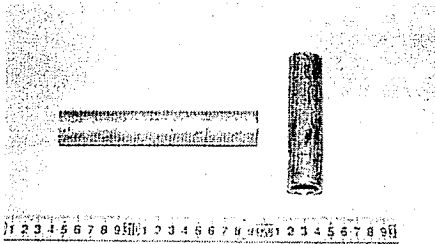


図6 金属配管類 (例: 金属配管)

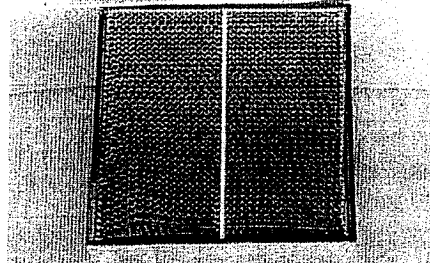


図9 フィルタ類 (例: HEPA フィルタ)

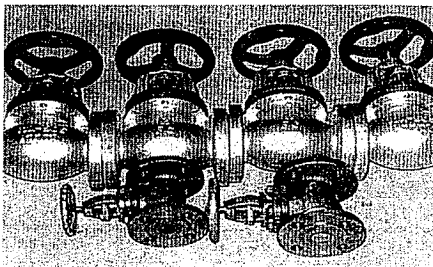


図7 塊状金属類 (例: 弁)

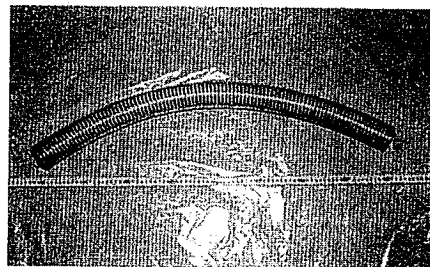


図10 塩ビ管類 (例: 耐圧塩ビホース)

発電所の重量分布と一致するようにサンプリングを行った。

1.4.2 開缶調査結果

図4に開缶調査結果を重量百分率で示す。

金属類が7割程度を占めており、つづいて保温材類、フィルタ類の順となった。

図5～10に、廃棄物分類ごとの代表的な廃棄物を示す。

1.4.3 開缶調査結果に基づく廃棄物分類

開缶調査の結果、現在保管されている状態で

ドラム缶に固型化材料を注入固化した場合には一体的な固型化、強度の面で必ずしも好ましくなく、廃棄体の製作に際して事前に廃棄物を分別する必要があることが確認できた。

廃棄物の分類については、その強度と形状に着眼し分類を行った。

強度については、廃棄物自体が十分な強度を有するものはドラム缶内に直接廃棄物を収納して固型化材料を注入すること、強度が不足する廃棄物はドラム缶内に固型化材料の補強内周層を確保したうえで固型化材料を注入する。

また、形状については、固型化材料が充填さ

表1 廃棄物型式分類の前提条件

技術基準	廃棄物型式分類の考え方			分類	該当する品目・形状
耐埋設荷重強度を有する	廃棄物の強度に応じた分類が必要	廃棄物材質による区分け	廃棄物強度が高いもの	A	金属、コンクリート、ガラス等
			廃棄物強度が低いもの	B	保温材、ゴム、フィルタ等
容器内に有害な空隙が残らないようにする	廃棄物内部への固型化材料の充填性に応じた分類が必要	廃棄物形状による区分け	固型化材料の充填が容易なもの	1	板、棒、塊、管、片状の廃棄物
			固型化材料の充填が困難なもの	2	保温材、フィルタ、缶、瓶の廃棄物

表2 廃棄物分類結果

型式分類	廃棄物分類	代表的な廃棄物品目
廃棄物強度が高く 固型化材料の充填が容易	A 1	金属片・板類
		金属板・片、鋼材、足場クランプ等
		金属配管類
		配管、フランジ等
		塊状金属類
		弁、スチームトラップ、ストレーナ等
廃棄物強度が高く 固型化材料の充填が困難	A 2	コンクリート・ガラス類
		コンクリート、石膏ボード等
		小物金属類
		ボルト・ナット等
		番線類
		番線、針金、溶接棒等
廃棄物強度が低く 固型化材料の充填が容易	B 1	缶類
		ペール缶、一斗缶、スプレー缶等
廃棄物強度が低く 固型化材料の充填が困難	B 2	塩ビ管類
		耐圧塩ビホース、ダクトホース等
		ケーブル類
		ケーブル等
	B 2	片・板類
		ヘルメット、ガスケツト、ポリバケツ等
		保温材類
		ガラスクロス、ケイ酸カルシウム、グラスウール等
	B 2	フィルタ類
		バグフィルタ、プレフィルタ、HEPAフィルタ等
	B 2	シート類
		防災シート等

れにくい廃棄物は、十分に充填できるように必要な処理を施すことを前提に分類を行った。

詳細については3章「雑固体廃棄物廃棄体の製作技術の確立と廃棄体性能評価」において述べるが、固型化材料の充填性、廃棄体の耐埋設荷重強度の観点から、雑固体廃棄物に対する強度分類、形状分類を表1のように設定することとした。

開缶調査結果を上記設定条件に従って分類整理すると表2のようになる。

強度分類上、金属、コンクリート及びガラスについては、注入する固型化材料と同等の強度を有する廃棄物であると判断される。一方、保温材・ゴム等については固型化材料と同等な強

度が担保できないものが多く、強度の低い廃棄物であると判断した。

また、形状分類では、板、棒、片等の形状のものは固型化材料の充填性に影響を与えないが、内部に空隙を有する保温材、フィルタ、缶、瓶等は固型化材料を充填するためには切断、圧縮、溶融等の処理が必要であると考えられる。

1.5 まとめ

現在原子力発電所に保管されている雑固体廃棄物は、現状の保管状態で固型化材料と一体的に固型化することは必ずしも好ましくなく、その組成、物性、形状等が廃棄体製作に多面的に影響を及ぼすため、特質をよく捉え十分な対策

を施したうえ、廃棄体製作に取り組む必要がある。

調査検討結果から、雑固体廃棄物は、強度、形状等を考慮した分類を行うことが可能であり、この分類に応じて適切に代表廃棄物を選定して、これをもとに実大模擬廃棄体を製作して評価試験を実施することにより、均質・均一固化体と同様に廃棄体としての技術的要件を評価できると考えられる。

2. 廃棄体製作の技術要件

2.1 はじめに

前述した固体の低レベル放射性廃棄物を埋設処分するためには、国が定めた技術的要件に対応して、処理および管理を行い、国による廃棄確認（技術的要件を満足していることの確認行為）を受ける必要がある。

現在、その廃棄確認の具体策については、規制当局（国およびその代行機関）、電気事業者および埋設事業者間で検討が実施されている段階である。ここでは、現在検討されている処理・

管理方法の考え方および廃棄確認について記述する。

2.2 廃棄体の技術的要件

平成4年6月18日に原子力安全委員会により次の3種類の廃棄物に対して低レベル放射性廃棄物として埋設処分することのできる放射能濃度の上限値が設定され、その中で廃棄体の基本的な要件が提示されている。

- ①容器に固型化した金属、塩ビ等の固体廃棄物
- ②容器に固型化することが困難な大型金属等
- ③容器に固型化していない放射性コンクリート

上記のうち主に①が、ここで扱っている原子力発電所の供用期間中に発生する雑固体廃棄物に相当する。①について提示された基本的な廃棄体要件を受けて、以下のように関係法令が整備されてきている。

1. 廃棄物埋設事業規則の改正（平成5年2月26日）

固体廃棄物の埋設廃棄体に対する技術基

表3 固体状廃棄物の技術的要件（技術基準）

項 目		規 定 内 容
放射性廃棄物の種類		固体状の放射性廃棄物であること
固型化方法	固型化材料	JISR5210若しくはJISR5211に定めるセメント又はこれと同等以上の品質を有するセメントであること
	容器	JISZ1600に定める金属製容器又はこれと同等以上の強度及び密封性を有するものであること
	固型化材料等 ¹⁾ の充填方法	固型化材料等はあらかじめ均質に練り混ぜたものであること 固型化材料等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
	容器内の空隙	容器内に有害な空隙が残らないようにすること
放射能濃度		埋設事業許可申請書等に記載されている最大放射能濃度を超えないこと
表面の放射性物質の密度		規則第14条第1号ハの表面密度限度の十分の一を超えないこと
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として長官の定める物質を含まないこと
荷重に対する強度		埋設された場合において受けるおそれのある荷重に耐える強度（耐埋設荷重強度）を有すること
著しい破損		著しい破損がないこと
標識・整理番号		容易に消えない方法により、廃棄体の表面の目につきやすい箇所に放射性廃棄物であることを示す標識及び当該廃棄体の表面における線量当量率が長官の定める線量当量率を超える場合にあっては長官の定める標識を付け、並びに当該廃棄体に関して廃棄確認申請書等に記載された事項と照合できるような整理番号を表示したものであること

41 固型化材料等とは、1)固型化材料（セメント）単独又は2)固型化材料（セメント）及び骨材、添加剤等の混和材料を混ぜたものを示す。

準が規定された。

2. 廃棄物埋設事業告示の改正（平成6年9月8日）

固体廃棄物の固型化方法の技術的細目が規定された。

上記の1.および2.により規定されている技術的要件を項目として整理し、これを表3に示す。

2.3 技術的要件に対する処理および管理方法

上記の技術的要件に対応するため、現在検討される固型化方法の基本的な考え方、これに関連する一般産業の事例および基礎的な試験による知見およびこれらを受けて対応策を整理した結果を以下に示す。

2.3.1 固型化方法の基本的考え方

雑固体廃棄物の固型化方法は、充填固化と呼ばれる以下のような手法の適用が検討されている。

る。

①あらかじめ適切な前処理を施した固体状廃棄物を容器内に収納する。

②流動性の良いモルタル等の充填材料を①の容器内に注入し、容器内の固体廃棄物を固型化する。

図11に一般的な固型化のフローを示す。

この固型化方法はプレパックドコンクリート（すなわち、粗骨材を型枠内にあらかじめ詰め、その空隙に流動性の良いモルタルを注入して造るコンクリート）として土木業界で適用されている手法に準じており、一般的な技術であるといえることができる。

2.3.2 使用する原材料の品質およびその管理方法

充填材料として使用されるモルタル等の原材料としては、(1)セメント、(2)細骨材（砂）、(3)減水剤等の混和材料、(4)水の4種類があげられる。

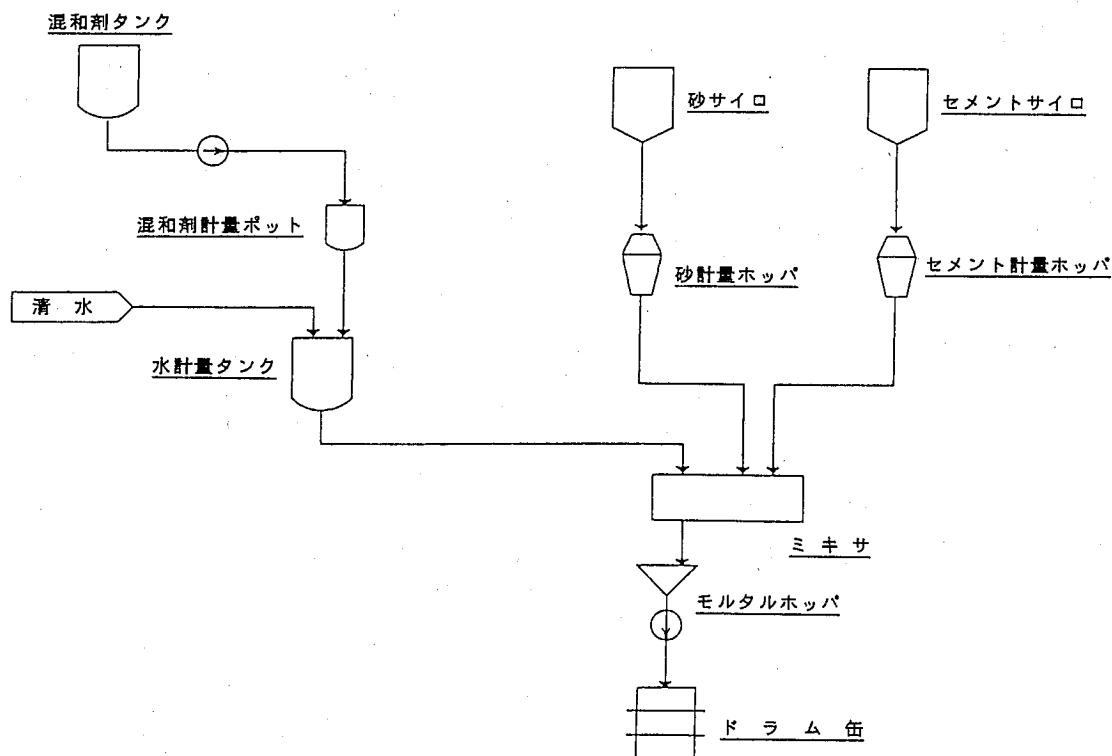


図11 固型化設備のプロセスフロー（例）

表 4 原材料の品質およびその管理方法

原材料種類		品 質	主な理由	管理方法例
セメント		J I S R 5 2 1 0または J I S R 5 2 1 1に定める 規格を満足していること	技術基準として規 定されているため	納入者に品質を示す試 験成績書等を提示させ る。
細骨材		○粒径が2.5mm 以下である こと ○粗粒率は充填材料の流動 性として所定のものが得 られるものであること	充填材料の流動性 を維持するため*1	納入者に品質を示す試 験成績書等を提示させ る。
		○上記以外は、J I S A 5 3 0 8の付属書1*2に定 める規格若しくはこれと 同等以上の品質を満足し ていること	一般業界的で配慮 されている原材料 の品質を満足する ため	
水	上水道 水	管理不要	一般業界的で配慮 されている原材料 の品質を満足する ため ただし、充填材料 の流動性維持にも 寄与している	_____
	脱塩水 ろ過水	上水道水の水質基準と同等 であること		試験検査を行う。
	回収水	上記の水を使用して回収し た上澄水であること		_____
		スラッジ固型分率が3%を 超えないこと		試験検査を行う。
混和材料		充填材料の性能が所定の流 動性の範囲に適合するよう な品質となるものであるこ と*3	充填材料の流動性 を維持するため	納入者に試験成績書等 を提示させる、または 試験検査を行う。

*1: プレパックドコンクリートに対して標準的な施工法を示した(社)土木学会のコンクリート標準示方書を参考にして定めた。

*2: 生コン工場に適用されるレディーミクストコンクリートの骨材に対して定められた規格である。

*3: 高い流動性と一定の圧縮強度を確保するために添加される減水剤以外の混和材料、例えば、膨張材、凝結遅延剤、保水剤等は特に添加する必要はない。

これら原材料の品質は以下の観点から決定される。

- ①表 3 に示した固型化材料(セメント)の技術的要件を満足すること
- ②充填材料の性能、とくに高い流動性を維持するため所定の品質を満足すること
- ③コンクリート業界等で一般的に配慮されている原材料の品質を満足すること。ただし、これについては、一般業界で求められる性

能と相違する部分もあるので、これらについて十分考慮したうえで決定されるべきである。

以上より、現在想定されている原材料の品質およびその管理方法を整理し、これを表 4 に示す。

2.3.3 充填材料の性能およびその管理方法

充填材料の性能は、プレパックドコンクリー

表5 充填材料の性能条件

充填材料の性能	性能条件例		
流動性	充填材料の種類	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	50秒	16秒
	上記以外	20秒	16秒
硬化後の強度	JISA1108(コンクリートの圧縮強度試験方法)により試験した硬化後の強度が、別途耐埋設荷重強度の観点から定められる管理値を上回ること		

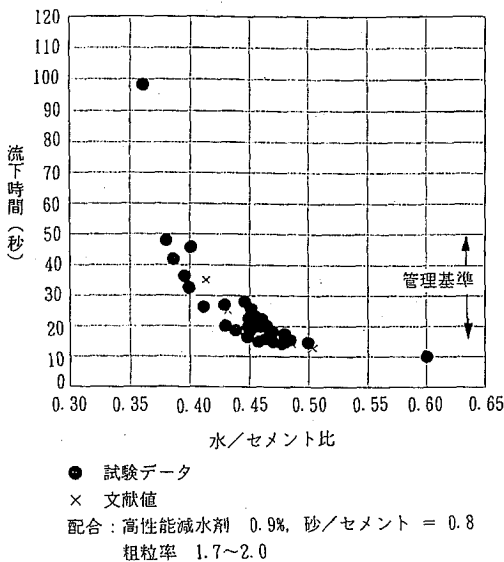


図12 水/セメント比と流下時間の関係

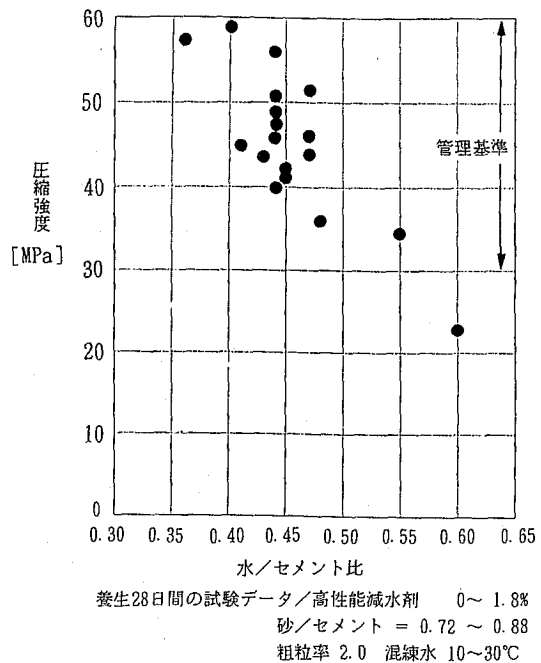


図13 水/セメント比と圧縮強度の関係

トの標準的な施工法を示した(独)土木学会のコンクリート標準示方書〔2〕に記載されている注入モルタルの配合決定方法を参考にして、表5の範囲を満足するようにする。ここでコンクリート標準示方書では、高性能減水剤を使用した場合、コンクリートが高強度となることを前提

としてPロートによる流下時間を25~50秒としているが、雑固体廃棄物の充填固化の場合はこの必要がないことからこの規定を拡大解釈して流下時間を16~50秒とした。

充填材料の性能を維持するための品質管理方法について、既往の文献調査および基礎的な試

験の実施により検討を行っている。このうち参考までに、水/セメント比と充填材料の流動性および硬化後の強度との関係について基礎試験した結果を図 12 および図 13 に示す。

これらの結果から、以下のことがわかった。

- ①充填材料の流動性を維持するために行う管理基準の方が、硬化後の強度を維持するための管理基準よりも一般的に狭く、前者の管理が重要である。
- ②充填材料の流動性を維持するためには、水/

セメント比の維持がとくに重要である。水/セメント比の維持は、これら原材料の計量誤差を一定範囲で抑えるとともに、細骨材中水分量の管理を行うことで対応することが可能である。

2.3.4 充填固化体製作時の管理方法

充填固化体を製作する段階は、固体廃棄物の前処理および固型化に分かれる。このうち、固型化については、さらに充填材料の計量、混練、

表 6 固型化に関する管理方法

段階	維持管理内容	主な理由	管理方法例
原材料の計量	計量器の計量誤差が、充填材料の流動性を維持できる範囲内であること	充填材料の流動性を維持するため	定期的に計量器の計量誤差を検査する。
充填材料の混練	混練機により充填材料が均質に練り混ぜられること	均質に練り混ぜることが技術基準として規定されているため	一般業界で通常使用されているものと同様の練り混ぜ性能を有する混練機を使用する。この判断事例として、JISA 1119 ^{*1} がある。
充填材料の注入	充填材料が廃棄物間の空隙に十分いきわたることを事前に確認した注入速度であること	一体的な充填固化を行うため	定期的に注入器の注入速度を検査する。
	注入時間、充填材料の攪拌等の注入方法が、注入中の充填材料の流動性を維持するに適したものであること	充填材料の流動性を維持するため	充填材料の流動性が維持されることを事前に確認する。
	有害な空隙が残らないような充填材料の注入レベルとすること	固化体上部に有害な空隙が残らないようにするため	定期的に注入器の注入レベルを検査する。
固化体の養生	充填材料の凝結が終了するまで、強い衝撃を与えないようにすること	一体的な充填固化を行うため	充填材料の凝結終了時間を事前に確認する。
	蓋締め以降に固化体上部にブリージング水が残らないこと	自由水が残らないようにするため	蓋締めを行う前に確認する。
	固化体上部の空隙が有害なものでないこと	固化体上部に有害な空隙が残らないようにするため	蓋締めを行う前に確認し、必要に応じて、再充填を行う。

*1 ミキサで練り混ぜたコンクリート中のモルタルの差及び粗骨材料の差の試験方法

注入および固化体の養生の4段階に分かれる。これらの各段階における管理方法を表6に示す。

2.3.5 技術的要件に対する対応策の整理

上記2.3.1～2.3.4の検討結果に基づき、各技術的要件に対する対応策を整理すると表7のとおりとなる。

2.4 廃棄確認の方向性

各技術的要件に対する規制側の廃棄確認手法としては以下のようなものが想定される。

- ①直接検査して確認する。
- ②廃棄物発生者が入手する納入業者からの試験成績書等により確認する。
- ③前述の表7に示す各技術的要件に対する発生側の品質管理方法の妥当性を事前に確認する。この際、発生者側から提示される事前の説明データについて第三者機関に確認させる場合もある。
- ④必要であれば、③に加えて、発生側で取得する記録を確認する。

上記に基づき、各技術的要件に対して想定される廃棄確認の方向性を整理し、これを表8に示す。

2.5 まとめ

固体の放射性廃棄物を埋設処分するための技術基準に規定されている技術的要件を整理し、それに対して現在検討されている廃棄物の固化処理方法およびその管理方法を対比して記述した。

また、これに対応して想定される廃棄確認の方向性を示した。

3. 廃棄体の製作技術の確立と性能評価

3.1 はじめに

原子力発電所での低レベル放射性廃棄物の大半を占める雑固体廃棄物は、前節ですでに述べたごとく、廃棄物の物性、形状等が多岐にわたっており、所定の固型化材料を用いて製作した

廃棄体の性能が、廃棄物の種類などに大きく依存して変動することが予想される。このため、廃棄体の製作に当たっては、廃棄物を事前にその強度、形状等に応じて分別し、これらを固型化することで廃棄体を画一化することが可能と思われる。これにより、廃棄体の製作手法、廃棄体の性能評価などが合理化できる。

以下に、上記の廃棄体型式区分の考え方に基づいて試験検討中の雑固体廃棄物廃棄体の製作技術および廃棄体性能評価の概要を述べる。

3.2 検討の手順

図14に検討の手順を示す。まず、雑固体廃棄物を内部空隙や強度の有無に応じて分類整理し、これをもとに廃棄体の型式を設定する。これと同時に、内部に空隙を生じうる廃棄物については、事前の前処理方法を検討する。その後、廃棄体の型式別の固型化基礎試験により基礎的な固型化条件を明らかにする。

固型化試験においては、実際の開缶調査データに基づいて、標準的のみなせる廃棄物を選定し、この標準廃棄物を用いて廃棄物収納量の把握、固型化材料の注入性および注入条件を試験評価する。また、この標準を外れた場合の変動範囲についても基礎的に試験評価する。これらの固型化基礎試験に基づき、原子力発電所での実作業を想定した廃棄体製作マニュアルを作成する。これは、確実に健全な廃棄体を製作できるように、特殊な技能および設備を使用しないで廃棄体を製作できることを目標としている。このマニュアルに基づいて、実大規模の廃棄体を製作し、これらの廃棄体性能を試験評価し、最終的にマニュアルの妥当性を確認することとしている。

3.3 廃棄体の製作に必要な分別と前処理

廃棄体の技術基準についてはすでに述べてあるが、この中で廃棄体の製作上の観点から対応すべき項目は、以下の2点である。

- ①廃棄体強度：廃棄体は埋設ピット内で俵積みされるため、その際の荷重に耐える強度が必要

表8 技術的要件（技術基準）に対する想定される廃棄確認方法の方向性

技術的要件		品質管理の特徴	廃棄確認方法の方向性
放射性廃棄物の種類		製作時の作業管理方法に依存する。	事前に提示される作業管理要領の説明書からその妥当性を確認する。
固型化方法	固型化材料	納入業者の試験成績書に品質が記載されている。	試験成績書を確認する。
	容器	納入業者の試験成績書に品質が記載されている。	試験成績書を確認する。
	均質な練り混ぜ	納入する設備仕様の設定に依存する。	事前に提示される設備仕様の設定根拠書からその妥当性を確認する。
	一体となるような充填	廃棄物の前処理作業 主に製作時の作業管理方法に依存する。 前処理設備／固化設備 設備仕様の設定及び定期的管理方法に依存する。 使用材料の管理 主に製作準備段階での材料管理方法に依存する。	事前に提示される作業管理要領の説明書、設備仕様の設定根拠書、設備の定期的管理要領の説明書、使用材料の管理要領の説明書等からその妥当性を確認する。
	有害な空隙	自動制御する場合： 設備仕様の設定及び定期的管理方法に依存する。 直接測定する場合： 測定結果がある。	事前に提示される設備仕様の設定根拠書、設備の定期的管理要領の説明書からその妥当性を確認する。 測定結果の記録を確認する。
放射能濃度		廃棄物履歴： 製作時の作業管理方法に依存する。 非破壊測定結果： 測定結果がある。 評価計算方法： 事前の分析データに基づき評価計算方法が決定される。	事前に提示される作業管理要領の説明書、評価方法の説明書により手法の妥当性を確認する。 測定結果の記録及びその計算結果を確認する。
表面の放射性物質の密度		測定を行う。	測定結果を確認する。
廃棄体の健全性を損なうおそれのある物質		事前調査及び必要に応じて製作時の作業管理を行う。	事前に提示される説明書により妥当性を確認する。
耐埋設荷重強度		廃棄物の前処理作業 主に製作時の作業管理方法に依存する。 使用材料、容器等の管理 主に製作準備段階での材料管理、容器・内籠の納入管理方法に依存する。	事前に提示される作業管理要領の説明書、使用材料・容器等の管理要領の説明書等からその妥当性を確認する。
著しい破損		外部から検査ができる。	検査を行う。
標識・整理番号		外部から確認ができる。	目視確認を行う。

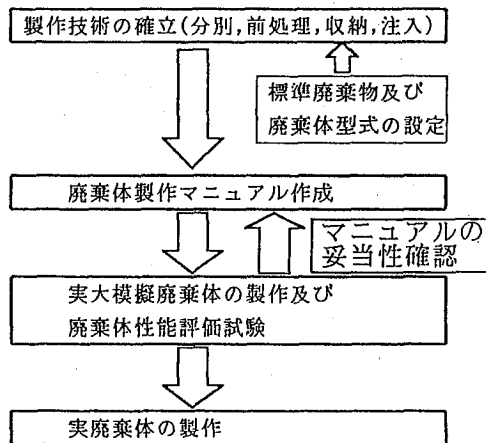


図14 検討フロー図

②廃棄体内部空隙：有害な空隙のないことが規定されている

雑固体廃棄物は、前述のごとく多種多様な廃棄物から構成されており、上記の廃棄体強度および内部空隙の観点から、表9に示すように分類することが必要となる。すなわち、廃棄体強度の観点からは、セメントモルタルで固型化した場合を想定すると、モルタル自体の一軸圧縮強度は通常 $400 \sim 500 \text{ kg/cm}^2$ ($3.9 \times 10^7 \sim 4.9 \times 10^7 \text{ Pa}$)と強固なものであるが、その内容物が金属などのようにそれ自体が大きな強度を有する場合と、保温材のように明らかに低強度のものを内容物とする場合では、廃棄体強度が大きく異なるものと考えられる。前者では、モルタル強度と同等かそれ以上となることが容易に予想できるが、後者では低下することが懸念される。したがって、後者を固型化する場合には、廃棄物の種類に依存しないで廃棄体強度を発現させる方式が確実である。本研究では、廃棄物の周囲に一定強度以上のモルタル層（廃棄体内周層）を設ける方式を検討している。

一方、内部空隙の観点からは、明らかに閉空間を有する缶類や、多孔質な保温材等はモルタルが内部に充填されないため、固型化後も空隙が残る事前に何らかの前処理が必要となる。以上をまとめると、

強度を持たない廃棄物：

表9 強度および空隙性に応じた廃棄物分類

空隙性	無し	有り
強度		
有り	A 1 (金属, ガラス等)	A 2 (缶, 瓶類)
無し	B 1 (塩ビ管, 板等)	B 2 (保温材, フィルタ等)

廃棄体容器内周層で強度を保証（内張または内籠の使用）

空隙のある廃棄物：

切断、圧縮、熔融などの前処理による空隙除去

で対応することが必要であり、このためには表9に示したように廃棄物を分別分類し、これに従って、廃棄体を製作するのが合理的と考える。これに従えば、廃棄物はA1、A2、B1、B2の4区分に分類され、廃棄体はA廃棄体とB廃棄体の2区分に型式設定される。表10にA廃棄体とB廃棄体の製作イメージを示す。

3.4 廃棄物の圧縮による前処理方法の確証

前述の型式設定に従えば、空隙性廃棄物のA2、B2廃棄物は、切断、圧縮もしくは熔融によって内部空隙を除去する必要があるが、切断、熔融は、適切な方式を取れば閉空間を除去できるのは明白である。一方、圧縮についてはどの程度の圧縮応力であれば空隙が除去されたと判断できるか確証しておく必要がある。

開缶調査で存在比率の高い缶類、保温材類およびフィルタ類等の代表的なA2、B2廃棄物を 0.12 m^3 ドラム缶に収納し、圧縮試験を実施した。

この試験では

- ①廃棄物の減容性
- ②圧縮体の内部観察
- ③圧縮体の比重

を評価しており、結果の一例として、圧縮応力が減容比に与える影響を図15に示す。結果は、

表10 型式別廃棄体イメージ

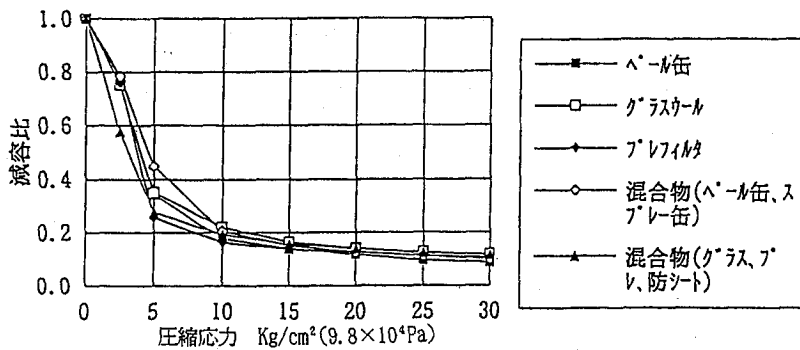
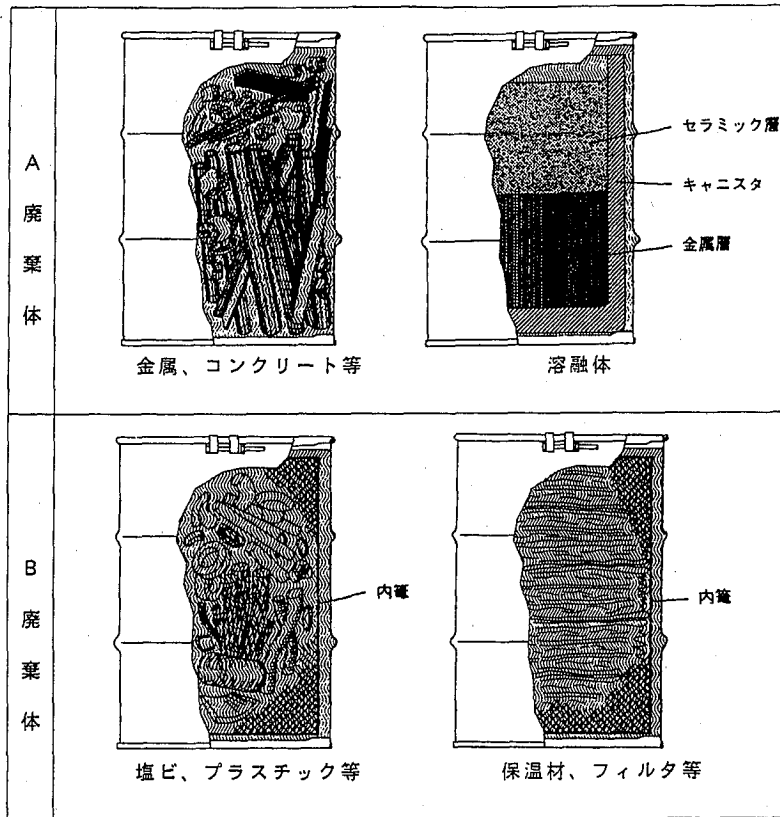


図15 圧縮応力と減容比の関係

缶類、保温材、フィルター共に、圧縮応力 20 kg/cm² (2 × 10⁷ Pa) 程度で減容比がほぼ飽和することがわかった。また、圧縮体を切断した切断面を内部観察すると、内部は厚密状態になっており、マクロな空隙が存在しないこともわかった。

3.5 固型化基礎試験

3.5.1 標準廃棄物の設定

固型化基礎試験実施に当たり、試験に使用する標準廃棄物を設定した。上述のごとく、廃棄物を強度および内部空隙の観点から、A1、A2、

B1、B2に区分したが、雑固体廃棄物は多種多様であり、廃棄物の種類によって廃棄体の性能が変動する可能性がある。したがって、開缶調査結果に基づいて数量的に多数を占める雑固体廃棄物を選定することで、多岐にわたる雑固体廃棄物を代表する標準廃棄物として定義した。

標準廃棄物の設定に当たっては、下記の考え方を基準とした。

- ①廃棄物の累積重量比率が90%までの廃棄物を選定する。
- ②廃棄物の単独比率が1%以上の廃棄物を選定する。

表11に選定した標準廃棄物とその構成割合を示す。なお、溶融体についてはA1区分としている。

3.5.2 収納試験

3.5.1で選定した分類ごとの廃棄物の廃棄体容器への収納量を試験評価した。評価に当たっては、廃棄物の構成割合と収納方法の違いによる収納重量の変動を確認した。

〔試験に用いる模擬廃棄物の構成割合〕

上述の標準的な廃棄物の構成割合に加えて、収納量の変動が大きいと思われるA1廃棄物については、廃棄物構成の変動を考慮した最大重量および最小重量の構成割合を設定した。

〔収納方法〕

人手による密収納、人手による普通収納および機械収納の3ケースについて実施した。

人手密収納：人偽的に最大限密に収納努力するもの

人手普通収納：人偽的に普通に収納するもの

機械収納：コンベアにより機械収納するもの

〔試験結果〕

- ①図16に結果の一例を示すが、収納量が最も大きいのは人手による密収納であり、最も少ないのは機械によるランダムな収納である。

- ②廃棄物区分ごとの収納量の変動範囲は以下

表11 標準廃棄物

区分	品名	累積割合(%)	単独割合(%)
A1	金属片類	4.4	4.4
	配管類	6.9	2.5
	塊状金属類	9.0	2.1
	コンクリート類	9.4	4
	小物金属類	9.6	2
	希線類	9.8	2
	計器類	9.9	1
A2	缶類	10.0	10.0
B1	管類	4.8	4.8
	線類	8.9	4.1
	片、板類	9.9	1.0
B2	保温材類	5.4	5.4
	フィルタ類	8.2	2.8
	シート類	10.0	1.8

のとおりである。

A1廃棄物：120～310 kg/0.2 m³ドラム

A1、A2混合廃棄物：150～290 kg/0.2 m³ドラム

B1廃棄物：18～38 kg/0.2 m³ドラム

B2廃棄物：30～100 kg/0.2 m³ドラム

A2廃棄物については、存在量が極めて少ないことから、現実的な収納を想定してA1廃棄物との混合状態で評価した。

3.5.3 固型化材料試験（プレパックド試験）

雑固体廃棄物の固型化方式は、あらかじめ廃棄体容器(0.2 m³ドラム缶)中に雑固体廃棄物を収納しておき、この雑固体廃棄物中に固型化材料を注入するものであり、土木業界で実施されているプレパックド工法と類似している。プレパックド工法は、粗骨材を充填した型枠中にセメントモルタルを下部より注入するもので、土木学会標準示方書中で詳細な管理項目が規定されている。ここでは、プレパックド工法を雑固体廃棄物へのモルタル充填固型化に適用する場合の管理項目および管理値の妥当性を検討するため、以下の試験を実施した。

〔試験方法〕

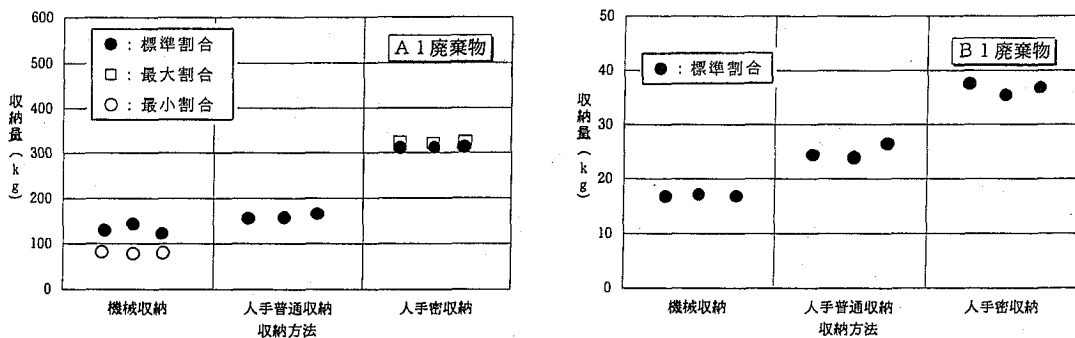


図 16 A1、B1 廃棄物の収納試験結果

表 12 プレパックド工法による注入試験結果

試験番号	1	2	3	4	5	6	7	8
固化化材料	モルタル A				モルタル B	モルタル C	モルタル D	
水/セメント比	37.5				39.5	35.0	43.0	43.5
充填方法	下部打 ち上げ	上部流 し込み	下部打 ち上げ	上部流 し込み	上部流 し込み	上部流 し込み	上部流 し込み	上部流 し込み
注入速度 (dm^3/min)	25	25	10	10	10	10	25	10
P ロート 流下時間(s)	48.9	45.0	49.8	48.7	28.4	69.9	14.2	18.9
注入前空隙 量(dm^3)	97.4	91.4	87.4	85.2	88.1	82.2	90.0	85.9
固化化材 注入量(dm^3)	99.6	78.7	87.1	84.0	86.7	21.7	87.4	85.0
廃棄体 充填率(%)	96	94	100	99	99	70	99	99

P ロート流下時間 16～50 秒程度のモルタルを、粗骨材を充填した 0.2 m^3 ドラム缶中に注入したときのモルタル充填率を測定し、雑固体廃棄物への適用の妥当性を検討する。パラメータとして、充填方法（上部充填、下部充填）および注入速度を変化させた。

〔試験結果〕

結果を表 12 に示すが、プレパックド工法での流動性の上限値である P ロート流下時間 50 秒前後においても、注入速度が $25 \text{ dm}^3/\text{min}$ 以下であれば廃棄体充填率が 90 % 以上であり、良好な充填性能を示すことがわかった。これより、本条件により雑固体廃棄物に対しても同様の充填性能を示すものと予測できる。

3.5.4 固化化注入試験

プレパックド工法でのモルタル注入条件の雑固体廃棄物への適用性を、実大規模での固化化試験により確認評価した。本試験では、雑固体廃棄物へのセメントモルタルの注入性を確認することを目的としており、そのため、廃棄物は最大の密収納、セメントモルタルの流動性は上限値の P ロート 50 秒前後で実施することとした。試験条件を以下に記す。

〔廃棄物収納条件〕

- 廃棄物：標準廃棄物
- 収納方法：人手による密収納
- 収納容器： 0.2 m^3 アクリル容器
- 廃棄物空隙量：水置換法により評価

〔固化化条件〕

- モルタル流動性：P ロート 50 秒前後
- 注入速度：15、25、 $40 \text{ dm}^3/\text{min}$
- 加振：有、無の 2 ケース
- モルタル充填量：重量法により評価

〔試験結果〕

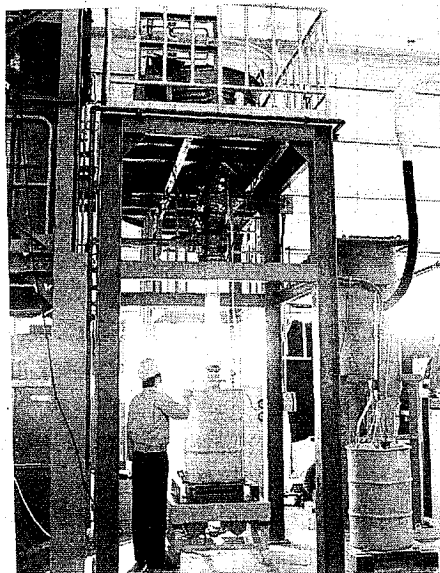
結果を表 13 に示す。また、注入状況の 1 例を図 17 に示す。いずれの廃棄物に対しても、廃棄体充填率はほぼ 100 % であり、雑固体廃棄物に充分適用できることがわかった。また、今回のケースでは加振なしでほぼ充填できる。

3.6 廃棄体製作マニュアルの作成

これまでの実際の雑固体廃棄物の開缶調査データ、廃棄物の分類、廃棄体の型式設定、空隙性廃棄物の前処理方法の確証、収納試験および

表 13 模擬廃棄物への注入試験結果

廃棄物	No	Port流下 時間(S)	注入速度 (dm^3/min)	注入前 空隙量(dm^3)	固化化材料 注入量(dm^3)	廃棄体 充填率(%)
A 1	1	5 2	1 5	1 5 7	1 5 7	1 0 0
	2	5 1	2 5	1 6 4	1 6 1	9 8
	3	5 2	4 0	1 6 9	1 6 9	1 0 0
	4	6 8	2 5	1 6 7	1 6 7	1 0 0
	5	1 9	2 5	1 6 9	1 6 8	9 9
A1+A2	6	4 7	2 5	1 5 3	1 5 3	1 0 0
B 1	7	5 0	2 5	1 7 7	1 7 2	9 7
B 2	8	4 8	2 5	9 2	9 2	1 0 0



(混練注入装置)



(注入途中)

図 17 固化化材注入状況

固化化基礎試験結果に基づき、廃棄体の製作マニュアルを作成した。これは、図 18 に示す製作標準工程の中の分別マニュアルと固化化マニュアルに分けて作成している。これらは、作業に熟練していない発電所内作業者を対象としており、特殊な技能および設備を使用しないでも健全な廃棄体を製作できることを目標としている。このマニュアルは現状、これまで述べてきた基礎的な試験に基づいて作成されたものであり、今後は、実大規模の廃棄体を本マニュアルに基づいて製作し、廃棄体の性能を評価するこ

とにより、マニュアルの妥当性を確認していく予定である。

3.7 実大模擬廃棄体の製作および廃棄体性能評価試験（今後実施予定）

固化化マニュアルに基づいて製作した廃棄体（標準廃棄体）の性能を実証するために、実大模擬廃棄体を製作していく予定である。実大模擬廃棄体の仕様を以下に示す。

〔模擬廃棄物仕様〕

- 前節で選定した標準廃棄物

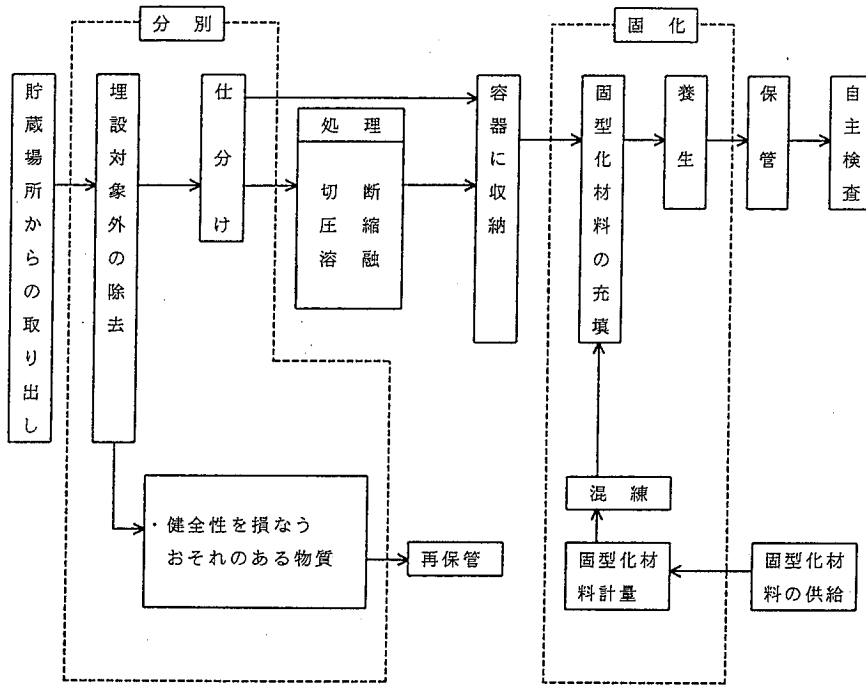


図 18 廃棄体の製作工程 (例)

- 標準廃棄物を圧縮処理した圧縮体
- 標準廃棄物を溶融処理した溶融体

〔固型化材仕様〕

- プレパックド工法規定に準じたセメントモルタル
- 流動性：P ロート 16～50 秒程度
強度：標準的なセメントモルタル強度および低強度 (300 kg/cm^2 ($2.9 \times 10^7 \text{ Pa}$) 程度) の 2 種類

〔固型化用容器〕

- A廃棄体：0.2 m³ドラム缶
- B廃棄体：内籠付き 0.2 m³ドラム缶
内張付き 0.2 m³ドラム缶

上記仕様で実大模擬廃棄体を製作し、雑固体廃棄物中へのセメントモルタルの充填性および耐埋設強度に関する性能評価を実施する。

①セメントモルタルの充填性能評価

- 水置換法による廃棄体空隙率評価
- 廃棄体断面観察
- X線 CT 法による廃棄体断層撮影

②耐埋設強度評価

- 実大模擬廃棄体の圧縮荷重試験
(通常モルタル、低強度モルタル)

3.8 まとめ

多岐にわたる雑固体廃棄物を、その性状に応じて分類し、この分類ごとに注入固型化する廃棄体型式を設定した。また、廃棄体製作に係る廃棄物の前処理、固型化注入等の基礎試験を実施し、廃棄体製作マニュアル作成に必要な基礎データを取得した。

以上の結果をまとめて示す。

- ①固体廃棄物の強度および空隙の有無に応じて廃棄物を分類し、これらを必要に応じて前処理した後に固型化する下記の廃棄体型式を設定した。

A廃棄体：強度のある廃棄物を固型化

B廃棄体：強度のない廃棄物を固型化

- ②缶類、保温材等の空隙性廃棄物は、圧縮応力 20 kg/cm^2 ($2 \times 10^7 \text{ Pa}$) 程度で有害な空隙を除去できる。

- ③廃棄物への固型化材注入に関し、プレパッ

クド工法を参考にしたモルタル注入条件が適用可能である。

- ④発電所内での作業を前提とした廃棄体製作マニュアルを作成した。

4. 廃棄体の放射能評価

4.1 はじめに

埋設する廃棄体中の ^{14}C 等の核種の放射能濃度の評価方法については、平成4年4月原子力安全委員会より「放射能濃度決定方法」として、スケーリングファクタ（以下「SF」という）法をはじめとする6種類の方法が示され、すでにその一部を均一・均質固化体に適用し、六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターへの埋設が進められている。

電気事業者においては、これと並行して第2次埋設に向けて、雑固体廃棄物に関する放射能評価方法について、雑固体廃棄物のサンプリング、分析を実施するとともに検討を鋭意進めている。

ここでは、雑固体廃棄物に関する放射能量並びに放射能濃度の評価の検討状況を示す。

4.2 雑固体廃棄物の放射能インベントリの概況

原子力発電所から発生する放射性の雑固体廃棄物は、主にドラム缶に収納され、保管されている。この際の放射能の管理データとしては、個々のドラム缶の表面線量当量率が主体である。したがって、雑固体廃棄物の放射能濃度および放射能量を把握するために、表面線量当量率をベースとして、放射能濃度を算出し、放射能量の推定評価を行った。

放射能の推定方法としては、廃棄物の発生から一定時間経過した時点で表面線量当量率への寄与が最も大きい核種は ^{60}Co であることから、管理データである表面線量当量率がすべて ^{60}Co によるものであるとして、 ^{60}Co 換算放射能濃度に換算する係数を、遮へい計算コードである「点減衰核積分コード：QAD」を用いて廃棄物種類ごとに密度の関数として算出し、ドラム

缶ごとの廃棄物種類、表面線量当量率および重量のデータを基に ^{60}Co 換算放射能濃度を算出する方法を適用した。

実際に、平成4年度末現在の各電力の雑固体廃棄物保管状況の実態調査結果を基に、 ^{60}Co 換算放射能濃度分布および放射能量を求めた結果を図19に示す。

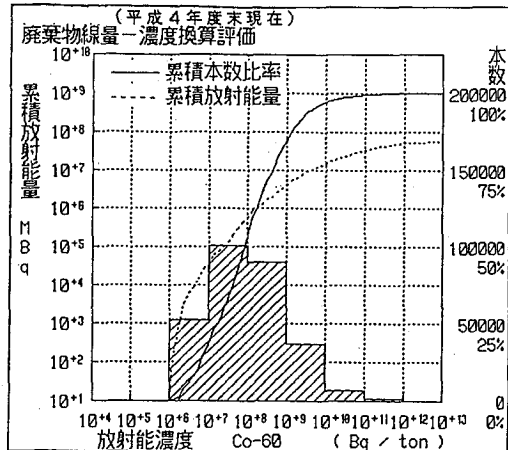


図19 雑固体廃棄物の放射能濃度分布および放射能量評価

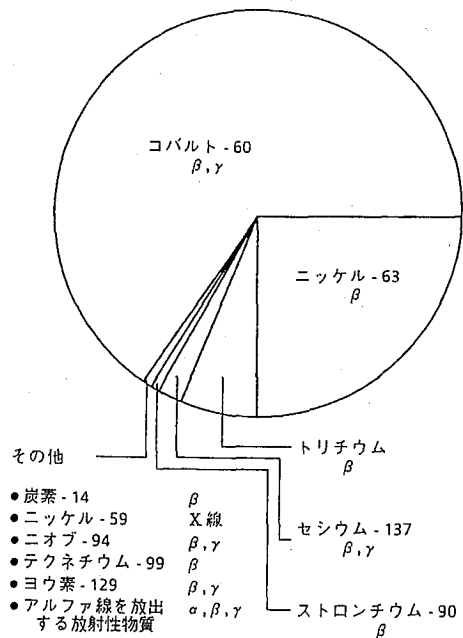


図20 低レベル放射性廃棄物中の放射性物質の割合

平成4年度末現在での雑固体廃棄物の累積貯蔵量の ^{60}Co 換算放射能濃度は $1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^{12}$ Bq/tonの範囲と推定され、また、総放射能量は約 6×10^{13} Bqと推定された。

^{60}Co 以外の核種の放射能濃度については、雑固体廃棄物のサンプリング・分析を別途実施し、 ^{60}Co 等との相関関係に基づき、別途算定した ^{60}Co 等との組成比により、推定評価することが可能である。

廃棄物中の放射性物質の割合の一例として、第1次埋設の実績を図20に示すが、 ^{60}Co 、 ^{63}Ni 、 ^3H および ^{137}Cs の4核種で放射能の大部分を占めていることがわかる。雑固体廃棄物の放射能においても、生成源が同一であることから、これと同様の核種割合となることが想定される。

なお、本項では雑固体廃棄物の放射能濃度等の概況について記述したが、各廃棄物の実際の放射能濃度等の調査方法については次項に記述することとする。

4.3 雑固体廃棄物のサンプリング分析

4.3.1 分析に供するサンプリング対象の選定

雑固体廃棄物は、主にプラントの定期検査および改良工事等で発生する金属、塩化ビニル等

の固体状の廃棄物であり、その放射能汚染は定期検査等を行った系統の流体との接触によってもたらされている。このため、雑固体廃棄物の放射能評価のためのサンプリング対象は、次の項目を考慮してその種類等を選定している。

- ①雑固体廃棄物の発生量
- ②プラント内の発生系統
- ③雑固体廃棄物の汚染形態

a. 雑固体廃棄物発生量からのサンプリング対象

雑固体廃棄物および焼却灰の貯蔵量の調査結果より、図21に示すように数量的に主要な廃棄物種類としては、金属類、塩ビ類、保温材、気体フィルタがあり、これらで約80%を占めている。また、放射能量的には、金属類、液体フィルタ、気体フィルタ、焼却灰、塩ビ類の順に多く、これらで約80%を占めている。

したがって、放射能濃度評価のためのサンプリング対象としては、いずれにおいても摘出される金属類、気体フィルタおよび塩ビ類に加え、放射能量的に占める割合の多い液体フィルタ、焼却灰（合わせて約30数%を占めている）を選定した。

b. 発生系統および汚染形態からのサンプリング対象

核種の生成条件および特性、ならびに蒸発、

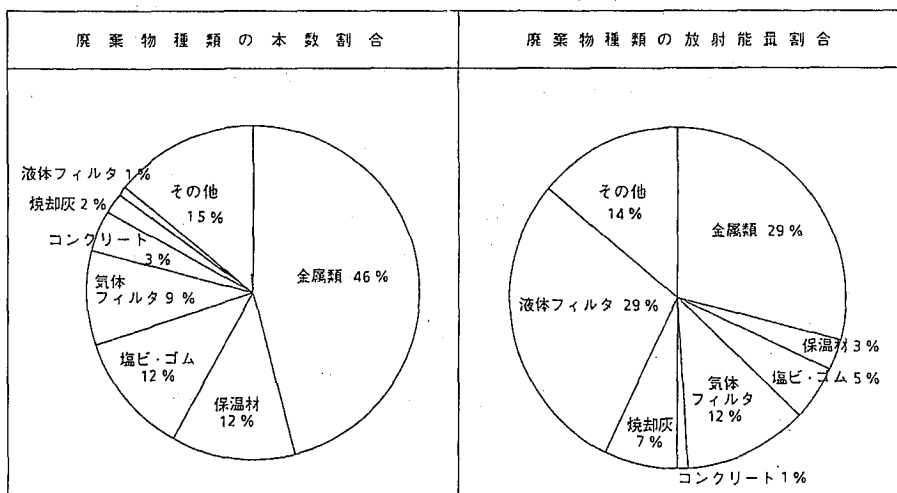


図21 雑固体廃棄物の種類ごとの発生割合

濃縮等のプラントでの運転条件を考慮すると、発生系統としては核種の生成源となる原子炉系、蒸発操作により揮発性核種と不揮発性核種とで組成が変化する恐れのあるタービン系（BWR のみ）、収集された廃液の濃縮操作が実施されるラドウエスト系および建屋排気を扱う建屋換気系の 4 分類に大別される。

また、雑固体廃棄物の汚染形態として、配管、

機器など常時系統流体と接触して表面が汚染した「直接汚染物」と、定期検査時に一時的に流体と接触して表面が汚染した「間接汚染物」に分類される。

これらを先に示した廃棄物種類を加えて整理したものを表 14 に示す。

c. 雑固体廃棄物のサンプリング状況

前述した「廃棄物発生量」、「発生系統」および

表 14 雑固体廃棄物の汚染区分とサンプリング対象物

		固 体 廃 棄 物 の 汚 染 源			
		原子炉系 (炉 水)	タービン系 (主 蒸 気 復 水)	ラドウエスト系 (濃縮廃液)	建屋換気系 (排 気)
対 象 プ ラ ン ト		BWR PWR	BWR	BWR PWR	BWR PWR
汚 染 形 態	直 接 汚 染 物	配管等金属類 液体フィルタ 機器交換部品等	配管等金属類 機器交換部品等	配管等金属類 液体フィルタ 機器交換部品等	気体フィルタ
	間 接 汚 染 物	塩ビ・ゴム類 資材等金属類	塩ビ・ゴム類 資材等金属類	塩ビ・ゴム類 資材等金属類	塩ビ・ゴム類 資材等金属類

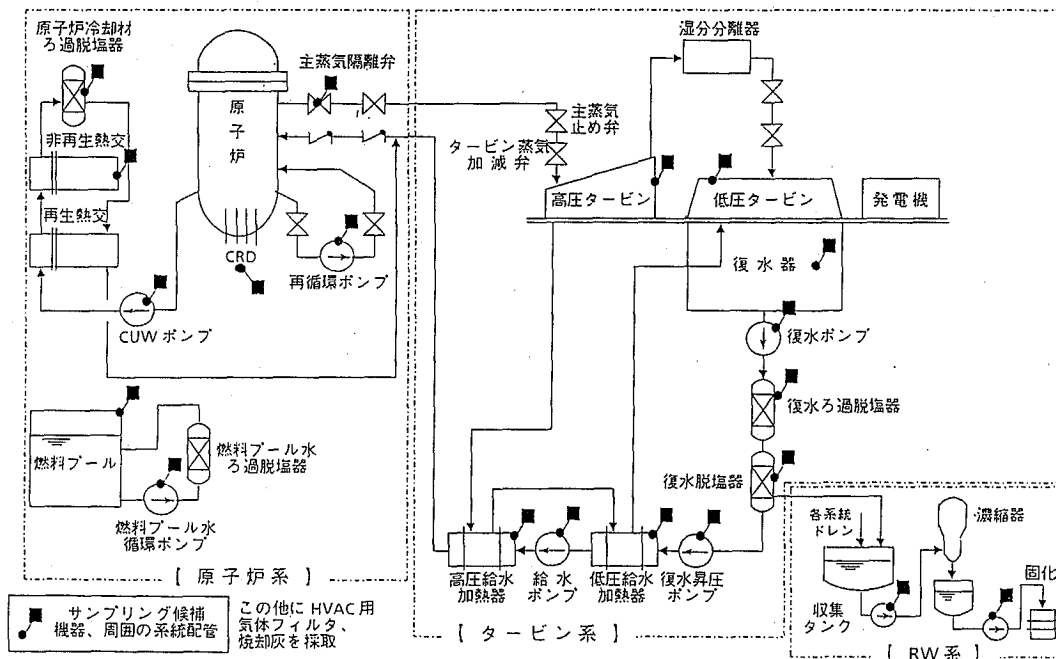


図 22 BWR 発電所におけるサンプリング候補ポイント

び「汚染形態」からなる雑固体廃棄物のサンプリング対象の考え方に基づき、実際に採取している雑固体廃棄物のサンプリングポイントについて、BWR 発電所を例に図 22 に示す。

現在、この考え方に沿って、廃棄物種類および発生系統等に関して、満遍なく試料を採取し、難測定核種の放射能濃度分析を進めており、放射能評価の検討に十分なデータを収集している。

4.3.2 放射化学分析方法

サンプリング対象として選定した雑固体廃棄物は、以下のように分類できる。

①金属類

②塩ビ・ゴム類

③保温材、コンクリート類

④気体フィルタ類（ガラス繊維）

⑤液体フィルタ

⑥焼却灰

このうち、③～⑥の放射化学分析方法は、基本的には均一・均質固化体と同一であるが、①および②（金属類および塩ビ・ゴム類；以下「金属類等」という）の放射化学分析方法は、前処理方法が均一・均質固化体と一部異なっている。これは、金属類等の放射能が表面汚染であるため、固化体内部に放射能が分散している均一・均質固化体のように廃棄物全量を溶解する必要はなく、廃棄物表面に付着している放射性物質

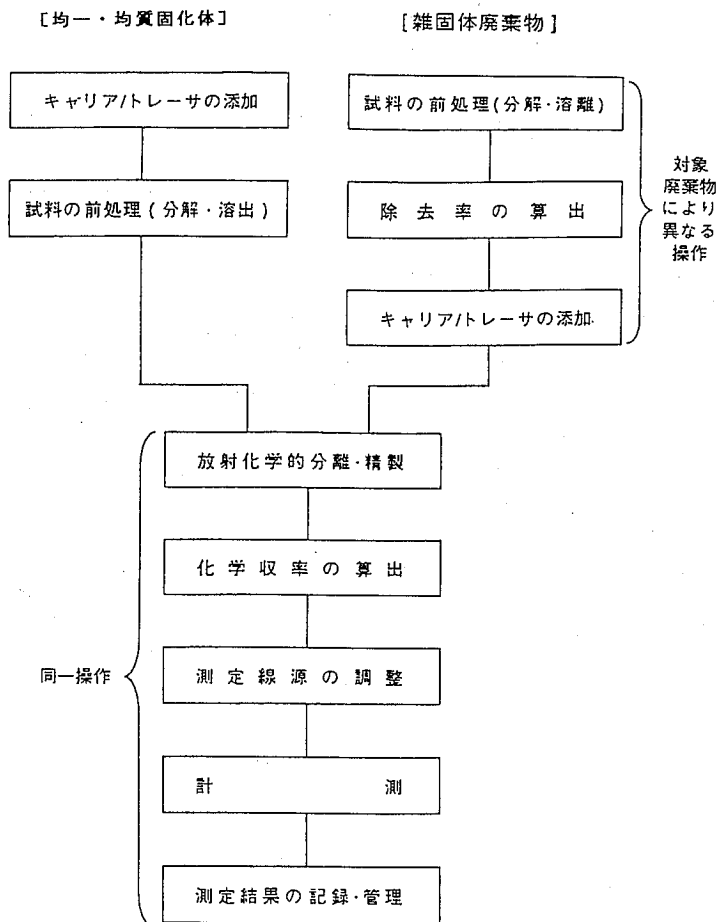


図 23 廃棄物の放射化学分析フロー

表 15 雑固体廃棄物の放射性物質除去方法の概要比較

分析核種	均一・均質固化体 (参考)	金 属 類		塩 ビ ・ ゴ ム 類	
		方式 I	方式 II	方式 I	方式 II
H - 3	燃焼分解+蒸留 または 純水浸漬+蒸留	純水浸漬+蒸留	燃焼分解+蒸留	純水浸漬+蒸留	燃焼分解+蒸留
C - 14	燃焼分解 +コールドトラップ または 湿式分解 +コールドトラップ	湿式分解 +コールドトラップ	燃焼分解 +コールドトラップ	湿式分解 +コールドトラップ	燃焼分解 +コールドトラップ
Co-60 Ni-63 Sr-90 Nb-94 Cs-137 全 α	酸分解 (混酸)	酸浸漬+超音波処理 不溶物は酸分解 (直接酸分解の場合有り)	汚染部剝離 +酸分解	酸浸漬+超音波処理 不溶物は酸分解 (直接酸分解の場合有り)	汚染部切断 +酸分解
Tc-99 I-129	アルカリ溶融 (KOH, NaOH, Na ₂ CO ₃ +NaNO ₃)	亜硫酸浸漬+超音波処理 不溶物はアルカリ溶融	汚染部剝離 +アルカリ溶融 または 揮散回収	亜硫酸浸漬+超音波処理 不溶物はアルカリ溶融	汚染部切断 +アルカリ溶融 または 揮散回収

表 16 金属類等の前処理方法 (⁶⁰Co、⁶³Ni等)

	酸浸漬 + 超音波処理	剝離 + 酸分解処理
機械的除染法	超音波洗浄処理 (酸浸漬と同時)	ダイヤモンドやすり による表面の掻き取り
浸漬時間	30分	—
除染・溶解液	1N 塩酸	1N 塩酸 又は 濃硫酸
除去率の確認	超音波洗浄処理前後の 試料の γ 線計測	剝離処理前後の 試料の γ 線計測
試料量の確認	超音波洗浄した原廃棄物重量	剝離処理した原廃棄物重量

注) 放射能濃度 (Bq/g) = 測定放射能量 (Bq) ÷ 試料量 (g) × (1/ 除去率)

を除去する前処理方法を適用しているからである。金属類等と均一・均質固化体の放射化学分析フローは図 23 に示すとおりであり、前処理以降の分離精製方法および計測方法は双方とも同一である。

金属類等の表面からの放射性物質の除去方法としては、種々の機械的、化学的除染技術が適用できると考えられる。現在、金属類等に実際に適用している前処理方法は表 15 に示すとおりである。

核種別に見ると、³H および ¹⁴C の前処理方法は均一・均質固化体と同一であるが、⁶⁰Co 等については均一・均質固化体では「全量を酸分解」

していたのに対し、金属類等では「酸浸漬+超音波処理」または「汚染表面 (部分) の剝離/切断+酸分解処理」を適用している。

具体的な前処理方法の内容は、表 16 に示すとおりであり、表面の汚染放射能の除去方法として、化学的に除染するか、機械的に除染するかの違いである。いずれの方法を適用した場合も、分析対象とした試料の処理前後に γ 線計測を行い除去率を確認することで、雑固体廃棄物の放射能濃度を適切に把握することが可能である。

表 17 放射能濃度の決定方法

決 定 方 法	決 定 方 法 の 概 要
廃 棄 体 分 析 法	個々の廃棄体から試料を採取して、これを放射化学分析し、当該廃棄体の放射能濃度を決定する方法
原 廃 棄 物 分 析 法	固化処理直近プロセス廃棄物から試料を採取してこれを放射化学分析し、当該バッチの廃棄体の放射能濃度を決定する方法
非 破 壊 外 部 測 定 法	個々の廃棄体について外部から非破壊測定し、当該廃棄体の放射能濃度を決定する方法
スケーリングファクタ法	代表サンプルの放射化学分析から得られる難測定核種と Key 核種の相関関係と個々の廃棄体外部からの非破壊測定結果を組み合わせて廃棄体の放射能濃度を決定する方法
平均放射能濃度法	代表サンプルの放射化学分析から廃棄体の平均放射能濃度を決定する方法
理 論 計 算 法	原子炉燃焼計算等により理論的に廃棄体の放射能濃度を決定する方法

代 表 サ ン プ ル：母集団を適切に代表している廃棄体から採取した試料

難 測 定 核 種：廃棄体外部から非破壊測定困難な放射性物質

K e y 核 種：廃棄体外部から非破壊測定可能な γ 線を放出し、難測定核種と相関関係を有する放射性物質

4.4 放射能の推定評価方法（SF 法の適用性）

原子力発電所から発生し、すでに埋設が開始されている均一・均質固化体の、六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターの廃棄物事業許可申請書に記載されている放射性物質の放射能濃度および放射エネルギーの決定方法については、平成 4 年 4 月原子力安全委員会において了承された「廃棄体中の放射性物質濃度の具体的決定手順について」の中であげられている表 17 に示した 6 種類の決定方法がある。

実際に均一・均質固化体には、「非破壊外部測定法」、「SF 法」、「平均放射能濃度法」および「理論計算法」の 4 種類の決定方法を核種の特性に応じて適用している。

雑固体廃棄物の放射能の評価方法としては、表 17 に示した 6 種類の中で雑固体廃棄物に適した方法を摘出し、具体的な評価方法として検討を進める必要がある。

ここで、雑固体廃棄物の放射能濃度の不均一

性を考慮すると、基本的には「非破壊外部測定法」により定量可能な ^{60}Co 等の key 核種の濃度を測定したうえで、汚染の程度によらず key 核種との組成比率が一定とみなせる区分ごとで評価する「SF 法」を適用することが最も合理的な方法と考えられる。

実際に雑固体廃棄物をサンプリング・分析し、炉型式別に評価を行った例を、図 24 に示す。選択した key 核種との良い相関関係が認められ、雑固体廃棄物においても均一・均質固化体と同様に「SF 法」の適用性が高いことを示している。

4.5 非破壊放射能測定装置の適用性

廃棄体の外部から ^{60}Co および ^{137}Cs 等の γ 線を計測し、その放射エネルギーを定量する放射能測定装置は、均一・均質固化体についてはすでに原子力発電所において実運用されており、雑固体廃棄物に対しても所定の測定精度が得られる

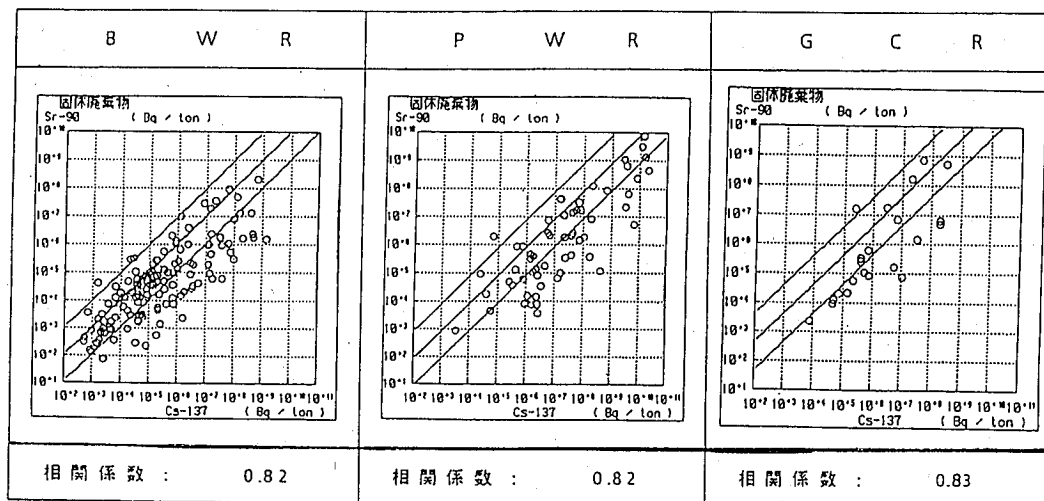


図 24 難測定核種/key 核種の分布傾向

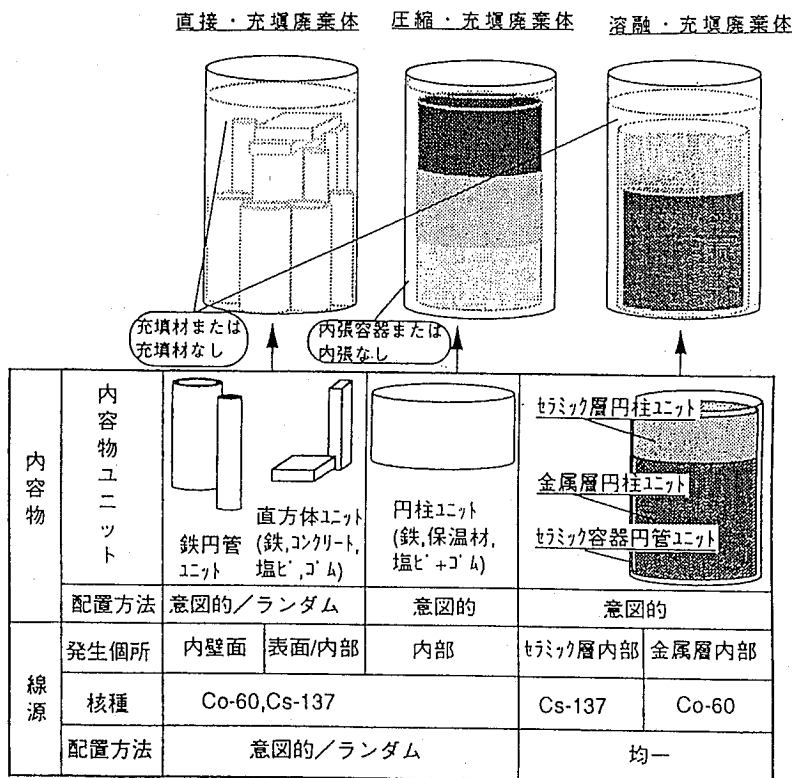
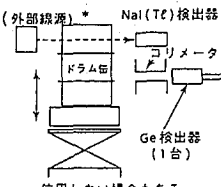
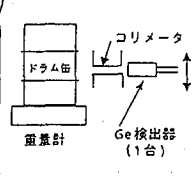
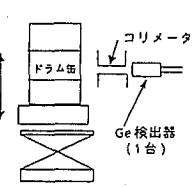
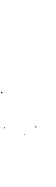
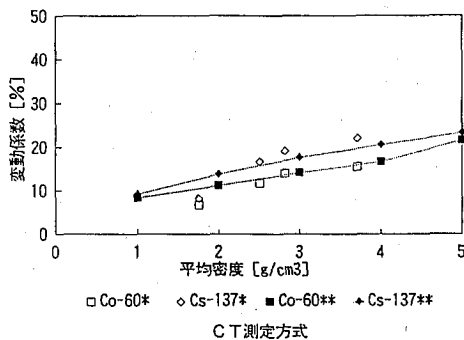


図 25 各廃棄体の概要

表 18 非破壊放射能測定装置の概要

測定方式	CT測定方式	グロス γ 測定方式	コリメータ測定方式	スペクトル補正方式
装置構成	 (外部線源)* NaI(Tl)検出器 ドラム缶 コリメータ Ge検出器 (1台) *: 使用しない場合もある	 プラスチックシンチレータ ドラム缶 重量計 コリメータ Ge検出器 (1台)	 ドラム缶 コリメータ Ge検出器 (1台)	 ドラム缶 コリメータ Ge検出器 (1台)
測定原理	NaI検出器の測定情報から得られる小ブロック毎の放射能分布と密度情報から、Ge半導体検出器による γ 線スペクトロメトリの結果を補正し、各核種の放射能量を算出する。	プラスチックシンチレータ検出器によるグロス γ 線計数率と、Ge半導体検出器による γ 線スペクトロメトリの結果から、各核種の検出効率を考慮し、各々の放射能量を算出する。	Ge半導体検出器のコリメータを介して得られるピーク/ピーク比より、減衰効果を求め、 γ 線スペクトロメトリの結果から各核種の放射能量を算出する。	Ge半導体検出器のスペクトル情報から得られるコンプトン/ピーク比より、減衰補正係数を求め、 γ 線スペクトロメトリの結果と上記補正係数から、各核種の放射能量を算出する。
減衰補正情報	放射能分布 密度情報 (密度分布、平均密度等)	平均密度	ダブルピーク比による減衰効果	散乱線 (コンプトン/ピーク比)
放射能定量情報	γ 線ピーク計数率	グロス γ 線計数率及び γ 線ピーク計数率	γ 線ピーク計数率	
特徴	小ブロック毎の放射能分布を求めることによる減衰補正	- 散乱線を利用した減衰補正 - 広範囲なダイナミックレンジ	コリメータを介したダブルピーク比の減衰補正	散乱線を利用した減衰補正



*: 直接・充填廃棄体 (線源10個)
 **: 均一・均質固化体

図 26 放射能測定装置の測定精度 (例)

よう、種々の工夫がなされている。本節では、放射能測定装置の雑固体廃棄物への適用性について示す。

放射能測定装置の観点からは、雑固体廃棄物

は以下の3タイプの廃棄体に分類される。各廃棄体の概略は、図25に示すとおりである。

- ①直接・充填廃棄体
- ②圧縮・充填廃棄体
- ③溶融・充填廃棄体

これらの廃棄体の放射能濃度を測定するに当たり、測定精度等が変動する主要因は、以下のとおりである。

- ①線源位置がランダムであること
- ②内容物の位置がランダムであること
- ③廃棄物の材質 (密度)、大きさ (重量、遮蔽厚さ) が変化すること

これらの変動要因に対応するために、現在、以下の4種類の放射能測定方式が実用段階にある。各測定方式の概要は表18に示すとおりである。

- ①CT測定方式
- ②グロス γ 測定方式

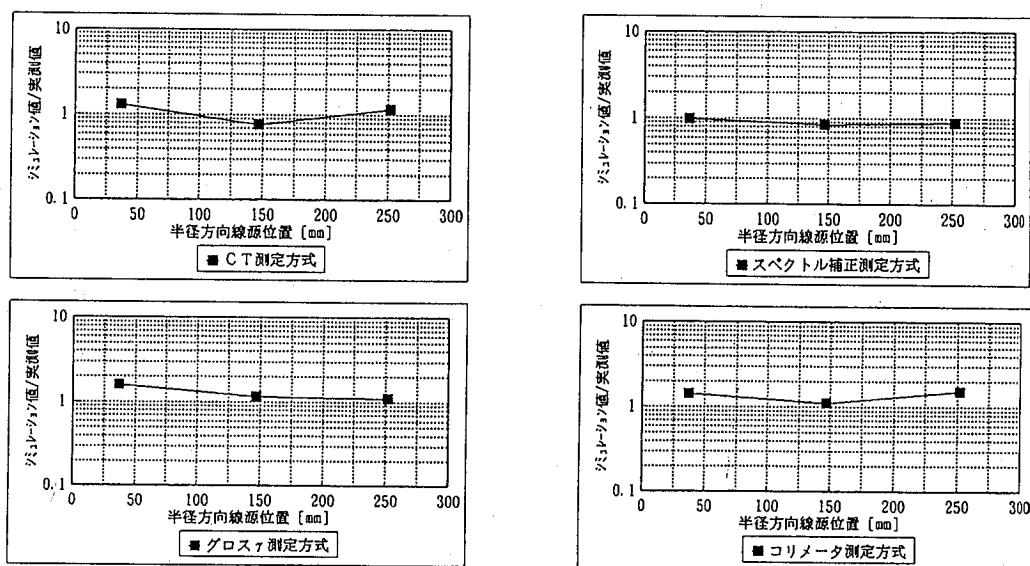


図 27 シミュレーション値/模擬廃棄体試験値の比較
(直接・充填廃棄体 [500kg 収納]; ^{60}Co)

③コリメータ測定方式

④スペクトル補正測定方式

上記 4 方式の雑固体廃棄物への適用性については、廃棄体の放射能分布および密度分布による誤差（マトリックス誤差）を、計算機によるシミュレーションにより評価した。その結果、図 26 に示すとおり、線源 10 個（廃棄体の実態調査結果から平均的と考えられている線源数）の場合には十分な測定精度が得られている。

さらに、シミュレーションの妥当性の確認を模擬廃棄体試験により実施した。その結果、図 27 に示すとおり、シミュレーションと模擬廃棄体試験の結果は実運用上問題ない程度によく一致しており、シミュレーション結果は妥当であると考えられた。

以上より、雑固体廃棄物に対する放射能測定装置の適用性については、見通しが得られたと考える。

4.6 まとめ

雑固体廃棄物の放射能評価について、総放射能の推定方法として、廃棄物の表面線量から推定する方法を示した。また、搬出時の廃棄確認

への対応としては、廃棄体の一体一体の放射能の定量方法として、SF 法を例にあげ、SF の設定に必要なサンプリング対象物の選定方法および放射化学分析方法の概要を示した。

また、SF 法を適用する際に必要な key 核種の定量については、非破壊放射能測定装置の雑固体廃棄物への適用の見通しが得られている。

5. 参考文献

- [1] コンクリート標準示方書 施工編：(社)土木学会 (1993)。
- [2] 日本原燃株式会社パンフレット：六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センター—その概要と安全性について—、日本原燃株式会社 (1995)。