

廃棄体放射能濃度測定技術に関する調査 報告書

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2000年3月

ニュークリア・デベロップメント株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

廃棄体放射能濃度測定技術に関する調査報告書
(契約業務報告書)

浦山勝己
遠藤保美
木野健一郎
大家暁雄

要 旨

原子力施設の運転に伴って発生する放射性廃棄物の処理・処分あるいは再利用の検討が進む中で、放射性廃棄物中の低い放射能濃度を測定する技術が重要になってきている。本報告は放射性廃棄物中の放射能濃度の測定技術の現状について概括的に調査し、整理したものである。

国内外の処分廃棄体の濃度基準や無拘束再利用の基準を調査することにより、廃棄物中の放射能濃度の測定目標範囲を把握した。放射能濃度の測定技術については、放射化学分析法と非破壊測定法に分けて実施中あるいは開発中の手法を調査し、各手法の特徴を明らかにした。調査した放射能濃度測定技術を各種の廃棄体に適用する場合の測定の可能性および課題について検討した。

本報告書は、ニュークリア・デベロップメント株式会社が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究成果に関するものである。

契約番号：11C2745

機構担当部課室：東海事業所 環境保全・研究開発センター 環境保全部 技術開発グループ

Study on Present Status of Measurement Technologies for Low-level Radioactivity Concentration in Waste

Katsumi Urayama*, Yasumi Endo*,
Kenichiro Kino*, Akio Ohya*

Abstract

The measurement technologies for low-level radioactivity in the wastes generated from nuclear facilities operation become more important recently for the purpose of processing and disposal of the wastes or reuse of them. This report presents the status art of the measurement technologies.

By studying the domestic and foreign criteria for disposal of the wastes and for unrestricted reuse of them, required range of radioactivity for the measurement was evaluated. The study covers a lot of measurement technologies in practical use or under development, classifying as radiochemical analysis and non-destructive measuring, and clarifies their performance. The study also discusses applicability and issues in the use of the measurement technologies for specific type of the waste.

This work was performed by Nuclear Development Corp. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : 11C2745

Waste Technology Development Group, Waste Management Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

* : Omiya Research & Development Department, Nuclear Development Corporation

目 次

1. 緒言	1
2. 放射性廃棄物の区分の現状と国際動向の整理	2
2. 1 日本 の 状 況	2
2. 2 国 外 の 状 況	3
3. 廃棄体確認技術の調査	1 4
3. 1 破壊分析技術	1 4
3. 2 非破壊測定	2 6
3. 3 有害物質の測定	4 0
4. 放射性核種の濃度測定における検討	4 6
4. 1 適用できる測定技術	4 6
4. 2 適用例	4 7
4. 3 技術的課題	4 7
4. 4 各廃棄物への測定技術の適用性検討	4 9
5. クリアランスレベル検認方法の検討	5 7
5. 1 破壊分析による検認方法	5 7
5. 2 非破壊測定手法による検認方法	5 8
謝 辞	6 1
参 考 文 献	6 2
添 付 資 料	6 3

1. 緒言

核燃料サイクル開発機構殿（以下「サイクル機構殿」と記します。）における低レベル放射性廃棄体に含まれる放射性核種の濃度測定は、廃棄物の管理、処理、処分上必要であり、各種廃棄体に対する適用性がある技術について調査検討し、それらの開発課題を明確にしておくことが、今後の計画の上でも重要である。

そこで、廃棄物の区分の現状等について、原子力施設から発生する放射性廃棄物及び TRU 廃棄物の処理・処分における関連規準と、廃棄物の分類、区分、クリアランスレベル設定における国内外の動向と、それらの中で、破壊分析、非破壊検査している放射性核種の濃度測定技術及び測定方法や国内外の関連研究分野の技術について調査する。また、サイクル機構殿における低レベル放射性廃棄物（ウラン廃棄物、TRU 廃棄物等）の放射性核種の濃度を確認するために適用できる技術として、処理技術（除染、圧縮、混練固化、溶融処理）に着目し、処理に適用する測定装置と放射性核種濃度と測定するタイミング等について検討・評価するとともに、評価した方法を適用するために必要な技術的課題を抽出・整理した。

2. 放射性廃棄物の区分の現状と国際動向の整理

廃棄物中の放射能濃度の測定技術を調査するに際して、放射能濃度の目標測定範囲を把握するために、国内外における廃棄物の区分および放射能濃度基準の現状について調査した。国外については米国、英国、フランス、ドイツを対象として、調査の結果を国別に整理した。

2. 1 日本の状況

日本国内における廃棄物の分類、区分、放射能濃度基準についての調査結果を整理して表 2-1 に示す。

(1) 放射性廃棄物の分類と区分

一般に放射性廃棄物はその取扱の面から放射能濃度レベルにより分類される。放射能濃度のレベルは国際的に共通しているわけではないが、廃棄物処理専門部会の報告によれば便宜上表 2-2 のように考えられている。¹⁾さらに、放射性廃棄物は廃棄物の処分方式の観点から、より具体的に区分される。

日本では、放射性廃棄物の発生元、放射能濃度レベルを総合的に考慮して、高レベル廃棄物と低レベル廃棄物に大別し、低レベル廃棄物はさらに発生元別に発電所廃棄物、TRU 廃棄物、ウラン廃棄物、RI・研究所廃棄物に分類されている。これらの廃棄物はそれぞれ処分方式に関連して区分される。²⁾日本では中レベル廃棄物を特に分類していないが、実際には低レベル廃棄物の中には浅地層処分には適合しない比較的放射能濃度の高い廃棄物が存在し、これに該当するものと考えられる。

(2) 放射能濃度基準

現状は発電所廃棄物の処分の対応が急がれることから、低レベル発電所廃棄物の区分に係わる放射能濃度基準の法制化が先行し、放射能濃度上限値以下（表 2-3 参照）の範囲で浅地層処分が実施されている。それ以外の低レベル廃棄物の区分に係わる放射能濃度基準も検討中であるが、発電所廃棄物の基準に準じることになる。^{3) 4) 5)}日本の場合は廃棄物の発生元が廃棄物分類の指標として付いてまわるので、発生元を明確にしておくことが重要である。

低レベル廃棄物の濃度上限値は浅地層処分可能な範囲を決める重要な基準であるが、日本の場合は米国より上限値が低く、欧州より高い傾向にある。また、日本では α 核種濃度の上限値は 1GBq/t のレベルで検討されているが、国外ではほぼ 4GBq/t で一致している。

(3) クリアランスレベル

日本では最近発電所の解体に関連して放射性廃棄物としないクリアランスレベルが検討されており、原子力安全委員会から放射能濃度基準の試案（表2-4参照）が提示されている。⁶⁾ 国外ではすでに運用している国が多いが、今後再利用が進むと国際流通に乗る可能性があるため、国際的な基準が必要となる。IAEAの提示している基準案（表2-5参照）はこれからの協議の基本になるものと考えられる。⁶⁾

2.2 国外の状況

米国、英国、フランス、ドイツにおける廃棄物の分類、区分、放射能濃度基準についての調査結果を国別に整理して表2-6～9に示す。

(1) 放射性廃棄物の種類と区分

欧州では、発生元にかかわらず高レベル、中レベル、低レベル廃棄物に分類している。⁷⁾ 一方、米国では、国の管理下に置く使用済燃料および再処理に伴う高レベル廃棄物を核廃棄物、民間施設から発生する低レベル廃棄物、主に軍事施設から発生する TRU 廃棄物とに分類している。⁸⁾

廃棄物の区分については各国とも低レベル廃棄物の範囲について明確にしているが、それ以外は検討中である。米国では廃棄物中の長寿命核種濃度と短寿命核種濃度の組合せ（表2-10参照）で、英国では α 核種濃度と β 核種濃度で、フランスでは半減期と α 核種濃度に着目して区分している。^{7) 9)} ドイツでは浅地層処分は採用せず、深地層処分を基本路線としているため発熱量にもとづいて区分している。^{7) 9)}

(2) 放射能濃度基準

低レベル廃棄物の区分に関連して、米国、英国では日本と同じように国としての α 核種および β/γ 核種の放射能濃度上限値（表2-10参照）を定めている。^{7) 9) 10)} フランスでは α 核種の放射能濃度上限値を定めているが、 β/γ 核種については施設の性状を考慮して個別に判定する方向にある。^{7) 11) 12) 13)} ドイツでは基本的要件は定めているが、濃度上限値は個別に判断する方向にある。ただし、発熱/非発熱の判断基準については岩塩床に定置したときの温度上昇値を定めている。^{7) 9)}

(3) クリアランスレベル

英国、ドイツでは従来から廃棄物の再利用が実施されており、放射能濃度基準も明確になっている。⁶⁾米国では発電所の解体例も多く、解体時の施設の開放基準が準用されている。⁶⁾フランスではクリアランスレベルの放射能濃度基準はなく、発生する区域のゾーニングにより非放射性廃棄物扱いとしている。⁶⁾

クリアランスレベルの廃棄物の再利用が進んできている現状では、国際間の取り決めも必要な時期にきていると考えられる。

表 2-1 放射性廃棄物の区分の現状と国際動向（日本）

国別	廃棄物種類		発生源	廃棄物区分	放射能濃度基準	廃棄体形態	処分方策	
日本	高レベル放射性廃棄物		再処理施設			ガラス固化体	約 30 年間に中間貯蔵後 深地層処分(検討中) ・幌延地下研究施設(計画)	
	低レベル放射性 廃棄物	TRU 廃棄物	再処理施設 MOX 燃料加工施設	α 核種濃度が目安値より高いもの	α 核種濃度 > 1 GBq / t (検討中)			
				α 核種濃度が目安値より低いもの	α 核種濃度 < 1 GBq / t (検討中)	発電所廃棄物に準ずる(検討中)	発電所廃棄物に準ずる(検討中)	
		発電所廃棄物	原子力発電所の運 転及び解体	放射性核種濃度の比較的高いもの	核種濃度 > 政令濃度上限値(1)			
				放射性核種濃度の比較的低いもの	核種濃度 < 政令濃度上限値(1) (原子炉等規制法施行令第13の9) (表2-3参照)	200L ドラム充填均質固化体 (セメント、アスファルト、プラスチック) 200L ドラム不均質セメント充填固化体 (計画)	コンクリートピットセメント充填方式 浅地層処分(300 年間管理監視) ・六ヶ所埋設センター(実施中) 4 万 m ³ (最終 約 60 万 m ³) 深さ 8 m	
				放射性核種濃度が極めて低いもの	核種濃度 < 政令濃度上限値(2) (原子炉等規制法施行令第13の9) (表2-3参照) (固形化しない金属などは検討中)	容器に固形化しないコンクリート	素堀トレンチ埋設(50 年間管理監視) ・原研埋設実地試験施設(実施中) 250 万 m ² 深さ 3.5 m	
		ウラン廃棄物	ウラン転換施設 ウラン成型加工施設 ウラン濃縮施設	ウラン濃度が比較的高いもの	TRU 廃棄物に準ずる(検討中)	TRU 廃棄物に準ずる(検討中)	TRU 廃棄物に準ずる(検討中)	
				ウラン濃度が比較的低いもの	TRU 廃棄物に準ずる(検討中)	TRU 廃棄物に準ずる(検討中)	TRU 廃棄物に準ずる(検討中)	
		RI・研究所廃棄物	試験研究炉を設置、 核燃料物質を使用 している研究所等 放射性同位元素等 の使用施設等	発電所廃棄物に準ずる(検討中)	発電所廃棄物に準ずる(検討中)	発電所廃棄物に準ずる(検討中)	発電所廃棄物に準ずる(検討中)	
	クリアランスレベル	発電所廃棄物		放射性廃棄物として取扱う必要のないもの	原子力安全委員会提示案(検討中) (表2-4参照)			
		ウラン廃棄物		天然レベル以下のもの	土壌中ウラン濃度(約 1.8ppm) (検討中)			

表 2-2 放射性廃棄物の放射能レベル区分

「放射性廃棄物の放射能レベルについては国際的な基準がなく、かつすべてに当てはまる妥当な区分を考えることは不可能である。ここでは便宜上次表に示すレベル区分をとることにした。」

(原子力委員会廃棄物処理専門部会 (1964))

固体状 ($\mu\text{Ci} / \text{ml}$)		液体状 ($\mu\text{Ci} / \text{ml}$)		気体状 ($\mu\text{Ci} / \text{ml}$)	
高レベル	$> 10^3$	極高レベル	$> 10^5$	高レベル	$> 10^{-3}$
中レベル	$10^3 \sim 1$	高レベル	$10^5 \sim 10^3$	中レベル	$10^{-3} \sim 10^{-6}$
低レベル	$1 \sim 10^{-3}$	中レベル	$10^3 \sim 10^{-3}$	低レベル	$10^{-6} \sim 10^{-9}$
極低レベル	$< 10^{-3}$	低レベル	$10^{-3} \sim 10^{-6}$	極低レベル	$> 10^{-9}$
		極低レベル	$< 10^{-6}$		

表 2-3 低レベル廃棄物埋設処分の濃度上限値

(原子炉等規制法施行令 第13条の9)

政令濃度上限値 (1)		政令濃度上限値 (2)	
固型化廃棄体		非固型化コンクリート	
核種	濃度上限値 (Bq / t)	核種	濃度上限値 (Bq / t)
C-14	3.7×10^{10}	H-3	3.0×10^9
Ca-41 *	3.1×10^9	C-14	1.1×10^8
Co-60	1.11×10^{13}	Ca-41 *	1.5×10^8
Ni-63	1.11×10^{12}	Co-60	8.1×10^9
Sr-90	7.4×10^{10}	Ni-63	7.2×10^9
Cs-137	1.11×10^{12}	Sr-90	4.7×10^6
α 核種	1.11×10^9	Cs-137	1.0×10^8
		Eu-152 *	3.6×10^8
		α 核種	1.7×10^7

* 原子炉内の中性子線の作用により放射化の汚染があったコンクリート廃棄物の場合に適用

表 2-4 主な原子炉施設におけるクリアランスレベル

(原子力安全委員会放射性廃棄物安全基準専門部会)

放射性核種 * 1	算出基準値 * 2 (Bq / g)
H-3	200
C-14	5
Cl-36	2
Ca-41	80
Mn-54	1
Fe-55 * 3	3000 * 3
Co-60	0.4
Ni-59	600
Ni-63	2000
Zn-65	1
Sr-90	1
Nb-94	0.2
Tc-99	0.3
I-129	0.7
Cs-134	0.5
Cs-137	1
Eu-152	0.4
Eu-154	0.4
Pu-239	0.2
Am-241	0.2

* 1 代表的な放射性核種 (20 核種) についての算出結果

* 2 少なくとも 10 トン程度の固体状物質ごとに平均化された濃度であるとして算出

* 3 単位は Bq / cm²

表 2-5 IAEA クリアランスレベル

(TECDOC-855)

放射性物質濃度の 範囲 (Bq / g)	放射性核種 *			放射性物質濃度の 単一代表値 (Bq / g)
≥ 0.1	Na-22 Na-24 Mn-54 Co-60 Zn-65 Nb-94 Ag-110m Sb-124	Cs-134 Cs-137 Eu-152 Pb-210 Ra-226 Ra-228 Th-228 Th-230 Th-232	U-234 U-235 U-238 Np-237 Pu-239 Pu-240 Am-241 Cm-244	0.3
< 1.0	≥ 1.0	Co-58 Fe-59 Sr-90 Ru-106	In-111 I-131 Ir-192 Au-198 Po-210	3
< 10	≥ 10	Cr-51 Co-57 Tc-99m I-123 I-125	I-129 Ce-144 Tl-201 Pu-241	30
< 100	≥ 100	C-14 P-32 Cl-36 Fe-55	Sr-89 Y-90 Tc-99 Cd-109	300
< 1000	≥ 1000	H-3 S-35 Ca-41	Ni-63 Pm-147	3000
< 10000				

* Rn-220, 222 は、この分類では考慮されていない。

表 2-6 放射性廃棄物の区分の現状と国際動向 (米国)

国別	廃棄物種類		発生源	廃棄物区分	放射能濃度基準	廃棄体形態	処分方策
米国	核廃棄物	使用済み燃料	原子力発電所			使用済燃料	深地層処分(岩塩層坑道)(準備中)
		高レベル廃棄物	軍事施設 再処理施設(貯蔵)			ガラス固化体	・ユッカマウンテン処分場 深さ 350m
	低レベル放射性 廃棄物	中・低レベル廃棄物	原子力発電所の 運転及び解体 ウラン濃縮施設 放射性同位元素の 製造 医療措置、核医学、 研究	クラス D	クラス C 上限値(1)を超える		・深地層処分(検討中)
		低レベル廃棄物		クラス C	長寿命核種濃度<上限値(1) 短寿命核種濃度<上限値(2-3) (10CFR61)(表2-10参照)	200L ドラム詰固化体(セメント、アスファルト)、金属箱入り雑固体 高健全性容器(HIC)	素堀トレンチ浅地層処分 ・バーンウェル処分場(実施中) 140 万 m ³ 深さ 20 ft
				クラス B	短寿命核種濃度<上限値(2-2) (10CFR61)(表2-10参照)	200L ドラム詰固化体(セメント、アスファルト)、金属箱入り雑固体 高健全性容器(HIC)	・リッチランド処分場(実施中) 87 万 m ³ 深さ 13.5m
				クラス A	長寿命核種濃度<上限値(1)×0.1 短寿命核種濃度<上限値(2-1) (10CFR61)(表2-10参照)	200L ドラム詰固化体(セメント、アスファルト)、金属箱入り雑固体	・ビイティ処分場(実施中) 25 万 m ³ 深さ 8m 改良型浅地層処分(検討中)
	TRU 廃棄物	TRU 廃棄物	軍事施設	放射能濃度の高いもの	α 核種濃度 > 100nCi/g (3.7GBq/t)		深地層坑道処分(試験中) ・WIPP(試験中) 150 万 m ³ 深さ 660m
		低レベル廃棄物		クラス C	α 核種濃度 < 100nCi/g	低レベル廃棄物に準じる	低レベル廃棄物に準じる
				クラス A	α 核種濃度 < 10nCi/g(0.37GBq/t)	低レベル廃棄物に準じる	低レベル廃棄物に準じる
	クリアランスレベル			クリアランスレベル以下	β γ 核種汚染密度 < 5000dpm / 100cm ² (Regulatory Guide 1.86) (敷地開放基準準用)		実施例 ・シッピングポート ・ショーハム ・フォートセントブレイン ・パスファインダー

表 2-7 放射性廃棄物の区分の現状と国際動向 (英国)

国別	廃棄物種類	発生源	廃棄物区分	放射能濃度基準	廃棄体形態	処分方策
英国	高レベル廃棄物 (HLW)	再処理施設 使用済み燃料	放射能に起因する温度上昇の著しいもの		ガラス固化体	50年間地上保管 深地層処分(検討中)
	中レベル廃棄物 (ILW)	再処理施設 原子力発電所の 運転及び解体	核種濃度が低レベル廃棄物より高く 高レベル廃棄物より低いもの 短寿命/長寿命の分類(検討中)	LLW の基準を超える		深地層処分(検討中)
	低レベル廃棄物 (LLW)	原子力発電所の 運転及び解体 核燃料サイクル施設 医療機関 研究機関 肥料、油田		α 核種濃度<4 GBq/t β γ 核種濃度<12GBq/t (Radioactive Substances Act 1960)	200L モルタル充填ドラム ISO 規格コンテナ(400Lモルタル充填 ドラム充填)	素掘トレンチ方式浅地層処分 コンクリートボルト方式浅地層処分 ・ドリッグ処分場(実施中) 200万 m ³ 深さ 8m 深地層坑道処分 セラフィールド(再検討中)
	極低レベル廃棄物 (VLLW)		処分場への処分不要,生活廃棄物として処分可	β γ 核種<400KBq (0.1 m ³ 以下) または 40 KBq/個 (Radioactive Substances Act 1960)		一般廃棄物並埋設処分(再検討中)
	クリアランスレベル		規制除外(固体廃棄物)	核種濃度<0.4 Bq/g (天然放射性核種は核種毎) (Radioactive Substances Exemption Order 1986)		実施中

表 2-8 放射性廃棄物の区分の現状と国際動向 (フランス)

国別	廃棄物種類	発生源	廃棄物区分	放射能濃度基準	廃棄体形態	処分方策
フランス	高レベル廃棄物	再処理施設	カテゴリーC		ガラス固化体	50年間貯蔵後 深地層処分(検討中) ・地下研究所(3地点候補)(計画中)
	中レベル廃棄物	原子力発電所の 運転及び解体 再処理施設 研究機関 医療機関	カテゴリーB	半減期>30年 α 核種濃度>3.7GBq/t	コンクリートコンテナ詰固化体 角型金属容器入固体 400Lドラム詰圧縮雑固体	コンクリートチェムリ/モノリス方式 浅地層処分(300年管理監視) ・ラマンシュ貯蔵センター(実施中) 48.5万m ³ 深さ5m ・オーブ処分場(実施中) 100万m ³ 深さ5m
	低レベル廃棄物		カテゴリーA	半減期≤30年 α 核種濃度≤3.7GBq/t/廃棄体 α 核種濃度≤0.37GBq/t/処分場 の全廃棄体 β/γ 固化体廃棄物(実施例) Co-60≤50000 GBq/t Sr-90≤91 GBq/t Cs-137≤330 GBq/t		
	極低レベル廃棄物		放射性廃棄物としての処分が必要のないもの	放射能濃度≤100Bq/g		
	クリアランスレベル		クリアランスレベル以下	ゾーニングにより非放射性扱い		実施中

表 2-9 放射性廃棄物の区分の現状と国際動向 (ドイツ)

国別	廃棄物種類	発生源	廃棄物区分	放射能濃度基準	廃棄体形態	処分方策				
ドイツ	高レベル廃棄物(HAW)	原子力発電所 再処理施設	発熱性廃棄物	$\Delta T(\text{岩塩層}) > 3 \text{ K}$	使用済燃料 ガラス固化体 他	約 30 年間で中間貯蔵後 深地層処分(岩塩層坑道)(検討中) ・アッセ実験用処分場(閉鎖) ・ゴアレーベン処分場(計画中) 深さ 800~1300 m				
	中レベル廃棄物(MAW)	原子力発電所の運 転及び解体 核燃料サイクル施設 研究開発機関 放射性同位元素産 業 医療機関					非発熱性廃棄物	$\Delta T(\text{岩塩層}) < 3 \text{ K}$	200L ドラム(1次容器) 鋳鉄製円筒容器(液体用1次容器) コンクリート製または鋳鉄製箱型コン テナー(2次容器)	深地層処分(廃坑内)(検討中) ・コンラッド処分場(計画中) 65 万 m ³ 深さ 1100~1200 m ・モルスレーベン処分場(停止中) 35 万 m ³ 深さ 500m
	低レベル廃棄物(LAW)		原子力限定再利用	1~200 Bq/g	管理区域で使用する遮蔽材、廃棄物 容器	実施中				
	クリアランスレベル									
		無拘束再利用					核種濃度 < 0.1Bq/g 表面汚染 α 核種汚染密度 < 0.05 Bq/cm ² β γ 核種汚染密度 < 0.5 Bq/cm ²			

表 2-10 低レベル廃棄物の上限値

(1) 長寿命核種上限値

(10 CFR 61)

核種	上限値 (1) (Ci /m ³)
C-14	8
放射化金属中の C-14	80
放射化金属中の Ni-59	220
放射化金属中の Nb-94	0.2
Tc-99	3
I-129	0.08
半減期 5yr 以上の α 核種	100 *
Pu-241	3500 *
Cm-242	20000 *

* 単位は nCi / g

(2) 短寿命核種上限値

(10 CFR 61)

核種	上限値 (2-1) (Ci /m ³)	上限値 (2-2) (Ci /m ³)	上限値 (2-3) (Ci /m ³)
半減期 5yr 以下の核種の総和	700	*	*
H-3	40	*	*
Co-60	700	*	*
Ni-63	3.5	70	700
放射化金属中の Ni-63	35	700	7000
Sr-90	0.04	150	7000
Cs-137	1	44	4600

* クラス B, C の廃棄物については制限なし。ただし、外部放射線の効果、輸送・取扱・処分の際の内部発熱に対する工学的考慮を要する。表中の他の核種の濃度が、これらの核種と関係なくクラス C 廃棄物にならないときはクラス B とする。

3. 廃棄体確認技術の調査

廃棄体中の放射能濃度を確認する技術には廃棄体の一部から試料を採取し放射化学分析を行う破壊分析法と、廃棄体そのもの全体の放射線を直接的に測定する非破壊測定法がある。前者は、廃棄体の一部ではあるが採取試料の詳細な放射能情報を得ることができるのに対し、後者は廃棄体そのものの保有する全体の放射能情報を得ることができるが破壊分析法と比べ情報量は少ない。一方、破壊分析法は採取試料を分析する前に、分析対象核種に対する前処理を必要とするのに対し、非破壊測定法は廃棄体自体を容器に入れたまま測定評価できるので処理能力は高い。

これらの破壊分析法と非破壊測定法の測定技術について以下に調査する。

3. 1 破壊分析技術

廃棄体中の核種濃度を測定するためには非破壊分析（測定）が主流であり、非破壊測定の精度確認や非破壊分析では測定できない核種を評価するために破壊分析が用いられるケースが多い。

しかし、廃棄体中の放射能濃度を測定する最も確実な手法は、破壊分析法であり、LLW 処分においては、非破壊分析と核種組成による濃度評価手法（SF 法）の適用性を確認する為に、数多くの破壊分析を実施してきている。

破壊分析は分析試料中の対象核種濃度にあわせ、試料量または検出器を比較的自由に選定することが可能であり、非破壊分析に比べて広い濃度範囲の核種を分析するために有効な手段である。その為、クリアランスレベルなどの極低レベルの放射能濃度を確認する為には、破壊分析が最も有効な手段であると考えられる。

現在発電炉から発生するクリアランスレベルの放射能濃度確認においても、破壊分析データに基づいた検討をふまえた、非破壊分析の適用性の検討が進められている。

ここでは、現在までに LLW 処分関連などに適用された破壊分析法を主体とした、廃棄体中放射能濃度破壊分析技術について述べる。

3. 1. 1 ウラン及び TRU の核種分析

ウラン及び TRU 廃棄物の破壊分析技術をまとめて、表 3. 1-1 に示す。

ウラン及び TRU は、これらから放出される α 線及び対象元素を直接測定することにより、試料中の濃度を分析することが可能である。

(1) 質量分析法

今回の調査で、ウラン及び TRU 廃棄物の分析への適用性を検討した質量分析法は、ICP-MS である。質量分析装置には、誘導結合プラズマ質量分析装置（以下 ICP-MS）の他に様々な質量分析装置（GD-MS 等）があるが、何れの質量分析装置も、装置に導入可能な試料量が少なく、測定試料の均一性が確保できていない試料の分析には不向きである（スポット的に高濃度／低濃度の分析値を与える危険度が高い）と考えられることから、今回の調査から除いている。

①測定原理

ICP-MS は、高周波で誘導したアルゴンプラズマ中に試料を導入し、プラズマ中でイオン化した試料を四重極型の質量分析計に導入し、目的質量数に得られたシグナルの強度を測定する装置である。

ICP-MS の検出限界値は、バックグラウンドのシグナルに対し、目的元素を含む標準試料を導入した際に得られるシグナル強度の差により決定されることから、バックグラウンドの低い質量数 (m/z) = 200 以上の元素に対しては、非常に高感度の分析が可能である。

ICP-MS は、質量分離部に四重極を使用していることから、同一質量を持つ同重体の分別が不可能である為、分析試料の材質によってはこれらを分離するための適切な前処理が必要となる。また、イオン化源に ICP を用いていることから、測定試料の液性によっては、分析対象元素のイオン化が妨げられ、正確な定量ができなくなる。

ICP-MS による分析では、これらのマトリクスによる要因を取り除くための前処理が必要となる。

②前処理の概要

ICP-MS は、通常液体試料中の微量元素を分析することから、固体試料は酸、アルカリなどを使用して液化する必要がある。

測定試料成分に分析対象元素と同一質量数をもつ妨害元素が存在する場合は、これらとの化学的分離操作が必要となるが、U-238 を対象とした場合には、これらの分離操作は特に必要としないと考えられる（天然妨害核種が存在しない）。

また、TRU 廃棄物では、Pu-238 の存在を考慮する必要があるが、Pu-238 はその半減期が短く (2.41×10^4 年)、単位放射能当たりの質量が少ないことから、放射能レベルの低い範囲では U-238 分析の妨害になるとは考えにくい。U-238 に比べ、異常に高濃度の Pu-238 が存在する場合は放射能が高くなり、別途分離が必要になるが、通常は必要ないと考えられる。

③適用例

ICP-MSによるウラン・TRU分析は、U-238、Np-237などの長半減期核種の分析対象に限定される為、TRU・トータル α 線放出核種の評価の為には適していない。しかし、分析対象試料の履歴などから、汚染源が限定される場合（ウランによる汚染）には、他の放射線計測法に比べ、非常に高感度かつ簡便に分析が可能であることから、適用の可能性はある。

また、廃棄物ではないが、材料中に不純物として含まれるウランの定量などに適用された例がある。

④課題など

ICP-MSによる分析は、分析試料の液化が必要になる。分析試料の材質によっては容易に液化ができないものもあり、試料の前処理方法には分析対象に応じた検討を要する。

(2) α 線計測

今回の調査で、ウラン及び TRU 廃棄物の分析への適用性を検討した放射線計測法は、 α 線スペクトル分析及び全 α 線分析の2種類である。

①分析原理

放射線計測は、分析試料中に含まれる α 線放出核種から放出される α 線を測定することにより、その核種を定量するものであり、 α 線スペクトル分析ではエネルギー分別した α 線を、全 α 線分析では試料から放出される α 線の総量を計測する。

スペクトル分析には、表面障壁型の α 線スペクトルメータを使用し、全 α 線計測では 2π ガスフローカウンタを使用する。

②前処理の概要

α 線は、その飛程が短く試料と検出器の間の障害物（測定試料の材質）により容易に遮へいされてしまうことから、 α 線を測定する為には、これらを除く前処理が必要となる。

これら、 α 線の計測上妨害となる試料成分からの分離には、溶媒抽出や沈殿分離、イオン交換分離などの化学的な分離操作が必要となることから、分析試料の液化が必須である。

液化した試料は、その成分に応じて α 線放出核種を抽出する分離操作が施される。

また、 α 線スペクトル分析では、 α 核種から放出される α 線エネルギーが近接しているものに関しては、前処理により化学的に元素（核種）分離する必要がある。但し、Pu-239 及び Pu-240 等の同位体分離はできないことから、Pu-239 及び Pu-240 はこれらの放射能の合計として測定される。

③適用例

α 線計測によるウラン・TRU 核種分析は、LLW 処分時の破壊分析に多数分析実績がある。特に、セメント固化体中の TRU 分析においては、セメント材に含まれるウランと分析対象としている TRU を分離分析する為に、 α 線スペクトル分析を実施している。また、軽水炉の水質管理分析では、全 α 分析による α 核種の分析が行われている。

④課題など

放射線計測によるウラン・TRU 分析は、分析試料の液化が必要になる。分析試料の材質によっては容易に液化ができないものもあり、試料の前処理方法には分析対象に応じた検討を要する。

また、分析試料成分から目的としたウラン・TRU核種を抽出するための分離を確認する為、分析対象核種の同位体（スパイク）を使用した化学回収率の補正法などを検討する必要がある。

（3）発光分光分析法

今回の調査で検討した、誘導結合プラズマ発光分光分析（ICP-AES）によるウラン分析は、高濃度のウランを含有している試料に限定して適用性があると考えられる。ICP-MS分析の項において記した様に、単位放射能当たりの質量が大きいU-238などを検出するためには、放射線計測と元素分析の2方向からのアプローチが可能となる。ICP-AESは、ICP-MSに比べ感度の点では劣るものの、元素分析装置としての普及率は高く、汎用性の高い分析装置である。

①分析原理

誘導結合プラズマ発光分光分析装置（以下ICP-AES）は、高周波で誘導したアルゴンプラズマ中に試料を導入し、プラズマ中で励起された元素からの発光スペクトルを分光器で分別し、測定対象元素の発光強度を測定する。

ICP-AESは励起源にICPを用いていることから、測定試料の液性によっては、分析対象元素のイオン化が妨げられ、正確な定量ができなくなる。

また、試料成分により分光干渉が発生する場合は、これら妨害となる成分を分離する必要がある。

ICP-AESによる分析では、これらのマトリクスによる要因を取り除くための前処理が必要となる。

②前処理の概要

ICP-AESは、通常液体試料中の微量元素を分析することから、固体試料は酸、アルカリなどを使用して液化する必要がある。

また、試料中にウランに対して分光干渉を与えるような成分が含まれている場合は、これらを分離除去する等の化学的分離操作が必要となる。

③適用例

ICP-AESによるウラン分析は、分析対象に限定があり、廃棄物分析に適用した例はないが、対象廃棄物の使用履歴（高濃度ウランに接していた等）によっては、簡便かつ低コストで分析が可能となる手法であると考えられる。

④課題など

ICP-AES による分析は、分析試料の液化が必要になる。分析試料の材質によっては容易に液化ができないものもあり、試料の前処理方法には分析対象に応じた検討を要する。

3. 1. 2 ウラン・TRU 以外の核種分析

ウラン及び TRU 以外の廃棄物破壊分析技術をまとめて、表 3. 1-2 に示す。

ウラン及び TRU 以外の核種は、これらから放出される β 、 γ 、 X 線を測定することにより、試料中の濃度を分析することが可能である。

(1) γ 線スペクトル分析

廃棄物中に含まれる γ 線放出核種は、 γ 線スペクトル分析によりその核種濃度を定量することが可能である。 γ 線スペクトル分析は、他の放射線計測に比べ比較的容易であるが、測定対象とする核種が放出する γ 線のエネルギー、光子放出率及びその存在量によっては適切な分離操作が必要となる。

①分析原理

γ 線計測は、分析試料中に含まれる γ 線放出核種から放出される γ 線をゲルマニウム半導体検出器で測定することにより、その核種を定量するものである。

ゲルマニウム半導体検出器では、検出器に入射した γ 線の光電効果により発生した電気信号を波高分別し、入射 γ 線のエネルギー別の計数率を求めることが可能な装置である。そのため、エネルギーの異なる γ 線を同時測定することが可能である。

しかし、実際には、検出器に入射する γ 線は光電効果とコンプトン散乱を起こし、実際の γ 線のスペクトルは、光電ピーク（光電効果による電気信号）とコンプトン散乱線（光電ピークよりエネルギーの低い領域全体のベース上昇）の複合スペクトルとなる。その為、測定試料中に高エネルギーの γ 線を放出する核種が存在する場合には、その核種が放出エネルギーより低いエネルギーの γ 線計測に影響を与える（バックグラウンド上昇による検出限界値の悪化）ことがある。

したがって、分析対象試料と測定対象核種によっては適切な前処理操作が必要となる。

②前処理の概要

γ 線スペクトル分析では、ゲルマニウム半導体検出器を使用する。ゲルマニウム半導体検出器による γ 線の計測では、あらかじめ検出器の計数効率を確認する際に使用した標準線源

と体積・密度を同一にしておく必要がある。通常、ゲルマニウム半導体検出器による測定では液状の試料が多く用いられる。これは、検出器の効率を求めるための標準線源の加工が容易なためである。一方、固体状の標準線源により検出器が校正されている場合には、固体試料を直接測定することが可能である。

ゲルマニウム半導体検出器では、測定対象とする核種が放出する γ 線エネルギーに該当する領域に光電ピーク（定量ピーク）が検出されるが、同時にこれより低いエネルギー領域にコンプトン散乱によるバックグラウンド上昇が生じる。したがって、測定対象試料に複数の γ 線放出核種が存在する場合は、その検出感度は、“高エネルギー>低エネルギー”（光子放出率が同じと考えた場合）となる。以上のことから、 γ 線スペクトル分析では低エネルギーの γ 線を放出する核種を測定する場合には、目的核種を計測上の妨害となる核種から沈殿分離、イオン交換、溶媒抽出などの化学的分離する操作を実施している。

この様な、元素分離を伴う前処理操作を実施した場合は、分析試料に既知量の目的核種の安定同位体を添加し、前処理終了後にその安定同位体量を確認することによる“化学回収率補正”を実施している。

③適用例

γ 線計測による核種分析は、LLW 処分時の破壊分析に多数分析実績がある。また、環境モニタリングや、原子カプラントの水質管理分析など、多方面の放射線計測に適用されている一般的な手法である。

④課題など

γ 線スペクトル分析には、分析試料の液化が必要になる。分析試料の材質によっては容易に液化ができないものもあり、試料の前処理方法には分析対象に応じた検討を要する。また、試料中に含まれる分析対象核種以外の γ 線放出核種との分離方法も重要な検討項目の一つである。

(2) β 線核種分析

廃棄物中に含まれる β 線放出核種は、液体シンチレーションカウンタや、 2π ガスフローカウンタによりその核種濃度を定量することが可能である。

①分析原理

β 線計測は、分析試料中に含まれる β 線放出核種から放出される β 線を液体シンチレーシ

ョンカウンタや、 2π ガスフローカウンタで測定することにより、その核種を定量するものである。

液体シンチレーションカウンタは、分析試料と液体シンチレータ（対放射線発光体）を混合し、このカクテル（試料とシンチレータの混合液）中で放射線により励起されたシンチレータから発生するケイ光を測定することにより、試料中の放射エネルギーを測定する装置である。シンチレータは、 β 線はもとより、 α 線及び γ 線に対しても発光特性があり、試料中に複数種の放射性核種が含まれていた場合には、これらの分別が困難である。（一部 H-3、C-14 の同時計測等の技法もある）

その為、液体シンチレーションカウンタで β 線を測定する場合には前処理によって、分析対象とする核種を純粋に精製する必要がある。

また、ガスフローカウンタは、計数ガス（通称 PR ガス）を充填したセル内に試料（固体状が一般的）を導入し、試料から放出される放射線と、計数ガスの反応で発生する電子を電氣的に増幅して計数する計数装置である。ガスフローカウンタはエネルギー分別性能が無く、計数ガスに入射した放射線数を測定する計測装置である。したがって、液体シンチレーションカウンタ同様、ガスフローカウンタで放射線を測定する場合には、その前処理段階で、測定目的核種を放射化学的に精製しておく必要がある。

②前処理の概要

β 線測定に使用する測定器にはエネルギー分別性能を持たないものが多く、 β 線放出核種の分析では、測定対象を分離精製することが必要となる。

分析試料に含まれる分析対象核種を放射化学的に精製する為には、分析試料を液化した後、沈殿分離、溶媒抽出、イオン交換等の放射化学的分離操作を行っている。

また、多くの場合、分析試料中には目的核種と桁違いに多く存在する γ 線放出核種が、計測上の妨害となることから、これらの核種とも放射化学的な分離が必要となる。

この様な、元素分離を伴う前処理操作を実施した場合は、分析試料に既知量の目的核種の安定同位体を添加し、前処理終了後にその安定同位体量を確認することによる“化学回収率補正”を実施している。

さらに、 β 線計測では測定試料の自己吸収及び測定しようとしている β 線のエネルギーが、計数効率に大きな影響を与えることから、これらの補正も実施する必要がある。

③適用例

β 線計測による核種分析は、LLW 処分時の破壊分析に多数分析実績がある。また、環境モ

ニタリングや、原子カプラントの水質管理分析など、多方面の放射線計測に適用されている一般的な手法である。

④課題など

β 線核種分析には、分析試料の液化が必要になる。分析試料の材質によっては液化が容易にできないものもあり、試料の前処理方法には分析対象に応じた検討を要する。また、試料中に含まれる分析対象核種以外の核種との分離方法も重要な検討項目の一つである。

分析対象によっては、揮発性を持つ元素もあり、その放射化学的分離には化学的知識と熟練した技術が必要である。

(2) X線核種分析

廃棄物中に含まれる X 線放出核種は、X 線スペクトルメータよりその核種濃度を定量することが可能である。

①分析原理

X 線計測は、分析試料中に含まれる X 線放出核種から放出される X 線を Si (Li) 半導体検出器で測定することにより、その核種を定量するものである。

Si (Li) 半導体検出器は、ゲルマニウム半導体検出器同様、検出器に入射した X 線の光電効果により発生した電気信号を波高分別し、入射 X 線のエネルギー別の計数率を求めることが可能な装置である。そのため、エネルギーの異なる X 線を同時測定することが可能である。

ゲルマニウム半導体検出器と大きく異なる点は、その検出器の形状が薄く作られており、 γ 線の様な高エネルギーの電磁波に対しては極端にその応答性が劣ることである。

したがって、Si (Li) 半導体検出器を使って X 線を測定する場合には、試料中に共存する γ 線放出核種の影響を受けにくい。

②前処理の概要

X 線は 3~30keV 程度の低エネルギーの電磁波であり、これを検出するためには、専用の検出器が必要になる。X 線測定用に設計された半導体検出器では、多くの場合低エネルギー領域の感度特性が高くなっており、他の放射線計測に比べ、共存する γ 線放出核種から放出される γ 線の影響を受けにくい。

しかし、X 線はそのエネルギーが低いことから、試料形状の影響（自己吸収）を受けやすく、正確な測定を行うためには、幾何学効率を揃えた標準線源による校正と、自己吸収の少

ない試料形状とするための放射化学的前処理や自己吸収補正が必要となる。

分析対象試料から測定対象核種を放射化学的に分離回収する様な前処理操作を行った場合は、分析試料に既知量の目的核種の安定同位体を添加し、前処理終了後にその安定同位体量を確認することによる“化学回収率補正”を実施している。

③適用例

X線計測による核種分析は、LLW 処分時の破壊分析に多数分析実績(Fe-55、Ni-59 及び Ca-41 など)がある。

④課題など

X線核種分析には、分析試料の液化が必要になる。分析試料の材質によっては容易に液化ができないものもあり、試料の前処理方法には分析対象に応じた検討を要する。また、試料成分から分析対象核種を分離回収する方法も重要な検討項目の一つである。

表 3.1-1 廃棄体放射能濃度の測定技術調査結果

測定原理		質量分析法	α 線スペクトル分析	全 α 核種分析	発光分光分析
		ICP-MS	α 線スペクトロメータ	ガスフローカウンタ	ICP-AES
対象廃棄物		TRU 廃棄物/ウラン廃棄物	TRU 廃棄物/ウラン廃棄物	TRU 廃棄物/ウラン廃棄物	TRU 廃棄物/ウラン廃棄物
実施場所		放射化学分析施設全般	放射化学分析施設全般	放射化学分析施設全般	放射化学分析施設全般
測定装置の性能	検出限界	$\sim 1 \times 10^{-4}$ Bq(U-238)/g (固体試料 10g)	$\sim 1 \times 10^{-3}$ Bq(全 α)/g (固体試料 10g)	~ 0.1 Bq(TRU 核種含 U-238)/g (固体試料 10g)	\sim 数 100 Bq(U-238)/g (固体試料 10g)
	測定精度	\sim 数 %	$\sim \pm 10$ %	$\sim \pm 10$ %	\sim 数 %
	測定時間	数 min	~ 13 hr	~ 50 min	\sim 数 min
廃棄体の容器と形態		-	-	-	-
適用状況		実用中(材料中の不純物分析)	実用中(LLW の α 放射能分析)	実用中(LLW の α 放射能分析)	検討中(実績なし)
適用できる廃棄物処理技術		全般(溶解可)	全般(溶解可)	全般(溶解可)	全般(溶解可)
サンプル形態(破壊分析の場合)		液体	液体	液体	液体
前処理(破壊分析の場合)		分析試料により、酸/アルカリ溶解	分析試料により、酸/アルカリ溶解後 α 核種回収	分析試料により、酸/アルカリ溶解後 α 核種回収	分析試料により酸、アルカリ溶解
2次廃棄物(破壊分析の場合)		酸、アルカリ分析廃液	酸、アルカリ、有機溶媒等分析廃液	酸、アルカリ、有機溶媒等分析廃液	酸、アルカリ分析廃液 高濃度ウラン廃液
処理能力		3 試料/2 \sim 3 day/人 (3試料を同時に処理)	3 試料/3 \sim 4 day/人 (3試料を同時に処理)	3 試料/2 \sim 3 day/人 (3試料を同時に処理)	3 試料/2 \sim 3 day/人 (3試料を同時に処理)
保守		ICP-MS の性能維持 分析室(クリーンルーム)の清浄度管理	放射能分析装置の性能維持 分析室の清浄度管理	放射能分析装置の性能維持 分析室の清浄度管理	ICP-AES の性能維持 分析室の清浄度管理
価格		2 \sim 3 人・日/3 試料+諸経費(材料費等)	3 \sim 4 人・日/3 試料+諸経費(材料費等)	2 \sim 3 人・日/3 試料+諸経費(材料費等)	2 \sim 3 人・日/3 試料+諸経費(材料費等)
安全性		汚染拡大防止	汚染拡大防止	汚染拡大防止	汚染拡大防止
長所		高感度分析可	核種別放射能の定量可	試料の前処理が短時間	高濃度ウラン試料に対し簡便に定量可 広範囲のマトリックスに対応可
短所		短寿命核種は低感度	試料の前処理に熟練が必要 分析処理時間が長い	核種別放射能の定量不可	検出感度が低い ウラン、トリウム以外の α 核種には適用不可
今後必要な開発項目		分析技術として開発要素少ない(確立技術) 分析対象試料材質に応じた前処理法	分析技術として開発要素少ない(確立技術) 分析対象試料材質に応じた前処理法	分析技術として開発要素少ない(確立技術) 分析対象試料材質に応じた前処理法	分析対象試料材質に応じた前処理法
品質保証上の測定項目		分析装置の感度確認	α 核種の化学回収率の確認	α 核種の化学回収率の確認	

表 3.1-2 廃棄体放射能濃度の測定技術調査結果

測定原理		γ線スペクトル分析	β線核種分析		X線スペクトル分析
		ゲルマニウム半導体検出器	ガスフローカウンタ	液体シンチレーションカウンタ	SiLi半導体検出器
対象廃棄物		RI汚染/放射化廃棄物 クリアランス廃棄物	RI汚染/放射化廃棄物 クリアランス廃棄物	RI汚染/放射化廃棄物 クリアランス廃棄物	RI汚染/放射化廃棄物 クリアランス廃棄物
実施場所		放射化学分析施設全般	放射化学分析施設全般	放射化学分析施設全般	放射化学分析施設全般
測定装置の性能	検出限界	0.001~0.3 Bq(Co-60)/g (固体試料 10g)	~0.2 Bq(Sr-90)/g (固体試料 10g)	~0.4 Bq(C-14)/g (固体試料 10g)	~0.5 Bq(Ni-59)/g (固体試料 10g)
	測定精度	~数%	~数%	~数%	~数%
	測定時間	数 1000 sec	数 1000 sec	数 1000 sec	数 10000 sec
廃棄体の容器と形態		-	-	-	-
適用状況		実用中(LLWのγ線放出核種分析)	実用中(LLWのβ線放出核種分析)	実用中(LLWのβ線放出核種分析)	実用中(LLWのX線放出核種分析)
適用できる廃棄物処理技術		全般(溶解可)	全般(溶解可)	全般(溶解可)	全般(溶解可)
サンプル形態(破壊分析の場合)		液体	液体	液体	液体
前処理(破壊分析の場合)		分析試料により、酸/アルカリ溶解後に目的核種を分離回収	分析試料により、酸/アルカリ溶解後に目的核種を分離回収	分析試料により、燃焼・蒸留などにより目的核種を分離回収	分析試料により、酸/アルカリ溶解後に目的核種を分離回収
2次廃棄物(破壊分析の場合)		酸、アルカリ、有機溶媒等分析廃液	酸、アルカリ、有機溶媒等分析廃液	酸、アルカリ、有機溶媒等分析廃液	酸、アルカリ、有機溶媒等分析廃液
処理能力		3試料/3~4 day/人 (3試料を同時に処理)	3試料/3~4 day/人 (3試料を同時に処理)	3試料/3~4 day/人 (3試料を同時に処理)	3試料/3~4 day/人 (3試料を同時に処理)
保守		放射能分析装置の性能維持 分析室の清浄度管理	放射能分析装置の性能維持 分析室の清浄度管理	放射能分析装置の性能維持 分析室の清浄度管理	放射能分析装置の性能維持 分析室の清浄度管理
価格		3~4 人・日/3試料+諸経費(材料費等)	3~4 人・日/3試料+諸経費(材料費等)	3~4 人・日/3試料+諸経費(材料費等)	3~4 人・日/3試料+諸経費(材料費等)
安全性		汚染拡大防止	汚染拡大防止	汚染拡大防止	汚染拡大防止
長所		高感度分析可 核種別放射能の定量可 試料の前処理が短時間	核種別に精製する事により核種毎の定量可	低エネルギーβ線放出核種の定量が可能。 H-3、C-14 など	共存γ線放出核種の影響を受けにくい。
短所		測定試料マトリクスにより検出限界値が異なる	試料の前処理に熟練が必要 分析処理時間が長い 核種毎に自己吸収補正が必要	試料の前処理に熟練が必要	試料の前処理に熟練が必要 分析処理時間が長い 核種毎に自己吸収補正が必要
今後必要な開発項目		分析技術として開発要素少ない(確立技術) 分析対象試料材質に応じた前処理法	分析技術として開発要素少ない(確立技術) 分析対象試料材質に応じた前処理法	分析技術として開発要素少ない(確立技術) 分析対象試料材質に応じた前処理法	分析技術として開発要素少ない(確立技術) 分析対象試料材質に応じた前処理法
品質保証上の測定項目		分析対象核種の化学回収率の確認	分析対象核種の化学回収率の確認	分析対象核種の化学回収率の確認	分析対象核種の化学回収率の確認

3. 2 非破壊測定

一般に使用されている非破壊測定は、廃棄体が容器に収納されている状態が大部分であるため、放射線の透過力の強い中性子線やガンマ線を使用する。これらの各使用する放射線に対する非破壊測定法の概要は次の通りである。

中性子線を利用した測定

プルトニウム、ウラニウムの同位体は、長い半減期である。これらの核種は、ガンマ線の放出率が相対的に小さい。したがって高密度マトリックス中に存在する場合、ガンマ線測定手法では測定が困難である。高密度廃棄物、不均一マトリックス、核分裂/放射化生成物が多く含まれる TRU 廃棄物も同様に、ガンマ線測定では測定は困難または不可能となる。

しかしながら中性子測定は、これらの定性定量分析に極めて有効な手段である。中性子測定には、二つのカテゴリーに分類されるパッシブ法とアクティブ法がある。

パッシブ法は、自発核分裂の結果生じる時間相関のある中性子と時間相関のない(α , n)反応の中性子を測定する。自発核分裂中性子の発生は、Pu238, Pu240, Pu242, Cf252, Cm242, Cm244 が想定され、マトリックス中の低いZの材料と α 粒子が相互作用して生じる(α , n)反応の中性子を検出する。パッシブ法は、アクティブ法と比べ、精度/信頼性が良く、容易な操作で経済的な手法である。

アクティブ法は、廃棄物中の核分裂同位体を測定するために、Cf252線源を使用し、自発核分裂を起こさないウラニウムの分析に活用している。

この様な中性子線を利用した TRU 測定方法は、図 3. 3-1 に示す分類方法で適用されている。

- ・ パッシブ中性子法(図 3. 2-1 の①)
- ・ アクティブ遅発中性子法(図 3. 2-1 の③, ⑤, ⑤')
- ・ アクティブ即発中性子法(図 3. 2-1 の②, ④, ④')

図中に示す②は④④'と同様に即発成分を測定するものであるが、定常中性子源との分離を核分裂ガンマ線とのコインシデンスによる方法を用いたものである。そのため、中性子源としてガンマ線放出のない RI 線源を用いる必要があり強度がとりにくく、200 リットル-ドラム缶よりも小型の廃棄物が主な測定対象となっている。

尚、測定技術調査に際し、アクティブ中性子法の遅発/即発中性子の適用は、図 3. 2-1 に示した分類で実施しているため、調査技術表の閲覧時には本図の分類を参考にする必要がある。

ガンマ線を利用した測定

ガンマ線を利用した測定法には、スペクトロスコピとグロスカウンターの二つの方式がある。

ガンマ線スペクトルを利用した測定方式は、マトリックス密度が十分小さな原子炉廃棄物の分析に最良の手法である。検出部には高分解能のガンマ線スペクトロスコピに高純度 Ge 検出器を使用し、低分解能ガンマ線スペクトロスコピには NaI(Tl)シンチレータを使用する。試料は、マトリックス中の不均一性や線源の不均一分布の影響を最小化するために回転しながら測定する。測定した結果から試料の放射能強度を評価するには、ガンマ線の吸収の補正を行い、廃棄物のマトリックスにより複数の減衰補正技術を必要とする。

グロスカウントを利用した測定方式は、大面積のシンチレータを適用し、ガンマ線スペクトロスコピ方式と比べ一度に大量の廃棄物の測定処理が可能である。

また、ガンマ線を利用した方法に廃棄物容器内の放射能分布を精度良く測定する方法にトモグラフィガンマスキヤナー法がある。この方法は廃棄物容器内の密度分布の詳細情報を三次元で取得することが可能であるが、正確さを中心とするこの測定方法は、適用検出器が膨大であり、かつ、測定時間が多いことから未だ実用化には至っていない。

この様にパッシブガンマ法は特別な装置を必要とせず容易に測定評価可能な方法である。そのため、廃棄体の性状が均一化されているものならば廃棄体表層のガンマ線を測定評価することにより廃棄体の放射エネルギーを評価することが可能である。この場合、検出器に入射するガンマ線は廃棄体の内部の自己遮蔽から表面に近い部分の廃棄体の放射能からのガンマ線しか測定することができない。このため、廃棄体全体をガンマ線検出器で覆い、全検出器の入射計数を加算することにより廃棄体からの放射線量を増加させる方法も考えられる。この場合に適用する検出器は比較的検出部の加工、保守が容易なプラスチックシンチレータ(核種組成が既に把握時)や NaI(Tl)シンチレータ(核種が未定)などがよいものと考えられる。

廃棄体中に存在する核種が一核種の場合(溶融除染時に可能性あり)に対する、ガンマ線を検知する検出器には、プラスチックシンチレータ、NaI(Tl)シンチレータ、Ge 検出器が一般的に候補として掲げられる。これら三種の検出器に対し、核種が一つであると既知の場合には、核種分析情報は不要となり

- ・ 計数効率が高い : NaI(Tl) > プラスチックシンチ > Ge
- ・ 検出器価格の安さ : プラスチックシンチ > NaI(Tl) > Ge
- ・ 保守性
: プラスチックシンチ > NaI(Tl) > Ge

- 加工性

: プラスチックシンチ>NaI(Tl)>Ge

の点からプラスチックシンチレータ、NaI(Tl)シンチレータが適用性が高い。

パッシブガンマ線法を適用する場合、被廃棄体の放射能濃度(放射線)が高い場合には、短時間で測定評価可能であるが、この放射線の強度に対し適用可能な限界がある。一般的に、NaI(Tl)の場合、このシンチレータの発光パルスの減衰時間が230nsであることから約 10^6 個/s程度の電気パルスが生じる。通常、信号処理系で用いられているパルス処理性能は μ Secオーダーであるため、この程度までのパルス数まではパッシブガンマ法が適用できる。高レベルの廃棄体時には検出器への入射ガンマ線を減少させる必要があるため、コリメーターの適用などの配慮が必要となる。

これら中性子線、ガンマ線を利用した非破壊測定法として、パッシブガンマ法、ガンマスキャナー法、トモグラフィガンマスキャナー法、パッシブ中性子法、アクティブ中性子法、パッシブ/アクティブ中性子法について技術調査を実施した。

尚、パッシブ、アクティブ法によるBq/g換算は、0.2g/cc(金属)と仮定して評価
以下に各方式の調査結果を示す。

注記：表中に示す検出限界ならびに検出精度は次式にて評価したものである。

検出限界

$$N = N_b + K/2 \left[K/T + \left\{ (K/T)^2 + 4N_b(1/T + 1/T_b) \right\}^{1/2} \right]$$

N：計数率(cpm)

N_b ：バックグラウンド(cpm)

T：試料測定時間(min)

T_b ：BG測定時間(min)

K：検出限界を σ のK倍とする確率係数

(通常K=3としている)

検出精度

$$T = (a \pm \sigma) / A = a / A \sqrt{(\sigma/a)^2} = \sigma / A$$

T：検出精度

A：真値

a：測定値の平均値

σ ：測定値のばらつき

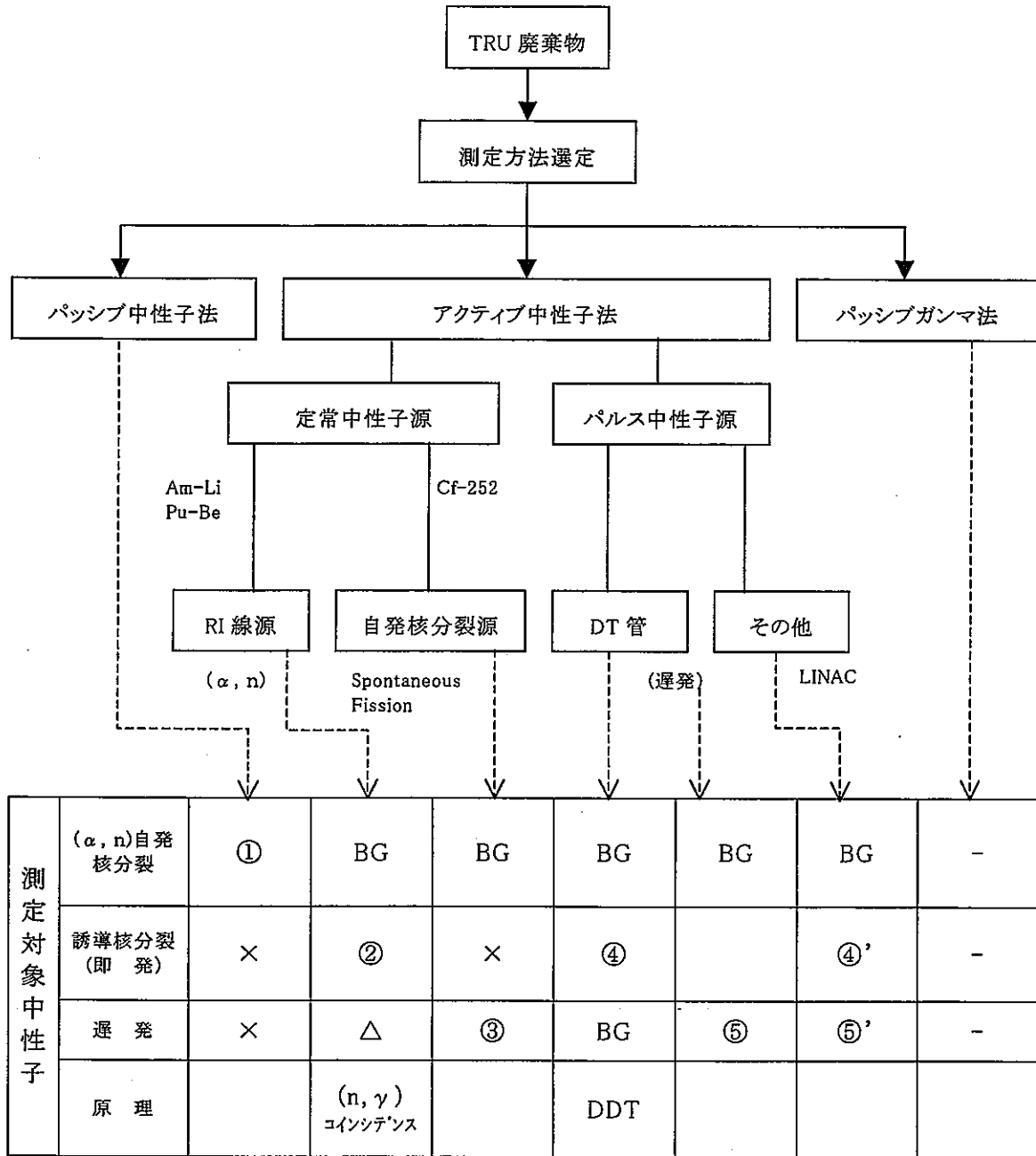


図 3. 2-1 廃棄物中の TRU 測定手法

表 3.2-1 廃棄体放射能濃度の測定技術調査結果

測定原理		パッシブガンマ法	
		Ge 検出器(4台)	NaI 検出器:7.6×13×41cm(2) or Ge 検出器(3)
対象廃棄物		TRU 廃棄物/低レベル廃棄物	TRU 廃棄物/低レベル廃棄物
実施場所		キャンベラ社(高速ガンマセグメントスキャンシステム)	キャンベラ社(Q ² 低レベル廃棄物分析システム)
測定装置の性能	検出限界	⁶⁰ Co 30 kBq/ドラム(0.2g/cc 均一分布)	[密度 0.1g/cc 時の Bq/g] ¹³⁷ Cs:6.7E-3, ⁶⁰ Co:5.6E-3, ²³⁵ U:1.2E-2 ²³⁹ Pu:4.3E+2, ²⁴¹ Pu:1.3E+3 [密度 1.8g/cc 時の Bq/g] ¹³⁷ Cs:1.5E-3, ⁶⁰ Co:1.1E-3, ²³⁵ U:3.7E-3 ²³⁹ Pu:1.1E+2, ²⁴¹ Pu:4.5E+2
	測定精度		
	測定時間	3分/ドラム	10分/ドラム
廃棄体の容器と形態		200 L ドラム(最大 400kg)	200 L ドラム
適用状況		実用中(カタログ有)	実用中(カタログ有)
適用できる廃棄体処理技術		圧縮固化(2 g/cc 以下)	圧縮
サンプル形態(破壊分析の場合)		-	-
前処理(破壊分析の場合)		-	-
2次廃棄物(破壊分析の場合)		-	-
処理能力		20ドラム/時間	~30 min/体(廃棄体着脱含む)
保守		Ge 検出器への液体窒素補給	
価格		-	
安全性		特になし	特になし
長所		測定核種が多種(スケーリングファクタ利用可)	測定核種が多種(スケーリングファクタ利用可)
短所		TRU 核種の検出感度は低い	TRU 核種の検出感度は低い
今後必要な開発項目		スケーリングファクタ利用の場合、Key 核種の選定及び他核種のスケーリングファクタの設定	スケーリングファクタ利用の場合、Key 核種の選定及び他核種のスケーリングファクタの設定
品質保証上の測定項目		Ge 検出器の計数効率、分解能の定期校正	Ge 検出器の計数効率、分解能の定期校正
添付資料番号		1	2

表 3.2-2 廃棄体放射能濃度の測定技術調査結果

測定原理		パッシブガンマ法		パッシブガンマ/ベータ法
		Ge 検出器、プラスチックシンチレータ	NaI 検出器(48 台、4 面配置)	NaI 検出器(12)、PLS 検出器(12)
対象廃棄物		極低レベル廃棄物(バルク単位測定)	極低レベル廃棄物(バルク単位測定)	クリアランスレベル廃棄物
実施場所		日本(原子力発電技術機構)	日本(原子力発電技術機構)	三菱重工業
測定装置の性能	検出限界	[検出下限] ⁶⁰ Co 0.004Bq/g	[検出下限] ⁶⁰ Co 0.4Bq/g	[検出下限] ⁶⁰ Co 0.1Bq/g 0.1Bq/cm ²
	測定精度			
	測定時間	数分/廃棄体	3分/廃棄体	数秒/廃棄体
廃棄体の容器と形態		廃棄体重量 100Kg～トンオーダー	廃棄体重量 数 Kg～100Kg	廃棄体サイズ 1m×1m×10cm
適用状況		開発中	開発中	開発中
適用できる廃棄体処理技術				
サンプル形態(破壊分析の場合)				
前処理(破壊分析の場合)				
2次廃棄物(破壊分析の場合)				
処理能力				
保守				
価格				
安全性		特になし	特になし	特になし
長所		測定核種が単一時あるいは組成が既知の場合には有効(スケールンクファクタ利用可)	測定核種が単一時あるいは組成が既知の場合には有効(スケールンクファクタ利用可)	測定核種が単一時あるいは組成が既知の場合には有効(スケールンクファクタ利用可) 放射化、汚染廃棄物自動識別 廃棄体の局所汚染弁別評価
短所		核種組成不明確時には評価不可 バルク測定のため、局所的な放射能測定は不可 表面汚染、放射化区分不可	核種組成不明確時には評価不可 バルク測定のため、局所的な放射能測定は不可 表面汚染、放射化区分不可	核種組成不明確時には評価不可
今後必要な開発項目		スケールンクファクタ利用の場合、Key 核種の選定及び他核種のスケールンクファクタの設定	スケールンクファクタ利用の場合、Key 核種の選定及び他核種のスケールンクファクタの設定	スケールンクファクタ利用の場合、Key 核種の選定及び他核種のスケールンクファクタの設定
品質保証上の測定項目		形状の異なる廃棄体毎の効率確認	Ge 検出器の計数効率、分解能の定期校正	検出器の計数効率、分解能の定期校正
添付資料番号				

表 3.2-3 廃棄体放射能濃度の測定技術調査結果

測定原理		パッシブガンマ法	ガンマスキャナー法
		全面プラスチックシンチレータまたは液体シンチレータ	Ge 検出器,線量率計
対象廃棄物		低レベル廃棄物	TRU 廃棄物/低レベル廃棄物
実施場所		ドイツ(NIS/RADOS)	BNFL 社(セグメントガンマスキャナー)
測定装置の性能	検出限界	[検出限界] $^{60}\text{Co} < 1\text{Bq/g}$, $^{137}\text{Cs} < 1\text{Bq/g}$	^{60}Co 1mBq/g (代表的バッチ 300Kg で)
	測定精度	<±15%	
	測定時間	30分/ドラム	1分
廃棄体の容器と形態		最大:120×100×80cm ³ 1000Kg	100,200,500 L ドラム
適用状況		実用中	実用中(カタログ有)
適用できる廃棄体処理技術			圧縮固化
サンプル形態(破壊分析の場合)			—
前処理(破壊分析の場合)			—
2次廃棄物(破壊分析の場合)			—
処理能力			1ドラム/時間
保守		特になし	Ge 検出器への液体窒素補給
価 格			—
安 全 性		特になし	特になし
長 所		測定核種が単一時あるいは組成が既知の場合には有効	測定核種が多種(スケーリングファクタ利用可)
短 所		核種組成不明確時には評価不可	
今後必要な開発項目		スケーリングファクタ利用の場合、Key 核種の選定及び他核種のスケーリングファクタの設定	スケーリングファクタ利用の場合、Key 核種の選定及び他核種のスケーリングファクタの設定
品質保証上の測定項目		形状の異なる廃棄体毎の効率確認	Ge 検出器の計数効率、分解能の定期校正
添付資料番号		3	4

表 3.2-4 廃棄体放射能濃度の測定技術調査結果

測定原理		トモグラフィックガンマスキャナー法
		GeまたはNaI検出器(160台)
対象廃棄物		TRU廃棄物
実施場所		Los Alamos National Laboratory
測定装置の性能	検出限界	Pu HPGe:28mg(U-nat 換算:1.1×10 ³ Bq/g), NaI:7mg(U-nat 換算:2.8×10 ² Bq/g)
	測定精度	
	測定時間	60分/ドラム
廃棄体の容器と形態		200Lドラム
適用状況		開発中(カタログ有)
適用できる廃棄体処理技術		
サンプル形態(破壊分析の場合)		-
前処理(破壊分析の場合)		-
2次廃棄物(破壊分析の場合)		-
処理能力		
保守		Ge検出器への液体窒素補給 Ge,NaIなどの定期校正
価格		-
安全性		特になし
長所		ドラム内部の放射能分布可視化
短所		測定時間が長い
今後必要な開発項目		短時間測定
品質保証上の測定項目		Ge,NaIの計数効率、分解能の定期校正
添付資料番号		5

表 3.2-5 廃棄体放射能濃度の測定技術調査結果

測定原理		パッシブ中性子法			
		He-3 検出器(4π方向 60本) 同時/非同時計測	He-3 検出器(4π方向 36-60本) Ge 検出器(1)	He-3 検出器(4π方向 26本) Ge 検出器(2台)	He-3 検出器(30本以上) オプション:Ge 検出器
対象廃棄物		TRU 廃棄物/ウラン廃棄物	TRU 廃棄物/ウラン廃棄物	TRU 廃棄物/ウラン廃棄物	TRU 廃棄物
実施場所		キャンベラ社(パッシブ中性子ドラムカウンタ)	BNFL 社(TRU ドラムモニター)	BNFL 社(CRATE/BOX モニター)	BNFL 社(TRU Package Monitor)
測定装置の性能	検出限界	・0.73mg ²⁴⁰ Pu (同時計測) (1.6×10^1 Bq/g ²³⁸ U 換算) ・0.4mg ²⁴⁰ Pu (全中性子計測) (1.1×10^1 Bq/g ²³⁸ U 換算)	・20mg Pu-Total (7.3×10^2 Bq/g U-nat 換算) ・ダイナミックレンジ 20mg-850g ($7.3 \times 10^2 \sim 3 \times 10^7$ Bq/g)	・1g Pu-Total (2.9×10^2 Bq/g U-nat 換算) ・ダイナミックレンジ 1g-850g ($2.9 \times 10^2 \sim 2.5 \times 10^8$ Bq/g)	・20mg Pu-Total (4.5×10^3 Bq/g U-nat 換算) ・ダイナミックレンジ 0-500g ($0 \sim 1.2 \times 10^9$ Bq/g)
	測定精度		±15 %	±25%	±7%
	測定時間	1000 sec	1000 sec	4 hr	5 分
廃棄体の容器と形態		118, 200 L ドラム	200, 500 L ドラム	2.5m(H)×3.5m(W)×3m(H)	350mm(H)×350mm(W)×450mm(H)
適用状況		実用中(カタログ有)	実用中(カタログ有)	実用中(カタログ有)	実用中(カタログ有)
適用できる廃棄体処理技術		圧縮、混練、溶融固化	圧縮、混練、溶融固化	圧縮、混練、溶融固化	圧縮、混練、溶融固化
サンプル形態(破壊分析の場合)		-	-	-	-
前処理(破壊分析の場合)		-	-	-	-
2次廃棄物(破壊分析の場合)		-	-	-	-
処理能力		~30 min/体(廃棄体着脱含む)			
保守			Ge 検出器への液体窒素補給	Ge 検出器への液体窒素補給	
価格					
安全性		特になし			
長所		操作が簡単	大型ドラムの測定可	大型廃棄物の測定可	装置小
短所				測定時間が長い	測定時間が長い 大型廃棄体測定不可
今後必要な開発項目					
品質保証上の測定項目		He 検出器の計数効率の定期校正	He 検出器の計数効率の定期校正 Ge 検出器の計数効率、分解能の定期校正	He 検出器の計数効率の定期校正 Ge 検出器の計数効率、分解能の定期校正	He 検出器の計数効率の定期校正
添付資料番号		6	7	8	9

注記:パッシブ、アクティブ法による重量換算(Bq/g)は、内容物を金属(0.2g/cc)、体積を廃棄体の容器と形態に示された値を基に算出

表 3.2-6 廃棄体放射能濃度の測定技術調査結果

測定原理		パッシブ中性子法
		He-3 検出器(12本) Ge 検出器(1台)
対象廃棄物		TRU 廃棄物
実施場所		BNFL 社(TRU Piece Monitor)
測定装置の性能	検出限界	・50mg Pu-Total (1.4×10^4 Bq/g U-nat 換算) ダイナミックレンジ 50mg-850g Pu ($1.4 \times 10^4 \sim 2.4 \times 10^6$ Bq/g)
	測定精度	±20% for 5g Pu (300 秒)
	測定時間	
廃棄体の容器と形態		300×300×300mm
適用状況		実用中(カタログ有)
適用できる廃棄体処理技術		
サンプル形態(破壊分析の場合)		-
前処理(破壊分析の場合)		-
2次廃棄物(破壊分析の場合)		-
処理能力		
保守		
価格		
安全性		特になし
長所		操作が簡単
短所		
今後必要な開発項目		
品質保証上の測定項目		He 検出器の計数効率の定期校正
添付資料番号		10

注記:パッシブ、アクティブ法による重量換算(Bq/g)は、内容物を金属(0.2g/cc)、体積を廃棄体の容器と形態に示された値を基に算出

表 3.2-7 廃棄体放射能濃度の測定技術調査結果

測定原理		アクティブ中性子法	
		He-3 検出器 14MeV 中性子発生管	He-3 検出器(8台)、BF3 検出器(1台) 14MeV 中性子発生管(～10 ⁶ n/pulse)
対象廃棄物		TRU 廃棄物/ウラン廃棄物	TRU 廃棄物/ウラン廃棄物
実施場所		原研	三菱重工
測定装置の性能	検出限界		1.3×10 ⁻³ Bq/g ²³⁵ U (0.239g/cc ポリエチレン) 2.3×10 ⁻³ Bq/g ²³⁵ U (0.2g/cc 金属)
	測定精度		±20 %
	測定時間		600 秒
廃棄体の容器と形態		200 L ドラム	200 L ドラム
適用状況		開発中	実績有
適用できる廃棄体処理技術		圧縮、混練固化	圧縮、混練固化
サンプル形態(破壊分析の場合)		-	-
前処理(破壊分析の場合)		-	-
2次廃棄物(破壊分析の場合)		-	-
処理能力			～20 min /体
保守		中性子発生管の動作確認	中性子発生管の動作確認
価格			
安全性		中性子遮蔽	中性子遮蔽
長所		高速中性子利用のため廃棄体中の分布の影響小	TRU 核種の検出感度が良い
短所			廃棄体種類を予め設定
今後必要な開発項目			
品質保証上の測定項目		中性子発生管の強度確認	中性子発生管の強度確認 He 検出器の計数効率の定期校正
添付資料番号		11	

注記:パッシブ、アクティブ法による重量換算(Bq/g)は、内容物を金属(0.2g/cc)、体積を廃棄体の容器と形態に示された値を基に算出

表 3.2-8 廃棄体放射能濃度の測定技術調査結果

測定原理		パッシブ/アクティブ中性子法		
		He-3 検出器 (64 本) ²⁵² Cf 中性子源 (8×10 ⁶ n/s)	He-3 検出器(4π方向)、Ge 検出器(1台) 14MeV 中性子発生管(2~3×10 ⁶ n/s)	He-3 検出器(4π方向)、Ge 検出器(1台)、NaI 検出器 14MeV 中性子発生管(2~3×10 ⁶ n/pulse)
対象廃棄物		TRU 廃棄物/ウラン廃棄物	TRU 廃棄物/ウラン廃棄物/低レベル廃棄物	TRU 廃棄物/ウラン廃棄物/低レベル廃棄物
実施場所		キャンベラ社(パッシブ/アクティブ シャフラスシステム)	BNFL(Los Alamos) (パッシブ-アクティブ/ガンマ線エネルギー評価システム)	BNFL(Los Alamos) (パッシブ-アクティブ/ガンマ線エネルギー評価クレートシステム)
測定装置の性能	検出限界	アクティブファーストモード ・111mg ²³⁵ U (紙マトリックス) (8.9×10 ³ Bq ²³⁵ U 換算) ・402mg ²³⁵ U (鉄マトリックス) (3.2×10 ⁴ Bq ²³⁵ U 換算) アクティブサーマルモード ・24mg ²³⁵ U (紙マトリックス) (1.9×10 ³ Bq ²³⁵ U 換算) ・61mg ²³⁵ U (鉄マトリックス) (4.9×10 ³ Bq ²³⁵ U 換算) パッシブモード ・3mg ²⁴⁰ Pu _α (紙マトリックス) (2.7×10 ⁶ Bq ²³⁵ U 換算) ・2.57mg ²⁴⁰ Pu _α (鉄マトリックス) (2.3×10 ⁶ Bq ²³⁵ U 換算)	パッシブ法 ・1mg Pu-Total (3.8×10 ⁴ Bq/g U-nat 換算) ダイナミックレンジ 1mg-1Kg (3.8×10 ⁴ ~3×10 ⁷ Bq/g)	パッシブ法 ・1mg Pu-Total (3.8×10 ⁴ Bq/g U-nat 換算)
	測定精度			±25 %
	測定時間	アクティブモード 500 秒 パッシブモード 1000 秒	1000 秒	30 分
廃棄体の容器と形態		200 L ドラム	200~500 L ドラム	BOX 1.25m×1.25m×2.5m 1.56m×1.56m×2.5m
適用状況		実用中(カタログ有)	実用中(カタログ有)	実用中(カタログ有)
適用できる廃棄体処理技術		圧縮、混練、溶融固化	圧縮、混練、溶融固化	
サンプル形態(破壊分析の場合)		-	-	-
前処理(破壊分析の場合)		-	-	-
2次廃棄物(破壊分析の場合)		-	-	-
処理能力				
保守			Ge 検出器への液体窒素補給 中性子発生管の動作確認	Ge 検出器への液体窒素補給 中性子発生管の動作確認
価格				
安全性		Cf-252 中性子源の保管 中性子遮蔽	中性子遮蔽	中性子遮蔽
長所		アクティブ/パッシブ法併用のため廃棄体種類に適した測定可	アクティブ/パッシブ法併用のため廃棄体種類に適した測定可	アクティブ/パッシブ法併用のため廃棄体種類に適した測定可
短所		装置が大 廃棄体種類を予め設定	廃棄体種類を予め設定	廃棄体種類を予め設定
今後必要な開発項目				
品質保証上の測定項目		Cf-252 中性子源の線源強度確認 He 検出器の計数効率の定期校正	中性子発生管の強度確認 He 検出器の計数効率の定期校正	中性子発生管の強度確認 He 検出器の計数効率の定期校正
添付資料番号		12	13	14

注記:パッシブ、アクティブ法による重量換算(Bq/g)は、内容を金属(0.2g/cc)、体積を廃棄体の容器と形態に示された値を基に算出

表 3.2-9 廃棄体放射能濃度の測定技術調査結果

測定原理		パッシブ/アクティブ中性子法	
		He-3 検出器 ²⁵² Cf 中性子源	
対象廃棄物		TRU, LLW 廃棄物	
実施場所		Harwell Instrument Ltd	
測定装置の性能	検出限界	アクティブモード ・500mg ²³⁵ U (4×10^{-2} Bq/g ²³⁵ U 換算: ドラム最大重量 1t) パッシブモード ・0.5mg ²³⁹ Pu (6.4×10^{-5} Bq/g ²³⁵ U 換算: ドラム最大重量 1t)	
	測定精度		
	測定時間	アクティブモード 3分 パッシブモード 15分	
廃棄体の容器と形態		200 L ドラム	
適用状況		実用中(カタログ有)	
適用できる廃棄体処理技術		圧縮、混練、熔融固化	
サンプル形態(破壊分析の場合)		-	
前処理(破壊分析の場合)		-	
2次廃棄物(破壊分析の場合)		-	
処理能力			
保守			
価格			
安全性		Cf-252 中性子源の保管 中性子遮蔽	
長所		アクティブ/パッシブ法併用のため廃棄体種類 に適した測定可	
短所		装置が大 廃棄体種類を予め設定	
今後必要な開発項目			
品質保証上の測定項目		Cf-252 中性子源の線源強度確認 He 検出器の計数効率の定期校正	
添付資料番号		15	

注記: パッシブ、アクティブ法による重量換算(Bq/g)は、内容物を金属(0.2g/cc)、体積を廃棄体の容器と形態に示された値を基に算出

表 3.2-10 廃棄体放射能濃度の測定技術調査結果

測定原理		電離電流測定法		
		電離箱	電離箱	電離箱
対象廃棄物		TRU 廃棄物/ウラン廃棄物	TRU 廃棄物/ウラン廃棄物	TRU 廃棄物/ウラン廃棄物
実施場所		BNFL 社	BNFL 社	LRAD(ロス・アモス)
測定装置の性能	検出限界	0.04 Bq/cc(α 放射能) (重量換算: 5×10^{-3} Bq/g)	15 Bq(α 放射能) (重量換算: 5×10^{-3} Bq/g)	1.9Bq (Total α : U_3O_8)
	測定精度			
	測定時間	100 秒		20~30 秒
廃棄体の容器と形態		1×1×0.8m	配管長 1~6m 配管径 50~150mm	小物物品汚染モニタ
適用状況		実用中(カタログ有)	実用中(カタログ有)	実用中
適用できる廃棄体処理技術				
サンプル形態(破壊分析の場合)				
前処理(破壊分析の場合)				
2次廃棄物(破壊分析の場合)				
処理能力				1分
保守価				
安全性		特になし	特になし	
長所		不定形廃棄物でも測定可	配管内外面の表面汚染測定可	大型物品自動搬出モニタ、特殊形状内部モニタなどへの応用可能
短所		廃棄物の性状/形態により検出性能変化 閉鎖部分の想定不可 環境放射能の影響大	閉鎖部分の想定不可	閉鎖部分の想定不可
今後必要な開発項目		β 線による電離測定の可能性	β 線による電離測定の可能性	β 線による電離測定の可能性
品質保証上の測定項目		測定容器内の汚染確認 基準廃棄体による電離電流校正	測定容器内の汚染確認 基準廃棄体による電離電流校正	測定容器内の汚染確認 基準廃棄体による電離電流校正
添付資料番号		16	17	

重量換算仮定条件
金属密度=7.6g/cc 体積=廃棄体容器

重量換算仮定条件
金属密度=7.6g/cc
配管外形=60.5mm 肉厚=3.5mm 長さ=6m

3. 3 有害物質の測定

低レベル放射性廃棄物の処分においては、有害物質または埋設設備の健全性を損なう物質は消防法に規定する物質としている。この物質（消防法別表）を表3. 3-1に、また、有害物質としての規制物質は、表3. 3-2に示したとおりである。サイクル機構殿の施設から発生する廃棄物においても、これらの物質が使用されてない、あるいは入っていないことを確認する必要があり、ここでは、廃棄物中の有害物質測定技術について述べる。

(1) 廃棄物中の有害物質測定技術

廃棄物中の有害物質測定技術をまとめて表3. 3-3に示す。

有害物質の判定基準値は極微量濃度 (>1mg/l) であり、それらの判定測定は既に環境測定として実績のある破壊測定技術がもっとも有効な手段であると考えられる。非破壊測定技術としては、X・ γ 線CT法やパルス高速中性子法により、密度差による識別あるいは主要元素量を求めることが可能であるが、有害物質の判定基準値をクリア出来るような感度を有するものはみあたらない。

(2) 有害物質の識別

サイクル機構殿の施設から発生する主な廃棄物は、雑固体であると考えられる。このような中に有害物質が混入している場合、ランダム混入であり破壊分析を適用する場合、サンプリングが廃棄体中の有害物質の代表値であるとする担保が得ることは困難なことから、識別は廃棄物の分析を行なうなどして混入物を取り除くしかないと考えられる。また、この前段として廃棄物発生時点で分別回収するか、当該施設で有害物質を含む物質を一切使用しない管理を行なっていくなどの対応が必要と思われる。

低レベル放射性廃棄物の処分では、雑固体の処分廃棄体製作をする場合、廃棄物ドラムを開缶し、内容物の分別作業により有害物質（Pb等）を取り除く（尚、Alは固形化すると発ガスし、固化体に影響をおよぼすので取り除いている）作業を行なっている。

液体廃棄物は、最終的にはセメント固化等の処理が行われるので、この前段の廃液（バッチ処理されると仮定）でサンプリングし、破壊分析して確認するか、または廃液となるプロセスの工程上、有害物質は一切混入しないとする管理記録が示せるのであれば、後者のほうが得策であると考えられる。

また、破壊分析を行なう場合、次の分析法があげられる。

- ・質量分析法（ICP-MS）
- ・発光分光分析（ICP-AES）

- ・原子吸光法（フレイム・電気加熱原子吸光装置）
- ・高速液体クロマトグラフィー（HPLC）

有害物質の判定基準値以下の測定を行なう装置としては、無機系の分析では発光分光分析か原子吸光法、有機系の分析では高速液体クロマトグラフィーで対応が可能と考える。質量分析法は高感度であるが、装置が高価で取り扱い、メンテナンスの負荷が大きいため、有害物質の測定装置として用いるのは過大な装置であると思われる。

表3. 3-1 危険物の指定 (消防法別表)

危険物の指定 (消防法別表)

類別	性質	品名	類別	性質	品名
第1類	酸化性固体	1 塩素酸塩類 2 過塩素酸塩類 3 無機過酸化物 4 亜塩素酸塩類 5 臭素酸塩類 6 硝酸塩類 7 ヨウ素酸塩類 8 過マンガン酸塩類 9 重クロム酸塩類 10 その他のもので政令で定めるもの 11 前各号に掲げるもののいずれかを含有するもの	第3類	自然発火性物質及び禁水性物質	8 金属の水素化物 9 金属のリン化物 10 カルシウム又はアルミニウムの炭化物 11 その他のもので政令で定めるもの 12 前各号に掲げるもののいずれかを含有するもの
		第4類	引火性液体	1 特殊引火物 2 第一石油類 3 アルコール 4 第二石油類 5 第三石油類 6 第四石油類 7 動植物油類	
第2類	可燃性固体	1 硫化リン 2 赤リン 3 硫黄 4 鉄粉 5 金属粉 6 マグネシウム 7 その他のもので政令で定めるもの 8 前各号に掲げるもののいずれかを含有するもの 9 引火性固体	第5類	自己反応性物質	1 有機過酸化物 2 硝酸エステル類 3 ニトロ化合物 4 ニトロソ化合物 5 アゾ化合物 6 ジアゾ化合物 7 ヒドラジンの誘導体 8 その他のもので政令で定めるもの 9 前各号に掲げるもののいずれかを含有するもの
		第6類	酸化性液体	1 過塩素酸 2 過酸化水素 3 硝酸 4 その他のもので政令で定めるもの 5 前各号に掲げるもののいずれかを含有するもの	
第3類	自然発火性物質及び禁水性物質	1 カリウム 2 ナトリウム 3 アルキルアルミニウム 4 アルキルリチウム 5 黄リン 6 アルカリ金属 (カリウム及びナトリウムを除く)及びアルカリ土類金属 7 有機金属化合物 (アルキルアルミニウム及びアルキルリチウムを除く)	第6類	酸化性液体	1 過塩素酸 2 過酸化水素 3 硝酸 4 その他のもので政令で定めるもの 5 前各号に掲げるもののいずれかを含有するもの

表3. 3-2 産業廃棄物に含まれる有害物質判定基準等の値

産業廃棄物に含まれる有害物質判定基準等の値

処分方法	埋立処分	海洋投入処分			埋立場所への排出		洋上 焼却	環境 基準	排出 基準
	燃え殻 ばいじん 汚泥 鉱さい *1	有機性 汚泥	廃酸 廃アルカリ	無機性 汚泥	水底 土砂	廃酸 廃アルカリ	廃油	環境水	排水
有害物質	単位	mg/l	mg/kg	mg/l	mg/l	mg/l	mg/kg	mg/l	mg/l
アルキル水銀化合物	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	—	不検出	不検出
水銀又はその化合物	0.005	0.025	0.025	0.0005	0.005	0.005	—	0.0005	0.005
カドミウム又はその化合物	0.3 ^{*2}	0.1	0.1	0.01	0.1	0.1	—	0.01	0.1
鉛又はその化合物	0.3 ^{*2}	1	1	0.01	0.1	0.1	5	0.01	0.1
有機リン化合物	1	1	1	不検出	1	1	—	—	1
六価クロム化合物	1.5 ^{*2}	0.5	0.5	0.05	0.5	0.5	25	0.05	0.5
ヒ素又はその化合物	0.3 ^{*2}	0.15	0.15	0.01	0.1	0.1	5	0.01	0.1
シアン化合物	1	1	1	不検出	1	1	—	不検出	1
PCB	0.003	0.003	0.003	不検出	0.003	0.003	—	不検出	0.003
トリクロロエチレン	0.3	0.3	0.3	0.03	0.3	0.3	15	0.03	0.3
テトラクロロエチレン	0.1	0.1	0.1	0.01	0.1	0.1	5	0.01	0.1
ジクロロメタン	0.2	0.2	0.2	0.02	0.2	0.2	10	0.02	0.2
四塩化炭素	0.02	0.02	0.02	0.002	0.02	0.02	1	0.002	0.02
1,2-ジクロロエタン	0.04	0.04	0.04	0.004	0.04	0.04	2	0.004	0.04
1,1-ジクロロエチレン	0.2	0.2	0.2	0.02	0.2	0.2	10	0.02	0.2
シス-1,2-ジクロロエチレン	0.4	0.4	0.4	0.04	0.4	0.4	不検出	0.04	0.4
1,1,1-トリクロロエタン	3	3	3	1	3	3	150	1	3
1,1,2-トリクロロエタン	0.06	0.06	0.06	0.006	0.06	0.06	3	0.006	0.06
1,3-ジクロロプロペン	0.02	0.02	0.02	0.002	0.02	0.02	1	0.002	0.02
チウラム	0.06	0.06	0.06	0.006	0.06	0.06	不検出	0.006	0.06
シマジン	0.03	0.03	0.03	0.003	0.03	0.03	1.5	0.03	0.03
チオベンカルブ	0.2	0.2	0.2	0.02	0.2	0.2	10	0.02	0.2
ベンゼン	0.1	0.1	0.1	0.01	0.1	0.1	5	0.01	0.1
セレン又はその化合物	0.3 ^{*2}	0.1	0.1	0.01	0.1	0.1	5	0.01	0.1
有機塩素化合物	—	4	4	1	40	—	40	—	—
銅又はその化合物	—	10	10	0.14	3	—	70	—	3
亜鉛又はその化合物	—	20	20	0.8	5	—	450	—	5
フッ化物	—	15	15	3	15	—	40	—	15
ベリウム又はその化合物	—	2.5	2.5	0.25	2.5	—	125	—	—
クロム又はその化合物	—	2	2	0.2	2	—	100	—	2
ニッケル又はその化合物	—	1.2	1.2	0.12	1.2	—	60	—	—
バナジウム又はその化合物	—	1.5	0.5	0.15	1.5	—	75	—	—
フェノール類	—	20	20	0.2	—	—	—	—	5

*1：燃え殻、ばいじん、鉱さいについては、水銀、カドミウム、鉛、六価クロム、ヒ素、セレンのみを対象。

*2：カドミウム、鉛、六価クロム、ヒ素、セレンについては、土壌への吸着の可能性が考慮されている。

表 3.3-3(1/2) 廃棄体中の有害物質測定技術調査結果(1/2)

測定原理		質量分析法	発光分光分析	原子吸光法	高速液体クロマトグラフィー
		ICP-MS	ICP-AES	フレイム・電気加熱原子吸光装置	HPLC
対象廃棄物		放射性廃棄物	放射性廃棄物	放射性廃棄物	放射性廃棄物
実施場所		放射化学分析施設全般	放射化学分析施設全般	放射化学分析施設全般	放射化学分析施設全般
測定装置の性能	検出限界	Cd, Pb, Cr 等 ~0.00002mg/L	Cd, Pb, Cr, As, Se 等 As:0.01mg/L, Se:0.15mg/L	Cd, Pb, Cr, As, Hg 等 Pb:0.01mg/L, 他は Pb 以上の感度を有する	有機系の有害物質 アルキル Hg 等規制値程度の感度を有する
	測定精度	~数%	~数%	~数%	~数%
	測定時間	数 min	数 min	数 min	
廃棄体の容器と形態					
適用状況		実用中(材料中の不純物分析)	実用中(材料中の不純物分析)	実用中(材料中の不純物分析)	実用中
適用できる廃棄体処理技術		全般(溶解可)	全般(溶解可)	全般(溶解可)	全般(溶解可)
サンプル形態(破壊分析の場合)		液体	液体	液体	液体
前処理(破壊分析の場合)		分析試料により酸、アルカリ溶解	分析試料により酸、アルカリ溶解	分析試料により酸、アルカリ溶解	ろ過
2次廃棄物(破壊分析の場合)		酸、アルカリ分析廃液	酸、アルカリ分析廃液	酸、アルカリ分析廃液	分析廃液
処理能力		2~3day/試料(複数検体処理可)	2~3day/試料(複数検体処理可)	2~3day/試料(複数検体処理可)	1day/試料(複数検体処理可)
保守		ICP-MSの性能維持 分析室の清浄度管理	ICP-AESの性能維持	原子吸光の性能維持	HPLCの性能維持
価格					
安全性		汚染拡大防止	汚染拡大防止	汚染拡大防止	汚染拡大防止
長所		高感度分析可	高感度分析可	高感度分析可	化学物質の同定可能
短所		有機物系は分析できない 無機系で単元素しか測定できない	有機物系は分析できない 無機系で単元素しか測定できない	有機物系は分析できない 無機系で単元素しか測定できない	分析条件によって測定対象物が限定される
今後必要な開発項目		分析技術として開発要素少ない 分析対象マトリックスの前処理法	分析技術として開発要素少ない 分析対象マトリックスの前処理法	分析技術として開発要素少ない 分析対象マトリックスの前処理法	分析技術として開発要素少ない
品質保証上の検査項目		分析装置の感度確認	分析装置の感度確認	分析装置の感度確認	分析装置の感度確認

表3.3-3(2/2) 廃棄体中の有害物質測定技術調査結果(2/2)

測定原理		X・γ線 CT法	パルス高速中性子法
		X・γ線が対象物質の核外電子と相互作用により生じるγ線を断層撮影し同定する。	高速中性子を対象物に照射、主要元素から放射されるγ線を検知して同定する。
対象廃棄物		放射性廃棄物	放射性廃棄物
実施場所		BRI社(低レベル廃棄物の内容物識別装置)	SAIC社 PFNA(パルス高速中性子解析技術)
測定装置の性能	検出限界	布、ガラス、セメント、金属、Pb、Uの識別可能	H, O, N, Al, Fe等検知
	測定精度		
	測定時間		
廃棄体の容器と形態		200ℓドラム	200ℓドラム
適用状況		開発中	実用化段階(DOEアイダホへ納入予定)
適用できる廃棄体処理技術		除染または圧縮後測定	除染または圧縮後測定
サンプル形態(破壊分析の場合)		—	—
前処理(破壊分析の場合)		—	—
2次廃棄物(破壊分析の場合)		—	—
処理能力		4~5ドラム/h	3~4ドラム/h
保守		X線発生装置と検出器の性能維持	加速器とγ線検出器の性能維持
価格			
安全性		X線遮蔽	中性子遮蔽
長所			高速中性子利用のため廃棄物中の分布の影響小
短所		有害物質の検出感度は低	有害物質の検出感度は低
今後必要な開発項目		有害物質判定基準値レベルの検出感度向上が必要であるが達成は非常に困難	有害物質判定基準値レベルの検出感度向上が必要であるが達成は非常に困難
品質保証上の検査項目			

4. 放射性核種の濃度測定における検討

放射性廃棄物は、発生場所の区分、種類、放射能レベルに応じ、処分などを考慮し除染、圧縮、混練固化、溶融等の処理がなされている。それぞれの処理に適用できる測定技術として、非破壊測定を主体とした、廃棄体中放射能濃度測定技術について検討した。

4. 1 適用できる測定技術

LLW 関連の非破壊測定技術を表 4-1 に、ウランおよび TRU 廃棄物関連の非破壊測定技術を表 4-2 に示す。

(1)測定技術

測定対象を除染（雑固体として位置付）、圧縮体、混練固化体、溶融体として、それらの低レベル廃棄物、ウラン廃棄物および TRU 廃棄物であるとし、適用性の高い測定技術（装置）を表 4-1 および表 4-2 に摘出した。

廃棄体中の核種濃度を非破壊測定のみで対応できるのは、廃棄体中に核種が単独で存在するケースであり、そのほかの場合は、破壊分析技術か LLW 処分の搬出検査装置のように非破壊測定で定量できる Key 核種に対し、あらかじめ測定対象物の核種濃度を破壊分析し、その核種組成割合により濃度評価手法（SF 法）により測定される。

破壊分析法は、放射能濃度測定する確実な方法であるが、この方法で廃棄体中の放射能濃度測定を全て行うためには、分析コスト、被ばくの観点より、本測定対象の廃棄体へ適用することは難しいと考える。

①低レベル廃棄物の測定技術

低レベル廃棄物には、 α 、 β 、 γ 線を放出する核種であると考えられる。このうち γ 線放出核種は、非破壊測定で γ 線スペクトル分析により、その核種濃度を定量することが可能である。しかし、この方法では α 、 β 線を放出する核種の測定はできないので、非破壊測定で得られる核種を Key 核種として、他の核種は破壊測定で全体の核種組成割合による SF 法を適用することにより評価される。

LLW 処分関連において Key 核種と測定されない他核種を SF 法で評価する方法で、均質固化体と雑固体（充填固化、圧縮固化、溶融体）の放射能濃度測定が原子力発電所で発生する廃棄物に対して実用化されている。発電所以外の廃棄物あっても、それらと同様な測定方法を適用することができると思う。

②ウラン廃棄物

ウラン濃度を測定する方法として、U-235 や U-238 から放出される γ 線を測定するパッシブガンマ法と、核分裂性物質である U-235 に中性子照射して測定するアクティブ中性子法が適用できる。アクティブ中性子法では U-235 の定量であり、この場合ウランの同位体組成割合が既知であることが必要である。

③TRU廃棄物

TRU核種の濃度を測定する方法として、Pu 等から放出される γ 線を測定するパッシブガンマ法と、Pu-238 や Pu-240 から放出される自発核分裂/ $\alpha \cdot n$ 中性子を測定するパッシブ中性子法と、核分裂性物質である Pu-239 や Pu-241 に中性子照射して測定するアクティブ中性子法が適用できる。いずれの測定方法においても、測定される核種はTRU核種の一部でしかなく、その他の核種をSF法で評価することが必要である。

4. 2 適用例

①低レベル廃棄物

原子力発電所で発生した廃棄物のLLW処分搬出検査装置では、パッシブガンマ法による非破壊測定とSF法による放射能濃度の測定実績がある。(三菱等の測定概要を添付資料に示す)

②ウラン廃棄物

パッシブガンマ法とアクティブ中性子法を適用した装置が開発、実用中である。また、ウランのみの汚染である廃棄物で比較的均質な廃棄体では、 $\beta \cdot \gamma$ 線の線量等を測定する方法もある。

③TRU廃棄物

パッシブ中性子法/アクティブ中性子法によりTRUの代表核種を測定する装置が開発・実用中である。また、TRU核種以外の γ 線核種が入ってない廃棄物については、パッシブガンマ法で測定する方法もある。

4. 3 技術的課題

①低レベル廃棄物

・パッシブガンマ法による測定では、 γ 線を放出する核種の定量であり、その他の核種

については廃棄物の発生場所、種類に応じた核種濃度の相関を破壊測定で求め、適切なSF法を設定する必要がある。

- ・雑固体等では、密度が高くかつ密度・線源偏在を伴う廃棄体となるため、それらの偏在補正機能を確保する必要がある。
- ・溶融体においては、金属層とセラミック層に分離され、また各層において核種割合が大きく異なるため、各層を分離測定できる手法を確立する必要がある。

②ウラン廃棄物

- ・パッシブガンマ法では、ウランからの γ 線放出が小さいこと、放出エネルギーが低いことため線源の補正、密度差による影響を受けるので、それらの偏在補正機能を確立することが必要である。
- ・アクティブ中性子法では、廃棄物組成により、照射中性子束が異なり測定精度に影響を受けるため、廃棄物組成を既知とするか、測定による組成の識別定量を行う必要がある。

③TRU廃棄物

- ・パッシブ中性子法、アクティブ中性子法は、TRU核種の一部しか測定されないため、その他の核種については、廃棄物の発生場所・種類におうじた核種濃度の相関を破壊測定で求め、適切なSF法を設定する必要がある。
- ・パッシブガンマ法では、TRU核種から放出される γ 線エネルギーが非常に低いため、TRU以外の核種(バックグラウンド)の影響を補正できる手法を検討する必要がある。

4. 4 各廃棄物への測定技術の適用性検討

サイクル機構殿の施設（MOX加工施設、再処理施設、核燃料加工施設等）から発生する廃棄物の測定対象として、除染（雑固体）、圧縮体、混練固化体、溶融体として処理された廃棄物に対して、各種の非破壊測定技術の適用性について検討を行なった。

(1)最終処分を考慮した廃棄物処理フローの推定

各施設から発生する廃棄物に対し、最終処分を考慮した処理フローは、図4-1のように推定される。雑固体や圧縮体は、そのものを200ℓドラムにセメント注入固化すれば処分対応できると考える。処分対応となる廃棄体は放射能濃度の確認測定が必要であり、最終処分形態の廃棄体が測定可能となる測定性能を有する測定技術を選定すべきと考える。また、ウラン廃棄物やTRU廃棄物は密度が高くなると測定性能が低下する傾向が強いので、この場合、最終処分形態廃棄体用に選定した測定技術であるならば、最終処分形態の前段での測定（例えば、除染後の廃棄体や固化体前の焼却灰、カートンボックス等）を同一技術で（装置）対応することは可能である。

(2)測定技術の適用性検討

前4.1項において、測定対象を除染（雑固体）、圧縮体、混練固化体、溶融体として、それらの低レベル廃棄物、ウラン廃棄物及びTRU廃棄物に対し、適用性のある測定技術を調査した。ここでは、それらの廃棄物に対して、適用性評価と技術的課題を表4-3～表4-4に示す。

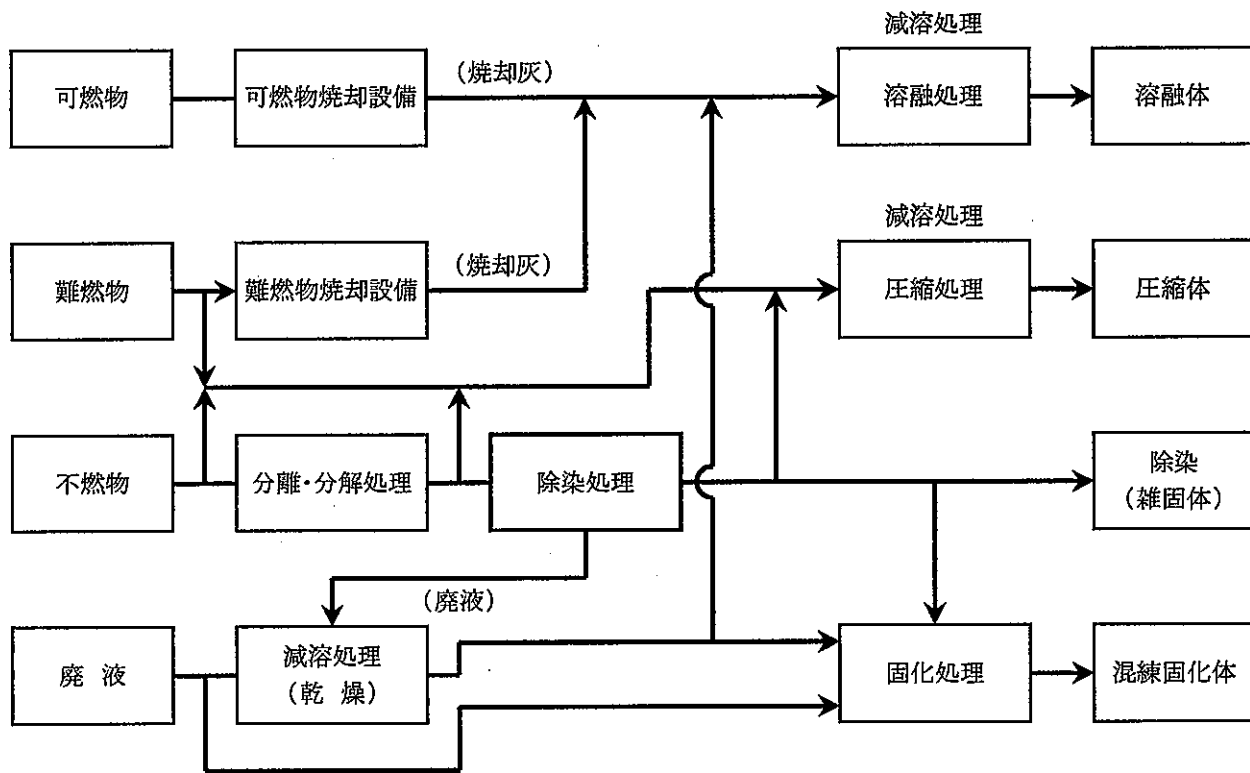


図4-1 最終処分を考慮した廃棄物処理フロー (想定)

表4-1 廃棄体放射能濃度の測定技術

廃棄物	測定対象	適用技術	適用上の要件			品質保証上の測定項目	技術的課題
			測定上の要件	測定形状	性能等		
低レベル廃棄物 (β/γ)	除染 (雑固体)	(パッシブガンマ法) LLW 搬出検査装置 Ge 検出器あるいは Ge 検出器+Nal 検出器 (三菱、東芝、日立、日揮)	高エネルギーのγ核種を定量し、難測定核種は SF 法で評価	200l ドラム ~1000kg 以下	10 分/ドラム 測定精度 Co-60 ±30% Cs-137 ±50% 検出限界 Co-60 ±0.4Bq/g Cs-137 ±2.0Bq/g (密度 3g/cc)	Ge 検出器の効率測定と分解能及びエネルギー補正	原子力発電所 LLW 以外の場合 Key 核種の選定及び他核種の SF 法を設定要
		(パッシブガンマ法) Q ² 低レベル廃棄物分析システム Ge 検出器(3 台) または Nal 検出器(2 台) (キャンベラ社)	高エネルギーのγ核種を定量し、難測定核種は SF 法の適用は可能	200l ドラム ~2g/cc 程度	10 分/ドラム 検出限界 Co-60 ±1.1E-3Bq/g Cs-137 ±1.5E-3Bq/g (密度 1.8g/cc)	検出器の効率とエネルギー校正	Key 核種の選定及び他核種の SF 法を設定要 密度、線源偏在に対する補正機能
		(パッシブガンマ法) NIS/RADOS 全面プラスチックシンチレータまたは 液体シンチレータ(ドイツ)	測定核種が単一で組成が既知であること	200l ドラム~1m ³ コンテナ ~1000kg 以下	30 分/ドラム 測定精度 ±15% 検出限界 Co-60 あるいは Cs-137 1.0Bq/g	形状の異なる廃棄体毎の効率確認	測定対象核種、組成であることの識別が必要 内容物、核種不明の廃棄物には対応できない
		(ガンマスキャナ法) セグメントガンマスキャナー Ge 検出器+線量計(BNFL 社)	高エネルギーの核種を定量し、難測定核種は SF 法の適用は可能	100l、200l、500l ドラム ~2g/cc 程度	1 分/ドラム 検出限界 Co-60 ±1E-3Bq/g (密度 1.5g/cc)	検出器の効率測定、分解能及びエネルギー校正	Key 核種の選定及び他核種の SF 法を設定要 密度、線源偏在に対する補正機能
		破壊分析技術 (前記 3.1 項の測定技術)	代表的なサンプリングをし、試料を液体化させる	液体	数千~数万秒/サンプル 測定精度 数%	分析対象核種の化学回収率の確認	前処理に長時間を要するため、この効率化検討分析対象試料に応じた前処理法の確立 分析対象核種以外のγ線核種分離法の確立
	圧縮体	LLW 搬出検査装置	(除染(雑固体)と同様)				
		Q ² 低レベル廃棄物分析システム	(")				
		NIS/RADOS	(")				
		(パッシブガンマ法) 高速ガンマセグメントスキャンシステム Ge 検出器 4 台(キャンベラ社)	均質な廃棄体中の高エネルギーγ核種を定量し、難測定核種は SF 法の適用は可能	200l ドラム 密度 2g/cc 以下	20 ドラム/h 検出限界 Co-60 30kbq/ドラム (密度 0.2g/cc)	Ge 検出器の効率測定、分解能及びエネルギー補正	均質な廃棄体として評価しているため、密度、線源偏在があると測定精度が悪くなる。 高密度の測定法の確立
		セグメントガンマスキャナー	(除染(雑固体)と同様)				
	混練固化体 (均質固化体)	LLW 搬出検査装置	(除染(雑固体)と同様)				
		Q ² 低レベル廃棄物分析システム	(")				
		NIS/RADOS	(")				
		高速ガンマセグメントスキャンシステム	(圧縮体と同様)				
		セグメントガンマスキャナー	(除染(雑固体)と同様)				
	溶融体	LLW 搬出検査装置	金属層とセラミック層の境界と各層の密度、溶融後の核種残存率情報要	(除染(雑固体)と同様)			(除染(雑固体)と同様)
		Q ² 低レベル廃棄物分析システム	金属層とセラミック層の境界と各層の密度、溶融後の核種残存率情報要	(")			金属層とセラミック層の分割測定手法の確立 他(除染(雑固体)と同様)
		セグメントガンマスキャナー	金属層とセラミック層の境界と各層の密度、溶融後の核種残存率情報要	(")			金属層とセラミック層の分割測定手法の確立 他(除染(雑固体)と同様)
		破壊分析技術 (前記 3.1 項の測定技術)		(")			他(除染(雑固体)と同様)

表4-2(1/2) 廃棄体放射能濃度の測定技術

廃棄物	測定対象	適用技術	適用上の要件			技術的課題	
			測定上の要件	測定形状	性能等		
ウラン廃棄物	除染 (雑固体)	(パッシブガンマ法) Q ² 低レベル廃棄物分析システム Ge 検出器(3 台) または NaI 検出器(2 台) (キャンベラ社)		200l ドラム ~2g/cc 程度	10 分/ドラム 検出限界 U-235 ±1.2E-2Bq/g (密度 0.1g/cc)	検出器の効率測定とエネルギー校正 天然ウラン、回収ウラン、濃縮ウランの識別測定が必要 密度、線源偏在による補正機能	
		(アクティブ中性子法) TRU 測定装置 He-3 検出器(8 本) BF3 検出器(1 台) 14MeV 中性子発生管(三菱)	内容物組成割合が既知であること ウラン濃縮度が既知	200l ドラム ~1g/cc 程度	10 分/ドラム 測定精度 ±20% 検出限界 U-235 90Bq/ドラム (金属 0.2g/cc)	中性子発生管の強度確認 He-3 検出器の計数効率確認	廃棄物組成により照射中性子束が変化するため、組成の識別定量法の確立
		(パッシブ/アクティブ中性子法) パッシブ/アクティブシヤフランシステム He-3 検出器(64 本) ²⁵² Cf 中性子源	同上	200l ドラム	アクティブ 500 秒 パッシブ 1000 秒 検出限界 2k~30kBq/ドラム U-235	²⁵² Cf 中性子源の強度確認 検出器の計数効率確認	同上
		(パッシブ/アクティブ中性子法) パッシブ-アクティブ / γ線エネルギー評価システム He-3 検出器+Ge 検出器 (BNFL 社)	同上	200l~500l ドラム	1000 秒/ドラム 検出限界 1.5E+6Bq/ドラム (天然ウラン)	中性子発生管の強度確認 検出器の計数効率確認	同上
		破壊分析技術 (前記 3.1 項の測定技術)	代表的なサンプリングをし、 試料を液体化させる	液体	数千~数万秒/サンプル 測定精度 数%	分析対象核種の化学回収率の確認	前処理に長時間を要するため、この効率化検討分析対象試料に応じた前処理法の確立 分析対象核種以外の γ線核種分離法の確立
	圧縮体	Q ² 低レベル廃棄物分析システム		(除 染 (雑 固 体) と 同 様)			密度が高くなるほど感度は低下する (除 染 (雑 固 体) と 同 様)
		TRU 測定装置		(")			(除 染 (雑 固 体) と 同 様)
		パッシブ/アクティブシヤフランシステム		(")			(")
		パッシブ-アクティブ / γ線エネルギー評価システム		(")			(")
		破壊分析技術 (前記 3.1 項の測定技術)		(")			(")
	混練固化体 (均質固化体)	Q ² 低レベル廃棄物分析システム		(除 染 (雑 固 体) と 同 様)			(圧 縮 体 と 同 様)
		TRU 測定装置		(")			(除 染 (雑 固 体) と 同 様)
		パッシブ/アクティブシヤフランシステム		(")			(")
		パッシブ-アクティブ / γ線エネルギー評価システム		(")			(")
		破壊分析技術 (前記 3.1 項の測定技術)		(")			(")
溶融体	Q ² 低レベル廃棄物分析システム		(除 染 (雑 固 体) と 同 様)			(圧 縮 体 と 同 様)	
	TRU 測定装置		(")			(除 染 (雑 固 体) と 同 様)	
	パッシブ/アクティブシヤフランシステム		(")			(")	
	パッシブ-アクティブ / γ線エネルギー評価システム		(")			(")	
	破壊分析技術 (前記 3.1 項の測定技術)		(")			(")	

表4-2(2/2) 廃棄体放射能濃度の測定技術

廃棄物	測定対象	適用技術	適用上の要件			技術的課題	
			測定上の要件	測定形状	性能等		
TRU 廃棄物	除染 (雑固体)	(パッシブガンマ法) Q ² 低レベル廃棄物分析システム Ge 検出器(3 台) または NaI 検出器(2 台) (キャンベラ社)	γ線放射核種を定量、他核種は SF 法の適用は可能	200ℓドラム ~2g/cc 程度	10 分/ドラム 検出限界 ²³⁹ Pu 110Bq/g ²⁴⁰ Pu 450Bq/g (密度 1.8g/cc)	Ge 検出器の計数効率、分解能及びエネルギー校正	低エネルギーγ線を測定するために、高エネルギーγ線下での測定手法の確立 検出感度の向上 Key 核種の選定および他核種の SF 法の設定要
		(パッシブ中性子法) パッシブ中性子ドラムカウンタ He-3 検出器(60 本) (キャンベラ社)	自発核分裂/α・n 中性子を定量 他核種は SF 法の適用で評価、内容物が既知	200ℓドラム	1000 秒/ドラム 検出限界 ²⁴⁰ Pu 0.4~0.73 mg/ドラム	He-3 検出器の計数効率確認	内容物による検出感度の補正 Key 核種に対する他核種の SF 法の設定要
		(パッシブ中性子法) TRU ドラムモニター He-3 検出器(36~60 本) (BNFL 社)	同上	200ℓ、500ℓドラム	1000 秒/ドラム 検出限界 20mgPu-total/ドラム 測定精度 ±15%	同上	同上
		(パッシブ/アクティブ中性子法) パッシブ-アクティブ γ線エネルギー評価システム He-3 検出器+Ge 検出器 14MeV 中性子発生管 (BNFL 社)	核分裂性核種を定量 他核種は SF 法の適用で評価、内容物は既知	200ℓ~500ℓドラム	1000 秒/ドラム 検出限界 1mgPu-total/ドラム	中性子発生管の強度確認 検出器の計数効率確認	廃棄物組成により照射中性子束が変化するため、組成の識別定量法の確立 Key 核種に対する他核種の SF 法の設定要
		破壊分析技術 (前記 3.1 項の測定技術)	代表的なサンプリングをし、試料を液体化させる	液体	数千~数万秒/サンプル 測定精度 数%	分析対象核種の化学回収率の確認	前処理に長時間を要するため、この効率化検討時分析対象試料に応じた前処理法の確立 分析対象核種以外のγ線核種分離法の確立 密度が高くなるほど感度は低下する (除染(雑固体)と同様)
	圧縮体	Q ² 低レベル廃棄物分析システム		(除 染 (雑 固 体) と 同 様)			
		パッシブ中性子ドラムカウンタ		(")			(除 染 (雑 固 体) と 同 様)
		TRU ドラムモニター		(")			(")
		パッシブ-アクティブ γ線エネルギー評価システム		(")			(")
		破壊分析技術 (前記 3.1 項の測定技術)		(")			(")
	混練固化体 (均質固化体)	Q ² 低レベル廃棄物分析システム		(除 染 (雑 固 体) と 同 様)			(圧 縮 体) と 同 様)
		パッシブ中性子ドラムカウンタ		(")			(除 染 (雑 固 体) と 同 様)
		TRU ドラムモニター		(")			(")
		パッシブ-アクティブ γ線エネルギー評価システム		(")			(")
		破壊分析技術 (前記 3.1 項の測定技術)		(")			(")
	溶融体	Q ² 低レベル廃棄物分析システム	金属層とセラミック層の境界と各層の密度、溶融後の核種残存率情報要	(除 染 (雑 固 体) と 同 様)			金属層は高密度となるため、検出困難となる (除 染 (雑 固 体) と 同 様)
		パッシブ中性子ドラムカウンタ		(除 染 (雑 固 体) と 同 様)			(除 染 (雑 固 体) と 同 様)
		TRU ドラムモニター		(")			(")
		パッシブ-アクティブ γ線エネルギー評価システム		(")			(")
		破壊分析技術 (前記 3.1 項の測定技術)		(")			(")

表4-3 測定技術の適用性評価と技術的課題

廃棄物	測定対象	適用技術	適用性検討	技術的課題	適用性評価	
低レベル廃棄物 (β/γ)	除染 (雑固体)	(パッシブガンマ法) LLW 搬出検査装置 (三菱、東芝、日立、日揮)	原子力発電所から発生する LLW(均質固化体、充填固化体、圧縮体、溶融体)の放射能濃度測定として実運用及び運用段階にあり、Key 核種を非破壊測定で、難測定核種は破壊分析での核種相関による濃度評価手法(SF 法)により測定される。 サイクル機構殿の施設から発生するものも、同様な手法で対応できると考えられる。	サイクル機構殿の施設から発生する廃棄物に対し、発生区分毎により核種相関が異なる場合、区分に応じた SF 法を設定する必要があり、破壊分析の負荷が生じる。	○	
		(パッシブガンマ法) Q ² 低レベル廃棄物分析システム (キャンベラ社)	Ge 検出器を複数使用しているため測定性能は高くなるが、雑固体では密度・線源偏在がともなうので、この偏在補正機能が必要であり、それらの手法及び性能が明確化していない。γ 線放出核種以外の核種は SF 法を適用することは可能と考える。	雑固体の場合、密度・線源偏在に対する補正機能が必要。 (その他、LLW 搬出検査装置と同様)	×	
		(パッシブガンマ法) NIS/RADOS (ドイツ)	トータルな β・γ 線量から初期放射能を評価するので、単一核種で測定対象物が均質である必要がある。雑固体への適用は困難と考える。	トータル β・γ による放射能評価であり、本技術では雑固体の測定は困難。	×	
		(ガンマセグメント) セグメントガンマスキャナー (BNFL 社)	LLW 搬出検査装置とほぼ同様な対応が可能と考える。	LLW 搬出検査装置とほぼ同様と考える。 国内での実績がない。	△	
		破壊分析技術	測定対象廃棄物を同技術で全数測定することは困難。非破壊測定で測定されない核種に対する Key 核種との相関を測定するのに適している。	分析の効率化と核種単体分離法の高度化が必要と考える。また廃棄物を代表できるサンプリング法の確立も必要と思われる。	○ (SF 法適用による場合)	
	圧縮体	LLW 搬出検査装置	除染 (雑固体) と同様			○
		Q ² 低レベル廃棄物分析システム	除染 (雑固体) と同様			×
		NIS/RADOS	除染 (雑固体) と同様			×
		(パッシブガンマ法) 高速ガンマセグメントシステム (キャンベラ社)	Ge 検出器を複数使用しているため測定性能は高くなるが、密度が低い廃棄物が対象であることから、密度・線源偏在補正機能に難点があると考える。 γ 線検出する核種以外は、SF 法を適用することは可能と考える。	高密度の廃棄物対応が必要 (その他、LLW 搬出検査装置と同様)	△	
		セグメントガンマスキャナー	除染 (雑固体) と同様			△
		破壊分析技術	除染 (雑固体) と同様			○ (SF 法適用による場合)
	混練固化体 (均質固化体)	LLW 搬出検査装置	除染 (雑固体) と同様			○
		Q ² 低レベル廃棄物分析システム	均質固化体である場合、適用できると考えられる。	除染 (雑固体) と同様		○
		NIS/RADOS	除染 (雑固体) と同様			×
		高速ガンマセグメントシステム	圧縮体 と同様			△
		セグメントガンマスキャナー	除染 (雑固体) と同様			○
	破壊分析技術	除染 (雑固体) と同様			○ (SF 法適用による場合)	
	溶融体	LLW 搬出検査装置	電共研で、測定性能について評価済、金属層とセラミック層は各々密度、核種は均質であることを前提とし、各層の境界評価(体積を評価)し測定できる。 γ 核種(Key 核種)以外の核種は SF 法で評価。	金属層とセラミック層の境界検出性能の向上 (その他、除染(雑固体)と同様)	○	
		Q ² 低レベル廃棄物分析システム	密度が高くなるので適用は困難かと考える。	金属層とセラミック層の評価手法の確立	×	
		セグメントガンマスキャナー	除染 (雑固体) と同様			△
破壊分析技術		除染 (雑固体) と同様			○ (SF 法適用による場合)	

表4-4(1/2) 測定技術の適用性評価と技術的課題

廃棄物	測定対象	適用技術	適用性検討	技術的課題	適用性評価	
ウラン廃棄物	除染 (雑固体)	(パッシブガンマ法) Q ² 低レベル廃棄物分析システム (キャンベラ社)	U-235 及び U-238(娘核種)からのγ線スペクトル評価であり、測定装置は実用化されたもので対応できる。但し、本装置では密度が対象であり、密度、線源の偏在補正する機能の補強が必要と考えられる。	天然、回収、濃縮ウランの識別測定法の確立 密度・線源偏在による補正機能の確立	△	
		(アクティブ中性子法) TRU 測定装置 14MeV 中性子発生管(三菱)	U-235 のみの定量で、低密度が対象となる。装置は大型で中性子発生管を用いるため高価である。廃棄物種類により検出感度が異なる。また、全ウラン量を評価するためにはウラン濃縮度が既知である必要がある。	廃棄体組成による検出感度の補正機能の確立 検出感度の向上	×	
		(パッシブ/アクティブ中性子法) パッシブ/アクティブシヤフランシステム ²⁵² Cf 中性子源	アクティブシヤフラが対象で、U-235 のみの定量で低密度が対象となる。 ²⁵² Cf を用いるので、この入手と中性子遮蔽が重要となる。装置は大型で高価である。また、全ウラン量を評価するためにはウラン濃縮度が既知である必要がある。	廃棄体組成による検出感度の補正機能の確立 ²⁵² Cf の入手確保と取扱法を確立 検出感度の向上	×	
		(パッシブ/アクティブ中性子法) パッシブ-アクティブ /γ線エネルギー評価システム (BNFL 社)	アクティブ中性子法とパッシブγ線法を組み合わせることにより、上記のアクティブ中性子法より定量精度は向上できる可能性がある。装置は大型で高価となる。	廃棄体組成による検出感度の補正機能の確立	×	
		破壊分析技術	廃棄体中の代表サンプリングして分析は可能であるが、ドラム缶等に入っている全量を評価するためには、均質であることが条件となるため、困難と考える。	サンプリングしたものが、廃棄体を代表することを担保できることが絶対条件となる。(適用困難か)	×	
	圧縮体	Q ² 低レベル廃棄物分析システム	除 染 (雑 固 体) と 同 様			△
		TRU 測定装置	除 染 (雑 固 体) と 同 様			×
		パッシブ/アクティブシヤフランシステム	除 染 (雑 固 体) と 同 様			×
		パッシブ-アクティブ /γ線エネルギー評価システム	除 染 (雑 固 体) と 同 様			×
		破壊分析技術	除 染 (雑 固 体) と 同 様			×
	混練固化体 (均質固化体)	Q ² 低レベル廃棄物分析システム	均質固化体の場合、ドラム表面近傍からのγ線が効率よく測定できるので、検出感度等向上するため、適用可能と考える	天然、回収、濃縮ウランの識別測定法の確立	○	
		TRU 測定装置	測定されやすくなるが基本的は、除染(雑固体)と同様			×
		パッシブ/アクティブシヤフランシステム	測定されやすくなるが基本的は、除染(雑固体)と同様			×
		パッシブ-アクティブ /γ線エネルギー評価システム	測定されやすくなるが基本的は、除染(雑固体)と同様			×
		破壊分析技術	均質固化体であり、サンプリングにより代表することが担保できるので精度の高い測定が可能である。	サンプルの液化処理法の効率化		
溶融体	Q ² 低レベル廃棄物分析システム	金属層とセラミック層の密度の異なる2層となるため各層からのγ線計数値の重み付けが出来るようにする必要がある。	密度の異なる2層の均質体測定手法の確立	△		
	TRU 測定装置	測定されやすくなるが基本的は、除染(雑固体)と同様			×	
	パッシブ/アクティブシヤフランシステム	測定されやすくなるが基本的は、除染(雑固体)と同様			×	
	パッシブ-アクティブ /γ線エネルギー評価システム	測定されやすくなるが基本的は、除染(雑固体)と同様			×	
	破壊分析技術	金属層とセラミック層の2層となるが、各層ともに均質であれば、サンプリングにより代表することが担保できるので精度の高い測定が可能。但し、1 廃棄体で 2 サンプルの分析が必要。	混練廃棄体と同様			○

表4-4(2/2) 測定技術の適用性評価と技術的課題

廃棄物	測定対象	適用技術	適用性検討	技術的課題	適用性評価	
TRU 廃棄物	除染 (雑固体)	(パッシブガンマ法) Q ² 低レベル廃棄物分析システム (キャンベラ社)	TRU 核種から放出されるγ線は、低エネルギーのγ線であり、高密度及び密度・線源偏在があるものは測定が困難。また Cs-137 や Co-60 のような高エネルギーγ線が混在する場合は、それらの散乱線に更に測定困難となる。 γ線測定が不可能な核種は、SF 法を適用する必要がある。	高エネルギーγ線共存下での測定手法の確立 廃棄物発生区分毎の SF 法適用範囲を確認する必要がある。この場合、Key 核種の選定及び SF 法の設定要。	×	
		(パッシブ中性子法) パッシブ中性子ドラムカウンタ (キャンベラ社)	自発核分裂/(α・n)中性子を定量、他核種についてはSF法を適用する必要がある。測定回路が複雑となり、装置は比較的高価となる。	内容物による検出感度補正の確立 Key 核種の選定及び SF 法の設定要	△	
		(パッシブ中性子法) TRUドラムモニター (BNFL 社)	パッシブ中性子ドラムカウンタとほぼ同様			△
		(パッシブ/アクティブ中性子法) パッシブ-アクティブ γ線エネルギー評価システム (BNFL 社)	核分裂性物質(fissile)と自発核分裂/(α・n)中性子を定量することができる。他核種は SF 法を適用する必要がある。 中性子発生管が必要であり、中性子遮蔽等で装置は大型化し、高価である。	内容物による検出感度補正の確立 Key 核種の選定及び SF 法の設定要	×	
		破壊分析技術	廃棄体中の代表サンプリングをして分析は可能であるが、ドラム缶等に入っている全量を評価するためには、均質であることが条件となるため、困難と考える。	サンプリングしたものが、廃棄体を代表することを担保できることが絶対条件となる。(適用困難か)	×	
	圧縮体	Q ² 低レベル廃棄物分析システム	除染 (雑固体) と同様			×
		TRU 測定装置	除染 (雑固体) と同様			△
		パッシブ/アクティブ/シヤフランシステム	除染 (雑固体) と同様			△
		パッシブ-アクティブ γ線エネルギー評価システム	除染 (雑固体) と同様			×
		破壊分析技術	除染 (雑固体) と同様			×
	混練固化体 (均質固化体)	Q ² 低レベル廃棄物分析システム	測定されやすくなるが基本的は、除染 (雑固体) と同様			×
		パッシブ中性子ドラムカウンタ	測定されやすくなるが基本的は、除染 (雑固体) と同様			△
		TRUドラムモニター	測定されやすくなるが基本的は、除染 (雑固体) と同様			△
		パッシブ-アクティブ γ線エネルギー評価システム	測定されやすくなるが基本的は、除染 (雑固体) と同様			×
		破壊分析技術	均質固化体であり、サンプリングにより代表することが担保できるので精度の高い測定が可能である。	サンプルの液化処理法の効率化 TRU 核種の破壊分析手法(前処理法)の確立		○
	熔融体	Q ² 低レベル廃棄物分析システム	測定されやすくなるが基本的は、除染 (雑固体) と同様			×
		パッシブ中性子ドラムカウンタ	測定されやすくなるが基本的は、除染 (雑固体) と同様			△
		TRUドラムモニター	測定されやすくなるが基本的は、除染 (雑固体) と同様			△
		パッシブ-アクティブ γ線エネルギー評価システム	測定されやすくなるが基本的は、除染 (雑固体) と同様			×
		破壊分析技術	金属層とセラミック層の2層となるが、各層ともに均質であれば、サンプリングにより代表することが担保できるので精度の高い測定が可能。但し、1 廃棄体で 2 サンプルの分析が必要。	混練廃棄体と同様		○

5. クリアランスレベル検認方法の検討

平成11年3月の原子力安全委員会の放射性廃棄物基準専門部会報告書「主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて」で基本的な考え方が示された。この部会における作業は平成12年4月に報告書案を作成し、7月に完成する。その後、検認報告書として原子力安全委員会に提出されるとともに、一般の意見公募を行い同年12月に検認にかかる報告書が完成し基準化される。この報告案では平成11年3月に提示されたものから大きく変動することはないものと考えられるが、実際の放射性廃棄物のクリアランス化を企てるためには、この基準を余裕をもって検認可能な測定・評価技術が必要となる。

専門部会が提示したクリアランスレベルと核種別の測定技術を表5-1に示す。表に示した測定技術は3章で抽出・検討した測定技術のうち検出性能がクリアランスレベル検認に適用できるものを抽出した。なお、検出目標濃度は基準値の一律1/10としている。クリアランス廃棄物の判定基準は、基準値に対する対象核種濃度の分数和が1以下であり、基準値の1/10レベルで各核種の濃度を測定可能であれば、クリアランス廃棄物の判定が可能として選定した。

5.1 破壊分析による検認方法

(1) α 線放出核種

クリアランスレベル検認で全 α 核種として判定するには、全 α 核種分析（全 α 測定法）を適用できるが、核種毎濃度を評価するには、化学分析操作と放射線測定を組合せて放射性物質濃度を評価することとしている。

(2) β 線放出核種

β 線核種（H-3、Sr-90、Tc-99、I-129、Cl-36、C-14、Ni-63）についても、化学分析操作と放射線測定を組合せて放射性物質濃度を評価することとしている。基本的には、科学技術庁の放射能測定シリーズに示される測定方法で放射性物質濃度は測定・評価可能と考えられるが、多くの廃棄物を検認するには合理的な検認手法を検討／技術開発が必要となる。

(3) γ 線放出核種

γ 線放出核種については、基本的に低バックグラウンドのGe検出器を用いたスペクトル測定で放射性物質濃度が評価可能と考えられるが、核種組成によっては、分離操作等も必要と考えられる。

(4) X線放出核種

X線放出核種 (Ca-41、Ni-59、Fe-55) については、X線スペクトルメータにより放射性物質濃度は評価可能と考えられるが、X線はそのエネルギーが低いことから試料形状の影響を受けやすく自己吸収の少ない試料形状とするための前処理や自己吸収を補正することが必要となる。

軽水炉のクリアランス検認で測定困難核種については、スケーリングファクター法 (SF法) で評価する計画となっている。軽水炉以外の施設でも適切なSF値を設定し、検認作業を合理化することが必要と考えられる。

5. 2 非破壊測定手法による検認方法

多量の廃棄物の中からクリアランスレベルを検認するには非破壊測定方式が最も有効な手段として考えられる。軽水炉廃棄物では、炉中からの各系統毎にキー核種とスケーリングファクターを設け、このキー核種を非破壊方式で測定することにより合理的な検認方法を取り入れようと検討している。この検認方法の適用性を検討するに際し以下の項目が重要となる。

- ・ 特性調査とエリア/系統区分
- ・ 二次的な汚染の区分
- ・ 放射化による汚染区分
- ・ 核種別放射能濃度の決定方法
- ・ 難測定核種の評価方法
- ・ クリアランスレベルの検認単位
- ・ クリアランスレベルの判定に必要な測定性能
- ・ 代表点の考え方

これらの諸項目を条件に、種々の検認測定装置の開発が実施されつつある。軽水炉廃棄物用では⁶⁰Coを検出評価しスケーリングファクタを適用することにより廃棄体の検認を行う装置が、原子力発電技術機構(以下、原機構)や三菱重工業などから開発されている。

原機構の開発装置は廃棄物をバルク単位で処理する検認装置で、廃棄物の重量が大きくし検出限界を低くする方式である。数kg~100kgの範囲で0.4Bq/gの検出限界で、これ以上のtonオーダーになると0.004Bq/gの検出限界となる。

また、三菱重工業が開発している装置は廃棄体の最大体積を1m幅×1m奥×0.1m高とし、軽水炉の供用期間から廃止措置に至るまで適用可能なサイズに定めている。そして、検認単位はBq/g以外に表面汚染Bq/cm²の検認単位も同時に測定評価可能な測定機構となって

いる。そのため、廃棄物中の汚染廃棄物、放射化廃棄物を弁別しながら検認可能である。

ここでは、軽水炉廃棄物についての検認装置事例を記載したがウラン廃棄物を対象に合理的検認可能な技術として開発したものとして、大面積の α 線と β γ 線の個別検出器を組み合わせた光伝送型放射線検出器がある。この検出器の性能は開発段階ではあるが1m幅×1m奥の検出面を有し、廃棄体の局所汚染(100cm²)を100秒で0.02Bq/cm²の検出限界を保有している(平均汚染密度としては 1×10^{-4} Bq/cm²)。

この他に、LRADなどの電離作用を利用した方式も考えられるが複雑な廃棄体形状の閉鎖部分には適用できず、環境のラドン、トロンなどの影響を受けやすいなどの課題が存在する。

したがって、今後、軽水炉廃棄物の合理的検認手法の様なウラン廃棄物を対象とした合理的検認方法の検討が必要である。

表 5-1 クリアランスレベル検認方法の検討結果

核種	濃度基準値 (Bq/g) (Bq/cm ²)*	検出目標濃度 (Bq/g) (Bq/cm ²)*	測定技術					
			全α核種分析 (2πガスフローカウンタ)	α線スペクトル分析 (α線スペクトロメータ)	β線核種分析 (2πガスフローカウンタ)	β線スペクトル分析 (液体シンチレーション カウンタ)	γスペクトル分析 (遮蔽付 Ge 検出器)	X線スペクトル分析 (Si(Li)検出器)
全α核種	0.2	0.02	○					
Pu-239	0.2	0.02		○				
Am-241	0.2	0.02		○				
Nb-94	0.2	0.02					○	
Tc-99	0.3	0.03			○			
Co-60	0.4	0.04					○	
Eu-152	0.4	0.04					○	
Eu-154	0.4	0.04					○	
Cs-134	0.5	0.05					○	
I-129	0.7	0.07			○			
Mn-54	1	0.1					○	
Zn-65	1	0.1					○	
Sr-90	1	0.1			○			
Cs-137	1	0.1					○	
Cl-36	2	0.2			○			
C-14	5	0.5				○		
Ca-41	80	8						○
H-3	200	20				○		
Ni-59	600	60						○
Ni-63	2000	200				○		
Fe-55*	3000*	300*						○
測定技術選定根拠			β核種分析と測定記が共用可能	U235,238,Pu239+240, Am-241等のα核種が単独で測定可能	β線が効率良く測定可能(科技庁環境放射能測定マニュアル相当)	低エネルギーβ線が効率良く測定可能(科技庁環境放射能測定マニュアル相当)	複数のγ線核種の同時分析が可能、比較的高感度で測定可能(科技庁環境放射能測定マニュアル相当)	X線領域のスペクトル分析可能
品質保証上の測定項目			回収率 計数効率	回収率 計数効率	回収率 計数効率	回収率 計数効率	模擬線源による測定精度 確認	回収率 計数効率
技術的課題			分析対象試料に応じた前処理法	分析対象試料に応じた前処理法	分析対象試料に応じた前処理法	コンクリート/金属中のH-3の簡便な採取法	なし	分析対象試料に応じた前処理法

謝 辞

本調査報告は核燃料サイクル開発機構殿の御協力のもとにニュークリア・デベロップメント（株）が作成しました。調査検討にあたり資料の御提供や御指導を頂きました東海事業所・環境保全研究開発センター環境保全部技術開発グループの皆様にご礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本原子力産業会議：放射性廃棄物管理ガイドブック (1994)
- 2) 原子力環境整備センター：放射性廃棄物ポケットブック(1999)
- 3) 原子力環境整備センター：原環センタートピックス No. 25(1993)「再処理廃棄物の処理・貯蔵・処分技術の現状」
- 4) 原子力環境整備センター：原環センタートピックス No. 26(1993)「ウラン廃棄物の処理・処分研究の現状」
- 5) 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会：「RI・研究所等廃棄物処理処分の基本的考え方について」(1998)
- 6) 原子力委員会放射性廃棄物安全基準専門部会：「主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて」(1999)
- 7) 日本原子力情報センター：欧州再処理および放射性廃棄物視察団報告書(1993)
- 8) 原子力環境整備センター：原環センタートピックス No. 15(1990)「米国における放射性廃棄物管理」
- 9) 原子力環境整備センター：原環センタートピックス No. 19(1991)「各国における低レベル放射性廃棄物の処分」
- 10) 原子力環境整備センター：原環センタートピックス No. 2(1987)「英国における中低レベル放射性廃棄物の処分」
- 11) 原子力環境整備センター：原環センタートピックス No. 3(1987)「フランスにおける放射性廃棄物の処分」
- 12) 松田文夫：原子力学会誌、Vol. 40, No. 12(1998)「フランスにおける発電所廃棄物の処理・処分の現状」
- 13) 天沼、石原：テクノ・プロジェクト「放射性廃棄物対策に関する原子力委員会専門部会等報告書集大成(1987)

添 付 資 料