

低レベル放射性廃棄物の処理等の
技術開発の在り方について
平成 27 年度報告書

平成 28 年 2 月

一般社団法人 日本原子力学会
「東京電力福島第一原子力発電所事故以降の
低レベル放射性廃棄物処理処分の在り方」特別専門委員会

目 次

1. はじめに.....	1
2. 調査・検討の項目と方法.....	1
2.1 平成 27 年度調査検討における技術の分類と整理	1
2.2 技術の調査	6
3. 調査結果.....	6
3.1 バックエンド技術の評価分析	6
3.1.1 我が国の廃棄物の区分、廃棄体濃度区分及び処分方策	6
3.1.2 技術の現状.....	9
3.1.2.1 廃棄物処理に係る分野	9
3.1.2.2 廃止措置に係る分野	12
3.1.2.3 共通技術	16
3.1.3 現状技術の課題とニーズ	17
3.1.3.1 廃棄物処理に係る分野	17
3.1.3.2 廃止措置に係る分野	20
3.1.3.3 共通技術	22
3.1.4 技術開発の方向性と高度化方策.....	23
3.1.4.1 廃棄物処理に係る分野	23
3.1.4.2 廃止措置に係る分野	24
4. まとめ	29
委員会活動.....	30
【添付資料】	33

1. はじめに

低レベル放射性廃棄物の処理処分については、東京電力福島第一原子力発電所事故（以下、「東電福島第一原発事故」という）以降、事故に由来する放射性物質で汚染された廃棄物の課題もあり、今後の展開が不透明となっている。一方、2012年に改正された原子炉等規制法により、原子炉の運転期間は原則40年とされ、原子力規制委員会の許可を受けて、1回に限り20年を限度として延長することができることから、60年を超える原子炉が原則廃止となった。これにより、廃止措置を進める原子炉が増加することとなり、廃止措置に伴う低レベル放射性廃棄物の発生は今後さらに加速されていくと予想される。また、政府による「エネルギー基本計画」（平成26年4月11日）において、原子力発電の依存度を「可能な限り低減させる」としながらも、原子力発電は「重要なベースロード電源」と位置付けられているため、原子炉の稼働により一定規模の放射性廃棄物が継続して発生することが考えられ、今後の低レベル放射性廃棄物の処理、処分については着実に進めていく必要がある。

循環型社会の実現を目指す我が国にとって、低レベル放射性廃棄物を効果的に処理処分するための技術は、極めて重要なものであり、効果的かつ効率的な技術開発を進めていく必要がある。そのため、現状の処理処分に関する技術体系を整理し、今後の技術開発の方向性及び大学、研究開発機関、メーカー等の関係機関が担うべき役割についての考え方をとりまとめる必要がある。そこで、日本原子力学会「東京電力福島第一原子力発電所事故以降の低レベル放射性廃棄物処理処分の在り方」特別専門委員会（以下、「委員会」）では、「低レベル放射性廃棄物の処理等の技術開発の在り方」を課題の一つとして取り上げ、平成25年度より検討を行ってきたところである（平成25年度は、研究専門委員会として検討を実施）。

本報告書は、平成25年度から平成27年度にわたって検討された「低レベル放射性廃棄物の処理等の技術開発の在り方」におけるバックエンド技術のうち、低レベル放射性廃棄物処理技術と廃止措置技術について、今後の技術開発の課題や方向性を明確にし、技術開発を行う主体（役割分担）の検討を行い、更に、整理された技術毎に、技術の現状、課題、今後の方向性等をとりまとめたものである。

2. 調査・検討の項目と方法

2.1 平成27年度調査検討における技術の分類と整理

平成26年度はバックエンド技術の要素技術を機能等の属性（例：減容技術、切断技術等）に従って分類し、大分類、中分類、小分類と階層化した樹形図を作成した。

平成27年度は、技術を代表するような中分類程度に再分類し、各技術について、技術の現状、課題及び今後の方向性等を調査・整理した。また、個々の技術の原理や属性だけで分類するのではなく、実施する工程毎に適用する技術全体を俯瞰し、高度化に向けての課題やニーズを調査した。更に、廃止措置工程に沿って技術を分類することで、廃棄物の処分及び廃止措置の最終状態に至るまでの各段階における技術的課題を摘出でき、技術開発の方向性を見出しやすくした。

その結果、基本方針として、バックエンド技術を、第一階層を大分類として技術分野を「廃棄物処理技術」、「廃止措置技術」及び「共通技術」とし、第二階層を中分類として作業目的を達成するための工程や作業内容を示す技術として「工程・作業目的別分類」とし、第三階層を小分類として、それぞれに使われる要素技術群として「機能目的による分類」とした。

(1) 分類について

前項の基本方針に基づき調査対象となる技術分野を設定した。大分類の技術は、IAEA の Safety Standards Series No. GSR Part 5 "Predisposal Management of Radioactive Waste : General Safety Requirements" (2009) 等の指針や技術資料を参考にしてさらに中分類、小分類を整理した。

なお、2000 年発行の IAEA Safety Standards Series No.WS-R-2 “Predisposal Management of Radioactive Waste, Including Decommissioning” では、廃棄物の処分前管理 (Predisposal Waste Management) は廃止措置も含め廃棄物処理における前処理、処理及び調製を、また、廃止措置活動は除染、解体、放射性物質と廃棄物の除去、構造物や部品の除去等を含むものとしている。このことから、廃止措置活動の今後の増加により、従来は廃棄物処理技術の範囲に入れられてきた廃止措置技術を広く捉えるものと考えられる。

従って、バックエンド技術の第一階層の大分類として技術分野である廃棄物処理 (Radioactive Waste Processing) 技術及び廃止措置 (Decommissioning) 技術の 2 分野とし、各分野に共通する技術は共通技術としてまとめた。

- ・大分類Ⅰ 廃棄物処理技術 : 中分類 (9 技術)
- ・大分類Ⅱ 廃止措置技術 : 中分類 (10 技術)
- ・共通技術 : 中分類 (2 技術)

(2) 中分類技術の選定と対象範囲

中分類は第二階層である「作業目的を達成するための工程や作業内容を示す技術の括り」として、上記 2 分野を構成する作業の主要工程に沿った技術項目とした。なお、本委員会における技術評価は、中分類毎に行っているが、中分類を構成する代表的な個別技術を小分類とした。大分類及び共通技術を構成する中分類を次に示す。また、大分類ⅠとⅡの間で関連性 (類似性、作業のフロー) について図 2.1-1 に、中分類毎の個別技術の代表例を小分類として表 2.1-1 に示す。

・大分類Ⅰ (廃棄物処理技術) : 中分類 9 技術

1. キャラクタリゼーション、2. 分別、3. 除染 (金属類)、4. 除染 (コンクリート)、5. 細断 (固体廃棄物)、6. 減容 (固体廃棄物)、7. 液体廃棄物処理、8. イオン交換樹脂処理、9. 廃棄物固化・廃棄体化

・大分類Ⅱ (廃止措置技術) : 中分類 10 技術

10. 廃止措置計画策定、11. 施設特性調査、12. 系統除染、13. 炉内構造物解体、
14. 圧力容器解体、15. 施設解体（金属類）、16. 施設解体（コンクリート）、
17. 高線量解体廃棄物固化・廃棄体化、18. 再利用（金属・コンクリート）、
19. 再利用（サイト）

・ 共通技術：中分類 2 技術

20. 放射線計測、21. 遠隔操作技術

大分類Ⅰに属する中分類は、廃棄物処理施設で実施される前処理、処理及び調製（廃棄体化）に相当する技術 9 項目とし、大分類Ⅱに属する中分類は原子力施設の廃止措置で実施される準備、計画、活動及び終了確認の技術 10 項目とした。また、共通技術に属する中分類は 2 項目とした。

なお、廃止措置では IAEA DS452 (SGWS-G-2.1 及び 2.4 の改定版) の活動項目を参考に、これまでの廃止措置活動のフローに基本的に沿ったものとした。図中で廃棄物処理技術は基本的に廃棄物処分の前処理に位置づけさせるため、廃棄体製作への道筋を含めるべきであること、また、廃止措置プロセスからも廃棄物処理への流れがあることを図中の点線矢印で示した。なお、大分類ⅠとⅡに属する中分類技術の内容においては、同目的の技術が重複して記載されている部分もあるが、廃止措置で発生する膨大な廃棄物を既存の処理施設の設備拡充や施設増設で対処する場合も十分考えられることから、併記することとした。

なお、中分類「20 放射線計測」及び「21 遠隔操作技術」は、大分類ⅠとⅡに共通する技術であることから「共通技術」とした。

（３）対象とする原子力施設と放射性廃棄物

バックエンド技術の適用対象とする原子力施設及び放射性廃棄物の性状、種類については、以下のとおりとした。

・ 対象原子力施設

主として原子力発電所を対象。（試験研究用原子炉、核燃料使用施設、加工施設及び RI 施設を含む）

・ 放射性廃棄物の性状と種類

- ① 性状：液体及び固体廃棄物
- ② 廃棄物の種類：
 - (a) 発電所廃棄物
 - (b) 研究施設等廃棄物及び RI 廃棄物
 - (c) ウランを含む廃棄物

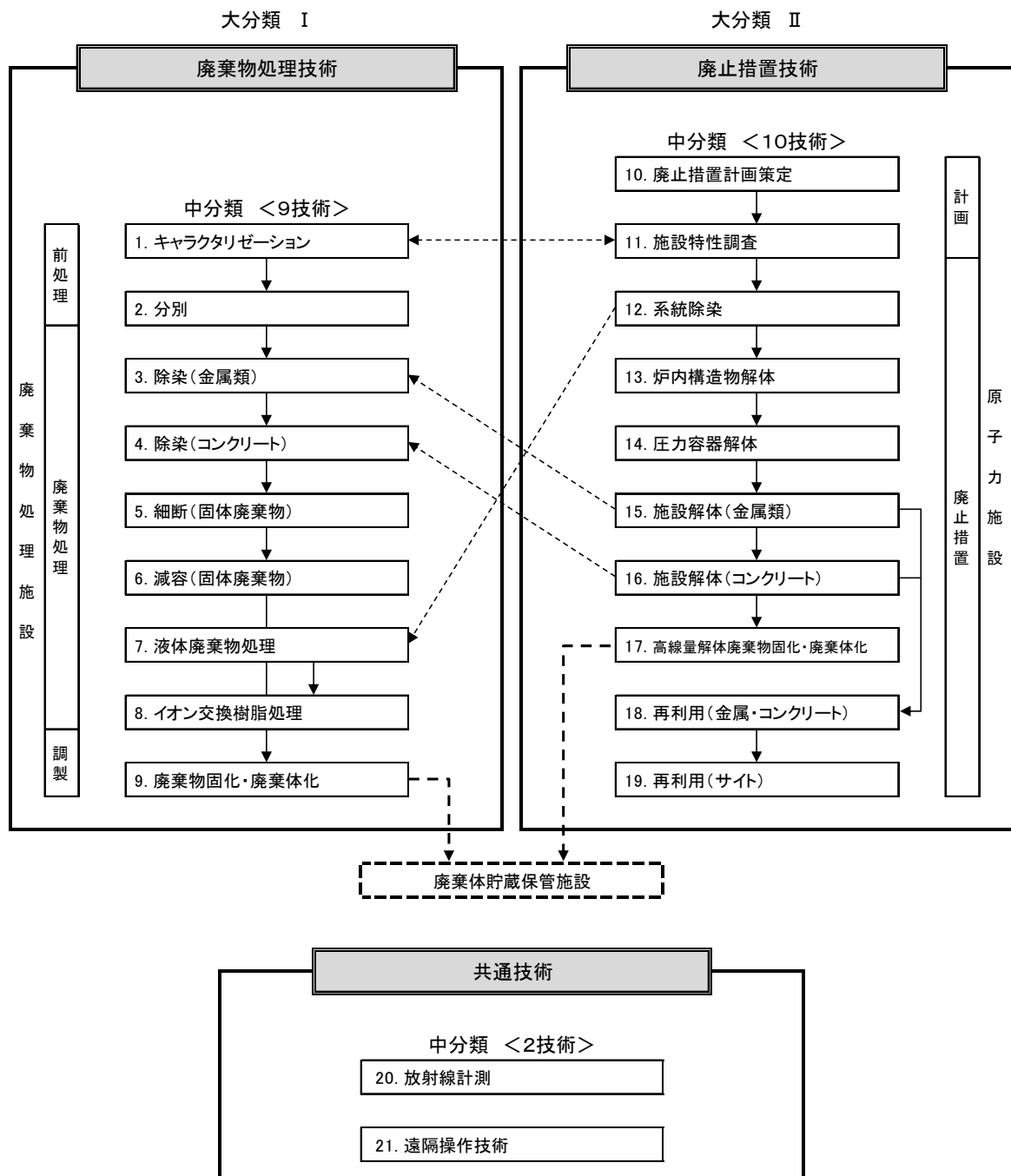


図 2.1-1 バックエンド技術の大分類と中分類及び技術の関連性

表 2.1-1 大分類、中分類及び小分類

大分類Ⅰ

大分類	中分類	技術 番号	小分類 ()内は個別技術の代表例
廃棄物処理 技 術	キャラクタリゼーション	1	放射能インベントリー測定(放射化学分析、パッシブ γ 測定法)、放射線計測(γ 線測定、 α 線測定、 β 線測定)
	分 別	2	産業廃棄物分野(電磁選別、非鉄金属電磁気選別、風力選別)、原子力分野(手動開梱分別)
	除 染 (金属類)	3	物理的处理(プラスト法、噴射法、手動法、熱的方法、金属溶融法)、化学的处理(酸／アルカリ浸漬法、酸化還元溶解法)、電気化学的处理
	除 染 (コンクリート)	4	機械的方法(切削、破碎、プラスト等)、熱的方法、化学的方法(泡沫塗布)
	細 断 (固体廃棄物)	5	熱的切断法(電気利用法、酸化反応利用法)、機械的切断(研削方式、往復運動方式、回転運動方式)
	減 容 (固体廃棄物)	6	焼却処理法、直接圧縮方式、溶融法
	液体廃棄物処理	7	化学的处理(イオン交換脱塩)、物理的处理(蒸発濃縮、中空糸膜ろ過、逆浸透膜)
	イオン交換樹脂処理	8	化学的处理(溶離処理、Fenton 湿式処理)、熱的处理(焼却処理、酸素プラズマ熱分解、ワックス混練固化・焼結)
	廃棄物固化、廃棄体化	9	濃縮廃液固化(セメント、アスファルト、プラスチック、ペレット造粒)、固化(ガラス、溶融)、充填固化(セメント)、新素材固化(ジオポリマー)

大分類Ⅱ

廃止措置 技 術	廃止措置計画策定	10	総合エンジニアリングシステム(廃止措置評価コード)、廃棄物量評価システム(廃止措置物量データシステム)、コスト評価システム(廃止措置コスト評価コード)
	施設特性調査	11	放射化放射能評価技術(DORT 及び ORIGIN-MD による計算)、空間線量率測定技術(サーベイメータ、テレテクター、 γ カメラ)、建屋内外の放射能測定(サンプル採取、スコーピング測定・評価、サーベイメーター)
	系統除染	12	酸化剤・還元剤を用いた除染技術(CORD 法、DFD 法、HOP 法、T-OZON 法)
	炉内構造物解体	13	解体装置位置決め技術(ポーラークレーン、テレスコピックチューブ、テンショントラス、マニピュレータ)、機械的切断技術(レスプロソー切断法、ボルトミーリング切断法、砥石車切断法)、熱的切断技術(プラズマアーク切断法、レーザー切断法、ガス切断法)
	圧力容器解体	14	遠隔解体撤去工法(マスト(回転支柱)型遠隔解体技術)、解体適用ツール(プラズマアークソー、ガス切断(酸素・アセチレン、酸素・プロパン)大型バンドソー)、一括廃棄体化・撤去技術(コンクリートセメント充填による炉内構造物等との一体化搬出技術)
	施設解体 (金属類)	15	機械的切断技術(金属鋸切断法、砥石車切断法、ワイヤーソー切断法、水ジェット切断法)、熱的切断技術(プラズマ切断法、レーザー切断法、ガス切断法)
	施設解体 (コンクリート)	16	切断技術(ダイヤモンドワイヤーソー)、切削技術(スキャブラー)、破碎技術(ブレーカー、制御爆破)、熱的解体技術(直接通電、レーザー)
	高線量解体廃棄物 固化・廃棄体化	17	L1 廃棄物を対象とした容器製作・廃棄体化の方法 (溶接容器の製作、「容器に封入」廃棄体化技術、「容器に固化」廃棄体化技術)、 L1 廃棄物を対象とした靱性鑄造容器の製作・廃棄体化の方法
	再利用 (金属、コンクリート)	18	金属廃棄物の再利用技術(高周波溶融法、溶融時のサンプリング)、大型機器の解体・再利用技術(蒸気発生器(SG)等の解体・溶融法)、コンクリートの再利用技術(コンクリート破碎・サンプル採取、粗骨材の回収)
	再利用 (サイト)	19	放射能インベントリー評価、導出基準濃度算出方法、サイト解放放射線測定マニュアル、放射能濃度測定法、除染技術、測定手法マニュアル

共通技術	放射線計測	20	廃棄物放射線測定(GM 管、シンチレーション式、半導体検出器)、クリアランスにおける放射線計測(バスケット型専用測定装置)、高線量場の測定(テレテクタ)
	遠隔操作技術	21	マニピュレータシステム(動力、センサー、情報収集、操縦系)、遠隔操作工具(先端器具、工具交換システム)、習熟用シミュレータ(仮想現実技術利用、習熟度評価システム)

2.2 技術の調査

2.1 で整理した中分類技術の 21 項目について、以下の調査を実施した。

- (1) 技術の現状
- (2) 現状技術の課題とニーズ
- (3) 技術開発の方向性と高度化方策

具体的には、「(1) 技術の現状」では、当該技術の目的及び内容について基本原理や特長を含む開発動向や技術レベルを調査・評価した。

「(2) 現状技術の課題とニーズ」では、バックエンドにおける技術ニーズについて調査した。

「(3) 技術開発の方向性と高度化方策」では、技術高度化の方策や異種分野でのシーズとなる研究やその開発の具体的枠組み等について検討した。

本委員会は、原子力発電所における運転廃棄物の処理や処分の経験、これまでの廃止措置で適用されてきた技術の現状と経験及び今後の課題を参考とすることが重要であるとの認識から、「原子力発電所の操業・解体に伴う廃棄物処理・処分の現状と今後の技術課題」について電気事業連合会から講演を頂いた。添付資料に講演内容を示す。

3. 調査結果

3.1 バックエンド技術の評価分析

3.1.1 我が国の廃棄物の区分、廃棄体濃度区分及び処分方策

我が国の放射性廃棄物は表 3.1-1 に示すように発生源で区分されており、発電所廃棄物は内容物とその放射能濃度で 3 区分されている。

表 3.1-1 我が国の放射性廃棄物の発生と区分¹⁾

廃棄物の種類			発生源	廃棄物の例
高レベル放射性廃棄物			再処理施設	ガラス固化体
低レベル放射性廃棄物	発電所廃棄物	放射能濃度の比較的高い廃棄物（L1 廃棄物）	原子力発電所	制御棒、炉内構造物
		放射能濃度の比較的低い廃棄物（L2 廃棄物）		廃液、フィルター、廃器材、消耗品等を固形化
		放射能濃度の比較的低く極めて低い廃棄物（L3 廃棄物）		コンクリート、金属等
	超ウラン核種を含む廃棄物		・再処理施設 ・MOX 燃料加工施設	燃料棒の部品、廃液、フィルター
	ウランを含む廃棄物		・ウラン精錬 ・燃料加工施設	消耗品、スラッジ、廃器材
	研究所等廃棄物		大学、企業、研究機関、等	廃液固化体、雑固化体、金属、コンクリート、プラスチック、フィルター
クリアランスレベル以下の廃棄物			上記の全ての発生源	解体廃棄物の大部分

発電所廃棄物のうち「放射能濃度の比較的低い廃棄物」(L2 廃棄物)は、現在、日本原子力発電株式会社の低レベル放射性廃棄物埋設センターに定置されている。

発電所以外の低レベル放射性廃棄物に関しても、第二種埋設処分対象として管理できるものと考えられており、現状の各廃棄物処分における濃度上限値を表 3.1-2 に示す。

表 3.1-2 浅地中処分及び余裕深度処分の濃度上限値

(1) トレンチ処分に係る濃度上限値 (Bq/t) ²⁾

(L3 廃棄物対象)

核 種	濃度上限値
Co-60	1E+10
Sr-90	1E+07
Cs-137	1E+08

(2) ピット処分に係る濃度上限値 (Bq/t) ³⁾

(L2 廃棄物対象)

核種	濃度上限値	核種	濃度上限値
C-14	1E+11	Tc-99	1E+09
Co-60	1E+15	Cs-137	1E+14
Ni-63	1E+13	α 核種	1E+10
Sr-90	1E+13		

(3) 余裕深度処分*に係る濃度区分値 (Bq/t) ⁴⁾

(L1 廃棄物対象)

核種	濃度区分値
C-14	1E+16
Cl-36	1E+13
Tc-99	1E+14
I-129	1E+12
α 核種	1E+11

(※「余裕深度処分」に関しては「中深度処分」とする名称の変更が検討されている)

L1、L2 及び L3 として 3 区分された廃棄物を含む我が国の放射性廃棄物の処分方策を図 3.1-1 に示す。クリアランスレベル以下のものは再利用又は産業廃棄物処分場で処分される。

放射性廃棄物処理（Processing）は、前処理、処理及び調製により廃棄物を処分の要件に適合させることを目的とし、また可能な限り廃棄物量を低減させ、安全性と経済性を向上させることにある。我が国の廃棄物処理技術は既に実績のある多くの技術を有している。

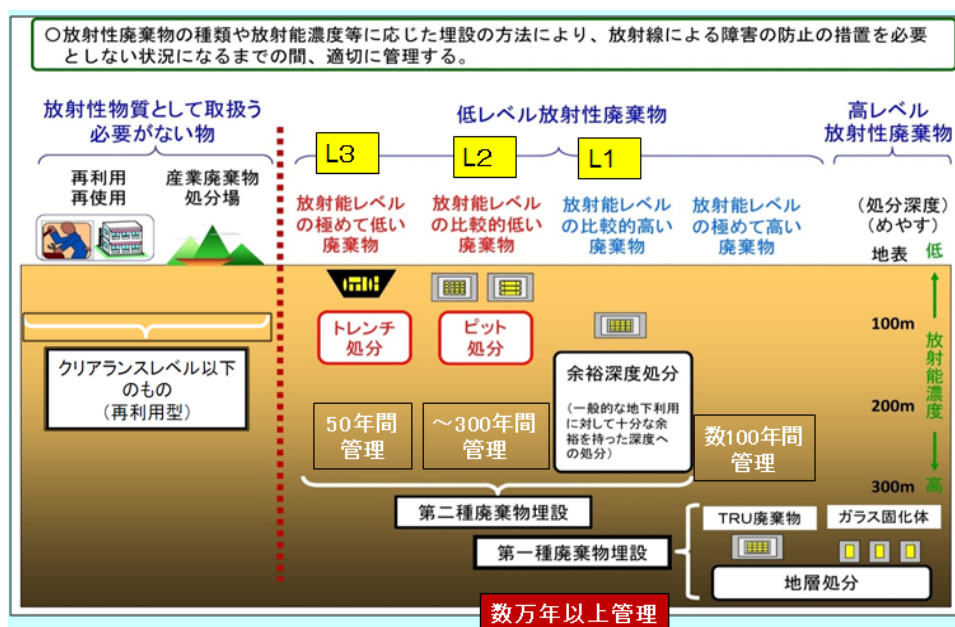


図 3.1-1 我が国の放射性廃棄物の処分方策⁵⁾

表 3.1-1 に区分する放射性廃棄物の中で、L2 廃棄物以外の廃棄物については定常的な処分までの経験*はない。廃棄物処理や廃止措置を円滑に進めるには技術基盤としてこれらの廃棄物の処分方策の早期実現が必要である。

また、原子炉の廃止措置においても原子炉建屋の解体まで行われた事例は旧日本原子力研究所の動力試験炉（以下、JPDR という。）だけであり、今後の発電所の廃止措置に向けた技術基盤の整備と技術の高度化への期待が大きい。このような我が国のバックエンド分野の状況を背景として、廃棄物処理及び廃止措置における技術の調査・評価を行った。（* JPDR の解体コンクリート（L3 廃棄物）の試験埋設の実績はある）

- 1) 資源エネルギー庁ホームページ「放射性廃棄物の区分と発生」から作表
- 2) 「核燃料物質又は核燃料物質に汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則」の別表第二（第一条の二第五号関係）
- 3) 「核燃料物質又は核燃料物質に汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則」の別表第二（第一条の二第四号関係）
- 4) 核燃料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律施行令第三十一条
- 5) 原子力規制庁「第二種廃棄物埋設に係る規制制度の概要」平成 27 年 1 月 26 日資料より作図

3.1.2 技術の現状

3.1.2.1 廃棄物処理に係る分野

(1) キャラクタリゼーション*

放射性廃棄物のキャラクタリゼーションは、主に放射性廃棄物の放射能を評価するもので、その中核技術は放射線計測である。廃棄物処理の最初の段階から搬出、貯蔵保管貯蔵までの工程で放射線を直接またはサンプリングにより測定し、必要により可視化機能も有効に使い放射能を評価し、処分における廃棄体の放射能インベントリー評価及び作業における放射線管理に資するものである。現在、発電所、研究施設等でのインベントリー評価では、サンプリング試料の放射化学分析、スケーリングファクター法等が採用されている。

インベントリー評価では、パッシブ γ 線測定による非破壊法の主要技術はほぼ成熟しているが、ウラン等では α 線計測に代わり微弱な γ 線を計測する技術開発が行われている。今後は、パッシブ測定法の改良、アクティブ測定法の研究に取り組む必要がある。

作業の安全管理、特に廃棄物の極小化、適正な区分けを目的とした廃棄物のキャラクタリゼーションも行われるが、高線量と低線量で遠隔か手動かの相違があるものの γ 線サーベイメーター等が実用化されている。キャラクタリゼーション結果が廃棄物の区分等に適用される処理現場では作業の合理化、迅速化が求められるため、効率的な測定及び処理作業に追従できる測定システムの開発が必要である。（*：ここでは放射線学的キャラクタリゼーションに特化している。）

(2) 分別

放射性廃棄物の分別は、その後の処理を容易化すること、埋設等の基準に従い有害な物質を予め除去することを目的とする。廃棄物の線量により高線量のものはセルや遮へい付グローブボックス、低線量のものは手作業にて行い、現状では大規模な機械的選別装置は使用されていない。発電所のように発生状況から予め放射能の比較的高い廃棄物、比較的低い廃棄物さらに極めて低い廃棄物に分別する場合もある。また、研究施設等廃棄物の処理においても分別が行われるが、既に原子力機構に実績がある分別処理技術が利用できる。今後、多くの原子力施設で廃止措置が増加し機械的分別のニーズが高まることから、合理的、標準的な自動分別装置（特にキャラクタリゼーション測定機能を具備）が必要である。

(3) 除染（金属類）

金属除染技術は、世界的に廃止措置活動も含め多くの開発・利用の経験があり、現在では適用技術はかなり絞られてきた。放射性核種に汚染された金属表面の除染は、作業員の被ばく低減、放射性廃棄物の低減、再利用等を目的に行われる。同一目的でも施設供用中と廃止措置とは手法や個別技術の内容に相違もある。除染技術については、高い除染係数（DF）を得ること、二次廃棄物の低減及び除染コストの低減を図ることが必要である。

各除染技術の分類方法としては、個別の技術を物理的、化学的、電気化学的の3小分類にまとめている。

(4) 除染（コンクリート）

コンクリートの除染には表面や放射性物質が浸透した部分の洗浄（熱的及び泡等）、切削（削りとり）、破碎（衝撃）等により放射性物質を除去する方法がある。原子力施設の低線量部位で対象となるコンクリート除染には、土木・建築工事で用いられる手動タイプの治工具類が多く用いられる。切削に使われる技術で代表的なものはミリングカッター、グラインダー、各種の乾式・湿式ブラスト技術である。破碎技術としては、スキャブラー、ブレーカー（削岩機）、ニードルガン等がある。何れも可搬型の汎用装置である。現場作業に当たっては飛散する粉じんによる内部被ばくの防止のため、切削技術並びに粉じん回収技術に更なる改善が必要であること及び除染効果を迅速に（同時並行的に）評価できる手法の開発が必要である。

(5) 細断（固体廃棄物）

分別された固体廃棄物は、汚染部位を分離し次の処理工程に適合したサイズに調整するため、切断又は破碎（コンクリート類）が行われる。特に、廃棄物収納容器の充填率向上には細断が必要である。L2 相当の廃棄物の容器としては雑固化体用に 200 ℓドラム缶が使われるが、その充填率は処分コストに影響する。これまで固体全般に適用された細断技術はニブラー、バンドソー、ディスクカッター等の機械的切断法、プラズマアーク切断等や酸素ガソリントーチ切断等の熱的切断法であるが、最近のレーザー切断は、二次廃棄物発生量が少ないこと等から採用することへの期待もある。細断のための個別技術も産業分野ではコスト削減と高性能化が図られている。細断技術は、廃止措置での粗解体に続く下流の技術として位置づけられ、効率化が必要である。

(6) 減容（固体廃棄物）

処分容器に収納される廃棄物は、種々の方法で減容し容器への充填率を高める。減容法は焼却法、圧縮法及び熔融法に区分した。焼却法は、排ガス浄化技術を含めて高い減容率の実用化された技術である。圧縮法は、世界的にも国内の発電所でも利用され、最近は、減容比 10 程度の 2,000 t クラスの高圧縮装置が開発利用されている。熔融法は、金属類に対して高周波誘導炉を用いる技術については、欧米及び日本において実用化されている。また、マイクロ波熔融法及び水蒸気改質処理法は焼却灰の熔融及び難燃物の焼却にそれぞれ実用化されている。現在、国内の発電所では焼却法や圧縮法等が、減容比の高い処理方法として使用されている。

(7) 液体廃棄物処理

運転時に原子力発電所から発生する放射性液体廃棄物の大部分は、放射能濃度の低い廃液であり、浄化した後に再利用するか外部放出される。一部のものは、蒸発濃縮処理され、濃縮廃液は固化処理される。浄化された廃液は放射能濃度確認後に外部放出される。PWRの場合、一次系の廃液のみ蒸発濃縮し凝縮後の廃液は外部放出されている。

一般に原子力発電所では、運転停止時の定期検査前に一次系配管の化学除染(系統除染)を行うことが多い。また、廃止措置では、その前段で系統除染が行われる。除染により配管内面に付着した放射性クラッドが化学除染液中に溶解し、放射性核種を大量に含んだ化学除染液が発生する。これらはフィルターやイオン交換樹脂で過及び吸着により除去する。廃液は化学処理と蒸発濃縮されるが濃縮廃液は固化し、蒸留分は放射能濃度を確認して外部放出される。

液体廃棄物処理技術は、発電所やその他の原子力施設では実績ある技術である。一方、系統除染廃液処理では、日本原子力研究開発機構のふげん発電所(以下、ふげん発電所という。)や浜岡原子力発電所等の実績・経験をもとにより標準的、効果的な処理方法が必要である。

(8) イオン交換樹脂処理

原子力発電所の場合、復水系や廃棄物処理系で発生する放射能濃度の低いイオン交換樹脂は、焼却炉で焼却処理されている。しかし、一次冷却水系で発生する放射能濃度の高いイオン交換樹脂は処理できず保管されてきた。PWRのイオン交換樹脂に関しては、樹脂からクラッドや放射性核種を溶離により分離回収できるようになり、濃度の低くなった樹脂は焼却処理を行っている。使用済イオン交換樹脂は発生量も多くかつ放射能濃度も比較的高いため、各国で研究開発が進められている。我が国でも熱的処理や上記の溶離処理のような化学的処理等の開発が進められている。余裕深度処分レベルの使用済イオン交換樹脂・スラッジが未処理で貯蔵保管されており、これらの合理的な処理法の確立が大きな課題である。廃止措置においてもイオン交換樹脂の処理は課題であり、更なる有望技術の絞り込みと実用化が必要である。

(9) 廃棄物固化・廃棄体化

当初の原子力発電所では、主な廃棄物である濃縮廃液について、海洋投棄を前提として耐水性及び耐圧性の観点から、アスファルト固化とセメント固化が耐水性及び耐圧性の観点から実用化された経緯がある。しかし、1972年の廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約(ロンドン条約)により海洋投棄は禁止されて陸地処分されることとなり、より減容効果の高い熔融固化、ペレット造粒固化等が実用化された。六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターの稼働により、我が国でも低レベル放射性廃棄物の埋設処

分が開始された。放射性核種の収着能力が安全評価に大きな役割を占めることから、セメント系固化材による固化が主流になりつつある。

原子力発電所において、固化処理されていない廃棄物としてはイオン交換樹脂、焼却灰等がある。これらの合理的な処理技術及び固化技術の開発が必要である。

3.1.2.2 廃止措置に係る分野

(10) 廃止措置計画策定

廃止措置計画策定の中核技術は、プロジェクト管理ツールであるシステムエンジニアリングであり、廃止措置計画の策定段階から工程、体制、物量、安全、コスト等の管理を行うためのソフトウェアである。原子力発電所のシステムエンジニアリングは 20～30 年間の膨大な物量と作業情報を管理するため、構成するシステムとして汎用のプロジェクト管理、データベース管理、工程管理等のコードシステムが適用される。JPDR において最初に開発された COSMARD コードシステムに続き、ふげん発電所を対象にした DEXUS は三次元 CAD データと可視化技術を使用し廃止措置の管理に適用されている。

膨大な情報を持つデータベースと多様なシステム構成及び 3D 等可視化機能を備えた総合的システムエンジニアリングコードの開発は、単独の機関や組織で実施するのは困難である。我が国では発電所の廃止措置計画管理に利用される総合的な機能を持つシステムエンジニアリングは実現していないが、3D の可視化技術を用いたシミュレーション技術は各所で開発されており、廃棄物量やコストを評価する専用コードもできている。本技術は、国内外の機関相互の情報交換が必要である。

(11) 施設特性調査

施設特性調査は、施設の設計・建設・運転の情報及び放射線学的情報を基に施設の状況を詳細に把握し、各段階で進められる廃止措置活動の安全及び計画的立案に資することを目的とする。放射線学的調査は施設特性調査の重要項目である。これにより廃止措置前からサイト解放に至るまでの作業計画策定や作業・工法の選択、作業員の被ばく評価、廃棄物分類と発生量を評価、規制解除の確認及び廃止措置の効率的かつ安全な実施が可能となる。

放射線学的調査はプラント、設備、機器内の残存放射能インベントリー評価（サンプリング測定含む）、空間線量率評価、運転に伴う施設内部や外部の汚染状況等を詳細に測定するものである。運転履歴の調査も重要で汚染事故等の影響、特にホットスポットの調査も行われる。調査の技術の中心は放射線計測であり、インベントリー評価では各種測定器や汚染検出用サーベイメーター等がある。高線量部位の測定では目的に応じ各種の γ カメラが実用化されている。広範囲な場所では可搬型の測定器やロボット技術の援用が必要である。

(12) 系統除染

軽水炉の一次系の系統除染は、定期検査や解体作業での作業者の被ばく低減を目的に一次冷却系統に付着したクラッド等の汚染物を化学薬品により溶解剥離し、汚染した溶液からフィルターやイオン交換樹脂を用いて放射性物質を除去する除染法である。系統除染は供用中にも行われる等経験ある技術で、これまでに多くの化学除染剤が国内外で試験され、その効果も明らかになってきた。CORD 法を用いた最近のドイツのシュターデ発電所（PWR）の一次冷却系の系統除染では DF70 以上の好成績を挙げている。米国のメインヤンキーでは DFD 法で DF30 程度、スペインのゾリタでは NITROX/DFD 法により一次冷却系、余熱除去系等で DF30 程度が得られている。

日本では、ふげん発電所や浜岡原子力発電所で CORD 法や HOP 法及び T-OZON 法が使われている。系統除染後の廃液はフィルターやイオン交換樹脂で汚染物を回収する。その後の処理は発電所の液体廃棄物処理設備で処理している。

(13) 炉内構造物解体

炉内構造物は原子炉の軸方向及び径方向の中性子分布束に従って炉心周辺は強く放射化されるので接近しての作業はできない。炉内は放射化に加え腐食生成物（CP）で極めて高い汚染状態となっている。定検時の燃料交換で一時的に撤去できる炉内構造物は、廃止措置において除染後に機器除染ピット（DSP）を利用して水中又は気中で遠隔解体するのが一般である。これらの取出しプロセスでは定検時の作業と同様でポーラークレーンや専用の吊具を利用する。

日本では、JPDR において炉内構造物の撤去・解体実績がある。原子炉内には原子炉容器内外に固定された配管のほかに、BWR ではシュラウド管、上下の格子板、ジェットポンプ等が、PWR ではコアバレルやバップル板等があり、これらは遠隔作業で取外し後 DSP へ移動し、DSP 内で水中解体し収納容器に入れたうえで遮蔽容器にて施設外に搬出することが考えられる。炉内構造物の切断や運搬には、水中切断機器やマスト型の遠隔機器が主に用いられ、国内では補修作業として経験が積まれた作業である。

前述の様に、炉内構造物の解体は、炉上部に設けた例えばマスト型マニピュレータと切断装置で行われるが、既に海外では多くの実績があり、実用化されていると言える。附帯的な技術として、切粉の回収や熱的切断でのヒューム対策があり、これらの対策のため炉上部にはグローブボックス等を設置し、負圧管理下に置いて運用することが多い。

(14) 圧力容器解体

原子炉圧力容器の解体には原位置で本体を切断・解体する「切断方式」と圧力容器全体を一括で撤去した後にそのまま埋設処分または解体する「一括撤去方式」があり、両者とも諸外国で幾つかの経験がある。JPDR の場合は切断方式が採用された。

欧米では切断方式と一括撤去方式（浅地中処分）の技術が比較できるようになったが、どちらも技術的に大きな困難はない。切断方式では圧力容器内側から切断工具を設置した支柱をマスト型回転プラグに搭載し回転、伸縮させる。工具はアブレッシブウォータージェット（AWJ）が利用され、プラズマアーク法、機械的切断（ディスクソー）等の在来工法、酸素－ガス切断法も最近の廃止措置では使用されている。

一括撤去方式は接続配管を切り離したのち圧力容器を内容物の有無に拘わらずフランジ部の上蓋で封じ、吊りだし移送する。米国やドイツで行われている。我が国で本技術の実績はないが、海外では種々の炉型で実用段階にある。

（15）施設解体（金属類）

原子炉内の機器設備以外に廃止措置では多くの金属廃棄物が発生する。それらの大半は放射能濃度の低いものであり、基本的には手動で切断・解体される。ここでいう施設解体とは、撤去された低線量の大型構造物である使用済燃料貯蔵ラック、配管類、クレーン、マニピュレータ、ハウジング等を対象とするもので、これらは除染、切断、解体、細断によって廃棄体製作に適するサイズにされる。これら廃棄物の表面汚染の程度に高低はあるが、管理区域での作業として強力な遠隔操作機器を使う場合や、人力による場合の安全な作業環境を維持するためにグローブボックスや簡易フード内で切断する。

切断技術はプラズマアーク等の熱的切断法、AWJ 法やバンドソー等の機械的切断法で簡易なものが用いられる。本技術では、切断時の火災や汚染の拡大が懸念されるが、汚染や塗装等の状況を把握したうえで大型機械の導入が可能な分野でもある。海外では廃棄物集中処理施設での大型低線量廃棄物の切断解体装置が実用段階にある。

（16）施設解体（コンクリート）

原子力発電所の物量の 90～95%を占めるコンクリートの解体と処理は廃止措置において重要な作業である。原子力施設が一般の建築・構造物と異なる点は中性子による放射化により比較的線量が高い部位があり、また運転中に放射性核種により一部が表面汚染されていることである。施設解体の目的は、施設特性調査結果を踏まえそれらの部位を原位置で切除し、放射性廃棄物として分離することである。汚染箇所に対しては切削法や破砕法等の除染技術が類似技術として利用できる。線量が高い部位の解体には安全のため遠隔操作を基本とした機器の援用を受けて切削や破砕を行う。特に生体遮へいの炉心部の放射化部位の解体は、コアボーリング等でブロック切出して非放射化部位から切り離す方法が取られる。放射能レベルが基準以下になった部位に関しては一般的なコンクリート解体手法が取られる。欧米ではこれらの技術は廃止措置で適用されておりほぼ実用段階にある。

（17）高線量解体廃棄物固化・廃棄体化

本技術の中核技術は適切な保管・貯蔵及び処分容器の開発である。解体された高線量の炉内構造物の機器や部材（L1 廃棄物）は、大型高線量廃棄物特有の容器に収納し、廃棄体化される。余裕深度処分に該当する高線量廃棄物の廃棄体化実績はないが、学会標準において、L1 廃棄体の製作に係わる基本的要件が溶接容器で外寸 1.6m×1.6m×1.6m（最小肉厚 5 cm、最大重量 30 t）とする概念が示されている。L1 廃棄物は、多種多様な廃棄物があるため、処理・廃棄体化が困難であると考えられる。技術開発としては、高線量廃棄物のコスト低減化、廃棄体の標準化の必要性も含めた追加検討があり、諸外国の例を参考にした検討が必要である。一例として、ドイツでは MOSAIK 容器及び大型の廃棄体容器（GNS Yellow Box）の実績がある。英国では、廃棄物の保管・貯蔵、処分に関わる新戦略の要件に対応するため、マグノックス用の最終処分容器に開口部の大きい溶接製のサンドイッチ型キャニスター（Sandwich Container）や同サイズの靱性鋳鉄容器（SNT BlueBox）を開発している。米国も C クラス廃棄物の各種容器を持っている。特殊なケースでは一括撤去方式で圧力容器本体を収納容器とした米国トロージャン発電所の例もある。これらの技術も欧米ではほぼ実用段階にある。

（18）再利用（金属、コンクリート）

再利用は循環型社会の形成に不可欠な要素で、廃止措置ではドイツやスウェーデン、英国が積極的に取り組んでいる。再利用のうち金属は付加価値のある材料として、また、コンクリートは骨材再生とともに廃棄物低減の観点から技術が開発されている。再利用の主要なプロセスは除染と汚染部位の検出と切り離しであり、クリアランスを目指す技術である。汚染された鋼材の迅速な除染法としては乾式のブラスト、特に金属粒を用いる方式が使われる。金属廃棄物について、欧米では放射性金属専用の溶融設備を設け、それぞれの施設で年間数千 t 規模の溶融処理を実施し、廃棄物を利用した廃棄物容器の製造も行う等、リサイクルシステムを確立している。

日本原子力発電の東海発電所（以下、東海発電所という。）の廃止措置から発生する金属廃棄物の一部についてはクリアランスの確認を受け、溶融処理し、遮蔽体等への再利用が行われている。一方、コンクリート廃棄物の再利用については、海外では解体された汚染コンクリート処理の場合、粉碎したうえで湿式除染によって主にセシウム核種を除去し、再利用レベル以下にしている事が多く、骨材回収等の技術も開発されている。日本では、JRR-3 改造炉の建設に伴い発生したコンクリート廃棄物についてクリアランスの確認を受け、研究所内の埋め戻し材や駐車場の路盤材等に再利用された。

（19）再利用（サイト）

サイト（土地と建物）の再利用はサイト解放基準以下であることを規制当局が確認することで実現する。欧米各国では建屋を含む無条件のサイト解放を行った発電所は 20 基程度であるが、この基準や跡地利用を巡り事業者、規制者、第三者機関及び住民が協議し合

意を得たうえ最終状態を決めている。現在、日本の基準（規制解除基準値及び確認方法）は整備中であるが、これまでは、対象エリアの線量率及び表面汚染密度が周辺領域のそれに比し同程度以下であることとして認可されている。サイト利用の標準的プロセスと基準は、IAEA や OECD/NEA の指針等で示されている。無条件解放が困難な場合の「条件付解放」の制度・基準も欧米（英国を除く）では有する。サイトの再利用技術の中核は除染技術（特にコンクリート、土壌）と除染効果を確認する放射能測定である。建物や土地の測定面積は広大であるため、欧米では高精度かつ迅速な測定法が規格として適用されている。確率論的汚染評価手法の採用で測定点数の削減も図られている。

3.1.2.3 共通技術

(20) 放射線計測

廃棄物処理及び廃止措置でこれまで使用された技術の現状について、計測が容易な γ 核種の計測は、高精度化や測定の迅速化、可視化等の高度化が実現されつつあるが、 α 線や中性子線等の測定は時間と精度の観点から今後の課題となっている。このような場合にはパッシブ法のみならず何らかのアクティブ手法の開発が必要である。廃止措置では、クリアランスの実施に伴い、規制解除に用いる計測技術及び測定確認手法の検討が求められている。国内では、コンクリート中の H-3 の β 線計測やサイト解放における広域又は地中放射能濃度の測定方法の合理化も求められる。JRR-3 では H-3 を水浸法によりクリアランス測定された。諸外国のサイトの放射能測定では土地は広域の可搬型 In-situ Ge-半導体検出器が用いられている。建屋内面の測定も同様である。

(21) 遠隔操作技術

遠隔操作技術の導入は、作業の安全、特に高線量領域での作業における被ばく防止と効率的で高精度な作業を可能とするものである。原子炉、再処理施設、ホットセル等のホット施設では作業目的に適した遠隔操作機器が装備されている。解体で用いるマニピュレータには頑強な装置が必要で、数百 kg の取扱いが可能なパワーマニピュレータが使用される。廃止措置において必要となる遠隔機器は、切断、切断片の取扱い、搬出等に使用されるため、重量物が扱えて、精度よく位置合わせができるものが必要である。

炉内構造物等の解体では、支援機器としてシミュレータ装置、軽量級の遠隔機器、自走式ロボットに搭載する観察・測定機器等が必要である。遠隔機器に装着される工具は機能が特化されているため、目的に応じた工具が必要である。そのため、迅速な工具交換機能や、使用環境（作業雰囲気、放射線量）に対応できる性能・機能を持った遠隔機器が必要である。

欧米の原子炉解体及び核燃料施設の運転や解体では、これまで遠隔操作機器が多く開発され、センサー類、操作アルゴリズム等の整備が進んでいる。

3.1.3 現状技術の課題とニーズ

低レベル放射性廃棄物処理技術と原子力施設の解体技術に関する調査の結果、現状における技術的課題が明らかになった。主な課題は、迅速な測定技術、被ばく低減を目指す遠隔化や自動化、原子力施設の解体に伴って発生する二次廃棄物の安定化のための処理技術、高度な除染技術等である。ここでは明らかになった技術的課題から技術ニーズを抽出する。

これらの技術は相互に関連を持つものであり、以下に記載される技術ニーズも、大分類に関わらず、相互に関連を持つものが多い。しかし、技術的には同じでもそれぞれの目的に沿ったニーズがあるため、ここではあえて重複を避けず、大分類に沿った技術ニーズのまとめ方を採用した。

3.1.3.1 廃棄物処理に係る分野

(1) キャラクターゼーション

キャラクターゼーションの目的は廃棄物・廃棄体の放射能インベントリーを特定すること及び処理プロセスにおける作業等者の被ばくを防護することであり、その中核技術は放射線の計測である。放射能インベントリー評価では、対象廃棄物のサンプリングと放射化学分析、パッシブγ線測定またはそれらを組み合わせたスケーリングファクター法等が用いられ、これまでに、難測定核種以外の非破壊計測技術は確立されており、ここではα核種やC-14、I-129等の難測定核種の非破壊での放射能評価技術の開発がインベントリー評価の高性能化、効率化に強く求められている。このため、パッシブ計測法の高精度化とともにアクティブ法等を用いた分析技術の開発利用が望まれる。一方、輸送や保管の安全のため、廃棄物の表面線量測定による被ばく防護に係る測定として、高線量廃棄物の測定にはセル等の処理施設のゲートモニター（γ線）や遮蔽容器の表面線量には可搬型測定器による測定が用いられている。分別においては必要に応じ放射能レベルマップを作成し、放射能レベルに応じた仕分も行われる。以上のことからキャラクターゼーションの計測技術は概ね実用化されているものの、キャラクターゼーションに関して次の様な技術ニーズがある。

- 1) 大量の廃棄物に対し、短時間・低コストで放射能測定ができる非破壊分析法
- 2) 高放射性廃棄物の自動処理と連携した計測法
- 3) 低線量廃棄物の手動測定部分の自動化
- 4) アクティブ法による非破壊（放射能）分析法

(2) 分別

分別は、その後に行われる焼却、圧縮、溶融等の処理を容易に進める事と、埋設処分の際の有害物質の混入を防ぐため、処理の前に有害物質を除去する事を目的に実施される。

これらの処理の大部分は自動化した分別装置は使われず、手動で行われている。特に吸入摂取が問題となる廃棄物や微粒子等の飛散が心配されるものに対してはグローブボックス等で手動分別されている。しかし、今後、廃止措置によって発生する大量の廃棄物に対処するため、分別に関して次の様な技術ニーズがある。

- 1) 金属廃棄物からの有害物（Pb、Al 等）の自動分別技術
- 2) 廃止措置に向けた大量廃棄物の自動分別技術

（３）除染（金属類）

廃止措置で発生する廃棄物の除染の目的は、放射能レベルを低下させ、作業における被ばくを低減すること及び放射性廃棄物の放射能レベルを低下させることである。このため、廃止措置過程の除染（金属類）に関して次の様な技術ニーズがある。

- 1) 物理的除染における研磨剤等の二次廃棄物量低減と二次廃棄物処理における被ばく低減
- 2) 化学的除染における化学廃液等の二次廃棄物量低減と二次廃棄物処理での被ばく低減

（４）除染（コンクリート）

廃止措置におけるコンクリート除染で使用される機器は、工業界で使用されているものが大部分で、プレーナー、スキャブラー等が代表例である。コンクリートの除染は、コンクリート表面を薄く削り取ることで行うが、同時に放射性物質を含んだ多量の粉塵が発生する。従って、作業者の被ばく防止と放射性物質を含んだ粉塵の拡散を防ぐため、除染（コンクリート）に関して次の様な技術ニーズがある。

- 1) 原子炉建屋除染時の高所作業等における安全性確保のための遠隔除染技術
- 2) 放射性粉塵の回収と閉じ込め技術

（５）細断（固体廃棄物）

細断のための切断技術としては基本的に既存技術が活用され、熱的切断と機械的切断に大きく分類される。熱的切断には、レーザー切断、プラズマアーク切断、機械的切断にはバンドソー、ディスクカッター、ダイヤモンドワイヤーソー等がある。熱的切断法の場合、スパッタや低蒸気圧放射性物質の揮発等による二次廃棄物の発生、及び汚染範囲の拡大が懸念されている。細断技術に関して次の様な技術ニーズがある。

- 1) 切断ヒューム等による被ばく防止のための遠隔化
- 2) 機械的切断工具交換時の被ばく防止のための工具の長寿命化

（６）減容（固体廃棄物）

固体廃棄物の減容方法には切断法、圧縮法、焼却法、熔融法等がある。圧縮法や切断法に技術上の大きな問題はない。一方、熔融法は主として無機材質について適用され、減容率が大きく均一な廃棄体ができる特徴がある。減容における課題として高放射性物質の減容作業時の被ばく防止や、有害物質が混入した時の取り扱い対応が必要である。減容に関して次の様な技術ニーズがある。

- 1) 高放射化廃棄物の減容時の被ばく対策
- 2) 減容装置の自動化
- 3) 有害化学物質を含んだ廃棄物の処理法
- 4) 焼却、熔融におけるオフガス処理と工程廃棄物処理の高度化

(7) 液体廃棄物処理

原子力発電所から発生する液体廃棄物の種類は炉型によって異なるが、基本的に廃液処理方法は実用化されている。しかし、洗濯廃液の発生量は、近年のフロン規制によるドライクリーニングの中止から、増加傾向にあり、洗濯廃液の乾燥粉末化による減容が新しい技術として採用されている。また、除染廃液の処理にはイオン交換樹脂が多用されているが、使用済みイオン交換樹脂の処理については技術開発の余地がある。液体廃棄物処理に関して次の様な技術ニーズがある。

- 1) 洗濯廃液処理技術

(8) イオン交換樹脂処理

放射能レベルの低いイオン交換樹脂は焼却処理が行われているが、放射能レベルが高いイオン交換樹脂の場合、処理なしで貯蔵されている。放射能レベルの高いイオン交換樹脂から放射性物質を分離回収することで、焼却処理を可能とするための研究が行なわれている。イオン交換樹脂処理に関して次の様な技術ニーズがある。

- 1) 溶離処理後の高線量廃液の処理システム
- 2) 系統除染廃液処理後のイオン交換樹脂の処理技術

(9) 廃棄物固化・廃棄体化

濃縮廃液や雑固体廃棄物の固化技術として、アスファルト固化、プラスチック固化、ペレット固化、熔融固化、セメント固化が実用化されているが、最近では、減容性の低いセメント系に戻りつつある。処分施設の安全評価に対応したものであるが、新材料による固化技術開発が望まれる。また、焼却灰等が大部分未処理で貯蔵されており、この廃棄物への対応が今後の課題として残っている。海外では低レベル放射性廃液のガラス固化も報告されている。廃棄物固化・廃棄体化に関して次の様な技術ニーズがある。

- 1) 未処理の焼却灰等の廃棄物固化技術

3.1.3.2 廃止措置に係る分野

(10) 廃止措置計画策定

廃止措置のプロジェクトマネジメント（廃止措置計画策定を含む）は、廃止措置の計画策定段階（実施中も含む）から、要員、工程、廃棄物量、コスト等の評価を行い、それらに沿った廃止措置活動が可能な組織や設備等、管理体制の枠組みの構築を行う分野である。原子炉施設の廃止措置では膨大な情報とナレッジマネジメントを必要とするうえ、炉毎に異なる規制内容、炉型、出力、解体方法、社会受容性等を考慮した汎用システムの構築が必要である。廃止措置計画策定に関して次の様な技術ニーズがある。

- 1) 国内外の廃止措置評価データの蓄積と評価システムの高精度化
- 2) 汎用システムエンジニアリングコードの構築

(11) 施設特性調査

施設特性調査の対象は、施設内の汚染レベル、空間線量、設計データ、施設建設記録データ、運転管理データ、放射能インベントリー、物量等で、廃止措置シナリオ検討、安全管理、コスト評価等に反映される。この調査は施設の運転中から開始し、解体が完了し、規制解除に至るまで継続される。我が国における廃止措置を効率的に進めるためには、海外の廃止措置の事例や規制指針を集約し、参考とすることが必要となる。このため、情報の収集と評価を進めると共に、大量の情報を効果的に活用できるシステム構築も必要である。施設特性調査に関して次の様な技術ニーズがある。

- 1) 廃止措置に関わる情報活用システム構築

(12) 系統除染

系統除染は除染する機器、配管内に化学溶液を循環させ、内表面の汚染放射性物質を溶出させる方法である。系統除染で重要なことは除染効果の向上の他に、二次廃棄物発生量の低減及びその処理がある。また、作業時の被ばく低減のため、除染手順、安全管理、除染液の漏洩対策を標準マニュアルとして整備することが重要である。系統除染に関して次の様な技術ニーズがある。

- 1) 施設特性調査に基づく系統除染技術の選択方法の標準化
- 2) 被ばく低減のための標準マニュアル
- 3) 設備の共用できる移動可能な系統除染装置
- 4) 除染情報のデータベース化

(13) 炉内構造物解体

炉内構造物は長期間の中性子照射により放射化しており、解体には遠隔技術が必要である。切断器具には既存のものが適用でき、対象となる原子炉の状況によって選定する。原

子炉の炉内構造物解体実績は海外で多く積み重ねられており、原子炉室上部からマスト型の遠隔装置を用いて切断器具を炉内に導く方式が多く用いられている。炉内構造物の切断において、考慮すべきは二次廃棄物の発生である。また、遠隔装置の負荷軽減と、狭隘部への接近性のため、切断器具の小型化は重要である。炉内構造物解体に関して次の様な技術ニーズがある。

- 1) 切断時に発生する二次廃棄物の拡散防止及び回収・梱包技術
- 2) 遠隔操作機器への搭載のための切断装置の小型化

(14) 压力容器解体

今後の廃止措置における原子炉压力容器解体の方法については、細断方式と一括撤去方式を比較評価し選定する必要がある。また、切断方法の選択、二次廃棄物対策等についての検討評価も重要である。これらの状況から、压力容器解体に関して次の様な技術ニーズがある。

- 1) 切断後の細断物回収
- 2) 二次廃棄物回収技術

(15) 施設解体（金属類）

原子力施設のような、大型で複数の材質が混在する構造物の解体では、切断対象の寸法や材質に応じ適用する切断技術の選択が必要である。切断手段は対象の大きさや切断環境で選択される。これらの切断技術は一般的技術であり、放射線環境への対応が必要である。施設解体撤去に関して次の様な技術ニーズがある。

- 1) 工具の破損防止と遠隔交換性向上
- 2) ワイヤソーの遠隔操作技術
- 3) 切断ノズル（熱的切断法）の自動スタンドオフ調整技術
- 4) 耐放射線性向上

(16) 施設解体（コンクリート）

廃止措置対象のコンクリート構造物は放射性物質に汚染されたもの、放射化したもの等を含む不均一構造であるため、高放射線量部位を含むものと放射線量の低い部位を考慮して解体されている。そのため、コンクリート構造物の解体では、放射性廃棄物の発生量を少なくするため、汚染が浸透した表面を切削してから解体する等の手法が用いられる。汚染部位の除去は一般工業界で使用されている切削技術が応用される。課題としては、コンクリート切削に伴って発生する放射性粉じん対策が挙げられる。施設解体(コンクリート)に関して次の様な技術ニーズがある。

- 1) 切断方法と二次廃棄物回収の遠隔化と自動化
- 2) 切断工具等の長寿命化

3) 粉塵の回収及び処理技術

(17) 高線量解体廃棄物固化・廃棄体化

L1 廃棄物の廃棄体製作については日本原子力学会標準に 2 例が示されているが、L1 廃棄物の細断あるいは処理、廃棄体化の作業実績がないため、L1 廃棄体製作方法に係るコスト等については、低減化を含め、評価する必要がある。高線量解体廃棄物固化・廃棄体化に関して次の様な技術ニーズがある。

1) 多種多様な廃棄物への対応やコストの評価

(18) 再利用（金属・コンクリート）

解体で発生する金属廃棄物の再利用では溶融法が適用される。海外では大量の金属等の再利用が行われている。除染し、クリアランスした金属類は溶融されインゴットに再生産され、コンクリートは埋め戻し材として再利用が行われている。廃棄物の細断・溶融装置と連携したクリアランス検認方法があれば更に効果的である。再利用（金属・コンクリート）に関して次の様な技術ニーズがある。

1) 細断溶融処理と連携したクリアランス検認システム

(19) 再利用（サイト）

サイトの再利用技術には除染（特にコンクリート、土壌）と除染効果を確認する放射線測定がある。現在、サイト解放に係る基準等が無いことから技術ニーズはサイト解放の制度・政策的な課題を抽出した。サイト解放に至るまでの評価のプロセスについては、IAEA や米国のマニュアルを参考に手順の確立を図ることが重要である。また、サイト解放では核種毎の評価や認可が必要となるが、諸外国ではその基準濃度を簡易に評価する計算コードが公開され利用されている。評価コードの整備、土地や建物の汚染密度の測定と基準値の確認における評価点数や測定方法に関する標準化が必要である。再利用（サイト）に関して次の様な技術ニーズがある。

1) サイト解放マニュアル等の整備

2) サイト解放の基準値の導出に係るコード類の整備

3.1.3.3 共通技術

(20) 放射線計測

放射線計測技術は、作業者の被ばく管理、周辺環境の監視等のために行うものであり、その機器は放射線の電離や蛍光作用を利用する検出器、パッシブ法やアクティブ法の検出部及び検出された電気信号の処理システムから構成される。

クリアランス測定では、大量の測定対象の微量な放射性物質を正確に精度よく測定する必要がある。新しい放射線計測技術については研究が継続されている。放射線計測に関して次の様な技術ニーズがある。

- 1) 土壌やコンクリートに浸透した放射性物質の迅速測定技術
- 2) 高分解能シンチレータ検出器
- 3) 容器内に偏在した時の計測・評価

(21) 遠隔操作技術

遠隔技術は、原子力施設の運転・解体において重要な技術である。遠隔機器は単機能のものが多く、遠隔操作技術の高度化は、電子技術を応用した知能化を考慮する必要がある。遠隔機器の操作性向上、耐放射線性の向上、技能訓練方法の合理化などが必要である。遠隔操作技術に関して次の様な技術ニーズがある。

- 1) 遠隔機器の自律化
- 2) 操作性の向上と技能訓練システム

3.1.4 技術開発の方向性と高度化方策

技術開発の方向性として、技術の高度化やシーズの中から開発項目や考え方を抽出し、表 3.2.4-1 に中分類の技術項目毎に「技術ニーズ」と「技術開発の方向性」及び「開発主体」について、①廃棄物処理技術、②廃止措置技術毎の検討結果を以下にまとめた。

3.1.4.1 廃棄物処理に係る分野

廃棄物処理技術については、商業用原子力発電所、研究開発炉及び核燃料使用施設等で既に実施済みの技術が大部分であるが、未処理の廃棄物や合理化ニーズに基づいた開発すべき技術がある。

(1) 放射線計測技術

α 核種、C-14、I-129 等の難測定核種の計測では、従来、湿式の破壊分析及びその後の放射線計測を組み合わせた手法が主となっていた。将来的には乾式測定による簡便、高精度測定やクティブ法の開発による非破壊測定技術の研究開発が望まれる。

(2) 高線量廃棄物への対応技術

余裕深度処分対象の L1 廃棄物の廃棄体化は、日本原子力学会標準で製作方法が例示されているが、現在、高線量廃棄物のほとんどは処理されず貯蔵されているのみである。高線量の多種多様な廃棄物に対して海外の例も参考にする等、コスト低減化を含む廃棄体製作に向けた処理技術開発が望まれる。

(3) 新素材の開発・適用

従来の素材に代わる廃液処理フィルターや廃棄物固化材の開発が望まれる。中空糸膜の採用により再生廃液を劇的に低減した実績があり、新素材の開発による洗濯廃液の新たな処理法や核種収着能力と減容能力に優れた新たな固化材が期待される。また、イオン交換樹脂の新たな処理及び固化技術の開発が望まれる。

(4) 一般産業分野からの応用

一般産業で大規模に実用化されている技術の適用により、大幅な作業合理化の可能性がある。固体廃棄物の処理前の分別に一部自動化が試みられているが、一般産業分野よりも高い精度が要求される等の課題がある。廃止措置段階では大量の廃棄物が対象となることから、分別技術の高度化が望まれる。

3.1.4.2 廃止措置に係る分野

米国、英国、ドイツ等では既に商業用軽水炉の廃止措置の実績が多く、これらの実績技術の調査検討の中から今後の高度化及び技術ニーズの抽出を行った。

(1) システム技術

システム技術は、プラントの 3D 情報、バーチャルリアリティ等を取り入れた廃止措置のエンジニアリングシステムなどがあり、原子炉の設計建設段階から廃止措置の計画策定を支援するなど、必要不可欠な技術になるものと考えられ、これらの総合的な開発が望まれる。

(2) 除染技術

系統除染技術は種々の方法が開発実用化されている。実際の運用段階での課題は、作業の標準化やマニュアル整備等を体系化することによる作業の合理化と除染廃液の処理により生じる二次廃棄物の低減方策がある。二次廃棄物については、廃液をイオン交換樹脂やフィルター等で処理しており、その処理方策が求められる。また、運用の合理化については、運転中の原子炉でも定期的に系統除染が実施されており、廃止措置の際にも運転中の原子炉と共用できるコンパクトな系統除染システムと運用システムを構築することにより合理化が望まれる。

(3) 遠隔技術

国家プロジェクトとして、フランスでは"Maestro"、アメリカでは"RIM"という遠隔技術の開発を実施している。

遠隔技術の高度化には電子機器の耐放射線性向上と高度な電子技術の適用、遠隔操作技術向上を目的としたバーチャルリアリティを用いた施設の準備等、中長期的な研究開発が望まれる。

（４）廃棄物処理技術

高線量廃棄物については遠隔操作技術による安全な処理、低線量廃棄物については処理の迅速・自動化等が期待されるとともに、クリアランスのための計測システムや再利用の促進が求められる。

廃止措置において発生する廃棄物に対する包括的な処分対応が必要であり、産業廃棄物としての処分、クリアランス廃棄物の再利用、大量の極低レベル放射性廃棄物のトレンチ処分、高線量廃棄物の処分等、合理的な対応が望まれる。

（５）再利用

金属やコンクリートの再利用は廃棄物を低減するために不可欠であり、欧米では金属廃棄物を溶融施設にて溶融処理し、廃棄物容器として活用している。これは条件付き再利用とともに、極低レベル放射性廃棄物を活用しているものが多く、我が国でも検討が望まれる。サイト解放については、汚染状況の計測評価技術の構築が望まれる。

表 3.1.4-1 バックエンド技術のニーズ及び技術高度化に向けた技術開発の方向性

大分類	中分類	技術ニーズ	技術開発の方向性	開発主体*
廃棄物処理技術	1. キャラクターゼーション	①大量の廃棄物に対し、短時間・低コストで放射線測定ができる非破壊分析法 ②高放射性廃棄物の自動処理と連携した計測法 ③低線量廃棄物の手動測定部分の自動化 ④アクティブ法による非破壊（放射能）分析法	(1) 高度化及び実用化が望まれる技術 ・α核種、C-14、I-129等の非破壊（放射能）測定技術又は乾式分析技術 ・廃棄物処理と連携した放射線測定技術の開発 ・高ガンマ線環境下でのガンマ線分布迅速測定技術 (2) 高度化方策 ・難測定技術や非破壊（放射能）測定技術の開発によるインベントリー評価技術の高度化。アクティブ分析手法の開発、化学分析等異分野の技術導入	計測技術の高度化研究では、大学、産業界、研究機関 システム構築では、電気事業者、研究機関、産業界、大学 規制要件では、規制当局の参画
	2. 分 別	①金属廃棄物からの有害物（Pb、Al等）の自動分別技術 ②廃止措置に向けた大量廃棄物の自動分別技術	(1) 高度化及び実用化が望まれる技術 ・産業廃棄物分野での有用材料等の分別技術の適用 ・廃止措置に向けた多種多様な廃棄物の自動分別処理技術 (2) 高度化方策 ・大量な廃棄物の場合に、キャラクターゼーション機能を備えた合理的管理システムの実用化	管理システム構築 のでは、電気事業者、産業界及び研究機関
	3. 除 染 （金属類）	①物理的除染における研磨剤等の二次廃棄物発生量低減と二次廃棄物処理における被ばく低減 ②化学的除染における化学廃液等の二次廃棄物量低減と二次廃棄物処理での被ばく低減	(1) 高度化及び実用化が望まれる技術 ・研磨剤、化学溶液等の二次廃棄物低減化及び作業者の安全確保のための自動・遠隔化技術の開発 (2) 高度化方策 ・高線量機器や系統の遠隔除染技術開発	自動化・遠隔化では、産業界、電気事業者
	4. 除 染 （コンクリート）	①原子炉建屋除染時の高所作業等における安全性確保のための遠隔除染技術 ②放射性粉塵の回収と閉じ込め技術	(1) 高度化及び実用化が望まれる技術 ・高所作業等における安全性確保のための作業遠隔化、自動化技術の開発 ・汚染粉塵の挙動研究（シミュレーション等）と防護技術 (2) 高度化方策 ・コンクリート粉塵の挙動シミュレーションの基礎研究	コンクリート粉塵の挙動シミュレーションでは、大学、研究機関、産業界
	5. 細 断 （固体廃棄物）	①切断ヒューム等による被ばく防止のための遠隔化 ②機械的切断工具交換時の被ばく防止のための工具の長寿命化	(1) 高度化及び実用化が望まれる技術 ・作業者の安全、負担軽減、被ばく低減の観点から、作業の自動化・遠隔化技術の開発 (2) 高度化方策 ・作業の自動化・遠隔化の開発、工具の長寿命化	自動化・遠隔化では、産業界、電気事業者
	6. 減 容 （固体廃棄物）	①高放射化廃棄物の減容時の被ばく対策 ②減容装置の自動化 ③有害化学物質を含んだ廃棄物の処理法 ④焼却、熔融におけるオフガス処理と工程廃棄物処理の高度化	(1) 高度化及び実用化が望まれる技術 ・高線量廃棄物の減容処理における遠隔化、自動化 (2) 高度化方策 ・実績ある欧米の研究機関等の事例を参考に国内の既存技術の改良、高性能化を図る	高線量廃棄物では、研究機関、産業界、電気事業者
	7. 液体廃棄物処理	① 洗濯廃液処理技術	(1) 高度化及び実用化が望まれる技術 ・中空糸膜ろ過技術に匹敵する洗濯廃液処理技術の革新 (2) 高度化方策 ・有機物分解に関する新たなシーズ技術の基礎研究	基礎研究では、大学、研究機関等の機関でのシーズ発掘
	8. イオン交換樹脂処理	①溶離処理後の高線量廃液の処理システム ②系統除染廃液処理後のイオン交換樹脂の処理技術	(1) 高度化及び実用化が望まれる技術 ・余裕深度処分も含めた高線量樹脂の処理処分システム構築 (2) 高度化方策 ・未処理のまま貯蔵中の高線量樹脂の処理のため、異分野の技術の調査と基礎研究の立上げ。	高線量樹脂では、電気事業者、研究機関、規制当局

大分類	中分類	技術ニーズ	技術開発の方向性	開発主体*
	9. 廃棄物固化・廃棄体化	①未処理の焼却灰等の廃棄物固化技術	(1) 高度化及び実用化が望まれる技術 ・イオン交換樹脂、焼却灰の固化処理技術 ・ジオポリマー等の新規無機材料による固化技術 (2) 高度化方策 ・従来のセメント固化が難しい焼却灰やイオン交換樹脂に対応可能な固化材の研究開発	未固化焼却灰等では、電気事業者、大学等の基礎研究、異分野からのシーズ発掘
廃止措置技術	10. 廃止措置計画策定	①国内外の廃止措置評価データの蓄積と評価システムの高精度化 ②汎用システムエンジニアリングコードの構築	(1) 高度化及び実用化が望まれる技術 ・廃止措置の計画進行において透明性を持って確認・監視できるツールとして汎用プロジェクト管理コードシステム・国内外の廃止措置実績データの収集とデータベース構築 (2) 高度化方策 ・国内及び国際協力によるコードシステムの高精度化（ベンチマーク）	データベース、システム開発では大学・研究機関を中心に、電気事業者、産業界 規制要件では、規制当局の参画
	11. 施設特性調査	①廃止措置に関わる情報活用システム構築	(1) 高度化及び実用化が望まれる技術 ・施設特性調査の法規準、マニュアル、技術規格の整備 (2) 高度化方策 ・施設特性調査の情報データベース（設計データ、建設記録、保守、被ばく管理等）の構築 ・調査結果の評価のためのプロジェクト管理ツールの開発	電気事業者、大学、産業界、エネ庁、規制当局
	12. 系統除染	①施設特性に基づく系統除染技術の選択方法の標準化 ②被ばく低減のため、標準マニュアルの整備 ③共用可能な系統除染装置 ④除染情報のデータベース化	(1) 高度化及び実用化が望まれる技術 ・共用型系統除染装置 ・運転のマニュアル化・システム化 (2) 高度化方策 ・データベースの構築	基礎研究では大学、研究機関、技術開発では、産業界、電気事業者
	13. 炉内構造物解体	①切断時に発生する二次廃棄物の拡散防止及び回収・梱包技術 ②遠隔操作機器への搭載のための切断装置の小型化	(1) 高度化及び実用化が望まれる技術 ・自律作業型遠隔装置による解体 ・バーチャルリアリティを活用した解体高度化技術の開発 (2) 高度化方策 ・高線量な炉内機器等の解体に適用できる中長期的なバーチャルリアリティの開発及び実証	基礎研究では、大学、研究機関、情報共有と共同開発では、電気事業者、産業界
	14. 压力容器解体	①切断後の細断物回収 ②二次廃棄物回収技術	(1) 高度化及び実用化が望まれる技術 ・細断物、二次廃棄物回収技術の確立 (2) 高度化方策 ・回収技術の自動化検討	研究機関、電気事業者、エネ庁、規制当局、技術開発では大学、産業界、電気事業者
	15. 施設解体（金属類）	①工具の破損防止と遠隔交換性向上 ②ワイヤーソーの遠隔操作技術 ③切断ノズル（熱的切断法）の自動スタンドオフ調整技術 ④耐放射線性向上	(1) 高度化及び実用化が望まれる技術 ・機械的切断技術の遠隔化、迅速化 ・ファイバーレーザの高出力化と耐放射線性向上 (2) 高度化方策 ・原子炉の構造・形態に応じた切断工法自動選択システム化	研究開発機関、電気事業者、産業界
	16. 施設解体（コンクリート）	①切断方法と二次廃棄物回収の遠隔化と自動化 ②切断工具等の長寿命化 ③粉塵の回収及び処理技術	(1) 高度化及び実用化が望まれる技術 ・粉じん対策を中心とした作業環境の安全対策と被ばく防止技術・解体作業の遠隔化・自動化及び機器の耐久性向上 (2) 高度化方策 ・遠隔自動化による効率向上と粉塵等の防護技術開発	基礎研究では、大学、研究機関、応用研究・実証では、電気事業者、産業界、
	17. 高線量解体 廃棄物固化・廃棄体化	①多種多様な廃棄物への対応やコスト評価	(1) 高度化及び実用化が望まれる技術 ・多種多様な形態の高線量廃棄物に応じた処分施設への適合性を考慮した最適廃棄体（容器含む）の開発 (2) 高度化方策 ・学会標準の今後の適合性を考慮した容器の製作と実証	保管、貯蔵、処分容器では、研究機関、電気事業者、産業界、基準等では規制当局

大分類	中分類	技術ニーズ	技術開発の方向性	開発主体*
	18. 再利用 (金属、コンクリート)	①細断溶融処理と連携したクリアランス検認システム	(1) 高度化及び実用化が望まれる技術 ・細断溶融処理と連携したクリアランス検認システムの検討 (2) 高度化方策 ・細断溶融処理と連携したクリアランス検認システムの確立	技術開発では、研究機関、電気事業者、基準等では規制当局
	19. 再利用 (サイト)	①サイト解放マニュアル等の整備 ②サイト解放の基準値の導出に係るコード類の整備	(1) 高度化及び実用化が望まれる技術 ・サイト解放における汚染状況の評価技術と標準化とそのマニュアル (2) 高度化方策 ・スクリーニングサーベイでホットスポットを見逃さない測定手法の開発	放射線計測では、大学・研究機関を中心に基礎研究、除染では、電気事業者、産業界、基準等では規制当局
共通技術	20. 放射線計測	①土壌やコンクリートに浸透した放射性物質の迅速測定技術 ②高分解能シンチレータ ③容器内に偏在した時の計測・評価	(1) 高度化及び実用化が望まれる技術 ・クリアランス測定 of 標準化のための統計的手法の開発 (2) 高度化方策 ・クリアランスにおいて、計測マニュアル、学会標準等による基準、規格化に向けた技術の枠組みの整備	基礎研究では、大学、研究機関、標準化では、研究機関、電気事業者、規制当局
	21. 遠隔操作技術	①遠隔機器の自律化 ②操作性の向上と技能訓練システム	(1) 高度化及び実用化が望まれる技術 ・電子機器の耐放射線性向上と高度な電子技術の適用、遠隔操作技術向上を目的としたバーチャルリアリティを用いた施設の準備 (2) 高度化方策 ・フランスの Maestro "アメリカの RIM "のような国下プロジェクトに倣った目的指向の技術開発	基礎研究では、大学、研究機関、中長期計画と標準化では産業界、電気事業者、開発推進では政府

＊：主に高度化方策、研究開発の開発主体

4. まとめ

(1) 放射性廃棄物処理技術

原子力発電所から発生する液体及び固体廃棄物の処理技術の現状、課題とニーズ及び今後の高度化への方向性について調査検討した。現状技術の更なる高度化、イノベーションが望まれる技術がある。具体的には、核種分析及び放射能測定の簡便化と高精度化、効果の高い除染技術や性能の高い切断技術（耐久性ある工具）、イオン交換樹脂の減容処理技術の高度化が期待される。

一方、放射化した部材を含む L1 相当の廃棄物では減容技術、作業の自動化と遠隔化、収納容器開発等、引き続き検討されることが望まれる。

廃棄物処理技術の高度化は、処理と処分を合わせて全体として安全性、経済性の最適化を図ることを目的として行うものであり、これにより処理及び処分におけるコストの軽減に貢献するものである。

(2) 廃止措置技術

廃止措置においては、プラント内外の放射能評価の高精度化や迅速化、汎用システムエンジニアリング技術、高線量低減技術、高線量部位の遠隔解体撤去技術、高汚染領域の効率的除染技術、廃棄物物流管理、二次廃棄物の効率的処理技術、サイト解放の際の合理的確認技術等に関して個別技術、システム化と開発の枠組み構築等、解決すべき課題がある。海外の先進的技術にも着目し、今後の廃止措置活動の効率化を図ることが重要である。

電気事業者や産官学が一体となり、工学的、技術的ポテンシャルを生かし、技術開発を着実に進めることが望まれる。

以 上

委員会活動

日本原子力学会

「東京電力福島第一原子力発電所事故以降の低レベル放射性廃棄物処理処分の在り方」

特別専門委員会委員名簿及び活動記録

「東京電力福島第一原子力発電所事故以降の低レベル放射性廃棄物処理処分の在り方」

特別専門委員会

委員名簿

主査	井口 哲夫	名古屋大学
幹事	佐々木 泰	日本原燃
委員	池田 泰久	東京工業大学
	出光 一哉	九州大学
	榎戸 裕二	RANDEC
	大江 俊昭	東海大学
	金子 昌章	東芝
	小崎 完	北海道大学
	坂下 章	三菱重工
	佐々木 尚	三菱マテリアル
	高橋 邦明	原子力機構
	朽山 修	原安協
	新堀 雄一	東北大学
	野下 健司	日立 GE ニュークリア・エナジー
	長谷川 信	原子力機構
	福谷 哲	京都大学
	古谷 誠	日本原燃
	三橋 偉司	東京都市大学
	棕木 敦	日揮
	柳原 敏	福井大学

以上 20 名（順不同、敬称略）

「東京電力福島第一原子力発電所事故以降の低レベル放射性廃棄物処理処分の在り方」

特別専門委員会

活動記録

第1回委員会 平成27年9月28日

- (1) 特別専門委員会の設置について
- (2) 平成27年度特別専門委員会の検討内容について
 - ① 低レベル放射性廃棄物の処理等の技術開発の在り方に関する検討について
 - ② 「低レベル放射性廃棄物の処理等の技術開発の在り方」に係る検討のための新技術分類の考え方
 - ③ バックエンド技術の再分類と調査担当者
 - ④ 低レベル放射性廃棄物の処理等の技術開発の在り方 報告書目次
 - ⑤ バックエンド技術資料集（仮題）
 - ⑥ 平成27年度の委員会日程

第2回委員会 平成27年11月19日

- (1) 「原子力発電所の操業・解体に伴う廃棄物処理・処分の現状と今後の技術課題」について
- (2) 低レベル放射性廃棄物の処理等の技術開発の在り方に関する検討について
 - ① バックエンド技術の新分類（大分類区分見直し及び中分類技術の再確認）
 - ② バックエンド技術の再分類とサポート委員（改定案）
 - ③ バックエンド技術資料集（仮題）（改定案）
 - ④ 「低レベル放射性廃棄物の処理等の技術開発の在り方」報告書（案）

第3回委員会 平成28年1月26日

- (1) 低レベル放射性廃棄物の処理等の技術開発の在り方に関する検討について
 - ① 「低レベル放射性廃棄物処理等の技術開発の在り方」報告書（案）

原子力発電所の操業・解体に伴う廃棄物処理・処分の現状と今後の技術課題

2015年11月19日
電気事業連合会 原子力部
平井 輝幸

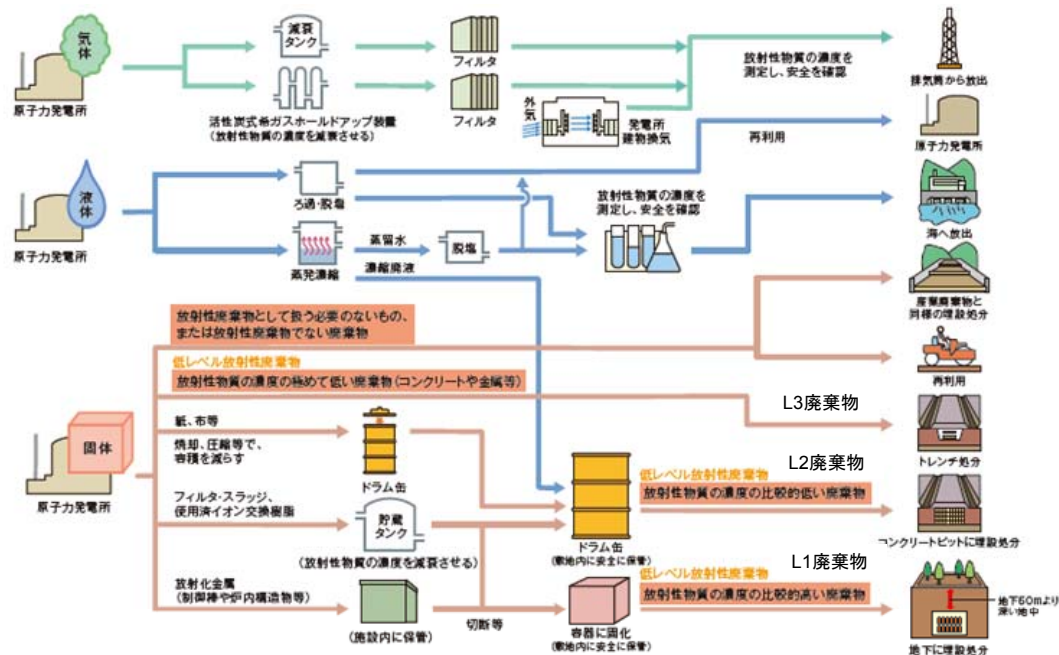
電気事業連合会

原子力発電所の操業に伴う廃棄物処理・処分の現状と課題

電気事業連合会

原子力発電所の廃棄物処理フロー

2



電気事業連合会

原子力発電所の廃棄物処理方法について

3

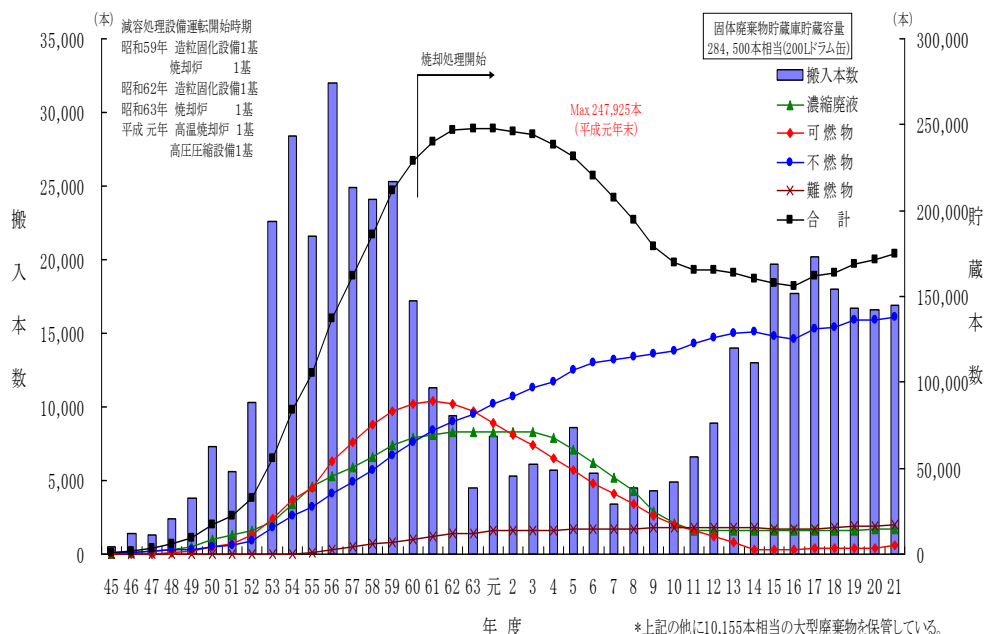
- 気体廃棄物 ろ過、減衰後に放射能を測定して放出
より減衰時間の大きい活性炭式希ガスホールドアップ装置等の採用
により放出放射能量を低減
- 液体廃棄物 ろ過、蒸発濃縮等の処理後に放射能を測定して放出
ろ過のみで放出していた放射能の低い廃液についても、蒸発濃縮、活
性炭等の処理を行うことにより放出放射能量を低減
- 固体廃棄物 発電所内で安全に保管し、最終的には埋設処分する
 - ・保管の観点から
 - 発生量の低減(復水フィルタの採用、樹脂の非再生運用等による
濃縮廃液発生量の低減、発電所への不要資材の持込制限等)
 - 減容(焼却、圧縮、減容比の高い固型化方法の採用等)
 - ・埋設処分の観点から
 - 廃棄体の技術基準を満足し、埋設施設の安全評価上有利な特性を
もち、適切な放射能評価が実施できるよう、処理を実施。

電気事業連合会

原子力発電所における固体廃棄物発生量推移の例

4

固体廃棄物貯蔵庫 搬入本数及び貯蔵本数の推移



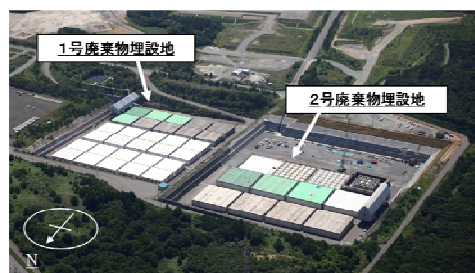
電気事業連合会

日本原燃（株）六ヶ所埋設センター

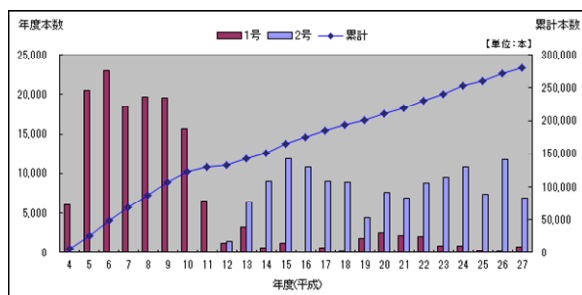
5

現行施設

	施設規模	対象廃棄物
1号施設	ドラム缶20万本相当 (約14万本受入済み)	濃縮廃液、使用済樹脂、焼却灰など
2号施設	ドラム缶20万本相当 (約7万本受入済み)	金属類、保温材、フィルターなどの固体状廃棄物



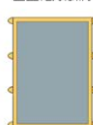
これまでの低レベル放射性廃棄物の受入れ状況(平成27年10月末現在)



- ・1号廃棄物は減容処理が進み発生本数減少
- ・2号廃棄物は固化施設導入が進み今後発生本数増加の見通し、
- ・計画的に増設の検討が必要

- ・用地面積 約360万 m^2 (ウラン濃縮工場用地、専用道路を含む)
- ・1号廃棄物埋設地4万 m^3
1ビットあたりドラム缶5120本(320本×16セル)
- ・2号廃棄物埋設地4万 m^3
1ビットあたりドラム缶12960本(360本×36セル)
- 最終的には約60万 m^3

固化化方法例



1号廃棄体
(均質・均一固化体)

固化化方法例

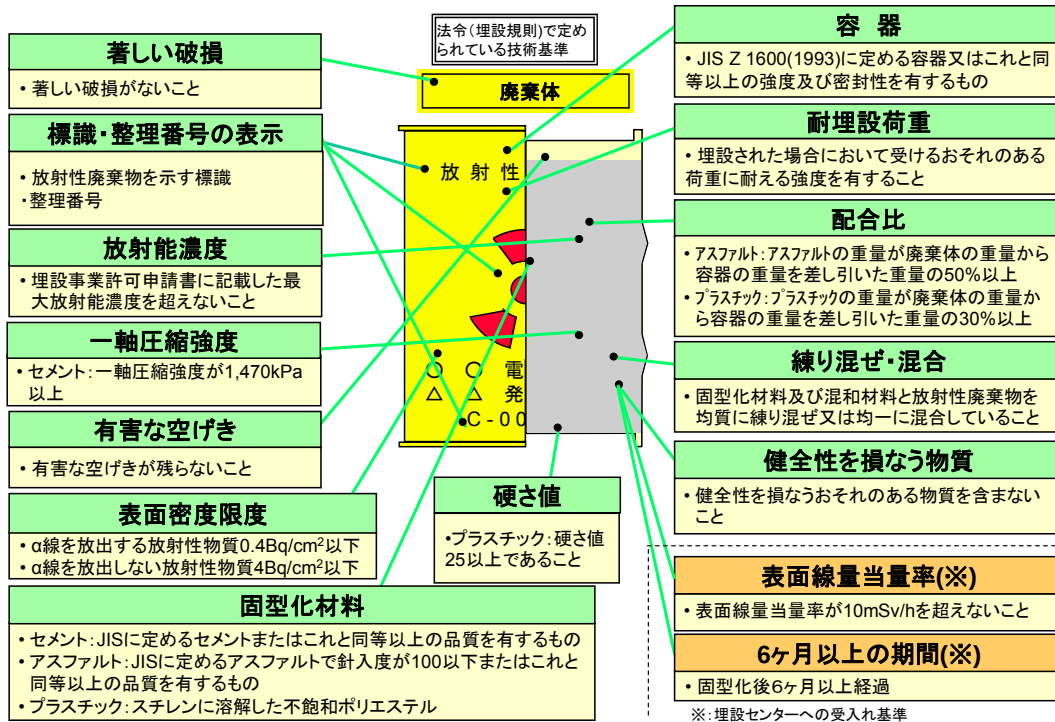


2号廃棄体
(充てん固化体)

電気事業連合会

廃棄体の技術基準（均質・均一固化体の例）

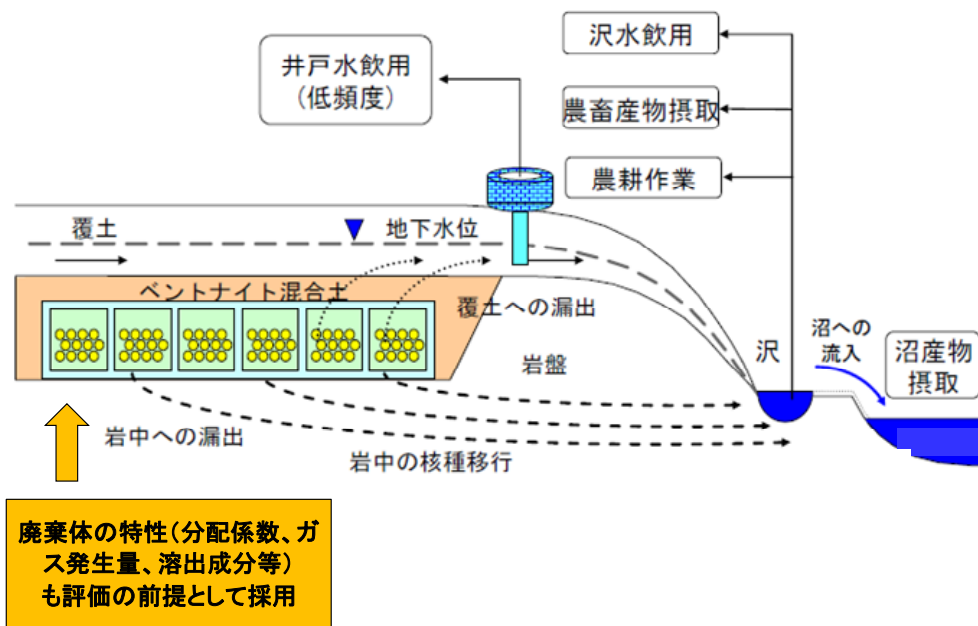
6



電気事業連合会

コンクリートピット処分場（L2）の安全評価の例

7



電気事業連合会

○非破壊外部測定

個々の廃棄体について、外部から放射能濃度を測定。Co-60、Cs-137に適用

○スケーリングファクター法

非破壊外部測定によって測定された核種(key核種)の放射能濃度との相関関係(スケーリングファクター)を用いて、対象核種の放射能濃度を決定する方法。Key核種と生成機構が類似、廃棄体への移行関係が明らかな場合に適用。

○平均放射能法

物理化学的挙動の検討からもkey核種との間に相関が無く、代表サンプルの放射能濃度が一定範囲内に収束している場合に適用。

○理論計算法

対象核種と生成機構が同一であるとみなせる同位体が存在する場合に適用。
Ni-59をNi-63濃度から決定している。

○原廃棄物法

廃棄体を作成する前の原廃棄物の放射能濃度から廃棄体の濃度を決定する方法。

電気事業連合会

○濃縮廃液

- ・当初はセメント固化体(海洋投棄にも対応)
→より減容性の高いアスファルト固化体(約1/3)
プラスチック固化体(約1/5)への転換
- ・濃縮廃液そのものの発生量が減少、埋設処分上の制約等からセメント固化体への回帰も

○使用済樹脂

- ・貯槽で保管後、安定保管、埋設処分のために固型化
- ・減容の観点から低濃度の樹脂は焼却へ
- ・高濃度の樹脂について、溶離して高濃度の廃液と低濃度の残渣に分離する発電所もある

○焼却灰

- ・固化体製作に際して、前処理が必要。
→適切な廃棄体の製作方法について検討が必要

電気事業連合会

○直接充填固化体

- ・固体廃棄物を切断、圧縮等を行ったうえで、ドラム缶に収納してモルタルを充填。
- 試験により、廃棄体中に有害な空隙が残存しないような、切断、圧縮条件、モルタルの製造・充填方法等を設定。
- 強度の弱い廃棄物は、容器内側に一定厚のモルタル層を確保。

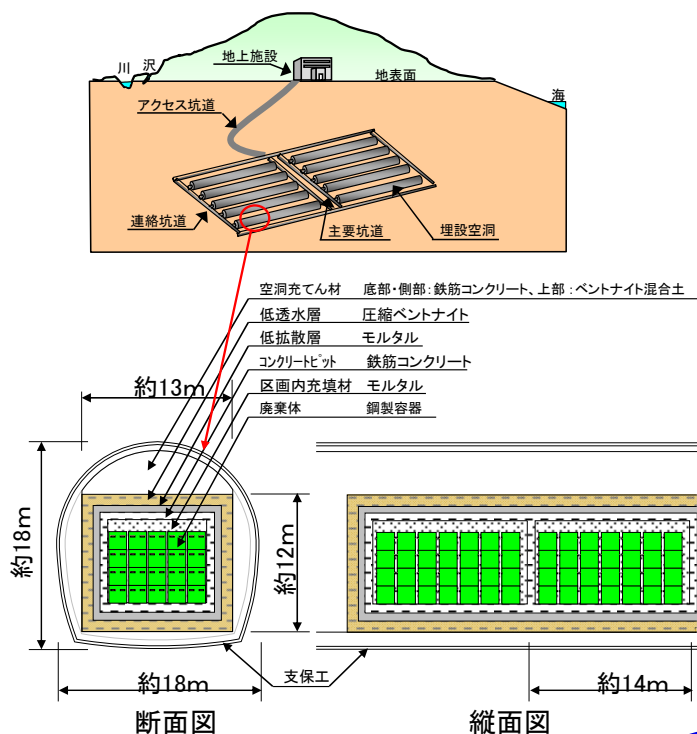
○溶融固化体

- ・固体廃棄物を溶融(プラズマ溶融、高周波溶融)した後に、ドラム缶に収納してモルタルを充填。
- Cs-137は溶融によって揮発しやすいが、放射能評価の観点から、Cs-137の残存率を適正に評価している。

○角型容器を使った処分の実現

- ・大型機器廃棄物を細かく切断してドラム缶に収納するのは非効率的。
- 角型容器を適切に処分できる施設概念、廃棄体確認方法の検討が必要。

余裕深度処分（L1）の概念・特徴



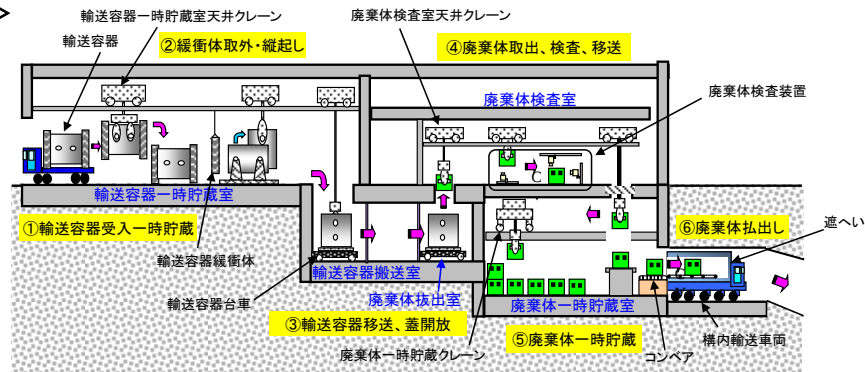
- 余裕深度処分は、住居建設などの一般的な地下利用のほか、高層建築物の建設、地下鉄、上下水道、共同溝などの利用を想定しても十分に余裕のある深度（法令では地表から50m以深）に処分する方法となっている。

- 放射性物質の移行は、「廃棄物・廃棄体」、「天然バリア」、「人工バリア」により長期にわたり抑制する。

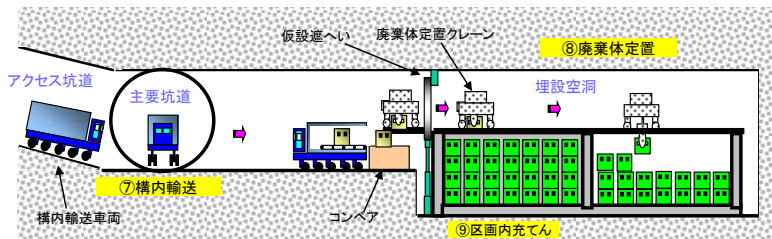
操業イメージ①（廃棄体の受入～埋設）

12

<地上施設>



<地下施設>

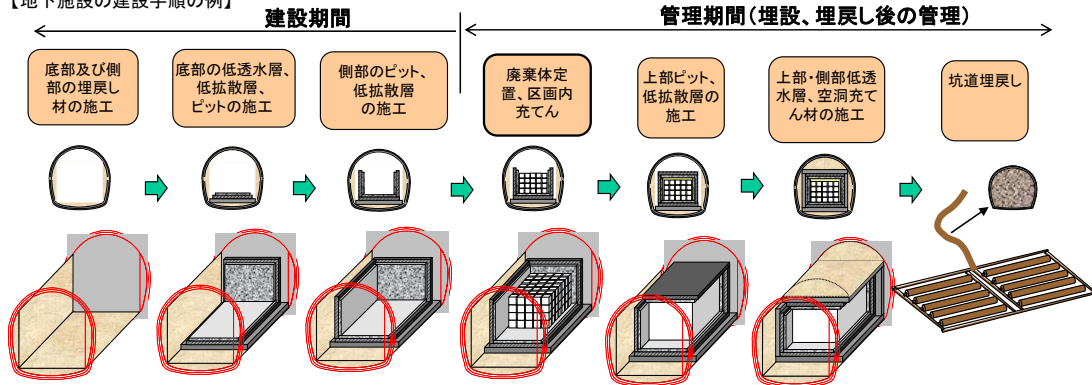


電気事業連合会

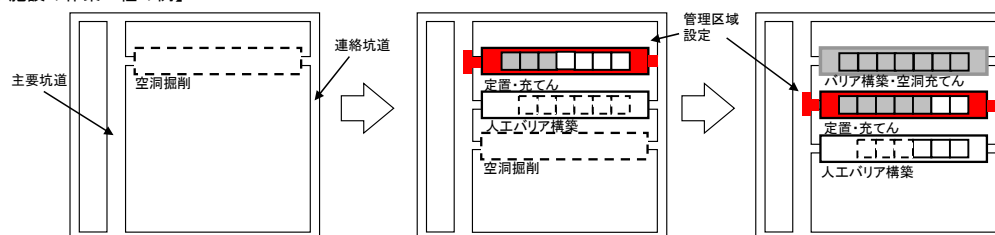
操業イメージ②（埋設施設の建設～坑道埋戻し）

13

【地下施設の建設手順の例】



【地下施設の作業工程の例】

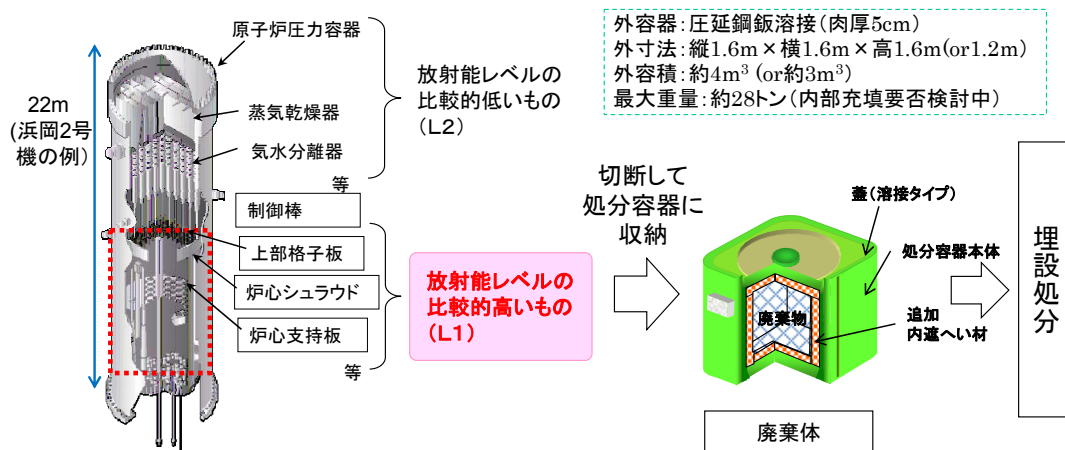


電気事業連合会

L 1 廃棄物処分容器

14

- L1廃棄物は、原子力発電所の廃止措置に伴って発生するものの他、制御棒等運転中にも多く発生する。
- L1廃棄物は炉内廃棄物等の大型機器や、制御棒等の長尺物が多く、細かく切断して、ドラム缶に収納することは非効率的。



L 1 廃棄物の検討状況と今後の課題

15

○L1廃棄物の検討状況

- ・容器は5cm厚の鋼製角形容器、廃棄物の線量に応じて内部遮蔽を追加(最大20cmの追加遮蔽まで検討)
- ・蓋は溶接する方向で検討中。溶接の際の品質管理方法も作成。
- ・廃棄物に付着した自由水を除去するために、水切り、乾燥処理(減圧乾燥等)を行う。
- ・水の放射性分解による水素の発生を抑制するため、線量の高い廃棄体については、従来のモルタルによる固型化の他に、固型化材を充填しない、砂充填の必要性について検討中。
- ・使用済樹脂については、脱水の他、安定化処理(熱処理、分解などによる無機化処理)が必要。
- ・放射化金属の放射能評価については、放射化計算による評価を主体とすることを検討。

○L1廃棄物の課題

- ・放射化計算における金属中不純物の評価、照射線量等の評価の適正化
- ・L1廃棄体の放射能閉じ込め性能維持期間の評価
- ・使用済樹脂の安定化方法の最適化

原子力発電所の廃止措置の 現状と課題

電気事業連合会

我が国の廃止措置の現状

17

- 1998年3月 日本原子力発電所(株)東海発電所が廃止。
→廃止措置中
- 2009年1月 中部電力(株)浜岡原子力発電所1, 2号機が廃止。
→廃止措置中
- 2012年4月 東京電力(株)福島第一原子力発電所1～4号機が廃止。
→中長期ロードマップに基づく廃炉・汚染水対策を実施中
- 2014年1月 東京電力(株)福島第一原子力発電所5, 6号機が廃止。
- 2015年4月 下記の5プラントが廃止。
 - 関西電力(株)美浜原子力発電所 1、2号機
 - 日本原子力発電(株)敦賀発電所 1号機
 - 中国電力(株)島根原子力発電所 1号機
 - 九州電力(株)玄海原子力発電所 1号機

電気事業連合会

18

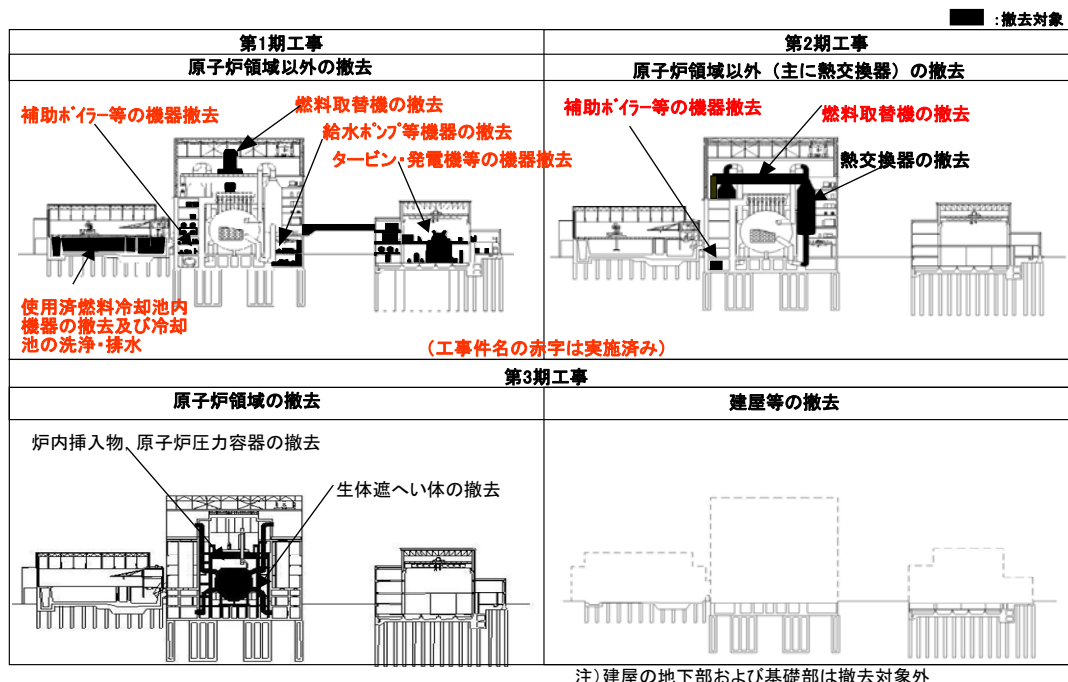


19



東海発電所廃止措置工事 全体概要

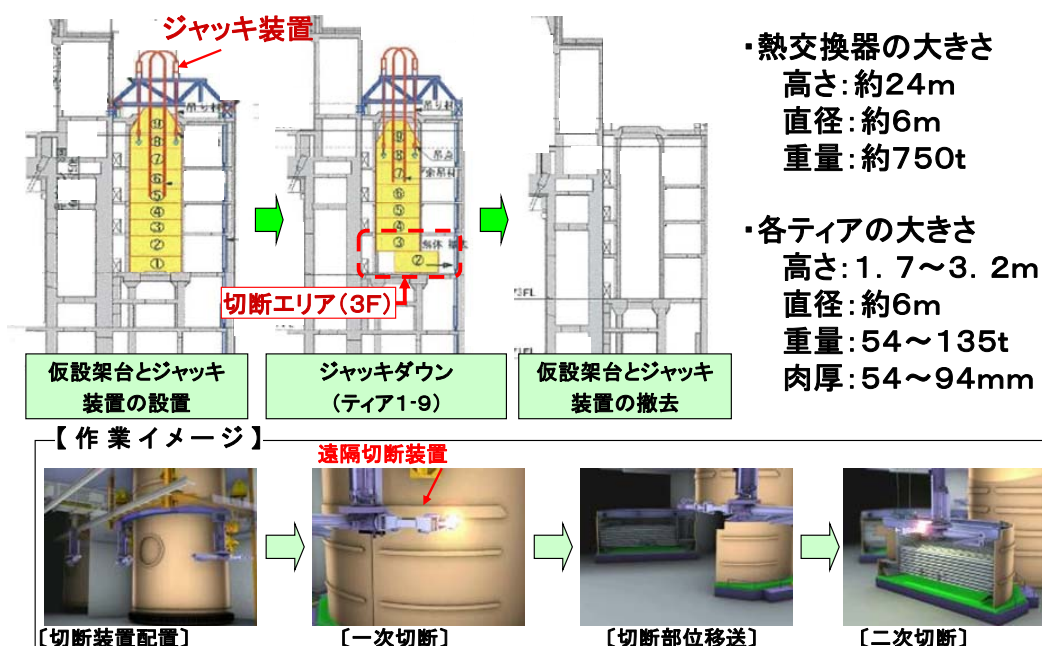
20



電気事業連合会

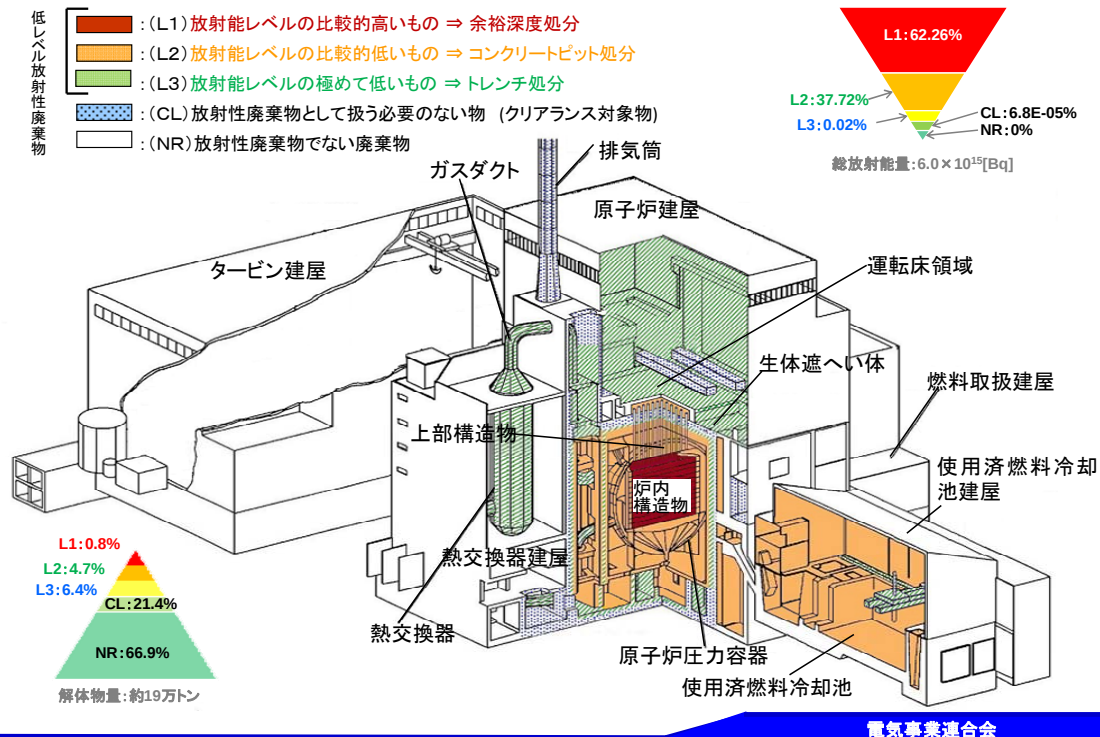
東海発電所 熱交換器解体撤去の概要

21

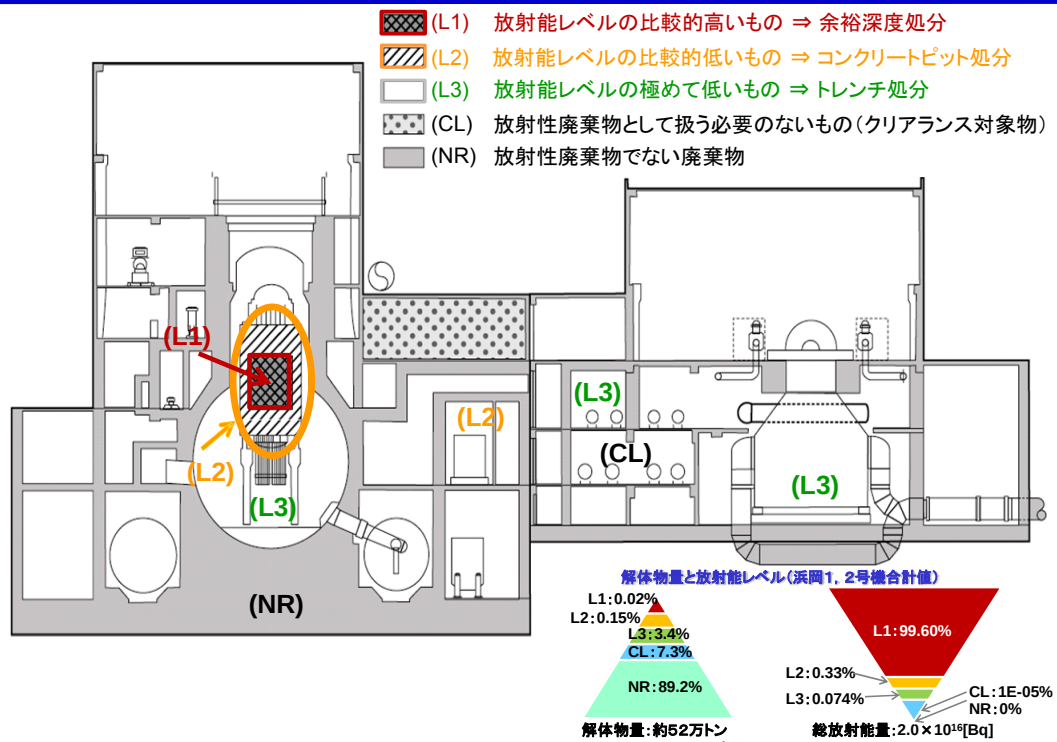


電気事業連合会

廃止措置に伴い発生する廃棄物（東海発電所の例） 22



廃止措置に伴い発生する廃棄物（浜岡1, 2号の例） 23



原子力発電所の廃止措置に伴い発生する廃棄物の量 24

単位: ton

区分	商業用原子力発電所 (57プラント)の合計	
L1	約8,000	LLW合計: 約450,000 ⇒約2%
L2	約63,000	
L3	約380,000	
CL	約890,000	
NR	約18,500,000	NR: 約93%
合計	約20,000,000	合計: 100%

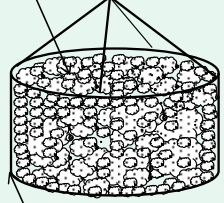
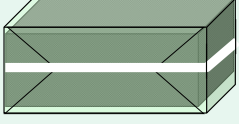
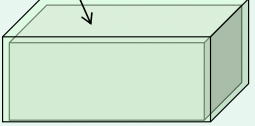
【注】東海発電所、浜岡1,2号機は実態調査を反映。それ以外は標準プラント(BWR/PWR×大中小規模)の評価データをもとに積算・集計。(建設中の2プラントは含まない)

単位: ton

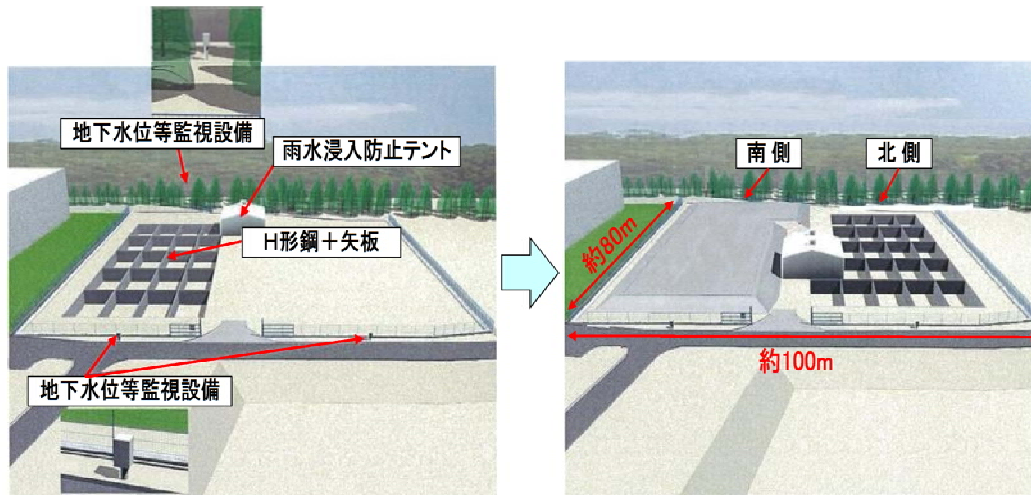
区分	BWR 小規模	BWR 中規模	BWR 大規模	PWR 小規模	PWR 中規模	PWR 大規模	GCR
L1	50	70	80	120	190	200	1,540
L2	760	830	850	710	1,230	1,720	8,950
L3	5,530	6,750	11,810	1,850	2,570	4,040	12,300
CL	9,710	9,750	28,490	3,970	8,080	11,660	41,100
NR	130,620	220,430	495,420	187,150	215,750	477,300	128,700
合計	146,670	237,830	536,650	193,810	227,820	494,920	192,400

電気事業連合会

L 3 廃棄物の例 25

	金属廃棄物	コンクリートガラ	コンクリートブロック
埋設形態	鉄箱収納	フレキシブルコンテナ収納	プラスチックシート梱包
収納イメージ	  注)埋設時には鉄箱内に砂等を充填	  コンクリートガラ フレキシブルコンテナ	  コンクリートブロック プラスチックシート

電気事業連合会



クリアランス金属の再利用（東海発電所の例）

鋳造品再利用実績

- ① 遮へい体79体 → J-PARC*（KEK向け）[H19年10月10日納品開始]



遮へい体
1000×500×200mm
約700kg/体

*大強度陽子加速器施設

- ② ベンチ、応接テーブル、ブロック → 原電向け [H20年2月29日配備開始]
原電以外向け [H20年3月28日納品開始]



ベンチ 61脚



応接テーブル 10台



ブロック 600個
(構内利用)

車両の進入を
防止するためのブロック
16個

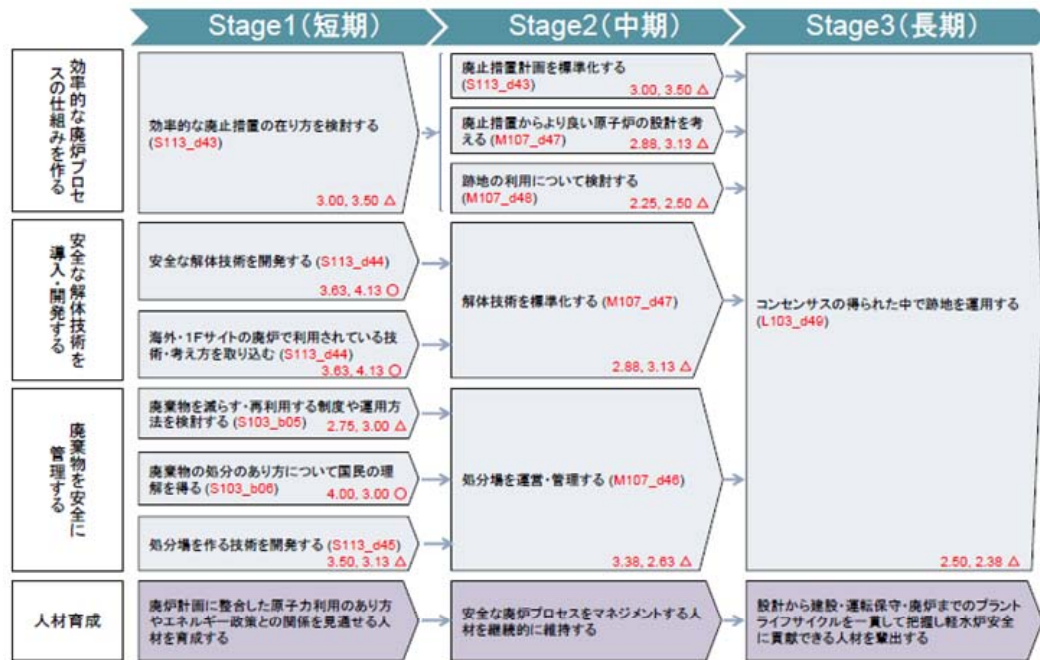


③ 展示

環境省内居室
文部科学省副大臣室他居室
内閣府原子力委員会委員室前他居室

ベンチ1脚
ベンチ3脚
ベンチ2脚

H22年6月22日～
H22年7月29日～
H22年10月28日～



廃止措置に関する課題

- 中間貯蔵施設や乾式貯蔵施設等の使用済燃料搬出先の確保
- 放射性廃棄物(L1, L2, L3)の処分場の確保
 - 角形容器等を効率的に処分できる施設形態の適用(L2)
 - 多様な立地条件に適用できる処分概念の適用(L3)
- クリアランス物の再利用の促進
- 安全かつ合理的な廃止措置計画の構築
- 安全性、経済性、廃棄物対策等を踏まえた適切な高線量機器解体方法
- サイト解放時の測定方法、基準等