



PROFILE

■ 森 久 起

昭和23(1948)年生。1973年名古屋大学工学研究科原子核工学専攻修士課程修了。2005年日本原子力研究開発機構執行役核燃料サイクル技術開発部門長。2012年日本環境安全事業株式会社技術アドバイザー、環境回復情報ネット代表。環境省環境回復検討会委員、環境放射能除染学会。

除去土壌等の減容化システムの構築への期待と課題

～中間貯蔵から最終処分への技術的整合性を求めて～

Expectation and Task for Constructing the Volume Reduction System of Removed Soils

～ In Search of the Technical Integrity from the Intermediate Storage to Final Disposal ～

森 久起*

環境回復情報ネット(〒271-0086 千葉県松戸市二十世紀が丘萩町37)

Hisaki MORI*

Environment Restratement Information Net

(37 Nijusseikigaokahagi-machi, Matsudo, Chiba 271-0086, Japan)

Summary

The intermediate storage volume of the removed soils and incineration ash in Fukushima is supposed about 22 million cubic meters. Within 30 years after starting the intermediate storage, the final disposal outside Fukushima prefecture to these removed soils and incineration ash is determined by the law. Because these removed soils are the very-very low radio activity, the volume reduction method is most effective to reduce the burden of the final disposal. As the volume reduction technology is the stage of research and development, the possibility of the introduction of the volume reduction technology that has the consistency of the final disposal technology is evaluated from the point of view of cost. Since this business is accompanied by economic and technical risk to implement private companies, this project is considered appropriate to be implemented as a national project.

Key Words: Intermediate storage, Volume reduction, Final disposal

1. はじめに

東電事故から4年半が経過し、福島第一原子力発電所の損壊した1号機から4号機で、汚染水対策、内部調査など徐々にではあるが廃止措置に向けた準備が行われている。しかし、高線量であることやこれまで世界的にも対処した例が少ない燃料デブリを取り扱うことから、技術的には難易度が高く、産官学の総力を傾けた技術開発・研究開発が行われており、ロボティクスの専用の研究施設が整備されつつある。

事故による環境の放射性物質汚染により、福島県では現在でも約10万人余の人々が避難を余儀なくさせられている。2012年以降の除染により、9月5日には全町避難の楢葉町で

避難解除がなされるなど、徐々に住民帰還が可能な状態が広がっているが、除染により取り除かれた除去土壌等が福島県内43自治体の約10万か所の現場保管及び約1,000か所の仮置場にて保管され、東電福島第一原子力発電所周辺16平方キロに設置予定の中間貯蔵施設へ搬入・保管される計画にある。

その保管量は最大で約2,200万 m^3 と想定され、その半分は中間貯蔵事業に従事する労働者の放射線安全の対象ともならない10,000 Bq/kg以下の極低レベルの放射能濃度であると想定されているが、30年以内の2045年までに福島県外での最終処分を行うことを国は法的に約束している。福島県よ

*Corresponding author: E-mail: erin@m.jcnnet.jp

りもはるかに少量の指定廃棄物の最終処分が福島県外では難航していることを考えれば、中間貯蔵後の最終処分を見据えた除去土壌等の減容化は不可欠であり、その減容化システムの構築に当たっては最終処分技術との整合性が必要なことは言を俟たない。

未曾有の事故以降、汚染地域が徐々に縮減しているが、中間貯蔵後の最終処分を見据えた取り組みは、国、自治体、国民、住民、事業者、大学・研究機関が英知を結集して解決を図ることができるかを試されていると考える。福島第一原子力発電所の廃止措置よりもはるかに難しいナショナルプロジェクトでもであると認識すべきである。

本稿は、2015年9月29日に行われた環境放射能除染学会第10回講演会にて話した内容に加筆して、減容化システム構築への期待と課題としてまとめたものである。

2. 減容化技術と最終処分技術の特徴

(1) 減容化技術と最終処分技術の技術的整合性は取れているか

環境省では中間貯蔵施設に搬入された除去土壌等を減容化する技術開発の戦略策定の検討会を2015年7月に立ち上げた。この検討会では、減容化技術の適用の方向性及び今後の10年間程度の技術開発戦略を策定することとしている。

減容化技術には土壌汚染対策で用いている分級洗浄技術が既存技術で既にある他、化学処理、熱処理、溶融塩処理、機械処理など除去土壌とセシウムの吸着特性に着目した様々な技術提案がなされている現状である。これら提案されている技術は基礎的な研究から始められており、正にシーズ型技術である。中間貯蔵施設には除去土壌等の他にも除染廃棄物等の焼却灰が160万 m^3 程度搬入・生成されると想定されており、焼却灰の減容についても技術開発を進めていく必要がある。その際、減容化の目的も明確にしていく必要があると考える。具体的には、

- a) 最終処分の安全性向上
- b) 処分実施地域の受容性向上
- c) 量的な取扱性の向上
- d) 中間貯蔵から最終処分の経済性の向上

が図られる必要があると考える。

一方、最終処分技術については、放射性廃棄物処分技術として、1992年から青森県六ヶ所村にて浅地中でのビット型処分が実施されており最終処分の技術体系が実用規模技術として確立している。浅地中での放射性廃棄物処分へは、原子力発電所から持ち込まれることからコバルト、マンガン、セシウム等の多核種が最終処分されており、中間貯蔵後の最終処分においては ^{137}Cs の単核種処分になることから最終処分技術の最適化の検討が必要であるものの、除去土壌等の最終処分技術は既存技術への適応性が求められる。即ち、ニーズ型技術として確立していく必要がある。

现阶段では、シーズ型技術である減容化技術とニーズ型技術である最終処分技術との間の整合性が取られている状況にはなく、シーズ型技術開発に当たっては最終処分技術を見据えた開発を進めていく必要がある。

(2) 減容化技術の現状

a) 焼却灰の減容化技術の現状

中間貯蔵施設へは特定廃棄物のうち10万 Bq/kg 超及び可燃性の除染廃棄物が搬入され、約160万 m^3 の焼却灰が保管されることが想定されている。

焼却灰にはセシウムが水に溶出しやすい飛灰と溶出しにくい主灰がある。

飛灰の減容化については、国立環境研究所やその他民間事業者等が提案しており、図3に示す洗浄・除去設備では、水中に溶出させたセシウムを吸着材であるブルジャンブルーにて捕捉することにより、高減容を達成することができることを明らかにしている。

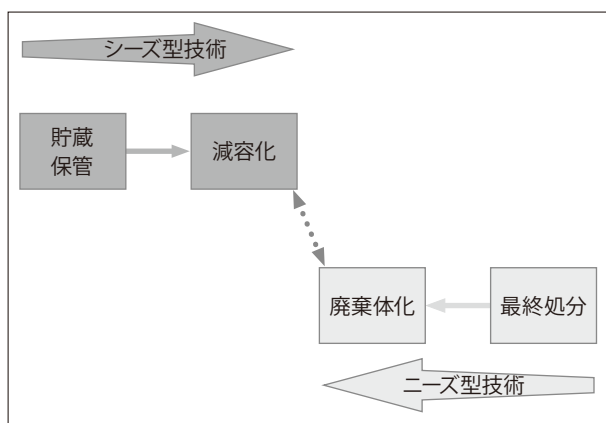


図1 現状の減容化技術と最終処分技術の関係イメージ

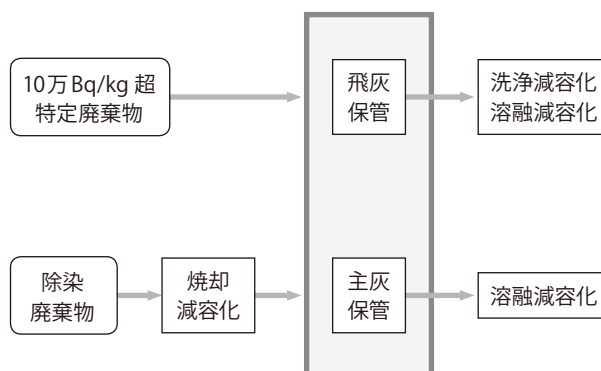


図2 焼却灰減容化フロー図

ごみ焼却飛灰中の放射性物質の洗浄・除去設備

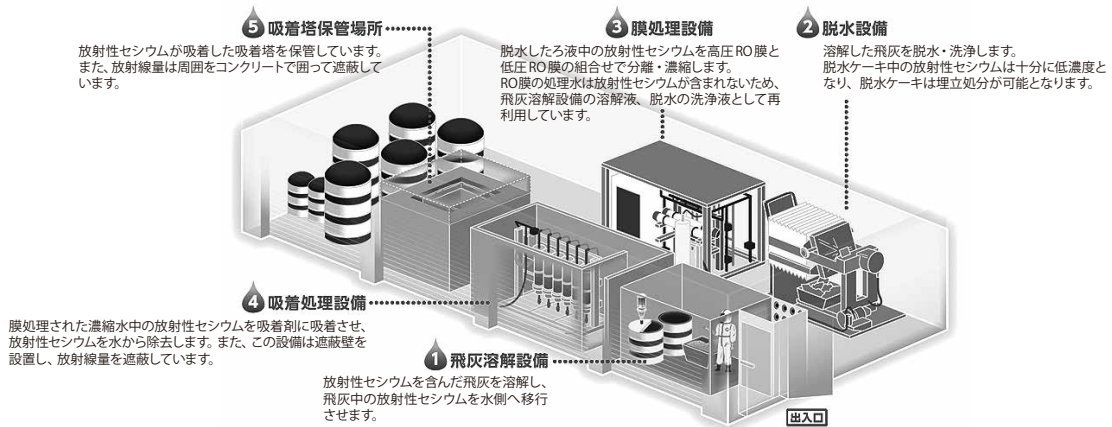


図3 焼却飛灰の減容化システム
 国立研究開発法人 国立環境研究所/福岡大学/株式会社神鋼環境ソリューション

出典: 国立研究開発法人 国立環境研究所「放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分(技術資料 第四版改訂版)」(2014年4月14日)、138ページに記載の図 8.7 から転載

プルシャンブルーについては、環境放射能除染学会第10回講演会で、東工大の竹下らが熱分解でシアンが無害化を提

案している。

また、主灰については、民間事業者の集まりである除染・廃棄物技術協議会が、加熱分離の一事例として、図4に示す熔融減容化設備を、熔融炉内での放射性セシウムの挙動についての知見を獲得していく必要はあるものの、既存技術を用いて実現が可能であると提案している。

洗浄減容化技術及び熔融減容化技術はいずれも基礎研究段階から実証段階に至っており、実規模実証施設による運転性・保守性のデータ取得を行う必要があると考える。

b) 除去土壌の減容化技術の現状

除去土壌の減容化フローは図5に示すように、一次減容化、二次減容化という2ステップの減容化を行うことが適切であると考える。

一次減容化では大量の除去土壌を減容化率は低いものの、迅速かつ大量に処理することができる分級洗浄技術を適用し、二次減容化によって高減容を達成させることができると考える。

事故後の初期段階では、放射性セシウムが土粒子の表面に付着していることから化学処理により除去することができる実験結果も示されていたが、現在では、福島に多く含まれる雲母の層間(フレイド・エッジ)に強く吸着され、簡単には除去できないことが報告されている。

一次減容化技術である分級洗浄技術は環境省が実施した除染技術実証事業などで民間事業者が保有している土壌汚染対処技術を基本として、放射性物質を取り扱うことに伴う水処理、放射線被ばく対策等の知見が獲得された段階にあり、既に実用化段階に到達しつつある技術であると考え。一方、

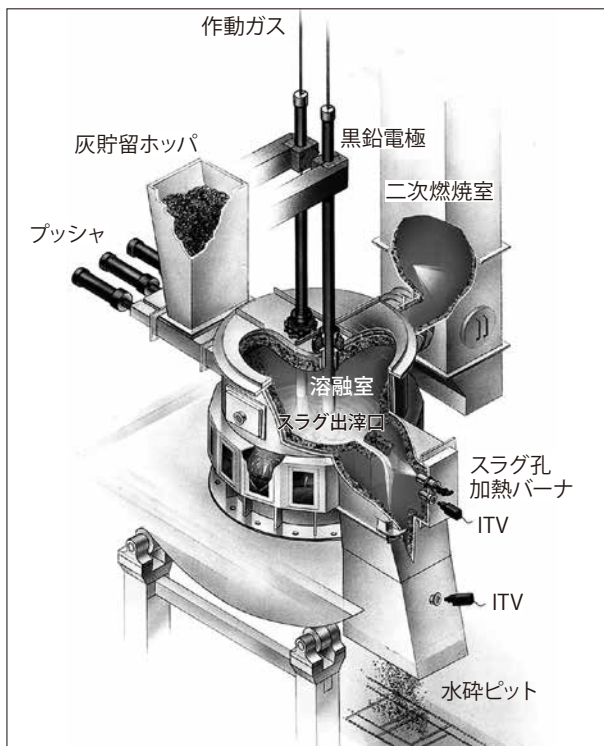


図4 焼却主灰の熔融減容化施設

出典: 日立造船株式会社作成のパンフレット「プラズマ式灰熔融システム」中に掲載されている図

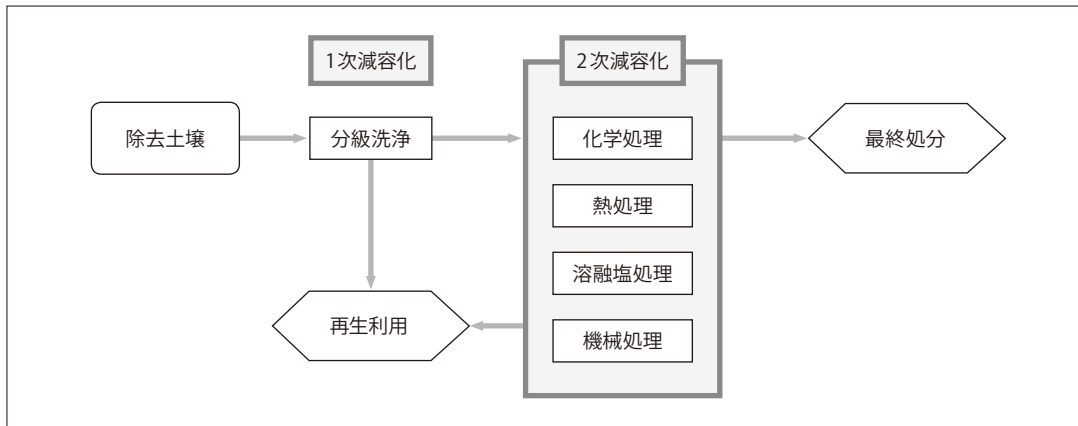


図5 除去土壌の減容化フロー図

二次減容化技術としては、化学処理、熱処理、熔融塩処理、機械処理など様々な方法が提案されているが、シーズ型研究の基礎研究段階であり、チャンピオンデータを競っている段階にあると考える。

除去土壌の減容化においては、最終処分量の減量に反比例して再生利用量が増量することから、再生利用基準を整備することも並行して行う必要がある。

(3) 最終処分技術の現状

a) 放射性廃棄物の区分

わが国においては、放射性廃棄物は低レベル放射性廃棄物と高レベル放射性廃棄物の二区分に分類整理されている。

高レベル放射性廃棄物は再処理工場にて再処理された後の核分裂生成物、超ウラン元素 (TRU) 等からなる廃棄物であり、300 m 以深の地層に処分されることとなっている。

低レベル放射性廃棄物は、浅地中処分相当、余裕深度処分相当、TRU 等の地層処分相当の廃棄物に分類されている。浅地中処分相当の放射性廃棄物は原子力発電所や大学等の研究施設の施設運転及び保守に伴い発生する放射性廃棄物が主なものであり、放射能濃度によってトレンチ型処分廃棄物とピット型処分廃棄物に分かれ、地表 10 m 程度までに処分される。ピット型処分においては、セシウム核種では 10 万

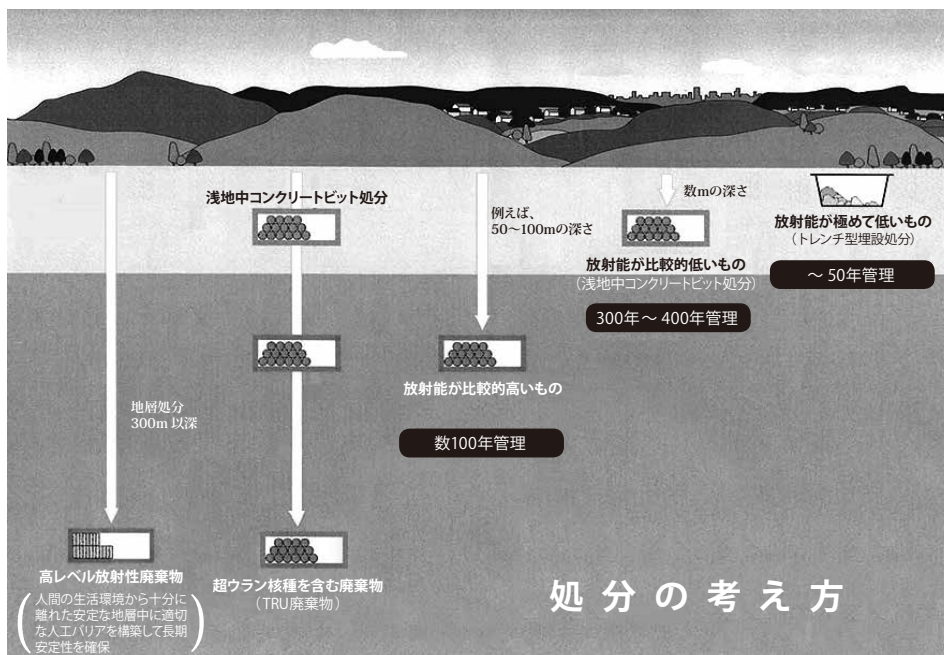


図6 わが国の放射性廃棄物処分の考え方

出典：日本下水道施設業協会第7回公開講座「放射性廃棄物の観点からの下水汚泥処理処分の課題」(2011年7月15日、講演者は森 久起)の講演資料集 23 ページから転載

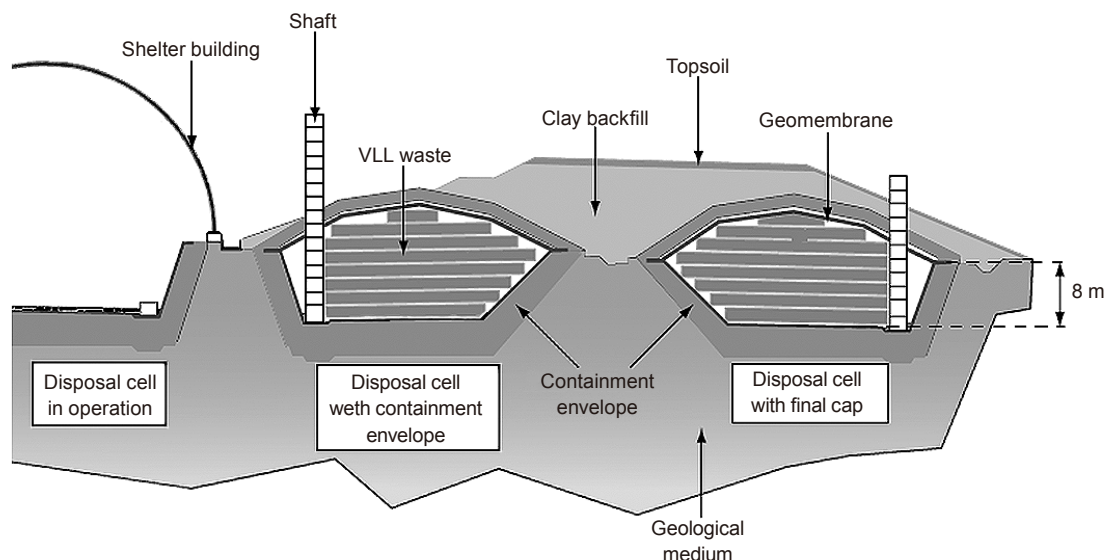


図7 トレンチ処分構造図(フランスのモルビリエ)

出典: Essential Series 232VA, "THE VERY-LOW-LEVEL WASTE DISPOSAL FACILITY", ANDRA (July, 2008) の5ページより転載

Bq/kg ~ 1,000 億 Bq/kg と非常に幅が広い放射能濃度範囲で処分を行うことができる。

除去土壌等はその放射能濃度から中間貯蔵においてはトレンチ型に相当する貯蔵施設にて保管され、減容化された後の最終処分ではピット型にて処分されることが想定される。

b) 放射性廃棄物処分場の構造と管理

低レベル放射性廃棄物の処分場は原子力利用を進めている世界各国で設置されており、図7はフランスの極低レベル放射性廃棄物を処分するトレンチ型処分場の各セルの構造図である。モルビリエに設置されている。

図の一番左が放射性廃棄物をトレンチに定置している時の状態で、処分場に雨水が侵入しないように、かまぼこ型の天井を設けている。地表面から8m下を最低部とした構造である。

真ん中が放射性廃棄物の定置が完了した段階であり、上部に遮水シートを設置して、処分後の管理期間中に雨水が入らない構造を採用している。一番右が埋設を完了した段階の状態で、遮蔽の効果も考慮して遮水シートの上に粘土層を敷設し、最上部を芝生などで覆い、管理状態へ移行する。各セルには点検抗が設けられている。

図8は低レベル放射性廃棄物を処分するピット型処分施設の構造図で、日本原燃株式会社の2号埋設施設である。

ピットはコンクリート構造で、各セルに360個(9段5列8行)の200リットルドラム缶が定置され、その隙間にコンクリートを充てんし、上蓋コンクリートを設置し、セル構造の周囲と上部にベントナイトなど遮水性土壌を施し、さらにその上部に約9mの覆土を施している。ピットの最低部は地下約18mになっている。また、ピットには管理期間中に利用する点検通

路が設けられている。

放射性廃棄物は夫々の核種が固有の半減期により放射能が減衰することから、段階管理の考えが導入されており、図9に示すように、埋設段階、約300年間の保全段階を経て、管理を必要としない廃止措置段階に至ると考えられている。

また、放射性廃棄物の最終処分場の安全規制においては、図10に示すように、長期間の段階管理に伴う不確実性を考慮した安全規制の考え方が導入されており、原子力発電所の安全規制の基準よりも厳しい基準が適用されている。

c) 浅地中処分場の事例

i) 日本原燃株式会社

低レベル放射性廃棄物埋設センター

わが国では原子力利用に伴う研究が始められた当初より低レベル放射性廃棄物の処分にかかる様々な検討・研究が進められ、海洋処分の研究もなされたが、最終的に陸地処分とすることとなった。

これを受けて、商用原子力発電所から出る低レベル放射性廃棄物の処分場として、青森県六ヶ所村に日本原燃株式会社により低レベル放射性廃棄物埋設センターの建設が1990年に開始され、1992年から埋設処分を開始した。この埋設センターはピット型処分施設であり、総面積340万 m^2 (注1)の敷地に60万 m^3 (200リットルドラム缶で300万本相当)の低レベル放射性廃棄物を処分できる容量を持っている。1992年に1号埋設(施設容量:200リットルドラム缶で約20万本相当)での受入を開始し、2000年には同じ施設容量の2号埋設での受入を開始し、現在に至っている。

なお、原子力施設の建屋等で放射化されたコンクリート等の

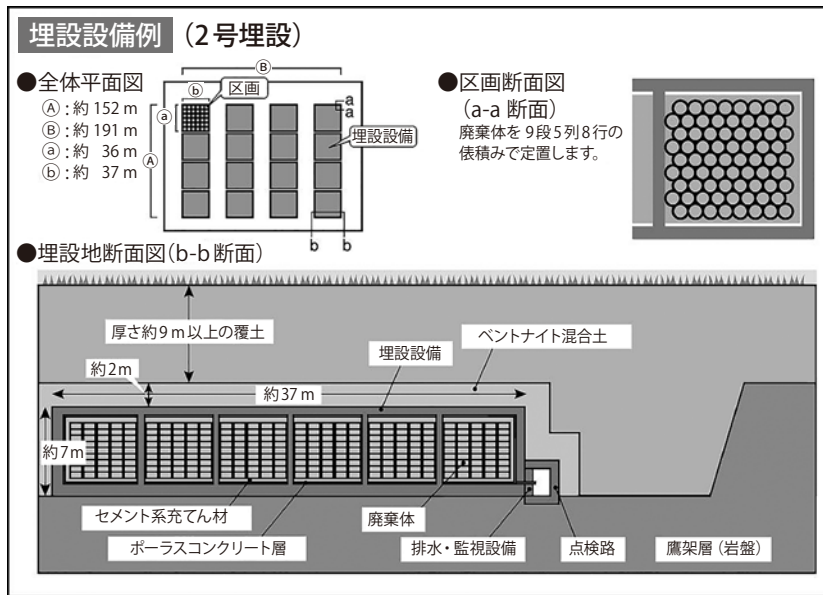


図8 ピット型処分構造図(日本原燃)

出典:「埋設設備の構造:2号埋設設備」日本原燃株式会社ホームページ 埋設事業より転載

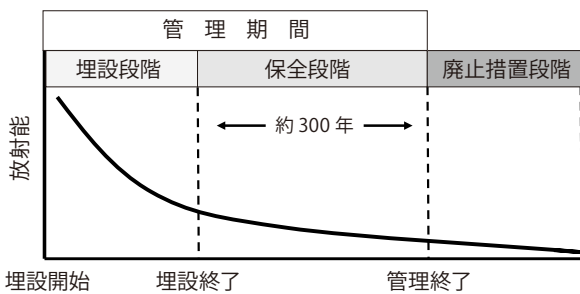


図9 処分場の段階的管理概念図

出典:国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構のホームページ、研究施設等廃棄物の埋設事業「用語集」より転載 (URL; <https://www.jaea.go.jp/04/maisetsu/glossary/glossary.html>)

極低レベルの放射性廃棄物が原子力施設の廃止措置に伴って排出してくる。現在、わが国で最初の商業用原子力発電所である日本原電株式会社東海発電所の廃止措置が行われており、極低レベルのコンクリートは発電所敷地内でトレンチ型の埋設処分を実施する計画が進められている。

(注1) ウラン濃縮施設用地も含めた用地全体の面積

ii) 研究施設等低レベル廃棄物処分場

読者によっては信じられない気持ちになると思われるが、わが国での原子力利用の研究が始められた当時の1955年頃から現在までの半世紀以上に渡って、研究等で生じた低レベル放射性廃棄物は処分できず、大学・研究所並びに原子力発電所以外の民間事業者が夫々の原子力施設で放射性廃棄物を保管管理し続けている。

これらに加え、日本原子力研究開発機構(以下「原子力機構」)が研究や事業を行って排出された低レベル放射性廃棄物を加えた放射性廃棄物を研究施設等低レベル廃棄物と総称されている。2008年に原子力機構法が改正され、原子力機構が研究施設等低レベル廃棄物の処分実施主体となっている。

約12万 m^3 (200リットルドラム缶で約60万本相当)を約100万 m^2 の敷地内に処分することとなっており、廃棄物の放射能濃度によってトレンチ処分とピット処分とに分けて処分されることとなっている。原子力機構が示した事業計画によれば、施設の建設と操業の総費用は約2,000億円と計画されている。

3. 減容化から最終処分へのシステム化への考察

(1) シーズ技術とニーズ技術の融合の条件

チャンピオンデータの取得を目指した減容化のシーズ型技術と地域住民の安全を確保しなければならない最終処分のニーズ型技術とを技術的整合を持たせて、図13に示すように、システム化を図っていくことが必要である。

現段階では、減容化技術の詳細が不明なために技術的取り合い点を明確にすることはできていないが、シーズ型技術が既存のニーズ型技術の要件を満足するように研究開発を行うことが必要と考える。

その際の一つの視点として、減容化においては、何処まで放射能濃度をあげていくべきかを検討することが必要である。

除去土壌の放射能濃度は $10^3 \sim 10^5$ Bq/kg程度であり、丁度、トレンチ型処分とピット型処分の中間の放射能濃度である。

一方、原子力利用における放射性廃棄物処分のピット型低

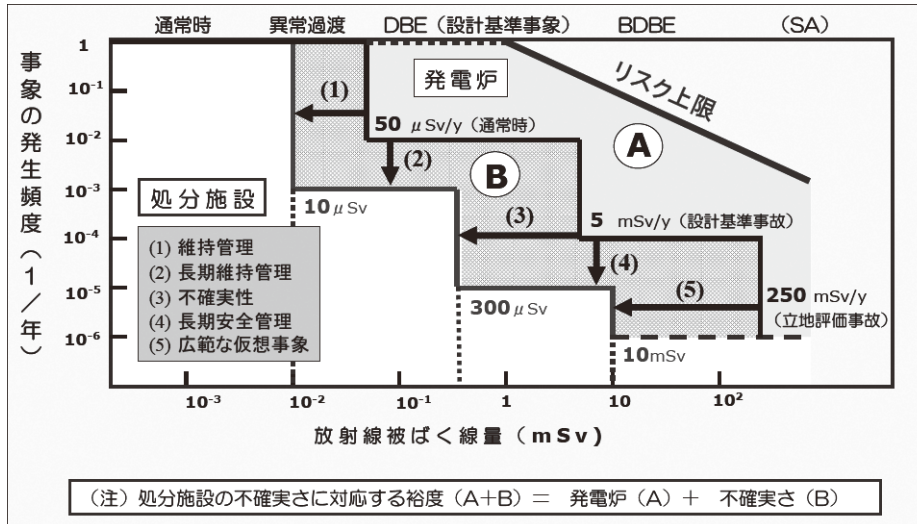


図10 放射性廃棄物処分におけるリスク管理目標(概念)

出典: 旧原子力安全委員会開催シンポジウム(2010年2月23日)での講演「放射性廃棄物の処分に係る安全規制の動向と原子力安全委員会の活動」(講演者: 早田 邦久) 資料 (NSFR2010. URL: <http://www.nustec.or.jp/NSC/nsrf2010/pdf/01.pdf>) の図(12ページ)より転載



図11 日本原燃株式会社の低レベル放射性廃棄物埋設センター
出典: 日本原燃株式会社ホームページ 埋設事業より転載
(URL: <http://www.jnfl.co.jp/business-cycle/llw/>)

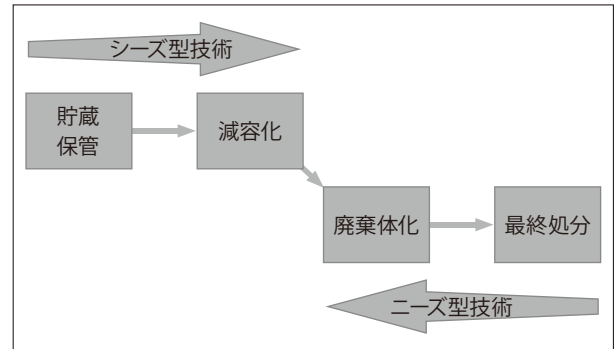


図13 減容化技術と最終処分技術の技術整合性が取れた関係イメージ

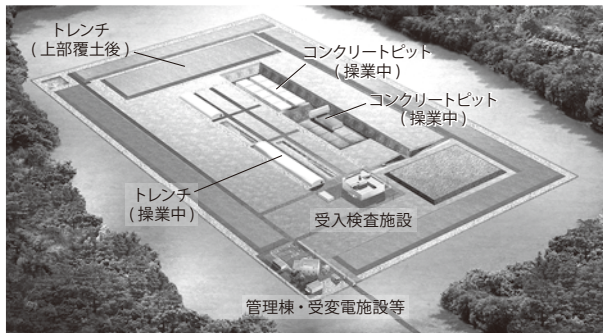


図12 研究施設等廃棄物の埋設処分場の完成予想図
出典: 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構のホームページ、「埋設事業の紹介」より転載
(URL: <http://www.jaea.go.jp/04/maisetsu/aisatu/aisatu2.html>)

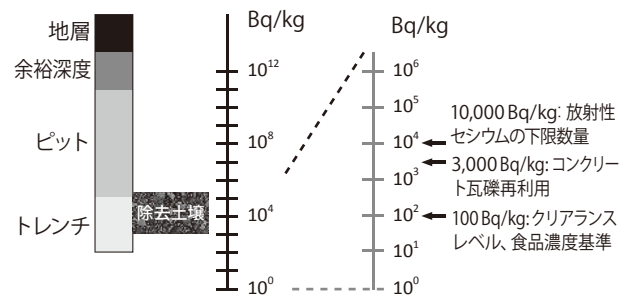


図14 最終処分のカテゴリーと放射性物質濃度

レベル放射性廃棄物処分では $10^5 \sim 10^{11}$ Bq/kg の放射能濃度範囲を処分することができるとしている。即ち、除去土壌の放射能濃度を最大で約100万倍まで濃縮したとしてもピット型処分場で処分することができることを意味している。このこと

から、減容化への期待は少なくとも $10^{-3} \sim 10^{-4}$ までを達成することにあると考える。

減容化を行うと、減容化残渣或いは濃縮残渣という極低放射能濃度の除去土壌が大量に発生する。この極低の除去土壌

表1 中間貯蔵施設での貯蔵保管量予測値

種類	放射能濃度 (Bq/kg)	数量 (万m ³)
焼却灰	除去廃棄物	約 155
	対策地域内廃棄物	約 2
除去土壌	8,000 以下	約 1,006
	8,000 ~ 100,000	約 1,036
	100,000 超	約 1

環境省 中間貯蔵施設等福島現地推進本部「除去土壌等の中間貯蔵施設 の案について(概要版)」(URL; https://josen.env.go.jp/chukanchozou/action/acceptance_request/pdf/draft_outline_131214.pdf) の5 ページに記載された表を簡略化したもの

表2 放射性セシウム (¹³⁴Cs+¹³⁷Cs) 物理的減衰値

	単位: Bq/kg				
	0年	2年	12年	22年	32年
発生量 予測時	100,000	60,810	38,400	30,180	23,970
	50,000	30,405	19,200	15,090	11,985
	4,000	2,432	1,536	1,207	959
中間貯蔵 事業 開始時		100,000	63,150	49,630	39,420
		50,000	31,575	24,815	19,710
		4,000	2,526	1,985	1,576

は再利用が前提であり、減容化技術開発と並行して減容化残渣の放射能濃度基準を設定することが必要となる。

既に、特措法では災害瓦礫のうちコンクリート瓦礫の再利用基準として3,000 Bq/kgが設定されており、除去土壌に対しても同じ基準を適用することが適切であると考えられる。

原子力利用で発生する廃棄物のうち、100 Bq/kg 未満の廃棄物は廃掃法の廃棄物として扱うことが可能であり、その再利用に当たっても利用方法を制限せずに無拘束での再利用を可能とする基準であることに留意することが必要である。一方、ドイツでは廃棄物の放射能濃度によって再利用範囲を限定しながら放射性廃棄物の処分量を減少させる合理的な政策が取られていることを参考に、特措法においても再利用範囲を限定した再利用基準(減容化残渣基準)を定めることは合理的な考え方であり、早期に検討を開始する必要がある。

(2) 減容化対象の除去土壌量

中間貯蔵施設に貯蔵保管される除去土壌量は表1に示す通りの濃度区分と数量であり、総量で約2,200万m³であると予測されている。ただし、この予測には2つの課題がある。第一に、この予測は航空機モニタリング(2013年3月実施)により得られた空間線量率から除去土壌等の発生量と放射能濃

度を予測したものであるが、実際の除染に伴う除去土壌等の発生量と放射能濃度の実績データが反映されていないこと、さらには、空間線量率が放射性物質の物理的半減期よりも早く低下していることが挙げられる。第二には、除染後に仮置場等にて保管されている除去土壌も放射性物質の物理的半減期に従って放射線量が減衰していることを指摘することができる。

表2は、2011年の事故により環境に放出された¹³⁴Csと¹³⁷Csの比が1:1であったことを踏まえて、上段には発生量予測が行われた2013年3月を起点にした放射性セシウムの物理的減衰を示した。また、下段には中間貯蔵が開始された時期である2015年3月を起点にした放射性セシウムの物理的減衰を示した。

なお、8,000 Bq/kg以下は4,000 Bq/kgを代表値とし、8,000 ~ 100,000 Bq/kgは50,000 Bq/kgを代表値とした。

再利用基準をコンクリート瓦礫の再利用基準(3,000 Bq/kg)と同じとすると、8,000 Bq/kg以下に分類される約1,006万m³の除去土壌は、最終処分終了時点である2045年(32年後)においては再利用基準を大きく下回る放射能濃度になるので、減容化処置を施さなくとも直接に再利用できると考える。

(3) 除去土壌の減容化処理と最終処分のフロー

図15は8,000 ~ 100,000 Bq/kgの除去土壌に注目した減容化処理から最終処分へのフロー図である。土壌洗浄を中心とする第一次減容化にて低濃度土壌と高濃度土壌とを荒ごなし的に分別し、高濃度土壌を第二次減容化にてさらに高減容化し、高減容に伴い高濃度化した除去土壌をピット型処分場にて処分を行うことを検討の前提とした。

なお、100,000 Bq/kg超は発生量が僅か1万m³であることから、今回の検討では評価対象外としたが、実際にはこれも減容化処理によりさらに高濃度化させることが可能である。また、8,000 Bq/kg以下は減容化処理を行わず、直接に再利用に供するとした。

4. 減容化評価

(1) 一次減容化評価

一次減容化処理で用いる土壌洗浄技術は化学物質に汚染された土壌を回復させる技術として建設業界にて既に利用されている技術であるが、平成23年以降、環境省等の技術実証事業で、放射性物質を扱うことに伴う被ばく防止、飛散防止措置の創意工夫が様々になされ、技術的にかなり確立している技術である。

図16は、2011年に内閣府が実施した技術実証事業の成果であり、2012年6月に日本原子力研究開発機構が成果を取りまとめて報告している。

この洗浄技術は、一次洗浄段階で、除去土壌に含まれる植

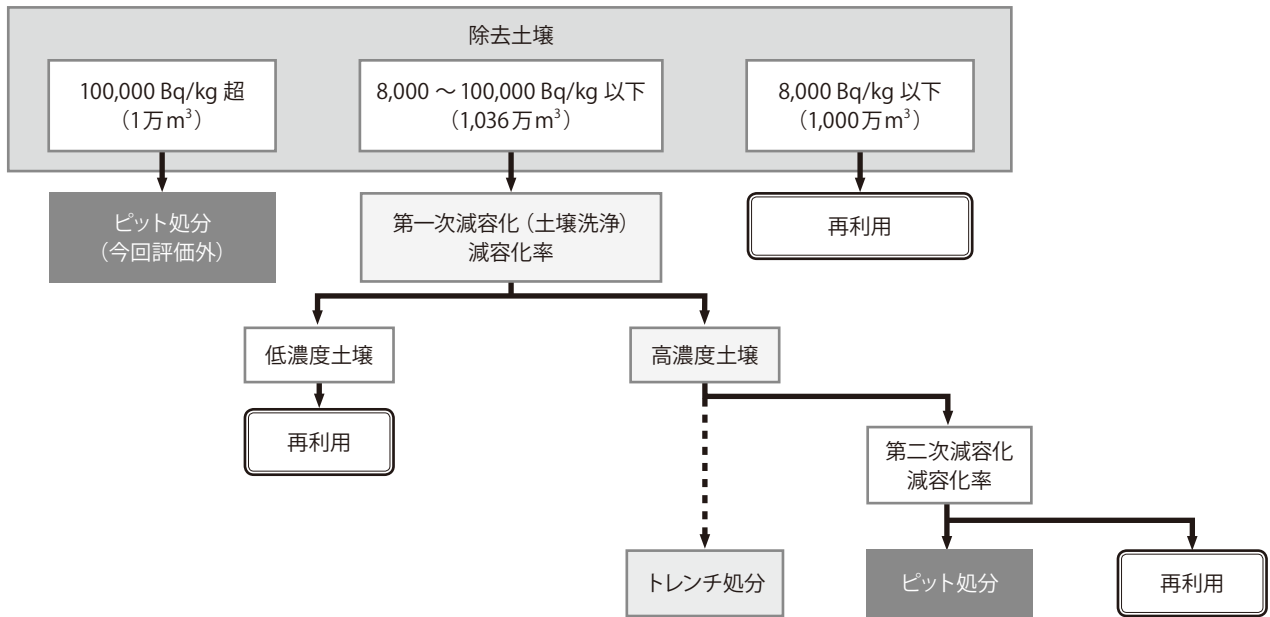


図 15 除去土壌の一次減容及び二次減容フロー

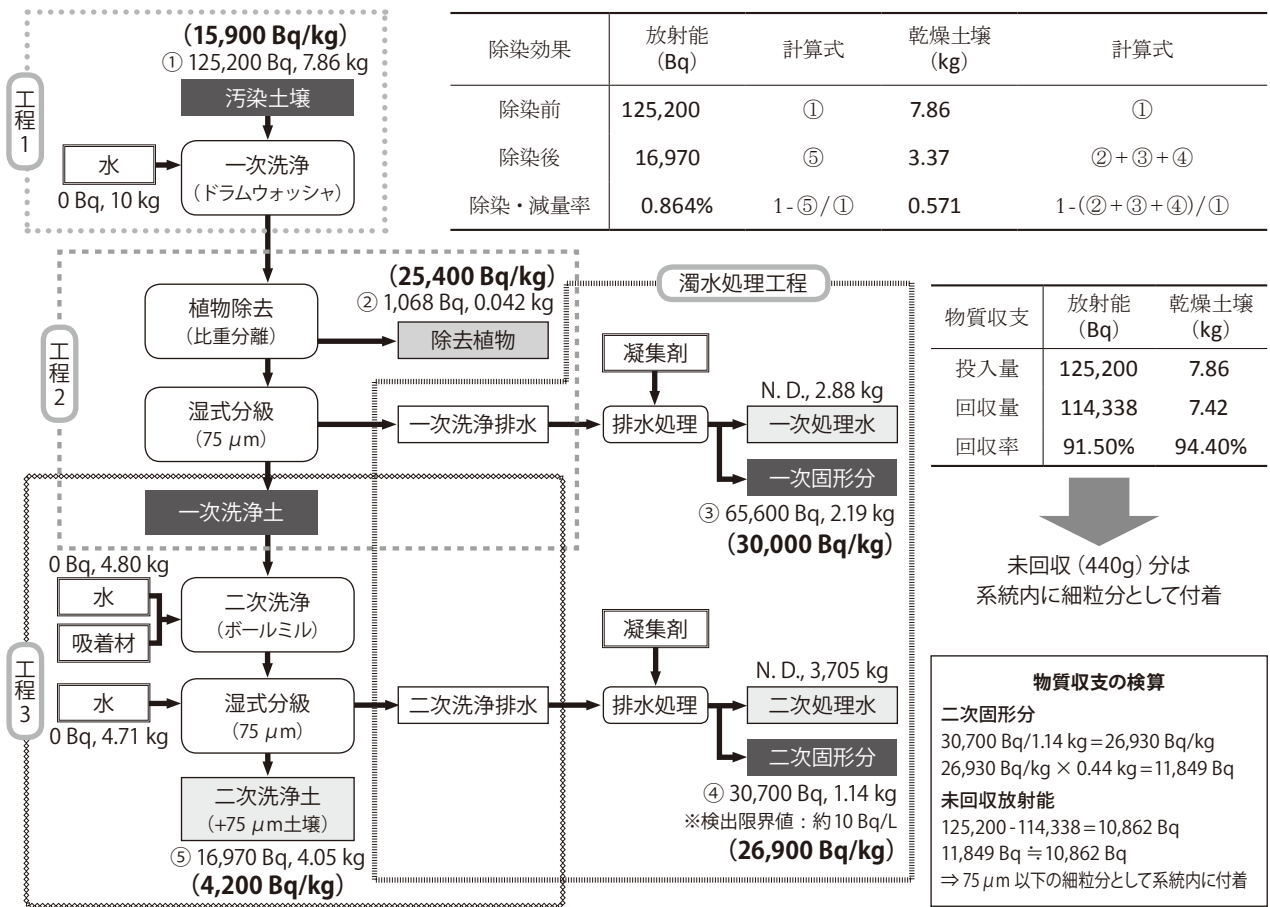


図 16 一次減容化技術の実証事業成果 (一例)

(注) 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構発行の「福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務報告書」(2012年6月)、51ページの図に著者が放射性物質濃度を追記

物の根などを比重分離により除去したのちに湿式分級により除去土壌を粒形 75 μm にて篩い分級し、75 μm 以下の粒形の高濃度分を回収し、粒形 75 μm 以上を二次洗浄としてボールミルにより表面に付着しているセシウムを分離し、これを再び 75 μm にて篩い分級し、これを回収してセシウムが付着している土壌を集めて濃縮し、その残渣が減容化分として回収される。

これにより、洗浄処理前に 15,900 Bq/kg あった除去土壌が平均して 28,900 Bq/kg までの約 1.8 倍濃縮することができている。洗浄処理後の洗浄残渣（濃縮残渣）は 4,200 Bq/kg であり、洗浄残渣の放射エネルギーは洗浄前の約 1/4 まで低減させることができている。減容化については、洗浄処理前に 7.86 kg あったものが、濃縮側には除去された植物を除いて 3.33 kg で、42.4% まで減容化されている。

2012 年度以降に実施された実証事業等により、より良いデータが出ているものと思うが、この評価においては上記データをレファレンスデータとして用いた。

(2) 二次減容化評価

a) 二次減容化評価の考え方

二次減容化技術はシーズ型技術開発段階の技術であり、現段階ではレファレンスケースを設定するだけのデータが存在しない。このため、以下の条件を設定し、二次減容化技術への要求基準をコスト面から評価した。

- i) 二次減容化処理対象の除去土壌量は一次減容化処理のレファレンスケースから算出する
- ii) 二次減容化処理目標は一次減容化処理後の除去土壌量の 1/100 まで減容化をレファレンスケースとする
- iii) 二次減容化処理費用は二次減容化せずにトレンチ型処分をした場合の費用の 1/10 と二次減容化後のピット型処分費用の差額を充当することとし、これから二次減容化処理単価のレファレンス値を算出する

なお、ここで示した係数 1/100 及び 1/10 はかなり意欲的

な係数であり、減容化技術開発に対する期待値でもある。

b) 二次減容化レファレンス評価

原子力における低レベル放射性廃棄物の処分に係る費用については必ずしも十分な情報が開示されている状況にはないが、原子力機構が検討を進めている低レベル放射性廃棄物処分場については、文部科学省研究施設等作業部会にて表 3 及び表 4 に示すように処分数量及び建設・運転管理費用が試算されている。

これをもとに、建設費から運転管理費までを含めたトレンチ型処分及びピット型処分の夫々の単価は 95 万円 / m^3 、330 万円 / m^3 と算出される。

二次減容化の対象となる除去土壌量は 4-(2)-a) のレファレンス値から約 500 万 m^3 と算出され、二次減容化処理単価（レファレンス値）は約 6.2 万円 / m^3 と算出される。

また、約 500 万 m^3 の除去土壌を全てトレンチ型処分するとすれば、処分だけで約 4.75 兆円の費用となり、処分場として必要な面積は原子力機構の研究施設等廃棄物処分場から推計すると約 4,200 万 m^2 の規模と算出される。これに対してレファレンスケースにおいては、処分費用が約 1,650 億円、処分場面積が約 42 万 m^2 の規模となる。

なお、この評価結果は、原子力機構の研究施設等廃棄物処分場の公表データをもとに単純に比例計算した結果にすぎず今後詳細な評価が必要であるが、二次減容化技術開発を進める者への一つの目標を示すこととなれば幸いである。

(3) レファレンス評価に対する感度分析

レファレンス値は不確定な様々な仮定の下に評価を行っているため、一次減容化及び二次減容化の減容率を変数とした感度分析を行った。

表 5 は感度分析結果である。一次減容化率 57.6%・二次減容化率 1/100 はレファレンス値である。一次減容化率を上げることにより処分費用を下げることができるものの、二次減

表 3 処分予定量(本数:200Lドラム缶換算)

	ピット	トレンチ	合計
原子力機構	189,800	199,200	389,000
大学・民間	18,200	148,800	167,000
合計	208,000	348,000	556,000

原子力科学技術委員会 研究施設等廃棄物作業部会(第12回、2015年7月1日)の配布資料12-3、「研究施設等廃棄物物理設事業の進捗について」(国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構作成)(URL; http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/057/shiryo/_icsFiles/afiedfile/2015/07/09/1359587_3.pdf)の5ページに記載された内容をもとに著者が作成

表 4 総事業費(単位:億円)

	ピット	トレンチ	合計
建設費	537	230	766
操業費	704	385	1,090
人件費	112	42	154
一般管理費	13	5	19
合計	1,367	662	2,029

出典:原子力科学技術委員会 研究施設等廃棄物作業部会(第11回、2014年2月17日)の配布資料2、「埋設処分業務の実施状況」(国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構埋設事業推進センター作成)(URL; http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/057/shiryo/_icsFiles/afiedfile/2014/02/26/1344450_1.pdf)の5ページに記載されたもの

表 5 減容化目標評価結果(評価例)

二次	一次	10%	30%	50%	57.60%	70%	90%
1/1000		308	239	171		103	34
		9.2	9.2	9.2		9.2	9.2
1/200		1,538	1,197	855		513	171
		7.9	7.9	7.9		7.9	7.9
1/100		3,077	2,393	1,709	1,658	1,026	342
		6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
1/50		6,154	4,780	3,419		2,051	684
		2.9	2.9	2.9		2.9	2.9
1/20		15,385	11,966	8,547		5,128	1,709
		-7.0	-7.0	-7.0		-7.0	-7.0
1/10		30,769	23,932	17,094		10,256	3,419
		-23.5	-23.5	-23.5		-23.5	-23.5

上段：二次減容化後のピット処分費用(億円) 下段：二次減容化目標処理単価(万円/m³)



図 17 新型転換炉「ふげん」

出典：国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構より提供された写真

容化単価へは影響を与えないことが分かった。また、二次減容化率が 1/20 程度では、4-(2)-a) の iii) の条件では成立しないことが分かった。

5. ナショナルプロジェクト管理の必要性

(1) ナショナルプロジェクトの先行例

わが国では、開発に巨額の費用がかかり、民間だけでは技術開発リスクを負いきれない国家的な目標を達成するために、原子力開発や宇宙ロケット開発などではナショナルプロジェクトに国が指定し、産官学の総力を結集させて、決められた期間内に事業として成立させることが行われてきた。

その一例として、新型転換炉「ふげん」の開発を紹介する。

新しい原子炉開発は、一般的に、実験炉⇒原型炉⇒実証炉⇒実用炉の4段階を経て電力会社が運営する商業用の原子炉にしていく方策がとられてきたが、新型転換炉「ふげん」は

軽水炉技術を利用することもあり、実験炉を経ずにいきなり原型炉から開発された。当時の日本では東海ガス炉(英国から輸入)、美浜1号炉(米国から輸入)、福島1号炉(米国から輸入)と何れも輸入技術にて商業用原子力発電所が建設された段階であり、国産技術で全く新しい原子炉開発を行うことには大きな開発リスクがあった。このため、国(動燃:開発責任、設計・研究開発・試運転・運転)、電力(J-Power:施工監理、電力各社:運転協力)、民間(日立製作所、東芝、三菱重工、富士電機、住友重機械:機器設計・製造・据付)が力を結集して開発に当たった。

新型転換炉「ふげん」は、福井県敦賀市に建設され、電気出力 16.5 万 kw の小さな研究開発段階の原子力発電所であるが、1979 年に運転を開始して現在は廃止措置が行われている。その間に約 219 億 kwh (設備利用率約 62%) の発電を行ったユニークな原子炉である。

建設中には、オイルショックによる資材確保難や設計時点では分っていなかった応力腐食割れ問題があったりして、表 6 に示すように、建設工期に若干の遅れはあったものの、調査を開始してから 16 年後の 1979 年に運転を開始することができた。また、運転開始直後に米国で TMI 事故が起こり、その対応を求められたりもした。

この表を見て分かるように、新型転換炉「ふげん」の中核技術に関して実規模試験ができる 4 つの研究施設を設け、設計・安全審査段階、建設・試運転段階での技術課題を一つひとつクリアしていったことが、輸入・技術導入による軽水炉技術とは違うところである。

新型転換炉「ふげん」を開発するにあたり、

- a) 自らの手で設計を行い、自らの手で重要機器のノウハウを確立する
- b) 開発に必要な情報とそれが必要な時期を明確にして開発を進める

表6 新型転換炉「ふげん」の開発・建設工程

西暦	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981
ふげん	調査検討			設計・安全審査							建設・試運転						本格運転		
	重水臨界試験装置 (DCA)					建設		実規模実証による試験研究											
	流動伝熱試験装置 (HTL)					建設		実規模実証による試験研究											
	ATR 安全性試験装置 (A 安)					建設		実規模実証による試験研究											
研究 開発 施設	コンポーネントテストループ(CTL)					建設		実規模実証による試験研究											
商業炉	▽ 原電東海炉運転開始				▽ 東電福島第一1号機運転開始														
	▽ 関電美浜1号機運転開始																		

動燃十年史編集委員会「動燃十年史」(動力炉・核燃料開発事業団が1978年発行)の237ページに記載された詳細な工程を著者が簡略化し、商業炉の運転開始時期を追記

c) 既存技術は極力利用するが、必ず自ら評価し、必要あれば自ら検証する
を開発の基本方針に据えて進めている。
「中間貯蔵～減容化～最終処分」の一連の事業はこれまでわが国が経験したことがない大事業であり、民間責任のみで実施するにはリスクが高い事業でもあり、先例が示すように、ナショナルプロジェクトで実施することが適切であると考えれば、新型転換炉「ふげん」開発において行われた手法は参考になる所が多くあると思われる。

(2) ナショナルプロジェクトとしての中間貯蔵事業

中間貯蔵事業は、約2,200万 m³ の焼却灰と除去土壌等を扱い、現段階ではこれ以降の取扱量については未確定ではあるが敢えて言うとするれば、約1,100万 m³ の焼却灰と除去土壌等の減容化処理を行い、さらに約500万 m³ の除去土壌に対して高減容化処理を行い、最終的には数10万 m³ 台までに高減容された放射性廃棄物を福島県外で処分し、減容化残渣などは再生利用を実施することとなる事業であり、これらを取り扱う数多くの施設・設備を安全に運転・保守できる能力も求められる事業である。加えて、これらの業務を法律で定められている30年以内に完了させねばならない事業でもあることから、事業の遂行には大きなリスクが存在することとなり、ナショナルプロジェクトとしてわが国の総力を結集して実施することが適切であると考ええる。

その際、ナショナルプロジェクト・マネジメントの優劣が事業の遂行に大きく左右することを肝に銘じなければならぬ。その中心は「人・物・金」に中間貯蔵事業では「時」の4

要素を的確にマネジメントできるかに係っている。
特に、人については、員数確保は勿論のこと、少なくとも10年間～15年間程度の期間を継続して事業に従事する者を確保できるかという「人の継続性」は事業を成功に導く重要な要素である。

表7は減容化から最終処分への工程をイメージしたものである。

工程は大きく分けて、研究開発段階、減容処理段階、最終処分段階に区分され、研究開発段階には初期の15年間程度しか割り当てることができない。それ故、研究開発段階の初期に行われる調査が極めて重要な役割を担うこととなる。

減容処理段階は、研究開発段階の成果を踏まえて、10年後程度から一次減容化及び二次減容化を実施していくこととなる。

最終処分段階については、二次減容化による最終処分量、最終処分放射線量等の設計条件を踏まえて最終処分場の設計・建設を行い、30年以内の県外処分を最終の4年間程度で搬出・最終処分を行うことを想定する。また、最終処分に当たっては、高減容化された除去土壌等を最終処分できる廃棄体化にすることも必要であり、このための施設整備も最終処分段階で実施することが必要となる。このことから、表7に示すように中間貯蔵期間である30年間の半ば辺りから最終処分場の設計を開始する必要があることが分かる。

6. 減容化への今後の課題

減容化はまだコンセプト段階であり、実用技術にしていくまでには様々な課題が存在する。簡単に整理すると、以下の通りである。

表7 「減容化～最終処分」工程 (イメージ)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
研究 開発	調査		要素技術開発					実証施設建設				運転																		
減容 処理											施設建設		一次減容化処理																	
											概念設計		二次施設建設						二次減容化処理											
最終 処分											概念設計		廃棄体化施設建設				廃棄体化													
											概念設計		最終処分場建設 (基本設計・安全審査・建設)						埋設				搬出							

- (1) 減容化に係る基礎情報が不足しており、研究開発段階の調査期間内に基礎情報の収集・整理
例えば、除去土壌・除染廃棄物の発生量、夫々の放射能濃度分布、除去土壌の粒度分布、土壌洗浄技術の実績データなど
- (2) 再利用基準の整備と再利用先の確保
- (3) 最終処分核種が¹³⁷Csのみであり、廃棄体化、最終処分場の設計・安全評価手法の確立
- (4) 中間貯蔵施設整備計画に減容化施設整備計画を加えた総合的な施設整備計画の立案
例えば、減容化施設の設置場所の確保、中間貯蔵施設の安全評価、整備工程への反映
- (5) 減容化技術の知見の集約方法
例えば、一次減容化技術は民間技術を活用、二次減容化技術はナショナルプロジェクト責任箇所へ集約
- (6) 減容化システムの評価手法の確立
焼却灰も含めた減容化の総合的システム評価手法の確立であり、これを一元的にマネジメントすることも必要である。

7. おわりに

東海道新幹線は1964年10月1日に東京オリンピックの開催に併せて開業され、爾来、50年を経過した今日まで大きな事故を経験することもなく、安全に、経済的にも成功を収めている。その東海道新幹線を実現するために、1956年に実現可能性調査チームが旧国鉄内に設置され、3年後の1959年に着工され、5年の歳月を経て営業運転を達成した。

建設当時の十河国鉄総裁、島国鉄技師長は建設予算が超過した責任で開業時には辞任をしていたが、二人の卓越した人材が今日の東海道新幹線を支えているといっても過言ではなく、事業と技術とを全体的に見通して継続性を持ってマネジメントしていく態勢が中間貯蔵事業においても必要であること

を示しているようにも思われる。

また、中間貯蔵施設候補地及び候補地の周辺地域は空間線量率が高い地域であり、最も復興が難しい地域であると認識されている。中間貯蔵～最終処分の事業を推進することにより、新しい産業の創出と知の集約が行われ、避難されている方々の帰還と地域の復興の促進に寄与することが期待される。

本稿は、筆者が独断偏見的に示したものであり、しかも、本稿で示した様々な試算値は今後精緻化されていく必要がある概念的なものと認識している。ご批判をいただくことを期待している。

参考文献

- 1) 厚生労働省：「事故由来廃棄物等処分業務に従事する労働者の放射線障害防止のためのガイドライン」p.1(2014).
- 2) 森 久起：全体のシステム化と湿式減容化の可能性. 環境放射能除染学会第10回講演会(2015).
- 3) 環境省：「中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略検討会(第1回)」.
- 4) 「低レベル放射性廃棄物埋設センターについて」日本原燃株式会社HP. (<http://www.jnfl.co.jp/business-cycle/llw/llw-center.html>), 2015年11月閲覧.
- 5) 国立研究開発法人 国立環境研究所資源循環・廃棄物研究センター：「放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分(技術資料 第四版)(平成26年4月14日改訂版)」8. 焼却飛灰の水洗浄による放射性セシウムの除去, pp.132-153 (2014).
- 6) 竹下 健二：汚染土壌など放射性廃棄物の高減容処理を目指した亜臨界水洗浄プロセスの開発. 環境放射能除染学会第10回講演会(2015).
- 7) 除染・廃棄物技術協議会 焼却灰ワーキンググループ：「焼却灰処理技術・最終処分技術集(平成25年10月)」

- 灰処理技術 A-3 (2013).
- 8) 塚田 祥文:陸域環境における放射性セシウムの挙動と存在形態. 放射能除染のための国際シンポジウム(2015).
 - 9) 森 久起:放射性廃棄物の観点からの下水汚泥処理処分の課題. 日本下水道施設業協会第7回公開講座(2011).
 - 10) 「モルビリエ処分場」ANDRA HP. (<http://www.andra.fr/international/pages/en/menu21/waste-management/waste-management-strategies/very-low-level-waste-repository-1613.html>) 2015年11月閲覧.
 - 11) 「研究施設等廃棄物の埋設事業」国立研究開発法人日本原子力研究開発機構HP. (<http://www.jaea.go.jp/04/maisetsu/index.html>) 2015年11月閲覧.
 - 12) 早田 邦久:放射性廃棄物の処分に係る安全規制の動向と原子力安全委員会の活動. NSFR2010 (2010).
 - 13) 環境省:「管理された状態での災害廃棄物(コンクリートくず等)の再生利用について(2011年12月27日)」.
 - 14) 環境省中間貯蔵施設等福島現地推進本部:「除去土壌等の中間貯蔵施設の案について(平成25年12月)」, 除去土壌, 廃棄物等の発生見込み量及び濃度 pp.4-7.
 - 15) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構:「福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務報告書」, 除染技術実証試験事業編, pp.51 (2012).
 - 16) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構:「埋設処分業務の実施状況」(2014).
 - 17) 「ふげんの歩み」国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子炉廃止措置研究開発センターHP. (<https://www.jaea.go.jp/04/fugen/index.html>) 2015年11月閲覧.
 - 18) 動燃十年史編集委員会「動燃十年史」, 動力炉・核燃料開発事業団(出版), 1978年.
動力炉核燃料開発事業団「動燃二十年史」, 動力炉・核燃料開発事業団(出版), 1988年.

2015年11月10日 原稿受付

和文要約

福島県で発生する除去土壌等は約 2,200 万 m³ と想定され、中間貯蔵施設にて保管された後に、2015 年 3 月を起点として、30 年以内に県外処分をすることが法律で定められている。日本原燃株式会社の低レベル廃棄物埋設センターの処分容量は 60 万 m³ であり、中間貯蔵後の処分量は比類なき大量の処分量と言わざるを得ない。除去土壌等の放射能濃度は一部には高い濃度のものもあるが、殆どが極低レベルの濃度であり、処分の負担を軽減するための減容化処理は避けられない。その減容化処理技術はシーズ型開発段階であり、チャンピオンデータの獲得を目指した研究段階ではあるが、30 年以内という限定された期間内に技術確立するためには、処分技術とのシステム化と技術調和が不可欠である。減容化技術に対するコスト期待値を処分と連動させて技術評価の一つとして実施した。

2,200 万 m³ を取り扱うには技術的・経済的・時間的リスクが存在し、ナショナルプロジェクトとして、人と技術との継続性を保つことができる体制の確立も並行して実施される必要がある。

