

事故炉の廃止措置と 放射性廃棄物処理処分について

—原子力学会事故調査委員会—
バックエンド部会関係者による検討

(独)日本原子力研究開発機構
林道 寛

検討の背景

現在までに作成された関連する資料

- (1)「東京電力福島第一発電所1～4号機の廃止措置に向けた中長期ロードマップ」
原子力災害対策本部 平成24年7月（同改訂：平成25年6月）
- (2)「福島第一原子力発電所により発生する放射性廃棄物の処理処分
～研究開発課題の抽出と解決に向けた考え方～」
日本原子力学会、特別専門委員会 平成25年3月



学会活動

- (1)これらを踏まえて、重複を避けるとともに、現状を踏まえ、サイト内放射性廃棄物の処理・処分と廃止措置についての今後の対応に関する留意事項と課題の進め方に対する提言
- (2)事故調査委員会はバックエンド部会から2名の委員が参加。部会内の関係者による報告書案の作成
- (3)学会事故調査委員会の報告書に反映(頁数に制限)
- (4)本セミナーでは、部会内の検討の要点を報告

基本的なアプローチ

- (1) 放射性廃棄物は、その性状や核種濃度に応じて処理していくことを基本とし、リスクの低減化と廃棄物の減容・安定化を行い処分。また、廃止措置は、段階的にリスクを低減していくことが原則 ⇒被ばく等のリスクを合理的に最小化
- (2) 放射性廃棄物の処理・処分と廃止措置は、個々の段階の最適化が、必ずしも全体としての最適化とはならない
- (3) プロジェクト全体のマネジメントをどう遂行するかが鍵となる。特にエンドステートをどう想定するか
- (4) ステークホルダーと様々な情報を共有し、技術的課題や社会的受容性に柔軟に対応



通常発電炉と事故炉の相違点に留意した対応

放射性廃棄物のサイト内保管状況-1

(H24.12.27時点)

保管場所	エリア境界空間線量率 (mSv/h)	種類	保管方法	保管量 ^{※1}		前回報告比 (H24.9.28)		エリア占有率
固体廃棄物貯蔵庫	0.05	コンクリート、金属	容器	2,000	m ³	-	m ³	35%
A：敷地北側	0.45	コンクリート、金属	仮設保管設備	5,000	m ³	-	m ³	43%
B：敷地北側	0.05	コンクリート、金属	容器	4,000	m ³	-	m ³	98%
C：敷地北側	0.01	コンクリート、金属	屋外集積	31,000	m ³	+2000	m ³	90%
D：敷地北側	0.02	コンクリート、金属	シート養生	2,000	m ³	-	m ³	86%
E：敷地北側	0.01	コンクリート、金属	シート養生	3,000	m ³	-	m ³	88%
F：敷地北側	0.01	コンクリート、金属	容器	1,000	m ³	-	m ³	99%
L：敷地北側	0.01未満	コンクリート、金属	覆土式一時保管施設	5,000	m ³	+1000	m ³	66%
O：敷地南西側 ^{※2}	0.07	コンクリート、金属	屋外集積	6,000	m ³	-	m ³	36%
合計（コンクリート、金属）				59,000	m ³	+3000	m ³	68%
G：敷地北側	0.01	伐採木	屋外集積	11,000	m ³	-7000	m ³	53%
H：敷地北側	0.02	伐採木	屋外集積	16,000	m ³	-	m ³	93%
I：敷地北側	0.02	伐採木	屋外集積	11,000	m ³	-	m ³	100%
J：敷地南側	0.06	伐採木	屋外集積	12,000	m ³	-	m ³	77%
K：敷地南側	0.04	伐採木	屋外集積	5,000	m ³	-	m ³	100%
M：敷地西側	0.01	伐採木	屋外集積	17,000	m ³	+6000	m ³	80%
合計（伐採木）				72,000	m ³	-1000	m ³	79%

※1 端数処理で1,000m³未満を四捨五入しているため、合計値が合わないことがある。

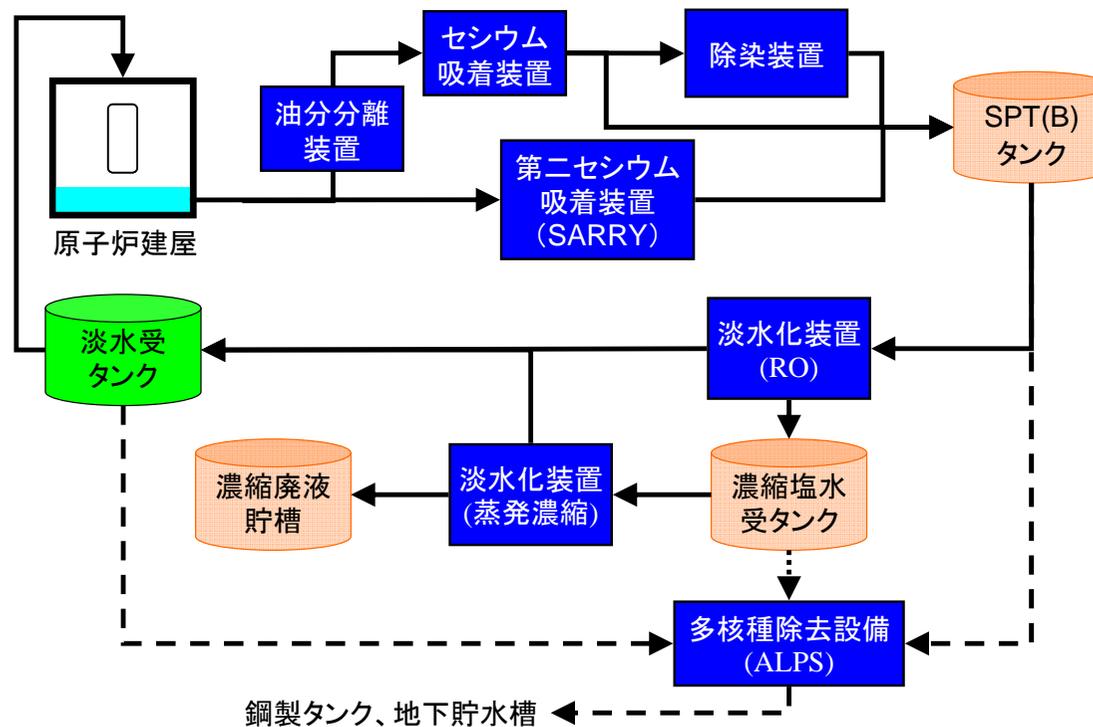
日本原子力学会、特別専門委員会報告書より 平成25年3月

放射性廃棄物のサイト内保管状況-2

-汚染水処理二次廃棄物-

- ◆ 汚染水は燃料の溶融による多量の放射性核種のほか、海水成分やホウ酸を含む。
- ✓ 一部は、油分やセシウムを除去した後で、炉心冷却のために循環。
- ✓ その他の浄化後は敷地内にタンクを設置して保管。

2012年11月現在



- 左図に示す汚染水処理装置の系統からは、多量の二次廃棄物が発生する。2012年11月13日現在、
 - ✓ アレバ社(停止中)の沈殿凝集後のスラッジ:597m³
 - ✓ キュリオン製Cs吸着装置の廃ゼオライト:402本、
 - ✓ 東芝製第二Cs吸着装置(SARRY)の廃ゼオライト:68本。
- 数千m³/週の汚染水処理を実施。
- 多核種除去装置(ALPS)は、Cs以外の多くの核種除去が可能。
- 現在、汚染水は毎日400トン程度増え続けている。

日本原子力学会、特別専門委員会報告書より 平成25年3月

放射性廃棄物の発生状況(設備導入)

-今後の装置導入により発生する汚染水処理二次廃棄物-

多核種除去設備 (未稼働)	水酸化鉄スラッジ	(約 150 基/年)	水酸化鉄スラッジ	HIC (外径 1.5 m、高さ 1.8 m) 内で保管予定
	炭酸塩スラッジ	(約 600 基/年)	炭酸塩スラッジ	
	活性炭	(約 4 基/年)	活性炭	HIC 内で保管予定、乾燥状態
	Ag 添着活性炭	(約 8 基/年)	Ag 添着活性炭	
	チタン酸塩	(約 8 基/年)	チタン酸塩	
	フェロシアン化合物	(約 5 基/年)	フェロシアン化合物	
	酸化チタン	(約 7 基/年)	酸化チタン	
	キレート樹脂	(70 基/年)	キレート樹脂	
	樹脂系吸着材	(10 本/年)	樹脂系吸着材	

日本原子力学会、特別専門委員会報告書より
平成25年3月

事故廃棄物の特徴

全体としての特徴:

- ①燃料中に含まれる放射性核種の存在
 - ②その一部が水素爆発により飛散し、建物内外の瓦礫・草木類の表面に付着・浸透・吸着。レベルにばらつき
 - ③汚染水中にも燃料中の放射性核種が存在
- これらは、一部の核種を除いて分かっていない

(1) 伐採木

- 付着核種の多くは揮発性(I-131、Cs-134、Cs-137など)
 - 表面線量は0.1～0.3mSv/h程度。
- 有機物を多く含む。枝葉の部分は比較的線量が高い。

(2) 瓦礫類

- 汚染レベルには、かなりのばらつきがあり、線量の高いものは採取が困難。
- 金属(アルミニウム、鉛など)や、有機物としてケーブルの被覆材(PVC)も混入。

(3) 汚染水処理二次廃棄物

- 二次廃棄物は、多種多様であるが、これらは主にCsの放射能レベルが極めて高く、これまで処理・処分実績がない。
- セシウム吸着塔については、構造上、ゼオライトを取り出し採取分析することが困難。
- スラッジも線量が極めて高く、性状調査や核種分析のための採取が極めて困難。
- ALPSもスラッジや多量の使用済み吸着材が二次廃棄物として発生するが、これらも処理・処分の実績もなく、採取分析も困難な構造。

日本原子力学会、特別専門委員会報告書より 平成25年3月

放射性廃棄物処理・処分上の留意点-1

(1)伐採木

- Cs以外に、SrやIや燃料起源核種 (TRU、核分裂生成物) も含まれる可能性がある。発生場所によらず混合していることから、処理・処分に向けて付着した放射性核種とその定量化。
- 一時保管槽に保管している伐採木は、汚染の拡大防止の観点から、保管期間に応じて腐植対策を講じることも考慮。

(2)瓦礫類

- 表面線量率により分類されているが、発生場所によらず混合して保管している。
- 適切な分別処理と処理・処分に向けて付着した放射性核種とその定量化。

(3)汚染水処理二次廃棄物

- 処理後に含まれる放射性濃度に応じて処分していく。そのインベントリ確定については、処理前後の滞留水分析または二次廃棄物そのものに含まれる放射性核種とその定量化。
- 実廃棄物からのサンプリング分析の際、試料の代表性に留意。特にゼオライトの分析では、溶解による気中への移行に留意。
- 高線量下での微量核種や難測定核種の分析は、設備や要員の確保などの整備も急務
- 廃棄体製作においては、塩分やホウ酸量の分析が必要。処分では、処理をどう行うかも課題であり、二次廃棄物の発生経緯を分析し、放射性核種以外の定量化も。

放射性廃棄物処理・処分上の留意点-2

(4) 放射性廃棄物の長期保管

- 共通的な課題としては、インベントリ評価や分別(放射能濃度やリサイクルの可能性)、ガス発生対策(水の放射性分解、金属腐食、有機物分解等に伴う)など。
- 一部の瓦礫等については容器に収納され一時保管中。今後の保管期間を考慮し、長期貯蔵に適した容器の機能や材料選定も検討。
- 特に、1～3号機とも一時海水が炉内に注入されたことから、通常の貯蔵に要求される仕様に加え、塩分やホウ素などの不純物による耐食性を考慮した処分容器を考慮。
- 処分に至るまでの各輸送の段階で同一の容器が使用可能かどうかの評価も重要。さらに、そのままでは長期の保管貯蔵に不適と判断される場合には何らかの安定化処理を施す必要があり、処分を念頭に置きながらの廃棄体化の検討が重要。

廃棄物に対する今後の対応(1)

-インベントリー調査-

廃棄物の性状分析

- (1)処理・処分するにあたり、第一に必要なことは廃棄物中の放射性核種分析とその濃度の特定である。水素爆発による系統機器設備の破損や熔融燃料による汚染(燃料要素、FP、CPが混在)がある事から、廃棄物全体に亘り、早期分析が必須。
- (2)従来の統計的な措置の可能性を見極める事が重要。事故炉の廃棄物は、再処理廃棄物に近い性状を想定しての対処が必要。
- (3)膨大な廃棄物の処理・処分への道筋をつけるための第一歩はインベントリの確定。
- (4)極めて多量の試料分析を行うためには、分析の優先度も考慮しつつ、処理・処分において重要となる核種を整理して対処する。
- (5)分析に関する品質保証の観点からも学会標準等の分析方法の確立も並行して進めることが重要。



分析体制の整備

- (1)分析可能試料数は、2016年末までに年間50試料、2020年度末で年間200試料を計画
- (2)廃棄物の性状把握、物量評価等を2014年までに、また、2017年までに処分概念の構築(ロードマップ)
- (3)分析設備の整備の遅れを考慮しても現状の分析計画では対応が難しいか？
- (4)分析体制の増強を考慮

廃棄物に対する今後の対応(2)

-廃棄物処理-

処理上の留意点

- 二次的な廃棄物を極力発生させないようにすること。
 - 処理の検討にあたっては、放射能濃度に対応した処分概念(トレンチ、ピット、余裕深度、地層の各処分)を考慮することが不可欠であるため、放射能濃度をより推定しやすい処理方法。
 - 廃棄物の性状把握と同様、処分区分を見越したうえでの処理方法の選択。
- 減容については、減容後の含有放射エネルギーが保存されるので、処理後の区分に留意。また、溶融する場合、Csなど飛散する放射性物質もあり、含有放射エネルギーが溶融体に保存されないことに留意。
- 伐採木について焼却処理を採用した場合、灰中に放射性セシウムが高濃度に濃縮され、また焼却を行わず生木を裁断等した後に微生物分解させるコンポスト処理を採用した場合には、付随して発生する大量の有機物の処理・処分方策の検討が必要。

廃棄物に対する今後の対応(3)

-廃棄物処分-

(1)伐採木・瓦礫類

- 瓦礫・伐採木等廃棄物に共通した特徴は、①物量がかなり多く、②今後変動すること、③含まれる放射性核種が多岐に渡る可能性があること、④廃棄物の放射性核種の濃度分布が相当広範囲にわたること、⑤不純物が含まれることなどが挙げられる。処分の可能性とその物量評価を行うための性状、インベントリの把握が急務
- 瓦礫については、高濃度の汚染物量が多いことから適切な処分概念、伐採木や汚染土壌については、減容処理しない場合に備えて大容量の処分場概念や有機物の影響(錯体(イソサッカリン酸錯体など)形成による放射性核種の移行促進、微生物の活性化、ガス発生等)に配慮した概念の検討。
- 廃棄物の性状把握、物量評価等を2014年までに、また、2017年までに処分概念の構築(ロードマップ)

(2)汚染水処理に伴う二次廃棄物

- 処分概念の検討にあたり、廃棄物に共通して、バリア構成の検討、有機物等が核種移行プロセスに及ぼす影響や、塩分が緩衝材性能、核種移行プロセスに及ぼす影響の評価。
- 現行の吸着塔については多様なものが存在し、核種濃度や油分などの不純物等に差異があり、それぞれ性状が異なることに加え、第二セシウム吸着装置では吸着剤を充填したベッセルに鉛遮へい体が一体となっているため、吸着剤と一括または分離して処分するかの取扱いなどが課題。
- スラッジについては、塩分やその他不純物(油分、フェロシアン化物、有機物、ホウ素)が混入しているため、廃棄体の製作と関連して容器材料の選定が課題。
- 多核種除去設備(ALPS)は、汚染水浄化に欠かせない装置であるが、処理後の二次廃棄物については、処分容器材料の選定に加え、有機系樹脂吸着剤分解物が核種移行プロセスに及ぼす影響評価が課題。
- 性状や核種濃度等の分析を代表制も考慮して実施する事が優先

廃止措置(1)

-通常の原子炉施設に対する考え方-

原子炉施設の廃止措置

- 燃料を搬出すれば、施設は静的な状態となる
- 狭い国土の有効活用
- 放射性廃棄物となるのは解体撤去物の僅か数%
- 発電コストとして合理的に負担可能な費用で解体撤去しうる



施設を解体撤去して、敷地の再利用を図る

廃止措置(2)

-通常の原子炉施設に対する考え方(2)- (廃止措置方式の分類)

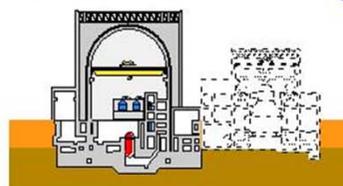
■ 即時解体:ステージ3 (Immediate dismantling)



永久停止後、可能な限り早期に放射性物質を含む施設の機器、構造物、設備、部品を撤去するか、施設の制限なしの使用のために解放できるレベルまでの除染。米国NRCの分類では、**DECON**。

長期貯蔵もしくは処分のための施設の全ての放射性物質の速やかな撤去と処理。

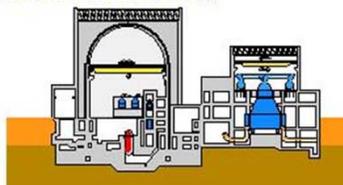
■ 遅延解体:ステージ2 (Deferred dismantling)



施設の最終的解体撤去を遅らせて、安全な状態に維持し、施設を長期間貯蔵。米国NRCの分類では、**SAFSTOR**。

初期の除染又は解体撤去がいくぶん伴うこともあるが、施設の主要部分は、一定期間、暫定モード。この期間の後に、廃止措置プロセスが完了され、施設の規制管理から解放。

■ 密閉管理:ステージ1 (Entombment)



放射能が減衰して、規制上の管理からの施設の解放が可能なレベルになるまでの間、汚染物質を構造的に耐久力のある物質の中に入れておく。米国NRCの分類では、**EBTOMB**。

施設が最終的な浅地中廃棄物処分サイトとして指定。

出典: Decommissioning Strategies for Facilities Using Radioactive Material, IAEA Safety Reports Series No.50 (2007)

廃止措置(3)

-通常の原子炉施設に対する考え方(3)-

廃止措置に伴う放射性廃棄物の処理処分

- 対象物の性状及び汚染状況の把握が可能
- 放射性廃棄物量(運転中含む)は約50基の発電所で100万m³程度
- 放射性物質は一定期間管理すれば、減衰する
- 地上管理より地中埋設の方がよりリスクは少なく、より合理的



放射性廃棄物は汚染レベルに応じて
埋設処分して、一定期間管理

廃止措置(4)

-福島第一発電所の状況 - 廃止措置にあたり

(1)廃棄物に関して判っていること

- 水処理廃棄物、廃資機材、樹木、瓦礫、土壌など多種類、かつ物量が多くサイト全域に分布
- 大きく分けて、廃液系廃棄物と気体系廃棄物がある
- 対象物の性状や汚染状況の詳しい把握は困難
- 汚染核種及び総インベントリーはある程度推定評価可能
- 冷却維持のため、廃棄物は増え続けるが、保管容量は厳しい状況
- 対象物の重量の把握は困難

(2)施設に関して判っていること

- 2号機以外の原子炉建屋上階部は爆発により損壊
- 地下部は汚染水が溜まっている
- 建屋内のPCV周りは高線量のため、近接が困難
- コンクリート構造物は亀裂等による浸透汚染の可能性がある
- 建屋周りの土壌など、環境汚染がある
- 冷却維持及び燃料取り出しなど、今後も追加施設が必要

(3)その他

- 冷却継続、燃料取出し、デブリ調査など優先課題が山積
- 廃止措置及び廃棄物処理処分への資金、人材、インフラ(分析/研究施設)などの投入資源には限りがある
- 発生した廃棄物は、当面サイト内に貯蔵するが、エンドステートをどうするかについて検討を要する

廃止措置(5)

-廃止措置実施上の主な相違点-

通常の原子炉と事故炉(福島第一)

	通常プラントの廃止措置	事故プラントの廃止措置
燃料	運転中と同様に取出し、搬出して処理が可能	燃料デブリの形で回収して、当面保管(扱いについて検討要)
施設	建屋を遮へいとして活用することができる	建屋、設備の破損がある
状況把握	汚染状況を事前に調査して廃止措置計画を立案可能	汚染状況の事前把握は困難。進捗に応じて確認していく。
環境	環境汚染はない	土壌、草木、海浜砂等の環境汚染あり
放射性核種	主な核種は原子炉周りの構造材のCo-60	左記に加え、気中では揮発性核種(Cs-134/137、Sr-90)、汚染水中に重金属FP核種及び燃料構成核種がある可能性あり
浸透汚染	構築物への浸透は殆どない	破損施設や地下部への浸透を考慮する必要あり
物量	放射性廃棄物となる物量はユニット当たり1~2万トン	放射性廃棄物となる物量はユニット当たり数十~数百万トン(想定)
処分制度	現行法令で処分制度は整備済み	処分制度はない
汚染水	既存施設で処理	FP核種や塩分を含む多量の汚染水がある

廃止措置(6)

-廃止措置実施上の留意点-

(1)手順

- プラント機器・システムを撤去する前に放射線量低減化のために建屋の除染の実施。その際に二次廃棄物発生、除染方法の選定、処分区分の観点に留意する。
- 廃止措置のエンドステートをどうするかについては、複数のシナリオを考慮。シナリオ選定にあたり、科学的・社会的観点を考慮する。

(2)汚染形態

- 揮発性核種による表面汚染、揮発性核種による浸透汚染、汚染水による表面汚染、汚染水による浸透汚染
- 除染の際は、除染に伴う作業員等の被ばく線量が、除染による低減線量を上回らないこと

(3)除染方法(適用技術)

- 汚染状況と汚染レベルを把握した上で、具体的な技術を選定。また、二次廃棄物の発生量と処理・保管方法に負担とならない方法を考える。
- 狭隘な場所、複雑な対象物など、遮へい等を施すことも考慮する。また、化学薬品等を用いた複雑な除染方法は極力避け、揮発性核種の再浮遊が生じ難い、簡便な方法を極力適用する。
- 高圧ジェット洗浄等の水を使う場合は、汚染を拡大する可能性があることに留意する。
- 汚染に応じて、複数の方法の組合せや除染に伴う被ばく線量とその後の作業線量とのバランスを考慮し最適化

廃止措置(7)

-通常プラントとの相違点を考慮した廃止措置実施上のポイント

- ✓ 建屋・設備が破損している。
- ✓ 汚染状況の把握が困難。進捗に応じて確認。
- ✓ 土壌・草木・海浜砂等の広大な環境汚染
- ✓ 放射化核種に加え、揮発性、FP、燃料構成核種を考慮
- ✓ 浸透汚染(破損施設や地下部)
- ✓ 放射性廃棄物量は数十～数百トン/ユニット(想定)
- ✓ 事故炉の廃棄物処分制度がない
- ✓ 大量の廃棄物に対処する設備の投入
- ✓ 廃棄物中に塩分・ホウ酸・油分・有機物等が混入



- ✓ 作業の進捗に伴い、計画を適宜見直す。
- ✓ 汚染源と汚染を受けた対象との関係を把握し、汚染の種類、浸透汚染の有無や有害物の含有の確認
- ✓ 揮発性核種汚染したものの解体は、機械的切断が望ましい
- ✓ 作業被ばくの低減のための除染は費用対効果を考慮、廃棄物量低減の除染は合理的に行えるか
- ✓ 廃止措置時のリスクは段階的に低減していくことが原則であり、施設の安定化と廃止措置を迅速・安全に進めるための規制はどうあるべきか、進捗状況を考慮し、適切に見直していく必要性
- ✓ 作業環境が厳しく、より広範に亘り、遠隔工法の導入
- ✓ 膨大な廃棄物の保管施設の設置にあたり、廃棄物をいたずらに移動されることなく、最適化を図る

廃止措置(8)

-事故炉の廃止措置に関する法整備-

事故施設の廃止措置に関わる法制度として、原子炉等規制法の改正

- 事故施設が特定原子力施設に指定された場合、規制委員会が定める措置について実施計画を定め、これを遵守する義務が課される(炉規制法64条の3)。
- 特定原子力施設に指定されると、廃止措置規制も含めた一般の規制法の規定が免除され(炉規制法64条の4)、実施計画に基づく措置を中心に実施。
- 東電は福島第一に対しては、平成24年11月に実施計画を提出。平成25年6月に補正追加



事故炉の安定化と廃止措置を迅速かつ安全に進めるための規制はどうあるべきかという観点から、進捗状況を考慮し、適切に見直していく事も重要

まとめ(1)

(1) 放射性廃棄物の処理処分

- あらゆる廃棄物について、処理処分に向けた放射性核種の定量分析が必須
- 伐採木等については有機物の影響(放射性核種の移行促進、微生物の活性化、ガス発生)を考慮した安全評価
- 瓦礫類は有害物や有機物が混入。また、通常の廃止措置に比べて高濃度の汚染物量が多くなる。
- 汚染水処理二次廃棄物は実廃棄物からのサンプリングが困難。今後投入する処理設備は代表部位のサンプリングを可能な構造とすべき。
- 廃棄体製作にあたり、廃棄物中の塩分濃度やホウ酸量を分析して対応を考慮すべき。
- その他、不純物(油分、フェロシアン化物など)を考慮した容器選定、バリア構成、各種移行挙動特性など、システム全体を考慮した対応をすべき。

(2) 廃棄物の性状分析の重要性

- 処分システムの性能評価の実施上、核種やその濃度と科学的な性状情報が必須。⇒核種分析と濃度の特定

(3) 廃棄物の対応

- 計画を全うするためにも、優先度を考慮しつつ、広範な廃棄物分析の実施。そのための分析設備を早急に整備
- 廃棄物は20～25年間の長期貯蔵⇒インベントリ評価や分別の実施とガス発生対策等の実施。適切な材料選定

まとめ(2)

バックエンド全体にかかる提言

- バックエンド対策のプロセス全体のマネジメントと最適化及び進捗に応じた柔軟な対応
- 様々なオプションを考慮して、エンドステートの在り方の議論とステークホルダー間の情報の共有
- 安定化と廃止措置を迅速に進めていくための規制制度は、リスクの低減の観点から、進捗に応じた見直しも重要
- 廃棄物の処分にあたり、放射性毒性、化学形態、物理化学的特性などを考慮した安全評価や新たな形態の検討を実施
- 廃止措置を加速させるためにも、廃棄物分析とその体制の一層の強化が必須。

ご清聴をありがとうございました。