

第13回 1F廃炉の先研究会

1F廃炉における『デブリ取り出し』と 安全性評価を考える

2021年5月13日

原子力損害賠償・廃炉等支援機構
加藤 和之

本日の内容

- 一般炉に関する日本の廃炉・廃棄物の制度・戦略と1F廃棄物の課題
- 諸外国の事故炉の廃炉戦略
- 燃料デブリの特徴と安全に係る課題・論点

一般炉に関する日本の廃炉・廃棄物の 制度・戦略と1F廃棄物の課題

日本の廃炉・廃棄物（一般炉、研究炉）に係る政策・制度・戦略

◆ 日本の廃止措置政策

原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画

○昭和57年6月30日、原子力委員会

原子炉の廃止措置については、安全の確保を前提に地域社会との協調を図りつつ進めるべきであり、さらに敷地を原子力発電所用地として引き続き有効に利用することが重要である。原子炉の廃止措置の進め方については、引き続き使用できる施設等の再利用を十分考慮した上で、原子炉の運転終了後できるだけ早い時期に解体撤去することを原則とし、個別には必要に応じ適当な密閉管理又は遮蔽隔離の期間を経るなど諸状況を総合的に判断して決めるものとする。

なお、商業用以外の試験研究用原子炉等については必要な範囲において上記廃止措置の考え方及び方法を準用することとする。

○平成6年6月24日、原子力委員会

原子力施設の廃止措置は、原子力施設設置者の責任の下、安全確保を大前提として、地域社会との協調を図りつつ進めることが重要であり、このために必要な技術開発を進めていきます。商業用発電炉の廃止措置については、原子炉の運転終了後できるだけ早い時期に解体撤去することを原則とし、解体撤去後の敷地利用については、地域社会との協調を図りつつ、原子力発電所用地として、引き続き有効に利用することとします。

原子炉の廃止措置に関する考え方

- 原子力施設設置者の責任
- 運転終了後できるだけ早い時期の解体撤去を原則
- 跡地は原子力発電所用地として有効利用

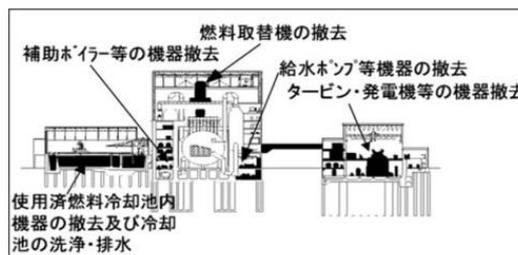
日本の廃炉・廃棄物（一般炉、研究炉）に係る政策・制度・戦略

◆ 日本の廃止措置政策

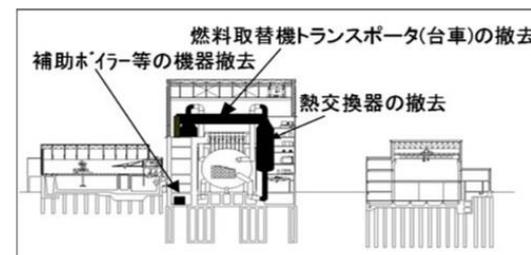
廃止措置計画の記載例

(島根1号、東海発電所の例)

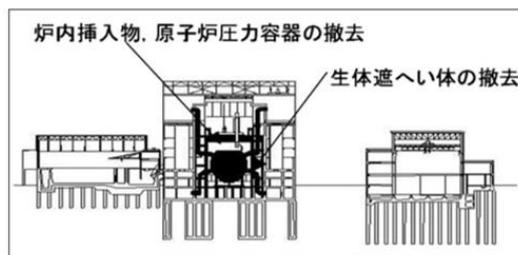
- 地下建物、地下構造物及び建物基礎は対象外



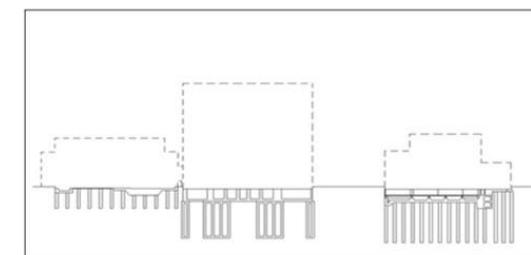
1. 原子炉領域以外の撤去



2. 原子炉領域以外(主に熱交換器)の撤去



3. 原子炉領域の撤去

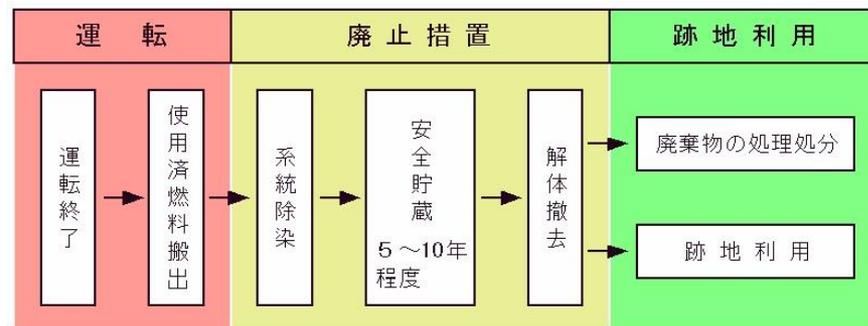


4. 原子炉領域以外の撤去

東海原子力発電所の解体手順（全体概要）

商業用発電炉の廃止措置についての基本方針

- 標準工程は、使用済燃料の搬出後、系統除染を行い、5から10年程度の安全貯蔵した後に、解体撤去する



商業用原子力発電施設の廃止措置の標準工程

日本の廃炉・廃棄物（一般炉、研究炉）に係る政策・制度・戦略

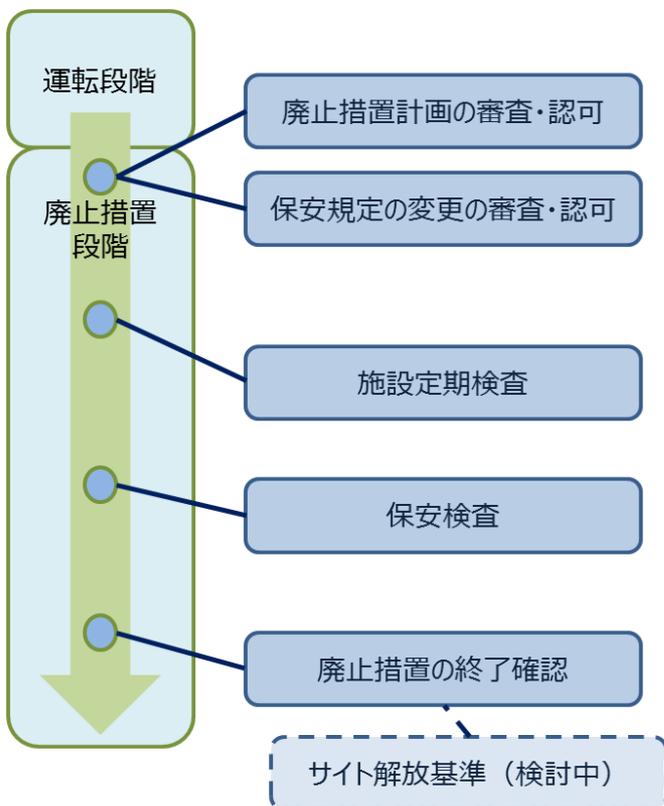
◆ 廃止措置の制度

原子炉等規制法抜粋

（発電用原子炉の廃止に伴う措置）

第四十三条の三の三十三 発電用原子炉設置者は、発電用原子炉を廃止しようとするときは、当該発電用原子炉施設の解体、その保有する核燃料物質の譲渡し、核燃料物質による汚染の除去、核燃料物質によって汚染された物の廃棄その他の原子力規制委員会規則で定める措置（以下この条及び次条において「廃止措置」という。）を講じなければならない。

2 発電用原子炉設置者は、廃止措置を講じようとするときは、あらかじめ、原子力規制委員会規則で定めるところにより、当該廃止措置に関する計画（次条において「**廃止措置計画**」という。）を定め、原子力規制委員会の認可を受けなければならない



廃止措置計画の審査（審査内規より）

- 廃止措置対象施設及びその解体の方法（実用炉規則第116条5号）
- 核燃料物質の管理及び譲渡し（実用炉規則第116条6号）
- 核燃料物質による汚染の除去（実用炉規則第116条6号）
- 核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の廃棄（実用炉規則第116条8号）
- 廃止措置の工程（実用炉規則第116条9号）

廃止措置計画の認可基準（実用炉規則第119条にて規定）

- 炉心から使用済燃料が取り出されていること（実用炉規則第119条1号）
- 核燃料物質の管理及び譲渡しが適切なるものであること（実用炉規則第119条2号）
- 核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の管理、処理及び廃棄が適切なるものであること（実用炉規則第119条3号）
- 核燃料物質若しくは核燃料物質で汚染された物又は原子炉による災害の防止上適切なるものであること（実用炉規則第119条4号）

廃止措置の終了確認（実用炉規則第121条より）

- 核燃料物質の譲渡しが完了していること
- 廃止措置対象施設の敷地に係る土壌及び当該敷地に残存する施設について放射線による障害の防止の措置を必要としない状況にあること
- 核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の廃棄が終了していること
- 第67条第1項に規定する放射線管理記録の同条第5項の原子力規制委員会が指定する機関への引き渡し完了していること

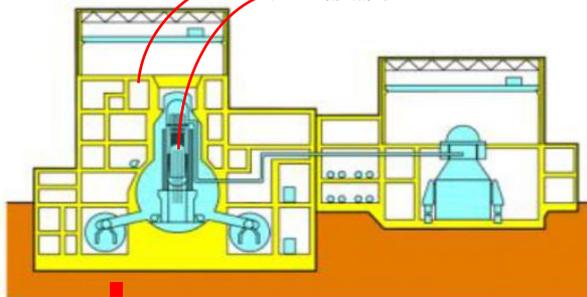
サイト解放基準(検討中)

ALARAの考え方に従い修復措置を講じた上で、代表的個人の受ける被ばく線量が線量拘束値である0.3mSv/y以下となることを要求する（原子力規制庁原子力施設のサイト解放基準について(案)）

日本の廃炉・廃棄物（一般炉、研究炉）に係る政策・制度・戦略

◆健全炉の廃止措置

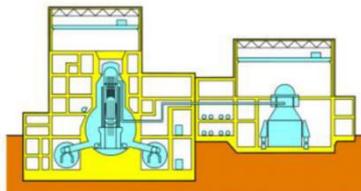
核燃料物質の撤去
と譲渡



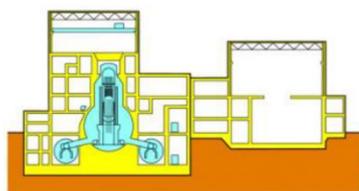
通常炉の場合、営業運転の終了後、核燃料物質（使用済燃料等）を炉心から撤去（その後譲渡等）した後に、廃止措置を実施

核燃料物質撤去後は、放射化生成核種（Co-60：半減期5年）の扱いが主なテーマとなる。

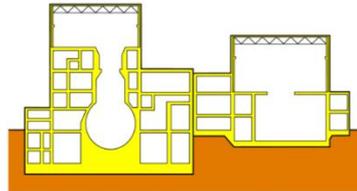
核燃料物質の撤去



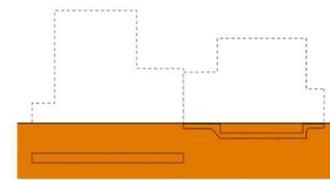
汚染状況調査、除染等



周辺設備の解体



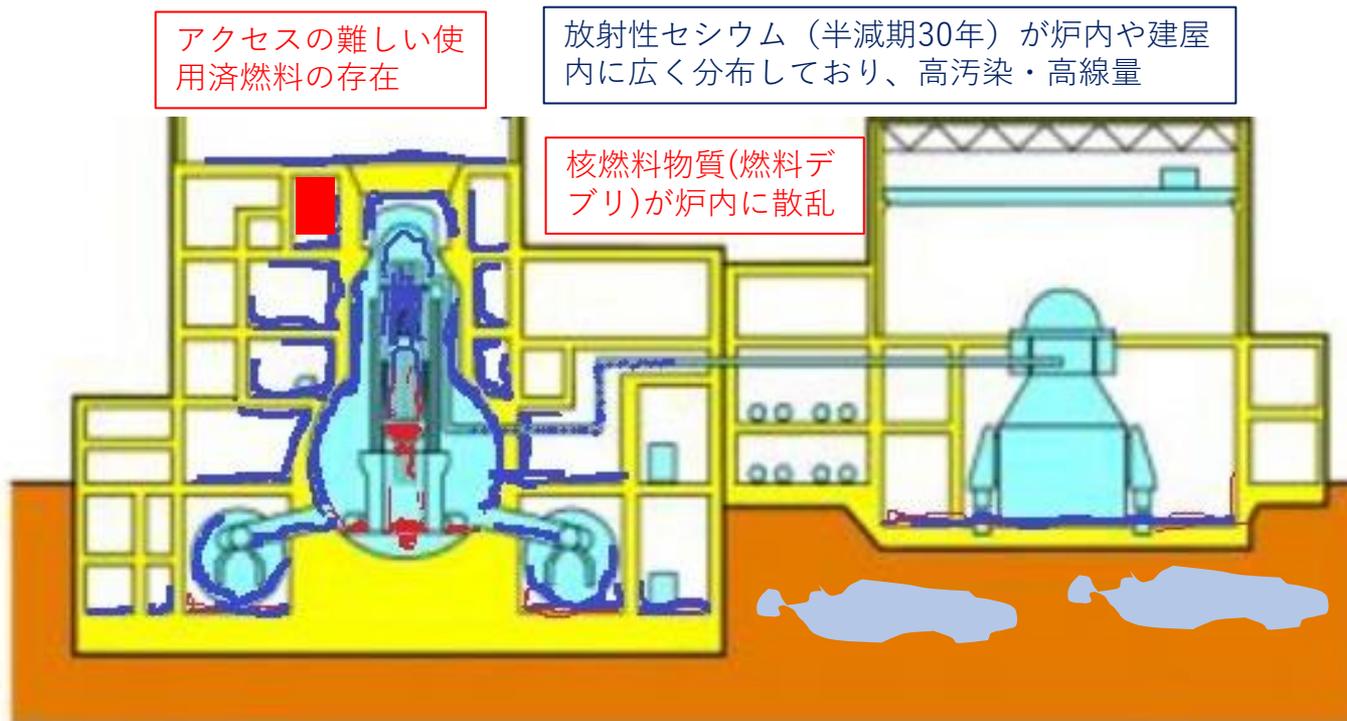
原子炉領域の解体



建屋等の解体

日本の廃炉・廃棄物（一般炉、研究炉）に係る政策・制度・戦略

◆福島第一発電所の廃止措置



原子炉等規制法上の追加措置

（危険時の措置）の要点

第六十四条（危険時の措置）

- ① 地震、火災その他災害が起こった原子力施設に対して応急の措置。
- ② さらなる災害を防止するため、または特定核燃料物質を防護するため「保安又は特定核燃料物質の防護につき特別の措置を要する施設（特定原子力施設）」として指定。
- ③ 原子力事業者に対して、保安又は特定核燃料物質の防護のための措置を実施する計画の提出を求め、その計画に沿った措置を命ずる。

日本の廃炉・廃棄物（一般炉、研究炉）に係る政策・制度・戦略

◆ 事業廃止の条件

事業廃止となる場合

1. 廃止措置の終了確認
2. 許可取り消し（ただし、この場合でも廃止措置計画認可、廃止措置実施、終了確認を得ることが要求され、終了確認までは当該事業者と見なされる）



廃止措置の終了確認ができないと事業廃止不可

日本の廃炉・廃棄物（一般炉、研究炉）に係る政策・制度・戦略

◆ 日本の廃棄物政策

原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画

○平成6年6月24日、原子力委員会

原子力施設の廃止措置により発生する放射性廃棄物の処理処分については、原子力施設設置者に、直接の廃棄物発生者として実施計画を整備し処分費用を負担するなど、処理処分を適切かつ確実にを行う責任があります。

原子力政策大綱（平成17年10月11日、原子力委員会）

原子力施設の廃止措置から生じる放射性物質として扱う必要のない資材を再利用することは、資源を有効活用する循環型社会の考え方にも整合するので、合理的である。

国、事業者等は、放射能濃度がクリアランスレベル以下のもの（放射性物質として扱う必要のないもの）の処理・処分又は再利用に当たっては、改正された原子炉等規制法に基づいて、各々が適切に対応することが重要である。

日本の廃炉・廃棄物（一般炉、研究炉）に係る政策・制度・戦略

◆ 日本の廃棄物政策

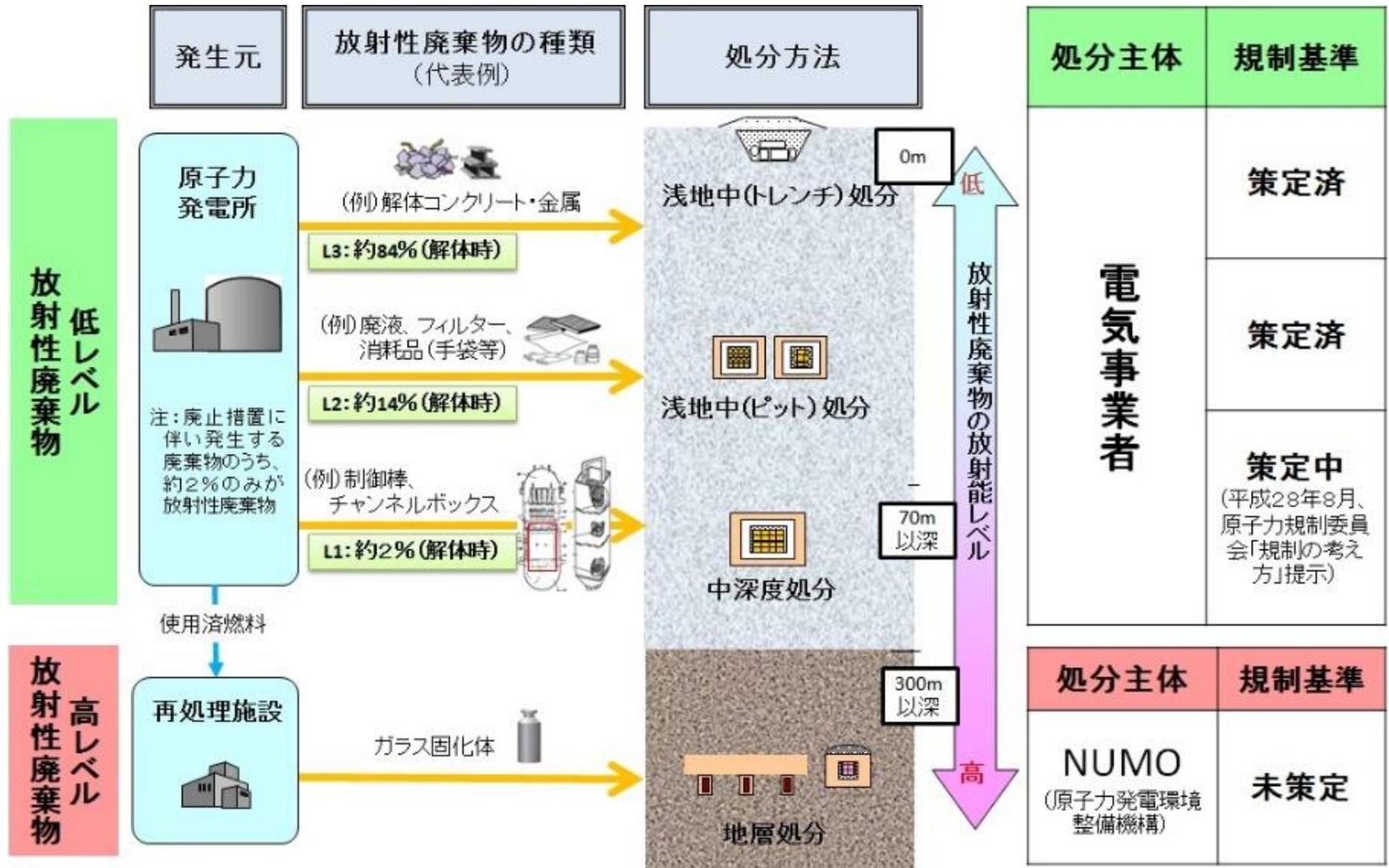
廃棄物の種類		廃棄物の例	発生場所	処分の方法(例)	
低レベル放射性廃棄物	発電所廃棄物	放射能レベルの極めて低い廃棄物	原子力発電所	トレンチ処分	
		放射能レベルの比較的低い廃棄物		廃液、フィルター、廃器材、消耗品等を固形化	ピット処分
		放射能レベルの比較的高い廃棄物		制御棒、炉内構造物	中深度処分
	ウラン廃棄物		消耗品、スラッジ、廃器材	ウラン濃縮・燃料加工施設	中深度処分、ピット処分、トレンチ処分、場合によっては地層処分
	超ウラン核種を含む放射性廃棄物 (TRU廃棄物)		燃料棒の部品、廃液、フィルター	再処理施設、MOX燃料加工施設	地層処分、中深度処分、ピット処分
高レベル放射性廃棄物		ガラス固化体	再処理施設	地層処分	

クリアランスレベル以下の廃棄物	原子力発電所解体廃棄物の大部分	上に示した全ての発生場所	再利用/一般の物品としての処分
-----------------	-----------------	--------------	-----------------

事業者ニーズに応じてパッチワーク的に制度整備：スペクトルの狭い廃棄物毎に離散的な制度
 → 1 F廃棄物の特徴はスペクトルが広く、連続的
 → 既存枠組みにどうあてはめるかだけでなく、新たな区分設定の必要性の議論も必要かもしれない

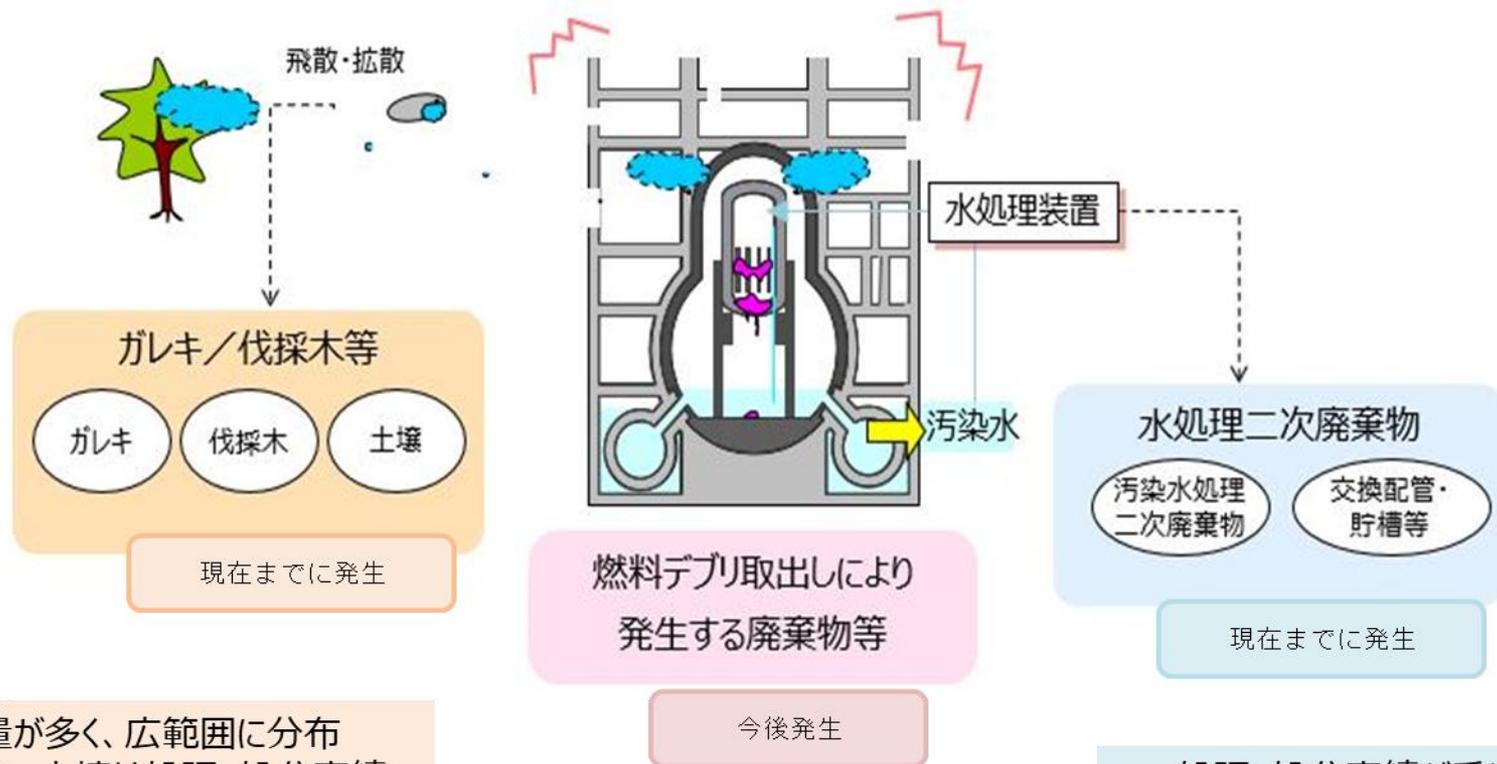
日本の廃炉・廃棄物（一般炉、研究炉）に係る政策・制度・戦略

◆ 日本の廃棄物政策



安全かつ1F廃棄物の特徴を踏まえた処分方法の検討が必要ではないか

1 F廃棄物の汚染源と特徴の概要



- 物量が多く、広範囲に分布
- 樹木、土壌は処理・処分実績が乏しい
- 飛散・拡散による表面汚染が主
- 一部滞留水を通じた浸透汚染
- Csによるスケーリングに期待

- 物量が多く高線量物も多い (高 $\beta\gamma$ 、高 α)
- 原廃棄物の採取が困難

- 処理・処分実績が乏しい
- 原廃棄物の採取が困難
- 装置の特徴に応じて発生量や核種量の一部推定が可能

- 津波による海水、ホウ酸水中のホウ素、飛散防止剤等の化学物質等の混入

1 F廃棄物対策の難しさ

複雑性 (Complexity)

- 炉心溶融時の燃料挙動や周囲の材料との相互作用のように事故時に種々の事象が複雑に絡み合っている
- 処理処分の様々な工程間で複雑な取り合いがあり上流側で行った作業やそこで用いた材料等が下流側で思わぬ形で影響を及ぼす可能性がある

不確実性 (Uncertainty)

- サイト内にある線量の高い場所（炉心付近等）の状況を正確に把握することが難しい
- 種々の廃棄物のインベントリ、組成、量などについての推定に誤差が含まれる
- 新たに導入する技術に関する知見が限られており、また、その結果生ずる二次廃棄物の量や特性等に関して不確かさがある

曖昧さ (多義性) (Ambiguity)

- 各ステークホルダの価値観などによってリスク認知や優先すべき課題などが異なる
- 廃棄物の長期貯蔵と処分の比較あるいは処分後の制度的管理の継続性等について様々な考え方がある

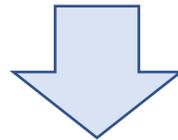
変動性 (Volatility)

- 廃炉事業の進展によってサイトの状況や対応すべき廃棄物の種類や量が変化する
- 廃炉事業を取り巻く社会環境や様々なステークホルダの意見が変化する可能性があり予測することが難しい
- 事故廃棄物処分に関する安全基準や関連する種々の制度が今後明らかになっていくと考えられるが現時点でそれらを予想することは難しい

1 F廃棄物対策の課題・論点

従来と異なる核種組成のものが多種・大量に発生

- 性状を把握するために時間を要する
 - 効率的な分析・評価方法の開発
- 廃棄物の分類に時間を要する（従来の区分にどうあてはめるか？それとも新たな分類を作った方が合理的か？）
 - 処分までを念頭においた最適化方法の検討（手戻りは無くしたい）
- 既存の技術がどの廃棄物に対してどの程度使えるかの見極め
 - 各種処理技術の適用範囲の検討、改良



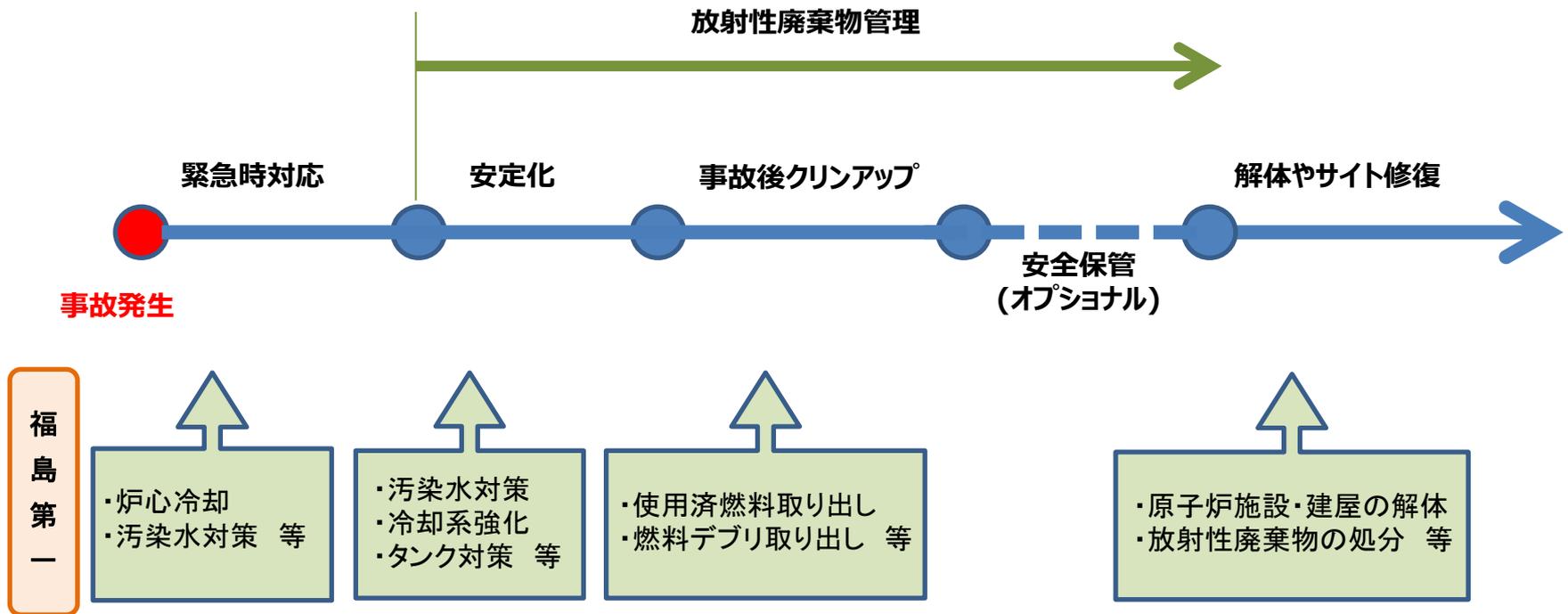
- ◆ 手も足も出ないわけではないが時間がかかっているのが現状
- ◆ 廃棄物量が多いことへの対策と量を減らす試みを並行して進めることが重要

諸外国の事故炉の廃炉戦略

国際機関における廃炉政策・戦略策定（事故炉）

出典:IAEA 原子力エネルギーシリーズ NW-T-2.7
「世界的クリーンアップの経験から得た教訓及び事故後の原子力施設の廃止措置」

国際原子力機関による事故施設の廃止措置の概念



諸外国の事故炉の廃炉戦略

◆ TMI-2

燃料取り出し後、安全貯蔵中。1号機と合わせて廃止措置計画策定中。
現状燃料デブリを99%回収済み

◆ チェルノブイリ4号機

事故以降、シェルター実施計画の下、閉じ込め措置用シェルター・オブジェクト(SO)を建設。その後、欧州復興開発銀行の支援により、新安全閉じ込め構造物(NSC)を建設し、2016年にSO上へスライド移動、2018年上期の運用開始。今後、崩落しやすい部分を取り除く安定化措置を行い、NSCの寿命である約100年以内に燃料デブリを取り出す計画



移設後のチェルノブイリ4号機NSC

諸外国の事故炉の廃炉戦略

◆ ウィンズケールパイル 1

破損燃料を残したまま、長期の監視 & 維持状態、2017年4月以降燃料撤去等を実施し、2030年以降維持管理状態に以降、2040年廃止措置完了予定。



諸外国と日本の廃炉・廃棄物に係る政策・制度比較

廃炉政策項目		英国	米国	日本
1. 責任の割り当て	政策	・原子力政策: BEIS ・放射性廃棄物: DEFRA	・CERCLA(スーパーファンド)	・原子力政策: METI
	規制	・原子力安全: ONR ・環境保護: EA/SEPA/NRW	・DOE 自己規制/DNFSB ・環境規制: EPA/州環境規制機関	・原子力規制委員会
	廃炉実施者	・NDA/SLC	・DOE EM/コントラクター	・民間電力事業者
	廃棄物長期管理	・NDA/RWM(SF,ILW,HAW) ・NDA/LLWR/DSRL(LLW)	・DOE EM(サイト内 LLW 処分場、WIPP TRU 処分場)	・電気事業者(LLW) ・NUMO(HLW)
2. 資金の確保		・議会が NDA 年間支出限度額決定	・通常予算外の環境クリーンアップ費	・解体引当金
3. 廃止措置アプローチ		・NDA 戦略の中でサイト毎に決定	・三者協定(DOE EM,EPA,州)で廃止措置アプローチ/最終目標像を特定	・即時解体
4. 安全・セキュリティ目標		・原子力規制: サイト解放基準 10^{-6} ・放射性物質法: サイト解放基準	・1mSv/y(公衆): DOE 省令	・0.3mSv/y 以下
5. 放射性廃棄物管理		・LLW 廃棄物管理政策(2007) ・HAW 浅地中長期管理(スコットランド) ・HAW 地層処分(イングランド)	・原子力廃棄物政策法: HLW ・低レベル放射性廃棄物政策法: LLW	・原子力長計 ・発生者責任で処理・処分
6. 使用済燃料管理		・基本は再処理 ・THORP 閉鎖後は未定	・DOE3 サイトで管理 ・Yucca Mt. プロジェクト	・再処理
7. 廃棄物量の最小化		・廃棄物ヒエラルキーの考え方	・廃棄物の最小化要求(DOE M 435.1-1)	・クリアランス制度
8. 廃止措置の終点		・ステークホルダーとの協議に基づく最終目標像案の策定要求(NDA)	・DOE, EPA, 地元州の三者協定にて設定(DOE Order 458.1)	・発電所用地として有効活用 ・放射線障害防止措置を必要としない状況
9. 情報公開・公衆参加		・SSG の設立と活動支援	・Citizen Advisory Board ・エネルギーアライアンスコミュニティ	・廃止措置実施方針の公表

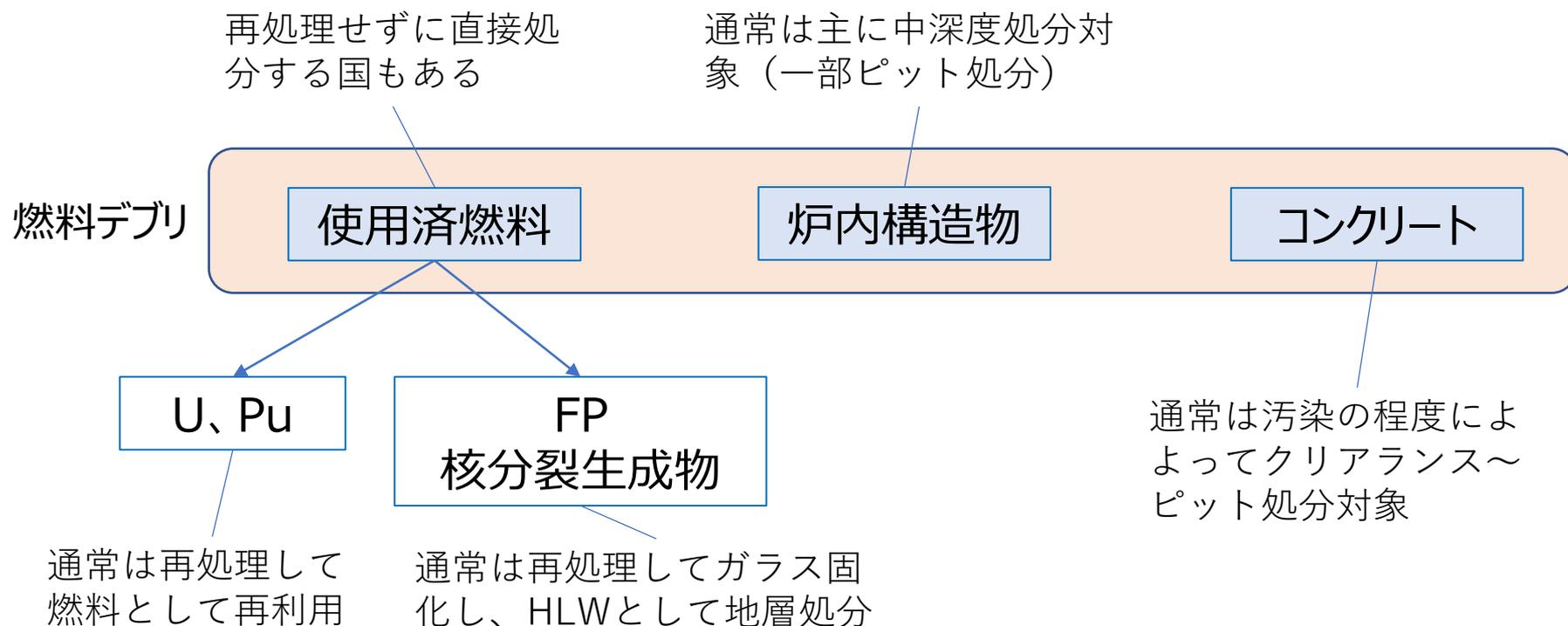
国の関与、廃棄物量最小化、ステークホルダーとの協調、廃止措置シナリオの柔軟性に差があるように見える

燃料デブリの特徴と安全に係る 課題・論点

燃料デブリとは？

原子炉冷却材の喪失により核燃料が炉内構造物の一部と溶融した後、再度固化した状態をいう。原子力発電所において電源喪失、ECCSの機能喪失などの事故が発生し核燃料の冷却機能を喪失した場合、核燃料は崩壊熱により融点を超えて溶融し、さらに炉心を構成する部材の一部も溶融させる。これらの溶融物は混在の状態では原子炉圧力容器の下部に落下（メルトダウン）、状況によっては圧力容器底部を貫通して原子炉格納容器内に落下（メルトスルー）する。これら溶融物は冷却により固化状態となる。燃料デブリは米国スリーマイル島原子力発電所事故、旧ソ連チェルノブイリ原子力発電所事故、福島第一原子力発電所事故において見られている。（ATOMICA）

燃料デブリの中身を分解してみると. . .



核燃料成分があり、放射線量が非常に高い

燃料デブリのリスクと当面の対応方針

➤ 臨界

- 形状管理で臨界防止
 - ✓ 炉内に留まっていた場合は地震影響等で形状変化の可能性
 - ✓ 酸化等によって金属塊が微粉末化して移動する可能性

➤ 飛散、拡散による被ばく

- 容器に封入して閉じ込める
- 原子炉建屋の管理

➤ 水素ガス発生（水の放射線分解で発生）

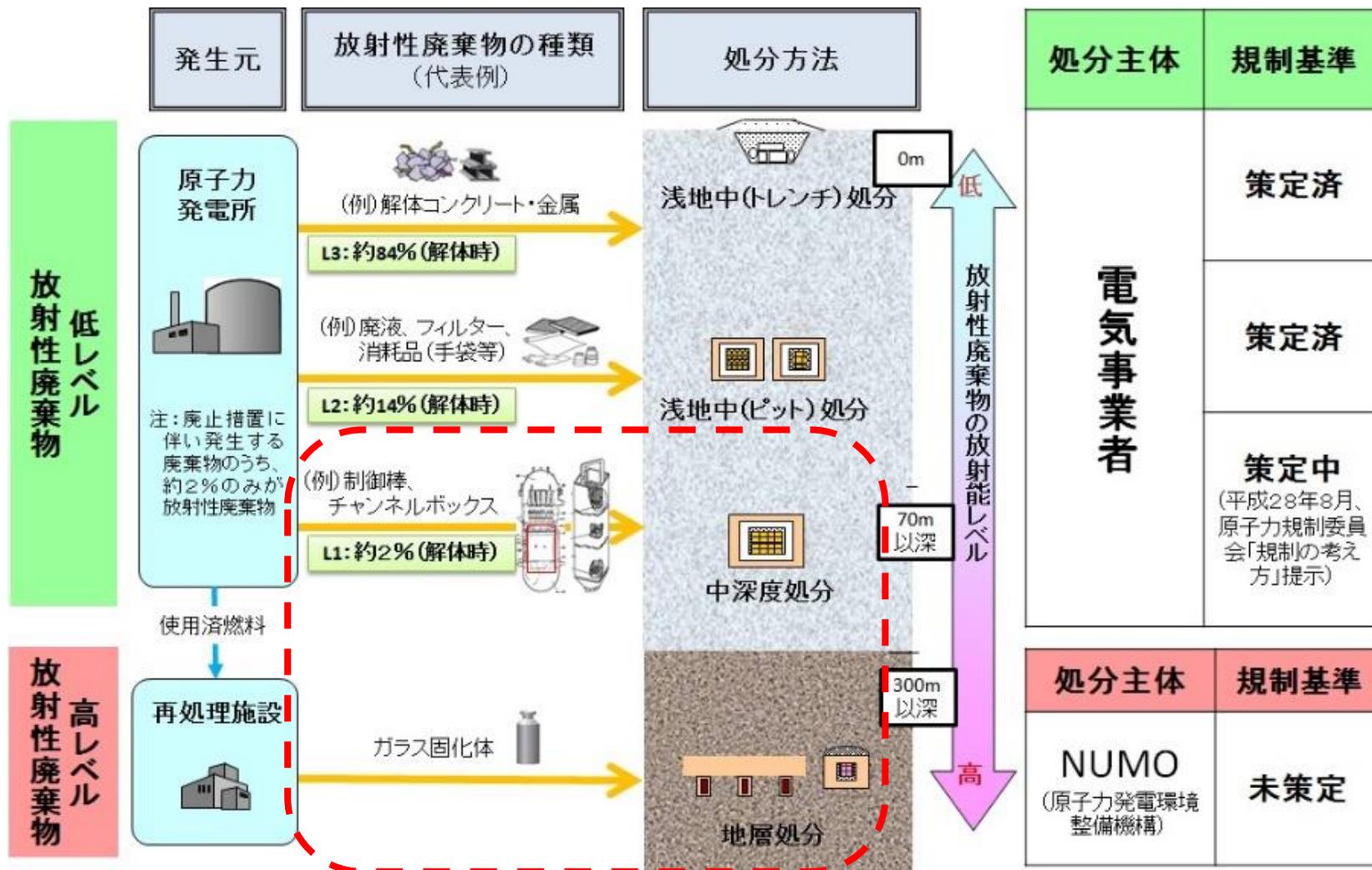
- 発生防止のため乾燥
- ベント付き容器に封入し、水素ガスが溜まらないようにする

取出し、容器に封入し適切に保管することで安全性は向上

日本の廃炉・廃棄物（一般炉、研究炉）に係る政策・制度・戦略

再掲

◆ 日本の廃棄物政策



燃料デブリは浅地中処分できるか

処分の基本概念からすると、中深度よりも深いところに埋設すべき成分がほとんどと予想

地表付近に処分するとなると長期にわたる安全対策が必ず必要になる

- リスクは同様に臨界、飛散・拡散、水素ガス発生
- 接近しなければ被ばくはしないため、長期間にわたり有効な工学的対策がとれるか否か
- 制度的対策によるサポートも必要かもしれない

深地層と同様な環境を工学的に作ることができるか？
また制度的対応の助けも借りてそれを長期間維持できるか？

地層処分の安全概念（深部地下環境の効果）

- 人の生活環境からの隔離
 - 土地利用や掘削により人が廃棄物に接近しない
 - もし放射性物質が地下水に漏出しても人の生活環境に到達するまで距離・時間を要する（半減期があるので放射エネルギーは小さくなる、拡散や希釈で濃度が下がる）
- 深部地下の安定環境の利用
 - 地下水は酸素の無い還元環境であり、燃料デブリからU、Puが漏出しにくい
 - 漏出しても地下水に溶けにくい（溶解度制限）
 - 地下水の流れは極めて遅い
 - 岩石が放射性核種を吸着し移行を遅くする
 - 金属の腐食速度も遅い

地層処分の安全評価のシナリオの概要

➤ 自然事象シナリオ

- 処分施設や地質環境が想定通りであれば安全が確保できることを確認
- 主に地下水を介した被ばく過程の評価

➤ 人為事象シナリオ

- 人間の活動によって廃棄物に接近して被ばくした場合の影響の確認
- そのような行為が起こりにくい場所、深度への処分または埋設する廃棄物濃度の制限を要求

➤ 外部事象シナリオ

- 立地選定において地震、火山活動等の可能性は排除するものの念のため評価し甚大な影響が無いことを確認
- 極端に発生確率の低い事象は考慮しない

安全対策の課題・論点

- 深部地下と同様の環境を工学的に作れるか？
 - ベントナイトやコンクリートでどの程度の性能のバリアを構成できるか
 - 汚染源となる燃料デブリの量は技術的に安全上どの程度まで許容されるか（どの程度回収すべきか）

- 人間が接近することをどう防ぐか？
 - 燃料デブリが存在することを知らせる。しかし、どの程度の期間有効か
 - 偶然に掘削が試みられた時に物理的抵抗性を持った（掘ることができない）構造物を作ることは可能か

- 人工物には寿命があり、記録の保存が鍵ではないか？

記録の保存・継承

- 記録を保管できてもアクセス性や有効性が問題
 - 公文書管理制度はあるがそれだけで十分か
 - 罰則制度を有する掘削禁止措置が必要では
- モニュメントが有効という説とかえって関心を持たれ掘削につながるという説もあり
 - エジプトのピラミッドと盗掘
- 伊勢神宮の式年遷宮は地層処分を進めている外国に大きな関心を持たれている。（錦帯橋の架け替えも同様？）
 - 当時の寿命でも20年毎であれば、2度は遷宮に携わることができ、初めて遷宮を経験する次世代の技術者へ技術を継承していくのに合理的であるという説

燃料デブリの長期間の安全対策を考える上では、事故の記憶を留めるための試みは、相俟って非常に有効な方法となる可能性があるのでは

最後に

皆様の関心事にうまく応えられたか自信はありませんが、この研究会の活動がさらに発展し福島の復興に大きく寄与されることを祈念いたします

ご清聴ありがとうございました