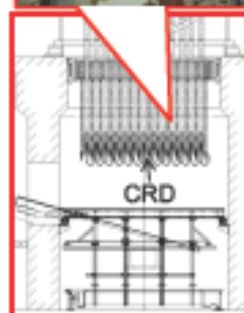


複雑な炉内構造物配置と狭隘なPCV内部空間

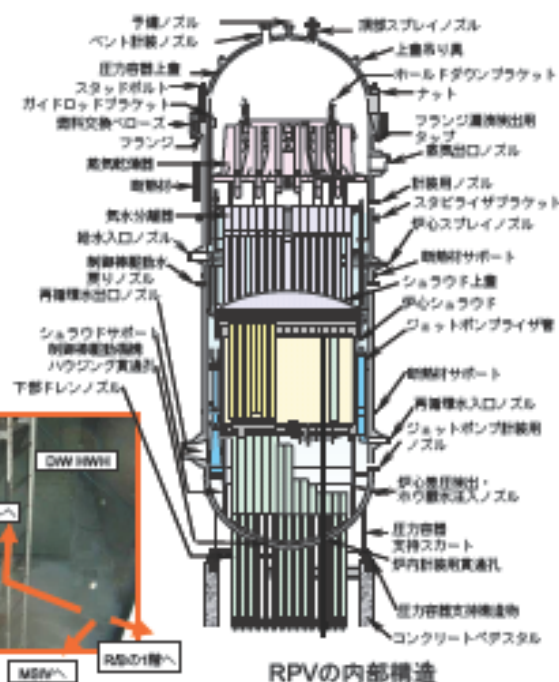
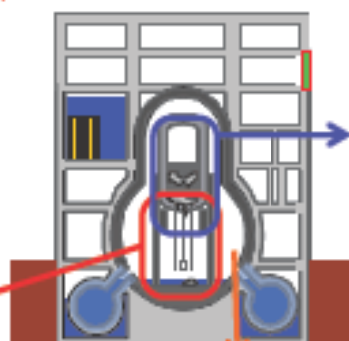
例: PCV内部構造は極めて複雑であり点検・補修機器の内部投入が困難

*写真は5号機のもの（参考）



PCVベデスタル

IRID

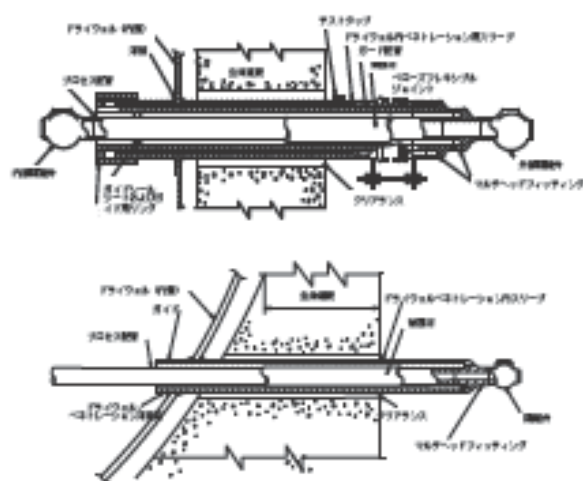


RPVの内部構造

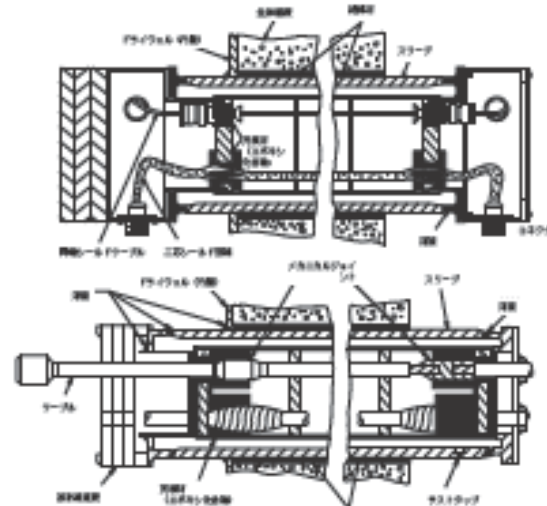
©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

複雑かつ多様なペネトレーションによる困難な止水

- ハッチ、ベント管、配管ペネトレーションおよび電気ペネトレーションを含めた全体で多数かつ多様なペネトレーション（1号機：約150箇所、2号機：約200箇所、3号機：約190箇所）
- 一部のペネトレーションの形状は複雑であるため、止水が難しい。
- PCVペネトレーションには弁があり、PCV内に装置を挿入することは難しい。



機械ペネトレーションの概略図



電気ペネトレーションの概略図

IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

沸騰水型原子炉(BWR) 格納容器(PCV)



「Browns Ferry Unit 1 under construction 1966.Sep.」
Tennessee Valley Authority – TVA's 75th Anniversary webpage

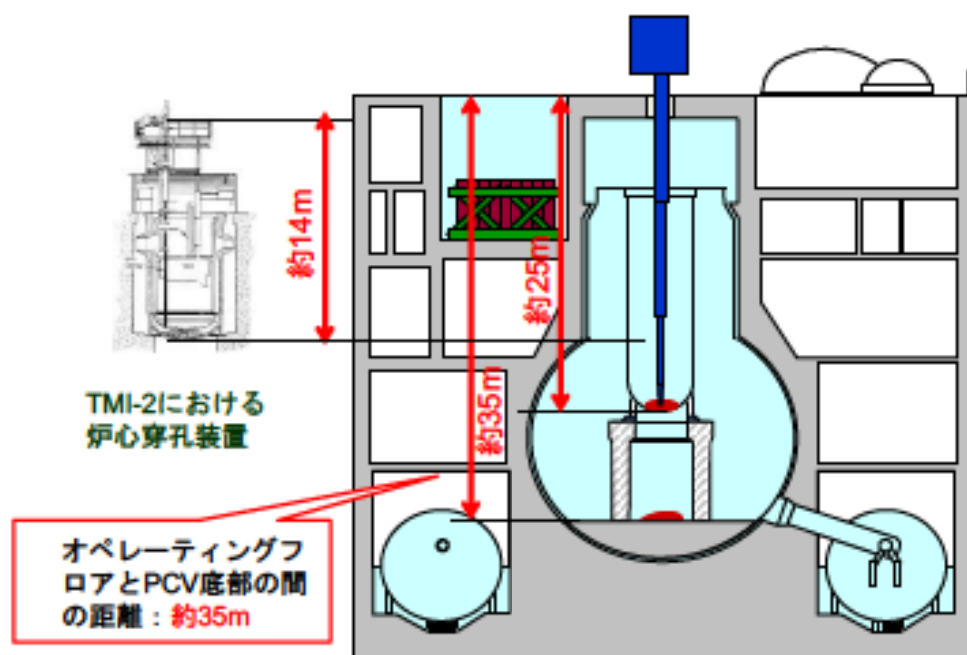
PCV開口部

ハッチ、ベント管、配管ベネ
および電気ベネ

1号機 約150か所
2号機 約200か所
3号機 約190か所

オペレーティングフロアとPCV底部の間の物理的距離

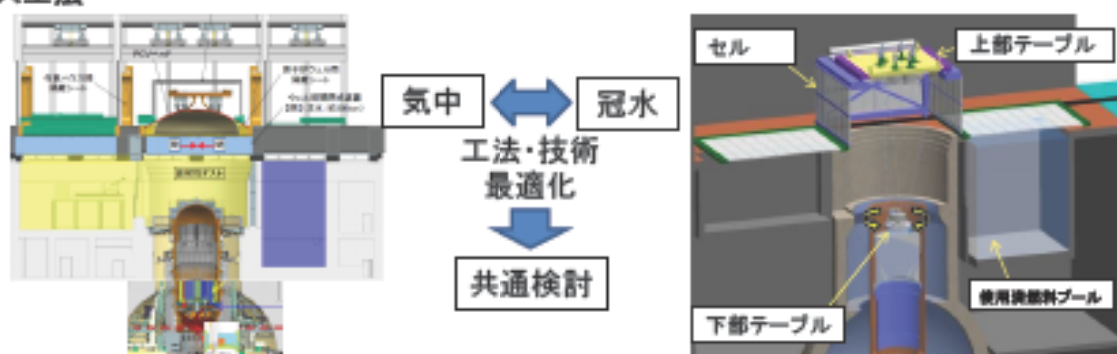
- PCV満水が成立した場合、燃料デブリ取り出し装置は35mの距離から制御される必要がある。
- このため福島の場合は燃料デブリ取り出しではTMIと比べて更に精度の高い装置の開発が必要である。



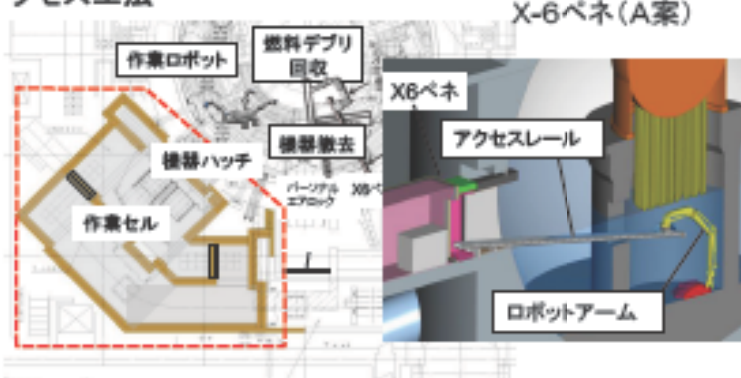
燃料デブリ取り出し工法～工法概念～

81

上アクセス工法



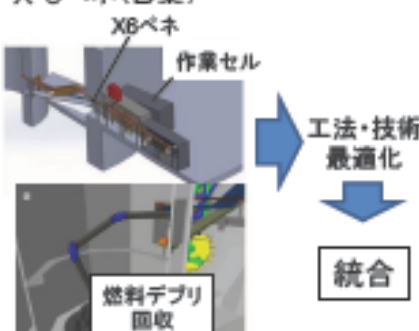
横アクセス工法



IRID

X-6ペネ(A案)

X-6ペネ(B案)



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

燃料デブリ取り出しのキーポイント

82

1. 安全性：放射線遮蔽、放射性物質の飛散防止

- これらの機能は、デブリ切削から移送まで一貫して全ての作業行程を通じて、どの取出工法でも必要
- 実現可能性、リスクと改善点を要素/模擬試験によって把握

2. 実用性：遠隔操作、自動操作、保守性

- 超高線量下での極めて厳しい挑戦
- 実現可能性は要素/模擬試験によって把握すべき

3. 検証と訓練

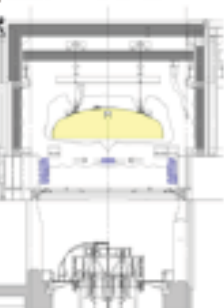
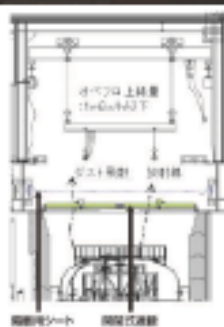
- 実機適用前にモックアップ試験・訓練が必要

4. 安全要求と安全設計

- 福島事故炉特有の事象（バウンダリ機能の喪失、建屋地下汚染水滞留等）を考慮した安全設計



遠隔作業用アーム（節内ロボット）のハンドリング試験



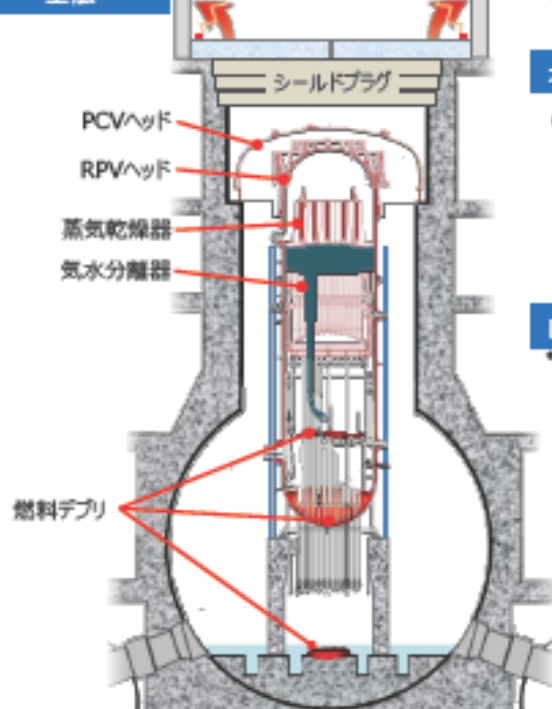
隔離用シート



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

気中-上アクセス工法



作業員の被ばく低減

- シールドプラグに代わる開閉式カバーの設置
水充填式により、不要時の軽量化と形状の追従性を実現

大型構造物取り出し時の汚染拡大防止

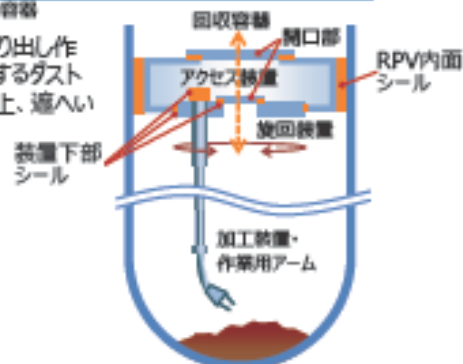
- ダスト飛散防止のための、エリア間仕切りフィルム、シートの開発



RPV*内燃料デブリ取り出し時の汚染拡大防止

*RPV：原子炉圧力容器

- 燃料デブリ取り出し作業中に発生するダスト等の拡散防止、遮へい技術の開発

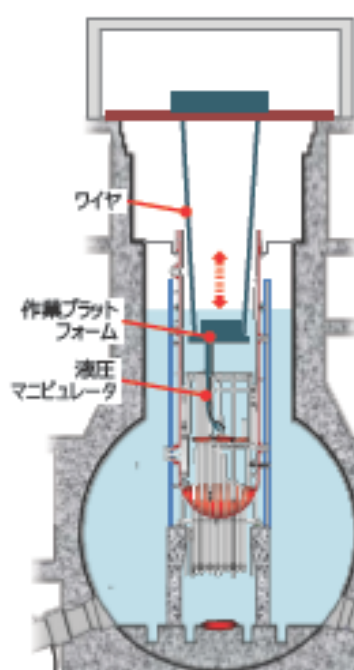


IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

遠隔作業技術

冠水工法



遠隔ハンドリング技術

- 液圧マニピュレータの開発

液圧を駆動源とした小型・高出力マニピュレータ
・耐放射線性 10kGy/h以上、2MGy以上

- 作業能力

燃料デブリへのアクセス

- ・先端負荷15kgでの、移動速度2mm/秒
先端位置精度±2mm程度の安定制御

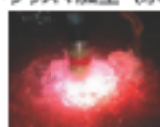
- ・加工時の反力を受けることを想定

燃料デブリの取り出し（横アクセス）

- ・垂直下向き200kg保持、持ち上げ最大45度
- ・100kgを水平まで持ち上げ可能
- ・柔構造による障害物との干渉影響を吸収

- 切削技術（一例）

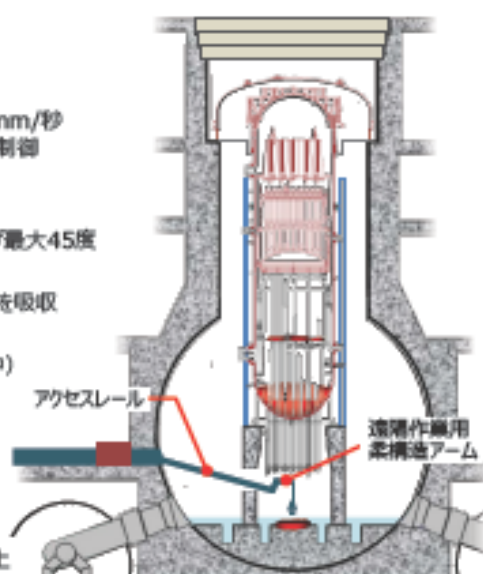
- ・コアボーリング ・プラズマ加工（水中）



- 計測技術

- ・耐放射線性の確認・限界能力の向上

気中-横アクセス工法



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

－燃料デブリ取り出しに向けた技術開発－

- 福島第一における燃料デブリ取り出し作業は、**TMI-2と比較して一層の困難**が予想される。作業の全体戦略、取り出し工法、デブリ取り出しツールの開発については、**国内外の叡智を結集**する必要がある。
- 燃料デブリ取り出し達成のためには、関連する各プロジェクトの目的・ゴールを明確にした上で、**部分最適ではなく、全体最適となるよう**に計画し、**柔軟に技術開発**を行う必要がある。
- 戦略の策定にあたっては、実現可能な様々なオプションを検討し、第一案だけでなく**必ず代替案を準備しておくことが重要**である。

福島第一原子力発電所の廃止措置 －放射性廃棄物－

福島第一事故廃棄物と操業廃棄物の比較

87

不確実性の項目	対策の度合い	
	操業廃棄物	事故廃棄物
廃棄物発生【量、種類、時期】	◎	△
ハンドリング（取り出し・区分）【困難性】	◎	△
性状把握【情報の充分性、サンプルの困難性、サンプルの代表性】	○	△
処理・廃棄体化技術	○	?～△
埋設・処分方法及び安全評価	△～○	?
規制・技術基準、ガイドライン、サイティング	△～○	?

◎：把握している、あるいは充分見通しがある。○：概ね見通しがある。△：限定的である。
?：論じられる段階ではない。

- 操業廃棄物は、課題があるものの比較的管理された状態にある。
 - ・ 現時点の発生量はもとより今後の推移、個別の廃棄物中の含有放射線量や化学物質等の基本的な廃棄物性状に係わる情報は把握されている。
 - ・ 未処理・処理済の双方とも現行の規制に基づく保管管理等が適切に行われている。
 - ・ 処分方法や安全評価方法に加え対応する規制・基準についても整備されてきている。
- 福島第一事故廃棄物は、多数の不確実性が技術的に重要な課題となる。それら不確実性を解消し、管理された状況に置くことが対策並びに技術開発の大きな目標となる。

IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

放射性廃棄物処理・処分研究開発の実施内容

88

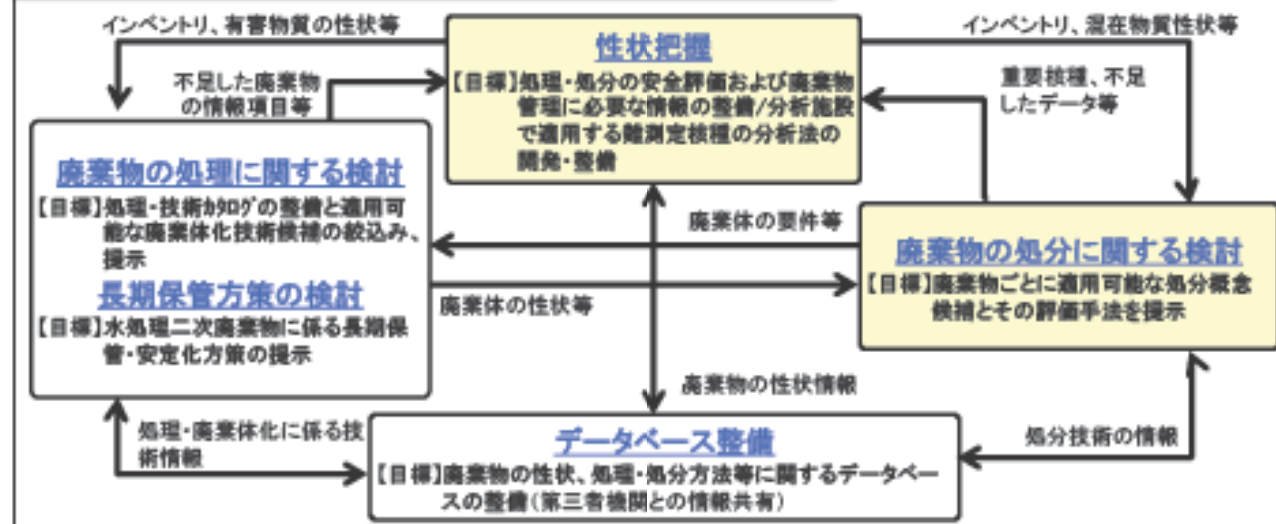
廃棄物ストリームに関する検討

廃棄物ストリーム：事故廃棄物の発生・保管から処理・処分までの一連の廃棄物の取り扱い

処理・処分等に関する技術情報（前提条件を含む）、政策・制度等に係る情報

個別の研究成果の総合的な判断と調整、安全かつ合理的な処理・処分の実現に向けて必要な検討課題等の提示

個別研究開発項目（廃棄物ストリームの構築に必要な知見を与える基礎研究開発）



IRID

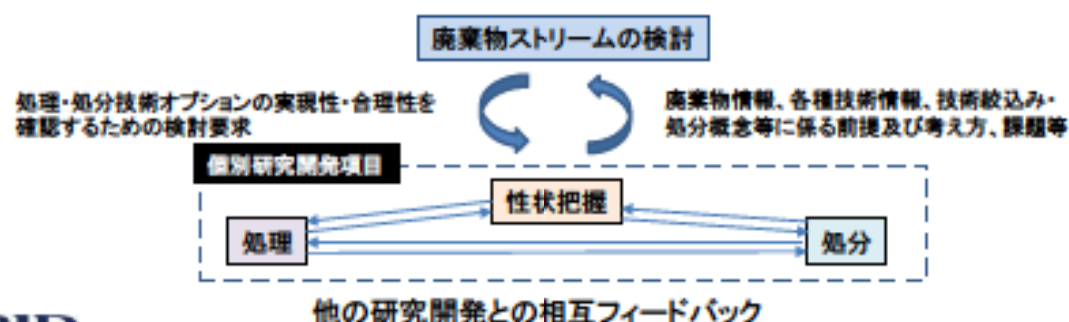
©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

廃棄物ストリームに関する検討

- 事故の影響により廃棄物の性状に関する情報が少ないという特徴を踏まえ、全体を俯瞰するとともに各研究開発と相互にフィードバックすることで研究開発を合理的、効率的に進めるため、全体の安全性及び合理性を確保しながら、発生から保管、前処理・処理(分別・減容・安定化)を経て、長期保管あるいは処分にいたる流れ(廃棄物ストリーム)を整備する。



廃棄物ストリームのイメージ



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

廃棄物ストリームの検討

- 発生時期と発生場所により1F内全ての廃棄物を抽出し、抽出した廃棄物に対して、以下を整理

発生理由
発生場所
廃棄物名称
汚染区分
発生量
放射能濃度
線量率
化学組成(含水率、有害物質等)
保管場所

- 放射性廃棄物の分類として、汚染形態や材質を考慮
- 運転中に発生した廃棄物や、解体に伴い発生する廃棄物もリスト化
- 廃止措置に向けた作業の進捗や、性状把握での分析結果など研究成果を適宜反映できるようにする

- ◆ 原案を作成する分類として以下を設定

S1 : 圧力容器
S2 : 格納容器金属
S3 : 格納容器コンクリート
S4 : 建屋内金属
S5 : 建屋内コンクリート
S6 : 飛散瓦礫金属
S7 : 飛散瓦礫コンクリート
S8 : 可燃物
(以下、汚染水処理二次廃棄物)
S9 : 吸着塔①、②
S10 : 多核種除去設備①、②
S11 : 除染装置スラッジ
S12 : フィルタ

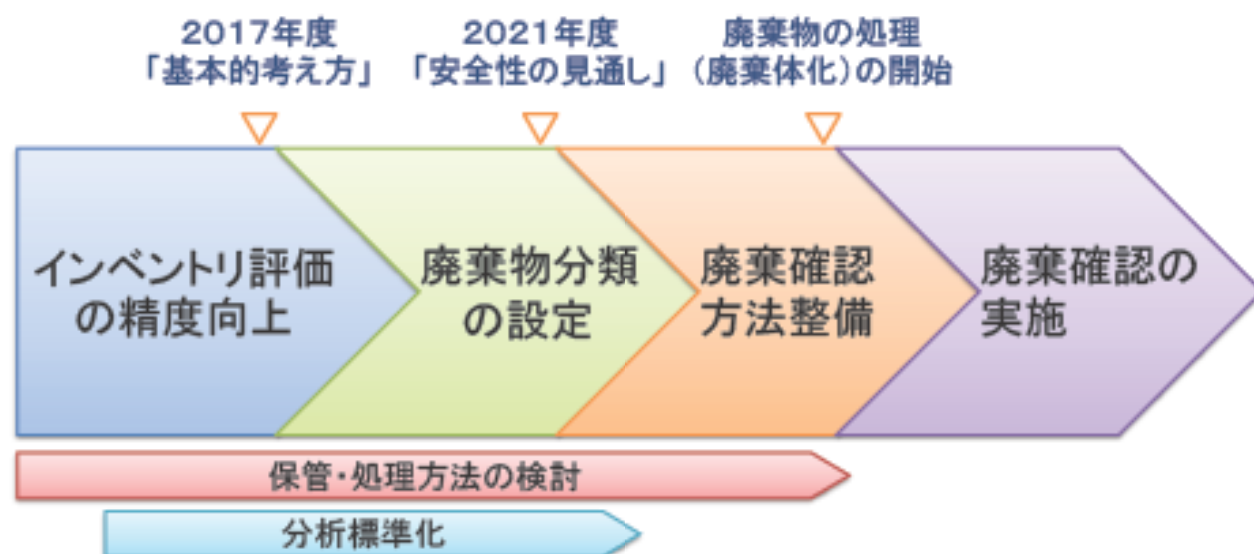
課題

- 廃棄物量やインベントリに応じて細分化・分類の見直しが必要

IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

性状把握に関する研究開発 —廃炉の進展に伴う分析目的の推移—



IRID

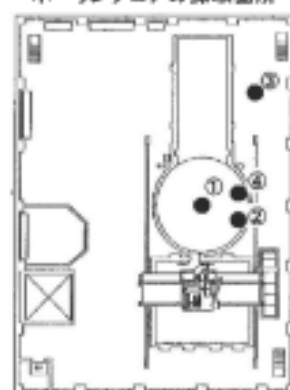
©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

性状把握に関する研究開発 —建屋内ガレキの採取・分析—

■ コンクリート片・保温材
1号機・3号機原子炉建屋
1階で行われた遠隔重機
「ASTACO-SoRa」を用い
た障害物撤去作業にお
いて大量に回収された瓦
礫から、建屋搬出時に握
り拳程度の大きさのものを分取。

■ ボーリングコア
2号機原子炉建屋5階オ
ペフロで採取された4つ
のコア試料のうち、中央
付近のもの(図②)の表
面塗膜(直径約40mm)

ボーリングコアの採取箇所



2号機原子炉建屋5階オペフロ ●: 採取箇所

分析対象核種

■ 既存の処分システムにおける評価対象核種を参考に、以下の核種を対象として選定

γ線核種 : ^{60}Co , ^{94}Nb , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu

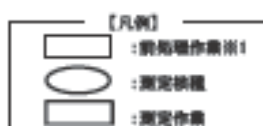
β線核種 : ^3H , ^{14}C , ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{59}Ni , ^{63}Ni , ^{79}Se , ^{90}Sr , ^{99}Tc , ^{129}I , ^{241}Pu

α線核種 : ^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am , ^{242}Am , ^{243}Am , ^{244}Cm , ^{245}Cm , ^{246}Cm

IRID

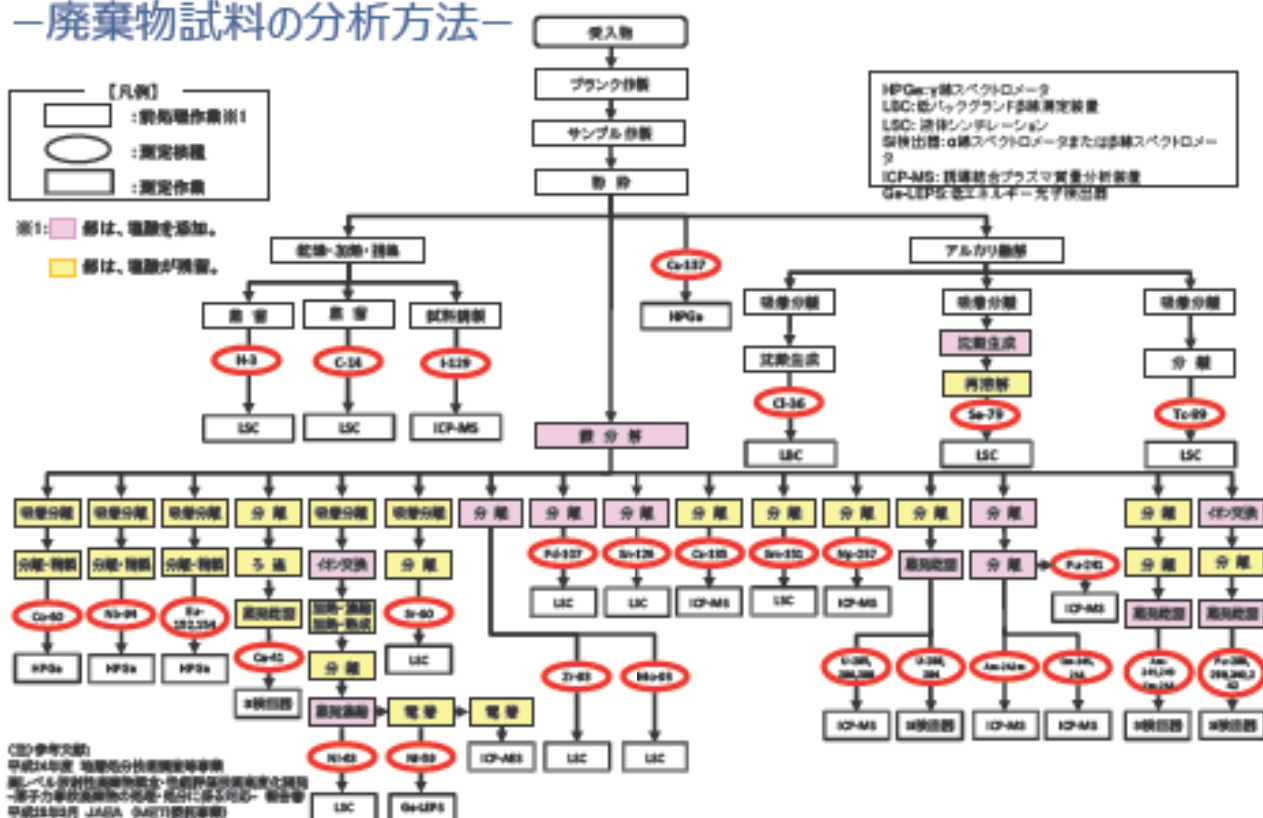
©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

性狀把握に関する研究開発
—廃棄物試料の分析方法—



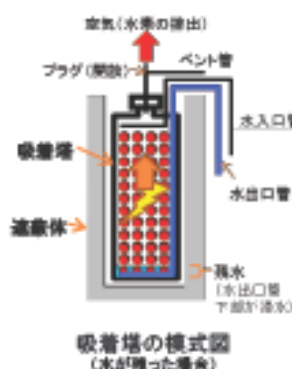
提示: 易比, 增體步逐加。

■ 假比、實際的現象



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

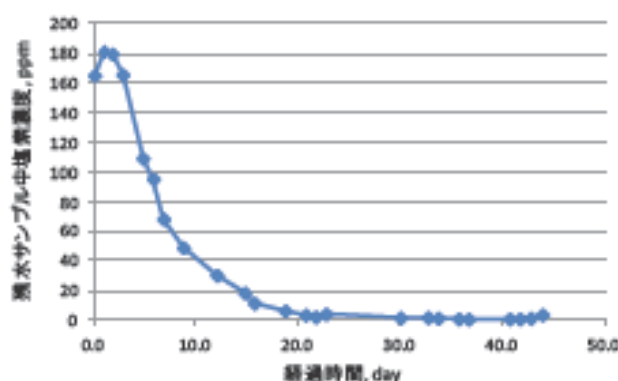
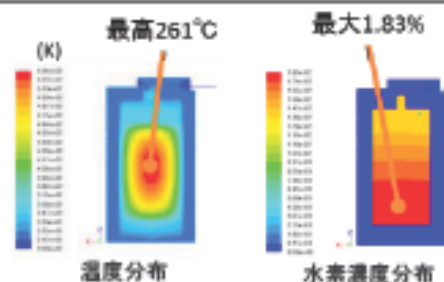
長期保管の検討及び廃棄物の処理に関する検討 セシウム吸着装置吸着塔の評価（１）



◆セシウムの発熱により吸着塔内で水が蒸発する過程で、容器壁付近の水から塩分が除かれることを示唆

解析の結果(例)

- 崩壊熱: 618 W
- 水素発生量(25℃, 1 atm)
ゼオライト層: 24.3L/d
水没層表面: 0.76L/d
- 水没層の熱伝導率は水の
1.1倍の値



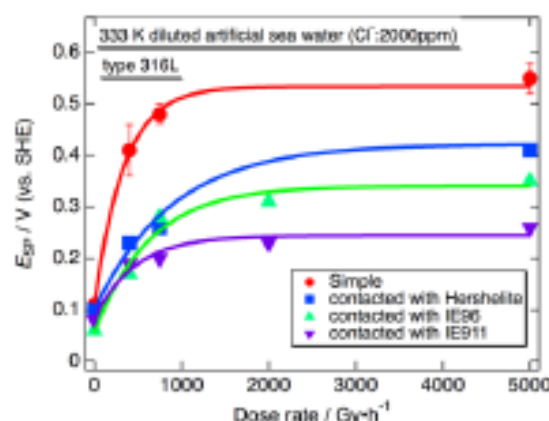
模擬吸着塔を用いた加熱試験における底部残水の塩化物イオン(Cl⁻)濃度の変化

IRID

International Research Institute for Nuclear Decommissioning

長期保管の検討及び廃棄物の処理に関する検討 セシウム吸着装置吸着塔の評価（2）

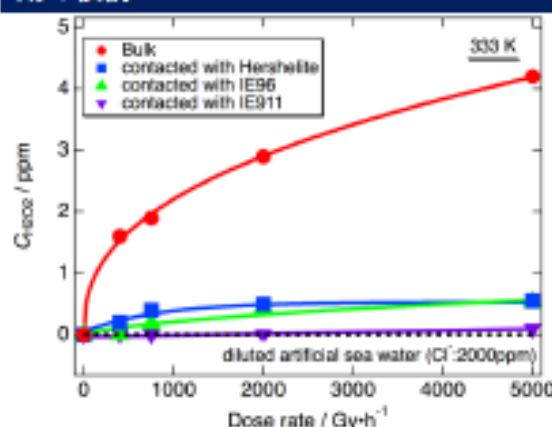
ガンマ線照射下での電気化学試験



照射下ステンレス鋼の定常浸漬電位(E_{oc})の測定結果

腐食に係わる定常浸漬電位 E_{oc} (高電位ほど腐食発生リスクが高まる)はガンマ線照射により上昇するが、KURION及びSARRYで使用するゼオライト(Hershelite, IE96, IE911)の共存により、上昇が抑制された。

ゼオライトによる腐食発生リスクの低減作用の検討

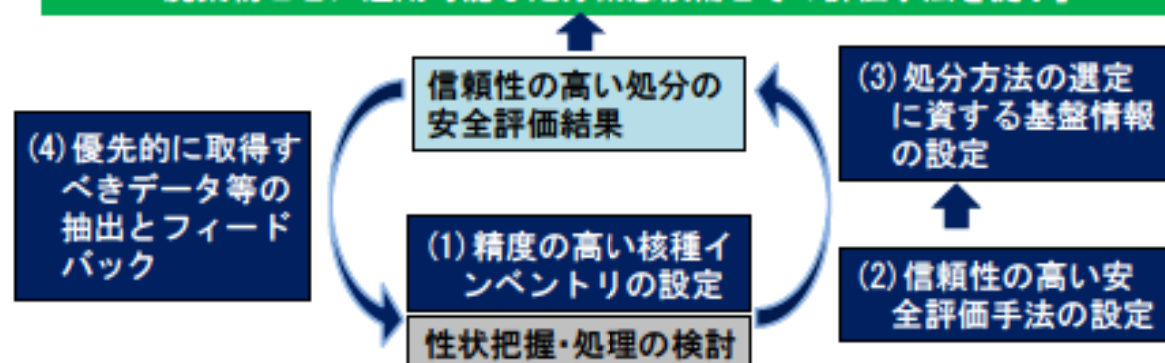


ガンマ線照射下の過酸化水素の測定結果

ガンマ線照射下でのゼオライト共存系における水質分析を実施し、ゼオライト共存下での E_{oc} 上昇抑制作用は、ゼオライトによる過酸化水素生成の抑制によることを解明した。

廃棄物の処分にに関する検討

「廃棄物ごとに適用可能な処分概念候補とその評価手法を提示」



➤廃棄物の処分にに関する検討の目標「廃棄物ごとに適用可能な処分概念候補とその評価手法を提示」を達成するためには、「信頼性の高い処分の安全評価結果」が必要。そのためには、以下の設定等が必要

- (1) 精度の高い核種インベントリの設定
- (2) 信頼性の高い評価手法（シナリオ、モデル、パラメータ、解析ケース）の設定
- (3) 処分方法の選定に資する基盤情報の設定（工学的対策につながる情報）
- (4) 優先的に取得すべきデータ等の抽出とフィードバック

英国原子力廃止措置機関（NDA）全体戦略

- 戦略の策定にあたっては、明確なEnd-State（最終的にどうしたいか）の構想に基づき、実現可能な様々なオプションを検討し、その結果、第一案だけでなく、必ず代替案を策定する。これらの検討課程は公開する。
- この際、「技術」のみに焦点を当てた議論をしても意味はなく、ミッション遂行のための諸環境整備、例えば従業員への動機付けを与えるための理念や長期に渡る作業に必要な作業環境・体制の整備も必要。

英国原子力廃止措置機関（NDA）の戦略（放射性廃棄物） (Integrated Waste Management)

- サイト修復という最終目的を達成するための重要成功要因として総合廃棄物戦略が高位に位置付けられている。
- NDA各サイトでは、廃棄物の発生量予測に基づき、処理・保管設備計画及び敷地利用に関する綿密な長期計画を立て、相応の投資を行って戦略的にサイト修復事業を進めている。
- 総合廃棄物戦略は、以下の基本原則を有する。
 - ① リスクの低減
 - ② 廃棄物の極小化
 - ③ 意思決定においては、資金・実現性・技術的成立性・被ばく・安全・セキュリティ・環境負荷等を考えて優先度のバランスをとる。等

未知への挑戦 — 廃炉の課題をどう解決するか —

廃炉に本質的に必要な課題を見つけるには

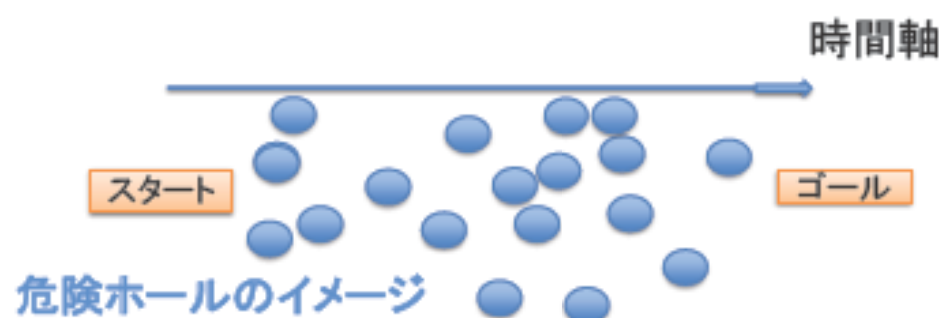
(1) 意図的計画法 (Statisticな方法)

- ① 仮説を立てて将来予測
- ② 仮定にもとづき取り出し方法策定
- ③ 上記方法のリスクを検討
- ④ 予測をベースに投資
- ⑤ 成果を実現するために実行

(2) 仮説指向計画法 (Dynamicな方法)

- ① 取り出しのための目標設定
- ② どのような仮定を証明できれば目標達成可能か
(含むリスク検討)
- ③ 重要な仮定の妥当性検証のために計画を立案
- ④ 投資

- ・何故失敗したのかを議論
 - ✓ 危険ホールの抽出（時間軸を意識）
- ・成功するためにはどうすればよいか、既存概念に囚われないアイデアを抽出（新規研究課題の抽出）
- ・外的リスクを踏まえての問題点・課題の議論
- ・リスクを踏まえたアイデア改善案を抽出（具体的な研究課題の抽出）
- ・時間軸を意識した成功パスを構築
- ・パス毎にリスクを評価



思考展開方法

STEP 1. 思考展開図を作成する（参考：畑村洋太郎編、実際の設計）



要求機能-機能構成-機能要素 — 機構要素-構造要素-全体構造
 （テーマ - 課題 - 課題要素 — 具体的解決策 - 具体案 - 全体計画）

STEP 2. 異なるテーマで思考展開図を作成

STEP 3. 仮説の分析と検証方法の検討

STEP 4. 俯瞰的全体計画の作成

STEP 5. 成功パスの探索

STEP 6. 時間軸を入れて検討

STEP 7. 仮説の分析と検証方法の再検討

STEP 8. 時間軸を入れたシナリオ構築

－ 廃炉研究開発に求められること －

- 将来が読めない不確実性の高い現象（社会）を完全に予測することは確かに困難である。
- 但し、将来何が起こりそうかリスクを含めて俯瞰し、仮説をたてた上で、あらかじめ何らかの備えをしておくことはできるだろう。
- この場合、影響度合いが大きいと思われる不確実な事象を徹底的に洗い出し、モニタリングすることによって仮説を検証することは重要である。
- 廃止措置完遂には、全体を見て将来のリスクを理解できる人材が必要であり、研究開発を通じて俯瞰的視野をもつ人材を育成することは極めて重要である。

－ 材料技術への期待 －

通常のプラント建設や運転・保守の分野では定常問題をいかにうまく解くか鍵だが、廃炉は時間とともに状況が変わる、いわば非定常の課題である。どのようにして不確実性のある将来事象を予想し、そのリスクに対処するのか。

真に重要な本筋（幹）はどこにあるのかを熟考し、安全かつ確実な方法で廃炉を行うことが極めて重要である。

一方、本質的に確率的な現象である材料寿命の評価にはリスク評価の概念が必要であり、例えば腐食影響を考慮に入れるべき設備信頼性評価手法として、ベイズ統計等確率的手法が導入されている。

リスク評価を行うためには統計的確率、頻度の推定、損失の重篤さを定める必要があるが、どうやって想定外を想定するのかとのパラドックスがいつもついてまわる。

－材料技術への期待－

将来が読めない不確実性の高い現象(社会)を完全に予測することは確かに困難である。

しかしながら、将来何が起こりそうかをよく考え、あらかじめ何らかの備えをしておくことはできるだろう。

即ち、影響度合いが大きいと思われる不確実な事象を徹底的に洗い出し、それをモニタリングすることによって仮説の検証をしっかり行う必要があり、社会的影響の大きな材料評価には、まさにこういった姿勢が重要であると思う。

但し、トータルリスクを低減するためには、材料単体で解決できない課題も数多くある。技術の更なる発展のためにも、システムの中の材料という視点にたった技術開発が進められることを期待している。