

2018年12月10日

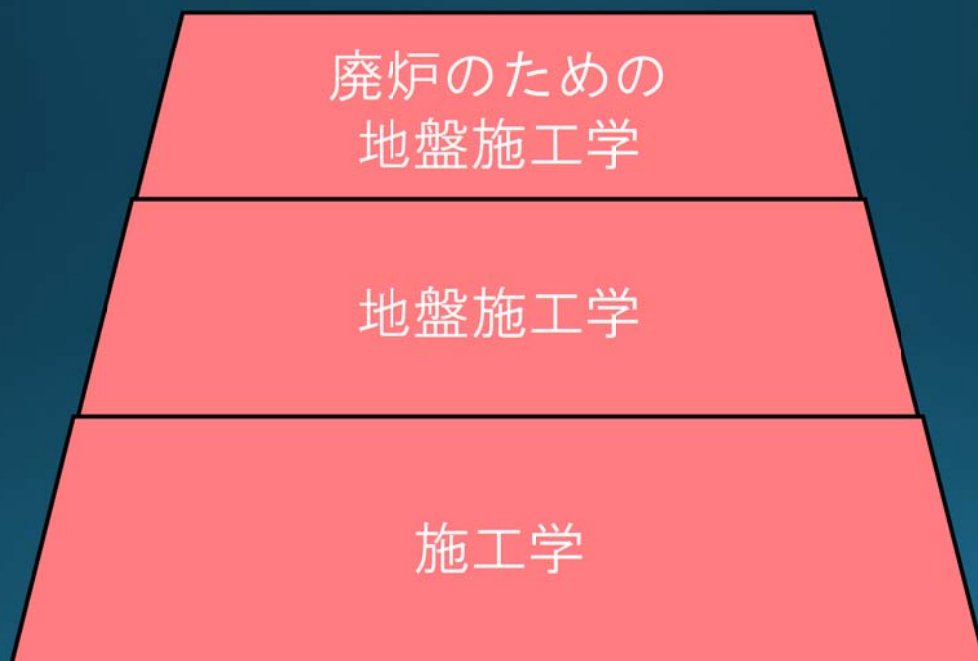
「福島第一原子力発電所の廃止措置への貢献を目指す『廃炉地盤工学』」に関する講習会

廃炉地盤工学における 地盤施工学

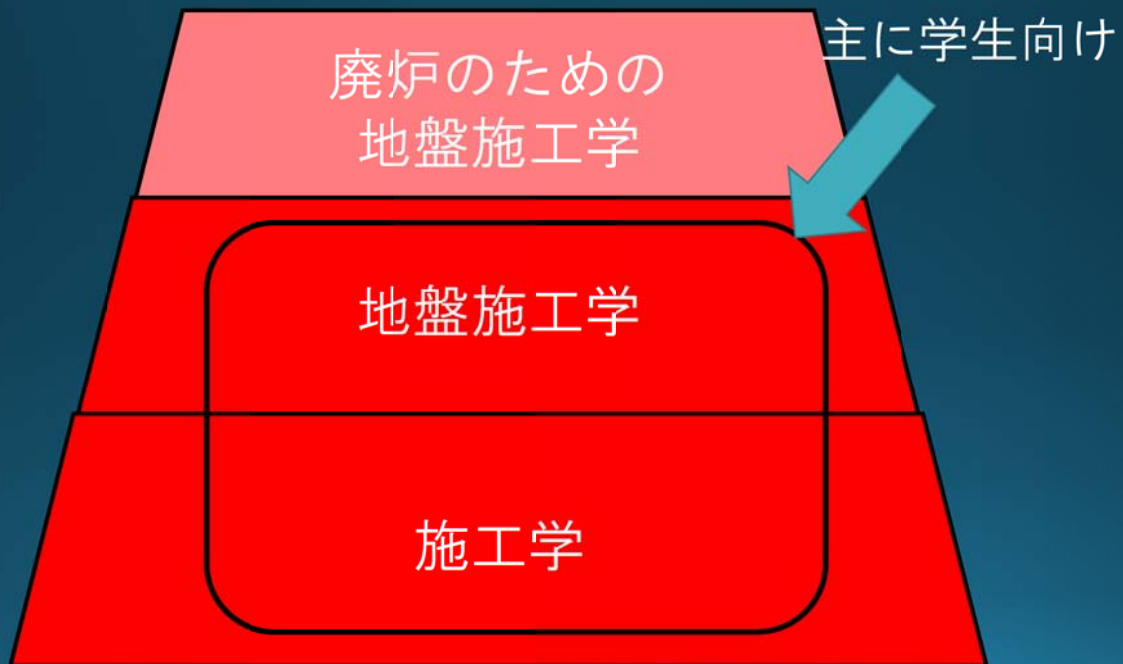
早稲田大学 理工学術院総合研究所

後藤 茂

廃炉地盤工学における 地盤施工学の構造



廃炉地盤工学における 地盤施工学の構造



施工/施工学とは

- 上流概念である設計・計画を**具現化する建設行為**であり、**施工計画の作成、施工（管理）の実施**に大別される。
- **施工計画**とは、使用する材料とそれを用いた建設（施工）方法や建設機械・労務などを**実施時間軸に沿って具体的に記述**したものである。
- **施工管理**とは**施工が計画に則っておこなわれていること**を管理するものである。
- **施工学**とは**施工を合理的に行えるようにするための学問**である。

施工計画・管理の範囲

- 方法・機械 (Method, Machine)
施工の方法を決め、必要な機械等を手配する。
- 材料 (Material)
工事に必要な材料の決定や手配をおこなう。
- 人・労務 (Man)
施工に必要な人員を予測し、時期に合わせた手配をおこなう。



これらのすべてを含むことにより具体性が備わる。
(5W1H: Who(だれが)、When(いつ)、Where(どこで)、What(なにを)、Why(なぜ)、How(どのように))

施工の手順 (要素)

- | | |
|-----------------|----------|
| 1. 材料の選択 | 最適な材料 |
| 2. 施工方法・施工機械の選択 | 最適な方法 |
| 3. 施工順序の組み立て | 最適なタイミング |

- 「最適」とは何を持って決めるのか？
 - 品質・性能 Q
 - コスト C
 - 工期 (納期) D
 - 安全 S
 - 確実性 (常識的・経験的に判断できる範囲) R

施工の管理項目 工事の品質を支配する4大要素

Q: Quality (狭い意味の品質)

C: Cost (原価)

D: Delivery (工期)

S: Safety (安全)

[**R**: Reliability (確実性)]

施工管理とは

●品質管理 (出来型管理) **Quality**

発注者が要求する品質目標を達成するために行う手段。

●原価管理 (労務管理, 調達管理) **Cost**

要求される品質を合理的なコストで達成するための労務費や資材調達費の管理。

●工程管理 (出来高管理) **Delivery**

工事途上で計画と実際の進捗を確認し、不備なところに必要な是正措置をとる管理。

●安全管理 **Safety**

工事に伴って発生する災害や職業性疾病を絶滅する目的で、組織的な施策を立てて実践活動を行うこと。

安全管理の4M・5E分析

十分な検討を行わないと要因は人，対策は教育になってしまう！！

因を抽出し、

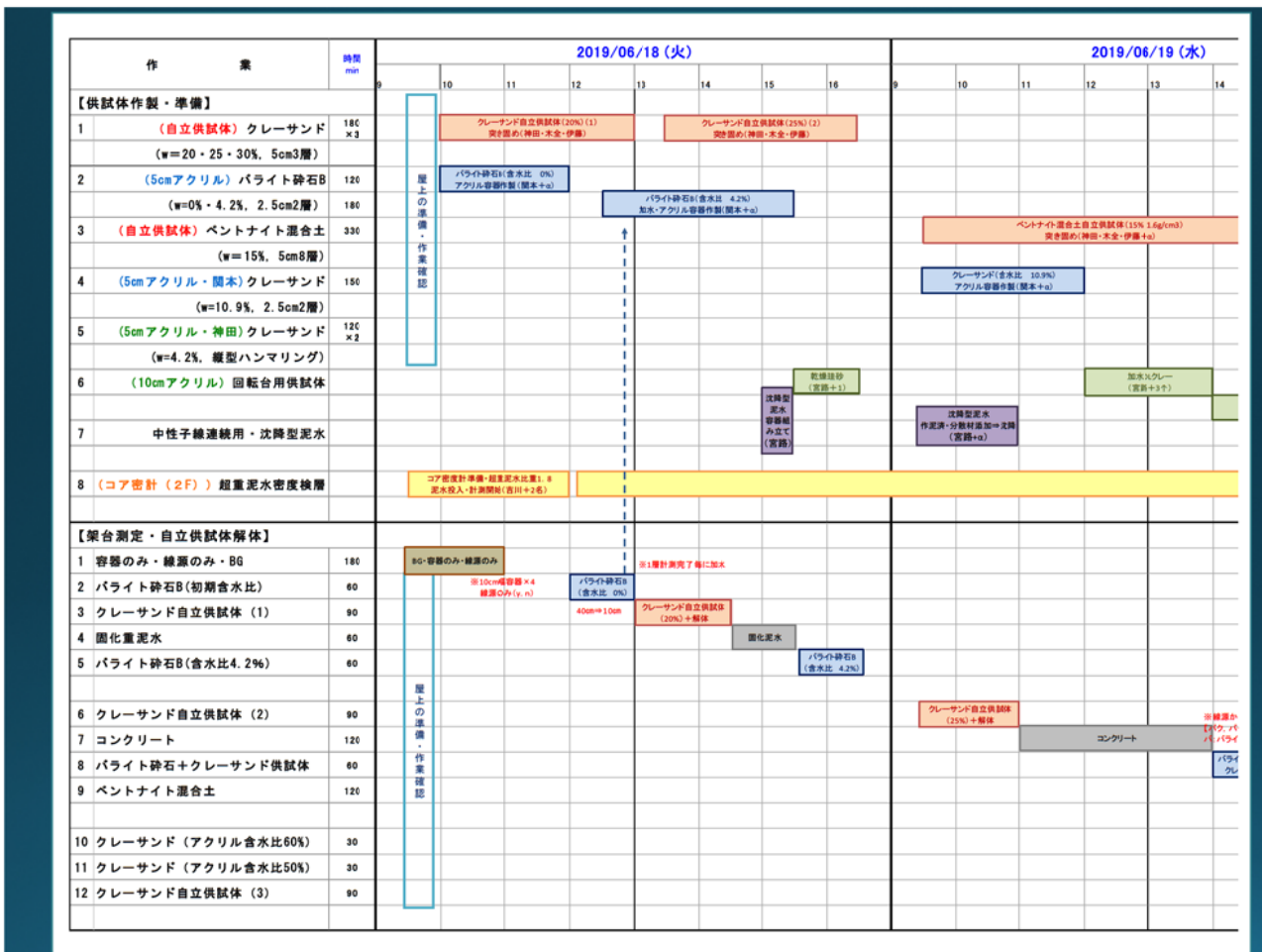
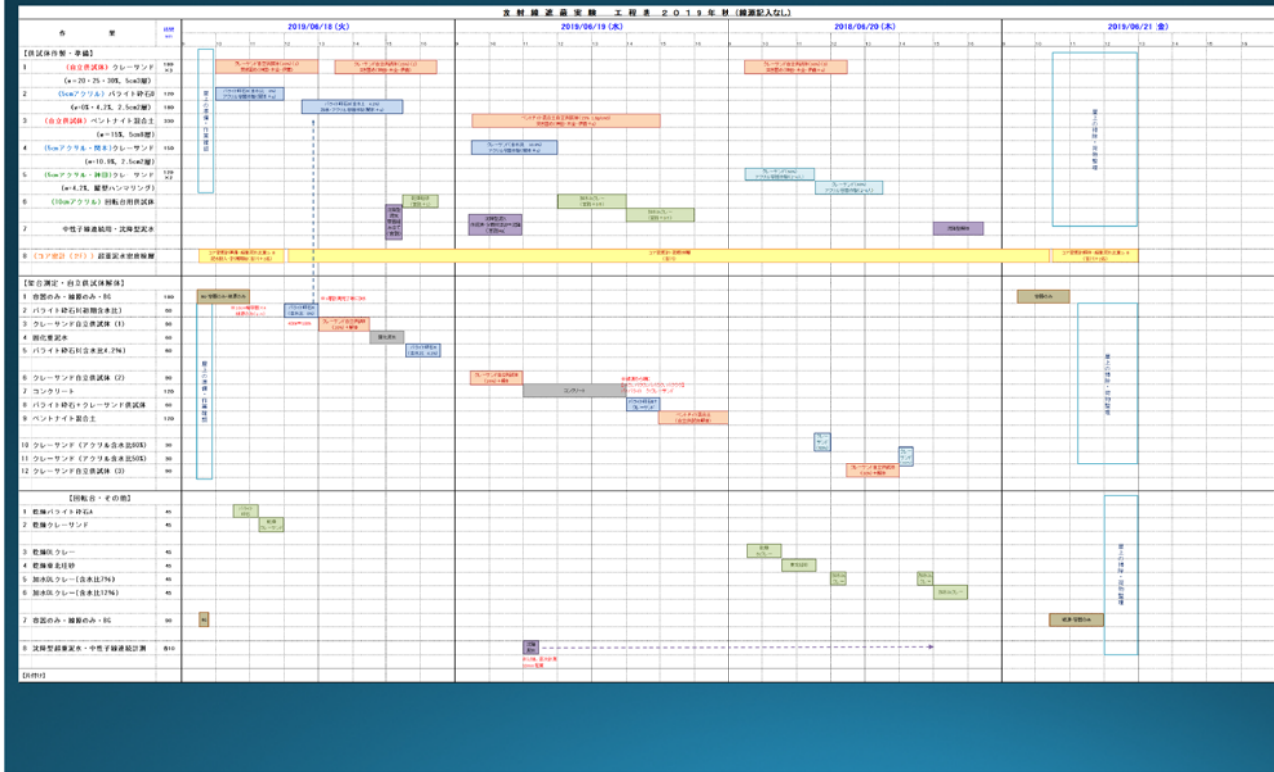


- チェルノブイリ原発事故
運転員らは、非常用炉心冷却装置 (ECCS) を含む重要な安全装置を全て解除したうえで、実験を開始した。
- スリーマイル島原発事故
運転員が冷却水過剰と誤判断し、非常用炉心冷却装置は手動で停止されてしまう。

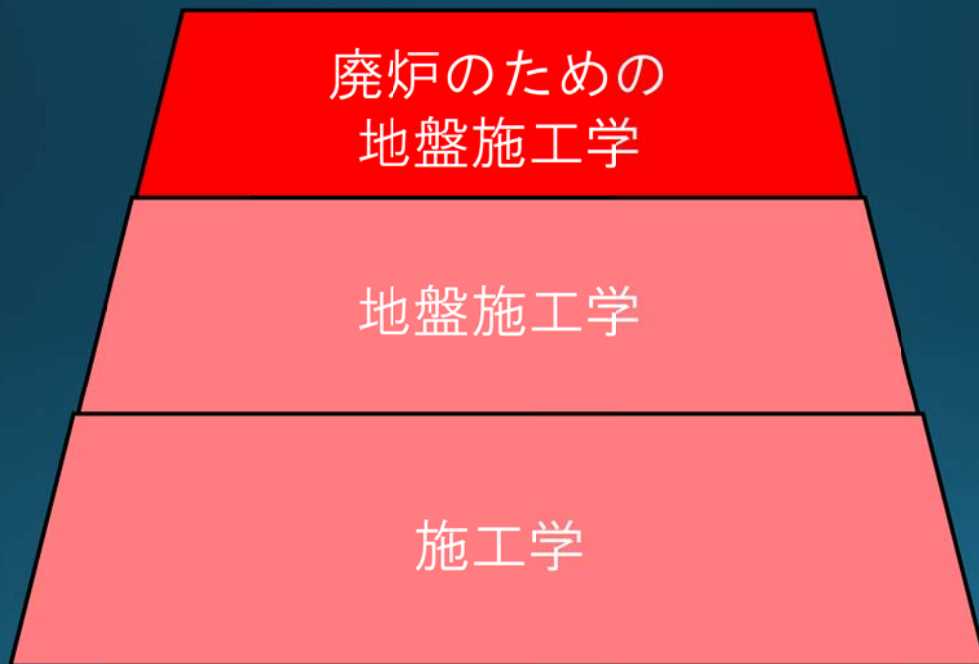
施工計画の作成 (経験的判断の内容)

- 工事完了までの流れをイメージする。
- 全体および各段階での要求機能や制約条件を想定(把握)する。
- それぞれの構成要素(材料、方法、機械)の要求性能を明確にし、最適な要素を選択(想定)する。
- 構成要素の相互の良関係・悪関係を確認し、できるだけ良関係になるように要素の変更・手順の組み替えなどをおこなう。
- 目的に対して最適な要素の組合せを決定し、実施上の問題点を再検討する。

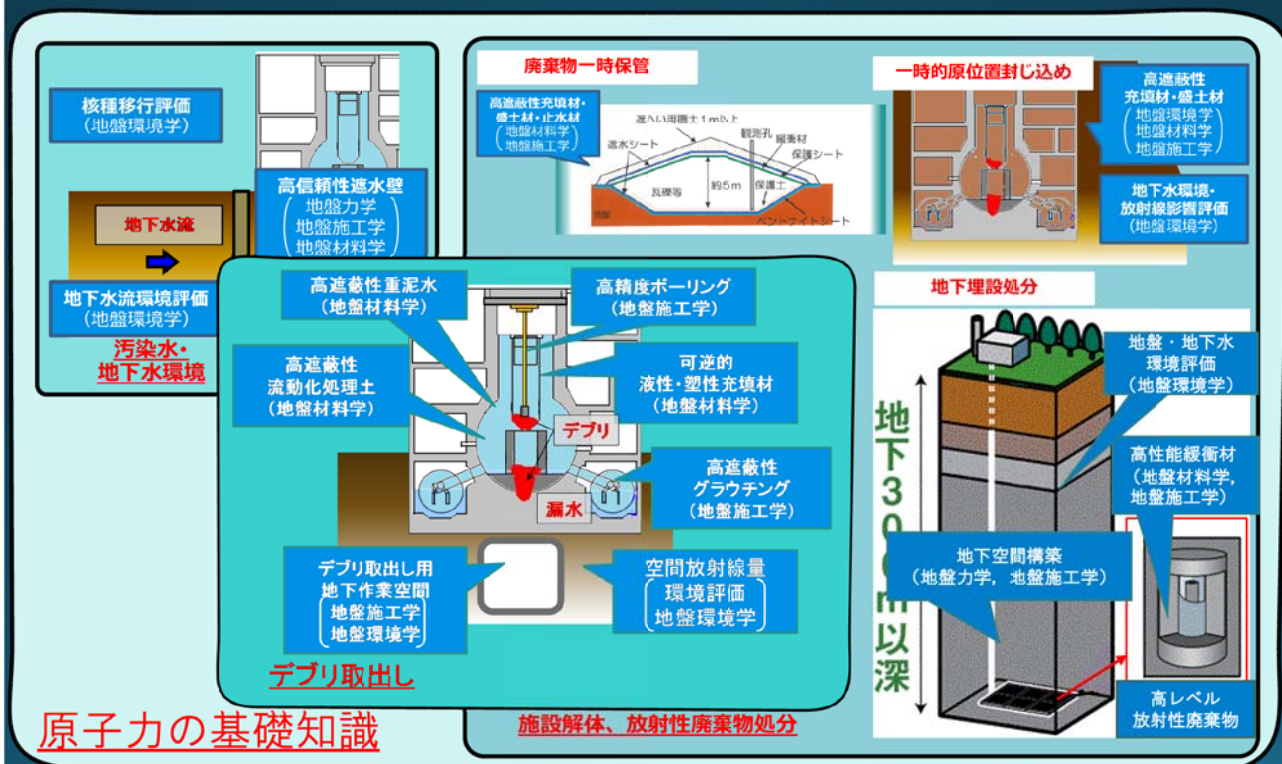
放射線遮蔽実験における例



廃炉地盤工学における 地盤施工学の構造



廃炉地盤工学の貢献できる 「廃止措置」の事象の例



(事故) 原子力発電所の廃炉 措置技術の特殊性 その1

① 通常工事に追加される評価基準 (放射性物質の遮蔽・閉じ込め)

- 地盤工学的技術を廃炉技術の観点から再評価。
 - 作業空間改善のための空間放射線量の低減
 - 周辺環境の防護のための放射能汚染物質の拡散防止
 - 廃止処置に関連する他分野技術の活用容易化のための補助

(事故) 原子力発電所の廃炉 措置技術の特殊性 その2

② 事象の未経験または類似事象の乏しさ (状況把握の困難さ、最適判断の基準の不明確)

- 類似事象：TMI-2 → 構造等の相違の考慮
- 類似事象：チェルノブイリ → 経験の活用の全否定

③ 各施工要素の要求性能の把握 (具体化) の困難さ。

- 最終形態の具体性欠如
- 次工程の性能 (制約条件に対する対応能力) の不明確さ

(事故) 原子力発電所の廃炉 措置技術の特殊性 その3

- ④ 制約条件把握の困難さ
 - 原子炉施設に関する知識の欠如（努力で解消可能）
 - 事故後の原子炉内部の状況の不明確さ（時間とともに解明される見込み）
 - 要求性能不明確に伴う建設要素の具体性の欠如
- ⑤ 建設要素相互の関連把握の困難さ。
- ⑤ 経験のない他分野要素（技術）との協働。

地盤施工学の構築方針

1) 方針1（基本的）

廃止措置の過程を考慮しつつ一般的な地盤施工との類似性を検討し、廃炉地盤工学・地盤施工学の主な流れを構築する。

（廃止措置の特殊性は制約条件、要求性能などから品質管理項目、管理試験などで組み込む。）

2) 方針2（上級編）

廃炉プロセスの上位の概念から参画することにより、制約条件や要求性能を緩和し、工法/材料の選択肢を拡大する。

地盤施工学の構築方針

1) 目的（要求機能）を単純化して、**類型工事から学ぶ！**（特殊性は品質管理項目等に反映）

2) 方針2（上級編）

廃炉プロセスの**上位の概念から参画**することにより、**制約条件や要求性能を緩和**し、**工法/材料の選択肢を拡大**する。

事故原発の廃止措置と類似一般工法・工事の対応

	作業項目	類似する一般工法
構造的及び環境安定性（安全性）の確保	地下水の流動制御	都市部山留め工事、産業廃棄物処理場
	構造耐震性の確保	（歴史的建造物等の）耐震補強／レトロフィット
	自然災害時の対応性向上	※一般的な仮設建造物でも考慮されるべきであるが実施事例なし。
燃料デブリの取出し	格納容器底部の燃料デブリ解体と取出し	対応不明
	燃料デブリからの放射線遮蔽	対応不明
	放射性物質の閉じ込め	対応不明
圧力容器・格納容器の解体	格納容器の解体撤去	サイロ等の解体工事、ダイオキシン類に汚染された施設の除染・解体工事
	圧力容器の解体撤去	同上
解体放射性廃棄物の処理・処分	一次仮置施設	産業廃棄物処理場、一般的な覆土工事
	中間貯蔵施設	（一般的な）地下貯蔵施設
	地層処分施設	山岳トンネル工事、大深度立坑工事

実際はどうだったのか？

スリーマイル島原子力発電所 2号機 (TMI-2)
の事故の事例
(チャイナ・シンドローム)
1979年3月28日

スリーマイル島原子力発電所

米国/ペンシルベニア州



ペンシルベニア州
ハリスバーグ - ミドルタウン



サスケハナ川の
スリーマイル島

スリーマイルアイランド原子力発電所
1号機・2号機
1979年3月28日

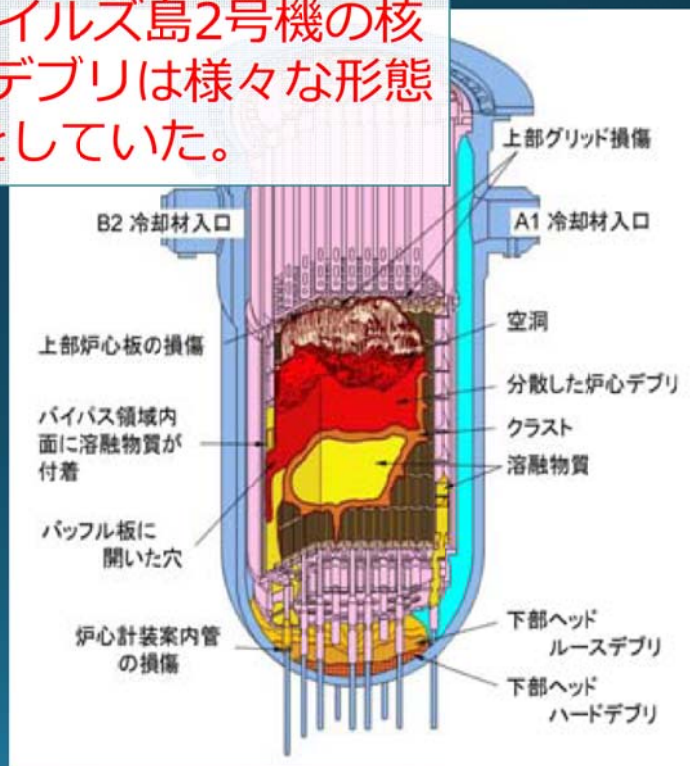


TMI-2でのデブリ取出し

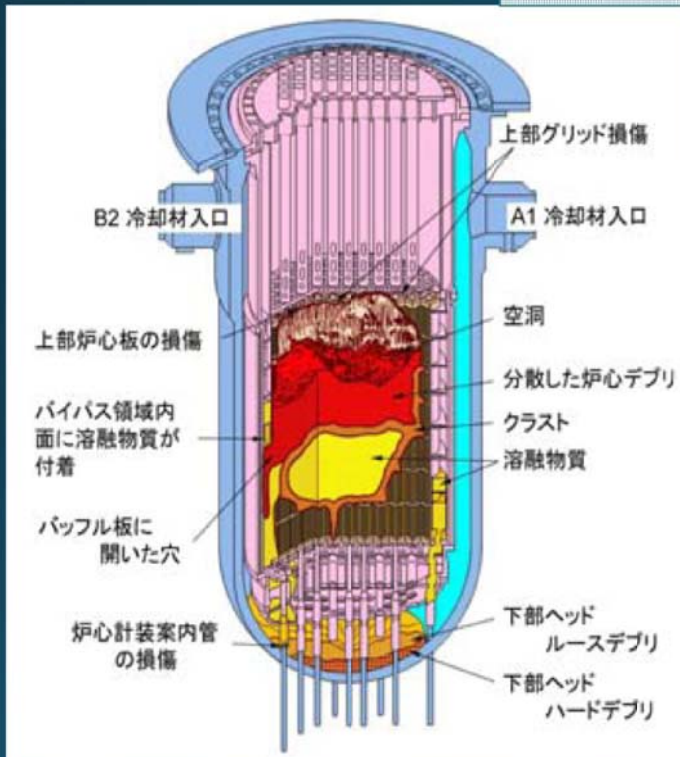
スリーマイルズ島2号機の核燃料溶融デブリは様々な形態をしていた。

- 事故の概要
- 1979年3月28日、米国スリーマイル島原子力発電所2号機で炉心が損傷事故発生。
 - 機器故障と人為的ミスにより、圧力容器から冷却水が流出、約2/3の炉心が露出。
 - 炉心中央上部で燃料集合体の溶融が始まり、炉心の約45% (62 t) が溶融。
 - デブリは集合体下部で一旦固化、再び溶融し、約19 tのデブリが圧力容器の下部ヘッド上に流れ落ちた。

JAEAの鷲谷氏より情報やスライドを頂きました。

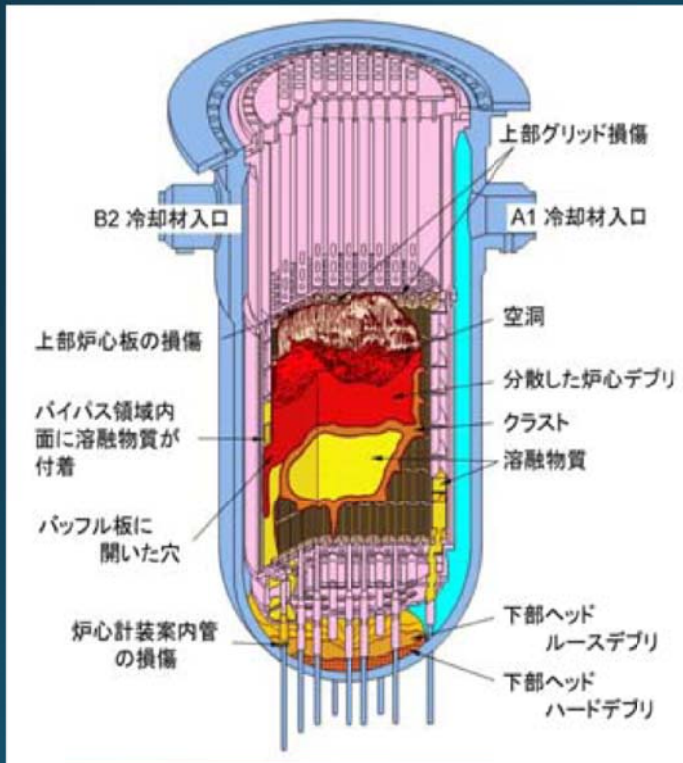


TMI-2でのデブリ取出し方法は土木的！



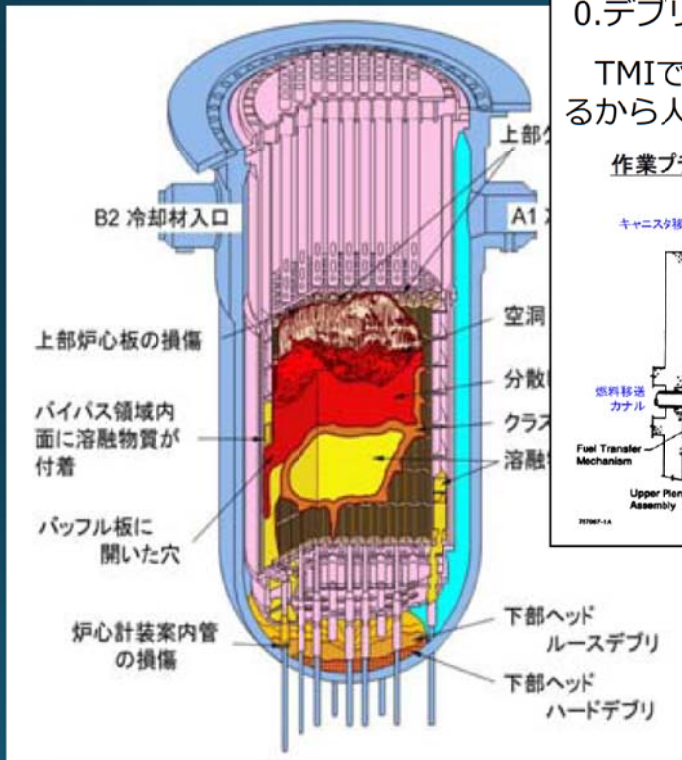
- ① 作業プラットフォームの設置
原子炉上部の蓋を撤去し、作業用プラットフォームの設置。放射線遮蔽して上部で人が作業。
- ② ルースデブリの除去作業
バスケット等を用いて除去。デブリは水中でキャニスタに回収。
- ③ クラスト・溶融固化物（塊）の除去作業
硬い上部クラスト（均一な溶融固化物の硬い表面層）はブレーカ（パーカッション）等では硬度が高く破碎できず、多数のコア穴を開け破碎（スイチング計画）
- ④ 溶け残った（切り株状）燃料の除去作業
切株状燃料はスパイク付燃料引抜装置で底から持ち上げ回収。
- ⑤ 下部炉心構造物の除去作業
コアボーリング装置とプラズマアーク装置による切断を組合せて除去。
- ⑥ 再固化した石状のデブリの除去
スライドハンマーを用い、端部より中央部へ向け破碎。デブリは容易に割れ、エアリフト装置類や長尺取扱ツールにより回収。

TMI-2でのデブリ取出し



- ① 作業プラットフォームの設置
原子炉上部の蓋を撤去し、作業用プラットフォームの設置。放射線遮蔽して上部で人が作業。
- ② ルースデブリの除去作業
バスケット等を用いて除去。デブリは水中でキャニスタに回収。
- ③ クラスト・熔融固化物（塊）の除去作業
硬い上部クラスト（均一な熔融固化物の硬い表面層）はブレーカ（パーカッション）等では硬度が高く破碎できず、多数のコア穴を開け破碎（スイチース計画）
- ④ 溶け残った（切り株状）燃料の除去作業
切株状燃料はスパイク付燃料引抜装置で底から持ち上げ回収。
- ⑤ 下部炉心構造物の除去作業
コアボーリング装置とプラズマアーク装置による切断を組合せて除去。
- ⑥ 再固化した石状のデブリの除去
スライドハンマーを用い、端部より中央部へ向け破碎。デブリは容易に割れ、エアリフト装置類や長尺取扱ツールにより回収。

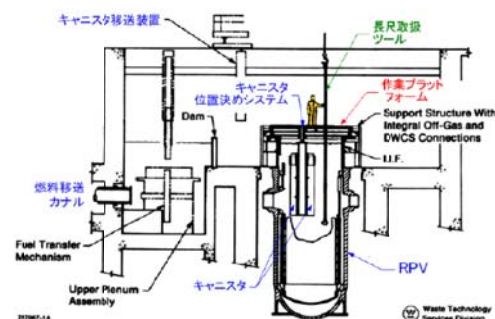
TMI-2でのデブリ取出し



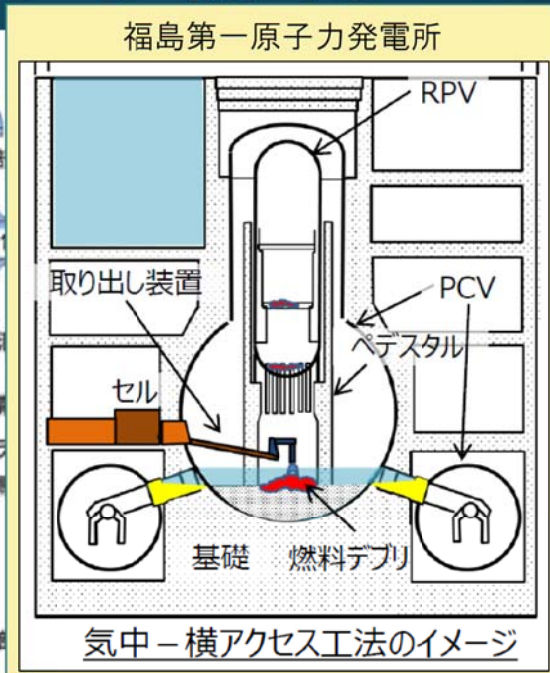
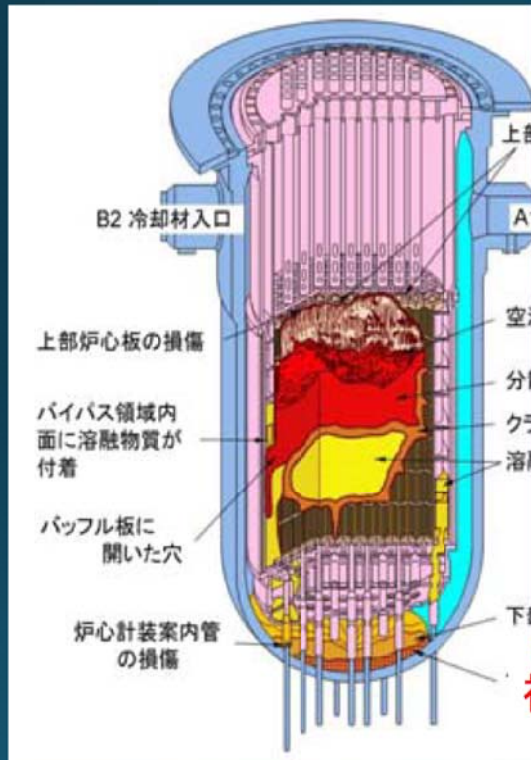
0. デブリ取出しのための仮設工事

TMIでは放射線遮蔽ができてい
るから人がそばに行けている。

作業プラットフォームの設置状況^{※1}

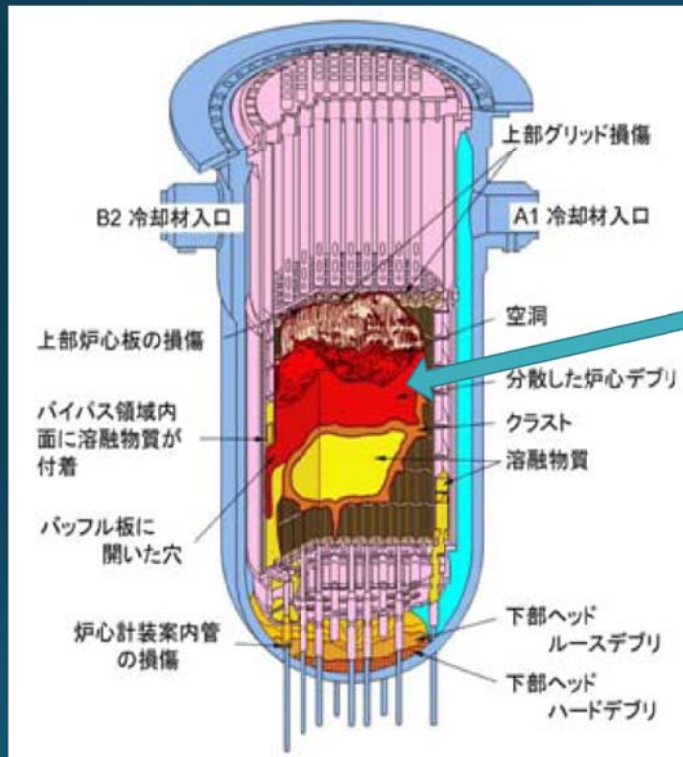


TMI-2でのデブリ取出し

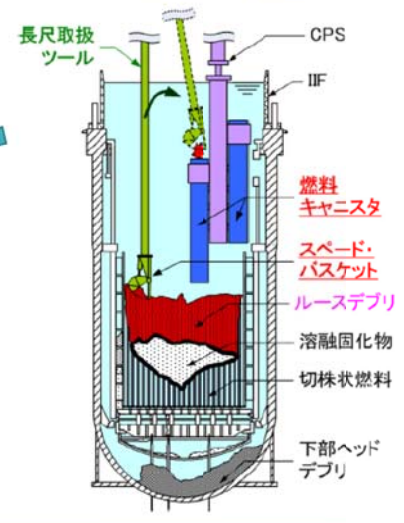


福島原発ではこの工程は無い。

TMI-2でのデブリ取出し



1.ガレキやガサガサのデブリはバケットですくって、キャニスタに入れた。



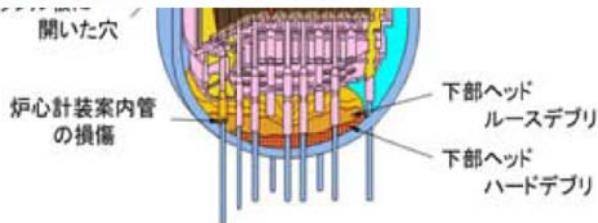
TMI-2でのデブリ取り出し

福島第一原子力発電所

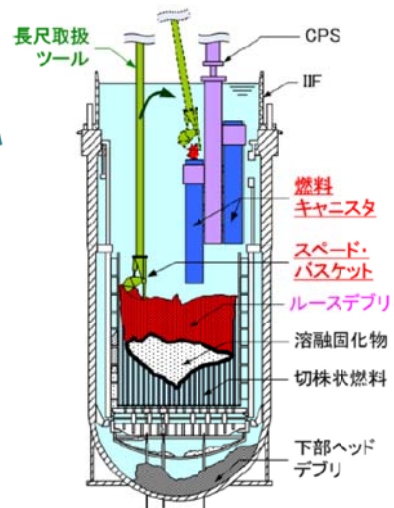


上部炉心板の損傷
空洞
分散した炉心デブリ

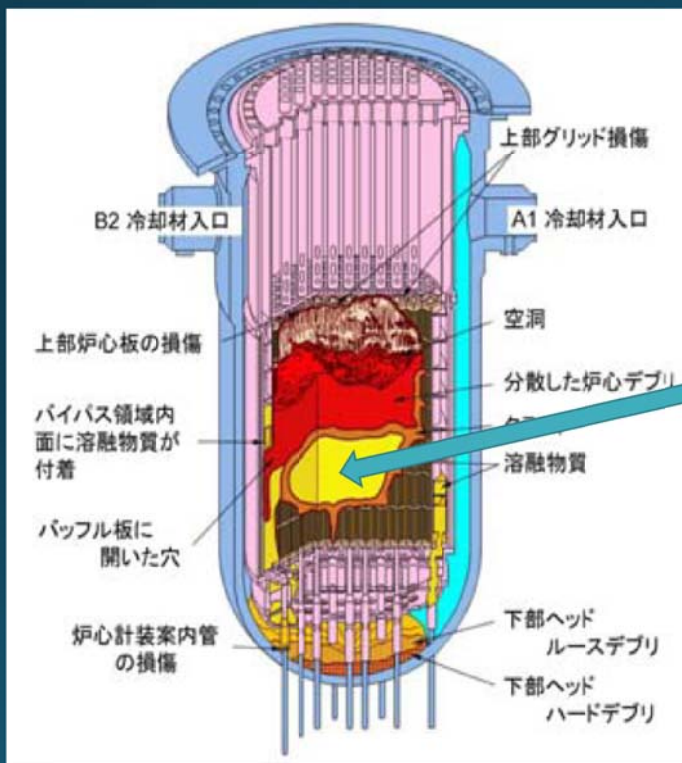
福島原発でも同様なものがありそう。
同様な方法を採用？



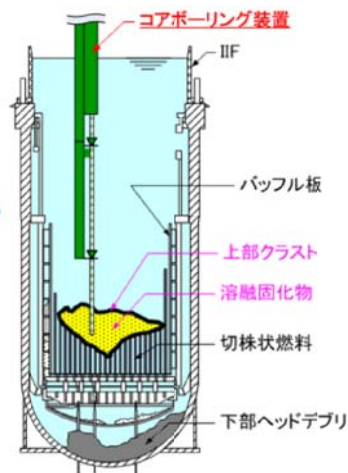
1.ガレキやガサガサのデブリはバケットですくって、キャニスタに入れた。



TMI-2でのデブリ取り出し

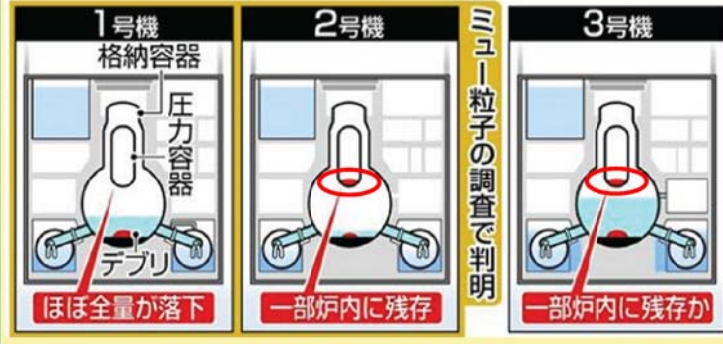


2.溶融固化した硬いデブリはボーリングで多数の穴を開けて砕いた（スイスチーズ工法）。

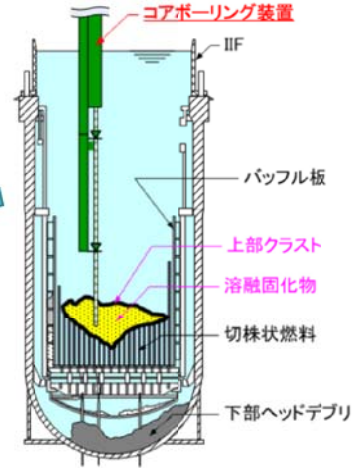


TMI-2でのデブリ取出し

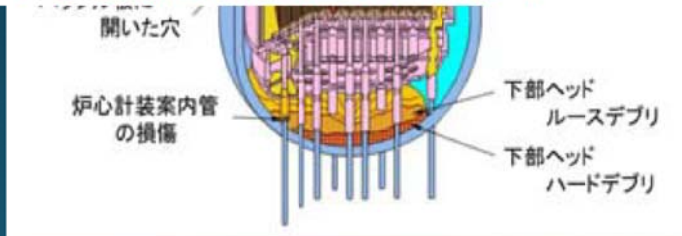
福島第一原子力発電所



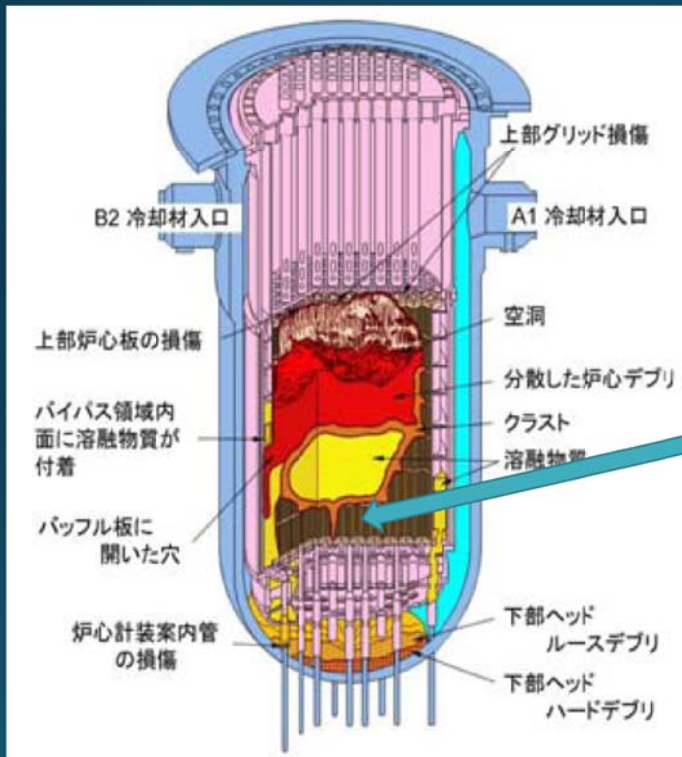
2. 溶融固化した硬いデブリはボーリングで多数の穴を開けて砕いた（スイスチーズ工法）。



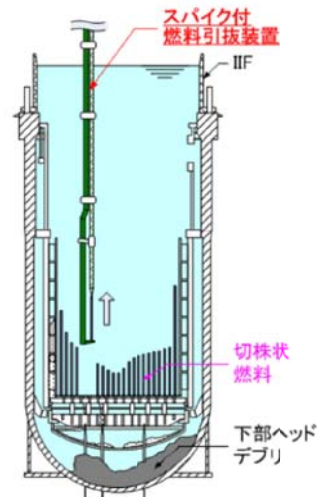
福島原発でも同様なものがあるのか？
TMI-2で取出しに手こずった！



TMI-2でのデブリ取出し



3. 切株状燃料はスパイク付燃料引抜装置で引き抜いた。

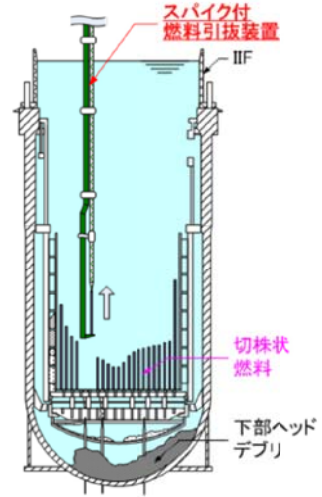


TMI-2でのデブリ取出し

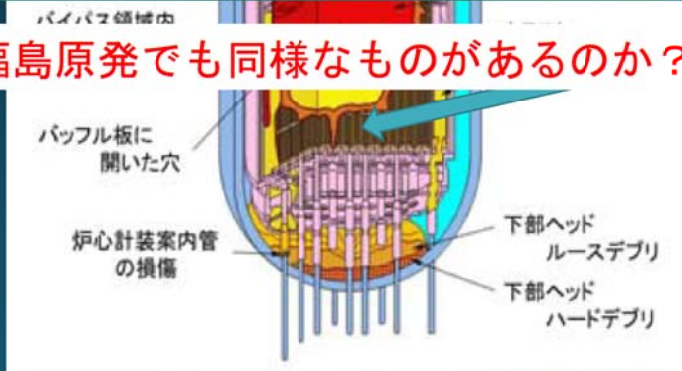
福島第一原子力発電所



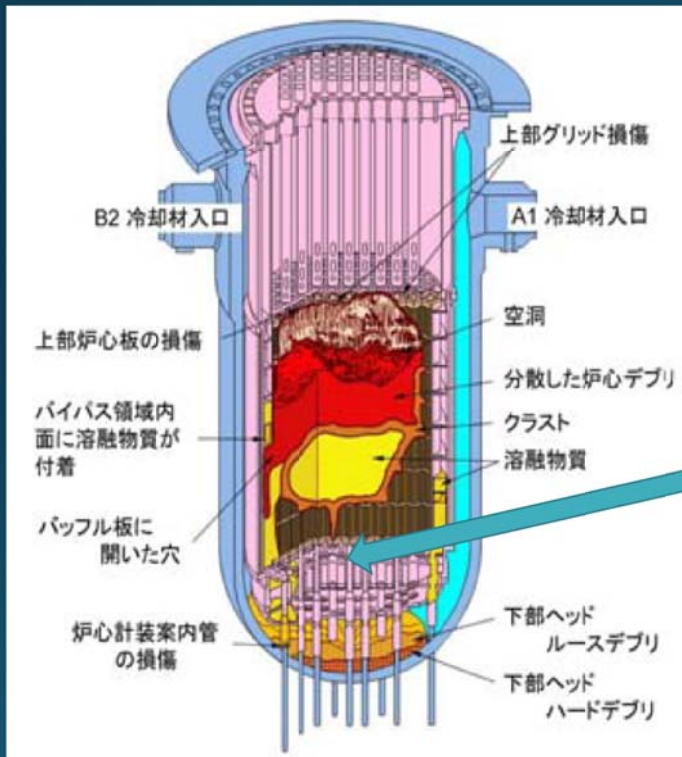
3.切株状燃料はスパイク付燃料引抜装置で引き抜いた。



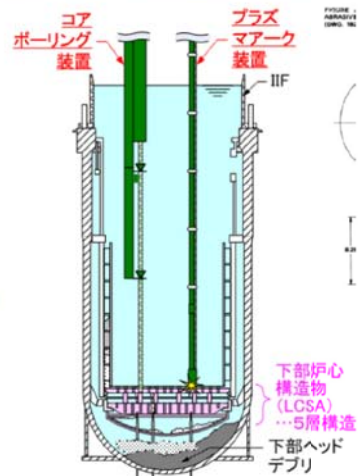
福島原発でも同様なものがあるのか？



TMI-2でのデブリ取出し



4.下部炉心構造物コアボーリングとプラズマアークによる切断を組合せて除去。



TMI-2でのデブリ取出し

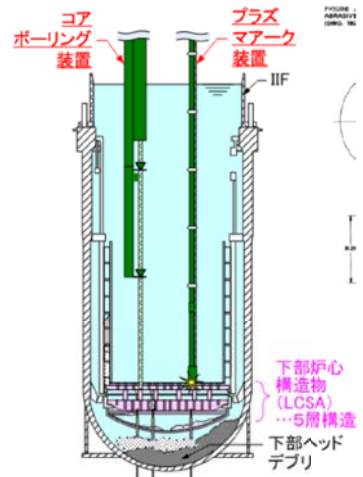
福島第一原子力発電所

VIEWING ANGLE: 90
Image1.st
ImageIndex

福島原発ではこれが膨大な量！
総量で900ton? 減量化が必要？

ハードデブリ

4. 下部炉心構造物コアボーリングとプラズマアークによる切断を組合せて除去。



TMI-2でのデブリ取出し

福島第一原子力発電所

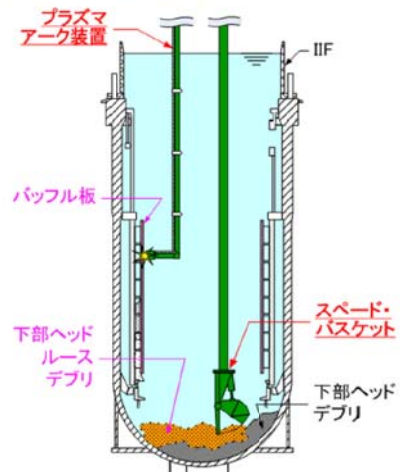
パッフル板に開いた穴

炉心計装案内管の損傷

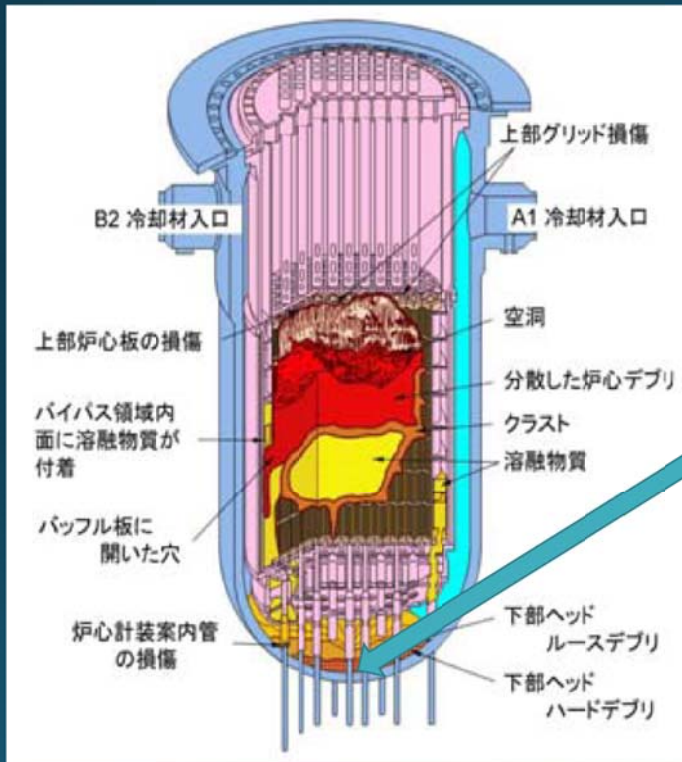
下部ヘッド
ルースデブリ

下部ヘッド
ハードデブリ

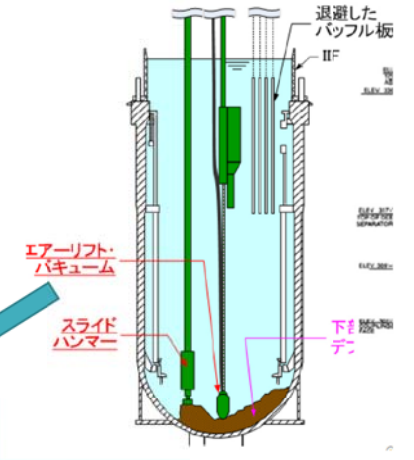
5. コアフォーマ部パッフル板はプラズマアークで切断、下部のルースデブリはバケットで回収。



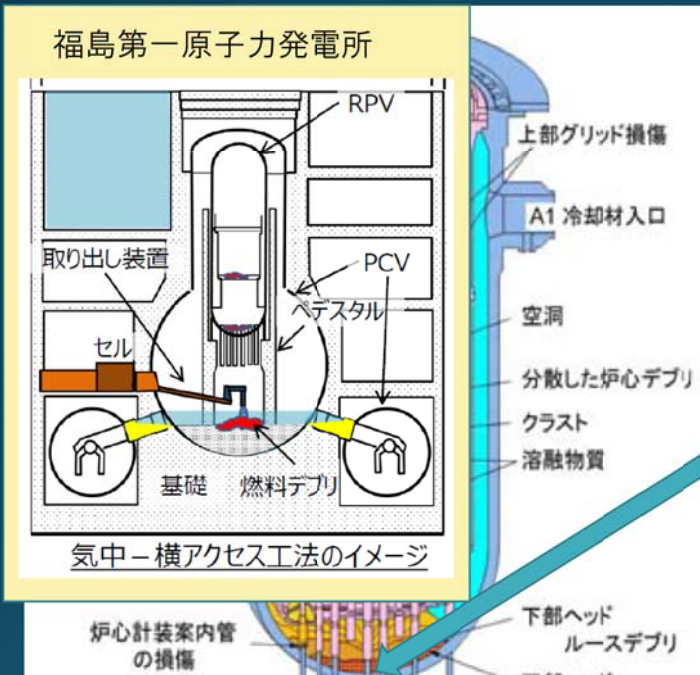
TMI-2でのデブリ取出し



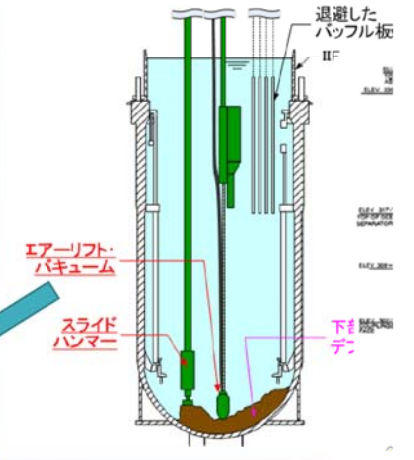
6.底部の石化したデブリはブレイカーで砕いて回収。



TMI-2でのデブリ取出し



6.底部の石化したデブリはブレイカーで砕いて回収。



福島原発でも同様なものが存在？
パーカッションで反力が大丈夫？

地盤施工学の構築方針

1) 目的（要求機能）を単純化して、**類似性を**
類型工事から学ぶ！！**管理**
（特殊性は品質管理項目等に反映）

2) 目的（要求機能）を広く捕らえて**工約**
法・材料選択の柔軟性を高める！！

目的（要求機能）を広く捕らえて工 法・材料選択の柔軟性を高める！

工事の品質を支配する4大要素

Q: Quality (狭い意味の品質)

C: Cost (原価)

D: Delivery (工期)

S: Safety (安全)

[R: Reliability (確実性)]

目的（要求機能）を広く捕らえて工法・材料選択の柔軟性を高める！

Reliability(確実性)は通常では経験的に判断できるが、廃炉では経験がないため判断が難しい。

C: Cost(原価)

D: Delivery(工期)

上流側概念に参画することにより工法・材料選択の確実性を高める。

[R: Reliability(確実性)]

遮水壁の例（あくまでも想像）

- ・要求される事項 建屋への地下水の流入を抑制したい。



- ・上流の概念：燃料デブリを冷却した汚染水が（地下水と混合されて）増加するのを防ぎたい。
- ・下流の概念：汚染水の貯蔵量（タンク建設）を増やしたくない。

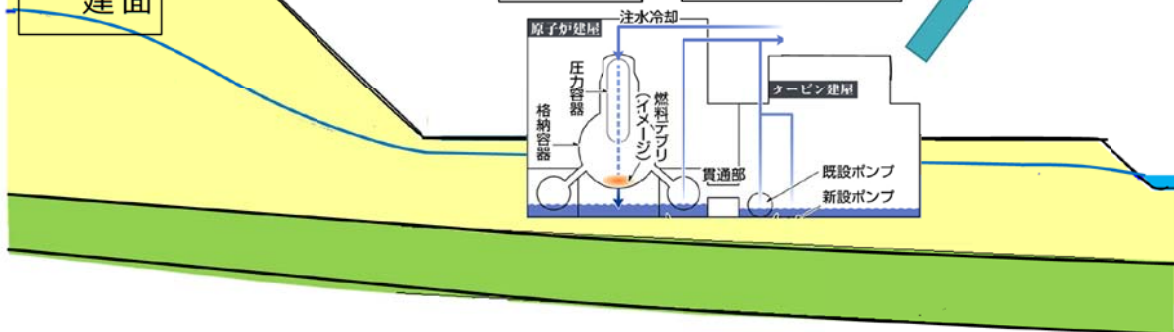
汚染水問題の捉え方

山からの地下水、地表水からの浸透水が原子力建屋周辺に流れてくる。

建屋が損傷しているため、地下水が建屋内に流入する。

格納容器が損傷しているため、デブリを冷却した水と流入地下水が混ざり合い、汚染水の量が増加する。

汚染水貯蔵タンクの増加



上流または下流の概念での対応

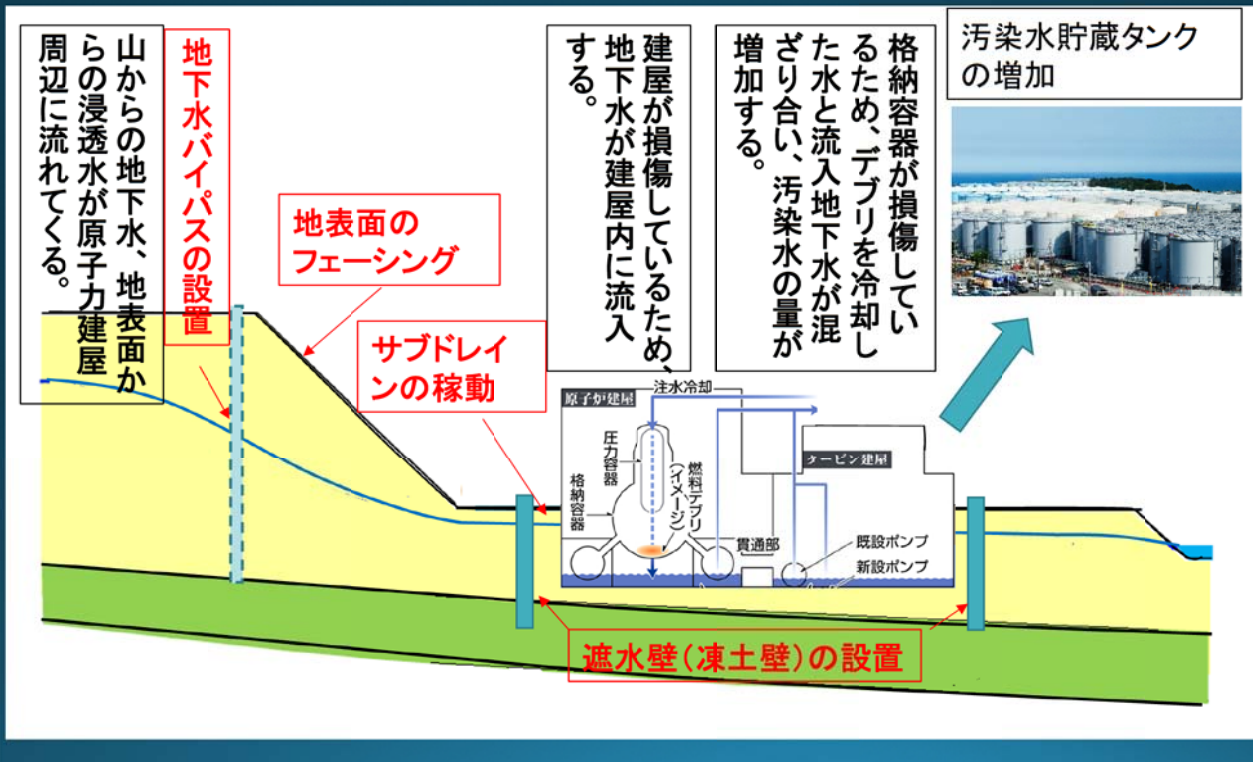
1. 上流（原因側）の概念：燃料デブリを冷却した汚染水が（地下水と混合されて）量が増加するのを防ぎたい。

- ・地下水が建屋周りに来なくする（**地下水バイパス他**）。
- ・燃料デブリに触れた水が建屋外に出なくする（**漏洩防止**）。

2. 下流（結果側）の概念：汚染水の貯蔵量（タンク建設）を増やしたくない。

- ・汚染水**貯蔵方法を変更**する。
- ・汚染水を**破棄（海中）**できるようにする。

汚染水問題の捉え方 現行の対策

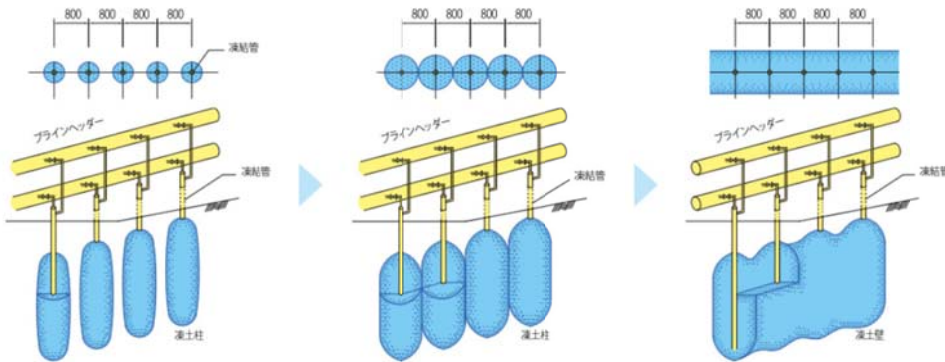


遮水（凍土）壁構築のための緒言

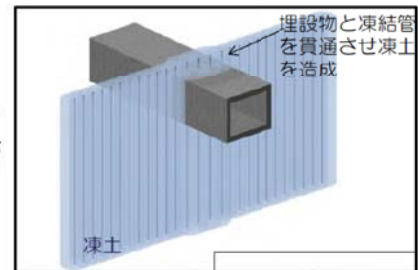
- ・要求機能：地下水の流入を抑制する。
- ・要求性能：遮水壁の遮水性
 - （材料・部材の透水係数、工法の確実性）
- ・制約条件①：高放射線環境下での施工→施工機械の規模
- ・制約条件②：輻輳する地下埋設物が存在する条件での施工
 - ・制約条件②を回避（緩和）するための選択肢
 - ・地中構造物が設置されていない（設置されているけれど数が少ない）場所に遮水壁を建設する。
 - ・地中構造物を撤去してから遮水壁を建設する。
 - ・地中構造物に影響を与えない工法で建設する。

人工地盤凍結工法による遮水壁の構築

凍結管の敷設から凍結土による遮水壁の構築まで



施工機械
小型のボーリング機械で凍結管を立て込む。



出典：(株)精研ホームページ

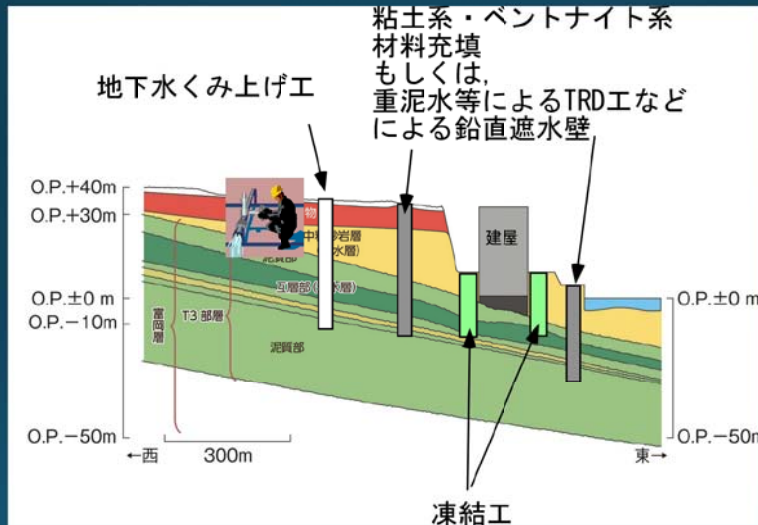
地中埋設物の問題の無いところでの対策：多重防御バリア



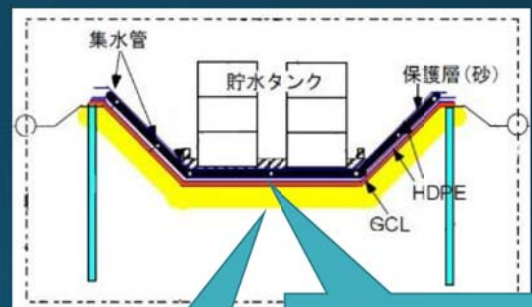
Google earth

① 汚染水・地下環境

数多くの工事経験をベースにした地下水遮水技術



汚染水貯蔵方法の変換・放出

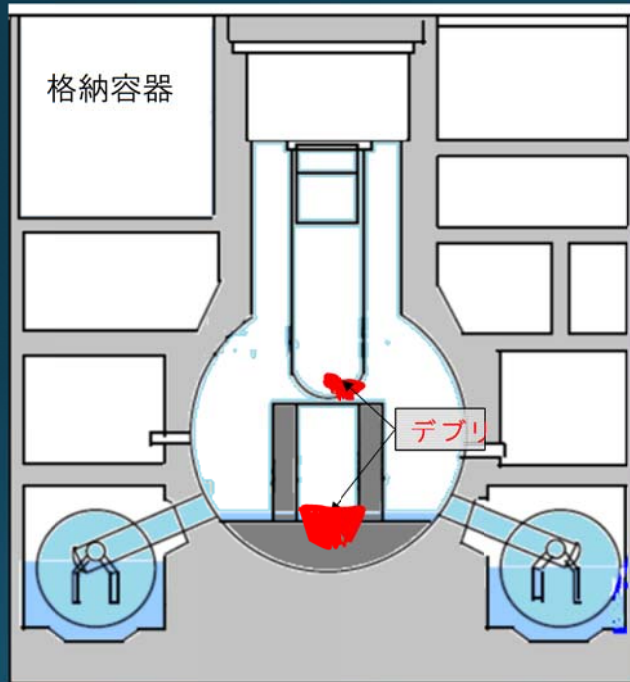


高性能止水性地盤
(地盤材料学
地盤施工学)

自己診断機能付き遮水材料
(地盤材料学)

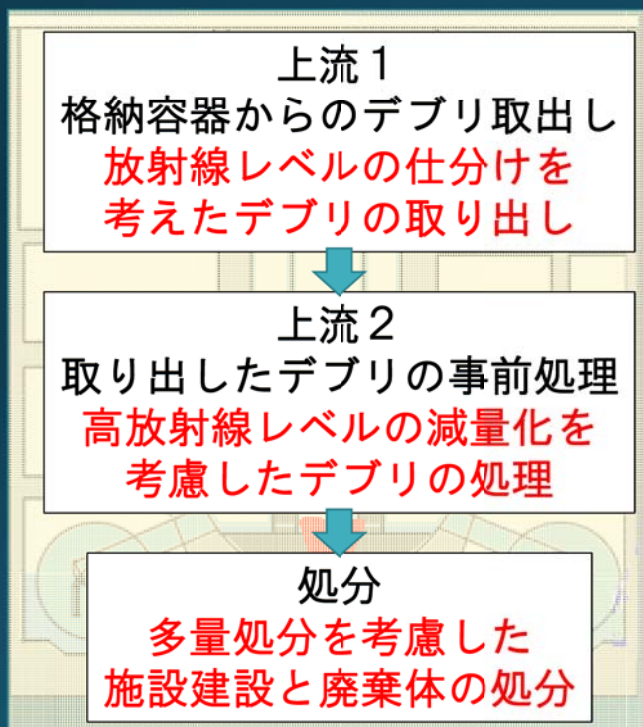
海洋投棄

熔融燃料（デブリ）処分の問題



- 格納容器からの取出し
高放射線環境での作業
無人化・IC機器の短命化
- 廃棄体としての処理
高い放射能レベル
種々雑多な廃棄物
- 地中埋設施設への移行
膨大な処分量への対応
適地確保の困難さ

熔融燃料（デブリ）処分の問題



- 格納容器からの取出し
高放射線環境での作業
無人化・IC機器の短命化
- 廃棄体としての処理
高い放射能レベル
種々雑多な廃棄物
- 地中埋設施設への移行
膨大な処分量への対応
適地確保の困難さ

取出し時のデブリの形態と工法

- ・デブリは取出し時に**形態が変化**する可能性がある
(大命題：**再臨界させない**)。
- ・デブリは**コアで抜くのか、削り取るのか？**
 - ・コア抜きの詳細方法 (**底部の縁切り他**)
- ・削り取りの**切削ズリの拡散防止と後処理方法**
- ・(**ズリを拡散させない**) **ズリ揚げ方法**
 - ・リバーサーキュレーション、エアリフト
- ・泥水と混合した**ズリの分離**
 - ・泥水シールドの処理プラント
 - ・サイクロン フィルタープレスで濃縮 (再臨界?)

原子力発電所（運転中、廃止措置）から発生する廃棄物

原子力施設	廃棄物の例	放射能レベルによる種類・区分		処分の方法
原子力発電所	コンクリート、金属	低レベル 放射性廃棄物	極低レベル L3	浅地中処分 (トレンチ)
	液体廃棄物、フィルタ 廃棄装置・資器材		比較的低レベル L2	浅地中処分 (ピット)
	制御棒、炉内構造物		比較的高レベル L1	余裕(中)深度処分 ⁽¹⁾
ウラン濃縮プラント 燃料製造プラント	廃棄装置・資機材 スラッジ		ウラン廃棄物	浅地中処分(トレンチ、ピット) 余裕(中)深度処分 地層処分 ⁽²⁾
再処理プラント MOX燃料製造プラント	燃料集合体の部品 フィルタ、液体廃棄物		TRU含有廃棄物	浅地中処分(ピット) 余裕(中)深度処分 地層処分
再処理プラント	ガラス固化体		高レベル放射性廃棄物	地層処分

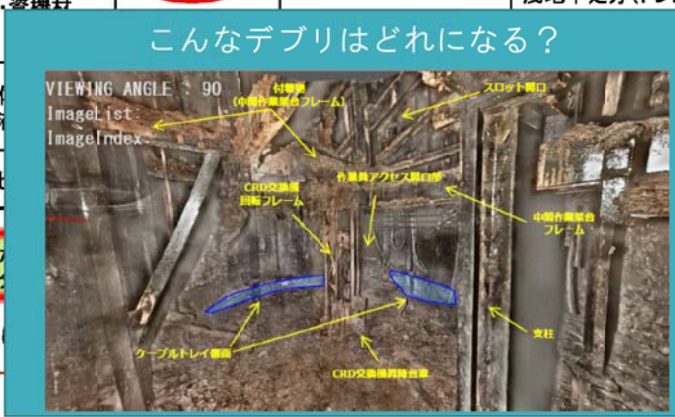
全てのプラント	廃止措置からの廃棄物の大部分	クリアランスレベル以下の廃棄物	再生利用、産業廃棄物
---------	----------------	-----------------	------------

現行規制施行(クリアランスは原子炉施設のみ)

注: (1)70m 以深 (2) 300m 以深

原子力発電所（運転中、廃止措置）から発生する廃棄物

原子力施設	廃棄物の例	放射能レベルによる種類・区分	処分の方法
原子力発電所	コンクリート、金属	発電所廃棄物 極低レベル L3 比較的低レベル L2 比較的高レベル L1 低レベル放射性廃棄物	浅地中処分 (トレンチ)
	液体廃棄物、フィルタ 廃棄装置・資器材		浅地中処分 (ピット)
	制御棒、炉内構造物		余裕(中)深度処分 ⁽¹⁾
ウラン濃縮プラント 燃料製造プラント	廃棄装置・資器材 スラッジ		浅地中処分(トレンチ、ピット)
再処理プラント MOX燃料製造プラント	燃料集合体 フィルタ、汚泥		
再処理プラント	ガラス固化体		
全てのプラント	廃止措置からの廃棄物の大部分		



こんなデブリはどれになる？

NSRF2010/ NSC(KS)

原子力発電所（運転中、廃止措置）から発生する廃棄物

原子力施設	廃棄物の例	放射能レベルによる種類・区分	処分の方法
再処理プラント	ガラス固化体	高レベル放射性廃棄物	浅地中処分 (トレンチ)
			浅地中処分 (ピット)
			余裕(中)深度処分 ⁽¹⁾
再処理プラント	ガラス固化体	高レベル放射性廃棄物	地層処分
全てのプラント	廃止措置からの廃棄物の大部分	クリアランスレベル以下の廃棄物	再生利用、産業廃棄物

処分しきれないの？

1号機

核燃料：約69トン

炉内 15ト
炉外 264ト

2号機

核燃料：約94トン

炉外のデブリ量(ト)
解析等 195ト
ミュオン調査 0~30ト

3号機

核燃料：約94トン

炉内 21ト
炉外 343ト

現行規制施行(クリアランスは原子炉施設のみ)

注: (1)70m 以深 (2) 300m 以深

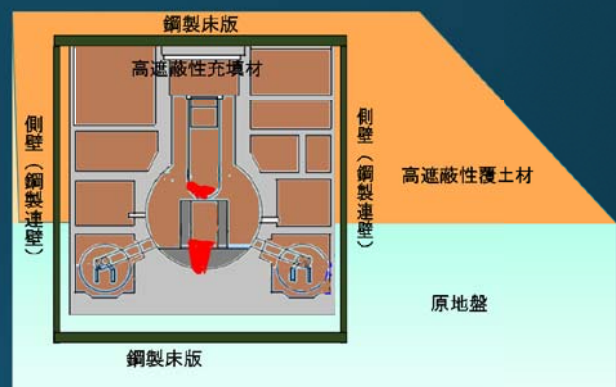
NSRF2010/ NSC(KS)

安定状態の維持： 一時的原位置安定保管

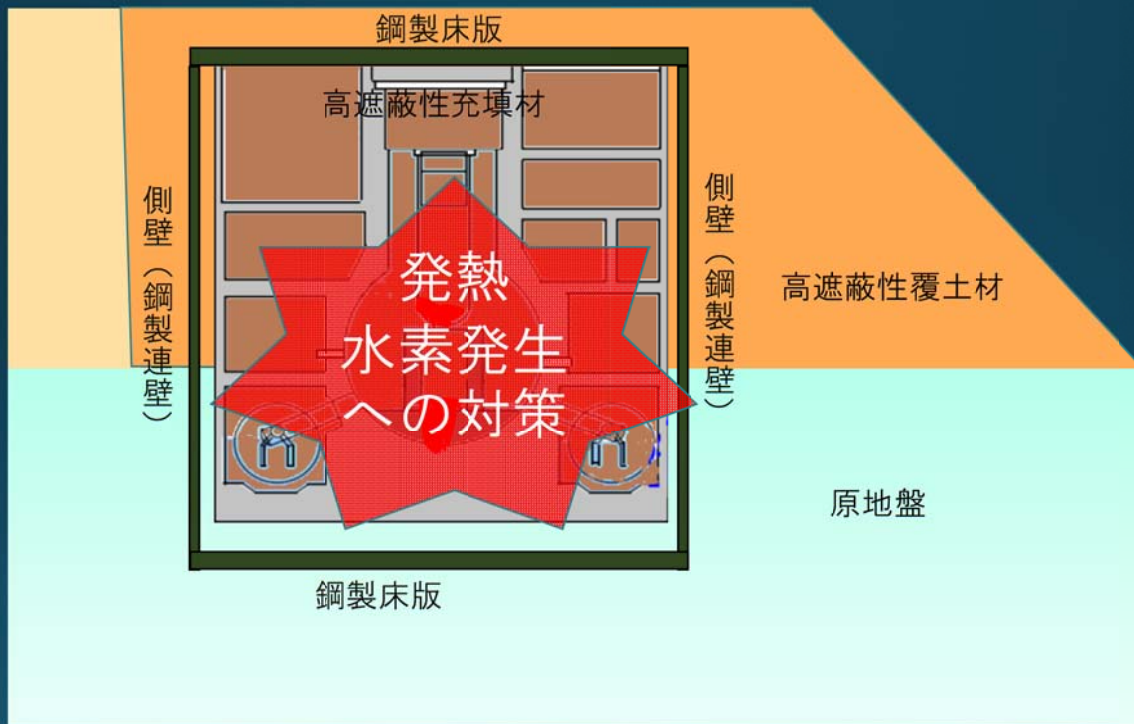
- 現状のデブリは安定状態（再臨界していない）。
- デブリの安定状態を長期間維持・管理しなければならなくなった場合。
(デブリ取出し技術の開発などに長期間を要する場合)
- 原位置封じ込め（閉じ込め・隔離）
重泥水・流動化処理土による格納容器充填
建屋外部の隔壁設置
鋼製連壁（側部）、HEP&JES（底）
課題：崩壊熱の発散、発生水素の除去

一時的原位置安定保管の可能性

- デブリの物理的安定
固体系充填材でデブリを固定できる。
- デブリの原子力的安定
中性子線吸収能力でデブリを安定させる。
- デブリの周辺環境的防護
ガンマ線遮蔽機能で周辺環境を守る。
- デブリを取り出すこともできる
再掘削可能性能によりデブリ取出しの再開が可能



一時的原位置安定保管の可能性； 解決せねばならない課題



END