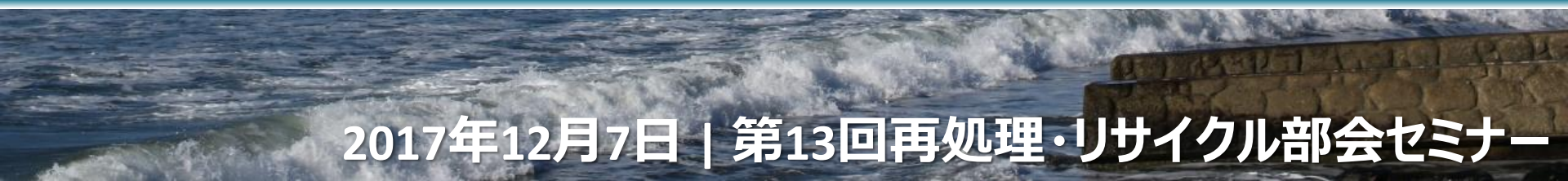




福島第一廃炉とアクチニド研究 (原子力レガシーへの取り組み)

山名 元

京都大学名誉教授,
原子力損害賠償・廃炉等支援機構(NDF) 理事長



2017年12月7日 | 第13回再処理・リサイクル部会セミナー

福島第一廃炉におけるNDFの役割

福島第一原子力発電所の廃炉に向けた関係機関の役割分担

原子力災害対策本部

事故対応に向けた政府の責務

廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議 廃炉・汚染水対策チーム

原子力損害賠償・ 廃炉等支援機構

- ・東電HDの議決権の過半数を保持

賠償支援

- ・東電HDに対する賠償支援（資金援助）
- ・東電経営のモニタリング

廃炉支援

- ・中長期的な廃炉の技術戦略の策定、政府・東電HDへの提示
(燃料デブリ取り出し、廃棄物対策)
- ・東電HDに対する助言・指導・勧告
- ・研究開発の企画・進捗管理

研究開発に係る技術支援

戦略プラン 2017 2015年～

廃炉等積立金 2018年～

プロジェクト管理 2018年～

廃炉に係る 情報発信

IRID/JAEA

経済産業大臣

廃炉推進に向けた政策

原子力規制委員会

安全規制※

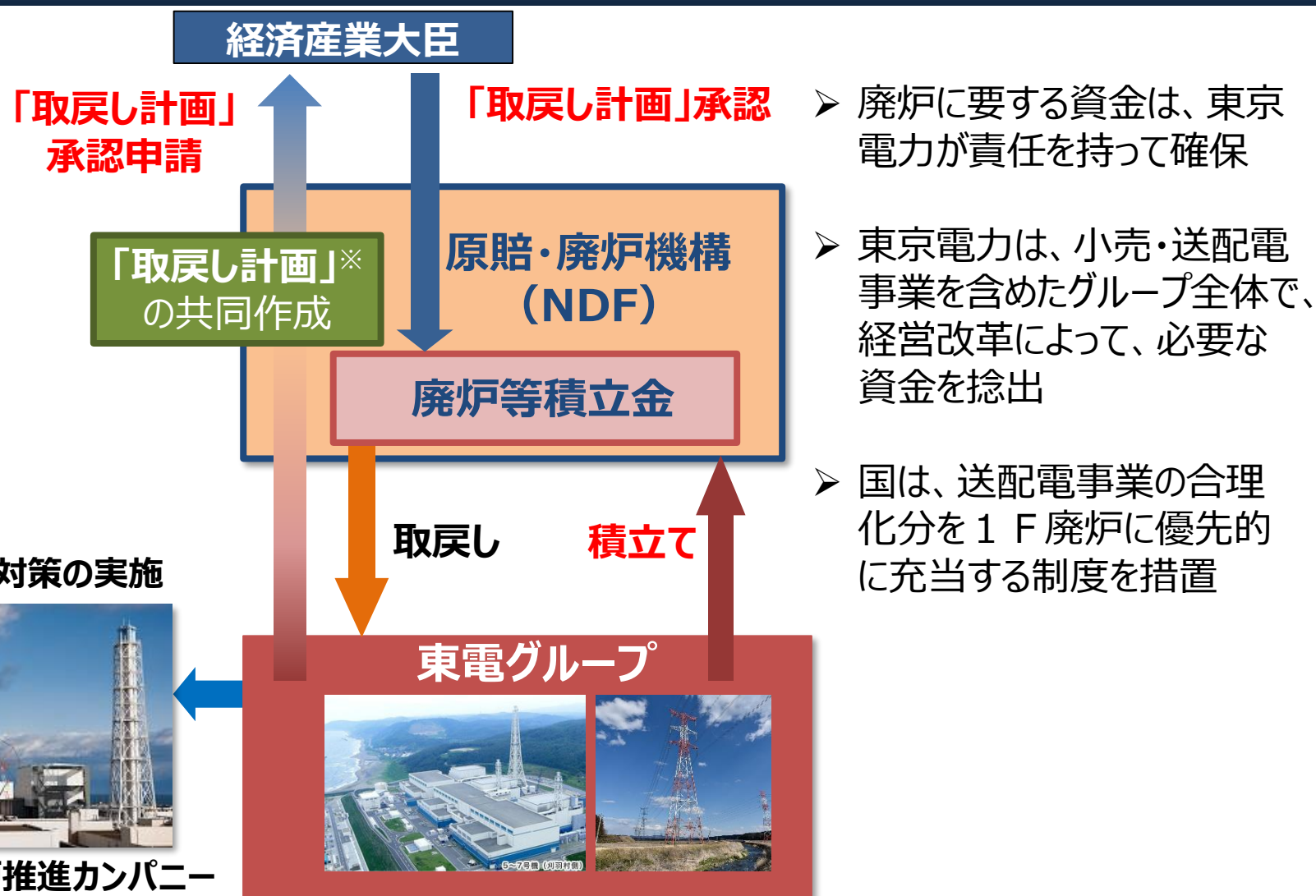
東京電力HD (福島第一廃炉 推進カンパニー)

- ・原子炉設置者としての廃炉責任
- ・NDFによる賠償支援（資金援助）を受けた電気事業の継続
- ・被災者に対する損害賠償責任

東電経営改革 (新々・総合特別 事業計画)

※ 具体的には、原子力規制委員会は、福島第一原子力発電所1～6号機を「特定原子力施設」に指定した上で、東電HDが作成した「実施計画」を審査・認可している

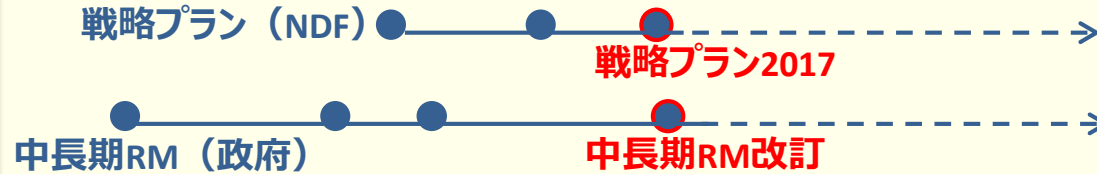
廃炉等積立金制度の創設（2017年10月～）



※ **取戻し計画**：廃炉等積立金の取戻しに関する**資金支出計画**。実質的には、支出の裏側には作業・工程が存在するため、「**廃炉の実行計画**」が作成される

中長期ロードマップ・戦略プランの沿革

戦略プラン及び
中長期RMの改
訂状況



第 1 期

第 2 期

第 3 期

2011

2016

2017

2021

2023

改訂前の中長
期ロードマップに
おけるマイルス
トーン

燃料デブリ取り出し

各号機を取り
出し方針決定

初号機を取り出し
方法確定

取り出し開始

廃棄物対策

処理・処分に関する
基本的考え方

処理・処分の方策とその安全性
に関する技術的な見通し

中長期RM改訂（2017年9月）による新しいスケジュール

改訂後の中長期
ロードマップにおけ
るマイルストーン

使用済燃料
プール内の燃
料取り出し

3号機取り出し開始

1号機取り出し開始
2号機取り出し開始

燃料デブリ
取り出し

初号機の燃料デブリ取り出し方法の確定

初号機の燃料デブリ取り出しの開始

小規模な取り出し作業に先行して着手

廃棄物対策

処理・処分の方策とその安全性に関する技術的な見通し

福島第一の現状と廃炉戦略

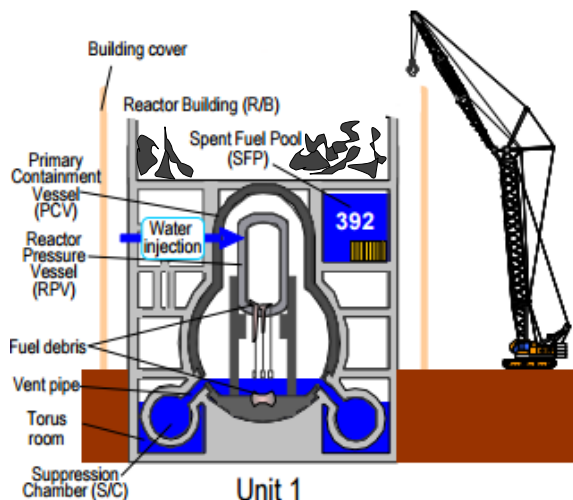
福島第一原子力発電所の最新の状況

構内, 安定化および改善済
高リスク源, 除去済
使用済燃料取り出し, 実施中
廃棄物の安全保管, 進行中
炉内調査, 着手済
燃料デブリ取り出しおよび廃棄物管理のための
基本プラン, 策定済

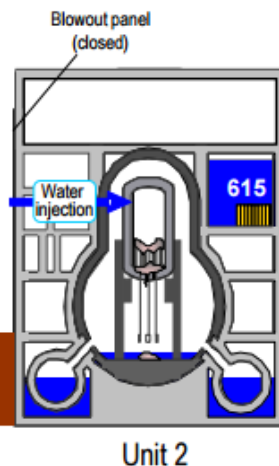


4つの事故炉の現在

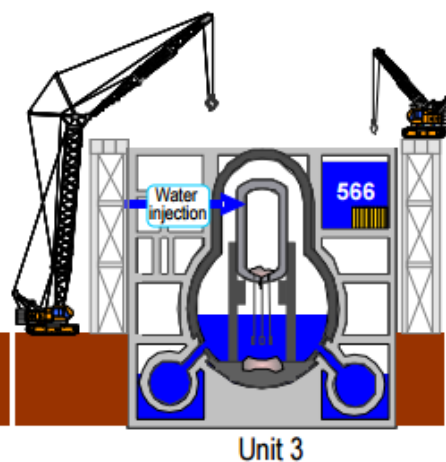
1号機



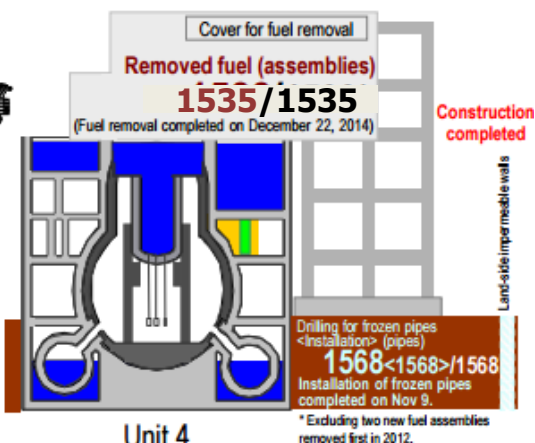
2号機



3号機



4号機



ガレキ除去, 実施中



構台設置, 完了



使用済燃料取り出し用カバー,
設置工事中



使用済燃料取り出し,
2014年に完了

出典: 東京電力ホールディングス

無断複製・転載禁止 原子力損害賠償・廃炉等支援機構

©Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation

事故直後から現在の変化

3号機 2011年



3号機 2017年 ドーム屋根



4号機 2011年

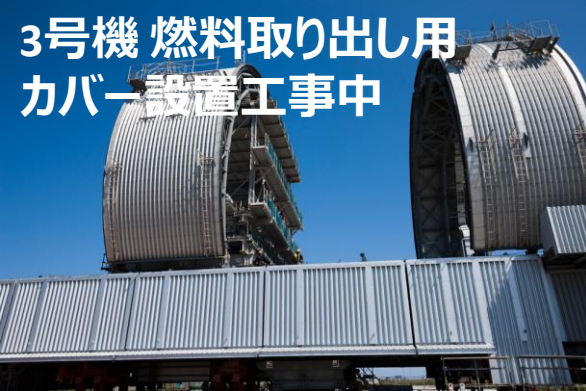


4号機 2017年



構内の改善状況

3号機 燃料取り出し用
カバー設置工事中



4号機 燃料取り出し用カバー



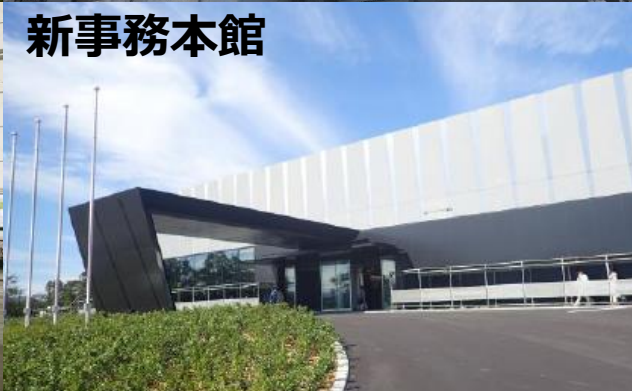
処理水保管用タンク



多核種除去設備(ALPS)



新事務本館



港湾エリア



1号機 建屋カバー解体



3号機 燃料取り出し用カバー
設置準備中

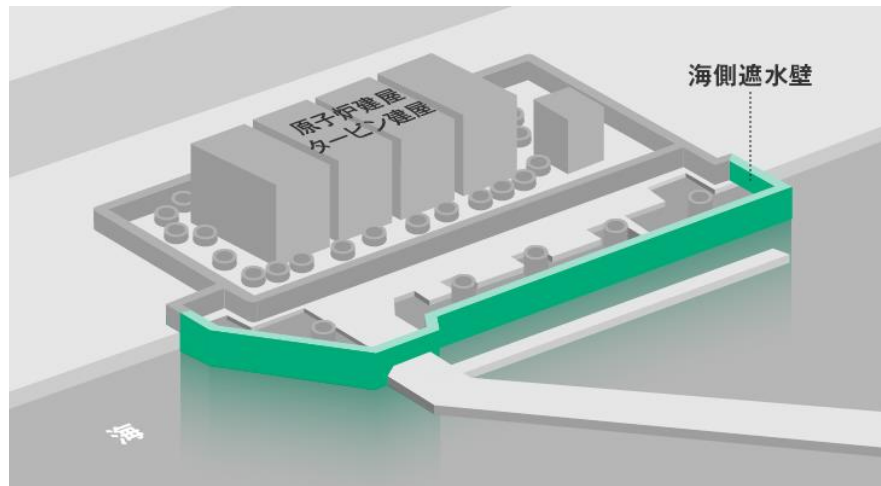


処理水保管用タンク



汚染水の閉じ込め

海側遮水壁



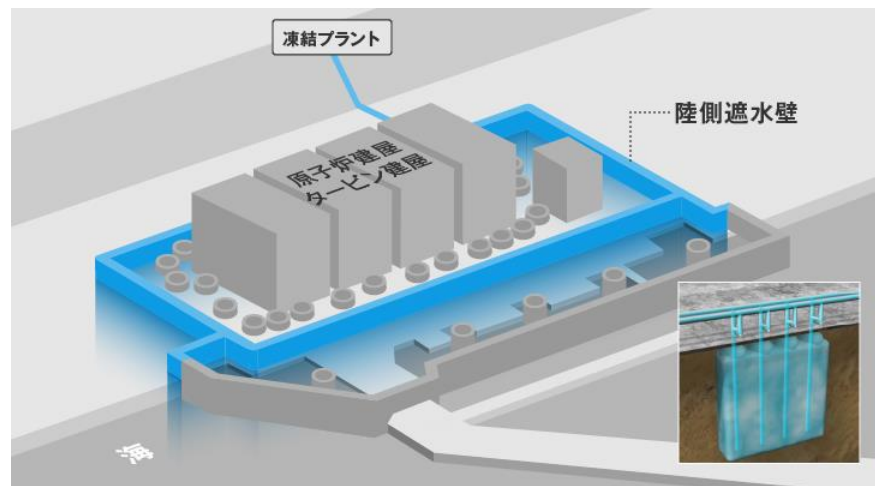
2015年7月に海側トレンチ内の高レベル汚染水を除去



サブドレン処理

サブドレンピット

山側遮水壁 (凍土壁)



海側遮水壁

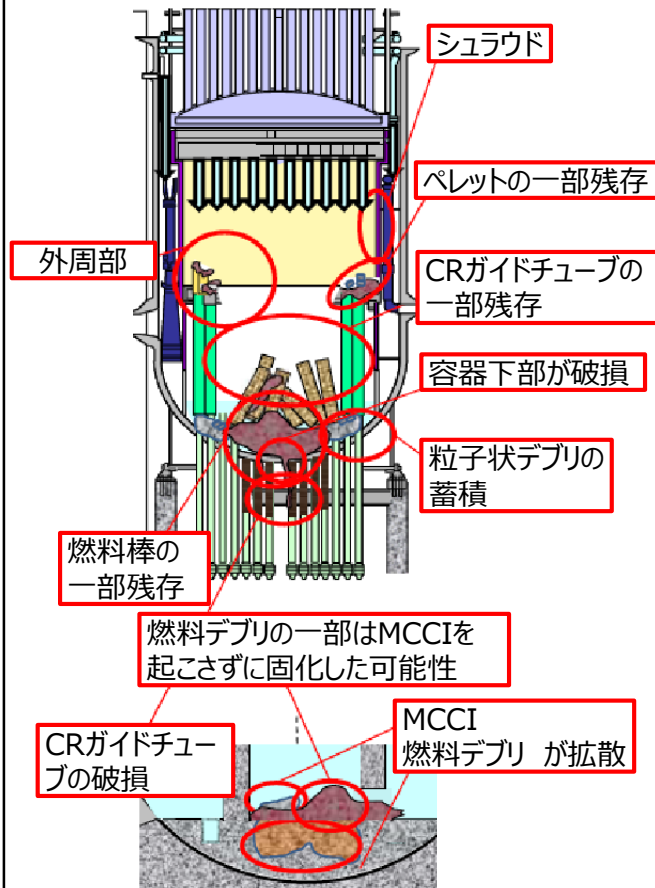


冷凍プラント建屋

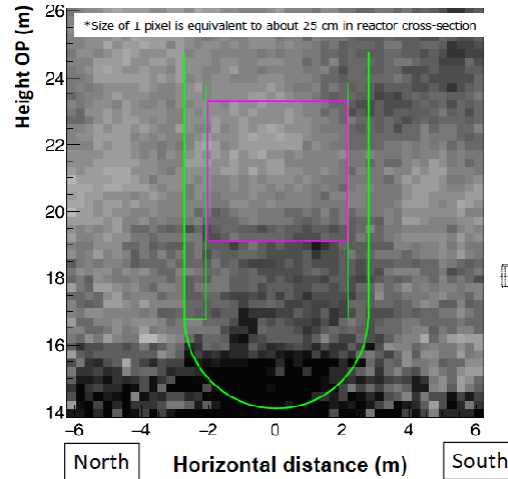
原子炉内状況の把握

シビア・アクシデント 解析コード

MAAPやSAMPSONから推測される状況



ミュオン測定

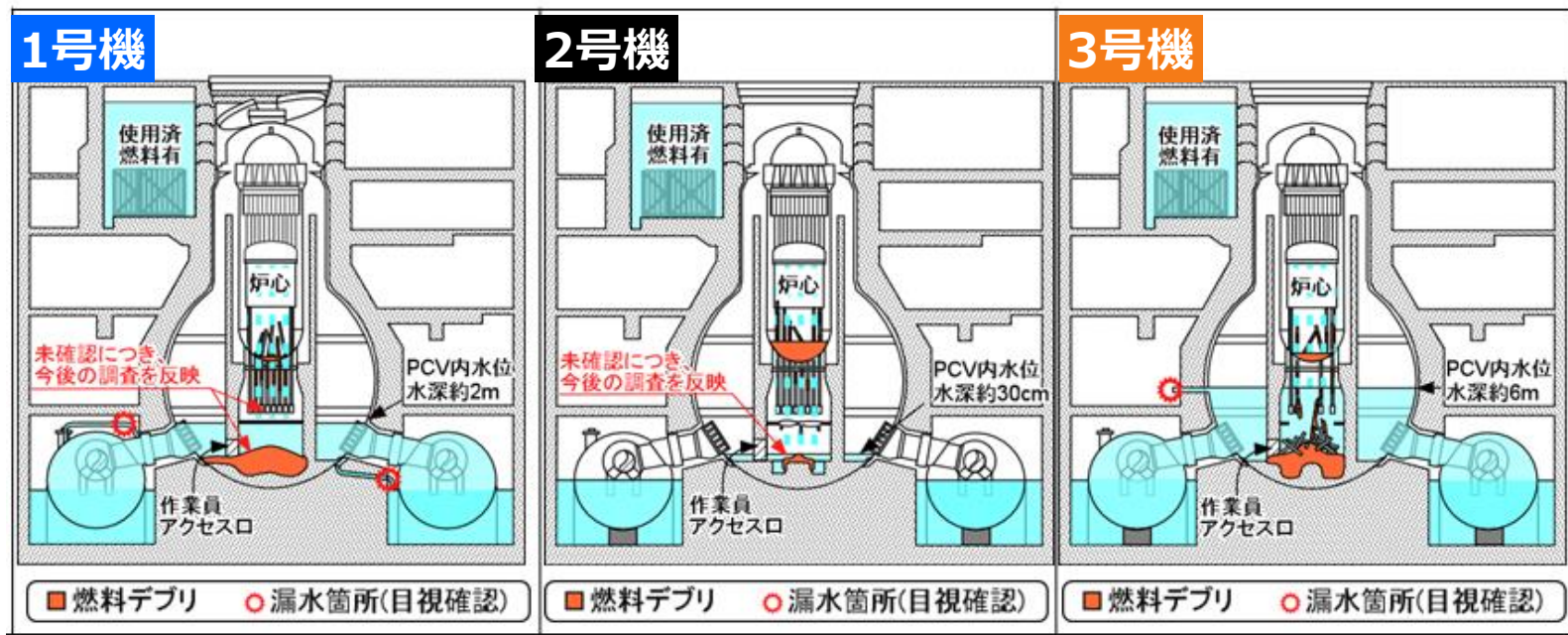


<http://photo.tepco.co.jp/en/index-e.html>

遠隔調査



号機ごとのプラント状況



最も確からしい燃料デブリ分布

- | | |
|-----|-------------------------------|
| 1号機 | 格納容器の底に大部分が存在 |
| 2号機 | 炉心の底に多くが存在する一方で、格納容器の底にも少量が存在 |
| 3号機 | 格納容器の底に、2号機と比較して多くが存在 |

考慮に入れるべき主要な要素

- 燃料デブリの場所と分布
- 格納容器 (PCV) 内水位の管理
- 作業員の被ばく量の低減及び安全
- 燃料デブリへのアクセス性(負荷・時間)
- 放射性ダストの飛散防止
- 汚染水管理
- 耐震性、臨界等
- 燃料デブリ取り出し工法の実現性

燃料デブリ取り出し戦略

【燃料デブリ取り出しには、安全性を最優先に周到な準備が必要】

- 1 : 放射性物質を漏らさない
- 2 : 作業員に被ばくさせない
- 3 : 燃料デブリを安全に回収

技術要件

地震時における格納容器（PCV）や建屋の健全性維持

労働安全の確保

作業員被ばく低減（除染・遮へい）

放射性物質の閉じ込め機能の確保（上アクセスの場合）

閉じ込めの確保と燃料デブリへのアクセス（横アクセスの場合）

燃料デブリ取り出し装置の開発

再臨界の防止

格納容器（PCV）内及び建屋内水位管理

結 論

燃料デブリ取り出し工法として、以下に軸足を置いて取組を進める

横アクセス

気中

理由

格納容器上部に貫通部が多く存在
- 止水技術の開発難易度が高い
- 総作業員の被ばく量が過大

最近の内部調査から、格納容器下部の知見が蓄積

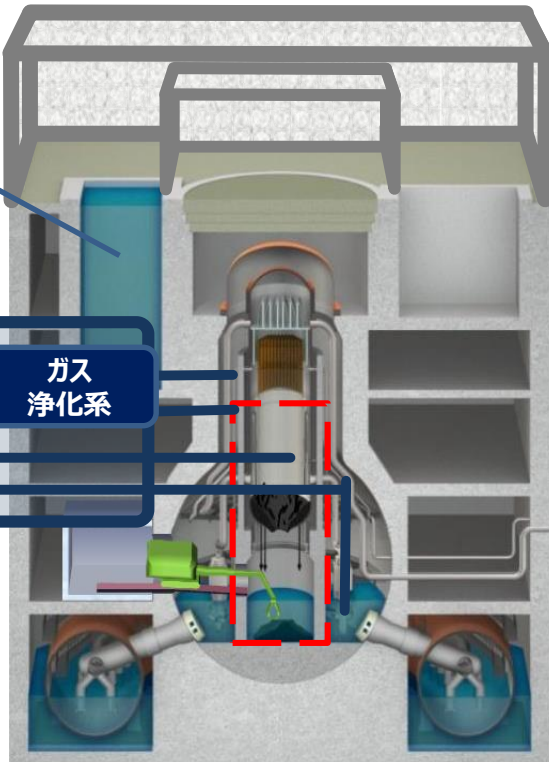
使用済燃料プールからの燃料取り出しと並行して進められる

使用済燃料プール

高性能フィルタ

ガス浄化系

水循環浄化系



固体廃棄物に関する取組

固体廃棄物の特徴

これまでに、約35万m³※が保管

- 通常炉と比べて発生量が大量
- 比較的高線量
- 核種組成や放射能濃度は、通常炉と比べて多様
- 水処理二次廃棄物には、日本で処理・処分実績がない材料も多く含有
- 処分の検討に不可欠な固体廃棄物の全体の発生量・性状は、今後の廃炉作業の進捗等により順次明らかになっていく

※ガレキ類や伐採木等に関するものであり、水処理二次廃棄物は含まないことに留意

ガレキ（鉄、コンクリート）、伐採木等、
土壌、可燃物、水処理二次廃棄物、
燃料デブリ取出工程で生じる廃棄物等、
解体で生じる廃棄物

固体廃棄物の管理の方針

- ◆ 処分の見通しを得るまでの間は、性状把握、保管・管理、先行的処理等に重点

当面の取組と研究開発

- ❖ 固体廃棄物の発生低減
- ❖ 固体廃棄物の減容処理
- ❖ 性状把握の推進
- ❖ 保管・管理の徹底
- ❖ 処分を念頭に置いた先行的処理方法の選定手法の構築
- ❖ 継続的な運用体制の構築
- ❖ 作業員の被ばく低減対策等

廃棄物貯蔵施設の整備



原子力レガシーとアクチニド研究

アクチノイド研究

Naming Four New Elements

indium 114.8	tin 118.7	antimony 121.8	tellurium 127.6	iodine 126.9	xenon 131.3
81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
113 Nh nihonium	114 Fl flerovium	115 Mc moscovium	116 Lv livermorium	117 Ts tennessine	118 Og oganesson

出典：Chem-Station



出典：東京電力ホールディングス

- 化合物, 錯体, 配位化学, および有機金属
- 計算科学
- 凝縮系物理
- 検出および分析
- 環境科学
- 冶金学および材料科学
- 溶液および気相化学
- 分光分析
- 表面科学および腐食
- 超アクチノイドおよび超重元素



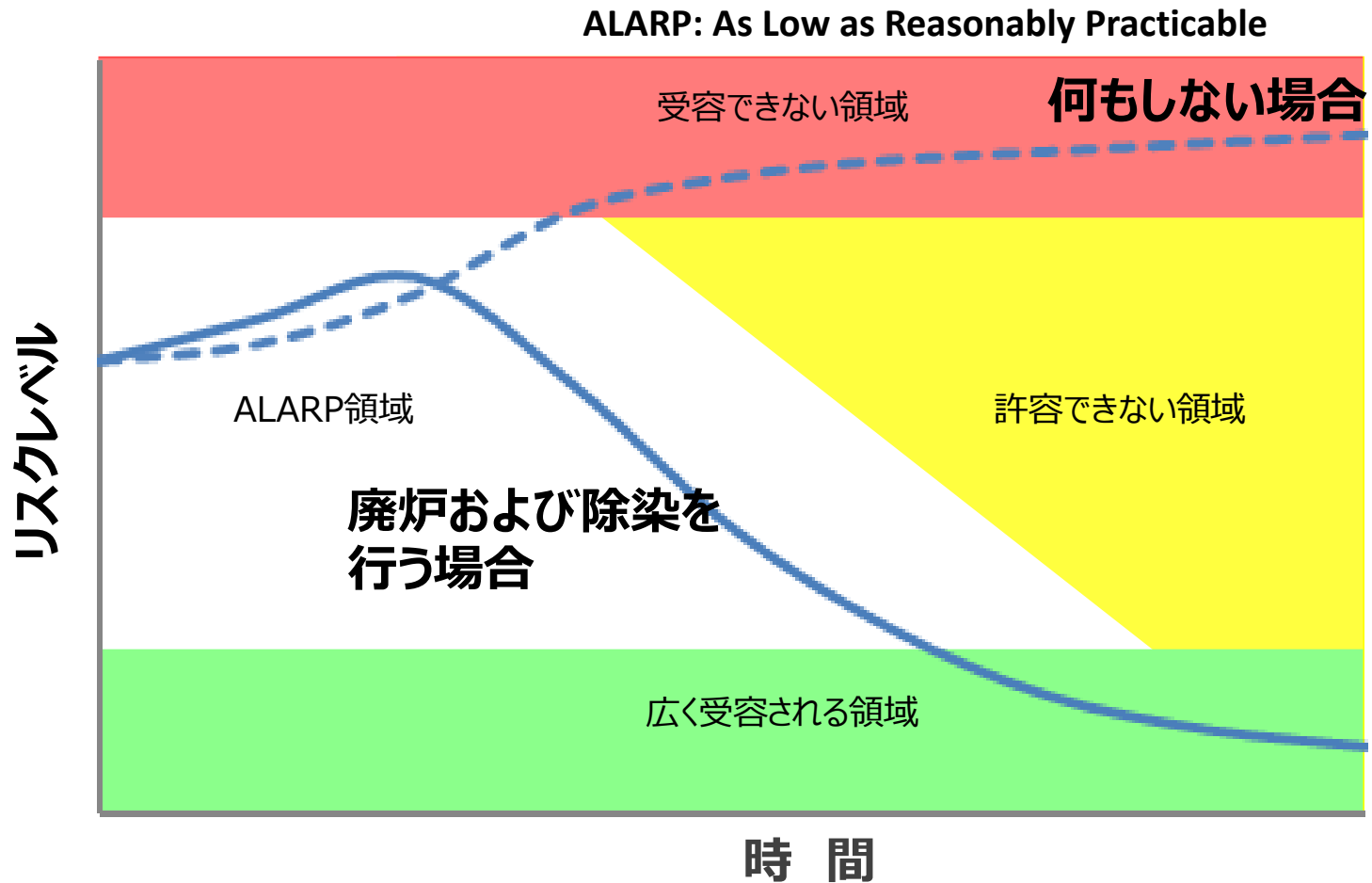
- 核燃料サイクル
 - 再処理
 - 核燃料
 - 廃棄物処分
 - 分離・変換
- 原子力レガシー
 - 環境修復
 - 廃炉
 - 安定化および隔離



原子力レガシー

- 核兵器生産のために汚染したサイト
 - 核兵器製造および核実験から発生したレガシー廃棄物の保管
 - 民生の燃料サイクル活動により発生した詳細不明の廃棄物の蓄積
 - 事故により深刻な損傷を受けた原子炉
 - 操業を終了した燃料サイクル施設
 - 使用を終了した研究施設 (研究炉, ホットラボ施設など)
 - ウラン鉱石の古い採鉱および選鉱施設
-
- 事故により発生した燃料デブリ
 - 事故炉の廃炉から発生した廃棄物 (構成材およびコンクリートなど)
 - 事故により汚染した土壌および地下水
 - 過酷事故から放出された大気浮遊性アクチニドによる広範囲な汚染
-
- 行き過ぎた操業によって生じた製造物の過剰保管 (使用済燃料, 回収ウラン, 余剰核兵器, 高レベル放射性廃棄物, 等)

リスクの時間変化 (原子力レガシー)



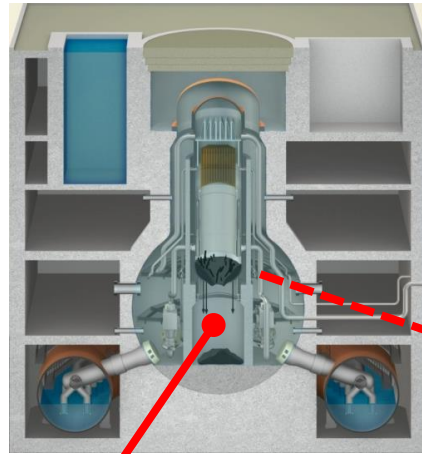
Reference: V. Roberts, G. Jonsson and P. Hallington, "Collaborative Working Is Driving Progress in Hazard and Risk Reduction Delivery at Sellafield" 16387, WM2016 Conference, March 6-10, 2016.

M. Weightman, "The Regulation of Decommissioning and Associated Waste Management" The 1st International Forum on the Fukushima Decommissioning (April 2016).

燃料デブリ

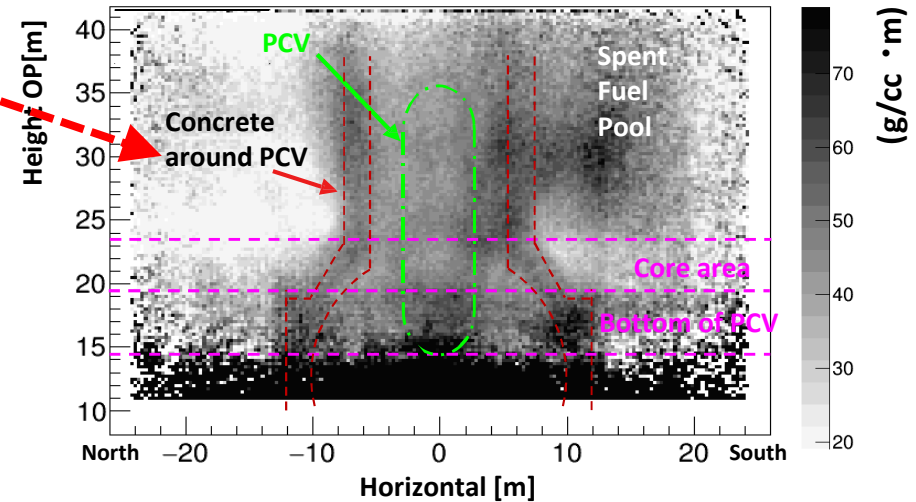
2号機の内部調査

ロボット調査



PCV内部調査が行われ、グレーチングの脱落および落下物が認められた。(2017年2月)

ミュオン測定による調査



ミュオン測定により、燃料デブリとみられる高密度物質がRPV底部および炉心の下部と外周部に確認された。(2016年7月)

燃料デブリの安全な取り出しに向けた戦略

- 放射性物質の漏えい防止
- 作業者への被ばく防止
- 燃料デブリの安全な取り出し

作業安全の確保

地震時のPCVおよび原子炉
建屋の構造健全性の確保

燃料デブリ取り出し機
器の開発

閉じ込め機能および燃料デブリ
へのアクセスルートの確保
(横アクセス工法)

閉じ込め機能の確保
(上アクセス工法)

作業者の線量低減
(除染, 遮へい)

気体浄化
システム

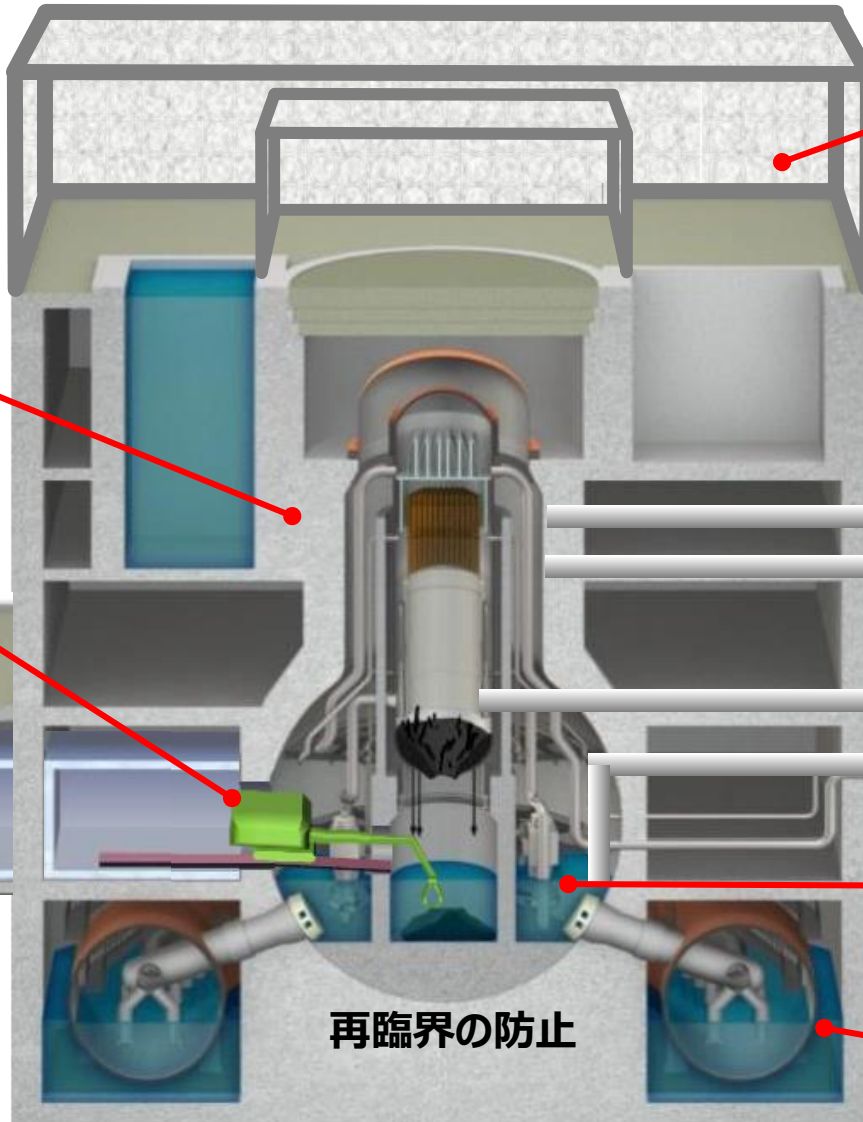
高性能
フィルター

水浄化
システム

PCV内の水位管理

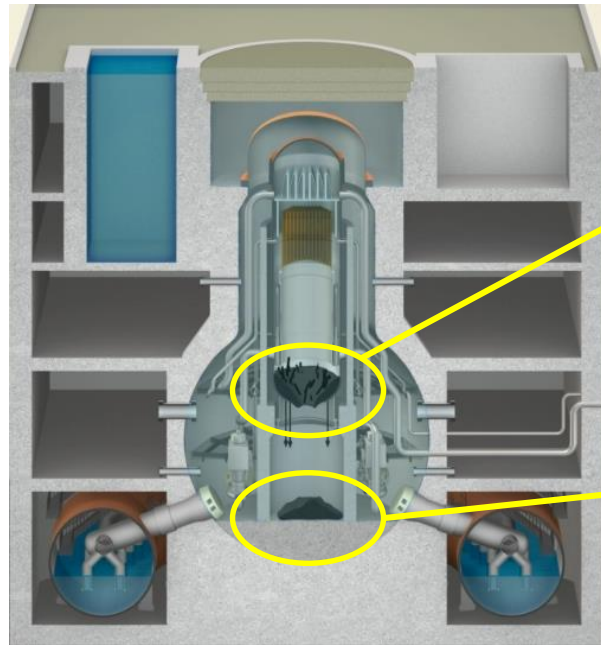
原子炉建屋内の
水位管理

再臨界の防止



福島第一原子力発電所の燃料デブリの予想

残存している燃料デブリの化学組成および特性は不明



炉心構成要素

- 燃料: UO_2 , PuO_2 , FP_xO_y
- 被覆管: Zr
- 制御棒: B_4C , Fe, Cr, Ni

燃料デブリ

$(\text{U}, \text{Zr})\text{O}_x$, $(\text{U}, \text{Zr}, \text{M})\text{O}_x$,
 $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Ni})_x(\text{U}, \text{Zr})$,
 $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Ni})_x\text{B}$,
M: 構造材の構成元素

MCCI生成物

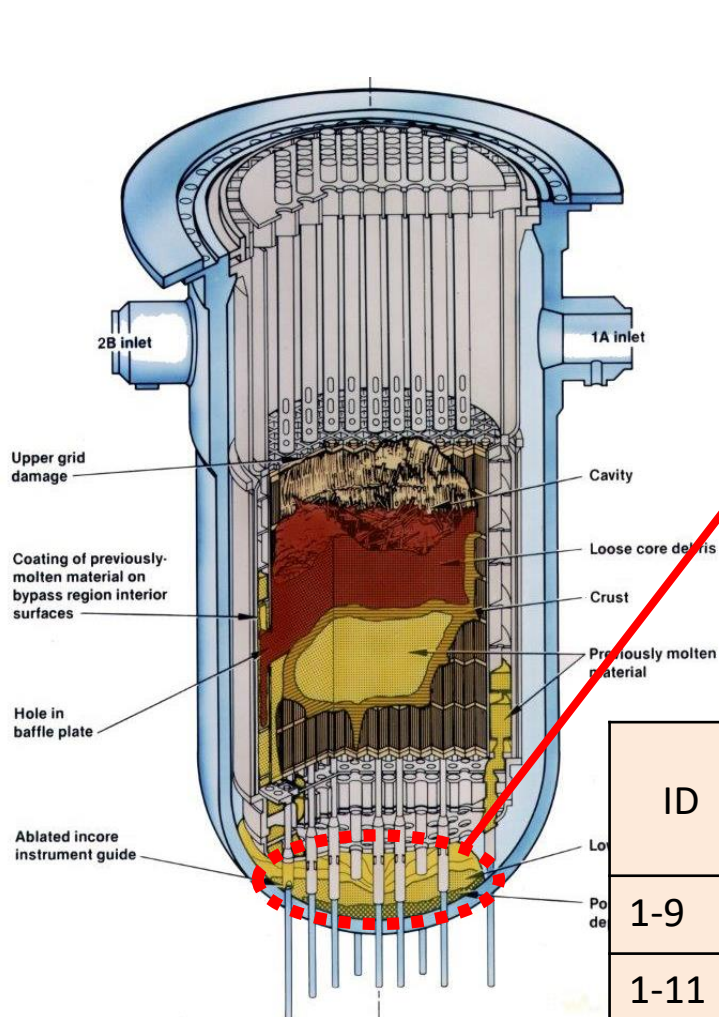
- コンクリート: CaO , SiO_2 ,
 Al_2O_3

$(\text{Zr}, \text{U}, \text{Ca})\text{O}_2$,
Al-Ca-O
Fe-Si-(Zr,U)-Al

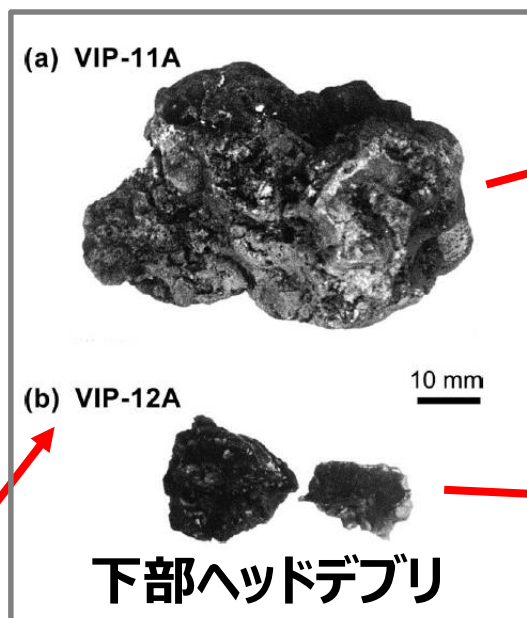
燃料デブリの特性把握の必要性

- 安全な取り出しの確保
- 保管の設計
- 最終処理・処分の検討
- 化学および相組成
- 形態
- 物理特性 (硬さ, 破壊靱性, 弾性係数, 等)
- 熱特性
- 機械特性
- 核特性 (臨界管理)
- 廃棄物としての健全性

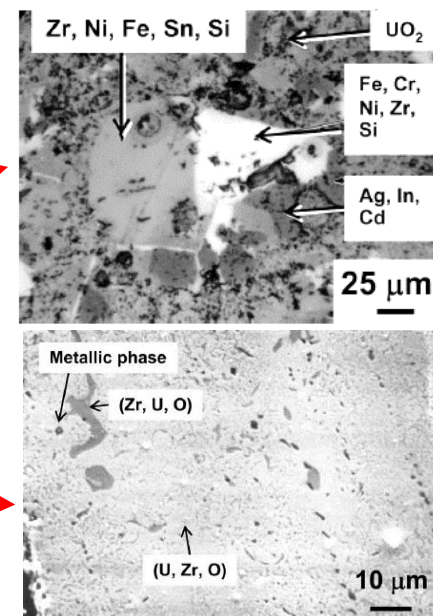
スリーマイル島原子力発電所2号機(TMI-2)の燃料デブリ



炉心の最終状態



下部ヘッドデブリ

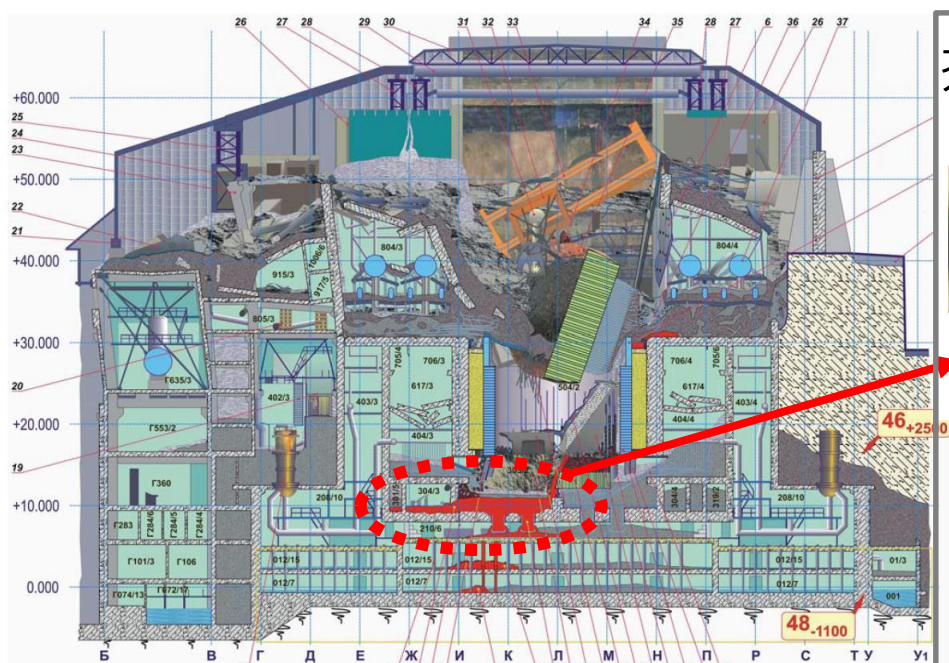


下部ヘッドデブリの化学組成

ID	密度 (g/cm ³)	平均デブリ組成 (wt%)						
		U	Zr	In	Cr	Fe	Mn	Ni
1-9	9.40	72.3	14.1	0.28	0.33	0.74	0.030	0.099
1-11	8.62	70.8	12.0	0.26	0.26	0.53	0.026	0.081
1-12	8.18	68.2	15.2	-	0.52	0.93	0.028	0.10

出典: Nagase et. al., J. Nucl. Sci. Mater., Vol. 49, No.1 (2012). NUREG/CR-6195 TMI V(92)E10 EGG-2732 (1994).

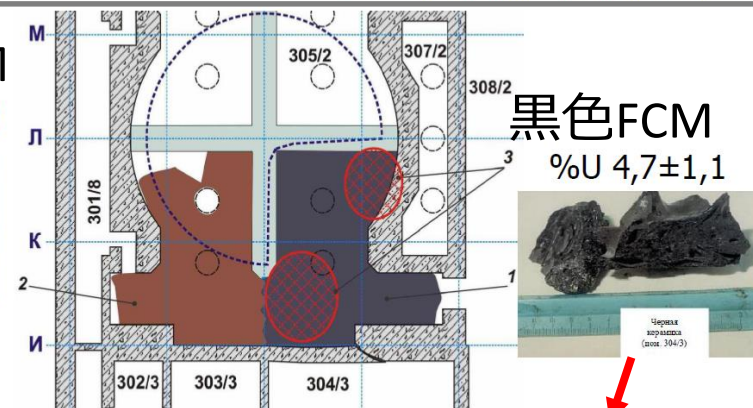
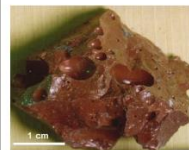
チェルノブイリ原子力発電所4号機の燃料デブリ



チェルノブイリ・シェルターの断面図

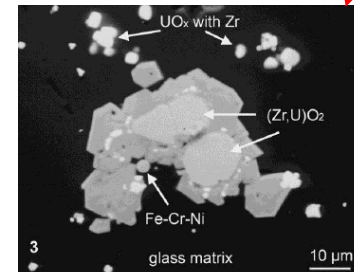
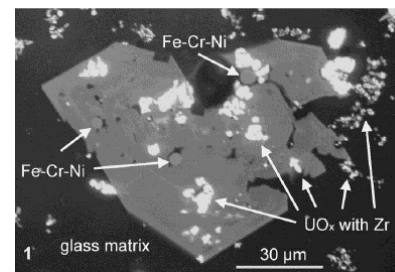
茶色FCM

%U $8,4 \pm 0,2$



黒色FCM

%U $4,7 \pm 1,1$



SEM-BSE像

FCMの化学組成

*FCM: Fuel Containing Materials, 燃料含有物質

溶岩状FCMのタイプ	U	Zr	Fe	Na	Si	Al	Mg	Ca
黒色FCM	4 - 5	2 - 6	0.3 - 6	2 - 10	19 - 36	3 - 8	1 - 5	3 - 13
茶色FCM	8 - 7	5 - 6	1 - 2	4	31 - 33	4	4	5

出典: K. Dolganov, IBRAE, Handout of Workshop in The 3rd Meeting OECD/NEA BSAF-2 (2016).

B. Burakov, V.G. Khlopin Radium Institute, Handout of the 2nd Int. Forum on the Decommissioning of Fukushima Dai-ichi NPS (2017).

燃料デブリの安定性

TMI-2 デブリ (高い安定性)

- 燃料デブリは、 $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ の溶液中でも溶解しなかった。
- 燃料デブリ、カリウム重硫酸塩、安定な担体およびトレーサーとともにバーナーで加熱したときに溶解した。
- JAEAでは、燃料デブリに変化が見られなかった。

チェルノブイリ FCM (安定ではない)

- 初期は、機械的な耐久性が非常に高かった。
- 1990年頃に自己崩壊が観察された。
- 二次的なウラン鉱物が形成された。

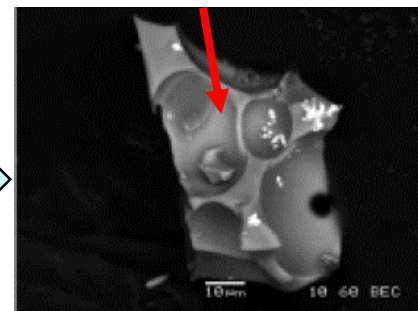


チェルノブイリ FCM

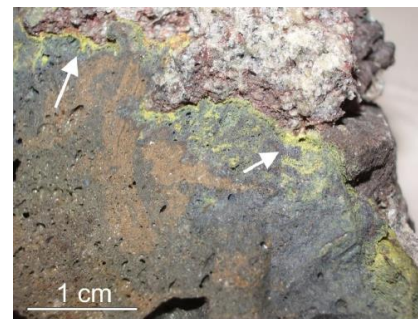


自己崩壊

ジャンピング・パーティクル



第二相形成



出典: D. W. Alers et. al., GEND-TNF-075-Pt.1, DE87 004546 (1986).

K. Dolganov, IBRAE, Handout of Workshop in The 3rd Meeting OECD/NEA BSAF-2 (2016).

B. Burakov, V.G. Khlopin Radium Institute, Handout of the 2nd Int. Forum on the Decommissioning of Fukushima Dai-ichi NPS (2017).

特異な物質へのアプローチ

研究目的

- ・ 廃炉および環境回復のより良い戦略と方法論を創るための確かな科学的根拠の確立
- ・ 特有なあるいは詳細不明な化合物を管理するための性状把握
- ・ アクチニド分布のマッピング
- ・ 回収したアクチニドを安定化あるいは固定化するための適切な化学的方法の探索
- ・ SA 解析コードの改良に反映するための鑑識的な評価
- ・ 物質収支の計算に向けたより良い定量化手法の確立
- ・ 放射性廃棄物の確実かつ安全な処分にに向けた戦略の確立

実験

- ・ レガシー施設から採取した実サンプルを用いた観察調査が必要
- ・ 現実的な条件下の模擬実験によって解析評価を支援

化学的関心

- ・ 高温における多元系反応の熱力学
- ・ 事故時の急激に変化した過酷条件下における反応速度および相変化
- ・ アクチニド特有の化合物の機械的・熱的特性
- ・ 回収した物質の長期劣化に関する緩慢な反応とメカニズム
- ・ 回収した物質の環境中における化学状態

研究材料

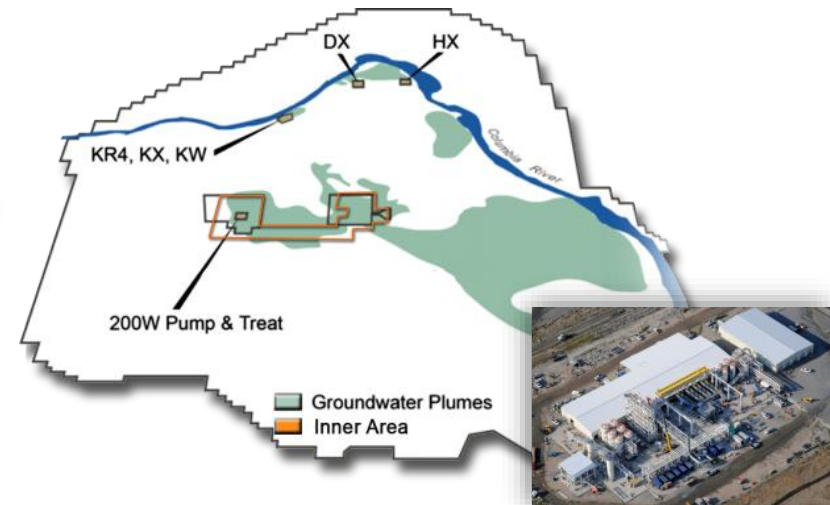
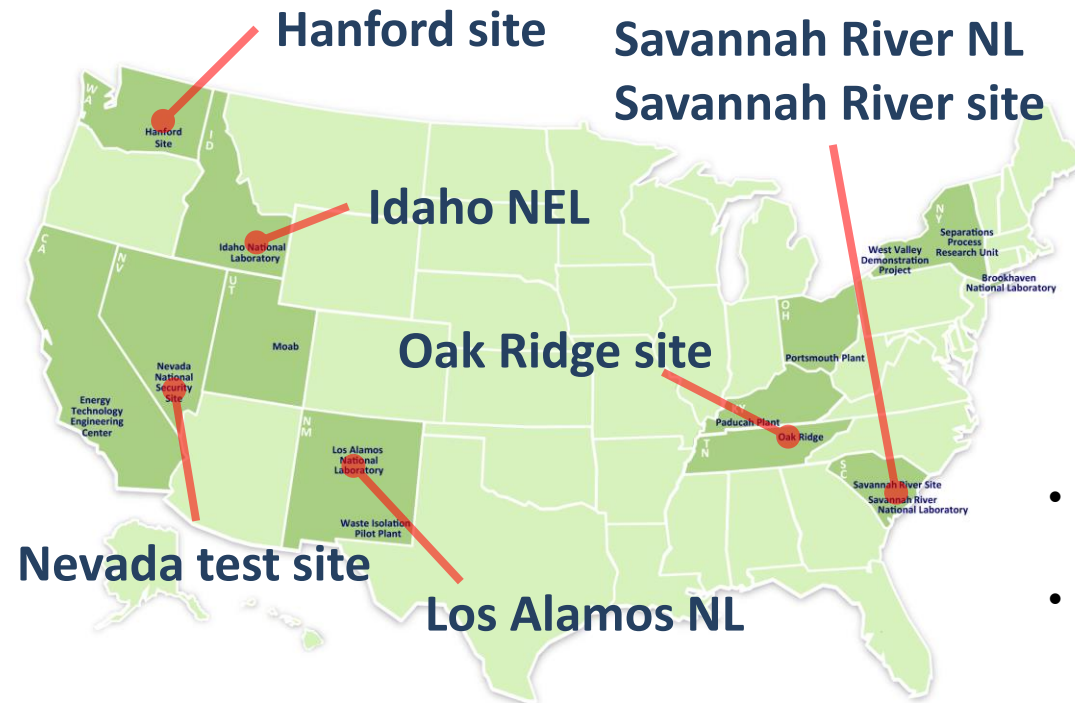
- ・ コリウムおよび燃料デブリ
- ・ MCCI 生成物
- ・ サブミクロン粒子
- ・ 粒子, 堆積物, およびスラッジ
- ・ 構造材及びコンクリート表面上に吸着した核種
- ・ Pu 生成物の同位体組成

世界のレガシーサイト

US-DOE 施設のレガシーサイト

クリーンアップ中のサイト

ハンフォードの地下水汚染



- 約60平方マイルのエリアにおいて、主要10種の汚染物質によるプルーム12か所に対策中
- 地下水から汚染除去する施設を6基運転中
 - River Corridor : 5基
 - Central Plateau : 1基

1989年以来、DOE-EM は107の原子力サイトのうち91サイトのクリーンアップを完了

- コスト ¥17,452B (US\$152B)

今後のクリーンアップに要する費用と期間

- ¥26,981B (US\$235B)
- 2065年完了予定

Slide from Rodrigo V. Rimando, Jr., Second International Symposium for Resilient Communities (2016)

ハンフォードサイト

歴史 - 第二次世界大戦からクリーンアップへ



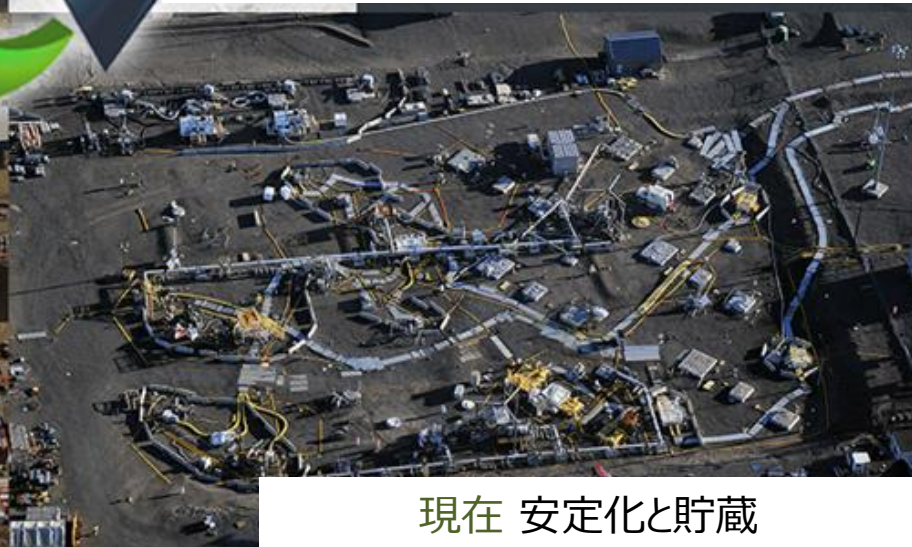
40s-80s 兵器級Puを製造



40s-80s 高レベル廃液を地下タンク貯蔵



現在 高レベル廃液の処理施設を建設中



現在 安定化と貯蔵

クリーンアップが完了したロッキーフラッツ

ロッキーフラッツ

- 21 トンの兵器級核物質の多くが不適切に貯蔵
- 30,000 リットルのPuと濃縮Uの溶液が老朽化したタンクや配管に残留し、漏洩も発生
- 15,000 m³ のTRU廃棄物やTRU含有廃棄物
- 100 トンのPu残さが処理処分方策が決まらないまま存置
- 2006年に規制的なサイト閉鎖を達成



- 1995年にDOEは、クリーンアップ完了には\$36Bの費用と70年の期間を要すると見積っていた
- 科学的な取り組み（例：粒子(コロイド)の移行挙動把握にシンクロトロンを活用）が奏功し、当初の見積りに対して60年早く、かつ\$29B低コストでクリーンアップを完了

Slide from B. Grambow, and originally from D. Clark,

英国が取り組むレガシーサイト

セラフィールド

- 1947年 兵器級Pu生産炉の建設を開始 (5.2km²)
- 1953年 コルダーホール型原子力発電所 (マグノックス炉) 運転開始
- 200を超える施設 (Pu生産炉、使用済燃料貯蔵プール(ポンド)、再処理施設、MOX製造施設、ガラス固化施設、他)
- レガシー施設と廃棄物



NDA
Nuclear
Decommissioning
Authority

Sellafield Ltd

Sellafield Plan, Issue 1 August 2011

英国が取り組むレガシーサイト

セラフィールド

第一世代マグノックス燃料ポンド



パイル燃料貯蔵ポンド



ウィンズケールパイル (1基の排気塔は解体済)



パイル燃料被覆管サイロ



- マグノックス燃料ポンドはスラッジ、マグノックス燃料、および種々の中レベル廃棄物(ILW)と低レベル廃棄物(LLW)を貯蔵
- 火災があったウィンズケールパイルには、約6,700個の燃料要素と1,700個の同位体カートリッジが残存
- パイル燃料被覆管サイロは、3,200m³の中レベル廃棄物を保有

Sellafield Plan, Issue 1 August 2011

事故を起こしたチェルノブイリ4号機

Lava-stream “Elephant foot”, 1990 [2]



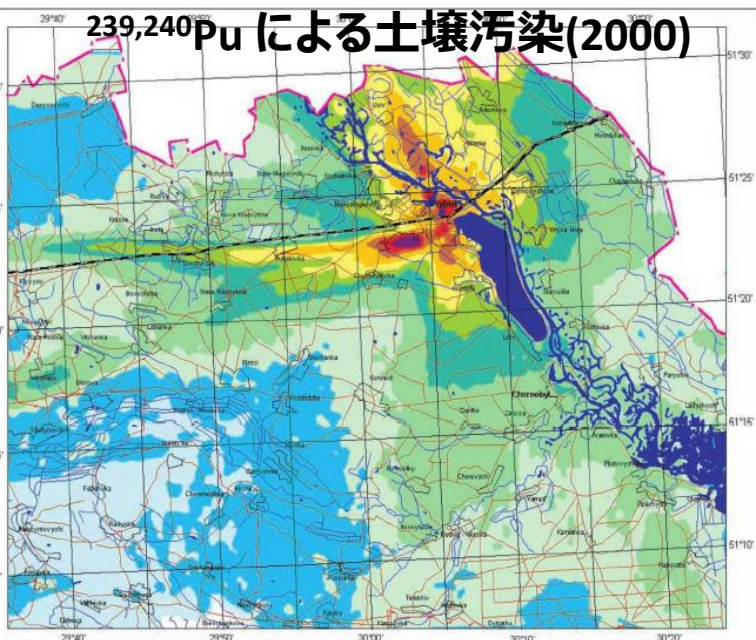
By courtesy of Boris Burakov

新設された閉じ込めシェルター



(d)

$^{239,240}\text{Pu}$ による土壌汚染(2000)



kBq/m²



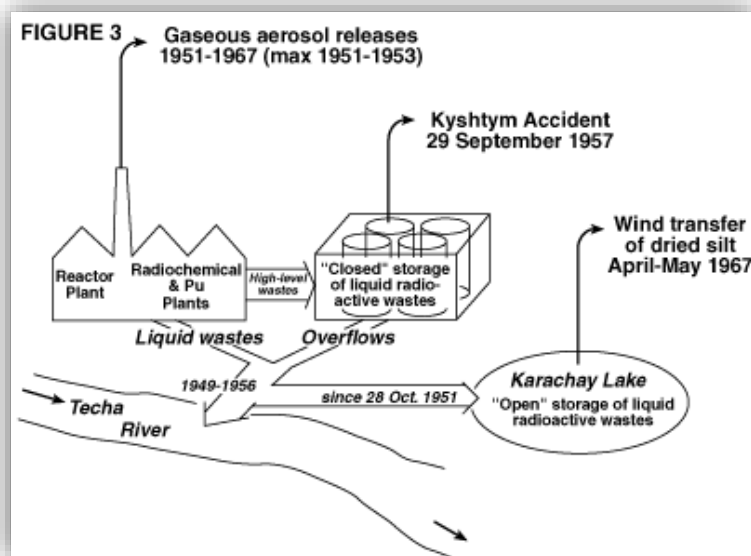
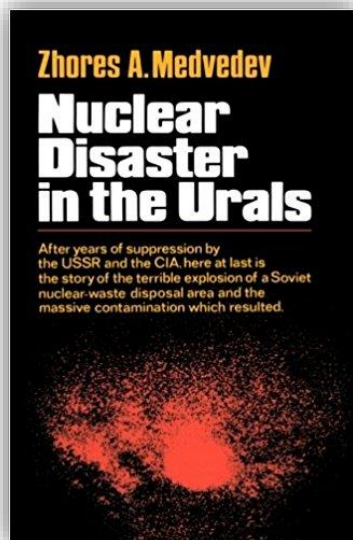
Scale 1:200 000

- State border
- Railway
- Road
- Towns and villages
- Rivers and lakes
- Exclusion zone border

Refs.: Volodymyr Berkovsky, CHARACTERIZATION OF RADIOACTIVE MATERIAL AND WASTE AFTER A SEVERE ACCIDENT” (2013)

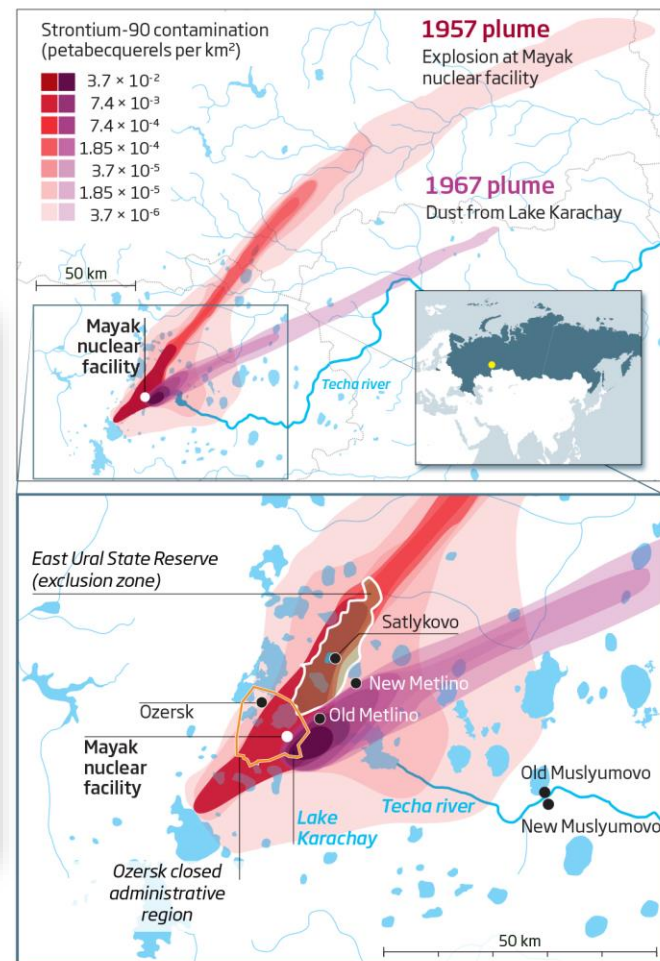
チェリャビンスク：よく知られていないレガシー

- 1957年9月の事故が最も有名であるが、このサイトで起きた一連の重大事故は、膨大なエリアを汚染し、多くの住民が被ばくした
- ソビエト政府はこの事故を軽視したが、最終的に1989年に事態を受け入れた



Triple disaster

Radioactive waste from the Mayak nuclear factory was dumped into the Techa river from the early 1950s. Then, in 1957, an explosion released a plume of airborne radioactive dust over the region. In 1967, another such plume was whipped up from the dried-up Lake Karachay



Refs.: Zhores A. Medvedev, Nuclear Disaster in the Urals

<https://www.newcoldwar.org/visit-to-russias-formerly-secret-mayak-nuclear-disaster-site/>

環境汚染

ハンフォードサイトにおけるPu汚染

アクチノイド汚染廃棄物のインベントリ

- ハンフォードにはPu-239 : 11,800Ci(189kg) , Pu-240 : 2,900Ci(12.6kg), Pu-241 : 37,500Ci(0.34kg), Am-241 : 28,700Ci(9.0kg) およびNp-237 : 55Ci (78kg) がサイト内に廃棄処分された。

Pu含有廃液の地下水への直接注入

- 1945～1947年にかけて、リン酸ビスマス法による再処理で発生した32000m³のPu含有廃液が注入システムによって地中処分された。この廃液には約4.3kg(268Ci)のPuが含まれていた。
- 現在、周囲にある観測井戸のうち飲料水基準レベルのPuが検出されるのは3か所のみ。不飽和帯水層から地下水にPuが移行した形跡はほとんど見られない。また、従来からPuが検出されてきた観測井戸において、濃度が増加する傾向は見られない。

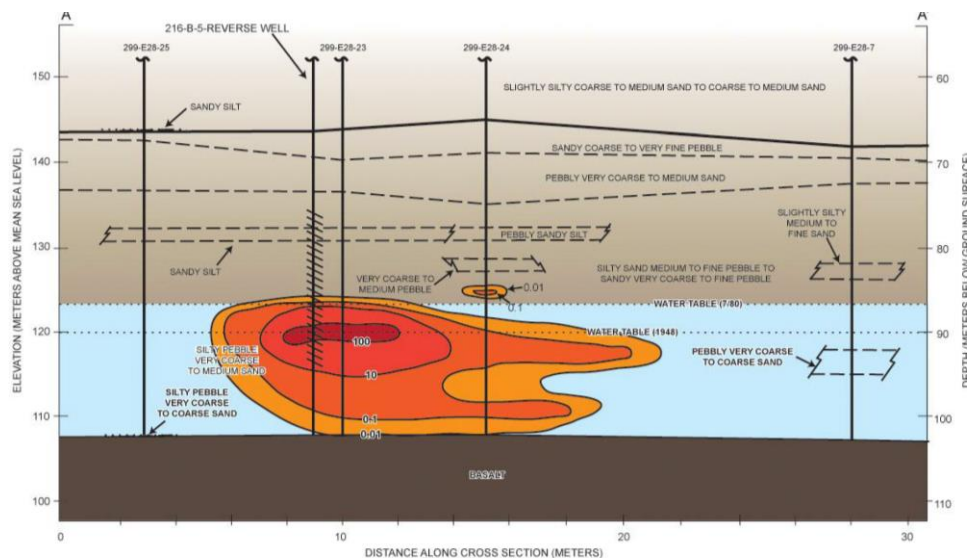
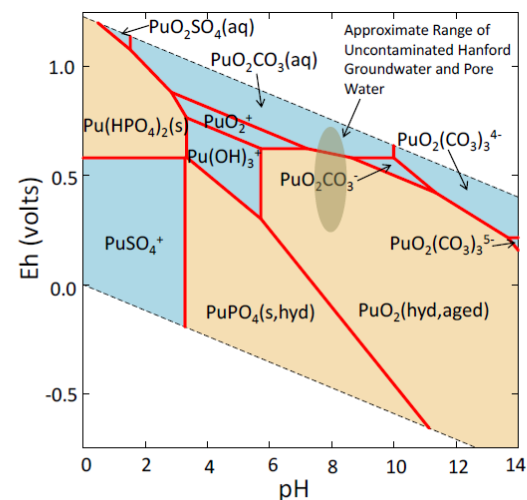


Figure 3.1. Cross-Section of Plutonium-239/240 Distribution in the Vicinity of the 216-B-5 Reverse Well (contours are in $\mu\text{Ci/kg}$) (Source: DOE/RL (1996), Figure F-4)

Refs: KJ Cantrell, AR Felmy, "Plutonium and Americium Geochemistry at Hanford: A Site-Wide Review", RPT-DVZ-AFRI-001 PNNL-21651

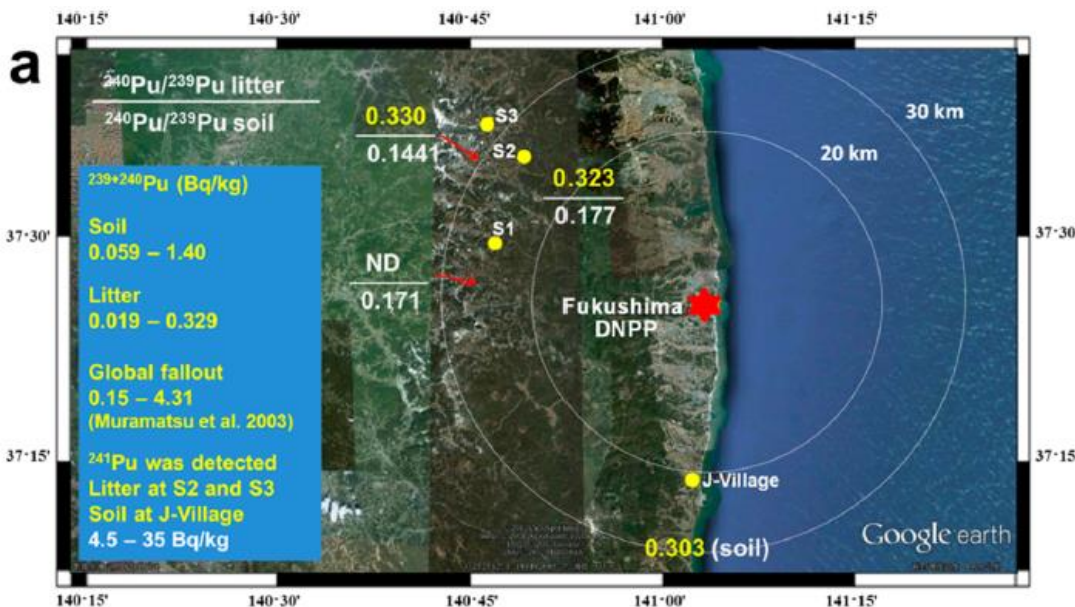


Eh pH Diagram for Plutonium at a Concentration of 10^{-10} M (1,500 pCi/L, the MCL) in a Hypothetical Hanford Site Groundwater with a Composition of 2×10^{-3} M HCO_3^- , 10^{-3} M Cl^- , 5×10^{-4} M SO_4^{2-} , 10^{-3} M HPO_4^{2-} , 10^{-3} M Na^+ , 2×10^{-3} M Ca^{2+} , and 5×10^{-4} M Mg^{2+} (298.15 K, 0.1 Mpa)

福島第一事故におけるPu

Puの同位体組成の精密分析により、事故による放出を調査した結果、核実験由来のフォールアウトに比べて、汚染レベルに対してほとんど影響していない。

参照論文: Jian Zheng,* Keiko Tagami, and Shigeo Uchida, "Release of Plutonium Isotopes into the Environment from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident: What Is Known and What Needs to Be Known", Environ. Sci. Technol. 2013, 47, 9584–9595



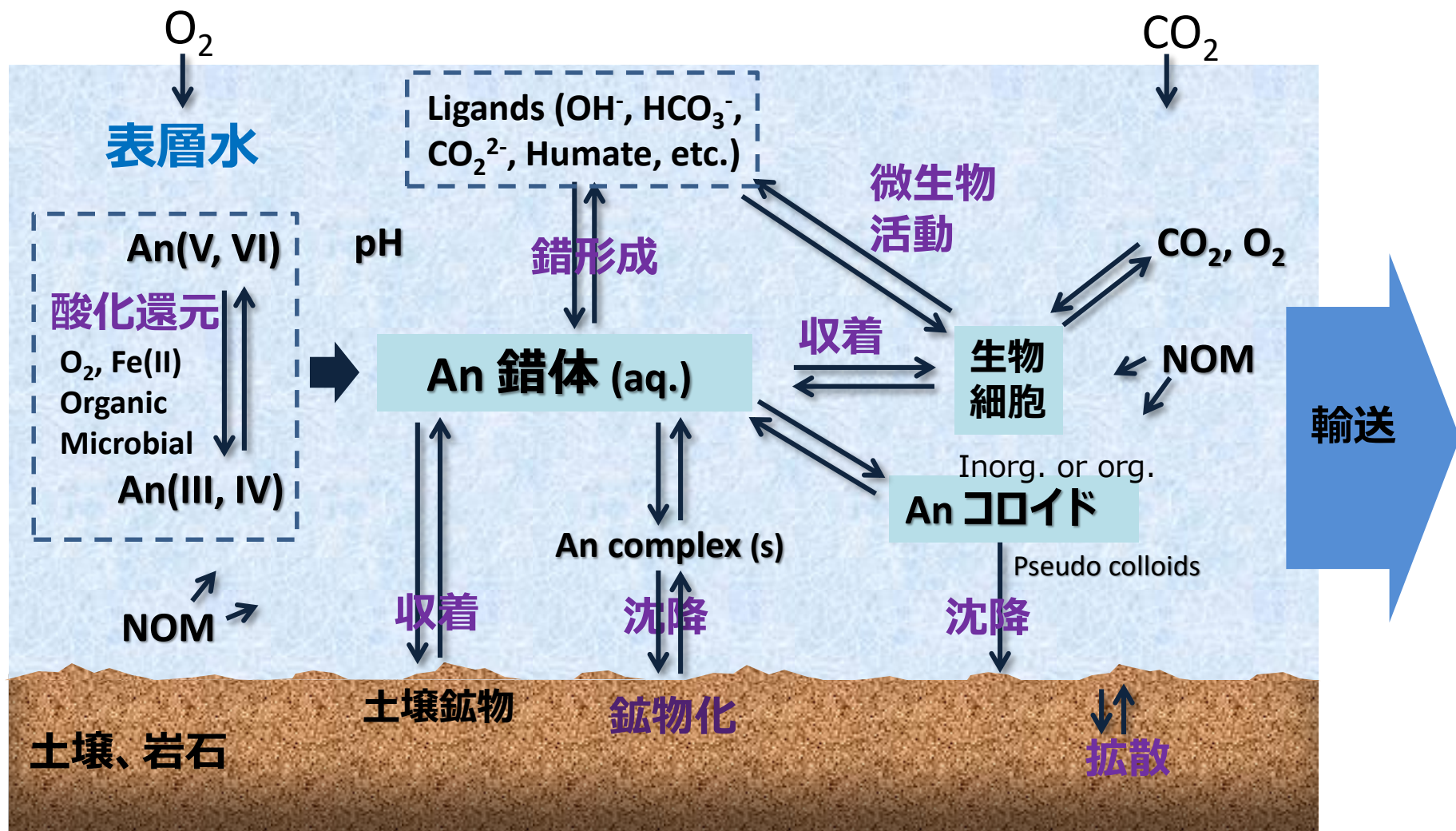
Results of $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{241}Pu activities and $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ atom ratios in surface soil and litter samples collected in the evacuation-prepared area (J-Village) and the deliberate evacuation area (S1, Katsurao Village; S2, Namie Town; and S3, Iitate Village). Data are cited from Sci. Rep. 2012, 2, 304.

Table 3. Estimation of the Amounts of Pu Isotopes Released from the FDNPP Accident and a Comparison with Chernobyl^a

		FDNPP accident	
	Chernobyl	METI calculated	estimation of this study
	amount of released (Bq)		
Pu-239 + 240	8.7×10^{13}	6.4×10^9	$1.0 \times 10^9 - 2.4 \times 10^9$
Pu-241	7.2×10^{15}	1.2×10^{12}	$1.1 \times 10^{11} - 2.6 \times 10^{11}$
Pu-238	3.5×10^{13}	1.9×10^{10}	$2.9 \times 10^9 - 6.9 \times 10^9$
	Pu inventories at reactors (Bq) at the time of accident initiation		
Pu-239 + 240	2.4×10^{15}		8.3×10^{15}
Pu-241	1.9×10^{17}		7.0×10^{17}
Pu-238	1.0×10^{15}		1.1×10^{16}
	percentage of core inventory released (%)		
Pu-239+240	3.5		$1.2 \times 10^{-5} - 2.9 \times 10^{-5}$
Pu-241	3.5		$1.6 \times 10^{-5} - 3.7 \times 10^{-5}$
Pu-238	3.5		$2.0 \times 10^{-5} - 4.7 \times 10^{-5}$

^aData on the Chernobyl accident are cited from Kruger et al.,⁸⁶ IAEA,⁷⁷ Harrison et al.,⁸⁷ and Devell et al.⁸⁸ Data on the estimation of the FDNPP accident releases of $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{241}Pu are cited from Zheng et al.²⁷

表層水系におけるアクチニドの挙動



NOM: Natural Organic Matter

Arranged from, G. R. Choppin, Plutonium in the environment, Elsevier (2001)

スペシエーションの研究

汚染源

- ・ 核実験のフォールアウト
- ・ 採鉱・選鉱の残さ
- ・ シビアアクシデントによるエアボーン放出
- ・ シビアアクシデントによる汚染水の放出
- ・ 化学プラント廃液の漏出
- ・ 燃料製造プラントからの漏えい
- ・ 劣化した廃棄物からの浸出

汚染の化学種

- ・ 溶存イオンあるいは錯体
- ・ 土壌や鉱物の表面への収着
- ・ 有機あるいは無機の疑似コロイド
- ・ 真性コロイド
- ・ 難溶性粒子
- ・ バイオ鉱物
- ・ 堆積物や沈殿

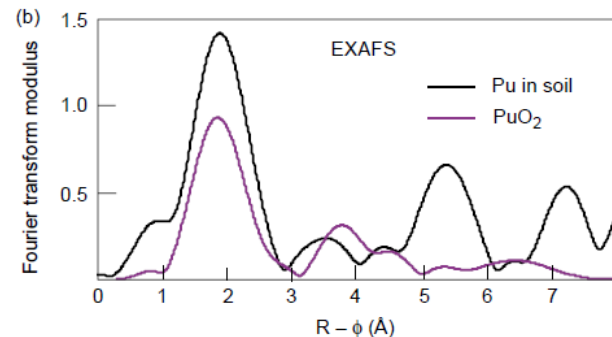
対策

- ・ マッピング
- ・ 除染
- ・ 保証措置分析
- ・ 拡散の予測と防止

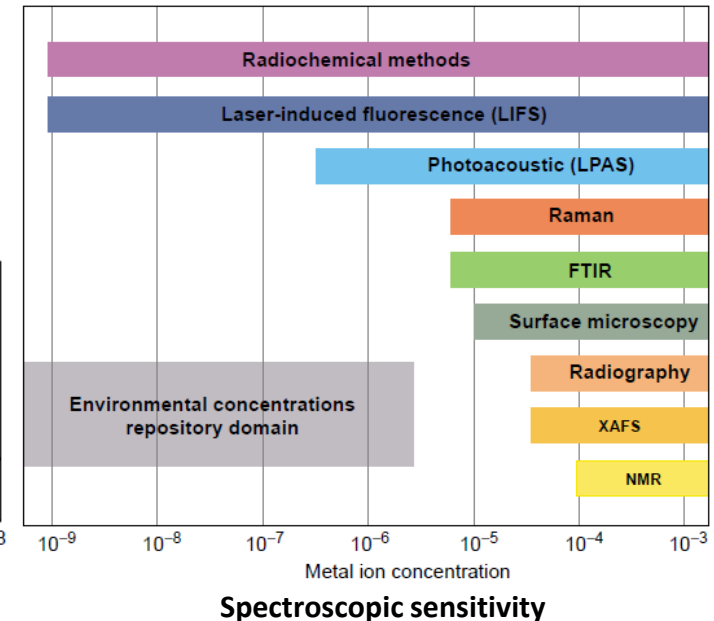
スペシエーション技術

1990年代以降、DOEサイトの環境汚染に対して、以下のような多くの優れたスペシエーション技術が適用されてきた

放射化学的分析, オートラジオグラフィー, 質量分析, SEM, XPS, XAFS XANES, NMR, FTIR, LIF, ラマン分光, UV-vis-吸光, etc.



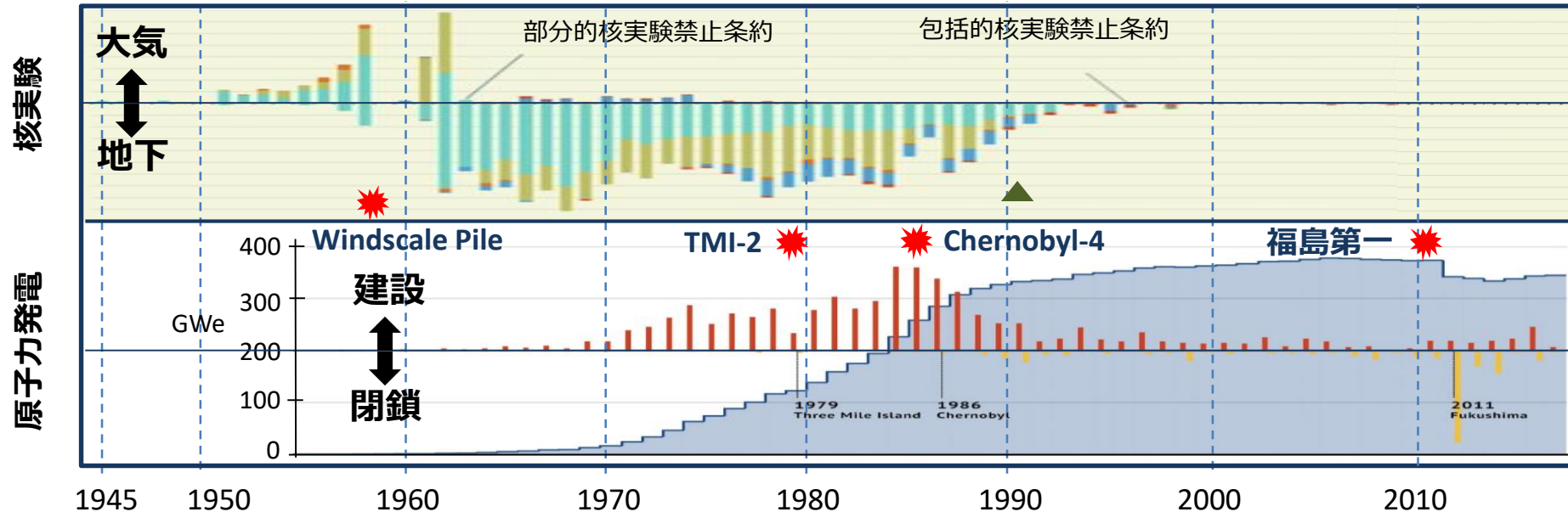
XAFS of Pu-contaminated soil and sample



Refs.: Wolfgang Runde, Los Alamos Science Number 26 2000

課題を解決するための研究

歴史的視点



核実験フォールアウトによる地球規模の大気汚染

地下核実験による地下環境汚染

核兵器製造施設によるサイト汚染

ウラン鉱山

サイト環境修復

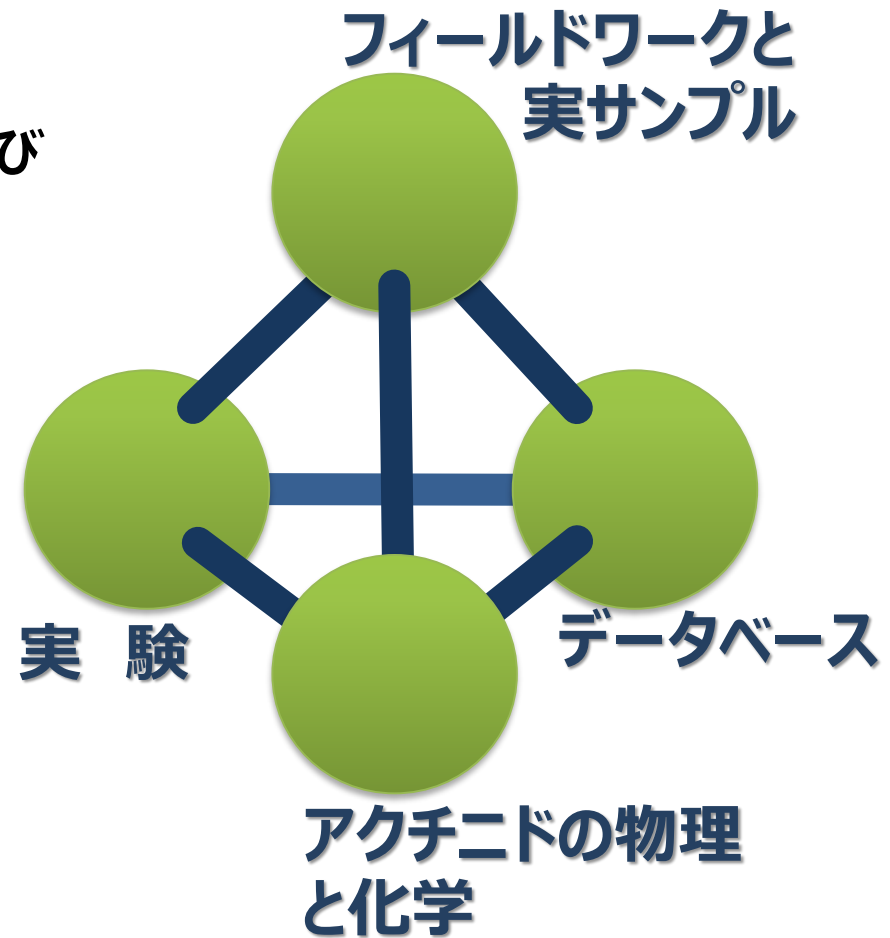
シビアアクシデントへの対応と廃止措置

事故後の環境修復

燃料サイクル施設や研究施設の廃止措置

不確定性の低減

- 検出、観測、モニタリング、マッピングおよび定量化
 - 毒性物質およびその基本特性のキャラクタリゼーション
 - 現在の状況をもたらした過程の解明
 - 長期的な変化とその将来影響の予測
-
- 環境中のアクチノイド核種の移行の現象解明と予測
 - 基礎データの高度化と実験による検証



レガシーと研究

レガシーサイト	重要課題	関連する物質	研究目的
事故サイト (例：福島第一)	・燃料デブリ取出し	・燃料デブリ	・燃料デブリ組成の熱力学的予測 ・物理化学的、機械的な物性 ・酸化劣化等の長期にわたる化学的变化
	・作業員被ばくの防護 ・解体	・汚染された機器、コンクリート、構造物、等	・核種のキャラクタリゼーションと定量化 ・汚染メカニズムの理解
	・廃棄物の処理・処分	・水処理二次廃棄物 ・性状が不明な廃棄物	・廃棄物組成のキャラクタリゼーション ・廃棄物の安定化 and/or 減容
	・公衆被ばくの防護 ・環境修復	・地下水、土壌	・汚染の定量化 ・核種の挙動（定着/移行） ・核種のスペシエーション
・不適切に管理 (例：Sellafield)	・レガシー燃料の管理	・長期貯蔵された燃料	・酸化劣化等の長期にわたる化学的变化
	・廃棄物の処理・処分	・性状が不明な廃棄物 ・不安定な廃棄物	・廃棄物組成のキャラクタリゼーション ・廃棄物の安定化 and/or 減容

レガシーと研究

レガシーサイト	重要課題	関連する物質	研究目的
核兵器関連 (例：Hanford)	廃棄物の処理・処分	高レベル廃液	- 廃棄物組成のキャラクタリゼーション - 廃棄物の安定化 and/or 減容
	- 公衆被ばくの防護 - 環境修復	汚染された地下水、土壌、河川・湖沼	- 汚染の定量化 - 核種の移行 - 核種のスペシエーション
その他汚染サイト (例：U 鉱山, 核実験サイト)	- 公衆被ばくの防護 - 環境修復	地下水、土壌	- 汚染の定量化 - 核種の挙動（定着/移行） - 核種のスペシエーション
高経年化炉廃炉 (世界中で100基以上)	- 作業員被ばくの防護 - 解体	汚染された機器、コンクリート、構造物、等	- 核種のキャラクタリゼーションと定量化 - 汚染メカニズムの理解
	使用済燃料の管理	使用済燃料	- 長期にわたる安定貯蔵 - 貯蔵あるいは処分時の廃棄物固化体の安定性
	廃棄物の処理・処分	高線量廃棄物	廃棄物の安定化 and/or 減容

結 言

- 第一世代の終焉から次世代への出発
- 公衆影響と環境への放射性汚染拡散の防止
- 風評リスクの防止と原子力の科学技術に対する公衆の信頼回復
- 教訓と経験を将来の廃止措置活動へ展開
- 知見を将来の原子力システムの安全評価へ採用
- 将来の原子力事故への対応能力の向上
- 科学の発展

