DeepL Proに登録すると、より大きなサイズの文書ファイルを翻訳できます。
詳しくは、www.DeepL.com/pro をご覧ください。

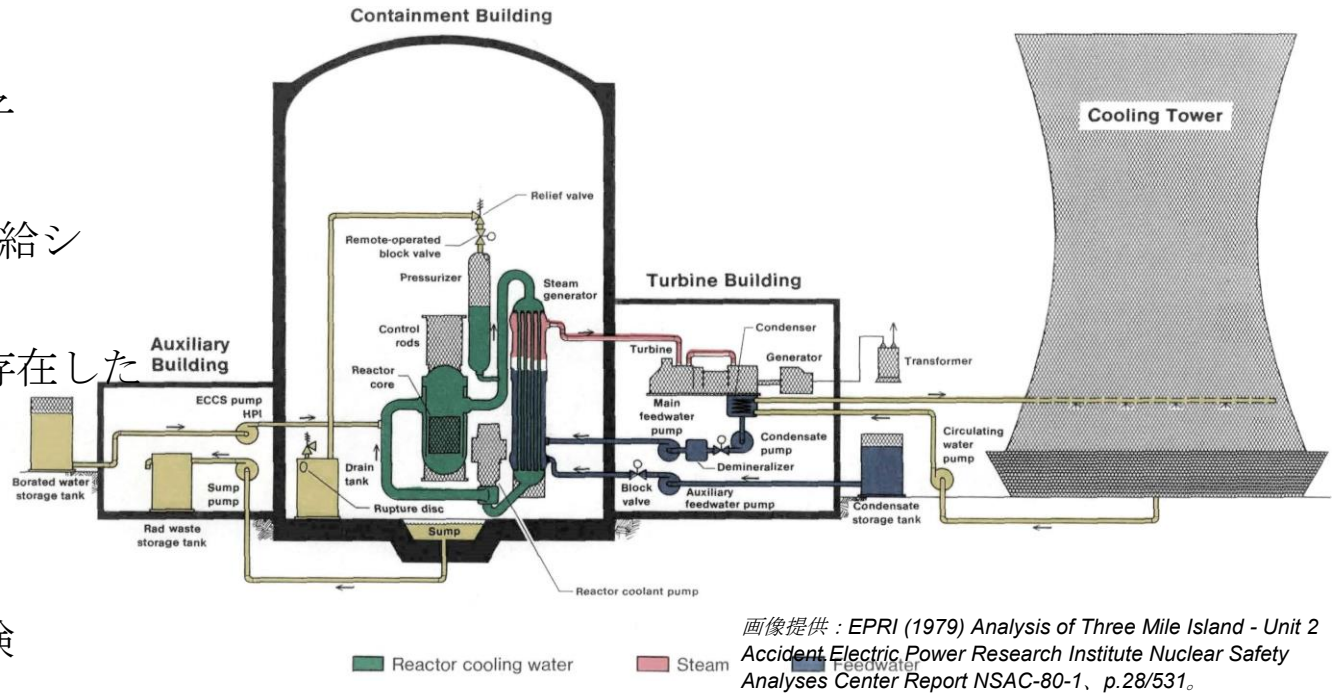
TMI-2の燃料除去活動に基づく米国の見解

第6回国際フォーラム
福島第一原子力発電所の廃炉について
福島県 2022年8月28日～29日

プレゼンターはジョイ・レンペ
寄稿者Joy Rempe, Rempe and Associates, LLC, Mitch Farmer, Argonne National Laboratory, Damian Peko, U.S. Department of Energy, and Donald Marksberry, U.S. Nuclear Regulatory Commission.

1979年3月28日 スリーマイル島2号機(TMI-2)事故

- デザインなどの配慮。
  - バブコック・アンド・ウィルコックス社製加圧水型原子炉2基（2,772MWt）。
  - 大型乾式格納容器に格納された2ループの原子力蒸気供給システム
  - 設計の安全性に関して「タイタニック」的な考え方が存在した
- イベントのあらすじ
  - 復水研磨脱塩装置メンテナンス時の蒸気発生器給水の喪失について
  - 加圧器のパイロット式リリーフバルブが閉まらず、未検出のまま小破して冷却水が失われた事故。
  - その後のオペレーターの対応で重大な事故が発生
    - 炉心領域の約26%をボイド化、2万kgを原子炉圧力容器下部ヘッドに移設。
    - 水素の放出で格納容器に引火
  - 15マイル圏内の144,000人が1週間自主避難

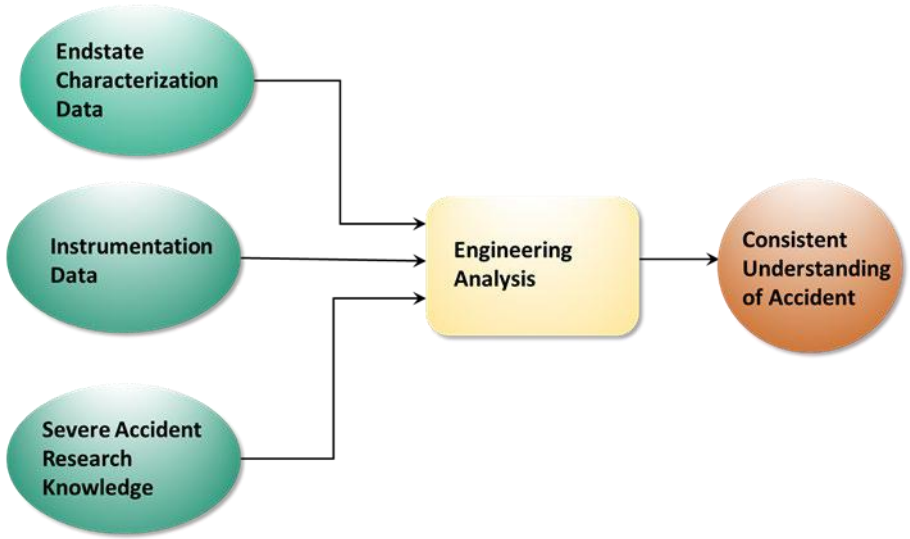


画像提供：EPRI (1979) Analysis of Three Mile Island - Unit 2 Accident Electric Power Research Institute Nuclear Safety Analyses Center Report NSAC-80-1、p.28/531。

- 放射性物質の放出は限定的。15 Ci (560 E9 Bq) of Iodine-131; 国際原子力事象評価尺度 (INES) レベル 5 [福島第一の事故はINESレベル7と評価]。

- 15マイル圏内の144,000人が1週間自主避難

TMI-2 クリーンアップ情報ニーズの特定と優先順位付けのためのアプローチ



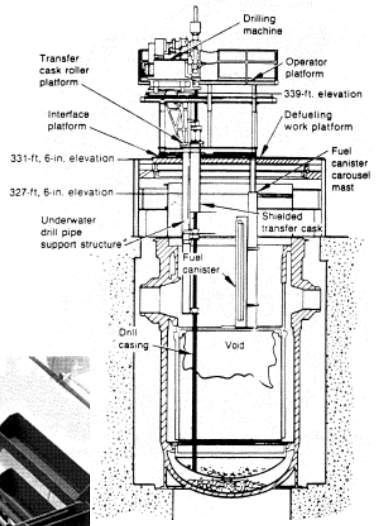
- プロセスは、計測データ、事故後の調査、既存のシビアアクシデントの知識、工学的分析に依存する
- 当初は工場の安定化に努め、その後浄化に注力

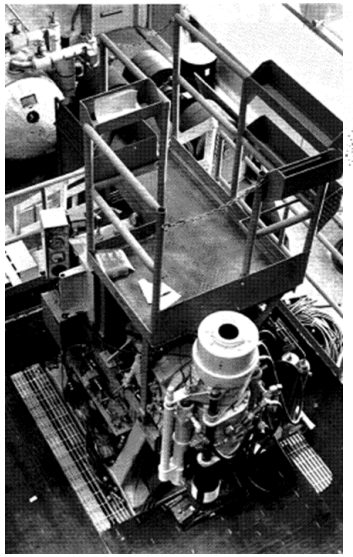
- 活動の優先順位付けのポイント、重点的な活動。
  - 将来の放射線放出とサイトの危険性を最小化する。
  - 安全かつ効率的な清掃を行うこと。
  - *資源が許す限り*、事故進展と原子炉の安全性向上に関連する不確実性を低減する。

- 原子炉の安全に関する洞察のために必要な、最も優先順位の高い情報は、クリーンアップのために必要です。

さまざまなデブリの回収方法を採用

コアボアマシン（適応型マイクロドリル）





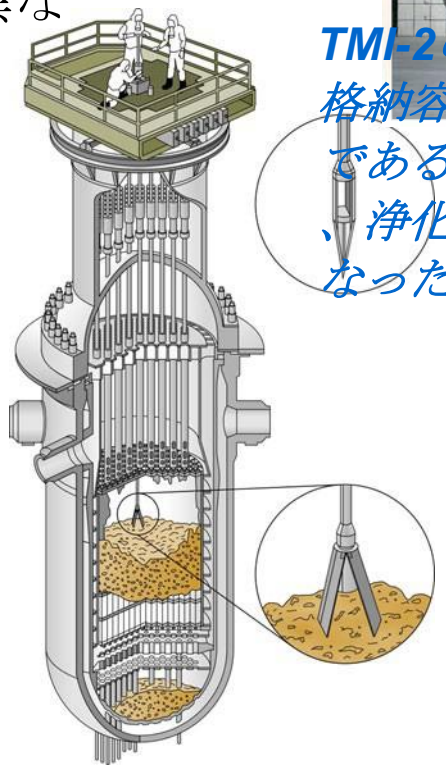
6つの主要な領域：炉心空洞、下部炉心支持アセンブリ（LCSA）、炉心バッフル板の後ろと内部、下部原子炉容器ヘッド、プラント内の「他の場所」。

位置の形状や破片の種類が異なれば、検索方法も異なる。

- コアボアマシン（溶融コア固化、LSCAカット）
- 切断（プラズマアーク、油圧剪断機、のこぎり）
- バルク除去（エアリフト）
- ミニ潜水艦（加圧器内）
- 手動制御機器（グリッパー、バケット）

- 困難（解決）
  - 現場での修理（モックアップとテスト、予備品と修理用具）
  - 異なるデブリ/構造物特性（プロトタイプテスト）
  - 水の透明度（過酸化水素）

- 不均質性（サンプルの分布と質量）



TMI-2の容器と格納容器が無傷であることから、浄化が容易になった。

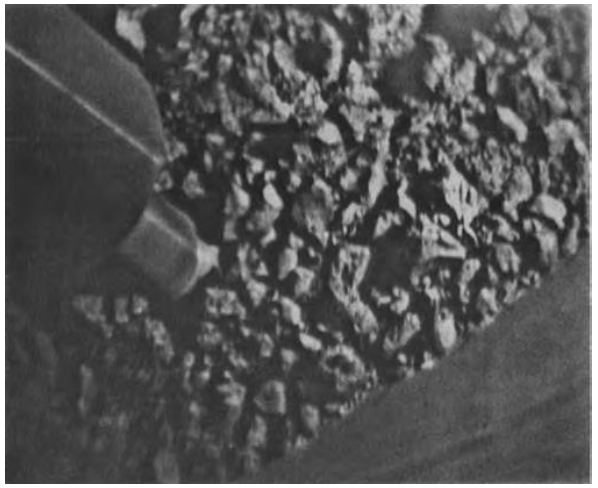
画像提供：EnergySolutions、INL

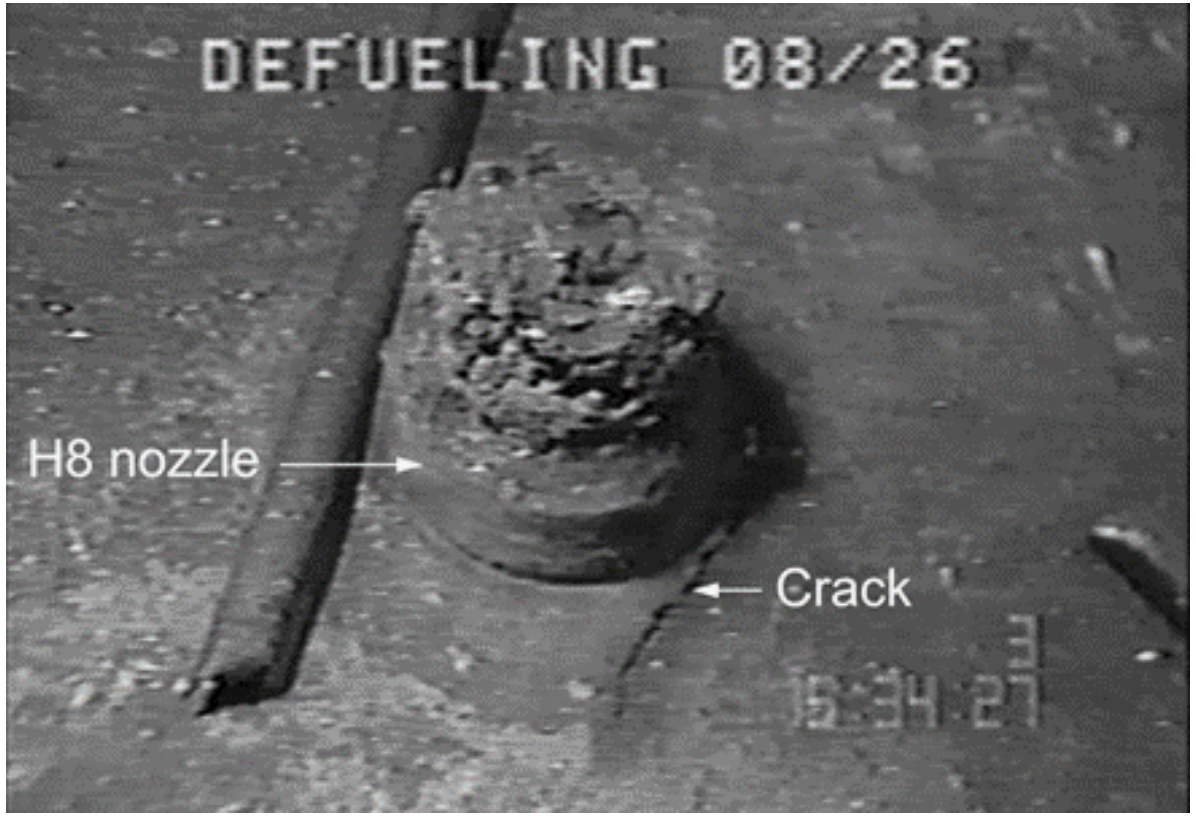
手動グローブボックス

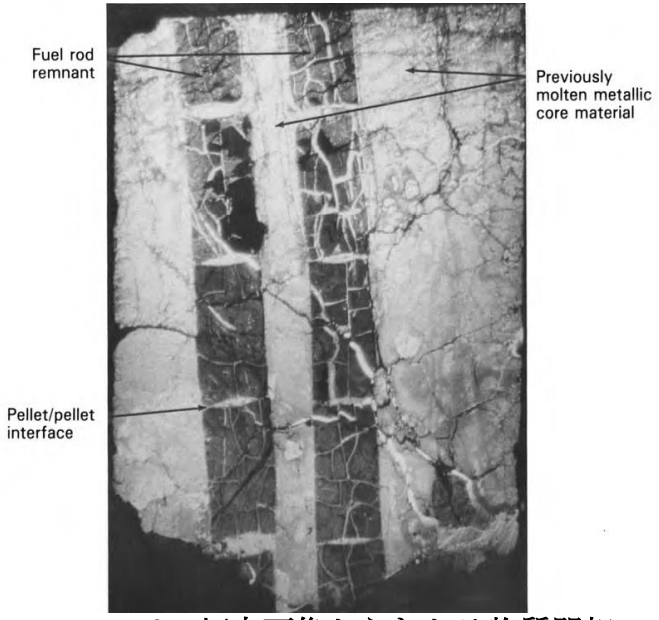
グラファイトコアサンプルツール

画像提供：EnergySolutions、INL

汚染浄化と原子炉の安全性に示唆を与える検査が行われた



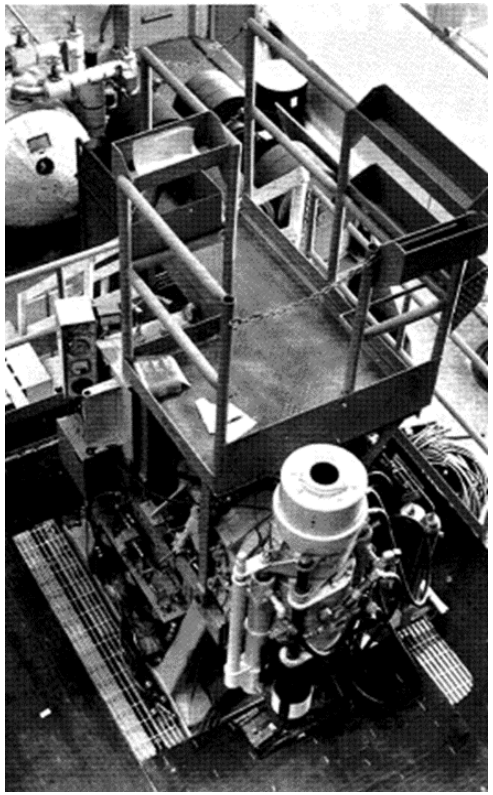




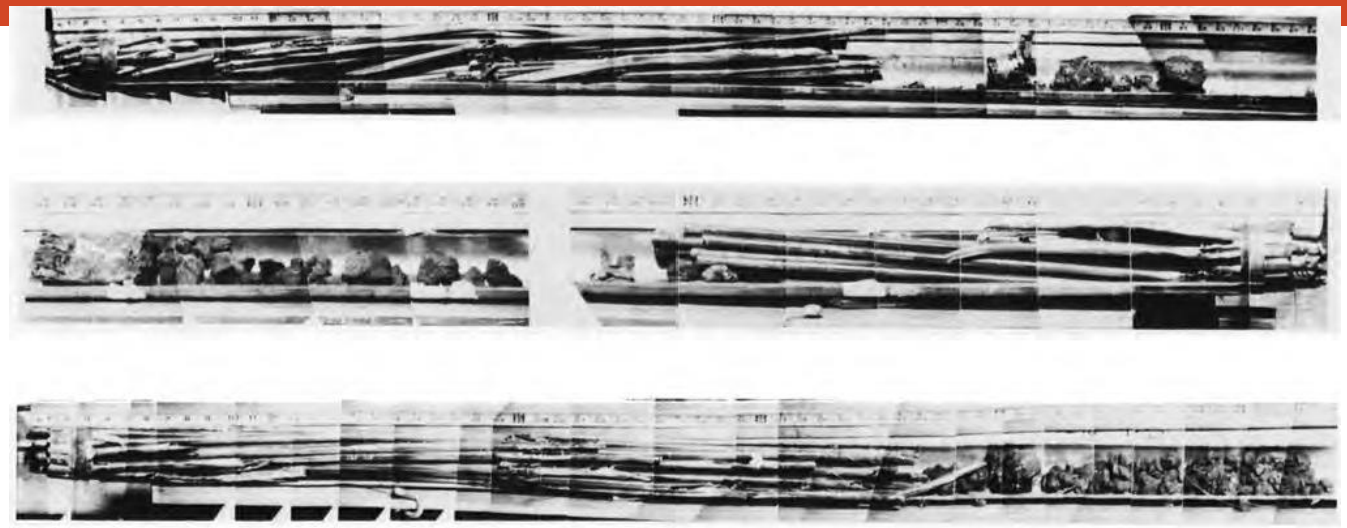
K-9の炉内画像からわかる物質間相互作用と被覆管溶融の様子

画像提供：INL、EnergySolutions

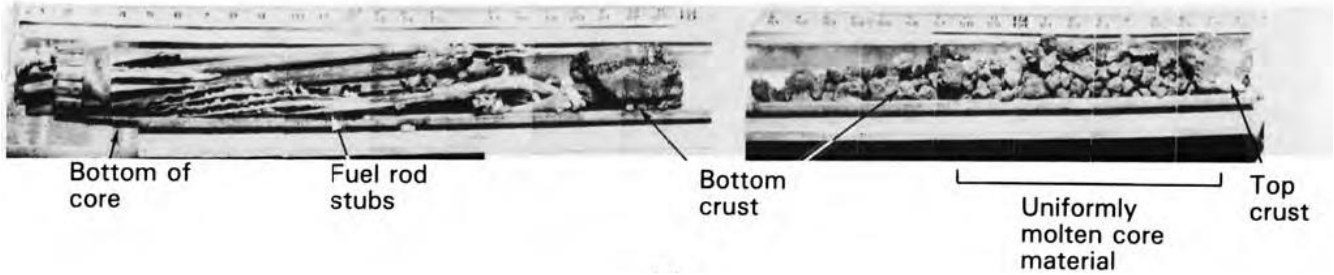
炉心溶融装置で原子炉の安全性が明らかになり、その後の燃料除去が容易になりました。



コアボアマシン（適応型マイニングドリル）



(a)周辺コア位置D8のコアボア試料のモザイク写真。

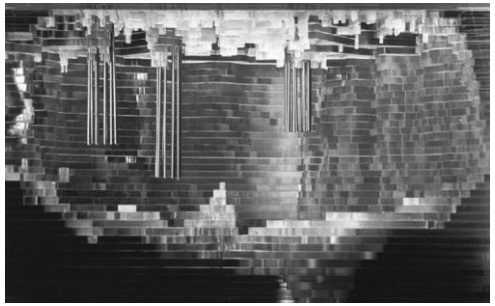


- コアボア試料採取のための燃料補給を一時停止
- デブリと残存燃料構造物の全長コアサンプル9個を取得
- *主な目的：*シビアアクシデントコードのベンチマーク（元素組成、酸化状態、物質間相互作用、ピーク温度、保持される核分裂生成物）。
- *副次的な目的：*燃料除去計画のサポート、下部炉心支持構造へのアクセスの提供
- 燃料補給が再開されると、コアボアマシンは硬質層を破壊するために再利用され、最終的には炉心支持構造を破壊した

画像提供：INL、EnergySolutions

(b）中心位置G8、
（c）周辺位置G12
、（d）中心位置K9
。

TMI-2 審査の視点

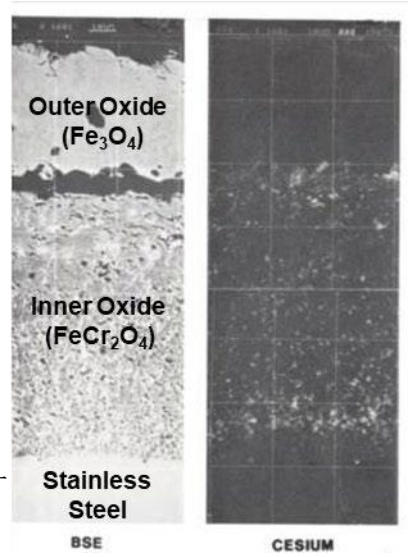


希望する情報	メソッド	使用予定・コメント
オンサイト（In-situ）		
デブリの位置、地形、燃料および構造物の損傷（歪み、スランプ、溶融、断片化、酸化、非対称性、など）	えいぞう	コアの損傷と破片の位置、溶融の進行、後続の試料を選択するための洞察力を提供した。除去前の試料の状態を記録。 **レトロスペクティブ・コメント**最も有用な情報 燃料補給の計画・設計とモデルの開発・確認；クリーンアップに必要なもの
デブリの位置と 地形	超音波トポグラフィーシステム	映像にバックアップし、デブリに関する知見を提供する の位置で、燃料除去作業中に使用された。**レトロスペクティブコメント。**グロスモデルの開発・確認に有用な情報。デブリのための装置の設計と適格性確認のための確認データ。 除去、輸送、保管を行う。

画像提供：EnergySolutions、INL

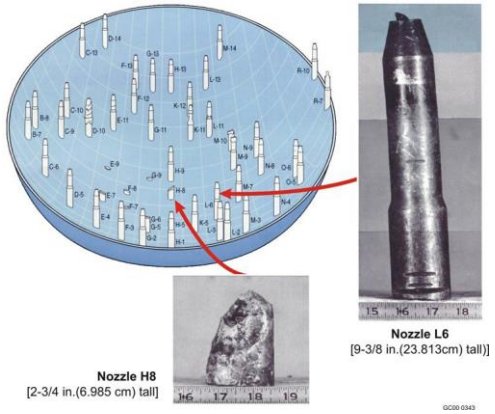
TMI-2試験依頼に関する追加情報は、EGG-TMI-6169（https://inldigitallibrary.inl.gov/TMI/EGG-TMI-6169-r1.pdf#search=EGG%2DTMI%2D6169）を参照してください。

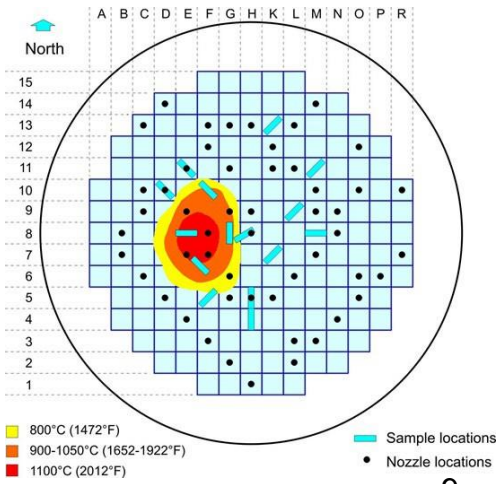
TMI-2 審査の視点（つづき）



画像提供：INLおよびエナジーソリュー

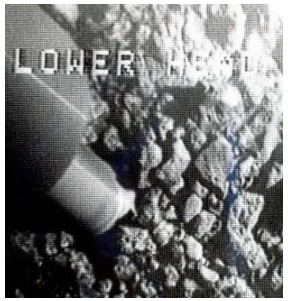
希望する情報	メソッド	使用予定・コメント
研究室		
原子炉冷却水システム 構造と コンポーネント情報 [ピーク温度 温度履歴を表示します。 と在庫を確認する。 配布、形式、および の大きさ（微粒子の場合）。 預託核分裂 製品]]をご覧ください。	の化学物質が含まれています。 放射化学的。 および冶金 試験、そして 研究室 ための技術 メジャリング 物理的 性 埋蔵量	コードのベンチマーク用データ 温度予測 と核分裂生成物の輸送 と沈殿する。新モデルは、必要に応じて開発されました。 **レトロスペクティブコメント** 核分裂生成物の分布 と温度情報 グロスモデルで使用 の校正を行います。





TMI-2 審査の視点（つづき）

破損した燃料棒

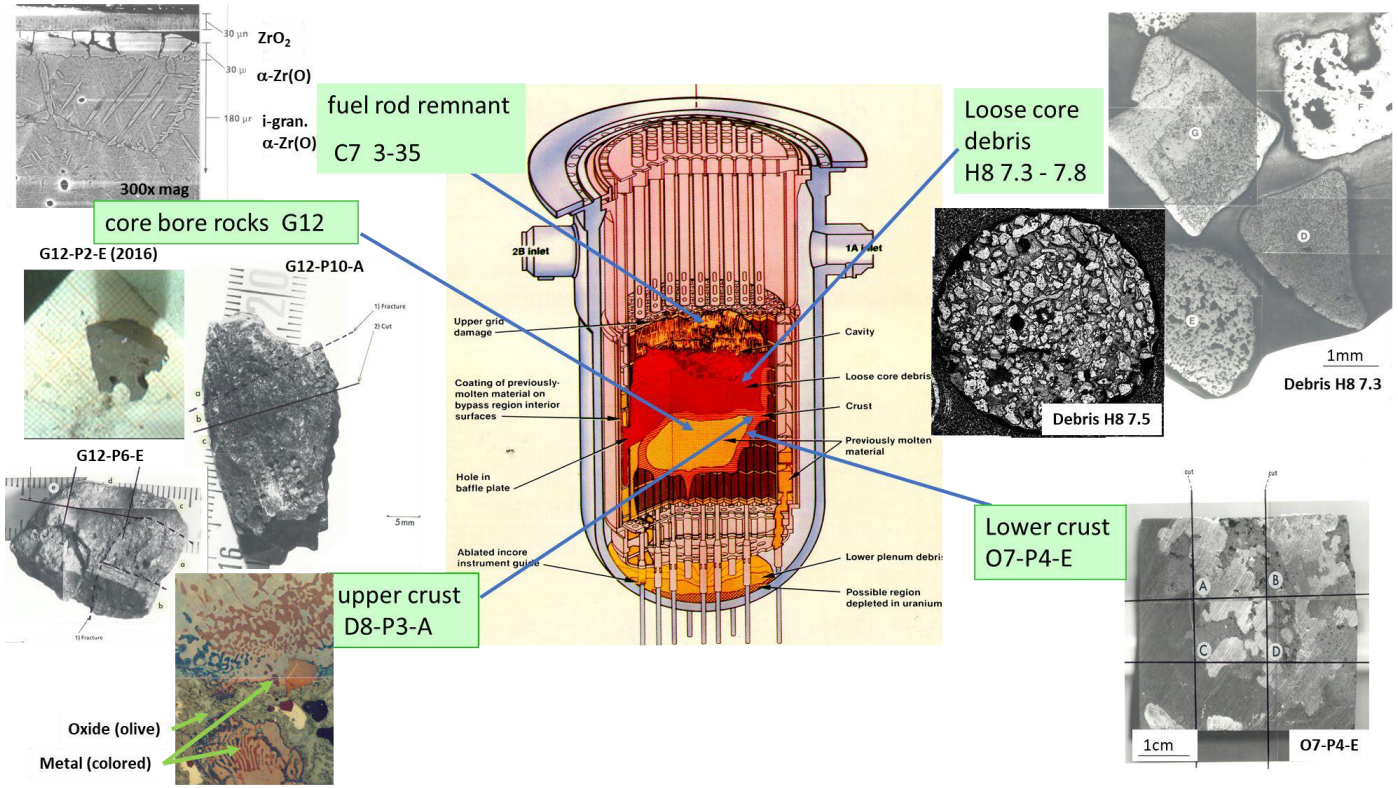


ロアヘッドルック

グラフィック提供：

希望する情報		メソッド	使用予定・コメント
研究室			
コリウム の器です。 と ノズル サンプル	ルースデブリ - 組成、核分裂生成物の保持・放出、物理的性質 形状（サイズ、空隙率、浸透率）、ピーク温度、液状化現象 温度、冷却速度	化学、同位体 要素で構成されています。 放射化学、ガンマ	コード予測の開発およびベンチマークに使用するデータ 温度と核分裂生成物の輸送のためと
	燃料棒セグメント - 境界または遷移における燃料棒の特性評価 溶融した瓦礫の間のゾーン；核分裂生成物 ペレット、酸化燃料、液化燃料の滞留・放出。 燃料と被覆管の相互作用、被覆管の残存健全性、燃料と被覆管のピーク時 クラッド温度	をスキャンします。 きんぞくしけん および各種実験室 の方法（プッシュロッド ダイラトメトリー、 レーザーフラッシュ に、拡散性など	を沈殿させる。必要に応じて新機種を開発。 原子炉圧力容器の健全性を見直す洞察 と潜在的な故障モードについて説明します。 **レトロスペクティブコメント**場所に依存する 組成データおよび核分裂生成物沈着量
	コア成層圏サンプル（複数の燃料を含むボアサンプルと 制御棒1本） - 組成（燃料と非燃料の比率）、材料 相互作用（損傷、物質間相互作用）、核分裂生成物 保持・放出、冷却性情報（空隙率、透水性）。 核分裂生成物保持・放出）	かりる (硬度、引張 強さ、圧縮 強度）および熱 プロパティ（密度。	グロスモデルキャリブレーションに有用なデータですが 酸化や気孔率によって特性が変化します。より簡単に を未照射の材料で得ることができることを確認した。 照射効果、必要に応じて）。ピーク温度 のグロス・キャリブレーションにのみ有用な情報です。 モデル結果設計のための確認データや
	コンポーネント（スペーサーグリッド、インコアインスツルメント、エンドフィッティング、ベッセル スチール） - ピーク温度と材料間の相互作用の特性化	熱伝導率 熱膨張係数、比熱容	取り外し、輸送のための機器の資格。 と保管されている、頭部下部の破片と構造

国際貢献の重要な側面
事故進展のコンセンサスインサイトの開発



- 国際プログラムでは、模擬試験、単体試験、システム解析コード計算などが行われました。
- 欧州連合共同研究センター、カナダ、フランス、ドイツ連邦共和国、スウェーデン、日本、スイス、イギリスの研究所で実施された試験。
  - デブリの「グラブ」サンプルと燃料棒のセグメントを含む。
  - ピーク温度、元素組成、化学形態、酸化状態、物質間相互作用、形態、核分裂生成物の保持、冷却速度・雰囲気に着目。
- 検査データ、単体テスト情報、解析コード結果、ディスカッションにより、重要なコンセンサス事故進展の知見が得られた。
  - 各RPV領域内の移設された物質の質量と組成
  - 核分裂生成物保持量
  - 冷却性
  - 酸化状態
  - 水素発生ポテンシャル

画像提供：JRC、INL

燃料補給、輸送、貯蔵の各活動に対応した試験

1986年から
2001年まで
INL TAN施設内
プールでの湿式
貯蔵

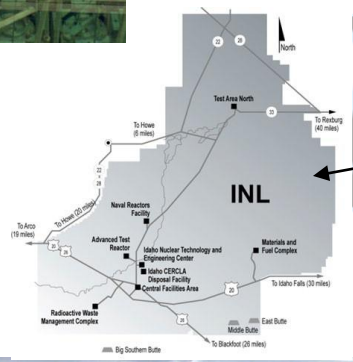
使用済燃料貯蔵

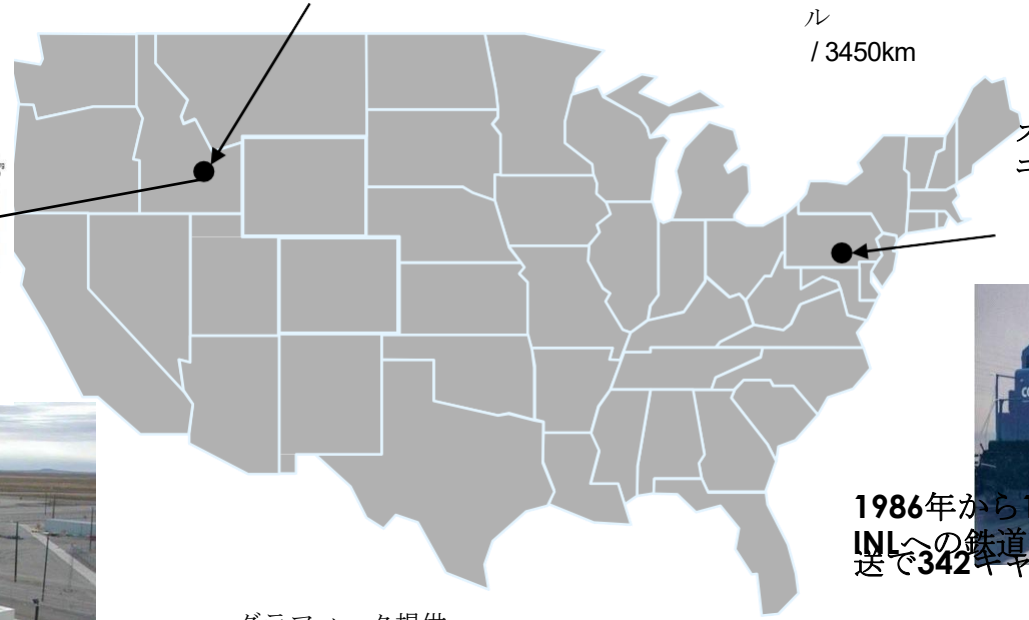
燃料と破片の貯蔵 アイダホ国立研究所 (INL)

鉄道輸送用キャスク 1個につき7キャニスター。1回の出荷で最大3キャスクまで。

~2200マイル
/ 3450km

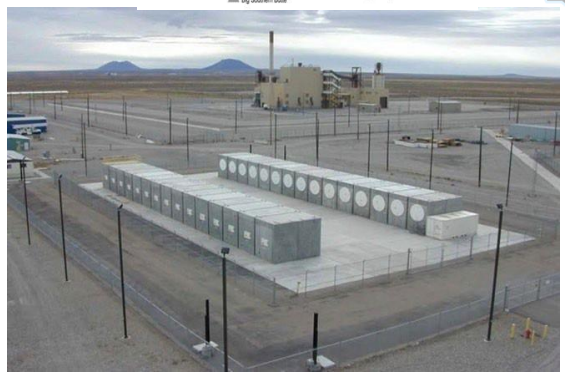
スリーマイル島 ペンシルバニア州ミドルタウン





グラフィック提供

2000 - 2001
プールから取り出し、脱水、乾燥し、INL TEC施設（25マイル /40km）にて乾燥貯蔵。



INLとEnergySolutions

1986年から1990年
INLへの鉄道輸送キャスクによる49回の輸送で342キャニスターの燃料と破片が発生

TMI-2とDaiichiの種類

よび

画像提供：東京電力ホールディングスおよびエナジーソリューションズ

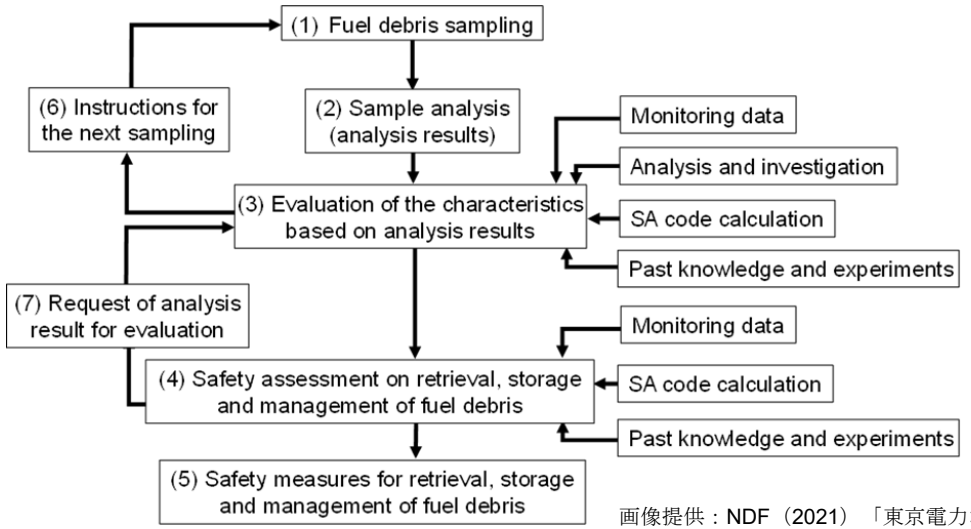
めの材料特性
- 最も汚染がひどい場所

■ 燃料補給の安全性に懸念がある可能性。
- 崩壊熱
- 再臨界
- 燃焼・発熱反応
- 放射性物質の放出（粉塵の発生）
- 格納容器または容器の構造的な不具合（荷重低下、地震現象）
- その他（産業労働安全、防火など）

■ ステークホルダーとのコミュニケーション

■ 知識が不完

閉会の辞



画像提供：NDF（2021）「東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の廃炉に向けた技術戦略プラン2021」。

- 当時、**TMI-2**の事故処理とクリーンアップの取り組みは、前例のないものでした。柔軟な「ステップ・バイ・ステップ」方式で課題を克服。
  - 情報要求に対する幅広いステークホルダーの意見
  - 専門技術開発（既存手法の応用）
  - コミュニケーションに役立つエンドステートダイアグラムと3Dモデル（新しいデータの取得に応じて更新されます）
  - シビアアクシデントシステム解析コード開発
  - 国内・海外番組
  - 透明性の高いパブリックコミュニケーション

- 日本は、より複雑な第一原発の**D&D**に対処するため、体系的な「ステップ・バイ・ステップ」方式を適用している。
  - 情報要求の特定と優先順位付けのための幅広いステークホルダーからの情報提供（日本文部科学省／米国DOE MOU）
  - モックアップによる先行技術開発とテスト（一部の技術は通常の運用・保守への応用もある）
  - コミュニケーションのための2Dおよび3Dビジュアライゼーション手法（新しいデータの取得に応じて更新されます）
  - シビアアクシデントシステム解析コードの拡張（その後のD&Dの促進）

  - 透明性のある公的コミュニケーション（ステークホルダーとの交流を促進するウェブサイト、公開会議など）。

- 国内外プログラム（事故経過の共通認識の促進）

- 透明性のある公的コミュニケーション（ステークホルダーとの交流を促進するウェブサイト、公開会議など）。