

# TMI-2の燃料取出し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：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

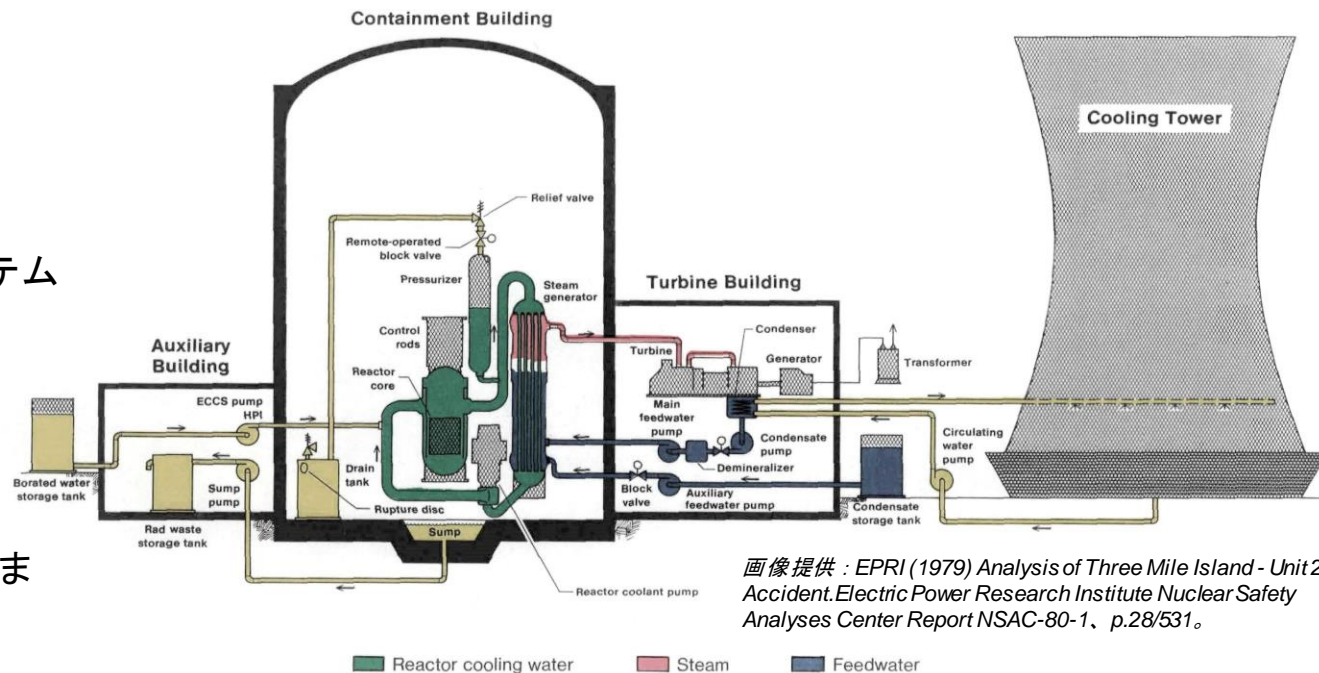
# 1979年3月28日 スリーマイル島 2号機(TMI-2)事故

## ■ 設計

- ・ 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/基)。
- ・ 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

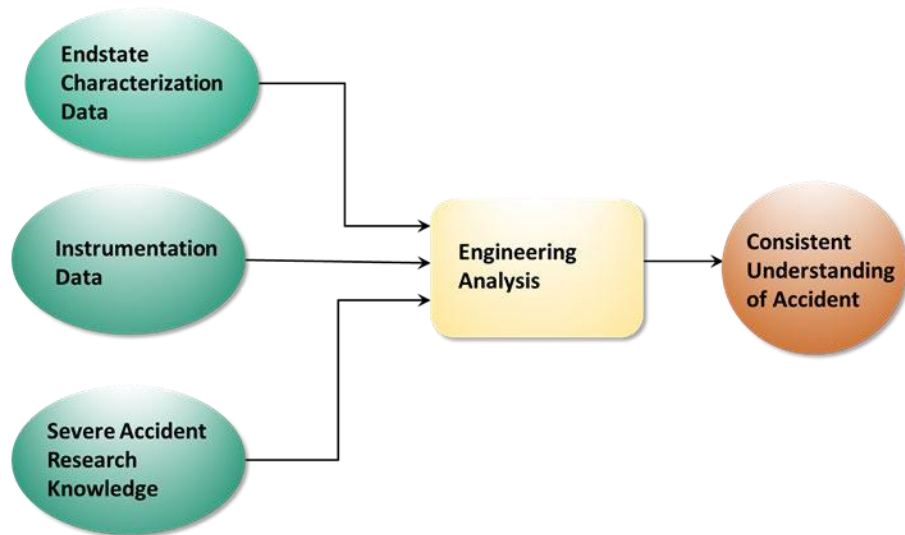
## ■ イベント推移

- ・ 復水研磨脱塩装置メンテナンス時に蒸気発生器給水が喪失
- ・ 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喪失事故に繋がった
- ・ 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%がボイド化; 2万kgの物質が原子炉圧力容器(RPV)下部ヘッドに移行
  - 水素の放出で格納容器に引火
- ・ 放射性物質の放出は限定的。15Ci (560 E9 Bq) の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人が最長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.

# 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
- 当初はプラントの安定化に努め、その後、クリーンアップに注力

- 以下の点に着目した活動の優先順位付けのポイント
  - 将来の放射線放出とサイトの危険性を最小化すること
  - 安全かつ効率的なクリーンアップを確実にすること
  - 資源が許す限り、事故の進展と原子炉の安全性向上に関する不確実性を低減すること
- 原子炉の安全に関する知見のために望ましく、クリーンアップのために必要な最も優先順位の高い情報

# 様々なデブリの取出し方法を採用

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

位置の形状やデブリの種類が異なれば、取出し方法も異なる。

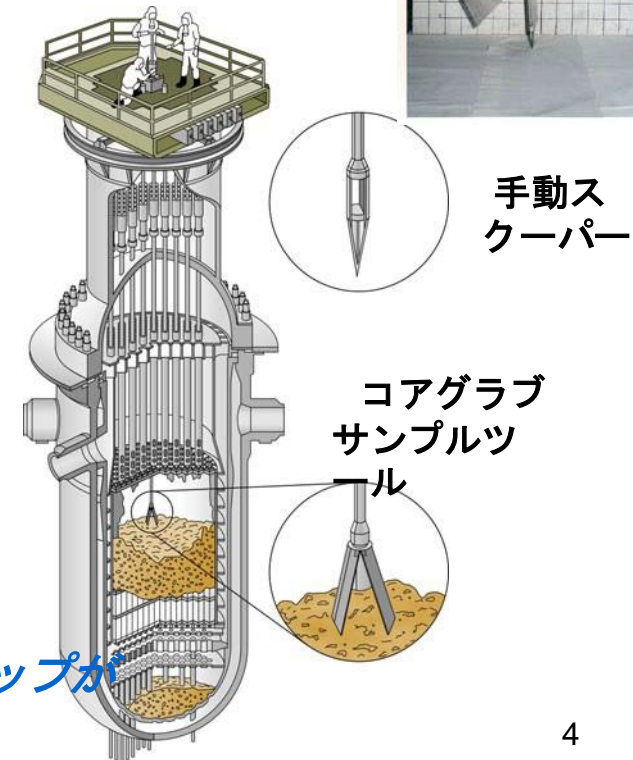
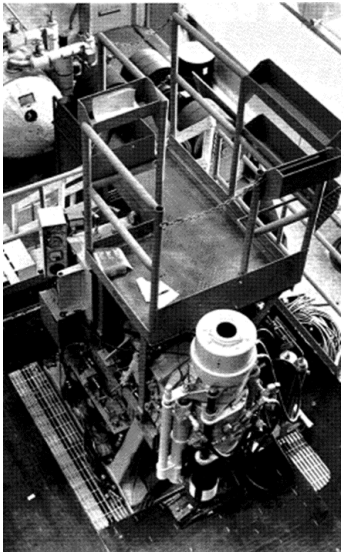
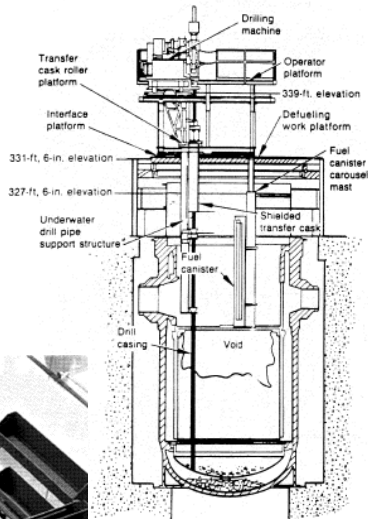
- コアボアマシン（溶融コア固化、LSCA切断）
- 切断（プラズマアーク、油圧剪断機、のこぎり）
- バルク除去（エアリフト）
- ミニ潜水艦（加圧器内）
- 手動制御機器（グリッパー、バケット）

## ■ 課題とその解決策

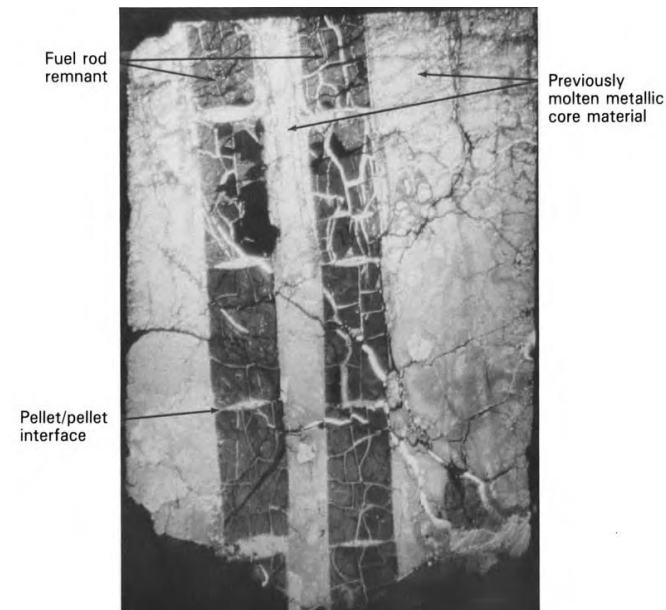
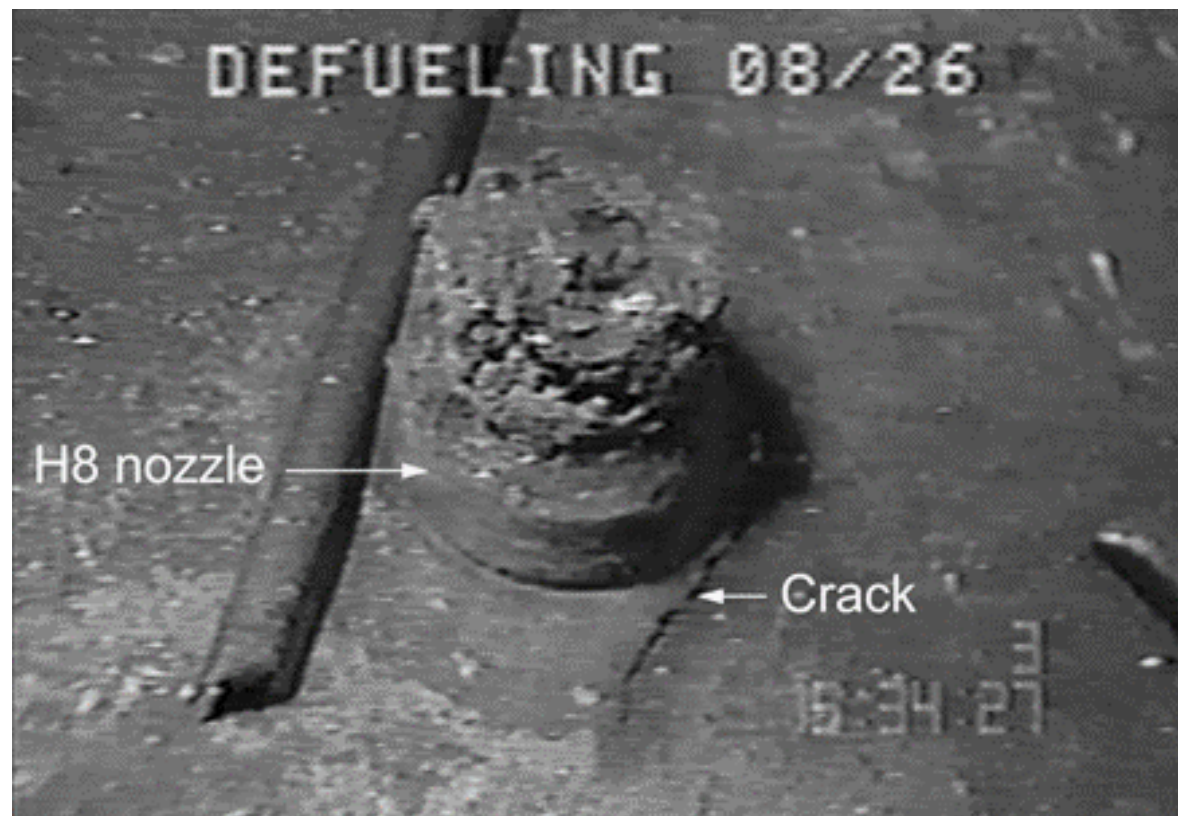
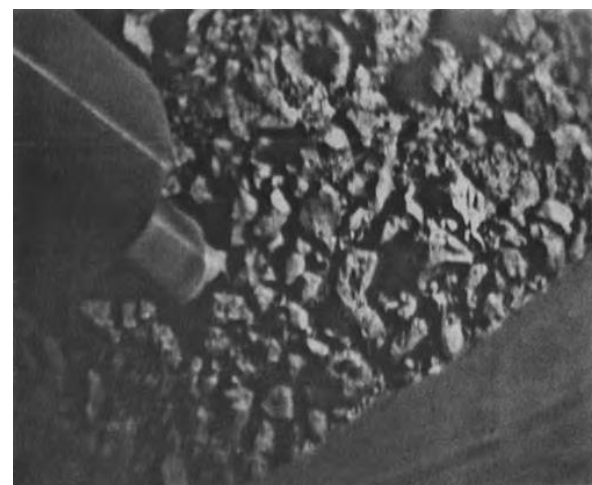
- 現場での修理（モックアップとテスト、予備品と修理用具）
- 異なるデブリ/構造物特性（プロトタイプテスト）
- 水の透明度（過酸化水素）
- 不均質性（サンプルの分布と質量）

TMI-2の原子炉容器と格納容器が無傷であることから、クリーンアップが容易になった。

コアボアマシン（適応型マイニングドリル）

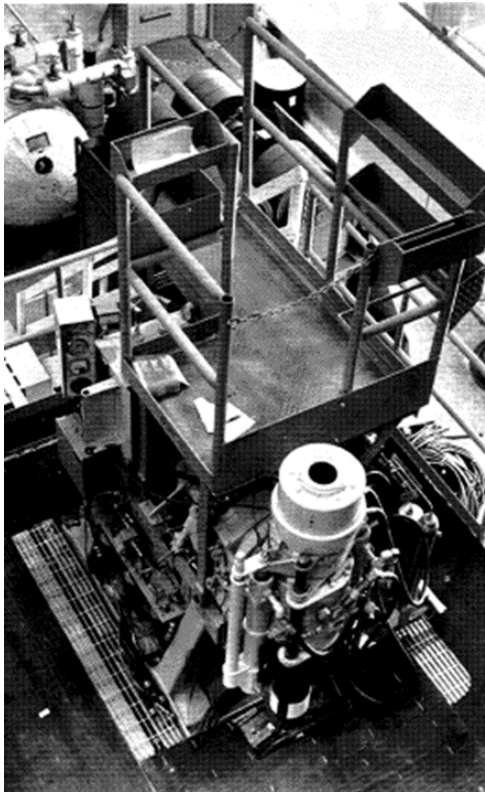


# クリーンアップと原子炉安全に関する知見につながる調査



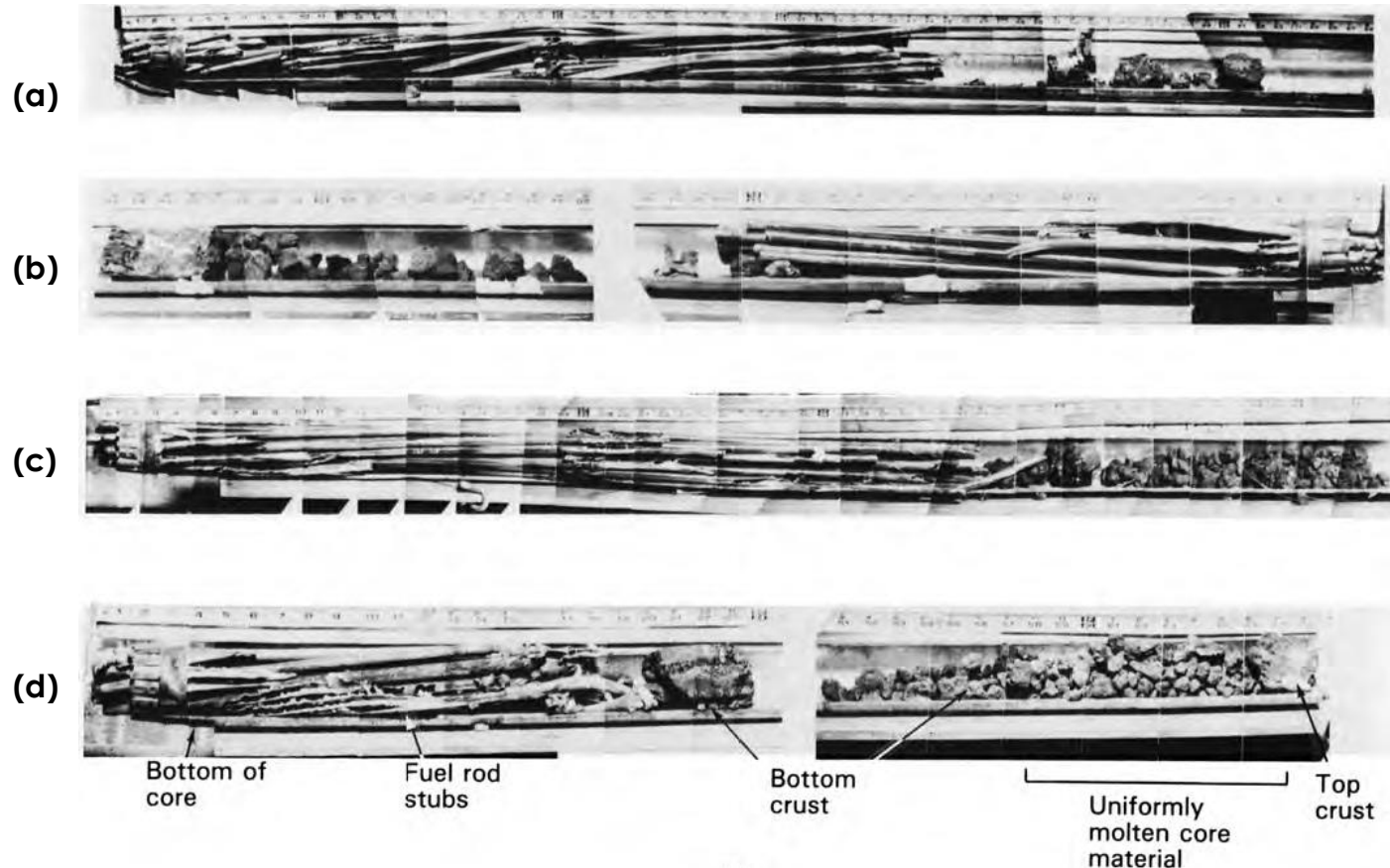
K-9の炉内画像からわかる物質間相互作用と被覆管溶融の様子

# 原子炉の安全性に関する知見を提供し、 その後の燃料取出しを促進したコアボアマシン



コアボアマシン（適応型マイニングドリル）

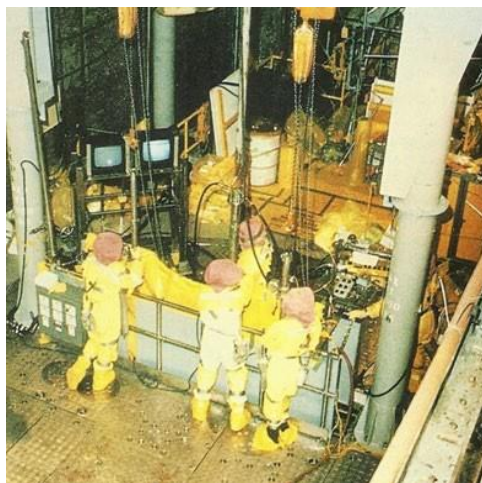
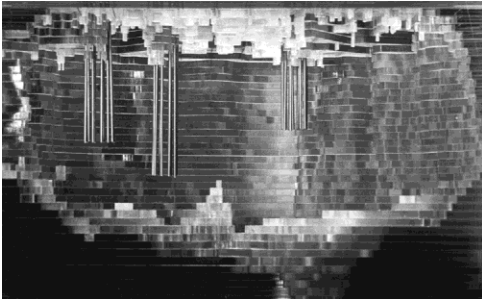
画像提供：INL、EnergySolutions



(a)周辺コア位置D8、(b)中心位置G8、(c)周辺位置G12、(d)中心位置K9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取出しを一時停止
- 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
- 主目的：過酷事故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
- 燃料取出しが再開されると、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

# TMI-2 調査の考え方



入手希望の情報	方法	計画上の用途・コメント
<b>オンサイト (In-situ)</b>		
デブリの位置、トポグラフィ、燃料及び構造物の損傷（歪み、スランプ、溶融、フラグメンテーション、酸化、非対称性等）	視覚イメージ（写真、ビデオ等）	炉心損傷とデブリ位置、溶融の進行、および後続のサンプル選択のための知見の獲得。除去前のサンプルの状態を記録  振り返り: 燃料取出しの計画・設計とモデルの開発・確認のための最も有用な情報であり、クリーンアップのためにも必要であった
デブリの位置とトポグラフィ	超音波トポグラフィシステム	映像のバックアップ、デブリ位置についての考察; 燃料取出し作業中に一貫して使用  振り返り: グロスモデルの開発・確認に有用な情報であった。デブリ除去、輸送、保管用機器の設計と認証のための確証データともなった

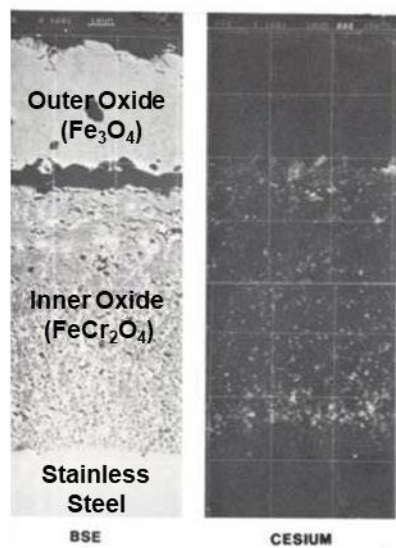
画像提供：  
EnergySolutions、INL

TMI-2試験依頼に関する追加情報については、

EGG-TMI-6169 (<https://inldigitalibrary.inl.gov/TMI/EGG-TMI-6169-r1.pdf#search=EGG%2DTMI%2D6169>)

を参照

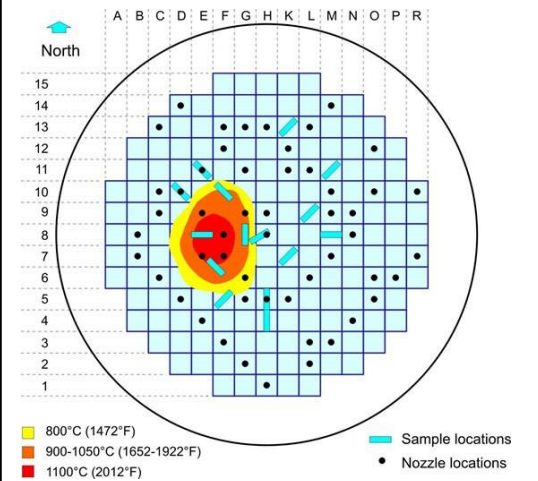
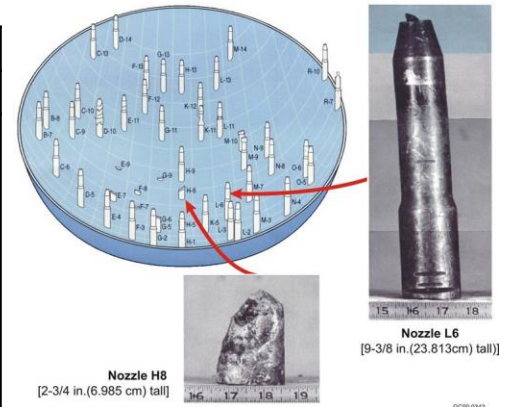
# TMI-2 調査の考え方 (続き)



画像提供 : INLおよび  
エネルギーソリューションズ



入手希望の情報	方法	計画上の用途・コメント
<b>ラボ</b>		
原子炉冷却水システムの構造とコンポーネントに関する情報 (ピーク温度、温度履歴および沈着した (deposited)核分裂性物質のインベントリ、分布、形状、サイズ(微粒子の場合))	化学、放射化学及び冶金試験、沈着した物質 (deposits)の物理的特性の計測のためのラボ技術	温度及び核分裂性物質の移動と沈着 (deposition)のコード予測のベンチマークのためのデータ。必要であれば新たなモデルを開発。  振り返りのコメント:核分裂性物質の分布及び温度に関する情報は、 <u>グロスモデル</u> の校正 (calibration)に使用

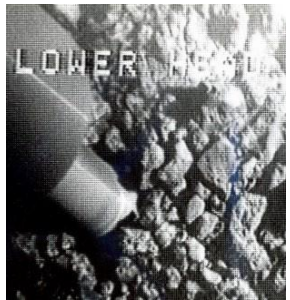




# TMI-2 調査の考え方 (続き)



破損した燃料棒

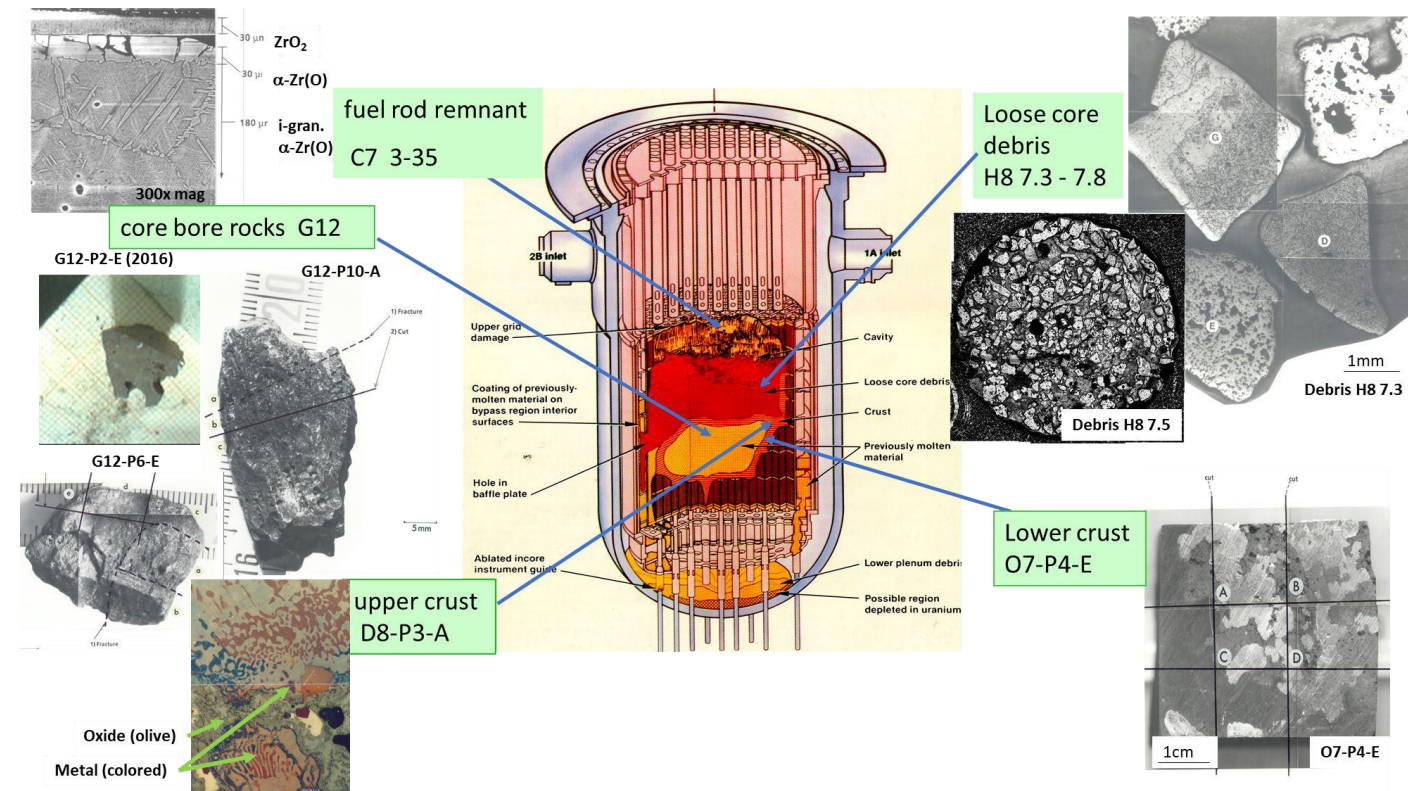


下部ヘッド

グラフィック提供：  
EnergySolutions

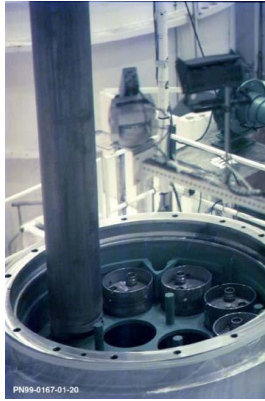
	入手希望の情報	方法	計画上の用途/コメント
コリウム、 圧力容器、 ノズルサンプ ル	剥離したデブリ - 組成、核分裂生成物の保持・放出、物理的 形状(サイズ、ポロシティ、浸透率)、ピーク温度、液化温 度、冷却速度)	ラボ  化学、同位体、元素、放射化学、 ガンマスキャン、金属組織調査及 び様々なラボベースの方法(プッ シュロッド膨張率測定、レーザー フラッシュ拡散率等)が、機械的 (硬さ、引っ張り強度、圧縮強度) 及び熱的特性(濃度、熱伝導率、 熱膨張係数、特定熱容量、液化 温度)把握のために用いられた	温度及び核分裂性物質の移動と沈着(deposition) のコード予測開発とベンチマークのためのデータ。 必要であれば新たなモデルを開発。原子炉圧力容 器の機能と潜在的な破損モードに関する知見の習 得。  振り返り:位置に依存する組成データと核分裂性 データはグロスモデルの校正に有用であったが、特 性は酸化とポロシティによって変化。未照射物質の データ取得は比較的容易(必要に応じ照射効果を 確認)。ピーク温度の情報はモデル結果のグロス校 正に対してのみ有用。燃料の取出し、輸送及び保 管のための機器の設計及び認証の確証データ。低 部ヘッドのデブリ・構造境界面の性状を把握するた めの追加データ・写真があれば有用だった
	燃料棒セグメント - 溶融し破片となったデブリ間の境界ないし 遷移領域における燃料棒の特性評価; 溶融していない (intact)ペレットの核分裂性物資の保持・放出、酸化燃料、 液化燃料、燃料・被覆管相互作用、被覆管に残った機能、 ピーク燃料及び被覆管温度		
	コア階層化サンプル(燃料と制御棒を含んだボアサンプル)- 組成(燃料と燃料以外の割合)、物質間相互作用(損傷、物 質間相互作用)、核分裂性物質の保持・放出、冷却に関する 情報(ポロシティ、浸透率)、核分裂性物質の保持・放出)		
	コンポーネント(スパーサグリッド、炉内計装機器、エンド ピース、容器の鋼(vessel steel) - ピーク温度と物質間相互 作用の特性評価		
	容器下部ヘッドに移行したデブリ(破碎後のデブリ硬化層から のグラブサンプル) - 組成、核分裂性物質の保持・放出		

# 事故進展の知見に関するコンセンサス形成のための 国際的参加の重要な面



- 国際プログラムでは、サンプル調査、単体試験、システム解析コード計算などが実施された。
- EU共同研究センター、カナダ、フランス、ドイツ、スウェーデン、日本、スイス、英国の研究所により実験は実施された。
  - 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
- 調査データ、単体テスト情報、解析コード結果やディスカッションにより、事故進展に関する重要な知見のコンセンサスが得られた。
  - 各RPV領域内の移動した(relocated)物質の質量と組成
  - 核分裂生成物保持
  - 冷却性
  - 酸化状態
  - 水素発生の可能性

# 本調査は燃料取出し、輸送、貯蔵を支える手助けになった



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



1986年から2001年まで  
INL TAN施設内  
使用済燃料貯蔵  
プールでの湿式貯蔵



鉄道輸送用キャスク1基につき7  
キャニスター、  
1回の出荷で最大3キャスク

燃料と破片の貯蔵アイ  
ダホ国立研究所 (INL)

~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



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キャニスター分の燃料とデブリ  
を運んだ



画像提供：INL、  
EnergySolutions

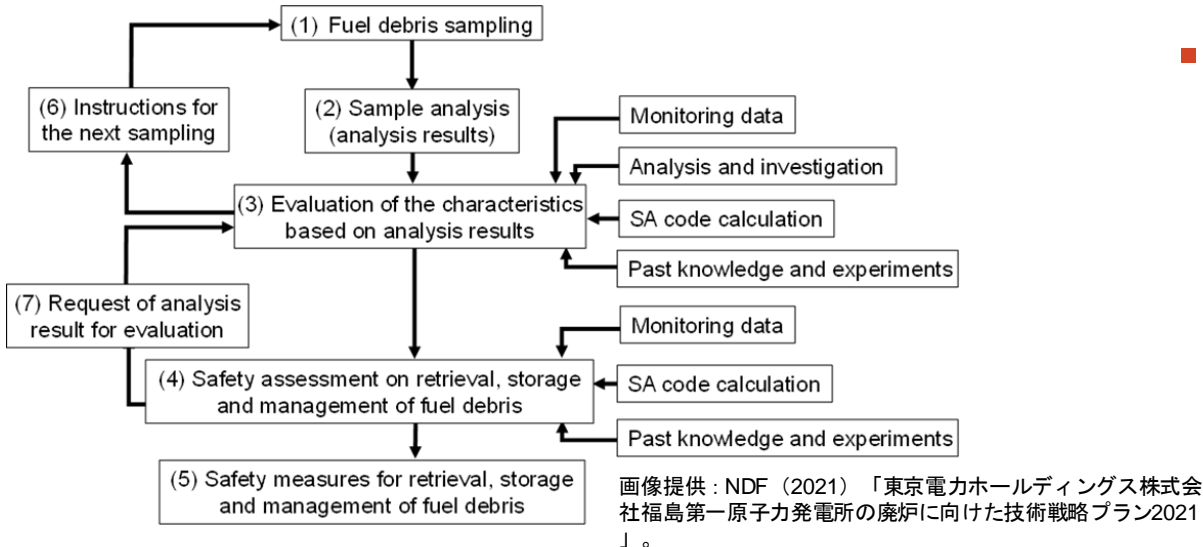
# TMI-2と1Fの燃料取出しの課題は似ている



画像提供：東京電力  
ホールディングス、  
エネルギーソリューシ  
ョンズ

- 知識が不完全であること
  - 燃料含有物質の位置
  - 取出し装置や出荷用キャニスターを設計するための材料特性
  - 最も汚染がひどい場所
- 燃料取出しの安全性の懸念
  - 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）
  - 格納容器または圧力容器の構造的欠陥（荷重低下(load drop)、地震）
  - 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

# 最後に



## ■ 当時、TMI-2の事故とクリーンアップ作業の課題は前例のないものだったが、「ステップ・バイ・ステップ」方式でフレキシブルに取り組んだ

- 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（新たなデータの取得に応じて更新）
- 過酷事故システム解析コード開発
- 国内・海外プログラム
- 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1F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（日本の文科省と米国DOEとの覚書）
- 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（新たなデータの取得に応じて更新）
- 過酷事故システム解析コードの拡張（その後のD&Dの促進）
- 国内外プログラム（事故進展に関する共通認識の促進）
- 透明性のあるパブリック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）