

1 Fデブリ取り出しに向けて -TMI-2で内部調査/デブリ分析データが どのように利用されたのか-

原子力安全部会「原子力安全夏期セミナー」発表資料

原子力損害賠償・廃炉等支援機構
技術グループ 審議役 倉田 正輝

いわき産業創造館、2024年9月2～3日

本日の概要

- はじめに
 - ◆TMI-2デブリ取り出しの時系列調査のモチベーション
- TMI-2内部調査の概要、炉内状態推定の変遷/精緻化
 - ◆Quick Look、コアボーリング、下部プレナム、コアフォーマ領域、圧力容器底部 → 事故炉の最終形態を推定
- TMI-2デブリサンプルの分析（分析方法、データ整理、代表性）
 - ◆炉心上部、ルースデブリ、コアボーリング、下部プレナム
- 内部調査・デブリ分析データの反映
 - ◆取出しの基本構想、取出しツール・収納缶の設計、検討課題
- 1F炉内状況推定、デブリ分析に向けて
 - ◆TMI-2の知見を参考に

はじめに

本調査のモチベーション： いよいよ始まる1Fデブリの分析の参考知見として、TMI-2事故では、内部調査/デブリ分析で得られた知見がどう整理され、デブリ取り出し方法にどのように反映されたのか、をまとめた。

- **事故直後の炉内状況推定 (GEND-007) [1]：** 損傷は軽微との推定が主流
Pick-and-plate工法を採用（圧力容器内で収納缶に挿入、吊上げて貯蔵プールに移送）、収納缶を基本設計、懸念事項を抽出し、内部調査計画に反映
- **Quick Look調査 [2]：** 炉心上部の損傷状態を確認、上部空洞、ルースデブリ堆積
収納缶の設計変更、炉心上部構造物を空中で解体、遠隔手動/長尺ツール工法を採用、取り出し開始
- **初期トラブル対応 [3,4]：** 微生物による懸濁等 取り出しツールや周辺システムの改良
- **ボーリング調査/下部プレナム調査 [5-8]：** 炉心中央～下部の損傷状態を確認
取り出し工法に反映（コアボーリング、プラズマアーク、など）
- **コアフォーマ領域/圧力容器底部の調査 [4,9,10]：** 損傷状態を確認
取り出し工法に反映、一部は国際協力
- **デブリサンプルの分析 [5-13]：** # **デブリ全体を代表するサンプルは存在しない**
 - 取り出し領域ごとに、**サンプリング方法を工夫**
 - 外観観察・物理分析、微細構造分析、化学/放射化学分析で、**(i) 堆積状態（形状、稠密度など）、(ii) 元素・核種分布の傾向、(iii) 物理化学特性の範囲、事故時ピーク温度**などを、定性的に整理
 - 得られた知見は、対象領域のデブリ取り出しに反映
 - さらに、事故進展シナリオ/炉内状況推定図を精緻化することで、次の段階の内部調査やデブリ取り出し方法に参照

TMI-2での燃料取り出し 基本構想

燃料デブリ取り出しの基本検討

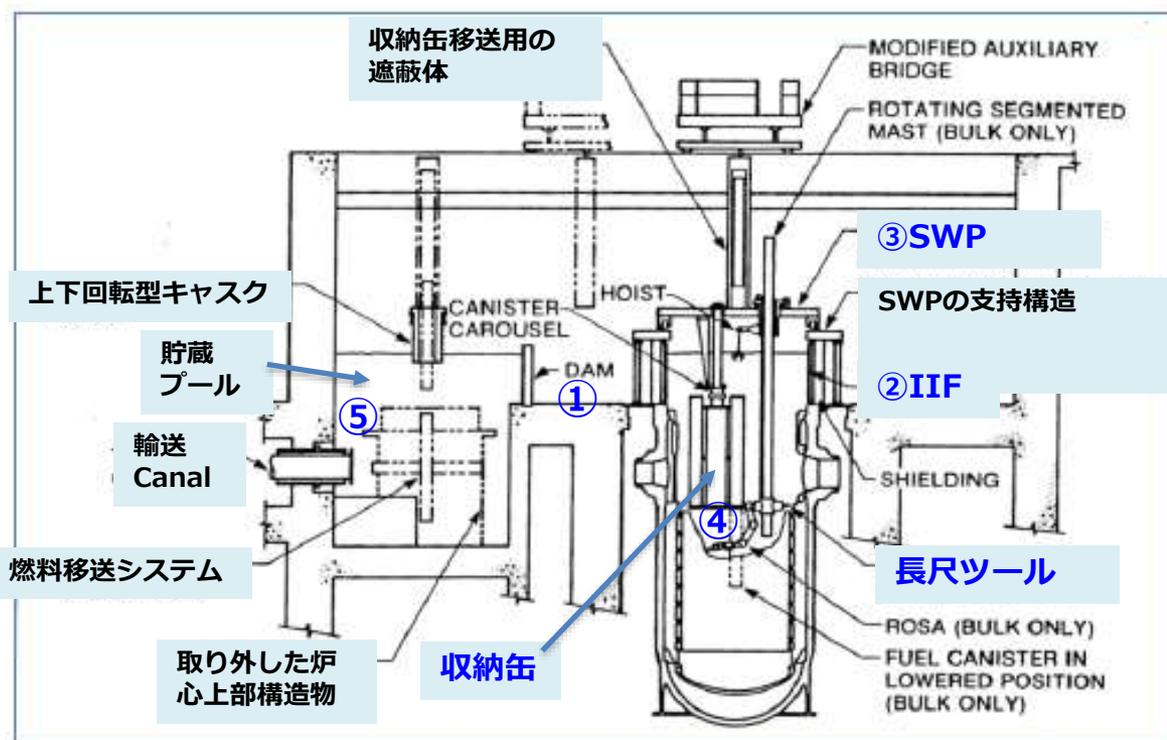
➤ Pick-and-place工法の基本検討（事故後、約2年で選定）

- 事故直後に、炉心損傷は軽微であると認識共有[1] →燃料集合体サイズの収納缶を基本設計（**Fuel Canister**：35cmΦ、3.7m長）
- ロボット方式、遠隔主導方式を比較検討 →信頼性の観点で**遠隔手動方式**を選定

➤ 取り出し工法基本設計（84.5）

基本検討に、**Quick Look**（後述）で得られた知見を反映

- ① 燃料輸送Canalの浅瀬部分を区切り、圧力容器へのアクセスルートに使用
- ② 圧力容器上部ヘッドを取り外し、**IIF** (Internals Indexing Fixture: 2m高) 設置、水位かさ上げ
- ③ IIFの上に、回転式作業台：**SWP** (Shielded Work Platform)を設置、取り出しツールや収納缶吊り下げ
- ④ 燃料デブリは、圧力容器内の水中で収納缶に回収、上部空間で遮蔽容器に収納し、貯蔵プールに移送
- ⑤ 収納缶は、使用済み燃料プールに一時保管後に、INELに輸送

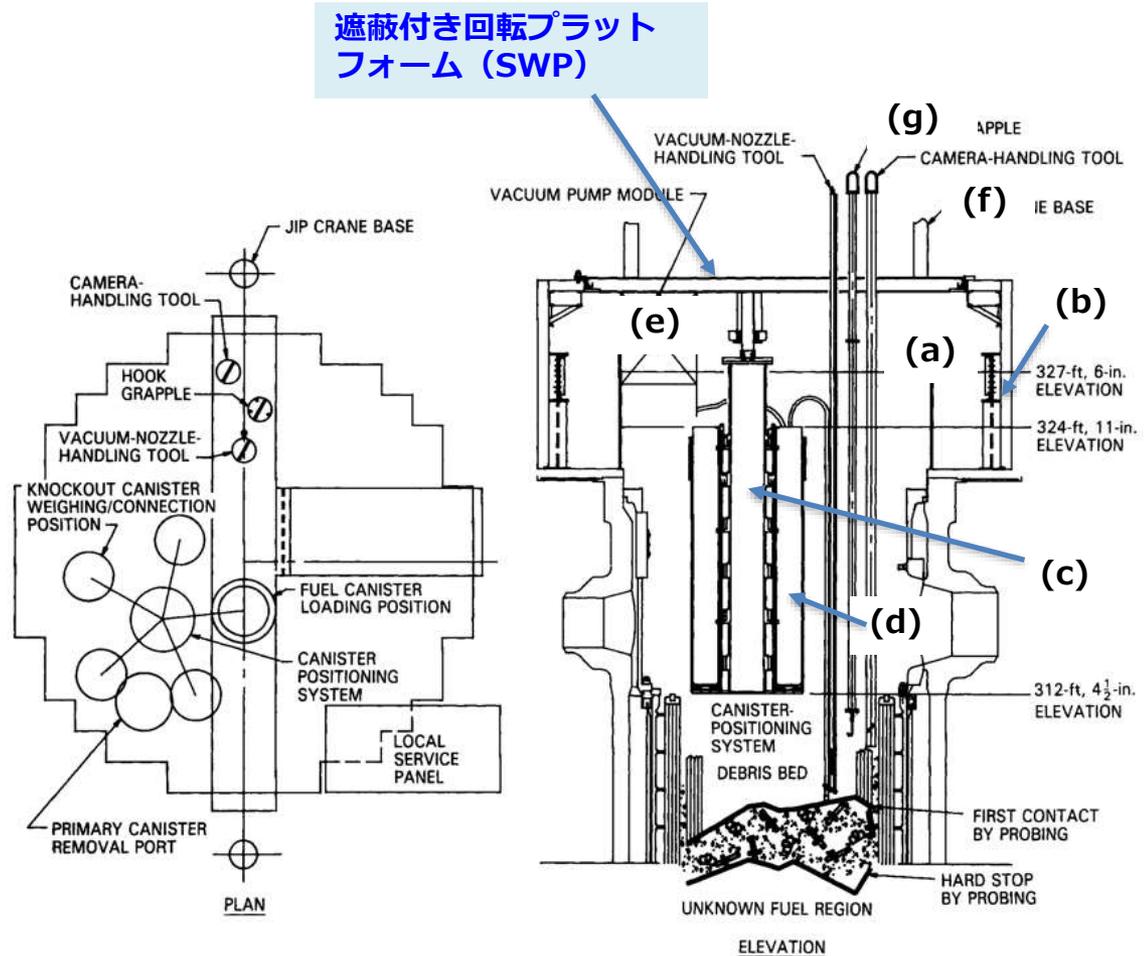


TMI-2でのデブリ取り出しの基本構想 [3]

燃料デブリ取り出しシステムの概要 -SWP-

➤ SWP設置 (85.8)

- a. IIF
- b. SWPの支持構造(回転式)
- c. 収納缶サポート(カルーセル)
周囲に収納缶配置
デブリ取り出し時に収納缶位置下げ
- d. 収納缶
- e. 真空吸引システム
- f. ジブクレーン
- g. 長尺ツール



SWPの概念図 [4]

TMI-2での内部調査 デブリ取り出しへの知見反映

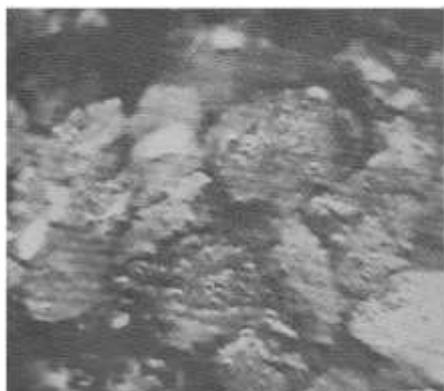
-Quick Look-

Quick Look -炉心上部の調査-

➤ 小型ビデオカメラによる調査 (82.7~8、3回)

- 炉心上部の制御棒案内管(CRGT)から、小型カメラ(3.2cmΦ)を12m下まで挿入
- **炉心中央に空洞**(約1.2m深さ)、**その下に瓦礫層**
- 瓦礫中に、破砕された燃料棒やペレット、可燃性毒物棒($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$)、スパイダー等を観測
- 探査プローブで堆積物をつつくと、表面から36cm侵入可能
- 上部構造物に大きな歪みや損傷は検出されず、**上部格子に燃料集合体の残留上部が固着**
- 炉心周辺には、**破損した燃料集合体が残留**

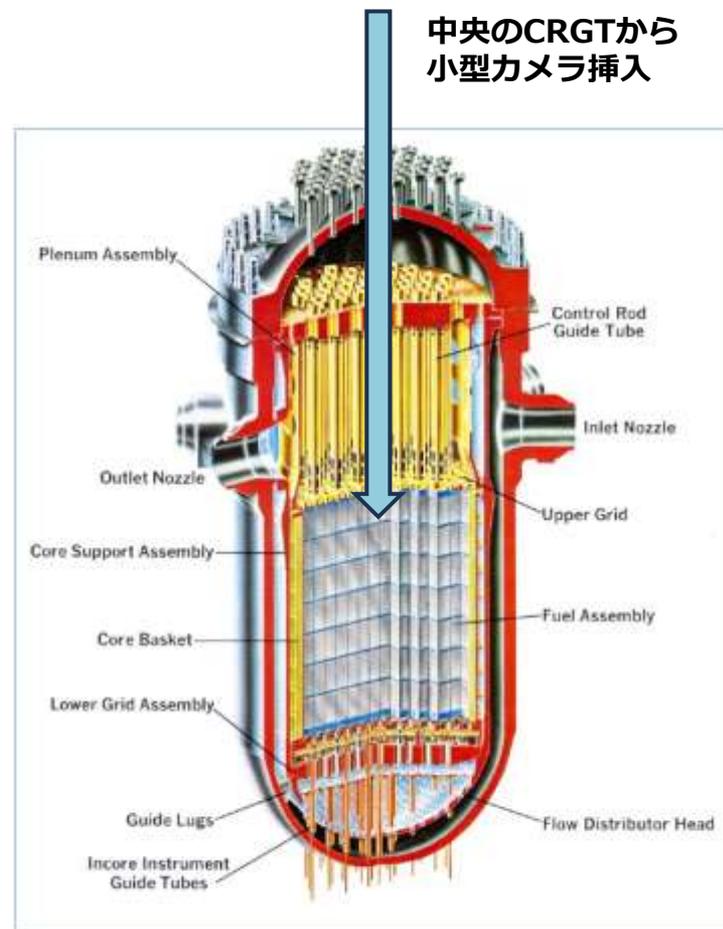
➔ 炉心上部の損傷は軽微でないことを確認、炉心上部のデブリ取り出し、炉心下部以下の内部調査計画に反映



炉心中央の空洞下瓦礫 [3]



炉心周辺部の破損燃料棒 [3]



事故前の圧力容器内の構成 [3]

Quick Look –Underhead Characterization–

➤ 上部ヘッドの内部調査 (82.12~83下期) [14]

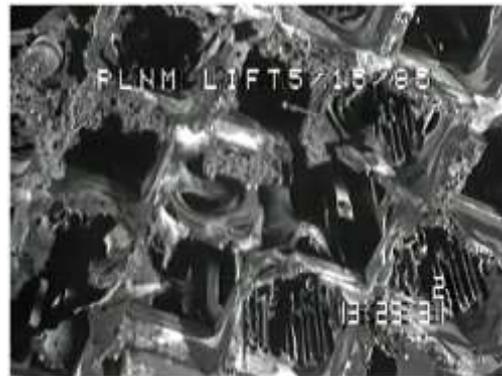
- 線量測定 → 0.4~6Sv/h
- 上部ヘッド内面と構造物のビデオ調査 → 大きな損傷なし、上部格子にインコネル溶融の痕跡
- 付着物サンプル採集 → 発火性試験、自然発火性なし
- リードスクリー移動試験 → 線量分布の変化なし

➤ 工法への反映

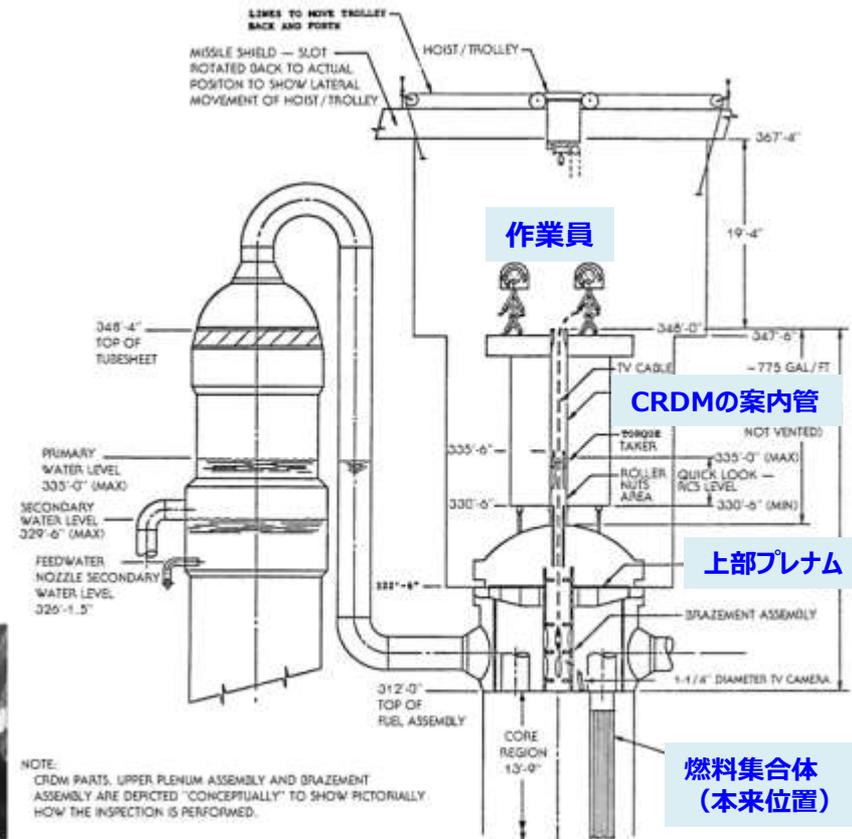
- 水没させずに、上部ヘッドを外せると判断**
- 懸念された、自然発火性については、**ジルコニウム水素化物**が、ほとんど検出されず

➤ 事故進展 (ピーク温度)

- 上部構造物 : <1250K
- 上部格子 : <1700K



上部格子の付着物 [3]



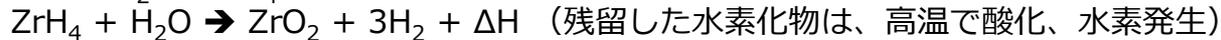
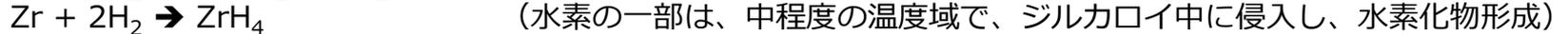
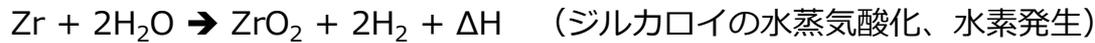
上部ヘッド内部調査の概要 [4]

デブリの自然発火性について

➤ Zr微粉の自然発火性・・・事故直後、PEISレポート[27]で指摘

- U,Pu,Ce,Nd,Zr,TiなどのIII,IV族元素の金属微粉は自然発火性を有する（再処理、貯蔵、処分などでの課題）
- TMI-2事故では、Zr水素化物、Zr金属、U-Zr合金、の微粉末について検討が必要（#NRCは、特に水素化物の自然発火性を重視）
- 仮に、これらの物質が事故過程で形成されており、デブリ取り出し作業中に切断面が空气中に露出されると、自然発火、さらには金属火災に至る可能性があり →可能性を排除できるロジック構築が必要

➤ 水素化物形成の化学反応・・・乾燥水蒸気とジルカロイの反応



➤ デブリ取り出し工程での懸念

- Zr水素化物微粉がデブリ中に残留していた場合、**水中での自然発火可能性**
- Zr水素化物微粉が炉心上部構造物に付着していた場合、上部ヘッド取り外しの際に**空気中での自然発火可能性**
- 取り出した燃料デブリ切削粉が、収納、貯蔵、処分、などで、**空気中での自然発火可能性**

水素化が起こる温度範囲は、
1200~1600℃くらい
事故時だけでなく、通常運転中
にも、被覆管内に形成される

➤ NRCによる評価、許認可

- 模擬試験により、水中での自然発火が起こる可能性は極めて低いと判定された。
 1. 冷却系フィルター回収物の分析（水素化物の探索）→自然発火性物質は検出されず
 2. ルースデブリの着火試験 →若干の発熱はあるが、燃焼は継続しない
- 空気中での自然発火性については、許認可項目に位置付けられ、以下を説明することとされた。
 1. TMI-2事故過程では、自然発火に十分な量のZr水素化物が形成されなかったこと
 2. 仮に、自然発火に至る物量のZr水素化物が発生していたとしても、事故進展中のガスフローでは上部プレナムに移行しなかったこと
 3. 自然発火性の微粉末が酸化物デブリ中に分散、あるいは混入していたとしても、自然発火条件には至らないこと

➔ 金属デブリ残留にかかわる課題は、自然発火性よりむしろ、貯蔵時や収納缶開封時の水素発生の課題として検討されることになった。

Quick Look –上部ルースデブリのサンプリング–

➤ コアデブリサンプリング計画（83.9～10）

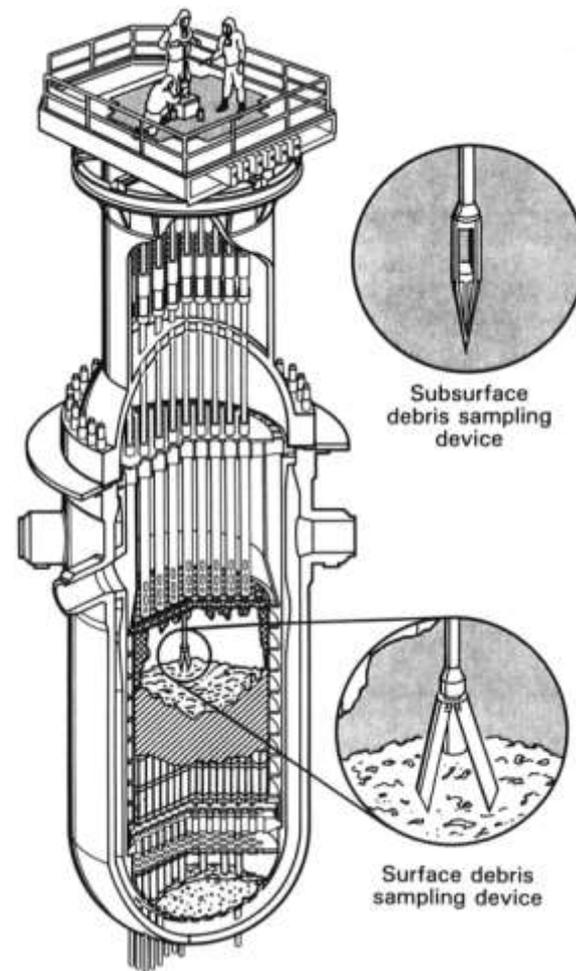
- **探針調査**（1.3cmΦのSS棒、回転させ自重で挿入、63か所）
→ ルースデブリの堆積深さ、約1m下に硬い層を確認
- **ルースデブリのサンプリング**（サンプラー、炉心中央と炉心中間、深さ方向、合計11か所、各約17～170g）

➤ デブリサンプルの分析方法

- 物理分析： 粒子の外観、粒度分布、かさ密度、など
- 微細組織分析： 金相、SEM/EDX、オージェ分光(**酸素濃度**)
- 化学・放射線分析： ICP、放射線
- 自然発火性、脱水/乾燥性、FP浸出の確認試験、磁性測定

➤ 工法への反映

- マクロな粒度/かさ密度の分布 → 収納缶と取り出しツールの設計改良
(収納缶設計追加、粉末・粒子の真空吸引システム)
- **マクロな炉心物質・FP分布の変化**を、ウランやCe-144に対する相対比として、定性的に評価 → デブリ取り出し工法に参照
- 微細組織分析で、デブリ成分を **5タイプに類型化**
→ **上部ルースデブリの物理化学的な特性の範囲を定性的に推定**



探針調査、ルースデブリサンプリング [15]

Quick Look –上部空洞のマッピング–

➤ Reactor Core Topography計画 (83.8~9)

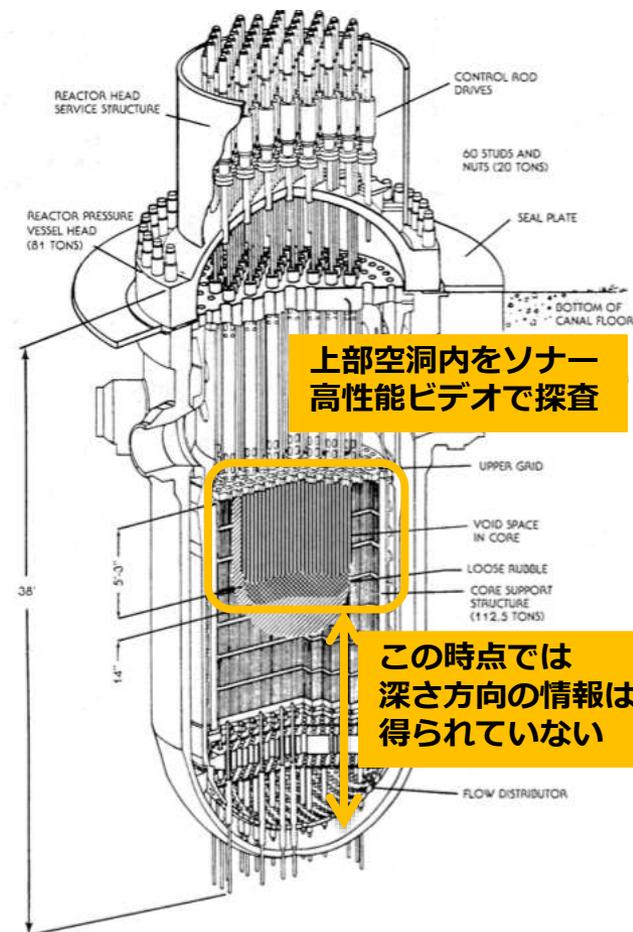
- ソナー調査(50万点) → 空洞の形状、周辺の破損・残留状態
- Topographyモデル作成(83.12) → 空洞容積(炉心の26%)、燃料集合体(上部格子ぶらさがり、炉心周辺残留)の状態

➤ Reactor Core Video Mapping (84.4)

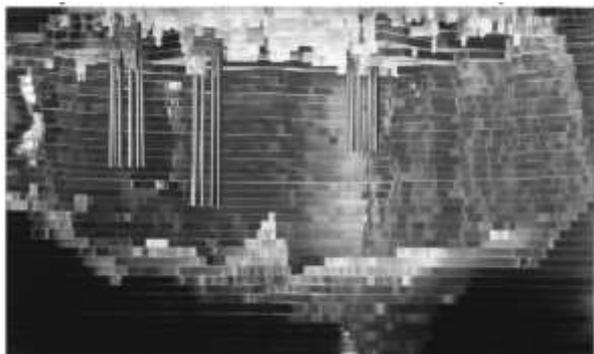
- 上部空洞内の詳細ビデオ観察 → モザイク/パノラマ写真

➤ 工法への反映

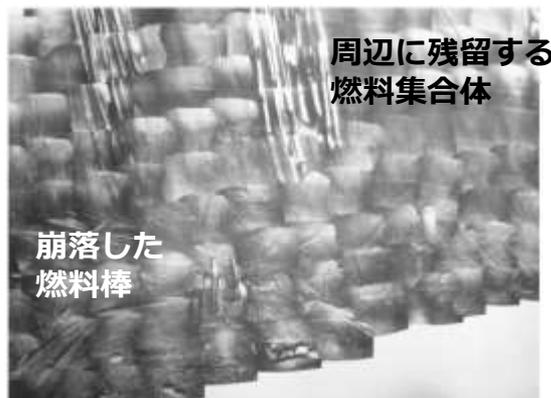
- **空洞をデブリ取り出しの作業空間に利用することを決定**
- 収納缶吊り下げの位置決め、ルースデブリ/残留集合体回収の順番と具体的な方法の検討 (主な治具：チゼル、シャーリング、ソー、ハンマー、ボール、など)



1982-1985時点での炉内状態推定 [3,4]

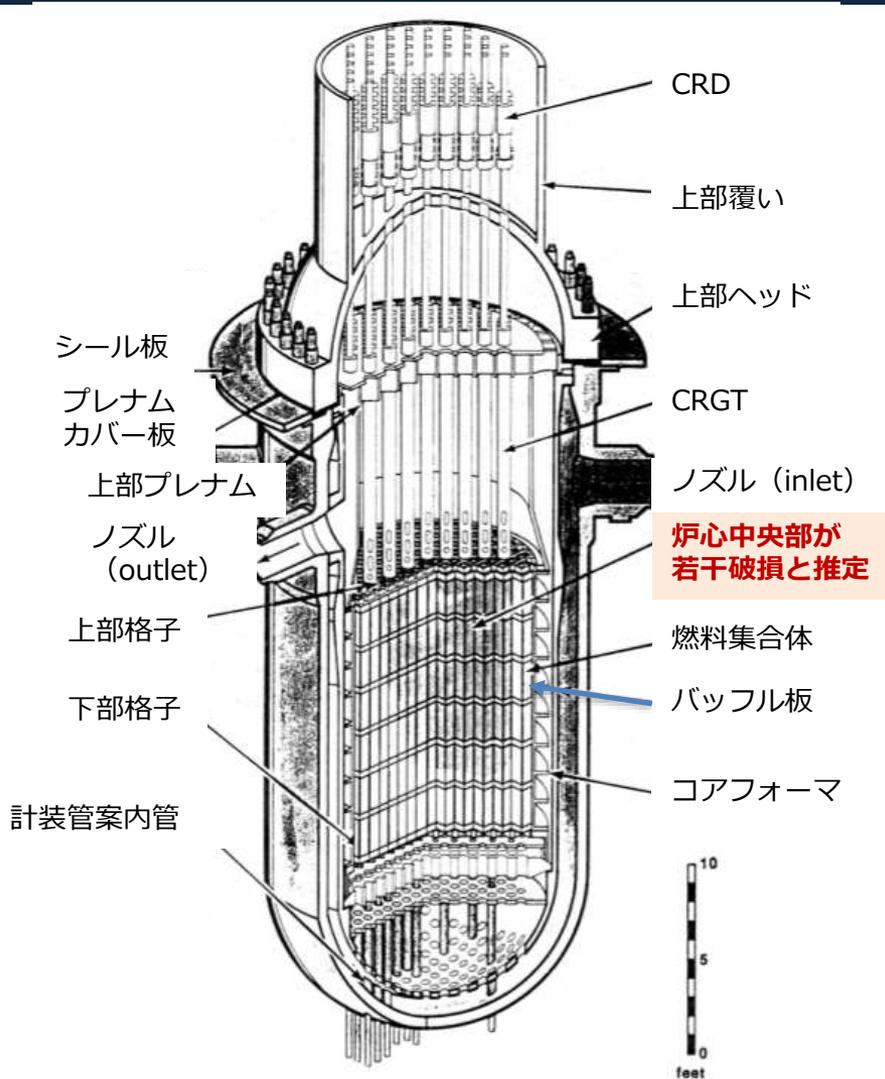


上部空洞のTopography [3]

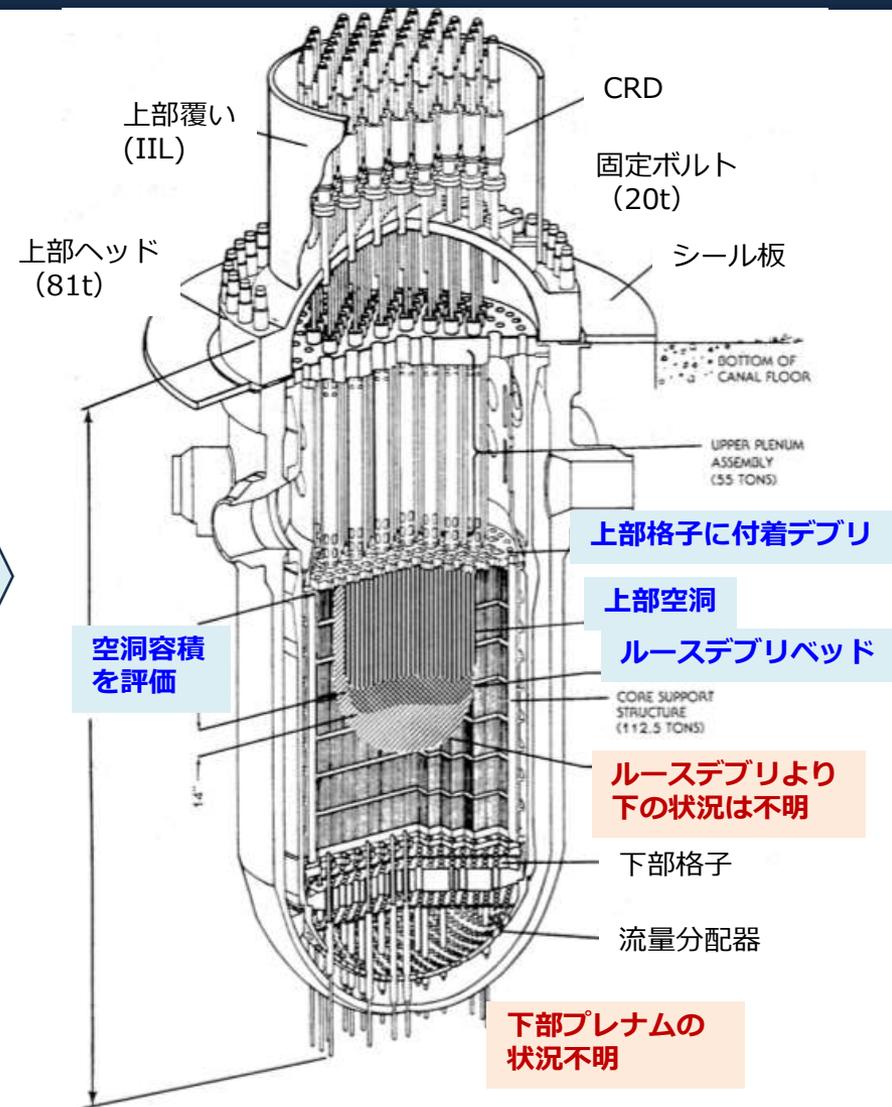


上部空洞のモザイク/パノラマ写真 [3]

状態推定の変遷① -Quick Lookを反映-



圧力容器内部調査以前 (1979-1982) [3,4]
(#炉心損傷は軽微と推定されていた)



炉心上部の調査以降 (1982-1985) [3,4]

上部ルースデブリの分析

➤ 物理分析：粒度、分布、かさ密度、など

- ✓ 堆積厚さ： 0.6～1m
- ✓ 粒子サイズ： 1～5mm(約90%)、最大20mm
- ✓ かさ密度： 3.5～3.8g/cm³ (堆積上部)
5.0～5.5g/cm³ (堆積底部)、粉末デブリ存在
- ✓ 混合性： 様々なタイプの粒子がよく混合

➤ 微細組織分析(金相、SEM/EDX、オージェ分光)

- ✓ デブリ成分を **5タイプに類型化、特性の範囲を定性的に判定**
 - Type-I 破碎されたペレット
 - Type-II 酸化・破碎された被覆管
 - Type-III 熔融凝固物: (U,Zr)O₂
 - Type-IV 金属材料の熔融凝固物
 - Type-V 燃料棒成分と構造材成分の酸化物混合物

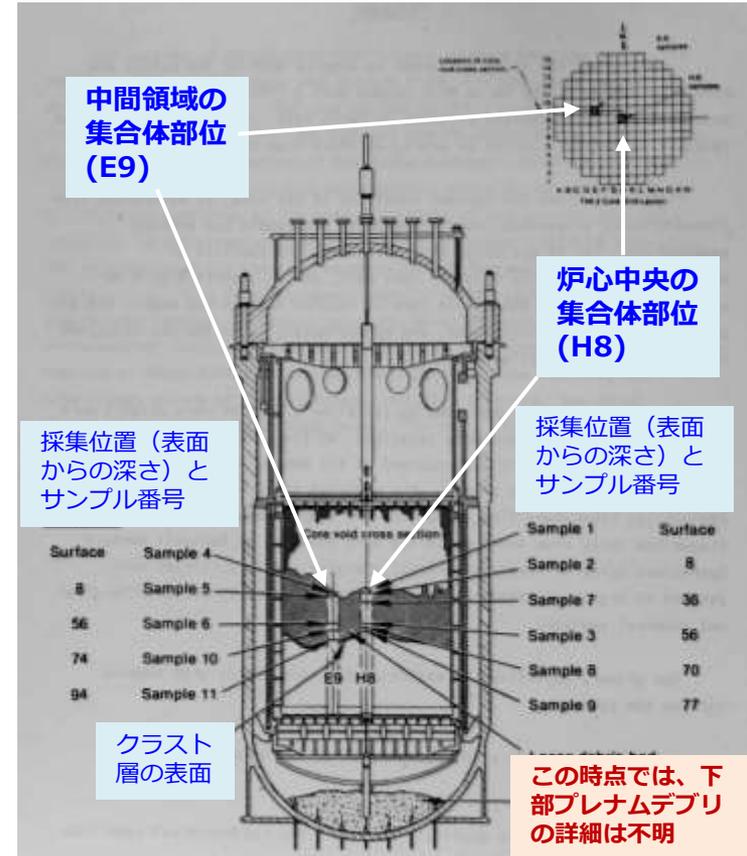
➤ 化学分析(ICP)、放射線分析

- ✓ **ウランやCe-144に対する濃度比**の分布として整理
- ✓ **Zrの>50%、SSの>30%が、選択的に下方に移行**
- ✓ Ag>90%、In,Cd~100%、揮発性FPなどが蒸発
➔ **ルースデブリ表層で濃化、揮発性物質のトラップ?**

➔ **収納缶の設計、デブリ取り出し工具 (ツール、デブリバケツ、など) に反映**

11か所サンプリング

➔ある程度の深さ・径方向の分布評価



ルースデブリのサンプリング [5,6]

化学・放射化学分析の方法

➤ 分析手順

- 領域ごとに、微粒子サンプル（20～200mg）を採集
- Pyrosulfate fusion technique**で溶融
 - # 不溶性残差あり、Agを多く含むため
- 炉心構成物質について、定量分析(ICP)結果を、主要な炉心構成元素の平均組成（右図）に対する変化として整理**
 - ✓ U/Zr、U/Fe、Fe/Ni/Cr、Zr/Sn、Ag/In/Cd、U/Gd、などで、データ整理
 - ✓ 炉心構成物質ごとに、分布の傾向を調査（燃料棒、制御材、可燃性毒物、SS/Inconel、など）
- FPについて、揮発性で区分し#1、代表的な核種を抽出、定量分析(放射線)結果を、UやCe-144に対する比として整理、ORIGEN-IIの計算結果と比較**
 - ✓ 高揮発性 **I¹²⁹, Cs¹³⁷**
 - ✓ 中揮発性 **Sr⁹⁰, Sb¹²⁵, Ru¹⁰⁶, Eu¹⁵⁴**
 - ✓ 低揮発性 **Ce¹⁴⁴**
 - ✓ ORIGEN-IIの計算結果の補正（最外周の燃料集合体はのぞく）

事故前のTMI-2炉心平均組成 [11]
主要15元素について（組成>0.01%の元素）

元素	炉心平均濃度 (wt%)	元素	炉心平均濃度 (wt%)
U	65.8	In	0.3
Zr	18.0	Sn	0.3
O	8.5 (事故時の酸化度上昇を除く)	Al	0.2
Fe	3.0	B	0.1
Ag	1.8	Cd	0.1
Cr	1.0	Mn	0.08
Ni	0.9	Nb	0.04
		Gd	0.01

#1 FPの揮発性の区分

高揮発性：希ガス、ハロゲン、Se、Te、アルカリ
中揮発性：沸点がUO₂融点以下(<3120K)、アルカリ土類、希土類/遷移金属の一部、Am、Cm。ただし、Ru、Moは酸化度により揮発性が変化、Euはやや揮発
低揮発性：アクチノイド、希土類、貴金属

#1 B.G. Schnitshler and J.B. Briggs, TMI-2 Isotopic Inventory Calculations, EGG-PBS-6798, 1985.

サンプル代表性について – 上部ルースデブリ–

➤ 上部ルースデブリサンプルの状態

- デブリは、事故進展の過程で、本来の炉心構成物質（燃料棒、制御棒、スパーサグリッド、など）と異なる物質に変化（破損燃料棒、破損制御棒、溶融凝固物、など）し、非均質に混合・堆積
- サンプル採集位置と物量に限界（炉心中央と中間の2か所、深さ方向に11個、各17～170g）

→TMI-2でも、サンプル代表性についての議論があった。#デブリの平均的な特性を代表する粒子は存在しない

➤ デブリ取り出しに必要な情報

• デブリ取り出し方法を決定するための知見・データ

- ✓ マクロな物理的特性を評価（深さ方向/径方向の粒度分布とかさ密度変化、粒子の硬さ、など）
- ✓ 画像データと照らし合わせ、治具や収納缶の設計、運用方法を決定

• デブリ取り出しの安全評価（臨界安全、取り扱い安全、線量、計量、など）のための知見・データ

- ✓ 溶融凝固の痕跡を有するデブリ粒子を選定（#結果的に29個）
- ✓ 微細組織分析、化学分析により、デブリ粒子成分を5タイプに類型化
 - (1) 破碎ペレット、(2) 酸化・破碎Zry被覆管、(3) 溶融凝固(U,Zr)O₂ #1
 - (4) 溶融凝固した金属粒子(制御棒、可燃性毒物棒由来)、(5) 酸化した構造材と燃料の反応生成物
- ✓ 5タイプの物理化学的特性の範囲、深さ方向/径方向の分布を評価
- ✓ 事故時のピーク温度#2を推定し、揮発性FP分布との関連性を評価
- ✓ さらに、自然発火性、脱水性、などの課題に対して、実サンプルを使った模擬試験で知見取得

#1 (U,Zr)O₂溶融凝固物
燃料棒溶融時に、亜酸化U-Zr-Oメルト形成
溶融凝固過程で酸化度上昇。水蒸気中では
最高で(U,Zr)₄O₉まで酸化

• 事故進展理解と、炉内状況推定図の精緻化

- ✓ 次段階でのデブリ取り出し対象領域の推定精度向上
- ✓ 調査・取り出し方法の具体化に反映

#2 ピーク温度の推定
約80%の粒子は<2000K。約20%の粒子は>2820K
→当初推定よりも、揮発性FPがデブリ中に保持されていると評価

上部ルースデブリ分析の例 -1A粒子、H8表層-

➤ 分析結果

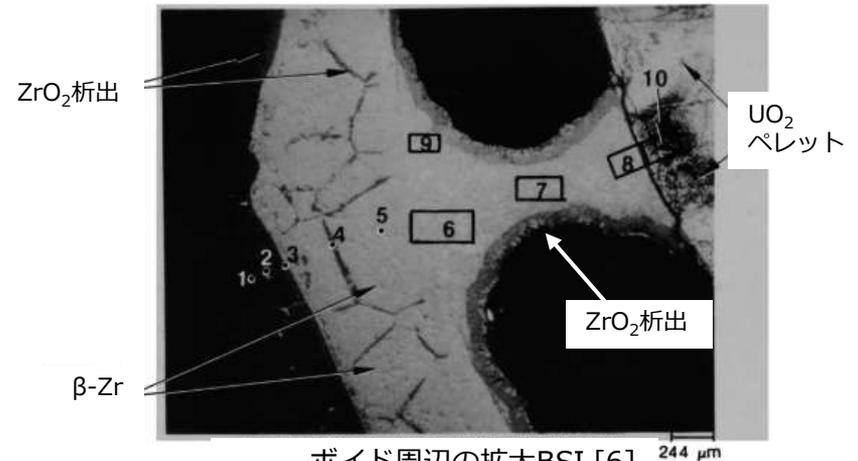
- Zry被覆管と UO_2 ペレットの破砕物、燃料/被覆管ギャップにU-Zr-Oメルトの凝固物が堆積
- **Zry被覆管**： 外周部が酸化、バルクは β -Zr相中に ZrO_2 析出
- **ペレット**： 結晶サイズ10ミクロン（結晶成長なし）、Fe-Zrメルトがクラック部に侵入した痕跡、 UO_2 結晶粒は溶融の痕跡なし
- **U-Zr-O凝固物**： ほぼ $(\text{U,Zr})\text{O}_2$ 、一部にU-Zr合金と α -Zr(O)が析出、さらに一部にSS成分混入
- サンプル表面にFe系物質が付着物 → 赤褐色

➤ 推定

- **昇温・溶融プロセス**： (1) Zry被覆管バルーニングで、燃料/被覆管ギャップが拡大、(2) 上部で溶融したU-Zr-Oメルトがギャップ中に溶落、(3) メルトの一部は、さらに溶落し、水蒸気ボイド形成、(4) ボイド周辺で、U-Zr-Oメルト中のZrが選択的に酸化
- **降温・凝固プロセス**： (1) U-Zr-Oメルトは、降温・凝固過程で、水蒸気と反応して酸化度上昇、(2) 金属リッチ領域は、 α -Zr(O)、U-Zr合金、 $(\text{U,Zr})\text{O}_2$ に相分離、(3) 酸化物リッチ領域は、 ZrO_2 と $(\text{U,Zr})\text{O}_2$ に相分離
- **ピーク温度**： 1000~1500Kと推定（#Zry被覆管の外周酸化膜厚さ、 UO_2 結晶サイズより）
- **U-Zr-Oメルト形成時の温度**： 2000~2200Kと推定（# U-Zr-O状態図より）
- 構造材の共晶溶融が、燃料溶融を促進させた可能性



1A粒子の断面（金相写真、エッチング後）[6]



ボイド周辺の拡大BSI [6]
(重元素が明るく見える)

微細組織分析では、BSIを活用

残留燃料集合体の分析

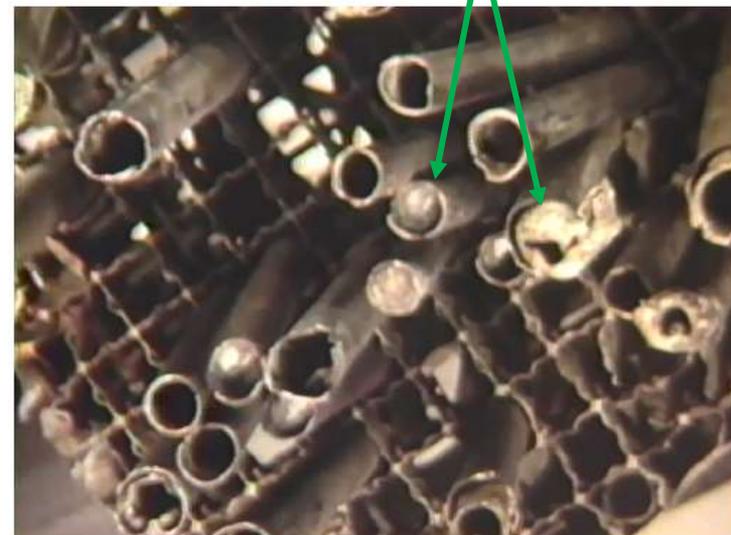
➤ 分析の目的

- 燃料取り出し手順・方法の具体化と、取り出しの安全評価のための知見・データの取得

➤ 分析の方法と結果

- 残留状態の確認
 - ✓ Core map, Topography, 接触調査(固着状態)
 - ✓ 42体の燃料集合体が炉心周辺部に、一部残留
 - ✓ 上部格子に、上部端栓や蒸発凝縮物が残留・付着
 - ✓ 残留燃料棒は、途中で脆性破断
- 切り出しサンプル・付着物サンプルの分析
 - ✓ 物理化学的な特性の範囲を評価
 - ✓ 細部の接触・固着・残留状態の確認
 - ✓ 径方向/軸方向に大きな温度勾配(ピーク温度2000～2200K)
 - ✓ 無傷に見える燃料棒でも下の方は>2000Kを経験
- 付着物サンプルの着火試験

燃料棒は、溶融ではなく、酸化して脆性破断して崩落した痕跡



炉心上部に残留していた燃料集合体 [4]

デブリ収納缶 -Quick Lookに基づく設計変更-

➤ 収納缶の設計変更： 粒子状デブリ用、粉末/スラリー状デブリ用を追加

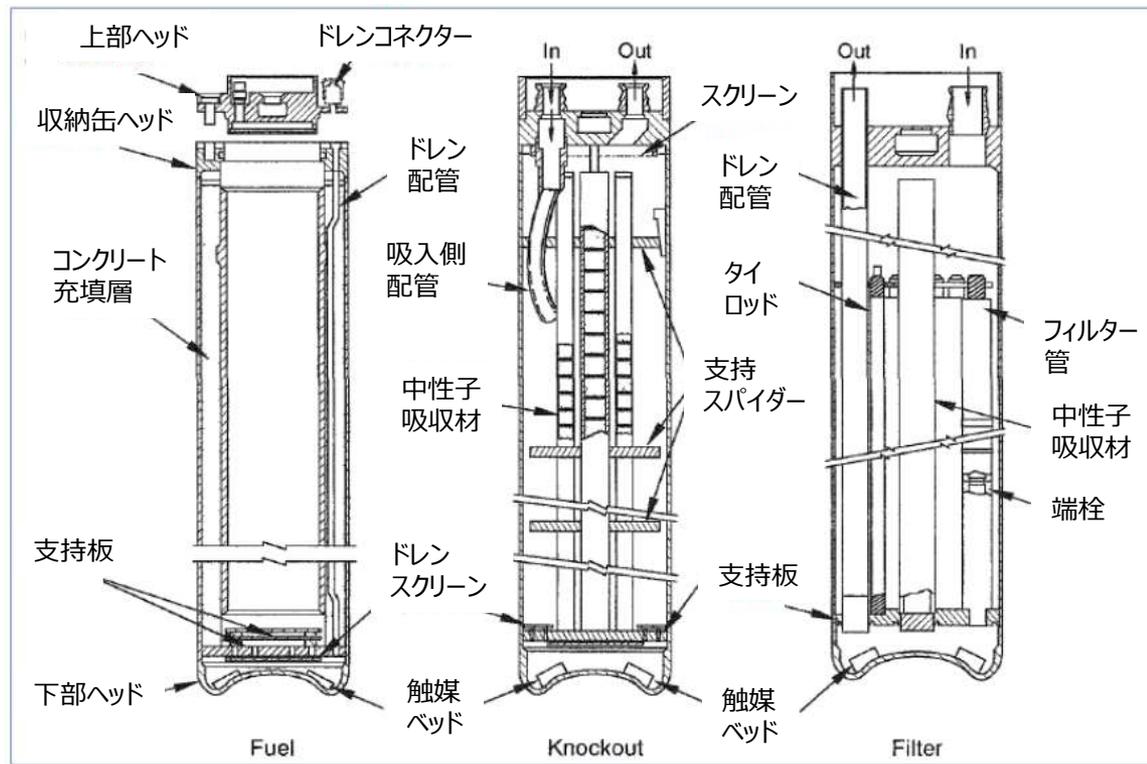
- 初期設計（**Fuel Canister**: 3.7m長、35cmΦ、81.4設計終了）
- Quick Look➔ 燃料集合体形状はほとんど残っておらず、瓦礫/粒子/スラリー状のデブリが大半
- 2タイプ（Knockout Canister、Filter Canister）を追加設計（外形サイズは変更なし）

➤ 基本設計（84.5）

- **Fuel Canister**(286体):
切断した燃料集合体の一部や瓦礫状デブリを収納。充填率を高めるため、エアリフトで粒子状デブリを隙間に挿入
- **Knockout Canister**(12体):
140ミクロン～ペレットサイズの粒子状デブリを真空吸引して回収。Filter Canisterと連結して使用
- **Filter Canister**(62体):
焼結金属フィルター(0.5ミクロン)、処理後の水は圧力容器内に還流。冷却水処理系や収納缶内の脱水系に接続

#備考

- 収納缶について、いくつかの改良案が提案されたが、3タイプの運用で対応した。**設計改良と現場適用のジレンマが、常に存在していたとの記述**
- INEL貯蔵プールの制限により、収納缶体数に上限➔**デブリ充填率を重視**



TMI-2で用いられた3タイプの収納缶 [3]

TMI-2での内部調査 デブリ取り出しへの知見反映

-コアボーリング、
炉心上部からのデブリ取り出し-

初期の下部プレナム調査 -コアボーリング以前-

➤ 圧力容器内の外周領域を通じた調査 (83~85)

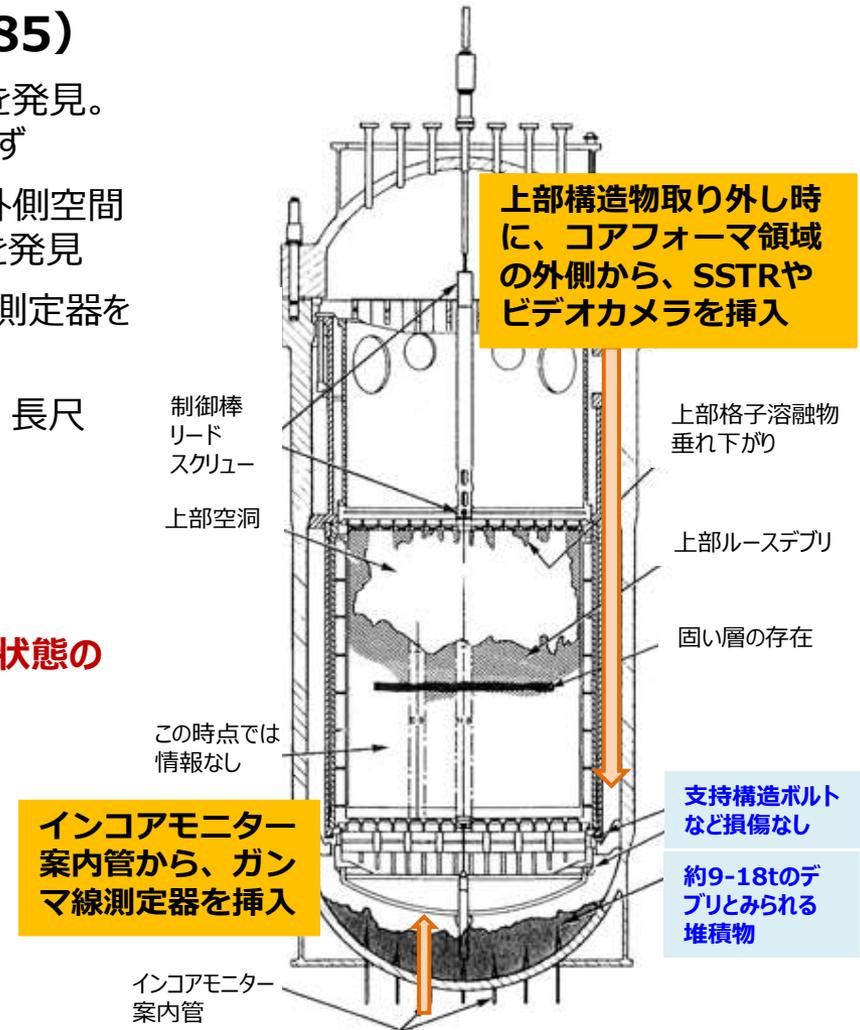
- 83年に、SSTR(Solid State Track Recorder)で堆積物を発見。しかし、デブリの下部プレナムに移行について諸説あり、結論出ず
- 85.2に、炉心上部構造物を取り外した後、コアフォーム領域外側空間を利用して、小型ビデオカメラを挿入、デブリとみられる堆積物を発見
- 85.3に、下部プレナムのインコアモニター案内管から、ガンマ線測定器を約50cm挿入し、堆積物の線量測定
- 85.7,12に、追加調査実施。堆積物重量約9~18tと推定。長尺ツールで11個のデブリサンプル回収(うち、7個を分析)

➤ 取り出し工法、ボーリング調査計画に反映

- 下部プレナム構造物(ほぼ無傷)の切断・解体が必要**
- ボーリング孔を使った、下部プレナム調査を実施(デブリ堆積状態の調査)**



下部プレナム堆積物の外観 [3]



上部ルースデブリ取り出し時点(1985-1986)での炉内状況推定図 [3,4]

炉心上部でのデブリ取り出し途中に得られた知見

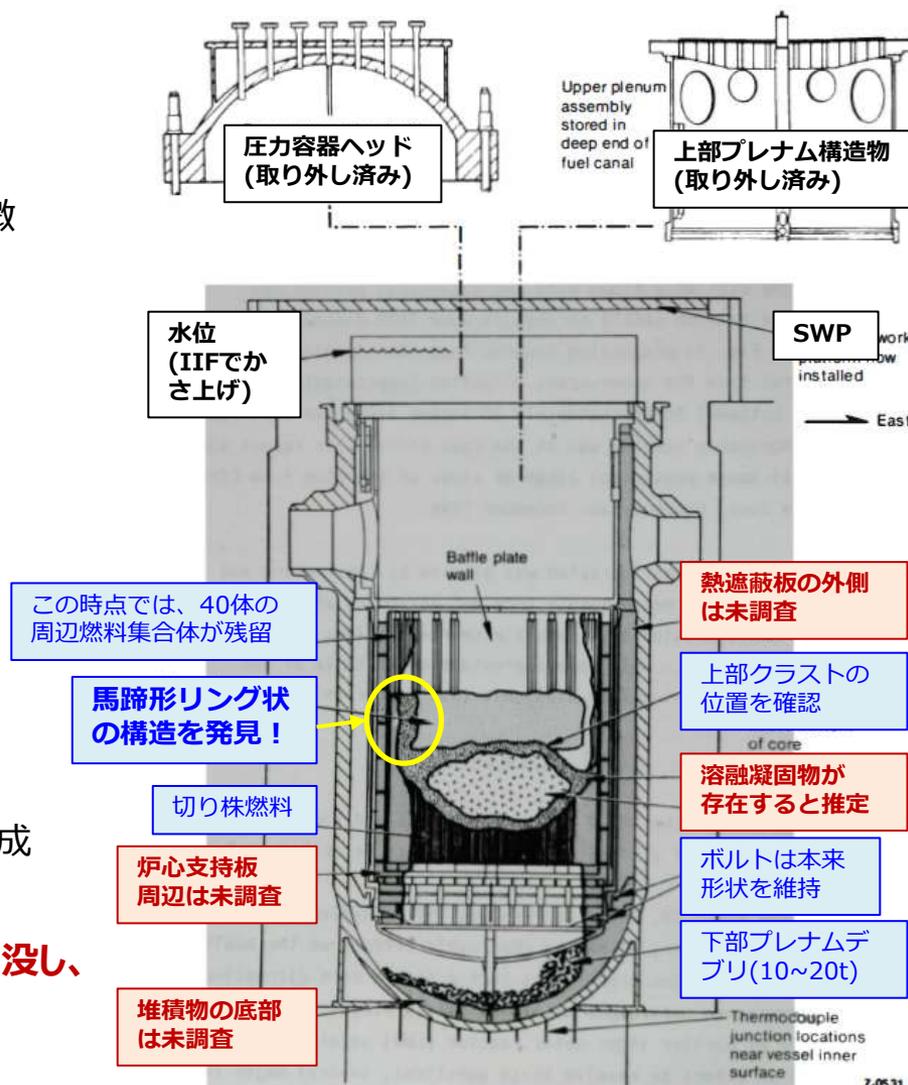
➤ 上部ルースデブリと残留燃料集合体の取り出しを進めつつ、デブリ残留状態をビデオ撮影

- 86.3: 炉心周辺側に、リング状の凝集物の存在を確認
- 86.6: SS棒押し込み調査、ビデオ観察(#この時点では、微生物による低い透明度)で、**馬蹄形リング構造**を確認 [20]
- 燃料棒下端から130~280cm、方位角120~70°、内径250cm、高さ約70cm、厚さ約20cm
- 周辺燃料集合体(残留物)の上に存在
- 上部は、破損した燃料バンドル等が化石のように凝集・固着
- 内表面は、石畳のような状態
- 下部には空洞、上部クラスト層との界面を形成

➤ 取り出し工法、ボーリング調査計画に反映

➤ さらに、事故シナリオ推定の精緻化に寄与

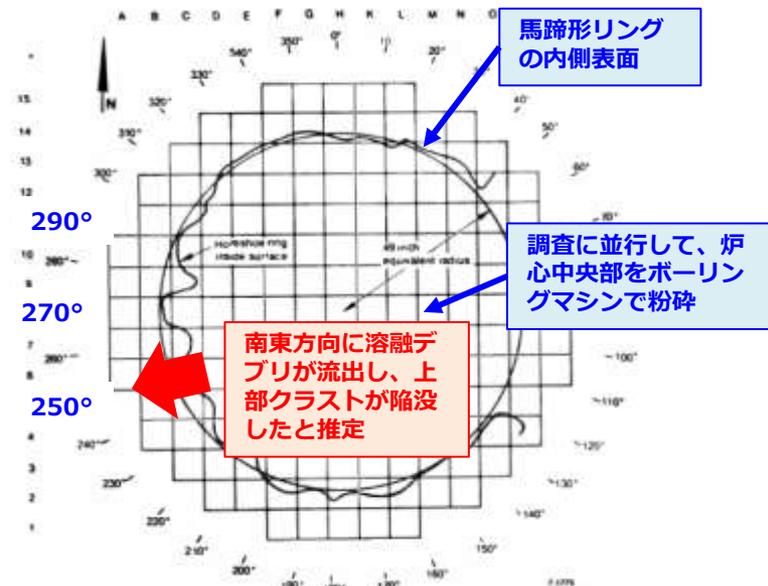
- 馬蹄形リングの上部あたりに、上部クラストの本来表面を形成
- デブリベッドの中央部で溶融プール形成
- 溶融デブリの下部プレナム移行時に、上部クラスト層が陥没し、周辺領域が馬蹄形リング状に残留と推定**



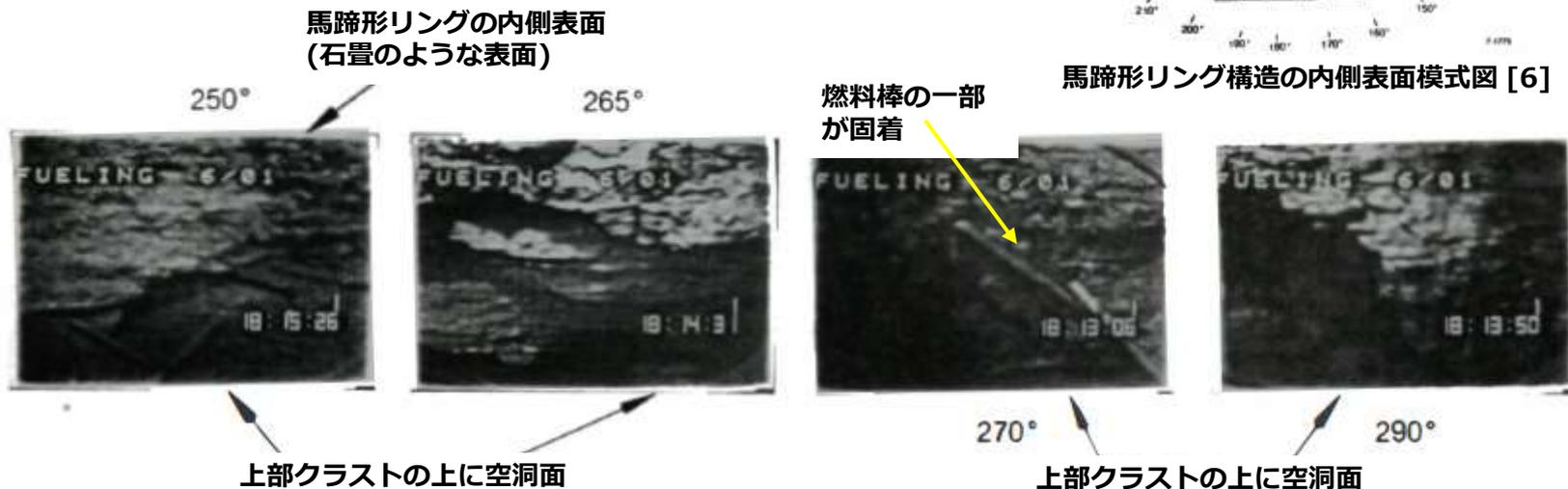
ボーリング調査直後(1986.10)の炉内状況推定図 [6]

馬蹄形リング構造の調査

- 馬蹄形リング構造の周辺を、水質改善にともなって、**ビデオ撮影・探針調査** (86.3~87.2)
- **コアボーリング調査**は、馬蹄形リング構造の内側のクラスト層に対して実施 (86.7) :



馬蹄形リング構造の内側表面模式図 [6]



コアボーリング調査、デブリ破碎・取り出し

➤ Core Stratification Sample Acquisition計画 (86.7~87.1)

- 86.7: コアボーリング(10本、6.1cmΦ、約2.5m長)
- 86.12~87.1: 砕いた溶融凝固領域からサンプリング (クラスト層、多孔質層)

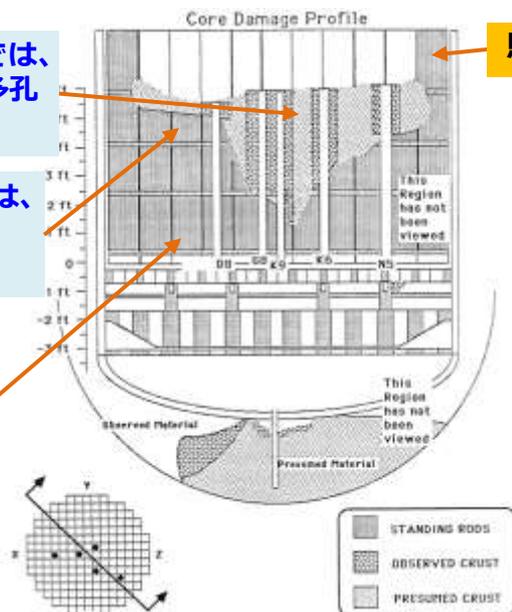
➤ クラスト層、溶融凝固層を破碎、デブリ取り出しのため

- 86.8: ボーリング装置を改良し、馬蹄形リング内側のクラスト層以下を、48本ボーリングして破碎
- 86.11: 破碎したデブリ瓦礫を、さらに409本ボーリングして細かく破碎

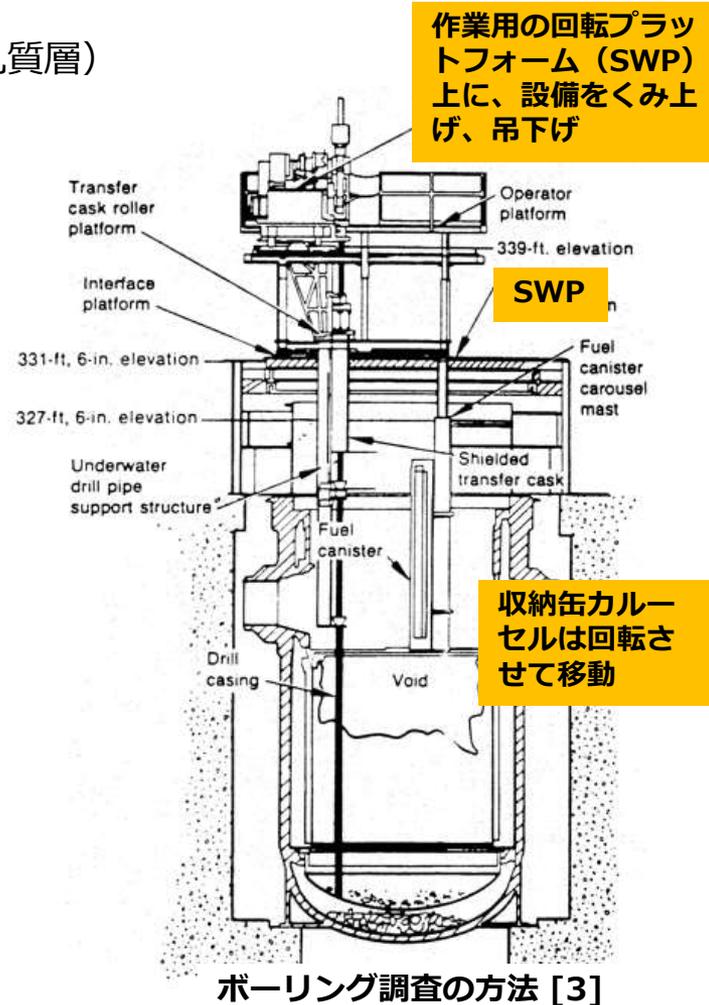
炉心中央 (G8,K6,K9) では、上下クラストに挟まれた多孔質の溶融凝固層が存在

中間領域 (D8,N5) では、上下クラストが一体化溶融凝固層なし

切り株燃料集合体



ボーリング調査の位置 [11]



ボーリング調査の方法 [3]

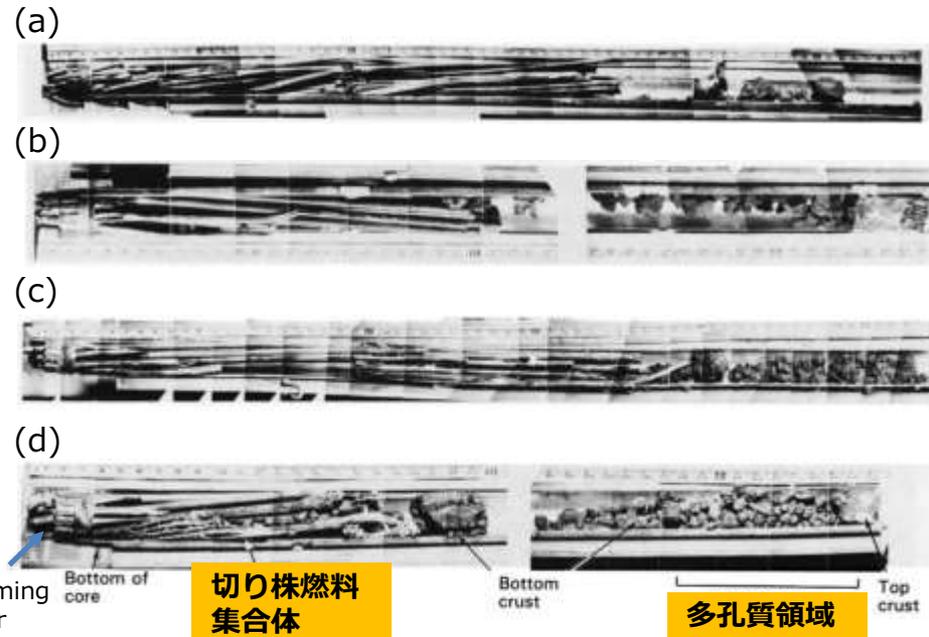
ボーリングサンプルの分析 -モザイク写真-

➤ 観測結果の概要 → 成層化状態を確認

- **上部クラスト層**： 稠密・硬い、4.5~11.5cm厚、金属相多い(約25%)、平均密度8.4g/cm³、重量約2.45t
- **熔融凝固層**： 多孔質・もろい、約3m径、炉心中央で約1.5m厚、炉心周辺で約0.3~0.6m厚、金属相少ない(数%)、平均密度5.5~8.8g/cm³、重量約21.5t、(約80%がボーリング中に流出)
- **下部クラスト層**： 稠密・硬い、数cm厚、るつぼ形状(下に凸)、**残留ペレットの隙間に熔融凝固物**、金属相多い(約40%)、平均密度7.3g/cm³、重量約8.76t
- **切り株燃料集合体**： クラスト層の下にはほぼ無傷の燃料棒/制御棒など、炉心中央で約0.6m高、炉心周辺で約1.2m高、重量約44.5t
- **炉心下部構造物**： ほぼ損傷なし、付着デブリ数t

➤ 取り出し工法、今後の調査計画に反映

- クラスト層は、**ボーリングマシンを改良して破碎 (前頁)**
- 切り株燃料集合体、炉心下部構造物は、**アークプラスママウオージェットで切り出し**
- デブリ取り出し過程をビデオ撮影し、**デブリの下部プレナム移行経路を調査**



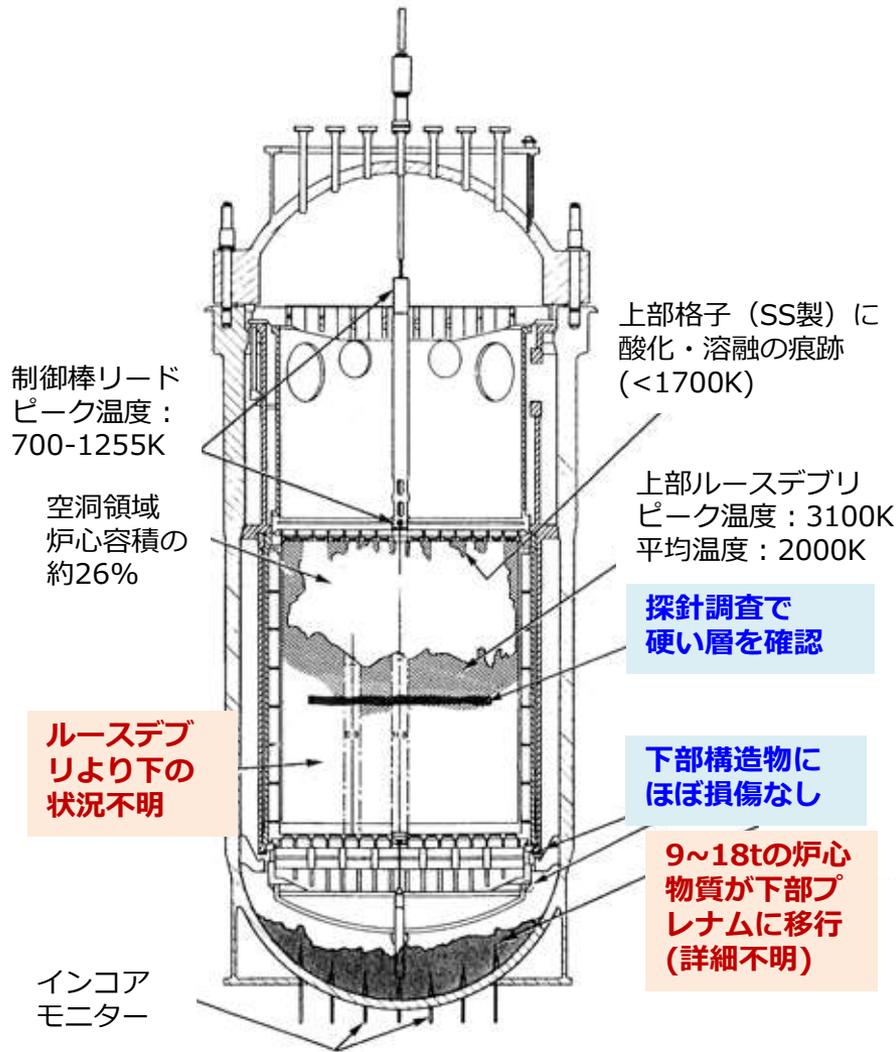
ボーリングサンプルの例 (取り出し位置：前頁参照) [11,12]

- (a) D8集合体部位 (炉心中間) (b) G8集合体部位 (炉心中央)
(c) G12集合体部位 (炉心周辺) (d) K9集合体部位 (炉心中央)
(#多孔質領域は、サンプルの流出が多い)

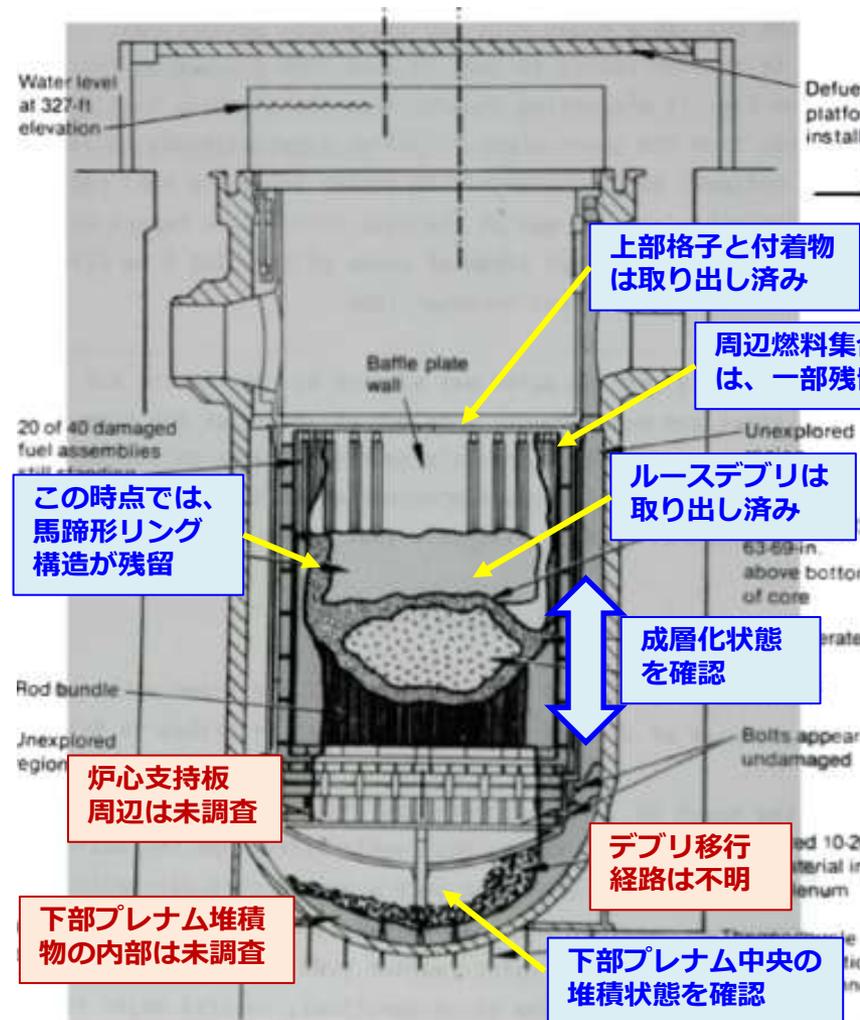
この時点で、デブリが炉心中央で熔融凝固したこと、熔融デブリの一部が下部プレナムに移行したこと、が確定した。

まだ、下部プレナムへの移行経路は不明だった。
(真下への移行? コアフォーマ領域を経由?)

状態推定の変遷② -ボーリング調査の前後-



上部ルスデブリ取り出し時点(1985-1986)での炉内状況推定図 [3,4]

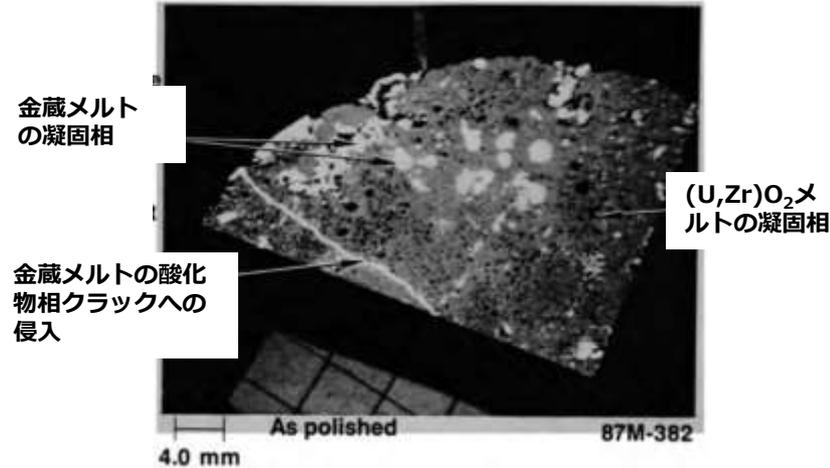


ボーリング調査の直後 (1986.10) [6]

ボーリングサンプルの分析例 -クラスト層-

➤ 上部クラスト、周辺クラスト（数個の塊サンプルを分析）

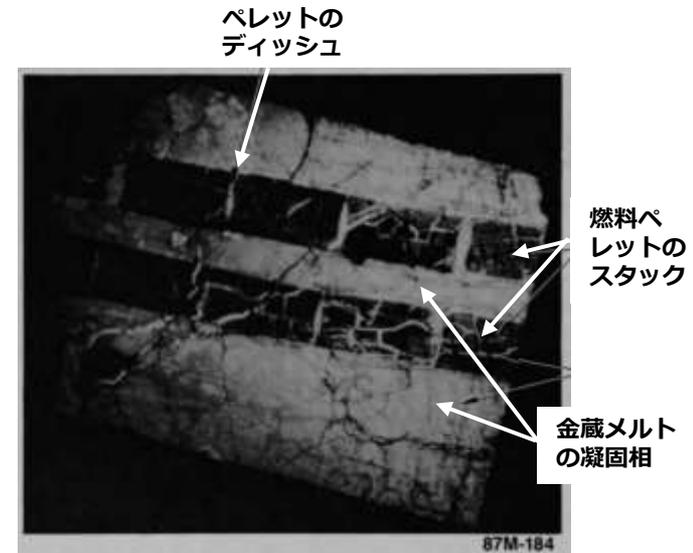
- 状態：多孔質セラミック相と、稠密金属相の混合物。硬く、相互溶解なし。
金属相割合は約25%（溶融凝固層より、金属リッチ）
密度：7.8~9.7g/cm³
- 主成分：(U,Zr)O₂、Zr-SS-インコネル-制御材由来の合金相
可燃性毒物棒由来の成分(Al,Gd)、わずかに金属U
- ピーク温度：>2810K、局所的に>3120K
- 化学分析：酸化物相は比較的均質、金属相は非均質
- 形成過程の推定：炉心構成物質が再溶融、凝固過程で上部/周辺クラストを形成。クラスト形成後に、炉心上部が再加熱され、金属メルトが再溶落して流入。**



上部クラスト (D8-P3) の断面金相 (研磨後) [11]

➤ 下部クラスト（数個の塊サンプルを分析）

- 状態：燃料ペレットのスタックの隙間に金属メルトが侵入し凝固。稠密、硬い。
Zrの相対濃度が、炉心平均より大きい。密度：7.0~7.6g/cm³
- 主成分：残留UO₂、Zr-O-SS-インコネル(-U)の溶融凝固物
制御棒+可燃性毒物棒由来の成分(Ag-In-Cd,Al,Gd)
- ピーク温度：1300~1500K、金属メルトは~2200K(Zr-O(-U)メルト)
- 化学分析：残留ペレット領域は比較的均質、
周囲の金属溶融凝固相は非均質
- 形成過程の推定：炉心上部で溶融した金属メルト(Zr-SSなど)が、冷却水水位の直上まで溶落し、燃料棒の隙間に堆積、被覆管を溶融して凝固。**

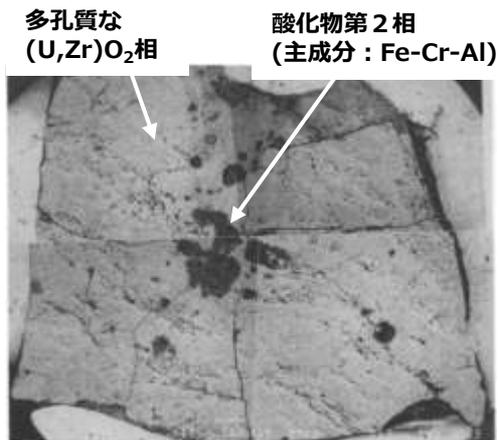


下部クラスト (K9-P1) の断面金相 (研磨後) [11]

ボーリングサンプルの分析 - 溶融凝固層 -

- **溶融凝固層（岩石状物質： 15個のセラミック粒子、3個の金属粒子、5個の混合物粒子を分析）**
 - 状態：多孔質セラミック相領域、稠密金属相領域、混合相領域、が混在。多孔質相は脆く、ボーリング中に約80%流出
金属相割合は、平均で約15%（比較的、溶融凝固層の周辺部に多い）
密度(金属相)：5.5~8.8g/cm³、密度(セラミック相)：6.9~8.8g/cm³、密度(混合相)：7.6~9.1g/cm³
 - 主成分(酸化物相)：(U,Zr)O₂多孔質バルク相、SS-Al系酸化物の第2相、Gd、多くの空孔/ポイド
 - 主成分(金属相)：SS-インコネル-制御材(Ag-In-Cd)、Zry中のSnの合金相
 - ピーク温度：>2810K、局所的に>3120K（# 溶融セラミック相から、四角いUO₂結晶が析出）
 - 化学分析：酸化物相は比較的均質、金属相は非均質
 - 形成過程の推定：炉心構成物質が再溶融し、均質な溶融プールを形成。一部は、クラストを破り下部プレナムに移行。残りは凝固（徐冷）。移行・凝固過程で、収縮。**

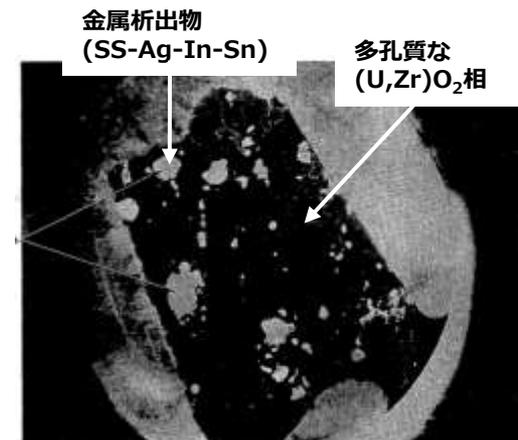
➔ **3タイプ（酸化物、金属、混合物）に類型化し、デブリ特性の範囲を定性的に整理**



溶融凝固層（K9, セラミック相領域、BSI）



溶融凝固層（O9, 金属相領域、金相）

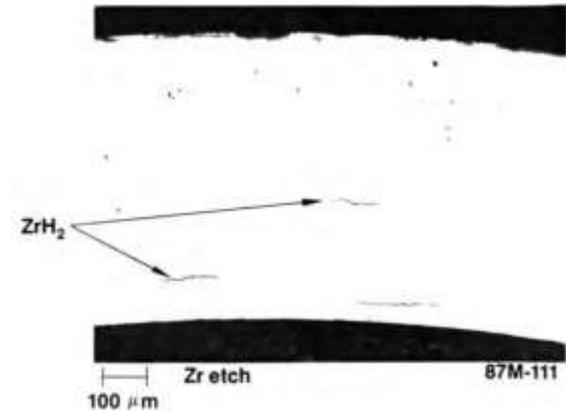


溶融凝固層（G12, 混合領域、金相） [11]

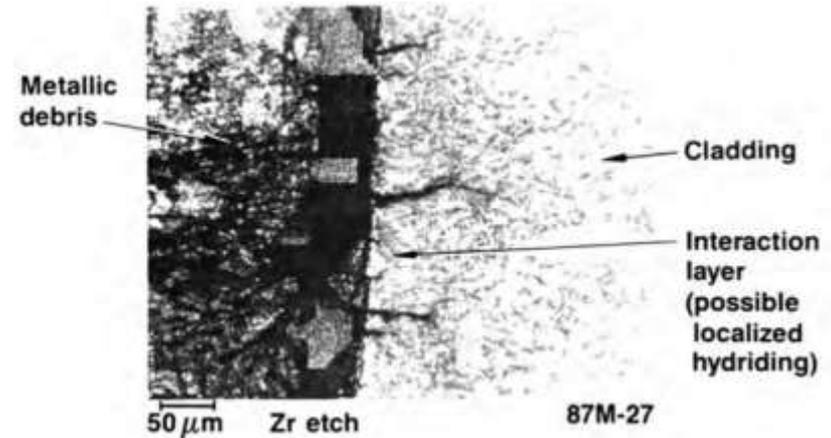
ボーリングサンプルの分析 –切り株燃料集合体–

➤ 切り株燃料

- 燃料棒3本(D4,G8,K9)、制御棒4本(D4,K9,N12,O7)、計装案内管1本(G8)をサンプリングし分析
- 状態： クラスト層の下に、切り株燃料集合体が残留
炉心外周で長く(約1.2m)、中央で短い(約0.6m)
燃料ペレットは、事故での昇温の痕跡なし
Zry被覆管は、再結晶化と表面酸化の痕跡なし
制御棒は、残留上端近くで、Ag-In-Cdがわずかに溶融
計装案内管内には、金属デブリが侵入した痕跡
- ピーク温度： 上端を除いて<920K、上端で>1073K
- 形成過程の推定： 事故時に冷却水の水位以下にあり、ほぼ無傷な状態を維持。**



切り株燃料部のZry被覆管 (K9) の断面金相 (エッチング後) [11]



切り株燃料部の計装案内管 (G8) の断面金相 (エッチング後) [11]

TMI-2での内部調査 デブリ取り出しへの知見反映

-下部プレナム調査、
炉心下部からのデブリ取り出し-

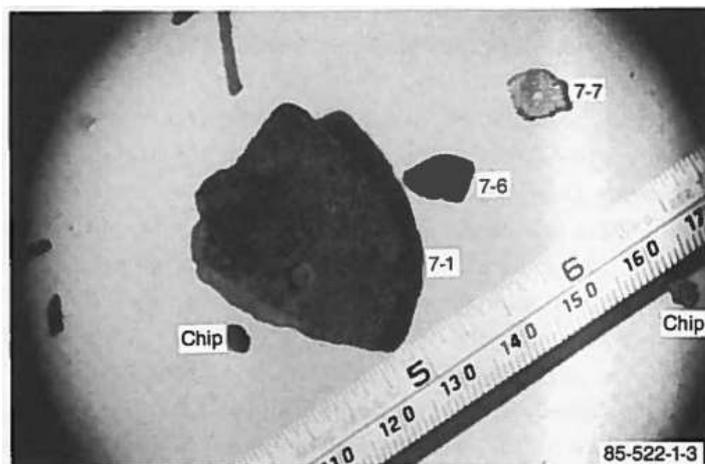
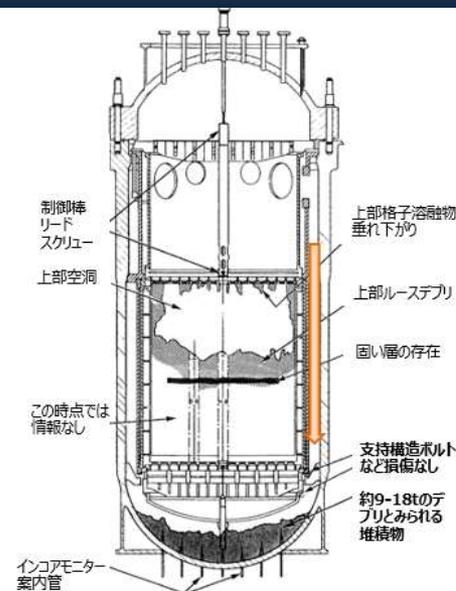
下部プレナム"ルース"デブリのサンプリング

➤ 下部プレナム調査 (85.7,12) 、P.22参照

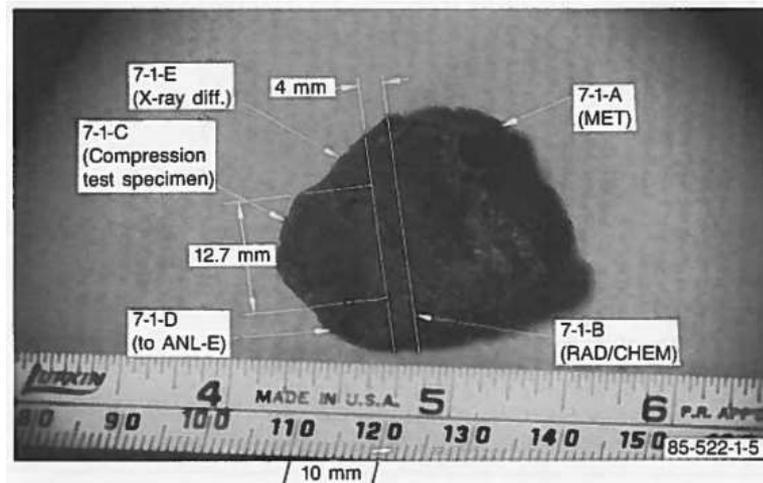
- 熱遮蔽の外側 (円環領域) から長尺ツールを挿入し、堆積物の画像撮影
- 下部プレナムルースデブリ** (周辺領域の表層) を採集、INELとANLに輸送して分析 (輸送中に計11個に分離、1~6mmサイズ)、数g~500g

➤ デブリサンプル分析

- サンプルを切断、小分けし、微細組織分析、化学分析、圧縮模擬試験、など



下部プレナム"ルース"デブリの外観 [8]



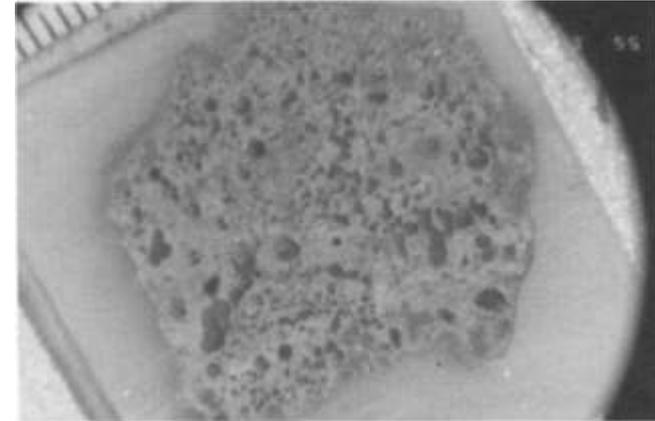
下部プレナム"ルース"デブリサンプルの分割 [8]

下部プレナム“ルース”デブリの分析

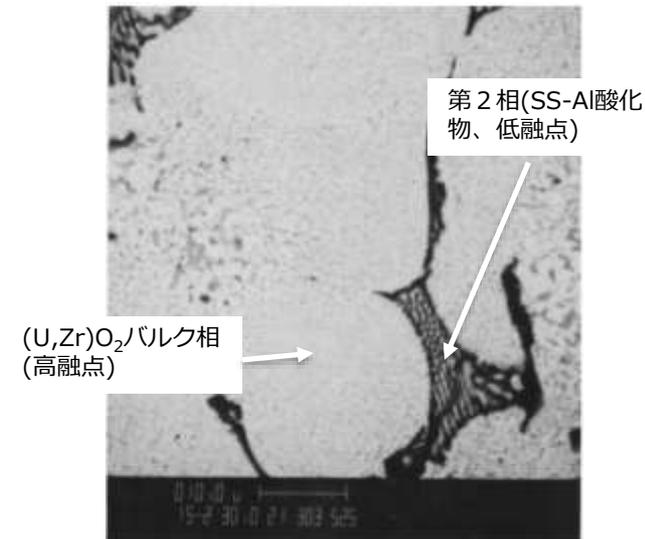
➤ 分析結果のまとめ

- 比重： 6.6～8.3 (平均7.1) g/cm³
- 空孔率： 8～30 (平均25) %
- 成分： **熔融凝固(U,Zr)O₂、Fe,Cr-Al酸化物 (第2相、粒界)**
空孔内にわずかに金属析出物(Ag,Ni,Sn,Ru)
Zr,SS,Alはほぼ酸化 (炉心部のような金属残留なし)
- 組成・分布： 比較的均質、62～72U-11～16Zr (wt%)、
残りはFe,Ni,Cr,Mo,Oなど、# **炉心平均に比べZr,SSが少ない**
- ピーク温度： >2810K、局所的に3120K近くに到達
(U,Zr)O₂は熔融の痕跡、一部UO₂が融点直下の痕跡
- FP分析： **平均で、Cs-137の13%、I-129の3%が空孔内に残留、**
Sb-125の2.5%、Ru-106の6%が金属デブリ中に残留
- U-235富化度： 炉心最外周の集合体を除いた平均値に近い
- **切断・圧縮試験**： ダイヤモンドソーで切断可能、圧縮応力111MPa

- **形成過程の推定**：
 - 炉心部で形成された熔融プールが、下部プレナムに短時間で移行
 - 炉心部で、金属メルトやSb,Ruはクラスト等に選択的に移行し、下部プレナムへの移行は少ない
 - デブリ酸化度が上昇し、金属メルト成分も酸化。その凝固過程で、低融点の第2相形成。広い温度範囲で、二種類の酸化物の固液混合状態を形成
 - このため圧力容器壁との接触性が低下し、伝熱に影響した可能性

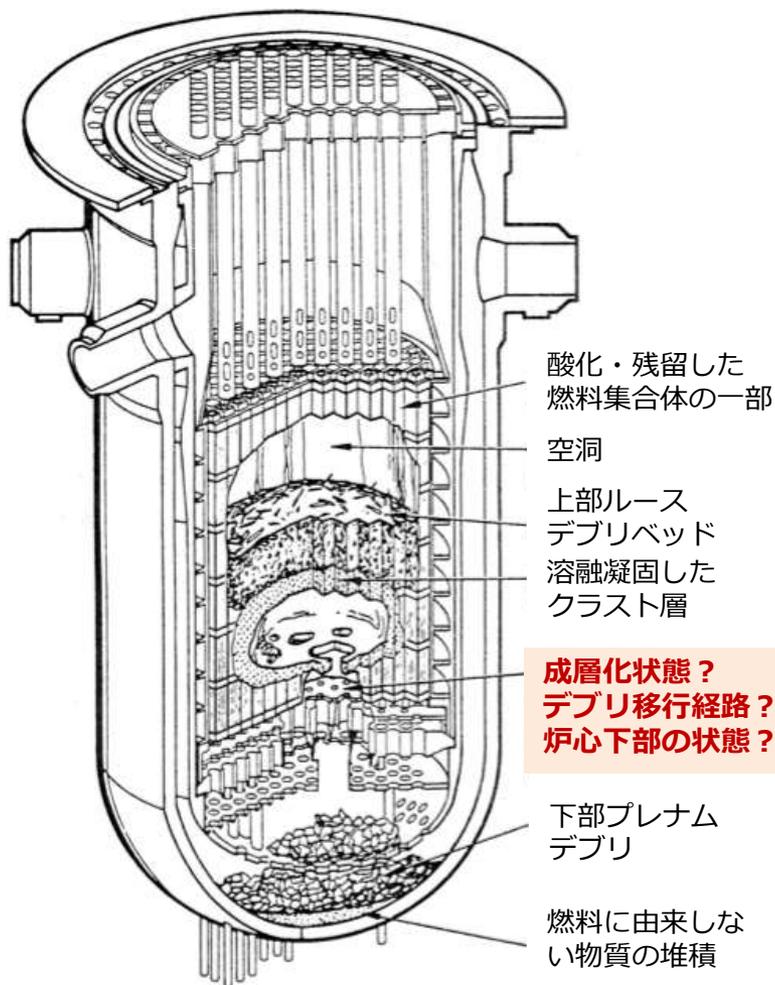


下部プレナムルースデブリ
(断面金相、研磨後、粒子11-5) [22]

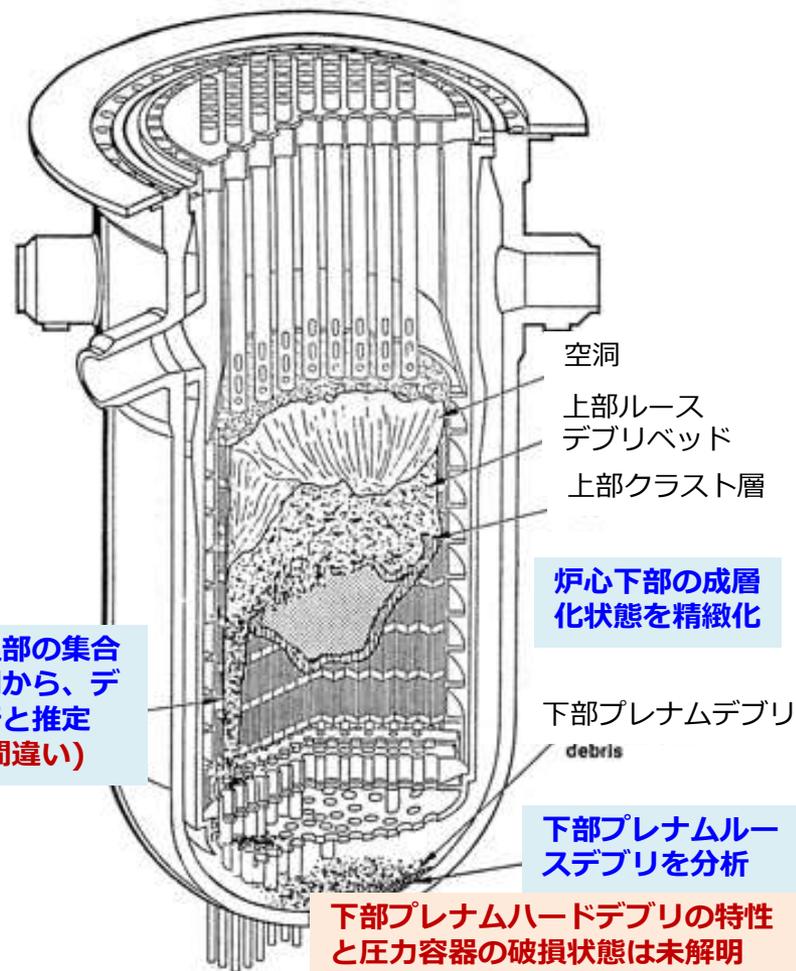


下部プレナムルースデブリ (拡大BSI) [22]

状態推定の変遷③ -デブリ移行経路の推定-



ボーリング調査の直前 (1986) [3,4]



ボーリング調査直後の推定 (1986-1987) [3,4]

炉心部のデブリ取り出し

- **燃料デブリ取り出し準備 (85.10～)**
 - Canister Positioning System (CPS)吊り下げ
 - デブリ取り出しツール装荷、収納缶の取り付け・位置決め
- **上部ルースデブリ、周辺燃料集合体の取り出し (85.11～)**
 - 上部ルースデブリの収納缶への格納 (長尺ツール、吸引システム)
 - 収納缶の圧力容器からの取り出し、貯蔵ラックへの移送
- **デブリ堆積状態の調査 (デブリ取り出しと並行)**
 - Mechanical probing (SS棒の押し込み) で、**馬蹄形リング構造**を発見 (86.6)、デブリ取り出し進捗にともなって、ビデオ観察 (86.3～87.2)
 - **コアボーリング調査** (10本、86.7)
 - 馬蹄形リング構造部分の取り出し (～86.11)
- **溶融凝固層とクラストの破砕 (ボーリング装置利用)**
 - 馬蹄形リング構造の内側を、粗く破砕 (86.8、48本)
 - さらに粉体化破砕 (86.11、409本)
 - 溶融凝固層とクラスト層の回収 (86.12～87.2)
- **切り株燃料集合体の回収 (87.3～9)**
 - ボーリング装置を外し、デブリ回収ツールや**アークプラズマトーチ**を装荷
 - コアフォーマ領域の調査 (87.10～)
- **炉心部からの燃料デブリ取り出し完了 (88.9)**



炉心部の燃料デブリ取り出し後の様子 (87.9) [3]
#周辺のバッフル板が残留している様子が見える

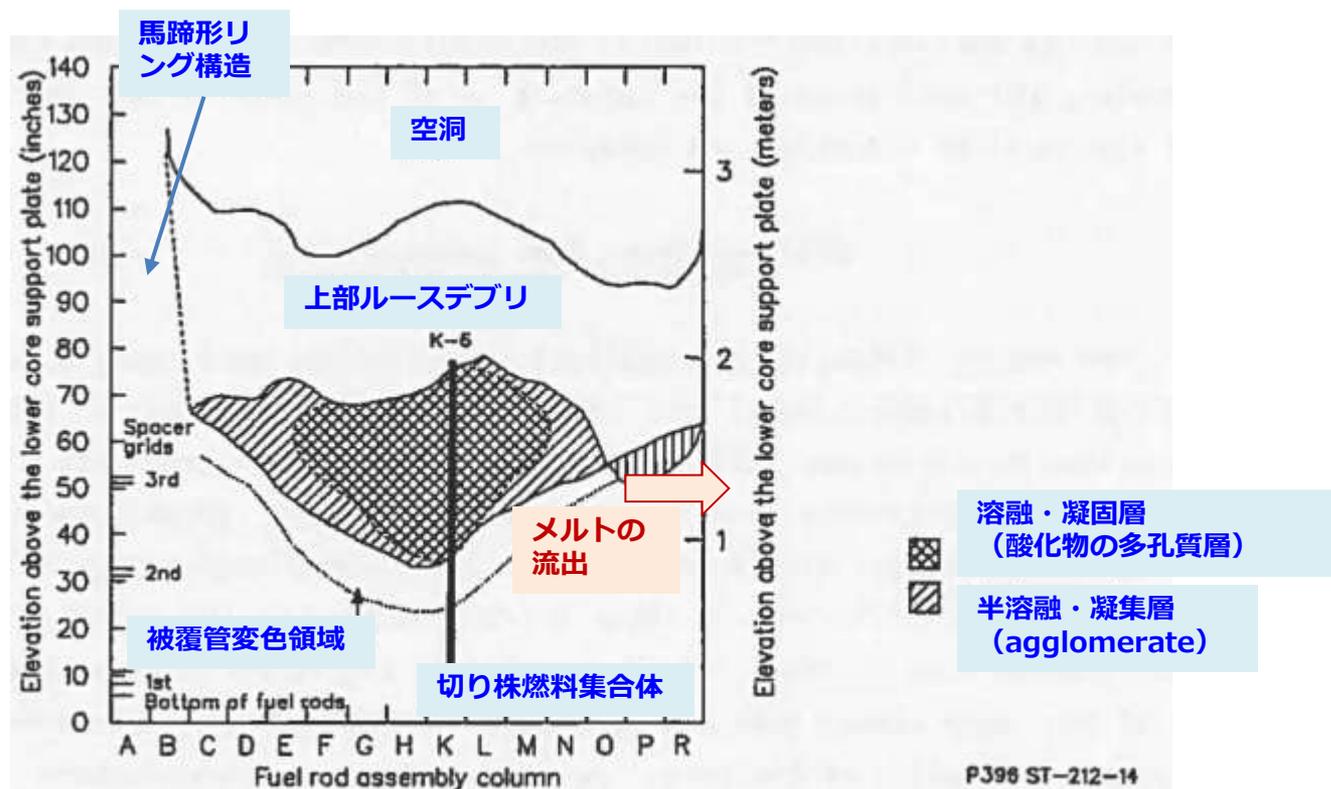
初期トラブル

- 微生物繁殖による、冷却水透明度の低下
#過酸化水素水投入と、油圧流体の変更により、対策
 - デブリコロイドと微生物の死骸によるフィルター目詰まり
#凝固剤とプレコートフィードにより、対策
- DWCS(Defueling water cleanup system)の改良**

溶融凝固層周辺の理解の精緻化

➤ 炉心部からの燃料デブリ取り出し（85.11～88.9）

- ボーリング過程、取り出し過程を動画撮影、デブリの残留状態や使用した治具の知見を記録し、デブリ堆積状態のマップを作成。それぞれの領域で用いた、取り出し治具と対応付け。



コアフォーマ領域の調査

86～: 周辺に残留した燃料集合体取り出し作業

バッフル板の大きな損傷は観測されず、
コアフォーマ領域へのデブリ侵入はほとんどないと推定

87.3～87.9: 切り株燃料集合体の取り出し作業

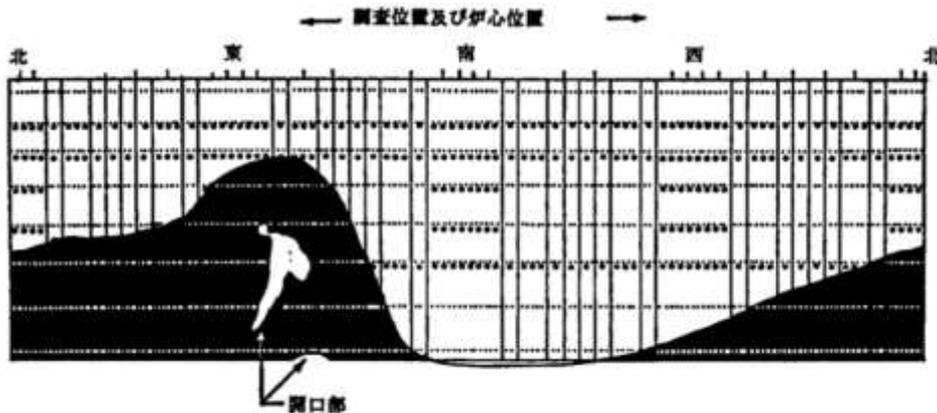
バッフル板に破損穴を発見 (R7集合体の近く)
破損穴の内部にデブリ堆積

87.10～: コアフォーマ領域の上から、ファイバースコープ、ビデオカメラ挿入

堆積物を発見、濁りが多く詳細な観測は困難
線量マップとビデオ画像の組み合わせで、**堆積物マップを作成**
バッフル板の外側に、**約4tのデブリ堆積**と推定

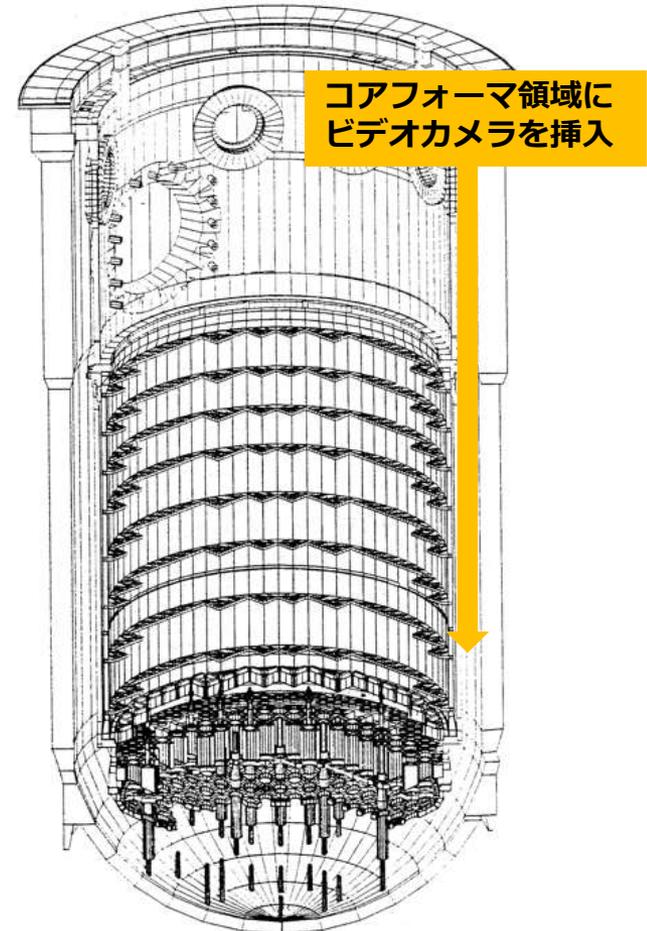
→バッフル切断、デブリ取り出し工法に反映

縦方向に8分割し、2枚ずつ、宙吊りで約90°回転させ、
ブラシやアークプラズマでデブリを回収



注: 黒く塗り潰してある部分にデブリが堆積していると推定されているが、
全部にデブリが堆積しているか否かは不明。

コアフォーマ領域のデブリ堆積状態の推定 [23]



コアフォーマ領域の見取り図 [4]
(バッフル板と炉心支持板を除去)

炉心下部構造物と下部プレナムデブリの取り出し

➤ 炉心下部支持構造 (CSA) の解体・取り出し (88.1~89.3)

- 本来の5層構造がほぼ維持され、数tのデブリが周辺部などに付着している。
- **コアボーリングマシン (案内管などの切断) 、プラズマアークトーチ (プレート状構造物の切断) 、ウォータージェット (燃料デブリの切り出し) を利用**

➤ バッフル板、コアフォーム領域の解体・取り出し (89.7~89.10)

- プラズマアークトーチで、バッフル板切断 (八分割)
- ボーリングマシンで、容器槽との接続ボルト取り外し (864本)
- バッフル板を縦軸で90度ひっくり返し
- 付着ルースデブリは、回転ブラシ治具で除去
- 固着ハードデブリは、機械式切断、ウォータージェット利用して取り出し

➤ 下部プレナムデブリの取り出し (89.3~89.12)

- インコアモニター案内管と、楕円形の流量分配ヘッドの除去
- **プラズマアークトーチ、ボーリングマシン、エアリフト、真空吸引システムなど使用**
- 固着しているハードデブリは、ウォータージェット、チゼルハンマーを利用して破碎し、いったん下部ヘッド上に集めてから、収納缶内に回収

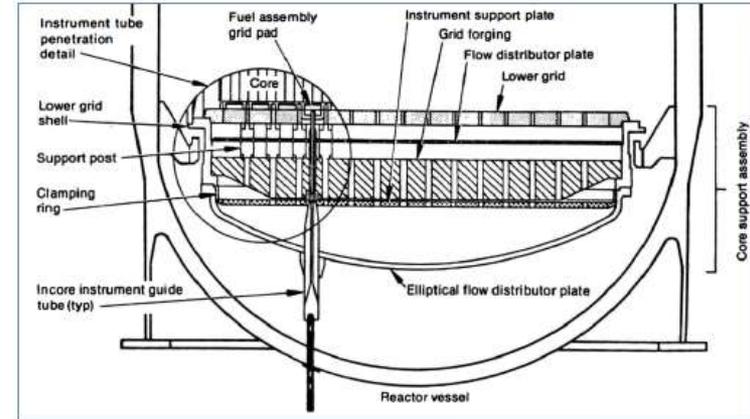
➤ クリーンアップ (~90.3)

• **デブリ取り出し作業の終了 (89.12)**

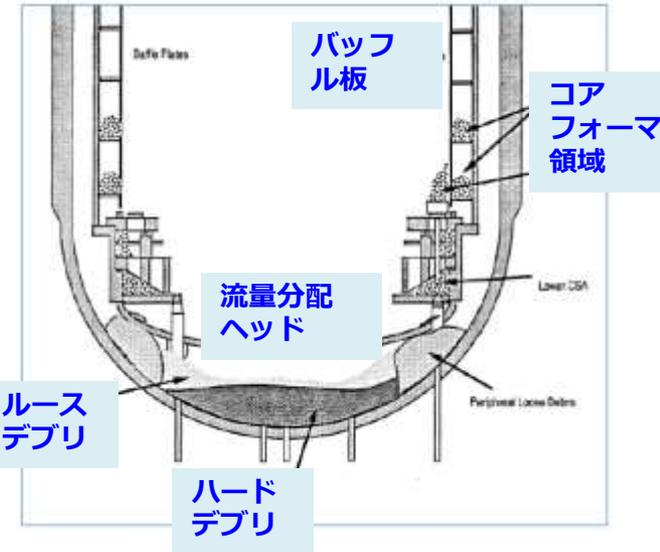
- 画像調査、サンプリングにより、燃料デブリの残留量を同定 (90.1)
- 圧力容器内のフラッシング、ルースデブリの吸引作業 (90.3)

• **デブリ未回収量は<900kg**

接続部の隙間、フィルター上、圧力容器への固着、などの残留量を評価



炉心下部の構造 [3]



炉心下部の支持構造物撤去後の様子 [3]

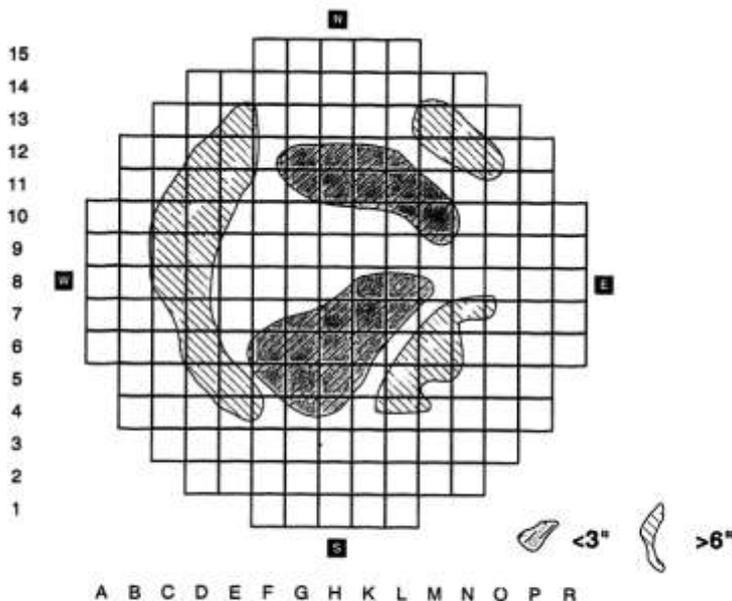
炉心下部のデブリ堆積状態の精緻化

下部プレナムデブリの取り出し（ルースデブリ、ハードデブリ）

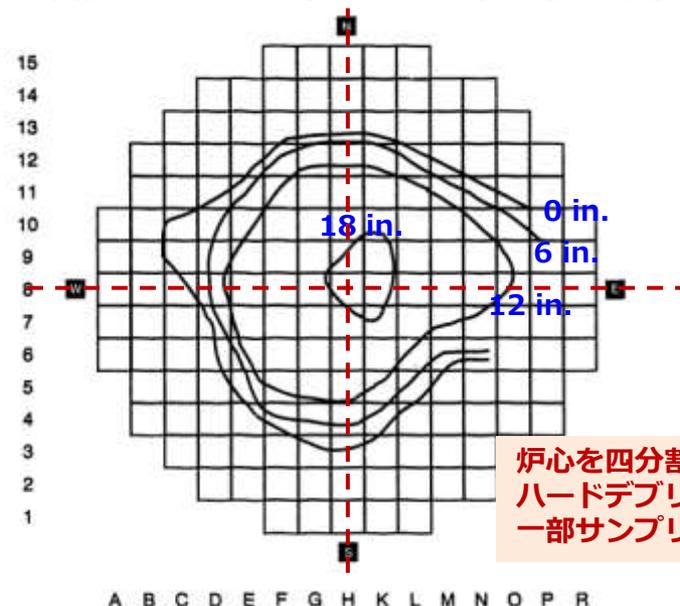
- 下部プレナムルースデブリ分布図作成（89.2）
- 下部プレナムルースデブリの取り出し、同ハードデブリの堆積状態の確認（～89.6）
5～45cm厚でハードデブリ堆積、圧力容器との間に断熱層あり
- スライドハンマー(136kg)を、6.1m高さから落下し、デブリ破碎
炉心を、南東、南西、北東、北西に分割し、それぞれからデブリサンプル採集
→サンプル代表性を確保するため



下部プレナムハードデブリの外観（破碎後） [9]



下部プレナムルースデブリの分布 [9]



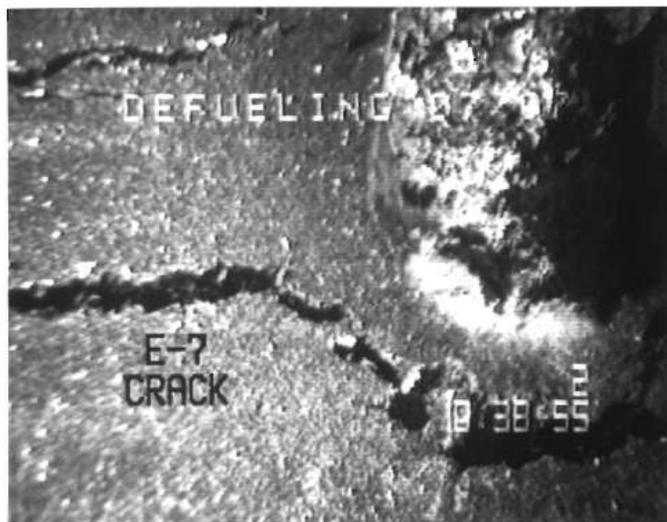
炉心を四分割して、ハードデブリを破碎、一部サンプリング

下部プレナムハードデブリの堆積厚さ [9]

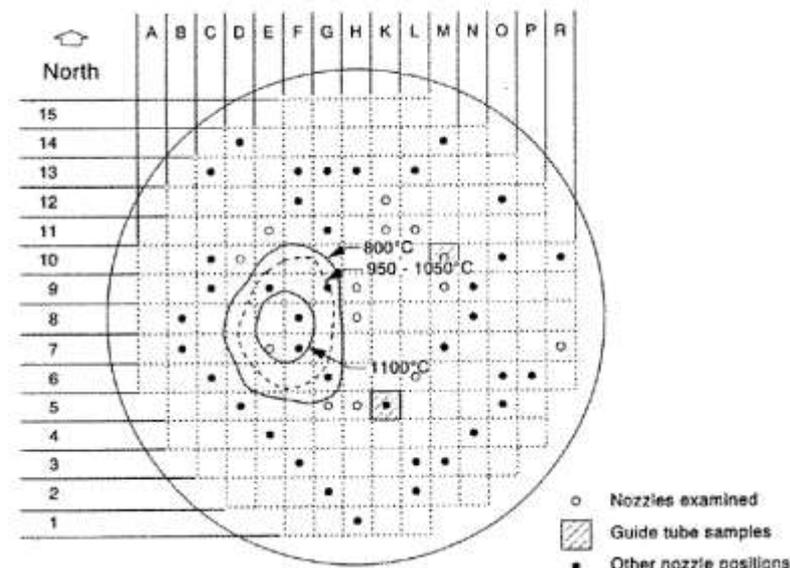
下部ヘッドの調査

➤ TMI-2 vessel investigation project (国際協力、VIP計画②)

- 下部ヘッドのビデオ撮影 (89.7) In coreモニター案内管のノズル近傍にクラック発見
- 高解像度カラービデオ、探査プローブを挿入 (89.8) 損傷サイズを測定 (#損傷は表面にとどまる)
最大6インチ長、0.25インチ幅、0.19インチ深さ
- 下部ヘッドからサンプル採集 (90.2)、# サンプルングのために2か月取り出し工程を開けた
RPV損傷モードの評価、損傷までのマージン評価
15個のRPV容器サンプル、14個のin coreモニターノズルサンプル、2本の案内管サンプルを採集
→微細組織観察で、熱損傷、化学反応、熱の入力量、残留強度を評価

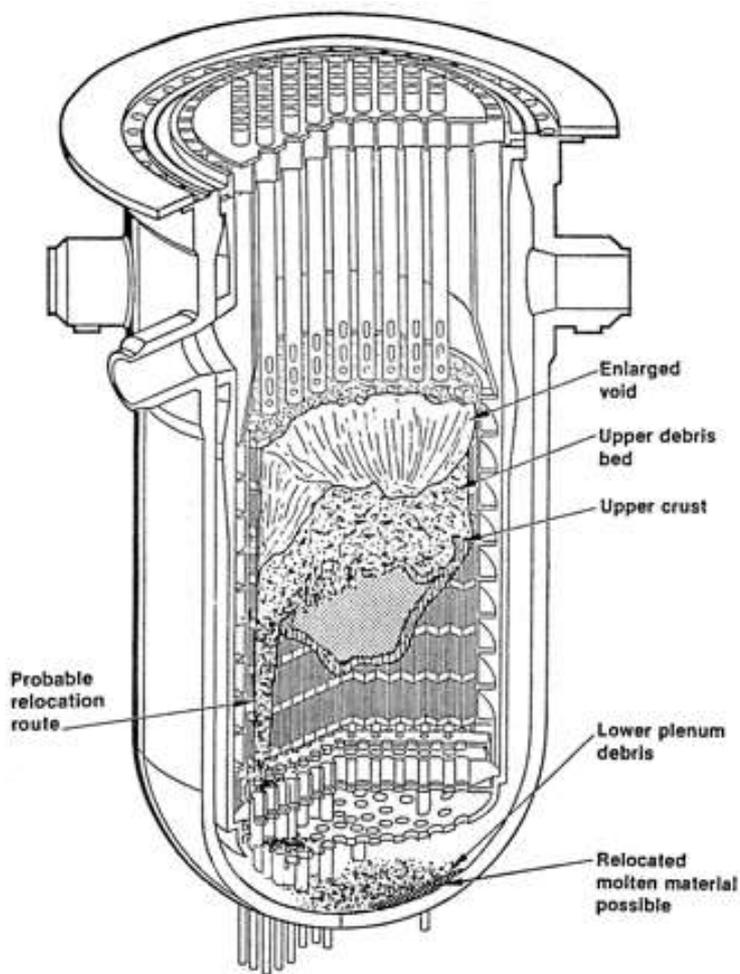


下部ヘッドのクラック [10]

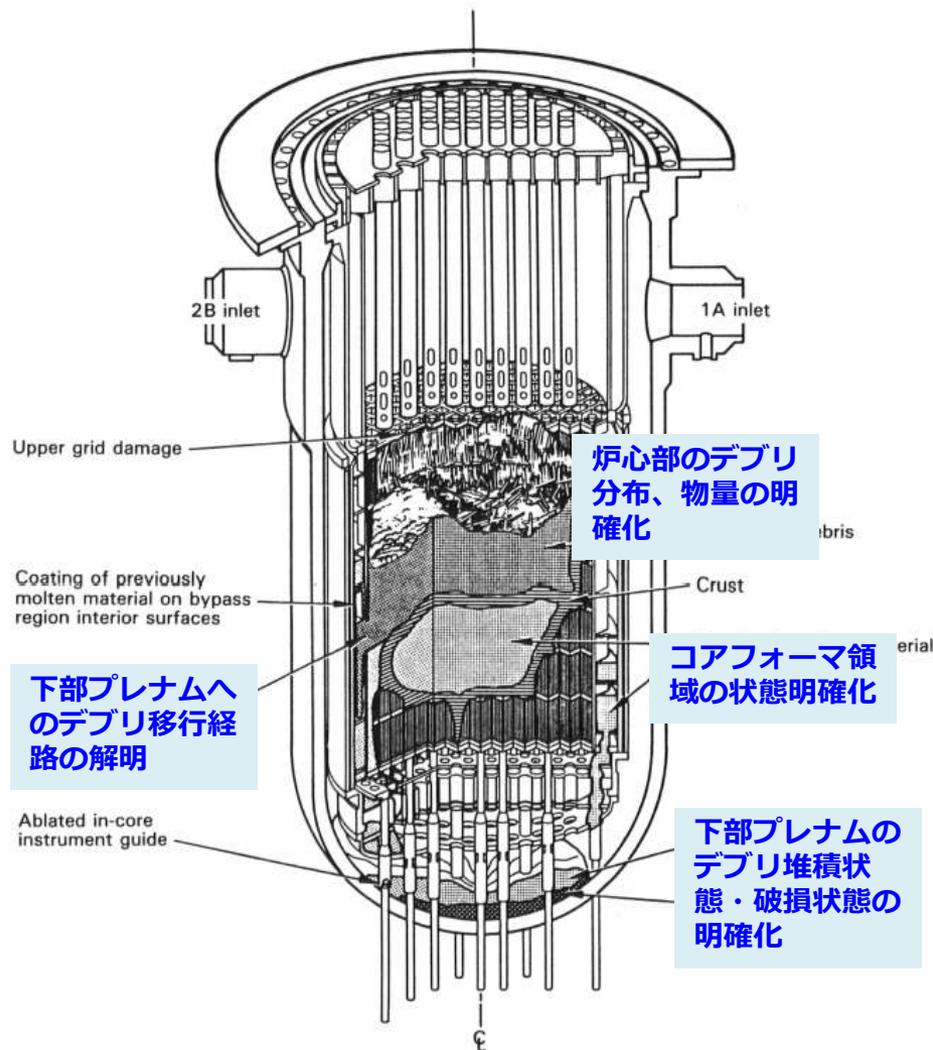


サンプルング位置 [10]

状態推定の変遷④ -最終形態-

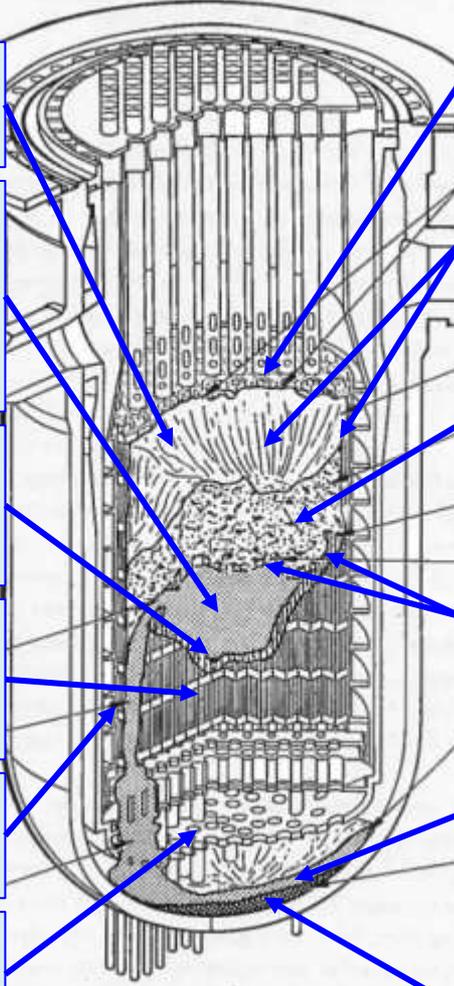


ボーリング調査直後の推定 (1986-1987) [3,4]



圧力容器内の最終形態 (1988~) [3,4]

TMI-2でのデブリ堆積状態のまとめ



③ 馬蹄形リング構造

- 上部ルースデブリの周辺領域
- わずかに溶融・固着の痕跡、2000~2200K

④ 溶融凝固相

- デブリベッドの中央が再昇温・溶融、>2810K
- 金属相約5%+酸化物約95%
- 酸化度は局所的に異なる、(U,Zr)O_{2±x}
- 周辺にクラスト形成
- 短時間で、下部プレナムに移行した痕跡

④ 下部クラスト

- 溶融金属デブリが、冷却水水位直上に堆積
- 燃料ペレット残留、2000~2200K
- 比較的低酸化度、金属デブリが多い

④ 切り株燃料集合体

- 上部で、下部クラストや周辺クラストと固着
- 隙間に、一部、金属メルト溶落の痕跡
- ピーク温度、<920K（上端以外）

⑤ 南東側バップル板の破損

- 溶融凝固デブリが、下部プレナムに移行した経路
- コアフォーミング領域にデブリ堆積

④ 炉心下部構造物の残留

- 本来の5層構造を維持
- 南東部に、溶融凝固相の移行経路、デブリ付着

① 上部格子に付着物、燃料集合体上部の残留

- 上部ルースデブリ再冠水時に発生した高温水蒸気で加熱された付着・固着物
- 発火性なしを模擬試験と分析で確認
- 切断面以下は、ルースデブリベッドに崩落

① 上部空洞、炉心周辺に燃料集合体の残留

- 局所的に昇温、>2810K、一部溶融
- 冷却水投入で、炉心上部が一気に崩落

② 上部ルースデブリ

- 局所的に昇温、>2810K、一部溶融
- 冷却水投入で、炉心上部が一気に崩落
- 発火性なし、比較的高酸化度
- 崩落・堆積以降のピーク温度、2000~2200K

④ 上部クラスト、周辺クラスト

- デブリベッド中央が再昇温・溶融、>2810K
- ルースデブリとの界面に形成
- 比較的低酸化度、金属相約25%
- 溶融凝固層の下部プレナム移行時に、大きく形状変化、周辺クラスト形成

④ 下部プレナムルースデブリ

- 溶融凝固層の下部プレナム移行、>2810K
- 比較的均質高酸化度、(U,Zr)O₂マトリックス
- 冷却時に、固液混合状態を形成

⑥ 下部プレナムハードデブリ

- 溶融凝固層の下部プレナム移行、>2810K
- ほぼ均質高酸化度、(U,Zr)O₂マトリックス
- 冷却時に、固液混合状態を形成し、圧力容器との間の断熱に寄与した可能性
- やや徐冷、冷却時に相分離

丸数字は、状況が確認された順番をおよそ示す

TMI-2でのデブリ取り出し方法のまとめ

③ 馬蹄形リング構造
-長尺ツールで、機械的に破碎・切断
-デブリバケツにいったん回収、収納缶に格納
-粒子デブリや、スラリーは、真空吸引で回収

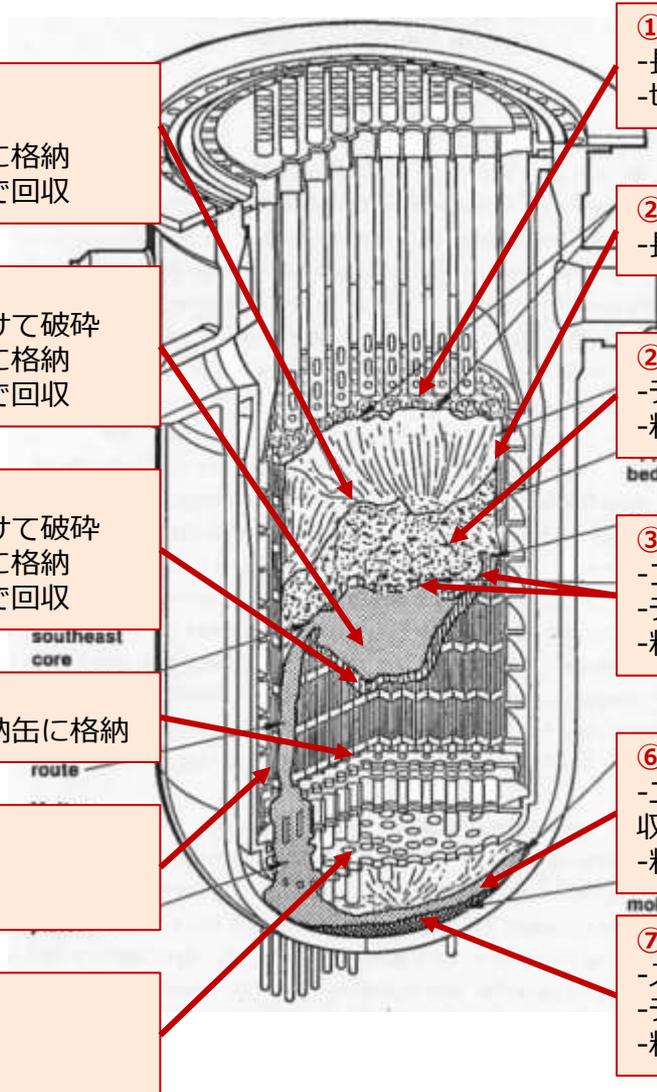
③ 溶融凝固相
-コアボーリングマシンで、2段階に分けて破碎
-デブリバケツにいったん回収、収納缶に格納
-粒子デブリや、スラリーは、真空吸引で回収

③ 下部クラスト
-コアボーリングマシンで、2段階に分けて破碎
-デブリバケツにいったん回収、収納缶に格納
-粒子デブリや、スラリーは、真空吸引で回収

④ 切り株燃料集合体
-アークプラズマトーチなどで切断、収納缶に格納

⑦ バッフル板、コアフォーマ領域
-バッフル板を一枚ずつ取り外し、切断
-付着デブリを、研磨or破碎して回収

⑤ 炉心下部構造物の残留
-アークプラズマトーチなどで切断
-付着デブリを、研磨or破碎して回収



① 上部格子、燃料集合体上部
-長尺ツールで、機械的に破碎・切断
-切断した集合体は、収納缶に格納

② 炉心周辺の燃料集合体
-長尺ツールで、機械的に切断、収納缶に格納

② 上部ルースデブリ
-デブリバケツにいったん回収、収納缶に格納
-粒子デブリや、スラリーは、真空吸引で回収

③ 上部クラスト、周辺クラスト
-コアボーリングマシンで、2段階に分けて破碎
-デブリバケツにいったん回収、収納缶に格納
-粒子デブリや、スラリーは、真空吸引で回収

⑥ 下部プレナムルースデブリ
-エアリフトなどで、デブリバケツにいったん回収、収納缶に格納
-粒子デブリや、スラリーは、真空吸引で回収

⑦ 下部プレナムハードデブリ
-スライドハンマーで破碎
-デブリバケツにいったん回収、収納缶に格納
-粒子デブリや、スラリーは、真空吸引で回収

丸数字は、デブリが取り出された順番をおよそ示す

1 F炉内状況推定、デブリ分析にむけて TMI-2の知見を参考に（私見）

1Fでの燃料デブリ分析に向けて、参考になりそうな知見

➤ デブリサンプリングについて

- ◆ ボーリング調査の代替として、**探針調査**が有効となる可能性
- ◆ デブリサンプルを複数採集できる場合には、**外観や形状の異なるサンプルが望ましい（類型化のため）**

➤ 主要構成物質の分析について

- ◆ 機械的な特性については、**浸漬法による密度測定、切断面の空孔率測定**、などが有効
- ◆ 化学的な特性やピーク温度評価については、**断面の微細組織観察**(SEM-WDX,TEM)が有効
- ◆ 得られた知見を、既往知見と比較
- ◆ 炉心構成元素を群に分け（燃料棒、制御棒、SS、インコネル、など）、**事故前の炉心平均組成に対して、領域ごとに平均組成と変動範囲を評価**（#TMI-2では17元素）
- ◆ さらに、炉心**構成元素の濃度比として整理**（Uで規格化して、データ整理）
- ◆ 内部調査での観測結果を照らし合わせ、領域ごとに、およそのデブリ主要成分の分布を推定

1Fでは、下部プレナム構造物や、ペDESTAL内構造物の物量を考慮する必要がある。

TMI-2炉心物質の平均組成

元素	組成 (wt%)	元素	組成 (wt%)
U	65.8	B	0.1
Zr	18.0	Cd	0.1
O	8.5	Mn	0.08
Fe	3.0	Nb	0.04
Ag	1.8	Si	0.04
Cr	1.0	C	0.04
Ni	0.9	Mo	0.03
In	0.3	Gd	0.01
Sn	0.3	Ti	0.01
Al	0.2	N	0.01
		Co	0.01

酸素濃度は、事故時の酸化度上昇を考慮していない
事故時には、3～6wt%増加すると推定される。

1Fでの燃料デブリ分析に向けて、参考になりそうな知見（続き）

➤ FP分析について

- ◆ 炉心平均でのORIGEN-II計算結果に対する比として、対象領域ごとに整理規格化の基準として、Uとの帯同性が高い核種（Ce-144など）を利用
- ◆ 定性分析により、存在する核種を同定
- ◆ 定量分析では、分析効率化のため、あらかじめ着目核種を選定しておく

TMI-2の例 高揮発性：I-129,Cs-137

中揮発性：Sb-125,Ru-104,Sr-90,Eu-154

低揮発性：Ce-144（濃度規格化の基準、Uとの帯同性）

1Fでは、選定する核種の半減期を考慮する必要

1Fでは、放射線測定でなく、主に質量分析を用いることを考慮する必要

➤ 酸素濃度測定について

- ◆ 堆積領域ごとの、**酸化物デブリや金属デブリ中の酸素濃度（デブリ酸化度）**は、デブリ特性の評価や事故進展の推定において、非常に重要な評価項目

TMI-2では、領域ごとに酸化度が異なっていた。

- 上部ルースデブリは、高温水蒸気との反応で、 U_4O_9 まで酸化度上昇
- 溶融凝固層は、 $(U,Zr)O_{2+x}$ 酸化物メルト+SS-Al-Ag-Sn金属メルト
- 下部クラストは、酸化物ペレット+金属溶融凝固物、わずかに亜酸化物(U-Zr-O)
- 下部プレナムは、 $(U,Zr)O_{2+x}$ 酸化物メルト+酸化物第二相(SS-Al含有)

例：下部プレナムルースデブリ中のFP濃度

核種	平均 (ORIGEN-II計算値に対する分析 平均値、%)	分析値の範囲 (%)
低揮発性		
Ce-144	102	83~152
中揮発性		
Sr-90	106	68~177
Ru-106	5.8	0~16
Sb-125	2.5	0~15
Eu-154	71	57~87
高揮発性		
I-129	2.8	0~22
Cs-137	12.8	0.38~35

○ 見出された傾向

- # Ce-144は、Uに帯同
- # Sr-90, Eu-144は、Uにある程度帯同するが、デブリ酸化度の違いが、局所的な分布に影響
- # Ru-106, Sb-125は、金属デブリ層に濃化
- # Cs-137, I-129は、空孔内で一部保持

まとめ

- TMI-2での、内部調査とデブリサンプル分析の進め方、および、そこで得られた知見が、デブリ取り出しの進捗にどのように反映されたのかを、時系列で整理した。得られた知見の活用やデブリ分析方法など、1F燃料デブリ分析でも参考になると思われる。
- **圧力容器の内部調査前、上部ヘッド取り外し前**
 - ① Pick-and-place工法を選定し、Fuel type収納缶を基本設計
 - ② 上部ヘッドと上部構造物の大気中での取り外しに向けて課題を抽出
 - ③ 上部ヘッド内の調査・サンプル分析・模擬試験により、工法を確定・取り外し
- **圧力容器の上部調査 (Quick Look)**
 - ① 炉心上部の破損状態確認し、収納缶の設計追加(粒子タイプ、フィルタータイプ)
 - ② さらに、取り出しツールの詳細や取り出し手順に反映
 - ③ デブリサンプル分析で、デブリ特性とFP分布を定性的な傾向として評価
 - ④ 探針調査で硬い層の存在を確認し、コアボーリング装置の設計と調査方法に反映
- **上部ルースデブリ取り出し**
 - ① 炉心周辺部に、馬蹄形リング構造を確認し、破砕・取り出し方法に反映
 - ② 冷却水の透明度低下が課題となり、油圧媒体を変更、冷却水循環系を改良

まとめ（続き）

➤ コアボーリング調査

- ① 溶融凝固層、クラスト層、切り株燃料集合体を確認し、デブリサンプル分析で、それぞれのピーク温度と物理化学的な特性を評価
- ② ボーリング装置を改良し、硬い層を破砕してデブリ取り出し
- ③ アークプラズマトーチにより、切り株燃料集合体を切断して回収

➤ 下部プレナム調査

- ① ルースデブリ、ハードデブリの分布と堆積状態、炉心下部構造物の状態を調査
- ② 炉心下部構造物は、アークプラズマトーチで切断して回収する工法を採用
- ③ ルースデブリは、エアリフト+デブリバケツ、真空吸引システムで回収
- ④ ハードデブリは、再度水没させ、スライドハンマーとコアボーリング装置で破砕して回収

➤ コアフォーマ領域

- ① デブリ移行経路を解明し、炉内状況推定図が完成
- ② コアフォーマ領域の解体、デブリ取り出しに反映

➤ 下部ヘッド調査

- ① 工程を2か月中断し、国際協力で、構造物サンプルを回収、事故時の圧力容器破損までのマージンを評価

参考文献

- [1] G.W. Croucher, THREE MILE ISLAND UNIT-2 CORE STATUS SUMMARY: A BASIS FOR TOOL DEVELOPMENT FOR REACTOR DISASSEMBLY AND DEFUELING, GEND-007, 1981.
- [2] Quick Look Inspection Report on the Insertion of a Camera into the TMI-2 Reactor Vessel, GEND-030, 1983.
- [3] [Three Mile Island Accident of 1979 Knowledge Management Digest, NUREG/KM-0001, Supplement 1, 2 and 3, USNRC, 2020.](#)
- [4] [The Cleanup of Three Mile Island Unit 2 A Technical History 1979 to 1990, EPRI NP-6931.](#)
- [5] R.K. McCardell, M.L. Russell, D.W. Akers and C.S. Olsen, Summary of TMI-2 Core Sample Examinations, Nucl. Eng. and Design, 118 (1990) 441-449.
- [6] TMI-2 CORE DEBRIS GRAB SAMPLE EXAMINATION AND RESULTS, GEND-INF-075-PT-1 and PT-2, 1986.
- [7] D.W. Akers, C.S. Olsen, R.V. Strain, TMI-2 Lower Vessel Debris Examinations, INEL-NUREG, CP-0082, 1986
- [8] C.S. Olsen, D.W. Akers, R.K. McCardell, Examination of debris from the lower head of the TMI-2 Reactor, GEND-INF-084, 1988.
- [9] D.W. Akers, S.M. Jensen, B.K. Schuetz, Examination of Relocated Fuel Debris Adjacent to the Lower Head of the TMI-2 Reactor Vessel, NUREG, CR-6195, 1994.
- [10] J.R. Wolf et al., TMI-2 Vessel Investigation Project Integration Report, NUREG, CR-6197, 1994
- [11] D.W. Ackers, M.L. Russell, C.S. Olsen, R.K. McCardell, and B.A. Pregger, TMI-2 CORE BORE EXAMINATIONS, Vol.1 and Vol. 2, GEND-INF-092-V-1 and V-2, 1990.
- [12] TMI-2 Core Debris Grab Samples Analysis of First Group of Samples, GEND-060, 1985.
- [13] C.S. Olsen, D.W. Akers and R.K. McCardell, Examination of debris from the lower head of the TMI-2 Reactor, GEND-INF-084, 1988.
- [14] Assessment of the TMI-2 Axial Power Shaping Rod Dynamic Test Results, GEND-INF-038, 1983.
- [15] A.W. Marley, D.W. Akers and C.V. Mclsaac, Sampling and Examination Methods Used for Three Mile Island Unit 2, Nucl. Technol. 87 (1989) 845-856.
- [16] International Atomic Energy Agency, Catalogue of Methods, Tools and Techniques for Recovery from Fuel Damage Events, IAEA-TECDOC-627, October 1991.
- [17] TMI-2 defueling tools engineering report, GEND-INF-073, EG&G Idaho Inc., 1986.
- [18] G.L. Calhoun, Fuel Removal Equipment for Three Mile Island, Nucl. Technol. 87(3) (1989) 587-594.
- [19] TMI-2 Defueling System Design Description, GEND-INF-065, 1985.
- [20] M.L. Russell, TMI-2 Core Horseshoe Ring Examination, GEND-INF-083, 1987.
- [21] Evaluation of Special Safety Issues Associated with Handling the TMI-2 Core Debris, GEND-051, 1985.
- [22] C.S. Olsen, S.M. Jensen, E.R. Carlson and B.A. Cook, Materials Interactions and Temperatures in the Three Mile Island Unit 2 Core, Nucl. Technol. 87 (1989) 57-94.
- [23] 渡会偵祐、井上康、舛田藤夫、TMI-2号機の調査研究結果、日本原子力学会誌 解説 vol. 32 (No. 4) (1990) 338-350.
- [24] R.V. Strain, L.A. Neimark, J.E. Sanecki, Fuel Relocation Mechanisms Based on Microstructures of Debris, Nucl. Technol. 87 (1989) 187-190.
- [25] TMI-2 Leadscrew Debris Pyrophoricity Study, GEND-INF-044, 1984.
- [26] TMI-2 Pyrophoricity Studies, GEND-043, 1984.
- [27] PEIS-Decontamination and Disposal of Radioactive Wastes Resulting from TMI-2, NUREG-0683, Vol. 1, 1981.