

# TMI 2号機でのデブリ取り出しの経験 1F廃炉への教訓

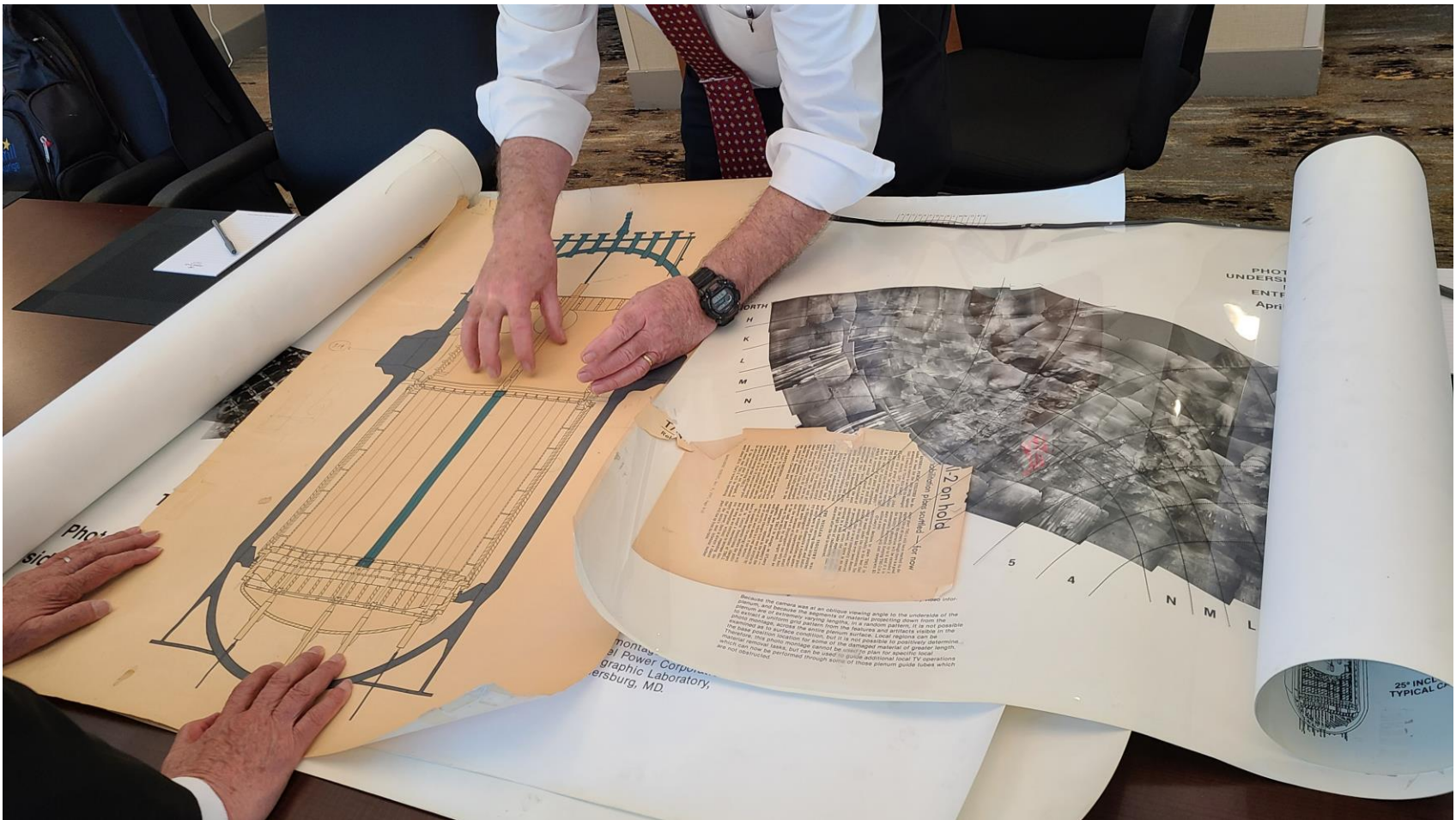
Gordon R. Skillman

TMI 2 デブリ取り出し責任者 1985年～1986年

NDF第7回福島第一廃炉国際フォーラム

2023年8月28日

# 本プレゼンテーションはゴードン・R・スキルマンの私的記録、NRCのナレッジ マネージメント（KN）ダイジェスト、同氏の同僚の記録に基づく



TMI 2 デブリ取り出しの記録  
(log) 1 ページ

1985年10月30日

Defueling Daily Log

30 October 1985

0930 Stationed the Defueling SRO to reconfigure the TMI-2 core. The following procedures will be used initially:

Defueling Operations	4200-OPS-3255.01
Heavy Duty Tool Op.	4210-OPS-3255.04
Work Platform Op.	4210-OPS-3255.09
Control System Op.	4210-OPS-3255.10
Defueling Aud. Video	4210-OPS-3255.11
Canister Positioning Sys.	4210-OPS-3255.12
R.B. Service Crane	Tell 4000-3882/65/237
Op of Canal Fill & Tool Flush.	4210-OPS-3257.01
Trans. of Defuel. Tools	4211-OPS-3252.05
Def. Eg. Contam. Control	4370-IMP-3205.06

Defueling SRO is James W. Quivette. This entry cannot use the hydraulic system and is restricted from putting a canister in the Reactor Vessel and removing fuel debris from the Reactor Vessel.

The criticality monitors are not installed.

late Entry 0905 Per Skillman - S. Levin gave permission to SLL.

1021 Entered R. B. began equipment startup

1126 Reactor Bldg. evacuation drill

1132 Re-entered Reactor Bldg.

1202 Secured defueling, exited Reactor Bldg., the monitors on the work spot handrail are being tested. The Reactor Vessel lights are in use and the camera's are on but not being moved.

# スリーマイル島原子力発電所

スリーマイル島は サスケハナ川の中州に位置する、航空写真（北西から南東へ）

TMI-1 - B&W NSSS - 2568 MWt - 1975年 運開

TMI-2 - B&W NSSS - 2772 MWt - 1979年 運開



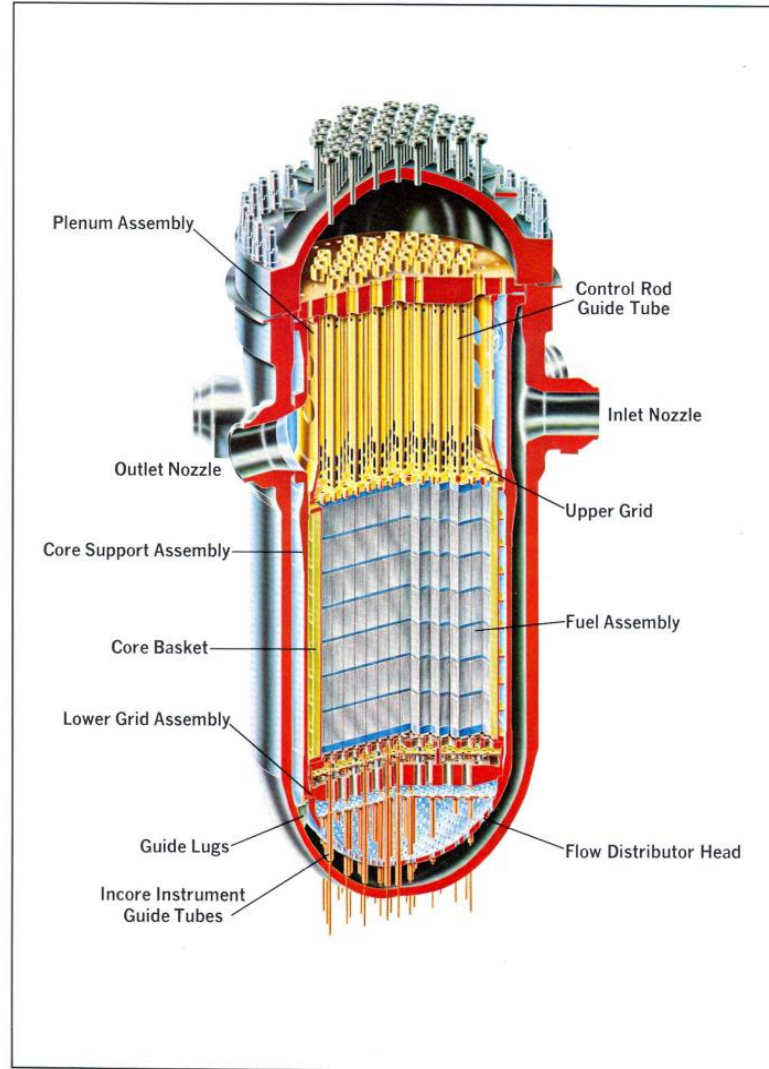
# サスケハナ川：この川への放射性物質が放出は国レベルでの大惨事につながる

- サスケハナ川；全長約 440マイル (700 km)
- 米国で16番目に大きい川
- 下流の複数の地域に飲料水源を提供
- 米国最大の河口であるチェサピーク湾に淡水の約 50% を供給
- TMI 2 原発からサスケハナ川への放射性水の漏洩は、国レベルで非常に深刻な影響を及ぼす

## Pressurized Water Reactor

### 内部構造

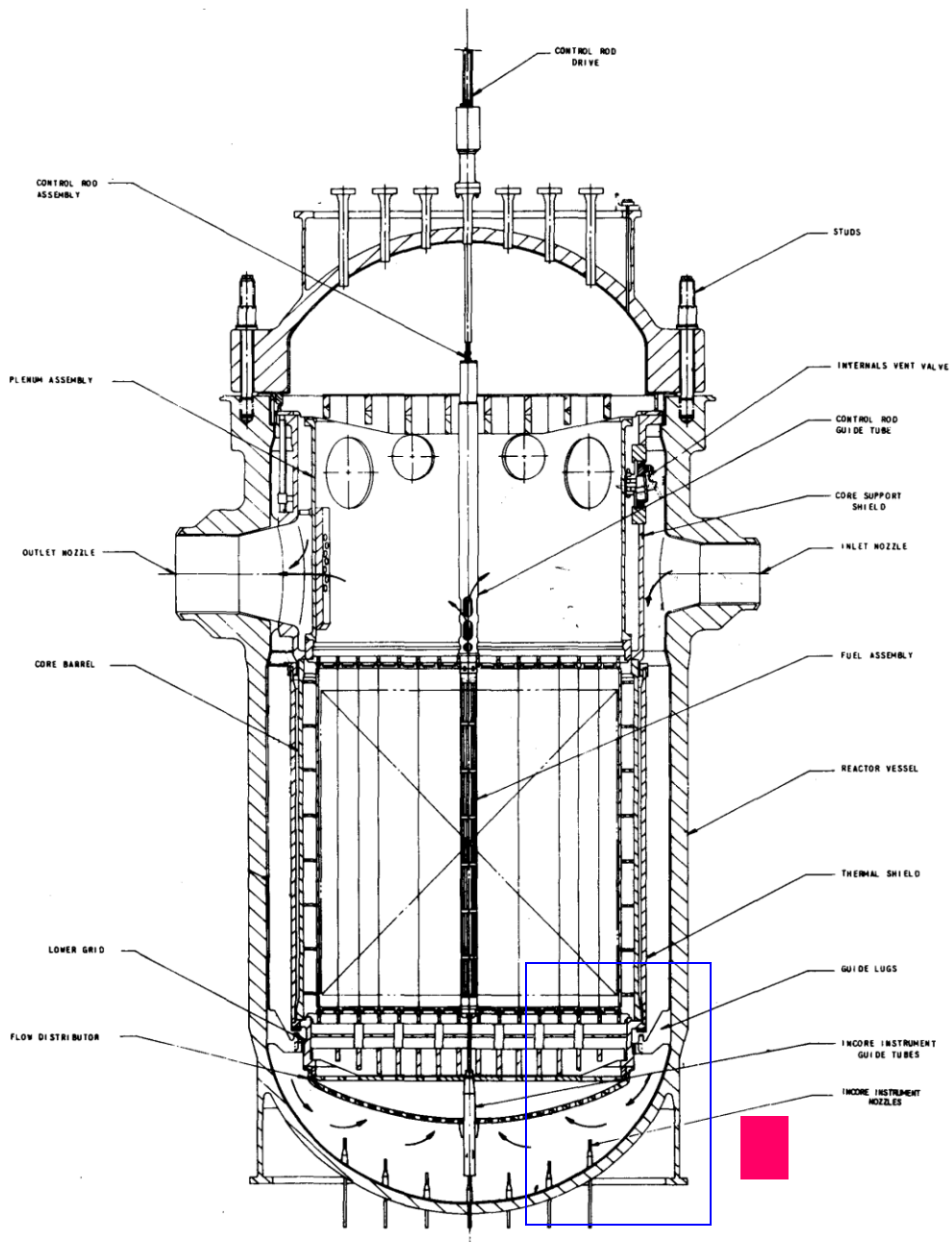
### 典型的な Babcock & Wilcox 社 原子炉容器の断面図



Babcock & Wilcox

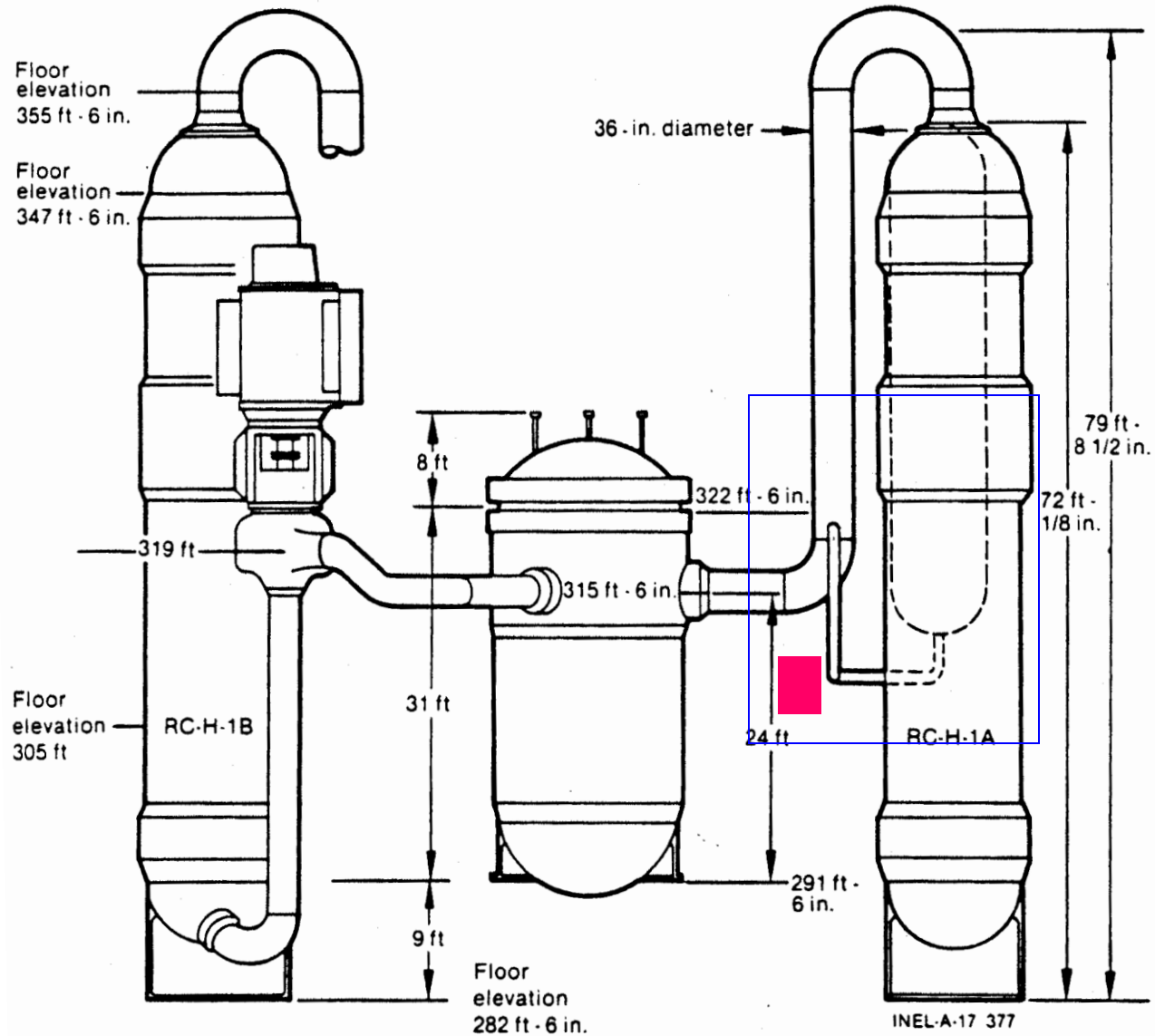
# TMI-2 原子炉容器内部構造図

炉心下部支持構造物の複雑さ（青枠・赤枠を参照）



# 典型的な B&W 原子炉 冷却システムの配置図 及びTMI-2 フロアレベル

(サージライン赤枠の  
ファントム内加圧器を参照)





# 事故

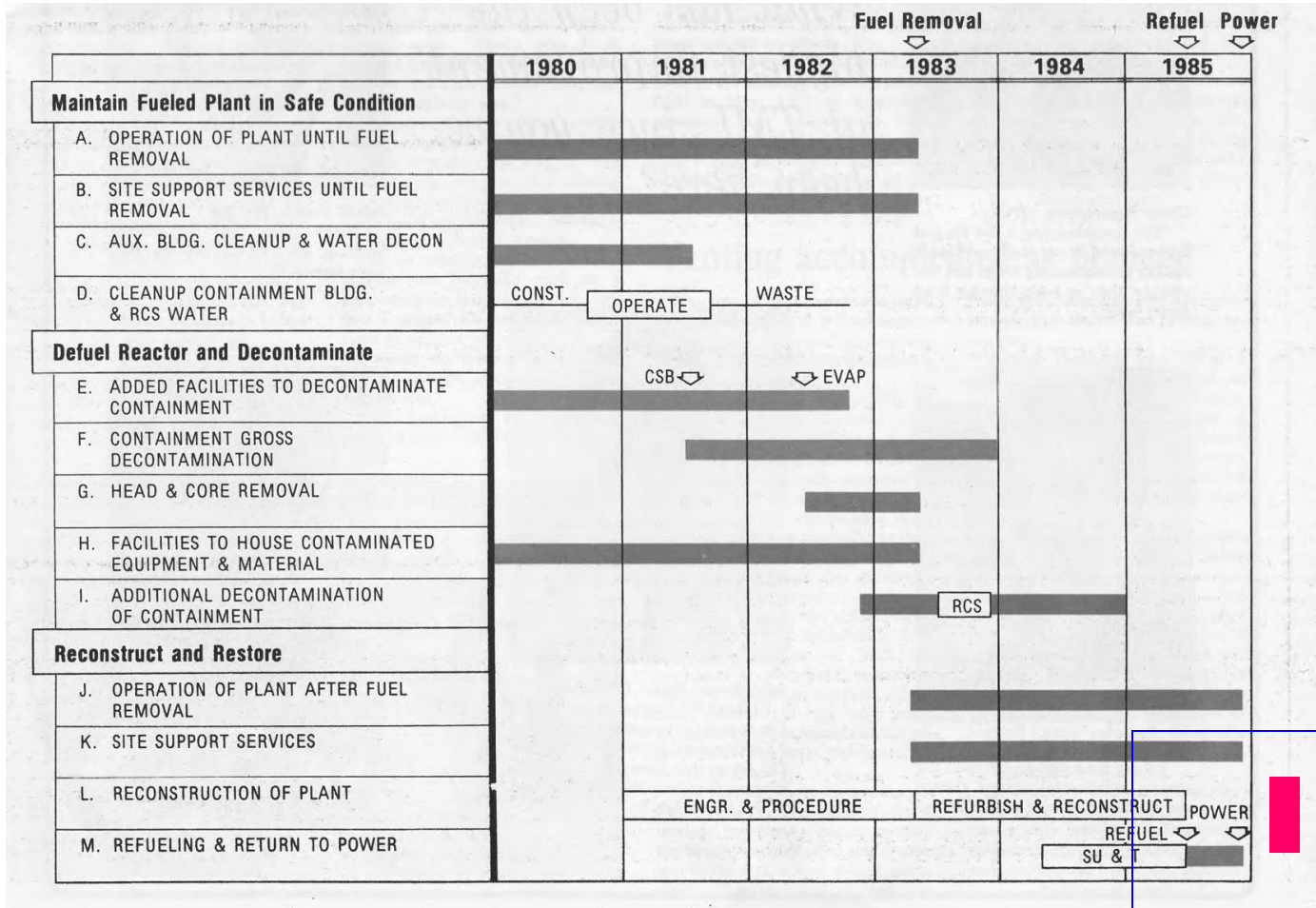
- 1979年3月29日午前4時事故発生。
- 春の雪解け水でサスケハナ川増水。そのため上流から 400 マイル（644キロ）も離れた多数の農業用地の牧場排水が川に流入。大腸菌を含む。
- この事故は原子炉冷却システムの小さな漏洩が原因で発生、最終的に炉心損傷に繋がった。電動リリースバルブ（PORV）は設計どおりに開いたが、140分間開固着。そのため、炉心に空洞ができ、炉心溶融、数十万ガロンの高濃度放射性液体が原子炉建屋の地下に漏出。
- 前例のない放射線レベルにより、原発のほぼすべての重要なエリアにアクセス不可。

# 加压器压力逃し弁 (PORV)



# データ収集の重要性

GPU社の初期の「クリーンアップ スケジュール」 (1980年8月) :  
クイックルックの前、赤枠に「発電再開」と記述



# TMI 2 クリーンナップ・タイムライン

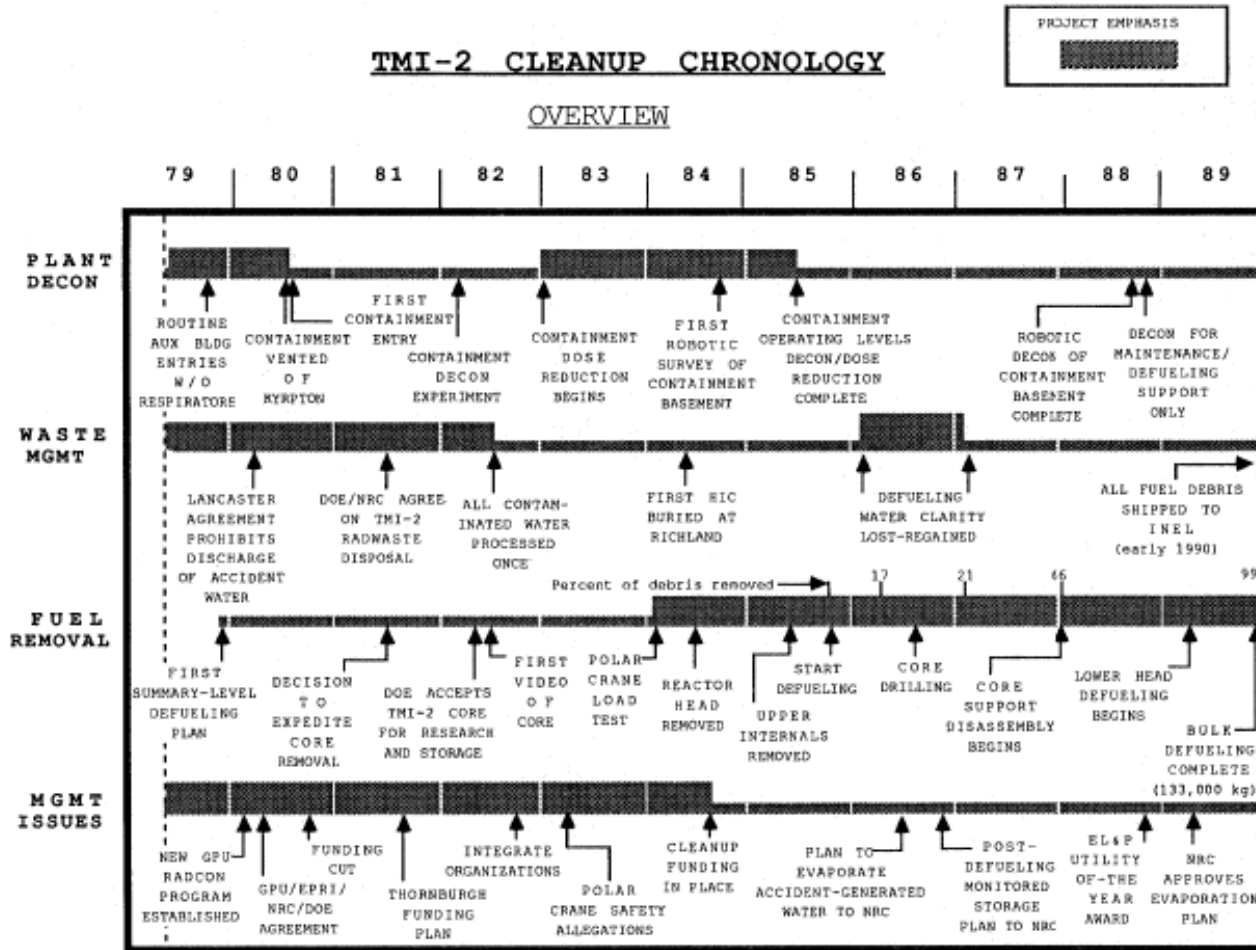
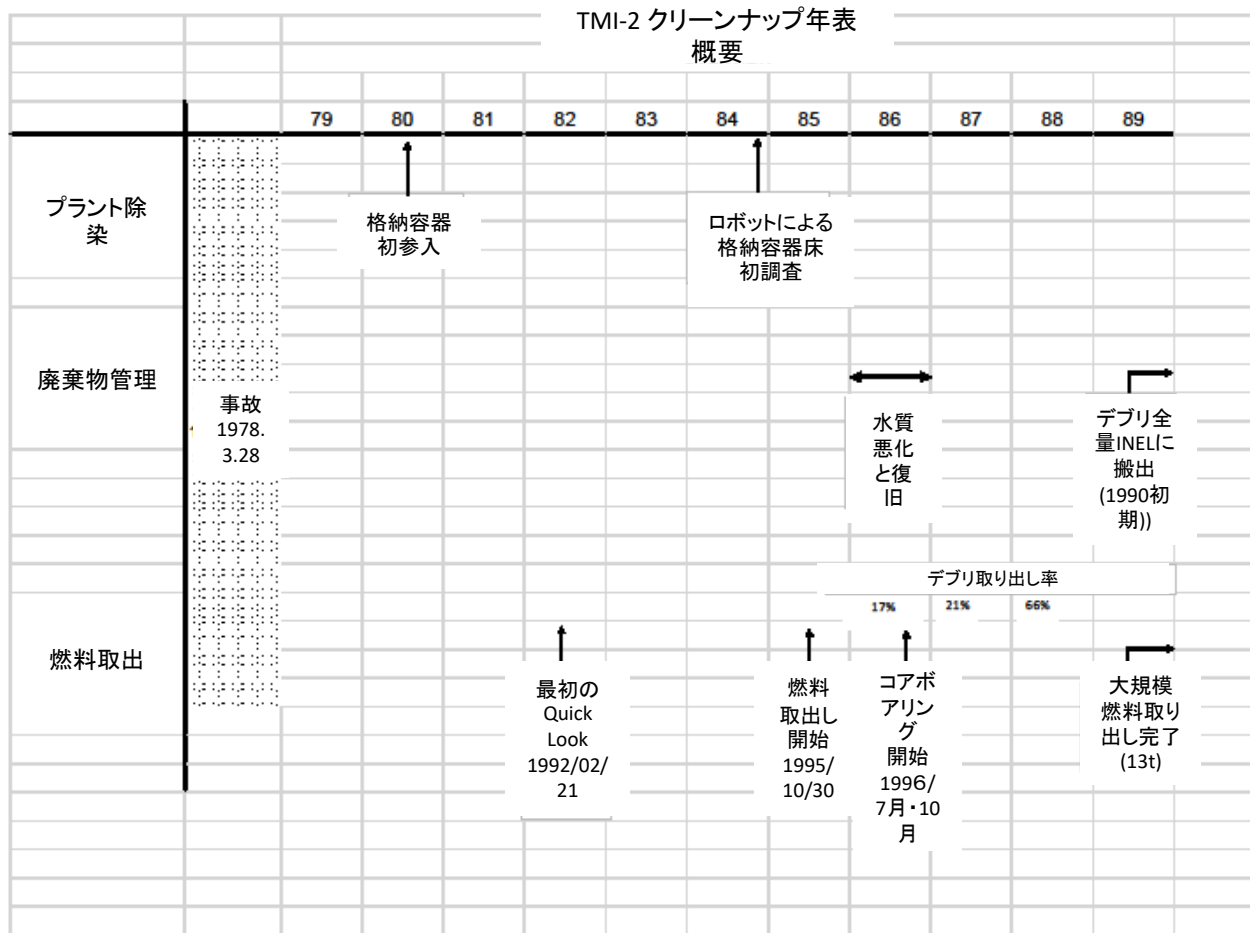


Figure 1-1. TMI-2 Timeline: Overview

# 簡略したタイムライン - 主な出来事



# データ収集は、デブリ取り出し計画の次の行動を 決めるために重要

- TMI 2 計画を前進させるためにはデータ取得が不可欠
- GPU社のリーダーが数人のコンサルタントと協力して、炉心の最上部の下に何があるかを観察するためだけの「クイック・ルック」試行を開発、実行
- クイック・ルックの前までは炉心の状態が不明で、劣化した炉心へのアクセスや除去について明確な行動計画なし。
- クイックルックをやったことにより、初めてデブリ取り出しおよびクリーンアップ計画が開始。（それまでに期待されていた）再起動の可能性は断念
- クイックルックにより、コアデブリサンプルの取得など、追加データ収集の必要性が明確化

# クイックルック 1982年7月21日実施 (GEND-030 Vol 1) (1982年8月6日、12日にも)

- 事故から3年半経過
- チームは容器上部サービスプラットフォームに立って、CRDM主ねじを開放
- 炉心の死角中心にある主ネジ開口部（H-8）にカメラと照明装置を降下、炉心に接近
- カメラは1.5インチ（～38mm）径
- 炉心上部 5.5 フィート（～1.5m）が欠落していることを発見

# 炉心への初めてのビジュアル接近： 1982年7月21日のクイックルック (事故から3年経過)

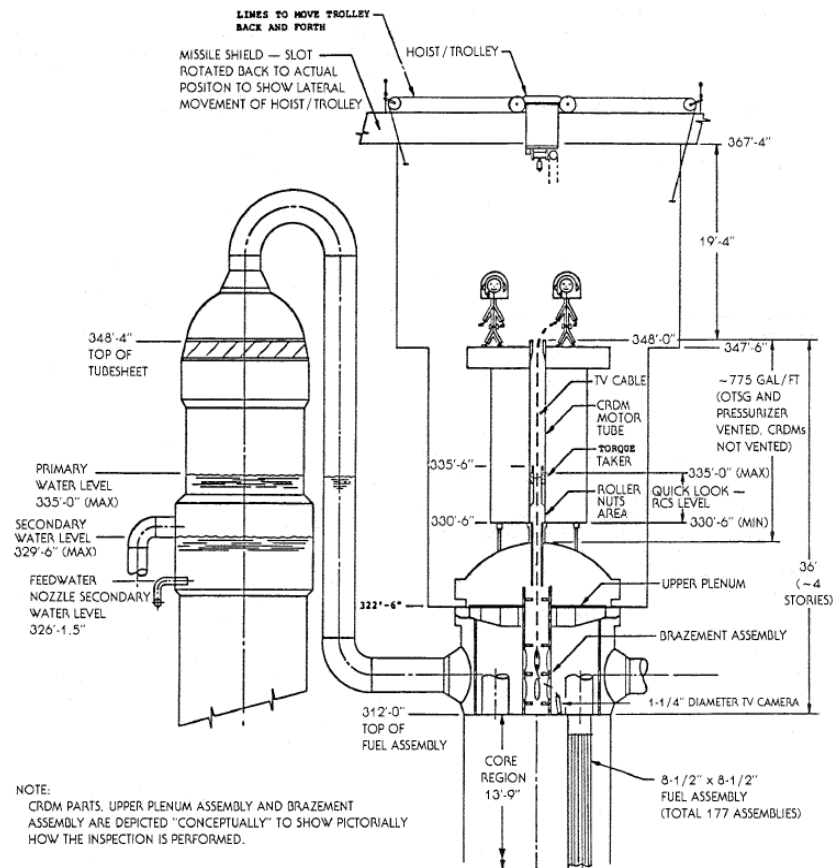
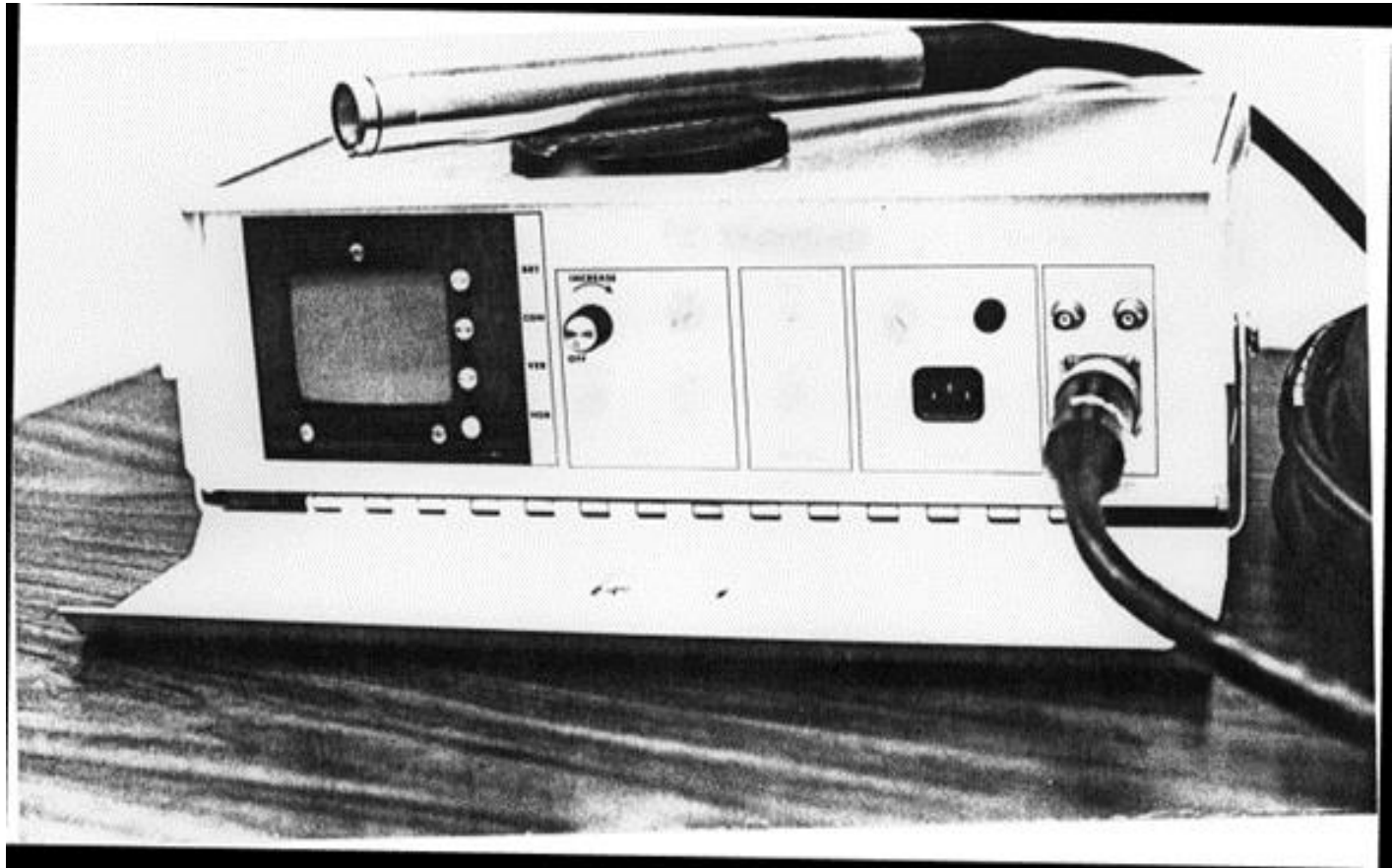


Figure 5-8. Conceptual Arrangement for TV "Quick Look" via Leadscrew Hole



# クイックルックカメラと電子機器

(データ報告書 - クイックルック検査結果 - TPO/TMI-026)



# クイックルックカメラを持っている様子

1982年7月21日

(ペンシルベニア州立大学 TMI-2 ビデオライブラリー)



# クイックルックチーム

- クイックルックカメラをCRDMオープニングに挿入 1982年7月21日

(ペンシルベニア州立大学 TMI-2 ビデオライブラリ)



クイックルック 1982年7月21日  
燃料棒、グリッドスペーサ、燃料棒上部スプリング



クイックルック 1982年7月21日  
グリッドスペーサ、燃料棒



## その後のクイックルック検査

- クイックルック検査は 3回実施。

クイックルック I - 1982年7月21日

クイックルック II - 1982年8月6日

クイックルック III - 1982年8月12日

各検査の方法は基本的に同じアプローチで、サービス構造から主ねじ開口部を通じて炉心にアクセス

- 各検査では、CRDM 主ネジの位置を変えて、損傷した炉心に入った。2回目と3回目の検査は、最初のクイックルックから燃料集合体から距離を開けた位置で効果的に実施された。

# クイックルック後想定された炉内状況

(NP-6931)

データ回収のこの初期段階では、  
デブリ取り出し開始した際、新たにどの  
ような燃料損傷が発見されるか不祥

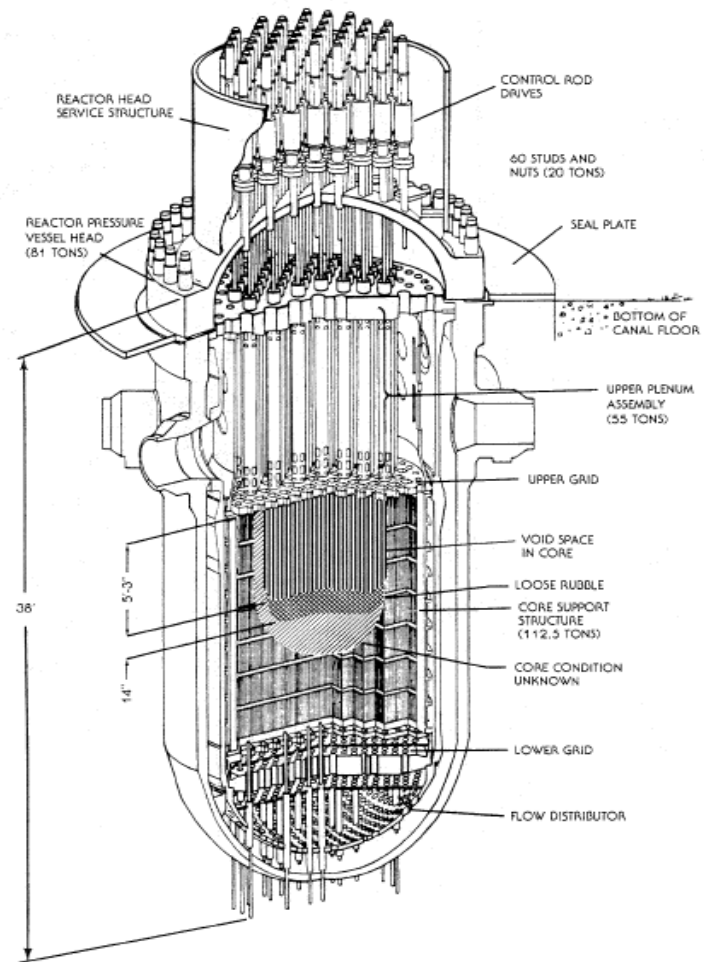


Figure 5-3. Known Post-Quick Look Core Conditions: 1982-1985

# クイックルックの結果、GPU社はデブリ取り出しへのアプローチとして包括的な計画を策定

- クイックルックはデータ収集の重要性を実証し、更にデータ収集を続けることの利点と価値を示す
- クイックルックは、専用のツールと過程を含む、デブリ取り出しへの包括的なアプローチの必要性を示す
- 発電所の将来（特に再稼働）と炉心撤去に関する、従前の計画や工程、考え方は断念され、新しいデータに基づいて新しい計画を策定
- 累積線量を最小限に抑え、作業員の安全と労働安全を確保しつつ、損傷炉心を安全かつ広範囲に除去することが課題に



# クイックロック開口部に回転カメラを挿入し、炉心空隙の 360度パノラマ画像を撮影



# 360 度パノラマカメラ検査で得られた炉心デブリの拡大図



原子炉容器下部のカメラ検査を実施：(画像は曲面部の外殻と楕円形分流板のボルト接合部)



# データ収集の重要性

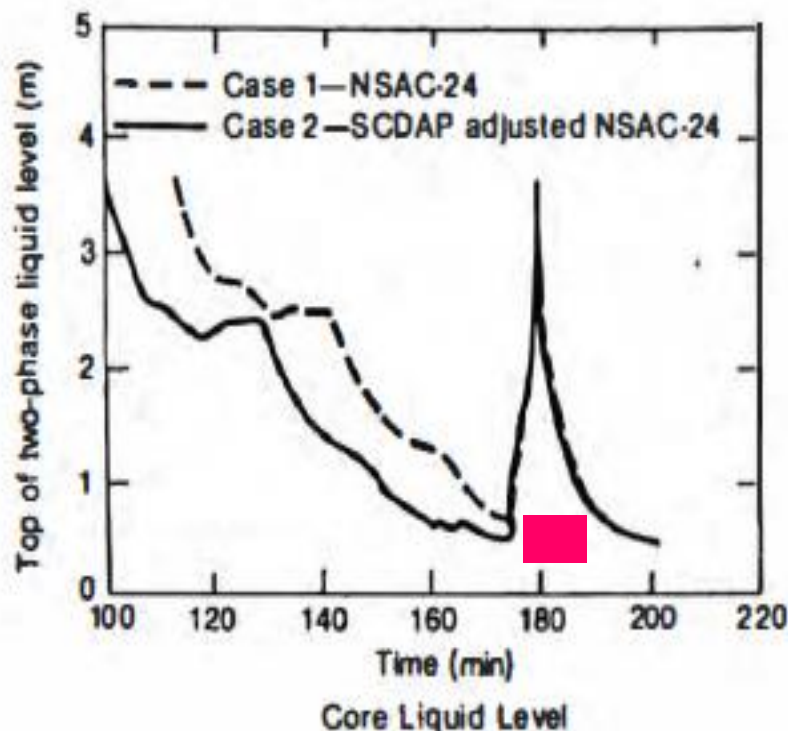
## クイックルック(及びその他データ収集)後における 炉心損傷と分析の相関関係

- 原子力安全分析センター (Nuclear Safety Analyses Center= NSAC) が実施した重要な分析から:
  - 事故発生から4時間から5時間半の間に行われた一連の温度測定では一部の温度は2500 °F (1370 °C) 付近にあったが、炉心の外縁付近では700°F (370 °C) 以下であった。(NSAC 80-1、技術解説、9-10ページから)
  - 炉心中心より上で測定された温度は、事故発生から約 8 時間は700°F (370 °C) (記録計器の限界温度) を超えたままであり、一部は最大 30 時間にわたり 700°F を超えたままであった。(NSAC 80-1、技術解説、9-10ページから)

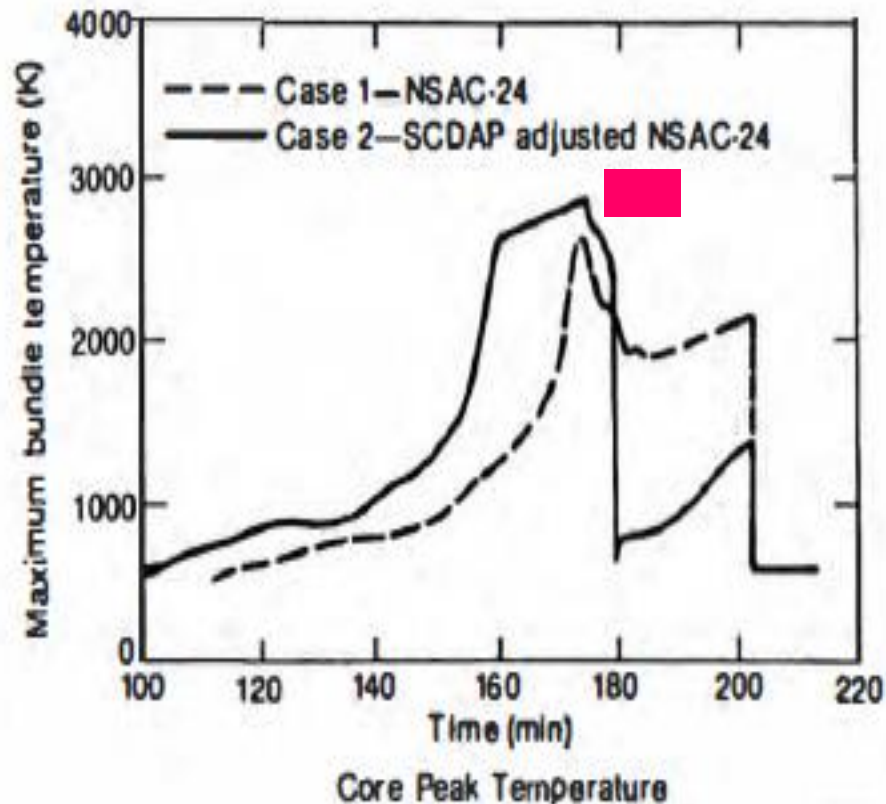
二相液面上部／時間相関  
TMI-2事故評価プログラム、EG&G アイダホ州  
1986年2月、42 ページ (1/2)

炉心レベルが午前 4 時から午前 7 時まで約3 時間継続的に低下している  
(1979年3月29日)

燃料バンドルの最高温度については次のスライドを参照



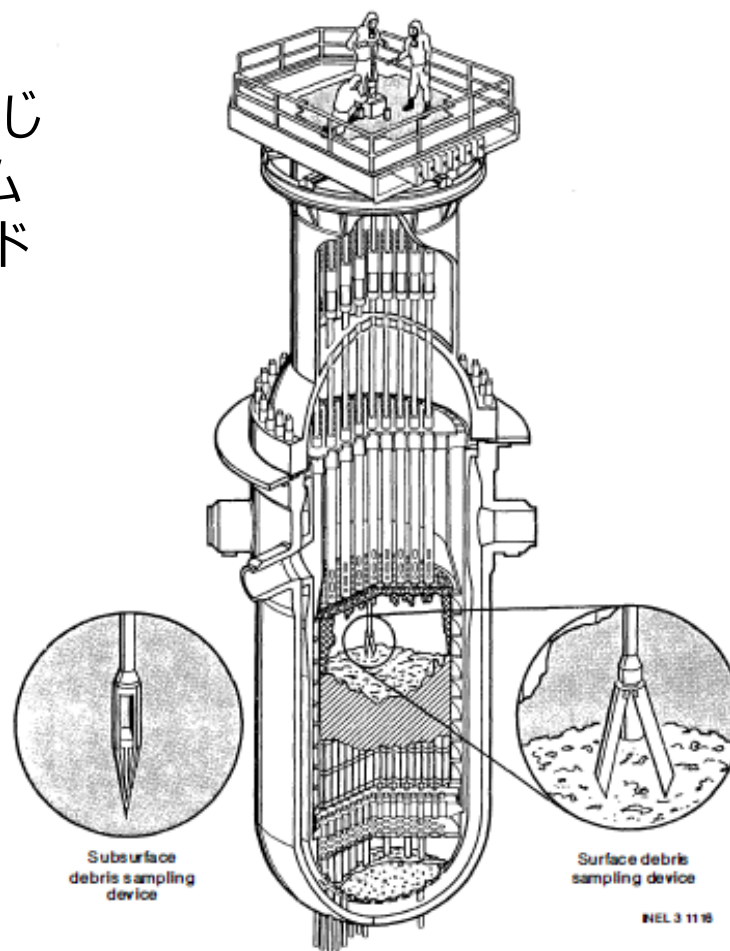
燃料バンドルの最高温度／時間相関  
TMI-2事故評価プログラム、EG&G社 アイダホ  
1986年2月、42 ページ (2/2)  
約175～180分で3000°Kに  
(～6時55分-7時00分、1979年3月28日)



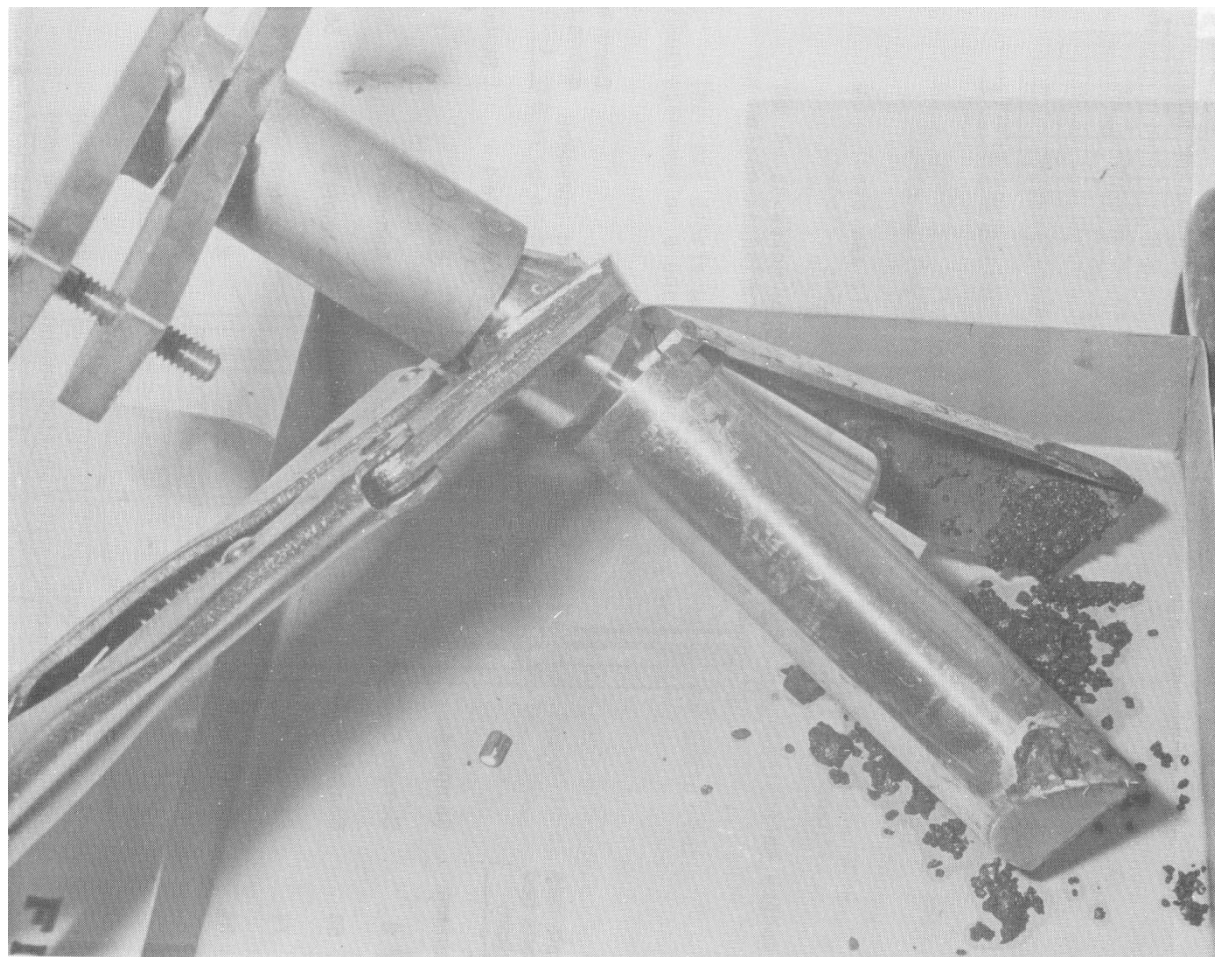
6 0484

# TMI-2 炉心デブリのサンプリング (GEND-57)

作業チームは、クイックルックの場合と同じ炉心へのアクセス経路を利用し、「クラムシェルツール」を使用して炉心デブリベッドの深部から複数 (multiple) の炉心サンプルを入手 (グラブサンプル)

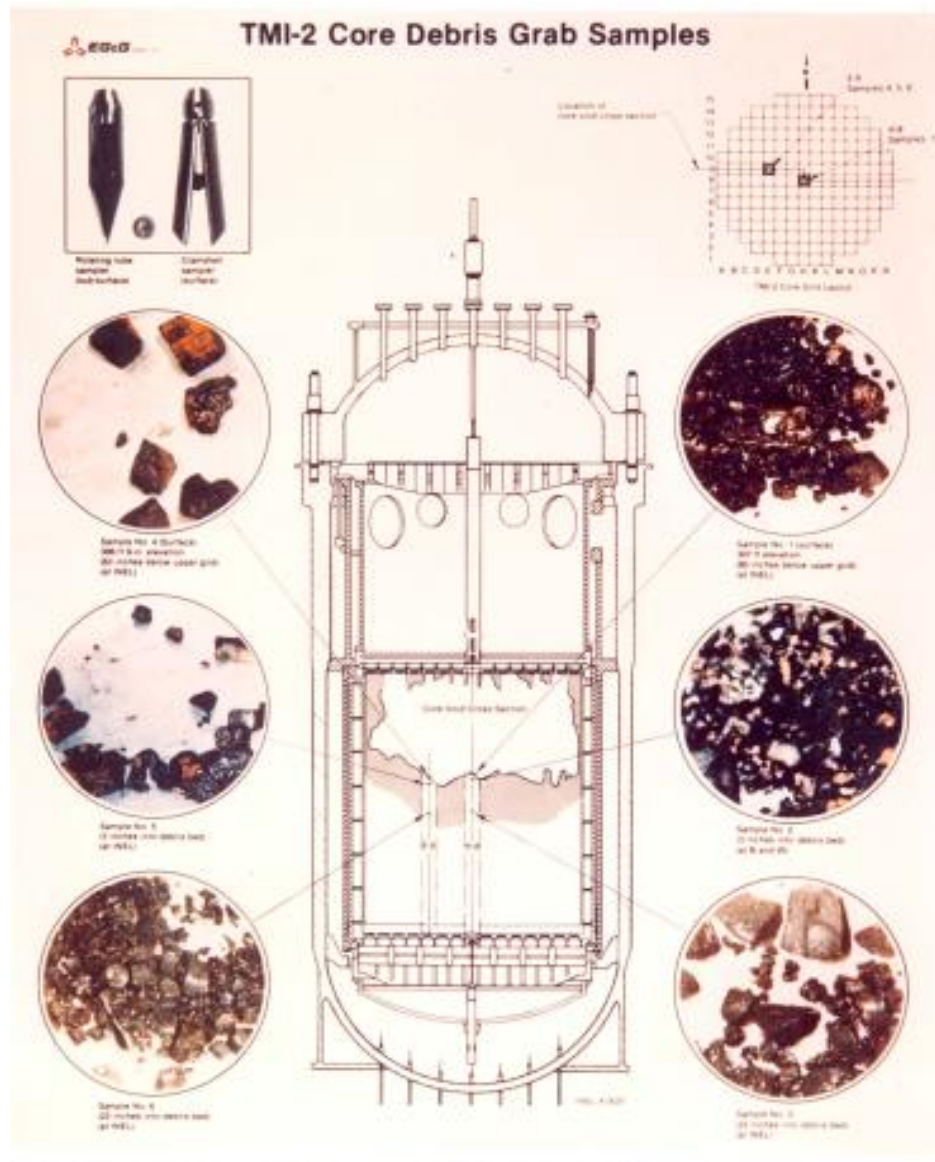


# 燃料デブリを示すTMI-2 炉心デブリグラブ・サンプルツール 「クラムシェルツール」





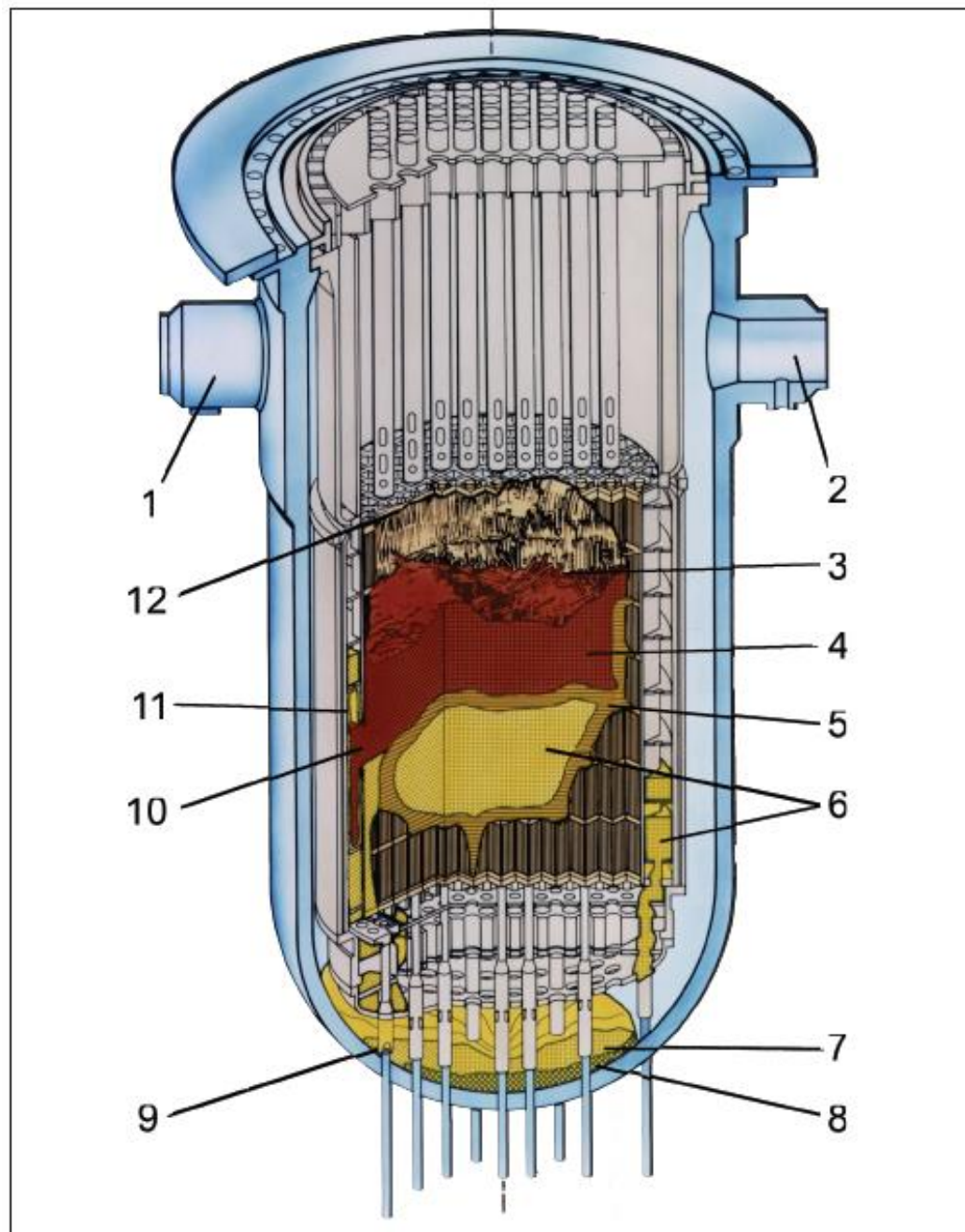
# 「クラムシェルツール」で取得した TMI-2炉心デブリのサンプル (EGG-6531, 7ページ)



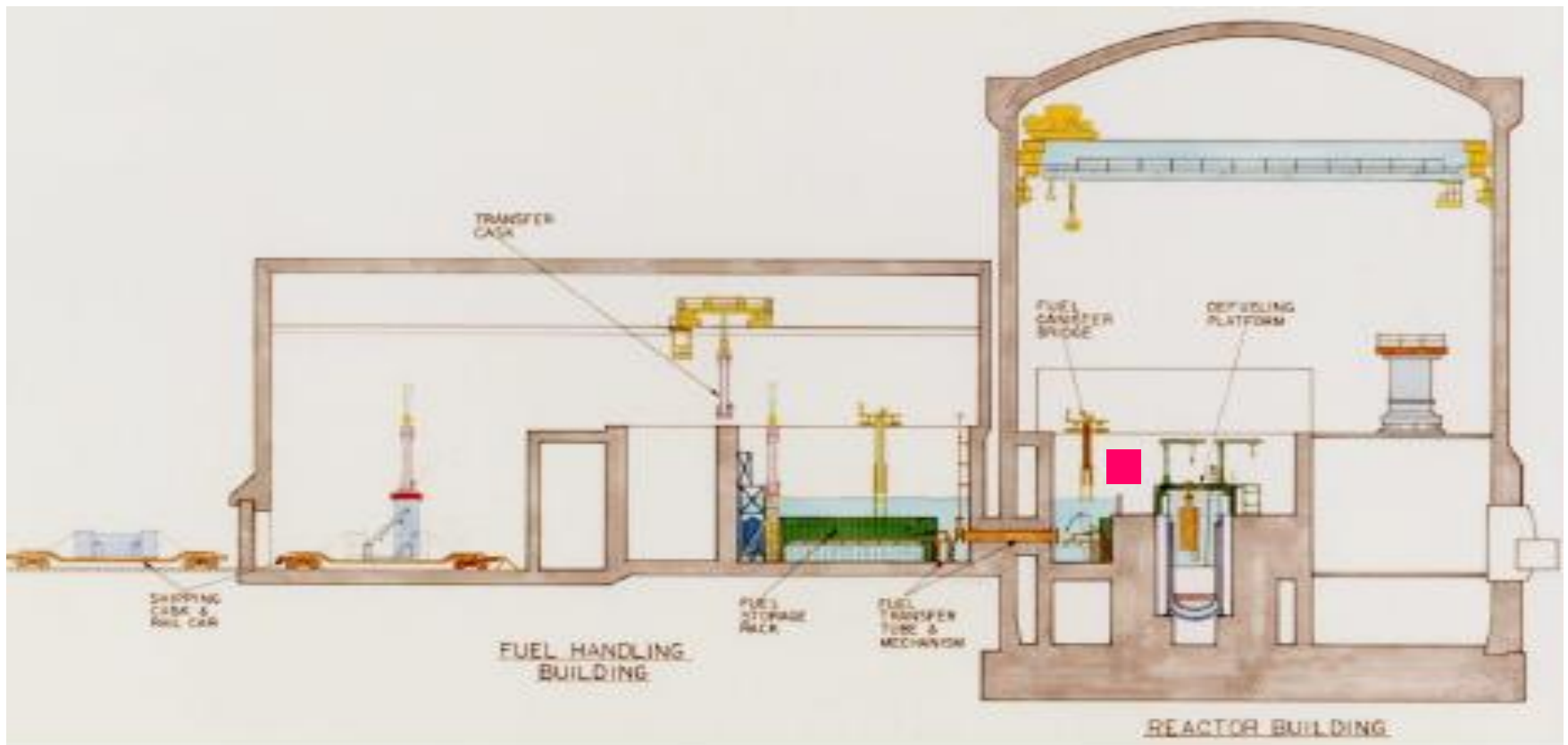
# TMI-2炉心最終状態図

注記 (NUREG/CR-6042):

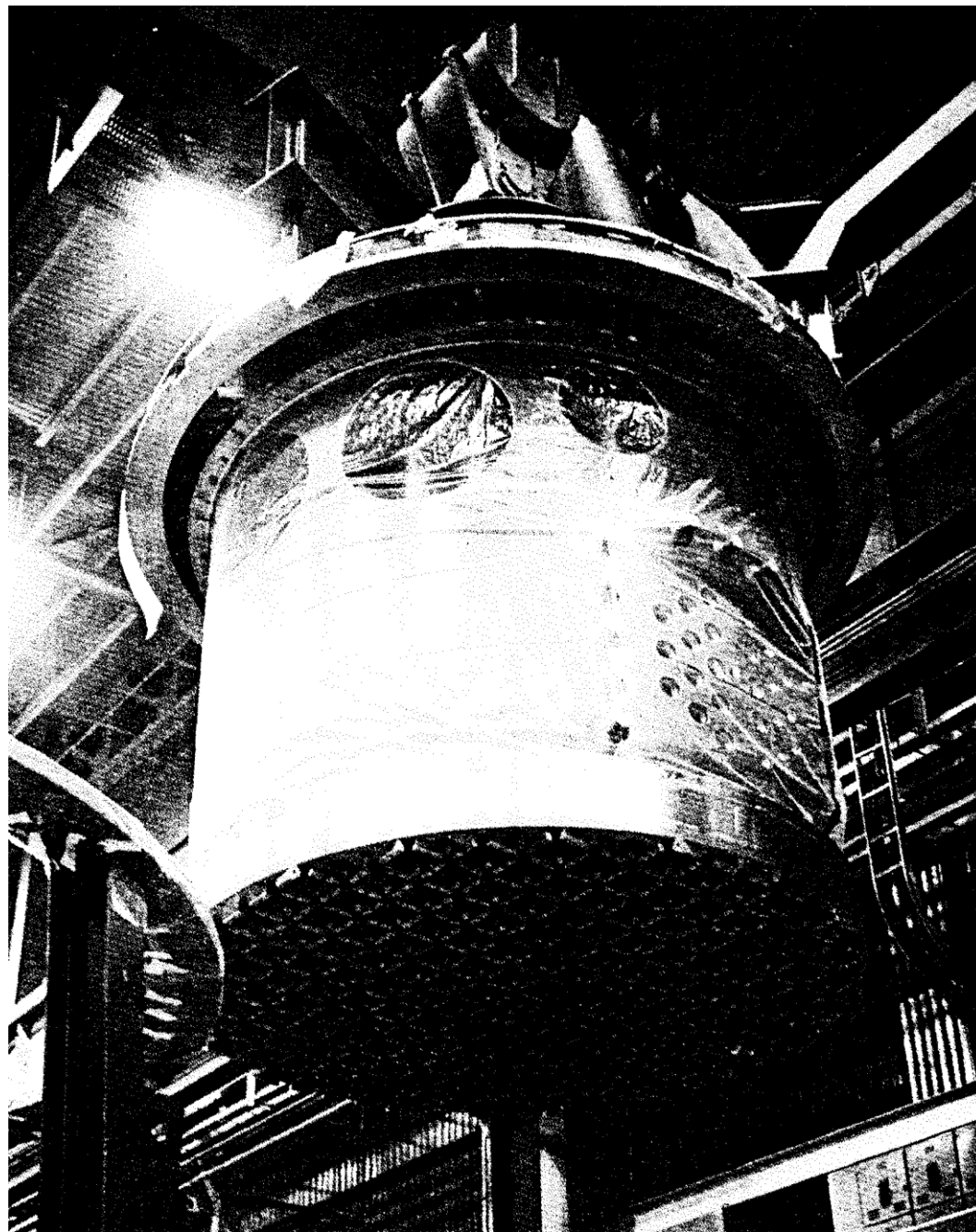
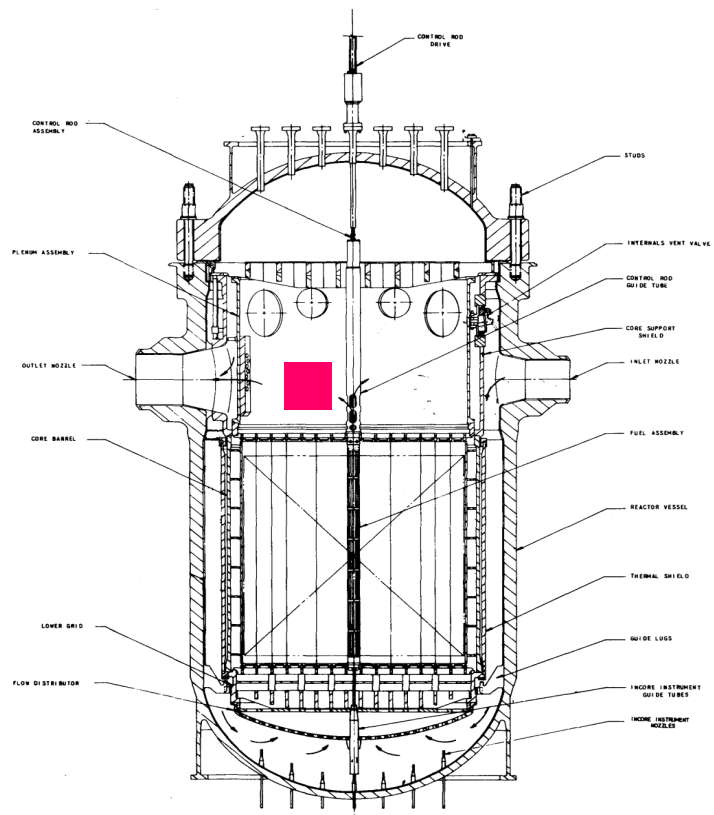
- (1) コールドレググループ2B入口
- (2) コールドレググループ1A入口
- (3) 空洞
- (4) ソフトな (loose) 炉心デブリ
- (5) クラスト (crust)
- (6) 再凝固した溶融物質
- (7) 下部プレナムのデブリ
- (8) 硬質デブリ
- (9) 損傷した炉内計装管
- (10) バッフルプレートの穴
- (11) バイパス内面周囲の再凝固した溶融物質のコーティング
- (12) 上部グリッドの損傷



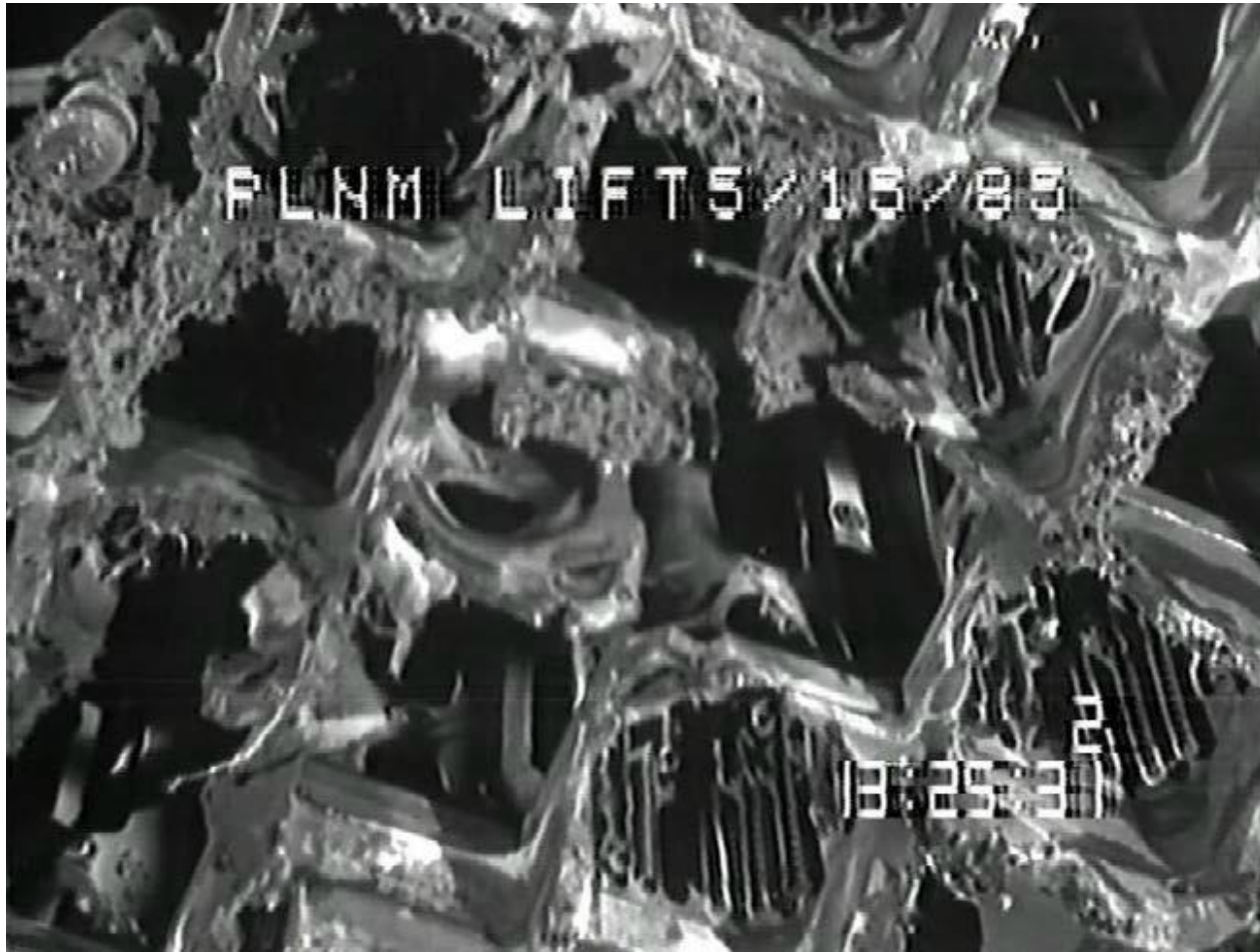
# TMI-2 デブリ取り出し準備中の配置図 (赤枠: ワークプラットフォーム、給水ダム、燃料交換装置)



# 次の画像の該当場所

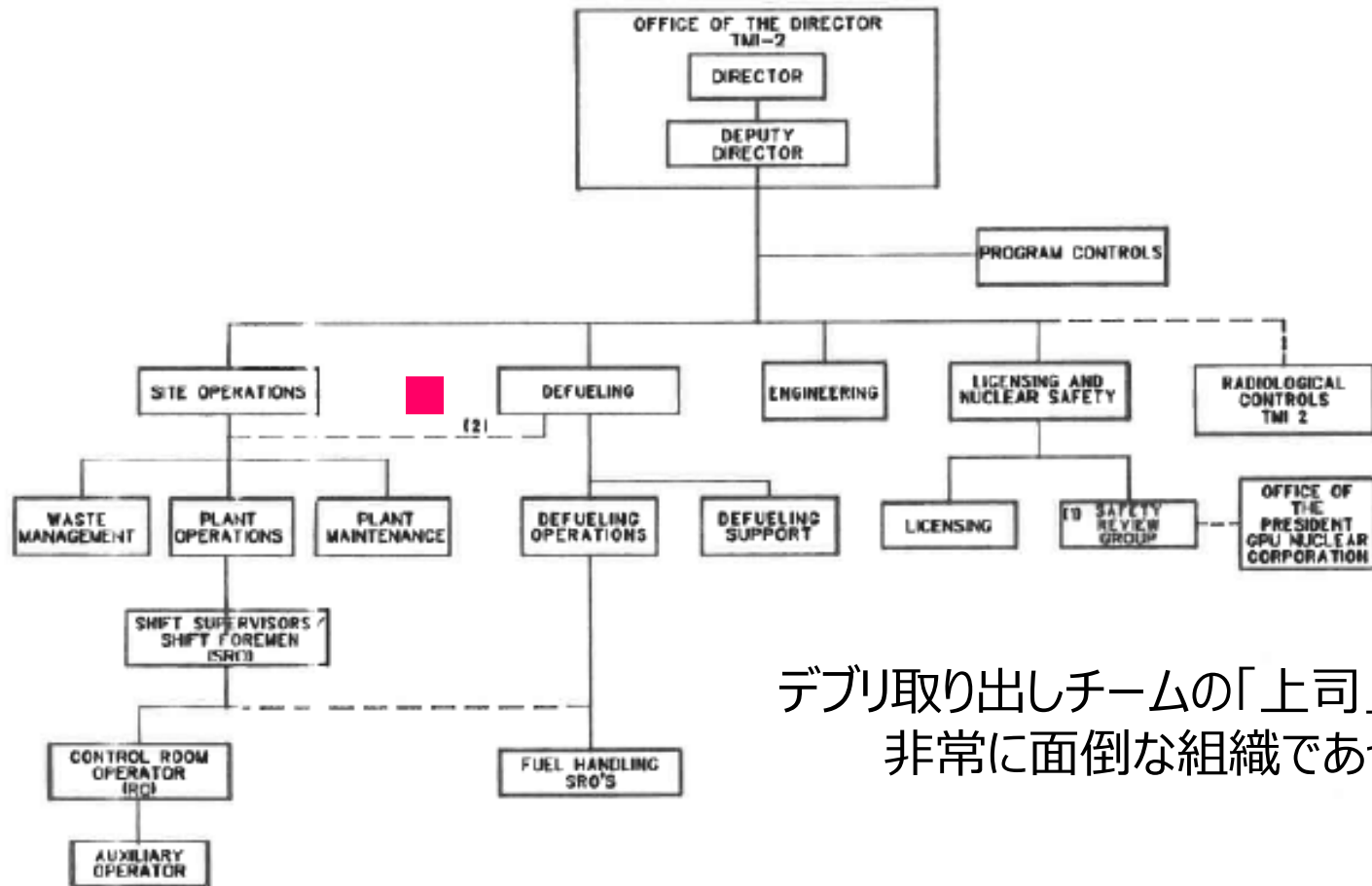


55トンのプレナムを取り出した後、  
上部グリッドプレートにこのような損傷を確認



# 1985年10月のデブリ取り出し開始時の TMI-2チーム組織図

(赤枠：「デブリ取り出し」と「サイト運営」の関係を見よ)



デブリ取り出しチームの「上司」が多く、  
非常に面倒な組織であった

# デブリ取り出しを実施するためのチームを開発

- 米国NRCから燃料取扱上級原子炉運転者ライセンス (FHSRO) を取得し、デブリ取り出しの監督を可能にするため、6人の作業員を訓練した。FHSROは責任をもって勤務するデブリ取り出しチームの監督者であった。
- ライセンスを取得したGPU社・Met Ed社オペレーターを活用。
- シフトは、他の部署の干渉を受けずに、主体的にデブリ取り出し作業を実行する権限を与えられた。
- タービン建屋にある原子炉建屋の回転プラットフォームの正確なレプリカを使用して、オペレータがデブリ取り出しを実行するための訓練を行った。

# TMI-2タービン建屋内にあったモックアップ

- 原子炉建屋の回転作業プラットフォームと同一：  
モックアップの監視委員会





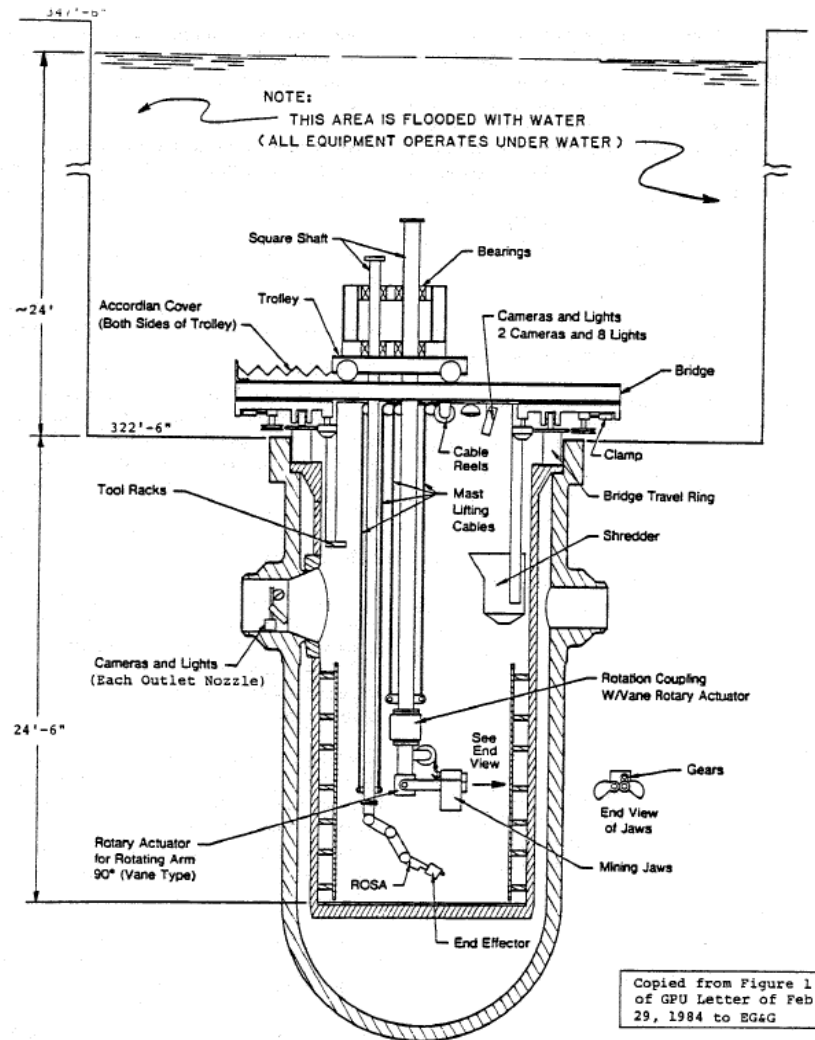
# デブリ取り出しのオペレーション

- 初期組織計画ではチームの規模は～11人であった。
- デブリ取り出しチームの従業員は、労働組合に加入しているTMI1、TMI2のGPU社従業員であった。従業員は強力な労働組合に守られていた。組合も労働者も、キャンペーン期間中、デブリ取り出しを精力的に支援した。

# GPU社は複数のデブリ取り出し工法の選択肢を評価

- 先行的に検討された概念：
  - 長い柄のツール - 浅い水位
  - **長い柄のツール - 深い水位 (選択されたオプション)**
  - シュレッダー：排出物は燃料取扱棟 (FHB) にポンプで送る
  - シュレッダー：排出物は原子炉建屋 (RB) 内のキャニスターに重力で排出
  - WCSD (Westinghouse Consolidated System Design ウェスチングハウス統合システム設計)
    - ROSA (却下)
    - MANFRED (水中アクセス・メンテナンス・除染の課題により却下)
- **長い柄のツールを利用した回転プラットフォーム付きバルク燃料除去システムを選択**
- 作業員の訓練と習熟を可能にするツールを備えた回転プラットフォームの同一のモックアップを製作。

ロボットデブリ取り出し  
 コンセプト：WCSD  
 (Westinghouse Consolidated  
 System Design) / ROSA  
 (水中アクセス・メンテ  
 ナンス・除染の課題に  
 より却下)



PRESENT REFERENCE  
 TMI-2 AUTOMATIC/REMOTE DEFUELING CONCEPT  
 (REACTOR CAVITY FLOODED)

Figure 8-8. Automatic/Remote Defueling Concept

# 遠隔デブリ取り出しコンセプト： MANFRED – (水中アクセス・メンテナンス・除染の課題により却下)

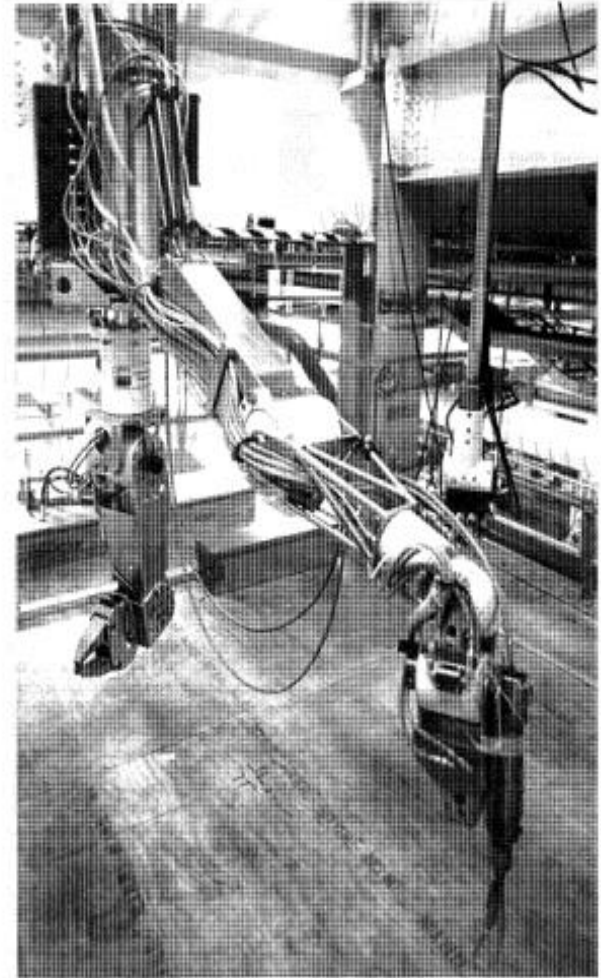
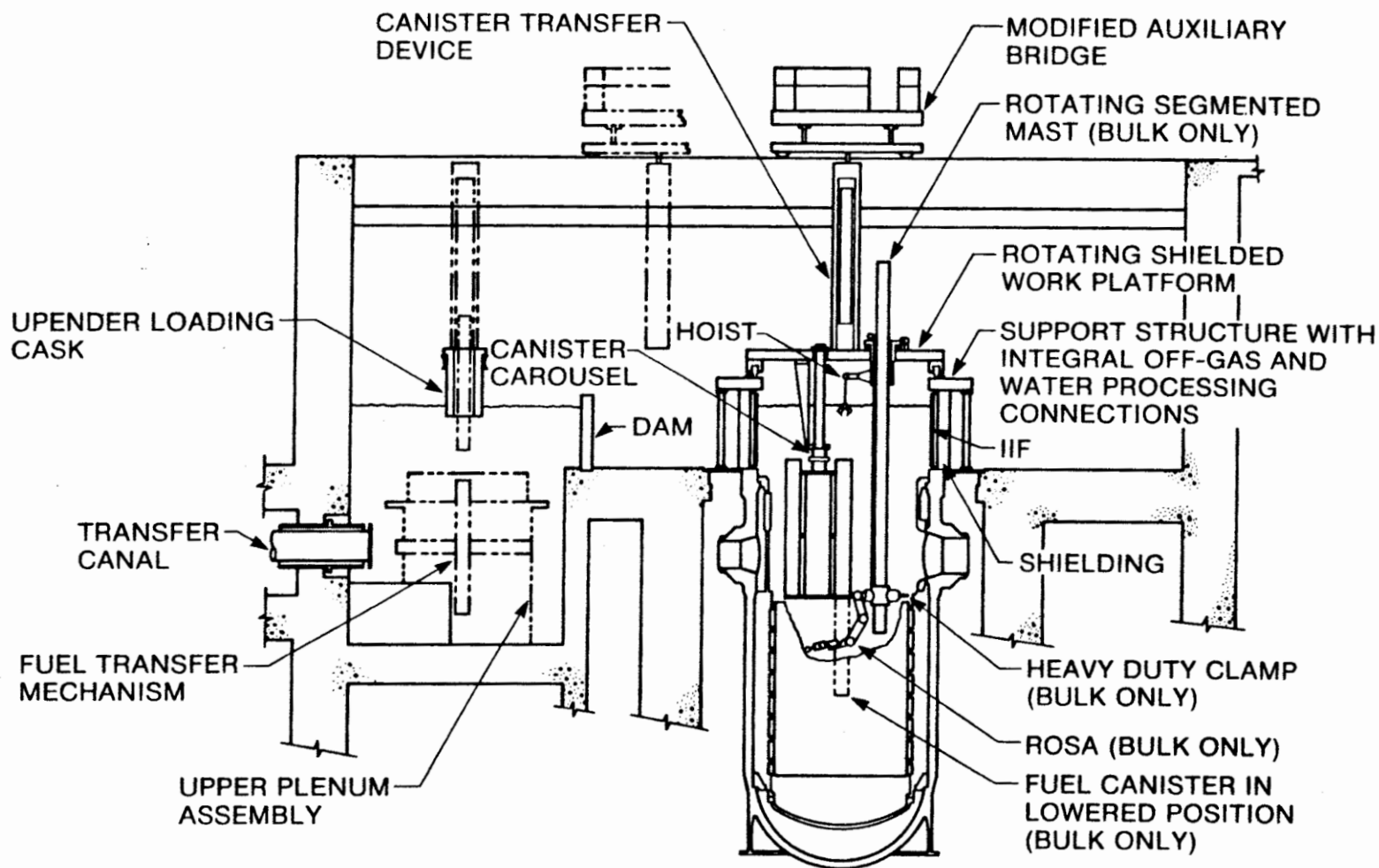


Photo 8-10. MANFRED

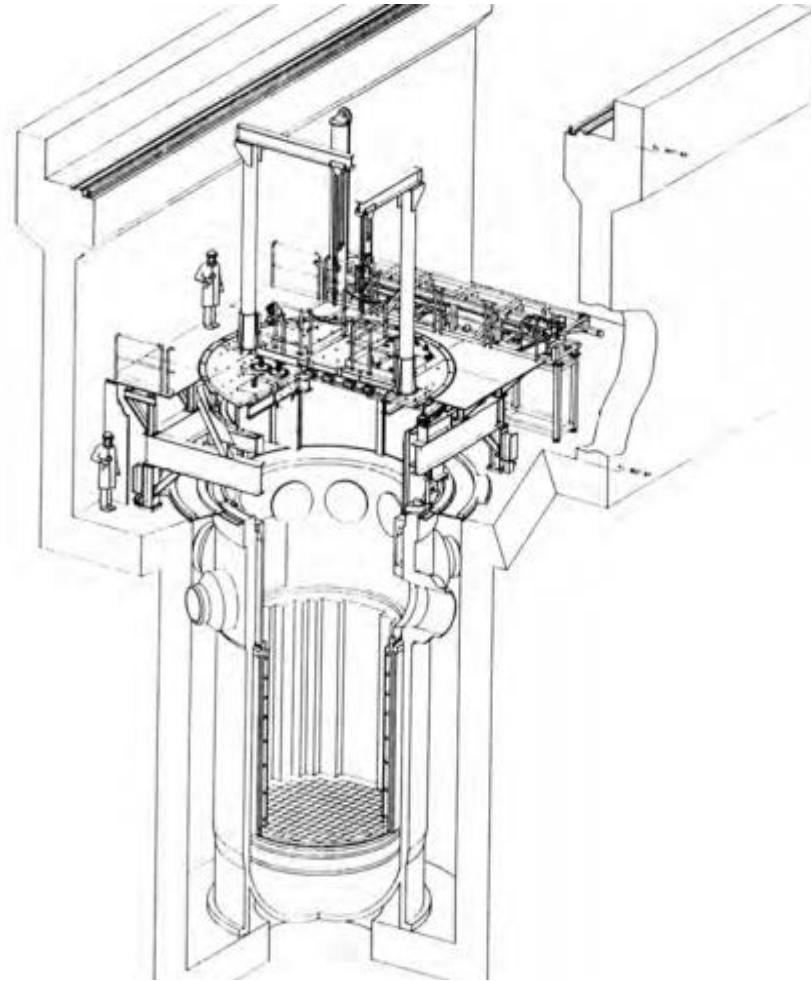
# バルクデブリ取り出しシステムの初期コンセプト：

比較的シンプル、工具の入手が可能、修理が容易  
(ROSAを含まず)



# デブリ取り出し (回転) 作業プラットフォーム

(GEND-INF-065)



# 建設中の作業プラットフォーム (TMI-2原子炉容器上部に設置)



# 回転プラットフォームの「オープンスロット」上で作業する デブリ取り出しチーム





# TMI-2 原子炉容器上の回転プラットフォーム上にいる デブリ取り出しチーム



# プラットフォームに立つデブリ取り出しチーム



# 柄の長い工具の一覧

(NP-6931)

Table 8-3. Summary of Long-Handled Tools

## Light-Duty

Vise grips

Bolt cutters

Hook tools

Socket wrench

Debris bucket handling tool

Partial fuel assembly tool

Measuring probe

Light-duty tong tool

End fitting loading tool

Banding tool

## Heavy-Duty

End effector handling tool

Three-point gripper

Four-point gripper

Grapple

Single-rod shears

Parting wedge

Heavy-duty tong tool

Spade bucket tool

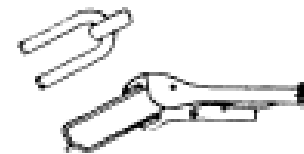
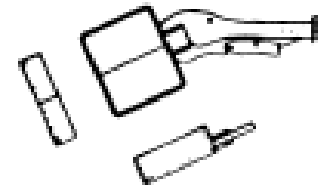
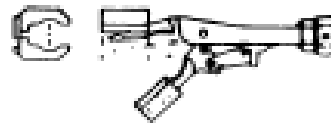
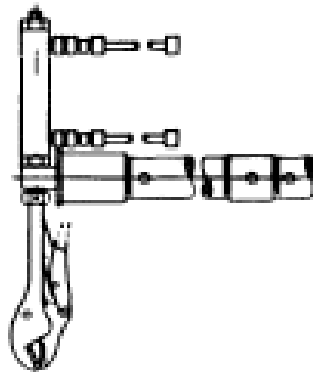
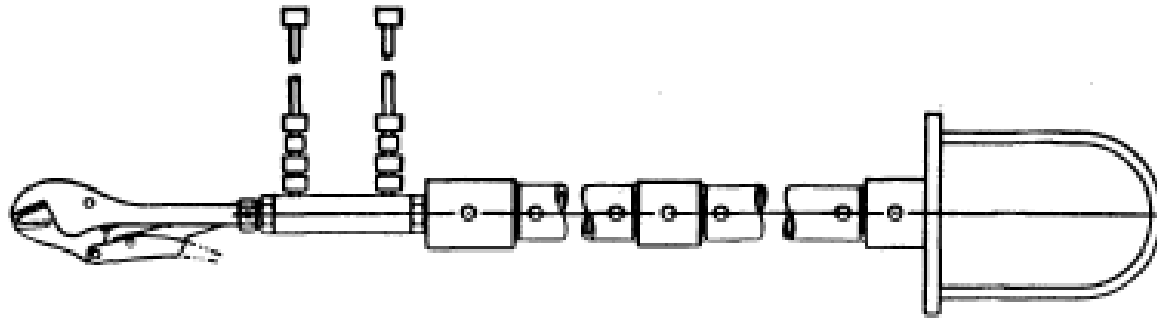
Clamshell tool

Heavy-duty shears

## ツールの出力

- デブリ取り出しツールは、油圧ツールの接続と取り外しに世界中で使用されている一般的な「クイックディスクコネクタ」、シンプルな油圧フィッティングを使用して設計された。
- デブリ取り出しツールを交換する際、数滴の作動油が原子炉容器水に漏れた。原子炉容器水は事故処理水扱いとなった。

# 携帯型デブリ取り出しツール



# 鑿 (chisel) と強力鋏 (Heavy Duty Shears) (NP-6931)

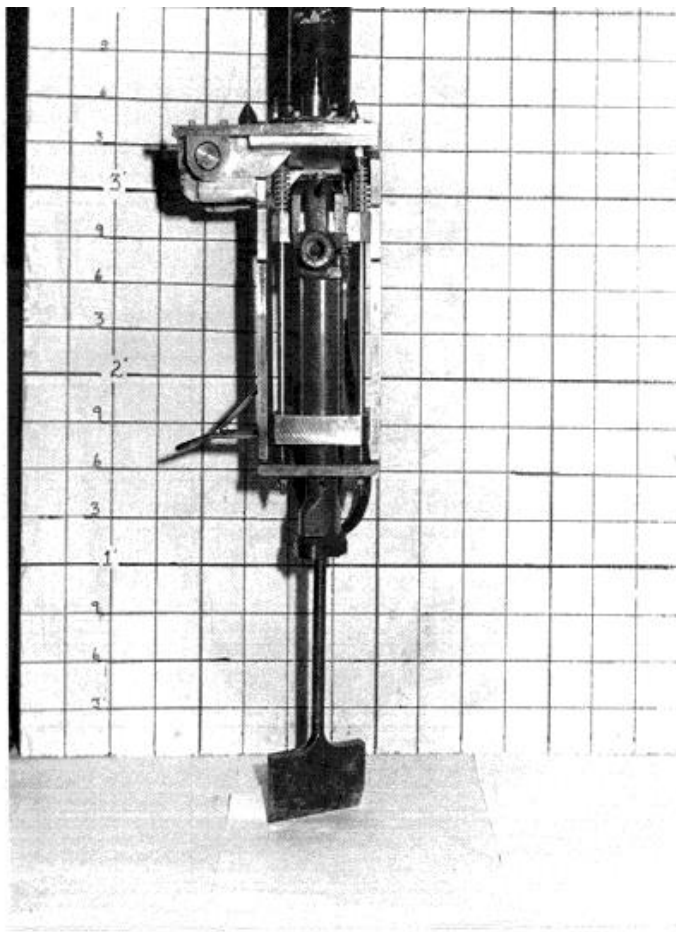


Photo 8-3. Chisel Tool

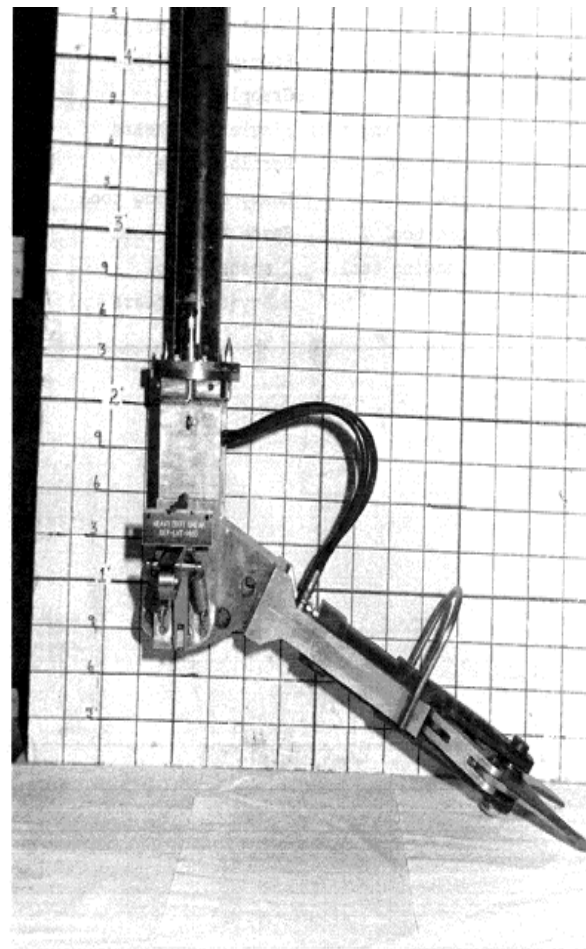


Photo 8-2. Heavy Duty Shears

# スプリッターとせん断ツール、 スペード バケット ツール (NP-6931)

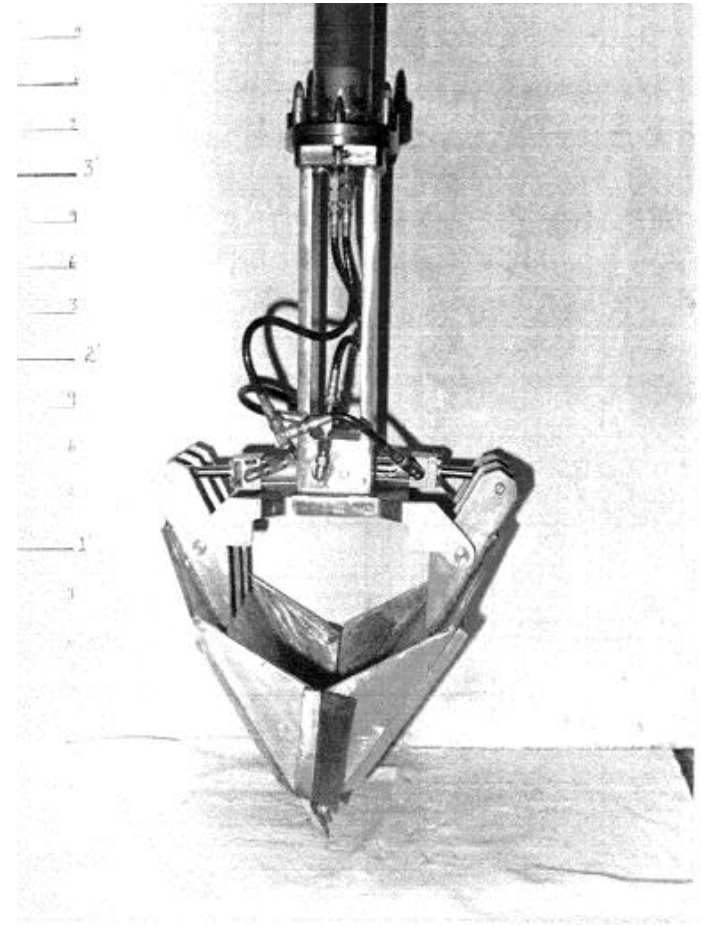
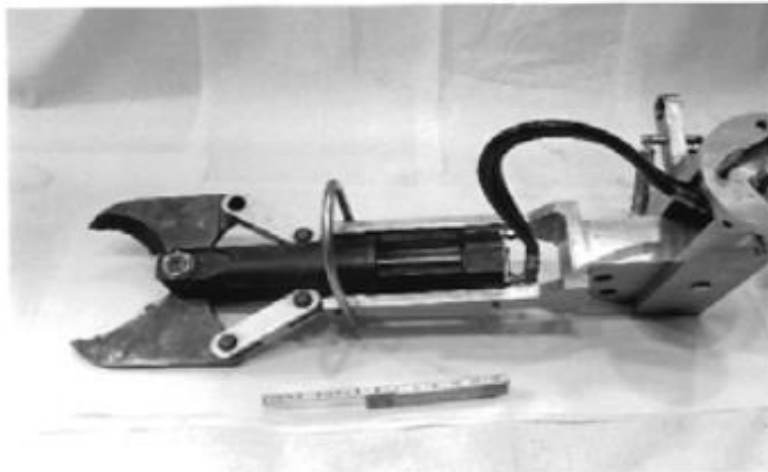
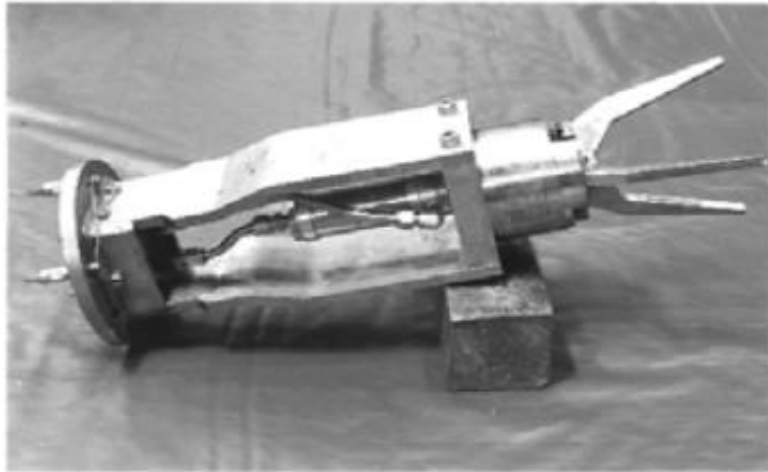
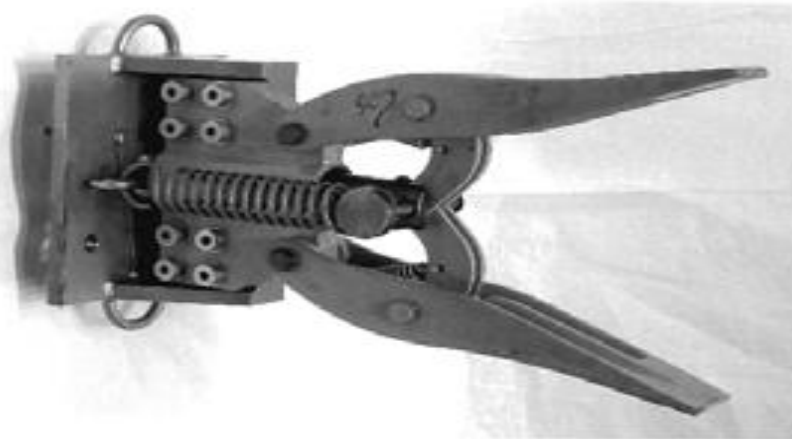


Photo 8-4. Spade Bucket Tool

# パーティングとグラブツール、小型クラムバケツツール





# 可視性と照明：1986年初頭 - 原子炉容器内の水中で微生物が増殖し視界が失われる

- ツールは、自動車のパワーステアリング液と同様の一般的な油圧液（炭化水素液）を使う共通の動力源で稼働されていた。漏れた微量の油圧液が目に見えない生物学的汚染の「餌」（栄養）となった。
- 原子炉容器水（事故水）中の目に見えない大腸菌群が、微量の油圧液を餌とし増殖した。
- 1985年10月（デブリ取り出し開始）から1985年12月中旬までは、デブリ取り出しチームの視界は良好であった。
- 想定外の生物増殖により視界が失われた。
- 照明しても燃料ターゲットを見ることはできなかった。
- 原子炉容器の水が不透明になった。

# 原子炉容器の水中で微生物が増殖した画像 (デブリの塊は「指先」くらいの大きさ)



# 視界が失われた結果、デブリを直接目視できない状況で 作業を継続 (デブリ取り出し作業は「盲目的 (ブラインド) 」)

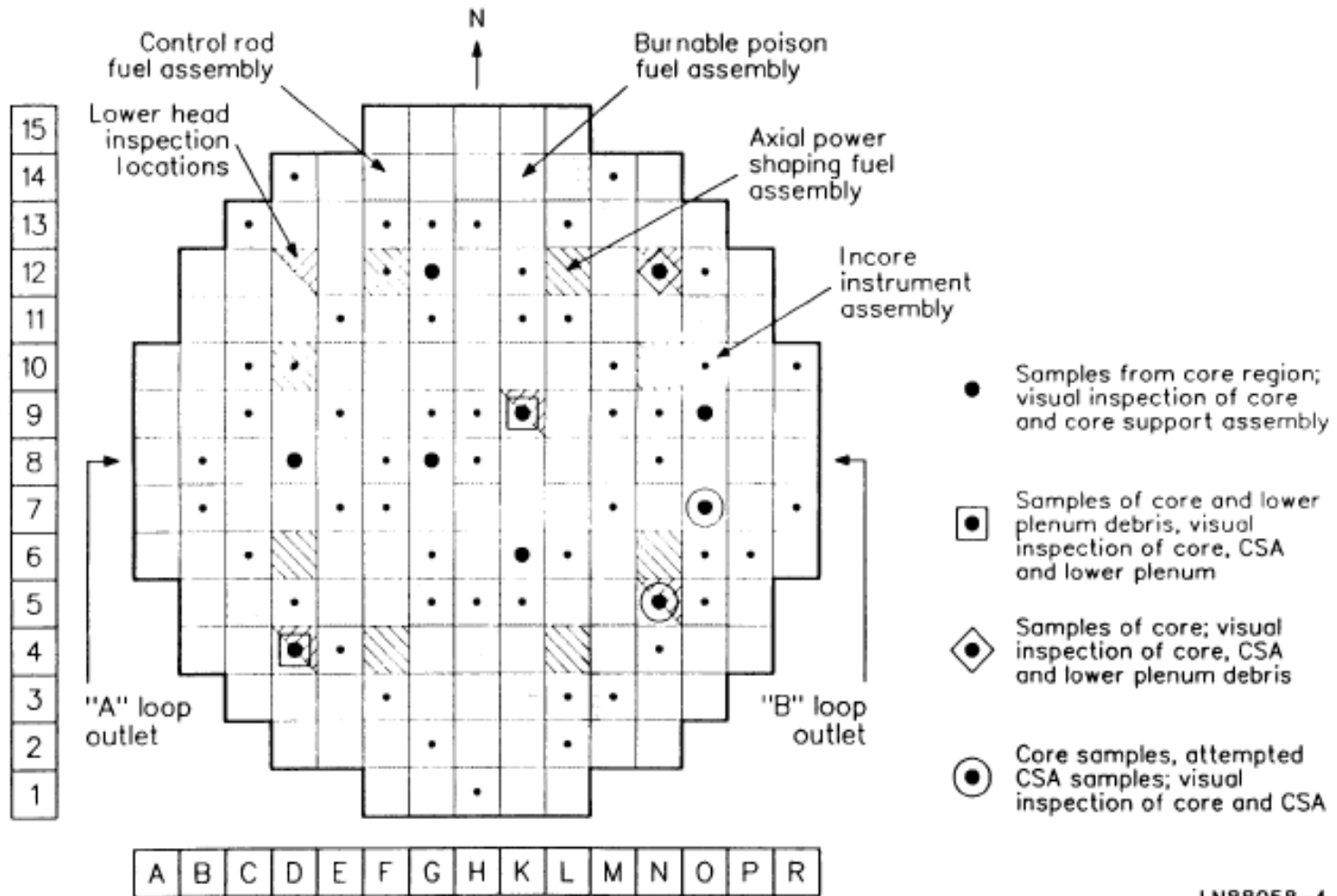
- 視界が悪くなくても、デブリ取り出しチームは炉内残存物を掴み、引き上げ続けた。明確な視界がなかったため、「盲目的 (ブラインド) 」にデブリ取り出しを行っていた。
- 1986年半ばにデブリ取り出しが実施されている最中に、GPU社と DOEは「コア ボア – データ取得」キャンペーン (コア層別サンプリング プログラム) を開始することで同意。
- 目的は、DOE が提供する回転作業プラットフォームに設置されているコアボーリングマシンを使用して、炉心の階層サンプルを入手すること。

# デブリ取り出しチームは、コアボーリングマシンをデータ収集のために使用していたが、デブリ取り出しの効果的なツールでもあることを発見

- コアボア（階層別サンプリング）プログラムは 10 ヶ所のコア位置を対象として（スライド61を参照）、炉心内のドーナツ状のクラストを発見。
- コアボーリングマシンは、ボーリング中に燃料デブリバキュームシステムにより除去した小さな燃料デブリの破片（ボーリング中に切削ビットの歯から）を生成した。燃料デブリバキュームシステムは、小さな燃料粒子も除去。デブリ取り出しチームはコアボーリングマシンと燃料デブリバキュームシステムの組み合わせで効果的にデブリ取り出しを行えることを発見。
- コアボーリングマシンはその後、下部炉心に約400個の穴（「**スイスチーズ状**」）を作る重要なツールとして使用した。その後、プラズマアークトーチと共に使用されて、下部炉心領域にアクセスするための重要なツールとして脚光を浴びることとなる。

# コアボアのサンプル位置 (10)

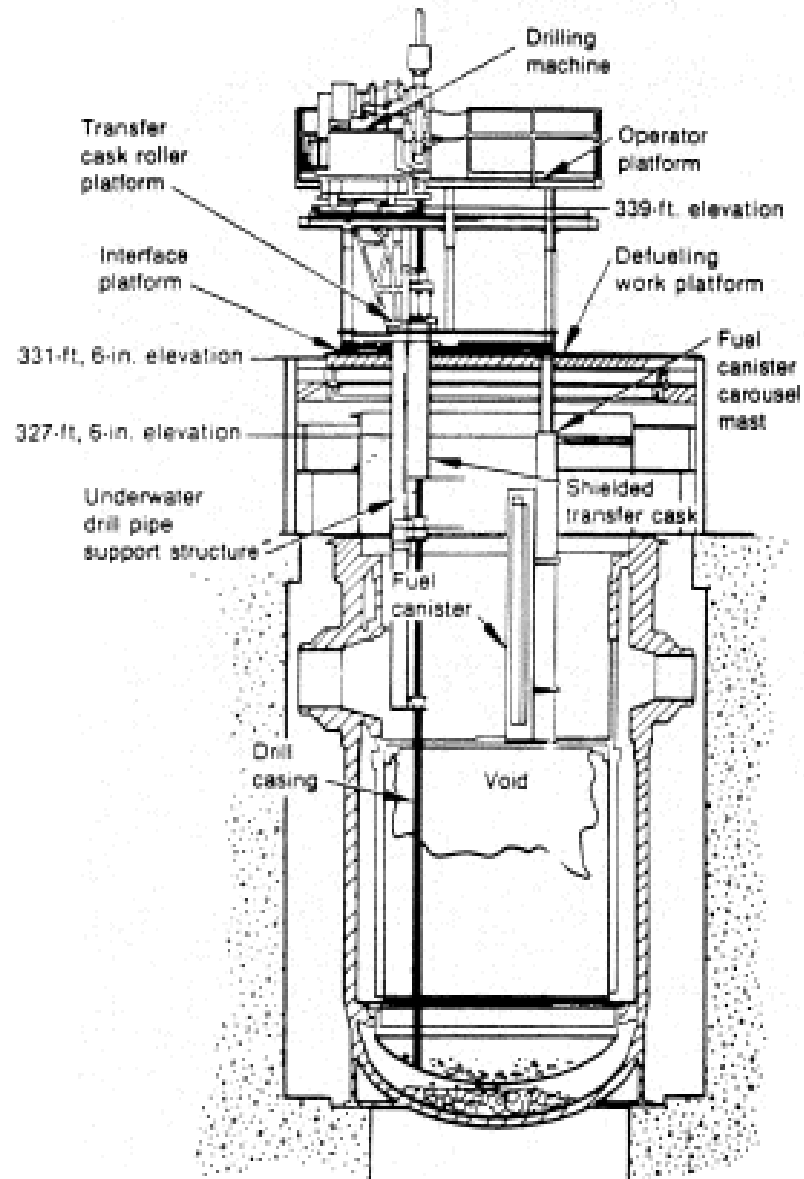
GEND-INF-092-v1 TMI 2 Core Bore Examinations Volume 1 -22ページ (PDF)



LN88058-4

Figure 2. Core bore sampling locations.

# コアボーリングマシン Core Boring Machine



# コアボア ドリルビット



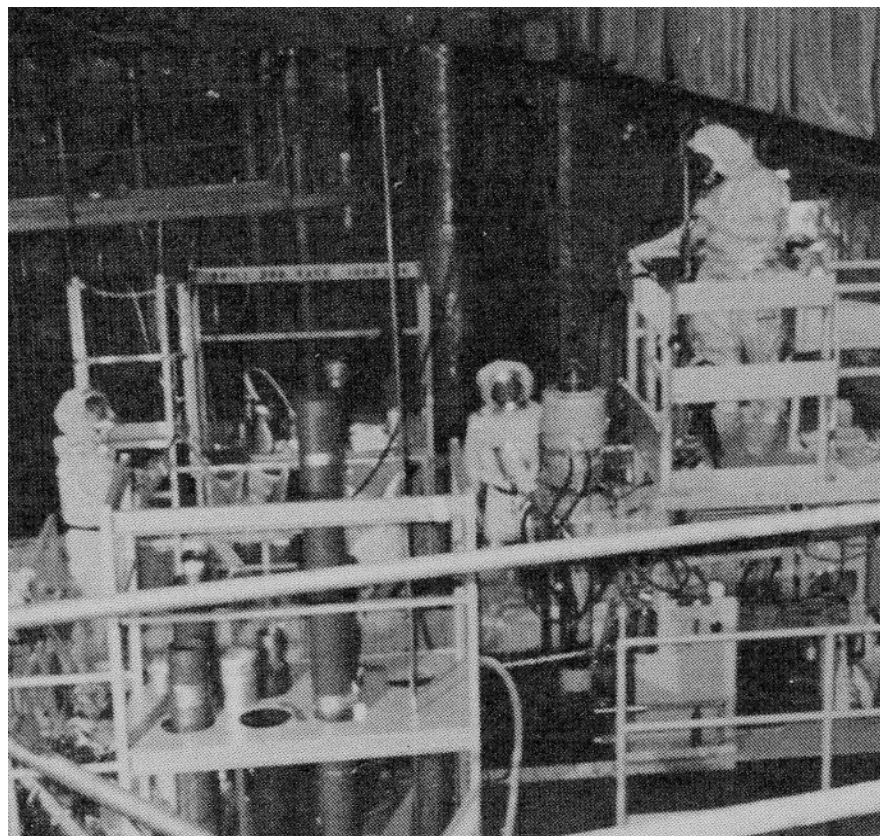
コアボーリングマシンはデータ収集活動の一環として回転作業プラットフォームに設置された。その有用性は重要なデブリ取り出しツールへと拡大した。

(コアボーリングマシンは、回転作業プラットフォームのモックアップには設置されておらず、TMI-2に出荷する前にINELでテストされた。)

**コアボーリングマシン**：1985年当初に炉心層状サンプルを抽出するために使用されたコアボーリングマシンは、デブリ取り出し中に炉心領域の凝固した一枚岩的なモノリス（炉心材料と溶融）を粉砕するために使用。

下部炉心アセンブリの一部に穴をあけ、切断したりするためにも使用。NRCはこれを承認。(NUREG/KM-0001, Supplement 1)。

安全性評価はコアボーリングマシン使用の各段階に伴って行われた。

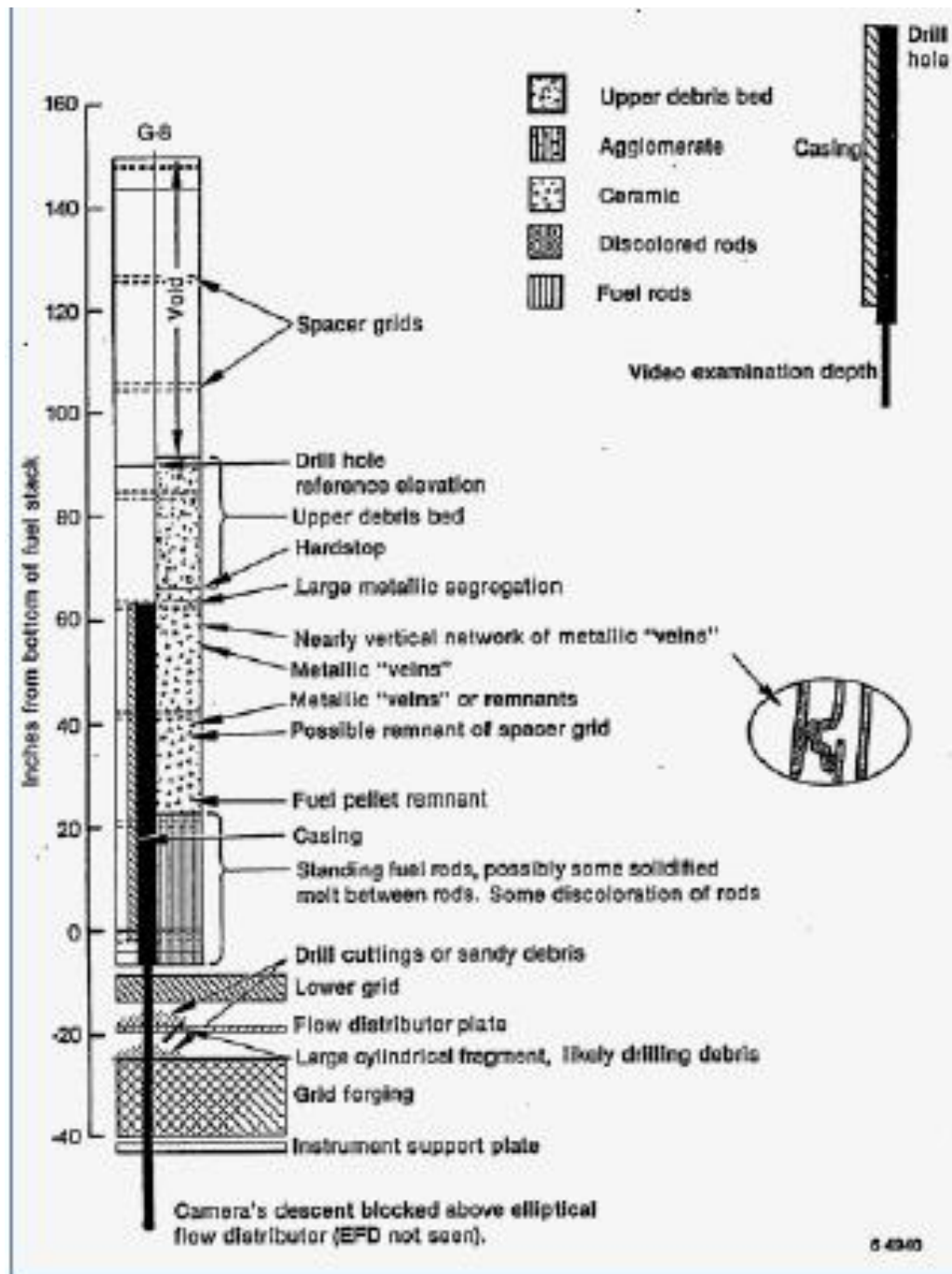




# コアボアの高さ詳細

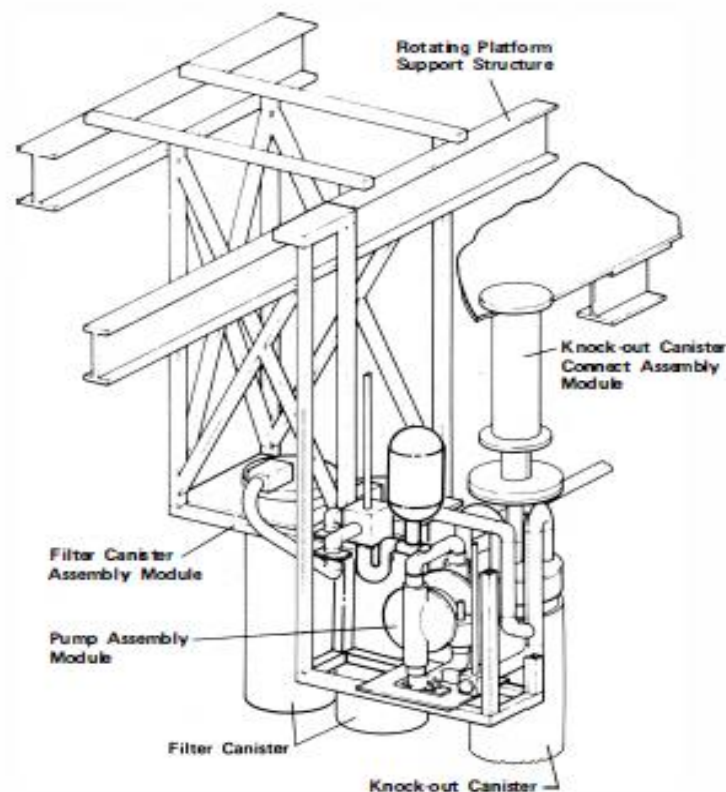
(KM Supplement 2  
51頁)

高さは燃料棒内の燃料ペレット  
スタックの底面より上



# 燃料デブリバキュームシステム

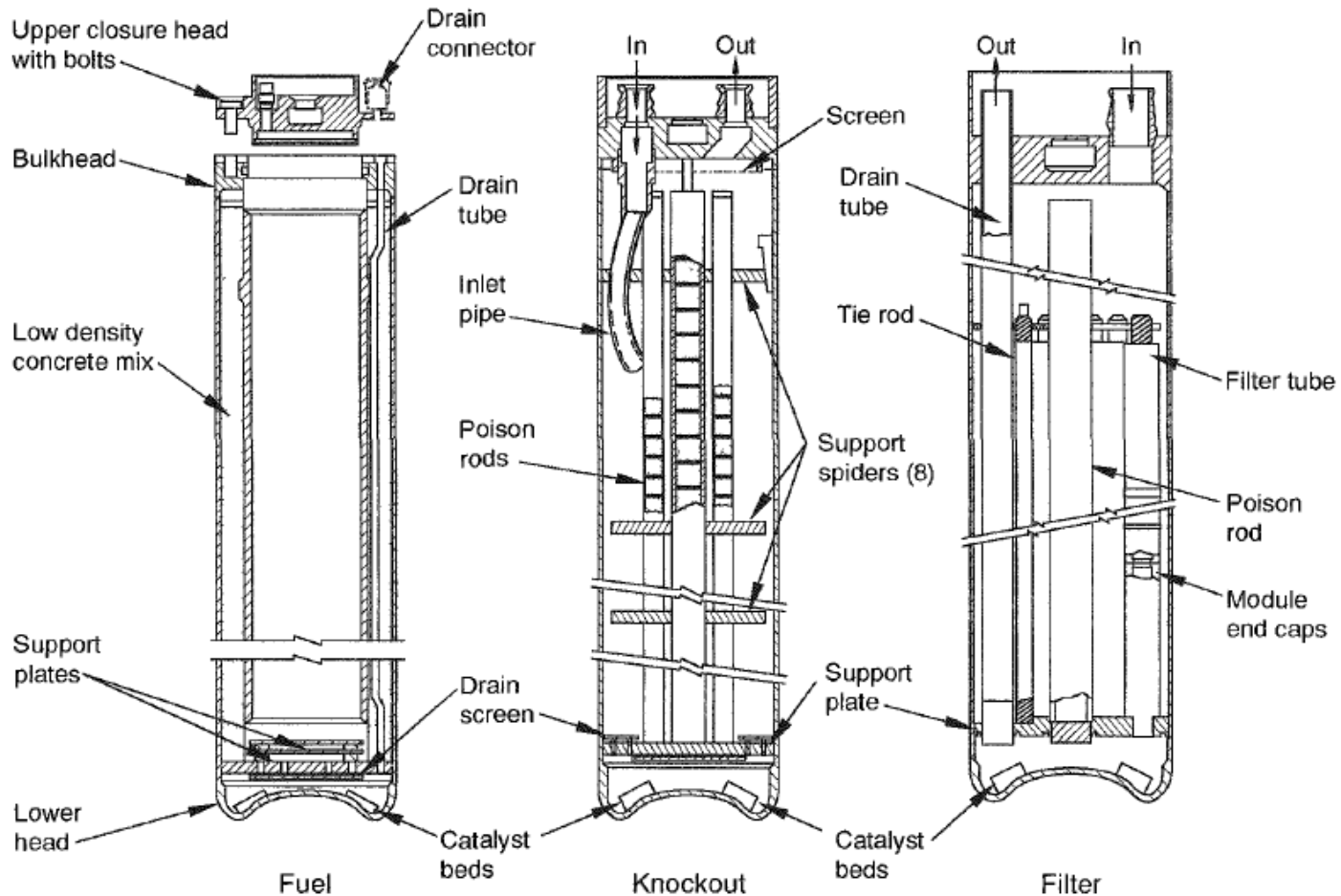
- 小さなデブリを除去するよう設計（燃料ペレットと同じくらいの大きさ）。
- デブリ取り出しプラットフォームの下面に固定し、プラットフォーム上の装置から制御。
- バキュームシステムのピックアップノズルはフレキシブルホースでキャニスターに接続され、柄の長いツールを使い、操作された。デブリが収集され、「ノックアウトキャニスター」に最初は通された。残りのデブリで0.5ミクロン以上の物はフィルターキャニスターにて収納された。
- バキュームデブリ取り出しは1985年12月31日に始まり、約300ポンド（136キロ）のデブリがノックアウトキャニスターに収容された。
- テストの結果によると、バキュームシステムは、改造を行った後でも、デブリ除去に効果的ではなかった。主に過度の詰まりが原因となった。その後、色々なエアリフトシステムが設計された。



759576-1A

Figure 15. Vacuum system.

TMI-2デブリ取り出しに3つの異なるキャニスター設計が使用（合計342個）  
 268個の燃料キャニスター（大きなデブリ用）  
 12個のノックアウトキャニスター（～140ミクロンからペレットまでの粒子）  
 62個のフィルターキャニスター（～140ミクロン未満のコアデブリ）



# 炉心下部バウンダリー下部からののデブリ取り出し

- デブリ取り出しチームは、下部構造物を垂直方向に正確に切断するためにコアボーリングマシンを使用した。
- 水平方向に正確に切断するためには ACES (Plasma Arc Automated Cutting Equipment) プラズマアーク自動切断装置) を使用。

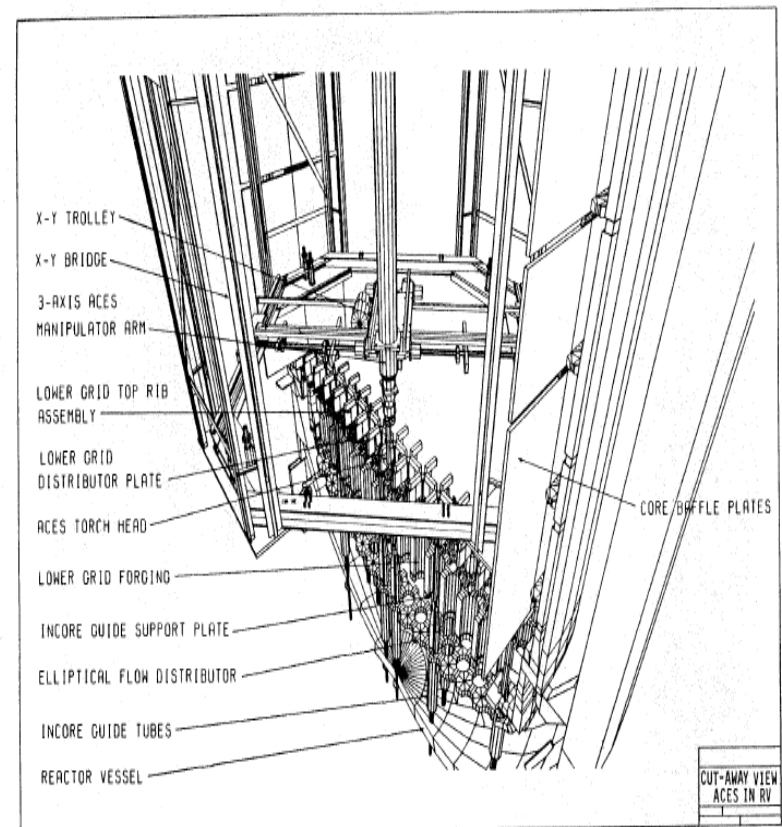
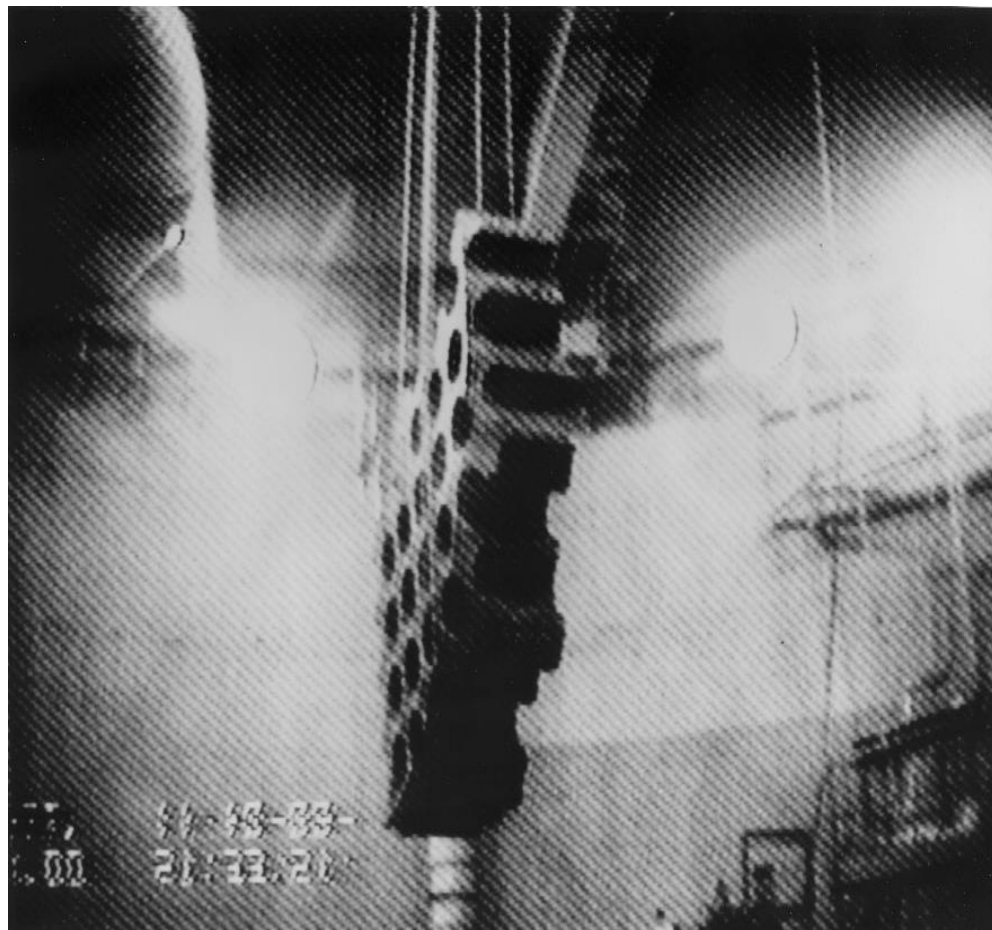


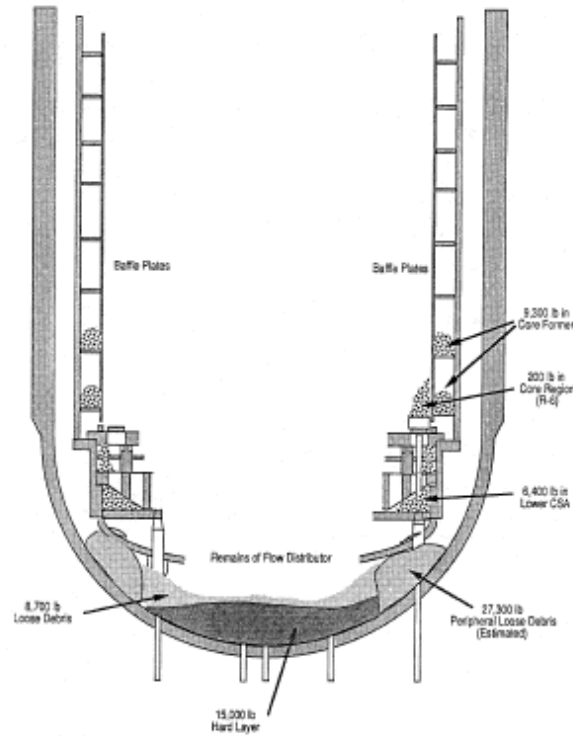
Figure 8-18. Computer View of ACES in the Reactor Vessel

プラズマアークトーチによって切断された下部グリッド鍛造部の一部。原子炉容器からこの下部グリッドが取り外されている様子 (KM Supplement 2).

下部炉心アセンブリ構造の下層、および原子炉容器の底部にある燃料にアクセスできるよう、下部炉心構造の一部が取り外された。



# 原子炉容器底部の燃料



**TMI-2 MATERIAL AT THE BOTTOM OF THE REACTOR VESSEL**

Figure 8-19. Lower Head Cross-section with LCSA Cut Out

# 原子炉容器下部ヘッドからの炉心デブリ除去

- デブリ取り出しの準備には、インコア・ガイド・チューブと楕円形分流ヘッドの一部を除去する必要があった。
- 下部ヘッドのデブリを取り出すために使用された装置には、以下が含まれていた：
  - エアリフト
  - 柄の長い道具
  - 容器内バキューム・システム
- キャビテーション（高圧 - 脈動）ウォーター ジェットとチゼル ポイント付きインパクトハンマーを使用して、下部ヘッドに付着した再凝固デブリを粉砕。
- 下部ヘッドからの約30トンの炉心デブリ取り出しは、1989年11月に完了。

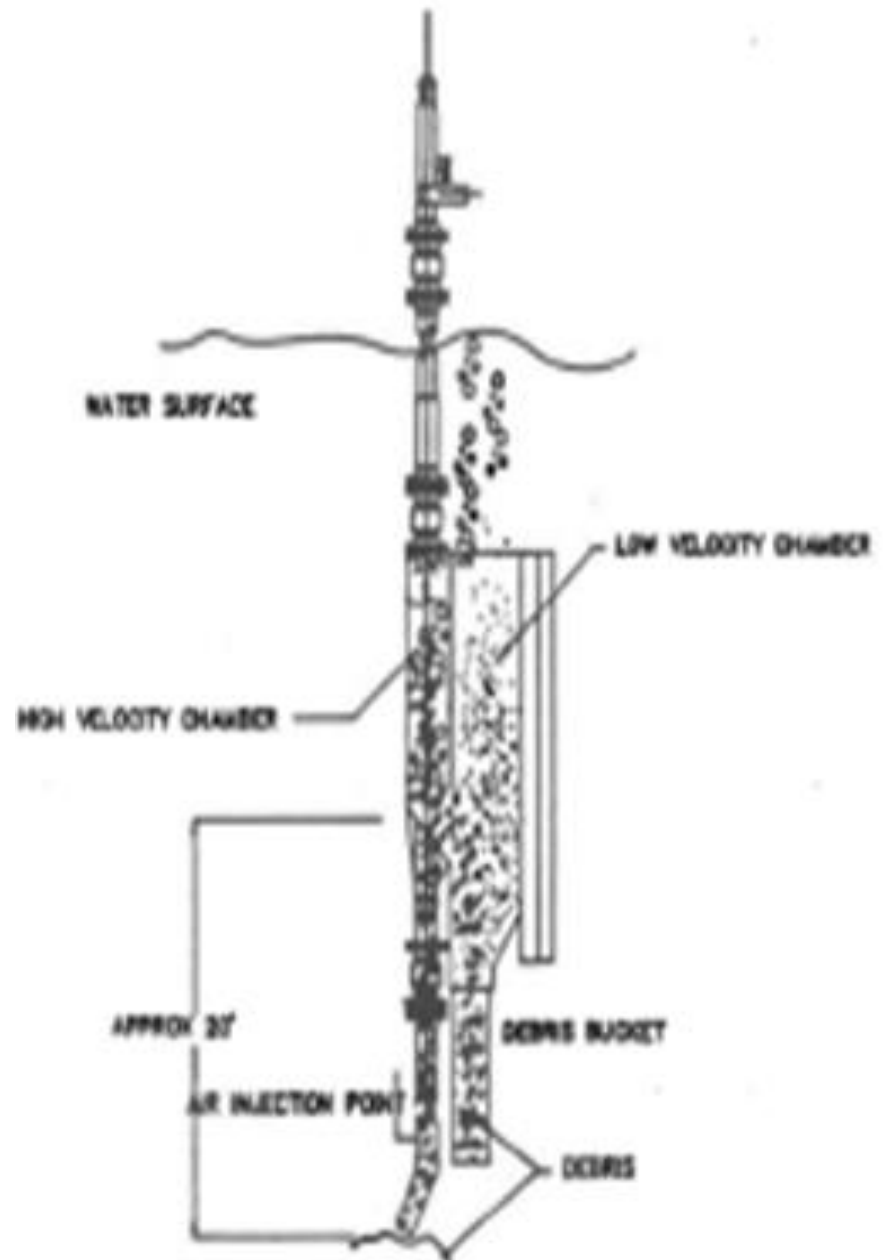
# 強力なエアリフトバキュームシステムを導入し活用

- このシステムは、炉心瓦礫床と原子炉容器の下部ヘッド領域から最大5cmの瓦礫を引き上げた。
- このシステムには、エアコンプレッサー、エアリフトパイプ、燃料キャニスター（72頁）が含まれていた。デブリが含まれる水をパイプに吸い込むため、圧縮空気がパイプの底部又は吸引端に噴射された。
- エアリフト・パイプの上部にある燃料キャニスター内部にデブリが沈殿した。エアリフトは、燃料アセンブリの破片やエンドフィッティングなど、変形した破片をすでに取り込んでいた燃料キャニスターの詰め込み効率を改善させた。



# エアリフト バキューム システム

(KM Supplement 2, 65ページ)



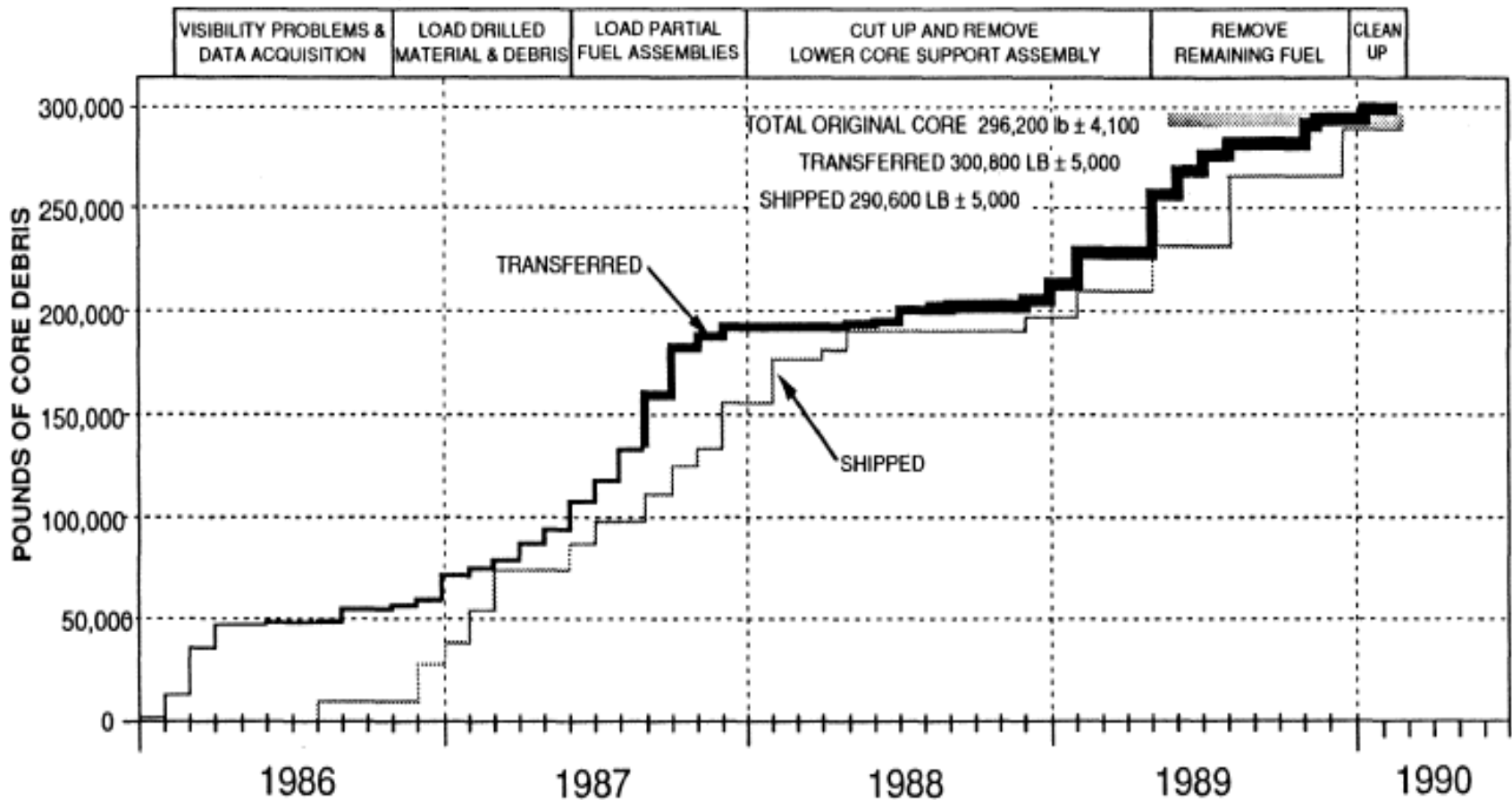
# TMI-2デブリ取り出し時のトラブル・事故 (KM - Supplement 2)

- デブリ取り出し作業中に報告された事故は非常に少なく、負傷者 2 名、その他の軽い事故がいくつか報告：
- **キャニスター落下。**1985年12月14日、作業中にデブリ取り出しキャニスターとスリーブが原子炉容器内に落下。
- **ツールの外れ。**1986年5月22日、回転プラットフォームの 1 番ジブクレーンのトロリーが外れ、原子炉容器内に落下。
- **ツールの外れ。**1986年8月19日、プラットフォームに立っていた作業員が怪我を負った。原子炉容器内の柄の長いツールが仮保管場所から外れ、作業員の右手の上に落ち、工具と工具ラックの間に挟まれた。
- **作業員が原子炉容器に滑落。**1988年5月22日、プラットフォームに立っていた作業員が滑って、アクセスハッチから原子炉容器内に転落した。作業員はプラズマアーク切断アセンブリの再設置に備えて、原子炉容器内に機器を設置していた。作業員は作業を行うために一時的にスリングを外していた。
- **燃料デブリと接触した作業員(1)。**デブリ取り出しツールを引き上げた際、燃料棒の破片が知らずに引き上げられ、プラットフォームに落下した。この破片は接触すると 1 時間あたり 10 レントゲン（単位）を計測した。ピーターズツール（バイスグリップ）で持ち上げられ、容器内に落下させた。
- **燃料デブリと接触した作業員(2)。**1989年に起きた別の事故では、ある作業員がTMI-2格納容器除染施設で燃料デブリを扱っていた際、知らずに手に約55レムの過剰被曝（規制値以上）を受けた。同僚は、手の皮膚に約13レムの予期せぬ被ばくを受けた。

# TMI-2 デブリ取り出し進捗

(Defueling Completion Report, GPU 1990)

注記： 炉心デブリの最初のキャニスターは、1986年1月に原子炉建屋から使用済燃料プール「A」に移送。これらのキャニスターはその後、分析と貯蔵のためにアイダホ国立工学研究所に搬出された。



# 基本的な技術上の教訓：スキルマン

- このフォーラムに参加することで、一つでも教訓を示すことができたなら、努力が報われるところ！これが最も重要。テクノロジーに敬意を払うこと。原子力安全、放射線安全、産業安全という、我々のテクノロジーの主な特徴に十分な注意を払うべき。以下の項目に対して、完全かつ徹底的な技術評価が実施され、それらにチャレンジしていることを確認。臨界、発火、冷却喪失、遮蔽喪失、予期せぬ放射線の発生、水素と放射性ガスの発生、落下防止、落下物からの頭上保護、呼吸器の保護、訓練、水上作業時の浮力（溺死）保護
- TMI-2 の経験から得た重要な教訓は、規制機関(米国 NRC)とGPU社の関係。NRCはTMI-2に現地事務所を設立し、NRCの高度な資格を持つベテラン職員を配置。NRC検査官は、原子力規制を検査し施行する法的に求められる義務を果たした。丁寧かつ客観的、思慮深く、建設的に実施。TMI-2 がもはや運転不能かつ再稼働が不可能であることを認識。GPU社とNRCは少し距離を置いた関係を維持し、そのおかげで相互に協力し、法的・専門的責任を果たすことができた。
- データ取得は成功するために必要不可欠。安全にデブリ取り出しを行い、成功する計画を立てるには、小規模な検査も、クイックルックやコアボアなどのより大きな検査も、徹底的な定量調査を実施する必要あり。各データを取得することで、追加のデータ取得の機会が更に発生。TMI-2では、データを取得することで、「次のステップ」へのよりわかりやすい道筋が明確化。
- デブリ取り出しシステム - シンプルで基本的なプロセスを選ぶべし。修理が簡単で、スペアパーツの入手可能な実証済みのテクノロジーを利用したプロセスを選択すべし。十分な遮蔽と接近ルートを用意する他に、デブリ取り出しチーム（作業プラットフォーム上のライセンスを持った作業員）が対象燃料物質から隔離（すなわち、遠隔）されるよう留意。並行して、モックアップを製造し、それをを用いて徹底的な訓練を行うこと。モックアップでの訓練に基づき、手順書を策定、再確認。
- 水質 - 水は放射線源でもありうるし、遮蔽体でもありうる。これは特にNDFの「オプション2」に関係？水が放射線学的にも生物学的にもクリーンであることを確認。核燃料の周りで使用される場合、水は減速材であり、確実に臨界を防ぐために、B10 などの毒による処理も必要。水の透明性と生物学的リスクを脅かす大腸菌群などの生物種を除去するには、水を処理する必要あり。オペレーターの周囲で使用される全ての 水に、消毒処理を行うことが推奨。乱流（微粒子の放出を引き起こすエネルギー的な水の動き）や不透明度を引き起こす原因に対しても、処理が必要。
- 可視性 - TMI-2デブリ取り出し作業中、照明と可視性の両方が常に課題。直接目視観測の必要があるデブリ取り出しオプションでは、目標物体が明確に見えることと、十分な電力と照明の両方が必要。影による認識能力の低下も考慮する必要あり。適切な照明を確保し、前進が不可欠な場合は予備を提供。

# チーム組織・リーダーシップの教訓：スキルマン

- 1Fのデブリ取り出しは大きな挑戦。この並外れた課題には膨大なリソースが投入される。リーダーに選ばれ、デブリ取り出しに全面的に関与する者には、会社が用意できる最大限の敬意を払うべき。デブリ取り出しへの関与はキャリアを向上させる任務であるべきで、深く関与する者はその貢献に対して報われるべき。
- 手順書 - 手順書の作成は非常に面倒で手間と時間がかかる骨の折れる作業。しかし、ルーティン作業の再現性を確保し、非定型作業の慎重さを確保するためには必要。デブリ取り出しの手順書準備すること（書くこと、書き直すこと）は、それを使用するスタッフ自らが作成し所有することで、それらの手順へのオーナーシップが強化。
- デブリ取り出しキャンペーンを開始する前に、上級管理職は、全体的な 1F デブリ取り出し戦略と基本的な方針を、現場で作業する要員に明確に、そして真剣に伝える必要あり。上級管理職と現場で作業する担当者の連携が取れていれば、優れた結果が得られる可能性高い。
- 上級管理職による決定は、上級リーダーが現場の労働カルチャーにしっかり参加している場合に、最も尊重され、支持される。上級リーダーとの距離が遠すぎる場合、現場は上級リーダーを支持するのに時間がかかる。離れたオフィスでの決定は、孤立と結果からの逃避の可能性があり、現場の状況を完全に理解することができず、組織の結束と成功を妨げる可能性。
- 全体的なデブリ取り出し戦略が合意されれば、上級管理職は、責任あるすべてのレベルのリーダーからしっかりした合意を獲得するために行動を起こすことを推奨。特に、書類を認定する人、戦略の成功（または失敗）に責任を負う人たち。
- コンサルタントを装ったマーケティングの人に注意を！（ある製品や行動を売り込むコンサルタントが、実際には役に立たない、未知の、あるいは証明されていない製品や疑わしい行動を売り込んでいるのではないことを確認せよ。）
- 上級管理職は、合意された全体的な目標と期待に関するフィードバック・セッションを定期的に、頻繁に、率直に、双方向で実施することを推奨。包括的な目標と期待は、デブリ取り出しプログラムの各主要段階における成功と成果の達成に焦点を当てるべき。日常の現場とデブリ取り出しの管理は現場部隊に任せるべき。もし上級管理職が、パフォーマンスの根拠を理解する時間を取らずに期待外れになった日々の設備利用や、デブリ取り出しの少なさに焦点を当てている場合、デブリ取り出しチームは上級管理職が現場の課題に触れていないと感じる。課題はデブリ取り出しチームに任せて、上級管理者は豊富にサポートするべし。
- 品質保証 - 上級管理職は、デブリ取り出し戦略作成の早い段階で、必要とされるツールや書類の品質レベルを確立を！これらの中には、原子力安全に関して非常にデリケートなもの、そうでないものあり。上級管理職によるこの早期の措置は、全てのデブリ取り出し活動の品質レベルについて管理方針を明確にすること。一部のデブリ取り出し装置や書類には、構造の詳細、臨界の防止、長寿命が不可欠なため、重要な原子力産業の品質保証（燃料キャニスター、フィルターキャニスター、ロックアウトキャニスター、燃料貯蔵容器）が必要な場合あり。ほとんどすべての工具は消耗品であり、多くの場合市販はされておらず。重要な原子力安全用途（臨界の影響を受けやすいもの）を除いて、すべての「原子力産業」の品質要件にこだわらず、他の場面で商用品質を強化することで対応する政策決定は、スケジュールとプログラムの成功に有益。この決定により、おそらく莫大なコストが削減され、組織内の対立が解消。

# 燃料取出し組織構築上の教訓：スキルマン

- デブリ取り出しには日々新たな課題が出現。デブリ取り出し組織は予期せぬ状況を予測し、必要に応じて素早く変更を加える準備を整えておくべし。政策と手順はこの現実を予測し、素早い調整を可能にする包括的なガイダンス手順を確保する必要あり。
- デブリ取り出し組織は、うまく機能しているプロセスを維持・保持し、わずかな変更でさらなる成功が得られる場合には素早く適用し、評価せよ。失敗したプロセスを即座に削除して新しいアイデアに置き換える準備を整えておくこと必要。要するに、成功したものを保持し、必要性があり合理的な場合には変更し、必要に応じて置き換える。どのような場合でも、良いものを維持せよ。
- 次のような特性を持つ人々が燃料取り扱いの仕事に適任。手動とロボット装置の操作が好きな人、工具の設計、機械的および水力工学上の力と機能を本能的に理解している人、照明と影を理解している人、「物事を直す」ことが得意な人。
- 次のような特徴を持つ人々がデブリ取り出し管理者の仕事に適任。技術的な資格を持つ人、原子力技術に深い敬意を持つ人、迅速かつ効果的に決定ができる人、人が好きでストレスがあっても協調的である人、複雑な作業プロセスに携わることを楽しむ人、ツールの設計と実際の機械的、水力工学的概念を理解している人、空間幾何学を理解する人、遮蔽とソースを理解している人。
- TMI-2 の経験を通じて最も有能なリーダーは、自分が責任を有する個々の技術分野を完全に理解し、より重要なのは、原子力技術に対して揺るぎない敬意を払う人。彼らは技術に伴う危険性を理解し、経験した放射線のおよび実際の状況から課せられる制約条件をよく認識したうえで、進捗かつ達成するよう適応させていく。また、彼ら有能なリーダーは、作業工程、従業員の個人的な課題、作業員の労働能力の観点から、人間の合理的な限界についても理解。彼らは有能で、親しみやすく、友好的でありながら、仕事の成果に対する目標を設定し、行動と規律の基準を強制するのに優れる。TMI-2の有能なリーダーは、時間的に敏感な作業や、放射線に敏感な作業には特別な注意を払う必要があることをよく理解。