

# スリーマイル島 原子力発電所事故： 復旧、クリーンアップ、 教訓および今後

2014年7月18日  
レイク・バレット

[Lake@Lbarrett.com](mailto:Lake@Lbarrett.com)

L. Barrett Consulting LLC

# スリーマイルアイランド(TMI)

- 軽水動力炉炉心溶融事故
  - 1979年: 35年前
- 福島第一原発との共通点/相違点
- TMI事故は大規模ながらも福島第一原発(1F)と比較すると過酷事故としては軽度
- クリーンアップの課題が相似
- TMIからの教訓の多くが活かせる
- TMIは安全にクリーンアップ、即ち福島第一原発も可能

# 米国/ペンシルベニア州



# ペンシルベニア州

## ハリスバーグ - ミドルタウン



サスケハナ川の  
スリーマイル島

# スリーマイルアイランド原子力発電所

## 1号機・2号機

### サスケハナ川



# スリーマイルアイランド原子力発電所

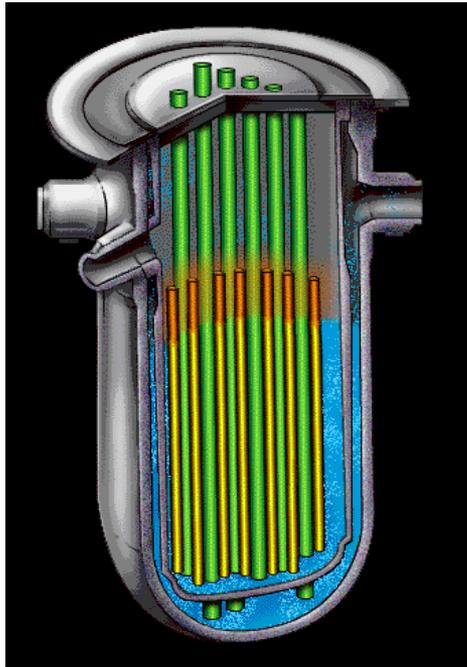
## 1号機・2号機

1979年3月28日

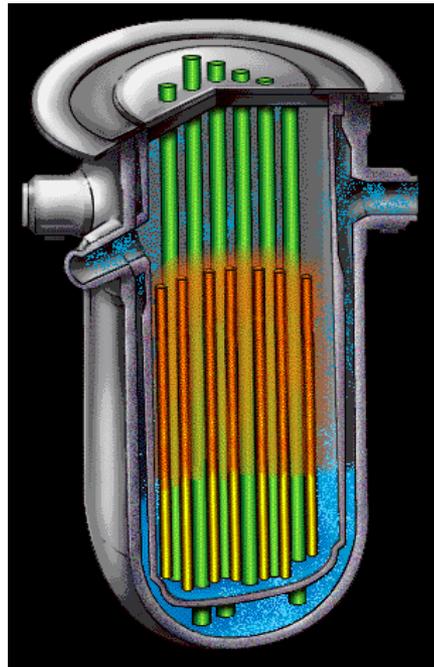




# スリーマイルアイランド原子力発電所 炉心損傷シーケンス

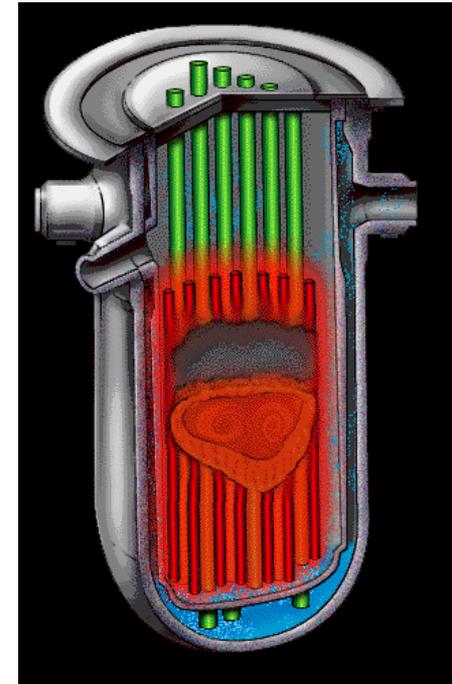


～120分  
炉心が露出 - 損傷開始  
800度で破損(～06:00)



～150分  
炉心の被覆が酸化  
～1800度  
(～06:30)

L. Barrett Consulting LLC



～226分  
炉心溶融 ～2700度  
(～07:30)

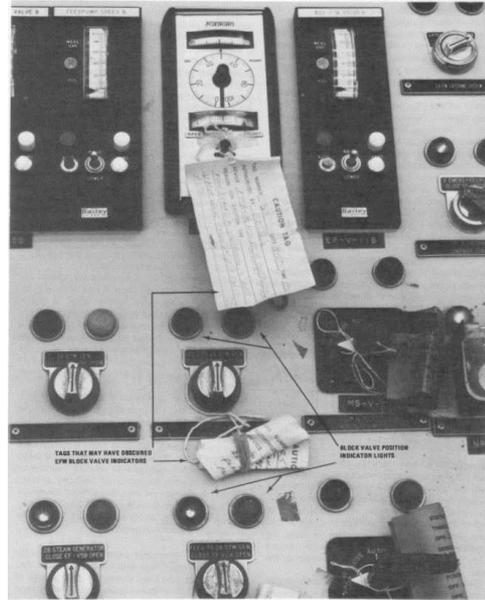
# 制御室の運転員の混乱

## プラント状態の把握不能

### 対応訓練の不足



複雑なシステム  
100を超える警告灯



表示灯を覆う安全タグ



冷静な思考が困難な環境

# 13:00 水素爆燃

## 格納容器の損傷なし

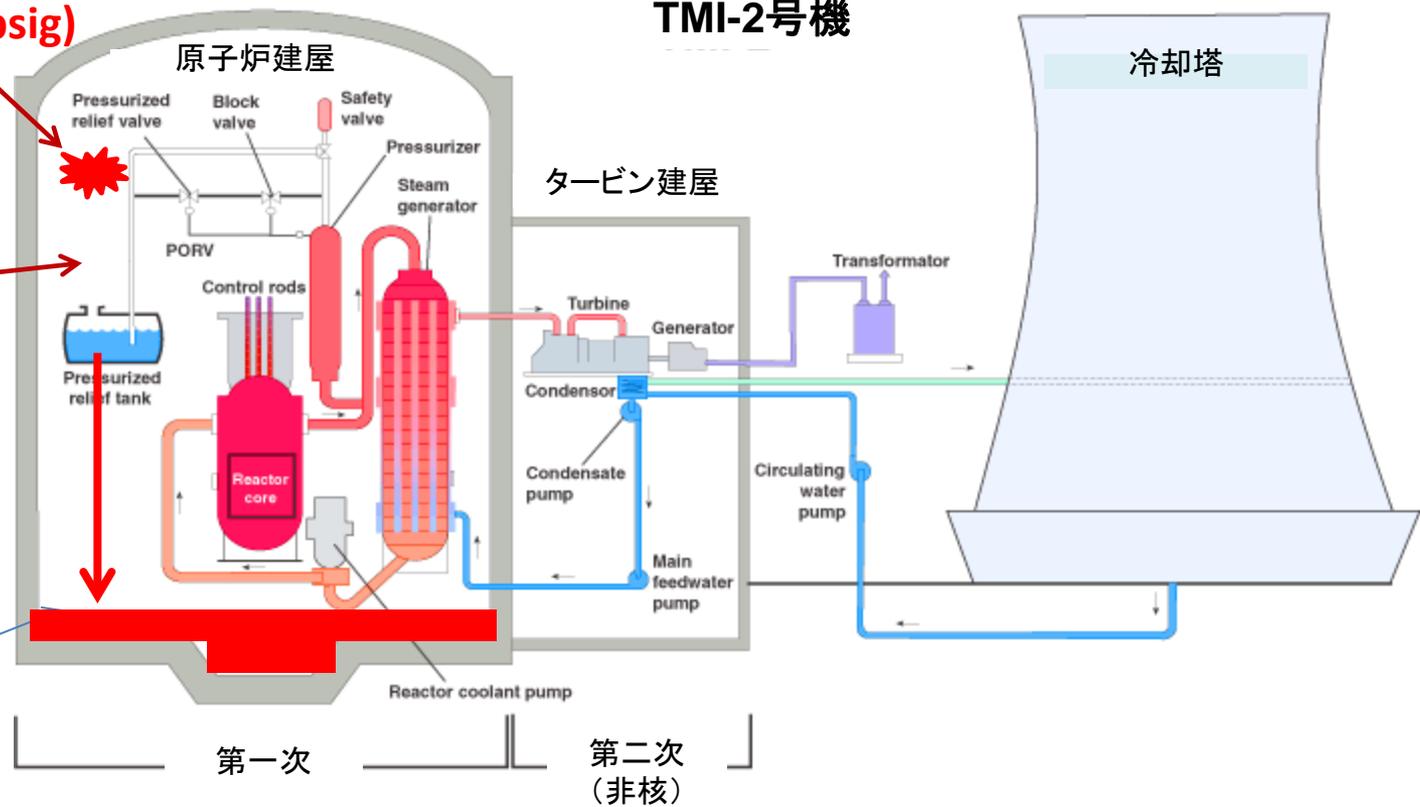
### 不明の状態が1週間続く

13:00 水素爆燃  
3MPa (28psig)

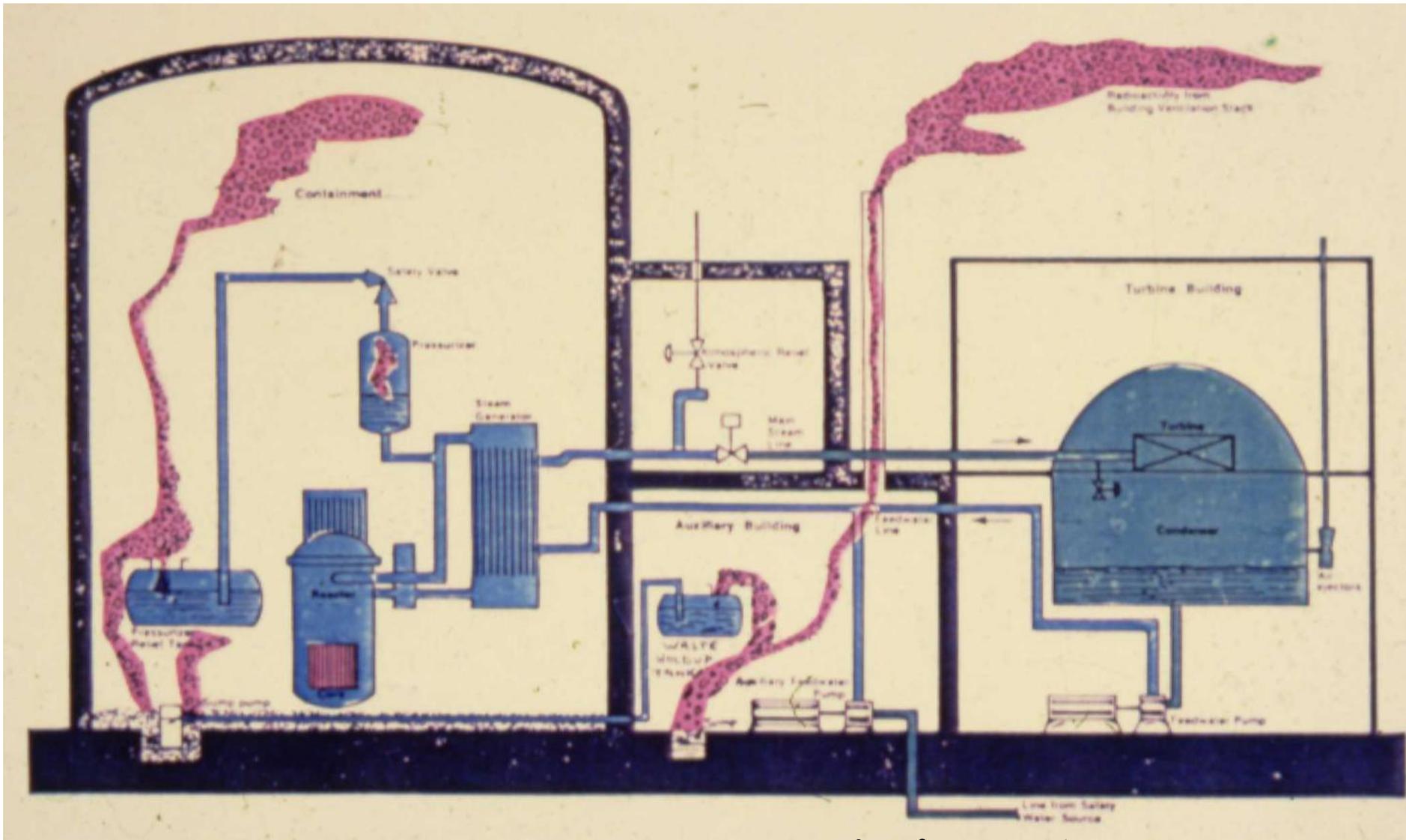
TMI-2号機

放射線  
>200Sv/時

水深は  
最大3m

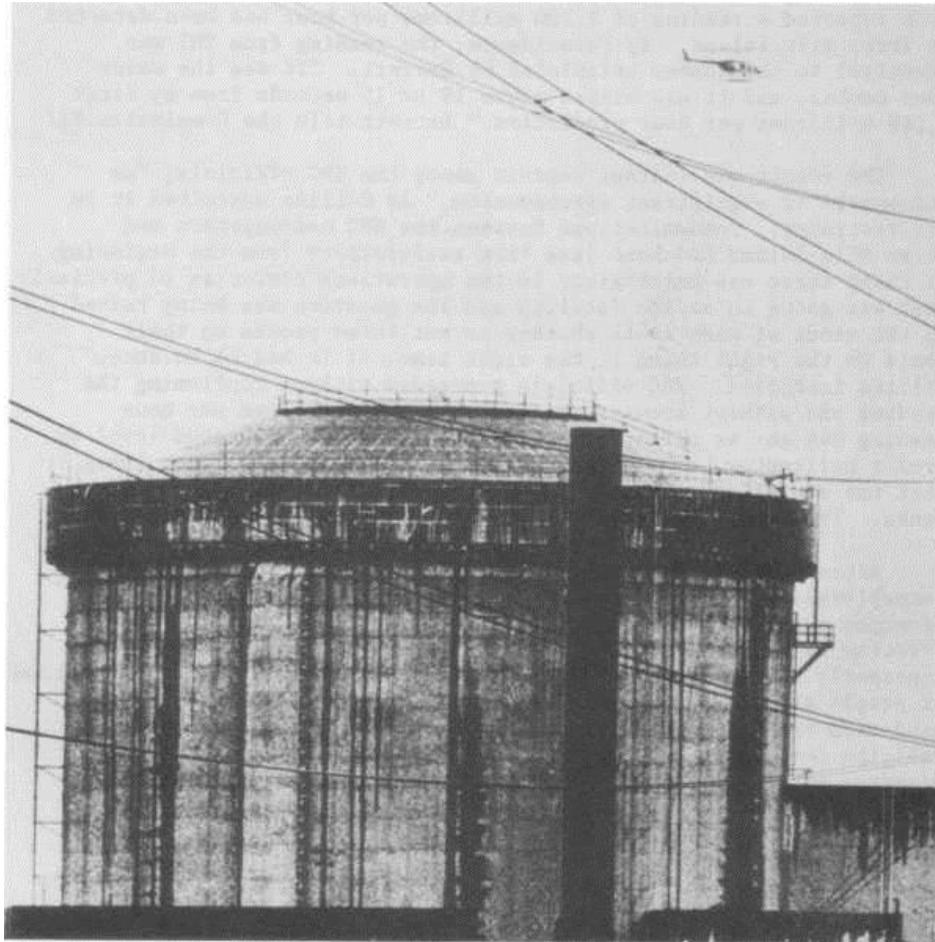


# 放射能の放出経路



溶融した炉心の冷却に、補助系統の主冷却材ポンプの運転が必要であった

# 放射性物質の敷地外流出は変動し、 指示値も錯綜 3月28～30日



# スリーマイルアイランド原子力発電所事故 における予防的な避難 1979年3月30日

- 不確実さと不明さが原因
- 妊婦や子どもに対する避難勧告は、  
10日間継続
- 最大14万人が避難。その大半は1週間未満  
– 原子力損害賠償保険から7,100万ドルの支払い

# 情報不足と不信感により人々が混乱

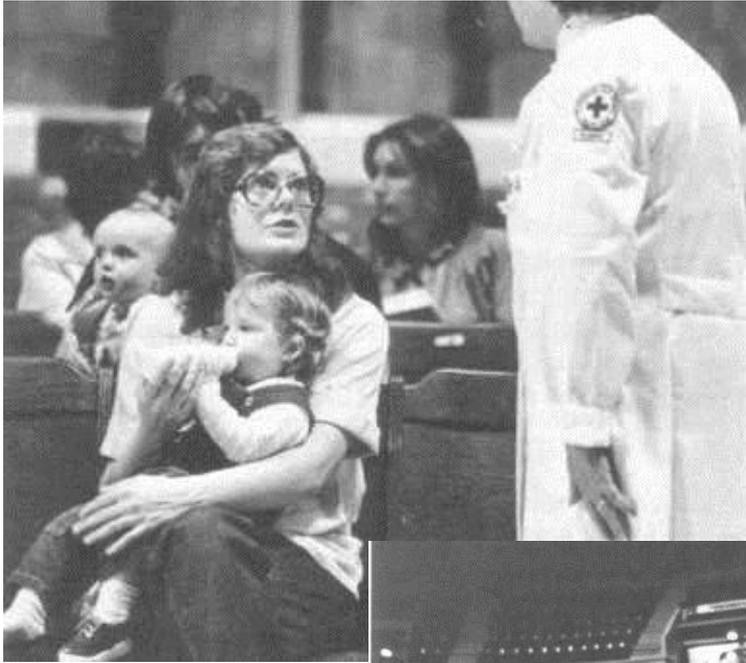


企業に対する不信



政府に対する不信感が高まったが、NRCで一元的に広報を担当したデントン氏が事故終息を進展させた。

# 避難場所



# カーター大統領の現地入り

4月1日



カーター、デントン、  
ペンシルベニア州知事ソーンバーグ



制御室を視察するカーター大統領

# 初期におけるプラントの安定化

- 炉心冷却の実現: 6時間
- 静的冷温(100度未満)停止: 1カ月
- 事故で発生した水は一切放出しなかった
- 事故で発生した水用の貯蔵スペースを確保するため、事故前の水を処理・放出した
- 事故で発生した水の河川放出は全くなし
- 補助建屋から大気中へのヨウ素放出を軽減

# 事故による放射線影響

- 公衆被曝アセスメントのための省庁間臨時グループ (Ad Hoc Interagency Dose Assessment Group) による所見
  - 200万人→3300人レム
  - 平均集団線量15 $\mu$ シーベルト(1.5ミリレム)
  - 最大「フェンスポスト(Fence-Post)」線量は830 $\mu$ シーベルト(83ミリレム)  
(推定実質最大線量は37ミリレム)
  - (バックグラウンドにおけるガン死者325,000人超に対して)TMI事故によるガン死亡リスク増加数は1人
  - 食品サンプリング検査 – すべて食品医薬品局(FDA)の制限値を下回る

# シビアアクシデント復旧における 優先順位

- 古来の基本原理：火、風、水、地
- 原子力事故復旧の基本原理：
  - 火：エネルギー - 炉心冷却
  - 風：大気中への放出の低減/コントロール
  - 水：水中への放出の低減/コントロール
  - 地：固体廃棄物の確実な管理

# 国家的支援



ビジターセンター指揮ステーション(Visitor Center Command Station) - 1000人以上

# 新たな事故対応・クリーンアップ管理組織

- **ゼネラル・パブリック・ユーティリティ社 (GPU) は統合国家クリーンアップ・チーム (Integrated National Cleanup Team) を設置**
  - **電力会社**
    - 所有者および既存の運転要員
  - **原子力請負業界**
    - 技術と運用をつなげる
  - **国家防衛関連研究所**
    - 知的知見および応用知見
  - **海軍の原子力関連知的産物**
    - 運転時における厳格な技術的方針
  - **学術機関**
    - 先端技術

# 新たな事故対応・クリーンアップ管理組織-2

- **アメリカ政府の支援**
  - 代理執行権限を有していたが、最大の国益の確保のため民営を維持
  - 米国原子力規制委員会 (USNRC) が主導機関
  - 米国エネルギー省 (DOE) が科学技術的支援を実施
    - 防護および非防護
  - 米国環境保護庁 (USEPA) が動的かつ局所的な環境モニタリングを実施
- **USNRCが特殊な規制プログラムを実施**
  - 特殊な現場代理権

# 新たな事故対応・クリーンアップ管理組織-3

- 人々への活発な情報伝達・人々の活発な関与に向けたプログラム
  - 人々の信頼と信用を再構築
  - 個々人の問題: 焦点は技術ではなく、人
- 議会による大規模な監視
- ペンシルベニア州が広範に関与
- 自治体が広範に関与
- 原子力産業界が広範に関与
  - 電力会社(例: 米国電力研究所(EPRI))
  - 協力企業(例: ベクテル社および原子炉蒸気システム供給会社(NSSS))

# 産業界・政府間の連携

- 連邦政府
  - エネルギー省(DOE)国立研究所
    - 高線量再処理の経験
  - DOEのR&Dサポート
    - 固形廃棄物処分
    - 使用済み燃料取り出し
- 他電力会社
  - EPRI(電力中央研究所)の合意
- 学会
  - 応用ロボット科学センター
    - ペンシルバニア州内の各大学

# 応用クリーンアップR&Dプログラムの新設

- DOE研究所によるプログラムと現場でのクリーンアップタスク問題解決活動を連動
  - TMIの現場に設置されたDOE技術統合室(TIO)
  - 全ての国立研究所での取り組みを調整
  - DOE高官の現場常駐: ウィリス・ビクスビー博士
  - INEL(EG&G)研究所の主要研究員
- 現場での実行可能なクリーンアップ作業に高度な技術研究を活用

# TIOの公式な「チームワーク」による 応用クリーンアップR&Dの合意

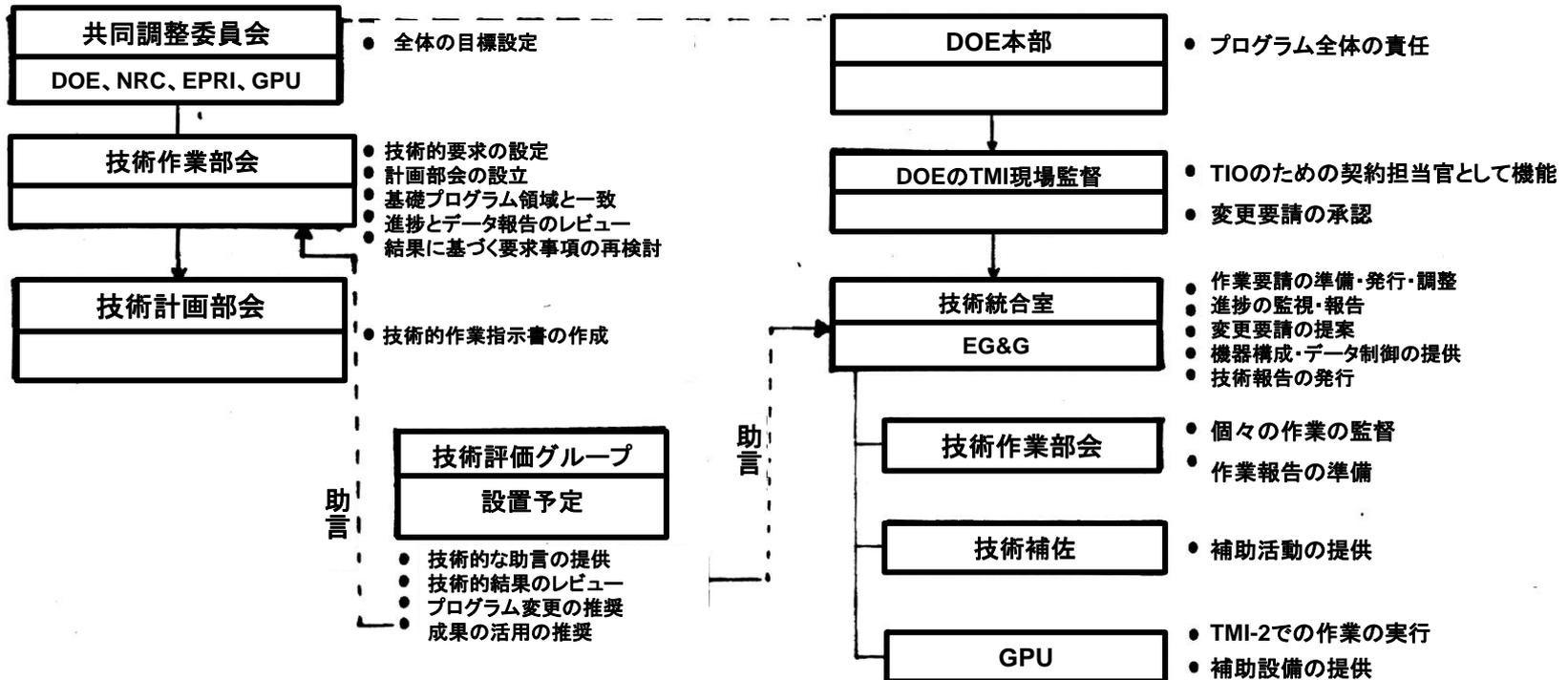
- 事故初期の科学的な事故対策を統合および形式化
  - 所有電力会社: GPUN社
  - DOE研究所組織
  - 電力研究所 (EPRI)
  - NRCによる研究
- 1980年3月締結および施行

# TIOによる開発技術の利用

- 処置および燃料取出しのための高度な水処理システム
- 劣化した炉心の検査機器
- 燃料取出し器具
  - 炉心ボーリングマシン
- 廃棄体 & 安全性分析
- 核分裂生成物の輸送分析
- 除染処置

# TMI-2号機クリーンアップにおけるTIOの組織機能

TMI-2  
情報・検査計画  
全体組織



# クリーンアップ原則-1

- **人々の安全および環境保全を維持**
  - 炉心冷却および高レベル放射性廃棄物の安定化
  - 大気への全放出について浄化、制御、モニタリング
  - すべての水を浄化、リサイクル、モニタリング、貯蔵
  - 固体放射性廃棄物を処分に向けて管理
- **作業安全を維持**
  - 作業員の被ばくを合理的に達成できる限り低く( ALARA) 管理
  - 作業安全ファクタおよび放射線安全ファクタ
- **破損燃料の取り出しに 集中**

# クリーンアップ原則-2

- 平常の停止原子炉と同様の状態にまでサイトを回復させる
- 燃料および放射性廃棄物を適切に処分
  - 技術的
  - 社会的
- オープンかつ透明な包括的プロセス
  - 一般にとって分かりやすいもの
  - ニーズに対応
  - 社会的・政治的支援の維持

# クリーンアップアプローチ

- **安全かつコスト効果の高い迅速なクリーンアップ**
  - リスクを減らし、封じ込めて安定化
- **明確な最終状態目標**
- **想定外を予測**
  - 監視し、学び、順応して成功
- **常にシンプルに**
  - できるだけ実績の高い技術を多く適用
- **外側から内側へ安全に作業**

# 補助建屋の除染

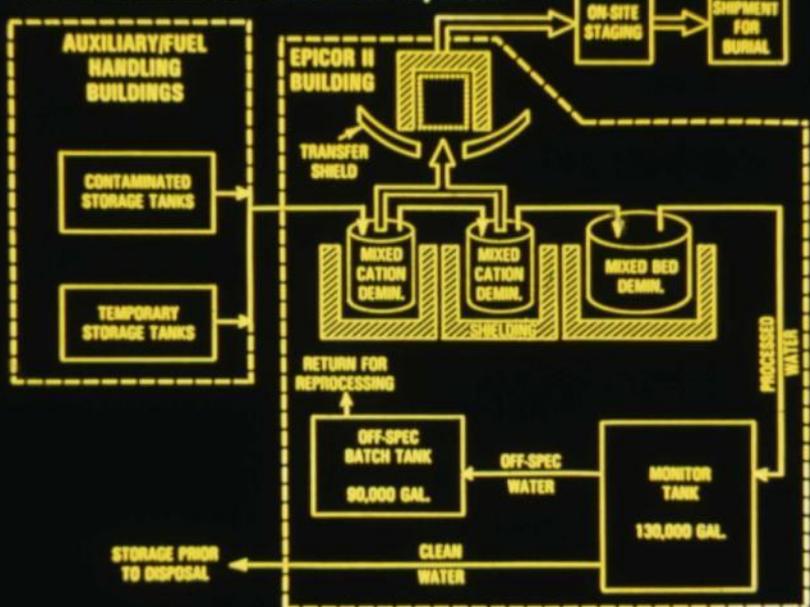
## 1979年



# 補助建屋の水処理

## EPICOR放射性廃棄物処理システム

TMI-2 EPICOR II Radwaste System



フローシート



建屋

L. Barrett Consulting LLC



樹脂製キャニスタ

# 補助建屋の高レベル放射性廃棄物の搬送・廃棄



樹脂製ライナをTMIに貯蔵

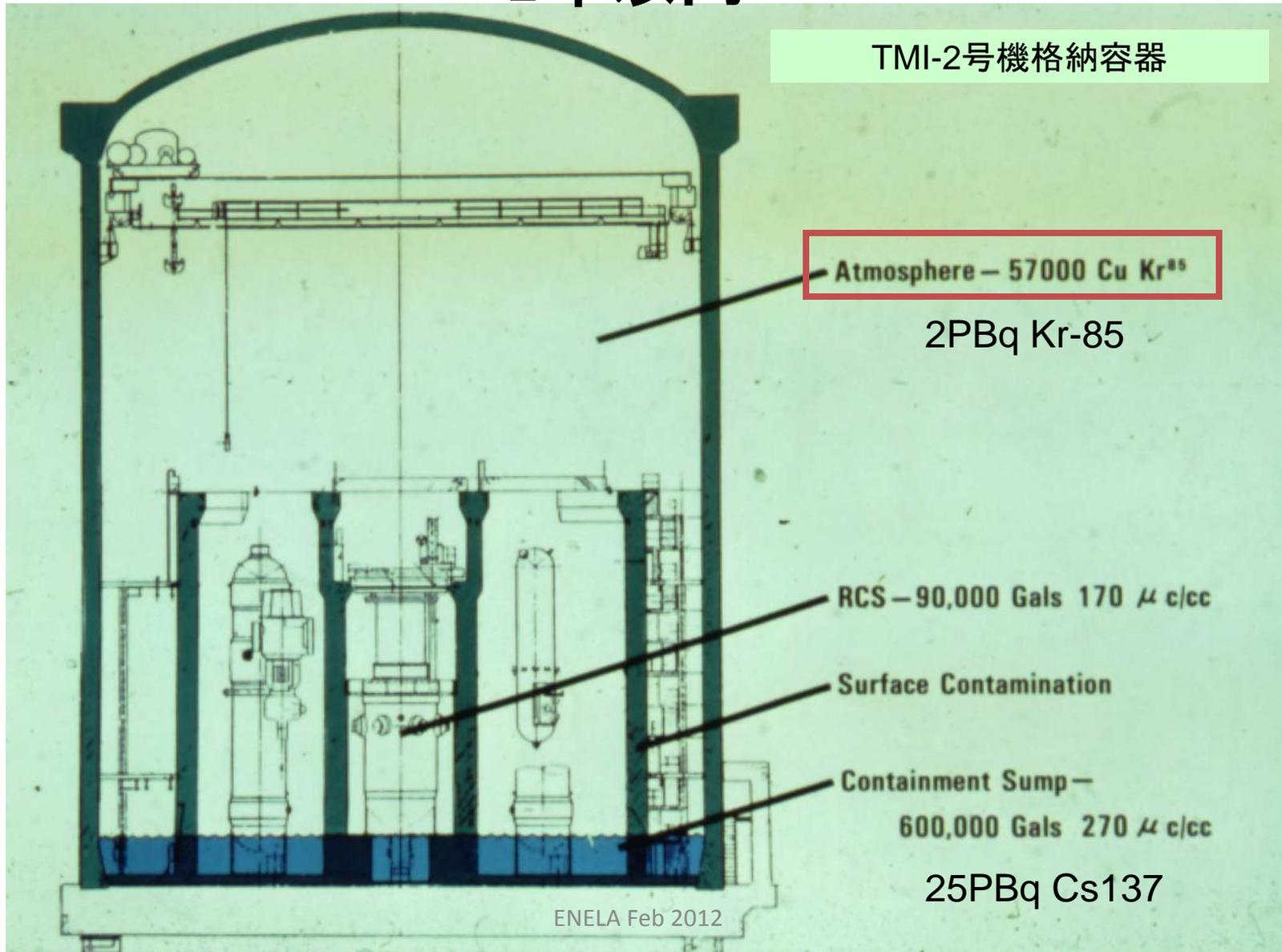


輸送キャスクへ装荷



高健全性容器に貯蔵し、ワシントン州にある埋設地に廃棄

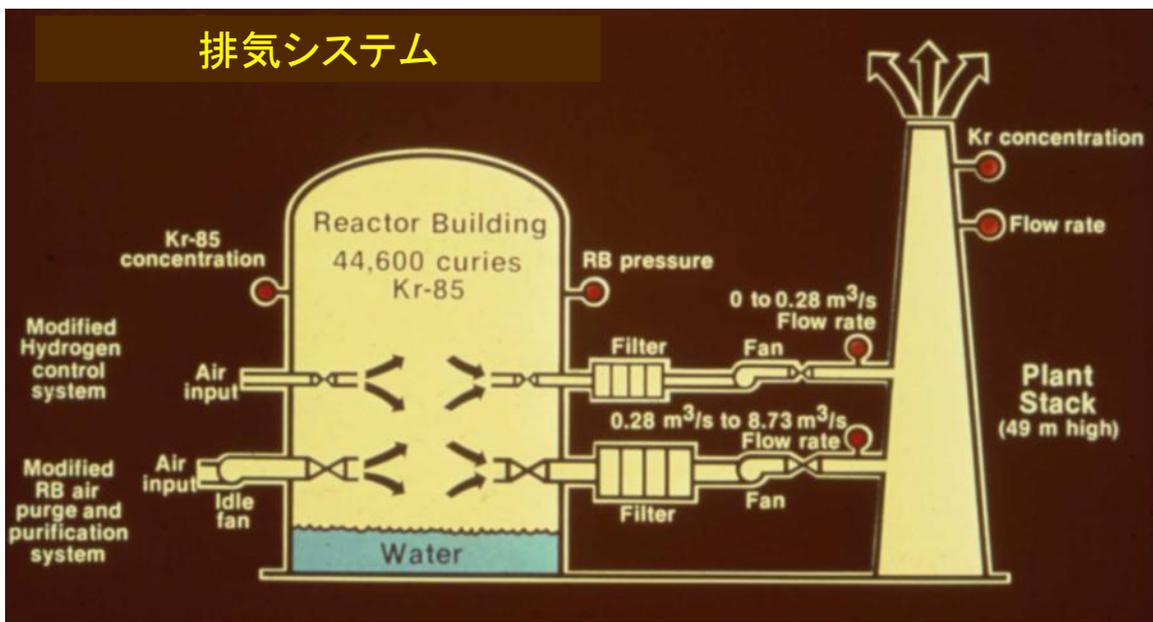
# 格納容器へのアクセスが必要 1年以内



# $^{85}\text{Kr}$ (クリプトン85) の放出

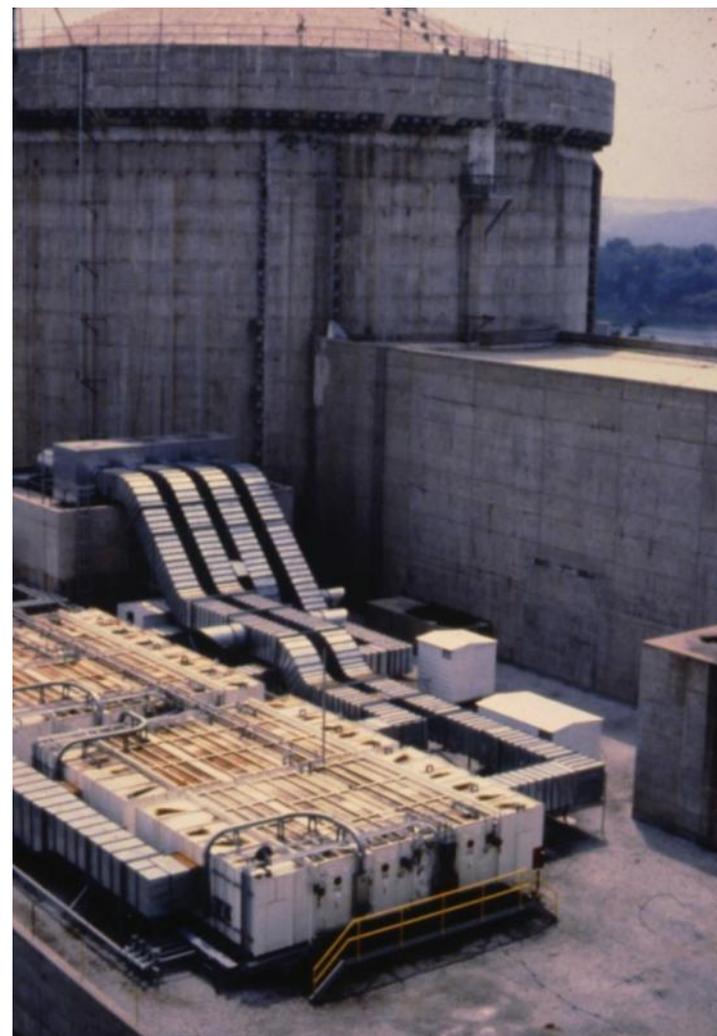
1980年6月28日

## 排気システム



概念

人々の感情的問題  
外部諮問委員会



除去系

# 格納容器の状態

密閉環境下でも大量の水蒸気により水滴が発生

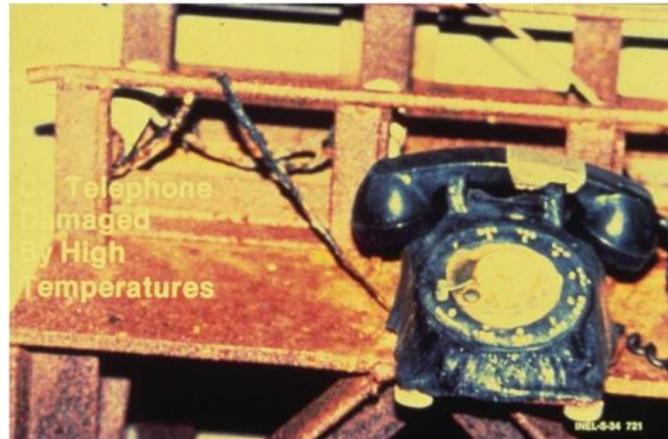
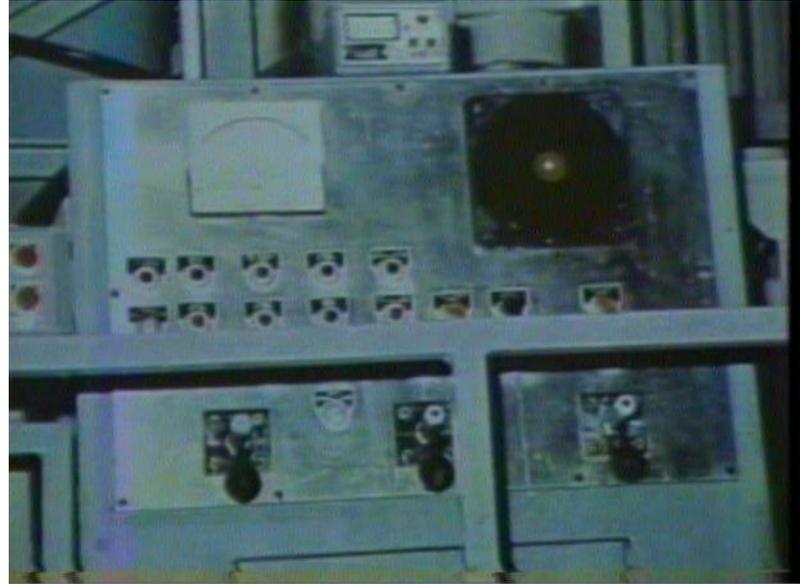
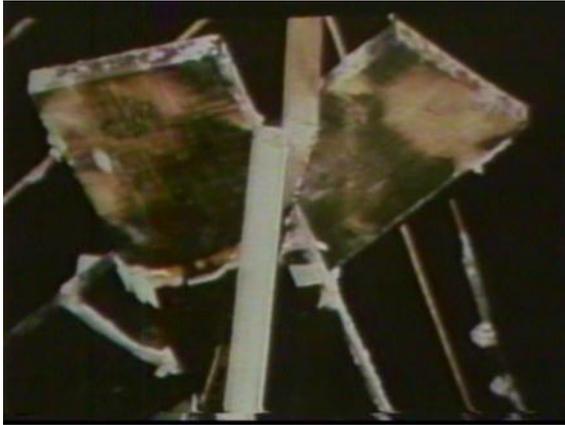


密閉環境下でも水蒸気から水が発生

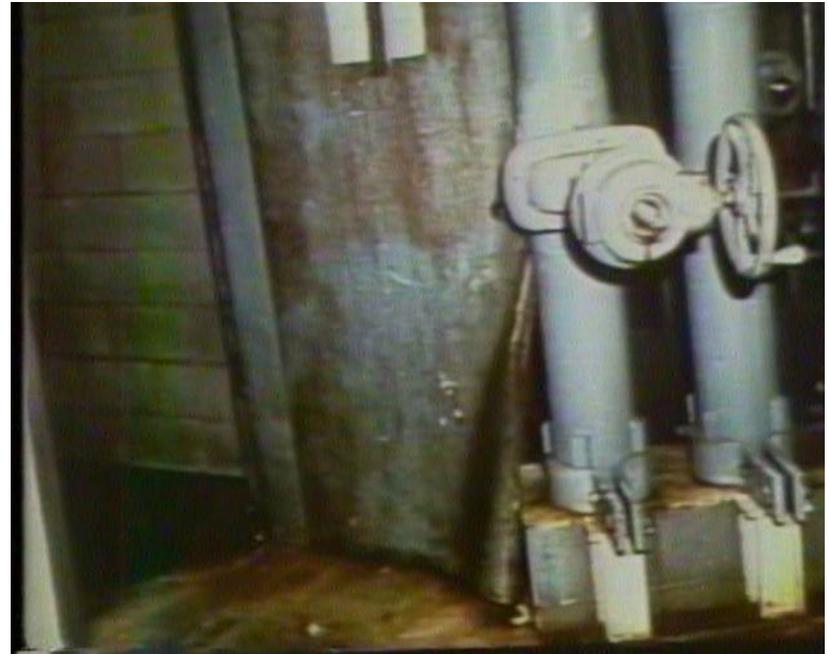


10Sv/時の温水が水深3mの  
深さで滞留

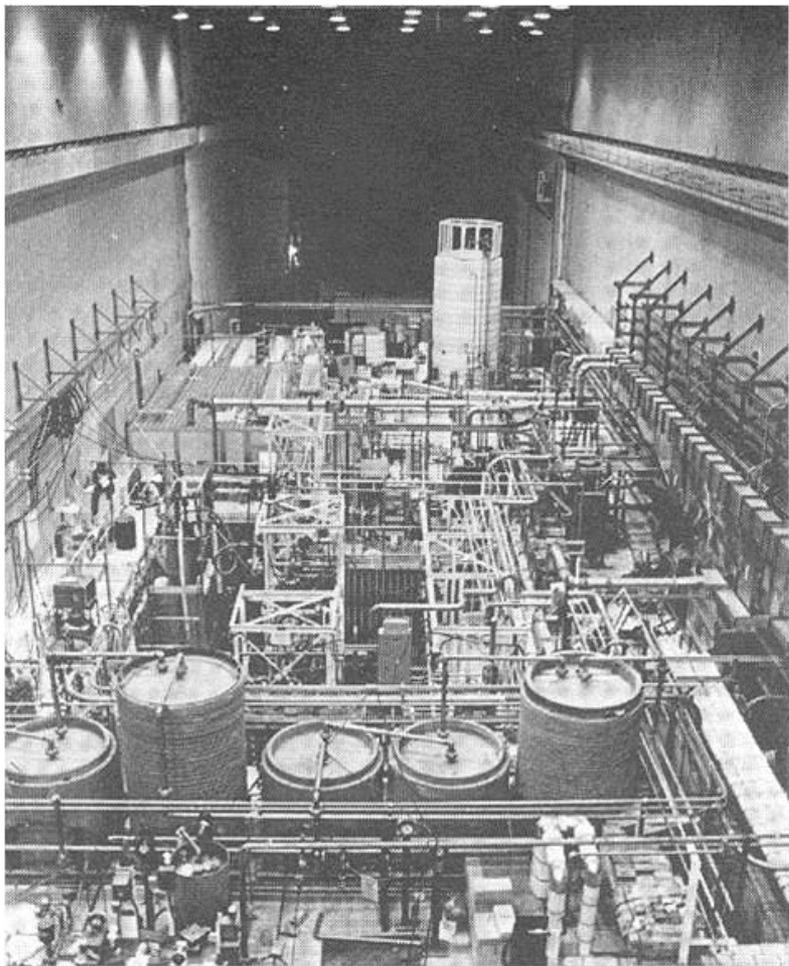
# 放射熱による損傷



# H2の圧力波による損傷

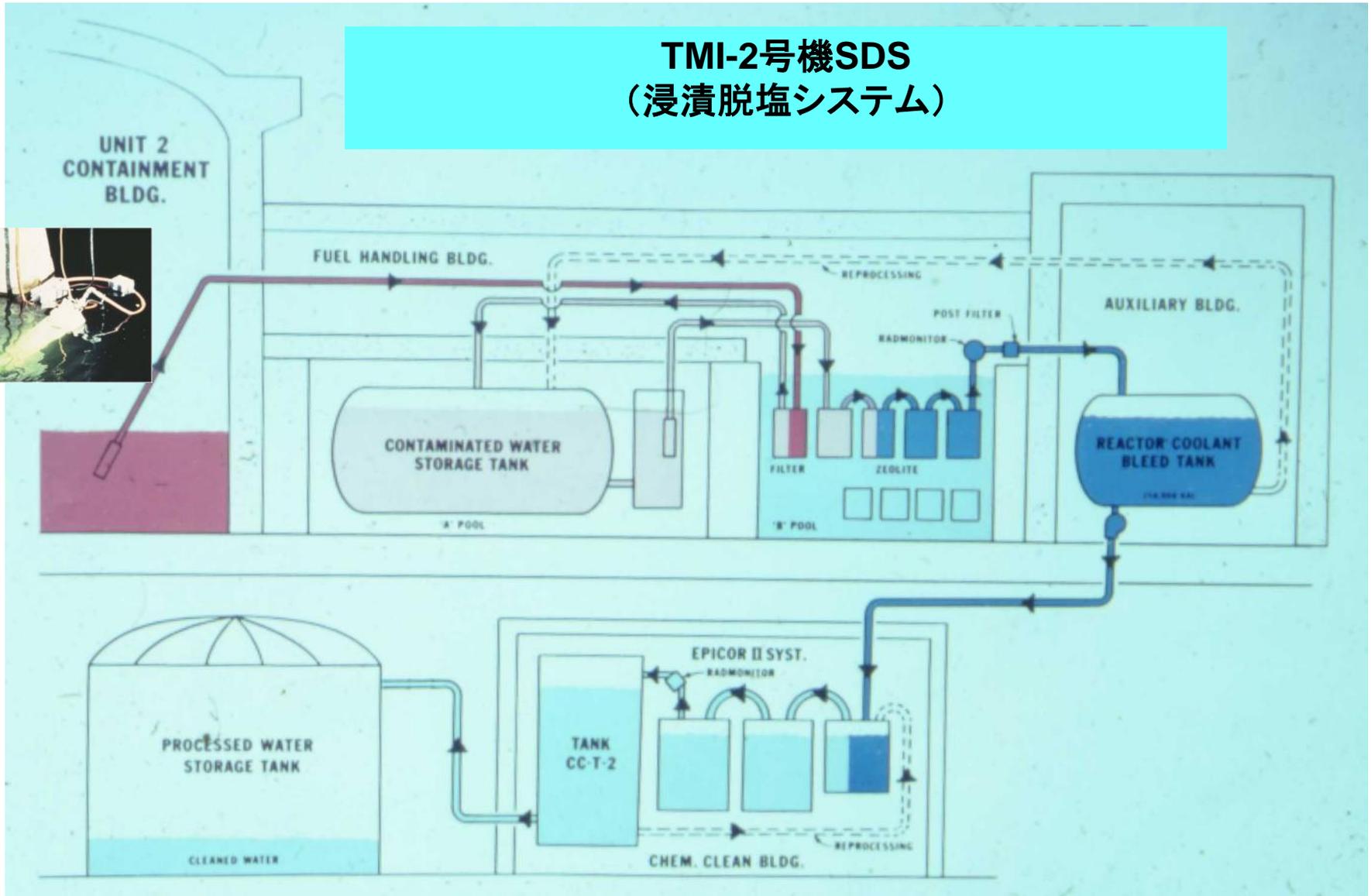


# 格納容器基部の250万リットルの水を処理



利用可能な最高の技術であるSDS (Submerged Demineralizer System : 浸漬脱塩システム) をベースとし、段階的な水浄化システムを開発

# TMI-2号機SDS (浸漬脱塩システム)



設計-運転チームと密接に連携し、システム開発に成功

# SDSの高放射性廃棄物

Csは1缶当たり1PBq (E15Bqまたは30KCi)

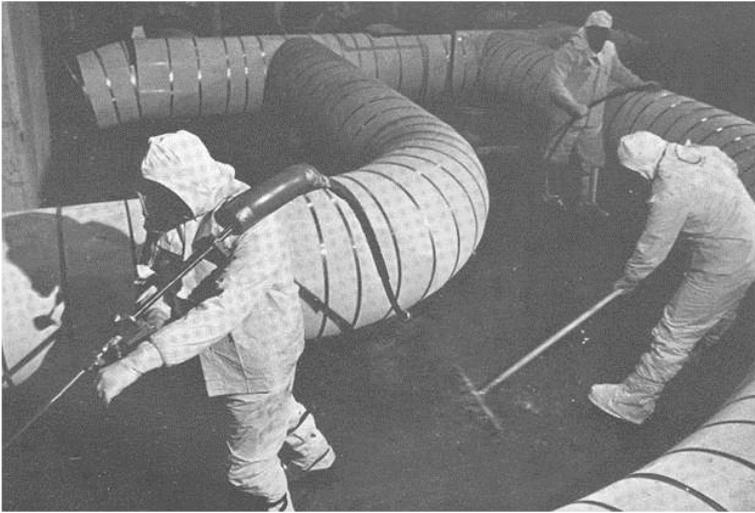


SDS輸送キャスクの装荷



SDS輸送キャスク

# 格納容器の除染



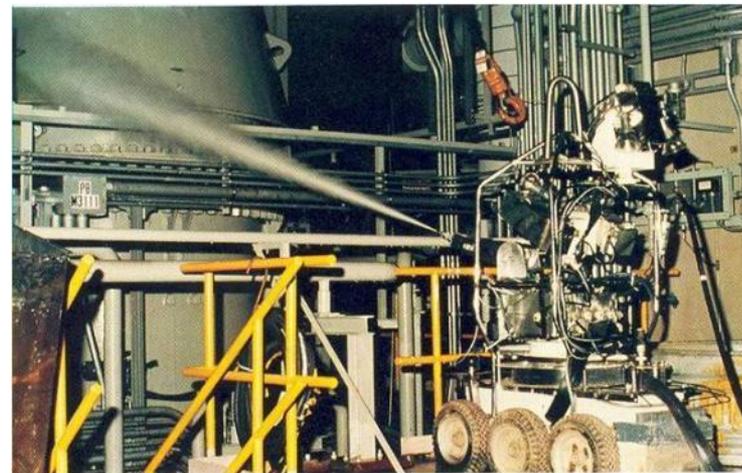
高圧洗浄



ロボット開発



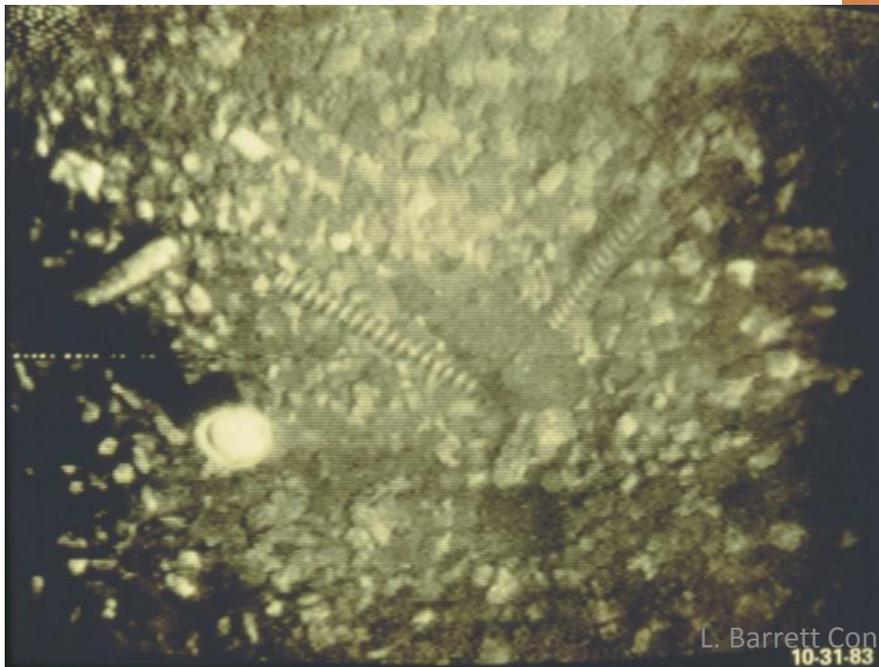
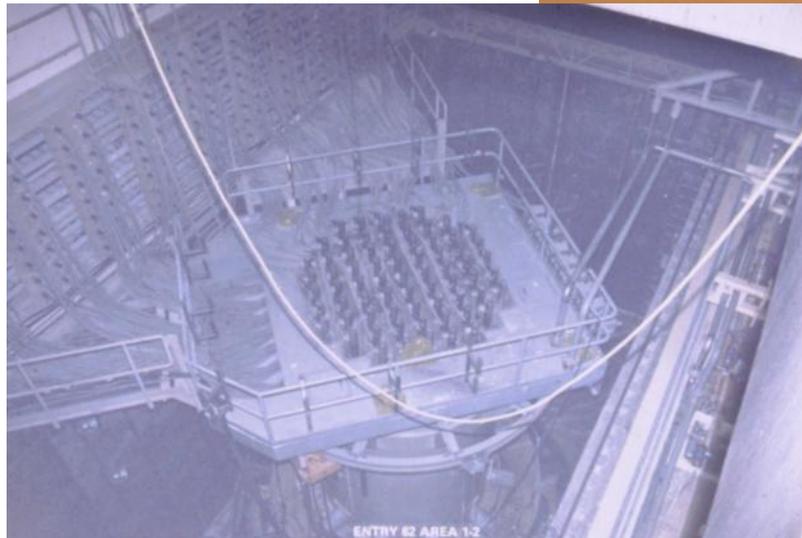
床の放射性スラッジ



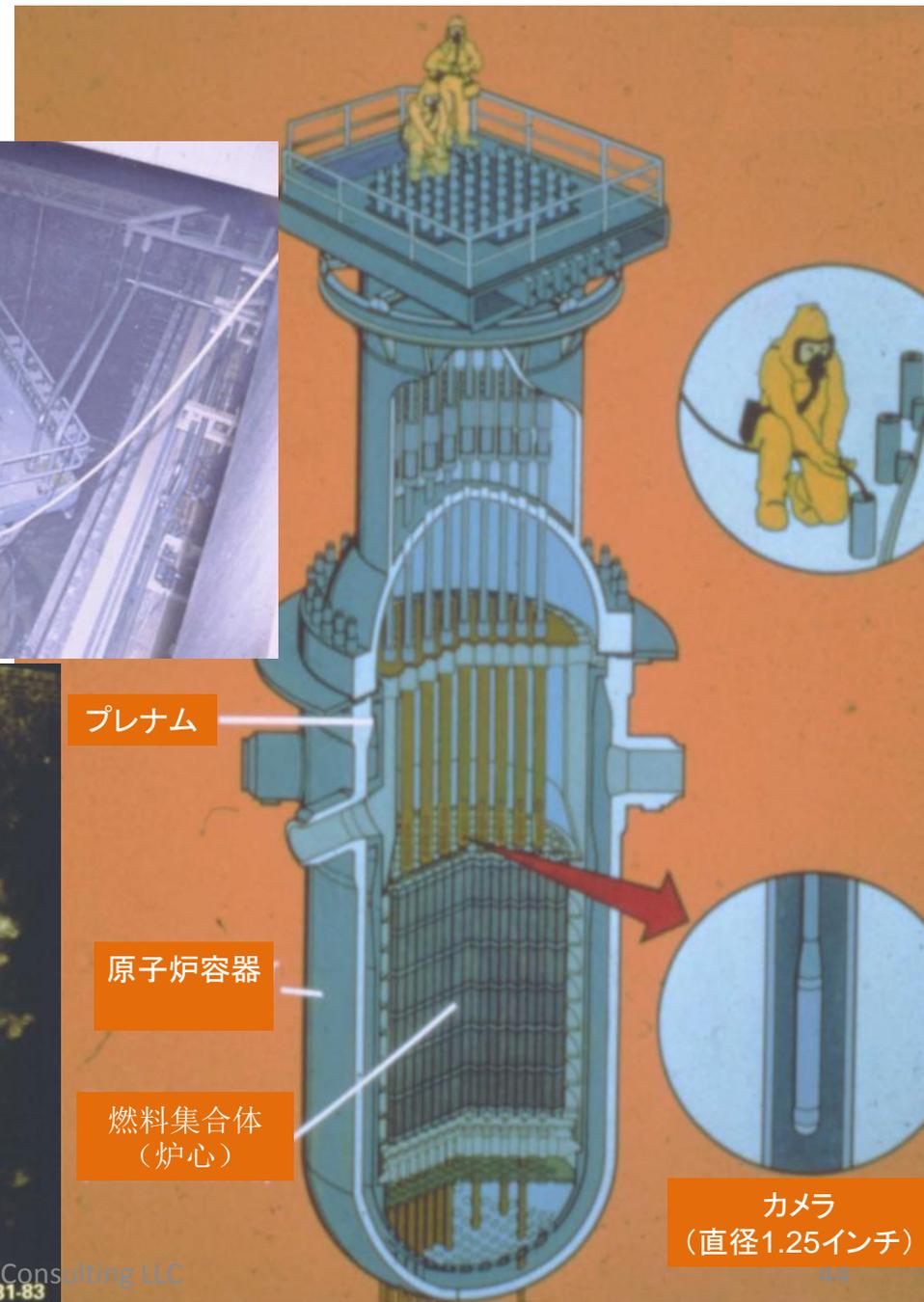
ロボットによる高圧洗浄

# 炉心の状態評価

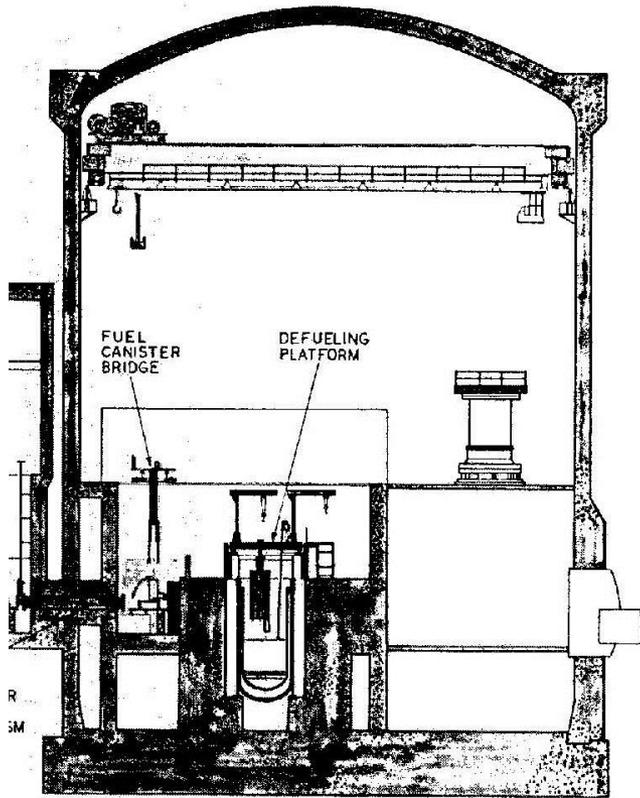
## 概要



L. Barrett Consulting LLC  
10-31-83



# 100トンのポーラークレーンの復旧



REACTOR BUILDING



# 原子炉内部構造物へのアクセス確保



炉心へのアクセス確保に向けた修復に従事  
(バレットが立入)

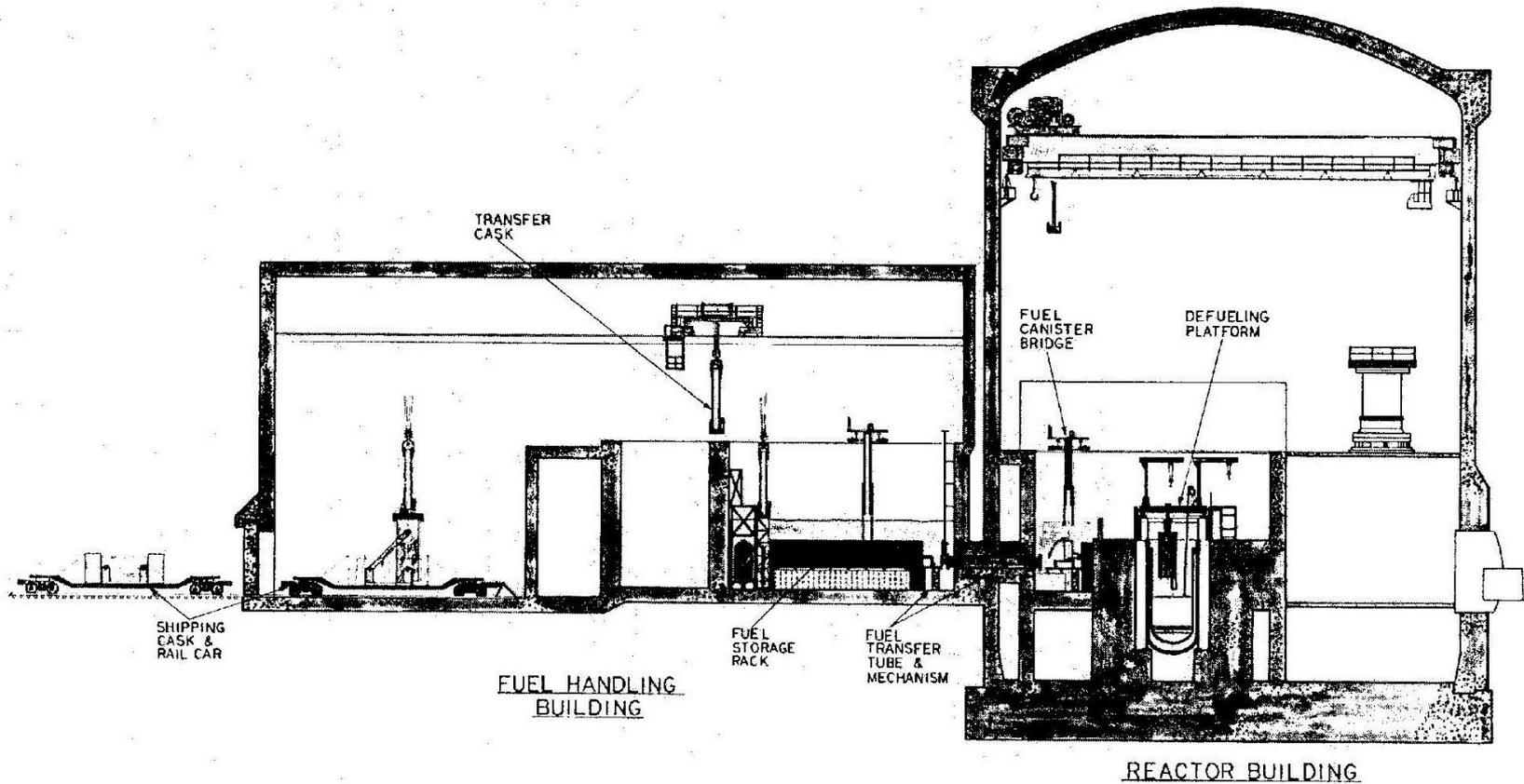


40トンのミサイル遮へいブロック  
(Missile Shield Block)の吊り込み

# 原子炉容器上蓋の吊り込み



# 燃料取り出し計画



# 内壁面の除染 進化のプロセス



手作業による表面の削り取り

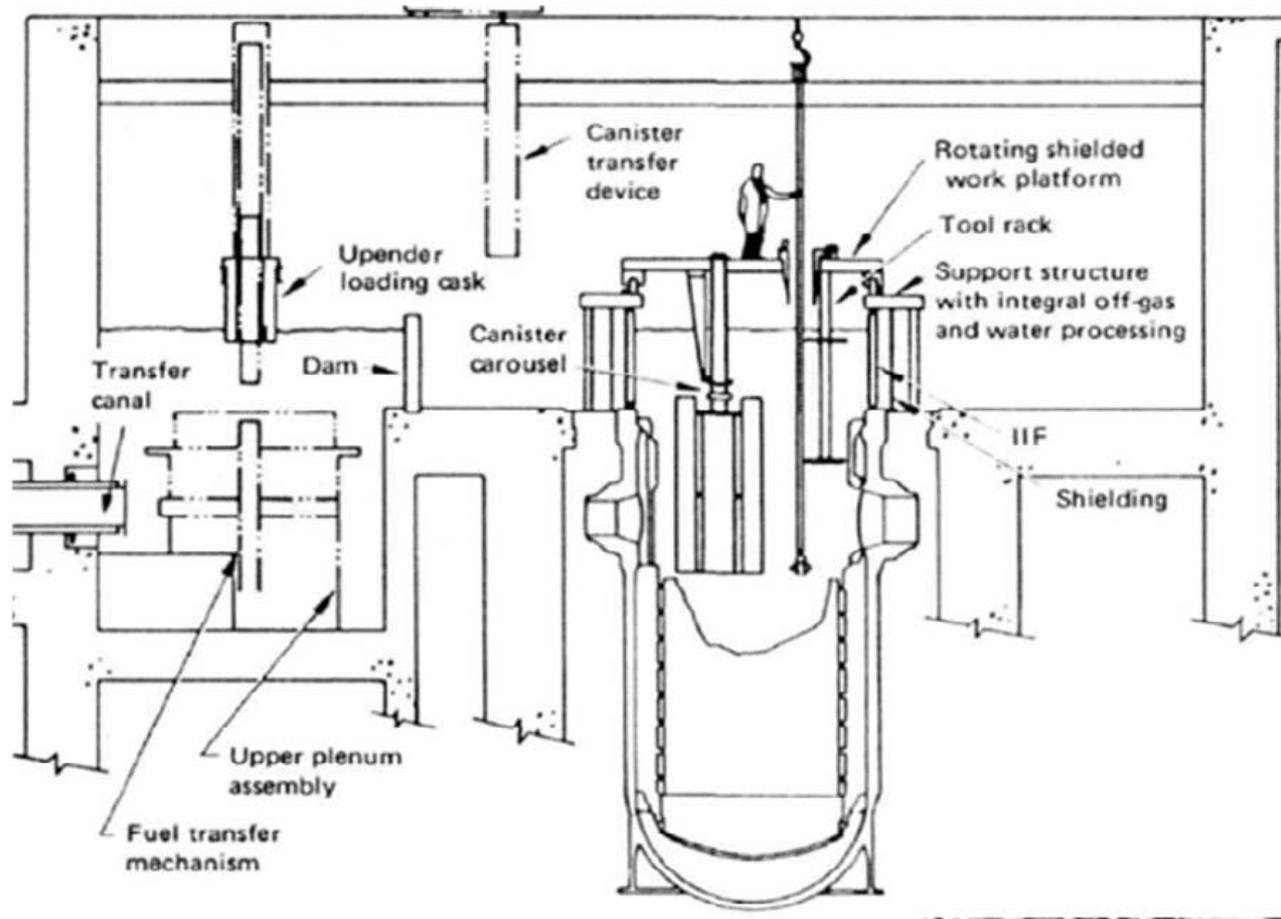


削り取り機



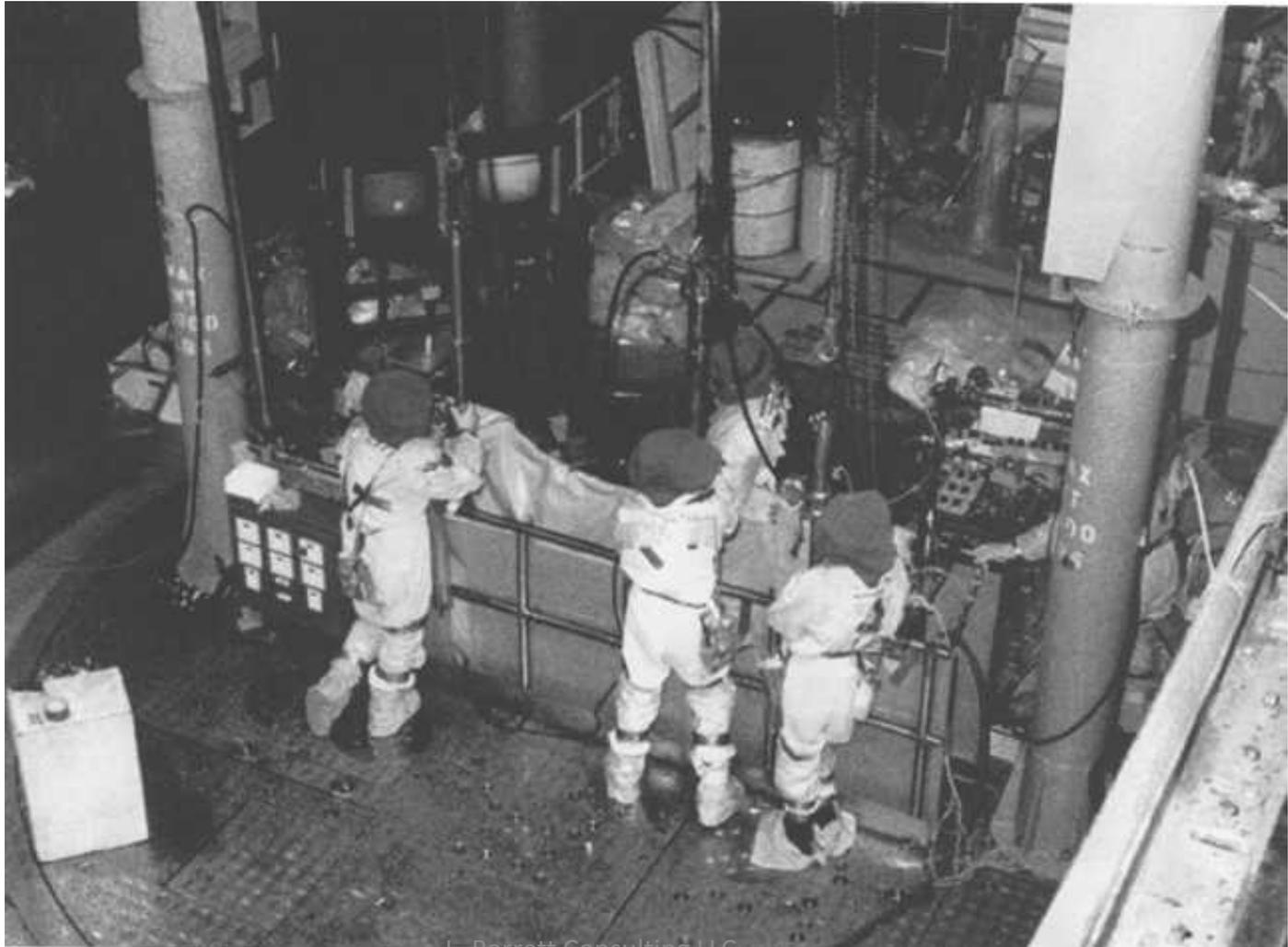
削り取り吸引ロボット

# 燃料取り出し作業のプラットフォーム

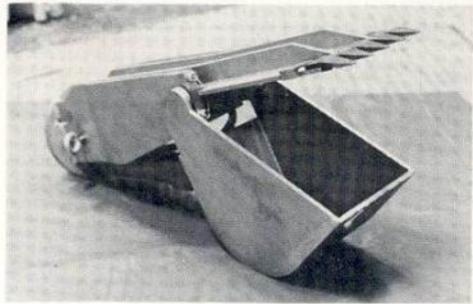
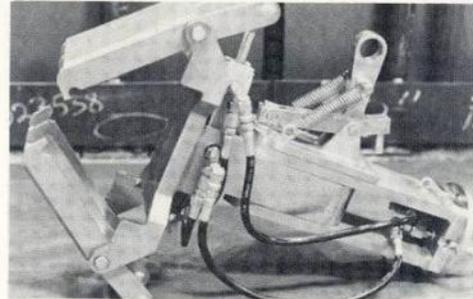
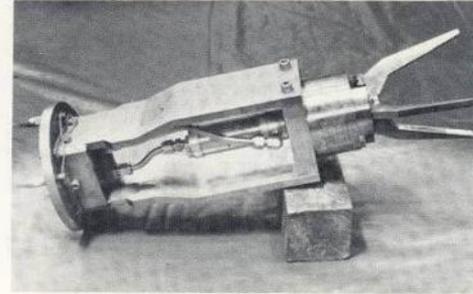


# TMI事故で損傷した炉心の取り出し

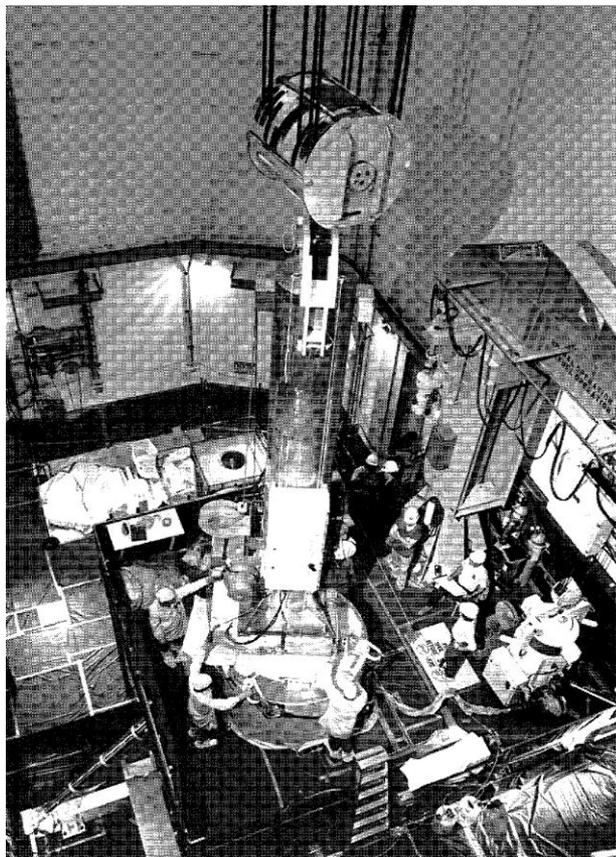
## 1985～1990年



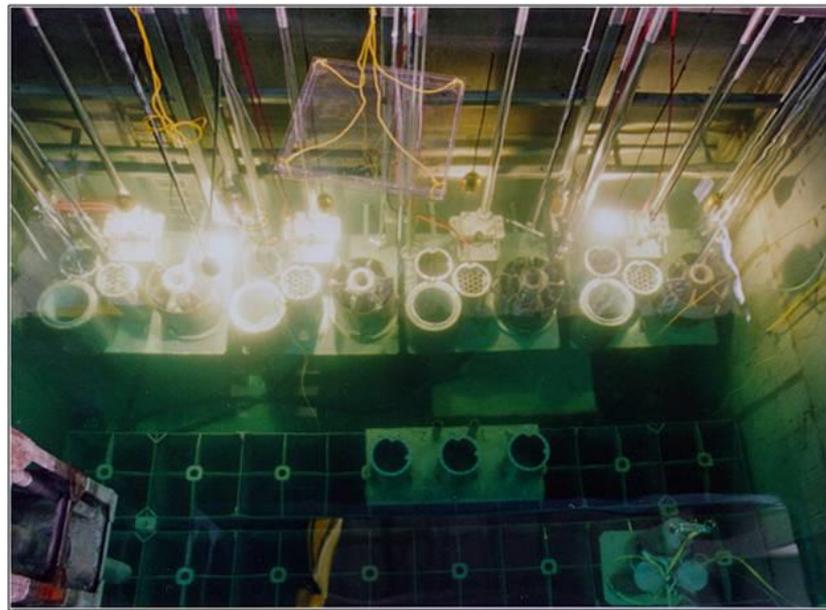
# 燃料取り出し用工具



# 装荷使用済燃料キャニスタの移送

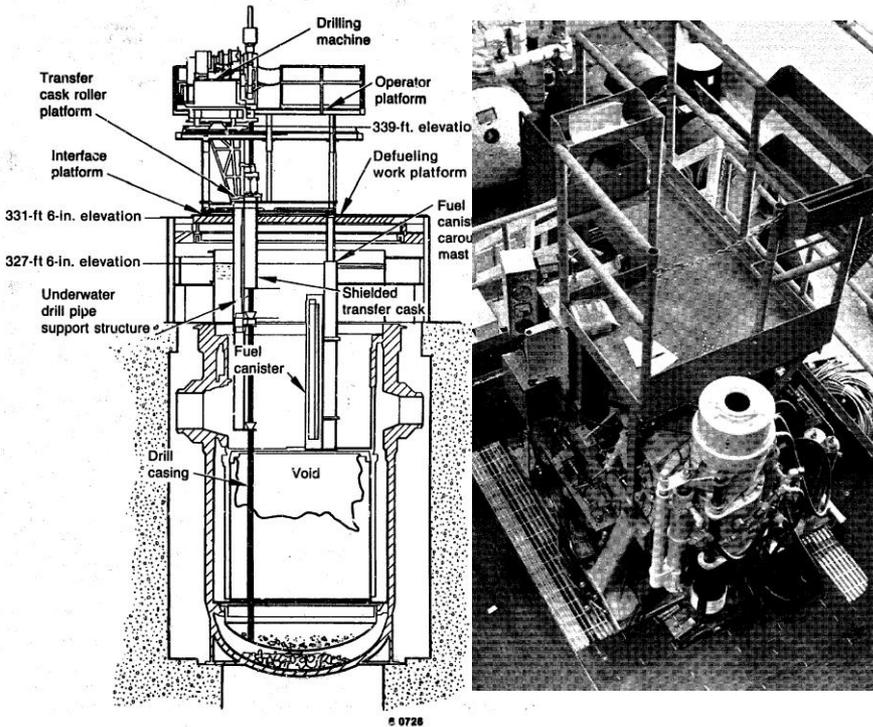


遮へい型移送ベル  
(transfer bell)

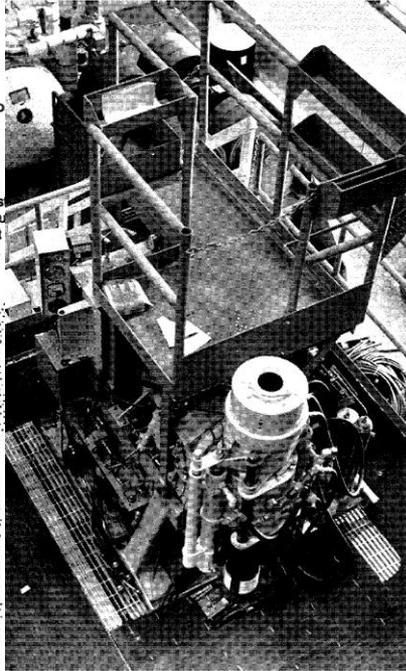


輸送カスクに装荷されるプール内の  
使用済燃料キャニスタ。  
344個のキャニスタを装荷。

# TMIの燃料取り出し

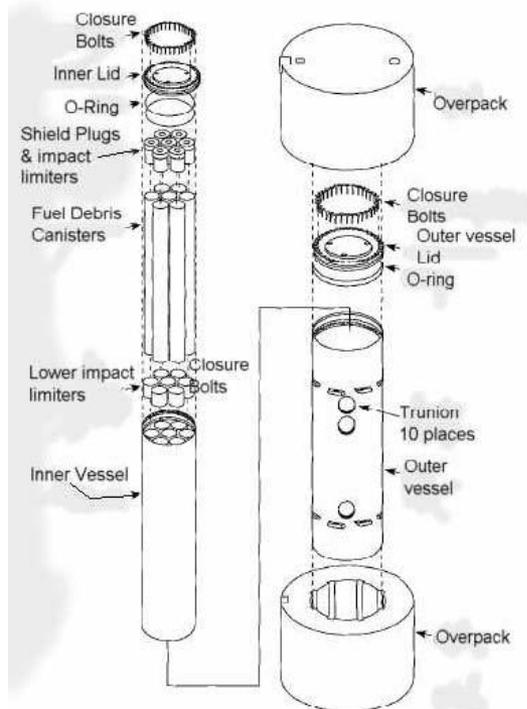


炉心ボーリングマシン

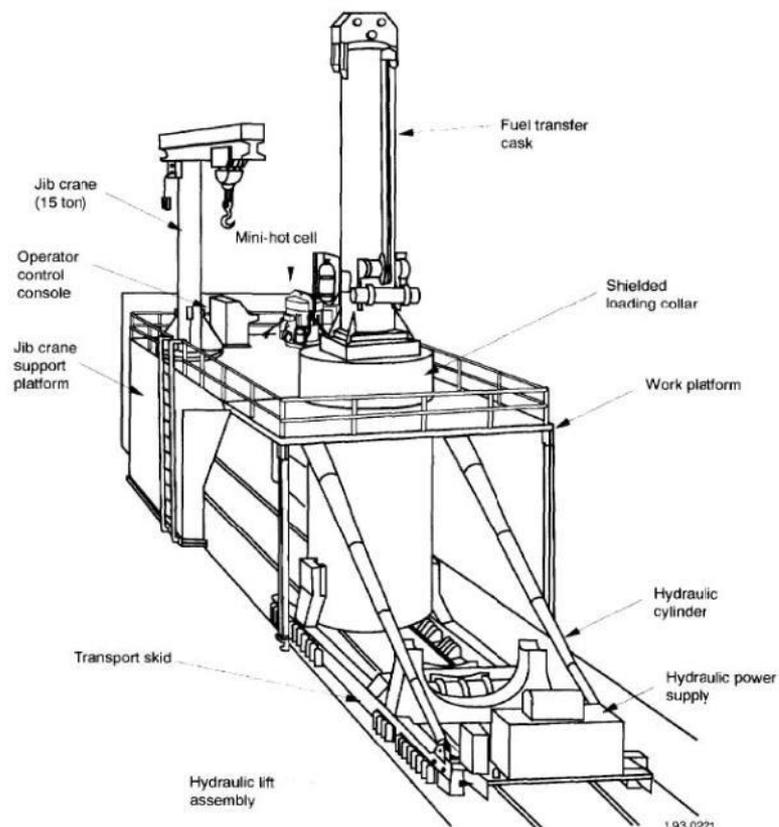


燃料抜き取り用キャニスタの装荷

# 輸送キャスクの開発、許認可、製造



燃料キャニスタ7つを収容



乾式装荷 (Dry Loading) システム

# 使用済燃料の移送



輸送キャスク



TMIからアイダホ州へ移送される最後の125Bキャスク使用済燃料(1990年)

# アイダホ州までの鉄道輸送ルート



Figure 17. Map of shipment route of TMI-2 wastes to Idaho National Engineering Laboratory.

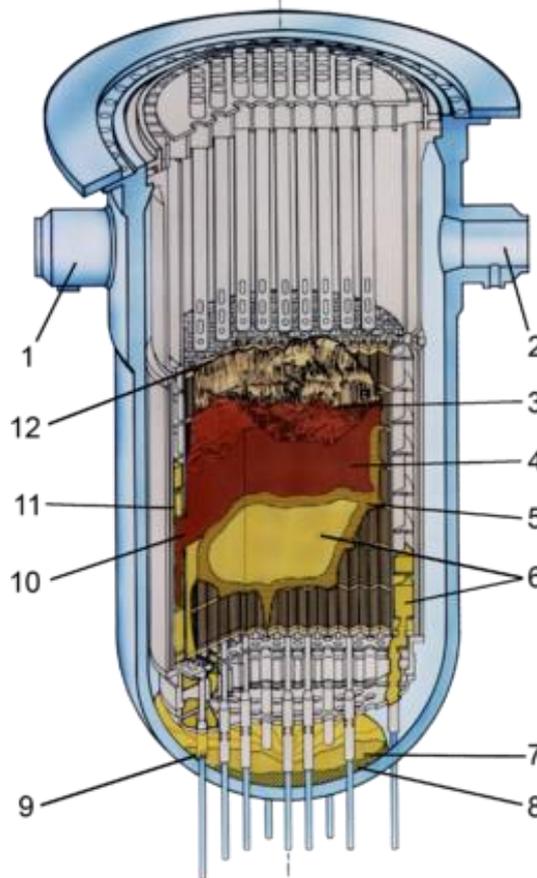
# アイダホ国立工学研究所 (INEL) における キャスクの荷下ろし



# 研究開発用に燃料キャニスタから 燃料取り出し



燃料をホットセルへ移送して解析



炉心材料および容器の解析

# INELによる原子力R&D/貯蔵プログラム アイダホ州におけるキャスク移送



# INELによる原子力R&D/貯蔵プログラム



乾式貯蔵中のTMI燃料(現在)

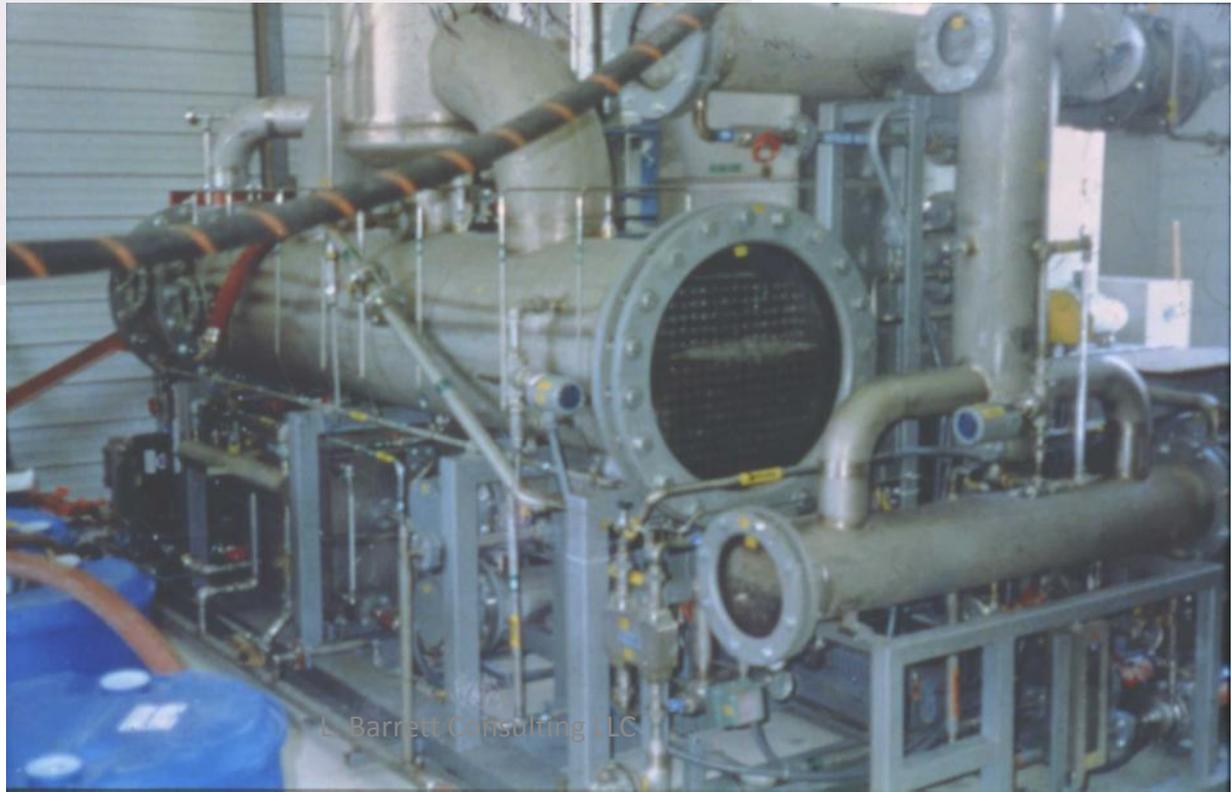
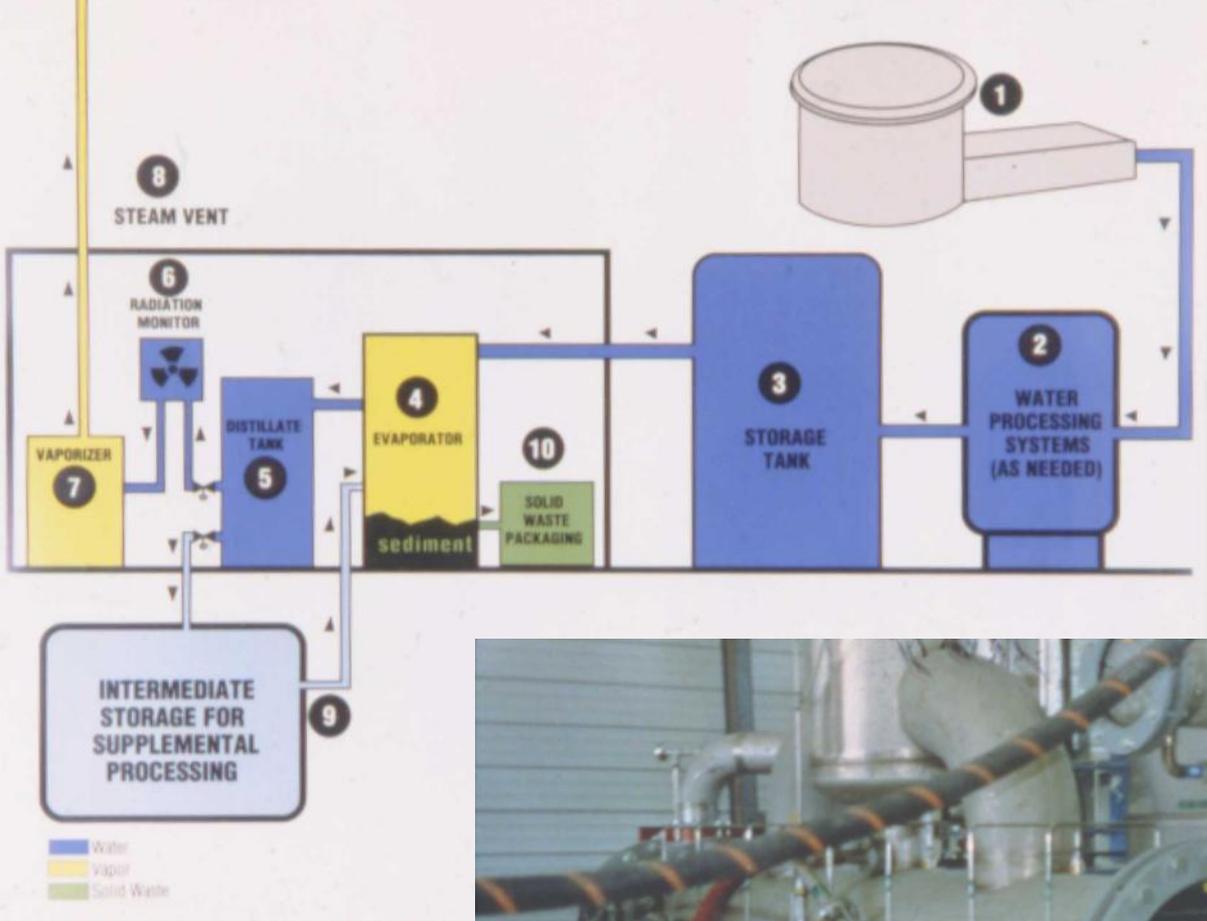
# 事故で発生した水の貯蔵タンク

## 下流域で飲料水を取水する都市が反対



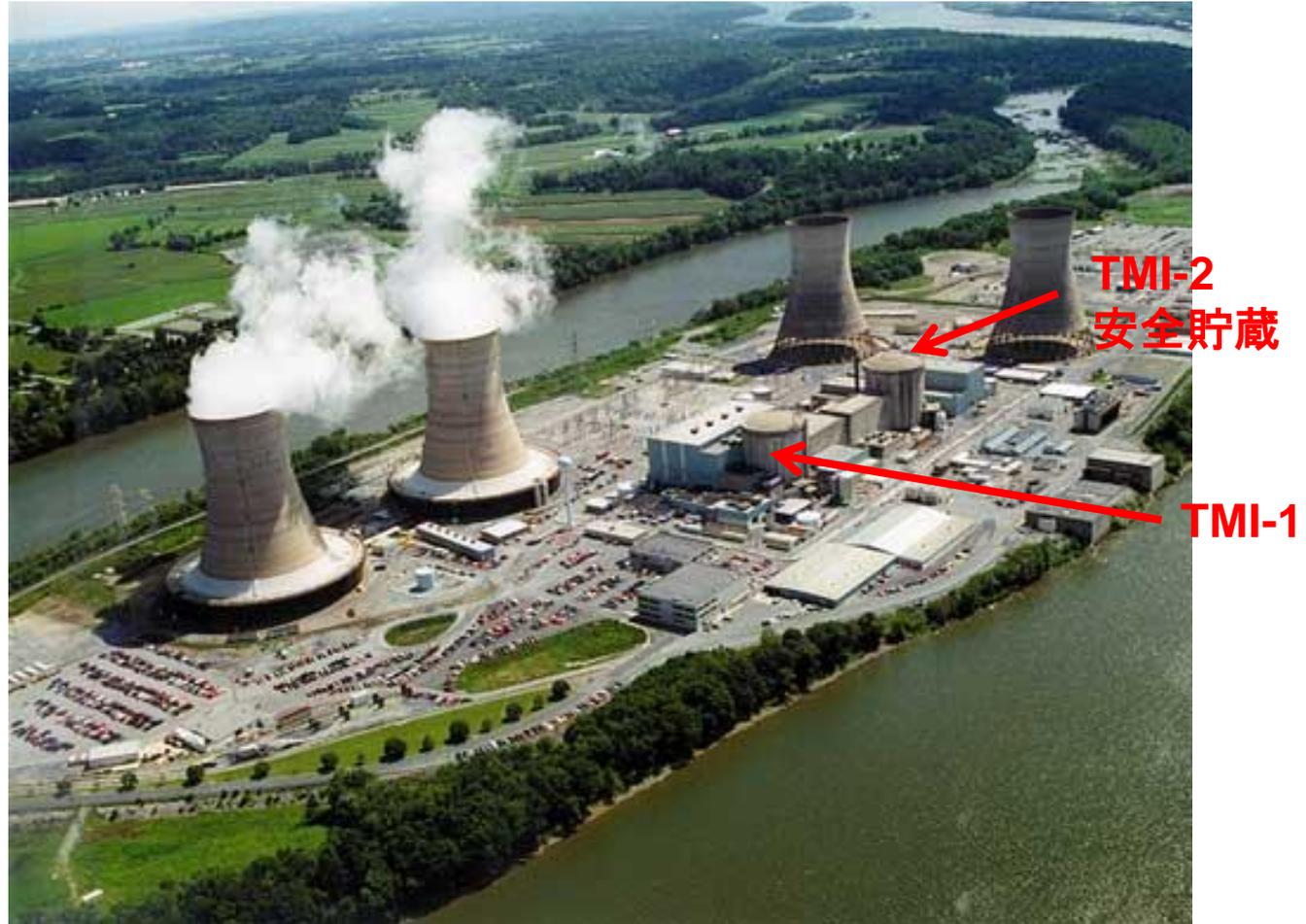
事故で発生した最大900万リットルのトリチウム水(24TBq)は放出基準を満たしていた。**しかし、感情的反発が激しかった。**

# トリチウム水を 大気中に蒸発させ て9,000トン を 処理 1991~93年



# 現在のスリーマイルアイランド 1号機・2号機

1993年～現在



1号機は2034年まで運転予定。  
その後、両ユニットは廃止措置へ移行予定。

# TMI事故の過程

- 原子炉トリップ: 1979年3月28日04:00
- 炉心溶融および移動: 1979年3月28日 ~05:00から07:30の間
- 水素爆燃: 1979年3月28日13:00
- 再循環冷却(Recirculation Cooling): 1979年3月28日遅く
- 段階的水処理: 1979~1993年: 最大で1.2MCiのCs137を除去
- 格納容器ベント、43KCiのKr-85: 1980年7月
- 格納容器への立入: 1980年7月
- 原子炉容器上蓋の取り外し、炉心溶融の発見: 1984年7月
- 燃料取り出し作業開始: 1985年10月
- 使用済燃料の移送: 1988~1990年
- 燃料取り出し作業完了: 1990年1月
- 処理水9,000トン蒸発処理: 1991~93年
  
- 費用: 最大10億ドル(2012年貨幣価値で23億ドル)

# TMI1号機の再稼働

- 2号機とは別のGPU組織
- 1985年9月18日に再稼働
  - 6年半にわたる工程
  - 運転員に対する教育訓練を強化
  - プラントの調整
  - 人々に対する規制上のヒアリング・プロセスの強化
- 現在、米国で最も優れた運転中の原子炉のひとつ



# TMIサマリー

- 米国において最も重大な原子炉事故
- 炉心溶融(当時は判明せず)
- 格納容器建屋への大量放出
- 環境への放出および環境影響はごくわずか
- クリーンアップの完了
- 広範囲にわたる影響 – 米国の原子力をさらに強化
  - 電力会社
  - 原子力産業界
  - 規制当局

# 米国の将来のクリーンアップ産業界 モデルとなったTMI

- **防護的クリーンアップ・プログラムの進展**
  - DOE環境管理部の創設
  - 技術開発
  - 技術利用
  - 効果的な管理方法の進展
- **商業的クリーンアップ・プログラムの進展**
  - 実用発電用原子炉向けD&D(廃炉・除染)プログラム

# 平和を取り戻したサスケハナ川

## 痛みを伴う経験こそ、教訓となる



大半のストレスから解放 – すべてが賢明に  
原子力はより安全に、そして生産性も高まっている

# レイク・バレット (Lake H. Barrett)

Lake@Lbarrett.com

レイク・バレットはエネルギー分野における独立した非常勤コンサルタントである。40年にわたって原子力エネルギーおよび核物質管理の領域に携わり、直近では、放射性廃棄物政策法に基づく、使用済燃料や高レベル放射性廃棄物処分に向けた米国のプログラムの実施を担当する、米国エネルギー省民生用核廃棄物管理局の前責任者であった。

その職務において、法定のサイト選定プロセスを通じて複雑な科学的手法を用いたユッカマウンテン地層処分場プログラムを主導し、大統領による指定およびその後の上院および下院の投票を成功に導いた。

また、米国原子力規制委員会に所属し、スリーマイルアイランド原子力発電所事故の初期対応に直接関与して、安定化、回復、損傷した原子炉の浄化における規制プログラムを担当する現地対策ディレクターを務めた。また、DOEの国防プログラムおよび民間産業における管理経験および技術経験が豊富である。民間部門では、ベクテル社(実用原子力発電プラント)およびジェネラル・ダイナミクス社の電気ボート(Electric Boat)部門(原子炉および海底システム設計、運転、デコミッションング)における勤務経験がある。