

核燃料部会セッション

「福島第一原子力発電所事故を踏まえた  
核燃料分野の課題と展望」

# 日本における シビアアクシデント研究の経緯

平成24年3月19日

京都大学大学院工学研究科

原子核工学専攻

杉本 純

# 内 容

1. 我が国におけるシビアアクシデント研究とアクシデントマネジメント整備の経緯
2. シビアアクシデント研究の現状(福島事故以前)
3. 福島事故のシビアアクシデント研究への教訓
4. 福島事故を踏まえたシビアアクシデント研究の展開
5. まとめ

# 1. 我が国におけるシビアアクシデント研究とアクシデントマネジメント整備の経緯

- TMI-2事故以降、軽水炉のシビアアクシデントに関する関心が世界的に高まり、シビアアクシデント研究が進展（80～90年代）
- 日本では主に日本原子力研究所及び原子力発電技術機構で実験及び解析研究を実施。国際協力により大規模実験データを入手（80～90年代）
- 1992年5月：原子力安全委員会「発電用軽水型原子力施設におけるシビアアクシデント対策としてのアクシデントマネジメント(AM)策について」
  - 事業者と行政に対し、対応すべき方針(事業者の自主的整備)を提示
- 1992年7月：通産省「AM対策の今後の進め方について」
  - 事業者に対しAMの計画的・速やかな整備等を要請
- 1994年3月：事業者がAM策整備方針を決定し、通産省に報告
- 1994年10月：通産省が事業者のAM整備方針を検討し、安全委に報告
- 2002年：事業者がAM策の有効性評価に関する報告書を保安院に提出、保安院が評価
- 2004年：事業者がAM整備後PSA報告書を保安院に提出、保安院が評価

# 我が国におけるシビアアクシデント対策の例(1/2)

| PWR       |  | BWR           |  |
|-----------|--|---------------|--|
| 原子炉停止     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 手動による原子炉停止</li> <li>・ 緊急ホウ酸注入</li> <li>・ 緊急2次系冷却、その多様化</li> </ul>   | 原子炉停止         | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 手動による原子炉停止</li> <li>・ 緊急ホウ酸注入</li> <li>・ 代替反応度制御(自動停止失敗時の再循環ポンプ停止等による方法)</li> </ul>   |
| 炉心冷却      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 手動ECCS起動</li> <li>・ 主蒸気逃し弁による2次系強制冷却</li> <li>・ フィード&amp;ブリード</li> <li>・ 冷却水供給の確保</li> <li>・ タービンバイパス系活用(2次系冷却)</li> <li>・ 代替水源の利用</li> </ul> | 原子炉及び格納容器への注水 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 手動ECCS起動</li> <li>・ 手動減圧(低圧注水を有効に)</li> <li>・ 格納容器注水(スプレイ)</li> <li>・ <b>代替注水手段(補給水系、消火系)</b></li> <li>・ 原子炉減圧の自動化</li> </ul>                         |
| FP閉込め     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 手動による格納容器隔離</li> <li>・ 格納容器内自然対流冷却</li> <li>・ 格納容器への注水</li> <li>・ 1次系強制減圧(DCH防止)</li> <li>・ 水素の計画燃焼(アイスコンデンサ型)</li> </ul>                     | 格納容器除熱        | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 格納容器スプレイ</li> <li>・ <b>圧力抑制プール経由のベント</b></li> <li>・ <b>耐圧強化ベント(過圧防止にベントラインを利用)</b></li> <li>・ 代替除熱(ドライウェルクーラー、冷却水浄化系)</li> <li>・ 残留熱除去系の復旧</li> </ul> |
| 安全機能のサポート | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 電源系、補機冷却水系、制御用空気系に対するバックアップ</li> <li>・ 号機間電源融通</li> </ul>   | 安全機能のサポート     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ <b>タービン駆動原子炉隔離時冷却系による炉心冷却及び電源復旧</b></li> <li>・ 原子炉施設間電源融通</li> </ul>  |

[参考：原子力安全／保安院「軽水型原子力発電所におけるアクシデントマネジメントの整備結果について－評価報告書」(2002); 原子力安全解析所,INS/M02-01(2002)]

# 我が国におけるAM整備の例(2/2)

## AM整備結果の評価

- 基本要件の確認
  - 実施体制（組織、役割分担、意思決定）
  - 施設・設備（支援組織の使用施設、計測制御の有効性）
  - 知識ベース（手順書類、プラント状態の把握、AM策判断）
  - 通報・連絡
  - 教育・訓練
- PSAによる有効性評価(AMによるリスクの減少)
  - 炉心健全性：炉心損傷頻度が2/3～1/6に減少
  - 格納容器健全性：格納容器破損頻度が1/5～1/18に減少

[参考：原子力安全／保安院「軽水型原子力発電所におけるアクシデントマネジメントの整備結果について－評価報告書」(2002); 原子力安全解析所,INS/M02-01(2002)]

## 2. シビアアクシデント研究の現状 (福島事故以前)

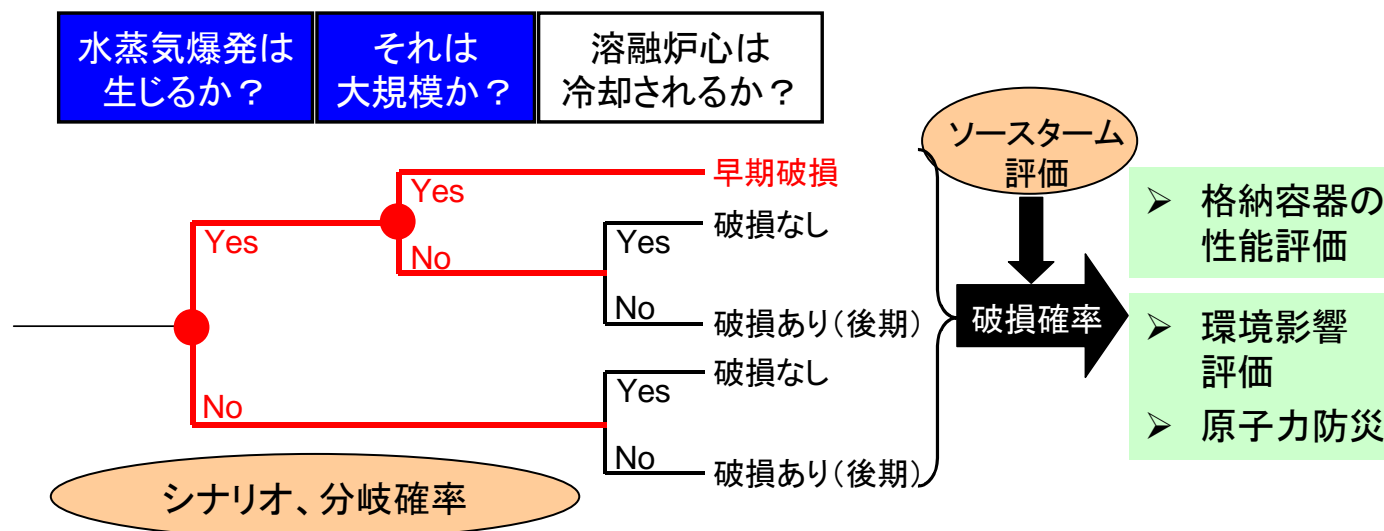
シビアアクシデント研究の目的

シビアアクシデント時の現象解明  
原子炉挙動、核分裂生成物(FP)の  
原子炉冷却系や格納容器内での挙動

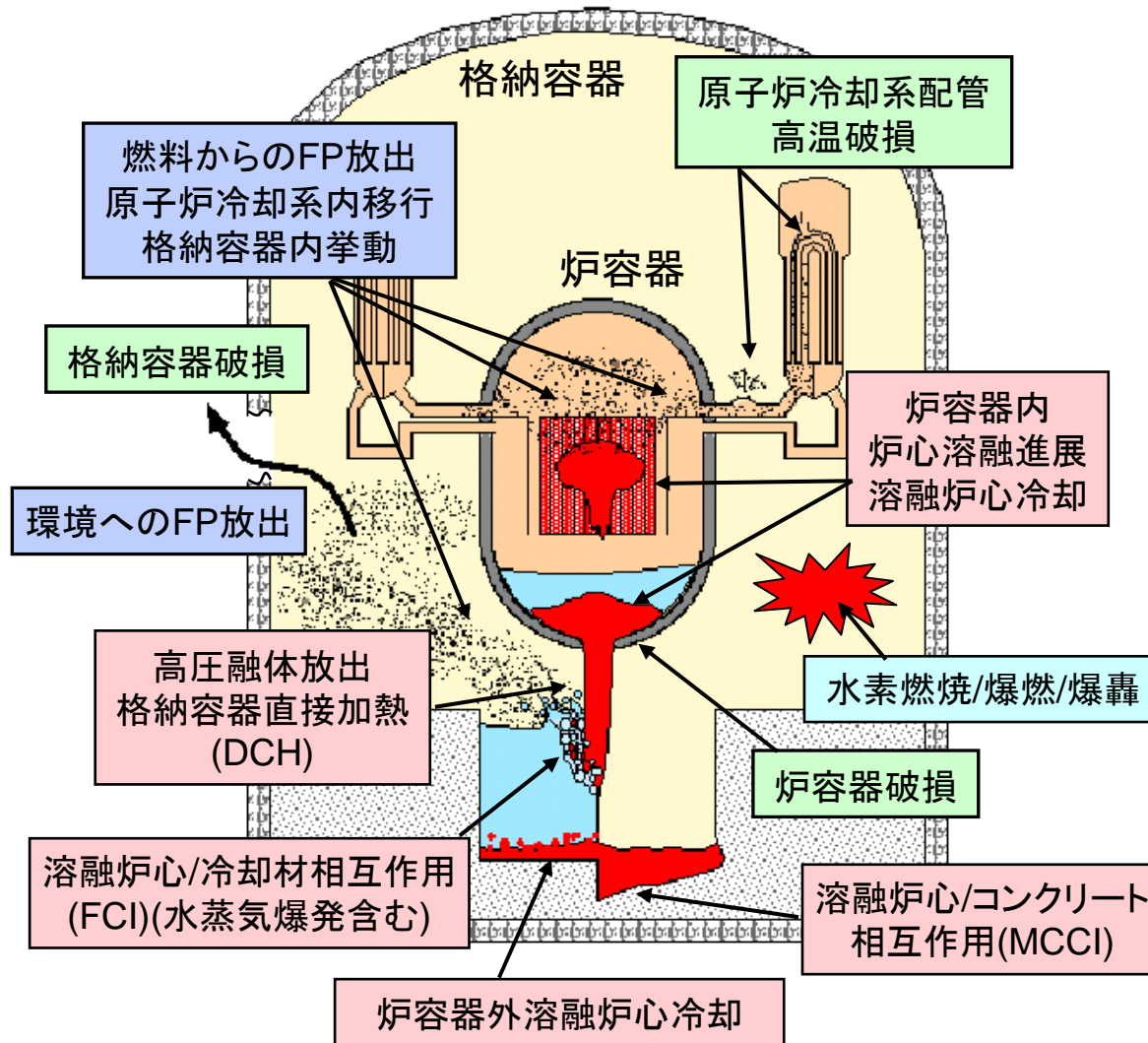
アクシデントマネジメント策  
の有効性評価

原子炉のリスクの定量化  
原子炉の持つ安全裕度の評価

格納容器イベントツリーの例



# シビアアクシデントの主な現象



止める

冷やす

閉じ込める

**溶融炉心の挙動**

- 主な熱源(崩壊熱)
- 冷却材、構造材との相互作用で機械的負荷(衝撃力)や格納容器加圧(ガス発生)
- 冷却の可否と防護壁への影響が重要

**核分裂生成物(FP)の移行挙動**

- ガス、エアロゾル等として移行
- 1次系から格納容器内へ、格納容器から環境への放出時期・量・化学形が重要(ソースターム)

**防護壁の耐性**

- とくに格納容器は最後の障壁
- 破損モード、時期が重要

シビアアクシデント時の現象解明のための研究

- 超高温の炉心融体、放射性物質の移動等、過酷環境下、複雑な系の熱流体力学、物理、化学の混合課題
- 多分野にわたる多くのマンパワー、合目的的な課題の限定が必要

# 燃料損傷・熔融

## 主要な燃料損傷実験と実験規模

| 実験名       | 実施機関/国   | 実験規模    |         |
|-----------|----------|---------|---------|
|           |          | バンドル構成  | 炉心長 (m) |
| OECD/LOFT | INEL/米国  | 121本    | 1.6     |
| PBF/SFD   | INEL/米国  | 32本     | 0.9     |
| ACRR      | SNL/米国   | 16本     | 0.9     |
| FLHT      | AECL/カナダ | 12本     | 3.6     |
| PHEBUS    | CEA/フランス | 21本     | 0.8     |
| NSRR      | JAERI/日本 | 4本      | 0.5     |
| CORA      | KfK/ドイツ  | 25本電気加熱 | 2.0     |
| TMI-2 R&D | GPUNC/米国 | 実事故     |         |



# FP挙動に関する主な実験

## 燃料からのFP放出

|             |         |
|-------------|---------|
| VI実験        | ORNL(米) |
| EVA/VERCORS | IRSN(仏) |
| VEGA        | JAEA(日) |

## 格納容器スプレイ

|            |             |
|------------|-------------|
| MISTRA     | CEA(仏)      |
| CARIDAS    | IRSN(仏)     |
| GIRAFFE-FP | NUPEC/東芝(日) |

## エアロゾルとヨウ素挙動

|           |             |
|-----------|-------------|
| TOSQAN    | IRSN(仏)     |
| ARTIST    | PSI(スイス)    |
| ICHEMM    | ECプロジェクト    |
| STORM     | JRC Ispra   |
| Falcon    | AEAT (英)    |
| COPIAT-AT | NUPEC/東芝(日) |
| WIND      | JAEA(日)     |

## プールスクラビング

|                  |              |
|------------------|--------------|
| PECA             | CIEMAT(スペイン) |
| Heron/ Sandpiper | AEAT (英)     |
| EPSI             | JAEA(日)      |

## ヨウ素化学

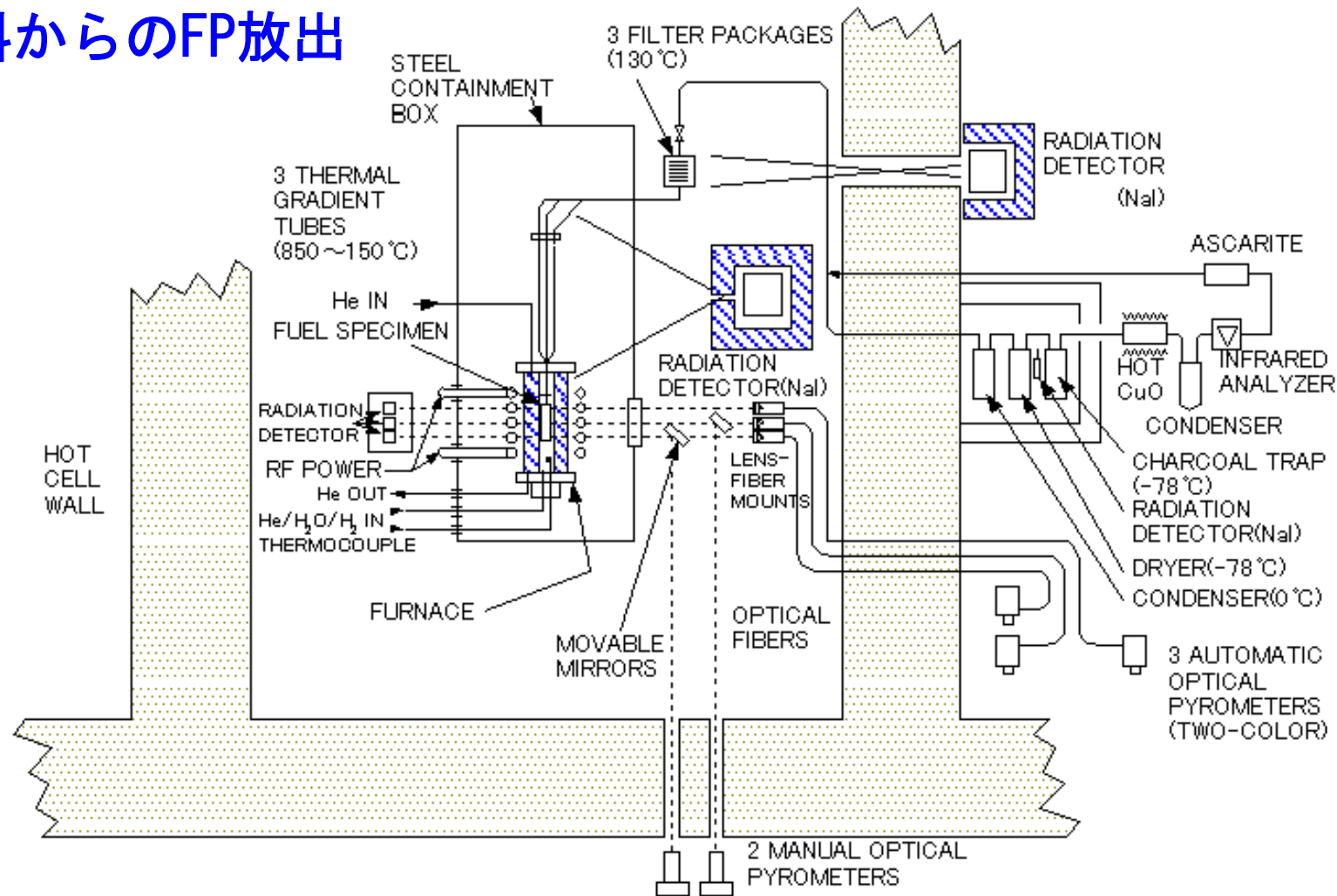
|                     |              |
|---------------------|--------------|
| RTF                 | AECL (カナダ)   |
| Harwell Co-60 cell  | AEAT (英)     |
| Iodine Release Exp. | JNES/JAEA(日) |

## 総合試験

|          |         |
|----------|---------|
| PHEBUS-F | IRSN(仏) |
|----------|---------|

CURRENT SEVERE ACCIDENT RESEARCH FACILITIES AND PROJECTS,  
OECD/NEA/CSNI/R(2004)6より

# 燃料からのFP放出

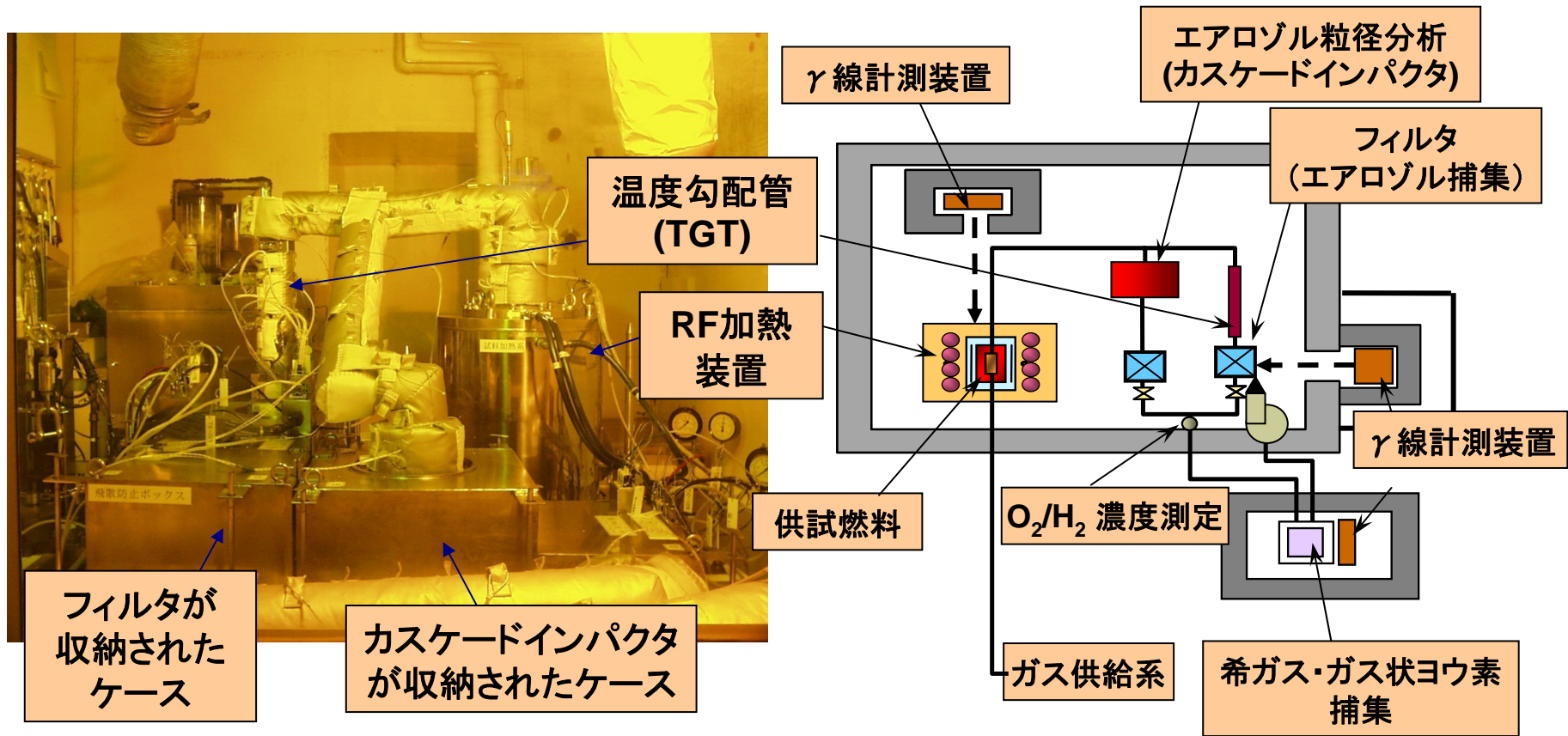


## ORNLのV I 実験装置系統図

[出典] 杉本 純ほか：シビアアクシデント研究に関するCSARP研究の成果、  
日本原子力学会誌、39(2), p.131(1997)

[参考] : ATOMICA<<http://www.rist.or.jp/atomica/>>

# 照射済み燃料からのFP放出実験 (VEGA) (原子力機構)

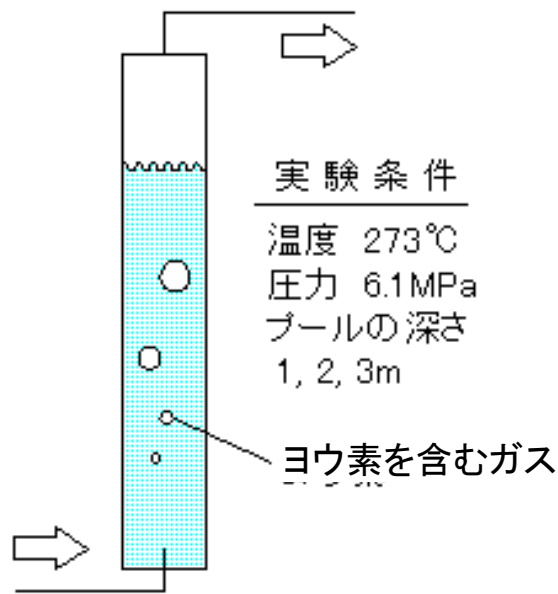


- 特徴
- 最高温度; 3150K
  - 最高圧力; 1.0MPa
  - 高燃焼度UO<sub>2</sub>燃料及びMOX燃料からの低揮発性FP及びアクチニド放出
  - 温度、圧力、雰囲気の影響を調べる

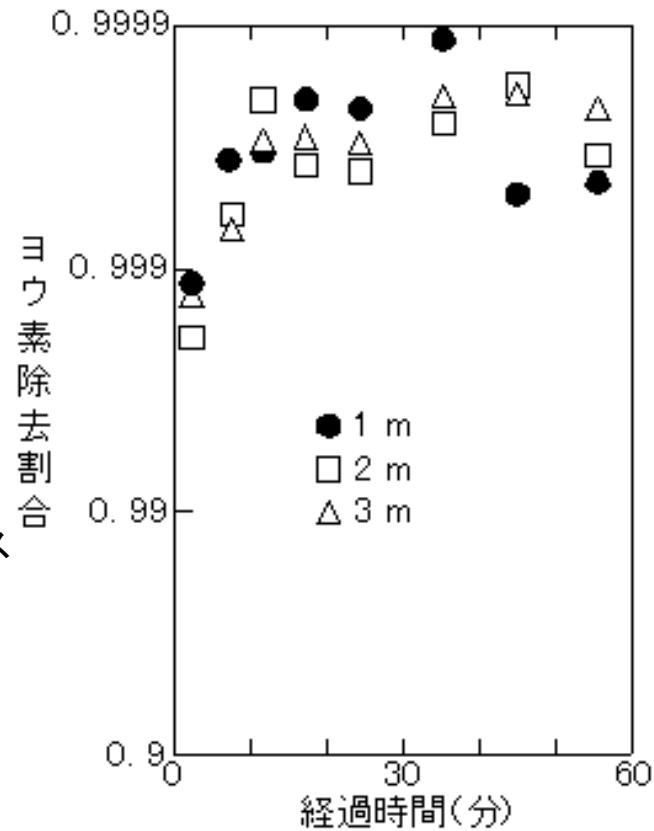
放出メカニズムの  
 説明  
 放出モデルの改良

ソースターム評価にお  
 ける不確かさを低減

# プールのスクラビング



装置模式図

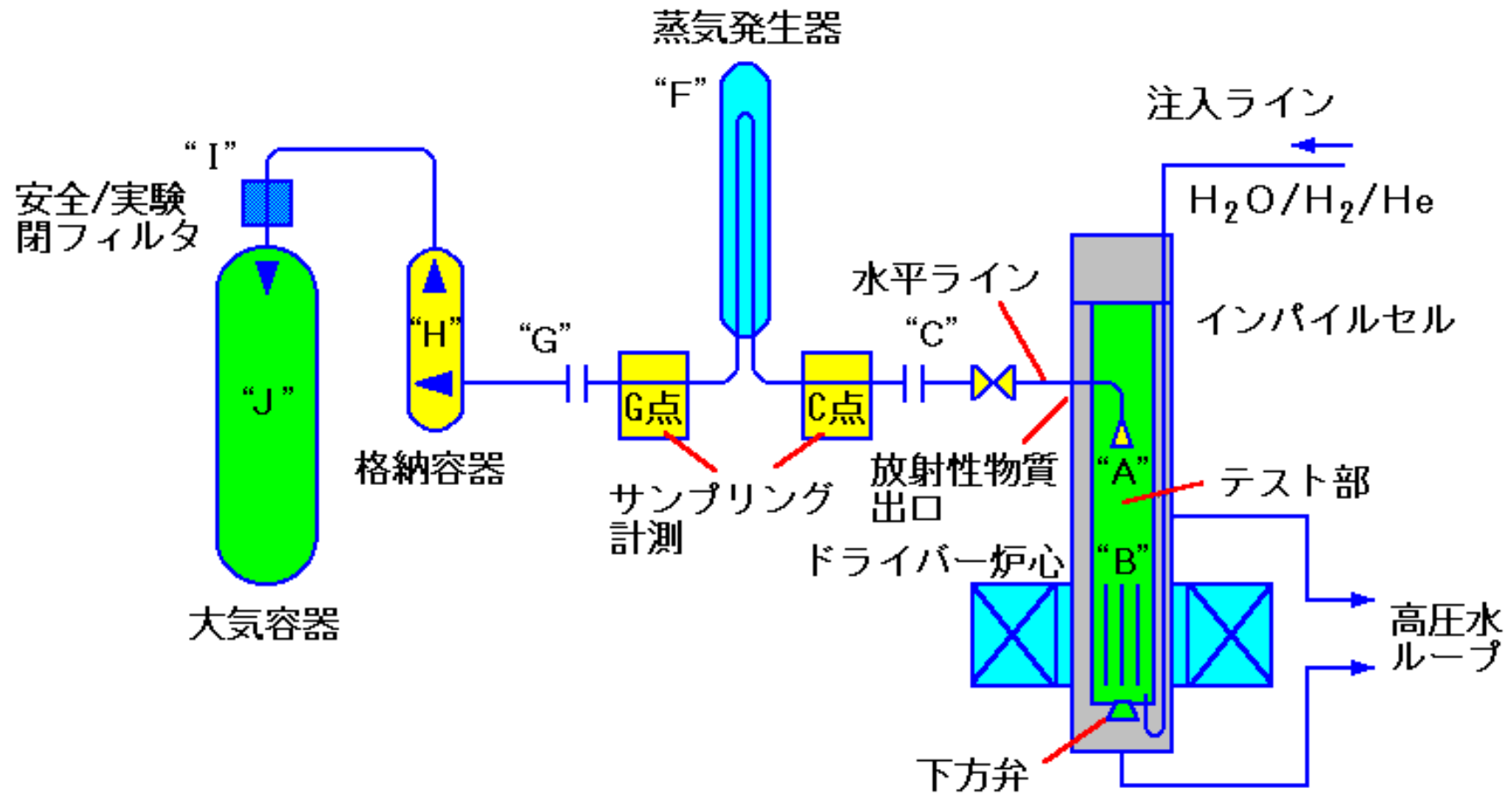


実験結果

## 原研のプールのスクラビング装置の模式図と実験結果

[出典] 西沢 嘉寿成ほか：軽水炉のシビアアクシデント研究の現状、  
 原子力学会誌、35(9), p.781(1993年)

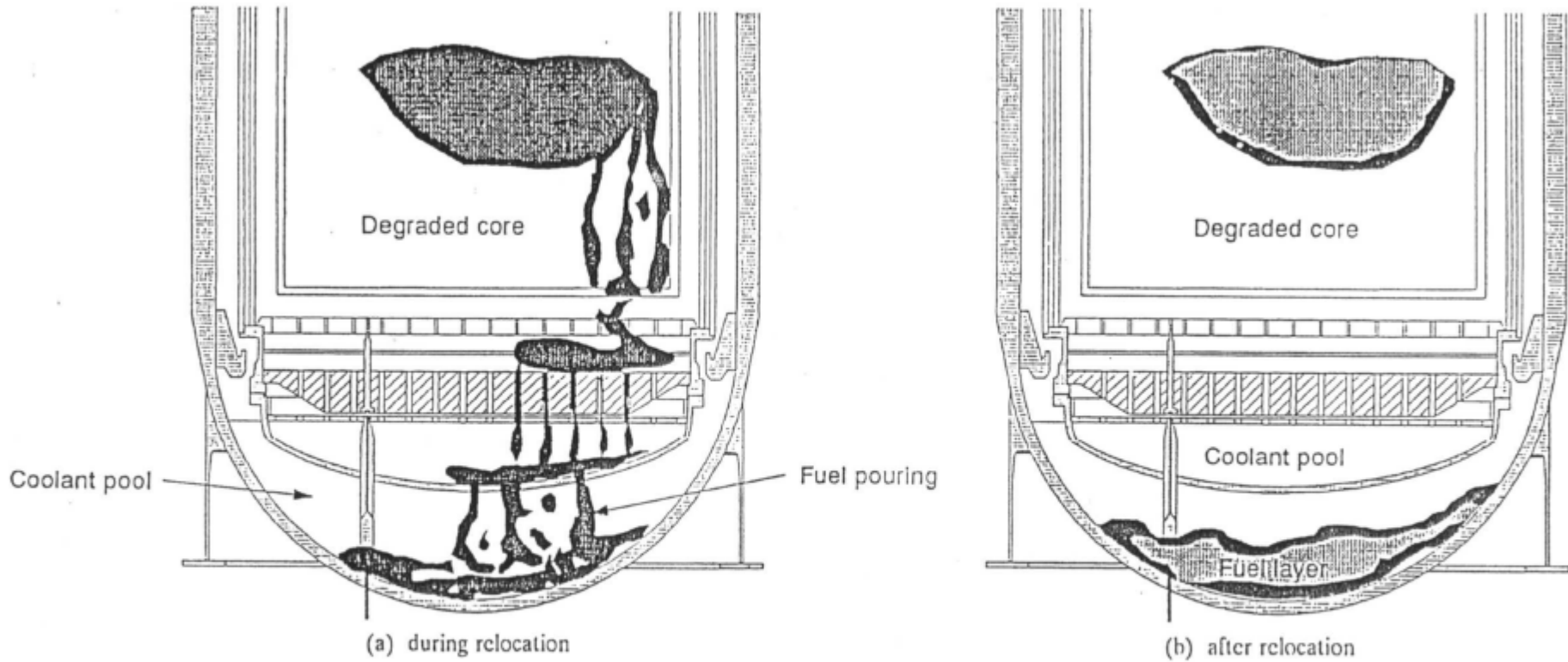
# Phebus-FP実験



PHEBUS-FP計画実験装置の概要

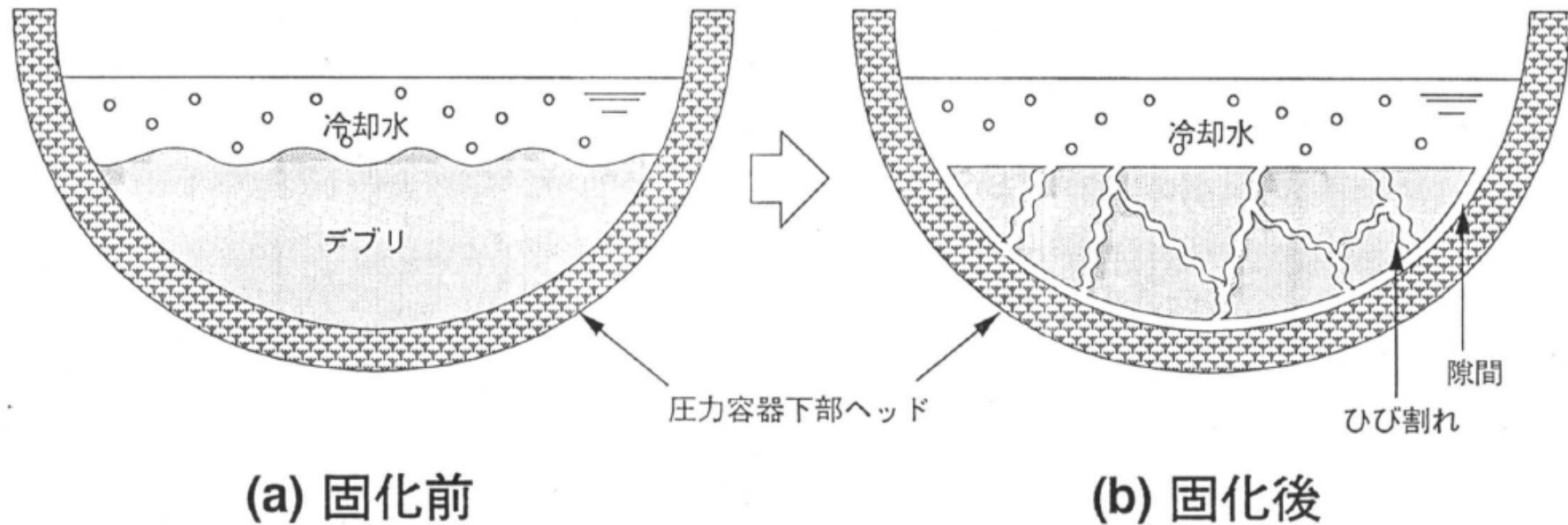
[出典] M.Schwaz and von der Hardt : Proc. Twenty-Third Water Reactor Safety Information Meeting, Maryland, USA, p254 (1995)

# 圧力容器の健全性



デブリの下部ヘッドへのリロケーション

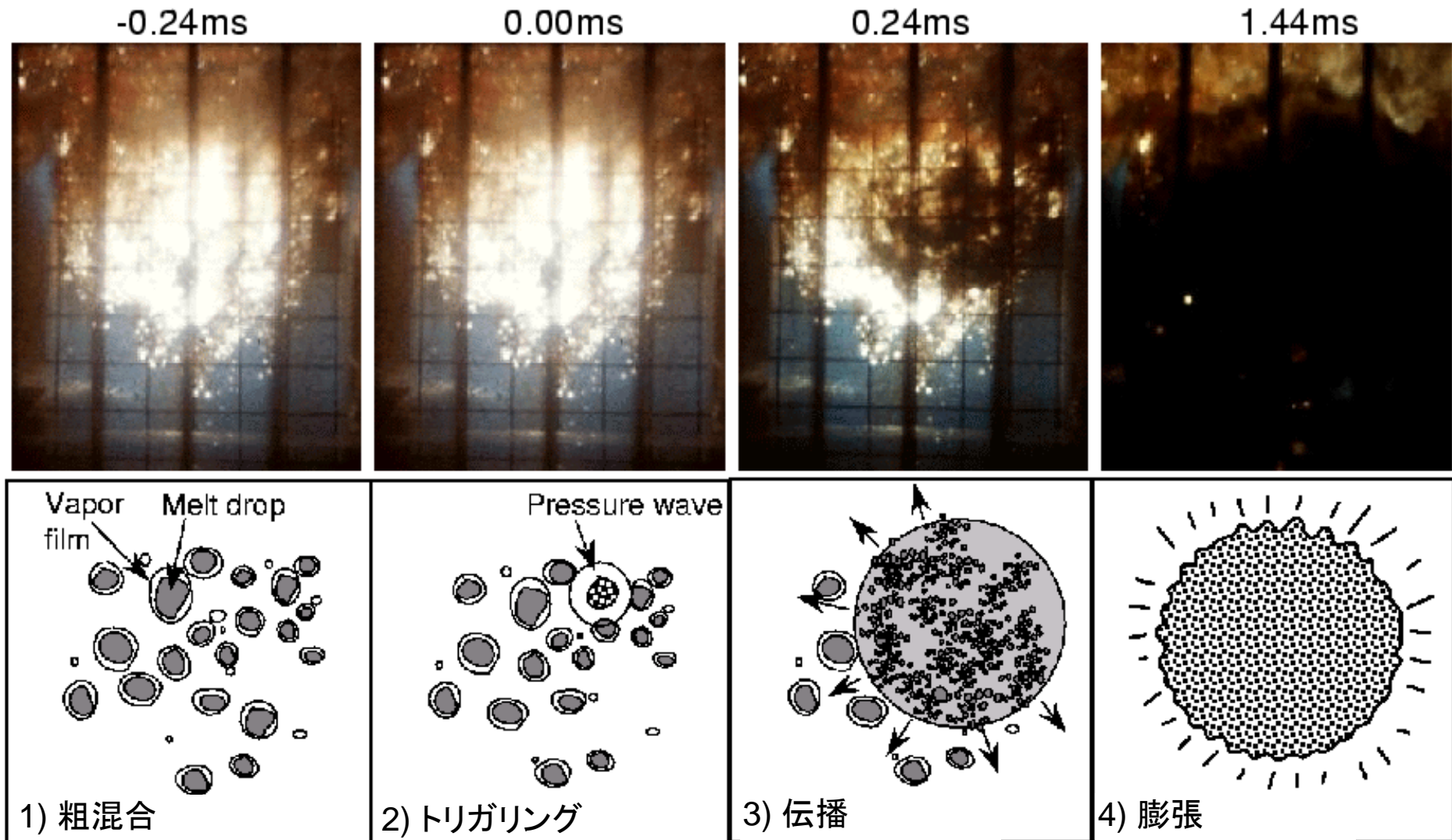
# 推定されている下部ヘッド デブリ冷却メカニズム



Reference: R. E. Henry and D. A. Dube, "Water in the RPV: A Mechanism for Cooling Debris in the RPV Lower Head", Proc. of the Specialist Meeting on Selected Containment Severe Accident Management Strategies, pp. 93-104, June 13-15, 1994, Stockholm, Sweden

# 格納容器内挙動

## 水蒸気爆発の高速写真

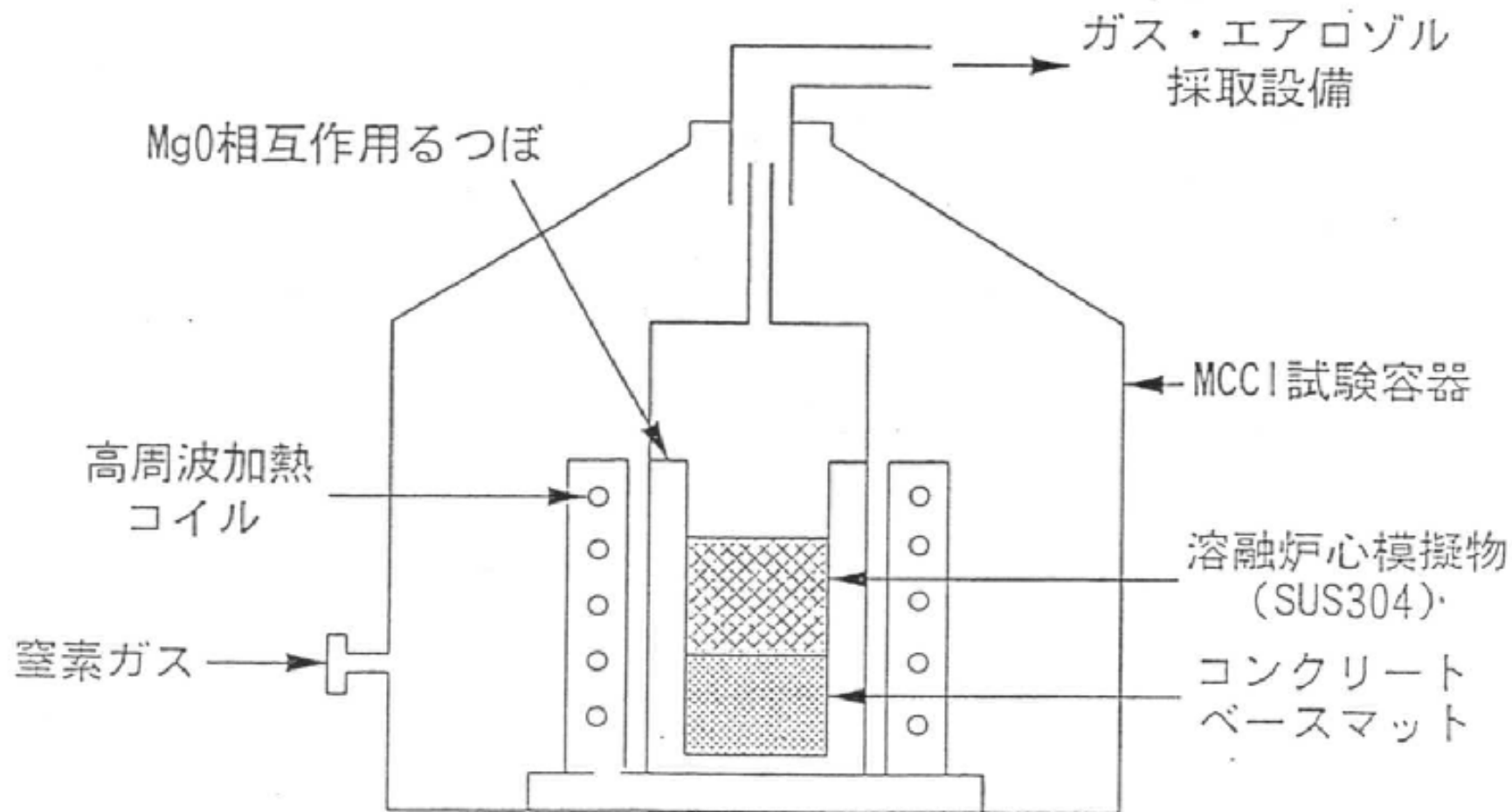


■ ALPHA STX-19: 20kgのテルミット溶融物(Fe+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2700K)を室温の水中に投下  
[Yamano et al., Nuclear Engineering & Design, 155, 369-389, 1995.; Moriyama et al., JAERI-Data/Code 99-017]



# 溶融炉心・コンクリート反応(MCCI)

## ALPHA計画MCCI実験装置の概要



# シビアアクシデント解析コード

- シビアアクシデント時のプラント全体の挙動を解析
- 熱水力挙動と炉心損傷、核分裂生成物 (FP) 移行等の現象論モデルを統合
  - ・ 現象論的研究の成果が集大成
- 確率論的安全評価 (炉心損傷から格納容器破損まで) において、個々の事故シナリオにおける事故進展の時間スケール、格納容器破損モード、核分裂生成物の放出量の評価に利用
- 例

|                |            |
|----------------|------------|
| ・ MAAP         | 米国FAIで開発   |
| ・ THALES-2     | 原子力機構で開発   |
| ・ ASTEC        | EUで開発中     |
| ・ MELCOR       | 米国SNLで開発   |
| ・ SCDAP/RELAP5 | 米国INEELで開発 |
| ・ IMPACT       | NUPECで開発   |

より簡略なモデル  
計算速度、可搬性は優る  
確率論的評価、防災対應用



より詳細なモデル  
計算速度、可搬性は劣る  
詳細な現象解析・推測用

# 福島事故までのSA研究関連の状況

## ■ 研究成果の整理と利用

- 規制への寄与：安全目標の確立、リスク情報の活用において、PSAとそれを支えるシビアアクシデント研究成果が重要
- リスク評価の手順標準化への寄与：レベル2 PSAにおける現象評価手法提示
- 将来型原子炉開発への寄与：設計におけるシビアアクシデントの考慮（民間自主基準の策定，1999年）
- 国際的動向を踏まえた、シビアアクシデントの規制上の位置づけ

## ■ さらなる研究課題

- シビアアクシデントを考慮した次世代炉格納容器設計の評価、新たなAM策の検証など
- リスク評価上の不確かさの低減
- 原子力防災対策の観点からの研究

## ■ 国際協力

- SARNET (EU)、OECD/NEA/CSNIにおける共同研究など
- 研究規模縮小傾向、装置と人材の有効利用が重要

## シビアアクシデント研究で残された課題(福島事故前)

2. Jean-Pierre Van Dorsselaere, B.R. Sehgal 他, Sustainable integration of EU research in severe accident phenomenology and management, Nuclear Engineering and Design, 241 (2011) 3451-3460

\* 18課題を”high priority”(6), “medium priority”(4), “low priority”(5), “could be closed”(3)の4カテゴリーに分類

### ■ high priority

- ✓ 再冠水時の炉心冷却性とデブリ冷却
- ✓ 溶融炉心コンクリート反応中の溶融プール形状と上部注水による溶融炉心冷却性
- ✓ 格納容器内水素混合・燃焼
- ✓ 溶融炉心の水への移動、圧力容器外水蒸気爆発
- ✓ ソースタームに及ぼす高燃焼度/MOX燃料の酸化の影響
- ✓ 原子炉冷却系及び格納容器内のヨウ素化学

### 3. 福島事故のシビアアクシデント研究への教訓

1. 日本原子力学会 原子力安全調査専門委員会 (2011.5.9)  
「アクシデントマネジメントが不十分であった可能性がある」  
「格納容器外の水素爆発は考慮されていなかった」  
「シビアアクシデント研究を推進するとともに、人材育成につとめる」
2. 原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本政府報告書 (2011.6, 2011.9)  
「アクシデントマネジメント (AM) 対策の徹底」  
「水素爆発防止対策の強化」  
「格納容器ベントシステムの強化」  
「放射性物質放出の影響の的確な把握・予測」
3. 大前研一プロジェクト最終報告書 (2011.12.21)  
「何があっても過酷事故は起こさないという設計思想に転換すべき」
4. 事故調査・検証委員会中間報告 (2011.12.26)  
「不適切であった津波・シビアアクシデント対策」
5. 米国原子力学会 福島第一ANS委員会報告書 (2012.3.8)  
「極低確率自然現象のハザード」  
「多数基サイトへの考慮」  
「シビアアクシデントマネジメントガイドの見直し」  
「事故診断ツールの開発」

## 4. 福島事故を踏まえたシビアアクシデント研究の展開

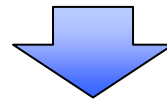
### ■ 新たな/強化すべき研究課題

- 福島事故における損傷炉心調査・分析
- 外部電源を必要としない受動的炉心・格納容器冷却システムの開発
- 水素挙動（分布、燃焼）解析、水素対策（再結合器）の検討
- 格納容器ベントの放射性物質除去機能の強化
- シビアアクシデント解析機能の高度化、ポータブル化
- シビアアクシデント発生後の炉心冷却、閉じ込め手法の検討
- 避難を必要としない次世代炉格納容器設計の評価

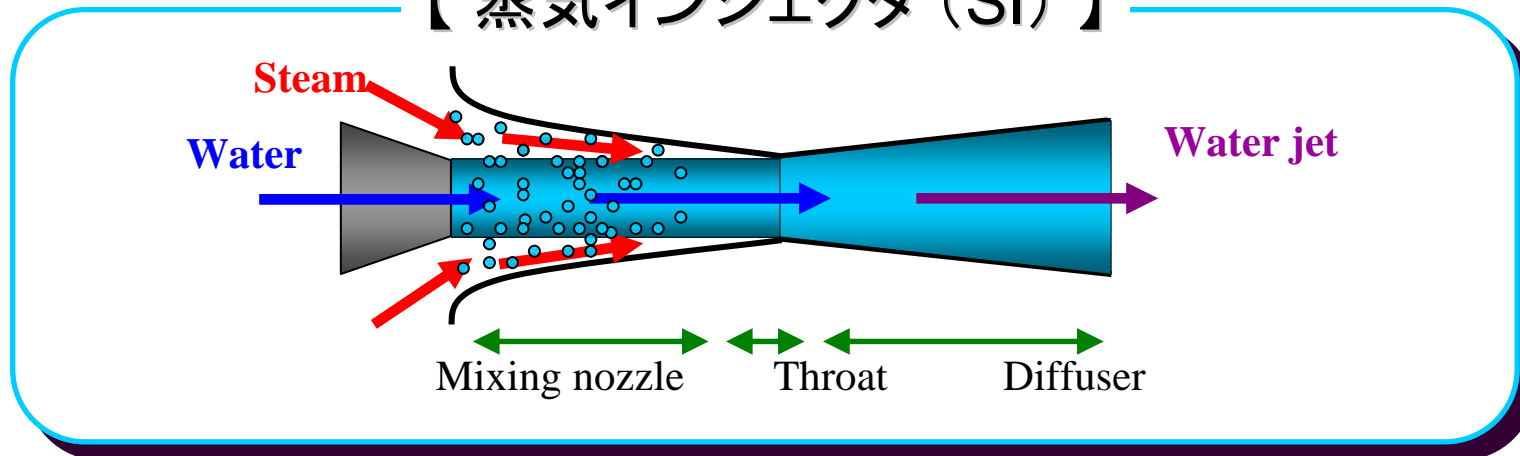
# 研究背景

阿部豊(筑波大)、超音速蒸気インジェクタの作動特性に及ぼす水噴流界面挙動の影響、原子力学会、2011.9より

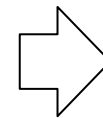
外部電源喪失からの冷却材喪失による炉心損傷事故への対策  
シビアアクシデント(SA)の防止と影響緩和  
静的安全システムの構築が不可欠



## 【 蒸気インジェクタ (SI) 】



水と蒸気の直接接触凝縮により  
駆動する静的噴流ポンプ



- 外部電源が不要
- 構造がシンプルかつコンパクト
- 高い伝熱性能を有する

## 5. まとめ

- ◆ 内外で精力的に実施されたシビアアクシデント研究の成果はアクシデントマネジメント対策に反映。福島事故では一定の役割を果たしたものの、技術的には不十分
- ◆ 福島事故を踏まえ、福島事故における損傷炉心調査・分析、受動的冷却システム、水素対策、格納容器ベント、シビアアクシデント解析、事故後の炉心冷却や閉じ込め手法などについて研究開発を強化することが必要
- ◆ 福島事故の教訓を世界が共有することにより、既存炉の安全レベルを格段に向上させるとともに、将来は原理的に避難が不要な次世代原子炉を実現することが必要