
シビアアクシデントを考慮した 熱水力安全研究計画

(独)日本原子力研究開発機構 安全研究センター
原子炉安全研究ユニット 熱水力安全研究グループ

佐藤 聡



背景

- 福島第一原子力発電所の事故では、地震と津波による全交流電源喪失でシビアアクシデントへ発展、格納容器の気体漏洩により建屋が水素爆発。
- 事故を受け、原子炉等規制法第一条の規制範囲が拡大され、シビアアクシデントも法規制範囲に含むことが明確化された。(原子力規制委員会設置法附則15)



熱水力安全研究の方針

- 設計基準を超える事故時の原子炉や冷却装置の状態・事故原因を解明し、福島事故対策に資する研究を実施
- 現行のBWRやPWR、新型軽水炉を対象にしたシビアアクシデント対策機器、パッシブ安全機器など、安全機器・設計のシビアアクシデント回避および影響緩和の有効性を確認
- 実証実験を補う信頼性の高い解析機能を持つ新たな解析手法を整備

研究計画

シビアアクシデントの回避 + 緩和に用いる 熱水力安全評価技術の開発・高度化

格納容器挙動実験

- シビアアクシデントについての安全評価及びアクシデントマネジメント策の評価に資するため、格納容器内熱水力挙動とエアロゾル挙動に係る実験データベースを構築するとともに評価手法を整備

炉心及び冷却ループ内熱流動実験

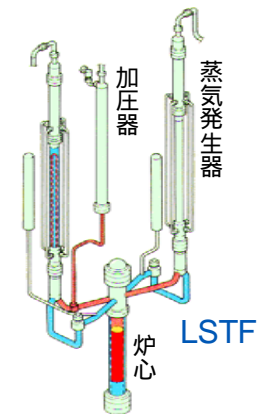
- 複雑な過渡変化を伴う3次元の伝熱流動に関する詳細データベースを高精度実験で取得し、シビアアクシデントの前兆までの現象を解明

大型非定常実験装置(LSTF)を用いた実験

- 全電源喪失(SBO)時に生じ得る熱水力現象の解明と炉心冷却確保に必要なAM策の検討など

数値解析技術の高度化

- 安全機器やアクシデントマネジメント策の有効性など、事故時に炉心冷却を確保する軽水炉の総合的な実力を、システム解析によって正確に評価する国産の安全評価手法の開発を支援



格納容器挙動実験

格納容器挙動研究の現状

□ OECD/NEAプロジェクトを通じて、格納容器挙動(容器冷却, 水素, エアロゾル, ヨウ素等)に係る実験及び解析的研究を精力的に実施. TOSQAN, MISTRA, THAI.

□ 水素挙動のコードによる検証

ISP-47 : 容器内の水素の密度成層と
その後の放出蒸気による成層浸食

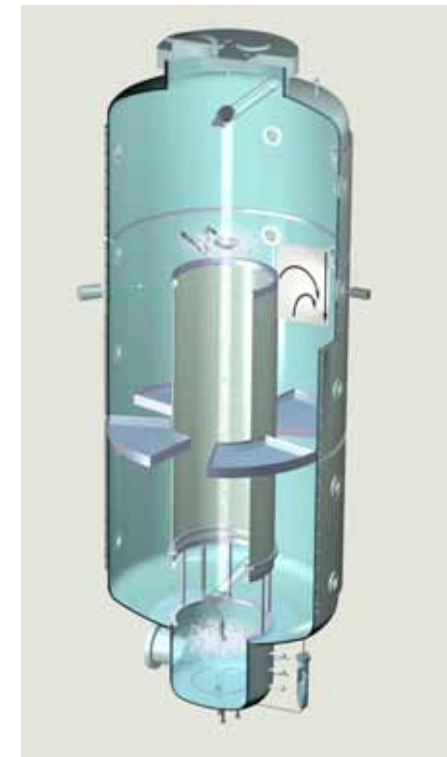
ISP-49 : 水素燃焼
と影響伝播



TOSQAN(7m³)



MISTRA(99.5m³)



THAI (60m³)

10m
4

JAEAが行う実験に反映すべき項目

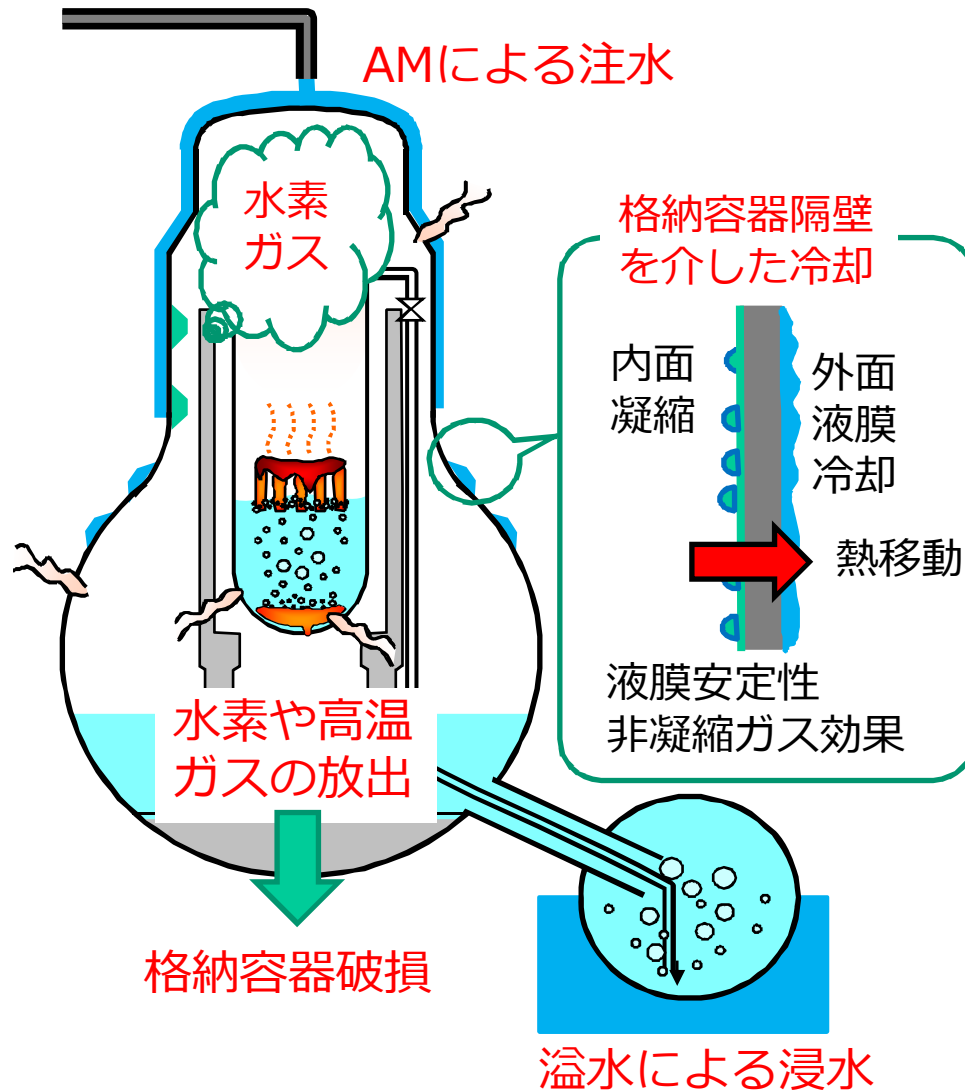
□ 従来研究に不足する実験データ取得・評価技術の整備

- ✓ **水素ガス分布**：乱流速度場の計測が重要。遷移領域内の密度差やブルーム挙動，凝縮の空間分布，ミストを伴う気相速度等。
- ✓ 事故条件をカバーする**広い条件でのデータベース**の構築。
- ✓ 3次元詳細計測：CFD検証用データの取得。

□ 福島事故との関連

- ✓ **格納容器破損**：容器破損がシール部や貫通部の**過熱**による損傷が原因と推定。米国ではSA時の容器内局所温度の評価が規制要件。
- ✓ **格納容器冷却**：2号機トーラス室で溢水による冷却が指摘。AMとしての容器の**外面からの冷却**の有効性。
- ✓ **スクラビング**：圧力抑制プール温度は**早期に飽和**になった。低サブクール水で，高温に過熱されたキャリアガス条件での実験は少ない。

JAEAが行う格納容器内熱水力挙動実験



目的

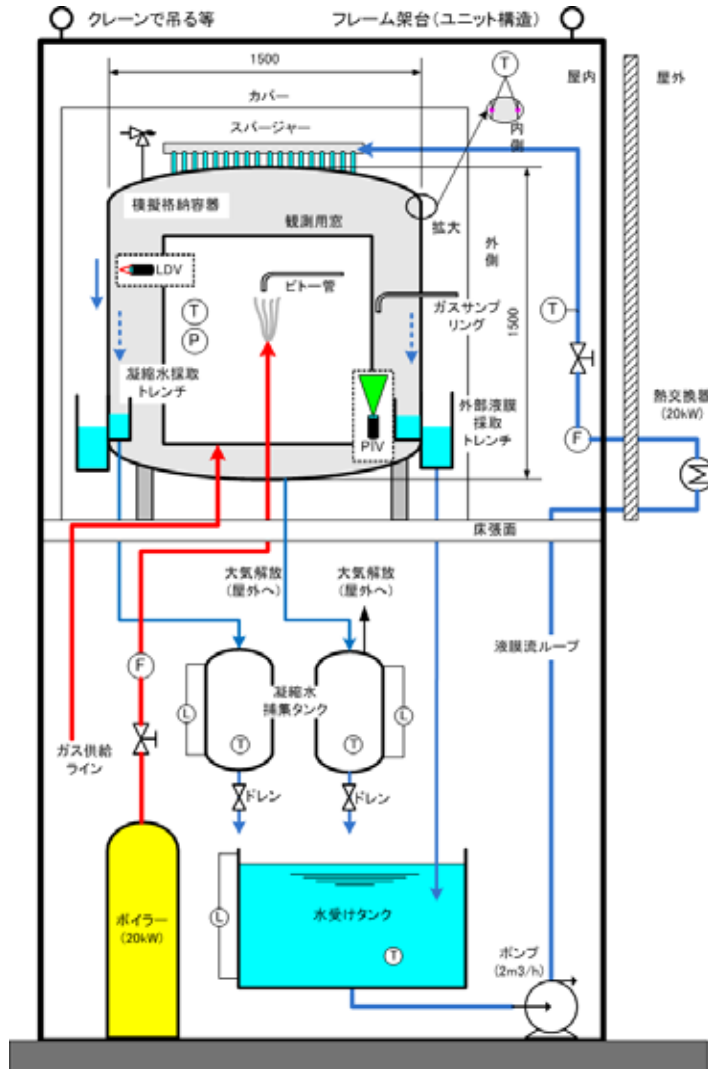
- 格納容器過熱破損の評価
- 水素爆発の評価
- アクシデントマネジメント策の評価

研究項目

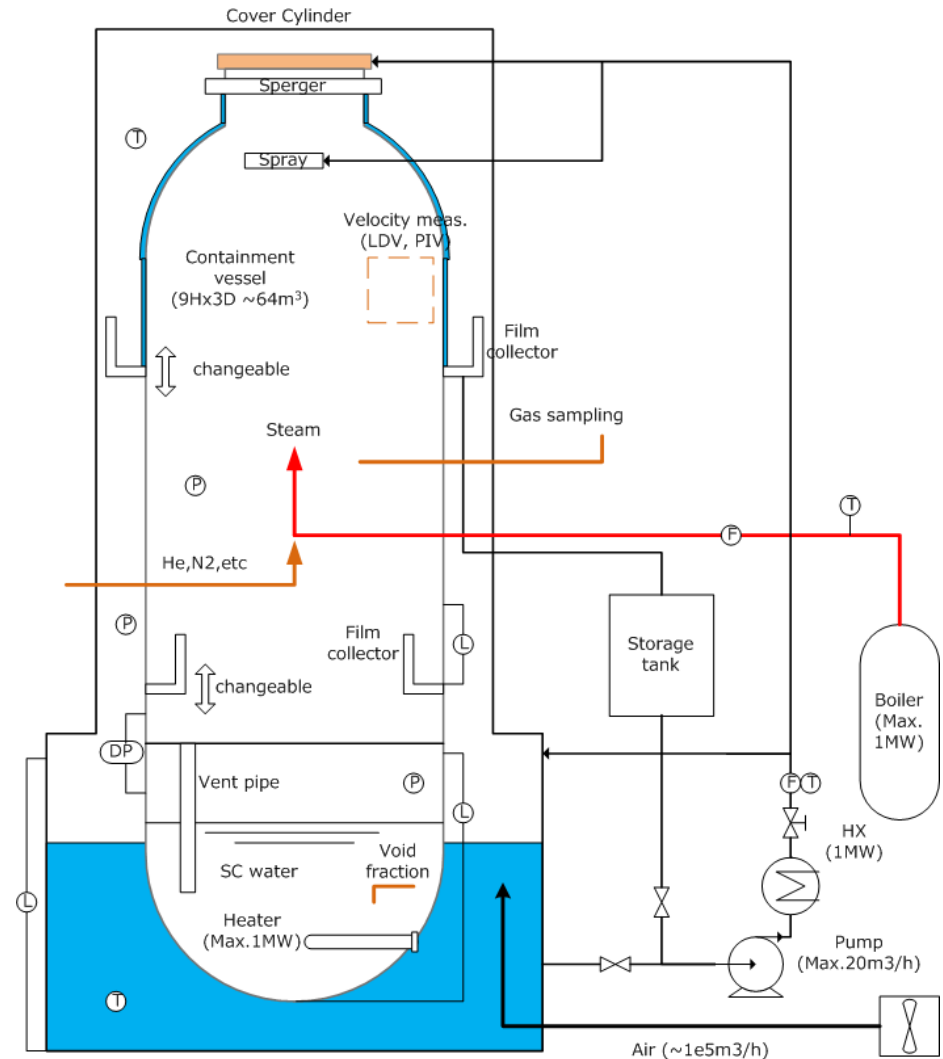
- 三次元的計測による詳細データベースの整備
 - ✓ 温度分布：炉容器破損孔からの噴流、格納容器冷却条件等の影響
 - ✓ ガス濃度分布：成層化、乱流混合の影響
- AM策の効果：外面冷却の効果

試験装置の概要

予備試験装置(H24年度製作予定)



大型試験装置(H25年度以降)



炉心及び冷却ループ内熱流動実験

研究概要・目的

対象：シビアアクシデントの前兆までの現象

事故時の局所現象を模擬・再現する高精度実験

- 炉心冷却や主要機器での事故時現象 (過渡変化、相互連関)
 - 安全評価上不確かさの大きい現象に特化
- 多次元伝熱流動、構造との相互作用、安定性の考慮
- スケーリング (実規への外挿性 = サイズや流体物性の影響) を考慮

国産の熱水力安全評価コードの開発・支援

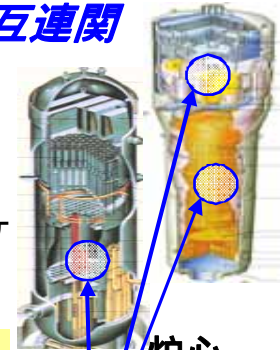
- 設計基準事象 + シビアアクシデントまで (炉心溶融以外)
- システム解析 + 局所詳細解析
JNESを支援 JAEAが開発

モデルの開発 検証と妥当性の評価・確認

詳細データベース

- ❖ 計測技術を駆使

マルチスケール相互連関

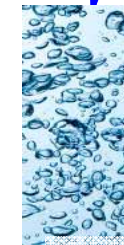


炉心

水位変動・露出
過熱と冷却
沸騰二相流
急過渡 など

主要機器

対向流制限
温度成層、対流
相分離 など



沸騰二相流
(微細流動の例)

- 軽水炉事故の高精度評価
- アクシデントマネジメント策の有効性評価
- 新型安全機器の性能確認
- 規制庁の判断を支援 + 軽水炉の安全性向上

実験内容(1)

大容量の蒸気源を有する熱流動ループを製作

- 炉心コンポーネント実験

燃料バンドルの過熱～冷却に至る過程での伝熱流動特性を詳細に模擬・再現

- ✓ 水位の変動・露出、過熱・冷却・凝縮
- ✓ 炉心上部対向流制限、急速過渡など

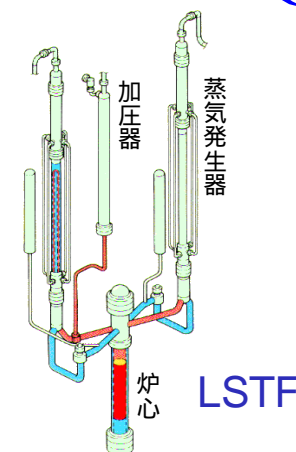
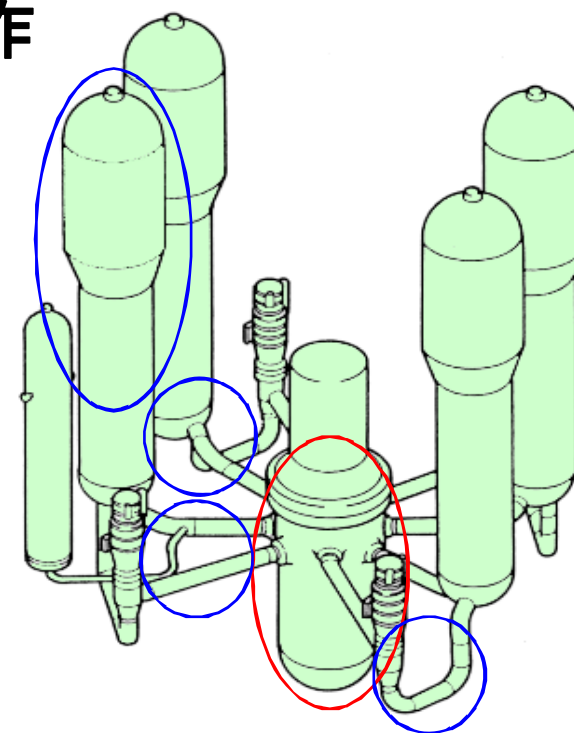
- 主要機器コンポーネント実験

炉心冷却や機器の健全性に関わる局所流動を詳細に模擬

- ✓ SG入口プレナム・伝熱管等における対向流制限、温度成層、流体混合、自然対流、相分離など



- ❖ 重要度ランク表(PIRT) や LSTF実験等との連携
- ❖ 不確かさの大きい現象に特化
ex. 大破断LOCA時のブローダウンピーク



実験内容(2)

● スケーリング詳細実験

機器のサイズや物性の影響に係るスケーリングを考慮した実験

- ✓ 流動特性の詳細な計測・評価
- ✓ 計測技術の開発

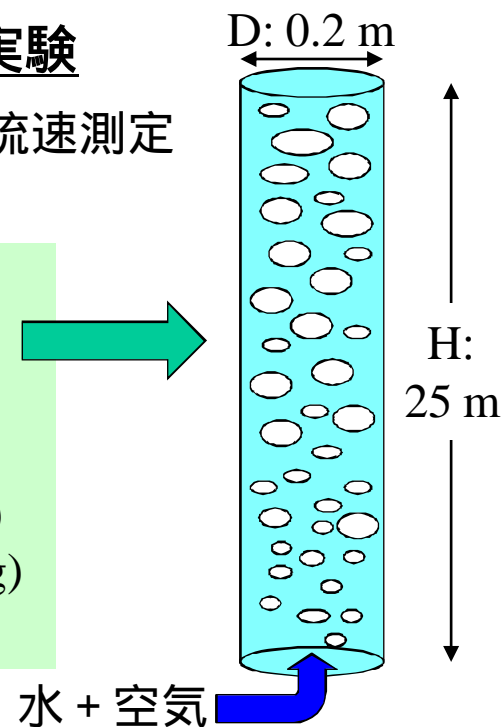
➡ CFDグレードのデータベースを整備

実験例: 大口径垂直管内二相流動実験

- ・ボイド率分布、界面形状、液相・気相流速測定
- ・流動様式線図の取得

計測技術の例

高速度カメラ
ワイヤメッシュセンサー
触針式ボイドセンサー
X線CT
PIV (Particle Imaging Velocimetry)
UVP (Ultrasound Velocity Profiling)
LDV (Laser Doppler Velocimetry)



数値解析技術の高度化

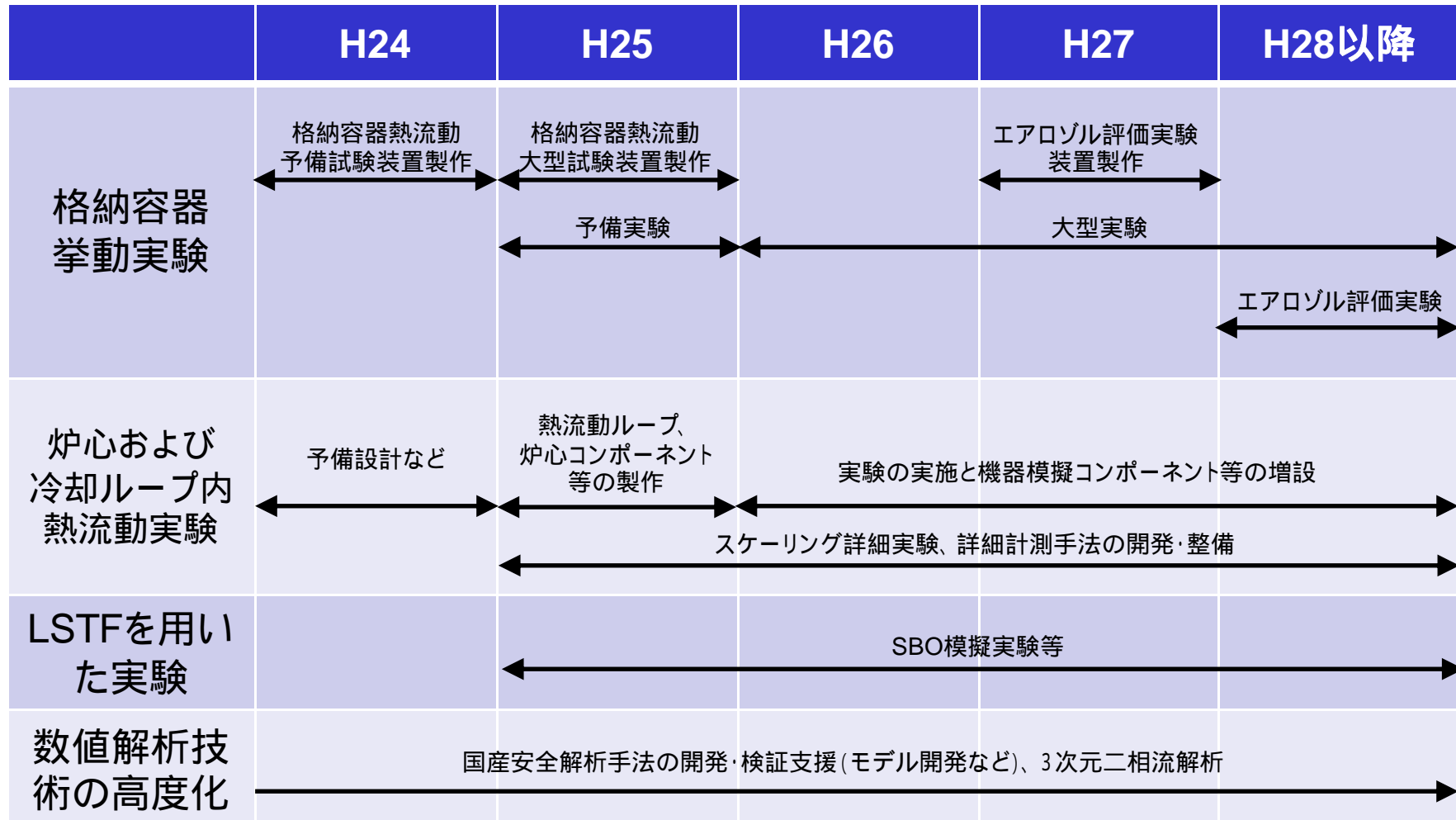
- ◆ 国産コード開発と V&V (検証と妥当性確認)
- ◆ 局所、詳細流動解析手法の整備

- システム解析最適評価 (BE) コードのモデル開発や検証を、JNESによるコード開発と同期・連携して実施
 - ✓ 高温高圧の3次元蒸気・水二相流動
 - ✓ 炉心冷却
 - ✓ 凝縮などの相変化を伴う
多次元低圧ガス流動 (格納容器内)

1次元～疑似3次元で解析する技術の開発支援
- 水-蒸気 3次元二相流動を高精度・高分解能で表現するCFDなど詳細解析手法を独自に開発し、詳細実験データに基づいて検証
 - ✓ 高温高圧の3次元蒸気・水二相流動
 - ✓ 凝縮などの相変化を伴う
多次元低圧ガス流動 (格納容器内)

3次元・高空間分解能で予測する解析技術の開発
- 事故現象の詳細な検討 ➡ アクシデントマネジメント策の検証や安全設備などの性能確証に適用

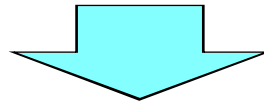
スケジュール



まとめ

シビアアクシデントの回避 + 緩和に用いる熱水力安全評価技術の開発・高度化を目的とし、以下を実施

- 格納容器挙動実験
- 炉心及び冷却ループ内熱流動実験
- LSTFを用いたSBO実験等
- 数値解析技術の高度化



- 福島事故対策
- 安全機器・設計のシビアアクシデント回避及び影響緩和の有効性確認
- 国産BEコード開発



補足用

ISP-47による重要項目の指摘

- 成層の崩壊：成層の強さ（崩壊の抵抗）に影響する上部と下部の密度差の影響。
- プルーム，ジェット：慣性の弱い浮カプルームも成層に強く影響する。壁や障害物の影響も。
- 流れ全体に対する凝縮の効果：凝縮によるHe挙動への効果や壁での凝縮分布（非凝縮領域含む）の影響。
- 推奨する計測対象
 - ✓ 遷移領域を含む気体密度分布。
 - ✓ ジェット及びジェット→プルームの速度や乱流強度。
 - ✓ 遷移領域内のプルーム挙動。
 - ✓ 壁モデルの改造に資する壁近傍での速度，濃度分布。
 - ✓ その他：凝縮の空間分布，ミストを伴う気相の速度・乱流。ミスト内液滴密度，壁面熱流束など。

プールスクラビング(エアロゾル除去)

- ソースタームに強く影響.
- 福島事故との関連：SCプール温度は**早期に飽和**になった。サブクールが小さく、高温に過熱されたキャリアガス条件での実験は少ない。
- AMとしての**フィルタードベント**評価の整備にも貢献。管冷却型PCCSのエアロゾル対策にも発展可能。
- シビアアクシデントを考慮した条件設定が重要。
 - ✓ **Churn-turbulent条件**：CFDコード検証として、流動の3次元計測とカップルさせた計測なども重要。
 - ✓ **様々なパラメータ**：バブルサイズ、ガス速度、ガス滞留時間、気液階面積。
 - ✓ エアロゾル移行の**分離効果試験**：オリフィス衝突、熱影響、拡散泳動、沈降、拡散衝突。

既往研究の問題点

- THAI実験の解析：CFDを含む大部分のコードはHe密度成層を再現できず，容器内密度を一様に計算（ISP-47）.
- 高温蒸気や高温ガス噴出時の周囲流体との混合や成層浸食など，乱流が支配する現象の**予測手法が未確立**.
- CFDグレードのデータ，事故条件でのデータが不足.

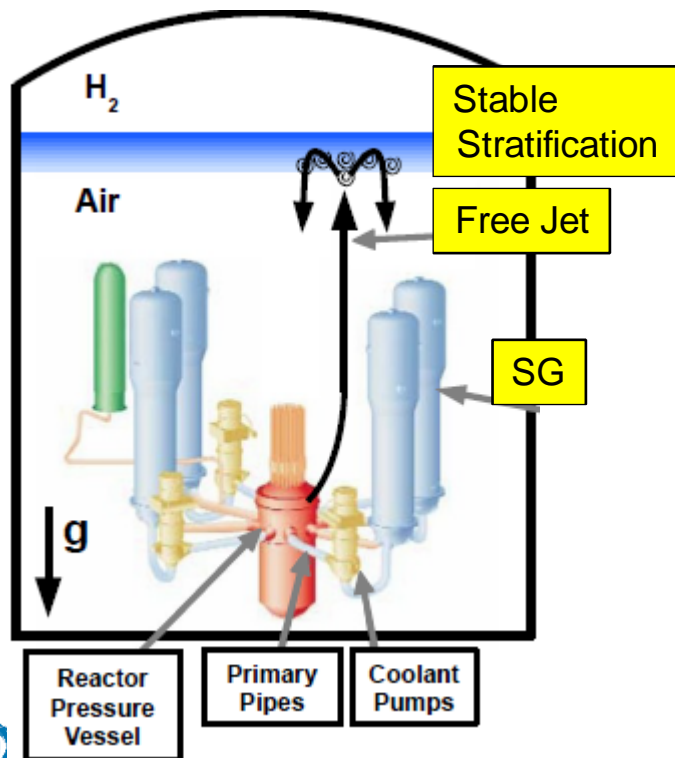
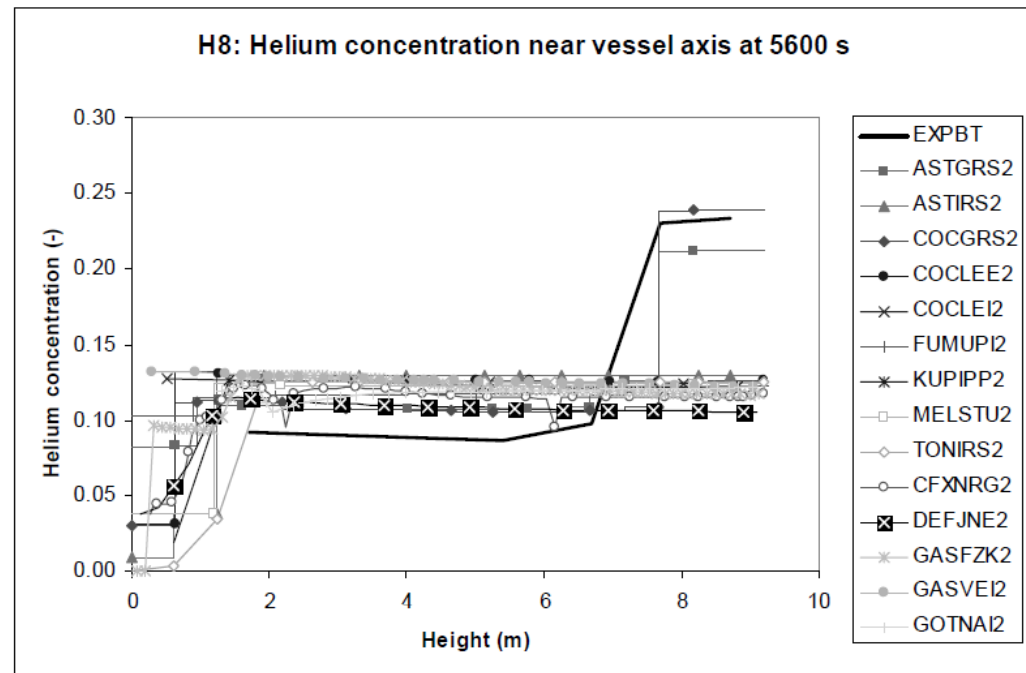
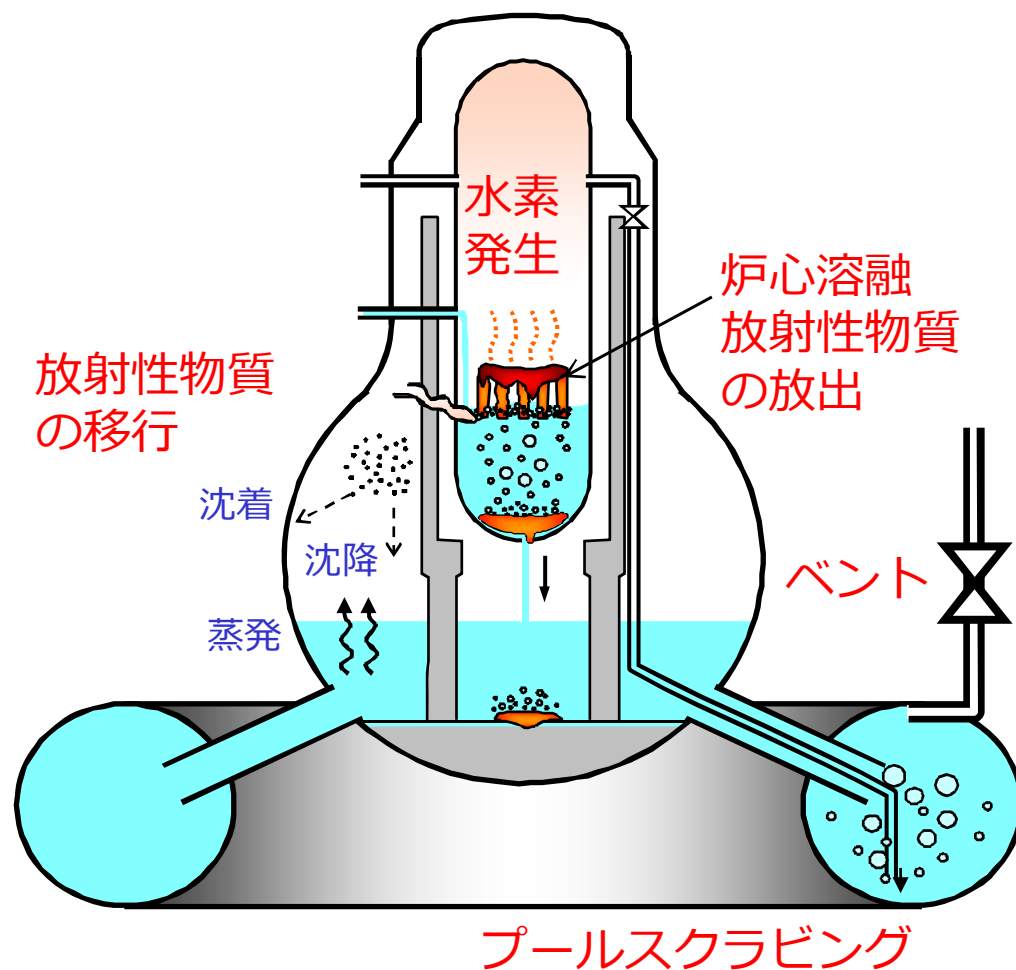


Figure 31. Open/blind ThAI predictions, vertical helium concentration profiles in phase III



エアロゾル評価手法の整備に関する実験



重要性

- ソースタームに強く影響。福島事故では、環境中に放射性物質が大量に放出され土壌汚染の原因となった。

従来研究

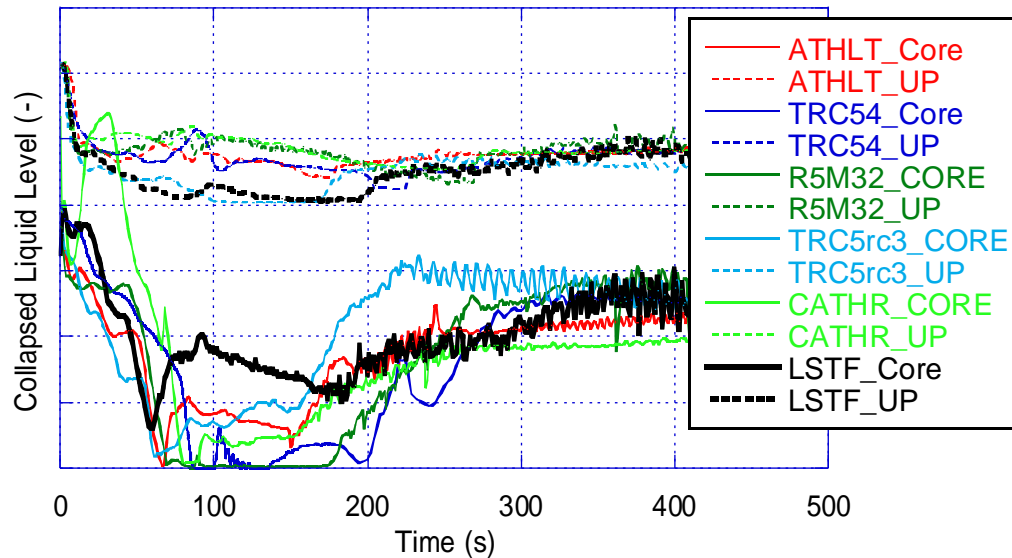
- 放射性物質の移行挙動：実際の事故条件(様々なパラメータ)を考慮した実験は不十分。モデルの高精度化も必要。
- プールスクラビング：福島事故で生じたと考えられる条件(低サブクール水中への過熱蒸気流入等)の研究例は少ない。

研究項目

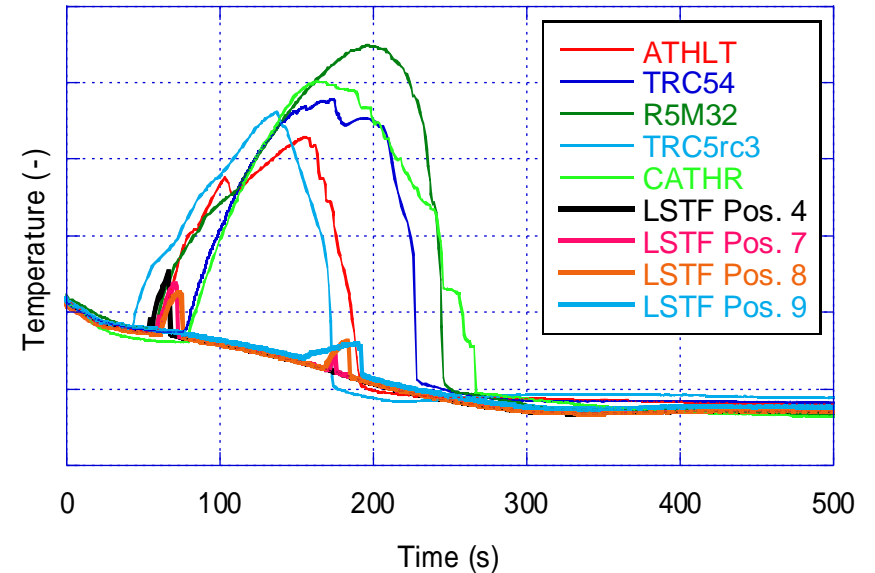
- エアロゾル移行挙動：シビアアクシデント条件での蒸発・沈着・沈降の測定と分離効果試験によるモデルの高精度化。
- プールスクラビング(エアロゾル除去)：広範な熱水力条件での計測。バブリングによるミスト生成等を含む。AMとしてのフィルタードベント評価手法の整備にも貢献。

最適評価コードの現状

Liquid Levels in Core & UP



Peak Cladding Temperature



コールドレグ中口径破断LOCA実験とブラインド解析結果の比較
(OECD/ROSA2 Project, Test-7)

熱流動実験研究計画

全体計画

H24	H25	H26	H27	H28
予備設計など	炉心コンポーネント等の製作	実験の実施と機器模擬コンポーネント等の増設		
		スケーリング詳細実験、詳細計測手法の開発・整備		
		国産安全解析手法の開発・検証支援(モデル開発など)、3次元二相流解析		

H24~25年度の計画

- 実験システムの全体設計
- 炉心コンポーネントの詳細設計及び製作
 - 圧力容器、燃料バンドル模擬ヒータ、流動制御機器、各種計装で構成
- スケーリング詳細実験用計測手法の開発及び基礎実験
- 炉心内伝熱流動に係るBEコード用モデルの検討、検証解析
- 3次元二相流解析コードの整備、モデル調査

LSTF全電源喪失実験

実験目的

- 全電源喪失事象を模擬し、アクシデントマネジメント策としてSG逃し弁全開による二次側減圧と給水ラインへの注水による一次系減圧効果を調査

実験概要

- 高圧注入系(HPI)と低圧注入系(LPI)は不作動
- 時刻ゼロで主給水停止、主蒸気弁閉止、炉心出力減衰を模擬
- SG逃し弁からの蒸気流出に伴い二次側水位が急速に低下、一次系圧力は上昇し、加圧器PORVが自動開閉
- ホットレグが空に近づいた時点でSG逃し弁全開と給水ラインへの注水により、一次系減圧を促進
- 蓄圧注入系(ACC)の作動とSGでの除熱により、炉心冷却の維持を確認し、実験終了