



Japan Atomic Energy Agency

大型格納容器試験装置CIGMA を用いた実験及び数値解析

日本原子力研究開発機構
安全研究・防災支援部門
安全研究センター
原子炉安全研究ディビジョン
熱水力安全研究グループ

石垣 将宏

平成28年度 安全研究センター報告会
平成28年11月22日
富士ソフト アキバプラザ

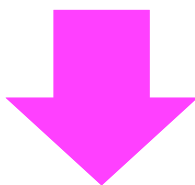
発表の概要

- 研究背景
 - 格納容器内熱水力挙動研究の対象
 - 大型格納容器試験装置CIGMAの研究課題
- CIGMAの特徴
- CIGMA実験
 - 外面冷却実験の詳細
- 数値流体力学（CFD）コードによるCIGMA実験解析
 - 外面冷却実験の解析結果
 - 課題
- まとめと今後の課題
- ROSA-SAプロジェクトの展望

※本研究成果の一部は、原子力規制委員会からの受託事業「平成27年度原子力施設等防災対策等委託費(軽水炉の事故時熱流動調査)」の一部として得られたものである。

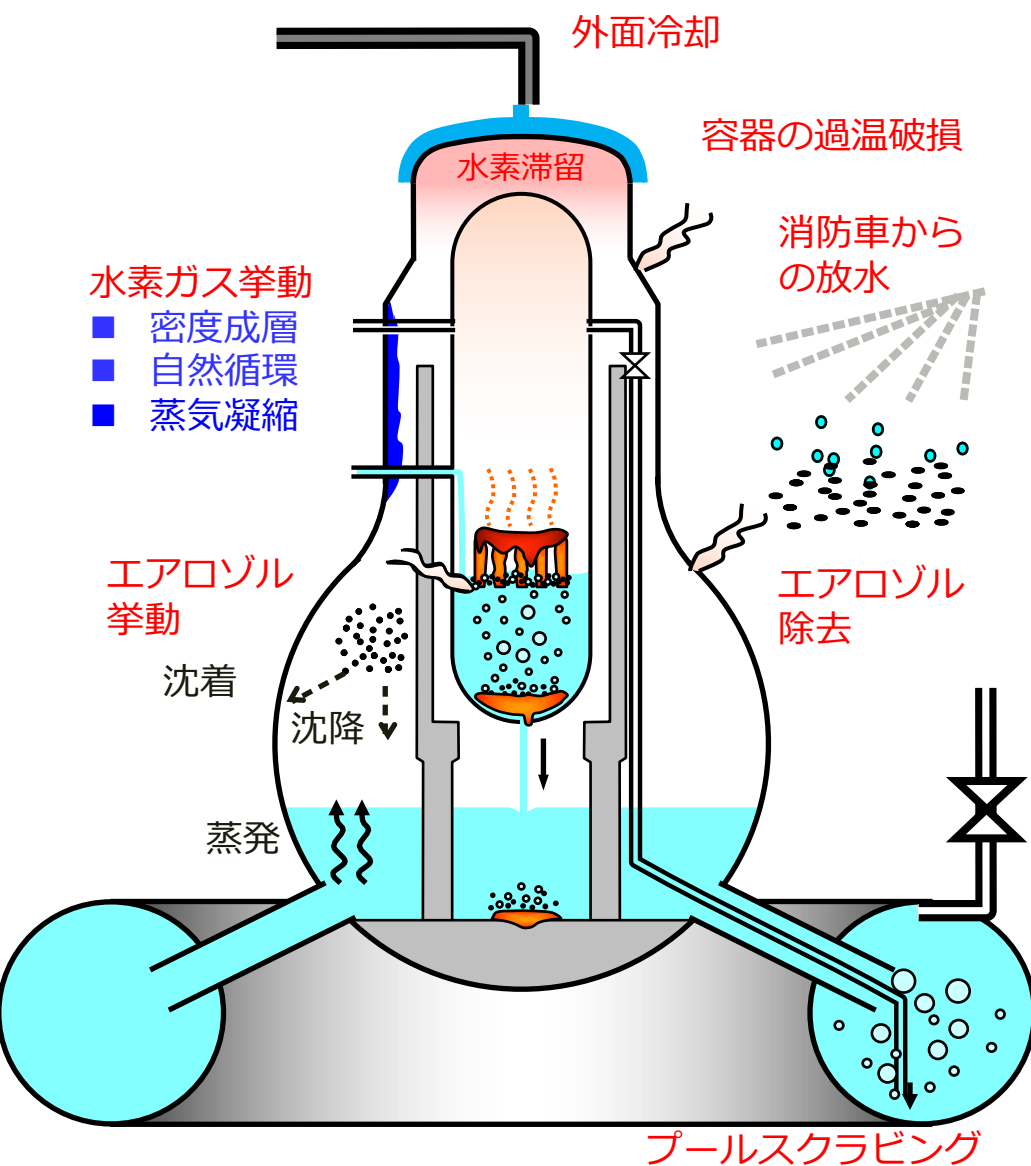
研究背景

- 福島第一原子力発電所の事故以降、シビアアクシデント対策の強化を特徴とする新しい安全規制。
- 安全規制を技術支援するとともに、長期的視点から安全評価・安全対策の高度化に寄与。
- ⇒シビアアクシデント研究の必要性



シビアアクシデント時の格納容器内挙動に着目

格納容器内熱水力挙動研究の対象



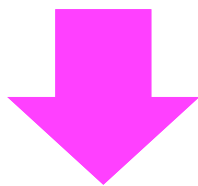
- 水素リスク
- 格納容器過温破損
- AM策の評価手法の整備
- ソースターム
- 解析手法の検証・整備

これらの研究課題に対して
ROSA-SAプロジェクトを
実施

ROSA-SAプロジェクトの中核
↳ 大型格納容器試験装置CIGMA
による実験

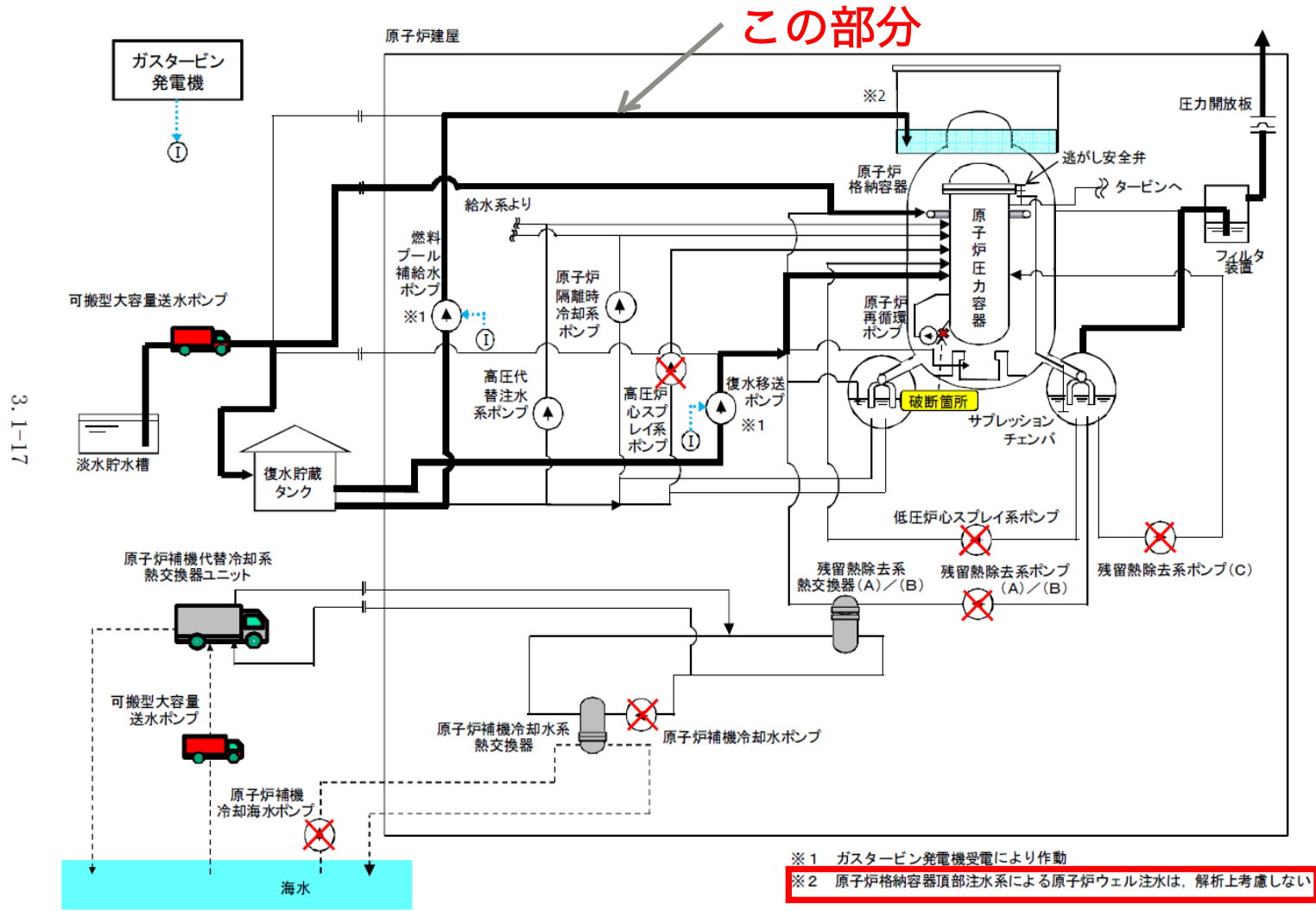
CIGMA実験における研究課題

- 従来研究(OECDプロジェクト等)の多くは、**水素リスク**に主眼。
 - より詳細な計測および実験データベースの拡張が必要。
- 1F事故では、1号機において、**過温により格納容器が破損**した可能性が指摘。しかし、**過温破損**に着目した実験研究は従来少ない。
 - 蒸気による容器内温度分布および格納容器への熱負荷を詳細に把握する必要性。
 - 溶融燃料により加熱された高温蒸気が流出する可能性。
- また過温破損対策として有効と考えられる**外面冷却**に関する実験も少ない。
 - 有効性評価手法の検討および解析コードの評価用データの必要性。
 - 実機においても格納容器破損防止策として検討。



これらの課題に対応して、大型格納容器試験装置CIGMAを製作。実験を開始。

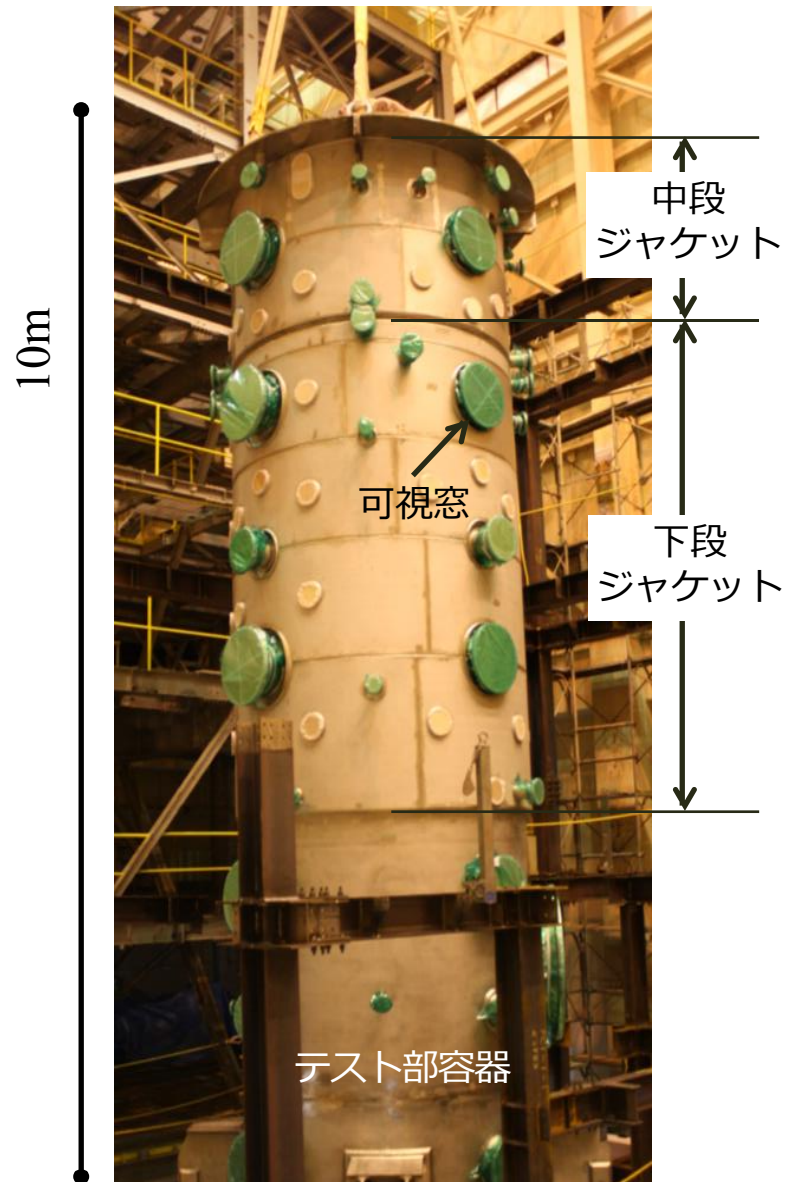
原子炉ウェル水張り(過温破損対策)



第 3.1.2 図 雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）時の使用系統概要

(低圧代替注水系（常設）、**原子炉格納容器頂部注水系（常設）**、原子炉格納容器代替スプレイ冷却系、原子炉格納容器圧力逃がし装置)

CIGMA (Containment Integral Measurement Apparatus) の特徴

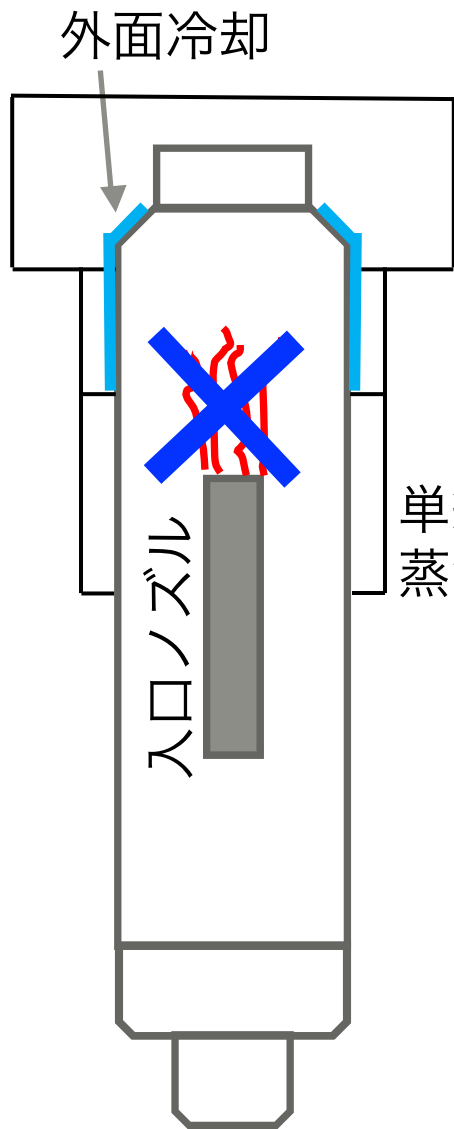


- 700°Cの高温蒸気ジェットを注入可能。容器耐熱300°Cと高温。
 - より広い条件での実験データを取得可能。
 - 数値解析コードでは多くの実験相関式が使われているため、適用範囲を拡張することは重要。
- 冷却系として内部スプレおよび上部プール、中段ジャケット、下段ジャケットを具備
 - 外面冷却および内部冷却に着目した実験が可能。
- 計測点密度が高い
 - CFD解析結果検証用の詳細なデータ取得が可能。

CIGMA実験

- 蒸気単相の外表面冷却実験CC-PL-01
- 蒸気および空気の外表面冷却実験CC-PL-04

外面冷却実験条件

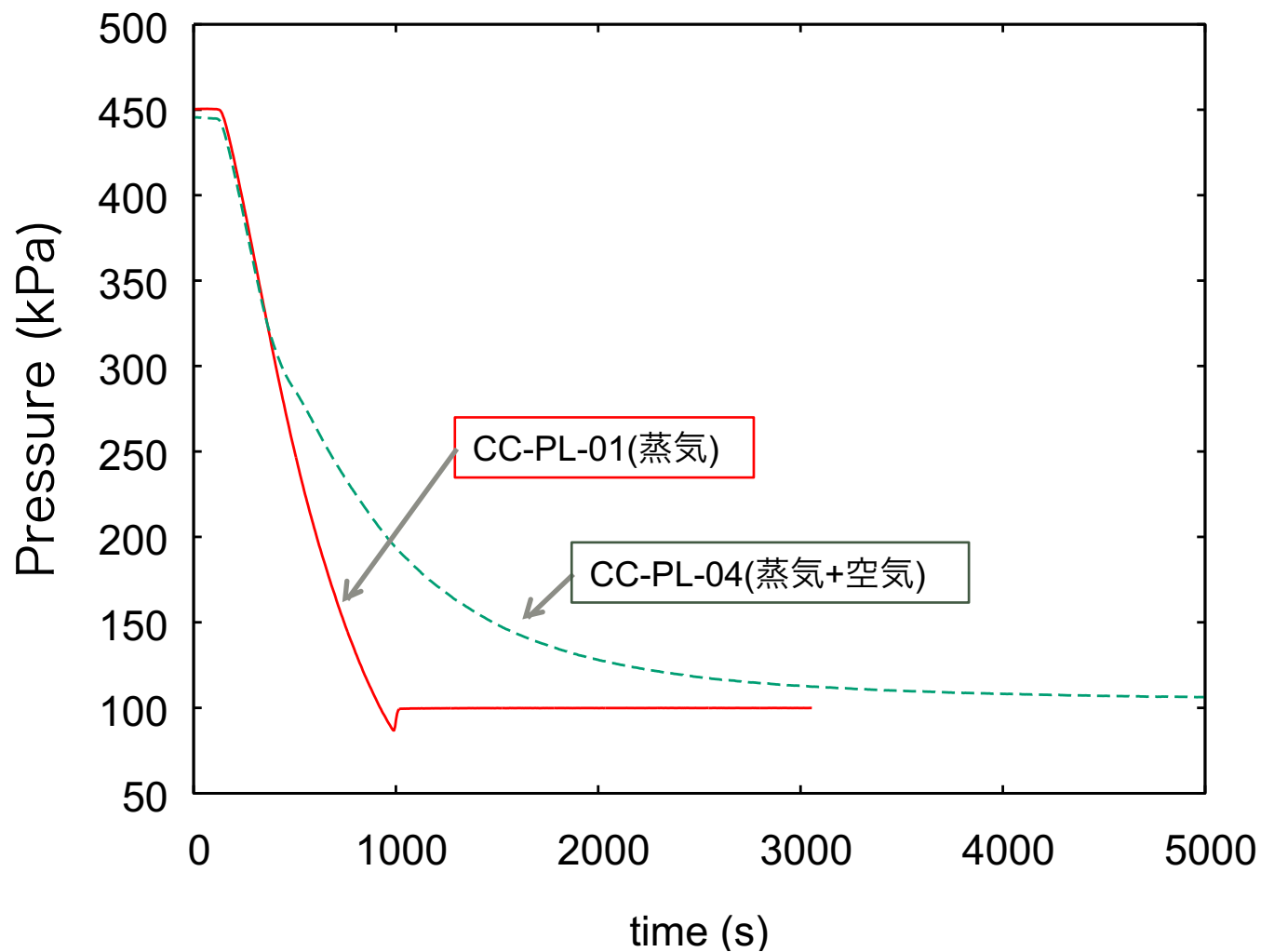


単純化のため、
蒸気の注入は考慮しない

	CC-PL-01	CC-PL-04
初期圧力	蒸気:450kPa	蒸気:350kPa, 空気:100kPa
初期温度	150℃	150℃
液膜流量	全面濡れ条件	全面濡れ条件
計測	温度	温度・ガス濃度

- 蒸気もしくは空気の注入完了後に外面冷却を開始。⇒ 蒸気凝縮の影響を計測するため、単純化した条件で実験を実施。
- 代表的な格納容器の耐圧値を考慮して条件設定。

外面冷却実験結果：容器内圧力

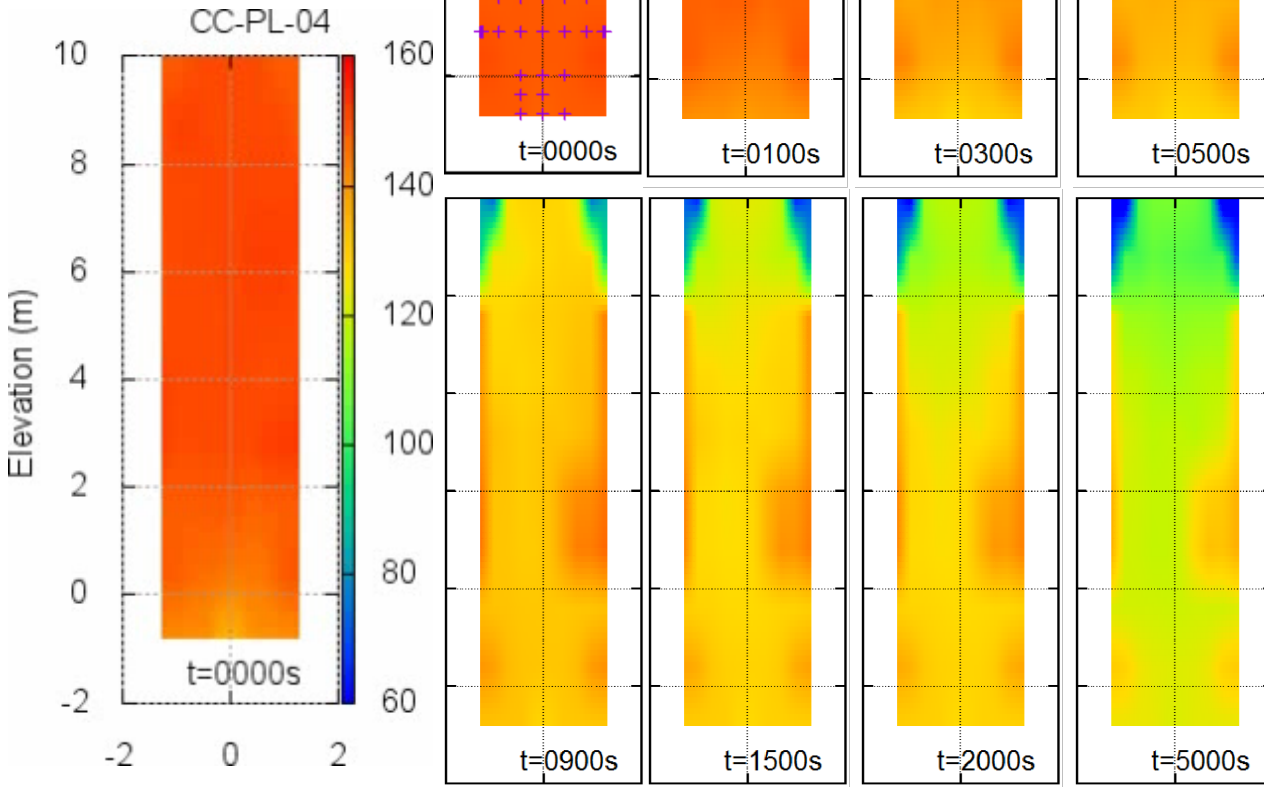


- 不凝縮ガスのあるCC-PL-04では減圧速度が遅い。

容器内断面の温度分布(CC-PL-04 ; 蒸気+空気)

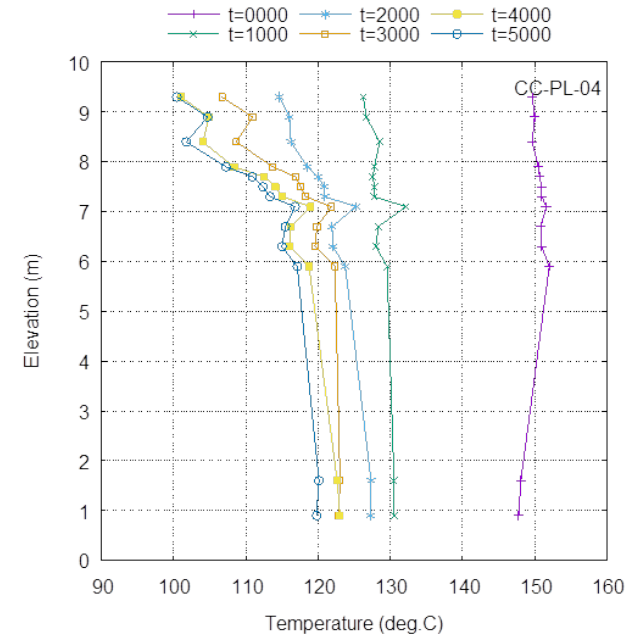
CC-PL-04
容器断面図
気相+境界壁温度

+が熱電対位置。
熱電対データ（壁外表面まで含む）
を内挿し，中心軸
を含む断面内分布
を表示



外面冷却範囲

- 容器内の凝縮水量をガターにより捕集し計測しているため，容器下部の壁面は高い状態を維持。（ガターの影響については別途検討）
- 上部ドームでは「逆温度成層」を形成⇒弱い自然循環を示唆。



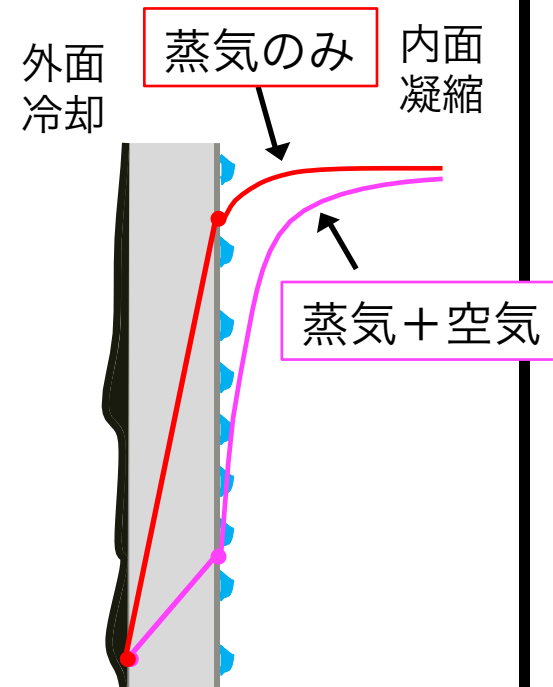
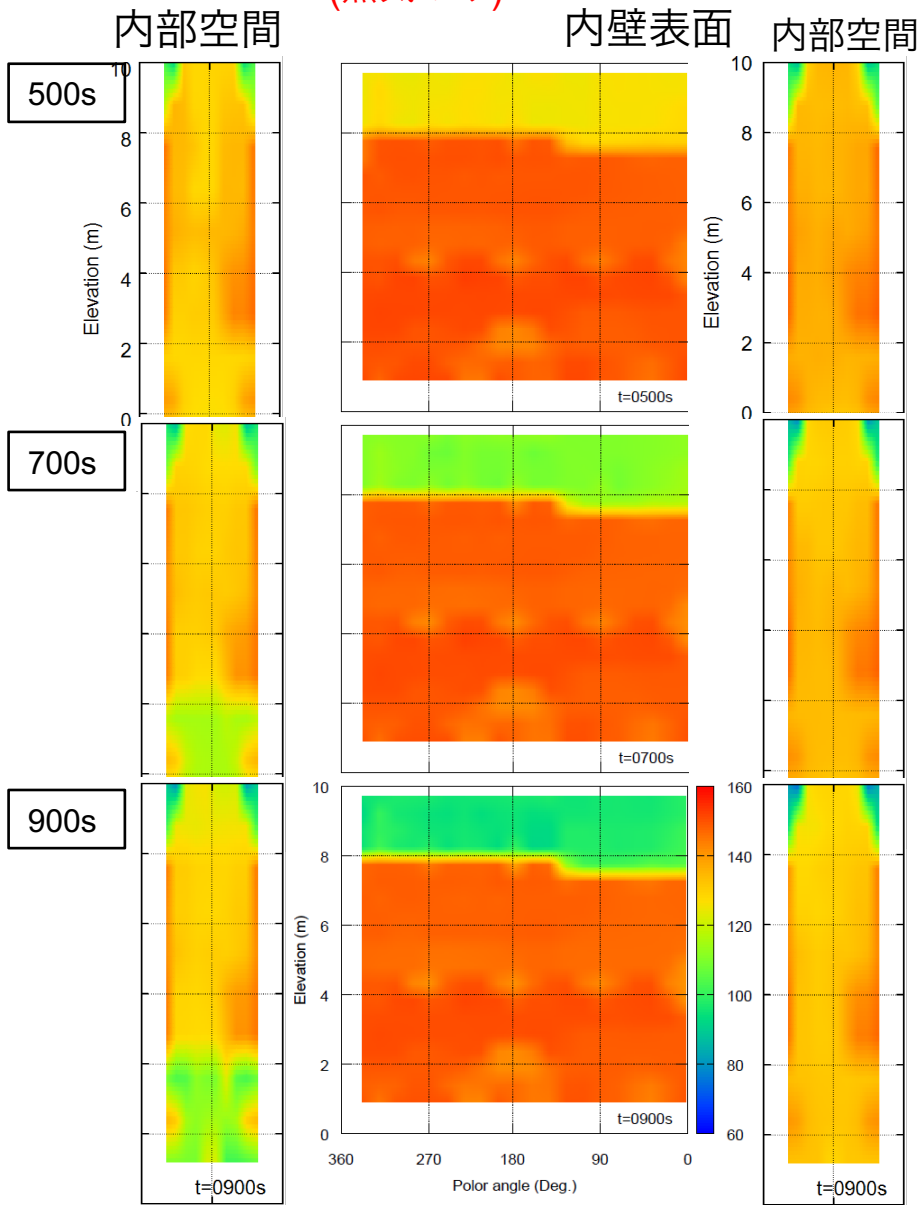
容器中心軸温度分布

内壁表面温度分布

CC-PL-01
(蒸気のみ)

CC-PL-04
(蒸気+空気)

温度分布模式図



- 不凝縮ガスを含む条件では、内壁表面温度が大きく低下。
- 内壁面の凝縮熱伝達の熱抵抗が大きい。
- 全体の熱流束は蒸気の場合よりも小さくなる。

CFDコードによるCIGMA実験解析

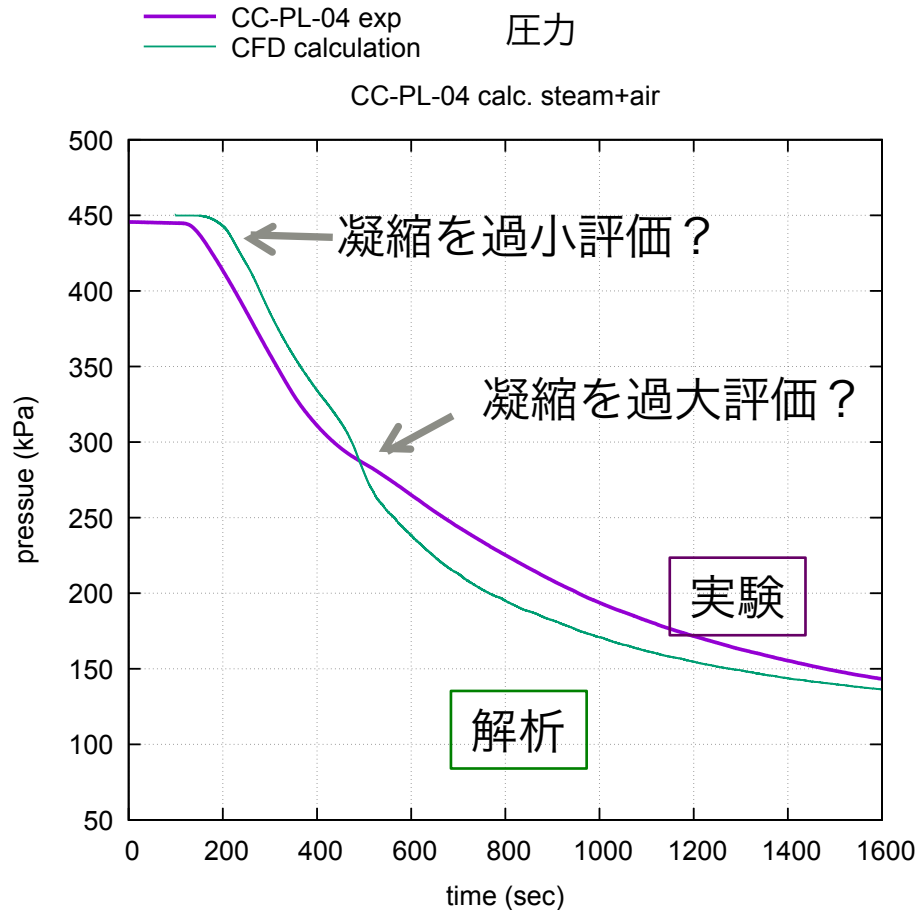
- 外面冷却実験CC-PL-04のCFD解析

CFD解析の課題および物理モデル

- 非常に大きな体積を有する格納容器内では多次元的な流動が発生。
 - 3次元挙動が支配的な格納容器におけるシビアアクシデント時の現象の理解, 事故進展挙動, AM策の有効性, LPコードの妥当性等の評価のためにはCFDコードによる解析及びその高度化が必要。
 - 本研究ではCIGMAによる外面冷却実験：CC-PL-04実験についてCFD解析を実施。
- 本解析の目的
 - 格納容器冷却に関する解析モデル（解析のベースケースとなるモデル）の検証および**CFD解析上の課題の抽出**
 - **流体解析のみ**に着目。固体壁内の熱伝導は考慮しない（詳細は後述）
- CFD解析にはCFDコードOpenFOAMを適用。
- 乱流モデル：RANS 低Reynolds数型k-epsilonモデル
- 壁面凝縮モデル：非凝縮ガス中の蒸気の拡散量から評価。

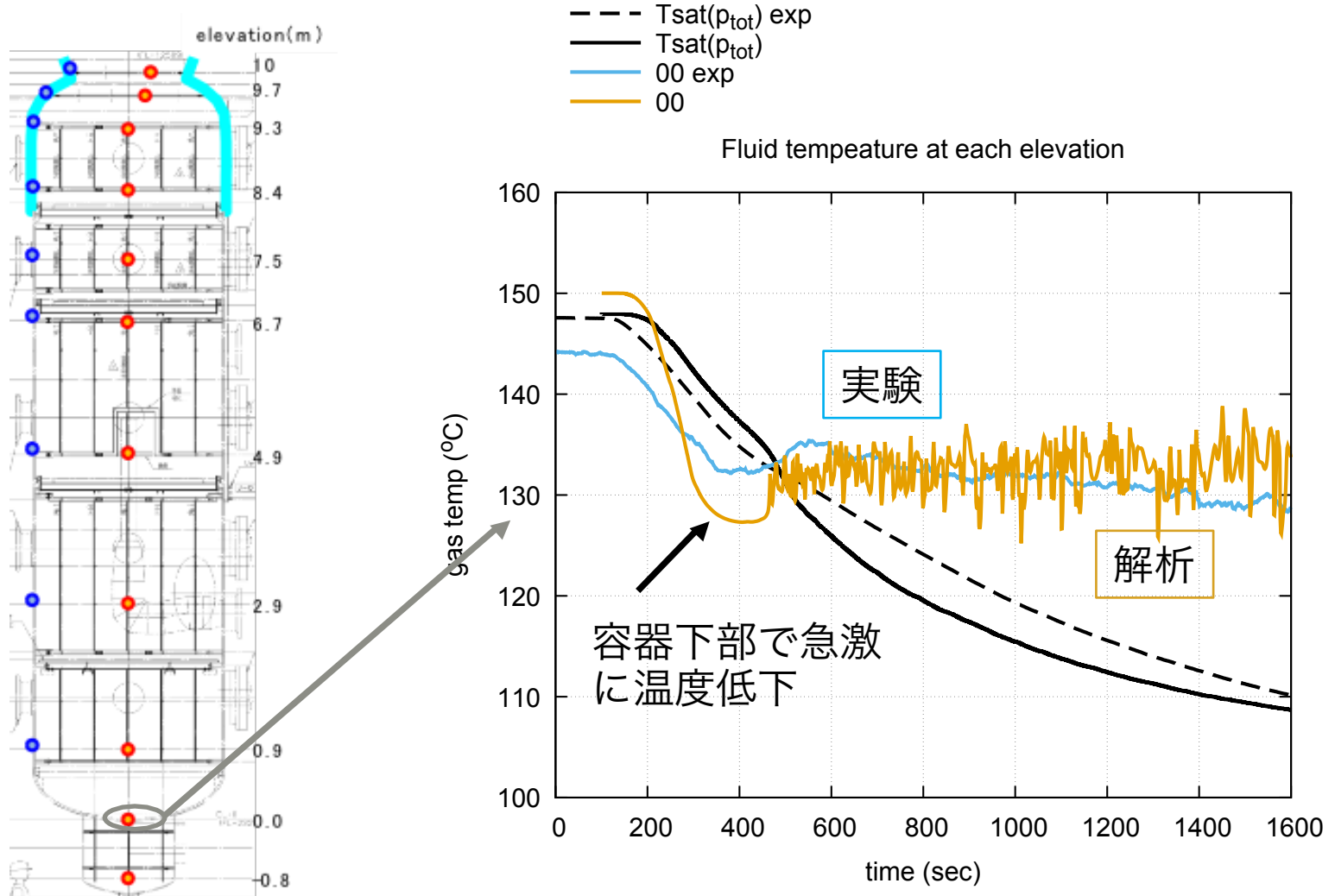
結果：圧力の挙動

※実験と冷却開始時刻を合わせるために
100秒オフセットを与えた。



- 内壁温度を境界条件として与えた解析では、圧カトレンドは実験とおおよそ一致。
 - →凝縮量（熱流束）の評価はほぼ妥当だと思われる。
- 外壁面温度を境界条件として与えた解析を行ったが、圧カトレンドは再現することが出来なかった。以降、内壁温度を境界条件とした場合の結果についてご紹介。

温度の挙動



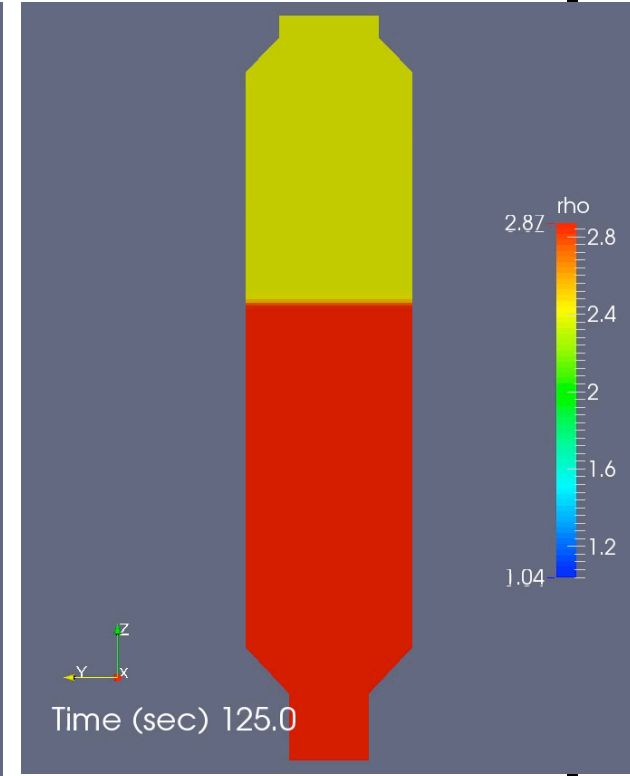
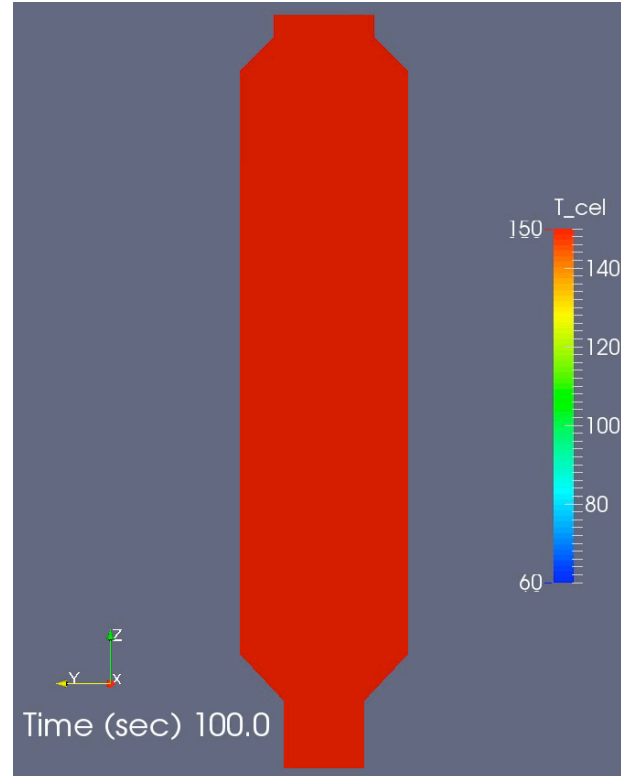
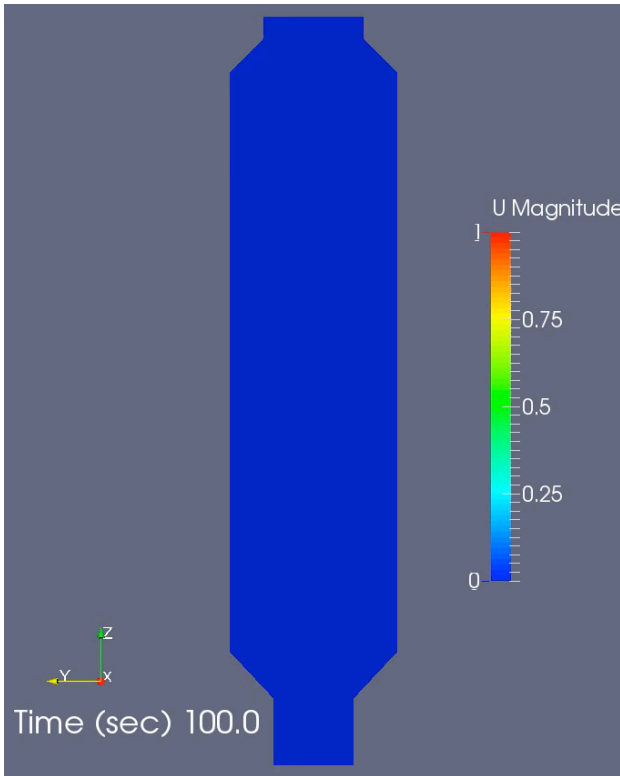
- 温度変動を過大評価。

流速・温度・密度分布（動画）

流速

温度

密度

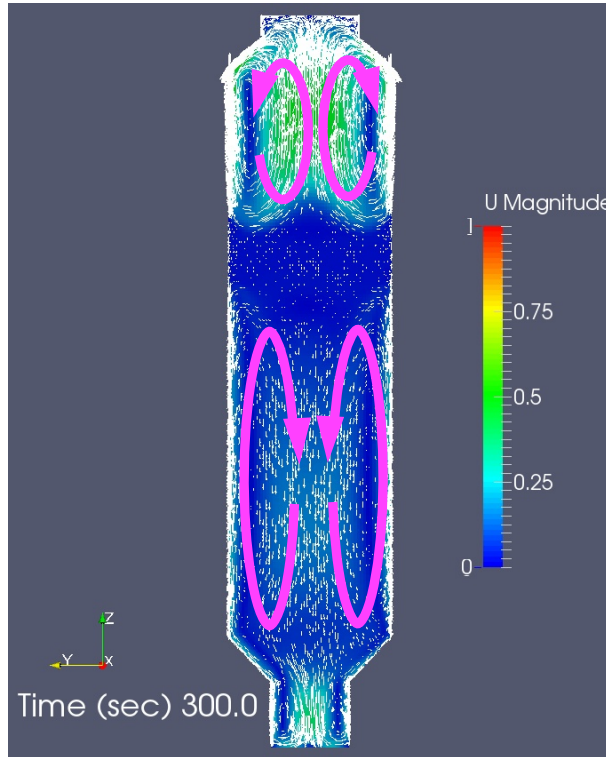


- 初期には安定な自然循環状態が見られる。
- 密度が一様になった後に、不安定な非定常流れへと遷移する。

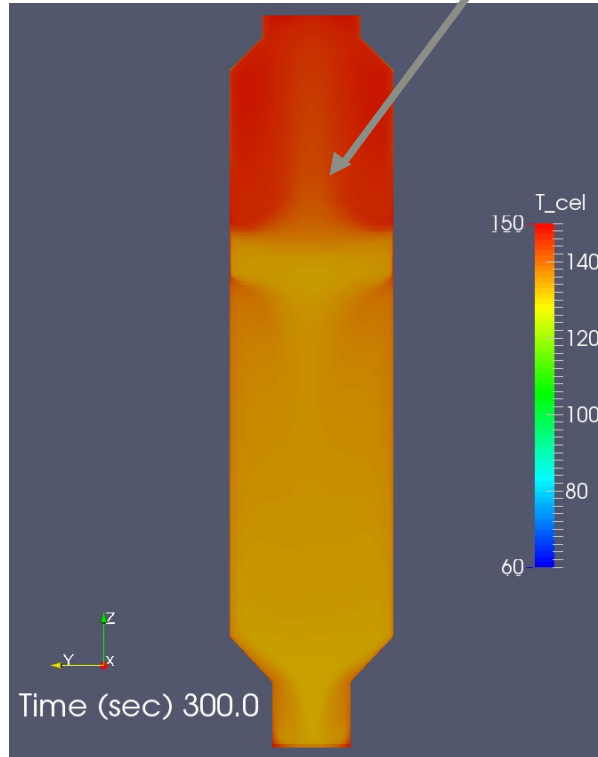
安定な自然循環流 (300s)

蒸気リッチで低温のガスが巻き上がっている。

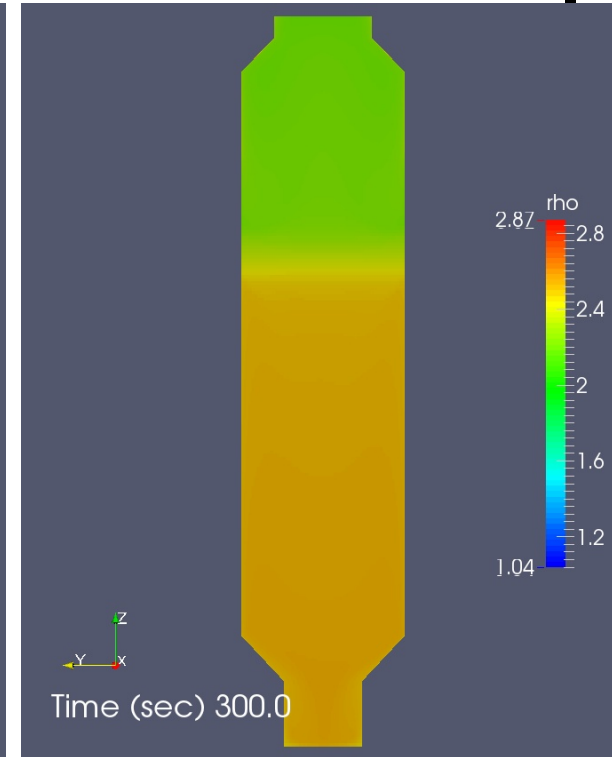
流速



温度



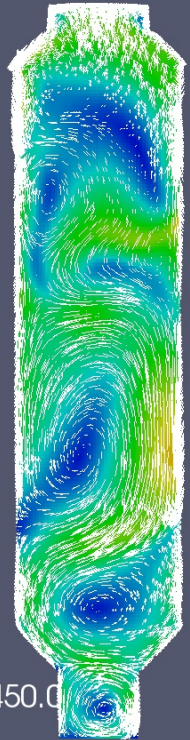
密度



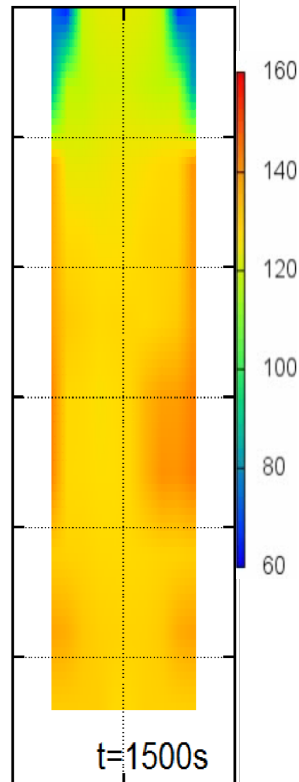
- 上部と下部で自然循環が発生。
- 容器下側のガス温度が低下。
 - 上の方から冷たいガスが流入？もしくは、凝縮による減圧で冷却？
- 下部の密度低下。この後、密度はほぼ一様化。それとともに非定常流れへ遷移。

不安定な非定常流れ (1450s)

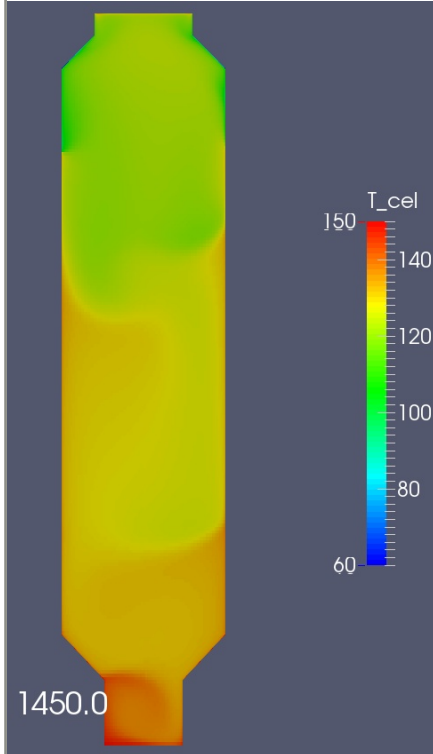
流速



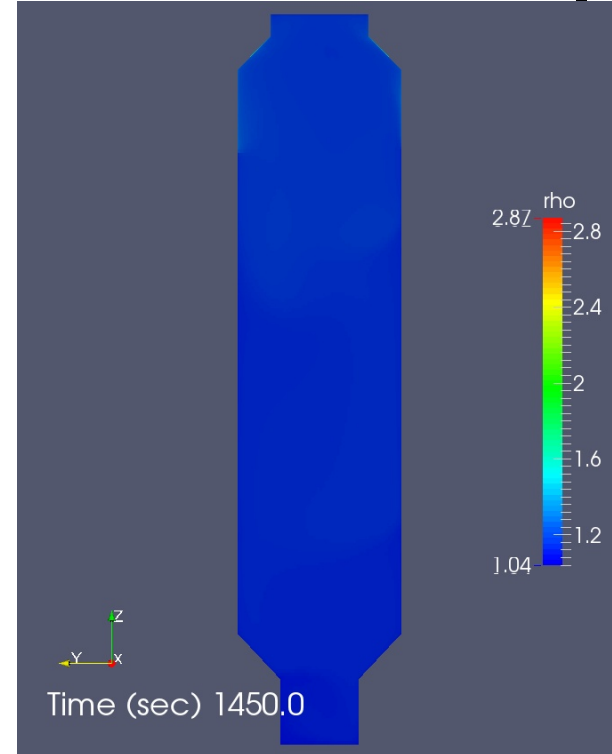
実験での温度分布



温度



密度



- 密度は均一ながら、下側のほうが上側よりも温度の高い状態になる。(逆温度成層)
 - CIGMA実験でも密度が均一である可能性。
- 非定常な渦の生成・消滅を繰り返す。
 - →温度変動を過大評価した原因と考えられる。
- 課題：自然循環流れとしては流速を過大評価している可能性。

まとめ

CIGMA実験

- 過温破損及びその対策として有効と考えられる外面冷却に重点を置いて、装置設計を行い、実験を開始。
- 蒸気単相、蒸気・空気混合での外面冷却実験をそれぞれ実施。
 - 非凝縮ガスを含む場合に逆温度成層が観測された。

CFD解析

- CFDコードにより外面冷却実験の解析を実施。はじめの検討として、流体解析における課題抽出を行った（固体・流体間の熱伝達は無視）。
 - 逆温度成層は解析でも見られたが、温度変動を過大評価。←乱流モデルの課題？
 - 下部の過大な温度低下。←バルク凝縮を考慮していないため？

今後の課題

CIGMA実験

- 今後、パラメータを変更した条件での外面冷却実験を実施。
- 過温破損に着目した実験として、過熱蒸気（700°C）を用いた実験も実施予定。
- 数値解析コード検証のベースとなる実験データ構築を目指す。
- より広い条件で実験を実施するとともに評価手法を整備する。

CFD解析

- 過大な温度変動の改善
- 容器外壁内の熱伝導も考慮した解析。（凝縮を伴う際の流体・固体境界条件の検討）
- スプレ挙動に関する解析

ROSA-SAプロジェクトの展望

2-3年

それ以降

CIGMA

- パラメータを変化させた場合の外
面冷却実験
 - 蒸気存在下での流速計測
 - 過熱蒸気実験等
 - 水素（ヘリウム）挙動の詳細計測
 - 解析モデルの構築・検証
- 解析コード検証用の実
験データベース拡張
 - 各種安全機器（PARを
模擬した熱源等）の影
響検討等

個別効果実験

- 凝縮発生時の流速及び温度の
詳細計測
 - 密度成層流れの詳細計測
 - エアロゾル挙動の計測実験
 - 解析モデルの構築・検証
- 解析モデル及び評価モデ
ルの高度化

数値解析

- 物理モデル（壁面凝縮，バルク
凝縮，輻射伝熱等）の課題検討
 - 乱流モデルの検討・改良
 - CFD/LP（集中定数）コードによ
る解析
- 実機の事故進展解析・
AM策評価
 - CFD・LPコードのカップ
リング