CIGMA装置体系での凝縮による水素局所化に関するCFD解析

2023年4月24日

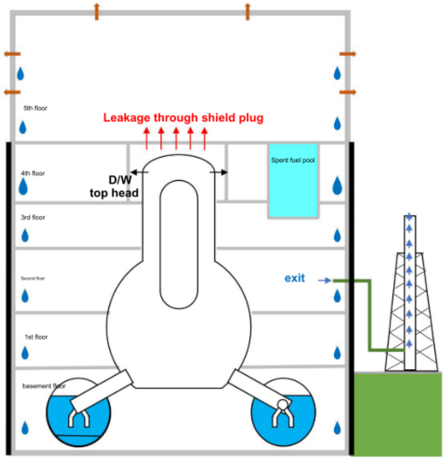
日本原子力研究開発機構
安全研究センター熱水力安全研究グループ

Ari Hamdani, 柴本泰照

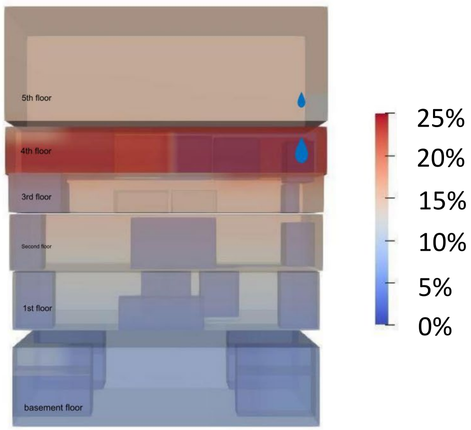
はじめに

- 検討会では，3号機において，4階及び5階の損傷の様子や福島中央テレビの映像から総合的に判断して「2段階爆発」可能性が指摘されている。
- 4階で第一段回目の爆発が発生した理由として，GOTHICを用いた解析により，シールドプラグ経由での水素漏洩に対し以下の可能性が指摘されている*。
  - ✓ 5階では酸素欠乏となり燃焼が不可となった。
  - ✓ 4階では水蒸気凝縮効果により水素濃度が高く、燃焼可能となった。

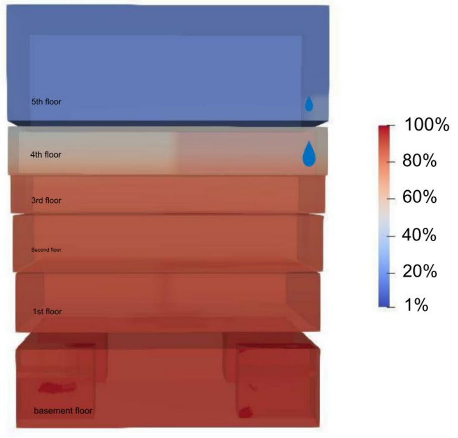
シールドプラグからの漏洩



GOTHICによる解析結果



水素濃度分布(%)



空気濃度分布 (%)

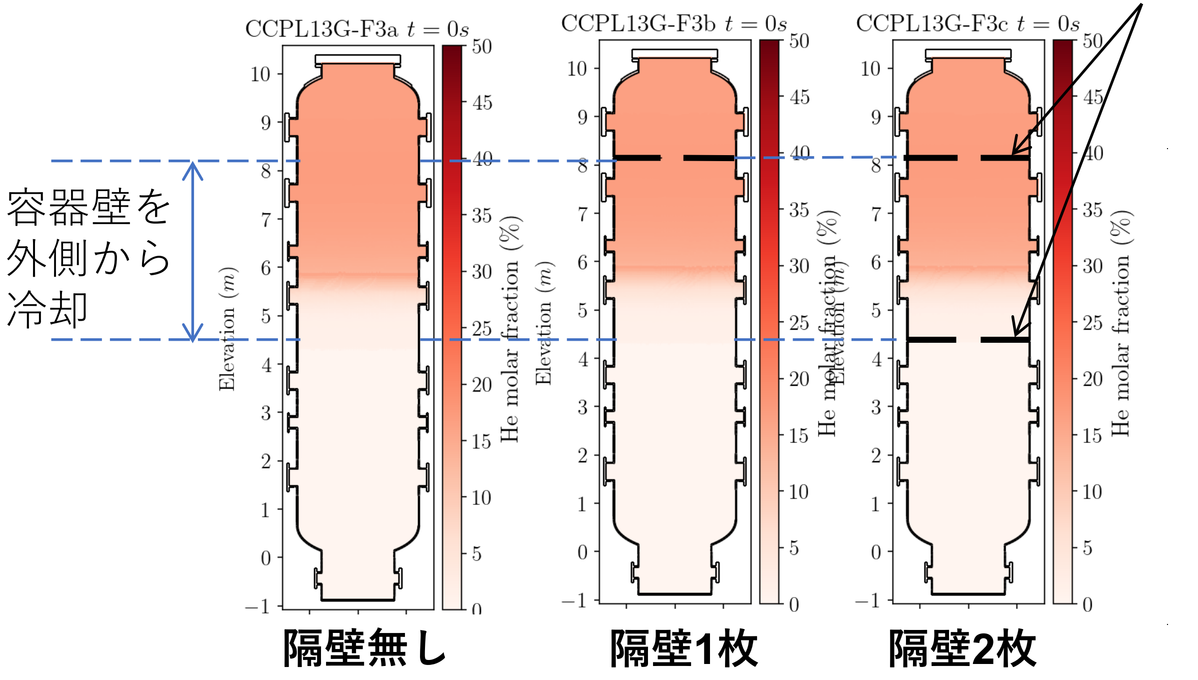
➡ 閉じられた容器の中間層で水素の濃縮が生じるかを、CIGMA実験装置の体系を用いたCFD解析を試みた。

* 東京電力福島第一原子力発電所における事故分析に係る検討会第34回会合，資料2，2022年12月20日

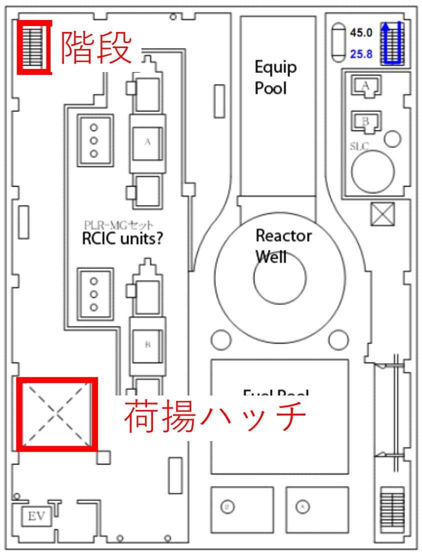
数値解析の初期・境界条件

- 初期条件：空気・水蒸気・ヘリウムの混合気体で加圧し，容器の上部にヘリウムの密度成層を形成。
- 境界条件：容器の中間部分の壁を冷却（中間部での凝縮を模擬）
- 階層を模擬するための隔壁を挿入（0枚，1枚，2枚）。隔壁には気体が行き来できる開口部を設ける。

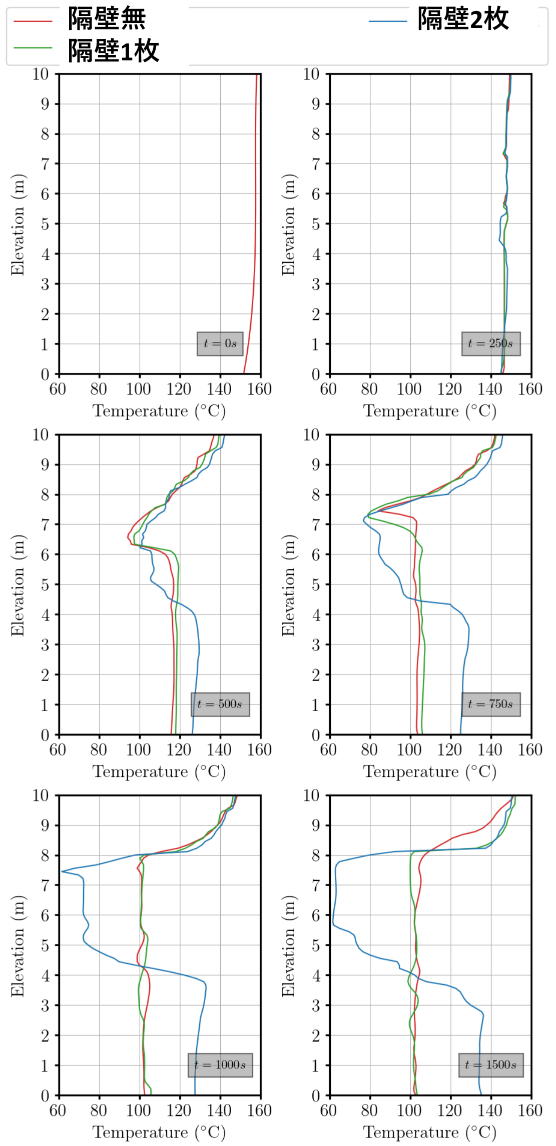
➡ 本計算は実機で想定される条件とは異なる。実事故に近い条件での計算を現在も継続実施中。

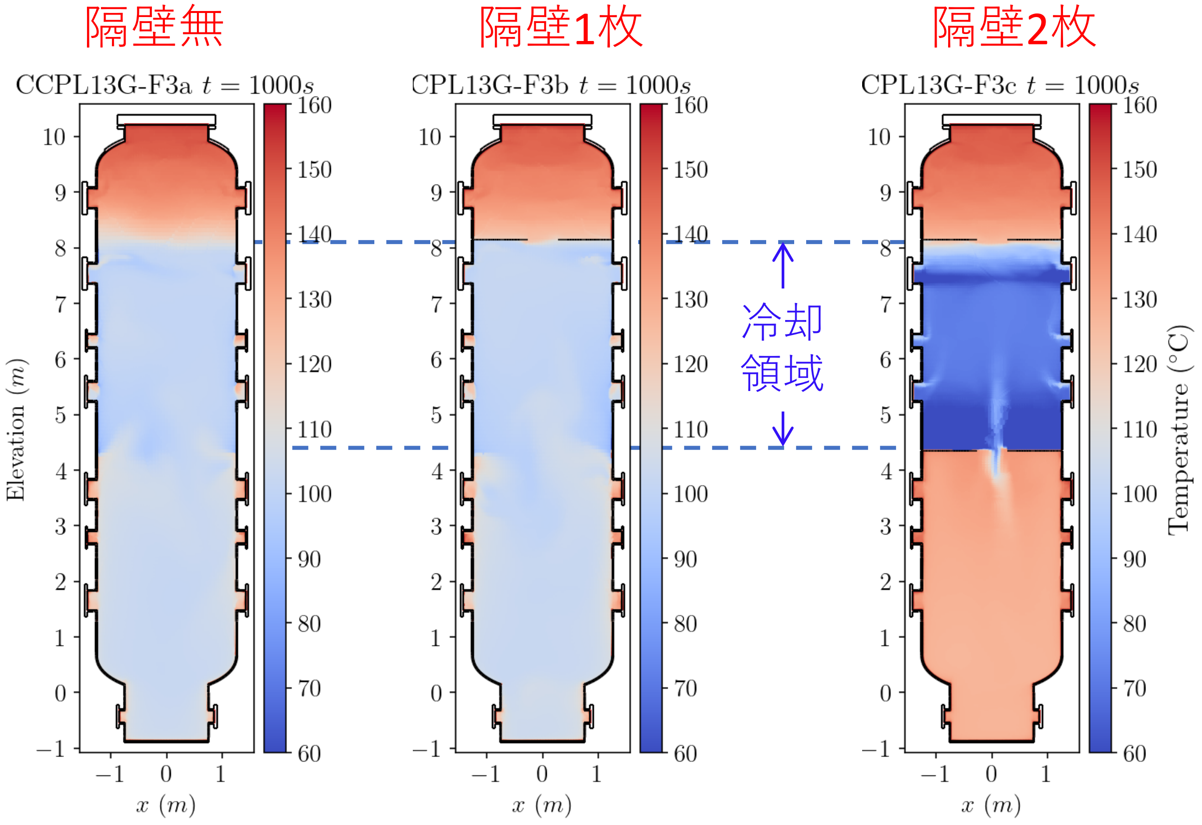


隔壁の中央部にはハッチを模擬した穴（面積比6%）をあける。



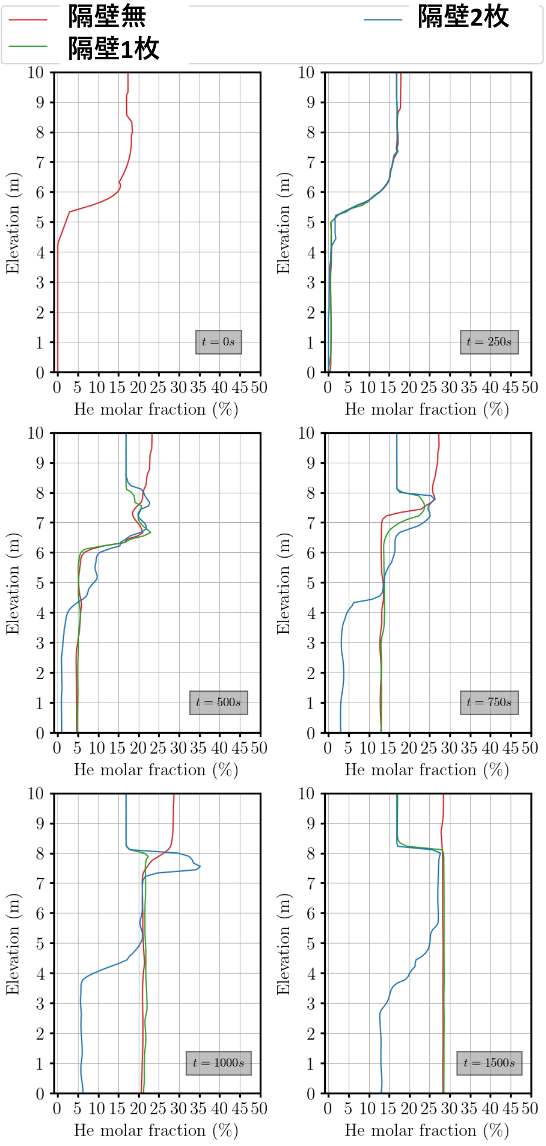
解析結果：流体温度分布（1000s後）

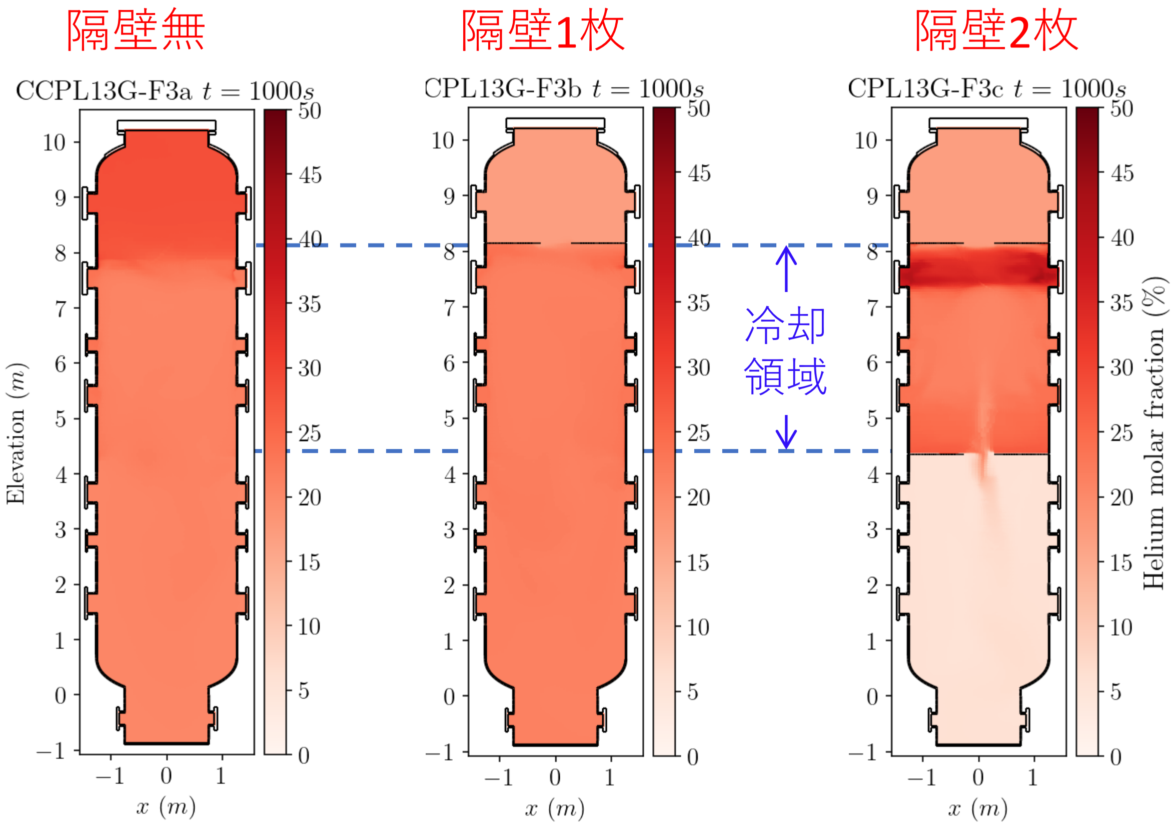




- 隔壁の影響が顕著に現れる。
- いずれも容器上部の気体温度は高温を維持。
- 隔壁2枚条件では，隔壁で挟まれた領域で温度が低下し，混合が進まない状況が観察された。

解析結果:ヘリウム濃度分布(1000s後)

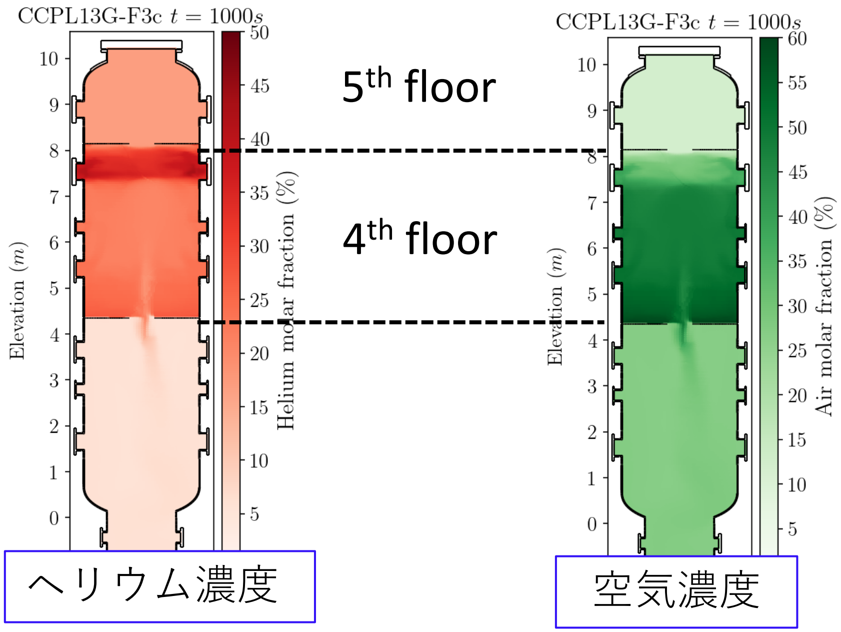




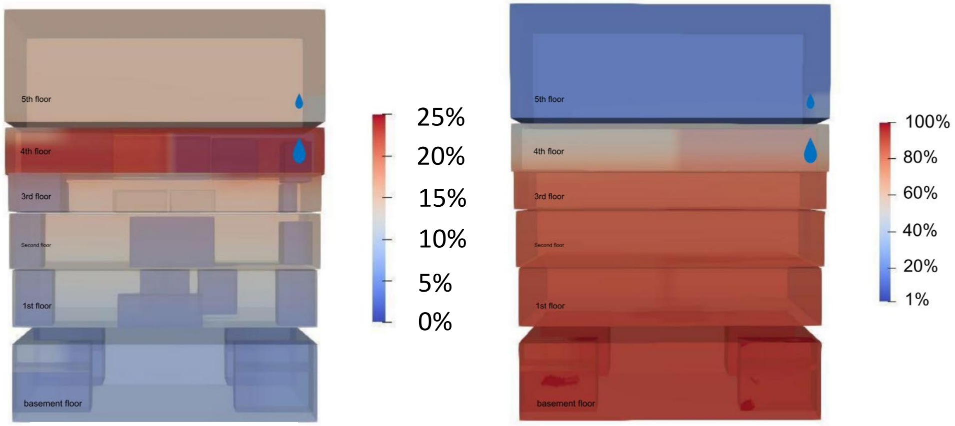
- 隔壁に挟まれた冷却領域では、蒸気濃度が減少し、ヘリウムの蓄積が生じる。
- ヘリウムの最高濃度は隔壁2枚条件での天井壁の直下で生じる。
- TEPSYSのGOTHIC解析と類似の結果。

まとめ

- 隔壁2枚条件では，水蒸気の凝縮による対流駆動と隔壁による循環抑制が働き，中間階で顕著なヘリウム蓄積が観察された。
- より事故条状況に近い条件で解析を継続中。
- CIGMA装置により事故状況を定性的に再現できる実験が可能であり，検討に着手。検討可能なパラメータは以下。
  - ✓ 蒸気及びヘリウムの供給流量（比）や時間
  - ✓ 中間層の凝縮量（冷却水温度や水位で制御）



解析1000秒後の気体濃度分布



水素濃度(%)　　空気濃度 (%)

GOTHICによる解析結果

参考資料

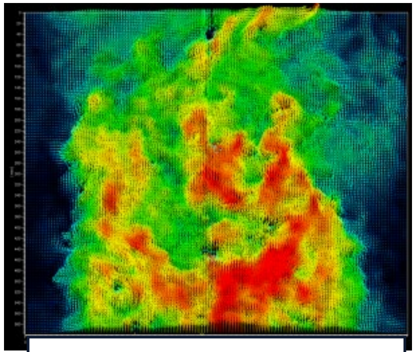
CIGMA装置について

圧力(MPa)	0.5(high temp.), 1.5(max.)
温度(C)	300(ave), 700(max.)
サイズ	11mH x 2.5mD
体積	~ 51m^3

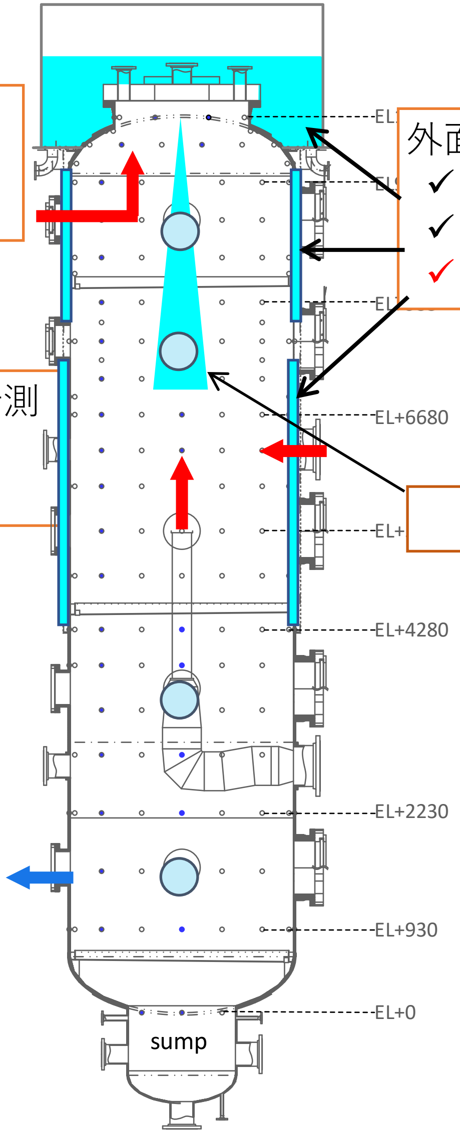
様々な箇所から蒸気ー空気ーヘリウム混合の高温気体（~ 700 ℃）を注入

高密度名温度とガス組成の計測
Concentration (QMS): 100
Temperature (TC): 650

流体の可視化
(large size window)



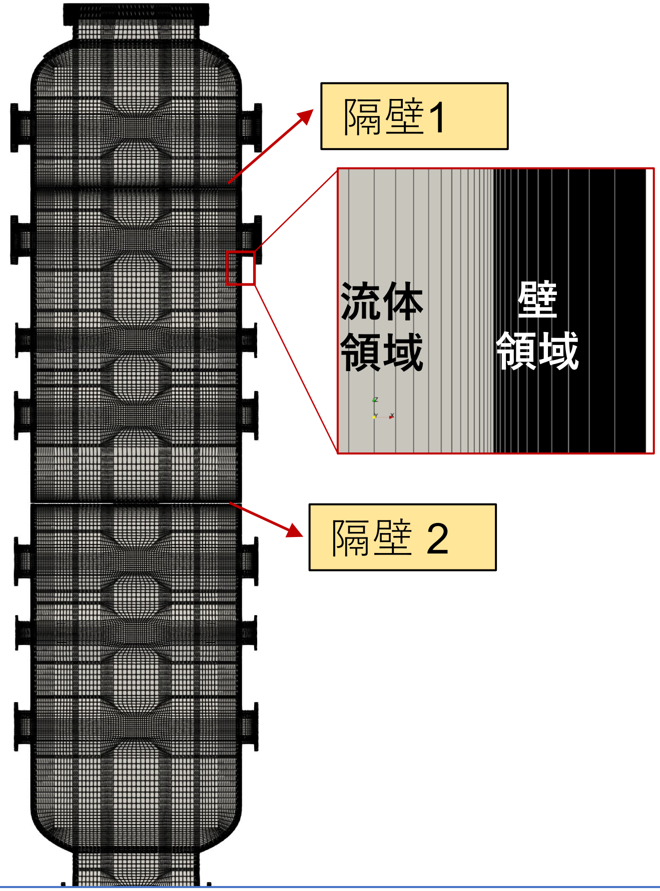
PIV measurement



外面冷却機能
- ✓ upper pool
- ✓ middle jacket
- ✓ **lower jacket**

スプレイ噴射

数値解析モデル

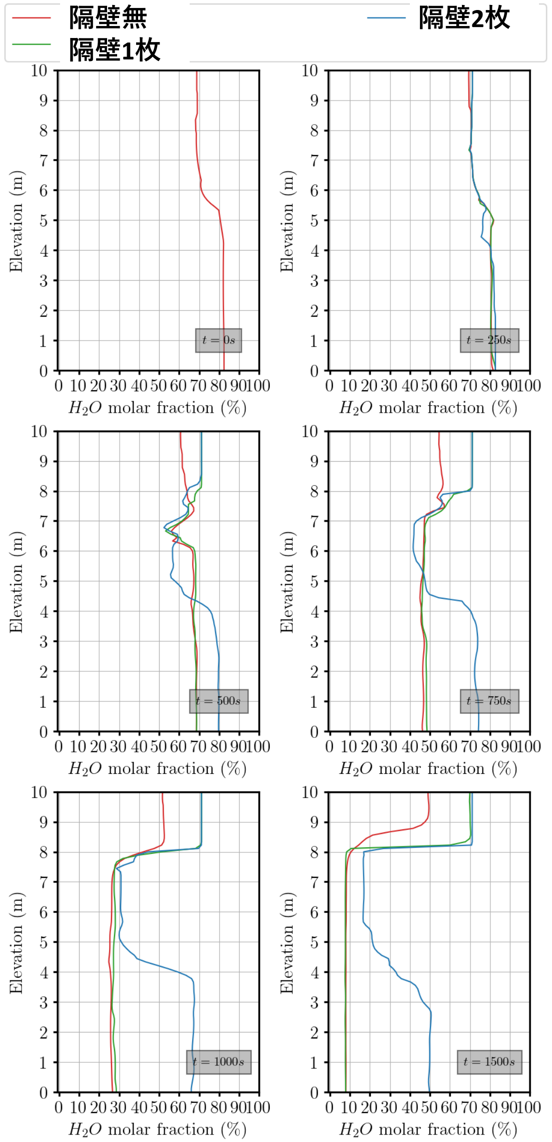


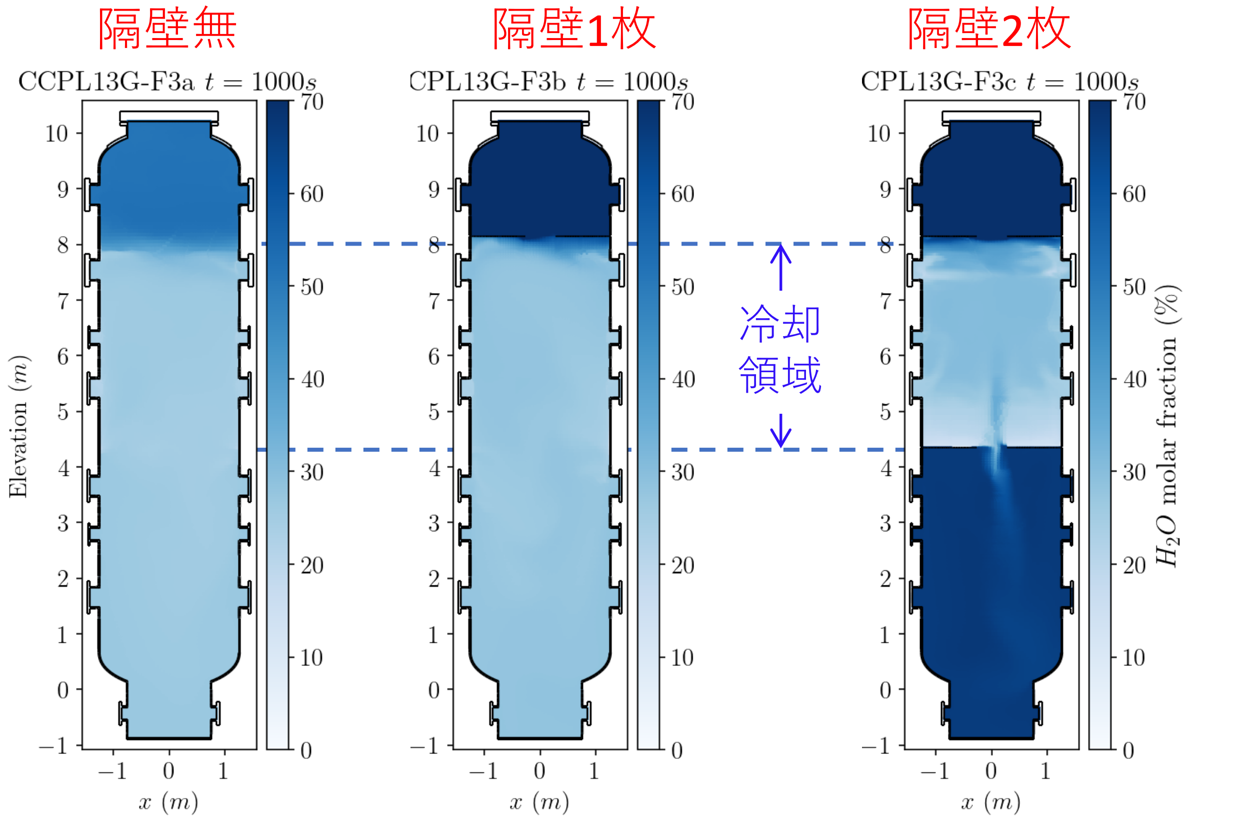
Solid region: 1,212,580 hexahedra cells
Fluid region: 2,878,760 hexahedra cells
Wall-adjacent cell $y^+ < 1$

CFD code	OpenFOAM 9
OpenFOAM solver	ContainmentFoam
Governing Equations	unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (URANS) model
Turbulent Transport	k-ω based Shear Stress Transport (SST) model, including production and dissipation terms for buoyancy turbulence based on SGDH
Wall Condensation	single phase ‘diffusion-layer’ approach
Multi-Species Transport	effective binary diffusion model (Fuller model)

Ari Hamdani, Satoshi Abe, Masahiro Ishigaki, Yasuteru Sibamoto, Taisuke Yonomoto, CFD analysis on stratification dissolution and breakup of the air-helium gas mixture by natural convection in a large-scale enclosed vessel, Progress in Nuclear Energy, Volume 153, 2022, 104415.

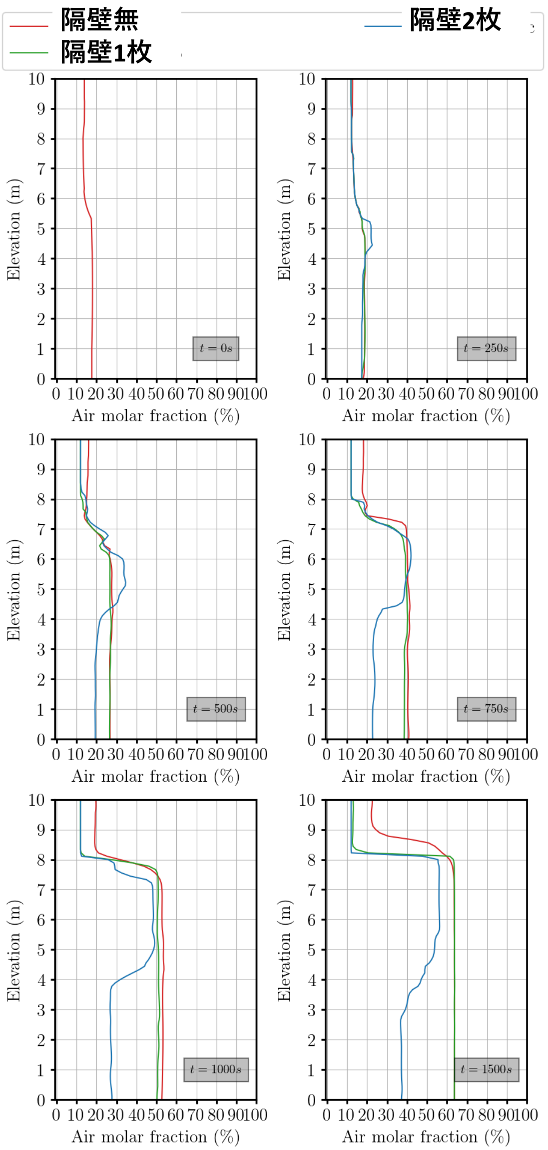
解析結果：水蒸気濃度分布（1000s後）

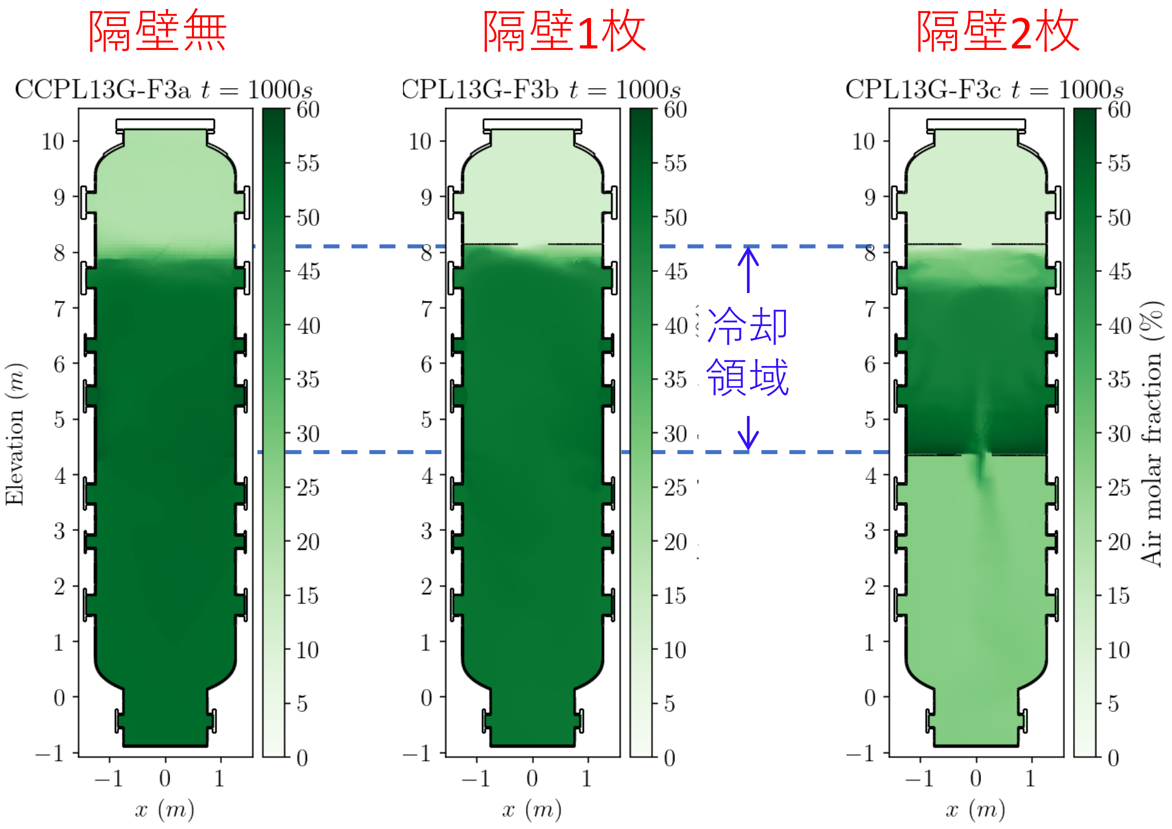




- 隔壁2枚条件では，隔壁に挟まれた冷却領域のみ蒸気濃度が低下した。
- 蒸気凝縮が非凝縮性ガス　（ヘリウムと空気）の濃度勾配を生み，移行の 駆動力となるが，隔壁により循環が阻害される。

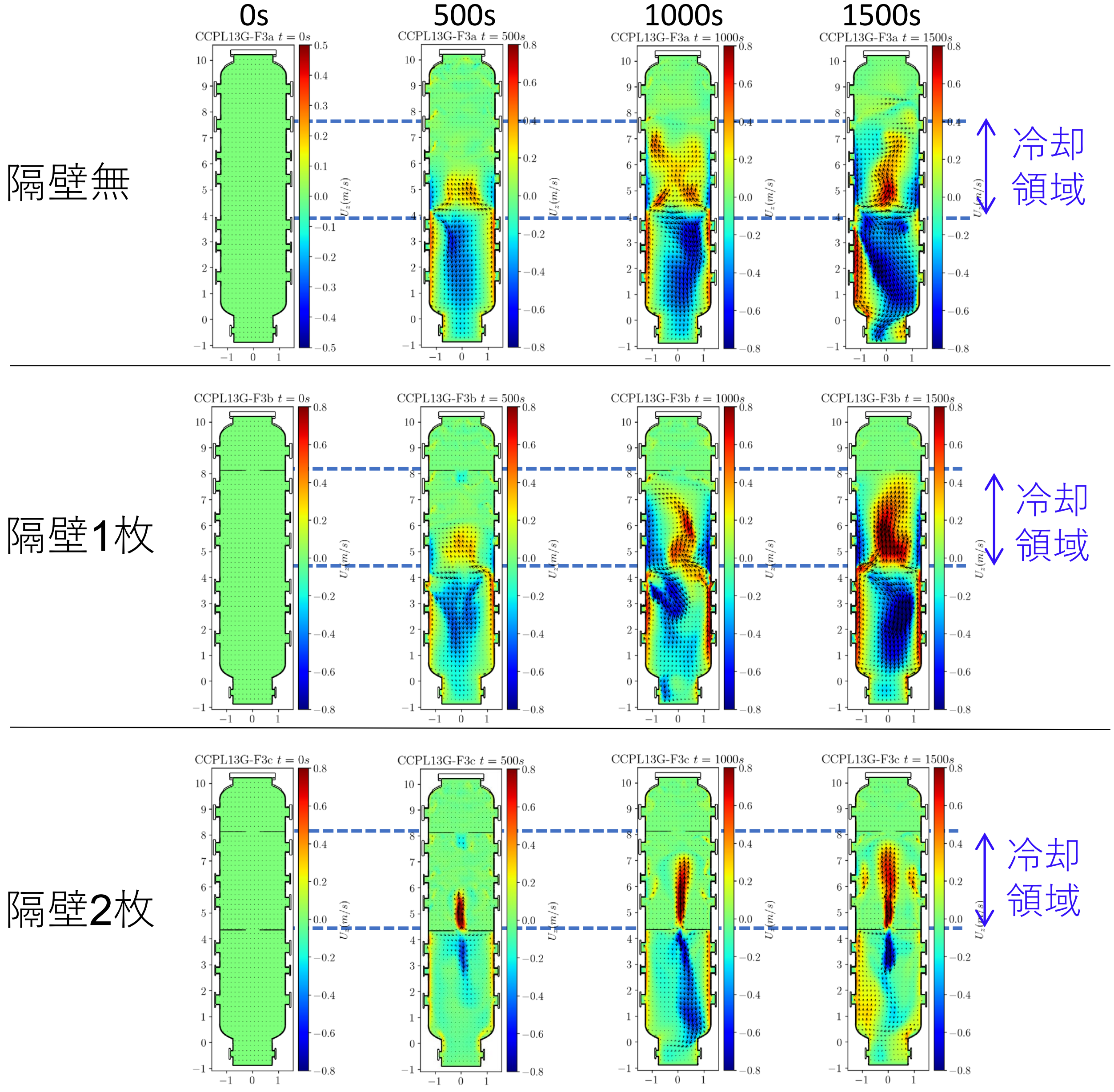
解析結果：空気濃度分布（1000s後）





- 空気濃度の挙動はヘリウム濃度の挙動と類似。

解析結果：流速分布（0～1500s）

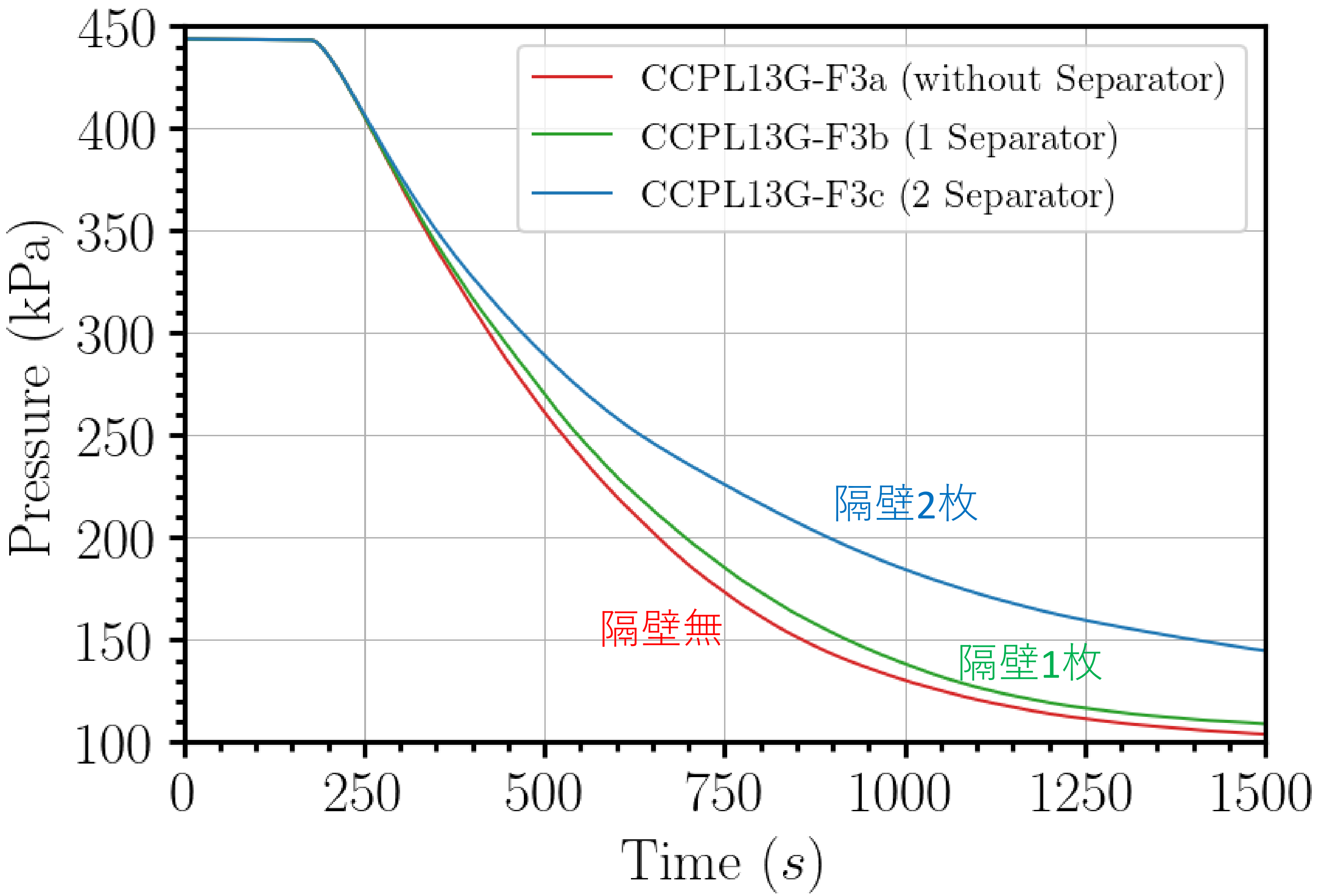


カラーコンター
赤：鉛直上昇
青：鉛直下降

- 冷却領域とその下部で自然循環が生じ、対向する双子渦が形成される。

- 中央部での凝縮により隔壁の穴を通じて上下から気体が供給される。
- 下部からの供給量が多い。

解析結果：圧力変化



CCPL13G-F3a (without Separator)
CCPL13G-F3b (1 Separator)
CCPL13G-F3c (2 Separator)
Pressure (kPa)
Time (s)
450
400
350
300
250
200
150
100
0
250
500
750
1000
1250
1500
隔壁2枚
隔壁無
隔壁1枚