

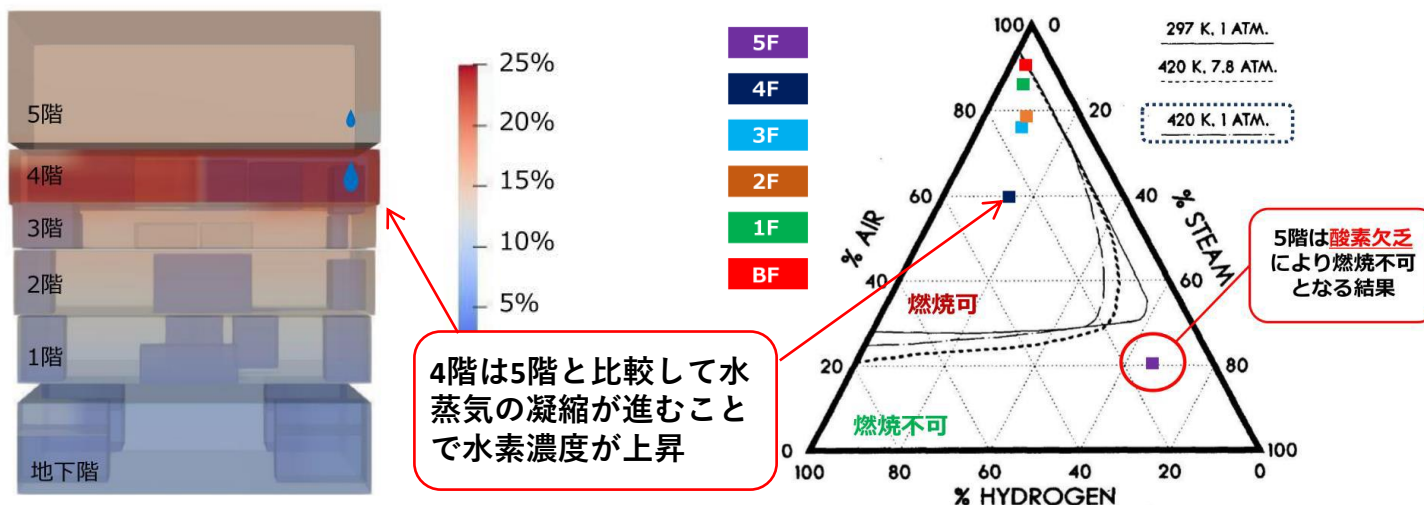
CIGMA装置体系での 凝縮による水素蓄積に関する実験計画

2023年9月12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

相馬秀, Ari Hamdani, 孫昊旻, 柴本泰照

- 検討会では、3号機建屋において、「2段階爆発」の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[1]。
 - ✓ 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。



GOTHICによる解析結果（右：水素濃度分布，左：各階の気体成分比）

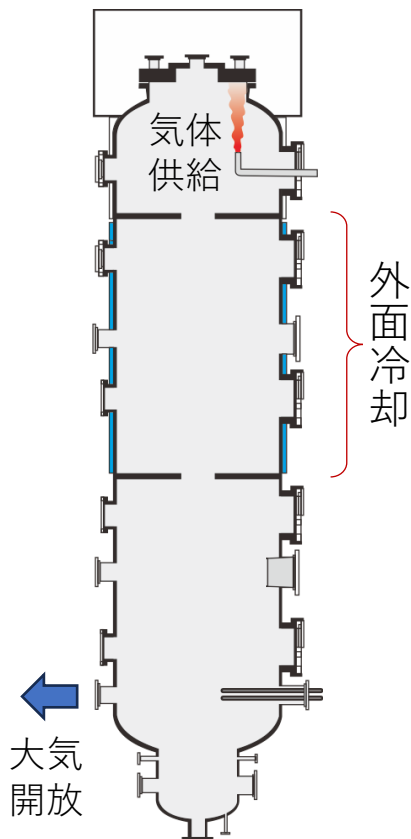


凝縮と移流のバランスの結果として、閉じられた容器の中間層で水素の濃縮が生じる現象を、JAEA/CIGMA装置を用いて再現する実験を提案[2]。

[1] 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。

[2] 同第37回会合，資料5-1，2023年4月24日。

CIGMA容器



- CIGMA装置上部で気体（水蒸気＋ヘリウム，ヘリウムは水素模擬体）を注入しながら，外面冷却機能により，容器壁表面で水蒸気を凝縮させる。
- 試験部容器の幾何形状は実機建屋と大きく異なり，スケーリング則も部分的にしか成立しないので，厳密な事故の再現は不可能。
- ここでは，凝縮駆動による水素移行と蓄積という現象に着目し，現象を支配する要素（凝縮量・移流拡散）と，鉛直方向濃度分布との関係性を把握することを目的とする。
- ベースケースの設定はTEPSYSのGOTHIC解析の条件を参考とするが，現象理解という目的に即して，拡散から移流に至るまで幅広い条件設定を検討。

本発表

- 実験境界条件の設定の考え方の紹介。
- 予備解析の結果の紹介。

- DW圧力の実測値を再現する事故シナリオを推定し、水素・水蒸気の発生量と格納容器からの漏洩量 = 建屋への供給量を推定[1]。

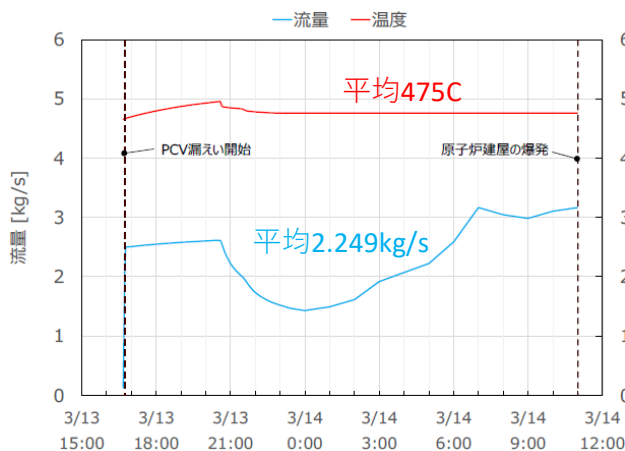
解析ケース	水蒸気総漏洩量	水素総漏洩量
ケース1	約150トン	約1300kg
ケース2	約110トン	約975kg
ケース3	約75トン	約650kg

← 事故シナリオから求まる基本条件

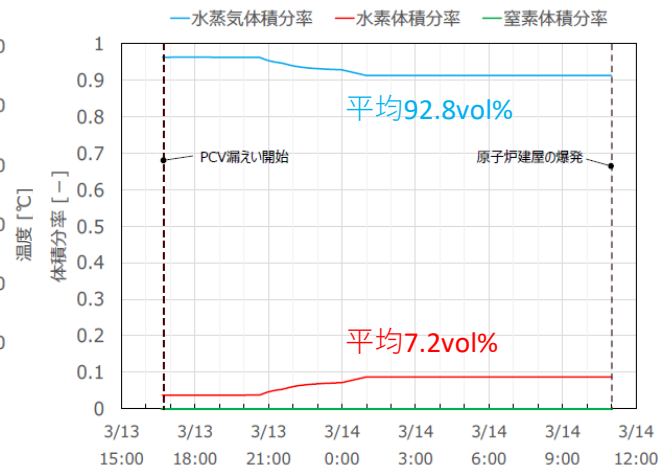
← 第34回検討会で提示した解析条件
(水素爆発映像と整合した条件)

ケース1の条件

- 気体温度
- 気体流量
- 気体組成



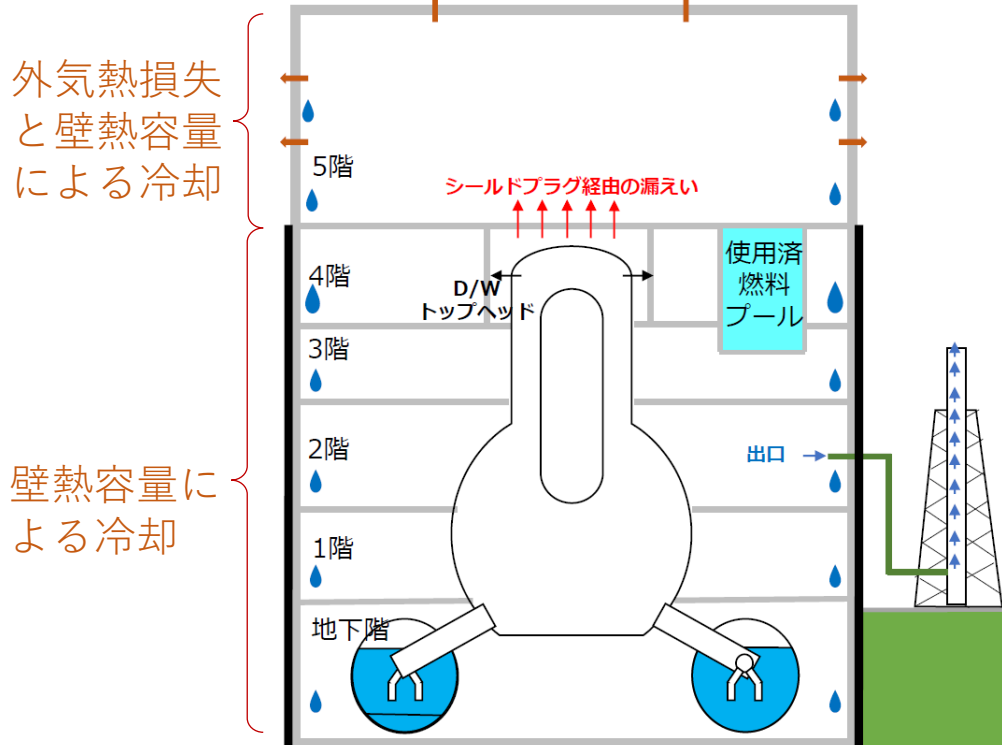
漏えいガスの流量（ケース1）及び温度



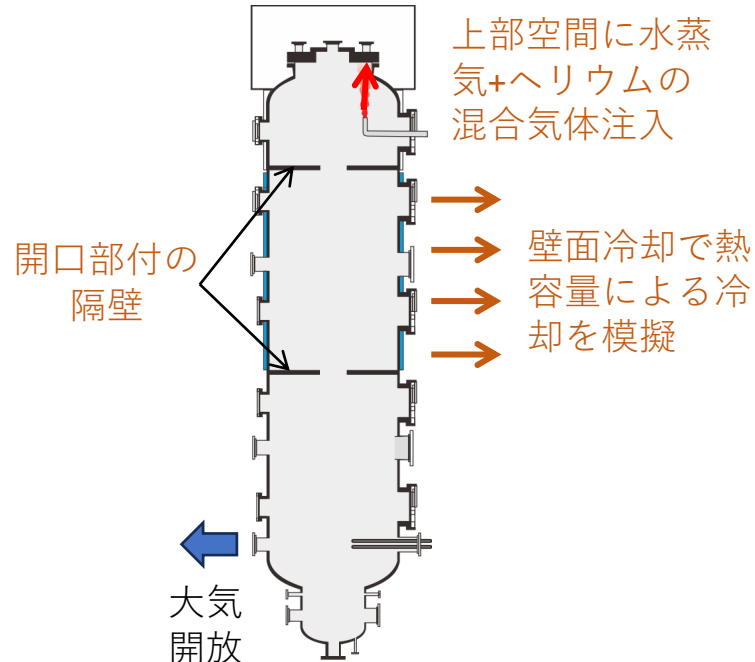
漏えいガスの組成

[1] 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38回会合，資料2-2，2023年6月22日。

TEPSYSによるGOTHIC解析

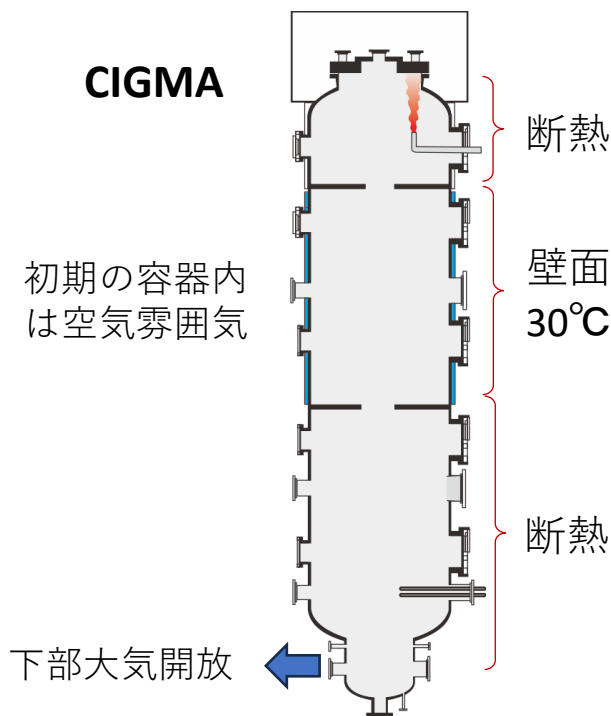


CIGMA(50m³)



基本ケースの考え方

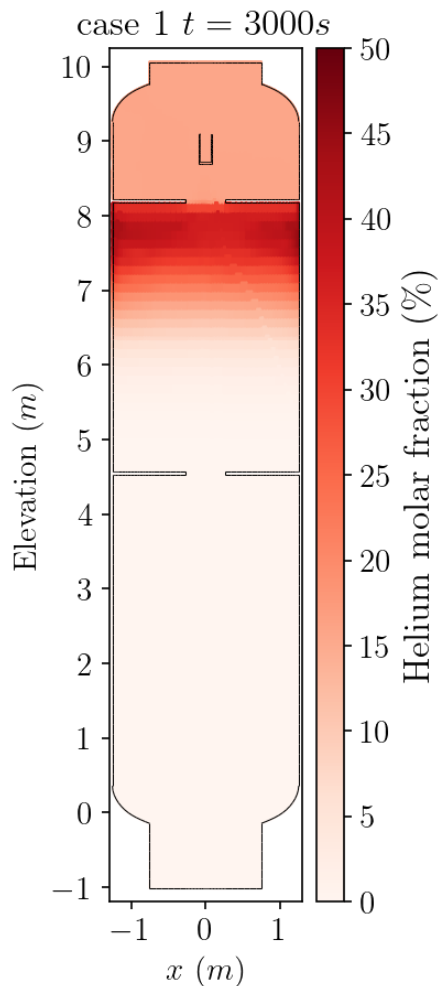
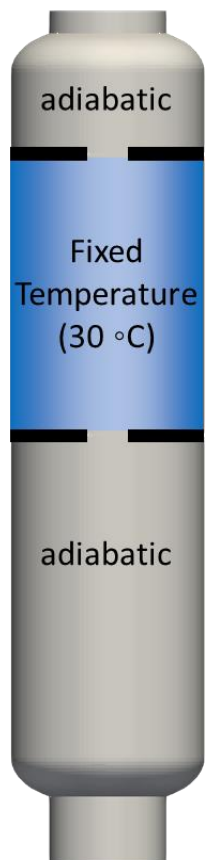
- **注入気体**：流量は3号機建屋とCIGMA試験容器の体積比から決定。但し、低流量のため、計測の測定限界による調整を行う。組成と温度はGOTHIC解析値を使用。
- **熱伝達**：解析による構造材の温度変化と熱容量から除熱量の見積もりを検討中。
- **実機データ**：建屋体積や構造材の熱容量などは、BSAFプロジェクトで提供されたデータを使用。



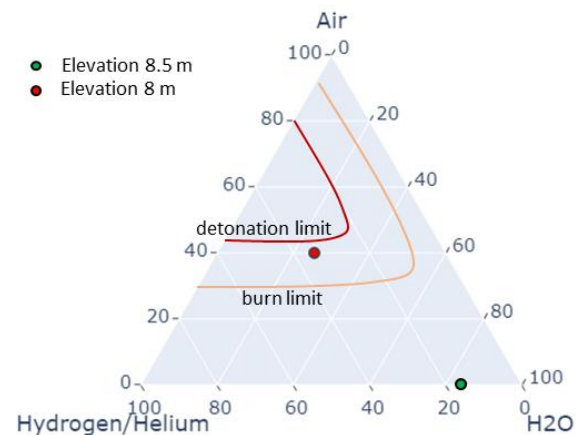
	TEPSYS 解析	CIGMA解析
初期条件		
圧力 (MPa)	0.1	0.1
温度 (°C)	30	30
注入気体		
温度 (°C)	475	475
組成 (蒸気:水素)	0.99:0.01	0.95:0.05
平均流量 (kg/s)	2.249	0.00465
除熱条件		
5階	熱損失+壁熱容量	断熱
4階	壁熱容量	壁30°C固定

- OpenFOAMコードを用いた予備解析を実施。
- 流量は体積比を考慮。ヘリウム蓄積が生じやすい条件での移行挙動を把握。
- 乱流モデル=k- ω SST, 凝縮モデル=HMTD (拡散層モデル)。
- トータル114万メッシュ, 壁近傍は $y^+ < 1$, 最大セルサイズ=5cm。

ヘリウム濃度分布



シャピロ線図



- 本計算では凝縮熱伝達が過大な条件なため、速やかにHe濃縮が生じた。
- 凝縮熱伝達量を下げる等、条件を緩和させた解析を継続中。

- CIGMA実験の境界条件をTEPSYSによるGOTHIC解析の境界条件を参考に検討。
 - 注入気体の流量は体積比スケーリング則を用いて基本ケースを決定。
 - 熱伝達境界条件はTEPSYS解析結果（構造材温度変化）を参考に検討中。5Fと4Fの除熱量のバランスも検討する。
 - バルクヘッドの有無も検討。
- 並行してCFDによる予備解析も継続実施し，境界条件策定の参考とする。
- 実験は2024年1月頃を予定。

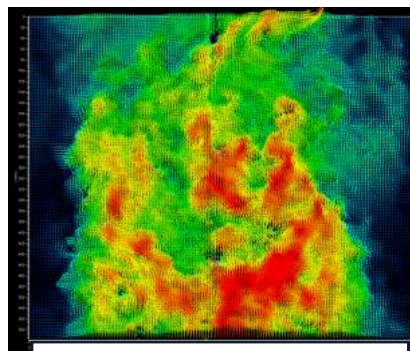
参考資料



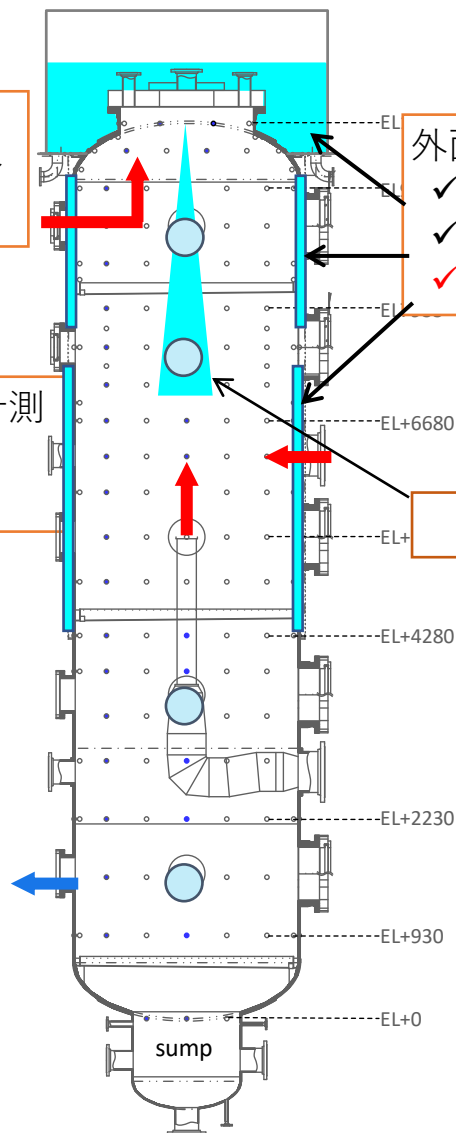
様々な箇所から蒸気-空気-ヘリウム混合の高温気体 (~700 °C) を注入

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)



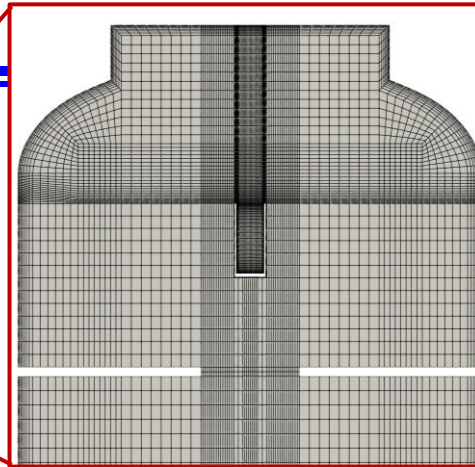
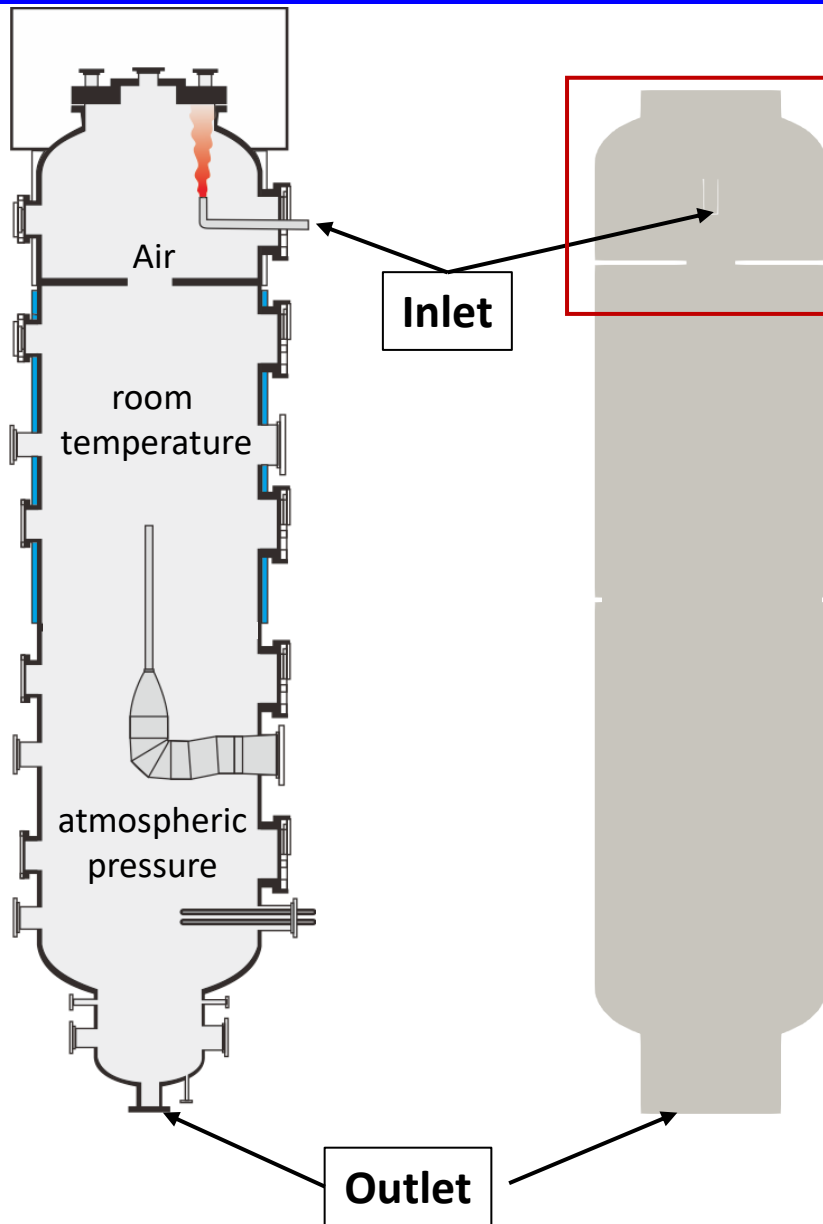
PIV measurement



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

スプレー噴射

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



Total mesh :
1,141,748 hexahedral

Near wall y^+ :
< 1

Maximum cell size:
50 mm

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
Wall Condensation	single phase 'diffusion-layer' approach
Multi-Species Transport	effective binary diffusion model (Fuller model)