

CIGMA装置体系での 凝縮による水素局所化に関する実験

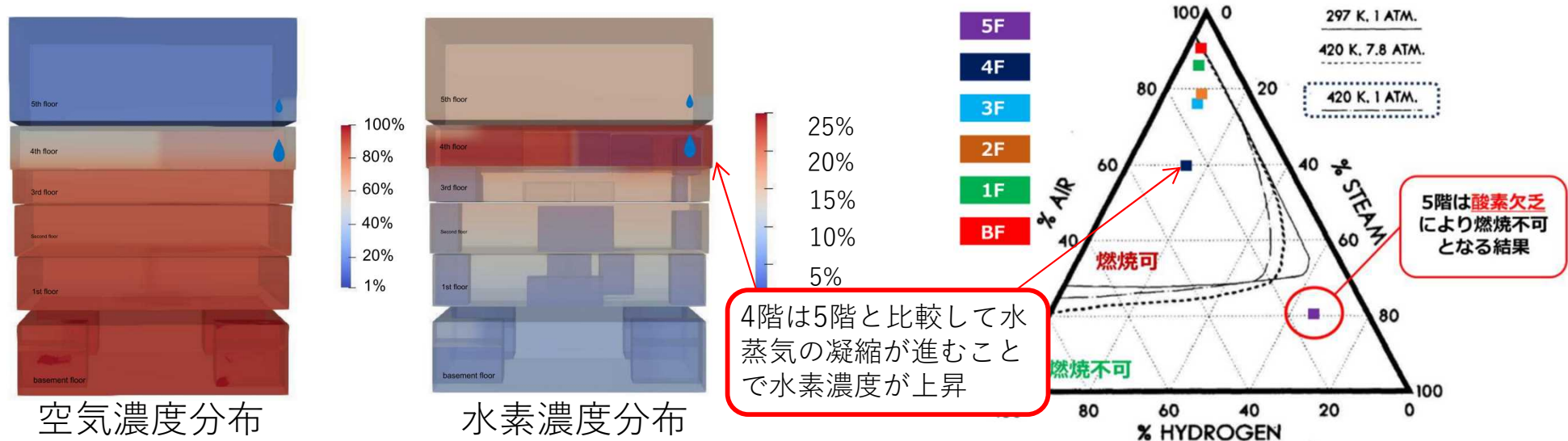
2024年(令和6年)3月12日

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

Ari Hamdani, 相馬秀, 柴本泰照

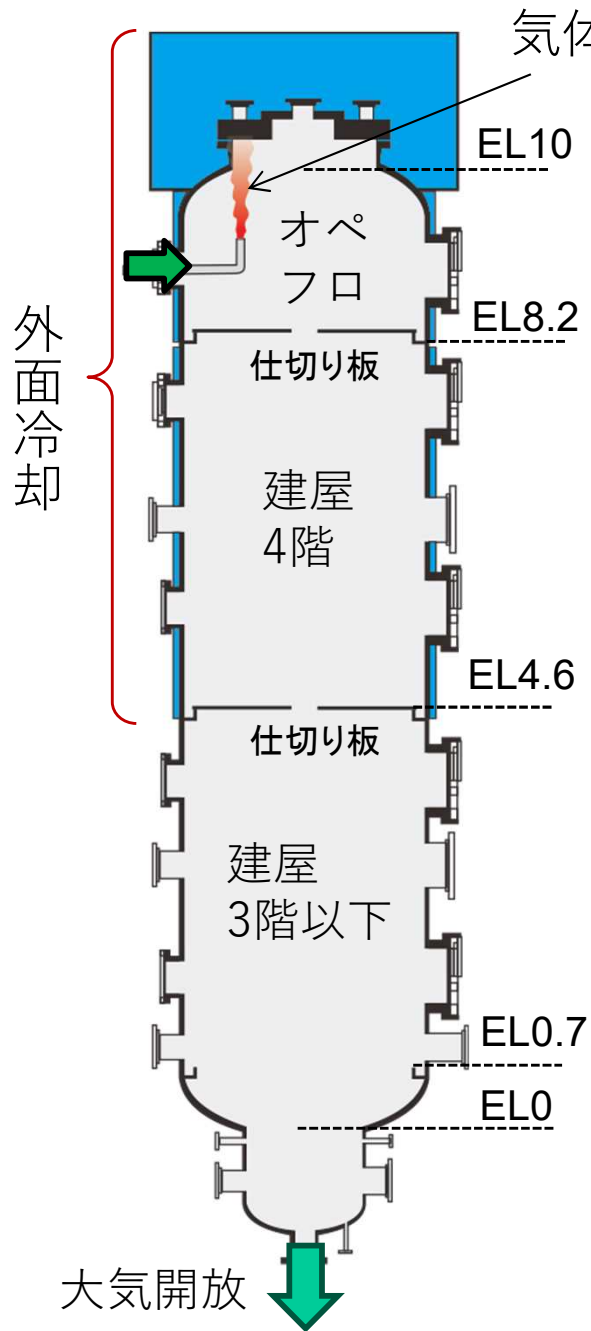
- 検討会では、3号機建屋において「2段階爆発」の可能性が指摘されている。
- 4階で第一段回目の爆発が発生した理由として、GOTHICを用いた解析により、シールドプラグ経由での水素漏洩に対し以下の可能性が指摘されている[1]。
 - ✓ 5階では酸素欠乏となり燃焼が不可となった。
 - ✓ 4階では水蒸気凝縮効果により水素濃度が高く、燃焼可能となった。



GOTHICによる解析結果（左：気体濃度分布，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]。
- 実験の境界条件の考え方についてご説明[3]。

[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. [2]同第37回会合,資料5-1. [3] 同39回会合,資料4-4.



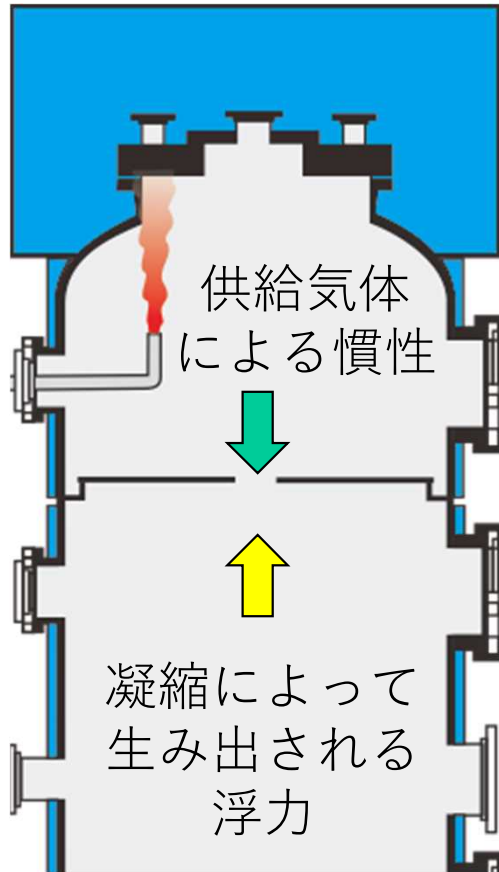
気体供給（シールドプラグから建屋への漏れと想定）

- CIGMA装置上部に気体（水蒸気＋ヘリウム，ヘリウムは水素模擬体）を注入し、上半身を外面冷却して、容器壁表面で水蒸気を凝縮させる。
 - 水素移行を検証する上では、**ヘリウムは良好な水素模擬体**であることがTHAI実験で確認されている。
- 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、**移流・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（移流や拡散、凝縮量）と鉛直方向気体濃度分布との関係性を把握することを目的とする。
- 実験の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する。

Inlet mass flow rate				Vol. Scaling
Parameter	dim.	1F3 TEPSYS	CIGMA	
Volume	m ³	26000 (5th floor)	12.3 (upper region)	
Steam mass flowrate	g/s	2230	35	
Hydrogen mass flowrate	g/s	19.4	0.3	
Steam mass flowrate per unit volume	g/s/m ³	0.086	2.8	1:30
Hydrogen mass flow rate per unit volume	g/s/m ³	0.0008	0.024	1:30
Inlet enthalpy				
Parameter	dim.	1F3 TEPSYS	CIGMA	
Inlet temperature	°C	475	120	
Steam specific enthalpy	kJ/kg	3436	2717	
Steam inlet enthalpy per unit volume	kW/m ³	0.3	1.9	

- 1F3の事故進展は約19時間であり、容器体積当たりの気体供給流量（PCVからの漏れ）が非常に小さい。
- CIGMA装置の計測系の制約*により、蒸気とHeの流量比を実機解析に合わせると、実機解析の30倍の流量設定が限界。
- 供給エンタルピの体積スケーリングは6倍程度。
- 本実験は、時間に対する加速実験と見なすことができる。

*設定可能な最小流量は、He:0.2g/s, 蒸気:4g/s

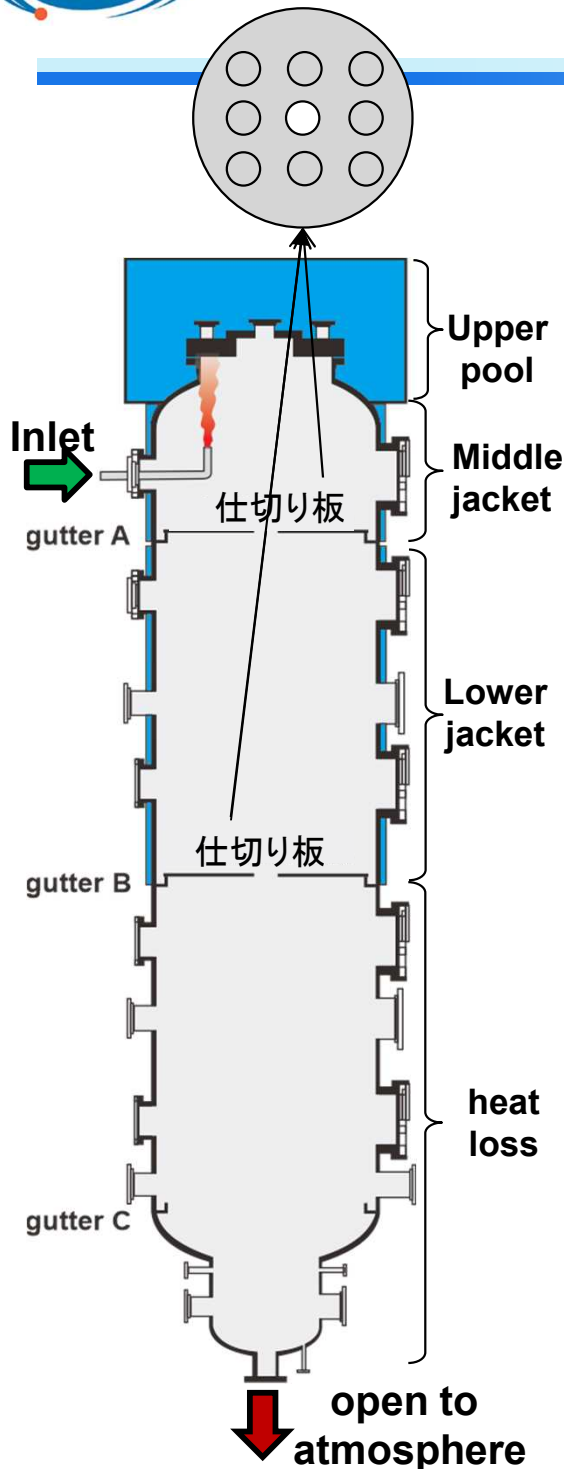


- 供給流量差は慣性と浮力の比に影響する可能性がある。開口部のフルード数で粗い評価ができる。

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{\Delta\rho/\rho g D}}$$

現在のCIGMA実験条件では $Fr \sim 2$ 、実機想定流量では $Fr < 0.1$ となる。

- 今後の検討課題
 - ✓ Fr 数が小さいと慣性による下部への流体移行が浮力で阻害される恐れがあり、低 Fr の実験が必要。
 - ✓ 開口部の孔の数。

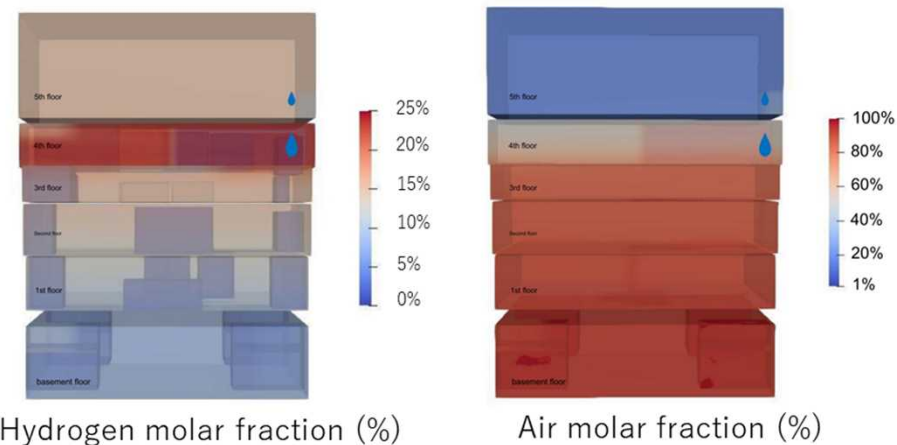
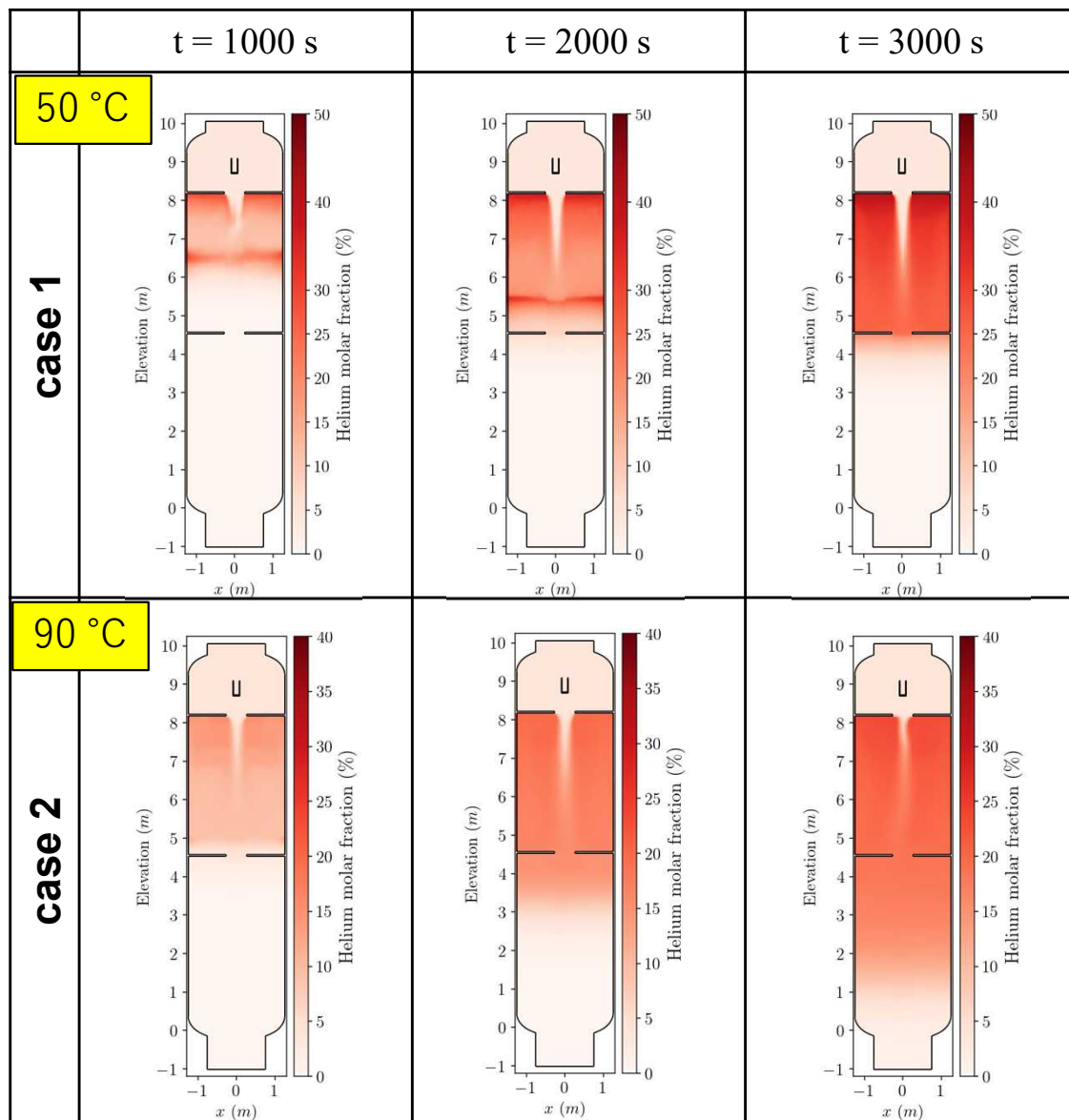


	CC-SJ-01 (Case 1)	CC-SJ-02 (Case 2)	1F3
Initial pressure (MPa)	0.1		0.1
Bulkhead aperture ratio	1:100		1:30
Injection temperature (°C)	120		~475
Inlet flowrate ratio (Steam:H ₂)	99:1		99:1
Steam mass flow rate (g/s)	35		~2230
Helium mass flow rate (g/s)	0.3		~19
Injection time (s)	10,000		66,000
Upper pool temperature (°C)	50	90	unknown
Middle jacket temperature (°C)	50	90	unknown
Lower jacket temperature (°C)	50	90	unknown

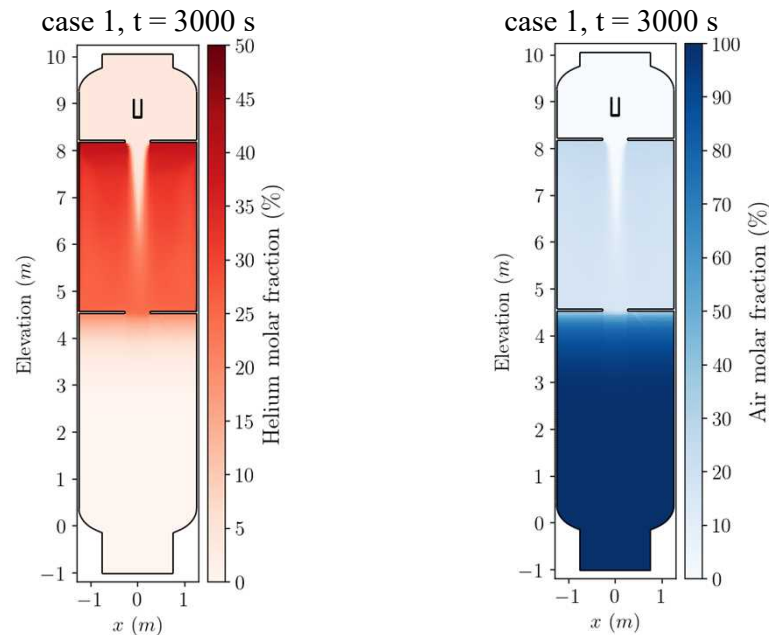
- 実機の冷却は構造材ヒートシンクと外気放熱量が想定されるが、定量的な熱伝達量は不明。
- 実験では50°Cと90°Cの壁温度を設定。

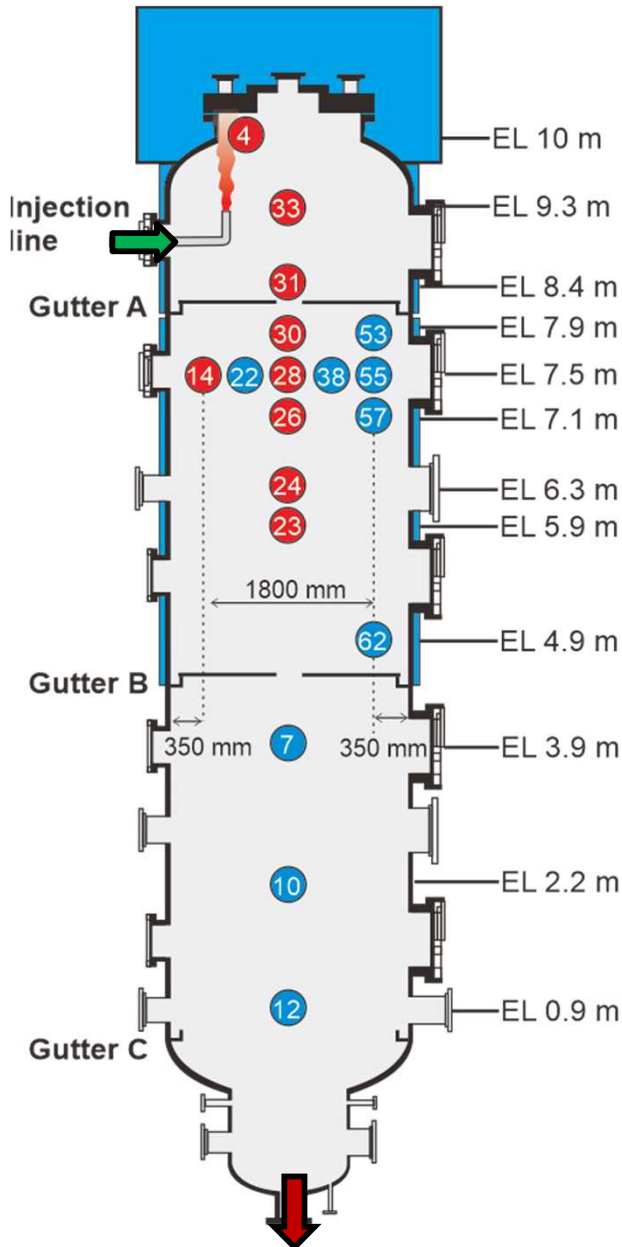
OpenFOAMによる事前解析を実施し、TEPSYS解析を定性的に模擬することを確認。

TEPSYS analysis using GOTHIC code



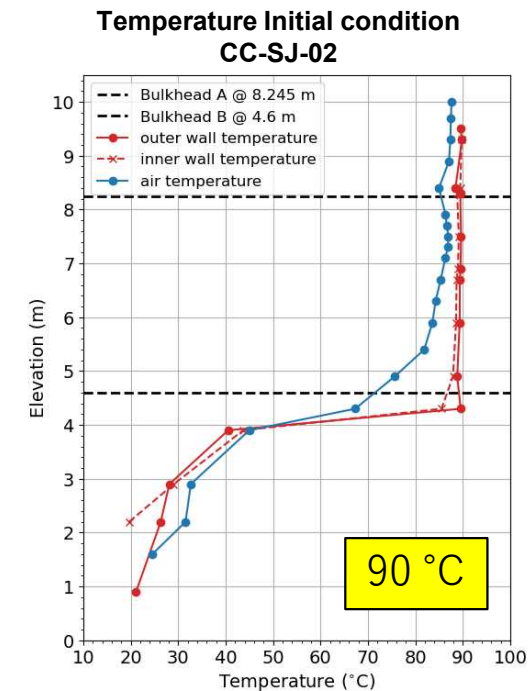
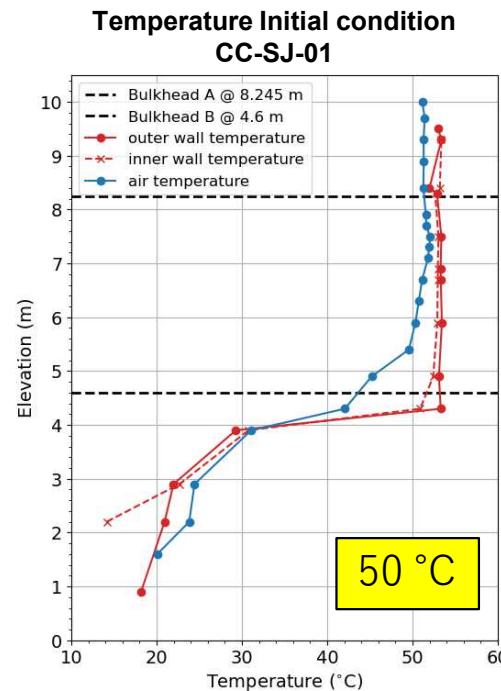
CFD simulation in CIGMA facility





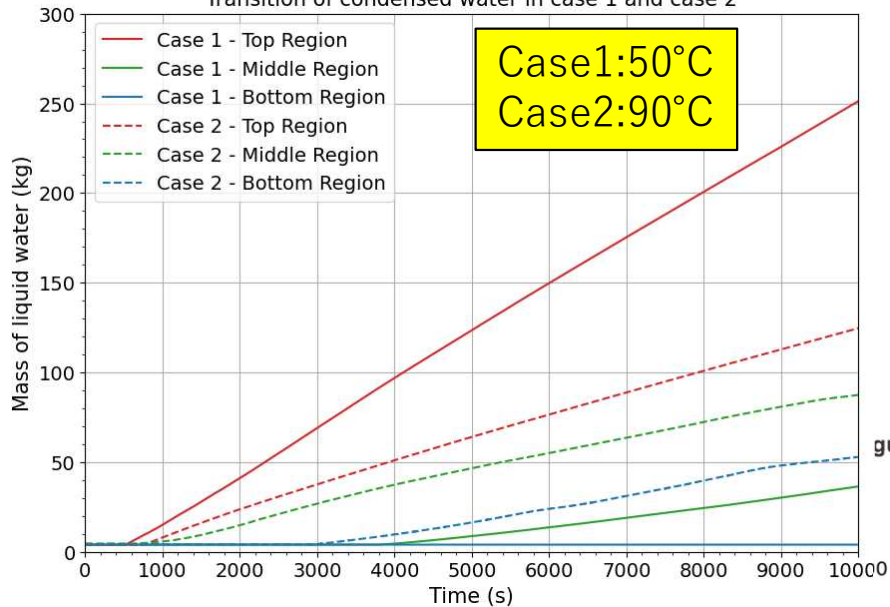
- QMS sensor location (HIDEN 4F)
- QMS sensor location (HIDEN 3F)

1. 上部及び中間部を冷却水（設定温度）により予熱。
2. 壁温が設定温度に達した後、上部空間に供給ノズルを通して蒸気とヘリウムを一定温度で上向きに注入。
3. 容器内の温度及びガス濃度を熱電対及びQMS*を用いて計測。
4. 実験時間は約10000秒。

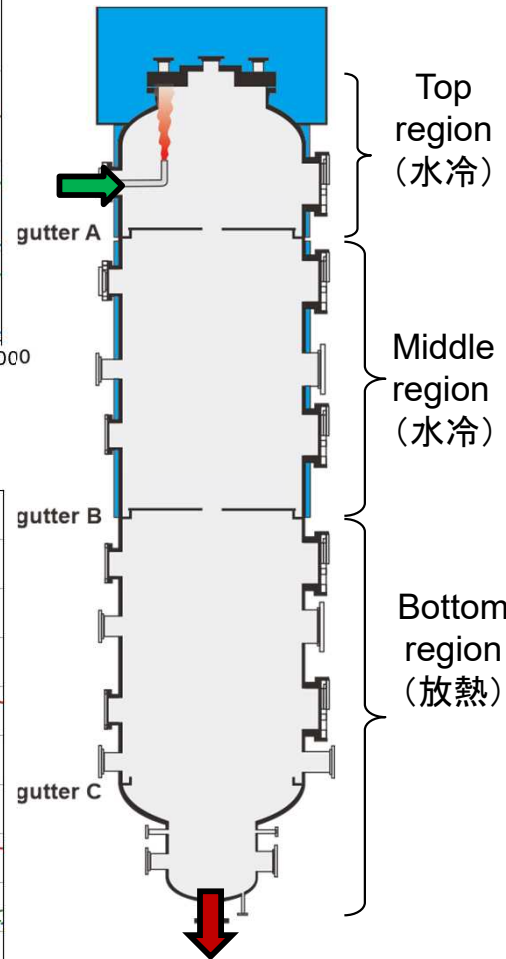
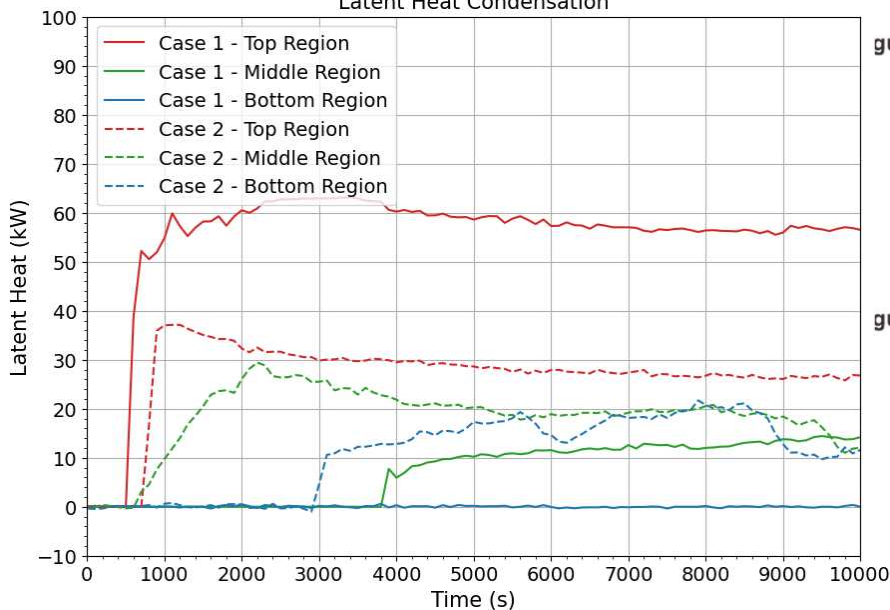


* QMS: 四重極形質量分析計

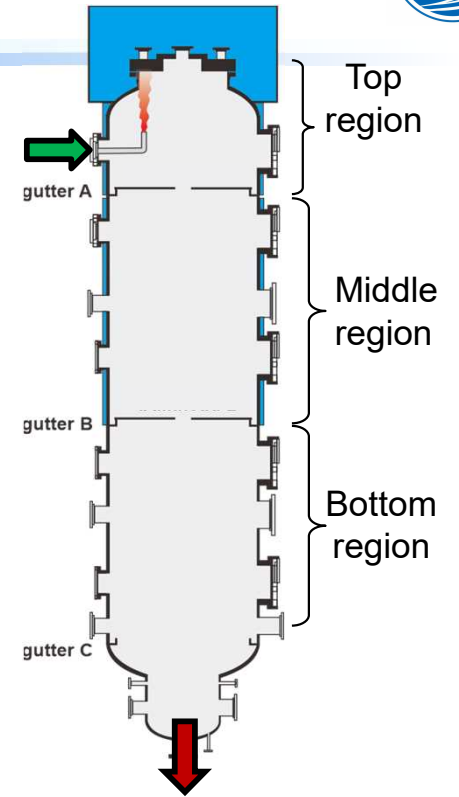
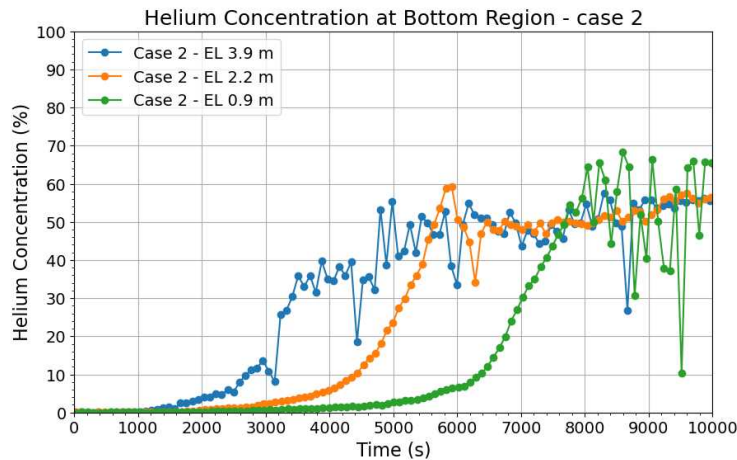
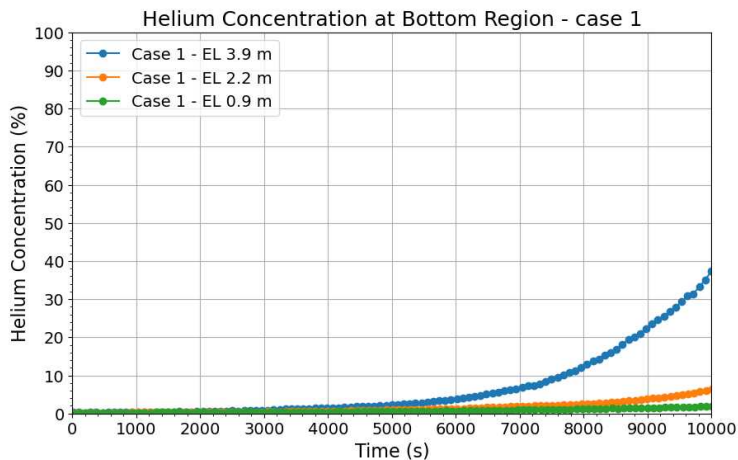
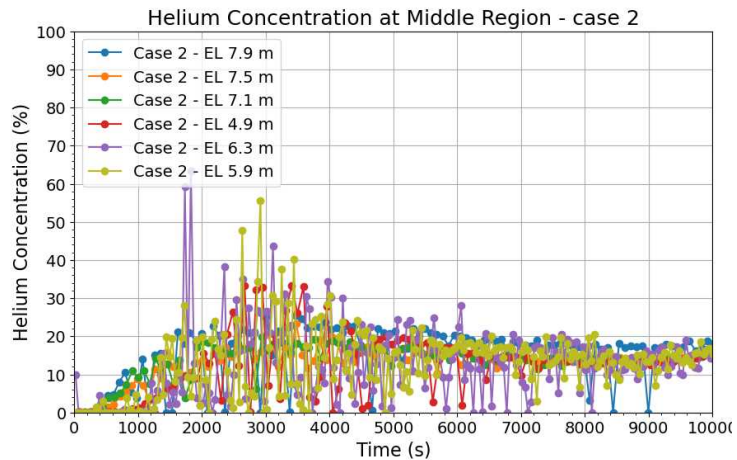
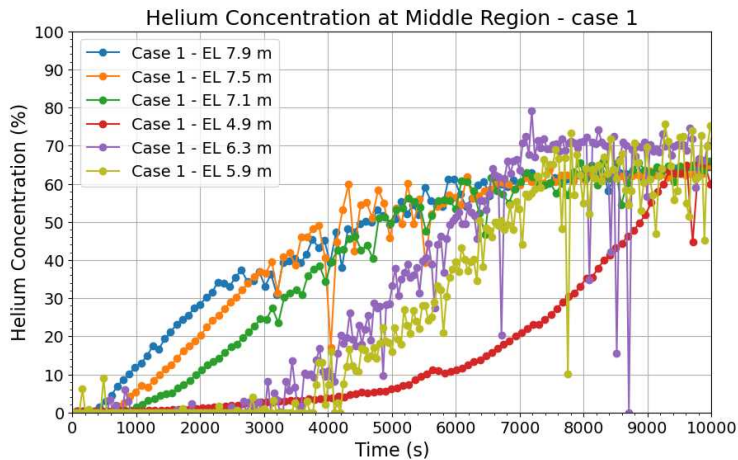
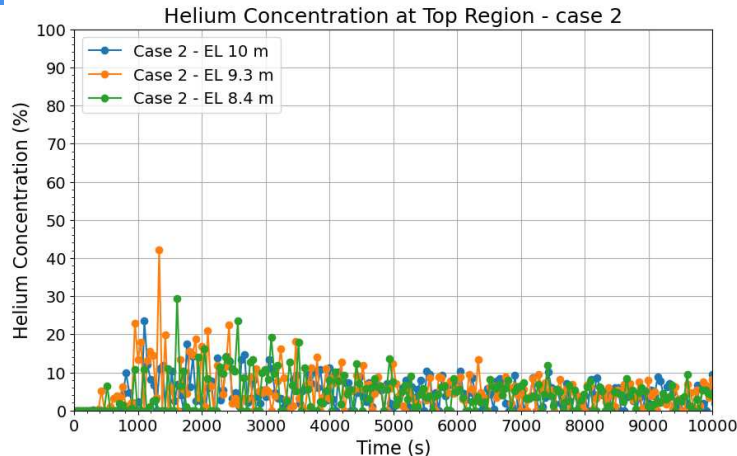
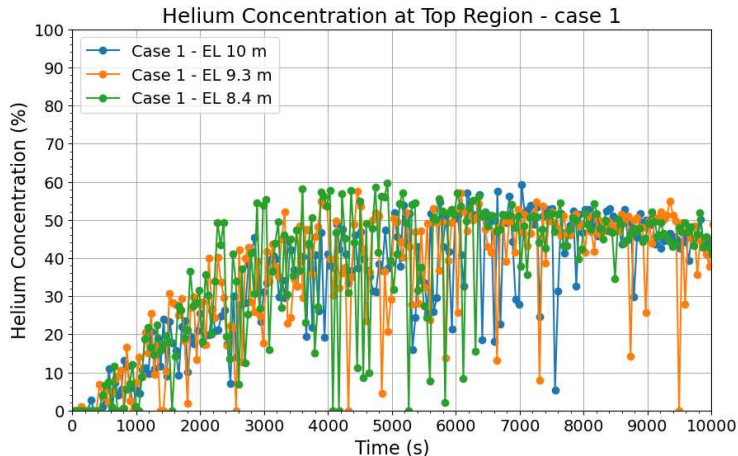
Transition of condensed water in case 1 and case 2



Latent Heat Condensation

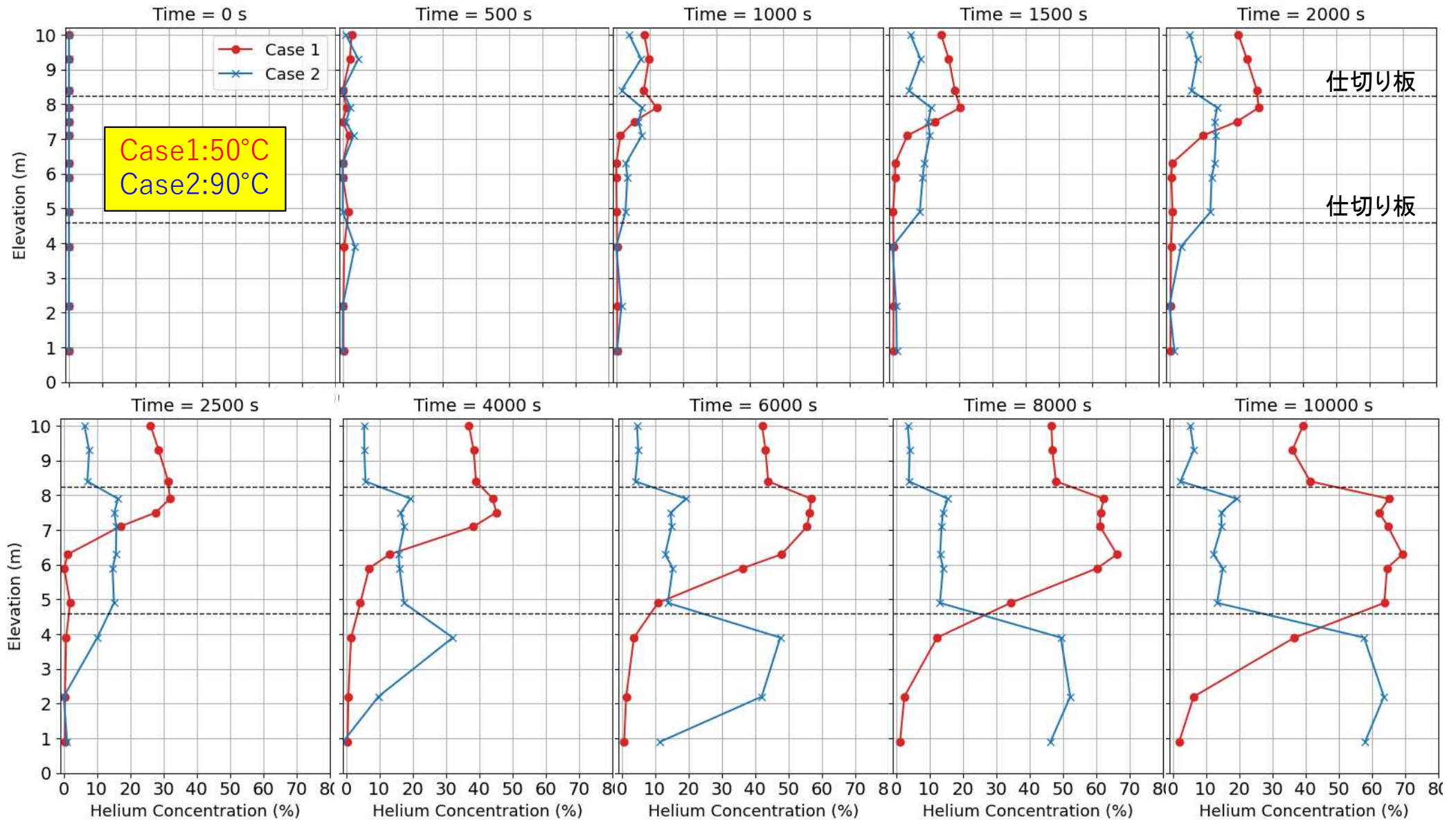


- 壁面での凝縮水はガターで回収し、凝縮水量から除熱量を評価できる。
- Case1 (冷却水温50°C) では、容器の上半身でほとんどすべての蒸気が凝縮。
- Case2 (冷却水温90°C) では、容器の上半身の凝縮が少なく、最下部まで蒸気が侵入する。最下部は初期室温の構造材熱容量と自然放熱による凝縮が進行する。
- 凝縮水量による除熱量 (潜熱) の評価では、実験中ほぼ一定値の除熱量となった。

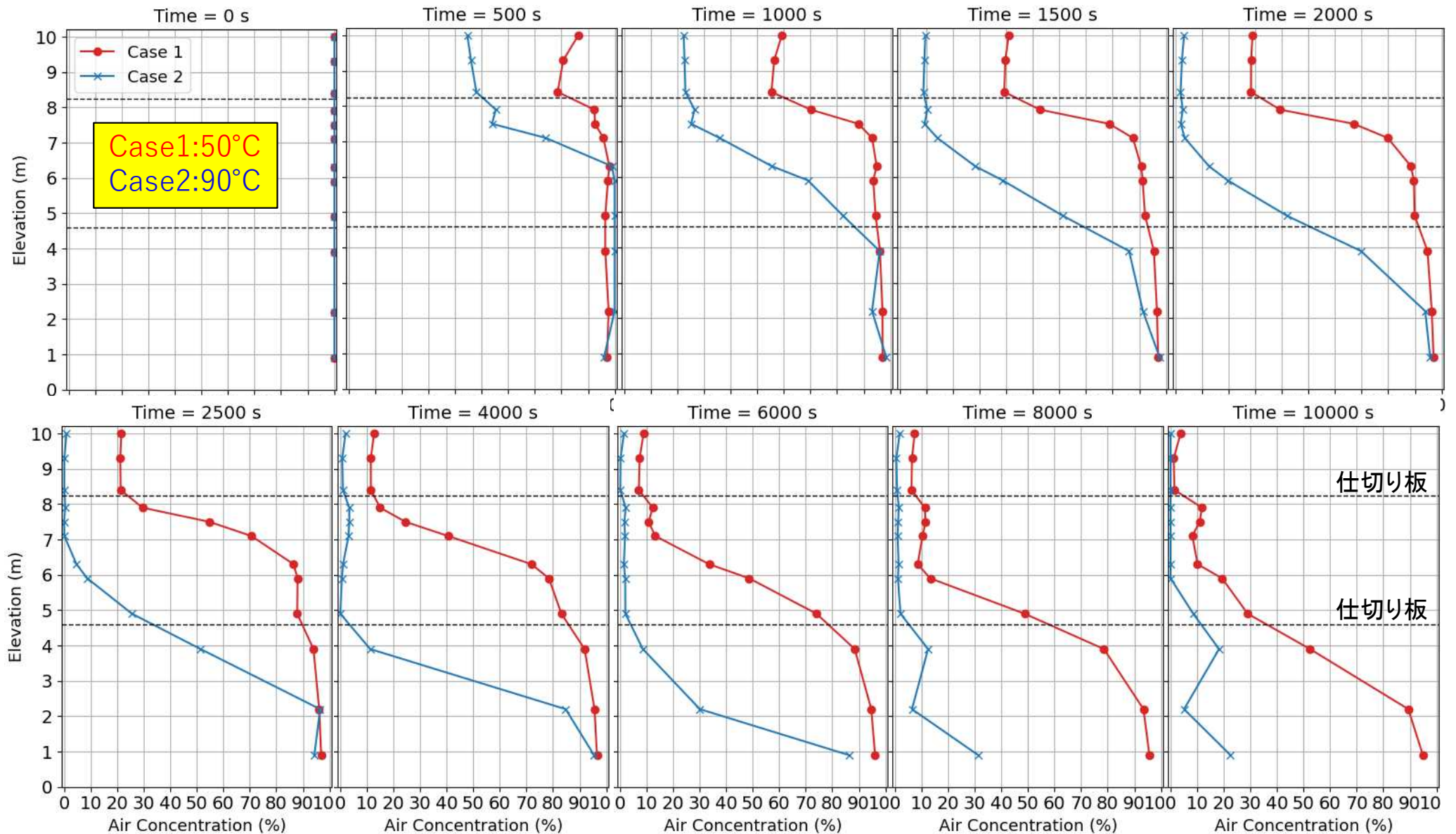


- 気体が過飽和条件ではバルク中に液滴が存在し、それを吸い込むことでQMS内で液滴が蒸発して一時的に蒸気濃度が上昇するため、振動的なデータとなる。
- 見通しをよくするため、LPF*により円滑化したデータで解析を行った。

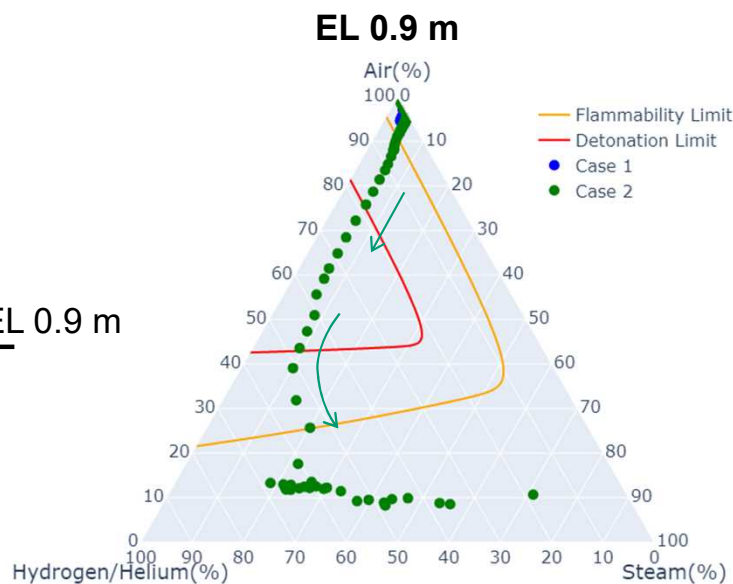
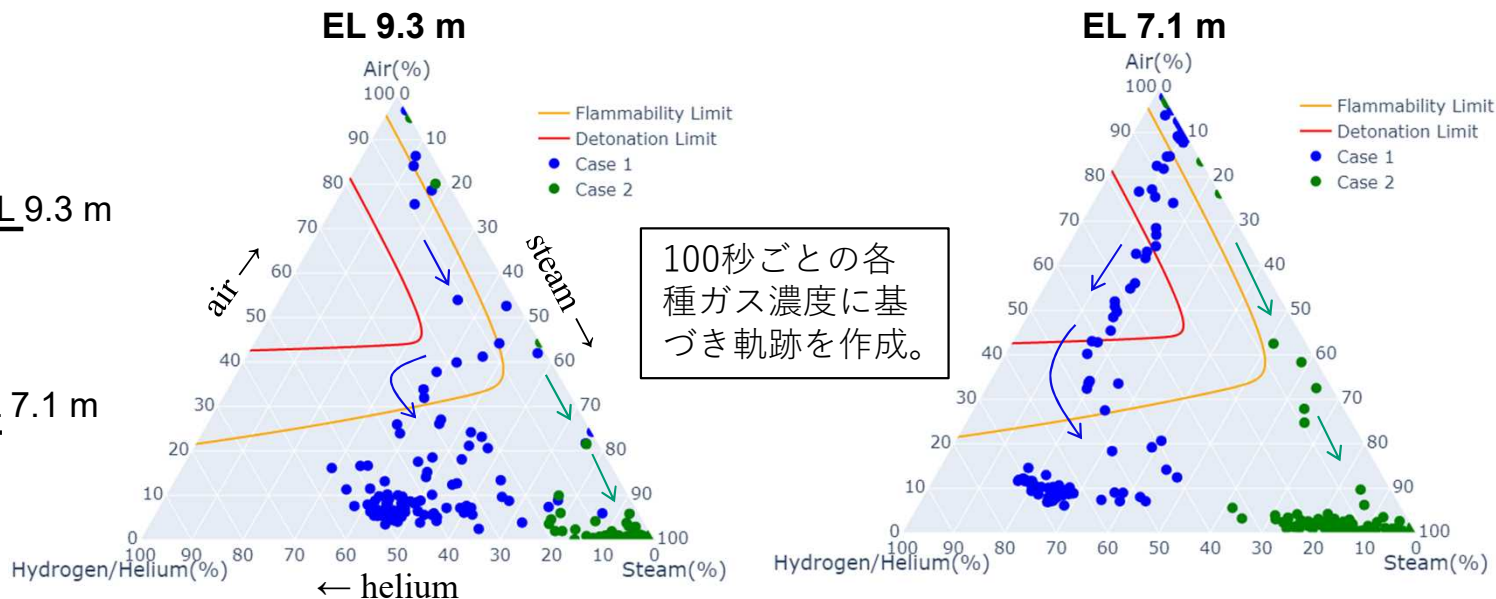
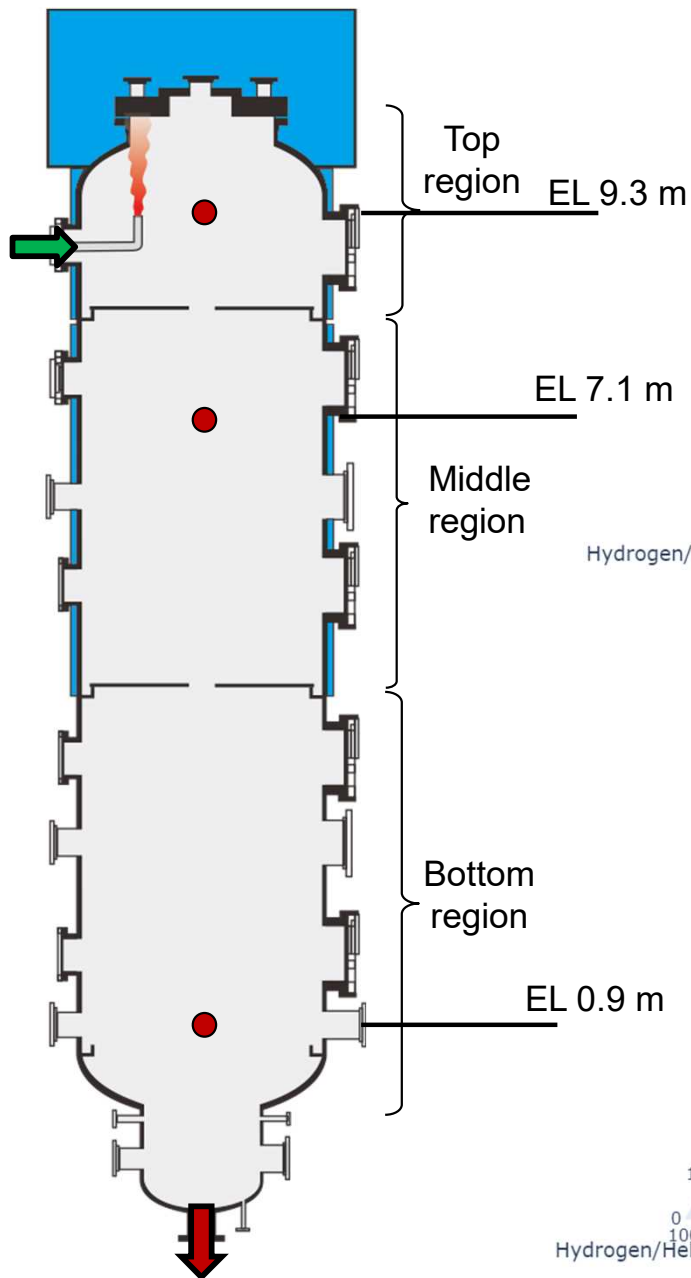
*LPF: low-pass filter



- いずれも供給したヘリウムが大気開放された下部に移行する。
- Case1では、中間階までに大量の凝縮が生じるため、上半身でヘリウム濃度の上昇が見られる。
- Case2では、下層階までヘリウムが到達する。凝縮しづらい条件では蒸気と共にヘリウムが下層階まで運ばれ、下層部でヘリウム濃度の上昇が見られる。



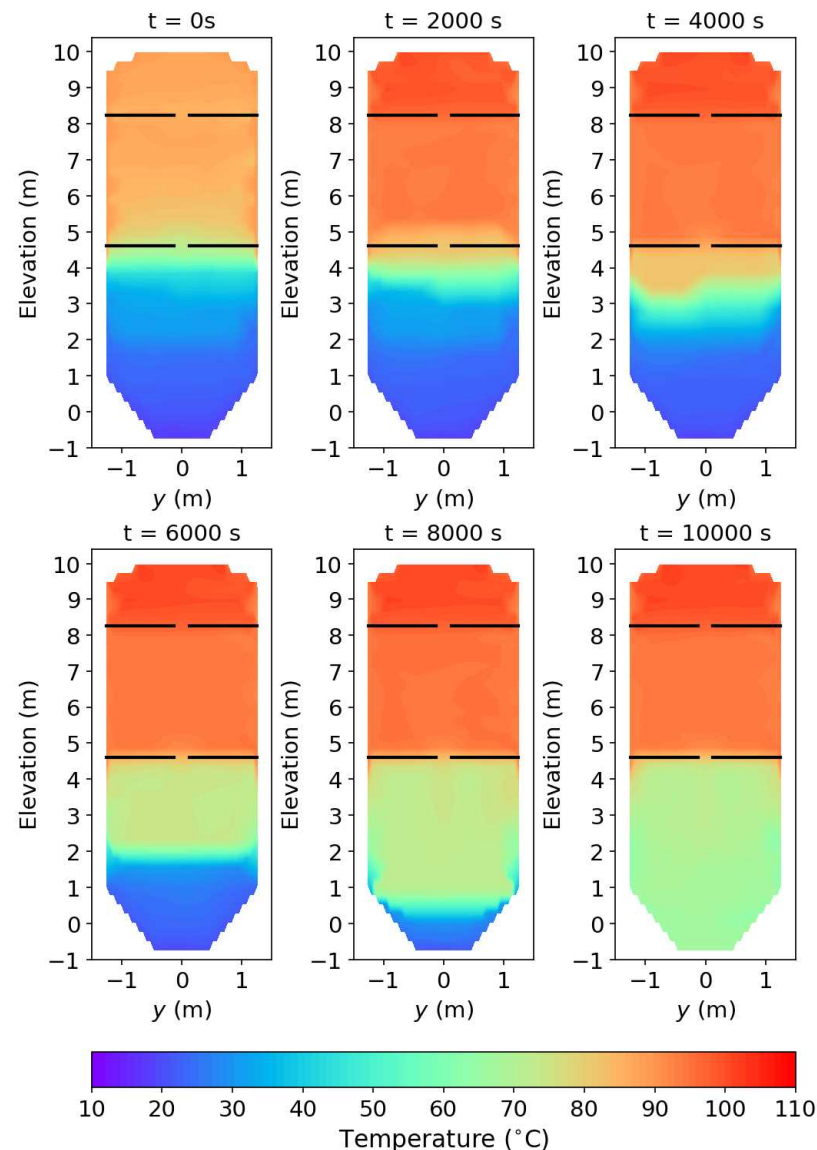
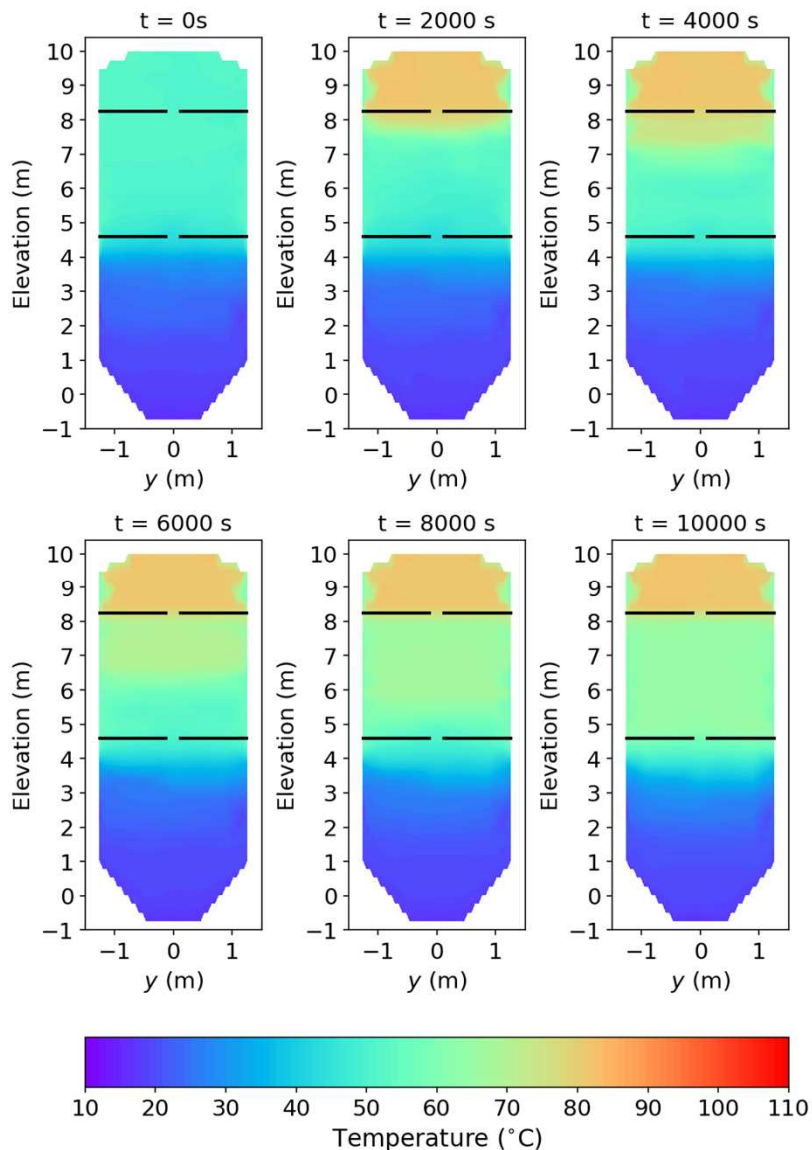
- 注入される蒸気とヘリウムは空気よりも密度が軽いため、蒸気+ヘリウムの注入によって上部空間の空気がパーズされ、空気濃度は時間が経つにつれて減少する。
- 空気がパーズされる領域は、大気開放される排気位置（今回は容器底部）にも依存する。



- Case1のEL7.1において、2000秒と4000秒の時点で混合物の濃度が燃焼可能領域に位置する。
- Case2ではEL0.9で燃焼可能領域に位置する。
- 気体が注入箇所（最上階）より離れた位置でヘリウムや空気の蓄積が生じることを示唆。

case 1 (50°C冷却)

case 2 (90°C冷却)



Case1 と Case2では下部への気体の移行の様子の違いが顕著にみられ、これは蒸気凝縮の結果と整合し、Case2では容器全体に渡って凝縮が生じる。

- 今回の実験では、建屋への蒸気+Heのリーク流量が容器体積比で、1F3事故進展評価の約30倍（エンタルピ換算で6倍）の移流の慣性が高い条件で実施した。
- 壁の冷却条件によってヘリウムの蓄積状況に違いが見られ、冷却が強い場合には上・中段でのヘリウム濃度の上昇が顕著であり、冷却が弱い条件ではヘリウムはより下層階まで運ばれた。
- ヘリウムの蓄積は移流（供給）、拡散、冷却のバランスで決まるが、定性的には、**蒸気・ヘリウムが供給される空間よりも離れたところでヘリウムや空気の蓄積が生じることが示された。**
- スケーリングの歪みとしては気体の移行の主要因が移流か拡散かの違いがある。実験的には低流量（低Fr）の実験の実施が望まれる。