

熱水力安全研究

ROSA-SA計画における
原子炉格納容器内多成分気体密度成層に係る
OECD/NEA PSI CFDベンチマークテスト

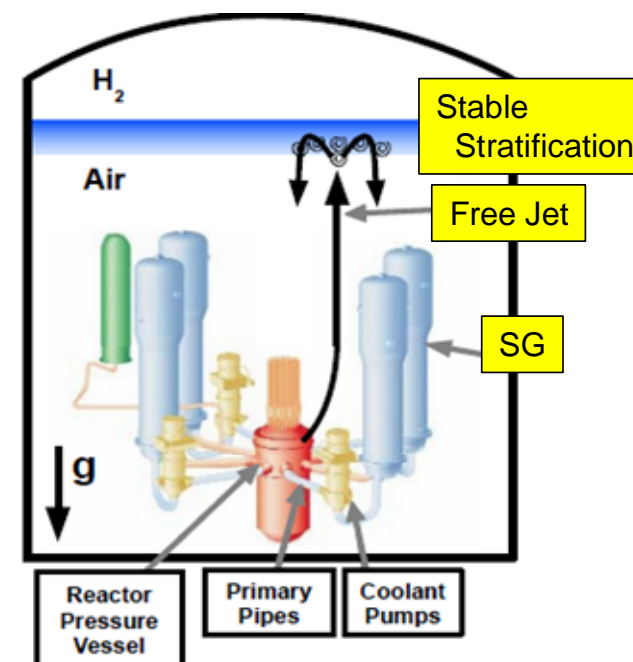
熱水力安全研究グループ 安部 諭

背景

- シビアアクシデントの防止&緩和
 - 福島事故以降の規制強化

規制に係る技術基盤整備のための研究ニーズ

- 格納容器内熱水力現象の把握
 - ROSA-SAプロジェクト (2013 ~)
Rig of Safety Assessment Severe Accident
- 水素リスク、過温破損、ソースターム移行
 - 熱水力現象が強く影響するSA事象
- 3次元的で複雑な流れを形成
 - 高度な詳細計測技術
 - 数値流体力学(CFD)解析の活用



既往研究

- OECD/SETH-2; PANDA, MISTRAで実験
 - SA時のさまざまな現象に関して調査
 - ✓ **密度成層**、自然循環、壁面凝縮、冷却方法、PARでの発熱



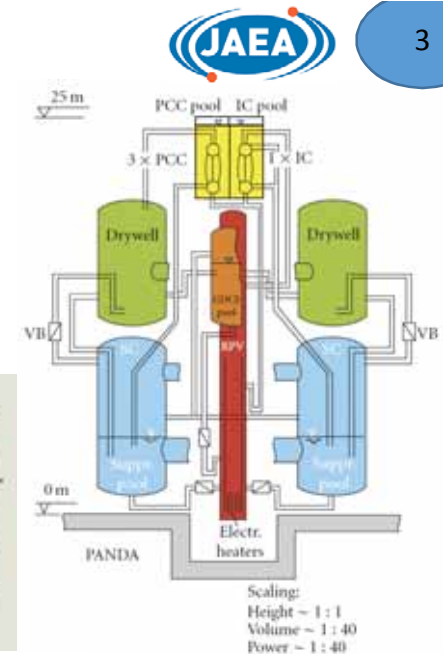
TOSQAN (IRSN)



MISTRA (CEA)



THAI (Becker Tech.)

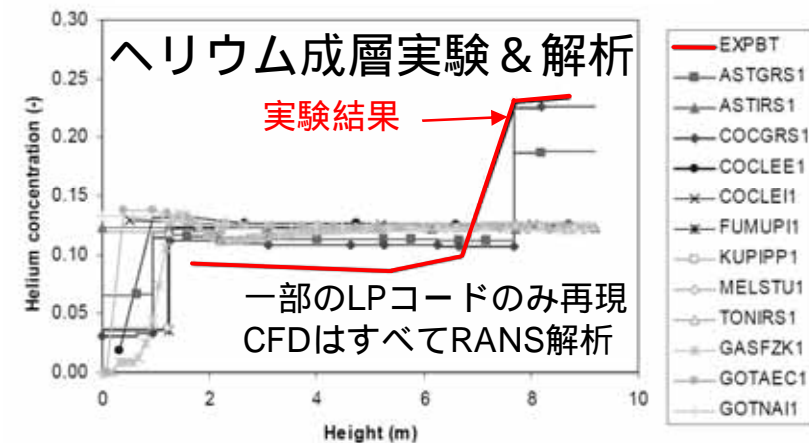


PANDA (PSI)

Scaling:
Height ~ 1:1
Volume ~ 1:40
Power ~ 1:40

- ISP-47; 21機関が参加
 - 模擬格納容器による実験に関する解析
 - ✓ CFD解析はすべてRANS解析 (Reynolds-averaged Navier-Stokes)
 - ✓ CFDは密度成層を予測できず
解析能力の改善が必要
(例: **浮力効果を考慮した発展モデル**)

Vendel J, Cornet P, Malet J, Porcheron E, Paillère H, Caron-Charles M.L., Studer E, Fischer K, Allelein H.J. International Standard Problem ISP-47 on Containment Thermal Hydraulics, Final Report. Paris (France): NEA/CSNI, OECD; 2007



OECD/NEA PANDA CFD benchmark (2013-2014)

PSI所有の模擬格納容器(PANDA)を用いた実験に関するCFD解析

Andreani M, Badillo A, Kapulla R. Synthesis of The OECD/NEA-PSI CFD benchmark exercise, CFD4NRS-5; 2014 Sept. 9-11; Zurich

- モチベーション

- 成層浸食メカニズムの把握
- 模擬格納容器(@JAEA) 実験 & 解析へのステップ

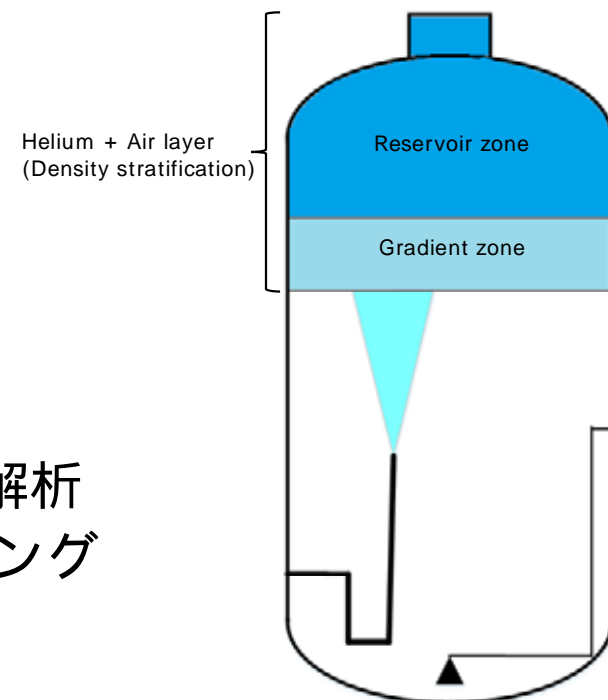
- 体積：90.24 m³
- 解析時間：7200 s
- 大気圧条件下
- 直径75 mmのジェットノズル
 - 流速4.67 m/s
 - ヘリウム濃度 13.4%
- 領域上部3 mに密度成層
 - ヘリウム濃度 37%

- 実験内容

- 鉛直浮力ジェットによる密度成層侵食・崩壊
- 大空間(90.24 m³) & 長時間解析 (7200 s)

- 本研究グループの解析

- **RANS**(Reynolds-**a**veraged Navier-**S**tokes)解析
 - ✓ 平均場のみを変動(乱流)場の効果はモデリング
 - 乱流モデルを改良



ベンチマーク解析に向けて 現象把握

Abe S, Ishigaki M, Sibamoto Y, Yonomoto T. RANS and LES analyses on a density stratified layer behavior of multicomponent gas by buoyant jet in a small vessel. ICONE 22; 2014 July, Prague

● 解析内容: 小型容器内での鉛直ジェットによる成層崩壊

- RANSとLES解析を比較
 - RANS
Reynolds-averaged Navier-Stokes
 - LES
Large-eddy simulation
- 実験前解析

平均場	Grid scale	変動場 Sub-grid scale
RANS		
LES		
DNS (Direct Numerical simulation)		

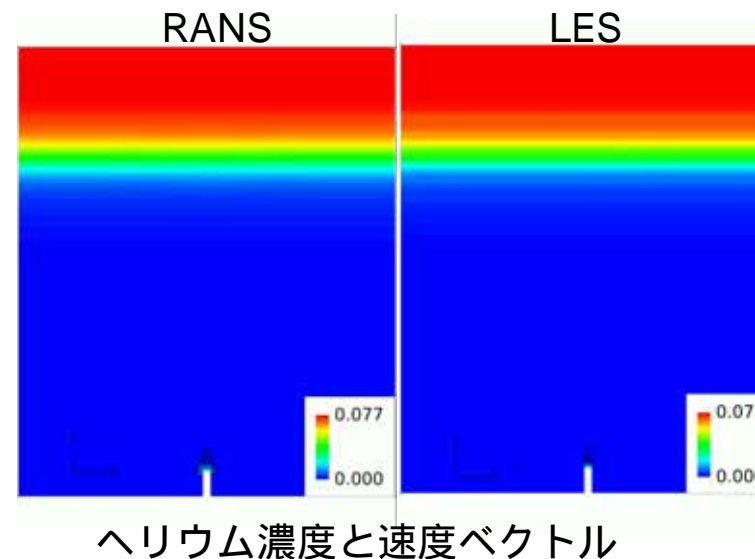
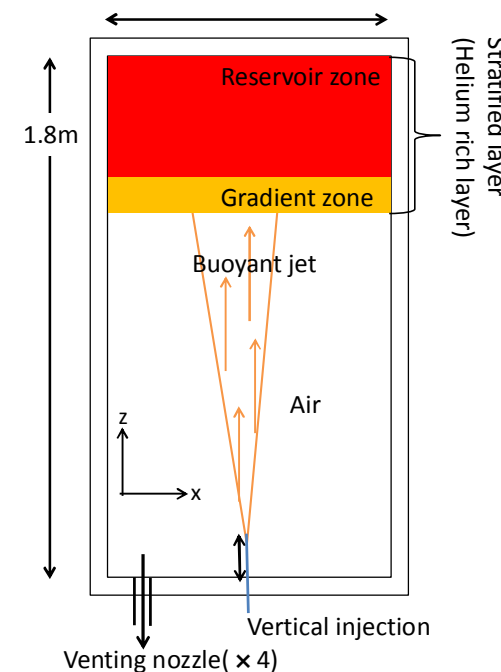
計算コスト : RANS < LES

ベンチマーク解析ではRANSを用いる

(一般的な)計算精度 : RANS < LES

● 結果

- RANS解析では密度成層浸食を過大評価
 - ✓ ISP-47の結論と類似
- 乱流による輸送メカニズムに大きな違い



乱流モデルの改良

(1)よどみ点での乱流生成

おなじような流れを参考：**衝突噴流**
 淀み点での乱流エネルギーの過剰を抑える

Kato-Launderの修正(KL修正)を導入

Kato, M. and Launder, B. E. Proc. 9th Symposium on Turbulent Shear Flows, Kyoto, August 1993, pp. 10.4.1-10.4.6.

乱流エネルギー生成項の修正

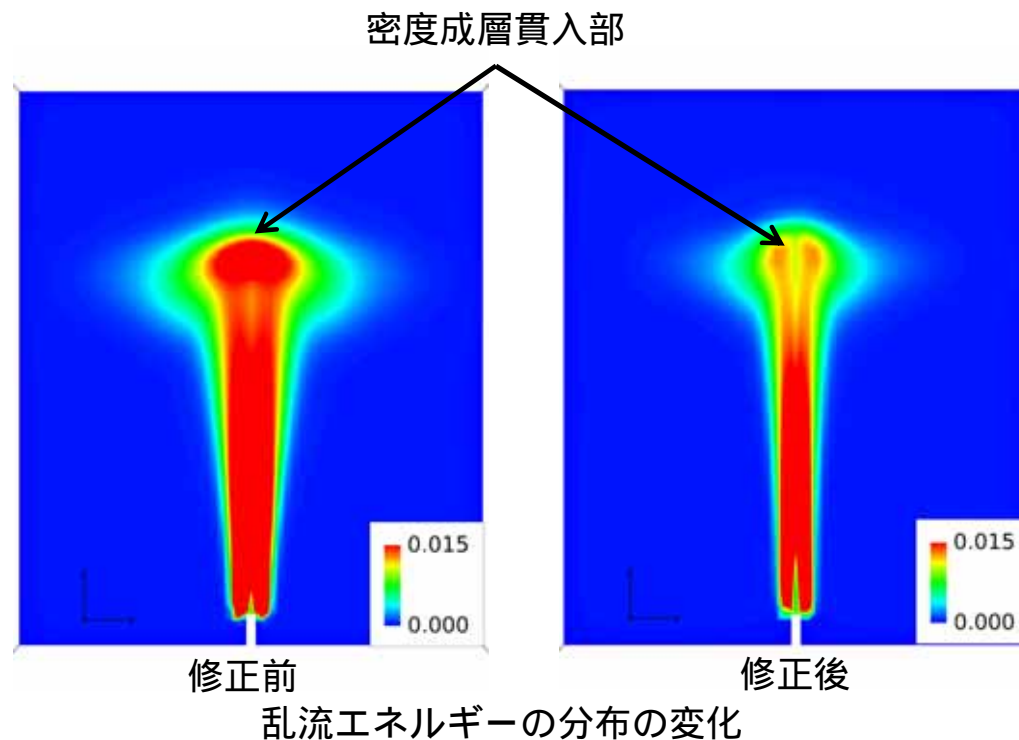
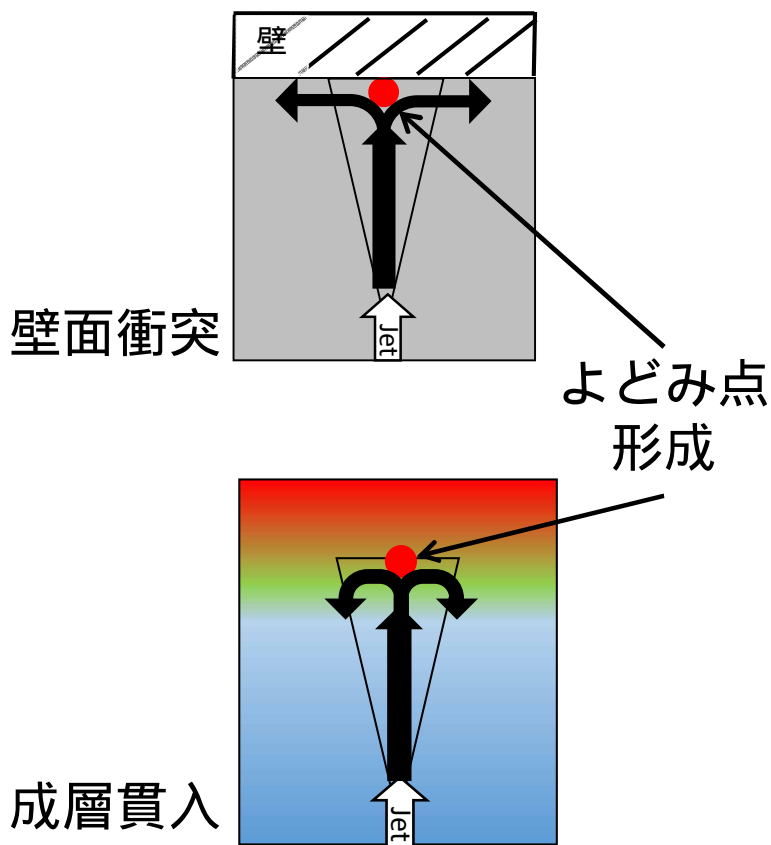
$$P_k = \mu_t S S$$

↓

乱流エネルギー過大生成を改善

$$P_k = \mu_t S \Omega$$

S : Modulus of mean rate-of-strain tensor
 Ω : Modulus of mean rate-of-rotating tensor



乱流モデルの改良

(2) 密度成層での乱流抑制効果

おなじような流れを参考：**大気安定・不安定**
香月モデルを二成分気体解析に適用

- **浮力効果**による乱流生成の増大・減衰を考慮

Katsuki T et al., Journal of Environmental Engineering, Architecture Institute of Japan. 2009; 74 640: 735-743 [in Japanese]

乱流粘性係数評価の修正

$$\mu_t = \langle \rho \rangle C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$



浮力効果を考慮

$$\mu_t = \langle \rho \rangle C_\mu f_\mu (1 - R_t) \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$\frac{G_{ij}}{P_{ij}} \cong \frac{G_k}{P_k} = -R_t$$

μ_t : 乱流粘性係数

k : 乱流エネルギー

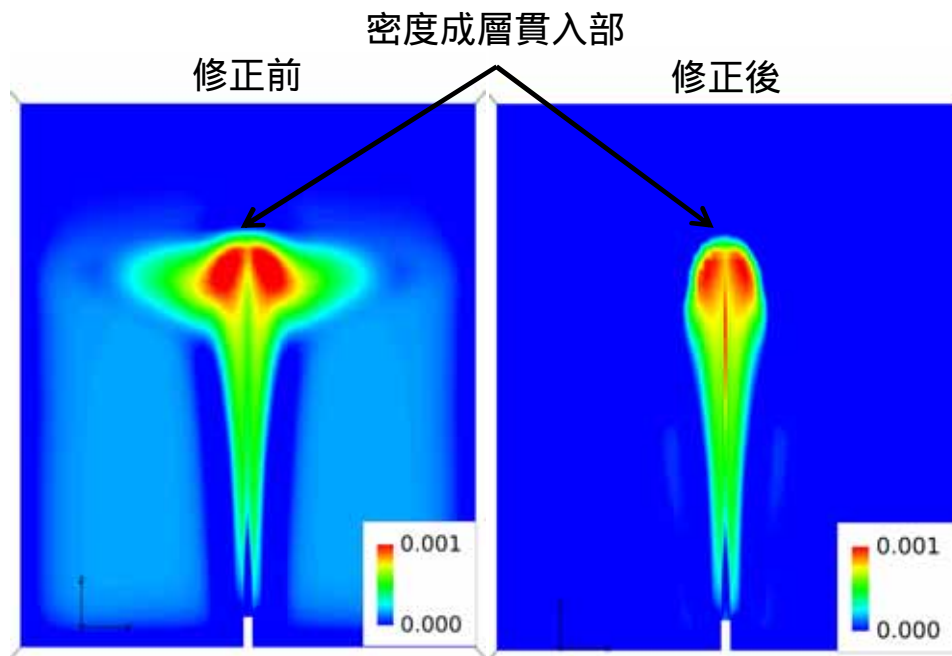
ε : 乱流散逸率

P_k : 乱流エネルギーの生成項

G_k : 浮力による乱流エネルギーの生成項

R_t : **リチャードソン数**

→安定度の指標

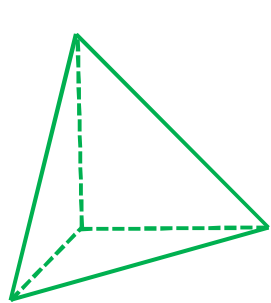


乱流粘性係数の変化

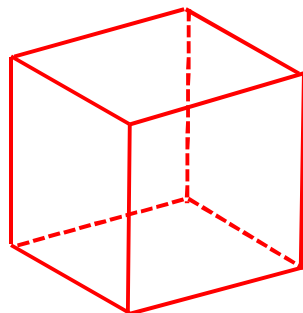
ベンチマーク解析

- 解析コード: OpenFOAM ver. 2.1.1
- 多成分気体による圧縮性流体
- 乱流モデル: **改良型低Re k-モデル**(上述)
- 解析メッシュ(Post-test解析): 76万要素
 - Hexahedral mesh
 - 解析にあわせて形状を簡略化

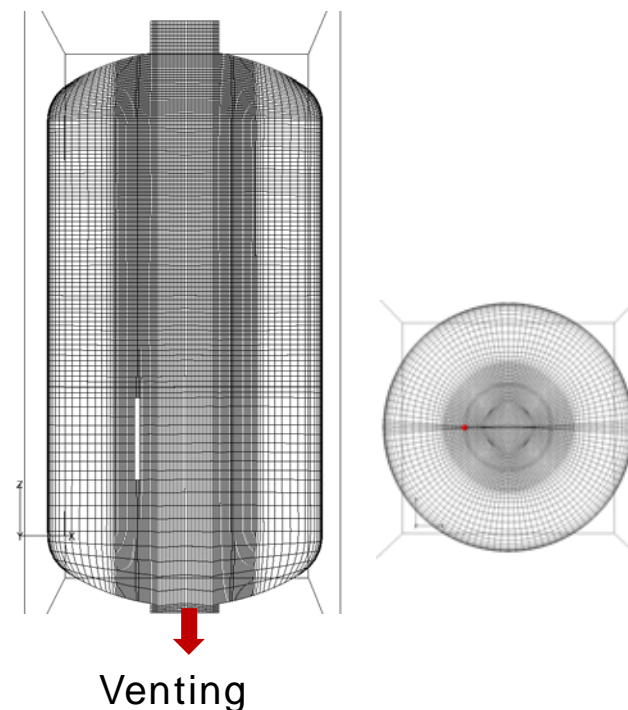
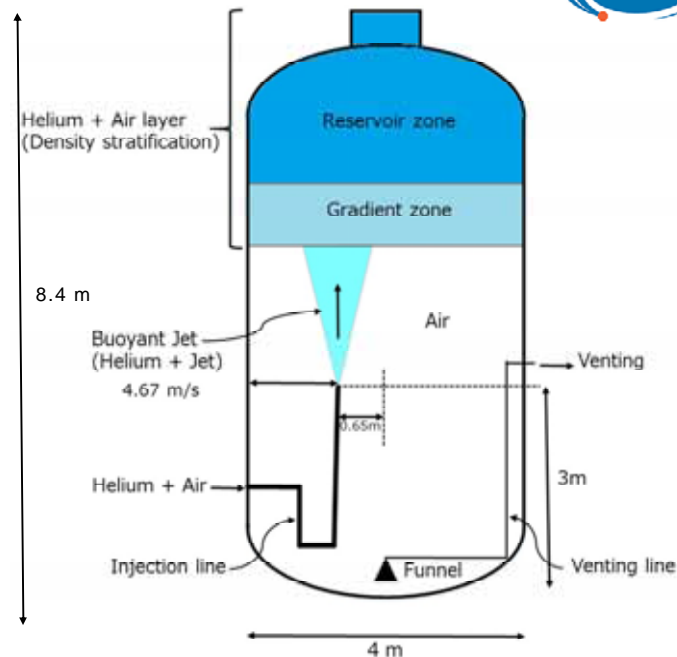
**Blind解析では、Tetraメッシュ(200万)を採用
実験値と大きな差(後述)**



四面体

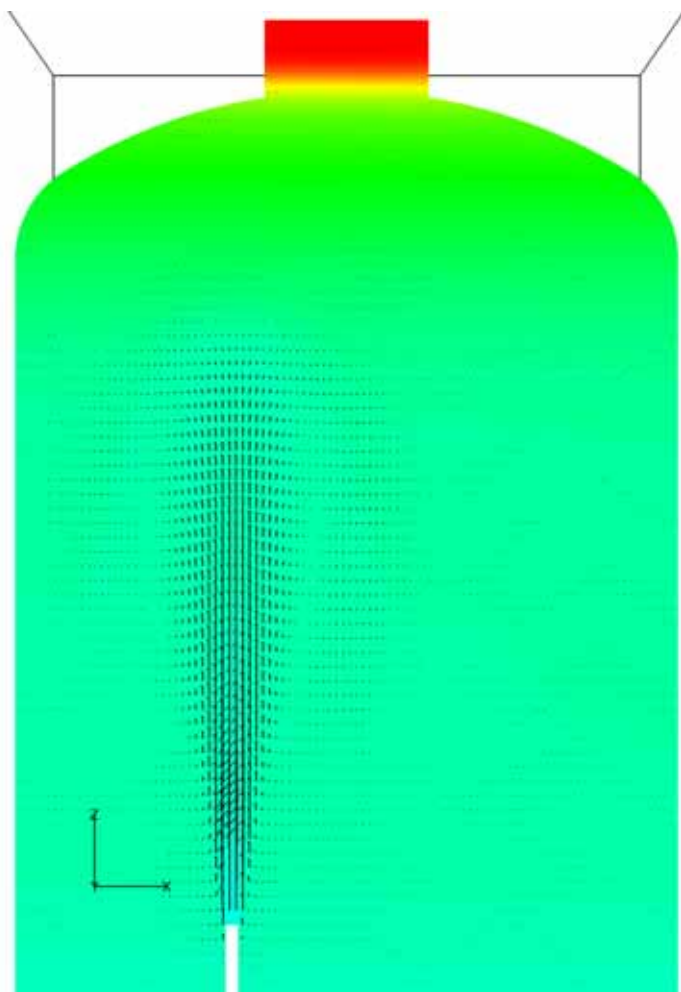


六面体

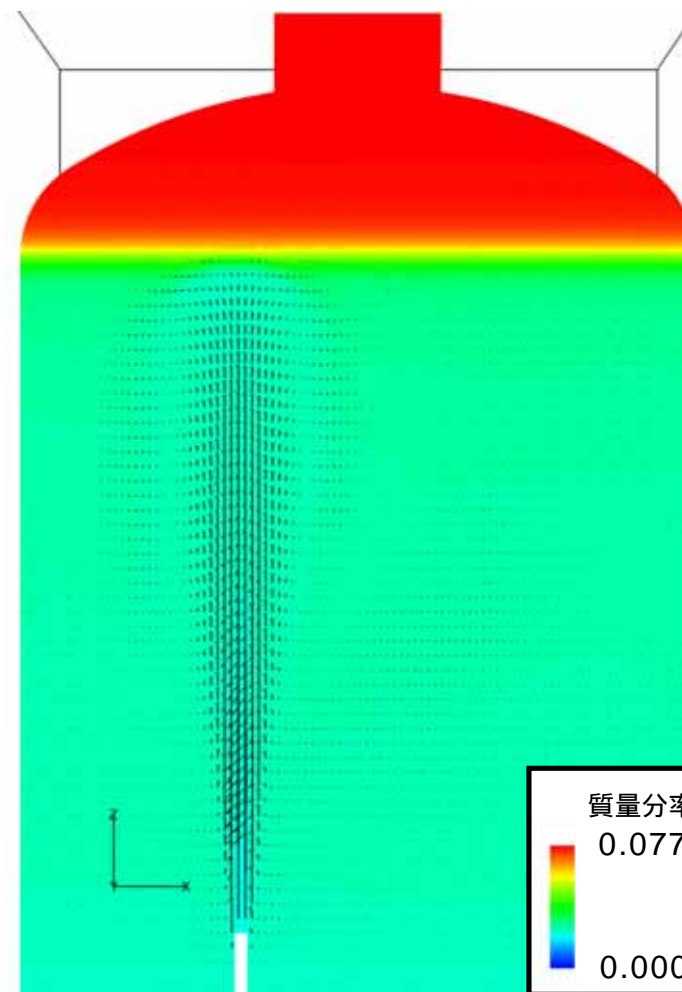


解析結果 ヘリウム濃度と速度ベクトル

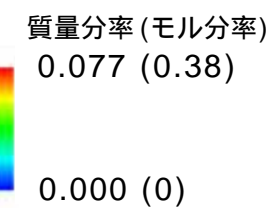
乱流モデル改良なし



乱流モデル



2000 s



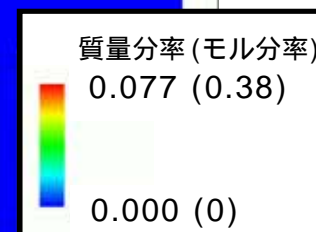
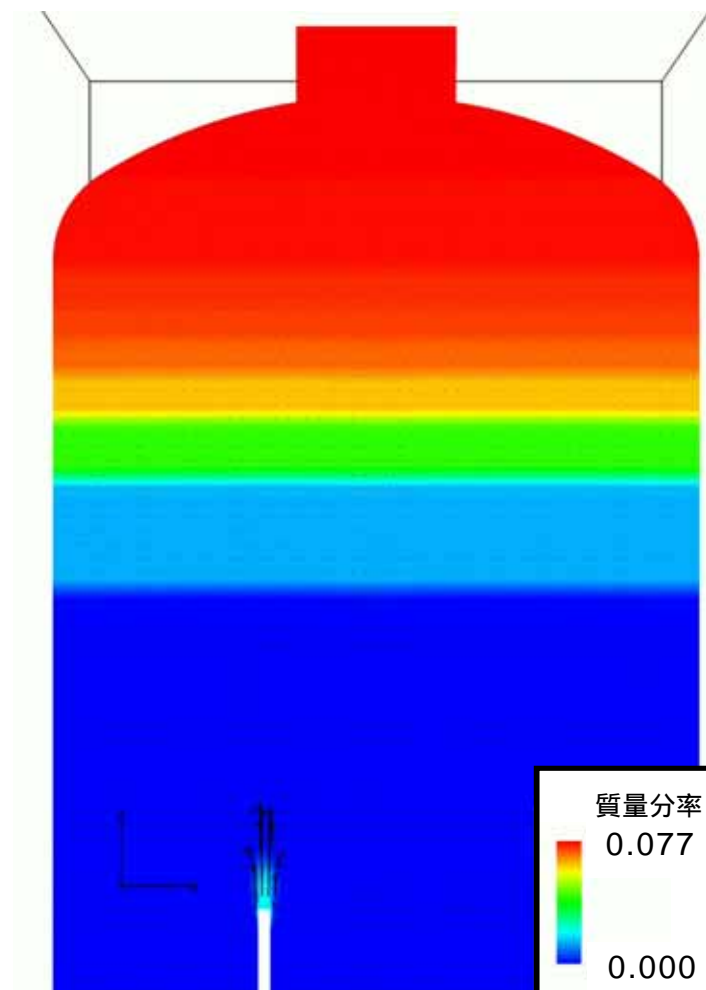
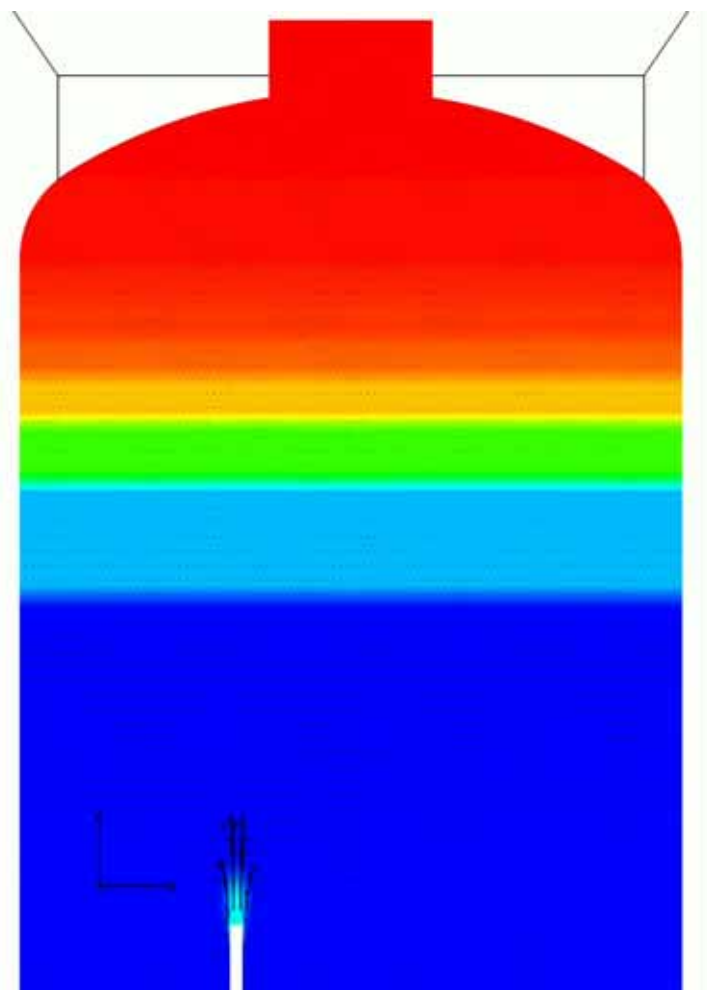
解析結果 ヘリウム濃度と速度ベクトル

アニメーション

0 ~ 5000 s

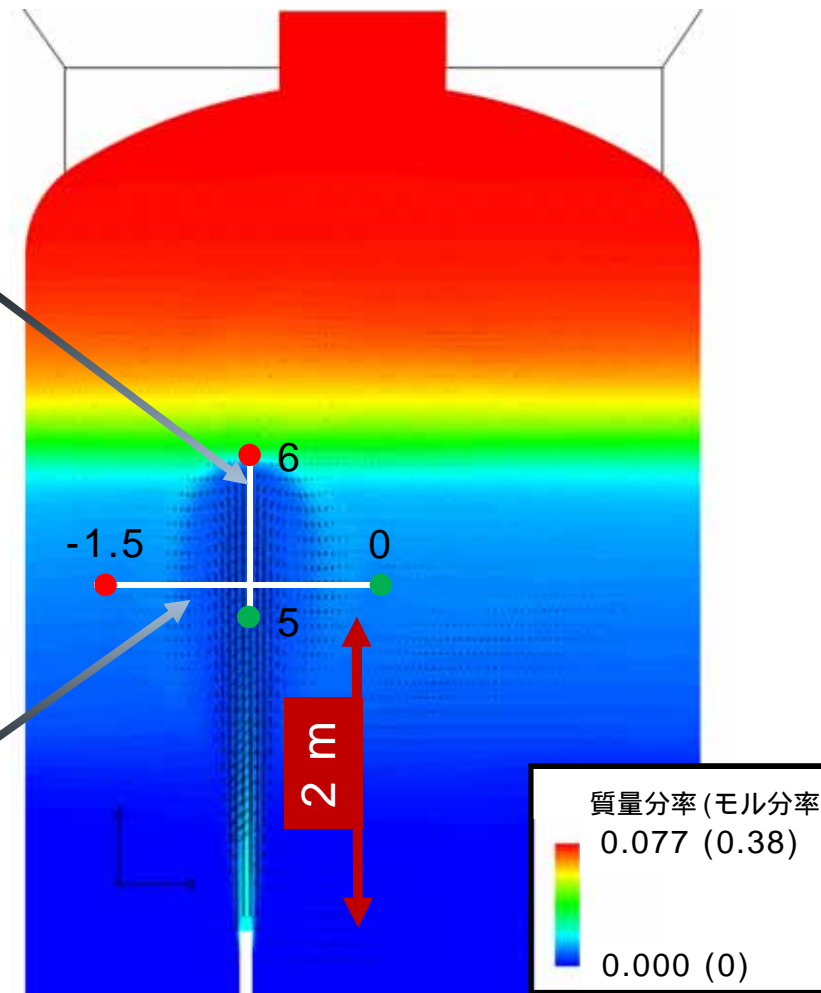
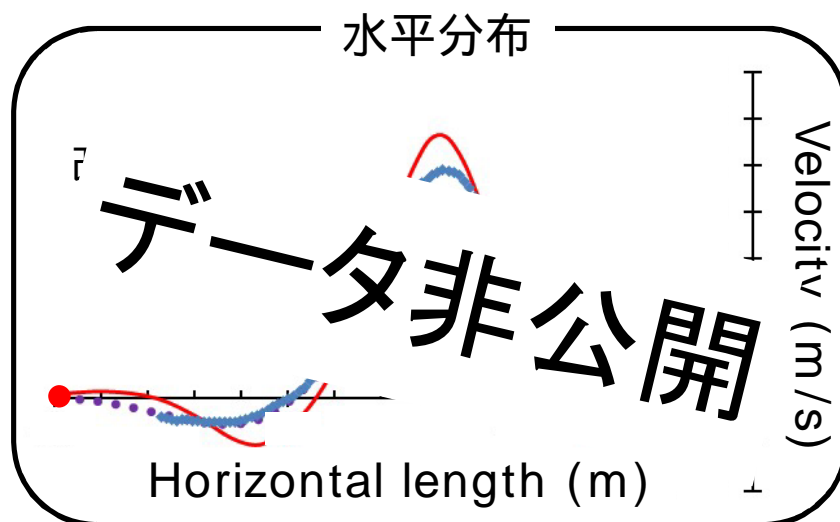
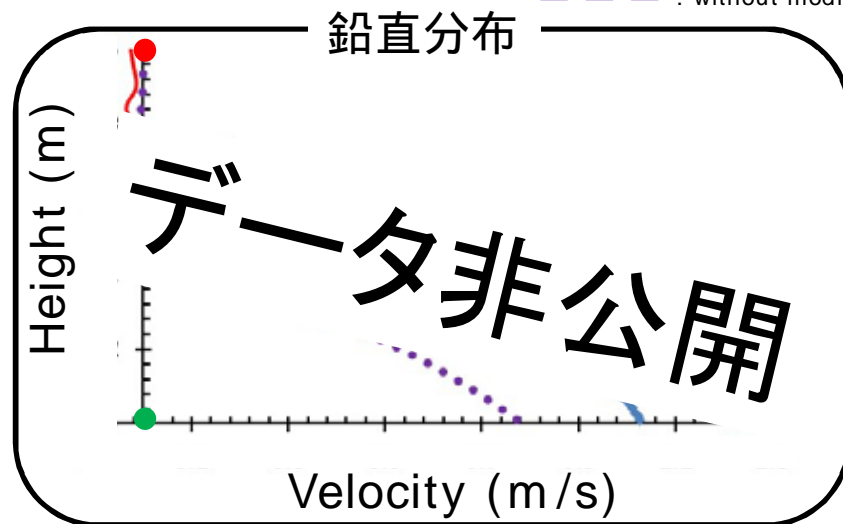
乱流モデル改良なし

乱流モデル改良

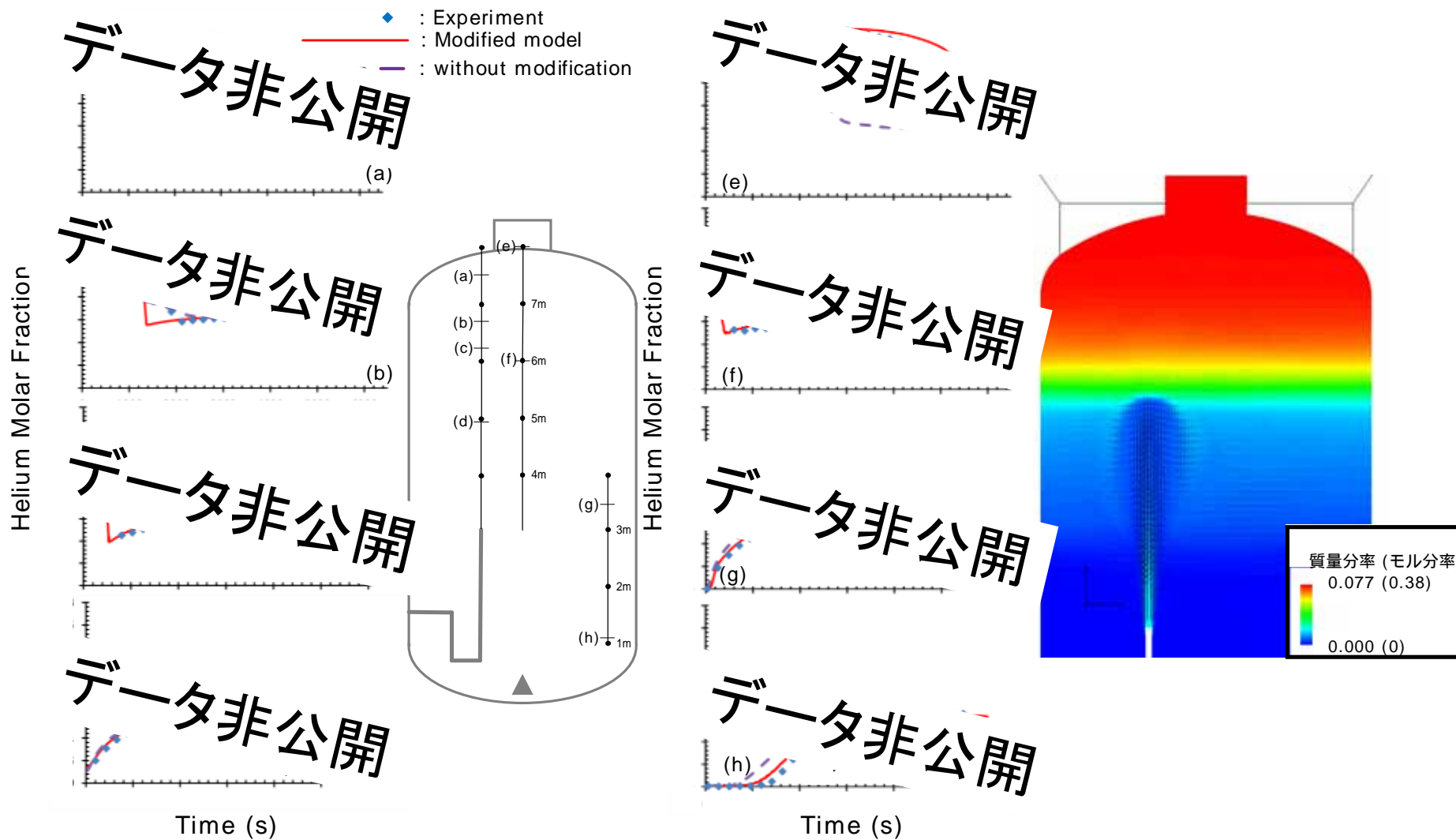


実験データとの比較 鉛直速度空間分布

- ◆ : Experiment
- (red) : Modified model
- - (purple) : without modification



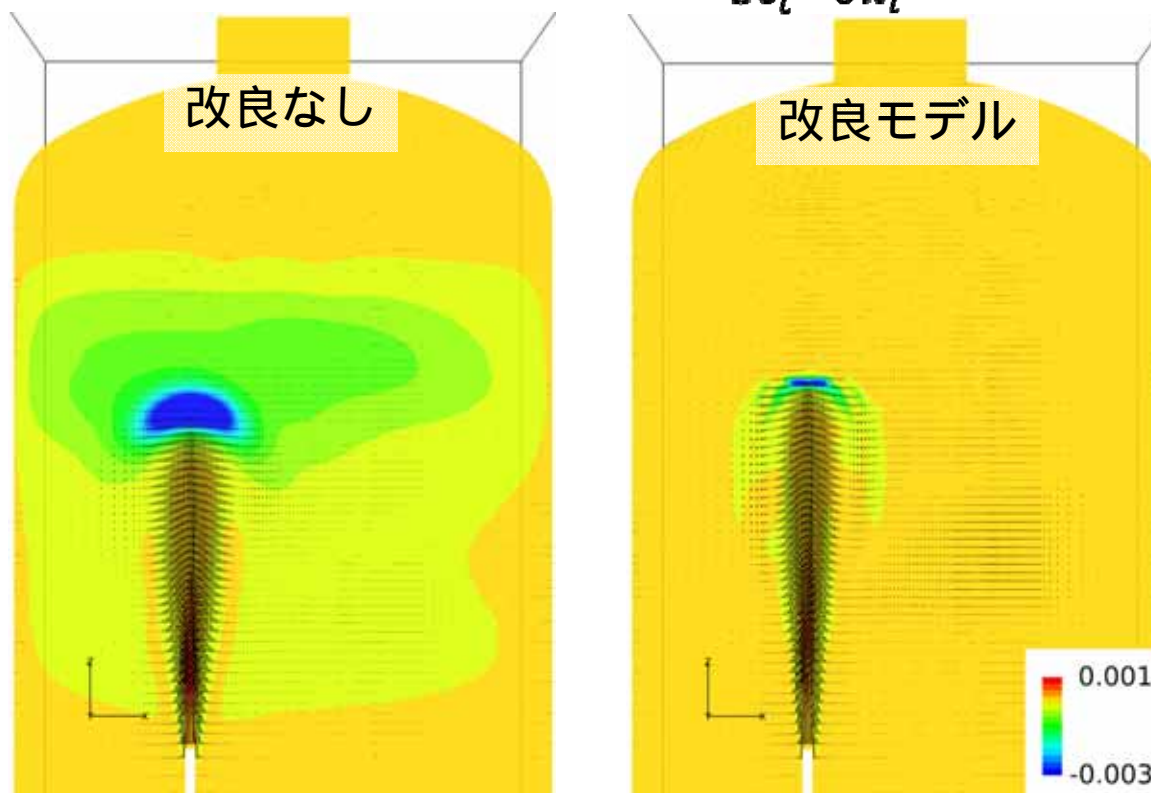
実験データとの比較 ヘリウム濃度時系列変化



乱流による輸送メカニズム

ヘリウム鉛直乱流フラックスの空間分布

$$\langle \rho \rangle [u'_i Y'_k] = -\langle \rho \rangle \frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial [Y_{He}]}{\partial x_i}$$



改良なしモデルの場合

- 広い範囲で混合促進
- 成層崩壊の過大評価の原因

改良モデルの場合

- 狭い範囲でのみ混合促進

ベンチマーク全体

CFD4NRS-5 Keynote speech から抜粋

Andreani M, Badillo A, Kapulla R. Synthesis of The
OECE/NEA-PSI CFD benchmark exercise, CFD4NRS-
5; 2014 Sept. 9-11; Zurich

- Blind 解析結果を提出
- 19機関が結果を提出

コード

- 商用コード : 12
- 原子力研究機関開発コード : 6
- オープンソースコード : 1

乱流モデル

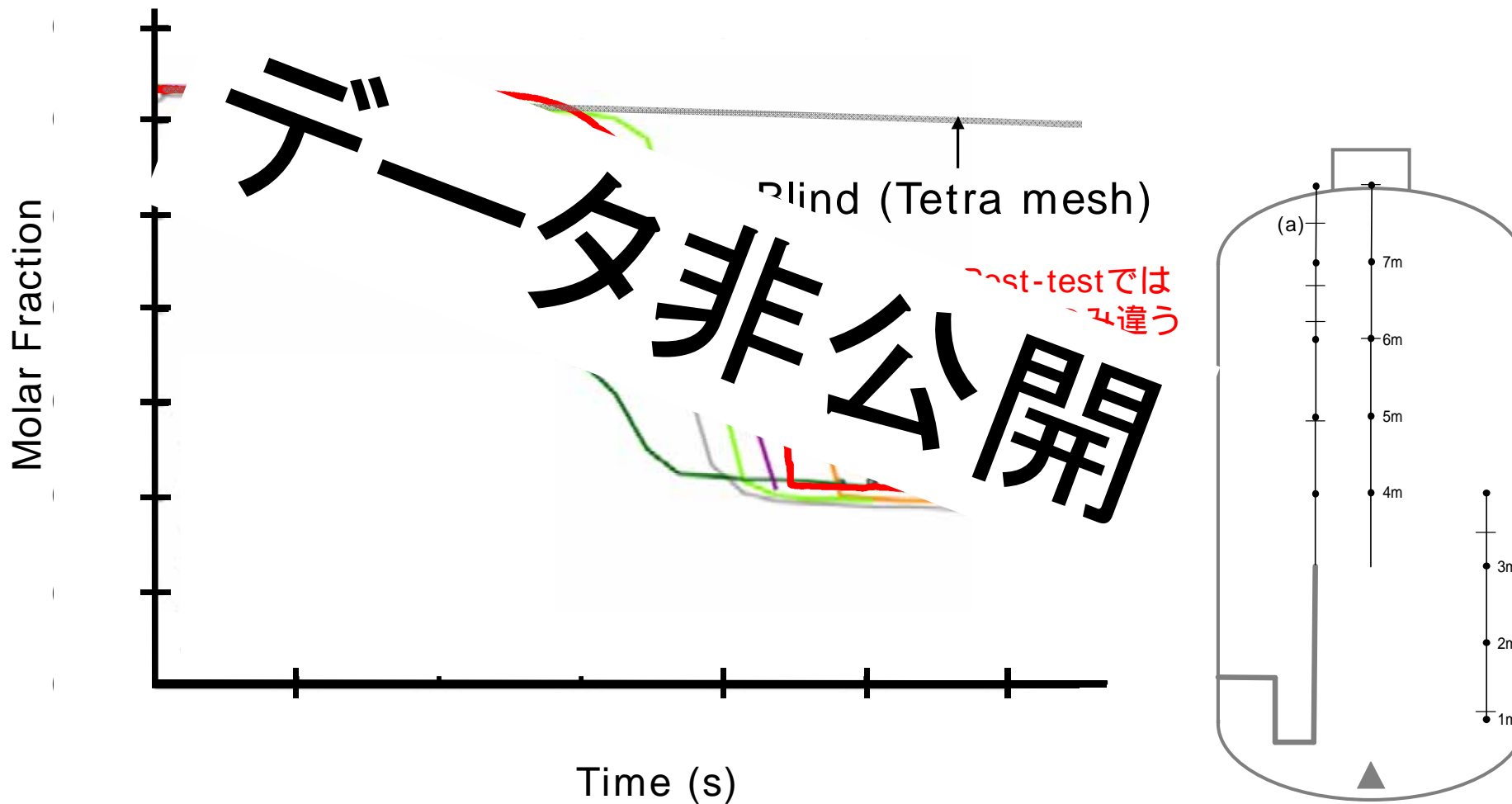
- RANS解析 : 15
- LES解析 : 3
- 乱流モデルなし : 1

 ランキング上位

User ID	解析Code	乱流モデル	メッシュ数 ($\times 10^3$)
1	Trio_U 1.6.8	k-	2900
6	P ² REMICS	k-	1383
8	CFX 14.5	SST	717
11	CFX 26	k- SST	2200
12	Fluent 14	RSM	2077
17	Fluent 14.5	k- SST	2200
19	STAR-CD 4.20	Low-Reynolds k-	2064
20	CFX 14.5.7	k- SST	1612
32	Fluent 12.1.2	k- (realizable)	474
33	CFX 14.5	SAS-SST	1263
34	CABARET 2.5	ILES	4331
37	OpenFOAM 2.1.1	Modified k-	2035
38	Logos 4.0.7	Laminar	300
39	CFX 14.5	SAS-SST	1203
41	Fluent 15	k-	448
42	Fluent 15	Dynamic Smagorinsky	790
43	Fluent 14	ZLES/WALE	1626
45	GOTHIC 8.0	k-	4
47	GOTHIC 8.0	k- in jet region, Mixing length elsewhere	8

ベンチマークテスト 他の参加機関との比較例

他の参加機関との比較 (上位5/19)



ベンチマーク解析のまとめ

CFD4NRS-5 Keynote speechから抜粋

Andreani M, Badillo A, Kapulla R. Synthesis of The OECE/NEA-PSI CFD benchmark exercise, CFD4NRS-5; 2014 Sept. 9-11; Zurich

- ベンチマーク解析では、統計的手法によりランキング
 - 比較的新しいモデル(SAS-SSTなど)かつ商用コード(CFXなど)を用いた計算結果が良い結果を示した
 - 成層侵食メカニズムに関する詳細な議論はされず
 - 浮力の乱流への影響の考慮(ISP-47で指摘)についても議論されず
- 計算メッシュに関して
 - メッシュ数のみ議論
 - メッシュの作成に関する詳細な議論が必要
 - ✓ メッシュの種類(ヘキサorテトラ)が及ぼす影響は議論されず
 - 多くのベンチマーク参加者にはよく知られていたが...
 - 実機のような複雑な形状を解析する際のメッシュ作成には重要

まとめと今後の計画

1. ROSA-SAプロジェクト (2013~)
2. OECD/NEA PANDA CFD Benchmark
 - 鉛直ジェットによる密度成層侵食・崩壊
 - ✓ オープンソースコードOpenFOAMを用いて解析
 - ✓ 乱流モデル改良
 - ✓ 実験値と良く一致(Post-test 解析)
 - ✓ 乱流による輸送メカニズムに関して考察
3. 今後の計画
 - 小型実験 & 解析(RANS, LES)
 - ベンチマーク解析(計算メッシュの影響)
 - 大型格納容器(@JAEA)実験と解析

