

# 格納容器/原子炉建屋熱流動解析コードBAROCの開発

## BAROCの開発経緯(念い)

格納容器と原子炉建屋の熱流動解析は、シビアアクシデント解析において重要な解析項目のひとつです。

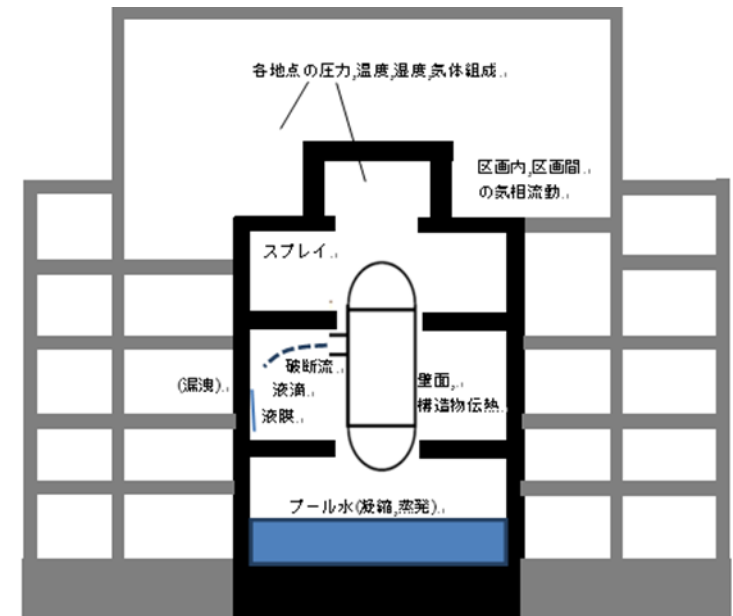
一方、格納容器と原子炉建屋を対象とした熱水力シミュレーションコードは、米国製のものが使用され、日本製のものはほとんど存在しません。

シビアアクシデント解析の基幹コードを外国製だけに頼ることは、わが国の原子力安全解析において望ましくない状況といえます。

従来のシビアアクシデント解析コードと連携可能なわが国発の本格的な格納容器と原子炉建屋の熱流動解析コード「**BAROC**」の開発を提案します。

## BAROCの特長(目指しているもの)

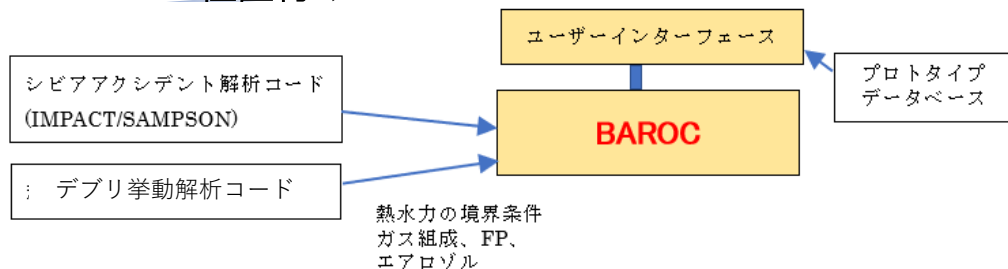
- ① 1次元モデルと3次元モデルの任意な構成
- ② 複雑形状の現実的・効率的な数値解法
- ③ 相変化と液相、液滴、液成分、放射性物質の挙動の効率的な数値計算法
- ④ プラント特有の流体機器、伝熱に関する解析モデルを実装
- ⑤ 利用しやすいユーザーインターフェース
- ⑥ プラントデータベースによる解析効率化
- ⑦ 既存コードとの有機的インターフェイス
- ⑧ コードの並列化による処理速度の高速化



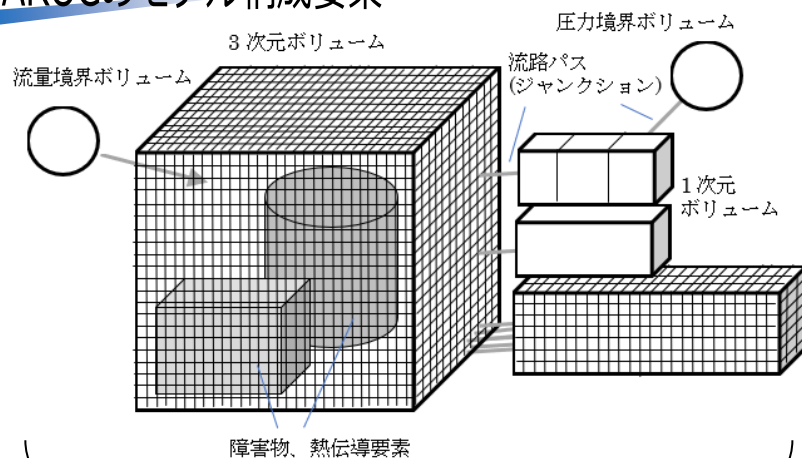
(注)**BAROC** ( **B**est estimate **A**nalysis code for thermal-hydraulic phenomena with **R**eactor **O**perations in **C**ontainments and reactor buildings )

# 格納容器/原子炉建屋熱流動解析コードBAROCの開発

## BAROCの位置付け



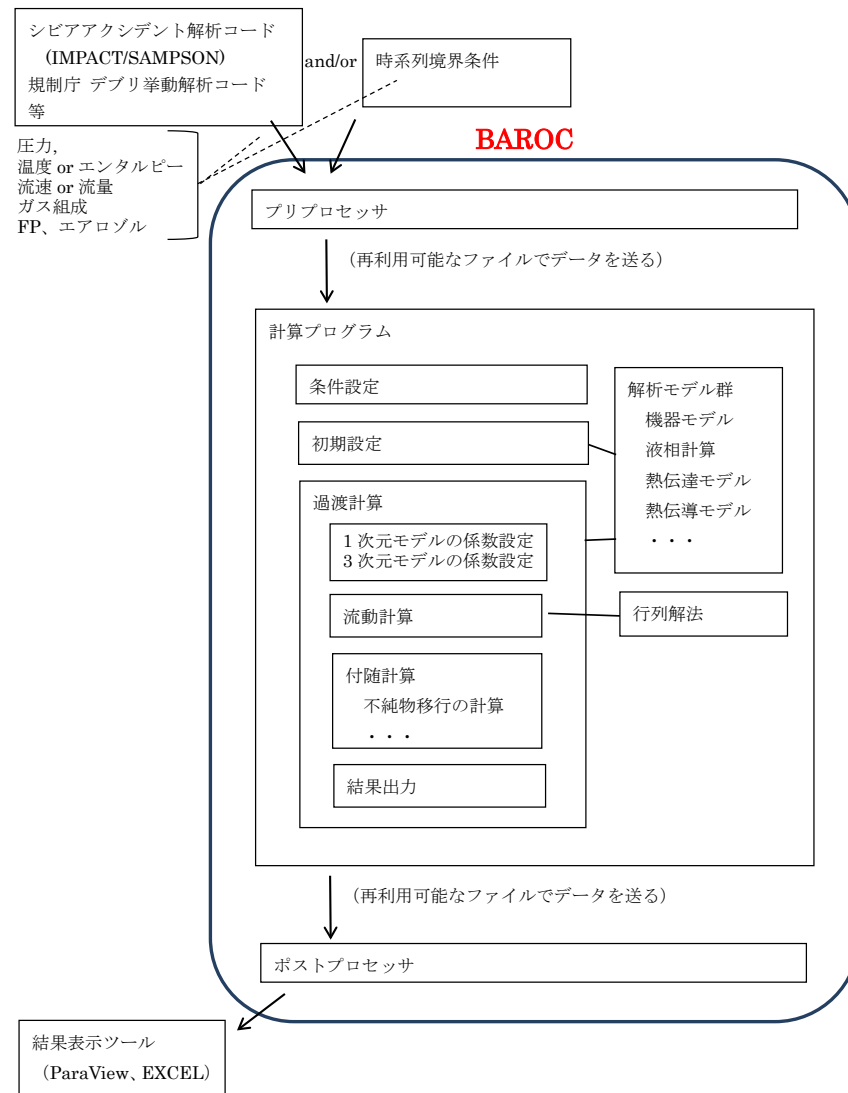
## BAROCのモデル構成要素



## 高速計算処理の方策

- ①気相流動計算を基本とする
- ②1次元格子と3次元格子で構成される行列を一括で解く
- ③高速な行列解法の採用 (Lis<sup>(1)</sup>を採用)
- ④並列化処理

## BAROCのプログラム構成



(1)反復解法ライブラリLis : Library of Iterative Solvers for linear systems, <https://www.ssisc.org/lis/>

# 格納容器/原子炉建屋熱流動解析コードBAROCの開発



## ■ BAROCコードの熱流動解析機能(目指しているもの)

| No. | 項 目                        | 内 容                                             |
|-----|----------------------------|-------------------------------------------------|
| 1   | 基礎方程式(気相のみ)                | 1次元・3次元の圧縮性流体に対する質量保存式、運動量保存式、エネルギー保存式          |
| 2   | 状態方程式                      | 完全理想気体、およびSRK式、NIST/REFPROPに基づく実在物性流体           |
| 3   | 液相流動モデル                    | 高さ関数、蒸発・凝縮考慮                                    |
| 4   | 計算格子                       | 構造格子、スタガード格子、マルチブロック                            |
| 5   | 対流項の差分スキーム                 | 一次精度風上差分法<br>2次・3次精度の制限関数minmod付きTVD法           |
| 6   | 数値解法                       | SIMPLEC法(MCBA法)<br>圧力・流速・エネルギーが強く結びついた解法(ECBA法) |
| 7   | 乱流モデル                      | k-εモデル、(LES)                                    |
| 8   | 多成分系ガス                     | ガス濃度に対する質量保存式                                   |
| 9   | 放射性物質(FP)                  | パッシブスカラーに対する質量保存式、Lagrange粒子追跡モデル               |
| 10  | 液滴、固体粒子、<br>エアロゾル粒子(固体・液体) | パッシブスカラーに対する質量保存式、Lagrange粒子追跡モデル               |
| 11  | 燃焼モデル                      | Arrhenius式とMagnussen渦消散モデルのハイブリッドモデル            |

# 格納容器/原子炉建屋熱流動解析コードBAROCの開発

## ■ BAROCコードの開発スケジュール(短期的)

| No. | 開発改良作業項目              | 担当者   | 2020年7月 | 2020年8月 | 2020年9月 | 2020年10月 | 2020年11月 | 2020年12月 | 2021年1月 | 2021年2月 | 2021年3月 |
|-----|-----------------------|-------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|
| 1   | 多成分系ガス濃度モデル           | 高橋    | ■       | ■       |         |          |          |          |         |         |         |
| 2   | 分子拡散モデル               | 高橋    |         | ■       | ■       |          |          |          |         |         |         |
| 3   | 乱流拡散モデル               | 高橋    |         | ■       | ■       |          |          |          |         |         |         |
| 4   | 状態方程式(完全理想気体)         | 三橋    |         | ■       | ■       |          |          |          |         |         |         |
| 5   | 状態方程式(SRK)            | 三橋    |         | ■       | ■       |          |          |          |         |         |         |
| 6   | 物性各種関数                | 高橋    |         |         | ■       | ■        |          |          |         |         |         |
| 7   | 物性データベースの拡充           | 高橋    |         |         | ■       | ■        |          |          |         |         |         |
| 8   | 燃焼モデル                 | 三橋    |         |         |         |          |          | ■        | ■       | ■       |         |
| 9   | マルチブロック               | 三橋    |         |         |         |          | ■        | ■        | ■       | ■       |         |
| 10  | 境界条件の整備               | 三橋・高橋 |         | ■       | ■       | ■        |          |          |         |         |         |
| 11  | ECBA法の計算安定化           | 三橋    | ■       | ■       |         |          |          |          |         |         |         |
| 12  | Nos.4-7を含めた単成分系テスト・検証 | 三橋    |         |         |         |          | ■        | ■        | ■       |         |         |
| 13  | 多成分系テスト・検証            | 高橋・三橋 |         |         |         |          | ■        | ■        | ■       | ■       |         |
| 14  | 燃焼テスト・検証              | 高橋・三橋 |         |         |         |          |          |          |         | ■       | ■       |

テスト・検証の結果からモデルの見直しや改良を行う

(注)No.7は下記を基に整備

McBride, B. J., Gordon, S. and Reno, M. A., "Coefficients for Calculating, Thermodynamic and Transport Properties of Individual Species", NASA Technical Memorandum 4513 (1993).

# 格納容器/原子炉建屋熱流動解析コードBAROCの開発



## ■ BAROCコードに必要な解析モデル(長期的)

| No. | 項 目        | 内 容                                                                                                                   |
|-----|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | 流量計算の補助    | ① 臨界流モデル<br>② 液相計算（ボリューム別の水量集計と流路パス高さに基づくボリューム間移行等）                                                                   |
| 2   | 工学的安全設備    | ① ポンプとファン、弁、ドア、バキュームブレーカー<br>② 熱交換器、冷却器、加熱器<br>③ スプレィ、ドライヤ、ミスト除去器<br>④ フィルター、チャコールフィルター、水素リコンバイナ、イグナイタ                |
| 3   | 壁/熱構造物内    | ① 1次元熱伝導モデル<br>② 境界条件は 流体との伝熱、温度指定、熱流量指定                                                                              |
| 4   | 壁/熱構造物表面   | ① 対流伝熱（自然対流、強制対流の相関式）<br>② 伝熱モデル（気单相、液单相、核沸騰、未飽和沸騰、膜沸騰、凝縮伝熱）<br>③ 気相への放射伝熱<br>④ 凝縮、再蒸発、濡れ壁モデル、液膜エンハンスメント、ミスト形成        |
| 5   | 制御系        | ① 機器制御や計算結果集計を目的とした変数定義<br>② 計算諸変数の和、積、商、積分、微分<br>③ テーブル関数、PID、一次・二次遅れ、進み遅れ、最小、最大、対数、指数、正弦、シグナル関数、切替、ランプ、ラグフィルター、速度制限 |
| 6   | 管路系1次元流体解析 | ① Advance/FrontNet/Tの解析機能を参考<br>② 数値解法はSETS法による圧縮性流体解析モデル                                                             |

# 格納容器/原子炉建屋熱流動解析コードBAROCの開発

## MCBA法

※SIMPLEC法ベース  
商用コードで良く利用

運動量保存式の連立方程式を解く

圧力修正・流速修正の係数の計算

質量保存式に基づいた  
圧力Poisson方程式を解く

※最大の違い！

圧力、流速、密度の更新

全エネルギー保存式の連立方程式を解く

多成分系質量保存式の連立方程式を解く

状態方程式の計算

最新密度を状態方程式により更新

※この処理がSIMPLEC法関連論文に明記されて  
いないが圧縮性流体解析では必須！！

## ECBA法

※圧縮性流体解析に強い

運動量保存式の連立方程式を解く

圧力修正・流速修正の係数の計算

全エネルギー保存式に基づいた  
圧力Poisson方程式を解く

圧力、流速、全エネルギーの更新

質量保存式の連立方程式を解く

多成分系質量保存式の連立方程式を解く

状態方程式の計算

※灰色は未完

# 格納容器/原子炉建屋熱流動解析コードBAROCの開発



## 1. 衝撃波管解析

- 圧縮性流体解析の標準問題
- 高圧部と低圧部の流体が仕切板によって分けられた管路において、仕切り板を瞬時に外したときの圧力等の変化を厳密解[1]と比較
- 計算は次の2ケースを実施

### i. ケース1

高圧部：圧力 1.0MPa、温度 800K

低圧部：圧力 0.1MPa、温度 300K

$X=0.1\text{m}$ 、格子分割数：200

完全理想気体、比熱比 1.4

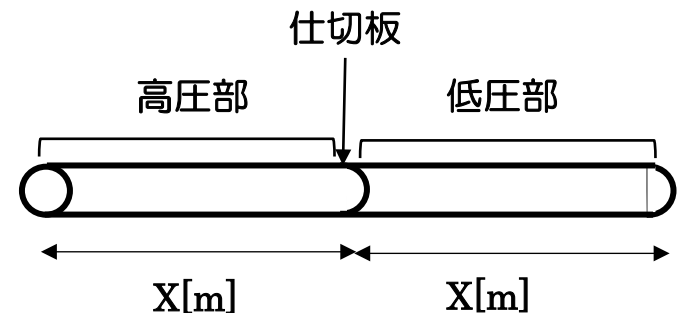
### ii. ケース2

高圧部：圧力 1.0MPa、温度 350K

低圧部：圧力 0.1MPa、温度 280K

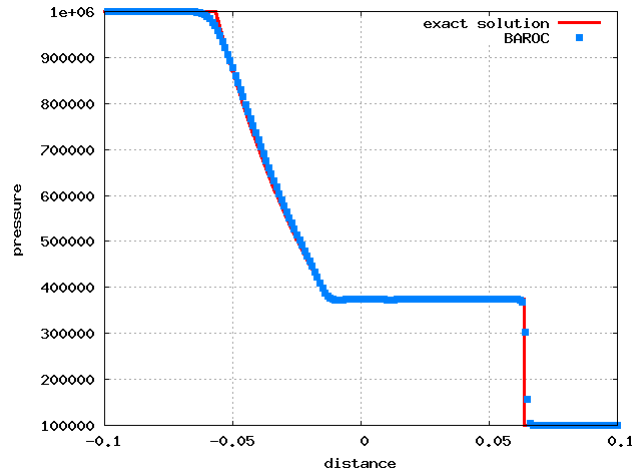
$X=0.5\text{m}$ 、格子分割数：200

完全理想気体、比熱比 1.4

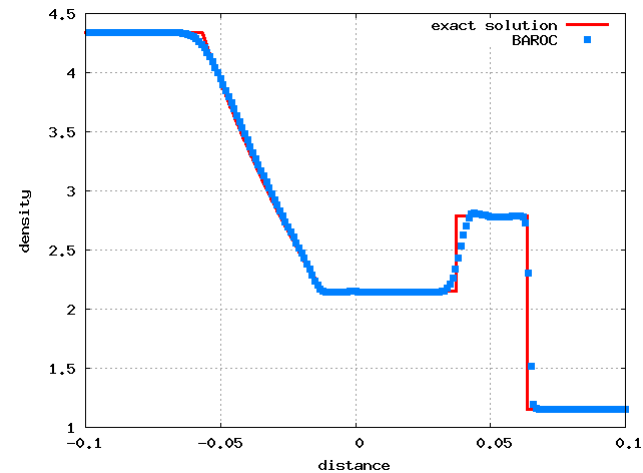


[1] Sod, G. A., "A Survey of Several Finite Difference Methods for Systems of Nonlinear Hyperbolic Conservation Laws", J. Comput. Phys. 27 (1978) 1-3.

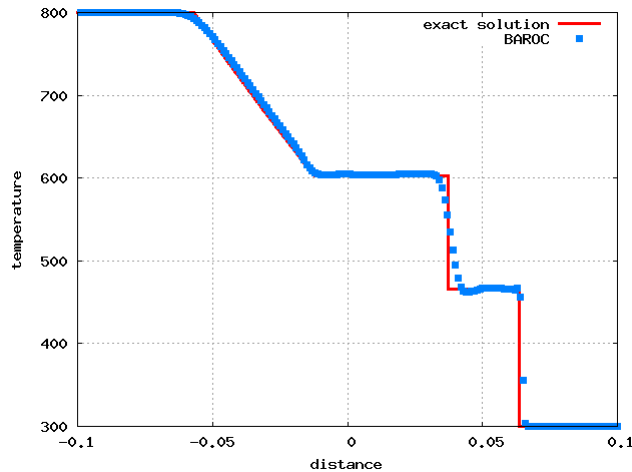
# 格納容器/原子炉建屋熱流動解析コードBAROCの開発



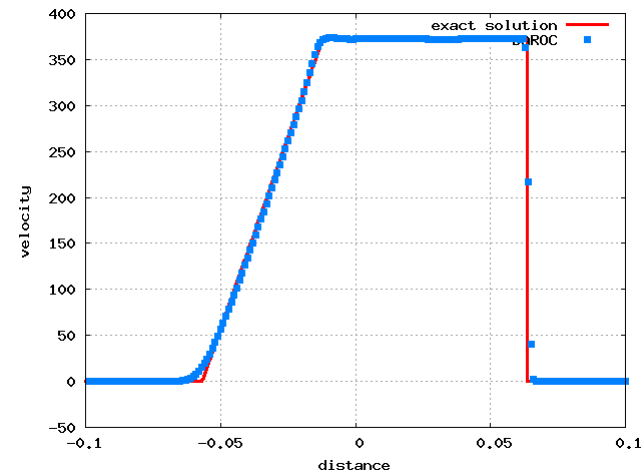
圧力分布



密度分布



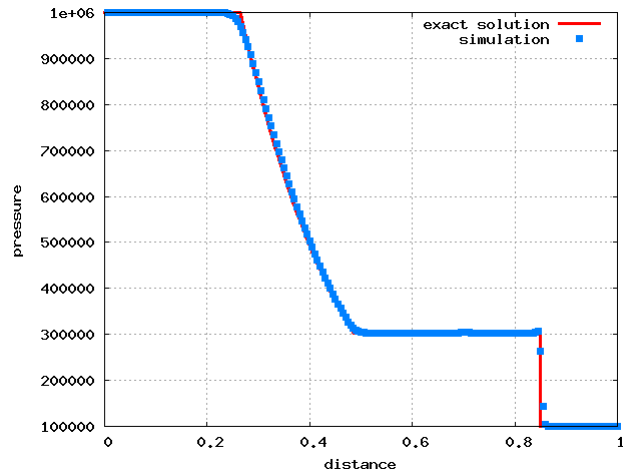
温度分布



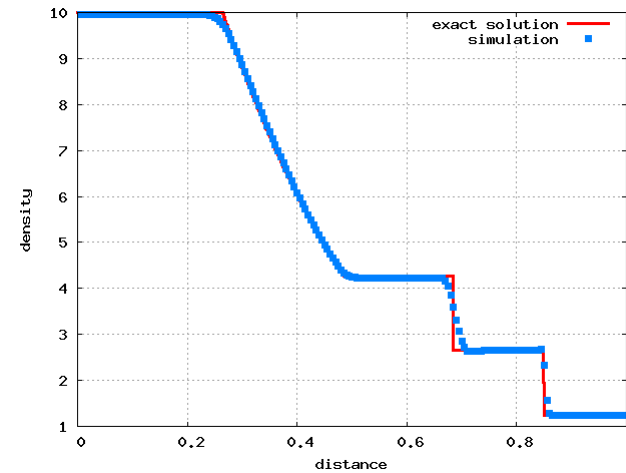
流速分布

ケース1：200分割、Courant数0.06

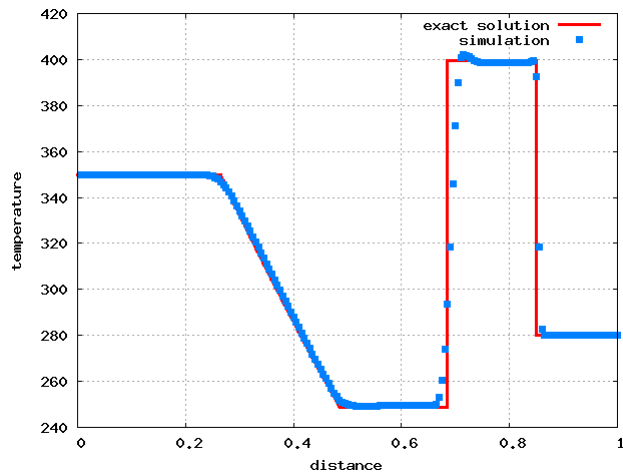
# 格納容器/原子炉建屋熱流動解析コードBAROCの開発



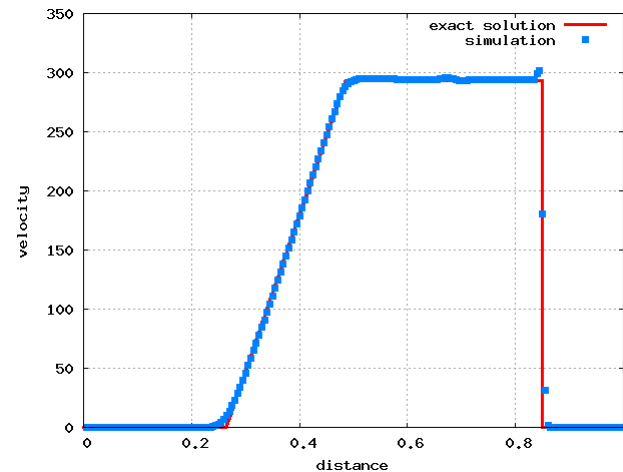
圧力分布



密度分布



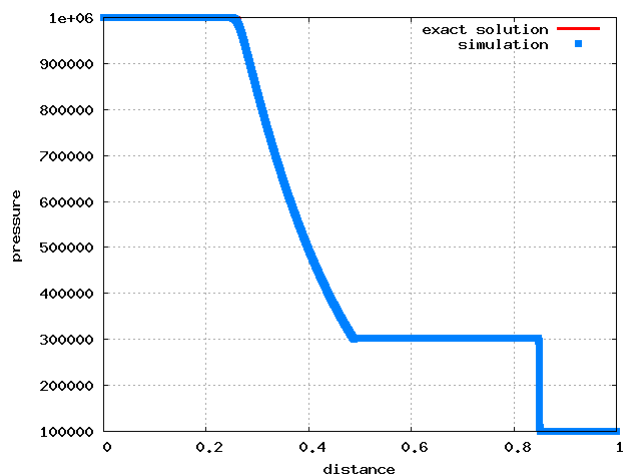
温度分布



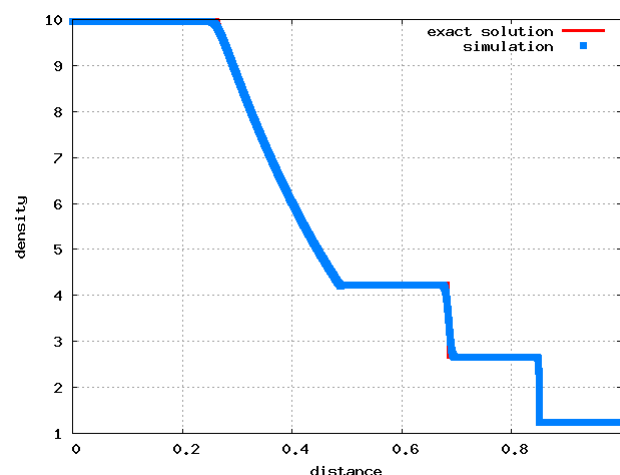
流速分布

ケース2：200分割、Courant数0.06

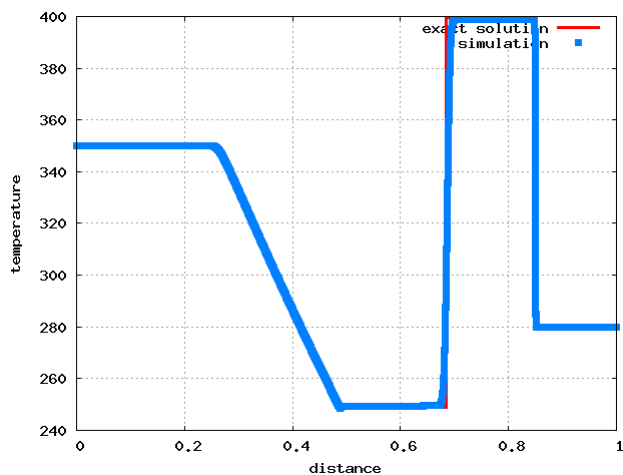
# 格納容器/原子炉建屋熱流動解析コードBAROCの開発



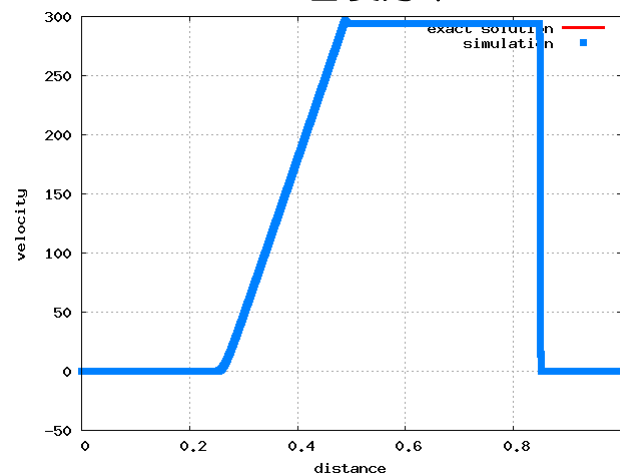
圧力分布



密度分布



温度分布



流速分布

ケース2：1,000,000分割、Courant数100

## 2. サーマルキャビティ解析

- 自然対流解析、熱伝導解析の標準問題
- 加熱面と冷却面に挟まれた正方形内の自然対流解析
- 最も著名なベンチマーク解[2]と比較
- 計算は次のケースを実施

加熱面：温度 280K

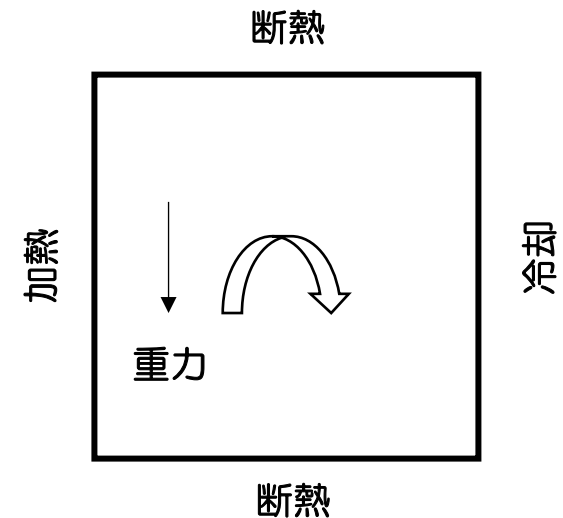
冷却面：温度 270K

X=1.0m、格子分割数：100×100

完全理想気体、比熱比 1.4

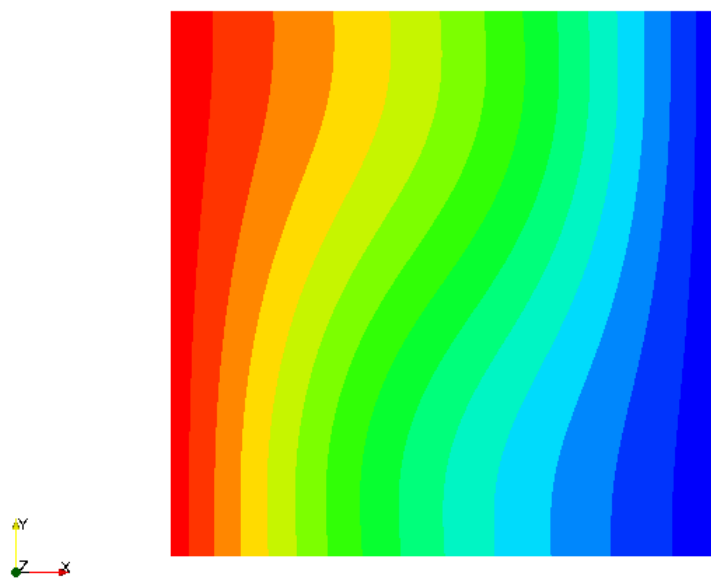
Prandtl数 0.71、Rayleigh数 1,000

重力 9.80665[m/s<sup>2</sup>]

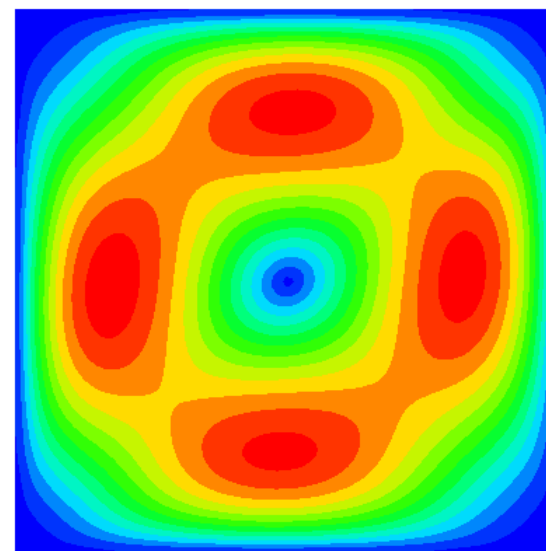
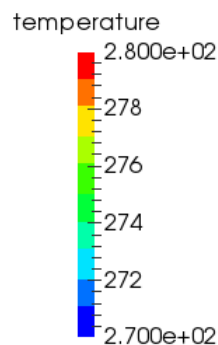


[2]de Vahl Davis, G., "Natural convection of air in a square cavity: A benchmark numerical solution", Int. J. Numer. Methods Fluids, 3 (1983) 249-254.

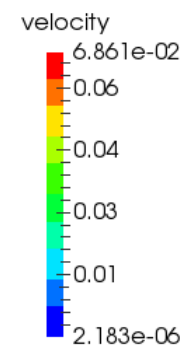
## 格納容器/原子炉建屋熱流動解析コードBAROCの開発



温度分布



流速分布(絶対値)



| No. | 項目         | 本計算           | ベンチマーク解[2] | 備考                               |
|-----|------------|---------------|------------|----------------------------------|
| 1   | 平均Nusselt数 | 1.140(+1.97%) | 1.118      | 加熱面と冷却面の温度差で無次元化した温度勾配を加熱面に沿って積分 |
| 2   | 水平方向最大流速   | 3.608(-1.12%) | 3.649      | 最大流速は高さで無次元化(熱伝導度と熱容量の比)で流速を無次元化 |
| 3   | 垂直方向最大流速   | 3.683(-0.38%) | 3.697      | 最大流速は高さで無次元化(熱伝導度と熱容量の比)で流速を無次元化 |

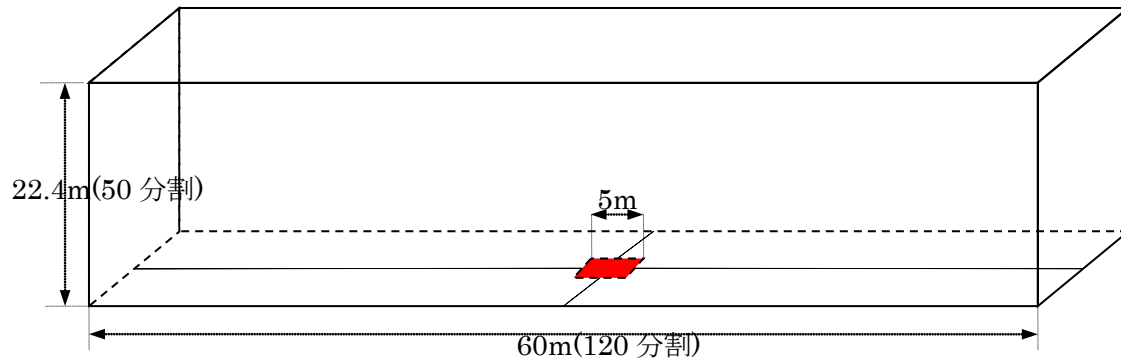
(注) カッコ内の数値はベンチマーク解との差異

# 格納容器/原子炉建屋熱流動解析コードBAROCの開発



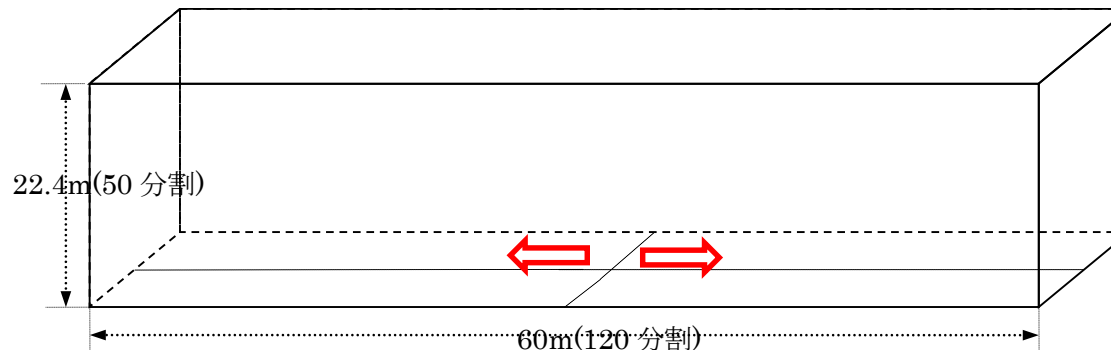
## 3. 原子炉建屋規模の熱流動解析

### (1) 自然対流モデル



- ① 60m×60m×22.4m
- ② 120×120×50=720,000格子
- ③ 空気の初期温度298.15K
- ④ 床面と天井面の温度298.15K
- ⑤ 床面の中央高温部398.15K
- ⑥ 四方の壁面は断熱

### (2) 強制対流モデル



- ① 60m×60m×22.4m
- ② 120×120×50=720,000格子
- ③ 空気の初期温度298.15K
- ④ 空気流入量10.0kg/s
- ⑤ 流入流体温度398.15K
- ⑥ すべての壁面は断熱

## 格納容器/原子炉建屋熱流動解析コードBAROCの開発

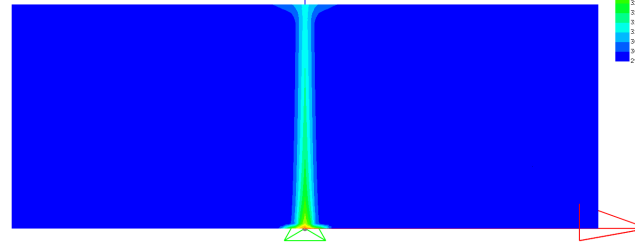


## 3.原子炉建屋規模の熱流動解析

| No. | 計算ケース          | 解析ソフトウェア                | 数値解法                 | 乱流モデル  | 解析格子数      | Courant数 | 解析時間(s) | 解析ステップ | CPU時間             | Poisson方程式の反復総回数 | 結果の良否 | 備考                                                                             |
|-----|----------------|-------------------------|----------------------|--------|------------|----------|---------|--------|-------------------|------------------|-------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | 実規模原子炉建屋内の自然対流 | 3次元圧縮性流体解析プログラム (BAROC) | MCBA<br>(密度ブレンド:1.0) | 無      | 120X120X50 | ~2,000   | 50,000  | 339    | 17 hr 3 min 4 s   | 249,750          | ○     | mcbaNC22、AFFr、非圧縮性(preBAROC)と同等の計算結果                                           |
| 2   | 同上             | 同上                      | MCBA<br>(密度ブレンド:1.0) | k-εモデル | 120X120X50 | ~900     | 50,000  | 574    | 14 hr 40 min 53 s | 234,803          | ○     | mcbaNC12、AFFr、非圧縮性(preBAROC)と同等の計算結果、乱流粘性係数が分子粘性係数の~10 <sup>4</sup> 倍          |
| 3   | 同上             | 同上                      | ECBA                 | 無      | 120X120X50 | ~2,000   | 50,000  | 339    | 15 hr 10 min 21 s | 260,313          | ○     | ecbaNC22、AFFr、非圧縮性(preBAROC)と同等の計算結果                                           |
| 4   | 同上             | 同上                      | ECBA                 | k-εモデル | 120X120X50 | ~900     | 50,000  | 574    | 14 hr 44 min 45 s | 272,229          | ○     | ecbaNC12、AFFr、非圧縮性(preBAROC)と同等の計算結果、乱流粘性係数が分子粘性係数の~10 <sup>4</sup> 倍          |
| 5   | 実規模原子炉建屋内の強制対流 | 同上                      | MCBA<br>(密度ブレンド:1.0) | 無      | 120X120X50 | ~4,000   | 20,000  | 294    | 14 hr 29 min 52 s | 145,781          | □     | mcbaFC21                                                                       |
| 6   | 同上             | 同上                      | MCBA<br>(密度ブレンド:1.0) | k-εモデル | 120X120X50 | ~5,000   | 20,000  | 294    | 9 hr 7 min 50 s   | 145,257          | ○     | mcbaFC12、乱流粘性係数が分子粘性係数の~10 <sup>8</sup> 倍、圧力Poisson方程式以外の保存式の反復回数が減って、全体として速い  |
| 7   | 同上             | 同上                      | ECBA                 | 無      | 120X120X50 | ~5,000   | 20,000  | 294    | 6 hr 37 min 20 s  | 186,367          | ○     | ecbaFC22                                                                       |
| 8   | 同上             | 同上                      | ECBA                 | k-εモデル | 120X120X50 | ~5,000   | 20,000  | 294    | 7 hr 53 min 27 s  | 212,146          | ○     | ecbaFC12N、乱流粘性係数が分子粘性係数の~10 <sup>8</sup> 倍、圧力Poisson方程式以外の保存式の反復回数が減って、全体として速い |

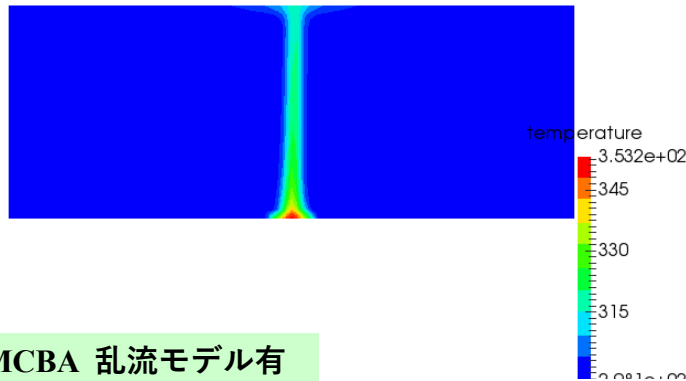
# 格納容器/原子炉建屋熱流動解析コードBAROCの開発

AFFr・非圧縮(参考)

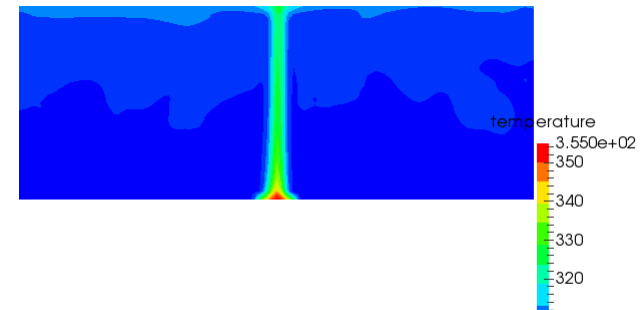


## (1) 自然対流モデル

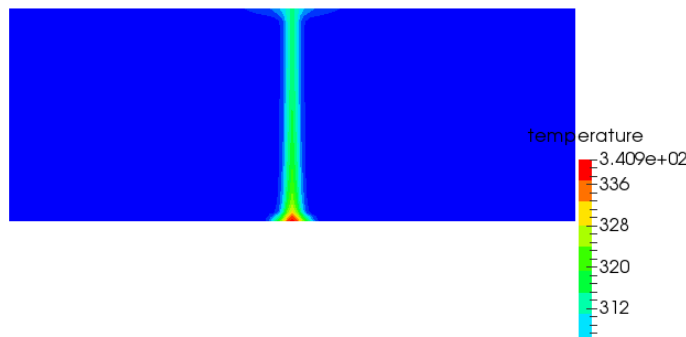
MCBA 乱流モデル無



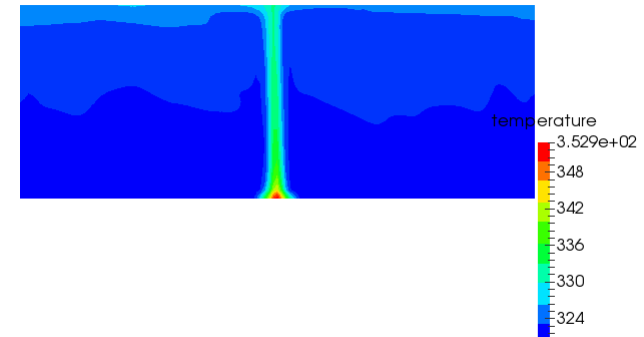
ECBA 乱流モデル無



MCBA 乱流モデル有



ECBA 乱流モデル有

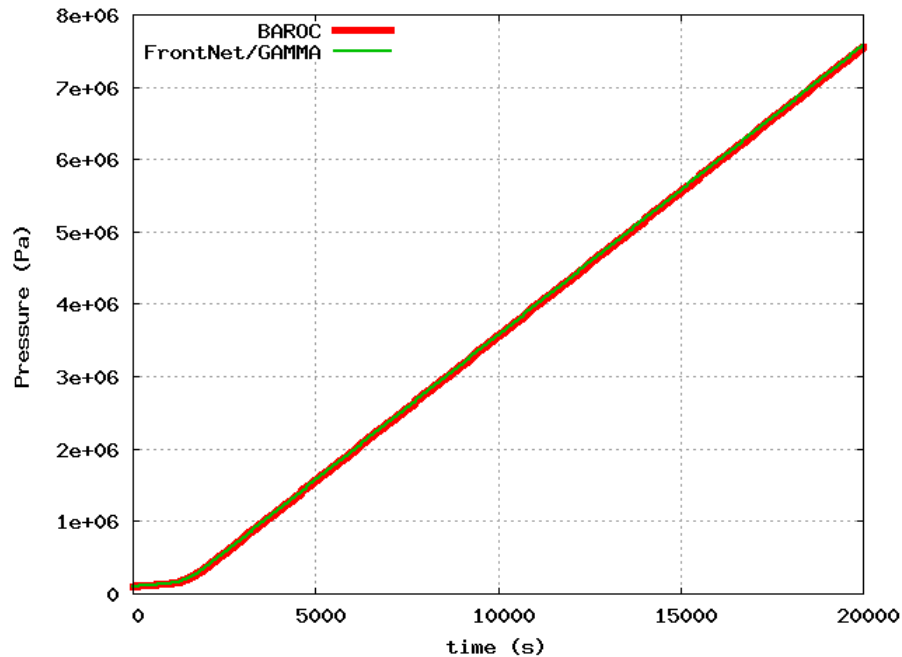


2,700秒前後の温度分布、この時点で時間刻み幅100~120秒、Courant数900~1,200

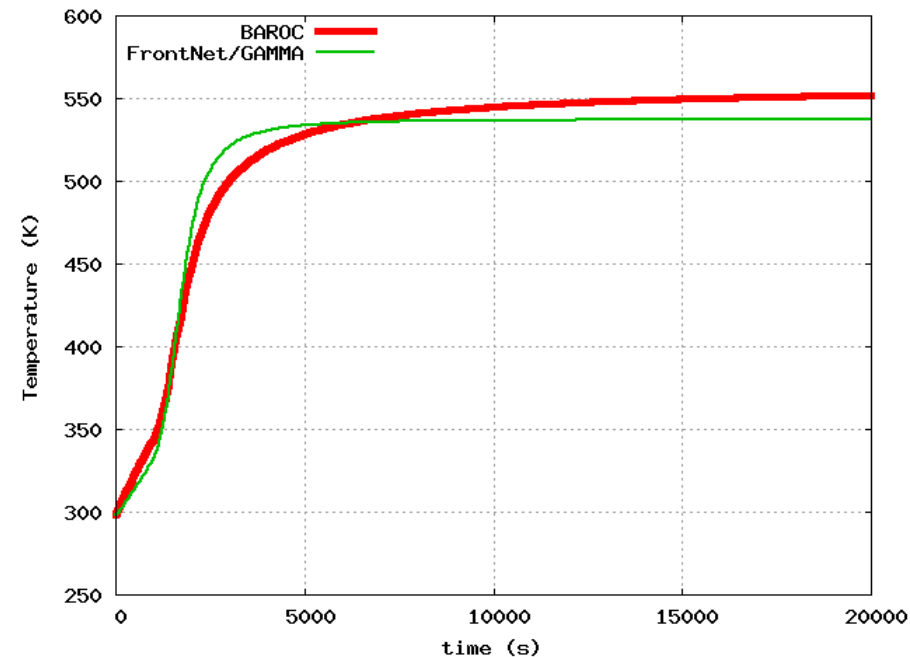
# 格納容器/原子炉建屋熱流動解析コードBAROCの開発



## (2) 強制対流モデル

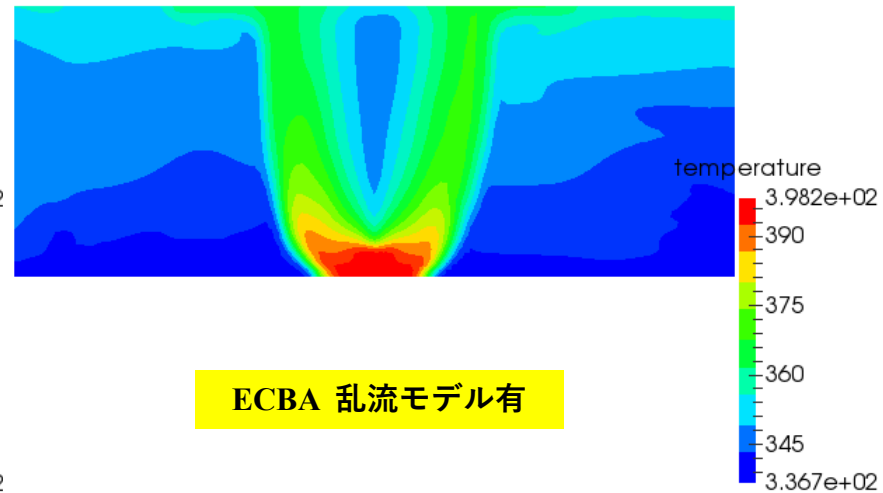
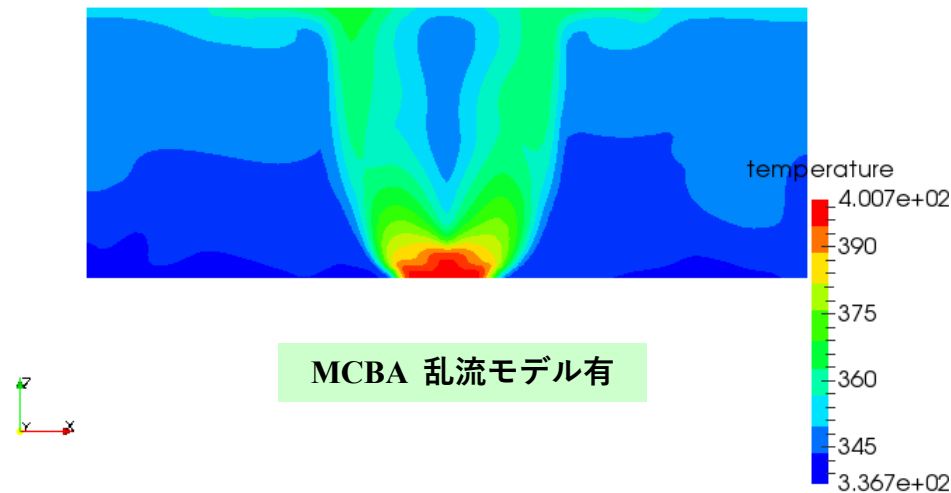
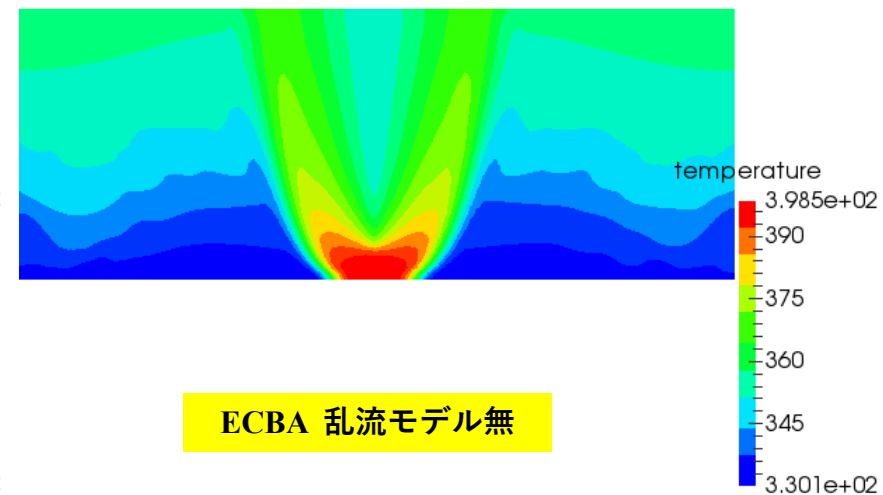
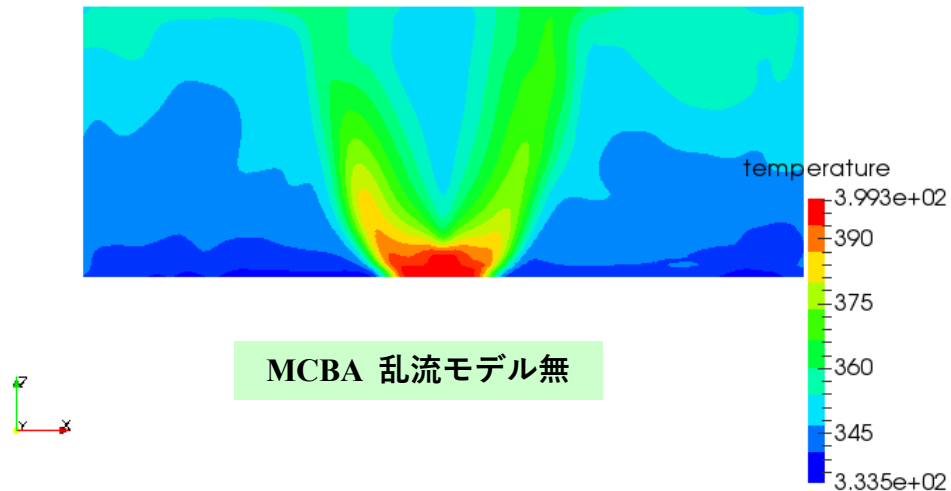


平均圧力変化の比較



平均温度変化の比較

# 格納容器/原子炉建屋熱流動解析コードBAROCの開発



1,000秒での温度分布、この時点で時間刻み幅50秒、Courant数750~780