

過酷事故時原子炉建屋・格納容器の熱流動解析コードAdvance/BAROCのFP エアロゾル挙動モデルの妥当性確認

高橋 淳郎* 大西 史倫* 浜野 明千宏* 三橋 利玄**

Validation of FP Aerosol Behavior Model in the Reactor Building and Containment Vessel Thermo-Fluid Dynamics Code, Advance/BAROC

Atsuo Takahashi*, Fumitomo Onishi*, Achihiro Hamono** and Toshiharu Mitsuhashi*

筆者らが開発した格納容器・原子炉建屋熱流動解析コード Advance/BAROC(以下、BAROC)の FP エアロゾル挙動モデルの妥当性確認を行うため、FP エアロゾル沈着試験 (NSPP 試験) を対象に試験解析を行った。FP 沈着挙動は実験値と概ね一致した結果が得られたが、雰囲気中に水蒸気が存在するケースでは若干異なる傾向となったため、FP エアロゾルの水蒸気による影響等を考慮する必要性が示唆された。

Keywords: BAROC、3次元圧縮性流体解析、過酷事故、FP 挙動、エアロゾル沈着、原子炉建屋

1. はじめに

福島第一原子力発電所の事故後、漏洩した FP (核分裂生成物) の挙動については原子炉建屋等での高い放射線量による調査の困難性から未だ不明な点が多く残されており、FP エアロゾル挙動の物理現象を詳細に解析することは廃炉作業や今後の安全性解析にも役立てられるものと考えられる。BAROC[1]は原子炉建屋と原子炉格納容器内の水素や水蒸気などの多成分ガスの3次元熱流動や FP エアロゾルの沈着を考慮した分布挙動を解析するために開発されたコードであり、これまでに福島第一原子力発電所を模擬した系での解析を行ってきた。本報では BAROC の FP エアロゾル挙動モデルの定量的な検証のために、NSPP (Nuclear Safety Pilot Plant) エアロゾル実験を対象とした解析を行い、実験との比較検討を行った結果について報告する。

2. FP エアロゾル挙動解析モデル

BAROC では熱流動計算と同時に FP エアロゾ

ル挙動解析の計算を行っている。その際に FP エアロゾル解析モデルの計算精度向上のため、熱流動計算の時間刻み幅よりも短い時間刻み幅で解析を行うサブサイクル法を適用している。BAROC の FP 挙動解析モデルの機能概要一覧を表 1 に示す。

なお、BAROC の熱流動計算機能については、本誌の別掲の投稿[7]を参考とされたい。

表 1 BAROC の FP 挙動解析モデルの機能概要

No.	項目	内容
1	基礎方程式	エアロゾル濃度をパッシブスカラー(トレーサー)とした対流拡散方程式
2	重力沈降モデル	重力沈降速度を流速に加算
3	凝集モデル	エアロゾル粒子同士の衝突によるポピュレーションバランスモデル
4	沈着モデル	拡散及び慣性衝突、熱泳動、拡散泳動、重力沈降による沈着を考慮

*アドバンスソフト株式会社 第4事業部

4th Computational Science and Engineering Group,
AdvanceSoft Corporation

**アドバンスソフト株式会社 技師長
Chief engineer, AdvanceSoft Corporation

FP エアロゾルの流動挙動はパッシブスカラー (トレーサー) として取り扱い、FP の質量濃度を次式の対流拡散方程式で解いている。

$$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u Y_k = \nabla \cdot \frac{\mu_t}{\sigma_c} \nabla Y_k + \rho Y_{k,ss} \quad (1)$$

Y_k : エアロゾル濃度 (添字の k は粒径クラス)

ρ : 流体密度

u : 流速

μ_t : 乱流粘性係数

σ_c : 乱流 Schmidt 数

$Y_{k,ss}$: エアロゾル濃度の生成消滅

また、エアロゾル粒子の重力沈降モデルは次式のように重力沈降速度を熱流動計算で解いた流速に加算する形で組み込んでいる。

$$u = u + Y_k \left(1 - \frac{\rho}{\rho_k} \right) g \Delta t \quad (2)$$

ρ_k : エアロゾル密度

エアロゾルの凝集モデルとして次式で表されるエアロゾル粒子同士の衝突によるポピュレーションバランスモデルを組み込み、衝突速度として乱流運動による衝突、浮力・重力による衝突、層流剪断による衝突を考慮している。

$$Y_{k,ss} = \left(\frac{1}{2} \sum_{i+j=k} \beta(i,j) n_i n_j - \sum_{i=1}^{\max} \beta(i,k) n_i n_k \right) \quad (3)$$

$\beta(i,j)$: 粒子グループ i, j の衝突速度

n_i : 粒子径グループ i の数密度

壁面、床面、天井面、構造物へのエアロゾル粒子の沈着モデルについては、拡散及び慣性衝突による沈着モデル、熱泳動による沈着モデル、拡散泳動による沈着モデルは THALES2 コードと同様のモデル[2][3]を 3 次元的に拡張して導入している。

$$v_k = v_{dk} U_+ + v_{Ik} + 2.0 \times 10^{-8} \text{Re} \quad (4)$$

v_{dk} : 拡散による沈着速度

v_{Ik} : 慣性衝突による沈着速度

U_+ : 無次元摩擦速度

Re : レイノルズ数

v_{thmk}

$$= \frac{3v_g C_n r_k (\lambda_g + 2.5K_n \lambda_p)}{2T_g (1 + 3K_n) (2\lambda_g + \lambda_p + 5K_n \lambda_p)} \Delta T_g \quad (5)$$

v_{thmk} : 熱泳動による沈着速度

v_g : 気体の動粘性係数

C_n : Cunningham の補正因子

r_k : エアロゾル粒子の半径

λ_g : 気体の熱伝導度

λ_p : 粒子の熱伝導度

K_n : Knudsen 数

ΔT_g : 壁面近傍での温度勾配

$$v_{difk} = \frac{\sqrt{X_{H_2O}}}{X_{H_2O} \sqrt{m_{H_2O}} + X_{air} \sqrt{m_{air}}} \omega_{condw} \quad (6)$$

v_{difk} : 拡散泳動による沈着速度

m_{H_2O} : 水蒸気の分子質量

m_{air} : 空気の分子質量

X_{H_2O} : 水蒸気のマール分率

X_{air} : 空気のマール分率

ω_{condw} : 壁面への水蒸気の凝縮速度

重力沈降による沈着モデルについては、THALES2 コードのモデルは集中定数系を前提としたものであり、BAROC コードにおいて重力方向への異方的な沈着をモデル化するのは困難である。そこで、沈着速度は重力沈降速度に依存すると考えられるため、次式のように終端速度 $v_{terminal}$ の f_g による定数倍を重力沈降による沈着速度 v_{grav} とする簡易的なモデルを導入し、重力に対して垂直な面 (床面) への沈着として考慮した。本試験解析では、解析結果が実験値に適合するように $f_g = 0.2$ とした。

$$v_{grav} = f_g \times v_{terminal} \quad (7)$$

3. NSPP エアロゾル実験

3.1. 実験概要

NSPP エアロゾル実験[4] [5]は軽水炉や高速増

殖炉の事故時における格納容器内での酸化ナトリウム (Na_2O)、酸化鉄 (Fe_2O_3)、酸化ウラン (U_3O_8) のエアロゾル挙動を研究するため、オークリッジ国立研究所(ORNL)で実施された。小型化した格納容器を模した容器内でエアロゾルを発生させ、その濃度の時間変化が測定された。容器内の雰囲気は乾燥空気または水蒸気を含んだ空気である。BAROC の解析対象として選定したのは、NSPP-106 試験 (エアロゾル種類: Na_2O /乾燥空気中) と NSPP-503 試験 (エアロゾル種類: Fe_2O_3 /湿度 100%空気中) である。

3	初期温度	313.15 K
4	初期圧力	1.09×10^5 Pa
5	エアロゾル流入時間	0~3 分
6	エアロゾル流入量	0.01 kg/s
7	エアロゾル粒子密度	2270 kg/m^3 (Na_2O の密度)
8	エアロゾル粒径分布	平均粒径 $10.8 \mu\text{m}$, 標準偏差 $2.22 \mu\text{m}$ の対数正規分布
9	解析時間	24 時間

3.2. 実験装置

NSPP-106 試験と NSPP-503 試験で使用された容器のサイズは高さ 5.49m、内径 3.05m の上下が丸まった円筒形状である[4][5]。NSPP-106 試験では容器外部のタンクからナトリウムを 473K に加熱してある容器内の BURN PAN へ注入し Na_2O エアロゾルを発生させている。NSPP-503 試験では容器上部から Fe_2O_3 エアロゾルを注入、容器下部の側面から水蒸気を注入し、容器内の雰囲気を一様にするために容器下部に設置したファンで攪拌している。

表 3 NSPP-503 試験の解析条件

No.	項目	内容
1	解析モデル	高さ 5.49m、内径 3.05m、上下が半球状の円筒 32×32×58=59392 格子 (有効格子数 43832)
2	雰囲気	空気+水蒸気 (湿度 100%) (6 時間まで水蒸気を流入)
3	初期温度	383.0 K
4	初期圧力	1.95×10^5 Pa
5	エアロゾル流入時間	0~17 分
6	エアロゾル流入量	0.00012 kg/s
7	エアロゾル粒子密度	5240 kg/m^3 (Fe_2O_3 の密度)
8	エアロゾル粒径分布	平均粒径 $2.8 \mu\text{m}$, 標準偏差 $1.6 \mu\text{m}$ の対数正規分布
9	解析時間	24 時間

4. BAROC による試験解析

4.1. 解析条件

表 2 と表 3 に NSPP-106 試験と NSPP-503 試験の解析条件を示す。エアロゾル流入量と粒径分布は、測定開始時点での実験値に一致するよう参考文献[6]を参考に決定した。

表 2 NSPP-106 試験の解析条件

No.	項目	内容
1	解析モデル	高さ 5.49m、内径 3.05m、上下が半球状の円筒 32×32×58=59392 格子 (有効格子数 43832)
2	雰囲気	空気

4.2. 解析結果

図 1 と図 2 に NSPP-106 試験解析で得られた容器内温度と圧力の時間変化を実験結果と比較して示す。点線が実験値で実線が BAROC による解析結果である。温度は容器の中央水平断面内で中

心軸から 1.07m の位置 (赤い点線と実線) と、中央から+1.5m の高さでの水平断面内で中心軸から 965mm の位置 (青い点線と実線) の 2 か所での測定結果を示した。実験開始後 3 分までに圧力と温度が上昇しているが、これは高温 (773K) の Na を容器内に注入させているためである。容器中央よりも+1.5m の高さでの温度が高くなっているのは対流によるものと考えられる。BAROC ではエアロゾル粒子はパッシブスカラーとして取り扱っており、粒子は温度の情報をもたないため、773K の Na の注入に対応する発熱量を流体に直接付加することで温度と圧力の上昇を模擬した。実際の Na 注入量など実験の詳細が不明であるため、Na 注入期間中の温度と圧力の実験値と解析値との差は比較的大きいが、後述するエアロゾル濃度測定開始時間 (十数分) 以降は実験値と解析値の差は小さくなっており問題ないと判断した。

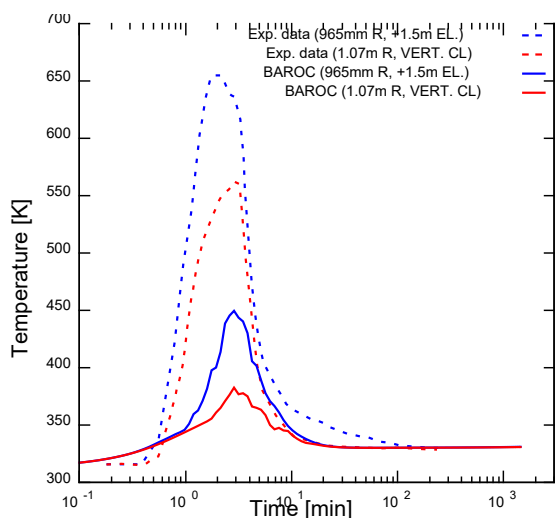


図 1 容器内温度時間変化 (NSPP-106 試験)

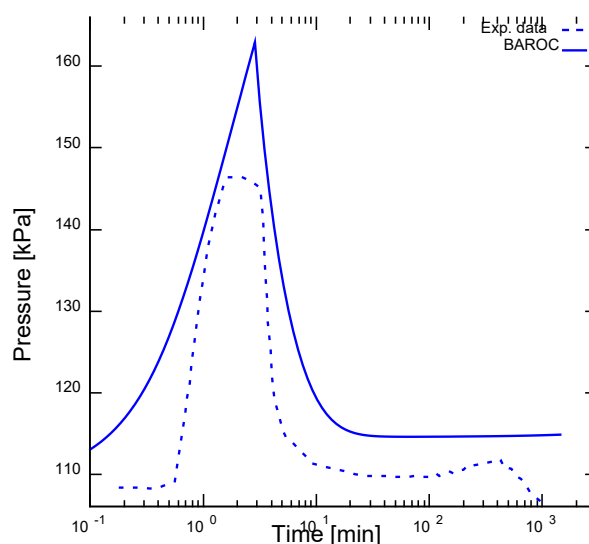


図 2 容器内圧力時間変化 (NSPP-106 試験)

図 3 と図 4 に NSPP-503 試験で得られた容器内温度と圧力の時間変化を実験結果と比較して示す。点線が実験値で実線が BAROC による解析結果である。実験では実験開始から 6 時間水蒸気を流入させているため、流入期間中は温度と圧力が上昇している。実験における流入水蒸気の流量や温度が不明なため、BAROC による解析では実験値を再現するように温度 374 K の水蒸気を 0.004 kg/s の流量で 6 時間流入させた。

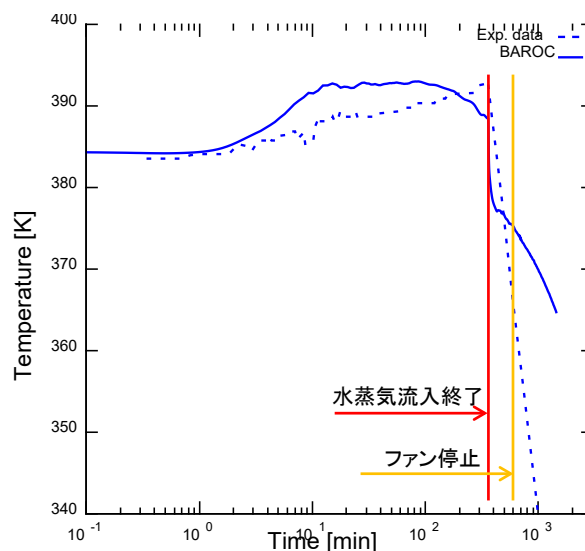


図 3 容器内温度時間変化 (NSPP-503 試験)

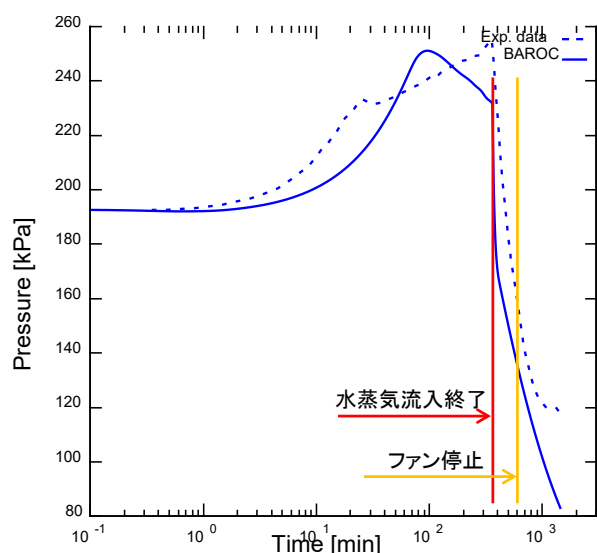


図 4 容器内圧力時間変化 (NSPP-503 試験)

図 5 に NSPP-106 試験解析で得られた浮遊エアロゾル濃度の時間変化を実験結果と比較して示す。容器内の 3 カ所での実験結果 (点) と BAROC による解析結果 (実線) を比較した。時間経過とともに発生したエアロゾル粒子が容器内面に沈着するため、浮遊エアロゾル濃度は減少し、容器上部よりも下部で若干エアロゾル濃度が高くなるという傾向は実験と BAROC による解析結果で概ね一致した。

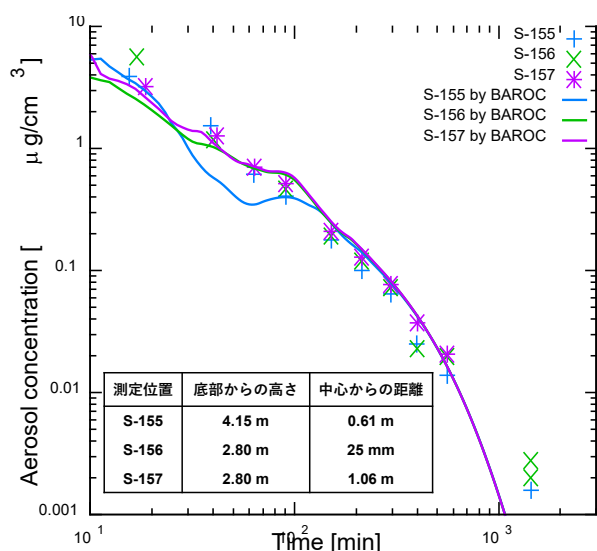


図 5 浮遊エアロゾル濃度時間変化 (NSPP-106 試験)

図 6 に NSPP-503 試験解析で得られた浮遊エアロゾル濃度の時間変化を実験結果と比較して示す。

す。BAROC による解析結果は NSPP-106 試験での測定箇所と同じ 3 カ所での結果を示している。容器下部に設置したファンにより容器内の雰囲気は一樣に攪拌され、これら 3 カ所の測定結果はほぼ同じ値となった。実験結果のプロットは下に凸の形で約 500 分以降のエアロゾル濃度の変化が少なくなっているのに対し、BAROC による解析結果は上に凸の形で 500 分以降もエアロゾル濃度は低下し続けている。

数百分までの BAROC による解析結果が実験結果よりも過大評価になっている。容器内に水蒸気が存在するため、実験ではエアロゾル粒子の湿性沈着やエアロゾル粒子同士の凝集が水蒸気により促進される効果が存在するが、BAROC ではこれらを考慮していないことが原因として考えられる。また、数百分以降の BAROC による解析結果が実験結果よりも過少評価になっている。BAROC では沈着した粒子の再浮遊を考慮していないことや重力による沈着モデルの過大評価などが原因として考えられる。

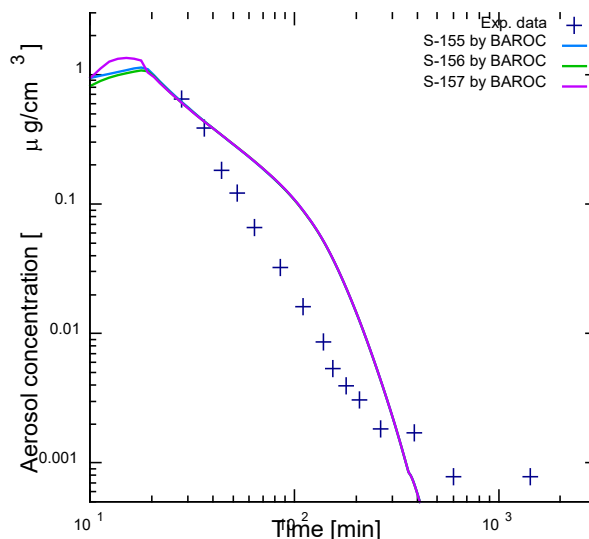


図 6 浮遊エアロゾル濃度時間変化 (NSPP-503 試験)

図 7 と図 8 に NSPP-106 試験解析と NSPP-503 試験解析で得られた容器内浮遊粒子の粒径分布の時間変化を示す。粒子の凝集により粒径が大きい粒子の割合は増加するが、粒径が大きいほど重力沈着の影響を受けやすいため時間が経つと粒径が大きい粒子は減少し、粒径が小さい粒子がほ

とんど占めていることが確認できた。

どちらのケースとも、24 時間程度経過後に浮遊しているのは粒径 $0.1\mu\text{m}$ 程度以下の小さい粒子のみとなった。

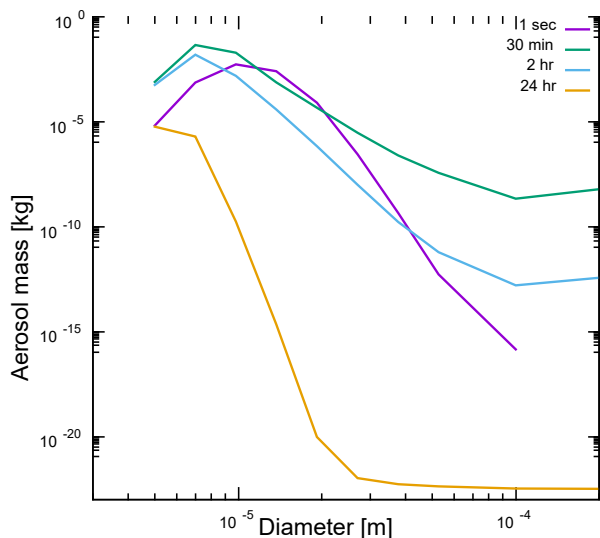


図 7 浮遊エアロゾルの粒径分布時間変化 (NSPP-106 試験)

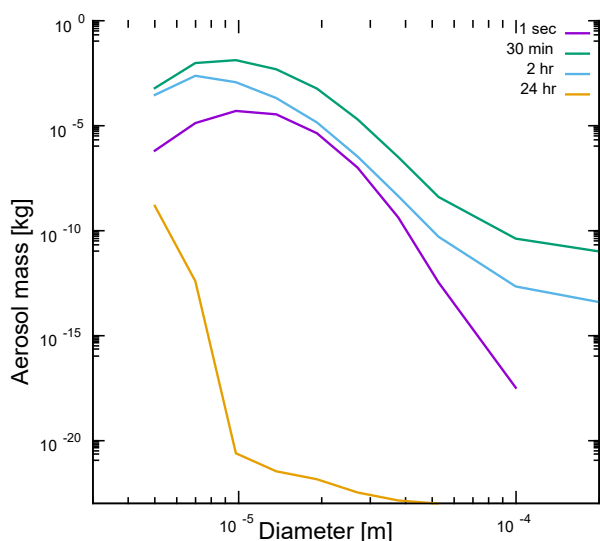


図 8 浮遊エアロゾルの粒径分布時間変化 (NSPP-503 試験)

図 9 と図 10 に NSPP-106 試験解析と NSPP-503 試験解析で得られたエアロゾルの浮遊分布と沈着分布の時間変化を可視化した結果を示す。容器内面へのエアロゾル沈着量はカラスケールで、容器内の浮遊エアロゾル量は白黒スケールで表している。また、熱流動計算による流速もベクト

ルで同時に表示している。NSPP-106 試験では加熱された BURN PAN により、NSPP-503 試験では容器内下部に設置したファンにより、上昇流が発生している。どちらのケースとも容器底部への沈着量が多いが、上昇流が容器上部と衝突する上面にもわずかながら沈着していることが確認できた。

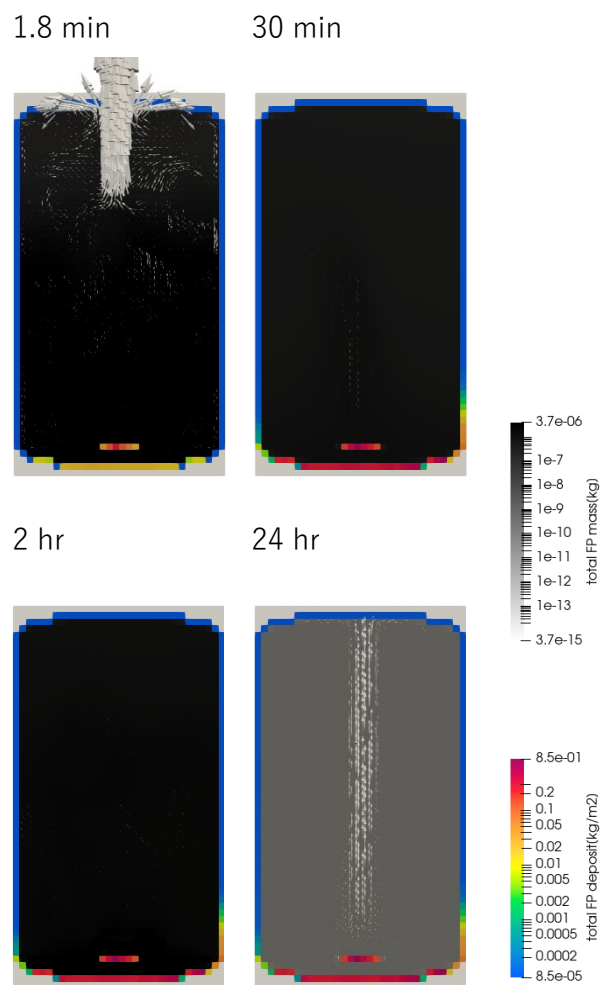


図 9 エアロゾルの浮遊分布と沈着分布の時間変化 (NSPP-106 試験：容器の垂直断面図)

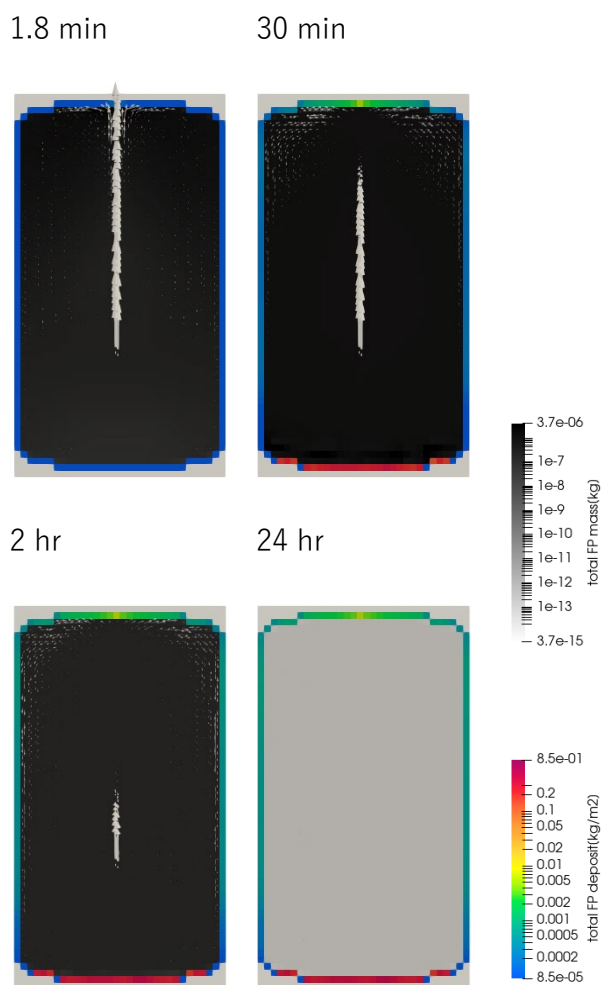


図 10 エアロゾルの浮遊分布と沈着分布の時間変化 (NSPP-503 試験：容器の垂直断面図)

5. まとめ

NSPP エアロゾル実験を対象として BAROC のエアロゾル挙動モデルの定量的な検証解析を行った。BAROC による解析では、エアロゾル粒子の発生メカニズムや容器内の雰囲気などを正確に模擬できていないが、エアロゾル濃度の時間変化は概ね実験に一致することが確認できた。

ただし、特に水蒸気が存在する条件でのエアロゾル濃度の時間変化において実験との乖離が見られたため、湿性沈着や再浮遊モデルの組み込みについて検討が必要と考えられる。今後は上記の課題を解決すると同時に、福島第一原子力発電所のシールドプラグやオペレーションフロアへの FP エアロゾルの沈着など、実機解析への適用を進める予定である。

参考文献

- [1] 大西他, “過酷事故時の原子炉格納容器・原子炉建屋内の水素分布解析”, アドバンスシミュレーション, Vol.29 (2022).
- [2] 石川 淳, 村松 健, 坂本 亨, 「THALES-2 コードによる BWR Mark-II を対象としたレベル 3PSA のための系統的なソースターム解析」(2005).
- [3] H. Jordan, and M. R. Kuhlman, "TRAP-MELT2 Users Manual", NUREG/CR4205, BMI-2124, Battelle Memorial Institute, (1985).
- [4] R. E. Adams, T. S. Kress, M. L. Tobias, NUREG/CR1767 (ORNL/NUREG/TM-408) (1981).
- [5] R. E. Adams, M. L. Tobias, NUREG/CR4798 (ORNL/TM-10301) (1987).
- [6] 石神 努, 小林 健介, 梶本 光広, “放射性物質移行挙動解析コード ART を用いた NSPP エアロゾル実験の解析”, 日本原子力学会誌, 31(8), p.920 (1989).
- [7] 大西他, “過酷事故時原子炉建屋・格納容器の熱流動解析コード Advance/BAROC によるブローアウトパネル作動時の原子炉建屋内水素濃度分布解析”, アドバンスシミュレーション, Vol.31 (2024).

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイル(カラー版)がダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)