過酷事故時の原子炉格納容器・原子炉建屋内のCs挙動解析 高橋 淳郎* 大西 史倫* 浜野 明千宏** 三橋 利玄*

Three-Dimensional Analysis of Cs Behavior in the Containment Vessel and Reactor Building during a Severe Accident

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

過酷事故時における原子炉格納容器および原子炉建屋内のセシウム(Cs)などの FP エアロゾル挙動の 物理現象を詳細に解析することは安全性解析において重要である。そこで、当社開発の原子炉格納容器・ 原子炉建屋内3次元熱流動解析コードBAROCにFPを対象としたエアロゾル挙動解析機能を組み込み、 解析コードの有効性を確認するために、原子炉格納容器から漏洩した Cs エアロゾルの流動に伴う挙動 と原子炉ウエル壁面やシールドプラグへのセシウム沈着挙動を解析した。解析結果は福島第一原子力発 電所の各号機のシールドプラグ近傍での放射線量分布と定性的に対応することが示され、有効性を確認 した。

Keywords: BAROC、3 次元圧縮性流体解析、過酷事故、Cs 挙動、エアロゾル沈着、多成分ガス、原子炉 格納容器、原子炉建屋、原子炉ウエル、オペレーティングフロア

1. はじめに

福島第一原子力発電所の事故後、漏洩したセシ ウム(Cs)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 が残されているものの、炉心損傷が発生した 1~ 3 号機では原子炉建屋上部のシールドプラグ内部 に、原子炉格納容器のトップヘッドフランジから 漏洩したと推定される FP (核分裂生成物)に起因 する高濃度の放射線量が測定されている。ただし、 1~3 号機それぞれの事故進展が異なることや事 故発生から時間がかなり経過していることから 放射線測定量にも大きな差異がある[1]。また、シ ールドプラグ同士や建屋躯体との隙間に存在す ると考えられる漏洩経路についても不確実な点 が多い。このように、事故進展の違い、時間が大

*アドバンスソフト株式会社 熱流動エンジニア リングセンター

Thermal Hydraulics Engineering Center, AdvanceSoft Corporation

**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 きく経過していること、漏洩経路の不明点などに より不確実性が大きいものの、FP エアロゾル挙動 の物理現象を詳細に解析することは、今後の安全 性解析に役立てられるものと考え、BAROC コー ドを用いて FP エアロゾル挙動を解析した。解析 では FP エアロゾルとして Cs に絞り、シールドプ ラグからオペレーティングフロアへの漏洩面積 がシールドプラグ周辺の Cs の挙動や壁への沈着 に与える影響について検討を行った。

本稿では、BAROC コードの FP エアロゾル挙動 解析モデルの概要および過酷事故時における原 子炉建屋内 Cs 挙動解析について報告する。

2. FP エアロゾル挙動解析モデル

2.1. 基礎方程式

本モデルでは FP エアロゾルをパッシブスカラ ー(トレーサー)として取り扱う。基礎方程式は エアロゾル FP の i成分の質量濃度Y_i[kg/m³]の対 流、拡散、重力沈降、沈着などを考慮した質量保 存式として次式で表される。拡散項では分子拡散 と乱流拡散を考慮する。

$$\gamma_{\nu} \frac{\partial \rho Y_{i}}{\partial t} + \left(\frac{1}{r}\right)^{\alpha} \frac{\partial r^{\alpha} \gamma_{r} \rho u Y_{i}}{\partial r} + \left(\frac{1}{r}\right)^{\alpha} \frac{\partial \gamma_{\theta} \rho \nu Y_{i}}{\partial \theta} + \frac{\partial \gamma_{z} \rho w Y_{i}}{\partial z} = \left(\frac{1}{r}\right)^{\alpha} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^{\alpha} \gamma_{r} (\rho D_{i} + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{c}}) \frac{\partial Y_{i}}{\partial r}\right) + \left(\frac{1}{r^{2}}\right)^{\alpha} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\gamma_{\theta} (\rho D_{i} + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{c}}) \frac{\partial Y_{i}}{\partial \theta}\right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_{z} (\rho D_{j} + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{c}}) \frac{\partial Y_{i}}{\partial z}\right)$$
(1)

+ $\gamma_v \rho S_i - \gamma_v \rho R_i$ ここで、 $\alpha = 1$ のとき、円筒座標系の(r, θ, z)に対応 し、 $\alpha = 0$ のときデカルト座標系の(x, y, z)に対応 する。 γ_v は体積多孔率、 $\gamma_r, \gamma_\theta, \gamma_z$ は r, θ, z 又はx, y, z各方向の面積透過率、 ρ は流体密度、u, v, wは r, θ, z 又はx, y, z方向の速度、 D_i は分子拡散係数、 μ_t/σ_c は 乱流拡散係数を表し、 σ_c は乱流 Schmidt 数であり 通常 1.0 である。また、 S_i は凝集による i 成分へ の移行やデブリからの発生によるエアロゾル生 成項、 R_i は凝集による他成分への移行や重力沈降、 沈着によるエアロゾル消滅項を表す。ただし、凝 集の影響は今後の検討課題とし、また、重力沈降 の影響は手計算による検討の結果、比較的小さい と判断し今回は考慮しないこととした。

2.2. 乱流沈着モデル

沈着率は次のように表される。

$$R_i = \frac{v_i A}{V} Y_i \tag{2}$$

ここで、*v*_iはエアロゾル FP の i 成分の壁沈着、 拡散沈着、乱流沈着、熱泳動沈着による沈着速度、 Aは沈着有効面積を表す。沈着有効面積は流体格 子が接している部分の壁の面積とする。

THALES2 でのモデル[3]は、沈着速度は拡散お よび慣性衝突、重力沈降、熱泳動、拡散泳動のそ れぞれによる沈着速度の合計として計算してい るが、重力沈降しないことや拡散の効果は(1)式で 直接考慮されていることから、ここでは乱流沈着 による沈着速度のみを考慮し THALES2 で採用 している TRAP-MELT2 コードの方法[4]を参考 に以下のように求める。

乱流沈着はエアロゾルの粒径によって支配的 になるメカニズムが異なる。エアロゾル直径が lµm 以下の場合、拡散が支配的であるとして定式 化した Davies モデルによる沈着速度v_{di}と、エア ロゾル直径が lµm 以上の場合に慣性衝突が支配 的であるとして定式化した Friedlander モデルに よる沈着速度v_{li}を次のように組み合わせてエア ロゾル沈着速度v_iを求める。

$$v_i = v_{di}U_+ + v_{Ii} + 2.0 \times 10^{-8} \text{Re}$$
(3)

$$U_{+} = \sqrt{\frac{f}{2}} |\boldsymbol{u}| \tag{4}$$

$$f = 0.0014 + 0.125 \mathrm{Re}^{-0.32} \tag{5}$$

 v_{di}

$$=\frac{1}{14.5\text{Sc}^{\frac{2}{3}}}$$
(6)

$$\times \frac{1}{\frac{1}{6}\log_{10}\frac{(1+\phi)^2}{1-\phi+\phi^2} + \frac{1}{\sqrt{3}}\tan^{-1}\frac{2\phi-1}{\sqrt{3}} + \frac{\pi}{6\sqrt{3}}}$$

$$\phi = \frac{\mathrm{Sc}^{1/3}}{2.9}, \qquad \mathrm{Sc} = \frac{v_g}{D_p} \tag{7}$$

ここで、 $v_i : エアロゾル沈着速度(cm/s)$ |u| : 気体の流速の絶対値(cm/s) $v_g : 気体の動粘性係数 (cm²/s)$ $D_p : エアロゾルの拡散係数 (cm²/s)$ Re : Reynolds 数 (-) Sc : Schmidt 数 (-) であり、Reynolds 数は次式より求める。 |u|L

$$\operatorname{Re} = \frac{|\boldsymbol{u}|L}{\nu_g} \tag{8}$$

ここで、Lは代表長さを示し、入力で設定する。標準値として、原子炉格納容器と原子炉建屋の解析に対しては 1.0m とした。

Friedlander モデルによる沈着速度v₁は、式(9)

で表されるエアロゾルの緩和時間τと無次元緩和時間τ-を用いて、式(10)から式(12)により求める。

$$\tau = \frac{\rho_p (2r_p)^2}{18\mu_g} Cu, \qquad \tau_+ = \frac{\tau U_+^2}{v_g}$$
(9)

τ+ < 5.6の場合

$$v_{Ii} = \frac{1}{\sqrt{\frac{2}{f}} + \left(\frac{1525}{0.81\tau_{+}^{2}} - 50.6\right)}$$
(10)

 $5.6 \leq \tau_+ < 33.3$ の場合

$$v_{Ii}$$

$$=\frac{1}{\sqrt{\frac{2}{f}+5\log_{10}\left(\frac{5.04}{0.18\tau_{+}}-0.959\right)-13.73}}$$
(11)

τ+≥33.3の場合

$$r_p = \sqrt{\frac{2}{f}} \tag{12}$$

ここで、
$$ho_p:$$
エアロゾル密度(g/cm³) $\mu_g:$ 気体の粘性係数 (dyn/cm²・s) $r_p:$ エアロゾル半径(cm)

3. 原子炉ウエルとオペレーティングフロア内の Cs 挙動解析

解析対象を図 1 に示す福島第一原子力発電所1 号機原子炉建屋相当の原子炉格納容器上部の原 子炉ウエルおよびオペレーティングフロアとし、 トップヘッドフランジから水素、水蒸気、Cs エア ロゾルが漏洩したと仮定して、エアロゾル粒子を パッシブスカラー(トレーサー)として取り扱い、 乱流拡散による沈着を考慮し解析を行った。



図1 原子炉ウエルとオペレーティングフロアのモデル

3.1. 想定シナリオと計算条件

解析対象を原子炉格納容器上部の原子炉ウエ ルおよびオペレーティングフロアとし、図1に示 した3DCADを活用して公開情報を基に作成した 原子炉ウエルとオペレーティングフロアのモデ ル形状をSTLファイルに変換して利用し、STLフ ァイルのモデル形状から直交格子での分割を行 い、さらに形状模擬精度を上げるためにポーラス 設定を行い計算に使用した。表 1 に本解析の計算 条件を示す。

想定シナリオとして、トップヘッドフランジか ら水素、水蒸気、Csエアロゾルが漏洩したと想定 して、シールドプラグからの漏洩口の面積が異な る2ケースについて解析を行った。シールドプラ グは図 2 のように 3 枚の円板状の鉄筋コンクリ ートが重なった構造になっており、それぞれの円 板はさらに円に垂直な面で3分割され、分割の方

過酷事故時の原子炉格納容器・原子炉建屋内の Cs 挙動解析

向は上段と下段の円板は同じ向き、中段の円板は それらと垂直な向きになっている。したがって通 常時でもシールドプラグ同士また建屋躯体との 接触面での隙間がわずかに存在すると考えられ るが、現時点でその隙間の総面積を見積もること は難しい。そこで解析上は、隙間が 1mm の場合 (ケース 1) と 16mm の場合 (ケース 2) に相当 する漏洩面積の円筒状の穴を、上段中段下段のシ ールドプラグを3分割する直線の交点4か所に設 け、原子炉ウエルおよびオペレーティングフロア を流路で接続した。また、コンクリートの粗度や 流路面積の急激な拡大縮小を考慮し流路の抵抗 係数として1,000を与えた。

水素と水蒸気の流入量は MAAP による解析結 果[1]を参考に、モル比1:2.78 に相当するものと し流入開始から15800 秒(4.4 時間)の間 0.346 kg/s の流量(総量 5466.8 kg)でトップヘッドフランジ の円周上の1箇所から流入させ、その後は停止さ せた。Cs エアロゾルは流入開始から15800 秒(4.4 時間)の間 0.01kg/s の流量で粒径 10μm の粒子を 水素と水蒸気の流入場所から流入させた。

Cs エアロゾルの流量については不確かさが大きいため、最終的な沈着総量から手計算で計算した放射線量が福島第一原子力発電所1号機~3号機での実際の測定値程度になるオーダーとして上記の値を設定した。



図 2 シールドプラグ断面図

表 1 原子炉ウエルとオペレーティングフロア 内の Cs 挙動解析計算条件

№	項目	内容
1	計算体系	X=33.0 m (格子分割数:66)
		Y=42.0 m (格子分割数:76)
		Z=23.2 m (格子分割数:45)
2	全格子数	225,720
3	有効格子数	178,906
4	数値計算法	ECBA 法
5	状態方程式	SRK 式
6	乱流モデル	<i>k-ɛ</i> モデル
7	考慮するガス	N_2 , O_2 , H_2 , H_2O
	成分	
8	対流項の差分	一次精度風上差分法
	スキーム	
9	時間刻み幅	Courant 数の最大値によ
	制御	る自動制御
10	Courant 数の	1,000
	最大値	
11	行列計算法	ILU(2)-BiCGStab(l)法
		(Lis[5]を利用)
12	解析対象時間	流入開始から18時間
13	原子炉建屋内	圧力 : 101,325Pa
	初期条件	温度 : 298.15K
		気体成分:N ₂ 77.5%、O ₂
		20.6%, H ₂ O 1.9%
		流速 :ゼロ
14	水素、水蒸気、	原子炉格納容器トップへ
	Cs 流入個所	ッドフランジ
15	水素流入量	210.3 kg
16	水蒸気流入量	5,256.5 kg
17	Cs 流入量	158 kg
18	水素・水蒸気	500 K
	流入温度	
19	水素・水蒸気、	計算開始から 4.4 時間ま
	Cs 流入条件	で一定量で流入。
20	流速境界条件	スリップ
21	温度境界条件	外壁:298.15 K
		内部構造:断熱

3.2. 計算結果

3.2.1. Cs エアロゾルの流動に伴う挙動

隙間の異なる 2 ケースの Cs エアロゾルの流動 に伴う挙動を図 3 に示す。トップヘッドフランジ から漏洩した Cs エアロゾルがシールドプラグの 穴を経由してオペレーティングフロアに拡がる 様子や、シールドプラグの穴が大きいほどオペレ ーティングフロアへの上昇流の流量が大きくな る傾向が確認できた。

流入開始から 4.4 時間後のトップヘッドフラン ジからの流入を停止した後も原子炉ウエルから オペレーティングフロアへの流れが継続してい ることが確認されたが、この原因は流入停止直後 の原子炉ウエルとオペレーティングフロアの圧 力差によるもので、その後圧力が平衡に達した後 は主に水素の浮力と拡散によるものと考えられ る。

流入開始から 18 時間後の原子炉ウエルからオ ペレーティングフロアへの流入がケース2の方が 大きいのは、この浮力と拡散による水素の原子炉 ウエルからオペレーティングフロアへの移動が シールドプラグの漏洩口が大きいケース2の方が 起こりやすいためであると考えられる。

3.2.2. Cs エアロゾルの沈着挙動

隙間の異なる 2 ケースの Cs 沈着挙動を図 4 に 示す。また、原子炉ウエル、シールドプラグ、オ ペレーティングフロアの Cs 沈着量の時間変化を 図 5 に示す。

ケース1はケース2より隙間が小さいことから、 ケース1の方がシールドプラグに多くのCsが沈 着することが確認された。また、水素、水蒸気、 Cs エアロゾルの流入が停止する4.4時間までは、 ケース1では原子炉ウエルに多くのCsが沈着す るのに対し、ケース2はオペレーティングフロア の天井に多く沈着する傾向が確認された。これは、 ケース1は原子炉ウエル内でCsが多く留まるの に対し、ケース2は原子炉ウエルからオペレーテ ィングフロアへの流体の漏洩が大きいためと考 えられる。

ケース2で流入開始から4.4 時間以降も原子炉 ウエル、シールドプラグ、オペレーティングフロ ア内のCs沈着量が増加しているのは、水素の浮 力と拡散により、時間経過とともに解析領域内の 低い位置ほど流体密度が増加することが原因と 考えられる。流体密度が増加すると、(3)式に含ま れるRe数が大きくなり、沈着速度は増加する。

これに対してケース1で流入開始から4.4 時間 以降、沈着量がほとんど増加していないのは隙間 が小さく水素の原子炉ウエルからオペレーティ ングフロアへの移動が少ないため、流入停止と相 まって原子炉ウエル内の流動がほとんど停滞し ているためと考えられる。



図 3 ケース1(左)とケース2(右)のCsエアロゾル濃度分布の時間変化 (注)灰色の建屋と原子炉ウエルはYZ面で、カラーのコンター図はXZ面で切り取った断面図



図 4 ケース1(左)とケース2(右)のCs沈着分布の時間変化 (注)灰色の建屋と原子炉ウエルはYZ面で切り取った断面図



4. まとめ

本解析では、BAROC コードを用いて原子炉ウ エルとオペレーティングフロアでの流動に伴う Cs 挙動と壁への沈着挙動を評価した。シールドプ ラグの隙間による漏洩面積が小さいほど原子炉 ウエルからオペレーティングフロアへ流出する Cs エアロゾルが少なく、シールドプラグ下面およ び漏洩孔に沈着する Cs の量が多くなる傾向が確 認された。また、シールドプラグの隙間による漏 洩面積が小さいほど、Cs の原子炉格納容器からの 漏洩が停止すると、原子炉ウエル、シールドプラ グ、オペレーティングフロアの Cs 沈着量がほと んど変化しないことが分かった。これは漏洩停止 後の沈着量が放射線量評価の目安になる可能性 を示唆している。

今後はシールドプラグモデルの詳細化や、Cs エ アロゾル粒子の沈着モデルの拡充、また FP の流 動や沈着に関する実機での調査結果や実験結果 をモデルに反映すること等により、より精度の高 い解析を行えるよう BAROC コードの開発と解析 を進めていく予定である。

参考文献

- [1] 原子力規制委員会、「1~3号機原子炉建屋 における線源調査について ~汚染密度、核 種スペクトル測定の分析~」、(2020.6.25).
- [2] 東京電力,「福島第一原子力発電所 1~3 号
 機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明
 問題に関する検討 第4回進捗報告」,
 (2015.12.17).
- [3] 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」, (2005.9).

- [4] H. Jordan, and M. R. Kuhlman, "TRAP-MELT2 Users Manual", NUREG/CR4205, BMI-2124, Battelle Memorial Institute, (1985).
- [5] 反復解法ライブラリ Lis, https://www.ssisc.org/lis/
- ※ 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。)