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 _{大西 史倫* 浜野 明千宏* 高橋 淳郎* 三橋 利玄**}

Analysis of Hydrogen Concentration Distribution in the Reactor Building During Blowout Panel Operation using Reactor Building and Containment Vessel Thermo-Fluid Dynamics Code, Advance/BAROC

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

福島第一原子力発電所の事故では 1、3、4 号機で原子炉建屋が破損する水素爆発が発生している。 しかし、2 号機は 1 号機の水素爆発の影響によりブローアウトパネル(以下 BOP)が脱落し、BOP が開い た状態であった。そのため、原子炉建屋内の 5 階に水素が滞留せず、発生した水素が BOP を経由して 原子炉建屋外に流出したことで水素爆発に至らなかったと考えられている。そこで、筆者らが開発し た Advance/BAROC を用いて BOP 作動時の原子炉建屋内の水素濃度分布解析を行った。得られた解析 結果では BOP 作動時において、水素漏洩停止後の水素濃度は十分低く水素爆発に至らないことが予想 される結果が示された。

Keywords: BAROC、3次元圧縮性流体解析、過酷事故、水素濃度分布、多成分ガス、水蒸気凝縮、原子 炉建屋、ブローアウトパネル

1. はじめに

福島第一原子力発電所の事故では複数の原子 炉建屋で水素爆発が発生しており、改めて原子 炉建屋内の水素濃度分布解析[1]が重要視されて いる。しかし、現在使用されているシビアアク シデントコードの多くは外国製の商用コード [2][3][4]であり、複雑な原子炉建屋を考慮した解 析には耐え難い状況である。その理由として原 子炉建屋規模の解析を実施するには膨大な計算 時間が必要であり、解析コストが高いなどの問 題がある。

これらの問題を対処するために、筆者らは過 酷事故時原子炉建屋・格納容器の熱流動解析コ

*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

AdvanceSoft Corporation

ード Advance/BAROC(以下、BAROC)を開発し、 前報[5]において原子炉建屋内の水素濃度分布解 析への適用性を示した。

本報では福島第一原子力発電所 2 号機(以下、 1F2)の事故に着目し、BOP 作動時の原子炉建屋 内の水素濃度分布解析を行い、得られた解析結 果を基に水素漏洩停止後の水素濃度が水素爆発 に至る濃度に達するか否かを検討した。

2. BAROC の機能概要

BAROC の機能一覧を表1に示す。BAROC で は多成分ガスの3次元圧縮性流体の計算を従来 SIMPLEC 法系列の解法[6][7]に比べて計算時間や 計算安定性を改善させ、高速かつ効率良く計算 できるように ECBA 法を独自開発した[8]。 ECBA 法は圧力や温度の大きな変化に対応できる ように圧力・流速・エネルギーが強く結びつい た解法である。本章では BAROC に組み込まれて いる主要な解析機能の概要について説明する。

2.1. 基礎方程式

基礎方程式は次のとおりである。

①質量保存式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = \sum \nabla \cdot \left(\rho D_{pq} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) \nabla Y_p + S_\rho \qquad (1)$$

上式右辺第1項は式(4)の拡散項の総和であり 本来ゼロとなるものであるが、数値計算上必ず しもゼロとはならず、密度で表される質量保存 式と成分濃度の質量保存式の総和と整合が取れ るように加えたものである。

②運動量保存式

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u u = -\nabla p - \nabla \cdot \tau - \nabla \cdot \tau_t - \rho g$$
 (2)
 $+ S_{\rho u}$

③エネルギー保存式

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{E+p}{\rho}\right) \rho u &= \nabla \cdot \left(\lambda + \frac{\mu_t C_p}{P r_t}\right) \nabla T \\ &+ \sum \nabla \cdot h_p \left(\rho D_{pq} + \frac{\mu_t}{\sigma_c}\right) \\ &- \frac{\lambda}{C_p} \right) \nabla Y_p + S_E \end{aligned} \tag{3}$$

上式右辺第2項は濃度拡散に伴うエネルギー 変化項を表している。

④ガス成分物質濃度の質量保存式

$$\frac{\partial \rho Y_p}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u Y_p = \nabla \cdot \left(\rho D_{pq} + \frac{\mu_t}{\sigma_c}\right) \nabla Y_p + S_p \quad (4)$$

ここで、Eは全エネルギー、tは時間、 ρ は流体密 度、pは流体圧力(以下、単に圧力)、 τ は剪断応 力、 τ_t は乱流運動量束、 C_p は定圧比熱、 C_v は定 積比熱、Tは流体温度(以下、単に温度)、 μ_t は乱 流粘性係数、 Pr_t は乱流 Prandtl数、 σ_c は乱流 Schmidt数、 h_p はガス成分のエンタルピーを示す。 さらには、 Y_p は p 成分の質量分率、 D_{pq} は成分 p と q の相互拡散係数、 S_p , S_{pu} , S_E , S_p は各保存式の 生成消滅項を示す。

2.2. 数値計算法

数値計算法の根幹である圧力 Poisson 方程式を、 これまでの SIMPLE 法系列の質量保存式ではな く、エネルギー保存式に基づいて組み立て圧力、 流速、エネルギーが強く結びついた解法として ECBA 法[8]を独自に開発した。

圧力 Poisson 方程式を組み立てるために、エネ ルギー保存式を次のように変形する。文字の色 が異なっている項(次式左辺第3項と右辺第2項) が新たに追加した項を示している。

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{E+p}{\rho}\right) \rho u - \nabla \\
\cdot \left(\lambda + \frac{\mu_t C_p}{Pr_t}\right) \nabla \left(\frac{E}{\rho C_v}\right) \\
= \nabla \cdot \left(\lambda + \frac{\mu_t C_p}{Pr_t}\right) \nabla T - \nabla \\
\cdot \left(\lambda + \frac{\mu_t C_p}{Pr_t}\right) \nabla \left(\frac{E}{\rho C_v}\right) \\
+ \nabla \cdot \sum h_p \left(\rho D_{pq} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} - \frac{\lambda}{C_p}\right) \nabla Y_p + S_E$$
(5)

未知数である圧力修正量*δp*のみの方程式とな るようにするために、式(5)に次の式(6)を代入 すると、式(7)で表される圧力 Poisson 方程式が 得られる。

$$E = \rho h - p + \frac{1}{2}\rho u^{2}$$

$$\cong \left[\left(\frac{\rho h}{p} \right)^{n+1(l)} - 1 \right] \left(p^{n+1(l)} + \delta p^{n+1(l+1)} \right) + \left(\frac{1}{2}\rho u^{2} \right)^{n+1(l)}$$

$$p^{n+1(l+1)} = p^{n+1(l)} + \delta p^{n+1(l+1)}$$

$$\rho u^{n+1(l+1)} = \rho u^{n+1(l)} - \nabla \left[\frac{\delta p^{n+1(l+1)}}{a_{d} + \sum a_{LU}} \right]$$
(6)

ここで、式(6)の3番目の式は SIMPLEC 法に基づいた定式化である。

$$\begin{split} & \left[\left(\frac{\rho h}{p} \right)^{n+1(l)} - 1 \right] \frac{\delta p^{n+1(l+1)}}{\Delta t} \\ &+ \nabla \cdot \left[\frac{\left(\frac{\rho h}{p} \right)^{n+1(l)}}{\rho^{n+1(l)}} \frac{\delta p^{n+1(l+1)}}{\rho^{n+1(l)}} \right] \rho u^{n+1(l)} \\ &- \nabla \cdot \left(\frac{E+p}{\rho} \right)^{n+1(l)} \nabla \left[\frac{\delta p^{n+1(l+1)}}{a_d + \sum a_{LU}} \right] - \nabla \\ &\cdot \left(\lambda + \frac{\mu_t C_p}{Pr_t} \right)^{n+1(l)} \nabla \left[\frac{\left\{ \left(\frac{\rho h}{p} \right)^{n+1(l)} - 1 \right\} \delta p^{n+1(l+1)}}{\rho C_v^{n+1(l)}} \right] \\ &= \frac{E^n - \left[\left(\frac{\rho h}{p} \right)^{n+1(l)} - 1 \right] p^{n+1(l)} - \left(\frac{1}{2} \rho u^2 \right)^{n+1(l)} }{\Delta t} \\ &- \nabla \cdot \left(\frac{E+p}{\rho} \right)^{n+1(l)} \rho u^{n+1(l)} + \\ \nabla \cdot \left(\lambda + \frac{\mu_t C_p}{Pr_t} \right) \nabla T^{n+1(l)} - \nabla \cdot \left(\lambda + \frac{\mu_t C_p}{Pr_t} \right) \nabla \left(\frac{E^{n+1(l)}}{\rho C_v} \right) \\ &+ \nabla \cdot \sum h_p^{n+1(l)} \left(\rho D_{pq} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} - \frac{\lambda}{C_p} \right) \nabla Y_p^{n+1(l)} + S_E \end{split}$$

上記の式は、左辺に集められた $\delta p^{n+1(l+1)}$ に関 する連立方程式としてまとめられ、右辺は荷重 項として代数的に求めることができる。なお、 対流項の離散化を通して得られる $[\delta p^{n+1(l+1)}]^2$ は 小さいものとして省略している。

連立方程式の行列計算用の反復解法ソルバー として、自社保有の BiCGStab 法[9]ソルバーの他、 日本で開発された反復解法ライブラリ Lis[10]も 利用することができる。Lis は偏微分方程式の離 散化式の線型方程式および固有値問題を解くた めの並列反復解法ソフトウェアライブラリである。

2.3. 状態方程式

本解析では状態方程式として次の実在流体の 状態方程式である Soave-Redlich-Kwon 式[12](以 下、SRK)を用いた。

$$p = \frac{\rho T}{1 - b\rho} R - \frac{a\rho^2}{1 + b\rho} \tag{8}$$

ここで、R は一般気体定数を分子量で割ったもの である。係数a、bは多成分系では次のように表 される。

$$a = \sum_{i} \sum_{j} X_{i} X_{j} (a_{i} a_{j})^{0.5} \quad b = \sum_{i} X_{i} b_{i}$$

$$a_{i} = a_{ci} D(T)_{i} = \left[1 + m \left[1 - \left(\frac{T}{T_{c}} \right)^{0.5} \right] \right]_{i}^{2}$$

$$a_{ci} = \left[\frac{f_{a}}{P_{c}} \left(\frac{R}{M} T_{c} \right)^{2} \right]_{i} = const.$$

$$b_{i} = \left(f_{b} \frac{R}{M} \frac{T_{c}}{P_{c}} \right)_{i} = const.$$

$$m_{i} = 0.48 + 1.574\omega_{i} - 0.176\omega_{i}^{2} = m_{i}(\omega_{i})$$

$$= const.$$

$$f_{a} = 0.42748 \qquad f_{b} = 0.08664$$
(9)

2.4. バルク凝縮

解析において凝縮などの相変化を伴う現象を 考慮しないと、水蒸気が増加し解析領域内の湿 度が 100%を越えても気体のまま存在し、圧力を 現実よりも大きく増加させる問題がある。 BAROC では解析領域内の水蒸気濃度が湿度 100%を越えた分を凝縮させるバルク凝縮モデル を導入している。なお、凝縮した水は計算体系 から削除している。

2.5. 壁面凝縮と熱伝達モデル

壁面において、対流による熱伝達と水蒸気の 凝縮による熱伝達を考慮する。対流による熱伝 達は気体と壁面との熱伝達であるが、水蒸気の 凝縮による熱伝達は、壁面に水蒸気の凝縮で液 膜が形成されるものとし、気体と液膜との熱伝 達、液膜と壁面の熱伝達および凝縮に伴う潜熱 を考慮している。モデルの概要を図1に示す。



2.6. 壁構造物熱伝達モデル

格納容器や原子炉建屋の雰囲気と外気の熱伝 達を考慮するために、外壁に接する流体格子、 外壁および外気の間の壁構造物の温度計算機能 として、図 2 に示す壁構造物熱伝達モデルを BAROC に導入した。

壁構造物中心温度Twを一点集中近似として、 壁構造物へ出入りするエネルギーバランスから 壁構造物温度を算出することにより、壁に接す る流体格子と外気との熱伝達を評価するモデル である。モデルの概要を図2に示す。

壁構造物へ出入りするエネルギーバランス式 は次のとおりである。

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho C_p V T_w = U_{in} A (T_g - T_w) - U_a A (T_w - T_a)$$
(10)

ここで、ρC_pは構造物の熱容量、Vは構造物の堆 積、Aは構造物の伝熱面積、T_gは流体温度、T_aは 外気温度である。さらに、U_{in}は格納容器や原子 炉建屋の壁内面の総括熱伝達係数、U_aは格納容 器や原子炉建屋の壁外面の総括熱伝達係数であ り、次式のように表される。

壁内面と壁外面の温度は壁構造物の厚み方向の温度分布をT_wと壁構造物の熱伝導度κから直線と近似して求めている。

$$\frac{1}{U_{in}} = \frac{1}{h_{in}} + \frac{\frac{d}{2}}{\kappa}$$

$$\frac{1}{U_a} = \frac{1}{h_a} + \frac{d/2}{\kappa}$$
(11)

ここで、は壁構造物の厚み、*h*_{in}は流体側の熱伝 達係数、*h*_aは外気側の熱伝達係数である。



N⁰	項目	詳細
1	基礎方程式	・多成分系ガスに対する3次元圧縮性流体の質量保存式、
		運動量保存式、エネルギー保存式
		・成分ガス濃度の質量保存式
2	状態方程式	・完全理想気体式
		・Peng-Robinson 式[11]
		・Soave-Redlich-Kwong 式[12]
		・NASA 物性データベースの 24 種の化学種物性[13]
3	放射性物質(FP)	・エアロゾル粒子に対するパッシブスカラーの質量保存式
		・拡散沈着、重力沈降、熱泳動、拡散泳動、凝集を考慮
4	数值解法(陰解法)	・圧力、流速、エネルギーが強く結びついた解法 (ECBA法)
5	乱流モデル	・k-モデル
6	水蒸気凝縮・熱伝達	・バルク凝縮・壁面凝縮モデル、壁構造物熱伝達モデル
	行列方程式反復解法 ソルバー[10]	・BiCGSafe 法
7		・BiCGStab(l)法(l は残差多項式の次数で 2 以上)
		・GMRES 法(並列計算のみ)
	行列方程式前処理法 [10]	・ILU(n)法(n はフィルインレベルでゼロ以上)
		・ILUT 法
8		・Additive Schwarz 法 (部分行列直接法、ILU(n)法または ILUT 法
		との併用で利用)
		・SA-AMG 法(並列計算のみ)
0	計算格子	・構造格子
9		・スタッガード格子
10	対流項の差分 スキーム	•一次精度風上差分法
		・2 次・3 次精度の制限関数 minmod 付 TVD 法
11	並列計算機能	• MPI
		・領域分割法
12	計算形状の取込	・テキストデータファイル
		・3D CAD で作成した STL ファイル(バイナリ形式)から
		形状データを取込可能
13	可視化	・可視化ファイルは vtk 形式
		・計算結果の可視化は ParaView(注)を使用

表1 Advance/BAROC の機能一覧

(注)ParaView は米国サンディア国立研究所、Kitware Inc. ロスアラモス国立研究所が共同開発したオー プンソースの可視化アプリケーション

3. 想定シナリオと解析条件

想定したシナリオは全交流電源喪失後、炉心 溶融に伴い原子力格納容器トップフランジから シールドプラグを経由して原子炉建屋内 5 階オ ペレーションフロアに水素と水蒸気が流入し、 その後 4.4 時間で流入が停止するとした。水素と 水蒸気はシールドプラグ 1 か所からオペレーシ ョンフロアに流入するものとした。

解析の現象時間は 6 時間とし、水素と水蒸気 は現象時間 4.4 時間まで一定の流量で流入し、 4.4 時間以降流入は停止するものとした。水素と 水蒸気の流入量は前報[5]と同様にモル比 1:2.78 に相当する 210kg と 5,250kg とし、流入する気体 温度は 1,000K とした。なお、水素流入量には不 確定性があり、前報[5]と同様に 134kg と 400kg についても解析を行い検討した。

原子炉建屋内の初期水蒸気濃度は相対湿度 60% 相当のモル分率を算出し入力条件として与えた。

外壁と内壁の温度は壁構造物熱伝達モデルを 用いて解析し、外気の温度は 298.15K で固定した。 壁の厚みは、床面を 1m、その他 5 面の外壁を 0.3m とし、材質をコンクリートとして熱容量と 熱伝導度を与えた。外気側の熱伝達係数は入力 条件として与え、内壁の熱伝達係数は BAROC に 組み込まれている相関式を用いて求めた。水蒸 気凝縮はバルク凝縮と壁面凝縮を考慮した。

本解析では BOP 作動状況に応じた原子炉建屋 内の水素濃度分布を検討するために、①BOP Close、②BOP Open、③BOP Opened by pressure の 3 種類を設定し解析を行った。

なお、本解析では表 2 に示した計算機サーバ

ーを使用した。

主要な解析条件を表3に示す。

表2 使用した計算機サーバーのスペック

No.	項目	詳細
1	OS	CentOS release 7.6.1810
2	CPU	Intel Gold 5218 2.30GHzz
3	Memory	96GB

N⁰	項目	内容
1	解析体系	1F2 相当の原子炉建屋モデル
		X=43.0 m (格子分割数:86)
		Y=43.0 m (格子分割数:86)
		Z=60.0 m (格子分割数:104)
2	全格子数	769,184
3	有効格子数	496,236
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	考慮するガス成分	N ₂ , O ₂ , H ₂ , H ₂ O
8	対流項の差分スキーム	一次精度風上差分法
9	時間刻み幅制御	Courant 数の最大値による自動制御
10	Courant数の最大値	1,000
11	行列計算法	ILU(n)/BiCGStab(l) (n=2、l=2、Lis[10]を利用)
12	解析対象時間	流入開始から6時間
	原子炉建屋内初期条件	压力 : 101,325Pa
		温度 : 298.15K
13		気体成分:N2 77.5%、O2 20.6%、H2O 1.9%※
		湿度 60%を想定
		流速 : ゼロ
14	水素・水蒸気流入個所	5階シールドプラグ
15	水素流入量	1: 134kg、2: 210kg、3: 400kg
16	水蒸気流入量	5,250kg
17	水素・水蒸気流入温度	1,000K
18	水素・水蒸気流入条件	解析開始から 4.4 時間まで一定量で流入[14]
		① BOP Close (BOP 閉条件)
19	BOP の状況	② BOP Open (BOP 開条件)
17		③ BOP Opened by pressure[15] (BOP が指定圧力により開く
		条件)
20	流速境界条件	スリップ
		壁構造物:外気 298.15K で固定し、壁構造物熱伝達モデルに
21	温度境界条件	より計算
		内部構造物:断熱
22	水蒸気凝縮	バルク凝縮と壁面凝縮を考慮
23	備考	原子炉建屋からのリーク量は考慮していない

表3 原子炉建屋内水素分布解析の解析条件

4. 解析モデル

公開情報より 1F2 の各階平面図を入手した[1]。 入手した図面より、5階から4階へ下りる階段は 3か所設置されており、機器ハッチも2階から5 階まで設置されていることを確認した。解析で は5階の機器ハッチを閉とし、2階から4階まで の機器ハッチは開とした。これら情報に基づき、 3D CAD を活用し、3次元の原子炉建屋モデルを 作成した。なお、入手した図面では内部の構造 物の高さ情報が不明なため、本モデルにおいて 設置する構造物の高さは各フロア高さの半分と 仮定して設定した。

作成した 1F2 相当の原子炉建屋モデルを図 3 示す。原子炉建屋の赤色部分に BOP を設置した。 BOP の設置位置、サイズ、動作圧力は参考文献 [15][16]をもとに設定した。

作成したモデル形状を STL ファイルに変換し、 BAROC に取り込んで解析に活用した。取り込ん だモデル形状は直交格子で分割を行い、さらに

5. 解析結果

5.1. BOP の動作状況による圧力変化の違い

BOP の作動状況による原子炉建屋内の圧力変 化を図 4 に示す。BOP 閉条件の結果は時間とと もに原子炉建屋内の圧力が上昇しているが、BOP 開条件では水素を含む気体が流入しても BOP か ら気体が排出されるため、原子炉建屋内の圧力 は上昇しない。

BOP が指定圧力で開く条件では、指定圧力ま では BOP 閉条件と同様の圧力変化を示すが、現 象時間約 10 分で指定圧力に到達し、BOP が開い たため、原子炉建屋内の圧力が低下した。その 際、圧力波の発生に伴う圧力振動が見られる。 解析結果から BAROC で BOP が指定圧力で開く 解析が行えることが確認できる。

これら機能を活用することで、BOP 設置位置 検討等の解析に活用できると考えられる。 形状模擬精度を上げるために、ポーラス設定を 行い解析に用いた。



図3 原子炉建屋モデルと BOP 設置箇所



図4 原子炉建屋内の圧力変化

5.2. BOP からの気体流出量変化

BOP の作動状況により原子炉建屋 BOP から気体の流出量変化を図5に示す。

BOP 閉条件では BOP からの気体の流出量がゼ ロであり、原子炉建屋からの流出がないことが 確認できる。

BOP 開条件と BOP が指定圧力で開く条件では、 現象時間 2 時間までは気体の流出量に差異が発 生している。これは指定圧力に応じて BOP が開 くまでの時間が影響していると考えられる。な お、BOP が開いた瞬間、圧力波の発生に伴う圧 力振動によって流出量変化にも振動が発生する。

その後現象時間 2 時間以降は BOP 開条件と BOP が指定圧力に応じて開く条件では同様の結 果が得られている。

現象時間 4.4 時間で水素・水蒸気の流入が停止 することで流入による駆動力が失われ、それが 圧力振動を発生させて流出量にも振動が現れる。





5.3. 原子炉建屋内の水素最高濃度と水素平均濃度の変化

原子炉建屋内5階の水素最高濃度変化を図6に 示す。原子炉建屋内5階の水素最高濃度はBOP 閉条件だと現象時間4.4時間で約20%まで増加す るが、BOP 開条件とBOPが指定圧力に応じて開 く条件では初期17%まで上昇した水素最高濃度 は約14%まで低下する。

現象時間 6 時間後には BOP 閉条件では約 10%、 他の 2 条件では 0.1%まで低下しており、BOP が 開いていることで 5 階の水素最高濃度が著しく 低下する結果が得られた。

次に原子炉建屋5階と4階の水素平均濃度変化 を図7と図8に示す。原子炉建屋5階の水素平均 濃度は BOP 閉条件だと現象時間4.4 時間で約 11%まで上昇するが、他の2条件では、2%以下 であった。これは BOP が開くことで5階に滞留 した水素を含む気体が BOP から排出された結果 である。 BOP 閉条件では、原子炉建屋 4 階の水素平均 濃度は現象時間 4.4 時間の水素・水蒸気流入停止 後一旦低下するが、その後上昇に転じている。 これは流入停止時点の原子炉建屋 5 階の水素平 均濃度が約 11%で、4 階は約 4%と濃度差があり、 流入停止に伴う駆動力喪失による流動変動によ って 5 階の水素が 4 階に移行したことよるものと 考えられる。

5 階の体積が約 20,000m³に対し、4 階の体積が 約 4,000m³で 1/5 程度と小さく、原子炉建屋 3 か 所に設置された階段等の開口部を通じて、5 階か ら水素濃度が約 3 倍高い気体が 4 階に移流拡散し たことで原子炉建屋 4 階の水素平均濃度を押し 上げた結果といえる。さらに計算を進めれば、 移流拡散によって同程度の水素濃度に近づくも のと考えられる。



図6 原子炉建屋内5階の水素最高濃度



図7 原子炉建屋内5階の水素平均濃度



5.4. 水素流入量による影響検討

水素流入量には不確定性があり、前報[5]と同様に 134kg と 400kg についても合わせて解析を行い検討した。

3 ケースの水素流入量の解析結果として現象時 間6時間における原子炉建屋5階の水素最高濃度 を示した位置での水素濃度、水蒸気濃度、空気 濃度を図9と図10の三元図に示し、BOP開閉に より原子炉建屋5階が可燃領域にあるのか、爆 轟領域なのかを判別し水素濃度が水素爆発に至 る濃度に達するか否かを検討した。

図 9 より BOP 閉条件における水素流入量 3 ケ ースの解析結果はいずれも可燃領域であること が分かった。また、BOP 開条件の図 10 では、現 象時間 6 時間で原子炉建屋内の水素濃度は 0.1% まで低下し、いずれの水素流入量では可燃領域 から外れており、水素濃度が水素爆発に至る濃 度に達しないことが分かった。

原子炉建屋内への水素の流入量にもよるが、 BOP が開くことで原子炉建屋内に流入した水素 は建屋内から排出され、水素の可燃や爆轟を防 ぐには効果的な手段であることが確認できる。 ただし、本解析では原子炉建屋からのリーク量 を無視することや内部構造物を断熱として扱っ ており、これらの影響については今後の検討課 題としたい。



図 9 BOP Close 条件の 5 階三元図[17]



図 10 BOP Open 条件の 5 階三元図[17]

5.5. 原子炉建屋内の水素濃度分布と流速分布

各時刻における原子炉建屋内の水素濃度分布 を図 11 に示す。BOP 閉条件では原子炉建屋 5 階 のフロアの水素濃度が時間とともに上昇し、現 象時間 4 時間時点で約 10%以上となる。原子炉 建屋 4 階以下では、階段等を経由して、下の階 に水素が移行して水素濃度が上昇している。

BOP 開条件と BOP が指定圧力で開く条件では 原子炉建屋 5,4 階の水素濃度は BOP 閉条件と比 べて低い濃度を示しており、これは BOP から水 素を含む気体が流出することによって水素濃度 が低下している。

各時刻における原子炉建屋 5 階 BOP 周辺の流 速分布を図 12 に示す。BOP 閉条件では流入開始 から流入停止までの期間は水素・水蒸気の流入 箇所であるシールドプラグから5階の天井面に



図11 原子炉建屋内の水素濃度分布



図 12 原子炉建屋 5 階 BOP 周辺の流速分布

向けた流速が確認できる。

BOP 開条件と BOP が指定圧力で開く条件では、 BOP から外気への流出があるため、BOP 閉条件 と比べ原子炉建屋 5 階の天井に向かう流速は減 少している。その結果、BOP から水素を含む気 体が流出し、原子炉建屋内の水素濃度が低下し た。

水素・水蒸気の流入停止後に当たる 6 時間で は外気からの流入が確認できる。そのことは図 5 の気体の流出量変化からも裏付けられる。外気 から BOP を通して空気が流入することによって 水素濃度がさらに低下しているものと考えられる。

6. まとめ

本報では 1F2 の事故に着目し、①BOP 閉条件、 ②BOP 開条件、③BOP が指定圧力で開く条件の 3 ケースについて原子炉建屋内の水素濃度分布解 析を行い水素漏洩停止後の水素濃度が水素爆発 に至る濃度に達するか否かを検討した。

①BOP 閉条件では、現象時間 4.4 時間で 5 階の 水素平均濃度は最大で約 10%、4 階の水素平均濃 度は同時刻で約 4%程度であったが、②BOP 開条 件と③BOP が指定圧力で開く条件では、BOP か ら水素を含む気体が原子炉建屋 5 階から排出さ れ、4 階と 5 階の水素平均濃度は低下し、水素・ 水蒸気流入時に水素最高濃度は 2%以下、流入停 止後の 6 時間で 0.1%まで低下した。また、不確 定性のある水素流入量を 134kg、400kg と変えて も同様に水素濃度は低下し、いずれの水素流入 量では可燃領域から外れており、水素濃度が水 素爆発に至る濃度に達しないことが分かった。

原子炉建屋内への水素の流入量にもよるが、 BOP が開くことで原子炉建屋内に流入した水素 は建屋内から排出され、水素の可燃や爆轟を防 ぐには効果的な手段であることが確認できた。

ただし、本解析では原子炉建屋からのリーク 量を無視していること、内部構造物を断熱とし て扱ったこと、水蒸気が凝縮して生成される水 滴挙動、水滴が落下して形成される床面の水層 挙動、燃料プールからの蒸発・凝縮などを考慮 していない。今後は随時これら機能を組み込ん でこれらの影響について検討していきたい。

参考文献

- [1] 福島第一原子力発電所事故発生後の詳細な 進展メカニズムに関する未確認・未解明事 項の調査・検討結果「第6回進捗報告」に ついて(添付資料1-10)(2022) 東京電力 (株).
- [2] Frank Rahn, "GOTHIC CONTAINMENT ANALYSIS PACKAGE TECHNICAL MANUAL Version 7.2b(QA)", NAI 8907-06 Rev 17 (2009).
- [3] Frank Rahn, "GOTHIC CONTAINMENT ANALYSIS PACKAGE USER MANUAL Version 7.2b(QA)", NAI 8907-02 Rev 18 (2009).
- [4] "MELCOR Computer Code Manuals Vol. 1: Primer and User's Guide Version 1.8.6 ", NUREG/CR-6119, Sandia National Laboratories (September 2005).
- [5] 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).
- [6] Patankar, S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow ", Hemisphere (1970).
- [7] Van Doormaal, J. P. and Raithby, G. D.,
 "Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows",
 Numerical Heat Transfer. vol. 7, pp. 147-163, (1984).
- [8] 三橋、"陰解法による 3 次元圧縮性流体解析の新手法 SIMPLE 法系列の限界を超えて"、 アドバンスシミュレーション vol.28 (2020).
- [9] H. A. van der Vorst, "Bi-CGSTAB : a fast and smoothly converging variant of Bi-CG for the solution of nonsymmetric linear systems", SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 13(2), 631–644 (1992).
- [10] 反復解法ライブラリ Lis, https://www.ssisc.org/lis/
- [11] Peng, D. Y, and Robinson, D. B., "The characterization of the heptanes and heavier

fractions for the GPA Peng-Robinson programs", Gas Processors Association (1978).

- [12] Soave,G.;"Equilibrium constants from a modified Redkh-Kwong equation of state"; Chemical Engineering Science, Vol.27, p.1197-1203 (1972).
- [13] Bonnie J. McBride, Sanford Gordon and Martin A. Reno, Coefficients for Calculating, Thermodynamic and Transport Properties of Individual Species, NASA, Technical Memorandum 4513 (1993).
- [14] 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).
- [15] 第 13 回東京電力福島第一原子力発電所にお ける事故の分析に係る検討会 資料 4, 原子力 規制庁(2020).
- [16] 国プロ「原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発」2号機原子炉建屋オペレーティングフロ ア調査計画について」,東京電力(株) (2014).
- [17] Z.M. Shapiro, T.R. Moffette, "HYDROGEN
 FLAMMABILITY DATA AND APPLICATION
 TO PWR LOSS-OF-COOLANT ACCIDENT",
 WAPD-SC-545, U.S. Atomic Energy
 Commission, Pittsburgh, PA (1957).
- ※ 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。)