

運転時における原子炉格納容器の温度分布評価

Evaluation of Temperature Distribution in a Containment Vessel during Operation

歌野原 陽一 (Yoichi Utanohara)*¹ 村瀬 道雄 (Michio Murase)*¹ 柳 千裕 (Chihiro Yanagi)*¹
 増井 章裕 (Akihiro Masui)*² 猪股 亮 (Ryo Inomata)*² 神谷 祐二 (Yuji Kamiya)*²

要約 原子炉格納容器(CV)の健全性評価に係る安全解析では、初期値として定格出力運転中のCV気相部の平均的な温度を用いている。しかし、実際にはCV内の温度は分布を持っているため、その平均温度を求めることは容易ではない。CV平均温度の評価方法として数値シミュレーションの利用が考えられるが、CVの構造上、数値シミュレーションを困難にする要因(多区画化された大容量閉空間での温度分布再現性、各機器からの放熱と換気空調系による熱の移流拡散の再現性)が多数存在する。そこで本研究では、数値シミュレーションにより運転中のCV内部の温度分布の再現を試み、その上でCV平均温度を評価した。対象は3ループPWRプラントのCVとし、各機器からの放熱、換気空調系による流れ、CV外部への放熱、太陽光受熱等を考慮した。その結果、温度分布は気流に大きく影響を受けることが確認された。特に、気流の経路となる開口部は温度分布に影響を与えた。CV内の温度は階層が上がるにつれ上昇し、強制対流支配から自然対流支配の流れ場となることが推察された。CV内の温度を体積平均温度で評価すると、階層別、気相、固相(コンクリート、CV鋼板)別に異なる結果となるが、CV全体の体積平均温度は、ほぼ気相部平均温度と一致した。開口部の有無による温度分布への影響や、CV内の平均温度の評価が数値シミュレーションにより容易に行えることが確認できた。

キーワード 原子炉格納容器, PWR, 換気空調系, 温度分布, CFD

Abstract For safety analysis of the containment vessel (CV) in a nuclear power plant, the average temperature of the gas phase in the CV during operation is used as an initial condition. An actual CV, however, has a temperature distribution, which makes the estimation of the average temperature difficult. Numerical simulation seems to be useful for the average temperature estimation, but it has several difficulties such as predictions of temperature distribution in a large and closed space that has several compartments, and modeling the heat generating components and the convection-diffusion of heat by ventilation air-conditioning systems. The main purpose of this study was to simulate the temperature distribution and evaluate the average temperature in the CV of a three-loop pressurized water reactor (PWR) during the reactor operation. The simulation considered the heat generation of equipment, flow due to the ventilation and air conditioning systems, heat loss to the CV exterior, and the solar heat. The predicted temperature distribution was significantly affected by the flow. Particularly, openings, which became flow paths, affected the temperature distribution. The temperature increased with a rise in height within the CV and the flow field seemed to transform from forced convection to natural convection. The volume-averaged temperature was different between gas and solid (concrete, CV wall) phases as well as between heights. The total volume-averaged temperature of the CV was nearly equal to the average gas phase temperature. It was found to be easy to evaluate the effect of openings on the temperature distribution and estimate the average temperature in CV by numerical simulation.

Keywords containment vessel, PWR, ventilation and air-conditioning system, temperature distribution, CFD

* 1 (株)原子力安全システム研究所

* 2 MHI 原子力エンジニアリング(株)

1. はじめに

加圧水型原子炉(PWR)における原子炉格納容器(CV)は、主要な1次系機器をその内部に格納する鋼鉄製の容器である。CVは多重防護システムを構成する障壁の1つであり、気密性や耐圧性を備え、PWRの1次冷却材喪失事故(LOCA)時などにおいて、周辺環境への異常な放射性物質の放出を防ぐように設計されている。

LOCA時におけるCVの健全性は、LOCAを想定した安全解析により評価される⁽¹⁾。使用される安全解析コードは1点近似の領域モデルであり、初期値として運転時のCV内の気相平均温度および圧力(大気圧)が用いられる。しかし、CV内の平均温度の評価は容易ではない。というのも、運転時におけるCV内部では、原子炉容器(RV)や蒸気発生器(SG)等の内部温度(1次系温度)の高い機器が周囲のCV内雰囲気に対し放熱しており、その放熱を換気空調系で冷却することで温度が調整されており、また、CV内はコンクリート壁により区画化および階層化されているため、場所ごとに応じて温度に分布が生じる。よって、安全解析に必要な運転時のCV内平均温度を評価する際、その評価方法が問題となる。

運転時のCV内平均温度の評価方法の1つとして、数値流体力学(CFD)ソフトウェアを利用したCV内のシミュレーションが考えられる。数値シミュレーションによりCV内の温度分布が再現できれば、気相平均温度の評価も容易である。しかし、CVの構造上、数値シミュレーションを困難にする要因が多数存在する。例えば、CVは大容量かつ閉空間であり、コンクリート壁で複雑に区画化されている。区画間は開口部等によって連結され気流の通り道となるため、開口部の再現性が温度分布に影響すると考えられる。また、各所にSG等の放熱する機器が設置され、換気空調系で冷却しているため、放熱量、風向、風量等を適切に設定して温度分布を再現しなければならない。

これまで、CVを対象とした数値計算は多数行われているが、ほとんどの研究がシビアアクシデント時におけるCVの挙動を対象としたものである。例を挙げると、原子力安全基盤機構では、シビアアクシデント時のCVを対象とした、数値シミュレーションを行なっている⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。OECD/PANDA試験、および実機体系を模擬したCV多区画内におけるCFDである。得られた知見として、標準 $k-\epsilon$ 乱流モデルが評価に十分適用できることや、多区画形状において全体を循

環する流れが形成されると温度分布が均一になることなどを確認している。他の例では、1次系およびCVを対象としたCFD技術の確立を目指したECORA(Evaluation of Computational Fluid Dynamic Methods for Reactor Safety Analysis)プロジェクト⁽⁵⁾⁽⁶⁾では、シビアアクシデント時の水素濃度分布シミュレーションを行っており、リーク箇所付近では水素濃度分布が一様でなく区画ごとに偏りがあるが、破断箇所から離れた区画では均一な分布となることや、開口部の有無が水素濃度分布に影響していること等が示されている。このように、既往の研究はシビアアクシデントを対象としたものが多く、運転中のCVにおける温度分布を対象とした研究例は見当たらない。

そこで本研究では、運転中の3ループPWRプラントCV内部における熱流動場の数値計算を行い、流れ場と温度分布の傾向を調べた。そして、CV内部の温度分布に影響を与える要因を検討した。また、CV全体および各領域の体積平均温度を数値的に求め、各領域でどの程度温度に偏りがあるかを調べた。

2. 格納容器の概要

2.1 格納容器の概観

対象は3ループPWRプラントのCVとする。図1にCVの概観を示す。格納容器は炭素鋼製で、高さは約80m、外径約40mである。CVの外側にはコンクリートの遮蔽壁があり、CVと遮蔽壁の間はアニュラス部となっている。遮蔽壁の上部は開放されており、CVのドーム部が直接外気に接している。内部は5階までの階層構造となっており、主要機器であるRV、SG、1次冷却水冷却ポンプ(RCP)、加圧器等が配置され、コンクリート製の壁や床で区画化されている。SG、RCPは3階より上層のSGループ室内に、加圧器は加圧器室内に設置されている。SGループ室は上部が開放されCV上部空間へと繋がっているが、加圧器室には天井がある。

2.2 換気空調系

CV内部には主に3種類の換気空調系が設置されており、CV内部を冷却している。それぞれ格納容器循環空調装置、原子炉遮蔽冷却装置、制御棒駆動装置(CRDM)冷却装置である。図2に換気空調系の概要を示す。格納容器循環空調装置は3台の格納容器再循

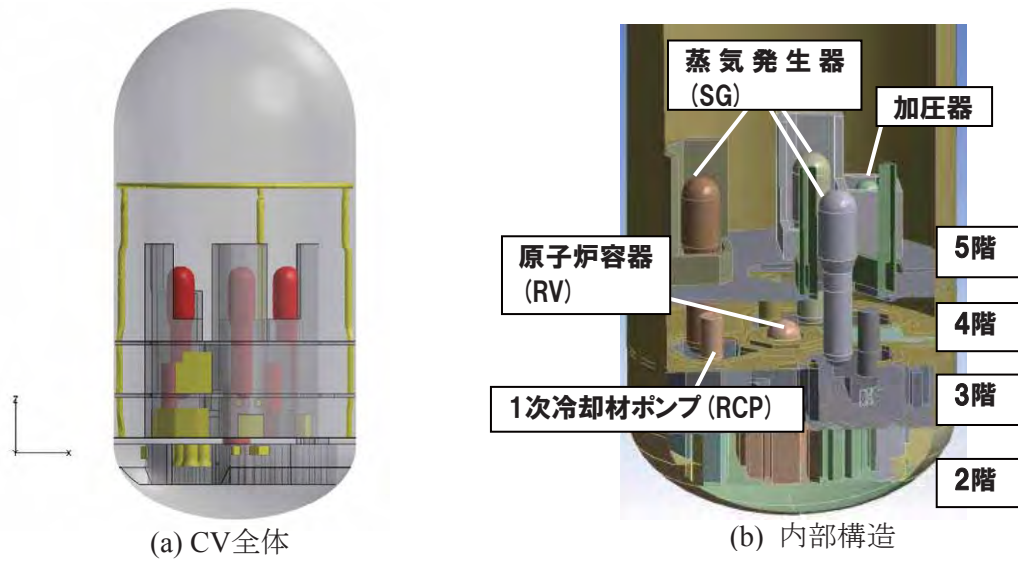


図1 CVの概観

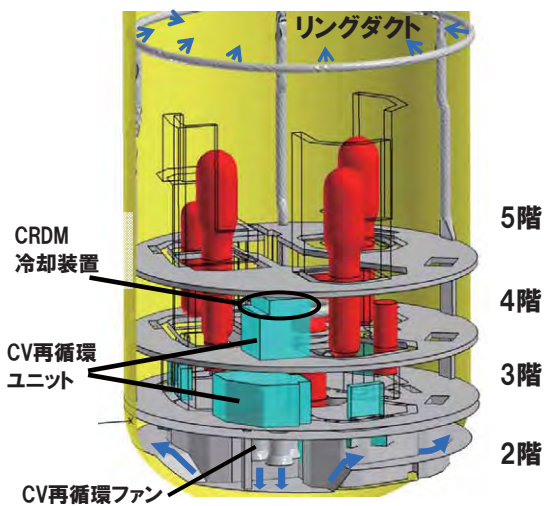


図2 換気空調系

環ユニット (CV 再循環ユニット) と 3 台の格納容器再循環ファン (CV 再循環ファン) で構成されており, SG, RCP などの機器の放熱から CV 全体の冷却を行っている。

CV 再循環ユニットで冷却された空気は図 3 に示すように CV 再循環ファンにより 2 階の圧力ヘッダ室へ吹き出され, 外周部へと流れる。外周部には 3 階の SG ループ室および CV 上部のリングダクトへ通じるダクト入口があり, 冷却空気が上層へと運ばれる。また, 冷却空気の一部は原子炉遮蔽冷却ファンにより圧力ヘッダ室から原子炉キャビティへと運ばれ, RV を冷却する。

圧力ヘッダ室から SG ループ室へ運ばれた冷却空気は, 図 4 に示す各ループ室, 加圧器室下部に設置された換気空調系から吹き出され, 室内を上昇しながら SG, RCP, 加圧器を冷却する。また, 3 階と 4 階 (図 4, 図 5) の SG ループ室外には CV 再循環ユニットが設置されており, 周囲の空気を吸い込んで冷却し 2 階の圧力ヘッダ室へと送っている。RV の上部には CRDM 冷却装置のためのリングダクトが設置され, 周囲の空気を吸い込んで 4 階の CRDM 冷却設備で冷却し, 4 階へ排気している。

3. 数値計算方法

数値計算には ANSYS 社の汎用熱流体解析ソフトウェア FLUENT 13 を使用した。表 1 に計算条件の詳細を示す。計算領域は CV 鋼板の外表面までであり, 外側のアニュラス部およびコンクリート壁は計算対象外である。計算では CV 内部の空気だけでなく, 床, 壁等のコンクリート, CV 鋼板内部の熱伝導も計算している。乱流モデルには, 標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた。対流項の差分スキームは計算の安定化のため 1 次風上スキームとした。流体・固体間の熱伝達は, FLUENT のデフォルトでの機能である温度の壁関数を用いた解法により計算する。本計算で用いた計算メッシュを図 6 に示す。全体はテトラメッシュ (四面体メッシュ) で構成されており, メッシュ数は約 170 万セル (1,662,261 セル) である。

換気空調系の流量は設計値をもとに設定した。表 2

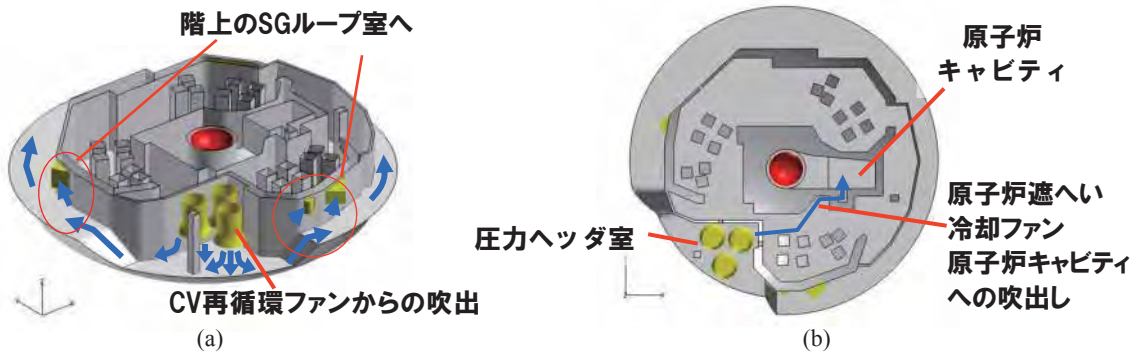


図3 2階の構造 (圧力ヘッド室, 原子炉キャビティ)

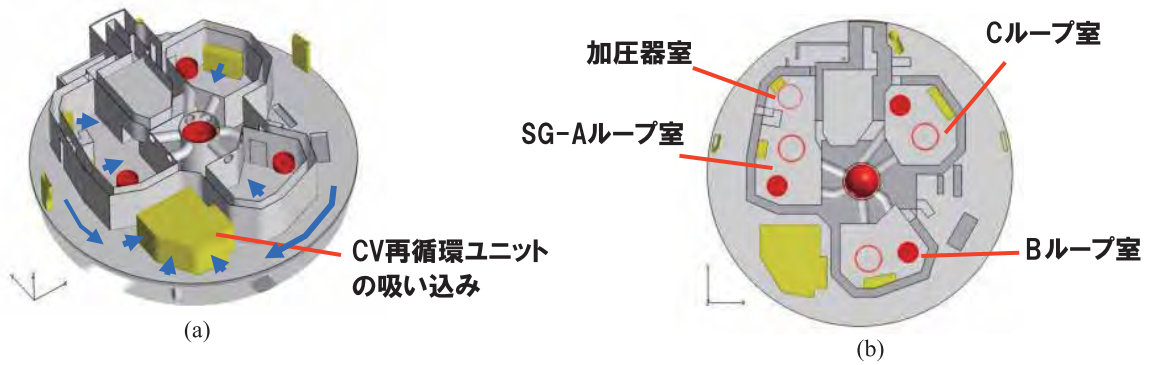


図4 3階の構造

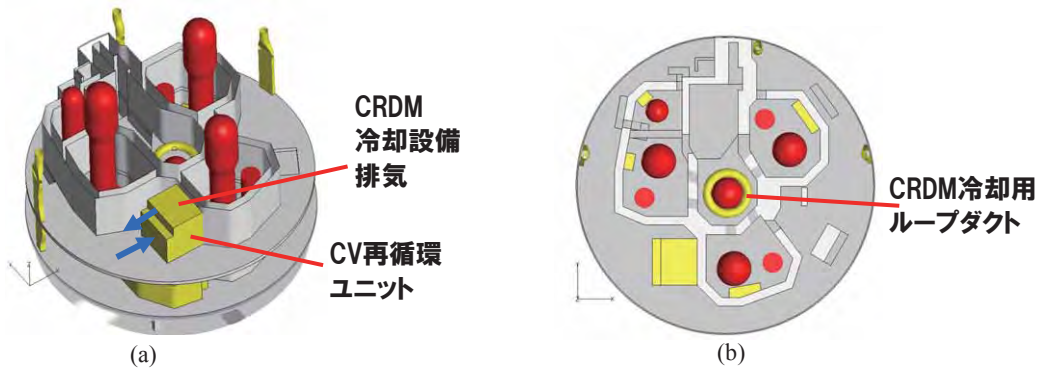


図5 4階の構造

に流入境界 (吹出し部) で設定した流量を示す. 冷却空気は圧力ヘッド室からダクトを通して各部へ送られるが, ダクト内の流れは計算せず, 吸込み部・吹出し部で流量が対応するように流出境界 (吸込み部) の流量を設定した. また, 吸込み部と吹出し部で温度が対応するようにした. RV や SG などの各種機器の CV 雰囲気への放熱量は定格出力運転時のプラント設計値を参考に表 3 のように設定した. CV 天井からの太陽光受熱も考慮する. ちなみに, CRDM からの放熱は, CRDM 冷却装置の排気温度の設定により考慮した.

CV 系外へは CV 内空気温度と系外の外気温度に応じて放熱があるとして, 図 7 に示すような放熱モデルを仮定した. このモデルをもとに伝熱相関式を導出し, 温度境界条件として与えた. 境界は CV 鋼板の外表面であり, アニュラス部とコンクリート壁は上述のように計算対象外である. ただ, 伝熱相関式の作成ではアニュラス部とコンクリート壁の影響を考慮している. CV 内部と外気との間には CV 鋼板, アニュラス部, コンクリート壁の 3 つの層がある. アニュラスは鋼板を取り巻くリング状の密閉空間とし, 自然対流に

よる熱伝達を仮定する。CV 内から系外への伝熱相関式の作成に当たっては、CV 鋼板内部の熱伝導、CV 鋼板外表面・アニュラス部・コンクリート壁内表面の自然対流熱伝達、コンクリート壁内部の熱伝導、コンクリート壁外表面から外気（温度 T_{out} ）への放熱の、4つを考慮する。CV 鋼板内径（内半径）・外径（外半径）アニュラス中央での半径、およびコンクリート壁内径（内半径）・外径（半径）[m]を、それぞれ $D_{cv,i}$ ($r_{cv,i}$)、 $D_{cv,o}$ ($r_{cv,o}$)、 r_{ann} 、 $D_{conc,i}$ ($r_{conc,i}$)、 $D_{conc,o}$ ($r_{conc,o}$)、アニュラス高さを H_{ann} とする。CV 系外への放熱量 Q_{loss} [W]は次式で与えられる。

$$Q_{loss} = 2\pi r_{cv,o} H_{ann} K (T_{w,cv,i} - T_{out}) \quad (1)$$

温度境界条件としては、熱流束 q_{loss} [W/m²]の形で与える。

$$q_{loss} = \frac{Q_{loss}}{2\pi r_{cv,o} H_{ann}} = K (T_{w,cv,i} - T_{out}) \quad (2)$$

$T_{w,cv,i}$ [K]はCV 鋼板内表面の温度、 K は熱通過率 [W/(m² K)]である。 K は次式で与えられる。

$$K = \left(\frac{r_{cv,o}}{\frac{\lambda_{cst}}{\ln(D_{cv,o}/D_{cv,i})}} + \frac{r_{cv,o}}{r_{ann} \alpha_{ann}} + \frac{r_{cv,o}}{\frac{\lambda_{conc}}{\ln(D_{conc,o}/D_{conc,i})}} + \frac{r_{cv,o}}{r_{conc,o} \alpha_{out}} \right)^{-1} \quad (3)$$

ここで、 α_{ann} はアニュラスにおける自然対流熱伝達率 [W/(m² K)]、 α_{out} は建築物外表面の総合熱伝達率 [W/(m² K)]である。 λ_{cst} はCV 鋼板の熱伝導率 [W/(m K)]、 λ_{conc} はコンクリート壁の熱伝導率 [W/(m K)]である。

アニュラスにおける自然対流熱伝達率 α_{ann} は、縦に長い密閉空間における自然対流熱伝達の式⁽⁷⁾を用いる。

$$\alpha_{ann} = \frac{Nu_L \lambda_{air}}{L_{ann}} \quad (4)$$

$$Nu_L = 0.22 \left(\frac{Pr_{air}}{0.2 + Pr_{air}} Ra_L \right)^{0.28} \left(\frac{H_{ann}}{L_{ann}} \right)^{-\frac{1}{4}} \quad (5)$$

ここで、 λ_{air} は空気の熱伝導率 [W/(m K)]、 L_{ann} はアニュラスの幅 [m]、 Ra_L はレイリー数でありプラントル数 Pr とグラスホフ数 Gr の積として表わされる。

$$Ra_L = Pr_{air} Gr_L = Pr_{air} \frac{g \beta_{air} \Delta T L_{ann}^3}{\nu_{air}^2} \quad (6)$$

g は重力加速度 [m/s²]、 β_{air} は空気の体膨張率 [1/K]、 ν_{air} は空気の動粘性係数 [m²/s]、 $\Delta T = T_{w,cv,o} - T_{w,conc,i}$ はアニュラス両面の温度差 [K]

表1 数値計算条件

流体	空気 (ブシネスク近似)
固体	コンクリート, 鋼板 (炭素鋼)
乱流モデル	標準 $k-\epsilon$ モデル
時間	定常計算
圧力・速度カップリング	SIMPLE
対流項差分	1次風上 (運動量, エネルギー, k, ϵ)
流体・固体間の熱伝達	温度の壁関数 (対数則) により直接計算
想定日時	4月1日 13時30分

表2 換気空調系流量

流入境界 (吹出し部)	総流量 [m ³ /s] (流速 [m/s])
CV 再循環ファン吹出し	89.8 (11.9)
SG-A 室下部 換気空調系	27.8 (3.87~4.42)
SG-B 室下部	44.3 (1.47~4.39)
SG-C 室下部	45.7 (3.68~3.73)
加圧器室下部	16.5 (3.82~5.09)
リングダクト (20か所)	28.3 (11.2)
CRDM 冷却設備	20.87 (1.21)
原子炉遮蔽冷却ファン	14.3 (9.59)

表3 各機器の放熱量

機器	放熱量 [W/m ²]
RV	290
SG	300
RCP	3600
加圧器	350
太陽光 (ドーム部)	22.1

である。 β_{air} は理想気体として温度の逆数で与える。

$$\beta_{air} = \frac{1}{T_{ann}} \quad (7)$$

$$T_{ann} = \frac{T_{w,cv,o} + T_{w,conc,i}}{2} \quad (8)$$

T_{ann} はアニュラスでの平均温度 [K]である。 β_{air} 以外のアニュラスにおける空気の物性値 (λ_{air} , β_{air} , ν_{air})は T_{ann} での値を用いる。

建築物外表面の総合熱伝達率 α_{out} の値には、一般的に使用されている 20 kcal/(m² h °C) = 23.26 W/(m² K)を用いた⁽⁸⁾。

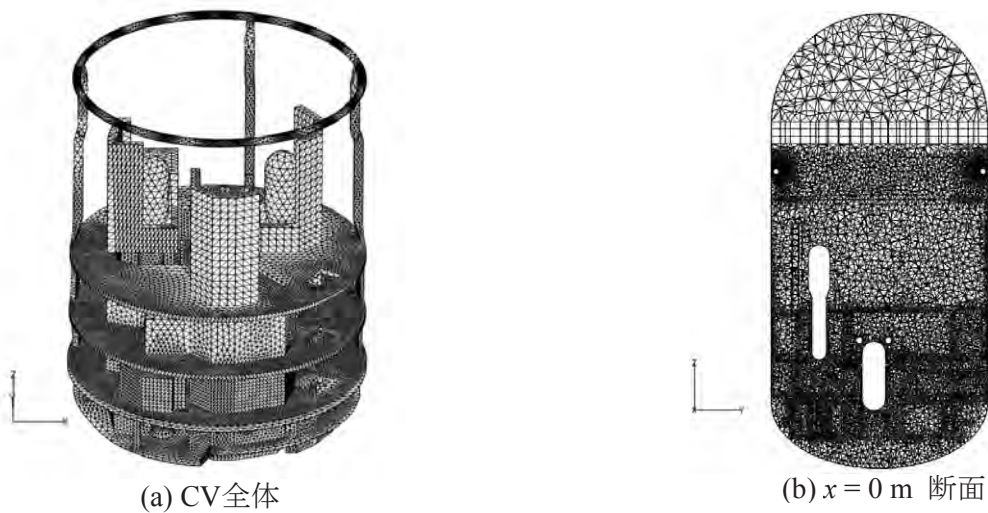


図6 計算メッシュ

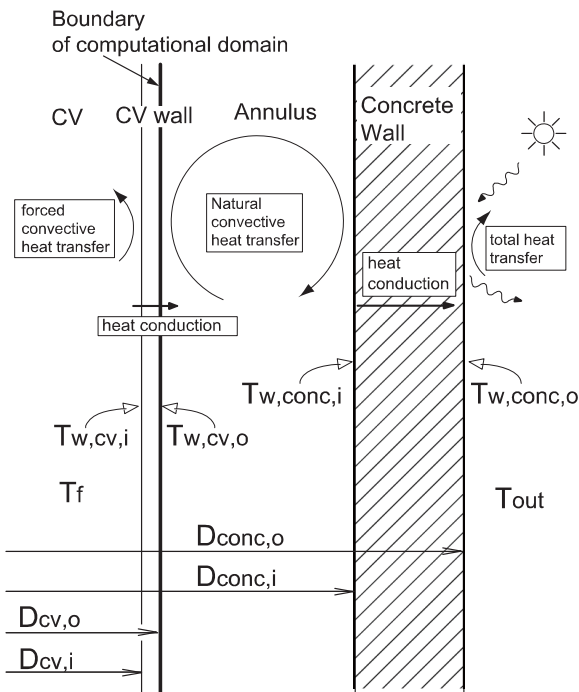


図7 CV系外への放熱モデル

4. 計算結果と考察

4.1 CV 全体の流れ場と温度分布

図8の(a)にCV全体の速度分布を、(b)に温度分布を示す。また、図9にCV断面における流速ベクトル分布を示す。CV再循環ユニットで吸い込まれ冷却された空気は、CV最下部の圧力ヘッド室へ吹き出

され、ダクトを通してSG室下部やリングダクトへ吹き出される。SG室下部に吹き出された空気は、SGやRCP等を冷却しながらループ室内を上昇しCV上部へと流れる。速度は圧力ヘッド室や換気空調系付近で高くなるが、CV上部へ達する付近では大体1 m/s程度となる。温度に関しては、下層はCV再循環冷却設備による冷却のため低温になっており、上層へ向かうにつれてRV、SG、RCP等の放熱により温度が上昇する。CVの天井部付近で特に温度が高くなっているのは、太陽光受熱の影響である。

CV内下層では気流はコンクリート壁等の区画に沿って流れている。一方、上層では区画の影響を受けず比較的一様に流れ、かつ局所的に循環を形成している。上層の温度はほぼ一様に分布しており、気流により混合されたものと考えられる。混合の過程はリングダクトからの吹出しによる強制対流、もしくは浮力による自然対流によるものと考えられる。だが、どちらが支配的なのかは速度分布や温度分布だけでは判断できない。また、場所に応じて自然対流と強制対流のどちらが支配的かは異なると考えられる。そこで、数値計算結果を用いて次式のリチャードソン数 Ri を評価した。

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} = \frac{g\beta_{air}\Delta TL}{U^2} \quad (9)$$

ここで、温度差 ΔT は評価する領域での最高温度 T_{hot} と平均的な温度 T_{ref} の差 $\Delta T = T_{hot} - T_{ref}$ で評価した。また、 $\beta_{air} = 1/T_{ref}$ 、 L および U はそれぞれ評価する領域の代表長さ[m]、代表速度[m/s]である。 Ri 数は浮力と流れの慣性力の比であり、 $Ri \ll 1$

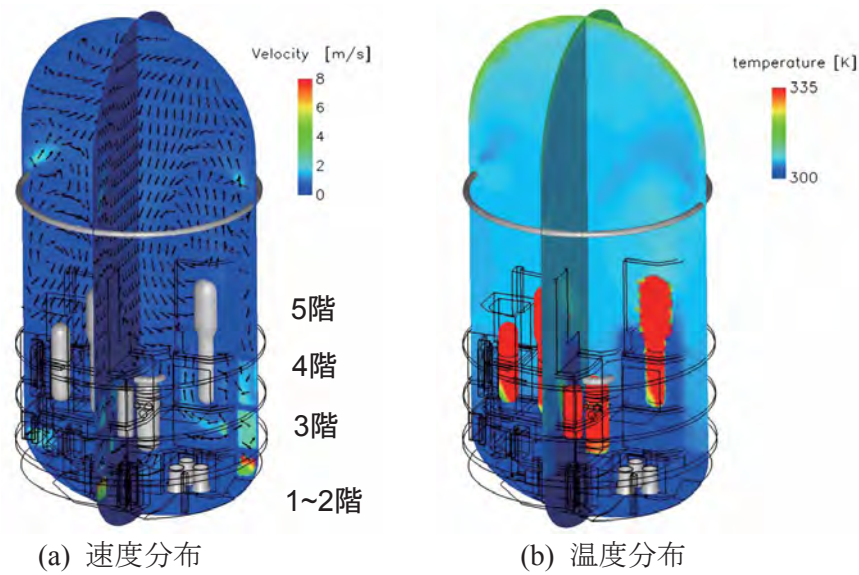


図8 CV全体 ($x = 0 \text{ m}$, $y = 0 \text{ m}$ 断面上) の速度分布と温度分布

表4 各領域の Ri 数

領域	ΔT [K]	L [m]	U [m/s]	Ri
5階～天井	50	50	0.5	320
4階ループ室外	15	10	2	1.2
4階ループ室内	50	10	2	4.0
3階ループ室外	5	10	2	0.40
3階ループ室内	1	10	2	0.082

であれば強制対流支配, $Ri \gg 1$ であれば自然対流支配である. 表4に各領域における Ri 数を示す. 3階では Ri 数は1を下回っており, 強制対流が支配的である. これは, 換気空調系からの気流により領域が冷却されており, 温度差が比較的小さいためと考えられる. 4階になると, SG等の放熱によりループ内では温度差が大きくなり, $Ri = 4$ と浮力の影響が比較強くなり始める. 5階より上層では, 区画の制限がなくなるため代表長さが長くなり, 流速も低下することから Ri 数が増大している. よって, CV上層ではリングダクトによる吹出しよりも, 浮力による自然対流が支配的であると考えられる. このように, CV内部は下層から上層になるにつれ, 強制対流支配から自然対流支配の流れ場へと変わると考えらる.

4.2 水平断面における流れ場と温度分布

鉛直断面に続き, 水平断面での流れ場と温度分布について述べる. 水平断面での流速ベクトル分布と温度分布を図10に示す. 下層から上層にかけてみていく

と, まず2階(Elevation 14 m)ではCV再循環ファンからの吹出しにより, 圧力ヘッダ室の流速は速い箇所では12 m/s程度に達する. また, 温度は吹出し温度と同程度に保たれている. 気流は外周部に沿って流れ, 外周部に数箇所あるダクトを通してSGループ室・加圧器室の換気空調系およびリングダクトへと抜ける.

3階(Elevation 20 m)では各ループ室の換気空調系から4 m/s程度吹出しがあり, ループ室を横断して壁面に衝突している. ループ室内温度は, 室外に比べ低く保たれている. また, ループ室外ではCV再循環ユニットにより雰囲気気吸込まれるため, 気流がCV再循環ユニットへ向かっている.

4階(Elevation 26.9 m)では, 各機器からの放熱の影響により, ループ室内の空気が加熱されている. 特にRCPによる加熱が他の機器よりも大きくなっている. 4階もループ室外でCV再循環ユニットへ向かう気流が形成されている. CV再循環ユニットの近傍で少し温度の高い箇所があるが, これはCV再循環ユニットの上に設置されたCRDM冷却装置から吹出す空気が周辺の雰囲気気温度よりも高いためである.

5階(Elevation 35 m)より上層では, 温度が全体的に均一化されていくが, 加圧器室は高温なままである. 加圧器室は吹き抜けになっておらず天井が設置されているためと考えられる. 加圧器室内の高温分布については, 4.3節でさらに考察する.

以上のように, ループ室内は区画化されることにより, 低い階層では換気空調系の冷却効果で温度がループ室外より低く保たれている. しかし, 加圧器室のよ

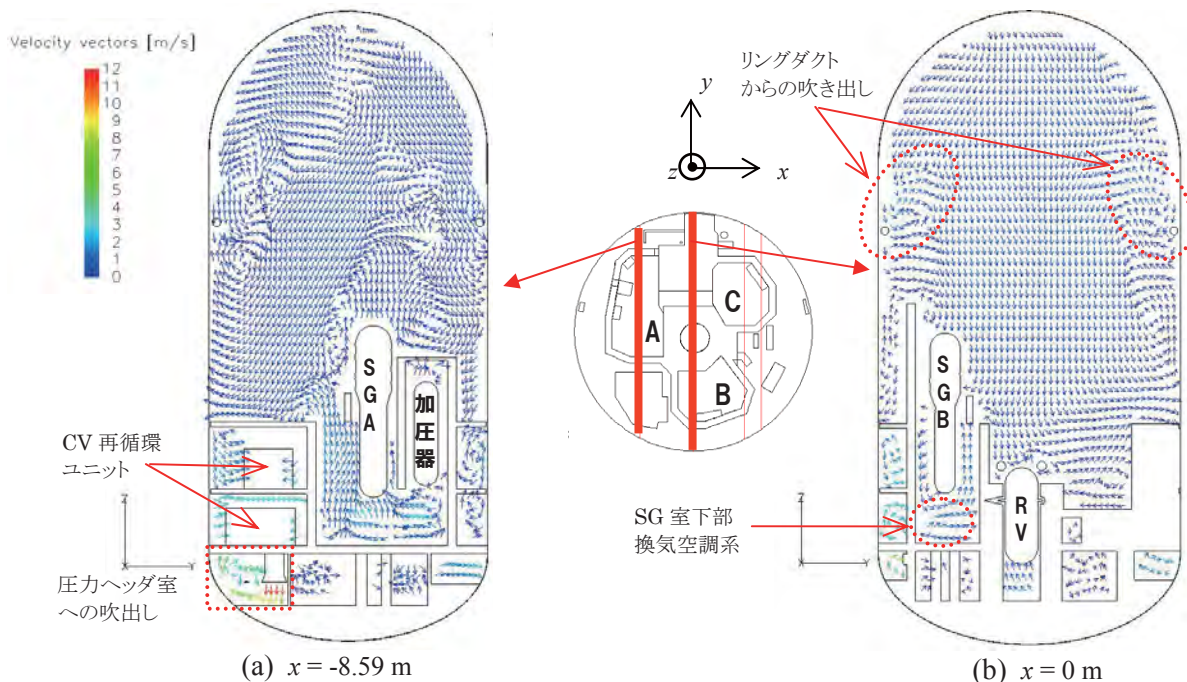


図9 CV断面における流速ベクトル分布

うに天井がある場合は、機器から放熱された熱が外部へ流出できず、室内に滞留する結果となった。加圧器室では4.1節で述べたように、浮力支配の流れ場となっていると考えられる。このように、区画化されることより、各領域の温度に差が生じている。

4.3 温度分布に対する気流の影響

CV内はコンクリートの壁・床等で区画化されているが、開口部があると気流の経路となる。図11に開口部で形成された気流の一例を示す。3~5階床面には機器搬入等で使用されるハッチがあり、本計算では開口部として模擬している。この開口部に5階から3階へ吹き降ろす流れが形成されている。それに応じて、上部区画(5階)の暖かい空気が下部区画(3~4階)へと流入し、下部区画の温度が上昇している。開口部による気流の発生は図11(c)に示すように、開口部を挟んだそれぞれの領域の圧力差で説明される。この例の場合、3~4階のループ室外よりも5階の圧力が高いため、吹き降ろすような気流が発生している。区画化された領域は区画間で圧力に差が付きやすいため、開口部により気流が発生し、熱の移流も発生することになる。このように、気流の経路はCV内の温度分布に大きな影響を与えたと考えられる。

気流が温度分布に影響を与える例として、図10

(d)で示した5階加圧器室内の高温分布について考える。図12は鉛直断面での加圧器室内の流れ場と温度分布、圧力分布を示したものである。加圧器室の下部には図10(b)に示すように換気空調系が設置されており、冷却された空気が加圧器へ向けて吹き上げられている。だが、図12においては冷却空気は加圧器の片側しか通っておらず、また、5階以上は上昇していない。加圧器室上部(5階以上)には高温の空気の層があり、加圧器で加熱された空気が浮力により滞留しているものと考えられる。また、図12(c)の圧力分布で示すように、高温空気の滞留により天井部付近の圧力が上昇している。したがって、下部からの気流が5階以上へ上昇しなかった原因は、換気空調系の吹き出し流速(つまり動圧)および流量が滞留空気の圧力に逆らって押し流すほど大きく無かったためと考えられる。このように、放熱する機器の周囲が壁と天井で区画化され、吹き込まれる気流の流速が低いと上部に高温層が形成される可能性がある。

開口部の有無が温度分布に与える影響を検討するため、4階の加圧器室にある扉(発電所運転時には閉)を開放してシミュレーションを行い、閉止時との比較を行った。図13に扉開放時の結果を示す。加圧器室扉は図13(a)の点線で囲った部分にあり、扉を開放することで気流が室外へ流出する結果となっている。この流出した気流は主に加圧器室下部の換気空調系から

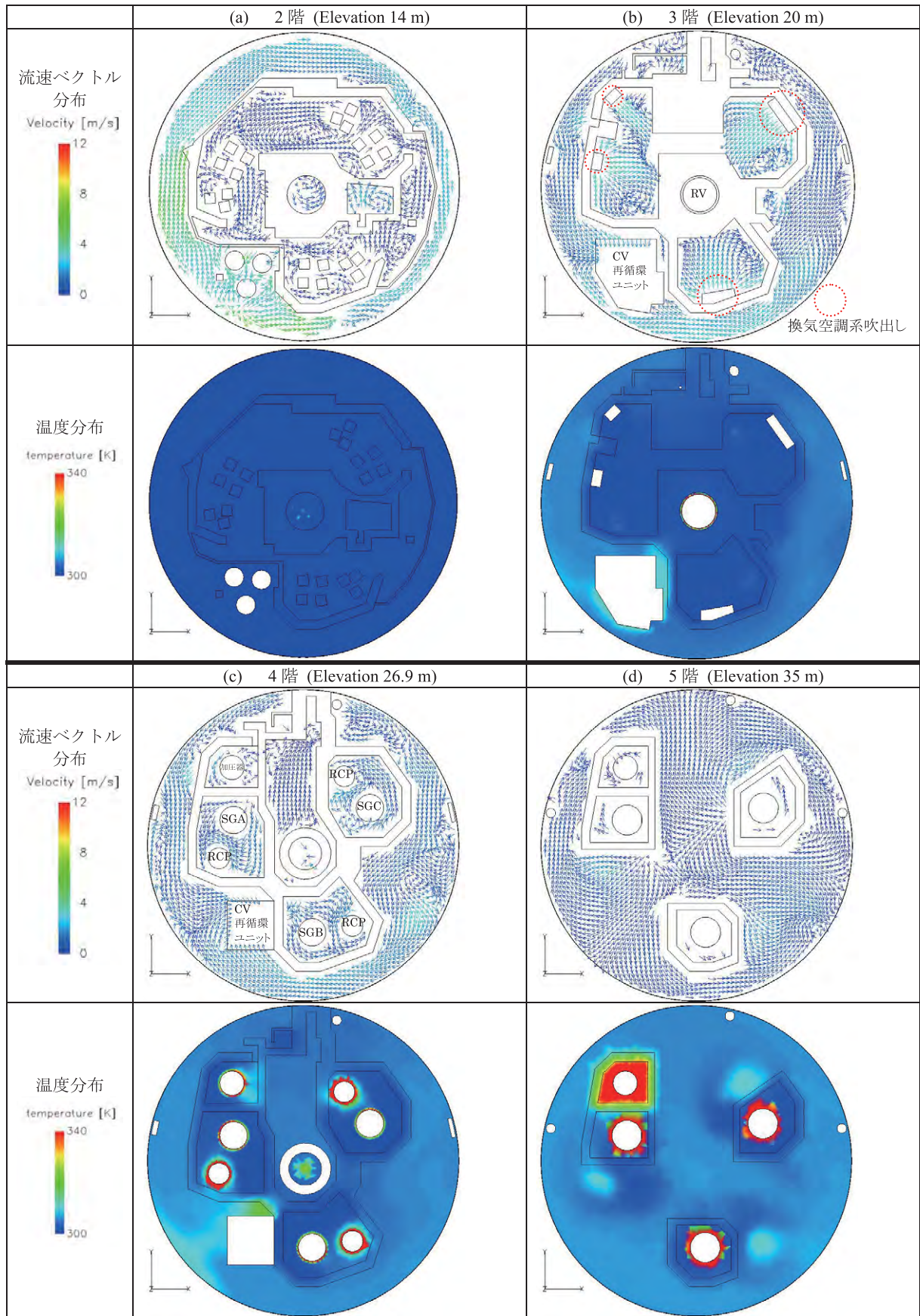


図10 各階層での流速ベクトル分布と温度分布

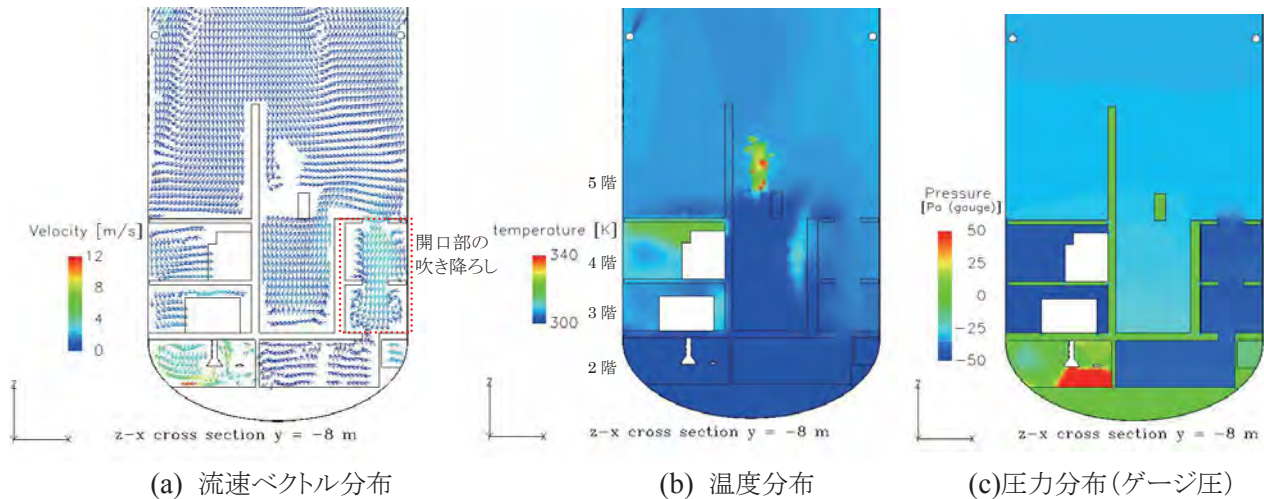


図 11 床面開口部の下降流と温度分布への影響

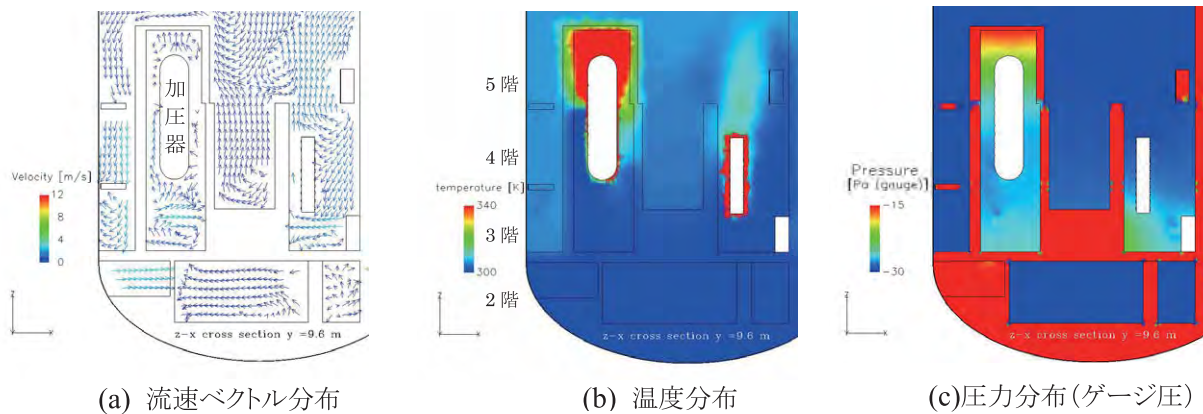


図 12 加圧器周りの流れ場と温度分布

吹き出されたものと考えられる。図示はしていないが、扉閉止時には、換気空調系からの気流の一部は加圧器室上部へ上昇するものの、行き止まりであるため最終的に全流量が SG-A ループ室側へ流出していた。扉を開放することで、SG-A ループ室側とは別の気流経路が形成され、気流が室外へ流出したと考えられる。扉開放時の温度は図 13(b) に示すように、扉閉止時 (図 10(c)) に比べ加圧器室内および室外で低下する結果となっている。室外での温度低下は、換気空調系からの冷却空気の影響と考えられる。また、室内の温度低下についても、滞留していた高温空気が扉から一部流出したためと考えられる。図 13(c) は鉛直断面における加圧器室内の温度分布を示したものであり、依然加圧器室上層で高温空気が滞留しているが、扉閉止時 (図 12(b)) と比べ加圧器室上層の温度が低下し

ていることがわかる。このように、開口部が存在することにより気流の経路が形成され、熱の輸送により周囲の領域の温度分布が影響を受けることがわかる。

以上のように、開口部の存在は CV 内の温度分布に影響を与えることがわかる。ECORA プロジェクト⁽⁵⁾における CV 内の水素燃焼数値シミュレーション例でも、開口部を通して燃焼が伝播しており、開口部の有無が CV 内の現象に影響を与えていた。よって、CV のような複雑に区画化された構造内において温度分布を再現するためには、開口部を忠実にモデル化することが重要である。

4.4 CV 内の体積平均温度の評価

CV 内における階層別および気相・物性別の体積平

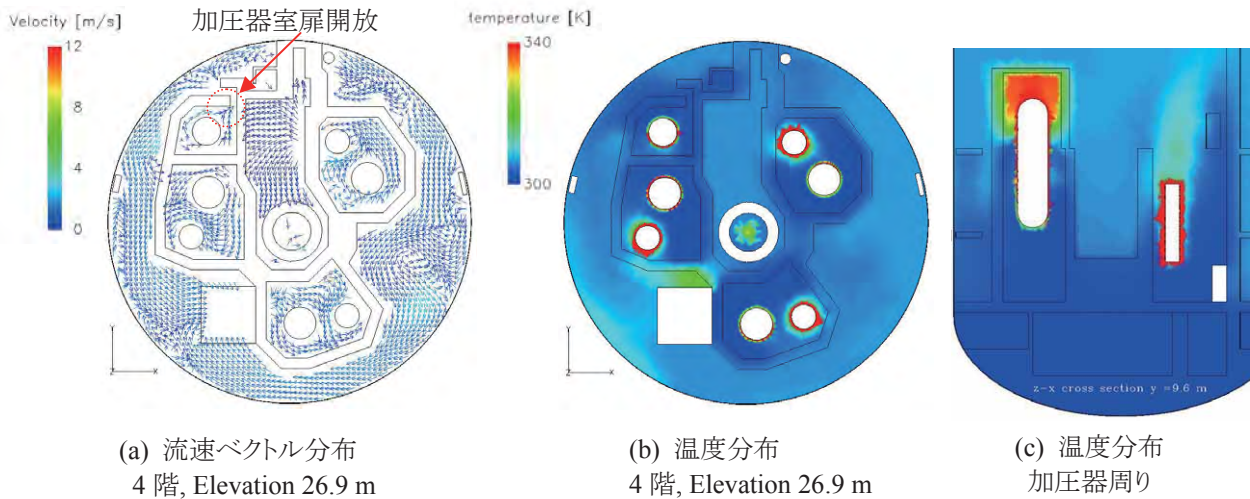


図 13 加圧器室の扉がない場合の流速分布と温度分布

均温度を表 5 に示す。温度は最下層である 2 階の体積平均温度比として算出している。CV 内では階層が上がるにつれ、温度が上昇している。5 階より上層では、ほぼ一様な温度となっている。階層が上がるにつれて温度が高くなる要因として、浮力により高温空気の上昇したこと、下層に設置された換気空調系による冷却空気の効果、下層にコンクリート構造が多く分布しコンクリート熱伝導率が低いこと、といったことが考えられる。

物性別に見ると、コンクリートの温度が最も低く、気相、CV 鋼板の順に温度が高くなっている。特にドーム部の CV 鋼板は太陽光受熱の効果のため、側面よりも高温となる結果となった。CV 鋼板の温度がコンクリートよりも高い要因として、コンクリートに比べ熱伝導率が高いこと、コンクリート壁に比べ換気空調系からの気流に直接さらされていないことなどが考えられる。

以上のように、CV 内の体積平均温度は階層、物性ごとに差がある。CV 全体の体積平均温度は、ほぼ CV 気相部の体積平均温度と同じであった。これは、気相が CV 内において体積の大半を占めるためと考えられる。

4.5 数値シミュレーションの有効性と課題

本研究では、CV 内の速度分布と温度分布を数値計算により再現し、区画化された領域における流れ場お

表 5 階層別・物性別の体積平均温度*

場所	2階との比 (体積平均温度)
リングダクトより上層	1.3
5階～リングダクト	1.3
4階	1.2
3階	1.1
2階	—
気相全体	1.2
固相全体 (コンクリート)	1.0
CV 鋼板 側面	1.3
CV 鋼板 ドーム部	1.6
CV 鋼板全体	1.3
CV 全体	1.2

*比は各温度を摂氏 (°C) で表し算出した。各階層の温度は気相および固相を総合した体積平均温度である。

よび各領域間の温度差、開口部の有無による温度分布への影響などを評価することができた。また、計算結果を用いることで、CV 全体および各領域での体積平均温度を比較的容易に評価することができた。数値計算の利点は、計算結果が得られれば、上述の評価が容易に行なえる点にある。実際に風速計や温度計を用いて CV 内部の流速、温度を直接測定しても、測定点数には限度があるため、熱流動場の 3 次元的な評価は難しい。また、温度の 3 次元的な分布が得られなければ、平均温度の算出も出来なくなる。

ただ、本稿は定性的な傾向の言及に留まっており、実際どの程度正確に定量的な評価が行なえたかについては検討を行っていない。計算方法の妥当性の検討

のためには、実際の温度データとの比較が必要であり、今後の課題である。

5. 結論

本研究では、運転中の原子力発電所における CV 内の平均温度を評価するために、3 ループ PWR プラントを対象とした CV 内温度分布の数値シミュレーションを行った。そして、CV 全体の体積平均温度を評価した。その結果以下のような知見が得られた。

- CV 内の温度は階層が上がるにつれ上昇し、強制対流支配から自然対流支配の流れ場へと変わると考えらる。
- 温度分布は気流に大きく影響を受ける。また、開口部は気流の経路となるため、温度分布を再現するには開口部を適切に模擬する必要がある。
- 平均温度は階層、気相、固相によって異なるが、気相が体積の大部分を占めるため、固相も含めた CV 全体の体積平均温度はほぼ気相平均温度となる。
- 数値シミュレーションの利用により、開口部の有無が温度分布に及ぼす影響や CV 内部の体積平均温度の評価が可能となる。

参考文献

- (1) 三菱重工業株式会社, 三菱 PWR 原子炉格納容器内圧評価解析手法, MHI-NES-1016, (2000)
- (2) 原子力安全基盤機構, アクシデントマネジメント知識ベース整備－格納容器内多次元流動解析手法の検証と自然対流冷却 AM 策への適用－, JNES/SAE06-057, (2006)
- (3) 原子力安全基盤機構, アクシデントマネジメント知識ベース整備－格納容器内多次元流動解析手法の検証と自然対流冷却 AM 策への適用－, JNES/SAE07-048, (2007)
- (4) 原子力安全基盤機構, アクシデントマネジメント知識ベース整備－格納容器内多次元流動解析手法の検証と自然対流冷却 AM 策への適用－, JNES/SAE08-020, (2008)
- (5) Heitsch, M., Review of CFD Applications to Containment Related Phenomena, EVOL-ECOR A-D10, (2003)
- (6) Scheuerer, M., Heitsch, M., Menter, F., Egorov, Y., Toth, I., Bestion, D., Pigny, S., Paillere, H., Martin, A., Boucker, M., Krepper, E., Willemsen,

S., Muhlbauer, P., Andreani, M., Smith, B., Karlsson, R., Henriksson, M., Hemstrom, B., Karppinen, I. and Kimber, G., Evaluation of computational fluid dynamic methods for reactor safety analysis (ECORA), Nuclear Engineering and Design, 235 (2-4), pp. 359-368, (2005)

- (7) 望月貞成, 村田章, 伝熱工学の基礎: 日新出版, (1994)
- (8) 空気調和・衛生工学会, 設計用最大熱負荷計算法, (1989)