

原子炉格納容器内熱流動挙動に対する輻射伝熱モデルの影響評価

石垣将宏¹⁾、山下晃澄¹⁾、安部諭²⁾、相馬秀²⁾、柴本泰照²⁾、永井亨³⁾
¹⁾福井大学、²⁾日本原子力研究開発機構、³⁾名古屋大学

福島第一原子力発電所の事故時には、高温の燃料被覆管に含まれるジルコニウムと冷却材である水の反応により水素が発生し、水素爆発が起こった。このような事故を防ぐために、事故時の格納容器内での水素を含む流体の挙動を正確に予測することが重要である。また、事故時には高温高压の水が大気圧にさらされることで大量の蒸気が発生する。蒸気は輻射を吸収・放出する。そのため、このような事故時の熱流動の数値解析では気体の輻射伝熱を考慮する必要がある。しかし、格納容器内熱流動に対する気体の輻射伝熱を考慮することの有効性は確認されているが、輻射伝熱モデル(Radiation Heat Transfer モデル:RHTモデル)と吸収係数モデルの影響を個別に評価できていない。また、これまでの事故時の格納容器内熱流動の研究における注入気体温度は実験装置内の流体の初期温度に対して約20°C高いだけであり、一次冷却材温度(約325°C)と気温(約25°C)の差に比べるとかなり温度差が小さい。炉心熔融を伴う事故時には、さらに高温の蒸気となることも考えられるため、温度変化が大きい場合に格納容器内熱流動に対する輻射伝熱の影響を明らかにすることが重要となる。

そこで本研究では、輻射伝熱を考慮するために必要なモデルである輻射伝熱モデルと吸収係数モデルが格納容器内熱流動に与える影響を評価することを目的とした。解析対象は、大型格納容器実験装置CIGMA装置を用いた高温蒸気ジェット実験の1つであるJT-SJ-07実験である。比較した項目は、温度分布、温度変化率分布、計算に要した時間である。

CIGMA装置は図1に示す高さ10mの円筒型容器から構成されている。JT-SJ-07実験は、高温蒸気ジェットによる容器過熱実験である。実験の初期場は壁面温度120°C、100%の蒸気雰囲気条件とした。蒸気はメインノズル(図1中のオレンジ色部分)から容器内に噴入させた。

本研究では、輻射を考慮しない計算に加えて、輻射伝熱(RHT: Radiation Heat Transfer)モデルと吸収係数モデルの3つの組み合わせを用いた計算を行った。用いた組み合わせは、次の4パターンである。

a) without radiation, b) P1 model & constant model, c) fvDOM & constant model, d) fvDOM & wbm。RHTモデルと吸収係数モデルの組み合わせ

に関しては、RHTモデル&吸収係数モデルの並びで表記した。数値シミュレーションにはCFDコードOpenFOAM11とユーリッヒ総合研究センター(FZJ)にて開発されている格納容器内熱流動向けのOpenFOAM11の拡張機能であるcontainmentFOAM11を用いた。

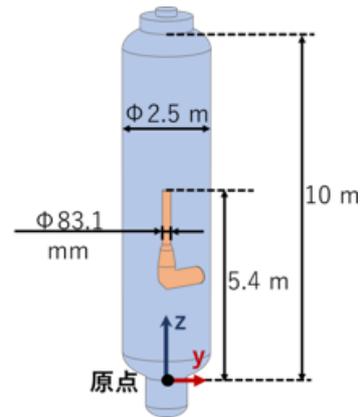


図 1 CIGMA の体系

本研究では、蒸気ジェットの流入開始を18.0sとし、ジェット流入開始から30.0s後である48.0s時点のデータを用いた。数値解析においては、蒸気ジェットの流入開始を0.0sとしたため、30.0s時点での解析結果を用いて実験データと比較をした。温度変化率はジェット流入開始から30.0s後と初期温度分布（実験時間18.0s、解析時間0.0s）の温度差を30.0sで除して求めた。解析結果の流体場の更新頻度と輻射伝熱の更新頻度の比（流体/輻射 f/r ）=10の解析結果の温度分布と温度変化率分を図2と図3に示す。これらのグラフはいずれも、中心軸から径方向に0.9m離れた位置のデータである。温度変化率分布では、原点を基準とした軸方向の長さ $z=5.0\text{m}$ 以上の領域ではconstant modelを用いた解析である(b)と(c)が、 $z=5.0\text{m}$ 以下の領域では(a)と(d)が実験値に近い結果となった。

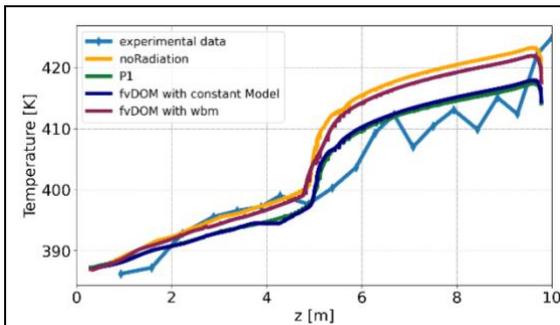


図2 温度分布（中心軸から0.9m）

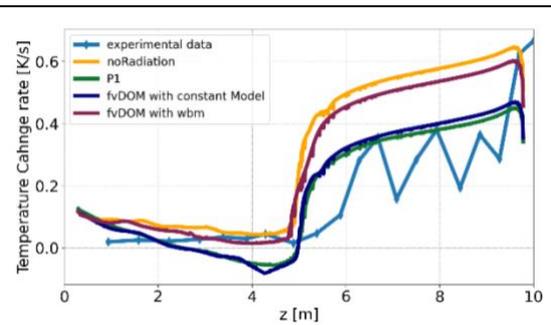


図3 温度変化率分布（中心軸から0.9m）

constant modelを用いた解析は、蒸気流入口よりも底部の領域で温度変化率分布の実験値との差が無視できない。そのため、本研究ではconstant modelを用いた場合に輻射による放射強度を過大評価している可能性が高く、本研究の結果のみから格納容器内熱流動に適した輻射モデルを決定することはできなかった。ここで、輻射を考慮した場合の各組合せの温度変化率分布の相対誤差を比較した。相対誤差を計算するための基準値として(a)の解析結果を用いた。RHTモデルの違いによる相対誤差の差は3%程度であったが、吸収係数モデルの違いによる相対誤差の差は約20%であった。そのため、吸収係数モデルの方がRHTモデルよりも温度変化率に大きく影響することが明らかとなった。温度変化率分布が輻射の有無や吸収係数モデルの差によって大きく異なったため、解析時間が長くなるほど各モデルの組み合わせや輻射伝熱モデルの有無による温度分布の差はさらに広がると考えられる。最後に、参考として輻射伝熱モデルを用いた場合の計算時間（経過時間）を(a)と比較した。計算時間の比較は全てIntel Xeon Gold 6248、152並列（研究室のクラスター）で行った。P1モデルを用いた計算は計算時間の増加がほとんどなかった。fvDOMを用いた場合の計算コストはどちらも約20.0%増加した。吸収係数モデルが異なる場合でも計算コストの増加量は同様であった。これらの結果から計算時間に対してはRHTモデルの方が吸収係数モデルよりも大きく影響を与えることがわかった。

成果発表

- [1] “格納容器雰囲気熱流動に対する輻射伝熱モデルの影響評価”，山下晃澄、石垣将宏、安部諭、相馬秀、柴本泰照、永井亨，日本原子力学会 秋の大会2024，2024
- [2] “NUMERICAL EVALUATION OF INFLUENCE OF RADIATIVE HEAT TRANSFER MODEL ON CONTAINMENT THERMAL-HYDRAULICS”，Akisumi Yamashita, Masahiro Ishigaki, Satoshi, Abe, Shu Soma, Yasuteru Sibamoto, Toru Nagai, NTHAS13, Seoul, Korea, 2024