

管路系流体過渡解析ソフトウェアAdvance/FrontNet/Γの 蒸気ブローダウン解析への適用

秋村 友香* 三橋 利玄*

Steam Blowdown Analysis using One-Dimensional Fluid Transient Analysis Software Advance/FrontNet/Γ

Yuka Akimura* and Toshiharu Mitsuhashi*

管路系流体過渡解析ソフトウェア Advance/FrontNet/Γ の機能を拡大するために“水”と“水蒸気”の相が異なる二成分モデルを導入し、二成分モデルの適用性検討のために蒸気ブローダウンを模擬した解析を行った。解析により妥当な結果が得られ、二成分モデルの適用性を確認した。本稿では、“水”と“水蒸気”の相の異なる二成分モデルの定式化と蒸気ブローダウンを模擬した解析の計算結果について報告する。

Key word : 管路系 1 次元流体解析、水”と“水蒸気”の相が異なる二成分モデル、蒸気ブローダウン

1. はじめに

図 1-1 に示すように、原子力プラント施設では、安全対策として逃し安全弁(SRV)がついており、压力容器内の圧力が上昇してある設定圧を超えると逃し安全弁が開き、水蒸気を逃がして圧力を下げる。配管内の物理現象に着目すると、通常時は逃し安全弁の 2 次側配管には窒素などの気体が封入されており、圧力抑制プールに浸かっている配管内にはプールの水面と同じ高さまで水が入っておりこれらは常温であるが、逃し安全弁が開くと高温の水蒸気が一気に配管に流入し、一部は冷やされて凝縮し水となりながら窒素を押し出して、さらに水を押し出し、プール内へ流出する。

このような過渡現象を 1 次元流体解析で解く場合、気液二相流の 1 次元流体解析が必要となるが、大掛かりな解析となり、解析が手軽に行えない。そこで、Advance/FrontNet/Γ に“水”と“水蒸

気”の相が異なる二成分モデルを導入し、水蒸気が水を押し出す解析を行うことができるようにした。

Advance/FrontNet/Γ はアドバンスソフト株式会社が開発・販売を行う管路系流体過渡解析ソフトウェアであり、気体、液体、超臨界流体のいずれかの単相流の 1 次元過渡解析を行うことを目的に開発され、気体の圧力波伝播解析や、液体の熱流動解析などに実績が豊富な解析ソフトウェアである。

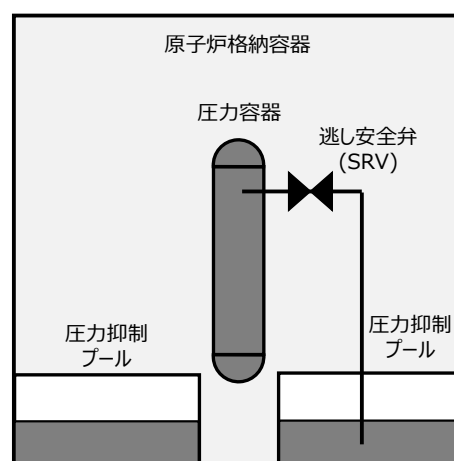


図 1-1 原子力施設の逃し安全弁 (参考[1])

*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

本稿では、“水”と“水蒸気”の相の異なる二成分モデルの定式化をまとめ、適用性検討のために蒸気ブローダウン解析を実施した結果を報告する。なお、解析では、気体は水蒸気 1 成分とし、重力や凝縮は考慮しなかった。

2. “水”と“水蒸気”の相の異なる二成分の物性関数モデル

従来の Advance/FrontNet/Γ では REFPROP4.0[2] の水の物性数値テーブル（図 2-1 と図 2-2）を使って水物性を計算していた。しかし、気液の密度差とエンタルピー差が非常に大きい場合に計算を安定に行うことができなかった。

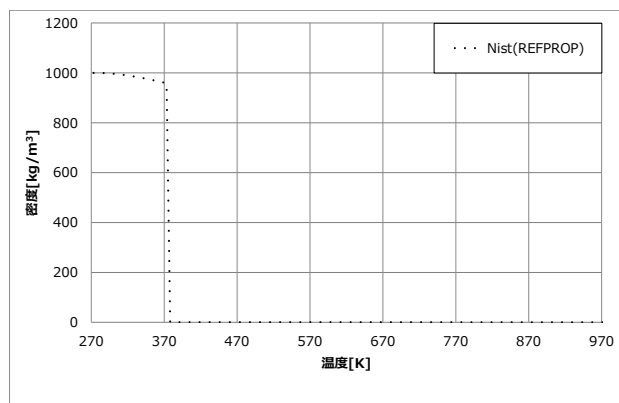


図 2-1 水の密度 (@大気圧) REFPROP

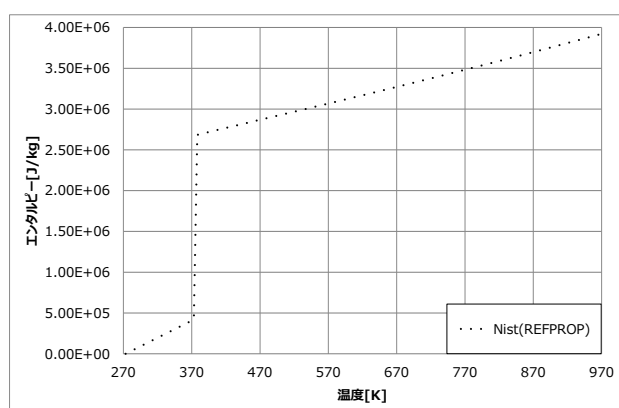


図 2-2 水の比エンタルピー (@大気圧) REFPROP

そこで、水蒸気に対しては既存機能を使うこととし、水については新たな関係式を導入し、計算安定化を図った。水蒸気についてはこれまでと同様に、圧力、温度、密度に対する理想気体の状態方程式を使い、比エンタルピーは NASA 多項式を使った。水については圧力、温度、密度の関係式を次に示す IF97 の圧縮水の式(Wagner の式)[3]、

比エンタルピーの式は Chase の式[4]を新たに導入した。

$$\frac{1}{\rho RT} = \frac{1}{p^*} \sum_{i=1}^{34} \left[-n_i I_i \left(7.1 - \frac{p}{p^*} \right)^{I_i-1} \left(\frac{T^*}{T} - 1.222 \right)^{J_i} \right] \quad (1)$$

$$C_p = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + \frac{a_4}{T^2} \quad (2)$$

Wagner の式を用いた水の密度の振る舞いを図 2-3～図 2-6 に示す。図中の Nist (REFPROP)による物性値は水蒸気から水までを広く使えるものであるが、Wagner の式が水に対してのみの適用性のため、水蒸気の範囲に対しては不適切である。

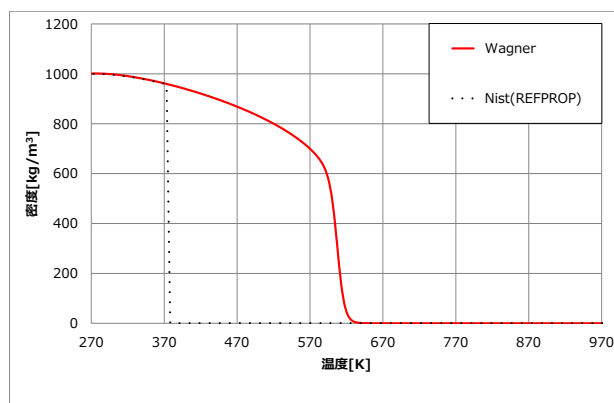


図 2-3 水の密度の温度依存性 (@大気圧)

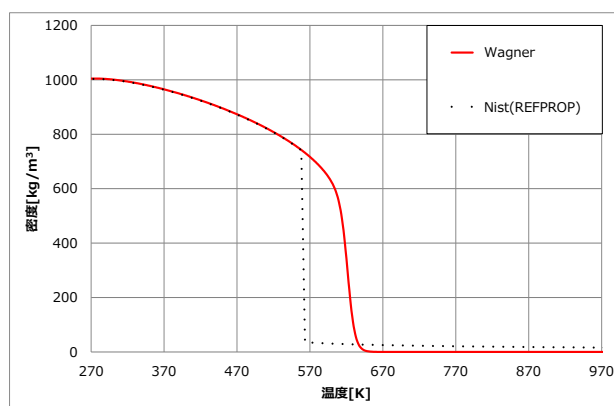


図 2-4 水の密度の温度依存性 (@7MPaA)

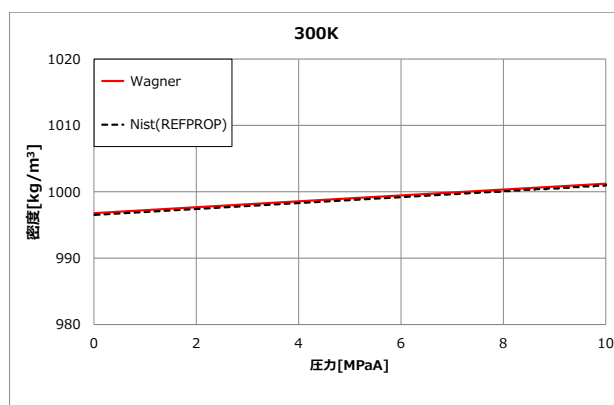


図 2-5 水の密度の圧力依存性 (@300K)

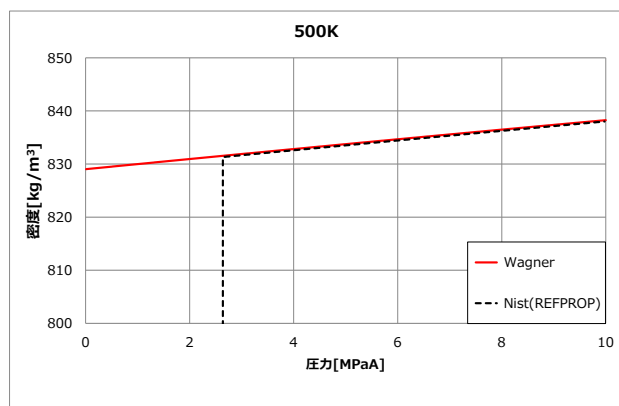


図 2-6 水の密度の圧力依存性 (@500K)

Chase の式を用いた水の比エンタルピーの振舞いを図 2-7 に示す。NASA 多項式は気体を想定しており、Nist (REFPROP)は水蒸気から水までを扱えるものである。Chase の式が有効なのは図 2-7 の 570K 付近以下の温度範囲である。

エンタルピー基準について、Chase の式は 298.15K でゼロとなるように基準を取っている。一方、REFPROP は 273.15K 基準を取っている。Advance/FrontNet/Γ では、298.15K でゼロとなるように基準を取り、NASA 多項式とは 298.15K で潜熱分 2253kJ/kg だけ、かさ上げして基準を合わせるようにした。

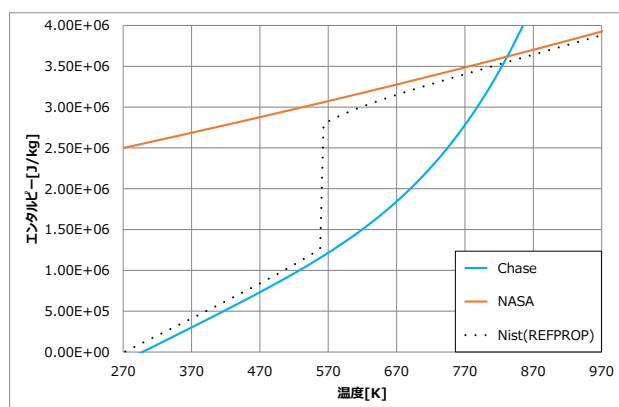


図 2-7 水の比エンタルピー

3.2. “水”と“水蒸気”の相の異なる二成分モデルの基礎式

“水”と“水蒸気”の相の異なる二成分モデルに対して、クオリティ（質量分率） Y_i とボイド率（体積分率） α_i を新たな変数として導入する。これらの変数に対する質量保存式およびエンタル

ピーの式は次のようになる。

① “水”と“水蒸気”二成分の質量保存式

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho Y_i u}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

② エンタルピーの式

$$h(T) = \sum_i^n Y_i h_i(T) \quad (4)$$

③ ボイド率とクオリティの関係

$$\alpha_L \rho_L = \rho Y_L, \alpha_G \rho_G = \rho Y_G \quad (5)$$

ここで、L は水、G は水蒸気を表す。

運動量保存式とエネルギー保存式は既存の式を解く。

4. 蒸気ブローダウン解析結果

蒸気ブローダウン解析の対象管路系の模式図を図 4-1 に示す。この模式図を Advance/FrontNet/Γ のボリューム・ジャンクション法に従ってモデル化したものが図 4-2 である。ここで、圧力温度条件や配管径、配管長などは情報が公開されていないため、推定値を使用することとした。

解析では、以下を想定した。

- ① 時刻 10 秒までは通常運転とする。
- ② 時刻 10 秒に異常を検知したと想定し、0.1 秒/100%の速度で蒸気止め弁が遮断する。
- ③ 時刻 10 秒から逃し安全弁が 0.1 秒/100%の速度で開放し、5 秒間開度を保持したのち、5 秒かけて閉まるものとする。

計算結果は図 4-3 に示すように蒸気止め弁 1 次側と、逃し安全弁 2 次側のうち、初期状態が水蒸気の配管①と水の配管②の 2 か所を出力した。

解析により得られた結果を図 4-4～図 4-16 にまとめた。通常運転時、蒸気止め弁は約 10%に絞られており、弁の流れは臨界流となっている。管内流速は約 60m/s である。蒸気止め弁を急閉すると、運動エネルギーが遮断されたことによる圧力上昇（スチームハンマー）が見られた（図 4-4、図 4-5）。

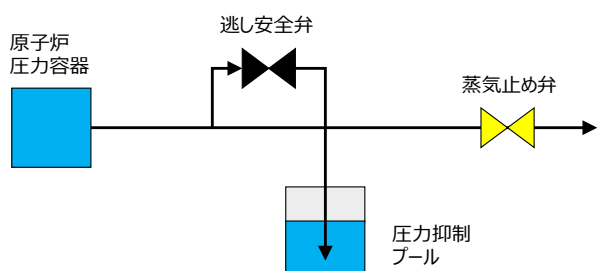


図 4-1 対象管路系の模式図

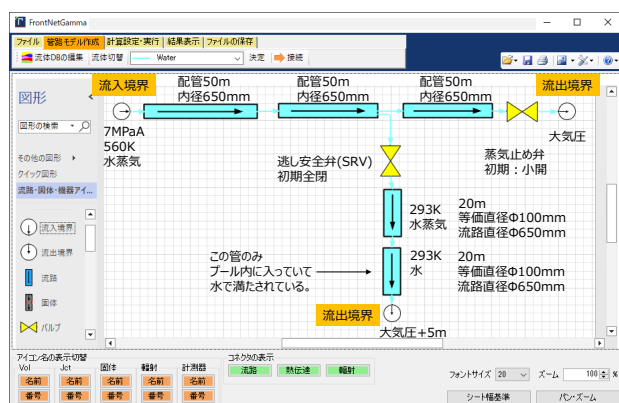


図 4-2 Advance/FrontNet/Γ の計算モデル

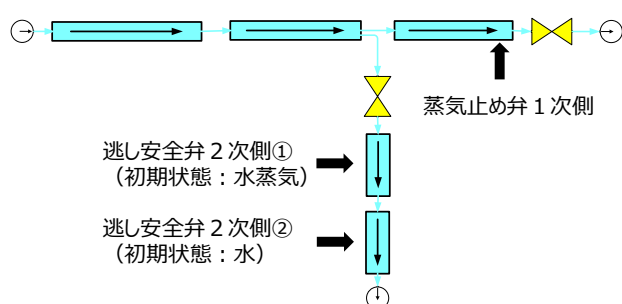


図 4-3 計算結果の出力位置

逃し安全弁が 10s に開くと逃し安全弁 2 次側①では水蒸気流入で圧力が上昇し（図 4-6）、高温水蒸気流入で温度が上昇する（図 4-7）。逃し安全弁 2 次側①の圧力は 15s 付近まで上昇し続けるが、逃し安全弁が 15s に全閉すると圧力は急激に減少し、それに伴って温度の一時的な低下と流速の上昇が 17s あたりにみられる（図 4-7、図 4-9）。ここで、密度は圧力上昇に伴い増加していたが 15s から圧力低下により下がり（図 4-8）、質量流量がほぼ一定（図 4-10）であることから流速が一時的に増加している。その後、圧力、温度などは静定する。

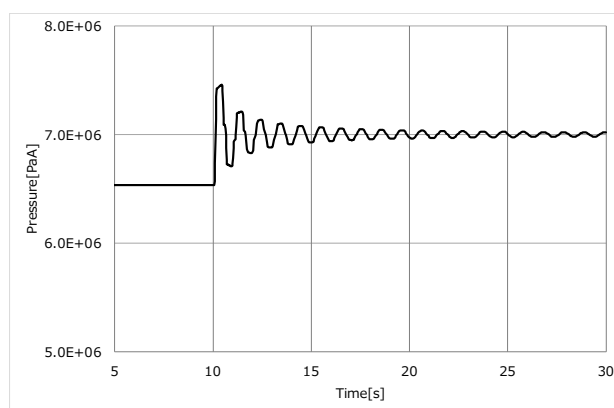


図 4-4 蒸気止め弁 1 次側圧力

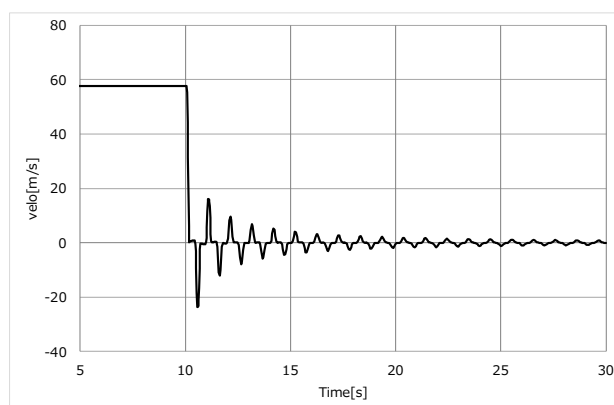


図 4-5 蒸気止め弁 1 次側流速

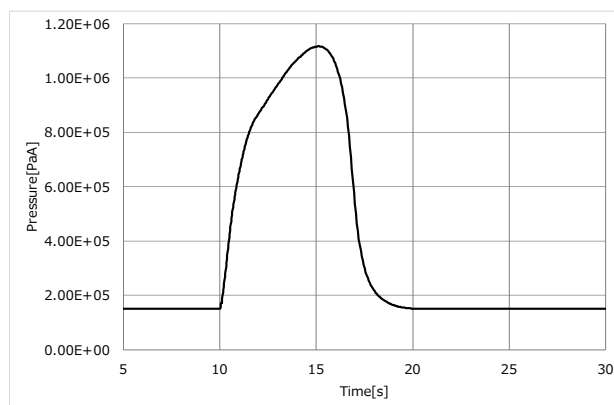


図 4-6 逃し安全弁 2 次側①圧力

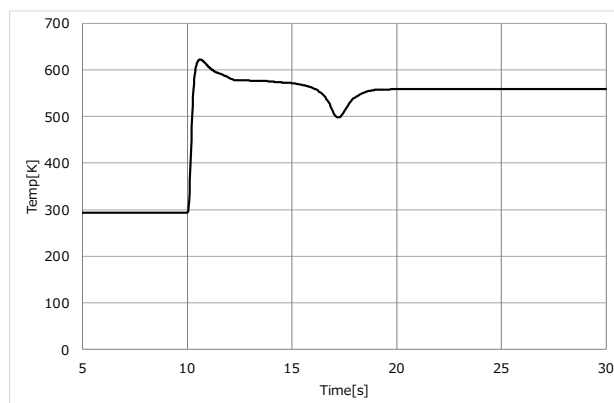


図 4-7 逃し安全弁 2 次側①温度

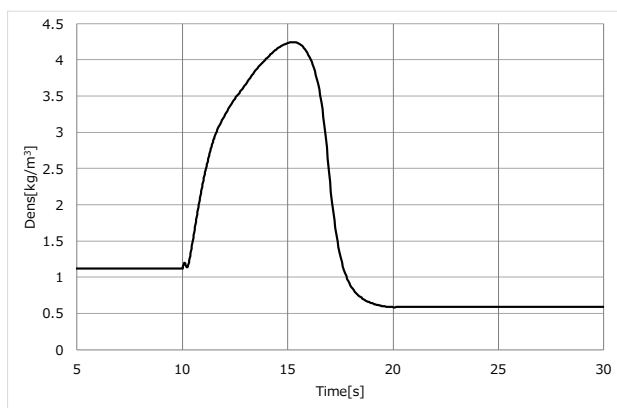


図 4-8 逃し安全弁 2 次側①密度

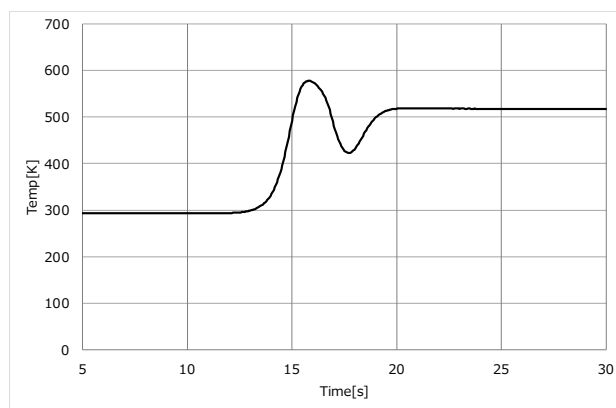


図 4-12 逃し安全弁 2 次側②温度

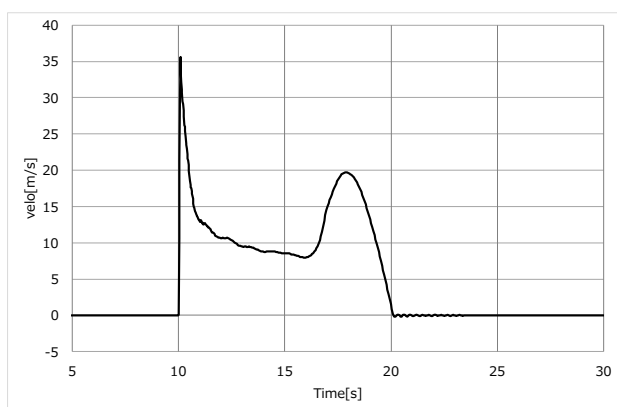


図 4-9 逃し安全弁 2 次側①流速

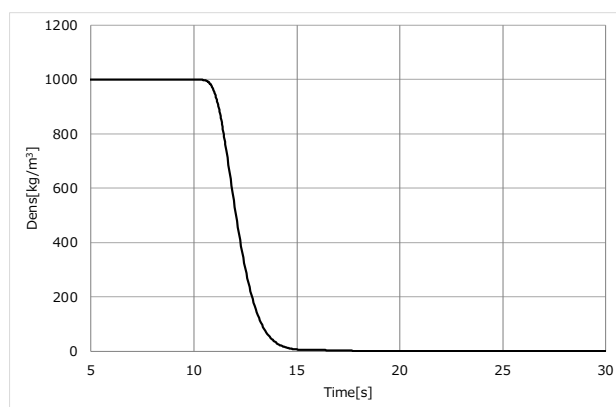


図 4-13 逃し安全弁 2 次側②密度

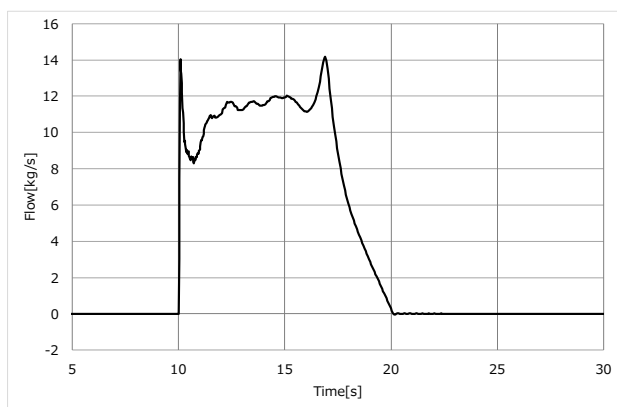


図 4-10 逃し安全弁 2 次側①質量流量

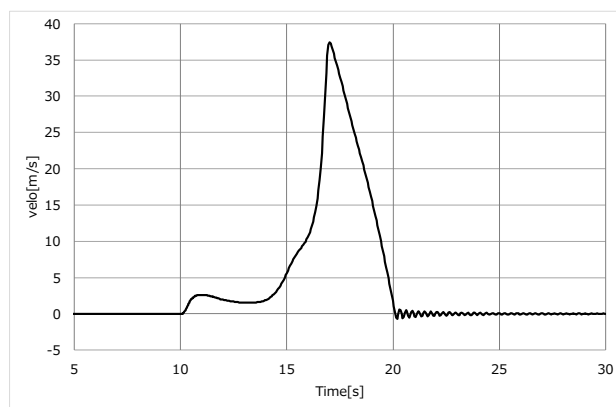


図 4-14 逃し安全弁 2 次側②流速

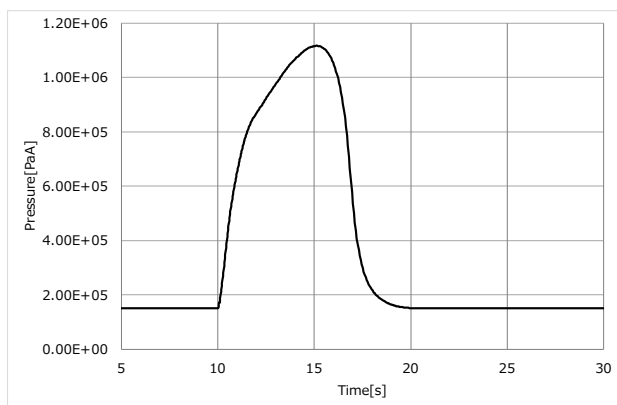


図 4-11 逃し安全弁 2 次側②圧力

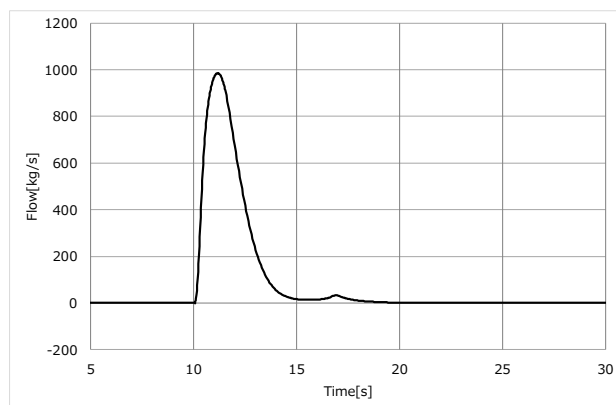


図 4-15 逃し安全弁 2 次側②質量流量

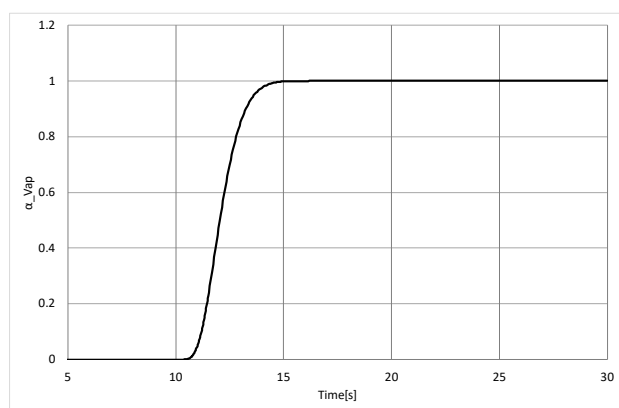


図 4-16 逃し安全弁 2 次側②ボイド率

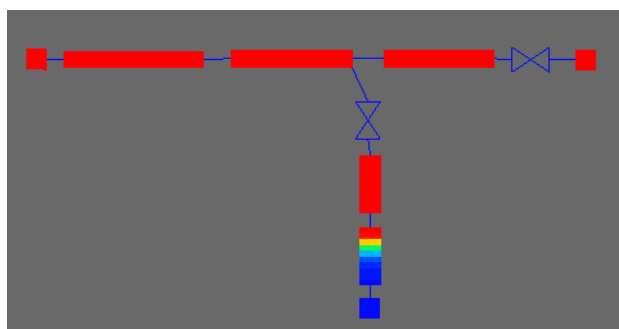


図 4-17 ボイド率分布 (15 秒)

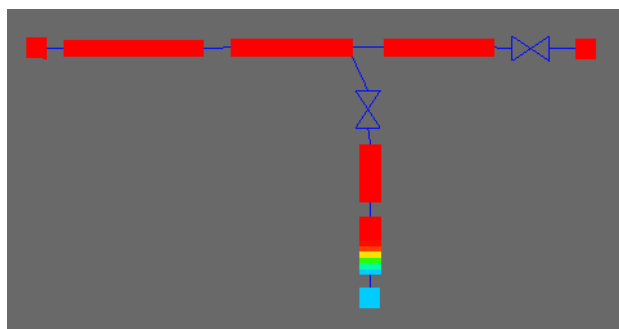


図 4-18 ボイド率分布 (17 秒)

逃し安全弁 2 次側②では、圧力と温度は逃し安全弁 2 次側①と同様の振る舞いである(図 4-11、図 4-12)。密度は水が水蒸気に置き換わって約 1/1000 となった(図 4-13)。同様にボイド率は 0.0 から 1.0 へと滑らかに変化した(図 4-16)。流速は逃し安全弁開放直後に約 35m/s となり(図 4-14)、その後、遮断に応じてゼロとなった。質量流量は止まっていた密度約 1000kg/m³ の水が一時的に数 m/s の流速で押し出され、12s 付近で約 1000kg/s となり、その後遮断に応じて静定した(図 4-15)。

図 4-17、図 4-18 に時刻 15 秒と 17 秒のボイド率分布を載せる。水が水蒸気に押し出されている様子が分かる。

5. まとめ

単相流の過渡解析用の管路系流体過渡解析ソフトウェア Advance/FrontNet/Γ に対し、水と水蒸気の相の異なる二成分モデルを導入し、それぞれの物性関数を考慮することで、蒸気ブローダウン解析を行うことができた。特に、高温の水蒸気で常温の水を押し出す部分について問題なく安定的に計算できていることが分かる。詳細な気液二相流には立ち入っていないが、密度差、圧力差、温度差のある水と水蒸気の“二成分”の混合計算を行うことができたのは、今後の気液二相流解析機能の導入へ向けた第一歩と考えられる。

今後の課題としては、重力を考慮した計算の安定化や凝縮モデルの導入、また、気体として空気や窒素の混合成分を考慮できるようにすることである。今後はこれらの機能の向上に取り組んでいきたい。

参考文献

- [1] https://www.tepco.co.jp/decommission/information/accident_unconfirmed/pdf/2017/171225j0132.pdf
- [2] <https://www.nist.gov/srd/refprop>
- [3] 日本機械学会 蒸気表, 1999. 丸善株式会社
- [4] Chase, M, W, Jr. Nist-JANAF Thermochemical Tables. Fourth Edition, J. Phys. Chem. Ref. Data. Monograph 9. 1998, p1-1951.

Advance/FrontNet/Γ はアドバンスソフト株式会社の登録商標です。

※ 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。)