



JAEA-Research

2025-003

DOI:10.11484/jaea-research-2025-003

再処理施設の高レベル廃液蒸発乾固事故の MELCORを用いた施設内の熱流動解析モデルの検証

Verification of Analytical Model of MELCOR Code for
Accident of Evaporation to Dryness
by Boiling of Reprocessed High Level Liquid Waste

吉田 一雄 桧山 美奈 玉置 等史

Kazuo YOSHIDA, Mina HIYAMA and Hitoshi TAMAKI

原子力安全・防災研究所
安全研究センター

Nuclear Safety Research Center
Nuclear Safety and Emergency Preparedness Institute

June 2025

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの転載等の著作権利用は許可が必要です。本レポートの入手並びに成果の利用(データを含む)
は、下記までお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Reuse and reproduction of this report (including data) is required permission.
Availability and use of the results of this report, please contact
Library, Institutional Repository and INIS Section,
Research and Development Promotion Department,
Japan Atomic Energy Agency.
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

再処理施設の高レベル廃液蒸発乾固事故の
MELCOR を用いた施設内の熱流動解析モデルの検証

日本原子力研究開発機構 原子力安全・防災研究所 安全研究センター

吉田 一雄、桧山 美奈*、玉置 等史

(2025 年 2 月 20 日受理)

再処理施設の過酷事故の一つである高レベル放射性廃液貯槽の冷却機能喪失による蒸発乾固事故では、沸騰により廃液貯槽から発生する硝酸-水混合蒸気とともにルテニウム (RuO_4) の揮発性の化学種が放出される。このためリスク評価の観点からは、Ruの定量的な放出量の評価が重要な課題である。揮発性Ruは施設内を移行する過程で床面に停留するプール水中の亜硝酸によって化学吸収が促進されることが想定され、施設内の硝酸-水混合蒸気の凝縮水量がRuの施設内での移行に重要な役割を担う。当該事故の施設内の熱流動解析では、水の熱流動を解析対象とする MELCOR コードを用いている。解析では、凝縮の支配因子である蒸発潜熱が、事故時での施設内の温度帯域で同程度であることから硝酸をモル数が等しい水として扱っている。本報では、この解析モデルの妥当性を確認するために、MELCORの制御関数機能を用いて硝酸-水混合蒸気を水蒸気で近似することによって生じる誤差を補正する解析モデルを作成し解析を実施し補正効果を比較することで従来の解析モデルの妥当性を確認した。その結果、補正解析モデルの適用によって各区画のプール水量の分布は変化するものの施設内のプール水量の総和には影響しないことを確認した。

Verification of Analytical Model of MELCOR Code for
Accident of Evaporation to Dryness by Boiling of Reprocessed High Level Liquid Waste

Kazuo YOSHIDA, Mina HIYAMA* and Hitoshi TAMAKI

Nuclear Safety Research Center
Nuclear Safety and Emergency Preparedness Institute
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 20, 2025)

An accident of evaporation to dryness by boiling of high-level radioactive liquid waste (HLLW) is postulated as one of the severe accidents caused by the loss of cooling function at a fuel reprocessing plant. In this case, volatile radioactive materials, such as ruthenium (RuO_4) are released from the tanks with water and nitric-acid mixed vapor into the atmosphere. Accurate quantitative estimation of released Ru is one of the important issues for risk assessment of those facilities. RuO_4 is expected to be absorbed chemically into water dissolving nitrous acid. Condensation of mixed vapor plays an important role for Ru transporting behavior in the facility building. The thermal-hydraulic behavior in the facility building is simulated with MELCOR code. The latent heat, which is a governing factor for vapor condensing behavior, has almost same value for nitric acid and water at the temperature range under 120 centigrade. Considering this thermal characteristic, it is assumed that the amount of nitric acid is substituted with mole-equivalent water in MELCOR simulation. Compensating modeling induced deviation by this assumption have been assembled with control function features of MELCOR. The comparison results have been described conducted between original simulation and modified simulation with compensating model in this report. It has been revealed that the total amount of pool water in the facility was as same as both simulations.

Keywords: Reprocessing Plant, High-Level Radioactive Liquid Waste, Accident of Evaporation to Dryness by Boiling, Volatized Ruthenium, Latent Heat, Thermo-hydraulic Behavior, MELCOR Code

* Frontier System Co., Ltd.

目次

1. はじめに	1
2. MELCOR を用いた蒸発乾固事故解析での課題	4
2.1 解析上の課題	4
2.2 硝酸の同モルの水での代用による誤差の補正	6
2.3 気液各層の温度の適正化による伝熱補正	7
3. 施設内の熱流動解析のベースケース	9
3.1 解析モデル	9
3.2 解析条件	10
3.3 解析結果	11
4. 補正モデルを用いた解析	14
4.1 プール水量への補正効果	14
4.2 考察	15
5. まとめ	23
参考文献	24

Contents

1. Introduction	1
2. Issues of concern with accident analysis with MELCOR	4
2.1 Analytical issues	4
2.2 Compensating induced error with substitution of mole equivalent water steam for nitric acid	6
2.3 Appropriate modeling of temperatures in vapor and liquid phase for thermal transfer	7
3. Basic case of thermal-hydraulic behavior analysis in facility building with MELCOR	9
3.1 Analytical models	9
3.2 Boundary conditions	10
3.3 Analytical results	11
4. Analysis with compensating modeling	14
4.1 Effect on amount of pool water	14
4.2 Discussion	15
5. Summary	23
References	24

1. はじめに

再処理施設で想定される重大事故の一つに高レベル廃液貯槽の蒸発乾固事故がある。高レベル廃液には、再処理で取り除かれた核分裂生成物の硝酸塩が含まれ、それらの崩壊熱による発熱のため常時冷却する必要がある。冷却機能が全喪失した状態が継続した場合、廃液が沸騰しいずれ乾固する。この過程において廃液中の放射性物質は、沸騰で発生する飛沫の形態、あるいは廃液の温度上昇に伴い発生する揮発性化学種として貯槽外に流出する¹⁾。乾固時には、含有硝酸塩の脱硝反応が進行しNO_xガスが発生し始めると考えられる。溶液の沸騰及び脱硝反応に伴い発生する気体（蒸気あるいはガス）とともに貯槽から放出される放射性物質は、事故シナリオの一つとして貯槽の圧力上昇を防止する目的で設置される廃ガスシールポットから廃ガス処理セル内に流出することが想定される¹⁾。このシナリオではセルに流出した放射性物質を含む気体は、セル排気系から排気筒放出されるかまたはセルから建屋内へ逆流し建屋排気系から排気筒放出される。この事故シナリオでの蒸気等の流れを図1.1に示す。

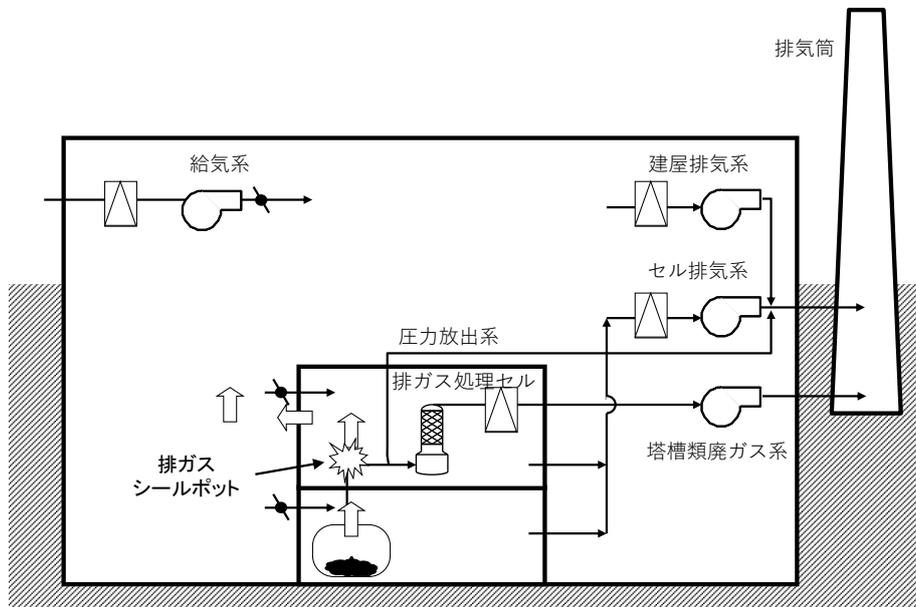


図 1.1 事故時に想定される再処理施設内での放射性物質の移行経路

当該事故のリスク評価では、廃液の沸騰により貯槽から施設内のセル等の区画に流出した放射性物質が施設内を移行し、最終的に施設外の環境中に放出される放射性物質質量（いわゆるソースターム）を定量的に最適予測することが求められる。日本原子力研究開発機構（以下、機構という）では、再処理施設のリスク評価の精度向上に資するため、計算プログラムを用いてソースタームを解析的に評価する手法の整備²⁾を進めている。

ソースターム解析では、

- a) まず廃液貯槽から再処理施設の区画内に流出する放射性物質の経時的な変化を求める。貯槽から流出した放射性物質はエアロゾルまたは気体状 Ru として硝酸-水混合蒸気とともに施設内を移行する。

- b) 移行挙動を解析するには、施設内の熱流動解析により硝酸－水混合蒸気及びNO_x流量、施設区画内での蒸気の凝縮を模擬する必要がある。

さらに

- c) 気体状 Ru の移行挙動に影響する施設内の気液各相で生じる化学挙動を解析する必要がある。

文献 2)では、上記要件を満たす具体的な計算コードとともに図 1.2 に示す解析手順が提案されている。

ステップ 1 : SHAWED を用いた廃液貯槽の沸騰現象の解析

主要な解析項目は、沸騰時の廃液の温度上昇、沸騰に伴う硝酸及び水の蒸気発生量、沸騰段階の飛沫発生量、沸騰晩期から乾固にかけて発生する NO_x 量、Ru 量である。再処理廃液の沸騰を模擬する計算プログラム：SHAWED (Simulation of High-level radioActive Waste Evaporation and Dryness)³⁾ は、任意の多成分硝酸塩水溶液の気液平衡モデルに基づき廃液の沸騰を模擬している。廃液の沸騰・濃縮の進展に伴う温度などの熱水力パラメータや硝酸濃度の過渡的な定量的変化は、廃液の発熱量、硝酸濃度、FP 硝酸塩の組成及び濃度等の条件に大きく依存し変動する。リスク評価に資するためのソースタームを精度よく評価するには、これらの境界条件の多様な変動に対応可能な汎用性のある計算プログラムにより解析的に求めることが重要である。

ステップ 2 : MELCOR を用いた施設内の熱流動解析

ステップ 1 で求めた廃液貯槽から流出する硝酸及び水の蒸気発生量、温度を境界条件として、硝酸－水混合蒸気が設内の移行経路の沿って流れるときのセル等の区画内の温度、蒸気、ミスト量及び凝縮液量を解析する。飛沫はエアロゾルとして区画内での沈着量を計算する。このような施設内の熱流動挙動解析には、原子炉施設のシビアアクシデント時の熱流動を解析する計算コード：MELCOR⁴⁾ を用いている。MELCOR は、解析対象施設を複数の領域（コントロールボリューム）に分割してそれらを流路（フローパス）で連結し、コントロールボリューム内の質量及びエネルギーに対して、一点集中定数型近似モデルで表現し、コントロールボリューム間の圧力差、重力、流動抵抗、流体の慣性を考慮した運動方程式によって流体のコントロールボリューム間の移行量を計算する。

ステップ 3 : SCHERN を用いた施設内の化学挙動解析

ステップ 1 で求めた廃液貯槽から流出する硝酸及び水の蒸気発生量、温度、沸騰晩期から乾固にかけて発生する NO_x、O₂ 量、Ru 量、ステップ 2 で求めた各区画内の凝縮液量、温度、蒸気流速を境界条件として、蒸気の移動経路に沿って施設内の各区画の気液各相の NO_x、硝酸、亜硝酸、水、Ru の濃度を解析する。蒸気の流れの上流から下流に向け区画ごとに逐次的に解析する。このステップでは、ステップ 2 において MELCOR で解析した施設内の熱流動状態（温度、蒸気流量など）を境界条件としてそこでの化学挙動を解析する計算プログラム：SCHERN (Simulation of Chemical Reaction of Nitroxide)⁵⁾ を開発した。SCHERN は、再処理施設内での硝酸－水混合蒸気、その凝縮水及び NO_x が存在する気相及び液相で構成される系において想定される化学反応に伴う多様な化学種の濃度の経時変化を、化学反応速度を考慮した連立一次微分方程式の数値解として求める。

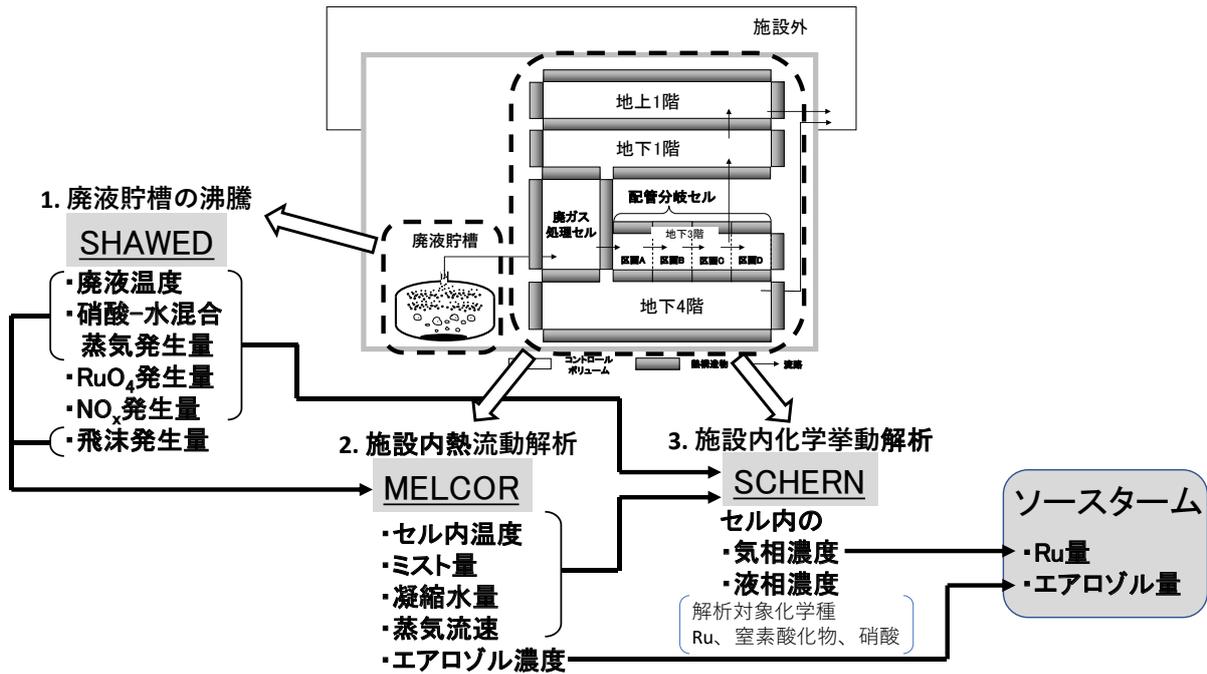


図 1.2 再処理施設での蒸発乾固事故時のソースターム解析の流れ（文献 2）より転載）

上述のステップ 2 の MELCOR を用いた施設内での熱流動解析について、文献 2)では、MELCOR は原子炉施設での炉心損傷を伴う過酷事故を対象に開発されているため、硝酸の熱流動は模擬できないが、当該事故での熱流動の特徴を踏まえて解析モデルを工夫することで近似的に妥当な解析が可能であるとしている。解析では、凝縮の支配因子である蒸発潜熱が事故時での施設内の温度帯域で同程度であることから硝酸をモル数が等しい水として扱っている。文献 2)では、この解析モデルの妥当性を示すために、MELCOR の制御関数機能を用いて硝酸-水混合蒸気を水蒸気で近似することによって生じる誤差を補正する解析モデル（以下、補正モデルという）を作成し、それを最上流の解析区画のみに適用した解析を実施し、補正効果を比較すること従来の解析モデルの妥当性を確認したとしている。

本報では、MELCOR で硝酸-水混合蒸気の熱流動解析を実施することの課題を具体的に解説しこれに対応するために、硝酸を同モルの蒸気で近似することの妥当性を検証するための補正モデルを再検討するとともに、施設内のすべての解析区画に補正モデルを適用して解析を実施し、その結果を定量的に分析することで、硝酸を同モルの蒸気で近似することの妥当性を確認することを試行する。

2. MELCOR を用いた蒸発乾固事故解析での課題

2.1 解析上の課題

蒸発乾固事故解析において貯槽から発生した放射性物質を含む硝酸－水蒸混合蒸気が施設内をどのように移行していくかは、施設内での熱流動解析により模擬する。これにより、各区画内の凝縮水量、凝縮速度、蒸気流速、気相及び液相温度等を求めることができる。これらのデータの精度は、構造物表面での除熱を模擬する解析モデルに依存する。文献 2) で述べたようにこの観点から現状の MELCOR の解析モデルでは、解決すべき課題として次の 2 点を挙げることができる。

- a) 硝酸の蒸発／凝縮が扱えないので水で代用している。
- b) 解析対象とする空間では、気液各層の温度は異なるが、ほぼ同温の扱いとなる。

課題 a) の硝酸の蒸発／凝縮を扱えない点を補うため、これまでの解析では硝酸を同モルの水として取り扱っている。この概略的な仮定は、**図 2.1** に示す硝酸及び水の単位モル当たりの蒸発潜熱を比較すると解析対象の温度領域（～120℃）硝酸及び水の単位モル当たりの蒸発潜熱は概ね同じであること、またその期間の沸騰の初期段階では水の蒸発が圧倒的に多いことを根拠としている。

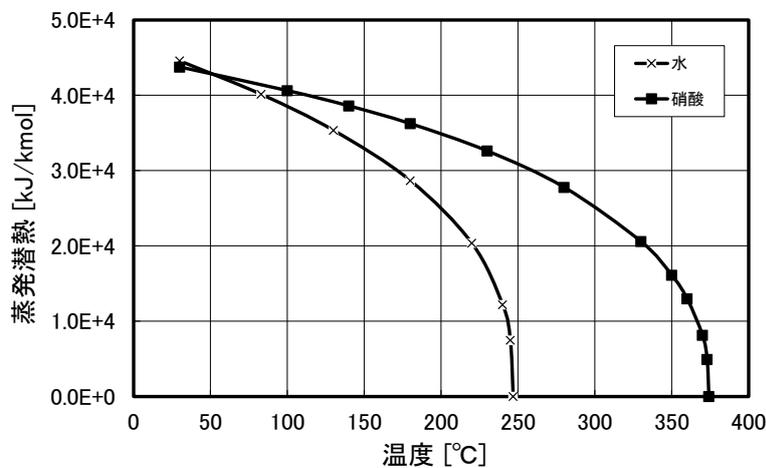


図 2.1 硝酸及び水の単位モル当たりの蒸発潜熱の比較（文献 2）より転載）

課題 b) については、文献 6) に記載の Ru の気相部移行試験の結果から、硝酸－水混合蒸気の凝縮過程では、気相部と液相部の硝酸濃度はほぼ同じであると推察される。このことから気液各層の温度は、**図 2.2** に示すように気相が液相より高い。**図 2.3** に再処理施設内で事故時に生じると考えられる空間内の温度分布と MELCOR での実規模解析の熱的状态を示す。MELCOR の解析での各区画内の空間は、プール水と蒸気相で記述される。床面はプール水で覆われる。蒸気相に接する壁面では蒸気凝縮により液膜が形成される。事故時の実施設で想定されるバルクの気相部では硝酸－水混合蒸気の露点（液相温度）より高温であるためミストは形成されないと想定される。これに対して、これまでに実施した MELCOR を用いた熱流動解析⁷⁾ではプール水と蒸気相

の温度は、解析対象区画の圧力に対応する飽和温度にほぼ等しくなる（MELCOR の非平衡オプションを選択した場合）。構造物壁面での熱伝達は自然対流を仮定し、熱流動状態に関係なく一定値を用いている。本報で示す MELCOR のベースケース解析では、熱伝達モデルで計算している。

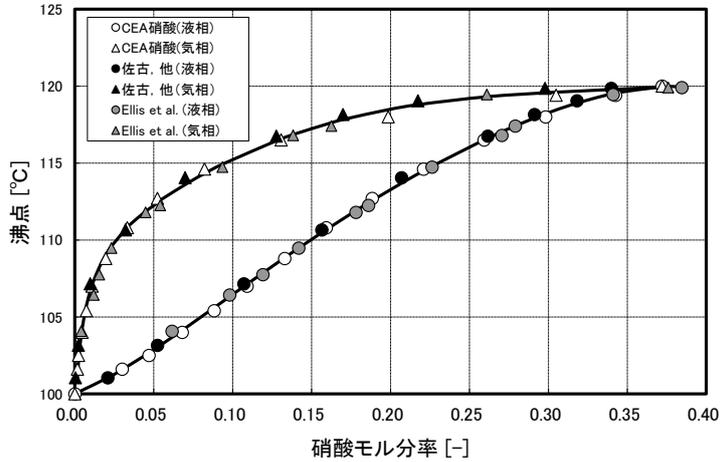


図 2.2 大気圧での硝酸－水混合水溶液の沸騰時の気液平衡状態（文献 8）より転載）

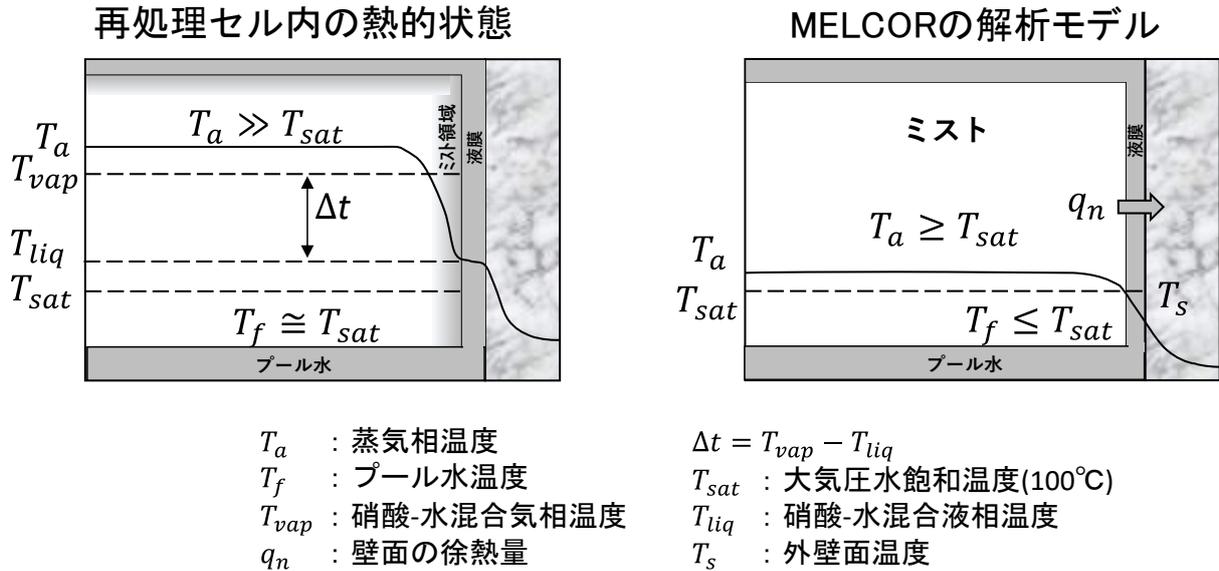


図 2.3 再処理施設内の温度分布と MELCOR での実規模解析の熱的状态（文献 2）より転載）

本章では、これら 2 つの解析モデルにおける仮定が、凝縮液量をはじめとする熱流動状態に及ぼす影響の定量的な分析を試行する。そのために必要な解析モデルの改良あるいは精緻化のためのモデルを提案し、従来の解析結果と比較することで MELCOR を用いた当該事故解析の合理的な解析モデルの提案に資する。

2.2 硝酸の同モルの水での代用による誤差の補正

先に述べたように廃液温度が 120 °C を超えるまでは、貯槽から流出する蒸気は水蒸気が圧倒的に多い。MELCOR の解析では SHAWED で解析した硝酸及び水の蒸気を入力条件としている。MELCOR の解析では、流出蒸気は廃ガス処理セル内、それ以降に繋がるセル内の壁面等で除熱され凝縮する。MELCOR が計算する凝縮液量は水のみとして求められるので、水及び硝酸の蒸発潜熱の差異が凝縮液量の誤差の原因となる。

図 2.1 に示すように蒸気が約 50 °C 以上の領域で高温であるほど硝酸及び水の蒸発潜熱の差異は大きくなる。そこで最も高温の状態で蒸気が流入する廃ガス処理セルを対象に、潜熱の誤差が凝縮水量の及ぼす効果の定量的な把握を試行した。

(1) 補正の基本的な考え方

上述のようにここで仮定する解析条件では、気相部の水蒸気のうち、モル数で等価な硝酸蒸気が含まれる。各区画での気相部の硝酸及び水のモル濃度から、他の気相成分が十分に少ないと仮定して硝酸モル分率を求める。実験から凝縮水のモル分率は気相部モル分率に等しい判断されるので、この値を基に MELCOR が計算する単位時間当たりの凝縮水 (M_{liq}) 発生量を水の分子量で除してモル量に換算し、硝酸のモル分率： M_f を乗じて硝酸成分のモル量を求め、水の分子量を乗じて硝酸相当の水量[kg/s]を求めることができる ((2.1)式では、水分子量は、それで除したのち再び乗じるため水分子量の項はない)。この量に水及び硝酸の潜熱 (Lh_w 及び Lh_n) の差分を硝酸の潜熱で除した値を乗ずれば潜熱補正後の水換算の凝縮量の補正量となる。この計算の流れを (2.1)式に示す。

$$\Delta M_{lat} = \frac{d}{dt} M_{liq} \times M_f \times (Lh_w / Lh_n - 1) \quad (2.1)$$

2.1 節で述べたように、実験結果から硝酸－水混合蒸気の凝縮過程⁶⁾では、気相部と液相部の硝酸濃度はほぼ同じであると推察される。このことから凝縮する蒸気のモル分率から水及び硝酸の蒸発潜熱を求める必要がある。MELCOR 解析では、関数機能を利用して次の 2 つのパラメータを基に計算した。

- ・ これまでに SCHERN で解析した廃ガス処理セル内での気相部の硝酸モル分率変化の時間依存テーブル入力
- ・ 温度依存の硝酸及び水の蒸発潜熱のテーブル入力

さらに MELCOR で計算される凝縮液発生速度を基に硝酸－水混合蒸気の潜熱及び水蒸気のみ
の潜熱の差分（単位質量当たりの潜熱は水蒸気のみの方が大きいので混合蒸気の場合より凝縮水は少なく計算される）から求めた凝縮水量の増分をプール水に追加、それに対応する蒸気の減少分を気相部より差し引き、これらの差分に対応する潜熱の差分を気相部のエネルギーとして補正した。

2.3 気液各層の温度の適正化による伝熱補正

図 2.2 に示すように気液が同温の平衡状態では、気液各層のモル分率は大きく異なる。例えば温度は 110 °C での平衡状態では、液相のモル分率が 0.15、気相のモル分率は 0.026 である。一方、比較的大きな空間（バルク）にモル分率が 0.03 の硝酸－水混合蒸気が存在し、壁面での除熱により混合蒸気が凝縮する場合、液相である凝縮水のモル分率は、小規模な実験結果⁶⁾からの推定では気相と同じ 0.03 となり、その時の液相温度は 101.3 °C になると推定される。

ここでの改良モデルの検討では、共沸状態（沸騰状態の硝酸水溶液で気液両相のモル分率が等しい状態）より低い温度（120.5 °C 以下）の沸騰状態の貯槽から流出した混合蒸気が施設内のセルに流入する場合を想定する。緩やかに混合蒸気が流入する状態では、壁面から離れた空間では流入した気相の温度が維持される。一方、壁面での除熱により液膜が形成される壁面近傍の空間では気相温度が低下し、気相と同じモル分率のミストが生成されると想定される。図 2.3 の左側に再処理セルで事故時に想定される温度分布等の熱的状态を示す。ミストは液膜に取り込まれるため液膜のモル分率も気相のそれと同じになると想定される。先にも述べたように混合蒸気がガラス管内で凝縮する小規模実験では同モル分率の気液各相が共存することが確認されている。このことから図 2.3 の左側に示した再処理セル内の気液各相の温度： T_{vap} 及び T_{liq} は、気相のモル分率で一意に定まると仮定する。事故時の実施で想定されるバルクの気相部では硝酸－水混合蒸気の露点（液相温度）より高温であるためミストは形成されないと想定される。

これに対して MELCOR を用いた既往の実規模解析での熱的状态を図 2.3 の右側に示す。MELCOR では、ボリューム内の圧力、質量及び内部エネルギーは気液平衡を仮定して予め求め、その後液相中の気相（気泡）及び気相中の液相（ミスト）、非凝縮気体の存在及び気液間の断熱状態を仮定して、圧力及び気液各層の体積を求め気液温度の疑似的な非平衡をモデル化している。蒸気凝縮を伴う空間では、気相温度は飽和温度より高く、液相温度は飽和温度にほぼ等しく計算される。各区画内の空間は、プール水と蒸気相で記述される。床面はプール水で覆われる。蒸気相に接する壁面では蒸気凝縮により液膜が形成される。

(1) 補正の基本的な考え方

熱流動解析結果を受けて実施する SCHERN を用いた化学挙動解析では、プール水量は Ru の液相への移行量を解析する上で重要である。再処理施設内での熱流動解析での重要な解析項目の一つであるプール水量は、各区画に接する構造物表面（床、壁、天井）での除熱に依存する。MELCOR の解析では、構造物が接する空間の熱流動状態に応じて構造物表面の熱伝達係数： h [W/K/m²] を求める解析オプションが選択できる。図 2.3 に示す事故時に想定される施設内の熱的状态と MELCOR の解析モデルを比較すると、壁面での液膜の温度が異なる。壁面での除熱は、壁面温度と液膜温度の差及び熱伝達係数で決まる。液膜の温度 MELCOR モデルでは、飽和温度であるのに対して、現実的な熱的状态として想定されるケースでは、気相部の硝酸濃度に依存し変化する液相温度： T_{liq} になると考えられる。液膜温度の差異による伝熱量の増分： ΔQ を MELCOR で計算される壁面での伝熱量： q_n をもとに(2.2)式より用いて求め、各区画のボリュームの蒸気相から差し引き補正した。 S_w [m²] は液膜が形成される構造物の表面積の総和である。 T_a は MELCOR で計算される壁面温度であり、現実的な熱的状态において想定される壁面温度とは同じ値ではない

が、近似的に等しいと仮定する。

$$\Delta Q = \left((T_{liq} - T_a) \times h - q_n \right) \times S_w \quad (2.2)$$

本節で提案する解析モデルは、区画内の気相部バルクの温度に関係なく気相部の硝酸モル分率によって決まる凝縮水の温度（プール水温度とは異なる）が凝縮水量を決定することから、下流区画にはバルクの蒸気が流入するが解析的にはその温度には無関係に凝縮水温度が決まるため、上流から下流に向けて逐次的に進める SCHERN 解析に影響しない。

3. 施設内の熱流動解析のベースケース

本章では、SHAWED の解析結果を境界条件として、MELCOR を用いた施設内の熱流動解析について説明する。当該事故時に貯槽から発生した蒸気が放射性物質とともに施設内を移動する経路をもとに施設内の各区画及びそれらの間を繋ぐ流路で構成されるボリューム・フローパスの解析モデルを設定する。

3.1 解析モデル

本報での MELCOR を用いた施設内の熱流動解析で想定する事故シナリオでは、廃ガスシールポットから廃ガス処理セル内に流出する場合を想定する¹⁾。一般的には、セルに流出した放射性物質を含む気体は、セル排気系から排気筒放出されるかまたはセルから建屋内へ逆流し建屋排気系を経由し排気筒から放出される。ここでは後者の移行経路を仮定する。図 3.1 に仮想的な実規模施設を対象とした MELCOR の分割モデルを示す。高レベル廃液貯槽は解析の境界条件である。廃ガス処理セル及び廃ガス処理セルに近接する建屋区画（放射性配管分岐セル）の容積、壁表面積は文献 9) に掲載された施設の平面図及び立面図から推定している。それ以外の区画は、概略値を設定している。放射性配管分岐セルは、図 3.2 に示すように容積、コンクリート壁面が広いので、発生蒸気の移行可能な経路を考慮して 4 区画でモデル化している。

当該事故の解析では、熱吸収源であるコンクリート壁での凝縮水の発生が重要である。廃ガス処理セル、放射性配管分岐セルでは図面から測った壁厚をできるだけ忠実に再現したが、それ以外の壁面の厚さは 2 m を仮定している。温度解析に必要な物性値は MELCOR 内蔵の値を用いている。全電源喪失による冷却機能喪失を想定するので、換気系の停止を仮定する。これにより事故時の建屋内への新たな空気の流入はないとする。

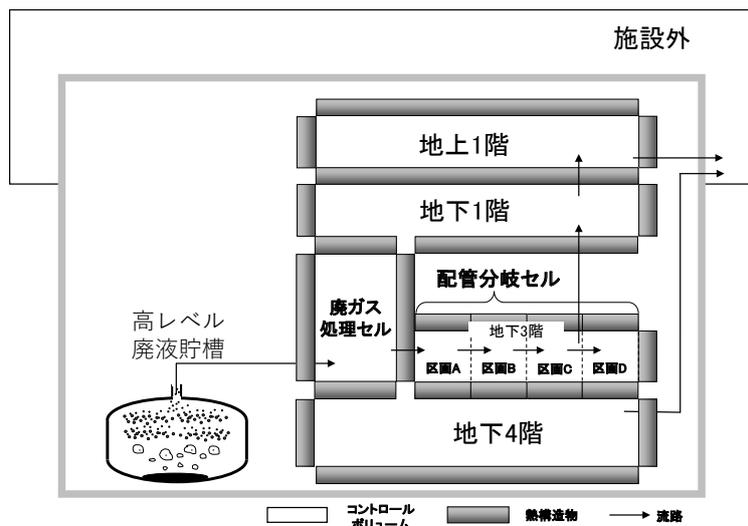


図 3.1 仮想的な実規模施設のボリューム分割図（文献2）から転載）

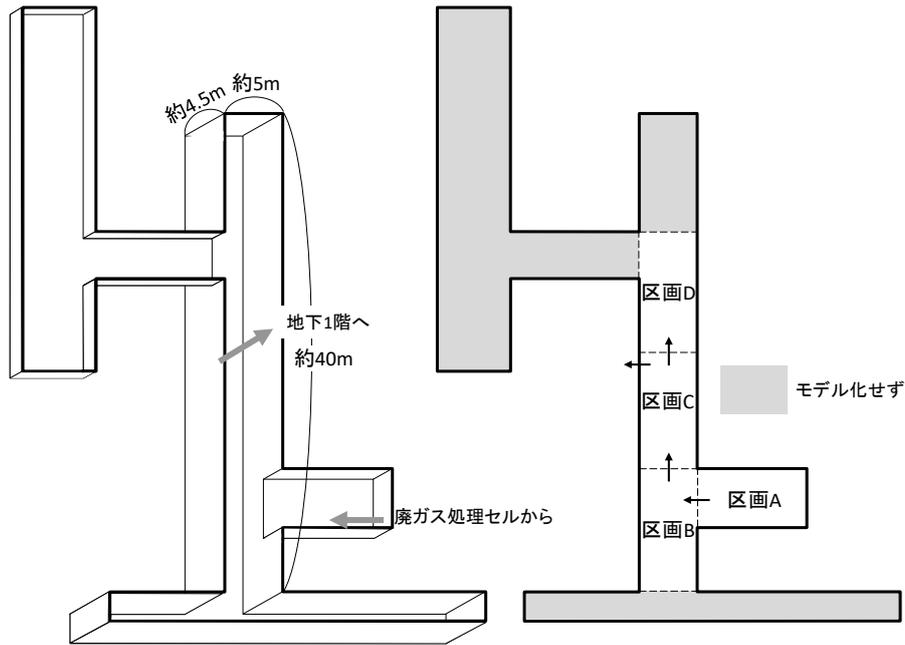


図 3.2 放射性配管分岐セルのコントロールボリューム分割（文献 2）から転載）

3.2 解析条件

(1) 貯槽からの流出ガス流量及び温度

廃液貯槽から廃ガス処理セルに至る流路の流量として図 3.1 に示す硝酸及び水蒸気の各流量、及び蒸気温度を MELCOR 解析の境界条件として設定する必要がある。解析では、硝酸と水の単位モル当たりの潜熱がほぼ等しいことから硝酸蒸気はモル数の等しい水蒸気として扱うモデルとしている。

MELCOR では、蒸気流量を解析の境界条件とする場合、蒸気を供給する時間依存ボリューム（Time-Specified Volumes、蒸気供給ボリュームと呼ぶ）と時間依存流路（Time Dependent Flow Path、蒸気供給流路）を用いる。蒸気供給ボリュームでは、圧力[Pa]、温度[K]、蒸気分圧[Pa]、非凝縮ガスのモル比[-]及びボリューム体積[m³]（任意）の入力が必要である。圧力及び蒸気分圧は大気圧、非凝縮ガスのモル分率はすべてゼロである。

温度は、蒸気がほぼ消失するまでは SHAWED の解析結果を時間依存のテーブル形式で入力する。それ以後の乾固段階では硝酸塩の熱分解に伴う脱硝反応で発生する NO_x 及び O₂ が放射性物質のキャリアガスとなるため、この段階の温度は、乾固物の温度を別途計算する必要がある。本報では文献 7) の解析結果を援用する。

蒸気供給流路は、蒸気流速[m/s]を時間依存のテーブル形式で入力する必要がある。SHAWED 解析で得られる流出蒸気流量[kg/s]を MELCOR の制御関数（Control Function）機能を用いて蒸気流速に変換する。SHAWED 解析の硝酸蒸気流量は、モル数の等しい水蒸気流量に換算し、水蒸気流量に加算する。

(2) NO₂ 及び O₂ の発生量及び温度

MELCOR では、非凝縮性の気体として N₂、O₂ 及び NO が既定の気体として設定され、水の蒸発及び凝縮への影響を考慮するための取り扱いである。当該事故の SHAWED 解析では貯槽で発

生ずる NO_x はすべて NO_2 であると仮定し、 O_2 とともに発生するモデルとなっている³⁾。MELCOR では NO_2 の物性値を入力すれば考慮可能であるが、解析上は化学反応を考慮するわけではないので同モルの NO で代用する。

O_2 及び NO の発生も時間依存ボリューム（非凝縮ガス供給ボリューム）で模擬する。状態量として圧力[Pa]、温度[K]、蒸気分圧[Pa]、非凝縮ガスのモル比[-]及びボリューム体積[m^3]（任意）を入力する。圧力は大気圧、温度は蒸気供給ボリュームと同じ、蒸気分圧はゼロ、 O_2 及び NO のモル比は、廃液中の硝酸塩がすべてⅢ価であると仮定し 1 : 4 とする。

NO_2 の発生速度[mol/s/L]は、文献 3) に示した相関式を制御関数で表現し求める。相関式では、昇温速度[K/s]の値も必要であるため、流出気体温度の時間依存テーブルから求める昇温速度を時間依存テーブルで入力する。さらに別の制御関数を用いて NO_2 の発生速度をもとに、貯槽 1 基分の廃液：120 m^3 からの発生速度に換算し、非凝縮ガス供給ボリューム中の NO の濃度[mol/m^3]を用いて非凝縮ガス供給流路の流速[m/s]に換算する。

3.3 解析結果

(1) 気相部の温度

図 3.3 に建屋内の各区画での気相部温度の変化を示す。最上流の廃ガス処理セルの温度が最も高く乾固直前まで徐々に上昇する。貯槽から流出する蒸気が乾固直前で減少するため一端は低下に転ずるが、 NO_2 の発生量の増大に伴い再び上昇する。 NO_2 の発生が減少するにつれ再び低下に転ずる。配管分岐セルの A、B 及び C の各区画の温度は、ほぼ 100 $^{\circ}\text{C}$ で推移し乾固後は低下する。その他の区画の温度は、100 $^{\circ}\text{C}$ 未満で推移する。

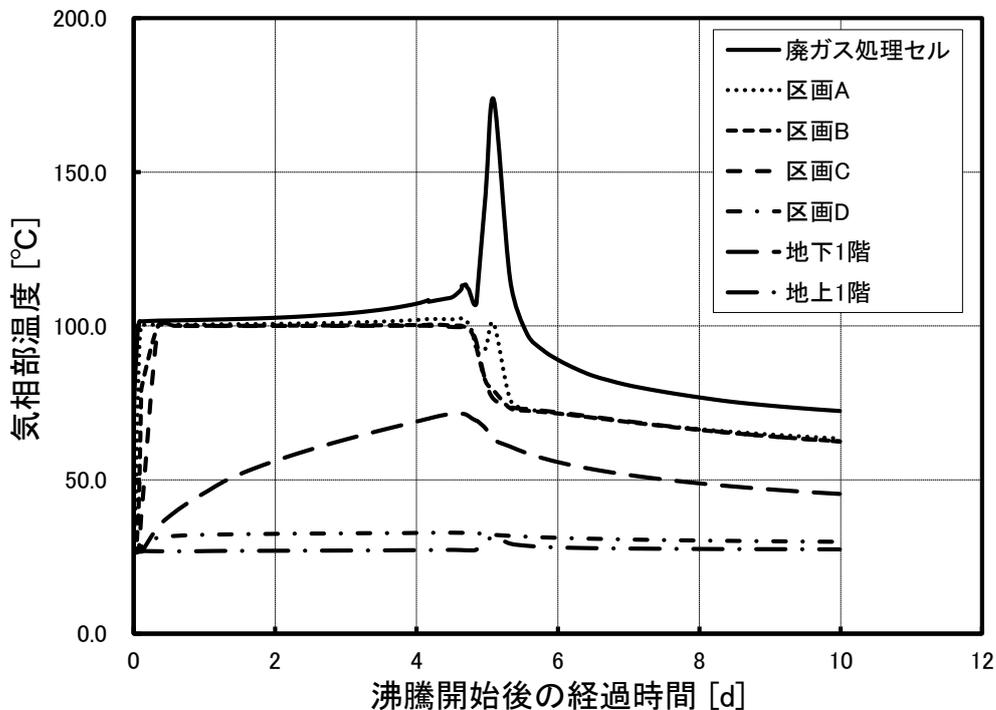


図 3.3 各区画内の気相部温度

(2) 凝縮水量

図 3.4 に建屋内の各区画での凝縮水の変化を示す。壁面の面積が狭い廃ガス処理セル及び配管分岐セルの各区画の凝縮水に比して大空間を想定した地下 1 階には約 15~20 倍の凝縮水が停留する。乾固後は NO₂ の熱量で上流側の区画では凝縮水はわずかではあるが蒸発し減少する。地下 1 階では、蒸気の供給がなくなるので凝縮水の増加は止まる。地上 1 階での乾固後の凝縮水の発生は、地下 1 階のミストが NO₂ により押し出されて流入しプール水として停留し始めることに因る。

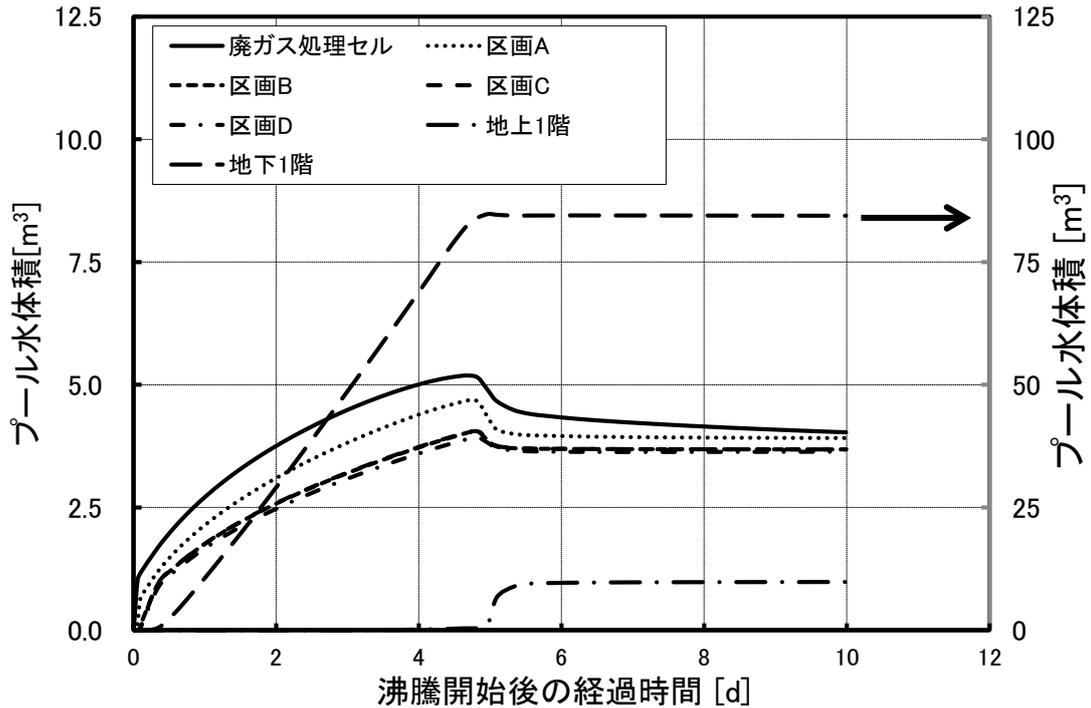


図 3.4 各区画内のプール水体積

(3) ミスト量

図 3.5 に示すようにミストは、配管分岐セルの区画 D、地下 1 階及び地上 1 階にのみ存在する。それ以外の区画では、乾固するまでは気相部の温度が 100℃より高いためミストは存在できない。乾固後には蒸気の供給がないため引き続きミストは存在しない。区画 D は、“行き止まり”のため気相部温度がほとんど上昇せず、わずかなミストが停留している。地下 1 階及び地上 1 階は MELCOR で設定されているミストの上限濃度 (0.1 kg/m³) が最大となる。地下 1 階では、0.3 日～乾固時まで上流よりミストの供給があり上限値で推移し、乾固後は供給がなくなり地上 1 階に NO₂ の発生で押し出された分だけ減少する。地上 1 階では逆に乾固後に地下 1 階から押し出され増加するが上限値に達して以降一定値を維持する。

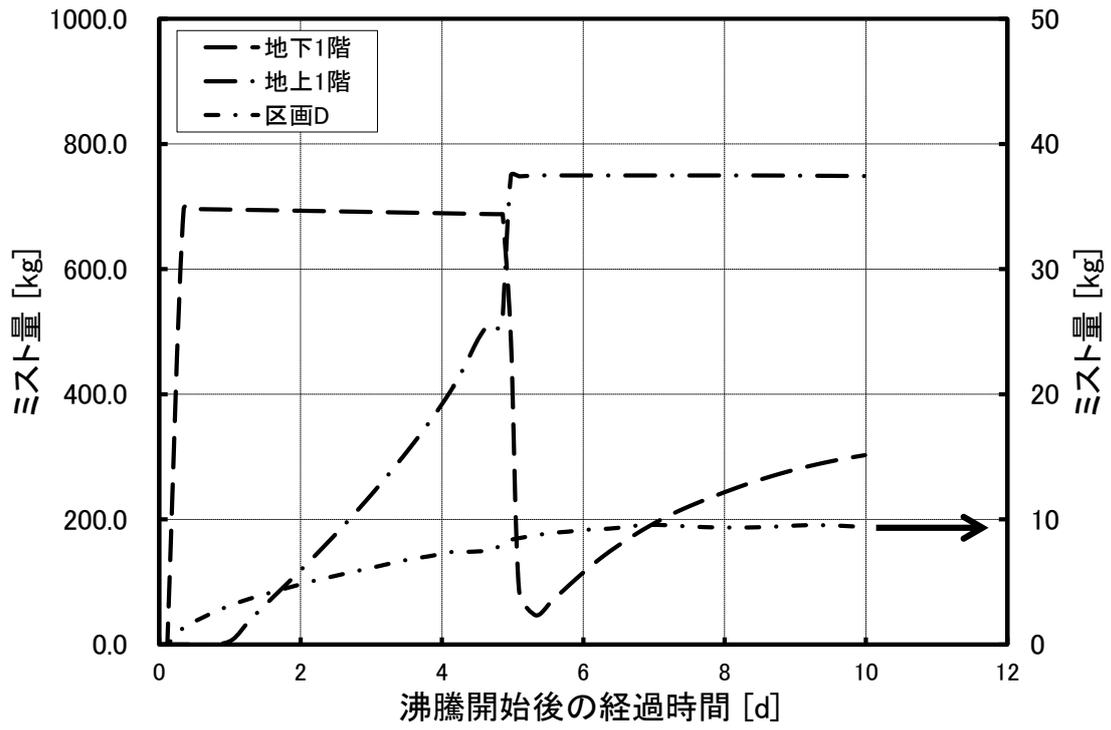


図 3.5 各区画内のミスト量

4. 補正モデルを用いた解析

2章で提案する「硝酸の同モルの水での代用による誤差の補正」（潜熱補正と呼ぶ）及び「気液各層の温度の適正化による伝熱補正」（伝熱補正と呼ぶ）の2つの補正モデルを適用した解析を実施し、それらが各区画内の凝縮水量に及ぼす効果について分析する。分析では、各補正モデルを個別に適用した場合、両者を同時に適用した3ケースに分けて適用し、補正モデルの凝縮水に及ぼす効果はほぼ乾固時の 3.9×10^5 秒及び計算終了時点のプール水量で整理した。補正モデルは各コントロールボリューム（解析対象とする施設内の区画）ごとに制御関数で定義する必要があるため解析に際しては、上流側の区画より順次適用することで補正モデル波及効果についても分析を試みた。分析は、MELCOR1.8.5及びMELCOR2.2の異なるバージョンについても実施した。

4.1 プール水量への補正効果

表4.1及び表4.2に、それぞれ乾固時及び10日後のMELCOR1.8.5でのプール水量の解析結果を示す。表中のグレーのセルが示すケースが補正モデルを適用したケースである。表の最上段の行で「補正無し」とあるのは、いずれの区画にも補正モデルを適用していない基本的なケースである。最下段のケースa7-3は、すべての区画に両方の補正モデルを適用したケースである。このケースと補正をしない最上段のケース0とを比較してプール水の増加率を求めた値を最下行に示す。伝熱補正及び潜熱補正のそれぞれが、各区画のプール水量に及ぼす効果を比較すると、区画ごとに影響に度合いが異なる。表4.1に示す乾固時のプール水では、最上流の排ガス処理セルでは、潜熱モデルを適用すると増加するのに対して伝熱モデルを適用した場合プール水は減少する。両モデルを適用すると結果としてわずかに増加する。逆に区画Aでは、伝熱補正の効果が大きく潜熱補正ではわずかな増加に留まるのに対して両方を適用すると増加傾向が増す。これに対して、区画B、C及びDでは伝熱補正はほとんど効果がないのに対して潜熱補正の効果が大きくなる傾向にある。さらに増加率では区画B、C及びDが、排ガス処理セル及び区画Aよりも一桁大きい。

乾固後では、水蒸気の供給がなくなり、代わって高温のNO_xガスが発生するため排ガス処理セル及び区画Aのプール水は再蒸発し減少に転じ、下流側の区画ではわずかに増加する。表4.2に示す10時間後のプール水では、最上流の排ガス処理セルでは、潜熱モデルを適用すると増加するのに対して伝熱モデルを適用した場合プール水は減少する。両モデルを適用しても結果としてわずかに減少する。逆に区画Aでは、伝熱補正の効果が大きく潜熱補正ではわずかに減少し両方を適用すると増加する。これに対して、区画B、C及びDでは伝熱補正でわずかに増加するのに対して潜熱補正の効果が大きい傾向にある。さらに増加率では区画B、C及びDが、排ガス処理セル及び区画Aよりも一桁大きく、乾固時に比べて増加率は大きい。これは乾固後の上流側で再蒸発したプール水が下流側の区画に移動することに因る。

表4.3及び表4.4にそれぞれ乾固時及び10日後のMELCOR2.2でのプール水量の解析結果を示す。表の構成は表4.1と同じである。ケースb5-1の伝熱補正モデルを適用したケースでは、区画Dのプール水が減少しほぼゼロになり計算が進まない結果となり解析を断念した。ケースb5-2～b7-3のケースでは、区画Dでは伝熱補正モデルは適用していない。伝熱補正及び潜熱補正のそれ

ぞれが、各区画のプール水量に及ぼす効果を比較すると、区画ごとに影響の度合いが異なる。乾固時でのプール水量に着目すると上流の排ガス処理セルでは、潜熱モデルを適用すると増加するのに対して伝熱モデルを適用した場合プール水は減少する。両モデルを適用すると結果として増加する。区画 A では、逆の傾向となる。区画 B、C 及び D では伝熱補正の正の効果に加えて潜熱補正の効果がより大きな効果があり、両方の相乗効果でさらに大きくなる傾向にある。

4.2 考察

排ガス処理セルから区画 D に至る領域でのプール水の増加は、区画 B～D において顕著である。MELCOR のバージョンで比較すると、MELCOR2.2 がより顕著に増加し、2 つの補正モデルを個別に適用したケースでの補正効果を加算した値よりも、両モデルを同時に適用するほうが補正効果が大きくなる傾向がある。排ガス処理セルから区画 D に至る区画は空間の容積はほぼ同じで、これらの区画では SCHERN での解析結果から得た同一の気相部の硝酸モル分率を境界条件として用いており、気相部温度もほぼ同じである。潜熱モデルでは、これらのパラメータ及び凝縮量（プール水量及びミスト量の和）の変化量によって補正量が決まる。図 4.1～図 4.4 に MELCOR1.8.5 及び 2.2 を用いて模擬した補正無しケース（a0 及び b0）及び両補正モデルを用いたケース（a7-3 及び b7-3）での各区画でのプール水の変化を示す。

図 4.1～図 4.4 に示すように、MELCOR のどちらのバージョンの解析結果でも区画 B～区画 D のプール水の変化は全解析期間を通してほとんど同じである。これはこの 3 区画の体積、床面の高さが同じであるためこの 3 区画でプール水は同量になる。グラフでもこれらのプール水量の変化はほぼ重なっている。表 4.1～表 4.4 に示すように同じバージョンの解析で補正モデルの適用の有無のケースの結果を比較すると、上流側の廃ガス処理セル及び区画 A では、補正モデルの効果は数%であり、変化の傾向もほぼ同じである。これに対して区画 B～区画 D では補正モデルの効果は大きい。乾固時での増加率は MELCOR1.8.5 で約 10%、MELCOR2.2 では約 26%である。区画 B～区画 D におけるそれぞれの補正モデルの効果と比較すると、伝熱補正モデルの効果はほとんどないのに対して潜熱補正効果は大きい。この補正により区画 B～区画 D では乾固間際になりミストが発生して凝縮水の増加率が大きくなり、結果プール水が増加している。この傾向は両バージョンの解析結果に表れている。

表 4.1～表 4.4 に示すように解析対象のすべての区画のプール水量の総和は、補正モデルの適用の有無に拘わらず変化は両バージョンの解析結果においてわずかである。施設全体でのプール水の総和にも両バージョンでの解析結果に有意な差異はない。個々の区画でのプール水の増減に着目すると、貯槽からの蒸気量が減少する沸騰晩期において区画 B～区画 D においてミストが発生し、これにより潜熱補正モデルの効果が優位になりプール水が増大する。下流側の地下 1F では、両補正モデルの適用でプール水が減少している。これは地下 1F から区画 C にミストが逆流するとともに地上 1F にミスト及び蒸気が流出することによる。地下 1F からのミストの流出は、配管分岐セルの区画 B～区画 C に両補正モデルを適用することでそれぞれの区画内の蒸気の凝縮が促進され逆流が発生したと考えられる。地下 1F からのプール水の流出に及ぼす両補正モデルの効果は、バージョン 1.8.5 に比べてバージョン 2.2 で顕著である。バージョンの違いによる解析結果

の差異の原因については、MELCOR の熱流動解析モデルの改良に起因するものと思慮されるが明確な理由はここでの解析結果からは分析できない。以上の考察から事故時の施設内のプール水量は、補正モデル適用により区画間でのリロケーションは見られるものの、施設全体でのプール水の全量に変化は見られない結果となった。

表 4.1 MELCOR1.8.5 を用いた解析での各区画の乾固時点のプール水量に対する補正効果 [単位 kg]

ケースNo.	適用区画	適用モデル	排ガス処理セル	区画A	区画B	区画C	区画D	地下1F	地上1F	総和
a0	補正無し		5. 248E+03	4. 769E+03	4. 054E+03	4. 059E+03	4. 073E+03	8. 086E+04	2. 856E+01	1. 031E+05
a1-1	排ガス処理セル	伝熱	5. 176E+03	4. 817E+03	4. 061E+03	4. 067E+03	4. 081E+03	8. 086E+04	2. 843E+01	1. 031E+05
a1-2		潜熱	5. 369E+03	4. 685E+03	4. 042E+03	4. 047E+03	4. 061E+03	8. 086E+04	2. 893E+01	1. 031E+05
a1-3		伝熱+潜熱	5. 257E+03	4. 761E+03	4. 053E+03	4. 058E+03	4. 072E+03	8. 086E+04	2. 925E+01	1. 031E+05
a2-1	区画A追加	伝熱	5. 176E+03	4. 829E+03	4. 058E+03	4. 063E+03	4. 077E+03	8. 086E+04	2. 847E+01	1. 031E+05
a2-2		潜熱	5. 369E+03	4. 780E+03	4. 013E+03	4. 019E+03	4. 032E+03	8. 085E+04	2. 898E+01	1. 031E+05
a2-3		伝熱+潜熱	5. 256E+03	4. 858E+03	4. 024E+03	4. 030E+03	4. 043E+03	8. 084E+04	2. 959E+01	1. 031E+05
a3-1	区画B追加	伝熱	5. 176E+03	4. 825E+03	4. 221E+03	4. 226E+03	4. 224E+03	7. 933E+04	2. 873E+02	1. 023E+05
a3-2		潜熱	5. 371E+03	4. 775E+03	4. 089E+03	4. 095E+03	4. 098E+03	7. 957E+04	2. 865E+02	1. 023E+05
a3-3		伝熱+潜熱	5. 256E+03	4. 857E+03	4. 127E+03	4. 132E+03	4. 131E+03	7. 948E+04	2. 935E+02	1. 023E+05
a4-1	区画C追加	伝熱	5. 175E+03	4. 829E+03	4. 098E+03	4. 101E+03	4. 115E+03	8. 076E+04	2. 836E+01	1. 031E+05
a4-2		潜熱	5. 370E+03	4. 776E+03	4. 597E+03	4. 606E+03	4. 605E+03	7. 773E+04	4. 986E+02	1. 022E+05
a4-3		伝熱+潜熱	5. 259E+03	4. 854E+03	4. 546E+03	4. 552E+03	4. 555E+03	7. 813E+04	4. 425E+02	1. 023E+05
a5-1	区画D追加	伝熱	5. 176E+03	4. 829E+03	4. 116E+03	4. 121E+03	4. 142E+03	8. 072E+04	2. 878E+01	1. 031E+05
a5-2		潜熱	5. 371E+03	4. 756E+03	4. 610E+03	4. 617E+03	4. 623E+03	7. 770E+04	5. 299E+02	1. 022E+05
a5-3		伝熱+潜熱	5. 259E+03	4. 823E+03	4. 640E+03	4. 641E+03	4. 652E+03	7. 775E+04	5. 477E+02	1. 023E+05
a6-1	地下1F追加	伝熱	5. 176E+03	4. 829E+03	4. 099E+03	4. 105E+03	4. 120E+03	8. 075E+04	2. 834E+01	1. 031E+05
a6-2		潜熱	5. 376E+03	4. 771E+03	4. 508E+03	4. 516E+03	4. 522E+03	7. 814E+04	4. 579E+02	1. 023E+05
a6-3		伝熱+潜熱	5. 258E+03	4. 847E+03	4. 614E+03	4. 620E+03	4. 624E+03	7. 779E+04	4. 956E+02	1. 022E+05
a7-1	地上1F追加	伝熱	5. 183E+03	4. 818E+03	4. 075E+03	4. 084E+03	4. 098E+03	7. 987E+04	7. 483E+02	1. 029E+05
a7-2		潜熱	5. 374E+03	4. 764E+03	4. 593E+03	4. 602E+03	4. 605E+03	7. 776E+04	6. 667E+02	1. 024E+05
a7-3		伝熱+潜熱	5. 256E+03	4. 844E+03	4. 498E+03	4. 505E+03	4. 504E+03	7. 787E+04	2. 922E+03	1. 044E+05
	増加率		1. 528E-03	1. 559E-02	1. 090E-01	1. 099E-01	1. 057E-01	-3. 701E-02	1. 013E+02	1. 263E-02

表 4.2 MELCOR1.8.5 を用いた解析での各区画の 10 日後のプール水量に対する補正効果 [単位 kg]

ケースNo.	適用区画	適用モデル	排ガス処理セル	区画A	区画B	区画C	区画D	地下1F	地上1F	総和
a0	補正無し		4.198E+03	3.981E+03	3.736E+03	3.736E+03	3.746E+03	8.364E+04	7.877E+02	1.038E+05
a1-1	排ガス処理セル	伝熱	4.106E+03	3.941E+03	3.746E+03	3.746E+03	3.756E+03	8.380E+04	7.976E+02	1.039E+05
a1-2		潜熱	4.206E+03	3.893E+03	3.733E+03	3.743E+03	3.743E+03	8.376E+04	7.942E+02	1.039E+05
a1-3		伝熱+潜熱	4.114E+03	3.909E+03	3.743E+03	3.743E+03	3.753E+03	8.381E+04	8.031E+02	1.039E+05
a2-1	区画A追加	伝熱	4.060E+03	4.096E+03	3.724E+03	3.723E+03	3.733E+03	8.366E+04	8.416E+02	1.038E+05
a2-2		潜熱	4.210E+03	3.946E+03	3.720E+03	3.720E+03	3.730E+03	8.364E+04	8.412E+02	1.038E+05
a2-3		伝熱+潜熱	4.057E+03	4.107E+03	3.708E+03	3.708E+03	3.718E+03	8.368E+04	8.514E+02	1.038E+05
a3-1	区画B追加	伝熱	4.060E+03	4.093E+03	3.967E+03	3.962E+03	3.971E+03	8.192E+04	1.246E+03	1.032E+05
a3-2		潜熱	4.213E+03	3.942E+03	3.858E+03	3.854E+03	3.863E+03	8.227E+04	1.251E+03	1.032E+05
a3-3		伝熱+潜熱	4.057E+03	4.107E+03	3.878E+03	3.874E+03	3.882E+03	8.217E+04	1.267E+03	1.032E+05
a4-1	区画C追加	伝熱	4.060E+03	4.096E+03	3.830E+03	3.830E+03	3.836E+03	8.344E+04	7.797E+02	1.039E+05
a4-2		潜熱	4.211E+03	3.943E+03	4.379E+03	4.379E+03	4.388E+03	8.033E+04	1.205E+03	1.028E+05
a4-3		伝熱+潜熱	4.060E+03	4.111E+03	4.390E+03	4.391E+03	4.394E+03	8.048E+04	1.165E+03	1.030E+05
a5-1	区画D追加	伝熱	4.061E+03	4.096E+03	3.853E+03	3.853E+03	3.859E+03	8.340E+04	7.770E+02	1.039E+05
a5-2		潜熱	4.212E+03	3.933E+03	4.418E+03	4.418E+03	4.427E+03	8.016E+04	1.173E+03	1.027E+05
a5-3		伝熱+潜熱	4.061E+03	4.087E+03	4.499E+03	4.499E+03	4.502E+03	7.998E+04	1.175E+03	1.028E+05
a6-1	地下1F追加	伝熱	4.060E+03	4.096E+03	3.832E+03	3.832E+03	3.838E+03	8.343E+04	7.812E+02	1.039E+05
a6-2		潜熱	4.217E+03	3.940E+03	4.282E+03	4.282E+03	4.291E+03	8.074E+04	1.178E+03	1.029E+05
a6-3		伝熱+潜熱	4.059E+03	4.102E+03	4.458E+03	4.458E+03	4.462E+03	8.012E+04	1.165E+03	1.028E+05
a7-1	地上1F追加	伝熱	4.060E+03	4.096E+03	3.830E+03	3.830E+03	3.835E+03	8.343E+04	2.966E+03	1.060E+05
a7-2		潜熱	4.216E+03	3.936E+03	4.379E+03	4.379E+03	4.388E+03	8.029E+04	1.345E+03	1.029E+05
a7-3		伝熱+潜熱	4.058E+03	4.105E+03	4.352E+03	4.352E+03	4.356E+03	8.009E+04	4.689E+03	1.060E+05
	増加率		-3.337E-02	3.117E-02	1.649E-01	1.649E-01	1.628E-01	-4.239E-02	4.952E+00	2.101E-02

表 4.3 MELCOR2.2 を用いた解析での各区画の乾固時点のプール水量に対する補正効果 [単位 kg]

ケースNo.	適用区画	適用モデル	排ガス処理セル	区画A	区画B	区画C	区画D	地下1F	地上1F	総和
b0	補正無し		5.272E+03	4.812E+03	4.071E+03	4.077E+03	4.091E+03	8.150E+04	1.867E+02	1.040E+05
b1-1	排ガス処理セル	伝熱	5.213E+03	4.849E+03	4.077E+03	4.082E+03	4.097E+03	8.150E+04	1.867E+02	1.040E+05
b1-2		潜熱	5.424E+03	4.720E+03	4.053E+03	4.072E+03	8.150E+04	1.868E+02	1.040E+05	
b1-3		伝熱+潜熱	5.310E+03	4.791E+03	4.066E+03	4.071E+03	8.150E+04	1.867E+02	1.040E+05	
b2-1	区画A追加	伝熱	5.234E+03	4.880E+03	4.095E+03	4.100E+03	4.115E+03	8.148E+04	1.567E+02	1.041E+05
b2-2		潜熱	5.452E+03	4.858E+03	4.040E+03	4.045E+03	8.145E+04	1.568E+02	1.041E+05	
b2-3		伝熱+潜熱	5.309E+03	4.907E+03	4.034E+03	4.039E+03	8.148E+04	1.852E+02	1.040E+05	
b3-1	区画B追加	伝熱	5.213E+03	4.863E+03	4.085E+03	4.090E+03	4.108E+03	8.147E+04	1.849E+02	1.040E+05
b3-2		潜熱	5.421E+03	4.794E+03	4.237E+03	4.242E+03	8.012E+04	6.015E+02	1.037E+05	
b3-3		伝熱+潜熱	5.309E+03	4.894E+03	4.094E+03	4.099E+03	8.060E+04	5.586E+02	1.037E+05	
b4-1	区画C追加	伝熱	5.213E+03	4.863E+03	4.402E+03	4.409E+03	4.427E+03	8.052E+04	1.837E+02	1.040E+05
b4-2		潜熱	5.422E+03	4.789E+03	4.670E+03	4.676E+03	7.843E+04	1.035E+03	1.037E+05	
b4-3		伝熱+潜熱	5.309E+03	4.805E+03	5.175E+03	5.184E+03	7.660E+04	1.654E+03	1.039E+05	
b5-1	区画D追加	伝熱	解析不能	解析不能	解析不能	解析不能	解析不能	解析不能	解析不能	解析不能
b5-2		潜熱	5.426E+03	4.759E+03	4.887E+03	4.894E+03	7.708E+04	1.726E+03	1.037E+05	
b5-3		伝熱+潜熱	5.408E+03	4.548E+03	5.182E+03	5.201E+03	7.587E+04	2.189E+03	1.036E+05	
b6-1	地下1F追加	伝熱	5.213E+03	4.863E+03	4.402E+03	4.409E+03	4.427E+03	8.052E+04	1.837E+02	1.040E+05
b6-2		潜熱	5.422E+03	4.806E+03	4.670E+03	4.676E+03	7.840E+04	1.092E+03	1.037E+05	
b6-3		伝熱+潜熱	5.308E+03	4.812E+03	5.337E+03	5.345E+03	7.575E+04	1.839E+03	1.037E+05	
b7-1	地上1F追加	伝熱	5.213E+03	4.863E+03	4.402E+03	4.409E+03	4.427E+03	8.052E+04	1.837E+02	1.040E+05
b7-2		潜熱	5.422E+03	4.806E+03	4.670E+03	4.676E+03	7.840E+04	1.092E+03	1.037E+05	
b7-3		伝熱+潜熱	5.309E+03	4.778E+03	5.152E+03	5.161E+03	7.683E+04	1.394E+03	1.038E+05	
	増加率		7.066E-03	-7.211E-03	2.655E-01	2.660E-01	2.631E-01	-5.731E-02	6.464E+00	-2.112E-03

表 4.4 MELCOR2.2 を用いた解析での各区画の 10 日後のプール水量に対する補正効果[単位 kg]

ケースNo.	適用区画	適用モデル	排ガス処理セル	区画A	区画B	区画C	区画D	地下1F	地上1F	総和
b0	補正無し		4. 232E+03	4. 007E+03	3. 739E+03	3. 739E+03	3. 749E+03	8. 433E+04	1. 701E+03	1. 055E+05
b1-1	排ガス処理セル	伝熱	4. 174E+03	3. 979E+03	3. 748E+03	3. 746E+03	3. 756E+03	8. 440E+04	1. 706E+03	1. 055E+05
b1-2		潜熱	4. 354E+03	3. 930E+03	3. 723E+03	3. 724E+03	3. 734E+03	8. 433E+04	1. 701E+03	1. 055E+05
b1-3		伝熱+潜熱	4. 252E+03	3. 930E+03	3. 737E+03	3. 737E+03	3. 747E+03	8. 440E+04	1. 706E+03	1. 055E+05
b2-1	区画A追加	伝熱	4. 188E+03	4. 081E+03	3. 738E+03	3. 738E+03	3. 748E+03	8. 440E+04	1. 664E+03	1. 056E+05
b2-2		潜熱	4. 375E+03	4. 046E+03	3. 709E+03	3. 709E+03	3. 719E+03	8. 432E+04	1. 659E+03	1. 055E+05
b2-3		伝熱+潜熱	4. 252E+03	4. 111E+03	3. 687E+03	3. 687E+03	3. 697E+03	8. 437E+04	1. 705E+03	1. 055E+05
b3-1	区画B追加	伝熱	4. 174E+03	4. 070E+03	3. 757E+03	3. 753E+03	3. 763E+03	8. 431E+04	1. 703E+03	1. 055E+05
b3-2		潜熱	4. 351E+03	3. 992E+03	3. 921E+03	3. 922E+03	3. 931E+03	8. 296E+04	2. 089E+03	1. 052E+05
b3-3		伝熱+潜熱	4. 252E+03	4. 099E+03	3. 784E+03	3. 779E+03	3. 788E+03	8. 344E+04	2. 065E+03	1. 052E+05
b4-1	区画C追加	伝熱	4. 174E+03	4. 070E+03	4. 123E+03	4. 123E+03	4. 131E+03	8. 324E+04	1. 699E+03	1. 056E+05
b4-2		潜熱	4. 352E+03	3. 988E+03	4. 373E+03	4. 373E+03	4. 382E+03	8. 120E+04	2. 458E+03	1. 051E+05
b4-3		伝熱+潜熱	4. 253E+03	4. 020E+03	4. 930E+03	4. 929E+03	4. 934E+03	7. 922E+04	3. 035E+03	1. 053E+05
b5-1	区画D追加	伝熱	解析不能	解析不能	解析不能	解析不能	解析不能	解析不能	解析不能	解析不能
b5-2		潜熱	4. 362E+03	3. 970E+03	4. 587E+03	4. 587E+03	4. 595E+03	7. 982E+04	3. 105E+03	1. 050E+05
b5-3		伝熱+潜熱	4. 371E+03	3. 813E+03	4. 947E+03	4. 947E+03	4. 961E+03	7. 839E+04	3. 556E+03	1. 050E+05
b6-1	地下1F追加	伝熱	4. 174E+03	4. 070E+03	4. 123E+03	4. 123E+03	4. 131E+03	8. 324E+04	1. 699E+03	1. 056E+05
b6-2		潜熱	4. 352E+03	4. 004E+03	4. 371E+03	4. 371E+03	4. 380E+03	8. 116E+04	2. 517E+03	1. 052E+05
b6-3		伝熱+潜熱	4. 252E+03	4. 026E+03	5. 087E+03	5. 086E+03	5. 101E+03	7. 842E+04	3. 202E+03	1. 052E+05
b7-1	地上1F追加	伝熱	4. 174E+03	4. 070E+03	4. 123E+03	4. 123E+03	4. 131E+03	8. 324E+04	1. 699E+03	1. 056E+05
b7-2		潜熱	4. 352E+03	4. 004E+03	4. 371E+03	4. 371E+03	4. 380E+03	8. 116E+04	2. 517E+03	1. 052E+05
b7-3		伝熱+潜熱	4. 252E+03	3. 992E+03	4. 906E+03	4. 906E+03	4. 910E+03	7. 948E+04	2. 786E+03	1. 052E+05
	増加率		4. 939E-03	-3. 836E-03	3. 123E-01	3. 121E-01	3. 097E-01	-5. 746E-02	6. 383E-01	-2. 452E-03

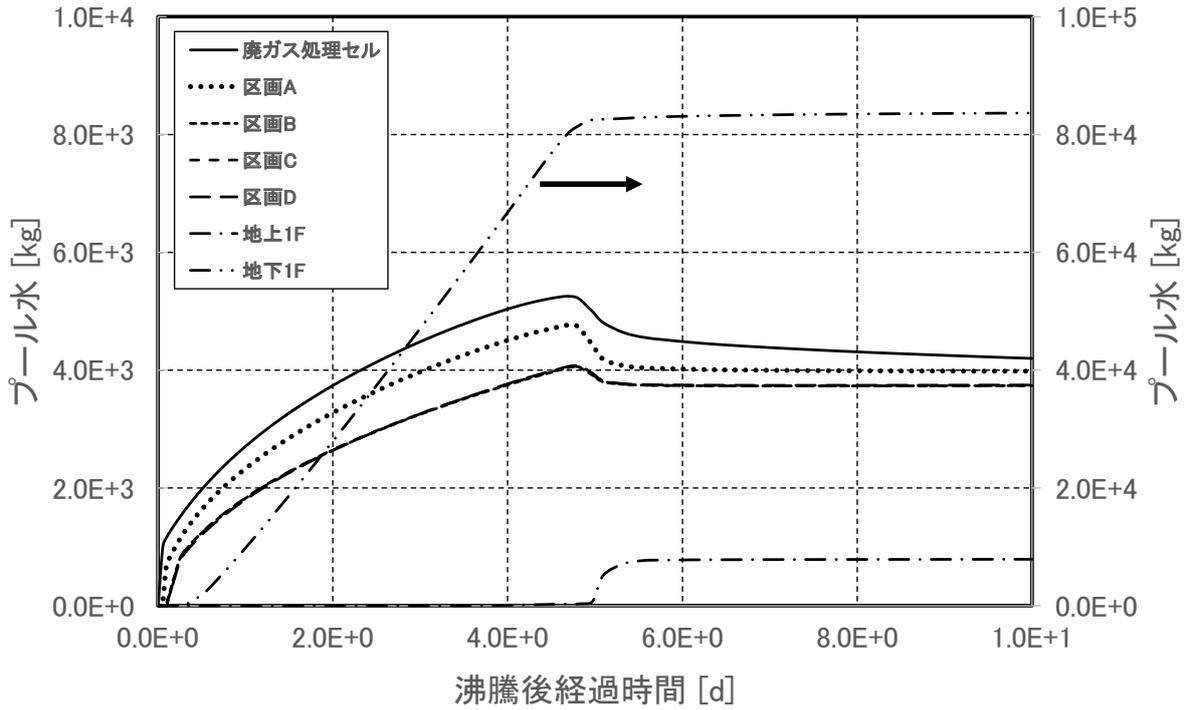


図 4.1 MELCOR1.8.5 での補正無しケース(a0)の各区画のプール水量の変化

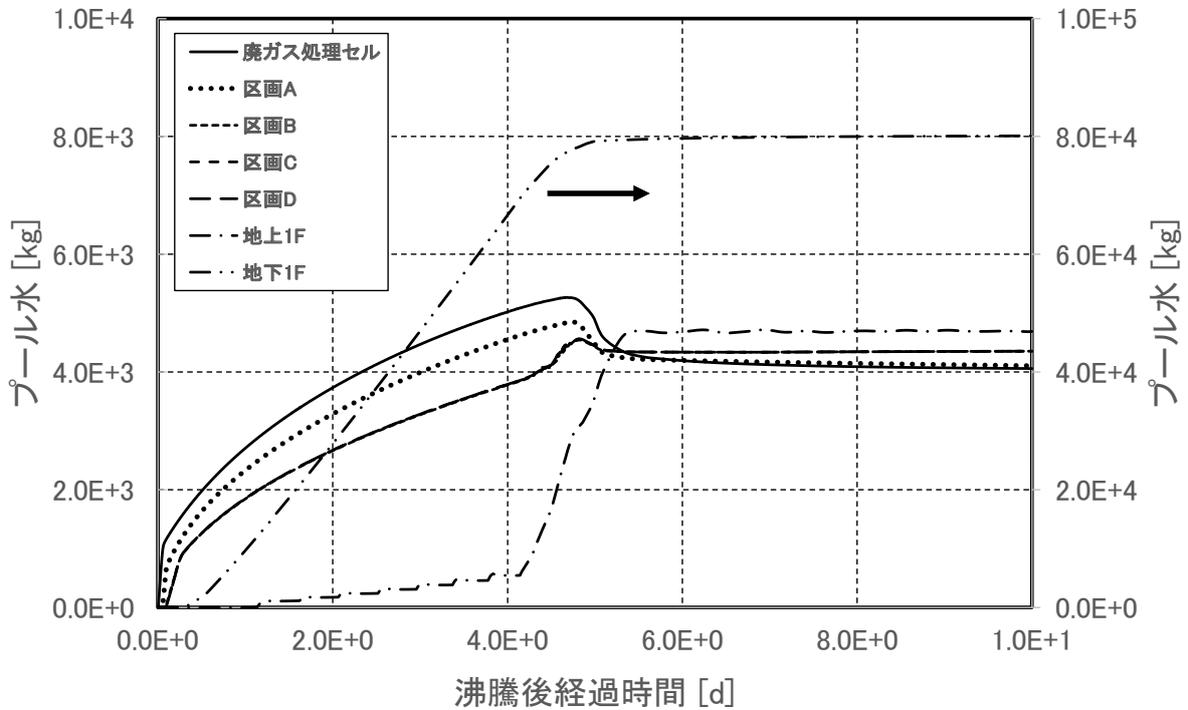


図 4.2 MELCOR1.8.5 での両補正モデルを用いたケース(a7-3)の各区画のプール水量の変化

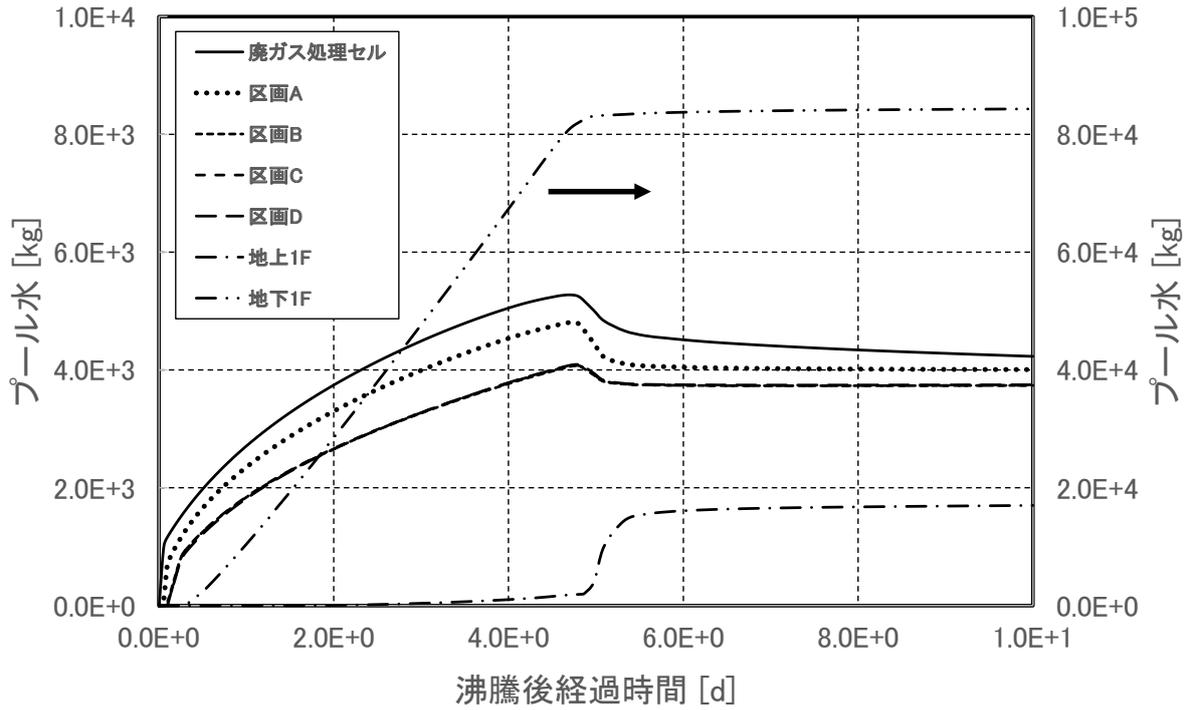


図 4.3 MELCOR2.2 での補正無しケース(b0)の各区画のプール水量の変化

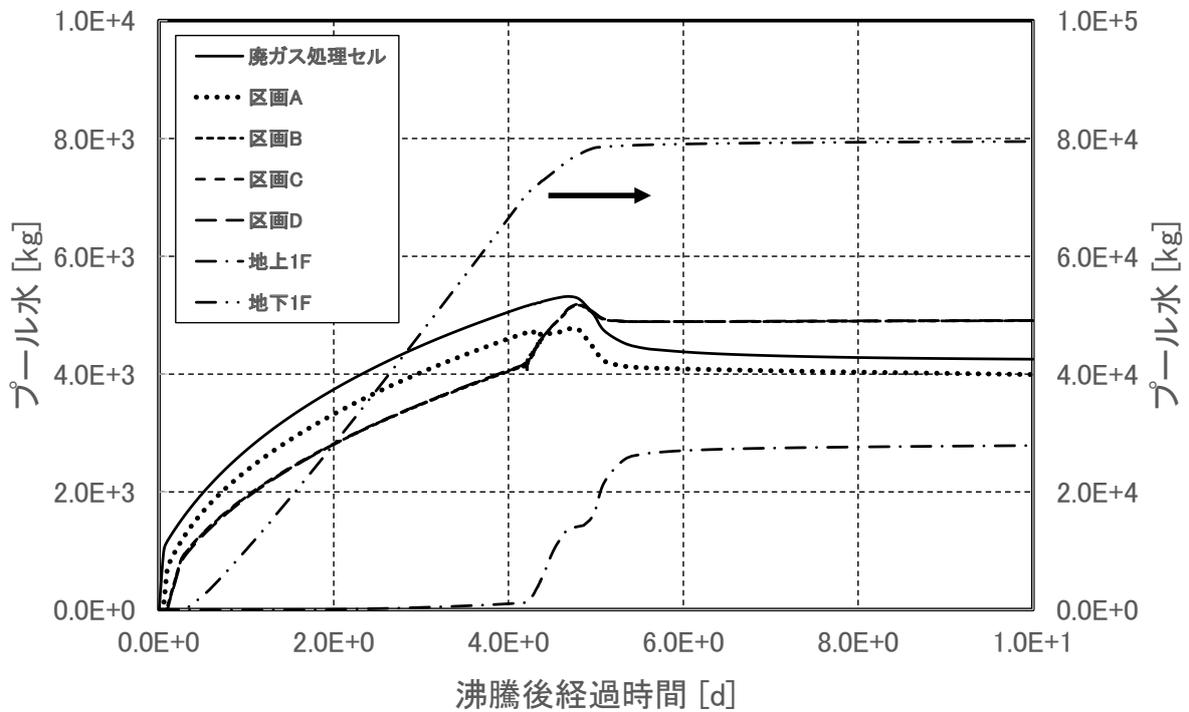


図 4.4 MELCOR2.2 での両補正モデルを用いたケース(b7-3)の各区画のプール水量の変化

5. まとめ

再処理施設の重大事故である高レベル廃液の蒸発乾固事故の影響評価において重要な核種である Ru は揮発性化学種の RuO_4 に変化して貯槽から流出し、施設内を移行する過程で凝縮水へ移行することが想定される。このため当該事故で施設外へ移行する Ru を含む放射性物質量を精度良く評価するための解析手法の整備を進めている。提案する手法では SHAWED、MELCOR 及び SCHERN の 3 コードを連携して用いる。

SHAWED 及び SCHERN は、高レベル廃液乾固事故を対象として新たに開発、整備した計算コードであるのに対して、MELCOR は原子炉施設の炉心損傷事故を対象としたコードであり、水及び非凝縮気体の熱流動を 1 点近似の均質体系でモデル化している。このコードを硝酸-水混合蒸気の熱流動解析に使用するにあたり、次の 2 つ課題があることを指摘した。

- ・ 硝酸蒸気を等モルの水蒸気で置き換える仮定を用いている。
- ・ MELCOR の均質モデルでの気液の飽和状態と、硝酸-水混合蒸気雰囲気での気液各相の温度差がある実際の状態との差異があり、凝縮水量に影響する可能性がある。

本報ではこれら 2 つの課題が凝縮水量の発生に及ぼす影響を定量的に分析した。分析に際して、これらの課題が凝縮水発生に及ぼす効果を補正するために MELCOR の制御関数機能を活用した伝熱補正モデル及び潜熱補正モデルを提案し、これを用いて MELCOR1.8.5 及び 2.2 の 2 つのバージョンで解析し結果を分析した。その結果、以下の結論を得た。

- ・ 解析対象のすべての区画のプール水量の総和は、補正モデルの適用の有無に拘わらず変化は両バージョンの解析結果においてわずかである。施設全体でのプール水の総和にも両バージョンでの解析結果に有意な差異はない。
- ・ 施設内のプール水量は、貯槽からの蒸気量が減少する沸騰晩期において補正モデル適用により区画間でのリロケーションが起こる。最大のプール水が停留する区画から上流及び下流に向けてミスト及び蒸気が流出することによる。
- ・ 揮発性 Ru の施設外への流出を抑制する観点では、施設内に停留するプール水が補正の有無に拘わらず差異がないことから、硝酸蒸気をモル数の等価な水蒸気で置き換える解析モデルでも問題ない。

参考文献

- 1) 「再処理施設における放射性物質移行挙動に係る研究」運営管理グループ, "再処理施設における放射性物質移行挙動に係る研究報告書", 2014.
- 2) 吉田 一雄, 玉置 等史, 桧山 美奈, "再処理施設の高レベル廃液蒸発乾固事故のソースターム解析手法の整備," JAEA-Research 2023-001, 2023, 26p.
- 3) 吉田 一雄, 玉置 等史, 桧山 美奈, "再処理施設の高レベル廃液蒸発乾固事故解析のための廃液沸騰模擬計算プログラム : SHAWED の整備," JAEA-Research 2022-011, 2022, 37p.
- 4) R. O. Gauntt, R.K. et al., "MELCOR Computer Code Manuals, Vol. 2: Reference Manuals, Version 1.8.5 May 2000," NUREG/CR-6119, Vol. 2, Rev. 2, SAND2000-2417/2, 2000.
- 5) 吉田 一雄, 玉置 等史, 桧山 美奈, "SCHERN-V2: 再処理施設の高レベル廃液蒸発乾固事故での化学的挙動解析プログラム解説書," JAEA-Data/Code 2021-008, 2021, 35p.
- 6) 日本原子力研究開発機構, "平成 28 年度原子力施設等防災対策等委託費(再処理施設内での放射性物質の移行挙動に係る試験等) 事業 事業報告書," 平成 29 年 3 月, 2017, <https://www.nsr.go.jp/data/000210760.pdf>, (閲覧 2024/12/14).
- 7) 吉田 一雄, 石川 淳, "MELCOR コードを用いた再処理施設の廃液沸騰事象解析," JAEA-Research 2012-026, 2012, 25p.
- 8) 吉田 一雄, 阿部 仁, "多成分硝酸塩水溶液の気液平衡状態推定法の提案," JAEA-Research 2014-001, 2014, 22p.
- 9) 日本原燃株式会社, "再処理事業指定申請書及び同添付書類," 平成元年 3 月申請 (平成 8 年 4 月, 同 13 年 7 月, 同 16 年 10 月変更許可申請) .

