JAEA-Research 2017-015

DOI:10.11484/jaea-research-2017-015

再処理施設の高レベル廃液の蒸発乾固事故での 気体状ルテニウムの凝縮水への 移行速度に係る相関式の導出

Development of Correlation of Gaseous Ruthenium
Transfer Rate to Condensed Water
in Accident of Evaporation to Dryness by Boiling
of Reprocessed High Level Liquid Waste in Fuel Reprocessing Facilities

吉田 一雄 玉置 等史 吉田 尚生 天野 祐希
阿部 仁

Kazuo YOSHIDA, Hitoshi TAMAKI, Naoki YOSHIDA, Yuki AMANO and Hitoshi ABE

安全研究・防災支援部門 安全研究センター

Nuclear Safety Research Center Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness

January 2018

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてに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ホームページ(http://www.jaea.go.jp) より発信されています。

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2018

再処理施設の高レベル廃液の蒸発乾固事故での 気体状ルテニウムの凝縮水への移行速度に係る相関式の導出

日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門 安全研究センター

吉田 一雄、玉置 等史、吉田 尚生、天野 祐希、阿部 仁

(2017年10月24日受理)

再処理施設では、重大な事故の一つとして全交流電源の喪失等により長時間にわたり冷却機能が失われると、貯槽中の高レベル放射性廃液が沸騰し、乾固に至る事故(蒸発乾固事故)が想定される。廃液の沸騰により硝酸及び水が蒸発することで濃縮が進み、廃液温度が120 ℃以上になる沸騰晩期から乾固段階において気体状ルテニウム(Ru)が発生し、それが硝酸・水混合蒸気(以下、混合蒸気という)の凝縮に伴い凝縮液中に移行することが、実廃液及び模擬廃液を用いた実験で確認されている。貯槽から流出した混合蒸気は建屋内の構造物壁面で除熱され凝縮する。この際に気体状Ruは凝縮水に移行することが想定され、建屋内でのRuの移行量を定量化する上で、混合蒸気の凝縮過程でのRuの移行の定量的な模擬が重要である。このような観点から、気体状のRuを含む混合蒸気の凝縮に伴い気体状Ruの凝縮水への移行量を測定する実験が実施されている。

本報では、この実験で得られたデータを基に、実測不能な実験装置内の蒸気流速等を熱流動解析結果から推定し、気体状 Ru の凝縮水への移行速度に係る相関式を導出した結果について述べる。さらに、同相関式を実機規模の事故解析結果に適用し、Ru の凝縮水への移行量の評価を試みた。

原子力科学研究所: 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4

Development of Correlation of Gaseous Ruthenium Transfer Rate to Condensed Water in Accident of Evaporation to Dryness by Boiling of Reprocessed High Level Liquid Waste in Fuel Reprocessing Facilities

Kazuo YOSHIDA, Hitoshi TAMAKI, Naoki YOSHIDA, Yuki AMANO and Hitoshi ABE

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

(Received October 24, 2017)

An accident of evaporation to dryness by boiling of high level liquid waste is postulated as one of the severe accidents caused by the loss of cooling function at a fuel reprocessing facility. It was observed at the experiments with both actual and synthetic liquid waste that a large amount of ruthenium (Ru) is volatilized and transfer to the vapor phase in the tank, at the later phase, in which liquid waste temperature rises up to 120 °C. The nitric acid and water mixed vapor released from the tank is condensed at the walls and ceilings of compartments in the building. Gaseous Ru is expected to transfer into the condensed water. Quantitative estimation of the amount of Ru transferred condensed water is key issues to evaluate the reduction the amount of Ru through leak path in the facility building. A systematic series of experiments has been carried out to measure the amount of Ru to be captured in the condensed water through the glass tubes.

This report presents that a correlation has been developed for Ru transfer rate to condensed water with vapor condensing rate based on the experimental results and additional thermal-hydraulic simulation of the experiments. Applicability of the correlation has been also demonstrated with the accident simulation of typical facilities in full-scale.

Keywords: Spent Fuel Reprocessing Plant, Radioactive Liquid Waste, Accident of Evaporation to Dryness by Boiling, Thermal-hydraulics, Gaseous Ru, Condensed Water, MELCOR

JAEA-Research 2017-015

目次

1. はじめに	1
2. 実験の概要	
2.1 実験装置	
2.2 実験条件	
2.3 実験結果	3
3. 実験の熱流動解析	
3.1 解析コードの概要	
3.2 実験体系のモデル化 ····································	
3.3 解析結果	6
4. 熱流動解析結果に基づく実験データの分析	9
4.1 実験データの補正	9
4.2 データ分析の結果	10
5. 実機規模施設の熱流動条件での適用性の検討	12
5.1 事故時の施設内の熱流動解析	12
5.2 凝縮速度に対する Ru 移行速度の相関式と Ru 移行量の試算	16
6. まとめ	·· 17
参考文献	17

CONTENTS

1. Introduction ·····	1
2. Overview of experiment ·····	2
2.1 Apparatus	
2.2 Conditions ·····	2
2.3 Results ·····	3
3. Thermal-hydraulic simulation of experiment ·····	
3.1 Overview of computer code ·····	
3.2 Modeling of experimental apparatus ·····	
3.3 Simulation results ······	6
4. Data analysis based on simulation results ·····	
4.1 Correction of experimental results ·····	9
4.2 Results of data analysis · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	10
5. Feasibility study at accident conditions of typical facilities ······	12
5.1 Simulation results of thermal-hydraulics in facilities ·····	12
5.2 Correlation of Ru transfer rate to condensed water with vapor condensing rate	
and estimation of amount of Ru in condensed water ······	16
6. Summary ·····	17
References ·····	17

1. はじめに

再処理施設で想定される事故のリスクを評価する上では、施設外へ移行する放射性物質の量を精度良く評価することが重要である。このためには、気相中に移行した放射性物質の挙動を評価することが不可欠である。例えば、新規制基準において重大事故の一つとされる高レベル廃液貯槽の冷却機能喪失に起因する「蒸発乾固事故」では、放射性物質(硝酸塩として廃液中に溶解している核分裂生成物(Fission products: FP))を含む大量の硝酸及び水の蒸気(以下、混合蒸気という)が発生し、通常の廃ガス処理系を経由しないでセル等に流出し、セルあるいは建屋排気系を経由して施設外へ移行するシナリオが想定される1)。

高レベル廃液の沸騰段階での放射性物質の気相部への移行のメカニズムとしては、液面での気泡の破裂によって生成される飛沫のうち比較的小さい粒径の飛沫と、揮発性物質の温度上昇に伴う気化による移行が想定される 2 。エアロゾル化による移行は、沸騰開始から廃液温度が約 120 とまでの沸騰初期段階で支配的である。沸騰が進み、廃液温度が 120 C以上に上昇する沸騰晩期では、廃液中のルテニウム (Ru) が揮発性化学種である RuO4に変化し 3 、気相への移行が顕著となる。公衆の放射線被ばくを含む環境への影響は後者が桁違いに大きい 10,2 。

このような重大事故に対処するために、新規制基準では、事故の拡大防止、影響の緩和のための対応(重大事故等対処策)を設けるよう要求しており、対処策の有効性は、施設外へ放出される放射性物質の総量が基準を十分に下回ることで確認される。上述のような事故の特徴を踏まえ、蒸発乾固事故の重大事故等対処策として、廃液貯槽に注水し、廃液温度の上昇を抑えることで Ruの気化を抑制し、例えば1週間後の外部の支援により事故の収束を図る方策が検討されている中。仮にこの対策が失敗すれば、揮発性の RuO4 が大量に発生するが、気相中の硝酸及び水蒸気が凝縮する場合には、Ru が液相に移行することが実験で確認されている中。実機の事故条件下でも、建屋内を移行する蒸気は、大量に凝縮することが解析的に示されており 50、RuO4の凝縮水への移行量を定量的に評価できれば、事故時の放射性物質の施設外への移行量評価の精度を向上できる。このような観点から、気体状の Ru を含む硝酸及び水の混合蒸気(以下、混合蒸気という)の凝縮に伴う Ru の凝縮水への移行量を測定する実験が実施されている 60。

本報では、この実験で得られたデータを基に、気体状 Ru の建屋内での移行挙動のモデル化の試行について述べる。第2章では、Ru の凝縮水への移行量を測定した実験及びその結果の概要を示す。Ru の凝縮水への移行のモデル化では、移行挙動に影響すると考えられる試験装置内の混合蒸気の温度、流量、気液各相の硝酸モル分率等のパラメータに関する情報との関連を基に実験で得られたデータを整理する必要がある。これらのパラメータに係る情報は実測が困難であるため、計算コードによる実験装置内の熱流動解析により推定した。第3章では、このための実験装置内の熱流動を模擬するための解析モデルと解析結果を示す。凝縮液中のRu 量との相関関係の定量化に際しては、実験終了後に凝縮した液量及び凝縮液中に移行したRu 量を推定し、実測値を補正する必要がある。第4章ではこのための解析を行った結果を示す。さらに、第5章では同相関式を実機規模の事故解析結果に適用し、Ru の凝縮水への移行量の評価を試みた。

2. 実験の概要

参考文献 6)によれば、実験では 150℃に加熱した一定組成の混合蒸気に RuO4を一定の比率で混合した気体を、同温の乾燥空気を搬送気体として、ガラス製の複数の反応管で構成される全長 2 m の凝縮部を通過させた。凝縮部の外側は 60 ℃に保持され、各反応管内部で蒸気が凝縮する。 実験終了後に各反応管に停留する凝縮水を採取し、液体積、硝酸濃度、Ru 濃度を測定している。 反応管で凝縮せずに流出した蒸気は、反応管の下流に設置されたガラスフィルタ、コンデンサ及 びガス吸収瓶で回収され、実験終了後に硝酸濃度、Ru 濃度を測定したとしている。

2.1 実験装置

図 2.1 に Ru を含む混合蒸気を通過させて凝縮させる配管部の概念図を示す。配管部は、内径 100 mm、長さ 200 mm のガラス製の 9 個の反応管及び、同径の長さ 100 mm の釣鐘状のガラス製の出入り口部で構成される。各反応管の出入り口の内径は 85 mm と狭まっており、横置き状態で各反応管に凝縮水が停留する構造になっている。

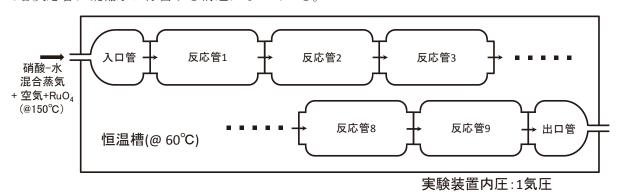


図 2.1 蒸気凝縮を発生させるガラス製配管部の概要

2.2 実験条件

各実験ケースでは、表 2.1 に示すように反応管に流入させる Ru、硝酸及び水のモル比を変化させている。具体的には、実験ごとに異なる濃度の硝酸水溶液を 250℃以上に加熱した蒸発缶に滴下し急速に加熱することで気化させ、硝酸及び水の混合蒸気を掃気用の空気とともに反応管に供給する。掃気用空気の注入量は各実験で共通で 0.3 NL/min である。

実験番号	CLPF1	CLPF2	CLPF3	CLPF4	CLPF5
Ru [mol/min]	1.54×10 ⁻⁶	2.21×10 ⁻⁶	1.42×10 ⁻⁶	1.58×10 ⁻⁶	2.24×10 ⁻⁶
HNO ₃ [mol/min]	1.60×10 ⁻⁴	1.62×10 ⁻⁴	1.61×10 ⁻⁴	7.19×10 ⁻⁴	4.55×10 ⁻²
H ₂ O [mol/min]	7.94×10 ⁻⁴	3.59×10 ⁻⁴	1.60×10 ⁻²	3.58×10 ⁻³	2.88×10 ⁻²
実験番号	CLPF6	CLPF7	CLPF8	CLPF9	_
Ru [mol/min]	1.65×10 ⁻⁶	1.88×10 ⁻⁶	5.45×10 ⁻⁶	1.88×10 ⁻⁶	_
HNO ₃ [mol/min]	3.20×10 ⁻³	3.19×10 ⁻⁴	3.19×10 ⁻⁴	6.39×10 ⁻²	_
H ₂ O [mol/min]	1.59×10 ⁻²	1.19×10 ⁻³	1.59×10 ⁻³	3.18×10 ⁻¹	_

表 2.1 各実験での Ru、硝酸及び水の供給速度

2.3 実験結果

一例として**図 2.2** 及び**図 2.3** に、それぞれ CLPF5 の反応管内凝縮液量、酸濃度分布及び反応管内 Ru 分布を示す。

参考文献 6)によれば、各反応管内で回収した凝縮液量は、下流側に向けて減少する傾向を示した(図 2.2)。凝縮液の酸濃度は下流側に向けて徐々に増加する傾向を示し、反応管内での凝縮液酸濃度は供給した 2.23 mol/L よりも高かった一方で、下流のコンデンサ内の凝縮液の酸濃度は 0.86 mol/L であったとしている 6 。

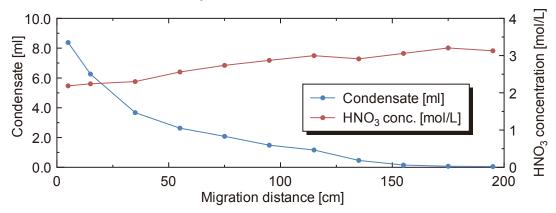
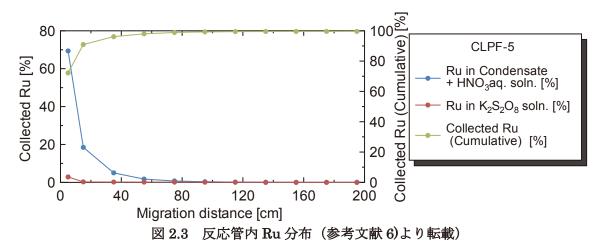


図 2.2 反応管内凝縮液量及び酸濃度分布 (参考文献 6)より転載)

反応管内の Ru 分布を図 2.3 に示す。参考文献 6)によれば、Ru のほぼ全量が反応管内で捕集されたとしている。反応管内の Ru は、凝縮液及び硝酸水溶液による洗浄で水溶性の画分を回収し、続いて Ru 溶出液(ペルオキソ二硫酸カリウムを含む水酸化カリウム水溶液)により反応管内表面に沈着した Ru (RuO_2 を想定)を回収した。そのうちの 95.9%は水溶性の画分として得られたとしている。一方、Ru 溶出液により回収された沈着 Ru 量は全体の 3.7%であった。反応管の下流に設置したガラスフィルタ中でも 0.4%の Ru が捕集されたが、そのうち 0.3%は Ru 溶出液で回収された。これはガラスフィルタ中では RuO_2 のエアロゾルが捕集されたことを示唆しており、本試験において反応管内で捕集されずに通過した Ru の大半はエアロゾル状 RuO_2 であったものと考えられるとしている。反応管内を通過した Ru はガラスフィルタで全量が回収されており、コンデンサ内凝縮液及びガス吸収瓶中で回収された Ru は検出限界以下であったとしている。



3. 実験の熱流動解析

Ru の凝縮水への移行のモデル化では、移行挙動に影響すると考えられる試験装置内の混合蒸気の温度、流量、気液各相の硝酸モル分率等のパラメータに関する情報と実験で得られたデータとの関連で整理する必要がある。これらのパラメータに係る情報は実測が困難であるため、計算コードによる実験装置内の熱流動解析により推定した。本章では、このための実験装置内の熱流動を模擬するための解析モデルと解析結果を示す。

3.1 解析コードの概要

解析には、炉心損傷で発生したエアロゾルの移行を伴う原子炉施設でのシビアアクシデントを解析するために開発された MELCOR が を用いる。当該コードは、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。さらに、それを境界条件としてエアロゾルの移行量も計算する。原子炉施設を対象に開発されているため、硝酸の熱流動を模擬できないが、解析対象をコントロールボリュームとフローパスでモデル化する方法は、汎用性が高く再処理施設内の熱流動解析にも適応可能である。

コントロールボリューム間の物質の流動は、水、非凝縮ガス及びエアロゾルを考慮できる。水 については、蒸気、ミスト、プール水に分けて考慮し、非凝縮性ガスについては、必要な物性値 を入力することで複数の任意の種類のガスを考慮できる。

熱伝達モデルでの燃料、デブリ、構造物、雰囲気及び冷却材の相互間の熱伝達係数は、沸騰状態に応じた相関式及び雰囲気の流動に応じた熱伝達係数の相関式から計算する。解析条件として流速を指定することも可能である。構造物内の熱伝導は、任意のメッシュに分割したヒートストラクチャでモデル化し、各メッシュ点の温度を計算する。

3.2 実験体系のモデル化

(1) 解析体系

図 2.1 に示す実験装置の概念図と同様な体系をモデル化した。9 個の反応管は、反応管 1 から反応管 9 で示す横向きの円筒のコントロールボリュームでモデル化する。各反応管及びそれらを内蔵する恒温槽との間での熱の移動は、ガラス管壁面を 1 メッシュのヒートストラクチャで模擬し、それを介した冷却でモデル化する。恒温槽内に位置し、Ru を含む混合蒸気を反応管へ供給するガラス細管においても供給混合蒸気からの除熱があるためモデル化する。入口管及び出口管は、それぞれガス導入部及びガス排出ガラス管をモデル化している。これらの各セルの初期条件は、大気圧、60 $^{\circ}$ $^{\circ}$

(2) 反応管からの除熱量

解析による反応管内の状態量の模擬では、温度が最も重要なパラメータの一つである。反応管内の温度、とりわけ気相部の温度は、蒸気と凝縮液の共存状態を仮定すれば除熱量に依存して決

まる飽和温度で規定される。冷却による除熱量は、蒸気の冷却及び凝縮水の温度上昇のための顕 熱を含め大半は蒸気凝縮の潜熱に費やされる。したがって、主要な境界条件の一つとして、実験 終了時の各反応管内での凝縮液量が実測値に合うように反応管内面での熱流束を調整することで 気相部温度を模擬する。

(3) 硝酸水溶液の凝縮を水の凝縮で代替することによって生じる課題への対応

反応管内の気相部は、凝縮性気体の硝酸及び水の二成分の混合蒸気と掃気用の空気の三成分系から成る。先に述べたように MELCOR は、硝酸の熱流動を取り扱えず、凝縮気体は一成分しか評価できない。このため、硝酸の凝縮を水蒸気の凝縮で評価できるよう工夫が必要である。

実験後の凝縮液の硝酸濃度の実測値は、供給硝酸水溶液の硝酸濃度に比してやや高いがほぼ同じである。反応管内において 1 気圧での気液平衡状態を仮定すれば、液相が存在する飽和状態での気相部の温度は図 3.1 に示す硝酸モル分率で決まる露点に等しくなる。液相の温度は外部からの冷却によって決まる温度となり、それに等しい沸点に対応する硝酸モル分率で平衡が保たれると考えられる。図 3.1 の原点は、空気の分圧を差し引いた圧力での水の飽和温度を基点としている。MELCOR では、気液各相の温度は同温である。実験解析の主眼は反応管内での気相部の温度、凝縮液の蓄積挙動等であるため、気液平衡での気相部の温度を模擬できるように次のような解析条件を適用する。

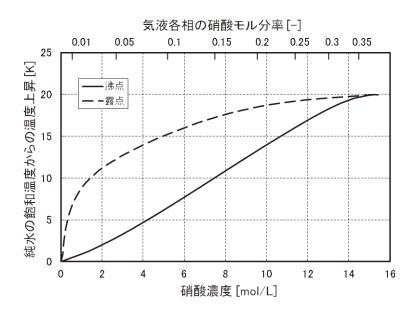


図 3.1 硝酸水溶液の沸点と露点 (参考文献 6)より改変し転載)

• 供給混合蒸気量

実験装置内での温度を含めた凝縮挙動を支配する主要な因子は蒸発潜熱である。100℃以下での 硝酸及び水の単位モル当たりの蒸発潜熱は大きくは異ならない®ことから、混合蒸気中の硝酸成 分をモル数が等しい水とすることで近似する。

• 掃気空気量

MELCOR では、硝酸水溶液の沸騰を模擬できないので、掃気空気量を減少させることで水蒸気分圧を大きくし、水の飽和温度が高くなるように調整し、硝酸による露点の温度上昇を模擬する。

(4) 各実験ケースの飽和温度の推定

図 3.2 に(3)で示した方法で推定した各実験ケースでの飽和温度と硝酸供給速度との関係を示す。 図に示すように CLPF-1 及び CLPF-7 の実験条件で想定される飽和温度は、反応管の外部の冷却 温度に近接しているため蒸気凝縮が発生しないか、又は凝縮液量が少ないと考えられるため解析 対象から除外した。CLPF-2 では、供給蒸気量と回収凝縮液には大きな差異があるため除外した。

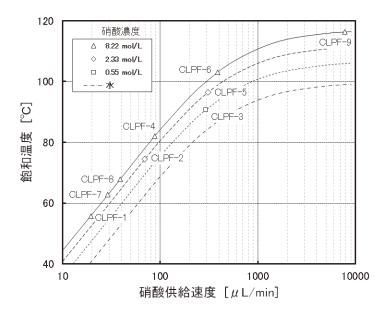


図 3.2 各実験ケースの硝酸供給速度と飽和温度との関係(参考文献 6)より転載)

3.3 解析結果

解析結果の一例として CLPF・5 の結果を示す。図 3.3 に各反応管内のミスト量を示す。混合蒸気の流入による蒸気分圧の上昇に併せて飽和蒸気温度が上昇し、気相部温度に等しくなる(飽和状態になる)とミストが生成される。図 3.3 に示すようにミスト生成開始から実験終了時点までを各反応管での凝縮時間とした。MELCOR の解析では、ミスト濃度が上限(0.2kg/m³)に達すると、管壁に液膜が形成される。液膜厚さが上限(0.5mm)に達するとプール水が溜まり始める。図 3.4 にプール水(凝縮水)の変化を示す。MELCOR で計算されたプール水の計算終了時点の蒸気、ミスト及びプール水の合計値が、実験の凝縮液量に一致するように反応管内面の熱流束を調整した。図 3.5 に実験終了時点の各反応管内の水量をミスト、蒸気及びプール水に分けて示す。図 3.6 に気相部温度の模擬結果を示す。図 3.7 に各反応管内の空気を含む気相部の平均流速の変化を示す。Inlet 及び Outlet Tube、それぞれの入口及び出口は内径 1 cm φ のため流速が速くなりコントロールボリューム内の平均流速も、他の反応管内の流速に比べ速い。各反応管の流速は、蒸気の凝縮に伴い下流ほど蒸気流が減少するため平均気相部流速は漸減するが、全ボリュームで水蒸気凝縮が始まる 3000 秒以降では一定値で推移する。

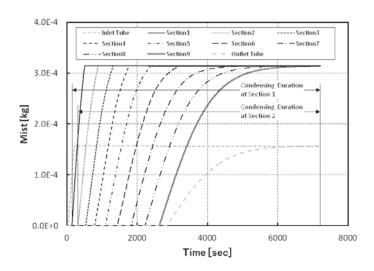


図 3.3 各反応管内のミスト量の変化 (参考文献 6)より転載)

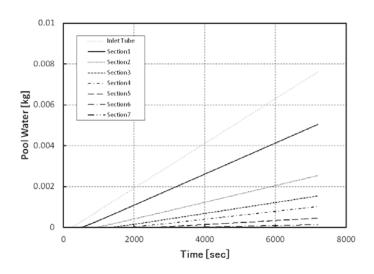


図 3.4 各反応管内の凝縮液量の変化

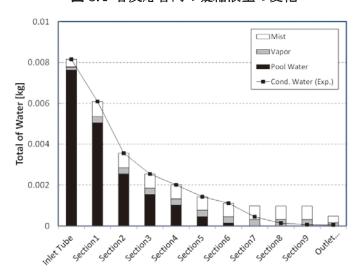


図 3.5 実験終了時点での各反応管内のプール水、ミスト及び蒸気量 (参考文献 6)より転載)

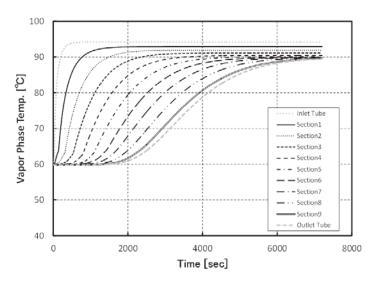


図 3.6 各反応管内の気相部の温度変化 (参考文献 6)より転載)

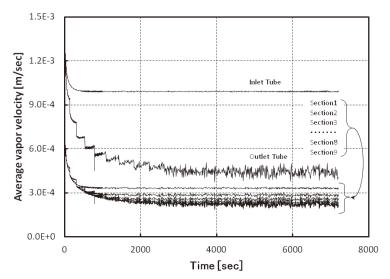


図 3.7 各反応管内の平均蒸気流速 (参考文献 6)より転載)

4. 熱流動解析結果に基づく実験データの分析

凝縮液中の Ru 量との相関関係の定量化に際しては、実験終了後に凝縮した液量及び凝縮液中に移行した Ru 量を推定し、それを基に実測値を補正する必要がある。本章ではこのための解析を行った。

4.1 実験データの補正

反応管内の気相部には Ru を含む空気と混合蒸気が共存する。実験装置の下流に設置された真空ポンプは実験終了と同時に停止し反応管部分での流動は無くなる。このため実験終了後に回収される反応管内の凝縮液には、実験終了時点での気相部のミスト、混合蒸気及び Ru が含まれる。 凝縮液及びそれに含まれる Ru 量の実測値を基に混合蒸気の凝縮に伴う Ru の凝縮液の移行の相関を分析するためには、実験終了時点での混合蒸気量及びそれに含まれる Ru を除く必要がある。

(1) 実験終了時点の残存混合蒸気量の補正

3章での MELCOR による実験装置内の熱流動解析では、各反応管内の気相部に存在するミスト、水蒸気及び空気の経時変化が計算される。各実験ケースの解析に際して硝酸水溶液の沸点上昇を模擬するために、沸点上昇分だけ飽和蒸気温度が上昇するよう掃気空気流量を調整し、実際の実験条件より低く抑えている。このため各反応管内の蒸気量の模擬結果は、実際よりは多くなっていると考えられ、その結果を補正には用いることができない。そこで、同様の MELCOR の解析モデルを用いて、掃気空気量を実験値の 0.3 NL/min((@0) C)に合わせるとともに、気相部の蒸気量は温度に依存することから各反応管の蒸気温度が 3章での解析値に合うように各反応管内面での熱流束を調整し気相部の蒸気量の収束値を新たに求め、実験終了時点の残存混合蒸気量とした。

(2) 実験終了時点の気相中の Ru の補正

(1)で求めた実験終了時点の残存蒸気には、Ru が含まれている。Ru の凝縮液への移行に係るデータ整理においては凝縮液中のRu 量の実測値から残存混合蒸気中のRu 量を差し引く必要がある。各反応管内の気相部のRu 量: $M_{\mathrm{R}i}$ [kg] を評価するには、MELCOR で模擬した反応管 i の出入り口の蒸気流量: $W_{\mathrm{in}\,i}$ 及び $W_{\mathrm{out}\,i}$ [kg/s]、及び(1)で補正した気相部蒸気量 $M'_{\mathrm{s}\,i}$ を基に、時刻:t における各反応管 i での Ru の質量: $M_{\mathrm{R}i}$ についての保存式(2)を、(3)及び(4)式を組み合わせて上流から下流に向かって順次解くことで求める。関数 F は、凝縮速度: $V_{\mathrm{cond}\,i}$ をパラメータとするRu の凝縮移行速度 [kg/s]を表し、実測値間の相関を基に予め求める。凝縮液中のRu 量の実測値から $M_{\mathrm{R}i}$ の実験終了時点の値を差し引いた値を基に新たな相関関数が求まる。これもとに再度 $M_{\mathrm{R}i}$ の変化を計算する。 $M_{\mathrm{R}i}$ が収斂するまで繰り返しの補正を行う。

$$\frac{\Delta M_{Ri}(t)}{\Delta t} = W_{\text{in }i}(t) \alpha_{i-1}(t) - W_{\text{out }i}(t) \alpha_{i}(t - \Delta t) - F\left(V_{\text{cond }i}(t)\right)$$
(2)

$$M_{Ri}(t) = M_{Ri}(t - \Delta t) + \Delta M_{Ri}(t) \tag{3}$$

$$\alpha_i(t) = \frac{M_{Ri}(t)}{M'_{Si}(t) + M_{air,i}(t)} \tag{4}$$

$$\beta_i(t) = \frac{M_{Ri}(t)}{M'_{si}(t)} \tag{5}$$

4.2 データ分析の結果

図 4.1 に凝縮液量及び凝縮水へ移行した Ru 量の実測値(a)及び補正値(b)の関係を示す。CLPF8 を除いて明確な相関性がある。CLPF3、5 及び 6 (以下、主要ケースという) は、供給硝酸蒸気量がほぼ同じであることから、相関関係はほぼ同様の傾向であるのに対して CLPF4 及び CLPF9 は、主要ケースに比べて凝縮水の減少に対する凝縮液中に移行した Ru 量の低下が緩やかである。

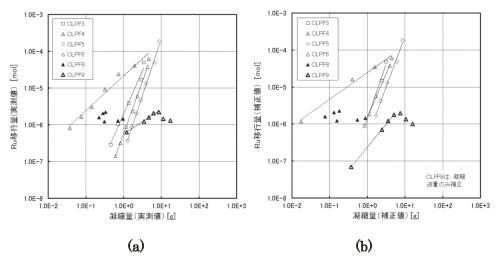


図 4.1 凝縮量及び Ru 移行量の実測値及び補正値の相関関係

(1) データ整理のためのパラメータの算出

(a) 凝縮水量と凝縮水中の Ru 量の相関

凝縮量は、実験継続時間に依存するため実験ケース相互の比較が可能なように凝縮速度及び Ru 移行速度で比較する。Ru の凝縮水への移行は、気相部に生成されるミストも凝縮水の一つの形態と捉えれば、凝縮水の生成は、ミストが生成される時点から始まると考えられる。 ② 3.3 に示すミスト量の変化からミスト生成開始時刻が判定できる。 ② 3.4 に示すように凝縮水量は実験終了時点まで単調に増加することから、各反応管でのミスト生成時刻から実験終了時点までを凝縮水生成時間として(6)式及び(7)式により、単位伝熱面積当たりの凝縮速度: V_{cond} [g/h/m²]及び Ru 移行速度: V_{Ru} [mol/h/m²]を算出する。

$$V_{\rm cond} = \frac{$$
 凝縮液全量 (補正値) (6) $\left({\bf z}$ 集験継続時間 $-$ ミスト生成開始時刻 (計算値) $\right) \times \left({\bf c}$ 然面積 $\right)$

$$V_{\text{Ru}} = \frac{$$
 凝縮液中Ru全量(補正値) (7) $\frac{}{(実験継続時間 - ミスト生成開始時刻(計算値)) \times (伝熱面積)}$

図 4.2 に凝縮速度及び Ru 移行速度の相関を示す。凝縮速度が速いほど Ru 移行速度が速い傾向があり、両者には概ね直線性がある。図中に各ケースの補正値を累乗近似した直線及び近似式を示す。各近似式は(8)式の形式で表される。

$$V_{\rm Ru} = k \left(V_{\rm cond} \right)^a \tag{8}$$

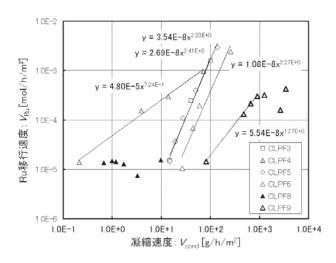


図 4.2 凝縮速度及び Ru 移行速度の相関関係

(b) 凝縮に伴う移行以外のメカニズムに係る考察

図 3.2 に示すように主要ケースに含まれる各実験は、硝酸濃度は異なるが硝酸供給速度がほぼ同じである。主要ケースに対して CLPF4 及び 9 の硝酸供給速度は、それぞれ約 1/6 倍及び約 23 倍である。図 4.2 に示すように CLPF4 では、主要ケースに比べ凝縮速度が遅いにも拘わらず、Ru 移行速度は同程度であり、累乗近似した直線の傾きも緩やかで、凝縮速度が減少しても Ru 移行速度は大きく減少していないことから、他のメカニズムでの Ru の移行が有意になっていると考えられる。

例えば、混合蒸気に対する Ru の濃度に着目すると、定性的には Ru 濃度が濃いほど凝縮水へ移行し易いと考えられる。主要ケースに比べ CLPF4 は、Ru の混合蒸気に対する相対濃度は大きく、 CLPF9 は極端に小さい。主要ケースを含めた 3 つのケースでの Ru 移行速度が同等の大きさであることから、Ru 濃度の影響はないと考えられる。

あるいは、化学吸収などの蒸気の凝縮に依存しないメカニズムが作用していることが想定される。逆に CLPF9 では凝縮速度が速いのに Ru 移行速度は寧ろ小さい。蒸気流速が速いため化学吸収される間もなく下流に流され、化学吸収が阻害されたと考えれば説明できる。 CLPF9 では蒸気供給量は、主要ケースに比べ約 23 倍であるが、凝縮速度は図 4.2 に示すように約 10 倍程度であることから、凝縮速度も蒸気流速の影響を受けているが、凝縮が少ない分、蒸気流速は速くなっている。

2.2節の実験条件でも記したが、混合蒸気は硝酸水溶液を急激に加熱し発生させている。このとき硝酸が分解し NO_x が発生すれば、凝縮液に NO_x が溶解し亜硝酸に変化することで RuO_4 の凝縮液への化学吸収を引き起こす可能性が想定される。

ここでの考察は、化学吸収の反応速度と蒸気流速の相対関係で決まると考えられるが、Ru の化学吸収が有るのか、有るとしてその速度はどの程度か等の情報が無い状況での推論の域をでない。これらの点を解明する実験の実施が期待される。

5. 実機規模施設の熱流動条件での適用性の検討

実規模の施設内において高レベル廃液貯槽で発生した蒸気の流出路で想定される熱流動条件に対して、実験で得られた相関式の適用可能性について考察する。実機規模での蒸気流路における熱流動条件は、MELCORによる解析から得た。本章で示す試解析は、実験結果から導出したRuの凝縮水への移行に係る相関式を用いて仮想的な実規模施設を対象に、Ruの凝縮水への移行量を評価する手順を示し、相関式の適用可能性を考察することを目的に実施した。解析結果(数値)は、特定の施設でのRuの凝縮水への移行量を示すものではない。

5.1 事故時の施設内の熱流動解析

(1) Ru を含む蒸気流の施設内の流路

蒸発乾固事故では、高レベル廃液貯槽での廃液の沸騰及び脱硝反応に伴い発生する気体(水蒸気、硝酸蒸気あるいは NO_x ガス)とともに貯槽から放出される放射性物質は、貯槽の圧力上昇を防止する目的で廃ガス処理セル内に設置されてい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 9 。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、又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。 **図 5.1** に事故時の蒸気などの流れを示す。

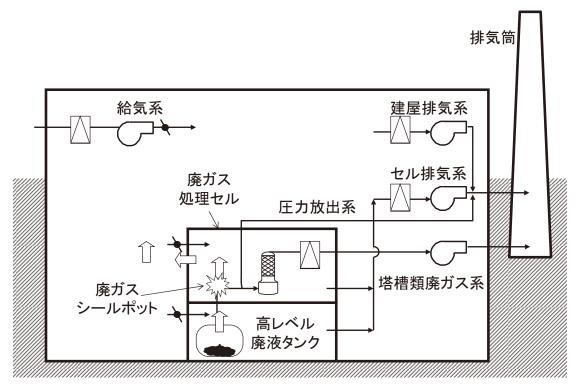


図 5.1 想定される放射性物質の移行経路 (参考文献 1)より転載)

(2) 解析モデル

解析モデルは、参考文献 5)での解析で用いたモデルと同等である。図 5.2 に MELCOR の建屋内の区画を表す分割モデルを示す。貯槽、貯槽セル、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)は、容積、壁表面積は参考文献 10) に掲載された施設の平

面図及び立面図から推定した。それ以外の区画は、概略値を設定した。

貯槽からの発生蒸気は廃ガス処理セルに流入すると仮定した。沸騰晩期に廃液中の硝酸塩の脱硝反応により発生する NOx ガスは無視する。貯槽内は大気圧であるが廃液の沸騰時の温度は、硝酸塩が溶解しているためモル沸点上昇により約 103 $^{\circ}$ 以上で沸騰する 11 。MELCOR では水のみの沸騰/凝縮を取り扱うためこのような硝酸塩水溶液の沸騰/凝縮を模擬できない。試行解析のため 100 $^{\circ}$ での水の沸騰/凝縮で近似した。

放射性配管分岐セルは、**図 5.3** に示すように容積、コンクリート壁面が大きいので、発生蒸気の移行可能な経路を考慮して4区画でモデル化した。

コンクリート壁は、廃ガス処理セル、放射性配管分岐セル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2mを仮定した。コンクリート壁(天井を含む)は、 図 5.4に示すように厚さ方向に5分割し、温度勾配を模擬できるようにモデル化した。

コンクリート表面 (壁及び天井) での除熱による蒸気の凝縮によって形成される液膜の厚さは、 0.5 mm を仮定 (MELCOR の既定値) した。建屋各区画を表すコントロールボリュームでは、 凝縮水と気相部気体との温度非平衡を仮定するモデルを選択した。気液界面の熱伝達係数は MELCOR の内蔵評価式を利用した。各区画のミスト濃度の上限は、コードの既定値: 0.1 kg/m³ に設定した。

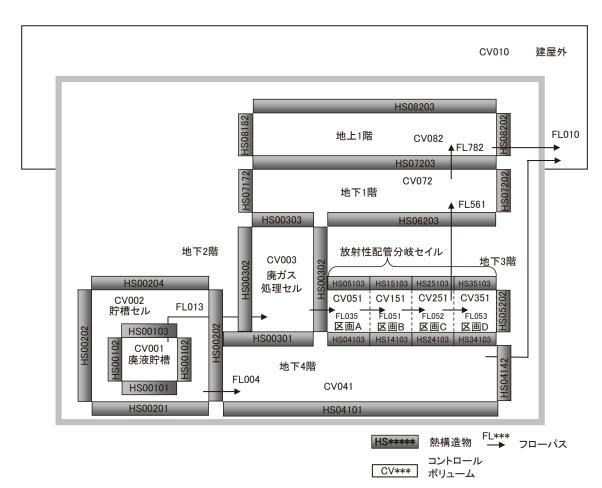


図 5.2 仮想的な実規模施設の分割図 (参考文献 5)より転載)

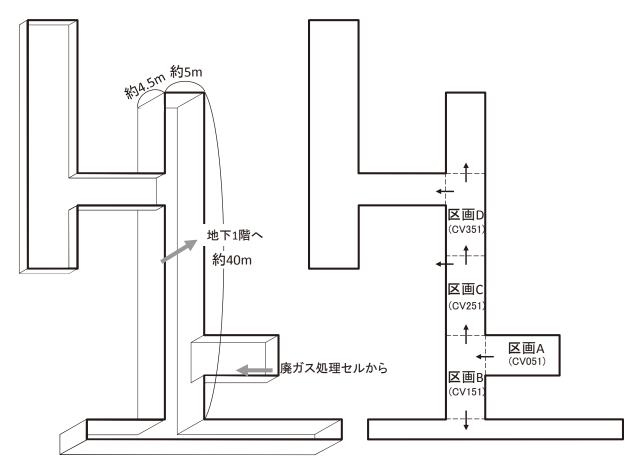


図 5.3 放射性配管分岐セルのコントロールボリューム分割 (参考文献 5)より転載)

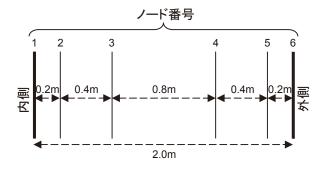


図 5.4 コンクリート壁の代表的なメッシュ分割 (参考文献 5)より転載)

(3) 解析条件

貯槽からの流出蒸気量及び温度は、参考文献 11)に示されている沸騰模擬ツール ¹²⁾を用いた解析結果から得た。参考にした解析では、発熱が 5 W/L の廃液 120 m³を内包する 1 基の貯槽の冷却機能喪失を仮定している。図 5.5 に硝酸及び水蒸気の各流量、それらの総和、及び蒸気温度を示す。蒸気温度は廃液温度に等しいと仮定した。本章での解析では、硝酸蒸気を水蒸気と仮定し、図 5.2 中のジャンクション FL013 の流量とした。

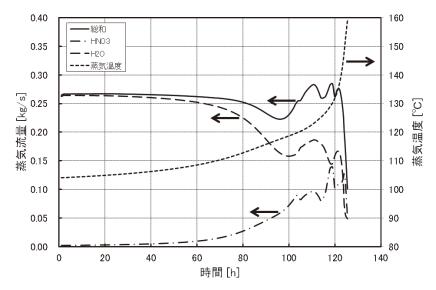


図 5.5 廃液貯槽から発生する硝酸及び水蒸気の流量、蒸気温度

(4) 解析結果

図 5.6 に流出蒸気の移行経路となる施設内空間での蒸気凝縮速度: V_{cond} の経時変化を示す。Ru の気相への移行が顕著となる沸騰開始後 105 時間以降 (廃液温度が 120 $^{\circ}$ $^{\circ}$ 以上) の期間では、 V_{cond} は概ね $10\sim200$ g/h/m² で推移する。蒸気凝縮は、上流のセルから順に進むため、地上 1 階までには、十分な蒸気が到達しないため分析の対象外とした。

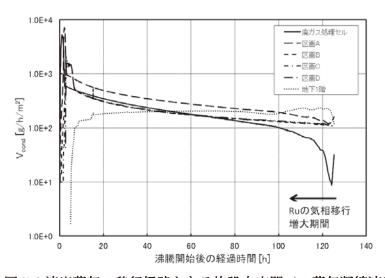


図 5.6 流出蒸気の移行経路となる施設内空間での蒸気凝縮速度

5.2 凝縮速度に対する Ru 移行速度の相関式と Ru 移行量の試算

蒸気の移行流路で想定される実機規模での蒸気凝縮速度を考慮して主要ケース (CLPF3、5 及び6) の累乗近似式の係数及び指数を算術平均し (11)式を得た。

$$V_{\text{Ru}} = 2.44 \times 10^{-8} \times (V_{\text{cond}})^{2.34} \tag{11}$$

(11)式を用いて**図 5.6** に示す V_{cond} を基に V_{Ru} を試算した結果を**図 5.7** に示す。凝縮液中に移行可能な Ru 量は、**図 5.7** に示す V_{Ru} を時間積分することで求めることができる。気相中に十分な Ru の存在を仮定したときの凝縮液中の Ru の積算量を**図 5.8** に示す。

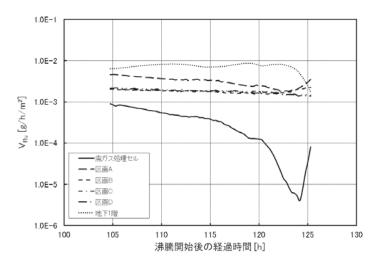


図 5.7 施設内の各区画での Ru 移行速度の推定値

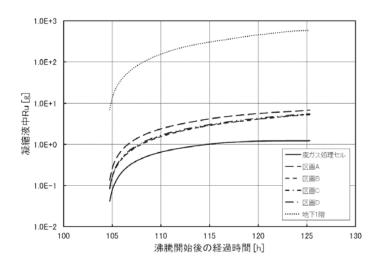


図 5.8 凝縮液中に移行可能な Ru 量の推定値

6. まとめ

再処理施設で想定される高レベル廃液貯槽の蒸発乾固事故では、廃液温度が 120 ℃以上になる 沸騰晩期から乾固段階において気体状 Ru が発生し、硝酸・水混合蒸気の凝縮に伴い凝縮液中に移 行する。気体状の Ru を含む硝酸及び水の混合蒸気の凝縮に伴い Ru の凝縮水への移行量を測定す る実験で得られたデータを基に、実測不能な実験装置内の蒸気流速等を熱流動解析結果から推定 し、気体状 Ru の凝縮水への移行速度に係る相関式を導出した。さらに、同相関式を実機規模の 事故解析結果に適用し、Ru の凝縮水への移行量の評価を試みた。その結果、以下の結論を得た。

- ・蒸気凝縮が発生する単位面積当たりの凝縮速度のべき乗に対して気体状 Ru の凝縮水への移行 速度には直線性の相関がある。
- ・凝縮速度が相対的に速い又は遅い領域では、蒸気の凝縮に伴う移行以外のメカニズムによる移行 が、影響している可能性がある。

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) M. Philippe, J.P. Mercier, J.P. Gue, "Behavior of Ruthenium in the Case of Shutdown of the Cooling System of HLLW Storage Tanks," Proc. of 21th DOE/NRC Nucl. Air Cleaning Conf., San Diego, CA, Aug., 1990, NUREG/CP-0116, Vol 2, pp.831-843 (1990).
- 3) T. Kato *et al.*, "Study on volatilization mechanism of ruthenium tetroxide from nitrosyl ruthenium nitrate by using mass spectrometer", *J. Nucl. Mater.*, 479, 123-129 (2016).
- 4) 日本原燃株式会社、"Ⅱ.重大事故の等の拡大の防止等に関する有効性評価 3.異常な水準の放 出防止対策"https://www.nsr.go.jp/data/000057151.pdf (2015).
- 5) 吉田 一雄、「重大事故対処策を考慮した実規模再処理施設の蒸発乾固事故解析」, JAEA-Research 2016-004 (2016), 15p.
- 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).
- 7) R. O. Gauntt, 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).
- 8) 吉田 一雄、「再処理施設の蒸発乾固事故解析での気体状 Ru の移行挙動に影響する硝酸・水混合蒸気の凝縮のモデル化」、JAEA-Research 2016-012 (2016), 24p.
- 9) 関根 啓二 他、「再処理施設における放射性物質の移行挙動に関する研究 (2) 高レベル濃縮 廃液の冷却システムと冷却機能喪失事象」日本原子力学会 2012 年秋の大会予稿集 E32 (2012).
- 10) 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).
- 11) 吉田 一雄、石川 淳、阿部 仁、「再処理施設の蒸発乾固事故での放射性物質の移行挙動解析」、 日本原子力学会和文論文誌、14[4], 213-226 (2015).

JAEA-Research 2017-015

12) 石川 淳、城戸 健太郎、吉田 一雄、「再処理廃液の沸騰乾固模擬ツールの開発」、日本原子力 学会和文論文誌, 12[2], 165-174 (2013).

国際単位系(SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本i	単位
巫平里	名称	記号
長 さ	メートル	m
質 量	キログラム	kg
時 間	秒	s
電 流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光 度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
和工里	名称	記号
面	責 平方メートル	m ²
体		m^3
速 さ , 速 月	まメートル毎秒	m/s
加 速 月		m/s^2
波	毎メートル	m ⁻¹
密度,質量密度	ま キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	ま キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比 体 和	責 立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	まアンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強き	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) ,濃厚	ま モル毎立方メートル	mol/m ³
質 量 濃 月	ま キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝		cd/m ²
出 切 半	b) (数字の) 1	1
比透磁率(^{b)} (数字の) 1	1

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

表3. 回行の名称と記方で表されるJ祖立平位				
	SI 組立単位			
組立量	名称	記号	他のSI単位による	SI基本単位による
	10 AD ATT	記り	表し方	表し方
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 (p)	m/m
立 体 角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 (b)	m^2/m^2
周 波 数	(d)	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力,応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷,電気量	クーロン	С		s A
電位差 (電圧),起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静 電 容 量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁 束 密 度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	$^{\circ}\!\mathbb{C}$		K
光	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
	ルクス	lx	lm/m^2	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 (f)	ベクレル ^(d)	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与,	グレイ	G	T/l	$m^2 s^{-2}$
カーマ	2 24	Gy	J/kg	m s
線量当量,周辺線量当量,	. (-)	_	7.0	9 -9
方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
	カタール	kat		s ⁻¹ mol
Charlest Contract and Contract			to the second second second	mm > f t = > >>f f t = >

- 酸素活性|カタール kat simple

 (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、患についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。(d)へルソは周朝現象についてのみ、ペクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。(d)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度開局を表す数値はどもらの単位で表しても同じである。(f)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。(g)単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM動告2(CI-2002)を参照。

表 4 単位の中に因有の名称と記号を含むSI組立単位の例

表 4. 単位 Ø)中に固有の名称と記号を含		立の例
	S.	I 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量,エントロピー		J/K	$m^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg⁻¹ s A
吸 収 線 量 率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射 強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m4 m-2 kg s-3=m2 kg s-3
放 射 輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語					
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10^{24}	ヨ タ	Y	10 ⁻¹	デ シ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10 ⁻³	₹ <i>リ</i>	m
10^{15}	ペタ	Р	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	Т	10 ⁻⁹	ナーノ	n
10^{9}	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	丰 口	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
0			-01	18	

10-24 ヨクト

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位			
名称	記号	SI 単位による値	
分	min	1 min=60 s	
時	h	1 h =60 min=3600 s	
目	d	1 d=24 h=86 400 s	
度	۰	1°=(π/180) rad	
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad	
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad	
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²	
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³	
トン	t	1 t=10 ³ kg	

da

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で 表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値		
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J		
ダ ル ト ン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg		
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da		
天 文 単 位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m		

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
		1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノ ッ ト	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ ー パ	Np ¬	CI単位しの粉は的な関係は
ベル	В	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
デ シ ベ ル	dB ~	7.7.7.4.4.1.7.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダ イ ン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St =1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フ ォ ト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$
ガ ウ ス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 △ 」 は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

	3	名利	ķ		記号	SI 単位で表される数値		
+	ユ		リ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq		
ν	ン	卜	ゲ	ン	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$		
ラ				k	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy		
ν				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv		
ガ		ン		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$		
フ	æ.		ル	131		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m		
メートル系カラット						1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg		
卜				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa		
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa		
力	П		IJ	ſ	cal	1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー),4.1868J (「IT」カロリー),4.184J(「熱化学」カロリー)		
3	ク		口	ン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m		