JAEA-Research 2016-004

DOI:10.11484/jaea-research-2016-004

DI COS

重大事故対処策を考慮した再処理施設の 蒸発乾固事故解析

Accident Analysis of Evaporation to Dryness by Boiling of Reprocessed High Level Liquid Waste at Fuel Reprocessing Facilities with Considering Severe Accident Measures

吉田 一雄

Kazuo YOSHIDA

安全研究・防災支援部門 安全研究センター リスク評価研究ディビジョン

Risk Analysis and Applications Research Division Nuclear Safety Research Center Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness

June 2016

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, 2016

重大事故対処策を考慮した再処理施設の蒸発乾固事故解析

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 リスク評価研究ディビジョン 吉田 一雄

(2016年3月10日受理)

再処理施設では、長時間の全交流電源の喪失等により冷却機能が失われると、貯槽中の放射性廃液が沸騰し乾固に至る事故(蒸発乾固事故)が、重大事故の一つとして想定される。この事故では、放射性物質は、廃液の沸騰中は発生する蒸気で、乾固後は核分裂生成物の硝酸塩の脱硝反応で生成する NOxにより搬送され施設外へ移行すると考えられる。事故時の放射性物質の施設外への移行を緩和するための重大事故対処策として、廃液貯槽に注水し、乾固に至るのを防止するとともに、発生した蒸気を仮設配管で建屋内の大空間へ誘導し凝縮させる対策が考えられている。本報では、再処理施設を対象に重大事故対処策を考慮した事故シナリオを想定し、貯槽を含めた施設内で水蒸気等の熱流動およびエアロゾルの挙動を計算コードを用いて解析し、重大事故対処策が放射性物質の施設外への移行軽減に及ぼす効果について考察した。

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

Accident Analysis of Evaporation to Dryness by Boiling of Reprocessed High Level Liquid Waste at Fuel Reprocessing Facilities with Considering Severe Accident Measures

Kazuo YOSHIDA

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

(Received March 10, 2016)

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 plant. In this case, some amount of fission products (FPs) will be transferred to the vapor phase in the tank, and could be released with steam and NO_x gas to the environment. NO_x is generated from denitration of nitrate fission products during dry out phase. Two mitigative severe accident countermeasures have been proposed by the licensee. One of them is injecting cold water to waste tanks to prevent dryness and another is leading generated vapor through temporary duct to huge spaces in the facility to condense the vapor.

Thermal-hydraulics and aerosol transport behaviors in compartments of a typical facility building have been analyzed based on the scenario with these countermeasures. The effectiveness of the countermeasures is discussed from a view point of the reduction of radioactive material released to the environment.

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

目次

1. はじめに ····································	1
2. 事故シナリオ	
2.1 事故の概要	2
2.2 想定する事故シナリオ	2
3. 計算コードの概要	4
4. 事故解析モデル	
4.1 解析の体系	5
4.2 解析の条件	5
5. 解析結果	
5.1 施設内の熱流動解析結果	9
5.2 エアロゾル移行挙動解析結果	10
6. まとめ	15
参考文献	15

CONTENTS

1. Introduction ·····	1
2. Accident scenario ·····	2
2.1 Overview of Accident · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
2.2 Assumed accident scenario ······	2
3. Overview of computer code ·····	4
4. Models of accident analysis ·····	
4.1 System modeling · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	5
4.2 Conditions of analysis · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	5
5. Results ·····	9
5.1 Thermal-hydraulics in the facilities · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	9
5.2 Aerosol transport behavior simulated · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	10
6. Summary ·····	15
References ·····	15

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))を含む大量の硝酸および水の蒸気(以下、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「)。このような事故シナリオでは、エアロゾルとして蒸気と共にセル内等に流出した放射性物質が、セル壁面での除熱により凝縮する蒸気とともに床および壁等に沈着し除去されることが期待できる。

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のエアロゾル化と、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。前者の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℃までの沸騰初期段階で支配的であり、沸騰が進み、廃液温度が120℃以上に上昇する沸騰晩期では揮発性化学種に変化したRuの気化による移行が顕著となり、環境への影響は後者が桁違いに大きい¹,₂。

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評価される。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 3。このような対処策では、沸騰で生じる飛沫のエアロゾル化に因る放射性物質の気相への移行が長期化することで移行量が時間の経過と共に増加する。このため施設外へ放出される放射性物質量を評価するには、建屋内の熱流動条件を境界条件としてエアロゾルの移行を模擬する計算コードを用いてエアロゾルの移行挙動を精度良く解析することが適切と考えられる。

参考文献 4)では、発電用原子炉施設の炉心損傷を伴うシビアアクシデント解析コード MELCOR 5)を用いて蒸発乾固事故での建屋内の熱流動およびエアロゾルの移行解析を試みた。この解析では、残余のリスク評価に資する観点から事故の進展防止策あるいは影響緩和策を講じない事故シナリオを想定した。その結果、水の沸騰を解析対象とする当該コードが、硝酸水溶液の沸騰現象の模擬にも適用可能であることを示した。

本報では、上述の重大事故対処策を講じた事故シナリオでの施設外への放射性物質移行量を定量的に評価することを目的に計算コードを用いた解析を試行した。解析では、MELCOR コードを用いて再処理施設内での事故時の熱流動およびエアロゾルの移行挙動を模擬した。得られた解析結果をもとに、本報での解析で想定した事故対処策が放射性物質の施設外への移行軽減に及ぼす効果についても考察した。

なお、本報で解析の対象とする施設は、再処理施設に係る公開情報を参考にしつつも、多くの 仮定に基づき想定した仮想的な施設である。したがって後述する解析結果は、特定の施設の当該 事象の解析結果を示すものでは無いことを明記する。

2. 事故シナリオ

2.1 事故の概要

再処理施設の機器には、放射性物質の崩壊熱により内包する溶液の温度が沸点まで上昇するものがある。このような機器の沸騰を防止するために、例えば六ヶ所再処理施設では、信頼度の高い独立 2 系統の安全冷却水系統を設置し、維持管理している ^{6),7)}。また、このような対策にもかかわらず、冷却機能が全喪失した場合でも沸騰までに時間余裕があり、種々の対策を施すことで沸騰を防止できる。敢えてこれらの対策を考慮せず冷却機能が全喪失した状態が継続すると仮定すれば、溶液が沸騰しいずれ乾固する。乾固時には、含有硝酸塩の脱硝反応が進行し NOx ガスが発生すると考えられる。

溶液の沸騰およ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となる 1)。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。図 2.1 に事故時の蒸気等の流れを示す。

2.2 想定する事故シナリオ

参考文献 4)の解析では、事故の拡大防止策および影響緩和策を一切講じない事故シナリオを想定している。解析の結果では、廃液貯槽の冷却機能喪失後、約 15.6 時間で沸騰が始まり、約 5 日間継続し乾固するとしている。沸騰により発生した蒸気は、容積の大きい空間でより多く凝縮し、エアロゾルの除去が期待できることが示されている。検討中の重大事故対処策でも、仮設の排気系を経由して大空間のセルに蒸気を導き凝縮する方法が示されている 3。

本報で想定する事故シナリオでは、Ruの大量放出を回避するため、沸騰開始と同時に注水を開始し、蒸発した溶液量を間欠的に水で補い満水状態を維持しつつ廃液の温度を 120℃未満に保つ。これにより Ruの気化を回避し、飛沫同伴で気相へ移行した放射性物質を含むエアロゾルを建屋内の大きなセルでの蒸気凝縮により除去する重大事故対処策を想定する。事故発生後 7 日間で貯槽の冷却機能が回復し、事故が終息すると仮定する。

高レベル廃液の崩壊熱による発熱を 5W/L 1 、注水する水の温度を 20°C、沸騰時の廃液温度を 103°Cと仮定すると、冷却機能喪失後の 7 日間のうち、沸騰開始から事故終息までの約 6.4 日間の発熱量は 3.32×10^8 kJ(=5W/L $\times120$ m $^3\times10^3$ L/m $^3\times6.4$ d $\times24$ h $\times3600$ s)は、注入した水の顕熱 および蒸発潜熱に等しいことから、注水量は約 126×10^3 kg と概算される。概算では廃液を水と 仮定し 100°C未満の定圧比熱:4.2 kJ/kg/K、蒸発潜熱:2257 kJ/kg とした。また、注水を繰り返す約 6.4 日間では、沸騰と未沸騰の状態を繰り返すが、単位水量の顕熱と蒸発潜熱の比から、この期間のうち廃液が沸騰している時間の合計は約 5.5 日となる。これより、沸騰までの 0.65 日 (15 時間)に連続的な沸騰を仮定した 5.5 日を加えた 6.15 日を解析終了時間とした。

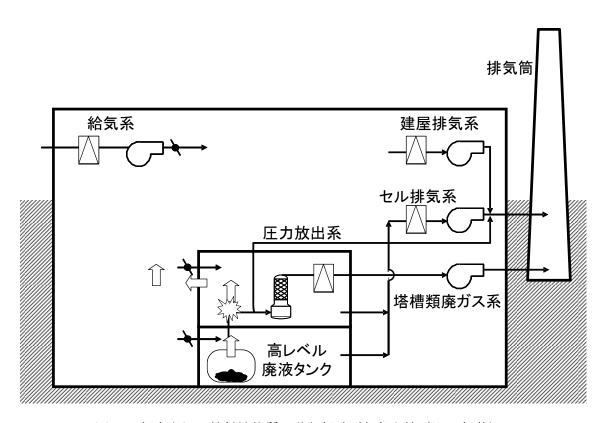


図 2.1 想定される放射性物質の移行経路 (参考文献 1)より転載)

3. 計算コードの概要

MELCOR がは、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計算コードである。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、放射性物質の硝酸塩を含む再処理廃液の沸騰を模擬する機能は内蔵されていないが、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。構造物内の熱伝導は、任意のメッシュに分割し、各メッシュ点の温度を計算する。

エアロゾルの沈着は、温度及び流動などの雰囲気条件並びにエアロゾル粒径に応じて支配的となる沈着のメカニズムが異なり、慣性衝突、重力沈降、熱泳動、拡散泳動、層流拡散、乱流拡散を考慮している。エアロゾルの粒径分布を複数の粒径区分に分割して考慮し、凝集に伴うエアロゾルの粒径区分間の再配分とともに粒径区分ごとにそれぞれの沈着機構の沈着速度を計算する。ガス状の放射性物質は、流体の流れに乗って輸送される間に構造物表面及びエアロゾル表面に沈着する。主要な沈着機構として、ガスの凝縮、再蒸発及び化学吸着をモデル化している。

4. 事故解析モデル

4.1 解析の体系

図 4.1 に 2 章で検討した事故シナリオを踏まえた 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、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 7)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。

図 4.1 には示していないが、貯槽は 3 基分(120 $m^3 \times 3$)を一つのコントロールボリュームでモデル化し、全ての発生蒸気が廃ガス処理セルに流入すると仮定した。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 $^{\circ}$ 。MELCOR では水のみの沸騰を取り扱うためこのような硝酸塩水溶液の沸騰を模擬できない。第 2 章で想定した事故シナリオでは、断続的に注水して廃液の減少を補う拡大防止策を想定するので、廃液の温度は 103 $^{\circ}$ $^{\circ}$ 程度で推移すると推定されるため、100 $^{\circ}$ $^{\circ}$ での水の沸騰で近似しても結果を大きく左右しないと判断される。

放射性配管分岐セルは、図 4.2 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 4.3 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。

4.2 解析の条件

(1) 飛沫同伴に起因するエアロゾルの発生量

参考文献 9)によれば、沸騰初期での飛沫同伴による気相への放射性物質の移行率(ARR: Airborne Release Rate)を次式で示す単位時間当たりの質量の比で定義し、実験の分析結果を基に概ね 2.0×10^{-5} であるとしている。

参考文献 9)において参照した実験で用いた模擬廃液では、硝酸濃度は 1.97 mol/L である。沸騰 初期で気化する硝酸は無視できるとし、崩壊熱(120 m^3 /基× $5.0 \text{ W/L} \times 1000 = 6.0 \times 10^5 \text{ W/基}$)が水の蒸発のみに寄与すると仮定すれば、単位時間当たりでの廃液からの液相成分の蒸発は、 100° Cの水の蒸発潜熱:2257 kJ/kg として、0.265 kg/s(= $600 \text{kJ/s} \div 2257 \text{kJ/s}$)である。廃液中の硝酸塩濃度は、0.285 kg/L から、「単位時間に沸騰で減少する廃液に含まれる難揮発性物質の質

量」は、0.0755kg/s(= 0.265kg/s÷1.0kg/L×0.285kg/L)となる。よって「液面で発生し気相を移行する飛沫に含まれる難揮発性物質の質量」は、貯槽 1 基当たり、 1.51×10^6 kg/s/基となる。解析では、一定速度で貯槽 3 基分のエアロゾルが発生すると仮定した。

(2) 発生するエアロゾル粒径分布

参考文献 1)では、大型の実験装置を用いて沸騰時に発生する飛沫に由来するエアロゾルの粒径分布を測定した結果が示されている。それによれば、模擬廃液を沸騰させ、管体を約 150℃に加熱した高さ約 2m、内径 0.2m の管内を蒸気とともに上昇する飛沫が水分を失って、乾燥したエアロゾルになる。それをカスケードインパクタで回収し分析している。回収したエアロゾル中の Cs および Cs の量をもとに粒径の分布を推定している。図 4.4 に示すように 2 種類の元素の実測値の平均値に対して粒径区分ごとのエアロゾルの体積に対数正規分布を仮定し、粒径分布の中央径は、Cs 1.6 Cs m、幾何標準偏差は、Cs 2.4 であるとしている。測定したのは乾燥したエアロゾルの粒径であるため、溶液成分を含むミスト径分布を推定する必要がある。参考文献 Cs 2)によれば、廃液が乾固すると体積は約 Cs 7.3%に減少する。また、参考文献 Cs 10)によれば、Cs 2 実験の実廃液と上述の実験で使用した模擬廃液の硝酸塩濃度はほぼ等しいと推察され、乾固直前では体積は Cs 10 分の 1 程度まで減少することが観測されている。これらの知見よりミストの中央径は約 Cs 10 倍の Cs 16 Cs 16 Cs 17 位定した。

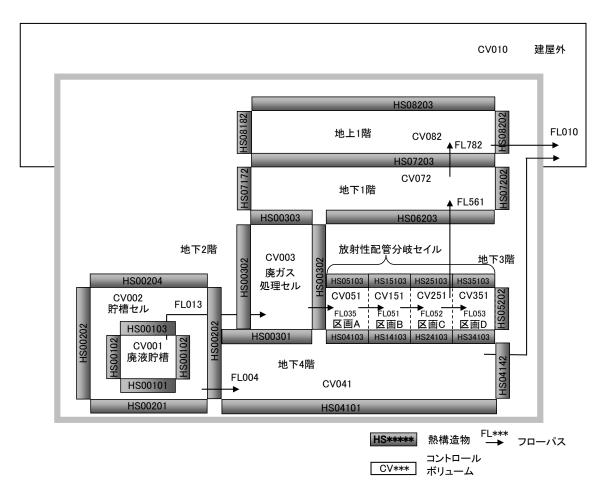


図 4.1 仮想的な実規模施設の分割図

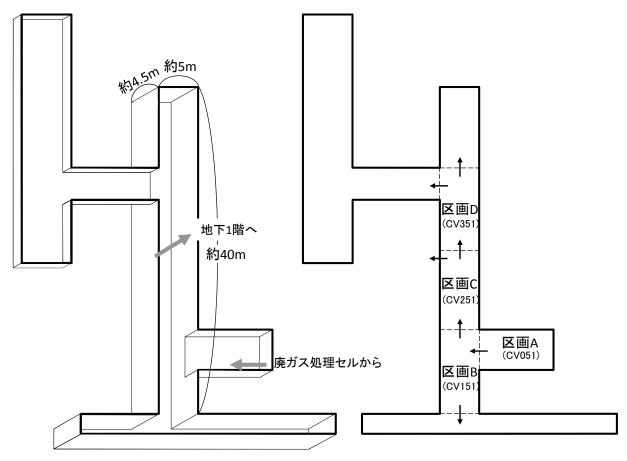


図 4.2 放射性配管分岐セルのコントロールボリューム分割

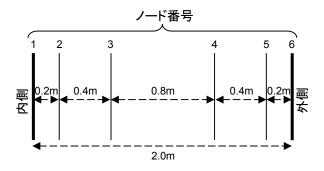


図 4.3 コンクリート壁の代表的なメッシュ分割

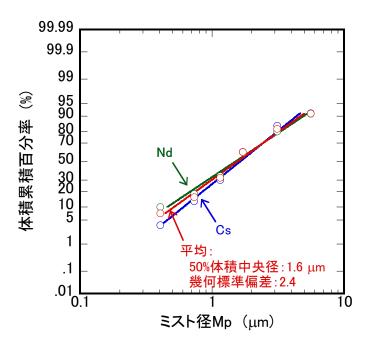


図 4.4 飛沫由来のエアロゾル粒径分布 1)

5. 解析結果

5.1 施設内の熱流動解析結果

(1) 蒸気流量

図 5.1 に建屋内の各区画間の蒸気流量を示す。貯槽から流出した蒸気は、廃ガス処理セルおよび放射性配管分岐セル内をほとんど減少することなく地下 1 階の大空間に流入する。地下 1 階では、多くの蒸気が凝縮し、液相水およびミストとして停留し、地上 1 階へ流入する蒸気は半減し、施設外へはほとんど流出しない。地下 1 階および地上 1 階の容積は、それぞれ、7000 m^3 および7500 m^3 である。再処理施設では、施設内を負圧に維持しフィルタを経由して換気することで放射性物質の閉じ込めを達成する設計のため、圧力上昇による閉じ込めはできない。このため7 日間施設外への蒸気の流出を抑えるには、これらを併せた程度の空間が必要と考えられる。

大空間へ導いた蒸気は、建屋換気系で取り込まれた外気で希釈して排気系フィルタを経由して施設外へ放出される。事故の影響緩和の観点からはフィルタの健全性が重要となる。地上 1 階を経由しないと仮定した場合、100℃の蒸気(図 5.3 参照)が 7 日後に最大で約 0.5 kg/s(図 5.1 参照)の速さで建屋換気系に流入することになる。この蒸気を気温 10℃、相対湿度 30%の外気の導入により建屋換気系のなかで混合して未飽和に保ち、水蒸気の凝縮に伴うミストの発生を抑えて、換気系のフィルタ機能が維持可能かを検討するために、排気風量を変化させた感度解析を実施した。

解析では、地下 1 階から排気ダクトへの流入部を $3m \times 3m \times 4.4m$ の熱構造物のない (冷却されない) ボリュームでモデル化した。排気流量は、六ヶ所再処理施設の廃液貯槽が設置されている建屋の排気系の流量:11万 m^3/h を基本ケースとして、2倍および0.5倍にした解析を実施した。図 5.2 に合流部での飽和蒸気圧と水蒸気分圧の変化を示す。両者が等しくなると飽和状態となりミストが生成される。いずれのケースも沸騰後の早い段階で飽和に至る。排気流量が多いと合流部の気相の温度が低下し、その分飽和蒸気圧が低くなることで、より早く飽和状態となり、フィルタの健全性の観点からは、厳しい結果となる。

(2) 各区画内の気相部温度、ミスト濃度および凝縮水プール水量

a) 気相部温度

図 5.3 に建屋内の各区画の気相部の温度を示す。冷却機能喪失後 0.65 日で貯槽は沸騰する。沸騰に伴い蒸気がセル内に流入し、沸騰開始後 17.2 時間で廃ガス処理セル及び、放射性配管分岐セル (区画 D を除く) が 100℃の蒸気に満たされる。区画 D は終端の区画のため蒸気流入はほとんど無い。大空間の地下 1 階およびその下流の地上 1 階は多くの水蒸気が凝縮するため温度上昇は緩やかである。

b) 気相部ミスト濃度

図 5.4 に建屋内の各区画の気相部のミスト濃度の変化を示す。区画 D を除く配管分岐セルの各区画では、沸騰開始後短時間で気相部温度が 100 になりミストはなくなるので省略した。地下 D 階は上流からのミストの流入はなく、ミスト量は、気相部温度に対する飽和蒸気圧と全圧との差で決まる。ミスト量は温度上昇による飽和蒸気圧の上昇とともに徐々に低下し、D 日後には気相

温度が 100 $^{\circ}$ に達しミストはなくなる。地上 1 階では、当初は地下 1 階から流入するミストにより増加傾向にあるが、地下 1 階が 100 $^{\circ}$ に達した以降では、減少に転ずる。

c) 凝縮水プール水量

図 5.5 に 7 日後(解析では 6.15 日後)の建屋内の各区画の凝縮水プール水量(体積)を示す。 凝縮水量は、壁面積と蒸気の通過速度で決まる。(a)に示す絶対値は、空間体積が大きいほど多く なる傾向がある。(b)に示すように区画体積との比で比べると、上流側の廃ガス処理セル、区画 Aが大きく、下流側では地下 1 階がやや大きいもののほぼ同じ値である。

5.2 エアロゾル移行挙動解析結果

(1) 気相部のエアロゾル濃度

図 5.6 に建屋内の各区画の気相部のエアロゾル濃度の変化を示す。上流から下流に向かってエアロゾル濃度は順次低下している。廃ガス処理セルに比して地上 1 階の大空間では、解析終了時点で 10⁻² 程度まで低下し、廃ガス処理セルおよび配管分岐セルでの除去率が大きい。

(2) 床面への沈降量

図 5.7 に単位床面積当たりのエアロゾルの沈降量の変化を示す。気相部のエアロゾル濃度が大きい上流側の区画ほど単位面積当たりの沈降量が多い。地上 1 階の大空間では、解析終了時点で廃ガス処理セルに比して 10^{-3} 程度小さい。廃ガス処理セルおよび配管分岐セルでの単位床面積当たりのエアロゾルの沈降量が大きい傾向は、気相部エアロゾル濃度と同様である。

図 5.8 に各区画の床面全体の沈降量を示す。解析終了時点で発生エアロゾル総量の約 62%が、廃ガス処理セルおよび配管分岐セルの床面に沈降し、地下 1 階および地上 1 階を含めればほぼ 100%が建屋内に留まっている。凝縮液量は、地下 1 階および地上 1 階が圧倒的に多いが、エアロゾル除去の観点からは、必ずしも大空間を経由した放出が必須とは言えないことを示唆している。

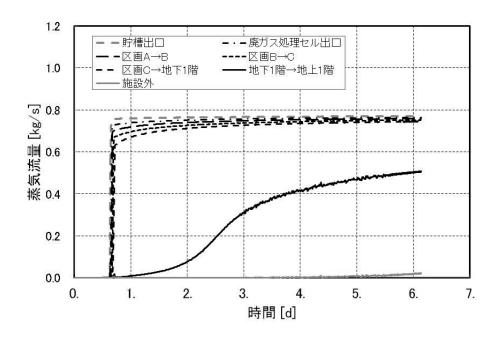


図 5.1 建屋内の各区画間の蒸気流量

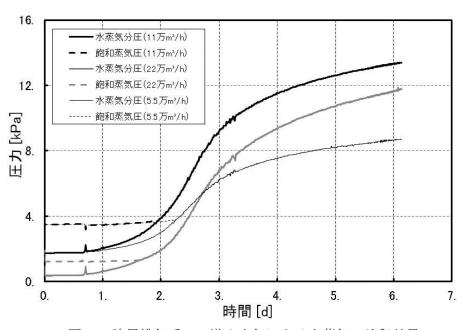


図 5.2 建屋排気系での導入空気による水蒸気の希釈効果

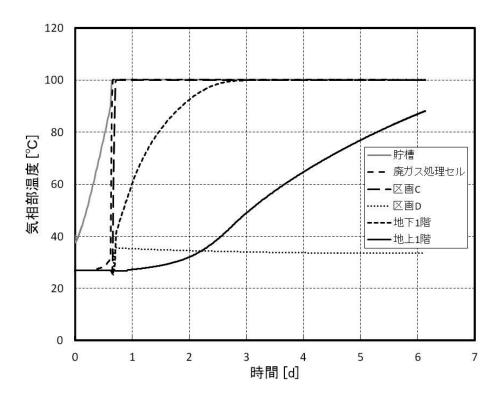


図 5.3 建屋内の各区画の気相部温度

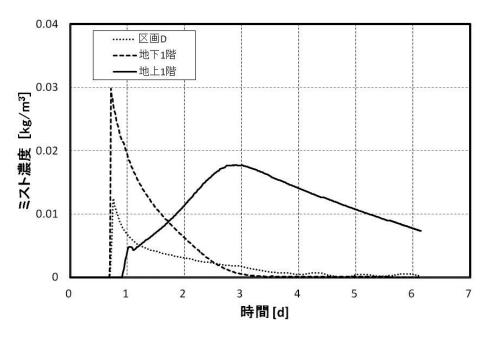


図 5.4 建屋内の各区画の気相部のミスト濃度

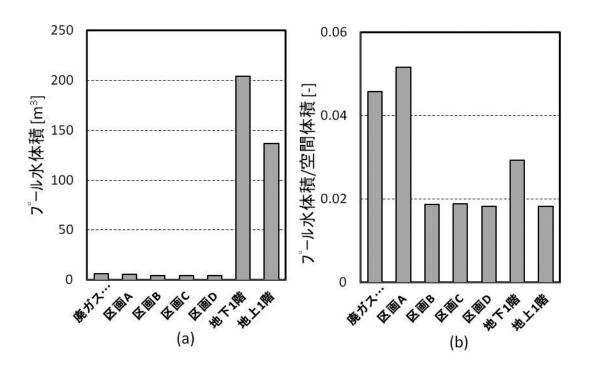


図 5.5 7日後の建屋内の各区画の凝縮水プール水量

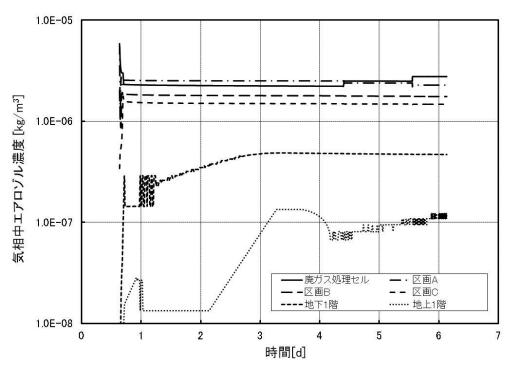


図 5.6 建屋内の各区画の気相部のエアロゾル濃度の変化

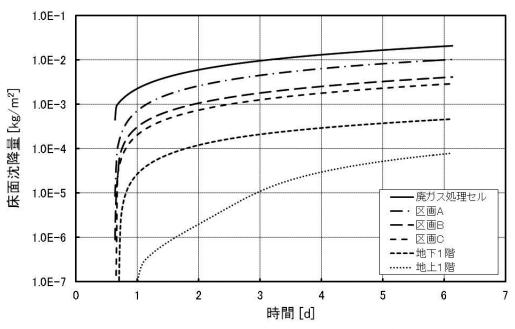


図 5.7 単位床面積当たりのエアロゾルの沈降量

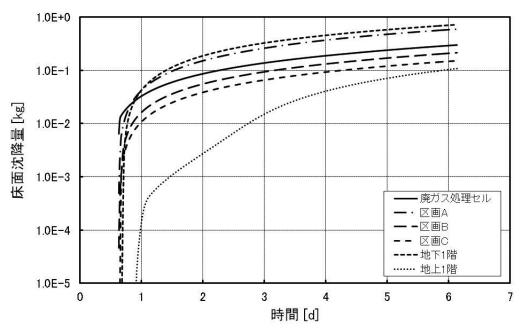


図 5.8 各区画の床面のエアロゾルの沈降量

6. まとめ

再処理施設で想定される重大事故の一つである蒸発乾固事故を対象に、重大事故対処策を考慮した事故シナリオを想定し、貯槽を含めた施設内での水蒸気等の熱流動およびエアロゾルの挙動を MELCOR を用いて解析した。その結果をもとに事故対処策が放射性物質の施設外への移行軽減に及ぼす効果について考察し、次の結論を得た。

- ・ 建屋換気系が作動している場合、廃液の沸騰開始後の早い段間で排気系内の蒸気が飽和状態に なるため排気系フィルタに水分が付着し機能低下する可能性が考えられる。
- ・ 大空間に発生蒸気を誘導することで大量に蒸気を凝縮できるが、エアロゾル除去の観点からは、 蒸気の移行経路の上流部で多くのエアロゾルが重力沈降で除去されるため、大空間のエアロゾ ル除去への寄与割合は小さい。

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) 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) 日本原燃株式会社、"Ⅱ.辞意大事故の等の拡大の防止等に関する有効性評 3.異常な水準の放出防止対策"https://www.nsr.go.jp/data/000057151.pdf (2015).
- 4) 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故事象解析"、JAEA-Research 2012-026 (2012), 25p.
- 5) 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).
- 6) 宮田 敬士 他、"六ヶ所再処理工場の確率論的安全評価、(Ⅱ) 高レベル濃縮廃液沸とう事故の発生 頻度評価 (内的事象)"、日本原子力学会和文論文誌、Vol.7, No.2, pp.85-98 (2008).
- 7) 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).
- 8) 吉田 一雄 他、"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、Vol.14, No.4, pp.213-226 (2015).
- 9) 吉田 一雄、"再処理施設の高レベル廃液蒸発乾固事故における飛沫同伴による移行率の機構論的 相関式の導出"、日本原子力学会和文論文誌、Vol.14, No.1, pp.40-50 (2015).
- 10) 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.

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本i	単位
- 本半里	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

	22 4.	25/14	+ 14 0	こして、くびられたのりは正元十二	エットレコ			
	· Ax	立量		SI 組立単位				
	水 且.			名称	記号			
面			積	平方メートル	m ²			
体			積	立方メートル	m^3			
速	さ,	, 速	度	メートル毎秒	m/s			
加	3	速	度	メートル毎秒毎秒	m/s^2			
波			数	毎メートル	m ⁻¹			
密	度,	質量	密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³			
面	積	密	度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²			
比	1	体	積	立方メートル毎キログラム	m³/kg			
電	流	密	度	アンペア毎平方メートル	A/m ²			
磁	界	の弱	きさ	アンペア毎メートル	A/m			
量	濃度	(a)	濃 度	モル毎立方メートル	mol/m ³			
質	量	濃	度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³			
輝			度		cd/m ²			
屈	折	펵		(数丁=>>) 1	1			
比	透	磁当	(b)	(数字の) 1	1			
	THE Rolls when				AT THE SHE WAY			

- 金 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。し これらは無灰元量あるいは次元1 ともっ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

±3 国右の夕私レ記号で書されるCI組立単位

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位								
			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				
	2017年	記り	表し方	表し方				
平 面 角		rad	1 ^(b)	m/m				
立 体 角		sr ^(c)	1 ^(b)	m^2/m^2				
周 波 数	ヘルツ ^(d)	$_{\mathrm{Hz}}$		s^{-1}				
力	ン	⊦ N –	그 드	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	C		A s				
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	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$				
電 気 抵 抗	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	バー	Wb	ウ V 東	m ² kg s ⁻² A ⁻¹				
磁 束 密 度	テスラ	Т	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)	$^{\circ}$ C		K				
光	ンメ	lm	ル cd s表 ^{c)}	cd				
照	スク	ЛХ	度 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	Cvv	J/kg	m ² s ⁻²				
カーマ	7 6 1	Gy	o/Kg	m s				
線量当量,周辺線量当量,	3. ← ~ n, l (g)	C	T/1	m ² s ⁻²				
方向性線量当量,個人線量当量	シーベルト(g)	Sv	J/kg	m s				
酸 素 活 性	カタール	kat		s ⁻¹ mol				
(a)CI控頭部は田右の夕新と記具を控	~知力出仕し知7.4	1-11-7 + 6	お田づきて 1 か1 協商					

- 酸素 活性 月タール kat simol
 (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、量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。
 (a)地外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。(a)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、せ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申位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度関係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勧告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. 単位の)甲に固有の名称と記号を含	むSI組工事	<u> </u>
	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	秒ルカ	Pa7s パ	m ⁻¹ Æ s ⁻¹
力のモーメント	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
角 速 度	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	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² 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
電 荷 密 度	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	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² 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/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

衣 5. SI 街頭譜								
乗数	名称	名称 記号		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	Е	10 ⁻³	ミリ	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			
10^{2}	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z			
10^{1}	デ カ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	у			

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	٥	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					

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	_	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
				1 mmHg≈133.322Pa
オンク	ゲストロー	- A	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海		里	M	1 M=1852m
バ	_	ン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
1	ツ	卜	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ	_	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 ~	74,3411 - 72441 - 12111 0

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 ≙ (10³/4 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	はさない	いその	他	の	単	位	の	例	
								-	_	_

		名利	ķ		記号	SI 単位で表される数値		
牛	ユ		IJ	ĺ	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				A	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv		
ガ		ン		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$		
フ	フェルミ			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	口		IJ	ĺ	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		