JAEA-Technology 2015-044 DOI:10.11484/jaea-technology-2015-044



# 溶液燃料臨界事故時における放射性ヨウ素の 気相への移行挙動

Study on Release Behavior of Radioiodine from Fuel Solution under Criticality Accident Condition

> 田代 信介 阿部 仁 Shinsuke TASHIRO and Hitoshi ABE

安全研究・防災支援部門 安全研究センター 燃料サイクル安全研究ディビジョン

Fuel Cycle Safety Research Division Nuclear Safety Research Center Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness 日本原子力研究開発機構

March 2016

Japan Atomic Energy Agency

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(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) 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 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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

JAEA-Technology 2015-044

## 溶液燃料臨界事故時における放射性ヨウ素の気相への移行挙動

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 燃料サイクル安全研究ディビジョン

田代 信介, 阿部 仁

(2015年12月10日 受理)

核燃料サイクル施設における溶液燃料臨界事故時の放射性ヨウ素の気相への移行挙動を把握 することは、同事故における公衆への影響を評価する観点から極めて重要である。本報では、 過渡臨界実験装置(TRACY)を用いた臨界実験において、臨界を終息させた後、溶液燃料中 の放射性ヨウ素濃度が減少傾向を示す時間まで溶液燃料を保持した条件及び臨界を継続させた 状態で溶液燃料を保持した条件の下で、TRACY 炉心気相に移行した<sup>133</sup>Iの経時的な放射能濃 度を測定した。得られた経時的な炉心タンク気相中の放射性ヨウ素濃度測定値に、放射性ヨウ 素の移行評価モデルを適用することで、放射性ヨウ素の気相への積算移行割合及び移行速度を 評価した。

過渡臨界後に臨界を終息させ溶液燃料を炉心タンク内に保持した場合には,133Iの気相への 移行速度は,ほぼ1時間後から3時間後までの時間帯で最大値を示し,8時間以降でほぼ一定 となることが分かった。また,経過時刻毎の全核分裂数と移行速度の関係を得ることができた。 一方,JCO臨界事故のように臨界が継続した状態で溶液燃料を保持した場合には,放射性ヨウ 素の積算移行割合と移行速度は時間とともに単調に増加することが分かった。

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

## JAEA-Technology 2015-044

# Study on Release Behavior of Radioiodine from Fuel Solution under Criticality Accident Condition

Shinsuke TASHIRO and Hitoshi ABE

Fuel Cycle Safety 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 December 10, 2015)

In order to estimate public dose under a criticality accident in fuel solution of a nuclear fuel cycle facility, release behavior of radioiodine from the fuel solution to atmosphere is very important. In this report, <sup>133</sup>I concentration in gas phase of TRACY core tank was measured until the concentration in the solution decreased. Furthermore, cumulative release ratio and release rate from the solution to the atmosphere of radioiodine were evaluated by applying previously reported evaluation model.

As a result, for the case of short transient criticality, release rate of <sup>133</sup>I became maximum at 1 hour later from the ending and almost constant after 8 hours later. Furthermore, relationship of each elapsed time between total fission number and release rate of <sup>133</sup>I could be derived. On the other hand, for the case of long criticality excursion, such as JCO criticality accident, the cumulative release ratio and release rate of radioiodine increased monotonously with time.

Keywords: Iodine, Criticality Accident, Confinement, TRACY

## 目 次

1.	緒言	1
2.	試験	3
2	2.1 試験装置	• 3
2	2.2 試験条件及び方法	-3
3.	試験結果及び考察	9
ć	3.1 炉心タンク気相中におけるヨウ素濃度変化	9
ć	3.2 ヨウ素の気相への積算移行割合及び移行速度の評価	10
4.	結言	17
謝	辛	17
参	考文献	18
付金	录 溶液燃料臨界時における気相への放射性物質移行評価モデル	19

# Contents

1.	Introduction	1
2.	Experiment	3
	2.1 Apparatus	3
	2.2 Experimental method	3
3.	Results and discussion	9
	3.1 Time evolution of gaseous iodine concentration in the core tank	9
	3.2 Estimation of release ratio and release rate of iodine	10
4.	Conclusion	17
Ac	cknowledgements	17
Re	eferences	18
Aŗ	opendix Model for evaluating release ratio of radioactive materials from Fuel Solution	1
	under criticality accident condition	19

This is a blank page.

## 1. 緒 言

六ヶ所再処理施設では,設計基準事故の一つとして,「溶解槽における臨界事故」が想定され, 公衆に対する影響評価がなされている<sup>1)</sup>。また,福島第一原子力発電所の事故後に制定された 再処理施設を対象とした新規制基準<sup>2)</sup>では,「セル内において発生する臨界事故」が重大事故の 一つとして挙げられることになった。このように臨界事故は,施設の設計の妥当性の評価に加 えて,設計上定める条件より厳しい条件において発生する事故時の安全性を評価する上でも, 重要な事故である。

再処理工程で取り扱う溶液(溶液燃料)で臨界事故が発生した場合には,溶液中に溶存して いる放射性物質に加えて,臨界に伴って溶液中に生成する放射性物質が気相中へ移行する。こ のうち一部のヨウ素種(無期状ヨウ素(L)及び有機ヨウ素(CH<sub>3</sub>I等))と希ガス核種は揮発 性を有しているためにガスとして気相中に移行し,セルや換気系内を移行し,その一部が施設 外へ放出される。したがって公衆への影響を評価する観点からは,これら核種の気相への移行 挙動を把握することが極めて重要である。六ヶ所再処理施設における設計基準事故の評価では, NUREG-1320<sup>3</sup>を参考にして,放射性ヨウ素の気相への移行割合を25%として評価している。 しかしながらこの数値の出典4<sup>60</sup>を遡ると,これはBWRの冷却材喪失事故についての評価指針 から引用されたものであることがわかる。このように評価対象が異なる指針からの数値を引用 したのは,溶液燃料臨界事故時の放射性物質の気相への移行割合に係る直接的なデータの報告 例がなかったためであると考えられる。しかし,重大事故として位置づけられる臨界事故評価 を行う際には,過度な保守性を廃した最適評価データを用いるべきであり,その意味で,溶液 燃料を用いた過渡臨界時の気相への積算移行割合及び移行速度データそのものが重要となる。

以上の背景の下,旧原研では,平成8年度から平成14年度まで,燃料サイクル安全工学研 究施設(NUCEF)の過渡臨界実験装置(TRACY)を用いて,低濃縮ウランの硝酸ウラニル溶 液燃料を用いた過渡臨界実験を実施し,放射性物質(ヨウ素及び希ガス等)の気相への移行挙 動データを取得してきた。

溶液燃料臨界事故の場合,溶液燃料中に存在する核分裂生成物は,それぞれが属する崩壊系 列にしたがって生成しまた減衰していくため,溶液燃料中での存在量自体が経時変化すること が大きな特徴となる。著者らは,このような特徴を踏まえ,気相中の放射性ヨウ素濃度測定値 と溶液燃料中の放射性ヨウ素の存在量の経時変化を組み合わせた核種移行評価モデルを考案し, 放射性ヨウ素の気相への移行割合を評価してきた。溶液燃料を炉心タンク中に5時間保持する という条件下で平成12年度までに得られた結果から評価した放射性ヨウ素(<sup>131</sup>I あるいは<sup>133</sup>I) の気相への積算移行割合(実験を継続した5時間後までに溶液燃料中に生成した積算量に対す る気相中に移行した積算量の割合として定義。詳細は Appendix 参照。)は、臨界を速やかに終 息させた場合の最大値が約0.2%であり、臨界を継続させた場合の最大値は約0.9%であった<sup>7-9</sup>。

しかしながら、核分裂によって生成した放射性ヨウ素の存在量の経時変化に係る計算は、5 時間後でも放射性ヨウ素が溶液燃料中に比較的多量に存在していることを示している(後述す る図5参照)。このことは、5時間後でも放射性ヨウ素の気相への移行が継続していることを意 味しており、実際に上記の報告では、積算移行割合が増加している段階での結果が示されてい る。そこで本報では、TRACY 試験において測定可能で、かつ、放射能量が大きい <sup>133</sup>I を対象 として、臨界を速やかに終息させた後の溶液燃料の保持時間を、TRACY の運転限度時間を考 慮して 10 時間まで拡大することで、溶液燃料中のヨウ素量が減少する時間帯までの放射性ヨ ウ素の積算移行割合を評価することとした。さらに、臨界を速やかに終息させた場合と終息さ せない場合の放射性ヨウ素の気相への移行挙動に対する影響を観察するため、可能な限り全核 分裂数と溶液燃料の保持時間を同じにした試験を行った。

また,実際の溶液燃料臨界事故時の事故収束のための対応方法や公衆への影響を,経過時間 との関係で検討するためには,放射性物質の積算移行割合ではなく,移行速度の経時変化が有 用な情報となるものと考えられる。そこで本報では,これまでの核種移行モデルを拡張し,放 射性ヨウ素の気相への移行速度の経時変化についても評価することとした。

## 2. 試 験

#### 2.1 試験装置

図1にTRACY<sup>10)</sup>のベントガス配管系の概略を示す。TRACY 炉心タンクを中心としてベ ント配管及び槽類が設置されており、4.5×10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/s の流量でベントガスが系全体を循環して いる。溶液燃料から炉心タンク気相中に移行したヨウ素は TRACY ベントガス配管系に移行し, ヨウ素吸着塔において回収される。この TRACY ベントガス配管系に、溶液燃料から気相中に 移行した放射性物質を捕集するためのいくつかの捕集装置(Mst, 粒子径 A/B, ヨウ素 A/B/C) を設置した。このうち Mst は、炉心タンク気相をサンプリングするものであり、エアロゾル状 放射性物質の粒径分布特性を観察するための粒子径分級ユニット(東京ダイレック(株)製 Model MC-300) とガス通過部の直径が 30 mm のカートリッジフィルタタイプのヨウ素捕集フ ィルタ(ICF)エレメントから構成されている。ICF エレメントは,溶液燃料から気相中に移 行した放射性ヨウ素を物理形・化学形別に捕集するために、エアロゾル状ヨウ素の捕集を目的 とした 1 枚のメンブレンろ紙(東洋濾紙(株)製 J100A), 無機状ヨウ素(I2)の捕集を目的 とした5枚の銀添着ろ紙(東洋濾紙(株)製 No.50 濾紙に真空蒸着法で銀を約0.3 mg/cm<sup>2</sup>蒸 着させたろ紙),さらに有機状ヨウ素(CH<sub>3</sub>I等)の捕集を目的とした3枚の硝酸銀添着アルミ ナベットフィルター(日立製作所製,硝酸銀添着率約10%,アルミナベット径:30~50メッ シュ,1枚のカートリッジ内充填量:約5.8g)から構成されている。粒子径 A/Bは7段の捕 集段からなるアンダーセンタイプカスケードインパクタ(東京ダイレック(株)製、分級可能 な粒径範囲: 0.5~7.3μm) とその後段に Mst と同様の ICF エレメントが設置されている。ま たヨウ素 A/B/C は、ICF エレメントのみが設置されている。各捕集装置には、それぞれのユニ ットやエレメントを内包したサンプラが複数本、並列に設置されており、サンプラ上部の空装 弁の遠隔操作による切換えとサンプラ下流のマスフローコントローラで所定の流量(1.7×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/s) に制御したポンプ吸引による流量サンプリングを用いて, 捕集時間毎に捕集することが できる。

#### 2.2 試験条件及び方法

試験には、<sup>235</sup>U 濃縮度約 10%,硝酸濃度約 0.7 mol/L,ウラン濃度約 400 g-U/L の組成の溶 液燃料 <sup>11)</sup>を用いた。

表1に本報告におけるTRACY 試験条件を示す。TRACY では幾つかの溶液燃料に対する反応度添加モードが選択できるが、表1の各試験は、調整トランジェント棒(図1参照)を溶液燃料中から圧空によって速やかに引抜くことで反応度を添加するパルス引抜きモードのもとで行われたものである。R174 及び R166 以外の各試験では、溶液燃料が過渡臨界となった後、調製トランジェント棒を溶液燃料中に再挿入させて速やかに臨界を終息させ、その後、それぞれの保持時間にわたって溶液燃料を炉心タンク内で保持した。R174 及び R166 については、調整トランジェント棒を溶液燃料中に再挿入しない状態(臨界継続)で、溶液燃料を炉心タンク内で5時間保持した。なお、各試験においては、保持時間後に溶液燃料をダンプ槽に排出した。表1に示した試験の内、R156 と R176 は、臨界継続の有無による放射性ヨウ素の気相へ

の移行挙動への影響を観察することを目的とした試験である。

図 2~4 にそれぞれの試験条件における核出力経時変化を示す。縦軸の核分裂率 Fs [fissions/s]は,核分裂電離箱による経時的な過渡出力値 [W]の測定値 <sup>11)</sup>を 3.2×10<sup>-11</sup> J/fission で除した値である。反応度添加量が同じ試験では,調整トランジェント棒挿入時点までの核分 裂率の時間履歴は良く一致している。表 1 中の全核分裂数 Fsa は,図 2~4 に示した各試験の Fsの時間積分値である。また,表 1 中の単位溶液燃料体積当たりの全核分裂数 Fsd [fissions/m<sup>3</sup>] は,Fsa を TRACY 炉心タンクの溶液燃料体積 0.12 m<sup>3</sup> で除して求めた。

気相に移行したヨウ素をそれぞれの捕集装置にて捕集時間毎に捕集した。試験後に各捕集装 置に設置してある各サンプラを解体してそれぞれのユニットや ICF エレメントを取り出して 密封試料化した後に Ge 検出器(セイコーEG&G(株)製 GMX・25190-P)を用いたγ線分析 を行い、ヨウ素量を定量した。六ヶ所再処理施設の設計基準事故評価では、公衆へ影響を及ぼ す観点から、臨界に伴い溶液燃料中に生成する放射性ヨウ素として<sup>131</sup>I(半減期:8.0d)、<sup>132</sup>I (同:2.3 h), <sup>133</sup>I(同:20.8 h)及び<sup>134</sup>I(同:52.6 min)並びに<sup>135</sup>I(同:6.6 h)<sup>3)</sup>を評価 対象としている。溶液燃料から放出がないと仮定した場合の溶液燃料中の放射性ヨウ素の放射 能濃度の経時変化を計算した結果を図 5 に示す。これは,パルス引き抜きによって 2.9\$の反応 度を添加し、その後、臨界を終息させたと仮定した場合の計算結果である。図 5 からは、<sup>135</sup>I の放射能濃度が最も高く、その次に <sup>133</sup>I の放射能濃度が高いことがわかる。ただし、ほぼ 15 時間以降では 133 Iの濃度が最も高くなることを考慮すると, JCO 臨界事故のように溶液燃料が 長時間にわたって存在するような事故では、133Iは評価上最も重要な核種であると考えること ができる。実際のTRACY試験においては、運転準備やy線測定のための試料調整のためには、 実質的には7日以上の時間間隔が必要であった。したがって、上述のγ線分析によって検出で きる放射性ヨウ素は、131Iと133Iに限られた。そこで本報では、TRACY 試験において測定可 能で,かつ,放射能量が大きく公衆への影響評価上最も重要な核種として,<sup>133</sup>Iに着目し,放 出挙動を評価することとした。なお, <sup>131</sup>Iは, 溶液燃料中に前試験の残存分が確認されたため, 本報での評価からは外した。

γ線分析で得られた試料中の<sup>133</sup>Iの放射能強度は、それぞれの捕集時間幅の中央時刻(以下、「捕集中央時刻基準」という。)までの崩壊補正を行い、さらに、捕集時間のサンプラ積算通過 流量で除することで、捕集中央時刻基準の放射能濃度に換算した。<sup>133</sup>Iの崩壊補正計算には、 JNDC (Japanese Nuclear Data Committee)核データライブラリ<sup>12)</sup>の核データを使用した。 計算に用いた<sup>133</sup>I を含む崩壊系列を図6に示す。

- 4 -

Run No.	反応度 [\$]	全核分裂数 Fs [fissions]	単位溶液燃料体積当 たりの全核分裂数 Fsd [fissions/m <sup>3</sup> ]	臨界継続	炉心タンク内 溶液燃料保持時間[h]
R176	0.5	$1.1  imes 10^{17}$	$9.2  imes 10^{17}$	速やかに終息	5
R156	1.5	$3.0\! imes\!10^{17}$	$2.6 imes10^{18}$	速やかに終息	5
R225 2.9		$6.5\! imes\!10^{17}$	$5.4 imes10^{18}$	速やかに終息	10
R174	0.5	$2.5  imes 10^{17}$	$2.1  imes 10^{18}$	5時間継続	5
R166	1.5	$8.5 imes10^{17}$	$5.4 imes10^{18}$	5時間継続	5

表 1 TRACY 核出力特性



図1 TRACY ベントガス配管系の概要



図 2 TRACY の核出力経時変化(R156, R166)



図 3 TRACY の核出力経時変化(R174, R176)



図 5 溶液燃料から放出がないと仮定した場合の溶液燃料中の放射性ヨウ素の放射能濃度 の経時変化の算出値



図 6<sup>133</sup>I を含む崩壊系列<sup>12)</sup> η:核分裂収率 [-], t<sub>1/2</sub>:半減期,矢印に付加した数字:分岐比

## 3. 試験結果及び考察

3.1 炉心タンク気相中におけるヨウ素濃度変化

図7にサンプリング結果をもとに算出した炉心タンク気相中の<sup>133</sup>Iの放射能濃度の経時変化 を示す。これらは、Mst で時間毎に捕集したヨウ素量を、同時間に Mst を通過した積算流量で 除することで算出したものである。<sup>133</sup>Iの放射能濃度は、過渡臨界時点から数分後から上昇し た。臨界を速やかに終息させた試験では、133Iの放射能濃度は、ほぼ1時間後から3時間後ま での時間帯で比較的高い値を示した後,徐々に減少した。気相中の<sup>133</sup>I濃度は全核分裂数が大 きいほど高い値となった。図5に過渡臨界によって溶液燃料中に生成する<sup>133</sup>Iの濃度変化の計 算例を示した。図5の計算条件は、反応度添加量やFsdは本報で取り上げた試験の条件とは異 なるために, <sup>133</sup>I 濃度の絶対値は本報での試験における値とは一致するものではないが, 溶液 燃料中の 133I 存在量の時間履歴の傾向は同様であると考えられる。図 5 からは、133I の放射能 濃度は、約3時間後に最大となり、その後、約4時間後にかけて微減し、それ以降、徐々に減 少していくことがわかる。放射性物質の溶液燃料から気相への移行には、溶液燃料中に存在し ている放射性物質量の大小や溶液燃料内部の撹拌効果及び気泡生成による気液接触面積の増大 などの物理的な効果が影響しているものと考えられる。図7のR176における炉心タンク気相 中の 133I の放射能濃度の経時変化は、図5 に示した溶液燃料中の 133I の放射能濃度や図 12 の 放射性ヨウ素全体のモル濃度の経時変化とよく似ている。R176は、これら3試験の内でもっ とも添加反応度が低かったために出力ピークにおける核分裂率も約3桁小さい。そのため、上 述の物理的な効果の寄与が他の2試験より小さく、気相への移行挙動が溶液燃料中での放射性 ヨウ素の存在量の経時変化の挙動と似た傾向となったのではないかと考えている。このことは、 Fsd が大きいほど気相中での 133I の放射能濃度は高くなり、かつ、濃度の上昇も速かったとい う図7の傾向とも矛盾しない。臨界を速やかに終息させたうえで溶液燃料を10時間保持した 試験(R225)では、おおよそ4時間以降に気相中の<sup>133</sup>Iの放射能濃度の低下が顕著となり、6 時間以降その割合を緩めながら10時間後まで低下していった。

過渡臨界後に調整トランジェント棒を再挿入せず,臨界継続させた試験(R174, R166)でも, Fsd が大きいほど<sup>133</sup>Iの放射能濃度は高く推移した。特に,R166は,R174を含めた他の試験 結果よりも約1桁高い値となった。またR174及びR166ともに,他の試験結果と異なり,気 相中の<sup>133</sup>Iの放射能濃度は単調に増加していく傾向が観察された。これは,臨界継続によって, 溶液燃料中での<sup>133</sup>Iの生成が継続することに加え,溶液燃料内部の撹拌効果や気泡生成による 気液接触面積の増大などの物理的な効果も,臨界を終息させた試験結果と比べて,より大きく 寄与しているためと考えられる。



図7 炉心タンク気相中の <sup>133</sup> Iの放射能濃度の経時変化

3.2 ヨウ素の気相への積算移行割合及び移行速度の評価

<sup>133</sup>Iの気相への積算移行割合は,著者らが考案した溶液燃料臨界事故時の放射性物質移行評価モデル<sup>7-9</sup>(詳細は Appendix に再掲)を適用して評価した。

本報では、この評価モデルに対して以下の式を新たに連立させることで、<sup>133</sup>Iの気相への移 行速度 RR<sub>I</sub> [mol/m<sup>2</sup>/s]を評価した。

$$RR_{\rm I} = \frac{\xi_{\rm I} \times I_{\rm sol}}{A_{\rm sol}}$$

ここで, ξ<sub>I</sub> [s<sup>-1</sup>]は<sup>133</sup>Iの溶液中から気相への移行係数, I<sub>sol</sub>は溶液燃料中<sup>133</sup>I 原子数, A<sub>sol</sub> [m<sup>2</sup>] は TRACY 炉心タンク内における溶液燃料の表面積(0.02 m<sup>2</sup>)である。

<sup>133</sup>Iの気相への移行速度の評価結果を図8及び図9に示す。図9はR166以外の試験に対す る評価結果を拡大して示したものである。臨界を速やかに終息させた試験(R176, R156, R225) に対する評価結果は、図6に示した炉心タンク気相中の<sup>133</sup>I放射能濃度の経時変化と同様に、 過渡臨界からほぼ1時間後から3時間後までの時間帯で比較的高い値を示した後、徐々に減少 した。また、Fsdが大きいほどその値は大きく、増加の割合も高かった。溶液燃料を炉心タン ク内に10時間保持したR225に対する評価結果を見ると、気相への移行速度は、過渡臨界から 5時間以降も時間経過とともに低下していった。これは、溶液燃料中の<sup>133</sup>I濃度が減少したた めと考えられる。なお、8時間以降でほぼ一定となった気相への移行速度は、約 7.7×10<sup>13</sup> mol/m<sup>2</sup>s であった。一方,過渡臨界後に調整トランジェント棒を再挿入せず臨界継続させた試 験(R174, R166)では、気相への移行速度は単調に増加した。この傾向も図6に示した炉心タ ンク気相中の 133I 放射能濃度の経時変化と同様の傾向である。図 10 に, R176 評価結果を基準 とした相対的な<sup>133</sup>Iの気相への移行速度の経時変化を示す。これは、それぞれの試験に対して 評価された 133I の気相への移行速度を, R176 に対して得られた値で除したものである(した がって, R176 では1となっている。)。臨界を速やかに終息させた試験(R156, R225)では, 時間経過とともに R176 評価結果に漸近する傾向が見られる。上述のように、ヨウ素の気相へ の移行速度に対しては、溶液燃料中のヨウ素濃度の増加や溶液燃料の温度上昇に伴う溶液燃料 内部の撹拌効果及び気泡生成による気液接触面積の増大、溶液燃料の温度の上昇などの気液面 における物質移動に係る物理的な効果の影響を受ける。しかしながら、臨界終息後の時間経過 に伴って、ヨウ素濃度以外の影響が低下するため、各試験における気相への移行速度評価結果 が漸近していくものと考えられる。それに対して, R174 及び R166 では相対的な気相への移 行速度は単調に増加した。特に,R166 に対する評価結果は,過渡臨界から 4.5 時間後で比べ ると、他の試験と比べると 30 倍程度大きな値となった。これは、臨界継続により上述の 2 つ の効果が、臨界を終息させた試験結果と比べて、より大きく寄与したためと考えられる。

気相への積算移行割合の経時変化の評価結果を図 11 に示す。臨界を速やかに終息させた試 験(R176, R156, R225)での気相への積算移行割合は,Fsdの増加とともに減少している。こ の傾向は,図8に示した気相への移行速度の傾向とは逆である。図12に,R176評価結果を基 準とした溶液燃料中の<sup>133</sup>I存在量の経時変化を示す。溶液燃料中の相対的な<sup>133</sup>I存在量は,R176 に対して,R156及びR225で,それぞれ約3倍及び約6倍となっている。それに対して,図 10に示したように,<sup>133</sup>Iの相対的な気相への移行速度は,約1.5倍及び約2倍であった。この ことは,Fsdの増加に伴って,<sup>133</sup>Iの気相への移行速度自体は増加するが,その増加割合より も,溶液燃料中の<sup>133</sup>I濃度の増加割合が大きいことを意味している。このことから,図11に 示したFsdの増加に伴う積算移行割合の見かけ上の低下の傾向が評価されたものであると考え ることができる。

一方,過渡臨界後に調整トランジェント棒を再挿入せず,臨界継続させた試験(R174, R166)の積算移行割合は,臨界を速やかに終息させた試験に比べて高い値となった(R174 では Fsd が若干小さい R176 の結果に近い値となっている)。特に,R166の積算移行割合は,過渡臨界 から 4.5 時間後の値は約 1.0%となっている。これは,臨界継続によって,溶液燃料中での <sup>133</sup>I の生成が継続することに加え,溶液燃料内部の撹拌効果や気泡生成による気液接触面積の増大 などの物理的な効果がより大きく寄与したためと考えられる。

このように、本報におけるヨウ素の積算移行割合は、六ヶ所再処理施設の設計基準事故評価 で採用している 25%を十分下回っている。しかしながら、ヨウ素は、溶液燃料のような酸性溶 液中に溶存すると揮発性化学形となり気相中に移行する。したがって、溶液燃料が炉心タンク 内に存在し続けた場合、溶液燃料中の放射性ヨウ素が十分減衰するまでは放射性ヨウ素の気相 への移行は継続することになり、積算放出割合は単調に増大することになる。このことから、 従来の再処理施設における安全評価のように五因子法の考え方に基づいて事故時の公衆への影 響を評価する場合,ヨウ素の積算収量に乗ずる積算移行割合としてどのような値を採用するか は,臨界事故の継続時間のみならず,その継続時間内での溶液燃料の保持状態(臨界が継続し ていたか否か)を十分検討する必要がある。

溶液燃料の臨界事故を考えた場合,事故収束のための手段としては,Gd 等の中性子吸収材 を溶解した水溶液を溶液燃料に加えることが想定される。この場合,臨界が停止し,その状態 のまま,溶液燃料が保持されることになる。一方,1999年9月に発生したJCO 臨界事故では, 臨界が約20時間継続し,その間,放射性物質の放出が続いた。表1に示した本報での試験条 件の内,臨界後に速やかに終息させた試験(R176,R156,R225)は,前者の事故条件に近く, また,臨界を継続させた試験(R174,R166)は,後者の事故条件に近い。図13に,単位溶液 体積当たりの全核分裂数と<sup>133</sup>Iの気相への移行速度との関係を示す。これらの結果は,臨界を 速やかに終息させた試験で得られたものである。したがって,図13の結果は,臨界後に事故 対応を行うことで臨界を終息させた場合の条件に該当する。移行速度は,時間とともに増加し, 臨界終息後約2時間後をピークとしてその後低下していくことがわかる。図13に示した結果 から,事故評価において想定する具体的な全核分裂数に対応する移行速度を補間し読み取るこ とで,暫定的ながら各時刻における<sup>133</sup>Iの気相への移行速度を得ることができる。例えば,溶 液燃料体積を3m<sup>313</sup>,全核分裂数を1×10<sup>19</sup> fissions(すなわちFsd=3.3×10<sup>18</sup> fissions/m<sup>3</sup>) <sup>10</sup>の条件を仮定した場合には,図13の結果から<sup>133</sup>Iの気相への移行速度を読み取ることで,図 14に示した放出速度の時間履歴を算出することができる。



図 9 133I の気相への移行速度の経時変化評価結果(除 R166)



図 10 規格化した <sup>133</sup>I の気相への移行速度(R176の移行速度に対する相対値) の経時変化評価結果



図 11 133 Iの気相への積算移行割合の経時変化評価結



図 12 規格化した溶液燃料中の<sup>133</sup>I存在量(R176の存在量に対する相対値) の経時変化評価結果



図 13 単位容積当たりの全核分裂数別の 133 I の気相への移行速度の関係



図 14 仮想した臨界事故時における <sup>133</sup> Iの気相への移行速度の経時変化計算例

## 4. 結 言

再処理施設における臨界事故は、従来の設計基準事故に加えて、新規制基準において新たに 定義された重大事故の一つとしても取り上げられており、施設の安全性を定量的に確認する上 で重要な事故である。本報では、溶液燃料過渡臨界実験で得られた経時的な炉心タンク気相中 の放射性ヨウ素濃度測定値に、著者らが考案した放射性ヨウ素の移行評価モデルを適用するこ とで、<sup>133</sup>Iの気相への積算移行割合及び移行速度を評価した。過渡臨界後に臨界を速やかに終 息させた場合には、<sup>133</sup>Iの気相への移行速度は、ほぼ1時間後から3時間後までの時間帯で最 大値を示した後低下し、8時間以降でほぼ一定となることが分かった。また、経過時刻毎の全 核分裂数と移行速度の関係を得ることができた。過渡臨界後に臨界を速やかに終息させた条件 は、重大事故対策として過渡臨界開始後速やかに中性子吸収材を溶液燃料に投入して未臨界状 態にした条件に近い。本報で得られた経過時刻毎の全核分裂数と移行速度の関係に対して、事 故評価で想定される全核分裂数条件を補間することで、暫定的ではあるが、時刻毎の放射性ヨ ウ素の気相への移行速度を見積もることが可能となる。一方、JCO 臨界事故のように臨界が継 続した場合には、放射性ヨウ素の積算移行割合と移行速度は時間とともに単調に増加すること が分かった。

本試験のような低濃縮ウラン溶液燃料を対象とした過渡臨界実験及び放射性物質放出実験は 世界的に見ても例がなく、本報で述べた評価結果は、事故時の影響評価を行ううえで貴重な技 術的知見である。今後は、溶液燃料における核的動特性評価やヨウ素の移行経路での挙動評価 との結合を行うことで、総合的な溶液燃料臨界事故時の影響評価手法の確立を図っていく。

#### 謝 辞

TRACY の運転ならびに核出力データをご提供いただきました安全試験部 NUCEF 技術第1 課(当時)の関係者の皆様に感謝いたします。

閉じ込め試験装置のセットアップ,運転,試料のガンマ線分析を著者らと共同で実施いただ きました,プロセス安全研究室(当時)の津幡靖宏,永井 斉,小池忠雄,岡川誠吾の各氏, (財)高度情報科学技術研究機構(当時)鹿島陽夫,千代田メインテナンス(株)綿引 剛の 各氏に感謝いたします。

# 参考文献

- 1) 日本原燃(株):再処理事業所 再処理事業指定申請書(1997).
- 2) 原子力規制委員会:使用済燃料の再処理の事業に関する規則,原子力規制委員会規則第六 号 (2015.8.31).
- J. E. Ayer, A. T. Clark, P. Loysen et al., Nuclear Fuel Cycle Facility Accident Analysis Handbook, NUREG-1320 (1988).
- U. S. Nuclear Regulatory Commission (NRC): Assumptions Used for Evaluating the Potential Radiological Consequences of Accidental Nuclear Criticality in a Fuel Reprocessing Plant, Regulatory Guide 3.33 (1977).
- 5) U. S. Nuclear Regulatory Commission (NRC): Assumptions Used for Evaluating the Potential Radiological Consequences of Loss of Coolant Accident for Boiling Water Reactors, Regulatory Guide 1.3 (1974).
- 6) U. S. A.E.C.: Calculation of Distance Factors for Power and Test Reactor Sites, TID-14844 (1962).
- 7) 阿部 仁,田代 信介,永井 斉,小池 忠夫,岡川 誠吾,村田 幹生,"溶液燃料の過渡臨 界事象に伴う放射性ヨウ素及び希ガス等の放出挙動の検討(受託研究)", JAERI-Tech 99-067 (1999), 23p.
- 8) 阿部 仁,田代 信介,小池 忠雄,岡川 誠吾,内山 軍藏,"溶液燃料過渡臨界事故時にお ける放射性希ガスの放出挙動の検討(受託研究)", JAERI-Research 2001-027 (2001), 20p.
- 9) H. Abe, S. Tashiro, T. Koike, S. Okagawa and G. Uchiyama, "Source term on release behavior of radioactive materials from fuel solution under simulated nuclear criticality accident", ANS NCSD Topical Meeting full paper (2001).
- K. Nakajima, Y. Yamane, K. Ogawa, E. Aizawa, H. Yanagisawa and Y. Miyoshi, "TRACY Transient Experiment Databook 1) Pulse Withdrawal Experiment", JAERI-Data/Code 2002-005 (2002), 158p.
- 11) 會澤 栄寿, 小川 和彦, 櫻庭 耕一, 塚本 導雄, 菅原 進, 竹内 真樹, 宮内 正勝, 柳澤 宏 司, 大野 秋男, "TRACY の運転記録", JAERI-Tech 2002-031 (2002), 120p.
- K. Tasaka, J. Katakura, H. Ihara et al., "JNDC Nuclear Data Library of Fission Products –Second Version-", JAERI 1320 (1990), 253p.
- 13) 日本原燃株式会社,第84回核燃料施設等の新規制基準適合性に係る審査会合資料2(2) 六 ヶ所再処理施設における新規制基準に対する適合性【重大事故等対処施設】「溶解槽におけ る臨界事故」への対処の有効性評価,https://www.nsr.go.jp/data/000129269.pdf(参照: 2015年12月1日).

#### Appendix:溶液燃料臨界時における気相への放射性物質移行評価モデル<sup>7-9)</sup>

評価モデルの概要を図Aに示す。2章2.1 で述べたように TRACY 炉心タンク気相はベント ガスによって常に一定の割合で希釈・換気されており, Mst から得られたデータを基に気相中 に放出された放射性核種量を評価するためには、この換気による希釈効果をも考慮する必要が ある。本モデルでは、<sup>133</sup>Iの溶液中から気相への移行係数ξ [s<sup>-1</sup>]とベントガスによる TRACY 炉心タンク気相内の換気効果を表す希釈係数ψ [s<sup>-1</sup>]を導入し、炉心タンク溶液中及び気相中に おける<sup>133</sup>Iの濃度を以下の式で表している。

(溶液中の<sup>133</sup>I原子数の時間変化)

1т

$$\frac{dI_{sol}}{dt} = Fs \times \eta_{I} + \lambda_{p} \times P_{sol} - (\lambda_{I} + \xi_{I}) \times I_{sol}$$
(A-1)

$$\frac{dI'_{sol}}{dt} = Fs \times \eta_I + \lambda_p \times P_{sol}$$
(A-2)

(気相中の<sup>133</sup>I原子数の時間変化)

$$\frac{dI_{gas}}{dt} = \xi_{I} \times I_{sol} - (\lambda_{I} + \psi) \times I_{gas}$$
(A-3)

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{I}_{\mathrm{gas}}}{\mathrm{d}\mathbf{t}} = \boldsymbol{\xi}_{\mathrm{I}} \times \mathbf{I}_{\mathrm{sol}} \tag{A-4}$$

ここで、I<sub>sol</sub>及び I<sub>gas</sub> は溶液燃料中及び TRACY 炉心タンク気相中の <sup>133</sup>I 原子数である。I'<sub>sol</sub>及 び I'<sub>gas</sub> はそれぞれ I<sub>sol</sub>及び I<sub>gas</sub> の時間変化を表す微分方程式から消滅項を削除した式より計算さ れる <sup>133</sup>I 原子数であり、溶液中及び気相中で減衰せず蓄積していくものと考えた場合の <sup>133</sup>I の 積算原子数である(すなわち I'<sub>sol</sub>はその時刻までの積算生成量を意味する。)。また Fs [s<sup>-1</sup>]は単 位時間当たりの核分裂数、η [·]は核分裂収率そして $\lambda$  [s<sup>-1</sup>]は崩壊係数である。さらに P は親核 種を、また添字 I は <sup>133</sup>I の値であることを表している。Fs については各試験の出力の経時変化 曲線を幾つかの時間領域に分け、指数曲線で近似することで経時変化曲線を得ている。 $\psi$ につ いては、TRACY 炉心タンクと同一形状を有する模擬装置を製作し、ベントガス流量及び炉心 タンク内気相体積等の条件を TRACY 試験に合わせた上で、実験的に測定し決定している <sup>6</sup>。

本報の解析では、気相容積 0.28 m<sup>3</sup>、ベントガス流量 4.5×10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/s の条件の下で測定された値 (0.016 s<sup>-1</sup>)を使用した。過渡臨界時には炉心タンク中では溶液燃料液面の上昇等の動的現象 が引き起こされている。したがって、特に過渡臨界直後のψは、このような静的な実験条件で 得られた値とは厳密には異なることが予想される。過渡臨界直後のψの評価に TRACY 炉心タ ンク内での動的な現象による効果を取り入れることは今後の課題である。ただし、図 6 に示し たように、<sup>133</sup>I は、過渡臨界からある程度時間遅れをもって気相への移行が顕著となることか ら、ψに対するこれら動的現象の影響は小さいと考えられる。

上記の微分方程式のうち、Igas を気相中の濃度に変換した値は、Mst で測定された実験デー

タに対応する。そこで Mst で測定された炉心気相中の <sup>133</sup>I の個数の経時変化(図 8 参照)が以下の式で表されるものと仮定している <sup>6-8)</sup>。

$$I_{\rm gas} = \alpha \times exp(\beta \times t)$$

ここで, α及びβはパラメータである。これらパラメータを Mst による実測値を用いて測定時間 間隔毎に算出する。またこの式から Igas の時間変化に関する微分方程式を以下のように表すこ ともできる。

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{I}_{\mathrm{gas}}}{\mathrm{d}\mathbf{t}} = \alpha \times \beta \times \exp(\beta \times \mathbf{t}) \tag{A-6}$$

この式と(A-3)式を連立させてξを決定するとともに(A-1)~(A-4)式を連立させることで各変数 の経時変化を算出した。そして以下の式で定義される<sup>133</sup>Iの気相への積算移行割合 R<sub>I</sub>[%]の経 時変化を計算した。なおこれらの計算には,図5に示した JNDC 核データライブラリに記載さ れた核データを用いた<sup>12)</sup>。

$$R_{I} = \frac{I'_{gas}}{I'_{sol}} \times 100$$
 (A-7)

ベントガス  
サンプラ  

$$\lambda_{I}$$
  
 $\mu_{gas}$   
 $\lambda_{gas}$   
 $\lambda_{gas}$   
 $\lambda_{gas}$   
 $\lambda_{I}$   
 $\mu_{sol}$   
 $\lambda_{I}$   
 $\lambda_{I}$ 

## 図A <sup>133</sup>Iの気相への放出モデル <sup>6-8)</sup>の概要

(A-5)

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本ì	SI 基本単位			
盔半里	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	А			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
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						
an de La SI 組立単位	SI 組立単位					
名称	記号					
面 積 平方メートル	m <sup>2</sup>					
体 積 立方メートル	m <sup>3</sup>					
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s					
加 速 度メートル毎秒毎秒	$m/s^2$					
波 数 毎メートル	m <sup>-1</sup>					
密度,質量密度キログラム毎立方メート/						
面積密度キログラム毎平方メート/	$\nu$ kg/m <sup>2</sup>					
比体積 立方メートル毎キログラ」	m <sup>3</sup> /kg					
電 流 密 度 アンペア毎平方メート/	$\nu$ A/m <sup>2</sup>					
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m					
量 濃 度 <sup>(a)</sup> , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>					
質量濃度 キログラム毎立方メート/						
輝 度 カンデラ毎平方メート/	$\nu$ cd/m <sup>2</sup>					
屈 折 率 <sup>(b)</sup> (数字の) 1	1					
比 透 磁 率 <sup>(b)</sup> (数字の) 1	1					
(a) 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。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、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。

#### 表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

	SI 旭立単位				
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方	
平 面 隹	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 (в)	m/m	
立 体 催	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 (b)	$m^2/m^2$	
周 波 数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	1	s <sup>·1</sup>	
力	ニュートン	Ν		m kg s <sup>-2</sup>	
压力,応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>	
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	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$	
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	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$	
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$	
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	$\text{kg s}^{2} \text{A}^{1}$	
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 <sup>(e)</sup>	°C		K	
光東	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd	
照度	ルクス	lx	$lm/m^2$	m <sup>-2</sup> cd	
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>	
吸収線量,比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^{-2}$	
線量当量,周辺線量当量, 方向性線量当量,個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$	
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol	

酸素活性(カタール) kat [s<sup>1</sup> mol
 (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 ュ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。
 (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)へルツは周頻現象についてのみ、ペラ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。
 (e)セン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。やレシウス度とケルビンの
 (d)ペルジは高頻現象についてのみ、ペラ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。
 (e)センジス度はケルビンの特別な名称で、1、通道を表すために使用される。それシウス度とケルビンの
 (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.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	SI 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 <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>		
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>		
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>		
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>		
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 <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>		
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 <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>		
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>		
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>		
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A		
表 面 電 荷	「クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A		
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A		
誘 電 卒	コァラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$		
透磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>		
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 <sup>-1</sup> 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 <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>		
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	$m^{-3} s^{-1} mol$		

表 5. SI 接頭語						
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号	
$10^{24}$	<b>э</b> 9	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d	
$10^{21}$	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	с	
$10^{18}$	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 <sup>-9</sup>	ナノ	n	
$10^{9}$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピコ	р	
$10^{6}$	メガ	М	$10^{-15}$	フェムト	f	
$10^{3}$	+ 1	k	$10^{-18}$	アト	а	
$10^{2}$	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			
日	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 <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>			
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>			
トン	t	$1 \pm 10^3 \text{ kg}$			

## 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	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J		
ダル	ŀ	$\sim$	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg		
統一原于	子質量単	单位	u	1 u=1 Da		
天 文	単	位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> 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 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海 里	М	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{\cdot 12} \text{ cm})^2=10^{\cdot 28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	の単位しの教徒的な問題は
ベル	В	31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 -	

#### 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 <sup>-7</sup> J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N			
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s			
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$			
スチルブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx			
ガル	Gal	1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>			
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$			
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10 <sup>3</sup> /4 π)A m <sup>-1</sup>			
(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						
	4	名利	5		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	-	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
$\scriptstyle  u$	$\sim$	ŀ	ゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ĸ	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
$\scriptstyle  u$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	Ξ		1フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 <sup>-4</sup> kg
ŀ				N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力			IJ	-	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			~	ц	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$