JAEA-Research 2018-013 DOI:10.11484/jaea-research-2018-013



モックアップ試験流下ガラス試料の放射光XAFS分析 (受託研究)

Synchrotron Radiation Based XAFS Analysis of the Simulated Nuclear Waste Glass Samples Prepared by Bottom Drain Test in the Full-scale Mock-up Melter (KMOC) (Contract Research)

岡本 芳浩	永井 崇之	塩飽 秀啓	狩野	茂
姫野 晴行	小林 大志	中谷 三喜ぬ	É	

Yoshihiro OKAMOTO, Takayuki NAGAI, Hideaki SHIWAKU, Shigeru KANO Haruyuki HIMENO, Hiroshi KOBAYASHI and Mikio NAKATANI

> 原子力科学研究部門 原子力科学研究所 物質科学研究センター 放射光エネルギー材料研究ディビジョン

Energy and Environment Materials Science Division Materials Sciences Research Center Nuclear Science Research Institute Sector of Nuclear Science Research **March 2019**

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(<u>https://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, 2019

モックアップ試験流下ガラス試料の放射光 XAFS 分析 (受託研究)

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力科学研究所 物質科学研究センター 放射光エネルギー材料研究ディビジョン

岡本 芳浩、永井 崇之⁺、塩飽 秀啓、狩野 茂⁺、姫野 晴行^{*}、小林 大志^{*}、中谷 三喜雄^{*}

(2018年12月25日 受理)

模擬廃液を利用したガラス固化体モックアップ試験のうち、高レベル模擬廃液供給 20 バッ チ分の流下ガラス試料中の元素の化学状態および局所構造を、放射光 XAFS 分析によって調べ た。セリウム元素の分析の結果、バッチが進むにつれて、緩やかに酸化が進む傾向が確認され た。マンガン、鉄、亜鉛については、バッチ間の違いはほとんど認められず、ガラスの骨格構 造に入り込んで安定化しているものとみられた。EXAFS 解析の結果では、白金族元素を除き、 明らかに結晶性と思われる元素は無かった。イメージング分析の結果、ジルコニウムやモリブ デンでは、目立った析出はほとんど観察されなかった。白金族元素では、筋状の析出が認めら れたが、いずれも小さなものであった。

本報告書は、日本原燃株式会社からの委託研究契約により、日本原子力研究開発機構が実施した研究成果の一部をまとめたものである。

原子力科学研究所·播磨事務所:〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

- + 核燃料・バックエンド研究開発部門 核燃料サイクル工学研究所 再処理廃止措置技術開発センター ガラス固化部
- * 日本原燃株式会社

JAEA-Research 2018-013

Synchrotron Radiation Based XAFS Analysis of the Simulated Nuclear Waste Glass Samples Prepared by Bottom Drain Test in the Full-scale Mock-up Melter (KMOC) (Contract Research)

Yoshihiro OKAMOTO, Takayuki NAGAI+, Hideaki SHIWAKU, Shigeru KANO+, Haruyuki HIMENO*, Hiroshi KOBAYASHI* and Mikio NAKATANI*

Energy and Environment Materials Science Division, Materials Sciences Research Center, Nuclear Science Research Institute, Sector of Nuclear Science Research, Japan Atomic Energy Agency Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo-ken

(Received December 25, 2018)

The chemical state and local structure of some elements in the simulated nuclear waste glass samples (20 batches) prepared by bottom drain test in the full scale mock-up tests using KMOC melter were investigated by synchrotron radiation based X-ray absorption fine structure (XAFS) analysis. As a result of the analysis of cerium element, it was confirmed that the oxidation proceeds gently as the batch advanced. For manganese, iron, and zinc, there was almost no difference between batches, which seemed to be stabilized by getting into the frame structure of the borosilicate glass. There were no elements that seemed to be clearly crystalline except for platinum group elements. Remarkable precipitation was hardly observed in zirconium and molybdenum with the imaging analysis.

Keywords: XAFS, Imaging XAFS, Vitrification, Nuclear waste

This work was performed by Japan Atomic Energy Agency under contract with Japan Nuclear Fuel Ltd.

+ Vitrification Department, TRP Decommissioning Center, Nuclear Fuel Cycle

Engineering Laboratories, Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste

Management Technology Development

* Japan Nuclear Fuel Limited

目 次

1.	緒言	1
2.	分析試料と放射光実験	1
3.	放射光 XAFS 分析の結果	3
ę	3.1 セリウム(L ₃ 吸収端)	3
ę	3.2 セリウム(K吸収端)	5
ć	3.3 クロム、マンガンおよび鉄	6
ć	3.4 亜鉛	7
ć	3.5 ジルコニウム	7
ć	3.6 モリブデン	8
e e	3.7 ルテニウム	9
e e	3.8 ロジウム	9
ę	3.9 パラジウム	- 10
ć	3.10 XAFS スペクトルによる白金族元素量の評価	• 11
ć	3.11 ストロンチウム、イットリウム(予備的結果)	-12
4.	イメージング XAFS 分析の結果	-13
5.	まとめ	·16
謝	锌	-17
参	考文献	-17

Contents

1.	Introduction	1
2.	The sample and XAFS experiment	1
3.	Synchrotron radiation based XAFS analysis results	3
	3.1 Cerium (L ₃ -edge)	3
	3.2 Cerium (K-edge)	5
	3.3 Chromium, Manganese and Iron	6
	3.4 Zinc	7
	3.5 Zirconium	7
	3.6 Molybdenum	8
	3.7 Ruthenium	9
	3.8 Rhodium	9
	3.9 Palladium	10
	3.10 Evaluation of platinum group element quantity by XAFS spectrum	11
	3.11 Strontium and Yttrium (Preliminary results)	12
4.	Imaging XFAS results	13
5.	Summary	16
A	cknowledgements	17
R	eferences	17

1. 緒言

ガラス固化体は、ガラス原料(ここではホウケイ酸ガラス)と多数の種類の元素から構成さ れる高放射性廃液を、高温で溶融混合して製造される多成分系物質である。そのため、ガラス 中における構成元素ごとの化学状態や局所構造に関する情報を得ることは重要である。XAFS 法は、元素のX線吸収端に基づく分析法であり、吸収端のエネルギーは元素固有なので、強い 元素選択性を有している。つまり、多成分系の中から、特定の元素の情報を抜き出すことを得 意としている。また、対象元素の濃度が低くても、精度の高い分析が可能である。特に蛍光X 線を使用したXAFS分析では、使用する機器にもよるが、数ミリモルの微量成分の分析が可能 になる。そのため、国内外の放射光施設において、ガラス固化試料の分析に幅広く使用されて いる。たとえば、フランスの標準ガラス固化試料 SON68 では、数多くの構成元素周りの構造 情報がまとめられているが[1]、そのほとんどは放射光 XAFS から得られた結果である。

こうした事情を背景に、ガラス固化技術に関する研究では、対象試料を XAFS 法を使って分 析されることが多い。我々も、ホウケイ酸ガラス中の白金族元素の化学状態を、放射光 XAFS 法を駆使して調べてきた[2,3]。ただし、そのほとんどは実験室スケールで調製された試料を対 象としたものである。これによりガラスと廃液の反応、混合状態などの評価は可能だが、実際 にはガラス溶融炉内で対流し、最終的には流下することで固化体になる。そのため、実機規模 のガラス溶融炉で実際に流下させるモックアップ試験が実施されている。本報告書は、日本原 燃株式会社が日本原子力研究開発機構において実施したモックアップ試験(KMOC)のうち、 8 次試験(フェーズ 5)(以降、KMOC#8(5))の流下ガラス試料の一部についての放射光分析 実験の結果をまとめたものである。

2. 分析試料と放射光実験

放射光分析に使用したガラス試料は、KMOC#8(5)試験において、高模擬廃液供給の連続 20 バッチ(以降、B-1~B-20と表記)で製作・採取されたものである。使用した試料は、同じ測 定条件にするため、流下到達重量 100kg 採取で統一した。流下試験試料の塊から、放射光実験 用に薄板状に切り出したものを測定に使用した。板の厚さは、広範囲のX線エネルギーに対応 できるように、1.0mm および 2.0mm の 2 種類とした。

分析対象元素は、酸化還元状態についての有力な情報が期待できるセリウム、化学状態が目 まぐるしく変化すると予想されるロジウムおよびそれと同時にデータ取得が可能なパラジウム の3元素については、全バッチ試料を対象として重点的に XAFS 測定を実施した。このほか、 クロム、マンガン、鉄およびルテニウムが過半数の試料を対象に、ジルコニウムおよびモリブ デンが8割以上の試料を対象に XAFS 測定を実施した。亜鉛はガラス原料成分だが、廃棄物成 分含有によりその局所構造を変える可能性があることから、測定対象とした。このほか、スト ロンチウムおよびイットリウムを試験的に測定した。イメージング XAFS 測定[4]については、 4 試料について実施した。XAFS 測定は、高エネルギー加速器研究機構放射光実験施設 (KEK-PF)の BL-27B ステーション、大型放射光施設 SPring-8 の BL11XU および BL22XU を使用した。利用した施設と対象元素の組み合わせは、表1の通りである。

放射光 XAFS 測定のレイアウトを図1に示す。通常の XAFS 測定では、試料の前後に検出器 を置いて吸収係数を測定する透過法と、試料表面からの蛍光 X 線を選別して測定する蛍光法の 2 通りを使用した。透過法は、試料を透過する X 線を測定するので、バルクの情報が得られる のが特徴である。一方、蛍光 X 線は試料表面からの反射なので、蛍光法では表面近傍の情報が 得られる。測定では、透過法によって測定可能な場合は、透過法によるデータ取得を優先した。 吸収端のエネルギーが低い、もしくは対象元素の含有量が少ないために十分な信号が得られな い場合に、蛍光法を使用した。イメージング XAFS 測定[4]では、XAFS 測定の下流側のイオン チェンバーを、透過 X 線を投影するビームモニタ、投影像を撮影する高感度デジタルカメラに 置き換えた。測定自体は、通常の XAFS 測定の制御方法を利用し、エネルギーを走査しながら、 高速で撮影画像を保存した。画像は 16 ビットグレースケールの濃淡情報からなり、それらを 数値化して X 線強度とした。

元素	吸収端	E ₀ (keV)	測定範囲(keV)	手法	使用施設
Cr	К	5.989	$5.91 {\sim} 6.15$	蛍光法	KEK • PF BL-27B
Mn	K	6.539	$6.47 {\sim} 6.68$	蛍光法	KEK \cdot PF BL-27B
Fe	K	7.112	$7.07 {\sim} 7.22$	蛍光法	KEK \cdot PF BL-27B
Zn	K	9.659	9.49~10.30	蛍光法	KEK \cdot PF BL-27B
Sr	K	16.105	$15.907 {\sim} 17.007$	蛍光法	KEK • PF BL-27B
Y	K	17.038	$16.838 \sim 17.738$	蛍光法	KEK • PF BL-27B
Zr	K	17.998	$17.80 \sim 18.80$	透過法	KEK \cdot PF BL-27B
Mo	K	20.000	$19.80 \sim 20.90$	透過法	KEK \cdot PF BL-27B
Ru	K	22.117	$21.80 \sim 23.02$	透過法	SPring-8 BL11XU
Rh	K	23.220	$22.73 \sim 24.30$	透過法	SPring-8 BL22XU
Pd	K	24.350	$24.00 \sim 24.88$	透過法	SPring-8 BL22XU
Ce	L_3	5.723	$5.65 {\sim} 5.85$	蛍光法	KEK · PF BL-27B
Ce	К	40.443	39.96~41.51	透過法	SPring-8 BL11XU

表1 KMOC8 次試験(5)流下ガラス試料の放射光 XAFS 測定の概要





3. 放射光 XAFS 分析の結果

3.1 セリウム(L3吸収端)

セリウムの L₃吸収端(E₀=5.723keV)の XANES スペクトルは、セリウムの原子価が 3 価 と 4 価の場合では、吸収端直後のホワイトラインの形状と出現位置に大きな違いがあり、その 判別に用いることができる[5]。さらに、標準物質の XANES データを利用した線形結合解析を 行うことで、試料中に含まれるセリウム元素の 3 価と 4 価の割合を求めることができる。この 特徴を利用し、流下ガラス試料中のセリウム元素の原子価の 3 価/4 価の比を導出し、その変 化を調べた。線形結合によって合成された XANES スペクトルを図 2 に示す。ホワイトライン が分裂しているのが特徴であり、4 価の割合が多いことを示している。さらに、バッチが進む につれてホワイトラインの低エネルギー側ピークが低く変化していることが分かる。これは、 バッチの進行とともに 4 価の割合が増加し、3 価の割合が低下したことを示している。



図2 流下ガラス試料のセリウム L₃吸収端 XANES およびフィッティングカーブ

線形結合解析の結果得られた流下ガラス試料中セリウム元素の3価と4価各成分の割合の変 化を、図3にそれぞれ示す。XANESスペクトルの形状変化で確認したように、全体的に4価 のセリウムの割合が多く、バッチ全体を通してそれは変わりない。一方、バッチ初期は4価の 割合が7割程度なのに対し、バッチが進むにつれて緩やかにその割合が増加し、最後には約9 割近くになっている。



図3 流下ガラス試料のセリウム元素の原子価割合の変化

3.2 セリウム(K吸収端)

L₃吸収端 XANES 解析から、試料中のセリウムの原子価は 4 価が主成分であったので、たと えば結晶性の CeO₂ として存在している可能性も考えられる。ホウケイ酸ガラス中でガラス相 に溶けているセリウムは、3 価で安定に存在しているとの報告がある[6]。一方、我々はホウケ イ酸ガラス中のセリウムが 4 価の場合でも、ガラス相に溶けていることを突き止めており、そ の局所構造が非晶質性なのか結晶性(CeO₂ など)なのかは、EXAFS 解析によって評価しなく てはならない。そこで、流下ガラス試料中のセリウム元素について K 吸収端(E₀=40.443keV) の EXAFS 測定を実施した。

得られた EXAFS 関数及び動径構造関数を図4に示す。EXAFS 関数の振幅は非常に小さく、 取得できた関数の範囲も構造秩序が発達していないために減衰が著しい結果、10Å⁻¹ 程度まで であった。これは、ガラス試料中のセリウムが、結晶性物質として存在しているとはみられな いことを示している。動径構造関数には、Ce-O 対に相当する第1ピークのみが観察された。 そのカーブフィッティング解析からは、配位数が約6、距離が2.15~2.20Å、デバイワーラー 因子が0.010~0.015Å²であった。これらは、結晶性 CeO²の値と比較すると、距離2.33Åよ りも短く、デバイワーラー因子0.007Å²よりも大きい。特にデバイワーラー因子は、高温融体 並に大きく、ガラス試料中のセリウムが構造秩序を持たない環境にあることを示している。こ れら第1ピークの評価結果および第2配位圏以降に有意な相関ピークが認められないことから、 流下ガラス試料のセリウムはガラス相に溶けていると結論づけられる。



図4 流下ガラス試料のセリウム K 吸収端 EXAFS 関数及び動径構造関数

3.3 クロム、マンガンおよび鉄

クロム、マンガンおよび鉄は、いずれも複数の原子価を取り得る酸化還元元素であり[5]、その原子価の分析はガラスの化学状態を知る上で重要である。これらの元素の K 吸収端のエネル ギー帯(6~8keV)では、板状の試料を使った透過法による XAFS 測定は難しいので、すべて 蛍光法によって測定した。試料を粉末状にすれば、透過法でも測定可能だが、粉末状にするこ とで吸湿性を帯び、酸化還元挙動に影響をあたえる可能性があるので、採用しなかった。

図5に、流下ガラス試料のクロム元素のK吸収端(E₀=5.989keV)、マンガン元素のK吸収 端(E₀=6.539keV) および鉄元素の K 吸収端(E₀=7.112keV) による XANES スペクトルを示 す。クロムでは、ガラス試料中の含有量が非常に少ないとみられること、このエネルギー付近 にプラセオジムの L₃吸収端(E₀=5.964keV)やセリウムの L₂吸収端(E₀=6.164keV)などの 妨害吸収があるために、かなりノイズの入ったスペクトルになった。そのため、試料間の差に ついて議論することは難しい。しかしながら、ホワイトラインの形状などから、全ての試料に おいてクロムは3価として存在しているとみられる。クロムが6価の場合、鋭いプリエッジが 出現することが知られているが、観測されなかった。マンガンでは、試料間で若干の差が認め られるが、おおむねマンガンは2価で存在しているとみられる。バッチが進むにつれて、わず かに吸収端のピークが高エネルギー側にシフトしていることから、バッチ後半では3価のマン ガンが混在している可能性がある。鉄では、良質なスペクトルを得られた上で、試料間でほぼ 一致した結果が得られた。これらの結果は、ガラス試料中の鉄の化学状態に全くといって良い ほど変化や違いが無いことを示している。前述のセリウム元素における変化から、試料の置か れた酸化還元状態に一定の差があることは明らかである。それにもかかわらず、鉄のデータが ここまで一致することは、鉄がガラスのネットワーク構造に入っているためであると考えられ る。弱いながらもプリエッジが観察されたことから、ガラス試料中の鉄元素は、原子価が3で、 4 配位の Fe-O 構造をとって、ガラス構造を形成しているものとみられる。



図5 流下ガラス試料のクロム、マンガンおよび鉄元素のK吸収端 XANES スペクトル

3.4 亜鉛

亜鉛は、廃液成分ではなく、ガラス原料の中に修飾化合物として添加されている成分である が、硬X線を利用して評価が可能な数少ない原料側の元素である。亜鉛元素K吸収端 (Eo=9.659keV)の EXAFS による動径構造関数を、図6に示す。Zn-O相関に対応する第1 ピーク、Zn-Si相関に相当する第2ピークが共通的に観察された。試料間の差異がほとんど無 いように思われる。第1ピークのカーブフィッティング解析から得られた構造パラメーターで は、配位数はほぼ4であり、デバイワーラー因子は0.004~0.007Å2の範囲にある。動径構造 関数において、試料間の差が認められないことから、ZnO4四面体構造が発達し、ガラスのネ ットワーク構造に入っているのではないかと推測される。

3.5 ジルコニウム

流下ガラス試料の、ジルコニウム元素 K 吸収端(E₀=17.998keV)の EXAFS による動径構 造関数を、図 7 に示す。動径構造関数上には、Zr-O 相関による鋭い第 1 ピークとブロードな 第 2 ピークが観察された。第 2 ピークは、Zr-Si 相関による寄与とみられる。さらに、帰属は 不明だが、微弱な第 3 ピークが観察された。これらの特徴は、全試料において共通的に認めら れた。第 1 ピークのカーブフィッティング解析の結果は、Zr-O 間距離が約 2.09Å、配位数が 約 6 強にまとまっていた。これらの傾向がバッチ全体に共通していることから、ガラス試料内 のジルコニウムの配位構造がほぼ同じであり、試料間での差がほとんど無いことを示している。 ジルコニウム元素が、ホウケイ酸ガラス中に決まった配位構造で含まれ、それが容易に変化し ない可能性を示唆している。動径構造関数の第 2 ピークは Zr-Si 対に対応しているが、これは ジルコニウム元素が SiO4 ネットワークに囲まれた状態にあること[1]を示している。



図6 流下ガラス試料の亜鉛元素K吸 収端EXAFSによる動径構造関数



図 7 流下ガラス試料のジルコニウム元 素 K 吸収端 EXAFS による動径構造関数

3.6 モリブデン

図8に、流下ガラス試料のモリブデン元素K吸収端(E₀=20.000keV)による動径構造関数 を示す。ホウケイ酸ガラス中で、モリブデン元素はモリブデン酸イオン(MoO₄)²の化学形をと り、6価として存在する[7]。得られた結果は、バッチ全体でモリブデン酸イオンの特徴を示し ている。第1ピーク以遠に、有意義なピークが観察されていないが、これは、(1)モリブデン酸 イオン周りの構造秩序が低い、あるいは(2)結晶性であった場合にモリブデン酸イオンに配位し ている陽イオンが比較的軽い元素であるの、どちらかと考えられる。このうち(2)のケースの想 定される陽イオンについては、FEFF[8]による理論計算による評価から、カルシウムよりも軽 い元素であろうと推定される。第1ピークのカーブフィッティング解析から得られた、Mo-O 対の構造パラメーターは、距離1.75~1.80Åの範囲に、配位数もモリブデン酸イオンに相当す る4配位に集約していた。デバイワーラー因子は、0.0015~0.0030Å²の範囲にあり、これら は、通常の結晶性物質としても小さな値であり、モリブデン酸イオンが rigid であることと対 応した結果である。

3.7 ルテニウム

図9に、流下ガラス試料のルテニウム元素のK吸収端(E₀=22.117keV)によるEXAFS関数を示す。ルテニウムは、ホウケイ酸ガラスにほとんど溶けず、通常はRuO₂結晶として存在することが知られている[9]。図中、破線で示したRuO₂のEXAFS関数とよく一致しており、 測定した全バッチ試料において、ルテニウムの化学形はRuO₂であるとみられる。



図 8 流下ガラス試料のモリブデン元素 K吸収端 EXAFS による動径構造関数



図 9 流下ガラス試料のルテニウム元素 K 吸収端 EXAFS 関数

3.8 ロジウム

ホウケイ酸ガラスを原料とした模擬ガラス試料中においてロジウムは、金属と酸化物の混合 状態で存在することが知られている。このうち、酸化物では、熱力学的に予想される Rh₂O₃ で はなく RhO₂の化学形を取ることが報告されている[10]。厳密には、固溶体 (Ru,Rh) O₂ であ り、ルテニウムとロジウムの性質が良く似ており、大きさもほとんど同じことから、両者を構 造解析から区別することは難しい。今回得られた結果でも、Rh-O 間距離の評価から、生成し ている酸化物は RhO₂ であると判断した。そこで、図 10 に示すように、流下ガラス試料のロジ ウム元素の K 吸収端 (E₀=23.220keV) による EXAFS 関数を、ロジウム金属と RuO₂ (RhO₂ と同形)の標準スペクトルの線形結合 (LC Fitting) から合成した (図中の破線)。この解析か ら、各試料中の金属と酸化物の割合を導出した。その結果を、図 11 に示す。これまでの分析 例から、ホウケイ酸ガラス中のロジウムの化学形は、10~20%が金属で、残りは酸化物 (RhO₂) であることが多い。ガラス中のロジウムは、均一には分布していないことが多いので、XAFS 実験で凝集部に X 線があたると、金属の割合が大きくなる傾向がある。そのため、この分析結 果は試料の均質性や試料のどの部分で測定を実施したかに依存する傾向がある。それでも、ほ とんどの試料において、酸化物と金属の割合は、これまで認められた範囲内に収まっている。



図 10 流下ガラス試料のロジウム元素 K 吸収端 EXAFS 関数



図11 流下ガラス試料におけるロジウム化学形(金属・酸化物)の割合変化

3.9 パラジウム

図 12 に、流下ガラス試料のパラジウム元素 K 吸収端 EXAFS 関数と動径構造関数を示す。 ホウケイ酸ガラス中でパラジウム元素は、金属あるいは合金(Pd-Te)として存在することが 知られている[11]。今回の分析でも、多くの試料においてパラジウム金属の特徴を示す結果が 得られた。バッチの始まり B-1 の動径構造関数には、短い位置に第1ピークが認められるが、 明らかに Pd-O 対によるものである。これは高模擬供給による流下試験が、洗浄運転の後に行 われたため、酸化物が残ったものと推定される。B-3 以降の流下ガラス試料には、酸化物は認 められない。動径構造関数の第2配位圏以降のブロードなピークの特徴まで良く一致している ことから、ガラス試料中のパラジウムの化学形は金属であるとみられる。



図 12 流下ガラス試料のパラジウム元素 K 吸収端 EXAFS 関数及び動径構造関数

3.10 XAFS スペクトルによる白金族元素量の評価

これまでに示した結果は、各元素の化学状態および局所構造に関するものであるが、透過法 により測定した XAFS スペクトルの吸収端ジャンプ量は、当該元素の存在量に比例する(図 13)。つまり、吸収端ジャンプ量を比較することで、定量的な評価ができる。我々の分析では、 試料厚みが一定の板状試料を用いているので、厚みに対する補正は必要ない。そこで、ルテニ ウム、ロジウムおよびパラジウムの吸収端ジャンプ量をグラフにした結果を、図 14 に示す。 流下ガラス試料中の3元素の量は、模擬廃液の組成がそのまま反映されており、ルテニウムが 最も多く、次いでパラジウム、これら2つよりロジウムの量が少ない。バッチの最初(B-1 と B-2)では、白金族元素そのものが少なく、B-3から急に増加するものの、その後のバッチでは、 さほどの増加も減少も認められなかった。前述のように、白金族元素の分布は均一ではないと みられるので、ガラス試料のどこに X 線を照射したかによって、白金族元素の量は増減する。 それでも、バッチ B-4 以降の白金族元素量に大きな違いは見られず、ほぼ一定の量で推移して いる。これらのデータから、バッチ後半は白金族元素の過度な流下もない、安定な状態に置か れたものと推察する。



図 13 XAFS スペクトルと吸収端ジャンプ量について



図 14 流下ガラス試料のルテニウム、ロジウムおよびパラジウム元素 K 吸収端 XAFS ジャン プ量

3.11 ストロンチウム、イットリウム(予備的結果)

参考情報とするべく、これまでに実施実績の無かったストロンチウムおよびイットリウム元素のXAFS測定および解析を試みた。模擬廃液中のこれらの元素の含有量がかなり少ないので、 良質なXAFSスペクトルの取得が難しかったが、いくつかの試料についてはフーリエ変換解析 が可能なデータが得られた。図15に、ストロンチウム元素およびイットリウム元素のK吸収 端EXAFSによる動径構造関数を示す。

得られたストロンチウム元素の動径構造関数には、Sr-O対に相当する第1ピークが認められた。このピークのカーブフィッティング解析から、Sr-O対の配位数が約5、距離は2.53~2.55 Åであり、これまでの報告例[12]とほぼ同じであった。得られたデバイワーラー因子の値は、 0.010~0.012Å2程度とかなり大きく、かなり構造秩序が低い局所構造をとっているとみられる。動径構造関数の第1ピークより遠距離側の評価は困難だが、有意なピークが見当たらないことから、ガラス相に溶けているものと推察される。

イットリウム元素の動径構造関数は、Y-O 相関に対応した第1ピークが観察されたほかは、 有意なピークは見当たらない。第1ピークよりわずかに長い、2.9Å付近に相関らしき微弱なピ ークが認められ、3価の Ce との類似性を示唆しているが、現状のデータの質では判断できな い。ホウケイ酸ガラス中のイットリウムは、6配位と8配位構造の報告がある[13]が、今回の 結果はほぼ6配位で、Y-O間距離は2.25~2.28Åであった。デバイワーラー因子は、およそ0.070 Å2前後と、ある程度の構造秩序を有した状態にあるとみられる。さらに詳細な分析が必要だ が、現段階では、非晶質性のケイ酸化合物の形態で、ガラス相に溶け込んでいると推定される。



図 15 流下ガラス試料のストロンチウムおよびイットリウム元素 K 吸収端 EXAFS による動 径構造関数

4. イメージング XAFS 分析の結果

流下ガラス試料のうち B-3、B-10、B-15 および B-20 バッチの 4 試料について、イメージン グ XAFS 分析を実施した。同一試料に対して、同一視野を対象に、ジルコニウム、モリブデン およびルテニウムの吸収端を対象にイメージング XAFS 測定を実施した[14]。測定データの解 析から得られたジルコニウム、モリブデンおよびルテニウムの分布を図 16~18 に示す。各バ ッチの各元素にそれぞれ 3 枚の分布図があるのは、同一試料の全視野から 3 つの領域(512× 512 ピクセル)を選択して、分布図を求めたためである。すなわち、バッチ名と番号(①~③) は、各元素で同じ領域を対象としているので、元素間での分布の特徴などが直接比較可能であ る。

ジルコニウムの分布については、気泡などの存在(B-3 および B-10)が認められるが、ほぼ 均一なグレーになっている。すべての試料と視野において、ジルコニウムはほぼ均一に分布し ていると判断できる。一部、凝集析出が認められたが、いずれも 100µm より小さく、数も少 ないので、「KMOC#8(5)の運転条件などによって生成したもの」では無いと考えられる。

モリブデンは、ガラス固化体の製造でしばしば問題になる結晶性化合物(イエローフェーズ) になることがある。得られたモリブデン元素の分布をみると、ジルコニウムと同様に、一様な グレーになっている。一部に小さな析出が認められたが、ほぼ均一に分布していることが分か った。 ルテニウム元素の分布は、これまでのジルコニウムやモリブデンと異なり、析出や凝集が、 全ての試料と視野において確認された。限られた視野を対象とした分析ではあるが、得られた 分布図から、以下のようなルテニウム元素の分布の変化が認められた。

(1) バッチ初期(B-3 まで):おおむね 50µm 未満の微粒子状の析出が多い。

(2) バッチ中期(B-10~B-15): 100µm 程度の析出と筋状の凝集の出現。

(3) バッチ後期(B-15~B-20): 筋状の凝集が流下に沿うようにみられる。

ガラス固化試料の中に、巨大な凝集体を形成するルテニウム酸化物の針状結晶[15]は、今回の イメージング分析では確認されなかった。多くは 100µm 程度の小規模な析出にとどまり、筋 状の析出が認められたものの、それらが極端に偏ることなく、流下ガラス試料に含まれている ことが確認された。



図 16 流下ガラス試料のイメージング XAFS によるジルコニウム元素分布



図 17 流下ガラス試料のイメージング XAFS によるモリブデン元素分布



図 18 流下ガラス試料のイメージング XAFS によるルテニウム元素分布

5. まとめ

高模擬廃液供給のモックアップ試験(KMOC#8(5))で採取されたガラス試料20バッチ分の放射光分析を行い、以下の知見を得た。

(1) セリウム元素の L₃ 吸収端の XANES 測定を実施して原子価を評価し、さらに K 吸収端 EXAFS 測定を行い、局所構造を調べた。解析の結果、バッチが進むにつれて、4 価の割合が 緩やかに増加することが分かった。局所構造については、結晶性を示すことはなく、ガラス相 に溶解していることを示唆するデータが得られた。

(2) 妨害吸収の影響から XANES 解析に限定されたが、クロム、マンガンおよび鉄の XANES 分析を実施した。クロムはおおむね3価であった。マンガンは2価であったが、一部3価成分 が混在している可能性があった。鉄はおおむね3価であるとみられる。鉄の XANES スペクト ルは試料間に差が無く、ガラスの骨格構造に入っているものと推定された。

(3) 廃液成分では無いが、亜鉛の EXAFS 解析を実施した。得られた結果は、ZnO₄四面体構造の発達を示唆するものであり、亜鉛がガラスのネットワーク構造に入っている可能性が考えられる。

(4) ジルコニウムおよびモリブデンの分析では、これまでに明らかになったホウケイ酸ガラ ス系試料の結果とほぼ同じ結果が得られた。一部の試料で小さな析出が観察されたが、偶発的 に発生したものであると考えられる。

(5) 白金族元素の XAFS 分析では、ルテニウムは RuO₂、ロジウムは RhO₂ と Rh 金属の混合 状態、パラジウムは Pd 金属であることが確認された。吸収端ジャンプ量の評価から、白金族 元素の量が、バッチ後半でほぼ一定に落ち着くことが確認された。

(6) 白金族元素のイメージング XAFS 分析では、初期バッチでは小さな粒子状の析出が確認 され、バッチの進行とともに筋状に発達する様子が確認された。しかし、針状結晶や大きな凝 集は確認されなかった。

(7) 新たにストロンチウムとイットリウムの XAFS 測定を対象に試験的に分析を実施した。 いずれの元素も、ガラス相に溶けていることを示唆する結果が得られた。

謝辞

この報告書は、日本原燃株式会社からの委託を受けて、日本原子力研究開発機構が実施した 「改良型ガラス溶融炉モックアップ試験フェーズIIIへの支援」における成果の一部をまとめた ものである。本研究をまとめるにあたり、貴重なコメントを下さいましたガラス固化部ガラス 固化処理課守川洋課長に感謝します。また、この報告書における放射光実験は、高エネルギー 加速器研究機構放射光実験施設共同利用実験課題 2016G064 および 2017G066、大型放射光実 験施設 SPring-8 施設利用課題 2017A3505、2017B3505、2017B3712 および 2018A3712 にお いて実施された。

参考文献

[1] G. Calas, L. Galoisy, L. Cormier, G. Ferlat, G. Lelong, The Structural Properties of Cations in Nuclear Glasses, Proc. Mater. Sci., Vol.7, 2014, pp.23-31.

[2] Y. Okamoto, H. Shiwaku, M. Nakada, S. Komamine, E. Ochi, M. Akabori, REDOX state analysis of platinoid elements in simulated high-level radioactive waste glass by synchrotron radiation based EXAFS, J. Nucl. Mater., Vol.471, 2016, pp.110-115.

[3] 岡本芳浩, 永井崇之, 塩飽秀啓, 猪瀬毅彦, 佐藤誠一, 放射光 XAFS およびイメージング XAFS 法による模擬ガラス試料中のロジウム元素の化学状態分析, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.16, No.4, 2017, pp.180-190.

[4] 岡本芳浩, 塩飽秀啓, 鈴木伸一, 矢板毅, CCD 画像から取り出した信号による位置分解 XAFS 分析, X線分析の進歩, Vol.42, 2011, pp.183-195.

[5] 山本孝, 行本晃, X線吸収スペクトルにおける見かけ上の化学シフトを利用した半経験的価数評価,分析化学, Vol.62, No.5, 2013, pp.555-563.

[6] P. Jollivet, C. Lopez, C. Den Auwer, E. Simoni, Evolution of the local environment of cerium and neodymium during simplified SON68 glass alteration, J. Nucl. Mater., Vol.346, No.2-3, 2005, pp.253-265.

 [7] G. Calas, M. Le Grand, L. Galoisy, D. Ghaleb, Structural Role of Molybdenum in Nuclear Glasses: An EXAFS Study, J. Nucl. Mater., Vol.322, No.1, 2003, pp.15-20.

[8] A. L. Ankudinov, B. Ravel, J. J. Rehr, S. D. Conradson, Real-space multiple-scattering calculation and interpretation of x-ray-absorption near-edge structure, Phys. Rev. B, Vol.58, No.12, 1998, pp.7565-7576.

[9] M. Sacchi, M. Antonini, M. Prudenziati, Ru-metal segregation in borosilicate glasses, Phys. Stat. Sol. A, Vol.109, No.1, 1988, pp.K23-K26.

[10] H. Kleykamp, The Chemical State of Fission Products in Oxide Fuels at Different Stages of the Nuclear Fuel Cycle, Nucl. Tech., Vol.80, No.3, 1988, pp.412-422.

[11] L. Galoisy, G. Calas, G. Morin, S. Pugnet, C. Fillet, Structure of Pd-Te precipitates in a

simulated high-level nuclear waste glass, J. Mater. Res., Vol.13, No.5, 1998, pp.1124-1127. [12] S. V. Stefanovskya, A. A. Shiryaevb, Ya. V. Zubavichusc, and J. J. Puransd, Local environment of strontium ions in borosilicate and aluminophosphate glasses, Inorg. Mater. Appl. Res., Vol.4, No.3, 2013, pp.265-271.

[13] S. Simon, M. Wilke, R. Chernikov, S.Klemme, L.Hennet, The influence of composition on the local structure around yttrium in quenched silicate melts - Insights from EXAFS, Chem. Geol., Vol.346, 2013, pp.3-13.

[14] 岡本芳浩,中田正美,赤堀光雄,塩飽秀啓,駒嶺 哲,福井寿樹,越智英治,仁谷浩明,野 村昌治,イメージング XAFS 法による模擬ガラス試料中のルテニウムの状態分析,日本原子 力学会和文論文誌, Vol.11, No.2, 2013, pp.127-132.

[15] H. Boucetta, R. Podor, L. Stievano, J. Ravaux, X. Carrier, S. Casale, S. Gossé, A. Monteiro, S. Schuller, Mechanism of RuO₂ Crystallization in Borosilicate Glass: An Original in Situ ESEM Approach, Inorg. Chem., Vol.51, No.6, 2012, pp.3478-3489.

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 ²				
体 積 立方メートル	m ³				
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 ⁻¹				
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/	ν kg/m ²				
比体積 立方メートル毎キログラ」	m ³ /kg				
電 流 密 度 アンペア毎平方メート/	ν A/m ²				
磁 界 の 強 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/					
輝 度 カンデラ毎平方メート/	ν cd/m ²				
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1				
比 透 磁 率 ^(b) (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 祖立单位				
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 ^(b)	rad	1 (в)	m/m	
立 体 催	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 (b)	m^2/m^2	
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	1	s ^{·1}	
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²	
压力,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	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$	
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 ²	$\text{kg s}^{2} \text{A}^{1}$	
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 ^(e)	°C		K	
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd	
照度	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, 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 ^(g)	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$	
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol	

酸素活性(カタール) kat [s¹ 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、1、組定差で建度問題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 ⁻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 九	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	
表 面 電 荷	「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 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 ⁻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	$m^{-3} s^{-1} mol$	

表 5. SI 接頭語					
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10 ⁻²	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 ⁻⁹	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 ² =10 ⁴ m ²			
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³			
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 ⁻¹⁹ J		
ダル	ŀ	\sim	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ 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 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
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 ⁻¹⁰ 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 ⁻⁷ J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N			
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =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 ⁻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	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$			
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						
	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 ¹⁰ 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 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² 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 ⁻¹⁵ 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 ⁻⁴ 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	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$