

カルシウムを添加したウランの レーザーブレークダウン発光分光

- 時間分解分光 -
(受託研究)

Laser Induced Breakdown Spectroscopy of the Uranium Including Calcium
- Time Resolved Measurement Spectroscopic Analysis -
(Contract Research)

赤岡 克昭 丸山 庸一郎 大場 正規 宮部 昌文
音部 治幹 若井田 育夫

Katsuaki AKAOKA, Youichiro MARUYAMA, Masaki OBA, Masabumi MIYABE
Haruyoshi OTOBE and Ikuo WAKAIDA

原子力基礎工学研究部門
環境・放射線工学ユニット

Division of Environment and Radiation Sciences
Nuclear Science and Engineering Directorate

May 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは独立行政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。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 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
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, 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, 2010

カルシウムを添加したウランのレーザーブレイクダウン発光分光
- 時間分解分光 -
(受託研究)

日本原子力研究開発機構

原子力基礎工学研究部門 環境・放射線工学ユニット

赤岡 克昭、丸山 庸一郎、大場 正規、宮部 昌文、音部 治幹⁺、若井田 育夫

(2010 年 2 月 1 日 受理)

低除染 TRU 燃料の迅速なその場分析を遠隔で実現することを目的として、レーザーブレイクダウン発光分光 (LIBS) 法をウラン酸化物試料に適用し、不純物スペクトルの出現特性を取得した。不純物として発光スペクトルの簡単なカルシウムを選定し、酸化ウラン中に微量の酸化カルシウムを添加した試料における発光スペクトルの時間分解測定を行い、強度、励起温度等の特性を明らかにした。その結果、ウランスペクトルに対して安定した強度のカルシウムスペクトルを得るためには、レーザー照射後 $4\mu\text{s}$ 以上経過したスペクトルを観測することが最適であることが判った。

本報告は、特別会計に関する法律（エネルギー対策特別会計）に基づく文部科学省からの受託事業として、日本原子力研究開発機構が実施した平成 20 年度「低除染 TRU 燃料の非破壊・遠隔分析技術開発」の成果である。

原子力科学研究所(駐在)：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

⁺燃料・材料工学ユニット

**Laser Induced Breakdown Spectroscopy of the Uranium Including Calcium
- Time Resolved Measurement Spectroscopic Analysis-
(Contract Research)**

Katsuaki AKAOKA, Youichiro MARUYAMA, Masaki OBA,
Masabumi MIYABE, Haruyoshi OTOBE⁺ and Ikuo WAKAIDA

Division of Environment and Radiation Sciences
Nuclear Science and Engineering Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 1, 2010)

For the remote analysis of low DF TRU (Decontamination Factor Transuranic) fuel, Laser Breakdown Spectroscopy (LIBS) was applied to uranium oxide including a small amount of calcium oxide. The characteristics, such as spectrum intensity and plasma excitation temperature, were measured using time-resolved spectroscopy. As a result, in order to obtain the stable intensity of calcium spectrum for the uranium spectrum, it was found out that the optimum observation delay time of spectrum is 4 microseconds or more after laser irradiation.

Keywords: Laser Induced Breakdown Spectroscopy, Natural Uranium, Calcium, Delay Time, Impurity, Nuclear Fuel

Present study is the result of “Development of laser remote analysis for low-decontaminated TRU fuel” entrusted to Japan Atomic Energy Agency by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan (MEXT)

⁺Division of Fuels and Material Engineering

目 次

1. 緒言	1
2. 実験方法	1
3. 実験結果	3
3.1 スペクトル測定結果	3
3.2 クレーター観察結果	3
4. 考察	4
4.1 プラズマ励起温度の観測遅延時間依存性	4
4.2 ウランとカルシウムのスペクトル	5
4.3 スペクトル強度の観測遅延時間及びプラズマ励起温度依存性	7
4.4 スペクトル幅の観測遅延時間及びプラズマ励起温度依存性	8
4.5 スペクトル強度比の観測遅延時間及びプラズマ励起温度依存性	8
5. 結言	11
謝辞	12
参考文献	12

Contents

1. Introduction	1
2. Experiment	1
3. Results	3
3.1 Spectroscopy	3
3.2 Observation of ablation crater	3
4. Discussion	4
4.1 Plasma excitation temperatures	4
4.2 Spectra of uranium and calcium	5
4.3 Spectra intensity	7
4.4 Line width	8
4.5 Spectra intensity ratio	8
5. Conclusion	11
Acknowledgements	12
References	12

This is a blank page.

1. 緒言

レーザーブレイクダウン発光分光(LIBS: Laser Induced Breakdown Spectroscopy)分析法は、パルスレーザー光を試料に照射して発生するプラズマからの発光を分光することにより、試料を構成する元素組成を分析する方法である。レーザー照射によってアブレーションされ、試料表面から放出された原子等は、ほぼ同時にブレイクダウンによりプラズマ化される。このプラズマは10000K程度の高温になり、再結合、イオン化、原子化、再励起などを短時間で起こし、数 μ sから数ms程度の時間経過と共に原子やイオンの脱励起により元素固有の蛍光を放出する。この蛍光の波長と強度を広範囲にわたって測定することにより、元素固有のスペクトルとその母材に対するスペクトルの強度比から、予め求めてあった検量線と比較することにより不純物を含む試料の組成分析を短時間で実施することができる。

これまでに LIBS の研究は、基礎から応用まで国内外で数多くなされ¹¹⁾、フランスやアメリカでは、核燃料物質に含まれる不純物の分析への適用の研究^{12)・14)}も積極的に行われている。我々はこの LIBS 法を次世代の高速炉核燃料サイクルで有望視されている低除染 TRU 燃料の不純物分析に適用するための研究を 2005 年度より開始した^{15)・17)}。低除染 TRU 燃料は、主な母材がウラン(U)やプルトニウム(Pu)で、ネプツニウム(Np)、アメリシウム(Am)キュリウム(Cm)といった超ウラン元素(TRU)を数%含み、ランタノイド系元素を不純物として数百～数千 ppm 含むと想定されている。これらの重元素は、原子構造が比較的簡単なアルミニウム(Al)や銅(Cu)などの軽い元素に比べて、極めて複雑な発光スペクトルを持つため、この中に混在した不純物の発光スペクトルを定量的に精度良く分光分析することは困難が予想される。このため、我々は先ず、ウランの実験に先立って、模擬試料としてウランと同様に比較的複雑なスペクトルを持つガドリニウム(Gd)に、比較的簡単なスペクトルを持つ銅(Cu)を不純物として添加した金属試料を用いて、複雑なスペクトルに混在した不純物の分析及び評価手法を検討し、検量線の作成および検出下限が算出できることを示した¹⁵⁾。また、LIBS では不純物のスペクトルと、上準位のエネルギーレベルが同程度である母材のスペクトルとの相対的な強度、即ちスペクトル強度比によってその濃度を分析することから、母材のスペクトルを同定し、スペクトルの単独性やスペクトル強度等のスペクトル自身の特性と共に、エネルギーレベル等を明らかにする必要がある。このために母材となる核燃料としてウランのスペクトルを LIBS により測定し、原子スペクトル 165 本、一価のイオンスペクトル 381 本について抽出し同定を行いデータとしてまとめた¹⁷⁾。

本報告では、酸化ウラン(U_3O_8)に酸化カルシウム(CaO)を不純物として添加した試料を用いて、ウランに含まれたカルシウムのスペクトル強度や幅、ウランとのスペクトル強度比の時間分解分光を行い、その結果に基づき、LIBS における発光スペクトルの強度やその母材に対するスペクトル強度比の時間依存性、観測遅延時間や観測時間幅等の最適条件について議論する。

2. 実験方法

実験は Fig. 1 に示すように 2kPa の Ar ガスで満たした密閉できる分析容器内に試料を設置して行った。試料は、天然ウランの酸化物粉末 U_3O_8 に酸化カルシウム粉末 CaO を添加し、卓上型ボ

ールミルにより 24 時間攪拌混合し、プレス成型器により厚さ約 1mm、直径約 10mm のディスク状に約 200MPa の圧力で圧縮成形後、高温ヒーターを用いて大気雰囲気中にて 1300℃で 8 時間、仮焼結した。試料の Ca/U 比は 3306ppm(weight)であった。使用したレーザーは Q スイッチ Nd:YAG レーザー (Brilliant B) の 2 倍高調波、波長 532nm で、繰返し数 10Hz、パルス幅 4.5ns で発振し、ビーム径 8mm である。レーザー光のエネルギーを波長板と偏光ビームスプリッターキューブを用いて

5mJ/pulse に調節し、焦点距離 200mm の平凸レンズで試料表面に直上から 10 パルス集光照射した。発生したブレイクダウン発光はレーザー入射方向とは垂直をなす角度から焦点距離 100 mm、有効径 50 mm の 90 度偏向型非軸放物面鏡を 2 枚組み合わせた集光器で NA=0.22、コア径 0.4mm の紫外グレードの石英ファイバーを通して ICCD カメラ付 Echelle 型イメージング分光器(LTB ARYELLE)に導き 250~1050nm(連続測定波長域 250~750nm) の範囲のスペクトルについて時間分解分光を行った。

測定は観測時間幅を $1\mu\text{s}$ に設定し、レーザー照射から観測までの観測遅延時間を 0.0~10 μs まで変化させた。実験パラメータ等の詳細を Table 1 に示す。

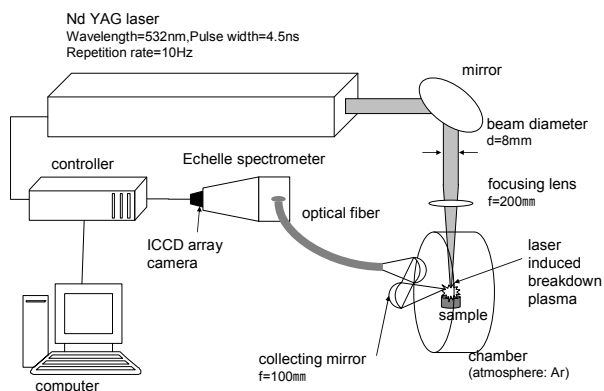


Fig. 1 Experimental Setup.

Table 1 Experimental condition and apparatus

<i>Laser</i>	<i>Q-switched Nd-YAG laser (Brilliant b / Qauntel)</i>
Wavelength	532 nm
Pulse width	4.5 ns
Repetition rate	10 Hz
Energy	5 mJ/pulse
Beam diameter	8 mm
Focal length of focusing lens	200 mm
Spectrometer	Echelle Spectrograph (ARYELLE / LTB)
Resolution of wavelength	$\lambda / 8000$ (@3pixels)
Range of wavelength	250~750nm (@1shot)
Delay time	0.0~10.0 μs
Gate duration	1 μs
Number of integrate	10
Optical fiber	200-1050nm transmission/ 400 μm core/ 2m length
Collecting mirror	50mm aperture / 100mm focus length
Atmosphere	Ar (2kPa)

3. 実験結果

3.1 スペクトル測定結果

測定したスペクトルの全体像の時間変化を Fig. 2 に示す。縦軸がスペクトル強度、横軸が波長と観測遅延時間でそれぞれ 250~750nm、0~10 μ s で、参考文献 17)と同様の方法で感度・波長校正したスペクトルである。なお、観測時間幅が 1 μ s であるので、例えば、観測遅延時間 1.0 μ s のスペクトル強度は 1.0~2.0 μ s の間の発光スペクトルの積算値となっている。レーザー照射直後の 0.0 μ s 時に比べ、0.5 μ s 時にはスペクトル強度が強くなり、その後時間と共にスペクトル強度が弱くなっているのが判る。

また、図では 2.5 μ s 付近でスペクトル強度の若干の落ち込みがみられるが、これは、どの波長においても一様に強度が下がっていることから、プラズマの不安定性に起因するものであり、特別な物理現象ではないと思われる。

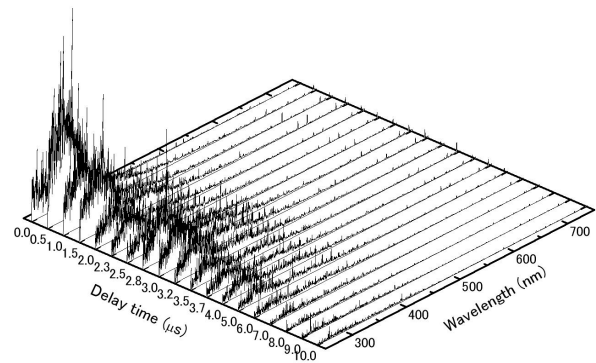


Fig. 2 Emission spectra of U including Ca as a function of the delay from the laser pulse.

3.2 クレーター観察結果

照射したレーザー光強度を決定するために、ブレイクダウン発光スペクトルを測定した試料表面を操作型共焦点レーザー顕微鏡 (Olympus LEXT OLS3000) で観察した。Fig. 3 に照射により生成されたクレーターの鳥瞰図を示す。中央の窪みがクレーターであり、クレーター奥と右頂点付近に見られる窪みは試料の欠けである。この試料は酸化物粉末を圧縮成形・仮焼結したことから、以前に報告 15)した金属ガドリニウムのクレーターに見られる様な金属光沢や滑らかさは無く、表面に粒状性が見られる。更に、クレーター内部も滑らかではない。この試料の画像解析の結果により得られたクレーター半径 186 μ m から、1 パルスあたり 4.6J/cm²(10⁹W/cm²)のレーザー光強度が算出された。更に、アブレーションによる蒸発体積 $4.56 \times 10^5 \mu\text{m}^3/\text{puls}$ 、が得られたが、酸化物試料の密度の算出が困難であったため、蒸発質量を見積もることはできなかった。

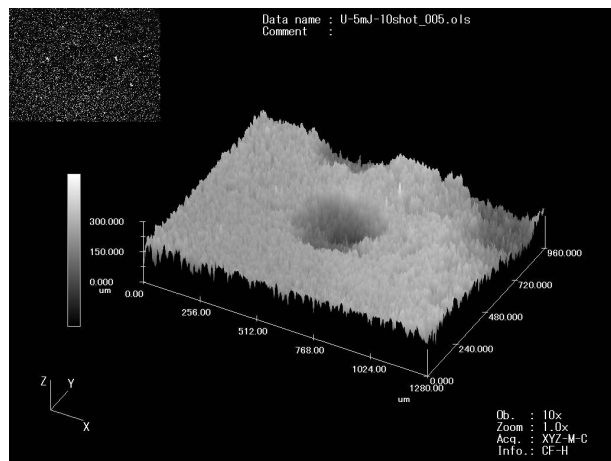


Fig. 3 Confocal laser scanning microscope image of the typical produced by 10 shots of laser pulse.

4. 考察

緒言で述べたように、LIBS におけるプラズマ発光はレーザー誘起プラズマ中における過渡的な現象であり、発光スペクトルの強度などの時間依存性が非常に重要になる。そこで、ここでは、スペクトル強度の S/N 比の低減やスペクトル形状の精鋭化等、観測遅延時間や観測時間幅等の最適化のため、プラズマ励起温度やウラン及びウランに含まれたカルシウムのスペクトル強度や幅、及びその強度比の観測遅延時間依存性について議論する。

4.1 プラズマ励起温度の観測遅延時間依存性

まず、以前の報告¹⁷⁾と同様 Boltzmann プロットの方法を用いて測定したスペクトルからプラズマ励起温度の観測遅延時間依存性について求めた。上に述べたように LIBS におけるプラズマ発光は過渡現象であるが、ここでは観測時間幅 $1 \mu\text{s}$ の間は、観測領域においては局所熱平衡 (LTE: Local Thermodynamic Equilibrium) の状態であると仮定する。この時、エネルギーレベル U (Upper) から L(Lower)へのスペクトルの発光強度 I_{UL} はプラズマ励起温度 T と以下の関係で表される。

$$I_{UL} = \frac{hc g_U A_{UL}}{4\pi \lambda_{UL}} \frac{N}{Z} \exp\left(-\frac{E_U}{kT}\right) \quad (1)$$

ここで、 h はプランク定数、 c は真空の光速、 g_U は上準位の縮退数、 A_{UL} は遷移確率、 λ_{UL} は波長、 E_U は上準位のエネルギーレベル、 k はボルツマン定数である。 N と Z は関与する原子あるいはイオンの数密度と分配関数であり、この分配関数 Z は次の様に、その原子のエネルギーレベル E_i と縮退数 g_i の状態和で表され、プラズマ励起温度に依存する。

$$Z = \sum_i g_i \exp\left(\frac{-E_i}{kT}\right) \quad (2)$$

次に(1)式の両辺の自然対数をとれば、

$$\ln\left(\frac{I_{UL} \lambda_{UL}}{g_U A_{UL}}\right) = -\frac{1}{kT} E_U + \ln\left(\frac{hc N}{4\pi Z}\right) \quad (3)$$

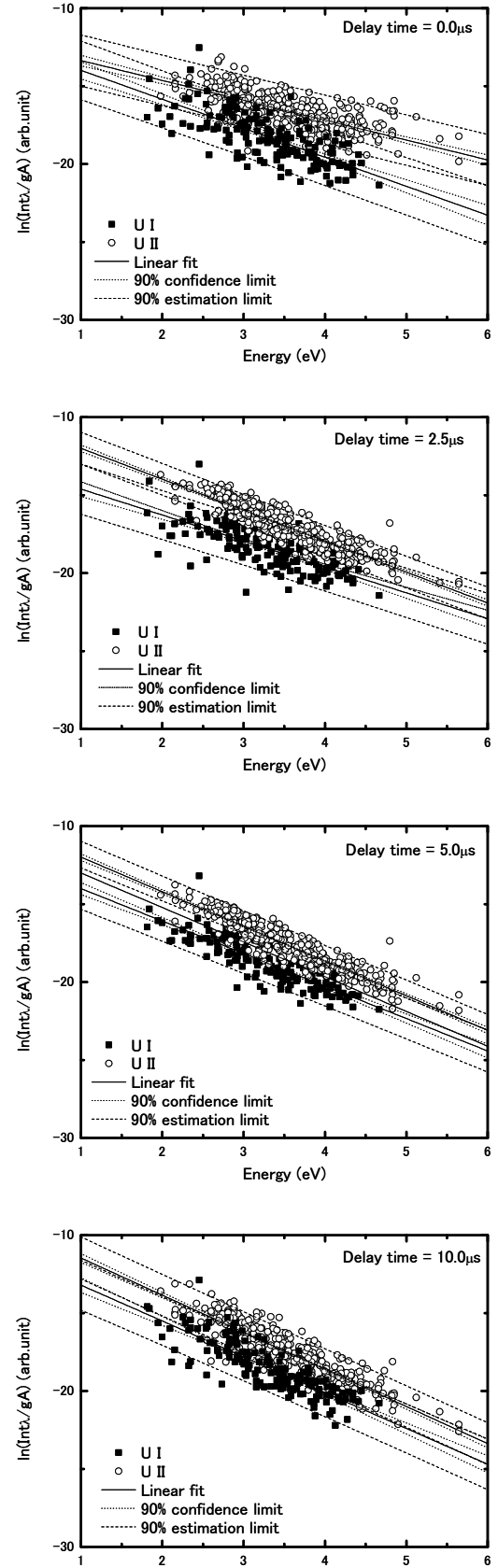


Fig. 4 Boltzmann plots for U I and U II at 0.0, 2.5, 5.0 and 10.0 μs

となる。但し、この式において右辺の第 2 項は N 、 Z を含むため、原子とイオンでは値が異なる。この(3)式を用いて、以前¹⁷⁾同定した原子スペクトル 165 本、一価のイオンスペクトル 381 本を元に測定した観測遅延時間依存性に対する Boltzmann プロットを実施した。その結果の一部を Fig. 4 に示す。図の横軸が上準位のエネルギー、縦軸は(3)式の左辺であり、■がウラン原子、○が一価のウランイオンの Boltzmann プロットである、図の上から、観測遅延時間が 0.0、2.5、5.0、10.0 μs である。図中の実線はリニアフィットした直線、点線は 90%信頼限界、破線は 90%推定限界である。

観測遅延時間が短いときはばらつきが大きく、長くなるにつれて小さくなりプラズマ励起温度がそろってきていることが判る。なお、この直線の Y 切片の違いは先に述べた(3)式右辺第 2 項の数密度 N と分配関数 Z の違いを示している。これらの直線の傾きからプラズマ励起温度を求め、観測遅延時間に対してプロットした図を Fig. 5 に示す。レーザー照射直後は 9000K 程度であった高温のプラズマが数 μs の後に急激に冷却され、その後プラズマ励起温度の変化は小さくなる。この傾向は過去に報告されている例^{21),22)}と同様である。本測定においては観測遅延時間 4 μs 以降は、約 5000K の温度を 10 μs 程度まで保っている。このことから、4.6J/cm²($\simeq 10^9\text{W/cm}^2$) のレーザー光強度における酸化ウランのアブレーションでは、レーザー照射後 4 μs を越えるとプラズマ励起温度が 5000K 程度で比較的長い時間安定することから、観測時間幅を数 μs 以上に広げ、長く観測することによるスペクトル強度の積算量の増加が可能であることが判った。この結果は、これまでに我々が LTE を仮定して測定した観測遅延時間や観測時間幅が妥当であることを示している。

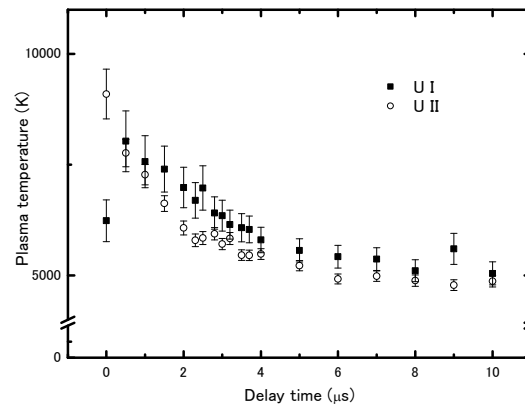


Fig. 5 Time resolved plasma excitation temperatures for uranium atom and ion.

4.2 ウランとカルシウムのスペクトル

Fig. 2 に示したように観測遅延時間が早い場合には測定スペクトルの強度は強くなるが、Fig. 5 に示したプラズマ励起温度の急激な変化のためスペクトルの観測遅延時間の変化に対する安定

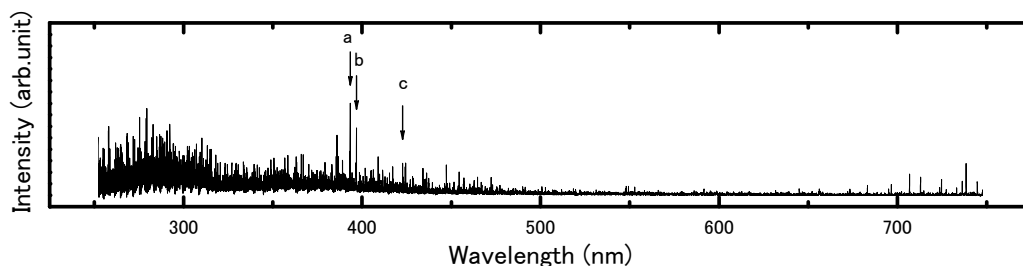


Fig. 6 Emission spectra of natural uranium including calcium

The arrows show the spectra of calcium

Table 2 Identified data of calcium spectra measured within uranium spectra

No	Measure- ment	“CFA Scientific Divisions: AMP: Databases”									
	Wave- length (nm)	Wave- length (nm)	log(gf)	Ele- ment		Energy Level	J	Configu- ration	Energy Level	J	Configu- ration
						(eV)			(eV)		
a	393.369	393.3663	0.134	Ca	II	0.000	0.5	4s	3.151	1.5	4p
b	396.868	396.8469	-0.166	Ca	II	0.000	0.5	4s	3.124	0.5	4p
c	422.706	422.6728	0.243	Ca	I	0.000	0	4s ²	2.933	1	4s4p
A	393.305	393.2021	-0.528	U	II	0.036	5.5	f ³ d ²	3.188	6.5	f ³ sp
B	396.757	396.6549	-0.070	U	II	1.044	4.5	f ⁴ s	4.170	5.5	f ⁴ p
C	394.484	394.3816	0.099	U	I	0.000	6	d7s ²	3.143	6	

性は悪くなる。観測遅延時間が遅い場合は、その逆である。母材に含まれる微量の不純物を分析するためには、母材とともに不純物のスペクトルにおいても強度が強いだけでなく、その安定性が分析精度を左右する。そのためには母材とともに不純物のスペクトル強度と幅の観測遅延時間・プラズマ励起温度依存性について解析する必要がある。

そこで、不純物であるカルシウムと母材であるウランのスペクトルを比較するために、観測遅延時間 $5\mu\text{s}$ で測定したスペクトルの全体像を Fig. 6 に示す。スペクトル強度は波長 436.325nm のウランのスペクトルで規格化し、不純物として添加したカルシウムのうち確認できたスペクトルを矢印(a, b, c)で示した。また、図に矢印で示したスペクトルをスペクトル解析ソフト PLASUS SpecLine と Center for Astrophysics(CfA)の Atomic and Molecular Physics(AMP) Science Group がインターネットで公開しているデータベース²³⁾を使用して同定を行った。その結果、観測されたカルシウムのスペクトルはイオンスペクトル 2 本(a, b)と原子スペクトル 1 本(c)であった。また、これら 3 本のカルシウムスペクトルの近傍にあるウランスペクトルのうち、スペクトル強度が比較的強く特徴的なウランのイオンスペクトルを 2 本(A, B)、原子スペクトルを 1 本(C)選び、参考文献 17)からスペクトルデータを参照し、カルシウムスペクトルのデータと共に Table 2 に示した。次に、これら 6 本のスペクトルの観測遅延時間 0.5 、 5.0 、 $10.0\mu\text{s}$ 時のスペクトルを Fig. 7 に示す。横軸は波長で破断線を用いて 6 本のスペクトルを同時に示した。レーザー照射直後の $0.5\mu\text{s}$ 時にはウランもカルシウムも共にイオンのスペクトル強度は強いが、原子のスペクトル強度は他の時刻に比べ相対的に弱い。 $5\mu\text{s}$ 時のスペクトルと比較すると原子のスペクトル強度のほうが相対的に強いことが良く判る。この傾向はカルシウムのほうがより顕著であるように見える。

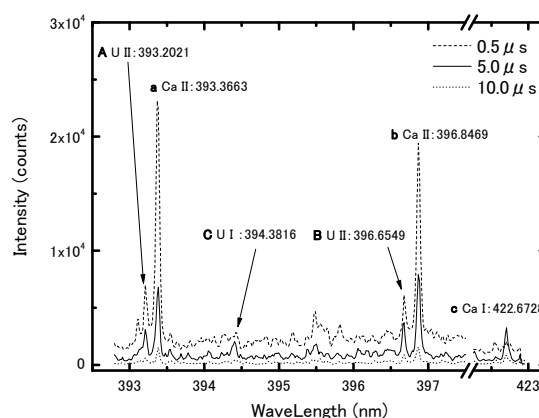


Fig. 7 Emission spectra (393-423nm region) of uranium including calcium

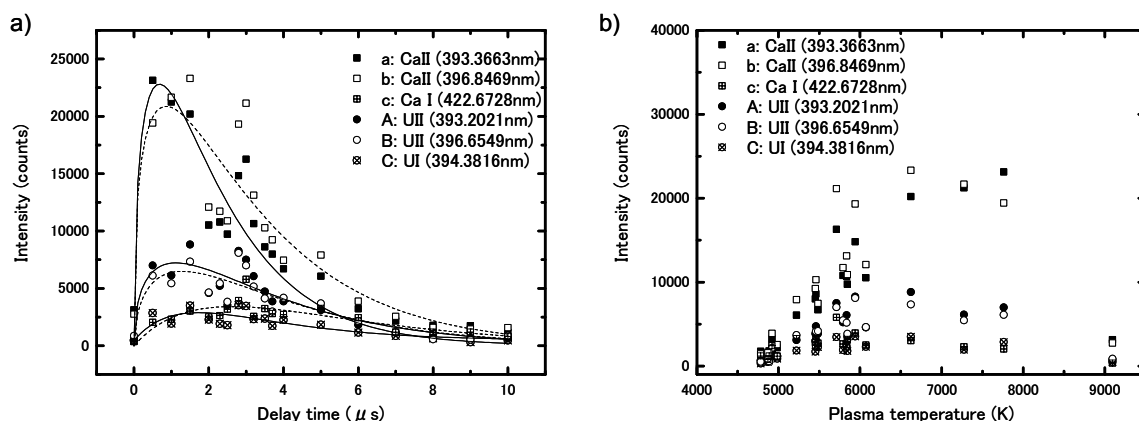


Fig. 8 Spectra intensity of uranium and calcium.

a) As a function of delay time b) As a function of plasma temperature

4.3 スペクトル強度の観測遅延時間及びプラズマ励起温度依存性

まず、Table 2 に示したカルシウムとウランのスペクトルのスペクトル強度の観測遅延時間依存性とプラズマ励起温度依存性を Fig. 8 に示す。Fig. 8 a) から、いずれのスペクトルもレーザー照射後、短時間でスペクトル強度が最大になり、その後、弱くなることが判る。特に最大になる時刻はカルシウムイオン(a, b)が最も早く、スペクトル強度の変化も最も大きい。次にウランイオン(A, B)がピークを迎え、その後、ウラン原子(C)、最後にカルシウム原子(c)の順で強くなる。Fig. 5 から判るようにレーザー照射後 9000K 程度のプラズマが 4μ s 時には再結合や輻射等により 5000K まで冷却されるため、内部エネルギーの高いイオンの数密度は急激に減る。一方、原子はイオンに比べエネルギーが低いため、その数密度の減少は相対的に遅い。それに加え、高準位の原子やイオンの再結合や輻射等による数密度の増加が伴う。これらの相乗的な効果により、原子のスペクトル強度の時間変化のピークがイオンのスペクトルのピークより遅れてやってくるものと考えられる。

また、Fig. 8 b) のプラズマ励起温度依存性のグラフから、プラズマ励起温度が高くなるにつれ、スペクトル強度が高くなるが、6000K 以上のプラズマ励起温度ではスペクトル強度はあまり変化していないことが判る。(1)式において分配関数 Z の項を無視すれば、プラズマ励起温度 T が 10000K 以下、上準位のエネルギーレベル E_U が 4eV 程度であるときは、プラズマ励起温度が上昇するにつれ、スペクトル強度も上昇するはずである。しかし、先に述べたとおり Fig. 7 a) では、6000K 以上のプラズマ励起温度ではスペクトル強度の変化が少ない。このことは、Fig. 5 が示すようにプラズマ励起温度が 6000K 以上を示すのはアブレーション直後から観測遅延時間 4μ s までの初期の間であり、過渡的現象が続いているためと思われる。この初期段階においては観測時間幅 1μ s の間では LTE が成り立っていない、あるいはプラズマ励起温度が高いため分配関数 Z を無視することができない等の理由が考えられる。

以上の結果から、観測遅延時間が 4μ s 以前の早い時期においてはスペクトル強度は急激に変化するが、観測遅延時間 4μ s 以降のプラズマ励起温度が 5000K 程度で安定している期間ではスペクトル強度は減少するがその変化は緩やかであることが判った。

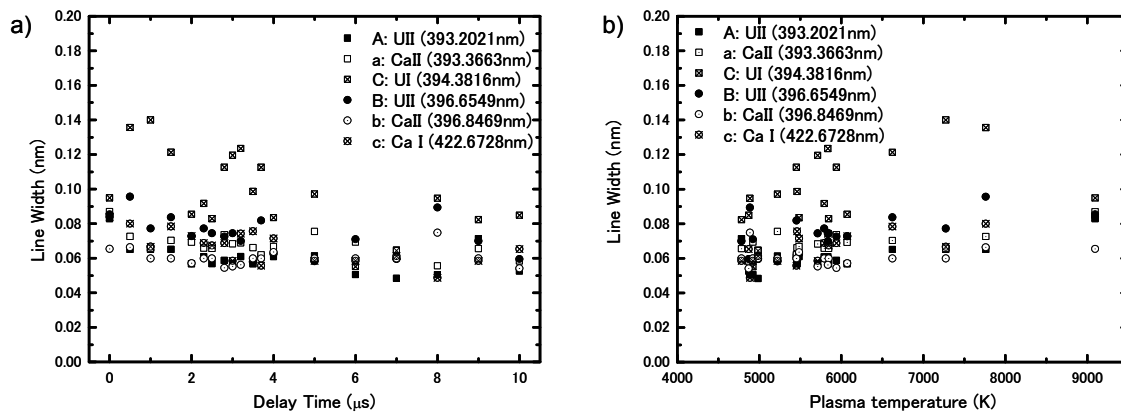


Fig. 9 Line width of uranium and calcium spectra

a) As a function of delay time b) As a function of plasma temperature

4.4 スペクトル幅の観測遅延時間及びプラズマ励起温度依存性

次に、スペクトル幅の観測遅延時間依存性とプラズマ励起温度依存性について Fig. 9 に示す。いずれも、観測遅延時間が遅い、あるいはプラズマ励起温度が低い場合にはスペクトル幅が狭くなることが判る。プラズマ励起温度が 5000K 程度である観測遅延時間 5 μ s 以降のスペクトル幅は 0.06nm 程度であり、分光器の分解能が $\lambda/8000$ (3 ピクセル)、400nm 近辺での分解能が 0.05nm 程度であることを考えれば、ほぼ分解能の限界のスペクトル幅になっていることが判る。Fig. 9 a) より、これ以上観測遅延時間を遅らせてもスペクトル幅が狭くなる様子は伺えないが、Fig. 9 b) からは、プラズマ励起温度を下げることで、スペクトル幅を更に狭くできる可能性があることが判る。

従って、プラズマ励起温度が 5000K 程度で安定している観測遅延時間 4~10 μ s の期間では、スペクトル幅は 0.06nm と十分狭く、もし、プラズマ温度を更に下げることができればスペクトル幅を更に狭められる可能性がある。

4.5 スペクトル強度比の観測遅延時間及びプラズマ励起温度依存性

最初に述べたように我々が低除染燃料に適用する LIBS による不純物の分析法は、不純物のスペクトル強度とその近傍にある母材のスペクトルとの強度比を取ることであり、あらかじめ作成した検量線を用いて不純物濃度を求める方法である。このことから、不純物自身のスペクトルの安定性と共に、母材のスペクトルに対する安定性も重要になる。上で解析してきたとおり、観測遅延時間 4 μ s 以降には、プラズマ励起温度は 5000K 程度で安定し、スペクトル強度も大きな変化は無く、スペクトル幅も十分狭いことから、この観測遅延時間以降が安定したスペクトルを測定できる条件である。

ここで、参考文献 15)でも述べたスペクトル強度比について再度考える。カルシウムのウランに対するスペクトル強度比は(1)式より以下のように表される。

$$\begin{aligned}
 \frac{I_{UL}^{Ca}}{I_{UL}^U} &= \frac{\frac{hc g_U^{Ca} A_{UL}^{Ca} N^{Ca}}{4\pi \lambda_{UL}^{Ca}} \exp(-\frac{E_U^{Ca}}{kT})}{\frac{hc g_U^U A_{UL}^U N^U}{4\pi \lambda_{UL}^U} \exp(-\frac{E_U^U}{kT})} \\
 &= \frac{\lambda_{UL}^U g_U^{Ca} A_{UL}^{Ca} N^{Ca} Z^U}{\lambda_{UL}^{Ca} g_U^U A_{UL}^U N^U Z^{Ca}} \exp(-\frac{E_U^{Ca} - E_U^U}{kT})
 \end{aligned} \quad (4)$$

但し、母材であるウランについては肩に U を、不純物であるカルシウムについては肩に Ca を指標として付加した。この式のうち、(2)式に記載した分配関数である Z^U/Z^{Ca} と $\exp(-(E_{Ca_u} - E_{u_u})/kT)$ の 2 つの項がプラズマ励起温度に依存するためスペクトル強度比に変化を与える要因となる。2 番目の項は $E_{Ca_u} - E_{u_u}$ をできるだけ小さくすれば、即ち、上準位が同じエネルギーであれば無視できるが、分配関数に起因する最初の項はプラズマ励起温度の変化の影響を無視するこ

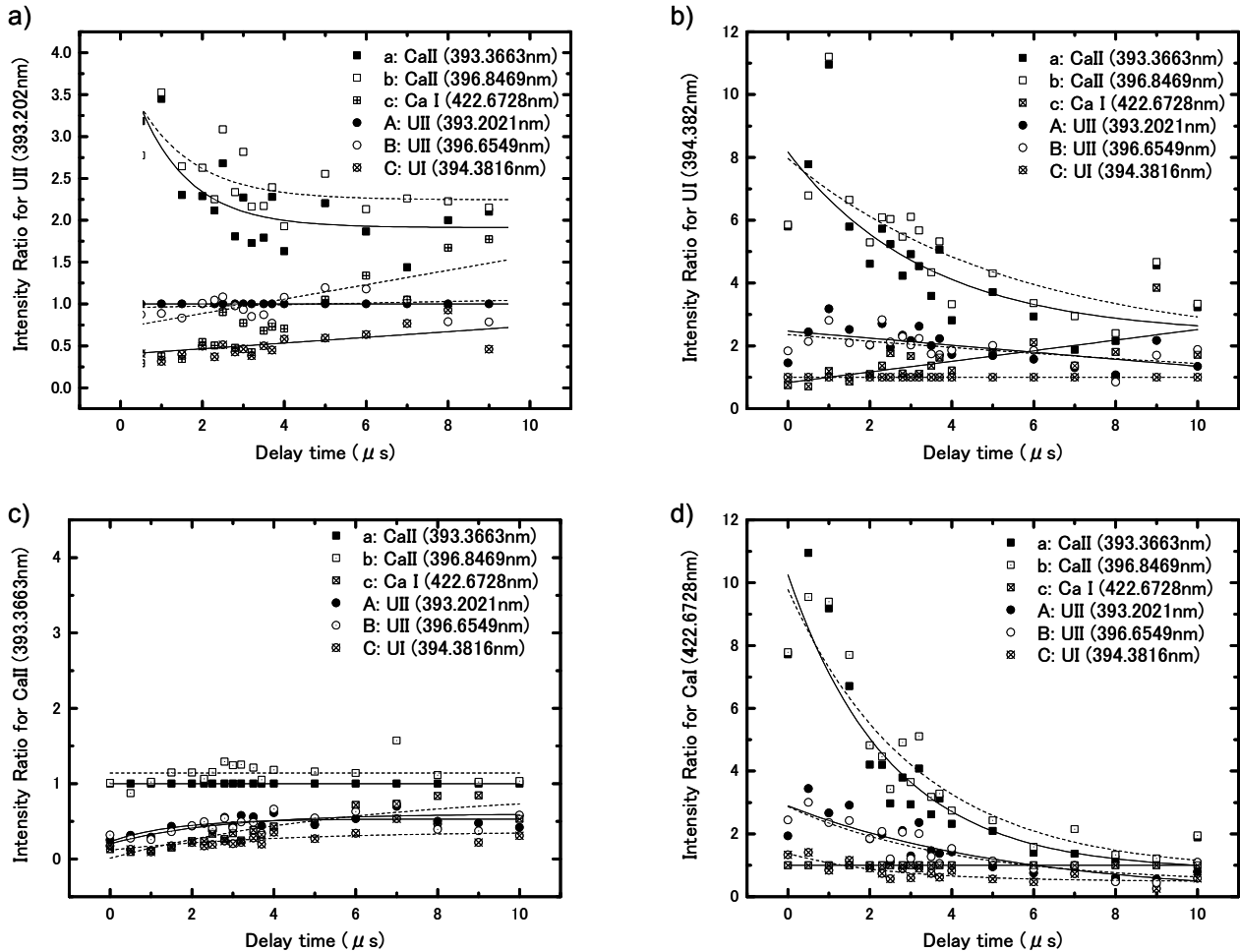


Fig. 10 Spectra intensity ratio of uranium and calcium as a function of delay time.

- The intensity ratio for uranium ion spectra at 393.202nm.
- The intensity ratio for uranium atom spectra at 394.382nm.
- The intensity ratio for calcium ion spectra at 393.3662nm.
- The intensity ratio for calcium atom spectra at 422.6728nm.

とができない。従って、できるだけプラズマ励起温度が安定している状態でスペクトルを測定する必要がある。

Table 2 で示したスペクトルに関するスペクトル強度比の時間依存性を Fig. 10 に示す。それぞれ、a)はウランイオンのスペクトル(A)に対するスペクトル強度比で b)はウラン原子のスペクトル(C)、c)はカルシウムイオンのスペクトル(a)、d)はカルシウム原子のスペクトル(c)に対するスペクトル強度比である。

Fig. 10 a)のウランイオン(B)の強度比はほぼ一定で(A)と重なっているのが判る。一方、カルシウムイオン(a、b)のスペクトル強度比はレーザー照射直後には大きく $4\mu\text{s}$ までに急激に減少するが、それ以降はつきは大きいものの、ほぼ一定になっていることが判る。前述の「4.3 スペクトル強度の観測遅延時間及びプラズマ励起温度依存性」で述べたとおり観測遅延時間 $4\mu\text{s}$ 以前では LTE が成り立たないとした場合でも、ウランイオンにおいては、式(4)に含まれる分配関数 Z^u が同じであることから $Z^u/Z^u=1$ と一定となり、分配関数のプラズマ励起温度による変化はスペクトル強度比に影響を与えない。そのため、アブレーション直後の LTE の成り立たないプラズマ励起温度の急激な変化がある場合においてもスペクトル強度比が一定になっていると考えられる。一方、カルシウムイオンの場合には、分配関数がウランイオンと異なり、プラズマ励起温度が急激に変化しているレーザー照射直後から $4\mu\text{s}$ の間までの間は Z^u/Z^{Ca} によるスペクトル強度比に対する影響を無視することができないと考えられる。実際、Fig. 10 c)で示したカルシウムイオン(a)に対するカルシウムイオン(b)のスペクトル強度比の変化、即ち同じ分配関数を持つカルシウムイオン同士のスペクトル強度比の変化はほぼ一定である。このことから、アブレーション直後から $4\mu\text{s}$ 以内におけるウランイオンスペクトルとカルシウムイオンスペクトルの強度比の違いはウランとカルシウムの分配関数の違い、即ちエネルギーレベル構造の違いによることが判る。この違いはウランイオンに比べ、カルシウムイオンが水素様の電子配置であり、エネルギーレベルが極端に離散的であり、エネルギーレベルが多く緻密なウランイオンの分配関数とプラズマ励起温度依存性が大きく異なるためと考えられる。

一方、Fig. 10 a)の原子のスペクトル強度比から、ウラン原子(C)とカルシウム原子(c)の場合には、イオンと異なりどちらも観測遅延時間に対して一定の強度比になることは無く、時刻が進むにつれ強度比が大きくなっていくのが判る。これは、Fig. 10 b)、d)からも明らかであり、a)と同様、原子に対するイオンのスペクトル強度比が減少（イオンに対する原子のスペクトル強度比が増加）している。Fig. 5 のプラズマ励起温度の観測遅延時間依存性と合わせて考えれば、プラズマ励起温度がほとんど変化しない $4\mu\text{s}$ 以降の観測遅延時間においてさえ、原子のスペクトル強度比が増加していることが判る。このことは、原子スペクトルのイオンスペクトルに対する強度比の増加がプラズマ励起温度によらないことを示している。従って、イオンの再結合や発光によりイオンが原子に変わっているわけではないと考えられる。Fig. 8 を見ても判るようにスペクトル強度自身は観測遅延時間と共に減少していることから、観測領域に観測領域の外から原子が供給されることによる原子の増加ではなく、観測領域にあるイオンが原子に比べ観測領域外へ逃げていく割合が多いため、相対的に観測領域内の原子のスペクトル強度がイオンに比べ相対的に増加したと考えられる。

最後にウランのイオンスペクトルに対するスペクトル強度比のプラズマ励起温度依存性を Fig. 11 に示す。4500～6000K までの間、イオンのスペクトル強度比はほぼ一定である。一方、原子についてはプラズマ励起温度が下がる（観測遅延時間が遅くなる）とスペクトル強度比が上がるという、上の議論をそのまま反映した結果が得られた。

これらのスペクトル強度比の観測時間依存性の結果から、4 μ s 以降においてイオンに対するイオン、原子に対する原子のスペクトル強度比がほぼ一定になることと共に、イオンに対する原子のスペクトル強度比は一定にならないことが判った。

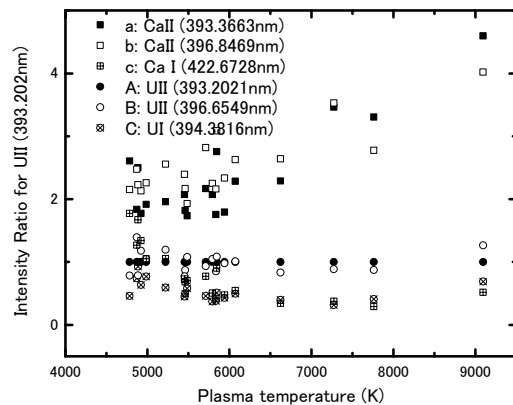


Fig. 11 Spectra intensity ratio of uranium and calcium as a function of plasma temperature

5. 結言

レーザーブレイクダウン発光分光分析法を低除染燃料に含まれる不純物の組成分析に適用するために、酸化ウランに酸化カルシウムを添加した試料を用いて時間分解分光を行い、プラズマ励起温度、スペクトル強度、強度比及び幅について考察を行い、以下のことを明らかにした。

- 1) プラズマ励起温度の変化はレーザー照射直後から 4 μ s までの間に 9000K から 5000K まで急激に減少するが、それ以降は大きな変化は無くほぼ 5000K で安定して推移する。
- 2) スペクトル強度はレーザー照射後、最初にイオンが急激に強くなり、その後遅れて原子がピークを迎える。その後 4 μ s までの間に、急激に弱くなるが、それ以降、上記のプラズマ励起温度の変化と同様に強度の減少も緩やかになり安定する。
- 3) スペクトル強度比はイオン・イオン、あるいは原子・原子で、解析する必要がある、何れもレーザー照射後 4 μ s 以降ではほぼ一定でプラズマ励起温度と同様に安定である。
- 4) スペクトル幅はプラズマ励起温度が低いほど狭く、5000K で本システムの分解能のほぼ限界に達したが、レーザー照射後 4 μ s 以降においてはプラズマ励起温度が低下しないためスペクトル幅を狭くはできない。

以上の結果、プラズマ励起温度が安定するレーザー照射後 4 μ s 以降においては、スペクトル強度もスペクトル強度比も安定であり、十分狭いスペクトル幅が得られ、観測遅延時間の最適な条件が 4 μ s であることが判った。

更に、「4.5 スペクトル強度比の観測遅延時間及びプラズマ励起温度依存性」の考察によりアブレーション直後から 4 μ s 以内におけるウランイオンスペクトルとカルシウムイオンスペクトルの強度比の時間変化が異なるのは、エネルギー構造が極端に離散的で水素様の電子配置であるカルシウムイオンの分配関数と緻密なエネルギー構造を持つウランイオンの分配関数との違いに由来するプラズマ励起温度依存性の差によるものと考えられることが判った。このことは、ウランとプルトニウム、あるいは TRU であるアクチノイドなどの同属元素においては、カルシウムイ

オンに比べ、エネルギー構造が緻密で互いに分配関数が似ていると考えられることから、プラズマ温度依存性の違いが小さい可能性がある。そのため、プラズマ温度に対するスペクトル強度比の感受性が小さくなり、LIBS による分析にとって有利に働く可能性があると考えられる。

今後、これらの結果を踏まえて、最適な観測遅延時間をウランに含まれる不純物の濃度の分析手法に適用するとともに、プルトニウムや TRU であるアクチノイドの LIBS による分析の研究に適用する予定である。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたって多くの助言を頂きました、レーザー物質制御研究グループの大場弘則氏に深く感謝いたします。また使用したウラン試料をご提供くださった計画管理室の伊藤光雄氏、上野隆氏に感謝いたします

本報告は、特別会計に関する法律（エネルギー対策特別会計）に基づく文部科学省からの受託事業として、日本原子力研究開発機構が実施した平成 20 年度「低除染 TRU 燃料の非破壊・遠隔分析技術開発」の成果である。

参考文献

- 1) Special issue for the LIBS. Spectrochim Acta, B 56 pp.565-1034 (2001)
- 2) Special issue for the LIBS. Spectrochim Acta, B 57 pp.1107-1247 (2002)
- 3) Special issue for the LIBS. Spectrochim Acta, B 60 pp.877-1242 (2005)
- 4) 義家亮: “レーザ誘起破壊プラズマ発光分析法と燃焼排ガス中ダストのオンサイト分析技術” までりあ、43 p.201 (2004).
- 5) Ryo Yoshiie, Ai Kojima, Shigeyuki Uemiya, Makoto Nishimura, Shinji Kambara and Hiroshi Moritomi: “Monitoring of Volatile Cadmium in Flue Gas from the Waste Incineration Process Using LIBS”, J. Chem. Eng. Jpn. 38 p.528 (2005).
- 6) 毎田充宏、濱田智広、桑子彰: “レーザブレイクダウン分光法による堆肥分析装置” 東芝レビュー Vol.60 No.11 p.45 (2005).
- 7) 安田剛大、葛谷幹夫: “レーザ誘起プラズマ発光分光分析法によるプラスチック中の鉛の定量” 分析化学 54 p.637 (2005).
- 8) S. Nakamura, Y. Ito, K. Sone, H. Hiraga and K. Kaneko: “Determination of an Iron Suspension in Water by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy with Two Sequential Laser Pulses”, Anal. Chem. 68 p.2981(1996).
- 9) 内田祐、桑子彰、小長井主税、前田克治: “ダブルパルスレーザ誘起ブレイクダウン分光法による水中ナトリウムの高感度検出” 分析化学 52 p.425 (2003).
- 10) 上田真三、田中知、長崎晋也、長谷川秀一、門信一郎、木村貴海 他: “地下水におけるコロイドの In-Situ レーザ計測に関する技術開発(平成 13～15 年度)” 革新的実用原子力技術開発費補助事業報告書.
- 11) 大高雅敏、林田均: “レーザ誘起ブレイクダウン分光法を用いたナトリウムエアロゾル見

地に関する研究” サイクル機構技報 18 p.23 (2003).

- 12) P. Fichet, P. Mauchien and C. Moulin: “Spectrosc.Determination of impurities in uranium and plutonium dioxides by laser-induced breakdown” , *Ap.l. spectroscopy*, 53 p.1111_(1999).
- 13) W. Pietsch, A. Petit, A. Briand: “Isotope ratio determination of uranium by optical emission spectroscopy on a laser-produced plasma - basic investigations and analytical results” , *Spectrochim Acta*, B 53 p.751 (1998).
- 14) Coleman A. Smith, Max A. Martinez, D. Kirk Veirs and David A. Cremers:
“Pu-239/Pu-240 isotope ratios determined using high resolution emission spectroscopy in a laser-induced plasma” , *Spectrochim Acta*, B 57 p.929 (2002).
- 15) 赤岡 克昭、丸山 庸一郎、大場 正規、宮部 昌文、若井田 育夫: “ガドリニウムに添加した銅のレーザーブレイクダウン発光分光分析(受託研究)” JAEA-Research 2008-081 (2008)
- 16) 赤岡 克昭、丸山 庸一郎、大場 正規、宮部 昌文、音部 治幹、若井田 育夫: ”LIBSによるウラン酸化物中の不純物測定法の開発”東北大学金属材料研究所ワークショップ 「素材産業に関係する新しい分析・解析技術」
- 17) 赤岡 克昭、丸山 庸一郎、大場 正規、宮部 昌文、音部 治幹、若井田 育夫: “レーザーブレイクダウン発光分光法によるウランスペクトルの測定 (受託研究)” JAEA-Research 2009-029 (2009)
- 18) I. Bassiotisa, A. Diamantopouloua, A. Giannoudakosa, F. Roubani-Kalantzopouloua, M. Kompitsas ; “Effects of experimental parameters in quantitative analysis of steel alloy by laser-induced breakdown spectroscopy” *Spectrochim Acta*, B 56 p.671 (2001).
- 19) JOSEPH R. WACHTER, DAVID A. CREMERS: “Determination of Uranium in Solution Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy” *App. Spectrosc.* 41 p.1042 (1987)
- 20) 長崎 晋也、田中 之人、門 信一郎、田中 知: ”微粒子計測における時間分解型レーザー誘起ブレイクダウン分光法の有効性とブレイクダウンプラズマのエネルギー伝播／伝達過程” 日本原子力学会和文論文誌 1 p.472 (2002)
- 21) LOUIS ST-ONGE, MOHAMAD SABSABI, AND PAOLO CIELO:” Quantitative Analysis of Additives in Solid Zinc Alloys by Laser-induced Plasma Spectrometry” *J Analytical Atomic Spectrometry* 12 p997(1997)
- 22) Nek M. Shaikh, S. Hafeez, M.A. Baig:” Comparison of zinc and cadmium plasma parameters produced by laser-ablation” *Spectrochim Acta*, B 62 p1311 (2007)
- 23) Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics: (online) “CFA Scientific Divisions: AMP: Databases” <http://www.cfa.harvard.edu/amp/ampdata/kurucz23/sekur.html> (accessed 2010/01/10)

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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
物質モル	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 基本単位	
	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ル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	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ル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	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

組立量	SI 組立単位			
	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
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(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	C		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
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	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	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス度 ^(e)	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光強度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
放射線量の放射能 ^(f)	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
吸収線量, ビエエネルギー分与, カーマ	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
	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

(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付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) ヘルツは周期現象についてのみ、ベ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。

(e) 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、温度差や温度間隔を表す数値はどち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

組立量	SI 組立単位		
	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
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 sA
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
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 sA
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 ³ 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	接頭語	記号	乗数	接頭語	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	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	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	キロ	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	y

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	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) 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
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI 単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	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
ボアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォトル	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 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

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フエルミ	f	1 フエルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリー), 4.1868 J (「IT」カロリー) 4.184 J (「熱化学」カロリー)
ミクロン	μ	1 μ =1 μm=10 ⁻⁶ m

