JAEA-Research
2010-036

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分析

—レーザー光強度依存性—
（受託研究）

Laser Induced Breakdown Spectroscopy Analysis of the Uranium Including Calcium

- Dependence of Laser Power -
(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・放射線科学ユニット

Division of Environment and Radiation Sciences
Nuclear Science and Engineering Directorate

October 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

JAEA-Research 2010-036

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分析
―レーザー光強度依存性―
（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・放射線科学ユニット
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 8 月 23 日　受理）

レーザーブレークダウン発光分光（LIBS）法による低除染 TRU 燃料の迅速なその場分析を遠隔で実現するために、不純物としてカルシウムを添加（3306ppm(weight)）したウラン酸化物試料を用いてプラズマからのスペクトルの発現特性を取得した。ウランとカルシウムのそれぞれの発光スペクトルについてレーザー光強度をパラメータとして時間分解分光測定し、スペクトル強度、スペクトル幅、プラズマ励起温度等の特性を明らかにした。その結果、発光強度は 5mJ(10kJ/cm^2)の未満の場合、プラズマ励起温度に依存し、5mJ 以上の場合は蒸発量に依存することが示唆された。安定した強度で十分狭い幅のスペクトルを得るためには、5mJ のレーザー光強度で試料を照射すればよいことが分かった。

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

JAEA-Research 2010-036

Laser Induced Breakdown Spectroscopy Analysis of the Uranium Including Calcium - Dependence of Laser Power - (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 August 23, 2010)

For the remote analysis of low DF TRU (Decontamination Factor Transuranic) fuel, Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) was applied to uranium oxide including a small amount of calcium oxide (～3306ppm(weight)) as a sample, and the spectrum emitted from laser-breakdown plasma was examined. The characteristics, such as spectrum intensity and plasma excitation temperature as a function of laser power, were measured using time-resolved spectroscopy. As a result, the laser power of around 5 mJ was found optimum to obtain the stable intensity and narrow line width of spectrum.

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

---

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 ---------- 2
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レーザー光強度依存性 ---------- 4
4.2 ウランとカルシウムのスペクトル ---------- 6
4.3 スペクトル強度のレーザー光強度依存性 ---------- 8
4.4 スペクトル幅のレーザー光強度依存性 ---------- 9
4.5 スペクトル強度比のレーザー光強度依存性 ---------- 10
5. 結言 ---------- 12
謝辞 ---------- 13
参考文献 ---------- 13

Contents

1. Introduction ---------- 1
2. Experiment ---------- 2
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 ---------- 6
4.3 Spectra intensity ---------- 8
4.4 Line width ---------- 9
4.5 Spectra intensity ratio ---------- 10
5. Conclusion ---------- 12
Acknowledgements ---------- 13
References ---------- 13

This is a blank page.

1. 緒言

レーザーブレークダウン発光分光(LIBS: Laser Induced Breakdown Spectroscopy)分析法は、パルスレーザー光を試料に照射し、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手法である。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、ほぼ同時にブレー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μｓ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し、不純物や素材を構成する元素固有のスペクトルとその母材のスペクトルの強度比を算出し、予め求めてある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。

これまでに国内外において基礎から応用まで数多くの LIBS の研究がなされ [1)-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進めている [15)-19)]。

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、我々はまず、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)を母材とし、不純物として比較的簡単なスペクトルを持つ銅（Cu）を添加した金属試料を用い、複雑なスペクトルに混在した不純物の LIBS による分析及び評価手法を検討し、検量線及び検出下限の算出を行った [16)]。その結果、不純物の発光スペクトルを定量的に精度良く分光分析できることを確認した。

また、LIBS では不純物や素材を構成する元素と母材が関与する発光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の詳細なデータを明らかにする必要がある。このために核燃料としての母材である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)]。更に、LIBS における発光は短時間で起こるレーザー誘起プラズマ中の過渡的な現象であることから、不純物としてカルシウムを添加した酸化ウラン試料を用いて LIBS による時間分解分光を行い、プラズマ励起温度、スペクトル強度、スペクトル幅、不純物と母材のスペクトル強度比等の時間依存性を明らかにした。その結果、プラズマ励起温度の変化が小さくなるレーザー照射後 4μｓ 以降において安定したスペクトルを観測できることが判った [19)]。これらの一連の分光試験結果より、安定したスペクトルを得るためにはプラズマ励起温度とその変化が重要なファクターであることが確認できた。

本報告では、プラズマ発光スペクトルの時間依存性の結果と同様にレーザー光強度がプラズマ励起温度や試料の蒸発量に影響を与え、発光スペクトルの強度や幅、安定性等を左右することから、発光スペクトルのレーザー光強度依存性に着目し、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た時間分解分光を行った。この結果に基づき、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レーザー光強度依存性とその最適条件について議論する。

2. 実験方法

分光実験は Fig. 1 に示すように密閉できる分析容器内を 2kPa の Ar ガスで満たし、回転試料台に試料を設置して実施した。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 Ca/U 比 3306ppm(weight)で添加し、卓上型ボールミルにより 24 時間撹拌混合し、プレス成型器により約 200MPa の圧力で厚さ約 1mm、直径約 10mm のディスク状に圧縮成形後、高温ヒーターを用いて大気雰囲気中にて 1300℃で 8 時間、仮焼結したものを用いた。使用したレーザーは Q スイッチ Nd:YAG レーザー（Brilliant B : Quantel 社）で、ビーム径 8mm、波長 532nm、繰返し数 10Hz、パルス幅 4.5ns で発振する。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 0.2～60mJ/pulse に調節し、焦点距離 200mm の平凸レンズで

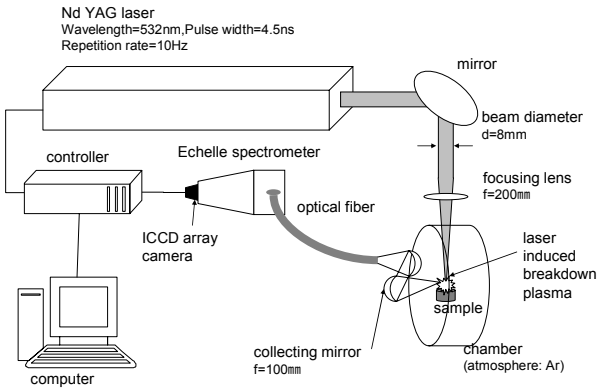

Fig. 1 Experimental Setup.

Table 1 Experimental condition and apparatus

Laser	*Q-switched Nd-YAG laser (Brilliant B / Quantel)*
Wavelength	532 nm
Pulse width	4.5 ns
Repetition rate	10 Hz
Energy	0.2～60 mJ/pulse
Beam diameter	8 ㎜
Focal length of focusing lens	200 ㎜
Spectrometer	Echelle Spectrograph（ARYELLE / LTB）
Resolution of wavelength	λ/8000 (@3pixels)
Range of wavelength	250～750nm (@1shot)
Delay time	5.0 μs
Gate duration	10 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)

試料表面に直上からレーザー光を集光照射した。なお、一回の分光測定あたり 10 パルス（レーザー照射時間 1 秒）のレーザー光を照射した。発生したブレー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 ㎜、有効径 50 ㎜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(ARYELLE :LTB 社)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。我々の以前の測定 [19]では、観測遅延時間が 4μs 以上であればプラズマ励起温度が大きく変化せず、局所熱平衡（LTE : Local Thermodynamic Equilibrium）を仮定できることから、測定の S/N をあげるため観測遅延時間を 5μs、観測時間幅を 10μs に設定して測定を行った。更に、アブレーションによる試料の蒸発体積やレーザーのエネルギー密度を算出するために、それぞれのレーザー光強度で 10 パルス照射し、ブレークダウンスペクトルを観測した試料の表面のクレータを操作型共焦点レーザー顕微鏡（LEXT OLS3000： Olympus 社）で観察した。実験パラメータ等の詳細を Table 1 に示す。

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レーザー光強度依存性を Fig. 2 に示す。縦軸がスペクトル強度、横軸が波長とレーザー光強度でそれぞれ 250～750nm、0.2～60mJ/pulse、参考文献 [17),19)]と同様の方法で感度・波長較正したスペクトルである。250～500nm にウランの強い発光スペクトルが見られ、700nm 以降にはアルゴンの発光スペクトルが見られる。レーザー光強度が強いほどスペクトル強度が強くなることがよくわかる。

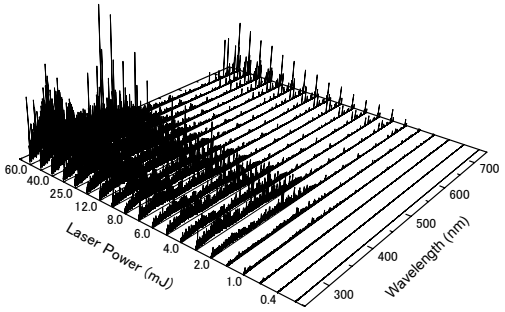

Fig. 2 Emission spectra of U including Ca as a function of the laser power.

3.2 クレーター観察結果

照射したレーザー光エネルギー密度を決定するために、ブレークダウン発光スペクトルを測定した試料表面に生成されたクレーターを操作型共焦点レーザー顕微鏡で観察した。Fig. 3 にレーザー光強度 25mJ で 10 パルス照射した際に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、両隣はそれぞれ 20mJ、30mJ で 10 パルス照射した

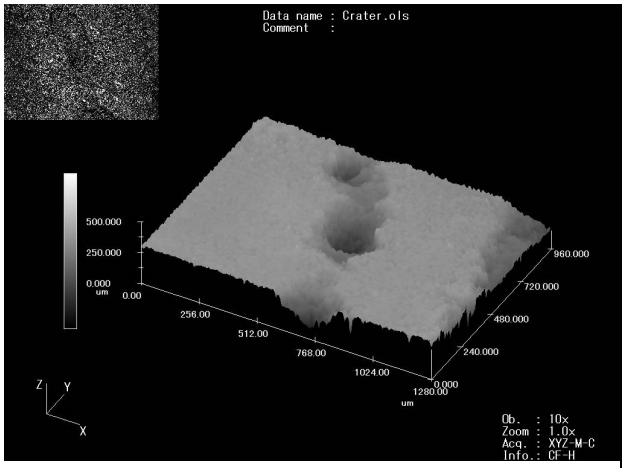

Fig. 3 Confocal laser scanning microscope image of the typical produced by 10 shots of laser pulse

際にできたクレーター孔である。この様にして得られた画像から画像解析を行い、レーザー光強度に対するクレーター体積およびクレーター孔面積を求めた。照射したレーザー光強度をクレーター孔面積で除せばレーザー光エネルギー密度が得られる。これらのレーザー光強度に対する変化を Fig. 4 に示す。なお、Fig. 4 の値はレーザー光を 10 パルス照射した場合の値であり、1 パルスあたりの蒸発体積（クレーター孔体積）の場合には、10 で除する必要がある。また、レーザー光強度が弱い場合にはクレーター孔が小さく、正確な測定ができないため 5mJ 以上のレーザー光強度の場合にのみ行った。いずれもレーザー光強度とともに増加している。特に、クレーター体積とレーザー光エネルギー密度はほぼ比例して増加していることが判る。なお、使用した試料 U_3O_8 の理論密度は 8.3g/cm^3 であることから、25mJ と 5mJ の 10 パルス照射時の蒸発体積から、1 ショットあたりの蒸発質量を求めると、それぞれ約 73μg、14μg 以下であると推定される。

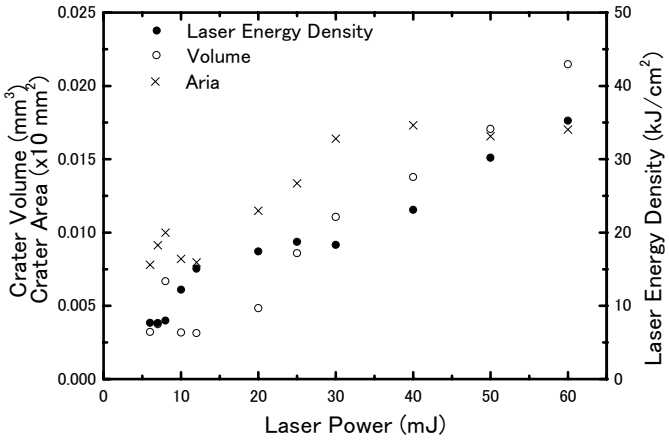

Fig. 4 Laser energy density, crater volume and area as a function of laser power

4 考察

先にも述べたように、レーザーアブレーションによって生成されるプラズマ発光はレーザー光強度に大きく影響を受ける。そこで、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、レーザー光強度の最適化のため、プラズマ励起温度、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スペクトル幅、その強度比のレーザー光強度依存性について実験結果をもとに議論する。

4.1 プラズマ励起温度のレーザー光強度依存性

まず、以前の報告 [17),19)] と同様に Boltzmann プロットの方法を用いて、測定したウランのスペクトルからプラズマ励起温度を求め、レーザー光強度依存性について解析した。LIBS によるプラズマ発光は過渡現象であるが、前回の報告 [19)] のとおりレーザー照射から 4μs 経過した後はプラズマ励起温度が大きな変化をしないことから、観測時間 4～14μs の観測時間幅 10μs 間は、観測領域においては LTE であると仮定しても差し支えない。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。

$$I_{UL} = \frac{hcg_U A_{UL}}{4\pi\lambda_{UL}} \frac{N}{Z} \exp(-\frac{E_U}{kT}) \qquad (1)$$

ここで、h はプランク定数、c は真空の光速度、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。

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

次に(1)式の両辺の自然対数をとれば、

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

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。

そこで、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 本について、各レーザー光強度における Boltzmann プロットを実施した。その結果の一部を Fig. 5 に示す。Fig. 5 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。レーザー光強度が 0.4、5.0、20.0、50.0mJ/puls の場合の結果を a)~d)にそれぞれ示す。図中の実線はリニアフィットした直線、破線は 90%信頼限界、点線は 90%推定限界である。レーザー光強度が弱い場合には傾きが大きく、強くなる

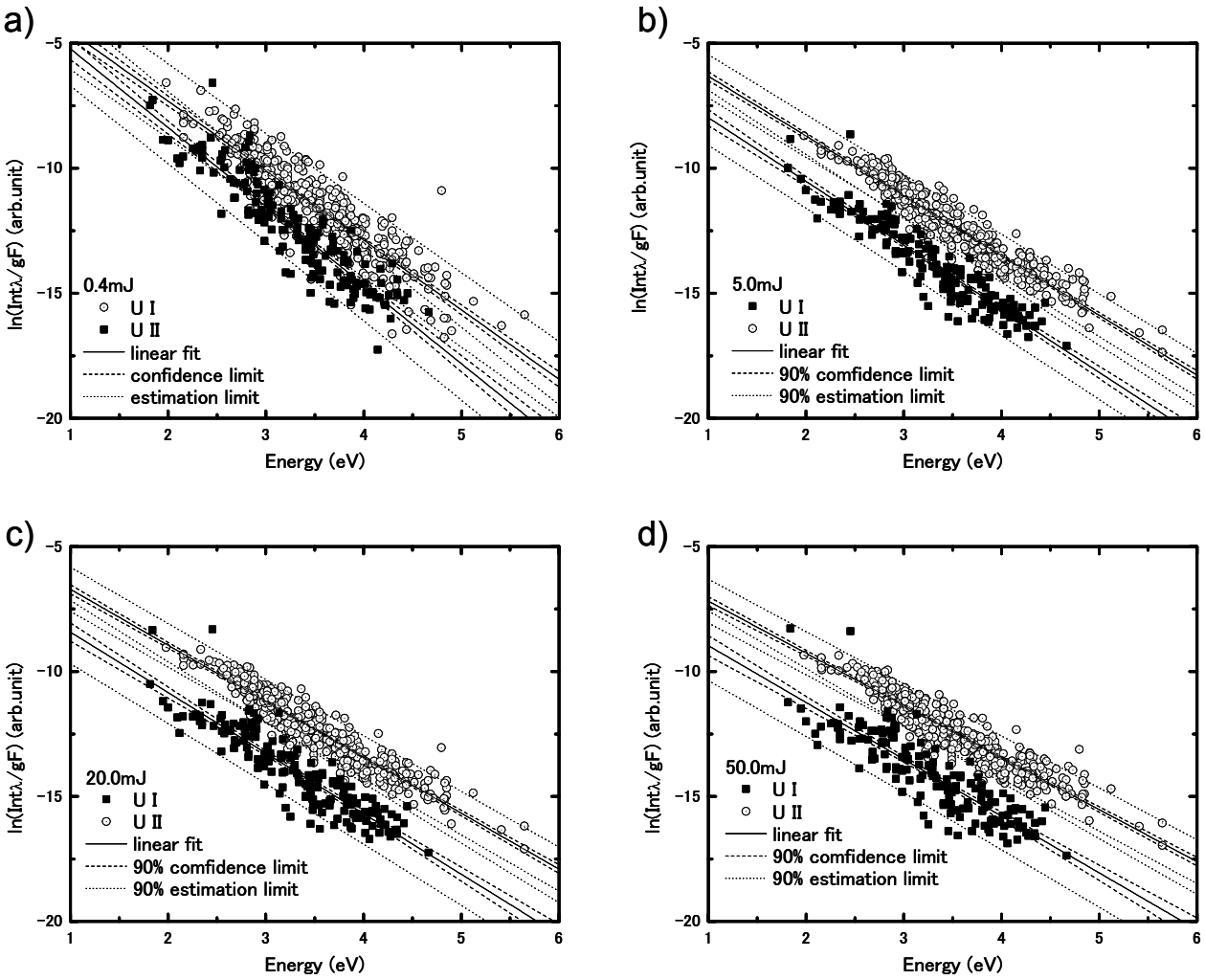

Fig. 5 Boltzmann plots for U I and U II at 0.4, 5.0, 20.0 and 50.0mJ laser power

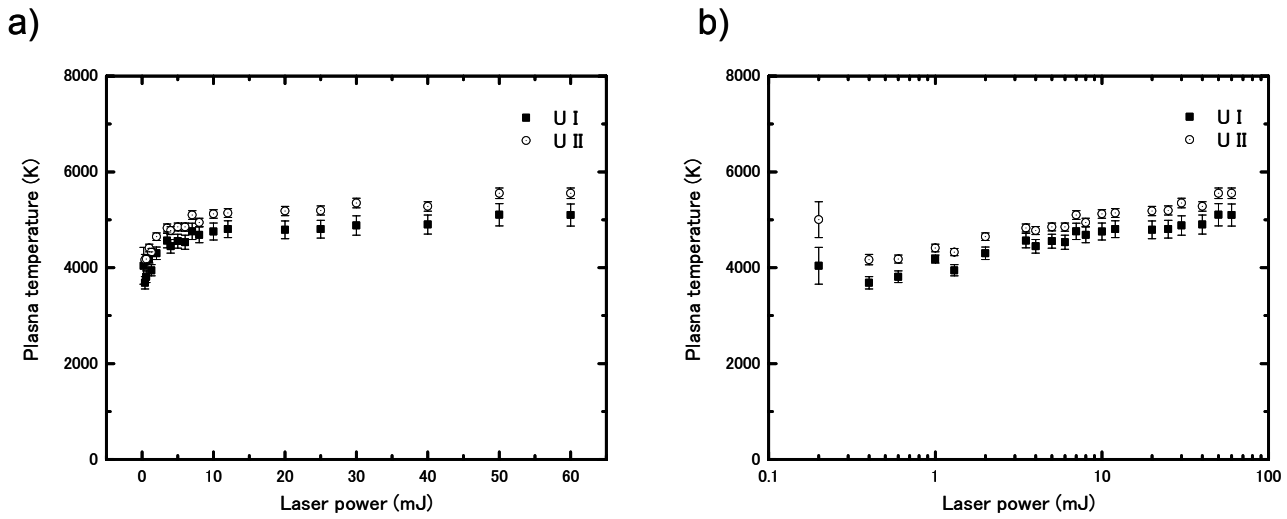

Fig. 6 Plasma excitation temperatures vs. laser power for uranium atom and ion.

につれて小さくなりプラズマ励起温度が高くな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。

Fig. 5 の直線の傾きからプラズマ励起温度を求め、レーザー光強度に対してプロットした図を Fig. 6 に示す。a)はレーザー光強度を線形にとり、b)は対数にとったグラフである。先のグラフと同様に■がウラン原子、○が一価のウランイオンのプラズマ励起温度である。これらのグラフから全体的にイオンのプラズマ励起温度の方が原子のそれよりも 400K 程度高いことがわかる。また、a）よりレーザー光強度が 5mJ 程度まではプラズマ励起温度が急激に上昇し 5000K 近くに達した後、なだらかに 5500K 程度まで上昇する。この様にプラズマ励起温度はレーザー光強度に比例して上昇していないが、b)の対数のグラフよりプラズマ励起温度は、レーザー光強度の対数にほぼ比例していることが判る。更に、Fig. 4 ではレーザーエネルギー密度と蒸発体積(質量)がレーザー光強度にほぼ比例し、試料の蒸発量はアブレーションによって与えられるレーザーのエネルギー密度に比例することを示した。これと同様にプラズマ励起温度はレーザーエネルギー密度に比例するわけではなく、レーザー光強度依存性と同様にその対数にほぼ比例することになる。従って、レーザー光強度を上げ、そのエネルギー密度をあげるだけでは蒸発量は増加するが、プラズマ励起温度を効率よくあげることができない。逆に、レーザー光強度を下げてもプラズマ励起温度は急激には下がらないことを意味している。

4.2 ウランとカルシウムのスペクトル

Fig. 4 に示したようにレーザー光強度が強くなると測定スペクトルの強度と同様に蒸発量も比例して増加する。従って、レーザー光強度の不安定性は、そのまま、スペクトル強度や蒸発量の不安定性につながる。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の強度やその安定性が分析精度を左右する。そこで母材とともに不純物のスペクトル強度と幅のレーザー光強度・プラズマ励起温度依存性について解析し、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の発現特性を比較する必要がある。まず、不純物として添加したカルシウムと母材のウランのスペクトルの全体像を Fig. 7 に示す。図は、レーザー光強度 5mJ で測定したスペクトルで、その強度は波長 436.32471nm のウランのスペクト

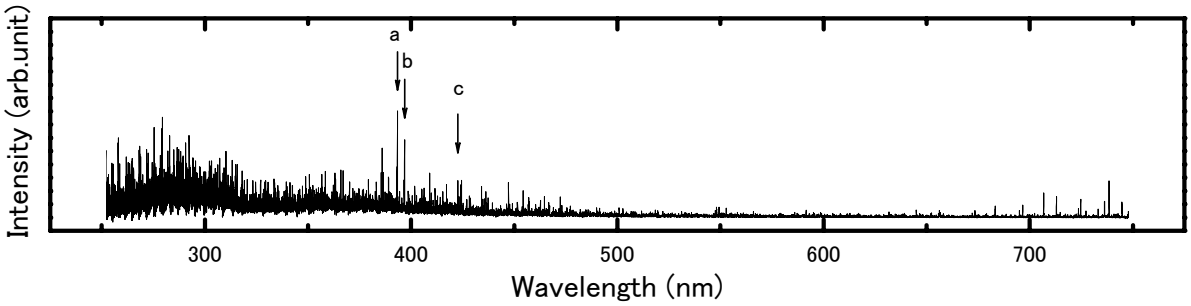

Fig. 7　Emission spectra of natural Uranium including Calcium

The arrows show the spectra of calcium.

ルで規格化し、確認できたカルシウムのスペクトルを矢印(a、b、c)で示した。更に、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[20]を使用して同定を行った結果、観測された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、上準位のエネルギーレベルが近い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 本のスペクトルのレーザー光強度 0.4、5.0、50.0mJ 時のスペクトルを Fig. 8 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。レーザー光強度が 0.4mJ の場合は、50mJ の場合と比較するとスペクトル強度が非常に弱いため、同じスケールではウランもカルシウムも共にほとんど確認できない。しかし、レーザー光強度が強くなる(>5mJ)に従って、スペクトルが大きくなり詳細が確認できるようになる。また、レーザー光強度が 50mJ 程度の非常に強い場合には、イオンのスペクトル強度が相対的に強くなっているように見える。

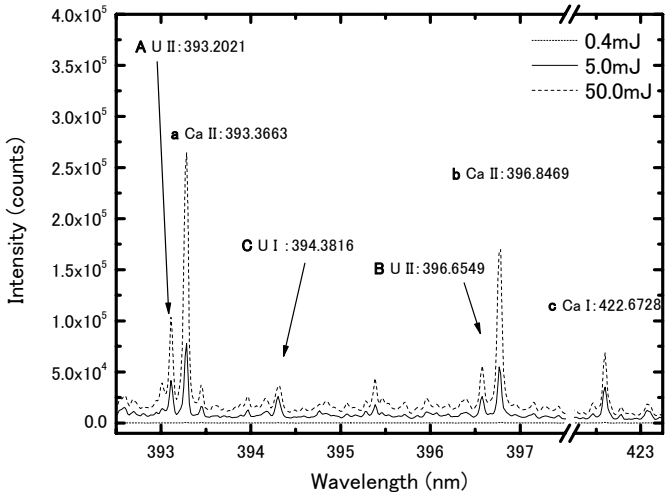

Fig. 8 Emission spectra (393-423nm region) of uranium including calcium

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 (eV)	J	Configu-ration	Energy Level (eV)	J	Configu-ration
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^3d^2	3.188	6.5	f^3sp
B	396.757	396.6549	−0.070	U	II	1.044	4.5	f^4s	4.170	5.5	f^4p
C	394.484	394.3816	0.099	U	I	0.000	6	$d7s^2$	3.143	6	

4.3 スペクトル強度のレーザー光強度依存性

Table 2 に示したカルシウムとウランのスペクトルに対するスペクトル強度のレーザー光強度依存性を Fig. 9 に示す。いずれのスペクトルもレーザー光強度が強くなるにつれスペクトル強度も強くなるが、レーザー光強度が 5mJ 以下の弱い場合にはスペクトル強度の増加は著しく、それを越えたあたりから比較的ゆるやかに増加している。従って、5mJ までは、レーザーのエネルギーが効率よくスペクトルの発光強度に転換されていると言える。

今、LTE が成り立つと仮定しているので、発光を観測している空間内では時間的に大きく体積も圧力も変化していないとしてよい。その時、その空間に含まれる原子あるいはイオンの数密度はレーザー照射によってアブレーションされた原子数(蒸発体積)に比例すると考えられる。この時、先のスペクトル強度の(1)式から、スペクトル強度は原子あるいはイオンの数密度 N(蒸発体積)に比例し、指数(exp)の肩のプラズマ励起温度 Tに依存して変化することが判る。また、Fig. 4 より数密度 N（蒸発体積）はレーザー光強度に比例し、Fig. 6 a)よりプラズマ励起温度はレーザー光強度 5mJ 以上に対して飽和傾向にあることが判る。ここで、あらためて、Fig. 9 を見れば、レーザー光強度が 5mJ 以下の弱い場合には、Fig. 6 a)のようなプラズマ励起温度の変化に近く、5mJ 以上ではプラズマ励起温度の上昇が少ないにもかかわらず、スペクトル強度は Fig. 4 の蒸発体積のように比例するように増加している。これらのことから、スペクトル強度はレーザー光強度に依存して増加するが、レーザー光強度が 5mJ 以下の弱い間はプラズマ励起温度が急激に上がることによりスペクトル強度が増加し、5mJ を超えるとプラズマ励起温度の上昇が少なく、蒸発量（数密度）の増加によりスペクトル強度が増加すると考えられる。

次に、原子とイオンのスペクトル強度の増加を比較する。例えば、Fig. 9 で、レーザー光強度が 1mJ と 5mJ 時のスペクトル強度を比較すると、原子では 3 倍程度に強くなっているが、イオンでは 5～6 倍と原子の倍近くスペクトル強度が強くなっている。一方、10mJ と 50mJ の場合では、スペクトル強度はいずれも 2 倍程度の増加である。このことから、レーザー光強

度が 5mJ 以下の弱い場合には、Fig. 6 a)に見られる様にプラズマ励起温度が急激に上昇するために、イオンの数密度の増加が著しくなり、原子よりもスペクトル強度が増加する。

また、10mJ 以上の場合にはプラズマ励起温度は Fig. 6 a)の様に飽和傾向を見せ、プラズマ励起温度が大きく変化しないが、蒸発体積（数密度 N）が Fig. 4 で示したように比例的増加するため、原子もイオンも同様にスペクトル強度が増加していると考えられる。

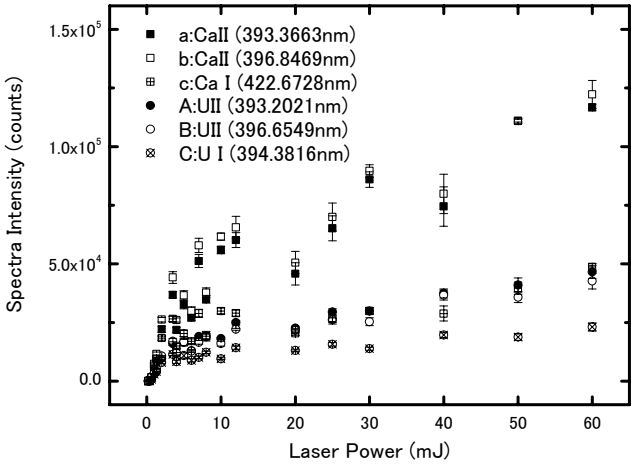

Fig. 9 Spectra intensity of uranium and calcium.as a function of laser power

以上の結果から、スペクトル強度はレーザー光強度に依存して増加する。レーザー光強度が 5mJ 以下の弱い場合には、レーザー光強度の増加に伴って増加する蒸発体積よりもプラズマ励起温度の増加のほうが著しくなり、スペクトル強度はプラズマ励起温度に依存すると考えられる。一方、レーザー光強度が 5mJ 以上の強い場合には、レーザー光強度の増加に対してプラズマ励起温度の増加が、蒸発体積の増加に比べ、相対的に小さくなることから、スペクトル強度は蒸発体積の増加に依存すると考えられる。更に、スペクトル強度はレーザー光強度が 5mJ 程度までは効率良く増加していることが明らかになった。

4.4 スペクトル幅のレーザー光強度依存性

次に、スペクトル幅のレーザー光強度依存性とプラズマ励起温度依存性について Fig. 10 に示す。レーザー光強度が 5mJ、あるいはプラズマ励起温度が 5000K 未満のときには Fig. 9 に示したようにスペクトル強度が急激に弱くなるため S/N 比が小さくなり、測定精度が下がる。そのためにスペクトル幅のばらつきも大きくなっている。また、分光器の分解能がλ/8000(3 ピクセル)であり、400nm 近辺での分解能が 0.05nm 程度になることを考えれば、約 20mJ 以下のレーザー光強度で測定されたウラン原子（C)以外のスペクトル幅は 0.6～0.8nm であり、分解能の限界近くになっていることが判る。しかし、スペクトル強度が強く安定して幅の測定が可能であるレーザー光強度が 20mJ を超える場合には、ウラン原子(C)のスペクトル幅はレーザー光強度が高くなるにつれて、広がる傾向にあるように見える。

LIBS においてスペクトル幅は、アブレーションされた原子やイオンの並進運動によるドップラー広がりと、雰囲気ガスの圧力に起因する圧力広がりに二つが主な要因と考えられる。今、ドップラー広がり（FWHM）は

$$FWHM = \frac{2\nu_0}{c}\left(\frac{2k_B T \ln 2}{m}\right)^{1/2} \tag{4}$$

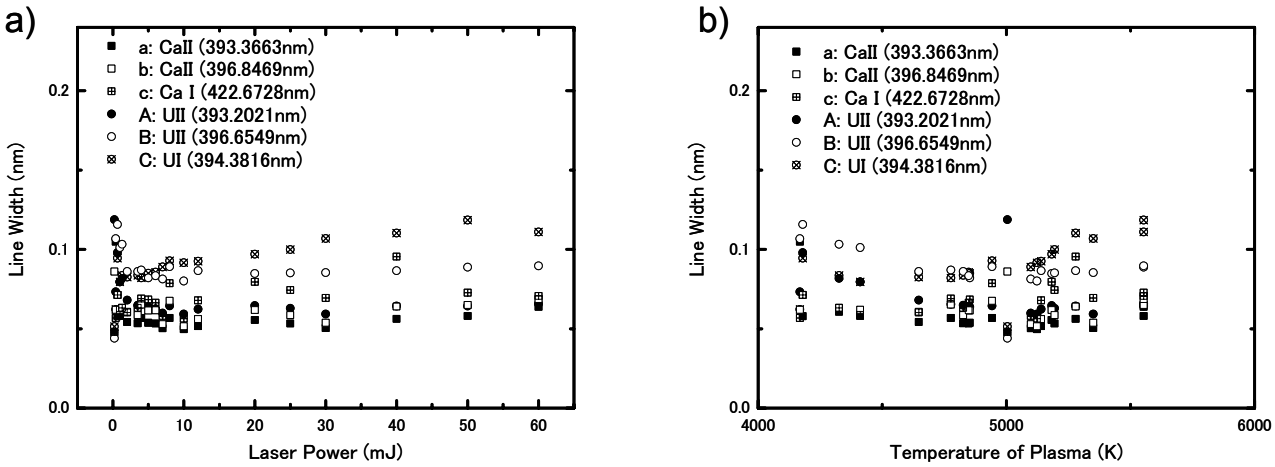

Fig. 10 Line width of uranium and calcium spectra

a) As a function of Laser Power　　b) As a function of plasma temperature

但し、FWHM は波長幅、ν_0はスペクトルの中心周波数、cは真空の光速度、k_Bはボルツマン定数、Tはプラズマ励起温度、mは母材（ここではウラン）原子の質量、で表される。LTB を考えてプラズマ励起温度 5000K でのエネルギーがアブレーション原子とイオンの並進運動のエネルギーと等価であるとすれば、そのドップラー幅は FWHM=2.5GHz（＝0.0013nm）になり、分光器の分解能である 0.05nm より遥かに小さい。このことは、レーザー光強度がスペクトル幅に与える影響がドップラー広がりではなく、圧力広がりであることを示唆している。しかし、本実験では、雰囲気ガスである Ar の圧力を 2kPa に保っているため、雰囲気の圧力は大きく変化しないはずである。ここで、「4.3 スペクトル強度のレーザー光強度依存性」の議論で、スペクトル強度は 5mJ まではプラズマ温度の影響を受け、それ以降では蒸発量の増加に依存していることが示唆されたことを考えれば。同じ理由で、5mJ 以上では蒸発量が増加することから、アブレーション原子が存在するブレークダウン発光空間においては原子密度が高くなることで局所的に圧力が高くなり、スペクトル幅が広がっている可能性が考えられる。

以上の結果から、20mJ を超えるレーザー光強度で照射した場合にはウラン原子(C)のスペクトル幅が広がる傾向が確認でき、5000K におけるドップラー幅が 0.0013nm で分光器の分解能の限界以下であることから、この広がりは強いレーザー光照射による蒸発量の増加に伴う局所的な圧力の増加によって引き起こされる圧力広がりと推察された。また、レーザー光強度が 5mJ 以下であれば、分光器の分解能以下の幅で十分な強度のスペクトルが安定して得られることが判った。より高分解能でのスペクトル測定が可能であれば、更に弱い強度のレーザー光でアブレーション時の蒸発量を下げ、スペクトル幅を狭くできる可能性がある。そのためには、今回の 10 パルスのレーザー照射を複数回繰返し測定を行うことにより、スペクトル強度の積算値を増やし、S/N 比をあげる必要があると考えられる。

4.5 スペクトル強度比のレーザー光強度依存性

上で解析してきたとおり、スペクトル強度はレーザー光強度が増加するにつれて増加し、スペクトル幅は若干ではあるがレーザー光強度(プラズマ温度)が減少するにつれて狭くなる。こ

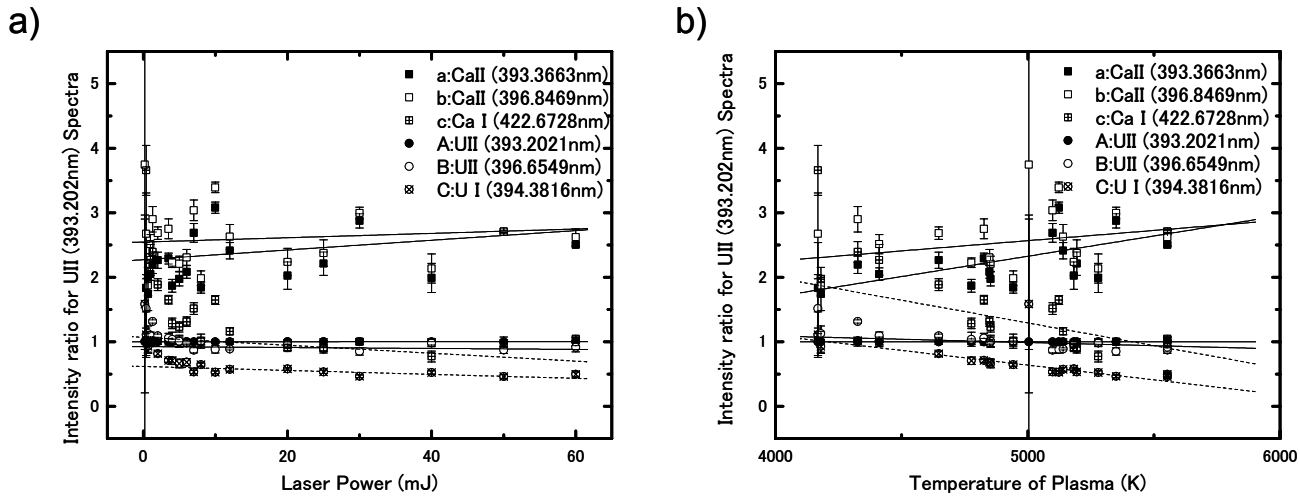

Fig. 11 Spectra intensity ratio of uranium and calcium

a) As a function of laser power b)As a function of plasma temperature

のことから、S/N 比や分解能を高くするためにはスペクトル強度を強く、スペクトル幅を狭くしなければならない。上の議論ではこれらスペクトル強度と幅に対しては 5mJ 程度のレーザー光強度が適当であることが判った。一方、LIBS による不純物の分析法は、スペクトルの絶対値からではなく不純物の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により、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り、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。そこで、ここでは、レーザー光強度とプラズマ励起温度に対するスペクトル強度比の安定性について議論する。

ここで、参考文献 16),17),19)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。

$$\frac{I_{UL}^{Ca}}{I_{UL}^{U}} = \frac{\dfrac{hcg_U^{Ca}A_{UL}^{Ca}}{4\pi\lambda_{UL}^{Ca}}\dfrac{N^{Ca}}{Z^{Ca}}\exp(-\dfrac{E_U^{Ca}}{kT})}{\dfrac{hcg_U^{U}A_{UL}^{U}}{4\pi\lambda_{UL}^{U}}\dfrac{N^{U}}{Z^{U}}\exp(-\dfrac{E_U^{U}}{kT})} = \frac{\lambda_{UL}^{U}g_U^{Ca}A_{UL}^{Ca}}{\lambda_{UL}^{Ca}g_U^{U}A_{UL}^{U}}\frac{N^{Ca}Z^{U}}{N^{U}Z^{Ca}}\exp(-\frac{E_U^{Ca}-E_U^{U}}{kT}) \tag{5}$$

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。蒸発量に依存する数密度 N はそれぞれの元素の存在量に依存するため、その比 N^{Ca}/N^U はプラズマ励起温度によらず一定である。また、2 番目の項 $E^{Ca}{}_U-E^U{}_U$をプラズマ励起温度よりも十分小さいものを選定すれば、即ち、上準位がほぼ同じエネルギーであれば無視できる。一方、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。

そこで、Table 2 で示したスペクトルに関するスペクトル強度比のレーザー光強度依存性と

プラズマ励起温度依存性を Fig. 11 に示す。それぞれ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、a)はレーザー光強度依存性、b)はプラズマ励起温度依存性である。これらから、ウランイオン(B)のスペクトル強度比はレーザー光強度に関してもプラズマ温度に関しても傾きが 0 に近く、(A)とほぼ同じであることが判る。これは、(A) と(B)の関与する上準位のエネルギーレベルが近いため式(4)に含まれる $E^{U}_{U'}-E^{U}_{U}$ が小さく、更にウランイオン同士であるため分配関数 Z が同じであることから $Z^{U}/Z^{U}=1$ と一定になり、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ためである。一方、カルシウムイオン(a、b)のウランイオン(A) に対するスペクトル強度比はレーザー光強度、プラズマ励起温度に対し傾きが正で増加している。カルシウムイオンとウランイオンのエネルギーレベルが近く、(4)式における $E^{Ca}_{U}-E^{U}_{U}$ が小さいにもかかわらずウランイオン(A)と異なり増加傾向である。一方、カルシウムイオン同士では若干の傾きの違いがあるが、共に正の傾きを持っている。これらのカルシウムイオンとウランイオンの違いはカルシウムイオンの分配関数とウランイオンのそれが大きく異なり、分配関数の比 Z^{Ca}/Z^{U} がプラズマ励起温度に対して一定にならないためであると考えられる。逆に、ウラン原子(C)とカルシウム原子(c)のスペクトル強度比は傾きが負で減少傾向になっている。これは、プラズマ励起温度が高くなれば原子やイオンを励起するエネルギーが高くなるため、原子に比べより高いエネルギーのイオンの数密度が相対的に増加するためと考えられる。

これらのスペクトル強度比のレーザー光強度とプラズマ励起温度依存性の結果から、同じ分配関数、同じ上準位のエネルギーであれば、プラズマ励起温度依存性は小さく、分配関数の異なる元素の場合に、レーザー光強度やプラズマ励起温度依存性を無視できなくなることが判った。

以上の考察の結果、低除染燃料に含まれる不純物の濃度分析にレーザーブレークダウン発光分光分析を適用するために特に必要な、安定したスペクトル強度比を得るためには、プラズマ励起温度を有る特定の温度に一定に、即ちレーザー光強度を一定に保てば良いことが判った。更に、S/N を高くするために必要な、十分強いスペクトル強度を得るためにはプラズマ励起温度を高く、即ち、レーザー光強度を強くする必要がある。しかし、狭いスペクトル幅を得るためには、それとは逆にプラズマ励起温度を低く、即ちレーザー光強度を低くする必要がある。上の考察の結果から、我々が実施した Ar ガス 2kPa の環境で観測遅延時間 4μs、観測時間幅 10μs の条件において、ブレークダウン発光を観測する際のプラズマ励起温度は 4000～6000K 程度であり、その際のスペクトル幅は 0.06～0.08μm で、我々の使用した分光器の分解能の限界近くである。これらのことを考慮すれば、レーザー光強度を 5mJ 程度に保つことが最適な条件となる。

5. 結言

レーザーブレー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レーザー光強度をパラメータとし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）レーザーアブレーションによる酸化ウラン試料の蒸発体積はほぼレーザー光強度に比例して増加するが、プラズマ励起温度は 5mJ を超えると飽和傾向になる。

2）スペクトル強度はレーザー光強度 5mJ 程度までは急激に強くなるが、それを超えると緩やかに増加する。

3）スペクトル幅はレーザー光強度 5mJ 、プラズマ励起温度 5000K まで下げると分光器の分解能近くまで十分狭くなり、それ以下のレーザー光強度でもスペクトル幅が狭くなる可能性があるものの、S/N 比が小さくなり、測定の積算回数を増やす必要がある。

4）同元素の原子あるいはイオン同士で、遷移の上準位のエネルギーレベルがほぼ同じであれば、スペクトル強度比はプラズマ励起温度に大きく依存せずにほぼ一定である。異元素の場合は分配関数のプラズマ励起温度依存性により、スペクトル強度比はプラズマ温度と共に大きく変化する。更に、原子あるいはイオンの異なる状態の場合には、プラズマ励起温度が増加するにつれイオンの数密度が増加するため、スペクトル強度比はプラズマ励起温度の増加と共にイオンのほうが強くなる。

5）5mJ のレーザー光強度で試料を照射してプラズマ励起温度 5000K 程度とすることにより、安定した強度で十分狭い幅のスペクトルを得られることが判った。この時の蒸発量は 14 μg/pulse 以下であった。

今後、これらの結果を踏まえて、最適なレーザー光強度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予定である。

謝　辞

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」の成果です。

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”まてりあ、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:“レーザブレー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:“レーザー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ー誘起ブレー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:“地下水中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:“レーザー誘起ブレー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”, Appl. Spectrosc., 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、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」2008

16) 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ークダウン発光分光分析(受託研究)”JAEA-Research 2008-081

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:“レーザーブレー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

18) 赤岡 克昭、丸山 庸一郎、大場 正規、宮部 昌文、若井田 育夫、“レーザーブレークダウン発光の自己吸収特性”東北大学金属材料研究所ワークショップ 「東北大学金属材料研究所ワークショップ 「新素材開発と工程制御・品質管理に向けた分析･解析技術」2009

19) 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:“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)” JAEA-Research 2010-004

20) Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics:（online）“CFA Scientific Divisions: AMP: Databases”http://cfa-www.harvard.edu/amp/ampdata/kurucz23/sekur.html (accessed 2009/07/01）

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
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	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	キログラム毎立法メートル	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	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

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	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	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		$s^{-1}\ mol$

(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。
(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	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
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	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=60s
時	h	1h =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	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	$1L=1l=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ 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	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

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	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
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	$1\ dyn=10^{-5}N$
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	$1\ sb\ =1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal\ =1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G\ =1Mx\ cm^{-2}\ =10^{-4}T$
エルステッド[c]	Oe	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(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	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています