JAEA-Research 2016-005 DOI:10.11484/jaea-research-2016-005



# レーザー誘起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

ー高分解能分光スペクトル (470-670nm)ー

Measurement of Uranium Spectrum using Laser Induced Breakdown Spectroscopy -High Resolution Spectroscopy (470-670nm)-

赤岡 克昭 大場 正規 宮部 昌文 音部 治幹

若井田 育夫

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

福島研究開発部門 廃炉国際共同研究センター 燃料デブリ取扱・分析ディビジョン

Fuel Debris Handling and Analysis Division Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science Sector of Fukushima Research and Development

May 2016

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<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

# レーザー誘起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 - 高分解能分光スペクトル (470-670nm)-

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 廃炉国際共同研究センター 燃料デブリ取扱・分析ディビジョン 赤岡 克昭、大場 正規、宮部 昌文、音部 治幹<sup>†</sup>、若井田 育夫

(2016年3月25日 受理)

低除染のマイナーアクチノイド (Minor Actinide: MA) 含有混合酸化物 (Mixture Oxide: MOX) 燃料等の様に y線・中性子線の影響が排除できない燃料の分析、あるいは東京電力福 島第一原子力発電所事故で生成された燃料デブリの分析等の様に高い放射線場における核燃 料物質の分析には、迅速かつ簡便な遠隔分析手法の開発が求められている。レーザー誘起ブレ ークダウン発光分光法 (LIBS) は非接触で直接しかも迅速に分析できることから、これらの 分析に適用可能な方法の一つとして考えられる。

LIBS を用いた核燃料物質の組成・不純物分析においては、核燃料物質であるウラン(U) やプルトニウム(Pu)等の複雑でスペクトル密度が高い発光スペクトルと不純物のスペクト ルとを明確に区別する必要がある。そのためには、これら核燃料物質のLIBSによる発光スペ クトル出現特性を明らかにする必要がある。そこで、波長分解能が λ/50000 の高分解能 Echelle型分光器を用いて、470~670nmの波長域の天然ウランの発光スペクトルを測定した。 測定したスペクトルについて分光器の感度及び波長の較正を行うことにより、分析に使用可能 と思われるスペクトルを同定し、LIBS用データとしてまとめた。また、エネルギー準位、振 動子強度を明らかにするとともに、測定したスペクトルの波長及び振動子強度の評価値が公表 されている値と矛盾なく一致することを示し、本データの信頼性を確認した。更に、新たなウ ランのスペクトルの同定を可能とする測定波長と絶対波長の相関及び測定振動子強度と既知 の振動子強度の相関を求めた。

原子力科学研究所(駐在):〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4 †原子力基礎工学研究センター 燃料・材料工学ディビジョン JAEA-Research 2016-005

# Measurement of Uranium Spectrum using Laser Induced Breakdown Spectroscopy -High Resolution Spectroscopy (470-670nm)-

Katsuaki AKAOKA, Masaki OBA, Masabumi MIYABE, Haruyoshi OTOBE<sup>†</sup> and Ikuo WAKAIDA

Fuel Debris Handling and Analysis Division Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science Sector of Fukushima Research and Development Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken (Received March 25, 2016)

Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) method is an attractive technique because real-time, in-situ and remote elemental analysis is possible without any sample preparation. The LIBS technique can be applied for analyzing elemental composition of samples under severe environments such as the estimation of impurities in the next generation nuclear fuel material containing minor actinide (MA) and the detection of fuel debris in the post-accident nuclear core reactor of TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. For applying LIBS to the analysis of nuclear fuel materials, it is indispensable to identify the emission spectrum and its intensity on impurities intermingled within complex emission spectra of matrix elements such as uranium (U) and plutonium (Pu). In the present study, an echelle spectrometer with a resolving power of 50,000 was employed to identify spectra and 119 ionic spectra can be identified. We have confirmed that the measured wavelength and oscillator strength of spectra are consistent with published values.

Keywords: Laser Induced Breakdown Spectroscopy, Natural Uranium, Nuclear Fuel, Echelle Spectrometer

†Fuels and Materials Engineering Division, Nuclear Science and Engineering Center

## 目 次

1.	緒言	-1
2.	実験方法	-1
3.	結果および解析	-3
9	3.1. スペクトル測定結果	-3
9	3.2. 分光システムの感度較正	-3
3	3.3. スペクトルの同定及び波長較正	-4
3	3.4. プラズマ温度、遷移確率、振動子強度の算出	-5
4.	結言	-7
謝話	锌	-8
参え	考文献	-8
付銷	禄	11
f	付録 1 天然ウランスペクトル	13
ſ	付録 2 天然ウランスペクトルデータ	35

## Contents

1.	Introduction	1
2.	Experimental procedure	1
3.	Results and analysis	3
	.1. Emission spectra	3
	.2. Calibration of sensitivity	3
	.3. Calibration of wavelength and identification of spectra	4
	.4. Calculations of plasma temperature,	
	transition probability and oscillator strength	5
4.	Concluding remarks	7
Ac	nowledgements	8
Re	erences	8
Ap	pendixes	-11
	ppendix 1 Measurement spectra of uranium	-13
	ppendix 2 Identified spectra data of uranium	-35

This is a blank page.

### 1. 緒言

レーザー誘起ブレークダウン発光分光 (LIBS: Laser Induced Breakdown Spectroscopy) 法は、 パルスレーザー光を試料に照射し、そこから発生するプラズマ発光を分光することにより、その 場でリアルタイムに固体・液体・気体等を構成する元素組成を分析する方法である<sup>1)</sup>。この LIBS による分析はレーザー及びレーザー光集光器、プラズマ発光集光器とその発光を分光する分光器 等の非常に簡単な装置構成で計測が可能であり、試料の元素組成を ppb から数%の広い濃度範囲 で測定が可能である。このことから、これまでに国内外で基礎から応用まで、数多くの研究がな されている<sup>2),3)</sup>。この LIBS による分析法は原子力分野においても研究が行われ、核燃料物質中に 含まれる数 100 ppm の不純物についての適用研究例もあり <sup>4</sup>、再処理工程の管理分析への導入に ついても検討が始まっている 5,6)。我々は資源の有効利用や環境負荷の低減、更には核拡散抵抗性 等の利点があることから、次世代炉心燃料として利用が検討されている 🤊 低除染のマイナーアク チノイド (Minor Actinide: MA) 含有混合酸化物 (Mixture Oxide: MOX) 燃料へ LIBS を適用 するための研究<sup>8)-20)</sup>を進め、UやPuの分析で障害となる強いγ線や中性子線の影響を低減し得 る手法として LIBS による遠隔分析性能を評価してきた。さらに、本手法は東京電力福島第一原 子力発電所における炉心溶融事故で生成された燃料デブリのその場遠隔分析へ適用できる可能性 が高いことから、その適用研究を開始しており 21)、分析に不可欠となる核燃料物質の分光データ を取得している<sup>22)</sup>。

LIBS においては、分析に使用する試料の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、測定時のスペクトルの安定性や高い精度を得るために、そのスペクトルに関 与するエネルギーレベルを明らかにすることが重要である。これらの目的のために、これまで測 定波長域が 250~1050nm で分解能が λ/8000 の Echelle 型広帯域分光器でウランスペクトルの 分光を行い、データとしてまとめた <sup>10)</sup>。しかし、分解能が低く、隣接するスペクトルと重なり合 い、干渉するために、LIBS に使用できる適当なスペクトルは、限られたスペクトルのみであった。 更に、定量分析をするためにはスペクトルのデコンボリューションなどの複雑な解析を必要とし た<sup>8),11),19)</sup>。そこで、分解能 λ/50000、同時測定可能波長域 350~470nm の Echelle 型高分解能分 光器を導入し、天然ウランの LIBS スペクトルを測定し、データ等をまとめた<sup>20)</sup>。さらに、より 長波長側のデータを取得するべく、分解能 λ/50000、同時測定可能波長域 470~670nm の Echelle 型高分解能分光器を導入した。

本報告では、新たに導入した同時測定可能波長域 470~670nm、分解能 λ/50000 の Echelle 型 分光器を用い、低除染 MOX 燃料や溶融燃料デブリの分析へ LIBS を適用する際に必要となる詳 細なウランスペクトルを測定・同定した結果について報告する。更に、未知のスペクトルの中か らウランのスペクトルとして同定し、評価するために有用である分光器の絶対波長に対する測定 波長の相関及び振動子強度の公表値に対する測定値の相関について議論する。

#### 2. 実験方法

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。実験はグローブボックス内に設置した密閉できる分析容器内

- 1 -

を 2kPa の Ar ガスで満たし、その 中に試料を設置して行った。試料は、 数 100mg の天然ウラン酸化物粉末  $UO_2 を約 16MPa の圧力でプレス成$ 型器により厚さ約 1mm、直径約 6mm のディスク状に圧縮成型し、 NUCEF 施 設 内 の 鉄 セ ル

(TRU-HITEC) に設置してある高
温ヒーターを用いて温度 1650K で
16 時間、4%H<sub>2</sub>/He 還元雰囲気中に
て焼結した。使用したレーザー光源



Fig. 1 Experimental setup

は Q スイッチ Nd:YAG レーザー(Brilliant Eazy)で、ビーム径 8mm、波長 532nm、繰返し数 10Hz、パルス幅 5ns である。レーザー光強度は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 に調節した。このレーザー光を光学窓を通してグローブボックス内に導き、 焦点距離 200mm の平凸レンズで分析容器内の試料表面に直上から 100 パルス集光照射した。 発生したブレークダウン発光は分析容器の外で、レーザー入射方向とは垂直をなす角度から焦 点距離 60mm、有効径 50mm の蛍光集光器で NA=0.22、コア径 0.4mm の紫外グレードの石英 ファイバーに集光し、このファイバーによりグローブボックス外に導き出した。グローブボック ス外ではこのブレークダウン発光を ICCD カメラ付 Echelle 型高分解能イメージング分光器 (LTB ARYELLE 400) により時間分解分光を行い、470~670nm の範囲のスペクトルについて 測定した。なお、測定に際してはレーザー光 100 パルス分を ICCD 上で積算した。レーザー照

Laser	Q-switched Nd-YAG laser (Brilliant Eazy / Qauntel)
Wavelength	532 nm
Pulse width	5  ns
Repetition rate	10 Hz
Energy	5 mJ/pulse
Beam diameter	8mm
Focal length of focusing lens	200mm
Spectrometer	Echelle Spectrograph (ARYELLE 400 / LTB)
Resolution of wavelength	$\lambda$ /50000 (@3pixels)
Range of wavelength	470~670nm (@1shot)
Delay	$5\mu~{ m s}$
Gate duration	$10\mu~{ m s}$
Number of integrate	100
Optical fiber	200-1050nm transmission/ 400 $\mu$ m core/ 10m length
Optical condenser	50mm aperture / 60mm focus length
Atmosphere	Ar (2kPa)

Table	1	Experimental	conditions	and	apparatuses
100010	_		0011011010110		apparated



Fig. 2 Emission spectra of natural Uranium

射から観測までの観測遅延時間と観測時間幅は、それぞれ 5μs、10μs に設定した。実験パラ メータ等の詳細を Table 1 に示す。なお、これらの実験条件は我々が通常 LIBS で使用する値と ほぼ同等である。

3. 結果および解析

3.1. スペクトル測定結果

Fig. 2 に ICCD 上で 100 パルス積算測定し たスペクトルを 100 サンプル測定し、それら を 更 に 積 算 した ス ペクトル の 全体像 (470-670nm)を示す。約 200nm の範囲に 多くのスペクトルが混在していることがわか る。なお、今回導入した分解能 λ/50000、同 時測定可能波長域 470~670nm の Echelle 型 高分解能分光器と従来使用してきた測定波長 域が 250~1050nm で分解能が λ/8000 の Echelle 型広帯域分光器の測定スペクトルの 比較を Fig. 3 に示す。このスペクトルからス ペクトルの半値幅が 0.089nm から 0.014nm と約 1/6 に狭くなり、より詳細にスペクトル が分解され、従来判別つかなかったスペクト ルの分解・同定が可能になっているのが判る。

#### 3.2. 分光システムの感度較正

Echelle 型分光器は、その原理上、多くの次数の回折光を同時に測定しているため、スペクトル強度を広範囲で比較する場合には、検出素子である ICCD カメラの感度に加え、そ



Fig. 3 Difference of the spectrum by the resolving power



Fig. 4 Emission spectra (480-520nm range) of Standard light source





れぞれの次数における感度をも較正する必要がある。例えば Fig. 4 に示した連続光である標準光 源(L7810-02/浜松ホトニクス)光を Echelle 型分光器で測定したスペクトルを見ると、破線で示 したなだらかに減少する放射照度を持つ標準光源のスペクトルが、約 4nm 間隔で山のような盛り 上がったスペクトルとして観測される。これが、Echelle 型分光器の特徴であり、それぞれの山は 異なる次数で回折したスペクトルである。このような各回折次数による多くの山がスペクトルに あらわれるため、他の分光器により得られたスペクトルとの比較が困難であるだけでなく、同じ 分光器内における異なる回折次数に現れるスペクトルの強度の直接比較も難しくなる。

そこで、我々は上で測定した際に用いた集光器、光ファイバー、分光器など、同じ光学系を用いて、あらかじめ分光放射照度の判っているキセノンランプの標準光源(L7810-02/浜松ホトニクス)を分光し、標準光源の分光放射照度のスペクトルをその測定スペクトルで除したスペクトルをファクターとして、測定された先のウランのスペクトルに乗ずることによりスペクトルの強度を較正した。その結果を Fig. 5 に示す。較正前のスペクトル Fig. 2 と比較すると各スペクトルの強度が異なっているのが判る。

3.3. スペクトルの同定及び波長較正

これらの結果を元に Fig. 5 で示した範囲のウランスペクトルについて同定を行った。スペクト ルの同定には、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 <sup>23)</sup>を使用した。なお、同定は大気波長で行った。ウランでは多くのスペクトルが存在し、 その中には原子やイオン等のいまだに同定されていないスペクトルが多数混在している。一般的 に分光器の波長精度は絶対波長精度よりも相対波長精度のほうが優れている。従って、これらの ことを考慮してスペクトルの同定を行わなければならない。そこで、データベースに掲載されて いるスペクトル同士の波長差を相対波長として、該当するスペクトルの波長差の組み合わせが一 致する測定スペクトルを抽出することにより、スペクトルの同定を行った。この際、信頼性が低 い測定スペクトルの絶対波長は ICCD の分解能 (3 ピクセル)の5 倍を基準に±15 ピクセル (絶 対波長で± λ/10000) 程度の範囲内で探索した。また、隣接するスペクトル間の相対的な波長差 が分解能の2倍(相対波長で±2λ/50000) 程度の範囲内に収まるように探索した。この様にして CfA のデータベースに登録されているデー タと比較することによって同定を行った結 果、分析に使用可能と思われるスペクトルと して、原子スペクトル 173 本、一価のイオン スペクトル 119 本を見出した。これらは CfA のデータベースで明らかになっているこの 波長域のスペクトルのほぼ全てである。従来 使用してきた分解能 λ/8000 の分光器で測定 されたスペクトル数が、同じ波長域において は、原子スペクトル 59 本、一価のイオンス ペクトル 89 本であり、これらに比較して より多くのスペクトルを確認することが できた。



Fig. 6 Correlation of the wavelength difference to database wavelength

次に、同定したスペクトルの波長精度について考察した。Fig. 6 に同定したスペクトルについ て分光器によって観測された指示波長とリファレンスの波長 23)との波長差をリファレンスの波長 でプロットした図を示す。図に示した直線のうち、実線は波長差の中心値を示し、破線は中心値 ±0.01nmの直線である。横軸のリファレンス波長に対して波長差は絶対波長の差を表し、最大 でも-0.02nm/600nmであることから、絶対波長精度は±λ/30000以下であることが判る。また、 横軸のリファレンスの波長に対する波長差の幅、即ち破線の幅は相対波長の波長差を表し、これ が最大でも±0.01nm/600nm程度であることから、相対波長精度は±λ/60000以下であることが 判る。このプロットは、使用している分光器の固有の絶対波長精度や相対波長精度を現している。 従って、測定されたスペクトルの幅がこの破線の範囲内に収まっていれば、測定されたスペクト ルの波長が確からしいといって差し支えない。

3.4. プラズマ温度、遷移確率、振動子強度の算出

これまで述べてきた感度と波長の較正並びにスペクトルの同定により、原子スペクトル 173 本、 一価のイオンスペクトル 119 本について明らかにした。これを用いてプラズマ温度、遷移確率、 振動子強度の算出を試みた。

LIBS では、レーザー照射後、ブレークダウンによりプラズマが発生し、そのプラズマは刻一刻 と状態が変化する過渡現象を示す。しかし、ここでは観測遅延時間 5 $\mu$ s 以降の観測時間幅 10 $\mu$ s の間、観測している領域は局所熱平衡(LTE: Local Thermodynamic Equilibrium)の状態であ り粒子密度は Boltzmann 分布すると仮定し<sup>11)</sup>、プラズマ励起温度を求めた。局所熱平衡状態で ある時、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 *Iu*Lはプラズ マ励起温度 *T*と以下の関係で表される。

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

ここで、*h*はプランク定数、*c*は真空の光速度、*gU*は上準位の縮退数、*AUL*は遷移確率、*AUL*は 波長、*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、*EU*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。次にこの式の両辺の自然対数をとれば、

$$\ln(\frac{I_{UL}\lambda_{UL}}{g_U A_{UL}}) = -\frac{1}{kT}E_U + \ln(\frac{hc}{4\pi}\frac{N}{Z})$$
<sup>(2)</sup>

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、先に同定したスペクトルのうち上準位のエネルギーレベル等のデータが判明している原 子スペクトル 173本、一価のイオンスペクトル 119本のデータを用いて原子とイオンのスペクト ルについて別々に Boltzmann プロットを実施した。その結果を Fig. 7に示す。図の横軸が上準 位のエネルギー、縦軸は(2)式の左辺であり、■がウラン原子、〇が一価のウランイオンの Boltzmann プロットである。図中の実線はリニアフィットした直線、破線は 95%信頼限界、点線 は 95%推定限界である。いずれも、ある程度のばらつきはあるものの直線でよくフィッティング されている。このばらつきは、それぞれのスペクトルの強度のばらつきや、プラズマ温度の不安 定性からくるものである。なお、この直線の Y 切片の違いは 先に述べた(2)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 度として、ウラン原子に対して 4880K(± 110K)、一価のウランイオンに対して 4850K(±400K)の値が得られた。いずれ のプラズマ温度も誤差の範囲内で一致し ていることが判る。また、この値は従来 使用してきた分解能 λ/8000 の分光器で 測定されたスペクトルから得たプラズマ 温度 4700K より若干高い値に出ている<sup>10)</sup>。 以下に、リニアフィットで得られた式を 記す。



Fig. 7 Boltzmann plots for U I and U II

UI

 $\ln(I\lambda / gA) = 6.97080 - 2.37914E_U$ 

UII  $\ln(I\lambda/gA) = 8.78702 - 2.39126E_{II}$ 

(3-2)

(3-1)

この Boltzmann プロットをリニアフィットして得られた式(3·1)及び式(3·2)は、測定されたスペ クトルの発光強度 *Iut*と遷移確率 *Aut*との関係を表している。従って、発光強度 *Iut*とエネルギ ーレベル準位 *Eu*が判れば、このリニアフィット直線から遷移確率 *Aut*、を求めることができる。 *Eu*にかかる係数はプラズマ温度の逆数を示し、この値はプラズマ温度の誤差の範囲内で一致して いる。このことから、遷移確率 *Aut*は得られたプラズマ温度が確からしく、これによって測定さ れた全てのスペクトル強度のばらつきが平均化されるとして得られる遷移確率と考えることがで きる。この遷移確率 *Aut*は振動子強度 *fuv*と次の関係が有る。

$$A_{UL} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{8\pi^2 e^2 (c/\lambda_{UL})^2}{mc^3} \frac{g_L}{g_U} f_{LU}$$
(4)

ここで、*E*oは真空の誘電率、*e*は電気素量、 *m*は電子質量である。従って、測定され た発光強度 *Iux* とリニアフィット直線 (3-1)式及び(3-2)式と(4)式を用いることに より、解析に用いた全てのスペクトル強度 を考慮して得られる振動子強度を計算す ることができる。これらの方法を用いて遷 移確率と振動子強度を求めた。更に、測定 スペクトルより求めた振動子強度(log(*gf*)) と既知の値<sup>23)</sup>との相関を Fig. 8 に示す。

Fig.7と同様、■がウラン原子、〇が一価



のウランイオンの振動子強度であり、それぞれの直線も先と同様、実線はリニアフィットした直 線、破線は 95%信頼限界、点線は 90%推定限界である。この振動子強度のばらつきは、測定さ れたスペクトル強度のばらつきによるものとして考えてよい。横軸が CfA のデータベースの記さ れている既知の振動子強度の対数値で、縦軸が Boltzmann プロットより得られた振動子強度の対 数値である。リニアフィットした直線は傾きが 0.93 程度であることから、求めた振動子強度の対 数値は既知のそれに比較し、大きいものは小さく、小さいものは大きく得られている傾向が見ら れる。一般的に振動子強度の大きいスペクトルは自己吸収の影響を大きく受け、スペクトル強度 が実際の値より小さく現れやすい。また、振動子強度が小さければスペクトル強度も小さくなり、 そのため近傍のスペクトルのすその干渉により測定されるスペクトル強度が大きく現れやすい。 これらのことから、先のこの傾向は自己吸収と近傍スペクトルの干渉による影響があると推察さ れる。このことを考え合わせても、得られた振動子強度は既知の振動子強度とよい相関がある。 この様にして計算された振動子強度が破線の 95%信頼限界内にあれば、測定されたスペクトル強 度も信頼でき、測定スペクトル自身も確からしいといって差し支えない。

以上のように較正した測定スペクトルとそのデータの最終結果を付録(Appendixes)に示す。

4. 結言

核燃料物質中に含まれる不純物の分析にレーザー誘起ブレークダウン発光分光分析法を適用す るために、複雑で密度が高い発光スペクトルを示す天然ウランのブレークダウンスペクトルを測 定し、470~670nmのスペクトルの全容を明らかにした。ウランのスペクトルに混在して現れる 不純物のスペクトルを区別し、かつその存在量を分析するためには、スペクトル基準となる信頼 性の高いウランの分光データが不可欠である。そこで、スペクトルの相対感度及び波長の較正を 行うことにより、測定スペクトルの中からレーザー誘起ブレークダウン分光分析に使用可能と思 われる単独スペクトルとして、原子スペクトル173本、一価のイオンスペクトル119本を抽出し、 ブレークダウン分光データとしてまとめた。なお、この測定波長域において CfA のデータベース に記載されているスペクトルの全てを観測することが可能であった。さらに、既存の分光データ を基に、これらのスペクトルの同定を行い、エネルギー準位、振動子強度を明らかにすると供に、 評価値が既存値と矛盾なく一致することを示し、本データの信頼性を確認した。

一方、CfA データベースに記載されているスペクトルは全て同定できたが、同定できない未知 のスペクトルが多数残った。これらの未知のスペクトルの中には、これらの測定スペクトルの波 長 *2* と選択側に基づいたエネルギーレベルの上準位 *Eu* と下準位 *El*の差が Fig. 6 に破線で示し た幅の範囲内で一致し、更に式(3·1)及び式(3·2)を用いて得られる振動子強度(log(*gf*))が Fig. 7 の 破線で示した 95%信頼限界内で一致すれば、この測定された未知のスペクトルを新たなウランの スペクトルとして同定できる。その場合の振動子強度の確からしさは、Fig. 8 の 95%信頼限界程 度であると考えられる。

#### 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25年度「次世代燃料の遠隔分析技術開発と MOX燃料による実証的研究」の成果を含みます。

#### 参考文献

- E. Tognoni, V. Palleschi, M. Corsi, and G. Cristoforetti, "Quantitative micro-analysis by laser-induced breakdown spectroscopy: a review of the experimental approaches", Spectrochim.Acta, B57 (2002) pp.1115-1130.
- "「レーザー誘起ブレークダウン分光法の産業応用に向けて」特集号"、レーザー研究、Vol.42 No.12(2014) pp.877-922.
- F. J. Fortes, J. Moros, P. Lucena, L. M. Cabalín, and J. J. Laserna, "Laser-Induced Breakdown Spectroscopy", Anal. Chem., 85(2013) pp.640-669.
- P. Fichet, P. Mauchien and C. Moulin, "Determination of Impurities in Uranium and Plutonium Dioxides by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy", Appl. Spectrosc 53 (1999) pp.1111-1117.
- 5) A.I. Whitehouse, J. Young, C.P. Evans, A. Brown, J. Franco, A. Simpson, J. Franco and A. Simpson, "Remote compositional analysis of spent-fuel residues using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy", Proceedings of Waste Management 2003 Symposium : WM 03 : waste management, energy security and a clean environment HLW, TRU, LL/ILW, mixed hazardous wastes and environmental management, February 23-27, 2003, Tucson, Arizona, USA.
- 6) J. E. Barefield II, D. K. Veira, C. A. Smith, and P. G. Eller, "Potential Safeguards Applications of LIBS in UREX1 Reprocessing", LA-UR-06-4319 (2006).
- 7) "高速増殖炉サイクルの研究開発方針について(文部科学省科学技術・学術審議会研究計画・ 評価分科会 原子力分野の研究開発に関する委員会 2006 年 10 月 31 日)"、

http://www.mext.go.jp/b\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/toushin/06112004.htm (accessed 2015/06/01).

- 8) 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, (2008),16p.
- 9) 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」講演論文集 (2008) p.55.
- 10) 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, (2009),49p.
- 11) 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, (2010),13p.
- 12) 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・レーザー光強度依存性・(受託研究)"、 JAEA-Research 2010-036, (2010),14p.
- 13) 若井田 育夫、 赤岡 克昭、 大場 正規、 丸山 庸一郎、 宮部 昌文、 音部 治幹、 仁木 秀明、"レーザー誘起プラズマ発光分光とアブレーション共鳴吸収分光法を組合せた次世代燃料の 遠隔分析技術に関する基礎研究"、核物質管理学会(INMM)日本支部第 30 回年次大会論文集 (CD-ROM)(2010) p.9.
- 14) 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 よる核燃料物質の高分解能分光、 核燃料物質の遠隔分析技術開発,2"、東北大学金属材料研究 所 2011 年ワークショップ「素材製造プロセス及び新素材開発の迅速化・高度化に資する分析・ 解析技術」(2011) p.107.
- 15) 赤岡 克昭、 丸山 庸一郎、 宮部 昌文、 音部 治幹、 高野 公秀、 若井田 育夫、"ウラン, ジルコニウム,鉄のブレークダウン発光分光とそのスペクトルの評価"、東北大学金属材料研究 所 2012 年ワークショップ「素材製造プロセス及び新素材開発の迅速化・高度化に資する分析・ 解析技術」講演論文集(2012) p.137.
- 16) K. Akaoka, Y. Maruyama, M. Oba, M. Miyabe, H. Otobe, I. Wakaida, Ikuo, "Determination of calibration curve for the neodymium contained as impurities in uranium by laser induced breakdown spectroscopy, Laser remote analysis for next generation nuclear fuel", International Conference on Laser Applications in Nuclear Engineering (LANE '13) Abstract book(2013) p.51.
- 17) 赤岡 克昭、加藤 政明、宮部 昌文、丸山 庸一郎、音部 治幹、清水 修、若井田 育夫、 "レーザー誘起ブレークダウン発光分光によるプルトニウムのスペクトル測定"、先端計測技術 の応用展開に関するシンポジウム、 鉄鋼,化学工学,エネルギー関連技術への適用技術 講演論 文集(2013) p.29.

- 18) 赤岡 克昭、 宮部 昌文、 音部 治幹、 若井田 育夫、"レーザー分光分析技術の原子力分野 への応用、 レーザーブレークダウン発光分光におけるスペクトル幅"、第2回先端計測技術の 応用展開に関するシンポジウム 講演論文集(2014) p.21.
- 19) 赤岡 克昭、 宮部 昌文、 音部 治幹、 若井田 育夫、"レーザー誘起ブレークダウン分光の 核燃料物質分析への適用"、レーザー研究、Vol.42 No.12(2014) pp. 918-922.
- 20) 赤岡 克昭、大場 正規、宮部 昌文、音部 治幹、若井田 育夫、"レーザー誘起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 -高分解能分光スペクトル (350-470nm)-"、JAEA-Research 2015-012, (2015), 48p.
- 21) M. Saeki, A. Iwanade, C. Ito, I. Wakaida, B. Thornton, T. Sakka and H. Ohba, "Development of a fiber-coupled laser-induced breakdown spectroscopy instrument for analysis of underwater debris in a nuclear reactor core", J. Nucl. Sci. Technol., 51, pp.930-938 (2014).
- 22) 若井田 育夫、赤岡 克昭、宮部 昌文、大場 正規、音部 治幹、加藤 政明、伊藤 主税、 西村 昭彦、 大場 弘則、 佐伯 盛久、"レーザー分光分析技術の原子力分野への応用、 LIBS, 共鳴分光の概要とその展開"、第2回先端計測技術の応用展開に関するシンポジウム 講演論文 集(2014) p.7.
- 23) Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics: (online) "CFA Scientific Divisions: AMP: Databases"http://cfa-www.harvard.edu/amp/ampdata/kurucz23/sekur.html (accessed 2015/06/01).

## 付録

不純物スペクトルとウランスペクトルの分離区別に必要である測定したウランの全スペクトルを Appendix 1 に、分析に使用可能と思われる単独でエネルギーレベルが既知のスペクトルのうち同定でき たスペクトルデータとして、原子スペクトル 173 本、一価のイオンスペクトル 119 本を Appendix 2 に 示した。なお、Appendix 1 の横軸は(1)式で波長較正した波長で示してあり、縦軸は感度較正したスペ クトル強度であり、測定された ICCD カメラのカウント数をそのまま記載した。また、Appendix 2 には 観測波長と感度較正したスペクトル強度の他、算出した遷移確率と振動子強度を記載し、同定に用いた データベースと共に記載した。なお、Int は 502.7307 nm UI のスペクトル強度を 100 として規格化し、 測定されたスペクトルの相対強度を示した。また、Ion は原子 (I) とイオン (II) の種別を表し、Conf は configuration (電子配置)を表している。 This is a blank page.















































Measurement							CfADa	atabase	;							
Wave			۵	Wave		۵	Ι		Lo	ower				Upp	er	
length	Int	log(gf)	~	length	log(gf)	^	ο		Ener	gyLevel				Energyl	_evel	
nm			1/s	nm		1/s	n	1/cm	eV	J	Co	onf	1/cm	eV	J	Conf
470.0870	24	-2 122	228E+06	470.0973	-2 453	106F+05	Π	289.036	0.04	55	f3d2	*61	21555 275	267	45	
470 1950	22	-1.635	6.99E+06	470 2040	-1.866	513E+05	π	4706 277	0.58	2.5	f3ds	*6H	25967 693	3.22	35	
470 2412	44	-1 404	1.19E+07	470 2512	-1.861	346E+05	π	2294 692	0.00	55	f3d2	*6K	23553 975	2.92	5.5	
471.5581	25	-0.084	2 47E+08	471 5669	-0.351	1 22E+07	ī	10208 488	1 27	4	d27s	*7K	31408 454	3.89	5	
472 2615	96	-2.066	2.57E+06	472 2717	-1 729	4.65E+05	п	1749 123	0.22	65	f3d2	*61	22917453	2.84	55	
473 1501	47	-1 674	6.31E+06	473 1594	-1.509	6.59E+05	π	4585 431	0.57	6.5	f3d2	*6M	25714.049	3 19	6.5	f3sp?
474 3434	20	-0.681	6.18E+07	474 3520	-0.953	2.20E+06	ī	6249 029	0.77	6	d27s	*7M	27324 524	3.39	7	1000
475 5629	54	-2 309	1.45E+06	475 5735	-2 156	2.20E+00	п	0.000	0.00	45	f3c2	*41	21021365	2.61	35	
475 6722	71	-0.865	4.02E+07	475 6806	-1014	2.59E+06	ī	620.323	0.08	-1.0	d7s2	*5K	21636.957	2.68	5	
476 8564	18	-1 454	1.02E+07	476 8664	-1.650	5.05E+05	T	620.323	0.08	5	d7c2	*5K	21584.695	2.68	6	
476.9170	32	-2.346	1.32E+06	476.9266	-2 285	1.90E+05	п	0.000	0.00	45	f3s2	*41	20961 725	2.00	35	
477 2597	46	-1 996	2.95E+06	477 2693	-1.880	3.22E+05	п	2294 692	0.00	55	f3d2	*6K	23241 367	2.88	5.5	
477 8023	20	-0.181	1.93E+08	477 8096	-0.460	5.32E+06	ī	10347 344	1 28	0.0 8	d27e	*7M	31270 334	3.88	0.0 Q	d27n 7N
477 9545	35	-2 175	1.00E+00	477 9628	-2.351	1.30E+05	п	914 758	0.11	45	f3d2	*6K	21831.041	271	45	
478.0102	18	-0.253	1.63E+08	478.0192	-0.494	7.20E+06	ī	10081 030	1 25	5	d27e	*71	30994.846	3.84	6	
478 5843	17	-1.083	2.41E+07	478 5920	-1 256	1.79E+06	ī	3868 486	0.48	3	dZr3	*5H	24757 269	3.07	4	
478 9989	19	-0.545	8.28E+07	479,0061	-0.685	3.53E+06	ī	7645 645	0.40	8	d7s2	*51	28516 373	3.54	8	
4/0.0000	10	-1.043	2.61E+07	473.0001	-1 271	0.00E+00	ī	3800 820	0.00	7	d7c2	*5	24581 201	3.05	8	
401.0792	32	-1.611	2.01L+07	401.0009	-1.032	9.00L+05	п	1420 872	0.47	55	u/sz	*JL */I	25163.004	3.00	65	
401.9470	32 25	-1 335	1.32E+07	401.9349	-1.51/	2.40L+05	т	620 323	0.00	5	d7c2	*41 *5K	21265.004	2.12	6.0	лĸ
404.2332	20	-0.160	1.02E+06	404.2403	-2.024	0.70L+05	п	020.020	0.00	5	u/sz	*JK	21203.034	2.04	55	/K
404.7041	25	-1.516	0.61E+06	404.7007	-2.024	2.24E+05	п	4505 421	0.20	5.5	1302	≁0N	22917.400	2.04	0.0	
405.7995	25	-2.166	0.01E+00	403.0090	-2.200	4.11E+05	п	4060.431	0.07	0.5	130Z	≁0ivi ≁/Iī	20103.904	0.1Z	0.0	
400.9010	30	-2.100	1.935-107	400.9094	1 500	1.740	щ	0.000	0.00	4.5	13SZ	*4I	20071.002	2.00	3.0	
480.0920	10	-1.441	1.02E+07	480.0991	1.000	1.00E+00	ц,	3401.302	0.07	3.5	130S	*01	20907.093	3.22	3.5	
480.8738	10	-1.212	1./3E+0/	480.8838	-1.280	9.70E+05	і п	3800.829	0.47	/	0/SZ	±CI∕	24333.793	3.02	7	
488.3000	18	-2.213	1.71E+00	488.3783	-2.200	1.30E+05	ц	2294.092	0.28	5.5	1302	*01	22/04.900	2.82	0.0 7	
488.3037	31	-1.342	1.2/E+U/	488.0141	-1.040	4.21E+00	і п	0.000	0.00	0	0/SZ	±CI∕	20404.323	2.04	7	
488.0209	15	-1.599	1.02E+00	488.0320	-2.000	1.72E+00	ш	014750	0.09	0.0	T30S	*01	20980.311	3.22	0.0	
489.9215	07	-2.183	1.83E+00	489.9280	-2.12/	2.09E+00	ц	914.758	0.11	4.0	1302	*01	21320.201	2.04	3.5	
491.0248	27	-0.000	0.80E+07	491.035Z	-0.887	2.39E+00	і п	0249.029	0.77	0	02/S	*/IVI	20008.482	3.30	1	
491.3003	40	-2.104	2.18E+00	491.3109	-2.070	2.30E+05	ш	2294.092	0.28	0.0 0.5	130Z	*01	22042.473	2.81	4.0	
492.4521	14	-0.883	3.60E+07	492.4646	-1.903	4.30E+05	ц	5007.334	0.70	3.5	tjas	*4H	25967.693	3.22	3.5	
492.8350	29	-0.835	4.01E+07	492.8447	-1.184	1.20E+06	1	42/5./0/	0.53	0	d/s2	*5K	24560.410	3.05	7	
493.2980	12	-1.262	1.50E+07	493.3060	-1.484	5.99E+05	1	3800.829	0.47	/	d/sz	*5L	24066.566	2.98	/	<b>60</b> 0
493.3590	23	-1.802	4.32E+06	493.3662	-2.212	1.08E+05	ш	4420.872	0.55	5.5	t3s2	*41	24084.135	3.06	4.5	t3sp?
495.0075	19	-1.836	3.9/E+06	495.0175	-2.049	1./4E+05	Ш •	5/90.641	0.72	5.5	f3ds	*4K	25986.311	3.22	6.5	
495.5671	20	-0.577	7.19E+07	495.5775	-0.778	2.00E+00	1	/645.645	0.95	8	d/s2	*5L	2/818.492	3.45	8	
490./231	20	-1.059	2.30E+U/	490./322	-1.251	8.92E+05	1	3800.829	0.47	/	a/s2	*oL	23926.784	2.97	8	
497.2014	30	-2.221	1.02E+06	497.2102	-2.496	1.08E+05	щ	914./58	0.11	4.5	tod2	*0K	21021.365	2.61	ა.5 ე -	
498.0822	23	-2.639	0.10E+05	498.6894	-2.500	1.06E+05	ш	914./58	0.11	4.5	f3d2	*0K	20961.725	2.60	3.5	
500.8114	00	-1.908	3.29E+06	500.8210	-1.963	2.07E+05	ш •	1/49.123	0.22	0.5	1302	*0L	21/10.//0	2.69	0.5	
501.1326	100	-1.5/3	7.10E+06	501.1409	-1.892	3.78E+05	1	620.323	80.0	5	d/s2	*5K	20569.228	2.55	4	17 514
502.7307	100	-0.867	3.59E+07	502.7384	-1.103	1.39E+06	1	0.000	0.00	0	d/sz	*5L	19885.515	2.4/	/	d/sp 5M
504.7289	12	-2.032	2.43E+06	504.7405	-2.585	0.80E+04	ш •	2294.692	0.28	5.5	1302	*0K	22101.332	2.74	4.5	
506.3678	18	-1.145	1.86E+07	506.3757	-1.331	8.09E+05	1	3800.829	0.4/	/	d/s2	*5L	23543.508	2.92	/	
507.7695	14	-2.842	3./2E+05	507.7805	-2.83/	2.69E+04	Ш	289.036	0.04	5.5	t3d2	*6L	1997/.096	2.48	6.5	
508.5735	15	-2.686	5.32E+05	508.5848	-2.580	8.4/E+04	Ш.	914.758	0.11	4.5	t3d2	*6K	205/1.682	2.55	3.5	
508.8167	11	-1.844	3.69E+06	508.8286	-2.024	1.62E+05	1	0.000	0.00	6	d/s2	*5L	19647.507	2.44	7	d/sp 7L
511.7150	30	-2.338	1.17E+06	511.7238	-2.116	1.95E+05	11	2294.692	0.28	5.5	f3d2	*6K	21831.041	2.71	4.5	
513.6928	9	-2.057	2.22E+06	513.7046	-2.202	1.59E+05	II T	6445.033	0.80	4.5	f3ds	*4I	25906.051	3.21	4.5	
514.4998	9	-2.236	1.46E+06	514.5084	-2.117	1.37E+05	II T	6283.434	0.78	6.5	f3ds	*4L	25714.049	3.19	6.5	f3sp?
515.3976	11	-2.695	5.07E+05	515.4048	-2.522	6.29E+04	Π	2294.692	0.28	5.5	f3d2	*6K	21691.512	2.69	5.5	
516.0225	40	-1.900	3.15E+06	516.0316	-1.639	4.11E+05	Π	5790.641	0.72	5.5	f3ds	*4K	25163.904	3.12	6.5	
516.4037	19	-0.572	6.70E+07	516.4139	-0.627	3.47E+06	Ι	8118.632	1.01	7	d27s	*5M	27477.553	3.41	8	
518.4479	26	-2.359	1.08E+06	518.4570	-1.855	3.46E+05	I	5401.502	0.67	3.5	f3ds	*6I	24684.135	3.06	4.5	f3sp?

Appendix 2 Identified spectra data of uranium

	Mea	surement							CfAD	)atabas	e					
Wave			•	Wave		•	Ι		Lo	ower				Upp	er	
length	Int	log(gf)	^	length	log(gf)		o		Ener	gyLeve	1			Energy	Level	
nm			1/s	nm		1/s	n	1/cm	eV	J	Co	onf	1/cm	eV	J	Conf
520.4230	20	-2.272	1.32E+06	520.4313	-1.838	2.98E+05	II	6283.434	0.78	6.5	f3ds	*4L	25492.918	3.16	5.5	
522.5006	14	-2.248	1.38E+06	522.5122	-2.194	1.12E+05	Π	5790.641	0.72	5.5	f3ds	*4K	24923.623	3.09	6.5	
523.8543	11	-1.650	5.44E+06	523.8615	-1.842	2.50E+05	Π	9553.185	1.18	5.5	f3ds	*	28636.887	3.55	6.5	
524.7267	13	-1.942	2.77E+06	524.7353	-2.352	1.08E+05	Π	5401.502	0.67	3.5	f3ds	*6I	24453.426	3.03	4.5	
524.7658	23	-2.297	1.22E+06	524.7749	-2.054	1.53E+05	Π	4585.431	0.57	6.5	f3d2	*6M	23635.916	2.93	6.5	
525.6928	18	-1.983	2.51E+06	525.7045	-1.924	2.87E+05	Π	5667.334	0.70	3.5	f3ds	*4H	24684.135	3.06	4.5	f3sp?
527.1899	7	-1.071	2.04E+07	527.2005	-1.243	9.14E+05	I	7645.645	0.95	8	d7s2	*5L	26608.482	3.30	7	
527.8077	13	-1.61/	5./8E+06	527.8169	-2.252	1.6/E+05		5401.502	0.67	3.5	t3ds	*61	24342.195	3.02	3.5	f3sp 6l
528.0297	32	-1.423	9.03E+06	528.0379	-1.541	6.25E+05	1	0.000	0.00	6 25	d/s2	*5L	18932.767	2.35	5	d/sp /L
520.0410	/ 01	-2.200	1.29E+00	520.9541	-2.300	1.04E+00	ц	2000 020	0.07	3.5	130S	*0I *5I	24300.020	3.01	4.5	
530.0410	11	-2 00/	2/0E+05	531 00/1	-2 959	2.17E+04	п	0.000	0.47	45	u/52	*JL *∕I	18827.008	2.01	55	f2d2c 6K
531 1779	19	-2.321	1.13E+06	531 1879	-2 138	1 43E+05	п	4420 872	0.55	55	f3s2	*41	23241 367	2.55	5.5	12023 011
531 2597	7	-1 477	7.89E+06	531 2716	-2.368	844F+04	п	5790 641	0.00	5.5	f3ds	*4K	24608 170	3.05	5.5	f3sp.6K
531,5184	6	-1.181	1.56E+07	531.5278	-1.200	8.76E+05	I	7645.645	0.95	8	d7s2	*5L	26454.103	3.28	8	loop old
531.9262	7	-0.791	3.81E+07	531.9396	-0.836	2.64E+06	I	10081.030	1.25	5	d27s	*7L	28874.929	3.58	6	
532.1529	6	-2.298	1.19E+06	532.1606	-2.385	9.70E+04	п	5667.334	0.70	3.5	f3ds	*4H	24453.426	3.03	4.5	
532.7675	11	-2.244	1.34E+06	532.7757	-1.971	2.09E+05	Π	6283.434	0.78	6.5	f3ds	*4L	25047.838	3.11	5.5	
532.9179	11	-1.908	2.90E+06	532.9241	-1.793	2.91E+05	Ι	0.000	0.00	6	d7s2	*5L	18759.179	2.33	6	
534.9780	6	-2.646	5.26E+05	534.9913	-2.425	6.25E+04	Π	4420.872	0.55	5.5	f3s2	*4I	23107.566	2.87	6.5	
536.3711	7	-1.737	4.24E+06	536.3807	-2.342	1.05E+05	Π	5667.334	0.70	3.5	f3ds	*4H	24305.625	3.01	4.5	
536.8337	7	-1.917	2.80E+06	536.8421	-1.733	4.28E+05	Π	9075.735	1.13	3.5	*		27698.008	3.43	4.5	
538.2857	6	-2.087	1.88E+06	538.2930	-2.288	1.32E+05	Ι	620.323	0.08	5	d7s2	*5K	19192.403	2.38	4	d7s 7K
538.5455	4	-0.642	5.24E+07	538.5547	-0.756	2.37E+06	Ι	13127.925	1.63	9	d27s	*7M	31690.981	3.93	8	5L
538.6127	12	-0.263	1.26E+08	538.6190	-0.669	4.10E+06	Π	15392.416	1.91	6.5	f4d	6L	33953.253	4.21	5.5	f4p *
538.9701	5	-0.942	2.62E+07	538.9847	-0.883	2.00E+06	I	10347.344	1.28	8	d27s	*7M	28895.590	3.58	7	
540.0822	11	-0.606	5.67E+07	540.0905	-0.604	3.79E+06	I	10288.617	1.28	6	d7s2	*3I	28798.886	3.57	7	
540.0822	11	-2.033	2.12E+06	540.0946	-2.092	1.85E+05	11	5401.502	0.67	3.5	f3ds	*61	23911.631	2.96	4.5	
540.3057	9	-2.301	9.96E+05	540.5187	-2.227	9.0/E+04	ш	5790.041 9204.262	1.04	5.5 7 5	tods	*4K	24293.094	3.01	0.5	
541.0126	/	-1.907	2.33E+00	541.0233	-1.909	1.70E+05	т	0394.30Z	0.53	7.5	d7c2	≁0ivi *5K	20007.270	3.33 2.82	7.5	
542 3291	4	-1.616	5.49E+06	542 3357	-1.665	5.45E+05	T	5762.078	0.00	5	d7s2	*31	22104.001	3.00	4	
544 4332	8	-2 140	1.63E+06	544 4467	-2 052	1.66E+05	п	5790.641	0.72	55	f3ds	*4K	24152 809	2.99	55	
545.9187	5	-2.189	1.45E+06	545.9250	-2.087	1.66E+05	I	620.323	0.08	5	d7s2	*5K	18932.767	2.35	5	d7sp 7L
546.5591	11	-2.005	2.21E+06	546.5676	-1.586	3.62E+05	п	9626.116	1.19	6.5	f3ds	*4K	27917.031	3.46	7.5	·
547.5644	23	-2.013	2.16E+06	547.5706	-1.276	9.81E+05	п	9241.966	1.15	4.5	*		27499.379	3.41	5.5	
548.0181	21	-1.761	3.85E+06	548.0265	-0.934	2.58E+06	Π	12513.884	1.55	5.5	f4d	6L	30756.109	3.81	4.5	f4p *
548.1144	29	-2.283	1.16E+06	548.1203	-1.677	4.67E+05	II	6445.033	0.80	4.5	f3ds	*4I	24684.135	3.06	4.5	f3sp?
548.2448	15	-0.823	3.33E+07	548.2526	-0.773	3.12E+06	Π	15392.416	1.91	6.5	f4d	6L	33627.116	4.17	5.5	f4p *
548.6906	14	-2.491	7.15E+05	548.7004	-2.060	1.61E+05	Π	5790.641	0.72	5.5	f3ds	*4K	24010.461	2.98	5.5	
548.8795	6	-0.282	1.16E+08	548.8883	-0.182	1.32E+07	Ι	14643.867	1.82	6	s7sp	7M	32857.449	4.07	5	ds8s *7L
549.1110	9	-1.902	2.77E+06	549.1222	-1.727	2.96E+05	Π	8510.866	1.06	5.5	f3ds	*	26716.691	3.31	6.5	
549.2811	83	-2.754	3.89E+05	549.2952	-2.110	1.72E+05	Π	0.000	0.00	4.5	f3s2	*4I	18200.092	2.26	4.5	f2ds2 4I
549.4539	6	-2.822	3.33E+05	549.4657	-2.326	7.45E+04	Ш	4420.872	0.55	5.5	f3s2	*4I	22615.316	2.80	6.5	
549.6310	11	-1.366	9.50E+06	549.6426	-1.357	7.46E+05	I	4275.707	0.53	6	d7s2	*5K	22464.293	2.79	6	
550.0578	6	-2.085	1.81E+06	550.0684	-2.145	1./5E+05	1	620.323	80.0	5	d/s2	*5K	18/94.831	2.33	4	
550,1360	10	-1.918	2.00E+06	550,4100	-1.941	2.10E+05	ll r	9553.185	1.18	5.5 4 F	tidds £24-	* • 41	2//25.023	3.44 2.0⊑	5.5 F F	flor fl
551 0200	13 10	-2.190	1.41E+U0	551.04128	-1.924	2.10E+00	Ц т	13107.005	U.8U	4.0 0	130S	≁41 ¥7№	24008.170 31970 994	3.05 2.00	0.0 0	1050 0K
551 1401	24	-1 507	1.00E+08	551 1/06	-0.270	0.10E+00	I T	13127.920 620.222	0.00	9	u2/S	≁/IVI *5⊮	31270.334 18750 170	ა.ԾԾ ე ??	e B	uz/p /N
551 3289	24 5	-1 20/	0.04E700 111E+07	551 3302	-1 326	5.50ETU3	T	7226 119	0.00	5 7	d7c2	∽л∖ ∗5⊮	25458 725	2.00	0 7	
552 7766	24	-1.569	5.89E+06	552 7810	-0.942	2 49E+06	т П	12513.884	1.55	55	f2d	61	30599 202	3 79	45	f4n *
553 1211	5	-1 257	1.21F+07	553 1265	-1 263	9,15F+05	ī	7864 204	0.98	5.5	d7s2	*51	25938 232	3.22	-7.5 6	י קדי.
553.5688	6	-2.796	3.48E+05	553.5777	-2.836	2.65E+04	ľ	2294 692	0.28	5.5	f3d2	*6K	20353.988	2.52	5.5	
553.8417	6	-1.956	2.41E+06	553.8522	-1.848	3.08E+05	Π	9075.735	1.13	3.5	*		27126.080	3.36	4.5	

	Mea	surement							CfAD	)atabas	e					
Wave			Α	Wave		Α	Ι		L	ower				Upp	ber	
length	Int	log(gf)		length	log(gf)		0		Ener	gyLeve	 			Energy	Level	·
nm			1/s	nm		1/s	n	1/cm	eV	J	Co	onf	1/cm	eV	J	Conf
554.4676	7	-2.598	5.48E+05	554.4807	-2.314	7.52E+04	Π	4585.431	0.57	6.5	f3d2	*6M	22615.316	2.80	6.5	
554.7943	5	-1.238	1.25E+07	554.8042	-1.586	5.62E+05	Π	12513.884	1.55	5.5	f4d	6L	30533.258	3.79	4.5	f4p *
555.1300	9	-2.149	1.54E+06	555.1425	-2.087	1.77E+05	Π	6445.033	0.80	4.5	f3ds	*4I	24453.426	3.03	4.5	
555.7793	7	-2.085	1.77E+06	555.7881	-1.997	2.41E+05	I	620.323	0.08	5	d7s2	*5K	18607.798	2.31	4	
556.4083	30	-1.011	2.10E+07	556.41 /U	-1.125	1.08E+06	l T	3800.829	0.4/	/	d7s2	*5L	21767.971	2.70	/	d7sp 5L
557.0000	13	-2.127	1.60E+00	557.0000	-1.554	5.00E+05	Ц	9553.185	1.18 1.20	5.5 o	13ds	* 71/1	2/499.3/9	3.41	5.5 7	
557 3543	5 5	-1 526	2.27E+06	557 3591	-1.023 -1.630	1.30E+00	I I	10347.344 6249.029	1.20 0.77	0 6	02/5 1976	*/lvi ∗7M	28280.700	3.5 i 3.00	, 7	
5580726	8	-2 664	4.65E+05	558.0805	-2.345	9.67F+04	ч	5401 502	0.77	35	f3ds	*61	23315 090	2,89	, 45	flen 6K
558,1146	11	-3.264	1.17E+05	558.1222	-2.769	3.04E+04	I	914.758	0.11	4.5	f3d2	*6K	18827.008	2.33	5.5	f2d2s 6K
558.1531	24	-3.151	1.51E+05	558.1594	-2.640	4.90E+04	Π	289.036	0.04	5.5	f3d2	*6L	18200.092	2.26	4.5	f2ds2 4I
559.7240	8	-2.314	1.03E+06	559.7365	-2.094	1.71E+05	П	6445.033	0.80	4.5	f3ds	*4I	24305.625	3.01	4.5	
560.2772	7	-1.588	5.48E+06	560.2892	-2.181	1.17E+05	П	6445.033	0.80	4.5	f3ds	*4I	24288.006	3.01	5.5	f3sp?
560.3870	5	-2.549	5.99E+05	560.3973	-2.524	6.35E+04	П	5401.502	0.67	3.5	f3ds	*6I	23241.033	2.88	4.5	
560.8763	3	-0.477	7.07E+07	560.8851	-0.371	1.00E+07	Ι	15720.682	1.95	5	d7sp	7L	33544.696	4.16	4	ds8s *7K
561.0779	18	-0.940	2.44E+07	561.0890	-0.937	1.63E+06	Ι	6249.029	0.77	6	d27s	*7M	24066.566	2.98	7	
561.6480	4	-1.318	1.02E+07	561.6575	-1.303	6.19E+05	Ι	8118.632	1.01	7	d27s	*5M	25918.137	3.21	8	
562.0689	30	-1.435	7.75E+06	562.0776	-1.629	4.51E+05	Ι	620.323	0.08	5	d7s2	*5K	18406.522	2.28	5	d7sp 7K
562.1453	10	-1.509	6.54E+06	562.1514	-1.532	4.77E+05	Ι	3800.829	0.47	7	d7s2	*5L	21584.695	2.68	6	
562.9374	4	-0.209	1.30E+08	562.9440	-0.229	8.28E+06	Ι	16900.387	2.10	7	d7sp	7M	34659.215	4.30	7	ds8s *7L
563.2394	5	-1.046	1.89E+07	563.2457	-1.067	1.06E+06	Ι	10069.176	1.25	7	d7s2	*3L	27818.492	3.45	8	
563.4300	7	-1.167	1.43E+07	563.4391	-1.063	1.07E+06	I	7645.645	0.95	8	d7s2	*5L	25388.868	3.15	8	
563.6722	3	-1.605	5.22E+06	563.6777	-1.635	4.42E+05	Ι	7005.532	0.87	6	d7s2	*3K	24741.245	3.07	5	
564.0207	3	-1.721	3.99E+06	564.0305	-1.596	4.83E+05	I	5762.078	0.71	5	d7s2	*3I	23486.695	2.91	5	
564.8265	2	-0.463	7.19E+07	564.8380	-0.424	5.25E+06	I	16900.387	2.10	7	d7sp ∝ io	7M	34599.667	4.29	7	*
565.3672	6	-2.542	5.99E+05	565.37/1	-2.69/	2.99E+04	Ш	2294.692	0.28	5.5	f3d2	*6K	19977.096	2.48	6.5	
565.8143	4	-1.875	2./8E+00	505.8204	-1./21	5.66E+U0	1	3868.480	0.48 0.00	ა 5	d/sz	+5H -⊬⊑¥	21536.849	2.67	ີ 3 ຄ	7-0 0L∕
560.330	9 3	-1.900	2.100	500.9430	-1.929 -1.542	1.88E+05	1 T	620.323 6970.020	0.00	5 6	0/52	*0N ⊎7M	18233.070	2.20	0 7	/sz jr
568 5134	ა 6	-1.097	4.10E+00	568 5211	-1.042 -1.763	3.90E+00 2 06E+05	1 T	0249.025	0.77	4	02/5 17c2	*/lvi ≁5ī	23040.020	2.90	/ 4	
569 1300	10	-1.000	4.23E+00	569 1342	-1 778	3.90L+05	T T	620 323	0.00	- 5	u7s∠ d7s2	≁л *5К	18185 999	2.75	4	
570.5527	2	-1 269	1 10F+07	570 5654	-1 091	1 85E+06	, T	10819 935	1.34	3	d97s	*71	28341 548	3.51	4	
570.6887	6	-2.293	1 04E+06	570.6993	-2.148	1 46E+05	Ц	7166,632	0.89	4.5	f3ds	*61	24684.135	3.06	4.5	f3sp?
570.9400	4	-1.501	6.46E+06	570.9493	-1.547	6.45E+05	ī	7103.921	0.88	3	d7s2	*5G	24613.754	3.05	4	1000.
571.6783	5	-1.718	3.91E+06	571.6875	-1.591	7.47E+05	I	4453.419	0.55	4	d7s2	*5I	21940.641	2.72	3	
572.2141	4	-0.706	4.01E+07	572.2237	-0.761	1.68E+06	I	13535.186	1.68	9	d7s2	*3K	31006.021	3.84	10	5L
572.3563	11	-2.629	4.79E+05	572.3648	-2.087	1.67E+05	Π	5401.502	0.67	3.5	f3ds	*6I	22868.033	2.84	4.5	
573.3173	5	-2.154	1.43E+06	573.3236	-1.976	1.53E+05	Π	8276.729	1.03	6.5	f3ds	*4I	25714.049	3.19	6.5	f3sp?
573.6303	5	-1.454	7.12E+06	573.6391	-1.242	8.93E+05	Ι	7005.532	0.87	6	d7s2	*3K	24433.260	3.03	6	
573.7209	4	-1.485	6.63E+06	573.7272	-1.241	1.06E+06	Ι	7020.710	0.87	4	7s2	5I	24445.762	3.03	5	*
574.7990	7	-3.371	8.59E+04	574.8106	-3.032	1.87E+04	Π	0.000	0.00	4.5	f3s2	*4I	17392.211	2.16	4.5	f2d2s 6K
574.8342	4	-2.391	8.20E+05	574.8448	-2.299	6.33E+04	Π	8276.729	1.03	6.5	f3ds	*4I	25667.906	3.18	7.5	
575.0413	4	-1.315	9.77E+06	575.0555	-1.057	2.53E+06	Ι	8856.992	1.10	2	d7s2	*5G	26241.797	3.25	3	
575.8012	8	-2.111	1.56E+06	575.8143	-2.104	1.22E+05	Ι	0.000	0.00	6	d7s2	*5L	17361.895	2.15	6	d7sp 7L
575.8248	6	-1.692	4.09E+06	575.8357	-1.900	2.30E+05	Ι	4275.707	0.53	6	d7s2	*5K	21636.957	2.68	5	
576.3497	3	-1.706	3.95E+06	576.3596	-1.554	6.23E+05	Ι	7103.921	0.88	3	d7s2	*5G	24449.391	3.03	4	
576.3497	3	-1.677	4.22E+06	576.3662	-1.527	4.59E+05	Ι	7326.118	0.91	7	d7s2	*5K	24671.388	3.06	6	
576.5285	2	-1.599	5.05E+06	576.5379	-1.430	4.97E+05	Ι	8118.632	1.01	7	d27s	*5M	25458.735	3.16	7	
576.7337	4	-1.678	4.21E+06	576.7451	-1.691	3.71E+05	I	5991.313	0.74	4	d7s2	*3H	23325.189	2.89	5	
577.0955	4	-1.599	5.05E+06	577.1053	-1.660	3.37E+05	I	6249.029	0.77	6	d27s	*7M	23572.086	2.92	6	
578.0513	22	-0.873	2.67E+07	578.0589	-0.858	1.84E+06	I	6249.029	0.77	6	d27s	*7M	23543.508	2.92	7	
578.8505	6	-2.220	1.20E+06	578.8568	-2.456	5.80E+04	I	4420.872	0.55	5.5	f3s2	*4[	21691.512	2.69	5.5	
5/9.1660	5	-1.8/9	2.63E+06	5/9.1/49	-1.819	1.88E+05	Ш.,	9626.116	1.19	6.5	f3ds	*4K	26887.270	3.33	/.5	.1.
570.8438	20	-2.642	4.53E+05	579,8530	-1.854	2.78E+05	п	5401 502	0.67	35	152 f3de	31 *61	24207.039	2.01	15	т

	Meas	surement							CfAD	atabas	e					
Wave			۵	Wave		Δ	Ι		Lo	wer				Upp	er	
length	Int	log(gf)	^	length	log(gf)	^	0		Energ	gyLevel	1			Energyl	_evel	
nm			1/s	nm		1/s	n	1/cm	eV	J	Co	onf	1/cm	eV	J	Conf
580.2015	9	-1.048	1.77E+07	580.2106	-0.875	2.03E+06	Ι	8118.632	1.01	7	d27s	*5M	25348.977	3.14	6	
580.5066	4	-1.690	4.05E+06	580.5193	-1.697	3.61E+05	Ι	5991.313	0.74	4	d7s2	*3H	23212.495	2.88	5	
581.3689	3	-1.797	3.15E+06	581.3820	-1.698	4.39E+05	Ι	5991.313	0.74	4	d7s2	*3H	23186.939	2.88	4	
581.4324	4	-1.962	2.15E+06	581.4417	-2.045	2.54E+05	Ι	3868.486	0.48	3	d7s2	*5H	21062.347	2.61	3	
581.6622	3	-1.290	1.01E+07	581.6772	-1.172	8.84E+05	Ι	10288.617	1.28	6	d7s2	*3I	27475.518	3.41	7	
581.8909	2	-1.796	3.15E+06	581.9017	-1.661	2.87E+05	Ι	7005.532	0.87	6	d7s2	*3K	24185.803	3.00	7	
582.7907	4	-2.509	6.09E+05	582.8005	-2.533	7.19E+04	Π	4706.277	0.58	2.5	f3ds	*6H	21860.053	2.71	3.5	
583.5937	10	-0.696	3.94E+07	583.6023	-0.555	3.21E+06	I	10347.344	1.28	8	d27s	*7M	27477.553	3.41	8	
583.7601	15	-2.533	5.74E+05	583.7682	-2.064	1.21E+05	I	4585.431	0.57	6.5	f3d2	*6M	21710.770	2.69	6.5	
584.3190	5	-1.036	1.80E+07	584.3277	-2.216	9.89E+04	I	6445.033	0.80	4.5	f3ds	*4[	23553.975	2.92	5.5	60 IO 01/
584.5197	10	-3.141	1.41E+05	584.5247	-2./88	3.18E+04		289.036	0.04	5.5	13d2	*6L	1/392.211	2.16	4.5	f2d2s 6K
585.1929	10	-1.783	3.21E+06	585.2003	-1.891	3.57E+05	і п	4453.419	0.55	4	d/sz ຄາມາ	*CI	10007.000	2.07	3 55	£2,42,5 61/
506 2205	2	-1.672	1.000-100	596 2406	-2.707	3.10E+04	ц	7020 710	0.22	0.5	7.02	*0L	24070.017	2.33	5.5	Ton +7K
587 0808	10	-2/15	4.12E+00	587.0930	-2.165	2.90E+05	п	5/01 502	0.67	4	1sz f3de	31 *61	24070.917	2.90	45	/sp */K
589 5222	6	-2 477	6.39E+05	589 5311	-2 243	9.14F+04	п	6283 434	0.78	6.5	f3ds	*4	23241.367	2.70	55	
589 8707	5	-1 550	5.40E+06	5898774	-1 397	512F+05	ī	6249 029	0.77	6	d27s	*7M	23197.009	2.88	0.0	
590.2426	5	-1.863	2.63E+06	590.2490	-1.650	6.12E+05	I	3868.486	0.48	3	d7s2	*5H	20805.796	2.58	3	7s2 3G
591.5279	86	-1.102	1.51E+07	591.5385	-1.125	9.52E+05	I	0.000	0.00	6	d7s2	*5L	16900.387	2.10	7	d7sp 7M
592.5353	4	-1.436	6.97E+06	592.5455	-1.190	6.45E+05	I	7645.645	0.95	8	d7s2	*5L	24517.311	3.04	9	d2s2 5L
592.9207	4	-1.989	1.95E+06	592.9314	-1.701	2.90E+05	Ι	3800.829	0.47	7	d7s2	*5L	20661.514	2.56	6	7L
593.3712	5	-2.266	1.03E+06	593.3817	-2.209	1.30E+05	I	620.323	0.08	5	d7s2	*5K	17468.213	2.17	4	d2s2 5H
593.4352	3	-2.123	1.43E+06	593.4445	-2.337	7.26E+04	Π	8510.866	1.06	5.5	f3ds	*	25356.975	3.14	5.5	
594.2677	3	-1.781	3.13E+06	594.2768	-1.784	3.45E+05	Ι	5762.078	0.71	5	d7s2	*3I	22584.593	2.80	4	
594.8494	4	-1.467	6.43E+06	594.8565	-1.408	4.33E+05	Ι	7645.645	0.95	8	d7s2	*5L	24451.765	3.03	8	d2s2 5K
595.1973	5	-2.255	1.05E+06	595.2031	-2.270	8.42E+04	I	6445.033	0.80	4.5	f3ds	*4]	23241.367	2.88	5.5	
595.6797	5	-1.816	2.87E+06	595.6859	-1.696	7.57E+05	Ι	3868.486	0.48	3	d7s2	*5H	20651.208	2.56	2	
597.1393	18	-1.712	3.63E+06	597.1501	-1.678	3.02E+05	Ι	620.323	0.08	5	d7s2	*5K	17361.895	2.15	6	d7sp 7L
597.6182	23	-1.203	1.17E+07	597.6321	-1.029	1.03E+06	Ι	3800.829	0.47	7	d7s2	*5L	20528.898	2.55	8	d7sp 7M
598.5983	12	-1.473	6.26E+06	598.6100	-1.575	5.50E+05	Ι	3868.486	0.48	3	d7s2	*5H	20569.228	2.55	4	
599.7203	12	-1.152	1.31E+07	599.7310	-1.078	1.03E+06	Ι	6249.029	0.77	6	d27s	*7M	22918.555	2.84	7	d7sp 5L
599.7843	5	-1.824	2.78E+06	599.7959	-1.769	2.43E+05	I	4275.707	0.53	6	d7s2	*5K	20943.428	2.60	6	7K
599.9320	5	-1.880	2.44E+06	599.9408	-1.670	2.64E+05	I	3800.829	0.47	7	d7s2	*5L	20464.525	2.54	7	
600.0077	3	-1.136	1.36E+07	600.0178	-0.790	1.58E+06	1	11308.153	1.40	9	d/s2	*5L	2/969./11	3.47	9	
600.4711	4	-1.291	9.46E+06	600.4815	-1.849	2.62E+05	1	9933.226	1.23	3.5	13ds	*	26581.916	3.30	4.5	
601.0770	4	-1.182	1.21E+07	601.0962	-0.920	1.71E+00	1	10204.999	1.27	о 0	d/sz	*3⊟ ±7M	20892.000	3.33	0	
601 2005	ა ა	-0.669	2065-07	601.0603	-0.909	1.34E±00 2.51E±06	T	10047.044	1.20	0 10	dZ/S	≁/IVI ≁5I	20979.203	2.00	0 11	d7op 7M
601.6651	4	-1 724	3.48E+06	601.4033	-1 794	2.69E+05	T	5762.078	0.71	5	d7s2	*3⊑ *3ī	22277 764	277	5	u/sp /w
601 7304	7	-1.865	2.52E+06	601 7381	-2 366	9.91F+04	П	4706 277	0.58	25	f3ds	*6H	21320 201	2.77	35	
601.7495	4	-1.619	4.42E+06	601.7563	-1.412	5.48E+05	I	6249.029	0.77	6	d27s	*7M	22862.451	2.83	6	
601.9139	3	-1.953	2.05E+06	601.9191	-1.750	4.67E+05	I	4453,419	0.55	4	d7s2	*5I	21062.347	2.61	3	
602.8013	5	-1.857	2.55E+06	602.8123	-1.665	7.94E+05	I	3868.486	0.48	3	d7s2	*5H	20452.805	2.54	2	
603.5382	2	-1.842	2.64E+06	603.5549	-1.776	6.13E+05	I	7191.682	0.89	2	d7s2	*5G	23755.597	2.95	2	
603.9507	5	-1.337	8.41E+06	603.9618	-1.185	9.18E+05	I	8118.632	1.01	7	d27s	*5M	24671.388	3.06	6	
605.0366	5	-1.894	2.33E+06	605.0485	-2.075	2.19E+05	I	3868.486	0.48	3	d7s2	*5H	20391.512	2.53	3	
605.0530	4	-1.477	6.07E+06	605.0675	-1.652	2.71E+05	I	7326.118	0.91	7	d7s2	*5K	23848.625	2.96	7	
605.1636	18	-2.635	4.22E+05	605.1738	-2.541	4.37E+04	II	914.758	0.11	4.5	f3d2	*6K	17434.363	2.16	5.5	f2d2s 4K
605.6722	6	-2.309	8.92E+05	605.6809	-2.300	7.01E+04	Ι	0.000	0.00	6	d7s2	*5L	16505.773	2.05	6	s27p 5K
605.6965	6	-1.516	5.54E+06	605.7081	-1.535	4.08E+05	Ι	6249.029	0.77	6	d27s	*7M	22754.061	2.82	6	
605.9628	4	-1.188	1.18E+07	605.9757	-1.016	1.35E+06	Ι	10069.176	1.25	7	d7s2	*3L	26566.919	3.29	6	
606.2196	6	-1.705	3.58E+06	606.2309	-1.726	2.27E+05	Ι	4275.707	0.53	6	d7s2	*5K	20766.506	2.57	7	s27p 5K
606.7132	13	-2.619	4.36E+05	606.7219	-2.630	4.25E+04	Π	914.758	0.11	4.5	f3d2	*6K	17392.211	2.16	4.5	f2d2s 6K
607.7236	14	-1.836	2.64E+06	607.7291	-1.477	4.63E+05	Ι	620.323	0.08	5	d7s2	*5K	17070.469	2.12	6	5L
608.7227	6	-2.329	8.45E+05	608.7336	-2.161	1.24E+05	I	6445.033	0.80	4.5	f3ds	*4I	22868.033	2.84	4.5	

Measurement							CfAD	atabas	e									
Wave			٨	Wave		^	Ι		L	ower			Upper					
length	Int	log(gf)	~	length	log(gf)	A	o		Ener	gyLeve	1			Energyl	Level			
nm			1/s	nm		1/s	n	1/cm	eV	J	Co	onf	1/cm	eV	J	Conf		
608.9039	3	-2.034	1.67E+06	608.9190	-1.838	2.01E+05	Ι	3800.829	0.47	7	d7s2	*5L	20218.830	2.51	6			
610.1645	4	-1.619	4.31E+06	610.1778	-1.489	3.87E+05	Ι	6249.029	0.77	6	d27s	*7M	22633.158	2.81	7			
612.7687	2	-1.639	4.08E+06	612.7773	-1.314	6.63E+05	Ι	8118.632	1.01	7	d27s	*5M	24433.260	3.03	6			
612.9647	10	-2.009	1.74E+06	612.9723	-1.990	1.65E+05	Ι	620.323	0.08	5	d7s2	*5K	16929.760	2.10	5	d7sp 7K		
613.2549	6	-0.876	2.36E+07	613.2620	-0.806	1.32E+06	Ι	11308.153	1.40	9	d7s2	*5L	27609.886	3.42	10	d7sp 7M		
613.8458	3	-1.231	1.04E+07	613.8545	-1.250	6.63E+05	Ι	10685.787	1.32	8	d7s2	*5K	26971.784	3.34	7			
615.2169	3	-2.070	1.50E+06	615.2262	-2.037	1.47E+05	Ι	4275.707	0.53	6	d7s2	*5K	20525.394	2.55	5			
616.4410	4	-1.488	5.70E+06	616.4514	-1.716	2.25E+05	I	7326.118	0.91	7	d7s2	*5K	23543.508	2.92	7			
617.1730	14	-0.949	1.97E+07	617.1859	-0.979	9.67E+05	I	7645.645	0.95	8	d7s2	*5L	23843.737	2.96	9	d7sp 7M		
617.5247	11	-1.502	5.51E+06	617.5394	-1.450	4.14E+05	1	42/5./0/	0.53	6	d/s2	*5K	20464.525	2.54	/			
618.1220	2	-1.931	2.04E+06	018.1393	-1./34	1.0/E+06	1	/191.682	0.89	2	d/sZ	*5G	23364.790	2.90	1			
622.4157	5	-1.818	2.03E+00	622.4204	-1.803	1.01E+05	I	3800.829	0.47	6	d7s2	*0L ≁5K	19880.010	2.47	/ 5	a/sp ow		
624 6422	2	-1.055	2.32E+00	624 6522	-1.616	2.495	T	42/5./0/	0.03	5	d7c2	≁0Γ. •∕Ω	20311.334	2.52	5			
6254096	5	-2 345	2.38L+00	625 4203	-2.423	6.44E+04	п	6445.033	0.71	45	t3de	*JI *4I	21700.330	2.70	45			
626.8586	4	-1 483	5.58E+06	626 8671	-1.387	4.64E+05	T	8118632	1.01	4.5 7	d27s	*5M	24066.566	2.70	ч.5 7			
627,9503	3	-2 650	3.79E+05	627,9619	-2 668	2.59E+04	п	5790.641	0.72	55	f3ds	*4K	21710 770	2.00	65			
628,0043	8	-2 610	4.15E+05	628.0183	-2.310	1.04E+05	п	5401 502	0.72	35	f3ds	*61	21320201	2.00	3.5			
629.1336	3	-3.256	9.35E+04	629,1463	-3.463	5.80E+03	П	914,758	0.11	4.5	f3d2	*6K	16804.918	2.08	4.5	f2d2s 6I		
629.1903	6	-1.284	8.77E+06	629.2012	-1.388	9.85E+05	I	8133.291	1.01	4	d7s2	*5H	24022.065	2.98	3			
629.3208	8	-2.084	1.39E+06	629.3328	-2.132	9.55E+04	I	620.323	0.08	5	d7s2	*5K	16505.773	2.05	6	s27p 5K		
629.8398	6	-1.767	2.87E+06	629.8533	-1.752	2.70E+05	I	4275.707	0.53	6	d7s2	*5K	20148.031	2.50	5	d7s 7K		
632.2280	4	-3.384	6.89E+04	632.2365	-3.277	1.10E+04	П	0.000	0.00	4.5	f3s2	*4I	15812.494	1.96	3.5	f2d2s 6I		
633.0660	3	-3.159	1.15E+05	633.0752	-3.358	6.08E+03	П	914.758	0.11	4.5	f3d2	*6K	16706.303	2.07	5.5	f4s 4K		
635.9179	9	-2.129	1.22E+06	635.9289	-2.090	1.22E+05	I	0.000	0.00	6	d7s2	*5L	15720.682	1.95	5	d7sp 7L		
637.2331	14	-1.472	5.54E+06	637.2450	-1.332	4.50E+05	I	3800.829	0.47	7	d7s2	*5L	19489.044	2.42	8	d2s2 5L		
637.2888	2	-2.023	1.56E+06	637.2990	-2.054	1.61E+05	Ι	5762.078	0.71	5	d7s2	*3I	21448.962	2.66	4			
637.8425	9	-3.203	1.03E+05	637.8519	-2.946	1.33E+04	Π	289.036	0.04	5.5	f3d2	*6L	15962.323	1.98	6.5	f2d2s 6L		
637.9525	5	-2.607	4.05E+05	637.9619	-2.367	7.04E+04	Π	5716.448	0.71	4.5	f4s	6I	21387.032	2.65	4.5	f3d2 *		
638.3482	3	-2.010	1.60E+06	638.3572	-2.091	1.21E+05	Ι	4453.419	0.55	4	d7s2	*5I	20114.300	2.49	5	d7sp 7K		
638.9691	6	-1.530	4.83E+06	638.9789	-1.444	5.34E+05	Ι	5991.313	0.74	4	d7s2	*3H	21636.957	2.68	5			
639.2662	8	-2.177	1.08E+06	639.2762	-2.093	1.01E+05	Ι	0.000	0.00	6	d7s2	*5L	15638.367	1.94	6	d2s2 5K		
639.5329	31	-1.606	4.04E+06	639.5426	-1.586	2.82E+05	Ι	0.000	0.00	6	d7s2	*5L	15631.855	1.94	7	d2s2 5L		
639.7085	5	-1.473	5.48E+06	639.7156	-1.427	4.06E+05	Ι	7005.532	0.87	6	d7s2	*3K	22633.158	2.81	7			
640.0253	3	-2.478	5.41E+05	640.0336	-2.866	2.77E+04	Π	5401.502	0.67	3.5	f3ds	*6I	21021.365	2.61	3.5			
641.1486	3	-1.713	3.15E+06	641.1593	-1.690	2.21E+05	Ι	7326.118	0.91	7	d7s2	*5K	22918.555	2.84	7	d7sp 5L		
642.4773	3	-2.890	2.08E+05	642.4867	-2.730	3.76E+04	Π	5401.502	0.67	3.5	f3ds	*6I	20961.725	2.60	3.5			
643.0802	3	-1.916	1.96E+06	643.0937	-1.907	2.85E+05	Ι	5991.313	0.74	4	d7s2	*3H	21536.849	2.67	3			
644.7936	2	-1.923	1.92E+06	644.8025	-2.520	4.84E+04	Π	9933.226	1.23	3.5	f3ds	*	25437.566	3.15	4.5			
644.9045	46	-1.362	6.97E+06	644.9160	-1.428	6.65E+05	Ι	620.323	0.08	5	d7s2	*5K	16121.933	2.00	4	d7sp 7K		
646.4881	10	-1.169	1.08E+07	646.4983	-1.105	7.37E+05	I	7326.118	0.91	7	d7s2	*5K	22789.789	2.83	8	d7sp 7L		
648.1592	2	-2.133	1.17E+06	648.1728	-2.144	1.27E+05	I	5762.078	0.71	5	d7s2	*3I	21185.800	2.63	4			
648.8231	3	-0.957	1./5E+0/	648.8342	-0.937	8./2E+05	1	13535.186	1.68	9	d/s2	*3K	28943.187	3.59	10	d/sp /L		
649.5106	3	-2.627	3./3E+05	649.5228	-3.1/9	/.4/E+03	Ш	4585.431	0.57	6.5	t3d2	*6M	19977.096	2.48	6.5			
650.3492	6	-1./80	2.62E+06	650.3622	-1.823	1.58E+05	1	42/5./0/	0.53	6	d/s2	*5K	19647.507	2.44	/	d/sp /L		
001.8851	6	-1.569	4.23E+06	001.8946	-1.582	3.16E+05	1	0249.029	U.//	6	dZ/s	*/M	21084.695	2.68	6			
002.0869	1	-1.915	1.91E+06	652.0982	-1.85/	3.11E+05	1	8133.291	1.01	4	a/s2	*0H ≁F'	23404.168	2.91	3	d7an 71		
652 6054	2	-1.82U	2.37E+00	652 7020	-1.//1	1.40E+00	I T	7040.040	0.90	ŏ	u/SZ	+0L +Ω	22904.002	2.00 0.61	9	u/sp /∟		
653 5242	2	-1.100	1.14E+00 6.18E±06	653 5474	-1.140 -1.516	1.01E+00	I T	0/02.0/8 0100 001	1.01	C A	d7c2	∿ئ س∡⊾⊔	210/8./30	2.01	c A			
654 2889	Л	1.40Z	0.10ETU0	654 2026	-1 222	3825+05	T	10347 344	1.01	4 Q	d27c	≁J⊓ *7М	25626 665	2.91 3.10	4 0	d2c2 71		
655 2500	4 1	-2012	1.51E+06	655 2752	-2 120	5.02E+0J	T	7326 119	0.01	0 7	d7c2	*54	20020.000	2.10 2.20	6	ULOL /L		
655 4060	۱ ۵	2.013 -1.923	1.31⊑+00 2.33⊑∔06	655 5010	-1 025	7.09L±04 3.60E±05	ı T	3862 126	0.91	י 2	d7s2	*54	10110 720	2.00	2			
658 2652	1	-2023	1.47E+06	658 2778	-2117	1.31E+05	Ĩ	7864 204	0.40	5	d7e9		23051 165	2.07	۲ ۲			
658.7737	2	-2.542	4.41E+05	658.7842	-2.926	1.30E+04	П	5526.750	0.69	6.5	f3ds	*6K	20702.037	2.57	6.5	f4d 6K		

	Measurement				CfADatabase											
Wave			А	Wave		А	Ι		Lo	wer				Uppe	er	
length	Int	log(gf)		length	log(gf)		0		Energ	yLevel				Energyl	_evel	
nm			1/s	nm		1/s	n	1/cm	eV	J	Co	onf	1/cm	eV	J	Conf
658.9915	2	-2.450	5.44E+05	659.0059	-3.008	1.88E+04	II	5401.502	0.67	3.5	f3ds	*6I	20571.682	2.55	3.5	
660.1298	2	-1.928	1.81E+06	660.1389	-2.145	6.44E+04	Ι	7645.645	0.95	8	d7s2	*5L	22789.789	2.83	8	d7sp 7L
660.3247	3	-2.859	2.11E+05	660.3340	-3.691	2.60E+03	I	2294.692	0.28	5.5	f3d2	*6K	17434.363	2.16	5.5	f2d2s 4K
660.3881	3	-1.644	3.47E+06	660.3992	-1.884	1.54E+05	Ι	7326.118	0.91	7	d7s2	*5K	22464.293	2.79	6	
662.0400	6	-2.277	8.05E+05	662.0531	-2.280	7.26E+04	Ι	620.323	0.08	5	d7s2	*5K	15720.682	1.95	5	d7sp 7L
662.1621	4	-3.022	1.45E+05	662.1776	-2.965	1.65E+04	I	2294.692	0.28	5.5	f3d2	*6K	17392.211	2.16	4.5	f2d2s 6K
662.2677	2	-2.120	1.15E+06	662.2835	-2.681	3.17E+04	I	7547.368	0.94	3.5	f3ds	*	22642.473	2.81	4.5	
662.5104	2	-2.179	1.01E+06	662.5295	-2.010	1.35E+05	Ι	5762.078	0.71	5	d7s2	*31	20851.579	2.59	5	
664.7669	2	-2.342	6.86E+05	664.7793	-2.398	4.02E+04	Ι	3800.829	0.47	7	d7s2	*5L	18839.262	2.34	7	d2s2 5K
665.6711	2	-2.777	2.51E+05	665.6819	-2.789	1.88E+04	Ι	620.323	0.08	5	d7s2	*5K	15638.367	1.94	6	d2s2 5K
668.3266	3	-2.100	1.19E+06	668.3384	-2.021	1.09E+05	Ι	3800.829	0.47	7	d7s2	*5L	18759.179	2.33	6	
669.1074	1	-1.630	3.49E+06	669.1200	-1.780	1.30E+05	Ι	10685.787	1.32	8	d7s2	*5K	25626.665	3.18	9	d2s2 7L
671.7304	3	-1.789	2.40E+06	671.7451	-2.631	3.46E+04	I	7547.368	0.94	3.5	f3ds	*	22429.859	2.78	4.5	
672.7827	1	-2.258	8.13E+05	672.7971	-2.386	5.51E+04	Ι	5762.078	0.71	5	d7s2	*31	20621.298	2.56	5	
673.6687	3	-2.607	3.64E+05	673.6805	-2.641	3.05E+04	Ι	0.000	0.00	6	d7s2	*5L	14839.736	1.84	5	d7s 7M
675.4822	2	-1.869	1.98E+06	675.4927	-1.974	1.03E+05	Ι	8118.632	1.01	7	d27s	*5M	22918.555	2.84	7	d7sp 5L
676.8493	1	-1.993	1.48E+06	676.8641	-2.132	1.19E+05	Ι	7864.204	0.98	5	d7s2	*5I	22634.142	2.81	4	

\_

表1.	SI 基本単位	<u>Ľ</u>								
甘大昌	SI 基本単位									
本平里	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	Α								
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
AI 立 是 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ル	kg/m <sup>3</sup>
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積 立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	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>8</sup>
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈 折 率 <sup>(b)</sup> (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	t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租立单位			
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 角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 (в)	m/m
立体鱼	ステラジアン <sup>(b)</sup>	$sr^{(c)}$	1 (b)	$m^2/m^2$
周 波 数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	-	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>	$m^{-1} kg s^{-2}$
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 <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
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	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
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	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
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 <sup>2</sup>	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,	ゲレイ	Gy	.I/kg	$m^2 e^{-2}$
カーマ		Gy	0/Kg	
線量当量,周辺線量当量,	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> c <sup>-2</sup>	
方向性線量当量,個人線量当量		50	orkg	III 8
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

酸素活性(1) ダール kat [s<sup>1</sup> mol]
 (w)SH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。
 (h)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (a)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)へルツは周期現象についてのみ、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。 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。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)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物告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

	S	[ 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	リ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	$W/m^2$	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
電東密度, 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	コアラド毎メートル	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	ダレイ毎秒	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	$10^{-2}$	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	v

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	۰	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	$1 t=10^3 kg$		

## 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			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	- F	$\sim$	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原	子質量単	単位	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	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉結的な朋友け
ベル	В	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	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$		
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 G =1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> 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 帰	<b>属さないその他の単位の例</b>
	名	称		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ	IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
$\scriptstyle  u$	$\sim$	トゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ			K	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
$\scriptstyle  u$			L	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガ	3	/	7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	x	N	111		1フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メー	ートルヌ	系カラ:	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 <sup>-4</sup> kg
ŀ			ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	進っ	大気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カ	П	IJ	Į	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	カ		~		$1 = 1 = 10^{-6} m$