

論文

高電離タンタリウムおよびタングステニオンの
スペクトルデータ中井 洋太*¹, 富田 博稔*², 近藤 嘉秀*¹Spectral Data for Highly Ionized Tantalum
and Tungsten Ions
(Ta IV-LXIII and W VI-LXIV)Yohta NAKAI*¹, Hirotohi TOMITA*², and Yoshihide KONDO*¹

(Received 30 November, 1996)

ABSTRACT

Wavelengths, energy levels, ionization energies, line classifications, oscillator strengths, and atomic transition probabilities for Ta IV to Ta LXIII and W VI to W LXIV are compiled. A short review of the work on each stage of ionization is included. The data are critically evaluated and best results, in our judgement, are quoted. The literature has been surveyed to December 1995.

トルデータ集の作成を行った。

1. 緒 論

次世代核融合実験装置として、現在日本、欧州連合 (EU), ロシア, 米国の協力により国際熱核融合実験炉 (International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)) の設計活動が進められている。ITER では、プラズマの小半径を設定するためのリミタおよび不純物除去のためのダイバータ材料にタングステン (W (Z=74), 融点3410°C) とタンタル (Ta (Z=73), 融点2996°C) の高融点金属を候補にあげている。いずれも、高温核融合プラズマの対向物であり、これらの高電離イオンがプラズマ中に混入する。したがって Ta と W の高電離イオンのスペクトルデータの収集と評価が緊急の課題となっている。そのためにわれわれは、これらのデータの収集と評価とともに、Ta と W のスペク

2. データの収集と評価

2.1 文献データの収集

まず Ta と W のスペクトルに関する既存の文献データを系統的に収集した。すなわち、1968年から1983年までのデータについては旧 NBS の文献集¹⁾²⁾³⁾⁴⁾, それ以降については IAEA の Bulletin⁵⁾ の文献情報をもとにして調べた。さらに新しい情報については、スペクトルデータの論文の主要発表誌である Journal of Optical Society of America B, Physica, Scripta, Atomic Data and Nuclear Data Table を逐次してチェックして必要文献の収集を行った。

*1 近畿大学原子力研究所

*2 近畿大学理工学部原子炉工学科

*1 Atomic Energy Research Institute

*2 Department of Nuclear Engineering, Faculty of Science and Technology, Kinki University

2.2 スペクトルデータの収集と評価

収集した文献から、遷移準位の同定されている実験的に得られたスペクトル線および等電子系列イオンの実験値と理論値の差の原子番号依存性のスケールリングから求めたスペクトル線の波長とエネルギー準位を選びだした。そして、各イオン種毎のスペクトル表とエネルギー準位表を作成した。

スペクトル表では発光スペクトルの波長、遷移の下位と上位準位の電子配置と項、これらに対応する下位と上位のエネルギー準位値、線強度、gf 値（下位準位の統計重みと吸収振動子強度の積）、放射遷移確率、文献等を記載した。またスペクトル表の配列は、波長の長い方から、同電子配置・項でまとめた。さらに波長とエネルギー準位値について、同一遷移で2つ以上のデータに関しては、文献の中身の検討、すなわち他の遷移との整合性、測定、計算方法とそれらの精度から、最も正しいと判断されるデータを採用した。

エネルギー準位値についても、各電子配置・項についての値について、スペクトル表と同じく評価し、最も正しいと判断されるデータを採用した。

また各イオン種のイオン化エネルギーも重要なデータの1つであるのでこれらに関しては、Carlson ら⁶⁾の全元素の全電離状態について球殻モデ

ルで計算した値を基本にしたが、各イオン種毎の文献に記載されているものはそれを採用した。Carlson らの値と実験値との平均偏差は、約5%である。Fig. 1, 2に Carlson ら⁶⁾が計算した Ta と W イオンのイオン化エネルギーとの電離数の関係を示す。これらの図から、例えば核融合プラズマの与えた温度で生じる高電離イオンの電荷数を推定することができる。

なお、波数とエネルギー (cm^{-1} と eV) の換算係数 $8065.5410 \pm 0.0024 \text{cm}^{-1}/\text{eV}$ の値は Cohen と Taylor⁷⁾ の値を用いた。

第2章の文献

- 1) Hagan L. and Martin W.C.: Bibliography on atomic energy level and spectra July 1968 through June 1971, NBS special publication 363 (1972)
- 2) Hagan L.: Bibliography on atomic energy levels and spectra July 1971 through June 1975, NBS special publication 363 Sup. 1 (1977)
- 3) Zalubas R. and Albright A.: Bibliography on atomic energy levels and spectra July 1975 through June 1979, NBS special publication 363 Sup. 2 (1980)

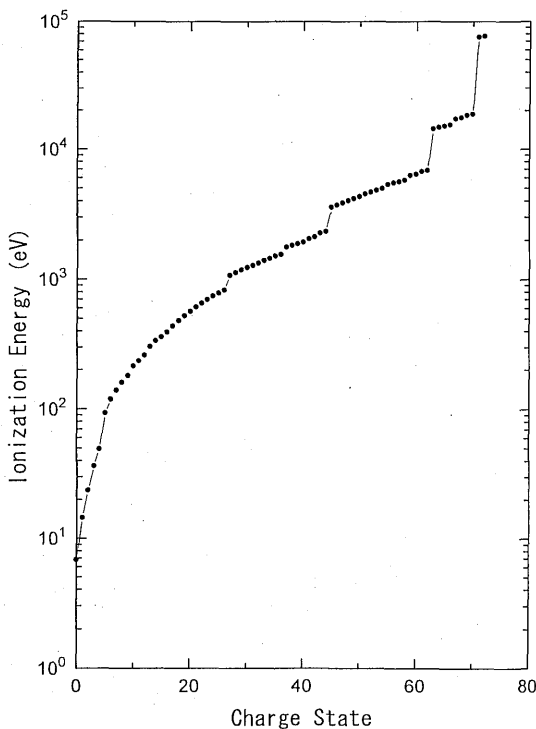


Fig. 1 Ionization Energy vs Charge State of Ta Ions ($Z=73$)

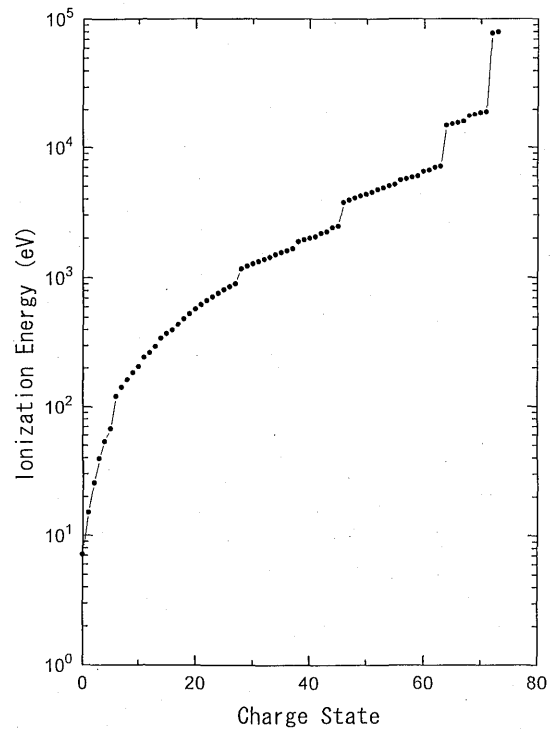


Fig. 2 Ionization Energy vs Charge State of W Ions ($Z=74$)

- 4) Musgrove A. and Zalubas R.: Bibliography on atomic energy levels and spectra July 1979 through June 1983, NBS special publication 363 Sup. 3 (1985)
- 5) International bulletin for atomic and molecular data for fusion: No. 33 (1986) -No. 49 (1995)
- 6) Carlson T.A., Nestor C.R. Jr., Wasserman N. and McDowell: Atomic Data 2 63-99 (1970)
- 7) Chen E.R. and Taylor: Rev. Mod. Phys. 59 1121 (1987)

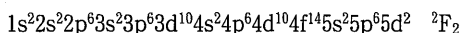
3. 高電離 Ta, W イオンのスペクトルデータ

3.1 収集評価した高電離 Ta, W イオンのスペクトルデータの概略説明

Table 1 に収集評価して、スペクトル表およびエネルギー準位表としてまとめたイオン類と、スペクトル線およびエネルギー準位の数を表す。

Ta IV (Yb I sequence)

基底状態



イオン化エネルギー

$$292900 \text{ cm}^{-1} \quad (36.31 \text{ eV})$$

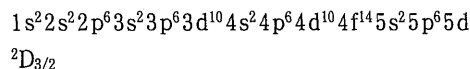
Meijer と Metsch (Me78) は $5d^2-5d6p$, $5d6s-5d6p$, $5d6s-6s6p$, $6s^2-6s6p$ の一電子遷移, $5d^2-6s6p$, $6s^2-5d6p$ の二電子遷移スペクトルの114本のラインを, 波長領域 2900—200Å にわたって, パルスホロー陰極およびスライディングスパーク光源を用いて測定し, 同定した。波長の測定精度は $\pm 0.003 \text{ \AA}$ であり, 最長波長では低分散能のため, 0.01 \AA である。

現在のところ Ta IV について Me78 のデータが唯一であるので, 波長・エネルギー準位とも彼らの値を採用した。

イオン化エネルギーは, Carlson ら (Ca70) の値を採用した。

Ta V (Yb II sequence)

基底状態



イオン化エネルギー

$$389340 \pm 200 \text{ cm}^{-1} \quad (48.272 \pm 0.025 \text{ eV})$$

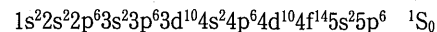
Meijer と Klinkenberg (Me73) は, Ta V の $5d-6p$, $6s-6p$, $5d-5f$, $6p-6d$, $6p-7s$ 遷移の13本のスペクトル線をホロー陰極とスライディングスパーク光源で観測した。その後, Suger と Kaufman (Su75a) は, これらのスペクトル線の再測定を精度 $\pm 0.005 \text{ \AA}$ で行うとともに, $6s-6p$ 線の超微細構造線の測定および, $6p-8s$ 線の測定を行った。さらに Suge と kaufman (Su79) は $5f-5g$, $5f-6g$ 線の測定とともに, これらを用いてイオン化エネルギーを求めた。

波長・エネルギー準位は, Su75 と Su79 の値を採用した。

イオン化エネルギーは Ka76 の値を採用した。

Ta VI (Yb III sequence)

基底状態



イオン化エネルギー

$$758250 \pm 400 \text{ cm}^{-1} \quad (94.01 \pm 0.05 \text{ eV})$$

Kaufman と Suger (ka75) は, Yb III 様イオン Ta VI の $5p^5 5d-4f^{13} 6p$, $5p^5 6p$, $5p^5 6s-5p^5 6p$, $4f^{13} 6p$, $4f^{13} 6s-4f^{13} 6p$, $5p^5 6p$, $4f^{13} 6p-4f^{13} 6d$, $4f^{13} 7s$, $4f^{13} 5d-4f^{13} 6p$, $4f^{13} 5p^6 1S-4f^{13} 5d$, $5p^5 5d$, $5p^5 6s$ 遷移のスペクトルの219本のラインを波長領域200—2000Å にわたってスライディングスパーク光源を用いて精度 $\pm 0.005 \text{ \AA}$ で測定した。さらに Kaufman と Suger (Ka76) は, Yb III 様イオン Ta VI の $4f^{13} 5p^6 1S-4f^{13} 6d$, $5p^5 6d$, $5p^5 7s$ 遷移のスペクトル線7

Table 1 Numbers of Compiled and Evaluated Spectral Lines and Energy Levels

Ta	Charge State	Spectral lines	Energy Levels
IV	3	114	30
V	4	21	16
VI	5	333	97
XXVII	26	6	4
XXVIII	27	2	3
XLIV	43	167	84
XLV	44	27	18
XLVII	46	4	4
LXIII	62	16	17
Total		690	273
W	Charge State	Spectral lines	Energy Levels
VI	5	17	14
VII	6	397	109
XIV	13	2	3
XXVIII	27	7	8
XXIX	28	2	3
XLV	44	167	18
XLVI	45	22	20
XLVIII	47	4	4
XLIX	48	1	2
LXIV	63	16	17
Total		635	198

本のラインをスライディングスパーク光源とトリガースパーク光源を用いて、測定精度 $\pm 0.005\text{\AA}$ で測定した。Wyart ら (Wy81) は、Yb 様イオン Ta VI $4f^{13}5d-4f^{13}5f$ 遷移のスペクトル線96本をスライディングスパーク光源を用いて精度は $\pm 0.005\text{\AA}$ で測定し、Slater-Condon 理論を用いて解析し、Ta VI については $4f^{13}5d-4f^{13}5f$ 遷移のスペクトル線85本を同定した。

波長、エネルギー準位共に Ka75, Ka76, Wy81 の値を採用した。

イオン化エネルギーは、Ka76 の値を採用した。

Ta XXVII (Ag sequence)

基底状態

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 4f^2 F_{5/2}$$

イオン化エネルギー

$$6711000\text{cm}^{-1} (832.0\text{eV})$$

Sugar ら (Su93a) は、TEXT トカマクへ Er, Yb, Hf, W, Pt, Au を注入して、これらの Ag 様イオンの6本の二重項線 $4d^{10}4f^2F-4d^94f(^1P)4f^2G, ^2D, ^2F$ のスペクトルを精度 $\pm 0.005\text{\AA}$ で測定し、同定した。そして実験値から得たエネルギー準位値と Cowan コードで求めたエネルギー準位値の差の Z-依存性から、Ta XXVII のこれらの遷移に対する波長とエネルギー準位を定めた。

ここでは波長、エネルギー準位とも Su93a の値を採用した。

イオン化エネルギーは、Carlson ら (Ca70) の値を採用した。

Ta XXVIII (Pd sequence)

基底状態

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} ^1S_0$$

イオン化エネルギー

$$8743000\text{cm}^{-1} (1084\text{eV})$$

Sugar ら (Su93) は、TEXT トカマクへの Er, Yb, Hf, W, Pt の注入によって、これの Pd イオンの $4d^{10}-4d^94f$ 遷移の共鳴線を観測した。そして求めたエネルギー準位値と Cowan コードで求めたエネルギー準位値の差の Z-依存性から、Ta XXVIII の $4d^{10}-4d^94f$ 共鳴線の波長とエネルギー準位値を求めた。

ここでは波長、エネルギー準位とも Su93 の値を採用した。

イオン化エネルギーは、Carlson ら (Ca70) の値を採用した。

Ta XLIV (Zn sequence)

基底状態

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 ^1S_0$$

イオン化エネルギー

$$18420000\text{cm}^{-1} (2284\text{eV})$$

Biémont (Bi89) は、Zn 様イオンの Ta XLIV の $4p^{23}P-4s4p, 4p4d, 4p4d-4p4f, 4s4d-4p4d, 4s4f, 4s4p-4p^{23}P, 4s4d, 4p^{21}S, 4p^{21}D, 4s4f-4p4f, 4p^{21}S-4p4d, 4s4p, 4p^{21}D-4p4d$ の一電子遷移、 $4^{23}P-4s4f, 4s4d-4p^{21}D, 4p^{21}D-4s4f$ の二電子遷移を Grant の多重電子配位 Dirac-Fock 法により Ag XVIII から WXLV までの波長、エネルギー準位、gf 値、放射遷移確率を計算した。さらに Curtis (Cu92) は、Zn 様イオンの Ta XLIV の $4s^2-4s4p$ 遷移について、半経験式を用いて波長、寿命を計算した。

波長、エネルギー準位については、Bi89, Cu92 の値を、gf 値、放射遷移確率については、Bi89 の値を採用した。

イオン化エネルギーは、Carlson ら (Ca70) の値を採用した。

Ta XLV (Cu sequence)

基底状態

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 ^2S_{1/2}$$

イオン化エネルギー

$$18669000 \pm 15000\text{cm}^{-1} (2314.7 \pm 1.9\text{eV})$$

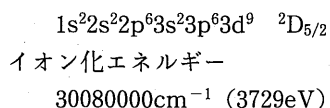
Reader と Luther (Re81) は、銅様イオン Ta XLV の $4s^2S-4p^2P, 4p^2P-4d^2D, 4d^2D-4f^2F$ 遷移をレーザー誘起プラズマ励起光源で測定し、同定した。波長の測定精度は $\pm 0.015\text{\AA}$ である。その後 Brown ら (Br89) は、銅様イオン Ta XLV の $4d^2D-5p^2P, 4f^2F-5g^2G, 4s^2S-5p^2P$ 遷移をレーザー誘起プラズマ励起光源で測定精度 $\pm 0.015\text{\AA}$ で測定し、この結果と Grant の多量電子配位 Dirac-Fock 法による計算と比較し同定した。また、Seely ら (Se89a) は銅様イオン Ta XLV を既存のデータと Grant の多重電子配位 Dirac-Fock 法による計算と比較し実験値と理論値のエネルギー差のフィッティングを行い Ru¹⁵⁺ から U⁶³⁺ までの波長を求めた。その後 Kania ら (Ka90) は、銅様イオン Ta XLV を波長領域 9—140 \AA において Nova レーザーを用いて測定精度 $\pm 0.015\text{\AA}$ で測定、同定した。

波長、エネルギー準位は、Re81, Br89, Se89a, Ka90 の値を採用した。

イオン化エネルギーは、Re81 の値を採用した。

Ta XLVII (Co sequence)

基底状態



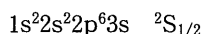
Ekberg ら (Ek87) は, Co 様イオン, Ru XVIII → Sb XXV, Sm XXXVI, Eu XXXVII, Cd XXXVIII, Yb XLIII, Au LIII の 3p⁶3d⁹²D-3p⁵3d¹⁰²P⁰ 遷移スペクトルをレーザー誘起プラズマ励起光源で測定した。そして, この結果を Grant の多重電子配位 Dirac-Fock 法による計算と比較し, 両者のエネルギー差のフィッティングを行い Sr XII から U LXVI までの波長を求めた。これらの波長の測定精度は, ±0.005 Å である。

ここでは, 3p⁶3d⁹²-3p⁵3d¹⁰²P の遷移と 3p⁶3d⁹²D_{5/2}-²D_{3/2} の磁気双極子遷移の波長及びエネルギー準位は Ek87 の値を採用した。

イオン化エネルギーは, Carlson ら (Ca70) の値を採用した。

Ta LXIII (Na sequence)

基底状態



イオン化エネルギー

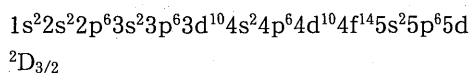
$$55676000 \text{ cm}^{-1} (6902.9 \text{ eV})$$

Seely ら (Se91) は, Na 様イオン, Cd³⁷⁺, In³⁸⁺, Sn³⁹⁺, Gd⁵³⁺ の 3s²S-3p²P, 3p²P-3d²D, 4p²F-5d²D, 4d²D-5f²F, 4f²F-5g²G 遷移を Nova レーザーを用いて測定した。この結果と, それまでに測定した他の低元素のデータを Grant の多重電子配位 Dirac-Fock 法による計算と比較し, 実験値と理論値のエネルギー差のフィッティングを行い外挿によって Y²⁸⁺ から U⁸¹⁺ までの波長をもとめた。これらの波長の測定精度は, ±0.015 Å である。

ここでは, Ta LXIII の 3s-3p, 3p-3d, 4d-5d, 4d-5f, 4f-5g の波長, エネルギー準位, イオン化エネルギーとも Se91 の値を採用した。

W VI (Yb II sequence)

基底状態



イオン化エネルギー

$$522370 \pm 300 \text{ cm}^{-1} (64.766 \pm 0.037 \text{ eV})$$

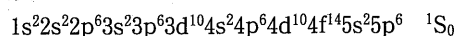
Meijer (Me74) は, W VI の 5f-5g, 5d-6p, 6p-7s, 6p-6d, 6s-6p, 遷移の13本のスペクトル線をスライディングスパーク光源で観測した。その後, Kaufman と Suger (Ka76) は, 5d-5f, 5d-6p, 6s-6p 遷移の8本のスペクトル線の再測定をスライ

ディングスパーク光線とトリガースパーク光線を用い測定精度±0.005 Å で行った。さらに Suger と Kaufman (Su79) は, 5f-5g, 5f-6g 遷移の4本のスペクトル線を追加測定するとともにこれらを用いてイオン化エネルギーを求めた。

波長・エネルギー準位は, Su79 の値を採用した。イオン化エネルギーは Su79 の値を採用した。

W VII (Yb II sequence)

基底状態



イオン化エネルギー

$$984100 \pm 500 \text{ cm}^{-1} (122.01 \pm 0.06 \text{ eV})$$

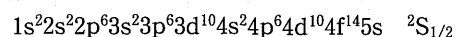
Suger と Kaufman (Su75) は, W VII の 5p⁶6s-5p⁵6p, 4f¹³6s-4f¹³6p, 5p⁵5d-5p⁵6p, 4f¹⁴5p⁶1S₀-5p⁵5d, 4f¹³5d 5p⁵6s, 5p⁵6d, 4f¹³6d, 5p⁵7s の一電子遷移, 5p⁵6p-4f¹³6p, 4f¹³6s-5p⁵6p, 5p⁵5d-4f¹³6p, 5p⁵6p-4f¹³6d, 4f¹³7s, 4f¹³6p-5p⁵6d, 4f¹³7s, 5p⁵7s, 4f¹³5d-5p⁵6p, 5p⁵5d-4f¹³6p, の二電子遷移の263本のスペクトル線を波長領域 100—2000 Å にわたってスライディングスパーク光線を用いて観測した。測定精度は±0.005 Å である。さらに Wyart ら (Wy81) は, スライディングスパーク光源を用いて Yb 様イオン Lu IV, Hf V, Ta VI, W VII の370本のスペクトル線を測定精度±0.005 Å で測定し, Slater-Condon 理論を用いて, 解析した。そして, W VII については 5p⁶d-4f¹³5f, 4f¹³5d-4f¹³5f, 5p⁵5d-4f¹³5f, の85本のスペクトル線を同定した。

波長, エネルギー準位共に Su75, Wy81 の値を採用した。

イオン化エネルギーは, Suger ら (Su75) の値を採用した。

W XIV (Pm sequence)

基底状態



イオン化エネルギー

$$2376000 \text{ cm}^{-1} (294.6 \text{ eV})$$

Curtis と Ellis (Cu80) は, Pm イオン W XIV-U XXII の共鳴線について, 非相対論的一電子配位 Hartree-Fock 法を用いて計算し, 波長, 平均寿命を求めた。

W XIV については, スペクトルの推定例もなく, Cu80 のデータが唯一である。

イオン化エネルギーは, Carlson ら (Ca70) の値を採用した。

W XXVIII (Ag sequence)

基底状態

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 4f^2 F_{5/2}$$

イオン化エネルギー

$$7198000 \text{cm}^{-1} (892.5 \text{eV})$$

Sugar ら (Su81) は、トリガースパーク光源で Ce XII から Ho XXI の銀様イオンの $4d^{10} 4f^2 F-4d^9 4f(1P) 4f^2 D, ^2 F, ^2 G$ 遷移を測定精度 $\pm 0.005 \text{\AA}$ で測定した。そして遷移エネルギーを W XXVIII まで外挿し、ORMAC トカマクで観測された 7 本の W XXVIII のスペクトル線 (測定精度 $\pm 0.02 \text{\AA}$) の同定を行った。その後 Sugar ら (Su93a) は、TEXT トカマクへ Er, Yb, Hf, W, Pt, Au を注入して、これらの銀様スペクトルを波長精度 $\pm 0.005 \text{\AA}$ で測定、同定した。そして実験値から得たエネルギー準位値と Cowan コードで求めたエネルギー準位値の差の Z-依存性から W XXVIII のこれらの遷移に対する波長とエネルギー準位を定めた。

ここでは波長、エネルギー準位とも Su93a の値を採用した。

イオン化エネルギーは、Carlson ら (Ca70) の値を採用した。

W XXIX (Pd sequence)

基底状態

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} \ ^1S_0$$

イオン化エネルギー

$$9308000 \text{cm}^{-1} (1154 \text{eV})$$

Sugar ら (Su93) は、TEXT トカマクへの Er, Yb, Hf, W, Pt の注入によって、これらの Pd 様イオンの $4d^{10}-4d^9 4f$ 遷移の共鳴線を観測した。そして求めたエネルギー準位値と Cowan コードで求めたエネルギー準位値との差の Z-依存性から W XXIX の $4d^{10}-4d^9 4f$ 共鳴線の波長とエネルギー準位を求めた。

ここでは波長、エネルギー準位とも Su93a の値を採用した。

イオン化エネルギーは、Carlson ら (Ca70) の値を採用した。

W XLV (Zn sequence)

基底状態

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 \ ^1S_0$$

イオン化エネルギー

$$19240000 \text{cm}^{-1} (2386 \text{eV})$$

Biémont (Bi89) は、Zn 様イオンの W XLV の $4p^{23} P-4s 4p, 4p 4d, 4p 4d-4p 4f, 4s 4d-4p 4d, 4s 4f, 4s 4p-4p^{23} P, 4s 4d, 4p^{21} S, 4p^{21} D, 4s 4f-4p 4f, 4p^{21} S-4p$

$4d, 4s 4p, 4p^{21} D-4p 4d$ の一電子遷移, $4p^{23} P-4s 4f, 4s 4d-4p^{21} D, 4p^{21} D-4s 4f$ の二電子遷移を Grant の多重電子配位 Dirac-Fock 法により Ag XVIII から W XLV までの波長, エネルギー準位, gf 値, 放射遷移確率を計算した。さらに Seely ら (Se89) は、Zn 様イオンの W XLV の $4s^2-4s 4p$ 遷移のスペクトルをレーザー誘起プラズマ励起光源で測定、同定した。(波長の測定精度は、 $\pm 0.005 \text{\AA}$) さらに Curtis (Cu92) は、Zn 様イオンの W XLV の $4s^2-4s 4p$ 遷移について、半経験式を用いて波長, 寿命を計算した。

波長, エネルギー準位については、Bi89, Se89, Cu92 の値を, gf 値, 放射遷移確率については、Bi89 の値を採用した。

イオン化エネルギーは、Carlson ら (Ca70) の値を採用した。

W XLVI (Cu sequence)

基底状態

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 \ ^2S_{1/2}$$

イオン化エネルギー

$$119471100 \pm 2900 \text{cm}^{-1} (2414.10 \pm 0.36 \text{eV})$$

Seely ら (Se89a) は、銅様イオン W XLVI の $4s^2 S-4p^2 P, 5p^2 P, 4p^2 P-4d^2 D, 5s^2 S, 5d^2 D, 4d^2 D-4f^2 F, 5f^2 F, 6f^2 F, 4f^2 F-5g^2 G, 6g^2 G$, 遷移のスペクトルをレーザー誘起プラズマ励起光源で測定し、同定した。波長の測定精度は $\pm 0.005 \text{\AA}$ である。さらに、Seely ら (Se89a) は、銅様イオン W XLVI を既存のデータと Grant の多重電子配位 Dirac-Fock 法による計算と比較し実験値と理論値のエネルギー差のフィッティングを行い Ru¹⁵⁺ から U⁶³⁺ までの波長を求めた。

波長, エネルギー準位とも、Se89, Se89a の値を採用した。

イオン化エネルギーは、Se89 の値を採用した。

W XLVIII (Co sequence)

基底状態

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^9 \ ^2D_{5/2}$$

イオン化エネルギー

$$31310000 \text{cm}^{-1} (3882 \text{eV})$$

Ekberg ら (Ek87) は、Co 様イオン, Ru XVIII → Sb XXV, Sm XXXVI, Eu XXXVII, Cd XXXVIII, Yb XLIII, Au LIII の $3p^6 3d^{92} D-3p^5 3d^{102} P^o$ 遷移スペクトルをレーザー誘起プラズマ励起光源で測定した。そして、この結果を Grant の多重電子配位 Dirac-Fock 法による計算と比較し、両者のエネルギー差のフィッティングを行い Sr XII から U

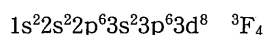
LXVI までの波長を求めた。これらの波長の測定精度は、 $\pm 0.005\text{\AA}$ である。さらに Seely ら (Se89) は、Co 様イオン WXLVIII の $3p^6 3d^{92} D_{3/2} - 3p^5 3d^{102} P_{1/2}^o$ と $3p^6 3d^{92} D_{5/2} - 3p^5 3d^{102} P_{3/2}^o$ 遷移スペクトルをレーザー誘起プラズマ励起光源で測定した。波長の全体的な測定精度は $\pm 0.005\text{\AA}$ である。そしてこの結果を Ekberg ら (Ek87) のフィッティング法と比較し、相互によく合うことを確認した。

ここでは、W XLVIII の $3p^6 3d^{92} D - 3p^5 3d^{102} P$ の遷移と $3p^6 3d^2 D_{5/2} - 2D_{3/2}$ の磁気双極子遷移の波長は Ek87 の値、これら以外の波長は Se89 の値を採用した。エネルギー準位は、Se89 の値を採用した。

イオン化エネルギーは、Carlson ら (Ca70) の値を採用した。

W XLIX (Fe sequence)

基底状態



イオン化エネルギー

$$32500000\text{cm}^{-1} \quad (4029\text{eV})$$

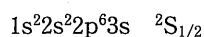
Seely ら (Se89) は、Fe 様イオン W XLIX の $3p^6 3d^8 [4, 4]_4 - 3p^4 ({}^2P_{3/2}) 3d^9 ({}^2D_{5/2})_3$ 遷移のスペクトルをレーザー誘起プラズマ励起光源で測定し、同定した。波長の測定精度は $\pm 0.005\text{\AA}$ である。現在のところ W XLIX について Se89 のデータが唯一である。

波長、エネルギー準位 (下位準位が未知のため x とおく) は、Se89 の値を採用した。

イオン化エネルギーは、Carlson ら (Ca70) の値を採用した。

W LXIV (Na sequence)

基底状態



イオン化エネルギー

$$57536000\text{cm}^{-1} \quad (7133.6\text{eV})$$

Seely ら (Se91) は、Na 様イオン、 Cd^{37+} , In^{38+} , Sn^{39+} , Gd^{53+} の $3s^2 S - 3p^2 P$, $3p^2 P - 3d^2 D$, $4p^2 F - 5d^2 D$, $4d^2 D - 5f^2 F$, $4f^2 F - 5g^2 G$ 遷移を Nova レーザーを用いて測定した。この結果と、それまでに測定した他の低元素のデータを Grant の多重電子配位 Dirac-Fock 法による計算と比較し、実験値と理論値のエネルギー差のフィッティングを行い外挿によって Y^{28+} から U^{81+} までの波長をもとめた。これらの波長の測定精度は、 $\pm 0.015\text{\AA}$ である。

ここでは、W LXIV の $3s - 3p$, $3p - 3d$, $4d - 5d$, $4d - 5f$, $4f - 5g$ の波長、エネルギー準位、イオン化エネルギーとも Se91 の値を採用した。

3.2 収集文献のリスト

- Bi89 Biemont E., At. Data Nucl. Data Tables 43 163 (1989)
- Br89 Brown C.M., Seely J.F., Feldman U., Cobble J.A. and Goldstone O, J. Opt. Soc. Am. B 6 1433 (1989)
- Ca70 Carlson T.A., Nestor C.W., Jr, Wasserman N. and McDowell J.D., Atomic Data 2 63 (1970)
- Cu80 Curtis L.J. and Ellis D.G., Phys. Rev. Lett. 45 2099 (1980)
- Cu92 Curtis L.J., J. Opt. Soc. Am. B 9 5 (1992)
- Ek87 Ekberg J.O., Feldman U., Seely J.F., Brown M., Reader J. and Acquista N., J. Opt. Soc. Am. B 4 1913 (1987)
- Ka75 Kaufman V. and Sugar J., J. Opt. Soc. Am. 65 302 (1975)
- Ka76 Kaufman V. and Sugar J., J. Opt. Soc. Am. 66 1019 (1976)
- Ka90 Kania D.R., MacGowan B. J., Keane C. J., Brown C.M., Ekberg J. O., Seely J.F., Feldman U. and Reader J., J. Opt. Soc. Am. B 7 1993 (1990)
- Me73 Meijer F.G. and Klinkenberg P.F.A., Physica 69 111 (1973)
- Me74 Meijer F.G., Physica 73 415 (1974)
- Me78 Meijer F.G. and Metsch B.C., Physica 94 C 259 (1978)
- Re81 Reader J. and Luther G., Physica Scr. 24, 732 (1981)
- Se89 Seely J.F., Brown C.M. and Behring W. E., J. Opt. Soc. Am. B 6 3 (1989)
- Se89a Seely J.F., Brown C.M. and Feldman U., At. Data Nucl. Data Tables 43 145 (1989)
- Se91 Seely J.F., Brown C.M. and Feldman U., Ekberg J.O., Keane C.J., MacGowan B. J., Kania D.R. and Behring W.E., At. Data Nucl. Data Tables 47 1 (1991)
- Su75 Sugar J. and Kaufman V., Phys. Rev. A 12 994 (1975)
- Su75a Sugar J. and Kaufman V., Phys. Rev. C 12 1336 (1975)
- Su79 Sugar J. and Kaufman V., J. Opt. Soc. Am. 69 141 (1979)
- Su81 Sugar J. and Kaufman V., Physica. Scripta. 24 742 (1981)
- Su93 Sugar J. and Kaufman V., J. Opt. Soc. Am. B10 799 (1993)

中井他：高電離タンタリウムおよびタングステンイオンのスペクトルデータ

Su93a Sugar J. and Kaufman V., J. Opt. Soc. Am. B10 1321 (1993)

Wy81 Wyart J.F., Kaufman V. and Sugar J., Physica Scripta 23 1069 (1981)

3.3 スペクトルデータ表, エネルギー準位表
収集評価してまとめた Ta および W のスペクトルデータ表とエネルギー準位表は A4 版で80頁

にのぼり, 本稿に全部を示すことが不可能である。そのため, 代表例として Ta XLIV, W XLV (Zn sequence) のスペクトルデータ表を Table 2, 3 に, エネルギー準位表を Table 4 に示す。なおスペクトルデータ表に関しては例えば $4p^{23}P_0$ の表示は $4p^{23}P_0$ と読む。また全てのデータは著者の計算機に収納しているので必要の場合には表出力またはフロッピーで提供することができる。

Table 2 Spectral Tables of Ta XLIV
Ta XLIV (Zn sequence) Ionization Energy = 18420000cm⁻¹ (2284eV)

$\lambda(\text{\AA})$	Classification		Energy Levels(cm ⁻¹)		gf	gA(s ⁻¹)	Ref
11645.883	4p23P0	4s4p(1/2, 3/2)o1	1563905	1572492	2.42-3	3.96+04	Bi89
306.936	4p23P2	4p4d(1/2, 3/2)o2	3077754	3403556	2.68-4	1.90+07	Bi89
214.570	2	1	3077754	3543804	8.87-4	2.14+08	Bi89
87.583	1	2	2261779	3403556	5.13-3	2.68+09	Bi89
78.002	1	1	2261779	3543804	3.82-2	4.19+10	Bi89
50.508	0	1	1563905	3543804	1.27+0	1.11+12	Bi89
241.184	4p4d(3/2, 5/2)o3	4p4f(1/2, 5/2)o3	4504312	4918932	6.13-4	7.03+07	Bi89
219.132	3	2	4504312	4960657	1.33-4	2.58+07	Bi89
212.271	1	2	4489562	4960657	7.38-6	6.55+05	Bi89
181.383	2	3	4367614	4918932	2.08-5	3.01+06	Bi89
170.545	4	3	4332577	4918932	3.03-6	8.94+05	Bi89
168.622	2	2	4367614	4960657	7.05-5	1.66+07	Bi89
229.273	4p21S0	4p4d(1/2, 3/2)o1	3107643	3543804	1.93-4	8.15+06	Bi89
210.048	4p4d(3/2, 5/2)o3	4p4f(1/2, 7/2)4	4504312	4980394	4.25-3	4.99+08	Bi89
209.839	3	3	4504312	4980868	9.46-4	1.43+08	Bi89
163.065	2	3	4367614	4980868	3.83-4	6.86+05	Bi89
154.365	4	4	4332577	4980394	3.80-3	1.06+09	Bi89
154.252	4	3	4332577	4980868	4.89-3	1.76+09	Bi89
191.866	4s4d(1/2, 5/2)2	4p4d(1/2, 3/2)o2	2882360	3403556	2.23-4	4.03+07	Bi89
178.641	3	2	2843773	3403556	5.42-6	1.59+06	Bi89
151.184	2	1	2882360	3543804	4.72-4	2.30+08	Bi89
179.338	4p23P2	4p4d(1/2, 5/2)o3	3077754	3635361	9.03-3	1.34+09	Bi89
178.253	2	2	3077754	3638754	2.37-3	4.98+08	Bi89
72.623	1	2	2261779	3638754	3.93-1	2.98+11	Bi89
161.548	4p4d(3/2, 3/2)o3	4p4f(1/2, 5/2)3	4299923	4918932	5.28-3	1.35+09	Bi89
151.347	3	2	4299923	4960657	4.49-3	1.83+09	Bi89
143.192	2	3	4220572	4918932	1.50-2	3.48+09	Bi89
140.326	1	2	4248032	4960657	1.05-4	2.13+07	Bi89
135.120	2	2	4220572	4960657	5.16-3	1.88+09	Bi89
146.957	4p4d(3/2, 3/2)o3	4p4f(1/2, 7/2)4	4299923	4980394	6.36-3	1.53+09	Bi89
146.855	3	3	4299923	4980868	1.34-3	4.15+08	Bi89
131.528	2	3	4220572	4980868	2.63-5	7.23+06	Bi89
145.077	4s4p(1/2, 3/2)o1	4p23P1	1572492	2261779	1.17-2	3.72+09	Bi89
120.047	2	1	1428770	2261779	6.37-2	4.92+10	Bi89
66.434	1	2	1572492	3077754	8.37-1	7.59+11	Bi89
60.643	2	2	1428770	3077754	1.47-1	2.66+11	Bi89
144.818	4s4d(1/2, 3/2)2	4p4d(1/2, 3/2)o2	2713034	3403556	3.75-2	1.19+10	Bi89
139.467	1	2	2686538	3403556	8.95-2	1.84+10	Bi89
120.370	2	1	2713034	3543804	6.00-2	4.60+10	Bi89
116.650	1	1	2686538	3543804	2.46-2	1.21+10	Bi89
143.053	4s4p(1/2, 3/2)o1	4p21D2	1572492	2271535	6.80-2	1.33+10	Bi89
118.657	2	2	1428770	2271535	6.74-2	3.19+10	Bi89

中井他：高電離タンタリウムおよびタングステンイオンのスペクトルデータ

$\lambda(\text{\AA})$	Classification		Energy Levels(cm^{-1})		gf	$gA(\text{s}^{-1})$	Ref
140.068	4s4f(1/2, 7/2)o3	4p4f(1/2, 5/2)3	4204996	4918932	4.70-3	1.60+09	Bi89
134.673	4	3	4176392	4918932	7.79-5	3.69+07	Bi89
132.334	3	2	4204996	4960657	4.47-3	2.38+09	Bi89
135.751	4s21S0	4s4p(1/2, 1/2)o1	0	736644	1.40-1	1.68+10	Bi89 Cu92
132.802	4s4d(1/2, 5/2)2	4p4d(1/2, 5/2)o3	2882360	3635361	7.65-2	2.07+10	Bi89
132.206	2	2	2882360	3638754	1.66-2	6.34+09	Bi89
126.328	3	3	2843773	3635361	5.15-2	2.15+10	Bi89
125.789	3	2	2843773	3638754	6.41-2	3.78+10	Bi89
130.609	4s4f(1/2, 5/2)o2	4p4f(1/2, 5/2)3	4153285	4918932	1.18-1	3.29+10	Bi89
125.286	3	3	4120757	4918932	4.52-2	1.92+10	Bi89
123.859	2	2	4153285	4960657	2.56-2	1.11+10	Bi89
119.062	3	2	4120757	4960657	4.35-2	2.87+10	Bi89
128.966	4s4f(1/2, 7/2)o3	4p4f(1/2, 7/2)4	4204996	4980394	1.29-1	4.01+10	Bi89
128.887	3	3	4204996	4980868	2.71-2	1.09+10	Bi89
124.378	4	4	4176392	4980394	5.30-2	2.29+10	Bi89
124.305	4	3	4176392	4980868	5.29-2	2.94+10	Bi89
120.881	4s4p(1/2, 1/2)o1	4p23P0	736644	1563905	8.98-2	1.23+11	Bi89
65.568	1	1	736644	2261779	9.60-2	1.49+11	Bi89
63.217	0	1	679919	2261779	5.10-1	2.84+11	Bi89
42.715	1	2	736644	3077754	1.22-2	2.68+10	Bi89
120.834	4s4f(1/2, 5/2)o2	4p4f(1/2, 7/2)3	4153285	4980868	8.91-6	2.91+06	Bi89
116.328	3	4	4120757	4980394	1.89-3	7.24+08	Bi89
116.264	3	3	4120757	4980868	1.61-4	7.93+07	Bi89
108.421	4s4d(1/2, 3/2)2	4p4d(1/2, 5/2)o3	2713034	3635361	6.77-3	2.74+09	Bi89
108.024	2	2	2713034	3638754	2.35-3	1.34+09	Bi89
105.018	1	2	2686538	3638754	3.35-5	1.21+07	Bi89
95.877	4p23P2	4s4f(1/2, 5/2)o3	3077754	4210757	6.42-3	3.33+09	Bi89
92.977	2	2	3077754	4153285	1.01-3	7.76+08	Bi89
52.868	1	2	2261779	4153285	4.38-2	6.28+10	Bi89
89.763	4s4p(1/2, 3/2)o1	4s4d(1/2, 3/2)1	1572492	2686538	2.01-2	1.66+10	Bi89
87.678	1	2	1572492	2713034	9.47-4	4.93+08	Bi89
79.506	2	1	1428770	2686538	4.05-3	7.11+09	Bi89
77.866	2	2	1428770	2713034	1.66-2	1.83+10	Bi89
88.712	4p23P2	4s4f(1/2, 7/2)o3	3077754	4204996	3.92-5	2.37+07	Bi89
88.338	4p21D2	4p4d(1/2, 3/2)o2	2271535	3403556	4.67-2	3.99+10	Bi89
78.600	2	1	2271535	3543804	5.33-4	9.60+08	Bi89
87.689	4p21S0	4p4d(3/2, 3/2)o1	3107643	4248032	2.57-2	7.43+09	Bi89

$\lambda(\text{\AA})$	Classification		Energy Levels(cm^{-1})		gf	$gA(\text{s}^{-1})$	Ref
87.503	4p23P2	4p4d(3/2, 3/2)o2	3077754	4220572	1.99-2	1.74+10	Bi89
85.450	2	1	3077754	4248032	1.58-2	2.40+10	Bi89
81.822	2	3	3077754	4299923	6.58-3	4.68+09	Bi89
51.052	1	2	2261779	4220572	2.42-1	3.72+11	Bi89
50.601	1	0	2261779	4238022	1.04-1	8.10+11	Bi89
50.346	1	1	2261779	4248032	2.55-1	6.71+11	Bi89
37.256	0	1	1563905	4248032	2.43-5	3.90+07	Bi89
80.750	4s4d(1/2, 5/2)2	4s4f(1/2, 5/2)o3	2882360	4120757	2.43-3	1.78+09	Bi89
78.683	2	2	2882360	4153285	2.67-3	2.87+09	Bi89
78.310	3	3	2843773	4120757	8.40-3	9.13+09	Bi89
76.364	3	2	2843773	4153285	2.93-3	4.70+09	Bi89
78.114	4p4d(1/2, 5/2)o2	4p4f(1/2, 5/2)3	3638754	4918932	2.45-4	1.91+08	Bi89
77.908	3	3	3635361	4918932	1.15-2	1.27+10	Bi89
75.649	2	2	3638754	4960657	1.28-2	1.49+10	Bi89
75.455	3	2	3635361	4960657	6.91-4	1.13+09	Bi89
77.528	4p23P2	4p4d(3/2, 5/2)o2	3077754	4367614	5.55-2	6.16+10	Bi89
70.831	2	1	3077754	4489562	6.82-2	1.51+11	Bi89
70.099	2	3	3077754	4504312	9.39-1	9.10+11	Bi89
47.487	1	2	2261779	4367614	7.60-3	1.35+10	Bi89
44.888	1	1	2261779	4489562	2.73-3	9.04+09	Bi89
34.180	0	1	1563905	4489562	1.25-3	2.37+09	Bi89
76.344	4s4p(1/2, 3/2)o1	4s4d(1/2, 5/2)2	1572492	2882360	1.14-1	7.81+10	Bi89
70.671	2	3	1428770	2843773	3.88-1	3.70+11	Bi89
68.795	2	2	1428770	2882360	1.52-1	2.14+11	Bi89
75.607	4s4d(1/2, 5/2)2	4s4f(1/2, 7/2)o3	2882360	4204996	1.65-1	1.38+11	Bi89
75.040	3	4	2843773	4176392	8.18-2	7.53+10	Bi89
73.463	3	3	2843773	4204996	3.79-2	4.68+10	Bi89
74.727	4s4d(1/2, 5/2)2	4p4d(3/2, 3/2)o2	2882360	4220572	1.60-3	1.91+09	Bi89
73.224	2	1	2882360	4248032	7.33-3	1.52+10	Bi89
72.632	3	2	2843773	4220572	1.25-3	2.22+09	Bi89
70.544	2	3	2882360	4299923	8.84-2	8.46+10	Bi89
68.674	3	3	2843773	4299923	4.16-2	5.88+10	Bi89
74.509	4p4d(1/2, 5/2)o2	4p4f(1/2, 7/2)3	3638754	4980868	2.76-1	2.37+11	Bi89
74.348	3	4	3635361	4980394	1.65-1	1.55+11	Bi89
74.321	3	3	3635361	4980868	2.58-2	3.11+10	Bi89
73.323	4p21D2	4p4d(1/2, 5/2)o3	2271535	3635361	2.35-1	2.08+11	Bi89
73.141	2	2	2271535	3638754	4.62-2	5.76+10	Bi89
72.363	4p21S0	4p4d(3/2, 5/2)o1	3107643	4489562	8.89-1	3.78+11	Bi89
71.037	4s4d(1/2, 3/2)2	4s4f(1/2, 5/2)o3	2713034	4120757	1.01-2	9.57+09	Bi89
69.432	2	2	2713034	4153285	7.18-2	9.93+10	Bi89
68.178	1	2	2686538	4153285	1.63-1	1.41+11	Bi89
70.579	4p4d(1/2, 3/2)o1	4p4f(1/2, 5/2)2	3543804	4960657	2.39-1	1.92+11	Bi89
65.990	2	3	3403556	4918932	2.93-1	3.20+11	Bi89
64.222	2	2	3403556	4960657	5.72-2	9.25+10	Bi89

中井他：高電離タンタリウムおよびタングステンイオンのスペクトルデータ

$\lambda(\text{\AA})$	Classification		Energy Levels(cm^{-1})		gf	$gA(\text{s}^{-1})$	Ref
67.329	4s4d(1/2, 5/2)2	4p4d(3/2, 5/2)o2	2882360	4367614	3.52-1	5.18+11	Bi89
67.168	3	4	2843773	4332577	5.35-1	6.15+11	Bi89
65.624	3	2	2843773	4367614	3.96-2	8.58+10	Bi89
62.220	2	1	2882360	4489562	8.42-2	2.42+11	Bi89
61.654	2	3	2882360	4504312	5.09-2	6.39+10	Bi89
60.221	3	3	2843773	4504312	8.24-2	1.52+11	Bi89
67.026	4s4d(1/2, 3/2)2	4s4f(1/2, 7/2)o3	2713034	4204996	1.64-1	1.74+11	Bi89
66.333	4s4d(1/2, 3/2)2	4p4d(3/2, 3/2)o2	2713034	4220572	3.08-2	4.66+10	Bi89
65.188	1	2	2686538	4220572	4.05-1	3.81+11	Bi89
65.147	2	1	2713034	4248032	4.22-2	1.11+11	Bi89
64.454	1	0	2686538	4238022	8.29-2	3.99+11	Bi89
64.041	1	1	2686538	4248032	2.04-1	3.31+11	Bi89
63.016	2	3	2713034	4299923	5.33-1	6.39+11	Bi89
65.151	4s4p(1/2, 1/2)o1	4p21D2	736644	2271535	2.40-1	2.26+11	Bi89
65.140	4s4p(1/2, 3/2)o1	4p21S0	1572492	3107643	1.68-1	7.91+11	Bi89
63.593	4s21S0	4s4p(1/2, 3/2)o1	0	1572492	1.13-0	6.21+11	Bi89 Cu92
63.399	4p4d(1/2, 3/2)o2	4p4f(1/2, 7/2)3	3403556	4980868	1.93-5	2.29+07	Bi89
60.438	4s4d(1/2, 3/2)2	4p4d(3/2, 5/2)o2	2713034	4367614	1.23-2	2.25+10	Bi89
59.486	1	2	2686538	4367614	4.57-3	5.17+09	Bi89
56.290	2	1	2713034	4489562	4.57-3	1.60+10	Bi89
55.826	2	3	2713034	4504312	2.41-2	3.68+10	Bi89
55.462	1	1	2686538	4489562	2.40-3	5.20+09	Bi89
54.077	4p21D2	4s4f(1/2, 5/2)o3	2271535	4120757	1.65-1	2.69+11	Bi89
53.142	2	2	2271535	4153285	3.14-2	7.43+10	Bi89
51.721	4p21D2	4s4f(1/2, 7/2)o3	2271535	4204996	2.00-2	3.57+10	Bi89
51.307	4p21D2	4p4d(3/2, 3/2)o2	2271535	4220572	1.67-1	4.22+11	Bi89
50.595	2	1	2271535	4248032	2.39-2	1.04+11	Bi89
49.300	2	3	2271535	4299923	1.90-1	3.72+11	Bi89
51.285	4s4p(1/2, 1/2)o1	4s4d(1/2, 3/2)1	736644	2686538	1.18-1	2.99+11	Bi89
50.597	1	2	736644	2713034	6.00-1	9.37+11	Bi89
49.835	0	1	679919	2686538	6.28-1	5.62+11	Bi89
47.708	41p21D2	4p4d(3/2, 5/2)o2	2271535	4367614	1.38-3	4.04+09	Bi89
45.085	2	1	2271535	4489562	9.27-4	5.07+09	Bi89
44.787	2	3	2271535	4504312	2.68-2	6.36+10	Bi89
46.605	4s4p(1/2, 1/2)o1	4s4d(1/2, 5/2)2	736644	2882360	2.42-2	4.46+10	Bi89
42.176	4s4p(1/2, 1/2)o1	4p21S0	736644	3107643	7.92-4	8.90+09	Bi89
29.514	4s4p(1/2, 3/2)o1	4p4f(1/2, 5/2)2	1572492	4960657	1.09-4	4.99+08	Bi89
28.652	2	3	1428770	4918932	5.46-8	3.17+05	Bi89
28.313	2	2	1428770	4960657	8.08-6	6.72+07	Bi89

$\lambda(\text{\AA})$	Classification		Energy Levels(cm^{-1})		gf	$gA(\text{s}^{-1})$	Ref
28.218	4s21S0	4p4d(1/2, 3/2)o1	0	3543804	$1.82-4$	$5.08+08$	Bi89
28.152	4s4p(1/2, 3/2)o2	4p4f(1/2, 7/2)3	1428770	4980868	$2.41-5$	$1.45+08$	Bi89
23.674	4s4p(1/2, 1/2)o1	4p4f(1/2, 5/2)2	736644	4960657	$2.30-4$	$1.64+09$	Bi89
23.540	4s21S0	4p4d(3/2, 3/2)o1	0	4248032	$4.95-8$	$1.99+05$	Bi89
22.274	4s21S0	4p4d(3/2, 5/2)o1	0	4489562	$2.80-4$	$1.25+09$	Bi89

Table 3 Spectral Tables of W XLV
W XLV (Zn sequence) Ionization Energy=19240000cm⁻¹ (2386 eV)

$\lambda(\text{\AA})$	Classification		Energy Levels(cm ⁻¹)		gf	gA(s ⁻¹)	Ref
2239.570	4p23P0	4s4p(1/2, 3/2)o1	1604720	1649371	1.00-3	4.44+05	Bi89
331.238	4p23P2	4p4d(1/2, 3/2)o2	3223547	3525445	1.62-4	9.87+06	Bi89
224.632	2	1	3223547	3668719	6.05-4	1.33+08	Bi89
85.631	1	2	2357638	3525445	5.09-3	2.78+09	Bi89
76.273	1	1	2357638	3668719	3.75-2	4.30+10	Bi89
48.450	0	1	1604720	3668719	1.28+0	1.21+12	Bi89
255.492	4p4d(3/2, 5/2)o3	4p4f(1/2, 5/2)o3	4691076	5082477	3.69-4	3.77+07	Bi89
230.071	3	2	4691076	5125724	3.08-5	5.44+06	Bi89
225.690	1	2	4682638	5125724	6.81-6	5.35+05	Bi89
190.847	2	3	4558497	5082477	1.14-5	1.49+06	Bi89
177.258	4	3	4518328	5082477	1.49-6	4.07+05	Bi89
176.296	2	2	4558497	5125724	5.61-5	1.20+07	Bi89
245.470	4p21S0	4p4d(1/2, 3/2)o1	3261337	3668719	1.78-4	6.57+06	Bi89
218.577	4p4d(3/2, 5/2)o3	4p4f(1/2, 7/2)3	4691076	5148580	6.09-4	8.50+07	Bi89
218.504	3	4	4691076	5148733	3.01-3	3.27+08	Bi89
169.468	2	3	4558497	5148580	2.12-6	3.51+05	Bi89
158.667	4	3	4518328	5148580	2.79-3	9.50+08	Bi89
158.628	4	4	4518328	5148733	2.09-3	5.55+08	Bi89
191.911	4s4d(1/2, 5/2)2	4p4d(2/2, 3/2)o2	3004370	3525445	2.64-4	4.77+07	Bi89
176.383	3	2	2958497	3525445	5.01-6	1.50+06	Bi89
150.523	2	1	3004370	3668719	6.11-4	3.00+08	Bi89
182.532	4p23P2	4p4d(1/2, 5/2)o3	3223547	3771398	6.32-3	9.03+08	Bi89
181.597	2	2	3223547	3774217	1.64-3	3.31+08	Bi89
70.593	1	2	2357638	3774217	3.91-1	3.14+11	Bi89
164.664	4p4d(3/2, 3/2)o3	4p4f(1/2, 5/2)3	4475179	5082477	3.89-3	9.57+08	Bi89
153.717	3	2	4475179	5125724	3.19-3	1.26+09	Bi89
145.783	2	3	4396524	5082477	6.50-3	1.46+09	Bi89
143.364	1	2	4428197	5125724	7.98-5	1.55+07	Bi89
137.137	2	2	4396524	5125724	2.61-3	9.26+08	Bi89
148.500	4p4d(3/2, 3/2)o3	4p4f(1/2, 7/2)3	4475179	5148580	1.03-3	3.10+08	Bi89
148.466	3	4	4475179	5148733	4.93-3	1.16+09	Bi89
132.969	2	3	4396524	5148580	1.97-3	5.30+06	Bi89
141.256	4s4d(1/2, 3/2)2	4p4d(1/2, 3/2)o2	2817511	3525445	3.70-2	1.24+10	Bi89
135.853	1	2	2789353	3525445	8.82-2	1.91+10	Bi89
117.480	2	1	2817511	3668719	5.92-2	4.77+10	Bi89
113.718	1	1	2789353	3668719	2.42-2	1.25+10	Bi89
141.190	4s4p(1/2, 3/2)o1	4p23P1	1649371	2357638	1.18-2	3.95+09	Bi89
117.041	2	1	1503238	2357638	6.28-2	5.10+10	Bi89
63.525	1	2	1649371	3223547	7.97-1	7.90+11	Bi89
58.129	2	2	1503238	3223547	1.67-1	3.29+11	Bi89
139.222	4s4p(1/2, 3/2)o1	4p21D2	1649371	2367648	6.66-2	1.38+10	Bi89
115.686	2	2	1503238	2367648	6.65-2	3.32+10	Bi89

$\lambda(\text{\AA})$	Classification		Energy Levels(cm^{-1})		gf	$gA(\text{s}^{-1})$	Ref
137.484	4s4f(1/2, 7/2)o3	4p4f(1/2, 5/2)3	4355122	5082477	2.75-3	9.69+08	Bi89
132.537	4	3	4327969	5082477	7.07-5	3.45+07	Bi89
129.769	3	2	4355122	5125724	2.59-3	1.44+09	Bi89
132.186	4s210	4s4p(1/2, 1/2)o1	0	756507	1.40-1	1.79+10	Bi89 Cu92
130.373	4s4d(1/2, 5/2)2	4p4d(1/2, 5/2)o3	3004370	3771398	7.87-2	2.21+10	Bi89
129.896	2	2	3004370	3774217	1.70-2	6.73+09	Bi89
123.016	32	3	2958497	3771398	5.09-2	2.24+10	Bi89
122.591	3	2	2958497	3774217	6.33-2	3.93+10	Bi89
127.878	4s4f(1/2, 5/2)o2	4p4f(1/2, 5/2)3	4300482	5082477	1.24-1	3.62+10	Bi89
123.497	3	3	4272740	5082477	4.78-2	2.09+10	Bi89
121.177	2	2	4300482	5125724	2.76-2	1.26+10	Bi89
117.236	3	2	4272740	5125724	4.65-2	3.16+10	Bi89
126.031	4s4f(1/2, 7/2)o3	4p4f(1/2, 7/2)3	4355122	5148580	2.73-2	1.15+10	Bi89
126.006	3	4	4355122	5148733	1.31-1	4.28+10	Bi89
121.860	4	3	4327969	5148580	5.45-2	3.15+10	Bi89
121.838	4	4	4327969	5148733	5.38-2	2.42+10	Bi89
117.911	4s4f(1/2, 5/2)o2	4p4f(1/2, 7/2)3	4300482	5148580	1.81-5	6.22+06	Bi89
114.176	3	3	4272740	5148580	2.22-5	1.14+07	Bi89
114.156	3	4	4272740	5148733	6.94-4	2.76+08	Bi89
117.895	4s4p(1/2, 1/2)o1	4p23P0	756507	1604720	8.85-2	1.28+11	Bi89
62.456	1	1	756507	2357638	9.65-2	1.65+11	Bi89
60.257	0	1	698086	2357638	5.15-1	3.15+11	Bi89
40.534	1	2	756507	3223547	8.89-3	2.17+10	Bi89
104.834	4s4d(1/2, 3/2)2	4p4d(1/2, 5/2)o3	2817511	3771398	6.04-3	2.62+09	Bi89
104.525	2	2	2817511	3774217	2.37-3	1.45+09	Bi89
101.537	1	2	2789353	3774217	2.54-5	9.86+06	Bi89
95.311	4p23P2	4s4f(1/2, 5/2)o3	3223547	4272740	5.06-3	2.65+09	Bi89
92.856	2	2	3223547	4300482	2.96-4	2.29+08	Bi89
51.471	1	2	2357638	4300482	2.25-2	3.40+10	Bi89
88.372	4p23P2	4s4f(1/2, 7/2)o3	3223547	4355122	1.65-4	1.01+08	Bi89
87.721	4s4p(1/2, 3/2)o1	4s4d(1/2, 3/2)1	1649371	2789353	2.01-2	1.75+10	Bi89
85.606	1	2	1649371	2817511	5.57-4	3.04+08	Bi89
77.754	2	1	1503238	2789353	3.98-3	7.31+09	Bi89
76.088	2	2	1503238	2817511	1.76-2	2.03+10	Bi89
86.371	4p21D2	4p4d(1/2, 3/2)o2	2367648	3525445	4.62-2	4.13+10	Bi89
76.860	2	1	2367648	3668719	5.02-4	9.45+08	Bi89
85.700	4p21S0	4p4d(3/2, 3/2)o1	3261337	4428197	2.66-2	8.05+09	Bi89

中井他：高電離タンタリウムおよびタングステンイオンのスペクトルデータ

$\lambda(\text{\AA})$	Classification		Energy Levels(cm^{-1})		gf	$gA(\text{s}^{-1})$	Ref
85.253	4p23P2	4p4d(3/2, 3/2)o2	3223547	4396524	1.98-2	1.82+10	Bi89
83.012	2	1	3223547	4428197	1.72-2	2.77+10	Bi89
79.896	2	3	3223547	4475179	3.98-3	2.97+09	Bi89
49.046	1	2	2357638	4396524	2.63-1	4.37+11	Bi89
48.537	1	0	2357638	4417909	1.04-1	8.80+11	Bi89
48.296	1	1	2357638	4428197	2.56-1	7.31+11	Bi89
35.417	0	1	1604720	4428197	2.48-5	4.40+07	Bi89
78.841	4s4d(1/2, 5/2)2	4s4f(1/2, 5/2)o3	3004370	4272740	1.75-3	1.34+09	Bi89
77.154	2	2	3004370	4300482	3.19-3	3.58+09	Bi89
76.089	3	3	2958497	4272740	8.89-3	1.02+10	Bi89
74.516	3	2	2958497	4300482	2.30-3	3.86+09	Bi89
76.437	4p4d(1/2, 5/2)o2	4p4f(1/2, 5/2)3	3774217	5082477	2.43-4	1.99+08	Bi89
76.273	3	3	3771398	5082477	1.16-2	1.32+10	Bi89
73.992	2	2	3774217	5125724	1.26-2	1.53+10	Bi89
73.837	3	2	3771398	5125724	6.33-4	1.09+09	Bi89
74.909	4p23P2	4p4d(3/2, 5/2)o2	3223547	4558497	7.14-2	8.48+10	Bi89
68.536	2	1	3223547	4682638	5.93-2	1.40+11	Bi89
68.142	2	3	3223547	4691076	9.06-1	9.30+11	Bi89
45.437	1	2	2357638	4558497	6.86-3	1.33+10	Bi89
43.011	1	1	2357638	4682638	2.56-3	9.23+09	Bi89
32.489	0	1	1604720	4682638	1.15-3	2.42+09	Bi89
74.033	4s4d(1/2, 5/2)2	4s4f(1/2, 7/2)o3	3004370	4355122	1.75-1	1.52+11	Bi89
73.021	3	4	2958497	4327969	1.10-1	1.07+11	Bi89
71.601	3	3	2958497	4355122	3.52-2	4.58+10	Bi89
73.801	4s4p(1/2, 3/2)o1	4s4d(1/2, 5/2)2	1649371	3004370	1.52-1	1.11+11	Bi89
68.716	2	3	1503238	2958497	3.84-1	3.87+11	Bi89
66.616	2	2	1503238	3004370	1.33-1	2.00+11	Bi89
72.761	4p4d(1/2, 5/2)o2	4p4f(1/2, 7/2)3	3774217	5148580	2.72-1	2.45+11	Bi89
72.612	3	3	3771398	5148580	2.48-2	3.14+10	Bi89
72.604	3	4	3771398	5148733	1.65-1	1.62+11	Bi89
71.831	4s4d(1/2, 5/2)2	4p4d(3/2, 3/2)o2	3004370	4396524	1.61-3	2.08+09	Bi89
70.233	2	1	3004370	4428197	6.14-3	1.38+10	Bi89
69.540	3	2	2958497	4396524	1.55-3	2.99+09	Bi89
67.990	2	3	3004370	4475179	8.13-2	8.38+10	Bi89
65.933	3	3	2958497	4475179	3.64-2	5.58+10	Bi89
71.238	4p21D2	4p4d(1/2, 5/2)o3	2367648	3771398	2.37-1	2.23+11	Bi89
71.095	2	2	2367648	3774217	4.51-2	5.96+10	Bi89
70.358	4p21S0	4p4d(3/2, 5/2)o1	3261337	4682638	8.77-1	3.94+11	Bi89
68.718	4s4d(1/2, 3/2)2	4s4f(1/2, 5/2)o3	2817511	4272740	2.73-2	2.75+10	Bi89
67.432	2	2	2817511	4300482	6.00-2	8.80+10	Bi89
66.176	1	2	2789353	4300482	2.21-1	2.02+11	Bi89
68.634	4p4d(1/2, 3/2)o1	4p4f(1/2, 5/2)2	3668719	5125724	2.41-1	2.05+11	Bi89
64.225	2	3	3525445	5082477	2.88-1	3.33+11	Bi89
62.489	2	2	3525445	5125724	5.44-2	9.29+10	Bi89

λ (Å)	Classification		Energy Levels(cm ⁻¹)		gf	gA(s ⁻¹)	Ref
65.036	4s4d(1/2, 3/2)2	4s4f(1/2, 7/2)o3	2817511	4355122	1.38-1	1.55+11	Bi89
64.345	4s4d(1/2, 5/2)2	4p4d(3/2, 5/2)o2	3004370	4558497	3.34-1	5.38+11	Bi89
64.109	3	4	2958497	4518328	5.04-1	6.36+11	Bi89
62.500	3	2	2958497	4558497	4.01-2	9.58+10	Bi89
59.585	2	1	3004370	4682638	9.47-2	2.97+11	Bi89
59.287	2	3	3004370	4691076	7.04-2	9.54+10	Bi89
57.717	3	3	2958497	4691076	9.05-2	1.81+11	Bi89
63.331	4s4d(1/2, 3/2)2	4p4d(3/2, 3/2)o2	2817511	4396524	4.39-2	7.31+10	Bi89
62.221	1	2	2789353	4396524	3.43-1	3.55+11	Bi89
62.085	2	1	2817511	4428197	4.16-2	1.20+11	Bi89
61.404	1	0	2789353	4417909	8.37-2	4.44+11	Bi89
61.019	1	1	2789353	4428197	2.06-1	3.69+11	Bi89
60.326	2	3	2817511	4475179	5.48-1	7.18+11	Bi89
62.068	4s4p(1/2, 1/2)o1	4p21D2	756507	2367648	2.44-1	2.53+11	Bi89
62.036	4s4p(1/2, 3/2)o1	4p21S0	1649371	3261337	1.69-1	8.80+11	Bi89
61.609	4p4d(1/2, 3/2)o2	4p4f(1/2, 7/2)3	3525445	5148580	1.50-5	1.88+07	Bi89
60.629	4s21S0	4s4p(1/2, 3/2)o1	0	1649371	1.14+0	6.87+11	Bi89 Cu92 Se89
57.439	4s4d(1/2, 3/2)2	4p4d(3/2, 5/2)o2	2817511	4558497	1.29-2	2.60+10	Bi89
56.525	1	2	2789353	4558497	4.42-3	5.54+09	Bi89
53.616	2	1	2817511	4682638	4.50-3	1.74+10	Bi89
53.374	2	3	2817511	4691076	2.04-2	3.41+10	Bi89
52.818	1	1	2789353	4682638	2.26-3	5.41+09	Bi89
52.491	4p21D2	4s4f(1/2, 5/2)o3	2367648	4272740	1.32-1	2.29+11	Bi89
51.737	2	2	2367648	4300482	1.66-2	4.12+10	Bi89
50.315	4p21D2	4s4f(1/2, 7/2)o3	2367648	4355122	2.11-2	3.97+10	Bi89
49.288	4p21D2	4p4d(3/2, 3/2)o2	2367648	4396524	1.83-1	5.02+11	Bi89
48.531	2	1	2367648	4428197	2.38-2	1.12+11	Bi89
47.449	2	3	2367648	4475179	2.19-1	4.63+11	Bi89
49.192	4s4p(1/2, 1/2)o1	4s4d(1/2, 3/2)1	756507	2789353	1.18-1	3.24+11	Bi89
48.520	1	2	756507	2817511	6.03-1	1.03+12	Bi89
47.818	0	1	698086	2789353	6.29-1	6.12+11	Bi89
45.644	4p21D2	4p4d(3/2, 5/2)o2	2367648	4558497	1.08-3	3.44+09	Bi89
43.197	2	1	2367648	4682638	9.64-4	5.74+09	Bi89
43.040	2	3	2367648	4691076	2.36-2	6.07+10	Bi89
44.487	4s4p(1/2, 1/2)o1	4s4d(1/2, 5/2)2	756507	3004370	2.76-2	5.58+10	Bi89
39.923	4s4p(1/2, 1/2)o1	4p21S0	756507	3261337	7.33-4	9.21+09	Bi89
28.766	4s4p(1/2, 3/2)o1	4p4f(1/2, 5/2)2	1649371	5125724	1.12-4	5.39+08	Bi89
27.939	2	3	1503238	5082477	5.77-8	3.52+05	Bi89
27.605	2	2	1503238	5125724	8.96-6	7.84+07	Bi89

中井他：高電離タンタリウムおよびタングステンイオンのスペクトルデータ

$\lambda(\text{\AA})$	Classification		Energy Levels(cm^{-1})		gf	$gA(\text{s}^{-1})$	Ref
27.432	4s4p(1/2, 3/2)o2	4p4f(1/2, 7/2)3	1503238	5148580	2.43-5	1.54+08	Bi89
27.257	4s21S0	4p4d(1/2, 3/2)o1	0	3668719	1.83-4	5.48+08	Bi89
22.887	4s4p(1/2, 1/2)o1	4p4f(1/2, 5/2)2	756507	5125724	2.40-4	1.84+09	Bi89
22.583	4s21S0	4p4d(3/2, 3/2)o1	0	4428197	1.46-8	6.34+04	Bi89
21.355	4s21S0	4p4d(3/2, 5/2)o1	0	4682638	2.88-4	1.41+09	Bi89

Table 4 Energy levels of Ta XLIV and W XLV (Zn sequence)
Ground state: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 \ ^1S_0$

Ta XLIV				W XLV			
Configuration	Term	J	Level(cm ⁻¹)	Configuration	Term	J	Level(cm ⁻¹)
4s ²	¹ S	0	0	4s ²	¹ S	0	0
4s4p	(1/2, 1/2) ^o	0	679919	4s4p	(1/2, 1/2) ^o	0	698086
		1	736644			1	756507
4s4p	(1/2, 3/2) ^o	2	1428770	4s4p	(1/2, 3/2) ^o	2	1503238
		1	1572492			1	1649371
4p ²	³ P	0	1563905	4p ²	³ P	0	1604720
		1	2261779			1	2357638
		2	3077754			2	3223547
4p ²	¹ D	2	2271535	4p ²	¹ D	2	2367648
4s4d	(1/2, 3/2)	1	2686538	4s4d	(1/2, 3/2)	1	2789353
		2	2713034			2	2817511
4s4d	(1/2, 5/2)	3	2843773	4s4d	(1/2, 5/2)	3	2958497
		2	2882360			2	3004370
4p ²	¹ S	0	3107643	4p ²	¹ S	0	3261337
4p4d	(1/2, 3/2) ^o	2	3403556	4p4d	(1/2, 3/2) ^o	2	3525445
		1	3543804			1	3668719
4p4d	(1/2, 5/2) ^o	3	3635361	4p4d	(1/2, 5/2) ^o	3	3771398
		2	3638754			2	3774217
4s4f	(1/2, 5/2) ^o	3	4120757	4s4f	(1/2, 5/2) ^o	3	4272740
		2	4153285			2	4300482
4s4f	(1/2, 7/2) ^o	4	4176392	4s4f	(1/2, 7/2) ^o	4	4327969
		3	4204996			3	4355122
4p4d	(3/2, 3/2) ^o	2	4220572	4p4d	(3/2, 3/2) ^o	2	4396524
		0	4238022			0	4417909
		1	4248032			1	4428197
		3	4299923			3	4475179
4p4d	(3/2, 5/2) ^o	4	4332577	4p4d	(3/2, 5/2) ^o	4	4518328
		2	4367614			2	4558497
		1	4489562			1	4682638
		3	4504312			3	4691076
4p4f	(1/2, 5/2)	3	4918932	4p4f	(1/2, 5/2)	3	5082477
		2	4960657			2	5125724
4p4f	(1/2, 7/2)	4	4980394	4p4f	(1/2, 7/2)	3	5148580
		3	4980868			4	5148733
Ionization Energy			18420000	Ionization Energy			19240000