

# ニッケル様イオンの禁制線の観測

中村信行研究室 松尾駿

## 1 章 背景と目的

### 1.1 多価イオン

一般に多価イオンとは2価以上の正、負イオンのことを言う。多価イオンは非常に不安定であり、また生成に必要なエネルギーが大きいため地球のような低温環境で存在しておらず、太陽コロナや核融合炉内の高温プラズマ中に存在している。高温プラズマを理解するうえで多価イオンに対する理解が不可欠である。

### 1.2 プラズマ素過程

一般にプラズマとは、気体の加熱により分子の運動エネルギーが増大することで粒子間の衝突が活発になり、電子と正イオンが飛び交うような状態を指す。高温プラズマは電子と多価イオンで構成されており、その発光は主に多価イオンの発光によるものである。プラズマ中では残留ガスとの電荷交換や電子衝突による電離などの様々な原子過程によって多価イオンの価数の変化がみられる。

### 1.3 禁制遷移

一般に2つの状態間の遷移が電気双極子遷移の選択規則を満たす場合は許容遷移、それ以外は禁制遷移と呼ばれる。等電子系列における多価イオンの禁制線の遷移確率は原子番号が大きくなるにつれて大きくなる。原子番号の大きいものではその遷移確率は許容遷移に匹敵するほどになりうる[1]。

### 1.4 Ni 様多価イオン

Ni 様多価イオンは図 1.1 のような基底状態において  $3d^{10}$  の電子配置を持つ閉殻構造をとり、第一励起状態である  $3d^9 4s$  から基底状態への遷移は禁制線となる。 $3d^9 4s$  より上準位において基底状態への禁制が強いものは直接基底状態に遷移せず、連鎖的にエネルギーの低い状態に遷

移し第一励起状態である  $3d^9 4s$  で準安定状態となる。 $3d^9 4s$  準位から生じる禁制線の発光強度は強い電子密度依存性を持つため、許容遷移との強度を比較することでプラズマ密度診断が可能である。

また、 $3d^9 4s$  の微細構造準位の中でも最も低いエネルギーを持つ最低励起状態である  $3d^9 4s (J=3)$  は磁気八重極子遷移によってしか脱励起することができない。この磁気八重極子遷移は他の禁制遷移と比べて非常に長い寿命を持つため、プラズマ中では放射脱励起する前に電子衝突電離、励起を起こしやすく、平衡電荷に大きな影響を与える[2]。

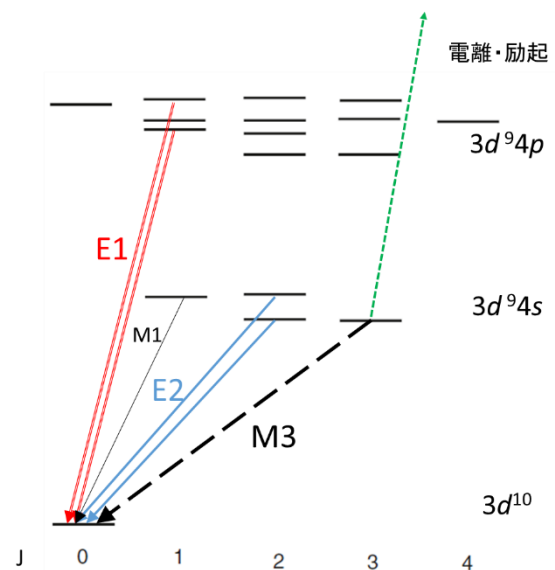


図 1.1 Ni 様多価イオンの  $3d^{10}$ 、 $3d^9 4s$ 、 $3d^9 4p$  のエネルギー準位図

### 1.5 本研究の目的

先行研究として電子ビームイオントラップを用いて Ni 様 Mo 多価イオンの発光スペクトルの観測がされている。その結果、Ni 様 Mo 多価イオンのイオン化エネルギーより低い電子ビームエネルギーにおいて Ni 様多価イオンよりも価数が1つ高い Co 様多価イオンと思われる発光が観測

された。[3]

それは  $3d^9 4s$  ( $J=3$ ) 準位を介した電離の寄与であると考えられている。そのような間接電離の寄与は  $3d^9 4s$  ( $J=3$ ) 準位の磁気八重極子の寿命によって変化するため、本研究では原子番号依存性を実験的に示すことを目的として複数の元素の Ni 様多価イオンの観測を行った。また、Co 様多価イオンと思われる発光が不純物による発光でなく長寿命な準位を介した間接電離による発光であることを確認することも目的としている。

## 2章 実験

### 2.1 電子ビームイオントラップ (Electron Beam Ion Trap:EBIT)

我々の研究室ではEBITを用いて多価イオンを生成している。EBITの多価イオン生成原理図を図2.1に示す。EBITは大きく分けて電子銃、3つの電極から成るドリフトチューブ(DT)、電子コレクターでできている。DTの周囲には超伝導コイルが設置されており、超伝導コイルによって生成される磁場によって電子銃から放出した電子を高密度に圧縮する。圧縮されたビームによる空間電荷ポテンシャルによって多価イオンを動径方向に閉じこめることができる。また、DT1, DT3の電位をあげてDT2の電位を下げることで井戸型ポテンシャルが形成されるため軸方向にも多価イオンを閉じ込めることができる。閉じ込めたイオンに電子ビームが次々と衝突することで逐次電離が起きる。ここでイオン化に寄与しなかった電子はDTを通過し電子コレクターによって回収される。

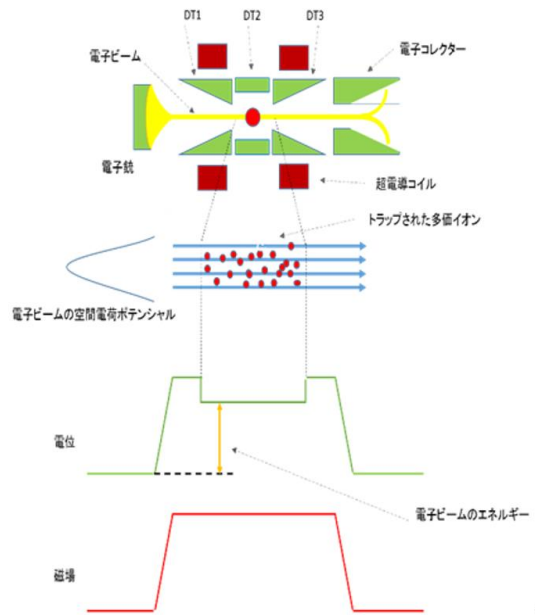


図 2.1 EBIT の多価イオン生成原理図

## 3章 結果

実験により得られた Zr の発光スペクトルを図 3.1 に示す。また、Flexible Atomic Code (FAC) と呼ばれる計算コードを用いて遷移波長の求め図 3.2 に示した。その結果を参考にして波長の同定を行った。

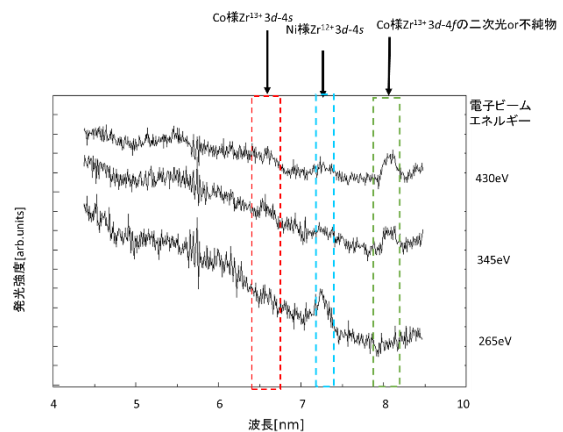


図 3.1 電子ビームエネルギー265eV、345eV、430eVにおいて観測された波長 4.8-8.8nm 付近での Zr のスペクトル

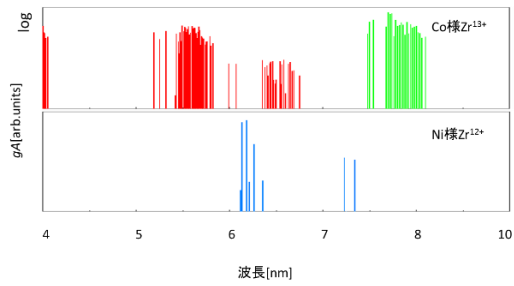


図 3.2 Zr の Ni、Co 様多価イオンの FAC 計算結果。横軸は波長、縦軸は  $gA$  値。縦軸は対数をとっている。赤と緑のラインが Co 様多価イオン、青いラインが Ni 様多価イオンである。緑のラインは  $3d-4f$  遷移の波長の 2 次光である。

波長 7.6nm 付近で  $Zr^{12+}$  の  $3d^9 4s$  から基底準位へ電気四重極子遷移の発光が見られた。また、波長 6.8nm 付近において  $Zr^{13+}$  の  $3d^8 4s$  から基底準位へ電気四重極子遷移と思われる発光が見られた。 $Zr^{13+}$  の発光だとすると生成するのに必要とされるイオン化エネルギー以下の条件で  $Zr^{13+}$  の発光を観測することができる。それと同時に  $Zr^{12+}$  の  $3d^9 4s$  から基底準位への遷移の発光の強度が弱くなっているので  $3d^9 4s \ ^3D_3$  の電子配置から間接電離が起きることによって 1 つ上の価数ができたと考えられる。

同様に、Mo の発光スペクトルと計算値をそれぞれ図 3.3、3.4 に示した。

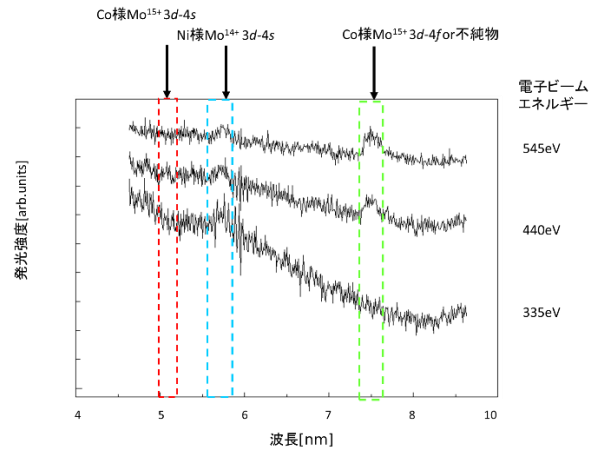


図 3.3 電子ビームエネルギー335eV、440eV、545eV において観測された波長 4.8-8.8nm 付近での Mo のスペクトル

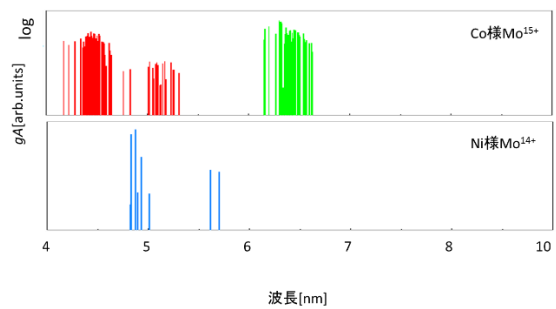


図 3.4 Mo の Ni、Co 様多価イオンの FAC 計算結果。縦軸は対数をとっている。

波長 5.8nm 付近において  $Mo^{14+}$  の  $3d^9 4s$  から基底準位への電気四重極子遷移の発光が見られた。また、 $Mo^{15+}$  を生成するのに必要とされるイオン化エネルギー以下の条件で  $Mo^{15+}$  の電気四重極子遷移の発光を観測することができる。しかしながら、8nm 付近において  $Mo^{15+}$  と同じ挙動をしながらも、FAC の計算値から準位を同定することが出来なかった遷移があった。これは FAC で考慮した準位が足りなかったためだと思われる。

次に波長 10-15nm 付近での Kr のスペクトルと計算値を図 3.5、3.6 に示した。これまでのところ電子ビームエネルギー

230eV でのスペクトルしか観測できてない。

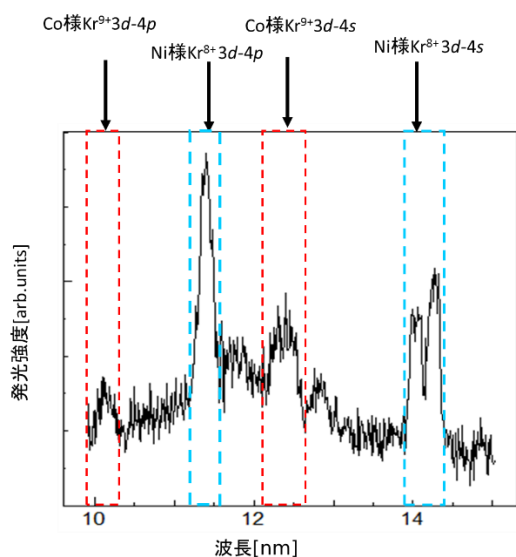


図 3.5 電子ビームエネルギー230eVにおいて観測された波長 10-15nm 付近での Kr のスペクトル

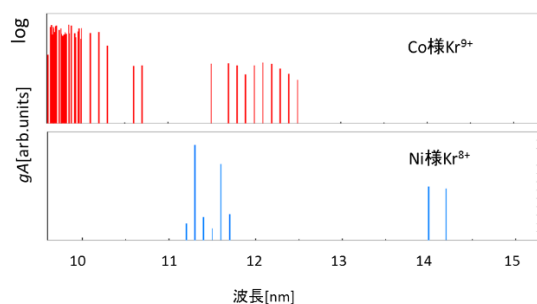


図 3.4 Kr の Ni、Co 様多価イオンの FAC 計算結果。縦軸は対数をとっている。

波長 11.4、14.1nm 付近において、それぞれ  $Kr^{8+}$  の  $3d^9 4p$  から基底準位への電気二重極子遷と  $3d^9 4s$  から基底準位への電気四重極子遷移からの発光が見られた。また複数のエネルギーで観測したわけではないが、波長 10.2nm、12.7nm において  $Kr^{9+}$  を生成するのに必要とされるイオン化エネルギー以下でも  $Kr^{9+}$  の発光を観測することができている。

#### 4章 結論・展望

今回の実験で Zr、Mo、Kr の  $3d^9 4s (J=2)$  から基底準位への電気四重極子遷移の発光が確認できた。Co 様多価イオンを生成するのに必要なイオン化エネルギー以下の電子ビームエネルギーで Co 様多価イオンと思われるスペクトルを観測した。これは準安定状態である  $3d^9 4s (J=3)$  が他の準位と比べて非常に長寿命であるため、電子衝突によって間接電離が起きることによって価数があがったと考えられる。また、Co 様多価イオンの  $3d-4f$  遷移の二次光か不純物の発光であるかを同定できなかったスペクトルがあった。不純物であるなら、試料を変更しても同じ波長で発光が観測される。しかし、元素ごとに異なる波長でスペクトルが見られたため不純物による発光ではないと考えられる。

今後は価数分析を行うことにより、Co 様多価イオンと思われる発光が不純物による発光でないことを確認したい。また、検出器を CCD に変え、分光器の調整を行うことでより高分解能なスペクトルの観測を試みたい。

#### 参考文献

- [1] 佐藤国憲「トカマクプラズマにおける高電離多価イオンの禁制線」(分光研究, 第 32 巻, 第 3 号, (1998))
- [2] E. Träbert, et al., Phys. Rev. A, 73, 022508 (2006)
- [3] 岸良子文、Emma Soke11、中村信行「電子ビームイオントラップによる Ni 様多価イオンの分光測定」『原子衝突学会第 40 会年会 P2-04』, 首都大学東京、2015 年 9 月