

# 金多価イオン発光線の観測

中村信行研究室 鈴木健人

## 背景と目的

重元素多価イオンの発光線は一般的にプラズマ診断やレーザー核融合などの観点で非常に重要視されている。例えば次世代エネルギー開発のプロジェクトである国際熱核融合実験炉 ITER のプラズマ分光診断ではダイバータ材であるタングステンの発光線が重要となっている。これまで我々の研究室では、過去に報告例のないタングステン発光線の観測を行って ITER プラズマの診断に有用なデータを蓄積してきたが、その中でも遷移の同定ができた発光線は一部しかない。これは  $4f$  や  $4d$  が開殻となるようなイオンの原子構造が複雑であるためであり、遷移の同定を行うには原子番号の異なる元素で等電子系列を系統的に調べることが有用な方法の一つとされている。

本研究では、タングステンと原子番号の近い金の発光線を観測し、原子番号の依存性を調べることを目的とした。そのために先行研究 [1] で既に同定されているタングステン 7 価の  $4f^{13}5p^6\ ^2F_{7/2} - ^2F_{5/2}$  遷移による発光線をタングステン 7 価と等電子系列である金 12 価で観測する実験を行った。この発光線は金 12 価では波長 330 nm 付近において観測できると理論計算で予測されている。

## 原理と実験装置

### 等電子系列

等電子系列とは同じ数の電子を持ったイオン系列のことを指す。一般に同じ遷移による発光線は原子番号が小さくなるにつれて発光線が長波長側に移動するという特徴を持っており、この特徴を利用することで原子番号の近いイオンの発光線の価数や遷移の同定の助けとなる。図 1 は原子番号 74~79 のプロメチウム様等電子系列イオンのスペクトルを表した図 [2] であり、等電子系列の特徴が顕著に表れている。

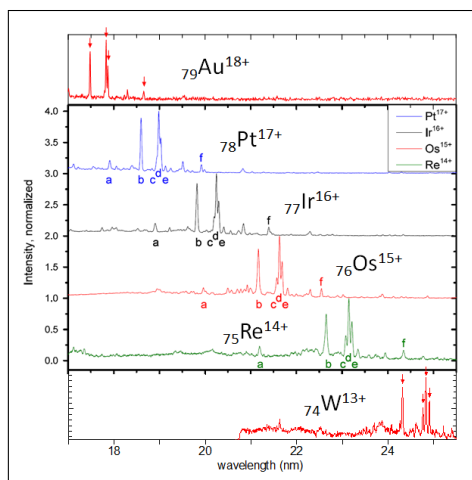


図 1: 等電子系列イオンのスペクトル [2]

## CoBIT と測定系

本研究では、低・中価数の多価イオンを生成する小型電子ビームイオントラップ (Compact Electron Beam Ion Trap :CoBIT[3]) を用いて実験を行った。CoBIT の原理を図 2 に示す。CoBIT は主に電子銃、ドリフトチューブ (DT), 電子コレクターから構成されている。DT の周りには超伝導コイルが配置しており、軸方向の強磁場を形成する。この電場によって、電子銃から放たれた電子ビームが加速され、磁力線に沿って径方向に圧縮されて DT に入射する。DT は 3 つの円筒電極に分かれており、中央の DT にかける電圧のみを下げることで井戸型ポテンシャルを生成し、軸方向にイオンをトラップすることができる。また、電子ビームの空間電荷ポテンシャルにより動径方向にイオンをトラップすることができる。このようにトラップされたイオンに電子ビームを衝突させ、逐次電離が起こることによって多価イオンが生成される。

実験に用いた測定系の概略図を図 3 に示す。可視領域での分光には反射型平面回折格子を用いた Czerny-Turner 型配置の分光器を使用した。EUV 領域では鏡面反射率が低いために反射鏡を必要とする平面回折格子を用いることができない。そこで回折格子には平面結像型不等間隔凹面回折格子を使用した。EUV 領域の発光は大気によって吸収されてしまうため、光学系は全て真空チャンバー内に収められ、真空度は  $\sim 10^{-6}$  Pa に保たれている [4]。

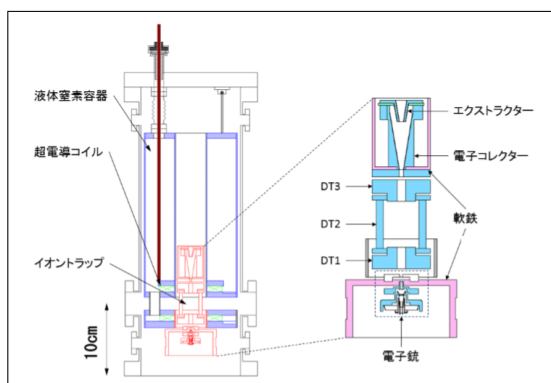


図 2: CoBIT の概略図 [3]

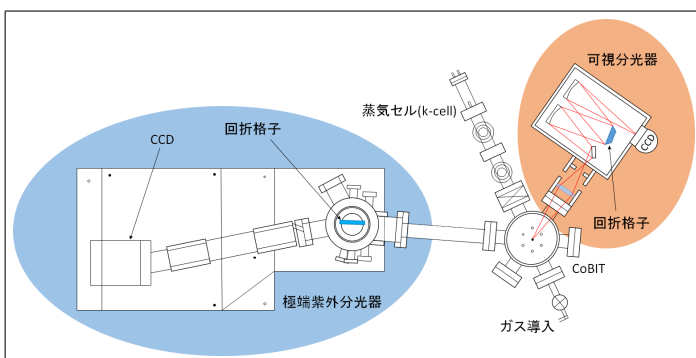


図 3: 測定系を上から見た図

## 実験

金の分光測定を行うために金を蒸着セルにて加熱し、蒸気として CoBIT 内に導入した。波長較正のため可視領域では標準ランプの発光線を、EUV 領域では鉄多価イオンの発光線を使用した。標準ランプは分光器の対向ポートに設置して観測を、鉄の分光測定にはフェロセンを導入した。電子ビームエネルギーを 220~375 eV に設定し、測定時間を 30 分として分光測定を行った。また、可視領域と EUV 領域は同時に測定し、可視領域では溝本数 300 本の回折格子を、EUV 領域では 1200 本の回折格子を用いた。

## 結果および考察

実験によって得られた EUV 領域における金のスペクトルを図 4 に示す. EUV 領域では先行研究 [5] により金の 16 価~19 価が同定されており, その発光線と比較し価数同定を行ったところ, 電子ビームエネルギー 375 eV のとき 16 価, 350 eV のとき 15 価, 280 eV のとき 14 価, 260 eV のとき 13 価, 220 eV のとき 12 価の金多価イオンが生成されていると考えられる.

実験によって得られた可視領域における金のスペクトルを図 5 に示す. EUV 領域と可視領域は同時に測定を行っており, 同じ電子ビームエネルギーで生成される価数は同じであると考えられるので電子ビームエネルギー 220 eV で金の 12 価生成されると予測できる. 220 eV で得られたスペクトルの波長 330 nm 付近に発光線が観測できている. 理論計算による値と非常に近いこと, 原子構造の違いにより金 12 価で観測できるこの発光線は強度がかなり弱いと予想されていたことから, この発光線が本実験の目的としている  $4f^{13}5p^6\ ^2F_{7/2} - \ ^2F_{5/2}$  遷移による発光線であると考えられる.

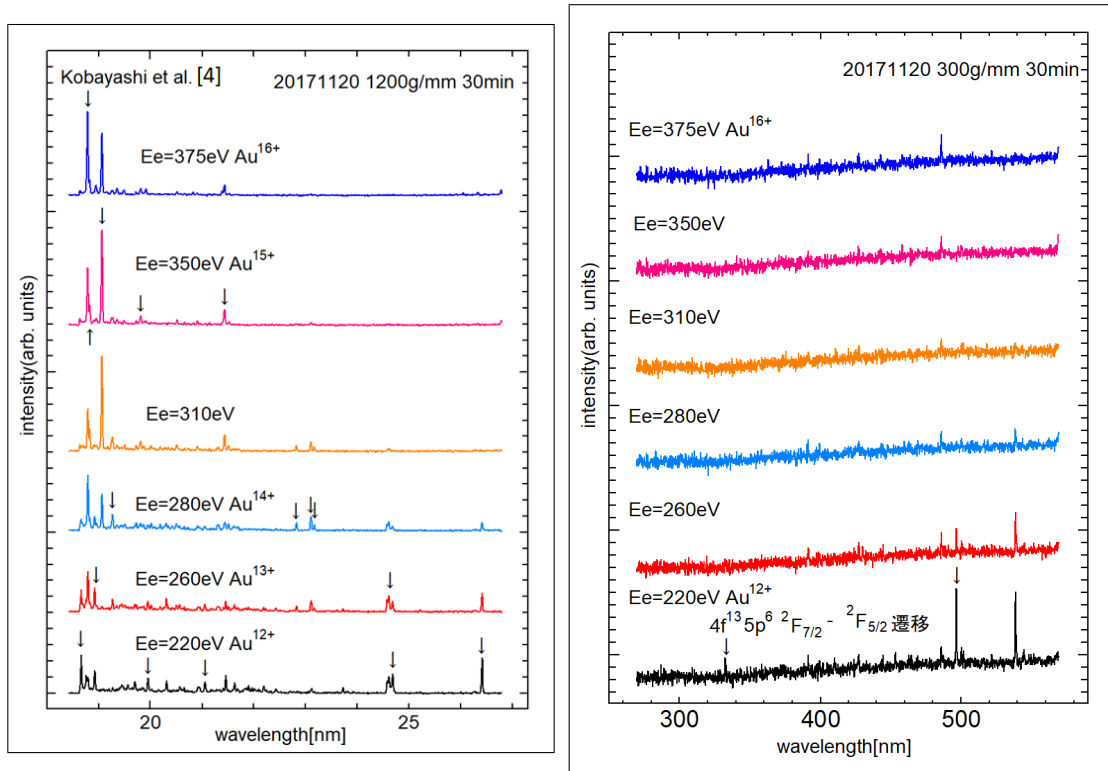


図 4: 本実験で得られた EUV 領域におけるスペクトル

図 5: 本実験で得られた可視領域におけるスペクトル

$4f^{13}5p^6\ ^2F_{7/2} - \ ^2F_{5/2}$  遷移による発光線について金 12 価とタングステン 7 価で比較を行ったものを図 6 に示す. 矢印で示されたものが  $4f^{13}5p^6\ ^2F_{7/2} - \ ^2F_{5/2}$  遷移による発光線である. 原子番号の小さいタングステンの発光線が長波長側に移動しており, 等電子系列の特徴と一致していることがわかる. また, 金で観測した発光線の強度が弱い理由としては原子番号によっては基底状態の電子配置が変化するためである. タングステン 7 価は  $4f^{13}5p^6$  が基底電子配置であるのに対し, 金 12 価では励起状態となっているため金で観測できる発光線の強度が弱くなると予想されており, これとも相違ない結果となっている.

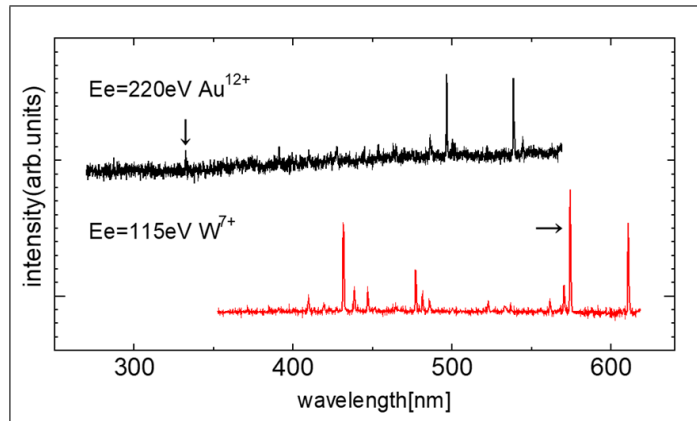


図 6: 金とタングステンによる原子番号依存性の評価

## まとめと今後の展望

本実験では小型電子ビームイオントラップを用いて金多価イオンの発光線を可視領域, EUV 領域で観測した. EUV 領域では先行研究と比較し, 良い再現性を示していることを確認するとともに各電子ビームエネルギーにおいて優勢となっている価数を同定することができ, これまでに観測例のない発光線についても観測することに成功した. 可視領域では電子ビームエネルギー 220 eV で目的とする金 12 価のイオンの発光線を観測できた. しかし強度も弱く, まだ再現性も確認できていないため, 今後はこの発光線について再現性を確認する予定である. また, タングステンと原子番号の近い金以外の元素についても発光線を観測し, 原子番号依存性を確かめていく予定である.

## 参考文献

- [1] M Mita *et al.*, *Atoms* **5**, 13 (2017)
- [2] H Bekker *et al.*, *J.Phys.B : At.Mol.Opt.Phys.* **48** 144018 (2015)
- [3] 菊池浩行氏 修士論文 (2007) 電気通信大学
- [4] 小林優介氏 修士論文 (2015) 電気通信大学
- [5] Y Kobayashi *et al.*, *Phys. Rev. A* **92**, 022510 (2015)