

# 磁気ボトル型電子分光器による BISER X 線の特性評価 Characterization of BISER X-ray by a magnetic bottle electron spectrometer

難波 慎一<sup>1)</sup>, Alexander Pirozhkov<sup>2)</sup>, 神門 正城<sup>2)</sup>  
Shinichi NAMBA<sup>1)</sup>, Alexander Pirozhkov<sup>2)</sup>, Masaki KANDO<sup>2)</sup>  
<sup>1)</sup>広島大学 <sup>2)</sup>量研

## (概要)

量子科学技術研究開発機構 (QST) 関西研の Pirozhkov らは、超短パルス高強度レーザーをガスに照射して発生する相対論的レーザープラズマから新たな高次高調波が放射されることを明らかにした。この高調波は Burst Intensification by Singularity Emitting Radiation (BISER) と名付けられ、通常の高調波と異なり、レーザー基本周波数の奇数偶数倍のスペクトルが発生する。放射機構は PIC シミュレーション法で解明され、パルス幅は~170 as と予想されている[3]。しかし、軟 X 線パルスの時間幅の実測には未だ至っていない。本研究はパルス幅計測に必要な高エネルギー分解能電子分光器を製作し、その特性評価を目的とした。具体的には、BISER X 線 (60~100 eV) と Xe 原子との相互作用で発生する 4d 内殻電離に伴うオージェ電子、光電子を観測した。

**キーワード** : BISER X-ray, 磁気ボトル型電子分光器, オージェ電子スペクトル, パルス幅計測

## 1. 目的

相対論的レーザープラズマから放射される BISER は通常の高次高調波とは異なり、奇偶数次のスペクトルからなり、その波長は keV 域まで達する[1,2]。PIC シミュレーションで、BISER 発生メカニズムやパルス幅特性が明らかにされている[1,2]。特に 170 as というパルス幅を持つ X 線源であることが示されたが、実験的には計測できていない。いわゆる、ポンプ・プローブ法のひとつである、アト秒ストリーク法でこのような短パルスのパルス幅を計測することが可能となるが、そのためには、Carrier Envelope phase (CEP) が lock されたプローブレザー、ポンプ・プローブレザー共に高い繰り返し周波数、高い分解能を有する電子分光器が不可欠である[3]。ところが、ショットごとの BISER X 線特性は異なるため、パルス幅を計測するためには、シングルショットで電子エネルギーを計測する分光器が必要となる。

本研究の目的は、検出効率が 100% である磁気ボトル型電子分光器を自作し、その特性を BISER-Xe ガス相互作用で発生する光電子、オージェ電子から評価することにある。十分なエネルギー分解能の分光器開発が成功すれば、アト秒ストリーク法に必要な 3 つの装置の内の一つが整備できたことになり、BISER シングルショットパルス幅計測が現実的なものになってくる。

## 2. 方法

図 1 に開発した磁気ボトル型電子分光器を示す。分光器は、BISER 発生用チャンバーの上部に取り付けられている。構成は主に真空チャンバーとフライト管 (1.2 m)、X 線集光点観測用チャンバーの 3 点から成る。

真空チャンバー内部にはテーパー型永久磁石 (30 mmφ) とガス噴射ノズル (0.25 mmφ) を設置した。永久磁石 (1.2 T) とソレノイドコイル (1.0 mT) によって形成されるミラー磁場により発生電子をほぼ 00% 捕獲する。電子は下方から照射される BISER ビームと Xe ガスとの相互作用で発生させ、ミラー磁場によってフライト管端点の MCP 検出器 (42 mmφ) で検出し電子分光を行う。X 線集光点観測用チャンバーは、磁石とノズルの相対位置や BISER X 線の発生スポットを正確に観測できる。構成は Mo/Si 球面/平面ミラー、X 線 CCD カメラであり、HeNe レ

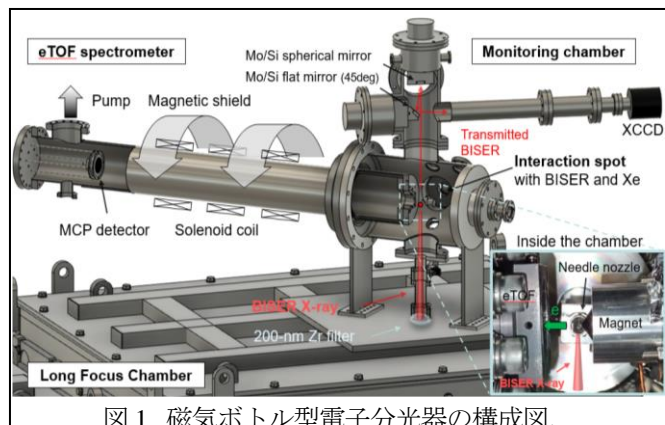


図 1. 磁気ボトル型電子分光器の構成図。

レーザーを用いて実験前にシャドウグラフで磁石とノズルの精密アライメントが可能である。図2には、実際に撮影した永久磁石、ノズル、分光器入口アパーチャ(φ3 mm), 及び、集光アライメント用のカーボンナノチューブ(CNT)の実際の位置関係を示す。CNTの先端はBISER X線の発生スポットを簡易的に示しており、レーザーはこの先端に集光される。

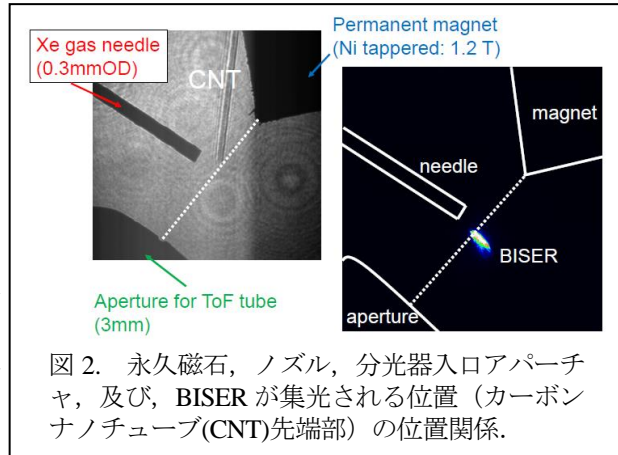


図2. 永久磁石、ノズル、分光器入口アパーチャ、及び、BISERが集光される位置(カーボンナノチューブ(CNT)先端部)の位置関係。

分光器を製作するにあたり、予め有限要素法にて発生するミラー磁場を計算し、この磁場で発生するXe 4d<sup>1</sup>内殻ホールに伴う8.26 eV オージェ電子の軌道を分子動力学により評価した。図3に装置概略と発生するミラー磁場の計算結果を示す。なお、今回対象とするエネルギー分解能の設計値は  $\Delta E = 0.36 \text{ eV}@8.26 \text{ eV}$  である。

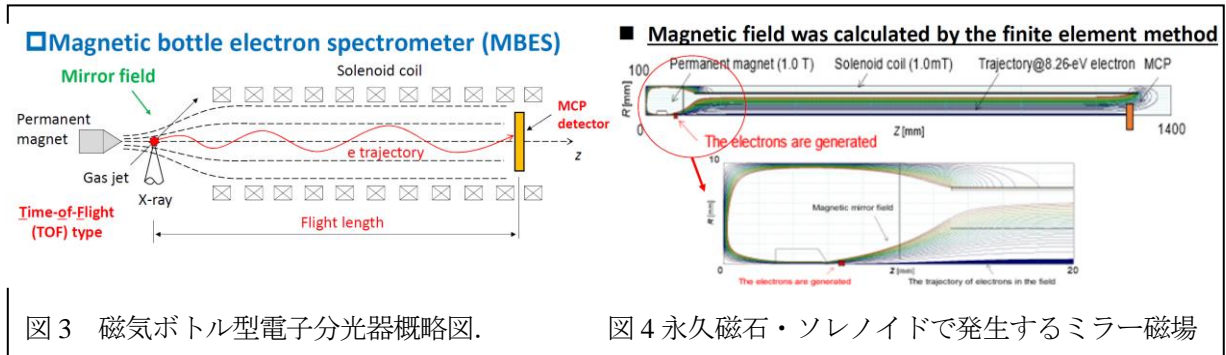


図3 磁気ボトル型電子分光器概略図。

図4 永久磁石・ソレノイドで発生するミラー磁場

### 3. 結果及び考察

理論的に予想されるオージェ電子のスペクトルを図5に示す。強度は分解能が良くなる低エネルギー側で高くなるが、電子発生量は各スペクトル分布の積分値で評価される。また、多数の次数からなるBISERをMo/Si凹面鏡、薄膜フィルタで90 eV付近のスペクトルのみを電子分光器に集光させるため、多数のXe 4d-1光電子が放出される。そこで、57次88.3 eVを中心波長とし、54次から61次までの高調波(エネルギー間隔1.32 eV)により発生する光電子スペクトルを評価した。その結果を図6に示す。ここで、Mo/Siミラーの反射率、高調波分解能を0.8 eV、電子エネルギー分布をローレンツと仮定した。

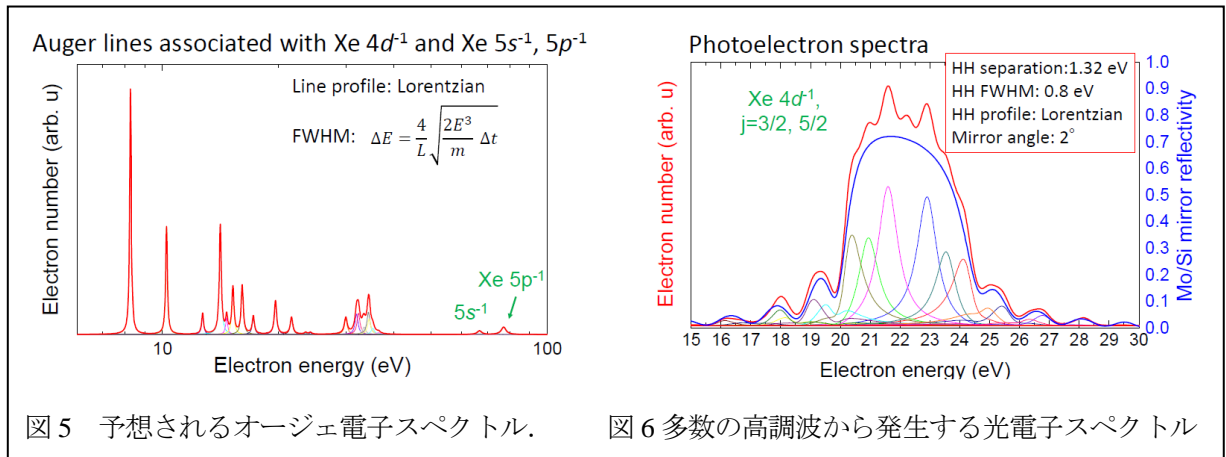
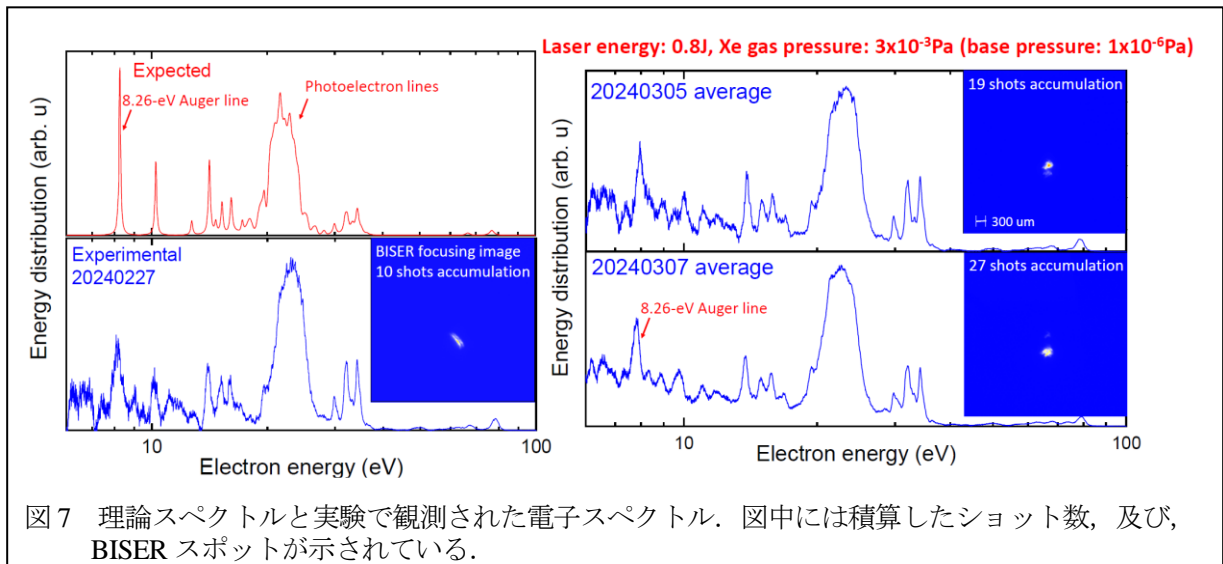


図5 予想されるオージェ電子スペクトル。

図6 多数の高調波から発生する光電子スペクトル

これらの理論から予想されるスペクトルを基にして、実験データを解析した。図7は、レーザーエネルギー約0.8 J、相互作用領域のXeガス圧 $3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ におけるXe光電子、オージェスペクトルを示す。図中には平均したショット数、及び、BISERスポット位置も示してある。光電子は多数の次数から発生するので明瞭な線スペクトルとしては観測されないが、実験値と理論値は非常に良い一致を示した。

今回、対象とする8.26-eVオージェスペクトルが高い分解能(FWHM:0.4 eV)で計測されたため、アト秒ストリークに必要な電子分光器は製作できたと判断した。



#### 4. 引用(参照)文献等

1. A. S. Pirozhkov, Phys. Rev. Lett. **108**, 135004 (2012).
2. A. S. Pirozhkov, Sci. Rep. **7**, 17968 (2017).
3. J. Itatani et al., Phys. Rev. Lett. **88**.173903 (2002).
4. S. Namba et al., AIP Advances., **5**, 117101 (2015).
5. Hikari OHIRO et al., Plasma Fusion Res. **17**, 2406020 (2023).