

ガスパフ Z ピンチプラズマからの軟 X 線放射

高杉恵一，秋山尚之¹，成澤理²，小林文成（日本大学）

Soft X-ray Radiation from a Gas-puff Z-pinch Plasma

Keiichi Takasugi, Hisashi Akiyama, Satoru Narisawa, Fuminari Kobayashi (Nihon University)

Abstract

Characteristics of soft x-ray radiation from an Ar gas-puff z-pinch plasma was investigated. The hot spot generated between the electrodes was dominated by K-shell radiations of He-like Ar ions, and the cloud structure was made up of K_{α} radiation of metal vapor. Ne-like and Na-like Ar ions were generated during the collapse, and EUV radiation was emitted by them. 13 nm radiation of Na-like Al was observed in the discharge with Al electrodes.

キーワード：Zピンチ，プラズマ，ガスパフ，軟X線，EUV，分光測定

1. はじめに

収縮型の Z ピンチはエネルギーの注入効率がよく，簡単に高温高密度プラズマを生成することができる[1]。ガスパフ Z ピンチはターゲットを交換せずに繰り返し放電を行なうことができ，また簡単にガスの種類を変えることができる。このプラズマからは紫外線から軟 X 線にわたる広い波長領域で光が放射され，半導体リソグラフィや X 線顕微鏡，結晶構造解析など，いろいろな光源として利用することができる。Ar を用いたガスパフ Z ピンチプラズマから放射される軟 X 線および極端紫外（EUV）光の分光特性，そして空間分布について報告する。

2. Z ピンチ実験装置

図 1 に SHOTGUN Z ピンチ装置の概略を示す。電源は容量 24 μF の高速コンデンサーからなり，25 kV 充電のとき 7.5 kJ の蓄積エネルギーになる。アノード側に高速ガスバルブと直径 28 mm の中空円環状のノズルが取り付けられていて，電極間に中空のガス分布を形成させることができる。ここでは放電に Ar ガスを用い，バルブ内の圧力を 0.5 MPa にして実験を行なった。電極間隔は 30 mm である。放電電流はログスキーコイルによって測定される。アノード側に取り付けられたコイルは装置に流れ込む全電流を測定し，カソード側は電極間を流れた電流を表わす。

軟 X 線の測定にはプラスチックシンチレータを用いたシンチレーションプローブ，EUV 光の測定には X 線ダイオード（XRD）を用いた。シンチレーションプローブは 10 μm の Be フィルターを用いているため，1 keV 以上のエネルギーを持つ軟 X 線にしか感じず，またエネルギーが高いほど感度が高い。XRD は Ni をカソードに用いており，20 eV ~ 5 keV の広い範囲の波長に感度があり，主に EUV 光を見ている。軟 X 線の空間分解測定にはピンホールカメラを用いた。画像の撮影には Kodak DEF フィルムを用いた。これも Be フィルターを用いているため，1 keV 以上の軟 X 線のみ感度がある。

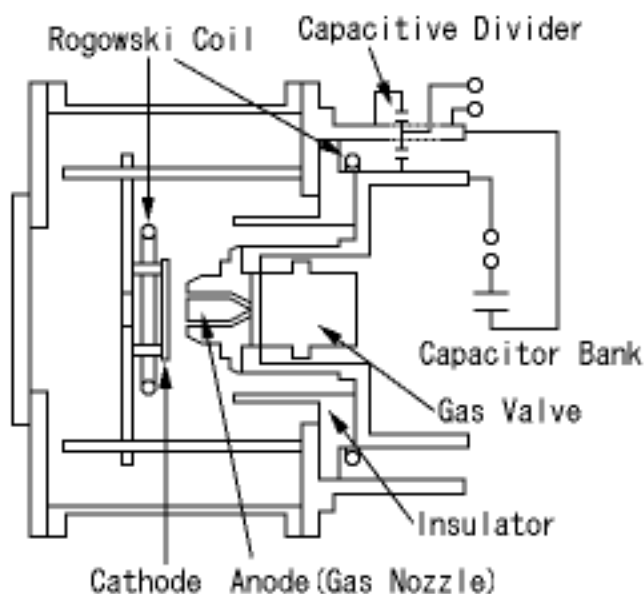


図 1 SHOTGUN Z ピンチ装置の概略

Fig.1 Schematic view of the SHOTGUN z-pinch device.

軟 X 線の分光測定にはヨハンソン型の結晶分光器，広い波長範囲の分光測定と空間分布の観測には凸型の結晶分光器を用いた。また，EUV 光の分光測定にはグレーティングを用いた斜入射分光器を用いた。これらの分光計測にも Kodak DEF フィルムを用いて記録を行なった。

3. 軟 X 線の発生

図 2 は放電電流波形と軟 X 線，EUV 光の波形である。電流のピーク値は約 230 kA である。放電開始後約 1 μs から急激に半径収縮が進み，電流波形にくぼみが生じている。このくぼみは負荷のインダクタンスの急激な増加によるもので，同時に高電圧が発生している。プラズマの半径収縮に伴って EUV 光の放射が強くなり，最大収縮時に鋭い軟 X 線パルス

¹ 現在：(株)日本エンジニアリングシステム

² 現在：(株)アルバック

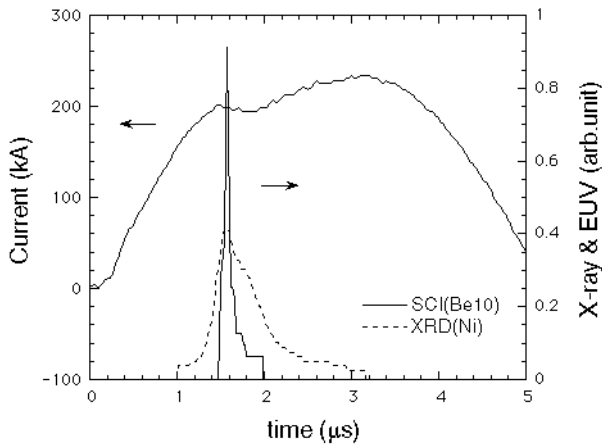


図2 放電電流, EUV光、軟X線の時間波形
Fig.2 Temporal behavior of discharge current, EUV light and soft x-ray emission.

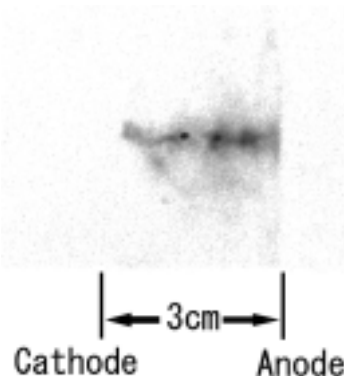


図3 Zピンチプラズマの軟X線像
Fig.3 Soft x-ray image of the z-pinch plasma.

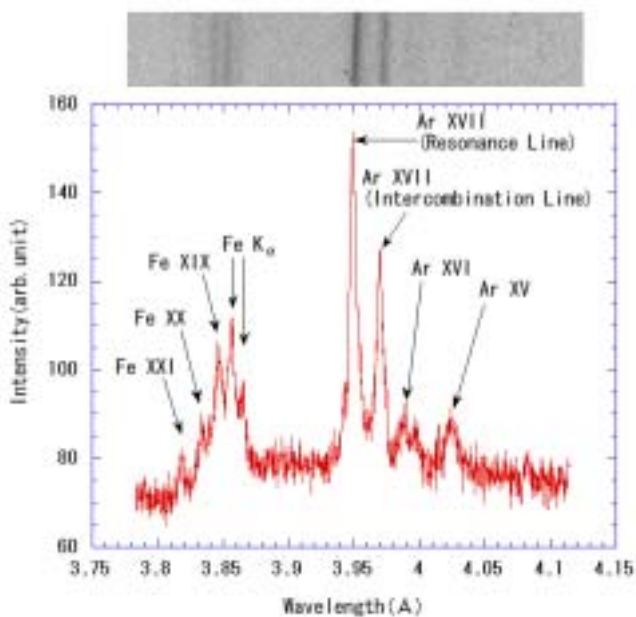


図4 Zピンチプラズマの軟X線分光スペクトル
Fig.4 Soft x-ray spectrum of the z-pinch plasma.

を生ずる。EUV光の放射時間は軟X線に比べて長いがそのピークの時刻はほぼ一致している[2]。

プラズマが最大収縮を起こす時刻はガスの量によって変化する。ガスパフから放電までの遅延時間を増大させると、ガスの量はほぼその時間に比例して増大し、最大収縮を起こす時刻も遅くなる。最大収縮を起こす時刻が遅くなれば、そのときの電流値が大きくなり、プラズマに入るエネルギーも大きくなる。この例では遅延時間0.35 msで実験を行なった。遅延時間が0.45 ms程度より大きくなるとガスの回りこみが起こり、電極間での放電ができなくなる。

図3はZピンチプラズマの軟X線ピンホール写真である。中心軸上に周期的に並んだホットスポットとその周囲に雲状の像が見える。アノード表面からも放射が見られるが、雲状構造と比べて弱い。この写真は時間積分されたものであるが、図2からわかるように軟X線は短時間にパルス的に放射されており、ホットスポットと雲状の構造は同時に形成されたものである[3]。

図4はヨハンソン型結晶分光器を用いて測定された軟X線のスペクトルである[4, 5]。結晶は石英を用いており、格子定数は $2d=6.62$ である。ローランド円の半径は250 mmである。He様Arイオンの共鳴線 (Ar XVII 3.9488) および異重項間結合線 (Ar XVII 3.9691) で強く放射されていることがわかる。これらの長波長側にLi様サテライト線 (Ar XVI 3.989) およびBe様サテライト線 (Ar XV 4.010) が見える。スペクトル線の解析の結果、プラズマの電子温度は約1 keVであることがわかった。ガスパフから放電までの遅延時間を変化させると、電子温度は0.7~1.2 keVの範囲で遅延時間とともに増大する傾向にあることがわかった。

Arイオンのスペクトルと同時にFeの K_{α} 線 (1.938, 6.398 keV) が観測された。観測されているのは2次の反射光である。 K_{α} 線の観測は中性のFe原子と電子ビームの存在を示している。この実験では電極にAlを用いており、Feはステンレス製の真空容器にしか使われていない。

4. 空間分解軟X線分光測定

高温のArプラズマと中性のFe原子の発生の起源を知るために空間分解能を持つ分光測定を行なった[6, 7]。図5は凸型の結晶分光器にスリットを取りつけたものである。スリットは放電の方向 (Z軸) と垂直になっており、Z方向の情報が波長と垂直な方向に現れるようになっている。またプラズマ

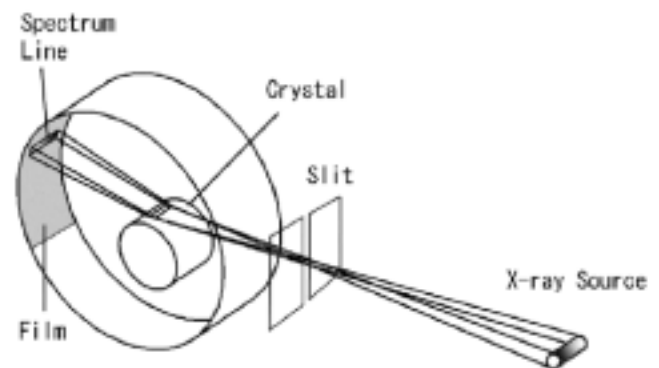
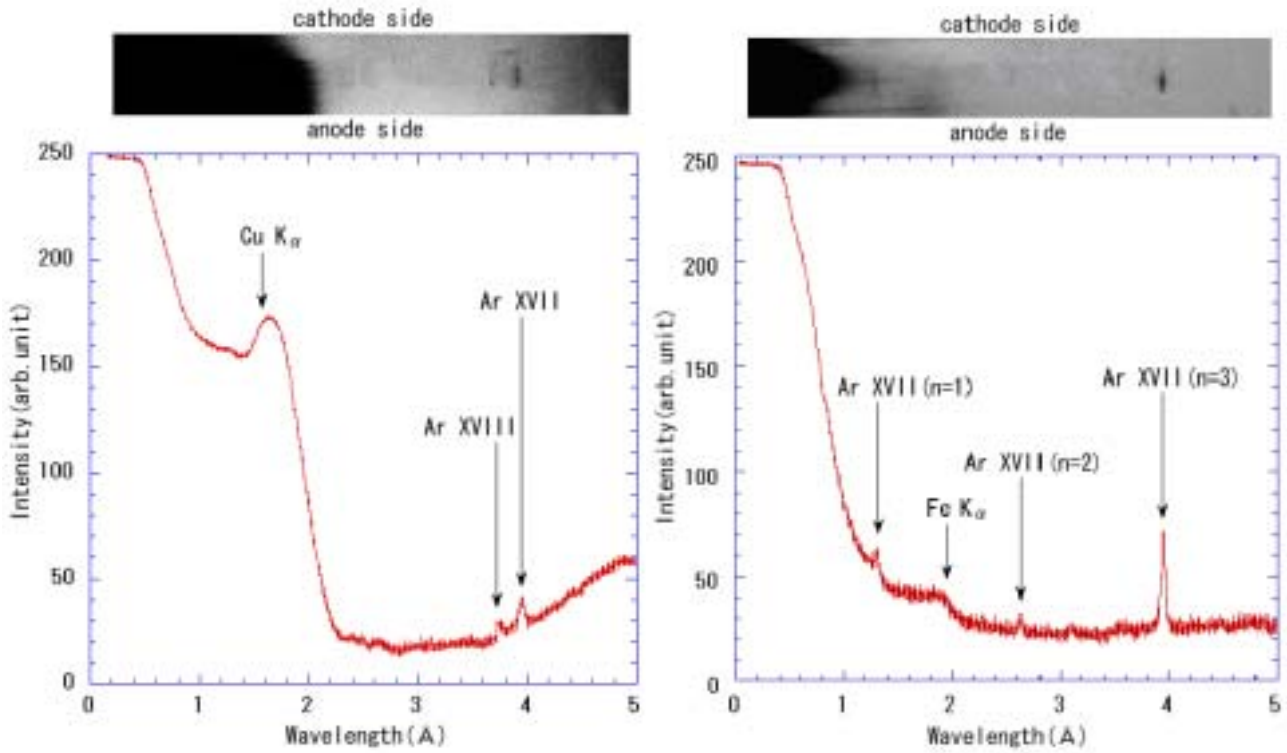


図5 垂直スリットをつけた凸型結晶分光器
Fig.5 Convex crystal spectrograph with a vertical slit.



(a) Cu electrode

(b) Al electrode

図6 空間分解能を持つ軟X線スペクトル
Fig.6 Soft x-ray spectrograms with spatial resolution.

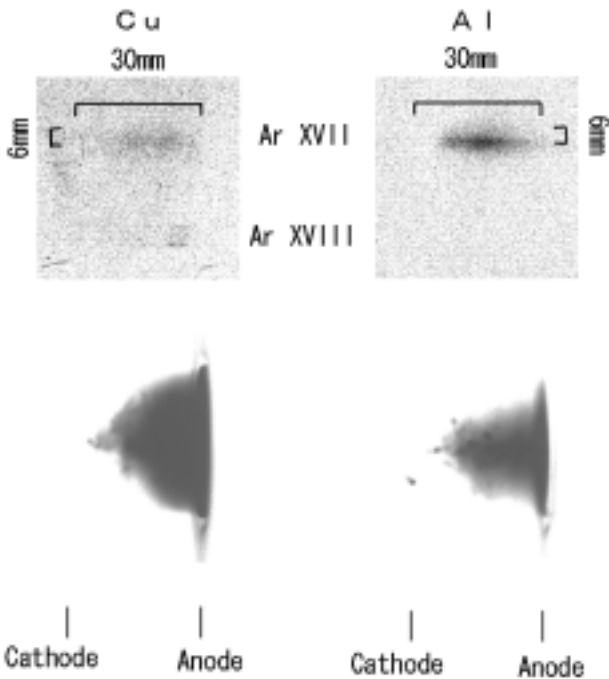


図7 Ar イオン線の空間分布と軟X線ピンホール写真
Fig.7 Spatial distributions of Ar ion spectra and soft x-ray pinhole images.

の半径方向の広がり波長方向への広がりとして現れる。結晶はマイカを用いており、格子定数は $2d=19.884$ である。結晶の曲率半径は 19.5 mm である。

図6に凸型結晶分光器による測定結果を示す。分光器が暗いため、これらのスペクトル線測定には200ショットの放電が必要であった。放電電極としてCuとAlとで比較を行った。Cu電極の場合、He様Arイオン線の他にH様Arイオン線も観測された。またCuの K_{α} 線(1.542, 8.040 keV)が観測された。スペクトル線の広がりから、Cuの K_{α} 線の半径方向の広がり30mm程度である。ArとCuのスペクトル線以外には観測している波長範囲には見つからなかった。Al電極の場合、He様Arイオン線は観測されたがH様Arイオン線は観測されなかった。またFeの K_{α} 線も観測された。スペクトル線の広がりCuの K_{α} 線と同程度である。

図7はArイオン線を拡大したものと、同時に撮影された軟X線ピンホール写真を並べて表示したものである。He様Arイオン線はZ方向にはアノードから2/3程度まで分布し、半径方向には約6mmの広がりをもっている。このデータは200ショットにわたって積分されたものであり、ホットスポットの分布とほぼ一致する。Cu電極の実験で見られたH様Arイオン線はアノード近傍にのみ存在する。ピンホール写真も同じだけ重ね撮りされたため、ホットスポットが隠されて雲状構造が強調された形になっている。雲状構造はやはりアノード側に偏ってノズル付近まで広がった分布になっている。この観測結果からピンホール写真で観測された雲状構造はCuおよびFeの K_{α} 線であると考えられる。またArイオン線はホットスポットから放射されていることがわかる。

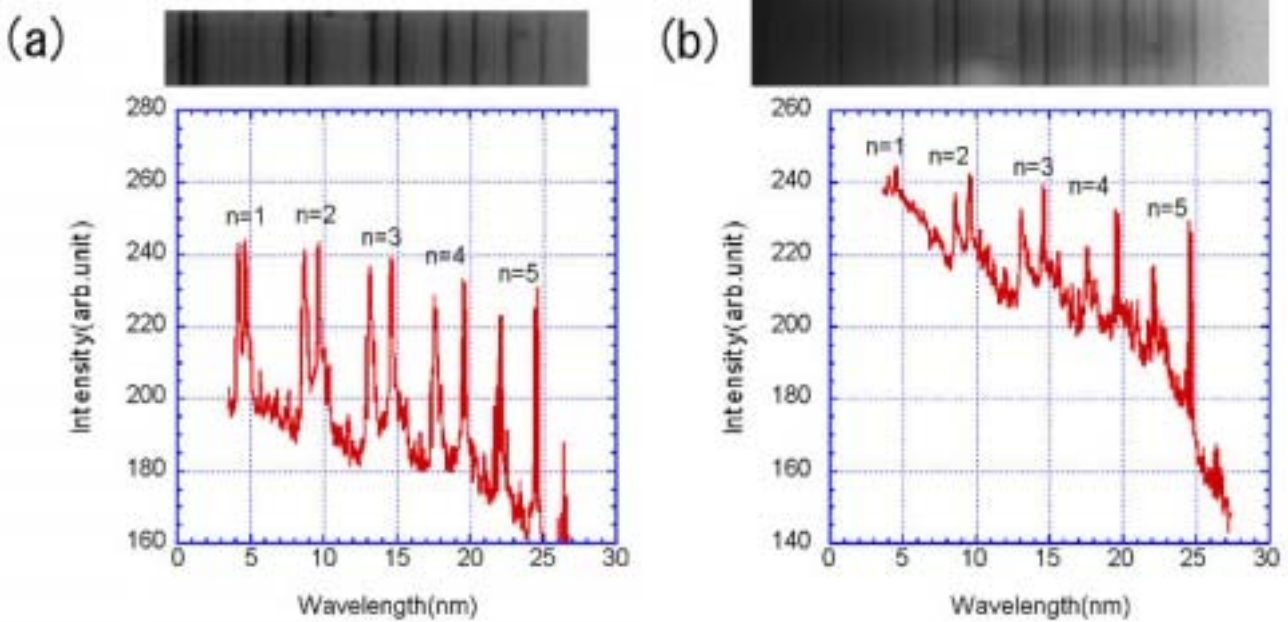


図8 (a) C電極 (b) Al電極を用いたZピンチプラズマのEUV分光スペクトル
 Fig.8 EUV spectra of the z-pinch plasma with (a) C and (b) Al electrodes.

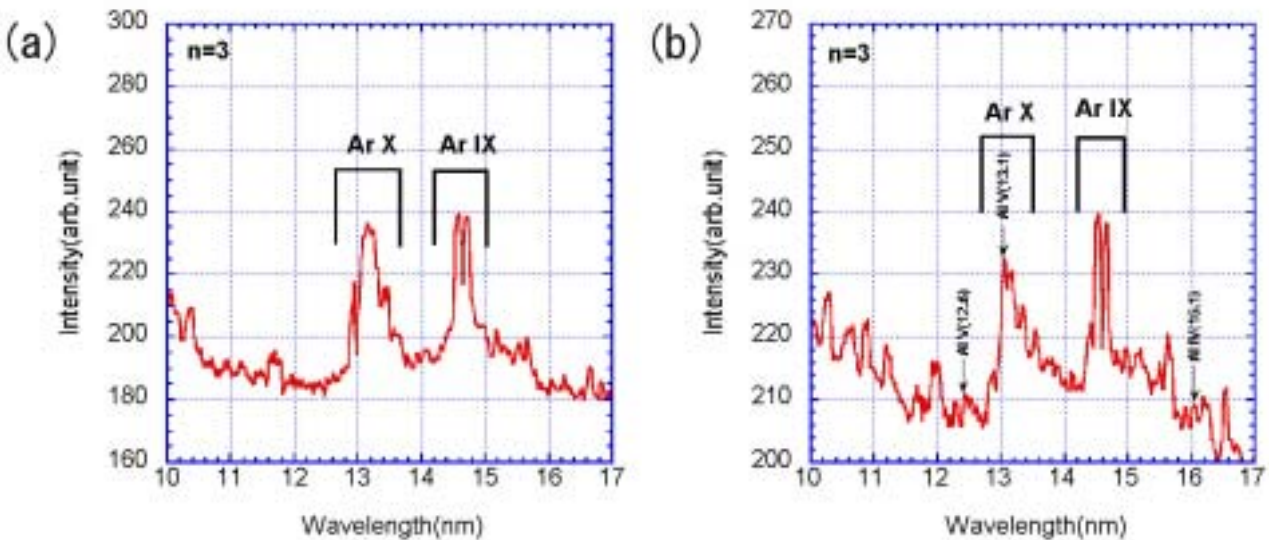


図9 EUV分光スペクトルの3次回折光付近の拡大図
 Fig.9 Detailed structures of 3rd diffraction of EUV spectra.

Cu および Fe の金属蒸気はその分布形状からアノード表面から発生したものと思われる。Cu 電極を使用した場合に Cu が発生するのは理解しやすいが、Al 電極から Fe が発生するのはステンレス容器からのスパッタリングによるものと考えられる。おそらく Al の蒸気も発生しているが、Al の K_{α} 線は測定範囲にない。Zピンチが半径収縮をした後の空間にアノードから蒸発した Cu や Fe がやってきて、電子ビームによって K_{α} 線が励起された、と考えることができる。最大収縮時にプラズマのインダクタンスの急激な変化から電極間に高電圧が生じ、電子ビームが発生したものと考えられることができる。

5 . EUV分光測定

Zピンチプラズマからは軟X線と同時にEUV光も放射されている。EUV光はホットスポットよりも広い空間領域から放射されているという結果がある[8]。また、軟X線は不安定性の成長に伴って発生し、Zピンチに縦磁場を加えて強い収縮を抑制するとホットスポットや軟X線の発生が抑制されて、EUV光の放射時間が長くなる、という結果が得られている[2]。EUV領域でのZピンチの放射特性を調べるため分光測定を行なった。

図8はEUV分光測定の結果であり、C電極とAl電極の

場合を比較している。ともに周期的な構造が現れており、高次の回折光が同時に観測されている。3次の回折光付近を拡大したのが図9である。スペクトルは多くの線の集合になっているが、だいたい2つのグループにまとまっている。1つはNa様Arイオン線(Ar X 4.327~4.503 nm), もう1つはNe様Arイオン線(Ar IX 4.873~4.918 nm)である。これ以外には強い放射は観測されなかった。C電極の場合Al電極比べてArイオンのスペクトル線が強くはっきりして、他の線は非常に弱い。Al電極の場合はArイオンのスペクトル線が比較的弱く、特にAr Xのスペクトル線が弱くなっている。また、Ar以外にも細かなスペクトル線が見える。この中でAr Xの3次の回折光と重なっているが、Na様Alイオン線(Al V 13.08 nm)のスペクトル線が観測された[9]。

Ar IXとAr Xとが同時に観測されたことから、このプラズマの電子温度は50~80 eV程度であることが推測される。ホットスポットの電子温度が1 keV程度であること、EUV光の放射時間が軟X線と比べてずっと長いことから、EUV光を放射する領域はホットスポットのように局在化しておらず、空間的に広がっていることが推測される。

6. まとめ

Arガスを用いた場合のガスパフZピンチプラズマからの放射の分光特性について調べた。ZピンチプラズマからはEUV光から軟X線にわたる広い波長領域で放射が行なわれていた。中心軸上に並ぶホットスポットの部分からはHe様Arイオンからの軟X線が放射され、電子温度は1 keV程度であった。電極間に広がった雲状の領域からはCuやFeのK α 線が放射され、電子ビームが発生していることが明らかになった。またNe様およびNa様Arイオンが生成され、EUV領域での放射が起きていることがわかった。この放射時間は軟X線よりも長く、ホットスポットよりも広がった領域から放射が起きていることが推測された。Al電極を用いた放電ではNa様Alイオンからの13 nmにおける放射が観測され、電極材料を用いて放射の波長を選択する可能性が示された。

参考文献

- [1] K. Takasugi, H. Suzuki, K. Moriyama and T. Miyamoto : Jpn. J. Appl. Phys. **35**, 4051 (1996).
- [2] K. Takasugi, T. Miyamoto, K. Tatsumi and T. Igusa : AIP Conf. Proc. **409**, 299 (1997).
- [3] K. Takasugi, T. Miyamoto, K. Moriyama and H. Suzuki : AIP Conf. Proc. **299**, 251 (1994).
- [4] E.O. Baronova, K. Takasugi, V.V. Vikhrev and T. Miyamoto : Proc. 13th Int. Conf. High Power Particle Beams 784 (2000).
- [5] N. Akiyama and K. Takasugi : NIFS-PROC-51, 17 (2002).
- [6] K. Takasugi, S. Narisawa and H. Akiyama : AIP Conf. Proc. **651**, 131 (2002).
- [7] S. Narisawa and K. Takasugi : NIFS-PROC-51, 11 (2002).
- [8] K. Takasugi, K. Moriyama, T. Shibuya and T. Miyamoto : Proc. 1996 Int. Conf. Plasma Phys. 1098 (1997).
- [9] F. Kobayashi and K. Takasugi : to be published in NIFS-PROC.