

K-37

発散型ガスパフを用いたピンチ放電の形状制御と高温プラズマの発生

Divergent Gas-Puff Z-Pinch Discharge for Generating a Hot Spot

○吉田航二郎¹, 高杉恵一²

*Kojiro Yoshida¹, Keiichi Takasugi²

Abstract: Studies on shape control of pinch discharge and high temperature plasma generation were conducted using divergent gas-puff. The experiment was conducted on the SHOTGUN III-U device, and the gas-puff was performed by an annular divergent gas nozzle provided on the inner electrode. Ar was used as the discharge gas, and the plenum pressure was 5 atm. The plasma converged to the tip of the inner electrode, and soft x-ray radiation from Ar ions was observed. The convergence velocity at a discharge current of 180 kA was 5.5×10^4 m/s. From the analysis of the current waveform, it was found that net energy of 750 J was input to the plasma. The size of the soft x-ray radiation source was 56 μm in the axial direction and 35 μm in the radial direction.

1. はじめに

プラズマフォーカスは収縮過程においてレイリー・テイラー不安定性を発生させずにプラズマを一点に収束させることのできる優れたシステムである。ガスパフZピンチは簡単に高温プラズマを発生することのできる効率のよいシステムである。効率のよい軟X線点光源を発生させるため、両者の利点を併せもつ発散型ガスパフZピンチが考案された^[1]。発散型ガスパフZピンチプラズマについては電流の方向による軟X線スペクトルの比較^[2]、およびK殻放射とL殻放射の形状比較^[3]が行われている。

この研究では増強された SHOTGUN III 装置を用いてプラズマの収縮過程が詳細に調べられた。また、高

温プラズマから放出される軟X線を観測することによってホットスポットの形状が観測された。

2. 実験装置

実験は SHOTGUN III-U 装置を用いて行われた(Fig. 1)。装置のエネルギー蓄積部は 40 kV, 18 μF のコンデンサーバンクからなり、正負両方向に充電することができる。この実験では内部電極に向かう電子ビームを抑制するため、-25 kV に充電を行い逆方向放電が行われた。

ガスパフは高電圧側に設置された高速ガス弁と内部電極上に設けられた発散型の円環状ラバルノズルによって行われる。ノズルの発散角は中心軸に対して 10° である。ノズルの径は 30 mm であり、対向する外側電極には 60 mm の穴が開いている。内部および外部電極の距離は 30 mm である。放電ガスには Ar が用いられ、弁の充填圧は 5 気圧であった。

放電電流は入力側および負荷側に置かれたログスキーコイルによって測定された。軟X線をモニターするため、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が用いられた。発生した軟X線のパルスをピンチ時刻としてプラズマの収縮過程が調べられた。

3. ピンチプラズマの観測

ピンチプラズマの形状を観測するため、高速カメラを用いた観測が行われた。カメラにはゲート付きイメージンテンシファイア Hamamatsu V3063U が用いられ、20 ns のゲート幅で観測が行われた。

放電が始まるとガスの表面に放電が走り、電流の増加とともに内部電極前面で収縮が始まる。Figure 2 はピ

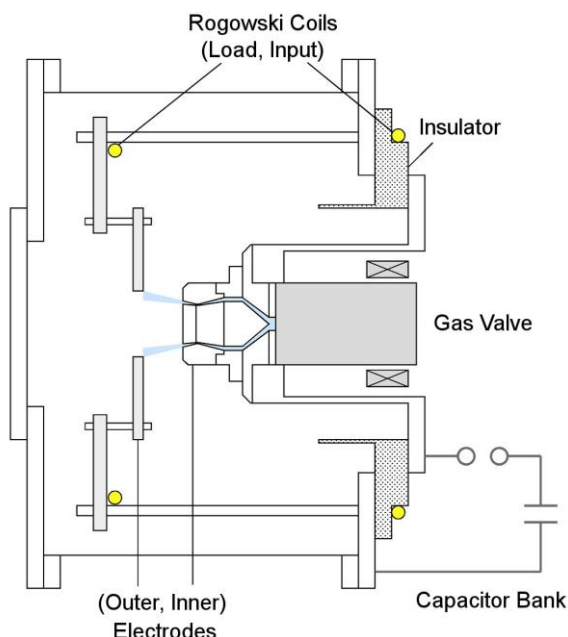


Figure 1. Schematic diagram of the SHOTGUN III-U divergent gas-puff z-pinch device.

1 : 日大院理工, 2 : 量科研

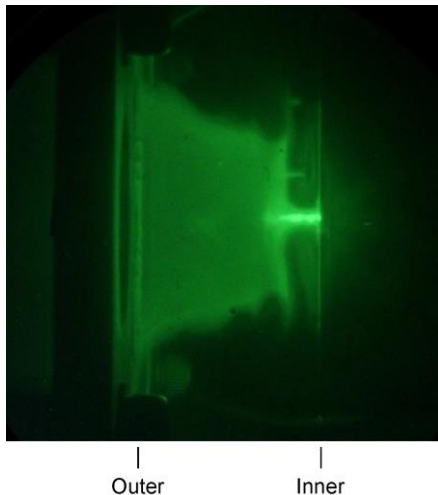


Figure 2. High-speed gated image of the pinch plasma at 50 ns before the maximum pinch.

ンチ時刻の 50 ns 前におけるプラズマ像である。内部電極先端に長さ 5 mm 程度のピンチ柱が形成されている。収縮過程の観測からプラズマの収縮速度は 5.5×10^4 m/s であった。ピンチ時に軟 X 線を放出するとプラズマ全体が不安定性によって崩壊する。

放電電流を解析することにより負荷のインダクタンスを評価することができる。システムへの入力エネルギーからプラズマのもつ磁気エネルギーを差し引くと、プラズマの加速に用いられた正味の入力エネルギーが求められる。ピンチ直前の電流値が 180 kA のとき、正味の入力エネルギーは 750 J であった。これはコンデンサーの蓄積エネルギー 5.6 kJ の 13 % に相当する。

4. ホットスポットの形状観測

温度 1000 万度程度の Ar プラズマでは Ar イオンが 16 価に電離して He 様 Ar イオンの K 殻放射(3.95 Å)が観測される。軟 X 線 CCD を備えたピンホールカメラを用いて Ar イオンの K 殻放射の空間的な観測が行われた。CCD は Laser-Laboratorium Göttingen e.V. 製のものである。画素は 6.45 μm, 1,392 × 1,040 ピクセルである。直径 10 μm ピンホールが用いられ、ピンホールとプラズマおよび CCD との距離はそれぞれ 195 mm および 180 mm であった。1 keV 以下の軟 X 線を除去するため、厚さ 15 μm の Be フィルターが用いられた。

Figure 3 は CCD に投影されたホットスポット像である。スポットは軸方向に少し伸びた形をしており、軸方向に 11 ピクセル(71.0 μm), 径方向に 8 ピクセル(51.6 μm)であった。ピンホール径を考慮すると、ホットスポットの大きさは軸方向に 56 μm, 径方向に 35 μm (分解能 7 μm)であることがわかった。

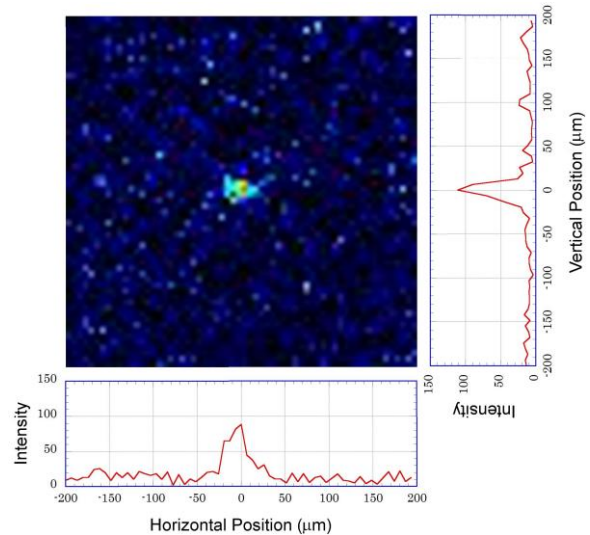


Figure 3. K-shell radiating spot image on the soft x-ray CCD.

5. 核融合エンジン

この研究のように、放電に Ar を用いると放射冷却によって He 様イオンまで安定して電離が進み、簡単に 1000 万度のプラズマが得られる。類推すると、放電に Kr を用いると 1 億度のプラズマが得られることになる。ここに核融合燃料を混入すれば熱核融合が起きることが容易に想像できる。

発散型ガスパフ Z ピンチは真空中でガスパフを行い、放電することによってホットスポットを発生させるものである。宇宙空間で用いるのにまさに理想的な形態であるといえる。NASA では核分裂・核融合エンジンの研究が進行している [4]。

6. 参考文献

- [1] K. Takasugi and E. Kiuchi : “Hard X-Ray Radiation from a Z-Pinch with a Divergent Gas-Puff”, Plasma Fusion Res., Vol.2, 036, 2007.
- [2] V. Shlyaptseva, K. Takasugi et. al. : “Radiative Characteristics of Reversed Polarity Gas-Puff Ar and Kr Plasmas”, IEEE Trans. Plasma Science, Vol.46, No.11, pp3842-3848, 2018.
- [3] K. Takasugi and M. Nishio : “Characteristics of Ar K- and L-Shell Radiations in the Divergent Gas-Puff Z-Pinch and the Application to Contact Photography”, IEEE Trans. Plasma Science, Vol.47, No.5, pp2615-2619, 2019.
- [4] R. Adams, J. Cassibry and K. Schillo : “The Pulsed Fission-Fusion (PuFF) Concept for Deep Space Exploration and Terrestrial Power Generation”, 10th Int. Conf. Dense Z Pinches, 2017.