

プラズマオープニングスイッチによる Z ピンチプラズマの電流制御の研究

指導 助教授 高杉 恵一

理工学研究科 量子理工学専攻 3011 白田 守紀

1. はじめに

これまで行なわれてきた SHOTGUN Z ピンチプラズマにおける観測結果から、半径方向への収縮段階において発生する Rayleigh-Taylor 型不安定性が、最大収縮時に現れるホットスポットの空間パターンに関係していることがわかっている[1]。有限ラーマー半径効果を考慮した Rayleigh-Taylor 不安定性において、波数が大きくなれば、プラズマの均一な圧縮を行えると考えられる。そこで、電流の立ち上がり時間を速くし、プラズマを加熱しないうちに強い磁場をかけて収縮させ、波数を制御することができるプラズマオープニングスイッチ(POS)の研究を企画した。

POS は、スイッチ媒質としてプラズマを用いたもので、MA 級の電流を導通し、100nsec 以下で遮断することが可能であり、高出力のパルスパワー発生装置におけるパルス圧縮装置として用いられる[3]。この研究の目的は、POS を動作させ、SHOTGUN Z ピンチ装置の電流の立ち上がりを制御し、ガスパフ Z ピンチプラズマへ適用させ、Rayleigh-Taylor 型不安定性の波数 k の制御を行い、最終的には EUV 放射を制御することにある。この研究では、POS に用いるための最適なプラズマガンを決出し、適用性を知るために SHOTGUN Z ピンチ装置の、電流の立ち上がりの制御を試みた。

2. プラズマガンの特性

POS に用いるプラズマガンとして沿面面積を変化させたものを 3 種類製作した。沿面の直径はそれぞれ 15mm、30mm、50mm で、絶縁物のポリエチレンをそのままプラズマのイオン種としている。

プラズマガンはコンデンサー容量 0.22 μ F、充電電圧 24kV で動作させた。各プラズマガンの放電特性を表 1 に示す。30mm のものが減衰の時定数 τ が最も小さくなっており、エネルギーの注入効率が良いと言える。次に、ラングミュアプローブを用いてガンの先端から 10cm の位置で放電から 10 μ s でのプローブの電流・電圧特性をとり、プラズマガンからのプラズマの電子温度と密度の測定を行った。各プラズマガンの電子温度と電子密度を表 2 に示す。30mm のものは他の 2 本に比べて 10 倍も密度が高くなっていることがわかる。

次にプラズマガンから放射されるプラズマの半径方向分布の測定を行った。プラズマガンの中心を Z ととし、Z=10cm の位置にプローブを挿入し、中心から半径方向に 2cm ずつプローブをずらしながら測定した。

これをガウス関数でフィッティングし、プラズマガンからのプラズマの広がりを求め、ガウス分布を仮定してその粒子数を求めた(表 3)。

15mm のガンは、プラズマの空間的広がりを見るとやや指向性に欠ける。逆に、50mm のガンに関してはプラズマの広がりが沿面の直径より狭くなっている。これは沿面面積が大きすぎるために効率の良い放電が出来なかった為と思われる。以上より、POS の最適な動作には 30mm のガンが適していると考えられる。

また、200kA の電流を 2 μ s 維持するものと仮定すると、必要になるプラズマガンからのプラズマの全粒子数は 2.5×10^{18} 個と計算出来る。また、研究室での過去の実験にてガンからのプラズマのドリフト速度が 2.0×10^5 m/s であることがわかっているので、それとオープニング動作に必要な粒子の滞留時間を 10 μ s、プラズマガンの本数を 8 本と仮定した場合のオープニングに必要な粒子数を求めると、1 本当たり 7.8×10^{16} m⁻³ のプラズマ粒子が必要である。

表 1 各プラズマガンの放電パラメータ

	L(μ H)	R(Ω)	τ (μ s)
15mm	5.01	1.72	5.8
30mm	5.48	2.17	5.05
50mm	5.49	1.54	7.15

表 2 各プラズマガンの電子温度と電子密度

	電子温度 T_e (eV)	電子密度 n_e (10^{18} m ⁻³)
15mm	14.050	4.56
30mm	16.557	48.4
50mm	21.528	4.38

表 3 各プラズマガンの粒子数と空間的広がり

	空間的な広がり (10^{-2} m)	粒子数 (10^{16} 個/m)
15mm	4.05	2.35
30mm	5.04	4.53
50mm	4.61	2.93

3. プラズマオープニングスイッチ実験

30mm のガンを用いて、プラズマオープニングスイッチ(POS)の実験を行った。まず、SHOTGUN Z ピンチ装置の POS セクションにプラズマガンを挿入して、放電電流の制御を試みた。ここでは、電極間を短絡し、プラズマガンを充電電圧 30kV、コンデンサー容量 0.88 μ F で 2 本、4 本と動作させた。プラズマガンのトリガーの時間と放電のトリガーの時間との差を遅延時間とし、その遅延時間を変化させ、その時の各電流波形を取った。遅延時間で、赤がアノード電流、青がカソード電流、緑がアノード電流とカソード電流の差分で、プラズマガンのプラズマに導通した電流である(導通電流)。プラズマガンの先端と中心導体までの距離は 6.5cm で行った。図 1(a)は、プラズマガン 2 本、遅延時間が 2.0 μ s の時の電流波形で、図 1(b)はプラズマガン 4 本、遅延時間が 2.9 μ s の時の電流波形の変化を比較したものである

初めにプラズマに電流が導通し、その後、その導通した電流が急激に減少しており、その部分でカソード電流の立ち上がりが良くなっている。この部分で、オープニング動作が起きていると考えられる。

2 本ときは遅延時間が 2.0 μ s の時に最も導通がよく、105kA 程度の電流を導通することが出来た。また、4 本ときは 2.9 μ s のときが最もよく、100kA の電流をおよそ 0.3 μ s 導通させることが出来た。

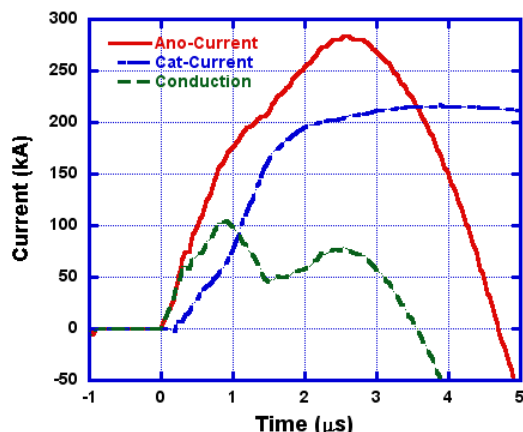
このことから、電極を短絡した時は電流の立ち上がりの制御が成功した。

4. まとめ

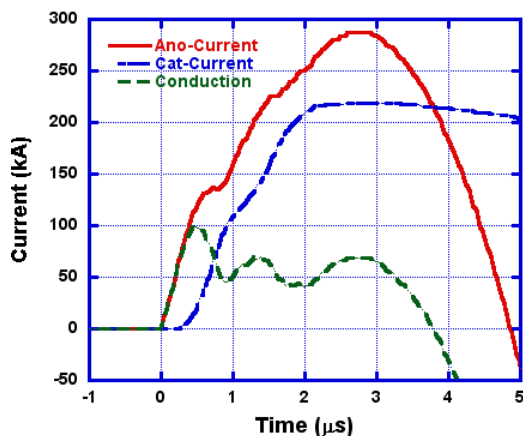
今回の研究の結果から、まず、3 本のプラズマガンの特性を調べ、そのうちプラズマの密度が高く、エネルギーの注入効率が良い沿面の直径が 30mm のガンを使い、SHOTGUN Z ピンチ装置の電極を短絡した状態で電流の制御を行った。

プラズマガンが 2 本、4 本ともに電流の立ち上がる時にはっきりと、アノード電流とカソード電流の立ち上がりに 0.2~0.3 μ s 程の時間差が生じている。これは、電流が POS 部に到達するときに全電流をプラズマガンからのプラズマで導通させているということになる。

導通電流は、2 本の場合は遅延時間 2.0 μ s の時に 105kA、4 本の場合は 2.9 μ s の時に 100kA 程度の導通があるという結果になった。過去に研究室で行われてきた同様の実験よりプラズマガンからのプラズマに電流の導通が見られ、オープニング動作が観測できた。これはこれまでの実験よりプラズマガンの放電に使用するコンデンサー容量を増やしたためにプラズマガンからのプラズマのエネルギーも増加し、プラズマの密度、温度、粒子数ともに増加したためだと考えられる。



(a) プラズマガン 2 本 遅延時間 2.0 μ s



(b) プラズマガン 4 本 遅延時間 2.9 μ s

図 1 電流波形

また、この実験中では、プラズマガンが 4 本、遅延時間が 2.9 μ s の時に電流の導通時間も長く、導通電流も高いため、オープニングスイッチとして一番適応していると考えられる。

電流の導通時間を増やすためにプラズマガンからのプラズマの密度・粒子数を増加させることが必要であると考えている。今回の実験では、POS の動作においてプラズマガンからのプラズマの密度・粒子が必要な値まで届かなかった。そこで、POS の最適な動作を行うために装置の更なる増強が必要であると考えられる。

参考文献

- [1] T. Takasugi, T. Miyamoto, K. Moriyama and H. Suzuki: AIP Conf. Proc. **299**, 251 (1994).
- [2] 森山琴也 修士論文, “ガスパフ Z ピンチプラズマの巨視的不安定性および放射 X 線の研究” (1994).
- [3] H. Akiyama, T. Majima, K. Fujita and S. Maeda: Jpn. J. Appl. Phys. **26**, 1743 (1987).