

発散型ガスパフZピンチにおける高エネルギーイオンの特性評価

Characterization of High-energy Ions in the Divergent Gas-puff Z-pinch

指導教授 高杉恵一

M4005 重根崇志

1. はじめに

発散型ガスパフZピンチは従来のガスパフZピンチでのガスの噴出角を変化させたものである。放電の特徴として、ホットスポットがアノード先端の一点にのみ形成され、プラズマフォーカスのように沿面放電をしないので再放電が起こりづらく、エネルギー効率が低い。

ガスノズルの噴出角を 10° または 90° にした発散型ガスパフZピンチの実験では、硬X線の検出により高エネルギーの電子の発生が確認されている[1]。トムソンパラボラを用いた加速イオンの計測では、放電電圧 20kV で 1.0MeV ほどの、さらに放電電極の正負の変化に関わらず、高エネルギーイオンが観測されている[2][3]。また、ピンホールを用いた発散型ガスパフZピンチの負極電極において、イオンの飛跡が観測されている[4]。

従来まではイオンの加速は誘導起電力によるものと考えられてきたが、この経緯から我々は電流の向きに依らない力学的反射モデルを提唱している。その実証を行なうために様々な測定器により観測されるイオンの特性を調べ、加速機構を理解することを目的として今回の研究を行なった。

2. 実験装置

今回の実験に用いた SHOTGUN III Z ピンチ装置の概略図を図 1 に示す。当装置はコンデンサーの容量が $12\mu\text{F}$ のコンデンサバンクを電源に用いている。ノズル径と電極間の距離はともに 30mm 、ガスの噴出角は 10° で、噴出ガスには 5 気圧の Ar ガス、電極の材質はノズル側でステンレス、もう一方ではアルミを用いた。 $\pm 40\text{kV}$ の電源をそなえ、正負両方向の放電を行なうことができる。この研究で

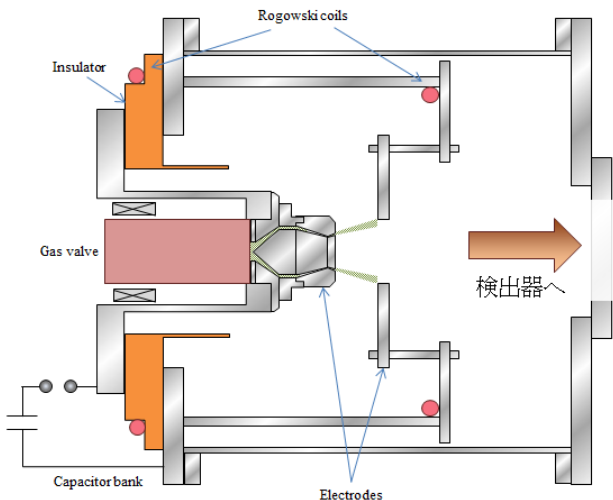


図 1 SHOTGUN III Z ピンチ装置の概略図

は、放電電圧は $+20\text{kV}$ 、 $+25\text{kV}$ 、 -25kV の三種類で行なった。加速イオンの検出には BARYOTRAK $67\times 67\times 0.9\text{mm}$ を使用した。この検出器は 100keV 以上のエネルギーのイオンを検出可能である。BARYOTRAK を用いた検出器は主に 3 種類である。図 2 の装置は Al のフィルタの厚みによってイオンの加速エネルギーのフィルタリングを行ない、およそその加速エネルギーを見積もることが可能となる。また、フィルタの無い部分ではイオンの空間分布が観測できる。図 3 の装置はイオンの飛跡のパラボラを描くことで、イオンの最大加速エネルギーを正確に測定できる。ただし空間分布が観測できないため、空間分布も同時に測定可能な装置を併用した（詳細は本論文に記載）。この同時測定装置はパラメータによってパラボラを描けなかった場合の原因究明に用いられる。

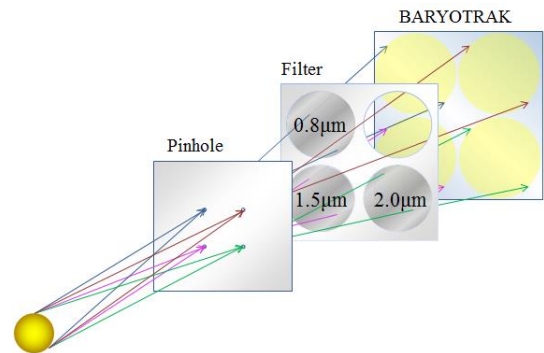


図 2 ピンホールフィルタ測定器の概略図

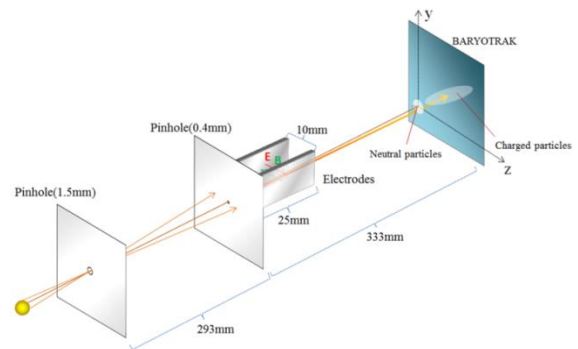


図 3 トムソンパラボラ装置の概略図

3. 実験結果

図 4 に図 2 の装置を用いた測定の結果を示す。放電ガスは全て Ar である。(a)は放電電圧 $+20\text{kV}$ 、(b)は放電電圧 $+25\text{kV}$ 、(c)は放電電圧 -25kV である。この測定における正極放電、すなわち(a)と(b)を比較すると、より電圧の高いほうが厚いフィルタを透過しており、イオンの加速エネルギーが増加していることが確認できる。しかし、(c)で示される負極放電の結果

ではフィルタを透過する加速イオンは確認されなかった。

図5にトムソンパラボラ装置を用いた測定の結果を示す。(a)は放電ガスがArでノズル幅は0.575mm、(b)は放電ガスがKrでノズル幅は0.575mm、(c)は放電ガスがKrでノズル幅は0.225mmのものを使用した。放電電圧は全て+25kVである。この測定においてはArイオン(図5(a))とKrイオン(図5(b))の最大加速エネルギーを比較すると等しくなるという結果となった。また図5(b)と図5(c)では、ガスノズルのガスの噴射口の幅が異なるが、当研究においてパラボラの再現性の変化が確認された。表1は各パラボラにおける最大エネルギー部分のパラメータであり、すべてのイオンにおいて等しい加速エネルギーを得られている。

図6にトムソンパラボラ装置を使用する際に空間分布も同時に測定可能な装置を用いた測定の結果を示す。実験条件としては図6(a)と図5(b)が、また図6(b)と図5(c)がそれぞれ対応する。これらの結果としては、(a)と(b)でイオンの空間分布の様子が異なった。図6(a)は全体的に飛跡が薄く、飛跡が残る部分と残らない部分がはっきりと分かれたが、図6(b)においては全体的に満遍なく飛跡が残り、イオンの軌道における制限が(a)に比べて少ないことが確認される。

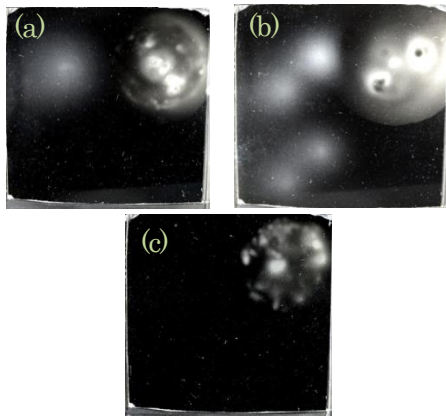


図4 ピンホールとAlのフィルタを用いた測定の結果

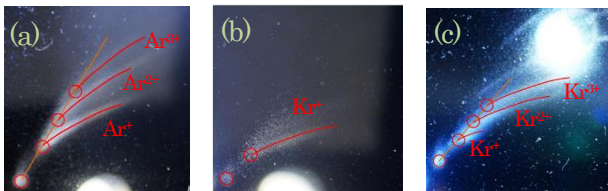


図5 トムソンパラボラ装置を用いた測定の結果

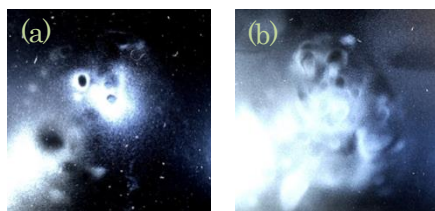


図6 ピンホールートムソンパラボラ同時測定装置を用いた測定の結果

表1 各パラボラ最大エネルギー部分のパラメータ

パラメータ	Ar ⁺	Kr ⁺	Kr ²⁺	Kr ³⁺	Kr ³⁺
電場による偏向距離z[mm]	31	31	33	66	99
磁場による偏向距離y[mm]	52	36	37	74	111
速度v[×10 ⁶ m/s]	23	16	16	16	16
エネルギー/電荷[MeV]	11	11	11	055	037
ノズル幅[mm]	0575	0575	0225	0225	0225

4. 考察

図4においては、イオンの加速は放電電圧のみならず、電流の向きによっても影響を受けるとされる。負極放電においてフィルタを透過するイオンは確認されなかったものの、加速イオンは観測された。電流の向きに依らない力学的なイオン加速[3]などの加速機構が存在すると考えられる。

図5においては、(a)ではAr⁺、Ar²⁺、Ar³⁺は等速度で、(c)ではKr⁺、Kr²⁺、Kr³⁺は等速度であるため、力学的なイオン加速の仮定を支持するものとはなっているが、(a)と(b)(c)の比較、つまりイオン種により速度が異なっている。放電プラズマの形状や状態は測定ごとに異なるためArイオンとKrイオンの最大加速エネルギーを確認する場合は、条件を全く同じにするためにこれらのガスを混合して行うべきであった。

図6においては、ノズル幅により空間分布の様子の違いが確認された。ここで、ノズル幅の違いによってガスがノズルから噴射される速さとガスの形状の変化が予想されるが、具体的なガスの速さや形状などは今回の結果からでは断定はできないため、加速イオンへの影響を知るにはさらなる方法と解析が求められる。

総括すると、ノズル幅が変わると加速イオンの検出量が変化する可能性が示唆された。また、パラボラの再現性や空間分布の様子も変化するため、ノズル幅による加速イオンの影響の違いを確認することで、加速機構に関するより詳細な分析が可能になると考えられる。

5. 参考文献

- [1] 木内恵菜: 修士論文「ガスパフ型プラズマフォーカス装置の研究」(2007)
- [2] 佐久間洋志: 修士論文「発散型ガスパフZピンチにおける高エネルギーイオン計測」(2010)
- [3] 西尾峰之: 博士論文「自己収縮プラズマにおける力学的イオン加速」(2011)
- [4] 岩田雅之: 修士論文「発散型ガスパフZピンチプラズマにおける高エネルギーイオンの発生」(2011)