

## Z ピンチプラズマにおける電流方向に依存しないイオン加速機構とその理論モデルの検証

### Ion accelerations independent of the direction of electric currents in the z-pinch plasma

○西尾峰之<sup>1</sup>, 佐久間洋志<sup>1</sup>, 高杉恵一<sup>2</sup>\*Mineyuki NISHIO<sup>1</sup>, Hiroshi SAKUMA<sup>1</sup>, Keiichi TAKASUGI<sup>2</sup>

Abstract: Ion accelerations independent of the direction of electric currents have been observed in the z-pinch experiments. Although the acceleration mechanisms of ions are discussed in theoretical and numerical studies, the consensus are not still obtained. Two potential mechanisms are briefly discussed in this study: (1) a zippering model generated by fluid dynamical instabilities and (2) a trapping model by a potential trough propagating toward the symmetrical directions along the axis. Experimental approaches are required for the purpose of the determination of the acceleration mechanisms from the above two models.

#### 1. はじめに

Z ピンチやプラズマフォーカスといった大電流放電に伴って電極軸方向に高エネルギーイオンが観測されている。このような高エネルギーイオンの発生には何らかの粒子加速現象が関わっていると考えられており、古くから様々な機構が提案されてきた。実験的な証拠として、以下の2点の指標が提案されている：指標(1) 高エネルギー粒子の発生は、電源によって供給される大電流の向きに依存せず、どちらの方向にも加速される。指標(2) 加速された際の最大速度は電荷に依らない、つまりイオン種に依らない。この2点を満たす加速機構として、具体的には以下の2種類の機構が議論されている。1つめは、ピンチ時に発生する流体力学的不安定性によってジッパリング効果（流体が絞り出される効果）で軸方向に加速される流体力学的効果が考えられる。2つめは、軸方向に対称に伝播するポテンシャルの谷によってイオンがトラップされるという波動的効果が考えられる。本稿においてはこの2つの機構について概説し、その是非を議論するための実験的アプローチについて述べる。

#### 2. 流体力学的なジッパリング効果

Vikhrev and Korolev (2006)において、半径収縮時に発生する  $m=0$  不安定性によって強いピンチが発生するとそのピンチによって粒子が外側に押し出されることで粒子が加速されるというモデルが提案された。この加速された粒子は周囲に存在するバルクプラズマと衝突して熱化され、Maxwell 分布になると予想された。この加速モデルは完全に流体力学的であるので、上述の指標(1)を満たしている。また指標(2)に関しては Maxwell 分布においては最大速度は完全には決定されないけれども、少なくともイオン種には依存しないということが分かる。しかしこのモデルにおける問題点は、単純にピンチするというだけで MeV オーダーの加速エネルギーを説明できるのかという点である。一般にジッパリング効果を説明するための理論は無く、Vikhrev and Korolev (2006)においても流体シミュレーションを行った結果として、その軸方向速度を説明している。したがってその計算された速度は何らかの理論によって説明可能と考えられる。以上のように流体力学的なジッパリング効果での加速においては、どの程度までの最大速度を説明しうるかということが最大の焦点となる。

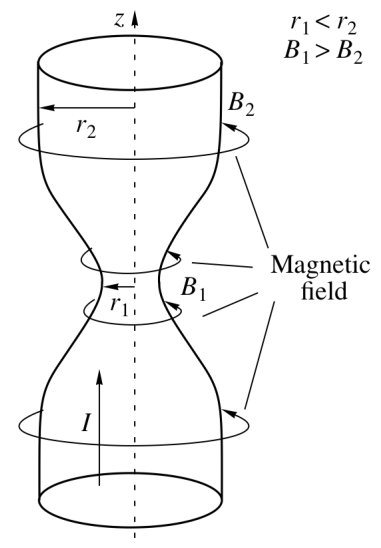


Fig.1: 円筒プラズマ中に電流を流すと半径方向に収縮する。ピンチ部でのジッパリング効果により軸方向上下にイオン加速が起こると推定される。(Fig. 9 in ref.[1])

### 3. 伝播する電氣的擾乱によるトラップ効果

Gary and Bloomberg (1973)はZピンチ放電を想定した計算により、電流方向に伝播する電氣的擾乱（ポテンシャルの谷）に捕捉れたイオンの加速が示されている。それによって加速されたイオンは擾乱の伝播速度である位相速度と同じ速度で移動するが、ある速度に達すると一定速度になるという計算がなされた。この計算においてはイオン種は固定されているが、最高速度がある臨界値を持つという結果は、指標(2)の部分的には満たしているように見える。しかしここで仮定されている擾乱は、イオン流体と逆方向に進む電子流体との速度の違いによる不安定性（二流体不安定性）によって生じるものであり、電流方向とそれと反対の方向に進む擾乱はポテンシャルの向きが異なることから、電流の向きに依らない加速は実現できないものと考えられ、指標 (1) を満足しない。Toida and Ohsawa(1996)は大電流放電を意図した計算ではなく太陽フレアを想定した計算を行っており、それによると異なるイオン種について到達速度がほぼ等しくなるような加速が見出されたとしており、この理論は指標 2) を十分に満たしている。その加速は、電磁場を含んだ衝撃波内で誘起される非線形磁気音波の発生によって生じた電場が重イオンを加速する過程を加速機構としている。そのときの電場がフレアの進行方向に対して対称に生成されるのかということについては言及がない。したがってこの伝播する電氣的擾乱によってイオンがトラップされることで加速されるという機構についてはさらなる理論的、数値的考慮が求められる。以上のように電氣的擾乱によるトラップ効果での加速は、どのような方向性を持った加速場が発生するのかということが重要である。

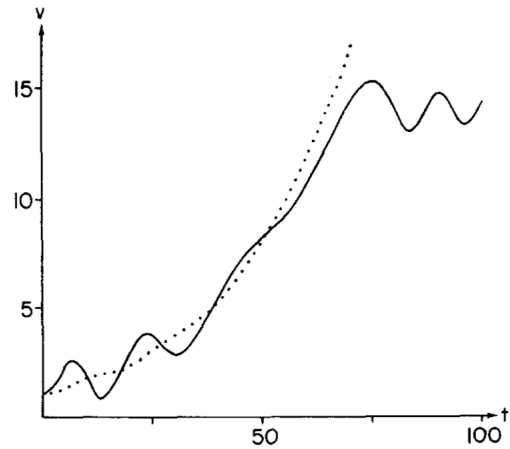


Fig.2: 典型的粒子の速度の時間進展(実線)と電氣波動擾乱の位相速度の時間進展(破線)。はじめ両者は同様に増加し束縛が起こっていることが分かるが、ある時間から粒子速度が上限値を持つようになり、位相速度の増加から離れる。(Fig.1 in ref.[2])

### 4. 加速機構の実験的検証に向けたアプローチ

流体力学的ジッパリング効果による加速を示すためには、実際の流体力学的不安定性の進展速度を計測する必要がある。これはピンチ領域における直接的な軸方向のジッパリング速度を計測するのは困難であるので半径収縮速度から欲しいの軸方向速度を推定することが第一歩となる。また軸方向収縮時の非対称性はジッパリングに影響を及ぼすと考えられるので、Zピンチの収縮に非対称性を持たせた実験である発散型ガスパフ実験での発散角依存性を調べることも必要であると考えられる。

もうひとつの機構である電氣的擾乱トラップ効果による加速についてであるが、それを実験的に示すことは現時点では困難であり、上記ジッパリング効果のための類推から間接的に議論できる状態ではない。

当日の発表では実験的アプローチの結果についても述べる。

### 5. 参考文献

- [1] V. V. Vikhrev and V. D. Korolev : “Neutron generation from z-pinch”, Plasma Physics Reports, Vol. 33, No. 5, pp356-380, 2006.
- [2] S. P. Gary and H. W. Bloomberg : “Ion acceleration in high-current diode”, Appl. Phys. Lett., Vol. 23, No. 2, pp112-113.
- [3] M. Toida and Y. Ohsawa : “Simulation study of acceleration of heavy ions and their elemental compositions”, Solar Phys., Vol. 171, pp161-175, 1997.