

ZピンチからのX線放射とX線計測

高杉 恵一 (日本大学)

X-ray Radiation from a Z-pinch Plasma and Its Measurement

Keiichi Takasugi (Nihon University)

1. はじめに

Zピンチはプラズマに大電流を流し、そのピンチ効果でプラズマを圧縮・加熱するものである。特に半径収縮を伴うZピンチは電磁エネルギーを効率良くプラズマに伝達することができ、簡単に高温高密度を得ることができる。最近の米国サンディア研究所の報告では 11.4 MJ の蓄積エネルギーの実に 15 % を越える 1.8-1.9 MJ のX線の発生が達成されている[1-3]。X線放射にはプラズマ電流の2乗のスケールング則が確認されており、Zピンチによる慣性核融合も夢ではなくなってきた。

ここでは日大の SHOTGUN Zピンチ装置を用いたX線放射の実験を紹介し、半径収縮を伴うZピンチに共通した不安定性、ホットスポット (X線点源) の形成、エネルギー伝達について述べる。また、縦磁場を用いたX線放射の制御に関する実験について述べる。

2. 実験装置

図1は SHOTGUN Zピンチ装置の概略である[4]。中空状の初期プラズマを形成するため、アノードは円環状のガスノズルと一体になっており、高速ガスバルブを用いている[5]。カソードはガスを停留させないようにたくさんの穴が開いている。ガスノズルの直径は 28 mm で、電極間隔は 25 mm である。ガスは Ar を使い、ガス溜めの圧力は 4 気圧で実験を行った。電源は定格 30 kV 24 μ F の高速コンデンサーである。実験では 20 kV 充電で用いた。縦磁場を加える実験では放電管内部に縦磁場コイルを設置し、放電直前に電極間に一様な磁場を形成させて実験を行った。

電流測定にはロゴスキーコイルを用いた。アノード側のコイルでは放電管に流れ込む全電流を、またカソード側のコイルでは電極間に流れるプラズマ電流を測定する。X線の測定には次のような測定器を用いた。

- ・シンチレーションプローブ
- ・X線ダイオード
- ・X線ピンホールカメラ

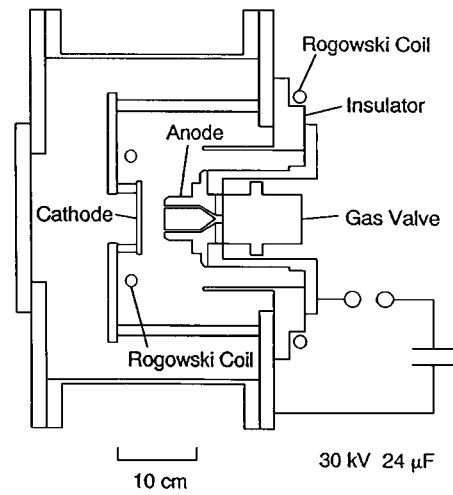


図1. SHOTGUN Zピンチ装置の概略

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

プラスチック・シンチレータと光ファイバとフォトマルチプライヤを組み合わせたシンチレーションプローブは約 1 keV 以上のエネルギーを持つ比較的硬いX線の時間応答を測定する。Ni カソードの光電効果を利用したフィルター無しのX線ダイオードは約 20 eV ~ 1 keV の極端紫外~軟X線の時間応答を測定する[6]。X線の空間分布を測定するためX線ピンホールカメラを用いた。カメラは大気中で操作し、しかもX線の吸収を減らすため、Be 窓を用い、チェンバー内は He ガスを充填している。その他、収縮するプラズマの形状を測定するため、N₂ レーザーによるシャドウグラフの測定を行った。

3. 半径収縮と不安定の成長

図2は放電のアノード電流とレーザーのシャドウグラフによるプラズマの半径収縮のようすを示したものである[7]。レーザーは1回の放電で1コマしか撮影できないが、半径収縮の段階では電流波形、プラズマの挙動ともに再現性は良い。半径収縮に伴って長波長で大振幅の不安定性が成長する。この不安定性は軸対称で軸方向の波長は約 5

mm である。半径収縮から取り残された部分は円板状に残っていく (d)。最大収縮 (e) の後、崩壊の過程で $m=1$ モードの不安定性が成長する (f)。

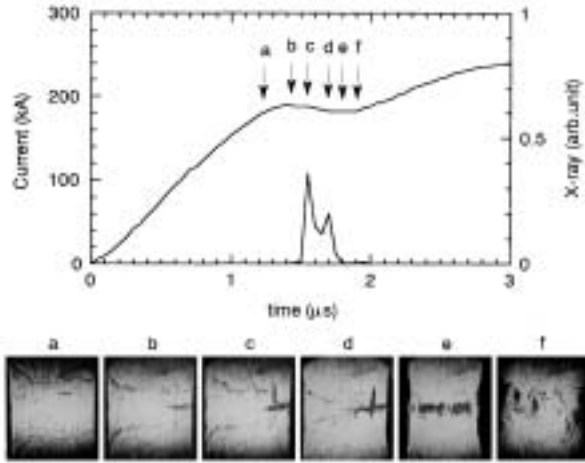


図2. Zピンチプラズマの半径収縮
Fig.2 Radial contraction of the Z-pinch plasma.

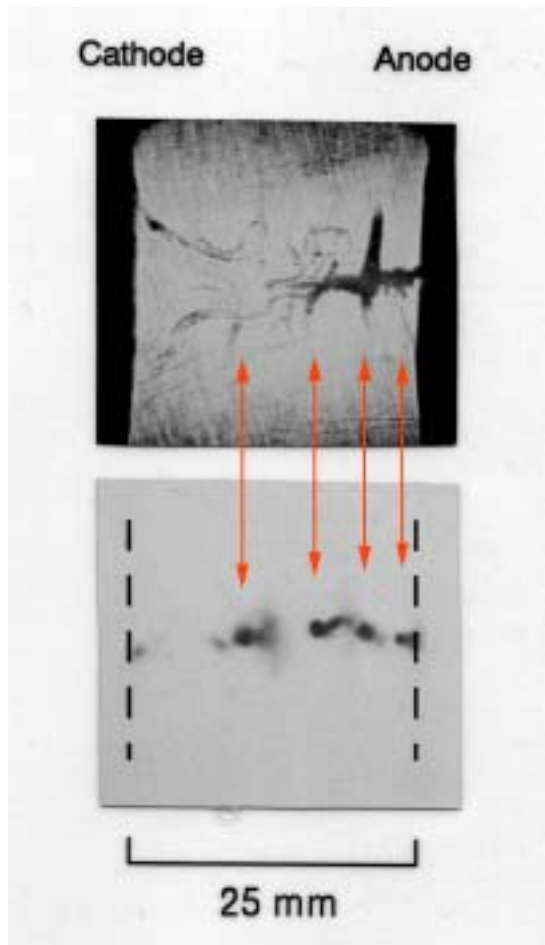


図3. 不安定性とホットスポットの対応
Fig.3 Spatial coincidence of instability and hot spots.

図3はシャドウグラフと同じ放電で撮影されたX線ピンホール写真を並べて比較したものである。X線像では3つの強いスポットが見える。これらはシャドウグラフの円板状の部分とちょうど対応している。この部分では軸方向に強い加速が起こっていると考えられる [8]。

Rayleigh-Taylor 不安定性の成長率は

$$\gamma = \sqrt{gk - \frac{1}{4}\omega_{ci}^2(k\rho_i)^2} \quad (1)$$

で与えられる。ここで g は収縮の加速度、 k は波数、 ω_{ci} はイオンサイクロトロン周波数、 ρ_i はイオンラーマー半径である。このルートの中の第2項は有限ラーマー半径効果で不安定を抑制する効果がある。成長率が最大になるのは

$$k = \left(g / \omega_{ci}^2 \rho_i^4\right)^{1/3} \quad (2)$$

のときである。半径方向の運動の解析から収縮が始まる時刻 $t=1.1$ ms では $\gamma=2.4 \times 10^{10}$ m/s² であり、このときの電流値 160 kA から $\omega_{ci}=5.7 \times 10^6$ s⁻¹ となる。波長 $2\pi/k=5$ mm で成長率が最大になるとすると、ラーマー半径 $\rho_i=7.6 \times 10^{-4}$ m となる。これから成長率 $\gamma=4.8 \times 10^6$ s⁻¹ が求められ、実験結果と良く一致する。

効率の良いプラズマの加速とX線発生には不安定性の発生は本質的であるが、プラズマの均一な圧縮と均一なX線源の形成とは相反する要求である [9]。マクロに見て「均一な」不安定性を実現するには波数 k の大きなモードを発生させる必要があり、(2) 式よりプラズマが収縮を開始するまでに大電流を流しておき、大きな加速度 g と小さなラーマー半径 ρ_i を実現することが重要である。

4. エネルギーの伝達

電源からZピンチに伝達される電力およびエネルギーは電流波形の解析から求められる [10]。一般的にはZピンチは抵抗値もインダクタンスも時間的に変化するが、半径収縮を開始してからは主に半径方向への加速、という形でエネルギーが伝達される。放電初期にはジュール加熱も起こるが、全体としてはそれほど大きくない。そこで抵抗分を一定として、インダクティブにZピンチに伝達される電力を調べてみる。

図4のような簡単な回路モデルを考える。コンデンサーの容量を C 、Zピンチを含む回路の抵抗を R 、回路のインダクタンスを $L(t)$ とする。コンデンサーの電圧を $V(t)$ 、回路の電流を $I(t)$ とすると

$$\frac{d}{dt}(LI) + RI = V \quad (3)$$

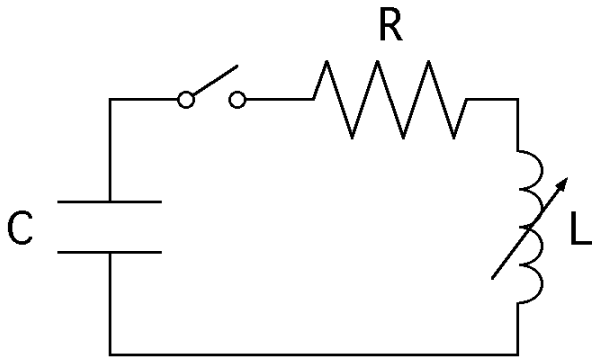


図4 . Zピンチの回路モデル
Fig.4 Equivalent circuit for a Z-pinch.

となる。コンデンサーの電圧 V は初期電圧 V_0 を用いて

$$V = V_0 - \frac{1}{C} \int I dt \quad (4)$$

と求められる。さらにもう1回積分することによって L が求められる。

$$L = \frac{1}{I} \int (V - RI) dt \quad (5)$$

Zピンチのインダクタンスは半径 r の円筒型の線路と対比させて考えることができる。

$$r = r_0 \exp\left(-\frac{2\pi\Delta L}{\mu_0 l}\right) \quad (6)$$

ここで ΔL はインダクタンスの変化分、 r_0 は初期半径、 l はピンチ柱の長さである。

さて、放電管に入る電力は

$$P = VI - RI^2 \quad (7)$$

で求められる。これを積分することによってエネルギーが求められる。全入力エネルギーから磁気的に蓄えられたエネルギーを差し引いた分が正味プラズマの半径加速によって入力されたエネルギーである。

$$E = \int P dt - \frac{1}{2} LI^2 \quad (8)$$

図5は放電電流の波形の解析し、電源からZピンチへのエネルギーの伝達の様子を示したものである。時刻 $4.7 \mu\text{s}$ あたりから入力エネルギーと磁気エネルギーとがずれ始め、半径方向への加速が起こっていることを示している。時刻 $5.2 \mu\text{s}$ での正味の入力エネルギーは 0.6 kJ (蓄積エネルギー 4.8 kJ の約 13%) で、このときの実効的なプラズマの半径は 0.1 mm である。

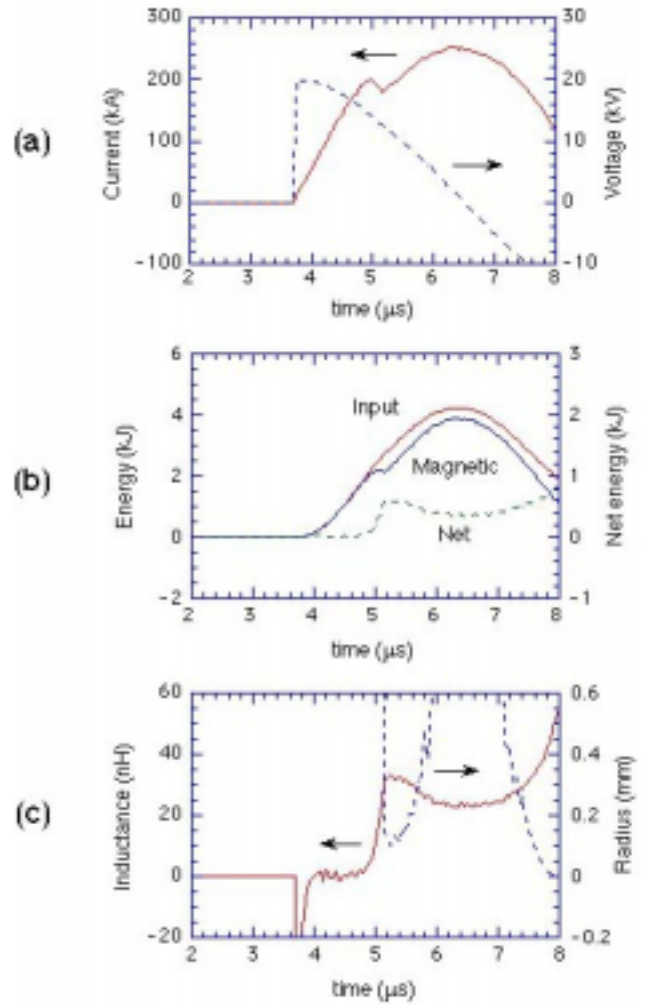


図5 . 電流波形と入力エネルギー

Fig.5 Discharge current and energy transfer.

5 . 縦磁場による運動の制御

Ar を用いたZピンチプラズマは Ar のK殻放射 ($3-4 \text{ keV}$) およびL殻放射 ($250-600 \text{ eV}$) により、広い範囲のX線光源として利用することができる。特にL殻放射はWater Windowと呼ばれる $280-530 \text{ eV}$ の領域全体をカバーしている。通常のZピンチでは両方が放射されるが、プラズマの半径収縮を抑制することにより、K殻放射を抑え、L殻放射だけを選択的に取り出すことができる。

Zピンチを安定化するために軸方向に磁場を加えることは核融合研究の初期のころから行われている。ここではそれをX線放射の制御のために利用する[11]。一様な軸方向磁場 B_{z0} を生成し、それが円環状の初期プラズマに完全に取り込まれるとすると、内部磁場は

$$B_z = B_{z0} \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \quad (9)$$

となる。方位角方向の磁場は

$$B_{z0} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (10)$$

であるから、両者の磁気圧が等しくなる場所では

$$r = \frac{2\pi r_0^2 B_{z0}}{\mu_0 I} \quad (11)$$

となる。不安定性に伴う強い収縮のみが抑えられればよいので、比較的弱い初期磁場で機能することが予想される。

図6は (a) 磁場がない場合と (b) 1.17 kG の磁場を加えた場合の電流波形とX線の波形を比較したものである。

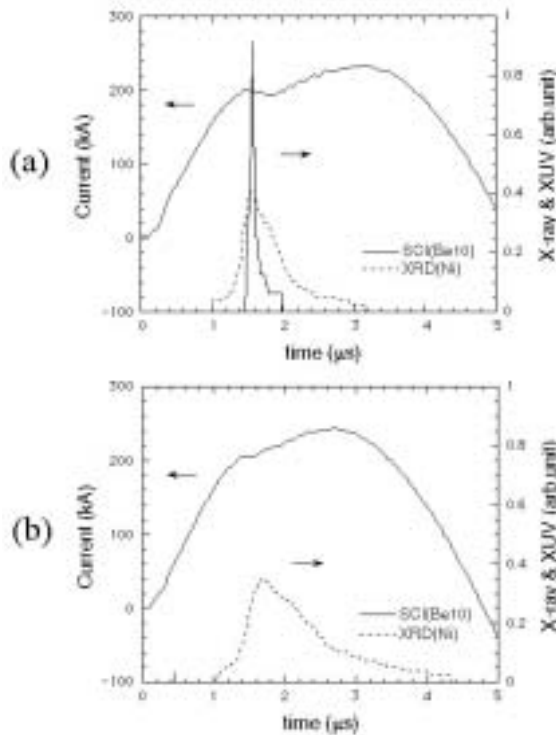


図6 . 縦磁場あり、なしの比較

Fig.6 Discharge current and x-ray radiation.

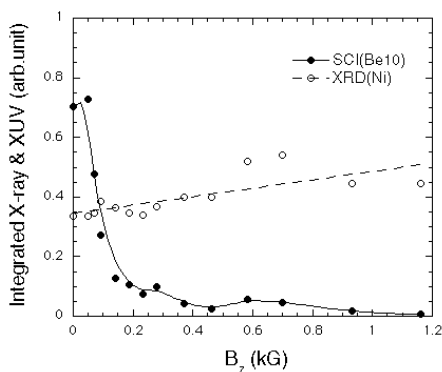


図7 . 縦磁場によるX線放射の変化

Fig.7 X-ray intensities vs. axial magnetic field.

軸方向磁場を加えることにより、シンチレーションプロブの信号は消滅し、X線ダイオードの信号は時間幅が広がっている。前者は主に Ar イオンからのK殻放射を捉え、後者は主にL殻放射を捉えている。図7は軸方向磁場を変化させたときのX線信号の変化のようすを示している。K殻放射は 0.2 kG 程度の磁場で大きく減少し、L殻放射は磁場の強度とともに徐々に増加している。これは軸方向磁場によってZピンチプラズマの持続時間が伸びている、と考えることもできる。

6 . おわりに

小形のZピンチ装置を用いてZピンチの半径収縮の過程とX線放射について調べた。半径収縮を伴うZピンチにおいてはプラズマの半径方向への加速によってエネルギーが注入され、13%の伝達効率を得ることができた。収縮時に成長する Rayleigh-Taylor 不安定はホットスポットの発生に不可欠なものであり、その波長は電流の立ち上がりの速さによって制御できると考えられる。

また、Zピンチは広範囲のエネルギーにわたるX線光源であり、エネルギーを制御することによって応用の範囲を広げることができる。半径方向の運動を制御するために軸方向磁場を加えることによりX線のエネルギーや時間幅を制御することができた。

参考文献

- [1] M.K. Matzen : Phys. Plasmas **4**, 1519 (1997).
- [2] D. Cook : Proc. 11th IEEE Int. Pulsed Power Conf., 25, Albuquerque (1997).
- [3] R.J. Leeper et.al.: Nuclear Fusion **39**, 1283 (1999).
- [4] K. Takasugi, A. Takeuchi, H. Takada and T. Miyamoto : Jpn. J. Appl. Phys. **31**, 1974 (1992).
- [5] A. Fisher, F. Mako and J. Shiloh : Rev. Sci. Instrum. **49**, 872 (1978).
- [6] R. H. Day, P. Lee, E.B. Salomen and D.J. Nagel : Los Alamos Sci. Lab. Rep. LA-7941-MS (1978).
- [7] K. Takasugi, T. Miyamoto, K. Moriyama and H. Suzuki : AIP Conf. Proc. **299**, 251 (1994).
- [8] V. Vikhrev : Private communication.
- [9] K. Takasugi, K. Moriyama, T. Shibuya and T. Miyamoto : Proc. 1996 Int. Conf. Plasma Phys. 1098 (1997).
- [10] K. Takasugi, H. Suzuki, K. Moriyama and T. Miyamoto : Jpn. J. Appl. Phys. **35**, 4051 (1996).
- [11] K. Takasugi, T. Miyamoto, K. Tatsumi and T. Igusa : AIP Conf. Proc. **409**, 299 (1997).