研究ノート

ETIGO-Iに於ける大強度パルス軽イオンビームの伝送実験 (II)

長岡技科大・工

山田哲夫, 升方勝己, 八井 淨, 松井正夫

(1982年8月11日受理)

Transport of an Intense Pulsed Proton Beam Through Wall-stabilized Plasma Channel in the Nagaoka ETIGO-I

Tetsuo Yamada, Katsumi Masugata, Kiyoshi Yatsui,
and Masao Matsui

(Received August 11, 1982)

Abstract

Transport of an intense pulsed proton beam has been experimentally investigated through a wall-stabilized plasma channel (1-m long) in the Nagaoka ETIGO-I. Proton beam of energy of 800-KeV is injected into the plasma channel. The transport efficiency increases with increasing channel current or decreasing channel pressure, being in good agreement with the existing theory. Changing the timing between channel current and LIB injection, we have found that there exists a good timing for the LIB injection. In some cases, the transport ceases to exist probably due to some plasma instabilities.

§ 1. はじめに

大強度パルス軽イオンビーム (Light - Ion Beam, LIB) による慣性閉じ込め核融合 (Inertial - Confinement Fusion, ICF)^{1, 2)}では, ダイオードから発生・収束されたビームをターゲットに照射する為, ビーム発生部からターゲットへの効率の良いビーム伝送が

Laboratory of Beam-Fusion Technology, Faculty of Engineering, The Technological University of Nagaoka, Nagaoka, Niigata 949-54.

要求される。即ち ICF 炉を想定すると、ターゲットの小爆発による燃焼生成物からダイオード部の破損を防ぐこと、また炉壁の負荷を低減する為にダイオードからターゲット間の距離が数 m 程度となり、損失の少ない LIB の伝送が不可欠となる。

LIB の伝送方法には i) 回転イオンリングを形成し、軸方向及び方位角方向の速度成分によって生ずる自己磁場により、LIB の保持と伝送を行なうリング法³⁾、ii) プラズマチャンネルによって方位角方向の磁場 B_θ を作り、チャンネル中に LIB を閉じ込めるプラズマチャンネル法⁴⁾等が提案されているが、後者の方が簡便であり且つ、過去の実績も多い。プラズマ・チャンネルは、LIB の電荷及び電流中和を果たすと同時に衝突によるビームのエネルギーロスが少なくなる様に密度を設定しなければならない。プラズマチャンネルの形成には、細線爆破型⁵⁻⁷⁾、レーザー励起型^{8, 9)}、及び壁閉じ込め型¹⁰⁾による所謂 Z-放電法を用いる事が多い。本実験では、低気圧ガス中での壁閉じ込め型 Z-放電によるプラズマチャンネルの形成と伝送特性実験を行ない、興味ある結果が得られたので報告する¹¹⁾。

§ 2. 実験装置

Fig. 1 に LIB 伝送実験装置の概略図を示す。大強度パルス軽イオンビーム発生装置 "ETIGO-I" ¹¹⁻¹⁵⁾ から磁気絶縁型ダイオード (Magnetically-Insulated Diode, MID) より取り出されたプロトンビームは、陽極の曲率 (曲率半径 $\sim 180 \text{ mmR}$) に従って収束し、プラズマチャンネルに入射される。今回の実験における典型的なダイオード電流及び収束点付近でのイオン電流密度は夫々 $V_d \sim 900 \text{ kV}$, $I_d \sim 60 \text{ kA}$, $J_i \sim 6 \text{ kA/cm}^2$ である。ビームのパルス幅は $\sim 80 \text{ nsec}$ (FWHM) であり、また MID に印加する絶縁磁場は 12 kG で $B/B_c \sim 2.7$ である。ここで B 及び B_c は夫々ダイオードギャップ間に印加される横磁場及び電子の磁場的絶縁が起こる臨界磁場を示す。プラズマチャンネルの圧力は $P_{ch} = 0.1 \sim 10 \text{ Torr. (air)}$ で、ダイオード側 ($P_d = 10^{-4} \text{ Torr.}$) とは $2 \mu\text{m}$ のポリエステルフィルムで保たれる。このフォイルによるプロトンビームのエ

Fig. 1 Schematic of LIB-transport experiment.

ETIGO-I に於ける大強度パルス軽イオンビームの伝送実験 (II)

ネルギーロスは900 keVのプロトンに対して100 keV程度である。

プラズマチャンネル電流は60 kV, 1.9 μ F, 3.4 kJのファストコンデンサバンクから供給され、立ち上がり時間は1.7 μ secであり、充電電圧50 kVのとき60 kAのチャンネル電流が得られる。チャンネルの最大入射半径は6 mm, チャンネル半径10 mm, チャンネル長さは約1 mとなっている。ビーム伝送部は黄銅管の中に硬質ガラス管またはアルミナのチューブが挿入された形状をもつ。尚、同軸形状はチャンネルの低インダクタンス化を図ると共に、キンク不安定性などのMHD不安定性の安定化のためにも有効とされている。

Fig. 1に示すように入出口でのプロトンビームのエネルギー及び粒子個数を測定するためにカロリメータ及び放射化法¹⁶⁾ ($^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}(\beta^+)^{13}\text{C}$)を用いた。両測定において銅板及びカーボングラファイトの有効面積は8.55 cm²であった。

§ 3. 実験結果及び検討

a) B_θ の半径方向分布

Fig. 2に磁気プローブから得られた磁場 B_θ の半径方向の分布を示す。 $r = 5$ mm付近から磁場が急激に立ち上がっているのが観測された。

つまり $r = 5$ mm付近にシート状の電流路が存在しているのが分かる。そして、このシート状の電流は $t = 0.5 \mu\text{sec} \sim 1.5 \mu\text{sec}$ にかけてチャンネル電流が増加するに従い、自己磁場によって内側に圧縮されていることが分かる。

b) 伝送効率とチャンネル電流の依存性

プロトンビームをチャンネル中に閉じ込めて伝送させるには、次式を満たすチャンネル電流 I_{ch} が必要である⁴⁾。

$$I_{ch} [\text{A}] = \frac{0.1 v_0 (1 - \cos \theta_m)}{1 - (a/R)^2} \quad (1)$$

ここで v_0 はプロトンビームの速度(m/sec), θ_m は最大入射角, a 及び R は入口でのプロトン

Fig. 2 Radial distribution of B_θ field measured by a magnetic probe, where a fast condenser bank of 50-kV, 1.6- μ F has been utilized. $P_{ch} = 0.3$ Torr.

ビームの半径及びチャンネルの半径である。例えば, $a/R = 0.6$ のチャンネルにより 800 keV, $\theta_m = 0.311$ (rad) のプロトンビームを伝播するには $I_{ch} = 90$ kA が必要となる。

Fig. 3 にチャンネル電流に対する伝送効率の実験結果及び $\theta_m = 0.311$ (rad) で 800 keV のプロトンビームが入射した場合の理論値を示す。伝送効率はチャンネルに入射したプロトンビームのエネルギー (又は粒子数) と出口で測定したプロトンビームのエネルギー (又は粒子数) の比率で定義する。プロトンビームはチャンネル電流が最大の少し手前の $t = 1.3$ μ sec で入射される。チャンネル電流が増加するとともに伝播効率が増加している。また, $I_{ch} = 50$ kA のとき約 80% の伝播効率を得られていることが分かる。この傾向は理論と良く一致するが, 全体的に実験結果は理論より 10~30% 低い。これはチャンネルプラズマとビームイオンとの衝突による損失のためと考えられる。これらの効果を更に詳しく調べるために次の実験を行なった。

c) 伝送効率とチャンネル圧力の依存性

プラズマチャンネルによるプロトンビームの減速の程度を調べるため, チャンネルの初期圧力に対するプロトンビームの伝送特性を調べた。Fig. 4 に $I_{ch} \sim 40$ kA のときの実験結果を示す。プロトンビームの入射タイミングは $t = 1.3$ μ sec である。

チャンネル圧力が 1 Torr. 以上になると, エネルギー伝送効率及び粒子伝送が急激に落ちる。これは, プロトンビームとプラズマチャンネル内の自由電子及び束縛電子との相互作用による損失によるものと考えられる。これ

Fig. 3 Transport efficiency (beam energy and proton number measured by calorimeter and carbon activation technique, respectively) as a function of channel current. The solid line represents the theoretical estimate calculated by eq. (1).

ETIGO-Iに於ける大強度パルス軽イオンビームの伝送実験(II)

Fig. 4 Transport efficiency vs. channel pressure, where the solid line represents the theoretical value of the energy transport efficiency.

イオンエネルギー損失を計算すると 900 keV のプロトンは約 5 Torr. の時 500 keV まで減衰し、これ以上の圧力の領域では放射化法でカウントされる領域からはずれる。しかし、実際には 10 Torr. 程度までの領域でカウントされており、これはチャンネル放電の結果、原子密度が初期の密度より低下したためと考えられる。

らの損失は、Bethe - Bloch の式¹⁷⁾

で与えられるクーロン散乱で良く説明できる。Fig. 4 にチャンネル長さが 1 m で空気の一価電離プラズマチャンネルに、800 keV のプロトンビームを入射したときのエネルギー伝送効率の理論値を示す。ここで、プラズマの電子温度は $T_e \sim 3$ eV と仮定した。これは $P_{ch} = 0.3$ Torr のときのチャンネル抵抗 $R_{ch} = 0.3 \Omega$ から Spitzer の理論値を用いて概算したものである。

ところで、Fig. 4 に於いてカロリメータで測定したエネルギー伝送効率と理論値を比較すると良く一致していることが分かる。前に記した方法で

d) ビーム入射タイミングと伝送効率

チャンネル電流の任意の時点にビームを入射した場合、伝送効率がどの様になるか実験してみた。

Fig. 5 にピークチャンネル電流をパラメーターとしたとき、放射化法によって測定された粒子伝送効率のビームの入射時間との関係を示す。チャンネル電流のピークは $t \sim 1.7 \mu\text{sec}$ である。 $I_{ch}(\text{peak}) \sim 20$ kA では、ピーク ($t \sim 1.7 \mu\text{sec}$) を過ぎた後でも LIB は良

く伝送している。しかし、 $I_{ch}(\text{peak})$
 $> 40 \text{ kA}$ となると、ピークを過ぎる
 とほとんどビームは伝送しない。この
 伝送不能領域は、プラズマチャンネル
 に何んらかの不安定性が生じたためと
 考えられる。

次に、チャンネル圧力をパラメータ
 ーとしたときの粒子伝送効率をFig. 6
 に示す。チャンネル圧力が比較的高い
 と($p_{ch} > 3 \text{ Torr.}$)、ピークを
 過ぎた時にプロトンビームを入射して
 も、良く伝送する。しかし、チャンネ
 ル圧力が低い($p_{ch} < 0.5 \text{ Torr.}$)
 とピーク以降ではほとんど伝送しな
 くなる。

ビームの伝送不能領域は、Fig. 5
 及び6より、プラズマチャンネルの電
 流が大きく、つまり磁場 B_θ が大きく、
 また、チャンネル密度が低い場合であ
 る。これはソーセージ不安定性の成長
 率が大きくなる様な条件と定性的に一
 致している。これについては、引き続
 き詳細に調べているので、いずれ報告
 したい。

e) チャンネル電流と閉じ込め角度

最後に、プラズマチャンネルを通過後のプロトンビームの拡がり¹⁸⁾を実験的に調べた。
 Fig. 7に実験装置図を示す。チャンネル出口を12mmφにコリメートし、ビームのダメー
 ジパターンを得るため、銅板を出口より35mm後方にセットした。ビームの入射タイミン

Fig. 5 Particle-transport efficiency plotted against beam-injection time after being closed the channel switch, where the channel current is a parameter.

Fig. 6 Particle-transport efficiency vs. beam-injection time, where the channel pressure is a parameter.

ETIGO-I に於ける大強度パルス軽イオンビームの伝送実験 (II)

POST - TRANSPORT BEAM EXPANSION

SHOT NUMBER	CHANNEL CURRENT I_{ch} (kA)	DAMAGE SIZE DIAM (mm)	BEAM-EXPANSION ANGLE (rad.)
B - 1714	20	11.7 ± 0.3	0.165 ± 0.05
B - 1704	38	16.5 ± 0.5	0.203 ± 0.07
B - 1529	49	20.3 ± 0.7	0.281 ± 0.1

Fig. 7 Post-transport beam expansion experiment.

(a) Schematic diagram of the experiment.

(b) Damage pattern on copper target.

グは $t = 1.3 \mu\text{sec}$ である。チャンネル電流が大きくなると、ビームの閉じ込められる最大入射角度が大きくなるので、チャンネル通過後のビームのダメージパターンも大きくなる。ダメージパターンより求めたビームの拡がり角を、チャンネル電流に対してプロットしたものを Fig. 8 に示す。実線は、ビームエネルギー $E_b = 800 \text{ keV}$ の場合の理論値である。実験値は、理論値を若干上回っている。これは、入射してくるプロトンビームのエネルギーが 880 keV の単一粒子だけではなく、かなり低エネルギーの粒子が含まれていると思われる。実験値は、 $E_b \sim 350 \text{ keV}$ 程度のプロトンビームに相当している事が分かる。

Fig. 8 Beam expansion angle at channel exit vs. channel current, where the solid line represents the theoretical value obtained by eq. (1).

§ 4. まとめ

壁閉じ込め型Zーピンチ法を利用して、半径10 mm、長さ1 mのプラズマチャンネルが形成された。これを利用して、プロトンビームの伝送実験を行ない、次の結果を得た。

- i) チャンネル内の電流路は、シート状になっており、チャンネルの電流増加と共にチャンネルの中心方向に圧縮される。
- ii) チャンネル電流が増加すると、伝送効率も増加する。800 keVのプロトンビームをチャンネルに入射し、 $I_{ch} = 50$ kAで伝送効率～80%を得た。
- iii) チャンネルの初期圧力を変化させ、プロトンビームの伝送効率を調べた。プロトンビームのエネルギー損失の機構は、プラズマ中の電子とのクーロン散乱によって説明できた。
- iv) チャンネルの方位角方向の磁場が大きく、また、チャンネルの密度が低いと、不安定性が生じ、ビームが伝送できなくなる。

参 考 文 献

- 1) S. Humphries, Jr : Nucl. Fusion 20, 1549 (1980).
- 2) 八井 淨 : 高温学会誌 6, 121 (1980) ;
八井 淨 : 応用物理 49, 1206 (1980) ;
八井 淨 : 日本物理学会誌 36, 757 (1981) ;
八井 淨 : フィジックス 3, 1 (1982).
- 3) M. Ikeda, S. Kawata, and K. Niu : 核融合研究別冊 47, No.7 210 (1982).
- 4) D. Mosher, G. Cooperstein, Shyke. A. Goldstein, D.G. Colombant, P.F. Ottinger, F. L. Sandel, S. J. Stephanakis, and F. C. Young: Proc. 3rd. International Topical Conf. on High-Power Electron and Ion Beam Research and Technology, Novosibirsk, USSR (1979) p.576.
- 5) P. A. Miller, R. I. Butler, M. Cowan, J. R. Freeman, J. W. Poukey, T. P. Wright and G. Yonas: Phys. Rev. Lett, 39, 92 (1977).
- 6) J. N. Olsen, D. J. Johnson and R. J. Leeper: Appl. Phys. Lett, 36, 808 (1980).
- 7) K. Yatsui, K. Masugata, T. Nakayama and M. Matsui : Phys. Lett. 89A, 235 (1982) ; 昆野康二, 他 : 核融合研究 46, 466 (1981).
- 8) J. N. Olsen : Sandia Report, SAND 81-0683 (1981) p.93.
- 9) R. M. Measures, N. Drewell, and P. Cordinal: J. Appl. Phys, 50, 2662 (1979).
- 10) F. L. Sandel, F. C. Young, S. J. Stephanakis, F. W. Oliphant, G. Cooperstein, S. A. Goldstein and D. Mosher: Bull. Amer. Phys. Soc, 24, 1031 (1979).
- 11) K. Yatsui, et al ; Proc. Intern. Top. Meeting on ICF Research by Light-Ion Beam (Nagaoka, May 11 & 12, 1982), edited by K. Yatsui, IPPJ-611 Inst. of Plasma. Phys., Nagoya Univ. (Oct. 1982) p.40.
- 12) K. Yatsui, Proc. US Japan Workshop on Compact Toroid (Osaka Univ, Feb., 1981) p.105.
- 13) K. Yatsui et al : Proc. 4th Intern. Top. Conf. on High-Power El. and Ion Beam Res. and Tech. (Palaiseau, France, 1981) p.27.
- 14) K. Masugata, et al : Jpn. J. Appl. Phys. 20, L347 (1981).

- 15) 升方勝己, 他 : 核融合研究別冊, 47, No.8, 100 (1982);
K. Yastui, K. Masugata and M. Matsui : Phys. Rev. 26A, No.5 (1982).
- 16) F. C. Young, J. Golden, and C. A. Kapetanacos ; Rev. Sci. Instrum, 48,
432 (1977).
- 17) T. P. Wright, T. A. Green, and T. A. Mehlhorn, J. Appl. Phys, 52, 147 (1981).
- 18) F. C. Sandel ; Proc. 4th Intern. Top. Conf. on High—Power El. and Ion Beam
Res. and Tech. (Palaiseau, France, 1981) p.129.