中性粒子ビーム入射によるミラー磁場中の ホットイオンのビルドアップと実験装置

谷津 潔，河辺隆也，三好昭一

(筑波大・物理)

(51年9月6日受理)

Abstract

Buildup of hot-ions by neutral-beam injection into a target plasma in a mirror field is calculated. The main assumption is that the background neutrals which determine the charge-exchange loss time are originated from charge-exchange collision of the injected energetic neutrals with the target plasma. Electric power for confining magnet and pumping speed for evacuation are examined for the experiment of hot-ion buildup.

§1 はじめに

ミラー磁場におけるマクロ不安定性は極小磁場を用いることにより安定化できることが示され¹⁾、次に問題となっていたミクロ不安定性もアメリカの2Xシリーズ、ソ連のPRシリーズ等の実験により高密度条件($(\omega_{pe}/\omega_{ce})^2 \geq 1$)のもとで⁽²⁻³⁾、あるいは端からプラズマを流入させることにより安定化されることが示された⁽⁴⁾。そのようにして安定化された条件のもとでプラズマ閉じ込め時間の実験式 $n\tau = 2 \cdot 10^9 T_i^{3/2}$ が2XⅡBで得られている。これはイオンの衝突損失で予想される式と密度、温度依存性は一致しているが、値は約1/3になっている。

上の結果は磁場のパルス運転を利用して、プラズマガン等で入射されたプラズマを磁場圧縮によ

Buildup of Hot-Ions by Neutral-Beam Injection in a Mirror Field and its Experimental Facility.

Kiyoshi YATSU, Takaya KAWABE, and Syoichi MIYOSHI
Institute of Physics, University of Tsukuba

り高温化したプラズマ，あるいはその中に中性粒子入射を行って加熱したプラズマについて得られたものである。開放端系装置の利点である定常運転を達成するためには定常磁場中で高温プラズマを生成し，維持することが必要であり，それがミラー型装置による次の研究課題の1つであると考えられる。

定常磁場中に中性粒子入射を行ない，ローレンツ電離によってプラズマを生成し，生成されたプラズマによる入射粒子の電離によりプラズマをさらにビルドアップさせる実験では不安定性のために 10^{10} cm^{-3} 程度以上の密度は得られていない。⁽⁵⁾ これを2X等の実験と合わせるとミラー磁場中でプラズマは低密度領域と高密度領域で安定であり，その間では不安定である。高密度領域での安定領域は $\omega_{pe}^2 / \omega_{ce}^2$, R_p / a_i (R_p : プラズマ半径, a_i : イオンのラーマ半径) 等の関数として理論的計算もなされているが，⁽⁶⁾ 現在迄の実験結果を簡単に密度の関数としてまとめると， $10^{10} - 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ の領域が不安定領域になっている。したがって定常磁場中に高温，高密度プラズマを生成するためには，この不安定領域を何らかの方法で飛び越さなければならない。

定常磁場中に高温，高密度プラズマを生成するためには，まずミラーの端から 10^{13} cm^{-3} 以上の高密度プラズマを流入させてターゲットプラズマとし，中性粒子入射によってホットイオンをビルドアップさせ，密度が 10^{13} cm^{-3} 程度以上になった後プラズマの流入を停止して高温プラズマと入れ換えるのが1つの有力な方法であると考えられる。

本文ではミラーの端から流入されたターゲットプラズマへの中性粒子入射による高温プラズマのビルドアップについて述べ，高温プラズマ生成の実験上の問題点を指摘する。

§ 2 ホットイオンのビルドアップ

ターゲットプラズマへの中性粒子入射によるホットイオンのビルドアップについて考察する。ターゲットプラズマはプラズマの安定性から密度 n_T は 10^{13} cm^{-3} 以上あることが望ましく，荷電交換損失時間を長くするためには中性粒子 (H^0 とする) 密度 n_0 との比 n_T / n_0 は100以上であることが要求されるが，プラズマガンにより，あるいは放電等によって作ったプラズマを加熱することにより，生成可能であると考えられる。

ターゲットプラズマの密度が一定であるとするホットイオンのビルドアップは次の式で表わされる。⁽⁴⁾

$$\frac{dn_H}{dt} = \frac{2R_p I_0}{eV_p} (n_H + n_T) (\sigma_i + \alpha \sigma_x) - (n_H + n_T) \frac{1 - \alpha}{\tau} \quad (1)$$

中性粒子ビーム入射によるミラー磁場中のホットイオンのビルドアップと実験装置

ここで n_H はホットイオンの密度, I_0 は高エネルギー中性粒子 (H^0 のみで考える) の等価電流, V_p はプラズマの体積, $\alpha = n_T / (n_H + n_T)$, σ_x は荷電交換の断面積, σ_i は電離の断面積でイオンと電子によるものの両方を含めて考えるものとし, σ_i , σ_x とも Sweetman の文献⁽⁷⁾ の値を用いることにする。 τ はここでは衝突損失時間 τ_c と荷電交換損失時間 τ_x で定まるものと考えることができる。 τ_c は前に述べた $2X \parallel B$ の実験式を用いて計算する。 τ_x を支配する中性粒子は入射中性粒子ビームとプラズマとの荷電交換で発生するものが大部分であると考えられるので (中性粒子ビーム源からの流入量は荷電交換で発生する量の $1/10$ 以下にすることが可能であると考えられる), n_0 の時間変化は次式で表わされるものとする。

$$\frac{dn_0}{dt} = \frac{2R_p I_0}{e V_0} (n_H + n_T) \sigma_x - n_0 \frac{2S}{V_0} \quad (2)$$

ここで V_0 は真空容器の体積で, S は排気速度であるが, H_2 に対する排気速度を用いるので, H^0 に対して 2 倍にしている。

次に具体的計算例について述べる。

プラズマ体積等は半径 100 cm のインヤンコイルを用いた装置で予想される $2R_p = 30 \text{ cm}$, $V_p = 1.4 \times 10^4 \text{ cm}^3$, $V_0 = 5 \times 10^5 \text{ cm}^3$ とし, また $n_T = 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $I_0 (H^0) = 100 \text{ A}$ とする。電子による σ_i は $T_e = 1 \text{ keV}$ の値を用いる。第 1 図には $S = 10^5 \text{ l/s}$ の場合の n_H の時間変化が中性粒子ビームのエネルギー E_0 をパラメータとして示されている。初期圧力 $P_0 = 10^{-7} \text{ Torr}$ としているが, ビームエネルギーが低い場合 σ_x の方が σ_i より大きく, 入射ビームとプラズマとの荷電交換で発生する中性粒子の量が多いために真空容器内

第 1 図 ホットイオン密度 n_H の時間変化

の圧力が急速に上昇して荷電交換損失時間が減少し, ホットイオンのビルドアップが停止して, さらに減衰してしまう。第2図には $E_0 = 60 \text{ keV}$ の場合の n_H の時間変化が S をパラメータとして示されている。

以上第1図, 第2図より, ターゲットプラズマへの高エネルギー中性粒子ビーム入射により定常にホットイオンを 10^{13} cm^{-3} 以上にビルドアップさせるためには, ビームエネルギーが高く, たとえば $60 - 70 \text{ keV}$ 以上で, 真空ポンプの排気速度も非常に大きくなければならないことがわかる。

§ 3 実験装置

ミラー磁場による高温プラズマの定常閉じ込めを立証するための実験装置に関して, 磁場発生コイル, 電源, 真空ポンプについて考察する。

(8)
コイルは普通のインヤンコイル, すなわち 180° の半円を組合わせたインヤンコイルを用いるものとする。半径の比 $R_2/R_1 = 3$ とすると軸上のミラー比は約2.5である。磁場の発生に要する電力を, コイルの大きい方の半径 R_2 をパラメータとして中心磁場に対して示すと第3図のようになる。ここで電流密度は $B = 20 \text{ kG}$ の時1~2秒のパルス運転ができるように 100 A/mm^2 程度にしてある。

プラズマ半径 R_p は $(0.1 - 0.2) R_2$ 程度になると考えられるが, $R_p = 0.15 R_2$ とした場合の R_p/a_i も第3図に示されている。プラズマがロスコーン不安定性に対して安定であるためには R_p/a_i が

第2図 ホットイオン密度 n_H の時間変化。
排気速度 S がパラメータ。

中性粒子ビーム入射によるミラー磁場中のホットイオンのビルドアップと実験装置

10程度以上大きいことが要求される

が、 2×10^5 Bでは R_p/a_i が5程度のプラズマも端からプラズマを流入させることにより安定化されることが示されているので、 R_p/a_i は5程度以上あればプラズマを安定に閉じ込めることができると考えられる。

装置の大きさとしては、中性粒子入射、および排気用のポートに要する面積から考えて、R2は50cm程度以上あることが望ましい。上に述べたような条件から、目的とする実験を行なうためには磁場用電源は20MW程度、できれば100MW以上あることが望ましい。したがって必要電力、あるいはコイルの熱の問題から最初の実験は準定常運転にならざるをえないであろう。

次に真空ポンプについて考える。この実験を行なうためには 10^5 l/s以上の排気速度を必要とするが、真空容器をコイルの内部に設置する形で考えると、真空ポンプをコイルの外部に

置いたのでは導管のコンダクタンスのためこれだけの排気速度を得ることは不可能である。したがって容器の面をゲッター面、あるいはクライオ面とした形の排気系を考えなければならず、真空ポンプの条件からも運転は準定常にならざるを得ないであろう。磁場、および中性粒子ビーム源の定常運転が実現できたとして、定常の排気でプラズマを維持できるか否かについては、中性粒子の壁からのリサイクリングに関して不明な点が多いためここで推定することは難しく、準定常運転の実験からデータを集積することが必要であろう。

これまでは n_T を 10^{13} cm^{-3} と仮定して、ビームの減衰長が $2R_p$ よりかなり大きい条件で議論

第3図 R_2 をパラメータとして、磁場強度に対して必要電力を示す。プラズマ半径とイオンラマ半径の比 R_p/a_i も $E_i=60 \text{ keV}$ の場合について示す。

を進めてきたのであるが， $2 R_p$ が減衰長と同程度，あるいはそれより大きくなると，荷電交換で生じた中性粒子がプラズマ領域から逃げる前に電離衝突をしてプラズマ中にトラップされるようになるため，必要な排気速度は小さくてすむようになる。しかし，密度を高くするためには， β 制限のために，磁場強度を上げなければならず，また密度が高くない場合は， R_p を大きくするためにコイルを大きくしなければならないので，磁場用電源はさらに大電力のものがようになる。

§ 4 結 び

以上ミラー型実験装置による実験の次の課題と考えられる，定常磁場中での高温プラズマの生成，維持を行なう1つの手段としての，ターゲットプラズマへの高エネルギー中性粒子ビーム入射によるホットイオンのビルドアップについて考察してきた。これより次のようなことが明らかにされた。

- 1) 中性粒子入射によりホットイオンを維持するためには，中性粒子のエネルギーは60—70 keV 程度以上必要であり，エネルギーがそれ以下の場合は莫大な排気速度を必要とする。60 keV 程度の場合でも，真空容器の面全体が排気面になる程の排気速度が必要である。
- 2) この実験を行なうための磁場を発生するためには，20 MW程度以上，望ましくは100 MW程度の電源が必要である。

参 考 文 献

1. Yu. V. Gott, M. S. Ioffe and V. G. Tel'kovskii, Nuclear Fusion, Suppl. Part 3, 1045 (1962).
2. J. R. Hiskes, A. H. Futch; Nuclear Fusion 14 (1974) 116.
3. F. H. Coensgen, W. F. Cummins, A. W. Molvik, W. E. Nexsen, Jr., T. C. Simonen and B. W. Stallard 5th Int. Conf. Plasma Phys. Contr. Fusion Res. (Proc. Conf. Tokyo, 1974) 1, IAEA, CN-33/D2-1.
4. F. H. Coensge, W. F. Cummins, B. G. Logan, A. W. Molvik, W. E. Nexsen, T. C. Simonen, B. W. Stallard, and W. C. Turner, Phys. Rev. Letters 35 (1975) 1501.
5. O. A. Anderson, D. H. Birdsall, C. C. Damm, J. H. Hoote, A. H. Futch, R. K. Goodman, F. J. Gordon, G. W. Hamilton, E. B. Hooper, A. L. Hunt, J. E. Osher and G. D. Porter, 5th Int. Conf. Plasma Phys. Contr. Fusion Res. (Proc. Conf. Tokyo, 1974) 1, IAEA, CN-33/D5-2.

中性粒子ビーム入射によるミラー磁場中のホットイオンのビルドアップと実験装置

6. D. E. Baldwin, H. L. Berk, L. D. Pearlstein, T. Kammash, and T. Uckan, *ibid* CN-33/D1-1.
7. D. R. Sweetman, *Nuclear Fusion* 13 (1973) 157.
8. R. W. Moir and R. F. Post, *Nuclear Fusion* 9 (1969) 253.