ミラー磁場中での電子の高周波加熱の機構*

名大プラズマ研 本 沢 忠 夫**

(昭和 40 年 11 月 22 日受理)

この問題についての理論的な考察は例えば M. Seidl¹⁾ によってなされている。その理論の中で彼は、外部から加えられる (ミラー磁場に垂直方向に偏向している) R. F. 場をその中で電子の運動に対する 1 種の摂動として扱い、それが加わった場合の電子の振舞いを摂動論を展開させることによって論じている。そして次のように結論している。

もし、ミラー磁場の中央面 (midplane) 近くに電子サイクロトロン共鳴領域が来るような場合について考えたとすれば、ピッチ角が元来大きい ($\sim 90^\circ$) 電子 (つまり、その反射点が中央面近傍にあるような電子) については効率よい加速がおこる。なぜなら、それらの電子は一樣な磁場の中にいるのと殆んど同じ状態にあるから。ところが、それ以外の多くの電子と R. F. 場とのエネルギーのやり取りは周期函数的におこっていて、それらの電子が得るエネルギーの時間平均値をとればそれは 0 に近くなるはずである。しかし、実際には残留ガスとの衝突などの効果が効いてくるから電子は統計的な加速 (stochastic acceleration) を受けることになる。したがって、ミラー磁場中での電子の高周波加熱は割にゆっくりおこっているにちがいないというわけである ($\sim 0.1 \text{ sec}$)。

ところが、我々の高周波加熱の実験^{2) ~ 4)} では割に短時間 ($\sim 1 \mu \text{ sec}$) 内に可成りの加熱がおこっていることが観測された。この場合、残留ガスとの衝突に対しての平均自由時間は $\sim 100 \mu \text{ sec}$ の程度である。したがって実験の結果は残留ガスとの衝突に起因してゆっくりおこる統計的效果だけでは説明しきれない。もっと効率のよい加熱機構が考えられねばならない。その 1 つの可能な機構を次に述べよう。

*) Mechanism of High Frequency Heating of Electrons in a Magnetic Mirror Field

**) Tadao HONZAWA (Institute of Plasma Physics, Nagoya Univ.)

ミラー磁場内に捕捉された電子は2つの反射点によってはさまれた空間内で往復運動を繰り返しているが、もし外部から上述したようなR・F・場が加えられると、電子はそのR・F・場から1回の往復運動毎に磁場に垂直な方向にエネルギー

$$\Delta W = \Delta W_1 + \Delta W_2 \quad (1)$$

を与える。ここで ΔW_1 、 ΔW_2 は夫々電子が行きと返りにえるエネルギーを表わしている。

しかるに、元々エネルギー $W = W_{\perp} + W_{\parallel}$ をもっている電子が磁場に垂直方向のエネルギー ΔW を与える（或いは失う）ということはミラー磁場の中央面を通過するときに何らかの原因により散乱されて

$$\Delta \alpha \approx \sqrt{\frac{W_{\parallel}}{W}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta W}{W}} \quad (2)$$

だけピッチ角が増（或いは減少）したことに相当するから、それに伴って反射点の位置 z_t は内側（或いは外側）に向って移動する。ただし(2)式を求めるにあたって $\Delta W \ll W$ を仮定した。そしてその移動距離は

$$\Delta z_t = -2 \left\{ B_t / \left(\frac{\partial B}{\partial z} \right)_t \right\} (\cot \alpha) \Delta \alpha \quad (3)$$

とかける。ここで添字 t は反射点の位置に対応した量を表わしている。

以上の議論から云えることは、(1)式において例えば $\Delta W = 0$ となったとしても、 ΔW_1 、 ΔW_2 に対応して(2)式から求まるピッチ角の変化分 $|\Delta \alpha_1|$ 、 $|\Delta \alpha_2|$ は必ずしも一致しないから、1回の往復運動当り

$$\Delta \alpha = \Delta \alpha_1 + \Delta \alpha_2$$

だけのピッチ角の変化分が残る。一般に（残留ガスとの衝突を無視した場合とかそれを無視しなくともR・F・場が充分強い場合には）、 $\Delta \alpha > 0$ となるから(3)式より $\Delta z_t = \Delta z_{t1} + \Delta z_{t2} < 0$ となって反射点は平均として内側に向ってドリフトすることになる。そのドリフトの速さは

$$v_d \approx \left(\frac{\Delta z_t}{2 z_t} \right) \langle v_{\parallel} \rangle \quad (4)$$

の程度である。ここで $\langle v_{\parallel} \rangle$ は電子の磁場方向の平均の速さを表わしている。したがって、はじめのうちはミラー磁場の中心（ $z = 0$ ）から可成り離れたところに反射点を有して（ゆっくりした

stochastic acceleration だけを受けて)いた電子も

$$\tau_e \approx z_M / v_d \quad (5)$$

程度時間が経った后では、その中心近くに反射点をもつようになり、遂には一様磁場中におかれた電子と同様に効率のよい加速を受けることができる。ただし、(5)式において z_M は最大磁場強度の点の z 座標を表わしている。かかる機構においては、電子の高周波加熱に要する時間は凡そ(5)式から決まる時間と同程度になるであろう。ちなみに我々の実験条件にあった τ_e を計算してみると $\sim 1 \mu \text{ sec}$ の程度になる。したがって以上のような機構の加熱が実際におこっているのではないかと考えられる。

参 考 文 献

- 1) H. Seidl: preprint (文献センター所蔵, 登録番号 2004, 1963)
- 2) 本沢, 田中, 池地, 高山: 核融合研究, 14, 5 (1965) p 476.
- 3) 本沢, 田中, 池地, 高山: 同上, 14, 6 (1965) p 696.
- 4) 本沢, 田中, 池地, 高山: 同上, 14, 11 (1965).