RF プラグ研究に対するコメント

武 田 進

(中 部 工 大)

(55年7月23日受理)

Comments to RF Plug

Susumu Takeda

(Received July 23, 1980)

Abstract

Some comments and questions are presented to the research works of RF Plug of a Plasma.

Most of the published works are experimentally investigated followed by the theories to explain the results. However, it is not clear whether or not the wave of an eigen mode is efficiently excited. Even the wave is excited, another mechanism might be more essential to the confinement. Thus further study will be required.

カusp中プラズマのプラグと加熱についてはプラズマ研究所で10年以上開発研究が行われ、多くの成果は多数の論文に発表されている。

ところで最近核融合研究誌⁽¹⁾に小島氏により一質問が述べられた。自分も似た様な疑問を前から持って居り、あらためて主な論文を読み直した所、関連して多くの新しい疑問が湧いて来たのでその一部をここに述べて討論の種としたい。

小島氏同様に果して静電サイクロトロン波が能率よく励起されているのか。この波の存在がプラグと加熱に本質的な役割をしているのであろうかというのが原点である。発表論文で明かになった主な実験事実は最適周波数の存在と電界、磁界、密度等の依存性である。

先づ初期の論文(2)では $\nabla_{\parallel} E^2$ と $\nabla_{\parallel} B$ による力の和が単粒子について考えられている。そしてこのモデルは不適当と言っている。 $F_{\parallel} \propto \frac{e^2}{4m} \frac{\nabla_{\parallel} E^2}{\omega_{ci} - \omega}$ なる形の式は後まで度々使用されて居るが $\nabla_{\parallel} B$ の効果は波動理論には考慮されてない。波動の固有モードの $k_{\parallel}$ は $2\pi/L$ (L は電極の長さ)とした。後には $k_{\parallel} = \pi/L$ を無条件に使用している。 $k_{\perp}$ の方は $J_0(k_{\perp}R) = 0$ の根より出して居るので電極の両端及びプラズマの半径 R で電界が零という境界条件を入れて R 方向に $m=0$ の定在波、 L 方向(磁界方向)に半波長の定在波を仮定したのかと思った。磁界方向の $k_{\parallel}$ は波数分解した中の成分を考えるならばこの方向には進行波となり固有モードではない。ここに言う固有モードは R 方向のみの定在波ということになる。

尚、静電イオンサイクロトロン波の平行方向電界は電極間電界の方向と直角になって、たとえ電極の端の効果で幾分の $E_{\parallel}$ があるとしても、 $k_{\parallel}$ の成分の静電波電界と能率よく結合するとは思えない。又直角電界により $m=0$ (R 方向の定在波)も $m=1$ (θ 方向の定在波)も励振は困難であろう。

しかしline cusp ではプラズマはシート状になり電界の電極間分布を後に測ったものでは中央で極大になり一応 π/h (h はプラズマの厚さ)の定在波の様に見える。この時電極間電界 $E_{\perp}$ で h 方向の静電波電界と結合可能である。そうだとすれば固有モードは厚さの方向の境界条件のみにより、小島氏の言われる様に電極間隙を変えても固有モードの周波数は不変のはずである。

現在に至るまで公式発表論文では平行方向の波の分散関係が測定されていないので固定は出来ない。

同じ論文のFig. 9には $\omega/\omega_{ci} = 1.25$ で k_i の極大がありイオンサイクロトロン減衰に相当するという記述がある。実験では $\omega/\omega_{ci} = 1.4$ 、後には $1.6 \sim 1.9$ にもなり、 ω_{ci} からの外れ

が大きく、サイクロトロン減衰と言えるかどうか。もっともその定義によるであろうが。

もう一つ不思議なことに波の分散は一般に $D(\omega, k_{\perp}, k_{\parallel}) = 0$ で表わされるので $k_{\perp}$ と $k_{\parallel}$ を電極の長さでプラズマの厚さできめれば ω は自動的にきまり、イオンサイクロトロン減衰の最大になる周波数と一致するとは限らない。言いかえるとプラグと加熱に対する optimum 周波数 ω と $k_{\perp}$ をきめると分散より決定する $k_{\parallel}$ は一義的にきまり、それに合せる様電極の長さを選ばせなければならない。

ion flux⁽³⁾ の定義ははっきりしない。エネルギー分析器のグリッドに減速電圧をかけてコレクタ電流を測っているのだから、その電圧に相当する速度までをもつ全粒子の総和で flux を定義して高周波の有無の比をとっている様だ。そうであれば ion flux α も減速電圧に依存して一義的に定まらない。又この減速電圧を充分大きくして全粒子をコレクトするのなら探針で電子密度を測ったものと同じになるう。

(4)の論文の中の理論ではプラグするための力 F は F_1, F_2, F_3 の積となって居り、 $F_1 \propto \frac{\nabla B}{B}$ の項が入っている。故に均一の磁界分布では波の存在とは無関係に $F=0$ となりプラグ出来ないことになる。前の論文(2)では ∇B は無視されて居り、後の論文でも大抵この項はない。最適周波数では $F = \nabla(-\frac{\phi}{T_i}) / T_i \cdot \phi \propto \frac{q E^2}{4m} (\omega^2 - \omega_{ci}^2)^{-1}$ をいつでも用いている。只プラズマ内の浸透電界が真空中の $(\frac{\omega_{pi}^2}{\omega_{ci}^2})^{-2}$ 倍又は $(\omega_{pi}^2 / \omega_{ci}^2)^{-1}$ と考えている。従って $\nabla_{\parallel} B$ が

必要条件かどうかははっきりしない。

(5)の論文で空間電位の存在が論ぜられているが波の存在は理論式に入っていない。尚高密度では $\alpha_e = \alpha_i$ とあるので(8)式よりその時 $\Delta\phi_s = 0$ 、従って(7)式より $\alpha_e = 1.0 = \alpha_i$ 、(6)式より $\phi = 0$ となってしまうのでプラグ出来ないことになる。

(6)の論文ではパラメータの比例則が述べられている。サイクロトロン半径とプラズマシースの厚さが同程度になると電界はプラズマ中によく浸透するという考えはこれまでしばしば述べられているが理論式には含まれていない様だ。

小島氏の提案の様に電極間空隙の容量とプラズマの等価インダクタンスの直列共振(レザナンスプロープの考え)を仮定すれば共振周波数 ω は $\omega^2 - \omega_{ci}^2 = \omega_{pi}^2 \frac{d_1}{d_2}$ (d_1 と d_2 はそれぞれ空隙と電極の間隔)となり $\phi \propto \frac{E^2}{n}$ の形になるから実験⁽⁶⁾と合う。又この時(4)の論文で Fig.13 の n と ω の関係を定量的によく説明する。

(7)の論文の Fig. 8 に示すコイル使用の場合はそのインピーダンスが低くプラグに必要な両端の

電圧で示すより電流で示す方が良くないか。電圧は1000ボルト位でもインピーダンスが低いため大電流が流れる。プラズマ密度の広い範囲にわたり電圧の変化は少ないが電流の方は如何であろうか。むしろ密度と高周波入力電力の関係を示せば効率の変化が直接わかる。

次に技術的なことだが、この様な低インピーダンスのコイルに大電流を給電するにはFig. 4の様な並列共振を用いるより直列共振回路の方が望ましい。又並列の50Ωには大電流が流れて効率を下げる。

コイルを用いると理論では $\omega/\omega_{ci} < 1$ 以下 (Fig. 12) となるのに実験ではFig. 10の様に $\omega/\omega_{ci} > 1.0$ となる。これは非線形効果によるとの説明は少し苦しい様にも思える。今まで電極型では常に $\omega/\omega_{ci} > 1$ となって非線形効果には言及してない。

(8)の論文はレーザ生成プラズマの閉じ込めの話である。先ず高周波のない時の密度の減衰時間は19μsecとなっており、初期の論文で200~400μsecに比して一桁も早い。又高周波プラグすると4倍位となるが前の論文の0mseという推定に比して大変早い。密度の相違も考えると $10^{13} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 数eVの電子温度では解離再結合の寄与は大きくないか。尚高周波のない時のカスプ損失の理論値との対比は如何なのであろうか。

(9)の論文では小島氏の提案⁽¹⁾に従ってインピーダンスの測定を行っている。電子の項は無視されてイオンの項のみ考えるとcold plasmaの誘電率は $1 - \omega_{pi}^2 / (\omega^2 - \omega_{ci}^2)$ となり $|\epsilon_Y|$ の周波数特性は図(7)(a)の実験値に大変良く合う。一方波動理論にする $|\epsilon_Y|$ には合はない。又直列共振の考えでプラズマ中の電界が真空中より大きくなることもよく説明出来る。

(10)の文献の中の第1.4-1図(p21)と第1.4-4図(p23)に示される電界と密度の空間分布測定は画期的であるとともに決定的である。初期の段階でこれが行われなかったのが不思議にも思える。(5)の論文の中で空間電位 ϕ_s の測定に際して電極の対称面(中心面)にプローブを置くことに依り高周波による妨害を観測しなかったという記述がある。中心面で高周波がないならば電界分布は半波長でなく一波長で $k_{\perp} = 2\pi/h$ (hはプラズマの厚さ)の固有モードかと思った。第1.4-1図(b)で電極間中央での電界が最大となって明かに π/h のモードであり、前の記述と矛盾する。しかし厚さの方向に定在波が確認されたとも解釈出来る。

所がこの電界の勾配 $\nabla_{\perp} E^2$ によるponderomotive forceは磁界と直角方向にも力を生じプラズマの厚さを広げるはずである。同図のnの分布を見ると高周波で高さは低くなるのに横へは殆んど広がってない。一方プラグにきくのは $\nabla_{\parallel} E^2$ であるが第1.4-4図を見ると電極の外側に電界がのびているとは言え $\nabla_{\perp} E^2$ に比して $\nabla_{\parallel} E^2$ は小さい。従って $\nabla_{\parallel} E^2$ によるプラグ

効果はゆるやかだが第 1.4 - 4 図の n の分布もゆるやかなのでこの点は少くとも定性的に矛盾はない。尚 1.4 - 4 図は波動パターンでないが波動の存在を否定するものでもない。

尚同頁の最後に高周波電界が電極から外へ $B=0$ まで拡がっていることは説明出来ないとの記述があるが、プラズマの横への拡がり (∇B による) を考えると波動は見かけ上減衰して見える。波動成分がかなり小さく、殆んどが同一位相の振動であってもゆるやかに振幅がへるのは不自然でないだろう。しかしこの図を見る限り電極の上で半波長 $k_{\parallel} = \pi/L$ の様な定在波は立っていないことがわかる。この程度の波長をもつ進行波が電極外部へ伝播していることはあり得る。どうしても $k_{\parallel}$ の直接測定 (波動パターンか相関測定) が望まれる。

以上筆者としての種々の疑問の中から問題点を考え私見を加えて見たものである。未発表のデータを含めて反論のあることを期待し一層明確な機構解明を望むものである。

終りに R F C の責任者、佐藤照幸氏との討論を感謝する。

参 考 文 献

- (1) 小島昌治 核融合研究 55年4月号 411
- (2) S.Miyake et al: J.Phys. Soc.Japan 27 (1969) 1611
- (3) T.Sato et al: J.Phys.Coc.Japan 28(1970) 808
- (4) T.Watari et al: Phys.Fluids 17(1974)2107
- (5) T.Watari et al: J.Phys.Soc.Japan 38(1975)1475
- (6) S.Hiroe et al: Phys.Fluids 21(1978)676
- (7) T.Watari et al: Phys.Fluids 21(1978)2076
- (8) T.Sato et al: Proc.Plasma Physics and Controlled
Nuclear Fusion Research (1978)401
- (9) 庄司多津男他 核融合研究 43(1980)415
- (10) プラズマ研究所 R F C 計画書 (1979)21, 23