

Electron heating experiments using the high-harmonic fast wave in high dielectric constant plasmas

高誘電率プラズマにおける高次高調速波を用いた電子加熱実験

Hiroshi Kasahara (笠原 寛史)

1. 序論

核融合を目指すには高温状態の粒子を閉じ込め、さらに加熱する必要がある。レーザー爆縮、磁場閉じ込め方式などが研究されており、現在トカマクプラズマが核融合炉への最有力候補となっている。トカマクプラズマでは波動、中性粒子入射などの加熱手法が研究されているが、融合炉レベルの高温、高密度プラズマを加熱する手法は未だ確立されていない。イオンの高次高調速波(High harmonic fast wave)を用いた加熱実験が、プリンストン大学(PPPL)を主体に始まり、東大・集団現象物理研究室でも HHHFW による波動伝搬・加熱効率の劣化原因の究明・効果的な電子加熱条件の探求を研究し始めた。本研究は HHHFW による電子加

熱条件を調べることで、HHFW 加熱手法が核融合炉レベルの高誘電率プラズマ加熱に有効かを研究する。

2. 高次高調速波(伝搬特性・加熱機構)

HHFW の伝搬特性はイオンサイクロトロン周波数より高次の速波であるため、イオンへの減衰が行われにくく、高密度プラズマに対し中心まで伝搬可能である。

主加熱機構は、電子ランダウ減衰(ELD)、走行磁気時間減衰(MP)である。ELD、MP はともに電磁波の位相速度 ω/k と電子の熱速度 V_{Te} に強い依存性を持つため、効果的な電子加熱を行うには上の値を適切に選ぶ必要がある。

電磁波の励起方法として導体(ストラップ)に電流を流すことにより行う

ため、比較的広範囲なスペクトルが励起される。またプラズマ中心へ電磁波が伝搬する過程で波数に変化(トロイダルモード保存)すると言った複雑な条件が加わるため、熱プラズマの加熱効果を調べるためには計算による評価が必要となる。

3. 一次元電子加熱計算

(ア) 高 β プラズマでの波動伝搬と減衰

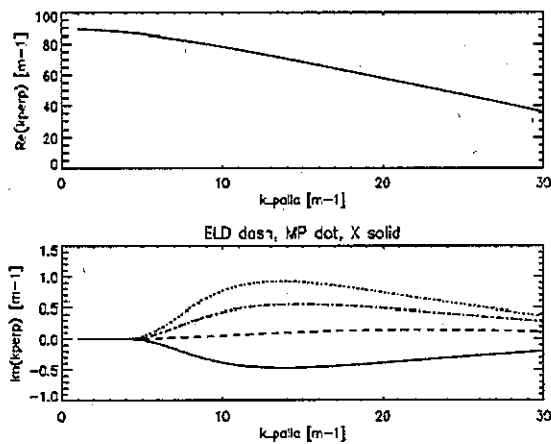


Fig.1 は $T_e=400\text{eV}$ (電子温度), $n_e=2.0 \times 10^{19}\text{m}^{-3}$ (電子密度), $B_T=0.3\text{T}$ (トロイダル磁場), $\beta_e \sim 4\%$ (=電子の圧力/磁場エネルギー), 周波数 $f=21\text{MHz}$ の電磁波の伝搬特性を示す計算結果である。横軸は磁場に平行方向な波数の成分を示し、(a), (b)はそれぞれ垂直方向の波数の実数成分、虚数成分を表す。(a)が正の値を持つことから、高誘電率プラズマ下でも HHFW は伝搬可能なことが分かる。(b)は波動の虚数成分表しているため、値が大きいほど、減衰が生じプラズマを加熱することが出来る。一点鎖線が虚数成分だが、その内訳を示すために点線(MP)、波線(ELD)、実線 ELD・MP によるクロス項)を合わせて載せた。減衰による効果は MP が ELD に比べ圧倒的に大きく、

$k_{\text{parallel}} \sim 13\text{m}^{-1}$ で最大値を迎えていることから、最適な条件が存在することが分かる。しかしプラズマが変化することによって k_{parallel} を変更するアンテナの設計は現実的ではなく、プラズマの変化に対して k_{parallel} を変えずに効率的な加熱が行うことが出来るかどうか核融合レベルのプラズマ加熱に HHFW が有効かどうかの焦点となる。

(イ) 電子加熱の最適化

電子加熱の最適化を考える上で、Fig1.(b) の様な極大値を持つのはプラズマ分散関数に関係していることを考え、 $\zeta_0 = (\omega/k_{\text{parallel}})/V_{Te}$ で計算を整理し、最適解を調べた。($\omega=2\pi \times 21\text{MHz}$, プラズマパラメータは Fig.1 と同じ)

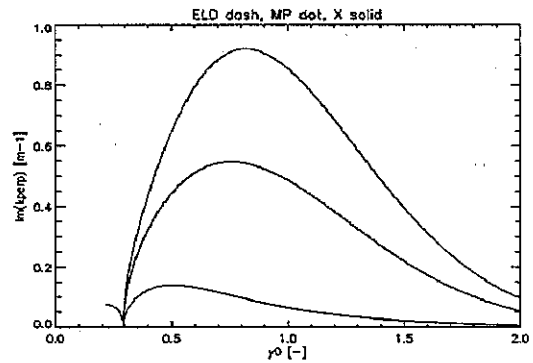
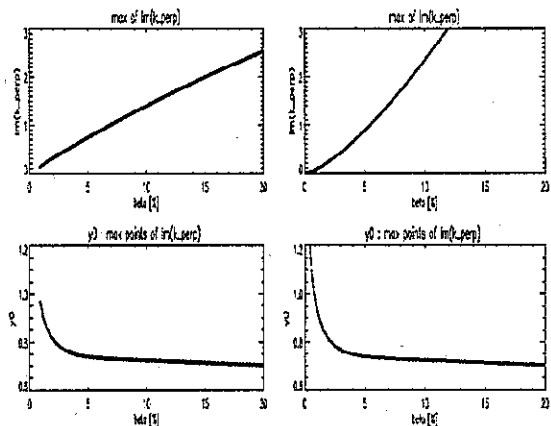


Fig.2 から ELD、MP の極大となる ζ_0 が異なることが分かる。 $\text{Im}(k_{\perp})$ の極大値は ELD より MP 側に有るが、MP との極大値とは



一致しておらず、ELD と MP の割合によって決まっている。様々な β_e による最適な ζ_0 、 $\text{Im}(k_{\perp})$ の値を調べることで、効果的なHHFW加熱条件のプラズマ依存性を調べた。

Fig.3は横軸 β_e 、縦軸が(a), (c)が $\text{Im}(k_{\perp})$ 、(b), (d)が $\zeta_{0\text{opt}}$ である。 β_e は n_e と T_e の積であるため、(a), (b)は T_e を変化、(c), (d)は n_e を変化させたことで β_e を変更した。同じ β_e に対する $\text{Im}(k_{\perp})$ の値は高 n_e の方が大きいので、HHFWは n_e の高いプラズマの加熱に特に優れていることが分かった。また(a), (c)より β_e が高くなるにつれ減衰が強くなるため、核融合レベルのプラズマを加熱するには都合がよく、 β_e が5%を越えた辺りから $\zeta_{0\text{opt}}$ の値が変わらず、HHFWの高 β_e プラズマでの最適解は $\zeta_{0\text{opt}} \sim 0.7$ に有り、 β_e に強く依存しない。

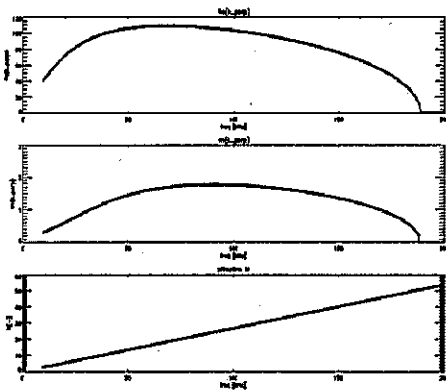


Fig.4はFig.3によって最適化された $\zeta_{0\text{opt}}$ をもとに f を変更することで、HHFWの伝搬(a)・減衰特性(b)がどのように変わるかを調べたグラフである($T_e=400\text{eV}$, $n_e=2.2 \times 10^{19}\text{m}^{-3}$, $B_r=0.3\text{T}$, $\beta_e \sim 4\%$)。周波数が100MHz近辺に $\text{Im}(k_{\perp})$ の最大値を持つが70~120MHzではあまり差が無い。50MHz以下では周波数に比例した減衰変化を示し、周波数依存性を調べることが出来る。Fig.1~Fig.3は k_{parallel} を変更するこ

とで電子加熱の最適化を行った。直接 k_{parallel} を見るのではなく、 $\zeta_{0\text{opt}}$ を考えることで、依存性を見やすくすることに成功し、高誘電率プラズマに対してHHFWによる電子加熱が有効である知己を得た。最適化された $\zeta_{0\text{opt}}$ に対し、その要素である f を変化させることで、周波数21MHzの時と比べ周波数の増加によって更なる加熱効果の増加が期待できることも分かった。

4. HHFWを用いた電子加熱実験

(ア) Large Helical Device (LHD)



Fig.5は核融合科学研究所にあるLHD装置に取り付けられたイオン加熱用アンテナである。幅の広いシングルストリップ構成になっているため、励起されるスペクトルがブロードであり、高出力を入射可能なため、高調波を作る条件(磁場、周波数、イオン)を調整することによって、HHFW電子加熱実験が可能となる。

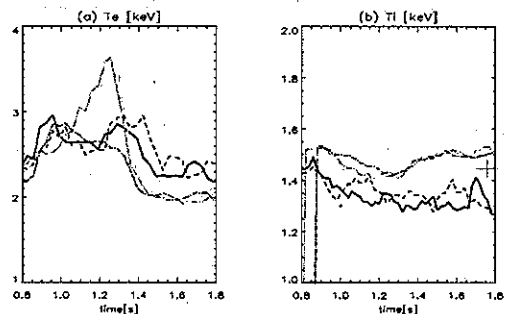


Fig.6はトムソン散乱、結晶分光によって計測された中心電子温度(T_e)、イオン温度(T_i)の時間変化のグラフである。HHFWを入射後の変化は、 T_i は殆ど変化しておらず、電子密度の高い場合では T_e は最高1keV弱増加($n_e=1.8 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$)した。これに対し電子温度が増加しなかったのは $n_e=1.3 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の時である。一次元波動計算によるSingle Pass減衰 $P_{\text{abs.single}}$ を評価すると、電子温度が増加しないときは $P_{\text{abs.single}}=0.6\%$ 、増加したときは $P_{\text{abs.single}}=3.3\%$ と5倍以上の差がある。 $n_e=3.0 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ まで増加させると、 $P_{\text{abs.single}}=17.2\%$ となり、 n_e の約2.3倍に対し、 $P_{\text{abs.single}}$ が約29倍になる。低い電子密度の時、明確な電子加熱が生じなかったことは、計算による $P_{\text{abs.single}}$ の値に一致し、HHFWによる電子加熱には高 n_e が重要であることが実験的にも確認された。また10月下旬から、11月上旬にかけてHHFWの密度、 f 依存性を調べる実験を予定しており、これによって $n_e \cdot f$ に依存して加熱効率が增加することを確認する。

(イ) Tokyo Spherical Tokamak-2

(TST-2)

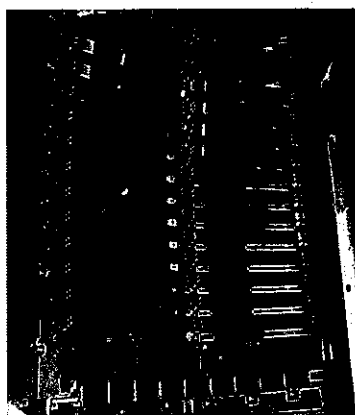


Fig.7は現在TST-2に設置されているHHFW用アンテナである。このアンテナは2本のストラップを持ち、周囲に不正磁場除去用のファラデーシールド、プラズマリミター用のMoタイルから成り立つ。LHDのアンテナと違いストラップが複数本になったため、励起波動スペクトルの幅が狭くなっている。現在このアンテナに変更を加え、 k_{parallel} 可変アンテナの実験準備を行っている。これにより計算で求めた ζ_0^{opt} に対し、2変数 ω , k への依存性を実験的にも調べることができる。

5. まとめ

ζ_0 に着目することで、電子加熱の最適化条件($\beta_e > 5\%$ では $\zeta_0 \sim 0.7$)を導いた。計算から等 β_e のプラズマなら、電子温度が高いプラズマより電子密度の高いプラズマの方が効果的な加熱が出来き、高密度プラズマに対する良好な加熱特性を証明し、核融合炉レベルのプラズマを加熱するのにHHFWが有効であることが分かった。LHDによる電子加熱実験では、密度の差による電子温度変化の明確な差として観測され、計算を裏付ける結果が得られた。追加実験として、TST-2では k_{parallel} の依存性を調べる電子加熱実験準備を準備している。計算により ζ_0 、アンテナ励起モードに対する最適化を行うだけでなく、 ζ_0 の要素である k , ω に対する加熱の依存性を評価するためのシステムを作り上げる予定である。