

高性能定常プラズマ生成へ向けた ICRF加熱アンテナの研究

笠原 寛史

核融合科学研究所で研究しているヘリカル方式によるプラズマ閉じ込めでは、高温プラズマの生成、維持、停止の制御性が非常に高いことが実証されています。研究所の大型ヘリカル装置(LHD)において高温プラズマの生成・維持の実現に欠くことのできない加熱手法の一つとして、高周波を用いる方法があります。特にFMラジオの周波数帯の高周波を用いたイオンサイクロトロン周波数帯(ICRF)加熱、携帯電話の50倍弱の周波数帯を利用した電子サイクロトロン周波数帯(ECRF)加熱の研究を集中的に行っています。これらのICRFとECRFの電磁波を用いたプラズマの長時間維持実験では、約1時間にわたり安定したプラズマ維持に成功していますが、時間経過とともに不純物混入がもとで生じる放射損失によってプラズマが冷却されてしまうことがあります。これまでの実験で用いたポロイダルICRF加熱アンテナ(図1)では効率の良いICRF加熱を実証することに成功しましたが、この加熱手法の確立には加熱効率のさらなる向上と同時に不純物混入などの問題を解決していくことが必要です。

磁場に沿った波数(単位長さ当りの波の数)が

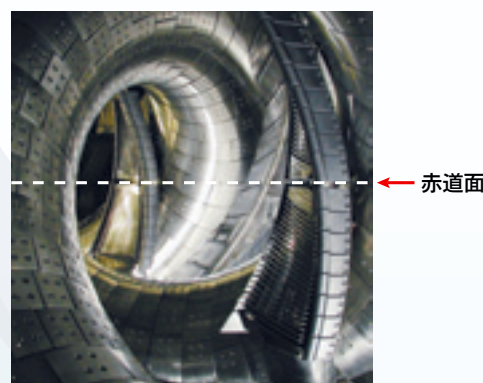


図1 赤道面に対し上下1対からなるループタイプのICRF加熱アンテナ(ポロイダルICRF加熱アンテナ)。プラズマの断面形状は楕円であり、紙面垂直方向がトロイダル方向になっています。ヘリカルプラズマはこの楕円がトロイダル方向に5回転しながらトーラスを1周しています。

大きい電磁波はプラズマ周辺部では存在できず、カットオフ密度と呼ばれる密度より高い領域にしかこの電磁波は存在・伝搬できません。この大きい波数を持つ電磁波を励起することで、よりプラズマ中心部での加熱を期待でき、そのため高い加熱効率が期待できます。そこでトロイダル方向に2本のアンテナを設置する波数制御型ICRF加熱アンテナ(図2)の開発及びこのアンテナを用いたプラズマ加熱の研究を開始しました。このアンテナはアンテナ形状が握手した手のひらを開いた形状をしており、a hand shake form type antenna からHAS(ハス)アンテナと名付けました(鍵となる波数(はすう)ももじてあります)。

ICRFアンテナは楕円が回転して出来ているヘリカルプラズマの形状に合わせる必要があり、設計及び製作の両面で非常に難易度の高いものであります。まず、設計段階においてアンテナの電磁波放射、電磁波の損失、プラズマの粒子軌道との干渉などの評価が重要となります。近年の3次元CAD/CAM(computer aided design / computer aided manufacturing)および電磁場解析シミュレーションにより、実機による試行錯誤を事前に解消し、精度の高いアンテナの設計・製作を行うことが可能となってきました。これらのシミュレーションとポロイダルアンテナによる定常プラズマ維持実験の経験を元に、HASアンテナを設計しました。HASアンテナ設計で鍵となったのは理想的な電磁波励起のための電流導体設置位置とプラズマ曲面に合わせた電流導体の3次元形状の最適化です。また、アンテナプロテクターの冷却能力の強化には冷却水の流量を増加させ除熱量を増加させるだけでなく、プロテクター材料として熱伝導率が非常に高い炭素材を採用することで、定常実験において問題となっていたプロテクター部の温度上昇の軽減を図っています。さらに、高周波シース効果と呼ばれる、アンテナ

周辺部で局所的に加速された粒子が集団運動して生じる電場効果を低減することも設計に盛り込みました。この電場は主プラズマとはほとんど関係しない周辺部に存在する粒子を加速します。高いエネルギーを持ったこの粒子が真空容器壁の一部に局所的に衝突することによって生じる熱負荷により、壁からの不純物の放出を生み出します。トカマクのICRF加熱実験ではこの不純物混入が無視できず、アンテナ間に流す電流の向きを逆向きにして電磁波を励起することで、高周波シース効果が低減出来たという結果が報告されています。LHDでも、入射エネルギーが30万キロジュールを超える定常放電実験においては局所的な発光とともに不純物が混入することがしば



図2 トロイダル方向に2本1対からなるHASアンテナ。各々のアンテナは上下ポートから高周波電力を供給しており、プラズマの径方向に動かすことができます。アンテナとプラズマの近接する場所ではカーボンプロテクターと呼ばれる炭素製の保護板(アンテナを四方から囲っている板)が取り付けられており、アンテナをプラズマから保護しています。

しば観測されています。この対策として、HASアンテナではできるかぎり高周波シース効果を低減することを設計に盛り込みました。製作精度を高めるためにも出来るだけ簡単な構造にし、理想的なアンテナの構造を電磁場解析により研究し、図2のアンテナ形状にしました。

図3はプラズマを模擬する媒質(プラズマの電子密度~1立方センチメートル当り1兆個の電子密度相当)を用いて計算したアンテナ周辺部で励起された電磁波の状況です。アンテナ前面では逆相励起、同相励起により励起された磁場分布が変化し、逆相励起では分布構造が細かく(波長が短い~大波数)、同相励起では分布構造が大きい(波長が長い~小波数)励起磁場が生成され、励起される電磁波の波数が制御可能であることが分かります。本アンテナを用いた加熱実験はLHDの昨年度の第14サイクルプラズマ実験から開始しました。予想通りに、大波数の波を励起する条件では入射パワーの80%以上がプラズマに吸収され、より高い密度までプラズマを維持しやすい傾向を得ています。今後の実験では励起波数の違いによる詳細な加熱分布および加熱効率の違いを調べることで、核融合プラズマに必要な電磁波の励起条件を探求し、高いイオン温度の達成および高温・高密度のプラズマを長時間にわたって維持することを目指していきます。

(プラズマ加熱物理研究系 助教)

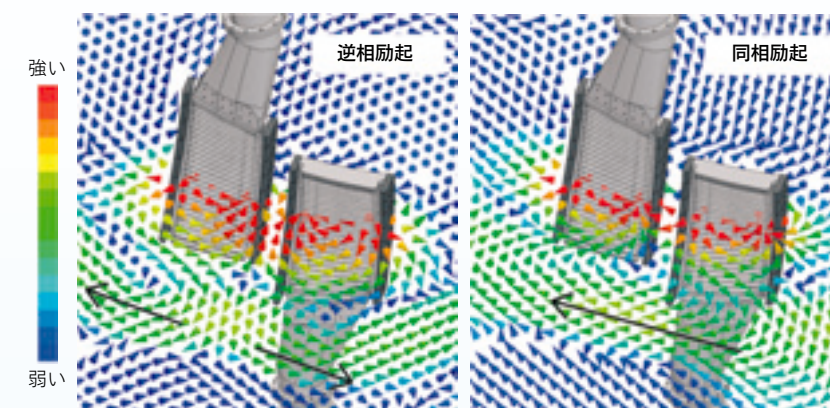


図3 3次元HASアンテナモデルおよび電磁場解析結果。LHD真空容器壁およびプラズマをもとにアンテナ周辺部の高周波磁場分布(矢印および三角錐は磁場方向、色は磁場の強さを表しています)を計算しました。電流導体の位相を逆相(大波数励起)、同相(小波数励起)にすることでアンテナ前面での励起される電磁波の分布が変わり、プラズマ中に誘起される電磁波の波数が変化していることを示しています。