

ICRFアンテナの開発 —インピーダンストランスフォーマーによる高性能化—

齋藤健二



LHDのICRFアンテナ

大型ヘリカル装置 (LHD) におけるプラズマ加熱手法の一つにイオンサイクロトロン共鳴周波数帯 (Ion Cyclotron Range of Frequencies, ICRF) 加熱があります。これは、アンテナから放射される数十メガヘルツ^{*1}の電磁波を用いてプラズマ中の荷電粒子 (イオンあるいは電子) を揺さぶることでプラズマを加熱する手法です。現在、LHDには図1のように2種類のICRFアンテナが1対ずつ設置されています。一つは手をつないだような形 (Hand-Shake form) のHASアンテナ、もう一つはLHDの磁力線にアンテナの向きを合わせ (Field Aligned)、インピーダンス変換^{*2} (Impedance Transforming) を真空容器内で行うFAITアンテナです。HASアンテナは2010年にLHDに設置されました。このHASアンテナには、2つのアンテナ内に流れる高周波電流のタイミング (位相) を調整することで、ICRF加熱のパフォーマンスを最大化できるという特徴があります。詳しくは、NIFS ニュース200号 (<https://www.nifs.ac.jp/NIFS-NEWS/pdf/200-1.pdf>) をご覧ください。ここでは、主にFAITアンテナの開発と、それに続くHASアンテナの改良について述べます。

FAITアンテナの開発

LHD用のICRF加熱機器はもともと25から100メガヘルツまでの広い周波数帯域に対応した仕様

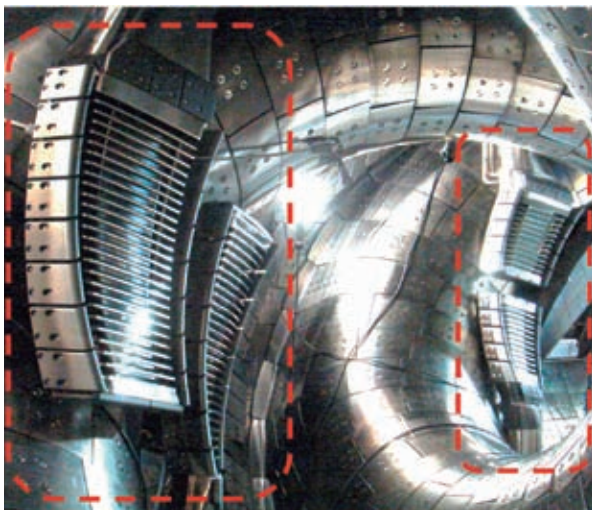


図1 HASアンテナ(左手前)とFAITアンテナ(右奥)

となっていました。特に、38.47メガヘルツでの少数イオン加熱^{*3}ではプラズマが効率良く加熱されることが確認され、長時間運転での加熱入力エネルギーの世界記録などの成果も収めてきました。そこで、さらに高出力で長時間の入射を目指すためにアンテナの最適化をこの周波数に特化して行いました。これにより誕生したのがFAITアンテナです。

FAITアンテナのアンテナヘッドの前面形状はLHDの磁場を追跡計算することで、プラズマの形に沿うように設計されました。また、入射電力の損失や不純物の増加の原因となる不要な高周波電場を作り出さないように、図2 (a) のようにアンテナヘッドを少し傾けて、LHDの磁力線に沿わせています。アンテナヘッド内には、図2 (b) のようにストラップと呼ばれる導体があります。ここに電流が流れることで磁場が発生し、プラズマ中に電磁波が伝搬していきます。ストラップとその周りの導体間には電圧がかかりますが、この電圧はアンテナ先端から離れるほど高くなります。大電力入射の場合には、高電圧によりアーキングと呼ばれる放電が起こり得ます。アーキングが起こると、プラズマの加熱ができなくなるだけでなく、ストラップなどが破損するおそれもあります。そこで、大電力入射を目指すFAITアンテナでは、アーキングを防ぐためアンテナヘッドの長さをできるだけ短くしました。

図3のようにアンテナヘッドへの電力の供給は同軸伝送管で行います。これまでのICRFアンテナはどれも、同軸伝送管の内導体の直径が伝送管に沿ったどの位置においても同じでした。この状態で大電力入射を行うと、伝送路やLHDの真空部と

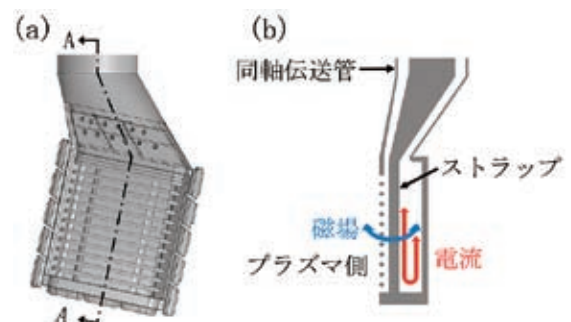


図2 (a) プラズマ側から見たFAITアンテナ(上側)のヘッド正面 (b) 断面A-Aの模式図

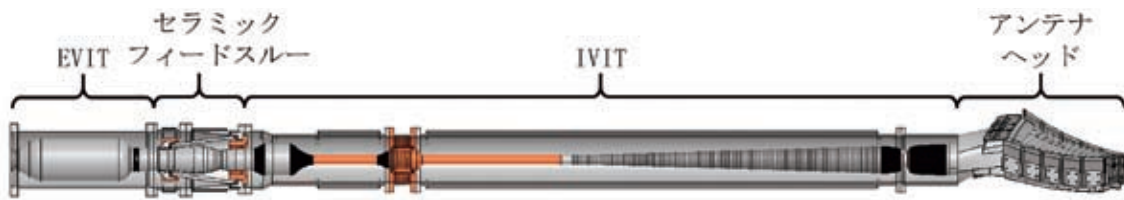


図3 FAITアンテナ内部の様子。従来のICRFアンテナとは違い、IVITを備えたFIATアンテナは、伝送管に沿った位置によって内導体の直径が異なります。左側（入力側）のEVITは2019年に追加されました。

外部の加圧部を仕切るセラミックフィードスルー等の重要な部品に大電流が流れたり高電圧がかかったりするなどしてこれらが破損するおそれがありました。そこで、内部インピーダンストランスフォーマー (In-Vessel Impedance Transformer, IVIT) と名付けたインピーダンス変換器を開発しました。これは、伝送路電圧を抑え入射可能電力をできるだけ大きくし、なおかつセラミックフィードスルーでの電圧や電流が小さくなるように伝送管に沿った位置に応じて最適な直径に内導体を設計した電力伝送装置です。

FAITアンテナは2013年からICRF加熱実験に使用され、効率よくプラズマを加熱することが確認されました。また、IVITの効果で大きな電力入射が可能であることも確認されました。2019年には、さらに大電力化を進めるために外部インピーダンストランスフォーマー (Ex-Vessel Impedance Transformer, EVIT) も取り付けられ、入射可能電力の目安となる負荷抵抗^{※4}の値が2.5倍程度に増大しました。その結果、数秒の短パルス運転なら少なくともアンテナ1本あたり2千キロワット程度の入射が可能であると見積もられています。

HASアンテナの改良

HASアンテナは効率良くプラズマを加熱することができますが、負荷抵抗が小さく大電力入射には不向きなアンテナでした。そこでHASアンテナにもEVITを取り付け、さらに同軸伝送管を図4のようにIVIT化することで、HASアンテナも大電力入射が可能になるように改良しました。改良されたHASアンテナは2020年にLHDに設置され、負荷抵抗が予定どおり、改良前の4.5倍程度に増大していることが確認されました。

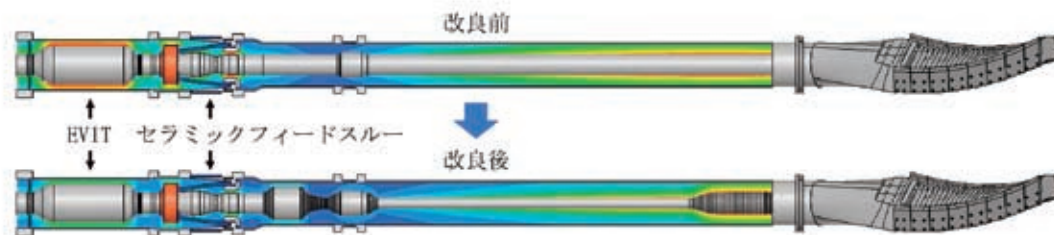


図4 HASアンテナの改良。内導体が大電力入射に最適な直径となるように改良されました。内外導体間の色が赤い程、強い電場強度を表します。このシミュレーションでは改良前後の入射電力は同じです。この改良により、セラミックフィードスルーより左側（入力側）の電場強度が大きく低下しているのが分かります。これにより、電圧も大きく低下しています。

今後の展開

今後は、このように最適化されたFAITアンテナとHASアンテナを用い、高性能プラズマを安定して長時間維持していくためのさまざまな課題に取り組みたいと思います。また、これらのアンテナに用いられたIVIT及びEVITの技術は韓国の超伝導トカマク装置KSTAR用ICRFアンテナにも応用され、昨年よりプラズマ実験に使用されています。さらに、中国の超伝導トカマク装置EAST用ICRFアンテナにおいても最適化されたインピーダンストランスフォーマーの使用が検討されています。このように、LHDで培われたアンテナ技術は、世界の核融合研究に貢献しています。

(プラズマ加熱物理研究系 准教授)

用語解説

- ※1 メガヘルツ：100万回/秒の振動を表す単位。
- ※2 インピーダンス変換：電圧÷電流がインピーダンスで、これを変換することをインピーダンス変換と言う。ICRF加熱で用いられる数十メガヘルツの高周波の場合、伝送路自体がコイルやコンデンサから構成される複雑な回路のようになっており、インピーダンスを変換することができる。そこで、FAITアンテナや改良されたHASアンテナでは、この性質をうまく利用することで、電流、電圧や高周波の反射を抑えるように伝送路設計が行われている。
- ※3 少数イオン加熱：ヘリウムあるいは重水素に軽水素が少し加わったプラズマを加熱する手法。軽水素イオンの磁力線に巻き付いた旋回運動の周波数と電磁波の周波数が一致する位置で加熱が起こる。
- ※4 負荷抵抗：入射電力を伝送路電圧の2乗で割った値に比例する量。負荷抵抗が大きいほど、伝送路電圧が抑えられ、大電力入射が可能となる。