

齋藤健二  
Kenji Saito核融合研  
NIFS

イオンサイクロトロン周波数帯(ICRF)加熱はプラズマ加熱手法の一種であり、MHz帯の電磁波が用いられている。本講演では、大型ヘリカル装置(LHD)でのICRF加熱に用いられているICRF加熱システムと、ここ10年間の大電力化への取り組みについて述べる。

### 1. ICRF加熱システム

LHDにおけるICRF加熱システムは大きく分けて高周波電源[1]、伝送系[2]、アンテナ[3, 4]から構成されている。

#### (1) 高周波電源

プラズマ加熱に用いられる高周波電力は数十mWのサイン波が3段のアンプで増幅され生成される。初段(~5kW)は半導体増幅器であるが、高出力の間中段(~100kW)及び終段(~1MW)には四極真空管が用いられている。入力された電磁波は四極真空管で増幅され出力キャビティを通して出力側の伝送管へ送られる。出力キャビティは長さ調整が可能な二重同軸管で構成されており、出力インピーダンスが $50\Omega$ で最大出力が得られるように調整されている。

#### (2) 伝送系

伝送系は高周波電力を高周波電源からアンテナまで100m以上伝送させるための重要なICRF加熱システム構成要素である。LHDの伝送路は特性インピーダンスが一般的な $50\Omega$ の同軸伝送管が用いられている。大電力伝送が可能なように外導体直径が約250mmの大型伝送管が用いられている。伝送管で高周波電源とアンテナを繋いただけでは、アンテナからの反射が大きく、十分にプラズマを加熱することができない。そこで、LHDの近くに液体整合装置という反射を自動で抑制する機器を設置している。T字で分岐した先端が短絡された伝送管(スタブ)の内導体と外導体の間に比誘電率が2.72のシリコンオイルを入れ、この高さを調整することで、実効的なスタブ長を変えている。シリコンオイルを用いずにコンタクトフィンガーを用いて、

その位置を調整することで反射を無くす方法もあるが、大電力入射時にコンタクトフィンガーを動かすと、そこが破損するため、LHDでは液体整合装置を用いている。整合装置を用いることで高周波電源~整合装置間では反射がなくなり、電圧、電流は小さく抑えられているが、整合装置~アンテナ間の伝送路(30~40m)では定在波が立ち、電圧、電流が高い部分が存在する。電圧が高いと伝送路の絶縁破壊を起こしやすくなり、電流が大きいと損失が大きくなる。特に高電圧で絶縁破壊を一度起こすとその伝送系は使えなくなるため、伝送路電圧を計測し電圧が閾値(LHDでは35kVに設定)を超えた場合、即座に遮断するように電圧インターロックを設けている。

#### (3) アンテナ

ICRFアンテナは先端がループ状になっておりそこに高周波電流が流れることで高周波磁場、さらには高周波電場が発生する。この電磁波がプラズマ内部に伝搬しプラズマが加熱される。ループのプラズマ側は板状でストラップと呼ばれており、その表面を千アンペア程度の電流が流れるため、長時間運転では冷却が不可欠である。

### 2. LHDにおけるICRF加熱機器の大電力化

LHDにおけるICRF加熱は様々な物理実験に対応できるように従来は25~100MHzの広帯域仕様であったが、2011年からは周波数を固定することで大電力化を進めてきた。ここでは、大電力アンテナの開発とパワー合成技術について述べる。

#### (1) FAITアンテナの開発

従来、ICRF加熱の加熱入力パワーは主に前述の整合装置~アンテナ間の伝送路の最大電圧で決まっていた。そこで、大電力化(あるいは安全率の向上)のためにはアンテナ自体に整合機能を持たせ、定在波電圧を低下させる必要がある。そこで考案されたものが、最適化された

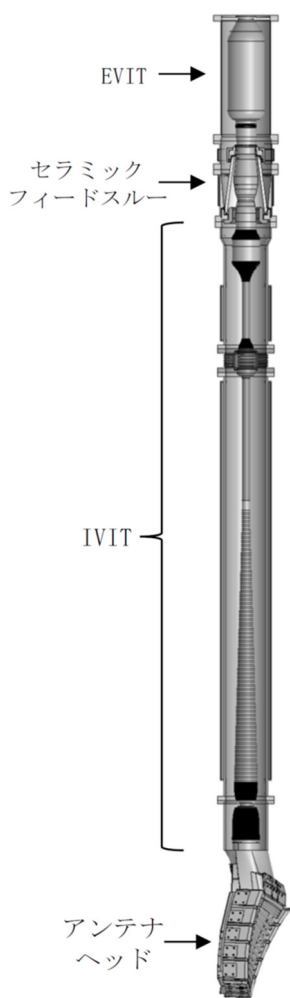


図1 FAIT アンテナ

内部インピーダンストランスフォーマー (IVIT) [5] であり、2013年にLHDに設置した図1に示すアンテナに用いられた。このアンテナはField-Aligned-Impedance-Transforming (FAIT) アンテナ[4]と呼ばれ上下1対がLHDに設置されている。超伝導コイルで生成される静磁場とストラップとが直交するようにアンテナヘッド自体が傾いている。大電力用のFAITアンテナではヘッド内部での電圧の上昇を防ぐため、ヘッド長はこれまでのアンテナの半分程度に短くなっている。通常ヘッドが短いと、負荷抵抗( $\propto$ 伝送電力/伝送路電圧の二乗)が小さくなり、入射可能電力は小さくなって

しまうが、IVITを用いることで負荷抵抗を逆に大きくすることができる。また、ヘッドが短いと、同じ放射電力にするためには、ヘッドでの電流を大きくする必要があり長時間運転では発熱の問題が生じる。そこで、電流の大きい部分にはモリブデンコーティングを施し、高周波電流による発熱を極力抑えるようにしている。IVITはセラミックフィードスルーでの電流、電圧、インピーダンストランスフォーマー上での電界強度を許容値以下に抑えつつ負荷抵抗 $\times$ アンテナ内伝送効率が最大になるように最適化されている。FAITアンテナはインピーダンストランスフォーマーを用いているため、周波数を大きく変えることはできず、27MHzの3種イオンを用いたヘリウム3加熱や25~28MHzのモード変換による電子加熱などは行えないが、高効率の加熱の実績がある少数イオン加熱に用いられてきた38.47MHzに特化した設計となっている。この周波数では重水素の2倍高調波加熱も可能である。2019年には外部インピーダンストランスフォーマー

(EVIT) [6]も取り付けただことで、負荷抵抗が十分大きくなり、アンテナ1台につき2MWの入射も可能であると見積もられている。なお、IVIT、EVITは波数制御アンテナ (HASアンテナ) においても用いられ、従来の低い負荷抵抗 ( $\sim 2\Omega$ ) を  $10\Omega$ 以上の上昇させ、1MW/アンテナ程度の運転が可能となった。

## (2) パワー合成装置の開発

LHD用高周波電源は38.47MHzの周波数で最大パワーが1.2~1.3MW程度であるが、二つの高周波電源からのパワーを合成することでさらに大電力化を行うことができる。図2にパワー合成器[7]を示す。各辺の長さや特性インピーダンスは38.47MHzにおいて、入力ポート間で直接のパワー伝達がないように調整されている。制御器も備わっており、入力のパワーや位相は損失がキャンセルするように自動的に調整される。パワー合成装置はプラズマ実験にはまだ使われていないが大電力ダミーロードへの入射試験で合成パワー2MW以上(6秒間)の運転実績がある。

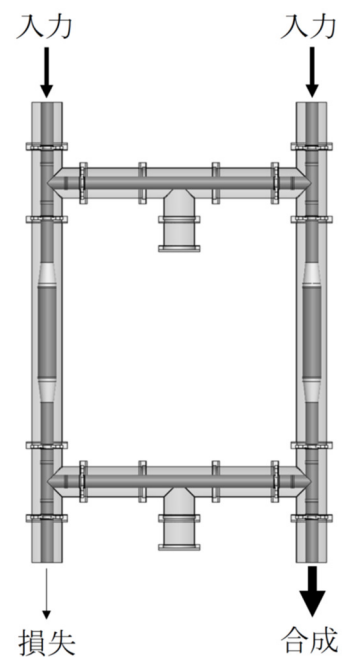


図2 パワー合成器

## 参照論文

- [1] T. Seki et al., Fusion Sci. Technol. 40, 253-264 (2001).
- [2] K. Saito et al., Fusion Eng. Des. 83, 245 (2008).
- [3] H. Kasahara et al., Proc. 38th EPS Conference, Strasbourg, P2.099 (2011).
- [4] K. Saito et al., Fusion Eng. Des. 96-97, 583 (2015).
- [5] K. Saito et al., Fusion Eng. Des. 88, 1025 (2013).
- [6] K. Saito et al., Journal of Physics: Conf. Series 823, 012007 (2017).
- [7] K. Saito et al., Fusion Eng. Des. 146, 256 (2019).