

### コラム3 “水を得たクーリングタワー”

核融合を目指すプラズマ加熱では、定常・大電力の加熱システムが不可欠である。その中でイオンサイクロトロン周波数帯加熱法では、閉じ込め装置の磁場強度、用いる加熱法、加熱するイオン種によって若干違いはあるが、数十から百 MHz までの周波数帯の高周波加熱源を用いる。周波数 50 MHz で、1.6 MW/5,000 秒の出力試験に成功した[1]。用いる出力真空管で若干の差異はあるが、後述するグリッドに流れる電流値、真空管内の真空度等により高周波出力が制限される。これらの制限を如何に低く抑制して大出力を得るかが開発の鍵である。1.5 MW で大電力定常出力に成功した鍵は、低インピーダンスモード共振であった。これによりスクリーングリッド電流 ( $I_{sg}$ ) を軽減することが可能となった。1.6 MW/5,000 秒の出力試験が行われた時の高周波加熱源の状況を表に示す。

| 周波数    | Ep/Ip            | Ecg/Icg                 | Esg/Isg                     | Ic          | 効率  |
|--------|------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------|-----|
| 50 MHz | 21.5 kV<br>110 A | 570 V<br>3 A<br>制限値：5 A | 1.45 kV<br>0.8 A<br>制限値：5 A | 0.5 $\mu$ A | 66% |

表1 Steady-state and high power test of RF generators.

この成果は大型ヘリカル装置（以下 LHD とする）実験開始に先立つ1995年に達成されている。当時プラズマ加熱法を開発すべく、負イオン高速中性粒子入射装置、電子サイクロトロン入射装置と平行して開発が行われていた。上記のテーブルに記述されているように高周波出力電力と効率とから供給直流電力は 2.4 MW であり、12 GJ の熱量となる。当時使用されていた冷却水システムは定常的に 1.5 MW の除熱が可能であった。除熱能力以上の使用であったために、前日の実験では貯蔵冷却水の温度が徐々に上昇し、約30分後には陽極への供給冷却水温度が40℃を超えた（使用している出力真空管は陽極出口温度を60℃以下にする様に要請されている）ので、定常共振を中止した。この原因はクーリングタワーの除熱能力が低下した事に因るものと判断し、実験の翌日にクーリングタワーの清掃を行った。その結果上記の5,000 秒（1時間23分）を達成することができた。

高周波伝送システムは高周波加熱源と真空容器内のアンテナ間を結ぶシステムで、大別して高周波電力伝送同軸管、DC ブレーク、インピーダンス整合器およびフィードスルーから構成されている。アンテナと整合器の間はこれらの構成機器は高い高周波耐電圧 ( $V_{RF}$ ) が要請される。数 MW の高周波電力伝送のためには目安として  $V_{RF} > 40$  kV が必要となる。ここでは高周波伝送システムの主なコンポーネントである幾つかの進化したインピーダンス整合システムについて記述する。

インピーダンス整合システムは、終端した短絡部を可

動させることによるスタブチューナーと、同軸状の同軸管の長さを可変にして伝送管の長さを可変にする位相変換器とがある。スタブチューナーの短絡部と位相変換器の接合部では、最大 1 kA の高周波電流が流れるので、高周波電力伝送時にそれらを可動することは高周波絶縁破壊の危険性がある。このことから液体スタブチューナーが考案された。高周波波長が液体中と気体中とで長さが異なることを利用している。液体スタブチューナーの液面を上下させることにより等価的にスタブチューナーとして機能する。この原理は液体位相変換器にも応用できる。高周波電圧印加中 ( $V_{RF} = 46$  kV) に液面を移動させて、整合をとることができた[2, 3]。核融合科学研究所の大型ヘリカル装置ではこのシステムが適用され、MW レベルの定常・加熱実験が実行されている。

大電力でのプラズマ定常維持実験では、インピーダンス整合システムの伝送同軸管や加熱アンテナのプラズマからの熱負荷等により、プラズマ加熱当初の設定値から大きく変動する。このために高周波加熱源からの入射電力、加熱アンテナからの反射電力の大きさとその位相差とから適切な液体スタブチューの液面位置を計算（約15秒毎）し、液面の高さを制御することにより、反射電力比を常時数パーセント以下に抑制することができている[4]。もしこの制御が行われていなかった場合はほぼ完全反射になっていると算定されている。

#### 参考文献

- [1] T. Seki *et al.*, Fusion Technol. **40**, 253 (2001).
- [2] R. Kumazawa *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **70**, 2665 (1999).
- [3] K. Saito *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **72**, 2015 (2001).
- [4] K. Saito *et al.*, Fusion Eng. Des. **81**, 2834 (2006).

(熊沢隆平, 核融合研)

### コラム4 “定常の道も1時間から”

大型ヘリカル装置（以下 LHD とする）における定常プラズマ維持実験について紹介する。1998年度から LHD のプラズマ実験が開始された。毎年 3 ~ 4 ヶ月の期間実験が実施され、2014年度には第18サイクルを迎える。イオンサイクロトロン波加熱（少数イオン加熱法を採用している）を主とした（電子サイクロトロン波加熱も同時に行われている）定常プラズマ維持実験はイオンサイクロトロン波加熱用アンテナの増数やアンテナの改良にともない、年々その成果を着実に積み上げている。2013年度の第17サイクルでは、電子密度  $1.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、イオンおよび

電子温度ともに 2 keV のプラズマを 48 分間維持に成功している。高周波入射電力は 1.2 MW であった。定常プラズマ維持の性能は、入射電力と維持時間の積を用いて評価しており、 $3.4 \times 10^9$  ジュールを達成している [1]。これまでの記録は同じく LHD で 2004 年に達成された記録で、 $1.6 \times 10^9$  ジュールであった [2]。この記録は当時フランスの Tore Supra が持っていた  $1.1 \times 10^9$  ジュールを超える成果であった。

定常プラズマ維持実験は年々着実に進展しているのであるが、高周波加熱源や高周波電力伝送システム（液体スタブチューナーを含めて）等に象徴されるハードウェアはその限界を超えていないが、定常プラズマは概ね 1 時間以内で崩壊している。これまでに達成されている 30 分を超える長時間プラズマ実験においては、ダイバータ板上に堆積したフレークがプラズマ中に混入することにより、プラズマが終息している。2004 年に達成された  $1.6 \times 10^9$  ジュール（持続時間 32 分）の実験では、30 分近くの持続時間の放電が連続して 3 ショット達成されている。この内のあるショットにおいて、詳細にプラズマ崩壊の様子が観測されている [3]。プラズマ崩壊の 0.25 秒前にビデオカメラにより、内側のダイバータ板近辺で火花が観測された（カメラの視野領域は LHD プラズマの一部でしかないので、火花の発生位置と視野領域が一致しているのは幸運であった）。直後に電子温度の急激な減少、そして電子密度増加を観測した。さらに 0.1 秒後鉄 (FeX) のライン、そして 0.2 秒後カーボン (CIII) のラインが最大値を示した。その後低温、低密度プラズマが高周波電力（アンテナからの反射電力比はインターロックレベル 10% を超えていないので、高周波電力は遮断していない）により維持されているが、放射崩壊したプラズマが再度復帰しないと判断し、約 1 秒後人的操作で高周波加熱源を遮断した。このことからカーボンと鉄不純物

が混入した結果であると容易に想像することができた。LHD の実験サイクル終了後真空容器内に入室しダイバータ板上を精査すると、多量のフレークが堆積しているのを発見することができる。このフレークは後日の詳細な分析により、カーボンと鉄の薄い膜が多層状（約  $8 \mu\text{m}$  のフレーク）に堆積しているということがわかった [4]。このフレークの成長過程は以下の様に推測している。通常の LHD 実験では 20~30 MW の高速中性粒子ビーム入射を主加熱として 10 秒以内の放電を繰り返し行い、そして実験終了後は He グロー放電を行い翌日の実験に備えている。このように主放電とグロー放電の繰り返しにより、ダイバータ板上に鉄と炭素の極めて薄い膜が多層状に堆積することになる。定常プラズマ実験において、経験的に約  $300 \times 10^6$  ジュールの加熱入力（例えば 1 MW で 5 分）を行うと、フレークの混入と思われる火の粉がプラズマ中に頻繁に現れる。この現象はカメラの映像を通して実時間で観察することができる。この間大きなフレークが混入すると、増大した輻射損失の為にプラズマが放射崩壊する。これが定常プラズマの終焉である。ダイバータ板温度は 300~400℃ まで上昇しており、付着したフレークの離脱のメカニズムがわかれば、それを回避する方法も対策できるのではないかと考えているところである。

#### 参考文献

- [1] H. Kasahara *et al.*, Proceeding of 25th IAEA Fusion Energy Conference (2014), IAEA-EX/7-3.
- [2] R. Kumazawa *et al.*, Nuclear Fusion 46, S13 (2006).
- [3] R. Kumazawa *et al.*, Proceeding of 22th IAEA Fusion Energy Conference (2008), IAEA-EX/P6-29.
- [4] M. Tokitani *et al.*, J. Nucl. Mater. 438, S818 (2013).

(熊沢隆平, 核融合研)



かさ ほん ひろ し  
笠原 寛 史

自然科学研究機構核融合科学研究所ヘリカル研究部プラズマ加熱物理研究系・助教。2006年東京大学大学院・科学博士。主な研究分野はイオンサイクロトロン周波数帯の電磁波を用いたプラズマ加熱および定常プラズマ研究。趣味のカフェ巡りが原因か体重は定常維持が実現出来ず、現在は増加フェーズ。早く減少フェーズに持ち込み定常化を目指し、日夜体重維持研究も合わせて継続中。



くま ざわりゅう へい  
熊沢 隆 平

核融合科学研究所名誉教授。1975年に名古屋大学プラズマ研究所に入所、2012年核融合科学研究所退官。在職中は開放端、トカマクとヘリカル装置においてプラズマ閉込めと加熱の研究に従事。研究分野はイオンサイクロトロン周波数帯での開放端プラズマの高周波封じ込めとトーラス装置での加熱の開発研究。趣味は健康維持を兼ねての週一のテニスと月一のゴルフ。「二兎を追う者、一兎も…」の故事を実感。