資 料

高周波プラズマ加熱装置の開発の現状

永 島 孝*

(1981年 2月12日 受理)

Present Status of RF Plasma Heating System Development

By Takashi NAGASHIMA

Outline and status of development of RF plasma heating system is reviewed. Plasma heating experiments in tokamaks have been presented, in particular, progresses in Japan have been introduced in relation to world wide progresses. Technical problems in application to coming fusion reactors as well as competitiveness and compatibility with neutral beam heating have been referred.

KEYWORDS: radiofrequency heating, fusion reactors, plasma heating, ICRF, LHRF, ECH, current drive

I. はじめに

近年核融合の研究開発は着実に進歩しており、磁気閉じ込めを利用した核融合実験装置、特に最近のトカマク型核融合装置でのプラズマ温度を高めるための手段である第2段加熱(追加加熱)法の進歩は目覚ましいものがある。トカマクにおける第2段加熱法として、高周波(Radiofrequency, RF)加熱法が中性粒子入射(NBI)加熱法とともに有望視されている。

RF加熱は、数十kHzから百数十GHzの周波数の電磁波をプラズマに放射し、種々の共鳴現象を利用して波からプラズマへエネルギーを変換することによりプラズマを加熱するものである。発振増幅管により発生する大電力のRFは、導波管等によりトカマク装置まで導かれ、アンテナの役目をする結合系によりターゲットのプラズマに入射される。このための装置が高周波加熱装置である。

本報では、RF加熱装置の開発の現状と、トカマク装置での種々の加熱実験の成果について述べ、また将来の展望について言及する。

II. RF加熱装置の概要

RF加熱の原理は、自然界に幅広く存在する音や光に関連する共鳴現象をプラズマ中で上手に利用して加熱に役立たせるものであり、プラズマへの電子レンジの利用とでもいえよう。

したがって、RF加熱装置は高周波を発生させるRF

励振部、大電力増幅を行う電力増幅部、導波管などの伝送系、結合系、大電力増幅部等のための電源部および制御系等から構成される(第1図参照)。加熱装置全体の効率を左右するものとして結合系、電力増幅管、伝送系が特に設計上重要である。

プラズマの加熱に用いられるRF加熱法は印加周波数に応じて次の4種類に大別される。

1. 電子サイクロトロン加熱(ECH)

数十～百数十GHzのマイクロ波を利用するもので、電子管としては単管出力200kW級のジャイロトロンが使用される。現在28GHzのものが日本原子力研究所(原研)および京都大学ヘリオトロン核融合研究センター(京大ヘリオトロン)で使用されている。米国では60GHzのものを開発中である。ソ連でも86GHz、300kWのジャイロトロンを加熱実験に使用している。その結合系には導波管が使用される。

2. 低域ハイブリッド波領域(LHRF)加熱

0.5～3GHz近傍のマイクロ波加熱を利用するもので、電力増幅管として主にクライストロンが使用されている。300kW級の実験が、原研(0.75GHz)、名古屋大学プラズマ研究所(名大プラズマ研、0.8GHz)で行われている。結合系には位相制御導波管(グリッドとも称される)、またはループ・アンテナが使用されている。写真1に、原研で使用している4個の開口導波管を使用した導波管アンテナを示す。

* 日本原子力研究所(Japan At. Energy Res. Inst.)

第1図 高周波プラズマ加熱装置の概念構成図

写真1 LHRF 加熱用4導波管結合系(原研)

3. イオンサイクロトロン波帯(ICRF)加熱

数十～百数十 MHz の RF を加えてプラズマを加熱するものである。1 MW 級の RF 発振器が名大プラズマ研で稼動中である。電力増幅には3～4極管が使用される。結合系にはループ・アンテナが使用されている。原研で使用を予定している $\frac{3}{4}$ ターンのループ・アンテナを第2図に示す。加熱実験ではどちらか一方を使用する。

① 中心導体, ② 戻り線, ③ ファラデーシールド
④ 短絡部, ⑤ 電流探針, ⑥ 真空容器

第2図 ICRF 加熱用 $\frac{3}{4}$ ターンのループ・アンテナ(原研)

4. 低周波加熱

アルペーン波や走行時間磁気ポンプ加熱 (TTMP) と呼ばれる数十 kHz ～数 MHz の低周波を利用する加熱であり、京大ヘリオトロンで1 MW 級(数百 kHz)のアルペーン波の実験結果がある⁽²⁾。電力増幅管としては送信管を使用し、結合系にはコイルを使用する。

Ⅲ. トカマク型核融合装置での プラズマ加熱実験の現状

トカマクでの RF 加熱実験は、100kW 級での実験は完了してその有効性が確認され、現在はMW級の加熱実験の時代に入りつつある。

1. ICRF 加熱

RF 加熱では最大の加熱実験が行われており、PLT (米)では1980年に600kWの入射により2keVの到達イオン温度と1kW当りの温度上昇率3~6eV/kWという良い結果を得ている⁽³⁾。日本でも原研のJFT-2a/DIVAで1979年に115kWの加熱実験で2.3eV/kW、加熱効率80%以上と高効率の結果を示した(第3図)⁽⁴⁾。TFR(仏)でも同様な良い加熱結果を得ている⁽⁵⁾。これらの実験では $\frac{1}{2}$ ターンのループ・アンテナが使用されているが、技術的にはアンテナ周辺での電圧破壊が一番問題である。原研では20MHz、1MW出力加熱の装置の製作を完了し、1981年3月から実験が開始される。また、TFRでは3MW、PLTでは2.5~5MWの加熱実験が予定されている。加熱機構についても比較的確になりつつあり、今後の結果が期待される。

2. LHRF 加熱

この周波数帯ではトロイダル方向に数個以上の開口

第3図 ICRF 加熱115kW入射時の
径方向のイオン温度の分布

導波管を並べたグリルが使用されている。原研では1976~77年に750 MHz、200kWの加熱装置の製作を行い、JFT-2において4導波管結合系を用いてイオン温度上昇率1~2eV/kWという結果を得てこの加熱法の有効性を実証した⁽⁶⁾。さらに1979年には300kWに増力し、その後のイオン加熱の実験では2~3eV/kW、加熱効率50%以上というLHRF加熱では最も良い結果を出している(第4図)。さらに、JFT-2では低密度領域で電流維持の基礎実験に成功し、RF加熱の多用性を示した⁽⁶⁾。

第4図 LHRF 加熱時の平均密度 $\bar{n}_e$ に対する
加熱効率 $\bar{n}_e \cdot \Delta T_i$ の依存性

世界的にも今年中にWega(仏、800MHz、0.8MW)、PLT(米、800MHz、1.2MW)、Alcator C(米、4.6GHz、4MW)でMW級の実験が計画されており、今後の成果が期待されている。

3. ECH 加熱

最近のジャイロトロン急速な進歩により、このようなミリ波帯のマイクロ波を利用した加熱実験がようやく可能になってきた。ソ連が1976年にTM-3で行なった実験⁽⁷⁾が最初であるが、1980年のISX-B(米)の実験では35GHz、100kWのジャイロトロンを用いた加熱装置により電子温度上昇率~6eV/kWという良い結果を出した⁽⁸⁾。原研でも28GHz、200kWの実験で3.8~5eV/kWという結果が得られている(第5図)⁽¹¹⁾。開発中のジャイロトロンを利用して、PDX(米、1982年、60GHz、400kW)、DIII(米、1983年、60GHz、2MW)、T-15(ソ連、未定、100GHz、5MW)の実験が計画されている。今後の大電力ジャイロトロンを進歩如何によるところが大いだが、将来は大電力の実験が行われると思われる。

4. アルベーン加熱および TTMP

Wegaで1980年まで200kHz、6MWという大電力のイオン TTMP の加熱実験が行われて来たが、加熱効

第5図 ECH 実験での電子温度の時間変化

率が数%と低く、加熱に伴うプラズマ損失の増加等の理由により実験は中止となった。最近、トカマクでのアルペーン加熱実験が計画され、TCA (スイス) では3 MHz, 2 MW, Pre Text (米) では2~11 MHz, 500 kWの実験準備が進められている。

IV. 技術開発の現状

以上のように、トカマク装置でのRF加熱は広い周波数帯にわたっており、それぞれの周波数帯により情況が異なる。

1. 結合系

ICRF加熱での一番の問題はループ・アンテナの問題であろう。RF絶縁破壊のために結合系で扱える電力密度は1~2 kW/cm²以下に制限されている。今後、加熱装置の大電力化に際しては障害となろう。したがって、実用炉への適合性からみても導波管型の結合系の開発が特に望まれる。これに対して、LHRFやECH加熱では容易に導波管アンテナが使用され、実績もあり技術的には大きな問題はない。LHRF加熱では、2~4導波管結合系を用いて2~8.5 kW/cm²の実績がある。ECH加熱では、JFT-2の実験で比較的容易に40~50 kW/cm²のレベルに達している。ただし、これらは0.1 s以下の短パルスの場合であり、今後長パルス化されてくると新たな問題が生じる恐れもあり、継続的な研究開発が必要である。

2. 大電力発振増幅器、他

ICRFでは既に単管出力1 MW級の3~4極管が米国、フランスで市販されており、技術的には大きな問題はない。しかし将来、結合系の導波管化を考えると周波数が百数十MHz以上になる可能性もあり、この場合には大電力源として送信管とクライストロンの選択が問題となろう。原研では1980年からLHRFのJT-60用高周波加熱装置のために2 GHz, 出力1.1 MWのクラ

イストロンの試作開発を開始し、1982年完成の予定である。その主要諸元を第1表に示す。フランスでも加速器用に500 MHz, 1 MWのクライストロンの開発を進めている。

第1表 JT-60用クライストロンの主要諸元

中心周波数	2.0 GHz	効率	50~60 %
高周波出力	1.1 MW	ビーム電圧	~90 kV
RFパルス幅	10 s	ビーム電流	~30 A

また、ECH用のジャイロトロンについては将来の大型核融合装置用には120~150 GHzのものが必要であるが、ソ連、米国などで段階的に開発を進める計画がある。ECH加熱の場合には大電力のミリ波用の立体回路素子、計測技術についても開発を進めなければならない。

V. 将来への展望

1. 加熱装置の技術

日本では現在臨界プラズマ試験装置(JT-60)の建設が進められており、20 MWのNBI加熱とともに10 MWのRF加熱を採用する予定である。主要諸元を第2表に、概念図を第6図に示す。結合系としては、第7図に示すような4段8列の導波管結合系を用いる予定である。

第2表 JT-60用高周波加熱装置の主要諸元

発振周波数	1.7~2.2 GHz
全高周波加熱入力	10 MW
全高周波出力	32~40 MW
加熱装置ユニット数	4
結合系の方式	多導波管(グリル)

RF加熱装置の場合には、JT-60以降に考えられる次期装置(例えば、INTOR⁽¹²⁾)に対して周波数や単管出力を大幅に変更する必要がないので、JT-60クラス的大型装置でその有効性が確認されれば、比較的容易にDT反応炉である次期装置に適用できる可能性をもっている。最近のRF加熱の急速な進歩とともに、上に述べた利点は注目すべきものである。

2. トカマクにおけるRF加熱の

将来とNBI加熱との関連

RF加熱はこれまでNBI加熱に一步遅れた形で進んできたが、ここ1~2年で本格的なMW級の加熱研究が始められようとしている。また、現在建設が進められているJT-60(日)、TFTR(米)、JET(EC)、T-15(ソ連)などの大型トカマク装置でも、NBI加熱とともに

第 6 図 JT-60 高周波加熱装置の 1 ユニットの概念図

第 7 図 JT-60 高周波加熱装置の位相制御型導波管結合系(グリル)

に 5~10 MW という RF 加熱実験が計画されている。前述のように、実用炉としては RF 加熱は NBI 加熱より適合性をもっているので、RF 加熱にとって中小型トカマクでの MW 級の実験による加熱機構の物理的理解と JT-60 クラスの大型トカマクでの高温プラズマ加熱の研究が急務である。これに対して NBI 加熱では、大電力負イオンビームの開発等実用炉への適用については新たな技術開発をしなければならないというマイナス面はあるが、NBI 加熱は着実な第 2 段加熱の手段として RF 加熱に先行している⁽¹³⁾。しかし RF

加熱は、トカマクの定常化(電流維持)の手段としても有望視されつつあり、炉設計の上からも利点があり、研究開発の重要度が増しつつある。

原研では、JFT-2(または JFT-2M)で数 MW, JT-60 で 10 MW の RF 加熱の実験が予定されており、これらの計画は以上のような観点から RF 加熱の実用炉への適合性を評価する上で重要な意味をもっている。

— 参 考 文 献 —

- (1) 田中茂利: 原子力誌, 18[2], 58 (1976).
- (2) OBIKI, T., et al.: *Phys. Rev. Lett.*, **39**, 812 (1977).
- (3) HOSEA, J., et al.: *IAEA-CN-38/D-5-1*, (8th Int. Conf. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Brussels, 1980).
- (4) KIMURA, H., et al.: *IAEA-CN-38/D-5-2*.
- (5) T.F.R. Group: *IAEA-CN-38/D-3*.
- (6) NAGASHIMA, T., et al.: "*Heating in Toroidal Plasmas*", Vol. 2, p. 281 (1979), Pergamon Press.
- (7) SUZUKI, N., et al.: *IAEA-CN-38/T-2-3*.
- (8) YAMAMOTO, T., et al.: *Phys. Rev. Lett.*, **45**, 716 (1980).
- (9) ALIKAEV, V., et al.: *Sov. J. Plasma Phys.*, **2**, 212 (1976).
- (10) GILGENBACH, R., et al.: *Phys. Rev. Lett.*, **44**, 647 (1980).
- (11) LA HAYE, R.J., et al.: To be published in *Nucl. Fusion*.
- (12) 森 茂, 他: 原子力誌, 22[7], 456 (1980).
- (13) 松田慎三郎, 他: 同上, 22[10], 703 (1980).