特集 核融合新技術

# 核融合用高周波技術の開発 Development of Radio Frequency Technology for Nuclear Fusion

核融合プラズマの加熱及び制御に使用される高周波は、1 MHzから 200GHz 程度 までの広範囲に及ぶが、周波帯に応じて個別に技術課題をもっている。日立製作所 ではこれらの技術開発に精力的に取り組んでいるが、その一端を報告する。すなわ ち、解析によりトカマクプラズマの電流駆動には、圧縮アルベン波が優れているこ とを確認するとともに、高周波によるディスラプションの抑制が可能なことを示し た。また日立製作所のプラズマ実験装置HT-1用200kWジャイロトロンを用いた ECRF加熱装置開発の要点、名古屋大学JIPP T-IIU用1.5MW0.1秒の ICRF 加熱装 置、京都大学へリオトロンE用の複雑な曲面をもつICRF アンテナなどについて述 べる。

加沢義彰*	Yoshiaki Kazawa
小林朋文**	Tomofumi Kobayashi
大塚道夫***	Michio Ôtsuka
滝沢照広*	Teruhiro Takizawa
鈴木登夫*	Takao Suzuki
前川明嗣****	Akiji Maekawa

# 日 緒 言

核融合の分野では,高周波技術はプラズマの加熱,診断な どに不可欠な要素技術として古くから使われてきた。最近, 特に高周波によるプラズマの加熱実験が、各所で大規模に行 なわれ成功している。またトカマクでは、高周波による直流 プラズマ電流の駆動実験が本格的に行なわれて成功している。 これにより、パルス炉といわれて実用上の弱点とされていた トカマク炉を、定常炉とする可能性も展望できるようになっ てきた。更に, 高周波を利用して, プラズマの温度や電流分 布などを制御して安定性を確保したり,最適化運転をする方 法も種々検討されている。これらの状況から,核融合用高周 波技術の重要性が増大している。 日立製作所は,昭和37年世界に先駈けてICRF(Ion Cyclotron Range of Frequency)加熱技術を開発し、50kW、14MHzの CW(Continuous Wave) 装置を製作して、本格的なミラー型 核融合実験装置IBICに適用した<sup>1)</sup>。その後、この分野でのニー ズが少なかったこともあり, 高周波加熱技術の開発をスロ ーダウンしていたが、前述のような状況に対応するため、 数年前から開発研究を積極的に推進している。特に, プラ ズマと高周波電磁界とのかかわりに関する解析的研究を通 じて, 各種加熱方式の評価やプラズマの制御手段の検討を行 なうとともに、ICRF加熱とECRF(電子サイクロトロン周波 数)加熱については、ソフトウェア、ハードウェア両面の開 発に努力している。本論文では、これらの研究を通じて得ら れた成果の一端について報告する。

表 | プラズマの各種加熱法の比較 本表は, 現時点で開発が比較的 進んでいる主な加熱法について, 現状で評価したものを示す。

項目		ICRF 加熱	LHRF 加熱	ECRF 加熱	NBI 加熱
	共	<ul> <li>(1)装置が簡単(特</li> <li>(2)プラズマ中心</li> <li>(3)粒子密度が増加</li> </ul>	に排気系など)で へのエネルギー伝	取扱いが楽 送が容易	<ul><li>(1) 開発が最も進</li><li>んでおり、大</li><li>型装置で有効</li></ul>
1.	谣	(4)入射電力が密度		性が実証され ている。	
利	Ш				<ul><li>(2) プラズマとの</li><li>結合系が単純</li></ul>
		(5) 経済性良好	(5)電流駆動用と	(5) RF の中では	(3) 高エネルギー
		(6) 加熱機構が明	して有効性が	プラズマとの	(>120keV)と
		確	実証されてい	結合系が最も	すればTCT(2
		(7) 効率が高い。	る。	単純	コンボーネン
点		(8) 周波数の可変		(炉への適合)	ト)効果で出力
		範囲大		(性良 )	増大(Q大)が
		(9) 既成技術を使		(6)加熱機構が明	期待できる。
		える割合が大		確	(4) 加熱機構が明
					確
		<ol> <li>NBIに比べて実</li> </ol>	2績が少ない。		(1) 高エネルギー
		(2) プラズマとの新	結合系(アンテナ-	ランチャ)が複雑	では効率が低
	共				下するので対
2		-			策要
۷.	诵				(2) ポート大とな
欠					り中性子の漏
					れ大
		(3) プラズマの近	(3) 加熱機構が未	(3) 出力管(ジャイ	(3) 高 価
		くに複雑な構	解明	ロトロンな	(t:t:L, ECRF)
		造のアンテナ	(4) 電流駆動効率	ど)の開発要。	とは競合の可
		が必要で,放	は密度 n の増	現状では100Hz	(能性あり))
点		射線,熱により	大とともに急	以上困難	(4) 炉心近傍のビ
		損傷しやすい。	速に低下	(4) 現状では高価	ームライン(ク
		遠隔保守も大			ライオポンプ
		変			など)寸法大
		(1)アンテナ	(I) 大電カクライ	(1) 大出力ジャイ	(1) エネルギー回
3.			ストロン	ロトロン	収器
技	項	(2) アンテナの保	(2) 高プラズマ密	(2) 高周波数化	(2) 負イオン源
111	н	守技術	度での高電流	(3) 低価格化	(3) 高入射電力密
発		3320	駆動効率化		度化
		Restriction of the second s			

# 2 プラズマの高周波加熱技術の展望

高周波加熱では、高周波電力をプラズマに注入して加熱す るが、磁場中でプラズマのイオン、電子の運動や波に共鳴す る数種の周波数帯が使われる。すなわち、ICRF(数メガヘル ツ~100メガヘルツ)、LHRF(Lower Hybrid Range of Frequency: 0.5~3GHz)、ECRF(Electron Cyclotron Range of Frequency: 20~200GHz)などである。高周波加熱法の中 で有望と考えられる上記3方式を、現在プラズマの加熱法と して最も開発が進んでいるNBI(中性粒子入射)加熱と対比し て表1に示す。加熱技術の進歩は急ピッチであり、この外に も、アルベン波加熱、断熱圧縮加熱、乱流加熱を含む抵抗加

#### 注:略語説明

ICRF(Ion Cyclotron Range of Frequency) LHRF(Lower Hybrid Range of Frequency) ECRF(Electron Cyclotron Range of Frequency) NBI(中性粒子入射) TCT(Two Component Torus) RF(Radio Frequency)

49

\* 日立製作所日立工場 \*\* 日立製作所エネルギー研究所 工学博士 \*\*\* 日立製作所エネルギー研究所 \*\*\*\* 日立エンジニアリング株式会社電機工場 工学博士 680 日立評論 VOL. 66 No. 9(1984-9)

熱など多くの加熱法が研究されており、10年後の予想は難しい状況にある。

## B トカマクプラズマと高周波の相互作用解析

高周波による電流駆動は、トカマク炉を定常炉化する有力 な手段と考えられている。定常炉は、電磁誘導方式によるパ ルス炉と比較し、炉の信頼性向上、材料及び支持構造に対す る電磁的・熱的繰返し応力の軽減、ポロイダルコイルの負担 軽減と電源容量低減、蓄熱器が不用などの利点をもっており、 日本原子力研究所の指導を得て、高周波による電流駆動定常 炉概念を検討した<sup>2)</sup>。また、炉構造の安全・保護に大きな影響 を及ぼすプラズマディスラプションを予防するため、高周波 によるプラズマ電流分布制御を考え、定量的に評価した。

定常トカマク炉の概念を明確にするために,(1)電流駆動効率の大きい高周波の選定,(2)定格運転時の最適動作点の決定, が必要である。電流駆動用高周波の種類としてECW(電子サイクロトロン波),LHW(低減混成波),MSW(磁気音波:周 波数~100MHz),マイノリティ成分をもつICW(イオンサイクロトン波:周波数~100MHz)及びCAW(圧縮アルベン波: 周波数5~50MHz)を考慮した。高周波の選定条件としては, 電流駆動効率j/p,(=駆動電流/駆動電力,冷い一様プラズマ近似での評価式を用いた。)波の伝搬条件,伝送系などが挙げられる。図1に解析により推定された高周波の電流駆動効率を示す。電流駆動効率の観点からは,低温プラズマ(2.5keV以下)ではLHWが,高温プラズマ(数キロ電子ボルト以上)では



図2 プラズマのエネルギーバランスを満たす温度と密度の関係 CAW(圧縮アルベン波)による定常炉の最適動作点は、パルス炉に比べ高温、低 密度である。 n<sub>111</sub> はCAWの屈折率を示す。

CAWが最もよい。波の伝搬条件に関して,LHWは駆動電流 分布が局在化しやすく,ECWは高い駆動効率を得るために は,炉構造の複雑なトーラス内側からの入射が必要である。 これに対し他の3種類の波はトーラス外側から入射可能であ り,駆動電流分布は中心集中分布になる。炉プラズマの温度 が少なくとも8keV以上であることから,核融合炉を定常炉



化するための最適な高周波は、CAW であると結論できる<sup>3),4)</sup>。 炉の最適動作点は、プラズマのエネルギーバランスを解くこ とにより、Q値(核融合出力/高周波入力)を最大にする点を求 めた。図2はエネルギーバランスが成立する電子温度、密度 を示したもので、パラメータはCAWの屈折率 $n_{\mu\nu}$ である。電 流駆動効率は $n_{\mu\nu}$ が大きいほどよい。これに対し、CAWが伝 搬するための条件を満たすためには、高温プラズマ領域(10 keV以上)では15< $n_{\mu\nu}$ <35でなければならない。一方、バル ーニング不安定性による $\beta$ 値(プラズマ圧力/磁気圧力)の上限 まで伝搬するのは、 $n_{\mu\nu}$ が30以下である。以上の検討から最 適動作点は、パルス炉に比べて高温、低密度(解析例では19.7 keV、 $0.87 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ )となる。

ディスラプションは、抵抗性MHD(Magnetohydrodynamics) 不安定性(テアリングモード)によって、プラズマ周辺領域に 形成される磁気島の幅がある限界を越えると発生する。磁気 島幅の時間進展を解析するため, 電磁流体方程式と電子に関 するエネルギー輸送方程式を基礎方程式とし、高周波による 局所加熱及び電流駆動によるプラズマ電流分布制御によるデ ィスラプション防止制御特性を解析した。解析対象の例を JT-60とし、ECW及びLHWを用いた磁気島幅の挙動を検討 した<sup>5)</sup>。高周波入力はいずれも2MWである。ECWによって 磁気島内部を加熱すると、幅20cmの磁気島が350ms後に消滅 することが分かる。これに対し、LHWをプラズマの回転周波 数50kHzに同期して入射し、磁気島中心部に駆動電流を誘起 すると、120msで磁気島は消滅する。図3はこの場合の磁気 島幅の減少率の時間変化を,図4はプラズマ電流と駆動電流 の空間分布を示す。磁気島内で駆動電流密度はピークをもっ ており、これが磁気島幅の減少に大きく寄与している。

図 | 各種高周波の電流駆動効率の比較 電子温度がIkeV前後のプ ラズマに対しては、低域混成波が最も駆動効率が高い。これに対し、炉プラズ マである電子温度数キロ電子ボルト以上のプラズマでは、圧縮アルベン波の駆 動効率が最も良い。

# 4 ECRF加熱技術の開発

# 4.1 開発目標

まず, ECRF加熱の高周波伝送系, 電源などの装置技術の 確立を図り, 第2段階としてHT-1<sup>6)</sup>でプラズマ加熱実験を行 なって, 加熱時のプラズマ位置制御, 密度制御などを含めた 総合プラズマ加熱技術を確立してゆく計画を進めている。こ

50

核融合用高周波技術の開発 681



低域混成波入射時の電流分布 低域混成波による磁気島幅減少率の時間変化 図 3 义 4 初期で20cm 磁気島内で駆動電流はピークを あった磁気島幅が、0.12秒後に零となり磁気島は消滅する。

もっており,これが磁気島の消滅に本質的な役割を果たしている。パラメータ は,低域混成波印加後の時刻を示す。

こでは主として、HT-1用ECRF加熱装置の開発状況を述べ る。

ECRF加熱装置は高周波発振管,発振管用電源及び高周波 伝送系から構成される。HT-1では発振管として、市販のジ ャイロトロン(バリアン社製, VGA8050, 周波数:28GHz, 出 力:200kW, パルス幅:40ms)を使用するが, ジャイロトロ ン用マグネット,電源及び高周波伝送系については,日立製 作所が新たに開発した。

#### 4.2 電 源

ジャイロトロンを動作させるのに, マグネット用直流電源 と電子ビーム引出し用高電圧直流電源を用い, マグネットは ジャイロトロンの発振に必要な1Tの磁場を印加するのに使 用される。発振に最適な磁場分布を得るために, 独立に励磁 される5個のコイルがある。定電流励磁電源はトランジスタ を用い安定度,設定精度とも1×10-3以下とした。高電圧直 流電源は、ジャイロトロン管内で電子ビームを引き出し、所定

のエネルギーまで加速するために使用されるとともに、管内 での放電などの異常事態に対しジャイロトロンを保護するた めに、短時間で出力電圧を零にするなどの保護機能をもつ。 出力電圧80kV,電流8Aで、安定に発振させるために電圧リ ップルを0.2%程度に抑えた。またジャイロトロンの異常を検 出後,5µs以内に出力電圧を零にしなければならない。図5 に、開発した電源の回路構成を示す。電力源としてコンデン サを使用し、高電圧用四極管を制御の容易なカソード接地で 用いて、出力電圧を制御する方式を採用した。異常時はイグ ナイトロンでコンデンサ両端を短絡し, 出力電圧を短時間で 零にする。また調整時や高周波出力測定時に必要な高デュー テイ運転に対応するため, ジャイロトロンと並列に取り付け たダイオードにコンデンサ充電電流を流し、連続充電ができ るようにした。開発した高電圧直流電源の主な仕様を表2に 示す。



高電圧パルス電源の回路構成 図 5 制御 管は、正常時には、ジャイロトロン印加電圧を一定に する機能をもつが,異状放電時には高速遮断機能(図 示せず)ももつ。

- "X

51

682 日立評論 VOL. 66 No. 9(1984-9)

表2 高電圧パルス電源の仕様 電子サイクロトロン加熱実験に,高 周波発振管として使用されるジャイロトロン用高電圧パルス電源の仕様を示す。

項目	仕 様
出力電圧・電流	80kV•8A
パルス幅	20ms
電圧リップル	0.2%
電圧立上り時間 (0→100%)	300µs
出力電圧除去時間	4µs

#### 4.3 高周波伝送系

高周波伝送系は、ジャイロトロンの高周波出力を効率よく 実験装置まで伝送し、加熱に最適なモードでプラズマに入射 するために使用される。伝送路は円形導波管を使用しており, マーク検出器、ベンド、モードフィルタ、気密窓、モード変 換器、ホーンアンテナなどから構成される。これらのコンポ ーネントのうち,気密窓以外のものを新たに開発した。伝送 系での全伝送損失は約1dB, 電圧定在波比は26.5~31GHzの 周波数範囲で、1.02~1.4である。HT-1では装置上の制約か ら、伝送系を小さくする必要があるので、ベンドとしてコー ナベンドを使用した。そこで、伝送損失の大部分はベンドで 生じている。一方, 高周波電力のプラズマ加熱への利用効率 を高くするために、直線偏波であるTE11モードを入射モード とした。このため、ジャイロトロンの発振モードであるTE02 モードから、TE11モードへの小型のモード変換器を開発した。 外観を図6に示す。モード変換率はTE02→TE01が96%, TE01 →TE11が80%であり、二つの変換器を接続した場合の総合モ ード変換率は約70%である。

いる。

### 5 ICRF加熱技術の開発

核融合プラズマを追加熱する各種の方式のうちで, ICRF 加熱方式が主流に位置づけられるようになった<sup>7)</sup>。ICRF加熱 は,経済性が良好で既成の技術を使える割合が大きいこと, 装置の配置や使用周波数の選択に自由度が大きいこと, など で魅力がある。

ICRF 加熱装置の代表的な構成を図7 に示す。

構成コンポーネントの中で,最も開発要素の大きいものは アンテナである。ICRF用アンテナは、これまでに各種の構 造のものが模索されてきた。従来は、プラズマ実験の研究者 が,研究対象として自らアンテナを設計開発するのが通例で あった。最近, ICRFの研究が急速に進展し, 大電力, 高性 能のアンテナが必要になってきている。このため、アンテナ の構造,材料,精度などの要求が厳しくなり,メーカーのも つ高度の生産技術が必要となった。

ICRFアンテナは、大出力の高周波電力をプラズマに効率 良く結合するために、プラズマに近接させる。このためにア

表3 ICRF加熱装置(日立製作所納入例) 最近製作,納入した核融 合プラズマ用ICRF加熱装置の納入範囲と仕様の概略を示す。

以上, HT-1用ECRF加熱装置開発の要点について述べた が、日立製作所ではこの外に、より高周波側のジャイロトロ ン発振管で必要となる超電導マグネッドの開発も進めてい る。既に、日本電気株式会社とヒューズ社に納入し、現在、 バリアソン社60GHzジャイロトロン用マグネットを製作して



No.				(1)	(2)	(3)	
納入装置の名称			称	ICRF用 アンテナ	大出力高周波発 振器及び電源装 置	高 周 波 加熱装置	
納 入 先			先	京都大学ヘリオ トロン核融合研 究センター	名古屋大学 プラズマ研究所	東北大学 工 学 部	
加熱対象の核融合装置			装置	ヘリオトロンE	JIPP T-IIU	Q <sub>T</sub> -U	
納入範囲	直	流	電	源	×	0	0
	高	周	波	部	×	0	0
	伝 送 系		×	0	0		
	ア	ン	テ	ナ	0	0	0
電気仕様	周	波数	N	1Hz	17.8及び26.7	20~45	0.05~20
	出	カ	N	/W	1.5	1.5	0.01
	13)	レス幅		S	≦0.001	≦0.I	0.005 及び CW
納	入	セッ	۰ ۲	数	1	2	1

注:○(日立製作所納入分),×(他社納入分),CW(連続仕様)





図6 モード変換器の外観 開発した2種類のモード変換器を組み合わせ ることにより、ジャイロトロンの出力(TE02モード)を直線偏波(TE11モード)に変え て. トカマクに入れることができる。

52



制御系

➡ (直流電力の流れ)

送系とアンテナを通ってプラズマに放射される。

核融合用高周波技術の開発 683





図8 ヘリオトロンE用ICRFアンテナの形状 アンテナを真空容器 内に設置したときの断面形状とフィードスルーを示す。

ンテナの設計,取付け,補修に当たっては,実験装置本体と 密接不離な検討が必要である。トカマクを含む磁気閉じ込め 装置でのICRF加熱実験は、1980年代に入り急速に進んだ。 高周波増幅系としては、周波数が数十メガヘルツ帯で、ユニ ット出力1.5MW,パルス幅1s程度のものが世界の記録品である。 日立製作所は、最近、表3に示す各種装置を製作、納入し

概念図を図10に示す。

図 9 ヘリオトロンE用ICRFアンテナに用いたフィードスルー 空容器内アンテナに高周波電力を伝達するとともに、真空を遮断するためのフィ ードスルーである。

スルーの絶縁物は高純度アルミナ磁器で,内外の導体に銀ろ う付けされている。外筒は大電力用としては直径60mmとコンパ クトなものを開発し、30kV ACの耐圧試験を実施した。

(2) JIPP T-IIU用ICRF加熱装置

ICRF加熱装置の終段増幅器,伝送,整合系,アンテナの

た。以下に、開発要素の特に大きい同表の(1)と(2)について概 要を報告する。

(1) ヘリオトロンE用ICRFアンテナ<sup>8)</sup>

アンテナの形状と真空容器への取付け法を図8に示す。へ リオトロンEの真空容器は、断面がレーストラック状でねじ れている。アンテナは、上下一対のループアンテナで、長さ 約500mmの中心導体を二重ファラデーシールドで覆ってある。 ねじれた特殊形状のアンテナの製作精度を高めるために,数 値制御工作機械と各種の製作治具を用いた。

ループアンテナの高周波入力側は、外観を図9に示すフィ ードスルーを介して, ICRF 用ポートに固定した。フィード

終段増幅器で、パルス幅0.1sにわたり、高周波出力1.5MW を得るために, Eimac製四極電子管8973を用いた。周波数20 MHzから45MHzまで連続可変させるために、四極電子管に付 ける出力共振回路は,集中定数回路と分布定数回路とを合わ せた特殊設計の回路を開発した。出力共振回路の設計に当た り、調整、組立、分解を容易にすることに特に意を用いた。

伝送系にはWX152D同軸管を用いた。アンテナを見たイン ピーダンスは、プラズマ実験条件により大幅に変わるので、 可変容量と可変インダクタンスを組み合わせたπ型可変整合 回路を開発した。周波数20ないし45MHz, 1.5MWの大電力に



図10 JIPP T-IIU用ICRF 加熱装置の主要部概念図 終段増幅器, 伝送系, π型可変整 合回路,アンテナの概念と,相互 関係を示す。

684 日立評論 VOL. 66 No. 9(1984-9)



図|| JIPP T-IIU用 ICRF 加熱装置の伝送系の外観 JIPP T-IIU と、それに取り付けた ICRF 加熱装置の伝送系の外観を示す。

対するπ型可変整合回路は、これまでに知られていない



図12 JIPP T-IIU用ICRFアンテナ取付状況 2種類のICRFアン テナを真空容器内に組み込んだ状況を示す。ICWアンテナとIBW(イオンバーン シュタイン波)アンテナが見える。

核融合炉で実用化されるまでには、まだ多くの課題を解決 しなければならないが、今後も関係諸機関の指導と協力を得

伝送系の外観を図11に、2種類のICRFアンテナ、すなわ ちICWアンテナとIBW(イオンバーンシュタイン波) アンテ ナとを、真空容器内に取り付けた状況を図12に示す。

この装置は、図7に示すICRF 加熱装置の構成をすべて備 える。また、完成時点では(パルス幅)×(出力)で、国内で最 高レベルである。日立製作所は、これらの装置の設計,製作, 技術開発を通じてICRF加熱装置の総合メーカーとしての技 術力を蓄積できた。

#### 言 結 6

核融合の分野で,最近日立製作所が行なった高周波技術の 開発についてその一部を紹介したが、次のような成果が得ら れた。

(1) トカマク炉を定常運転可能にする電流駆動方式として, 各種の高周波を比較し、 プラズマと高周波の相互作用を数値 解析した結果, CAWが最適である。

(2) また高周波により、プラズマのディスラプションを抑制 できる可能性も数値解析で示した。

(3) ECRF(電子サイクロトロン周波数加熱)については、日 立製作所のHT-1用に開発した装置が完成し,実験結果が出 つつある。また、ジャイロトロン用超電導マグネットを開発 した。

(4) ICRF加熱では、ヘリオトロンE用のアンテナや、JIPP T-IIU用の装置を開発納入した。

ながら継続的に開発を進め,先端的技術で顧客のニーズにこ たえてゆきたい。ここに述べた技術開発の多くは、日本原子 力研究所,名古屋大学プラズマ研究所,京都大学ヘリオトロ ン核融合研究センターなどの諸先生の御指導によるところが 大きい。心から感謝申し上げる。

### 参考文献

- 1) 只野,外:日立核融合実験装置,日立評論,原子力論文集 (昭37-8)
- 日本原子力研究所大型トカマク用開発部炉設計研究室:核融 2) 合実験炉(FER)の概念設計(オプションA), JAERI-M 83-213 (第1分冊)(第2分冊)
- 3) N. J. Fisch, et al. : Current Generation with Low-Frequency Waves, Phys. Fluids 24(1), Jan. 1981
- 4) T. Okazaki, et al. : A Steady State Tokamak Reactor Using the Compressional Alfven Wave, to be Published
- 5) K. Yoshioka, et al.: Numerical Study on Magnetic Island Suppression by RF Waves in Large Tokamaks, to be Published
- 6) 西,外:日立トカマク型非円形プラズマ実験装置,日立評論, **62**, 5, 355~358(昭55-5)
- IAEA : International Tokamak Reactor-phase two A, Part 7) 1 (1983)
- 8) 武藤, 外: ヘリオトロンE用ICRFアンテナの製作, プラズマ 核融合学会第1回年会講演予稿集, p. 198(1984-4)

