



研究最前線

双方向型共同研究の新展開に向けた28 GHz 帯の 高出力ジャイロトロン開発の現状

—センター間連携研究「電子サイクロトロン加熱による高密度プラズマ加熱」に向けて—

Progress of 28 GHz Range High Power Gyrotron for the New Research Development from the Bi-Directional Collaboration Research

今井 剛¹⁾, 双方向型共同研究委員会 EBW センター間連携研究検討グループ(假家 強¹⁾,
南 龍太郎¹⁾, 出射 浩²⁾, 関子秀樹²⁾, 長崎百伸³⁾, 佐野史道³⁾, 金子 修⁴⁾, 日野友明⁵⁾

¹⁾筑波大学プラズマ研究センター, ²⁾九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センター,

³⁾京都大学エネルギー理工学研究センター, ⁴⁾核融合科学研究所, ⁵⁾北海道大学

(原稿受付: 2013年4月8日)

核融合科学研究所の双方向型共同研究の新展開として, センター間連携研究「電子サイクロトロン波による高密度プラズマ加熱」を, 筑波大学, 九州大学, 京都大学がそれぞれの特長を活かして原型炉の設計に大きく貢献すべく開始した. これまでの筑波大学の GAMMA 10 や大型ヘリカル装置 (LHD) 用ジャイロトロン開発成果と九州大学や京都大学の電子バーンシュタイン波による高密度加熱研究の成果を統合させることにより, 原型炉で必要となる大型高密度プラズマでのコア加熱の信頼できる加熱法を開発することが目的である. この連携研究の心臓部である 28 GHz 帯のジャイロトロン開発では, 600 kW で 2 秒の発振に成功し, この成果から, 28 GHz-400 kW で連続かつ 35 GHz 帯でメガワットレベルの発振が可能なジャイロトロンの設計検討を行うとともに, 既存の 28 GHz 共振器で発振試験を実施し, 第 2 周波数での 35 GHz 帯発振にも成功した. 連携第一歩としての QUEST での筑波大の 28 GHz ジャイロトロンの適用による ECH/ECCD (Electron Cyclotron Heating /Electron Cyclotron Current Drive) と 8 GHz 帯の EBW (Electron Bernstein Wave) 加熱との組み合わせ実験に向け準備が着実に進展している.

Keywords:

bi-directional collaboration research, gyrotron, electron Bernstein wave heating, GAMMA10/PPX, Quest, Heliotron J

1. はじめに

核融合プラズマの電子サイクロトロン周波数帯の波は, 波長がミリのオーダーのマイクロ波 (ミリ波) であり, 導波管伝送とビーム伝送を組み合わせた伝送・入射が可能で, 多様なプラズマ制御機能と炉環境との整合性が優れた手法として非常に魅力的な加熱・電流駆動手段である. 特に, 原型炉で想定される大型高密度プラズマの, 内部制御が可能な信頼できる唯一の手法として期待されている. 当初は, ミリ波帯の大電力発振源がなかったため, 加熱手法としては考慮されていなかったが, 1970年代にロシアでジャイロトロンが開発され, ロシアのトカマクで 100 kW レベルの実験がなされ注目され始めた[1]. しかし, 100 kW を大きく超えるような出力は窓や共振器等の熱的問題のためジャイロトロンでも困難ではないかと考えられ, 炉での使用はあまり想定されていなかった. しかしながら ITER に向けて世界が協力して, この課題に挑戦した. なかでも, 日本が中心となって, エネルギー回収, ダイヤモンド窓, 高次体積モード共振器などのブレイクスルーとも言える技術開発に成功し[2-4], 一躍, 炉への適用性が現実

的となった[5]. この手法の核融合炉への開発の方向性としては, 2つある. 1つ目は, 単純に周波数の高い, サブテラヘルツの 200~300 GHz 帯ジャイロトロンを開発し, 遮断密度 ($n_e \propto f^2$) を高くして, 10^{20} m^{-3} を大きく超える大型プラズマの内部まで加熱・電流駆動を可能にするものである. そして, 2つ目は, 既存の周波数帯のジャイロトロン管を用いて物理的なアプローチで, 遮断密度以上のプラズマを加熱できる電子バーンシュタイン波 (EBW) 加熱手法を開発することである[6, 7]. この物理的な高密度加熱手法に関しては, これまで低磁場の小型装置で基礎的な実験が行われ, 遮断密度の10倍以上の密度でも効果的なプラズマ加熱が得られている[8]. また, 大型ヘリカル装置の LHD においても, 低パワーでの基礎実験がなされ, 期待できそうな加熱効果が得られはじめている[9]. 本稿では, この EBW 加熱の本格的な実証と炉への適用性についての見通しを得るために双方向型共同研究の下で, 九州大学の QUEST, 将来的には, 京都大学の Heliotron J]において本格的な高パワー EBW 加熱を行うために必要な心臓部のジャイロトロンの開発の現状を中心に述べる.

Corresponding author's address: Plasma Research Center University of Tsukuba, Tsukuba, IBARAKI 305-8577, Japan

Corresponding author's e-mail: imai@prc.tsukuba.ac.jp

2. 双方向型共同研究とセンター間連携研究

双方向型共同研究は、2003(平成15)年の核融合研究WG報告書にある核融合研究の重点化、効率化に沿って、開始された。比較的大規模な装置を持つプラズマ核融合関連の4つの大学センター(筑波大(プラズマ研究センター)、京大(エネルギー複合機構研究センター)、阪大(レーザーエネルギー学研究所)、九大(高温プラズマ力学研究所)、後に、工学関係センターがある東北大(量子エネルギー材料科学国際研究センター)と富山大(水素同位体科学研究センター)が入り、6センターとなった)が、大学の長をもちながら、原型炉やITERに向けての核融合研究の課題に役割分担をして効果的に貢献するために、構築された共同研究システムである[10]。核融合科学研究所(NIFS)が調整役となり、これらのセンターと大学を結び、効率的に円滑な共同研究が遂行され、重点化された研究目標に大学が一体となって貢献できる仕組みとなっている。これによって、図1の概念図に示すように各センターは、NIFSを通して実質的に全国の大学等の共同利用、共同研究施設として機能し、全国の大学等の研究者がこれらのセンターの共同研究に参画可能となった。この仕組みの構築によって、研究のみならず、学生教育や人材育成にも多大な効果が現れている[11]。

この双方向型共同研究を、さらに効果的に展開するために、センターの強み、特長を活かし有機的に結合させたセンター間連携研究を推進することを核融合科学研究所双方向型共同研究委員会で合意し、平成23年度から、1)ダイバータ熱・粒子制御、2)電子サイクロトロン加熱による高密度プラズマ加熱、以上の原型炉に向けた2つの重要課題を設定し、連携研究を開始した。1)は、非常に広範な内容を含んだテーマであり、全センターが連携して取り組みはじめている。これについては、別途、詳しい報告がされる予定である。本稿は、2)のテーマで、中心となる「電子バーシュタイン波(EBW)加熱手法」開発研究の推進の心臓部、ミリ波のパワー源ジャイロトロン開発研究の進捗についての報告である。本共同研究は、3つのセンターとNIFSが特長を活かし協力し、必要なジャイロトロン開発を筑波大、EBW加熱/電流駆動の特性評価実験と実証を九大QUESTで、ヘリカル装置におけるEBW加熱の本格実験を京大Heliotron Jで行うことをめざしている。

第一ステップとしては、GAMMA 10/PDX用の28 GHz

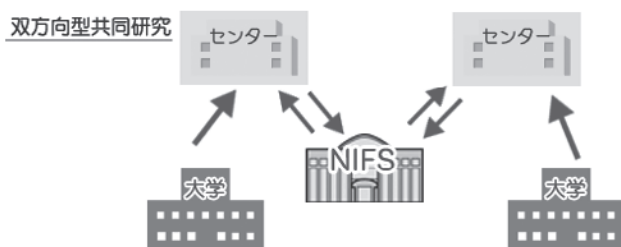


図1 核融合科学研究所が世話役となって組織された双方向型共同研究の概念図。このシステムにより、全国の大学等が参加センターの共同研究に参加可能となり、参加センターは実質的には共同利用・共同研究施設として機能している[10]。

のジャイロトロン開発を筑波大で推進し、さらに、その成果を九大のQUEST実験に適用し、明確なEBW加熱実験の検証に貢献することである。QUESTでは、これまで8 GHz帯のEBW実験を試みてきたが[12]、本格的な実証には、8 GHzの遮断密度($\sim 10^{18} \text{ m}^{-3}$)を大きく超える安定したターゲットプラズマが必要で、このターゲットを生成するために28 GHzのECHを用いる。また、Heliotron Jでは、標準的な閉じ込め性能を發揮できる磁場での本格的なEBW加熱実験が必要となる35 GHzジャイロトロン開発が必要であり、この設計も並行して推進する。これらの成果が得られた後、第2ステップとしては、この双方向型共同研究をベースに、より拡大した連携教育研究を展開するために、28/35 GHzの2周波数発振可能な新ジャイロトロンを開発、製作し、GAMMA 10、QUESTおよびHeliotron J等で装置に応じた性能で発振させ、EBW研究等の原型炉に必要な技術基盤構築に向けた学術研究を推進することである。

本報告では、これらの研究推進の中核となる28 GHz-400 kW連続出力をもち、また、同じ管で、磁場変更により35 GHzのMWレベル発振が可能なジャイロトロン開発に向けた研究の進捗および第1ステップのQUESTでの共同実験の準備状況を述べる。

3. ジャイロトロン開発

筑波大学では、日本のジャイロトロン開発の草創期に、GAMMA 10用の200 kW-28 GHzジャイロトロンを東芝と共同開発した背景と最近の日本原子力研究開発機構(JAEA)のITER用ジャイロトロン開発の飛躍的な進展[13, 14]を基盤に、LHD用77 GHz-1 MW超のジャイロトロン開発を、NIFSとの共同研究で、JAEAの協力も得ながら、2006(平成18)年から実施している[15]。これまでに秒レベルで世界最高性能のジャイロトロン開発に成功し、さらに、154 GHzへ展開し1 MW以上の発振に成功、LHDのECH実験に大きく貢献している[16-18]。これらをベースに、GAMMA 10用28 GHz-1 MW超ジャイロトロン開発を行い、1 MW以上の発振出力を得た[15, 17]。これらのジャイロトロン開発力の、大学等への研究展開を進め、また、大学の多様なニーズに対応しながら核融合研究へ貢献することをめざしジャイロトロン開発を行っている。

3.1 GAMMA 10用28 GHz-MW ジャイロトロン開発

図2にGAMMA 10用28 GHzジャイロトロン写真(a)と構造断面図(b)を示す。ジャイロトロンはジャイロ運動した電子ビームのエネルギーを共振器で電磁波に変換し、数GHz~数百GHzにわたる広い周波数領域においてMWレベルの出力が得られる可能性をもった大電力発振管である。図3はGAMMA 10用ジャイロトロン短パルス(約2 ms)でのビーム電流と出力パワー特性実験結果(●)を示す。ビーム電圧80 kV、ビーム電流40 Aで約1 MWの出力が得られているが、30 A以上の大電流領域で飽和気味であることがわかる[15]。ピッチファクター(α :ビーム電子の磁場に垂直と平行速度比)ごとの発振出力の数値計算結果も同じ図に示している。実験結果と計算を比較すること

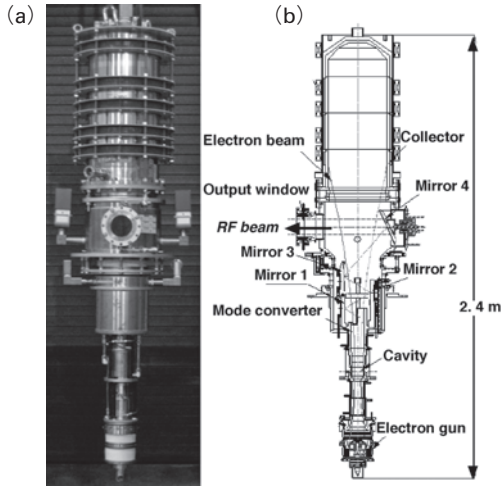


図2 (a) GAMMA 10用 28 GHz 1 MW ジャイロトロン写真。(b) ジャイロトロン構造断面図。

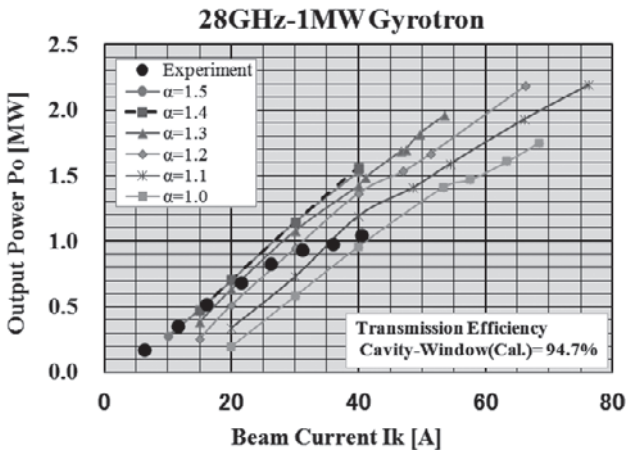


図3 GAMMA 10用 28 GHz 1 MW ジャイロトロンビーム電流に対する出力 (P_o) 特性の実験結果 (●) と数値計算結果 (実線, 点線). 数値計算では, ピッチファクター α が 1.0 から 1.5 (1.4 と 1.5 は, ほぼ重なっている) について示している。

により, 大電流領域での出力の飽和現象は, 大電流ほど, α が小さくなっているためと考えられる。これは, 大電流で電流密度が大きくなり, 電子ビームの重なり度合いを表すラミナー性が悪いと空間電荷効果等により α の分散が増加することに起因する。今後, さらに, 大電流領域で高パワーを狙う際には, 電子銃を改良して, ラミナー性をよくする工夫が必要である。実際, ラミナー性を改良設計した電子銃部の改修を実施し, 発振試験を開始したところ, 電流 40 A 以上でも飽和がみられず, 約 50 A で改造前の 1 MW を超える 1.25 MW 以上の発振出力を得た。長パルス試験に於いても 600 kW で 2 秒発振に成功した。これらについては, 別途報告する [19]。

このジャイロトロンを QUEST 電源 (70 kV, 25 A) で使用することを想定して, 同条件で試験を実施し, 400 kW 以上の出力が得られることも確認した。図 4 は 450 kW の 2 秒までの長パルス発振試験の結果である。長パルスにおいても安定な発振が得られている。また, 今後の連続 (CW) 運転に向けた出力窓 (サファイア製) の性能を評価するために, 450 kW, 2 秒発振試験時の窓温度上昇を測定

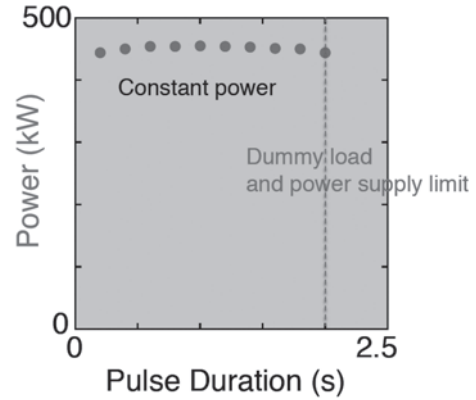


図4 28 GHz ジャイロトロン 450 kW の 2 秒までの長パルス試験結果。

し, 温度上昇が 9 °C 程度であることを明らかにした。この結果を用いた QUEST 用の CW 運転用の窓設計を 3.2 節で述べる。

3.2 QUEST 定常 EBW 実験に向けた新ジャイロトロン開発

QUEST では, 4 節でのべるように 28 GHz の 2 倍の高調波共鳴がプラズマの内側にあるため, 3.1 節で開発した 28 GHz のジャイロトロンを QUEST 用に改良設計する計画である。QUEST では連続 CW 運転が目標とされていることから, プラズマを維持する ECH/ECCD 用ジャイロトロンも CW 運転が必要とされる。低周波数ジャイロトロンの問題である RF ビームの回折損をできる限り抑制することが CW 化の最重要課題である。1-2 秒運転を目標にしていた既存管の設計では, 共振器から出力窓までの伝送効率 95% 程度で十分であった。しかし, CW 管では, 回折損による管内の不要 RF は極力低減する必要があり, 計算コードによる最適化をさらに進めた。その結果, 新モード変換器設計ではサイドローブを大幅に抑制し, 共振器での出力に対して出力窓までの伝送効率を既存管の 94.7% から 98.5% と大きく向上させ, 回折損を 1/3 以下に抑える設計ができた。170 GHz などに比較して波長が長い 28 GHz で, このような低損失設計を実現できたことから, CW 運転が大いに期待できる。また, 実際の製作時には, 回折損の効果を更に低減させるため, 副窓を設けて, 内部の不要 RF を排出する計画である。

次に, 3.1 節で述べたが, 既存のジャイロトロンを用いた窓試験を行った。これまで, サファイア窓の 28 GHz での誘電損失が明確でなかったことから, 実際到大電力発振試験での窓温度を測定し, 28 GHz での誘電損失係数 $\tan \delta = 3.3 \times 10^{-5}$ を実験的に得た。その値を用いて, 窓温度上昇のシミュレーションを行い, 図 5 の結果を得た。この結果から, サファイアの周辺冷却では, 温度上昇率は, 450 kW レベルではさほど大きくないが, 冷却時定数が長い図 5 (a) にみられるように, 温度が上昇し続け, 連続運転では 200 °C を大きく超えてしまう。この結果から, 周辺冷却のサファイア窓では CW 運転が困難であることがわかった。サファイアのダブルディスク窓でフロリナート表面冷却の場合のシミュレーションでは図 5 (b) に示すように, 現実的な熱伝達係数 ($h = 0.03 \sim 0.3 \text{ W/cm}^2 \text{ K}$) で 450 kW の CW

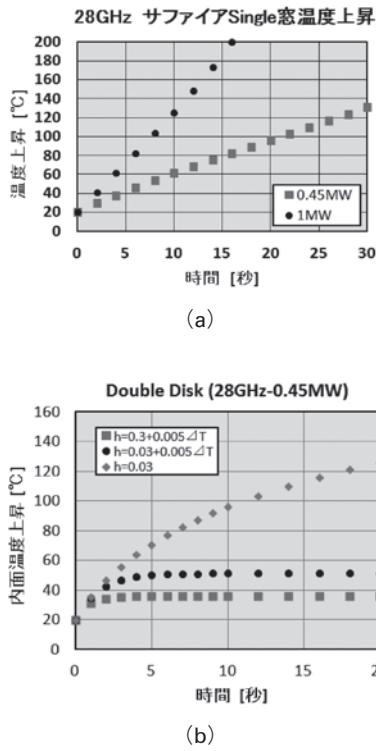


図5 出力窓温度上昇の数値計算結果。(a)サファイアのシングルディスクで周辺冷却時の 0.45 MW (■) と 1 MW (●) の温度変化。(b)サファイアのダブルディスクの間に冷却剤を流す表面冷却時の場合。0.45 MW で、表面での熱伝達係数がいくつかの場合について示してある。(通常使用する冷却剤では 0.3 W/cm²K 程度が期待できる。)

運転が問題なく可能との結果を得た。

3.3 Heliotron J の EBW 加熱に向けた 2 周波数ジャイロトロン開発

Heliotron J では、低磁場の 2.45 GHz を用いた EBW の基礎実験で、遮断密度の 10 倍以上の密度での加熱実験に成功し [8]、また、標準磁場での本格的な EBW 実験に向けた準備を進めている。標準磁場では、35 GHz 帯が EBW 実験の周波数として適切であり、QUEST 用に開発している 28 GHz をそのまま使用できない。GAMMA 10, QUEST, Heliotron-J で共用可能なジャイロトロンを開発できれば、非常に効率的に共同実験が可能であることから、35 GHz 帯でも発振できる 2 周波数ジャイロトロン開発を開始した。

その原理検証実験として、既存の TE_{8,3} モード共振器での 35 GHz 発振の可能性を検討した。35 GHz のモードで既存の共振器と同じ半径で共振するモードとして TE_{9,4} があり、発振が期待できることから、数値計算でその評価を行い MW レベルの発振の可能性を示した。しかし、このモードでの伝送特性から、モード変換器からの放射角度差が大きく、28 GHz と 35 GHz では、15° 程度ずれることがわかり、出力窓までの伝送効率が 70% 以下となる。また、放射パターンも収束が十分でなく、回折損が半分近くになること予測され、新たな、整合性のとれた共振器とモード変換器の設計が必要であることが明らかとなった [20]。

これを解決するには、設計を見直し、2 周波数で空洞共振器、モード変換器、伝送ミラー、出力窓を共用できるよ

う設計する必要がある。特に、共振器とモード変換器の両周波数での整合性が基本となる。この整合性を満たすには、2 周波数で同じ共振器半径 $Rc = (c/2\pi f) \cdot \chi_{mp}$ (χ_{mp} は m 次ベッセル関数の導関数の p 番目のゼロ点) をもつモードの組み合わせを調べ、その中からさらに、モード変換器からの放射角度がほぼ同じものを選定する。この検討により、空洞のモードとして 28 GHz では TE_{8,5}、35 GHz 帯では TE_{10,6} の組み合わせが最適であることがわかった。このモード組み合わせであれば、モード変換器についても、放射角度差は 0.6° 程度で、35 GHz 帯でも適切に伝送可能である。窓については、厚みを 2 倍にすることにより 35 GHz 帯でも半波長の整数倍とし、反射を抑制できる。この選定されたモードの組み合わせで、発振特性の評価とモード変換器の伝送特性の評価を進めている。図 6 が 2 つの周波数での発振特性で、主磁場 (空洞磁場) に対する発振開始電流と出力特性の計算結果である。28 GHz (図 6 (a)) および 35 GHz (図 6 (b)) の両周波数においても、比較的低い発振開始電流で、1 MW 以上は問題なく発振できる。モード変換器からの放射パターンは図 7 で、第 1 ミラーまでの伝送効率が 28 GHz (図 7 (a)) では約 98% と高効率を保ちながら、35 GHz (図 7 (b)) での伝送効率も 95% と大きく向上、数秒レベルでの運転を考慮すると、今回の設計でも十分使用可能であるといえる。28 GHz での連続運転という設計条件から、28 GHz でさらに回折損を低減するべく設計改良を進めていく。

これまで ITER 用や JT-60 SA に向けた 100 GHz 以上のジャイロトロンでの 2 周波数ジャイロトロンは実証されてきたが、28 GHz 帯といった離散性の大きい低周波数帯での実証は皆無であることから、低周波数での 2 周波数ジャイロトロン発振の原理検証試験を筑波大の試験装置において現存管を用いて試みることにした。そのため、既存のジャ

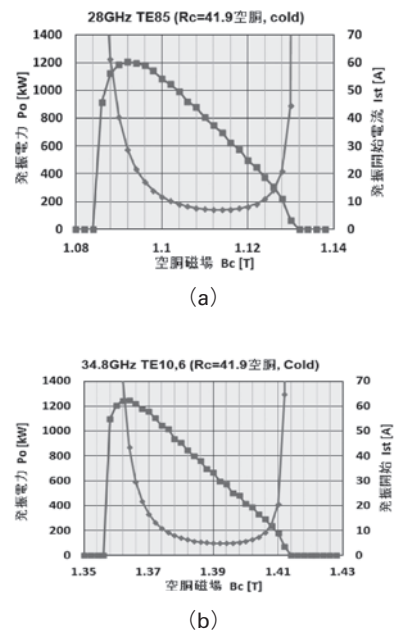


図6 主磁場 (空洞磁場) に対する新設計ジャイロトロン共振器の発振特性。(a) 28 GHz (TE_{8,5}) での発振開始電流と出力。(b) 35 GHz 帯 (TE_{10,6}) の場合。

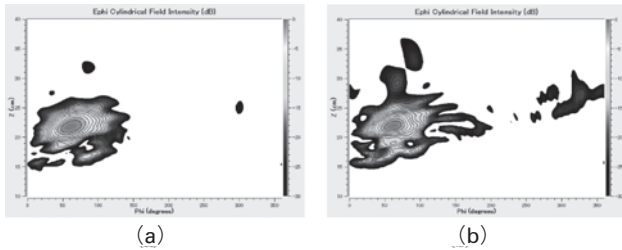


図7 2周波数ジャイロトロンに向けた新設計モード変換器の放射特性を示す第1ミラー位置での放射パワー分布の計算結果。(a)28 GHzの場合。(b)35 GHz帯の場合。横軸が周方向角度(0°~360°)、縦軸が管軸方向(磁場方向)を示す。

イロトロンを35 GHz帯でも出力が取り出せるように、窓の厚みを2倍の6.94 mmに改造し、波長を λ として、28 GHzで 2λ 、35 GHzで $5(1/2 \cdot \lambda)$ となるように実験を行った。その結果磁場調整により、計算から予測される周波数に近い35.46 GHzで870 kWの発振に成功した[19]。この出力は、伝送効率を加味すると1 MW以上の発振に相当する。この結果から2周波数ジャイロトロンが、低周波数のジャイロトロンにおいても可能であることが実証できたといえる。また、多目的ECHジャイロトロン開発に大きな一歩が得られ、第2ステップのEBWのセンター間連携研究の新展開に弾みをつけるものである。

4. 九大 QUESTでのEBW加熱連携研究の現状と今後の展開

さらに、このEBWセンター間連携研究の第1ステップの核として開始したのが、既存のGAMMA 10用1 MWジャイロトロンをQUEST用に調整し、九大に移送して、QUESTの8 GHz帯でのEBW実験のターゲットプラズマを生成して、EBWの本格的な実証をしようという連携研究である。図8に示すようにQUESTの磁場配位では、28 GHzの電子サイクロトロン第2高調波共鳴がプラズマの強磁場側に存在する。この共鳴層でのECH/ECCDにより8 GHz帯の遮断密度を大きく超える密度 $n_e = 3 \sim 4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ の安定したプラズマを生成し、8 GHz帯のEBW実験を行う計画である。現在、このECH/ECCD実験に向けて機器の準備を進めており[12]、伝送系、トーラス窓の設置も完了した。図9はQUESTに28 GHzジャイロトロンシステムを設置した場合の伝送系である。改造ジャイロトロンは2012(平成24)年11月末に筑波大へ搬入され、試験調整を実施し、すでに述べたように600 kWで2秒の発振を確認した。平成25年度3月末に九大に移送した。その後電源との組み合わせ試験、発振テストを終えた、平成25年度前半にはQUESTでの入射実験、さらには、8 GHz帯クライストロンによるEBW加熱・電流駆動と組み合わせた実験へと展開する計画である。

この成果を踏まえて、今後の拡大したセンター間連携に向けたジャイロトロン開発をさらに加速・推進し、順調に進めば多目的ECH用新ジャイロトロンも共同開発していく計画である。

5. まとめと将来計画

核融合科学研究所がコーディネーターとして2004(平成16)年にスタートした「双方向型共同研究」は、第1期中期計画で研究と人材育成両面でよい成果を挙げた。この双方向型共同研究をさらに発展させることを狙い、参加センターがそれぞれの特長を活かしてより強固に連携した共同研究を開始することが議論され、「電子サイクロトロン波帯による高密度プラズマ加熱」と「ダイバータの熱流・粒子束制御」の2つの課題が選定された。前者が本稿にかかる課題で、密度限界がない電子バーンシュタイン波を利用して、高密度プラズマを加熱することが研究の柱である。九大のQUESTのEBWや京大 Heliotron JでのEBW研究力と筑波大の強みであるECH装置の心臓部であるジャイロトロン管の開発研究力を結束し、強力な連携研究を推進しようという目論見である。このジャイロトロンの開発研究の最新の成果とそのEBW研究への適用の準備の様子を述べてきた。

GAMMA 10用1 MWジャイロトロンで、短パルスで1.25 MWを達成するとともに、600 kW、2秒の発振に成功し、また、同一管で35 GHz帯でのMWレベルでの発振に成功し、QUESTと Heliotron Jの両者に使用可能な2周波数の

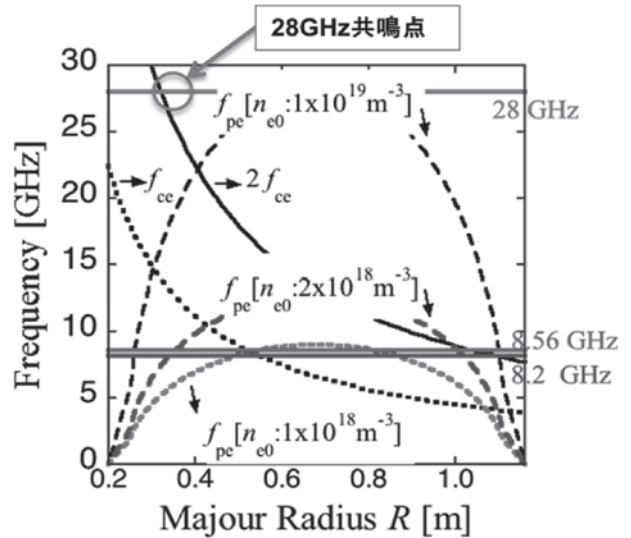


図8 QUESTでの周波数チャート。横軸が大半径、各位置でのプラズマ周波数(3つの密度分布の場合)とサイクロトロン周波数と第2高調波共鳴周波数を示す。

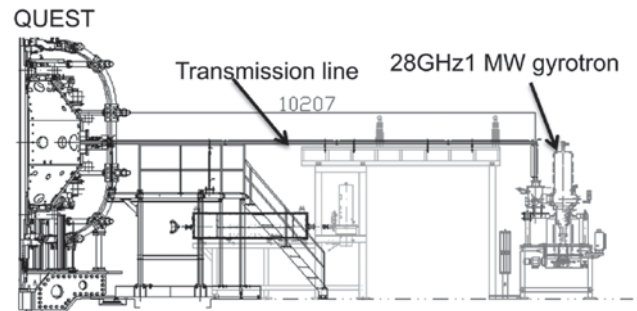


図9 QUESTと28 GHzジャイロトロン・システム間の伝送系の概要図。

ジャイロトロンの開発に大きく弾みをつける結果を得た。設計においても QUEST の連続運転に向け、既存管より回折損を 1/3 以下とする超低回折損のモード変換器の設計を行うことができた。多目的 ECH 用ジャイロトンでは、28 GHz と 35 GHz の両周波数で運転可能な共振器とモード変換器の設計も行い、28 GHz で高効率を保ちながら、35 GHz でも高効率伝送可能な設計ができた。

第 1 ステップのセンター連携研究として推進している QUEST での 28 GHz-ECH/ECCD と 8 GHz-EBW 組み合わせ実験に向けた準備は順調に進み、ジャイロトンとジャイロトン用電源およびその周辺機器、伝送・入射系、トラス用真空窓など順調に準備が進んでいる。平成 25 年度前半には組み合わせ実験が開始される予定で、閉じ込めが確保された遮断密度の数倍のプラズマで秒レベルの EBW が効率よく実証できれば、高密度加熱に大きなインパクトを与えることができる。第 2 ステップでは、この成果と双方向の枠組みをベースにし、連携を拡大し、QUEST の連続運転や Heliotron J での EBW 実験への多目的 2 周波数ジャイロトン開発、そして、全国の関連大学等の連携も加えて、EBW/ECH による高密度プラズマ加熱連携研究をさらに大きく展開していきたい。

謝 辞

本稿の作成にあたり、熱心に議論していただき、ご指導をいただいた双方向型共同研究委員会の委員の皆様から感謝します。また、ジャイロトン開発では、原子力機構の坂本慶司研究主席から多くのご助言をいただき、さらに、筑波大のプラズマ研究センターの皆様のご支援、ご協力をいただきありがとうございます。九州大学プラズマ応用力学センターと京都大学エネルギー複合機構研究センターの皆様、核融合科学研究所の ECH グループのご支援についても感謝の意を表します。最後に、本連携研究に対して、厚いご支援とご指導をいただいた核融合科学研究所

の小森彰夫所長に深く感謝いたします。

本稿の成果は NIFS 共同研究 (NIFS11KUGM050, NIFS11KUGM053, NIFS11KUTR069, NIFS11 KUTRO76, NIFS10KUHL030) によるものである。

参考文献

- [1] V.E. Golant *et al.*, Soviet Physics-Tech. Phys. **17**, 488 (1972) (Zh. Tech. Fiz. **42** 620 (1972)).
- [2] K. Sakamoto *et al.*, J. Phys. Soc. Jap. **65**, 1888 (1996).
- [3] K. Sakamoto *et al.*, Phys. Rev. Lett. **73**, 3532 (1994).
- [4] A. Kasugai *et al.*, Rev. Sci. Inst. **69**, 2160 (1998).
- [5] T. Imai *et al.*, Fusion Eng. Des. **55**, 281 (2001).
- [6] J. Preinhalter and V. Kopecky, J. Plasma Phys. **10**, 1 (1973).
- [7] H. Igami *et al.*, Plasma Phys. Controlled Fusion **48**, 573. (2006).
- [8] R. Ikeda *et al.*, Contrib. Plasma Phys. **50**, 567 (2010).
- [9] Y. Yoshimura *et al.*, Fusion Energy (Proc. 24th Int. Conf., San Diego, 2012) (Vienna: IAEA) EX/P6-16.
- [10] NIFS HP : <http://www.nifs.ac.jp/collaboration/gaiyou.html>
- [11] NIFS 平成 22 年度外部評価報告書 : <http://www.nifs.ac.jp/hyokarep/gaibuhyouka/subsize6down1022.pdf>
- [12] H. Idei *et al.*, Fusion Energy (Proc. 24th Int. Conf., San Diego, 2012) (Vienna: IAEA) EX/P6-17.
- [13] K. Sakamoto *et al.*, Nature Physics **3**, 411 (2007).
- [14] K. Kajiwara *et al.*, Fusion Energy (Proc. 24th Int. Conf., San Diego, 2012) (Vienna: IAEA) FTP/1-3Rb.
- [15] T. Kariya *et al.*, J Infrar. Millim. Teraherz Waves **32**, 295 (2011).
- [16] T. Imai *et al.*, Fusion Energy (Proc. 23rd Int. Conf., Daejeon, 2010) (Vienna: IAEA) FTP/P6-12.
- [17] R. Minami *et al.*, Fusion Energy (Proc. 24th Int. Conf. San Diego, 2012) (Vienna: IAEA) FTP/P1-20.
- [18] T. Mutoh *et al.*, Proc. of 21st International Toki Conf. PL -1 (2011).
- [19] T. Kariya *et al.*, Plasma Fusion Res. **8**, 1205107 (2013).
- [20] T. Eguchi *et al.*, Fusion Sci. Tech. **63**, 1T, 280 (2013).