

電子サイクロトロン加熱 (ECH) および電流駆動 (ECCD) は、プラズマから比較的遠方よりアクセスできる加熱方法で、原型炉でも主加熱法の1つとして検討されています。原型炉では、ECH/ECCD 法はトリチウム漏洩・増殖の観点で有利とされ、高効率電流駆動に向けた理論シミュレーション、長距離伝送路、開口アンテナ等につき検討が進められています。

講演では、ITERを主とし、ECH/ECCD システムの概要を紹介し、ECH/ECCD システムは、大電力発振・ジャイロトロン電子管、電子管運転用高圧電源、電子管出力を送る伝送路、伝送された電力をプラズマに入射するランチャーといった要素に大別されます。今回は、高圧電源を除く各要素につき、これまでの開発研究の流れを「高周波数化、大電力化、定常化、大型化」といったキーワードで整理します。課題解決のために、これまで培った技術による、新たな研究展開を紹介し、他分野となるマイクロ波計測に関連する内容を示します。併せて、DEMO：開口アンテナの検討を紹介し、

1. 大電力・定常 ECH/ECCD システム

1-1. 大電力発振電子管・ジャイロトロン

これまでの開発は、高周波数化、大電力化、定常化を念頭に進められています。キャビティの熱負荷軽減のためにキャビティ径を大きくすることができる高次体積モードが採用されています。発振される高次モード電界を、出力ビームとして取り出す高効率モード変換器が必要です。モード変換器によって高周波ビーム光路と電子ビーム軌道が分離でき、電位降下型コレクタ (CPD) によるコレクタ熱負荷の軽減が実現しました。モード変換されたビームは真空窓から出力します。ダイヤモンド窓の開発で、如何に窓での高周波損失を抑え、損失熱を除熱するかといった課題が克服されました。170 GHz : 1MW 出力で 3,600 秒発振 [1]といった高周波・大電力・定常運転が達成されたのは、モード変換器・ダイヤモンド窓を含む要素コンポーネントのブレイクスルー技術開発による

ものです。高次モード発振を活用し、更に複周波数発振といった展開が図られていますが、同一構造コンポーネントで、多周波数、大電力・高効率動作を実現するかが鍵となっています。

1-2. 長距離伝送路

伝送路はオーバーサイズ導波管ベースの方式、準光学鏡列ベースの方式があります。トリチウム漏洩の観点から、装置にある真空窓に加え、伝送路で真空窓設置が必要であれば、導波管ベース方式が有利です。世界的にもW-7X 装置を除く、多くの主要装置で導波管ベースの方式が取られています。

オーバーサイズ導波管伝送路では、主に伝送効率、アーキングが問題になります。長距離伝送路では数多くの導波管が接続され、接続でオフセット・傾き・隙間があるとオーバーサイズ導波管では主要伝搬モードに加え、高次モードが励起されます。接続箇所が複数であるため、励起モードは多岐で複雑となります。励起された高次モードは、非軸対称性や複数ピークを有しており、異なる位相定数を持ちます。異なるモード間の干渉で電界集中する場合、アーキングが起きやすくなります。また高次モード励起は伝送効率を低下させます。伝送波は最終的にランチャーからプラズマに入射されますが、励起高次モードは、プラズマ入射のビーム品質を劣化させます。

1-3. ランチャー

ランチャーでは、装置の大型化に伴うアンテナ (準光学) 伝送の長距離化で、入射ビーム品質管理が課題となります [2,3]。アンテナでの準光学伝送で、ストレー高周波が多くなるとビーム品質が低下し、発熱も問題となります。JT-60SA では比較的プラズマに近い位置まで導波管を用いて伝送する方式を採用しています [4]。大電力化に伴い、比較的狭い領域から複数ビームを入射することになり、入射ビーム間の位相干渉も起きます。

2. 新たな研究展開

2-1. 多モード間干渉

オーバーサイズ導波管を用いた伝送路では、高次モード励起を抑えるよう、導波管軸管理が必要です。一方、積極的にオーバーサイズ導波管に斜め入射するリモートステアリングアンテナといった応用例 [5] があります。用いるのは通常のコルゲート導波管でなく方形コルゲート導波管ですが、斜め入射することで同様に高次モードが励起されます。励起された高次モードは、異なる位相定数を持ちますが、導波管アンテナを伝搬後に、各々、入射面と同じ位相を持つ出力面を設定できれば、入射角度 θ と同じ角度 θ で放射します。その長さの半分のアンテナ長で、入射角度と反対の $-\theta$ 方向に放射し、更に半分 (1/4) の長さで $+\theta$ 方向に 2 分割されます。その長さ L は方形の 1 辺 a と波長 λ で決まります。リモートステアリングアンテナは、プラズマへの入射角 (アンテナ放射角) をアンテナ入射角で制御でき、ITER 上部アンテナとして検討されましたが、必要な放射ビーム品質を得られず、採用されませんでした。

出力が 2 分割される Splitter 動作を用い、共振器動作を用い、伝送路を高速に切り替える FADIS といった応用例があり、JT-60SA への適用が検討されています。JT-60SA では、高次モード励起を活用した複数周波数システム [6] となっています。Splitter 動作するアンテナの形状 a, L は波長即ち、周波数と関連があり、複数周波数システムでの運用は難しいですが、励起される高次モードを精査することで、2 周波数動作する FADIS が検討されています [7]。実験的にも 2 周波数動作に必要な新領域で良好な動作が確認されています。

2-2. 多素子間干渉

多モード干渉を用いた応用例は、入射面分布が出力面で「結像」するため、Talbot 効果として議論されます。本来の Talbot 効果は多素子間干渉を扱いますが、同様な多素子アンテナ間干渉を扱う、位相配列アンテナといった応用例があります。QUEST では、出力位相がロックできる 8.2 GHz クライストロン増幅管、基本導波管・位相配列アンテナを用いた ECH/ECCD システムが整備されています [8]。

QUEST では、電子サイクロトロン輻射 (ECE) 計測用位相配列アンテナも開発されています。位相配列受信には、ECE の位相検出を行う必要があります。熱ノイズ源模擬を用いた検証 [9] を経て、ECH 非誘導立ち上げプラズマでの ECE 計測が行われています。

2-3. 多素子・多モード間干渉

DEMO ECH/ECCD システムでは、運用・メンテナンスの観点から、開口アンテナを第一候補に検討が進められています。トリチウム増殖の観点で開口面積を小さくすると、複数アンテナを同一ポートから入射します。位相干渉を利用する位相配列アンテナが検討されましたが、オーバーサイズ導波管からの放射のため、十分にビームが広がらず、適切に放射角制御できません。装置の大型化に伴い、良好なビーム品質を得ることが難しいですが、反面、位相配列アンテナに必要なビーム広がりを得ることも難しいです。多モード・多要素間干渉を活用する「リモートステアリング位相配列アンテナ」で、ECCD に必要な斜め入射が検討されています。この場合、位相配列を組むために、ジャイロトロン出力の位相ロックが必要で、今後の研究展開が期待されます。さらに、伝送路での伝搬位相管理も求められますが、大電力伝送の発熱による熱延び・軸ずれが伝送効率に影響を与えることもあり、既に課題解決に向けた検討 [10] が始まっています。

核融合開発研究における ECH 高周波技術は、装置の高磁場・大型化、閉じ込めプラズマの高性能化に伴い、高周波数化、大電力化、定常化、大型化で進展してきました。その中で現在、低周波数大電力・定常ジャイロトロン管の開発 [11] も進められています。これまで以上に管内のストレー高周波対策が重要となります。新たな技樹進展が、更なる研究展開に繋がると期待されます。

- [1] R. Ikeda *et al.*, Nucl. Fusion **61** (2021) 106031.
- [2] K. Takahashi *et al.*, Fusion Sci. Technol. **67**, 718 (2015).
- [3] S. Kubo, Plasma Phys. Control. Fusion, **47** A81-90 (2005)
- [4] T. Kobayashi *et al.*, Fusion Eng. Des. **146(B)**, 1647-1651 (2019).
- [5] H. Idei *et al.*, Nucl. Fusion **46** 489 (2006).
- [6] T. Kobayashi *et al.*, EPJ Web of Conferences, **87** 04008 (2015)
- [7] H. Idei *et al.*, J. Infrared Millim. Terahertz Waves **36** 662 (2015)
- [8] H. Idei *et al.*, Proc. of the 19th Topical Conf. on Radio Frequency Power in Plasmas 473 (2011).
- [9] H. Idei *et al.*, J. Instrum. **11** C04010 (2016).
- [10] Y. Oda, in private communication.
- [11] T. Kariya *et al.* Nucl. Fusion **26** 066009 (2019).