

## NBIへの高周波技術利用 Utilization of Radio Frequency Technology for Neutral Beam Injection

安藤 晃  
Akira ANDO

東北大院工  
Graduate School of Engineering, Tohoku University

中性粒子ビーム入射加熱装置(NBI)は、トラスプラズマ加熱、閉じ込め改善、電流駆動に対し極めて有効な加熱方式であり、国際核融合実験装置(ITER)においても 1MeV の高ビームエネルギー加速された重水素負イオン源とこれを用いた NBI ビームラインの準備が進められている。将来的な NBI 開発においても高周波を用いたイオン源開発やビーム加速法の開発など高周波技術の重要性は増加している。

### 1. 高周波負イオン源の開発

ITER さらには将来の DEMO 炉では準定常での NBI 加熱が必要とされる。ITER-NBI 開発では 1 時間の連続運転を行うため、高周波を用いたプラズマ生成法を採用した負イオン源開発が、欧州、特にマックスプランク研究所(ドイツ)と RFX コンソーシアム(イタリア)で行われている。これまでの負イオン NBI の開発では、核融合科学研究所(NIFS)の LHD や量子科学技術研究開発機構(QST)の JT-60U 用 NBI で用いられてきたアーク/フィラメント型生成法で行われてきたが、ここで培われた重水素負イオン源の研究成果をさらに発展させ、国際協力で ITER 用 NBI システムの構築が進められている。

大型の NBI 用高周波イオン源は、当初 ASDEX-upgrade 用正イオン源として開発された。絶縁管外部にまかれたループアンテナに 1 MHz の高周波を印加した構造を持ち、内部にはファラデーシールド構造を設置し、プラズマ生成を行う形状であった。負イオン源ではこの生成方式を継承し、生成部のほかに拡散部容器を取り付け、ここに電極近傍の電子密度・温度を低減するためのフィルタ磁場を設置した構造となっている。マックスプランク研究所では BATMAN と呼ばれる実験用イオン源で RF 周

波数 1 MHz、電力 100kW の高周波電源を用いて実験を行い、その後、生成部を 4 カ所取り付けした ELISE 装置で大型化を進め、イタリアでの SPIDER、MITICA での実験を経て、ITER-NBI 実機へと開発が進められている。負イオン電流や長時間運転についてはそれぞれ目標値に到達できる結果が得られつつあるが、プラズマの空間分布の不均一性やビーム発散角が大きい点、さらに真空容器内部にイオン源を設置するため、アンテナ周囲の絶縁、RF マッチングなど動作上の課題点も指摘されおり、今後さらに開発を進める必要がある。

東北大においても ITER-NBI 用イオン源と同程度の大口径(内径 230 mm)の高周波負イオン源(図 1)の開発を目的として、最大出力 30 kW、周波数 0.3~0.5 MHz の FET インバータ型高周波電源を利用した実験研究を進めてきた。容積に対して比較的低電力、低周波数であるが、電子密度で  $10^{18}\text{m}^{-3}$  を越える高周波プラズマを実現し、Cs 添加により負イオン電流値  $8\text{mA}/\text{cm}^2$  とともに、電子電流と負イオンとの電流比が 1 以下の結果も得られている。

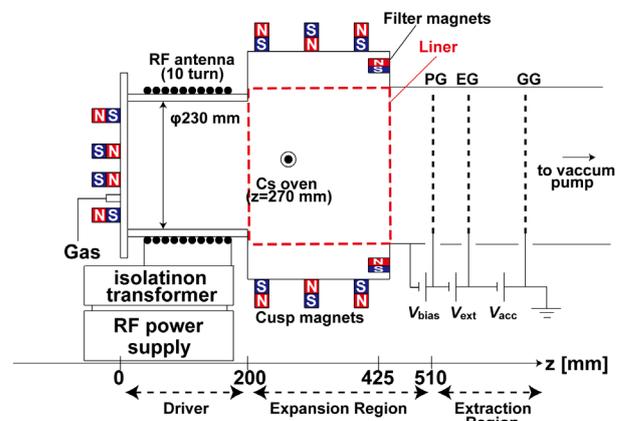


図 1 大口径高周波水素負イオン源 (東北大)

## 2. 高周波負イオン源の開発

今後の核融合実証炉に向けた開発研究において、装置大型化と高密度化に伴い1MeV以上のビームエネルギーが必須であるが、現在の複雑な電極構造を持つ静電加速方式では電極構造の複雑化や絶縁技術など課題点が多く、1MeV以上の静電加速の実現が困難と考えられる。また、定常運転時における電極損耗の課題なども懸念され、将来の DEMO 炉に向け、高周波を用いたビーム加速方式の開発研究が必要となっている。

従来の高周波を用いたビーム加速方式である RFQ では、MeV 級加速を行うことができてビーム電流値はせいぜい 10mA 程度であり、アンペア級の大電流ビーム加速を行った前例はない。最近 QST 六カ所所で進められている IFMIF 用 RFQ では 0.1A を越えるビーム加速を実現したが、今後 RFQ 方式では、1A を越えるビーム加速は自己電荷による発散効果が大きく実現が困難である。

最近、連続して設置された高周波空洞に、それぞれ印加する高周波電界と位相を調整し、加速系に入射されたイオンビームを徐々に加速、集群させ、1A を越えるビームが集群し、1MeV を越える高周波加速が可能であることが指摘された(図2)。この加速法を検証するため、自己電荷による発散効果も考慮した PIC シミュレーションを行い(図3)、粒子ビームが徐々に集群し、2MeV までの加速効果が確認された。今後、マルチビームレット条件での加速の可能性を検証することで 10A 級の高周波ビーム加速の実現性の検証を行って行く。

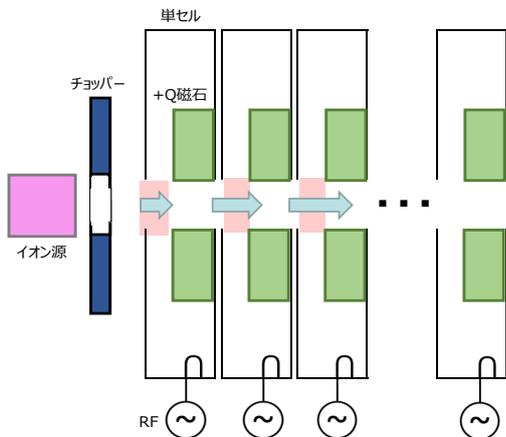


図2 連続した高周波空洞を用いたビーム加速法

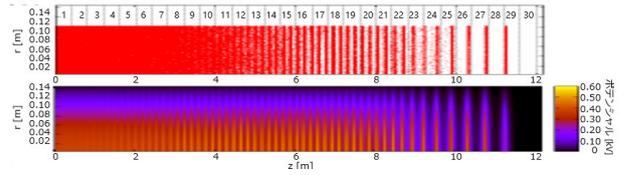


図3 ビーム集群の様子 (D-ビーム、0.1A)

## 3. 民生品利用の高周波電源の開発

高周波利用を進める際に課題となっている点として、負荷側との同調(マッチング)がある。高周波伝送では 50 オーム同調が基本であり、プラズマ生成用アンテナと同調するため、真空バリコンを用いた同調回路を用意する必要がある。このとき、真空負荷とプラズマ負荷で大きく同調条件が異なるため、プラズマ点火時に同調条件が大きく変わり、反射電力増や、アンテナ部でのブレイクダウンなどを生じることがある。また、高周波電源も 100kW 級になると真空管方式が使われることが多く、価格が高いことや、高電圧回路、冷却回路を含め、高周波発生効率が低下する原因でもある。

これらの難点を解消するために東北大ではインバータ型 RF 電源開発を進めてきた。図4に回路図を示すが、プラズマ点火時の同調を周波数変調で対応させることで高速応答が実現可能である。また、インバータ部のスイッチング用半導体素子もシリコン系では大電力対応で高速スイッチングが出来る素子が無かったが、近年の自動車の電動化をはじめとするモータ制御用民生需要が進み、窒化ガリウム(GaN)系素子が急速に開発され、数 100V、100A 規模の高速スイッチが可能な素子が提供されてきた。これを用いることで 1MHz を越える周波数領域で 10kW 級の高周波電源が安価に製造可能となってきた。

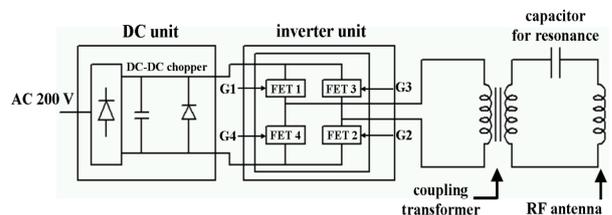


図4 インバータ型高周波回路

### 参考文献

- [1] U. Fantz et.al. *Frontiers in Physics*, 9 (2021) 709651.
- [2] V. Toigo et.al. *Fusion Engineering and Design* 168 (2021) 112622.