

将来の負イオンNBIシステムに向けた高周波空洞加速と光中性化
RF beam acceleration and photo-neutralization for the future negative-ion based NBI system

関川 悠太郎¹, 後藤 亮¹, 高橋 和貴¹, 安藤 晃¹, 津守 克嘉², 森 義治³
Yutaro SEKIKAWA¹, Ryo GOTO¹, Kazunori TAKAHASHI¹, Akira ANDO¹, Katsuyoshi TSUMORI²,
and Yoshiharu MORI³

1. 東北大院工 2. 核融合科学研究所 3. 京都大複合原子力科学研
1. Dept. of Electrical Eng., Tohoku Univ., 2. NIFS, 3. KURNS, Kyoto Univ.

1. はじめに

磁場閉じ込め核融合プラズマを加熱する最も有効な手法に中性粒子入射 (Neutral Beam Injection) 装置がある。NBIによりプラズマに中性粒子ビームを入射し、加熱することによって核融合条件を満たす高温高密度プラズマの生成が可能である。大型核融合プラズマの加熱用 NBI 装置には高エネルギーの重水素負イオンビーム加速と中性化システムが必要である。

国際熱核融合実験炉 ITER 用 NBI の 1 機あたりの仕様は、最大 16.5MW の電力、最大 3600 秒のパルス長である。それぞれの NBI では、静電加速手法によって 40A の重水素ビームが 1MeV のエネルギーで加速される。将来の DEMO 級の大型装置用 NBI には 1MeV を越えるビームエネルギーと中性化効率が高い光中性化技術が必須である。

しかし、従来の静電加速では高電圧化に伴う絶縁対策が課題となるため、加速可能なビームエネルギーは 1MeV が限界と考えられている。また、現行の NBI システムでのガス中性化セルでは、中性化効率が 60%にとどまるため、より高効率の光中性化セルの開発が不可欠である。

現在、次世代の NBI システムに向けた高エネルギービームの実現と中性化に向け、高周波加速方式と光中性化方式の検討を進めている。1MeV を越える高周波加速の検討では、加速空洞を多段に並べ、格段に異なった高周波位相と電界強度を持たせた構造を持たせることで、アンペア級ビームの多段加速が実現できることが PIC シミュレーションで示された。この際、空間電荷効果による加速効果への影響を検討している。さらに、光エネルギーを用いた光中性化方式を用いることで、理論上 95%以上のビーム中性化効率が達成可能である。ガス中性化と光中性化の混合システムを提案し、負イオンビームの中性化についても検討を進めている。

2. 実験手法と結果

高周波加速方式によるアンペア級ビーム加速手法と光中性化の検討を進めるため、空間電荷効果を取り入れた二次元 PIC モデルを構築した。

多段型高周波空洞加速器の構成を図 1 に示す。加速空洞数を 30 段とし、各段の加速空洞 (軸長 0.40 m, 加速ギャップ 0.03 m) に短形状の RF 加速電界 (最大電圧 300 kV, RF 周波数 25 MHz) を印加する構成である。また、加速空洞内に設置した軸長 0.37 m のソレノイドコイルで最大 5.0 T の軸方向収束磁界を与え、空間電荷効果による半径方向の発散を抑制している。

本加速方式により、ビームの進行とともに粒子の集群 (beam bunching) が形成されながら、ビームエネルギーの上昇と位相の安定が確認された (図 2)。最終的には出射エネルギー約 2MeV の到達を確認している。

また、光中性化セルの検討を進めるにあたって、ITER での構成を想定し、長さ 4.2m (ITER の中性化セルと同じ 3.0m とその前後に 0.6m ずつ) の軸対称モデルを用いて中性化反応過程についてシミュレーションを行った。ガス中性化過程を含めたシミュレーションにより、10kW のレーザー出力とガス中性化を組み合わせることで中性化効率は 74.1%となるとともに、負イオンビームの収束も確認された。

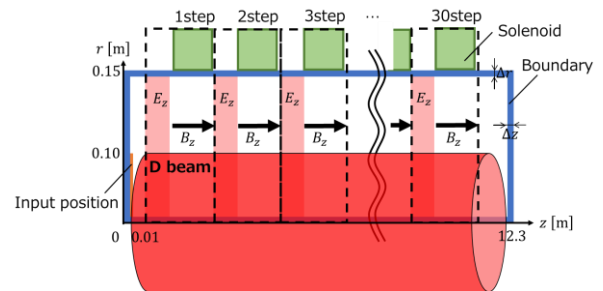


図 1: 多段式高周波加速器の計算モデル

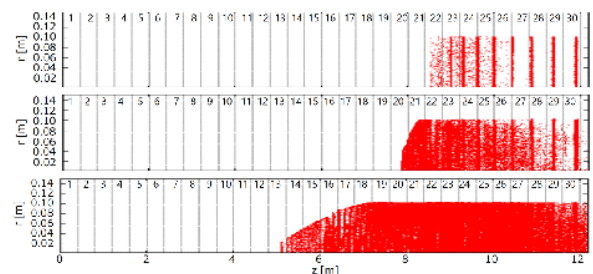


図 2: ビーム加速シミュレーション結果例 (上段からビーム電流 0.1A, 1A, 10A)