

多段型高周波加速空洞を用いた次世代 NBI 用 MeV 級ビーム加速の検討 MeV-class beam acceleration using multi-step RF cavities for next NBI system

佐藤 旭⁽¹⁾, 安藤 晃⁽¹⁾, 佐古 貴行⁽²⁾, 森 義治⁽²⁾, 津守 克嘉⁽³⁾

Asahi SATO⁽¹⁾, Akira ANDO⁽¹⁾, Takayuki SAKO⁽²⁾, Yoshiharu MORI⁽²⁾, Katsuyoshi TSUMORI⁽³⁾

(1)東北大院工, (2)京都大学, (3)核融合科学研究所

(1) Dept. of Electrical Eng. Tohoku Univ., (2) Kyoto Univ., (3) National Institute for Fusion Science

1. 概要

中性粒子ビーム入射装置(NBI)は, 核融合実現に向けた ITER や DEMO 等大型装置でのプラズマ加熱や電流駆動に不可欠であり, 大電流化および高エネルギー化が進められている. 現在は多孔多層の加速電極系を用いた静電加速手法により, 1MeV で数 10A 級の重水素負イオンビーム加速を行う開発が ITER-NBI で進められている. DEMO に向けさらに高エネルギー化が必要であるが, 絶縁系の大型化や電極系の複雑化などの問題がありこれ以上の高電圧加速は難しい.

最近我々は, 多段に並べた加速空洞にそれぞれ位相差を付けた高周波電圧を印加し, 印加電圧や位相を最適化することでアンペア級での 1MeV 以上の高周波加速方式を提案している (図 1). 本研究では, この高周波空洞を用いたビーム加速手法について, 重水素負イオンビームの空間電荷効果を考慮した PIC コードを用いたシミュレーションを実施し 1MeV 以上の高周波加速について検討を行った結果を報告する.

2. 計算モデル

荷電粒子は高周波加速空洞を通過するたびに電界から力を受け加速される. このとき, 位相安定性の原理により粒子は収束力を得て集群化する. このメカニズムを利用し, 各空洞に適切な振幅と位相を与えることで粒子群のバンチングを行い段階的に高エネルギーへとビーム加速を行う.

シミュレーションに際しての基礎方程式は相対論的運動方程式

$$m \frac{d\mathbf{u}}{dt} = q \left(\mathbf{E} + \frac{\mathbf{u}}{c} \times \mathbf{B} \right) \quad (1)$$

およびポアソン方程式

$$\nabla^2 \Phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2)$$

である. これらはいずれも円筒座標系で記述される.

本研究では PIC 手法を用いて高周波加速空洞における重水素負イオンによる自己電荷効果を考慮し, 30 段の各加速空洞に適切な振幅と位相で高周波電圧を与えた際の重水素負イオンの挙動をシミュレートした. 高周波空洞部における印加電磁界は軸対称分布であり矩形型及びガウス分布型を用いた.

3. 結果

ビーム電流 0.10 A の重水素負イオン (入射エネルギー 200 keV) を連続的に入射した際のシミュレーション結果を図 2 に示す. 各加速段ごとに印加された高周波電界により, 粒子群が徐々に集群を形成し 2MeV までの加速が可能である. 集群形成時には自己電荷により加速位相から外れる粒子も存在するが, ほとんどの粒子群は最適な位相で加速されている. 一方でビーム電流が 10A になると自己電荷により集群が崩れてしまうなど集群加速方式の課題についても報告する.

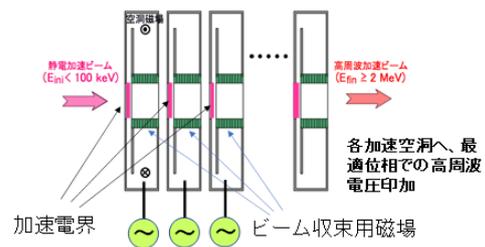


図 1 多段型高周波ビーム加速の概略図

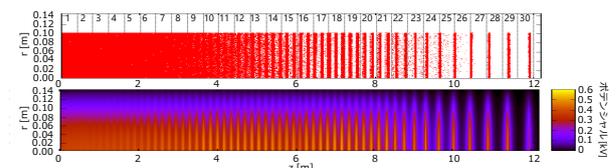


図 2 ビーム電流 0.10 A のビーム入射後 $t = 2.25 \mu\text{s}$ における粒子群の集群形成の様子. 上図は粒子群を, 下図はポテンシャル強度分布を示す.