

Multi-beam Cavity for Lower Energy Beam Acceleration

N. Hayashizaki, T. Hattori and J. Tamura

Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology

2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan

Abstract

An accelerator is a key device in accelerator-driven nuclear energy systems. Although high intense beam is useful for them, it involves the problems of space charge effect. The function of its defocusing force is extremely strong at low energy region. One of the solutions is the relaxation of defocusing force by dividing the high intense beam into some beams. We have proposed a high intense injector system with a multi-beam linear accelerator (linac). The prototype design of a multi-beam Radio Frequency Quadrupole (RFQ) linac has been carried out at TITech.

低エネルギーマルチビーム加速空洞

1. はじめに

重イオン慣性核融合や加速器駆動型核変換システムなど、原子力エネルギー分野用の加速器では、大きなビームパワーを得る目的で高強度イオンビームの加速が必要とされることが多い。このとき、空間電荷効果による強いビーム発散力の影響を可能な限り抑えることが、安定したビーム加速のために重要であり、とくに低エネルギー領域においては効果的である。そのひとつの方法として、高強度ビームを複数本に分割して加速をおこなうことで、発散力を低減させる方法が知られている。そこで本研究では、分割されたビームの効率的な加速にむけて、複数のビームを1台で加速可能な、低エネルギー加速空洞の開発をおこなっており、現在はRFQ線形加速器の検討を進めている。

2. マルチビーム加速空洞

小電流ビームを複数の加速空洞で並列に加速したあと、カスケード的に統合して電流量を増加させていく加速器構造は、とくに重イオン慣性核融合用の加速器技術として、これまで検討が進められてきている。このとき、各エネルギー段では1本のビームにつき1台の加速空洞が割り当てられるのが一般的であり、ビームファネリング技術などの実験的研究もおこなわれている^[1]。しかし、もしも1台の加速空洞で複数のビーム加速が可能になるならば、システムの小型化や省電力の点で有利となる。なかでも低エネルギー領域の加速においては、ビーム本数にあわせて加速空洞数も多くなるため効果は大きい。

本研究では、低エネルギーマルチビーム加速空洞としてRFQ型とIH型を取り扱う。現在は前者について検討を進めており、電力効率の優れたIH型加速空洞に複数の4ロッドRFQ電極を組み合わせた、マルチビームタイプのIH-RFQ構造の設計をおこなっている。なお、同構造のシングルビームタイプについては、すでにGSI（ドイツ）において加速実験がなされている^[2]。

3. マルチビーム加速RFQの検討

3.1 コンセプト

過去に検討がおこなわれた、たとえば100万kWの発電規模をもつ重イオン慣性核融合プラントの場合、その初段加速器には質量数200程度のイオンを数100keV/uまで加速する能力が求められる。また、必要とされるビーム電流量は400～500mAであり、これをビーム1本あたり30～50mA程度に分割することが予定されている。本研究では、これらのパラメータにも配慮しつつ、イオン質量数と加速エネルギーを抑えた低エネルギーマルチビーム加速空洞を考え、4ビームIH-RFQ加速空洞の原理実証機の開発をおこなうことにした。この加速構造を選んだのは、ロッド電極の拡張性や製造コストを考慮したためである。その基本パラメータは、最終的なビーム加速実験をも考慮して、イオン質量数を40程度、運転周波数25MHz、入射エネルギー2keV/u、出射エネルギー25keV/uとした。

表1 プロトタイプモデルパラメータ

Charge to mass ratio	1/40
Operation frequency	25
Input energy (keV/u)	2
Output energy (keV/u)	25
Vane length (cm)	252
Total number of cell	233

3.2 IH-RFQ加速空洞

この加速空洞構造のなかで高周波電磁場は、IH型と同じTE₁₁₀モードにより励振され、ドリフトチューブの代わりに、極性を考慮しながら各システムを通じて取り付けられた4本のロッド電極により、RFQ電場を発生する。マルチビーム加速の場合には、電極数の増加により分布容量も大きくなり、比較的小さな直径で低い周波数を実現でき、重イオン加速用に適する。共振周波数の基本的な調整は、リッジ端部の切り欠き（エンドチューナー）でおこなう。

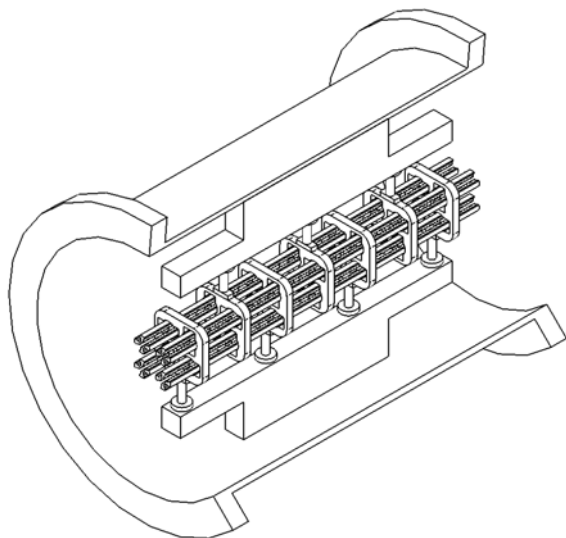


図1 4ビーム加速IH-RFQの構造図

3.3 電磁場シミュレーション

過去のIH線形加速器の開発において作られた既存の真鍮製モデルを改造して、4ビームIH-RFQ加速空洞のコールドモデル（電極モジュレーションなし）が作られた^[4]。これは内径670mm、全長1080mm、各ビームチャンネルのボア半径が8mmというものであったが、どちらかといえば形状確認のためのモックアップ的な要素が大きいものであった。そこで、あらためて3次元電磁場シミュレーションをおこない、図2のような計算モデルを基本形状として、その特性を解析することにした。

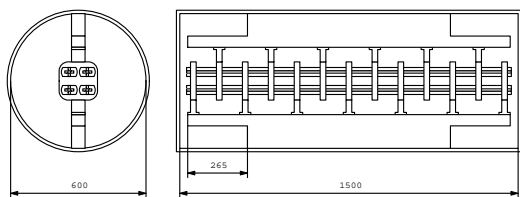


図2 シミュレーションモデル基本形状

実際のシミュレーションでは、電極モジュレーションを省略したビームボア半径5mmのモデルを作り、共振周波数、Q値、電場分布、電流密度などを計算した。このとき、計算モデルの分割メッシュ数を抑えるために、対称性を考慮して1/4分割モデルを主に利用した。その結果として、図3に示すように各ビームチャンネルの電極間には高周波四重極電場が形成されるが、ロッド電極取り付けベースの貫通部の配置形状によって、各方向成分が大きく異なることが分かった。これは隣り合うビームチャンネル間で電場が干渉するため、最も影響が少ないのは同極性の電極が隣接する場合であった。調整の結果、計算値として共振周波数25.4MHz、Q値6200が得られた。そのときのロッド電極近傍の電場分布を図4に示す。部分的に段差があるのは、電極取り付け

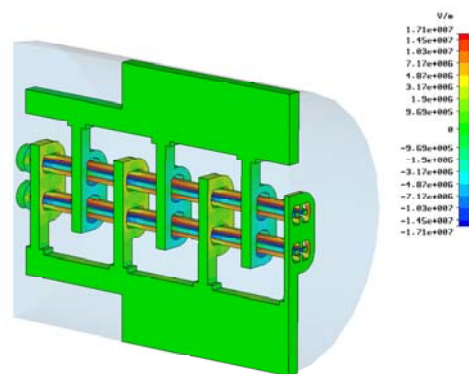


図3 シミュレーション結果（1/4分割モデル）

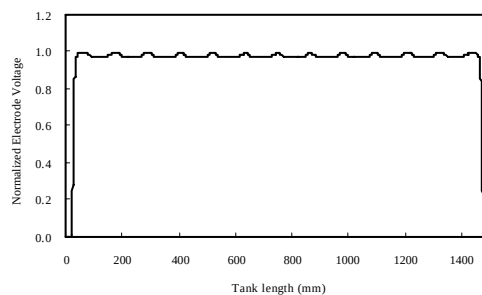


図4 電極近傍の電場分布

ベースの影響である。今後は、この影響をなるべく抑える構造の開発をおこなう。また、ステムを通じた各電極の冷却構造も検討事項である。

4. まとめ

原子力エネルギー分野用の低エネルギー大強度イオン線形加速器として、マルチビーム型のIH-RFQ加速空洞の基礎検討をおこなった。そして電磁場シミュレーションによる解析結果から、所定の高周波四重極電場を得るためには、各ビームチャンネル間の電極極性の配置や、その取り付けベースを工夫する必要があった。今後は、電場分布の最適化や効率的な冷却方法の検討を進めるつもりである。

参考文献

- [1] K. Johnson, et al., “A Beam Funnelling Demonstration: Experiment and Simulation”, Particle Accelerators, 37-38(1992)261-268.
- [2] U. Ratzinger, et al., “The GSI 36 MHz high-current IH-type RFQ and HIF-relevant extensions”, Nuclear Instruments and Method in Physics Research A, 415(1998)281-286.
- [3] Y. Fujiie, et al., “Heavy ion fusion reactor HIBLIC-I”, Research Report of Institute of Plasma Physics, Nagoya University, IPPJ-663 (1984).
- [4] T. Hattori, et al., “重イオン慣性核融合用多ビーム加速IH-RFQ型線形加速器”, Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, (2002)201-203.