話題

マルチビーム型 IH-RFQ 線形加速器システムの開発

石橋 拓弥*1·林崎 規託*2·服部 俊幸*2

Development of Multi-beam type IH-RFQ Linac System

Takuya ISHIBASHI^{*1}, Noriyosu HAYASHIZAKI^{*2} and Toshiyuki HATTORI^{*2}

Abstract

We developed a two-beam type IH-RFQ (Interdigital H type Radio Frequency Quadrupole) linac system to prove the principle of a multi-beam type IH-RFQ linac in Research Laboratory for Nuclear Reactors of Tokyo Institute of Technology. The multi-beam type RFQ linac has several beam channels in a cavity for accelerating high intensity and low energy heavy ion beams. The developed system consists of a two-beam type IH-RFQ cavity as a prototype of the multi-beam type cavity, a two-beam type laser ion source with DPIS (Direct Plasma Injection Scheme) and beam analyzers mainly. As a result of the beam acceleration test, the linac system accelerates carbon ions from 5 keV/u to 60 keV/u and generates about 108 mA (2×54 mA/channel) in the total output current. In this paper, we describe the development of the linac system and some results of the beam acceleration test.

1. はじめに

RFQ (Radio Frequency Quadrupole: 高周波四重極) 線形加速器はイオンビームを強収束しながら加速する 装置で,低エネルギー領域の陽子・軽イオンに対して 90%を越えるような高い粒子透過効率(入射粒子数に 対する出射粒子数の比)も実現可能である.また,入射 用静電加速器を必要とせず,バンチャーの機能も有し ているため,イオン源直下においても単体で利用できる. このような理由から RFQ 線形加速器は高エネルギーイ オン加速器の初段加速器としても利用されている.

これまでに様々なタイプの RFQ 線形加速器が開発されてきており,現在では設計・製作の容易性などの理由から,陽子・軽イオン用には 4-vane 型,重イオン用には 4-rod (π-0 mode)型が普及している.

RFQ線形加速器によってビームを加速するとき,加速可能なビーム電流量はビーム速度と四重極電極間に印加される電圧との積に比例する.四重極電極への印加電圧は放電限界値によって制限されるため,速度の遅い低エネルギー重イオンビームを大強度化(大電流化)することは非常に困難となっている.

しかし最近では、DPIS (Direct Plasma Injection

Scheme: 直接プラズマ入射法)を適用したレーザーイ オン源を使い, RFQ 線形加速器 1 台により 60 mA 程 度の重イオンビームの加速が実証されている¹⁾. これ よりさらに大きい 100 mA を越えるようなビーム電流 量を得るためには, 図1(a) に示すような RFQ 線形加



^{*1} 高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設 KEK Accelerator Laboratory

⁽E-mail: takuya.ishibashi@kek.jp)

^{*&}lt;sup>2</sup> 東京工業大学・原子炉工学研究所 Tokyo Institute of Technology, Research Laboratory for Nuclear Reactors

速器システムを複数配置し,ビームを並列に加速しな ければならない.しかしながら,加速するビームの本 数に応じて周辺機器(加速空洞,真空排気系,イオン源, RF電源,制御系など)も増え,システム全体が大規模 化するとともに建設・運転コストが増加してしまう.

2. マルチビーム型 IH-RFQ 線形加速器

そこで本研究では、加速器システムを大規模化せず に大強度の重イオンビームの生成を可能にする新しい RFQ線形加速器の研究開発を目的とし、特に複数本の ビームを1台の RFQ線形加速器で同時に加速するマ ルチビーム型 RFQ線形加速器の研究開発を行った.例 として、1台で4本のビームを加速する4ビーム型 RFQ 線形加速器システムの概念図を図1(b)に示す.この システム1セットで従来のシングルビーム型システム 4セット分と同等の大強度ビームが加速可能となる.

また質量が大きく,速度の遅い重イオンを加速する には、加速器の運転周波数を数十 MHz 程度まで低く 設定しなければならない.このような低い周波数を得 るためには加速空洞の径を大きくしなければならず, これを例えば 4-vane 型で実現するには数 m の空洞径 を要する.

電極要素の据え付け作業が行いやすいことから、マ ルチビーム型 RFQ 線形加速器の共振構造には 4-rod 型 もしくは IH (Interdigital H)型の適用が考えられる. マルチビーム型加速空洞はシングルビーム型に比べて 多くの電極要素を有するために空洞の静電容量が大き く、コンパクトな空洞径で低い周波数を実現できる.

4-rod型RFQ線形加速器は1984年頃、ドイツのフ ランクフルト大学で提案され、ここを中心に研究開発 されてきた.これまでに数多くの実機が製作されてい る.1999年には同大学のグループにより、重イオン慣 性核融合ドライバーへの応用を想定した2ビーム型 4-rod RFQが製作され、ビーム輸送実験が行われてい る(加速はしていない)²⁴.低エネルギー領域の電力 効率に優れたIH型共振空洞に四重極電極を組み込ん だシングルビーム型IH-RFQ線形加速器は、1998年に ドイツのGSIで実用機が製作され、ビーム加速に成功 している^{5.6}.しかし、マルチビーム型IH-RFQ線形加 速器の実機開発およびビーム加速などの詳細研究は行 われてこなかった.

3. 線形加速器の設計

3.1 基本設計

本研究ではマルチビーム型 IH-RFQ 線形加速器の原 理実証機として2ビーム型を採用し、開発を行った (表1). なお、レーザーイオン源については後述する.

大強度ビームを四重極電極で効果的に集束するため には、空間電荷効果の影響を抑える必要から電荷数対 質量比(q/A)のなるべく小さな粒子を加速する方が 適している.しかしq/Aを極端に小さくすると、数 m の加速空洞では十分な速度まで加速することができな い.本研究では、実験スペースや研究予算などを考慮 すると、加速空洞長は1-2 m 程度に制限されたため、 加速粒子は東京工業大学での研究実績が十分にある炭 素2価イオンq/A=1/6とした.

ビーム加速試験に使用する RF 電源は既存のもので, 周波数 50 ± 5 MHz, パルス運転時に最大電力 100 kW の出力性能を持つ.この RF 電源は主にドライバアン プ(三極真空管を使用)とメインアンプ(四極真空管 を使用)から構成されている.この電源は低周波数側 での出力特性が優れていたため,加速空洞の運転周波 数は 47 MHz と定め,設計を行った.ビーム加速試験 に際して,セパラトリクスの縮小を補うために四重極 電極間電圧を設計値以上印加する可能性がある.また 製作された加速空洞のQ値によっては,必要な四重極 電極間電圧を得るために設計値以上の RF 電力を投入 する.そのため,RF 電源の出力には余裕を持たせな ければならない.これらのことから,加速器の運転に 必要な消費電力はビームローディング 35 kW,壁損失 45 kW,合計 80 kW に収まるよう設計を行った.

3.2 四重極電極の設計

RFQ 線形加速器は図2に示すような4つの電極を持つ. 電極それぞれの間に角周波数 ω のRF電圧が印加され,対向する電極は同相に,隣り合う電極は逆相とする. このとき極性は半周期 T/2 = $\pi \omega$ で逆転するようにする. すると電極間に四回対称の RFQ 電場が発生し,これを使ってビームを集束・輸送する. またビームを加速するために電極の先端にモジュレーション(modulation)と呼ばれる凹凸をつけて進行方向の電場成分を作る. このとき4つの電極はビーム軸に対して上下対称・左右対称である. モジュレーションは上下

表1 2 ビーム型 IH-RFQ の基本パラメータ

荷電数対質量数比 q/A	1/6 以上
共振周波数 (MHz)	47
入出射エネルギー(keV/u)	5→60
入射電流 (mA/channel)	60
透過効率(%)	60 以上
出射電流 (mA/channel)	35 以上
全消費電力 (kW)	80
加速空洞長(m)	1.5



図2 変調四重極電極の形状



1対が凸(凹)になっているところでは左右1対が凹(凸) となるように加工される.

電極のセルごとにアパチャ半径 a, モジュレーショ ンインデックス m, 同期位相 ϕ_s が与えられれば RFQ 線形加速器における粒子の軌道は決定する(図 3). こ れらセルパラメータの選定にはビーム電流が 10 mA を 越えるような大強度 RFQ の設計に適した LANL (Los Alamos National Laboratory)の RFQUICK を使用し, 粒子軌道計算コードには PARMTEQM を使用した.

最適化した四重極電極における各種パラメータおよ びシミュレーション結果を**表2**にまとめる. ここで加 速粒子 C²⁺,入射エネルギー 5 keV/u,出射エネルギー 60 keV/u,運転周波数 47 MHz,入射エミッタンス 0.1 π mm mrad,粒子数 10000,四重極電極長 1481.2 mm, 入射電流 60 mA/channel, Kilpatrick 値(電極表面の電 場強度と Kilpatrick 放電限界値の比⁷⁾) 1.8 としている. これにより C²⁺ を 5 keV/u から 60 keV/u まで加速し, 透過効率 60%以上を達成する解が得られた.

3.3 RF 電磁場解析による空洞設計

加速空洞のRF特性は主にCST社のMicrowave Studioで評価した.2ビーム型IH-RFQ線形加速器の 概略図を図4に示す.2ビーム型IH-RFQ線形加速器 は多くの電極要素を持つため、空洞構造にはそれらの 取り付けが極力容易に行えることが必要であった.こ

表2 最適化したセルパラメータにおける2ビーム型 IH-RFQ線形加速器の各種性能

電極先端形状	$\rho_t = 0.75 r_0$
平均ビームアパチャ半径 (mm)	7.6
電極先端半径 (mm)	5.7
Q(MWS 値)	7700
壁損失(kW, 60% Q, ロッド間電圧で 規格化 , MWS 値)	42
透過効率(%)	72.7
出射電流 (mA/channel)	43.6
出射エネルギー幅 (%)	± 7
出射エミッタンス $\varepsilon_{x,n}(\pi \text{ mm mrad, RMS})$	0.24
出射エミッタンス $\varepsilon_{y,n}$ (π mm mrad, RMS)	0.26



図4 2ビーム型 IH-RFQ 加速空洞概略図

のことから空洞は図4に示すように2つの半円筒形空 洞と1枚のセンターフレームで構成される構造とした.

加速空洞の共振周波数は $f \propto 1/\sqrt{LC}$ の性質をもつ. センターフレームの上下から延びるリッジの端には切り 欠きが設けられており、この長さを変化させることは LCR 回路のインダクタンスLを変化させることと等価 である. したがってこれを調節することによって加速 空洞の共振周波数を設計値に合わせることができる.

Microwave Studio を用いてシミュレーションした, 加速空洞内の電磁場を図5に示す. TE₁₁₁モードが励振 されており,ロッド間に四重極電場が発生しているの が分かる.このときの表面電流を図6に示す.四重極 電極を支えるステムでの表面電流が特に大きく,周辺 の発熱も大きい.高周波電源からの同軸管と空洞はルー プカプラーにより磁気結合され,その真空シールには セラミック窓を用いた.



図5 2 ビーム型 IH-RFQ 加速電極の四重極電場



図6 2ビーム型 IH-RFQ 加速空洞内の表面電流

3.4 冷却構造

RFQ線形加速器を運転すると、加速空洞には発熱に よる応力が生じるため、空洞のRF特性が変化する. 例えば空洞が膨張すると空洞内で磁束の通過する面積 が増え(インダクタンスが増える)、共振周波数は減少 する. 電極間電圧が Kilpatrick 値 1.8、duty が 1%での 運転を想定し、COSMOS Worksの伝熱解析ソルバー を用いて伝熱・熱応力計算を行った.

シミュレーションモデルを図7に示す.空洞外側を 覆うように冷却ジャケットを取り付けている.熱流束 は Microwave Studio で計算した値を使用している. ここでは冷却構造をa) リッジ,b) リッジ・ステム, c) リッジ・ステム・電極(図8)に加工した場合で伝 熱解析を行った.その結果を表3にまとめる.空洞の 変位に対する共振周波数のシフトは,最大熱変位量が 空洞全体に一様に生じるものとして Microwave Studio で評価した.

適切な冷却構造により熱変位と周波数変化を抑える ことができ、この運転条件では b)の構造で十分に熱変



図7 伝熱シミュレーションモデル



図8 リッジ・ステム・電極に加工する冷却水路.緑色 の管が水路である

位を抑えられている. そのため2ビーム型 IH-RFQ 線 形加速器実機ではこの冷却構造を採用した. また,将 来的に IH-RFQ 線形加速器をさらに多チャンネル化, もしくは高 duty 化する場合,それに伴って発熱量の増 加が予想される. この問題に対応するため, c)の構造 も試作した.

4. 実機の製作

製作した 2 ビーム型 IH-RFQ 線形加速器実機の内部 を図9に示す.空洞内長 1500 mm,空洞全長 1700 mm,センターフレーム左右にある半円筒形空洞の半 径 246 mm,架台を含まない空洞全高は 670 mm である. 空洞は SUS304 で製作し,50 μm 厚の銅メッキを施し た(周波数 47 MHz での表皮深さはおよそ 10 μm). 真空排気用のポートは半円筒形空洞の上流に設けられ

冷却構造	最高温度 (℃)	電極端部 温度(℃)	空洞径最大 変位量 (µm)	$\Delta f(\mathrm{kHz})$	電極最大変位 量 (μm)
なし	75 (リッジ端)	74	200	34	900
ジャケット	48 (リッジ端)	45	50	8	270
a)	31 (空洞端)	27	20	3	38
b)	31 (空洞端)	25	20	3	18
c)	31 (空洞端)	25	20	3	18

表3 伝熱解析結果まとめ



図9 2ビーム型 IH-RFQ 線形加速器実機の内部写真

ており,真空ポンプへの電流流入を防ぐため,グリッドが取り付けられている.

電極を支えるステムは図 10 に示すような冷却水路を 加工した.あらかじめ水路を加工した C1020 ブロック 2 枚を合わせ,電子ビーム溶接することにより図 11 に 示すステムの原型を製作し,これを加工して最終的な 形状に仕上げた (図 12).

四重極電極の先端部は RFQUICK が生成したセルパ ラメータにもとづいて 3D CAD データを作成,それを NC 工作機械へ入力することによって加工した.水路 付きの電極1本を製作するにはまず四角柱型の無酸素 銅ブロック5個にφ4の冷却水路をガンドリルにより 加工し,それらブロックを電子ビーム溶接することに より1本の電極に仕上げた.しかし電極加工後,銅ブ ロックの溶接箇所において不良が見つかった(図13). 先端からの放電や四重極電場の質の低下,冷却水の漏 れが心配されたため,最終的な加速試験では水路付き



図10 ステムの断面. 左側は電極へ通じる水路が加工 される. 右側はステム自身で冷却水が循環する



図11 ステムの原型

の電極は使用しなかった.

なお電極の加工精度は三次元測定しており,厚さ方 向の誤差は水路の有無でそれぞれ最大 +73 µm と +25 µm であった.長さ方向の誤差は水路の有無でそれぞ れ最大 +96 µm と +11 µm であった.水路の有無に かかわらず,電極の寸法は事前にシミュレーションで 評価した許容誤差の範囲内に入っていた.



図12 最終加工されたステム



図13 四重極電極の溶接不良

5. 電場強度分布測定とアライメント

RFQ 電極間の電場強度分布は摂動法によって測定した. 摂動体を空洞へ挿入したことによる共振周波数の変化量が電場強度の2乗に比例することを利用した測定法で、本研究では空洞への透過波と入射波との間の位相差をベクトルボルトメーターで測定した. 摂動体はアクリルでできており、図14のような位置に置かれる. これを隣り合う2本の電極に常に接触するようにステッピングモーターで加速軸方向に動かすことにより、四重極電極の各象限における相対的な電場強度分布を測定する.

アライメント前の測定結果(ビームチャンネル1) を図15に示す.各象限間における電場強度のばらつき はチャンネル1で±8%,チャンネル2で±4%以内で あった.シミュレーションによる検討から,この電場 強度分布では透過効率が設計値より約5%低下してし まうことから,治具を製作してアライメントを行った. ステム間の距離と回転方向のアライメントは図16に示



図14 アクリル製摂動体の配置



図15 アライメント前の電極間電場強度分布



図16 ステム用治具をセットしている様子

す治具(精度 50 µm 以下)で行った.四重極電極間の 距離は図 17 に示すアルミ製の治具(精度 50 µm 以下), 中心位置は同図内に見えるアクリル製のターゲット(精 度 20 µm 以下)を用いて固定した.アライメント後の 四重極電極間電場強度分布を図 18 に示す.電極間にお ける電場強度のばらつきはチャンネル1で±1.7%, チャンネル2で±0.7%となり,目覚ましく改善された. そのためこのコンディションでビーム加速試験を行う ことにした.



図17 四重極電極用治具



6. レーザーイオン源

2ビーム型 IH-RFQ 線形加速器のイオン源には、マ ルチビームの場合でもシンプルな構造を採れる DPIS 型のレーザーイオン源を採用・開発した. レーザーイ オン源の特徴として、1) レーザーにより微小領域にエ ネルギーを集中でき、大きなプラズマイオン電流が得 られる, 2) CO₂ レーザーなどの長波長レーザーを大出 力で用いることにより高温プラズマが発生し、多価イ オンを生成できる、3) 固体標的・クライオ標的を用い ることでほとんどすべてのイオン種を生成できる, 4) 真空容器に標的物質を配置してそこへレーザー光を 集光するだけでプラズマが生成でき、システムの構成 がシンプルである、5) DPIS により従来必要であった イオン源と加速空洞間の LEBT (Low Energy Beam Transport: 低エネルギービーム輸送部)を省略して数 10 mA オーダーの大強度重イオン加速が行える、こと などが挙げられる.



図19 2ビーム型レーザーイオン源の構成



図20 レーザーイオン源断面

本研究で製作した2ビーム型レーザーイオン源は主 にレーザー,プラズマ生成チェンバー,ターゲット, 光学系,真空排気系,昇圧系から構成される(図19). アブレーションプラズマの生成にはQスイッチ Nd:YAGレーザー(発振波長:1064 nm,パルス繰り返し: 最大20 Hz,最大出力:1.16 J/shot)を使用した.

レーザーイオン源の断面を図 20 に示す. ターゲット 面に対して 30° 傾けて取り付けられた 2本の鋼管にレー ザー光が導入される. 接地している加速空洞に対して 5 keV/uの炭素イオンを入射するため, プラズマ生成 チェンバーとプラズマ輸送パイプを昇圧する. ターゲッ ト上で生成されたプラズマはプラズマ輸送パイプ内を 通り, パイプ先端にあるピンホール(φ 4) から四重 極電極入口へ出射される. パイプの先端には内ねじ構 造のキャップが取り付けられており, これにより RFQ 端板からのプラズマ入射位置を調整できる.

レーザー光はビームスプリッターにより2分割され, ミラーによりイオン源チェンバーへ導かれる. レーザー



図 21 生成ビームのパルス構造. レーザーエネルギー 430 mJ/channel, レーザーパルス幅13 ns, パワー 密度 7.9 × 10⁸ W/cm²

の集光には焦点距離 750 mm の平凸レンズを使用した. ミラーにおけるレーザーのエネルギーロスはレーザー 光の入反射角によっても異なる. そのため各ミラーの 傾きを微調整し, 各ビームチャンネル間でターゲット 上のレーザーエネルギーを約 1%の範囲内で等しくし た. また生成ビームはターゲット上のパワー密度 (W/cm²) に依存するため, ターゲット上でのレーザー 照射面積もノギスの精度で等しくした.

テストシステムを用いたビーム生成試験において設計粒子 C²⁺の生成量が大きくなるようにレーザーのエネルギーと照射面積を最適化した結果を図 21 に示す. レーザープラズマの電流密度は、その進行距離の3乗 に反比例することから⁸⁾、RFQ 線形加速器入口におけ る各価数のピーク電流を求めることができる.この試 験の結果、設計ビーム(C²⁺)の生成に成功した.

7. ビーム加速試験

製作した2ビーム型IH-RFQ線形加速器及びレーザー イオン源をDPISにより接続し,ビーム加速試験を行 うためのテストシステムを構築した(図22).全ビー ム電流の測定にはファラデーカップを,ビームの価数 分析にはこのシステムのために製作した静電アナライ ザーとファラデーカップを使用した.

プラズマ入射位置や引き出し電圧の最適化を行い, ビーム電流を測定した(図23). 各ビームチャンネル 間でのビーム電流を比較すると,パルス形状はほぼ完 全に一致しており,ピーク電流の差は0.5%以内に収 まっていた. 各チャンネル間で四重極電極の取り付け 誤差に違いがあったが(第5節参照),この程度の差で



図22 加速試験テストシステムの全体写真



図23 各チャンネル間でのビーム電流波形比較

は出射ビームのパルス形状に違いはほとんど見られな かった.またレーザー照射位置のアライメントエラー が 500 µm 存在すると,ピーク電流は 10%減少するこ とが他の実験で分かった.

アナライザーのビーム通過条件を 60 keV/u に合わせ て測定した各価数のビーム電流を図 24 に示す. 横軸は 空洞への投入 RF 電力をモニターするためのピック アップアンテナの出力を表している. 投入 RF 電力の 増加にしたがって各価数のビーム強度も増加している ため, このシグナルはエネルギー 60 keV/u の炭素ビー ムであることを示している.

2 ビーム型 IH-RFQ 線形加速器によるビーム加速試 験の結果を**表4**にまとめる. 出射エネルギー 60 keV/u, 最大約 108 mA (2 × 54 mA/channel)の炭素イオンビー ム加速に成功した. これは1台の RFQ 線形加速器で 加速された重イオンビームとして世界最大の電流量で ある.

— 33 — J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 8, No. 1, 2011 33



図24 ピックアップ電圧と各価数のビーム電流

RF バルス繰り返し(Hz)	1	
RF パルス幅(ms)	1	
duty(%)	0.1	
Q值	5900	
$Rs(k\Omega m)$	168	
入射エネルギー(keV/u)	5	
入射電流(mA/channel, total)	172	
出射エネルギー(keV/u)	60	
出射電流(mA/channel, total)	45	54
投入 RF 電力(kW)	65	76
Kilpatrick 値(w/o beam loading)	2.5	2.7

表4 ビーム試験結果

8. おわりに

以上, 概略ではあるが, マルチビーム型 IH-RFQ 線 形加速器システムの開発と原理実証実験について述べ た.本研究により低エネルギー・大強度重イオンのマ ルチビーム加速に関する多くの成果が得られた.

一方,マルチビーム型線形加速器の詳細研究は始まったばかりであり、本研究を通じていくつかの研究課題 と展望が見えてきた.

DPISを用いた入射システムでは目的価数以外のイオ ンも RFQ 線形加速器で加速されている. PARMTEQM ではこのようなマルチチャージを含んだ粒子軌道計算 は実行できない. したがって加速器のさらなる性能向 上, ビーム力学の詳細研究にはマルチチャージイオン を含んだ軌道計算コードが必要となる.

また本研究はマルチビーム型 IH-RFQ 線形加速器の 原理実証を主目的としており,その観点から加速空洞 を駆動する RF 電源は既存のものを使用した.これに より加速空洞の性能,特に空洞長と四重極電極の先端 形状は RF 電源の出力で制限されていた.したがって より大出力の RF 電源を使用することによりさらなる 大強度・高エネルギーの重イオンが生成できるだろう.

参考文献

- 1) Masahiro Okamura et al., Rev. Sci. Instr. 77 (2006) 03B303.
- A. Schempp, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, 390 (1997) 9.
- 3) H. Zimmermann et al., Proc. of the 1999 Particle Accelerator Conference (1999) 530.
- A. Shempp, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, 415 (1998) 209.
- 5) U. Ratzinger et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, 415 (1998) 281.
- U. Ratzinger et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, 415 (1998) 229.
- 7) W. D. Kilpatrick, Rev. Sci. Instr. 28 (1957) 824.
- B. Yu. Sharkov, S. A. Kondrashev, Proc. of EPAC96 (1996) 1550.