

# FABRICATION AND LOW-POWER MEASUREMENT OF THE J-PARC 50mA RFQ PROTOTYPE

Yasuhiro Kondo\*, Akira Ueno, Kazuo Hasegawa,  
Japan Atomic Energy Agency(JAEA)  
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195

## Abstract

An RFQ, whose peak current is 50mA, has been developed for the J-PARC linac. We adopt a laser beam welding(LBW) method to fabricate the RFQ cavity. A prototype cavity was successfully fabricated and low-power measurement has been performed. We obtained the nominal frequency and field uniformity within 1%.

## J-PARC 50mA RFQ 試作機の製作と低電力試験

### 1. はじめに

大強度陽子加速器計画(J-PARC)のリニアックは、立ち上げ初期において、エネルギー 181MeV、ピークビーム電流 30mA の負水素を加速する予定である<sup>[1]</sup>が、出来るだけ早い段階で 400MeV、50mA を達成するように求められている。そのため、日本原子力研究開発機構では、50mA 用高周波 4 重極(RFQ)リニアックの開発を行ってきた。J-PARC 50mA RFQ では、将来の高デューティ運転に対応するため、空洞構造として、銅の削りだし材を冶金的結合する構造を採用したが、4 分割された部品を結合するのに、今回新たに、レーザー溶接による結合を試みた。一般的には、同様な RFQ の製造方法として、ロー付けが用いられる<sup>[2][3]</sup>が、レーザー溶接は、入熱が極めて局所的なため、ロー付けに比較しても高い精度を達成できる可能性がある。また、ロー付けと異なり、構造体全体が焼きなまされることもないので、この点でも精度が期待できる。本論文では、J-PARC50mA RFQ の試作空洞の製作と、低電力試験について述べる。

### 2. J-PARC 50MA RFQ の設計

J-PARC 50mA RFQ は、J-PARC リニアックの最初の加速構造として、H<sup>-</sup> 粒子を、50keV から 3MeV へ加速する。RF パルス幅は、600 $\mu$ sec、繰り返し 50Hz で、空洞の周波数は 324MHz である。

セルパラメータの設計は、KEKRFQ<sup>[4]</sup>を用いて行ない、粒子シミュレーションには、PARMTEQM<sup>[5]</sup>を用いた。表 1 に、50mA の諸元を示す。

J-PARC 50mA RFQ は、ヴェーン長 3874mm であり、長手方向に分割された 3 つのモジュールからなる。3 つのモジュールの長さは、それぞれ、1304.1mm、1266.5mm、1303.4mm である。これらの長さは、分割位置が、ヴェーンの頂点に来るように調整されている。それぞれのモジュールは、4 つの部品からなり、レーザー溶接によって結合される。レーザー溶接は、RF コンタクトと真空シールの両方の役割を持つ。空洞の材質は、純粋無酸素銅である。3 つのモジュールと、端板は、ボルトによって結合され、RF コンタクトには、ヘリコフレックス、真空シールには、メタル O

表 1: J-PARC 50mA RFQ 諸元

空洞構造	4-vane
vane 長	3874 mm
セル数	362
vane 間電圧	80.7 kV
最大表面電場	31.5 MV/m (1.77Kilpatrick)
平均ボア半径	3.6 mm
vane 先端形状	0.89 $r_0$ (3.204 mm)
透過率*	94.5 %
横方向エミッタンス* (規格化、rms)	0.160 $\pi$ mm $\cdot$ mrad.
縦方向エミッタンス* (規格化、rms)	0.0923 $\pi$ MeV $\cdot$ deg.

\*PARMTEQM 計算値 (1.0  $\pi$  mm  $\cdot$  mrad.、100%、規格化、waterbag、60mA 入射)

リングが用いられる。J-PARC 50mA RFQ は、24 個の RF ピックアップ、30 個の真空引き口付き固定チューナーと、長手方向に分布する、2 つの RF カップラーを持つ。運転中の、共振周波数の微調整は、ヴェーンに流す冷却水の温度を制御することで行なう。J-PARC 50mA RFQ には、加速モードへの、2 重極モードの混入を防ぐため、20 対の  $\pi$  モード安定化ループ(PISL)<sup>[6]</sup>を備える。水平方向と、垂直方向の PISL の間隔は、210mm である。

空洞内面の形状は、SUPERFISH<sup>[7]</sup>と MAFIA<sup>[8]</sup>による計算で決定された。計算結果を 2 にまとめる。空洞の共振周波数の設計値は、SUPERFISH による計算値で決定、PISL の影響は、MAFIA によって求める。

### 3. 試作空洞の製作

図 1 に、今回製作した試作空洞を示す。この空洞は、J-PARC 50mA RFQ の、第 1 モジュール(入口側 1/3 部分)にあたり、ヴェーンのモジュレーション、RF コンタクト、真空シールなど、全て実機として使用出来ることを前提に製作した。第 1 モジュールに

\* E-mail: yasuhiko.kondo@j-parc.jp

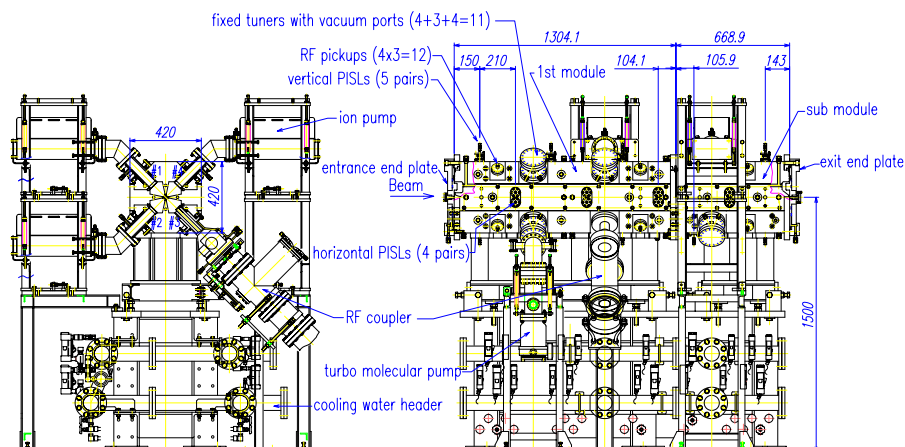


図 1: 50mA RFQ 試作機

表 2: SUPERFISH 及び MAFIA による計算のまとめ

SUPERFISH	共振周波数: $f_{SF}$	334.444 MHz
	Q 値: $Q_{SF}$	11403
	消費電力: $P_{SF}$	317 kW
MAFIA (PISL なし)	共振周波数: $f_{MFWOP}$	332.867 MHz
	Q 値: $Q_{MFWOP}$	11067
MAFIA (PISL あり)	共振周波数: $f_{MFWP}$	332.867 MHz
	Q 値: $Q_{MFWP}$	11067
	$f_{MFWOP}-f_{MFWP}:\Delta f_{MF}$	10.455MHz
	共振周波数設計値: $f_{SF}-f_{MF}$	323.989MHz

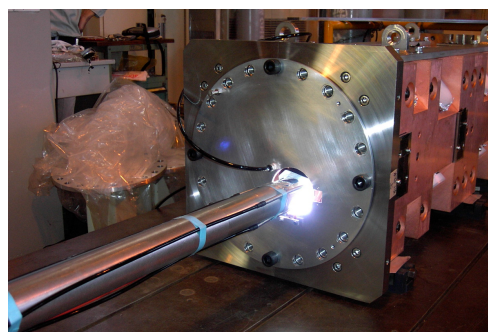


図 3: 空洞内面溶接の様子

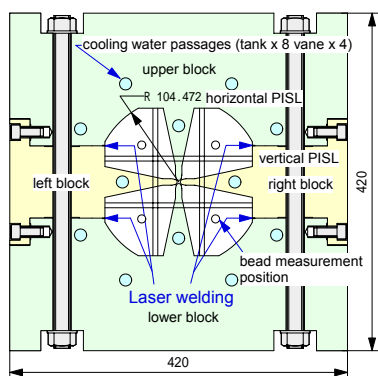


図 2: 50mA RFQ の空洞断面図

は、ヴェーンのエンドカットが無いいため、RFQ 空洞として成立させ、低電力ならびに大電力試験を行なえるように、補助空洞が接続されている。

図 2 は、空洞の断面である。1つのモジュールを構成する4つの部品は、それぞれ無酸素銅のブロックから削り出された。空洞内面の形状及びヴェーン先端は、総形バイトで加工された。ヴェーン先端の加工精度は、 $15\mu\text{m}$  以下である。

レーザー溶接前の段階で、一度空洞を組み上げ、低電力チューナー、低電力端板、RFピックアップを取り付け、設計通り加工出来ているか確認のため、低電力測定(共振周波数および電磁場分布測定)を行った。この段階では、PISLは取り付けられていない。

溶接前の低電力試験で、問題のないことが確認された後、4つの空洞部品は、機械的には、ボルトでお互いに結合され、空洞内面の4箇所、レーザー溶接された。溶接による、ヴェーン的位置ずれを防ぐため、空洞外面も、レーザー溶接した。溶接に使用したレーザーは、 $\text{CO}_2$ レーザーであり、加工点での出力は5kWである。空洞内面を溶接するときには、空洞内にアルゴンガスを満たしながら行なった。図3に、空洞内面溶接時の写真を示す。溶接前後のヴェーンの相対位置の変化量は、 $13\mu\text{m}$  以下であった。

溶接終了後、PISL、低電力チューナー、低電力端板、低電力カップラによって、空洞の共振周波数と、電磁場分布の調整を行った。(詳細は次章。)

図4に、PISL組み立て後の、空洞内面の写真を示す。この調整で得られたデータを基に、高電力部品の加工を行い、最終組み立てが行われた。

#### 4. 低電力試験

レーザー溶接前の仮組み段階、レーザー溶接後、及び高電力部品取り付け後の最終段階の3段階で、低

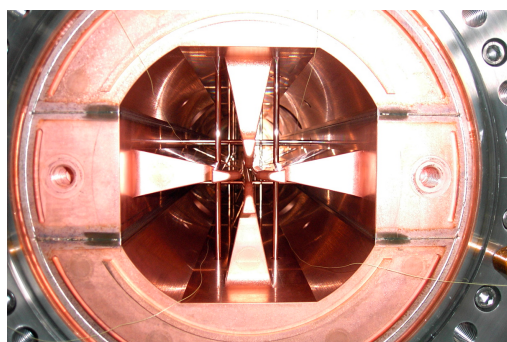


図 4: J-PARC 50mA RFQ の空洞内面図

電力試験を行った。

レーザー溶接前の低電力試験では、共振周波数と、電磁場分布の測定を行い、計算値と比較することで、正しく加工が行われていることを確認した。このときは、PISL は取り付けられていない。共振周波数の測定は、ネットワークアナライザを用い、電磁場分布は、ビーズ摂動法によって測定した。ビーズの通過位置は、図 2 中に示される。

レーザー溶接後の低電力試験では、空洞のチューニングを行った。まず、長手方向及び 4 つの象限間の電磁場分布が平坦度 1% となるよう、低電力チューナーによって調整する。同時に、共振周波数が、真空中、27 換算で、324MHz となるように調整した。

また、RF カップラの結合度が、1.5 となるように、ループの突き出し、大きさ、角度を調整した。この調整での低電力チューナーの、最大調整量は、7.7mm であった。(チューナーによる周波数変化:基準位置付近で 6.7kHz/mm、ヴェーン間隔 10 $\mu$ m(垂直、水平両方向とも変化した場合)あたりの周波数変化:240kHz)

ここで得られたデータを基に、高電力部品(真空引き口付固定チューナー、RF カップラ、端板)の寸法を決定し、加工した。これらの高電力部品を取り付けた後、最終確認の低電力測定を行った。図 5 に電磁場測定中の様子を示す。

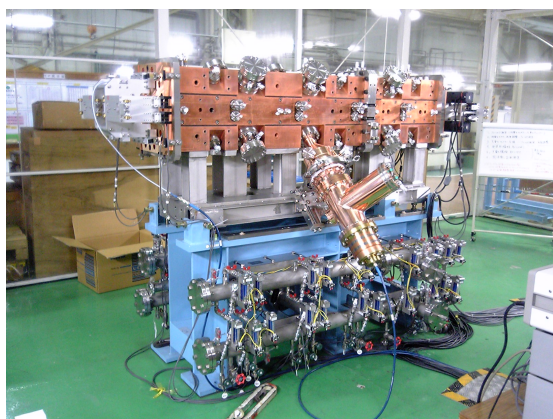


図 5: 50mA RFQ 試作機の電磁場分布測定

最終的な共振周波数は、空洞内真空、空洞温度 16 のとき、324.071MHz であった。これは、空洞温度を 27 に換算すると、324.010MHz である。無負荷

Q 値の測定値は、9885 であり、これは、SUPERFISH による計算値の 87% にあたる。加速モードと、一番近い 2 重極モードの分離は、22.66MHz であった。

また、6 に、最終的な電磁場分布を示す。電磁場の平坦度は、1% 以下である。縦軸は、ビーズの挿入による周波数の摂動を表し、電磁場強度の 2 乗に比例する。

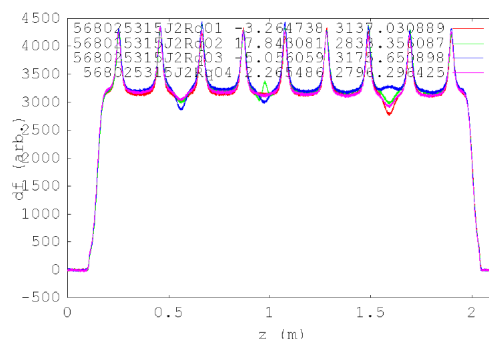


図 6: 50mA RFQ 試作機の電磁場分布

## 5. 結論

J-PARC 50mA RFQ の試作空洞を製作し、レーザー溶接によって、RFQ 空洞として必要な精度で製作可能であることを実証した。今後は、高電力試験を行い、空洞としての健全性を確認する予定である。

## 6. 謝辞

本 RFQ の製作にあたっては、株式会社東芝の、山下顕氏、後藤謙二氏にご担当いただき、全面的な技術的サポートをいただきました。感謝致します。

## 参考文献

- [1] Y. Yamazaki, "Accelerator technical design report for J-PARC", KEK-Report 2002-13; JAERI-Tech 2003-44, 2003.
- [2] D. Schrage et al., "CW RFQ fabrication and engineering", *Proc. of 1998 Linac Conf.*, 679-683, 1998.
- [3] A. Ratti et al., "The design of a high current high duty factor RFQ for the SNS", *Proc. of EPAC 2000*, 495-497, 2000.
- [4] A. Ueno and Y. Yamazaki, "New beam-dynamics design procedure for rfqs", *Proc. of 1990 Linac Conf.*, 329-331, 1990.
- [5] K. R. Crandall et al., "RFQ design codes", LA-UR-96-1836, 1996.
- [6] A. Ueno et al., "Beam test of the pre-injector and the 3-MeV H<sup>-</sup> RFQ with a new field stabilizer PISL", *Proc. of 1996 Linac Conf.*, 293-297, 1996.
- [7] J. H. Billen and L. M. Young, "POISSON SUPERFISH", LA-UR-96-1834, 1996.
- [8] T. Weiland, "On the unique numerical solution of maxwellian eigenvalue problems in three dimensions", *Part. Accel*, 17:227-242, 1985.