

Engineering design of RFQ at J-PARC linac

Takatoshi Morishita^{1,A)}, Yasuhiro Kondo^{A)}, Kazuo Hasegawa^{A)}, Fujio Naito^{B)}, Masakazu Yoshioka^{B)}, Hiroshi Matsumoto^{B)}, Yoichiro Hori^{B)}, Hiroshi Kawamata^{B)}, Yoshio Saito^{B)}, Hiroshi Baba^{B)}, Yosuke Iino^{C)}

^{A)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{C)} Toyama Co.,Ltd

4-13-16 Hibarigaoka 4-chome, Zama-shi, Kanagawa, 228-0003

Abstract

The beam commissioning of J-PARC linac has been started since November 2006. After the scheduled shutdown in summer 2007, the beam is successfully delivered from the linac to the RCS. Since then, a stable beam provision was emphasized. However, the trip in the RFQ was increased at the end of Sept. 2008, then, the stability of the beam operation decreased. To improve this situation, we started to prepare a new RFQ cavity as a backup machine. The basic concept of the engineering design is the simplicity and the effective vacuum pumping aiming at the stable operation. A 3m long cavity is divided into three modules longitudinally. A numerical control machining with ball-end mill is chosen for a vane machining. Four vanes are vacuum brazed each other after machining. Modules are aligned on the platform using a linear motion guide. A basic design of the key components and R&Ds on machining and brazing are described in this proceeding.

J-PARC リニアックにおける RFQ 工学設計

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex: 大強度陽子加速器施設) は大強度陽子ビーム加速器とそのビームを使用する実験施設からなる複合研究施設である^[1]。加速器はリニアック、RCS (3 GeV rapid-cycling synchrotron)、MR (50 GeV main ring synchrotron) で構成されている。リニアック初段部はピーク電流 30 mA の体積生成型負イオン源と出力エネルギー 3 MeV の RFQ (Radio-Frequency Quadrupole linac) で構成され、つづく DTL (Drift Tube Linac) で 50 MeV、SDTL (Separated-type DTL) で 181 MeV まで加速している。

J-PARC では、2008 年 12 月よりビーム供用が開始された。2008 年秋の運転中、RFQ でのトリップ回数が増加し、安定性が低下する事象が発生した^[2]。そこで、現在使用している RFQ のバックアップ機として RFQ を新規に製作することとした。このバックアップ機は、現在運転している RFQ のスペアという位置付けとし、セルパラメータは現有機と同一とすることで、設計時間の短縮と既存のリニアックへの互換性を確保する一方、運転の安定性を優先した設計検討を進めている。そのため、十分な真空排気設計、シンプルな空洞構造、および実績ある材料を選択し、精密加工や接合処理に関する試験を行っている。ここでは、バックアップ機の工学的な設計検討に関して報告する

2. 主な工学設計項目

表 1 : 主な工学設計項目

項目	方針
材質	高純度無酸素銅 + H I P (熱間等方圧処理)
加工	ボールエンドミルによる NC 加工
表面処理	化学研磨 or 電解研磨
接合方法	真空ロー付け

表 1 にバックアップ機の設計作業における主な検討項目を示す。空洞材質は、高電界の電子管で多くの実績を有する高純度無酸素銅を選択した。H I P 処理による内部欠陥除去を施した熱間型鍛造鋼を使用する。従来は総型バイトと呼ばれる加工形状に合わせた形状の刃物を製作して使用する 2 次元加工が主な加工方法であったが、加工機の進歩により、ボールエンドミルによる NC 加工によってベイン先端の曲面が高精度で加工できる可能性がある。次節にて、その加工試験について報告する。高電界でも放電しにくい表面にするため、化学研磨もしくは電解

¹ E-mail: takatoshi.morishita@j-parc.jp

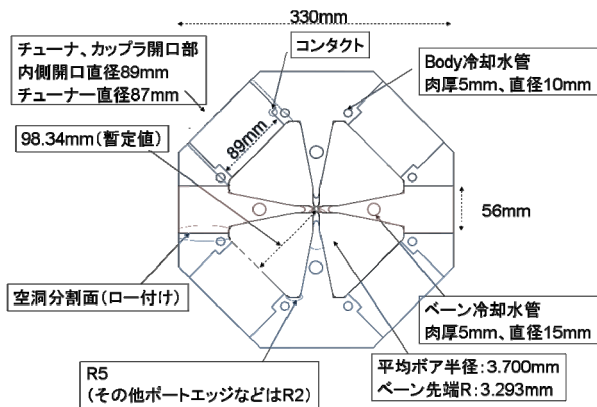


図1：RFQ断面概略

研磨により、加工痕の除去を計画している。表面処理後のベイン一体化接合は、高duty時もRFコンタクト性に優れ、真空シールも一体化できる真空ロー付けを選択した。図1の断面形状に示すように、上下のメジャーベインと左右のマイナーベインはそれぞれ加工、表面処理され、接合面でロー付けすることを想定している。図2に現在設計進行中の3次元CADモデルを示す。全長およそ3mの空洞は、長手方向に3分割することにした。加工対象長さが1m程度となり、連結時の組立誤差は発生するものの、NC加工機を使用して高精度の加工が可能となる。真空排気ポートは上流側モジュール、下流側モジュールに各4か所、中央モジュールに2か所設置する。イオン源から流入する動的なガスの排気と、高真空の維持の両立のため、排気ポンプはクライオポンプとイオンポンプを混在させることにした。また、現有機では、RFQ運転周波数近傍に存在するダイポールモードの混入抑制効果の高いPISL's (π -mode stabilizing loops) が使用されているが、構造が複雑

であり、高電界が発生する箇所もあることから、ダイポールモードの混入抑制効果は劣るものの、構造が簡単で、比較的表面電界が低いDSR's(Dipole Stabilizer Rods)を採用することとした。このような工学的な設計の変更に伴って、RF設計も見直しが必要となるため、平行して作業を進めている^[3,4]。

3. ベイン加工試験

NC加工機を用いたベイン加工試験を実施した。本試験の目的は、寸法精度の高いモジュレーション曲面加工の確認と、表面粗さの確認である。使用した刃物はボールエンドミル(R4)であり、試験材料は長さ500mmの無酸素銅Class1(C1011)である。加工に際し、より滑らかな表面が得られるように、ピッチと送り速度、方向等の加工条件に関して慎重に検討した。図3に寸法測定の様子と、代表的な寸法誤差測定結果を示す。

測定された寸法精度は全長500mmにわたって目標としていた $20\mu\text{m}$ 以下を十分に満たしていることを確認した。次に、表面粗さ計を使用して、ベイン近

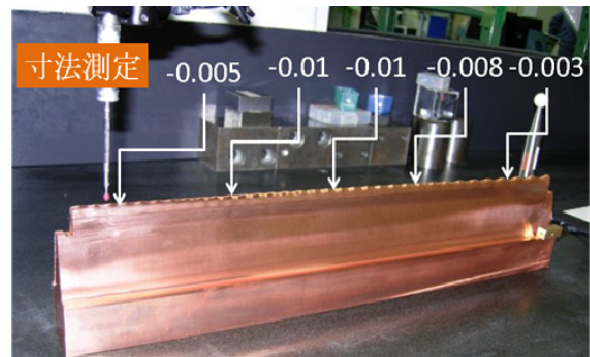


図3：ベイン加工試験品寸法検査

End端板部の基本設計

- 真空：SUSフランジ(空洞にロー付け) & 金属シール
- コンタクト：空洞部(銅)にRFコンタクト
- アライメント：
 - 横方向：ピン
 - 縦方向：面当り
 - 固定方法：フランジにボルト固定

連結部の基本設計

- 真空：SUSフランジ(空洞にロー付け) & ダイアフラム
- RF接触：空洞部(銅)にRFコンタクト
- アライメント
 - 横方向：ピン、外部基準面
 - 縦方向：空洞端面当たり
 - 固定方法：モジュール間ボルト固定 & 架台に固定



架台の基本設計：石定盤の上で組立アライメント、連結

- 長手方向スライド機構：LMG
- 空洞固定：架台への固定
- ビームラインへのアライメント：石定盤下部に水平、垂直位置調整機構
- 配管サポート：カップラ、冷却水ヘッダ、真空マニホールド等のサポート

図2：3D-CADモデル

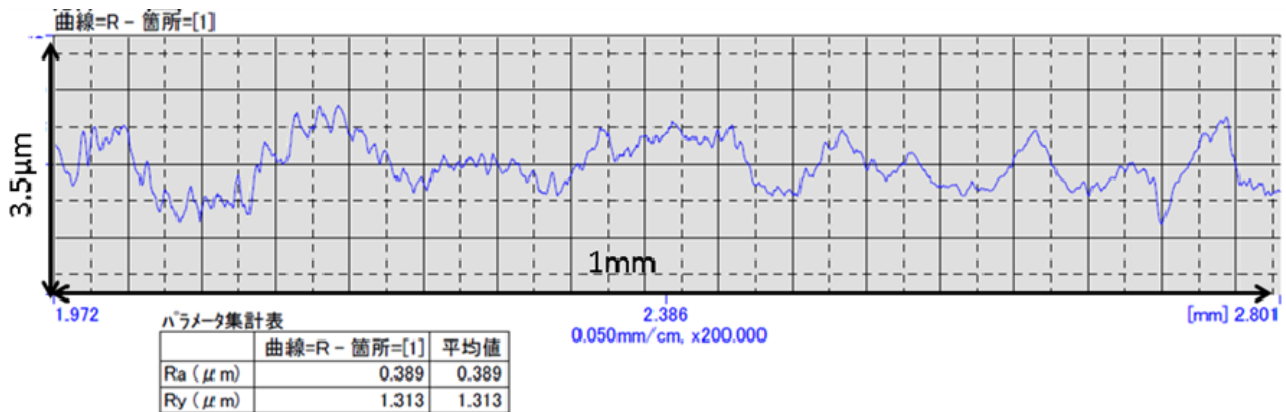


図4：ボールエンドミル加工表面の表面粗さ

傍側面の表面粗さを測定した。図4にその結果を示す。従来品（総型バイトを用いた加工、Ra 1.21μm、Ry 6.415μm）に比べ、より滑らかな表面に加工されており、表面粗さはRa 0.389μm、Ry 1.313μmに改善されることを確認した。

4. ロー付け時加熱によるベイン変形調査

ロー付けによる接合では、組み立てられた空洞が800℃以上（ロー材は銀ローを使用する予定）に加熱されるため、加熱前後で空洞の変形が懸念される。NC加工の最終仕上げ加工前に、各ベインをロー付けと同等温度に加熱することで、加工歪による変形を最小限にとどめるようにすることを検討している。また、高温時、銅が軟化しているため、重力に影響された変形が起こる可能性がある。この変形は、ロー付け時の姿勢に依存するものであり、空洞横置きでは図1におけるマイナーベインの垂れ下りが懸念される。空洞を垂直に立てた場合、そのような方向に重力がかからないが、ロー付け面が垂直になることによる接合健全性の不安や、ロー付け面の開きの危険性がある。現時点では、横置き姿勢でのロー付けを候補として、マイナーベインの変形量調査を行っている。試験用に製作したテストピース（材質：無酸素銅）に、以下に示す試験工程を実行中である。

- | | |
|------|--------------|
| 試験工程 | ①テストピース製作 |
| | ②加熱前寸法測定 |
| | ③焼鈍模擬加熱 |
| | ④焼鈍後寸法測定 |
| | ⑤ロー付け模擬加熱 |
| | ⑥最終寸法測定 ←進行中 |

図5は工程③の焼鈍を模擬した加熱前の炉内姿勢である。中央部の穴はガンドリルで加工したΦ15の冷却水流路であり、貫通穴である。それぞれ2回の加熱前後に、3次元測定にて寸法を測定し、変形量を評価する。工程③において、加熱前後の寸法変化はおよそ30μm程度見られた。テストピース素材は

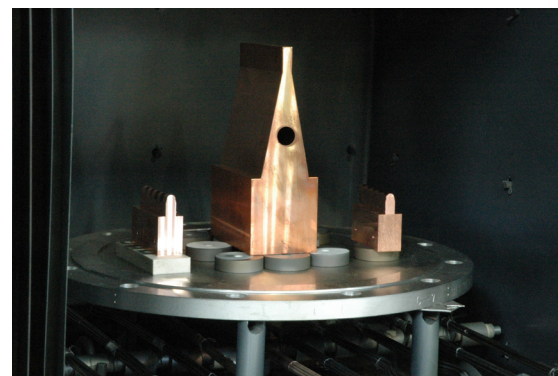


図5：テストピース焼鈍姿勢

熱間鍛造の無酸素銅であるが、100mmの角材から削り出したものであり、加工途中では焼鈍していない。そのため、工程③で生じた変形は加工歪によるものと考えている。工程⑤のロー付け模擬加熱では、テストピースを寝かせて配置し、ロー付けを模擬した加熱パターンを実行したのちに、寸法測定を行う予定である。

5. まとめ

J-PARCでは、RFQバックアップ機の設計を進めている。本報告では、これまでの工学設計活動における主な方針をあげた。高い寸法精度で空洞を加工することは、運転性能に大きく影響する重要な工学的検討課題の一つであり、ボールエンドミルを用いたNC加工試験において、表面粗さを含め良好な結果を得た。シンプルな構造と良好な電気的接触、クリーンな真空が望めるロー付け接合に関するR&Dを継続しており、早期のバックアップ機完成に向けて作業を継続中である。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki ed., “J-PARC Technical Design Report”, KEKReport 2002-13, JAERI-Tech 2003-44.
- [2] K. Hasegawa et al., in these proceedings..
- [3] T. Morishita et al., in these proceedings..
- [4] Y. Kondo et al., in these proceedings..