

容量性アイリスを用いた J-PARC 環結合型空洞の結合度調整 CAPACITIVE IRIS TO ADJUST COUPLING FACTOR BETWEEN WAVEGUIDE AND ACS LINAC IN J-PARC

田村潤 *A)、青寛幸 A)、根本康雄 A)
Jun Tamura*^{A)}, Hiroyuki Ao^{A)}, Yasuo Nemoto^{A)}
^{A)}J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

Abstract

The beam energy of the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) linac has been increased from 181 to 400 MeV by installing Annular-ring Coupled Structure (ACS) cavities in the maintenance period of 2013. Some of the ACS cavities require the correction of the coupling factor between waveguide and the cavity. To adjust the coupling factor, a capacitive iris in the rectangular waveguide was designed. And then, the rectangular waveguide with the capacitive iris was manufactured and installed to one of the ACS cavities. The capacitive iris corrected the coupling factor to the designed value and performed well under high-power operation.

1. はじめに

J-PARC リニアックではそのビームエネルギーを 181MeV から 400MeV まで増強するため、2013 年のメンテナンス期間に、21 台の ACS (Annular-ring Coupled Structure) 加速空洞、2 台の ACS バンチャー空洞、2 台の ACS デバンチャー空洞を、リニアック下流部のビーム輸送系に設置した。加速器トンネルへの設置後、ACS 空洞に大電力を投入し、2014 年 1 月、負水素イオンビームの 400MeV 加速に成功した。エネルギー増強後の J-PARC リニアックの概略を Fig. 1 に示す。

ACS 空洞は、2つの加速タンクと 1つのブリッジタンクで構成される。加速空洞においては (Fig. 2)、1つの加速タンクは 17 個の加速セルと 16 個の環状結合セルで構成され、ブリッジタンクは 5 個の励起セル (加速セル) と 4 個の非励起セル (結合セル) で構成される。空洞の加速モード ($\pi/2$ モード) 周波数は、ブリッジタンクの励起セルに設置されたプランジャーチューナーを用いて調整する。高周波源からの電力は、Fig. 3 に示されるように、ブリッジタンク中央の励起セル側面に開けられたアイリスを通して、空洞に供給される [1]。空洞内の真空排気は、加速タンク端の真空マニホールドに設置された 2 台のイオンポンプ (排気速度 500L/s)、空洞と高周波窓の間の導波管上部に設置された 1 台のイオ

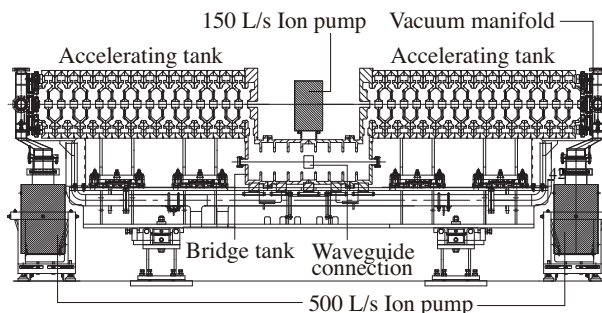


Figure 2: J-PARC ACS accelerating cavity.

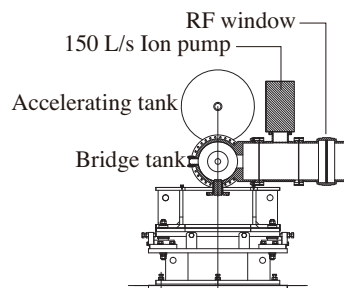


Figure 3: Bridge coupler of the J-PARC ACS.

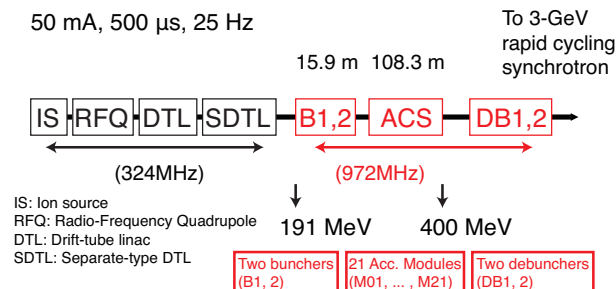


Figure 1: Diagram of the J-PARC linac accelerating structure in the 400-MeV beam operation.

ンポンプ (排気速度 150L/s) を用いて行う。

この ACS 空洞の導波管 (WR975) との整合は、ブリッジタンク中央セル側面のアイリス形状によって決まるが、製作された ACS 加速空洞の中には、導波管との結合度が目標値よりも大きいものがあった [2]。しかし、この部分は空洞製作後に追加加工による調整を行うことが困難である [3]。そこで、空洞と高周波窓の間の導波管部 (Fig. 4 の黄色) に容量性アイリス (Fig. 4 の紫色) を持たせることにより、空洞と導波管の結合度調整を行うこととした¹。VSWR が 1.85 である加速空洞 11 番 (21 台ある加速空洞のうち加速粒子速度 β の小さい方から 11

¹ クライストロン側から見た負荷全体の反射は、この容量性アイリスによって空洞単体で調整した VSWR と、高周波窓の反射によって決まる [4]。

*jtamura@post.j-parc.jp

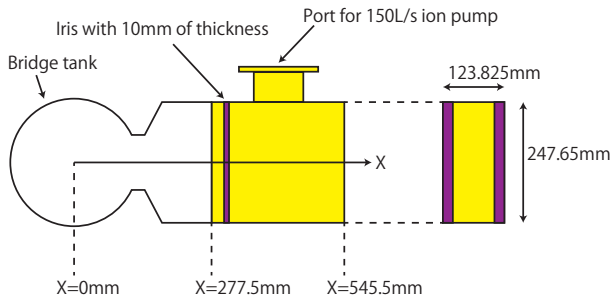


Figure 4: Rectangular waveguide with a port for 150 L/s ion pump.

番目の空洞) について、VSWR 値 1.45 を実現することを目的とした。これにより、ビームパワー増強時、クライストロンからの入力電力に余裕をもたせることができる。

2. 反射体による結合度調整

Figure. 4 の黄色で示されるイオンポンプ用真空引口付導波管 ($277.5\text{mm} < X < 545.5\text{mm}$) に容量性アイリス (Fig. 4 の紫色) を持たせることにより、ACS 加速空洞 11 番の VSWR 調整を行う。3次元電磁場解析ソフト ANSYS HFSS を用いて、厚さ 10mm の反射体の位置 (X 方向) および幅を決定する。用いた解析モデル (対称性により 1/4 形状) を Fig. 5 に示す。これは WR975 導波管、アイリス形結合部、ブリッジタンク中央の励起セル (1/2セル)、非励起セル (1セル)、励起セル (1/2セル) で構成される。この計算ではブリッジタンク中央セルを除いた空洞全体の壁損を、Fig. 5 の縞模様で示される 1/2セルの壁損に置き換えるよう、縞模様部の電気伝導度を調整した。また、加速モード周波数が運転周波数 972MHz になるよう、Fig. 5 の縞模様で示される励起セル部の径を調整した。

このモデルによる計算結果が妥当かどうかを確かめるため、これまでの真空引口付導波管 (Fig. 4 の黄色で反射体無し) と、外付けの反射体を組み合わせて低電力高周波測定を行い、測定結果との比較を行った。測定

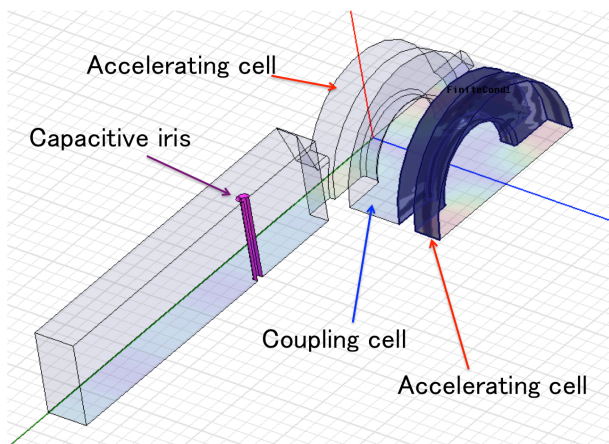


Figure 5: Analysis model for the bridge coupler. A quarter of the geometry is analyzed.

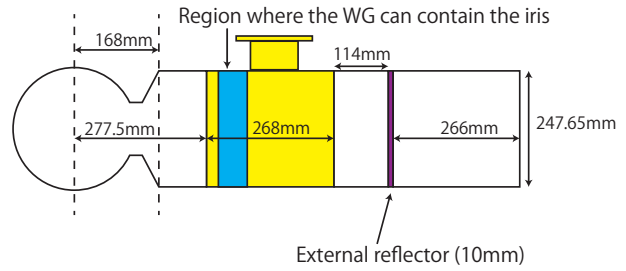


Figure 6: External reflector for LLRF measurement.

体系を Fig. 6 に示す。反射体 (Fig. 6 の紫色) の厚さは 10mm であり、挿入位置は、真空引口導波管から 114mm (変換フランジの長さ) 離れている。ここで用いた反射体は、導波管 E 面の両側から同じ幅だけ導波管を絞るものであり、10mm 幅、20mm 幅、30mm 幅の 3 種類である。反射体から 266mm 離れた場所が、入力波ポート位置である。測定は、加速モード周波数が真空換算で運転周波数 972MHz になるよう、可動チューナー位置を調整して行った。

反射体の幅を変化させたときの VSWR 計算値を Fig. 7 に、測定値との比較を Fig. 8 に示す。空洞壁損の大きさによって VSWR は変化するが、VSWR 計算値 (Fig. 7 および Fig. 8 の緑●) は、Fig. 5 の縞模様で表される面に 140 倍の負荷を設定して得られた値である。反射体幅 0mm に対して、Fig. 5 の解析モデルで得られた VSWR

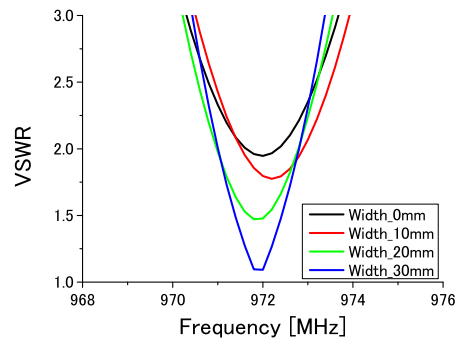


Figure 7: Simulation result of the VSWR depending on the width of the capacitive iris.

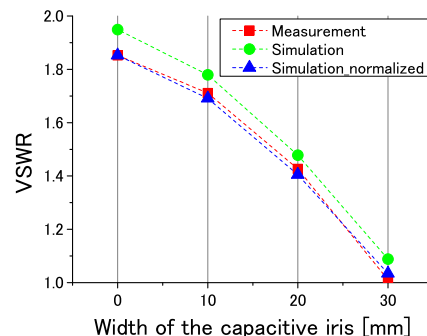


Figure 8: Comparison of the VSWR obtained by measurement and simulation.

計算値が、測定値 1.85 と等しくなるよう係数を掛けて規格化したのが Fig. 8 の青▲である。両側を 0mm から 30mm まで絞ることによって、VSWR を 1.85 から 1.0 まで変化させることができる。また、計算値と測定値がよく一致していることがわかる。

3. 容量性アイリス付導波管

Figure. 5 の解析モデルを用いて得られる VSWR 計算値が、測定値とよく一致することがわかったので、このモデルを用いて真空引口付導波管に持たせるアイリス寸法を決定した。302.5 mm < X < 363.2 mm のアイリス設置範囲で、アイリスと空洞の距離が最も近い位置 (302.5 mm < X < 312.5 mm) に設置した場合を Short、最も遠い位置 (353.2 mm < X < 363.2 mm) に設置した場合を Long、それらの間に設置した場合を Middle と呼ぶこととする。この 3 種類の位置で、アイリス幅を変化させたときの VSWR 計算値を Fig. 9 に示す。ここでも Fig. 8 と同様に、アイリス幅 0mm のときの計算値が測定値と等しくなるよう計算値に係数を掛けてある。アイリスによる VSWR 変化はその設置位置に対して周期性を持っており、Short 位置では小さくなる方向に、Long 位置では大きくなる方向に変化する。Short 位置に幅 20mm のアイリスを設置すると、VSWR が 1.85 から 1.45 まで小さくなる。よって、Short 位置に幅 20mm のアイリスを持った真空引口付導波管を製作した。

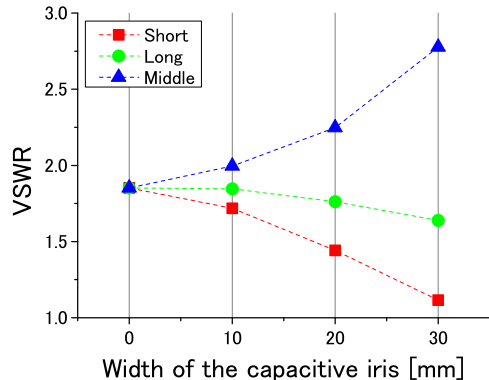


Figure 9: Dependence of the VSWR on the position and the width of the capacitive iris.

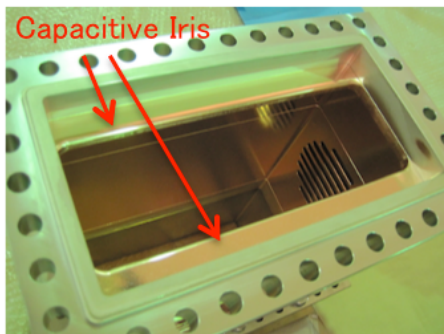


Figure 10: Manufactured waveguide which contains the capacitive iris.

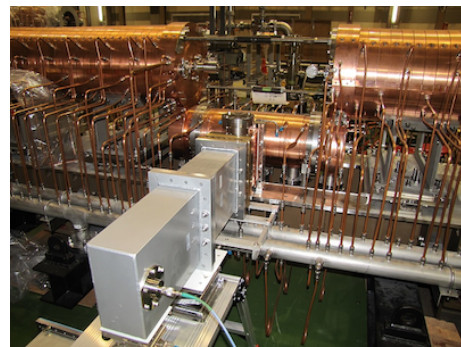


Figure 11: LLRF measurement.

製作したアイリス付導波管を Fig. 10 に示す。これを ACS 加速空洞 11 番に接続し、高周波測定を行った (Fig. 11)。ここでも、加速モード周波数が真空換算で運転周波数 972MHz になるよう、チューナー位置を調整した。測定によって得られた VSWR は 1.4567 であった。計算値との差は 1% であり、目標 VSWR 1.45 を実現することができた。

製作したアイリス付導波管を空洞に設置した状態で大電力試験を行い、約 50 時間のコンディショニングで定格加速電場の約 20% のマージンを加えた 1.75MW の電力投入に成功した [5]。このとき、この導波管部における顕著な発熱および放電は見られず、問題なく大電力を投入することができた。

4. まとめ

ACS 加速空洞 11 番について、導波管との結合度を調整するためのアイリス付導波管を製作した。これにより、目標 VSWR 値を得ることができた。製作したアイリス付導波管を空洞に設置した状態で大電力試験を行い、問題なく定格以上の電力を投入することができた。

参考文献

- [1] Y. Morozumi et al., "MULTI-CAVITY BRIDGE COUPLER", Proceedings of the Linear Accelerator Conference 1990, Albuquerque, New Mexico, USA.
- [2] K. Hirano et al., "COUPLING FACTOR ADJUSTMENT OF THE ACS MODULE BY USING THE REFLECTOR", Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009.
- [3] H. ao and H. Akikawa, "J-PARC ACS 用ブリッジコプラの開発", Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan.
- [4] H. ao et al., "DIELECTRIC CONSTANT MEASUREMENT USING RESONANT FREQUENCIES FOR MINIMIZING THE REFLECTION OF PILLBOX RF WINDOWS", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [5] J. Tamura, et al., "RESUMING OF ACS HIGH-POWER TEST FOR J-PARC LINAC ENERGY UPGRADE", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.