

FABRICATION OF THE ACS R&D MODULE FOR THE J-PARC LINAC UPGRADE

Hiroyuki Ao^{1A)}, Hiroyuki Asano^{A)}, Nobuo Ouchi^{A)}, Koji Takata^{B)}, Fujio Naito^{B)}, Kazuo Hasegawa^{A)},
Koichiro Hirano^{A)}, Takatoshi Morishita^{A)}, Yoshishige Yamazaki^{B)}

^{A)} Japan Atomic Energy Agency, 2-4 Shrakata-shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

The mass production of the J-PARC ACS has been started from the last of the FY2008. This 400 MeV upgrade is planned within the three years. The short R&D module has been fabricated from the last summer. This module includes the simplified coupling slot machining and the fixed coupling cell tuner. More additional optimization was also introduced in the detail cavity design for the mass production machining. After the final assembling the low-level RF measurement shows that the fixed coupling cell tuner has enough tuning range of 2 MHz and the whole module achieves $Z/Q=2.08 \times 10^3 \Omega/m$ that is about 97% of the design value.

量産型ACS空洞試験機の製作

1. はじめに

J-PARC LINACでは平成20年度から3カ年計画で現180MeVから400MeVへのアップグレードが始まった。ACS (Annular Coupled Structure)はこの200-400MeV区間に用いる結合形加速空洞である。これまでの開発段階で、我々はまずバンチャ用の短いモジュールを2台、続いて加速用のモジュールの製作と大電力試験を行ってきた。量産時、ACSを構成する中間セルは約1300枚必要であり、加工時間の短縮は非常に重要となる。昨年度から、特に加工時間を要していた結合スロット周囲の加工方法と形状の改良を進め、ローレベル測定での確認[1]を経て、改良型スロットの形状を採用した大電力試験機の製作を進めてきた。改良点を中心にこれまでの結果について報告する。

2. 量産機に向けた改良点

2.1 スロット加工の改良

加工時間短縮と加工プログラム作成を簡略化するため、スロット加工方案を変更した。

従来は5軸加工機を使ってスロットの各部に曲面加工を行い、滑らかな仕上げ面を得ていた。しかし5軸加工機を活用した加工では、滑らかな仕上がりが得られる反面、複雑な刃物と加工対象物の動きを制御するために加工プログラムの製作、バグだし修正に時間を要するなど量産には不向きな点も多かった。

そこでスロット形状を5軸加工機でなく通常の3軸加工機+回転で加工可能な形状に変更（仮に5軸加工機を用いたとしても自由度を限定）し、かつ面粗さや隅部の仕上げを簡素化することで加工時間の短縮と、入力プログラムの作成の簡略化を図った。

詳細については文献[1]を参照願いたい。

2.2 結合セルへのチューナーの追加

最終ロウ付け後に周波数調整を行う固定チューナーを今回の試験機から新たに追加した。形状を図1に示す。

チューナーの追加理由は次の通りである。これまでの開発段階で結合モード周波数の最終ロウ付けによる周波数変化が0.3~0.7 MHzと加速セル側の約0.1 MHzに比べて変化量が大きく、かつ試作機毎に変化量が異なり、傾向を把握することが出来なかった。また、この結合モード周波数の誤差は軸上電場の傾きの原因となる。よって量産機では最終ロウ付け後の調整が不可欠と判断したことによる。

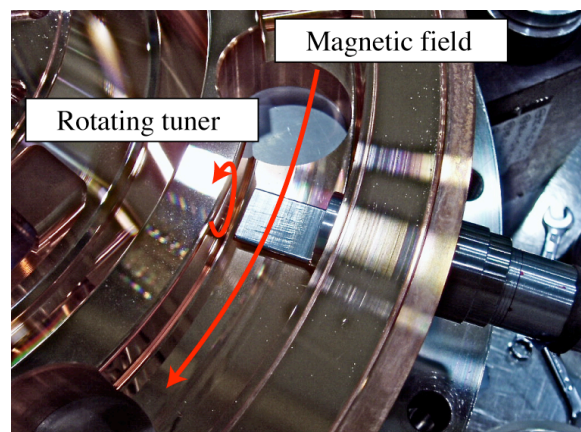


図1:結合セルにローレベル測定用（アルミ製）回転式チューナーを挿入した様子

¹ E-mail: hiroyuki.ao@j-parc.jp

本チューナーの先端部は翼形状で、ビーム軸方向に対して結合セルの中央(赤道部)からオフセットした位置にある。チューナー本体を回転させ、結合セル外周部の磁場のある領域を翼部分で横切ることによって周波数調整を行うものである。回転と固定はICFフランジの回転方向の自由度と締め付けを利用している。

チューナー数は試験機では余裕を見て結合セル1セルおきに、結合セル1セルあたり4個とした。量産機では、数を半減し結合セル1セルあたり2個とする予定である(次節、図2参照)。

3. 空洞設計

通常のACSモジュールは加速空洞2台を橋絡空洞で接続する、ビームの上下流方向に沿って対称な構成である。本試験機では対称形のモジュールの片方のみで最低限の構成を実現することとし、加速セル5セルの加速空洞1台と加速(励起)セル3セルの橋絡空洞を接続した構造とした。橋絡空洞の加速セルには運転周波数調整用の可動式チューナーが取り付けられる。図2にこれらの構成を模式図で示す。

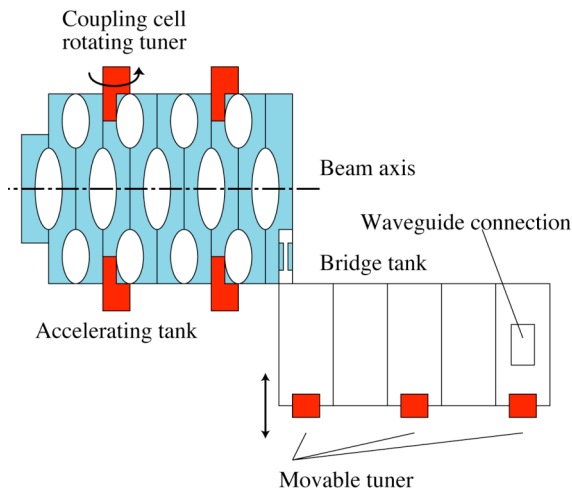


図2:試験機の空洞構成

設計は既存のLow- β 機($\beta=0.5583$)を基本とし、試作セルの測定結果や量産に向けた加工方案の改良を取り入れた形状とした。

4. ローレレベルRF測定

4.1 結合セルチューナー回転測定

先に示した結合セルチューナー回転させた場合の周波数変化を電磁場数値解析(Microwave Studio)の結果と比較してプロットに示す。

チューナーによる周波数変化量は結合セル1セルに対して約4 MHzであった。結合セル1セルおきに配置されるので、試験機の調整幅は約2 MHzとなる。量産機では調整幅1 MHzを予定しており、チューナー数を半分にしても必要な調整幅を確保できることが確認できた。

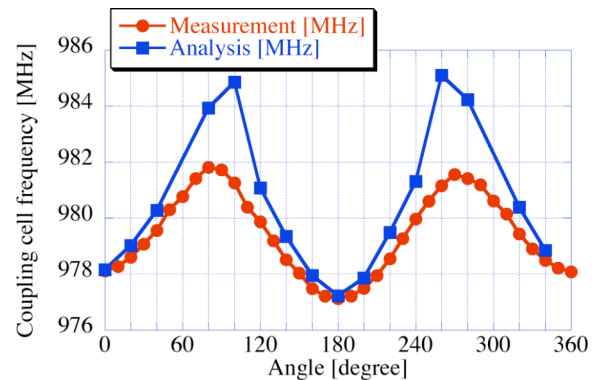


図3:結合セルチューナーの回転角と周波数変化

一方、プロットが示すように、解析での変化量は測定と比較して1.5倍程度大きい。定性的にチューナー翼部の先端と結合セル内周部との隙間が狭くなった場合に調整幅が大きくなる傾向があることから、翼部の先端形状が計算で正確に反映できていない点などに誤差要因があるのではないかと推測している。

4.2 橋絡空洞測定

橋絡空洞は橋絡空洞単体で仮組し、ディチューン棒を用いた測定と電磁場解析の結果を比較することにより、橋絡空洞の2つの加速(励起)セルの周波数を測定した。

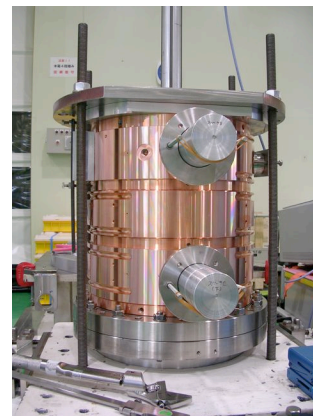


図4:橋絡空洞測定の様子(上が導波管接続側、下がICF356フランジ締結側)

いずれの加速(励起)セルにも可動式の周波数チューナーが取り付けられる。ローレレベル測定ではアルミ製の仮チューナーで代用し、可動範囲(空洞内面より挿入側40 mm、引き抜き側10 mm)での周波数変化を確認した。測定結果から加速空洞と一体となった後の周波数を予想し、運転周波数(972 MHz)がチューナー可動範囲のほぼ中央(挿入側15 mm)付近となるよう調整した。

各種ローレレベル測定と追加工による周波数調整後、加速空洞、橋絡空洞は別々にロウ付けにより組み立てられる。両空洞は最終的に架台上でICF356フラン

ジにより締結され、ACS空洞試験機が完成する。

4.3 全体組立後測定

組み上がった試験機の外観を図5に示す。空洞全体での性能を確認するため、ビーズ法によるビーム軸上電場分布の測定をおこなった。図6にビーズを軸上で移動させたときの空洞位相の測定結果を示す。

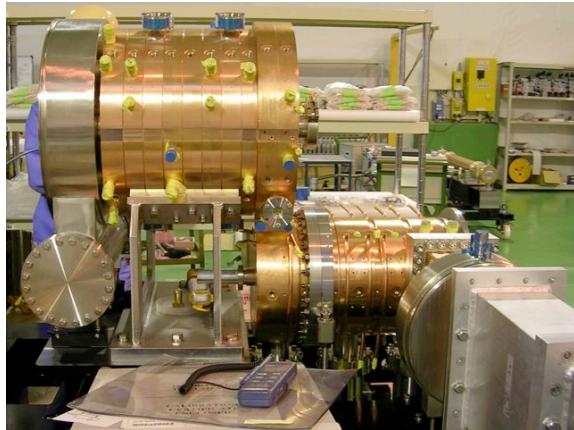


図5:試験機外観写真。左上が真空マニホールド(SUS)と加速空洞(OFC)、右下が橋絡空洞(OFC)と導波管(WR975)である。

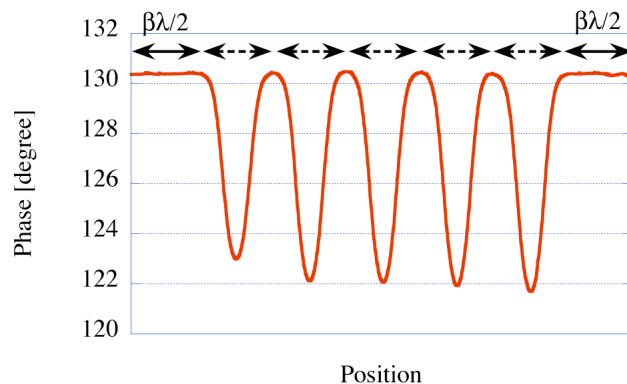


図6:ビーズ法による位相変化

電場分布の積分の際、加速空洞前後それぞれの長さ $\beta \lambda / 2$ の平均値をとってベースライン(電場の無い部分)の位相を 130.38 ± 0.03 と定めた。ベースラインの中心値および誤差範囲の上下限を用いて積分することでZ/Qの誤差を評価した。その後、空洞全体で測定された無負荷Q値を用いてシャントインピーダンスを算出した。

表1に主要パラメータとあわせて測定で得られた結果(下線部が測定値)を示す。

設計値との比較の為、表2にMicrowave Studioを用いた中間セル形状の解析結果を示す。

表1: ACS空洞試験機 主要パラメータ

周波数	972 MHz
β	0.5583
<u>Z/Q</u>	<u>$2.08 \pm 0.06 \times 10^3 \Omega/m$</u>
<u>無負荷Q</u>	<u>17720</u>
<u>Z</u>	<u>$36.8 \pm 1 M\Omega/m$</u>
<u>VSWR(RF窓含む)</u>	<u>1.5</u>
定格加速電圧 E_0	4.3 MV/m
繰り返し	50 Hz
パルス長さ	600 μs

表2:中間セル解析結果

Z/Q	2.46×10^3
無負荷Q	18205
Z	44.78 M Ω/m

モジュール全体の測定では、ブリッジ空洞があるため、Z/Qの値はStored energyの比の割合分 $5/(5+3/4)=0.87$ だけ小さくなる。よって設計値は $Z/Q=2.46 \times 10^3 \times 0.87=2.14 \times 10^3$ となる。

ここでStored energyの比の誤差について考察しておく。カップリング測定から算出した加速空洞と橋絡空洞の1セルあたりのStored energyの比は約4.1で、設計値4に比べ約3%大きめであった。仮に、この比の誤差を大きめに10%と仮定して 4 ± 0.4 としても、Z/Qの設計値は $Z/Q=2.14 \pm 0.02 \times 10^3$ 、 $\pm 1\%$ 程度の誤差に留まることがわかる。

測定値 2.08×10^3 と比較するとZ/Qの値は設計値の97%となる。よってローレベル測定では十分な結果が得られたと考えている。

5. まとめ

昨年夏から製作を進めてきた試験機の製作過程について改良点を中心にまとめた。

結合セルチューナーは必要な調整幅が製作初期に確認できたことから、既に量産機的设计へ反映されている。チューナー付き結合セルの周波数測定および調整は、今回の試験機が初めてであった。よって、量産機分の測定においてもまだ測定手法が確立されていない点があり、量産工程の中で逐次改善していかねばならない。

それ以外の周波数調整と組立については、既存機の経験もあり比較的順調に進んだ。ローレベルにおける全体測定でも所定の性能を確認することができた。

試験機は本年夏に東海に搬送され、大電力試験を開始する予定である。大電力下での空洞性能を既存機と比較しながら確認を進め、これらの結果を、既にスタートしている量産機へ出来る限り反映していきたいと考えている。

参考文献

- [1] H. Ao et al. "STATUS OF THE ACS CAVITY DEVELOPMENT FOR THE J-PARC LINAC ENERGY UPGRADE", Proceedings of the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan, p.494-496