

ACS CAVITY FOR J-PARC LINAC

H. Ao^{*A)}, H. Asano^{A)}, J. Tamura^{A)}, N. Ouchi^{A)}, K. Hasegawa^{A)}, T. Morishita^{A)}
 K. Takata^{B)}, F. Naito^{B)}, Y. Yamazaki^{A)}

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

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

Abstract

An annular-ring coupled structure (ACS) for J-PARC linac has been in mass-production since March 2009. It was planned to fabricate 18 ACS accelerating modules and two debuncher modules for the three years. At present, they are progressing on schedule. The past achievements include: ten accelerating modules were completed on schedule; the frequency tuning of the most accelerating modules was finished except two debuncher modules; and 14 accelerating modules have been brazed. One of the mass-produced modules was conditioned up to 1.6 MW, which corresponds to the accelerating field by 15% higher than the designed value of 4.2 MV/m.

J-PARC LINAC ACS 加速空洞

1. はじめに

J-PARC では 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) からのビームパワーを増強するため、リニアックの増強を進めている。その一つが Annular-ring Coupled Structure (ACS) を用いて、RCS への入射エネルギーを 400 MeV へ向上させるものである。これにより空間電荷効果 ($\beta^2\gamma^3$) による粒子数の制限が緩和され、RCS の出力を 0.6 MW から 1 MW へ向上することが可能となる。

エネルギー増強に必要な空洞は、製作済みの空洞を除いて、加速モジュール 18 台、デバンチャーモジュール 2 台である。これらの空洞を 3 年の短期間で製作するため、工程短縮の取り組みを進めてきた^[1,2]。

本報告では、2009 年 3 月から始まった ACS の量産について、昨年^[2]の報告以降、組立、試験が進められた量産初号機 (T07, T08)¹ のローレベル測定および大電力試験の結果について報告する。

2. 加速空洞の周波数調整

ACS の量産と性能を両立する上で、周波数調整を限られた工程の中で行うことは、最重要課題のひとつである。本節では、ロウ付け組み立て後の加速空洞全体の周波数について述べる。

ACS 空洞は $\pi/2$ モードの結合空洞形加速空洞であり、高周波的には加速モードと結合モードの 2 つのモードの周波数を調整する必要がある。ACS 空洞は加速セルの周囲に結合セルが環状に配置されているため、組立後、外周部から加速セルの周波数を調整できない。従って、組立前 (ロウ付け前) に個々の加速セルの周波数はすべて調整を済ませておく必要がある。一方、個々の結合セルについても組立前に調整を行うが、次の理由により組立後に最終的な周波数 (加速空洞全体での周波数) の調整を行う必要がある。

ロウ付け前の目標周波数は、ロウ付けによる周波数変化を予測し決定している。先行試作機での結果から、周波数変化は加速セルが約 +0.1 MHz と予測できたのに対し、結合セルは 0 MHz から +0.8 MHz までばらつき

が大きく一定の値を予測できなかった。従って、このばらつきを補正するため、結合セルについては、ロウ付け前の調整値は運転周波数 972 MHz に比べ 0.7 MHz 低めとし、ロウ付け後に最終的な周波数を調整することとした。この調整には結合セルに取り付けられた回転チューナー^[1]を用いて行い、調整可能範囲は +1 MHz である。

回転チューナーの位置決めを行うための測定セットアップを図 1 に示す。各加速空洞の測定を行うため、加速空洞と橋絡空洞の接続部の中間にある結合セルを貫通棒によりディチューンした。ピックアップを測定する加速空洞の両端 (上流と下流) にとりつけ、加速モードの周波数 (f_a) および隣接する上下のモードの周波数 (f_{-1}, f_{+1}) を測定した。

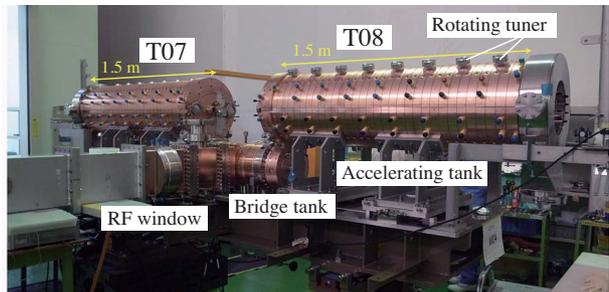
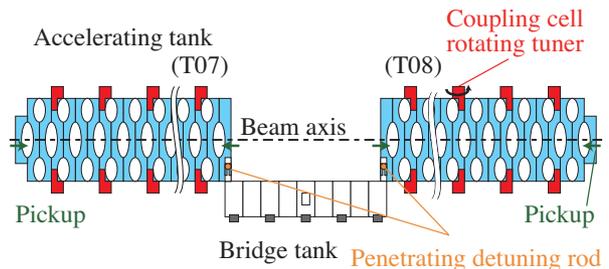


図 1: (上) 結合セル回転チューナー設定のための測定セットアップ。加速空洞と橋絡空洞の接続部の中間にある結合セルを貫通棒によりディチューンし T07, T08 の各周波数を測定、調整する。(下) ビーズ測定の様子。

周波数調整は、回転チューナーの角度を 5° 刻みで変化させて測定を行い、測定結果の中から、結合モード (f_c) が 972.00 MHz から 972.05 MHz の間にある位置を

*hiroyuki.ao@j-parc.jp

¹190 MeV から 400 MeV まで 21 モジュールで加速する。ビーム上流からモジュール (M)、加速空洞 (タンク:T) 番号が振られており、M01 (T01, T02), M02 (T03, T04)... の順となる。

選んだ(回転チューナーで周波数を目標値に厳密に合わせない)。これは時間短縮と、周波数調整作業が工場内の判断で進められるようにするためである。例として、T07 についての測定結果を表 1 に示す。

表 1: T07 空洞における加速モード ($\pi/2$ -mode: f_a)、下の隣接モード (f_{-1})、上の隣接モード (f_{+1}) (単位:MHz)

Rotated angle	f_{-1}	f_a	f_{+1}	f_c
50	969.48	972.02	974.52	971.98
55	969.51	972.02	974.56	972.05
60	969.56	972.02	974.60	972.14

表 1 の測定結果から、回転チューナーの角度は調整方針に従い、T07 については、回転角を 55° とし結合モードの周波数を 972.05 MHz とした。同様の測定と調整を T08 についても行い、回転角を 60° 、結合モードの周波数を 972.02 MHz とした。このように当初の目論見通り、回転チューナーを用いて結合モードの周波数を目標範囲内に調整することができた。

一方、ロウ付け後(回転チューナー設定後)の加速モードの周波数を表 2 に示す。加速モードの周波数も目標値 972.04 ± 0.1 MHz の範囲内に収まっていることが判る。

表 2: ロウ付け後の加速モードの周波数 (単位:MHz)

Tank	Achieved	Designed	Difference
T07	972.02	972.04	-0.02
T08	971.98	972.04	-0.06

このように量産初号機 (T07, T08) において、当初の予定通りの工程で周波数を目標範囲に調整することができた。量産初号機以降も同様に目標範囲に調整できている。今回の量産に用いた周波数調整の方案^[2]は有効に機能し、工程の進捗に大きく寄与することができた。

3. 電場分布測定

図 2 にビーズ法を用いた測定結果を示す(ビーズは材質 SUJ-2、直径 3.0 mm、ビーム軸のボア径は直径 40 mm)。図中にあわせて電場分布のフラットネス(周波数変化の平方根を用いて評価)とモジュールの外側 $\beta\lambda/2$ の区間での信号(周波数変化)のばらつき σ を示した。ここで電場分布のフラットネスは $(x_{max} - x_{min})/\bar{x}$ で定義した。ここで $x_{max}, x_{min}, \bar{x}$ はそれぞれ電場振幅の最大、最小、平均値を示す。この測定では、モジュール全体の周波数は橋絡空洞に取り付けられた可動式のプランジャ(5 台)によって運転周波数 972 MHz に調整されている。

図 2 に示すように、フラットネスは T07, T08 内で計算するとそれぞれ 2.4%, 2.3%、モジュール全体で 3.5% となった(モジュール両端のエンドセル部は、設計段階から電場振幅が小さくなること分かっているため評価から除外) これらの値はビーム力学からの許容値 (several

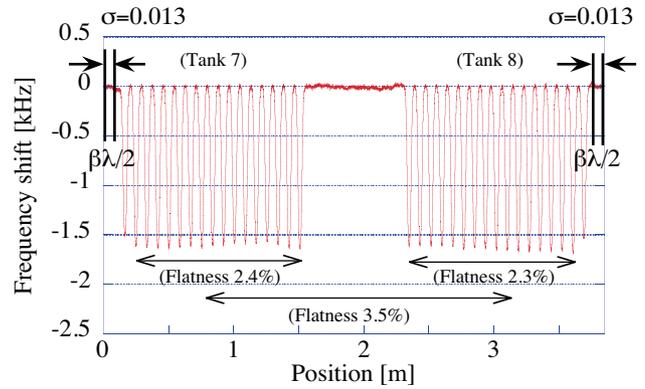


図 2: ビーズ法による周波数変化。フラットネスは電場振幅(周波数変化の平方根)から評価したもの。

percent)^[3]と同等以下であり実用上問題ない。しかし、この値は各セルの周波数誤差 ± 0.1 MHz から等価回路計算で予想される 1% に比べて有意に大きい。

この差異の要因を空洞と測定に分けて考察すると、空洞側の要因としては、ロウ付けによる各セルの周波数、結合度、および加速ギャップ長の変化などがあり得る。しかし、個々のセルについて、これらの変化を定量的に測定することは(デチューン測定で内面を傷つける恐れもあり)容易でない。

加速ギャップ長と電場振幅の関係を SUPERFISH で計算すると、ギャップが 0.2 mm 広がった場合、振幅が 0.1% 減少した。ロウ付け後の加速空洞の全長は設計値 1544.73 mm に対して、巻き尺による測定で 1544.8 ± 0.5 mm と中心値で約 0.1 mm しか差がなかったことから、パーセントオーダーの電場振幅の差が変形によって生じたとは考えにくい。現状では明確な原因は不明である。

一方、測定側の誤差を評価するため、図 2 に示すように、加速モジュールの両側 $\beta\lambda/2$ の範囲(データ点数約 140 点)での測定値のばらつきを求めると、標準偏差 σ で $\sigma = 0.011$ であった。この 1σ はフラットネスで約 0.4% の誤差に相当する。図 2 に示したフラットネスの評価では、このばらつきによる誤差を低減するため、各ピークの頂点前後の約 40 点を二次関数でフィットしてピーク値を評価した。しかしデータ点そのものが σ で表されるばらつきを持つため、関数フィットするデータ点数や範囲によって結果に差が生じる。

この誤差以外にも、電場のゼロ点(ドリフトスペース)の変動を補正する際の誤差もピーク値には影響を与えうる。空洞本体の無酸素銅は体積も大きく、時間的に速いゼロ点の変動(=周波数変化)が熱膨張で生じるとは考えにくい。よって、主に測定環境の変化(空洞内の大気誘電率の変化)に因るものと推測される。この対策として、空洞内部を乾燥窒素ガスで置換し、変動が減少することを別モジュールの測定で確認している。今後、より正確にフラットネスを評価するため、信号強度増によるばらつき σ の低減、測定環境変化の低減(測定エリアをブースで囲う、乾燥窒素ガスを吹き込みながら測定を行う)による測定精度の改善を進める予定である。

表3: 空洞 Q 値、シャントインピーダンス Z、Z/Q

	Designed	Achieved	%
Q-value	17830 ⁽¹⁾	18541	
Z	45.3 MΩ/m ⁽²⁾	45.7 ± 2.4 MΩ/m	100.9
Z/Q	2.42 × 10 ³ ⁽³⁾	2.47 × 10 ³	102.1

ビーズ測定の結果から求めたシャントインピーダンス Z、Z/Q を表3にまとめて示す。これらの値は実用上問題ない。

計算値と比較して100%を少し超えている一因としては、加速空洞と橋絡空洞の接続部は周期的構造では無いため、原理的にも、測定された結合度の比からストアードエネルギーの比を正確に算出することが難しい点がある。計算値との比較には、このような結合度の計算を必要としない加速空洞単体の Z、Z/Q を比較することが望ましく、今後、測定値と計算値の比較を進める予定である。

4. 大電力試験

表3に示した Z = 45.7 MΩ/m より、空洞長 3.083 m、加速電場 4.2 MV/m を用いて、空洞内面で消費される電力は 1.2 MW となる。今回は加速電場に約 15% のマージンを加えて 1.6 MW までコンディショニングをおこなった。パルス幅は設計値 600 μs であるが、フィードバックの幅を確保するため 650 μs までのコンディショニングをおこなった。大電力試験の経過を図3に示す。入力電力は加速空洞のピックアップの平均値を、空洞内の圧力は一番圧力の高かった橋絡空洞中央の真空計 (Bayard-Alpert (B-A) ゲージ) の値を示した。

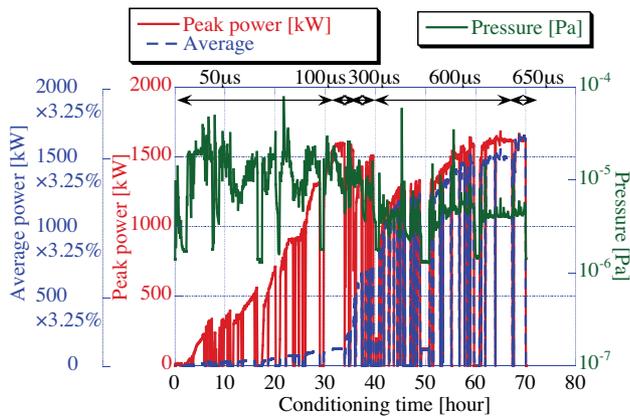


図3: 大電力試験の経過。(赤) ピーク電力、(青) 平均電力、(緑) 空洞内圧力。

¹Microwave Studio を用いた加速空洞部だけの計算値 (橋絡空洞含まず)。

²Z、Z/Q は橋絡空洞がある場合、ストアードエネルギーの比 $\frac{34}{34+5 \times (24/100)} = 0.966$ だけ小さくなる。ここで橋絡空洞 1 セルのエネルギーは、加速空洞と橋絡空洞の接続部の結合度を測定し、測定された結合度の比から加速空洞 1 セルの 24.0% と評価した (橋絡空洞の励起セル数は 5)。Microwave Studio の計算値は 46.9 MΩ/m。よって Z = 46.9 × 0.966 ~ 45.3。誤差は、電場積分のゼロ点の位置を $\sigma = \pm 0.011$ だけ変化させて評価した。

³Z/Q = 2.50 × 10³ × 0.966 ~ 2.42 × 10³。

コンディショニングに要した時間は約 60 時間で、これは量産機を順次大電力試験を行った後に設置していくことを想定しても許容できる時間である。表4に ACS の短いモジュールであるバンチャー^[4]のコンディショニング時間を比較して示す。これらの空洞はすべてパルス幅 (600 μs)、繰り返し (50 Hz) の条件が同一である。バンチャー (加速セル 5 セル/加速空洞あたり) に比べ、加速モジュール (加速セル 17 セル/加速空洞あたり) ではセル数が 3.4 倍に増えた。それに伴いコンディショニングの必要時間が約 2 倍になったことが判る。

表4: パワーレベルと時間 (単位: E₀, E_{sp} (MV/m))

Time (h)	Power (kW)	E ₀	E _{sp}	Kilpatrick
ACS (buncher)				
-	360	4.1	22.9	0.8
33	600	5.3	29.6	1.0
ACS (M04)				
44	1190	4.2	23.1	0.8
60	1600	4.9	26.9	1.0

コンディショニングや各種 RF 機器の試験を含めて約 240 時間の運転後、到達圧力は 1.6 MW 入力下で 2.0 × 10⁻⁶ Pa であった。この値は残留ガスによるビームロスが 0.1 W/m 以下となる 4 × 10⁻⁶ Pa を下回っている。しかし、同程度もしくはそれ以下の圧力で運転されている SDTL 空洞で、残留ガスによるビームロスが報告^[5]されており、この到達圧力でビームロスに対して十分かどうかは明らかでない。将来ビーム強度が増すに従って真空圧力の改善は重要となるため、引き続きビーム軸上の真空圧力の評価と改善を進めていく予定である。

5. まとめ

2009 年 3 月から始まった ACS の量産は順調に推移している。量産初号機の大電力試験も大きな問題なく終了した。測定方案の改良を進めながら、残りのモジュールについての製作、RF 測定、各種試験などを進めていく予定である。

(謝辞)

空洞製作には三菱重工業(株)の関係者の方々、大電力試験には RF グループを中心とする関係者の全面的なご協力を頂いた。深く感謝致します。

参考文献

- [1] H. Ao *et al.*, FABRICATION OF THE ACS R&D MODULE FOR THE J-PARC LINAC UPGRADE, in Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2009, p. 1044.
- [2] H. Ao *et al.*, ACS CAVITY FOR J-PARC LINAC, in Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2010, p. 552.
- [3] M. Ikegami, private communication.
- [4] H. Ao *et al.*, FIRST HIGH-POWER ACS MODULE FOR J-PARC LINAC, in Proceedings of LINAC06, 2006, pp. 725-727.
- [5] A. Miura *et al.*, RESIDUAL GAS PRESSURE DEPENDENCE OF BEAM LOSS, in Proceedings of LINAC10, 2010, p. 587.