

FABRICATION STATUS OF ACS FOR J-PARC LINAC

Hiroyuki Ao^{1,A)}, Koichiro Hirano^{A)}, Takatoshi Morishita^{A)}, Masanori Ikegami^{B)}, Akira Ueno^{A)}, Kazuo Hasegawa^{A)},
Yoshishige Yamazaki^{B,A)}, Valentin Paramonov^{C)},

^{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

^{C)} Institute for Nuclear Research, prospekt 60-letiya Oktyabrya 7a, Moscow

Abstract

We have been fabricated the several ACS modules step by step: the first buncher, the second buncher, the low-beta accelerating module, and so on. The data of the frequency fluctuation from brazing or stacking have been accumulated. This paper summarizes these RF measurement results and reports the problem at the present status.

J-PARC用ACS加速空洞の現状

1. はじめに

J-PARC LINACはピーク電流50mA、パルス長500 μ sec (空洞への高周波電力投入は600 μ sec)、繰り返し50Hzの大電流の負水素イオンを加速する。機器の放射化を避けるため、ビーム損失は最低限に抑えなければならない。ビームの質を保つ為に、加速電場の軸対称性を確保することが望ましい。このため、ACS (Annular Coupled Structure) を、加速電場の軸対称性とシャントインピーダンスのバランスに優れた構造として採用した。

ACSの模式図を図1に示す。ACSモジュールは加速空洞2台、ブリッジ空洞1台で構成される。詳しくは過去のproceedings等[1]を参照願いたい。

21台のACSモジュールにより200-400MeVのビームを加速する。平成20年度より4カ年でACSモジュールを製作、建設をおこなう予定である。

本論文では、先行機として製作したバンチャーモジュール2台のローレベルRF測定結果を纏め、製作過程で得た知見と現状の問題点について報告する。

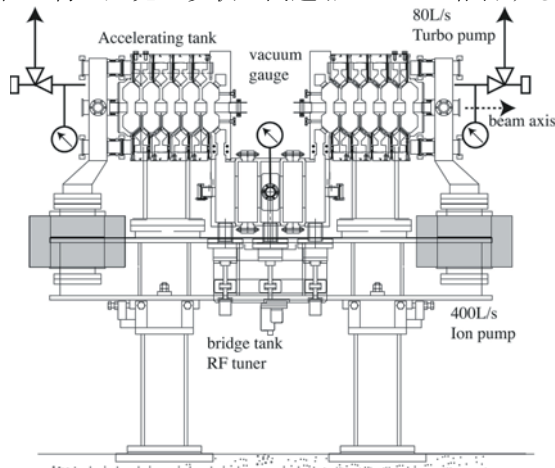


図1: ACSモジュール模式図

2. 組み立て後の空洞特性

2.1 周波数

加速モード周波数は運転周波数972 MHzに可動チューナーを用いて調整される。図2に加速モード周波数を調整後のdispersion curveを示す。結合モード周波数は、加速モード周波数から一つ上、一つ下のモードの周波数の平均値で求められる。

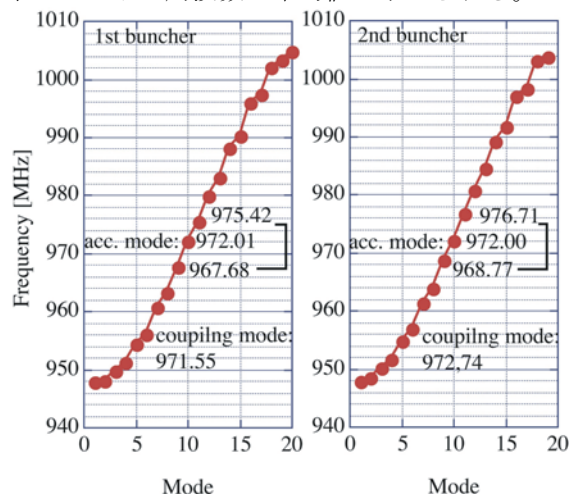


図2: Dispersion Curve (tunerでの周波数調整後)

結合モードはバンチャー1号機では971.55 MHzと低め、バンチャー2号機では972.74 MHzと高めになった。結合モードはmagneticなboundaryを持つため、周波数調整時の単体測定では境界条件の補正が必要である。このため調整目標値そのものにも誤差を含む。現状では、個々のセルに対しては ± 0.1 MHz程度を目標で調整加工を行い、調整目標や組立、ロウ付けなどの変動を含んで、最終的に約 ± 1 MHzの範囲に調整できるというところである。結合モー

¹ E-mail: hiroyuki.ao@j-parc.jp

ドの±1 MHzの誤差に対して、stored energyの解析上は加速セルに0.2MHzの誤差を含んでもfield tiltなどへの影響は最大±1.6%程度と見積もっており、バンチャー空洞では問題ない範囲であると考えている。加速モジュールでは1空洞あたりのセル数が17セルに増える。この場合ワーストケース（隣り合う加速セルの周波数差が一樣）では要求精度が±0.02 MHzでも±5%の誤差となるため、今後の試験結果を踏まえて対応を検討してゆくことが課題である。

2.2 電場分布

図3にビーズ法による電場分布測定結果を示す。エンドセルを除いたセル間の電場分布はバンチャー1号機で1.4%、バンチャー2号機で2.0%の差であった。電場分布の差はギャップ間寸法などの形状誤差にも影響を受けると考えられ、現状の各セルの周波数差だけで電場分布のばらつきを解析的に説明することは難しい。

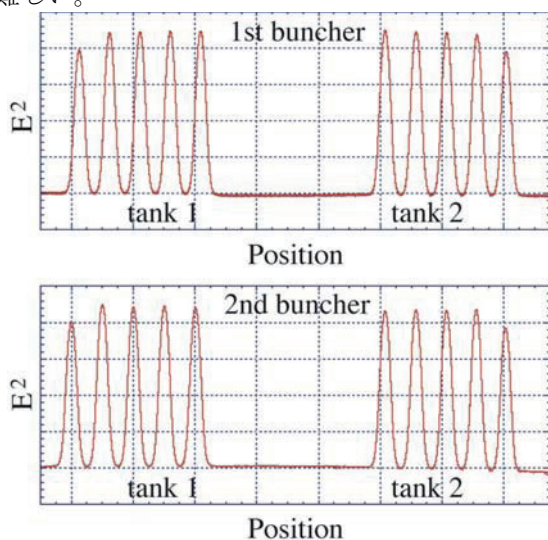


図3:電場分布測定結果

エンドセルでは電場ピーク値の低下がある。原因はエンドセルと隣のセル間のカップリングが、その他の周期構造部に比べて大きいためである。よって、カップリングを他のセルと合わせることで改善される。その方法としては、周期構造部同様の結合スロットをダミーでエンドセル部に設ける手法がある。この場合、部品の外径が中間セル同様に大きくなるため、現状では真空マニホールドとの干渉をうまく避ける必要がある。今後の加速モジュールで改良するかどうかについては、引き続き検討を進めていきたいと考えている。

2.3 シャントインピーダンス

設計はMAFIAとSUPERFISHを用いた。SUPERFISHで求めたシャントインピーダンス $Z = 51.3 \text{ M}\Omega/\text{m}$ 、トランジットタイムファクター $T = 0.82706$ である。

これに以下の各項目のロス増加を考慮する。結合スロット20%、表面仕上げ5%、温度（解析は20度、ローレベル測定は20-22度で行っているので省略）0%、ブリッジ空洞（3セル/5セル×4×2タンク）7.5%。これらのファクターを計算するとロス増加は1.422倍となる。よって、 $Z = 51.3 \div 1.422 = 36.1 \text{ M}\Omega/\text{m}$ が設計値となる。

測定結果はバンチャー1号機が $Z=33 \text{ M}\Omega/\text{m}$ 、バンチャー2号機が $Z=35 \text{ M}\Omega/\text{m}$ であった。両者とも設計値の90%以上が得られており、製作上の大きな問題は無いと考えている。

3. 製作過程における周波数測定

ACS空洞は加速セルが結合セルに包まれた構造になっている。そのため加速セルに外部から直接アクセスすることが出来ない。よって、通常、ディスクロード形加速管で行われているように、ロウ付け後に外部から肉薄部分を変形させる周波数調整は出来ず、ロウ付け前の加工で（加速モード周波数が可動チューナーの範囲に収束するように）調整を完了する必要がある。

従って、製作過程における周波数調整時の測定結果と、最終的な空洞周波数との関係を把握することが大きな課題となっている。

3.1 ハーフセル測定と仮組全体測定との差

加速セルはセル中央でelectricなboundaryを持つ。よって、この部分にアルミ製のショート板を置いて測定を行う。これを以下ハーフセル測定と呼ぶ。ショート板の周波数はエンドセルなどを用いて補正する[2]。

その後、加速空洞全体を仮組して周波数を測定する。理論上、ハーフセル測定の周波数の平均値が、加速空洞全体の周波数になるが、実際にはある程度の誤差を生じる。ハーフセル測定の周波数平均と加速空洞全体測定の周波数差（ハーフセル平均-仮組全体周波数）は以下の通りであった。

バンチャー1号機

空洞1: +0.079 MHz、空洞2: -0.095 MHz

バンチャー2号機

空洞1: -0.095 MHz、空洞2: -0.128 MHz

2台の空洞平均で、バンチャー1号機は-0.016 MHz、バンチャー2号機は-0.11 MHzであった。

3.2 全体ロウ付けによる周波数変化

全体ロウ付け前後での加速モード周波数変化を以下に示す。各モジュールとも2台の加速空洞の平均値である。（テストセルを除く）

テストセル（バンチャー1号機製作前のテスト）

加速: +0.1 MHz

結合: +0.7 MHz

| | | |
|---------------|----------|-------------|
| バンチャー1号機 | | |
| 平均 | 空洞1 | 空洞2 |
| 加速:+0.17 MHz | (+0.170, | +0.179 MHz) |
| 結合:+0.10 MHz | (+0.139, | +0.063 MHz) |
| バンチャー2号機 | | |
| 平均 | 空洞1 | 空洞2 |
| 加速:+0.03 MHz, | (+0.047, | +0.019 MHz) |
| 結合:+0.21 MHz, | (+0.217, | +0.196 MHz) |

次に各加速空洞のロウ付け後の各モードの周波数を以下に示す。

| | | |
|----------|---------|------------|
| バンチャー1号機 | 空洞1 | 空洞2 |
| 加速: | 972.17, | 972.16 MHz |
| 結合: | 971.81, | 971.73 MHz |
| バンチャー2号機 | 空洞1 | 空洞2 |
| 加速: | 971.74, | 971.75 MHz |
| 結合: | 972.14, | 972.10 MHz |

調整加工時の目標周波数は、事前のロウ付け（テストセルを含む）結果をふまえて決定した。

バンチャー1号機の結合モードは、最終ロウ付けでの変化量が+0.7MHzの予想であったが、実際には+0.1MHzしかなかった。このため結合モードの周波数は低めとなった。

テストセルでの誤差の原因は、結合モード周波数の測定精度が十分になかったためと考えている。結合モードの周波数を正しく測定するためには、セルの平面度が0.01以下である必要がある。これは、これまでの製作過程で経験的に判ってきたことである。これ以上のセル面に凹凸があると、面接触が不十分で正しい値を示さない。このため、ロウ付け前の結合セル周波数が正しく測定出来ておらず、ロウ付け前後で、精度のある比較が出来なかったものと考えている。

バンチャー2号機の加速モードは、最終ロウ付けでの変化量が+0.2MHzの予想であったが、実際には+0.03MHzとほとんど周波数変化しなかった。加速モード周波数が低い分は、ブリッジ空洞の周波数を高めに調整することで対応した。

現状、ロウ付けによる周波数変化は一定しているとは言えない。今後もデータを蓄積し、随時反映していく必要があると考えている。

3.3 モジュール全体周波数の予想

モジュールは加速空洞2台、ブリッジ空洞1台で構成される。モジュール全体をロウ付け前に仮組することは構造上難しい。このためロウ付け前には、2台の加速空洞とブリッジ空洞、それぞれ単体の周波数までしか測定できない。これら3つの測定結果から、モジュール全体を組み立てた後、可動チューナーの調整範囲内に運転周波数972MHzが入るかどうかを判断し、各空洞の周波数を調整しなくてはならない。

加速空洞、ブリッジ空洞がモジュール内に組み込まれた時の境界条件と、空洞単体での測定時の境界

条件での周波数の差を電磁場解析(MAFIA)で補正する。補正後の各空洞の周波数に各空洞の蓄積エネルギーで加重平均をとってモジュール全体の周波数を求めた。

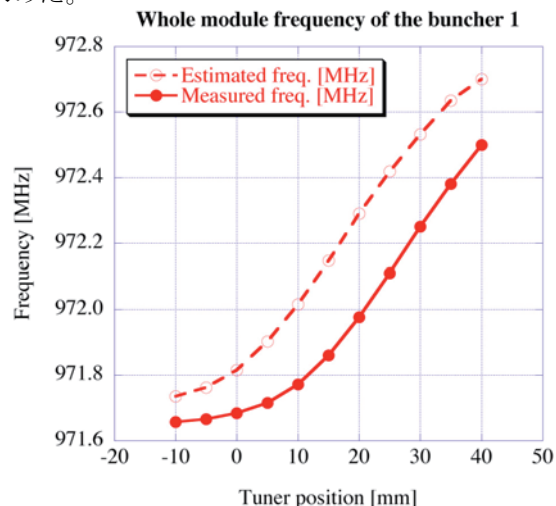


図4:モジュール全体周波数の予想値(点線)と測定値

バンチャー1号機での予想値と測定値を図4に示す。全体として周波数はやや低めになった。これはブリッジ空洞と加速空洞の接続部で厳密なmagnetic boundaryの拘束からやや外れて、周波数が低めに動いたと理解している。

まだ十分な実績があるとは言い切れないが、測定ベースの補正などを加えて0.1~0.2 MHz程度の精度で予想できる現状にある。

4. まとめ

2台のバンチャーモジュールのローレベル測定結果について詳細を述べた。バンチャー用空洞としては要求される仕様を満足する結果を得ることができたと考えている。製作過程においては、各セットアップでの測定誤差0.1から0.2MHz程度、ロウ付けによる周波数変化量も同程度の変動を持っていた。結果的には、これらの変動はチューナーの調整範囲に比べて小さく、可動範囲で吸収することができたといえる。加速モジュールでは調整範囲は小さくなるため、より精度を上げて反映していく必要がある。

これまでのR&Dで、J-PARC ACSの基本的な製作、調整手法については、ほぼ確立出来たと考えている。現状、量産に向けた重要な検討課題のひとつは工程短縮である。今後はこれまでのR&Dを振り返り、各作業の合理化をひとつひとつ進めていきたいと考えている。

参考文献

- [1] H. Ao et al. "First High-Power ACS Module for J-PARC Linac", Proc. of the 2006 Linac Conf., August 2006, p.725-727
- [2] H. Ao et al. "RF Tuning and Fabrication Status of the First Module for J-PARC ACS", Proc. of the 2005 Particle Accelerator Conf., May 2005, p.2684-2686