

ACS CAVITY FOR J-PARC LINAC

H. Ao^{*A)}, H. Asano^{A)}, N. Ouchi^{A)}, N. Tsubota^{A)}, K. Hasegawa^{A)}, K. Hirano^{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

H20年3月よりJ-PARC LINACのエネルギー増強が始まり、本計画では Annular Coupled Structure (ACS) 空洞20台を製作する。ACS 空洞では組立前に機械加工により共振周波数を調整する。この調整のためのデータ取得を目的として、試作セル(寸法決定用セル)を製作した。この結果をもとに量産寸法の決定、周波数調整を行い、完了した5台分については目標値(971.93 ± 0.05 MHz)の範囲内に調整することができた。現在ロウ付け、全体組立をすすめており、H22年秋には量産の1号機が完成する予定である。

J-PARC LINAC ACS 加速空洞

1. はじめに

H20年3月よりJ-PARC LINACのエネルギー増強が始まった。本計画では Annular Coupled Structure (ACS) 加速空洞モジュール18台、デバンチャー空洞モジュール2台をH24年夏までの約4年間で製作する予定である。

図1にACS加速空洞モジュールの概略を示す。加速モジュール1台は加速空洞2台と橋絡空洞1台で構成されている。2台の加速空洞は橋絡空洞で接続され、橋絡空洞の中央から高周波電力が供給される。

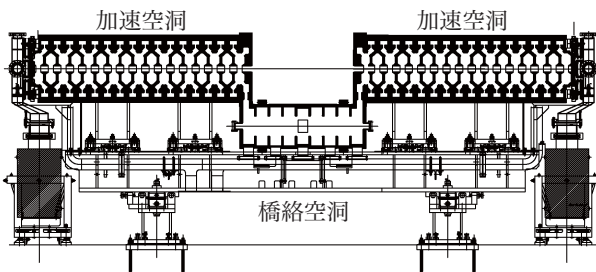


図1: ACS 空洞加速モジュール

これまでのACS先行試作機では加速モジュール1台の製作に約1年半を要していた。このACS空洞を3年間で20台を製作する場合には、各工程の合理化とともに、多数の空洞製作を並行して進めるための戦略が重要となる。工程の短縮に向けてはスロット加工の簡易化、試験機の製作など^[1]を進めてきた。本論文では我々の量産に対する取り組みと、これまでに得られた結果について報告する。

2. 寸法決定用セルと周波数補正係数

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をチューニングすることができない。従って、組立前(ロウ付け前)に加速セルの周波

数はすべて調整を済ませておく必要がある。このためACS空洞は組立前に周波数調整のための時間を必要とするが、組立後には高周波的な調整をほとんど必要としないため時間的な不確定要素が無く、工場出荷までのスケジュールを確定することができる。これは時間の限られた増強計画では大きなメリットである。

周波数調整は超精密旋盤を用いて、加速セル、結合セルの赤道部付近(磁場が集まっている箇所)を切削して半径 r を拡大し、周波数を下げることによりおこなう。機械加工を用いるため、セルの機械的な変化量(修正加工量)は精度良くコントロールできる。従って、形状変化 dr に対する周波数変化 df の割合、つまり周波数補正係数(df/dr)さえわかれば、各セルの周波数は精度良く調整できる。

先行試作機では、段階的に周波数調整することが時間的に許された。しかし、量産では工程短縮のため、周波数調整は1回のみ限定した。

先述の通り、周波数調整の精度を上げるためには周波数補正係数 df/dr を精度良く把握することが重要である。そこで、量産の最初にすべての幾何学的 β に対して各4枚のセルを”寸法決定用セル”として製作し、周波数測定を行うこととした。ACS空洞の幾何学的 β は空洞モジュール毎に変化させている。加速モジュール用として19種別あったことから、量産分とは別に $19 \times 4 = 76$ 枚の寸法決定用セルを製作した。図2に寸法決定用セル



図2: 寸法決定用セル

*hiroyuki.ao@j-parc.jp

ルの外観を示す。製作は量産セルの試作も兼ねることとし、冷却水路など内部構造も全く量産セルと同一とした。

ACS 空洞の結合スロットには磁場が集中するため、微小な形状差が周波数に影響を与える。しかも、この部分は三次元測定機による検査が難しく、寸法管理をすることができない。そこで、加工機を限定し、加工再現性によりセルの周波数のばらつきを抑えることが重要である。寸法決定用セルについても量産セルとの再現性を保つため、量産セルを加工する(予定の)加工機と同一の加工機で製作するようにした。

周波数補正の係数(df/dr)は、寸法決定用セルで2回の修正加工を行って実験的に求めた。加速セル、結合セルに対する周波数補正の係数(df/dr)の測定結果を図3に示す。

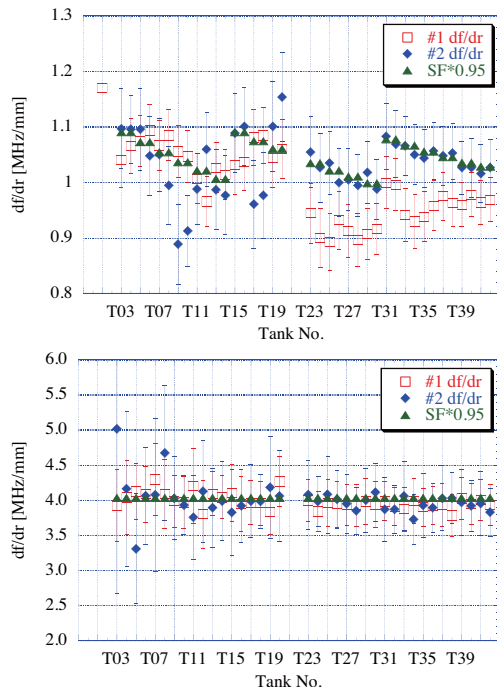


図3: 寸法決定用セルで求めた周波数補正の係数 df/dr (上:加速セル、下:結合セル)。“1”は修正加工1回目、“2”は2回目、“SF*0.95”は SUPERFISH の計算値に 0.95 倍のスロット分のファクターを掛けた計算値を示す。

加速セル形状は β によって異なるため、係数が 1 MHz/mm 前後になるよう修正加工部の形状を3通り(T03-13, T15-29, T35-41)に変化させている。そのためデータが3つのグループに分かれて分布している。

T23以降の修正加工1回目データ(#1)は明らかに2回目(#2)や計算値(SF*0.95)に比べて小さい。修正加工後の寸法など確認を行ったが、この原因は不明である。そのため一部のセルについて3回目の修正加工を行って再現性を確認し、結果#2のデータを採用することにした。

結合セル形状は β によらず一定である。T03付近で一部ばらつきが見られるが、全体的によく一致した結果が得られた。

3. 量産機の周波数調整

3.1 初期加工後の周波数

寸法決定用セルの測定結果から、全種類の β について修正加工の削り代の範囲内に目標となる周波数があることがわかった。そこで量産寸法の決定に際しては寸法決定用セルの周波数が量産時に再現することを仮定し、修正加工部分以外の寸法は寸法決定用セルと全く同一とした。

修正加工部分の寸法については加工時間短縮のため、できるだけ修正加工する予定量(マージン)を小さくすることとした。そこで調整加工部分については、過去のデータから想定される周波数のばらつき(0.3 MHz)分のマージンのみを残し、寸法決定用セルから削り込んだ形で量産寸法を指示した。

ここで、寸法決定用セルと量産セルとの間での周波数再現性(加工再現性)を見るため、量産機のうち初期加工が完了したものについて目標周波数との差をまとめてみた。初期加工の目標周波数は、加速セルが 972.23 MHz (=最終目標 971.93+マージン 0.3 MHz)で全 β で共通であるのに対し、結合セルは測定時の境界条件を補正する必要があるため β 毎に目標周波数が異なる。そこでどちらも目標周波数からの差を計算して、差の値をプロットにまとめた。図4に結果を示す。

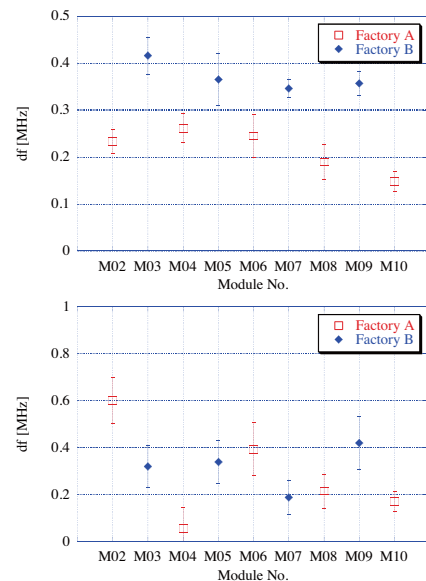


図4: 初期加工後の周波数と目標周波数との差(上:加速セル、下:結合セル)

周波数の差が大きいほど寸法決定用セルと量産セルの間で周波数の再現性(加工再現性)が良くないことを意味する。

加速セルは加工メーカーA,Bの2社で加工しているが、A,Bで周波数のずれ量が異なり、Bの方が寸法決定用セルからのずれが大きいことがわかる。同一 β 形状でのばらつきはA,Bとも標準偏差で $\sigma_A = 0.034, \sigma_B = 0.038$ と差はほとんどない。従って、寸法決定用セルから量産セルの加工へ進んだ段階でAには約0.2 MHz、Bには約0.35 MHzのオフセットが生じたと考えられる。Bのオフセット約0.35 MHzは、我々が想定したマージン0.3

MHzを超えていたが、幸いプラス側(周波数が高い)であったため、切削量を増やして対応することができた。

一方、結合セルでは加工メカによる差は見られない。これはスロットの形状変化が結合セルの周波数に与える影響が、加速セルに比べて比較的小さいためと理解できる。

3.2 修正加工後の周波数

修正加工はモジュール毎(加速空洞2台分)のセルを、ビーム軸に沿って奇数番目と偶数番目のセルの2グループに分けて2段階で行うこととした。これは第1段階の周波数調整の結果を第2段階の調整にフィードバックするためである。ただし現時点までは、図3で得られた周波数補正の係数を勘案し周波数調整を行うことで、第1段階から精度良く調整できており、第2段階でフィードバックを必要としたものは無い。表1に修正加工が終わった加速空洞について周波数をまとめて示す。表中のT03,T04...は加速空洞(タンク)の番号である。奇数番、偶数番の加速空洞を組み合わせて1台のモジュールを構成する。

表 1: 修正加工完了後の加速空洞周波数 (MHz)

	加速セル	結合セル
T03	971.935 ± 0.008	976.559 ± 0.019
T04	971.932 ± 0.023	976.545 ± 0.017
T05	971.939 ± 0.019	976.085 ± 0.019
T06	971.938 ± 0.026	976.070 ± 0.030
T07	971.942 ± 0.016	975.711 ± 0.013
T08	971.938 ± 0.011	975.761 ± 0.060
T11	971.933 ± 0.003	975.164 ± 0.024
T12	971.932 ± 0.002	975.164 ± 0.024
T13	971.939 ± 0.009	974.885 ± 0.035
T14	971.942 ± 0.012	974.872 ± 0.022

修正加工後の周波数は、加速セルについては目標 971.93 ± 0.05 MHz の範囲で一致しており問題ない。結合セルについても先述のとおりモジュール毎に目標周波数が異なるが、いずれも周波数測定誤差 ±0.05 の範囲で一致しており、問題ない結果が得られている。

3.3 ロウ付けによる周波数変化

周波数調整の終わったセルは、酸洗クロメート処理の後、ロウ付けにより加速空洞に組み立てられる。最終ロウ付け前後での周波数変化と、最終的な周波数調整の結果を確認するため、最終ロウ付け直前にロウ材を挟み込んだ状態で周波数測定を行った。現時点までに測定が完了した加速空洞(タンク)について、ロウ付け前およびロウ付け後の周波数測定結果を図5のプロットにまとめて示す。

図中、T21, 22, 42 は先行試作機であり、T21, 22についてはロウ材を挟まない測定(w/o brazing metal)を実施している。量産では工程短縮のためロウ材ありの測定のみとしている。

現時点で T07, 08, 03, 04 が量産機のうち最終ロウ付けまで進んだものである。いずれも先行試作機で得られた結果の範囲内で分布していることがわかる。最終的

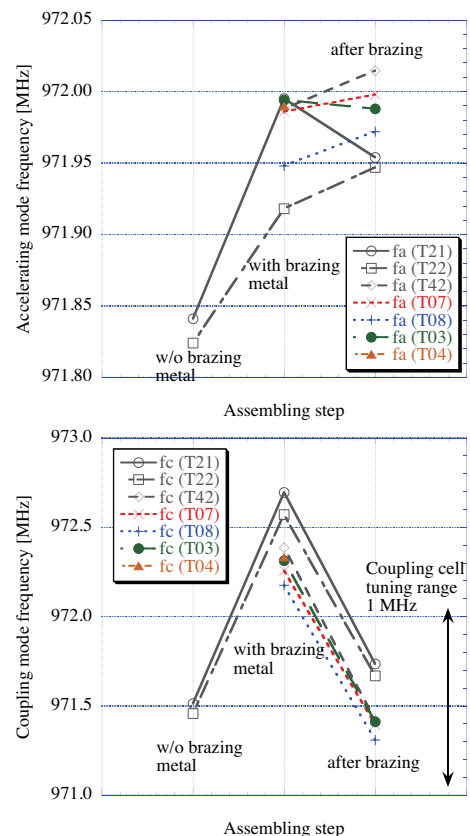


図 5: ロウ付け前後での周波数変化(上:加速モード、下:結合モード)。プロットは左から順にロウ材無し、ロウ材有り、ロウ付け後の周波数を示す。

にはモジュールに組立後の測定結果を待つ必要があるが、加速モードは可動チューナーによる調整範囲(調整幅 ±0.3 MHz)、結合モードは固定チューナーによる調整範囲(図中 tuning range 参照)に収まるものと予想され問題ない。

4. まとめ

時間の限られた増強計画の中で、寸法決定用セルの製作と測定、量産寸法の指示までを工程通りに進められるか、また量産分についても1回の修正加工で周波数調整を整然と進められるかという点は、ACS 空洞の量産においてまず大きな試練であった。加工面でいくつかの問題点はあったものの、現状は順調に推移しており、全体工程においても概ねスケジュール通りに進んでいる。ロウ付けが完了したものは順次組立がすすめられている。初号機についてはこの夏に全体組立後の高周波測定を行う予定である。その後は配管などの各種作業の後、秋には東海へ搬送し、大電力試験へと進める予定である。

参考文献

[1] H. Ao et al., "FABRICATION OF THE ACS R&D MODULE FOR THE J-PARC LINAC UPGRADE", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tokai, 2009,