

STATUS OF THE ACS CAVITY DEVELOPMENT FOR THE J-PARC LINAC ENERGY UPGRADE

Hiroyuki Ao^{1A)}, Koichiro Hirano^{A)}, Takatoshi Morishita^{A)}, Hiroyuki Asano^{A)}, Fujio Naito^{B)},
Akira Ueno^{A)}, Masanori Ikegami^{B)}, Kazuo Hasegawa^{A)}, Yoshishige Yamazaki^{B)}, 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

The mass production of the J-PARC ACS requires about 1300 cell parts, so that it is important to reduce the machining time. In the previous ACS model, it took about three hours per one coupling slot. We, therefore, optimized the slot design, the tolerance, and the machining process. As a result, the machining time reduced to forty-five minutes per one slot. The four test cells were fabricated to measure the frequencies and Q-values, and these results were compared with the electromagnetic analysis with the Microwave Studio. Between the analysis and the measurement, the differences are 1~1.5 MHz and 4~5 MHz, respectively, for the accelerating mode, and for the coupling mode.

J-PARC LINACエネルギーアップグレードへ向けたACS空洞の開発

1. はじめに

ACS空洞は、多数のハーフセル形状の部品(中間セル)で構成され、ロウ付けにより接合されている。量産時、中間セルは(18.5 module × 2 tank × 17 cell × 2 part/cell=1258)と約1300枚必要であり、スロット加工時間の短縮は工程合理化の為に非常に重要である。

これまで製作したACS中間セルのスロットの加工は、仕上げ、性能とも申し分無いものであった[1]。しかし加工時間としては1箇所約3時間20分を要し、中間セル1枚(スロット4箇所)では、スロットだけで13時間を超えてしまっていた。

そこで改めて加工メーカーの協力を仰ぎ、既存スロットの粗加工からの各段階において、面の仕上げとそれに必要な所要時間を検討し、妥当なところに仕上げを簡易化した。また加工方案も5軸"同時"加工を使わない刃物の動きとした。

一方、解析による初期(設計)周波数の精度向上が求められている。この背景としては、量産時には多種の β が必要であるが、試作モデル製作の時間的余裕がないこと。また、修正加工量(回数)の低減のため、初期設計で極力周波数が目標値に近い空洞で製作する必要があることなどによる。

従来は設計に主としてMAFIAを用いてきたが、最近のMicrowave Studio (MWS)などの計算環境により、より精度のよい電磁場解析による周波数評価が期待される。

今回、これらの見直しを加えたスロット形状で中間セル4枚を試作した。製作後、高周波測定を行い、形状変更による周波数変化をMWSの解析と比較した。ただし、MAFIAとMWSの解析コード間の比較については言及せず、ここではMWSによる解析値と測定値を比較するにとどめたい。本報告はこれらの結果について記すものである。

2. 加工の合理化

先行試作機として製作されたlow- β モジュールでは、先述の通りスロット1箇所あたり約3時間20分の加工時間を要していた。これを見直しにより約46分まで短縮することができた。よって合計のスロット加工時間では、約13時間から3時間に約10時間短縮となる。その他の加工箇所を含めた5軸加工機の加工時間は、従来の1枚/日から、1.5枚/日程度になる見込みである。単純に1.5で割り算すると、1300枚の加工には867日。加工機2台で433日、200作業日/年として、約2年2ヶ月。工程からすると実現性のある加工時間と考える。同様の計算で、従来の1日1枚では、加工機2台で3年3ヶ月を要する。よって、約1年1ヶ月は短縮できたことになる。

5軸同時加工を排したことにより、過去1ヶ月以上の試行錯誤を必要とした入力プログラム(CAM)作成が不要になった。5軸加工機を用いた場合でも、座標軸に対する動きがxyzと回転角 θ のみに制限されるため、加工機への入力指示は非常に簡単になった。

加工時間以外に、プログラム作成の負荷が無くなったことは非常に大きな改善と言える。入力プログラム作成に時間を要した理由は、構造の複雑さだけでなく、細部の仕上げに時間を要するなど、結果的に効率の悪い作業を必要としていたことが大きい。

関連する過去の反省点として、low- β モジュール以降に製作した試作機においても、同一スロット加工を進めざるを得なかったことがある。これはプログラム作成の負荷の為、スロット形状を変更せず加工を進めた方が結果的に短納期となるためであった。この点は今回の改善で進展を得たと言える。

今後引き続き、スロット部以外の形状についても、加工メーカーと共に、加工時間と空洞性能のバランスを最適化していきたいと考えている。

¹ E-mail: hiroyuki.ao@j-parc.jp

3. 高周波測定結果

試作セルの高周波測定の結果を、low- β モジュールの加速空洞#1 (T01) での結果と合わせて表2, 3にまとめる。

表2: Low T01と試作加工の比較 (単位:MHz, %)

	Low T01	試作EB	試作CD
加速mode	973.515±0.084	974.273	974.287
周波数	Q=8263±948	Q=8294	Q=8169
結合mode	978.558±0.021	983.537	983.572
周波数	Q=5004±1788	Q=3535	Q=3890
結合度 %	5.931±0.006	5.776	5.796

表3: 二次(nearest neighbor)の結合度 (単位:% , MHz)

	Low T01	試作EB	試作CD
加速セル	0.0049	0.0046	0.0044
結合セル	3.025±0.035	3.029	←
周波数差	MHz		

加速モードのQ値はlow- β 機の誤差範囲内で変化無かった。結合モードもやや小さいが誤差範囲内でほぼ変化なかった。これらの結果から、試作スロットは、充分実用機に採用できると考える。ただし周波数変化に伴う形状の微調整は必要である。周波数変化については、解析とあわせて次節以降で議論する。

4. 周波数差の解析

スロット形状の見直しにより、変更前に比べ周波数が変化した。変更前後について、それぞれのセルの周波数を解析によって求め、試作セルの測定結果と比較した。

4.1 スロット形状の変更点

従来のスロット形状写真を図1に、見直し後のスロット形状を図2に示す。また写真と同様に、MWSでの解析モデルについて従来のスロット形状を図3に、見直し後のスロット形状を図4に示す。

従来のスロット形状(図3上)作成時に、加速セル側のスロット周囲R部は、Rを作成しようとするエラー(隅部でRが接続できない為と推測される)となった。このためR4をC2面取りで近似しモデルを作成した。また、結合セル側の“flat region”については、斜面との接続部を連続的に曲面で結ぶことが形状入力上難しかったため、R6で接続することで近似している。

4.2 周波数解析結果

スロット有無による軸対称形状からの周波数差 Δf について、電磁場解析(MWS, SUPERFISH)の結果および測定結果を加速モードについては表4、結合モードについては表5にそれぞれ示す。測定では、スロット無しモデルが無い場合、軸対称形状の周

波数は、SUPERFISHの解析値で仮定してスロットによる周波数差 Δf を算出した。

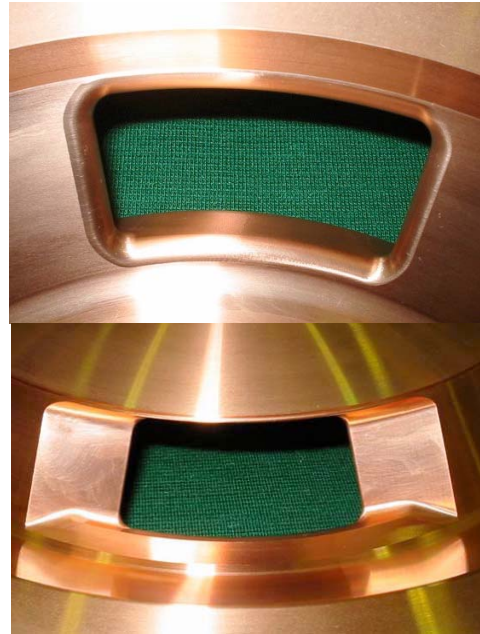


図1: 従来の結合スロット

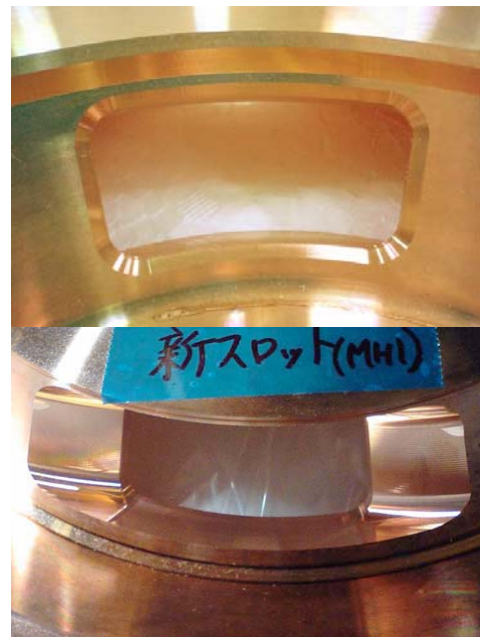


図2: 見直し後の結合スロット.

加速モードのスロットによる周波数差 Δf の測定値は、見直し前後で解析値よりも1.2から1.4 MHz程度大きくなった。スロット形状の見直しによる変化分を見ると、解析では変更前(low β)に比べ29.39-28.89=0.5 MHzだけ見直し後の方が高く、測定値も見直し後が0.77 MHz高い。大小の傾向、変化量もおおよそ解析と一致したと考えている。

結合モードのスロットによる周波数差 Δf の測定値は、解析値よりも変更前(low β)では4.4 MHz程度

大きく、見直し後のセル形状ではほぼ解析値と同じであった。スロット形状の見直しによる変化分を見ると、解析は変更前 (low β) に比べ 90.57-89.90=0.67 MHz だけ見直し後の方が高く、測定値は見直し後が約 5 MHz 高い。大小の傾向は一致しているが、変化量は解析値にくらべ測定値が 4 MHz 以上大きい結果となった。

表4: 加速モード周波数解析結果

	スロット無	スロット有	Δf
SUPERFISH	1004.34	-	-
MWS (Low β)	1001.46	972.07	29.39
MWS (見直し後)	1002.02	973.12	28.89
測定 (low)	(1004.34)	973.52	30.83
測定 (見直し後)	(1004.34)	974.28	30.06

表5: 結合モード周波数解析結果

	スロット無	スロット有	Δf
SUPERFISH	1073.55	-	-
MWS (Low β)	1072.65	982.08	90.57
MWS (見直し後)	1072.72	982.82	89.90
測定 (low)	(1073.55)	978.56	94.99
測定 (見直し後)	(1073.55)	983.59	89.97

5. 解析結果の考察と今後の対応

前節では主として見直し前後の差分を解析と比較してみたが、各表(表4, 5)から初期形状としての解析値(軸対称形状からスロットの変化 Δf を差し引いて求めた予想周波数)と測定値を比較したものを改めて表6に示す。

表6: 予想周波数と測定値との比較

	予想値	測定値	Δf
加速 (Low β)	974.95	973.52	1.43
結合 (Low β)	982.98	978.56	4.42
加速 (見直し後)	975.44	974.28	1.16
結合 (見直し後)	983.65	983.59	0.06

予想値と測定値には最大で加速モードで+1.4 MHz、結合モードで-4.4 MHz 差がある。現状、加速セルの加工調整代は±約 1 MHz であり、誤差は調整幅を少し超えている。この点では解析の精度は十分とは言えず、過去のデータを用いて解析方法、および調整加工幅の見直しなどの検討を、引き続き進めていく必要があると考えている。

従来のACS空洞製作では、解析との誤差は、試作セルの結果を反映することで対応してきた。初期形状での精度が十分得られない場合は、結果として調整加工の負荷(回数)が増大することになる。今後の量産工程(製作順序)策定では、修正回数を減らすために、有用なデータをとる機会を考慮し、リスク(性能未達、調整回数増大)を減らす、あわせて修正加工作業そのものの短縮に向けた判断基準の定

式化など、全体的な調整作業の合理化を進めていく必要があると考えている。

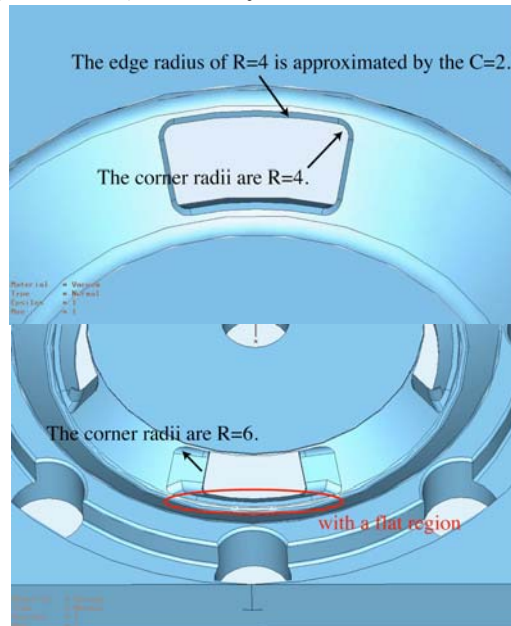


図3: 従来形状の結合スロット

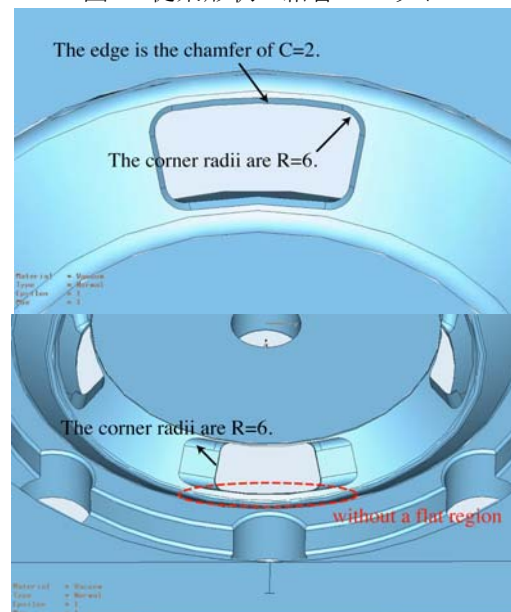


図4: 見直し後の結合スロット

今後、本試作スロットの形状を採用し大電力試験機の製作を進め、大電力下での性能確認を行っていく予定である。この製作工程を通して、高周波的には解析結果の反映や修正加工の合理化、加工面ではスロット以外の空洞細部の形状と加工最適化などのR&Dを盛り込み、量産に向けた検証を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