

ACS 型加速空洞の高周波測定の実状

青 寛幸^{A)}、秋川藤志^{A)}、林崎規託^{B)}

^{A)} 日本原子力研究所東海研究所 大強度陽子加速器施設開発センター
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

^{B)} 東京工業大学 原子力工学研究所
〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1

概要

これまで J-PARC 用 ACS 型加速空洞の製作に向けて、アルミ製セル、無酸素銅製セルの製作を行い、高周波測定を行ってきた。本論文ではこれまでの測定方法そのものの試験、及び測定結果、解析、今後の見通し等について報告する。

1 はじめに

Annuler Coupled Structure (ACS)型加速空洞は J-PARC 200~400 MeV 区間の加速管として開発を進めている[1]。2002 年 4 月以降、初号機にあたるバンチャー空洞の製作を開始した。加工手順や高周波測定等の R&D のため、実機サイズでのアルミ製セル、無酸素銅製セルの試作を行い、合わせて高周波測定のための治具類の準備と改良を進めてきた。現在、加速、結合両セルの量産寸法の最終検討を進めているところである。

ACS 型加速空洞は結合空洞型リニアックであり、 $\pi/2$ モードを用いる。高周波的には加速モード、結合モードの二つのモードを考慮する必要がある。

2 加速セル

加速モードは加速セル中央で electric な境界条件を設定すればよい。ここでは electric な境界条件を与えるショート板として、アルミ製の平板を用いて測定を行った。セットアップを図 1 に示す。

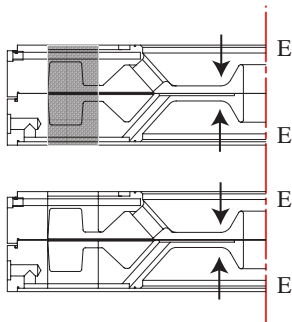


図 1：加速モード測定セットアップ

2.1 スロットによる周波数変化

周波数の解析は、軸対称な形状について SUPERFISH で解析を行い、スロットを含めた三次元形状についての効果を MAFIA で補正する形でおこなっている。この三次元形

状の影響（スロットの影響）について検討してみた。

アルミ製セルでは、まずスロット無しの軸対称な形状で製作し、その後スロット穴の加工を行った（無酸素銅製セルでは粗加工段階からスロット穴加工を行ったため、スロット無しモデルは存在しない）。スロット加工前後の高周波測定により、スロットによる周波数変化量を検証することができる。 $\pi/2$ （加速）モードについての結果を表 1 に示す。

表 1: スロットの有無による加速セルの周波数変化

slot	MAFIA	AI	OFC
無	1001.17	1004.9	N/A
有	971.59	973.86	973.54
Δf	29.58	31.04	-

スロット無しモデルでの周波数の絶対値は SUPERFISH の解析と $\pm 100\text{kHz}$ 程度で一致した。ここで SUPERFISH への形状入力には、アルミ製セルの三次元測定結果（二次元断面のマッピングデータ）を用いた。スロットによる影響は MAFIA の解析にほぼ近い。無酸素銅製セルについても、スロット無しの周波数測定値は無いが、二次元断面の寸法測定結果で解析値と比較することで、スロットによる周波数変化を考察できると思われる。

2.2 加速モード測定

各セットアップについても測定治具の改良を進め、合わせて比較検討を行った。図 2 に測定の様子を示す。



図 2：高周波測定の様子

境界条件については、それぞれ図 1 に示すように、真空ポートを detune、真空ポートの境界面を close (electric)、真空ポートの境界面を open、の三通りについて測定を行った。

これらの結果の比較検討から、

- 真空ポートの open, close による加速モードへの影響は見られない。
- 真空ポートを detune することで加速モードの周波数は約 700 kHz 高くなる。

ことを確認した。従って $\pi/2$ モード以外の周波数が必要な場合を以外は、真空ポートは open で良いと考え、量産時の調整は open で簡略化することを検討している (close では 8 個の真空ポートを個々に塞がねばならず、作業が煩雑となる)。一方、detune 状態は open に比べ、境界条件としての曖昧さが少ない。この detune による周波数変化量が一定であることを確認できれば、オフセット量を考慮して、加速モード測定とすることも考えられる。

3 結合セル

結合モードは加速セルが励起し、加速セル中央で magnetic な境界条件となる。結合セル内ではスロット位相が 45 度ずつ隣り合う加速セルに対してずれており、鏡面対称とはならず、単純に結合セル中央で electric な境界条件を用いるだけでは不十分である。従って、測定可能な複数の境界条件で周波数測定を行い、解析や 1/2 アルミモデル[2,3]等の測定結果を基にして結合モード周波数を算出する必要がある。

今回のバンチャー試作段階ではハーフセルは 2 枚しか準備できなかった。従って 2 枚である程度の精度で結合モード周波数を推定する方法を検討した。

結合モード測定時の分散関係は結合セル間の結合度で決まる。本機の形状ではこれは無視出来ない大きさとなる。結合度は主に真空ポートに依るもので、スロット位相の影響は比較的小さいと考えられる。また結合度やスロット位相の影響についても MAFIA である程度検討しておくことができる。そこで加速セルを detune し、スロット同位相となる境界条件 (結合セル中央で electric な境界) で測定、0 モード、 π モード相当の周波数差を求め解析と比較することにした。

3.1 スロットによる周波数変化

まず、加速セル同様にスロット加工前後の高周波測定による、周波数変化量を表 2 に示す。スロット同位相の π モード相当の周波数値を比較したものである。

表 2: スロットの有無による結合セルの周波数変化

slot	MAFIA	Al	OFC
無	1059.63	1083.5	N/A
有	981.36	1004.2	1002.24
Δf	78.27	79.3	-

スロット無しモデルでの周波数の絶対値は SUPERFISH の解析に比べ 1.1MHz 程度で高めであった。結合セルでは内、外周の両側で接触を確保する必要があり、セル面や端板の研磨、構造改良等による平面度や接触の改善が必要であった。これら修正による誤差や端板側の歪み等の影響ではないかと考えている。スロットによる影響は MAFIA の解析にほぼ近い値を得た。

次に図 3 にセットアップと各モードで周波数測定結果を示す。

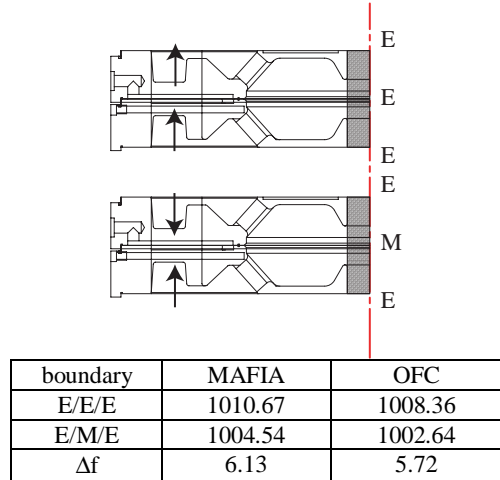
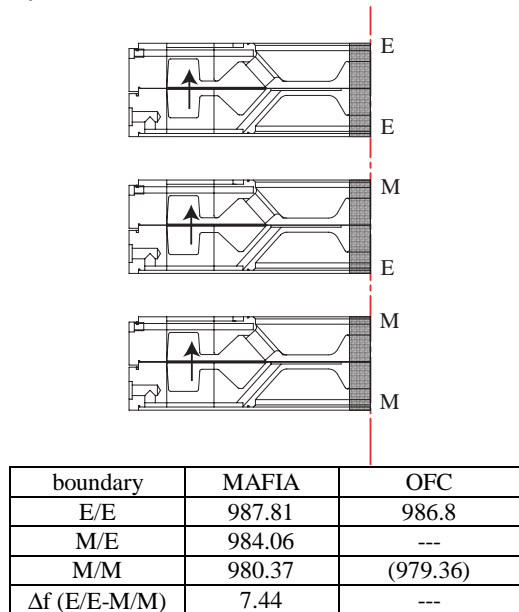


図 3 : 結合モード測定セットアップ (1)

スロット同位相における結合度はモデル測定と比較して概ね解析と一致していると考えて良さそうである。

3.2 結合モード測定

そこで引き続きスロット位相が 45 度回転している結合モードの周波数を検討してみた。スロット位相が 45 度回転している状態で結合度を見るためには、結合セルが最低 2 セル (最低 4 枚のハーフセル) 必要である。量産時はセル数が充分あるため、図 4 に示すような各境界条件の測定が可能である。これらの結果から結合モード (M-M) の境界条件、もしくは設計セル数での周波数を算出することができる。



(OFC の M/M-boundary は MAFIA での E/E と M/M の周波数差を E/E の OFC 測定値に当てはめて算出した)

図 4 : 結合モードセットアップ (2)

MAFIA の解析が示すように、E/E-M/E 間の周波数差 3.75 MHz と、M/E-M/M の周波数差 3.69MHz はほぼ等しい。実機では、E/E、M/E 測定が可能であり、この二つのモードの周波数差から結合モード (M/M) を算出することが出来る。

J-PARC 用 ACS では JHF 用 L-band ACS に比べてセル外径を小さく抑えるため、真空ポートが結合セルに大きく割り込む形で設計されている。このため結合セル間の coupling が大きくなり、セル数増加に伴う周波数の収束傾向が顕著になる。この特性を把握することが、製作段階における周波数調整の上で重要となる。

多連セルでの結合モードの周波数特性は、実機試作と平行して、1/2 アルミモデルを用いて測定を進めている。測定データの一部を用いて、上記セットアップ (2) での測定手順を検討してみた。

図 4 に 1/2 アルミモデルでの結合モード測定結果を示す。上記セットアップ (2) に準じて、加速セルはすべて detune し、結合セルを 2, 3, 4 セルと増加させて収束傾向を見たものである。また、表 3 に

- セル数毎での位相進みと周波数を分散関数に合わせて fitting した結果
 - セットアップ (2) で示した例のように 2 セル測定で収束値 E を推定した場合
- をまとめて示す。

表 3：結合モード周波数の評価 (2cell では E/E-M/E の周波数差を基に M/M を算出したもの。)

Boundary	2cell	Fitting
E/E	1960.85	-
M/E	1954.35	←
M/M	(1947.85)	(1947.96)

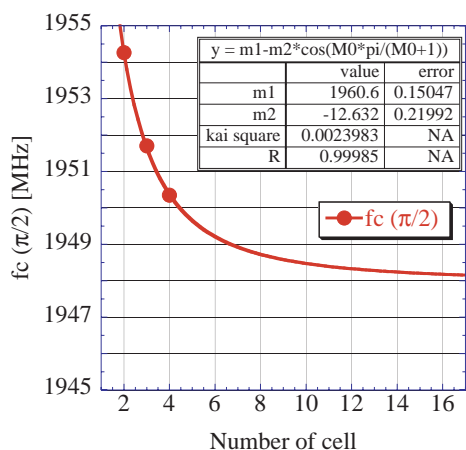


図 4：結合モード周波数の収束傾向の一例

両者の結果は現状 100kHz 程度の差にある。さらにセル数を増やした測定で fitting の良否を検証する必要がある。

真空ポートが貫通するセル間においては、この収束傾向が当てはまると考えられる。バンチャーでは結合セルは片側 4 セルである。4 セル等十分に収束しない範囲でのセル数については周波数測定時に 2 セル以上の測定を行って追い込む必要性が高いと考えている。

逆に実機加速モジュール (16 セル) になった場合には十分収束しているものと考えられ、収束傾向を把握するための測定 (バンチャーと同じ 4 セル程度は必要か) で代用できると考えられる。

4 まとめ

実機バンチャーモジュールの製作に向けて、各試験セルでの高周波測定の結果は解析から予想された範囲内の誤差にあることが確認された。加速セルについては 973.5 MHz と、ほぼ現状寸法で問題なく、加工誤差から生じるばらつきを吸収する周波数調整量を決定し、マージンとして確保しておけば良い。一方、結合セルについては 979.4 MHz となり、現状では運転周波数(972 MHz)との差が大きく、若干、初期寸法の調整と周波数調整手順の見直しが必要である。これまでの測定の結果はいずれも各解析の予想の範囲内であり、見直しを進めることで、調整可能な範囲に十分収束するものと考えている。

本論文では現状設計で必要と思われる結合モードの測定手順を検討、測定し、解析から大きく外れない結果が、現状得られていることを確認した。結合セル間のカップリングは高周波測定の面からすると収束性を考慮する等の煩雑さが増し、デメリットと言える。真空ポートの配置、寸法決定を空洞設計全体のバランスの中で行うためには様々な項目を検討する必要がある。空洞外径を小さく抑えるメリット、これらに加えて、結合セルの detune の必要性、真空排気特性等のバランスまでを考慮するためには、ACS 空洞内の真空排気特性等についても十分な検討が必要である。バンチャー空洞の製作に平行して、構造の最適化への検討を今後も引き続き進めていく予定である。

本 ACS バンチャー空洞に関連した R&D に関しては三菱重工 (株) 菅野様、三菱重工エンジニアリング、岡田様、高橋様、関係各位のご協力を頂きました。この場をお借りして、御礼を申し上げます。

参考文献

- [1] N. Hayashizaki, *et al.* "J-PARC 用 ACS 加速管の開発", Proceedings of the 28th Liner accelerator meeting in Japan, Tokai, Jul. 30 – Aug. 1, 2003.
- [2] H. Ao *et al.* "R&D Status of the Annular Coupled Structure Linac for the JAERI/KEK Joint Project", Proc. of the 2002 Linac Conf., August 2002
- [3] H. Ao *et al.* "Cold-model Tests of an Annular Coupled Structure for upgrade of a J-PARC Linac", Proc. of the 2003 Particle Accelerator Conf., May 2003