

統合計画用 ACS 型加速管の高周波測定

青 寛幸^{1,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) 東京工業大学原子炉工学研究所

〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1

概要

大強度陽子加速器施設、リニアックの高エネルギー部分として ACS 型加速管開発を進めている。ACS 型加速管の各種アルミモデルでの R&D、および実機バンチャー空洞の試切削における高周波測定の現状について報告する。

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究所が共同で推進する、大強度陽子加速器施設の第 1 期の建設が始まった[1]。リニアックは、出射エネルギーが 3MeV の RFQ、50MeV の DTL、190MeV の SDTL と 400MeV の ACS (Annular-Coupled Structure) から構成される。RF 周波数は RFQ から SDTL は 324MHz、ACS は 972MHz である。

実機 ACS 空洞 (バンチャー) 製作に先だって 1/2 スケールのアルミモデルの製作を行った。本モデルではローレベルでの空洞性能評価と、そのために必要な測定方法の検討を目的としている。空洞設計については[2]、ビーム設計は[3]等を参照されたい。1/2 モデルの結果は、現在平行して進められている実機 (バンチャー) 製作[4]で要求される必要精度、高周波測定の手法等へ、適宜反映する形で進めている。

2. アルミモデル概要

1/2 モデルは全体で、二種類の空洞 ($\pm 0.5581, 0.5624$)セル数として各 17 セル分を製作した。また 9 セルのブリッジ空洞、各 に対応した接続部も含めて製作し、測定の準備を進めている。図 1 に加速空洞部のモデル形状を示す。

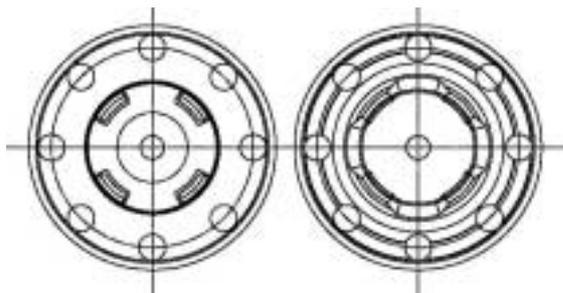


図 1 セル正面図 (左:加速セル側、右:結合セル側)

加速、結合セルがそれぞれハーフセルの形で一枚のモデルの裏表に含まれる。これは実機と同様の構成である。

測定は各セルを端版等と重ねてスタックすることによって行っている。測定条件として、締め付け固定力による変形の効果を考慮する必要がある。測定結果は締め付けトルクを接触面の面圧に換算して評価した。またセルを構成する端版は、締め付け治具とは別体とし、剛性を高めると共に、端版自身の個体差を確認できるよう配慮した。測定時のセットアップを図 2 に示す。

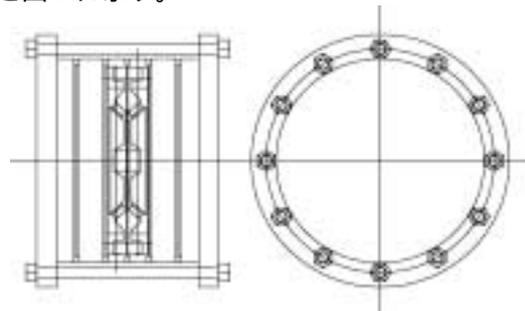


図 2: モデルのセットアップ

3. 1 / 2 モデル測定

まず結合スロットをもたない軸対称形状のモデルによる測定結果について述べる。その後製作したスロット付きのモデルについて、製作直後のモデル間の高周波的特性の個体差について述べる。

3.1 平面度の影響

図 3 に二種の について加速セルの周波数測定結果を示す。グラフに示す通り、最初に製作したモデル(LB: Low-Beta)では面圧の変化に対して数 MHz の変動幅をもち、周波数の面圧依存性が大きい。またハーフセル測定とシングルセル測定が 5MHz 以上異なる、締め付けと共に Q 値が低下するなど問題があった。

次に製作したモデル(HB: High-Beta)では面圧依存性の減少、Q 値の増加など改善の効果が見られた。

二種のモデルともすべて仕上げ面は面粗度 3.2S 程度であり、Q 値に大きな差を与えるような違いはない。しかし寸法測定により比較すると、low-Beta モ

¹ E-mail: aohi@linac.tokai.jaeri.go.jp

デルでは端板との接触面における平均平面度が $15\ \mu\text{m}$ 程度なのに対し、high-Beta モデルでは $2.5\ \mu\text{m}$ 程度であった。

この結果から、本モデルにおいてセルと端板との接触面の平面度は安定な高周波測定のために重要な要素であり、目安として $10\ \mu\text{m}$ 以下の平面度が必要であるといえる。

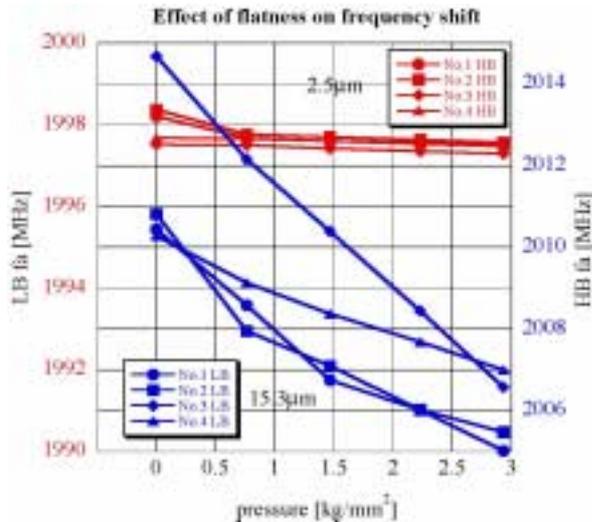


図 3：トルクによる周波数変化での平面度の影響

low-Beta モデルに関しても、上で用いたモデルのうち二枚の平面度を最大 $20\ \mu\text{m}$ から $10\ \mu\text{m}$ に修正加工を行ったところ、周波数の面圧依存性が high-beta モデル同様の变化幅に減少することが確認された。修正加工には超精密旋盤を用いた。

3.2 面圧と Q 値

周波数測定の際には締め付けによる変形を最小限にとどめながらも、端板との合わせ面における高周波の接触を確保する必要がある。本モデルにおける面圧と Q 値の関連、また面粗度との関係についての測定結果を図 4.5 に示す。

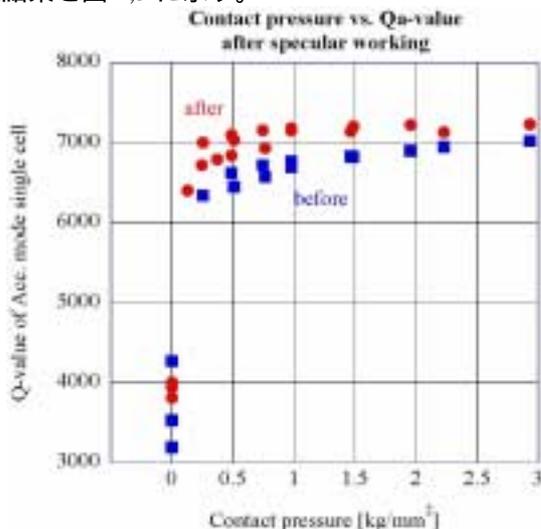


図 4 面圧と加速セル Q 値

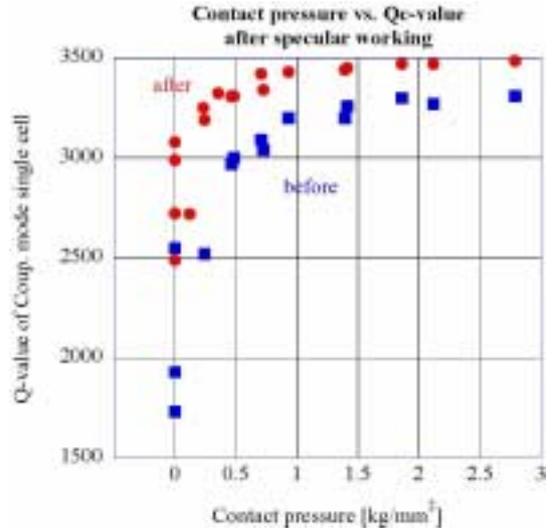


図 5 面圧と結合セル Q 値

図 4,5 では端面を鏡面加工する前後での比較を行っている。鏡面加工前の仕上げは普通旋盤で面粗度 3.2S で加工を行っている。面粗度について見ると、普通旋盤(3.2S)仕上げでは約 $2\text{kg}/\text{mm}^2$ 必要であった面圧は、鏡面加工では加速セル側では約 $0.5\text{kg}/\text{mm}^2$ 、結合セル側でも約 $1\text{kg}/\text{mm}^2$ 程度で収束している。全体セルの組立時には両接合面が交互に現れるため、実際にはこれよりもやや大きい面圧が必要になると思われる。

加速セル側と結合セル側の収束傾向を見ると、両セルとも合わせ面の全面積は大きく変わらないにも関わらず、結合セル側の方の収束が遅い。これは結合セル側の接合面が、セルの内周、外周と二カ所にあるためであると考えている。結合セル側端板の接触については十分配慮する必要がある。また結合セル側については、個体差による Q のばらつきが加速セル側に比べて大きい傾向が見られた(3.4 節参照)。

今後の修正加工の工程において、端面の鏡面仕上げを行って、接触のばらつきを抑える工夫が必要であると考えている。

3.3 解析との比較

SUPERFISH による解析値と測定結果を以下の表にまとめて示す。いずれもシングルセルでの測定値であり、測定環境の補正を行って解析条件に換算したものである。

Low-beta での周波数が加速セル(fa)、結合セル(fc)ともに低い原因は、モデル自身の接触面の修正加工

	測定値 (MHz)	解析値 SUPER FISH	差 (MHz)
Low-beta(0.5581) fa	2004.4	2005.9	-1.5
Low-beta(0.5581) fc	2156.9	2162.4	-5.5
High-beta(0.5624) fa	1998.1	1999.0	-0.9
High-beta(0.5624) fc	2148.8	2147.2	+1.6

による削り分の影響と考えている。

先に述べたように周波数は接触面圧によって変化する。ここでは測定結果に線形近似の fitting を行って、面圧ゼロでの周波数に外挿して評価している。どの面圧で評価するかによって数百 kHz の測定誤差がある。今後応力解析などを行って、変形の状況などをより詳細に評価し、高周波解析との比較に用いる測定値の評価手順を検証していく必要がある。

3.4 スロット付きセルの測定

スロット付きのセルは各 を 28 枚ずつ製作した。通常旋盤レベルでの加工誤差が、高周波的にどのように出るかをモデル単体の測定で評価した。境界条件としては、加速セル、結合セルとも端板でショートされる形の 2 セル空洞と考えればよい。最低次のモードから 3 つのモード($f_1 \sim f_3$)を測定している。最低次、 f_1, f_2 は主として加速セル側が励起するモード、 f_3 が結合セル側も励起するモードである。図 6 は High-beta のモデル 28 枚について、測定された周波数がどのように分布をしているかをヒストグラムの形にまとめたものである。

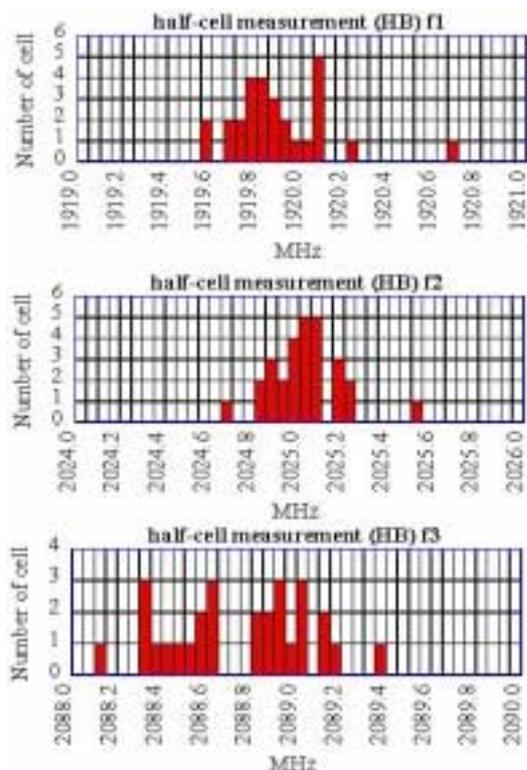


図 6 周波数測定値の度数分布

f_1, f_2 とも ± 200 kHz 程度の範囲に分布しているのに対して、 f_3 では ± 600 kHz 程度に分散が大きくなっている。スロット付きのモデルでは f_3 のモードに先に 3.2 節で述べた結合セル側の端板の影響が表れていると理解できる。

実機では最終仕上げの超精密加工により、ばらつきは低減できると期待される。これらのデータを各

種解析等と併せて、実機での周波数範囲の目標値を工程、作業量等を考慮しながら検討していくことになる。

本モデルでは ± 100 kHz を目標に周波数調整を行う予定である。

4. 等寸アルミモデル

アルミモデルの測定をベースにして、バンチャー製作の試作段階としてアルミモデルの試作、併せて高周波測定をすすめている。

高周波測定の観点からは、等寸大となることでモデル自身と端板の平面度確保が技術的な課題である。現状は普通旋盤による試作ということもあり、1/2 モデルで得られていたような精度に至っていない。結果、結合セル側での高周波漏れ、締め付け時の Q 値の劣化など 1/2 モデルの同様の問題点が発生した。これらの問題は研磨処理などによって対応し、多少の改善が確認されたが、今後、超精密加工まで含めた条件の下で、高周波測定に必要な精度等を検証していきたい。

実機サイズの測定では、端板固定の方法など単にスケールアップだけではうまく機能しない可能性がある。またハンドリングなど、作業効率、測定の安定性等まで考慮した測定治具類の開発が必要である。

5. まとめ

1/2 アルミモデルについて、単体での高周波測定を行い、基本的な測定手順と製作上の注意点、必要精度等について確認を行った。今後はこれらのセルを組み合わせた状態での周波数調整を進めて行く予定である。

また試切削を進めている実機についても、各種高周波測定の問題点がいくつか明らかになってきている。これら問題点を解決しながら、実機製作時の周波数測定と調整手順を検討していく必要がある。

謝辞

1/2 アルミモデルの製作に関しては石川島播磨重工業(株)栄様、青木様、他多くの方々のご協力を頂きました。この場を借りて御礼申し上げます。バンチャーの試切削モデルに関しては三菱重工業(株)菅野様、高橋様、岡田様、他多くの方々のご協力を頂きました。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 伊藤 崇,他 in these proceedings.
- [2] V. V. Paromov, \times The Annular Coupled Structure Optimization for JAERI/KEK Joint Project for High Intensity Proton Accelerators \boxtimes , KEK Report 2001-14 (2001)
- [3] 池上 雅紀,他, in these proceedings
- [4] 林崎 託規,他, in these proceedings