

J-PARC ACS用ブリッジカプラの開発

青 寛幸¹、秋川藤志

^{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

概要

J-PARC用のACS (Annular Coupled Structure) 型加速空洞のブリッジカプラの設計開発の状況について報告する。実機設計と平行して、1/2スケールの導波管と空洞の接続部の解析を行い、製作したモデルの測定値との比較を行った。

1. はじめに

ACS空洞において、導波管はdisk-load型のマルチセルブリッジカプラ(5または9セル)に接続される[1]。導波管との整合は空洞間とのアイリス径によって行う。この部分の設計を含めて、ブリッジ空洞全体の設計を最適化する必要がある。まず、その第一段階として、この導波管接合部の検討を行った。

この部分は、製作時に仮組や空洞組立後に追加工、調整を行うことが煩雑であり難しい。これは、

1) 各部品がロウ付けで組み立てられる。アイリス部の部品は積み重ねてスタックできるセルと異なり、仮組の治具等、方法が煩雑である、

2) 該当セルには周波数チューナーやモニターポートが取り付けられ、測定や測定後の再加工にはこれらの部品（もしくは高周波的な代用品）の取り付け、取り外しが必要、

3) 接合後の再切削には、工作機械への取り付け、および切削後の洗浄等の工数面の負担が大きい、等々の理由による。

いずれにせよ、本来は空洞全体を組立後に整合をとる作業を行うべきである。しかし、ブリッジ部と加速空洞部の脱着等の作業内容を考慮すると、高周波測定と調整作業を繰り返して最適形状を得ることは大変な作業量である。これらの調整作業は、特に本計画のような量産時には現実的でない。

また、設計面の問題では、各空洞のbetaでブリッジカプラ側のセル長が異なるため、各betaに最適化が必要である。また空洞内径の決定に際しては、導波管側への開口部による共振周波数の低下を、ある程度、補正しておく必要がある。これらの大部分をモデルによる実測で確認することも、また現実的でない。

これらの問題点を回避するためにも、解析で高周波的な特性を精度よく把握することが必要である。そのためには早い段階で、解析とモデル測定との結果を比較し、解析の信頼性を確認しておくことが不可欠である。昨年末以降、アルミモデル製作、測定作業を、実機の詳細設計と並行して行ってきた。次

節以降これらの現状をまとめて報告する。

2. 解析

三次元解析には汎用電磁場解析コードであるAnsoft HFSSを用いた。導波管と、アイリス部、中央の1セルの形状を入力し、導波管側からみた、S11を求めた。解析条件は、次節で述べる実際の測定と全く同様である。解析結果から Q_0 、 Q_{ext} を求めた。

また、開口部を持たない空洞1セルでの Q_0 の評価はSUPERFISHでもあわせて解析を行い、妥当性を検証した。

いずれの場合もモデル測定を前提に、アルミ材の電気伝導度を用いている。モデルサイズは実機972MHzの2倍、1944MHz ($\pi/2$ -mode)、導波管としてWRJ-2を選択した。初期の解析形状として中央部のセルのみとした(図1参照)。このモデルでは境界条件が本来の $\pi/2$ -modeと異なるため、共振周波数は1720MHz付近になっている。

アイリス部は長方形で短辺32.5mm、長辺45, 42.5, 40, 37.5mmの四種類とした。角部はR4を設けている。導波管からは一旦、短辺32.5mm、長辺60mmの凹部を経て、アイリスへとつながっている。

セル中心から導波管端面までは85mmである。これはアルミモデルでの組立性、実機では冷却水路の確保等のために必要となるアイリス周りのスペースを考慮して決定したものである。

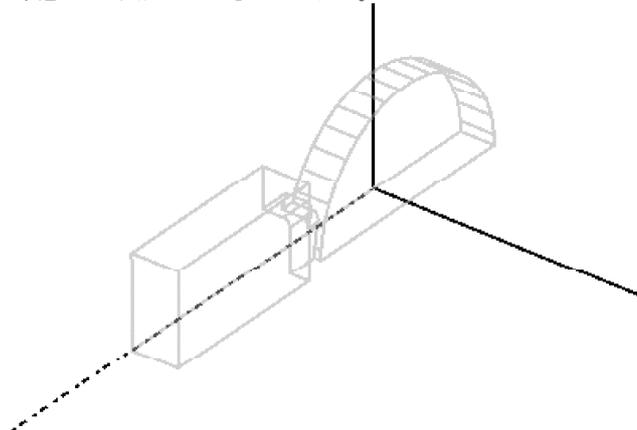


図1 解析モデル：対称性より1/4形状である

求められたパラメータ(S11)の一例を図2に示す。この結果から $R+jX$ の複素インピーダンスにおいて、S11の絶対値が最小となるときに $X=0$ となるように位

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

相オフセットを加え、 $R=X$ および $X=1$ となる周波数から Q_0 、 Q_{ext} を算出した。それぞれの開口寸法について、解析から求めた Q_0 、 Q_{ext} は次節で測定結果と併せて示す。

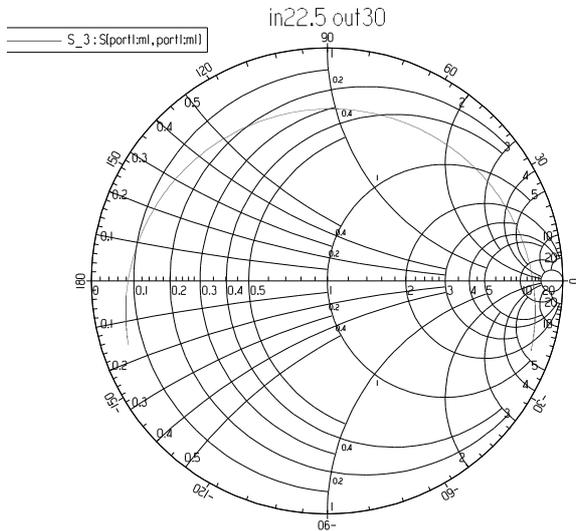


図2 S11解析結果例(開口部45×37.5mm)

3. 測定

3.1 単セル測定

製作したアルミセルの表面仕上げを確認するため、アイリスの無い単セル空洞について測定を行った。解析値 $f=1735.9\text{MHz}$, $Q_0=8100$ に対して測定値 $f=1735.1\text{MHz}$, $Q_0=7500$ と Q 値で解析値の92%程度が達成されていることを確認した。

3.2 結合度測定

解析した4通りの開口部形状について、導波管側にネットワークアナライザを接続し、S11の測定を行った。また、開口37.5mmのモデルについては、S12測定でQLの測定を併せておこない、二通りの素測定結果について比較検討を行った。

測定時の校正については、N-導波管変換器の手前のN型コネクタ端部で行っている。従って、変換器の反射分(SWR1.2程度)は空洞側に込みで測定されており、その分の誤差を今回の測定では考慮する必要がある。このとき、変換器の導波管端面での短絡時のS11で規格化したケースと比較した場合で、誤差はSWRで数%以内の差であった。

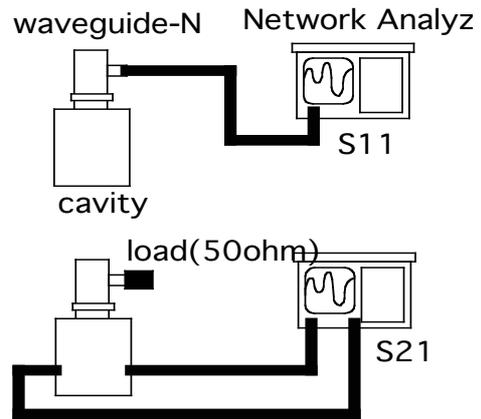


図3 測定セットアップ

解析値と測定値の比較を表1にまとめて示す。

開口寸法 (mm)		測定値	解析値
45	Q0	7715	7781
	Qext	1009	1188
	f (MHz)	1712.84	1711.88
	SWR	7.70	6.59
42.5	Q0	6500	7621
	Qext	1361	1598
	f (MHz)	1715.86	1714.78
	SWR	4.79	4.92
40	Q0	7083	7632
	Qext	1863	2146
	f (MHz)	1718.46	1717.33
	SWR	3.81	3.66
37.5	Q0	7540	7816
	Qext	2619	3098
	f (MHz)	1720.79	1719.70
	SWR	2.89	2.54

表1 S11測定、解析から求めた各パラメータ

周波数については湿度、温度条件等、正確に補正を加える必要があるが、表1に示したものは無補正の値を示した。本測定ではこの点の比較については重要視していないため、あくまで参考値である。

Q_{ext} についてプロットしたものを図4に示す。解析と測定値の比を見てみるとほぼ0.85で一定である。従って表面抵抗分による Q_{ext} の低下分を考慮すれば、解析値は形状変化に対してもほぼ妥当な値を与えているといえる。

導波管部分のパーツは各モデルとも開口部(セル部)を除き、各測定で共通して用いられているものである。従って、モデル間での形状、および表面の高周波特性の差は、開口部寸法以外に無いと考えてよい。

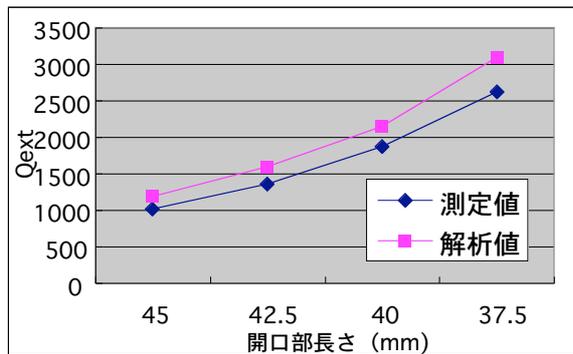


図4 Qextの測定値と解析値の比較

一方、Q0については前節でSUPERFISHに対して92%と述べたが、上記の各場合において、解析値との間で85-99%の幅で変動し、平均93%であった。この変動は組立時のモデル側の端板やセル部の表面、および各部のコンタクト等の影響ではないかと考えている。

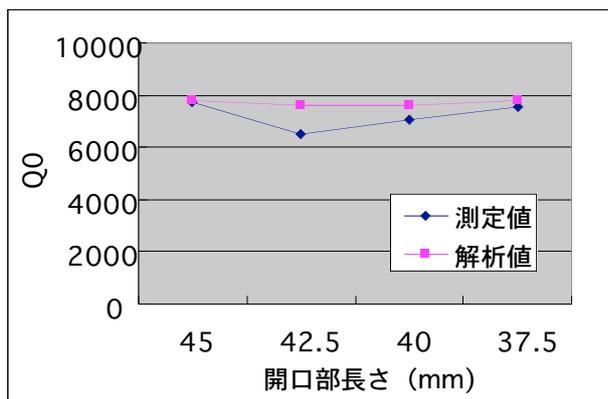


図5 Q0の測定値と解析値の比較

次にS21測定の結果を表2に示す。セル側に二本のアンテナを挿入し、透過パワーの反値幅からQLを測定する。導波管側はN型との変換器を介して50Ωで終端する。Q0が別途測定で確認できているとすると、Qextは $1/QL=1/Q0+1/Qext$ の関係式から求められる。このとき導波管側の長さを36mm、72mmとオフセットさせ、QLの変化を見た。

オフセット(mm)	QL	Qext
0	1885	2477
36	2213	3132
72	2337	3386

表2 S21測定で得たQLとS11測定からQ0=7540として算出したQext

この場合は導波管側の長さを変化させることによりQLの値が変化している。これは、導波管側からの

S11測定では、明確には見えなかった影響である。この導波管長さの影響については、N-導波管変換器による反射と、変換器から空洞までの距離が管内波長(約300mm)に比べて十分長くない点(72mmオフセットでも導波管長さが約100mm)が、現時点で問題として考えられる。今後、延長導波管や導波管ロード等の整備を行い、校正方法の見直しなども含めて、より精度を高めた測定を行っていく必要がある。

4. まとめ

導波管との接合部分について、まず1セル形状の場合の解析とモデル測定を行い、解析の妥当性と測定方法等を測定時の問題点なども含めて確認することができた。解析面ではこれらの手法を、現在製作を進めているバンチャー空洞用の設計に反映させていく予定である。マルチセルの場合の解析、ブリッジセルに取り付けられる周波数チューナーの影響などについても、引き続き解析を行う予定である。本試験に用いたハーフスケールモデルは、従来からR&Dを進めているモデルとの互換性を考慮して製作されている。ブリッジ全体での $\pi/2$ -modeに対するカップリング、あるいは加速空洞部との組み合わせ試験についても順次準備を進め、測定をしたいと考えている。

実際の実機製作に向けて検討すべき課題もまだ多い。ブリッジ部分の段階的な測定(加速管としての全体組立前の測定)を行う必要がある。その際、製作工程を考慮して、

1) どのような測定が可能か、2) それによって十分な性能が確認できるか、3) 測定にはどのような測定器具が必要か、等々である。

972MHzでの導波管(WR975)関係の測定器具の整備にも新規となるとある程度の時間を要する。また導波管等と異なり、境界条件の異なるセルの測定では、運転周波数の上下である程度広い範囲の周波数帯域に対応するものが必要である。現状準備できているものと、それらで実現できる測定範囲、精度等を含めて検討し、実機製作と測定準備を進めていかなくてはならないと考えている。

参考文献

- [1] Y. Morozumi, et al., "Multi-Cavity Bridge Coupler" Proceedings of the Linear Accelerator Conference, Albuquerque, NM, U.S.A. 1990

