

Research and Development on Annular-Coupled Structure at KEK

Tatsuya KAGEYAMA, Yoshishige YAMAZAKI and Kazuo YOSHINO

National Laboratory for High Energy Physics, KEK

ABSTRACT

A new Annular-Coupled Structure (ACS) operated in the $\pi/2$ mode has been developed for the high- β coupled-cell accelerating structure of the JHP 1GeV proton linear accelerator. In this research and development, we have found that the configuration (including number and cell-to-cell relative orientation) of coupling slots, through which adjacent accelerating and coupling cells are magnetically coupled, is the most important factor to put ACS to practical use.

ACS空洞の開発

はじめに

現在KEKにおいては大型ハドロン計画1GeV陽子線形加速器高ベータ部の $\pi/2$ モード Coupled-Cell型加速構造 (周波数 1296MHz) の有力な候補としてACS (Annular-Coupled Structure) 型加速空洞の開発を進めている。現在までに陽子リニアックの Coupled-Cell 型加速構造として実用化されたものとしてはSCS(Side-Coupled Structure)型空洞が知られている。SCS型空洞は円筒型の結合空洞を加速空洞に横付けした構造をしている。一方、ACS型空洞は図1のように加速空洞の周囲に環状の結合空洞を配置した構造を有している。環状型の空洞は円筒型の空洞とは異なる高周波特性を有しており、これが現在まで色々とACSに関する研究が行われてきたにもかかわらず、未だ実用化に至っていない原因の一つである。

図2に円筒型空洞と環状型空洞のモードスペクトラム (計算値) を示した。円筒の形状は直径 17.7 cm、長さ5 cmで、環状型空洞の形状は外形 40 cm、内径 17 cm、長さ5 cmであり、それぞれのTM010モードの周波数を 1300 MHzに合わせてある。この図から分かるように環状型の空洞は円筒型の空洞に比べて、TM010モードの近傍にTM110(dipole), TM210(quadrupole)などの高次モードを有している。以下の節では、これらの高次モードがACS型空洞の加速モードにどのような悪影響を与えるかについて過去の研究結果を簡単にまとめる形で述べる。次にどのようにすればこれらの問題点を克服することが可能であるかについて現在KEKで行なわれている研究開発を中心に述べる。

2スロットACSの問題点

過去において研究されてきたACSは加速空洞と結合空洞を磁氣的に結合させるためのカップリングスロットが2個のものである。2スロットACSの問題点について今までの研究結果に基づいて以下に箇条書き的にまとめた。(参考文献 [1], [2])

(1) セグメント間のカップリングスロットの相対的な向きをそろえた場合、スロットをあけたことによるTM110モードの周波数の下がり方がTM010モードのそれに比べて大きく、その結果としてTM010モードとTM110モードの周波数の差が小さくなり、TM010モードのパスバンドにTM110が入ってくる。

(2) セグメント間のカップリングスロットの相対的な向きを交互に90度ずらした場合、加速モードにおいて結合空洞中にTM210モードが励起される。そのために加速モードのシャントインピーダンスが劣化する。

(3) 2個のカップリングスロットによってある程度のカップリングを稼ごうとする場合、スロットの間口(弧長)を大きくする。しかしながら磁気的なカップリングスロットの場合、間口を広げていくとスロットの遮断周波数が下がってきて加速モードの周波数に近づいてくる。こうなるともはや加速空洞と結合空洞が磁気的に結合しているというカップルドセル的な描像は成り立たなくなる。

上記(1)と(2)の項目についてはKEKにおいても3次元電磁界解析コードMAFIAによって計算の上で確認された。また(3)の項目についてはMAFIAを使った上記の計算作業の過程で発見された。

KEKにおいては、2スロットACSに関する過去の研究結果、及び諸先生方よりの御助言を踏まえて、ACSのカップリングスロットの数を4個、8個と増やすことによって空洞の形状の軸対称性を回復する方向に持っていけばACS空洞の諸問題は解決できるであろうという定性的予測のもとにACSに関する研究開発を進めることになった。この定性的予測には、カップリングスロットを井戸型ポテンシャルにみたくて量子力学の摂動法を応用する手法が大いに役立った。研究の進め方としてはカップリング5%のACS空洞を一つの目標として、まず第一段階としてMAFIAを使用して上記の定性的予測を計算の上で定量的に確認する作業を行ない、次に第二段階として1/2スケールのモデル空洞を製作して測定を行った。

計算及び測定結果

4スロットACS(スロットの相対的位置は同方向)に関するMAFIAによる計算結果を図3と図4に示す。図3はスロット一つあたりの弧長とカップリングの関係を、図4はACS空洞のTM010、TM110、及びTM210の各モードの周波数の変化をカップリングを横軸にとってプロットしたものである。又比較のために2スロットACS(スロットの相対的位置は同方向)についての図4と同様のグラフを図5に示した。図4と図5を比較してわかるように、2スロットACSの場合にはカップリングが3.5%から上ではTM110モードがTM010のパスバンドに入って来ている。それに対して4スロットACSの場合には、カップリング5%でもまだTM110モードとTM010のパスバンドは離れている。(図4、図5における横軸のカップリングとはTM010の π モードと0モードの周波数の差をとって形式的に定義したものである。)図3からはカップリングがスロットの弧長の3乗に比例して増加していることがわかる。このことはスロットの数を4、6、8個と増やしていった場合、同じ大きさのカップリングをとるとするとスロットの弧長の総和(スロットの弧長 \times スロット数)は増加することを示している。機械的な強度、冷却の問題から、スロットの弧長の総和には上限があり(180度程度)、スロット数を増やすにしてもそれには限りがある。

モデル空洞については、4スロットと8スロットのACS空洞の1/2スケールモデルを無酸素銅より切削加工して製作した。4スロットACSについてはスロット弧長が30、36、40及び42度の4種類、8スロットACSについては20、25、及び30度の3種類のモデルを製作した。また空洞の内壁表面については酸洗処理による化学研磨を行ない、表面の仕上げ具合によるQ値の劣化を-4~-5%に抑えた。4スロット、8スロットACSともスロットの相対的位置を互い違いにした場合の測定結果を図6、7、8、及び9に示す。図6から分かるように4スロットの場合カップリング5%においてTM110とTM010のパスバンドは十分分離している。また図7は4スロットACSのカップリング

はスロットの弧長の3.5乗に比例して増加することを示している。スロットによるQ値の劣化については4スロットACSの場合、カップリング4.8%のときで約-20%であった。一方、図8から分かるように8スロットACSのカップリングに対する各モードの周波数の変化の様子は4スロットの場合と大差はない。ただし、8スロットの場合カップリングを5%にするためにはスロット一つあたりの弧長を34度程度にしなければならないことを図9は示している。これは全周の3/4を肉抜きすることになり、機械的強度や冷却の観点から現実的ではない。この測定結果からするとACS空洞の軸対称性を回復するには4スロット互い違いの形状で十分であることが分かる。

今後はhigh-powerモデルの製作を目指して、モデル空洞の詳細な高周波特性の測定を進めていく予定である。またMAFIAを使った計算においても3次元のメッシュをより細かくして計算精度を上げていきたい。

参考文献

- [1] R.A. Hoffswell and R.M. Laszewski, IEEE Trans. on Nucl. Sci. NS-30, 3588 (1983)
- [2] R.A. Jameson et al., 'Radio-Frequency Structure Development for the Los Alamos/NBS Racetrack Microtron', LA-UR-83-95 (1983)

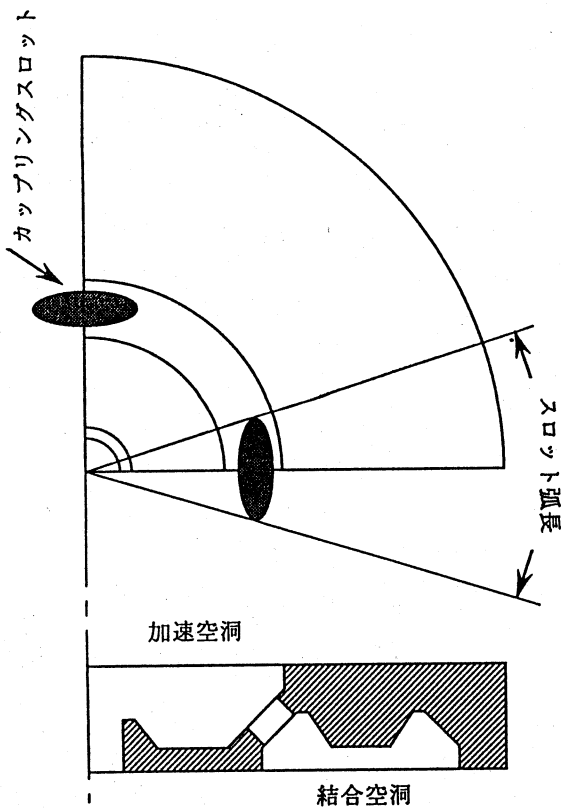


図1 4-slot ACS

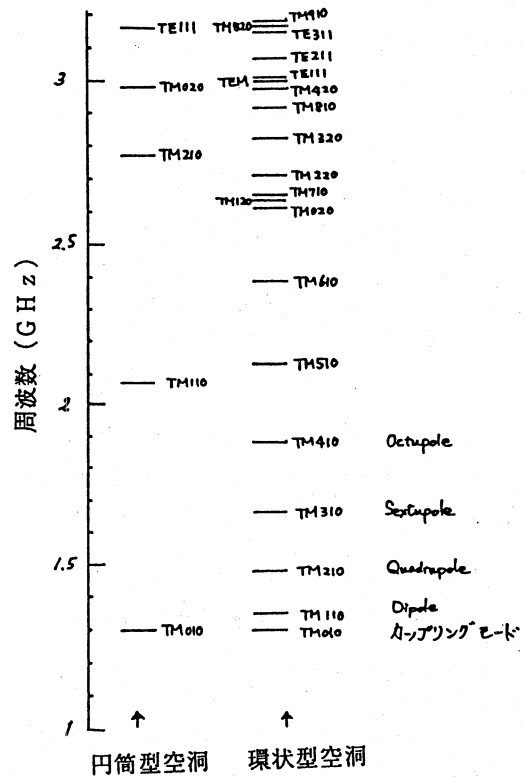


図2 円筒型空洞と環状型空洞のモードスペクトラム

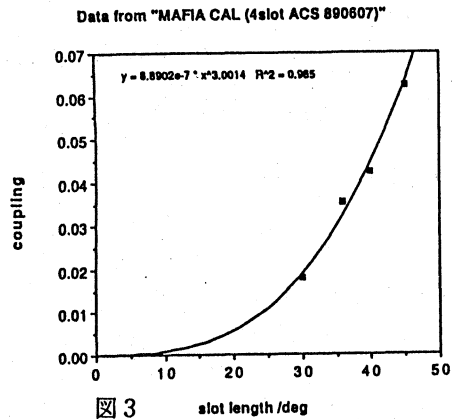


図3 カップリングとスロット弧長の関係 (4-slot ACS 計算値)

図4 カップリングに対する各モードの周波数変化 (4-slot ACS 計算値)

図5 カップリングに対する各モードの周波数変化 (2-slot ACS 計算値)

図6 カップリングに対する各モードの周波数変化 (4-slot ACS 測定値)

図7 カップリングとスロット弧長の関係 (4-slot ACS 測定値)

図8 カップリングに対する各モードの周波数変化 (8-slot ACS 測定値)

図9 カップリングとスロット弧長の関係 (8-slot ACS 測定値)

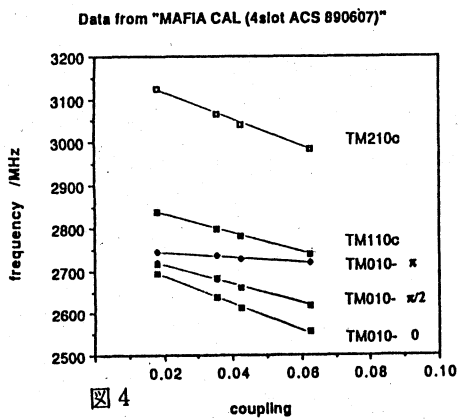


図4

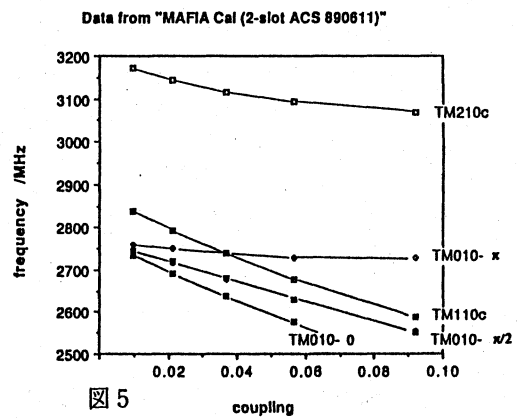


図5

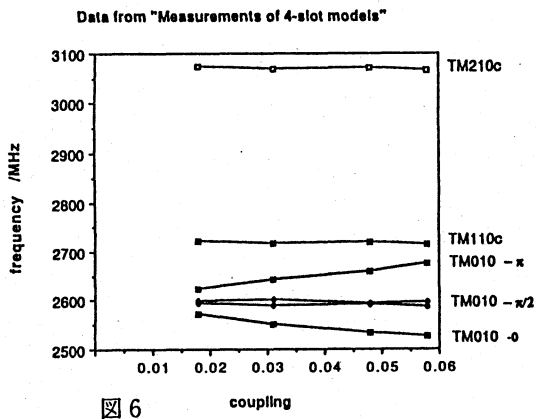


図6

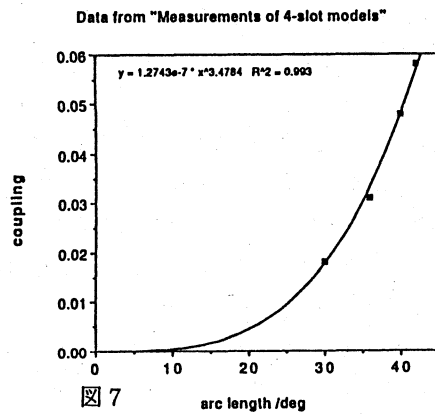


図7

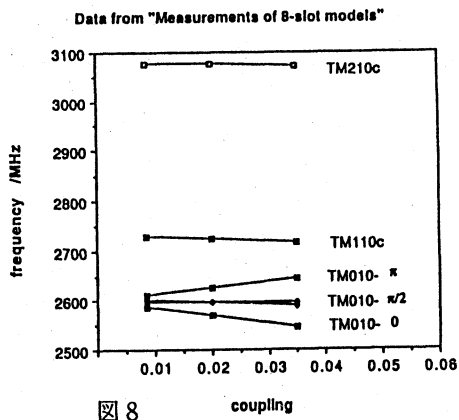


図8

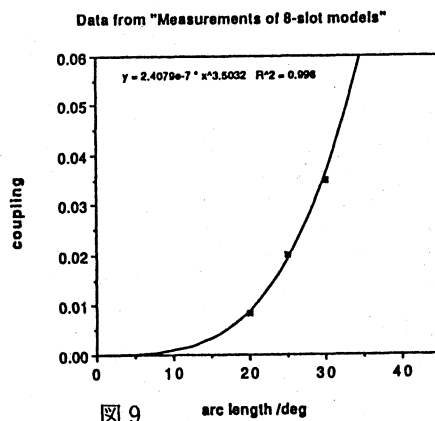


図9