

## Development of Annular Coupled Structure

T. Kageyama, Y. Morozumi, K. Yoshino and Y. Yamazaki  
 KEK, National Laboratory for High Energy Physics  
 Oho 1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken 305, Japan

**ABSTRACT** A  $\pi/2$ -mode standing-wave linac ( $f=1.296\text{GHz}$ ) of an Annular Coupled Structure (ACS) has been developed for the 1-GeV proton linac of the Japanese Hadron Project (JHP). This ACS has four coupling slots between the accelerating and coupling cells in order to suppress higher order mode mixing with the  $\pi/2$  coupling mode. High- $\beta$  ( $\beta=v/c=0.78$ ) and low- $\beta$  (0.52) prototypes were constructed and tested up to each design RF power. Concerning the effect of the coupling slots on the fields of a coupled-cavity linac, it was found that the slot arrangement of the side-coupled structure (SCS) tilts the accelerating field from the beam axis. On the other hand, the four-slot arrangement of the ACS gives an almost axially symmetric accelerating field to the beam.

### ACS型空洞の開発

#### 1. 序

ACS型空洞<sup>1)</sup>は、加速セルと環状の結合セルが交互に配置された構造をしている(図1参照)。環状の結合セルは、 $\pi/2$ 結合モードとなる基本モードのすぐ上に、2重極および4重極の高次モードを有している。これによって、結合モードは結合セル形状の軸対称性の破れに起因する高次モードの混入を受けやすくなっている。さらに、加速セルへの磁気結合孔の存在によって、結合セルの軸対称性は不可避免的に壊される。このACS型空洞の特性がその実用化を阻んできた要因である<sup>2, 3, 4)</sup>。

小さな磁気結合孔(以下、スロットと略)を軸周りに均等に配置する手法は、結合モードと高次モードの混合を禁止するひとつの有力な方法と考えられる。この可能性を実験で確認するために、4スロット、および8スロットのACS型空洞のコールド・モデルが製作され、それらの高周波特性が測定された。これらの実験から以下の事実が確認された<sup>4)</sup>：

- ・ 4スロット構造によって、結合モードへの高次モードの混合は十分に抑制されされる。
- ・ 8個にスロットを増やしても、先の4スロット構造に比べて顕著な高周波特性の改善はみられない。
- ・ 同じ結合度を得ようとする場合、磁気結合孔のために肉抜きされる部分の全面積は、8スロット構造の方が4スロット構造よりも広くなる。

以上の結果から、加速構造の機械的強度、および冷却に際しての熱伝達などを考慮した場合、軸周り90度おきに4個のスロットを配置した4スロットACSがひとつの現実的な構造と考えられる。

次に、大電力高周波投入時の特性を調べるために、高 $\beta$ 型および低 $\beta$ 型の電力試験モデルが製作された。高 $\beta$ 型モデルとしては、セグメント間のスロットの相対的な位置関係が異なる2種類のモデルが製作された。ひとつは、セグメント毎にスロットの位置を45度ずつ軸周りに回転させた互い違い構造をしている。もう一方は、すべてのセグメントのスロットの方向を揃え、加速セル及び結合セルそれぞれの中央の面について鏡面対称にス

ロットを配置した構造をしている。両者とも、定格のレベルまで問題なく高周波電力を投入することができた。性能的には、スロットの面積が同じ場合、互い違い型の方が同方向型よりも大きな結合度と高いシャント・インピーダンスを与えることがわかった。そこで、低 $\beta$ 型としては、スロット互い違い型モデルのみが製作された。高 $\beta$ 型試験モデルの詳細については文献5、6を参照のこと。

#### 2. 電力試験空洞

##### 2.1 構造

現在までに合計4台の電力試験空洞が製作され、試験が行われた。その内訳は次のとおりである。高 $\beta$ 型については、スロット互い違い型5セル・タンクが2台、スロット同方向型5セル・タンクが1台。低 $\beta$ 型については、スロット互い違い型7セル・タンクが1台である。ここでのセル数は加速セルの個数のことである。表1に、高 $\beta$ 型(互い違いスロット配置)、及び低 $\beta$ 型それぞれの定格値、および測定によって得られた種々の特性値を示す。

それぞれのモデルにおいて、加速セルの形状は高いシャント・インピーダンスが得られるようにノーズコーン間のギャップ長などが最適化されている。また、結合

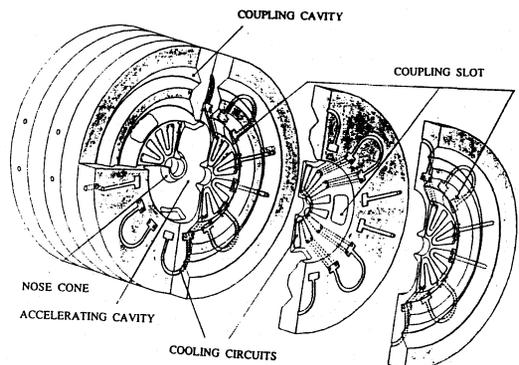


図1 4スロットACS型空洞の構造図。スロットの配置はセグメントごとに45度ずつ回転して互い違いにしてある。

セルについては、リッチ型導波管のリングのような形状に設計されている(図1参照)。これは、タンクの外径をできるだけ小さくするためである。空洞の部品は無酸素銅材から精密旋盤およびNCマシニング・センタ等を使って削りだされた。そして、ろうづけ前に、すべての加速セルと結合セルは、調整削りによって、設計周波数値に対して±100 kHzの精度で合わせ込まれた。すべての切削加工、及び周波数測定が完了した後、空洞部品は真空ろうづけにて接合され、タンクとなる。

図2に、電力試験のためのタンク構成の一例を示す。図中、左側は低β型7セル・タンク、右側は高β型5セル・タンクである。両タンクはブリッジ・カプラーにて電磁的に結合されている。ブリッジ・カプラーは、5セルのディスク・ロード型構造で、中央部に高周波入力孔がある<sup>7)</sup>。

## 2.2 高周波特性

図3は、ビード測定によって得られた $\pi/2$ 加速モードの軸上電場分布である。測定したタンクの構成は図2のものである。この電場分布は、ろうづけ後に周波数を再調整することなく得られたものである。低β型、および高β型タンクのそれぞれにおいて、その電場分布は両端のセルを除けば±0.5%の範囲で様である。それぞれのタンクにおいて、両端のセルの電場が他のセルに比べて5%程度高いのは、終端およびブリッジ・カプラー連結部の電氣的境界条件がまだ完全に $\pi/2$ モードにチューニングされていないことを示していると考えられる。

測定によって得られた特性値およびその理論値(SUPERFISHによる計算値)を表1にまとめておく。高β型タンクの場合、セル間の結合度は5.6%であった。シャント・インピーダンスについては、その理論値に対する劣化は22%であった。その内訳は、空洞壁の表面状態に起因する劣化が4%で、残りの18%がスロットによるものである。低β型については、結合度は5.2%、シャント・インピーダンスの劣化は19%で、そのうち15%がスロットによるものである。

## 2.3 電力試験

高β型、低β型タンクの合計4台について、ブリッジ・カプラーで連結される2台のタンクの組み合わせを変えて電力試験を行った。高周波源としては、THOMSON-CSF社(仏)製のパルス・クライストロンTH2104Aを使用した。電力試験においては、最初の高周波電力投入は0.1%(100 $\mu$ s×10Hz)という低いdutyで定格電力尖頭値の1.5~2倍まで行い、その後、段階的に2.75%(550 $\mu$ s×50Hz)までdutyを上げていった。最終的に、高β型、低β型とも、2.75%のdutyでそれぞれの定格電力尖頭値の1.5倍のレベルまでの電力試験に問題なく合格した。

表1 電力試験空洞のパラメータ

frequency	1.296 GHz	
duty factor	3 %	
pulse width	600 $\mu$ s	
repetition rate	50 Hz	
$\beta = v/c$	低β型	高β型
$E_0 T$	0.52	0.78
RF peak power	3.0 MV/m	3.5 MV/m
coupling constant	18 kW/cell	26 kW/cell
Q	0.052 measured	0.056 measured
$R(=ZT^2)$ M $\Omega$ /m	$1.5 \times 10^4 / 1.8 \times 10^4$	$1.9 \times 10^4 / 2.4 \times 10^4$
R/Q $\Omega$ /cell	30 / 37	42 / 54
	120 / 124	201 / 205
	measured / SuperFish	measured / SuperFish

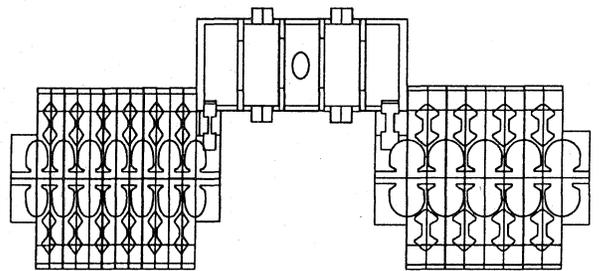


図2 高電力試験のタンク構成の一例。低β型7セル・タンク(左側)と高β型5セル・タンク(右側)がブリッジ・カプラーにて連結されている。

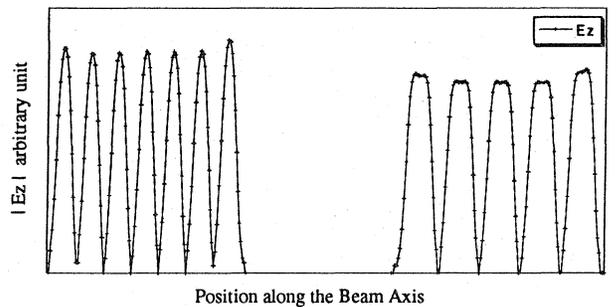


図3  $\pi/2$ 加速モードの軸上電場分布。図2のタンクの組み合わせに対してビード摂動法で測定。

## 3. 結合孔による加速電場の歪み

通常、加速セル形状の軸対称性は磁気結合孔(スロット)の存在によって壊される。その際、加速モードに高次モードが混入し、加速電場が歪んでしまう。歪みのある加速電場はビームに悪影響を与える可能性があり、高輝度ビーム用の線形加速器にとって深刻な問題になっている<sup>8)</sup>。

我々は、Side-Coupled Structure (SCS)型<sup>9)</sup>、および4スロットACS型それぞれのスロット配置が加速モードの電磁場をどのように歪ませるかについてMAFIA

を使って解析した。その手順は：

- 1) まず、スロット付きの場合について、 $\pi/2$ 加速モードの電磁場分布を求める。
- 2) つぎに、同じ加速セル形状のシングル・セル空洞の電磁場分布を求める。
- 3) 最後に、前者の電磁場分布から後者のそれを差し引き、加速モードの歪み成分を取り出す。

以上の解析から、以下のことが判明した。まず、SCS型のスロット配置は加速電場をビーム軸に対して斜めに傾けることが、明らかになった。図4の例では、SCS型の加速セルには、左側の結合セルは下側から、右側の結合セルは上側から取付けられ、その配置は上下非対称である。この非対称性は、加速モードにTE111的なモードを混合するように作用し、その結果、加速電場の方向が傾いてしまう(図4参照)。

SCS空洞の傾いた加速電場によってビームが横方向にどの程度蹴られるかについて定量的に調べた結果を、図5に示す。解析は、 $\beta=0.52$ 及び $\beta=0.78$ のSCSについて行い、セルあたりの加速量に対する横方向のキック量の比をセル間の結合度を横軸にとってプロットした。結合度=0に対応する構造は完全軸対称なシングル・セル空洞である。図5より、例えば、 $\beta=0.78$ のSCSで結合度=0.05の場合、横方向へのキック量の比は $8 \times 10^{-3}$ である。これは無視できない大きさである。しかし、幸いなことにキックの方向は次の加速セルでは逆転するので、隣り合う二つの加速セルがあたえる横方向のキックは相殺されてしまう。しかしながら、このつり合いは、加速セル間の電場の大きさ、位相にずれがないとき、かつビーム粒子の運動が線形の範囲でのみ保証される微妙なものであることに注意しなければならない。

さて、図5において、 $\beta=0.78$ のSCSのキック量の比は $\beta=0.52$ のSCSのそれに比べて約5倍大きい。これは、加速セル長が長くなるほどTE111モードの混入が増加することを示している。この現象は、TE111モードの周波数と加速モードの周波数の関係から次のように説明される。TE111モードの周波数は加速セル長が長くなるにつれて下がってくる。図5の例の場合、 $\beta$ が0.52から0.78に増えると、TE111モードの周波数は3.3 GHzから2.3 GHzに下がり、加速モードの周波数(1.3 GHz)に近づく。摂動論によると、あるモードに対する他のモードの混入比は二つのモードの周波数の差が小さくなるほど大きくなる。

次に、4スロットACS型空洞の場合には、加速モードに8重極モードが混入することが判明した。しかし、8重極モードの電磁場成分はビーム軸近傍においては無視できるほど小さい。よって、ビームに作用する加速電場は歪みのないものである。図5より、4スロットACSの加速セルがビームに与える横方向のキック量はほとんど0である。

#### 4. まとめ

歪みのない加速電場を与え、かつ比較的高いシャント・インピーダンスを有する4スロットACS型空洞は、高輝度ビーム用の線形加速構造として、有力な候補のひとつである。次の開発計画としては、18セルのタンクの製作を予定している。

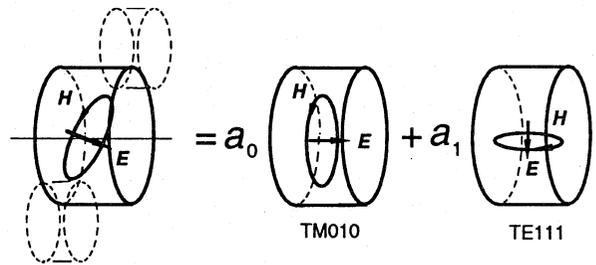


図4 SCS型空洞加速セルにおいて加速電場がTE111モードの混入によって傾くことを示す。

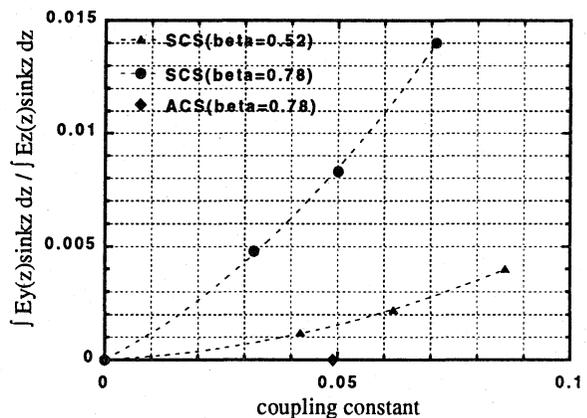


図5 二種類のSCS型空洞について、軸方向の加速量に対する横方向のキック量の比をセル間の結合度を横軸にとって示す。また、結合度=0.05のACS型空洞についても示す。

#### 参考文献

- [1] V.G. Andreev et al., Proc. 1972 Proton Linac Conf., pp. 114-118, 1972.
- [2] R.A. Hoffswell and R.M. Laszewski, IEEE Trans. on Nucl. Sci., Vol. 30, pp. 3588-3589, 1983.
- [3] R.K. Cooper et al., Preprint LA-UR-83-95, 1983.
- [4] T. Kageyama et al., Part. Accel., Vol. 32, pp. 33-38, 1990.
- [5] T. Kageyama et al., Proc. 1990 Linac Conf., Albuquerque, USA, LA-12004-C, pp. 150-152, 1990.
- [6] T. Kageyama et al., Proc. 1992 Linac Conf., Ottawa, Ontario, Canada, AECL-10728, Vol. 2, pp. 456-458, 1992.
- [7] Y. Morozumi et al., Proc. 1990 Linac Conf., Albuquerque, USA, LA-12004-C, pp. 153-155, 1990.
- [8] R.L. Sheffield et al., Nucl. Instr. and Meth., Vol. A318, pp. 282-289, 1992.
- [9] E.A. Knapp, B.C. Knapp, and J.M. Potter, Rev. Sci. Instr., Vol. 39, pp. 979-991, 1968.