

STUDY OF THE ACS LINAC WITH THE DIRECT RF-POWER SUPPLY SYSTEM

Fujio Naito^{*A)}, Hiroyuki Ao^{B)}, Hiroyuki Asano^{B)}, Nobuo Ouchi^{B)}, Koji Takata^{A)},
Kazuo Hasegawa^{B)}, Kouichiro Hirano^{B)}, Takatoshi Morishita^{B)}, Yoshishige Yamazaki^{A)},

^{A)} KEK, 1-1 Oho, Tsukuba-shi, 305-0801, JAPAN,

^{B)} JAEA, 2-4 Shirane, Shirakata, Toukai-mura, 319-1106, JAPAN

Abstract

The Annular Coupled Structure (ACS) cavity has been chosen as the linac structure of J-PARC to accelerate the H⁻ ion beam from 191 to 400 MeV. One ACS module is composed of two accelerating tanks which are coupled by the bridge cavity. As each of the tanks has 17 accelerating cells, one module has 34 accelerating cells. In this manner the bridge cavity simplifies the handling of the multi-tank system. While it is possible to feed the RF power into the each tanks directly without the bridge cavity. The later case requires the power divider and the phase shifter. However the total cost of them is probably less than that of the bridge cavity system. Furthermore the stability of the accelerating field in the tank is much stronger than the module with the bridge cavity since the practical cell number can be reduced. The present status of the study of the ACS linac with the direct rf-power supply system are described in the paper.

直接給電型 ACS 線形加速器の検討

1. 序

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) は高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と原子力科学研究機構 (JAEA) が共同で製作した大型加速器システムであり、既にビームの供用運転が開始されている。J-PARC 第一期計画に於ける線形加速器部の構成は上流から H⁻ イオン源、RFQ (3MeV)、DTL (50MeV)、SDTL (191MeV) と CCL (400MeV) である。ただし (諸事情により) CCL はまだ設置されてないので、現時点でのリニアック射出ビームのエネルギーは 181MeV となっている^[1]。

CCL の構造として J-PARC では環状結合型構造 (ACS) を使用する^[1]。34 加速セルを持つモジュールを 21 台設置して 400MeV までビームを加速する。更に SDTL と ACS の間にバンチャー空洞が 2 台と、ACS の下流にデバンチャー空洞が最低 1 台設置される予定である。

既にブリッジ空洞を使用した ACS 空洞の量産は開始されたが、量産化が決まる直前まで ACS のもう一つの構造としてブリッジ空洞を使用しない直接給電型 ACS も検討していた。量産が決定された時点で検討不十分だったため、この方式は採用できなかったが、その時点までで検討された結果を本稿にまとめておく。

2. ACS への RF 電力供給方式

2.1 ブリッジ空洞による加速タンク連結

J-PARC の ACS は 17 加速セルを単位加速タンクとし、2 タンクがブリッジ空洞で高周波的に連結され 1 モジュール (17x 2 = 34 加速セル、結合セルとブリッジセルも含めると計 77 セル) を成す。ブリッ

ジは図 1 に示すようにビーム軸から外れた場所で 2 タンクを接続している。そしてタンク間の軸上には収束用の Q ダブレットを設置する。ブリッジにより (RF 的には) 1 モジュールは 1 空洞と見なせるので、運転時の取り扱いは非常に単純化される。これがブリッジ空洞で複数のタンクを結合させた場合の最大の長所である。

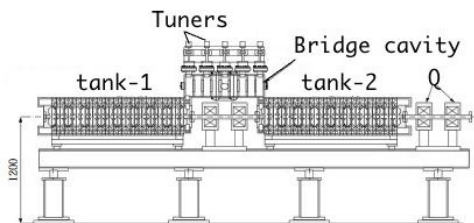


図 1: J-PARC/ACS の (初期) 基本構成

2.2 直接給電方式

一方、ブリッジ空洞を使わずにクライストロン出力を 2 分割し、2 タンクに独立に RF を直接供給する形式も考えられる (図 2)。利点としては、架台も各タンクで独立にできるため搬入や位置調整、磁石設置等の作業が容易になる事と、後述するように電場分布が摂動により強くなる事などが考えられる。もちろんクライストロン出力を 2 分割するため、RF 分割器と位相調整器等が追加が必要 (図 3^[2]) だが、ブリッジ空洞の製作費と比較すると全体として安価にできる可能性がある。

更にタンク中央の加速セルから RF を供給できれば、(ブリッジ空洞使用時の様にタンクの端部加速セルからパワーを供給するのに比べて) 給電ポイントから端部までのセル数が半減できるので、加速電場

* E-mail: fujio.naito@kek.jp

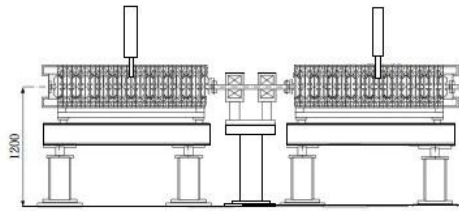


図 2: RF 直接給電型 ACS モジュールの構成

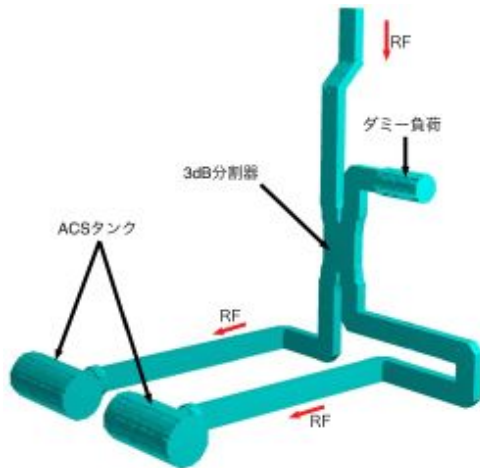


図 3: RF 直接給電型 ACS の立体回路構成 [2]

分布は各種摂動に対して強くなる。

等価回路計算 [3] の 1 例を (図 4) に示す。図の点は各タンクの加速セルが +0.2 MHz、結合セルが +0.6MHz 共振周波数 972MHz からずれている場合 (ブリッジ空洞は「ずれなし」とする) に、チューナーを使い全体の周波数を 972MHz に合わせた時の加速セルの電場分布を示している。(仮定した周波数のずれ量は実機で観測されたずれ量と同程度である [4]。) 青点で示された通常の ACS はブリッジ空洞の励起セル (セル番号 35,37,39,41,43) にチューナーがある。ブリッジなしの場合は各タンクの中央の加速セル (セル番号 17 と 61) にチューナーがある、とした。

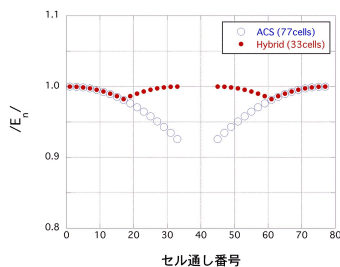


図 4: 加速セル電場分布 // 青: ブリッジ型 赤: 直接給電型

前述したように、セル数が少ないほど周波数ずれによる加速電場の傾きは小さくなる。図示した電場分布の幅は、直接給電方式ではブリッジ付きに比べ約 1/4 になっている。もしビーム設計からの要求が

DTL と同程度で $\pm \Delta E < 1\%$ すれば許容範囲であり、加速セル及び結合セルの周波数ずれの補正は不要となるため製作費用及び工期の低減に対する効果は大きい。

3. RF 給電部の構造

前節までで直接 RF 給電方式に予想される長短所を述べたが、次に構造を具体的に検討してみなければならない。

ACS 加速タンクに直接 RF 電力を給電する場合、タンク中央部の加速セルに RF 入力用ポートが必要となる。RF 入力部はアイリス結合としたいが ACS 加速セルの周囲は結合セルが囲んでいるため、そのままでは入力部用の空間を確保できない。そこで RF 入力ポートを持つ加速セルに隣接する結合セルを環状型ではなくサイドカップル型にして空間を作る。結合用アイリスと隣接する結合セルと加速セルを含むモデルの断面 (これは次節で説明するアルミモデルに相当する) を (図 5) に示す。中央の色違いの部分以外は通常の ACS セルである。アイリス寸法は加速セル数が 17 個の場合に想定されるピーク値 50mA のビームに対して十分な結合度を確保できる大きさを想定している。

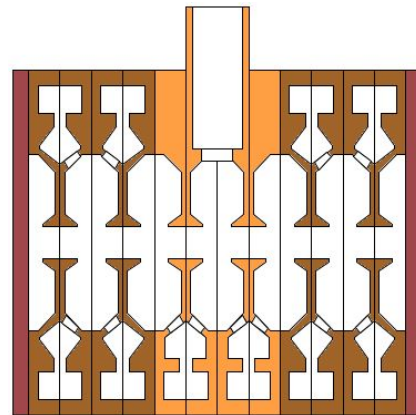


図 5: RF 入力部の構成

3.1 サイドカップル型スロットの電場分布への影響

J-PARC の ACS は加速軸に対して 90 度毎に計 4 個ずつの結合スロットを上下流に隣接する各結合セルに対して持つ。即ち加速軸に対し 4 回の回転対称性を持つ。更に一つの加速セル内では上下流スロットのビーム軸回転方向に対する位相をそろえているため、加速ギャップ中央面で鏡面対称になっている。しかし一般的なサイドカップル型の場合、上下流に一個ずつある結合スロットは 180 度位相がずれているためギャップ中央面は鏡面対称面ではない。その結果スロットの効果により偏向電場成分が軸上に現れる [2]。

ところが今回の給電セルに設けたサイドカップル型結合スロットはアイリスの反対側に上下流の結合スロットを配置しているため、ギャップ中央面は鏡面

対称面になっており偏向電場成分は生じない。但し、アイリスと結合スロットのバランスが不十分な場合は電場分布の中心が加速軸からずれるのと、加速電場分布が同心円から少し扁平になることが予想される。そこでまず電場中心のずれを数値計算で確かめた。結果を図6に示す。縦軸はz軸(ビーム軸)上でギャップ中心から10mmずれた位置でのy方向(-y方向に結合アイリス、+y方向に結合スロット)電場 $E_y(y)$ をギャップ中央での加速電場 E_z で規格化して図示している。加速電場がビーム軸に対し回転対称の場合は $y=0$ で $E_y=0$ となるはずだが、計算結果は0.07mm程 $E_y=0$ の位置はずれている。しかしこのずれは軸芯のアラインメント公差よりも小さい値であり、許容できる範囲内にある。

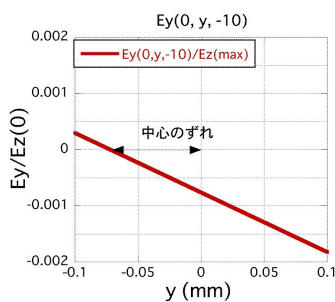


図6: RF入力セルの加速電場中心のずれ

4. 1/2アルミ製モデルによる試験

前節までの議論を元にアルミ製の1/2モデル(1.944GHz)を製作し、特性を測定した。図7は測定の様子である。分散特性と軸上電場分布を測定し、等価回路モデルと比較した結果が図8である。右側の電場分布で入力アイリスがある中央の加速セルの電場が高い。原因はサイドカップル型結合セルの結合度がアイリス付き加速セル側(k_s)とACS加速セル側(k_a)で同じスロット寸法にも関わらず異なるためと考えられる。データを再現するため等価回路モデルでは結合度を $k_s=4.4\%$ 、 $k_s=5.0\%$ 、ACS構造部は 5.6% として計算した。左図の分散曲線も同じ結合度を仮定すると測定値の振る舞いを良く再現する。(π/2モード周波数の実測値で規格化した。)従って一様な電場分布を得るためにはサイドカップル型結合セルのスロット形状は結合する加速セルの形式に応じて調整する必要がある。

5. 課題

今回のR & Dを通じて、基本的な考えに問題ないことは確認できた。しかしながら実機製作の為に次の項目が残されている:

- サイドカップル型スロットの結合度調整。(スロット形状の非対称化)
- RF入力アイリス部周辺の冷却構造。
- 可動チューナー構造。(ブリッジ励起セルに装着している従来品は寸法が全く異なるので使えない。)

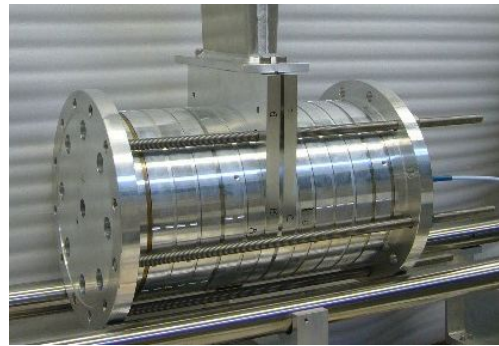


図7: 1/2サイズ アルミモデル

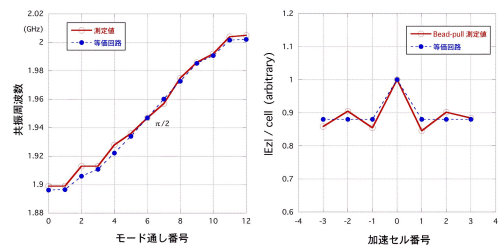


図8: 分散曲線と加速電場分布

従って、これらを全て考慮して試験空洞を製作し、最終的に大電力試験で問題が無いことを確認することが、実機の加速構造として選択されるための必要条件となる。

6. 結論

ブリッジを使用しないで各加速タンクに直接RFを供給する構造のACS空洞を考察した。各種計算と1/2サイズのアルミモデルによる低電力試験の結果は有効性を強く示唆している。実際の加速に使うには大電力試験機を製作し、大電力下でのRFと真空の特性を確認しなければならない。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki ed., "Accelerator Technical Design Report for J-PARC", KEK Report, 2002-13(2002).
- [2] S. Yamaguchi, private communication.
- [3] D. E. Nagle et al. "Coupled Resonator Model for Standing Wave Accelerator Tanks", Rev. Sci. Instr., 38(1967), p.1583.
- [4] H. Ao et al. "IMPROVEMENT IN THE ACS CAVITY DESIGN FOR THE J-PARC LINAC ENERGY UPGRADE", Proc. of the 2008 Linac Conf., Victoria, CANADA, to be published.
- [5] T. Kageyama, et al. "Development of Annular Coupled Structure", Proc. of the 1992 Linac Conf., Ottawa, CANADA, 2(1992) p.456