

## HIGH POWER TEST OF THE FIRST ACS MODULE FOR THE J-PARC LINAC

Koichiro Hirano<sup>1,A)</sup>, Hiroyuki Ao<sup>A)</sup>, Takatoshi Morishita<sup>A)</sup>, Hiroyuki Asano<sup>A)</sup>, Toshihiko Hori<sup>A)</sup>,  
Masayoshi Yamazaki<sup>A)</sup>, Tetsuya Kobayashi<sup>A)</sup>, Chikashi Kubota<sup>B)</sup>, Yoshishige Yamazaki<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Japan Atomic Energy Agency,

2-4 Shirakata-shirane, Tokaimura, Ibaraki, 319-1195

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization,

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

An ACS (Annular Coupled Structure) module has been developing for the 190-MeV to 400-MeV part of the J-PARC Linac. We have conducted the high power test of the first ACS module which consists of two accelerating tanks with 17 cells and a bridge tank with 9 cells. This paper describes results of the high power RF tests. The module achieved an average axial accelerating gradient of  $E_0=4.5\text{MV/m}$  at 1.8MW RF input power, 600  $\mu\text{s}$  pulse width, and 50Hz repetition rate.

### J-PARCリニアックの第1ACSモジュールの大電力試験

#### 1. はじめに

J-PARCリニアックでは、190MeVから400MeVまでの高エネルギー加速部にACS (Annular Coupled Structure)を有する加速空洞を用い、ビームエネルギーの増強を計画している。ビームラインには、2台のACSバンチャ空洞と21台のACSモジュールが設置される計画であり、現在、ACS空洞の開発を進めている。これまで、ACSバンチャ空洞の大電力試験<sup>[1]</sup>を実施し、共振周波数972MHz、空洞電力600kW、パルス幅600  $\mu\text{s}$ 、繰返50Hzの条件で、加速勾配4.8MV/m (設計4.3MV/m) が得られた。今回、高エネルギー加速部の最上流に設置される予定の第1番目のACSモジュール ( $\beta=0.56$ ) の大電力試験を実施した。本発表では、ACSモジュールの大電力試験及びその問題点について報告する。

#### 2. ACSモジュール

ACSモジュールは図1に示すように、17個の加速セルを有する加速タンクが2台とブリッジ空洞とで構成され、モジュール全体が $\pi/2$ モードで励起される。高周波窓 (以下、RF窓という) はブリッジ空洞の中央のセルに接続されている。加速セルは結合セルの内側にあり、図2に示すような複雑な構造になっているが、加速電場の軸対称性に優れた特徴を有している。ブリッジ空洞の9個のセルの中で、励起される5個のセルにそれぞれチューナーが付いており、この5連チューナーを用いて加速セル全体の周波数を約600kHz 変える

ことができる。加速セルの真空排気は、結合スロットを通じて結合セルにある8箇所の円形穴から行い、加速タンクエンドセルに接続されている真空マニホールドで取りまとめている。

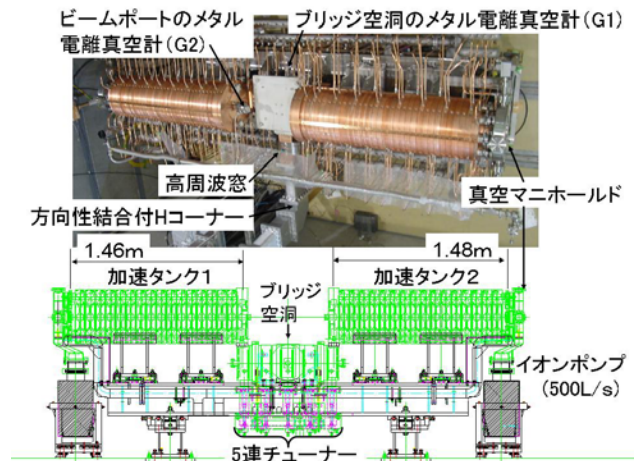


図1: 第1ACSモジュール

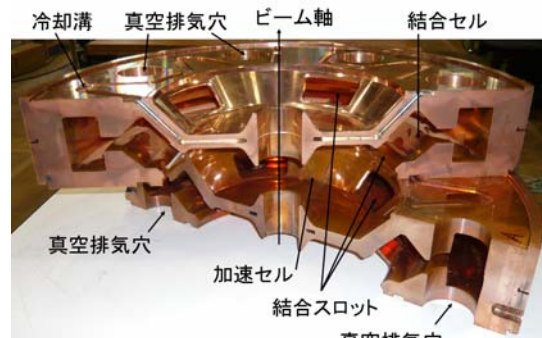


図2: 加速空洞断面構造

<sup>1</sup> E-mail: hirano.koichiro@jaea.go.jp

### 3. 大電力試験

RFパルス幅600  $\mu$ s、繰返50Hz (RFデューティ3%) の入力電力を図3のようにステップ状に変化させて、40分間以上保持した。チューナー挿入量を40mm、31.6mm、-10.3mmの各位置に固定し、各位置における空洞の共振周波数に一致するように運転周波数を調整した。具体的には、タンク端部に付いているピックアップポートから高周波電力を検波し、空洞電力が常に最大になるように調整した。入力電力及び反射電力は図1に示すRF窓直前の方向性結合器で測定した。また、冷却水は流量101 $\pm$ 1  $\ell$  /min、温度27.0 $\pm$ 0.2 $^{\circ}$ Cで使用し、タンク中央部 (9セル) 表面温度、冷却水温度、窓上昇温度、ブリッジ空洞側タンクのビームポート圧力、ブリッジ空洞内圧力等を測定した。

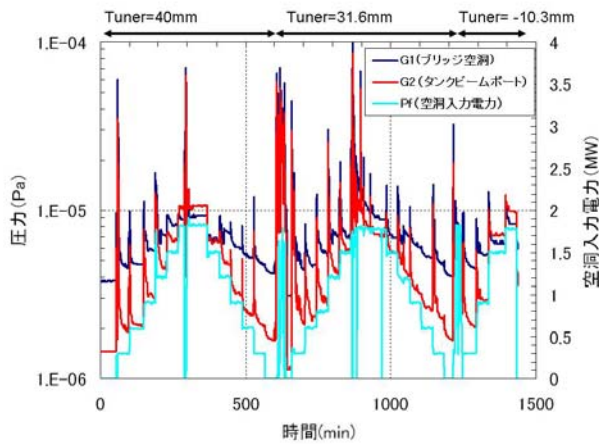


図3：試験時の入力電力と空洞内圧力変化

#### 3.1 加速電界

タンクの加速セルのStored Energy  $W_a$ とブリッジセルのStored Energy  $W_b$ の比を測定すると、 $W_a : W_b = 3.6 : 1$ となった。モジュール全体、タンク部、ブリッジ部、の各Stored Energyを $W$ 、 $W_{at}$ 、 $W_{bt}$ とすると、各部のセル数の割合から、空洞電力 $P_c$ の時のタンクの $W_{at}$ が (2) 式から求められる。

$$W = W_{at} + W_{bt} = W_{at} + 5W_b \quad (1)$$

$$W_{at} = 2 \times 17W_a = 0.96W = 0.96P_c Q_0 / \omega_0 \quad (2)$$

表1：摂動法による測定から求めた平均加速電界

チューナー挿入量 (mm)	44.58	24.4
ブリッジ部を含むモジュールのR/Q(k $\Omega$ )	7.0	7.0
タンクのR/Q(k $\Omega$ )	7.3	7.2
$Q_0$	17500	16800
入力電力 (MW)	1.8	1.8
空洞電力 (MW)	1.6	1.6
ブリッジ部を含むモジュールのStored Energy (J)	4.4	4.4
タンクのStored Energy (J)	4.3	4.3
タンク1の平均加速電界 (MV/m)	4.7	4.6
タンク2の平均加速電界 (MV/m)	4.8	4.5

チューナー挿入量44.6mm及び24.4mmで、摂動法による軸上電界分布の測定<sup>[1]</sup>を行い、表1に示すように、入力電力1.8MW、空洞電力1.6MWの時、タンクの平均加速電界は4.5MV/m以上になることが分かった。また、空洞内の電界に関する解析は、別途発表する予定である。

#### 3.2 温度特性

運転周波数972.00MHz、チューナー挿入量31.6mmの時、入力電力1.8MW、空洞電力1.6MWとなった。図4に示す温度に対する周波数変化量は28kHz/ $^{\circ}$ Cとなり、2台のタンクの空洞上昇温度が一致した。これは、摂動法による電場分布の測定で、チューナー挿入量32.9mmの時に、各タンクの平均加速電界がほぼ等しくなったことに対応する。

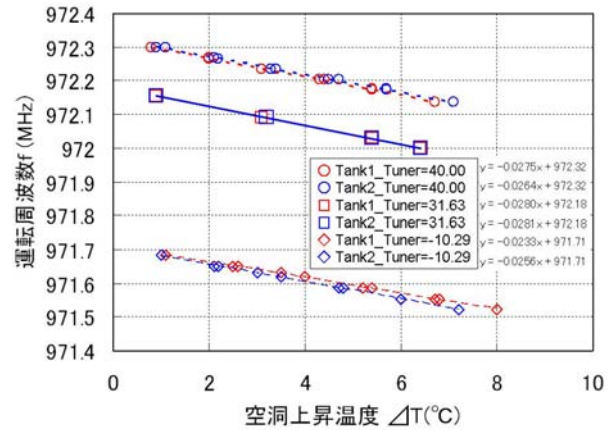


図4：空洞上昇温度に対する周波数変化

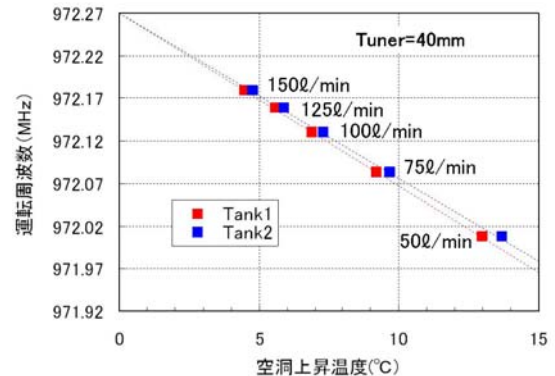


図5：空洞冷却水の流量変化に伴う周波数変化  
チューナー挿入量40mm、入力電力1.8MWの時、図5のように冷却水を50~1500 /minの範囲で変化させ、空洞上昇温度と共振周波数を測定した。流量を低下させても、温度上昇に対する周波数の傾きが途中で変化しなかったことから、異常な変形は局所的に発生しなかったと思われる。共振周波数は冷却水流量によって、約0.2MHz調整可能である。運転周波数調整によるパワ投入ができれば、空洞のチューニングは冷却水流量の調整や固定

チューナーとの組み合わせによって、1本の可動チューナーで対応できる可能性がある。

### 3.3 真空

高周波電力投入開始から約80時間後、高周波投入前のタンクビームポートの圧力は図3に示すように1E-6Paであったが、1.8MW投入時には1桁増加した。現在、空洞圧力分布について、グリーン関数行列を用いた節点解析法による計算<sup>[2]</sup>を行いながら、真空マニホールドの形状の変更や、RF窓と空洞との間に排気ポートを追加して、イオンポンプを増設するなど、圧力改善対策を検討している。

### 3.4 RF窓上昇温度

RF窓はバンチャ空洞やクライストロンと同じ、アルミナ (HA95) を用いた。窓表面の観測及び上昇温度の測定は、ACSバンチャ空洞大電力試験<sup>[3]</sup>の時と同様に実施した。図6に窓上昇温度測定結果を示す。また、マルチパクタリングによる発光現象は観測されなかった。クライストロン最大出力電力は3MWであり、立体回路の減衰量及びRF制御に必要な電力を差し引くと、空洞に入力可能な最大電力は2.6MWである。余裕を見て、この電力が窓に負荷されたとすると、窓の $\Delta T$ は110°C以上になる可能性があり、窓の熱破壊が懸念される。

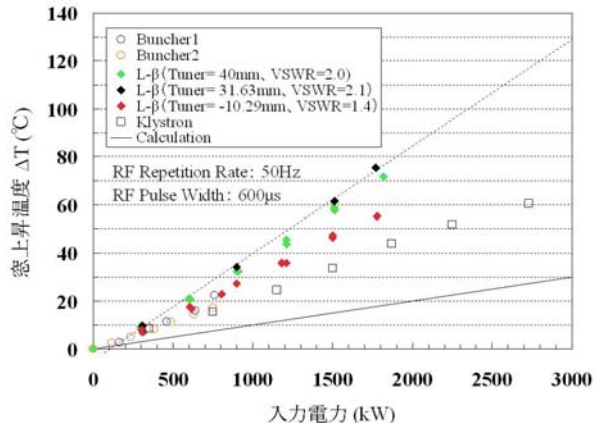


図6 RF窓上昇温度測定結果

窓上昇温度はチューナー挿入量の変化による反射波の影響を受けて変化した。HFSS (高周波三次元電磁界シミュレータ) を用いて、窓のパワロス計算し、定在波による影響を調べた。VSWR=2となる実際に近い反射パターンを得るために、モジュール全体の壁損をブリッジ空洞の1セルに置き換え、計算時の空洞の電気伝導率を1E4(S/m)に設定した。このとき、電気伝導率を極端に下げても、解析上の電磁場分布は変化しないことを確認した。また、空洞の共振周波数が972MHzになるようにチューナー挿入量を調整し、VSWR=2で空洞が

密結合になっていることを確認した。図7に示すように窓を現状位置から移動させた場合について、セラミックス部のパワロス計算し、その値を反射が無い場合のパワロスで規格化した。窓上昇温度はパワロスに比例することから、現状位置の窓上昇温度は無反射波の場合より1.5倍以上高くなる可能性があることが分かった。窓位置を現状から+87±3mm離す(前項の真空排気ポート長、相当分)ことにより、規格化パワロスが0.9となるため、窓上昇温度はクライストロン窓と同程度になると思われる。全反射時にRF位相が反転することから、パワロスの急激な増加を避けるため、反射の影響が少ない窓位置を選んだ。窓上昇温度が計算値より高いのは、TiNコーティングを含めた窓材のtan δの値が計算に用いた値より高い可能性がある。窓熱破壊のリスク低減化のため、tan δが現在より1桁低い窓材の採用を検討中である。

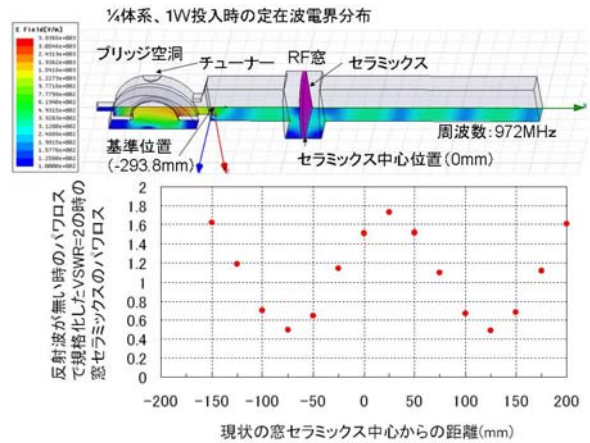


図7 HFSSによるRF窓のパワロス計算

## 4. まとめ

運転周波数972MHz、RFデューティ3%で設計<sup>[4]</sup>の空洞電力1.6MWを第1ACSモジュールに負荷することができた。このとき、空洞圧力は1E-5Paとなり、また、窓上昇温度は定在波により1.5倍高くなることが分かった。今後、ACS空洞の実機実現に向け、空洞圧力の改善、窓上昇温度低減化、空洞チューニング方法等を検討する予定である。

## 参考文献

- [1] H. Ao, et al., "J-PARC用ACS空洞初号機の大電力試験", 加速器学会, 2006.
- [2] N. Hayashizaki, et al., "Vacuum System Design of ACS Linac for J-PARC", 4th Vacuum and Surface Sciences Conference of Asia and Australia, 2008.
- [3] K. Hirano, et al., "ACSバンチャ空洞RF窓の大電力試験", 加速器学会, 2007.
- [4] "Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Facility Project, J-PARC", JAERI-Tech KEK-Report2002-13, 2003-044, p345.