

HIGH POWER TEST OF THE RF WINDOW FOR THE ACS BUNCHER CAVITY

Koichiro Hirano^{1,A)}, Hiroyuki Ao^{A)}, Toshihiko Hori^{A)}, Masayoshi Yamazaki^{A)}, Tetsuya Kobayashi^{A)},
Kenichirou Satou^{A)}, Kazuo Hasegawa^{A)}, Seiya Yamaguchi^{B)}, Fujio Naito^{B)}, Yoshishige Yamazaki^{B)}

^{A)} Japan Atomic Energy Agency,

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

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization,

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

Abstract

We have conducted the high power test of the ACS buncher cavity. This paper describes high power test of the RF window. The temperature of the window increased by 22 degrees at 750kW peak input power with a pulse width of 0.6ms and a repetition rate of 50Hz. Measurement in the window temperature rise was 2.9 times larger than calculation.

ACSバンチャ空洞RF窓の大電力試験

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。現在、ACS空洞の開発^[1]を進めており、ACSバンチャ空洞の大電力試験を実施中である。これまで、共振周波数972MHz、空洞電力600kW、パルス幅600 μ 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。^[2]

ACS空洞の高周波窓 (以下、RF窓という。) はピルボックス型である。加速器トンネル内の冷却システムの簡略化およびメンテナンス軽減化のため、空洞と同じ水圧 (7kgf/m²) の冷却水を使用し、RF窓円筒の外周部を冷却する方式を採用した。972MHzクライストロンのRF窓^[3]は、窓材外周の薄い銅板が直接水冷されており、窓材保護のために水圧は4kgf/m²以下に制限されている。このような窓材外周部を直接水冷する場合に比べて、RF窓の冷却効率の低下が懸念されたため、RF窓の上昇温度を評価する必要があった。そこで、RF窓の大電力試験を実施し、窓の上昇温度を赤外線放射温度計で測定した。パルス幅600 μ s、繰返50Hzの条件で、ACSバンチャ空洞に定格以上のピーク入力電力760kWを投入した時、窓上昇温度は22 $^{\circ}$ Cとなった。

本発表では、ACSバンチャ空洞RF窓の大電力試験について報告する。

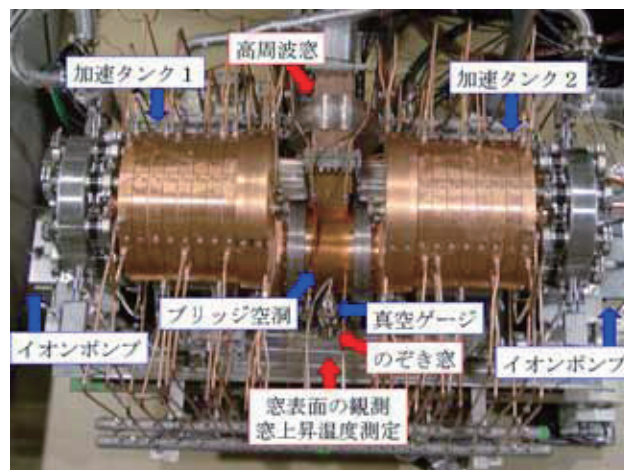


図1 : ACSバンチャ空洞

2. RF窓

窓材は、直径285mm、厚さ10mmのアルミナ (日本特殊陶業、HA95) を用いた。主な特性は、アルミナ含有量は95%、 $\tan \delta$ は 3×10^{-4} 、比誘電率は9.2である。また、この窓材は972MHzクライストロンの窓にも使用されている。アルミナ表面からの電子放出を減らし、マルチパクタを防止するため、真空側のアルミナ表面に、60 \AA のTiNを蒸着した。SUS304の窓円筒部に内径6mmの冷却管を2本ロー付し、流量2~3リッター/minの冷却水を流して窓の冷却を行っている。冷却水温度は、空洞温度と同様27 $^{\circ}$ Cである。

¹ E-mail: hirano.koichiro@jaea.go.jp

3. RF窓の大電力試験

RF窓の表面はブリッジ空洞の中央部にある内径37mmののぞき窓を通して、真空側から観測した。RF窓の表面温度は赤外線放射温度計（日本電気三栄製、TH1102）を用いて測定した。また、同じ位置にカメラを設置し、RFパワを投入した時のセラミック表面の様子を観測した。図2に測定体系を示す。ブリッジ空洞及びフレキシブル導波管の表面温度を熱電対で測定した。

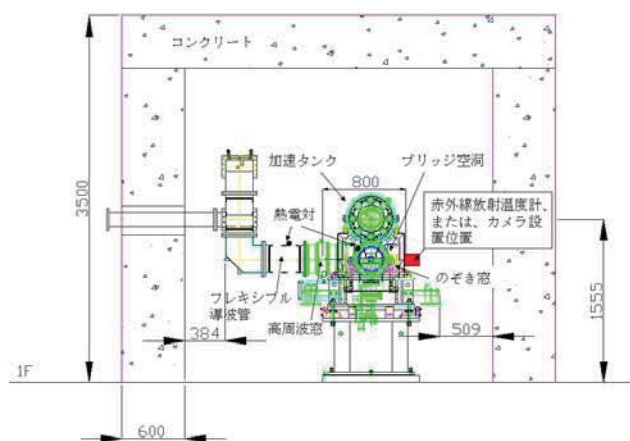


図2 RF窓測定体系

赤外線放射温度計の較正は、セラミック板に取り付けた熱電対の値と比較して行った。図3に較正体系を示す。熱電対を取り付けたセラミック板と赤外線放射温度計との距離は、RF窓から赤外線放射温度計までの距離（80cm）と等距離である。スライダックでリボンヒータの温度を調整し、セラミック表面の温度が一定になることを確認しながら、温度を上昇させた。のぞき窓及び穴の影響を調べるため、セラミック板と赤外線放射温度計との間に、のぞき窓、φ5mm穴付コーナ管、または、φ20mm穴付コーナ管を設置し、直接測定した場合と比較した。温度較正結果を図4に示す。

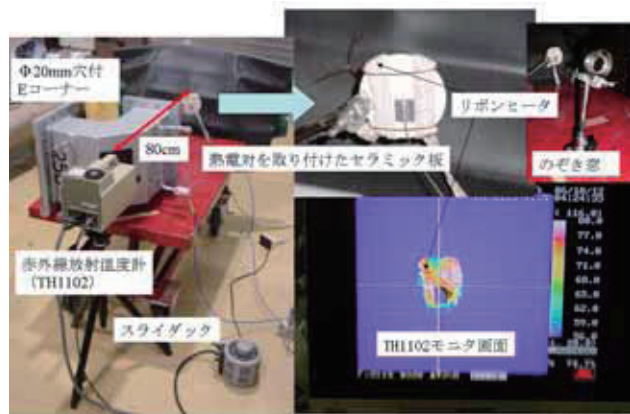


図3 赤外線放射温度計較正体系

φ5mmの穴を通して測定した場合には、赤外線放射温度計の値は半分程度に過小表示されたが、φ20mmの場合は、値の変化が無かった。φ20mmより大きいのぞき窓の穴（φ37mm）の場合は、温度補正が要らないと推測される。また、のぞき窓の有無で温度を測定した結果、のぞき窓がある場合には17%低く測定されることが分かった。

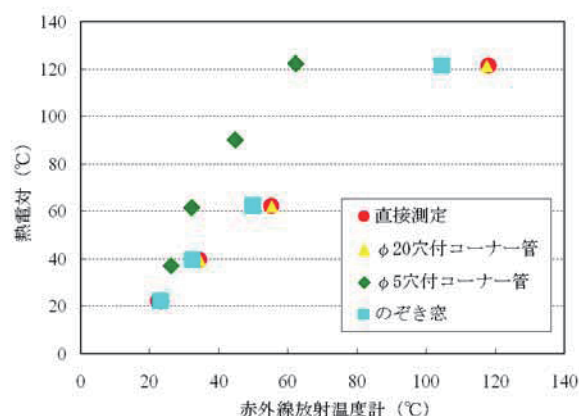


図4 赤外線放射温度計較正

窓上昇温度測定結果を図5に示す。ピーク電力760kW、パルス幅600μs、繰り返し50Hz、平均電力23kWの時、窓上昇温度は22°Cとなった。また、真空側から窓表面を見ても、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。

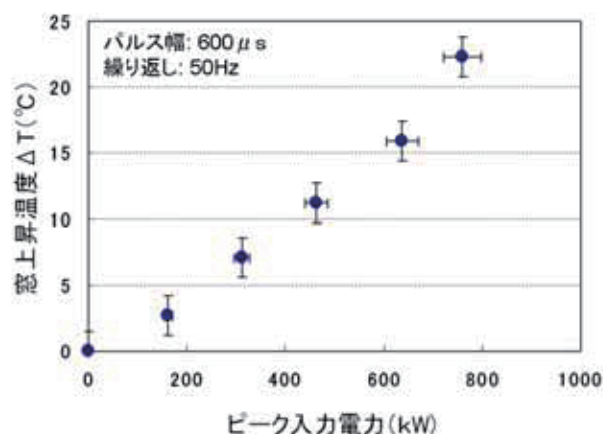


図5 RF窓上昇温度測定結果

4. 窓上昇温度計算

HFSS（高周波三次元電磁界シミュレータ）による窓の電磁場解析を行い、窓材の Loss Density [W/m³]を求めた。図6に計算結果を示す。

ACSレギュラー空洞には、ACSバンチャ空洞の3倍以上のパワが投入される。また、この窓材がクライストロンの窓にも使用されていることから、クライストロン最大出力電力3MW時の最大窓上

昇温度を計算することにした。ピーク入力電力3MW、パルス幅600 μ s、繰返し50Hz、平均電力90kWの時のLoss DensityをANSYS（熱流体解析プログラム）の入力データに用い、最大窓上昇温度を計算した。計算条件を表1に示す。ANSYSによる計算結果を図7に示す。平均電力90kWの時、中心温度は57 $^{\circ}$ C、 Δ Tは30 $^{\circ}$ Cとなった。

試験結果から、ACSバンチャ空洞の場合、平均電力90kWの時、 Δ Tは89 $^{\circ}$ Cになると推測される。これは計算値の2.9倍である。

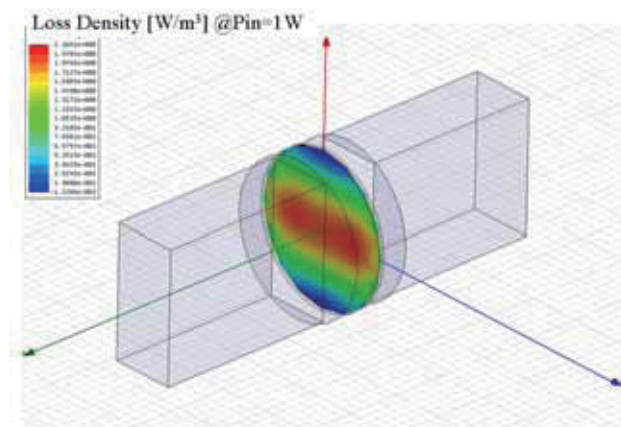


図6 HFSSによる窓のパワロス計算

表1 ANSYS計算条件

真空側	輻射あり
大気側	輻射及び熱伝達あり
熱伝導率	18 W/mK
輻射率	0.92
輻射熱伝達係数	5.63 W/m ² K
空気への熱伝達係数	4.66 W/m ² K
外周温度	27 $^{\circ}$ C

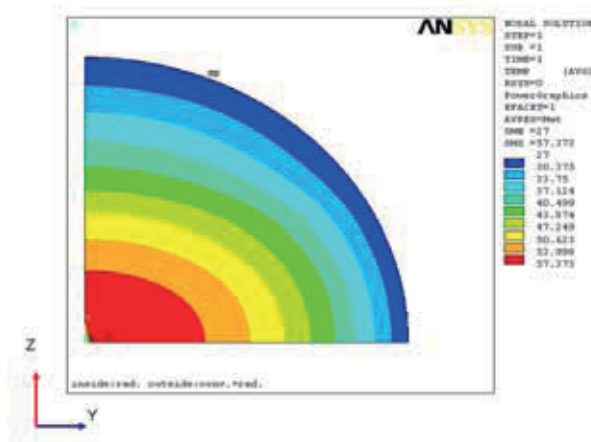


図7 ANSYSによる窓上昇温度計算

また、クライストロン窓の場合^[3]、平均電力90kWの時、 Δ Tは69 $^{\circ}$ Cになると推測され、測定値は計算値の2.3倍となった。いずれも、測定値は計算値の2~3倍程度高くなった。

RF窓は空洞アイリスから $3\lambda/4$ の位置にあり、この位置は定在波の節にあたる。空洞のVSWRは1.56であるが、定在波の節にある窓は反射波の影響を受けないため、測定値が高い理由にはならない。平均電力23kWの時の空洞の温度は31 $^{\circ}$ C、フレキ導波管表面温度は28 $^{\circ}$ Cであった。窓温度はこれらより高いことから、反射した他の高い温度を見ているわけではない。仮に、真空側及び大気側への輻射や熱伝導が全く無い場合でも、平均電力90kWの時、 Δ Tは40 $^{\circ}$ Cとなり、計算値は3割程度の増加である。以上のことから、実際の $\tan \delta$ は計算に用いた値より高いと考えられる。大口径窓材の $\tan \delta$ は測定されていないため、実際の値は不明である。窓温度が高くなると、窓から放出されるガス量が多くなり、空洞内真空度の悪化が懸念される。また、窓破壊温度に注意しなければならない。 $\tan \delta$ が小さい窓材を選択して、窓温度を低下させ、かつ、窓破壊温度に対して余裕のある窓材の採用を検討する必要がある。

5. まとめ

ピーク電力760kW、パルス幅600 μ s、繰返し50Hz、平均電力23kWのとき、ACSバンチャ空洞の窓上昇温度は22 $^{\circ}$ Cであった。また、窓表面の観測により、マルチパクタリングは発生しなかった。窓上昇温度の測定値が計算値の2.9倍になったのは、実際の $\tan \delta$ が計算に用いた値より高いことが原因である可能性がある。今後、 $\tan \delta$ が小さい窓材の採用を検討するとともに、窓製作前に、空洞共振器を用いて、大口径窓材の $\tan \delta$ を実測し、確認する必要がある。

謝辞

テストベンチの構築を手伝って頂いたJ-PARCセンター、大内殿、高安殿、仲田殿、植木殿に感謝します。

参考文献

- [1] H. Ao, et al., “J-PARC用ACS加速空洞の現状”，本研究会。
- [2] H. Ao, et al., “J-PARC用ACS空洞初号機の大電力試験”，Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, 2006
- [3] T. Hori, et al., “J-PARC 972MHz RFテストスタンドの活動状況 2007”，本研究会。