

RF CAVITY DEDICATED TO CONDITIONING OF RF INPUT COUPLERS IN SPRING-8

Hiroyasu Ego ^{#,A)}, Yuji Ohashi ^{A)}, Hiroshi Saeki ^{A)}, Shigeki Sasaki ^{A)}, Takahiro Watanabe ^{A)}, Hiroto Yonehara ^{A)},
Yoshitaka Kawashima ^{B)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198, JAPAN

^{B)} Brookhaven National Laboratory

NSLS-II Department, Building 817, Upton, New York, 11937, USA

Abstract

We use beam-accelerating cavities resonating at 508.58 MHz in the SPring-8 storage ring and the booster synchrotron. In order to feed an RF power into the cavities, we employ RF input couplers transforming WR-1500 waveguide to WX-77D coaxial line terminating in a loop. Since we should test and condition the couplers up to a rated power of 300 kW before installation in the cavities, we developed a compact RF cavity dedicated to the conditioning. The cavity has a diameter of 146 mm, a length of 130 mm, and a stub with a diameter of 70 mm. Two couplers are connected to the cavity and couple to rotational magnetic fields around the stub tightly. About 98 % of the fed RF power passes through the cavity assembly. We attach a frequency tuner to the cavity and cancel out a frequency deviation by inevitable errors in measurement in fabricating or assembling of the cavity and couplers. We tested the fabricated cavity and could successfully and stably transmit the rated RF power without damage to the cavity assembly. An X-ray leakage from the inside of the cavity was less than the regulations and we could carry out the high-power test without X-ray shields.

SPring-8 高周波入力カップラーエージング専用空洞の開発

1. はじめに

SPring-8 蓄積リング及びブースターシンクロトロンでは 508.58 MHz で共振する定在波型空洞^[1,2]を用いてビーム加速を行っている。これらの空洞へ大電力高周波を投入するために東芝製高周波入力カップラーE4263^[3,4]を使用している。空洞の最大入力電力 300 kW まで安定した運転を行うためには、カップラー単体の大電力試験及びエージングを行い、性能確認後に空洞へ取り付けなければならない。

E4263 は WR-1500 導波管から WX-77D 同軸管へ変成するタイプで、先端がループで終端されているため、ダミーロードへ直結して大電力試験を行うことは難しい。これまではシンクロトロン用 5 連空洞プロトタイプ機を流用してエージング試験^[5]を行ってきたが、真空漏れを生じて故障した。また、この 5 連空洞は、本来カップラー試験用ではないため使い勝手もよくない。そこで、高エネルギー加速器研究機構の内藤富士雄氏らが行ったカップラー 2 台を繋ぐ手法^[6,7]を参考にして、大電力エージング試験専用のコンパクト空洞を開発した。

空洞は円筒型で無酸素銅製である。2 台の E4263 を対向させて空洞に取り付け、大電力透過試験を行う。上流側カップラーから入力された高周波はカップラー先端のループと空洞中央に設けたスタブ間で

磁気結合を行い、下流側カップラーへ伝達される。カップラー・空洞間の結合度が大きいため、空洞の共振周波数はカップラー・ループの形状や製作誤差、空洞への組付け状態に敏感で、大きく変化する。そこで製造誤差や組付精度に因らず、空洞共振周波数を 508.58 MHz、VSWR を 1.1 以下に保つため、チューナーを空洞に設けた。

本論文では、第 2、3 章で空洞の設計について述べ、第 4 章で製作した空洞の特性試験及び大電力試験の結果について報告する。

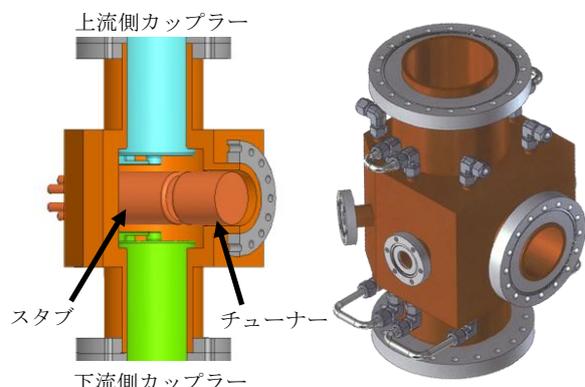


図 1 : 空洞の断面概略図 (左) と概形図 (右)

[#] ego@spring8.or.jp

2. 構造

図1に空洞の断面概略図と概形図を表す。空洞の内径は146 mm、長さ130 mmで、内部に直径70 mm、長さ105 mmのスタブをロウ付けで接合している。空洞本体とスタブは、表面での高周波損失を抑えるためにクラス2の無酸素銅で製作した。

空洞に2本設けた直径110 mmのカップラーポートに両側からスタブを挟み込み、ループがスタブと並行になるようにカップラーを取り付ける。カップラーポートを加えた本体の長さは427 mmである。直径73 mmのチューナーポートには、SPRING-8蓄積リング単セル空洞用に開発したチューナーを接続する。チューナーは直径70 mmの無酸素銅製プランジャーを駆動するもので、スタブと同軸で対向するように設置する。空洞の励振時には図2のようにスタブ回りに磁場、スタブ・チューナー間のギャップに電場が集中する分布をなす。そのため、チューナーの位置を変えると共振周波数を調整することができる。ループはスタブ側へ向けた。カップラーポート中心軸を空洞中心軸から13 mmオフセットさせ、スタブ長をカップラーのループより長くして、ループがスタブ・チューナー間ギャップから離れるようにした。これらによりループがスタブ・チューナー間の強い電界に晒されず、放電によるループ表面の劣化を緩和することができる。また、チューナーポート内へ強い磁場が侵入することも防げる。

その他に排気用ポート、ビューポート及びモニターアンテナ設置ポートを設けた。

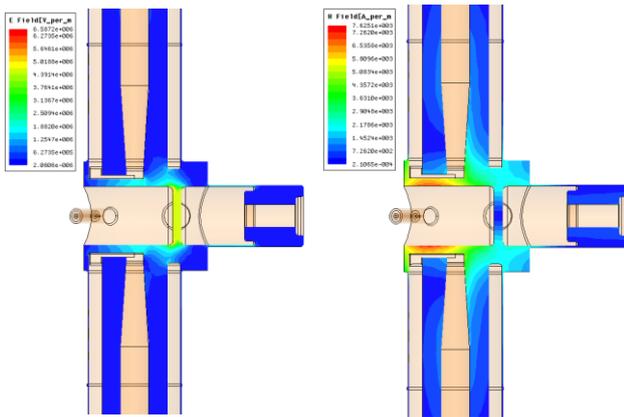


図2：空洞内電磁場分布 (左) 電場 (右) 磁場

3. 高周波・熱構造解析

3.1 高周波解析

上流側カップラーと空洞との結合係数を β_1 、下流側カップラーの結合係数を β_2 とする。空洞の対称性から β_1 と β_2 は等しく、1より十分大きい場合、空洞への入力電力 P_0 と、空洞内消費電力 P_C 、空洞通過電力 P_T 、空洞からの反射電力 P_R との関係は次のようになる。

$$\frac{P_C}{P_0} = \frac{4\beta_1}{(1+\beta_1+\beta_2)^2} = \frac{4\beta_1}{(1+2\beta_1)^2} \approx \frac{1}{\beta_1} \quad (1)$$

$$\frac{P_T}{P_0} = \frac{4\beta_1\beta_2}{(1+\beta_1+\beta_2)^2} = \frac{4\beta_1^2}{(1+2\beta_1)^2} \approx 1 \quad (2)$$

$$\frac{P_R}{P_0} = \frac{(1-\beta_1+\beta_2)^2}{(1+\beta_1+\beta_2)^2} = \frac{1}{(1+2\beta_1)^2} \approx \frac{1}{4\beta_1^2} \quad (3)$$

式(1)、(3)より、結合係数が大きいほど空洞内消費電力と反射電力は小さく、エージング試験に適した空洞となる。

今回設計した空洞のHFSS[®]解析結果を表1及び図3に示す。結合係数は58で、投入電力の約98.3%が空洞を通り抜け、約1.7%の電力が空洞内面にて消費される。ただし、この消費電力はカップラーの矩形導波管部やセラミックス部での損失は含まない。共振点でのVSWRは1.02で、1.1以下となる周波数帯域は0.65 MHzである。

共振周波数を左右する一因であるスタブ側面とカップラーループ先端間の距離依存性は、-1.6 MHz/mmである。一方、チューナー位置の調整により周波数は、-12.5 MHz/mmで変わる。チューナー基準位置から±4 mm以上のストロークを確保しているため、±50 MHz以上の周波数調整が可能である。よってカップラーの製作誤差や空洞への組付け状態によって共振周波数が変わっても、チューナーによって共振周波数508.58 MHz、VSWR 1.1以下となるように調整することができる。

表1：HFSS解析結果

共振周波数	508.58 MHz
結合係数 β	58
無負荷 Q	4380
外部 Q	73.3
電力透過率 P_T/P_0	98.3 %
空洞電力消費率 P_C/P_0	1.7 %
VSWR	1.02

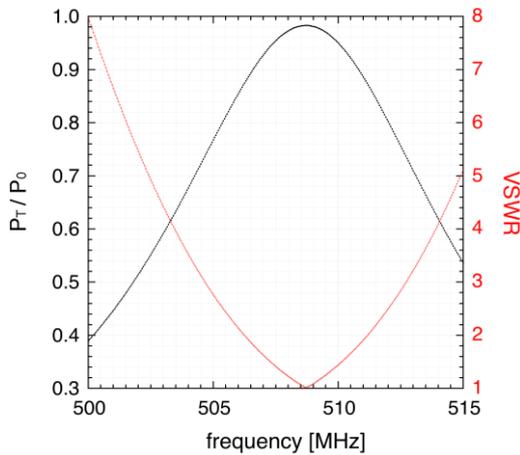


図 3 : 電力透過率と VSWR

3.2 熱構造解析

透過電力の約 1.7 % が空洞にて損失するため、定格 300 kW の高周波電力試験では約 5 kW が空洞内で消費される。この電力消費による温度上昇と空洞膨張をできるだけ抑え、熱応力での破損を防ぐため、冷却水路を設けて排熱を行う。ANSYS[®]を用いて、その排熱設計を行った。

空洞本体には直径 8 mm の直線水路を 8 本、各カップラーポートにはジャケット構造の水路を施した。また、スタブ表面での発熱が 1 kW 以上になるため、スタブには直径 8 mm の水路を 3 系路設けた。各水路には 6 l/min の純水を流して冷却し、300 kW 投入時の空洞の相当応力が、空洞母材である銅の引張り強さ 200 MPa の 1/3 以下となるように水路の配置を最適化した。

供給水温を 30 °C とした時の解析結果を図 4 に示す。最大温度上昇はスタブ部で約 12 °C である。応力はスタブと本体の接合部に集中し、相当応力の最大値は 55 MPa である。

4. 実機空洞試験

4.1 低電力特性測定

製作した実機空洞に E4263 を取り付け、高周波特性をネットワークアナライザーで測定した。共振周波数は設計値より約 5 MHz 高かったが、チューナーによって目的の 508.58 MHz に調整できた。透過損失は約 2.6 % であった。計算値の 1.7 % より大きいのは、測定に用いた 2 台の N 型同軸・導波管変換器や空洞計算領域外の損失によるものと考えられる。VSWR は 1.02、共振周波数のチューナー位置依存性は、-11 MHz/mm で設計に近い値が得られた。

4.2 大電力試験

組み立てた実機空洞の大電力試験を行った。図 5 にテストスタンドに設置した空洞の写真を示す。上流側カップラーは WR-1500 導波管でサーキュレーターを介して 1.2 MW クライストロンに接続した。

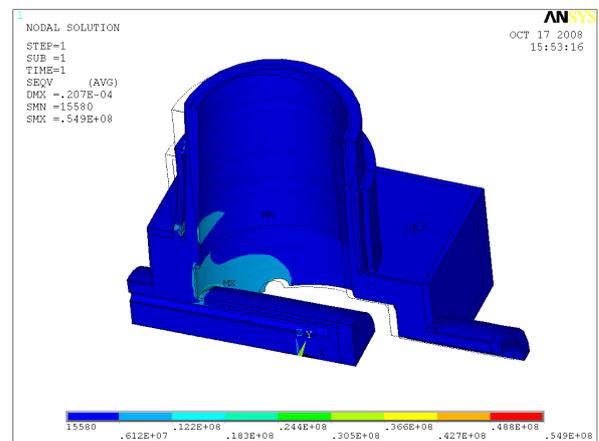
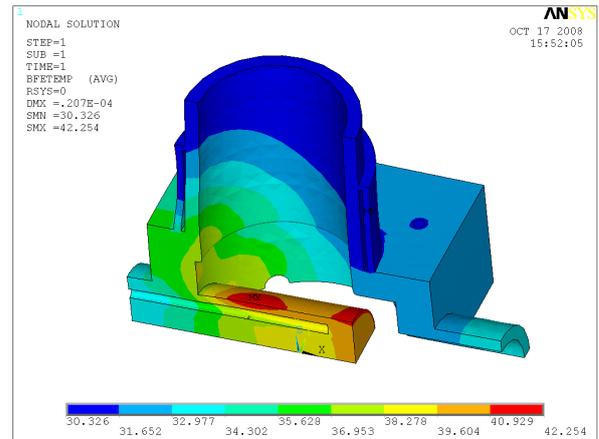


図 4 : 300 kW 運転時の熱応力解析結果

(上) 温度 (下) 相当応力

下流側カップラーは 1 MW ダミーロードへ接続した。空洞を通過した大電力高周波は、このダミーロードで消費させた。空洞は 50 l/min の排気量を持つターボ分子ポンプで 2×10^{-4} Pa 程度まで真空引きして試験を開始した。図 6 に空洞入力電力と真空値の変化を表したチャートを示す。大電力高周波投入中に真空は約 10^{-2} Pa まで一時的に悪化したが、約 20 時間のエイジングにより、 2×10^{-4} Pa まで回復し、定格 300 kW の定常運転に成功した。試験中発生したインターロックは、真空悪化 (閾値 8×10^{-3} Pa) 108 回、電力反射 (閾値 20 kW) 20 回であった。

空洞外側表面で測定した本体上昇温度は、ANSYS 計算値より 1°C 程度異なる部分もあったが供給冷却水温度、流量の変動を考慮するとシミュレーションとほぼ同等の結果であった。また、大電力投入中、空洞からの X 腺漏れは小さく、SPRING-8 での規制値 ($6 \mu\text{Sy/hr}$) 未満で、空洞を放射線防壁シールドで覆うことなく大電力試験を行うことができた。エイジング終了後は 30 l/min の排気量を持つイオンポンプに切り替えて空洞を保管しており、この状態での真空値は約 1×10^{-7} Pa である。

5. まとめ

SPring-8 定在波空洞で使用する高周波入力カップラーの大電力エージング試験専用のコンパクト空洞を製作した。空洞は、ほぼ設計通りの高周波特性を有し、チューナーによる共振周波数調整機能も動作した。また、カップラーや空洞を損なうことなく、規定の 300 kW まで大電力透過試験に成功した。

謝辞

今回の開発にあたり、カップラーエージング空洞に関する議論や関連資料のご提供等、高エネルギー加速器研究機構の内藤富士雄氏から多大なるご協力を賜りました。心より感謝いたします。また、空洞の製作におきまして金属技研株式会社姫路工場のスタッフ各位に大変お世話になりました。ありがとうございました。

参考文献

- [1] H. Suzuki, et al., Proceedings of the 8th Symposium On Accelerator Sci. and Tech., Saitama, Japan, p.113, 1991
- [2] H. Ego et al., Proceedings of the 17th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, p.180, 1992
- [3] http://www.toshiba-tetd.co.jp/electron/eled05_j.htm
- [4] M. Akemoto, Proceedings of the Particle Accelerator Conference, San Francisco, p.1037, 1991
- [5] T. Ohshima, et al., Proceedings of the 5th European Particle Accelerator Conference, Sitges, p.2047, 1996
- [6] F. Naito, et al., P Proceedings of the 5th European Particle Accelerator Conference, Sitges, p.2014, 1996
- [7] F. Naito, et al., Proceedings of the 1st Asian Particle Accelerator Conference, Tsukuba, p.776, 1998
- [8] <http://www.ansoft.co.jp/>
- [9] <http://ansys.jp/>

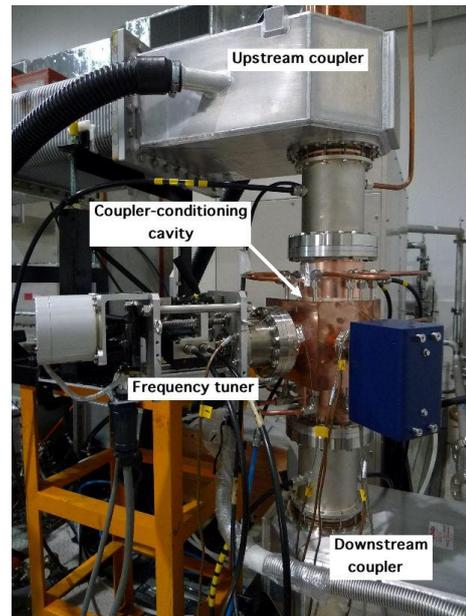


図5：テストスタンド実機空洞

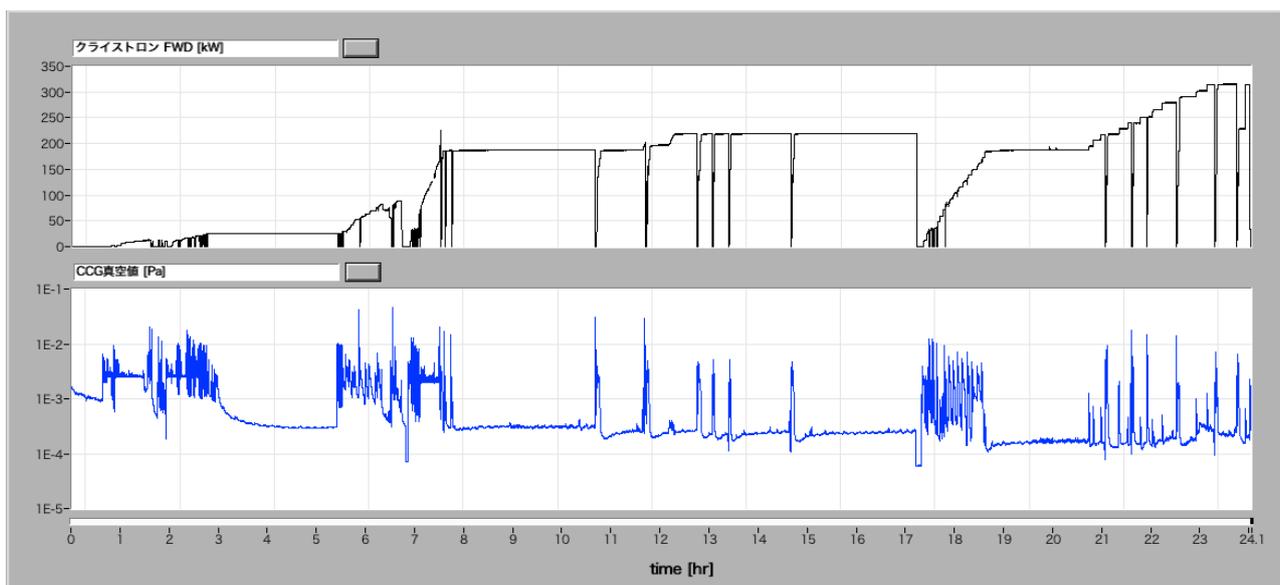


図6：300 kW 大電力試験チャート：（上）空洞入力電力（下）空洞内真空値