

RECTANGULAR-WAVEGUIDE WINDOW FOR A HIGH-POWER CW UHF COUPLER

Hiroyasu Ego[#], Yuji Ohashi, Hiroshi Saeki, Shigeki Sasaki
Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)
1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

Abstract

We have developed a compact ceramics window for an RF input coupler feeding an RF power into beam-accelerating cavities resonating at 508.58 MHz in the SPring-8 storage ring and the booster synchrotron. The window is a rectangular copper plate with a rectangular iris with rounded corners and fastens to the waveguide part of the coupler. A low-loss alumina ceramics, Kyocera A479B, fit into and was brazed to the iris in order to keep the waveguide in vacuum and transmit an RF power of 600 kW CW. VSWRs of the window are less than 1.1 in a wide frequency range more than 30 MHz. A copper gasket was specially designed to connect the window to a vacuum waveguide and affords us easy assembly and exchange in sure vacuum-seal and sound RF contact. We assembled the window and the vacuum waveguide terminated with a short plate and RF conditioned the single window with a standing wave of 150 kW. The RF and heat loads to the window were almost equivalent to those by a travelling wave of 600 kW and we could successfully and stably transmit the rated RF power without vacuum leakage nor damage to the window.

矩形導波管の真空封止・大電力高周波透過用セラミックス窓の開発

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共振周波数 508.58 MHz の定在波型空洞^[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 WR-1500 導波管から WX-77D の同軸ループへ変換する東芝製カップラー E4263^[3,4]を使用している。真空封止状態で高周波を透過させるため、円筒型セラミックス窓がカップラー同軸部に接合されている。しかし、その構造からセラミックスが故障破損した場合、カップラー全体を空洞から取り外して交換せねばならず、運転復帰には長い時間を要する。また、故障品は廃棄物としても大きい。そこで同軸の空洞接続部から真空封止部を切り離し、セラミックス破損時には窓のみ簡便に交換できるように導波管で着脱可能なセラミックス窓の開発を行った。WR-1500 (幅 381 mm × 高さ 190.5 mm) 導波管においてピルボックス変換型セラミックス窓は大型になってしまうため、開発したセラミックス窓は銅板に開けた R 付矩形アイリスに低損失アルミナ (誘電損失 < 0.0001) を接合した構造とした。その際、窓前後の導波管高さを 100 mm へ低くすることにより、小型化と透過周波数帯の拡大を図った。その結果、VSWR が 1.1 以下となる帯域は 30 MHz 以上となる。SPring-8 加速空洞での最大入力電力は連続 300 kW であるが、将来の投入電力増強を考慮して連続 600 kW まで透過ができるようにした。

本論文では、第 2 章でセラミックス窓の構造と製作について、第 3 章で高周波、熱構造設計について

述べ、第 4 章で製作したセラミックス窓の特性試験及び大電力試験の結果について報告する。

2. 構造

2.1 セラミックス窓

図 1 に製作したセラミックス窓プロトタイプ機の写真を表す。セラミック材は京セラ (株) 製の低誘電損失アルミナ A479B^[5]を使用した。仕様ではアルミナ 99.8%、誘電率 9.9、誘電損失 4×10^{-5} (8 GHz) である。このアルミナを幅 258.6 mm、高さ 80 mm、奥行き 5 mm、角を半径 20 mm で丸めた R 付矩形板に焼結、加工した。そしてセラミックスを幅 470 mm、高さ 190 mm、奥行き 18.4 mm のクラス 2 無酸素銅板フレームにセラミックスと同サイズのアイリスを開けて接合した。フレームへのセラミックス接合は加工による歪みを抑えるため、ろう付けと電子ビーム溶接の 2 過程で行った。最初にセラミックス

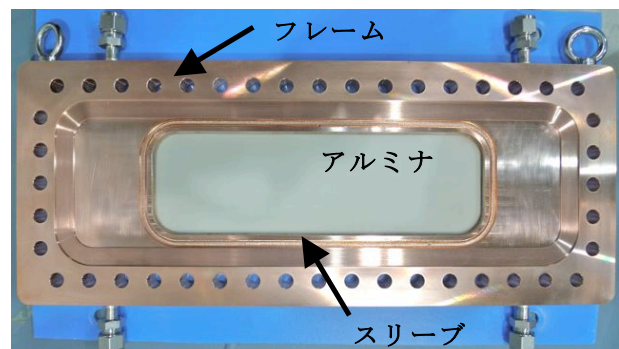


図 1 : セラミックス窓プロトタイプ機

[#] ego@spring8.or.jp

板をメタライズ (Mo-Mn+Ni メッキ) し、その形状に合わせて加工した無酸素銅製スリーブに銀ろう付けで接合した。高温ろう付けの際、膨張率の違いによるスリーブとアルミナの遊離を防ぐため、スリーブ外側からモリブデンワイヤにてバックアップ拘束した。セラミックスを接合したスリーブと銅板フレーム間は電子ビーム溶接にて組み立てた。真空封止用ガスケットを取り付けるため、ヘール加工したシール面を外周に形成した。また、真空時にアルミナ表面での2次電子放出を抑えるため、真空側表面には5~10 nmのTiNコーティングを施した。大電力運転時の冷却用としてフレームに直径8 mm水路を2本、セラミックスの両脇に設けた。

2.2 真空封止

カップラーの真空導波管部への取り付けと交換が容易になるように真空導波管とセラミックス窓の間は専用開発の銅製ガスケット⁶⁾を介して締結する構造とした。このガスケットはRFコンタクトも兼ねている。また、セラミックス窓、ガスケットの真空封止能力の検証と大電力試験用として真空導波管も製作した⁶⁾。概観構造を図2に示す。導波管の内寸は幅381 mm、高さは100 mmである。WR-1500規格の高さは190.5 mmであるが、セラミックス窓のコンパクト化と透過帯域を広げるために高さを100 mmへ矮小化した。真空耐圧を考慮して材質はステンレス (SUS304) である。高周波ロスによる発熱を小さくするため、内面には厚さ約15 μmの銅メッキを施した。導波管E面中央部には直径32 mmの真空排気ポートを2つ設けた。導波管の全長は199 mmで導波管の片側を金属板でショートすると508.58 MHzの高周波に対し、窓のセラミックス部で定在波の腹となるようにした。

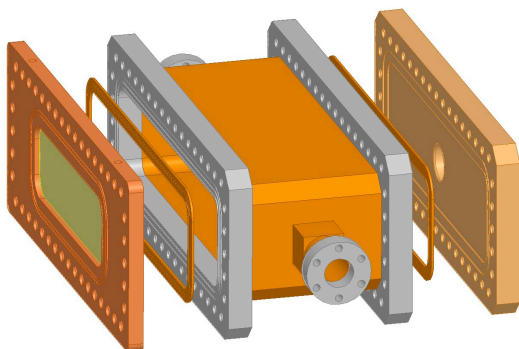


図2：セラミックス窓 (左) と真空導波管 (中央)

3. 高周波・熱構造解析

3.1 高周波解析

高周波の設計には HFSS¹⁷⁾を用いた。その解析結果を表1と図3に示す。中心周波数は509 MHzでVSWRは1.004、VSWRが1.1以下となる周波数帯

域は34 MHz、1.05以下となる帯域は17 MHzである。規定高のWR-1500導波管にセラミックス窓を設けた場合、VSWR 1.1以下の帯域は10 MHzとなったので、高さの矮小化により3倍以上広帯域化される。アイリス、セラミックス部では導波管同様のTE10モードで伝送され、600 kW透過時の最大電場は約400V/mmである。これはアルミナの耐圧16kV/mmより十分小さい。シミュレーションによるセラミックス窓の各パラメータと中心周波数との関係は以下の通りとなった。

$$f_a[\text{MHz}] = 509 - 3.26(x - 258.6) + 1.65(y - 80) - 38.1(d - 5) + 1.50(r - 20) - 20.8(\epsilon_r - 10.15) \quad (1)$$

x 、 y 、 d 、 r はセラミックスの幅、高さ、奥行き、角部半径 (すべて mm 単位)、 ϵ_r は比誘電率を表す。ここでは比誘電率は仕様値ではなく、セラミックスサンプルの測定値を採用した。この関係式より加工誤差を0.1 mm、比誘電率の誤差を0.3としても最大周波数変化量は11 MHz以下、VSWRの悪化は1.06程度となり、製造誤差によるRF特性の悪化も許容範囲に入る。

表1：HFSS解析結果

透過中心周波数	509 MHz
VSWR	1.004
パワー透過損失	0.04%
帯域 (VSWR 1.1 以下)	34 MHz

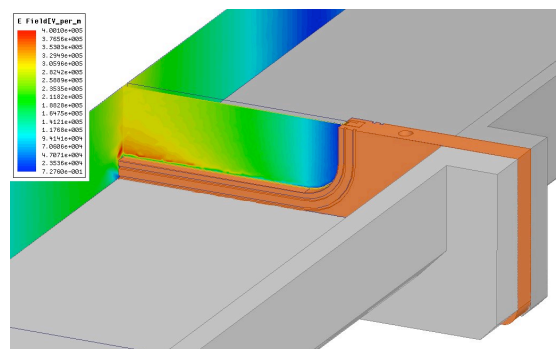
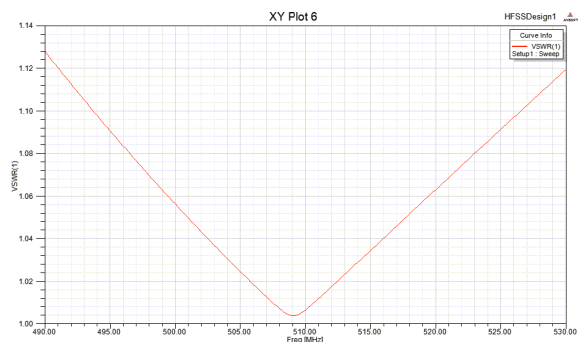


図3：VSWR (上) と電場強度分布 (下)

3.2 熱構造解析

高周波解析から 600 kW の高周波電力透過時にセラミックス、銅フレームで、それぞれ約 30 W、88 W の電力が消費される。セラミックス窓で消費電力が大きいのは、ろう付け部で約 143 W と見積もられた。これらの電力消費による温度上昇と熱膨張による破損を防ぐため、2本の冷却水路に 3 l/min の冷却水を流して排熱を行う。ANSYS Workbench^[7]を用いて、その排熱設計を行った。安全率を 2 とし、600 kW 伝送時のフレーム及びスリーブにかかる相当応力が銅の引張り強さ 200 MPa の 1/2 以下、セラミックスにかかる最大主応力が仕様強度 300 MPa の 1/2 以下、ろう付け引張強度 200 MPa^[8]の 1/2 以下を目指して水路の配置を最適化した。

水路をセラミックスから 36 mm 離れた位置に設置し、供給水温を 30 °C とした時の解析結果を図 4 に示す。最大上昇温度はセラミックス中央で約 26.3 °C である。相当応力の最大値はセラミックスと接合しているスリーブに生じて約 60 MPa、セラミックスにかかる主応力は、ろう付けの角に集中し、約 130 MPa であった。ろう付け部に対しては目標値より大きくなったが制限強度以下であるため、加工が容易な、この配置を採用した。

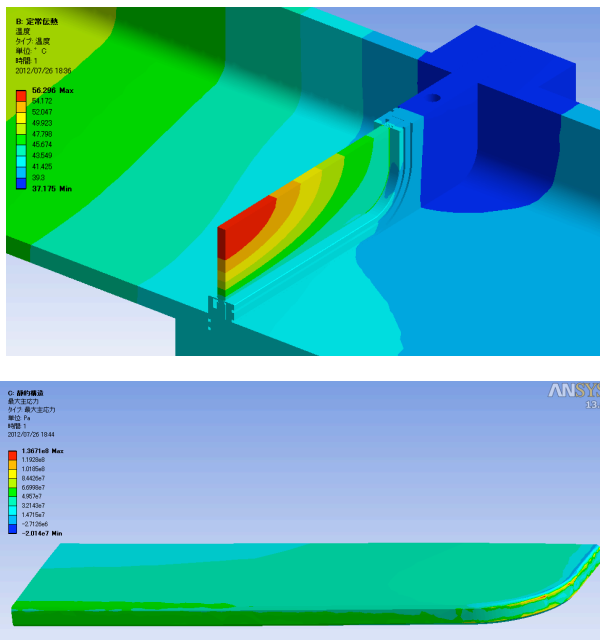


図 4：(上) 温度分布 (下) 最大主応力

4. プロトタイプ機試験

4.1 低電力特性測定

高さ 100 mm の矮小導波管を WR-1500 導波管に接続するため、1/4 波長段差変成器を製作した。プロトタイプセラミックス窓の両端に矮小導波管と変

成器を介して WR-1500 導波管、同軸導波管変換器に接続し、高周波特性をネットワークアナライザーで測定した。その測定結果を図 5 に示す。同軸導波管変換器の狭帯域特性ため、正確な中心周波数と帯域は測定できなかったが、測定値のピーク周波数 510.4 MHz 及び運転周波数 508.58MHz での VSWR はそれぞれ、1.01、1.08 であった。

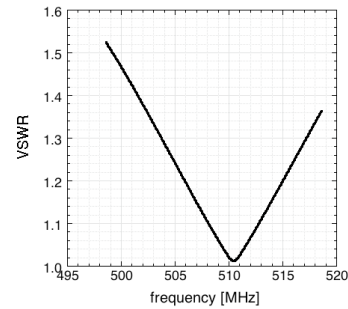


図 5：プロトタイプ機の VSWR 測定値

4.2 大電力試験

図 6 にテストスタンドで行った大電力試験セットアップの写真を示す。製作したプロトタイプ機は 1 台であるため、進行波による試験ができない。そこで進行波 600 kW の電場強度と熱負荷に相当する全反射 150 kW にて試験を行った。片側をショート板で閉じた真空導波管にセラミックス窓を締結し、変成器を用いて WR-1500 導波管に取り付け、サーキュレータを介して 1.2 MW クライストロンに接続

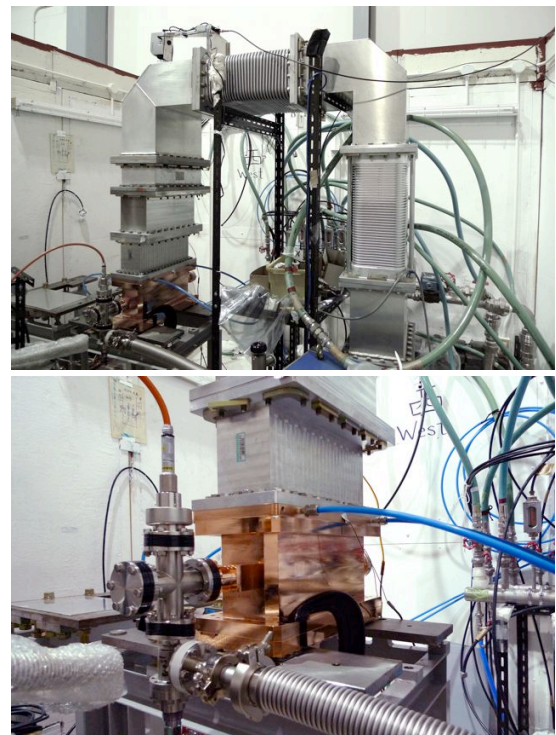


図 6：ハイパワー試験セットアップ

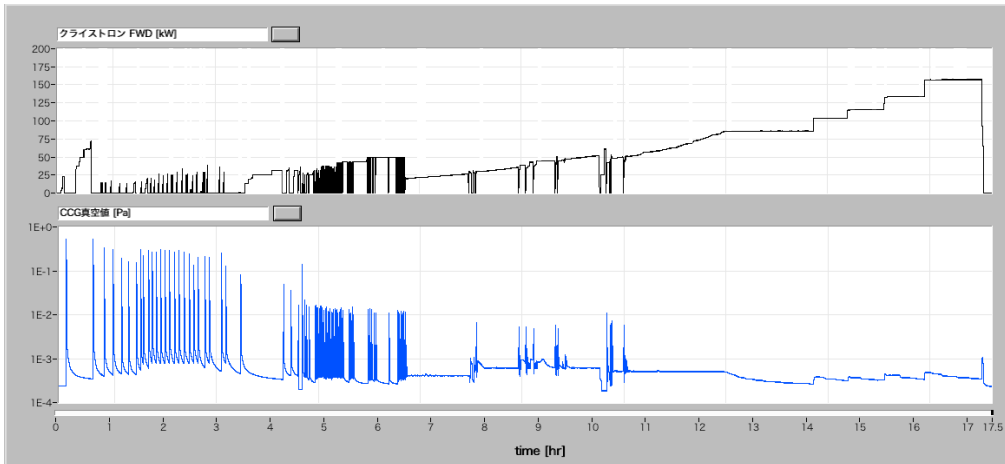


図 7 : 150 kW 大電力試験チャート : (上) 高周波電力 (下) 導波管内の真空値

した。セラミックス窓を透過した高周波は真空導波管のショート板で全反射されるのでサーキュレータに取り付けた 1 MW ダミーロードで吸収させた。

真空導波管のショート板には内部観察ポートが設けられており、アークセンサ (検出波長 400 nm、受光感度 $6 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) にて内部の放電状態を観測した。また、E ベンド導波管のポートには放射温度計を設置してセラミックス中心部の温度を測定した。真空導波管内を 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た後、大電力試験を開始した。クライストロン出力電力と真空値の変化を図 7 に表す。大電力投入の初期には放電により 10^{-1} Pa までの急峻な真空悪化を繰り返したが、約 7 時間を越えたあたりから急峻な放電と真空悪化は収まった。図 8 にアークセンサの出力波形を示す。急峻に出力飽和していた波形がエージングにより緩和されている状況が確認できる。約 18 時間のエージングによって真空は約 3×10^{-4} Pa で安定し、150 kW の連続運転に成功した。150 kW 時のセラミックス中心部上昇温度は 28.9°C で ANSYS 計算値より 2.6°C 高かった。パワーロスが設計より 1 割程度大きいことになるが、セラミックス A479B の誘電損失は仕様どおり十分小さい (< 0.0001) ことが確認された。銅フレームやスリーブ、窓近傍の温度上昇はシミュレーションとほぼ同等の値であった。

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での使用を目指した交換容易なコンパクトセラミックス窓を開発した。製作したプロトタイプ機は、ほぼ設計通りの高周波特性を有し、破損や真空漏れを起こすことなく、150 kW の全反射大電力透過試験に成功した。

謝辞

セラミックス窓の開発にあたって、京セラ (株) 吉住浩之氏、笹川敦司氏、コスモテック (株) 深水

光秀氏、杉嶋健司氏に大変お世話になりました。両社の技術によりセラミックス窓製作に成功いたしました。心より感謝申し上げます。また、真空導波管及びシール部の開発において (株) ムサシノエンジニアリング宮本和夫氏にご尽力いただきました。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] <http://global.kyocera.com/prdct/fc/product/pdf/electronic.pdf>
- [6] H. Saeki, et al., "Vacuum seal for a rectangular flange", Vacuum 85, p.975, 2011
- [7] <http://ansys.jp/>
- [8] 鴨志田 武, 伊坂昭雄, 茨城県工業技術センター研究報告, 第 21 号, p.38, 1992

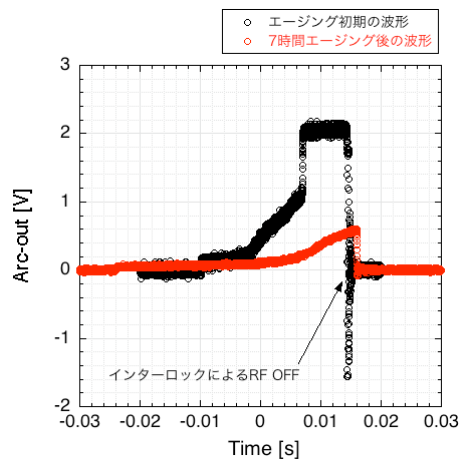


図 8 : アークセンサ出力波形の変化