PASJ2018 FROM10

ARES 空洞用高周波窓可換式入力結合器の大電力試験

HIGH-POWER TEST OF RF INPUT COUPLER WITH A REPLACEABLE WINDOW FOR THE ARES CAVITY

吉野一男[#], 影山達也, 坂井浩, 阿部哲郎, 竹内保直, 榎本瞬 Kazuo Yoshino[#], Tatsuya Kageyama, Hiroshi Sakai, Tetsuo Abe, Yasunao Takeuchi, Shun Enomoto High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

We have developed an RF input coupler with a replaceable window for the ARES cavity reused in SuperKEKB. The high-power test of the prototype coupler has been successfully completed. Before the high-power test, we detached the RF window part from the coaxial loop antenna part, and then tried to reassemble and weld the two parts. In this paper, we report the results of the high-power test and points needing improvement for vacuum-seal welding.

1. はじめに

SuperKEKB の常伝導空洞(RF 周波数 508.9 MHz)として、主リング(MR)に ARES 空洞[1]が 30 台、ダンピングリング(DR) に DR 空洞[2]が 2 台使われている。

ARES 空洞の高周波入力結合器(以下カプラ)においては、KEKBより結合度を高め、空洞1台あたりの給電電力も従来比で約1.9倍の750kW(連続波)に対応したSuperKEKB用の結合度増強型カプラへの更新を、ほぼ完了した。上記のカプラは、いずれも同軸構造で、高周波窓には外径 φ166 mm、内径 φ38 mm、厚さ10 mmのアルミナ円板を使用し、同軸部の先端には磁気結合ループを有する。これらの部品は、多段ロウ付けによって一体型に組み立てられている(図1参照:ループ部の突出し長さを除き、各カプラとも内面寸法は同一)。

我々は、結合度増強型カプラの開発や試験の過程で、 以下の知見を得た。

- 高周波窓の冷却は、アルミナの内・外周に金ロウ付けした薄肉銅金具を直接水冷しているが、その金具のロウ付け治具として使用されるモリブデンの金具及びワイヤー(図1拡大図参照)が原因となって水路の銅部品が腐食される。現在、その対策として防錆剤を添加した冷却水を流している[3]。腐食問題への根本的な対策の一つとして、高周波窓のアルミナ材料を低誘電損の高純度アルミナに変更して窓の発熱量を約一桁減らすことで、アルミナの内・外周銅金具が接する水路には直接通水しない間接冷却型カプラを開発した。その試作機の電力試験において800 kW(連続波)が入力できる事を確認した[4]。
- 間接冷却型の試作機においても、マルチパクタ放 電抑制用窒化チタン(TiNxOy) を従来仕様(厚み 10 nm)で成膜していたが、200 kW 辺りからマルチ パクタ放電による発光が発生する事を電力試験で 観測した。このため、本試作機の MR への適用は 断念し、DR の2 空洞(共に最大入力電力 200 kW の連続波)に取付けた。Phase IIからの DR の運転 では、カプラ由来の発光もなく順調に稼働し、高周

波窓専用の水冷が不要なので、メンテ費等のコスト 削減や、アルミナ内・外周水路の腐食の問題を解 消し信頼性を向上させている[5]。

- 窒化チタン膜を従来の 10 nm から 30 nm に厚くした高周波窓において、入力電力で約 70 kW で窓が破損する事例があった。その原因調査で、窒化チタン膜に銀ロウ付け工程と同じ熱処理を加えると、窒化チタン膜の電気抵抗が著しく低下することが判明した[6]。
- KEKB 当初から、メーカーで製作中のカプラにおいて、銀ロウ付けでの一体組立後の真空リーク試験で、高周波窓の金ロウ付け箇所からリークが発生したことが(69 台中 7 台)あった。

以上の経緯を踏まえ、高周波窓への窒化チタン成膜 後の熱処理(銀ロウ付け)を必要としない製造工程が重 要と考え、多段ロウ付けに依らない組立方法を考案し、 新たに SuperKEKB 用カプラをベースに高周波窓が脱 着可能な新型カプラを開発した(アルミナ材は従来と同 ー)[7][8]。昨年度までに、その同軸窓可換式試作初号 機 WRX15 (Window Replaceable eXperimental model fabricated in JFY 2015: 図1参照)の脱着試験と電力試 験を行った。



Figure 1: Cross-sectional view showing the prototype coupler WRX15.

[#] kazuo.yoshino@kek.jp

Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan

PASJ2018 FROM10



Figure 2: 3D view showing how to assemble the coaxial window and the coaxial loop coupler.

同軸窓可換式試作初号機 (WRX15)の脱 着構造の概要

設計や構造の詳細は文献[7]に、水路や熱解析の詳細は文献[8]で既に報告しているが、以下にその要点をまとめる。

2.1 分割·組立構造

高周波窓部と同軸ループ結合部が分割された状態から組立までを図2に示す。内導体の算盤玉は上下に半 割構造(図2左参照)となっており、平歯車形状に加工さ れた内導体連結ネジを算盤玉の下側部品に収納する。 算盤玉の合体には、下側部品を6本の六角穴付ネジで 締付ける。内導体の連結(図2右参照)は、先端に歯車 の付いた長尺棒の専用工具(以下、長尺工具)を、算盤 玉の上方開口部から差し込み、連結用ネジの歯車に噛 み合わせて回す。全てのネジはトルク管理で締付ける。

2.2 RF コンタクト

RF コンタクトは、高周波窓のアルミナ内・外周にロウ付 けされる銅金具の真空側先端を、同軸ループ結合部の 平面に押し当てる構造となっている(図 1 の拡大図参 照)。RF コンタクトの内導体側と外導体側の軸方向の相 対位置は同一平面とし、組立時や完成後の寸法測定で、 高い精度を得やすくした。内導体側の押し当ては、2.1 項で示した長尺工具をトルク管理で締付け、その軸力に よって RF コンタクトを得ている。外導体側も、その外周 の 6 本のボルトの軸力によって押し当てている(どちらも 線圧が 20 N/mm で締付け)。

2.3 外導体の真空封止

外導体連結部の真空封止は、薄肉リップ金具(片側 0.2 mm 厚の SUS304)の TIG(Tungsten Inert Gas)溶接方 式とした(図 2 中央参照)。このリップ金具は、外周方向 に外導体から 12 mm(その内 7~8 mm が水平部)張り 出しており、溶接部を切除しても、2~3 回の脱着ができ るよう想定していた。

2.4 内導体用水路の経路

従来の内導体用水路の経路は、(高周波窓の内周用 水路と並行して)内導体の大気側方向から導入し、ルー プ側の先端近くで折り返す二重管構造となっていた。 WRX15 では図1に示すように、外導体の水路からルー プ内部に新たに設けた水路を通して内導体の算盤玉近 くで折り返す二重管構造とした。

3. WRX15の脱着試験

WRX15 の大電力試験の前に、高周波窓の脱着を試 した。その理由は、内導体の算盤玉半割部品の組み立 て時の六角穴付ネジの締付けトルク値が、組立時に確 認していなかったからである。本機は RF コンタクトの押 し当てをネジやボルトの締付トルク値で管理しているので、 上述の部品の締付けトルク値の確認の必要があった。加 えて、脱着作業の難易度の検証や作業技術の習得及び



Figure 3: Cutting of the welded lip seal.

PASJ2018 FROM10



Figure 4: Confirmation of tightening torque for the abacus-shaped inner conductor part.

次号機への反映も考慮して、KEK 施設内で作業を行った。

3.1 実機のリップ溶接部の切断

リップ外周の溶接部の切断には、市販の金切りはさみ (三菱マテリアル製 tesky-u:ステンレス板厚 0.2~0.8 mm 対応)を使用した。事前にリップ金具を模擬したステ ンレス薄板で切断具合を試した後に、実機のリップ溶接 部を(周方向で1mm程度の切りしろを目安に)切断した。 図3に、リップ溶接部の切断時の写真を示す。

3.2 リップ溶接切断後の同軸ループ結合部の取り外し

同軸ループ結合部の取り外しは、図1に示すように算 盤玉内の連結ネジ頭部の隙間の軸方向の長さが、ネジ 側の長さより短いので、長尺工具を使ってネジを緩めて もそのままでは完全に外すことはできない。そのため、隙 間の範囲内でネジを緩めた後に、チェーンブロックを 使って結合部を徐々に吊り上げながら連結ネジを緩めて いき取り外した。

3.3 算盤玉半割部品の組立用六角穴付ネジの締付ト ルク値の確認

同軸ループ結合部を横置きにし、算盤玉半割部品を 取付けている 6 本の六角穴付ネジを、トルクレンチを 使って、規定より低い値から締めていき段階的に上げな がら規定値(0.8 Nm)になるまで締めた(図 4 参照)。その 後、3.2 項の逆の手順で高周波窓側に取付けた。

3.4 溶接模擬試験用の供試体

実機のリップ金具外周を溶接する前に、手持ちの溶接機(DAIHEN INVERTER ARGO 300P)における条件出しのため、リップ部金具を模擬した供試体を 3 組用意した。

供試体のリップ部は、材質と厚みは実機と同一にし、 外径は実機(φ232 mm)より少し大きめ(φ240 mm)にし て、切りしろを多めに確保し、中央部にダクトを介して真 空試験用の ICF70 フランジを取付けた(図5 参照)。

3.5 供試体のリップ外周の溶接

リップ外周の TIG 溶接では、メーカー(三菱重工業機



Figure 5: Vacuum leak test of a test piece for lip seal welding.

械システム株式会社)で溶接時に使用した銅の冷やし金 を使い、溶接要領(冷やし金を十分に密着させ、溶接が 冷やし金の内側に入らないこと等)も参考にして行った。 溶接の際は、クランプメータにて溶接電流をモニターし ながら行ったが、溶接電流が 10A 以下の低い領域では 安定しなかったので、溶接機を Panasonic TRS150 に変 更した。その後、溶接電流を微調整しながら溶接とリーク 試験を何回か繰り返し、補修溶接にて 1 組がリーク試験 に合格した。(溶接条件は、アルゴンガス流量:10 L/分、 タングステン電極: φ1.2 mm、溶接電流:測定値で 9 A 前後、初期電流(溶接開始時電流)及びクレータ電流 (溶接終了部のクレータという凹みを少なくするための終 了時の電流):4A、パルス無し)。この時点では、薄肉の ステンレス板の溶接は、経験がない溶接工にとってはか なり難しい作業であることが分かったが、供試体での補 修溶接がうまくいったことで実機でも溶接できると判断し た。

3.6 実機のリップ外周の溶接

最初に供試体で合格した溶接条件で実機のリップ外 周の溶接を行ったが、真空リーク試験で合格できなかっ た。更に補修溶接(図6参照)でもうまくいかなかったので、 溶接技術に詳しい KEK 職員に溶接部を見てもらい、薄 板溶接に関する以下の助言を頂いた。

冷やし金をしっかり圧着し、初期電流が4Aでも、



Figure 6: Repair lip welding for WRX15.

Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan

PASJ2018 FROM10



Figure 7: Repair welding where the welding lip is sandwiched by the two stainless steel plates (0.5 mm thick). (Red circle : Leak point after repair welding)

溶接電流が6A~8A程度であれば、経験上問題 なく溶接できる。

- 溶接電流と初期・クレータ電流との差が少ないと溶接の最後で凹凸が発生しやすい。薄肉用の溶接機では、初期・クレータ電流を1A程度に低くすると溶接しやすくなる。
- ・ 薄肉溶接が難しい場合は、例えば 0.5 mm の SUS 板を上下に挟んで、一緒に溶接すればうまくできる。
 以上の助言を踏まえて、溶接機を極薄板溶接が可能

な DAIHEN マイクロ TIG 溶接機(MRTP-135)に変え、 再度供試体での溶接を試し、供試体のリーク試験が合 格した後に実機の再補修溶接を行った(溶接条件は、ア ルゴンガス流量 10 L/分、タングステン電極: ϕ 1.2 mm、 溶接電流:測定値 9 A、初期電流・クレータ電流 4 A、高 速パルス(300Hz))。その補修でも複数のリーク箇所が 残ったので、その内の 1 箇所に 0.5 mm の SUS 板を挟 む重ね溶接を試した。そこでうまくいったので次に、補修 を繰り返して最も切りしろが残っていない 1 箇所に重ね 溶接を行った。しかし、SUS 板の左端の真空漏れは解 消できなかった(図 7 参照:赤枠が重ね溶接後の真空漏



Figure 8: TORR SEAL (Agilent Technologies Part Number 9530004) applied to one of the leak points.

れ箇所)。

以上の経緯から、溶接がうまくできなかった理由として、

- ステンレスの厚みが片側 0.2 mm の重ね合わせ溶 接は、薄肉溶接の熟練工や専門業者でないと対応 できないほど難易度が高い。
- 溶接リップ部の切断を、金切りはさみで行ったが、 切り端で角が生じた。溶接前にできるだけ角は落と したが、補修を繰り返すほど切り端の角が大きくなり、 そこの補修がうまくできずリークが残った。

これらの理由により補修溶接は諦め、2 箇所のリーク 箇所を TORR SEAL で封止することにした。

 リップ金具補修溶接後のリーク箇所への TORR SEAL による真空封止

TORR SEAL には Agilent Technologies 社製 (Part No.9530004) を使った。実機の前に SUS 板に仮塗布して、使い方や硬化時間(室温で 1~2 時間)及び乾燥時間(室温で 24 時間)後の硬化具合を確かめた。その後、 実機の 3 箇所のリーク箇所に塗布した(図 8 参照)。乾燥 後のリーク試験は 1 回目で合格した。

4. WRX15の大電力試験

4.1 高周波窓の電力試験前処理

現在、カプラの大電力試験前には、高周波窓の真空 側を、オゾン水洗浄を主な目的とした洗浄処理とベーキ ング処理を行っている[9]。WRX15 でも同様に以下の手 順で行った。

- 洗浄処理は、最初にアセトン、次に超純水で洗浄し、 最後にオゾン水で洗浄した。この時のオゾン水は、
 濃度 8 mg/L で 100 cc を投入し 10 分程度保持した。
- 窒素ガスを流しながら乾燥。
- ベーキング処理は、温風機とリボンヒーターを使い、 高周波窓側は真空状態にしながら行った。但し、今 回は TORR SEAL の使用温度範囲が-40℃~ 120℃なので、ベーキング温度(通常は最大 150℃) を最大でも100℃以下にして6日間行った。

当該処理により、電力試験時のパルチパクタ放電や 真空圧力の跳ねの頻度が低下し、結果としてコンディ ショニング時間の短縮(100時間程度から70時間前後) が期待される。

4.2 テストスタンドへのセットアップ

大電力試験は常設のテストスタンドにて行った。テスト スタンドは、放射線シールドの外壁内にアレス空洞系で 使用している貯蔵空洞が設置されている。貯蔵空洞には、 1 MW(最大)連続出力のクライストロンから、導波管・入 力側カプラを通して電力を投入し、出力側カプラ・導波 管を通して 1 MW(最大)ダミーロードに吸収される。入・ 出力側のカプラの各々の結合度を調整することで、空洞 への給電を模擬している[10]。入力側カプラに WRX15 を取付け、出力側カプラには、SuperKEB 用カプラの大 電力試験に常時使用している結合度増強型カプラの試 作機を取付けた。真空排気は、イオンポンプ(排気量: 400 L/s)2 台を 24 時間稼働させ、電力試験中のみター ボ分子ポンプ(排気量:300 L/s)を併用した。カプラへの



Figure 9: RF conditioning history curve for WRX15, together with that for a current-type coupler.

冷却水は、高周波窓内・外周水路には、防錆剤入り純水 をそれぞれ 5 L/min 通水し、同軸結合ループ側は純水 を 5 L/min 通水した。

- 4.3 大電力試験結果
- WRX15 の大電力試験は、(平日の日中のみの試験で)コンディショニング時間の累計 70時間弱で、 目標の入力電力(800 kW)に到達した。図 9 に入 力電力の日中の最大値の履歴を示す。コンディショ ニング時間は、オゾン水洗浄を行った従来機と同 等であった。又、窓の発光は、コンディショニング過 程での真空圧力の跳ねによる発光を除き通常は無 く、800 kW 到達後も発光は無かった。
- コンディショニング後に、温度や真空圧力等の各 データを 100 kW ステップで測定した。この試験で は、真空や反射のインターロックも無く 800 kW(真 空圧力は 6.7×10⁻⁶ Pa 以下)まで順調に上がった。
- 更に、クライストロンが安定動作する最大出力(約 900 kW)まで電力を上げ、カプラへの入力電力で 最大 835 kW まで投入できる事を確認した。

5. まとめと今後の予定

SuperKEKBのARES常伝導空洞の高周波給電カプ ラとして、SuperKEKB用性能増強型カプラを開発した。 開発段階において、高周波窓への窒化チタン成膜面が、 組立の後工程である熱処理(銀ロウ付け)により影響を受 けることが判明した。そこで、SuperKEKB用カプラと互換 性を保ちながら、銀ロウ付けに依らない機械的な方法で 同軸高周波窓部が脱着可能な入力結合器(WRX15)を 新たに開発し、その大電力試験を行った。試験の結果、 入力電力で最大 835kW(連続波)まで投入でき、従来機 と同等の性能を確認した。

現在、高周波窓可換式カプラ試作2号機の開発を進 めている。初号機ではリップ金具の再溶接の難易度が高 すぎたので、厚みを0.2 mmから0.4 mmに変更して溶 接を容易にする。又、高周波窓のアルミナ材料を低誘電 損の高純度アルミナに変更して窓の発熱量を減らすこと で、アルミナの内・外周銅金具が接する水路には直接通 水しない間接冷却方式を採用する。以前の間接冷却式 の試作機の電力試験で、冷却効果は800 kWまで実証 済みだが、高周波窓の発光の問題が残っており、この窓 可換式の特徴である窒化チタン成膜後の熱処理(銀ロウ 付け)の影響を受けていない成膜面が、高純度アルミナ のマルチパクタ放電を抑えると期待している。

謝辞

本研究の薄板溶接の試験で有益なご助言を戴いた高 エネルギー加速器研究機構の原和文氏に感謝の意を 表する。

参考文献

- T. Kageyama *et al.*, "ARES CAVITY SYSTEM FOR SuperKEKB", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2011, pp. 1245-1249; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj8/proceedings/po ster/TUPS126.pdf
- [2] T. Abe *et al.*, "Status of RF Accelerating Cavities for SuperKEKB Positron Damping Ring", The 22nd KEKB Accelerator Review Committee Meeting, Tsukuba, March. 14, 2018;

http://research.kek.jp/people/tabe/SR/Pres/KEKB_Revi ew/KEKB_Review_2018_DR-Cavities.pdf

- [3] 竹内保直 et al., "高周波窓冷却水路の腐食", The 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan, November, 2003;
 - http://conference.kek.jp/sast03it/WebPDF/1P075.pdf
- [4] K. Yoshino et al., "Indirect cooling of RF-window for the KEKB ARES Cavity by using High Purity Alumina Materials", Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2008, pp. 649-651; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj5_lam33/content s/PDF/TP/TP013.pdf
- [5] 吉野一男, "ダンビングリング空洞への高周波窓間接冷却型カプラの適用について", KEK Progress Report 2017-9, March, 2018, pp. 33;
 https://lib-extopc.kek.jp/preprints/PDF/2017/1723/172 3009.pdf
- [6] T. Kageyama et al., "INPUT COUPLER FOR THE ARES CAVITY IN SUPERKEKB", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2014, pp. 590-594; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings

/PDF/SAP0/SAP044.pdf

- [7] T. Kageyama et al., "RF INUT COUPLER WITH A REPLACEABLE WINDOW FOR THE ARES CAVITY", Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2016, pp. 353-356; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings /PDF/MOP0/MOP016.pdf
- [8] K. Yoshino et al., "THERMAL ANALYSIS OF RF INPUT COUPLER WITH A REPLACEABLE WINDOW FOR THE ARES CAVITY", Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2016, pp. 380-382;

https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceeding s/PDF/MOP0/MOP023.pdf

- [9] H. Sakai et al., "Ozonized Water Rinsing of RF Windows", Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2007, pp. 829-831; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj4_lam32/PASJ4-LAM32%20(D)/contents/PDF/FP/FP60.pdf
- [10] H. Sakai *et al.*, "High Power Testing of Input Couplers for SuperKEKB", Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference, 2005, p. 1294; https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnu mber=1590739