

## 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<sup>#</sup>, 影山達也, 坂井浩, 阿部哲郎, 竹内保直, 榎本瞬

Kazuo Yoshino<sup>#</sup>, 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 750 kW(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  $\phi$  166 mm、内径  $\phi$  38 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( $TiN_xO_y$ ) 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一)[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。

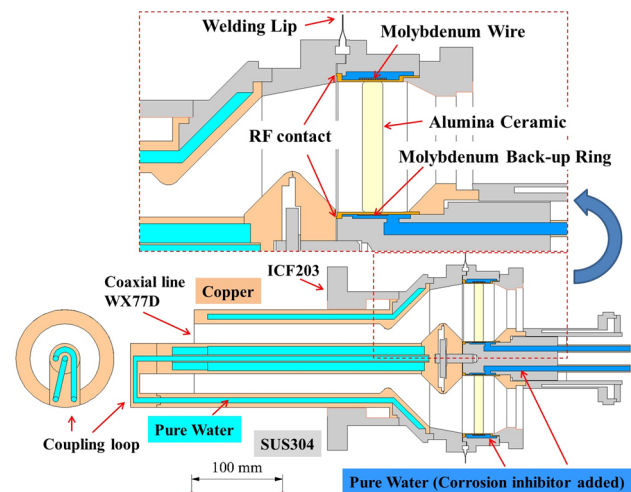


Figure 1: Cross-sectional view showing the prototype coupler WRX15.

<sup>#</sup> kazu.yoshino@kek.jp

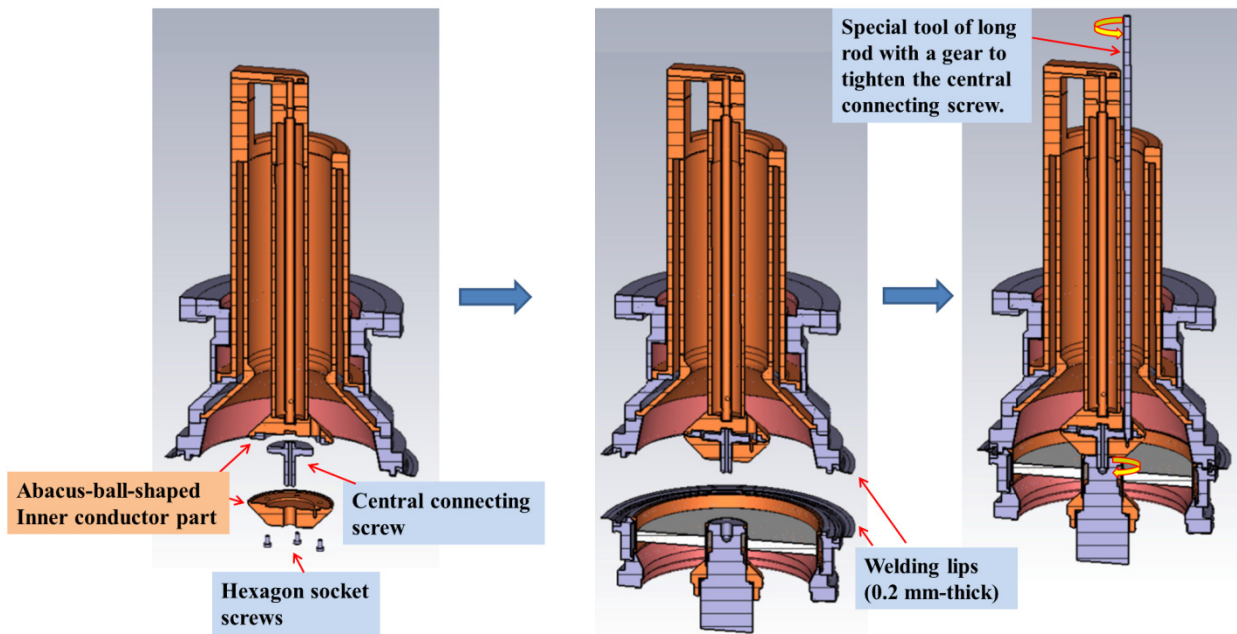


Figure 2: 3D view showing how to assemble the coaxial window and the coaxial loop coupler.

## 2. 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け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.

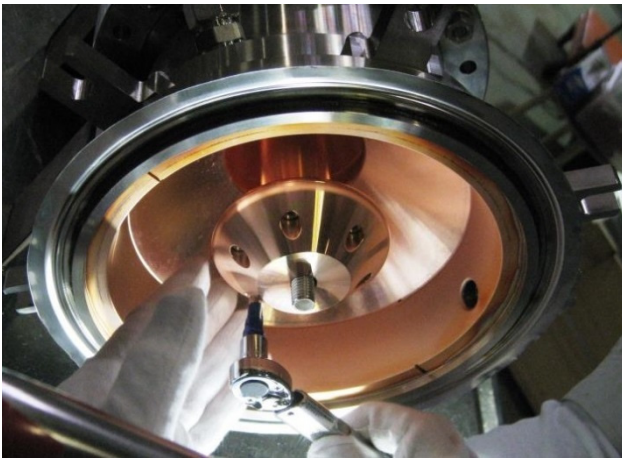


Figure 4: Confirmation of tightening torque for the abacus-shaped inner conductor part.

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 1 mm 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( $\phi 232$  mm)より少し大きめ( $\phi 240$  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

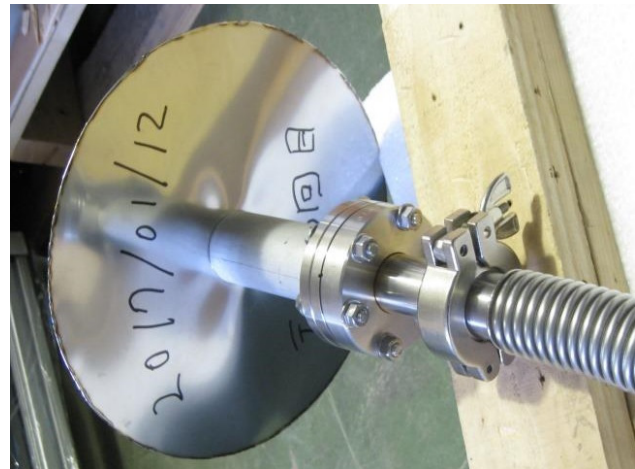


Figure 5: Vacuum leak test of a test piece for lip seal welding.

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ため、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:  $\phi 1.2$  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ため、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 4 A でも、

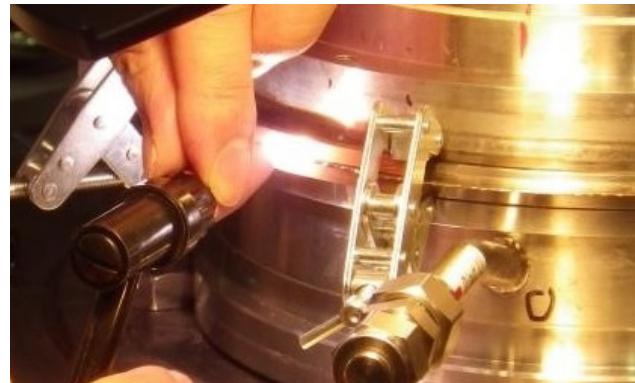


Figure 6: Repair lip welding for WRX15.



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 6 A~8 A 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 1 A 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:  $\phi$ 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 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。

### 3.7 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いった。但し、今回は TORR SEAL の使用温度範囲が  $-40^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$  なので、ベーキング温度(通常は最大  $150^{\circ}\text{C}$ )を最大でも  $100^{\circ}\text{C}$  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

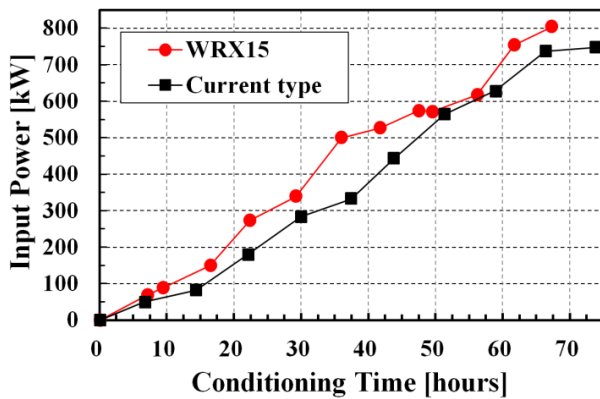


Figure 9: RF conditioning history curve for WRX15, together with that for a current-type coupler.

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  $6.7 \times 10^{-6}$  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。

### 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](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj8/proceedings/po-ster/TUPS126.pdf)
- 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\\_Review/KEKB\\_Review\\_2018\\_DR-Cavities.pdf](http://research.kek.jp/people/tabe/SR/Pres/KEKB_Review/KEKB_Review_2018_DR-Cavities.pdf)
- 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>
- 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](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj5_lam33/content_s/PDF/TP/TP013.pdf)
- 吉野一男, “ダンピ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/2017/1723/1723009.pdf>
- 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](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SAP0/SAP044.pdf)
- 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](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/MOP0/MOP016.pdf)
- 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/proceedings/PDF/MOP0/MOP023.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/MOP0/MOP023.pdf)
- 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](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj4_lam32/PASJ4-LAM32%20(D)/contents/PDF/FP/FP60.pdf)
- 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=&arnumber=1590739>