

SuperKEKB におけるアレス空洞用入力結合器

INPUT COUPLER FOR THE ARES CAVITY IN SUPERKEKB

影山達也[#], 吉野一男, 坂井浩, 阿部哲郎, 竹内保直

Tatsuya Kageyama[#], Kazuo Yoshino, Hiroshi Sakai, Tetsuo Abe, Yasunao Takeuchi

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The SuperKEKB collider to push the luminosity frontier is under construction. Its cutting-edge “nanobeam” scheme reduces the required beam currents and consequently allows us to reuse the ARES cavity system successfully operated in KEKB. On the other hand, the input coupler needs to be upgraded since the beam power per cavity is increased up to 600 kW. We report on the coupler development and production together with the results of high-power tests, and introduce a conceptual design based on some lessons learned from an RF window failure.

1. はじめに

ナノビーム方式を採用した SuperKEKB^[1]において、電子・陽電子ビームに対して要求される電流値は KEKB 実績比でいずれも 2 倍程度に収まる。其の点を踏まえ、改めて机上検討、及び実証実験を重ねた。其の結果、先の KEKB での大電流ビーム加速に実績を有するアレス空洞^[2] (RF 周波数 508.887 MHz) を、加速空洞本体に対する改造は不要、且つ高次モード減衰用電波吸収体に対する増強も不要、即ち現行型のままにて次期 SuperKEKB においても使用可能との結論を得た^[3]。

一方、アレス空洞 1 台あたりのビームへの供給電力の増加に対応すべく、入力結合器 (以下、入力カプラ、もしくは、単にカプラとも記す) については性能増強が必須となる。カプラ 1 個あたりの給電電力に対する要求仕様は、KEKB では 400 kW であったが、SuperKEKB では最大 750 kW (1MW 級クライストロン 1 本でアレス空洞 1 台に給電する場合) となる。内訳は空洞壁面電力 150 kW (定格空洞電圧 0.5 MV 発生時)、ビーム電力 600 kW である。

本論文では、当該入力カプラの開発、製造、電力試験、及び其の過程で得られた知見 (躓きから得るものは重い) について述べる。併せて、次期改良型的设计 (製作方法も含む) についても紹介する。

2. KEKB 用カプラ

アレス空洞への高周波給電の様子を Figure 1 に示す。アレス空洞は、加速空洞 (高次モード減衰式) と電磁場エネルギー貯蔵空洞 (大型円筒空洞 TE₀₁₃ モード) が、間に結合空洞を介して $\pi/2$ モード結合 (resonant coupling) されている三空洞系^[4]である。入力カプラは貯蔵空洞中段に設けられた三つの給電ポート (円筒周囲、結合空洞の方向を 12 時とし、上方から見て時計回りに 3 時、6 時、9 時の方向) の一つに取り付けられる。通常、3 時もしくは 9 時方向のポートを使用する。対向のポートには、運転時のカプラの様子を覗き窓を通して観測すべく、テレビカメラが取り付けられる

[#] kageyama@post.kek.jp

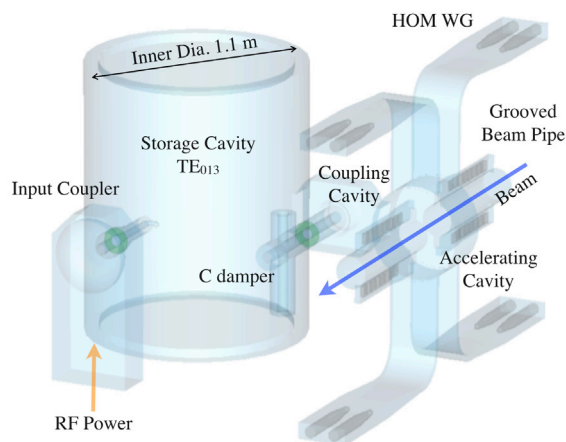


Figure 1: RF power feeding to the ARES cavity.

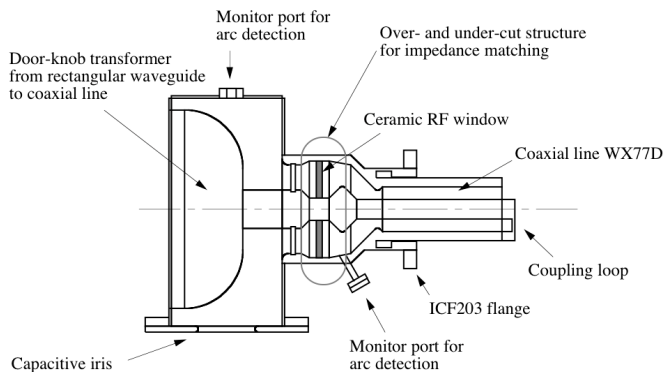


Figure 2: Input coupler for the ARES cavity.

KEKB 用入力カプラ^[5]の構造を Figure 2 に示す。矩形導波管から入って来た高周波は、ドアノブ変換器経由で同軸管に入り、真空気密用のアルミナ円板窓 (純度 95% のアルミナで外径 166 mm、中央孔内径 38mm) を透過し、同軸直管を通過して、終端の誘導ループを介して貯蔵空洞内の電磁場に結合する。なお、アルミナ窓の真空側表面には、二次電子放出係数を低減すべく、反応性 DC スパッタリング法により TiN (窒化チタン膜: 組成式 TiN_xO_y) を成膜 (~10 nm 厚) する^[6]。

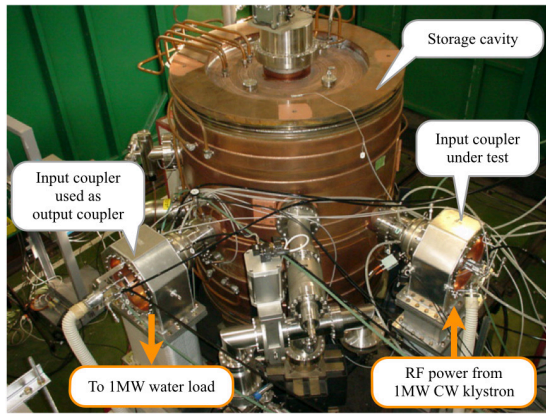


Figure 3: Setup of the coupler test stand.

当該 KEKB 用入力カプラについては、貯蔵空洞単体に 2 個のカプラを取り付けた形態 (Figure 3 参照: 貯蔵空洞の 3 時方向の給電ポートに試験対象となるカプラ、6 時方向のポートに貯蔵空洞から高周波電力を取り出すためのカプラを取り付ける。取り出された高周波電力は 1 MW 級水冷負荷に導かれる。入・出力側カプラ各々の結合度を調整することでビーム加速中のアレス空洞への給電を模擬する。) での電力試験において、800 kW までの給電性能が既に実証されている^[7]。

3. SuperKEKB 用カプラ

3.1 基本設計 (改造・改良の要点)

上述のように、SuperKEKB において要求される 750 kW 超級の給電性能は、試験設備限定での記録ではあるが、既に KEKB 用カプラを以て達成されている。よって、SuperKEKB に向けての入力カプラに対する性能増強は、KEKB 用の構造、製作方法 (真空炉中ステップ銲接合) を踏襲した上で、必要最小限の改造 (結合度増強: 結合ループ延伸)、及び KEKB において実証された改良 (信頼性向上: マルチパクタ抑制用の微細溝加工) を加えるにとどめた。

1) 結合ループの高さ (Figure 4: loop height) を KEKB 用カプラ (入力結合度は最大で $\beta = 3$) の 17 mm から 60 mm に延伸することにより、最大で $\beta = 8$ 程度の入力結合度を可能とした。入力カプラ同軸部の模型 (Figure 4) をアレス空洞予備機に取り付けて得られた測定結果 (入力結合度及び加速モード無負荷 Q 値の loop height に対する応答) を Figure 5 に示す。懸念されたループ先端部の温度上昇については、熱構造解析 (ANSYS 使用) を別途行い、現行の伝熱による冷却方式 (同軸管の内・外導体端部までは冷却水路が設けられている) のままでも定格運転時の冷却水温度に対する温度上昇 57°C と許容範囲内に収まることを確認した。

2) 入力カプラの同軸直管部 (Figure 2 において WX77D の部分) でのマルチパクタ放電を完全に抑制すべく、同軸管の外導体内面に周方向微細溝加工 (Figure 6) を施した。実際、KEKB で運転に使用したアレス空洞 32 台中 2 台において当該マルチパク

タ放電により給電電力を制限せざるを得ない事例が発生したが、微細溝加工を施したカプラに交換することにより問題は解消された^[8]。

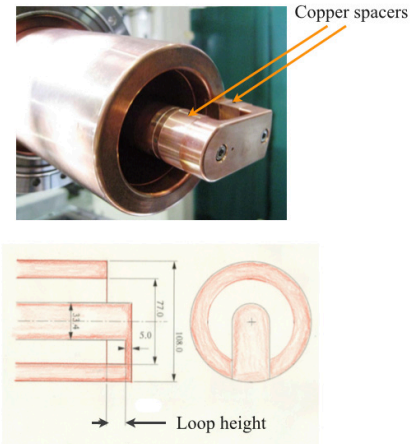


Figure 4: Cold model (coaxial part) of input coupler.

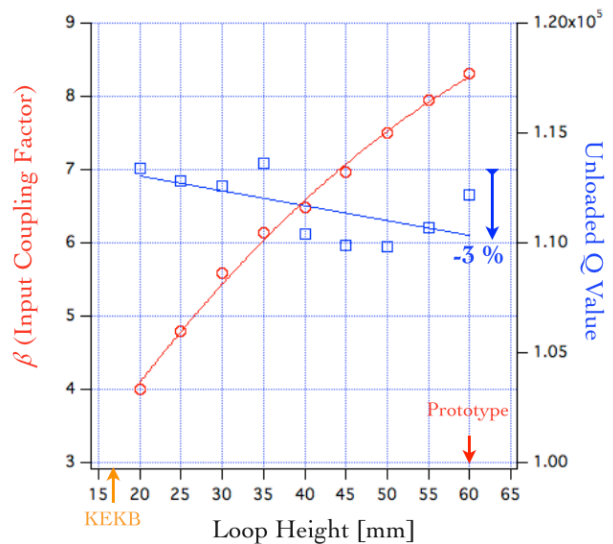


Figure 5: Input coupling factor, measured using a cold model, is plotted as a function of the loop height, together with the unloaded Q value of the accelerating mode.

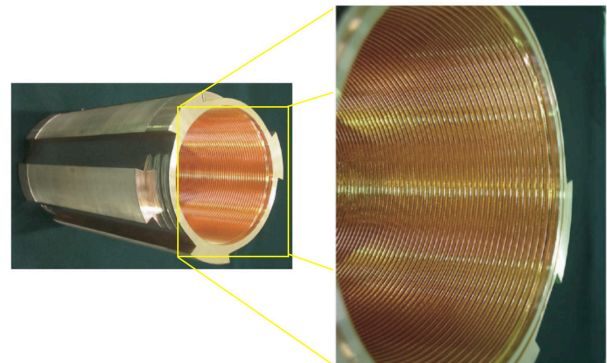


Figure 6: Fine grooving inside the outer conductor of the coaxial line to suppress multipactoring discharge.

3.2 初号機ビーム給電試験

上述の改造、改良を加えた性能増強型初号機を2009年度に製作した。2010年4月、前述の入力結合器試験設備 (Figure 3) において増強型初号機に対する大電力試験を行い、RF コンディショニングを800 kW まで成功裏に終えた。続いて、ビームへの600 kW 給電を実証すべく、当該カプラを KEKB 主リング大穂直線部のアレス空洞 D5-C (1MW 級クライストロン1本で当該アレス空洞1台に給電) に取り付け (空洞冷間時 $\beta = 6.4$)、翌5月中旬から1ヶ月余りにわたって BELLE 実験の間際にビームコンディショニングを行った。そして、KEKB 運転完了を数日後に控えた2010年6月下旬、空洞電圧0.47MV (壁面電力133kW) にてビーム (1.25 A) への給電610 kW を実証した^[3]。

3.3 量産機製造、電力試験

初号機の成功を受け、2010年度から2011年度にかけて量産先行機を計3個、2012年度から2013年度にかけて量産機を計16個製造した。高周波窓に対する TiN 成膜については、KEKB 用入力カプラ量産時に使用されていた実績の有る旧装置を使用することとした。それから、真空炉ステップ鑢接合における生産歩留りを向上させるべく、高周波窓 (アルミナ円板) の内・外周にろう接合される薄肉銅金具、鍵となる鑢接合時拘束用モリブデン金具、及びろう材形状について設計細部見直しにも注力した^[9]。

現在までにカプラ13個に対する電力試験を前述の地上試験設備において行い、其れ等全てについて給電電力750~800 kW までRF コンディショニングを成功裏に完了した。2013年4月にはアレス空洞用入力カプラ専用のオゾン水洗浄・真空ベーキング処理設備が利用可能となった。以降、高周波窓に対するオゾン水洗浄とベーキングが電力試験前処理の標準レシピとなった。一連の表面処理はマルチパクタ放電気味の高周波窓の症状改善に効果があることは過去に実験で確認されている^[10]。加えて、RF コンディショニング中に真空圧力が跳ねる頻度も当該処

理によって著しく減少した (Figure 7)。結果として、カプラ1個あたりのRF コンディショニングに要する総時間数は従来の100時間程度から70時間弱に短縮された。

4. 水素炉ステップ鑢接合 (Plan B)

ステップ鑢接合では、後工程で問題が発生した場合、溶接組立に比べて補修が困難である。特にカプラの場合、アルミナ窓と金具の接合部に問題が発生すると致命的である。即ち、製品はお釈迦になり、部品の再利用さえ高価なモノほど絶望的である。よって、或る期間内にカプラを量産する場合、上述のリスクを想定の上、代替策 (プランB) を事前に講じておくのが良案である。また、単位時間あたりの生産数を確保すべく、複数ラインで並行生産するのも良策である。実際、先の KEKB アレス空洞用入力カプラの量産においても、上述の例に漏れず、独立した二つ系統において且つ異なる方式でカプラが生産された。今回の SuperKEKB 用カプラの量産においても、前例に習い、先の第3章で述べた真空炉鑢接合方式 (プランAとも称す) での試作、量産と並行して、水素炉鑢接合方式 (プランB) についても別途開発を進めてきた。

4.2 プランB初号機高周波窓への TiN 成膜

プランA初号機に遅れること2年余、プランB初号機が2012年に完成した。遅延の一因として、プランB用の TiN 成膜装置の更新が挙げられる。プランAでは、先の KEKB 用カプラ量産で使用された旧成膜装置を再び使用することが出来た。一方、プランB側の旧成膜装置 (KEKB 用カプラ量産にも使用された) は使用不可となっていた。プランB側の新装置でアルミナ円板窓 (既に同軸内・外導体の薄肉銅金具が金鑢接合済み) に成膜した場合、内導体周辺近傍の膜厚が不足気味となり、且つ円板全面に均一な膜厚を得るのも困難であることが判明した。即ち、内導体近傍で膜厚10 nm を得るには、円板の径方向中間部分の膜厚が30 nm と過度に厚くなってし

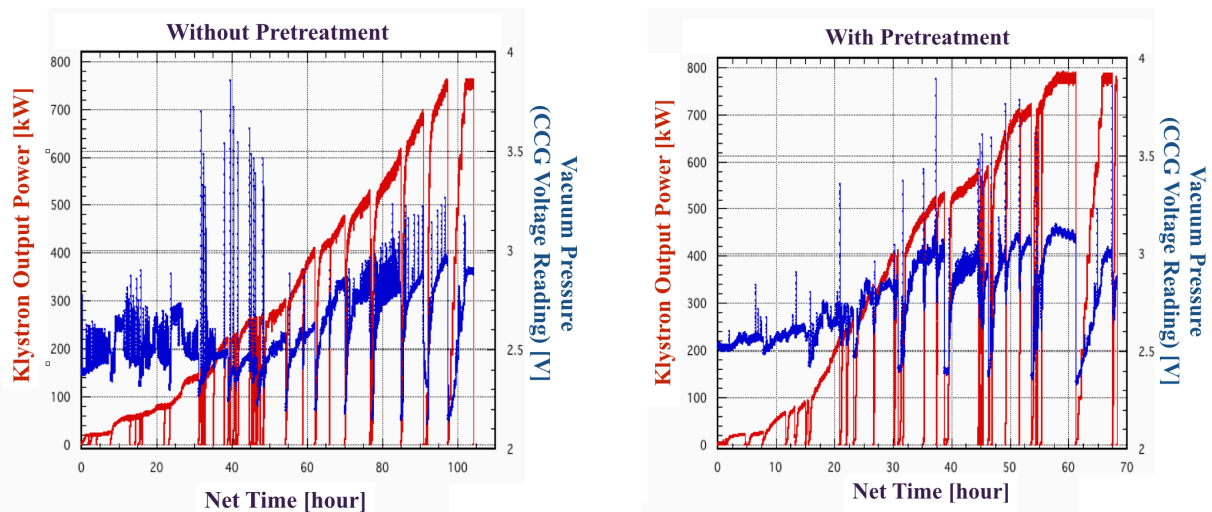


Figure 7: RF processing history plot (right) for an input coupler with pretreatment (ozone water rinsing of the RF window followed by vacuum bake-out) is compared with that (left) for another coupler without pretreatment.

まう。膜抵抗低下による発熱が懸念されたが、当該装置でアルミナ円筒内面に膜厚 40 nm 以上で成膜した高周波窓（豪州シンクロトロン加速空洞用入力カプラの窓で周波数は 500 MHz）での実績も考慮の上、膜厚 30 nm を了とした。

4.3 プランB初号機高周波窓の破損

プランB初号機に対する電力試験を 2012 年 11 月下旬に前述の地上試験設備において実施した。試験初日、入力電力が 70 kW を超えたあたりで反射トリップが頻発した後に窓が割れた (Figure 8)。各部温度記録 (Figure 9) を調べたところ、入力カプラ窓の内・外周 2 系統の冷却水の温度上昇が、出力カプラ側 (入力電力の約 5/6 が出力カプラを通して取り出される、残りは貯蔵空洞壁面損失) に比べて、異常に高かったことが判明した。加えて、当該水温上昇はコンディショニング初期から入力電力にほぼ比例していたこと。さらに、コンディショニング中において窓での連続的な放電、発光は観測されなかったこと。以上二つの事実から、異常発熱の原因は抵抗性と推定された。

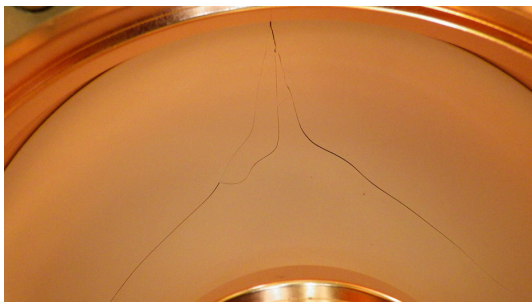


Figure 8: Broken alumina window of the first prototype coupler in Plan B.

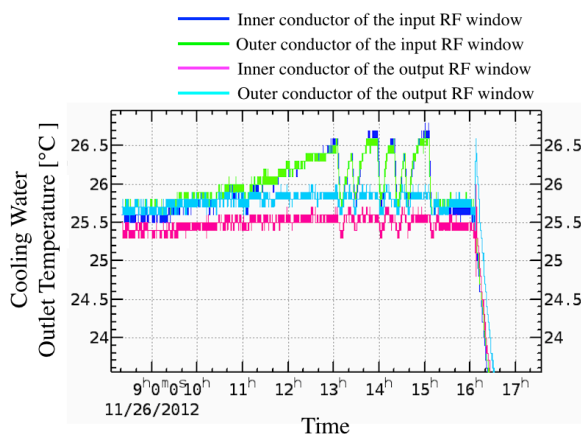


Figure 9: Temperature record of the water cooling system for the RF windows. The input coupler: the first prototype in Plan B. The output coupler: the first prototype^[3] in Plan A, successfully tested at D5-C in KEKB.

前述の水温上昇 (各系統とも冷却水流量は毎分約 4 L) のデータから窓部での総発熱量 (アルミナ誘電損、TiN 膜抵抗性発熱、周辺金具壁損の合計) を算

出した。入力カプラ側では通過電力 70 kW のときに窓部総発熱量 4.8×10^2 W、出力カプラ側では通過電力 58 kW (入力電力の 5/6) で 7.0×10^2 W となった。出力カプラ通過電力を 70 kW に揃えると、当該窓部での総発熱量は 8.4×10^2 W となる。そして、 4.8×10^2 W と 8.4×10^2 W の差、即ち、 4.0×10^2 W 分を当該窓で観測された抵抗性の異常発熱現象由来とした。

通過電力 70 kW 時の上記発熱量 4.0×10^2 W を入力カプラ窓表面 TiN 膜での抵抗性発熱と仮定すると、膜抵抗は 38 kΩ と算出された (膜抵抗はアルミナ円板全面で一定と仮定)。この値は高周波窓用の TiN 膜 (組成式 TiN_xO_y 。柱状晶構造で酸素原子が偏在する粒界が絶縁層となる^[6]) の抵抗値としては異常に低い。

後日、破損した窓を取り出し、TiN 膜抵抗を測定した。測定は簡易な 2 端子法 (端子間隔 20 mm にて直流抵抗を測定) で行った。膜抵抗値への換算係数は電磁場シミュレーション (CST EM STUDIO) にて別途求めた。円板中心から 39 mm (TiN 膜が最厚 ~30 nm になる辺り) の距離で、且つ外観上ひび割れの無い場所を選んで測定したところ、膜抵抗値として約 100 kΩ の値を得た。この値 (直流膜抵抗値) を高周波運転時発熱量から算出した膜抵抗値 38 kΩ と比較するには議論を要するが、TiN 膜抵抗低下説と矛盾しないデータが得られたと判断して良い。

4.4 TiN 膜抵抗低下の原因究明

コンディショニング中の状況から判断して、当該入力カプラ窓の TiN 膜抵抗は電力試験中に低下したのではなく、試験前には既に低かったと考えるのが妥当である。成膜も含めて製造工程の何処に問題が潜んでいるのかを究明すべく、高周波窓と同材質のアルミナ円板 (純度 95%、外径 60 mm、厚さ 10 mm) に膜厚 40 nm にて TiN を成膜し、膜抵抗値の変化を追跡した。膜抵抗値は簡易な 2 端子法 (端子間隔 10 mm にて直流抵抗を測定) にて行い、高抵抗測定には Agilent 絶縁抵抗計 4339B を使用した。端子間抵抗値から膜抵抗値への換算係数は、先と同様に、電磁場シミュレーションにて求めた。

TiN 成膜面の膜抵抗値の追跡測定の結果を、非成膜面 (アルミナ素地) の結果と併せて、Table 1 に示す。膜抵抗は水素炉銀鋳接合 (成膜後の工程) を再現した熱処理後に 7 桁低下している。即ち、膜抵抗の異常低下は膜厚が単に厚いだけでは起きない。後工程の水素炉での熱処理に原因があったと判明した。

TiN 膜結晶構造に対する水素炉での熱処理の影響を確認すべく、透過型電子顕微鏡 (TEM) での観察を某所に依頼した。その結果、当該 TiN 膜の特徴であるところの柱状晶構造が熱処理後には確認できなかった (Figure 10)。加えて、平滑なガラス表面に対する成膜実績から予想される名目膜厚 40 nm に比べて、アルミナ (純度 95%) 表面の実質膜厚は 20 nm 弱と半分に過ぎないことが判明した。これは、アルミナ表面が微視的には粒径 μm オーダーの焼結粒で凸凹で、実際の表面積は平滑面に比べて 2 倍程度広い (半球を平面に敷きつめたモデル) と推測されることから説明可能である。

熱処理による膜抵抗値の低下度は膜厚に依存しないのか、それとも閾値があるのか、更なる調査が必要である。水素ガスの影響についても調べるべく、対照として真空炉熱処理前後での膜厚抵抗の変化についても調査中である。直近の実験によると、暫定ではあるが、真空炉においても水素炉同様に膜抵抗値が7~8桁低下するという結果が得られている。

Table 1: Change in Sheet Resistance of TiN Film (40 nm) after Heat Treatment (800°C) in Hydrogen Furnace

	TiN film (40 nm) coated on alumina substrate	Non-coated alumina surface
Before HT	$5.6 \times 10^{11} \Omega$	$3.0 \times 10^{14} \Omega$
After HT	$3.6 \times 10^4 \Omega$	$1.6 \times 10^{14} \Omega$

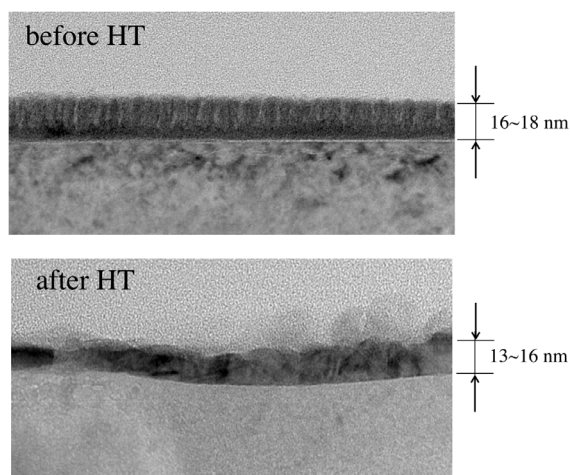


Figure 10: Change in microscopic structure of TiN (TiN_xO_y) film after Heat Treatment (800°C) in Hydrogen Furnace.

5. 次期改良型

前述の円筒窓（内面に膜厚 40 nm 以上で TiN 成膜）であるが、成膜後の工程は TIG 溶接組立のみである。この違いが彼我の明暗を分けたのである。今回の躓きから、窓に対する TiN 成膜後の熱処理工程は極力避けるべきであることを改めて認識させられた。特に大電力用途の場合、熱伝導の悪いアルミナ窓表面での発熱を低減するためにも避けた方が無難である。また、TiN 膜品質への後工程の影響を排除できれば、逆に成膜工程での自由度が増す可能性もある。さらには、先にも述べたが、ステップ溶接方式の生産歩留りにおけるギャングブル的リスクからも脱却できるだろう。

次期改良型カプラの構想図を Figure 11 に示す。アルミナ円板窓の内・外周に金具部品を溶接した後、真空側の面に TiN を成膜する。別途、同軸直管部の内・外導体部品を結合ループで架橋した一体型部品を製作する。当該内導体への冷却水往還は結合ループを通すことになる。内導体部品が片持ち梁の様に容易に動くこと（傾き、捻れ）が懸念される。対策

として、外導体円筒側面から支持棒を差し込めるように小径（ICF ミニフランジ規格相当）のサービスポートを周囲 3カ所に設けておく。次に、窓部品と一体型同軸管部品の組立である。窓側内導体端部を雄ネジ構造とし、対する同軸管側内導体端部には雌ネジ構造を設ける。円板状の窓部品を回してねじ込み、機械的締結力で双方内導体を連結する（気抜孔と RF コンタクトに配慮）。ねじ込み完了後、上記サービスポートから差し込んだ支持棒は取り除く。最後に外筒の組立であるが、こちらは真空封止が必要である。加工・組立精度から判断して、リップ金具シール溶接が適している。リップ金具外縁部の径方向寸法に余裕を持たせておけば、高周波窓の脱着交換も数回は可能であろう。

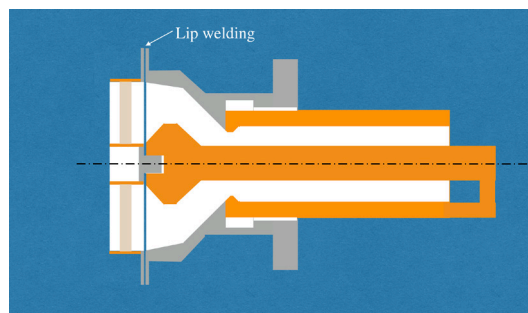


Figure 11: Conceptual design for coaxial-loop coupler which can be constructed without brazing after TiN coating on the RF window surface.

6. まとめ

SuperKEKB 運転開始時に必要とされる性能増強型入力カプラの個数は 10 個である。現在までに真空炉ステップ溶接にてカプラ 19 個（量産先行の 3 個を含む）を製作し、そのうち 13 個に対する電力試験を成功裏に完了した。一方、水素炉ステップ溶接方式では、試作段階で TiN 膜抵抗の異常低下に起因する窓破損という事態に遭遇した。しかしながら、その躓きから得た貴重な知見は次期改良型開発の礎となる。

参考文献

- [1] “SuperKEKB Design Report”, <http://kds.kek.jp/conferenceDisplay.py?confId=15914>.
- [2] T. Kageyama et al., Proc. PAC97, p. 2902 (1997).
- [3] T. Kageyama et al., Proc. of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p. 1245 (2011).
- [4] Y. Yamazaki and T. Kageyama, Particle Accelerators **44**, 107 (1994).
- [5] F. Naito et al., Proc. APAC98, p. 776 (1998).
- [6] S. Isagawa, et al., “Coating Techniques and Improvement of High Power CW Klystrons for TRISTAN”, EPAC94, June 27-July 1, 1994.
- [7] H. Sakai et al., Proc. PAC05, p. 1294 (2005).
- [8] T. Abe et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **13**, 102001 (2010).
- [9] K. Yoshino et al., Proc. of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p. 880 (2010).
- [10] H. Sakai et al., Proc. of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan, p. 829 (2007).