

高周波窓が交換可能な ARES 空洞用入力結合器

RF INUT COUPLER WITH A REPLACEABLE WINDOW FOR THE ARES CAVITY

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

We have developed a new type of RF power coupler for the ARES cavity being reused in SuperKEKB. The key design feature is that the coaxial window part is detachable from the coaxial loop coupler part, while both parts of the current type are integrated into one body by step brazing. In this paper, we report the structural design, assembling method, and thermal design of the new type in comparison with the current type.

1. はじめに

SuperKEKB[1]においては、先の KEKB での大電流ビーム加速に実績を有する ARES 空洞[2][3](RF 周波数:508.9 MHz)が再使用される[4]。一方、入力結合器(カプラ)については、空洞1台あたりのビームへの供給電力増大に伴い、空洞への入力結合度を KEKB 型に比べて高く取れる性能増強型[5]に順次交換を進めている。

現行の性能増強型カプラの基本構造と製作方法は KEKB 用の旧型[6]を踏襲しており、先端に磁気結合ループを有する同軸結合部とアルミナ円板を備えた同軸窓部が多段ロウ接合によって一体構造化されている。アルミナ円板の真空側表面にはマルチパクタ放電対策として窒化チタン膜が施されるが、現行製作方法では、成膜後のロウ接合の際に窒化チタン膜への熱影響が不可避である。成膜条件にも依るが、熱影響による窒化チタン膜の電気抵抗の著しい低下が窓破損に至る異常発熱を引き起こした事例にも遭遇した[5]。他の経験事例としては、窓材を高純度アルミナ(純度 99.7%)に変更した同軸窓において、現行の純度 95%のアルミナ窓と同じ成膜条件ではマルチパクタ放電が完全には抑制されず、窓表面での発光現象が長時間のコンディションにングにもかかわらず解消されなかった[7]。当該発光現象は、成膜後のロウ接合が真空雰囲気中、水素雰囲気中のいずれの場合でも観測された。よって、熱影響下での基板と膜の界面における不純物も含めた何らかの元素もしくは化合物の移動・拡散現象が膜の二次電子放出係数に影響しているのではないかと推測される。以上の実験事実から、多段ロウ接合による現行製作方法、即ち、窒化チタン成膜後のロウ接合時の熱影響が成膜条件の自由度(膜厚、膜と基板材料の相性など)を少なからず制限していると言える。

昨年度(2015 年度)、成膜済みの同軸窓に対する後工程での熱影響を避けるべく、製作方法を一から見直して新型カプラ試作初号機を開発、製作した。新型が現行型と最も違う点は同軸窓部と同軸結合部の組立にある。現行型はロウ接合であったが、新型では同軸の内・外導

体の各接続部での RF コンタクトをボルト・ネジの軸力によって得る方式とした。外導体側の真空封止については、外縁の薄肉リップ金具をシール溶接する方式を採用した。結果として、損耗リスクの高い同軸窓のみを交換すればカプラとして再生可能な構造にもなっている。

2. SuperKEKB 用現行型カプラの概要

図1に SuperKEKB 用現行型カプラ[5]の構造を示す。基本構造及び製作方法は、KEKB 用カプラ[6]を踏襲している。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導かれ、同軸窓(純度 95%のアルミナ円板、外径:166 mm、孔内径:38 mm)を透過し、同軸直管(WX77D)を伝播して、終端の磁気結合ループを介して貯蔵空洞内部の電磁場に結合する。同軸窓の真空側表面には、マルチパクタ放電の抑制を目的として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って窒化チタン膜(組成式 TiN_xO_y) [8]を厚さ 10 nm 程度に成膜する。そして、成膜後のロウ接合によって同軸窓部と同軸ループ結合部は一体構造となる。

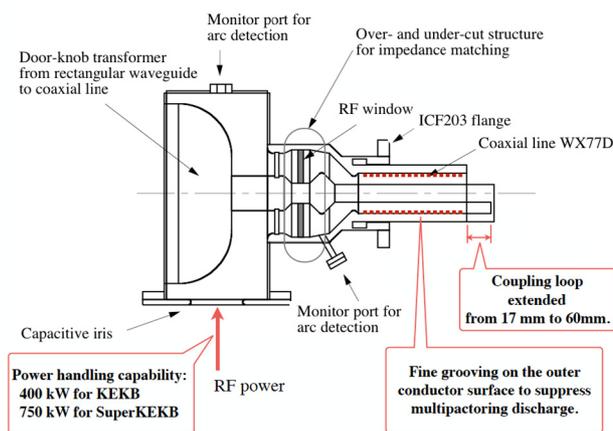


Figure 1: RF power coupler for the ARES cavity in SuperKEKB. Major upgrades and changes from the previous type for KEKB are indicated by markup balloons.

[#] kageyama@post.kek.jp

現行型カプラに対する要求仕様、それに応じての KEKB 用カプラからの変更点と改良点を以下にまとめる。

- 空洞1台あたりのビームへの供給電力の増大に伴い、カプラ1個あたりの給電電力仕様が 400 kW から 750 kW に上昇。なお、ARES 空洞壁面電力は 150 kW(空洞電圧 0.5 MV 運転時)で変わらず。
- 入力結合度は $\beta = 5$ 以上。それに余裕を持って対応すべく、同軸管先端部の磁気結合ループの高さ(空洞への突出し量)を 17 mm から 60 mm に変更。
- 同軸直管部(WX77D)の外導体内面でのマルチパクタ放電を抑制すべく、当該壁面に矩形波形状(軸方向に繰り返す周期 2 mm)の微細溝(周方向に一様、幅 1 mm、深さ 1.4 mm)加工を施す[9]。

なお、現行型カプラが上記の要求仕様を満足することは、一連の実験(専用テストスタンド[10]での大電力試験、KEKB でのビーム加速試験[5])を通して既に実証済みである。詳細については、文献[5]を参照されたい。

3. 同軸窓可換式試作初号機 WRX15 (Window Replaceable eXperimental model fabricated in JFY 2015)

3.1 構造概略

新型カプラ(型番:WRX15)の構造を同軸窓部と同軸ループ結合部を分離した形式で図2に示す。内・外導体の接続には、ボルト・ネジの軸力によって RF コンタクトを得る方式を採用した。コンタクトの線圧は当方の経験値 20 N/mm を目安とした。外導体の接続部における真空封止は、RF コンタクトとは機能を分離の上、外縁部の薄肉リップ金具溶接方式とした。リップ金具の径方向寸法には幾分かの余裕を持たせ、二、三回の脱着(リップ溶接部を切除して分離、組立後再溶接)に対応できるように配慮した。内・外導体の RF コンタクト面の相対位置(軸方向)については、同一平面を選んだ。これは、同軸窓と結合部の各々単品のロウ接合組立と事後寸法測定において、単純な平板治具で精度を得やすいからである。なお、真空中での RF コンタクトの設計においては、気抜き穴もしくは溝を適所に設けてガス溜まりが出来ないように注意したことは言うまでもない。

3.2 内導体連結方法

今回の新型カプラの開発途上、最も苦労した内導体どうしの連結部の設計について詳述する。同軸ループ結合部から同軸窓が脱着可能なカプラの先行開発事例としては、IFMIF/EVEDA の RFQ ライナック用入力カプラ[11]が挙げられる。当該カプラの内導体どうしの連結にはマルチコンタクト社製の RF コンタクトを装着したインナーコネクタが採用されている。当初、当方も同様のコネクタ部品の使用を検討したが、真空中かつ大電力での使用に関する当方の経験不足から見合わせた。最終的には、KEKB 常伝導空洞開発において最も実績のあるボルト・ネジ軸力による RF コンタクト方式に落ち着いた。

ところで、連結用のボルト・ネジを何処に仕込み、如何にして締め付けるのか?というパズルの解決には、意外にも結合部側内導体の算盤玉構造が突破口となった。

当該構造は同軸窓を空洞内部から飛んでくる電子から遮蔽する目的で設けられたものである。図3に内導体連結用のボルトを算盤玉内部に仕込む方法を示す。算盤玉は上下半割となっており、中央に歯車円板付きの内導体連結用ネジを収納する。算盤玉半割部品どうしの合体には沈頭六角穴付ネジを計6本使用する。言うまでもないが、以上2種類のネジの各々には気抜き穴が設けられている。図4に最終組立時の連結用ネジの締め付け方法を示す。先端に歯車のついた長尺丸棒の専用工具を同軸管の上方開口部から差し込み、連結用ネジ頭部の歯車に噛ませて回す。図5に内導体連結作業の様子を示す。

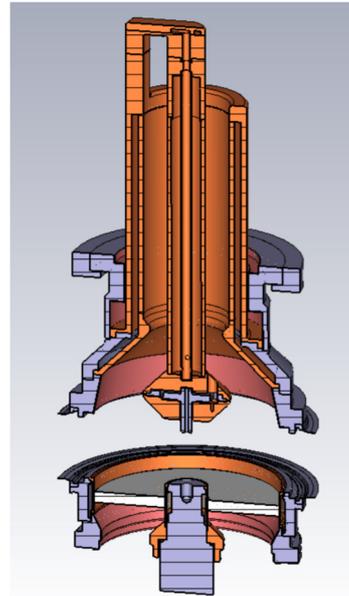


Figure 2: 3D view showing the prototype WRX15 where the coaxial window is detached from the coaxial loop coupler.

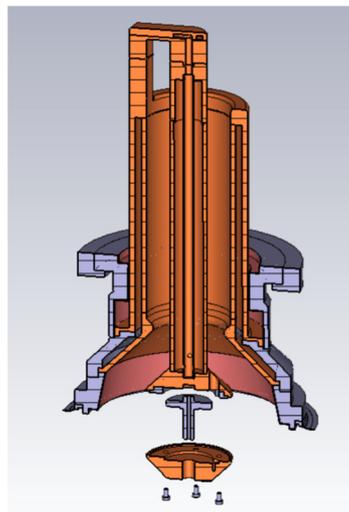


Figure 3: Exploded view showing how to install the central connecting screw into the abacus-ball-shaped inner conductor part.

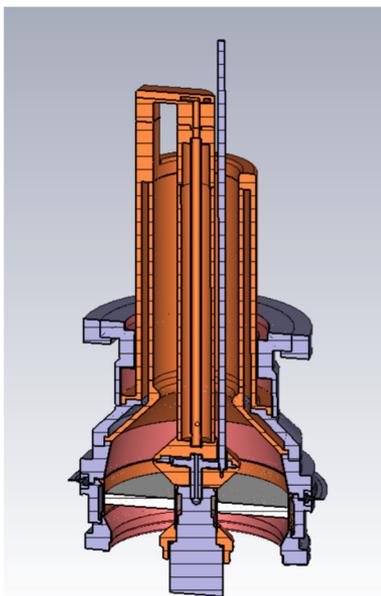


Figure 4: 3D view showing how to assemble the coaxial window and coupler parts. The central screw with a gear disc at the top is tightened using a special tool of long rod with a gear welded at the tip.



Figure 5: Final assembly of tightening the screw to firmly connect the inner conductors using the special tool (see Fig. 4) in combination with a torque wrench.

3.3 熱設計

新型カプラの水冷回路を図6に示す。比較のために現行型も併せて示す。同軸窓のアルミナ円板の内・外周にロウ接合された薄肉金具の各背面に設けられた内・外周2系統の水路については現行型と同様である。一方、同軸ループ結合部の内導体の冷却については、冷却水

の経路が大きく変更された。現行型では、水路を内導体の大気側の末端(図中下方)から真空側の先端(図中上方)まで直線的に導入している。新型では、同軸窓を脱着可能とする都合上、外導体と内導体の水路を磁気ループの往還水路を介して直列化して一つの系統にまとめた。当該水冷回路の変更が冷却性能に与える影響の評価については、今学会の文献[12]を参照されたい。

先に述べたように真空側の内導体組立には2種類のステンレス鋼製のネジが使用されている。無酸素銅製の算盤玉の内部に収納される歯車円板付きのネジが1本、算盤玉半割部品の合体組立に使用する沈頭六角穴付きネジが6本である。これらのネジは電気抵抗率が高く、熱伝導率が低いステンレス鋼製である。しかも、冷却は伝熱に頼るしかない。よって、事前にネジ部品での発熱について電磁場シミュレーション(CST MW STUDIO)を使って評価した。結果を図7に示す。図中の各発熱量は給電電力 800kW(無反射)のときの値である。枕頭六角穴付きネジの発熱量は1本あたり 10 mW と見積もられた。当該ネジ用のタップ穴を備えたステンレス鋼製の部品は上側の算盤玉半割部品(銅)にロウ接合されている。よって、10 mW 程度であれば伝熱にて十分に冷却される。一方、長尺丸棒工具導入用の開口部から侵入する RF 電磁場によって加熱される歯車円板付ネジおよびタップ穴を備えたステンレス鋼製部品の発熱量は、各々 5 μ W、19 μ W と見積もられた。いずれも極めて微小な値である。当該シミュレーションで得られた各部品(アルミナ円板窓も含む)の発熱量データは、先に言及した新型カプラの冷却性能の評価[12]にも使用された。

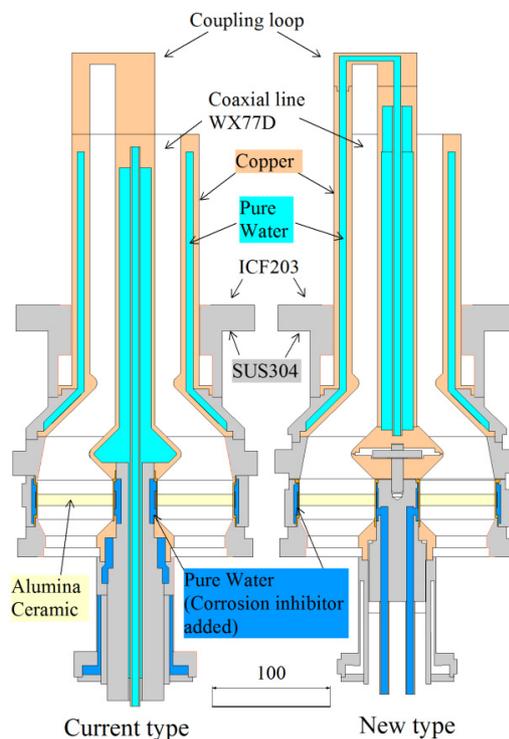


Figure 6: Cross-sectional views showing cooling-water circuits of the current and new types of couplers.

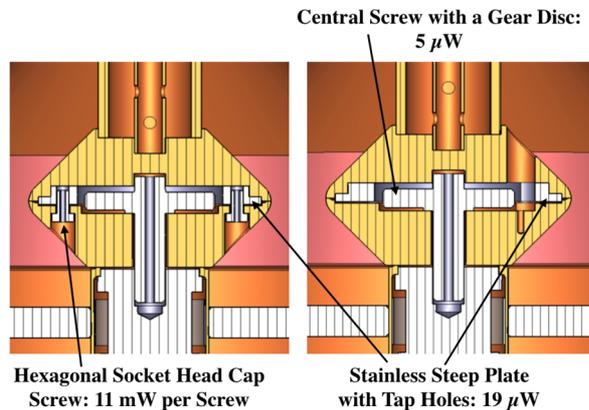


Figure 7: Heat generation rates estimated for the stainless-steel parts (screws and a plate with tap holes) when feeding RF power of 800 kW.

4. 今後の予定

当初、今夏7月にテストスタンドにおいて新型カプラの電力試験を実施する予定であった。しかし、内導体の算盤玉半割部品組立時の沈頭六角穴付ネジに対する締付トルクの値に疑義が生じた。慎重を期して「急がば回る」ことにした。外導体外周の薄肉リップ金具溶接を切除して同軸窓を取り外し、同軸結合部側の算盤玉半割部品どうしの接続が健全であるか否かを確認する予定である。期せずして、同軸窓脱着の検証実験を電力試験前に行うことになった。回り道ではあるが、こちらが本来の正しい手順であると前向きに考え直した。

今後の開発方針であるが、次段階として高純度アルミナ材(純度:99.6~99.7%)の円板を使って同軸窓を製作の上、新型初号機の現行同軸窓(アルミナ材の純度 95%)と交換することを計画している。究極的には、低誘電損の高純度アルミナ同軸窓をアレス空洞の入力カプラ用として実用化する。窓の発熱量低減により、アルミナ円板の内・外周にロウ接合されている薄肉金具が接液せざるを得ない現行の直接冷却方式を廃止して、厚肉金具に水路を設けて薄肉金具は伝熱によって冷やす間接冷却方式への変更が可能となる。これにより、水路と真空の隔壁の真空気密についても信頼性向上が期待できる。

5. まとめ

ARES 空洞は KEKB に引き続いて SuperKEKB での大電流ビーム加速にも使用される。ARES 空洞の高周波給電カプラとして、現行型(SuperKEKB 用性能増強型)と互換性を持たせるべく同軸ループ結合方式は踏襲しつつも、同軸窓部は脱着可能とした新型カプラを開発、試作初号機(型番:WRX15)を製作した。

一般論として、導波管窓の場合は一つの中空導体から成る構造ゆえに窓を脱着可能とする設計は珍しくなく、むしろ標準的である。一方、同軸窓の場合は内・外導体を同時に接続する必要があり、設計の難易度は必然的に高くなる。特に今回のような大電力用途の場合、内導体の接続については知恵を絞る局面に多々遭遇した。

同軸窓を脱着可能とした入力カプラの開発に一昨年より取り組んだ主な動機は、ロウ接合時における窓表面の窒化チタン膜への熱影響を避けたいからである。成膜後に熱影響フリーとなれば成膜条件に対する選択の自由度の幅も広がる。加えて、損耗リスクの高い窓部のみを交換することによりカプラを再生できる。即ち、経済的でもある。

謝辞

量子科学技術研究開発機構の前原直氏からは同軸窓が脱着可能なカプラの構造について貴重な御助言をいろいろと頂きました。ここに改めて御礼を申し上げます。

参考文献

- [1] “SuperKEKB Design Report”; <https://kds.kek.jp/indico/event/15914/>
- [2] Y. Yamazaki and T. Kageyama, *Particle Accelerators* **44**, 107 (1994).
- [3] T. Kageyama *et al.*, *Proc. PAC97*, p. 2902 (1997).
- [4] T. Kageyama *et al.*, *Proc. of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, p. 1245 (2011).
- [5] T. Kageyama *et al.*, *Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, p. 590 (2014).
- [6] F. Naito *et al.*, *Proc. APAC98*, p. 776 (1998).
- [7] K. Yoshino *et al.*, *Proc. of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, p. 649 (2008).
- [8] S. Isagawa *et al.*, “Coating Techniques and Improvement of High Power CW Klystrons for TRISTAN”, EPAC94, June 27-July 1, 1994.
- [9] T. Abe *et al.*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **13**, 102001 (2010).
- [10] H. Sakai *et al.*, *Proc. PAC05*, p. 1294 (2005).
- [11] S. Maebara *et al.*, *Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, p. 1140 (2015).
- [12] T. Yoshino *et al.*, “Thermal Analysis of RF Input Coupler with a Replaceable Window for the ARES Cavity”, MOP023, PASJ2016 (2016).