

ARES 空洞用高周波窓可換式入力結合器の熱解析

THERMAL ANALYSIS 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

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

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

We have developed a new 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 brazing. In this paper, we report the results of thermal analysis for the new type of power coupler in comparison with the current type.

1. はじめに

SuperKEKB アレス空洞においては、供給電力の増加に対応する為、Phase 1 の運転前に一部の区間を SuperKEKB 用入力結合器(マルチパクタ抑制溝加工を加えた結合ループ延伸による結合度増強型) [1]に取り換えた。今後 Phase 2 の運転に向けてこの結合度増強型に順次切り替えていく予定である。

当該入力結合器を開発していく段階で、様々な知見を得た。通常、このような高電力に対応したループアンテナ型の入力結合器では、真空気密用にロウ付けされたアルミナ(高周波窓)の真空側に、マルチパクタ放電抑制の為の TiN(窒化チタン)を成膜している(我々の場合は微量の酸素を含んだ TiN_xO_y を使用)。この成膜後、部品を組み立てる為に、ロウ付け工程を1~2回(メーカーにより異なる)行うが、この熱処理により(膜厚の低下は以前から知られているが)膜抵抗値が低下する事や膜結晶構造の変化を確認しており、最悪の場合電力投入中に窓の破壊に至る場合がある。又以前から、この後工程の熱処理後にアルミナの接合面から真空漏れが発生する事が(割合としては少ないが)何度かあり、その為に再製作を余儀なくされるので、メーカーとしてもリスクを抱える事になる。

以上の経歴を踏まえ、このループアンテナ型の入力結合器でも、高周波窓が脱着可能な構造を検討し、TiN成膜後の窓に対して、ロウ付け工程が加わらない改良型の提案[1]がされた。今回その試作機を開発した。その構造等の開発の詳細については、今学会の別の報告[2]を参考にしてもらい、本稿ではその試作機の熱解析結果を報告する。

2. 水路の比較

SuperKEKB 用入力結合器と今回試作した窓可換式入力結合器の水路の比較を Figure 1 に示す。従来の入力結合器では、内導体の水路をドーナツ側から導入していたが、試作機では外導体の水路からループアンテナを通して冷却する構造に変更した。この方法で水路的には、高周波窓が分離できる構造となった。

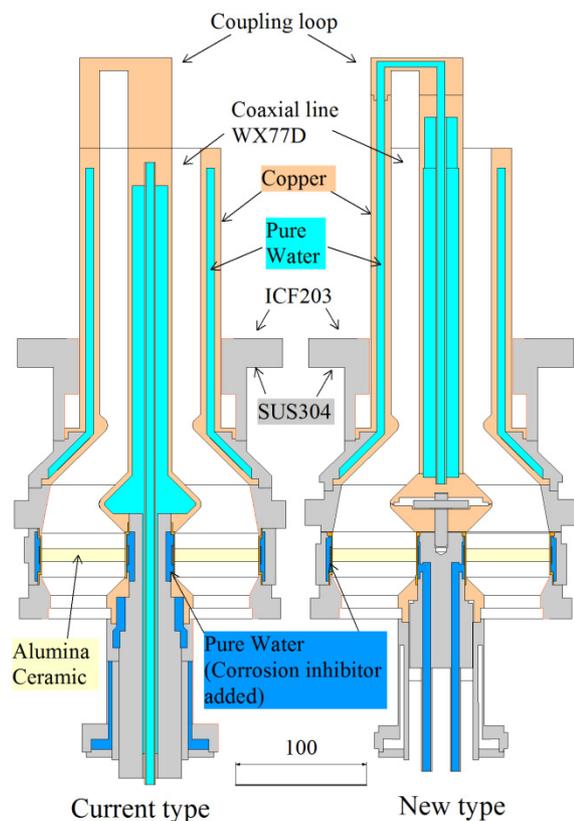


Figure 1: Cross-sectional views showing cooling-water circuits of the current and new types of couplers.

3. 熱解析結果

3.1 解析条件

熱解析には ANSYS を使った。発熱条件は、CST-MW-Studio を使い、SuperKEKB における最大の RF 電力 800kW 給電時における解析結果[2]を適用した。

入り水温は 30°C、水路の流量を 3 L/min としてその熱伝達係数を平均で外導体側に 284 W/m²K、内導体側に 674 W/m²K、大気側を 6 W/m²K と設定した。

[#] kazu.yoshino@kek.jp

解析に使用した材料特性値を Table 1 に示す。アルミナは両方とも日本特殊陶業製 HA95 を使っている。

Table 1: Material Properties

		Alumina	Copper	SUS304
Thermal Conductivity	W/mK	27	386	16.7
Young's Modulus	N/m ²	3.20E+11	1.18E+11	1.93E+11
Thermal Expansion Coefficient	/°C	7.70E-06	1.77E-05	1.73E-05
Poisson's Ratio		0.24	0.34	0.3

3.2 2次元解析による比較

SuperKEKB 用と窓可換型入力結合器におけるアルミナの発熱状態を簡易的に比較する為、始めに2次元軸対称モデルでの解析を試みた。(軸対称モデルなのでループ部は省いている。)

SuperKEKB 用入力結合器の解析結果を Figure 2 (a) に、窓可換型入力結合器の解析結果を Figure 2 (b) に示す。但し、窓可換型入力結合器の場合、内導体(大気側)の水路は軸対称構造ではないので、その熱伝達係数を水路の表面積比で除した値(76 W/m²K)を適用した。

両モデルともアルミナの内導体近傍が最も高温になっているが、窓可換型入力結合器の方が 10%程度高くなっている。この理由として、以下の2点が考えられる。

- (1) 両モデルとも窓の内外周は直接冷却水(防錆剤入り)で冷やしているが、SuperKEKB 用入力結合器では内導体を冷却する為の別系統の水路が、大気側から内導体の中央部を通していているので、その熱伝導による間接冷却の効果が大きいと思われる。
- (2) 窓可換型入力結合器では、内導体の算盤玉のように膨らんだ部分の中にボルトを仕込んで脱着

構造を設けている為、その空間によって内導体の真空側水路からの除熱効果が少なくなっている。

以上の理由により、窓可換型入力結合器の方がアルミナの温度が高くなっていると考えている。

3.3 窓可換型入力結合器の3次元解析結果

窓可換型入力結合器の解析結果を Figure 3 に示す。

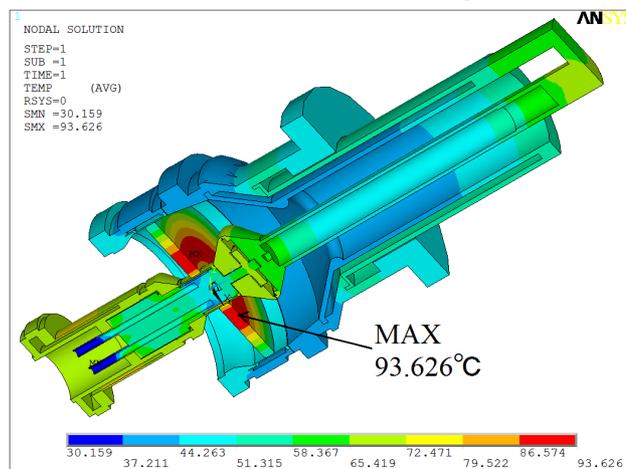
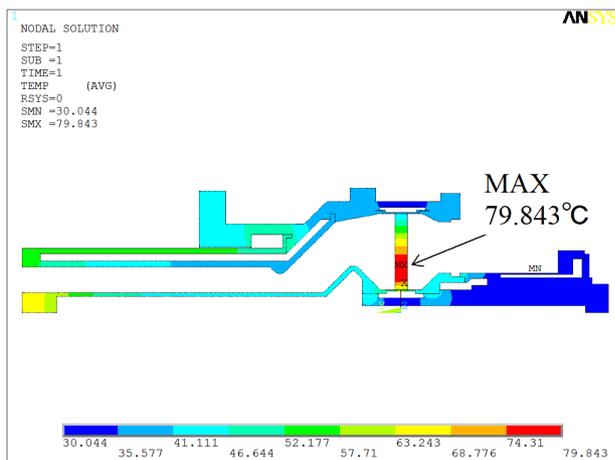


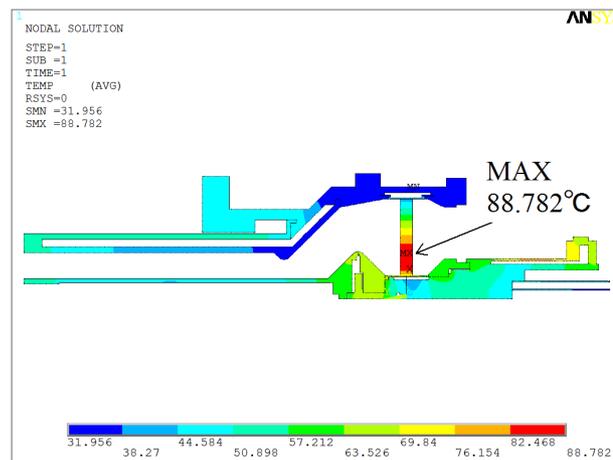
Figure 3: 3D temperature distribution for the new type when feeding RF power of 800 kW.

アルミナの温度は 2 次元解析結果より高くなっており、内導体(大気側)の水路の効果が、2 次元解析での想定よりも更に少ない事が解った。全体の温度分布としてはほぼ2次元解析結果に近い結果となっている。

アルミナ内導体近傍が最も高温(SuperKEKB 用入力結合器に比べ 17%上昇)になっている事は変わらないが、今回ループアンテナ内に水路を設けているので、ループアンテナ先端より内導体の大気側表面が高温になっている。



(a) Current type.



(b) New type.

Figure 2: Comparison of the 2D temperature distributions for the current and new types when feeding RF power of 800 kW.

4. 次号機の検討

現在、窓可換型入力結合器の電力試験の準備中である。今回の解析で、SuperKEKB 用入力結合器よりアルミナの温度が高くなる事が解ったので、試験時の流量を計算値の 3L/min から 5 L/min と多めに通水して行う予定である。

電力試験が目標の 800kW まで問題無く達成できれば次号機では水路を改良する必要性は少ないかもしれないが、今回の解析結果から次号機(高周波窓側のみ)では、SuperKEKB 用入力結合器の冷却効果に少しでも近づける事を目指して以下の検討も行った。

4.1 窓部と結合部内導体の連結ボルト材を銅に変えた場合

現在、窓部と結合部内導体の連結ボルト材は Figure 1 で示すように SUS を使っているが、それを熱伝導性の良い銅に置き換えて解析した結果を Figure 4 に示す。

この場合、連結ボルトの温度は低くなっているが、アルミナの温度低下は 0.15°C と極僅かで、ほとんど寄与しない事が解った。

4.2 内導体の大気側近傍に水路を追加した場合

次に、内導体の大気側近傍に $\phi 30\text{mm}$ 、高さ 70mm、幅 2mm の水路を追加した場合を解析した。その結果を Figure 5 に示す。

この場合、アルミナの温度はおよそ 3°C 近く低下している。又、内導体の大気側もループアンテナ先端部より温度が低くなった。

以上の結果より、内導体に水路を追加する方法が効果が大きい事が解ったので、次号機を開発する場合は追加水路の位置や形状の最適化を行いたい。

尚、次号機についてはアルミナの材質を高純度(99%以上)タイプに変更し、(アルミナに接合した銅の水路に通水する直接冷却ではなく)その直近に水路を設ける間接冷却にする事も検討している。

この間接冷却による電力試験は、KEKB タイプの試験機で過去に行っており、SuperKEKB における最大の RF 電力 800kW でも熱的に使える事を実証している[3]。但し、途中からアルミナの発光現象が発生し、その実用化には至っていないが、この窓可換型入力結合器では、先にも述べたが TiN 成膜後の熱処理工程が無く、膜結晶構造が変化しないので発光現象が低減する可能性がある。

5. まとめ

SuperKEKB 用入力結合器の次期改良型として、高周波窓が脱着可能な窓可換型入力結合器を試作した。その熱解析を行い、SuperKEKB 用入力結合器に比べアルミナの温度が最大 17%上昇することが解った。この為、これから行う電力試験では流量を計算値の 3L/min から 5L/min に増やして対応することにした。

電力試験が成功した場合、次号機では内導体(大気側)への水路の追加又は、高純度アルミナを採用した窓による間接冷却を行う事を検討していく。

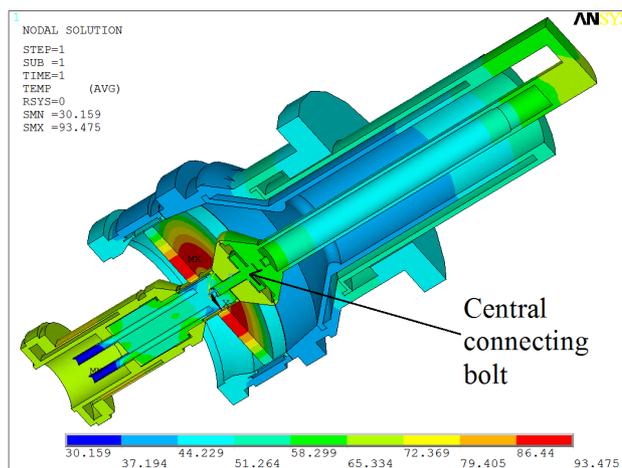


Figure 4: 3D temperature distribution for the new type where the material of the central connecting bolt is changed from stainless steel to copper.

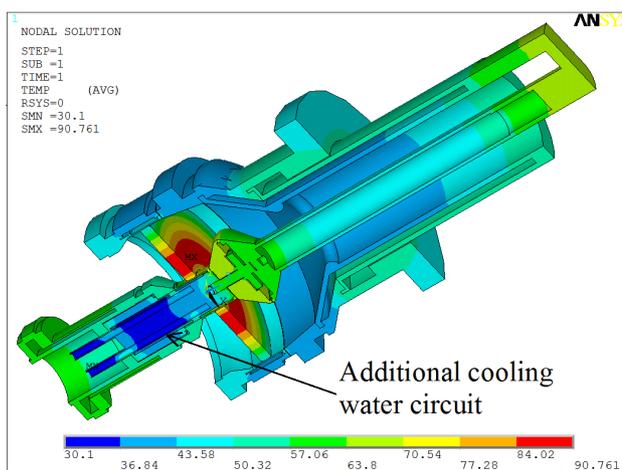


Figure 5: 3D temperature distribution for the new type with an additional cooling water circuit around the inner conductor at the air side.

参考文献

- [1] T. Kageyama *et al.*, "SuperKEKB におけるアレス空洞用入力結合器"; http://www.pasj.jp/cgi-bin/meetings/pasj11/pdf_get.cgi?SAP0%2FSA044%2FSA044.pdf#search=%27SuperKEKB+%E3%81%AB%E3%81%8A%E3%81%91%E3%82%8B%E3%82%A2%E3%83%AC%E3%82%B9%E7%A9%BA%E6%B4%9E%E7%94%A8%E5%85%A5%E5%8A%9B%E7%B5%90%E5%90%88%E5%99%A8%27
- [2] T. Kageyama *et al.*, "高周波窓が交換可能な ARES 空洞用入力結合器", MOP016 今学会(2016).
- [3] K. Yoshino *et al.*, "高純度アルミナ材の利用による KEKB ARES 空洞用 RF 窓の間接冷却化"; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj5_lam33/contents/PDF/TP/TP013.pdf