

Indirect cooling of RF-window for the KEKB ARES Cavity by using High Purity Alumina Materials

Kazuo Yoshino¹, Tetsuo Abe, Tatsuya Kageyama, Hiroshi Sakai, Yasunao Takeuchi
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

Abstract

Application of high purity alumina to high power CW RF windows has been investigated especially on the thermal and mechanical properties. One of our research goals is to double the power capability of the input coupler for the KEKB ARES cavity system from 500 kW to 1 MW. As reported in the previous paper, our thermal-structural simulation shows that an RF window made of 99.7% purity alumina can withstand 1 MW CW RF power transmission even without water-cooling around the RF window, owing to its very low dielectric loss, about 14% compared with that of 95% purity alumina chosen for the RF window material currently used in KEKB. Based on the simulation studies, two prototype couplers have been fabricated with use of high purity alumina of HA997 supplied by NGK/NTK of Japan. This paper reports the recent high power test results.

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

1. はじめに

近年、高純度アルミナに対するメタライズの信頼性が実用化の域に達し、KEKB加速器ARES空洞^[1]に使用されているような連続波大電力用途の入力結合器^[2]の高周波窓への応用も可能となってきた。昨年の論文^[3]で報告したように、現行ARES空洞入力結合器の高周波窓材を従来の純度95%から99%以上の高純度アルミナ材に変更した場合、誘電損失が一桁近く低いので窓自体の発熱が低く抑えられ、水冷回路簡略化が可能となり、以下利点を得る。

1) 高周波窓周囲の直接水冷が不要となり、窓専用の低圧水路系統が省ける。当該水路系においては、ポンプ吐出圧力の低い冷却装置や、ロウ付け工程の都合上、銅製の水路内にモリブデン治具が残るので、銅の腐食対策 (pH緩衝剤の混入)^[4]に細心の注意を払う必要がある。

2) 高周波窓周囲の専用低圧水路を無くした場合でも、アルミナの温度上昇や引張応力等の熱-構造特性は、入力結合器の構造は変えずに簡易な間接冷却用パイプの追加だけで同程度に抑えられる。

数値解析の結果に基づいて設計した高純度アルミナ (日本特殊陶業製HA997) を適用した入力結合器について、昨年度に二つのタイプ各1台、計2台の試作器を製作し、今年度その大電力試験を行った (図1にタイプAの構造を示す。:タイプBは、内面形状は同一だが外導体外周部品等の一部を除き殆ど銅製)。その結果、窓専用低圧水冷なしの間接冷却条件下で、タイプAは800kW、タイプBは500kWの連続高周波入力を達成した。本稿では、その詳細について報告する。

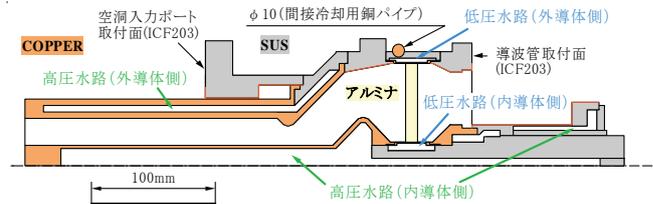


図1：入力結合器断面 (タイプA)

(軸対称1/2表示：Over-and under-cut型：高周波窓周囲を冷却する場合、内・外導体側とも低圧水を使用、その他の冷却は高圧水を使用)

		HA-95	HA-997
熱伝導率	W/mK	27	31
ヤング率	N/m ²	3.20E+11	3.20E+11
線膨張係数	/°C	7.70E-06	8.10E-06
ボアソン比		0.24	0.24
(比) 誘電率: ϵ_r [1MHz]		9.2	10
誘電正接: $\tan \delta$		3.00E-04	4.00E-05
誘電損失: $\epsilon_r \cdot \tan \delta$ [1MHz]		2.76E-03	4.00E-04
発熱量 (500kW入力)	W	191.3	27.7
発熱量 (1000kW入力)	W	382.7	55.5

表1：現行アルミナ(HA95)と高純度アルミナ(HA997)の材料特性と発熱量 (見積値)

2. 大電力試験

2.1 試験条件

間接冷却の為に、入力結合器の外周には銅パイプ ($\phi 10 \times 8$) を新たに一周巻きつけた。高周波窓の

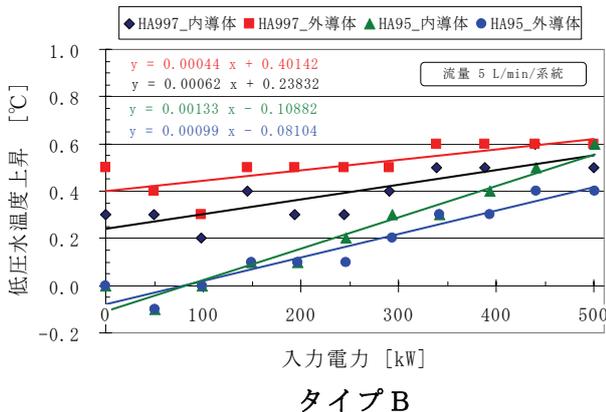
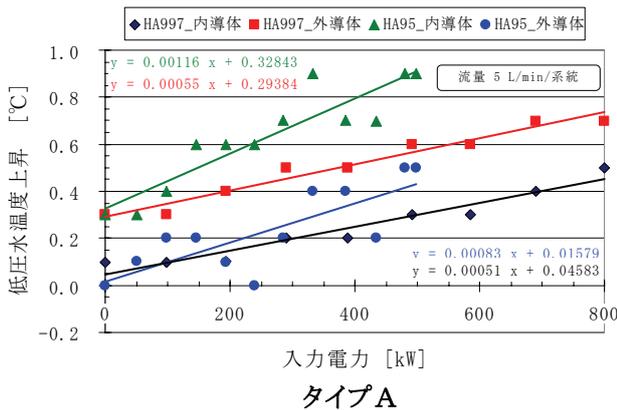
¹ E-mail: kazuo.yoshino@kek.jp

低圧水路（直接冷却用）は、アルミナ窓の発熱量を別途実験により求めるために残した。タイプA、Bとも、最初に低圧水路に通水（直接冷却）して窓（及び近傍同軸管壁面）の発熱量を測定した後、低圧水を省いて高圧水のみで間接冷却条件で試験を行った。なお、マルチパクタ防止用TiN被膜の厚みは、HA95と同じ10 nmである。今回、電力試験前に2台ともアルミナのTiN面側のオゾン水洗浄処理（+超純水洗浄+ベーキング）を行い、窓表面の汚れに起因する放電発光の抑制も狙った^[5]。

実験に使用した冷却水の温度安定度は、同軸管主要部を冷やす高圧水については±1.3℃である。一方、低圧水については、高精度温度制御仕様のチラー導入により、従来±2℃（HA95窓測定時）の変動幅を今回±0.1℃まで改善した。

2.2 試験結果

図2に、アルミナ周囲の低圧水温度上昇割合をHA95とHA997で比較した。測定データを直線で当てはめた勾配から求めた500kW入力時の発熱量（アルミナ窓自体の発熱と近傍の同軸管壁面損失の合

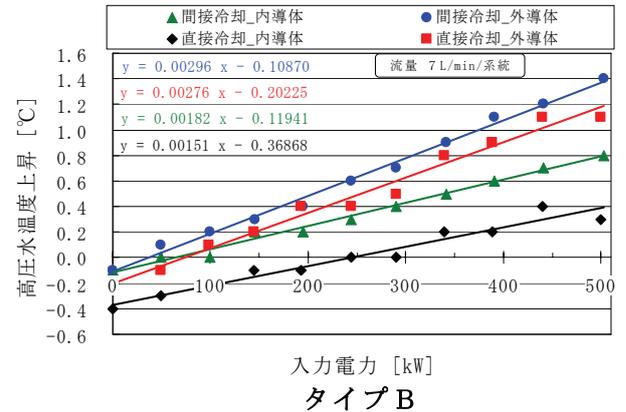
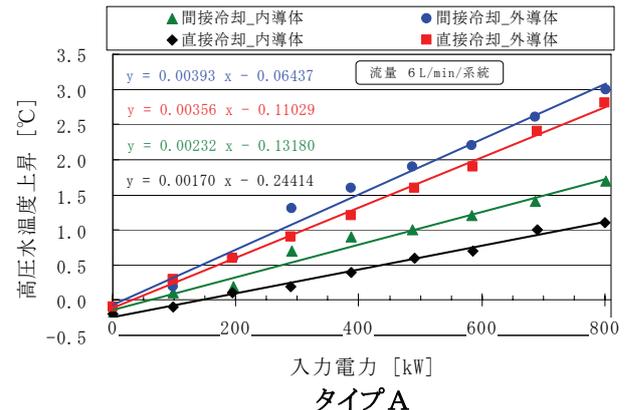


	HA997	HA95
タイプA(アルミナ+近傍の銅壁面損失) [W]	180	350
タイプB(アルミナ+近傍の銅壁面損失) [W]	180	400

図2：HA95とHA997における低圧水温度上昇（上段：タイプA、中段：タイプB、下段：各勾配から求めた500kW時の熱量の比較）

計）を比較すると、HA997の場合、HA95に比べてタイプAで170W、タイプBで220W減少している。表1の500kW入力時の窓自体の発熱量見積値は、HA95の場合で190W、HA997の場合で28W、その差は約160Wの減少と計算された。タイプAでの測定値170Wは上記計算値によく合っている。一方、タイプBでの測定値は3割ほど高めである。これについては、HA95窓の測定の際の高圧水の温度が通常に比べて約2.6℃高めで、高圧水側からの熱量が低圧水側に回り込んだためと推測される。高圧水側の温度安定度の改善が今後の課題である。

図3は、HA997を用いた入力結合器において直接冷却（低圧水有り）及び間接冷却（低圧水無し）における高圧水の温度上昇を示す。直接冷却から間接冷却に変えると、高圧水への熱流入が、500kW入力時においてタイプAで200W、タイプBで120W増えている。アルミナ周囲から低圧水に取り込んでいた熱量は180W（図2）であったので、その分が（内・外導体の）高圧水と新たにに取り付けた銅パイプの冷却水で吸収されていると考えられる。ちなみに銅パイプでの吸収熱量は、500kW入力時において



	直接冷却	間接冷却
タイプA [W]	1100	1300
タイプB [W]	1040	1160

図3：HA997における直接冷却（低圧水有り）と間接冷却（低圧水無し）での高圧水温度上昇（上段：タイプA、中段：タイプB、下段：各勾配から求めた500kW時の熱量の比較）

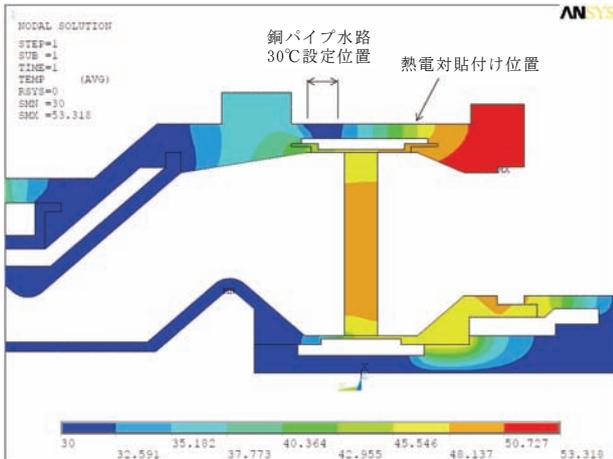


図4：HA997を用いた入力結合器（タイプA）における間接冷却時の温度分布（解析条件：入力電力500kW：高圧水路壁温30℃、雰囲気温度30℃、大気側熱伝達係数 $6 \text{ W/m}^2\text{K}$ ）

$70 \pm 40\text{W}$ と測定精度が不十分で確定値は出せていないが、除熱効果は確認できた。

熱解析との比較の為、HA997を用いた入力結合器（タイプA）における間接冷却時の温度分布と、銅パイプ近傍の導波管側の位置に貼り付けた熱電対による測定結果をそれぞれ図4及び図5に示した。熱電対の貼り付け位置における温度上昇率測定値は 0.032°C/kW 、それに対して解析値は 0.031°C/kW と、非常に良い一致を見た。なお、図5の200kW以下の領域において温度の応答が直線から外れているのは、高圧水入側温度が気温より高いため、大気側への除熱割合が無視出来なくなるためではないかと推測される。現行の銅パイプ取付け位置は当初予定位置より、従来の低圧水用継手との干渉を避ける等の理由で2cm程度空洞ポート側にずらした為、外導体導波管側からアルミナへの熱流入が増え、昨年度報告したアルミナの温度上昇解析値より2割ほど増加している。今回の実験では800kWまで熱的な問題による構造上の異常は認められなかったため、特段に対処する必要はない。しかしながら1MW入力にも安定に対応させる場合は、銅パイプの取付位置を少しでも導波管側に移すか、導波管側に接触面積が増えるような冷却管構造を考えた方が安心である。

3. 放電発光現象

今回の電力試験において、タイプA・Bともにアルミナ材変更起因すると推測される窓真空側放電発光現象が観測された。最初に試験をしたタイプBについては、入力電力100kW台から間欠的な放電発光が見え始め、比較的明るい発光であったので当初目標500kWで直接及び間接冷却条件での試験を終えた。一方、タイプAについては、300kW台から連続的な発光が見え始めたが、発光輝度はタイプBに比べて薄暗く、アークセンサも動作することなく800kWまで到達した。タイプA・Bともに当該発光による窓の異常発熱は観測されなかった。

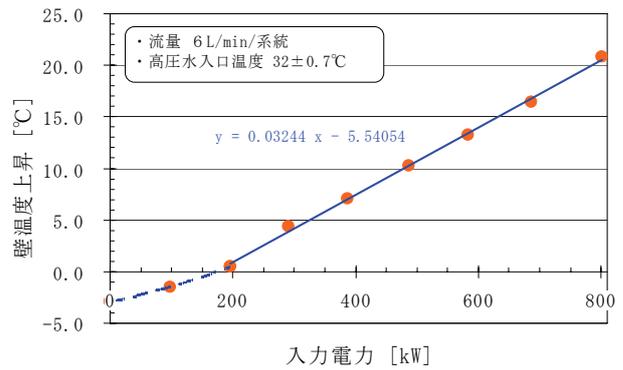


図5：HA997を用いた入力結合器（タイプA）における間接冷却時の（図4で示した熱電対取付け位置での）壁温の高圧水入口温度との差

窓表面の汚れ等に起因する放電発光現象は、これまでのHA95アルミナ窓発光現象の低減実績^[5]からオゾン水洗浄で抑えられたので、TiN表面の汚れに起因する発光ではなく、TiN前のアルミナの表面状態や高純度アルミナの2次電子放出係数の違い^[6]によるTiNの膜厚等の条件が適切でない事等が考えられる。

4. まとめ

KEKB常伝導加速空洞ARES用入力結合器の高周波窓について、窓周囲の冷却を直接冷却から間接冷却できるように、発熱量の少ない高純度低誘電損のアルミナセラミクス(HA997)を適用した実機を二種各1台、計2台製作して、各々大電力試験を行った。その結果、窓専用低圧水冷なしの間接冷却条件下で、タイプAは800kW、タイプBは500kWの連続高周波入力を達成した。今回の測定結果については、窓自体の発熱量、窓周辺の温度分布とも昨年報告した熱解析と良い一致を見た。一方、問題としては、タイプA・Bともにアルミナ材変更起因すると推定される窓自体の発光現象が観測された。今後は、高純度低誘電損のアルミナに最適なTiN膜厚の条件出しを行い、発光現象を抑えた高周波窓の開発を目指す。

参考文献

- [1] T. Kageyama et al., APAC98-6D039.
- [2] F. Naito et al., APAC98-6D040.
- [3] K. Yoshino et al., "Application of High Purity Alumina Materials to the RF-window for the KEKB ARES Cavity", Proc. of the 4rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan And the 32st Linear Accelerator Meeting in Japan, August 1-3, 2007, Wako, Japan.
- [4] 竹内保直 他., "高周波窓冷却水路の腐食", Proc. of SAS T03, 2003.
- [5] H. Sakai et al., "Ozonized Water Rinsing of RF Windows", Proc. of the 4rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan And the 32st Linear Accelerator Meeting in Japan, August 1-3, 2007, Wako, Japan.
- [6] 佐藤孝幸、道園真一郎、斉藤芳男、小林信一：真空、42(1999) 834.