

Application of High Purity Alumina Materials to the RF-window for the KEKB ARES Cavity

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

Abstract

Alumina ceramic of 95% Al₂O₃ content has been used as the RF window material for the input couplers designed to transmit RF power to the KEKB ARES cavities operated at 509 MHz. Recently, metallization of high-purity alumina, which is expected to be reliable and durable against step brazing process, is commercially available. Generally, high-purity alumina material has a very low dielectric loss. These two facts have motivated us to improve the thermal structural properties of the input coupler, especially around the RF window, and increase its power capacity from the current design of 500 kW to 1 MW for KEKB operation with higher beam currents expected in the near future. Thermal-structural analysis has been carried out for a case with the RF window made of HA997 alumina, which is of 99.7% purity and supplied by NGK Spark Plug Co., Ltd. According to the simulation results, the input coupler can transmit 1 MW of RF power even without water cooling of the RF window around its circumference.

KEKB ARES空洞用RF窓への高純度アルミナ材の適用

1. はじめに

KEKBの常伝導加速空洞(ARES)^[1]においては、同軸平板型高周波窓を用いた入力結合器が使用されている^[2]。製造メーカーによりRF構造部品の組立方法、及び使用金属材料に多少の違いはあるが、RF窓部の構造は基本的に同じでアルミナセラミクス（厚さ10mm、内径38mm、外径166mm）の内・外周に薄い円筒状の銅製金具（厚さ1mm）が金ロウで接合されている（図1）。ロウ付け加熱時に銅金具とアルミナの間の隙間を抑え込む補強材として、金具周囲にはアルミナの熱膨張率に近いモリブデン線が巻かれている。モリブデン線で補強された銅金具はアルミナ用水冷回路壁面の一部となっている。その都合上、運転初期には純水とモリブデンが反応して銅の腐食を進行させ、真空リークに至った事故も発生した^[3]。現在は防錆剤を投入する等の対策を講じて問題は起きていないが、結合器本体の冷却系（高圧水）とは別に、アルミナ周囲冷却用のチラーユニット（低圧水）を1～2空洞毎に用意・運転しており、その管理やメンテナンスの負担は少なくない。

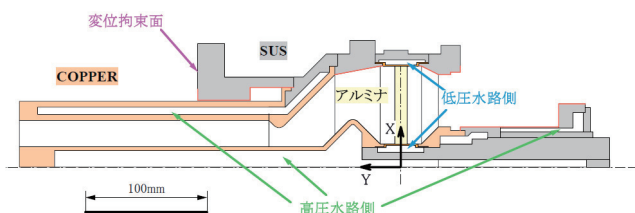


図1：入力結合器断面（三菱重工製）
（軸対称1/2表示：Over-and under-cut型）

そこで別の対策案として、窓の材質を純度95%のアルミナから、誘電損失（発熱量）の少ない高純度（99.7%）アルミナに変更して、窓周囲の冷却水を省いた場合の効果を調べた。それらの熱-構造特性はANSYSで調べ、電場特性の変化はHFSSで確認した。更に、窓の発熱量を計算値と実測値で検証した。

2. 熱-構造特性

2.1 解析条件

発熱条件は、アルミナの材質の違いによる影響が把握しやすいように、アルミナの内部発熱のみと、銅壁面の発熱も含んだ二つの場合に分けた。表1に解析の諸条件を、表2にアルミナの材料特性と発熱量を示す。

解析条件	境界条件
<ul style="list-style-type: none"> ・2次元軸対称モデル ・線形構造-定常伝熱 ・入力電力は500kWと1000W ・カプラー構造は三菱製 ・アルミナ材は、HA95とHA997 ・アルミナ水路通水有り無し 	<ul style="list-style-type: none"> ・フランジ面拘束 ・熱ひずみ基準温度30℃ ・水路壁温30℃ ・大気側熱伝達係数 6 W/m²K ・雰囲気温度 30℃ ・非通水時の水路は、大気設定

表1：熱-構造解析の諸条件

		アルミナ HA-95	アルミナ 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	/℃	7.70E-06	8.10E-06
ポアン比		0.24	0.24
(比)誘電率: ε _r [1MHz]		9.2	10
誘電正接: tan δ		3.00E-04	4.00E-05
誘電損失: ε _r tan δ [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2：アルミナの材料特性と発熱量（計算値）

¹ E-mail: kazuo.yoshino@kek.jp

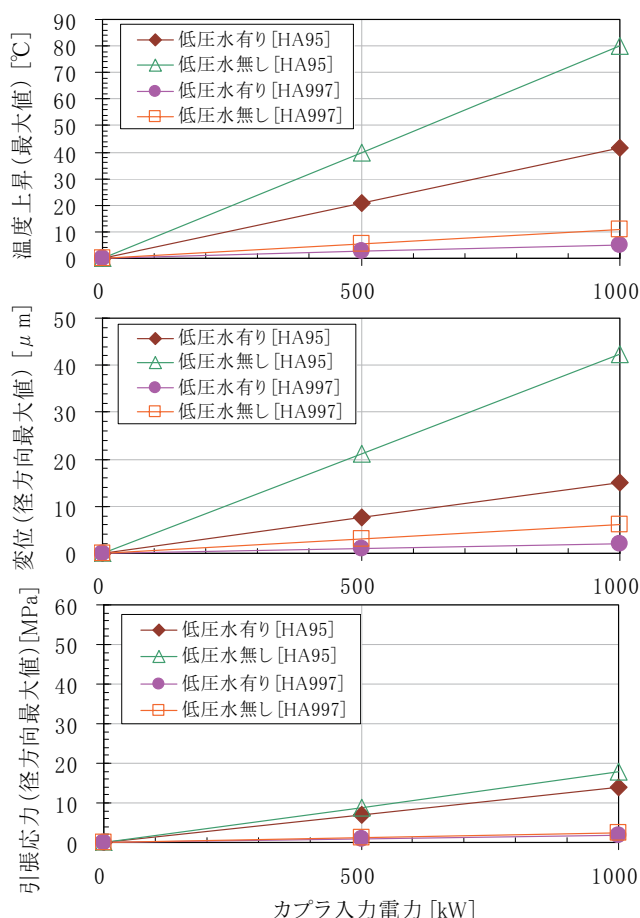


図2：両アルミナ材における水冷有無毎の熱-構造特性の変化（アルミナ内部発熱のみ）

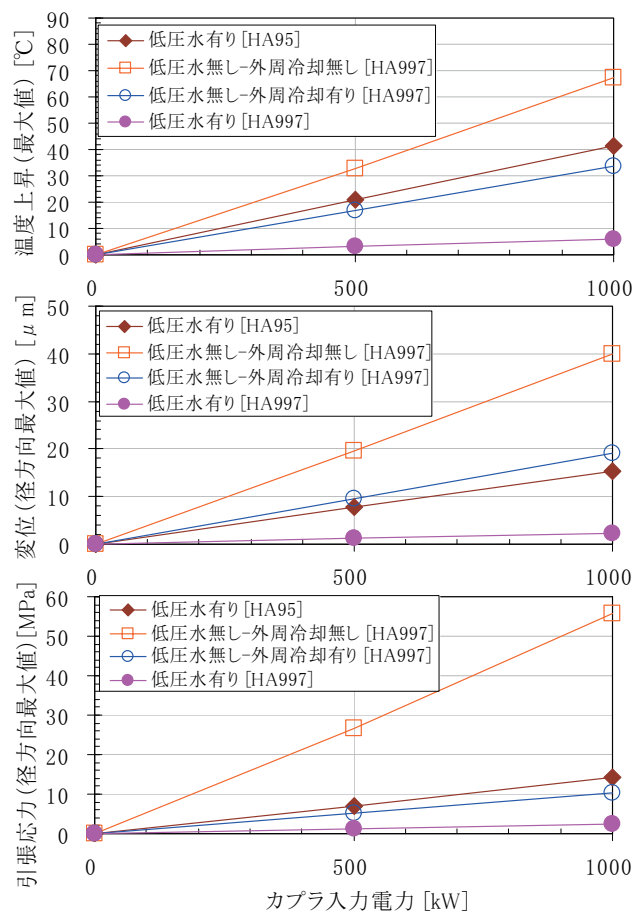


図3：両アルミナ材における水冷有無毎の熱-構造特性の変化（アルミナ発熱+銅壁面発熱）

2.2 アルミナ内部発熱のみの場合

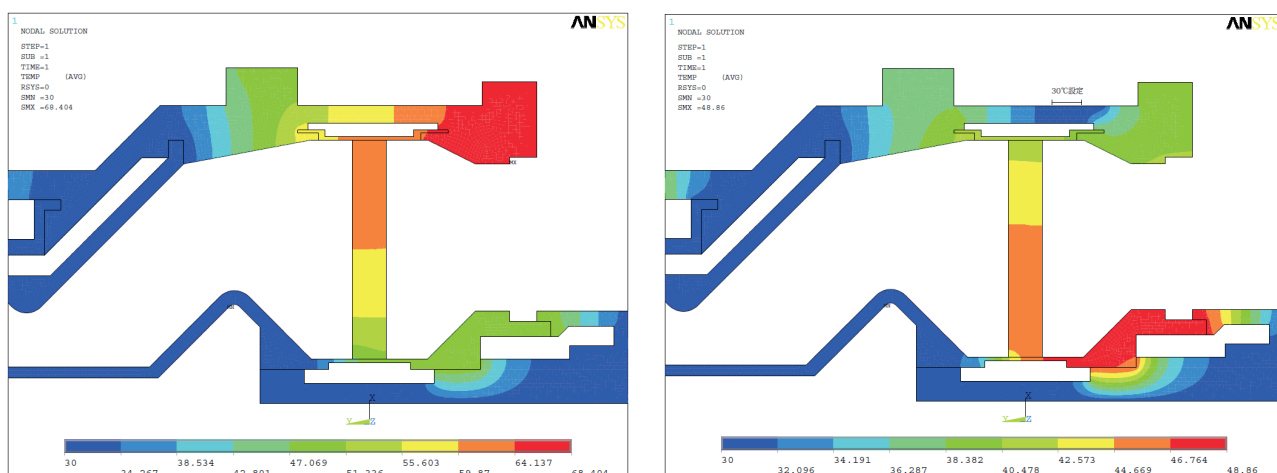
両アルミナ材におけるアルミナ周囲の水冷有無毎の熱-構造特性の変化を図2に示す。HA997（低圧水冷却無し）とHA95（低圧水冷却有り）の各特性を比べた場合、HA997の入力電力1MW時と同等の値は、260kW（温度）、410kW（変位）、170kW（引張応力）とかなり低くなっている。HA997の場合、高圧水からの熱伝導だけで十分冷却が足りている事を示している。従って、アルミナの内部発熱だけで考えた場合、HA997に変更すると、少なくとも2.4倍以上耐熱性能が向上し、アルミナ周囲の冷却水を省いても十分運転に使用できる。

2.3 銅壁面の発熱も含んだ場合

両アルミナ材におけるアルミナ周囲の水冷有無毎の熱-構造特性の変化を図3に示す（但し、HA95は水冷有りのみ。HA997の低圧水冷却無しの場合、結合器外周への冷却パイプ取付を想定した外周冷却の条件も追加）。銅壁面の発熱量は、実機の高電力試験時の水温上昇データから算出した値を適用した（500kW入力の場合で、外導体は高圧水側835W、低圧水側400W。内導体は、高圧水側112W、低圧水側102W）。図3において、低圧水冷却有りの場合

は、両アルミナとも内部発熱のみの条件（図2）と同じ傾向を示している。これは、アルミナ周囲の銅壁面の熱がほとんどその冷却水で除熱されていることを表している。一方、HA997の低圧水冷却無しの場合、銅壁面の熱が流れ込んでしまいアルミナの内部発熱のみに比べ、かなり温度上昇してしまう（図4-Aにその温度分布を表示）。そこで、現行の水路等の内部構造は変えず、高圧水でも除熱できるように、結合器外周に銅パイプを巻いた簡易水冷回路増設を想定（外周冷却）した場合についても解析した（図4-Bにその温度分布を表示）。その結果、外導体側からの熱流入は抑えられ、温度上昇や変位・応力等の特性も、HA95の水冷モデルとほぼ同じ傾向を示した。従って、HA997の低圧水冷却無しモデルにおいては、結合器外周に水冷回路を増設すれば、アルミナ周囲の低圧水を省いても、HA95の仕様範囲（500kW）と同程度に使えるものと思われる。

更に、別の選択肢として、外導体側は増設した冷却パイプで除熱しながら、内導体側のアルミナ周囲の水路のみ従来通り低圧水を利用する事も考えられる。この場合、外導体側に比べ内導体側はモリブデンの量が少ないので、腐食割合も低く、温度特性的にも図4-Bで示すような内導体からの熱流入は抑えられる（この条件におけるアルミナの温度上昇は、



4-A : 外周冷却無し

4-B : 外周冷却有り

図4 : アルミナ(HA997)周囲の低圧水を省いた場合の温度分布
(500kW投入時のアルミナ発熱+銅壁面発熱条件)

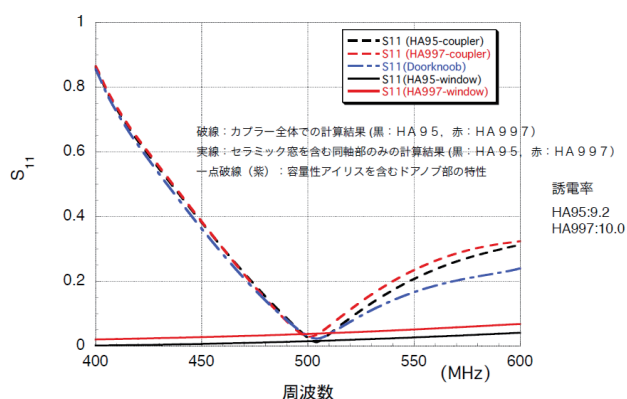


図5 : 窓の材質をHA95からHA997に変えた場合の電場特性の比較(HFSS)

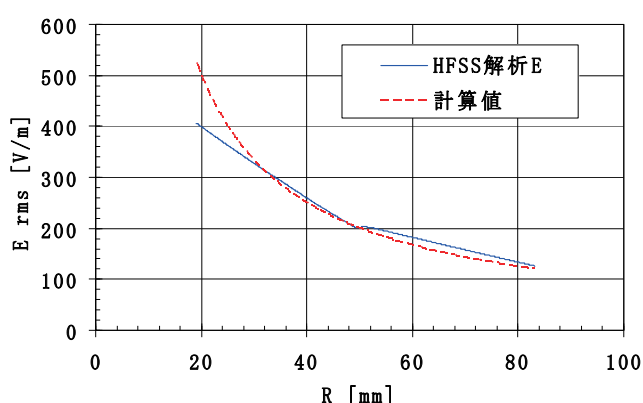


図6 : アルミナ窓部径方向電場分布理論値とHFSS解析値の比較 (入力電力1W換算)

500kW入力で10.3°Cとなり、HA95水冷有りの条件に比べ半分程度に収まっていた。

3. HFSSによる高周波特性評価

窓の材質をHA95からHA997に変更した場合の結合器の高周波整合特性をHFSSで解析した(図5)。運転周波数 509 MHzあたりで従来品に比べて若干反射波が大きくなっているが、実用上問題はない。結合器全体の高周波特性はドアノブ形状が支配的であり、アルミナ窓の材質の違いによる差は小さい。

また、アルミナ窓部の径方向電場強度分布についてもHFSSにて解析し、表2のアルミナ窓発熱量評価の根拠となる同様同軸管を仮定した場合の電場分布理論値と比較した(図6)。電場分布に多少の違いが認められるが、積分値では一致している。

4. まとめ

KEKB常伝導加速空洞ARES用入力結合器の高周波窓の材料として、誘電損失(発熱量)の少ない純度99.7%のアルミナセラミックスの適用をANSYSで検

証した。アルミナのみ発熱条件では、アルミナ周囲の冷却水(低圧水)を省いても十分適用可能だが、銅壁面の発熱を考慮すると、その分の除熱用に外導体に(高圧水用)冷却パイプを設ければ、現材質であるHA95と同程度の熱-構造特性が得られ、その仕様範囲までは適用可能である。

更に、上述のように外導体は冷却パイプのみで除熱し、内導体側にのみ低圧水を供給すれば、水路腐食のリスクを減らしつつ、耐電力性能の向上を目指すこともできる。

アルミナの材質変更による高周波整合特性の変化は小さく、実用上の問題は無い。

今後は、高純度アルミナ材HA997を高周波窓に使用した入力結合器を試作し、大電力試験での検証を行う予定である。

参考文献

- [1] T. Kageyama et al., APAC98-6D039.
- [2] F. Naito et al., APAC98-6D040.
- [3] 竹内保直 他., "高周波窓冷却水路の腐食", Proc. of SAS T03, 2003.