

# Structural Optimization of the Inner Conductor Sleeve of the Coaxial RF Window

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

## Abstract

As for RF power couplers, special attention should be paid to design of the hermetic braze joint between the ceramic window and metal fitting to reduce the interfacial stress due to the thermal expansion coefficient mismatch. For SuperKEKB where 28 ARES cavities are to be operated at 509 MHz, the development of an input coupler with a coaxial window is under way in order to feed a single ARES cavity with 800 kW CW RF power, about two times higher than for KEKB. The input coupler is fabricated by brazing in three steps, where the first sub-assembly is the coaxial alumina window to which inner and outer cylindrical copper sleeves are brazed. There is a molybdenum backing ring brazed to the inner sleeve from the inside to counterbalance the thermal expansion mismatch and reduce the interfacial stress between the alumina and copper parts. Through a series of stress analysis simulations followed by a fundamental experiment, we have investigated the counterbalancing mechanism by the molybdenum backing ring and also optimized its structure.

## 同軸平板型高周波窓の内導体金具の構造最適化

### 1. はじめに

同軸平板型高周波窓を備えた入力結合器においては、アルミナと銅製同軸金具との鑲付接合を含め、完成までに2段又は3段の鑲付工程を経て製作される。初めにアルミナと内・外導体銅製金具（及び内導体用応力緩和材料）を金鑲付けし（図1上段）、その後残りの部品と1～2回の銀鑲付で完成となる（図1下段）。その際、アルミナと銅製同軸金具との鑲付部には、熱膨張率の差から起因する応力により、アルミナの破損や鑲付面からのリークが発生する可能性がある。それらを防止する為にアルミナの接合部では応力を緩和する構造が必要になってくる。当該応力を緩和するため、内導体金具の内側及び外

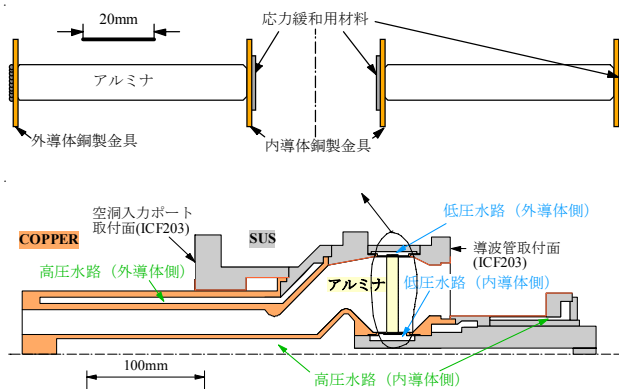


図1：同軸平板型窓拡大図（上段）及び同軸平板型窓を備えた高周波入力結合器断面図（下段：軸対称1/2表示：Over-and under-cut型）

導体金具の外側にアルミナの熱膨張率に近い材料を接合する方法が採られてきた。その構造では、鑲付温度からの冷却過程においてアルミナの孔内周と内導体銅金具の接合部に発生する引張応力が特に問題となる。この内導体金具と応力緩和用材料について、応力解析シミュレーションと基礎的実験を通して、材質や構造の最適化を行った。本稿では、その詳細について報告する。

### 2. 高周波窓の熱-構造解析

#### 2.1 解析条件

高周波窓の熱-構造解析は、ANSYSを用い2次元軸対称モデルで行った（図2）。アルミナと内導体金具及び応力緩和材料の鑲付け面は接合している設定とし、その鑲材の厚さは無視した。温度設定は金鑲付温度の1000℃を初期値とし、常温(30℃)にした場合の応力を求めた。解析に使用した材料の物性値は表1に示す。

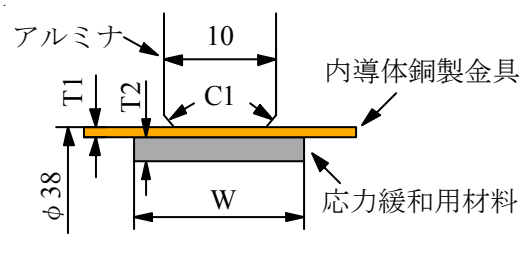


図2：熱-構造解析の2次元軸対称モデル

<sup>1</sup> E-mail: kazuo.yoshino@kek.jp

	導体材料	内導体応力緩和材料		
	純銅	アルミナ	モリブデン	タングステン
熱伝導率 [W/mK]	386	27	140	177
ヤング率 [N/m <sup>2</sup> ]	1.18E+11	3.20E+11	2.90E+11	3.40E+11
線膨張係数 [°C]	1.77E-05	7.70E-06	5.20E-06	4.40E-06
ポアソン比	0.34	0.24	0.31	0.17

表 1：解析に使用した材料の物性値（温度によらず一定値を使用）

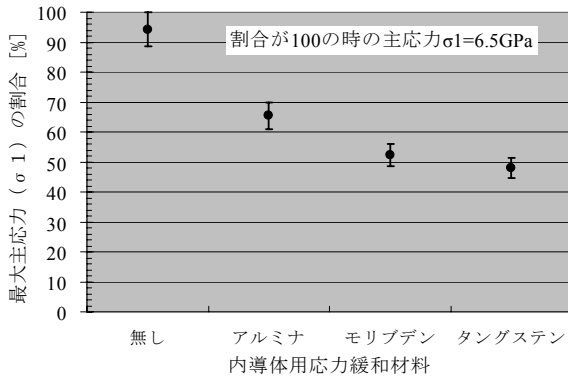


図 3：応力緩和材料毎のアルミナエッジ部に発生する最大主応力比較。割合の幅は、解析結果の等高線表示の範囲を示す。

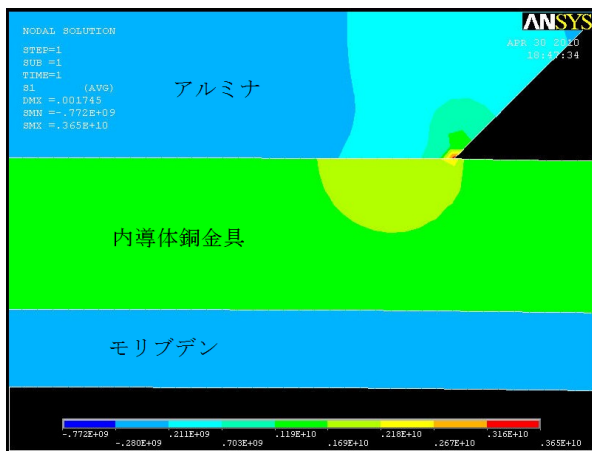


図 4：応力緩和材料をモリブデンにした場合の最大主応力  $\sigma_1$  の等高線表示（アルミナエッジ周辺の拡大図：応力の符号は、正が引張で負が圧縮）

## 2.2 内導体用応力緩和材料が無い場合と緩和材料の種類をアルミナ、モリブデン及びタングステンに変えた場合

図 3 に、応力緩和材料毎のアルミナエッジ部に発生する最大主応力の比較を示す。この時の内導体銅製金具の厚みは1mm、応力緩和材料の厚みは0.5mm、幅は15mmで（無し以外）一定とした。図 3 では、熱膨張率が小さい材料ほどアルミナエッジ部に発生する最大主応力が小さくなっている。この解析結果は、熱膨張率の大きい銅スリーブの影響を考えると、

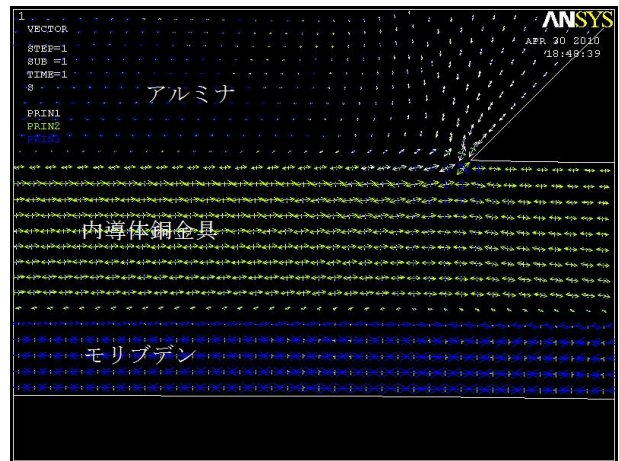


図 5：応力緩和材料をモリブデンにした場合の主応力のベクトル表示（アルミナエッジ周辺の拡大図）

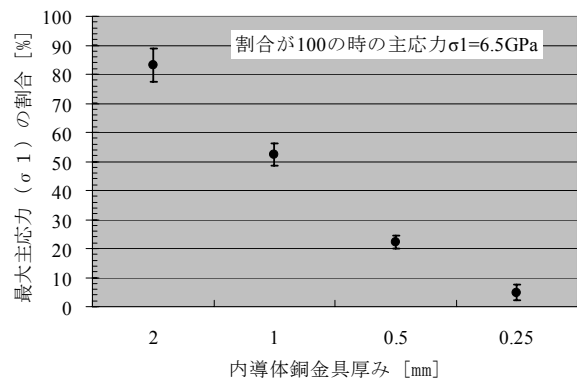


図 6：内導体銅製金具の厚み毎のアルミナエッジ部に発生する最大主応力比較。割合の幅は、解析結果の等高線表示の範囲を示す。

応力緩和材に窓材と同じアルミナを使用した場合<sup>[1]</sup>が最適という訳ではなく、むしろ窓材に比べて熱膨張率の小さい緩和材を選定の方が応力低減に効果的であることを示していて興味深い。但し、モリブデンとタングステンとの差は僅かなので、現実的にはどちらを選んでも問題ないと考えられる。

応力緩和材料をモリブデンにした場合の最大主応力の分布（アルミナエッジ周辺の拡大図）を図 4 に示し、その主応力のベクトル表示を図 5 に示す。図 4 及び図 5 では、アルミナエッジ部に最大主応力（引張応力）が集中することがわかる。特に図 5 のベクトルの向きから、銅製金具の（周方向ではなく）主に軸方向の膨張を応力緩和材料が抑える方向に作用し、その結果、アルミナエッジ部の引張応力を減らす効果が生じていると考えられる。

## 2.3 内導体銅製金具の厚みを変えた場合

図 6 に、内導体銅金具の厚み(T1)毎のアルミナエッジ部に発生する最大主応力の比較を示す。この

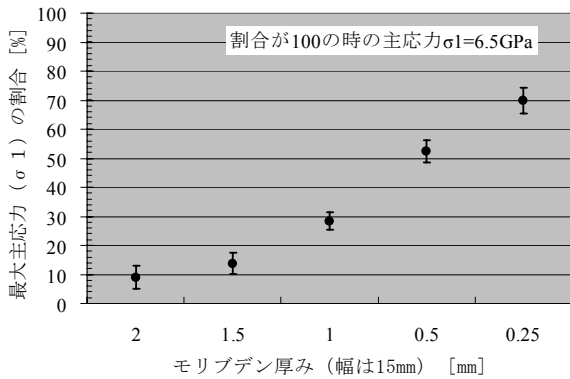


図7：モリブデンの厚み毎のアルミナエッジ部に発生する最大主応力比較。割合の幅は、解析結果の等高線表示の範囲を示す。

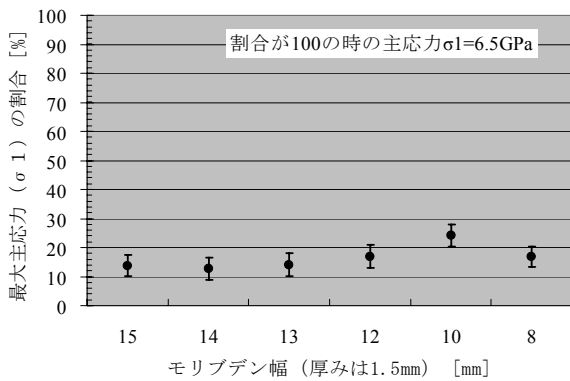


図8：モリブデンの幅毎のアルミナエッジ部及びその近傍に発生する最大主応力比較。割合の幅は、解析結果の等高線表示の範囲を示す。

時の応力緩和材料はモリブデンとし、その厚みは0.5mm、幅は15mmで一定とした。図では、内導体銅金具の厚みを薄くするほどアルミナエッジ部に発生する最大主応力が小さくなるのがわかる。薄くするほど軸方向の膨張を応力緩和材料が抑える割合が相対的に高まるためだと考えられる。但し、薄くするほど高周波窓の強度が低下するので、現実的には高周波窓や入力結合器の大きさと兼ね合いで決めていく必要がある。

#### 2.4 内導体用応力緩和材料にモリブデンを使用し、その厚みと幅を変えた場合

図7に、内導体用応力緩和材料にモリブデンを使用した場合の、厚み(T2)毎のアルミナエッジ部に発生する最大主応力の比較を示す。この時のモリブデンの幅は15mmで一定とした。図では、モリブデンの厚みを厚くするほどアルミナエッジ部に発生する最大主応力が小さくなるのがわかる。但し1.5mmから2.0mmにした場合の減少割合は他より少なくなっており、これ以上厚くしても効果は少ないと考えられる。

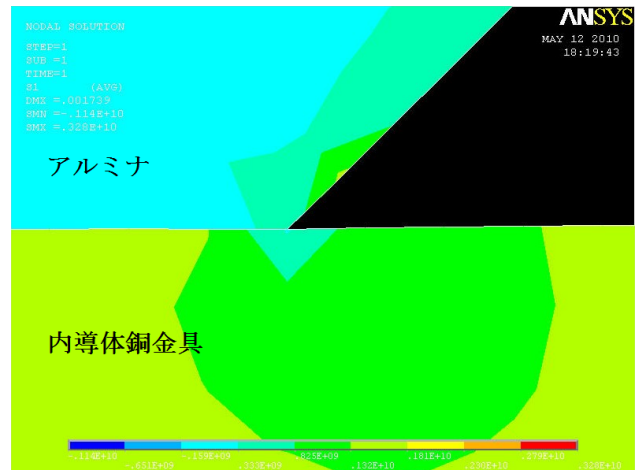


図9：図8におけるモリブデン幅が10mmの場合のアルミナエッジ近傍の最大主応力σ1の等高線表示（応力の符号は、正が引張で負が圧縮）

図8に、内導体用応力緩和材料にモリブデンを使用した場合の、幅(W)毎のアルミナエッジ部とその周辺に発生する最大主応力の比較を示す。この時のモリブデンの厚みは1.5mmで一定とした。図では、幅が10mmで極大値を示している。具体的には、12mmから8mmの間ではエッジ部以外の近傍でσ1の最大値が発生し、10mmで極大となっている（図9）。モリブデンの幅がアルミナの幅に近づくことで、モリブデンの端部に発生する応力が影響する割合が増えるためだと考えられる。

### 3. 応力緩和材料の追従性試験

実際に応力緩和材料を内導体銅金具に挿入する場合は、鑢付時の銅金具の熱膨張量に追従させるために、外径を内導体銅金具の内径より大きくしておき、銅金具に挿入できるように、応力緩和材料の一箇所にスリットを入れてバネのように伸縮性を与える必要がある。これまでの解析結果において、応力緩和材料はモリブデン又はタングステンから選び、2mm前後まで厚くすれば、最大主応力をかなり減らせる事がわかった。但し、厚くするほど剛性が増し伸縮性は失われるので、実際にモリブデンで試験片を製作し、追従性の検証を行った。図10に示すように、周囲を均等に締め付ける六爪チャック試験機を用意し、厚み0.5, 1.0, 1.5, 2.0mmの4種類（幅は全て15mm）のモリブデンリングを検証した。4種類とも締め付け後、熱膨張で開く分の口径までチャックを開いても、モリブデンは全て均一に追従して開くことを確認した（図11）。又試験後の外径が全て元に戻っていることも確認した。

### 4. まとめ

同軸平板型高周波窓を鑢付温度から常温まで下げた時の、アルミナエッジ付近に生じる最大主応力について、内導体銅金具の厚みや応力緩和材料の種類及び緩和材料にモリブデンを適用した場合の厚みや





図 10 : 応力緩和材料の追従性確認用六爪チャック試験機

幅を変えてANSYSで比較した。応力緩和材料は、アルミナより更に熱膨張率が小さい材料ほど最大主応力が小さくなる。内導体銅金具の厚みは、薄くするほど最大主応力が小さくなるが、薄くするほど高周波窓の強度が低下するので、現実的には高周波窓や入力結合器の大きさとの兼ね合いで決めていく必要がある。モリブデン等の応力緩和材料の厚みを厚くするほど最大主応力が小さくなるが、ある程度厚くするとその減少割合は少なくなっていく。モリブデン等の応力緩和材料の幅は、アルミナの幅に近づくほど最大主応力は増加傾向を示すので、アルミナ幅よりある程度長くする必要がある。

応力緩和材料を厚くした場合、鑢付時の内導体銅金具の熱膨張量に追従することを実験で検証し、2mmまで厚くしても均一に追従することを確認した。KEKBアレス(ARES)空洞の高度化においては、現行(周波数509MHz、定格電力400kW/連続波)に比べて約二倍の給電電力800kWを可能にする増強型結合器の開発を現在進めており、今回の研究による応力緩和の機構を反映していく予定である。

## 謝辞

今回の研究にあたり、三菱重工業株式会社菅野東明様、比嘉究作様及び日立原町電子工業株式会社阿部和彦様には有意義な助言を頂き、深く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] M. Neubauer et al., "HIGH POWER COAX WINDOW", Proc. of the IPAC'10, Kyoto, Japan.

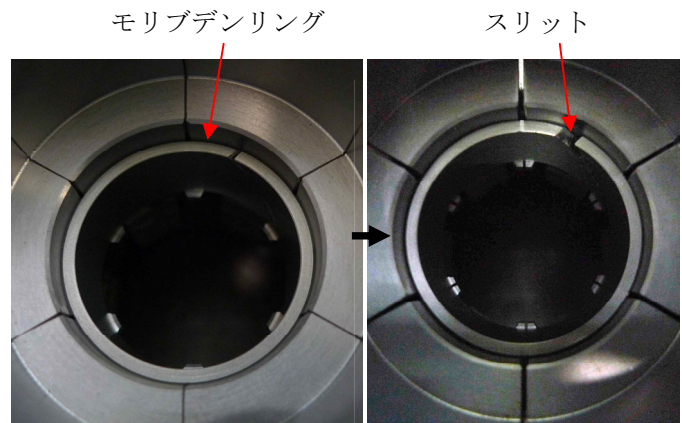


図 11 : 六爪チャック試験機による応力緩和材料(スリット入りモリブデン:厚み2mm)の追従性試験風景。左が所定の口径まで縮めた後で、右が熱膨張で開く分の口径まで開いた場合。