

# THERMAL CYCLE TESTS OF RF WINDOWS FOR STF INPUT COUPLERS

Masato Satoh\*, Eiji Kako, Shuichi Noguchi, Toshio Shishido, Ken Watanabe, Yasuchika Yamamoto  
 High Energy Accelerator Research Organization  
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 305-0801

## Abstract

It is supposed that the difference of the linear thermal expansion coefficient between copper and ceramic caused vacuum leak at ceramic RF windows at low temperature in STF-1 cryomodule tests. Thermal cycle tests of several samples with improved design were carried out to confirm the reduction of the thermal strain at the ceramic RF windows.

## STF 超伝導空洞用入力結合器の高周波窓の熱サイクル試験

### 1. はじめに

異種材料の接合ではそれぞれの線膨張係数の違いによる歪みがよく問題にされる。高周波回路で使用されるセラミック窓もセラミックと銅材との接合は確立された技術ではなく、歪みを軽減するための様々な設計がなされる。また、Ansys 等のシミュレーションコードによる構造計算も行われる。KEK-STF におけるクライオモジュール冷却試験で利用される超伝導空洞用入力結合器でも熱歪みの軽減策がいろいろと取られていたが、セラミック製 RF 窓での真空リークが発生した。KEK-STF では次期計画が進行中であり、この真空リークの問題に迅速な対応が求められ、我々は歪み軽減策を強化した試験器を製作し、熱サイクルを行い、改善策を検証した。本論文では、真空リーク発生状況、試験器を用いた熱サイクル試験の結果、および次期計画への対応について述べる。

### 2. STF クライオモジュール試験

#### 2.1 KEK-STF クライオモジュール試験の経過

KEK-STF は L バンド超伝導加速空洞の開発を目的に 2005 年度から整備が進められて来た。空洞単体の開発の他に安定運転を目的とする冷凍機、高周波源を含むシステム全体も構築され試験が行われた。4 空洞用のクライオモジュールを製作し、2007 年 10 月～11 月には 1 台の空洞のみによるクライオモジュール試験 STF-0.5 が実施された。2007 年 10 月は低温低電力試験が行われ、11 月は低温で 130kW の大電力が投入された。続く 2008 年 5 月からは当初予定の 4 空洞によるクライオモジュール試験 STF-1 が実施された。ここでは STF-0.5 で使用された空洞ユニットと他の空洞ユニット 3 台を合わせてシステムが構築され、2008 年 5 月～7 月にかけて低温低電力による試験が行われた。夏の停止期間中は一度室温に昇温されたが、9 月から再び冷却が行われ 12 月にかけて低温大電力試験が行われた。ここで、1 空洞は 3 度、3 空洞は 2 度の熱サイクルが行われたことになる。

#### 2.2 低温窓と室温窓の温度状況

クライオモジュール試験時の空洞は 2K に冷却される。空洞は熱侵入を防ぐために 5K と 80K の二つの断熱シールドに覆われており、真空槽であるクライオモジュールに納めることにより真空断熱される(図 1)。この超伝導空洞に高周波電力を送るのが入力結合器である。この入力結合器は室温側ではクライオモジュール外部の導波管に接続され、一方の低温側では空洞のポートに装着される。またクライオモジュール組み立て上の制約により、入力結合器は低温部と室温部の二つの部分から構成され、各部にセラミック窓が 1 枚ずつ設けられている。図 1 に示すとおり、低温部のセラミック窓(以下、低温窓)は 80K シールド近くに置かれ、冷却時は室温から 80K に冷却される。もう一方の室温部セラミック窓(以下、室温窓)はクライオモジュール外部に置かれ常に室温状態に保たれる。

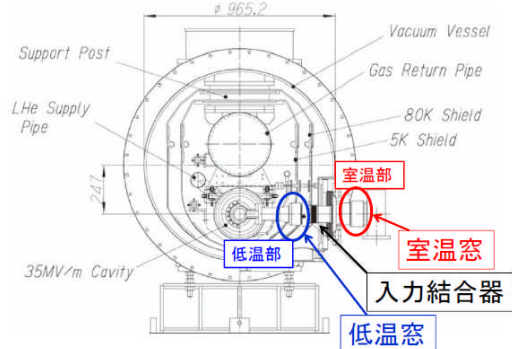


図 1: クライオモジュール断面図

#### 2.3 低温試験後の真空リーク

STF-1 低温大電力試験が終了の 2009 年 1 月にクライオモジュールは室温に戻され、入力結合器の真空リーク試験が行われた。クライオモジュール外側の室温窓、次に内部の低温窓の順にリーク試験を行ったところ、4 台の室温窓全てに真空リークが見つからない一方で、低温窓は 4 台中 3 台に真空リークが発生していた。本来ならば投入電力の影響も考慮すべきところであるが、室温窓に対して低温窓の真空リーク発生状況が顕著であり、熱サイクルが大

\* masato.satoh@kek.jp

きな原因であると考えた。リークレートはいずれも  $1 \times 10^{-4} \text{Pam}^3/\text{s}$  程度である。

### 3. 真空リークの詳細調査

STF-1 解体後の 2009 年 6 月から低温窓のリーク状況の詳細について、確認作業を開始した。最初に各部をマスキングしながら通常の真空リーク試験を行い、真空リークは全て低温窓上の内導体付近で発生していることが分かった。セラミック窓は内外導体にチョーク構造を有するために、蝟付け部を直接に観察することが出来ない(図 2、図 6 参照)。従ってワイヤーカッターによりチョーク部を切断し、セラミック窓蝟付け部を直接観察することにした。

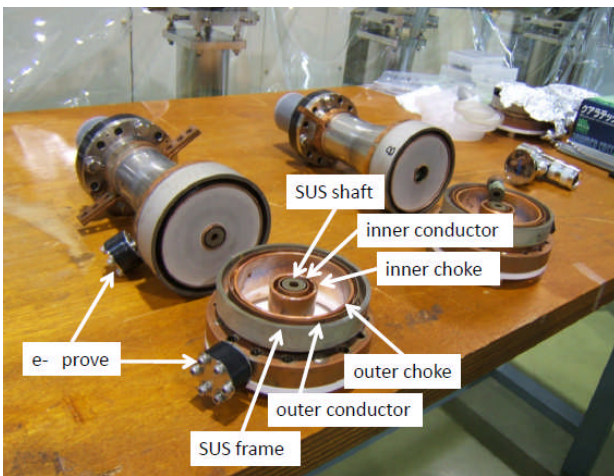


図 2: ワイヤークット後の低温窓

図 2 はワイヤークット後の低温窓である。セラミック窓と内外導体、他に機械的強度を高めるための SUS フレームと SUS の心棒があり、チョーク構造も見ることが出来る。蝟付け部を直接観察できるようになり、最初にスニファーマ試験を実施した。低温窓の内部に 1.2 気圧の He ガスを封入し、スニファーマプローブを内導体蝟付け部に当て、 $22.5^\circ$  ピッチで全周  $360^\circ$  を調べた。角度分解の  $22.5^\circ$  は内導体外径の  $24.0\text{mm}$  とスニファーマプローブ外径  $6.0\text{mm}$  により決定される。また、外導体側蝟付け部も同時にスニファーマ試験を行い、再度真空リークがないことを確認した。スニファーマ試験の低温窓蝟付け部の結果を図 3 に示す。いずれも  $2 \times 10^{-4} \text{Pam}^3/\text{s}$  程度のピークであり、通常リーク試験の結果と一致している。またスニファーマ試験と並行して石鹼水による確認も行った。図 4 は No.3 低温窓に石鹼水かけた様子を示しており、スニファーマで見つかった  $239^\circ$  の他に  $128^\circ$  にも泡の吹き出しが発生した。つまり、スニファーマ試験の場合は小さなリークは大きなリークのバックグラウンドに隠れて発見が困難であることが分かる。一方、石鹼水による確認は同じサンプルであっても泡が出る場合と出ない場合があり、再現性は良好ではない。図 4 では内導体銅パイ

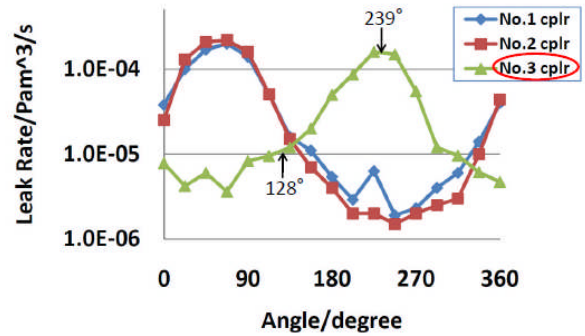


図 3: スニファーマ試験結果

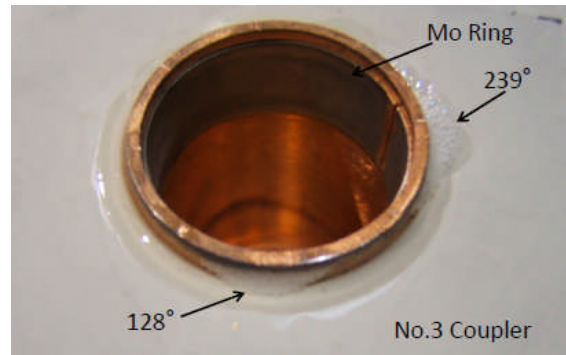


図 4: 石鹼水によるリーク確認

プの内側に、後述するモリブデンリングが蝟付けされている様子が見える。

スニファーマ試験後は低温窓 No.1, No.3 に対してカラーチェックを行った。結果の一部を図 5 に示す。写真のおおりに色素沈着が見られるのは蝟付け部および蝟付け付近のクラックであり、スニファーマで確認されたリーク箇所はすべて蝟付け部であった。ただし、カラーチェックの感度は良好であり、スニファーマ試験の結果以外の場所にも色素沈着が見られ、顕微鏡による確認が必要なほど微細な沈着も見られた。

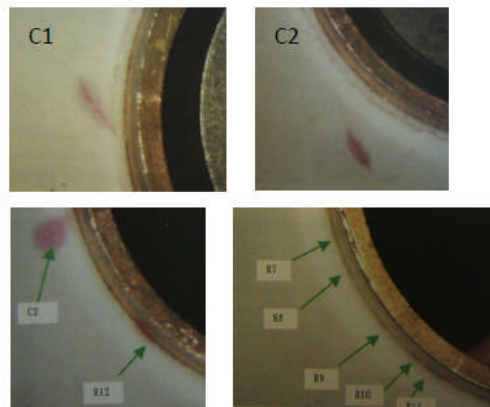


図 5: カラーチェックの結果

スニファーマ試験とカラーチェックからは、どの段階であるかは不確かであるがセラミックディスクにクラックが入るほどの歪みが生じていること、真空リークは内導体蝟付け部で発生することが分かった。しかもリークレートがどのサンプルでも一致しているので、歪みによる損傷は同じ程度であり、同じような経過を辿り真空リークが発生したと考えることができる。これはセラミックと銅の異材接合に由来すると考えられる。

## 4. セラミック窓と線膨張係数

### 4.1 セラミック窓の基本構造

KEK-STF で採用されているのはディスクタイプのセラミック窓である。周辺の構造を単純化でき、加工と製作が容易である長所を有する。STF-1 で採用されたセラミック窓の概要を図 6 に示す。

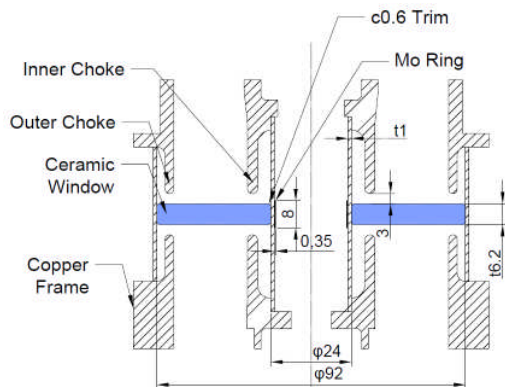


図 6：セラミック窓断面図

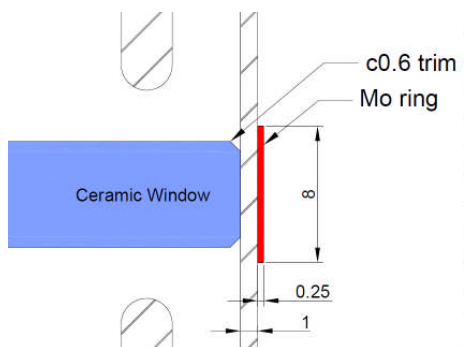


図 7：セラミック窓蝟付け部

円形セラミックディスクの寸法は外径 92mm、中心孔径は  $\phi 24$ mm、厚さは 6.2mm である。これに内外導体の銅パイプが差し込まれ、蝟付けを行う。蝟付け温度は約 1000°C である。STF-1 で使用された内外導体の銅パイプ肉厚は 1mm である。また、図に示されているとおり、内外導体の蝟付け部に覆い被さるようにチョーク構造が設けられている。チョーク構造は誘電体であるセラミックが挿入された分、インピーダンス整合させる役割と大電力の電磁界から蝟付け部の電界集中を緩和する役割を担う。図 7

は内導体側蝟付け接合部を拡大したものである。内導体銅パイプの外表面はセラミックディスクと蝟付けされ、同じ位置の裏面にはモリブデン製のリングがセラミックと一緒に蝟付けされる。このリングは厚さ 0.25mm、幅 8mm である。モリブデンはセラミックとほぼ同じ線膨張係数を持ち、セラミックと一緒に蝟付けすることにより銅の変形を抑制することが出来ると考えられている。

### 4.2 使用材料の線膨張係数

ここで使用材料の線膨張係数を図 8 に示す。5K の低温から蝟付け温度に近い 1200K (930°C) までのセラミック、銅、モリブデンの線膨張係数の変化が示されている。図が示すとおり 200K 以上の領域では、銅の線膨張係数はセラミックとモリブデンの約 3 倍であり、100K の低温状態ではセラミックが  $8 \times 10^{-7}$  であるのに対し、銅は  $1 \times 10^{-5}$  と 10 倍以上の膨張率を有する。この  $1 \times 10^{-5}$  という値は多くの材料が室温で持つ線膨張係数と同程度であり、100K においても銅は良く収縮することを意味する。従って、低温窓を 80K の低温状態に冷却するという事は蝟付け温度から室温まで冷却される時に生じる歪みと室温から 80K に冷却する時の二つの歪みが加算されることになる。熱歪みという面では室温窓よりは厳しい条件で使用することになる。

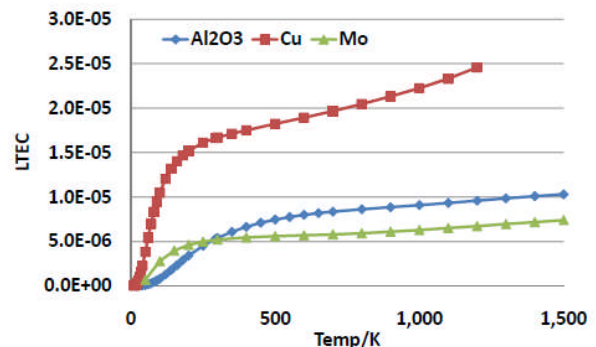


図 8：線膨張係数の比較

## 5. 試験器の製作

KEK-STF では DESY、FNAL とクライオモジュールシステムの共同開発研究 S1-Global (以下 S1-G) が進行中であり、2010 年 6 月から 8 空洞クライオモジュール試験が開始された。改良した低温窓を S1-G に用いるためには熱歪みを軽減する必要がある。これに迅速に対応するために我々は試験器を製作し、熱サイクルによる検証試験を行うことにした。

試験器で最初に試した熱歪み軽減策は、内導体銅パイプが温度変化に対し容易に弾性変形できるようにすることで、周囲への影響を極力抑えようというものであった。具体的には内導体銅パイプ肉厚を 1mm から 0.8mm に薄くすることにした。板材の内部応力は厚みの 3 乗に比例するので、この変更により内部応力を 0.5 倍程度に軽減され、弾性変形も容易になる。また、銅パイプの変形を矯正しているモリブデンリングについては銅パイプの弾性変形をあ

る程度許容することが好ましいと考え、厚さ 0.20mm の薄いものを採用することにした（試験器 #2）。ただし、銅パイプ肉厚 0.8mm の効果を見極めるために STF-1 で用いられたモリブデンリング 0.25mm の試験器も一緒に製作した（試験器 #1）。図 9 に試験器 #1、#2 を示す。全体の構造としてはセラミック窓が内外導体に蝟付けされ、片面にはチョーク構造と一体の真空排気用のフランジがあり、その裏面は蝟付け部を直接観察できるようにチョーク構造が取り除かれている。試験器 #1、#2 の熱サイクル試験は 2009 年 9 月から開始され、この結果よって S1-G にフィードバックが掛けられた。

一方で真空封止を強化する目的で、蝟付け時の蝟材をセラミック窓 c0.6mm のトリミング部に被覆することを考えた。c0.6 トリミングに蝟材被覆があるもの（試験器 #4）と被覆がないもの（試験器 #3）が製作された。ここで試験器 #1 と #3 は同じ寸法仕様である。

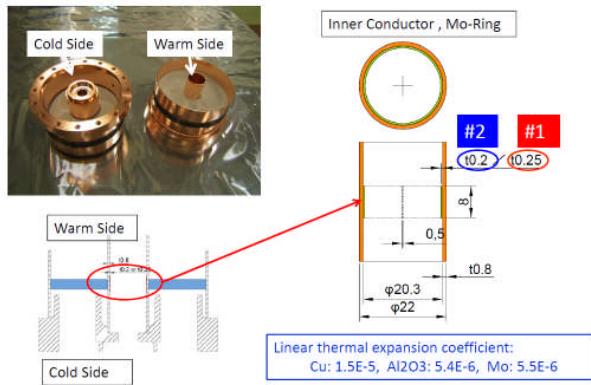


図 9：試験器 #1、#2

内導体銅パイプは両者ともに 0.8mm であり、#1 が既存タイプのモリブデンリング 0.25mm、#2 が 0.20mm である。

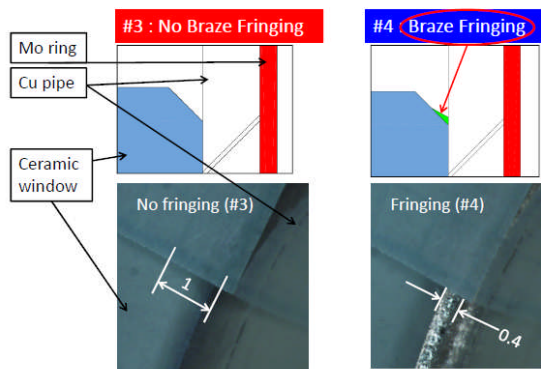


図 10：試験器 #3、#4

試験器 #3、#4 の両方ともに内導体銅パイプは 0.8mm、モリブデンリング 0.25mm である。#4 は真空封止を改善するために c0.6 トリム加工面に蝟材の被覆を設けた。

## 5. 熱サイクル試験結果

熱サイクル試験の結果は図 11 の通りである。結果はモリブデンリングの厚さが 0.20mm である試験器 #2 だけに真空リークが発生し、他 3 台には真空リーク発生はなかった。銅パイプの弾性変形を容易にするためと考えた措置は逆効果であることが分かった。2009 年 10 月のこの結果を受けて S1-G では内導体銅パイプ 0.8mm、モリブデンリング 0.25mm で製作することになった。

一方で試験器 #3、#4 の蝟材被覆の有無については 10 回の熱サイクルで違いは見られなかった。更に確認のために銅パイプ 0.8mm、モリブデンリング 0.25mm という寸法仕様の熱歪みに対する耐久試験を継続中である。

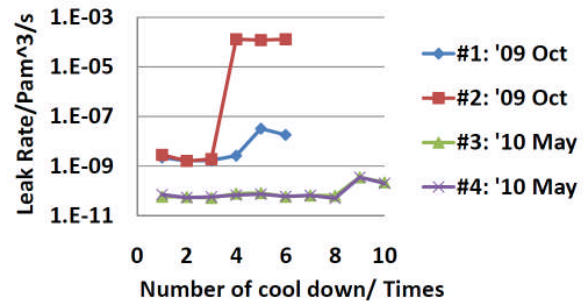


図 11：熱サイクル試験の結果

## 6. まとめと今後の活動

STF-1 で発生した低温窓の真空リークトラブルは試験器による熱サイクル試験により耐久性の高い寸法仕様を見出すことが出来た。この結果は KEK-STF で現在進行中の S1-G クライオモジュール試験に反映することができた。ここでは 2010 年 8 月下旬から入力結合器のエイジングが開始され、10 月からは STF-1 を上回る大電力試験も始まり、低温窓の経過観察は今後も必要である。一方で試験器 #3、#4 の熱サイクル試験を今後も継続し、耐久性を確認する予定である。

## 参考文献

- [1] H.Sakai, et al., "1.3GHz 主加速器用 20kW 入力コプラ開発の現状", Particle Accelerator Society Meeting 2009- Proceedings JAEA, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, Japan
- [2] <http://riodb.ibase.aist.go.jp/TPDB/AJAX/>