

## DEVELOPMENT OF STF INPUT COUPLERS FOR ILC

Masato Satoh<sup>#</sup>, Eiji Kako, Shuichi Noguchi, Toshio Shishido, Ken Watanabe, Yasuchika Yamamoto  
 High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

The development of L band 9-cells cavities for ILC has been proceeded at KEK-STF (Superconducting RF Test Facility), and the trial run of cryomodule on high power in low temperature also have been performed since 2005. Two times of cryomodule tests, STF phase-1(STF-1) and S1-Global(S1-G) have been carried out. In STF-1, vacuum leak trouble was happened on 3 ceramic RF windows on the input couplers among 4 ones due to thermal cycles. Those input couplers were planned to be used in next cryomodule test, S1-G, and the vacuum leak trouble was hurried up to be solved. In this article, the situation of vacuum leak in STF-1, the investigation of the leak and the improvement, the results of S1-G and another durability test will be stated.

## ILC 用 STF 入力結合器の開発

### 1. STF-1 における入力結合器の真空リーク

#### 1.1 STF 入力結合器

STF 入力結合器は同軸タイプであり、クライオモジュール外部の導波管(室温)から超電導加速空洞(2K)に RF 電力を伝達する。このために入力結合器は室温部と低温部の二つの部分から成り、その接続部にセラミック製の RF 窓が設けられている。(図 1) 低温側のセラミック製 RF 窓を低温窓と呼び、室温側のものを室温窓と呼ぶ。入力結合器の真空は二箇所の RF 窓により切り離されており、低温側は超電導空洞と直結であり、低温窓と室温窓の間は別途真空排気され、室温窓の外部は大気である。

クライオモジュールが低温に冷却されると、入力結合器の付け根では 5K、低温窓は約 80K に冷却され、室温窓は常に室温に保たれる。

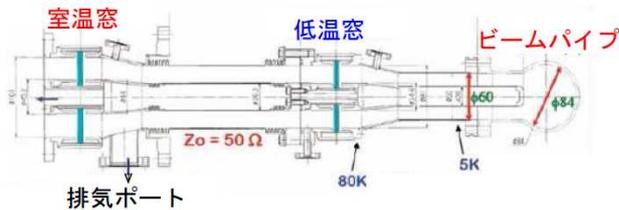


図 1: STF 入力結合器の断面図.

#### 1.2 低温大電力試験と真空リークの発生

STF-1 クライオモジュール試験の冷却期間は以下のとおりであった。

- 予備試験:2007年10月~2007年11月(1空胴)
- 第一回冷却:2008年5月~2008年7月(4空胴)
- 第二回冷却:2008年9月~2008年12月(4空胴)

KEK-STF では 1 クライオモジュールに 9 セル空洞が 4 台格納される。予備試験は 1 空胴だけによる低温大電力試験が行われ、第一回冷却では 4 空胴に

よる低温低電力試験、第二回冷却では 4 空胴による低温大電力試験が実施された。従って 1 空胴については 3 回、他の 3 空胴については 2 回の熱サイクルが掛けられたことになる。2008 年 12 月に STF-1 が終了し、終了時のシステムチェックを行ったところ、4 台中 3 台の入力結合器の低温窓で真空リークが見つかった。リーク量はいずれも  $1 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-4}$  [Pam<sup>3</sup>/s] であり、バックグラウンドは  $4 \times 10^{-7}$  [Pam<sup>3</sup>/s] であった。常に室温状態に保たれる室温窓には真空リークはなく、低温窓のみに起こっていることから、真空リークは熱サイクルにより発生したものと考えられる。

その後、スニファー試験及びカラーチェックによりリーク状況を調べると、真空リークは全て内導体とセラミック製 RF 窓の蝟付け接合部で発生していることが分かった。図 2 にカラーチェックの結果の一部を示す。写真中央に 1 mm 厚の内導体銅パイプが見えており、右側の白く見えている部分がセラミック製 RF 窓である。写真(左)は真空リークのある位置にインクの浸み出しが見え、写真(右)は真空リークのない部分でクラックが見つかった。

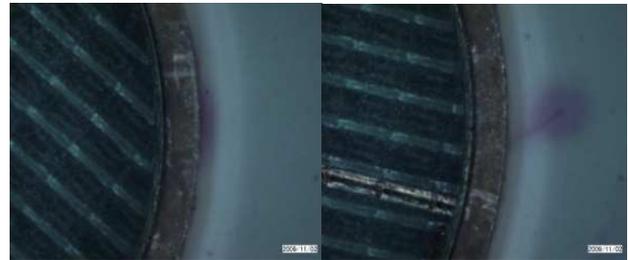


図 2: カラーチェックの結果.

#### 1.3 低温窓の構造

当初の設計は熱歪みを吸収する構造が取られている。(図 3) 外径 92 mm のセラミックディスクは内径 24 mm の穴が開けられ、厚さ 1 mm の外導体銅パイ

<sup>#</sup> masato.satoh@kek.jp

ブと内導体銅パイプが蝟付けされる。銅パイプが蝟付けされたセラミックディスクはチョーク構造に着けられ、低温窓全体の強度を保持すると同時に、この構造自体が熱歪みを吸収する。また銅とセラミックの線膨張率は大きく異なり(表 1)、銅パイプとセラミックの接合部に歪みが生じる。これを防ぐためにセラミックとほぼ同じ線膨張率を持つモリブデン(Mo)製の帯状のリングを内導体銅パイプの裏側に蝟付けし、銅パイプの歪みを軽減する。

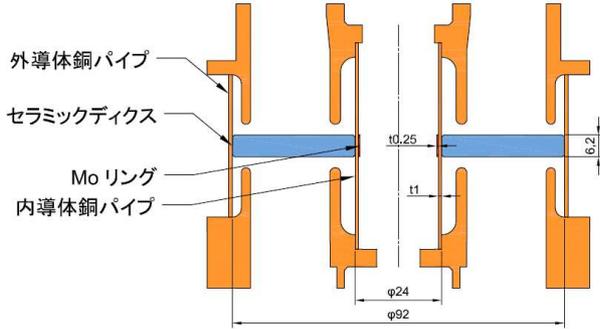


図 3: 低温窓の断面図

銅、セラミック、Mo の線膨張率(LTEC)を表 1 に示す。室温時の線膨張率を比較すると、銅の線膨張率が他よりも 3 倍ほど大きい。表中の積分値は蝟付け温度(1200K)から室温(300K)、室温から 5K までの区間で LTEC を温度で積分したものである。

表 1: 線膨張率(LTEC)と冷却時の縮み量 [1]

|                          | Cu                    | ceramics              | Mo                    |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| LTEC at room temperature | $1.67 \times 10^{-5}$ | $5.40 \times 10^{-6}$ | $5.21 \times 10^{-6}$ |
| 1200K<br>300K<br>LTEC dT | $16.6 \times 10^{-3}$ | $7.46 \times 10^{-3}$ | $5.39 \times 10^{-3}$ |
| 300K<br>5K<br>LTEC dT    | $2.7 \times 10^{-3}$  | $0.65 \times 10^{-3}$ | $0.89 \times 10^{-3}$ |

ここで図 3 に示す構造が室温状態で設計どおりであり、内部応力がないものと仮定する。これを 5 K まで冷却すると、表 1 により、図 4 に示すような変形が生じる。

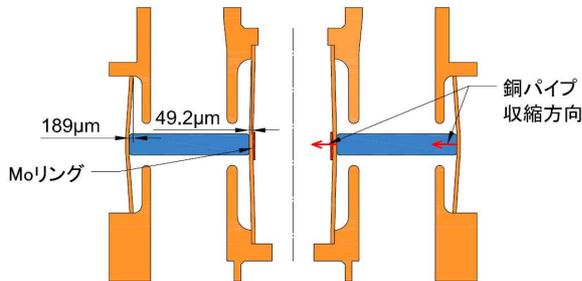


図 4: 5K における低温窓の変形.

外導体はセラミックディスクに対して 189µm 収縮し、内導体は 49.2µm 収縮する。この変形により、外導体はセラミックディスクを圧縮する方向に働き、内導体はセラミックディスクを引っ張り、セラミックディスクから剥がれる方向に働く。内導体蝟付け部は銅パイプの歪みを軽減するために Mo リングが裏面から蝟付けされているが、冷却時は Mo リングが銅パイプの収縮を十分に抑制することが出来ず、銅パイプの収縮に耐えられなかったために蝟付け部の損傷に至ったと考えられる。

## 2. 歪み軽減策と性能評価

### 2.1 低温窓の歪み軽減策

変形による応力を軽減するには剛性を下げれば良く、一方で、剛性の下げ過ぎは構造の保持を困難にする。低温窓の熱歪みの主な原因は内導体銅パイプの線膨張率の大きさにあり、銅パイプの厚さを薄くすることで応力も軽減できる。内部応力は厚さの 3 乗に比例するので、STF-1 で使用された厚さ 1 mm を例えば 0.8 mm に変更すると応力は  $0.512 (=0.8^3)$  倍と大よそ半減させることができる。

基本設計を変更せずに応力を緩和するには Mo リングの影響も考慮する必要があるが、これまでどの程度応力を緩和させるかは明確に理解されていなかった。そこで Mo リングの厚さの異なるテストサンプルを二種類作り、熱サイクルを掛けることにより性能評価を行うことにした。サンプル 1 は STF-1 と同じ 0.25 mm 厚の Mo リングであり、サンプル 2 はそれよりも薄い 0.20 mm である。ただし、両サンプルとも内導体銅パイプの肉厚は 0.8 mm である。テストサンプルの概要を図 5 に示す。

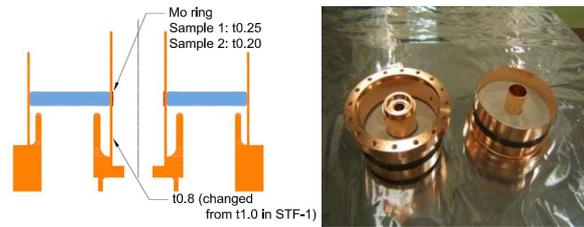


図 5: テストサンプル.

熱サイクルの冷却方法は二つのテストサンプルを同じクライオスタットに置き、室温から液体窒素温度まで冷却する。冷却後に再び室温に戻ったところで真空リーク試験を行う。図 6 に冷却時の様子を示す。

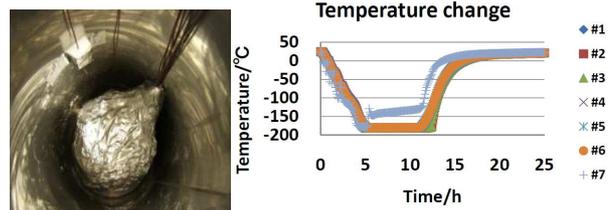


図 6: 熱サイクル時の冷却.

サンプルにはそれぞれ 3 個の熱伝対を設け、クライオスタット中の窒素雰囲気温度もモニターした。テストサンプルは温度を出来るだけ均一に保ちながら冷却するために 30 枚のアルミ фольで巻かれた。室温から液体窒素温度までは 5 時間かけて冷却した。計 6 回の冷却を行い、真空リーク試験の結果を図 7 に示す。

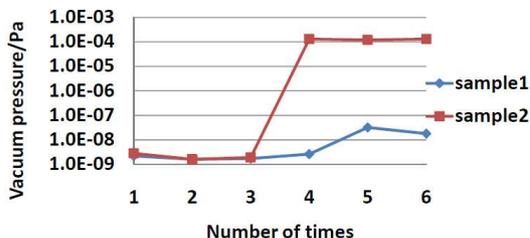


図 7: 熱サイクル試験の結果。

0.20 mm 厚の Mo リングであるサンプル 2 は 4 回目の冷却で真空リークが発生した。この時のリークレートは STF-1 の時と同じ  $1 \times 10^{-4} \text{ Pa m}^3 / \text{s}$  である。Mo リングが 0.25 mm 厚のサンプル 1 については 6 回の熱サイクルに耐えることができた。これらの状況から 0.20 mm 厚の Mo リングは銅パイプの歪みを十分に軽減することができず、Mo リング自身が銅パイプの歪みに負けて変形したために真空リークが発生したと考えられる。

以上の結果よりサンプル 1 の仕様が次期計画である S1-G に採用された。

### 3. S1-G と耐久試験

#### 3.1 S1-G 低温大電力試験

S1-G は ILC の構成要素を評価するために FNAL、INFN、DESY 及び KEK の共同で行われたクライオモジュール試験である。4 空洞を収めるクライオモジュール 2 組が用意され、一方のクライオモジュールに STF タイプの空洞が 4 台収められ、STF タイプの空洞には STF 入力結合器が使用された。S1-G のクライオモジュール試験の冷却期間は以下のとおりである。

- 第一回冷却:2010 年 6 月~2010 年 7 月
- 第二回冷却:2010 年 9 月~2010 年 12 月
- 第三回冷却:2011 年 1 月~2011 年 2 月

これらの入力結合器は最大で 350 kW の電力が投入された。ただし、パルス幅が 1.5 ミリ秒、繰り返し周波数は 5 Hz のパルス運転である。

2011 年 2 月に S1-G クライオモジュール試験が終了し、前回同様に入力結合器の真空リーク試験を行った。結果は使用された 4 台の STF 入力結合器の低温窓、室温窓の全てについて真空リークは見つからなかった。解体時の低温部の真空度は  $5 \times 10^{-5} \text{ Pa}$  であり、リーク試験時の低温窓のリーク量は全て  $1 \times 10^{-9} \text{ Pa m}^3 / \text{s}$  のバックグラウンドレベルであった。

#### 3.2 耐久試験

前回のサンプル試験で良好な結果を収めたサンプル 1 と同じテストサンプルのサンプル 3 とサンプル 4 を製作し、S1-G に並行する 2010 年 4 月から 2011 年 7 月にかけて 24 回の熱サイクル耐久試験を実施した。冷却方法は前回の性能評価時と同じである。最初の 8 回の冷却までは 1 回の冷却の度に真空リーク試験を実施し、8 回以降については 2 回乃至 3 回の冷却に対し 1 回の真空リーク試験を行った。結果を図 8 に示す。

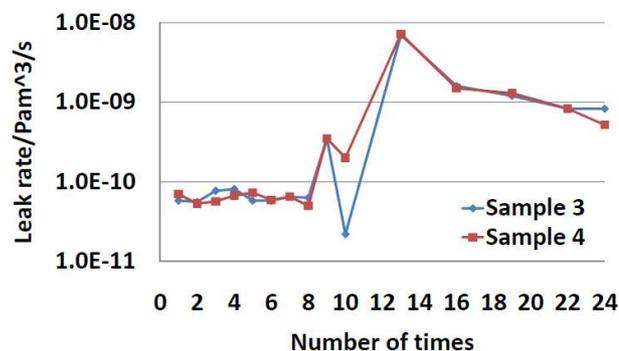


図 8: 耐久試験の結果。

13 回冷却後のリーク試験ではリークレートが  $1 \times 10^{-8} \text{ Pa m}^3 / \text{s}$  程度に上昇しているがバックグラウンドレベルである。図 8 のとおり、改良を加えたサンプルは異なる二つの個体について 24 回の熱サイクルに耐え、熱歪みに対し高い耐久性を示した。

### 4. まとめ

- STF-1 クライオモジュール試験では 4 台中 3 台の低温窓で真空リークが発生した。
- 内導体銅パイプの剛性を下げ、Mo リングの剛性を維持することにより真空リークを防ぐことが出来た。
- 改良型の低温窓を S1-G クライオモジュール試験に使用し、真空リークは実際に起こらなかった。
- 2 つの改良型サンプルで計 24 回の熱サイクルを行ったところ、真空リークは生じなかった。

### 参考文献

- [1] <http://riodb.ibase.aist.go.jp/TPDB/AJAX/>