

## STF2 クライオモジュールの低電力 RF 試験 LOW POWER RF TESTS OF STF2 CRYOMODULES

今田信一<sup>#,A)</sup>, 浅野峰行<sup>A)</sup>, 植木竜一<sup>A)</sup>, 柳町太亮<sup>A)</sup>, 山田浩気<sup>A)</sup>  
岡田昭和<sup>B)</sup>

宍戸寿郎<sup>C)</sup>, 山本康史<sup>C)</sup>, 加古永治<sup>C)</sup>

Shin-ichi Imada<sup>#,A)</sup>, Mineyuki Asano<sup>A)</sup>, Ryuichi Ueki<sup>A)</sup>, Taisuke Yanagimachi<sup>A)</sup>, Hiroki Yamada<sup>A)</sup>  
Terukazu Okada<sup>B)</sup>

Toshio Shishido<sup>C)</sup>, Yasuchika Yamamoto<sup>C)</sup> and Eiji Kako<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Nippon Advanced Technology

<sup>B)</sup> K-vac

<sup>C)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

### Abstract

The ILC prototype cryomodules were constructed as the STF2 project at KEK. There are two cryomodules called CM1 and CM2a. The CM1 cryomodule is consisted of eight superconducting 9-cell cavities and a superconducting quadrupole magnet. The CM2a cryomodule contains four superconducting 9-cell cavities. The superconducting cavity system consists of a superconducting cavity, a frequency tuner, an input coupler, two HOM couplers, and a monitor coupler. The low power RF tests were carried out to confirm their properties of superconducting cavities and these equipments. Tuner stroke tests, input coupler coupling stroke tests, measurements of external Q values, cable corrections and piezo stroke tests were performed. In this paper, the results of these RF tests are presented.

### 1. はじめに

KEK STF においては STF-2 計画として 2 台のクライオモジュール(CM1, CM2a)を建設した(Fig.1)。CM1 は ILC の仕様をみたすクライオモジュールで、9 セル超伝導空洞 8 台と 1 台の超伝導磁石が組み込まれ、CM2a には 9 セル超伝導空洞 4 台が組み込まれている。Fig.2 に示すように超伝導空洞システムは超伝導空洞、チューナー、インプットカップラー、HOM カップラー、モニターカップラーなどで構成される。

各機器の性能の確認および調整の為、低電力 RF 試験を実施したので、その結果について報告する。

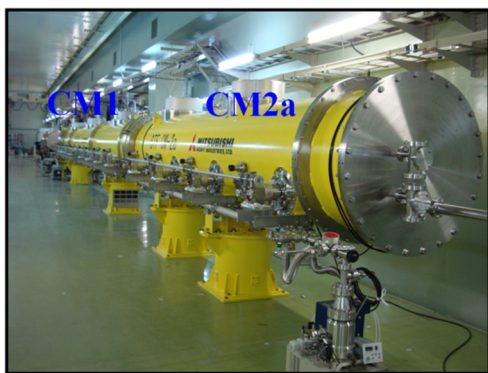


Figure 1: Completed STF2 cryomodules.

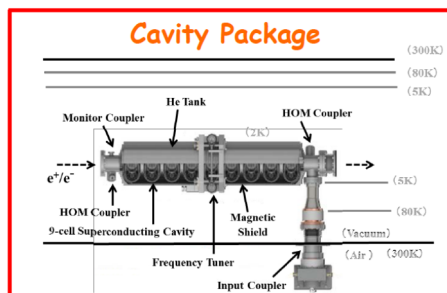


Figure 2: Cavity package of STF-2 superconducting cavity system.

### 2. 冷却時の空洞特性

2014 年 10 月から 2 週かけて 2 K まで空洞を冷却、冷却後 4 週間にわたり低電力 RF 試験を実施、その後、自然昇温により室温に戻した。(Fig.3)

Fig.4 は冷却時の空洞の共振周波数( $f_0$ )の変化を示している。共振周波数はネットワークアナライザーを用いて測定した。製作完成時の空洞は製作誤差などの要因により共振周波数が目標周波数よりずれている。加速モードの周波数を 2 K での運転周波数に合わせる為にプリチューニングが行われる。そのため、室温時の共振周波数は  $1297.99 \text{ MHz} \pm 100 \text{ kHz}$  に調整されている。4.2 K に冷却されると収縮によりおよそ 2 MHz 周波数が上昇する。その後、減圧により

<sup>#</sup> nat-ima@post.kek.jp

2 K まで冷却されると、今度は減圧による大気圧荷重の減少によりおよそ 230 kHz 周波数は減少し、1299.85 MHz±100 kHz となった。チューナーにより運転周波数の 1.3 GHz に調整できることを確認できた。

Fig.5 に冷却による超伝導空洞の外部 Q 値(Q<sub>L</sub>)の変化を示す。Q<sub>L</sub> は共振周波数とその半値全幅により次式で与えられ、ネットワークアナライザーで測定できる。

$$Q_L = \frac{f_0}{\Delta f}$$

室温時は、Q<sub>L</sub> ≅ Q<sub>0</sub> ≪ Q<sub>in</sub> の関係により室温での超伝導空洞の無負荷 Q 値(Q<sub>0</sub>)が 10000 程度であることがわかる。一方、2 K では Q<sub>L</sub> ≅ Q<sub>in</sub> ≪ Q<sub>0</sub> の関係にありインプットカップラーの外部 Q 値(Q<sub>in</sub>)が 3.5~5.4×10<sup>6</sup> の値であり、目標の 5×10<sup>6</sup> に調整可能な範囲にあることが確認できた。

Fig.6 はインプットカップラーからモニターカップラーに透過する RF パワーの冷却時の変化を示している。2 K における透過パワーからモニターカップラーの外部 Q 値(Q<sub>i</sub>)を見積もると Q<sub>i</sub> = 1.2~2.4×10<sup>11</sup> となることがわかる。

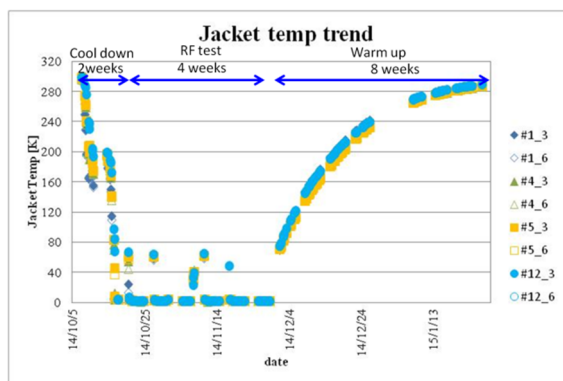


Figure 3: One cool-down/warm-up cycle for 14 weeks.

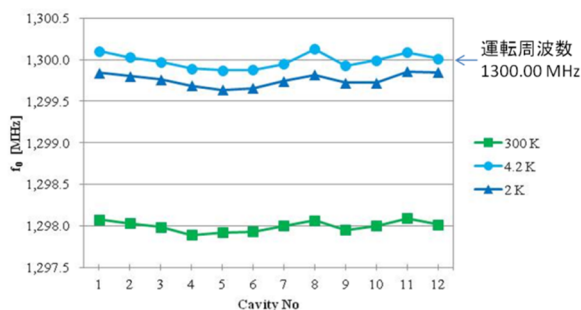


Figure 4: Resonant frequency (f<sub>0</sub>) at 300 K, 4.2 K and 2 K in twelve 9-cell cavities.

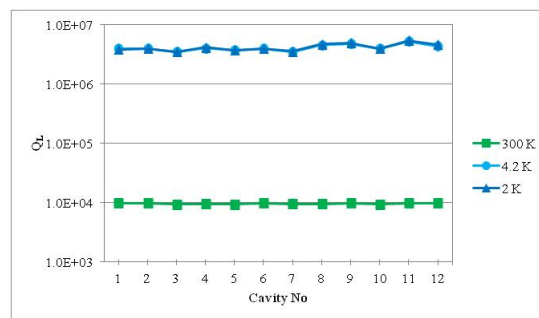


Figure 5: Loaded Q value (Q<sub>L</sub>) at 300 K, 4.2 K and 2 K in twelve 9-cell cavities.

### 3. 低電力 RF 試験

#### 3.1 チューナーstroーク試験

周波数チューナーは超伝導空洞に弾性変形範囲内の引っ張り荷重を軸方向に加えることにより、空洞に変形を与えて共振周波数を制御するものである。KEK では Fig.7 に示すようなスライドジャッキ型のチューナーを用いる。真空槽外部より 1 本のドライバーシャフトを回転させることでくさび形のローラーが傾斜部を移動することによりヘリウムタンク外周部のベローズ両端のフランジ間に荷重がかかり空洞の弾性変形範囲内で空洞全長を伸ばすことで周波数を上昇させることができる。

Fig.8 に各空洞のドライバーシャフトを 40 回転させた時の空洞の共振周波数の変化を示す。周波数変化は 480~573 kHz で 2 K での周波数 1299.85 MHz±100 kHz より、運転周波数 1.3 GHz に十分調整可能であることがわかる。40 回転は 2.2 mm 空洞長を長くすることに対応し、1 mm 当たりの周波数変化は 218~260 kHz となる。

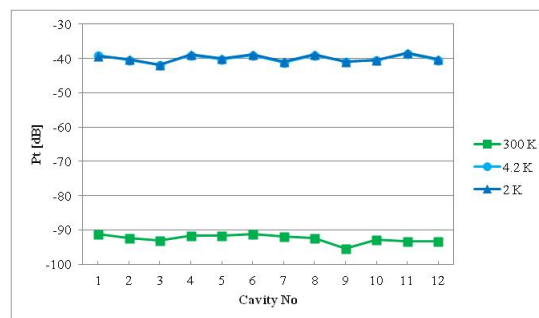


Figure 6: Calibration of transmitted power (P<sub>t</sub>) at 300 K, 4.2 K and 2 K in twelve 9-cell cavities.

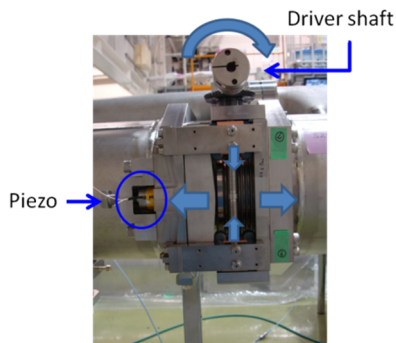


Figure 7: Frequency tuner system consisting of a slide-Jack and piezo tuner.

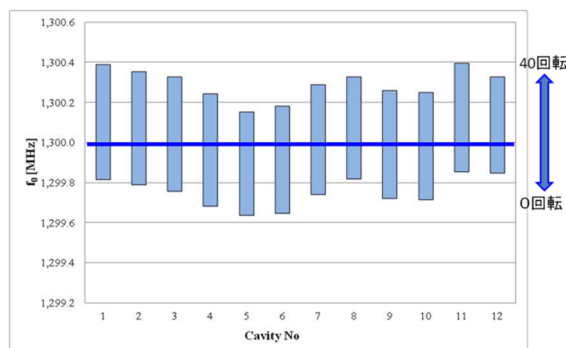


Figure 8: Tuning range of resonant frequency in 12 cavities.

### 3.2 インプット結合ストローク試験

Fig.9 にインプットカップラーの概略図を示す。インプットカップラーは低温部と室温部で構成され、高周波源からの導波管を通して供給される高周波 (TE01 モード) をインプットカップラーの同軸モード (TEM モード) に変換するためにドアノブ型同軸導波管変換器が取り付けられる。インプットカップラーの内導体のアンテナ先端にはベローが付いており長さ ( $\Delta l$ ) を変えることで空洞との結合度を調整できる。

Fig.10 に各空洞のインプットカップラーの外部 Q 値 ( $Q_{in}$ ) の測定結果を示す。  $Q_{in}$  のレンジはアンテナを最も空洞側に入れた時 ( $\Delta l$  最少) と空洞から最も抜いた時 ( $\Delta l$  最大) 値に対応する。各空洞とも目標値の  $5 \times 10^6$  にセットすることができた。

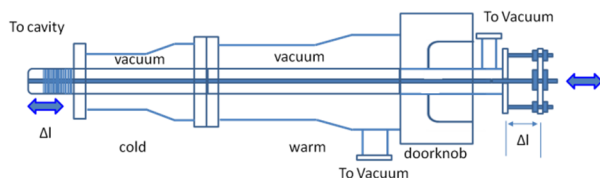


Figure 9: Schematic drawing of STF2 input coupler.

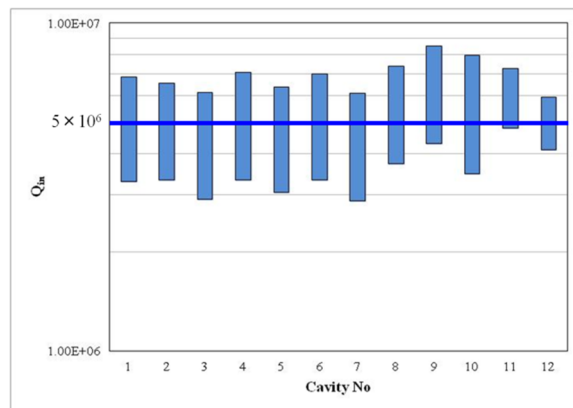


Figure 10: Coupling range ( $Q_{in}$ ) of input coupler in 12 cavities.

### 3.3 外部 Q 値の測定

モニターカップラーの外部 Q 値 ( $Q_i$ ) の測定には 3 つの方法を用いた。1 つめは、ネットワークアナライザーを用いて  $S_{21}$ 、 $Q_L$  を測定し、次式により求める。

$$P_i Q_i = 4 P_G Q_L$$

$$Q_i = \frac{4 P_G Q_L}{P_i} = \frac{4 \times Q_L \times \text{CorrectionFactor}}{10^{(S_{21}/10)}}$$

$i = \text{Monitor}, \text{HOM1}, \text{HOM2}$

2 つ目は、Fig.11 のセットアップで 400 W アンプを用いてバンド幅を測定し  $Q_L$  を求める。

$$Q_L = \frac{f_0}{\Delta f}$$

3 つ目は、400 W アンプを用いて空洞の蓄積エネルギーが半分に減衰する時の decay time ( $\tau_{1/2}$ ) を測定し次式より  $Q_L$  を求める。測定された decay time を Fig.12 に示す。

$$Q_L = \frac{2\pi f_0 \tau_{1/2}}{\ln 2}$$

$Q_L$  の値から次式により  $Q_i$  が求まる。

$$Q_i = \frac{4 P_G Q_L}{P_i}$$

$$P_G = P_{in} \times \text{correction factor}$$

$$P_i = P_t / \text{correction factor}$$

Fig.13 は 3 つの方法で測定した時の各空洞の  $Q_L$  を示している。ネットワークアナライザーで測定した結果は  $4.8 \sim 5.2 \times 10^6$  でアンプを用いた測定では  $4.2 \sim 4.8 \times 10^6$  となりネットワークアナライザーで測定したほうが平均 10 % 大きな値となっている。

Fig.14 は上式から計算した各空洞の  $Q_i$  の値を示し

ている。 $Q_L$ の測定はネットワークアナライザーとアンプを用いた方法で差がみられたが  $Q_t$  においては結果がよく一致していることが分かる。Fig.14 にはそれぞれの空洞の縦測定における  $Q_t$  の値も示している。縦測定の結果と今回の測定において 25 %の誤差の範囲で一致する結果となった。

ここで、 $Q_0$ の10倍程度に  $Q_t$ を設定するのが望ましい。2 K で  $Q_0=1 \times 10^{10}$ であるので  $Q_t=1 \times 10^{11}$ が望ましいがどの空洞も必要な値になっていることがわかる。

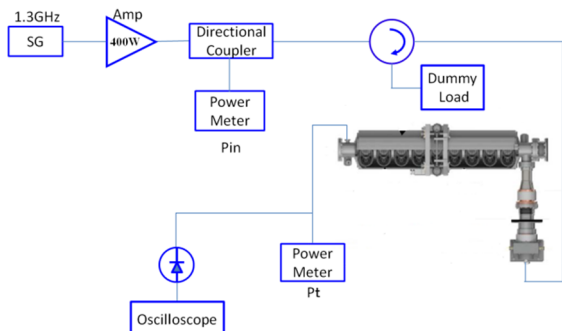


Figure 11: Set-up for calibration of monitor coupler ( $Q_t$ ) by rf source.

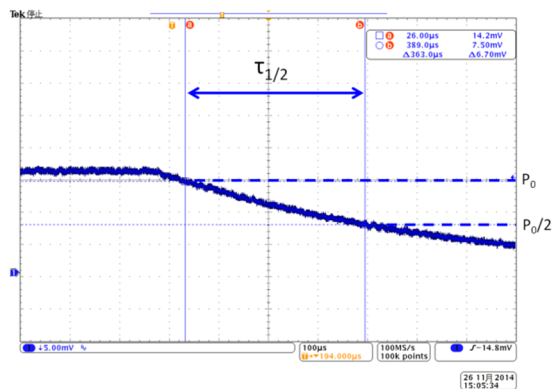


Figure 12: Measurement result of decay time.

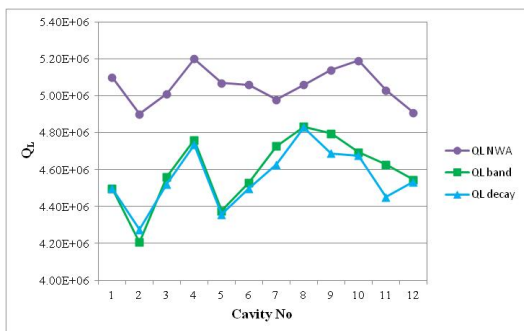


Figure 13: Comparison of  $Q_L$  value between three methods.

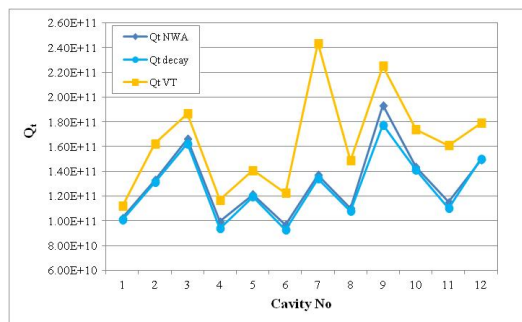


Figure 14: Calibrated value of monitor coupler ( $Q_t$ ) in 12 cavities.

Fig.15 に HOM カップラーの加速モードのフィルター特性を示す。HOM カップラーは空洞内を通過するビームによって誘起される有害な高調波モードを空洞外部に取り出すための同軸型アンテナであるが、高調波モードだけでなく加速モードとも結合を持つため、加速モードが外部に出ないようにノッチフィルターを持つ構造となっている。空洞を連結後に室温においてフィルター特性の測定および調整が行われている。Fig15 からわかるように、全ての空洞で加速モードにおける HOM カップラーの外部  $Q$  値( $Q_{HOM}$ ) $>1 \times 10^{11}$  となっており、必要なフィルター特性が得られていることがわかる。室温における HOM カップラーの調整が 2 K に冷却後も保たれていることが確認できた。

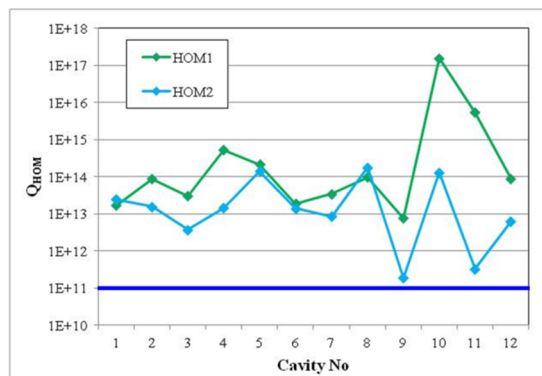


Figure 15: Filter property of HOM couplers to reject an accelerating mode.

### 3.4 ピエゾストローク試験

ILC のような超伝導空洞の高加速電界でのパルス運転では、空洞内表面の電磁界応力により空洞が変形し共振周波数のずれ（ローレンツデチューン）が起こる。このローレンツデチューンを補正するためにピエゾチューナーが用いられる。(Fig.7)

ピエゾ素子に電圧をかけた時の周波数の変化をネットワークアナライザにより測定した。Fig.16は各空洞に+500 Vの電圧をかけた時の周波数の変化を示している。No.4 空洞のピエゾは測定中に放電を起こし壊れたので値がない。ILCにおける運転加速電界 31.5 MV/m では 200 Hz のローレンツデチューンを補償する必要がある。No.1,4,11 以外の空洞においては 200 Hz 以上の周波数変化を得ることができた。No.1、No.11 において周波数の変化が小さいが電圧を上げることで (最大 1 kV)、十分な周波数変化が得られると考えられる。また、No. 4 についてはピエゾ素子を交換して、適正な動作を確認した。

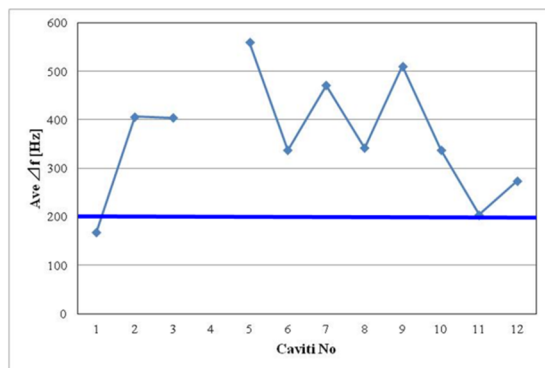


Figure 16: Frequency range of piezo voltage (+500V) in 12 cavities.

#### 4. まとめと今後

2014年7月の完成検査をもって STF2 計画用 CM1, CM2a クライオモジュールの組立が完成し、10月から冷却し、4週間の低電力 RF 試験を行った。チューナーの動作はスムーズで 1.3 GHz の運転周波数に調整できた。インプットカップラーは  $Q_{in}=5 \times 10^6$  に調整できた。 $Q_t$  については平均 25% の誤差の範囲で縦測定時の値と一致した。ピエゾについては、No.4 空洞を除いてローレンツデチューンの補償に必要な 200 Hz を得られると考えられる。HOM カップラーの加速モードのフィルター特性も必要な特性が得られた。

こうして、各機器の性能の確認及び調整ができた。今後の予定として、2015年10月に大電力での RF 試験を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] 加古永治、「超伝導空洞の高周波設計」高エネルギー加速器セミナー OHO'06 テキスト、(2006).
- [2] E. Kako, 「ILC 用超伝導空洞の開発」, 低温工学 48 (2013), "Development of superconducting cavities for ILC", TEION KOGAKU 48 (2013).
- [3] 加古永治、「超伝導空洞の基礎」高エネルギー加速器セミナー OHO'14 テキスト、(2014).