

## STF2 クライオモジュールの大電力 RF 試験 HIGH POWER RF TESTS OF STF2 CRYOMODULES

今田信一<sup>#,A)</sup>, 浅野峰行<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>, 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 called CM1 and CM2a were constructed as the STF2 project at KEK. The CM1 cryomodule consists of eight superconducting 9-cell cavities and a superconducting quadrupole magnet. The CM2a cryomodule includes four superconducting cavities. The high power RF tests were performed to confirm their performance and the effect of assembly process. The maximum accelerating gradient and the amount of x-ray radiation in each cavity were measured. In this paper, the results of these tests and comparison with vertical cryostat tests are described.

### 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、超伝導 9 セル空洞 8 台と 1 台の超伝導 4 極磁石が組み込まれ、CM2a には超伝導 9 セル空洞 4 台が組み込まれている。2014 年に行った低電力 RF 試験に続いて 2015 年 10 月 19 日から 12 月 9 日にわたって大電力での RF 試験を行い、各空洞の最大加速電界、放射線量を測定し、測定からの性能劣化の有無を確認した。



Figure 1: STF2 cryomodules.

### 2. 測定手順

Fig.1 は現在の STF2 クライオモジュールの様子を示しているが、大電力 RF 試験を行った当時には高周波システムがまだ整備されておらず、Fig.2 に示すように空洞一

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

台にのみ導波管をつなぎ地上の 800kW クライストロンからの RF パワーを空洞に供給して測定を行った。一つの空洞の測定が終わると次の空洞に導波管をつなぎかえて 1 台ずつ測定を行った。



Figure 2: Waveguide system for high power RF tests.

測定条件を Table 1 に、RF パワーの波形を Fig.3 に示す。P<sub>in</sub> は入射パワー、P<sub>t</sub> は透過パワー、P<sub>ref</sub> は反射パワーの波形である。P<sub>t</sub> の立ち上がりは 900 μ sec でフラットトップはショートパルス運転で 100 μ sec、フルパルス運転時には 800 μ sec とした。加速電界は、以下の式において測定された透過パワーから計算した。Z は空洞の形状から決まる定数で 30.8、Q<sub>t</sub> は低電力 RF 試験で測定した値を用いた[1]。

$$E_{acc} = Z \sqrt{P_t Q_t}$$

測定手順は以下の通りである。まず、チューナーを動かしてチューニングをとる。ショートパルスにおいて空洞

のエイジングを行う。パルス毎に  $Q_L$  を計算し、その値が正常時の 80%以下になった時、空洞がクエンチしたと判断し、 $Q_L$  インターロックが動作する。同じ加速電界で  $Q_L$  インターロックが 3 回動作したところを最大加速電界とした。フルパルスに切り替えて電界を上げていき同様に最大加速電界を決定する。フルパルスでの運転終了後、ローレンツ・デチューニングをピエゾチューナーにより補償し、さらに RF のフィードバック制御を行って 2 時間程度の長時間運転を行い加速電界の安定性を確認した。長時間運転時の加速電界は ILC スペックの 31.5MV/m を超えた空洞は 31.5MV/m で、超えなかった空洞は最大加速電界より少し低い電界で運転した。

Table 1: Operational Parameters

共振周波数	1.3 GHz
立ち上がり	900 $\mu$ sec
フラットトップ	100 $\mu$ sec, 800 $\mu$ sec
繰り返し	5 Hz
$Q_L$	$4.81 \sim 5.21 \times 10^6$
$Q_t$	$0.93 \sim 1.92 \times 10^{11}$

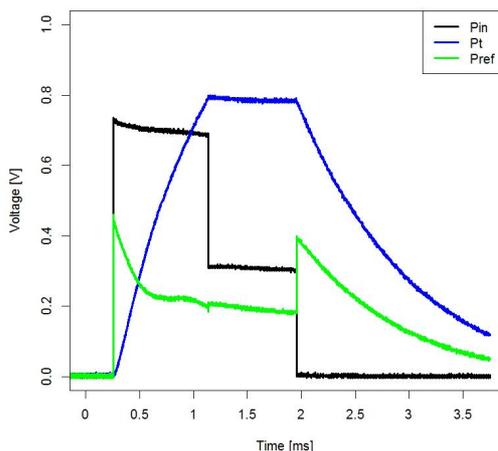


Figure 3: Waveform of RF signals during pulsed operation.

### 3. 測定結果

#### 3.1 最大加速電界

Fig.4 に 12 空洞の最大加速電界を示す。図中の文字はフルパルスにおける各空洞の性能を制限する要因を示している。Q はクエンチにより測定終了、A は放射線が多いため自主的に測定を終了、C は冷凍機負荷が大きいため終了したことを示している。基本的に、ショートパルスでのエイジングによって達成された最大加速電界にはフルパルスにおいても同じ加速電界まで到達した。#6 空洞と#8 空洞はフルパルスにおいてショートパルスと同じ最大加速電界に到達していないが、#6 空洞は空洞の発熱による冷凍機負荷が上昇したことが、#8 空洞は放射

線量が多かったため、フルパルスでは ILC スペックを超えたところで終了としたことによる。

12 空洞のうち 8 台の空洞において ILC スペックである 31.5MV/m を達成した。さらに、#1 から#4 空洞においては 35MV/m を超える結果が得られた。#1 と#4 空洞については放射線量により自主的に測定を終了したので、より高い最大加速電界が期待される。#5、6、7、9 空洞については ILC スペックに到達しなかった。#5、#7 空洞の性能を制限したものはフィールドエミッションで、#5 空洞においてはフィールドエミッションによる発熱が大きく冷凍機負荷の増大により終了した。#9 空洞は、たて測定の結果においても性能が低い空洞であったため、クライオモジュール試験においても同等の性能であった。

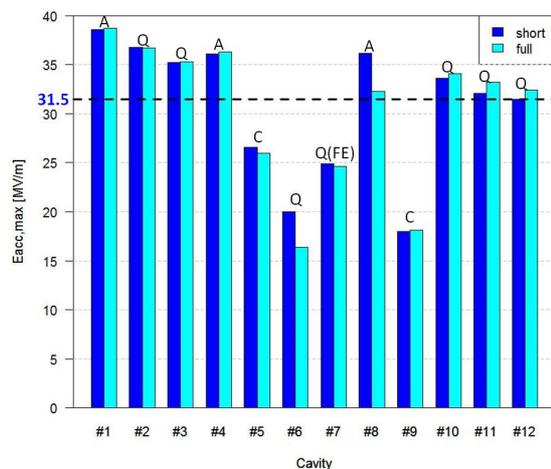


Figure 4: Achieved maximum accelerating gradient.

#### 3.2 放射線量

放射線量は ALOKA area monitor を使い、上流側のビームパイプに高感度、低感度 1 台ずつ、測定する空洞直下に高感度、低感度 1 台ずつ、下流側#9 空洞の近くに高感度 1 台、下流側ビームパイプに低感度 1 台を配置して測定された。Fig.5 は加速電界に対する放射線量(空洞直下)をプロットしたものである。1mSv/h を超えた空洞については低感度の値を用いている。

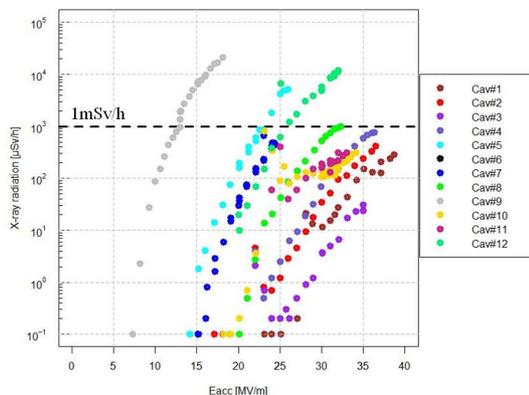


Figure 5: X-ray radiation vs.  $E_{acc}$ .

最大加速電界が高いものほど放射線量も少ない傾向にある。加速電界が低いものは放射線量が多く、フィールドエミッションによって性能が制限されたことが分かる。#6 空洞はショートパルスにおいて 17MV/m あたりから放射線が発生したが、フルパルスにおいては空洞の発熱が大きく放射線が発生する電界まであげることができなかったため、放射線がないという結果となっている。

放射線の発生する加速電界は 7.3MV/m から 24.0MV/m で平均 18.5MV/m であった。最大加速電界が高いものほど高い傾向にある。

## 4. たて測定との性能比較

### 4.1 最大加速電界の比較

Fig.6 は、たて測定とクライオモジュール試験での最大加速電界を比較したものである。また、Fig.7 は 4 空洞ごとの比較を示す。CM1a は#1 から#4 空洞、CM1b は#5 から#8 空洞、CM2a は#9 から#12 空洞を示している。クリーンルームの制約により 4 空洞ずつクリーンルームで連結作業を行い、その後 STF の地下トンネルに移動してから 8 連化作業を行ったため[2]、アセンブリ工程の影響を調べるために 4 空洞ごとの比較を行った。たて測定において、#1 から#8 空洞の最大加速電界は全て 35MV/m を超える結果であった。#1～#4 空洞はクライオモジュール試験においても全て 35MV/m を超え、最大加速電界の制限要因もたて測定と同じであり、たて測定の性能を維持することができた。しかし、#5～#7 空洞においては 30～53%の性能の低下がみられた。#5 と#7 空洞の性能の制限要因は、ひどいフィールドエミッションで、#5 空洞においては空洞の発熱により冷凍機負荷を増大させた。#6 空洞は放射線の発生はないが、空洞の発熱によりクエンチした。HOM の発熱も観測されており空洞性能の制限要因の一つと考えられる。CM2a の 4 空洞については、たて測定の最大加速電界をクライオモジュール試験でも達成し、制限要因も同じことからたて測定の性能を維持することができたと考えられる。#9 空洞は、たて測定時からひどいフィールドエミッションにより性能が制限されており、クライオモジュール試験においてもフィールドエミ

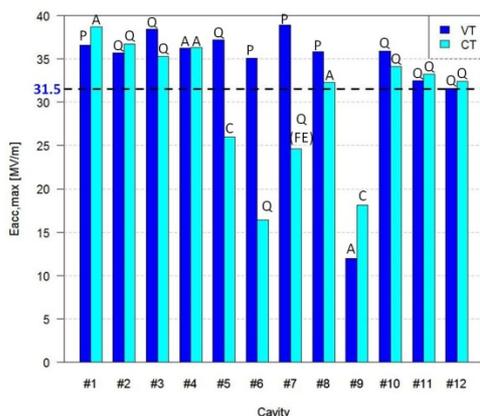


Figure 6: Comparison of achieved maximum accelerating gradient between vertical tests and cryomodule tests.

ッションによる発熱により冷凍機負荷で終了となったが、最大加速電界は 12MV/m から 18.1MV/m とパルス運転であることから上昇した。

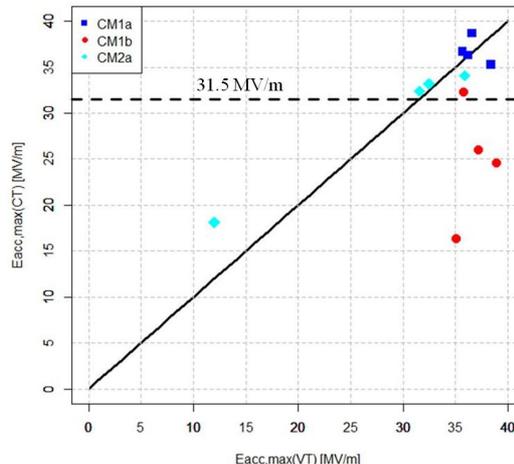


Figure 7: Comparison of achieved maximum accelerating gradient between vertical tests and cryomodule tests. The 12 cavities are classified by each assembly work in a clean room.

### 4.2 放射線量の比較

Fig.8 は、たて測定とクライオモジュール試験での最大加速電界における放射線量の比較を示し、Fig.9 は 4 空洞ごとの比較を示している。ただし、たて測定の結果は CW 運転で、空洞から 4mほど離れた場所で測定しているが、クライオモジュール試験での結果はデューティ約 1%のパルス運転で空洞直下において測定した結果である。また、クライオモジュール試験では#10～#12 空洞の測定場所はケーブルの長さの制限があり、#9 空洞の近くでの測定となっている。空洞#1 は、たて測定では放射線が発生しなかったが、クライオモジュール試験では 290  $\mu$ Sv/h 発生した。#4、5、11 空洞は、たて測定の

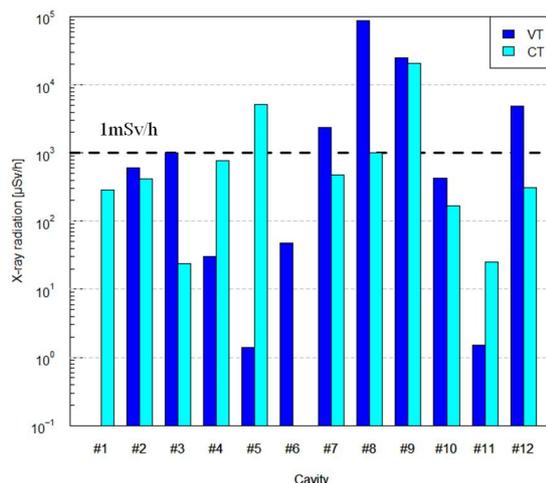


Figure 8: Comparison of the maximum x-ray radiation between vertical tests and cryomodule tests

時の放射線量と比較してクライオモジュール試験において増加した。#5 空洞においては 1mSv/h 超える放射線を発生しておりひどいフィールドエミッションを示している。その他の空洞は、たて測定の結果と同等及び減少する結果となった。

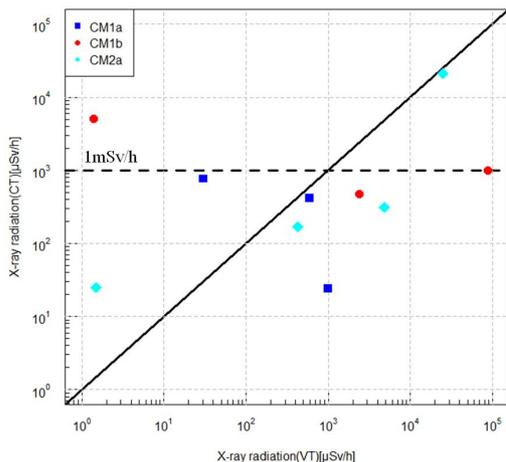


Figure 9: Comparison of the maximum x-ray radiation between vertical tests and cryomodule tests. The 12 cavities are classified by each assembly work in a clean room.

#### 4.3 放射線の発生が始まる加速電界の比較

Fig.9 は放射線が出始める加速電界のたて測定とクライオモジュール試験の比較で、Fig.10 は 4 空洞ごとの比較である。CM1 の#1 から#8 空洞は、たて測定の場合は 21.5MV/m から 36.6MV/m で放射線の発生が始まったが、クライオモジュール試験では 14MV/m から 23.1MV/m で放射線の発生が始まり、放射線の発生が始まる加速電界が低下する傾向がみられるが、CM2a の 4 空洞については、たて測定で 7MV/m から 24.3MV/m であったものが、クライオモジュール試験では 7.3MV/m から 24MV/m で同等な結果が得られた (Fig. 11)。

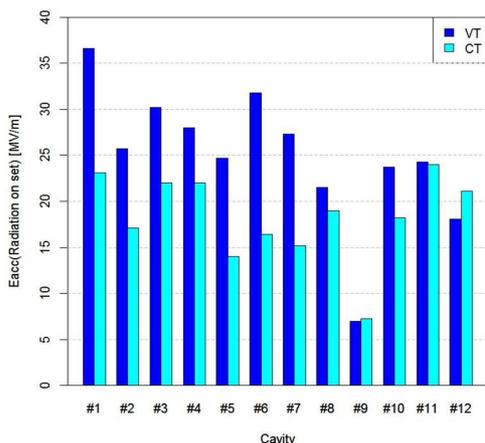


Figure 10: Comparison of the  $E_{acc}$  in x-ray radiation onset between vertical tests and cryomodule tests.

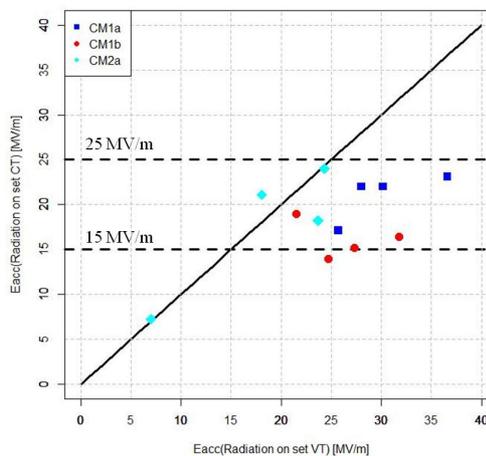


Figure 11: Comparison of the  $E_{acc}$  in x-ray radiation onset between vertical tests and cryomodule tests. The 12 cavities are classified by each assembly work in a clean room.

#### 4.4 性能劣化について

たて測定における空洞性能との比較から#5 から#7 空洞において最大加速電界の低下がみられた。4.1 に説明したように地下トンネルにおいて空洞の 8 連化を行った。クリーンブース内において 4 連化された空洞同士を Fig.12 のように中央の配管を取り付けて 8 連化したが、取り付け作業のやり直しを行った。取り付けの際、銀メッキしたボルトを用いるが、やり直し作業でそれを取り外す時にゴミが発生した。イオンガンを用いてそれを除去したが、クリーンブースのフィルター能力が足りずゴミを除去しきれなかった。そのゴミが配管内に混入し 8 連化された後のパージ作業の時に下流側の 3 台の空洞内に入ってしまったと考えられる。CM1 の#1 から#4 空洞と CM2a の 4 空洞に関しては性能の劣化は見られなかった為、クリーンルームでの連結作業については問題なかったと考えられる。簡易クリーンブースのクリーン度を改善しそれを維持しながら空洞連結作業を行うことが重要であり、今後の課題である。



Figure 12: String assembly of CM1 in STF tunnel.

## 5. まとめと今後の予定

12 台の 9 セル超伝導加速空洞の大電力 RF 試験を行った。12 台のうち 8 台の空洞において ILC スペックの 31.5MV/m を超える性能を達成し、さらに 4 台においては 35MV/m を超える性能を達成した。12 台のうち 3 台の空洞においては 30~53% の性能の劣化が見られた。この原因は 8 連化を行う際のゴミの混入であると考えられ、いかにクリーンな環境でモジュールを連結させるかが今後の課題である。今後は、9 月から冷却を開始し ILC スペックを超えた 8 台の空洞の  $Q_0$  値の測定、および 8 台同時運転を行う予定である。

### 参考文献

- [1] S. Imada *et al.*, 「STF2 クライオモジュールの低電力 RF 試験」, 第 12 回日本加速器学会, “Low power RF tests of STF2 cryomodules”, Proceedings of 12th PASJ (2015).
- [2] T. Okada *et al.*, 「STF2 CM1&CM2a クライオモジュール用 9 セル超伝導空洞の連結組立て」, 第 11 回日本加速器学会, “String Assembly of 9-Cell SC Cavities for STF2 CM1 and CM2a Cryomodules”, Proceedings of 11th PASJ (2014).