

STF-2 クライオモジュールの超伝導空洞の放射線量の変遷

CHANGE OF RADIATION LEVEL OF SUPERCONDUCTING CAVITIES IN STF-2 CRYOMODULES

菊池祐亮^{#, A)}, 今田信一^{A)}, 山本康史^{B)}, 加古永治^{B)}, 梅森健成^{B)}
Yusuke Kikuchi^{#, A)}, Shin-ichi Imada^{A)}, Yasuchika Yamamoto^{B)}, Eiji Kako^{B)}, Kensei Umemori^{B)}
^{A)} NAT Co., Ltd.

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

From February to April 2021, the STF-2 cryomodule was cooled down and the beam operation was carried out at the STF tunnel in KEK. Normally, all 14 superconducting cavities installed into the cryomodule are aged at each cooling test. The amount of radiation emitted from each cavity (the amount of field emission) is measured. Radiation dose is the best way to check the condition of superconducting cavities. In this report, we will report the changes in radiation dose measured in the cooling tests so far.

1. はじめに

KEK 内超伝導高周波試験施設 (STF) では、国際ニアコライダー (ILC) のための運転実証として、STF-2 クライオモジュール (Capture Cryomodule: CCM, Cryomodule1/2a: CM1/2a) の冷却試験およびビーム運転が行われてきた。最初のビーム運転 (コミッションング) は 2019 年 3 月に行われ、成功裏に終了した [1]。その後、2019~2020 年にかけて、CM2a 内の最も性能の低い Cavity#9 の入替作業を行った [2]。Cavity#9 には、高性能を目指した新しい表面処理 (N-infusion) を行った空洞が入れられている。

2021 年 4 月に STF-2 クライオモジュールに組み込まれているすべての超伝導空洞 (14 空洞) を初めて同時に運転した。2019 年の時は、導波管系が 8 空洞分しか用意されていなかった。

通常、冷却試験の度にクライオモジュールに組み込ま

れている空洞のエージングを行い、それぞれの空洞の放射線量 (field emission の量) を測定する。放射線量は、空洞の状況を確認するための最適な手段である。

ここでは、今回の試験結果と、これまでの試験との間で比較的特徴のあった空洞を選抜して、放射線量の変遷について述べる。

2. 測定条件・線量計設置位置

各空洞の放射線測定は、他の空洞からの放射線の影響を避けるために 1 台ずつ行っていく。以前までは高周波システムの構築が完了しておらず、各空洞に対し測定が終了するたびに導波管を次の空洞につなぎ直すという方法が取られていた [3]。今回の試験では、すべての空洞に対して導波管の接続が可能になったため [4]、測定対象の空洞以外はデチューンすることで RF パワーが入らないようにして測定を行った。

エージング中の測定条件を Table 1 に示す。

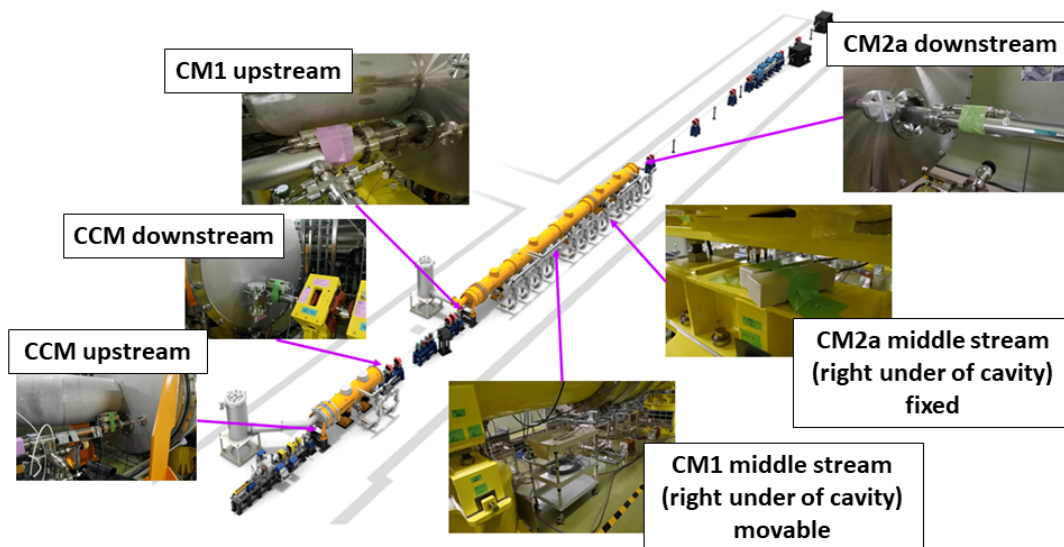


Figure 1: Radiation monitors at CCM / CM1/2a.

[#] nat-kiku@post.kek.jp

Table 1: Operational Parameters

Pulse width	1400 μ s (CCM) 1650 μ s (CM1/2a)
Frequency	1.3 GHz
Repetition rate	5 Hz

Figure 1 に線量計の設置位置を示す。線量計は、高感度と低感度の2種類あり、それぞれ1 mSv/hまでと100 mSv/hまで測定できる。CCMは上下流のビームパイプに高感度・低感度線量計を固定してある。CM1/2a は上下流のビームパイプの固定設置に加えて、空洞直下にも高感度・低感度線量計を置いた。下流のビームパイプには低感度のみ固定設置した。高感度線量計はCM2aの土台(Cavity#10の下付近)に固定設置して測定した。CM2a下流の高感度線量計と低感度線量計の設置場所が異なるのは、ケーブルの長さがそれぞれ20 mと40 mで異なっていることによる。

空洞1台の測定が終了するたびに、STF加速器RF運転モードを解除してトンネルにアクセスし、空洞直下の線量計を次の測定対象の空洞直下へ移動してから、再度トンネルを閉鎖する、という作業を繰り返した。

3. 測定結果

3.1 最大加速勾配

Table 2, 3と、Fig. 2に各空洞の最大加速勾配をまとめる。ILCスペックはFig. 2の赤線範囲内で示している31.5 MV/m \pm 20 % (25.2~37.8 MV/m)で、今回の試験ではCavity#6, #7がスペックを下回る結果であった。

Table 2: Maximum Eacc of CCM

空洞名	最大加速勾配	制限理由
CAV#1	28.1 MV/m	Quench
CAV#2	30.2 MV/m	Quench

Table 3: Maximum Eacc of CM1/2a

空洞名	最大加速勾配	制限理由
CAV#1	33.9 MV/m	Quench
CAV#2	34.0 MV/m	Quench
CAV#3	34.4 MV/m	Quench
CAV#4	29.0 MV/m	Quench
CAV#5	37.6 MV/m	Power limit
CAV#6	13.0 MV/m	Over heat load
CAV#7	21.9 MV/m	Quench
CAV#8	37.0 MV/m	Quench
CAV#9	36.1 MV/m	Quench
CAV#10	32.9 MV/m	Quench
CAV#11	31.3 MV/m	Quench
CAV#12	29.6 MV/m	Quench

※CAVはCavityのこと。

Cavity#6は大きな熱負荷が生じ、液体ヘリウム循環に影響を及ぼした(over heat load)ため、ヘリウム供給の制御が可能な最大値まで測定した。Cavity#6はこれまでの試験でも異常な熱負荷を生じており、放射線の測定やク

エンチまで至っていない。

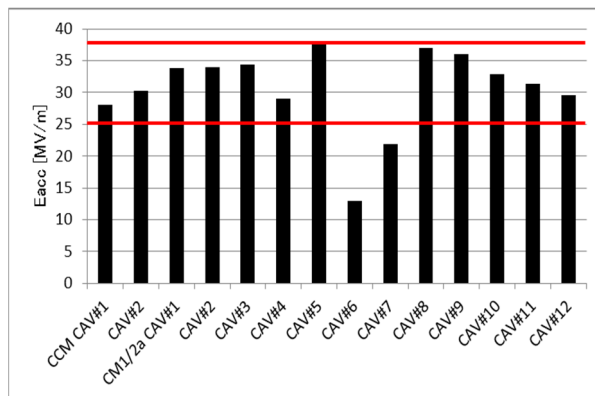


Figure 2: Maximum Eacc of each cavity.

3.2 Cavity#1, Cavity#2 (CM1)

Figure 3, 4でCM1上流に収録されたCavity#1, Cavity#2の結果を示す。

これまで(2015, 2016, 2019, 2021年)の測定結果を比較すると、2019年までの放射線量と2021年の放射線量とでは明らかな差が認められる。この間、CM1の8空洞は真空状態で保持されていたにもかかわらず、放射線量が増加したことで、原因が判然としない。CM1内に収録されている空洞への物理的な影響としては、地震による振動の影響くらいしか挙げられない。次回以降の運転でも要注意である。

また、今回のビーム運転前後でも多少の増加がみられた。のちにCCMの空洞についても述べるが、ビームライン上流側の空洞で線量増加の傾向があり、なんらかの影響を受けているものと思われる。

3.3 Cavity#5 (CM1)

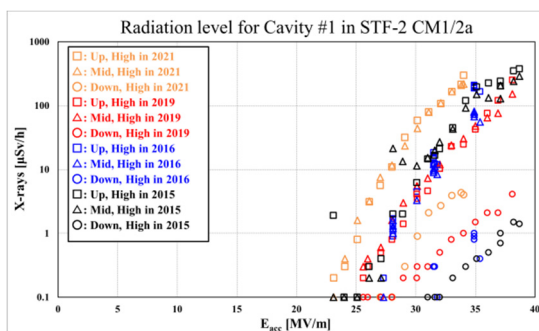
Cavity#5は2015年に行ったクライオモジュールでの性能試験にて、縦測定からの性能劣化が著しく、その後、長く運転から外されていた空洞である(導波管系は8空洞分しか供給されなかったため)。今回、再びRFパワーを投入し、放射線測定を行った。Cavity#5の結果をFig. 5に示す。グラフからわかるように、どの方向でも明らかに放射線量は減少している。Figure 5(a)は高感度のみであるが、低感度でも減少が確認できた。この空洞は、数回の冷却試験を経て、放射線量が減少し、かつフィールドも縦測定のレベルにまで回復したという稀なケースである。

また、今回のビーム運転前後においても線量は減少傾向にあり、今後の運転でも性能回復が期待される。Cavity#5の性能について、Table 4にまとめる。性能が回復したことは、STF史上初の結果である。

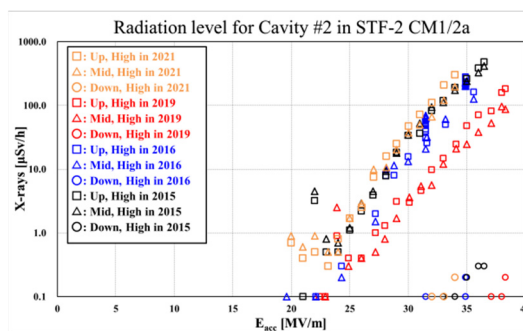
Table 4: Changes in the Performance of Cavity#5

Last V.T.	37.2 MV/m
2 nd test in 2015	>26.0 MV/m (admin. stop)
6 th test in 2021	37.6 MV/m

※1st testは低電力試験だった。(2014年)

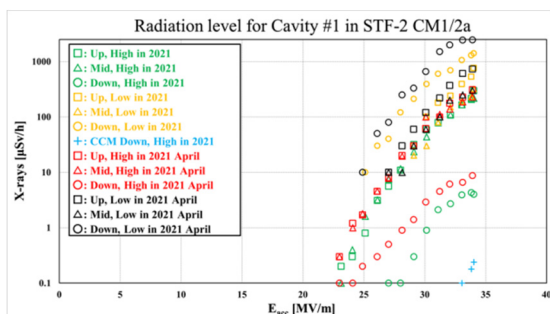


(a) Cavity#1

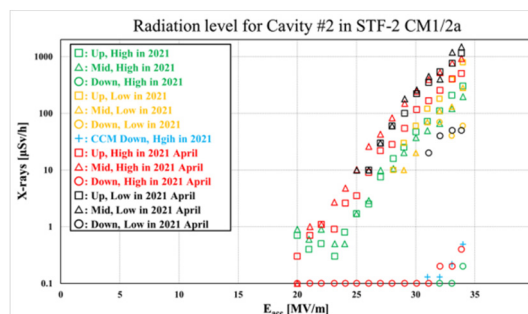


(b) Cavity#2

Figure 3: Comparison of Cavity#1, #2 in CM1 with past measurements (High-sensitivity).

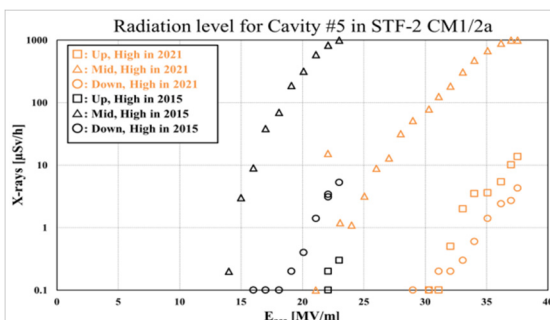


(a) Cavity#1

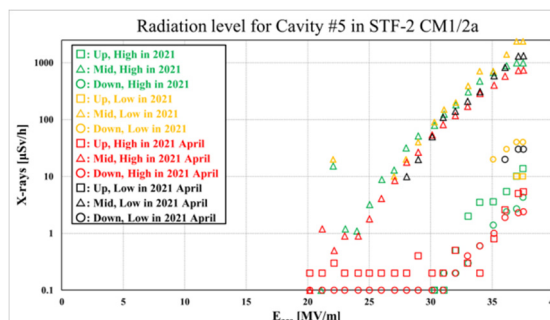


(b) Cavity#2

Figure 4: Comparison of radiation dose before and after beam operation of Cavity#1, #2 in CM1.



(a) Comparison with past measurements (High-sensitivity)



(b) Comparison of radiation dose before and after beam operation

Figure 5: Radiation dose of Cavity#5.

3.4 Cavity#9 (CM2a)

冒頭に述べたように、2020年にクライオモジュールに導入した空洞で、N-infusion処理が施されている。今回が初めての高電力高周波試験となった。

Figure 6はCavity#9のビーム運転前後の測定結果である。高感度・低感度ともプロットしてある。凡例末尾に”April”と付してあるのがビーム運転後である。

特に明らかに見受けられる結果としては、上流(□マーク)での放射線量が激減し、CCM下流側での放射線も消えたことである。その他の測定位置でも多少減っているように見えるため、今後の運転でもプロセスされるか注目したい。また、最大加速勾配については、クライオモジュール

導入前最後の縦測定では34.2 MV/mだったが、今回の試験では36.1 MV/mとなり、若干性能が上がった。この理由としては、縦測定での性能を制限していたものがfield emissionであったためと考えられる。Field emissionの影響を強く受けている空洞がクライオモジュール試験でRF dutyが下がることで(ILCは1%以下である)、クエンチフィールドが逆に上がる、という例はSTFで過去にも何度か観察されている。

3.5 Cavity#10 (CM2a)

Figure 7にCavity#10の結果を示す。これまでの測定と比較すると、線量が増加していることがわかる。2019年当時のことを考えると、それ以前の測定時よりも線量は減

少していたが、2021年に再び線量が増加している。2020年に行った空洞入れ替えの際に、ダストが混入するなどして、field emissionが悪化したものと考えられる。また、今回のビーム運転前後でも若干の線量増加がみられる。次回以降で、プロセスされるか要観察である。

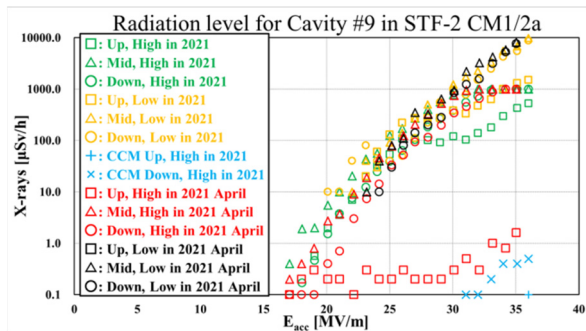
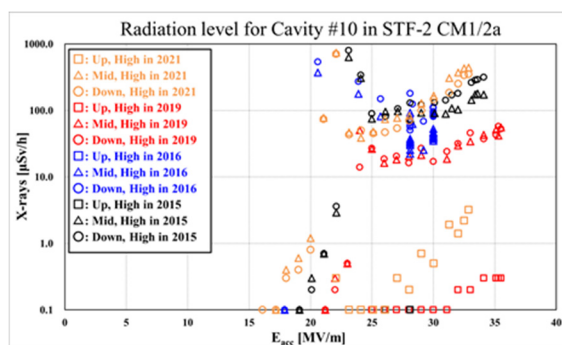
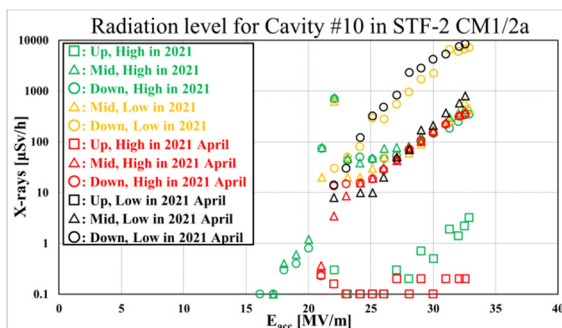


Figure 6: Comparison of radiation dose before and after beam operation of Cavity#9.



(a) Comparison with past measurements (High-sensitivity)



(b) Comparison of radiation dose before and after beam operation

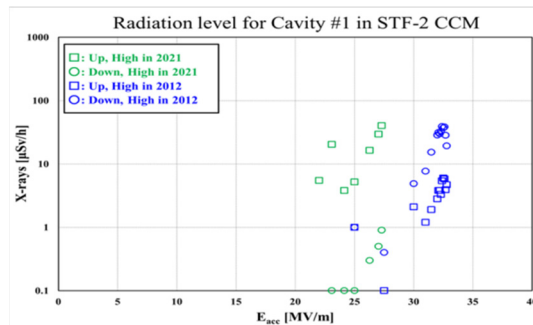
Figure 7: Radiation dose of Cavity#10.

3.6 CCM 空洞

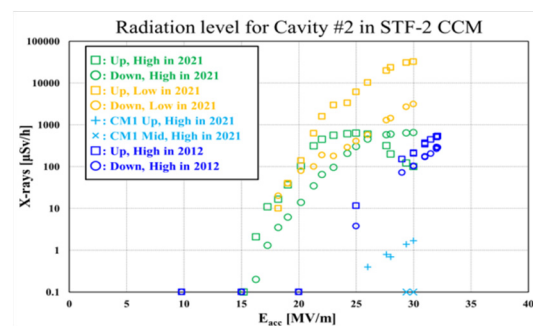
CCM 空洞は内蔵している2台ともに線量が増加した。Figure 8, 9 に結果を示す。これまで、線量計が不足しており、CCMの最後の線量測定は2012年(Quantum Beam)であった。CCMには上下流のビームパイプへの固定設置の線量計のみなので、モニターしているポイントは2カ所になっている。(CM1/2aでの空洞直下(Mid)

に相当するポイントはCCMでは設置していない。)

2012年の測定から線量が増加したが、今回のビーム運転前後では、ほぼ変化がなかったようにみえる。この線量変化の傾向は、前述のCM1/2a上流のCavity#1, #2の結果と近いものがある。

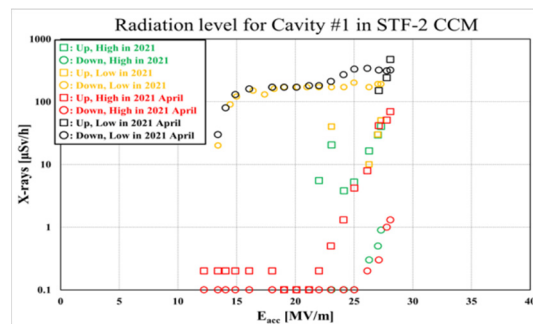


(a) Cavity#1 in CCM

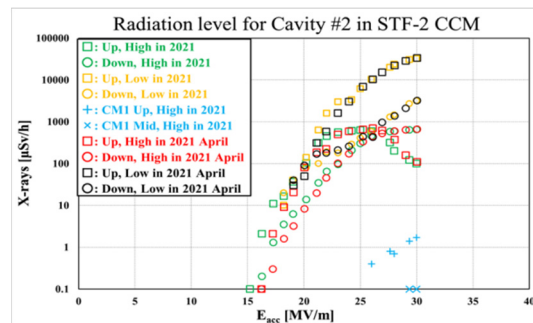


(b) Cavity#2 in CCM

Figure 8: Comparison of Cavity#1, #2 in CCM with past measurements (High-sensitivity).



(a) Cavity#1 in CCM



(b) Cavity#2 in CCM

Figure 9: Comparison of radiation dose before and after beam operation of Cavity#1, #2 in CCM.

4. まとめと考察

2021年4月に実施された STF-2 加速器運転では、内蔵されている全14空洞を初めて同時運転した。この報告では、結果において比較的特徴のあった空洞を選抜した。

CCM の2空洞と CM1/2a 上流の2空洞では、同様な傾向を持つ放射線量増加の結果だった。クライオモジュールの上流側の空洞でこのような結果となった理由として考えられるのは、

- 電子銃の放電によるアウトガスやダストがビームパイプを通じて空洞に影響を及ぼしている
- という可能性で、また、全空洞に当てはまる要因として挙げられるのは、
- ゲートバルブの開閉操作で発生するアウトガスやダストによる影響
 - 地震などによる物理的な振動による影響
 - サーマルサイクルによるガスの移動の影響
- などである。今後の運転でも放射線の推移を注意して見守る必要がある。

Cavity#5 については STF 史上初の性能回復の結果だった。今後も性能回復が進むのかが期待される。

Cavity#9 は昨年入れ替えた空洞で、今回の運転前後では線量の減少や、ILC スペックを超えるという結果だった。入れ替えにおける作業では CM2a の空洞を一度大気解放していたが、空洞性能の著しい悪化はなく、一連の作業は成功したものとと言える。

参考文献

- [1] Y. Yamamoto *et al.*, “ILC に向けた STF-2 加速器のビームコミッショニング”, Proc. of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan, FROH05.
- [2] Y. Yamamoto *et al.*, “STF-2 加速器のクライオモジュールにおける空洞入替作業”, in Proc. of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, Sep. 2020, FRPP31.
- [3] S. Imada *et al.*, “STF2 クライオモジュールの大電力 RF 試験”, in Proc. of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 8-10, 2016, Chiba, Japan, TUP019.
- [4] N. Numata *et al.*, “STF2 加速器の電力分配系の性能評価”, in Proc. of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, Aug. 2021, THP045.