

cERL 入射器クライオモジュールにおける空洞性能の回復

RECOVERY OF CAVITY PERFORMANCE IN CERL INJECTOR CRYOMODULE

山田浩気^{#,A)}, 浅野峰行^{A)}, 今田信一^{A)}, 柳町太亮^{A)}, 岡田昭和^{B)}, 許斐太郎^{C)}, 加古永治^{C)}
Hiroki Yamada^{#,A)}, Mineyuki asano^{A)}, Shin-ichi Imada^{A)}, Taisuke Yanagimachi^{A)}, Terukazu Okada^{B)},
Taro Konomi^{C)}, and Eiji Kako^{C)}
^{A)} Nippon Advanced Technology,
^{B)} K-vac,
^{C)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

An injector cryomodule for compact energy recovery linac (cERL) at KEK contains three 2-cell superconducting cavities. The cavity performance severely degraded due to field emission during long term beam operation. High power RF pulsed conditioning was carried out in order to recover the cavity performance. The status of the performance recovery in three cavities is described in this paper.

1. はじめに

KEK のコンパクトエネルギー回収型リナック (cERL) において、cERL の入射部では、10 mA のビームを 500 keV から 5 MeV まで加速することを目標としている [1,2,3]。入射器クライオモジュールに収納されている 3 台の 2-cell 超伝導空洞では、長期ビーム運転中に発生したフィールドエミッションに起因する X 線の急激な増加による空洞性能の劣化現象が起こった [4]。その性能劣化の解決方法として大電力 RF パルスエージングを行った結果、空洞性能が回復したので、報告する。

2. 入射器クライオモジュール

入射器クライオモジュールの模式図を Figure 1 に、ビームラインに設置された実機の写真を Figure 2 に示す。入射器クライオモジュールは、3 台の 2-cell 超伝導加速空洞から構成される。それぞれの空洞には、一本あたりの入射パワーを減らすため、また、ビームがキックされるのを防ぐために、上下に 2 つのインプットカップラーが取り付けられており、またその内導体には発熱対策として水冷チャンネルが取り付けられている [5]。さらに、ビームの通過によって誘起される有害な高調波を取り出すために 5 台の HOM カップラーが各 2-cell 空洞に取り付けられている [6]。空洞の周波数を調整するチューナーには、ピエゾ素子が取り付けられたスライドジャックチューナーシステムを採用している [7]。外部からの磁場の影響を防ぐために磁気シールドを空洞に被せ、液化ヘリウムで空洞を冷却するための配管やヘリウムジャケットで囲まれている。外部から熱が入らないように 5 K パネル、80 K パネル、それらを真空層で覆う構造になっている。入射高周波電力は 25 kW と 300 kW の 2 台のクライストロンから CW で供給されるため、インプットカップラーや HOM カップラーには高周波損失による発熱がある。ERL での CW の 100 mA 電子ビームの 10 MeV 加速運転で予想されるダイナミックロスはいんぷットカップラーで 4 W at 2 K, 16 W at 4.5 K、HOM カップラーで 7 W at 2 K, 4 W at

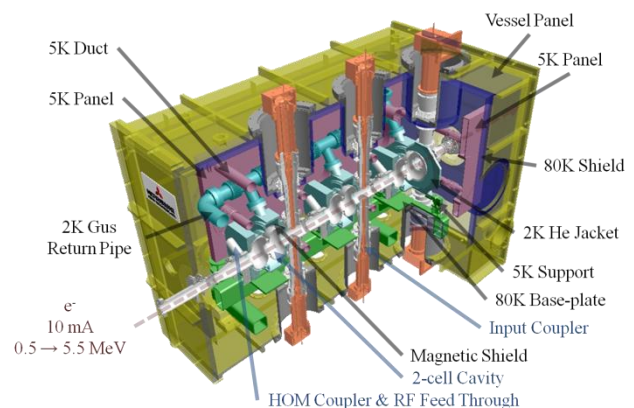


Figure 1: cERL injector cryomodule.



Figure 2: Injector cryomodule installed in the beam line.

4.5 K であるため [8]、十分な冷却が必要となる。

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

3. 入射器空洞の劣化現象

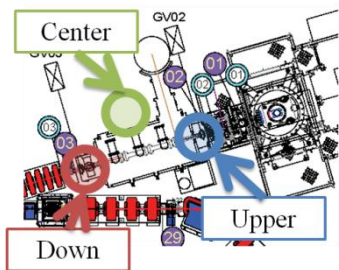


Figure 3: Location of X-ray sensors around cryomodule.

入射器空洞を上部から見た図を Figure 3 に示し、X線のセンサーの取り付け位置を示す。入射器空洞の上流部であるビームラインの直下(Upper)、反対側の下流部のビームラインの直下(Down)、周回部の反対側の側面部(Center)に、計 3 台の日立アロカメディカル(株)のポータブルエリアモニター(MAR-762)のセンサーを設置した。入射器空洞の性能を回復させる目的は、大幅に増えてしまった X 線と、その結果により増えてしまった熱負荷を減らすことである。Table 1 に前回のビーム運転終了間際の 3 台の空洞のそれぞれ個別 CW 7 MV/m 運転と、3 台同時 CW 7 MV/m 運転の加速電界、X 線、ヘリウム流量の状態を示す。7 MV/m というのは通常運転時に、必要な加速電界である。最初に 3 台同時 CW 運転時のヘリウム流量では 80 m³/h になっている、これは冷凍機の性能の限界寸前であり、通常運転では入射器空洞の他に主空洞も運転し、主空洞も同じヘリウム回収ラインを使っている為、入射器単独運転で 80 m³/h となると、通常運転が不可能になる。次に Upper X 線を見ると、それぞれの空洞の個別 CW 運転時には数 mSv/h 程度が観測されるだけだが、3 台同時 CW 運転時には数十 mSv/h まで上がり、Down の X 線は変わらないままである。これは下流側から出た電子が空洞が作る電界によって加速されたことを意味する。この加速された電子が、上流部にある電子銃のカソードに衝突する可能性が大きくなる。これら 2 つの理由から通常運転が不可能と判断し、主空洞やその他の空洞で性能回復の実績があるパルスエージングを行うことにした。

Table 1: X-ray Radiation Level at 7 MV/m in CW Operation before Pulsed RF Conditioning

	Eacc [MV/m]	Upper [mSv/h]	Center [mSv/h]	Down [mSv/h]	He flow [m ³ /h]
CAV#1	7.05	1.55	0.24	0.02	42.7
CAV#2	7.04	7.28	1.97	2.08	61.2
CAV#3	7.00	2.81	4.50	51.32	70.0
CAV#1,2,3 AVE.	7.00	32.27	5.45	51.75	80.0

4. パルスエージング

4.1 方法

Figure 4 に今回行ったパルスエージングの手段とパルス波の状態を示す。最初に 2 週間かけて空洞全体を室温から 2 K に冷却し、エージング前の状態を知るため、3 つの空洞のそれぞれ個別 CW 運転と、3 体同時 CW 運転を行った。その後個別にパルスエージングを行い、

エージング後すぐに CW 運転でエージングの効果を検証し、最後に 3 体同時 CW 運転を行い通常運転が可能かどうかを判断した。

2K cooling				
Each cavity CW operation			Pulse wide	Frequency
3 cavities CW operation				Dirty
CAV#1	CAV#1 pulse aging	1 msec	5 Hz	0.5 %
	CW operation	10 msec	5 Hz	5 %
CAV#2	CAV#2 pulse aging	500 μsec	5 Hz	0.25 %
	CW operation	5 msec	5 Hz	2.5 %
CAV#3	CAV#3 pulse aging	500 μsec	5 Hz	0.25 %
	CW operation	5 msec	5 Hz	2.5 %
3 cavities CW operation				

Figure 4: Procedures of pulsed RF conditioning.

4.2 結果

注意として、Figure 5,7,9,11 には不自然な横一直線があるが、これはシステムの都合上インターロック等でパワーがオフになった場合、その値のままデータロガーに記録され続けるものなので、実際はパワーオフの状態である。

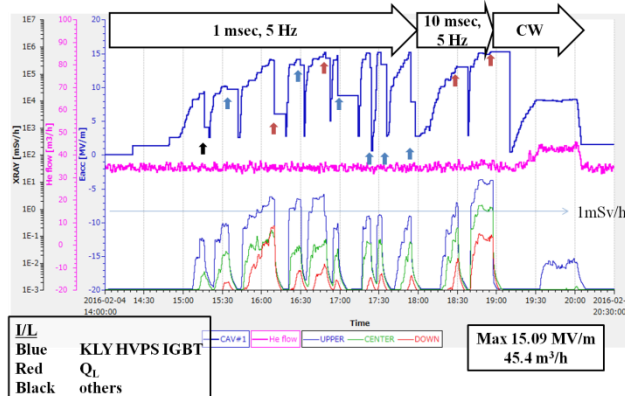


Figure 5: Pulsed RF conditioning results of Eacc, He flow rate and X-ray radiation level in No.1 cavity.

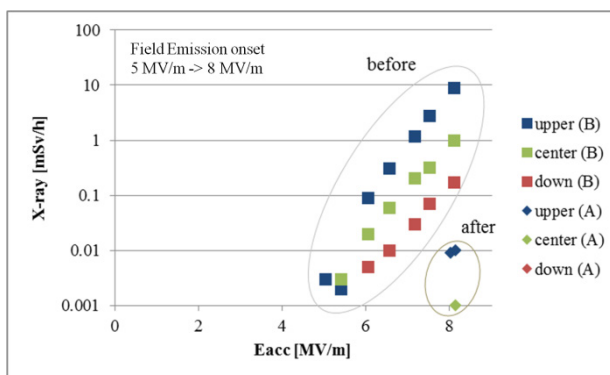


Figure 6: Comparison of X-ray radiation level before and after pulsed RF conditioning in No.1 Cavity.

Figure 5 に CAV#1 のパルスエージング中の加速電

界、ヘリウム流量、X線のトレンドグラフを示す。1 msec, 5 Hzと 10 msec, 5 Hz のパルス波で行った。この空洞では、1 msec, 5 Hz のエージング中に、図中の赤矢印はクエンチ発生時の Q_L のインターロック後に X 線が下がっているのが分かる。このパルスエージング中の最大加速電界は 15.1 MV/m となり、CW 運転でのヘリウム流量は 8 MV/m で 45.4 m³/h となった。エージング前後での CAV#1 の加速電界対 X 線でのグラフを Figure 6 に示す。X 線の onset がエージングにより 5 MV/m から 8 MV/m に回復でき、通常運転の 7 MV/m では X 線は検出されていない。X 線の量も UPPER で 10 mSv/h 近くあったものが、0.01 mSv/h まで減り、DOWN に関しては検出感度以下となった。

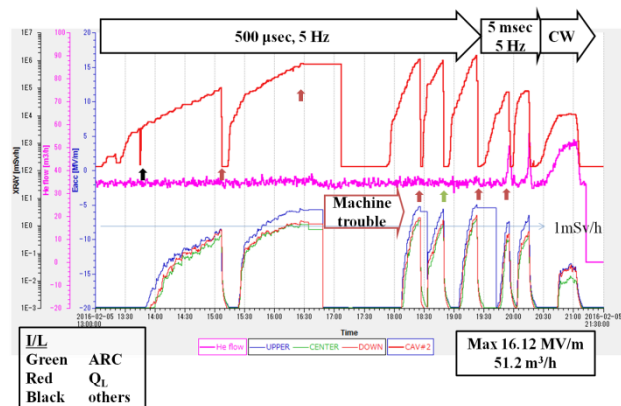


Figure 7: Pulsed RF conditioning results of Eacc, He flow rate and X-ray radiation level in No.2 cavity.

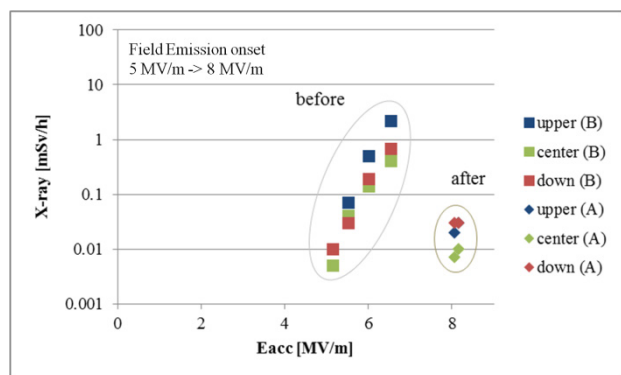


Figure 8: Comparison of X-ray radiation level before and after pulsed RF conditioning in No.2 Cavity.

CAV#2 のパルスエージング中の加速電界、X 線、ヘリウム流量のトレンドグラフを Figure 7 に示す。500 μ sec, 5 Hz と 5 msec, 5 Hz のパルス波で行った。途中クライストロンのトラブルにより 2 時間ほど運転できない状態が続いたが、完了することができた。この空洞もクエンチ発生時の Q_L のインターロック後に、加速電界がインターロック前より上がっていることが分かる。このパルスエージング中の最大加速電界は 16.1MV/m となり、CW 運転でのヘリウム流量は 8MV/m で 51.2 m³/h となった。CAV#2 の加速電界対 X 線でエージング前後のグラフを

Figure 8 に示す。X 線の onset がエージングにより 5 MV/m から 8 MV/m に回復でき、通常運転の 7 MV/m では X 線は検出されていない。X 線の量も UPPER で 10 mSv/h を超えていたが、2桁下がった。

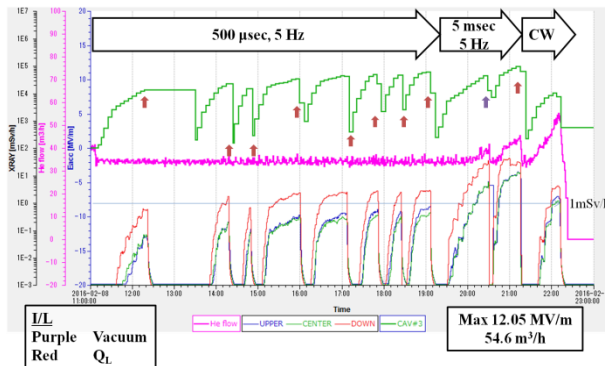


Figure 9: Pulsed RF conditioning results of Eacc, He flow rate and X-ray radiation level in No.3 cavity.

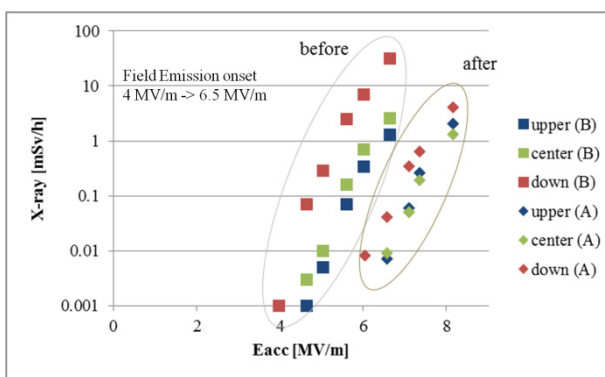


Figure 10: Comparison of X-ray radiation level before and after pulsed RF conditioning in No.3 Cavity.

CAV#3 のパルスエージング中の加速電界、X 線、ヘリウム流量のトレンドグラフを Figure 9 に示す。500 μ sec, 5 Hz と 5 msec, 5 Hz のパルス波で行った。この空洞もクエンチ発生時の Q_L のインターロック後に、加速電界がインターロック前より上がっていることが分かる。500 μ sec, 5 Hz のパルスエージングに時間がかかった為、後の 5 msec, 5Hz や、CW 運転の為に途中で切り上げる結果となった。そのため、このパルスエージング中の最大加速電界は 12.1MV/m となり、CW 運転でのヘリウム流量は 8MV/m で 54.6 m³/h となった。CAV#3 の加速電界対 X 線でエージング前後のグラフを Figure 10 に示す。X 線の onset がエージングにより 4 MV/m から 6.5 MV/m に回復できた。パルスエージングを途中で切り上げることがなければ、もっと回復できた可能性が高い。

パルスエージング前後の 3 台同時 CW 運転時の加速電界、X 線、ヘリウム流量を Figure 11 に示す。パルスエージング前は、通常運転である 7 MV/m に到達する前に、ヘリウム流量が冷凍機の限界値の 80 m³/h を超えてしまっていたが、パルスエージング後では通常運転より高い 8 MV/m での入射器単独運転が可能となった。その後加速電界を 7 MV/m まで引き下げ、安定運転がで

きることを確認した。パルスエージング前後の 3 体同時 CW 運転時の加速電圧対 X 線のグラフを Figure 12 に示す。X 線の onset が 3 MV から 4 MV まで回復した。課題となっていた UPPER の X 線が 1 mSv/h を下回ったものの、CAV#3 のパルスエージング不足ということもあり、今後のパルスエージングによる更なる X 線減少に期待したい。

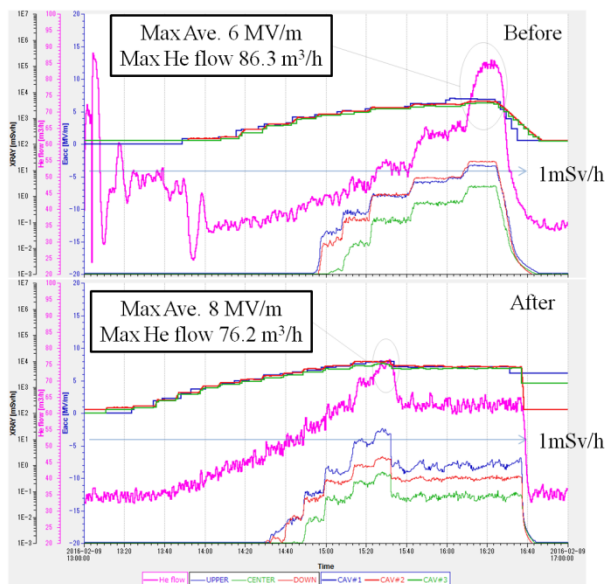


Figure 11: Trend of Eacc, He flow rates and X-ray level in CW operation before and after pulsed RF conditioning.

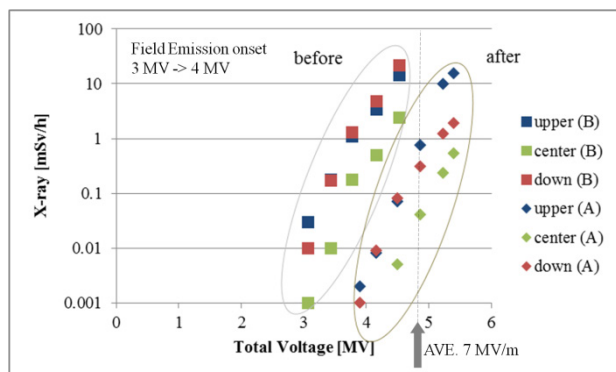


Figure 12: Total accelerating voltage of three cavities vs. X-ray before and after pulsed RF conditioning.

パルスエージング前後の 3 体同時 CW 運転時の加速電圧対ヘリウム流量を Figure 13 に示す。エージング前は通常運転の平均 7 MV/m を超えられず、冷凍機の限界値 80 m³/h も超えてしまう状態だったが、エージング後ではその両方をクリアしていることが分かる。

最後に Table 1 の比較としてパルスエージング後の結果を Table 2 に示す。

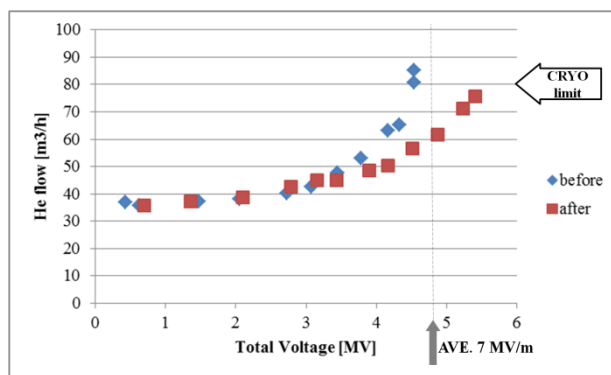


Figure 13: Total accelerating voltage of three cavities vs. He flow rate before and after pulsed RF conditioning.

Table 2: Results at 7 MV/m in CW Operation after Pulsed RF Conditioning

	Eacc [MV/m]	Upper [mSv/h]	Center [mSv/h]	Down [mSv/h]	He flow [m ³ /h]
CAV#1	7.01	0.0	0.0	0.0	45.4
CAV#2	7.01	0.0	0.0	0.0	51.2
CAV#3	7.11	0.06	0.05	0.34	54.6
CAV#1,2,3	AVE. 7.00	0.74	0.04	0.31	61.6

5. ビーム運転による劣化現象

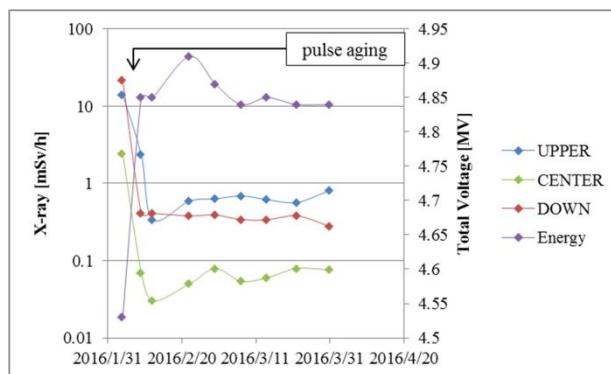


Figure 14: Changes of X-ray at 7 MV/m while beam operation.

今回論点となっている X 線の増加と熱負荷増加によるヘリウム流量の増加がビーム運転中にどれだけ増えるかを確かめるため、一週間ごとに 3 体同時 CW 運転時に平均 7 MV/m で記録したものを Figure 14, 15 に示す。Figure 14 には X 線を示したもののだが、はっきりした増加は見えない結果である。Figure 15 のヘリウム流量では、ある一点を除き徐々に増加している傾向が分かる。

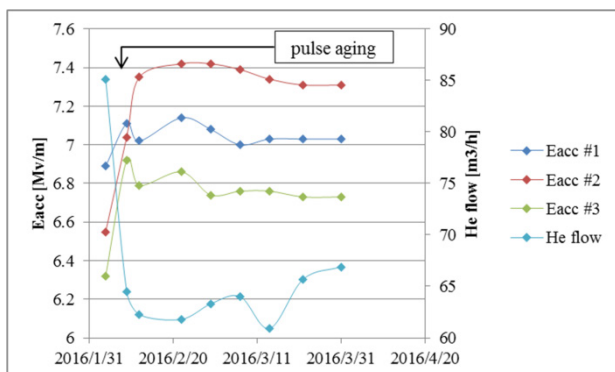


Figure 15: Changes of He flow at AVE. 7 MV/m while beam operation.

5. まとめ

cERL の入射器空洞で、性能回復のためのパルスエージングを行った結果、X線と熱負荷を改善することができ、通常運転が不可能だった状態を運転可能にまで、回復できることがわかった。今後、ビーム運転前は必ずパルスエージングを行った方が良いと思われる。

参考文献

- [1] K. Watanabe *et al.*, Proc. SRF'2009 (2009) 359.
- [2] S. Noguchi *et al.*, Proc. IPAC'10 (2010) 2944.
- [3] K. Watanabe *et al.*, Proc. LINAC'10 (2010) 401.
- [4] H. Yamada *et al.*, Proc. PASJ'2015 (2015) WEP051.
- [5] E. Kako *et al.*, Proc. SRF'2009 (2009) 485.
- [6] K. Watanabe *et al.*, Proc. SRF'2007 (2007) 530.
- [7] S. Noguchi, Proc. SRF'07 (2007) WE303.
- [8] Energy Recovery Linac Conceptual Design Report (2012).