

cERL クライオモジュールの大電力 RF パルスコンディショニング

HIGH POWER RF PULSED CONDITIONING IN CERL INJECTOR CRYOMODULE

今田信一^{#,A)}, 浅野峰行^{A)}, 柳町太亮^{A)}, 山田浩気^{A)}
許斐太郎^{C)}, 加古永治^{C)}

Shin-ichi Imada^{#,A)}, Mineyuki Asano^{A)}, Taisuke Yanagimachi^{A)}, Hiroki Yamada^{A)},
Taro Konomi^{B)} and Eiji Kako^{B)}

^{A)} Nippon Advanced Technology,

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

Abstract

An injector cryomodule for compact energy recovery linac (cERL) at KEK contains three 2-cell superconducting cavities. Although the cavity performance severely degraded due to field emission during the warm-up period when operation was stopped, the cavity performance was successfully recovered by high power RF pulsed conditioning. In this paper, the result of high power RF pulsed conditioning is reported.

1. はじめに

KEK のコンパクトエネルギー回収型ライナック(cERL)では、入射部において、10 mA のビームを 500 keV から 5 MeV に加速することを目標としている[1-3]。2016 年 3 月の運転終了から 2017 年 3 月の運転開始までの 1 年の運転休止期間においてフィールドエミッションに起因する X 線の増加による空洞性能の劣化現象が起こった。その性能劣化の解決方法として前回[4]も効果のあった大電力 RF パルスコンディショニングを実施した結果、空洞性能を回復させることができたので、その結果について報告する。

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 Fig. 1 に示す。入射器クライオモジュールには 3 台の 2 セル超伝導空洞が入っており、それぞれの空洞には上下に 2 台のインプットカップラーが、また、ビームによって誘起される有害な高調波を取り出すためにそれぞれの空洞に 5 台の HOM カップラーが取り付けられている。空洞の詳細については[5,6,7,8]を参照願いたい。

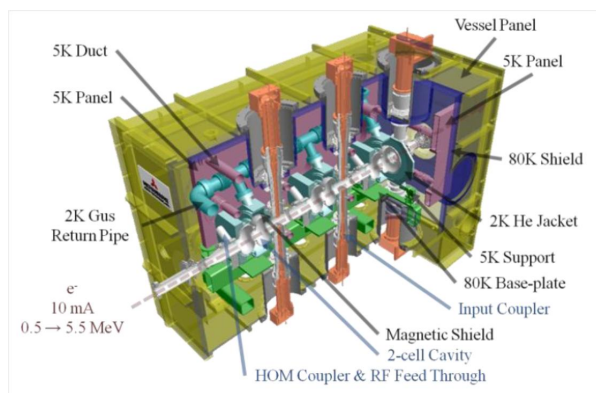


Figure 1: cERL injector cryomodule.

また、フィールドエミッションによる空洞からの X 線のモニターの為、入射器空洞の上流部のビームラインの直下(Upper)、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)の 3 か所に日立アロカメディカル(株)製のポータブルエリアモニタ(MAR-762)が設置されている。

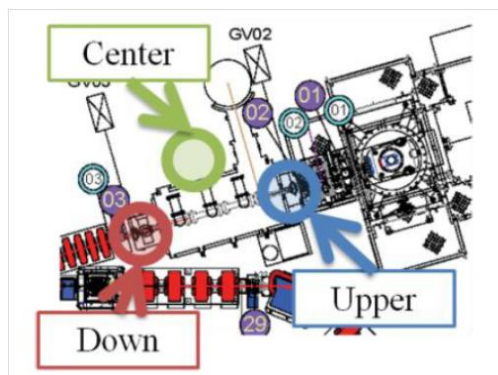


Figure 2: Location of X-ray sensors around cryomodule.

3. 入射器超伝導空洞の X 線の履歴

Figure 3 に加速電圧約 5 MV での 3 台同時運転時の X 線量の 5 年間の履歴を示す。青の矢印の区間は冷却期間を、オレンジの矢印の区間は運転停止期間を示している。ビーム運転前の入射器エージング時と運転終了近くのデータを示している。ビーム運転が開始された 2013 年から 1 mSv/h 程度の X 線量であったものが、2015 年の運転中に最大 50 mSv/h まで増加していることがわかる。この時は 5 MV での運転は X 線による発熱による冷凍機負荷の増大により 5 MV での運転ができなくなってしまった。また、下流で発生した電界放出電子が上流側に加速され電子銃のカソードに衝突する可能性が大きくなり通常運転ができなくなった。しかしながら、大電力 RF パルスコンディショニングを行うことで、X 線量は元の 1 mSv/h 程度まで減少させることができた[4]。ま

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

た、パルスコンディショニング後の運転期間中には性能の劣化は見られなかった。ところが、2016年3月から2017年3月までの1年間の運転停止後、ビーム運転前の空洞のエイジング時の測定において上流側で X 線量が 1 mSv/h から 60 mSv/h にまで悪化してしまった。運転停止期間中は入射器モジュールの上流、下流のゲートバルブを閉じて、真空状態のまま保っていたが空洞の性能が悪化してしまった。Figure 4 には各空洞の加速電界が 7 MV/m の時の X 線量の変化を示している。入射器モジュールの上流側から Cav#1、Cav#2、Cav#3 と呼んでいる。Cav#3 の X 線量が一番多く、Cav#2、Cav#1 の順に X 線量は少なくなっている。2015 年の空洞性能の劣化時には 3 台同時に劣化が見られたが、Cav#3 が一番劣化していることがわかる。停止期間後の測定においても性能の劣化したままであった。今回の劣化も 3 台同時に発生しており Cav#3 の X 線量が多い結果となっている。空洞性能の劣化の原因は、下流側のゲートバルブの開閉によるゴミの混入、warm up 期間中の空洞表面状態の変化などが考えられるが、今のところ分かっていない。

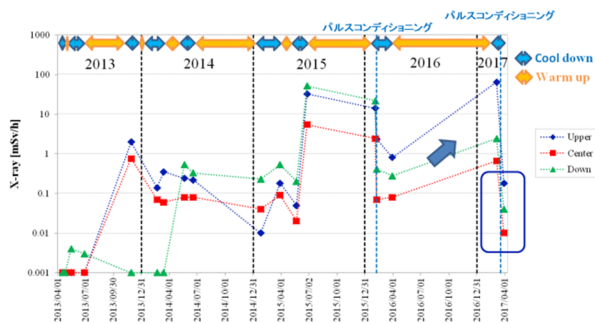


Figure 3: The history of x-ray radiation of the injector module.

4. パルスコンディショニング

4.1 方法

パルスコンディショニングは、①各空洞の CW 運転および 3 台同時運転を行い、現状の空洞性能を確認する。②各空洞のパルスコンディショニングを行う。③再度 CW 運転を行い、パルスコンディショニングの効果を確認し 3 台同時運転を行ってビーム運転に必要な加速電界での運転ができることを確認する、という流れで行った。各空洞のパルスコンディショニングの条件を Table 1 に示す。Cav#1 はパルス幅 1 msec (Duty 1%)、10 msec (Duty 10%)、Cav#2、3 はパルス幅 500μsec (Duty 0.5%)、5 msec (Duty 5%)で、それぞれ繰り返し 10 Hz の条件でパルスコンディショニングを行った。Fig.5 にはパルス運転時の透過パワーの波形を示す。上図が正常な状態の空洞における波形で、下図がクエンチ時の波形を示している。透過パワーの減衰時間(t_{decay})を測定し、次式から Q_L を計算する。

$$Q_L = \frac{2\pi f_0 t_{\text{decay}}}{\ln 2} \quad (1)$$

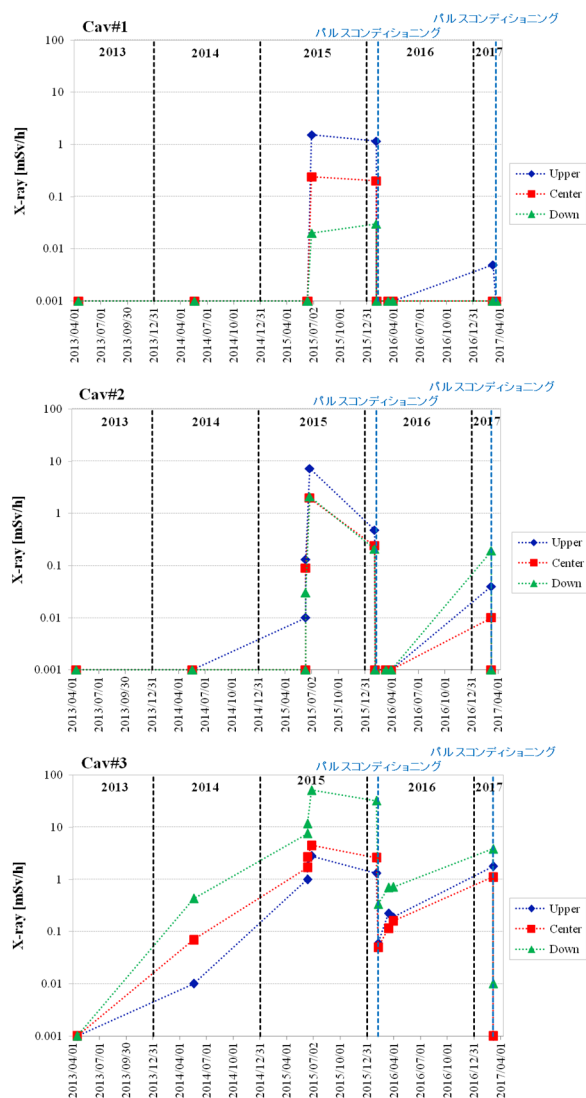


Figure 4: The history of x-ray radiation of each cavity.

Figure 5 からクエンチ時には t_{decay} の値が正常時の値より短くなっていることがわかる。 Q_L の値が正常値から下がった時を空洞のクエンチとみなし、インターロックにより RF を OFF することで、冷凍機への負荷を減らしている。ここで、 f_0 は空洞の共振周波数である。 Q_L の測定値とインターロックの為の閾値も Table 1 に示している。

Table 1: Pulsed Conditioning Parameters

	Pulse width [msec]	Frequency [Hz]	Duty [%]	Q_L	Q_L I/L
Cav#1	1	10	1	1.3×10^6	1.0×10^6
	10		10		
Cav#2	0.5	10	0.5	5.3×10^5	4.9×10^5
	5		5		
Cav#3	0.5	10	0.5	4.9×10^5	4.5×10^5
	5		5		

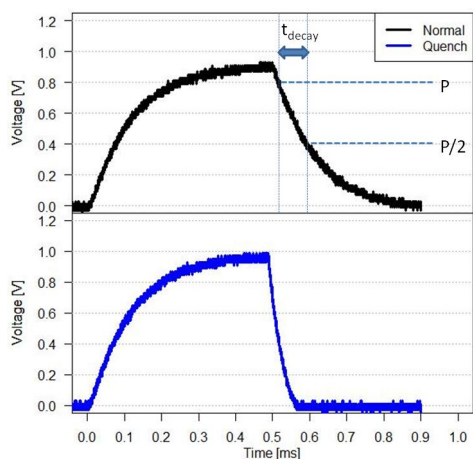


Figure 5: Waveform of transmitted RF signals. Comparison between normal (top) and quench (bottom).

4.2 結果

Figure 6 は、Cav#1 におけるパルスコンディショニング時の加速電界(Eacc)と X 線量の変化を示したものである。図中の矢印はインターロックの種類を示しており Q_L は Q_L インターロック(クエンチ)、Arc はインプットカップラーでの Arc インターロック、other は RF 制御系のインターロックである。パルス幅が 1msec 時には Eacc が 10.5 MV/m から X 線の発生が見られ、最大 Eacc が 17 MV/m で X 線量は上流部が 6.5mSv/h、側面部が 0.8 mSv/h、下流側で 0.05 mSv/h であった。パルス幅 10 msec では X 線は 10 MV/m から発生し、最大 Eacc が 17 MV/m で X 線量は上流部で 99 mSv/h 以上、側面部で 17.9 mSv/h、下流部で 1.78 mSv/h であった。また、パルスコンディショニング前後の CW 運転における加速電界と X 線量の関係を Fig. 7 に示す。パルスコンディショニング前の X 線のオンセットは上流部で 7 MV/m であっ

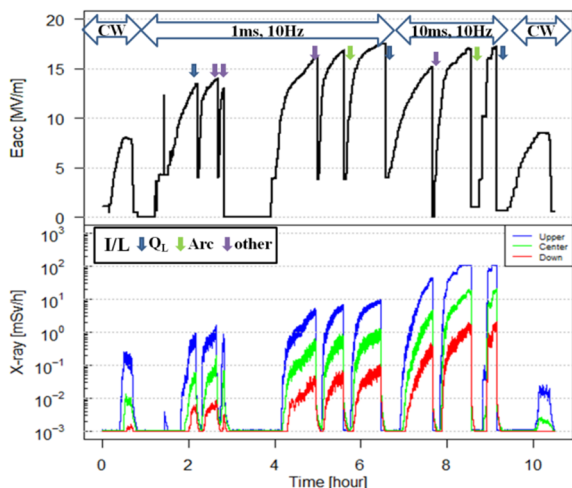


Figure 6: Pulsed RF conditioning results of Eacc (top), X-ray radiation (bottom) in No.1 cavity.

たが、パルスコンディショニング後には 8 MV/m においても X 線の発生が見られなくなった。パルスコンディショニングにより運転加速電界 7.6 MV/m では X 線の発生なしで運転できるまで性能が回復した。

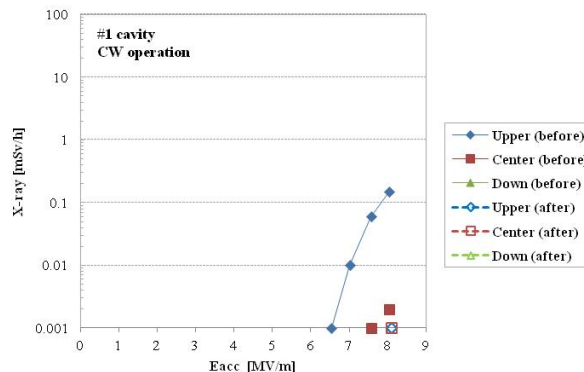


Figure 7: Comparison of the x-ray radiation level before and after pulsed RF conditioning in No.1 cavity.

Figure 8 に Cav#2 におけるパルスコンディショニング時の Eacc と X 線量の変化を示す。パルス幅 0.5 msec では 8 MV/m を超えたあたりから X 線が発生し始め、最大 Eacc が 16.6 MV/m で X 線量は上流部が 11.2 mSv/h、側面部が 3.54 mSv/h、下流部が 3.89 mSv/h であった。パルス幅 5 msec では 8 MV/m から X 線が発生し、最大 Eacc は 12 MV/m までしか上がらず、クエンチを繰り返した。X 線量は上流部が 7.31 mSv/h、側面部が 2.34 mSv/h、下流部が 2.45 mSv/h であった。Figure 9 にパルスコンディショニング前後の CW 運転における加速電界と X 線量の関係を示す。パルスコンディショニング前は 6 MV/m から X 線の発生が見られたが、パルスコンディショニング後は 8 MV/m から X 線が見られた。X 線量は Eacc が 8.1 MV/m の時にパルスコンディショニング前が上流が 1.21 mSv/h、側面部が 0.21 mSv/h、下流側で 1.35 mSv/h 程度であったが、パルスコンディショニング後にはそれぞれ 0.03 mSv/h、0.008 mSv/h、0.014

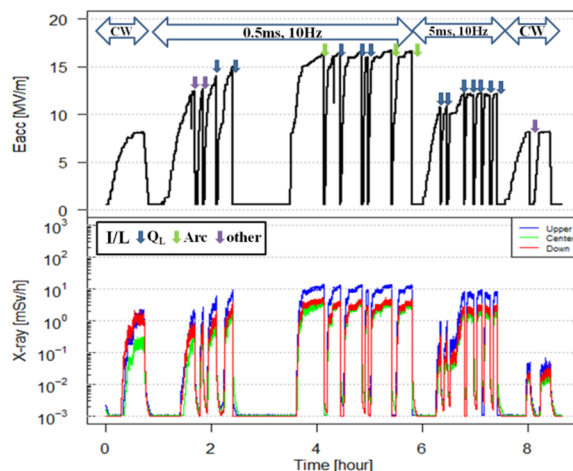


Figure 8: Pulsed RF conditioning results of Eacc (top), X-ray radiation (bottom) in No.2 cavity.

mSv/h まで減少した。また、運転加速電界 7.9 MV/m では X 線量は 0.03 mSv/h 以下になった。

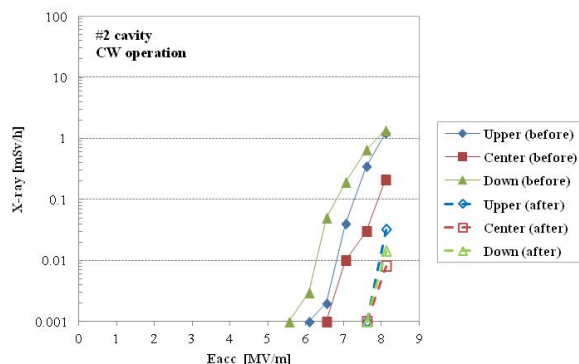


Figure 9: Comparison of the x-ray radiation level before and after pulsed RF conditioning in No.2 cavity.

Figure 10 に Cav#3 におけるパルスコンディショニング時の Eacc と X 線量の変化を示す。パルス幅 0.5 msec では 6 MV/m から X 線が発生し、最大 Eacc が 15.5 MV/m で X 線量は上流部が 5.56 mSv/h、側面部が 7.43 mSv/h、下流部が 13.67 mSv/h であった。パルス幅 5 msec では 7 MV/m から X 線が発生し、最大 Eacc は 14.1 MV/m までしか到達できなかった。X 線量は上流部が 31.6 mSv/h、側面部が 41.29 mSv/h、下流部が 99 mSv/h 以上であった。Fig. 11 にパルスコンディショニング前後の CW 運転における加速電界と X 線量の関係を示す。X 線のオンセットは 5 MV/m から 7 MV/m に上昇した。X 線量は Eacc が 8 MV/m において上流側が 14.5 mSv/h、側面部が 8.1 mSv/h、下流側が 26.0 mSv/h であったものが、それぞれ 0.07 mSv/h、0.11 mSv/h、0.64 mSv/h にまで減少した。運転加速電界 7.2 MV/m では 0.1 mSv/h 以下となりパルスコンディショニングにより空洞の性能が回復した。

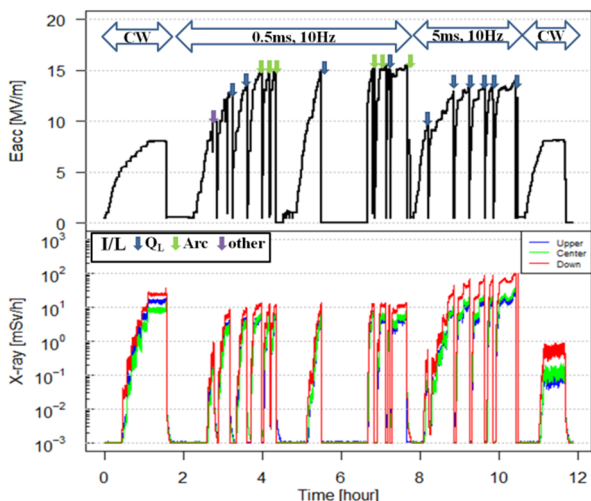


Figure 10: Pulsed RF conditioning results of Eacc (top), X-ray radiation (bottom) in No.3 cavity.

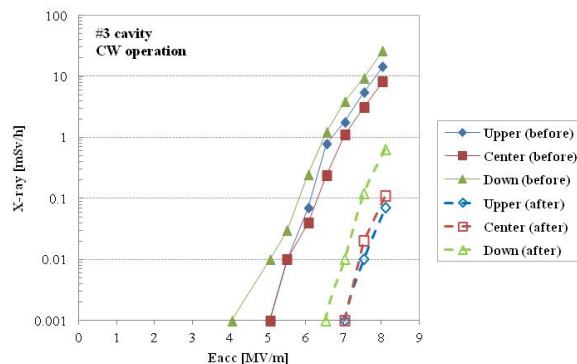


Figure 11: Comparison of the x-ray radiation level before and after pulsed RF conditioning in No.3 cavity.

Figure 12 にパルスコンディショニング前後の 3 台同時運転における加速電圧と X 線量の関係を示す。パルスコンディショニング前は 3.5 MV を超えたところから X 線が発生し 5.2 MV では上流側で >99mSv/h、側面部で 2.7 mSv/h、下流側で 7 mSv/h であったが、パルスコンディショニング後は 4.5 MV から X 線が発生し、上流側で 1.2 mSv/h、側面部で 0.02 mSv/h、下流側で 0.14 mSv/h となり、パルスコンディショニングにより 2 桁のオーダーで X 線量を減らすことができ、ビーム運転に支障のないレベルまで性能が回復した。

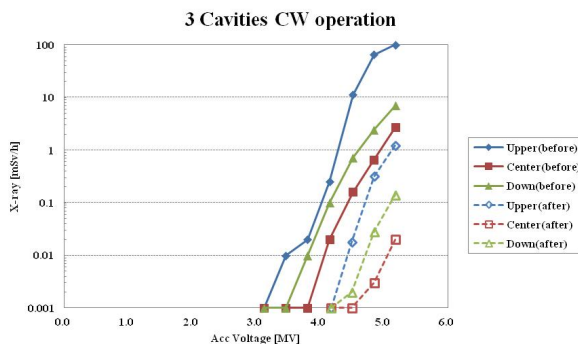


Figure 12: Total accelerating voltage of three cavities vs X-ray radiation before and after pulsed RF conditioning.

5. まとめと今後の予定

2016 年 3 月から 2017 年 3 月の 1 年間の間にフィールドエミッションにより空洞性能が劣化したが、大電力 RF パルスコンディショニングにより初期の性能にまで空洞性能を回復することができた。フィールドエミッションの低減にパルスコンディショニングが有効であることが改めて示されたが、劣化の原因はわかっていない為、原因の追究が求められる。今後の運転において超伝導空洞の性能が劣化した際には、大電力 RF パルスコンディショニングを行う必要がある。

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. LINAC'10 (2010) 401.
- [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'2007 (2007) WE303.
- [8] Energy Recovery Linac Conceptual Design Report (2012);
http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/library/publications/ERL_CDR_full_text.pdf