

## cERL 入射器クライオモジュール冷却時の運転履歴

### OPERATIONAL RECORD OF cERL INJECTOR CRYOMODULE DURING COOL-DOWN

今田信一<sup>#, A)</sup>, 浅野峰行<sup>A)</sup>, 山田浩気<sup>A)</sup>, 泰中俊介<sup>A)</sup>, 石原将治<sup>A)</sup>, 加古永治<sup>B)</sup>

Shin-ichi Imada<sup>#, A)</sup>, Mineyuki Asano<sup>A)</sup>, Hiroki Yamada<sup>A)</sup>, Shunsuke Tainaka<sup>A)</sup>, Shoji Ishihara<sup>A)</sup> and Eiji Kako<sup>B)</sup>

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

<sup>B)</sup> KEK, High Energy Accelerator Research Organization

#### Abstract

The compact energy recovery linac (cERL) at KEK has been operated with beam, since 2013. The injector cryomodule for cERL consists of three 2-cell superconducting cavities and accelerates CW electron beams to the beam energy of 5 MeV. Three cavities have been stably operated for six years. It was found that high power RF pulsed conditioning was very effective to recover the degraded cavity performance. The operational history of the cERL injector cryomodule 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 5.5 MeV に加速することを目標としている[1-3]。2013 年以來、これまで 6 年間ビーム運転を行ってきた。162.5 MHz の繰り返しの高電荷(40 pC)運転においては加速電圧 4.5 MV で、1.3 GHz の繰り返しでは 0.9 mA のビームを加速電圧 2.4 MV で安定に加速することができた。また、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が見られたが、大電力 RF パルスコンディショニングにより空洞性能を回復させることができた[4, 5]。本報告では、これまでの運転から得られた知見について報告する。

#### 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、ビームラインに設置された実機の写真を Fig. 2 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、カップラー一本当たりの高周波入射電力を減らすため、また、ビームがカップラーキックされることを防ぐために、上下対称に 2 台のイ

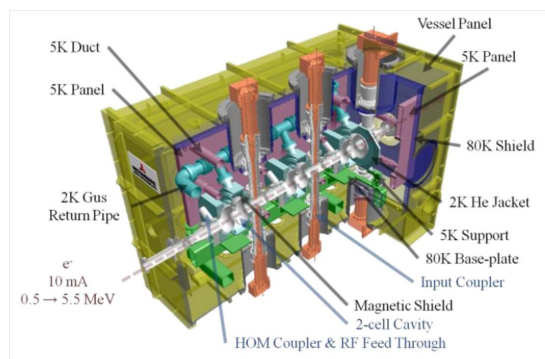


Figure 1: cERL injector cryomodule.

ンプットカップラーが設置されている。また、ビームによって誘起される有害な高調波電力を取り出すために、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[6-9]を参照願いたい。

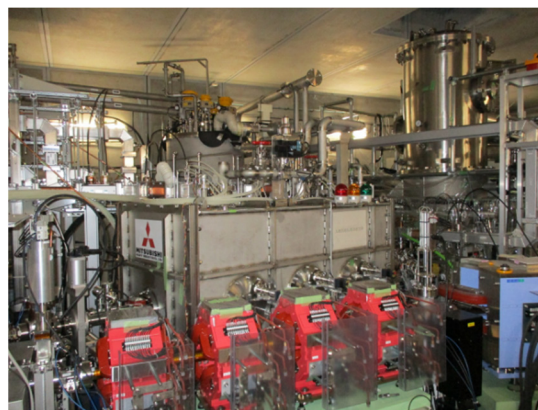


Figure 2: Injector cryomodule installed in the beam line.

#### 3. 冷却サイクル

入射器空洞を超伝導状態に保持するために、クライオモジュールを常温から 2 K に冷却する。常温から 80 K ヘリウムガスにより予冷し、その後、液体 He を空洞に取り付けられたヘリウムジャケットにためて 4 K に冷却する。最後に、減圧ポンプにより 3 kPa まで減圧することで 2 K に冷却される。これまでに行った入射器クライオモジュールの 13 回の冷却サイクルの履歴を Fig.3 に示す。また、これまでの冷却サイクルにおける冷却から昇温までのヘリウムジャケットの温度の変動を Fig.4 に示す。初期の運転では夜間の冷却を中断したため、次の冷却までに 45 K まで空洞温度が上昇し、週末には冷凍機を停止するため 140 K にまで上昇した。その後の運転では、夜間も週末も 4 K または 2 K にキープすることで十分なビーム運転の時間が確保されている。Fig. 5 には冷却期間の日数とその時の 4 K 運転の日数のヒストグラムを示している。

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

これからも 5th 以後ではビーム運転期間中の 4 K 運転の割合が増えていることがわかる。

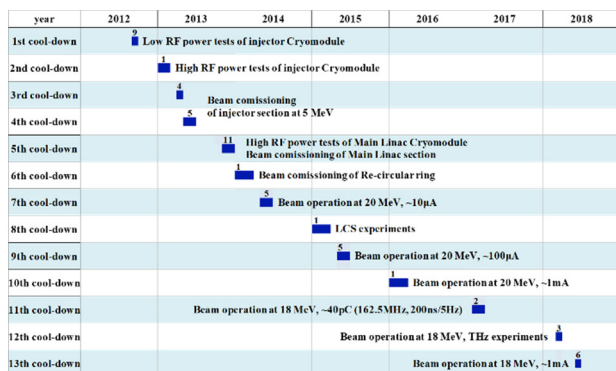


Figure 3: History of 13 cooling-down cycles for 7 years.

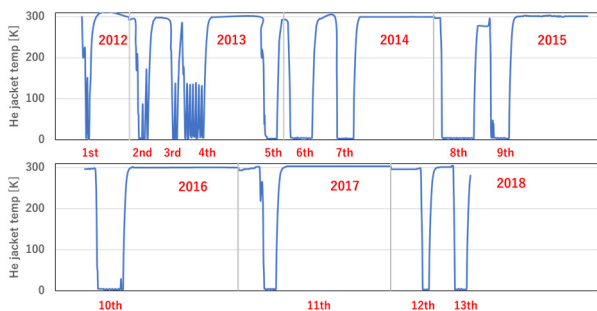


Figure 4: History of the cavity temperature from 2012 till 2018.

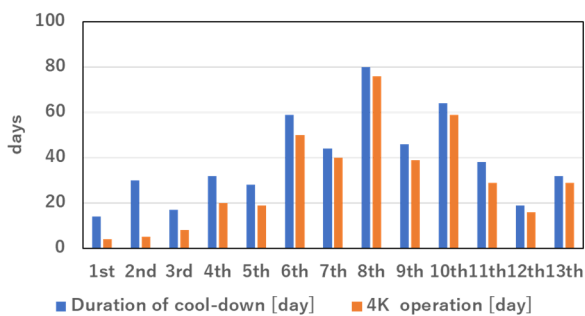


Figure 5: Histogram of the number of days during cool-down periods and operational days at 4.2 K.

#### 4. 入射器超伝導空洞の X 線の履歴

cERL の入射部の模式図を Fig. 6 に示す。フィールドエミッションによる空洞からの X 線を観測するために、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。

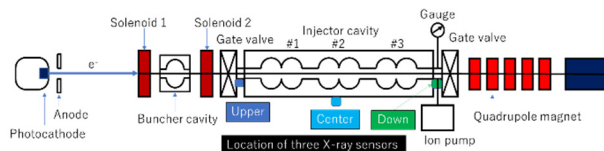


Figure 6: Location of X-ray sensors around cERL injector cryomodule.

Fig. 7 に加速電圧約 5 MV での 3 台同時運転時の X 線量の 6 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おり、ビーム運転前の入射器空洞のエージング時と運転終了近くのデータを示している。Fig.7 からわかるように、ビーム運転が開始された 2013 年では 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。X 線による発熱の増加によって冷凍機負荷が増大したことにより 5 MV での運転が維持できなくなった。また、下流で発生した電界放出電子が上流側の空洞で加速を受けることでさらに X 線量が増大することが原因で、運転時の加速電圧を下げる結果となった[10]。

空洞性能の回復のために、大電力 RF パルスコンディショニングを行った。これは、短いパルスの RF により通常運転よりも高い加速電場を空洞に発生させ空洞内にあるゴミを除去する方法である。大電力 RF パルスコンディショニングにより、X 線量は元の 1 mSv/h 以下まで減少させることができた。また、パルスコンディショニング後の運転期間中には空洞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ー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性能の劣化が見られた。同様の現象が、2018 年にも確認されたが、この時の X 線量の悪化の程度は小さかった。これらの劣化も大電力 RF パルス

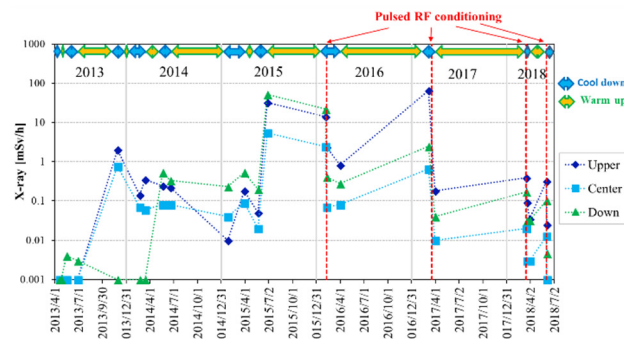


Figure 7: History of x-ray radiation levels at 5 MV in three cavity operation of the cERL injector cryomodule from 2013 till 2018.

コンディショニングにより回復させることができた。これらのことから、X線量増加による空洞性能の悪化に対して大電力RFパルスコンディショニングが有効であることが示された。ただし、大電力RFパルスコンディショニングの効果は昇温に伴い失われる可能性が高いため、電界放出電子を抑制するためには、ビーム運転の前には必ず行う必要がある。

Fig.8には各空洞の加速電界が7 MV/mの時のX線量の6年間の履歴を示している。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。このことから、下流側のビームパイプから何らかの汚染物質が飛来することが原因で、空洞性能の低下を引き起こしている可能性が考えられる。また、停止期間後の測定においてもその空洞性能は劣化したままであった。2017、2018年の停止期間後の冷却での空洞性能の劣化も3台同時に発生しており、Cav#3のX線量が一番多い結果となっている。大電力RFパルスコンディショニングにより空洞性能の回復ができており、初期の性能まで回復できている。

空洞性能の劣化に関するその他の原因として、下流側のゲートバルブの開閉によるゴミの混入、昇温・室温保持の期間中での空洞表面状態の変化などが考えられるが、今のところ明確には分かっていないため、さらなる調査研究が必要である。

## 5. 結論

入射器クライオモジュールにおいて、CWの0.9 mAの電子ビームを加速電圧2.4 MVにおいて安定なビーム運転が行えた。2015年の空洞の性能劣化後、昇温後の再冷却後にX線量の増加が見られるようになった。しかしながら、大電力パルスコンディショニングによる空洞性能の低下を回復できる手法が確立しつつあり、この方法の有効性が示された。

## 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'16 (2016) TUP022.
- [5] S. Imada *et al.*, Proc. PASJ'17 (2017) WEP041.
- [6] E. Kako *et al.*, Proc. SRF'2009 (2009) 485.
- [7] K. Watanabe *et al.*, Proc. SRF'2007 (2007) 530.
- [8] S. Noguchi, Proc. SRF'2007 (2007) WE303.
- [9] Energy Recovery Linac Conceptual Design Report (2012); [http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/library/publications/ERL\\_CD\\_R\\_full\\_text.pdf](http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/library/publications/ERL_CD_R_full_text.pdf)
- [10] H. Yamada *et al.*, Proc. PASJ'15 (2015) WEP051.

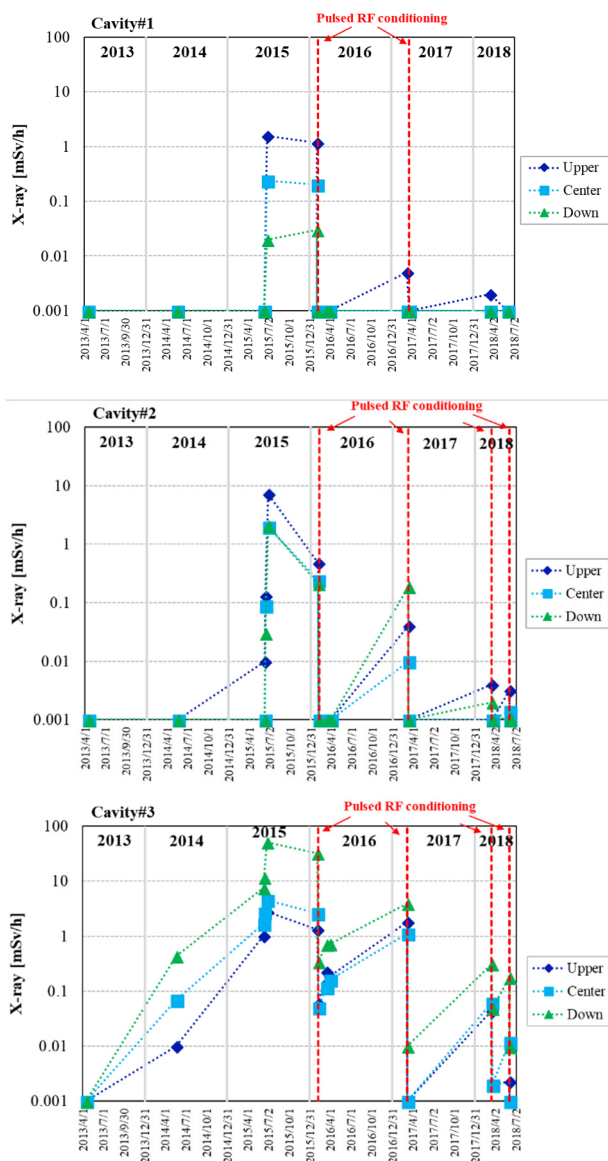


Figure 8: History of x-ray radiation levels at 7 MV/m of each cavity in one cavity operation; top (Cavity#1), middle (Cavity#2) and bottom (Cavity#3).