

cERL 入射器クライオモジュールにおける長期間ビーム運転経験 LONG OPERATIONAL EXPERIENCE WITH BEAM IN CERL INJECTOR CRYMODULE

山田浩気^{#,A)}, 浅野峰行^{A)}, 今田信一^{A)}, 柳町太亮^{A)}, 許斐太郎^{B)}, 加古永治^{B)}
Hiroki Yamada^{#,A)}, Mineyuki Asano^{A)}, Shin-ichi Imada^{A)}, Taisuke Yanagimachi^{A)},
Taro Konomi^{B)}, Eiji Kako^{B)}

^{A)} Nippon Advanced Technology (NAT)

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

Abstract

An injector cryomodule for compact energy recovery linac (cERL) at KEK has been operated since 2013. The cryomodule contains three 2-cell superconducting cavities, and RF power is operated with continuous wave. During long term operation, high power RF pulsed conditioning was carried out in order to recover the degraded cavity performance. This paper reports the operating experiences including troubles during the long beam operation of the injector cryomodule.

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) 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[1-3]。入射器クライオモジュールには 3 台の 2-cell 超伝導空洞が収納されている。本報告では、入射器クライオモジュールの長期ビーム運転時におけるトラブルなどを含めた運転経験について報告する。

2. 入射器クライオモジュール

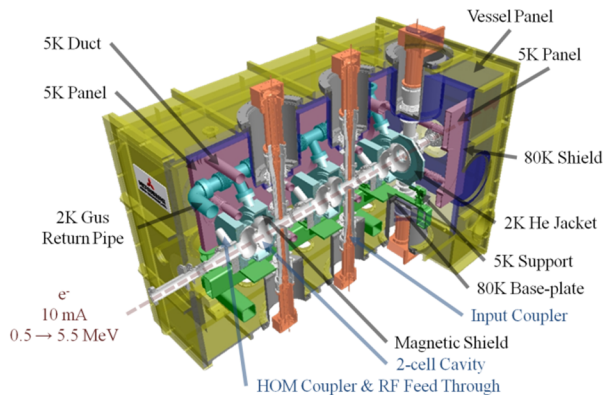


Figure 1: cERL injector cryomodule.

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、Aloka の放射線センサー設置位置を Figure 3 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、一本あたりの空洞への入射パワーを半減するため、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[4]。さらに、

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

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 空洞に取付けられている[5]。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[6]。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。

3. 入射器空洞の長期運転



Figure 2: Injector cryomodule installed in the beam line.

入射器空洞を超伝導状態にするために、クライオモジュールを常温から 2 K にまで冷却しなければならない。最初に 4.2 K の液化ヘリウムをヘリウムジャケットへ溜めてから 3 kPa まで減圧することで、2 K に到達することが

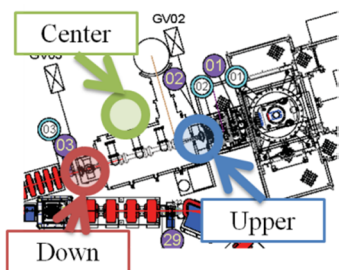


Figure 3: Location of X-ray sensors around cryomodule.

できる。今回は2月末からの6週間の運転での入射器クライオモジュールのヘリウムジャケットの温度の変動をFigure 4に示す。上段が温度変化の全体図で、下段が運転中の拡大図である。通常運転の10時間程度のビーム運転中は2 Kを維持しているが、運転が終わると減圧を停止して4 K状態を維持する。クエンチや冷凍機の停止等のトラブルで温度が上がっているところがあるが安定した冷却ができています。

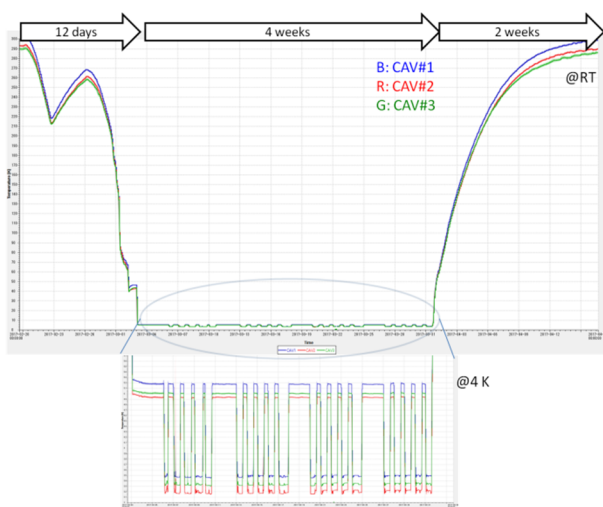
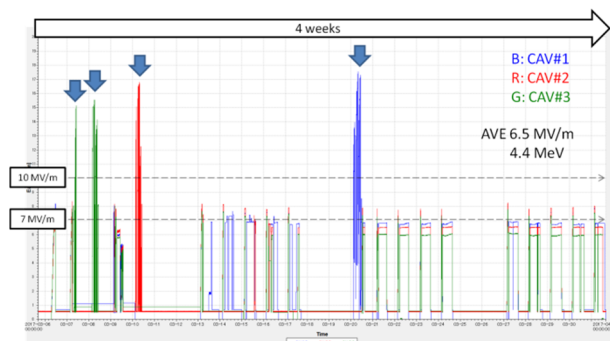


Figure 4: Temperature of injector cryomodule during beam operation.

今回のビーム運転での入射器空洞の運転加速電界をFigure 5に、X線の総量をFigure 6に示す。最初にCAV#3, CAV#2のエージングを行ったが、後述する入射器空洞起因のX線で上流側への影響があったため、CAV#1のエージングも後から行った[7]。3月からの4週間に渡っての運転は、入射器空洞起因のトラブルによるトリップが一度もなく、加速電界($E_{acc} = 6.5 \text{ MV/m}$)での安定した連続運転が行われた。

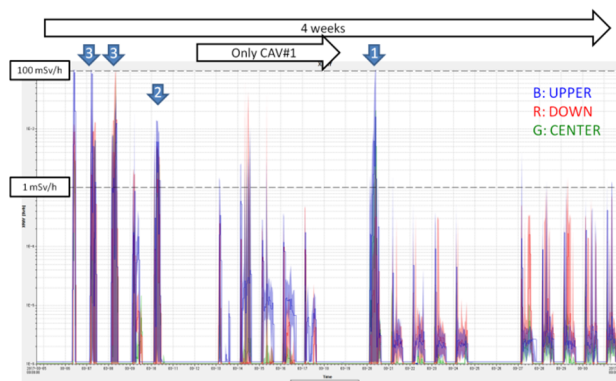
4 入射器空洞の一日運転

入射器空洞の一日の詳しい運転状況を示す。Figure 7は加速電界を、Figure 8はRFの入力パワーを示す。エージング時に少し高めの加速電界($E_{acc} = 7.5 \text{ MV/m}$)まで上げ、ビーム運転時には3空洞の加速電界の平均が($E_{acc} = 6.4 \text{ MV/m}$)で運転した。RFパワーも同様に、エージング時に少し高めのパワーで入力し、ビーム運転時には一度も途切れることなくパワーが入っている。



↓ : pulse conditioning

Figure 5: Accelerating gradient of three cavities with beam operation for four weeks.



↓ : pulse conditioning

Figure 6: X-ray radiation level for four weeks.

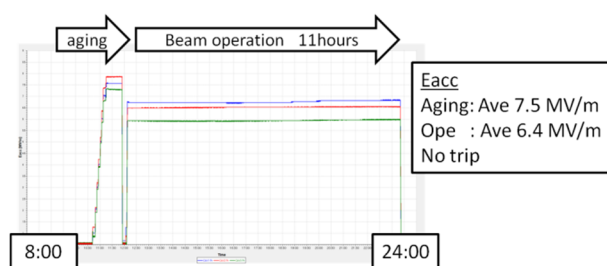


Figure 7: Accelerating gradient of three cavities with beam operation for one day.

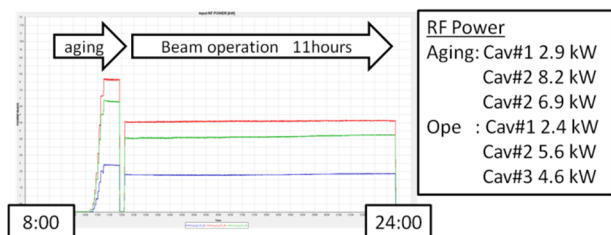


Figure 8: RF power of three cavities with beam operation for one day.

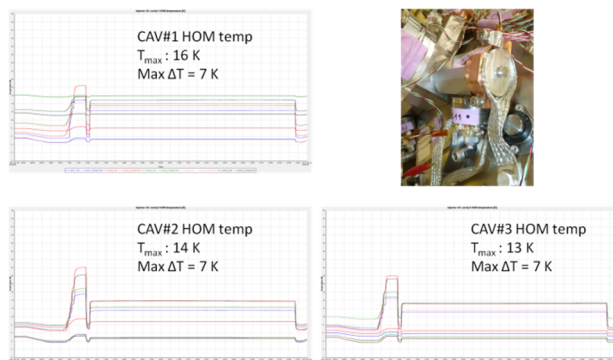


Figure 10: Temperature of HOM coupler of three cavities.

Figure 10 に各空洞の 5 つの HOM カップラーの温度変化を示す。Top 部分(点線)は温度上昇が 1 K に対しコネクタ部分(実線)は 7 K の上昇がある、これは HOM コネクタの冷却が不十分であり、ニオブ製ピックアップアンテナ先端での発熱により、超伝導破壊が起きているためである。

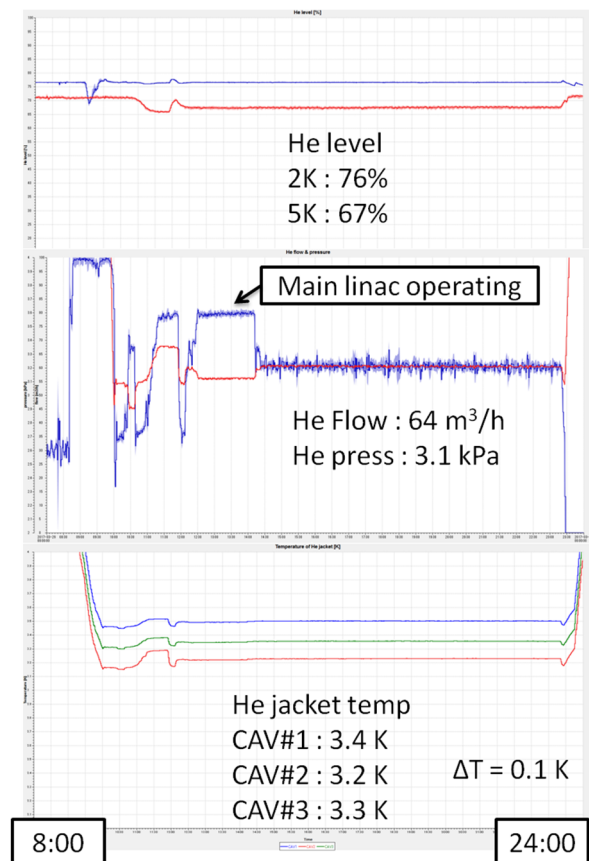


Figure 9: He level (top), He-gas flow and He-pressure at 2K line (middle) and Temperature of He jacket (bottom).

Figure 9 上段に液体 He の 5 K ポット、2 K ポットの液面計、中段に He 流量、圧力、下段に各空洞の He ジャケットの温度変化を示す。液面は減圧時や空洞が運転していない時に変動がある程度で、ビーム運転時には 5K, 2 K ポット共に安定しているのがわかる。He 流量は、He 回収ラインが主空洞のラインと合流したものを計測しているため、主空洞が運転している時に上昇したが、後に主空洞にパワーを入れずにビーム運転時には 64 m³/h で安定した運転ができています。He 圧力についても、大気圧から 3.1 kPa にまで減圧すれば、運転中に大きく変化することはない。He ジャケットの温度も減圧をすると 3 K まで冷え、空洞を運転しても温度変化が 0.1 K 程度に抑えられていることから、超伝導状態が維持できていると言える。

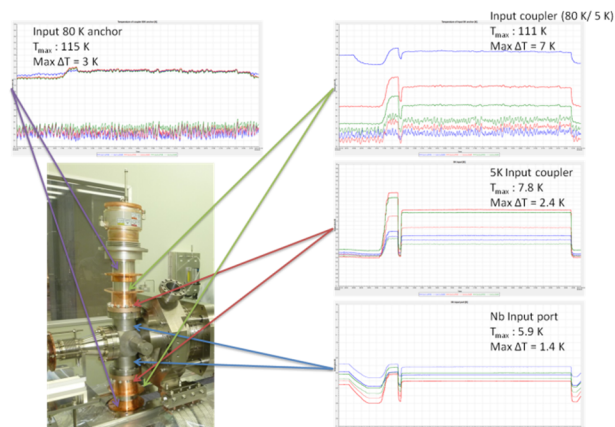


Figure 11: Temperature of input port.

Figure 11 に各空洞のインポートポートの温度変化を示す。左上から時計周りに 80 K アンカー、5 K と 80 K のアンカー中間の外導体、5 K アンカー、ニオブインポートポートの温度となっており、温度センサーの位置は図に示すように上下にそれぞれ取り付けられている。冷却時の温度は空洞から遠くなるにつれて高くなり、温度上昇は順に 3 K, 7 K, 2.4 K, 1.4 K となる。

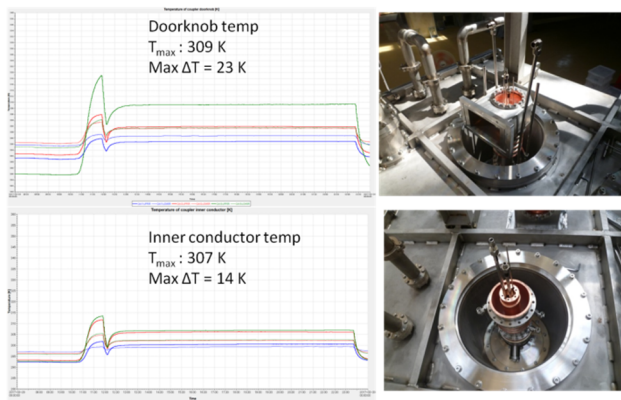


Figure 12: Temperature of inner conductor and doorknob.

Figure 12 にドアノブ、内導体の温度変化である。運転中において共に温度上昇が大きいため、冷却水、送風機による冷却などの対策をしているが、風冷をしなければ、約 350 K まで上昇してしまう可能性があり、ドアノブと内導体への冷却対策は必須である。

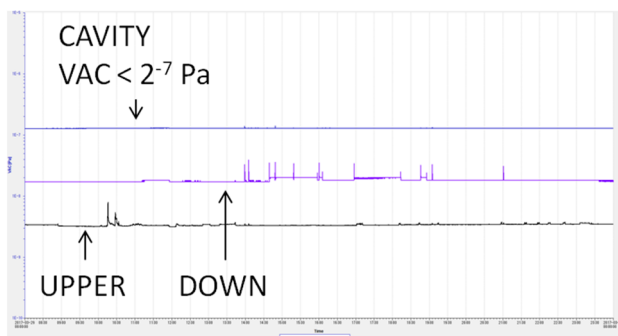


Figure 13: Vacuum of injector cavity, upstream CCG and downstream CCG.

Figure 13 に入射器空洞の真空(Ion gauge)と上流、下流それぞれ最寄りの真空(CCG)を示す。上流側はバンチャー空洞にある CCG なのでエイジング時に 2 回跳ね、下流側はビーム運転中に複数回跳ねているが、いずれも入射器空洞の真空に影響はなく、また入射器空洞自身から真空が悪化するということはないということがわかる。

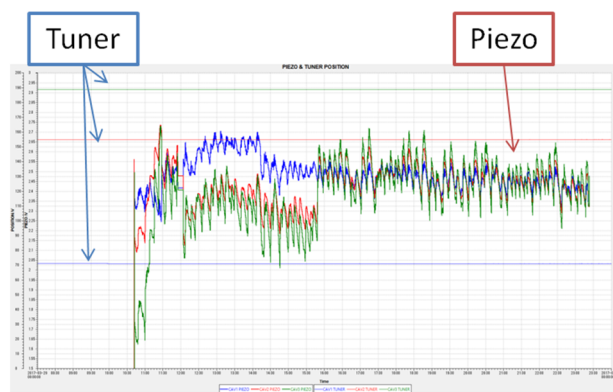


Figure 14: Applied voltage of three piezo tuners with feedback control of cavity gradients.

Figure 14 は運転中のメカニカルチューナー、ピエゾチューナーの変動を示しており、最初のエイジングの時は加速電界を手動で調整するため大きく変動しているが、ビーム運転中はピエゾ電圧にフィードバック制御をかけており、中盤に中間値になるように一度調整の為手動で動かしたが、安定した加速電界を保つことが出来ている。

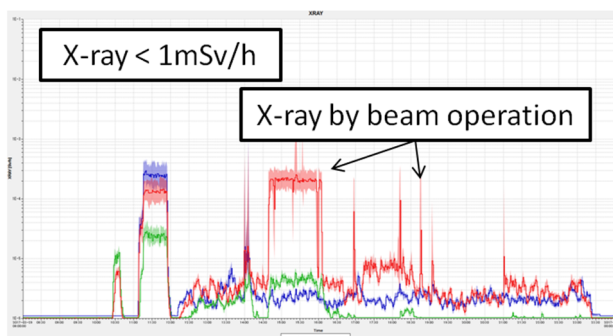


Figure 15: X-ray radiation with beam operation for one day.

Figure 15 は X 線の計測値を示しており、ビーム運転中は主空洞が運転している等の外部の影響で X 線が増えているところはあるが、入射器空洞単独では 1 mSv/h 以下に抑えられている。

5. 入射器空洞起因のトラブル

入射器空洞にパワーを入れ、ビーム運転をしていると、X 線が増え、真空が跳ね、その結果真空のインターロックが働くという現象が起こった。入射空洞下流側のスクリーンで放電現象があり、それによる真空悪化が原因である。Figure 16 にその時の入射器空洞の上流部の X 線、及び電子銃、その他入射器空洞周りに配置してある Aloka の X 線線量と、入射器空洞とその周りの真空計の値を示す。X 線の跳ねる現象は入射器空洞が動いている時で、上流側に X 線が出る状態でしか起こらず、かつビームラインのゲートバルブが開いている状態で起こったことから、入射器空洞から発生する X 線が上流側

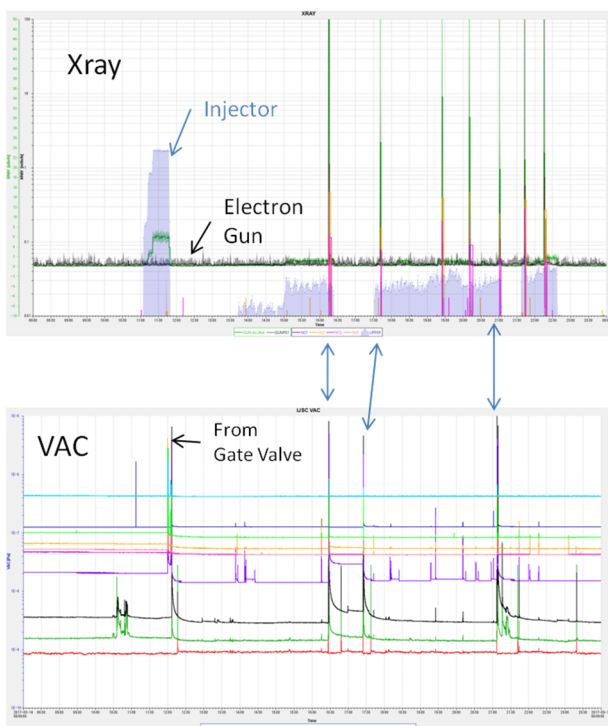


Figure 16: X-ray and vacuum burst by discharge of screen monitor.

の電子銃カソードにあたり、それにより電子が放出され、入射空洞で加速された電子が下流側スクリーンにあたり放電が起こったと推測出来る。これにより入射器空洞のパルスコンディションを追加で行わなければならなくなった。今後、運転をすることがあるなら、時間を割いてでもコンディショニングを行った方が良いと思われる。

6. まとめ

cERL の入射器空洞の長期安定運転は以前から成功しており[8]、今回も成功はしたものの、X線が増加していた影響で目的のパワーより低めの運転となった。このような事態が前回から起こり始めているので、今までの対策も講じつつも万全なコンディショニングを行ってからビーム運転を行うことが必要になるだろう。

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] E. Kako *et al.*, Proc. SRF'2009 (2009) 485.
- [5] K. Watanabe *et al.*, Proc. SRF'2007 (2007) 530.
- [6] S. Noguchi, Proc. SRF'07 (2007) WE303.
- [7] S. Imada, Proc. PASJ'17 (2017) WEP041.
- [8] H. Yamada, Proc. PASJ'14 (2014) SAP043.