

CERL 入射器クライオモジュールのビーム運転状況 STATUS OF CERL INJECTOR CRYOMODULE WITH BEAM OPERATION

山田浩気^{#A)} 浅野峰行^{A)}, 今田信一^{A)}, 植木竜一^{A)}, 柳町太亮^{A)},
岡田昭和^{B)}, 大戸寿郎^{C)}, 山本康史^{C)}, 加古永治^{C)}

Hiroki Yamada^{#A)}, Mineyuki Asano^{A)}, Shin-ichi Imada^{A)}, Ryuichi Ueki^{A)}, Taisuke Yanagimachi^{A)}, Terukazu Okada^{B)},
Toshio Shishido^{C)}, Yasuchika Yamamoto^{C)}, and Eiji Kako^{C)}

^{A)} Nippon Advanced Technology

^{B)} K-vac

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

Abstract

Compact Energy Recovery Linac (cERL) has been operated in the beam energy of 20 MeV and the beam current of ~80 μ A. Injector cryomodule consists of three 2-cell superconducting cavities, six high power input couplers, fifteen HOM couplers and three slide-jack tuners. Electron beams in injector section are accelerated from 400 keV to 2.2 MeV by the injector cryomodule. In this paper, the stable operation status of the injector cryomodule are reported.

1. はじめに

KEKが開発を進めている将来の3 GeV-エネルギー回収型ライナック (ERL)のために、実証機として35 MeV-コンパクトエネルギー回収型ライナック (cERL)が建設された。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 and 3]。今回は、80 μ Aの電子ビームを2.2 MeVまでの安定した加速運転ができたが、クエンチや放射線の増加もあったので、その状況を述べる。

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 Fig 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、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、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^[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^[6]。また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、そこに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。そして、外部から熱が入らないように 5 K パネル 80 K シールドを取り付け、それらを真空層で覆う構造になっている。また入射高周波電力は 25 kW, 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 カップラーでの高周波損失による発熱に注意が必要である。

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 4.5 Kであるため^[7]、十分な冷却が必要となる。

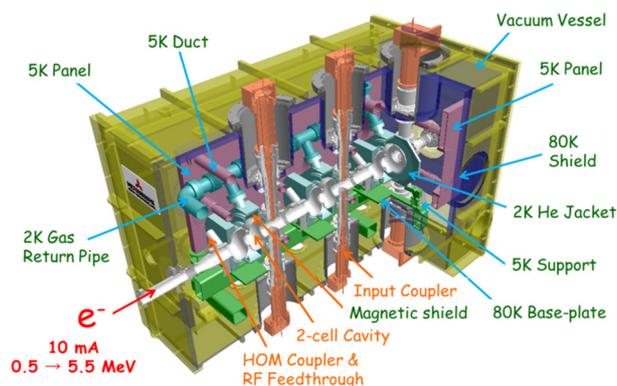


Figure 1: cERL injector cryomodule.



Figure 2: Injector cryomodule at the beam line.

3. 冷却サイクル

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 2K 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 に到達することができる。今回は 1 月からの 11 週間と、5 月からの 5 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 Fig 3 に示す。それぞれ上段が温度変化の全体図で、下段が拡大図である。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る。

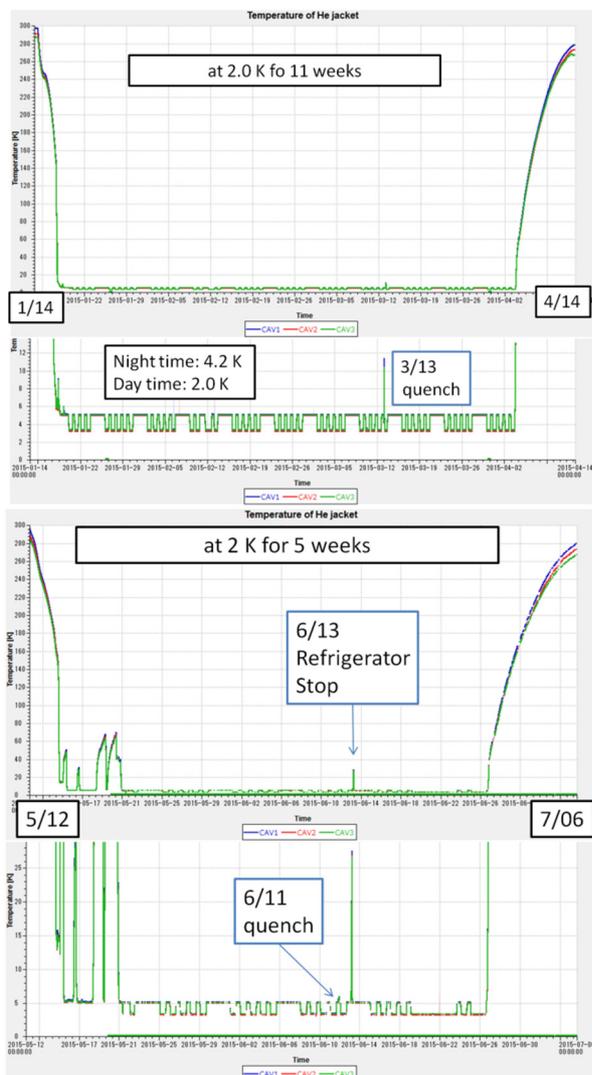


Figure 3: Cooling-down cycles for 11 weeks and 5 weeks.

4. ビーム運転

今回のビーム運転での入射器空洞の運転加速電界を Fig 4 に示す。1 月からの 10 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、目標としていた加速電界 ($E_{acc} = 3.2$ MV/m) での安定した連続運転が行われた。2 回 7.2 MV/m で運転しているが、beam study を行うために上げたものである。5 月からの 5 週間に渡っての運転は、3.2 MV/m で調整を行った後、7.2 MV/m で運転する予定だったが、後述する X 線の上昇により 3.2 MV/m に下げた運転が行われた。

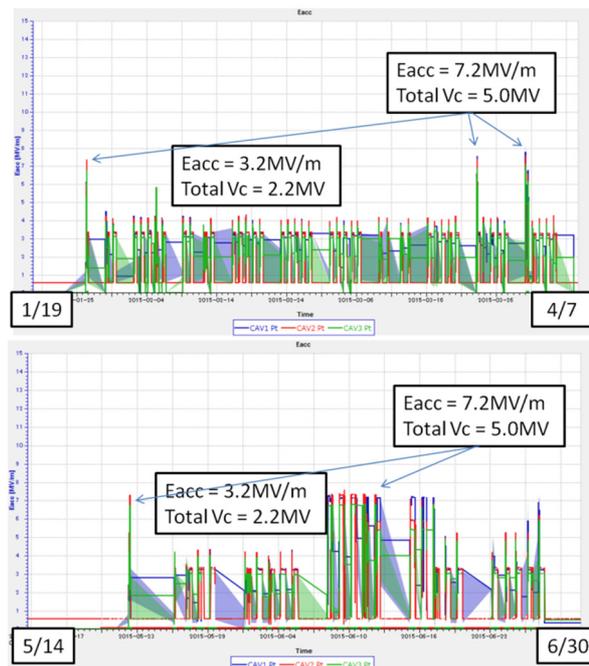


Figure 4: Accelerating gradient of three cavities with beam operation for 10 weeks and 5 weeks.

次に、入射器空洞の一日の詳しい運転状況を Fig 5 に示す。このグラフは上から、茶色が空洞内の真空で、ピンク色がヘリウム流量、一番下が 3 空洞それぞれの加速電界を示している。真空はビームラインを仕切るゲートバルブを運転開始前と後で開閉するので、その時に真空が悪化する。そのため、2 回真空が悪くなっているが、運転中は安定して 1.6×10^{-7} Pa を維持している。運転中は熱負荷でヘリウムが気化し、ヘリウム流量も上昇しているが、運転中は $60 \text{ m}^3/\text{h}$ を維持し、安定した冷却ができているといえる。

次に、入射器空洞のエイジング中に出る X 線を Fig 6 に示す。X 線検出器は入射空洞の上流部、下流部、そして側面に置いており、エイジング時は 3 空洞を 7 MV/m で行うが、最大で下流部の 0.30 mSv/h 程度まで X 線が出ることが分かった。

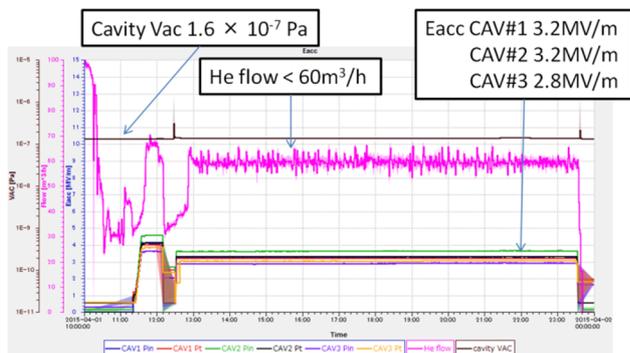


Figure 5: Cavity vacuum, He flow rate and Eacc of 3 cavities during a cool-down period, for one day.

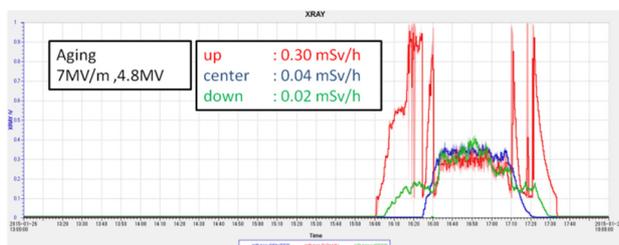


Figure 6: X-ray radiation during conditioning at 7 MV/m.

Fig 7 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、運転中はメカニカルチューナーは一定で、ピエゾにフィードバックをかけているため、非常に安定して加速電界を保つことができている。

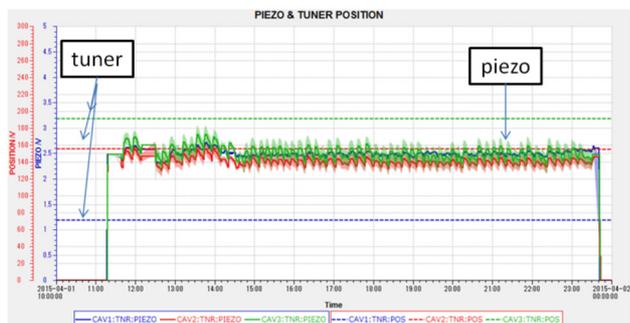


Figure 7: Applied voltage of three piezo tuners with feedback control.

Fig 8 には運転中のヘリウム流量、ヘリウム圧力、ヘリウムの液面計のグラフを示す。運転開始前の4K から 2K に移行する時や、エイジング時はヘリウム流量が安定していないが、ビーム運転中は、安定して液面を保っていることが分かる。



Figure 8: He-gas flow, He-pressure at 2 K, and He level (5 K & 2 K).

5. X線の増加

今回の運転では入射器空洞から出る X 線量がある日を境に増加した。Fig 9 は今回の運転期間中に、3 空洞を 7 MV/m でエイジングした時の 3 カ所の X 線の推移を示す。最初の運転では、3 か所共 1 mSv/h 未満だったが、上流部をみると 6/10 を境に 10 倍増加し、6/11 を境に更に 10 倍増加した。6/17 の測定値はモニターの測定限界値を超え、6/26 は、7 MV/m 近くまで上げると、ヘリウム流量が限界を超えそうになり、途中で切り上げた。X 線は 7 MV/m で 100 mSv/h 以上出ている結果になった。

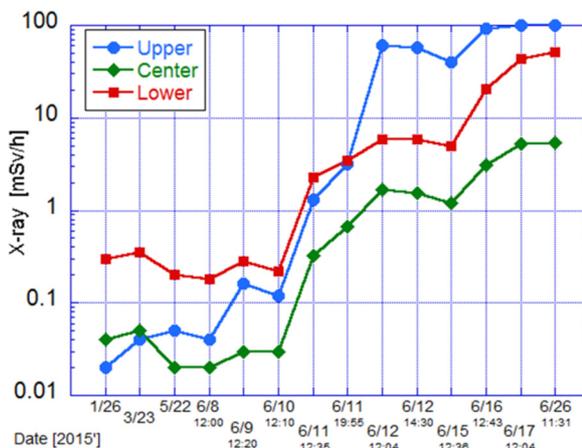


Figure 9: X-ray radiation during aging at 7 MV/m.

Fig 10 には、加速電界ごとの X 線を各空洞個別運転と 3 空洞同時運転の 4 つのグラフを示す。赤が 5/19, 青が 6/12, 緑が 6/26 のデータである。それぞれの空洞が、今回の運転で低い加速電界から X 線が発生するようになり、悪化したのがわかる。3 空洞同時運転においては 5/19 は 6 MV/m を超えると X 線が出ていたのだが、6/26 では、4 MV/m を超えると出始めている。X 線の影響で通常の 7 MV/m での運転が厳しくなったため運転中のパワーを下げ、X 線を減らしたが今後の為になんらかの対応が必要となる。

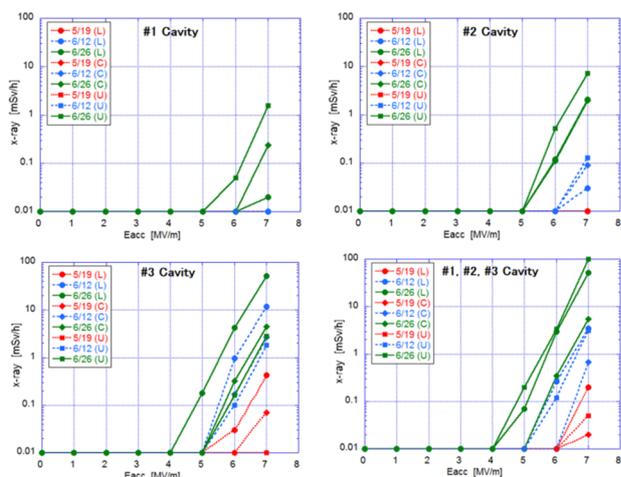


Figure 10: Change of x-ray radiation level in three cavities; 5/19, 6/12, 6/26.

6. 運転中のトラブル

ビーム運転中、空洞に電子ビームが当たり、クエンチが起こった時の入射器空洞の状況を示す。

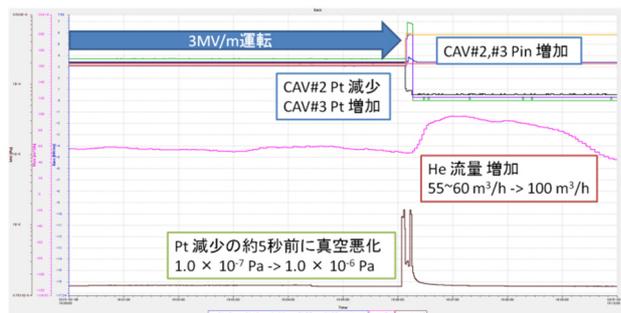


Figure 11: State of injector cavities by quench.

Fig 11 はクエンチが起こった時の加速電界、ヘリウム流量、空洞真空を示す。通常の 3 MV/m で運転していると、最初に真空が 1.0×10^{-6} Pa まで悪化し、その次に空洞 2 の Pt が減少し、空洞 3 の Pt が 7 MV/m まで増加した。ヘリウム流量が $100 \text{ m}^3/\text{h}$ まで増加し、ヘリウム流量のインターロックで運転停止となった。

Fig 12 は、クエンチ時の空洞の温度を示す。ヘリウムジャケットの温度をみると、空洞 2 の温度が 0.83 K と一番上がっており、空洞周りの温度も空洞 2 が最大で 13.4 K 上がっている。

これらの状況を整理すると、空洞 2 に電子ビームが当たり超伝導破壊が起き温度が上昇し、フィードバックで加速電界を維持しようとしていたため損失分のパワーが増え、ヘリウム流量が上昇した、といった経緯が推測される。今後、ヘリウム流量が上昇する前にインターロックがかかるようなシステム面での対応も必要となってくる。

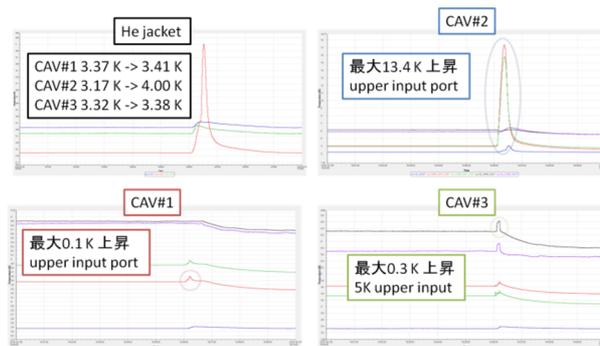


Figure 12: Temperatures of cavities at quench.

7. まとめ

入射器クライオモジュールにおいて、CW の 80 μA の電子ビームを 2.2 MeV 加速を長期間運転に成功した。安定したビーム運転に問題はないが、熱負荷を軽減するための改善点が見つかった。そのため、これ以上の入射パワーが要求されるビーム運転では更なる発熱対策が必要となる。また、フィードバックのシステム面でもいち早くインターロック等に対応できるような対策が必要となる。また増加した X 線への対応も必須である。

参考文献

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