

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)}, 宍戸寿郎^{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)}, Eiji Kako^{C)}
^{A)} Nippon Advanced Technology
^{B)} K-vac

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

Abstract

An injector cryomodule for the cERL is required to accelerate CW electron beams of 10 mA from the beam energy of 500 kV to 5 MeV. The injector cryomodule contains three 2-cell cavities equipped with two input couplers and five HOM couplers. The operating accelerating gradient (Eacc) of the 2-cell cavities was successfully demonstrated at 7.0 MV/m in CW operation. Three cavities have been stably operated with beam energy of 5 MeV in the injector section. The current status of the cERL injector cryomodule is described in this paper.

1. はじめに

KEK は、将来計画として 3 GeV-エネルギー回収型ライナック (ERL) の開発を進めており、その実証機として 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 の入射部クライオモジュールでは、10 mA の電子ビームを 500 keV から 5 MeV まで加速することを目標としている。今までのビーム運転において、0.3 μ A の電子ビームを 5 MeV まで加速する安定した運転ができたので、その状況を報告する。

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は、3 台の 2-cell 超伝導加速空洞から構成される[1, 2]。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[3]。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[4]。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キチューナーシステムを採用している。また、外部磁場の影響を遮蔽するために空洞は、磁気シールドで覆われ、その外側は液体ヘリウム容器となるヘリウムジャケットで囲まれている。外部からの熱侵入を抑制するために 5 K パネルや 80 K シールドによる熱遮蔽が、真空槽内に取り付けられている。また、CW の入射高周波電力は 25 kW と 300 kW の 2 台のクライストロンから 3 空洞に分配され、6 本のインプットカップラーに供給される。

3 GeV-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、インプットカップラーで 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、十分な冷却を考慮する必要がある。

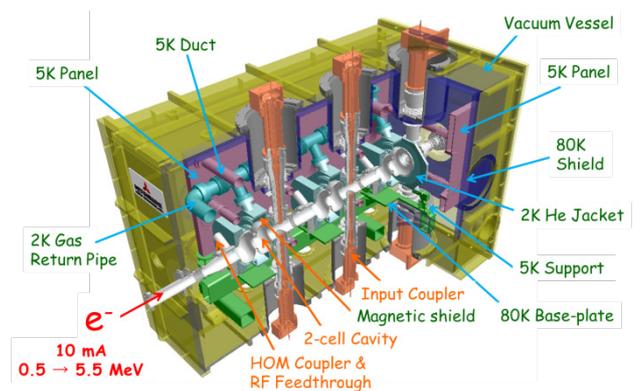


Figure 1: cERL injector cryomodule.



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 2 K にまで冷却しなければならない。最初にヘリウムガスで徐々に冷却し、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。これまでに行った入射器クライオモジュールの冷却サイクルの運転状況を Fig 3 に示す。1st cool-down では低電力試験として、チューナー、ピエゾストローク測定、ケーブルキャリブレーション、外部 Q 値測定、上下インプットカップラーの位相調整を行い、その後室温でのカップラーコンディショニングを行った。2nd cool-down では大電力試験を行い、パルスエージング、CW 運転での最大加速電界の確認、Q 値測定、ダイナミックロス測定、HOM の RF フィードスルーでの発熱観測などを行った。3rd cool-down は電子ビームを通して入射部のビームコンディショニングを行った。8 週間にわたって行われた 4th cool-down での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。運転中に夜間は冷却を中断しているため、次の冷却が始まる翌朝までに 45 K に空洞温度が上昇し、週末には冷凍機を停止するため 140 K にまで上昇する。通常平日の午前中には冷却を再開し、午後から準夜までの 10 時間程度のビーム運転中は 2 K を維持している。

Year	2012	2013	2014
Cryomodule Assembly of Injector Cryomodule	4 6		
1 st cool-down		9 Low RF power tests of Injector Cryomodule Coupler conditioning at RT	
2 nd cool-down		1 High RF power tests of Injector Cryomodule	
3 rd cool-down		4 Beam commissioning of Injector section	
4 th cool-down		5 Construction of Re-circular ring	
5 th cool-down		11 Beam commissioning of Main Linac section	
6 th cool-down		1 3 Beam commissioning of Re-circular ring	

Figure 3: History of cooling-down cycles.

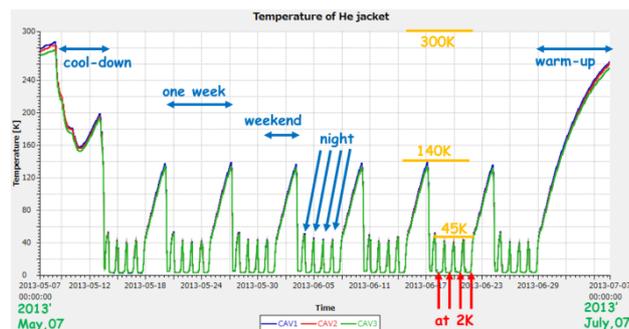


Figure 4: Cavity temperature during a cool-down period.

4. ビーム運転

4th cool-down におけるビーム運転で入射器空洞の運転加速電界の履歴を Fig 5 に示す。週明けの月曜日は空洞の冷却に費やされるため、ビーム運転は火曜日から金曜までの一週間に 4 日間行われることになる。4th cool-down のビーム運転中は、空洞のトラブルによるトリップが一回もなく、目標としていた加速電界 ($E_{acc} = 7.2 \text{ MV/m}$) で安定した連続運転が行われた。最後の週のみ、冷凍機側のヘリウム容量不足により平均加速電界を下げて運転しなければならなかったため、 6.5 MV/m に下げられた。

入射器空洞の一日の詳しい運転状況を説明する。入射器空洞を立ち上げるには、まず最初にエイジングを行う。一日の加速電界の様子を Fig 6 に示す。

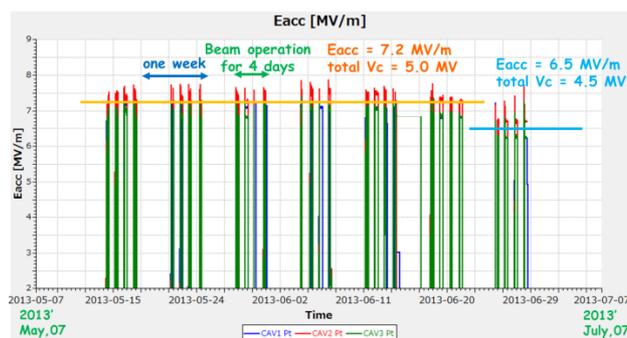


Figure 5: Accelerating gradient of three cavities with beam operation for seven weeks.

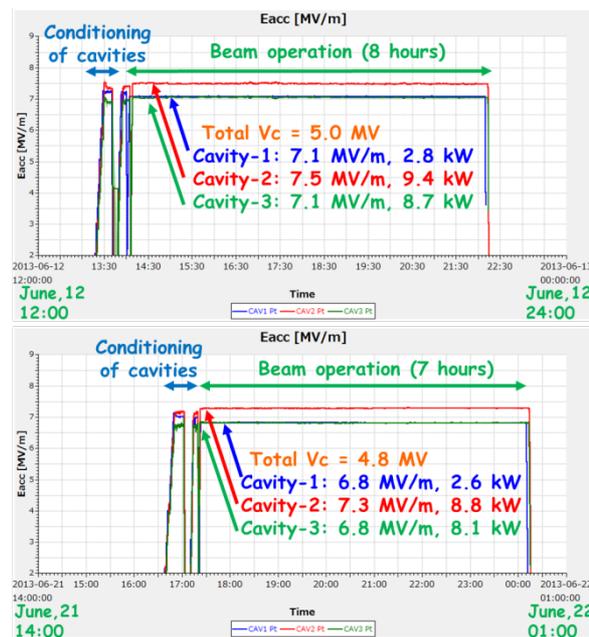


Figure 6: Operational accelerating gradient during stable beam operation for one day.

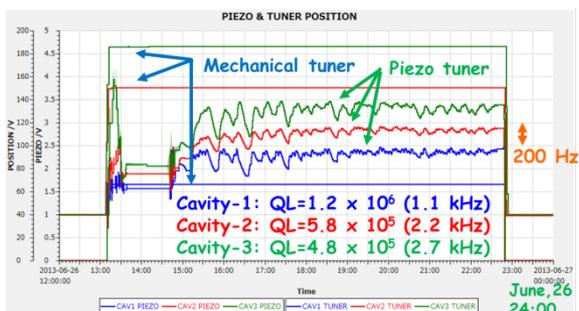


Figure 7: Applied voltage of three piezo tuners with feedback control of cavity gradients.

空洞エイジングは最初に加速電界を 1.0 MV/m まで上げてステップモーターによる周波数調整とピエゾ素子に電圧を印加してチューニングを行い、通常状態にして運転できることを確認した後に、一旦入射高周波電力を落としてから通常運転に切り替える。空洞#1~#3 はそれぞれ 7.1 MV/m, 7.5 MV/m, 7.1 MV/m (Total Vc = 5.0 MV) で安定した運転が行われていることが示されている。1 日最大 8 時間の運転が行われたが、その間一度のトリップすることなく、加速電界は非常に安定した運転が継続されている。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、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いるため、200 Hz 程度以下の変動で抑えることができ、安定した加速電界を保っている。

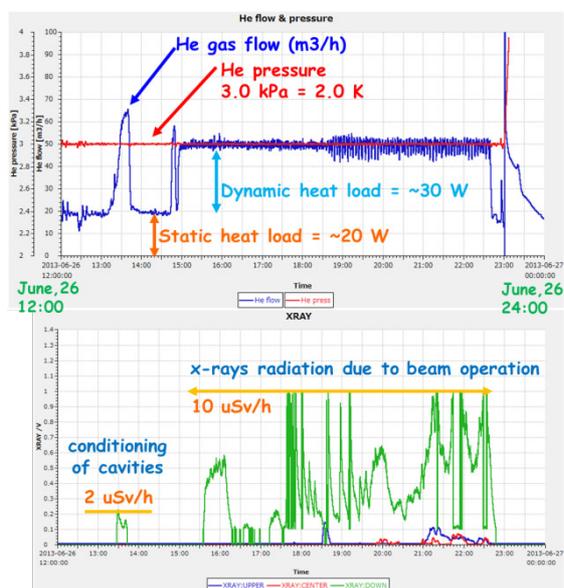


Figure 8: He-gas flow and He-pressure at 2K line (top) and x-ray radiation level near the injector cryomodule (bottom).

Fig 8 の上のグラフは冷凍機回収系のヘリウムの流量と圧力、下のグラフは入射器クライオモジュールのビームライン部の上流部と下流部、およびクライオモジュールの側面部に設置された、放射線強度のレベルを表している。入射器空洞を 2 K に冷却するために、液体ヘリウムの圧力を 3 kPa まで減圧する。運転中は熱負荷でヘリウムが気化しヘリウム流量は上昇するが、圧力に変動はなく制御できており、2 K を維持できていることがわかる。3 空洞で加速電圧 5 MV でのビーム加速運転中のダイナミッククロスは ~30 W, スタティッククロスは ~20 W となり、予想よりも多い結果となった[5]。X 線については、電子ビームが通っていない状態では下流部に 2 μ Sv/h 程度の放射線を検知しており、電子ビームが通った状態では 10 μ Sv/h 程度まで上がり、その他の部分では運転状況により変化するが数 μ Sv/h 程度の放射線が出ていることがわかった。

5. クライオモジュール内の温度変化

Fig 9 の上 2 つのグラフは上がヘリウム液面計のレベルのグラフで下がヘリウムジャケットの温度である。ヘリウム液面計のグラフを見てわかるが、運転中は空洞側の液面を一定に維持して運転できていることがわかる。ヘリウムジャケットの温度変化はわずか 0.1 K 以下で、空洞の温度を維持できていることがわかる。

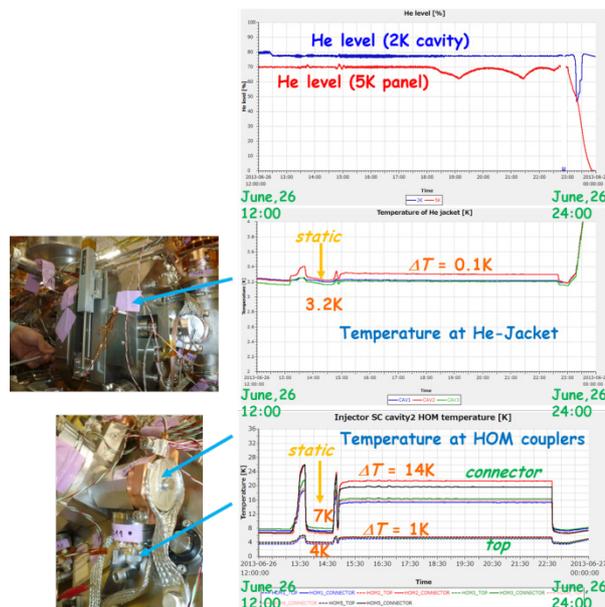


Figure 9: He-levels of 2K cavity and 5K panel (top), temperatures at He-jacket (middle) and temperatures near HOM couplers (bottom).

Fig 9 の下のグラフは空洞 # 2 の 5 台の HOM の温度変化を示す。Top 部分は温度上昇が 1 K に対しコ

ネクター部分は 14 K の上昇がある、これは HOM コネクター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[5]。

Fig 10 は入力カップラーの温度変化を示しており、上から ニオブ入力ポート、5 K アンカー、5 K と 80 K のアンカー中間の外導体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なっている。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 1.8 K, 3.3 K, 13 K となる。また 5 K アンカーのグラフと Fig 7 のピエゾの動きが似ていることから、周波数の僅かな変化の原因として 80 K での温度変化との何らかの関連が想像される。

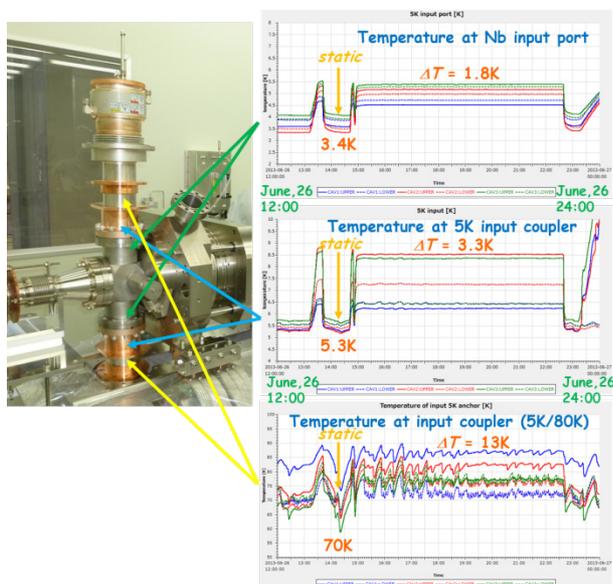


Figure 10: Temperatures at Nb input ports (top), temperatures at 5K thermal anchors (middle) and temperatures at outer conductors between 5K and 80K anchors (bottom).

Fig 11 は上から 80 K アンカー、ドアノブ、内導体の温度変化である。運転中においてドアノブ、内導体は温度上昇が大きいので、冷却水、送風機による冷却などの対策をしているが、もし対応をしなければ、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温度上昇の対策は必須である。

6. まとめ

入射器クライオモジュールにおいて低電流ではあるが、CW の電子ビームで 0.5 MeV から 5.0 MeV の安定した長期間運転に成功した。安定ビーム運転には問題点はなかったが、HOM カップラーでの熱負荷を軽減するための対応に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、HOM カップラーの RF コネクター部での更なる発熱対策が重要である。

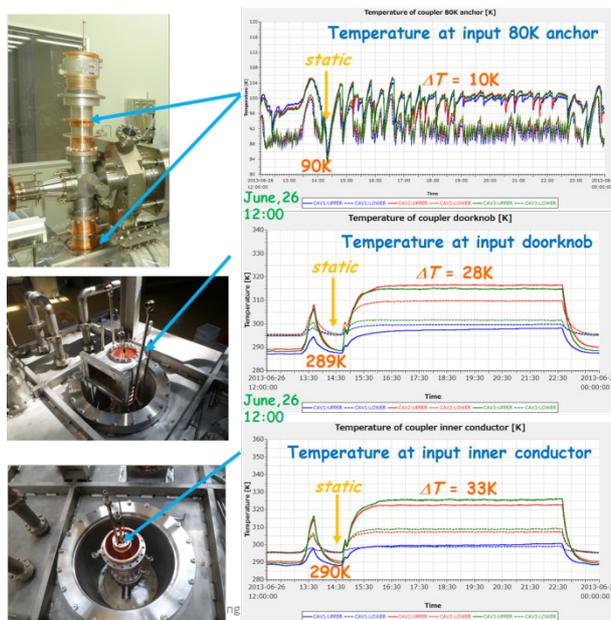


Figure 11: Temperatures at 80K anchors (top), temperatures at doorknobs of input couplers (middle) and temperatures at inner conductors (bottom).

参考文献

- [1] S. Noguchi, et al., "Present status of superconducting cavity system for cERL injector Linac at KEK", Proceedings of IPAC2010, Kyoto, Japan, (2010) p2944-2946.
- [2] E. Kako, et al., "Construction of injector cryomodule for cERL at KEK", Proceedings of IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA, (2012) p2239-2241.
- [3] E. Kako, et al., "High power tests of CW input couplers for cERL injector cryomodule", Proceedings of IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA, (2012) p2230-2232.
- [4] K. Watanabe, et al., "Status of development of the cERL superconducting injector Linac", Proceedings of LINAC20, Tsukuba, Japan (2010) p401-403.
- [5] E. Kako, et al., "High power tests of injector cryomodule for Compact-ERL", Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, (2013) p2340-2342.