

KEK STF クライオモジュールのビームパイプ再接続作業における クリーンアセンブリ環境の構築

CONSTRUCTION OF CLEAN ASSEMBLY ENVIRONMENT FOR BEAMPIPE RE- ASSEMBLY WORK AT STF-2 CRYOMODULES

今田信一^{#, A)}, 浅野峰行^{A)}, 山田浩気^{A)}, 泰中俊介^{A)}, 石原将治^{A)}, 菊池祐亮^{A)},
岡田昭和^{B)},
阪井寛志^{C)}, 加古永治^{C)}

Shin-ichi Imada ^{#, A)}, Mineyuki Asano^{A)}, Hiroki Yamada^{A)}, Shunsuke Tainaka^{A)}, Shoji Ishihara^{A)}, Yusuke Kikuchi^{A)}
Terukazu Okada^{B)}
Hiroshi Sakai^{C)}, Eiji Kako^{C)}
^{A)} Nippon Advanced Technology
^{B)} K-vac

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

Abstract

One of the problems in superconducting cavities is degradation of cavity performances due to field emission by particle contaminations. A slow pumping system with a particle counter in vacuum was developed. A clean assembly environment using the system was built and re-assembly work of the beam pipe in the STF-2 cryomodule was successfully carried out. The excellent cavity performance during the beam operation was confirmed. These results are reported in this paper.

1. はじめに

ILC のための超伝導空洞の基本技術を確立するために STF クライオモジュールが建設された[1]。STF クライオモジュールはキャプチャークライオモジュール、STF2 クライオモジュールで構成され、STF2 クライオモジュールは 12 台の 1.3 GHz、9 セル TESLA-like 空洞を含む (Fig. 1)。STF2 クライオモジュールの建設は高圧ガス認可の後、2014 年に完成した。12 台の超伝導空洞のたて測定、空洞連結作業、低電力試験が 1st cooldown の間に行われた[2]。2015 年の 2nd cooldown の間に大電力試験が行われた[3]。

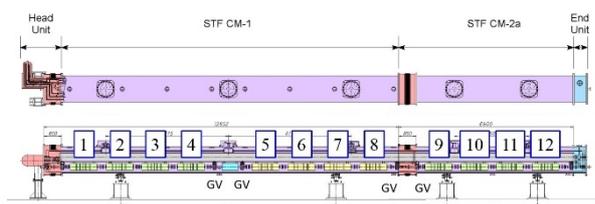


Figure 1: Layout of STF-2 cryomodule. Numbering of cavities are also described in STF-2 cryomodule.

STF における小さなクリーンルームとトンネル搬入口のため、空洞連結作業と STF2 クライオモジュールの組み立てには複雑な方法がとられた。ここで、たて測定後の連結作業とその結果について簡単に述べる。まず、たて

測定後に 4 台の超伝導空洞がクラス 10 のクリーンルームにおいて連結された。2 組の連結された 4 台の空洞は STF トンネルに搬入され、ローカルクリーンブースにおいて連結され 8 台の空洞が組み込まれた CM1 部分が完成した。残りの 4 台の空洞をクリーンルームで連結した後、これらの空洞は CM2a 部分に組み込まれトンネルに搬入された。最後に、ローカルクリーンブースを用いて CM1 と CM2a を連結し STF2 クライオモジュールが完成した。その後 STF2 クライオモジュールを用いて大電力試験が行われた。残念ながら、Fig. 1 に示した#5、#6、#7 の 3 台の空洞はひどいフィールドエミッションにより空洞性能は劣化した[3]。STF トンネルでのローカルクリーンブースにおける空洞連結作業の時に以下の理由によりダストが混入したためだと考えられる。

- ローカルクリーンブース内に層流が作れない
- ゲートバルブを開けた時の急な Ar ガスパーズ

急なパーズは#4 と#5 空洞の間のゲートバルブが開けられた時に行われた。この時、#8 と#9 空洞の間のゲートバルブは開けられなかった。2019 年、STF2 クライオモジュールを用いてビーム運転が計画された[4]。上に述べた理由により#8 と#9 空洞の間のゲートバルブを開けた時に再び空洞が劣化することが懸念されたため、ローカルクリーンブース、空洞連結作業、真空作業を改善して CM1 と CM2a の間を再組立てすることを決定した。

この論文において、ローカルクリーンブースでの作業、真空作業の改善について述べ、その改善されたクリーン作業による実際の STF2 クライオモジュールの再組立ての作業の様子とその結果を示す。

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

2. クリーンな組み立て作業の改善

2.1 新しいローカルクリーンブース

これまで用いてきたローカルクリーンブースを改善するために、新しいクリーンベンチを準備した。Figure 2 は KOACH[5]と呼ばれる新しいローカルクリーンベンチを用いた新しいローカルクリーンブースの概略図を示す。

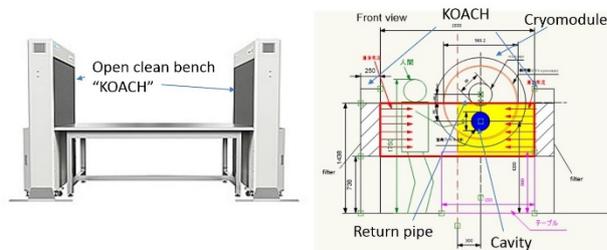


Figure 2: (Left) the open clean bench “KOACH”. (Right) Conceptual design of new local clean booth for STF-2 cryomodule. Yellow area is estimated to give ISO class 1 clean environment by using KOACH.

KOACHによりISOクラス1のクリーンな環境ができる。クリーンにしたい空間を別のクリーンシートなどで覆わなくても、ISOクラス1のとてもクリーンな空間が互いに向かい合ったフィルターによって作られる。これがKOACHの概念で超伝導空洞のためのいくつかのクリーンルームもこのKOACHを用いて作られている[6]。Figure 2の右図はKOACHを用いてローカルクリーンブースを作るための概念設計である。クライオモジュールのリターンパイプにより作業領域において層流のダウンフローを作ることができなかつたので、以前の組み立て作業においてクリーンな層流を得ることができなかつた。KOACHによる横からの層流により作業領域においてクリーンな環境が作られる。さらに、Fig. 2の右図に示すようにこのクリーンな空間において片側の層流を作業者が遮っても、もう一方の層流によりクリーンな環境が保たれることがわかつた[7]。したがって、Fig. 2の右図に示すように、クリーンな空間の半分が黄色で示した作業空間を完全にカバーする。

2.2 スローポンプ、ベントシステム

Figure 3にスローポンプ、ベントシステムの写真を示す。Figure 4は超伝導空洞のためのスローポンプ、ベントシステムの概略図を示している。スローポンプシステムはEURO-XFELの建設に用いられたシステムと同様である[8]。しかしながら、我々のシステムには排気とベント中のパーティクルを測定するために真空パーティクルモニター[9]が取り付けられた。さらに、ゲートバルブをゆっくりと動かすために全てのバルブはマニュアルでコントロールされる。これは、ゲートバルブを動かすことによるパーティクルの発生を防ぐために必要である[10]。スローポンプとベントの速度はマスフローメータによってコントロールされスローポンピングの間、マスフローメータは径の小さな配管でできたバイパスラインを通るフローをコントロールする。圧力が100 Pa以下になると、十分なコンダクタンスを得るために40 mm径の大きな配管のメインポンプラ

インに切り替えられ、最終的に、ターボ分子ポンプによって真空排気される。スローベントのために窒素ガスが使われスローベントラインにはディフューザーが取り付けられている。圧力はクリスタルイオンゲージで測定される。真空パーティクルモニターのダイナミックレンジは0.3 μmから3.6 μmである。スローポンプ速度は典型的に0.6 l/minでベント速度は0.2 l/minである。

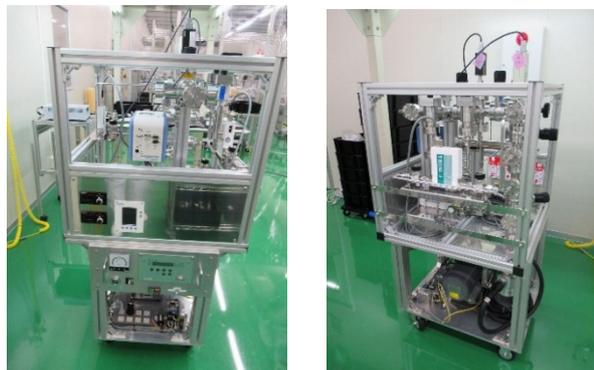


Figure 3: Picture of slow pumping & venting system.

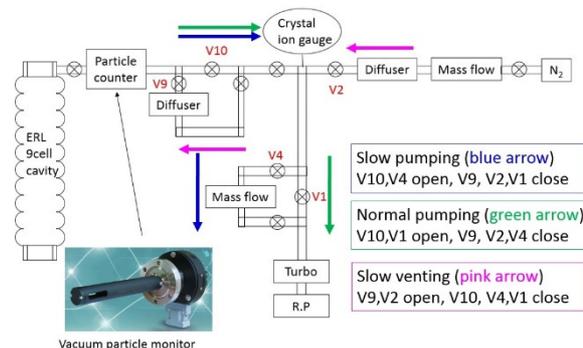


Figure 4: Detailed block diagram of slow pumping & venting system with 9cell cavity and valve assign (red).

3. STF2 クライオモジュールの再組立て

Figure 5はCM1とCM2aの間の再組立ての時の実際のクリーンブースの配置を示す。Figure 6は新しいクリーンブース、スローポンプ、ベントシステムの詳しいセットアップを示す。

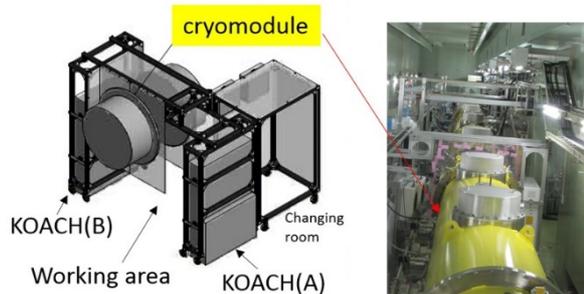


Figure 5: Actual configuration during the cryomodule reassembly work between CM-1 and CM-2a.



Slow pumping system KOACH (A) Changing room STF-2 cryomodule KOACH (B)
Figure 6: Detailed setup of clean booth in Fig. 5.

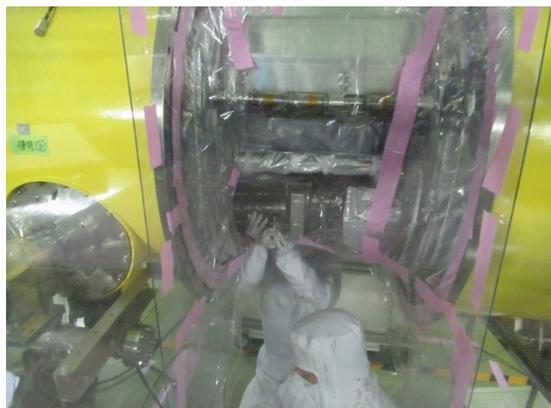


Figure 7: Reassembly work of bellows in STF-2 cryomodule.



Figure 8: (Left) Dried bellows in a clean room. (Right) Clean work in a local clean booth by using ionized gun.

Figure 7 は新しいクリーンブースでのベローズの再組立ての様子を示す。KOACH によって作られた ISO クラス 1 の環境を保つために、ベローズ以外の全てのクライオモジュールのコンポーネントはあらかじめ帯電防止ビニールフィルムで養生された。2 人の作業者のうち一人がクライオモジュールの下でベローズを支え、もう一人がベローズのボルトを外すために KOACH(A)側からアクセスした。KOACH(B)からのフローにより再組立て作業中のベローズ位置でクリーンな層流が保たれた。ベローズを取り外した後、このベローズと必要な真空部品を超純水で超音波洗浄しクラス 10 クリーンルームにおいて一晩乾燥させた (Fig. 8(left))。最後に、ベローズは 2 つのゲートバルブに再接続された。このクリーンな組み立て作業の間、全てのボルトとボルト穴はイオンガンによって洗浄された (Fig. 8(right))。

次に、スローポンプ、ベントシステムを用いてこのベ

ローズを排気した。Figure 9 はスローポンプシステムのセットアップと排気中のフローと圧力を示す。120 °C、68 時間のベーキングの後、真空圧力は 4×10^{-5} Pa に到達した。

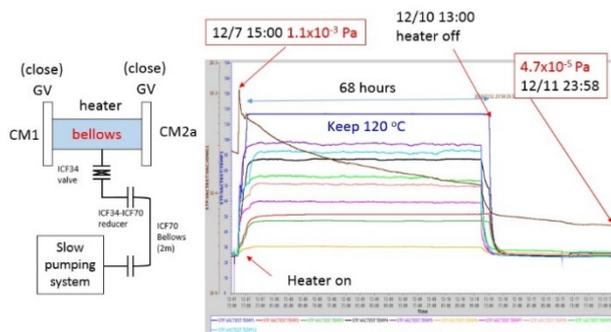


Figure 9: Setup of slow pumping of bellows (left) and its pumping results under baking (right). Brown line shows the vacuum pressure and other lines show the measured temperatures at slow pumping line. Blue line shows the temperature at bellows.

排気中にベローズ内にパーティクルが入るかどうかは重要なので、真空パーティクルモニターを用いてベローズへのパーティクルの移動を測定した。Figure 10 はスローポンプ、ベント中のフローレートを示す。

Figure 10 からわかるように、スローポンプシステムを用いてゆっくりと排気することができた。測定されたフローはマスフローコントローラによって 0.6 l/min で安定にコントロールされ 100 Pa に到達するのに 40 分かかった。100 Pa に到達後、スローポンプシステムにおけるゲートバルブを切り替えることで通常排気に変更した。最終的に、 10^{-5} Pa の真空度に到達した。このシステムを用いて排気だけでなくベントもコントロールできた。Figure 10 の右下図はベローズへの窒素ガスによるスローベント中に測定されたフローを示す。フローレートは 0.2 l/min にコントロールされた。このシステムによって、以前の作業中に起こったような急な排気、ベントを避けることができた。

Figure 11 は排気中の真空パーティクルモニターによって測定されたパーティクルカウントの結果を示す。3 回のパーティクルカウントの上昇が見られた。まず、スローポンプ中に 0.3-0.5 μm のサイズのパーティクルのカウントが 9 個増えた。次に、通常の排気に切り替えた後、ターボ分子ポンプの運転を開始したときに 0.3-0.5 μm のサイズのパーティクルのカウントが 46 個増えた。ゲートバルブの開閉はゆっくり行っていたので、バルブの切り替えでスローからノーマルの排気に切り替えた時にパーティクルの上昇は見られなかった。パーティクルはゲートバルブからではなく TMP 自身から発生したと考えられる。3 つめは、Fig. 11 の左上の図からわかるように突然のパーティクル上昇が見られた。この時、スローポンプラインのフランジを締めていたので、この作業がパーティクルを発生させたと考えられる。スロー排気を始めてから全部で 125 個の 0.3-0.5 μm のサイズのパーティクルが見られた。このベローズの約 3 日のベーキングと冷却の間、

パーティクルの上昇は見られなかった。マスフローコントローラーによる0.2 l/minのゆっくりとしたフローレートのおかげでスローベントの間にパーティクルの上昇がなかった。最後に、Fig. 9に示すようにICF34のバルブを閉じてCM1とCM2aのゲートバルブを開けて真空作業は完了した。

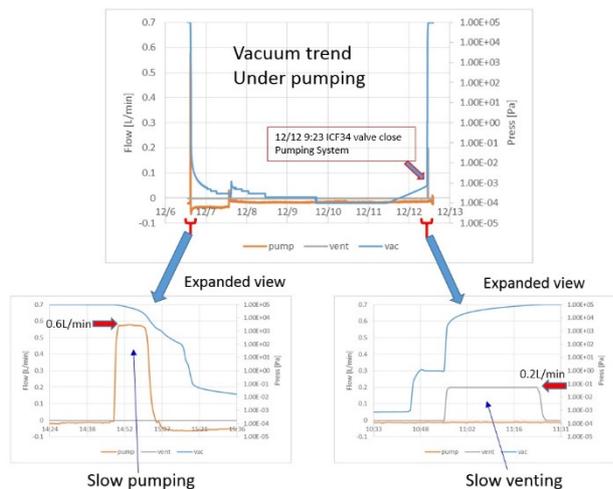


Figure 10: (Top) Vacuum pressure and flow rate history under baking of bellows. (Bottom left) Expanded view when we start slow pumping (Bottom right) Expanded view when we start slow venting. Under venting, the ICF34 valve have already closed.

ビーム試験のための STF2 クライオモジュールの冷却後、これらの空洞のひどいフィールドエミッションは見られなかった。ビーム運転の間、空洞の加速勾配は ILC クライオモジュールのターゲットである 32 MV/m 以上をキープできた[4]。この新しいローカルクリーンブースとスローポンプ、ベントシステムはこれまでに述べたクライオモジュールの再組立てだけでなくビームラインの建設にも使われた。改善されたクリーンな組み立て作業によりひどいフィールドエミッションを避けることができたので、このスローポンプ、ベントシステムは他のクライオモジュール組立てにも使用された[11]。

STFでのビーム試験が終了した後、Fig. 11で見られたTMPの運転時に出たパーティクルを検証する為、切り離し時に一時大気に曝した後、洗浄をしていないスローポンプシステムで、パーティクルカウンターを真空と大気圧で封じ切って再度測定を行った。Figure 12の上側に大気圧封じ、下側に真空封じの結果を示す。双方ともTMPのON/OFF時に0.3-0.5 μmのサイズのパーティクルのカウントがあり、またスクロールポンプのON/OFF時にもカウントが見られた。封じ切っているため、これらはポンプからではなく、起動停止中に起こる振動が原因と考えられる。従って Fig. 11でのTMPの振動のものと考えられる。

この検証実験は STF のクライオモジュール接続環境ではなく、別途、クリーンルーム内での実験で振動環境が違う。また、上記クライオモジュール接続作業後にさらにこのスローポンプ、ベントシステムにて、STF2のビーム

ライン接続作業を行い、そこでの作業時にこのシステムにさらにパーティクルが増えた可能性もあり、Fig. 12で見られたパーティクル数の上昇については今後詳細に調べる予定である。

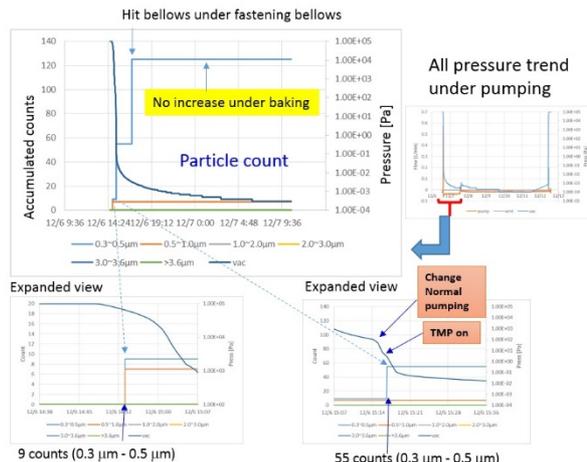


Figure 11: (Top right) Vacuum pressure and flow rate history under baking of bellows. (Top left) The measured accumulated particle counts when we start slow pumping (Bottom left) Expanded view of top left figure. (Bottom right) Expanded view of top left figure under changing normal pumping and TMP on.

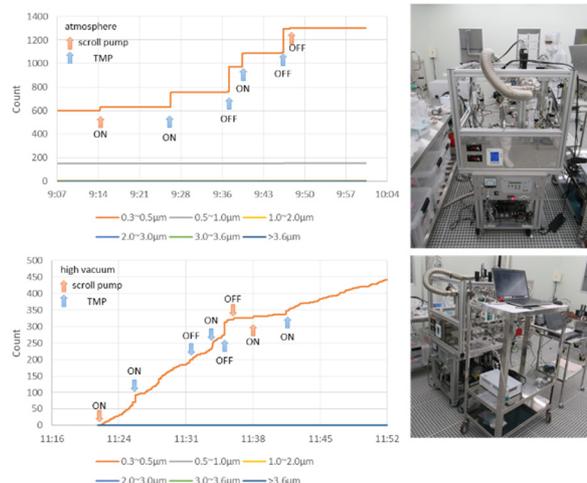


Figure 12: (Left Top) The measured accumulated particle counts in atmospheric pressure when the pump is turned on or off. (Left Bottom) The measured accumulated particle counts in high vacuum pressure when the pump is turned on or off. (Right) Picture of system under measurement.

4. まとめと今後の展望

STF2 クライオモジュールの再組立てのため、クリーンな組み立て作業環境を構築した。KOACHと呼ばれる新しいクリーンベンチが準備され STF2 再組立て作業のために最適化された。スローポンプ、ベントシステムは排気とベントの間に空洞にパーティクルを持ち込ませる大きな

乱流を作らないように開発された。さらに、パーティクルの移動をモニターするために真空パーティクルモニターが準備された。これらの改善により CM1 と CM2a の間のベローズの再組立ては完全にクリーンな環境のもとで行われた。このスローポンプ、ベントシステムを用いることで空洞に持ち込まれるパーティクルは劇的に抑制された。再組立て後のビーム運転においても STF2 クライオモジュールの 7 台の超伝導空洞において 32 MV/m 以上の平均加速勾配を達成した。この後 2020 年に STF2 クライオモジュールに新しい超伝導空洞のインストールを計画している。STF2 クライオモジュールの高い性能を保つために、これらの改善されたクリーン作業が手助けとなるだろう。

参考文献

- [1] ILC Technical Design Report (2013). <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report/>
- [2] T. Shishido *et al.*, “Assembly and Cool-Down Tests of STF2 Cryomodule at KEK”, Proceedings of SRF2015, TUPB109, Whistler, BC, Canada.
- [3] Y. Yamamoto *et al.*, “High Gradient Cavity Performance in STF-2 Cryomodule for the ILC at KEK”, Proc. of IPAC’16, Busan, Korea, p.2158 (2016).
- [4] Y. Yamamoto *et al.*, “Successful Beam Commissioning of STF-2 accelerator for ILC”, FROH05, in this conference.
- [5] KOACH C 900-F/H, KOKEN Ltd.
- [6] A. Miyamoto *et al.*, “SRF Cavity Assembly in Clean Room with Horizontal Laminar Flow”, Proc. of SRF2017, Lanzhou, China, p.620 (2017).
- [7] H.Sakai *et al.*, “Improvement for Clean Assembly work about Superconducting RF Cavity & Cryomodule to Suppress Field Emission” Proc. of PASJ2017, Sapporo, Japan (2017).
- [8] K. Zapfe and J. Wojtkiewicz, “Particle Free Pump Down and Venting of UHV-Vacuum System”, Proc. of the 13th Workshop on RF Superconductivity, Beijing, 2007, WEP74, pp. 681-684.
- [9] Wexx Co., Ltd. ; <http://www.wexx.jp/>
- [10] H.Sakai *et al.*, “Development of the Slow Pumping & Venting System” Proc. of PASJ2018, Nagaoka, Japan (2018).
- [11] T. Ebisawa *et al.*, “Preparation of the cryomodule assembly for the Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc) in Rokkasho”, TUP105, to be published in Proc. of SRF2019, Dresden, Germany.