

新しいクリーン環境下での KEK STF クライオモジュールの超伝導空洞交換作業 REPLACEMENT OF SUPERCONDUCTING CAVITY IN KEK STF CRYOMODULE BY USING NEW CLEAN ASSEMBLY SYSTEMS

山田浩気^{#, A)}, 今田信一^{A)}, 岡田昭和^{B)}, 加古永治^{C)}, 阪井寛志^{C)}, 山本康史^{C)}

Hiroki Yamada^{#, A)}, Shin-ichi Imada^{A)}, Terukazu Okada^{B)}, Eiji Kako^{C)}, Hiroshi Sakai^{C)}, Yamamoto Yasuchika^{C)}

^{A)} Nippon Advanced Technology

^{B)} K-vac

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

Abstract

One of performance degradations of superconducting cavities in accelerators is field emission due to particle contaminations. A slow pumping system and an improved clean booth have been introduced in order to solve the problem. One cavity in the STF-2 cryomodule was replaced by using these new clean assembly systems, because the cavity performance was quite poor in comparison with others. The results of the clean work are presented 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 1.3GHz、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、12 台の超伝導空洞の低電力試験が 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]。

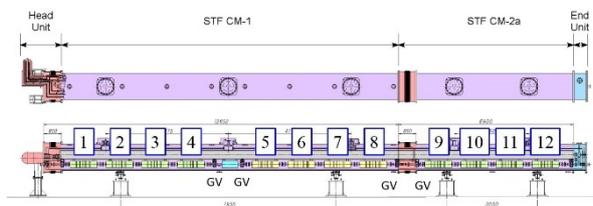


Figure 1: Layout of STF-2 cryomodule with the number of 12 cavities.

STF 棟のクリーンルームとトンネル搬入口が小さいため、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 台の空洞はフィールドエミッションにより空洞性能が劣化した

[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差圧による Ar ガスの流れ

#4 と #5 空洞の間のゲートバルブが開けられた時に、差圧による流れが発生した。この時、#8 と #9 空洞の間のゲートバルブは閉じたままであった。2019 年は STF2 でのビーム運転を予定しており、#8 と #9 空洞の間のゲートバルブを開ける必要があった。この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、トンネル内でのクリーン作業を実施した[4]。再組立て後のビーム運転においては STF2 クライオモジュールの 7 台の超伝導空洞において 33 MV/m 以上の平均加速勾配を達成した[5]。

2020 年は、さらに STF2 クライオモジュール内の空洞 #9 を空洞性能向上のために新たな窒素インフュージョン処理した空洞に入れ替える交換作業が行われた。2019 年のクライオモジュール再接続で使用したローカルクリーンブースやスローポンプシステムがクライオモジュール接続作業に極めて重要であると判明したため、今回の空洞入れ替え作業では、同じローカルクリーンブースのシステム及び全自動スローポンプシステムを使った真空作業をさらに改良を加えて CM2a の空洞入れ替え作業を行った。

この論文においてその改良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。特に、空洞組立作業時のそれぞれの必要とされるクリーン作業下の *slow pumping & venting* 時のパーティクル測定の結果を中心に述べる。

2. クリーンな組立作業

2.1 ローカルクリーンブース

今回の組立でも前回使用したローカルクリーンブースを使用する[1, 2, 3]。Figure 2 は KOACH[6]と呼ばれる

nat-hiro@post.kek.jp

ローカルクリーンベンチを用いたローカルクリーンブースの概略図を示す。

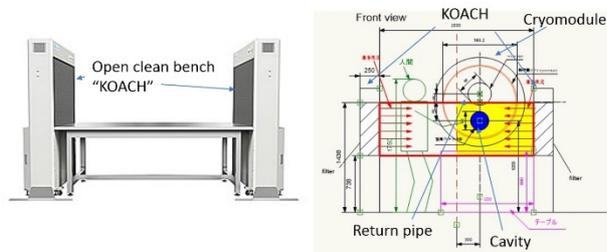


Figure 2: (Left) Open clean bench “KOACH”. (Right) Conceptual design of new local clean booth for STF-2 cryomodule. Yellow area shows ISO class 1 clean environment by using KOACH.

KOACH により清浄化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。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図である。2014 年の組み立て作業においては、モジュール上部からのダウンフローによるクリーンな層流を得ることができなかったため、今回は 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た。Figure 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分かった[7]。さらに、クライオモジュールの入り組んだ場所にある CM2a 下流側のビームパイプ接続作業においても、斜めから層流を送ることで作業場所のクリーン化も可能としている(後述)。

2.2 スローポンプ、ベントシステム



Figure 3: Picture of slow pumping and venting system.

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。前回使用した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を参考に製作され、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が取り付けられた[8,9]。我々は 2019 年のクライオモジュール作業から、更に改良を加え、全てのゲートバルブを圧縮空気制御で行い、主要なバルブは圧力を調整しゆっくりと動かすことができ、最初に設定を行えば、全自動で排気、ベントが可能となった。これにより、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ことが出来る[10]。スローポンプとベントの流速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流量をコントロールする。圧力が 100 Pa 以下になると、ターボ分子ポンプによって真空排気され、最終的に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る。スローベントには窒素とアルゴンガスが使われている。圧力はクリスタルイオンゲージ、キャパシタンスゲージ、ピラニー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。また、Q-mass を取り付けることにより、真空中の残留ガス分析が可能となった。

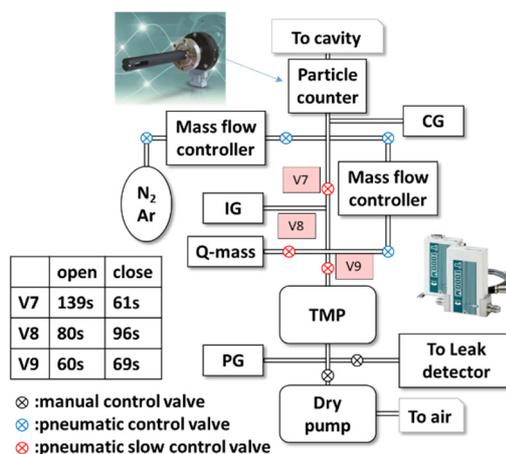


Figure 4: Detailed block diagram of slow pumping and venting system with valve assign. Table shows opening and closing time of pneumatic slow control valve (V7, V8 and V9).

3. スローポンプベントシステムの測定結果

今回 STF2 クライオモジュール CM2a の空洞#9 の交換時に、スローポンプベントシステムを使用した作業工程は、1.クリーンルーム内での空洞交換作業を完了した後、空洞を Ar ガスで満たし封じ切りを行った時。2.クライオモジュールの再接続の際、接続ビームパイプの真空引きを行った時。3.下流側のビームパイプとの接続の際、真空引きを行った時。全部で計 3 回使用した。(実際の CM2a の交換作業は参考文献[11]を参照)

3.1 CM2a 空洞の Ar スローベント

STF 棟のクラス 10 のクリーンルーム内で空洞の交換作業が終わった後、スローポンプベントシステムに接続し Ar スローベントを行った。Figure 5 は Ar スローベントを行っている写真を示す。

Figure 6 (Top) はスローポンプベントシステムを接続し、真空引きした時のポンプの流量と、各ゲージの真空圧力、ターボ分子ポンプの回転率を示し、Fig. 6(Bottom)は真空引き開始時のポンプの流量と、真空パーティクルカウンターの積算カウント数を示す。作業としては、最初にベローズの Ar ベントを行い、ベローズを空洞側と接続し、スローポンプを行い、He リークチェックを行った。真空引

きが始めた時、ポンプの流量が設定値の0.6 l/minを超えて大きくなった結果、その数秒後にパーティクルが検出された。それ以外のパーティクルの検出は、振動を与えてしまった時以外は無かった。安定した流量で真空引きが行われているのが分かる。



Figure 5: Picture of a slow pump system (left) and four-cavity after string assembly in class-10 clean room (right).

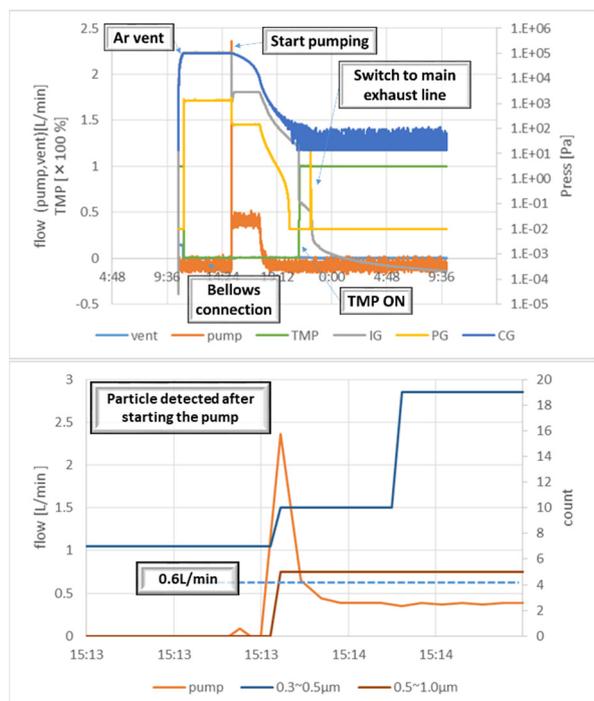


Figure 6: (Top) Trend of pumping and venting flow rate, vacuum pressure of each gauge, and turbo pump rotation rate in the connection between bellows and the cavity after string assembly. (Bottom) Pumping flow rate and particle counter when the pumping was started.

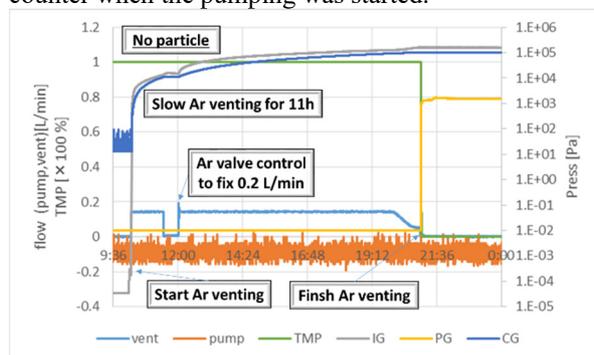


Figure 7: Trend of venting flow rate, vacuum pressure of each gauge, and turbo pump rotation rate during Ar gas slow venting.

Figure 7はリークチェックが終わった後、Ar ガスを封入するために、スローベントした時のベントの流量と、各ゲージの真空値、ターボの回転率を示す。途中、Ar のポンベ圧が弱かったため、ベントの流量が一時無くなってしまったが、修正後は、流量 0.2 l/min が安定しているのが分かる。ベントが終了し、切り離すまでの間にパーティクルの検出は無かった。Total で 19 カウント (0.3 μ m - 0.5 μ m) のみであり、Ar ベントではほとんどパーティクルが混入されなかったことが判明した。

3.2 CM1 と CM2a の再接続

CM1 と CM2a の接続は KOACH を用いた新しいローカルクリーンブースを用いて行なわれた。このクリーン環境下で空洞近傍の排気ライン用バルブにスローポンプシステムを接続し、スローで真空引きした後リークチェック、その後 Ar スローベントを行い、CM2a 側のビームパイプのゲートバルブをゆっくり開け、一日中スローで真空引きし、ベーキングを行った。Figure 8 は、ローカルクリーンブースを設置した CM1 と CM2a とスローポンプシステムの写真を示す。

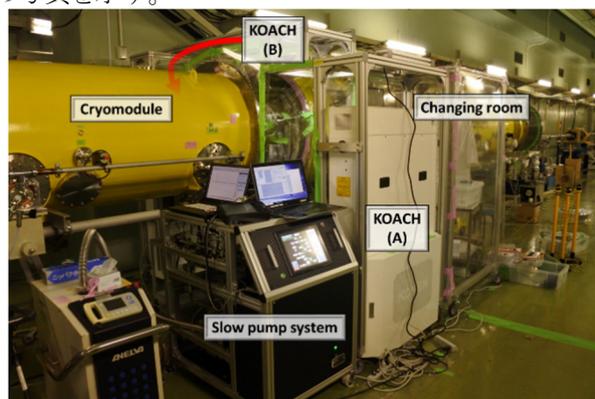


Figure 8: CM2a was connected with CM1. The slow pump system was installed in the STF tunnel with a new local clean booth.

Figure 9 (Top)は接続後、真空引き、リークチェック、Ar ベント、切り離し用の空洞に直結した GV を開け、空洞の真空引きした時の各流量と、各ゲージの真空圧力、ターボ分子ポンプの回転率を示し、Fig. 9 (Bottom)は、その時のパーティクルカウンターの積算値を示す。Figure 10 ではパーティクルの検出があった時のポンプ流量とパーティクルの積算値を示す。今回も真空引き始めの時流量が設定値より高くなる現象が起こったが、その点を除けば安定したポンプとベントが行われている。Figure 6 と違う点は、検出までの時間が、数秒だったのが数分後というところである。また、パーティクルはポンプ時のみ検出された。

Figure 11 (Top) はベーキング時に設置した熱電対の取り付け位置を示し、Fig. 11 (Bottom) はベーキング時の温度のトレンドを示す。途中ベローズの温度が低かったのでアルミホイルを巻き足して、120°C で 48h のベーキングを行った。

Figure 12 (Top) には、ベーキング中のパーティクルカウンターの積算値を示し、Fig. 12 (Bottom) には Q-mass による残留ガス分析の測定結果を示す。ベーキング中にパーティクルの検出は無く、Q-mass の測定では H₂O が

最も多く、ベーキング後に一桁落ちたことが分かる。

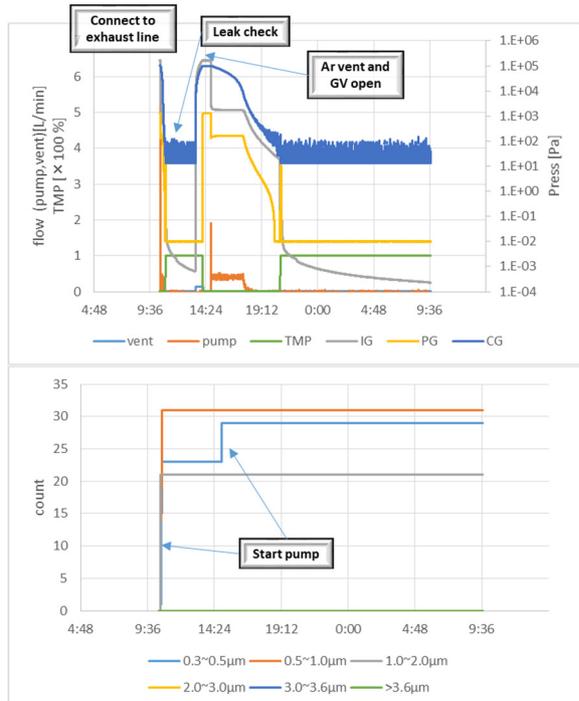


Figure 9: (Top) Trend of pumping and venting flow rate, vacuum pressure of each gauge, and turbo pump rotation rate during slow pumping in the connection between CM1 and CM2a. (Bottom) Trend of particle counter in this work.

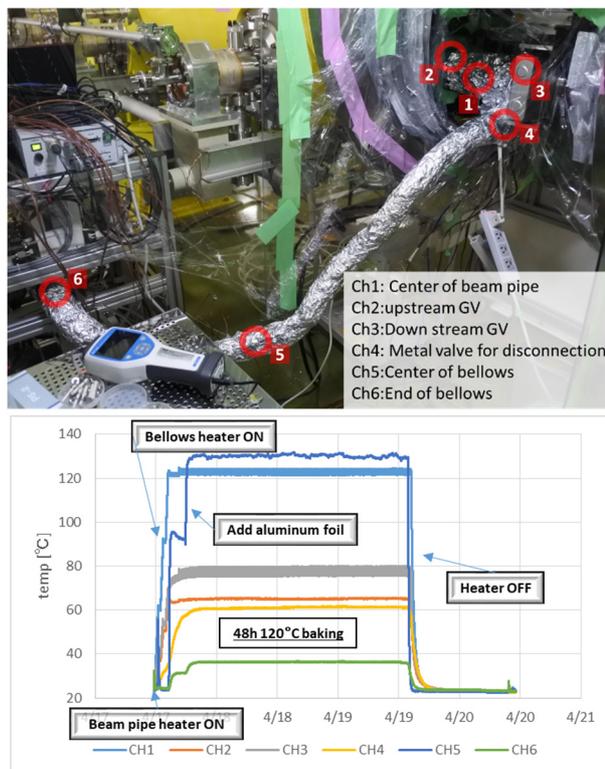


Figure 11: (Top) Picture of location of six thermocouples for baking a beam pipe and bellows between CM1 and CM2a. (Bottom) Temperature trend of each thermocouple during baking (120°C , 48h).

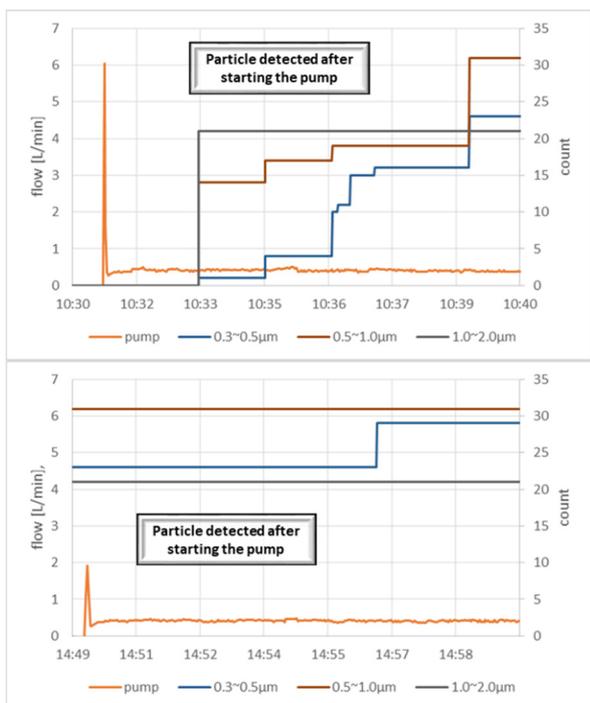


Figure 10: Trends of pumping flow rate and particle counter when the pumping was started before (Top) and after (Bottom) leak check.

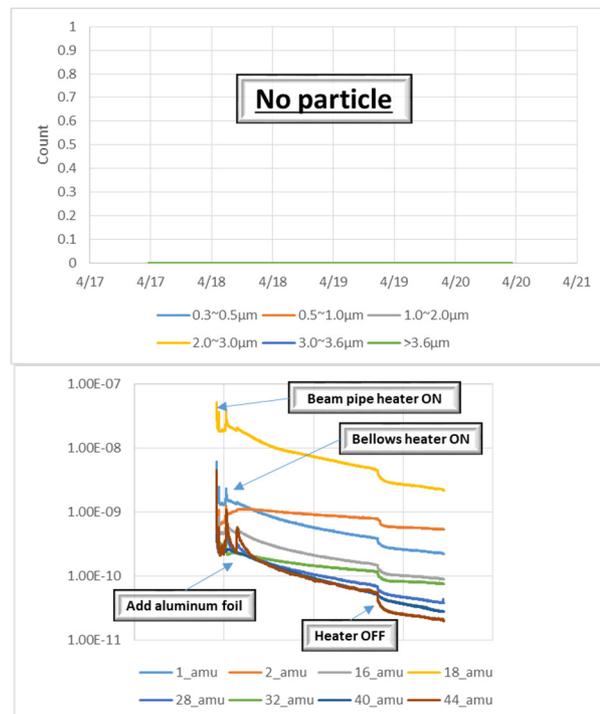


Figure 12: (Top) Trends of particle counter during baking beam pipe and bellows between CM1 and CM2a. (Bottom) Residual gas components by Q-mass measurement during this work.

3.3 CM2a 終端再接続

CM2a の終端とビームラインを接続するために、スローポンプシステムを接続し、真空引きを行いベーキング、この時イオンポンプのベーキングも同時に行う。ベーキング終了後、イオンポンプを脱ガスしCM2a 下流GV OPEN、スローポンプシステムの切り離しの為の N₂ ベントを行った。Figure 13 は接続された CM2a と終端のビームラインの写真を示す。KOACH の配置が互いに向かい合っている Fig. 8 と違い、作業場所がクライオモジュールの少し入り組んだ場所なので、片側の斜めから層流を流しこむ方法で行った。

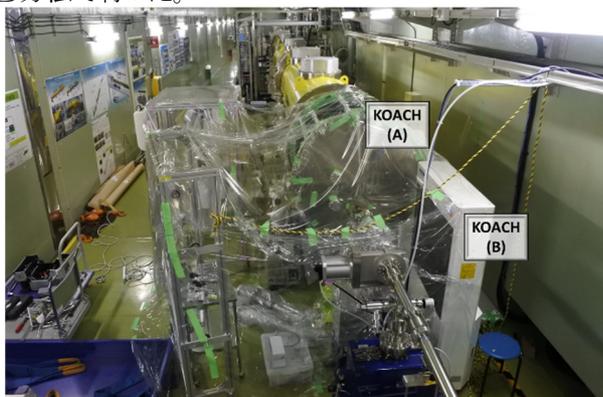
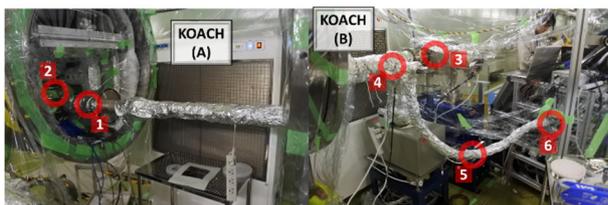


Figure 13: Picture of CM2a and beam line with the slow pump system and KOACH.



Ch1: Center of beam pipe
Ch2:upstream GV
Ch3:Down stream GV
Ch4: Metal valve for disconnection
Ch5:Center of bellows
Ch6:End of bellows

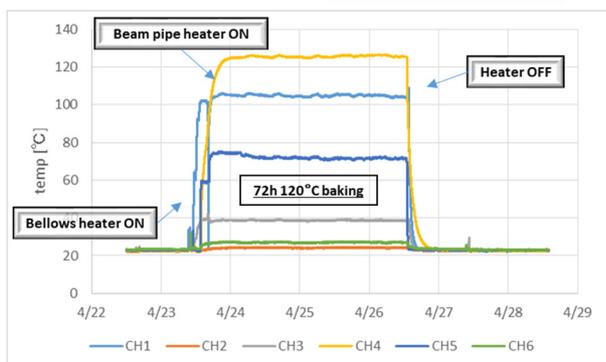


Figure 14: (Top) Picture of setup location six thermocouples for baking beam pipe and bellows between CM2a and beam pipe. (Bottom) Temperature trend of each thermocouple during baking (120°C, 72h).

Figure 14 (Top) はベーキング時に設置した熱電対の取り付け位置を示し、Fig. 14 (Bottom) はベーキング時の各場所の温度のトレンドを示す。120 °Cで 72h のベーキングを行った。

Figure 15 (Top) には、Q-mass の測定結果を示し、Fig. 15 (Bottom) にはベーキング中のパーティクルカウンターの積算値を示す。Q-mass の測定では H₂O が最も多く、ベーキング開始時には CO₂ が多く排出されているのが分かる。パーティクル測定では、最初のベーキング時にパーティクル数の増大が検出された。特に 0.5 μm ~ 1 μm で 900 カウントの上昇が見られた。この上昇は真空引きが悪かったために、超純水洗浄したベローズをヒートガンで炙ったときに、検出されたものである。すなわち、この急激な 0.3 μm ~ 1.0 μm のパーティクル数の上昇は、真空引きによって、水分が減圧時に凍り、それを炙った際に細かい微粒子となり、真空パーティクルモニターに検出されたものと思われる。その後、今回もポンプ開始の時にパーティクルが検出されたが、ベーキング中のパーティクルの検出は無かった。大量のパーティクル数の上昇が水起因であり、それ以外で大きな埃やゴミの移動は真空引きおよびベーキング時には見られなかったと思われる。なお、この真空引きおよびベーキングの際中には CM2a の GV は開いていないため、空洞へのパーティクルの混入はない。

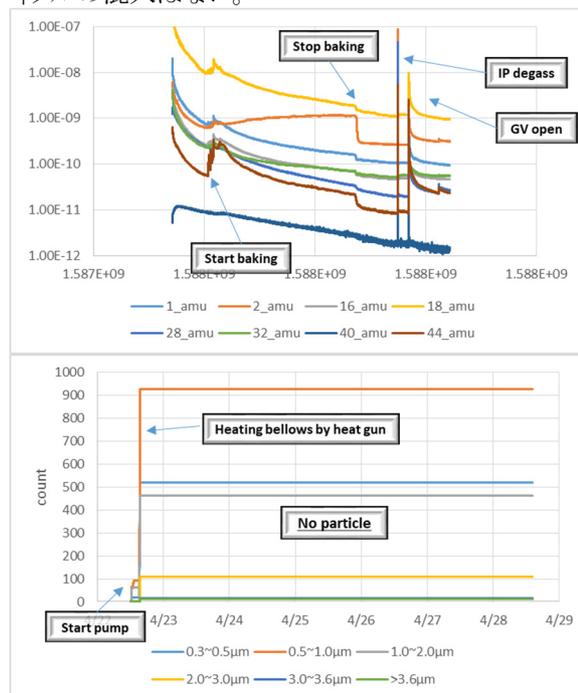


Figure 15: (Top) Q-mass measurement trends during baking beam pipe and bellows between CM2a and beam pipe. (Bottom) Trends of particle counter during this work.

Figure 16 (Top) は真空引き、ベーキング、イオンポンプ脱ガス、GV open 時のポンプ流量、各真空圧力、ターボ分子ポンプの回転率を示し、Fig. 16 (Bottom) はパーティクルの検出があった時のポンプ流量とパーティクルの積算値を示す。今回も真空引き始めの時流量が設定値より高くなる現象が起り、その数分後にパーティクルを検出している。しかし、その後ベーキングを行っているとき、および CM2a の GV を開ける際にはパーティクルの上昇は見られなかった。真空が十分に引けてからのパーティクルの移動はなかった。

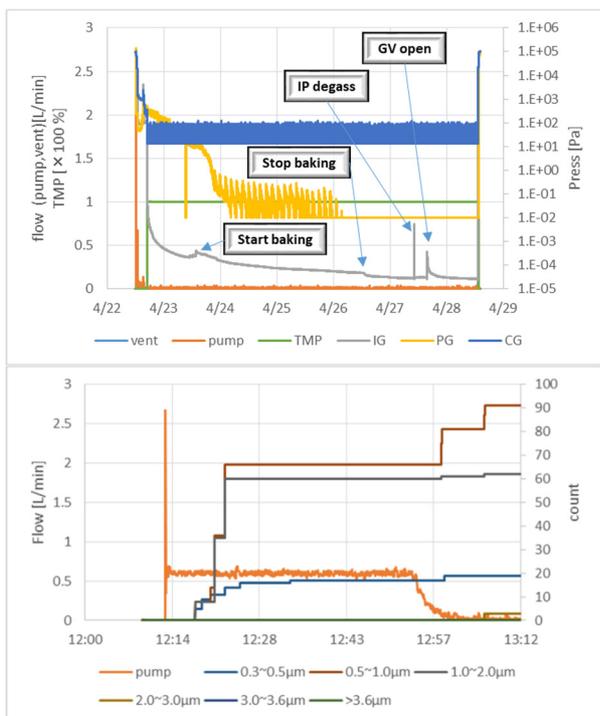


Figure 16: (Top) Trend of pumping and venting flow rate, vacuum pressure of each gauge, and turbo pump rotation rate during pumping and baking in the connection between CM2a and beam pipe. (Bottom) Trends of pumping flow rate and particle counter when particles were detected at the beginning of pumping.

Figure 17 は、Q-mass 起動直後とイオンポンプ脱ガスした後の残量ガス成分のマススペクトルを示す。水の成分が3桁も下がっていることも含めて、ベーキングによって、十分な脱ガスが出来ていることが分かる。

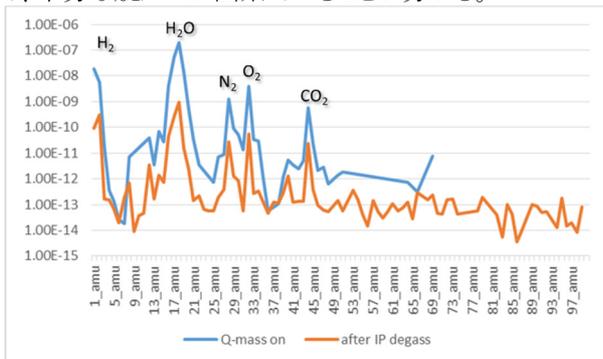


Figure 17: Mass spectrum of residual gas components just after start-up of Q-mass and after degassing the ion pump.

4. まとめと今後の展望

STF2 クライオモジュールの空洞交換のため、クリーンな組み立て作業環境を構築した。KOACH と呼ばれるクリーンベンチ、スローポンプ、ベントシステムは排気とベントの作業間に空洞内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し、それら全ての作業を自動で行うよう改良をした。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を設置した。これらの改善により CM2a の空洞交換作業は完全にクリーン

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と思われる。

今後、2021 年にビーム運転を行う予定であり、クリーン作業改善での組立を行った CM2a の空洞性能が低下することなく維持されることが期待される。なお、ポンプ開始時にオーバーシュートという問題点も見られ、自動化の細かい改善は今後の課題である。

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] S. Imada *et al.*, Construction of clean assembly environment for beampipe reassembly work at STF-2 cryomodules”, WEPI002, Proc. of PASJ2019, Kyoto, Japan (2019).
- [5] Y. Yamamoto *et al.*, “Successful Beam Commissioning of STF-2 accelerator for ILC”, FROH05, Proc. of PASJ2019, Kyoto, Japan (2019).
- [6] KOACH C 900-F/H, KOKEN Ltd.
- [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] Y. Yamamoto *et al.*, “Cavity exchange work for cryomodules in STF-2 accelerator”, (FRPP31), in this proceedings (2020).