

## STF-2 加速器のクライオモジュールにおける空洞入替作業

### CAVITY EXCHANGE WORK FOR CRYOMODULES IN STF-2 ACCELERATOR

山本康史<sup>#,A)</sup>, 加古永治<sup>A)</sup>, 梅森健成<sup>A)</sup>, 阪井寛志<sup>A)</sup>, 仲井浩孝<sup>A)</sup>, 小島裕二<sup>A)</sup>, 原和文<sup>A)</sup>, 本間輝也<sup>A)</sup>, 中西功太<sup>A)</sup>, 清水洋孝<sup>A)</sup>, 近藤良也<sup>A)</sup>, 木村誠宏<sup>A)</sup>, 荒木栄<sup>A)</sup>, 増澤美佳<sup>A)</sup>, 植木竜一<sup>A)</sup>, 岡田昭和<sup>B)</sup>, 今田信一<sup>C)</sup>, 山田浩気<sup>C)</sup>, 泰中俊介<sup>C)</sup>, 菊池祐亮<sup>C)</sup>, 早川厚<sup>D)</sup>,

Yasuchika Yamamoto<sup>#,A)</sup>, Eiji Kako<sup>A)</sup>, Kensei Umemori<sup>A)</sup>, Hiroshi Sakai<sup>A)</sup>, Hirotaka Nakai<sup>A)</sup>, Yuuji Kojima<sup>A)</sup>, Kazufumi Hara<sup>A)</sup>, Teruya Honma<sup>A)</sup>, Kota Nakanishi<sup>A)</sup>, Hirotaka Shimizu<sup>A)</sup>, Yoshinari Kondou<sup>A)</sup>, Nobuhiro Kimura<sup>A)</sup>, Sakae Araki<sup>A)</sup>, Mika Masuzawa<sup>A)</sup>, Ryuichi Ueki<sup>A)</sup>, Terukazu Okada<sup>B)</sup>, Shinichi Imada<sup>C)</sup>, Hiroki Yamada<sup>C)</sup>,

Shunsuke Tainaka<sup>C)</sup>, Yusuke Kikuchi<sup>C)</sup>, Atsushi Hayakawa<sup>D)</sup>,

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>B)</sup> k-VAC Co., Ltd.

<sup>C)</sup> Nippon Advanced Technology Co., Ltd.

<sup>D)</sup> Kanto Information Service Co., Ltd.

#### Abstract

From August 2019 to May 2020, one superconducting cavity used in the cryomodule (CM2a) installed in the STF-2 accelerator was replaced at the Superconducting RF Test Facility (STF) in KEK. The newly replaced cavity is subjected to a special heat treatment (nitrogen infusion: N-infusion) for the purpose of cost reduction for the International Linear Collider (ILC) project. The construction of the cryomodule in 2014 was carried out by the manufacturing company. However, this time, the cryomodule containing four cavities was dismantled and replaced with a new cavity in the clean room, reassembly of the cryomodule and beamline installation by KEK staffs and STF-related company persons. In September 2020, the first cool-down test after cavity replacement will be performed, and frequency tuner drive and Q value measurement will be done. In this presentation, we will report the details of first cavity replacement work and the subsequent cool-down test.

#### 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)の超伝導高周波試験施設(Superconducting RF Test Facility: STF)では、2006年から国際リニアコライダー(International Linear Collider: ILC)計画にとって基幹技術である超伝導空洞およびクライオモジュール(超伝導空洞が収納された状態の断熱真空容器の呼び名)の技術開発が進められてきた。ILCで要求されている運転スペックを満足するビーム加速試験を行うために始められた STF-2 計画は、これまで Tab. 1 のように進められており、2019 年度からは性能の良くなかった空洞を新たな熱処理法を施した新しい空洞と入れ替えるために、加速器トンネルからクライオモジュール(STF-2 のクライオモジュールは、8空洞が収納された CM1 と4空洞が収納された CM2a が合体したものである)を引き上げ、地上にて解体し、クリーンルームにて空洞を入れ替え、そして再び CM2a を組み立て、トンネルに戻すという作業を行った。この一連の作業は KEK スタッフおよび専門知識を持った専門委託員のみで行っている。ILC 建設時には、クライオモジュールが大量生産されることになるが、その際にも研究所スタッフおよび民間の専門委託員により実施されることが予想され、今回の作業はそのモデルケースになるといえる。以下の章では、CM2a の解体、空洞の入れ替え、CM2a の再組立て、CM2a のビームライン設置、の順で説明していく。

Figure 1 に CM1/2a 内の空洞位置、および各空洞の性能履歴を示す(性能履歴には Capture CM も示している)。

Table 1: Cool-Down Tests in STF-2 (incl. Plan)

Experimental period	Experimental contents
Oct~Dec/2014 [1]	Low power test
Oct~Dec/2015 [2]	Cavity performance check
Sep~Nov/2016 [3]	Eight cavities operation
Jan~Mar/2019 [4]	Beam operation w/ 10 cavities
Aug~Sep/2020	Low power test
Feb~Apr/2021	Beam operation w/ 14 cavities

#### 2. クライオモジュール(CM2a)の解体

CM2a の解体は、2019 年 8 月から始まった。まず、断熱真空槽の 대기開放を行い、CM1 と CM2a の分離、CM2a のクライオベッセルに接続されているパーツの取り外し(Warm 部カップラーやチューナー駆動部等)、ビームパイプとの切り離し、地上への移動、の順に進められた。空洞と連結しているビームラインの取り外しの際は、2018 年から導入された新型 local clean booth が用いられ

<sup>#</sup> yasuchika.yamamoto@kek.jp

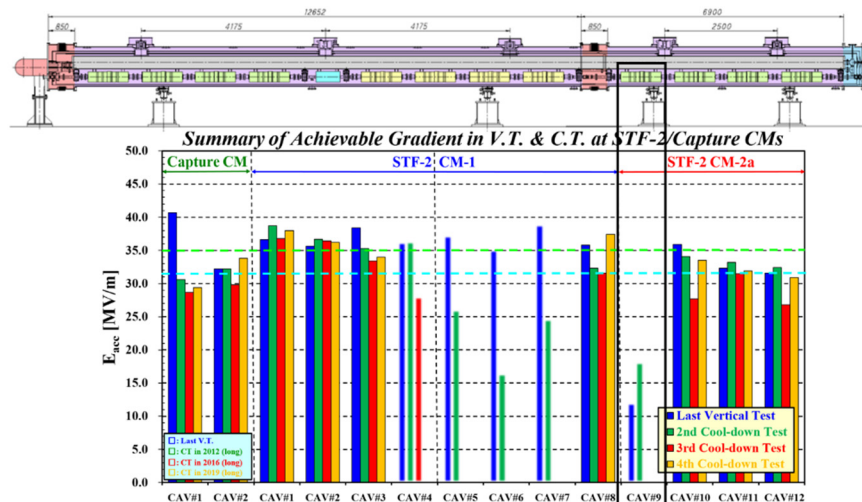


Figure 1: Cavity position in CM1/2a, and history of accelerating gradient in Capture CM and CM1/2a.

ている[5]。また、地上へ移動するために、空洞内を大気圧に戻す必要があるが、その際にはダストの混入を防ぐために *slow pumping system* が用いられた[6]。地上に引き上げた後、*cold mass* をクライオベッセルから引き出し、ハンガーに吊下げ、空洞ストリングをレールに降ろし、クリーンルーム前に移動させて、2019年の作業は終了した。

### 3. クリーンルームでの空洞入替作業

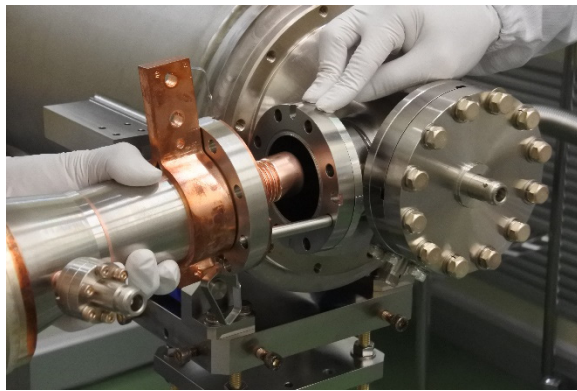
空洞入替作業は 2020 年 1 月から開始した。新たに入れる空洞は 2 月上旬に納品され、直ちに外面洗浄を行い、クリーンルーム内へと入れられた。クリーンルーム内での作業手順は以下のとおりである。

- ① 空洞ストリング(4空洞連結状態のこと)の最上流の1空洞(Fig. 1 中の Cavity#9)を切り離す
- ② 切り離れた空洞からビームパイプや *cold* 部カップラーを取り外す(これらのパーツは新たに入れ替える空洞に取り付けられる)
- ③ 切り離れた空洞をクリーンルーム外へ出し、同時に新たに入れる空洞を Class 10 エリアに入れる
- ④ 残った3空洞と新たに入れる空洞との位置をレーザー墨出し器で見ながら調整する
- ⑤ 空洞接続部と逆方向から Ar ガスを流しつつ、HOM カップラー用アンテナを取付(2カ所)
- ⑥ Ar ガスを流しつつ *cold* 部カップラー取付
- ⑦ Ar ガスを流しつつ空洞間接続用ベローズパイプと3空洞の連結
- ⑧ Ar ガスを流しつつ入れ替える空洞と3空洞との連結
- ⑨ Ar ガスを流しつつ入れ替える空洞とビームパイプ+ゲート弁との接続
- ⑩ リークチェックのために *slow pumping unit* と接続
- ⑪ *Slow pumping* 開始(約 1 日保持)
- ⑫ リークチェック(フード法含む) → 問題なし
- ⑬ *Slow ventilation* (Ar ガス使用)(約 1 日保持)
- ⑭ 空洞ストリングを Class 1000 に移動
- ⑮ ヘリウム供給配管取付
- ⑯ 空洞ストリングをクリーンルーム外へ移動・ヘリウム配管のリークチェック

2/12 から作業を開始して、1 週間後の 2/19 に全ての作業を終える工程であった。作業は極めて順調に進み、特段ミスもなく終了した。リークチェックのための *slow pumping unit* との接続時に、空洞との間をつなぐベローズ管のクリーニングを行った際、想定以上のダスト(0.3  $\mu\text{m}$  以上の微粒子)がカウントされ、しばらくの間、クリーニングに時間を要した。より安全な作業を目指すためには、極力短いベローズ管を用い、かつ、作業前に超音波洗浄を行っておく必要があると思われる。この点については、今後の検討課題である。⑪と⑬については[7]を参照されたい。Figure 2 は一連の作業の様子である。

### 4. クライオモジュールの再組立て

新たに組みあがった空洞ストリングは、温度計測線取付、チューナー取付、HOM カップラー調整、アライメントのためのターゲット座取付、等の作業のためクリーンルーム前でしばらくの間、待機状態になる。この状態での空洞のおおよその位置確認もレーザートラッカーを用いて行われた。その後、空洞ストリングはハンガーで待機していたガスリターンパイプ(GRP)の下に移動し、GRP に抱きかかえられるようにして一体になる。その後はしばらく空洞と GRP のアライメント作業になる。GRP 上部に取り付けられているサポートポストの上面を水平に調整し、また、空洞に取り付けられた入力カップラーの位置調整も行う必要がある。入力カップラーは、2枚の輻射熱シールド(5K と 80K)を貫き、クライオモジュール最外層まで出ており、最外層のポートの位置と合致している必要がある。アライメント作業は順調に進み、ILC の要求スペックである空洞位置の水平と垂直のバラつきが  $\pm 300 \mu\text{m}$  以下になった[8]。アライメント後は、温度計測線取付、熱アンカー取付(入力カップラーの熱アンカーには、従来ブレード線が用いられてきたが、今回は高純度アルミ材を導入した)、高周波ケーブル取付、ヒーター取り付け、断熱材(*super-insulation: S.I.*)巻き付け、などの細かい作業がしばらく続く。諸々の最終チェックを終え、5K 輻射熱シールドを取り付ける(輻射熱シールド取り付け後は、空洞にアクセ



(a) 入力カップラーの取付



(b) 空洞連結



(c) リークチェック用配管のクリーニング



(d) Class 10 から Class 1000 への移動

Figure 2: Assembly work in STF clean room.

ス出来なくなる)。そして、S.I.を巻き付け、その外側にさらに 80K 輻射熱シールドを取付、S.I.を巻きつけていく。これで cold mass が完成したことになる。

完成した cold mass をクライオベッセルへのインストール用レール上に移動させ、位置調整を行い、いよいよインストールになる。Cold mass とクライオベッセルはともに 6 m 程度の長さを持っているため、歪みの影響が無視できない。特に中央付近では、その歪みが最大となっており、インストール時にそのまま押し込むことが出来ず、何度か位置調整を行う必要があった。また、クライオベッセル内壁との隙間も小さく、cold mass との干渉に注意しながらインストール作業を進めていった。インストールに要した時間は1時間半であった。その後、サポートポストをクライオベッセル上面に吊下げるための治具を取り付けて(この治具はサポートポスト上面から飛び出ている位置決めピンと詰め合いの構造になっており、通すのが難しい)、クライオモジュール(CM2a)の組み立てが完了した。クライオベッセルについては、今回、残留磁場低減のための消磁作業が行われたことを附記しておく[9]。

## 5. クライオモジュールのビームライン設置

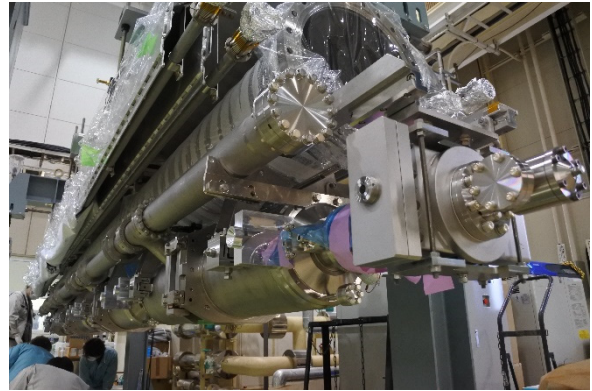
完成したクライオモジュール(CM2a)は 2019 年度内にビームライン上の台座に設置された。設置後に、CM1 の GRP との接続を行い、CM2a のアライメント作業に移った。今回は、CM1 のサポートポスト位置も調べることにし、2014 年に設置した際のデータと照合することにした。そ

の結果、当時の位置とはずれていることが判明した。その原因を探るため、9月の冷却試験後に断熱真空槽を大気開放し、サポートポストの位置調査を行うことにした。アライメント作業後に、各冷却配管の接続、端部の 5K/80K 輻射熱シールドの取付、S.I.巻き付け、を行った。冷却配管が接続された段階で、一度、加圧試験を行い、リークの無いことを確認した。2K と 5K のラインはゲージ圧で 0.07 MPa、80K のラインは 0.4 MPa 加圧した。その後、Warm 部カップラーの取り付けを行った。この際、local clean booth の設営はせず、ビームライン接続の時と同様、エアフィルターユニットの設置のみで作業を行った。取付後、Warm 部にヒーターを巻き、ベーキングを行った。ベーキングの間に、CM1 と CM2a のビームライン接続のための local clean booth の設営を行った。去年取り外したビームパイプは、クリーンルームにて超音波洗浄を行い、乾燥後に窒素封入した状態で現場に持ち込まれた。ビームライン接続後に slow pumping unit を用いてリークチェックを行い、ベーキング(120°C、48時間)を行った。次に、CM2a 下流端に移動し、再び local clean booth を設営し、空洞とビームラインとの接続作業を行った。リークチェックの後、ベーキングを行い、これでビームライン接続作業は完了した。

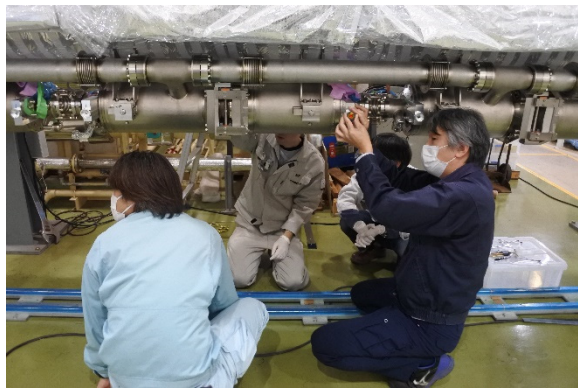
CM2a のビームライン設置後、総合耐圧気密試験を実施した。この試験では、2K と 5K のヘリウムラインおよび 80K の窒素ラインに所定の圧力をかける加圧試験を行うのと同時に、クライオベッセルについては各フランジと



(a) チューナー取付



(b) 空洞ストリングと GRP との接続



(c) 空洞アライメント調整



(d) 5K 輻射熱シールド取付



(e) Cold mass のクライオベッセルへのインストール



(f) CM2a のトンネル搬入



(g) CM2a とビームラインとの接続



(h) 完成後の様子

Figure 3: Digest of CM2a re-assembly/installation work.

ベッセル間接続部のリーク試験を行う。本試験に合格後、県庁に必要な書類を提出し、運転許可が下りた後、クライオモジュールの冷却が可能となる。当初、6月の冷却開始を目指していたが、間に合わず8月末開始となった。本学会期間中に実験開始になる予定である。Figure 3 にクライオモジュール再組立て・ビームライン設置の様子を示す。

## 6. 今回の解体・再組立てで判明したこと

今回の CM2a の解体・再組立て中に判明した主な事項を以下に列挙する。

- ① Cold mass をクライオベッセルにインストールする際、中央部付近で歪みによる影響のため調整に時間がかかった
  - ② サポートポストとクライオベッセル上部フランジとを接続する治具の位置決めピンの詰め合いが難航した
  - ③ サポートポストの水平位置固定用ボルトが浮いていた (CM1 側)
  - ④ CM2a 可動側サポートポストの浮き上がり防止用ボルトが当たっている痕が見つかった
  - ⑤ Cold mass と常温部との物理的接触
  - ⑥ サポートポストのアライメントの変化
- ①と②については製造時の工夫により、ある程度解消されるものと思われる。③と④は予想外の事であり、今後の冷却試験で GRP の動きが変わってくるものと予想される。⑤については、cold mass とクライオベッセルとの物理的距離に制限があるため解消できなかった。クライオモジュールの静的熱負荷については、今回の作業で改善することは無いと予想される。⑥については、もう少し詳細な調査が必要のため、9月の冷却試験後に真空断熱槽を大気開放し、改めて測定する予定である。

## 7. まとめと今後の予定

2019年8月から始まった CM2a の解体・空洞入替・再組立て・ビームライン再設置作業は無事終了した。KEK スタッフおよび専門知識を持った専門委託員のみでこれら一連の作業を成功裏に終えたということは、クライオモジュールの量産に必要な ILC 等の計画に対して、重要な意義を持つものといえる。

今後の予定としては、現在、すでに冷却試験が始まっているが CM2a の4空洞に対して network analyzer を用いた low power によるチューナー駆動試験や入力カップラーの結合度調整などを行う。その後、一旦、昇温し、GRP のアライメントチェックを行う。そして 2021年2月から再度、冷却開始となる予定である。ここでは Capture CM も含む計14空洞によるビーム運転が行われることになっており、ビームエネルギーは 420 MeV に達するものと予想される。一方、ビーム電流については RF ガンの状態に依存しているが、規制庁には 3.0  $\mu\text{A}$ 、最大ビームパワーとしては 1.35 kW で申請している。

## 謝辞

今回の作業に陰ながら関わってこられた全ての方々に感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] T. Shishido *et al.*, “Assembly and cool-down tests of STF2 cryomodule at KEK”, in Proc. of SRF2015, Whistler, BC, Canada, 2015, p. 888-892.
- [2] Y. Yamamoto *et al.*, “High gradient cavity performance in STF-2 cryomodule for the ILC at KEK”, in Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, 2016, p. 2158-2160.
- [3] Y. Yamamoto *et al.*, “Achievement of stable pulsed operation at 36 MV/m in STF-2 cryomodule at KEK”, in Proc. of SRF2017, Lanzhou, China, 2017, p. 722-728.
- [4] Y. Yamamoto *et al.*, “ILC に向けた STF-2 加速器のビームコミッションング”, in Proc. of the 16<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Aug. 2019, p. 187-192.
- [5] S. Imada *et al.*, “Construction of clean assembly environment for beampipe re-assembly work at STF-2 cryomodules”, in Proc. of the 16<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 2019, p. 408-412.
- [6] H. Sakai *et al.*, “Development of the slow pumping & venting system”, in Proc. of the 15<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 2018, p. 1157-1161.
- [7] H. Yamada *et al.*, “Replacement of superconducting cavity of KEK STF cryomodule by using new clean assembly systems”, in Proc. of the 17<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, Sep. 2020, FRPP30.
- [8] S. Araki *et al.*, “STF-2 アライメントおよび CM2a 加速空洞の入替え”, in Proc. of the 17<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, Sep. 2020, WEPP58.
- [9] M. Masuzawa *et al.*, “加速空洞用真空容器の消磁手法の検討”, in Proc. of the 17<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, Sep. 2020, FROO05.