

## STF-2 アライメントおよび CM2a 加速空洞の入替え

### STF-2 CRYOMODULE ALIGNMENT AND SUPERCONDUCTING CAVITY REPLACEMENT

荒木栄<sup>#, A)</sup>, 加古永治<sup>A)</sup>, 山本康史<sup>A)</sup>, 早野仁司<sup>A)</sup>, 清水健一<sup>B)</sup>, 岡田昭和<sup>C)</sup>, 今田 信一<sup>D)</sup>, 泰中 俊介<sup>D)</sup>

Sakae Araki<sup>#, A)</sup>, Eiji Kako<sup>A)</sup>, Yasuchika Yamamoto<sup>A)</sup>, Hitoshi Hayano<sup>A)</sup>, Kenichi Shimizu<sup>B)</sup>,

Terukazu Okada<sup>C)</sup>, Shinichi Imada<sup>D)</sup>, Shunsuke Tainaka<sup>D)</sup>

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

<sup>B)</sup> SK-service INC.

<sup>C)</sup> K-vac Co., Ltd.

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

#### Abstract

Beam commissioning for the STF2 accelerator was carried out at the KEK Superconducting RF Test Facility (STF) in March 2019. After that, in order to update, this time the cryomodule containing 4 cavities was dismantled and replaced with a new cavity in the clean room. The work of reassembling the cryomodule and installing the beamline was carried out by KEK staff and STF affiliated company personnel, except for the manufacturing company. When attaching the superconducting cavities to the cryomodule, they were accurately aligned and measured. As a result, we were able to install within the required accuracy of 0.3 mm. We will report how to align superconducting cavities.

#### 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(STF)は、超伝導加速空洞および高周波ならびに冷凍設備を含むクライオモジュールの研究開発が進められている。STF2 実験は、RF 電子銃と Capture Cryomodule (9 セル空洞 2 台)で大電流を生成する上流部ならびにクライオモジュール(CM1 および CM2a) 超伝導加速空洞 8 台+4 台で加速する主リニアック部、そして下流部とビームダンプで構成される。ILC 計画で必要なビーム加速試験とクライオモジュールの技術開発で2019年の3月には要求される加速勾配以上で電子ビーム運転を行い、Beam current: 2.8mA, Beam energy: 280MeV まで到達した[1]。一部の超伝導加速空洞は諸事情によりビーム加速に使用できなかったため、最も性能の低い空洞を新しい空洞に交換することが決定した。

超伝導加速空洞の入れ替え作業は組立作業と同等以上に複雑である。入れ替えのため CM2a の付属品を分解撤去して、本体を地上に搬出、シールド解体、クリーン環境にて空洞の入れ替え作業等である [2]。前回のクライオモジュール CM1/2a 組立時は製造メーカー主導が進められ、アライメント作業もその中で行われた。クライオモジュールへの組み込みは2014年以來であり、作業手順を確認しながら KEK 職員および専門知識を持つ業務委託関係者のみで進めた。それにより一連の作業方法の確認ができた。合わせて空洞のアライメント手順も再考した。また、STF ビームライン測量も合わせて進めた。本講演では、STF 空洞アライメントの手順およびクライオモジュールの設置について報告する。

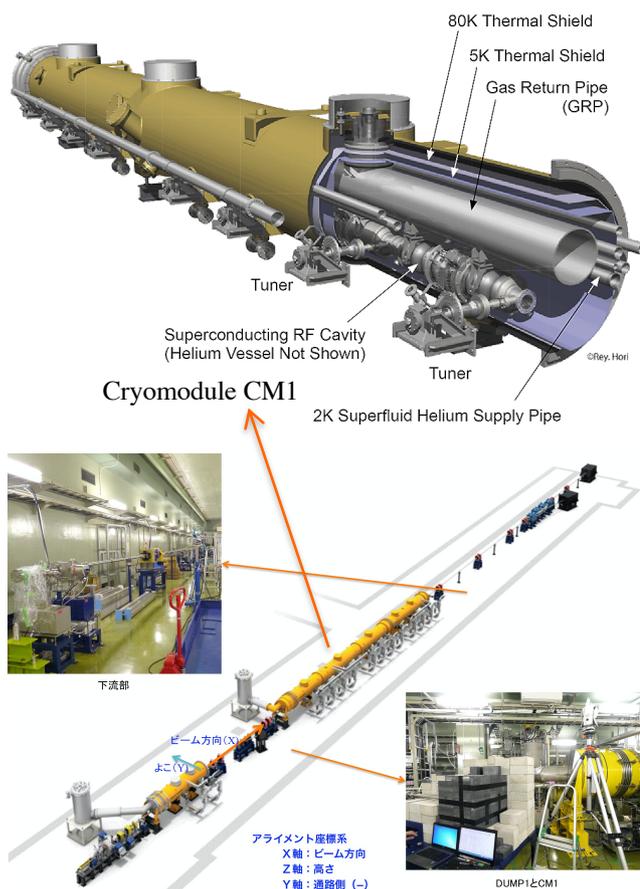


Figure 1: Schematic view of STF2.

<sup>#</sup> sakae.araki@kek.jp

## 2. 超伝導空洞の基準測量

CM2a に組み込まれる超伝導空洞(Superconducting cavity/CAV)は最新の注意を払いクリーンルームで空洞の入れ替えと組み立てならびに空洞 4 台の連結が行われている[3, 4]。その後、運搬架台でレールを介して一般区域に搬出される。先ず、その状態で個々の空洞センターを測定した。

### 2.1 空洞の基準点位置測量

Figure 2 に空洞単体の測定箇所を示す。空洞をクライオモジュールに取り付ける際、測量可能な動径方向に CAV 基準座(SR\_2 点, SL\_1 点)を設置した。比較のためフランジ円筒中心、治具による円筒真上、羽根位置(R\_2 点, L\_2 点)を測定した。4 連化した空洞の左右の基準点は片側からでは計測できないため、レーザートラック(LT)2 台を左右から挟み込むように設置した。

空洞シリンダー中心測定は前側の円筒測定(F)および治具による前後の円弧真上測定(T)からセンターを割り出した。双方は  $50\mu\text{m}$ (FWHM)で一致していたが、現状では 4 台が直線に並んでいるとは云えない(Fig. 3a)。そして、羽根位置もばらついていて(Fig. 3b)。CAV 基準座の位置(Fig. 3c)も空洞中心からズレることが判明した。

### 2.2 空洞基準点オフセット

電子ビームが 4 連化空洞(CM2a)中心で加速できるようにアライメントするために、空洞取り付け時の目標値を Table 1 のように設定した。

基準座目標値 = 基準座(SR, SL) - 空洞真上(T)

Table 1: Offset of Cavity Reference Target

| Target [mm] | Y_SR  | Y_SL  | Z_SR  | Z_SL  |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| cav1        | -0.06 | 0.10  | 0.49  | -0.26 |
| cav1.k      |       | 0.93  |       | -0.02 |
| cav2        | -0.01 | 0.06  | -0.18 | -0.56 |
| cav2.k      |       | -0.75 |       | -0.42 |
| cav3        | -0.17 | 0.16  | 0.11  | -0.83 |
| cav3.k      |       | 0.06  |       | -0.87 |
| cav4        | -0.06 | 0.42  | -0.39 | -1.24 |
| cav4.k      |       | -0.47 |       | -0.14 |

## 3. 超伝導空洞のアライメント

クライオモジュールの断面図を Fig. 4 に示す。空洞は太いガスリターンパイプ(GRP)に吊り下がり、一番外側のクライオバレルには、GRP 基準面があるサポートポストに、シールドも含め内容物がぶら下がる構造体である。

### 3.1 空洞組込アライメントの準備

CM2a をトンネルに設置する際には、GRP 基準面しか利用できない。2 つの基準面の傾きは一致しないので Roll は割り振り、高さは揃えた。その基準点

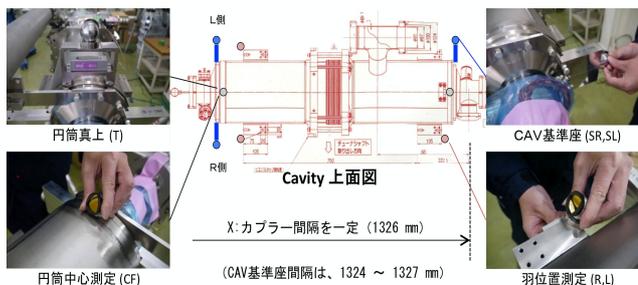


Figure 2: Position of measurement points on cavity.

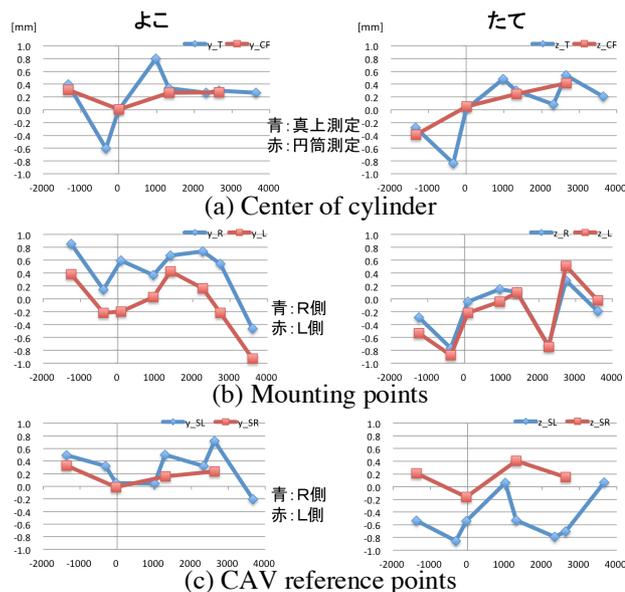


Figure 3: Superconducting cavities basic survey.

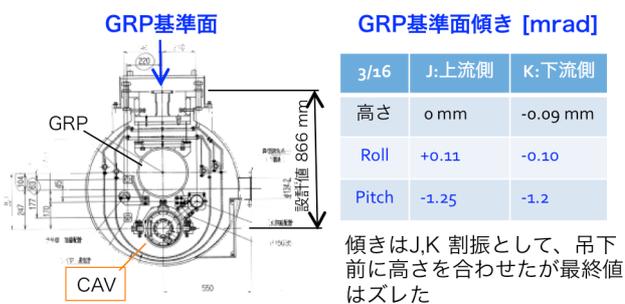


Figure 4: Sectional view of cryomodule.



Figure 5: Setup of the CM2 cavity alignment.

を結ぶ軸をビームラインと仮定して座標系を組んだ (Fig. 5a)。なお、空洞 Z Offset のばらつきが最大-1.2 mm と大きいため、組み込み位置に収まるように、GRP 基準面と空洞までの高さ間隔を設計値(866 mm) -2 mm とした。なお、2014 年初回の組立時は、-1 mm に調整していた[5]。

### 3.2 CM2a 空洞アライメント

4 つの空洞を直線にアライメントするために、基準座目標値に従い空洞基準点(SR, SL)を並べた (Fig. 5b, 6a)。組み込み時も基準点は左右の見通しができないためトラッカー2台同時測定で進めた。

4 連空洞の組み込み時は、空洞間が既にベローズで連結されており捻ると負担がかかる。そのため、roll 方向の調整は避けて、空洞中心が直線になるように調整した。それに伴い、各空洞の入力カップラフランジ中心高さ(Z)は、-0.7 ~ +1.5 mm の結果になった。ビーム(X)方向は各カップラがクライオジャケットの窓から適切に繋がるようにその間隔を  $\pm 0.2$  mm で調整した。導波管接続部は取り付けの許容範囲である。なお、4 つの空洞アライメント結果は、目標値との残差で  $dY=0.11$  mm(rms),  $dZ=0.06$  mm(rms)で十分な精度の結果である (Fig. 6b)。

## 4. STF アライメント

### 4.1 CM2a ビームライン設置

空洞アライメント後は各種センサーや配線ならびに冷却配管、シールド等を取り付けてクライオスタット容器に組み込まれる。その後、地下トンネルに搬入され指定の位置に設置される (Fig. 7)。主リニアックは、CM1(空洞 8 台+四極電磁石)ならびに CM2a(空洞 4 台)で構成される (Fig. 8)。CM1/2a のビームライン位置は、GRP 基準座から推測することしかできない。設計寸法通りに組み上げる事が重要であるが、2K 冷却状態における変形も、これまでの経験や計算値により考慮している。なお、GRP 基準座と空洞センター間(吊り下げ距離)は冷却時の縮みしろ -2 mm で設置した。

### 4.2 クライオモジュール(CM1/2a)アライメント

クライオモジュールの冷却時や運転時は、GRP 基準座も蓋で密閉され隠れるため、頻りに位置測定ができない。空洞組み込み時に於ける GRP 基準座とビームラインの関係性を考慮してアライメントを行う。トンネル内の床ならびに壁の基準点および CM1/2a を複数器械点から測定してアライメントを進めた。Figure 9 に CM1/2a のアライメント結果を示す。CM1 は設置時から再アライメントしておらず、2014 年 5 月以来の GRP 基準座位置の測量である (Fig. 9a)。平均空洞アライメント直線を考慮して、GRP 基準座の位置を調整する。今回 CM2a offset は、 $\Delta Y = -0.1$  mm,  $\Delta Z = -0.1$  mm とした。本年 4 月の CM1/2a のアライメント結果を Fig. 9b に示す。それぞれの青印が GRP 基準座の測定位置であり、赤印が offset を考慮した空洞中心ビームラインを推測した数値である。横方向および縦方向共に  $\pm 0.2$  mm に収まっている。

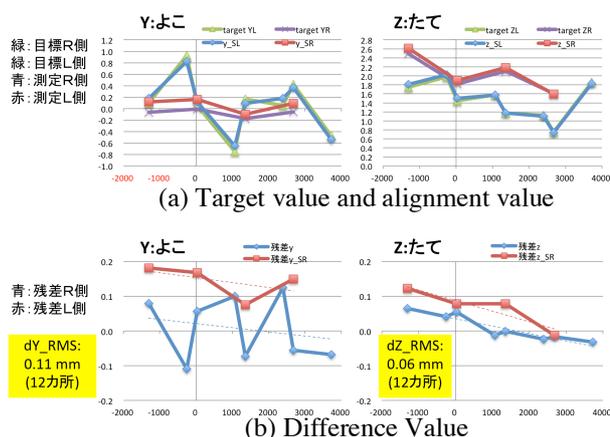


Figure 6: The result of alignment of 4 superconducting cavities for CM2a.

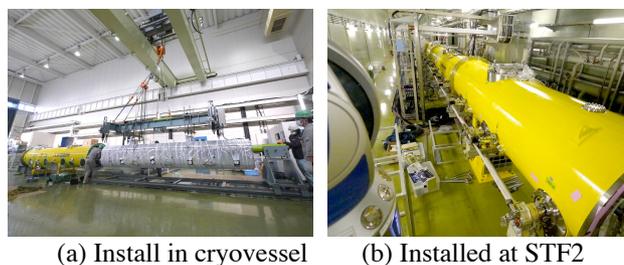


Figure 7: Install of cryomodule/CM2a.

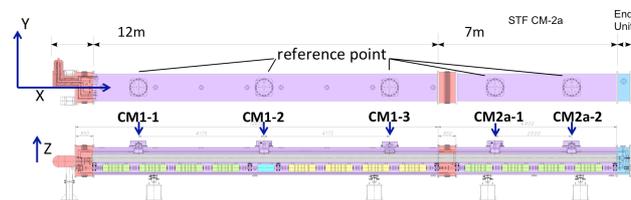


Figure 8: Position of reference points on CM1/2a.

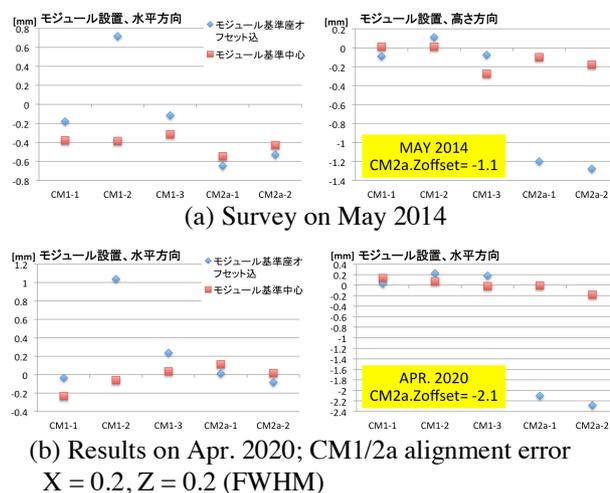


Figure 9: The result of the alignment installed in the beam line of STF2. Blue points are cryomodule reference point survey values. Red points about the value that pulled offset show the cryomodule center.

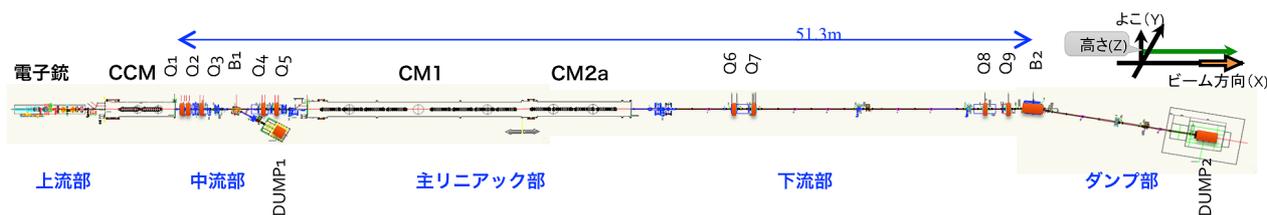


Figure 10: Layout of STF2 tunnel.

空洞の組み立て誤差を含めてもアライメントトレランスの 0.3 mm 以内を問題なく達成している。

#### 4.3 ビームライン測量

STF 地下トンネルの配置を Fig. 10 に示す。上流部を除くビームライン上の電磁石位置を測定した。若干の位置変動は見えるが、半割作業時の復元誤差も含んでいる。アライメント座標は上流部 CCM を原点としてデータを比較している。

Figure 11 に前回ビーム運転時の 2019 年 1 月と今回測定の結果の 2020 年 4 月の結果を示す。電磁石 Q2 はチェンバー変形のため横位置 2 mm 程ずらしてある。

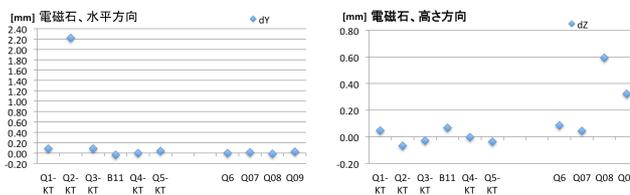
今回の測量は揺らぎが大きく、壁基準点も活用したがトンネルの変形・変動も見受けられる。下流部の沈下も疑われるので更に詳しく解析を進めている。レーザートラッカー設置高さも 2 m 程度まで上げているため、三脚の強度不足により測量値の再現性が悪くなっている。それを補うため 10 器械点の USMN[6]によるネットワーク解析をしている。平均 LT 角度精度  $H=3.9 \mu\text{rad}$ ,  $V=2.6 \mu\text{rad}$  (器械精度半分程度) であり、測量結果は正しいと云える。現在進められている冷却試験後の秋に再び調整・アライメントの方針である。

### 5. まとめと今後の予定

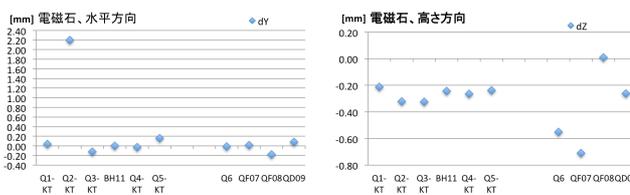
超伝導空洞の円筒フランジ機械中心をセンターとしてアライメントした。4 つの超伝導空洞はクリーンルームにてベローズで連結されており、互いに捻らないように超伝導空洞のアライメントを進めた。GRP 吊下時、高さ と ビーム方向 を目標値に合わせ、CM2a の 4 空洞取り付け精度(組立目標値との残差)は、横方向: 0.11 mm (rms/12 カ所)、縦方向: 0.06 mm (rms/12 カ所)である。

クライオモジュールには、内部の Cold mass がサポートポスト 3 カ所(CM1)、2 カ所(CM2a)でぶら下がっており、基準座位置をアライメント。6 年ぶりの CM1 再位置測定では、基準座 3 点の関係性に差異が見られた。CM1/2a トンネル設置アライメントは、縦および横方向(FWHM) =  $\pm 0.2$  mm 程度である。ビームラインアライメント目標精度の 0.3 mm 以下を達成している。また、下流部には電磁石を追加する予定もあり、位置修正が必要な電磁石も今秋に再調整、アライメントの予定である。

今回の空洞組立に伴うアライメントは著者ら関係者だけで作業を進めて組立手順なども確立した。



(a) Alignment on Jan. 2019



(b) Alignment on Apr. 2020

Figure 11: Result of STF2 magnets.

### 謝辞

本研究を支援して頂きました山口施設長、道園センター長に感謝致します。また、STF 棟での超伝導空洞入れ替え作業にご協力して頂いた全ての皆様に感謝申し上げます。

### 参考文献

- [1] 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", Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Aug. 2019, p. 187-192.
- [2] Y. Yamamoto *et al.*, "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", in this proceedings, Sep. 2020, FRPP31.
- [3] T. Okada *et al.*, "STF2-CM1 & CM2a クライオモジュール用 9 セル超伝導空洞の連結組立", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan, Aug. 2014, p. 1083-1087.
- [4] H. Yamada *et al.*, "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", in this proceedings, Sep. 2020, FRPP30.
- [5] S. Araki *et al.*, "KEK-STF2 クライオモジュールのアライメント", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan, Aug. 2014, p. 1055-1058.
- [6] <https://www.kinematics.com/spatialanalyzer/usmn.php>