

STF2 用 1.3 GHz 9 セル超伝導空洞から構成される Cryomodule の現状

STATUS OF THE CRYOMODULE CONSISTING OF 1.3 GHz 9-CELL SUPERCONDUCTIVE CAVITIES FOR STF-PHASE 2

宍戸寿郎^{#, A)}, 荒木栄^{A)}, 加古永治^{A)}, 近藤良也^{B)}, 仲井浩孝^{A)}, 原和文^{A)}, 山本康史^{A)},
原博史^{C)}, 柳沢剛^{C)}, 仙入克也^{C)}
Toshio Shishido^{#, A)}, Sakae Araki^{A)}, Eiji Kako^{A)}, Yoshinari Kondou^{B)}, Hiroataka Nakai^{A)}, Kazufumi Hara^{A)},
Yasuchika Yamamoto^{A)}, Hiroshi Hara^{C)}, Takeshi Yanagisawa^{C)}, Katsuya Sennyu^{C)}

^{A)} KEK, Accelerator Laboratory

^{B)} KEK, Institute of Particle and Nuclear Studies

^{C)} Mitsubishi Heavy Industries, LTD., Mihara

Abstract

As the next step of the quantum beam project, the STF2 project is in progress. Eight 9-cell cavities were assembled into the cryomodule, CM1. Four 9-cell cavities were assembled into the cryomodule, CM2a. The two cryomodules were connected as one unit and passed an examination of completion by Ibaraki prefectural government office in July of 2014. The target value of beam energy in the STF2 accelerator is 400 MeV. The first cool down test for the low power level RF measurements is planned in this autumn.

1. はじめに

MHI#12 と MHI#13 の 1300 MHz 9 セル超伝導空洞 2 台から成る Capture Cryomodule を使い、電子ビームの加速と逆コンプトン散乱による X 線生成を目的とした量子ビーム計画 (Quantum Beam Project) は、2013 年 3 月、その目的を無事に成し遂げて終了した^[1]。これに続くのが、電子ビームのエネルギー増強を目指す STF2 計画である。この計画は、MHI#14~MHI#22 の 9 台の空洞から性能のいい空洞 8 台を選択、4 連化+ 4 連化で 8 連化して 1 台の Cryomodule (STF2-CM1) に、また、MHI#23 ~ MHI#26 の 4 空洞を 4 連化して 1 台の Cryomodule (STF2-CM2a) とし、その 2 台を連結した、12 台の加速空洞を内蔵する Cryomodule (CM1+CM2a) と、Capture Cryomodule の 2 台の空洞を含めた合計 14 台で、電子ビームエネルギーを 400 MeV 以上にするを目的としている。2014 年 5 月末までに 2 台の Cryomodule の連結は完了し、12 空洞を含む Cryomodule は Capture Cryomodule の下流側ビームラインに設置された。本論文では STF2 用空洞の KEK 受け入れから、STF 棟地下トンネル内に Cryomodule が設置されるまでの経緯を報告する。

2. 空洞処理工程

空洞が製造され、KEK に納入された後に行われる空洞処理工程は以下の通りである。

1) 受け入れ時の空洞セル長、全長、電場平坦度 (Field Flatness)、共振周波数測定、2) 内視鏡 (京都カメラ) による内面の初期状態把握^[2]、3) 不純物層

除去のための 5 μ m の Pre-EP と 100 μ m の EP-I、4) 応力除去と水素脱ガスのための 750 $^{\circ}$ C、3 時間のアニール、5) EP とアニール処理後の内面状態把握のために再度京都カメラによる内面検査、であり、これらの工程は通常 1 回のみ行われる。続いて行われる工程は、6) 空洞周波数と各セルの電場強度調整を行うプリチューニング、7) 仕上げ電解研磨 EP-II、研磨量は 5~20 μ m、8) 140 $^{\circ}$ C、44 時間の Baking、9) 空洞無負荷 Q 値 Q_0 、加速電場 E_{acc} 、セルでの発熱箇所や発生する X 線量の測定を行う、空洞単体性能試験である縦測定 (Vertical Test)、である。これらの工程は要求仕様を満たすまで繰り返し行われる。なお、仕様を満たせず再測定の場合には、測定終了後に再度内面検査、場合によっては発熱箇所の欠陥除去のために局所研磨、電場平坦度の測定、必要に応じてプリチューニングを行う。

3. 空洞単体性能試験

STF2 (Superconducting RF Test Facility) -CM1 用空洞の、空洞単体性能試験 (縦測定) は 2011 年 1 月から 2012 年 11 月までに総計 22 回が行われた。その最終結果を Figure 1、Figure 2 に示す。MHI#16 を除く空洞で最大加速電場 $E_{acc,max} = 35$ MV/m 以上を達成した。MHI#16 は、初期に 34 MV/m の結果が得られたが、高加速電場を出せない空洞が出た時のために保管された。しかし、他の空洞性能が良かったために再測定の機会が得られず、最終的にこの結果に終わった。STF2 用 Cryomodule-1 (CM1) に収容されるのは MHI#16 を除いた 8 台の空洞で、縦測定で得られた最大加速電場の平均値は 36.7 MV/m であった^[3]。

[#] shishido@post.kek.jp

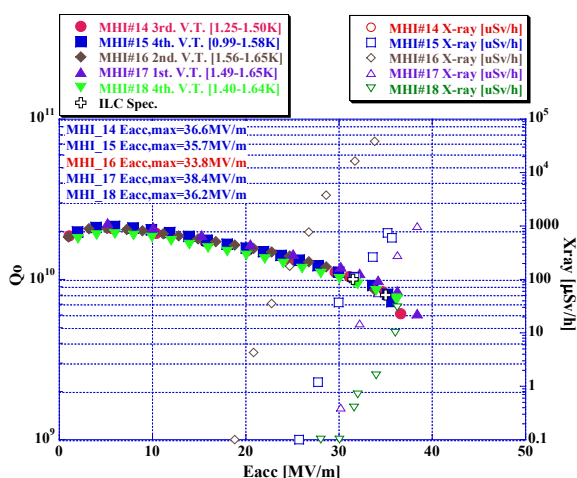


Figure 1: Final results of V.T. : MHI#14~MHI#18.

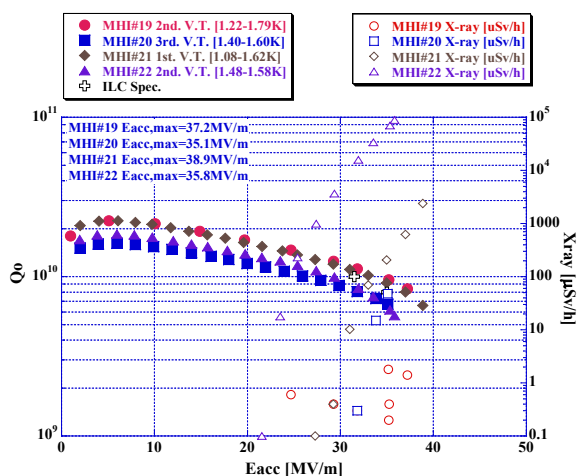


Figure 2: Final results of V.T. : MHI#19~MHI#22.

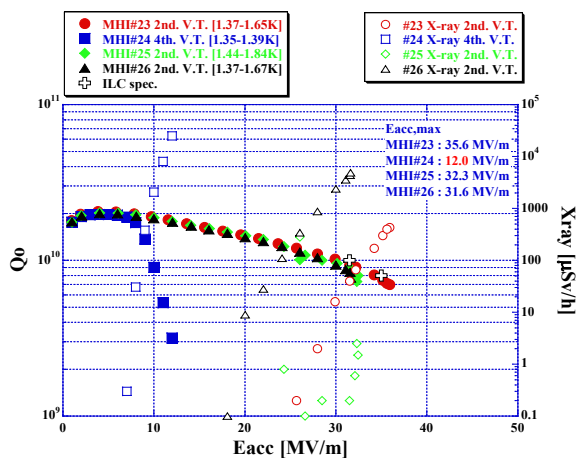


Figure 3: Final results of V.T. : MHI#23~MHI#26.

STF2-CM2a 用空洞 MHI#23~MHI#26 は、製造コスト削減を目的として製造された空洞である^[4]。これらの空洞の縦測定は 2013 年 10 月から 2014 年 1 月までに総計 10 回行われた^[5]。その最終結果を Figure 3 に示す。35 MV/m を超える性能を達成したのは MHI#23 のみであり、また MHI#24 は最後まで Field

Emission を克服できずに終了した。得られた最大加速電場の平均値は 28.0 MV/m である。この 4 台は連結されて STF2 用 Cryomodule-2a (CM2a) に納められた。

4. 空洞のモジュール化

4.1 空洞の連結

縦測定が終了した空洞は三菱重工に送り、空洞周りを磁気シールドで覆い、その外側にヘリウムジャケットと、ベローと一体化されたチューナー設置部の溶接が行われる。加工が終了した空洞は KEK に戻され、空洞連結工程が始まる^[6]。多連結化は 4 空洞に対して行われる。

空洞はまず重要部品周辺を防水処理した後、クラス 1000 クリーンルームに隣接したクリーンブース内で、超純水による高圧洗浄が行われる。その後、乾燥と清浄のためにクラス 1000 に 1 日程度放置され、乾燥が終わればクラス 10 へ移動させる。

連結作業前に、空洞全体をイオンガンを用いて清浄化し、フランジを外す場合は特に念入りに行う。両端の空洞外側にはゲートバルブ、続いて各空洞に低温側大電力入力カプラーの取り付けを行う^{[7],[8]}。その後、4 空洞の水平、垂直方向のアライメント調整が行われる。入力カプラー接続部、空洞連結部、各ポート部には錫メッキされたヘリコフレックスが真空シール材として使われる。クラス 10 クリーンルーム内で空洞内部を大気解放する工程では、フィルターを通したアルゴンガスを注入して正圧に保ち、ゴミの浸入を防ぐことが重要である。4 連化後にはリーク試験を行い、合格すればクラス 1000 へ移動、液体ヘリウム供給配管の接続を行う(Figure 4)。

ヘリウム供給配管のリーク試験も合格すれば、4 連化された空洞はクリーンルームの外に搬出される。



Figure 4: String assembly of 4 cavities : MHI#19 ~ MHI#22.

4.2 空洞の吊り下げ

クリーンルーム外に搬出された空洞は、共振周波数および Qext の測定が行われ、チューナーの取付け後には、その動作試験および特性確認が行われる。チューナー特性の試験結果を Table 1 に示す。

Table 1: Measurement Results of the Tuner Characteristics

Cavity	MHI#14	MHI#15	MHI#17	MHI#18
Ref. freq. (MHz)	1297.4298	1297.3960	1297.3717	1297.2523
$\Delta f/\Delta L$ (kHz/mm)	301	301	309	296
Δf /回転数 (kHz/回転)	15	15	16	16
ΔL /回転数 (mm/回転)	0.05	0.05	0.05	0.05
Max torque (Nm)	0.40	0.55	0.46	0.65
Cavity	MHI#19	MHI#20	MHI#21	MHI#22
Ref. freq. (MHz)	1297.3104	1297.2879	1297.3723	1297.4542
$\Delta f/\Delta L$ (kHz/mm)	299	295	316	285
Δf /回転数 (kHz/回転)	16	16	15	16
ΔL /回転数 (mm/回転)	0.05	0.05	0.05	0.06
Max torque (Nm)	0.56	0.50	0.80	0.68
Cavity	MHI#23	MHI#24	MHI#25	MHI#26
Ref. freq. (MHz)	1297.3823	1297.3580	1297.4953	1297.4350
$\Delta f/\Delta L$ (kHz/mm)	308	290	332	301
Δf /回転数 (kHz/回転)	15	16	16	16
ΔL /回転数 (mm/回転)	0.04	0.06	0.05	0.05
Max torque (Nm)	0.75	1.00	1.05	0.65

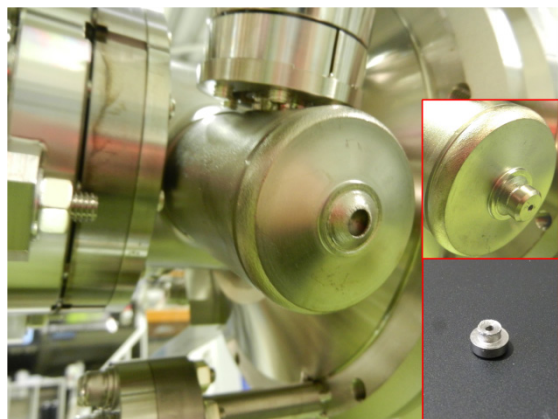


Figure 5: HOM Coupler from which the knob for frequency adjustment fell out : MHI#25 HOM#2.

続いて高次モードカプラー(HOM Coupler)の周波数調整が行われる。STF2-CM2a用MHI#25のHOM#2の調整時、調整周波数が大きいためノブの

引き抜き量も大きく、溶接方法の不適切により調整ノブが抜けてしまった(Figure 5)。

空洞の入力カプラーから遠い位置にあるHOM#2の調整方法は、ネットワークアナライザを用い、S21入力カプラーポート→モニターポートを基準として、入力カプラー→HOM#2が20dB落ち以上になる様に変形させる。MHI#25の基準値は-92dBであり、-110dB程度を目標にしたが、調整ノブが抜けたため-95dBで終了した(Figure 6)。 $Q_{HOM2} \sim 10^{11}$ 程度である。

この不具合について、後続機では抜けない様な溶接方法の改善と、また周波数調整が少なく済む様、HOM coupler内部の化学研磨量を増やす事とした。

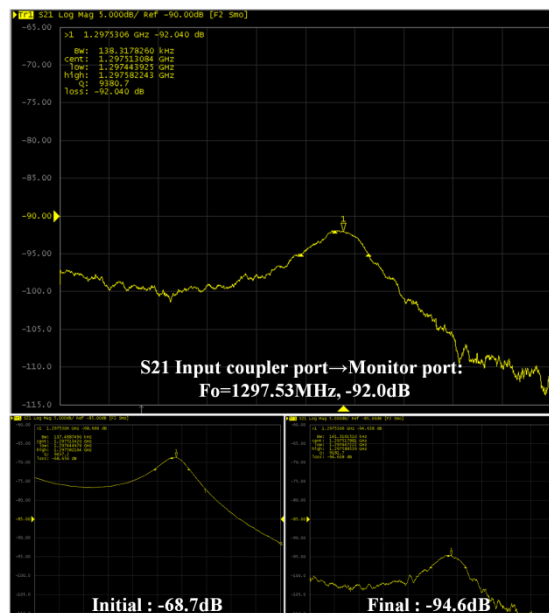


Figure 6: Adjustment of HOM#2 coupler of MHI#25.



Figure 7: Alignment of the cavities hanging under the Helium return pipe (GRP).

高周波測定が終わると、ヘリウムガス回収配管に吊り下げられ、アライメント調整後、固定される⁹⁾(Figure 7)。なお、CM1の8空洞はトンネル内で、CM2aの4空洞は地上部でヘリウム回収配管に吊り下げられた。CM1に納められる8空洞は、4連化された空洞をそれぞれ STF棟トンネル内に運び、8連化作業が行われた。中央ビームパイプの接続はク

リーンプースを設置してその内部で行われた。ビームパイプ構造の不適切により、1度接続されたビームパイプを取り外し、再度接続している。

その後、高周波ケーブル、温度センサー、断熱材や熱シールドの設置、各種配管の接続が行われる。

4.3 クライオスタットへの挿入

クライオスタットへの空洞の挿入は、CM1はSTF棟地下トンネル内で、CM2aは地上部で行われた。

CM1のクライオスタットは3分割タイプで、まず中央部、続いて上流側、下流側の順で挿入された



Figure 8: Insertion of 8 stringed cavities into the cryostat in the STF tunnel : MHI#14~MHI#22 without MHI#16.



Figure 9: Insertion of 4 stringed cavities into the cryostat at the ground floor : MHI#23~MHI#26.

(Figure 8).

CM2aでは、上流側治具をクライオスタット内にある台車に、下流側治具を地上部レールに乗った台車に乗せて移動し、空洞の挿入を行った(Figure 9)。

4.4 CM1とCM2aの連結

地上部で4空洞が挿入されたCM2aはSTF棟地下トンネルに下ろされ、CM1の下流側台座に載せられた。液体窒素供給配管、回収配管や液体ヘリウム供給配管、回収配管の接続とリーク試験、気密試験が行われ、問題なく終了した。CM1とCM2a間、およびCM2a下流側にはリーンプースを設置し、ビームパイプの接続を行い、12空洞の連結が完了した。下流側ビームパイプのベーキングが終了すると、クライオスタットを密閉し、モジュール全体のリーク試験を行った。リーク試験も無事終了し、12空洞を含むCM1とCM2aの連結は2014年5月末に完了した^[10] (Figure 10)。また冷却系のコールドボックスの設置と、コールドボックス、モジュール間の配管の接続も6月中旬に完了した(Figure 11)。

2014年7月3日、ヘリウムガス液化精製設備として茨城県による完成検査に合格した。Figure12は検査後のCapture cryomoduleと、連結されたCM1とCM2、および全体画像である。現在、秋から予定されている空洞冷却と低電力での高周波測定のため、周辺設備の整備が進行中である。



Figure 10: Connection between CM1 and CM2a cryomodules.

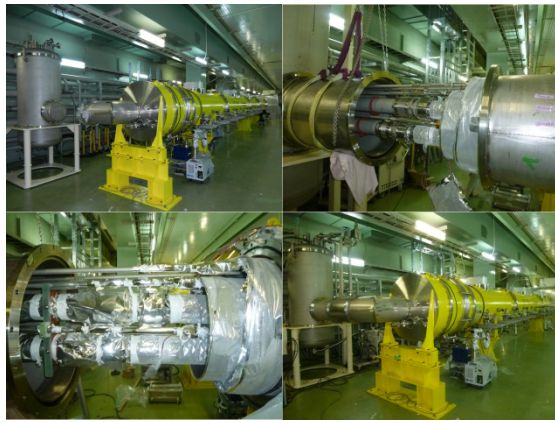


Figure 11: Connection of the cold box and the cryomodule.

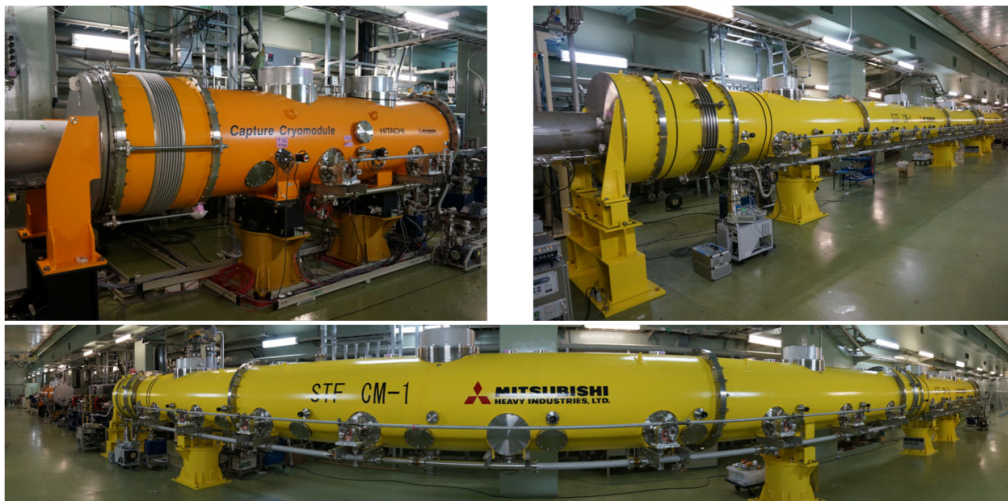


Figure 12: Capture cryomodule and CM1 + CM2a on July 31, 2014.

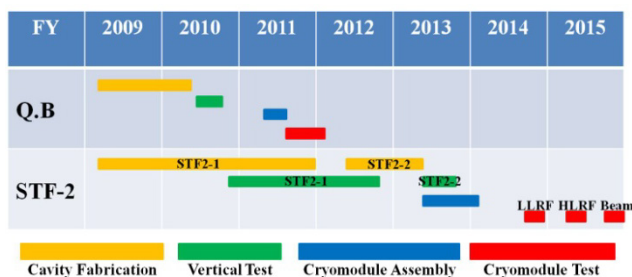


Figure 13: Processes from cavity fabrication to cryomodule test.

謝辞

STF 棟での表面処理に関して KEK 放射線センター沢辺元明氏の多大なるご協力に感謝いたします。日本アドバンステクノロジー (株)、ケーバック (株) およびアシストエンジニアリング (株) の皆様には、内面検査、表面処理、組立工程、低温性能測定において惜しみないご協力を得ましたので、ここに深く感謝の意を表します。

5. 終わりに

Figure 13 は量子ビームと STF2、各計画での空洞受け入れからモジュール試験までの期間を示す。

量子ビーム計画では空洞 2 台、STF2 では 9 台+4 台の合計 13 台を扱った。縦測定は 1 空洞 2 回を基本とし、ILC 要求仕様である最大加速電場 $E_{acc,max}$ が 35 MV/m 以上であれば 1 回目の縦測定でも合格とした。2 回の測定で合格しない空洞は、日程の許す範囲で 3 回目以降の測定を行っている。

2014 年 9 月からクライオモジュール冷却を開始し低電力での高周波測定を、2015 年の 4 月から大電力での高周波測定、10 月からビーム運転を予定している。

参考文献

- [1] H. Shimizu, et al., "X-ray Generation by Inverse Compton Scattering at the Superconducting RF Test Facility", submitted Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A
- [2] M. Asano, et al., "Inspection of inner surface in 9-cell SC cavities for STF2-CM2a cryomodule", 本学会
- [3] Y. Yamamoto, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 729 (2013) 589-595
- [4] H. Hara et al., "Superconducting Cavities R&D for ILC at MHI", 本学会
- [5] R. Ueki, et al., "Vertical test result of 9-cell SC cavities for STF2-CM2a cryomodule", 本学会
- [6] T. Okada, et al., "String Assembly of 9-cell SC cavities for STF2 CM1 and CM2a Cryomodules", 本学会
- [7] T. Yanagimachi et al., "High power tests of input couplers at test-stand for STF2 cryomodule", 本学会
- [8] S. Imada et al., "Assembly procedure of input couplers for STF2 cryomodule", 本学会
- [9] S. Araki et al., "Status of alignment for STF2 cryomodule", 本学会
- [10] T. Yanagisawa et al., "Development of Superconducting RF cryomodule for STF2", 本学会