

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 STRING ASSEMBLY OF 9-CELL SC CAVITIES FOR STF2-CM1 AND CM2A CRYOMODULES

岡田昭和^{#,A)}, 浅野峰行^{B)}, 今田信一^{B)}, 植木竜一^{B)}, 柳町太亮^{B)}, 山田浩気^{B)},
宍戸寿郎^{C)}, 山本康史^{C)}, 加古永治^{C)}

Terukazu okada^{#,A)}, Mineyuki asano^{B)}, Shin-ichi Imada^{B)}, Ryuichi Ueki^{B)}, Taisuke Yanagimachi^{B)},
Hiroki Yamada^{B)}, Toshio Shishido^{C)}, Yasuchika Yamamoto^{C)}, Eiji Kako^{C)}

A) K-vac

B) Nippon Advanced Technology

C) High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

In KEK-STF, construction of cryomodule is advanced as the STF2 project. Assembly of SC 9-cell cavities to install into a cryomodule is a very important procedure. The 9-cell cavities were set into a clean room, after the outside was rinsed by ultra-pure water with high pressure. Vacuum parts and input couplers were also carefully cleaned in a clean room. Cavity string assembly of four 9-cell cavities was carried out in a class-10 clean room. After a leak test of the stringed cavities, pure Ar gas was introduced into the inside of the cavities. Then, the cavity-string was moved to a class-1000 clean room, and the connecting pipes for supplying 2K-He were attached. In the outside of a clean room, cavity tuning systems and temperature sensors were mounted. Clean environment and clean handling are essential technologies in a clean room work. This report describes the process of the cavity string assembly and the cryomodule assembly of four 9-cell SC cavities.

1. はじめに

KEK-STF では、STF1・S1-Global・量子ビーム計画に続き、STF2 計画が進行している。STF2 計画では、ILC に向けての試験設備として、9セル超伝導空洞 8 台および 4 台 (計 12 台) を連結させ、1つのクライオモジュールとしてビームを加速させる予定である¹⁾。

超伝導空洞を組み立てる際には、粒子の混入を防ぐことが最も重要である。粒子が空洞内に入ると、高電界発生時に電界放出電子 (フィールドエミッション) による空洞性能の低下が起こる可能性が高い。超純水・エア・ガスは不純物を取り除いたものを使用すること、クリーンウェア・手袋・工具などに付着している粒子なども同様に除去することがとても重要である。さらに、超伝導空洞は極低温に冷却されるために、わずかな真空リークでもあると問題が生じてしまうため、気をつけなければならない。したがって、下記に示す各段階での工程全般において、繊細かつ慎重な作業が要求される。

1. クリーンルーム入室前の外面高圧水洗浄
2. 超伝導空洞の 4 連化組立 (クラス 10 室)
3. 2K-He 供給配管の組立 (クラス 1000 室)
4. 移動用架台への 4 連化空洞の吊下げ
5. 4 連化空洞の地下トンネルへの搬入、設置
6. 周波数チューナーの組立
7. 共振周波数測定・HOM フィルター調整
8. 4 連化空洞 2 台の 8 連化接続

9. 8 連化空洞の GRP への吊下げ
10. 予冷配管の接続
11. インพุットカップラーの 5K と 80K サーマルアンカーの取り付け
12. 8 連化空洞の真空容器内へ挿入
13. CM1 クライオモジュールのビームラインへの据付け
14. 上流側ビームチューブの取り付け、真空排気
15. 室温部カップラーの組立、真空排気
16. チューナーロッド、下部ポートの取り付け
17. CM2a 用超伝導空洞の 4 連化組立 (クラス 10 室)
18. CM2a 用 4 連化空洞の 2K-He 供給配管の組立 (クラス 1000 室)
19. CM2a クライオモジュールの地上部での組立
20. CM2a クライオモジュールのトンネル内への設置
21. CM1 と CM2a のクライオモジュール間接続
22. 下流側ビームチューブの取り付け、真空引き
23. CM2a 用室温部カップラー組立、チューナーロッド、下部ポートの取り付け
24. 上流部・下流部に真空排気系イオンポンプ設置
25. インพุットカップラーにドアノブ型同軸導波管変換器を取り付け、内導体内部排気用真空配管の取り付け
26. 2K-He, 5K-He, 80K-N₂ 供給・回収用コールドボックスとの配管連結
27. クライオモジュール真空槽内の真空排気

[#] kb-okada@post.kek.jp

2. 洗浄、組立準備

2.1 超伝導空洞の洗浄、組立準備

空洞連結用架台を洗浄、乾燥させ、クラス 1000 のクリーンルーム内に設置する。空洞がある程度の精度で連結が出来るようにアライメントをする必要がある。超伝導空洞を搬入用架台へ設置し、水分に弱い部分（鉄）などをビニール袋などで養生する。クリーンルームに隣接する入室洗浄用クリーンハットの中に入れ、高圧洗浄機で空洞の外面を高圧水洗浄（HPR）する。洗浄後クリーンルームに搬入し、エアガンで水分を飛ばして乾燥させる。空洞を連結組立用架台へ設置する。この工程を4台分行う。その後、パーティクルカウンターで検出しながらイオンガンで粒子を除去する。最終的に $0.3\mu\text{m}$ の粒子の数が 0 個に到達できたら、空洞をクラス 10 室へ移動する。図 1 に架台、超伝導空洞の洗浄工程を示す。



Figure 1: HPR rinsing and installation of SC cavities.

2.2 インพุットカップラーの洗浄、解体分離

テストスタンドでの大電力試験を終了したインพุットカップラー^[2]をクリーンルームに搬入して、イオンガンで粒子を除去する。インพุットカップラー内部は真空保持をしているので、まず排気系を接続し、真空引き後に Ar ガスでパージをする。そのあとに Ar ガスを流し、加圧させながら室温部（Warm）カップラーを切り離し、フランジを取り付けて保管をする。切り離された低温部（Cold）カップラーは、もう一度イオンガンで粒子を除去してクラス 10 のクリーンルーム内へ移動する。図 2 にインพุットカップラーの洗浄と解体分離の工程を示す^[3]。



Figure 2: Cleaning and dismantling the input couplers.

2.3 ゲートバルブ、真空部品の洗浄

ゲートバルブは開閉しながらイオンガンで粒子を除去する。開閉することによって、金属の擦れた時の粒子やゲートが収納される場所の粒子を取り除くためである。真空部品の洗浄は密閉の出来るビニール袋を使用し、FM-20（精密機械用洗剤）を水量に対し約 4%入れて、超音波洗浄機で洗浄する。袋から取り出して超純水で濯ぎ、クラス 10 内へ移動し

エアガンで水分を飛ばして乾燥させる。図 3 に各真空部品の洗浄方法を示す。



Figure 3: Rinsing of gate valves and vacuum parts.

2.4 超伝導空洞のアライメント

超伝導空洞を連結する前に行う重要な工程の一つが、空洞のアライメントである。空洞の中心（ビームライン）をレーザーで合わせて、XYZ 方向と回転方向を4台同じになるように調整する。図 4 にアライメントの調整方法を示す。（図 4 右端の図は各方向の調整ができる治具を示す。）

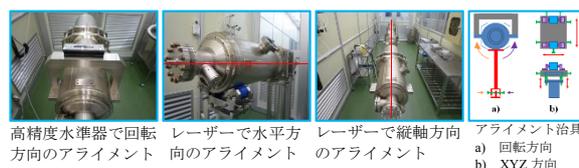


Figure 4: Alignment of SC cavities.

3. 超伝導空洞の連結組立

3.1 インพุットカップラー、アンテナ付 HOM カップラーフランジの取り付け

取り付け作業前に Ar ガスを空洞内へ流す。Ar ガスを流すことで空洞内が加圧され、ブランクフランジを外す際に粒子などが空洞内に混入することを防ぐためである。低温部（Cold）カップラーを結合導波管から取り外し、イオンガンで粒子を取り除いた後に、ヘリコフレックスを取り付け、空洞に接続する。次にアンテナ付 HOM カップラーフランジを取り付ける。この工程を空洞4台について行う。図 5 にインพุットカップラーと HOM カップラーのフランジ取り付けの工程を示す。



Figure 5: Assembly of input couplers and HOM coupler flanges.

3.2 ゲートバルブ、ベローズの取り付け、リークテスト

テーバ管付ベローズ内部の粒子を除去し、Ar ガスを流しながら、空洞の下流側へ取り付ける。次にゲートバルブとテーバ管付ベローズを接続する。各空洞間の3ヶ所に、ベローズを取り付ける。空洞上流部にテーバ管付ベローズを取り付け、下流側と同

様にゲートバルブを取り付ける。排気系を接続して真空引きを開始する。リークテストは最初に吹きつけによる粗いリークテストを行い、その後接続部分にビニールなどを使用して覆い、フード法によるリークテストをする。リーク (Leak rate <math>< 1.0 \times 10^{-10} \text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}</math> 以下) が無いことが確認できたら、空洞内に Ar ガスを導入する。Ar ガスを流し入れる時は、スローページ (80 ml/min) で行う。図 6 に超伝導空洞の連結の工程を示す。



Figure 6: Assembly of gate valves and bellows.

4. He 供給配管の組立、リークテスト

He 供給配管を入室洗浄用クリーンハット内で超純水を使用して高圧洗浄をする。洗浄した He 供給配管をクリーンルームの中に入れ、エアガンで水分を飛ばし乾燥させる。He 供給配管用の真空部品は超音波洗浄機で洗浄をする。全ての準備が整ったら、連結空洞をクラス 1000 室へ移動する。He 供給配管を取り付けるためのサポート治具を取り付けて、フィッティングテストをする。ヘリウムジャケット側にヘリコフレックスとボルトをセットして、He 供給配管を接続する。最後に排気系を接続し、吹きつけとフード法によるリークテストを行う。ここでクリーンルームの作業は終了である。この後に連結空洞をクリーンルームの外へ移動する。図 7 に He 供給配管の洗浄から組立、リークテストまでの工程を示す。

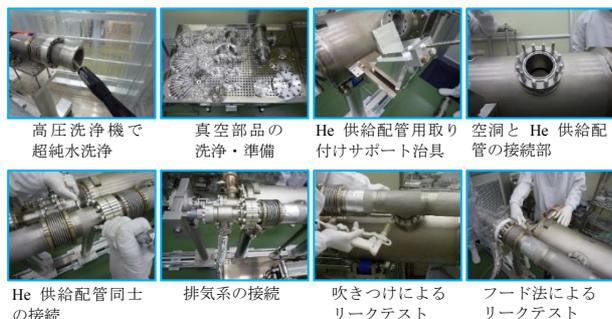


Figure 7: Rinsing, assembly and leak test of 2K-He supplying pipes.

5. 4 連結空洞をトンネルへ搬入、設置

搬入用吊り下げ架台に連結空洞を吊り下げ、連結

空洞をトンネルへ搬入する。連結空洞 4 台を 2 回に分けて搬入する。トンネル搬入後、組み立て場所の架台へ設置する。図 8 にトンネルへ搬入と設置の様子を示す。



Figure 8: Transportation of stringed four cavities into the STF tunnel.

6. 4 連化空洞の 8 連化接続

BPM 付ビームチェンバーのヒートショック試験、超音波洗浄、高圧水洗浄を行い、クリーンルーム内でエアガンを使用し、水分を飛ばし取り付けの準備をする。超伝導マグネット用 He 供給配管は入室洗浄用ハットで高圧水洗浄をしてクリーンルーム内で乾燥をする。8 連化部分の場所にクリーンブースを設置する。クリーンブース内の粒子をパーティクルカウンターで確認して粒子の数が 0 に到達したら BPM 付ビームチェンバーと He 供給配管を取り付ける。その後、排気系を接続してリークテストを行う。図 9 に BPM 付ビームチェンバーの試験、洗浄、取り付けと He 供給配管の洗浄、取り付けの様子を示す。



Figure 9: Connection between the stringed four cavities.

7. 8 連空洞の吊下げ

8 連化された空洞をガスリターンパイプの下へ移動して、ガスリターンパイプが空洞を迎えに行く形で下降をさせて吊り下げる。超伝導マグネットは反割りになっていて、昇降台車を使用し、BPM 付ビームチェンバーを挟む形で取り付けをする。超伝導マグネットに吊り下げ用治具を取り付けて、ガスリターンパイプに吊り下げる。図 10 に 8 連空洞と超伝導マグネットの吊り下げの様子を示す。



Figure 10: Hanging of eight SC cavities under GRP (gas return pipe) and installation of a SC magnet.

8. 予冷配管の接続

ガスリターンパイプに取り付けられている予冷配管と空洞の予冷配管を接続する。これは室温からの冷却及び加温を行うための配管である。予冷配管を接続後、排気系を接続してリークテストを行う。図 11 に予冷配管接続とリークテストの様子を示す。



Figure 11: Connection of pre-cooling pipes.

9. 真空容器内へ挿入、設置

5K・80K 熱放射シールドで覆われた 8 空洞を CM1 クライオモジュールの中に入れ、ビームライン上に設置する。図 12 に CM1 クライオモジュールへの挿入と設置の様子を示す。



Figure 12: Insertion of cold-mass into vacuum vessel.

10. 上流側ビームチューブの取り付け

上流側ビームチューブ取り付け位置にクリーンブースを設置し、パーティクルカウンターで粒子の確認をする。ビームチューブをゲートバルブとクライオモジュール端板に取り付ける。排気系を接続し、リークテストを行う。図 13 に上流側ビームチューブの取り付けの様子を示す。



Figure 13: Installation of a beam tube at upstream side.

11. 室温部カップラーの取り付け

クリーンブースを設置し、パーティクルカウンターで粒子を確認したら、温室部 (Warm) カップラーの取り付けをする。取り付ける時は、Cold 窓のゴミやヘリコフレックスを取り付けるシール面を必ず確認する。セラミック窓にゴミ等が付着していると放電の原因となる。温室部 (Warm) カップラーをクリーンブース内で 2 台ずつ取り付けてリークテ

ストを行い、CM1 クライオモジュール側 8 台取り付け。図 14 に室温部 (Warm) カップラー取り付けの様子を示す。



Figure 14: Installation of warm couplers.

12. CM2a クライオモジュールのトンネル内への搬入、ビームラインへの設置

CM1 の連結空洞と同様に CM2a 用連結空洞も洗浄や組立などを行い、クリーンルームの外で計測器の取り付け、測定をする。全ての取り付けが終了したら、連結空洞を CM2a クライオモジュールに挿入する。その後、クライオモジュールをトンネルに搬入し、CM1 クライオモジュールの下流に設置する。設置する際にガスリターンパイプを接続する。図 15 に CM2a クライオモジュールの搬入、設置の様子を示す。



Figure 15: Installation of CM2a cryomodule in the STF tunnel.

13. CM1 と CM2a のモジュール間接続

CM1 と CM2a クライオモジュールの接続場所に、クリーンブースを設置する。クリーンルームで洗浄したビームチューブと He 供給配管を接続する。その後、排気系を接続しリークテストを行う。図 16 に接続の様子を示す。



Figure 16: Connection between CM1 and CM2a cryomodule.

14. 下流側ビームチューブの取り付け

最下流にクリーンブースを設置し、クリーンルームで洗浄したビームチューブを取り付ける。排気系を接続し、リークテストを行う。図 17 にビームチューブ取り付けの様子を示す。



下流側ビームチューブの取り付け
排気系を接続し、リークテスト

Figure 17: Installation of a beam tube at the downstream side.

15. 上流部・下流部排気系ポンプの設置

真空部品とイオンポンプをクリーンルームで洗浄し、組み立てをする。クリーンブースを設置して、トンネルにイオンポンプのセットを搬入し、ビームチューブに接続する。その後、排気系を接続し、リークテストを行う。図 18 にイオンポンプの洗浄、組み立て、接続の様子を示す。



イオンポンプ用真空部品の洗浄
真空部品の組み立て
上流側イオンポンプの取り付け
下流側イオンポンプの取り付け

Figure 18: Installation of ion pumps at the beam line.

16. ドアノブ型同軸導波管変換器、内導体真空配管の取り付け

CM1、CM2a のインプットカップラー12 台にドアノブ型同軸導波管変換器を取り付ける。内導体部分に真空配管を取り付け、リークテストを行う。図 19 にドアノブと内導体真空配管の取り付けの様子を示す。



ドアノブ型同軸導波管変換器
インプットカップラーに取り付け
内導体真空配管の部品
内導体真空配管の取り付け

Figure 19: Installation of doorknob-type transitions.

17. CM1,CM2a クライオモジュールの完成

完成したクライオモジュールの写真を図 20 に示す。クライオモジュールの組立に関する作業工程と作業時間のまとめの表を図 21 に示す。2013 年 7 月に開始したクライオモジュールの組立は、約 13 ヶ月後の 2014 年 7 月末に無事に完成に至った。本件の関わる各作業工程の総計は、449 時間であった。



Figure 20: Completion of the CM1 and CM2 cryomodules.

工程内容	時間(h)	
1. 超伝導空洞連結用架台の洗浄・乾燥・設置・アライメント	39h	(13h × 3)
2. 超伝導空洞の外面洗浄・乾燥・設置	18h	(6h × 3)
3. インプットカップラーのイオンガンエア洗浄・解体分離	15h	(5h × 3)
4. ゲートバルブのイオンガンエア洗浄、真空部品の超音波洗浄・乾燥	21h	(7h × 3)
5. 超伝導空洞のアライメント	9h	(3h × 3)
6. 超伝導空洞の連結組立・リークテスト	57h	(19h × 3)
7. He供給配管の洗浄・組立・リークテスト	48h	(16h × 3)
8. 空洞の周波数測定	6h	(0.5h × 12)
9. 周波数チューナーの取り付け・測定	42h	(14h × 3)
10. HOMフィルターの調整	24h	(1h × 24)
11. BPM付ビームチェンバー、He供給配管の洗浄、空洞の8連化、リークテスト	9h	
12. 超伝導マグネットの取り付け	4h	
13. 予冷配管の取り付け・リークテスト	4h	
14. 計測器の取り付け、Inシート加工、サーマルアンカーの取り付け	25h	
15. CM1とCM2aの連結・リークテスト	10h	
16. 上下流ビームチューブの取り付け・リークテスト	12h	(6h × 2)
17. 室温部(Warm)カップラーの取り付け、真空ダクト取り付け、リークテスト	54h	(4.5h × 12)
18. 下部ポートの取り付け、チューナーロードの取り付け	18h	(1.5h × 12)
19. クライオモジュール上下流のイオンポンプ取り付け	14h	(7h × 2)
20. カップラーのドアノブ取り付け	12h	(1h × 12)
21. 内導体の真空ダクト取り付け	8h	
合計	449h	2014.07.30

Figure 21: Summary of the assembly work flow and the processing time.

18. まとめ

超伝導空洞を組立するにあたっては、洗浄（超純水・イオンガン）、粒子のないクリーンな環境が重要である。STF2 計画は、CM1・CM2a クライオモジュール（超伝導空洞 12 台）が設置され、2014 年 10 月に冷却される予定である。冷却後は 12 空洞の低電力試験、大電力試験をし、ビーム運転をする予定である。

参考文献

- [1] T.Shishido, et al.: “Construction of STF2 Cryomodule consisting of Twelve 1.3GHz 9-cell SC Cavities,” in these proceedings.
- [2] T.Yanagimachi, et al.: “High power tests of input couplers at test-stand for STF2 cryomodule,” in these proceedings.
- [3] S.Imada, et al.: “Assembly procedure of input coupler for STF2 cryomodule,” in these proceedings.