

S1-Global : 国際協力によるクライオモジュールの建設

大内徳人, 加古永治,

小島裕二, 近藤良也, 佐藤昌史, 穴戸寿郎, 設楽哲夫, 土屋清澄, 寺島昭男, 峠 暢一, 仲井浩孝,
野口修一, 早野仁司, 東 憲男, 山口誠哉, 山本 明, 山本康史, 横谷 馨, 渡辺 謙,
高エネルギー加速器研究機構, KEK (Japan)

C. Pagani, P. Pierini, A. Bosotti, R. Pararella, INFN/U. Milano (Italy)

K. Jensch, D. Kostin, L. Lilje, A. Matheisen, W. -D. Moeller, M. Schmoekel,

P. Schilling, H. Weise, DESY (Germany)

T. Arkan, S. Barbanotti, M. Battistoni, H. Carter, M. Champion, R. Kephart, J. Kerby,

D. Mitchell, T. J. Peterson, M. Ross, B. Smith, FNAL (USA)

2010年7月14日

Abstract

In an attempt to demonstrate an average accelerating gradient of 31.5 MV/m, as currently being envisaged in the design of the International Linear Collider (ILC), an international collaboration by KEK, INFN/Univ. of Milano (Italy), FNAL (USA), DESY (Germany) and SLAC (USA) is pursuing a joint experiment of building and operating eight units of 9-cell L-band cavities in a common cryostat. The experiment is called the S1-Global project. This project is conducted in the framework of the Global Design Effort (GDE), and is hosted by KEK. The S1-Global system joins two half-length cryomodules, each having a length of 6m and containing 4 cavities. The vacuum vessel and most of the cold-mass elements for one of the two cryomodules, Cryomodule-C, has been prepared by INFN/Univ. of Milano, and contains two cavities from FNAL and two cavities from DESY. The other cryomodule, Cryomodule-A, has been built by KEK and contains four KEK cavities. The assembly of the cryomodules was started in January 2010, and was completed in May. The first cooling-down test of the S1-Global cryomodules was successfully carried out in June–July. In this paper, our construction experience of the S1-Global cryomodules is presented.

1. はじめに

S1-Global 計画は、国際リニアコライダー(ILC, International Linear Collider)の主線形加速器に用いられるクライオモジュールの実証試験を目的とする。ここで、S0 は空洞単体試験, S1はクライオモジュール試験, S2は加速器ユニットでのビーム試験を示す。S1-Global クライオモジュール建設は、2008 年 4 月に米国 FNAL 研究所で開かれた超伝導 RF 技術会議で ILC 開発の国際研究協力の一環として提案され、会議参加研究所の合意の下に進められることになった。S1-Global プログラムでは、クライオモジュールに組み込まれる 8 台の超伝導空洞により、ILC の設計運転値である 31.5 MV/m を平均加速電界として達成することを第一目標としている。S1-Global クライオモジュールは 2 台の 6 メートルクライオモジュール (Module-A, Module-C) からなり、FNAL と DESY から提供された 4 組の超伝導空洞とインプットカップラー、KEK 提供の同 4 組がこれら 2 台のクライオモジュールに組み込まれる。Module-C はイタリア INFN 研究所が中心となり建設をおこない、Module-A は STF-1 で建設・試験をおこなったクライオモジュールを S1-Global 用に改造したモジュールである。

S1-Global クライオモジュールの設計は KEK が主体的に行い 2009 年に完了した[1]。クライオモジュールの組立ては

2010 年 1 月に開始され、5 月に STF トンネルへの据付を完了した[2]。クライオモジュールの冷却は 6 月から開始され、現在順調に試験を進めている。本報告では、S1-Global クライオモジュール設計から建設にいたる本グループの活動を紹介する。

2. S1-Global クライオモジュールの概要

まず、国際研究協力としての S1-Global プロジェクトの研究協力体制を以下にまとめた。

- INFN : Module-C の設計・建設と FNAL 超伝導空洞用ブレード型チューナー[3]の製作および組立て。
- FNAL : TESLA 型空洞 2 台, インプットカップラー, 空洞ジャケットへのブレード型チューナーの組立て。
- DESY : TESLA 型空洞 2 台, インプットカップラー, サックレー型チューナー[4], Module-C 用インプットカップラー 4 台の組立て。
- SLAC : Module-C 用高周波電力分配装置, FNAL 用インプットカップラーのエージング。
- KEK : TESLA 改良型空洞 4 台, 2 タイプのスライドジャッキ型チューナー[5], KEK 空洞用 Module-A の改造, 高周波電力分配システム, Module-A および Module-C の組立て, 冷却試験装置。

S1-Global クライオモジュールでは、8 台の超伝導空洞を ILC の運転加速電界 31.5 MV/m で運転することが第一課題であるが、以下の研究課題も含まれている。

- 31.5 MV/m の加速電界を ILC 運転モードである 5 Hz の RF パルス運転の実施。RF パルスは、1 ms のフラットトップをもち、パルス振幅は 0.07% の rms 誤差、0.35 度の rms 位相誤差を満足する。
- 異なる設計の超伝導空洞を含んだクライオモジュールの設計、組立て、アライメントの経験をえること。
- 無負荷状態と 31.5 MV/m の負荷運転での熱負荷測定。異なる設計の超伝導空洞とクライオモジュールの熱的な性能の比較。
- 設計の異なる周波数チューナーおよびインプットカップラーを装着した超伝導空洞パッケージの性能比較。
- ILC クライオモジュール建設時に基本的な設計概念として受け入れられている“plug-compatible-concept”の先導的な実施。

3. クライオモジュールの設計・製作

S1-Global クライオモジュールの設計は 2008 年 5 月から、KEK, INFN, FNAL が協力しておこない、2009 年 1 月にクライオモジュール部品製作を開始できる段階にまで到達した。最終図面が完成したのは、組込まれる超伝導空洞が決まる 2010 年 1 月である。

S1-Global クライオモジュールは図 1 に示すように、2 台の 6 メートルのクライオモジュール (Module-A, Module-C) から構成される。FNAL と DESY からの 4 台の超伝導空洞は Module-C に組込まれ、KEK からの 4 台の超伝導空洞は Module-A に組込まれる。2 台のクライオモジュールを接続した S1-Global クライオモジュールの全長は 14.9 m である。2 台のクライオモジュールのパラメータを表 1 に示す。

図 2 に Module-C の断面設計を示す。低温部分は真空容器から 2 本の G-10 のポストで吊り下げられている。図 1 に示すように、FNAL と DESY の空洞は異なる形状、長さであるがクライオモジュール内では同じ間隔で配置される。この間隔は DESY-XFEL クライオモジュール内での値と同じ 1383.6 mm に統一されている。また、超伝導空洞パッケージの設計は異なるが、超伝導空洞を支持する機構および形状は ILC の設計思想である“plug-compatibility”を満足する設計になっている。

Module-A は、STF-1 で KEK 空洞 4 台の冷却試験をおこなったものを改造して再利用された。このクライオモジュールの熱的・機械的な設計は、Module-C と同じ TTF-Type-III クライオモジュール [6] の設計を基本としている。低温部分の支持方式、断熱方式は図 2, 3 に示すように同じ様式となっているが、冷却配管および熱シールドのサイズは日本での製作と STF での運転に適した設計にしてある。

表 1 S1-Global クライオモジュールパラメータ

	Module-A	Module-C
Vacuum vessel length	6087 mm	5800 mm
Vacuum vessel O.D.	965.2 mm ϕ	965.2 mm ϕ
Gas return pipe length	5830 mm	6000 mm
Gas return pipe O.D.	318.5 mm ϕ	312.0 mm ϕ
2K LHe supply pipe O.D.	76.3 mm ϕ	76.1 mm ϕ
5K shield pipe O.D.[F/R]	30 / 30 mm ϕ	60 / 60.3 mm ϕ
80K shield pipe O.D.[F/R]	30 / 30 mm ϕ	60 / 60.3 mm ϕ
Cool-down pipe O.D.	27.2 mm ϕ	42.2 mm ϕ
Distance between couplers	1337.0 mm	1383.6 mm
Cavity package	KEK-a/KEK-b	FNAL/DESY
Cavity type	TESLA-like	TESLA-type
Tuner type	Slide jack	Blade/Saclay
Input coupler type	Disk window	Cylindrical window
Magnetic shield	Inside jacket	Outside jacket
Package length	1247.6 mm	1247.4/1283.4 mm

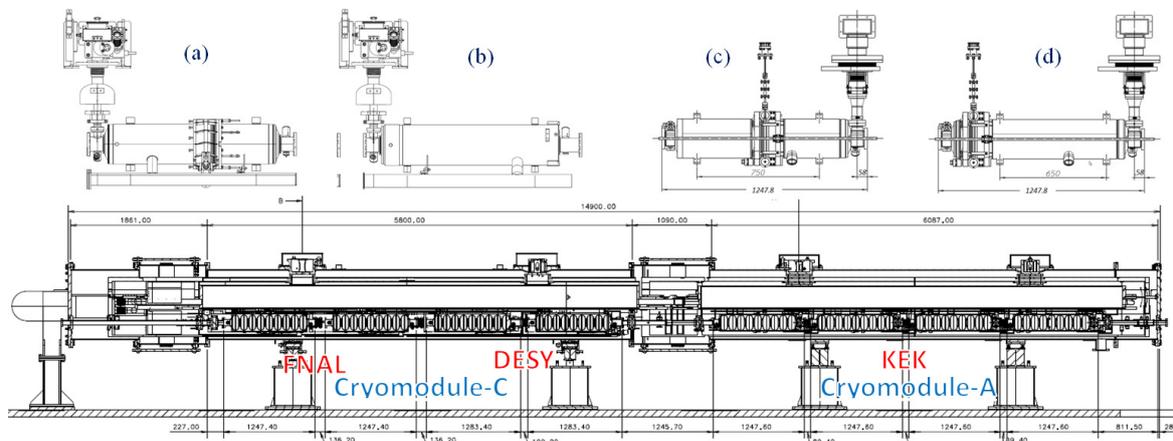


図 1 S1-Global クライオモジュールと各研究所の超伝導空洞パッケージ

- (a) FNAL 空洞 - ブレード型チューナー, (b) DESY 空洞 - サックレー型チューナー,
(c) KEK-a 空洞 - スライドジャッキ型チューナー, (d) KEK-b 空洞 - スライドジャッキ型チューナー。

図1に示すように、Module-A に組み込まれる KEK 超伝導空洞パッケージは、Module-C の FNAL と DESY 空洞において周波数チューナーの設計が異なるように、チューナーの位置が異なる2種類の設計である。この周波数チューナーの性能評価も S1-Global クライオモジュールでの重要な研究テーマである。KEK の空洞パッケージの内、中央部にチューナーを持つものは、ガス回収配管からの支持機構が FNAL/DESY 空洞と同じ構造を持ち“plug-compatibility”を満足する設計となっているが、他方の空洞は、サポート間隔が若干短く 650mm で設計されている。

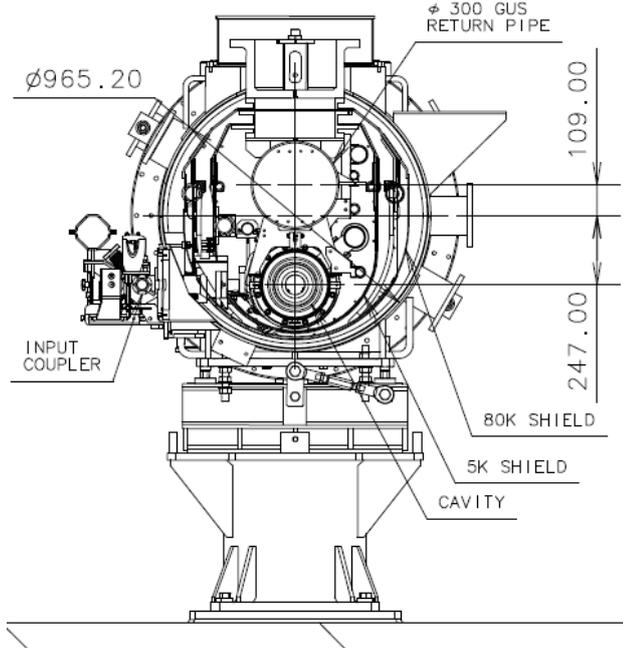


図2 FNAL 超伝導空洞部の Module-C 断面形状

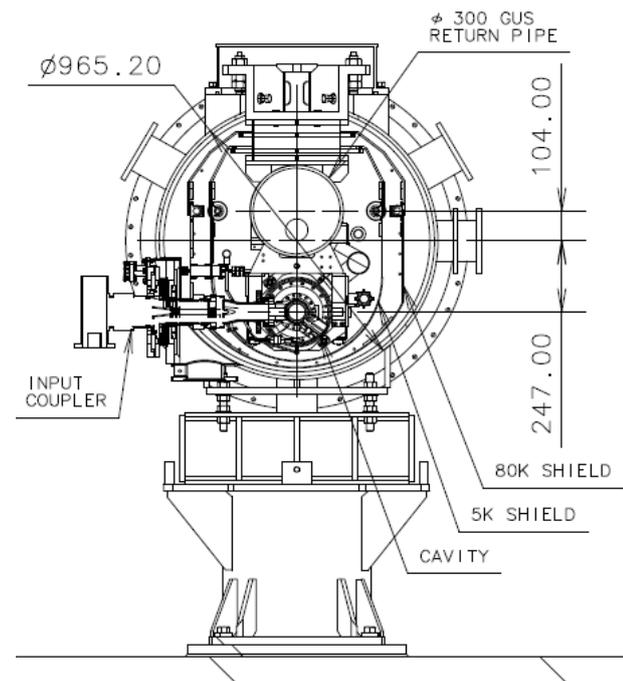


図3 Module-A 断面形状

4. 9セル超伝導空洞の性能試験結果

S1-Global クライオモジュールに組み込まれる2種類の超伝導空洞を図4に示す。DESY および FNAL では、DESY で開発された TESLA 空洞を用いた研究が継続しておこなわれており、KEK では電磁界応力によるセル変形を抑制するために TESLA 空洞に剛性を強める改良などを加えた TESLA 改良型空洞を開発した。S1-Global 用超伝導空洞 8 台は、それぞれの研究所で製造された後、空洞単体での高電界性能の確認試験がおこなわれており、図5, 6, 7に KEK 空洞4台、FNAL 空洞2台、および DESY 空洞2台の性能測定の結果をそれぞれ示す。KEK 空洞については、1空洞が 33 MV/m を達成しているが、3空洞は 27 MV/m であり、電界放出電子による Q_0 値の低下が高電界で見られる。DESY 空洞および FNAL 空洞では、いずれも 29 ~ 33 MV/m が Q_0 値の著しい低下もなく達成されている。図8に、縦型クライオスタット(cw 運転)での S1-Global 用 8 空洞の最大加速電界を示す。8 空洞の平均は 30 MV/m である。クライオモジュールに組込んだ状態でのパルス運転において、平均加速電界 31.5 MV/m を達成することが S1-Global での第一の目標である。

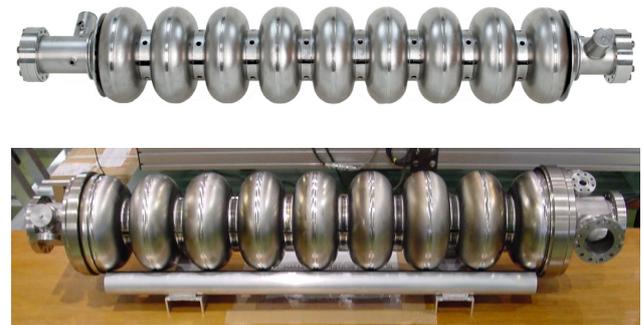


図4 上 TESLA 型 DESY/FNAL 超伝導空洞[7]
下 TESLA 改良型 KEK 超伝導空洞[5]

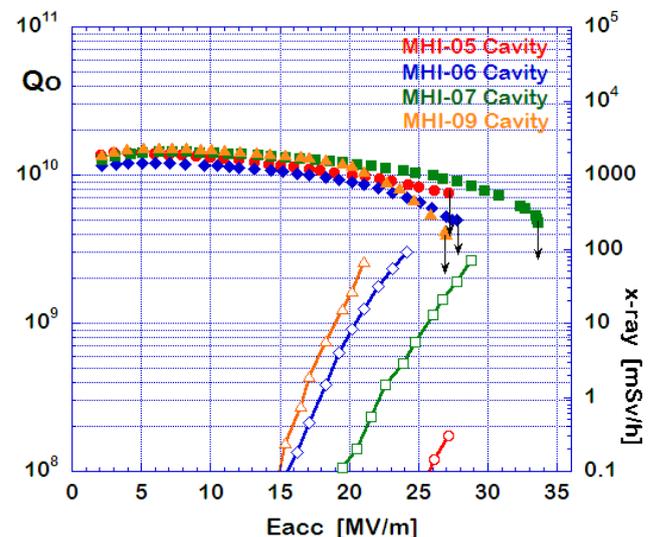


図5 KEK 4 空洞の性能測定の結果

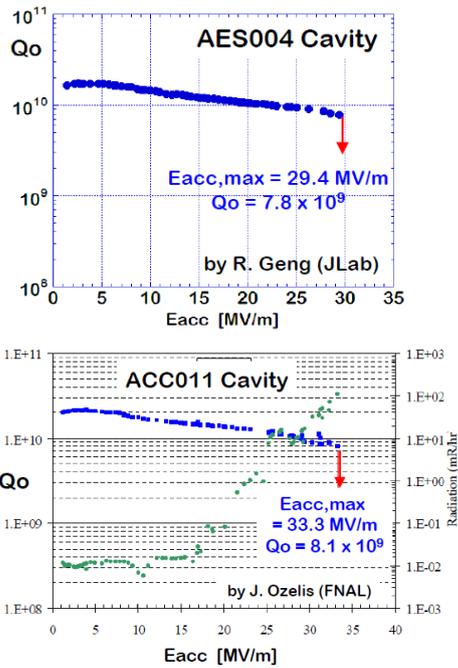


図6 FNAL 2 超伝導空洞の性能測定の結果

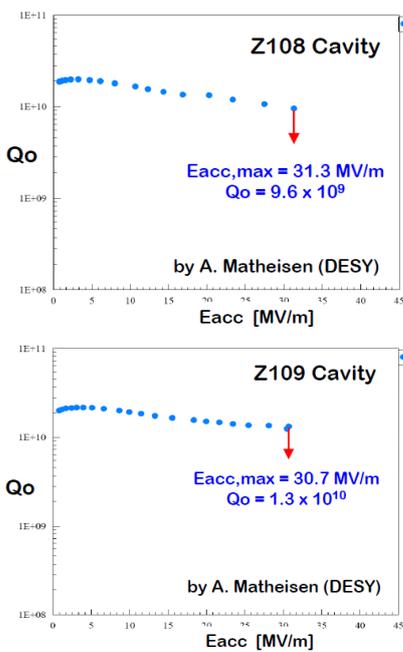


図7 DESY 2 超伝導空洞の性能測定の結果

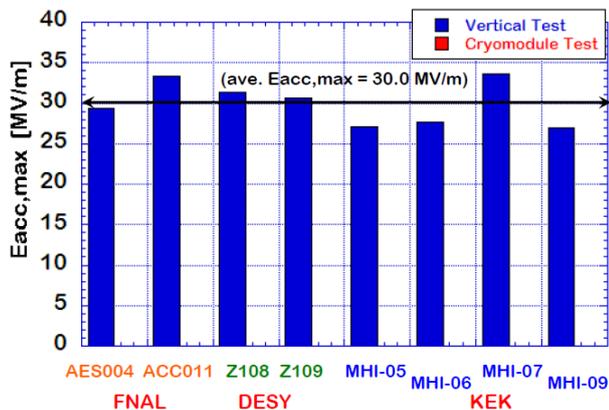


図8 S1-Global 用 8 空洞の空洞性能

5. 空洞の4連化組立て

高電界性能の確認を終えた空洞は、チタン製ヘリウム槽ジャケットが溶接され、各研究所のクリーンルーム内で低温部カップラーおよび真空フランジなどが装着された後、空洞内部を真空状態にしてKEKに空輸された。KEK受入れ後に、加速モード共振周波数の確認およびHOMカップラーの加速モードの遮断周波数の調整などの高周波測定がおこなわれた。空洞外面の十分な清浄化をおこなった空洞は、クリーンルーム内へ搬入され、架台の上に設置された。2010年1月中旬に開始されたクラス10のクリーンルーム内での空洞の4連化組立て作業の様子を図9、10に示す。



図9 FNAL/DESY 空洞の4連化組立て作業



図10 KEK 空洞の4連化組立て作業

FNAL/DESY 空洞の 4 連化組立ては、図 11 に示すように FNAL 3 名、DESY 2 名、KEK 2 名から構成される国際協力による空洞組立てチームによっておこなわれ、大きなトラブルもなく約 1 週間ですべての組立て作業を完了した。また、KEK 空洞の 4 連化組立て完成後には、図 12 に示すように STF 関係者の記念撮影がおこなわれた。



図 11 FNAL/DESY/KEK 空洞組立てチーム



図 12 KEK 空洞の 4 連化組立て完成後の記念撮影

6. 周波数チューナーの組立て

クリーンルーム内で 4 連化された空洞は、レール上を移動してクリーンルーム外の周波数チューナー取付けエリアに設置された。S1-Global 用 8 空洞には、チューナー性能の比較をおこなう目的で、異なるタイプのチューナーが 4 種類用いられている。図 13 に示すように、FNAL 空洞にはブレード型チューナー、DESY 空洞にはサックレー型チューナーが取付けられ、それぞれのチューナー機構にはローレンツ・デチューニング補正用の 2 台の piezo 素子が組み込まれている。KEK 空洞には、図 14 に示す 1 台の piezo 素子を組み込んだスライドジャッキ型チューナーが用いられた。チューナーの設置位置の異なる 2 タイプがあり、2 空洞は中央部に、2 空洞は端部に取り付けられている。FNAL 空洞および DESY 空洞へのチューナーの取付けは、図 15 に示すように INFN から 3 名、FNAL から 1 名のチューナー組立てチームによって、2 月中旬におこなわれた。また、FNAL/DESY 空洞への磁気シールドおよび断熱シートの装

着作業も同時におこなわれた。組立て終了後には、KEK の協力下で各チューナー機構の動作試験もおこなわれ、周波数変化の良好な動作を確認した。図 16 に、チューナー組立ての完了した 4 連化 KEK 空洞を示す。

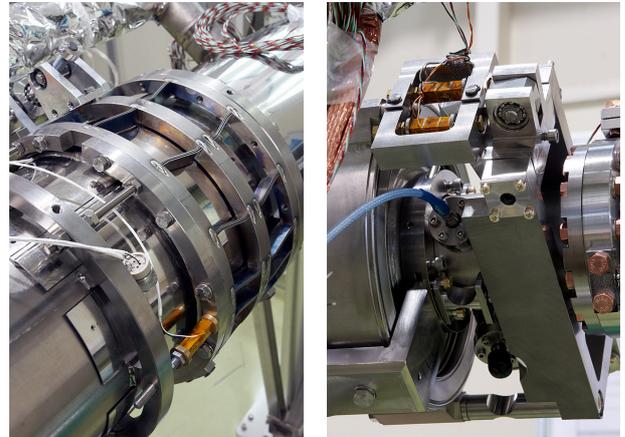


図 13 左 FNAL 空洞用ブレード型チューナー[3]
右 DESY 空洞用サックレー型チューナー[4]

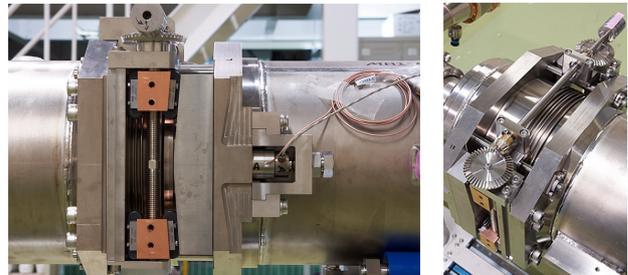


図 14 KEK 空洞用スライドジャッキ型チューナー[5]

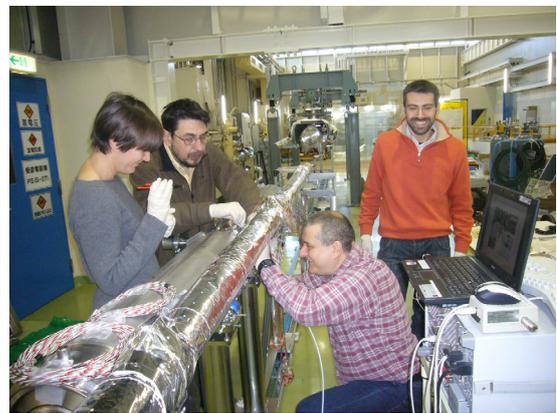


図 15 FNAL/DESY 空洞チューナー組立てチーム



図 16 チューナー組立ての完了した KEK 空洞

7. コールドマスの組立て

冷却配管, 5K 熱シールド, 80K 熱シールド, 多層断熱シート, および, サーマルアンカーなどのコールドマスの組立ては, まず Module-C からおこなわれ, 引き続き Module-A が組み立てられた。この作業は 2010 年 1 月 25 日に開始され, Module-C は予定通り 3 月 19 日に完成した。Module-A も 4 月 27 日に組立てを完了し, 翌 28 日にトンネルへ移動・配置を行った。Module-C の組立て作業において, 磁気シールドの組立て, チューナー調整などは, INFN および FNAL 研究者の協力を得て進めた。作業内容は以下の様になる。

1. Ti 材の液体ヘリウム供給配管および Ti-SUS 異材継手の溶接。
2. INFN および FNAL 研究者によるブレード型/サックレー型チューナーの調整, 磁気シールドの組立て。
3. 図 17 に示すように, 超伝導空洞をガス回収配管への取付け, および空洞スライド機構の調整。
4. 冷却配管の組込み, 空洞軸方向位置固定用インバーロッドへの空洞固定。
5. 5K 熱シールドの組立て, 溶接, 10 層の多層断熱シート (super-insulation) の取付け。
6. 80K 熱シールドの組立て, 溶接, 30 層の多層断熱シートの取付け。
7. Module-C へ温度計 106 個, wire position monitor (WPM) 5 台, 歪ゲージ 24 個, pin diode 24 個の取付け。
8. コールドマスを真空容器(クライオスタット)へ挿入(図 18 参照)。
9. 挿入後, 完成したクライオモジュールを地下のトンネルへ移動し据付。

Module-A についても同様の組立てがおこなわれ, 以上述べたセンサーの他, 空洞ヘリウム容器に 8 台の WPM, クライオスタットに 4 台のレーザー位置測定器が取り付けられている。レーザー位置測定器は冷却中のガス回収配管の動きを測定するために取り付けられた。



図 17 ガス回収配管への FNAL 空洞の取付け



図 18 真空容器への Module-C コールドマスの挿入

8. STF トンネル内への設置・配管接続

Module-A と-C をトンネルに移動した後の組立て作業としては, Module-C と 2K 冷凍器間, および Module-C と Module-A 間の配管接続, Module-A 端部配管組立て, リーク・圧力試験がおもな作業となる。図 19 にヘリウム冷却配管の接続が終了したクライオモジュールの様子を示した。ヘリウムリーク試験では, 熱シールド冷却配管部でヘリウムリークが検知されたものの, 空洞の冷却ラインではリークは検知されず, トンネルへの設置・冷却配管組立て・熱シールド組立てなど予定されたスケジュールで完了した。



図 19 ヘリウム冷却配管接続作業が完了した S1-Global クライオモジュール(手前から, Module-A, Module-C)

9. インプットカップラーの組立て

低温部と室温部の二重の高周波窓を有するインプットカップラーが, S1-Global 用 8 空洞に用いられた。低温部カップラーは, 空洞を清浄環境下で真空封止するためにクラス 10 クリーンルーム内にてすでに取り付けられており, トンネル内では低温部カップラーへの室温部カップラーの接続および導波管変換器の取り付けがおこなわれた。図 20 に, FNAL 空洞および DESY 空洞に用いられた TTF-III インプットカップラーを示し, 図 21 に KEK 空洞用 STF-II インプットカップラーを示す。これら 2 種類のインプットカップラーではセラミック窓の形状が異なっており, TTF-III では円筒型セラミック窓, STF-II では同軸円盤型セラミック窓を採用



図 20 FNAL/DESY 空洞用 TTF-III インプットカップラー[8]



図 21 KEK 空洞用 STF-II インプットカップラー[9]

している。また、空洞への取付けポートの口径として、TTF-IIIでは40mmφであるが、STF-IIでは60mmφと大口径になっておりセラミック窓部での通過電力密度が緩和されている。FNAL 空洞および DESY 空洞への室温部 TTF-III カップラーの取付け作業は、DESY からの1名と KEK との協力でおこなわれた。その様子を図 22 に示す。4 台の室温部 TTF-III カップラーの取付け作業は、3月下旬に約4日間で完了した。一方、KEK 空洞への室温部 STF-II カップラーの取付け作業は5月中旬におこなわれた。その様子を図 23 に示す。カップラー取付けを清浄環境下でおこなうために、簡易型クリーンブースを設置し、クリーンウェアを着て作業がおこなわれた。8 台のインプットカップラーおよび導波管変換器(通称、ドアノブ)の取付けが完了した S1-Global クライオモジュールを図 24 に示す。



図 22 FNAL/DESY 空洞への室温部カップラーの取付け作業 (TTF-III インプットカップラー)



図 23 KEK 空洞への室温部カップラーの取付け作業 (STF-II インプットカップラー)



図 24 8 台のインプットカップラーの取付けが完了した S1-Global クライオモジュール

10. クライオモジュールの冷却準備

S1-Global クライオモジュール内コールドマスの最終組立てが完了後、クライオスタットの端部フランジが取り付けられ、内部真空排気がおこなわれた。また、この段階で冷却状態をモニターするセンサー類の最終確認がおこなわれた。クライオモジュールに取り付けられた全センサーは、温度計 214 点、歪計 48 点、pin diode 48 点、WPM 18 点、位置測定計 5 点となった。

ヘリウムリーク試験が完了後、クライオモジュールに 2K の液体ヘリウムを供給する 2K 冷凍器と地上部冷却システムとの低温配管が接続され、6 月 4 日冷却が可能な状態になった。2K 冷凍器を図 25 に示す。冷却が開始されたのは 6 月 8 日で、2010 年 1 月に始まった組立てスケジュール表に記載された 6 月 7 日の冷却開始予定日から 1 日の遅れですべての組立て作業を終えることが出来た。

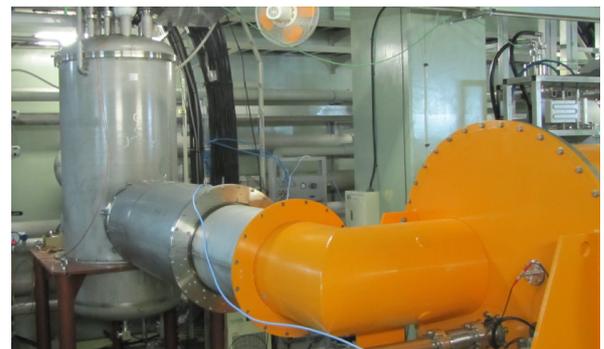


図 25 2K 冷凍器と S1-Global クライオモジュール

11. クライオモジュール試験のスケジュール

クライオモジュールの冷却試験は2回に分けておこなわれ、6, 7月の第1回冷却時にはおもに低電力高周波試験、9~12月の第2回冷却時にはおもに大電力高周波試験が予定されている。それぞれの冷却試験においておこなわれる試験項目を以下に示す。

第1回冷却試験：6~7月の6週間

1. 4Kでの静的熱負荷測定。
2. 2Kでの静的熱負荷測定。
3. 粗調整用モーターチューナーの周波数可変範囲、ヒステリシス特性測定。
4. 微調整用ピエゾチューナーの周波数可変範囲、ヒステリシス特性、周波数調整の再現性測定。
5. インพุットカップラー結合度可変範囲測定。
6. モニターカップラーの結合度の較正。
7. HOMカップラーの加速モードのフィルター特性測定。
8. ピエゾチューナーのパルス応答特性測定。
9. 機械振動モード測定。

などをおもにおこなう予定である。

8月末から9月初旬の期間：2週間

インพุットカップラー8台の大電力高周波源による室温でのRFエージングをおこなう予定である。

第2回冷却試験：9~12月の15週間

1. 4Kでの静的熱負荷測定。
2. 2Kでの静的熱負荷測定。
3. 高電界発生実験(各1空洞)。
4. ローレンツ・デチューニング測定。
5. ローレンツ・デチューニングの補正実験。
6. 1空洞毎の動的熱負荷測定。
7. 4空洞同時運転の動的熱負荷測定。
8. 8空洞同時運転の動的熱負荷測定。
9. 低電力高周波制御システム(LLRF)の実験。
10. 分布型大電力高周波源システム(DRFS)の実験。

などをおもにおこなう予定であり、12月末にはS1-Globalクライオモジュールに関するすべての試験を終了する。

12. まとめ

S1-Globalクライオモジュールの建設計画は2008年4月に提案されて以降、各研究所間の調整、設計段階を経て、2009年12月末までに、INFNからCryomodule-C、DESYから2空洞、FNALから組立て部品を含む2空洞(1空洞は1月初め着)が無事にKEKに届けられ、2010年1月よりS1-Globalクライオモジュールの建設を開始した。その後、組立て作業は順調に進められ、5月末にはトンネル内作業も終了し、冷却試験の準備を当初の予定通りに完了した。6月下旬の現在、S1-Globalクライオモジュールは、順調に2Kへ冷却され、空洞の低電力試験がおこなわれており、12月末までクライオモジュール試験が続けられる予定である。

[参考文献]

- [1] N. Ohuchi, *et al.*, "Plan of the S1-Global Cryomodule for ILC", PAC09, Vancouver, BC, Canada (2009) WE6RFP005.
- [2] N. Ohuchi, *et al.*, "Construction of the S1-Global Cryomodule for ILC", IPAC10, Kyoto, Japan (2010) WEPE008.
- [3] L. Lilje, "XFEL : Plans for 101 Cryomodules", SRF'07, Peking University, Beijing, China, (2007) MO102.
- [4] C. Pagani, *et al.*, "Piezo-assisted Blade Tuner : Cold Test Results", SRF'07, Peking University, Beijing, China (2007) TUP72.
- [5] E. Kako, *et al.*, "Cryomodule tests of four Tesla like cavities in the Superconducting RF Test Facility at KEK", PRST-AB, Vol. 13, 041002 (2010).
- [6] C. Pagani, *et al.*, "The TESLA Cryogenic Accelerator Modules", TESLA Report 2001-36.
- [7] B. Aune, *et al.*, "Superconducting TESLA Cavities", PRST-AB, Vol. 3, 092001 (2000).
- [8] W.-D. Moeller, *et al.*, "High Power Coupler for the TESLA Test Facility", SRF'99, Santa Fe, NM, USA (1999) p577.
- [9] E. Kako, *et al.*, "Advances and Performance of Input Couplers at KEK", SRF'09, Berlin, Germany (2009) p485.