

EURO-XFEL の量産化超伝導空洞モジュール建設に携わって (1年間の DESY 長期滞在記)

阪井 寛志*

Participating in the Construction of the Cryomodules of EURO-XFEL Superconducting Cavities
(One-Year Working Report at DESY)

Hiroshi SAKAI*

Abstract

EURO-XFEL was constructed to offer the most intense SASE free electron laser (FEL) in x-ray regime at DESY of Hamburg from 2009. I worked in DESY for one year to join the construction of the EURO-XFEL accelerator and to measure the performances of more than 800 1.3 GHz 9-cell superconducting cavities after the cryomodule assembly work in a mass-production phase. Especially, it is important to evaluate how many cavities would be degraded during cryomodule assembly work after the vertical tests. The mass-production of 100 cryomodules with 800 superconducting cavities is the largest scale in the world. In this article, we report my one-year stay at DESY concerning about the EURO-XFEL accelerator construction with this cryomodule test.

1. はじめに

2016年4月から2017年3月までKEKの長期海外派遣制度「高エネルギー加速器研究機構長期海外派遣制度」を利用し、ドイツ、ハンブルクにある DESY 研究所にて超伝導空洞の試験開発に携わった。主な目的は EURO-XFEL 加速器の建設に、1.3 GHz の 9 セル超伝導空洞の研究開発を通じて貢献することであった。800 台もの超伝導空洞の量産はいままでに経験のない規模であり、将来のより大規模な計画における問題点を見極めることにつながる。そこで、DESY の超伝導空洞開発グループに 1 年間加わり、この超伝導空洞の測定、モジュール化の作業に参加した。

2. EURO-XFEL 加速器

2.1 概要

EURO-XFEL はドイツ、ハンブルクに建設された X 線自由電子レーザー用の加速器である。

図 1 に加速器全体の構成を示す。EURO-XFEL

は高輝度 RF 電子銃を含む injector 部、1.5 km の約 800 台もの超伝導空洞からなる主ライナック部、200 m ものアンジュレータによる SASE-XFEL 生成部およびビーム実験を行うエンドステーションからなっており、全長 3.4 km もの長さの施設である。これらはハンブルクにある DESY サイトから地下のトンネルに置かれ、トンネルはエンドステーションが置かれているハンブルク市の東隣のシェーネフェルト市にまで延びている。

表 1 に EURO-XFEL の加速器のパラメータを示す。加速器としての特徴は 800 台もの量産化された超伝導空洞を用いることで、duty 1%程度 of long-pulse の大電流ビーム運転を可能としているところである。この大電流電子ビームを 17.5 GeV まで加速し、世界最高輝度の 1 Å 程度の X 線レーザー (XFEL) を発振させることを可能としている。

EURO-XFEL はヨーロッパの 11 か国からなる施設であり、各国が EURO-XFEL の加速器コン

* 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization
(E-mail: hiroshi.sakai.phys@kek.jp)

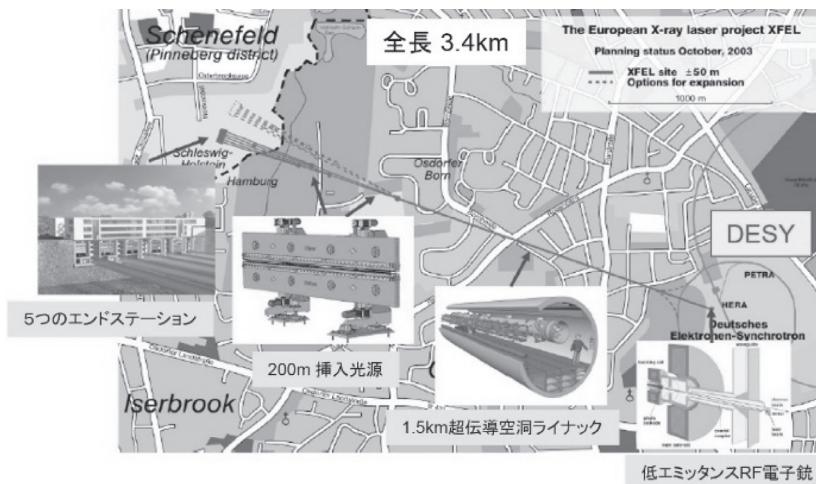


図1 EURO-XFEL 加速器全体像.

表1 EURO-XFEL 加速器の主なデザインパラメータ.

Photon energy	0.2-24 keV
Pulse duration	<100 fs
Pulse energy	a few mJ
Superconducting linac	17.5 GeV
Peak current	5 kA
Normalized (sliced) emittance	<1.4 mm mrad
Bunch charge	~1 nC
Pulse length of train	650 μ s (2,700 bunches)
Repetition ratio	10 Hz (27,000 bunches/s)



図2 EURO-XFEL の超伝導空洞クライオモジュールのトンネル内の設置の様子.

ポネントの設置開発に携わっている。超伝導空洞の主ライナック部は8個の空洞が一つのクライオモジュールとして組み立てられ、それらを100個トンネル内に並べる。このトンネルインストール前に DESY 研究所で、超伝導空洞クライオモジュールの最終性能評価試験が行われる。その試験に合格したクライオモジュールのみ DESY サイトから図2のように地下のビームラインに移設される。

2.2 EURO-XFEL の超伝導空洞製造の流れと課題

Long-pulse の大電流ビームの加速を可能とする EURO-XFEL の超伝導空洞には表2に示されるように 1×10^{10} を超える高い無負荷 Q 値 (Q_0) と 23.6 MV/m 以上の高い加速勾配が要求されている。図3はその超伝導空洞とそれを内包するクライオモジュールの様子である。

表2 EURO-XFEL 超伝導空洞のパラメータ.

Design gradient	>23.6 MV/m
Unloaded-Q (Q_0)	> 1×10^{10}
Installed module	100 modules
Cavities per module	8
Loaded-Q (Q_L)	4.6×10^6
Total beam current	5 mA
RF pulse	1.37 ms
Beam pulse	0.65 ms
Repetition ratio	10 Hz
Average beam power	650 kW

超伝導空洞は図3(上)に示すように 1.3 GHz の共振周波数の9セルの Nb 製の空洞でできている。空洞は RI 社(独)と ZANON 社(伊)の2



図3 EURO-XFELの超伝導空洞写真(上)とクライオモジュールの模式図。

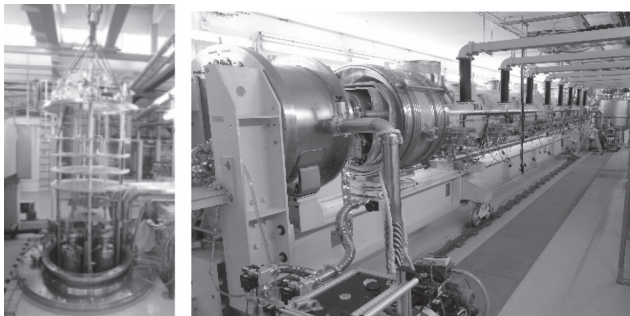
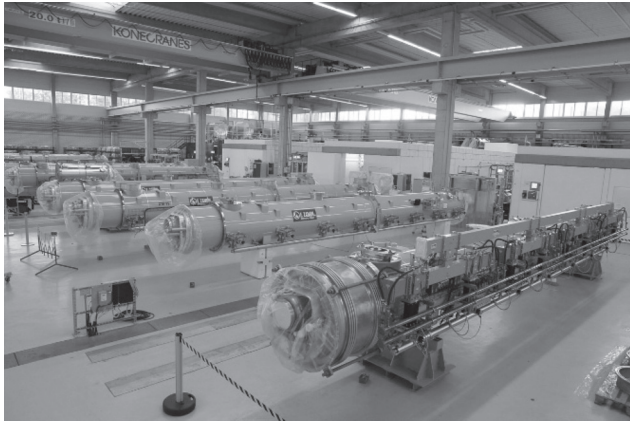


図4 AMTF (DESYにある超伝導空洞試験施設)。(上)全体像。(左下)縦測定スタンド。(右下)クライオモジュール測定スタンド。

社で約400台ずつ作成された。純度の良いNb板材 (RRR>300) から加工を行い、電子ビーム溶接により、図3に示すような超伝導空洞が作成される。その後、同社にて、電解研磨または化学研磨により、空洞内面の表面処理を行い、最後に空洞内の field emission 源となる微粒子を高圧超純水洗浄により除去し、ISO class 4のクリーンルームにて埃が入らないように梱包され、図4に示す DESY の超伝導空洞試験施設 (AMTF) に一度納められる。そこで空洞単体の性能評価試験(縦測定)を図4(左下)に示されるように行い、空洞が表2の加速勾配とQ値を満たしているかを確認する。これらが EURO-XFEL の量産化空洞

作成の一連の流れである。私の DESY 滞在前にすでに800台もの超伝導空洞の縦測定は無事終了し、仕様を満たした空洞の加速勾配 (usable gradient) の平均値は 29.8 ± 5.1 MV/m であった。この値は要求加速勾配 (23.6 MV/m) よりも大きく、縦測定の時点では量産化技術が成熟していることが明らかとなった¹⁾。

この後、性能試験をクリアした空洞は図3(下)にある形のクライオモジュールとして組み直すために、一度、サクレ研究所(仏)に送られ、研究所内のクリーンルーム (ISO class 4) で8台の空洞を一体化する。さらに、空洞以外の重要なコンポーネントである入力カプラー、超伝導電磁石、ビーム位置モニターなどと接続し、モジュール化された状態で、サクレからトラックで再度 DESY 研究所の AMTF に送られてくる。このモジュールのテストを図4(右下)にあるように AMTF にて行い、モジュール状態での性能を確認することが、ビームライン設置前の重要な工程となる。

私が滞在中に取り組んだ課題は、モジュール化における空洞性能の劣化の原因と対策を明らかにすることであった。超伝導空洞加速器をモジュール化する工程での性能劣化は、世界的な課題である。その主な原因はモジュール化中のゴミ混入による field emission による性能劣化である。私の場合もいままで KEK で Compact ERL (cERL) 用の主加速空洞用9セル1.3 GHzの超伝導空洞加速器を製作していたが、縦測定で25 MV/m以上の性能を有していた超伝導空洞がモジュール化した後、10 MV/mから field emission による放射線の大量発生により性能劣化を起こすという経験があった²⁾。いままで経験したことのない800台もの超伝導空洞の製作とインストールを行い、量産化時における問題点を明らかにすることは、超伝導空洞加速器をベースとしたプロジェクトが多く提案されている現在、極めて重要である。これが滞在中の私の大きな関心事の一つであった。

EURO-XFEL の場合、空洞単体試験では問題なかった800台もの空洞や入力カプラーなどがそれらを組み合わせたクライオモジュールが組立後も問題なく性能が確保できたのか? モジュール組立中に予期せぬ問題はなかったのか? 次節で、組立の現場における建設中の状況を紹介する。

3. 滞在中の EURO-XFEL の建設状況

3.1 DESY 滞在時の建設の状況

私の DESY 到着直後、2016 年 4 月には 100 台中約 80 台のクライオモジュールがすでに AMTF でのモジュールテストを終えていた。AMTF には 3 つのクライオモジュールを測定するスタンドがあり、それらを交互に使用することで、モジュールのテストと EURO-XFEL トンネルへの設置がスムーズに行われていた。AMTF では図 4 のように大量のクライオモジュールの測定を行い、トンネルにインストールする必要がある。そのため、DESY 以外にポーランドの研究所 (IPJ-PAN) の協力のもと、IPJ-PAN のメンバー (20 人弱) とともに現場では朝 7 時から夜 11 時まで 2 交代でシフトを組み、週に 1 台のペースでクライオモジュールの測定が行われた。AMTF での作業打ち合わせは毎日 8 時 45 分に現場で行われ、その日の予定が決められる。それとは別に超伝導空洞モジュールはフランスのサクレー研究所、LAL-Orsay と共同で製作されており、1 週間に 1 回の TV 会議を通じ、毎週の進捗状況をチェックし、EURO-XFEL の大量の超伝導空洞クライオモジュールの工程管理を行っていた (図 5)。

このモジュール製作工程で重要なのは、いかに空洞の性能を保ったクリーンなモジュールアセンブリができるかである。前節で述べたように空洞の性能を保つためには field emission を抑えるために、空洞はサクレー研究所の ISO class 4 のクリーンルーム内で生まれ、モジュール化される。そのモジュールが DESY に運ばれ、AMTF のクライオモジュールスタンドに接続する際にもゴミ混入を回避するためにクリーン環境下で再度接続する必要がある。さらにはトンネルのビームラインに最終的に接続するときにも同様な環境下で作業を行うことが要求される。EURO-XFEL ではゴミの混入を起こさぬように、(1)「真空作業時の際にゴミの混入を防ぐ、slow pumping & venting system の導入³⁾」、(2)「モジュールアセンブリ用のローカルクリーンブースの作成」を行い、モジュール化でも空洞の性能を劣化させないような工夫を行っていた。

図 6 はモジュール測定スタンドでの真空作業の様子である。モジュールテストを行うために空洞



図 5 週 1 回 (水曜) の TV 会議の様子。

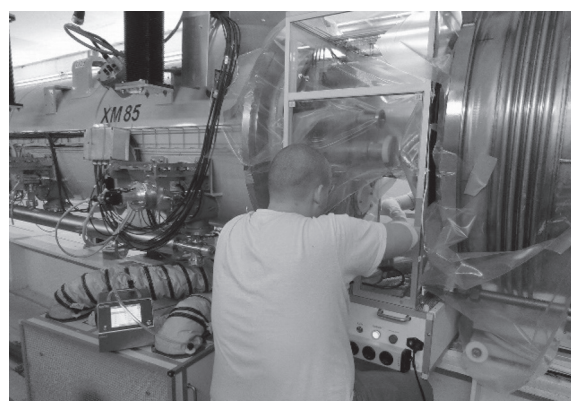


図 6 AMTF でのローカルクリーンブースを用いたモジュールアセンブリ作業の様子。

の真空引きを行う必要があるが、その真空ポートの接続時にゴミの混入を回避するため、図 6 のようにモジュールに特化したローカルなクリーンブースを用いて接続作業を行う。真空フランジ部以外を静電シートで養生後、ブースの下全面を覆う HEPA filter からクリーンな一様清浄流を流し、作業場所のローカルなクリーンな環境を保持している。ネジを外した真空フランジのネジ穴にはゴミが溜まっており、そこをイオンガンで、 $0.3 \mu\text{m}$ レベルの particle counter でカウントが 0 になるまでブローし続け、その後、フランジの接続を行う。接続を行った後はわずかなゴミの動きも起こさぬように slow pumping を行うなど、ゴミ混入回避の対策がモジュール接続作業では徹底して行われていた。このような作業はサクレー研究所の空洞接続作業でも同様に行われている。

私は DESY の AMTF での現場作業に参加した。ここでは、クライオモジュールの性能評価測定まで、縦測定で良い性能を記録した空洞の保持のた

めのクリーン作業に細心の注意を払っていることがわかった。2016年7月までにクライオモジュールの組立および測定作業が行われ、インストールされた97台のクライオモジュールでの空洞測定の結果は 27.7 ± 2.7 MV/mと概ね性能が確保され⁴⁾、モジュールに組み込んだ後も要求値である23.6 MV/mを十分確保できていることがわかった。この性能を確保した後に図7のようにトンネル内にモジュールを吊り下げる作業を行い、さらに図8に示すようにビームライン上のフランジの接続もAMTF同様細心の注意を払いクリーンブース内で作業が行われた。

特筆すべきは空洞だけに限らず、クライオモジュール前後に接続された真空チェンバー(50 m以上)内も一度、クリーンルーム内で超純水洗浄&ベーキングを行い、図8同様のクリーンブースを用意し、接続を行い、空洞への運転中のゴミによるfield emissionの劣化を起こさないような組立作業を行って、ビームラインの接続を行っていることであった。

3.2 モジュール化でのトラブルを乗り越えて

2016年9月までに前述したようにトンネル内に97台のクライオモジュールが性能劣化を起こさず、無事にインストールされた。そこに至るまでにはモジュールテストの段階で、様々なトラブルが発生した。特に問題の多かった部分はモジュールに接続した入力カップラーである。

図9が入力カップラー全体図である。セラミック窓は筒状の70 K温度のcold窓と室温部のwarm窓の2枚を用い、カップラー部の一つの窓が割れて

も、問題ないような2枚窓構造になっている。先端のアンテナを介し、空洞にパワーを送る同軸構造になっているが、内導体のロッドを用いてcold窓ごとアンテナを動かすことで、結合度(Q_L)を調整することができる。内導体の内側のロッドはモーターと接続するためにRFが通る真空状態のセラミックの内側と隔離するためにベローズで図9のように分けられ、ロッドの部分は大気になっている。入力カップラーは事前にRFによるコンディショニングを行うが、そのコンディショニングを行う際に、内導体と一体のベローズがリークを起こすことがモジュール接続後に頻発した。

この原因を調べるべく、カップラーを分解したところ、図9の写真にあるように内導体のロッド部に放電痕が見られ、内導体の内側で放電が起こっていることがわかった。入力カップラーは、RFコンディショニングをスムーズに行うために、内導体部にDC電圧をかけられる構造になっており、内導体部は外導体と絶縁されている。この構造のため、RFが一部warm側に漏れて内導体内に入ってしまったのではないかと疑われた。そこで、内導体の中の構造を模擬し、RFが内導体のwarm側から入ったとした場合のRFシミュレーションを行ったところ、図10にあるように図9の写真にある場所にRFの電場のpeakが見られた。



図7 トンネル内へのクライオモジュールの吊り下げの様子。モジュールを移動し吊り下げるための専用の台車(Mullewupp)を用意し、トンネル内に吊り下げる。

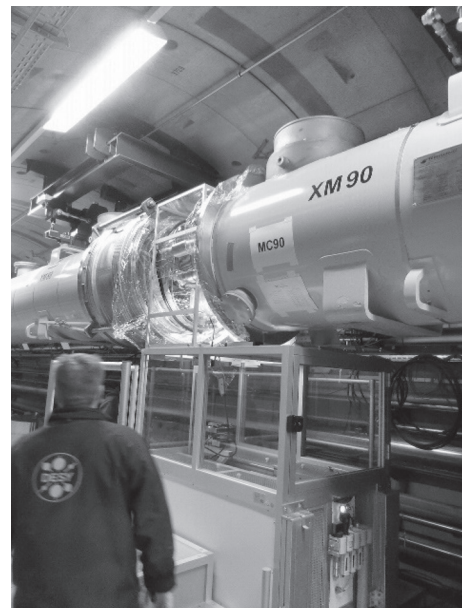


図8 トンネル内でのモジュール接続作業の様子。ローカルクリーンブースを用いて間にHOMダンパーの接続を行う。

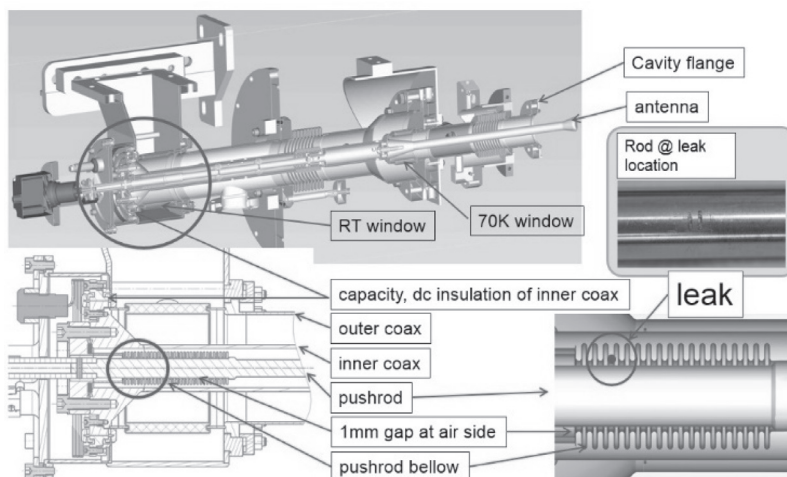


図9 EURO-XFEL 用入力カプラーとリーク箇所.

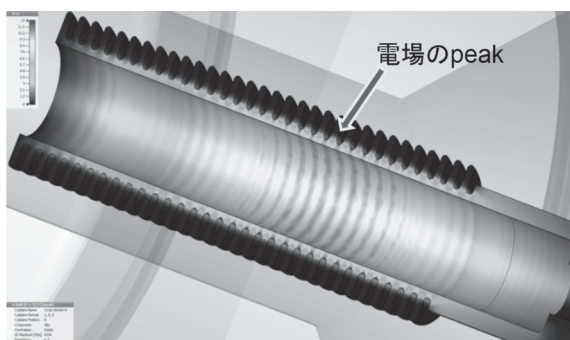


図10 内導体ベローズのRFシミュレーション結果. ベローズの真ん中に電場のpeakが見られる.

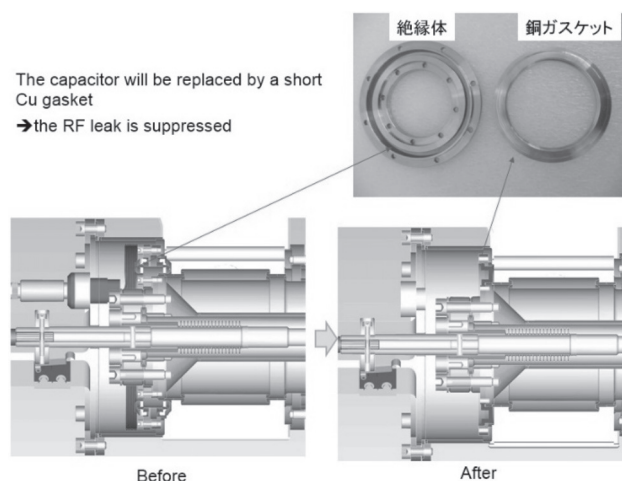


図11 入力カプラーのガスケット交換.

EURO-XFEL の前身であった DESY の FLASH 加速器でも同じ構造の入力カプラーを用いていたが、FLASH ではこの内導体のベローズの長さが短くこのような RF の共振は見られなかった。結合度可変範囲を大きくするために、ベローズを長くしたことが災いし、ベローズ部に放電を起こす結果となった。特にモジュール接続の際は、入力カプラーが空洞に対し、まっすぐに接続されない状況も多く、内導体が多少折れ曲がった状態で接続され、ベローズとロッド間の電場の高い場所の隙間が狭くなり、放電が起りやすかったと判断される。

真空リークは上記原因が問題と判断し、図11にあるように RF のリークを起こすもととなった絶縁部から漏れる RF をシールドするために銅ガスケットに置き換える作業を行うことにした。この判断を行ったのが、ちょうど私が DESY 滞在直前であり、すでに 80 台以上のクライオモジュール

がトンネルに入った状況であった。しかし、トンネル内、およびこれから来るモジュールに対し、800 台すべての入力カプラーのガスケット交換を 2016 年 9 月末までのトンネルインストールに間に合わせるために、ガスケット交換作業を行うこととなった。DC 電圧付加のバイアスコンディショニングを行うことはできなくなったが、それでも問題なく、RF コンディショニングを行うことができ、交換作業以降、致命的な真空リークは起こることはなくなった。

少しの設計変更が、問題を生じ、量産化においては致命的となることを実感した瞬間であり、量産化前には各コンポーネントに対して十分なテストを行う必要があることを痛感した次第である。

もう一つのトラブルとして、モジュール中の

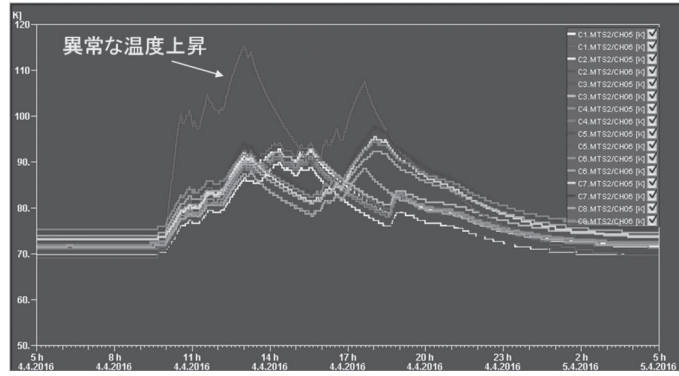


図 12 XM85 モジュールの 5 番目の空洞の入力カプラーの温度測定結果. グラフの矢印 (warm 部) のように大きな温度上昇が見られる.

RF コンディショニングでの予期せぬカプラーの発熱も問題となった. AMTF でのモジュール性能評価試験ではクライオモジュール中の 8 個の空洞を一つずつ RF コンディショニングを行っていくが, 建設の後半のモジュールに入るにつれて, 8 空洞中の 1 空洞に使う入力カプラーに予期せぬ温度上昇が見られた. 図 12 は 85 台目のクライオモジュール (XM85) の 5 個目の空洞に付けた入力カプラーの温度上昇の様子である. RF power 投入時に cold 窓と warm 窓の間の外導体 (warm 部) に 30 K 以上の大きな温度上昇が見られているのがわかる.

この入力カプラーをモジュールに取り付ける前に LAL-Orsay で入力カプラー単体の RF コンディショニングを行っているが, 残念ながら, そこでは温度分布測定を行っておらず, この問題はモジュール接続時に判明した. ただし, 前半のモジュールではこのような問題は見られず, 大量の入力カプラーを作っている間になんらかの製造工程で問題が生じたと思われ, 頻繁に工場に赴き品質管理の状態を問い合わせた. 入力カプラーの内部を詳細に観察したが, 異常は見られず, 結果, 2016 年 9 月末のモジュールのトンネルインストールまで問題点がわからないままであった. このトラブルを回避するために, 私が DESY 滞在中に真っ先に行った仕事は問題のあった入力カプラーと新しいカプラーの交換作業であった.

図 13 が warm 窓の交換作業の様子である. 幸い, 問題のある部分は warm 部であるため, クリーンルーム作業を必要とする cold 窓は交換せず, 簡易のクリーンブースをモジュール脇に図 13 のように配置し, AMTF で warm 窓のみを交換す



図 13 モジュールの入力カプラーの warm 窓の交換作業の様子. 交換作業中の筆者.

ることが可能であった. ただし, カプラー交換作業は細かい作業であり, 1 日に 2 個の入力カプラーの交換が限度であった.

2016 年 4 月はドイツ滞在のための家の整理, ビザ手続きや DESY での事務手続きなどがあり, 4 月の終わりからようやく AMTF やトンネル内のモジュール設置作業などの現場を見ることが可能になったが, 9 月末までのモジュールのトンネルインストールに間に合わせるために, KEK にいるときから入力カプラーの製作に私が携わっていたこともあり, 手続き後すぐにこのカプラー交換作業に 5 月から携わり, モジュールがトンネルに納まる 7 月末まで従事することとなった.

そのおかげかどうかわからないが, 9 月末までに無事にモジュールが 97 台設置された. 11 月からトンネル内の超伝導空洞の冷却を開始し, 年末に 4 K, 年明けにも 2 K に無事に冷却を行い, その後 2017 年 1 月からビームコミッショニングを

開始した。その後の成果はすでに5月のIPAC2017で報告されているように SASE-XFEL の発振が2017年5月に確認され⁵⁾、2017年7月現在、13.5 GeV まで電子ビームが加速され、8.3 keV の SASE-XFEL の発振がエンドステーションにある SPB/SFX ビームラインにて確認されている。その後はユーザー実験を予定している。

4. ま と め

私が DESY 滞在中に関わった、EURO-XFEL 用の量産化クライオモジュールの建設を中心に、長期滞在報告としてまとめた。モジュール組み込みによる性能劣化が危惧されたが、緻密なクリーン作業のもと、若干の性能劣化は見られたものの、23.6 MV/m の要求値に対し、97 モジュールの測定結果として、 27.7 ± 2.7 MV/m の性能を保持していたことは、私にとっては大きな驚きであったとともに、このようなクリーン作業を KEK での超伝導空洞開発に生かさなければいけないと切実に実感した。特にこのような現場の詳細な一つ一つの細かい作業を長期滞在中に目の当たりにできたことは大きな成果であった。さらに、100 台の量産化モジュールをトンネルに設置するまでの工程管理について、考えさせられた。今回は入力カプラーでのトラブルでモジュールの再組立を行うこととなったが、このようなことが量産化超伝導空洞では起こりうることを想定して、余裕のある組立や測定を行う必要があることがわかった。建設間際には国際協力のもとで作業が進む中、フランスサクレ研究所で組み立てられたモジュールはどんどん DESY に送られており、AMTF 内はモジュールの置き場所がないほど大量のクライオモジュールが置かれることとなった。前述の私が携わった入力カプラーの作業も効率的に行うことができなければ、作業工程は行き詰っていたと思われる。

DESY 滞在中の後半では、建設が一段落ついたので、私が取り組んでいるテーマの一つである高 Q 値、高勾配超伝導空洞の開発にも取り組むことができたが、前代未聞の 800 台もの超伝導空洞の量産化モジュール建設現場に携わらせてもらったのが非常に貴重な経験であった。さらに、設置されたモジュールが実際ビーム加速する場面を無事

に見届けることができたのは、加速器屋としては大きな幸せであった。

帰国後はこのような超伝導空洞の経験を生かし、当面、日本で行われる超伝導空洞のビーム加速が差し迫っている超伝導空洞クライオモジュール試験 (RIBF, IFMIF など) にクリーン作業の徹底化を行うことで空洞性能劣化の防止に貢献できればと思うとともに、将来の ILC や CW-XFEL などの量産化超伝導空洞モジュールへも、この経験を生かせればと思い、筆を置くことにする。

謝 辞

DESY では当時 EURO-XFEL の超伝導空洞 Group (以下 Grp.) のリーダーであった W. D. Moeller 氏に EURO-XFEL 建設中、超伝導空洞クライオモジュールの建設現場にスムーズに参加できるように全面的に協力いただきました。ここに深く感謝いたします。また、Moeller 氏を含めた DESY の超伝導空洞 Grp. の皆さま方には、超伝導空洞の開発とともに、不慣れな海外滞在中、様々な面でサポートをいただきました。おかげで1年の長期滞在中が無事に快適に過ごせましたことを感謝いたします。DESY 海外派遣に際し、山口誠哉加速器研究施設長、加古永治教授には、強く推薦いただき、派遣実現に全面的にサポートをいただきました。深く感謝いたします。最後に、KEK の超伝導空洞 Grp. の皆さまには私の不在中、KEK 側の色々なサポートをしていただきました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) D. Reschke et al., Phys. Rev. Acc. Beams 20, 042004 (2017).
- 2) H. Sakai et al., "High Power CW Tests of cERL Main-Linac Cryomodule", Proc. of SRF2013, Paris, France, p.849 (2013).
- 3) M. Boehnert et al., "Particle Free Pump Down and Venting of UHV Vacuum Systems", Proc. of SRF2009, Berlin, Germany, p.883 (2009).
- 4) N. Walker et al., "Performance analysis of the European XFEL SRF cavities, from vertical test to operation in modules", Proc. of LINAC2016, East Lansing, MI, USA, p.657 (2016).
- 5) W. Decking et al., "Commissioning of the European XFEL Accelerator", Proc. of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, p.1 (2017).