

■ 研究紹介

ILC に向けた STF Phase-2 計画の進展

KEK 加速器研究施設

山本 康史

yasuchika.yamamoto@kek.jp

2016年2月9日

1 始めに

1.1 STF Phase-2(STF-2)の目的

2013年にILC(International Linear Collider)[1]計画のTechnical Design Report(TDR)[2]が刊行された。それによるとILCの建設にあたり世界の三地域(アジア, 北米, ヨーロッパ)において開発された超伝導空洞の性能がILCスペック(表1)に到達していることが前提となっており, これを実証すべく高エネルギー加速器研究機構(KEK)内にあるSTF(Superconducting RF Test Facility)[3, 4]においてSTF-2計画が実施されている(進行形なのはまだ終了していないため)¹。STF-2の目的とは, すなわちTDRに記述されたILCスペックでクライオモジュール(超伝導空洞および周辺機器を収納したクライオスタットのこと)を動作させ, ILCと同様の条件でビーム運転を行うことにある。STF-2は当初, 26台の空洞が収められた3台のクライオモジュール(TDRに示されたRF structureの1ユニットに相当する)によるビーム加速試験を行うという計画であったが, 諸々の事情により, 12台の空洞を1台半の大きさのクライオモジュールに収めたビーム加速試験に変更された。8空洞の入ったクライオモジュールをCM1, 4空洞が入った方をCM2aとよぶ。図1はSTF-2クライオモジュールおよびSTF-2加速器の概観図である。

STF-2のこれまでの経緯を簡単に説明すると, 2014年秋に最初の冷却試験が行われ, 低電力試験(low power test)および静的熱負荷(Static heat load)²測定が実施された。そして, 昨秋の2回目の冷却試験では大電力試験(high power test)が実施され, クライオモジュールにおける全空洞の最大加速勾配が確認された。詳細は第3章で述べる。

¹ STF-2の主なメンバーは以下の通りです。

明本 光生, 加古 永治, 小島 裕二, 沢辺 元明, 宍戸 寿郎, 竹中 たてる, 仲井 浩孝, 中西 功太, 早野 仁司, 原 和文, 本間 輝也, 松本 利広, 道園 真一郎(以上, KEK 加速器研究施設), 近藤 良也(KEK 素粒子原子核研究所), 木村 誠宏(KEK 超伝導低温工学センター), 山本 明(KEK 先端加速器推進部)

² 空洞に大電力高周波を投入しない状態でのクライオモジュール全体の消費電力のこと。これに対し, 大電力高周波を投入した状態での熱負荷のことを動的熱負荷(dynamic heat load)と呼び区別される。

表1 ILCのスペック(TDRおよびILC Progress Report 2015[5]より抜粋)

Item	Specification
# of Cavities	14,742
# of Cryomodules	1,701
E _{acc} , Q ₀ @Vertical Test	35.0 MV/m (±20%), ≥0.8x10 ¹⁰
E _{acc} , Q ₀ @Cryomodule Test	31.5 MV/m (±20%), ≥1.0x10 ¹⁰
Drive Frequency/Mode	1.3GHz, TM ₀₁₀ , π-mode
Cavity fill time	924 μs
Beam pulse length	727 μs
Total RF pulse length	1650 μs
Pulse repetition rate	5 Hz
RF power into cavity	188 kW
Range of external Q-value	10 ⁶ ~ 10 ⁷
Range of Slow/Fast Tuner	>600 kHz / >1 kHz
Beam current	5.8 mA
Operational temperature	2K

1.2 STFにおけるクライオモジュール試験の歴史

ここではSTFにおいてこれまで実施されてきたクライオモジュール試験の歴史について簡単に述べる。STFではこれまでに延べ4回に亘るクライオモジュール試験が行われてきた。すなわちSTF Phase-1(STF-1), S1-Global, Quantum Beam(量子ビーム計画), STF Phase-2(STF-2)である。STF-1はSTFのクリーンルームで初めて行われた4空洞の連結作業³およびハーフサイズのクライオモジュールの組み立てを含む基礎的な技術実証を目的としたモジュール試験であった⁴[6, 7]。2010年に行われたS1-Globalでは, 国内組と海外組に分かれてそれぞれハーフサイズのクライオモジュールを建設し, STF 地下トンネルに設置して, それぞれが持ち込んだ空洞, 入力結合器(空洞に大電力高周波を送り込むためのセラミック窓を持った特殊なRF機器, 以後カプラ

³ 空洞をクライオモジュールに組み込む際, packing factor をかせぐため空洞をベローズのビームパイプを介して互いに連結する作業のことで連結された状態をCavity stringという。

⁴ インフラストラクチャの制限によりSTFでは一度に連結できる空洞は4台まで, またモジュール組み立てはハーフサイズ(~6m)までが限界である。

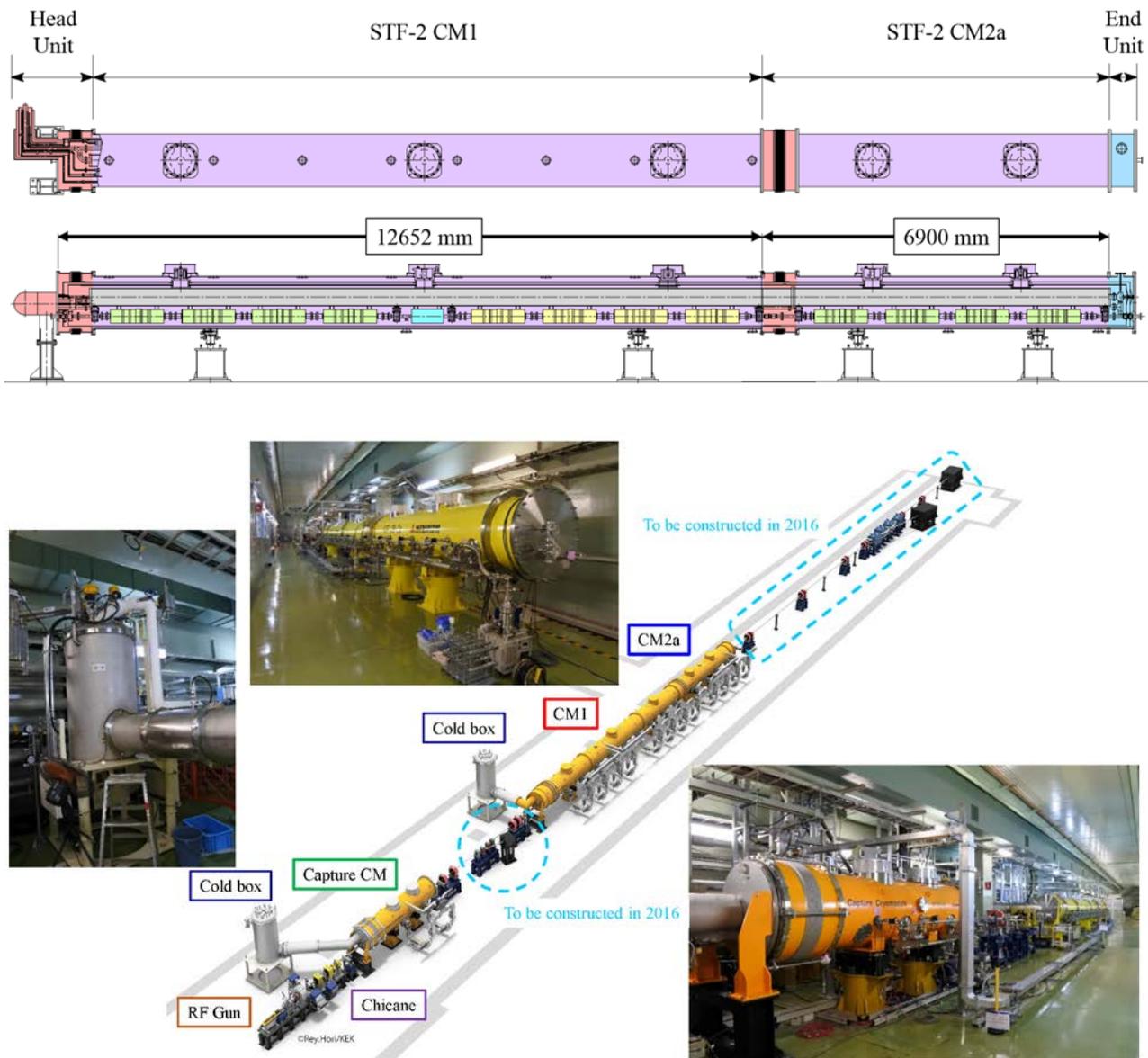


図1 STF-2 クライオモジュール(上)と STF-2 加速器概観図(下)。12.6m の CM1 と 6.9m の CM2a が合体したモジュールで、全長 20m にもなる。このモジュールを冷却させるために Cold Box(小型冷凍機)が一台新設された。CM1 の中央部には Beam Position Monitor(BPM) と超伝導四極電磁石が設置されている。超伝導電磁石の冷却法は、ヘリウム容器を用いずに空洞へのヘリウム供給配管から銅のブレード線やアルミの薄板を繋ぐことで冷却させる伝導冷却を採用している。Capture CM までの入射部は量子ビーム計画(2012 年)ですでに完成しており、また STF-2 クライオモジュールの前後にあるビームラインは 2016 年度以降に整備される予定である。現在、クライストロン(高周波源)からクライオモジュールまでをつなぐ導波管系を整備中である。

と書く)、周波数調整機構(チューナー)などの性能比較試験を行う、というものであった[8-10]。2012 年に行われた量子ビーム計画では 2 台の空洞が入った短いクライオモジュール(Capture Cryomodule)を建設し、STF にて初めてビーム運転およびビームとレーザーとの相互作用で生じた X 線を用いた実験を行い、試験加速器としてのスタートを切った[11-13]。その後、STF の空洞性能において目覚しい改善が見られ、ILC スペック(35 MV/m で Q_0 値が 0.8×10^{10} 以上であることを優に超える空洞が数多く揃い始めたことで、いよいよクライオモジュール試験においても ILC スペック(一台

のクライオモジュールの平均加速勾配が 31.5 MV/m で Q_0 値が 1.0×10^{10} 以上であることを目指すべく STF Phase-2 計画へ進むことになった。

2 STF-2 に向けた準備作業

ここでは量子ビーム計画以後、STF-2 に向けてどのような作業が行われたのかを時系列にしたがって簡単に説明する。

2.1 トンネル内整備

量子ビーム計画終了後、加速器の入射部のみを残し、それ以外の実験設備やビームダンプなどを全て撤去した。そして、新たなクライオモジュールや冷凍設備などを設置する場所を決めるための測量を行った。また、同時にビームダンプまでのビームラインの位置を確定した。図2は2013年頃の STF トンネルの様子で、Capture Cryomodule から下流側には何も設置されていないことがわかる。



図2 2013年頃の STF トンネルの様子(手前に設置されているのが量子ビーム計画で用いられた Capture Cryomodule である)

2.2 空洞の縦測定

CM1用の空洞としては全部で9台製造され、その内の性能の良いものから8空洞を選抜する、という方針で縦測定が実施された。一方、CM2aは4空洞のみ製造となったため、全く余裕のない中で縦測定となった。縦測定とは、4m長の縦型クライオスタットに空洞を入れ、内部を2Kの液体ヘリウム⁵で満たし、100W程度の1.3GHzの高周波をCW(Continuous Wave) modeで投入することによって空洞内に生じる電磁場を測定する、というものである。縦測定はセットアップの簡便さからCW modeで測定を行うが、ILC仕様のクライオモジュールでは5Hz/1650 μ sのパルス運転になり、RF duty cycle(空洞に高周波パワーを送り込んでいる時間)は1/100以下になる。したがって、縦測定では典型的に100W程度の電力が空洞内で消費されるが、クライオモジュールにおける運転では空洞当たり1W以下となる。図3は縦型クライオスタットに空洞を入れるところの様子と縦測定時の空洞の状況である。

通常 STF では縦測定で空洞がクエンチ⁶した際の温度分布やRF印加中の強X線領域などをモニターしており、縦測定後にその場所を内面観察することで機械的欠陥(defect

⁵ 液体ヘリウムの温度は大気圧で4.2Kであるが、減圧することで2Kあるいはそれ以下に下げることが出来る。

⁶ 超伝導状態が破壊され、空洞が通常の金属に戻ってしまう状態のこと。超伝導電磁石の場合と異なり、クエンチ時の空洞表面における消費電力はたかだか100W程度のため超伝導状態はすぐに回復する。



図3 空洞を縦型クライオスタットに入れているところ(左)と縦測定時の空洞に取り付けられたセンサー類(右)。センサーはカーボン抵抗による温度マッピングとPIN Photo DiodeによるX線マッピングがある。

という)が見つかることが多く、それを局所研磨機により除去することで性能を大幅に改善させる、という手法が確立している[14-17]。12空洞の結果は図4の通りで、12台中9台が35MV/m以上に到達する、という非常に良い結果となった。1空洞だけ極端に性能の悪い空洞(CM2a用のCavity #9)が見られるが、これは内部にスパッタボール(溶解した金属が空洞表面に付着したもの)が見つかった空洞である。おそ

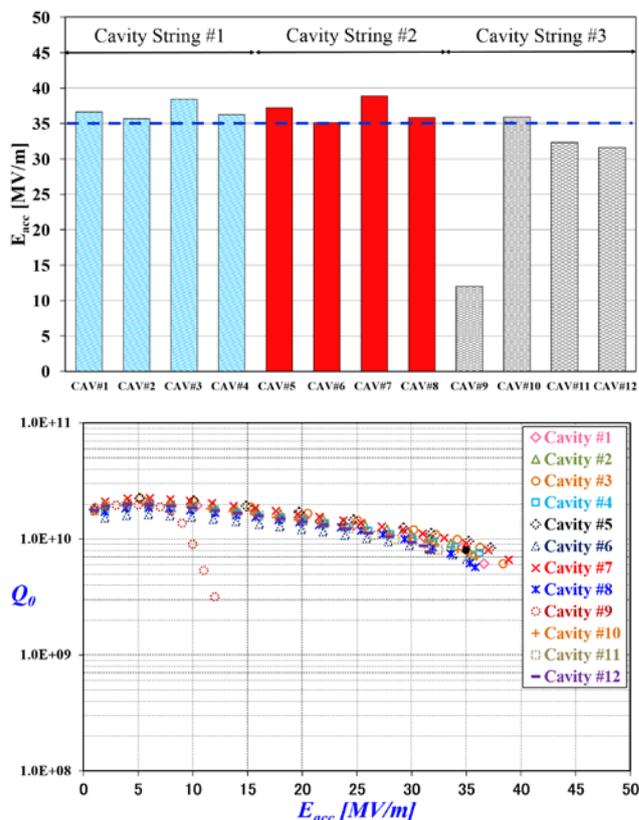


図4 STF-2クライオモジュール用空洞の縦測定結果のまとめ。上は最大加速勾配のまとめ、下は全空洞の Q_0 - E_{acc} カーブ(空洞性能評価に対する最も一般的なプロット)。黒点はILC仕様を示す。

回復する。

らく電子ビーム溶接時に不具合を起こしてしまったものと考えられ⁷、何度か局所研磨を実施しても性能に変化が見られなかったためやむを得ずモジュールに組み込むことにした(チューナーの取り付け位置が異なるため CM1 用の残りの空洞を用いることができなかった)。図4の中で、Cavity String #1はCavity #1から#4、Cavity String #2はCavity #5から#8、Cavity String #3はCavity #9から#12より構成されている(空洞のナンバリングはビームライン最上流をCavity #1とし最下流にCavity #12が並ぶ順序である)。

2.3 カプラエージング@テストスタンド

カプラは空洞と並んで重要なパーツであり、その性能次第では空洞へ所定のパワーを送り込むことが難しくなってしまう恐れがあるため、テストベンチにおける初めての大量電力によるエージングは慎重に行われる。大量電力試験における放電の影響で不具合が生じるリスクを最小にするため、RFパルス幅を10 μ sから始め、定格電力まで達した後、徐々に幅を広げていって最終的に1500 μ s (full pulse)までエージ

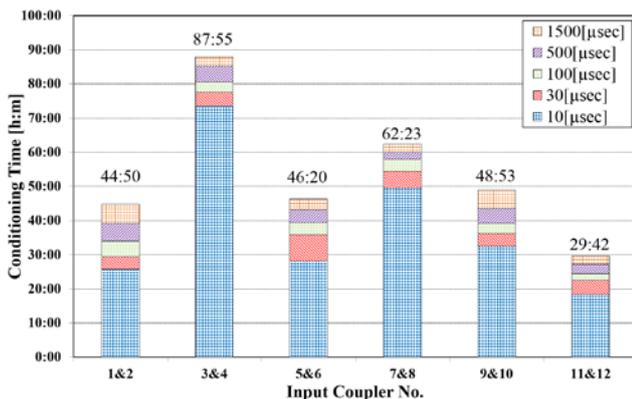
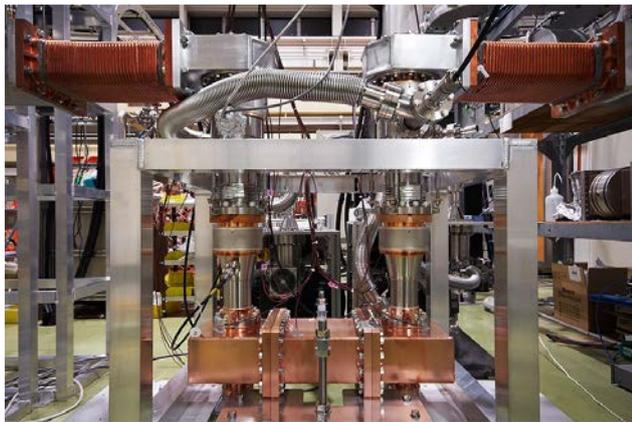


図5 テストスタンドにおけるカプラエージングの様子(上)とカプラ2本ごとのエージング時間のまとめ(下)。テストスタンドは2本のカプラを結合導波管で接続した構造になっている。カプラは1バッチ4本で製造されるが、最後のバッチが最短時間であることがわかる。

⁷ 開先の手入れが不十分か電子ビーム溶接機のパラメータが適当でない場合、溶解した金属が跳ねて空洞表面に付着してしまうことがあり、それが原因で性能が制限されてしまう。溶接箇所から離れたところにあるため、内面観察装置で見つけるのはやや難しい。

ングを行っていく⁸。テストスタンドでは図5のように2セット毎に進行波(traveling wave)によるエージングを行い、計12本のカプラエージングを終えるのに(交換作業を含めて)18週程度かかる。最大到達パワーは500 μ s以下で1.2MW、500 μ s以上で800kWである(TDRスペックに対してマージンを持たせている)。モニターシステムとしては、真空圧力(インターロックの上限値は 2×10^4 Paにセットされる)、アークセンサー(アーク放電検出用モニターで異常値が検出された場合、直ちにインターロックが作動しRF Offとなる)、電子プローブ(放電時の電子を検出するアンテナ)、VSWR(Voltage Standing Wave Ratio)メータなどがあるが、インターロックイベントの多くは放電時の真空圧力のはねによりインターロックシステムが作動し、RF Offとなるケースである。

2.4 空洞連結作業@クリーンルーム

空洞の縦測定およびカプラエージング終了後⁹、いよいよ肝心のクリーンルーム内での空洞連結作業に入る。STFのクリーンルームはClass10(ISO4相当)およびClass1000(ISO6相当)の2つに分かれており、空洞連結およびカプラ接続作業はClass10内で行われる。ILCでは8台ないし9台の空洞連結を行った後、12m超のクライオモジュールへと組み込まれるが、STFのクリーンルームでは最大4空洞までしか連結作業が行えないため、4空洞ごとに3回に分けて連結作業を行った(図6)。空洞のポートを開ける前に、パーティクルカウンターで検出される0.3 μ m以上のパーティクル数¹⁰が0になるまでイオンガンでポート周辺を入念に掃除する。そして開ける直前に反対方向から1 ℓ /minの清浄なアルゴンガスを流しながら(ガス内のパーティクル数に異常がないことを事前にチェックしている)作業を行い、空洞内にパーティクルを入れないよう細心の注意を払う。

連結後にCavity Stringの両端にゲート弁を取り付けて、内部の真空排気およびリークチェックを行った後、Class10からClass1000へ移動する¹¹。そこで空洞へのヘリウム供給配管を取り付け、そのラインのリークチェックも行ってからCavity Stringをクリーンルーム外へ出して終了する。

⁸ TDRのスペックではfull pulseで1650 μ sであるがReference Design Report(2007)[18]では1500 μ sであったためSTFではこれに倣っている。

⁹ 縦測定後、空洞はヘリウムジャケットとチューナー部品の溶接のため一度メーカーに送り返される。

¹⁰ 空気中を浮遊している異物またはボルト締結時に発生する金属粉などの数。

¹¹ リークチェック後にCavity Stringはアルゴンガスで一旦パージされる。



図6 Class10 クリーンルーム内でのカプラ取り付け(上), 空洞連結作業(中)および完成した4空洞の Cavity String の様子(下)。この段階で、空洞にはヘリウムジャケットとチューナー部品が溶接されており、空洞本体は見えなくなっている。

2.5 Cavity String 連結作業

STF-2 以前のクライオモジュールはいずれもハーフサイズかそれより短い大きさのモジュールであったため、地上部にあるモジュール組み立てエリアで組み込み作業が行われてきたが、CM1は長さが12m超のモジュールであるため、地上部の組み立てエリアは使用できなかった(トンネルへの搬入口の大きさはハーフサイズがギリギリである)。このた

め二台の Cavity String を一台ずつ地下トンネルに移動させ、そこで互いを連結させるという方針を採用した(図7)。STF では Cavity String 同士の連結作業を行ったのはこれが初めてであり、その際にいくつか通常とは異なる作業を実施した。作業内容を以下に列挙しておく。

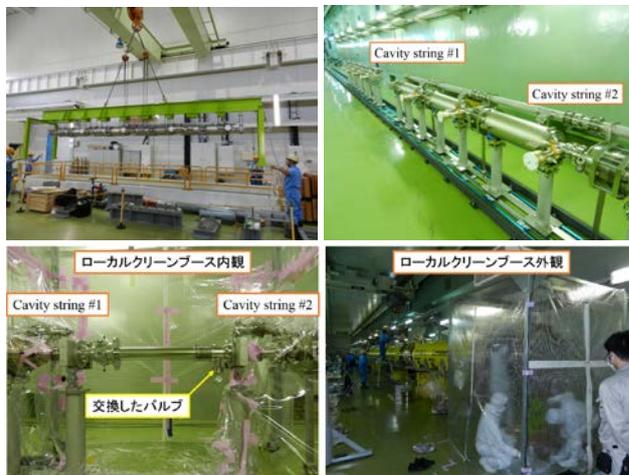


図7 搬入口から地下トンネルへ下ろされる Cavity String(上左), 地下トンネル内のレール上に並べられた2つの Cavity String(上右), Cavity String 連結作業の様子(下左)と作業で使用したローカルクリーンブース(下右)。

- トンネル内にローカルクリーンブースを設置してその中で作業を行った(本来はClass 10環境下で行われるべき作業であるがインフラストラクチャの制限により止むを得なかった)。使用したローカルクリーンブースはフィルターが一つだけ付いた簡易型のタイプであるが、それでエアフローが十分であるかどうかは定かでない。
- 2つの Cavity string 間を繋いでいるビームパイプに使用する予定であったメタルバルブを取り付け後、サイズが大きくてモジュールの構造物と干渉することがわかり、急遽、現場にて取り付けたバルブの交換作業および取り付け方向の変更作業を行った。これは Cavity string #2 に近い方のフランジである。この追加作業の際にビームパイプの再クリーニングは行わなかった。
- ゲート弁を開放する際、Cavity string およびビームパイプ内部を真空ではなくアルゴンガス封入で行った。それぞれの内圧の正確な数値は分からず Cavity string 側が負圧になっていた可能性もある。その場合、バルブの交換作業時のボルト締結で生じた金属粉などが Cavity string #2 に吸い込まれた可能性がある。

2.6 クライオモジュール組み込み作業

8 空洞が連結された CM1 用の Cavity String をクライオモジュールへ組み込む作業もトンネル内で行われた。ILC では 8 台ないし 9 台の空洞が連結された Cavity String を Gas

Return Pipe¹²に吊り下げ、二重の輻射熱シールド(5Kと80K)を取り付け、さらに Super Insulation と呼ばれる断熱材を数十層巻きつけた後、12m 超の一体物のクライオスタットに組み込まれる。しかし、STF-2 では作業エリアの制限によりクライオスタットを3分割し、それぞれを組み込んだ後、互いに接続して一体物とする方針が取られた。一方、CM2aの組み込み作業は従来どおり地上部の作業エリアで行われ、完成したクライオモジュールとして地下トンネルへ設置された。いずれの組み込み作業も物理的干渉などがないことを確認しつつ、慎重に進められた(図8)。



図8 クライオモジュールへの組み込み作業の様子(上左右)、トンネルへ下ろされるCM2a(下左)、トンネル内での作業エリア(下右)

2.7 トンネル内設置作業

CM1とCM2aの接続作業は、お互いをビームライン上に設置した後、実施された。ここでも§2.5で述べたようにCM1の8空洞のCavity StringとCM2aの4空洞のCavity Stringを連結する作業が行われ、またクライオモジュール内外を貫通するビームダクトと排気系が接続された。その後、クライオモジュールに供給される液体ヘリウムおよび液体窒素の配管接続が行われ¹³、総合気密試験を実施した後、高圧ガス保安法に基づく完成検査を受け、ようやく加速器モジュールとしての運転が茨城県庁より許可された(図9)。



図9 完成検査間近のビームライン上に設置されたSTF-2クライオモジュール

¹² 蒸発した液体ヘリウムが冷凍機に戻るラインでクライオモジュールの背骨にあたる構造体。直径は380mmである。

¹³ 配管接続は全部で7カ所あり、STF-2ではそれぞれフランジにより締結されたが、ILCの場合は溶接である。どちらの方法を採用するかで高圧ガス保安法の適用基準が変わってくる。

3 STF-2 クライオモジュール冷却試験

STF-2ではこれまでに2回の冷却試験が行われており、ここでは低電力試験および大電力試験に分けて説明する。また、大電力試験で明らかになった空洞性能の劣化問題について議論する。

3.1 Low Power Test (1st cooldown)

Low power testでは、チューナー駆動試験(数100kHz範囲で駆動でき、空洞周波数調整に用いられる)、ピエゾ駆動試験(数100Hz範囲で駆動でき、High power test時の空洞周波数の微調整に用いられる)、各ポート(入力ポート、透過ポート、2つの高調波ポートの計4つである)のQ値測定、RFケーブルの較正、などが行われた[19]。常温から4Kまでの冷却中に、空洞の収縮により周波数が2MHz程度上がり、さらにそこから2Kに至る際ヘリウムを減圧することで空洞全長が伸びて周波数が300kHz程度下がる¹⁴。2K到達後に1.3GHzに合わせるためチューナーが用いられるが、通常は数100kHz程度変化させれば十分である(図10)。

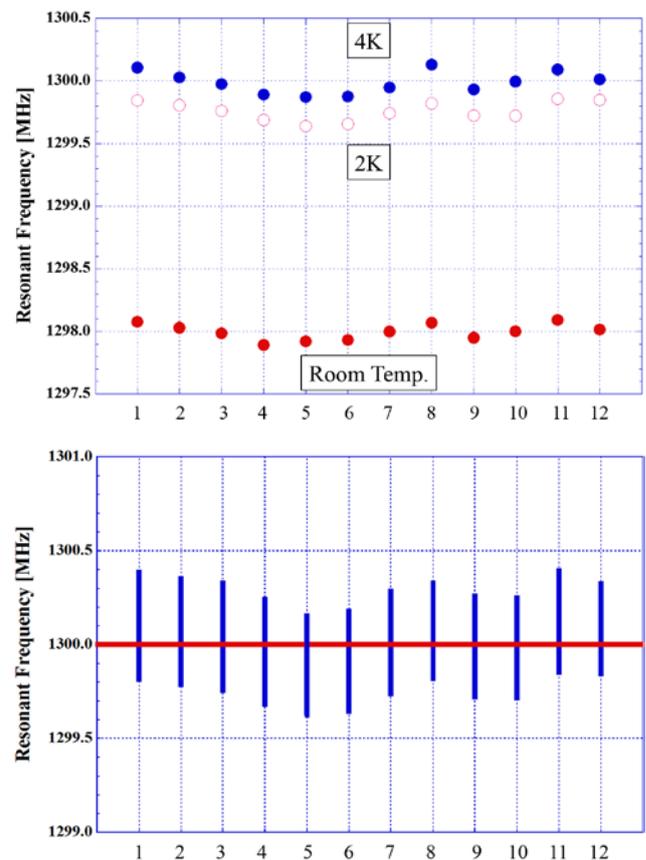


図10 冷却試験時の空洞周波数の変化(上)とチューナー駆動試験の結果(下)。2K到達後、チューナーによって1.3GHzに調整される。いずれの空洞も冷却中の周波数変化がよく揃っており、またチューナーによって1.3GHzに調整可能である。

¹⁴ 常温から2Kまでの周波数変化を見越した上で、常温でpre-tuning machineにより空洞周波数を予め調整しておく。

3.2 High Power Test (2nd cooldown)

High power test の主目的は、空洞のエージングを行い、最大加速勾配を測定することにある。さらに、ILC スペックである 31.5MV/m での安定な運転を確認することも含まれる。今回は高周波関連のクライストロンおよび導波管が一空洞のみの供給であったため、一空洞ずつ測定しては導波管を切り替えて隣の空洞に移る、という作業を繰り返す行することで試験を実施した(図 11)。また、実験時間の制限により最大加速勾配のみを確認することにし、 Q_0 値の測定やローレンツ離調¹⁵の測定は3回目の冷却試験に持ち越すこととなった(本年5月から実施予定)。



図 11 High power testの様子(上)と導波管切り替え作業の様子(下)。今回使用したクライストロンは量子ビーム計画で用いたもので、最大出力800kWの小型のタイプである。導波管系も入射部から30mほど下流側に延ばすことで対処した。

冷却前にカプラからのアウトガスの影響を最小にするため、常温でのカプラエージングを行う必要がある。ここでもテストスタンドの時と同様にまずは短いパルス幅で始めて、徐々に幅を広げていった後、1650 μ sec(full pulse)で定格

¹⁵ Lorentz Force Detuning とよばれ空洞内に生じる電磁界応力により空洞がわずかに変形することで、空洞周波数も変化する現象。空洞の加速勾配が 31.5MV/m の時に 400Hz 程度の変化が生じるため、空洞周波数は予め離調させた状態にし、RFが入ったらマッチングが取れるようにセットされる。

電力までを確認することになる(時間の都合上4ステップで上げていった)。ただし、モジュールに組み込んだ状態では、ビームが無い限り基本的に定在波(standing wave)でRFは伝播するため、テストスタンドの条件と同じというわけではない。図 12 は全カプラの常温エージングにかかった時間であるが、テストスタンド時とは逆に最後の4本が最も時間がかかっている。

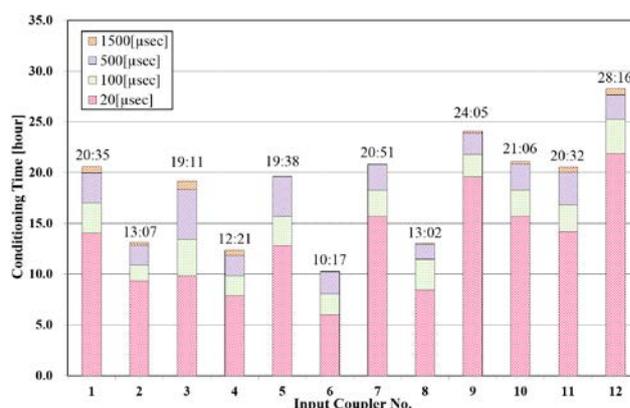


図 12 全カプラの常温エージングにかかった時間

冷却後の空洞のエージングも常温の場合と同様に放電やクエンチ時の性能劣化の影響を下げるため、パルス幅が900 μ sの short pulse から始めて、次に1650 μ sの full pulse へと移行する。具体的には、放射線量、高調波結合器における発熱具合、高調波結合器からの高周波出力の3つを主にモニターしながら加速勾配を上げていく。エージングが十分行われない状態で入力パワーを増やしていくと、大放電や放射線バースト(短時間に大量の放射線が一気に放出される現象)などが発生し空洞やカプラの性能に深刻な不具合を起こす可能性があり、この作業は慎重に行う必要がある。

図 13 は縦測定およびクライオモジュール試験(short pulse の場合と full pulse の場合に分けて示してある)における最大加速勾配のまとめで、結果としてクライオモジュールとしての平均加速勾配は 30.3 MV/m で、空洞個々の性能は 12 空洞中 8 空洞が ILC スペックである 31.5MV/m 以上に到達した。また、性能劣化については Cavity String #1 および#3 については観測されず、Cavity String #2 の連続する3空洞が field emission¹⁶による性能劣化を引き起こしていることが判明した(性能劣化を起こした空洞の位置が一ヶ所にまとまっているため、共通の原因で引き起こされたことが示唆される)。

¹⁶ 空洞内に多数のパーティクル(典型的なサイズは 1 μ m 以下であると考えられている)が堆積することで電子が放出され、その電子を加速することにパワーが使われてしまうため空洞内の電磁界強度を上げることが出来なくなってしまう現象で、加速器のダークカレント源にもなる。

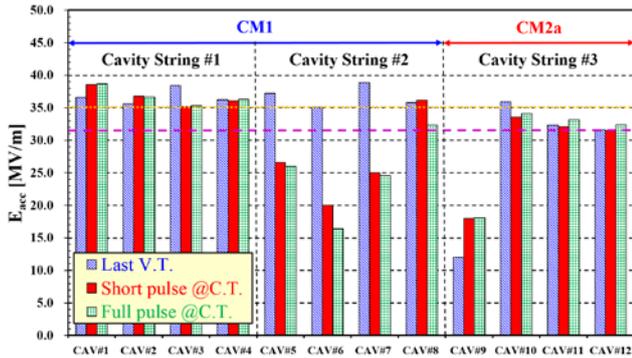


図 13 縦測定およびクライオモジュール試験での空洞性能(最大加速勾配のみ)のまとめ。ILCにおけるそれぞれの目標値である35MV/mと31.5MV/mのところに点線がひかれている。縦測定でField emissionにより性能が制限されている場合、RF duty cycleの低いモジュール試験では最大加速勾配が上がる可能性がある。この図ではCavity #9が該当する。Cavity #6のFull pulseでは放射線の出現前に異常な熱負荷の増大によりshort pulseよりも低い加速勾配で性能が制限されてしまい、field emissionよりさらに事態は深刻である。

Cavity String #3のCavity #9は前に説明したように、縦測定時から内部に不具合を抱えていることがわかっておりながらモジュールに組み込んでしまった空洞であるが、モジュール試験ではパルス運転のためRF duty cycleが下がり、逆に性能が上がった空洞である。S1-Globalで用いた4空洞の内の一台中、縦測定で28MV/mでfield emissionにより制限されていたのがモジュール試験では38MV/mまで上がった例もあり、必ずしも劣化するばかりではない(図14上図の4つある丸の点の一つ)。

3.3 空洞性能の劣化について

縦測定で良い性能が出ていた空洞がモジュールに組み込んだ後で測定を行うと性能が劣化している場合がある、という現象は「空洞性能劣化問題」といって、超伝導空洞が用いられている世界中の加速器研究所で昔から問題となっており、未だ解決をみていない[20]。劣化のタイプは大まかにいって2つあり、一つは今回のHigh power testでも観測された大量の放射線を伴いながら低い加速勾配でクエンチ(field emissionによるクエンチ)してしまうものと、もう一つは放射線をほとんど、あるいは全く伴わないにも関わらず低い加速勾配でクエンチを起こすものである。後者に関しては、量子ビーム計画で用いられた2空洞の内の一台中が当てはまる。

High power testで性能劣化が判明した3空洞はいずれもCavity String #2にある空洞で、前に説明したように地下トンネルでCavity Stringの連結作業を行ったものである。この作業中にCavity String #2内へ大量のパーティクルが混入してしまったものと考えられるが、一方でCavity String #1はそれほど深刻な影響を受けていないように見える。このことは交換したバルブから遠い側であったという点が一つの理由として考えられる。しかし、観測された放射線のデー

タから判断すると、縦測定で放射線がほとんど観測されていなかったCavity #1および#4に放射線の増加が観測されており、全く無傷ではなかったようである。

図14はSTFにおける縦測定とクライオモジュール試験の空洞性能を比較したもので、上が各空洞の比較で下がモジュール(Cavity String)ごとの平均加速勾配の比較となっている。これらの図から明らかなように隣り合う3台の空洞で性能劣化が観測されたのは今回が初めてであり、またそのいずれもがfield emissionにより性能が制限されているという点も初めてのことであった。ただし、この問題は作業環境や作業内容の向上があれば自ずと改善されていくものであると期待される。一方で、放射線をほとんど伴わず低い加速勾配でクエンチを起こしてしまう現象(図14上図の2つある三角の点の一つ)については手がかりが全く無いため直ちに解決できる(少なくともパーティクルの混入といった単純な)問題ではないと思われる。今回12空洞のエージングを行って実感したことは、空洞のエージングはある程度時間をかけて行う必要があるということである。量子ビーム計画のモジュールで性能劣化が起きてしまった空洞はエージング時間が短か過ぎたということがデータからわかっており、性能劣化の一因であった可能性はある。これとは別にもう一点、個人的に疑わしいと思っているものはカプラで、これは空洞直近に付いているニオブ以外の唯一の金属物のため(銅メッキの表面は超純水洗浄のみ実施)、放電が起

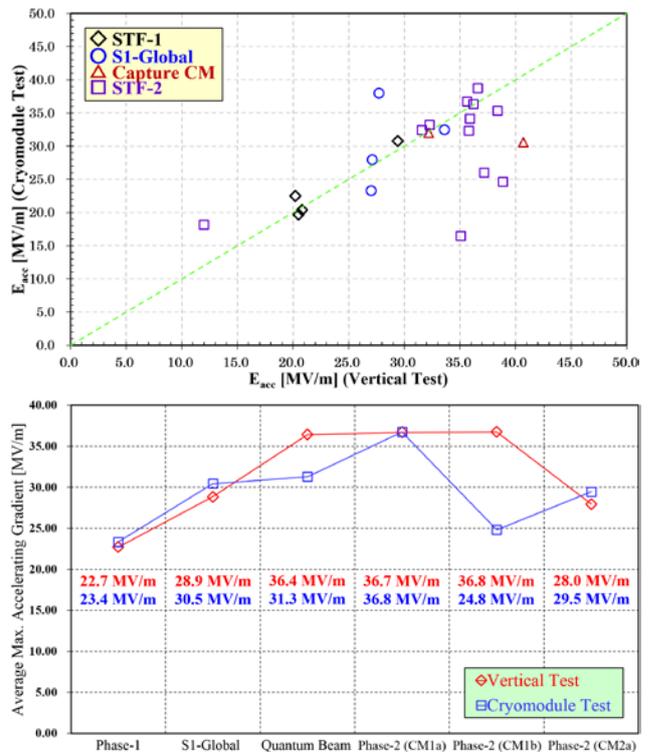


図 14 縦測定とクライオモジュール試験における全空洞の最大加速勾配の比較(上)と各Cavity Stringの平均加速勾配の推移(下)。量子ビーム計画のモジュールのみ二空洞で、他は四空洞である。同じCavity Stringの隣り合う三台の空洞で性能劣化が生じたのは今回が初めてである。

こった際にカブラ表面から何らかの異物が空洞の方へとんでいるのではないかと考えているが、確証は無い。

補足であるが、かつてクライオモジュールの移送中の衝撃により空洞性能が劣化するのではないかと疑われたことがあったが、最近 DESY にて建設中の Euro-XFEL 計画[21]におけるモジュール試験の結果からはそのような証拠は一つも観測されておらず、特に問題となっていないようである。これは ILC にとっても朗報である。

4 今後の予定と残った課題への取り組み

これまでに2回の冷却試験を行ってきた STF-2 計画であるが、空洞関係の測定はまだ完了しておらず、本年も継続して行われる予定である。空洞関係の主な試験項目は以下の通りであるが、これらは一回の冷却試験では終わらせられない内容のため、今後1~2年かけて順次実施していくことになる。

- 各空洞のローレンツ離調の測定
- 各空洞の Q_0 測定
- 12 空洞の同時運転および Q_0 測定
- 12 空洞を用いたビーム運転

Cavity string 連結作業時の環境整備の一環として、これまで STF で使用してきたローカルクリーンブース(図7の下右図)から、たとえば図15のように Euro-XFEL 計画にて採用されているような性能の良いローカルクリーンブースへ切り替えることを検討する。また、Euro-XFEL のクリーンルーム作業を担当しているフランスのサクレー研究所でその効果が示されているように、我々のクリーンルーム作業のクオリティもさらに向上させる必要があるものと思われる。



図15 DESY で建設中の Euro-XFEL のトンネル内におけるクライオモジュール連結作業の様子(DESY のウェブサイトより[22])。連結部全体を透明なケースで囲い、下部からクリーンエアを流し、パーティクルカウンターで作業中のパーティクル数をモニターしながら作業を行う。作業者の手が入るところのみ開放されている。連結部は加速器全体でおおよそ100箇所になる。

カブラの処置に関しては、現在超純水による表面洗浄のみであるところを、海外の研究所ですで行われているよ

うな超音波を用いた洗浄法に切り替える、あるいは高圧水洗を試してみることを検討中である。

おわりに

STF は故戸塚洋二元機構長による強力なリーダーシップのもと2006年に建設され、その後、鈴木厚人前機構長の在任中に劇的な進歩を遂げた。現在は山内正則機構長のもとで ILC 建設に必要な技術開発を行っているところである。また、高崎史彦元理事、岡田安弘理事、神谷幸秀理事、生出勝宣前加速器研究施設長、山口誠哉加速器研究施設長からはこの十年間に多くの叱咤激励を受けました。以上の諸先生方に深く感謝申し上げます。

STF は建設当初から最少人数の KEK スタッフと多くの民間業者からのメンバーで管理・運営がなされてきました。また、KEK 加速器研究施設以外の他の研究系や大学関係のスタッフも少なからず参加していただいております。多くのサポートが得られてきました。これまで STF の活動に関わってきた全ての KEK スタッフ、大学関係者および民間業者の方々に対し、ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] <http://www.linearcollider.org/ILC>
- [2] ILC Technical Design Report (2013).
<https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [3] <https://ilc.kek.jp/STF/>
- [4] 早野仁司, 高エネルギーニュース **25-3**, 137 (2006).
- [5] The ILC Progress Report (2015).
<http://newline.linearcollider.org/2015/10/29/linear-collider-collaboration-published-progress-report-for-the-ilc/>
- [6] M. Akemoto *et al.*, STF Phase-1 Activity Report, KEK Report 2009-3 (2009).
- [7] E. Kako *et al.*, PRST-A and B, Vol.13, 041002 (2010).
- [8] M. Akemoto *et al.*, S1-Global Report, KEK Report 2013-3 (2013).
- [9] 大内徳人, 加古永治, 高エネルギーニュース **29-2**, 70 (2010).
- [10] Y. Yamamoto *et al.*, "Test Results of the International S1-Global Cryomodule", Proceedings of SRF2011, pp. 615-624, Chicago, Illinois, USA.
- [11] 早野仁司, 高エネルギーニュース **32-2**, 101 (2013).
- [12] H. Shimizu *et al.*, NIMA, Vol.772, p26-33 (2015).

- [13] Y. Yamamoto *et al.*, “Construction and Beam Operation of Capture Cryomodule for Quantum Beam Experiments at KEK-STF”, Proceedings of IPAC2012, pp. 2236-2238, New Orleans, Louisiana, USA.
- [14] Y. Iwashita *et al.*, PRST-A and B, Vol.11, 093501 (2008).
- [15] Y. Yamamoto *et al.*, NIMA, Vol.623, p579-581 (2010).
- [16] Y. Yamamoto *et al.*, NIMA, Vol.729, p589-595 (2013).
- [17] Y. Yamamoto *et al.*, “Recent Results of Performance Tests for L-band 9-cell Cavity at KEK-STF”, 第9回日本加速器学会年会, pp.142-149, Osaka, Japan, (2012).
- [18] ILC Reference Design Report (2007).
<https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Reference-Design-Report>
- [19] T. Shishido *et al.*, “Assembly and Cool-Down Tests of STF2 Cryomodule at KEK”, Proceedings of SRF2015, TUPB109, Whistler, BC, Canada.
- [20] D. Reschke *et al.*, “Recent Progress with EU-XFEL”, Proceedings of SRF2015, MOAA02, Whistler, BC, Canada.
- [21] <http://www.xfel.eu/>
- [22] <http://xfel.desy.de/pictures/>