

■ 研究紹介

STF-2加速器のビームコミッショニング

KEK加速器研究施設

中西 功太, 早野 仁司, 福田 将史, 松本 利広, 森川 祐, 山本 康史

kota.nakanishi@kek.jp, hitoshi.hayano@kek.jp, masafumi.fukuda@kek.jp, toshihiro.matsumoto@kek.jp, yu.morikawa@kek.jp, yasuchika.yamamoto@kek.jp

2019年(令和元年)8月5日

1 はじめに

1.1 概要

高エネルギー加速器研究機構(KEK)内にある超伝導高周波試験施設(Superconducting RF Test Facility: STF)では、2006年から国際リニアコライダー(International Linear Collider: ILC)計画の基幹技術である超伝導空洞およびクライオモジュールの技術開発および性能試験が行なわれてきた。これまでに実施されてきた計画は、STF-1, S1-Global, Quantum Beam, STF-2の4計画である(表1参照)。計14台の空洞を用いた現在進行中のSTF-2計画では、STF初となるILCと同様の運転条件を満足するビーム運転の実証を主目的としたクライオモジュールの冷却試験が行なわれてきた。今年の1~3月に実施された4回目の冷却試験にて、ILCの要求スペックを上回る加速勾配での電子ビーム加速に成功し、その結果を国内外にて発表してきた[1, 2]。本稿では昨年から始まったビームライン建設やビームダンプの設置、クライオモジュールの性能、高周波制御、冷凍機設備、ビームチューニングなどについて個々に詳細を述べていくことにする。表2はILCの技術設計書(Technical Design Report: TDR[3])に掲載されているビーム運転時の主なスペックである。

表1 STFで実施された4計画(STF-2は現在進行中)

Project	Experimental period
STF Phase-1 (STF-1) [4, 5]	F.Y. 2008~2009
S1-Global [6, 7]	F.Y. 2010~2011
Quantum Beam [8-10]	F.Y. 2012~2013
STF Phase-2 (STF-2) [11, 12]	F.Y. 2014~

本稿では、クライオモジュールの名称について次のように呼ぶことにする。Quantum Beam計画で導入された2空洞が収納されたクライオモジュールをキャプチャークライオモジュール(Capture Cryomodule: CCM)と呼び、STF-2計画のために導入された12空洞が収納されたクライオモジュールをCM1(上流から8

空洞目まで)およびCM2a(下流の4空洞)、総称してCM1/2aと呼ぶことにする。2aとは半分のサイズという意味である。

表2: ILCのビーム運転時の主なスペック

Item	Specification
Accelerating gradient	31.5 MV/m
Q_0	1.0×10^{10}
Drive Frequency, Mode	1.3 GHz, TM ₀₁₀ , π -mode
Cavity fill time	924 μ s
Beam pulse length	727 μ s
Total RF pulse length	1650 μ s
Pulse repetition rate	5 Hz
Beam current	5.8 mA
Operational temperature	2 K

2 STF-2加速器

2.1 加速器の設計とビームライン建設

STF-2(F.Y.2009から計画開始)で計画されているILC主線形加速器のなかの一つのRFユニットプロトタイプは10 MWマルチビームクライストロン1台と3台のクライオモジュールから構成される。電磁石の配置は、STF-2のユーザー利用を考えた将来計画を見越して決定された。

フォトカソードRF電子銃用のレーザーの準備状況から決まる電子ビーム強度と、ビームラインやクライオモジュールおよびビームダンプからの漏洩放射線の状況を把握するための限定されたビーム強度とを勘案して加速器ビーム申請を行なった。具体的には、最大ビームエネルギー500 MeV、最大ビーム電流300 nA、最大ビーム出力135 Wであるが、典型的な運転では、50 pC/bunch、パンチ間隔6.15 ns、パンチ数1000パンチ、ビームエネルギー280 MeVである。

CCMとCM1との間には、パンチ圧縮のためのシケインマグネットと収束光学系が計画されていたが、今回のビームライン建設ではシケインマグネットのかわりにエネルギーアナライザーとして使用する30度ベンドマグネットとビームダンプを配置した。

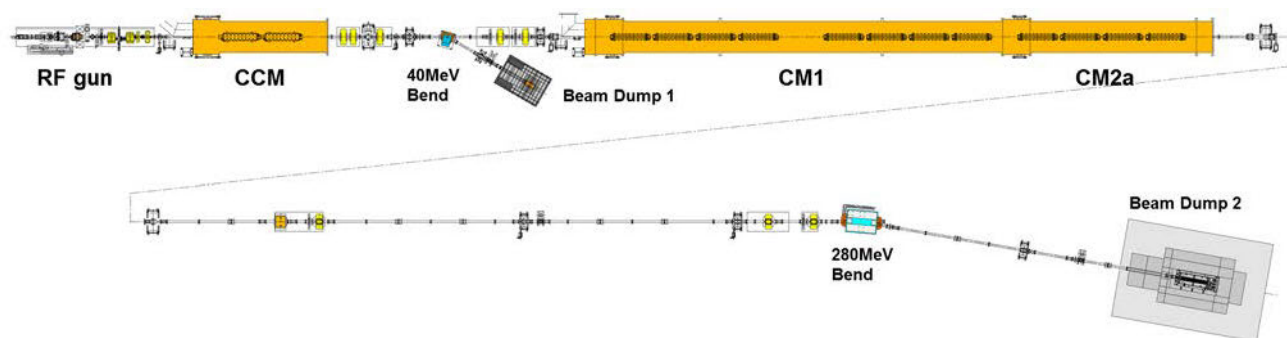


図1 STF-2加速器のビームラインの構成(将来のクライオモジュール増設のためのスペースを設けている)

計画されていた8台の4極マグネットは、5台だけを設置し、CM1/2aの間をビーム通過させる機能と4極マグネットスキャン(Qスキャン)によるエミッタンス計測を実現する。将来、設置が予定されている3台のクライオモジュールスペースの下流部に2段目のシケンマグネットを配置する計画であるが、今回は、この部分に10度ベンドマグネットによるエネルギーアナライザーを導入し、クライオモジュール未装着のドリフトスペース部分には2台の4極マグネットを配置して、ビーム収束輸送を行い、かつ、4極マグネットスキャンによるエミッタンス計測を行えるようビームプロファイルモニターを配置した。配置図を図1に示す。40 MeVのところの30度ベンドマグネットは広島大学から借用したもの、また、280 MeVのところの10度ベンドマグネットはSuperKEKBマグネットグループから借用したものである。4極マグネットは3台を新規に製作し、その他の6台は保管品を再利用した。軌道調整用のステアリングマグネット5台も保管品を再利用した。マグネット電源やその制御は、Quantum Beam計画時のものをそのまま流用した。

ビーム軌道モニター用に新たにボタン型ビーム位置モニターを7台装着した。プロファイルモニターとしては、スクリーンモニターとOptical Transition Radiation(OTR)モニターの組み合わせた圧空2段階挿入式のものを4台装着した。ビーム電流モニターとしては、今回ビームパルス長が比較的短いので、短いパルストレイン用の積分形電流モニター(Integrating Current Transformer: ICT)を2台導入した。

ビームラインの接続に使用する真空チェンバーは、内径57.2 mm外径60.5 mm長さ1 mのICF114フランジ付き真空パイプを基本型とし、マグネットやモニターの存在で決まるいろいろな長さの真空チェンバーの数をできるだけ少なくするように設計した。内外面は電解研磨処理を施してある。製造会社によるリークチェックが済んだものが納品された後、超純水高圧洗浄後、中性洗浄剤入り超純水で超音波洗浄を施し、クリーンルーム内で乾燥後ビニールバッグに封入保管した。STF地下トンネル内での組立装着時には、フランジ接続部領域に対向型クリーンユニットによる局所クリーンの場所を作り出し、圧空イオンガンでパーティクルカウンターによるダスト数のモニターをしながらフランジ部のダストを飛ばし、ダスト数がミニマムになってから接続

作業を行なった。その後、リークチェックと120 °Cバークを行なってからイオンポンプで 10^{-7} ~ 10^{-8} Paの真空を維持した。今回、リークチェック済みで納品されたにもかかわらず、組み立て直後にリークが見つかったものが多数存在したのでリークを起こした溶接部の修理で対応した。詳細な原因調査後、製造工程管理不良から起因している溶接部分の溶込み不良が見つかったので、そのようなチェンバーは再製作することになった。2019年中に入替えを計画している。

2.2 ビームダンプシステム

CM1/2aを用いたビーム加速試験を行うにあたり、新たにこのビームを受けるビームダンプ(以下、ビームダンプ2と呼ぶ)の開発が必要となった。2019年3月のビーム運転ではエネルギー500 MeV×平均電流300 nAのビーム強度135 Wを上限に原子力規制庁の運転許可を受けている。しかし、STF-2加速器は更なるクライオモジュールの追加とビーム電流の増強が将来的に計画されている。そこで本ビームダンプ2は受容する最大ビーム強度をエネルギー900 MeV×平均電流42 μ Aの37.8 kW(以下、38 kWビームと称する)に想定して開発した[13]。

2.2.1 構造設計

STF-2加速器は試験加速器であり、試験内容に応じてビームダンプ2に入射されるビームエネルギーやビームサイズは変化する。これらビーム条件の変化に対応するため、ビームサイズが小さい場合においても除熱可能な程度にビーム発熱密度を低減できるよう、ビームダンプの構成材料には低原子番号素材であるアルミ合金(A6061-T6)を採用した。図2に開発したビームダンプ2の断面構造を示す。ビームは直径8 cmのフィン付きアルミ合金円柱(コア部)に入射される。このコア部は円筒形状のアルミ合金(アウター部)に挿入されており、ビームダンプ後部より導入された冷却水がコア部とアウター部の隙間を流れることでコア部のビーム熱を除熱する。またアルミコア部はアルミ合金製フランジが接合されており、ビームダンプはビームラインに連続して接続されている。ビームダンプ後部には10 cm厚のSUS製円柱が設置され、コア部で落ち切らなかった γ 線を止める。

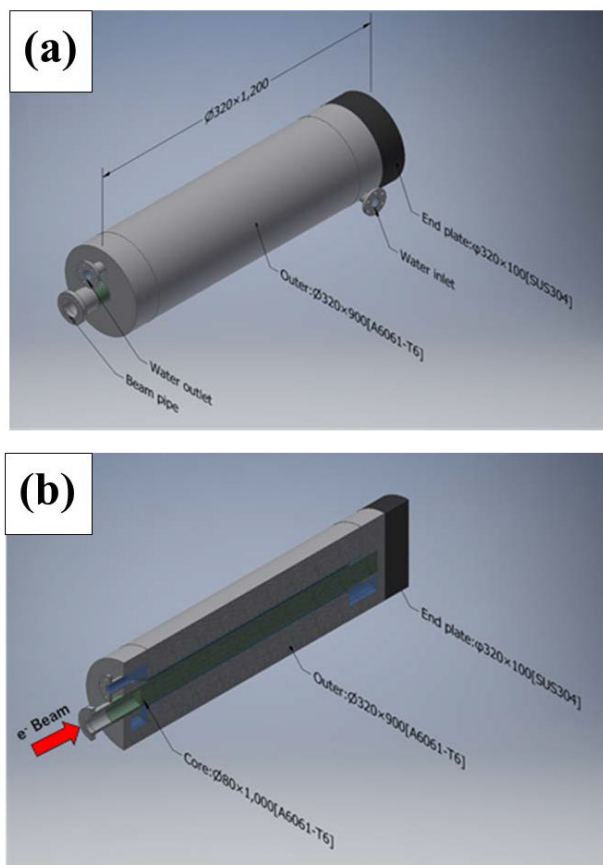


図2 Beam Dump2の断面構造

2.2.2 除熱性能

図3に38 kWビームを入射した場合のビームダンプ内の1 cm辺りのビーム発熱総量(Longitudinal Power)およびビームパルス毎の最大発熱密度(Peak Energy Deposition Density)を示す。本評価にはモンテカルロコードFLUKA[14]を用いた。最大発熱密度はコア部の深度10 cmで最大値110 J/cm³であるが、1 cmあたりの発熱量は深度20 cmで最大値830 W/cmとなる。図4に汎用有限要素解析ソフトANSYSで計算したビームパルス入射直後の温度分布を示す。最高温度は1 cmあたりの発熱量が最大値となった深度20 cm地点で観測され200 °Cを下回る。アルミ合金は200 °C以上で軟化が顕著に進むため、ビームダンプ2では最高温度がこの軟化温度(200 °C)を下回

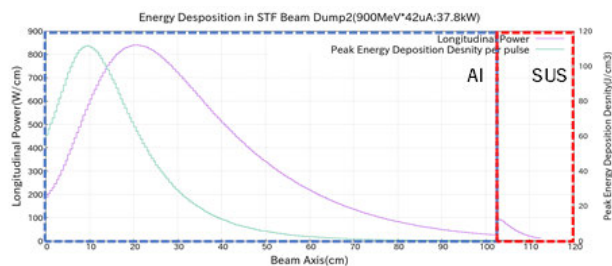


図3 入射後1 cm辺りの発熱量

るように設計した。ただし、軟化温度を越えた場合も、250 °C程度までは軟化による塑性変化は起こらない見込みである。また、塑性変化が生じた場合も、金属疲労の観点で不利になる可能性があるものの即損傷となるわけではない。

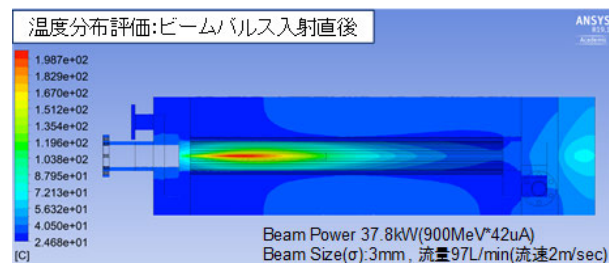


図4 ビームパルス入射直後の温度分布

2.2.3 熱応力-構造耐久性

図5は38 kWビームのパルス入射直後のコア部相当応力分布の計算値である。最高相当応力は155 MPaであり、ビーム発熱集中部分の圧縮応力に起因する。ビームパルス入射直後が最高温度を観測するとともに最大の圧縮応力が生じるが、一方でビームパルス入射直前が最も除熱が進み圧縮応力も緩和される。ビームパルス入射直前ではこの圧縮応力は121 MPaまで緩和されることが同計算で見積もられた。STF-2のビームは5 Hzのパルス運転であるが、上記評価よりビームダンプ2コア部では5 Hzで155 MPa⇔121 MPaと上下する圧縮応力に晒されることになる。パルスビームを受ける場合、繰返し応力による金属疲労も考慮して装置寿命を考えなければならない。この金属疲労の程度は応力比(繰返し応力の最小値/最大値の比)によっても大きく変わる。ビームダンプ2では最大強度155 MPaであり、応力比は121 MPa/155 MPaで0.78となる。参考文献[15]では応力比毎のS-N曲線が繰返し1×10⁸回まで記載されているが、この文献を見るに少なくとも1×10⁸回の繰返し応力に耐えることが分かる。これは5 Hzビーム運転で約5,600時間に相当する。

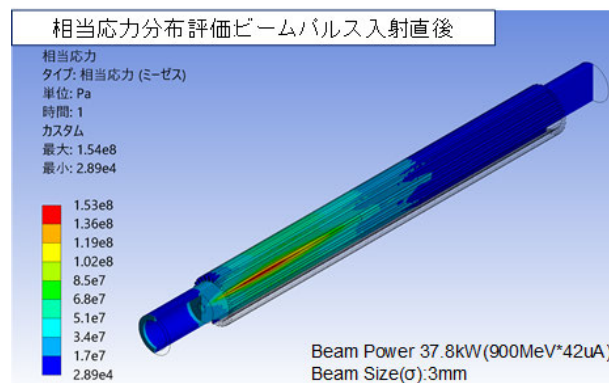


図5 コア部のビームパルス入射直後の相当応力分布

2.3 高周波システム

STF-2加速器において、超伝導空洞へマイクロ波を供給する高周波系は、ILCの高周波系に準じるものとして開発を進めている。RF電子銃部、CCM、CM1/2aの3か所に対して、RF電子銃の常伝導空洞へは5 MWクライストロン、CCMの2台の超伝導空洞には800 kWクライストロン、CM1/2aの8台の超伝導空洞には10 MWマルチビームクライストロンを用いて各空洞へ高周波を供給する。これらクライストロンは地上のギャラリーに設置し、その高周波出力は導波管を通じて地下のSTF-2加速器へ送られる。

ILCの高周波系は、10 MWマルチビームクライストロンで39台の超伝導空洞を励振する構成である。クライストロンのRF出力は導波管を通じて超伝導空洞まで分配することになるが、その導波管路には結合度を変更できるパワー分配器や導波管移相器が組み込まれ、各空洞へのRF入力やその位相のリモート制御が可能となっている。平均31.5 MV/m $\pm$ 20%の勾配分布を持つと想定される超伝導空洞で平均加速電場を向上させるため、空洞へはクエンチリミットの95%パワーを供給、10 MWマルチビームクライストロンは飽和出力の95%で運転することになっている。

ILCのビーム運転では、加速電場に対して振幅安定度 $\Delta A/A = 0.07\%$ rms、位相安定度 $\Delta\phi = 0.32$ deg. rmsの要求がある。これを実現するため、励振する全ての空洞波形をモニター、その振幅・位相のベクトル和を計算、設定値と比較してフィードバック制御をする低電力RF制御系を採用している。

この低電力RF制御系では、空洞からピックアップした信号の振幅と位相情報を保持しつつ運転周波数から10 MHzへ周波数変換した信号を用いて、アナログ-デジタル変換器(ADC)でサンプリング後にデジタルデータ変換、フィルタリング等のデジタル信号処理を施し、デジタル-アナログ変換器(DAC)でRF入力信号に変調を行う。このためADCとDAC、デジタル信号処理用にFPGA(Field-Programmable Gate Array)を搭載したデジタル制御ボードを専用に開発し、STF棟で進められた超伝導空洞の高周波系の運転に用いてきた。これまでのSTFでの高周波系の運転では、デジタル制御ボードによりILCに要求を満たす加速電場の振幅・位相安定度を実現している。また、空洞への入力RFから高い加速電場を得るため、運転周波数と空洞の共振周波数の差で表せられる空洞の離調をモニターし、離調がゼロになるように機械またはピエゾチューナーを調整する必要がある。このため、超伝導空洞への入力RF信号や空洞からの反射RF信号、空洞からのピックアップ信号の波形を用いて空洞の離調を常時モニターできるようにしている。

2.4 冷凍機システム

STFでは現在、CCMに2台の空洞、CM1/2aに12台の空洞と1台の超伝導4極マグネットの、合計14台の空洞と1台の超伝導4極マグネットがインストールされている。これらの空洞は約2 Kの飽和超流動ヘリウムで冷却される。冷凍システムは1986年より所内にて使用されていた液化機(Sulzer社製TCF200)をSTF棟に移設し、KEKで開発した2 K冷凍機を接続して構成されている。図6に示すように、2 K冷凍機は4 Kポットと2 Kポットから構成され、2 Kポットの圧力を約3 kPaまで真空ポンプにより減圧することで、所定の温度を実現している。超流動液化ヘリウムは2 Kポットから水平に延長された液化ヘリウム供給配管により空洞に供給されている。超伝導4極マグネットはCM1/2aの、上流より4台目と5台目の間に導入され、ヘリウム供給パイプに取り付けられた熱アンカーにより間接的に冷却される仕組みになっている。2 K冷凍機はCCMとCM1/2aのそれぞれに取り付けられており、2式の2 K冷凍機はそれぞれ独立に運転できるが、減圧ポンプは共用のため、それぞれの2 Kポットの圧力を独立に制御することはできない。このため、空洞の発熱量に応じて圧力差ができることがあり、圧力制御の対象であるCM1/2aは常に3 kPaに保たれる一方、CCMの圧力は負荷のバランスによって変動する。現状では、この冷凍システムで徐熱可能な高周波による損失熱は25 W程度である。

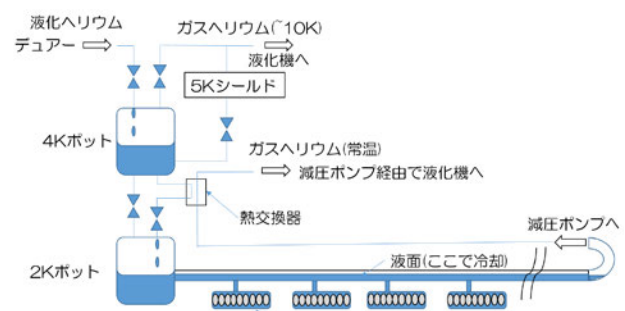


図6 STF-2加速器の冷凍機システム

3 クライオモジュールの性能

3.1 超伝導空洞

STF-2加速器に用いられている超伝導空洞の数は、CCMが2台、CM1/2aが12台の計14台である。CM1/2aは8空洞のみに導波管が接続されており、運転に使われている。また、今回の冷却試験では冷却後に1台の空洞(CAV#4)のチューナーに不具合が生じ¹、運転から外されることになった。図7はエージング後の全空洞の最大加速勾配である。2016年に実施された3回目の冷却試験で一部の空洞に性能劣化が見られたため、今回はショートパルスによるエージング(RF dutyを下げる)から行

¹ チューナー用モーターと連結される市販品である高真空用回転フィードスルーの故障であった。交換可能であるため今後の運転

には特に支障はない。

なったところ、無事元通りの性能に戻った。CM1/2aの7空洞の平均値は33.8 MV/mであった。

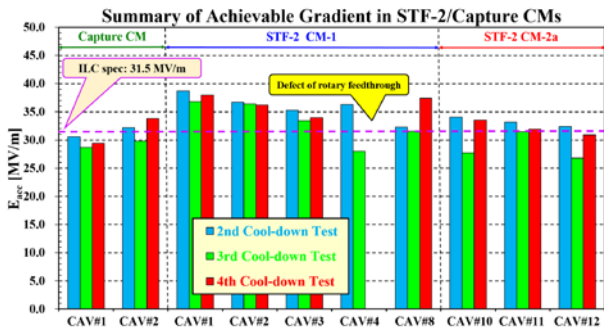


図7 STF-2加速器に用いられている全空洞の最大加速勾配の履歴。今回CAV#4のみチューナー部品の不具合により使用されていない。

空洞の熱負荷は、モジュール内で蒸発した後のヘリウムガス流量から求められる。測定手順は、静的熱負荷の測定→動的熱負荷(7空洞分)→動的熱負荷(7カップラー分)→静的熱負荷、の通りである。静的熱負荷とはクライオモジュールに高周波を投入していない状態での消費熱のことであり、動的熱負荷とは高周波を投入している状態での消費熱である。さらに、動的熱負荷には2パターンあり、空洞のチューニングが取れている場合とそうでない場合とに分かれる。チューニングが取れている場合は、高周波は空洞内まで伝播するが、取れていない場合はカップラー先端部で全反射となる。これにより、カップラーのみの動的熱負荷の測定が可能となる。カップラーは、空洞と常温とを物理的につなげる高周波機器であり、ここからの熱侵入を如何に小さくするかが一つのキーポイントである。図8は熱負荷を Q_0 値²に直したプロットで、前回の冷却試験(2016年に実施)の結果を含む3つの点が表示されている。誤差は、主に静的熱負荷の再現性およびヘリウムガス流量計の測定値のばらつきから求められた。赤い点は誤差の範囲内で表2のILCスペックと一

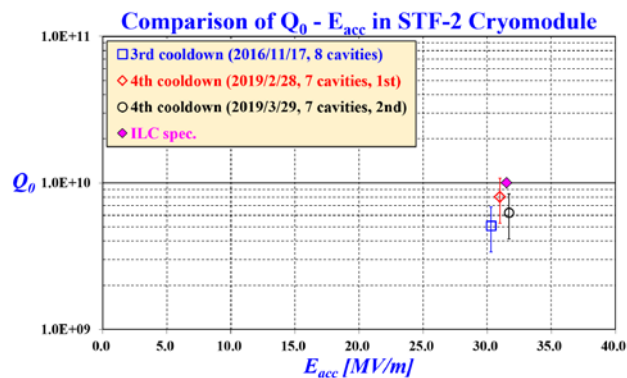


図8 CM1/2aの運転に用いている7空洞の平均的な Q_0 値。ダイヤ型の色塗り点がILCスペック。

² 超伝導の“性質”を表すパラメータで Quality factor という。慣習的に下添え字に 0 を入れる。

致しているが、全体的に Q_0 が低いのはfield emissionの影響である(空洞表面から放出される電子の加速にエネルギーが使われてしまう)。 Q_0 はヘリウムの消費量と関係しているため、ILC計画の運転経費に影響を及ぼす。高加速勾配と同様、高 Q_0 値も今後の課題である。

空洞から発生する放射線量はfield emissionの影響を調べるのに有効な測定で一空洞ずつ測定される。放射線は、CM1/2aの上流部、下流部、そして測定している各空洞の直下、の3ヶ所で測定している。図9はCM1のCAV#8から放出された放射線をCM1上流部のビームパイプに取り付けられたモニターで測定した放射線量の推移である(今回の結果で加速勾配が上がっているのはエージングの結果と思われる)。Fowler-Nordheimの表式[16]によると、加速勾配と放射線量(emission current)との間には指数的關係があり、実際の測定結果もそのような傾向を示している。今回のビームコミッショニングでは、これまで開けなかったCM1/2a両端のゲート弁をビーム通過のために開ける必要があった。ゲート弁の外側はビームラインであり、超伝導空洞内部と異なりアウトガスやダスト(field emissionの原因となるもの)の巣窟である。この影響を調べるため、ビームコミッショニング前後での放射線量を比較することにした。それが図9の赤と紫の点である。一見して明らかにビームコミッショニング後の方が放射線量は増えており、何らかの影響を受けたことがわかる。他の空洞にも同様の傾向が見えており、今後のビーム運転は要注意である。ただし、加速勾配に劣化が見られなかったことは幸いであった。

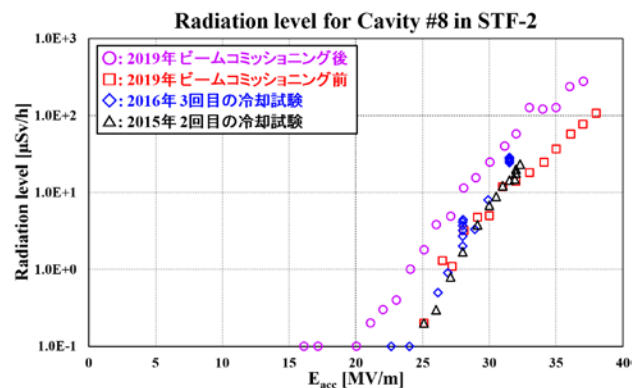


図9 CM1内のCAV#8からビームライン上流側に放射された放射線量の推移。

3.2 静的熱負荷測定

各クライオモジュールの2 K領域への侵入熱は、2 Kポットへの液化ヘリウムの供給を止めたうえで、蒸発して発生したヘリウムガスの流量を測定して実施する。ガスの流量はダイヤフラム式の乾式ガスメータを使用して測定している。ガスの体積流量

はガスメータ近傍で測定したガスの圧力と温度からリアルタイムで質量流量に変換され、蒸発潜熱から侵入熱に換算される。測定例を図10に示す。液化ヘリウムの供給を止めると、ヘリウムの液面の低下が始まり、蒸発ガスの流量が液面維持運転に比べて低い値で安定する。流量が十分に安定したことを確認し、流量から換算した入熱の平均値を求め侵入熱とする。図10の例では侵入熱は32.8 Wである。熱負荷の換算値は計算に使用した部分だけプロットしている。この測定では侵入熱は標準偏差0.98 W程度の揺らぎがあり、測定は3%程度の誤差を含んでいる。

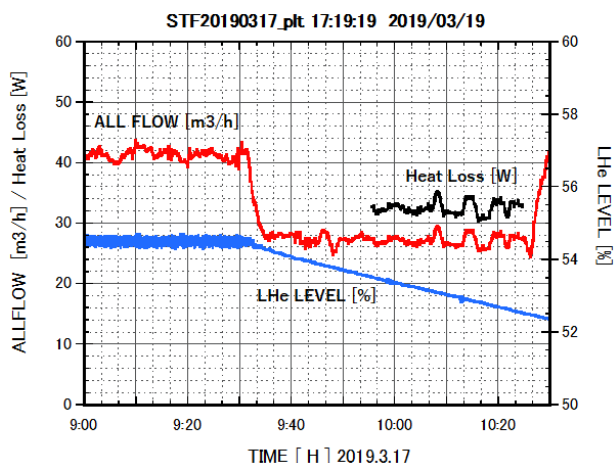


図10 熱負荷測定例

先に述べた測定方法を用いて、各クライオモジュールの侵入熱を測定した。その結果、CCMの侵入熱は7.5 W、CM1/2aの侵入熱は28.5 Wとそれぞれ評価された。ILCのTDRでは、8空洞を内蔵したクライオモジュール1台当たりの2 K領域への侵入熱は1.3 Wとされているので、この値は非常に大きいと評価せざるを得ない。CM1/2aには、12台の空洞と1台の超伝導4極マグネットが組み込まれているが、ヘリウム供給パイプの温度分布などからマグネットからの侵入熱が大きいと推定された。そこで、2015年の冷却試験前に主カレントリードを取り外し、その寄与分の測定と侵入熱の低減を試みた。主カレントリードを撤去した結果、CM1/2aの2 K領域への侵入熱は23 Wとなり若干の改善が見られた。さらに今回は、補助コイル用のカレントリードも含めたすべてのカレントリードを取り外したが、侵入熱の測定値は23.2 Wで有意な変化が見られなかった。

4 ビームコミッショニング

STF-2では、ILCにおいて要求される加速勾配31.5 MV/mを実現することを目的として、ILCスペックを満たしたCM1/2aを新たに追加したビームラインを構築し(CCMは2012年に設置済)、2019年2月からビーム運転を開始し、3月まで行われた[17]。

今回の運転でのビームコミッショニングの目的は、3月13日に原子力規制庁による放射線検査が予定されており、これを通して最大出力20%以上で電子ビームを生成し、ビームダンプまでロスなく通すこと、および、この生成した電子ビームの特性を測定することである。

今回ビームラインを延長しクライオモジュールを追加したことに伴い最大定格もQuantum Beam計画時から表3にあるように変更された。入射器モードとLINACモードの2種類があり、それぞれにおいて最大定格が設けられている。

表3 STF-2の最大定格

	入射器モード	LINACモード
最大エネルギー	45 MeV	500 MeV
最大ビーム電流	30 nA	300 nA
最大ビームパワー	1.35 W	135 W

今回の新ビームラインでのビーム運転は初めてであったので、まずビーム軌道や加速位相などの調整を行い、その後ビームエネルギー、カレント、エミッタンスなど生成した電子ビームのパラメータの測定を行った。

4.1 STF-2ビームライン

STF-2加速器では、電子源としてL-band(1.3 GHz)フォトカソードRF電子銃を用いている。カソードにはCs₂Teを蒸着し、そこに266 nmの紫外レーザー光を照射することで電子ビームを生成する。カソードの量子効率_{0.3%}であった。このRF電子銃で生成した電子ビームは、最初にCCMで40 MeVに加速する。入射器モードでは、この下流にある30度バンドマグネットで曲げて、ビームダンプ1へ捨てる。LINACモードでは、このバンドマグネットはOFFにして、ビームはそのまま通過し、CM1/2aでさらに280 MeVまで加速し、下流にある10度バンドマグネットで曲げてビームダンプ2へ捨てる。ビームラインのレイアウトを図11に示す。

4.2 ビームトランスミッション調整

4.2.1 軌道調整

ビームラインを延長して初めてのビーム運転のため、最初は電子ビームをビームダンプ2まで通す調整から始めた。この軌道調整では、クライオモジュールを通すことが主な調整になる。特にCM1/2aは全長20 mあり、その下流の最初のモニターまでさらに6 mあるが、この区間はビームを検出するモニターがない。そこで、手前まで4極マグネットの中心を通るようにビーム軌道を調整後、一旦、クライオモジュール前後の4極マグネットやステアリングマグネットをOFFにして、磁場でビームが蹴られないようにした。その上で、空洞のRF位相を変えながら上流のステアリングマグネットを使ってビームを振り、下流でビーム信号が見える場所をスキャンすることで通した。一度ビーム信号が捉えられれば、

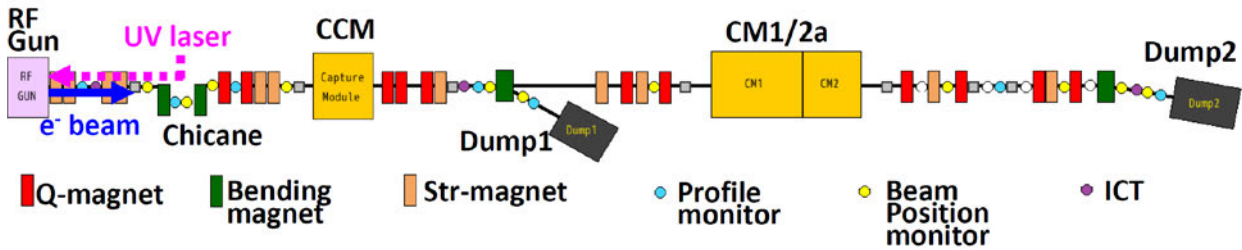


図 11 STF-2 ビームラインのレイアウト

あとはRF位相を通過して来るビームカレントが最大になるように調整し、ビームプロファイルモニターで軌道の中心に来るようにステアリングマグネットで軌道を調整し、最後に4極マグネットの磁場をデザイン値まで上げ、ビームがきれいに通るように微調整した。その後、ビームトランスミッションが最大になり、ビームロスが最小になるよう、4極マグネットやステアリングマグネットを調整しながら、検査を受けられる最大ビームパワーの20%以上にるように徐々にカレントを上げていった。

4.2.2 ビームロスの場所

図12は、インスタントカメラ用のフィルムをビームラインに約3週間貼り付けてビームロスの様子を見たものである[18]。ビームロスがあるところでは感光する。これを見ると、CCMやCM1/2aの入り口でもややロスがあるが、バンドマグネットで曲げてビームダンプ2へ向かうラインで、ビームロスが多いことが分かる。図13にバンドマグネット後のビームプロファイルの画像があるが、これを見るとエネルギーテールがあり、これが原因であると推測される。

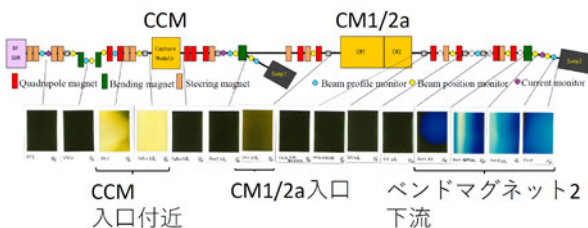


図 12 インスタントカメラのフィルムで測定したビームロスの様子。CCMやCM1/2aの入り口でややロスしている。また、最後のバンドマグネット2で曲げた後でもロスが見られる。

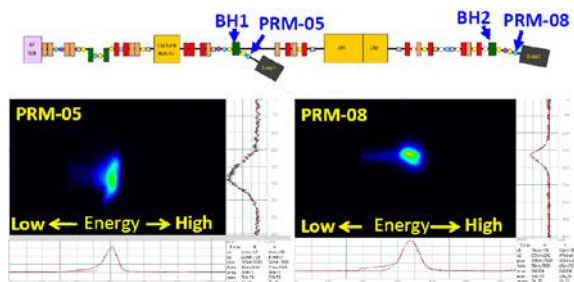


図 13 バンドマグネット下流のビームプロファイル。横軸がエネルギー方向となり、右側のほうがエネルギーは高い。

4.2.3 放射線漏洩検査

ビーム調整後、事前にKEKの放射線管理センターの方に運転中の漏洩放射線量を測定してもらい、すべての個所で基準値以下であることを確認した後、原子力規制庁による検査を受けた。そのときの電子ビームは263 MeV, 38 nC/6 μ s, 5 Hzで、このビームパワーは約50 Wとなり、最大ビーム出力の37%であった。このビーム出力で検査を受けて無事通過することができた。

4.3 電子ビームのパラメータ測定

今回のビーム運転で生成した電子ビームのパラメータ測定について以下で述べる。

4.3.1 ビームエネルギー

電子ビームのエネルギーは、バンドマグネットでビームを曲げた時の磁場強度から計算している。CCMおよびCM1/2a下流にあるバンドマグネットで各々のエネルギーを測定できる。図13のビームプロファイルは、バンドマグネット下流にあるビームプロファイルモニターで撮影したものである。エネルギー測定の際には、ここでビームが軌道中心に来るようにバンドマグネットの磁場強度を調整し、また、上流の4極マグネットで蹴られてバンドマグネットの入射位置や角度がずれないように4極マグネットの中心を通すように調整した。

図14は、各モジュールのクライストロンのRF位相をスキャンしたときのビームエネルギーを測定した結果である。運転時のRF位相は、エネルギー広がり最小になる場所に合わせ、ここではビームエネルギーもほぼ最大となっている。

これらの調整を行い、CCMおよびCM1/2a下流でのビームエネルギーは、それぞれ 40 ± 2 MeV, 280 ± 3 MeVとなった。また、これらのエネルギーの差と空洞長の合計から、CM1/2aにおける平均加速電界が計算できる。空洞長は1.035 mでCM1/2a内では7台の空洞でビーム加速されているので、平均加速電界は 33.1 ± 0.7 MV/mとなる。パルス幅6 μ sのビームではあるが、実際にビーム加速においてILCで要求されている加速電界の達成を確認できた。さらに、空洞に蓄積しているRFパワーから推定した加速電界が33.8 MV/mとなっており、ビームを加速して測定した加速電界と良く一致していることも確認できた。

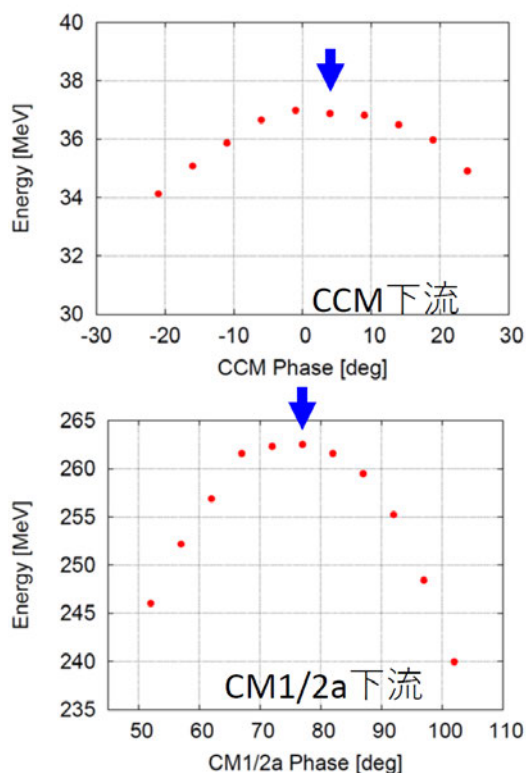


図 14 各クライオモジュールのクライストロンの RF 位相をスキャンしたときのビームエネルギーの変化。運転時は青矢印に合わせた。

4.3.2 電子ビーム電流

今回の運転では、280 MeV、56 nC/pulse、1000 bunches (6 μ s)/pulse、5 Hzのビームを生成できており、電子ビームカレントは、ほぼ最大定格まで上げて運転することができた。

電子ビームのカレントの安定性を見ると、ショット毎のカレントジッターはRMSで約3%と安定していた。しかし、電子を生成しているレーザー光と加速RFの相対的な位相のドリフトやジャンプにより、カレントのドリフトや急な変化が起こることがあった。RF電子銃では、これらの相対位相によって電子銃から出てくる電流量が変化するため、位相のドリフトはカレントドリフトとして観測される。

電子銃レーザーの発振器にはモードロックレーザーを用いており、加速器全体の基準信号から分周した参照用のRF信号とPhase locked loop(PLL)により同期をとることで、加速管のRF位相に同期させている。ただし、PLLがかかっている状態でも、レーザーと加速RFの相対位相がずれて、カレントのドリフトやジャンプが起きている。原因の一つは、このPLLによる同期の不調によるものと推測されているが、それ以外の原因は特定できておらず、今後調査する予定である。

4.3.3 エミッタンス

電子ビームのエミッタンスはCCMおよびCM1/2aの下流でそれぞれ測定した。測定には、4極マグネットの磁場強度を変えた時の下流でのビームサイズの変化からエミッタンスを算出するQ

スキャン法を用いた。ビームサイズは4極マグネットの下流にあるビームプロファイルモニターで測定している。このモニターは、鏡面加工したSUS板を電子ビームが通過したときに出るOTR光をCCDカメラで撮影するビームプロファイルモニターである。図15が各々の場所で撮影したビームプロファイル、および4極マグネットの磁場強度を変えた時のビームサイズの変化のグラフである。

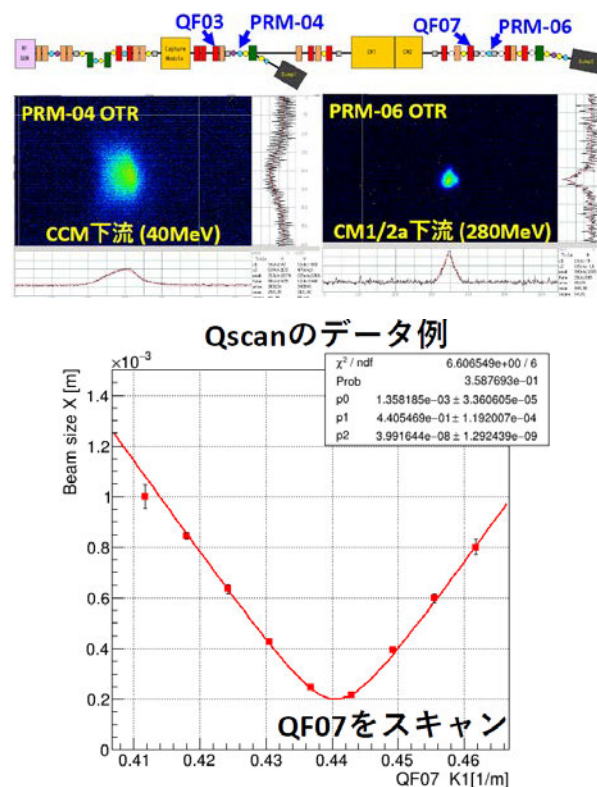


図 15 CCM 下流および CM1/2a 下流で撮影したビームプロファイル、および 4 極マグネットの磁場強度を変えた時のビームサイズの変化。

このように測定されたエミッタンスは、CCM下流において、水平、垂直方向でそれぞれ7 mm mrad、および11 mm mradであり、CM1/2a下流では水平、垂直方向でそれぞれ20 mm mrad、および16 mm mradであった。このときのビームエネルギーはそれぞれ40 MeV および280 MeV でバンチ電荷はそれぞれ31 pC/bunchおよび25 pC/bunchであった。測定は100バンチの電子ビームで行っている。

2012年のQuantum Beam計画ではクライオモジュールはCCMのみであったが、エネルギー39 MeV、バンチ電荷39 pC/bunchで、エミッタンスは約1 mm mradであり、今回の結果は、以前の結果と比較して10倍悪くなっている。また、CM1/2a通過によってもエミッタンス増大が起きている。測定した場所でのビームサイズは約200 μ mであり、Dispersionは約20 mm、エネルギー広がり約0.1%なので、Dispersionによるビームサイズへの影響は無視できる。

現時点ではエミッタンス増加の原因は特定できていない。超伝導空洞には水平方向にカップラーが付いているので、この影響(カップラーキックという)がないか調べるために、CM1/2aにおいて、その方向に軌道オフセットをつけてビームを通しエミッタンスを測定したが、大きな変化は見られなかった。また、今回はRF電子銃の入力RFパワーが2.5 MWと以前より低く加速電界が低いいため、空間電荷効果の影響で悪くなっている可能性もあるが、バンチ電荷を半分の20 pC/bunchにしてもエミッタンスは10%程度しか下がらず、ビームカレント依存性は小さかった。

4.4 高周波制御

今回のCM1/2aの運転では、最初に各空洞へのRF入力力が等分配になるようにパワー分配器の分割比を設定した。次に各空洞のクエンチリミットを調査しつつ、パワー分配器の分割比の調整を実施した。図16は、調整後の各空洞の離調(上段)と空洞波形(下段)である。下段の空洞波形は、入力RF(青)、反射RF(緑)、空洞RF(赤)であり、縦軸は空洞RFの加速電場である。ビーム加速を行う空洞RFのフラットトップで離調が0 Hzになるようにチューナーを設定している。この時の各空洞のベクトル和での平均加速電場は、34 MV/mであった。

次に、対応しているパワー分配器間の導波管に導波管スペーサーを挿入して位相長を変更、各空洞のRF入力位相を同期してビーム加速できるように調整した。その後、ビームプロファイルモニターを用いて、空洞毎の加速位相を導波管移相器で設定した[19, 20]。

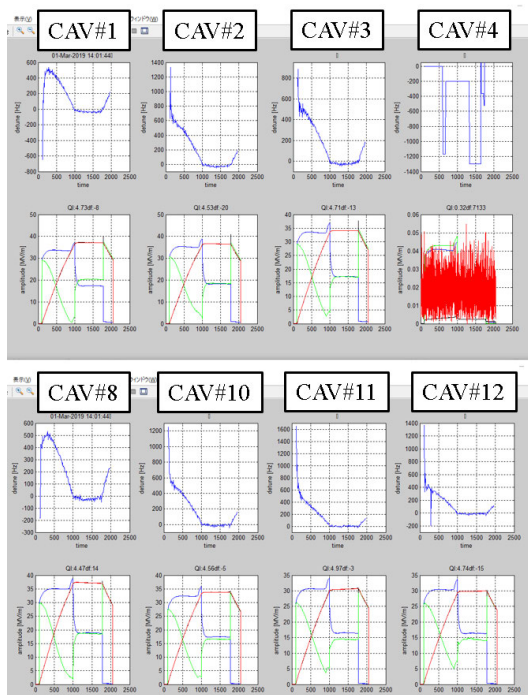


図16 平均加速電場33.8 MV/mでの各空洞の離調、入力RF、反射RF、空洞RF波形。CAV#4は不使用。

4.5 ビームダンプ

ビームダンプ2は2018年12月に完成/納品された。2019年1月には真空系と冷却水系の繋ぎ込み、遮蔽体の設置が完了し、ビーム受け入れ準備が完了した。この間、ビームダンプ2は2週間の1 MPa耐水圧試験を行ったが漏水なくクリアした。2019年3月には遂に初照射がなされた。この間の最大ビーム強度はおよそ280 MeV×280 nAの78 W程度であった。ビームダンプ2には熱電対が多数取り付けられているが、運転期間中には最大0.4 °C程の温度上昇が確認された。今回のビーム運転は問題無く運転完了した。

5 まとめと次回のビーム運転に向けて

今回のビーム運転では、最終的に280 MeV, 56 nC/pulse, 1000 bunches (6 μs)/pulse, 5 Hzで、ビームパワーにすると78 Wで最大定格の58%の電子ビームを生成することができた(表4)。また、CM1/2aの平均加速電界はILCの要求する加速電界を超える33.1±0.7 MV/mを出すことに成功した。これはILCの運転条件を実証したということになり、非常に意義深いことである。一方で、ビームエミッタンスは10-20 mm mradと悪く、また、加速RFと電子生成用のレーザーとの位相同期のドリフトやジャンプに起因するカレントの不安定性が見られた。これらの原因はまだ特定できておらず、今後の調査で原因を特定し、来年度予定されているビーム運転までに改善する必要がある。

表4 今回の運転でのビームパラメータ(LINACモード)

エネルギー	280 MeV
ビーム電流	280 nA
ビームパルス電荷	56 nC/pulse
	1000 bunches(6 μs)/pulse
パルス繰り返し	5 Hz
ビームパワー	78 W
CM1/2aでの平均加速電界	33.1 MV/m

超伝導空洞については、現在のところその性能に特に問題は見られないものの、今後継続していくビーム運転で性能劣化が起こらないかどうか注意して見守る必要がある。ILCは10年以上に亘り運転していく加速器であるため、長期間の性能の推移もまた重要な調査項目である。今年度はCM2aに入っている性能の悪い空洞(CAV#9)の交換作業を予定している。新たに入れる空洞には、最近、米国・フェルミ国立加速器研究所にて発見された新方式の熱処理[21]を行なった空洞を入れる予定である。

高周波制御については、今回の運転ではビームパルス幅が最大で6 μs程度であったため、加速電場のベクトル和に対するPIDフィードバック制御による運転であった。今後のRF電子銃のレーザー系増強によるビームトレイン長を延長した場合、安定な

ビーム運転のためには積極的にビーム負荷に対する補償を行う必要がある。補償手段については、反復学習制御等の様々な手段が考えられ、デジタル制御ボードに組み込んで実証を進めていく。

ビームダンプ2本体の開発は完了した。次年度はビーム強度を上げた運転が計画されており、ビームダンプ性能の本格的な試験ができる見込みである。ビームダンプ2本体以外では、冷却水系の更新を進める予定である。ビームダンプ2では除熱性能を向上させるためにコア部近くを冷却水が流れるため、冷却水の放射化が起こる。また、ビームダンプ2の構成材料であるアルミ合金は冷却水に対して微量ながら腐食していく。現在は簡易な閉ループ冷却水系にビームダンプ2を繋げているが、放射化物や腐食物対策に向けて、フィルター系を強化した冷却水系に更新する。

クライオモジュールの静的熱負荷が実測と計算とで大きく異なる点については、今後シミュレーションによる見積もり等を再検討する必要がある。

謝辞

ビームライン建設からビームコミッショニングまでの間、実に多くの方々にご協力いただきました。以下の方々にに対し、ここに改めて感謝申し上げます。

原田健太郎氏、多和田正文氏、増澤美佳氏、長橋進也氏(以上、KEK)

岡田昭和田氏、飯竹真之氏(以上、株式会社ケーパック)

浅野峰行氏、今田信一氏、山田浩気氏、泰中俊介氏、石原将治氏、石本和也氏、沼田直人氏、堤和昌氏、(以上、日本アドバンステクノロジー株式会社)

早川厚氏、寺嶋凌氏(以上、関東情報サービス株式会社)

参考文献

- [1] Y. Yamamoto *et al.*, “Successful Beam Commissioning in STF-2 Cryomodules for ILC”, in the 19th International Conference on RF Superconductivity, Dresden, Germany, 2019, WETEA6
- [2] Y. Yamamoto *et al.*, “ILCに向けたSTF-2加速器のビームコミッショニング”, in *Proc. of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Kyoto, Japan, Jul. 2019, FROH05
- [3] ILC Technical Design Report (2013).
<https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [4] 早野仁司, 高エネルギーニュース **25-3**, 137 (2006).
- [5] E. Kako *et al.*, “Cryomodule tests of four Tesla-like cavities in the Superconducting RF Test Facility at KEK”, *Phys. Rev. Special Topics - Accel. and Beams*, Vol.13, 041002 (2010).
- [6] 大内徳人, 加古永治, 高エネルギーニュース **29-2**, 70 (2010).
- [7] Y. Yamamoto *et al.*, “Test Results of the International S1-Global Cryomodule”, in *Proc. of the 15th International Conference on RF Superconductivity*, Chicago, IL, U.S., 2011, p.615-624.
- [8] 早野仁司, 高エネルギーニュース **32-2**, 101 (2013).
- [9] Y. Yamamoto *et al.*, “Construction and Beam Operation of Capture Cryomodule for Quantum Beam Experiments at KEK-STF”, in *Proc. of the 3rd International Particle Accelerator Conference*, New Orleans, LA, U.S., 2012, p.2236-2238.
- [10] H. Shimizu *et al.*, *NIMA*, Vol.772, p26-33 (2015).
- [11] 山本康史, 高エネルギーニュース **34-4**, 277 (2016).
- [12] Y. Yamamoto *et al.*, “Achievement of Stable Pulsed Operation at 36 MV/m in STF-2 Cryomodule at KEK”, in *Proc. of the 18th International Conference on RF Superconductivity*, Lanzhou, China, 2017, p.722-728.
- [13] Y. Morikawa *et al.*, “Development of STF Beam Dump”, in *Proc. of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Kyoto, Japan, Jul. 2019, FROH07
- [14] Alfredo Ferrari, Paola R. Sala, Albert Fasso, Johannes Ranfit, FLUKA: A multi-particle transport code, Version 2011-2x, CERN.
- [15] METALLIC MATERIALS AND ELEMENTS FOR AEROSPACE VEHICLE STRUCTURES. No. MIL-HDBK-5H, Dept of Defense, 1998.
- [16] R.H. Fowler and L. Nordheim, “Electric Emission in Intense Electric Fields”, in *Proc. of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, Volume 119, Issue 781, pp. 173-181.
- [17] M. Fukuda *et al.*, “Beam tuning in STF-2 accelerator”, in *Proc. of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Kyoto, Japan, Jul. 2019, THPI017
- [18] Y. Honda *et al.*, “Radiation Distribution Measurement at cERL with a General Purpose Imaging Film”, *Proc of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*.
- [19] T. Matsumoto *et al.*, “Status of low-level rf control system for STF2 accelerator at KEK”, in *Proc. of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Kyoto, Japan, Jul. 2019, WEPH011
- [20] K. Tsutsumi *et al.*, “Construction of RF Power Distribution System for Stable Beam Operation for STF2 Accelerator at KEK”, in *Proc. of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Kyoto, Japan, Jul. 2019, THPH009

- [21] A. Grassellino *et al.*, “Unprecedented Quality Factors at Accelerating Gradients up to 45 MV/m in Niobium Superconducting Resonators via Low Temperature Nitrogen Infusion”, *Supercond. Sci. Technol.* 30 (2017) 094004.