

## 超伝導加速器試験施設 STF (Superconducting RF Test Facility) の現状

早野 仁司\*

### Status of Superconducting RF Test Facility

Hitoshi HAYANO\*

#### Abstract

The superconducting RF test facility (STF) in KEK is aiming to promote R&D of superconducting linear accelerator to be used in the International Linear Collider (ILC) and other advanced accelerator concept. The STF construction is planned to be sub-divided into two parts. They are phase-1 plan and phase-2 plan. The phase-1 plan is aiming to have quick experience on all aspects of 1.3 GHz SC cavity and cryomodule technologies by producing 4 TESLA-shape cavities with 5 m cryostat and 4 LL-shape cavities with another 5 m cryostat, which are powered by 5MW klystron. The other aspect of phase-1 development is to construct new cavity surface treatment facilities, such as electrochemical polishing and clean room to achieve cavity high performance. The developments of the phase-1 were completed in the end of 2008. STF is now entered to the new phase, STF phase-2. On a way of phase-2 construction, the intermediate programs such as 'S1-Global' and 'Quantum beam accelerator' will be conducted. The overall concept, plan and schedule are introduced.

#### 序

超伝導加速器試験施設 STF (Superconducting RF Test Facility) においてこれまで行われてきた技術開発は、「STF-phase1」の段階を2008年12月に終了した。そしてその成果は2009年4月に「STF Phase-1 Activity Report」<sup>1)</sup>としてまとめられた。この区切りの時期に、STF 開発計画について、その計画策定、実行状況、そして今後の予定について報告しておきたい。なお、STF に関連する加速器各コンポーネントの設計、開発、成果など技術詳細については、別途それぞれ報告があるので、本稿では割愛させていただく<sup>2-7)</sup>。

### 1. STF 開発計画

#### 1.1 STF 開発計画の背景

電子と陽電子をできるだけ高いエネルギーまで加速し衝突実験を目指すりニアコライダーでは、より短い距離でできるだけ高いエネルギーに電子あるいは陽電子を加速し、ナノメートルのオーダーまでビームサイ

ズを絞って衝突させる事が要求される。KEK で行っているリニアコライダー加速器開発は、高勾配加速の実現と低エミッタンス電子ビームの実証およびそのビームを使用した収束光学系の検証である。後者については、加速器試験施設 (ATF, Accelerator Test Facility) を建設し低エミッタンスビームを実現し、さらに収束光学系を延長建設してビーム開発中である。一方前者については、1988年ごろよりいくつかの異なる加速方式が世界で並行して開発されてきており、KEK においては X バンド周波数の常伝導加速管を用いる方式と C バンド周波数の常伝導加速管を用いる方式とを開発してきたという経緯があった。しかしリニアコライダーはその規模の大きさから世界に一つだけ建設するという合意が世界の研究者の間で形成され、その加速方式を統一するために、ICFA (International Committee for Future Accelerators)<sup>8)</sup>傘下の ILCSC (International Linear Collider Steering Committee)<sup>9)</sup>のもとに ITRP (International Technology Recommendation Panel) が結成され、2004年8月にその答申が出された<sup>10)</sup>。これにもとづき ICFA

\* 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設  
High Energy Accelerator Research Organization, Accelerator Laboratory  
(E-mail: hitoshi.hayano@kek.jp)

が、リニアコライダーの主線形加速器は超伝導加速技術によると決定し、それを ILC (International Linear Collider) と命名した。これを受けて KEK における高加速勾配の実現研究は Lバンド周波数の超伝導加速技術に転換する事となった。そしてこれ以降リニアコライダー開発は国際的設計チーム GDE (Global Design Effort)<sup>11)</sup>において統一して行われる事となり、その設計開発研究のスケジュールが立案された。このプログラムにもとづいて、2005年8月に米国スノーマスで開催されたワークショップ、およびそれに続く会合で Baseline Configuration Document (BCD) がま

とめられた。さらに一年をかけて基準設計報告書 (Reference Design Report, RDR) がまとめられ、2007年8月にはその RDR<sup>13)</sup>が正式に公開された。

RDR に記述されている ILC 加速器は、図1のような全体レイアウト概念図で概観できる。そのなかで使われる超伝導加速技術は、以下のようなものである。加速空洞の形状は TESLA 型 (ドイツ DESY 研究所において開発されてきた加速空洞の形状) とする。加速電界は縦測定において 35 MV/m ( $Q_0$  は  $0.8 \times 10^{10}$  以上) を上回るものを選ぶ。運転加速電界は平均 31.5 MV/m 以上 ( $Q_0$  は  $1 \times 10^{10}$  以上) とする。以上を baseline configuration として設計を進めるが、alternative configuration として、縦測定 40 MV/m 以上、運転加速電界 36 MV/m 以上の空洞も開発目標とする。図2に、ILC 線形加速器の基本ユニットの概念図を示す。10 MW の L-バンドクライストロン1台で、26 台の 9 セル空洞 (それぞれの実効長は約 1 m) をドライブする。また、図3に、ILC 線形加速器が地下トンネルに実装されたときの概観図を示す。図4に、ILC での使用が想定される超伝導空洞パッケージの一例を図示する。ニオブ製の 9 セル空洞がヘリウムジャケット内に納められている。空洞の冷却は、このジ

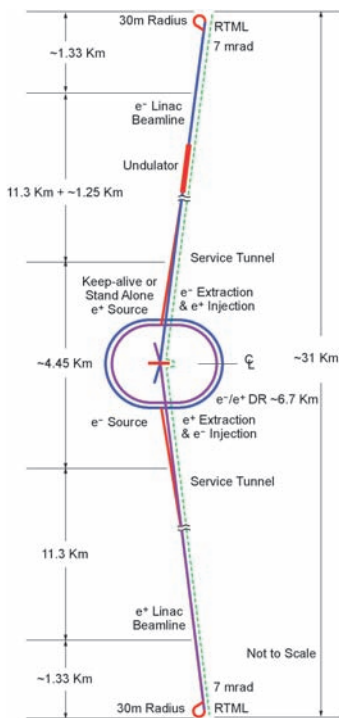


図1 ILC 加速器全体レイアウト概念図

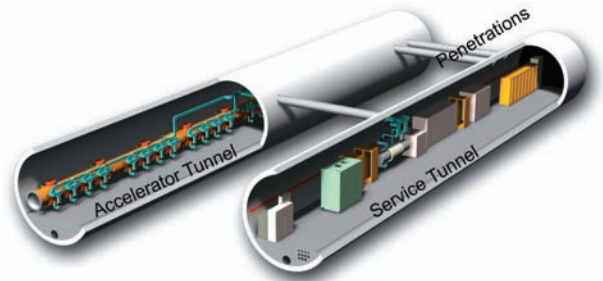


図3 ILC 線形加速器トンネルの概念図

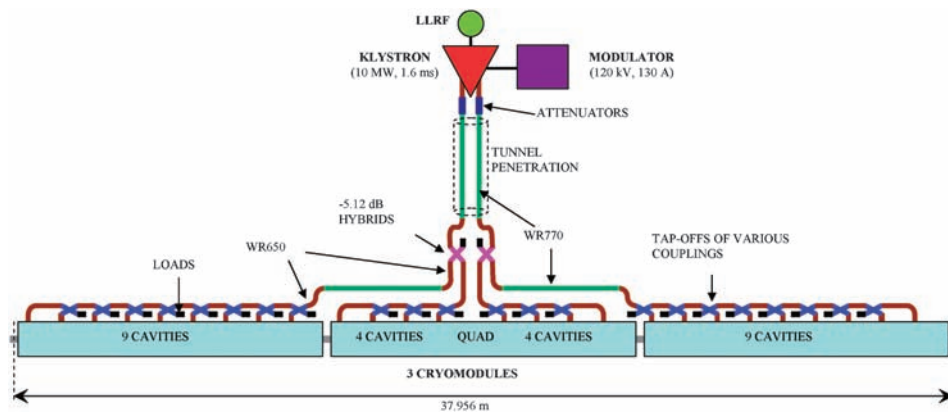


図2 ILC 線形加速器の基本ユニット



図4 超伝導空洞パッケージの概念図



図5 クライオモジュールの概念図

ジャケットの内側，空洞の外側に超流動液体ヘリウム（温度 2 K）を充填する事でおこなう．液体ヘリウムを供給するための配管，必要に応じて共振周波数を調整するためのチューナー，加速電界を発生するためのパルス RF 電力を導入する入力カップラーポートが見える．図 5 には，この空洞パッケージを 9 台ないしは 8 台おさめた 12 m 長のクライオモジュールの概観図を示す．

## 1.2 STF 開発計画の策定

ILC 加速器を超伝導空洞技術に基づいて推進する事が国際的に決定された 2004 年の時点で，KEK では超伝導加速空洞技術の開発とビーム蓄積リングへの利用に関して，すでに TRISTAN そして KEKB と 20 年以上におよぶ経験と人材をもっていた．KEK は世界にさきがけて超伝導加速技術の大規模な応用に成功しており，その後，KEKB では世界最高電流負荷での加速を安定に実現している．そして，L バンド単空洞では加速電界改善研究においても世界をリードする成果を得ていた．一方，リニアコライダー用の超伝導線形加速器の設計構想は，DESY により TESLA デザイン（9 セル空洞とそれを 8 台内包したクライオモジュール）が提案されていたが，これに匹敵する超伝導空洞技術およびクライオモジュール技術は日本には存在していなかった．同時に，TESLA デザインは，

ILC にそのまま踏襲するには必ずしも最適では無く，さらなる開発，もしくは設計最適化が必要とも考えられた．さらに，超伝導加速技術開発の観点から，KEK においては以下の三点がとくに大きな課題として認識されていた．すなわち，

- (1) 超伝導加速技術開発用の設備が KEK つくばキャンパスの複数の実験室と契約企業に分散しており，効率的集約的な開発活動に不都合である事，
- (2) 既存設備に老朽化が目立ち，今後の高潔度を保った長期利用に関して保守や修理に時間的制約・経費的制約が懸念された事，
- (3) ILC の超伝導加速技術を実証するために基本ユニット 1 基の試験加速器を建設するのでさえ，そこで必要とされる 20 台以上の超伝導加速空洞や長尺のクライオスタットの製作・組み立て・試験を行うのは，これまで KEK が経験したどの超伝導空洞装置よりも規模が大きく，これを試行していくのに適切な規模の設備が無い事，

が課題であった．

ILC という巨大加速器の実際の建設では，必要となる大量の空洞の製作と試験の全てを KEK 敷地内でまかなうという発想はもとよりなく，適切な時点で関連企業の協力を得て本格的な工業的生産ラインを研究所外あるいは企業に設ける事になるであろうとの考えは一致していた．しかし，ILC がプロジェクトとして正式な承認をまだ得ていなく，そして ILC の超伝導加速技術開発が完全に完了していない時点において，日本が ILC を将来ホストする可能性を上げるためには，あるいは日本グループが ILC で指導的役割を果たしていく技術的地位を築いていくためには，まず，KEK を中心とした国内研究所・大学が ILC 超伝導加速技術を確立し，それをマスターした人員を育成し，同時に，本格工業化の一步手前の段階までの基盤設備および作業工程確立と，超伝導線形加速器モデル確立の両方を実証してみせるのが必要である，との考えが議論の趨勢を占めた．また，最近の加速器応用から考えると，超伝導加速技術の開発は ILC 以外への適用，すなわち，高輝度短パルス光源 ERL などへの応用も念頭におくべき事，また，今後の展開可能性が高い superKEKB 加速器への対応も視野から外すべきでない，との指摘もされた．

以上の議論を総合的に検討した結果<sup>14)</sup>，KEK では，STF (Superconducting RF Test Facility=超伝導加速器試験施設) 設備を，以下に示す項目を目的として KEK に構築し推進する事が決定された．

- (1) 超伝導加速技術に関連する諸基盤施設をできる

だけ一つの建屋のもとに相互に近接して構築し、稼働させる。

- (2) 基盤設備建設と並行して、ILC 超伝導加速技術を獲得するべく ILC 加速モジュールを段階的に建設し、運転する。
- (3) これらを通して、ILC 超伝導加速技術を KEK および日本そしてアジアの大学・研究所グループが漸進的・総合的に習得し、その途上で日本の人材育成をし、また海外研究機関との共同研究拠点ともする。
- (4) 同時に、ILC 以外の加速器への超伝導空洞技術の応用にも一定の寄与ができるよう、ILC にせまく限定しない施設整備を行う。

これらの目的に沿うように STF 設備構築は、Phase-1 と Phase-2 の 2 期に分け、以下を行う事を決めた。

Phase-1 (STF1) では基盤設備の立ち上げ (KEK 内外の既存設備の移設も含む) をおこなう。また、ILC 向け超伝導空洞の開発と試作、そしてこれらを納めた横置きクライオスタット (クライオモジュール) の 2 K 冷却時のパルス RF による動作実験を試験的におこなう。具体的には、2 台の ILC 半サイズのクライオモジュールに 4 台ずつ、全 8 台の空洞を据え付け、5 MW の L-バンドクライストロン 1 台で動作させる試験実験をおこなう。これを通して、ILC 仕様そのものを全て完全に満足するのではなくとも、それに近い超伝導線形加速モジュールを建設し、それに必要な各機器の設計・製作・試験を通して、各担当グループが一渡りの設計・製作・実証の経験を積む。

Phase-2 (STF2) では ILC 線形加速器のプロトタイプを建設し、ビームを使った運転試験を行う。具体的には、図 2 に示すようなりニアックの基本ユニット 1 台を建設し、ビーム加速を含む定常運転を実現・実証する。これを通して、可能な限り ILC の性能仕様と実装仕様の双方を満たす各機器の設計・製作・試験に関して、各グループがさらに実務的経験を重ねる。そしてこれと並行して、生産技術の工業化を検討し準備する。

## 2. STF 計画のこれまでの展開

### 2.1 STF 基盤設備

STF 基盤設備の設置場所として、KEK つくばキャンパスの(旧)陽子リニアック棟が選ばれた。これは、J-PARC 加速器の開発に使用された建屋で、地上部



図 6 STF 棟の外観写真

に 30 m × 60 m の設備機器エリア、制御室、空調冷却水機械棟と、地下に 5 m × 90 m のトンネルをもち、空調設備、冷却水設備も備えている。STF の基盤設備は、この J-PARC 入射器試験装置が KEK 東海キャンパスに移設されるのに連動して、順次段階的に設備していく事になった。図 6 に STF 棟地上建屋の外観を示す。

STF 棟では、地下トンネルにビーム加速を最終ゴールとする試験加速器 (具体的には横置きタイプの長尺クライオスタット・クライオモジュールと呼ぶ) およびビーム源、ビームライン装置) を順次設置し、地上部に超伝導試験加速器を運転するために必要な冷凍機、RF 源、遠隔制御室、加えて、クライオモジュールのアセンブリエリア、超伝導加速空洞の最終組み立てや低電力 RF 特性測定に必要なクリーンルーム (複数)、表面処理装置、縦試験装置などを配置する事とした。図 7 に STF 棟内の設備の展開状況を示す。

以下、これらの設備の機能について概説する。

#### 2.1.1 空洞検査関連設備

空洞の諸性能および内面の表面欠陥の有無を検査する工程として、空洞内表面の目視ないし光学的高分解能撮像、空洞外寸の確認、加速モードと高調波モードの空洞共振周波数などの RF 測定および、空洞セルを個別に長手方向に塑性変形させる事による周波数補正 (プリチューニング) が含まれる。これらは、現状では 2 ヶ所に設置したクリーンエリアで作業が行われる。

#### 2.1.2 空洞表面処理設備

製造メーカーから納品された 9 セル空洞をヘリウム冷却用の液体ヘリウムジャケットに納める前の工程には、前述の各種検査に加えてアニーリング、フランジおよび空洞内表面の化学研磨、電解研磨、各種洗浄、ベーキングなどが含まれる。

これらの工程と後述する空洞の縦測定試験とは、空

## STF (Superconducting RF Test Facility)

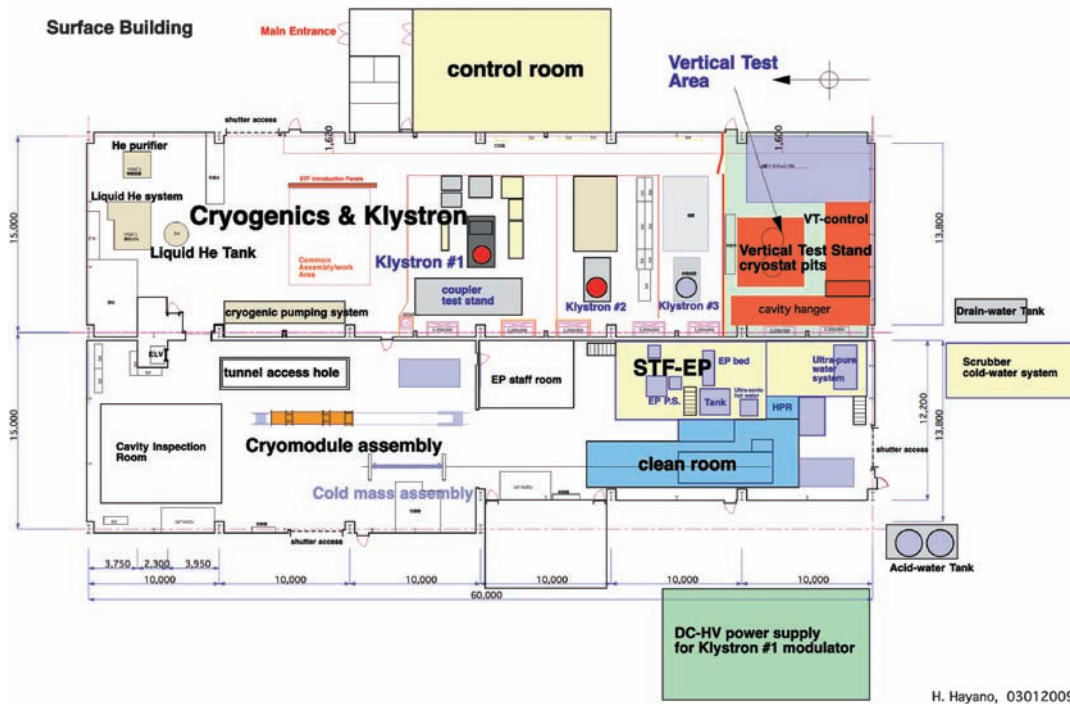


図7 STF 棟内の設備状況

洞内部汚染に伴う性能劣化が性能評価におよぼす混乱を最小限にとどめるため、なるべく近接した、ストリームライン化した清浄な環境のもとで作業を行う事が好ましい。従来、表面処理工程の大部分は、契約企業である野村鍍金の鹿沼工場で行われてきた。しかし、設備の老朽化に伴う補修維持経費の増大、数十キロの地上搬送途中及び前後の清浄環境確保や空洞微小変形の課題、また、とくに開発要素が依然多く残されている電解研磨処理については工程の管理と調整を研究者が詳細に行えるようにしたい、との要望から、それらの工程の大部分を KEK にて行えるよう、関連設備をまとめて STF 棟地上部の南西部約 1/4 (15 m × 30 m) の一角に展開する事とした。電解研磨処理直後の 1 次洗浄、超音波洗浄、高圧超純水洗浄、乾燥封止、真空引き、そしてベーキングという工程途上での塵芥汚染を最小限にとどめるため、この表面処理設備は後述のクリーンルームと密に結合したかたちで設置する事とした。

ただし、アニール炉については超伝導技術による ILC 開発が決定された直後に機械工学センターにてこれを調達設備済みである事、また、機械研磨については AR 棟に装置が存在すると同時に、発生する研磨材廃棄物と塵埃の処理に課題を残す事、さらに、こ

の 2 工程では空洞内表面の清浄維持は必ずしも必要とされていない事、などから STF には集約しない事とした。

## 2.1.3 クリーンルーム

STF では、以下の工程で清浄環境を必要とする：

1. 空洞内表面の検査、
2. 空洞共振周波数のビード測定とプリチューニング、
3. 空洞表面処理直後の封止と真空引き、
4. 空洞縦試験まえの測定機材取り付け、
5. 空洞パッケージへの大電力入力カップラーの取り付けと、空洞パッケージの多連化。

このうち 1~4 は空洞がまだ液体ヘリウムジャケットに納められる前、5 が液体ヘリウムジャケットに納められた後の工程である。とくに高い清浄度が要求されるのが、3 と 5 である。そこで、これらのために、前述の電解研磨表面処理設備の西側に隣接して、ISO Class-4 を内包する ISO Class-6 のクリーンルームを建設した。また、工程 1, 2, 4 のためのクリーンエリアを STF 建屋地上部北西の一角と、後述する空洞縦試験設備近傍に設置した。

## 2.1.4 空洞縦試験設備

表面処理を終えた空洞は、縦測定試験設備において

低電力 CW の RF 源 (200–300 W 程度) を使用して電界性能測定を行う。測定するのは、Q 値、限界加速電界、付随する RF 諸特性、Field Emission に伴う X 線線量と X 線強度分布、空洞クエンチ時の発熱分布などである。これには直径約 500 mm で 4 m 以上の深さの細長い縦型クライオスタットを使用するが、建屋内クレーンの揚程制約のため床にクライオスタット用縦穴を掘る必要があり、地下ピットと地下トンネルを備える STF 棟では可能な場所が限られてしまう。将来を見通して最適な場所として STF 建屋地上部の南東端の 15 m × 15 m のエリアに展開する事とした。

### 2.1.5 空洞組立関連設備

表面処理を経て縦測定試験で性能確認を終えた 9 セル空洞は、内部をアルゴン充填した状態で再び製造メーカーに渡され、工場にて液体ヘリウムジャケット容器を装着し(この状態になったものを「空洞パッケージ」と呼んでいる)、再び KEK に送り返される。クライオモジュール(横置きクライオスタット)内部への据え付け前に、一つ一つの空洞パッケージに大電力入力カップラーを取り付ける必要があり、また、多連空洞とする場合には、隣接空洞間の連結を行わなければならない。このとき個別空洞の封止を解く必要がある。塵芥混入汚染による空洞性能劣化を防止するため、前述の電解研磨一超純水洗浄後の空洞封止時とともに、これは最も神経を使う作業の一つとなる。この工程は、前述の ISO Class-4/6 のクリーンルームで行う。ILC の電界性能のためには数  $\mu\text{m}$  以上の大きさの塵芥は許されないという計算もある。

入力カップラー取り付けと多連化を終えた空洞パッケージ群は、そのあとクリーンルームから引き出され、クライオモジュール内部アセンブリの直径 300 mm ガスリターンパイプにつり下げられ、運転のために必要な各種配管、信号線、熱シールドを取付けた後、クライオモジュールの断熱真空容器の中に納められる。これらの作業は、STF 棟建屋地上部西側の、表面処理設備/クリーンルームの北に隣接したエリア (15 m × 30 m) で行う事とした。このエリアは、建屋西端のトラック搬入口に面していると同時に、地下トンネルの搬入口も内包しており、15 t クレーンを使って作業を行う事ができる。

### 2.1.6 RF 源関連設備

クライオモジュールを地下に設置してパルス RF 運転を行う(最終的にはこれにビーム源を加えて加速運転を行う)ために必要な大電力 RF 源は、STF 棟建屋地上部の東側中央部に設備する事とした。これは、J-PARC 用にこの建屋が使用されていたときと同様

の装置配置であり、冷却水配管や地下への導波管敷設上便利である。STF に必要なクライストロンの台数は 3 台であって、J-PARC 試験加速器での 5 台に比べて少ないので、残ったスペースは前述の縦測定設備に使用した。この大電力パルス RF 源は、立ち上げ後まず入力カップラープロセッシングに使用され、その後、当初の計画通り、クライオモジュールの空洞に使用された。LLRF 制御は J-PARC 用に開発されたものをベースにしたデジタルフィードバック回路を開発している。

### 2.1.7 冷凍機

冷凍機設備は AR 棟から移設した。屋外に設置するコンプレッサーなどとの接続連携、地下トンネルに設置するクライオモジュールへの液体ヘリウムの輸送、2 K への冷却に必要な減圧ポンプなどの配置の便も考え、STF 棟建屋地上部の北東端に液化機や液体ヘリウムタンク、ヘリウム精製機などを配置した。地上冷凍機で製造した液体ヘリウムは、トンネル内のコールドボックスに供給され、コールドボックスとクライオモジュールを接続してモジュール内の空洞ジャケットへ液体ヘリウムを供給する。運転温度は 2 K とした。ただし、ILC で想定している全ヘリウムのシステムではなく、予冷用に液体窒素を併用する。STF1 までの段階の地下トンネルでのクライオモジュール冷却は、試作機の比較的短期間の実験試験、という意図のものであり、冷凍機の建設と運転もこれに対応したものとなっている。

### 2.1.8 その他

放射線安全のための管理設備は J-PARC 加速器用のものを転用した。ビーム運転については、当初は、Cs-Te フォトカソードを用いた直流電圧電子銃(借用)をシングルバンチレーザー(借用)で駆動して、シングルバンチ電子ビームを生成し、加速空洞に通して加速電界性能確認を行う事を構想した。しかしながら、その後、STF1 のクライオモジュール試験においてはビームの必要性は高くないと判断し、ビーム生成機能の設備は STF2 へ先送りする事とした。

## 2.2 STF1 での加速器試験

STF Phase-1 (STF1) では、ILC 用超伝導空洞の開発と数台の試作、そしてこれらを納めた横置きクライオスタット(クライオモジュール)の超流動ヘリウムによる 2 K 冷却時のパルス RF による動作実験を、試験的に行う事がもう一つの大きな目的である。計画当初、STF1 完成時には、地下トンネルに 2 台のクライオモジュール(それぞれ長さ約 5 m; モジュール A, モジュール B と呼ぶ)を設置し、モジュール A

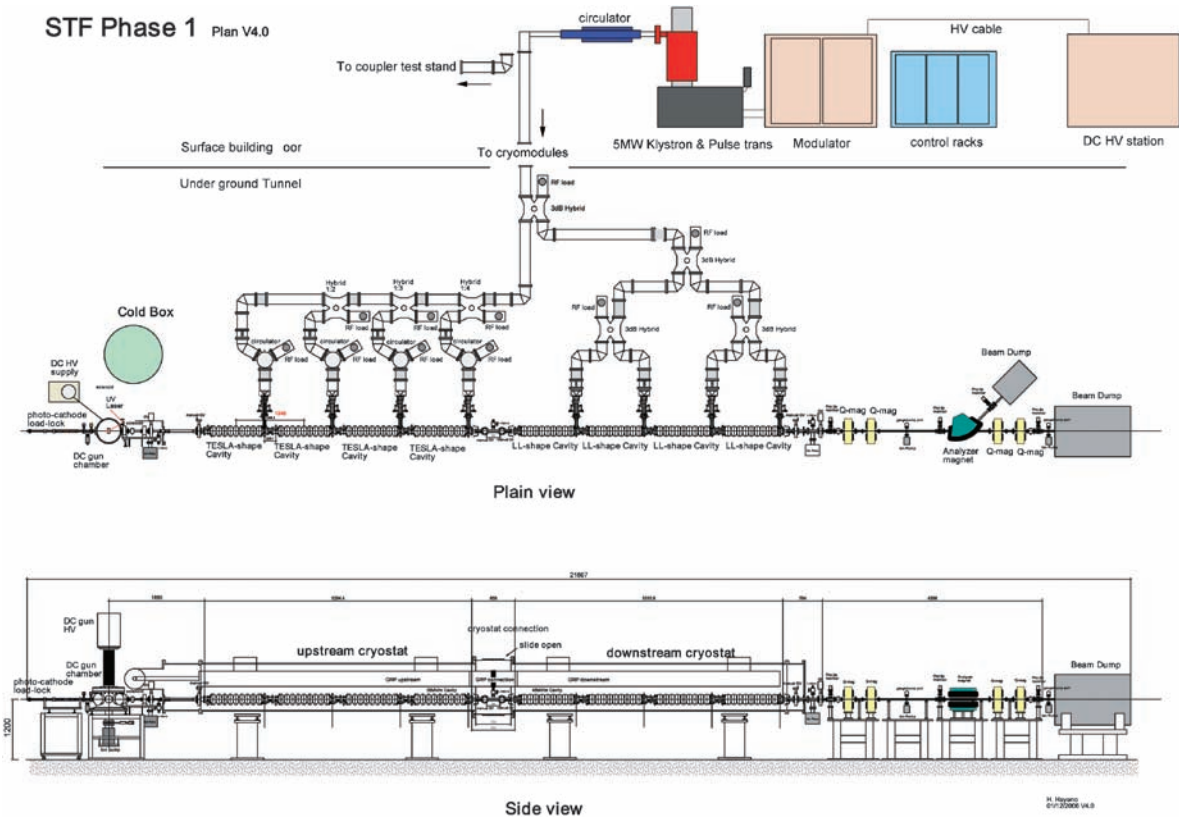


図8 STF1における加速器試験設備の計画概念図

には TESLA 改良型設計の、モジュール B には Low-Loss 型設計の 9 セル加速空洞を 4 台ずつ配備し、地上に設置した L-バンド (1.3 GHz) 5 MW クライストロン 1 台からのパルス RF 電力によって同時試験運転する事を予定した。図 8 に計画した加速器試験設備の概念図を示す。

ここで、空洞の加速電界の性能限界や、クライオモジュールへの配備後の性能歩留まりは大きな課題であるが、一方できちんと機能する加速器システムを開発するという総合的観点からは、空洞の他にも多数の検証を必要とするものがある。たとえば、空洞チューナー (周波数の微調整装置)、空洞カップラー (マイクロ波入力部分)、空洞 HOM カップラー (加速モード以外のマイクロ波を逃すための機構)、空洞磁気シールド、クライオスタット、これらに付随する異材継ぎ手や真空シール、熱シールド、マイクロ波源とその輸送システム、冷凍機、制御系などであり、そしてそれらの総合したシステム自体も開発が必要である。そこで、空洞の加速電界に焦点をおいた開発研究は、AR 東実験棟に既設の縦測定設備あるいは STF 棟に新設する縦測定設備での並行作業事項とし、STF 地下トンネルに展開するクライオモジュール開発作業から

は、ある程度分離して進める事とした。具体的には、勾配性能が ILC の性能仕様を必ずしも満たさなくとも、上記のシステム検証の使用に耐えるならば、製作した 9 セル空洞は STF1 に使用する、という方針を採った。

このように加速電界の問題を分離したうえで、STF1 で行う、とした場合の開発実験項目は以下の通りである。

(a) 空洞システム

ローレンツ離調 (加速電界が高いときに電磁力による空洞変形のため共振周波数がずれる現象) の補正システム

入力カップラーの大電力性能

HOM カップラーの動作確認

冷却時の熱収縮

(b) クライオモジュール

冷却ヘリウム制御

熱損失性能の確認

アライメント機構の性能

(c) マイクロ波源

クライストロンの性能

マイクロ波分配回路の性能

制御系によるフィードバック安定化性能

### 2.3 STF1 基盤設備と加速器試験装置の建設

計画策定当初は、2005-2006年の2年間のうちに8台の9セル空洞を製作し、STF設備の構築前からの既存設備を使用してこれら空洞の表面処理および縦測定を行い、クライオモジュールへの組込みまでを完成する事とした。引き続き、2007年には1年あまりの時間をかけて冷却試験およびRF運転実験を行い、2007年度の終わりまでにSTF1計画を終了すると策定した。RF源(クライストロンおよびその電源)については、5MWのユニット1基を2005年度内に準備し、2006年から始まる入力カップラーのRFプロセスに使用し、同時に、2007年のクライオモジュール試験に間に合うようにLLRF制御を整備する事とした。冷凍機はAR東からの移設を2005年度当初までに終了し、コールドボックスとトランスファーラインを2006年度当初までに整備し、試験の後、2007年のクライオモジュール実験のときに接続・運転ができるようにする事を考えた。

これらと並行して、STF棟に新規に設備していくクリーンルームは2005年度末までに完成、電解研磨設備は2006年度末までの完成を計画した。これらが実現すれば、2007年度はじめには、STF2にむけた次の段階のILCクライオモジュール開発に必要な基盤施設はほぼ完了し、STF1のクライオモジュール試験の経験を生かし、2007年度からSTF2計画でいよいよILCクライオモジュールの開発を行う、という方針であった。

現実には、2006年途中の時点で、空洞開発グループ間で開発進行に遅れないし差異が生じ、かつクライオモジュール開発とも組込み作業上の時期的なずれが生じた。議論の結果、2006年8月に、STF0.5という中間段階を設ける事を決めた。これは、それぞれのクライオモジュールにおいてTESLA改良型空洞1台だけ、LL型空洞1台だけを組込んで2007年はじめに冷却試験を行う、というものである。これによって冷却試験自体は当初の計画通り遂行可能となり、つぎに行うTESLA改良型空洞4台+LL型空洞4台のSTF1計画に進むための経験を積む事ができると考えた。しかしながら、このSTF0.5の途上で、クライオモジュールおよび空洞パッケージの数カ所に真空リークが見いだされたため、LL空洞はいったんクライオモジュールから取出して詳細なリーク試験を行う事となり、また、コールドボックスも切り離して地上部で修理する事となった。その結果、最初の冷却試験はクライオモジュールAのTESLA改良型空洞1台のみを

対象として2007年10-11月に行なわれた。その後、リークがない事が判明したLL型空洞をクライオモジュールBに再装着し、クライオモジュールAと交替する形での冷却試験が2008年2-3月に行われた。このLL型空洞一台のクライオモジュールBの試験終了をもって、STF0.5の終了と呼ぶ事とした。

2008年早春のクライオモジュールBの試験と並行してTESLA改良型空洞4台をクライオモジュールAに組込む作業が行われ、TESLA改良型空洞4台をもつクライオモジュールAの試験をもって、STF1実験の開始と見なす事が決められた。こうして、2008年2-3月のクライオモジュールBの試験終了後、ただちにクライオモジュールA(4台の空洞が組み込まれている)の再設置と接続交換がおこなわれ、クライオモジュールAについては、2008年5月から12月までの間に夏期シャットダウンをはさんで3回の冷却試験が行われた。以上の経緯で展開した、STF1での関連開発・建設・試験の足取りを、図9にまとめた。

これらの活動と前後して、STF1の次のステップの研究開発についても検討が進められた。たとえば、(a)LL型空洞の4台をクライオモジュールBに組み込んで運転する、(b)図2にあるようなILC線形加速器の基本ユニット1基を建設運転するSTF Phase-2(STF2)、(c)ILCの加速電界性能を満たす空洞の多連運転を特に重視してのクライオモジュール試験、などが可能性とされた。なかでも、加速器システムとしての(準)定常運転のデモンストレーションを目指すSTF2については、規模からして長い準備作業期間が必要とされる事から、予算とマンパワーの観点からTESLA改良型とLL型の二つの加速空洞設計開発を並列して進める事が問題となった。これらについて、数ヶ月にわたる部内の意見交換が行われ<sup>15)</sup>、検討を経て、STF2におけるシステム構築はTESLA改良型空洞で行う事が決定され、LL型空洞については、加速電界の限界性能を極める事を目標として開発を進める事が2008年4月に決定された<sup>16)</sup>。その結果、LL型空洞のクライオモジュール内に装備した状態での運転実験は、2008年はじめのSTF0.5時点でのもので休止する事となった。

以上のような経緯で、2008年終わりまでのTESLA改良型空洞4台を装着したクライオモジュールAの一連の冷却試験の終了をもって、STF1計画の終了とする事になった。

一方、STF1計画の基盤施設整備のうち、クリーンルームの建設は順調に進み、2006年春には使用可能



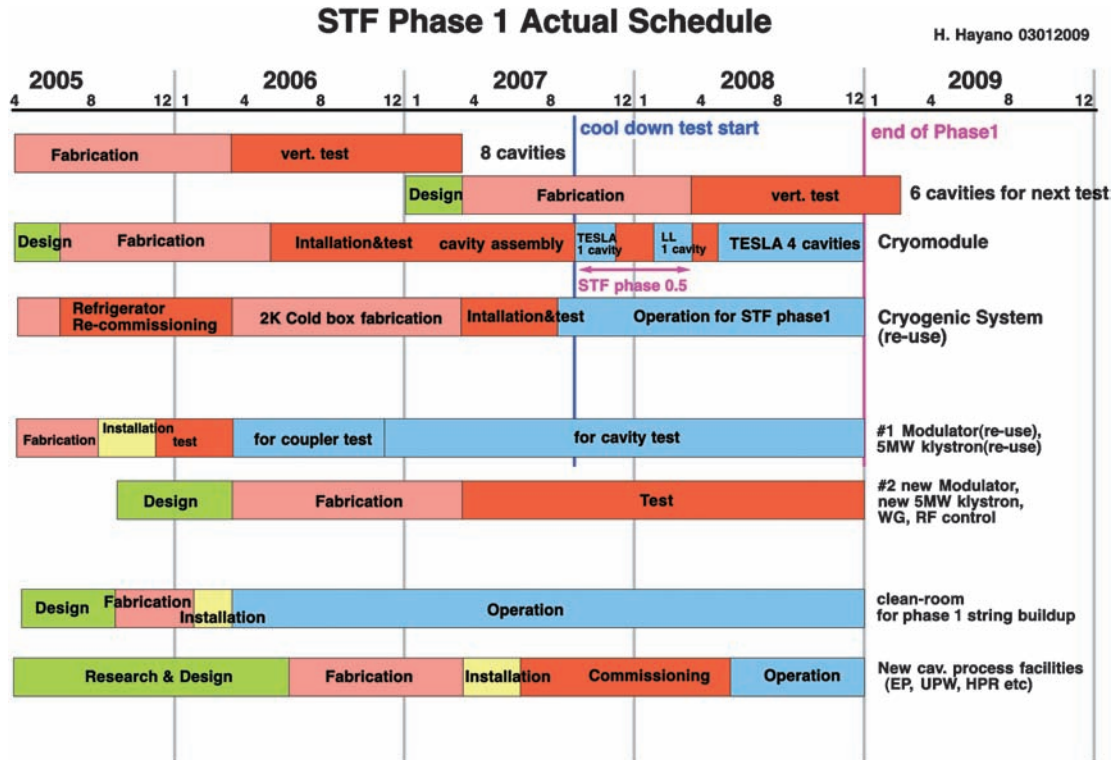


図 9

となった。一方、電解研磨設備は設計、建設、試運転ともに新規に策定すべき事項や安全審議上の検討事項が多く、当初の計画より1年ずれ込んで、2008年春の試運転となった。5 m長のクライオモジュールをトンネル内に導入する搬入口は、従来の4.5 m長の搬入口を9 mに拡張する工事を2006年春に行い完成した。クライオモジュールを冷却する冷凍機システムは、コールドボックス修正の後2007年9月には2 Kまで冷却できるシステムとして完成した。また、空洞の縦測定設備は2007年3月に床下ピット穴の工事が完了し、それから約1年をかけてクライオスタット、減圧ポンプ系、ヘリウム配管系、鉄シールド、測定室、組み立て室などを建設し、2008年7月に設備の総合運転立ち上げを行った。この時点で、当初計画していた基盤施設の整備は一応完成となる。

### 3. STFの今後の計画

今後は、これまでにSTFで得られた経験と基盤施設を土台に、ILCの基本加速ユニット1基を実証するSTF2を進めていく。第1章に述べたように、STF2の主題は、図2に示したILC線形加速器のプロトタイプを建設し、ビームを使った運転試験を行う、というものである。図10に、STF2の加速器を地下トンネルに設置する場合の構想を示す。これを通

して、可能な限りILCと同等の性能・実装仕様を満たす加速器機器の設計・製作・試験をおこない、関連するグループおよび企業で実務的経験を重ねる。並行して、生産技術の工業化の追求を本格化していく。この作業を段階的に進める具体的な構想は以下の通りである。

#### 3.1 クライオモジュールの追加試験

STF1ではクライオモジュールの熱負荷測定についておおむね所期の目標を満足する結果を得たが、熱収縮変形、空洞パッケージの磁気シールドの効果については詳細なデータ取得が困難であった。そこで、STF1のクライオモジュールBを流用して、これらの追加測定を行う事とした<sup>17)</sup>。空洞を吊り下げるバックボーンとなるガスリターンパイプの熱収縮変形を計測するために、外部からレーザー変位計により直接変位を測定する方法、金属ワイヤーをクライオモジュール内に通しワイヤーに流した信号を検出する事で非接触の変位測定を行う方法、また、外部アライメントスコープによるガラスターゲットの変位測定をおこなうためのターゲットをクライオモジュール内に装着する方法などが試された。低温時の磁気シールドの効果の測定については、STF縦測定設備で、パッケージ化する前の9セル空洞を磁気シールドで覆う場合、覆わない場合の残留抵抗値を測定比較する事での

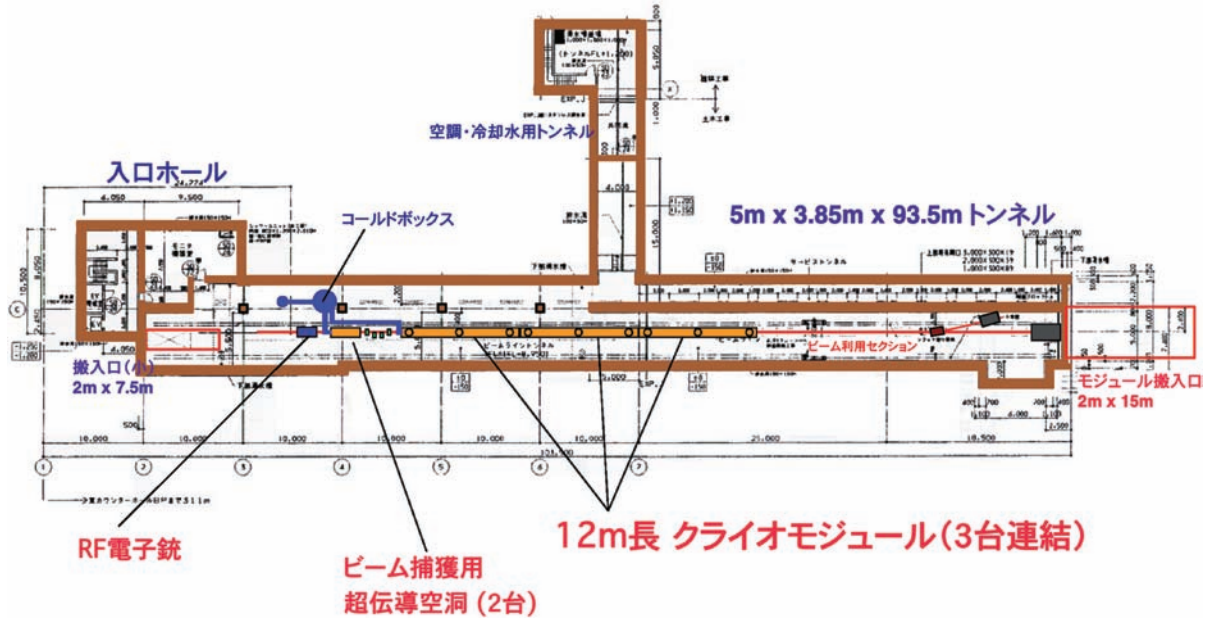


図10 STF2 試験加速器のトンネル内の配置計画

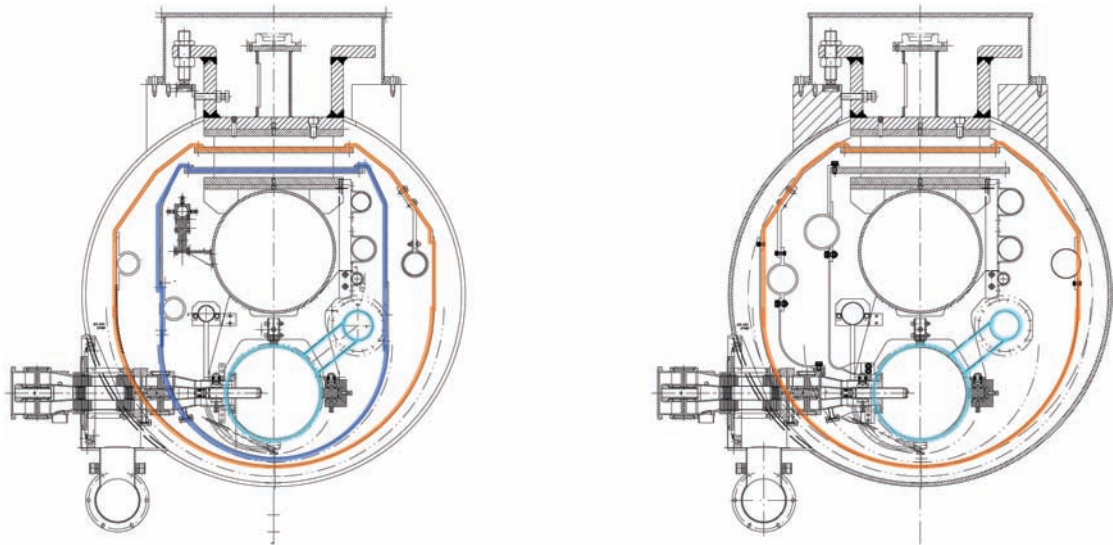


図11 ILC クライオモジュールでの2重シールド (左図) の内、5 K シールド (青色) を省いて熱負荷測定を行う (右図)。

シールド効果の間接的評価を行った。さらに、横クライオスタットに置かれた空洞パッケージ内での冷却時残留磁場を定量的に押さえるため、空洞パッケージに組み込まれる磁気シールドを模した空間をクライオモジュール内に設け、そこに磁場測定器を挿入して測定を行う事とした。これらの測定他に、STF1で試験したクライオモジュールでは熱シールドとして5 K シールドと80 K シールドの二層構造を採用したが、5 K 熱シールドを使わない場合についての測定も行

う。この場合、80 K シールドとして動作させてきた熱シールドは40 K に設定するが、5 K シールドが省ければクライオモジュールの部品点数と組立工程が軽減し、組立コストは削減できる。一方、冷却熱負荷は増大し、運転経費は増大する事が想定されるので総合的なシステム最適化の観点からは、40 K シールド一層のみの条件下の熱負荷値を実測定し、必要とされる冷凍機能力の増大分のデータを得るのが重要である<sup>18)</sup>。図11に5 K シールドが存在するクライオモジ

ジュール, 5 K シールドを省いた場合のクライオモジュール, それぞれの断面構想図を示す. これらの測定実験は, 2009年2-9月のあいだに, STF1のクライオモジュールB単体(RF源には接続せず, 空洞パッケージもダミーユニットを使う条件での冷却試験)で3回に分けて行う事を予定している. 得られた結果は, STF2およびILC GDEでの線形加速器設計構想の最終化に活かしていく予定である.

### 3.2 S1-Global クライオモジュール試験

空洞の加速電界性能については世界的には徐々に改善している傾向にあり, その最高性能の空洞を組んだクライオモジュールが DESY で3台程度試されている. しかし, どのクライオモジュールも, いまだ ILC の運転電界 31.5 MV/m に到達していない. 運転電界 31.5 MV/m は ILC にとってひとつの実証すべきマイルストーンである. このマイルストーンの実現については, FNAL では CM2 クライオモジュールの運転で 2010 年に達成しようとして計画している. そして, KEK では, 'S1-Global' クライオモジュールにおいて実証しようとして計画している. その S1-Global クライオモジュールとは, ILC の現在の加速電界仕様を満たす空洞を DESY と FNAL から KEK に持ち寄り, KEK においてクライオモジュールに組み込み, これらを同時に運転し平均加速電界 31.5 MV/m を実証しようというものである. これら世界の各グループ間には様々な協力関係が存在するが, 空洞形状, 入力カップラー, 周波数チューナーなどにおいてはすべてのグループが完全に同一設計を採っているわけではなく, 少しずつ異なった設計のものである. そこで, これらの異なった空洞パッケージを一つのクライオスタットにおさめ, 同時に運転する, という事は, 国際協力で行う ILC にとっては非常に大きい意義をもつものと考えられる. STF トンネルへ STF2 加速器据付けが始まるまでの今後の2年間のうち後半1年間を利用

し(前半の1年は前述のクライオモジュールBの単体試験に充てる), STF1 クライオモジュールAと INFN 製作のクライオモジュールCに KEK の空洞4台, DESY の空洞2台, FNAL の空洞2台を装着して空洞8台でモジュールを構成, ILC の運転電界 31.5 MV/m を目指す国際協力計画を KEK がホストする事になった. この国際協力実験が S1-Global と呼ばれるもので, 図12に, S1-Global のクライオモジュールの概念図を示す.

もともとこの試験は STF2 計画にはなかったものであるが, ILC の高電界空洞開発のマイルストーンとして位置づけられるとともに, そこで開発される高電界空洞を STF2 に使用するためのステップと考える事もできる. これに使用するクライオモジュールは 2009年10月から組み立てをはじめ, 2010年5月までに STF トンネルに設置し, 2010年6月から12月までの期間, 冷却と実験が行なわれる予定である. 機材の製作, 組立, 実験には, 三領域の研究機関からの寄与が持ち寄られる事になっている.

### 3.3 量子ビーム加速器の開発

S1-Global の完了後 STF2 の設置建設を行っていくが, STF2 の前段加速器が完成した段階で得られる電子ビームを利用して, 高品質大強度 X 線源の原理実証を行う事となった. この原理実証は「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発」すなわち「量子ビーム基盤技術開発」と略称する開発課題で外部資金の提供を得て行なうものである<sup>20)</sup>. この開発では, L-バンドのフォトカソード RF 電子銃からの高品質電子ビームを2台の9セル超伝導空洞(前段加速器)を使って加速する. この前段加速器の下流には大強度のパルスレーザー光蓄積装置を設ける. 前段加速器からの電子ビームと, レーザー光を光蓄積装置のなかで衝突させる事によって, 高品質かつ大強度 X 線の発生を実証するものである. これにより各種

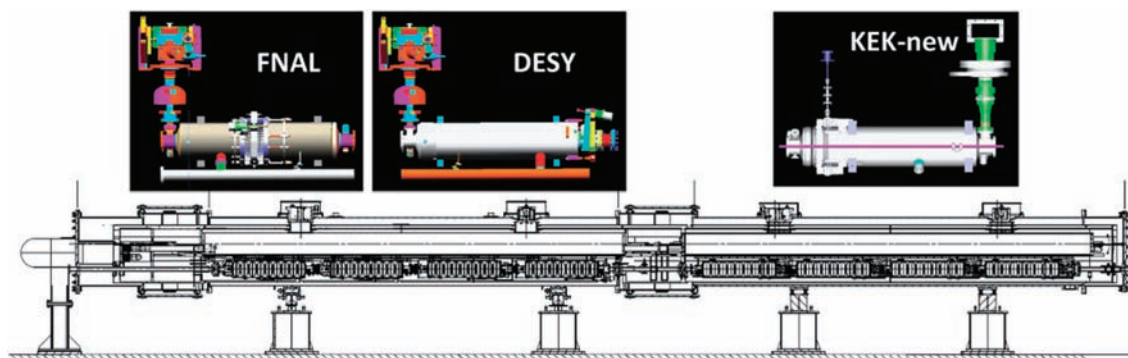


図12 S1-Global クライオモジュールの概念図

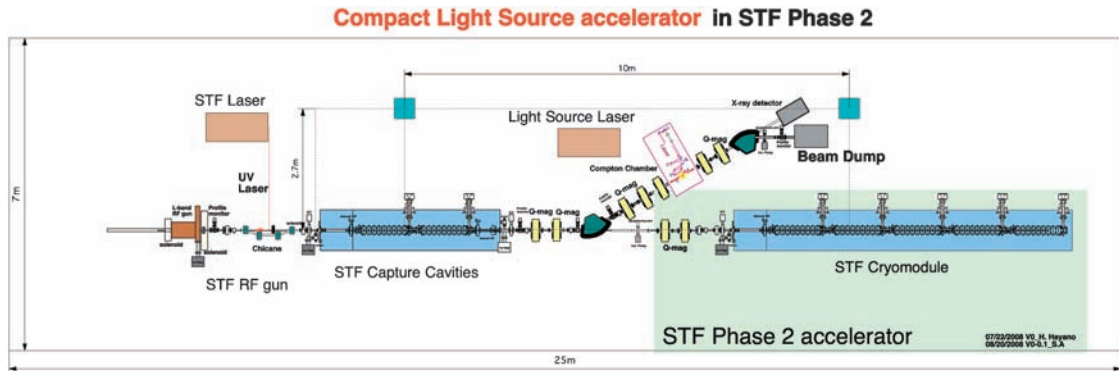


図13 量子ビーム基盤技術開発実験. STF2 のビーム入射部を利用する.

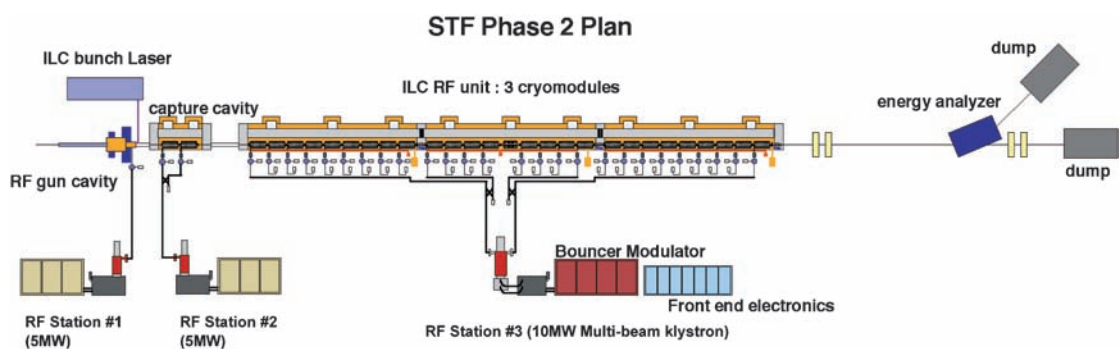


図14 STF2 の加速器構成の概念図

の利用を可能とするコンパクト大強度 X 線源を具体化させる開発である。図 13 に、量子ビーム基盤技術開発実験の機器配置の概念図を示す。想定されている実験期間は、2011 年 11 月から 2012 年 7 月であり、2012 年末までの課題完成を目指す。

### 3.4 STF2 における ILC クライオモジュールの開発

ILC では、9 セル超伝導空洞を 9 台内蔵する長さ 12.7 m の長尺クライオモジュールを約 1,700 台必要とする。この ILC クライオモジュールの概要設計は Reference Design Report (RDR) に記述されているが、より詳細な技術設計を進めると同時に、世界 3 領域でクライオモジュールの生産を行う際の仕様互換性（プラグコンパチビリティ<sup>20)</sup> の具体化を行なっていく必要がある。前節 3.3 で記述したように、加速器前段部分（RF 電子銃と 9 セル空洞 2 台）は 2009 年から 2011 年の間に量子ビーム加速器として建設され、2011 年から 2012 年にかけてビーム加速と X 線生成の試験を行う予定である。これに並行して、2009 年から 2010 年にかけて STF トンネルの最下流部を延長する形で 12.7 m もの長尺モジュールを搬入できるモジュール搬入口を建設する。同時に

STF 棟地上部のクリーンルームも 9 台の空洞の連結組立ができるように拡張し、コールドマス組立室およびモジュール組立室も対応して拡張する。この間に、26 台の超伝導空洞の製作、表面処理、縦測定を行い、空洞パッケージ化を進める。長尺クライオモジュールの 1 号機は 2012 年前半に空洞パッケージほかの組込みを終了し、量子ビーム加速器の実証運転が終わる 2012 年後半にトンネル内に設置する。コールドボックスと接続の後、まず 2013 年に、長尺クライオモジュール 1 号機 1 台だけの試験運転を行う。平行してクライオモジュールの 2 号機と 3 号機の組み立てを行い、2013 年後半でクライオモジュール 1 号機と接続し、2014 年ころに 3 台の長尺クライオモジュールが連結され ILC の 1RF ユニットと同等のものでの総合運転を行なう事を構想している。なお、これを運転するには 10 MW の L-バンド RF 源が必要であるが、これは 2009 年に調達可能との見通しを持っており、総合試験までに十分な準備期間を取る事ができる見込みである。図 14 に、STF2 での機材配置の概念図を示す。また、図 15 に、STF1 完了後、STF2 に至るまでの開発スケジュール案を示す。

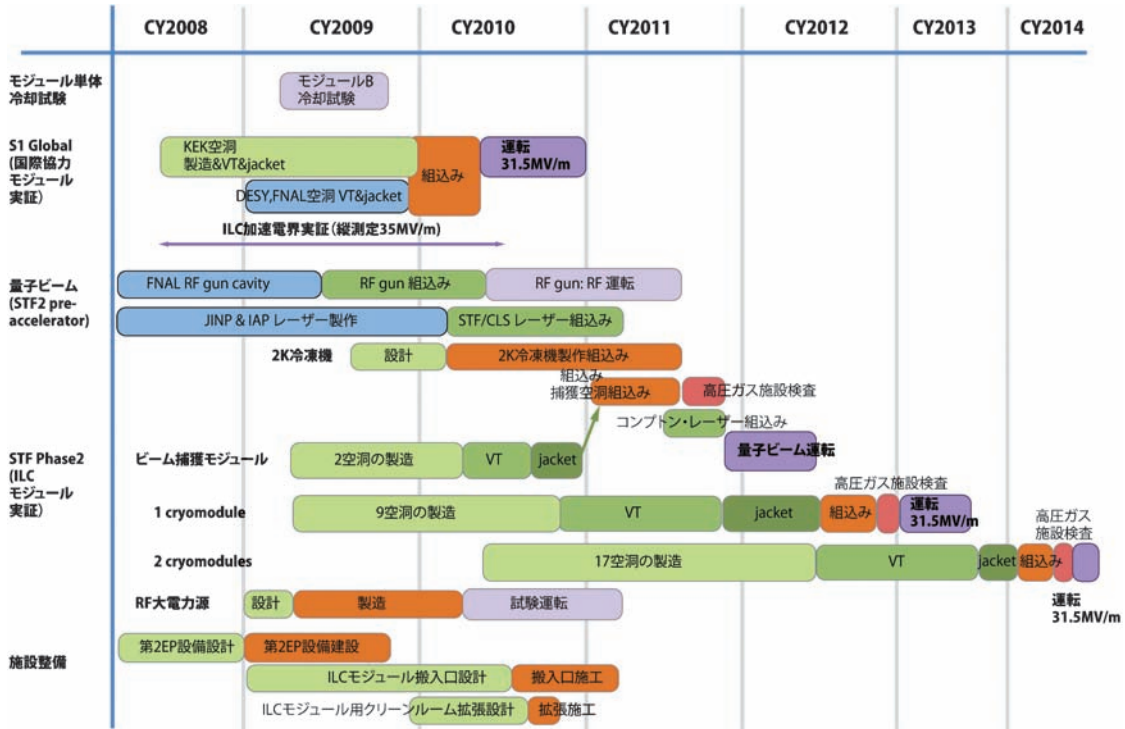


図15 STF2 加速器開発のスケジュール

### 3.5 ILC に向けての超伝導加速器技術の工業化

ILC における加速器要素部品としては、ニオブ製 9セル加速空洞および入力カップラーが約 15,000 台、クライオモジュールが約 1,700 台、クライストロンおよびクライストロン電源がそれぞれ約 560 台必要である。ILC 建設を世界規模の国際協力として行う場合、これらの要素部品を仮にアジア、欧州、北米の 3 領域で等分して 5 年程度の期間で行うならば、加速空洞と入力カップラーに関して、アジア日本領域だけで月産 83 台の製造を行う必要がある。クライオモジュールについては月産 9 台、クライストロンおよび電源は月産 3 台である。また、空洞の表面処理と縦測定試験、引き続いて空洞パッケージ化工程、クライオモジュールへの組み込み、入力カップラーの RF プロセッシングも必要であり、これらの処理速度も上の生産速度と整合しなければならない。クライストロンについても、高電圧プロセッシングと RF 出力プロセッシング工程で、類似の対応が必要である。ここでいう「ILC に向けての加速器技術の工業化」とは、こうした生産台数と生産期間を考慮に入れ、これらの要素部品の生産効率・歩留まりの向上、コスト削減、そのための設計の最適化、加えて部品試験と RF プロセッシング工程の効率化などを策定、検証し、現実化していく開発過程を指す。

これまでの STF1 においては、「現状の技術は、ま

だ、全体として基礎開発の段階に在る」との認識が支配的であり、必要機材の設計に関してはいわゆる製造性 (manufacturability) について強く意識する事は少なく、労働集約型もしくは過剰設計に傾く場合もあった、と思われる。STF1 が終了した現時点においても、たとえば空洞の表面処理工程にはまだ多くの課題が残り、これに十分な目処をつけるには相当数の空洞試作・試験・工程検証が必要であり、これは STF2 で取り組むべき大きな課題の一つである。しかし、すべての基礎 R&D が完了しなければ一切の工業化作業は開始できない、というのも妥当性を欠く極論である。可能な局面から製造性改善の追求を開始し、このために産業界との連携を深めはじめる事は、極めて重要と考えられる。契機の一つは、S1-Global において、日本グループのみならず欧州、米国グループの手になる超伝導空洞とクライオモジュールの統合的組み立てと運転を自ら手がける作業であると考えている。また、STF2 に向けた多数の空洞の製作・試験工程にも工業化にむけた研究の契機が存在する。さらに、これらに平行して、空洞製造工程自身を自らさらに深く理解し高性能を維持したまま効率化していく事を開発目的とした空洞製造設備を KEK が主導して構築していく事の検討を開始した。これには現在 ILC の要求性能を 50% 以上の歩留まりで出している空洞製造方法であるプレスしたニオブ製ハーフセルを電子ビーム

溶接で接合していく方法を出発点とするべきであり、電子ビーム溶接法の最適化、自動化、効率化の方向で開発して行く事が工業化の方向であろう考えている。この空洞製造設備の構築には産業界も含めてより広い範囲からの知見・アドバイスとマンパワーをつぎ込んでいく必要があり、得られたノウハウは散逸しないように KEK 研究者、技術者が主体的に保持し、ILC 建設に直接に役立てて行く必要がある。最終的にはこの空洞製造設備が ILC 空洞製造のモデルラインとなるように開発していきたい。そのための作業組織をどのように構成していくかの検討は急務であり、一方では産業界との研究会などの場を通していくつかの共同研究項目を議論しつつある。

### 謝辞

STF 開発計画の立案、策定、建設、整備、実行に際しまして、大学・研究所関係の多数の方々および多数の企業の方々のご協力をいただきました。そして KEK 機構長 鈴木厚人先生、KEK 前機構長 戸塚洋二先生には、大局的見地からのご指導をいただきました。KEK 加速器施設長 (2008 年度まで) 神谷幸秀先生、KEK 素粒子原子核研究所長 (2008 年度まで) 高崎史彦先生には、本設備の具体的方向性および人員・機材・設備などの面で、多大なご支援をいただきました。J-PARC センター長 永宮正治先生をはじめ、J-PARC リニアックグループの皆様には、旧陽子リニアック棟 (現 STF 棟) の使用に快くご協力いただきました。ここに深くお礼を申し上げます。

### 参考文献

- 1) STF group, KEK Report 2009-3, April (2009) A 「STF Phase-1 Activity Report」
- 2) 齋藤健治, 加速器学会誌「加速器」Vol. 2, No. 4 (2006) 「ニオブ超伝導空洞と材料・表面科学」
- 3) 田島裕二郎, 他, 加速器学会誌「加速器」Vol. 5, No. 1 (2008) 「L バンド超伝導加速空洞の内面検査システムの開発」
- 4) 加古永治, 他, 加速器学会誌「加速器」Vol. 5, No. 2 (2008) 「STF における TESLA-like 空洞のクライオモジュール試験」
- 5) 道園真一郎, 加速器学会誌「加速器」Vol. 5, No. 2 (2008) 「デジタル低電力高周波系の開発」
- 6) 大内徳人, 他, 加速器学会誌「加速器」Vol. 5, No. 4 (2009) 「超伝導加速空洞試験設備 (STF) におけるクライオモジュール冷却試験」
- 7) 明本光生, 他, 加速器学会誌「加速器」Vol. 6, No. 2 (2009) 「ILC 用バウンサー型パルス電源の開発」
- 8) <http://www.fnal.gov/directorate/icfa/index.html>
- 9) [http://www.fnal.gov/directorate/icfa/recent\\_lc\\_activities.html](http://www.fnal.gov/directorate/icfa/recent_lc_activities.html)
- 10) [http://www.fnal.gov/directorate/icfa/ITRP\\_Report\\_Final.pdf](http://www.fnal.gov/directorate/icfa/ITRP_Report_Final.pdf)
- 11) <http://www.linearcollider.org/cms/>
- 12) [http://www.linearcollider.org/wiki/doku.php?id=bcd:bcd\\_home](http://www.linearcollider.org/wiki/doku.php?id=bcd:bcd_home)
- 13) <http://www.linearcollider.org/cms/?pid=1000437>
- 14) <http://ilc.kek.jp/ILCAsiaNotes/2004/ILCAsia2004-06.pdf>,  
<http://ilc.kek.jp/ILC-AsiaWG/kekplan.pdf>
- 15) <http://ilc.kek.jp/LocalMeetings/>の“Cavity Review”の項.
- 16) <http://ilc.kek.jp/LocalMeetings/CavityReview/STF2CavityDecision.pdf>
- 17) <http://ilcagenda.linearcollider.org/contributionDisplay.py?contribId=501&sessionId=36&confId=2628>
- 18) <http://www.linearcollider.org/cms/?pid=1000570>,  
<http://ilcagenda.linearcollider.org/contributionDisplay.py?contribId=378&sessionId=12&confId=2628>
- 19) <http://ilc.kek.jp/LocalMeetings/QuantumBeam/QuantumBeamReport20080714.pdf>
- 20) [http://ilc-edmsdirect.desy.de/ilc-edmsdirect/file.jsp?edmsid=\\*865055](http://ilc-edmsdirect.desy.de/ilc-edmsdirect/file.jsp?edmsid=*865055),  
<http://ilcagenda.linearcollider.org/contributionDisplay.py?contribId=382&sessionId=12&confId=2628>