

超伝導 RF 試験設備 STF

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

早野 仁司

hayanoh@post.kek.jp

2006年12月25日

1 背景

国際リニアコライダー加速器 ILC の主線形加速器 (Main Linac) は超伝導加速空洞を約 20 km にわたって連ねて使用する。2005 年から世界的な研究者組織 GDE が中心となって ILC 加速器の設計と技術開発が進められているが、その中でも規模もコストも大きな部分を占める主線形加速器の開発が世界的な焦点となっている。この技術開発はドイツの DESY 研究所およびヨーロッパ各国が中心となっている TESLA コラボレーションが十数年の研究開発の実績もあって何歩も先をリードしている。主線形加速器部分の建設を担当できることが ILC 誘致に直接つながる公算が大きいため、北米領域ではシカゴの FNAL 研究所が、またアジア領域では KEK が、DESY のリードに追いつくべく積極的に超伝導線形加速器の開発に乗り出した。アメリカ内ではいくつかの超伝導加速技術に実績のある研究所と大学との協力関係を組織的に組み、総合的な試験設備を FNAL 研究所に作ることで開発を進めるといった計画を策定した。KEK はアジア領域内で開発拠点となるべく技術開発の計画を立案し、超伝導 RF 試験設備 STF を建設して主線形加速器技術開発をおこなうことを、中国、韓国、インドの主要研究所に説明し協力を要請した。しかしながら、技術開発は独自におこなう訳ではなく、KEK は DESY 研究所、FNAL 研究所はもとより、世界各国の主要研究所と協力関係を保ち、世界的コラボレーションに発展的に改組しようとしている TTC (TESLA Technology Collaboration、TESLA collaboration から改称) にも加盟して、技術開発の情報交換、開発技術そのものの交換、研究者の交流などにより、GDE の連携のもとでおこなっていく方針である。

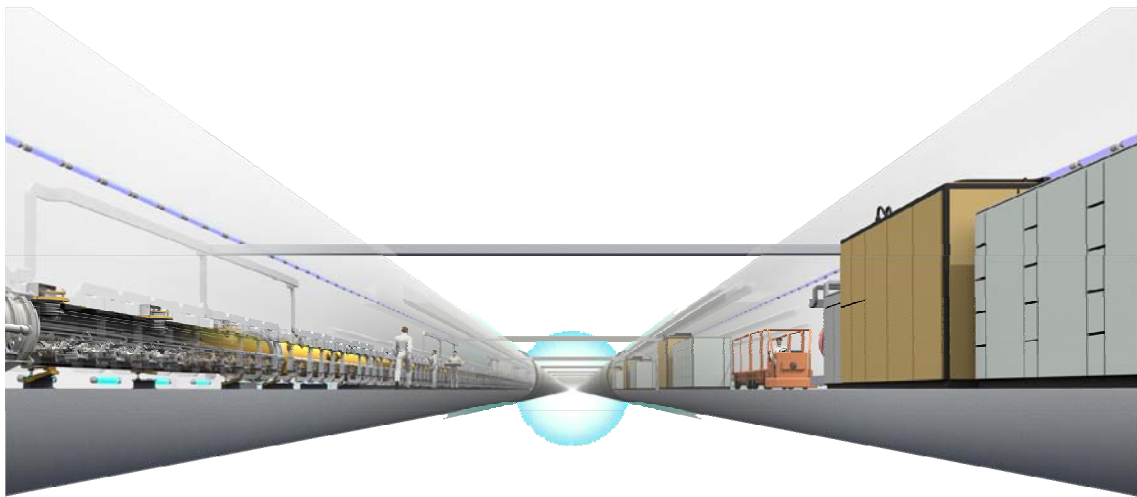
KEK は超伝導加速技術の分野で世界的な大きな実績がある。トリスタン加速器での大規模な超伝導加速空洞の使用、その実績のもとで開発された B ファクトリー加速器での超伝導加速空洞は 1.3 A もの大電流電子ビームの安定加速という世界トップの性能を誇るものである。また、B ファクトリー加速器用クラブ空洞や J-PARC 第二期計画用超伝導加速空洞も開発しており、それらの性能を支えてきた技術蓄積をいかに早くリニアコライダー加速器に応用するか、を考えて開発計画が策定された。主な獲得すべき技術開発事項は、これまでより 4~5 倍高い加速電界をもつ 9 セル加速空洞、加速空洞を密に並べて保冷するクライオモジュール、パルス大電力 RF を発生させるクライストロンおよびそのパルス電源、パルス大電流を安定に加速するためのフィードバック技術などである。開発計画は STF phase 1 と STF phase 2 の二期に分けてステップを踏んで技術獲得をするように策定され、最終目標は主線形加速器を建設できる担当能力の獲得である。これには担当能力をもつ研究者の育成はもとより、企業の担当能力の向上も目標のひとつである。

2 リニアコライダー主線形加速器の概要

主線形加速器は、5 GeV のダンピングリングに続くバンチコンプレッサー部でバンチ圧縮と同時に加速され 15 GeV となった電子ビームまたは陽電子ビームを 250 GeV まで加速する。すなわち正味の加速は 235 GeV の線形加速器である。図 1 に ILC 加速器の構成を、そして図 2 には地下トンネル内に設置された主線形加速器の想像図を示す。できるだけ短い距離で加速をおこなうように加速



図 1 ILC 加速器の概念構成図 (注: ただし 2006 年 11 月時点で左右のダンピングリングは両者とも中央の配置に設計が変更された)

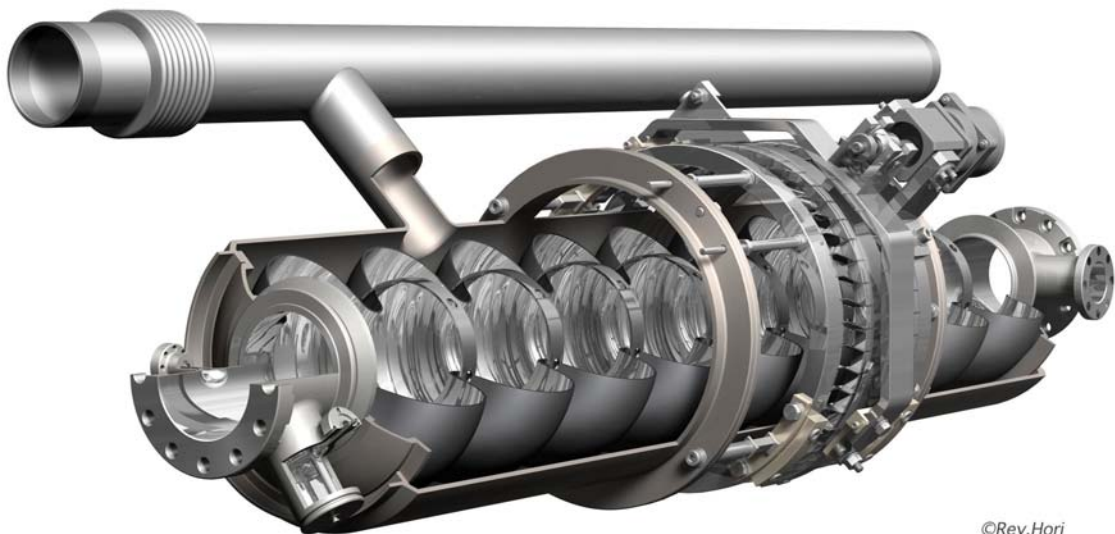


© Rey.Hori

図2 ILCトンネル内の加速器の想像図

空洞は可能なかぎり短く設計され、8 台の空洞を収容する細長いチューブ状のクライオスタット内に密に並べられる。それら 8 台の空洞を収容した 12m 長のクライオスタットをクライオモジュールと呼ぶ。図 3 に加速空洞の、図 4 にはクライオモジュールの内部構造を示す。連結されたクライオモジュールの約 150m ごとに、液体ヘリウム供給のユニットに接続される。大出力のヘリウム冷凍システムは約 5km の間隔で設置され、片側 2.5km、もう片側 2.5km の長距離にわたるクライオモジュールユニット群を冷却する。図 5 には 5km 毎に設置される地上部コンプレッサーで圧縮されたヘリウムをその直下の地下トンネル部で冷却液化するシステムの想像図を示す。

高周波加速のユニットは、3 台のクライオモジュールすなわち 24 台の 9 セル加速空洞とそれらに高周波電力を供給する 1 台のクライストロンおよびクライストロン電源そして電力を分配する導波管システムからなる。3 台のクライオモジュールの内、真ん中の 1 台にはビーム収束のための超伝導 Q マグネットが組み込まれている。ビーム加速は 5Hz のパルス運転であり、その 1 パルスでは 1.5msec、10MW の RF パルスが空洞に供給され、RF 電圧が空洞内に十分に立ち上がった 0.5msec 後からトレイン状の 1msec ビームパルス列(約 3,000 パンチ)が入射され加速される。トレイン内の平均電流は 10mA である。RF パワー損失の少ない超伝導空洞を使用するので加速電界を生成する RF パワーは非常に少なくすみ、10MW の電力の大部分はビーム加速に供される。



©Rey.Hori

図3 クライオモジュール内に内包される超伝導加速空洞のデザイン

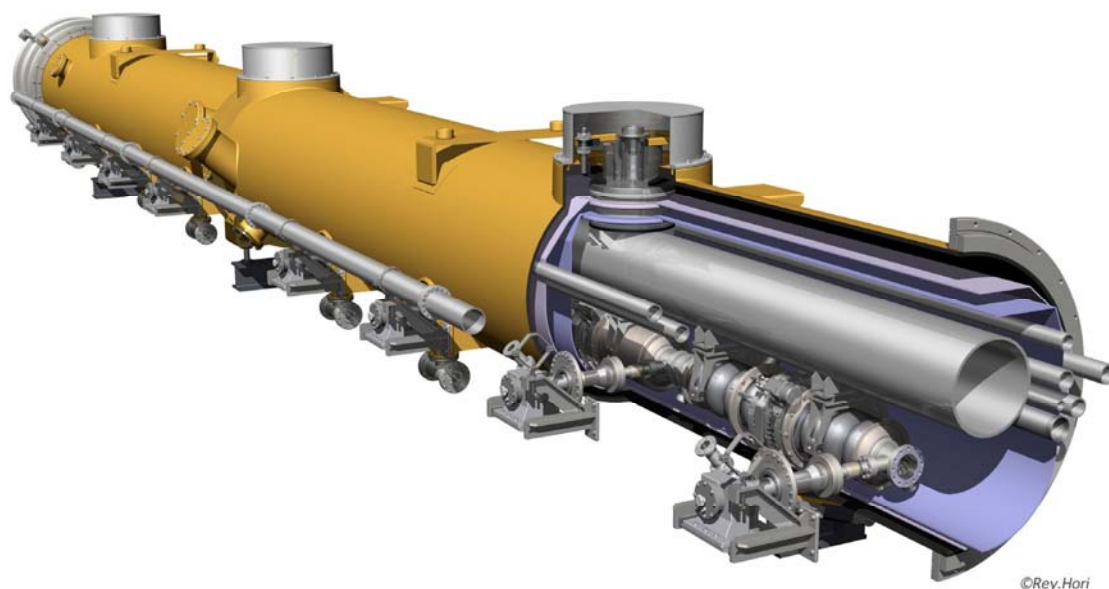


図4 主線形加速器に使用するクライオモジュールのデザイン

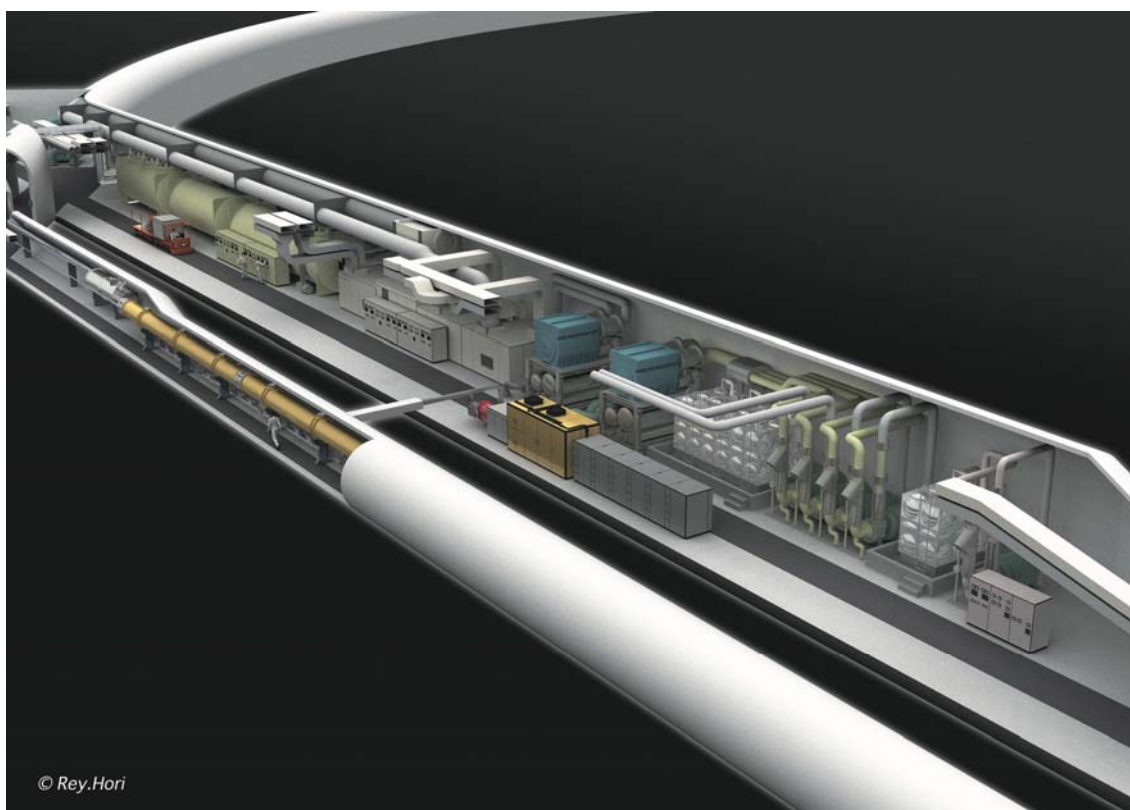


図5 ILC 加速器の冷凍機システムの想像図

3 リニアコライダー主線形加速器の技術的課題

長年 TESLA コラボレーションで開発されてきた超伝導加速技術を用いれば、リニアコライダー主線形加速器をすぐにも建設できるものなのであろうか？ 残念ながら低い建設コストを要求している現在の設計では、克服すべき技術課題がいくつか存在する。加速器全長を短く抑えるためには高い加速勾配の高性能空洞が歩留まりよく実現でき

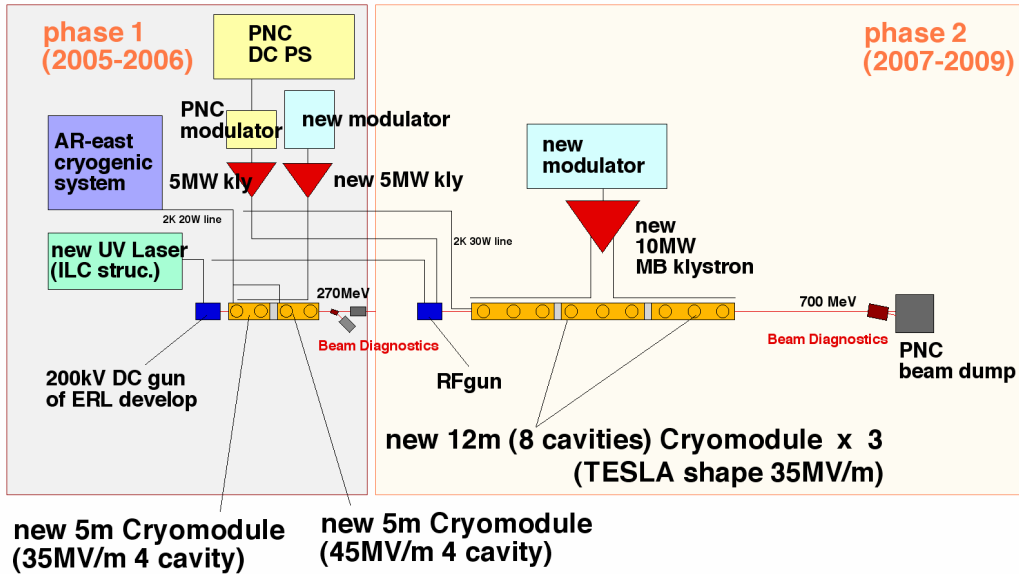
ることが要求されている。TESLA の設計値では 23.8 MV/m の加速勾配だったものが、ILC の設計では縦測定試験時に 35 MV/m をクリアし、それらの空洞をクライオモジュールに組み込んでからの運転は 31.5 MV/m と高く設定されている。この加速勾配は、技術開発をリードしている DESY でさえ、いまだに歩留まりよく生成できてはいない。また、クライストロンには新開発のマルチビームクライストロンを使用するが、 10 MW 出力での長時間安定運転の実績が DESY においてもまだない。開発された試験機

にはなんらかのトラブルが発生しており、低いパワーでの長時間運転の実績はあるが、高いパワーでは長時間は運転されていない。RF パルス内での振幅と位相のフィードバック制御は TESLA 設計加速電圧では試験され、その安定性が示されたが、ILC 設計パラメータではまだデータがなく、RF パワーにフィードバック余裕度が少ない設計なので懸念されている状況である。これらの他にもいろいろな技術的課題や不安がある状況である。

4 KEK の STF Phase 1 計画とその現状

KEK で、超伝導 9 セル加速空洞の製作と性能達成に必要な技術習得、複数台の加速空洞を収めるクライオモジュールの設計と製作、組み立て技術の習得、RF パワーの発生、伝達分配、位相振幅制御の技術習得などを短期間におこなう目的で Phase 1 計画が策定された(図6および図7参照)。また、同時に加速空洞の表面処理と加速電界試験、清浄環

Plan of Superconducting RF Test Facility (STF)



V3.0 Hitoshi Hayano, 12/02/2005

図 6 STF Phase 1 と Phase 2 の装置構成

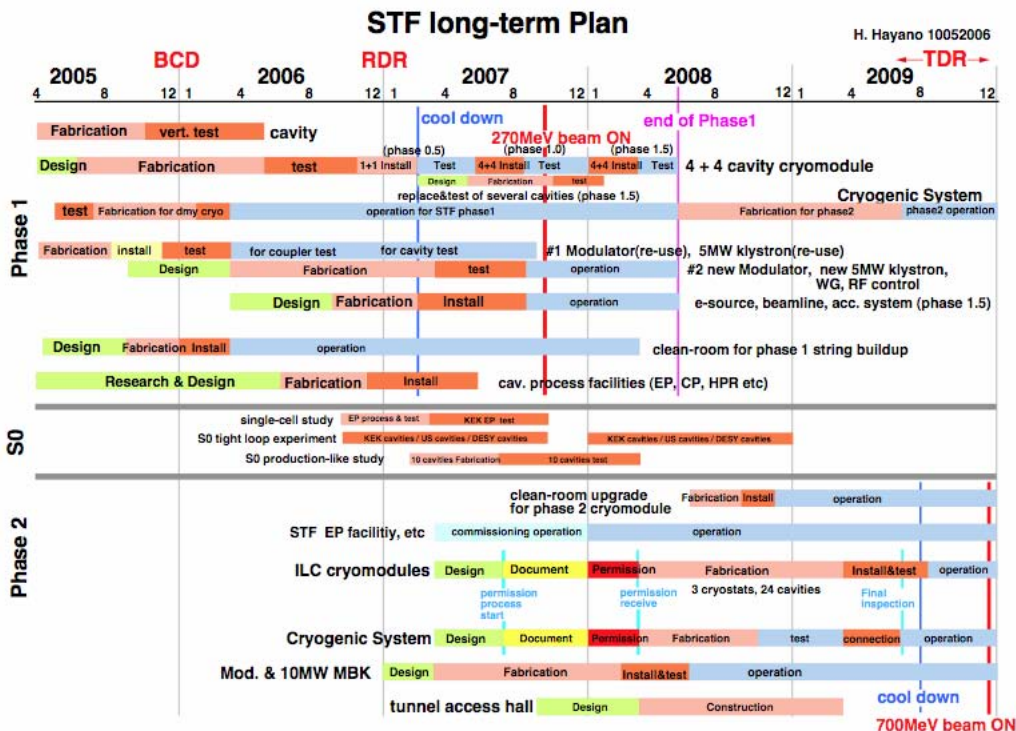


図 7 STF の長期スケジュール

境下での空洞組み立て作業、クライオモジュールへの組み込み作業までの一連の最重要な組み立て工程のための新規設備の整備も目的としている。

具体的には加速空洞として開発の提案のあった (a) TESLA 型空洞 (ILC 基準デザイン: BCD) の機械的剛性の改良版と (b) 空洞セル形状を大幅に変更し壁 RF 損失を減少させ赤道部での表面磁場強度と軸上の加速電場との比を下げて臨界磁場到達時に軸上電場が TESLA 型より向上するように設計した LL 型空洞 (ILC 代替デザイン: ACD) との二種類の空洞の開発をおこない、それぞれを 4 台ずつ収めるクライオスタット 2 台を製作することになった。その結果クライオスタットの全長は 5.5m 程度で収まり、現状の STF トンネルへの搬入口の長さ 4.5m を少しの変更工事で 9.5m 程度に拡張することで比較的簡単に対応できる。これは、最初から 12m モジュールを製作しているような困難を解決していくよりも、最初のステップとして半分の長さのモジュールで経験を積み、それから最終的な長さのものに進むほうがよりリスクが少なく技術獲得が出来る、ということも考えた結果である。

RF も、時間的に早くパワー生成ができ、いろいろな試験に使用できるようにと考え、動燃で使用していたクライストロン電源を改造し、大型ハドロン計画の研究開発用の 5MW クライストロンと導波管を転用することにした。RF 振幅位相制御は J-PARC 用に開発されてきた制御ボードを改造して開発要素をできるだけ少なくし、かつ新規購入品も減らして、素早い立ち上げを目指した。

ヘリウムの冷凍機はトリスタン加速器の空洞開発の試験に使われていたものを移設して使用する。これは 20 年以上も前の装置で、予備機として AR 東機械棟に設備されていたものである。

STF Phase 1 建設は 2005 年初めに開始され、当初の計画では約 2 年が経過した現在は冷却試験運転が開始されている予定であったが、かすかすの要因で約半年の遅れが生じている。また計画は少々変更され、最初の冷却試験はそれぞれのクライオモジュール内に 1 台ずつの空洞を装荷しておこない、主にクライオスタットの冷却性能を試験する目的に変更された。その試験が終了してから本格的に 4+4 の合計 8 台の空洞を装荷し、大電力 RF 系もフルに接続してクライオモジュールとしての冷却性能や RF 性能を総合的に評価することとなった。シングルバンチながらビーム加速試験もおこなう予定である。2006 年 12 月の時点では空洞 1 台ずつのクライオモジュールを組み立て中であり (図 8 および図 9 に写真を示す) 2007 年 1 月には 2 台のモジュールがトンネル内に下ろされ連結されて、2 月には冷凍機とのパイプ接続がおこなわれる予定である。最初の冷却試験は 3 月に予定されている。RF パワーは 2MW 出力が常時使用可能になっていて、空洞の入力カップラーの大電力試験が断続的におこなわれている (図 10 に RF パワーシステムの写真を示す)。冷凍機は運転可能状態にあり (図 11 参照) 地下トンネルまでのトランスファーラインの建設とトンネル内に設置するバルブボックスの製作がおこなわれている。



図 8-1 STF クリーンルームにおいて組み立て中の超伝導加速空洞 (TESLA 型空洞の組み立て)

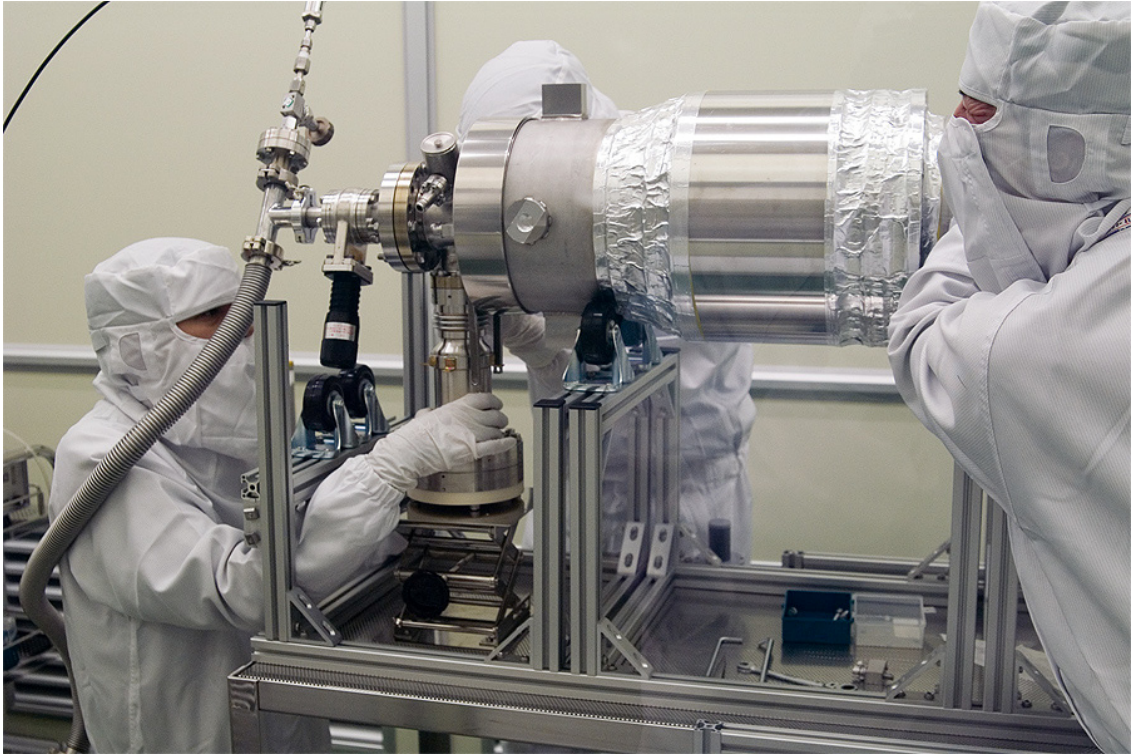


図 8-2 STF クリーンルームにおいて組み立て中の超伝導加速空洞（LL 型空洞の組み立て）

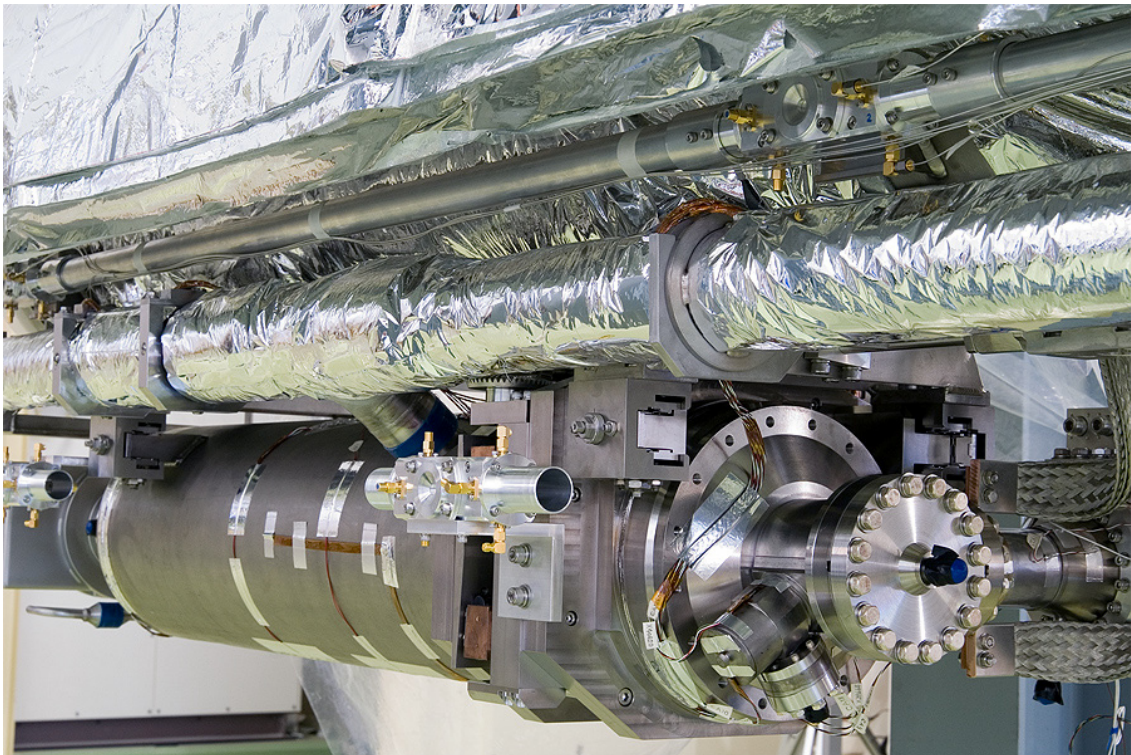


図 9-1 STF においてクライオモジュールに TESLA 型空洞を組み込んでいる様子

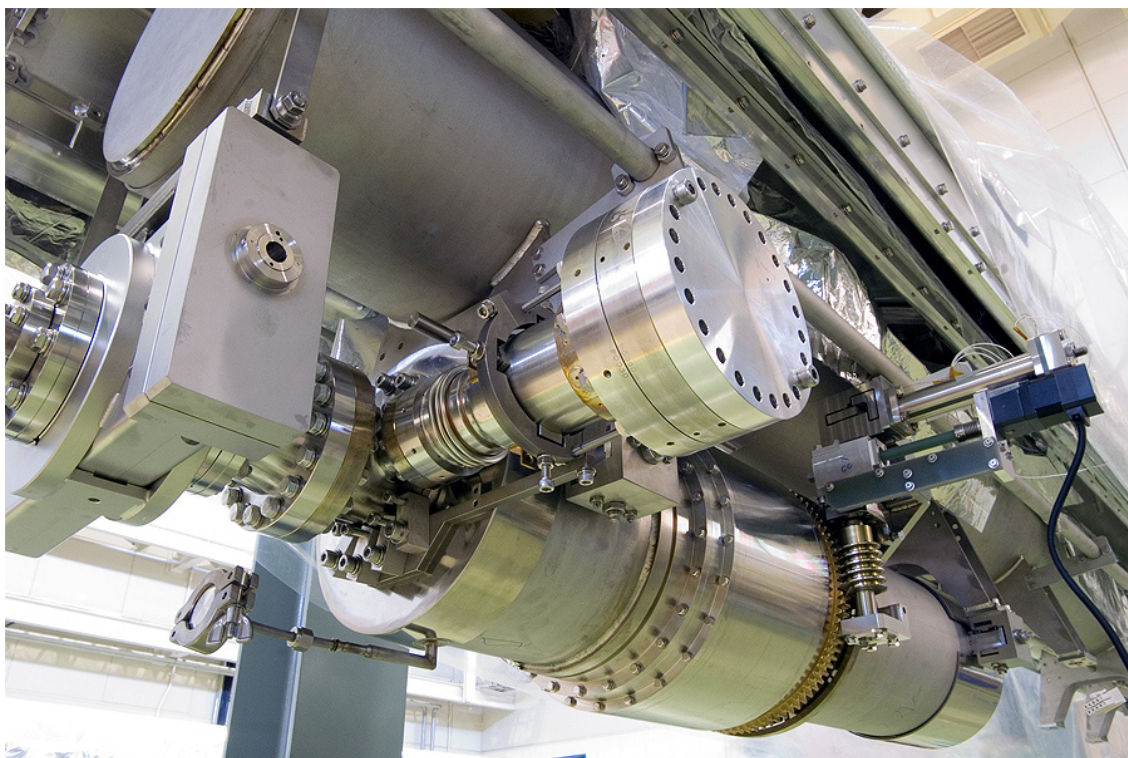


図9-2 STFにおいてクライオモジュールにLL型空洞を組み込んでいる様子



図9 STFにおいて組み立て中のクライオモジュール（空洞およびヘリウム配管系を断熱真空容器に挿入している様子）



図 10 STF 5MW RF パワーシステム



図 11 STF ヘリウム冷凍機

モジュールの製作と並行しておこなわれているのが空洞内表面の化学処理をおこなう電解研磨設備の建設、超純水製造設備、高圧超純水洗浄設備の建設、空洞組み立てをおこなうクリーンルームの建設、空洞の加速電界試験をおこなう縦測定設備の建設である。これらも諸事情から約半年の遅れが生じているが、2007年8月頃にはすべての設備が完成する予定である。これらの設備はSTF Phase 1には部分的にしか間に合わないが、Phase 2建設時にはフルに活躍するはずである。

5 STF Phase 2 計画

Phase 1計画の完遂の頃には、新規設備が稼働状態にあり、空洞製作、表面処理、加速電界試験、クライオモジュール組み込みや総合運転の経験が十分に積まれている状態にある。また、その頃にはGDEの設計チームはRDR(基本設計書)を完成させ、どのような構成の主線形加速器RFユニットを作って性能達成をすれば担当能力の証明となるかが明らかになる予定である。それらを踏まえて主線形加速器の基本RFユニット1基を設計製作し、ILC仕様のビームを負荷としてILC性能で長期間運転する試験設備を建設するのがPhase 2計画である(図6および図7参照)。そしてこの試験設備の建設から得られるであろう詳細設計と技術獲得はGDEの設計チームによるTDR(詳細技術設計書)の完成におおいに貢献するであろうと考えられる。

当初Phase 2計画は2007年から2009年の3ヵ年でおこなう予定であったが、Phase 1の終了を待ってそれらの経験を生かすために、そしてphase 1自体の遅れもあるので1年から1年半程度ずれ込むことは必至と考えられている。製作すべき試験装置はILC主線形加速器の1RFユニットで、10MWマルチビームクライストロンとその電源、RFパワーを24分配する導波管系、3台のクライオモジュール、それらの中に24台の加速空洞、そしてRF振幅位相制御をおこなうフィードバック制御系であり、それらの空洞を冷却する冷凍機システムである。なお、空洞にILCビーム負荷をかけて試験する必要があるのでILCビーム生成システムも必要である。STFトンネル内のPhase 1クライオモジュールの後方のトンネル部分にPhase 2クライオモジュール3台を並べることを計画している。

6 他領域の技術開発状況とこれからの協力計画、GDEとの関係

欧州領域ではDESY研究所が中心となって主線形加速器部分を担当しているが、2007年に建設が開始される予定のEuroXFEL(欧州X線自由電子レーザー)における技術開発とクライオモジュール製造の工業化という一歩進んだ重

要な開発がILCに大きく貢献してくれるであろうと期待されている。また、DESYはすでにILC1RFユニット規模の試験設備TTF(現在はFLASHと改名している)を持っていて、放射光ユーザーの障害にならない限りILCの研究に使用できる状態にある。

FNAL研究所が中心となってANL研究所、コーネル大学、JLAB研究所、SLAC研究所などがそれぞれ各主要部分の技術開発を担当し、総合試験設備をFNAL研究所敷地内に建設するというのがアメリカの計画である。FNAL研究所は、まずDESYが製作支援する空洞8台を収めたクライオモジュール1台をFNAL内で組み立て、試験をおこない、モジュール組み立てと試験の技術獲得をおこなう計画である。その完成はちょうどSTF Phase 1の完遂と同時期である。つぎに米国企業による空洞製作、クライオモジュール製作をおこない、米産のクライオモジュールを3台程度製作する計画である。これもちょうどSTF Phase 2に相当する時期である。

このように各領域の独自に策定した計画で現在は開発が進められているが、各領域の主要研究所はさかんに協力関係を築くべく研究所間の協定を結ぶ努力をしている最中である。一方、GDEはRDB(技術開発委員会)を作って効率的な技術開発をするような提言をおこなっている。RDBのもとで各専門技術に特化したタスクフォースも7つほど作られ、いかにしてILC性能を達成する技術開発を世界的協力関係のなかでおこなうかを話し合い、計画を策定し、各主要研究所に提言している。これらが効果的に機能し始めると世界的規模での緊密な情報交換ができ効率的な技術開発が可能となり、ILC実現に向けた大きな技術進歩が期待できる。