

ILC 施設設計の現状

CURRENT STATUS OF ILC FACILITIES DESIGN

宮原正信^{#,A)}, 山本明^{A)}

Masanobu Miyahara^{#,A)}, Akira Yamamoto^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The Global Design Effort (GDE) of the International Linear Collider project (ILC) published the Technical Design Report (TDR) in 2013 following the Reference Design Report (RDR) in 2007. The ILC civil engineering study has been extended with aiming at the design advances, assuming a potential model site based on the TDR. In particular, the review of the major accelerator tunnel cross-section such as a Main LINAC (ML) and Beam Delivery Service (BDS) has been carried out. Further, reviewing the conventional facility design corresponding to the layout change of the helium cooling system (Cryogenics) for Superconducting Radio Frequency (SRF) cavities has been mainly promoted. We describe on the current status of the ILC facility design. In addition we introduce the outline of Tunnel Optimization Tool (TOT) development in collaboration between KEK and CERN.

1. はじめに

国際リニアコライダー計画(ILC)は、2007年のReference Design Report(RDR)に続いて、2013年に発刊されたTechnical Design Report(TDR)に基づき、現在、実施計画のための技術開発が活発に展開されている。その中で、加速器や検出器等を収納する施設計画においても、グローバルなCFS(Conventional Facilities and Siting)チームによって、技術詳細設計に向けた準備検討が精力的に進められている。

本稿は、リニアコライダー施設設計に関する検討経過を踏まえた上で、現在の準備期間における検討状況について報告するものである。また、本報告では、主として主加速器トンネル(Main Linac Tunnel)や衝突実験ホール(Detector Hall)等の主要な地下構造物に関する施設設計の現状について報告する。

1.1 RDR までの施設計画の経過

我が国におけるリニアコライダー計画は1980年代後半から開始され、1997年には技術検討書(JLC Design Study) [1]が発刊されている。この報告書の中で、加速器装置を収容する重要施設となる加速器トンネルの建設技術について詳細に記述されている。特に、主トンネルの岩盤掘削工法としてNATMとTBMの二つの工法を紹介し、サイトの立地条件や地質特性によって適応する旨が論述されている。

その後、2000年代に入り、それまで各国で個別に展開されてきたリニアコライダーの基盤技術を国際的に一本化することが提案された。このプロセスでの最大の議論は、リニアコライダーの加速方式を、日本やアメリカが主導する常伝導加速空洞方式か、DESYが提唱する超伝導加速空洞方式のどちらを選択するかであった。

2004年に、国際的な技術選択会議が開かれ、超伝導

加速空洞方式の採用が決定された。この結果を受けて、2005年に国際設計チームGlobal Design Effort(GDE)が結成され、2007年にはILCの基準設計書Reference Design Report(RDR) [2]が発表された。この報告書では、アジア、アメリカ、ヨーロッパの3地域のサンプルサイトを前提とした建設案が提示された。また、RDRでは、建設サイトの必要規模としてトンネル長50km案が示された。RDRにおけるMLトンネル断面をFigure 2に示す。

1.2 TDR での検討経過

RDR発刊後、GDEはプロジェクトコスト全体の削減を図るため全ての分野において技術検討を実施、2013年に技術設計書Technical Design Report(TDR) [3]を発表した。TDRでの施設設計上の大きな課題の一つが、主加速器トンネルの一本化、すなわちツイントンネルからシングルトンネルへの変更であった。RDRでは、クライストロンや高周波電源を加速器トンネルとは別のトンネルに配置することが基本命題とされていた。これは、供用開始後にクライストロンの交換や電源の保守管理を容易にすることによってビーム運転効率を高めることが主眼であった。この「シングルトンネル」の可能性を求めて、欧米と日本で異なる二つの方式が提案された。欧米案は、敷地が平坦であることから、クライストロンや電源を2.5km毎に地上配置することによって、高周波を地上から地下に供給するKlystron Cluster System(KCS)方式を提案した。

これに対しTDRの日本案は欧米案とは異なり、日本の山岳サイトの特性である地下トンネルと地上の距離が長くなる点を考慮し、地下にクライストロンを分散して配置するDistributed Klystron System(DKS)方式を提案した。しかし、この案はRDRのように独立した別のトンネルではなく、一つの大きなトンネルの中央部にシールド壁を設けることによってビーム加速部と高周波部を分離する独自のシングルトンネル構想とした。TDRにおける日本案トンネル断面をFigure 3に示す。

[#] masanobu@mail.kek.jp

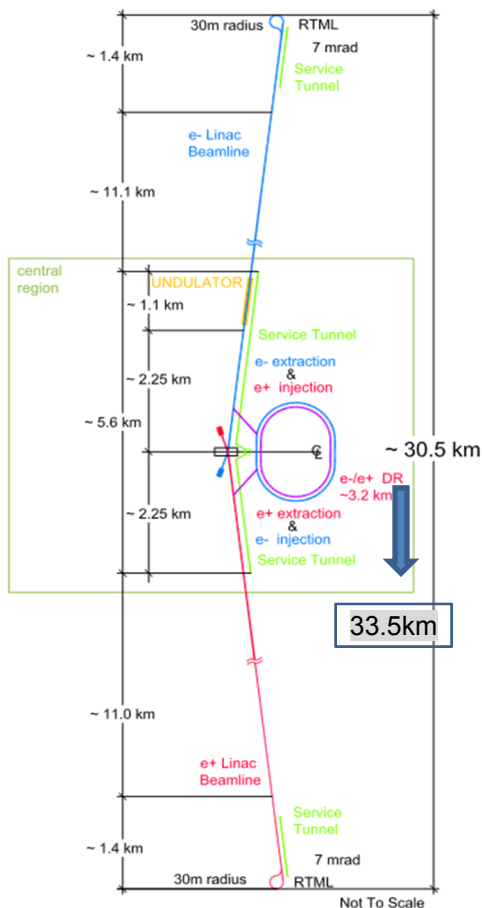


Figure 1: Schematic layout of ILC Accelerator.

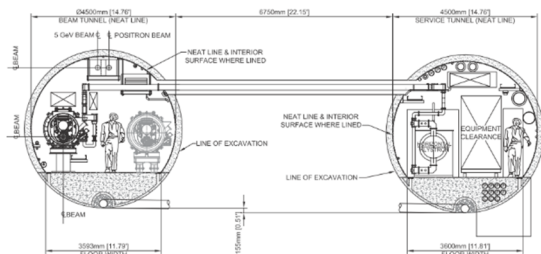


Figure 2: RDR ツイントンネル断面.

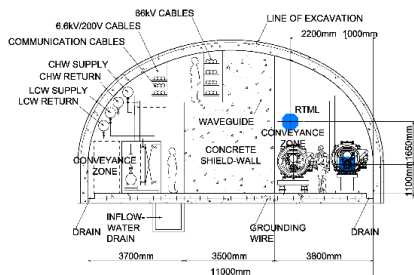


Figure 3: TDR 蒲鉾型トンネル断面.

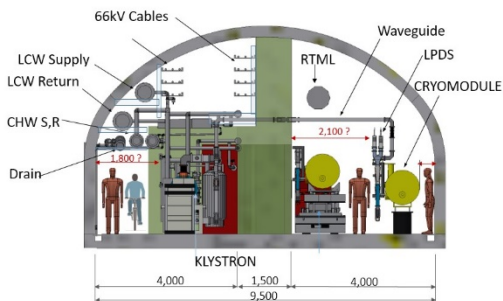


Figure 4: TDR 以降、改訂されたトンネル断面.

2. TDR 以降の主な変更設計

2.1 ILC 加速器施設全体レイアウト

ILC 施設は、電子線形加速器 (e⁻ Linac)、陽電子線加速器 (e⁺ Linac)、および実験ホール部の三つの部分から構成される。中央部の衝突点エリアには、地下約 100m の深度に実験ホール空洞が配置されるとともに、周長約 3.2km のダンピングリング (Damping Ring) トンネルが配置される。二つのメインライナックは中央部 (衝突点) で 14mrad の角度で交差する。施設の全長は、TDR では 30.5km とされていたが、その後の詳細な技術検討の結果、ダンピングリングから ML へのビーム入射に関するタイミング問題を等解決する観点から変更が必要となった。その結果、ML トンネル約 3km の延伸案が検討され、現在、この延伸部の配置に関する検討が行われている。

2.2 主加速器トンネル (ML) 断面

RDR では、Figure 2 が示す通り、超伝導加速器本体を設置する「ビームトンネル」と、クライストロンや電源などを設置する「サービストンネル」の二本のトンネルが併行するツイントンネル方式で計画された。トンネル断面はいずれも内径 4.5m の TBM (Tunnel Boring machine) 工法による円形断面で、両トンネルの離隔距離として約 8m (中心間距離約 11m) での建設が前提となった。また、両トンネル間は加速器本体に高周波を供給する導波管で接続するための、ペネトレーションと呼ばれる貫通孔の建設が必須条件であった。RDR 発刊後、このペネトレーションの建設技術や全体コストの削減などが重要な検討課題として浮上した。

TDR における日本案では、Figure 3 が示す通り、山岳トンネル工法 (NATM) での掘進計画を前提に、幅 11.0m 高さ 5.5m の「かまぼこ型」断面が提案された。このトンネル寸法は、2車線の道路トンネル又は複線の新幹線鉄道トンネルに匹敵する断面規模である。トンネル幅は、切羽 (きり) はでの岩盤掘削のために十分な作業スペースを確保できるほか、掘削ブリの搬送作業ではトラック方式による対面交通も可能となるなど、効率的な掘削サイクルや合理的な施工計画により経済的な断面サイズとなる。

また、トンネル中央部のコンクリート造のシールド壁は、TDR では高周波部に立ち入るメンテナンス要員の放射線被ばくを抑えるため、3.5m の壁厚を想定していた。しかし、その後の技術検討の結果、現在は Figure 4 の変更断面図が示すように、必要壁厚は 1.5m に変更された。これは、「ビーム運転時には、高周波エリアへの人のエリアへの入域を行わない」とする基本スキームの変更による

もので、その結果大幅なコスト削減が見込まれている。

2.3 主加速器へのアクセストンネル、アクセスホール

ILCの主加速器は、国内の既存加速器よりも地下深部に建設されるため、地上からのアクセスは施設計画にあたって重要な技術課題となる。特に建設時における大量のクライオモジュール等、主要加速器装置の搬送は建設スケジュールに直結する重要課題の一つである。また、人の安全な出入管理と共に、供用開始後の様々なメンテナンス作業時におけるアクセスの容易さも加速器の効率的な運用にとって大きな課題となる。

現在想定されている日本の有力候補サイトは、山岳サイト特有の地形条件から、地上の坑口と地下の加速器トンネル間をトンネル(斜坑)で結ぶ方式を主として想定している。トンネルの勾配は、クライオモジュールの搬送条件を考慮し最大 10%の傾斜となる。トンネルの内空間は、ヘリウム冷凍機などの大型機器を搬送するため幅 8.0m 高さ 7.5m の大断面が必要になる。搬送機能のほかに、地上と地下を連結する各種のエネルギー供給ラインとしての機能を確保すると同時に、非常時に備えた防災設備・安全機能も完備しなければならない。アクセス施設の断面、計画案を Figure 5、Figure 6 に示す。

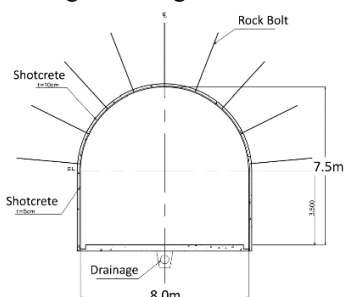


Figure 5: アクセストンネル断面.

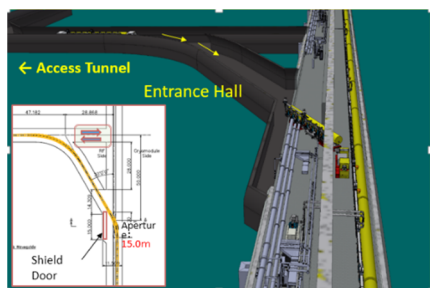


Figure 6: アクセスホール計画案.

2.4 ヘリウム低温設備の配置計画

ILCのビーム運転中、超伝導加速空洞の内部は、2K(絶対温度=-271°C)の低温状態を保持しなければならない。そのため、液体ヘリウムによる冷却設備(Cryogenics)が不可欠の基幹設備となる。TDRまでの日本案では、冷凍機や冷却用コンプレッサー等の主要機器は地下空間に設置することとしていた。TDR後の国際的な技術検討の結果、一部の設備を地上配置する方式が効率的かつ経済的である可能性が浮上してきた。現在、最終的な検討作業が継続されているところであるが、本編では 4.5K 冷凍機およびコンプレッサー設備を地上配置と想定した場合の地下構造物の規模縮小事例

を Figure 7 に紹介する。

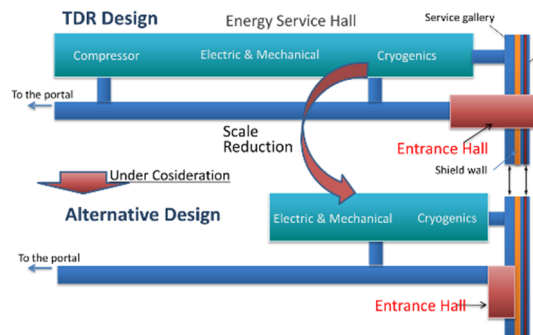


Figure 7: Cryogenics エリアの規模縮小事例 (圧縮機等の地上配置への変更に伴う縮小案).

2.5 BDSトンネル(Beam Delivery Service)

電子側では陽電子源ksrs衝突点まで、陽電子側では主加速器出口から衝突点までのビームラインが Beam Delivery Service(BDS)と呼ばれる区間である。ビームライン全長は電子・陽電子ビームラインの合計で約 4.5km。トンネルの線形は、主加速器の水平(ジオイドに平行)に対し、レーザーストレートの直線性が求められる。また、トンネルは衝突点で 14mrad の交差角で交わる。

BDS部の重要な役割は、主加速器で加速された電子・陽電子ビームを最終収束点まで運ぶことにあるが、その過程でビームパラメータのモニタリングや収束点でのビーム制御、検出器へのノイズ制御、ビームダンプ等様々な機能を求められるため極めて複雑な構造となる。BDS部の施設構成は Figure 8 に示すように、上流から

- ・ビーム診断部
- ・ビームコリメーション部
- ・エネルギーコリメーション部
- ・最終ビーム輸送部および収束部
- ・ビーム取り出し部およびビームダンプ部

などで構成される。

以上述べたように、BDS部ビームライン構成やコンポーネントの配置については、現在中央エリアでの機器レイアウトに関するワーキングチーム Central Region Working Group(CRWG)が結成され、集中的に議論を集約している。

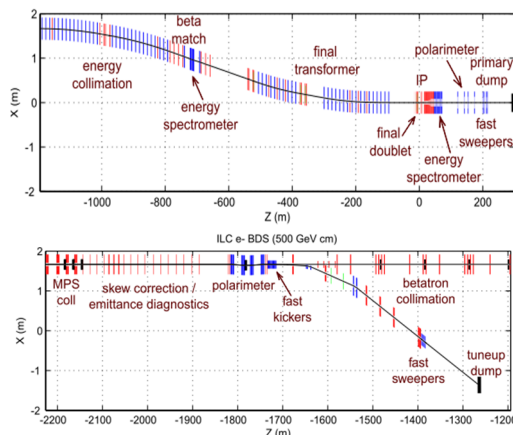


Figure 8: BDS部レイアウト.

2.6 実験ホール

ILC の衝突実験ホールは、TDR では実験ホール内空幅 25m、高さ 42m、長さ 142m の規模を有していたが、その後の技術検討で立坑を利用した検出器搬入方式への変更に伴い、規模の縮小が可能になった。現在の施設規模は、幅 25m、高さ 38m、長さ 108m となっている。

平面的には、ビームラインを挟んで両サイドに ILD と SID の二つの検出器組み立てホールが配置される。各ホールには、両サイドに保守作業のためのアルコーブ（側室）が敷設される。ILC 実験では、これらの二つの検出器が交互に衝突点に移動するブッシュプル方式により電子陽電子衝突実験が行われる。また、そのために重量 1 万数千トンの検出器を搭載した鉄筋コンクリート製の巨大なプラットフォームの駆動によって生じる実験ホール床版の変位量を極限まで抑制する必要から、特殊な岩盤解析に基づいた構造設計が求められている。詳細は ILC の土木工事に関するガイドライン[4]を参照。

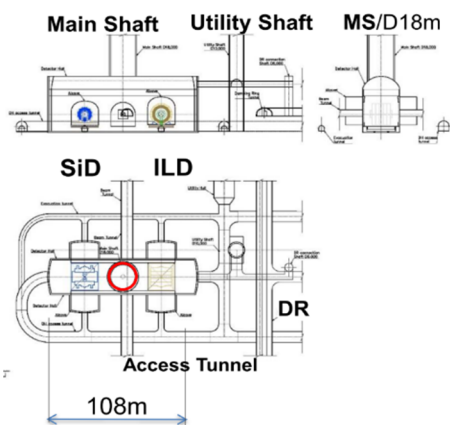


Figure 9: 実験ホール空洞 (平面・断面).

3. ILC-TOT開発の現状

ILC 地下施設と地上を結ぶアクセス用トンネルの最適な配置案を探るため、2015 年度から KEK と CERN による連携業務として進捗中の“Tunnel Optimization Tool (TOT)”について紹介する。このツールは、国土地理院の GIS (Geographic Information System) を活用し、既存のデジタル地形図上に ILC プロジェクトラインや地下構造物の位置情報、および地質情報などを重ね合わせることで、合理的な施設配置計画に資するものである。Figure 10 は、本ツール開発プロセスの一端を示すものであるが、現在、計画条件の変更などに柔軟に対応できるプログラムへの改良案の作成を進めている。

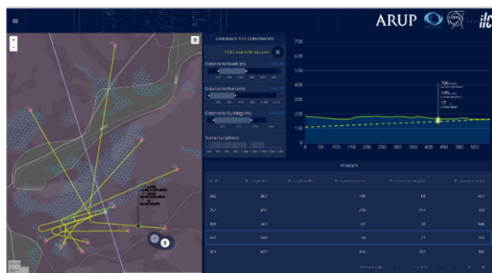


Figure 10: ILC-TOT 開発.

4. おわりに

4.1 建設スケジュールの概要

ILC の建設スケジュールは、現在も TDR 策定時の基本スキームが踏襲されている。すなわち、Figure 11 が示す通り、建設期間は 4 年の準備期間と 9 年の本建設期間、合計 13 年に及ぶ建設期間が想定されている。施設建設の観点では、全体工程のうち準備期間の 4 年を、加速器トンネルや実験ホール等主要施設の本設計期間と位置づけ、5 年目での工事着手を目指すことが基本方針となっている。また、続く 9 年間の本建設期間で、施設建設から主要機器の設置、及び供用開始に備えた試験調整までを網羅したマイルストーンが示されている。本プロジェクトの建設規模や設計内容から想定すれば、準備期間と本建設期間を一体的に捉えた総合的な建設計画の推進が望ましいと思料される。

Design and Construction

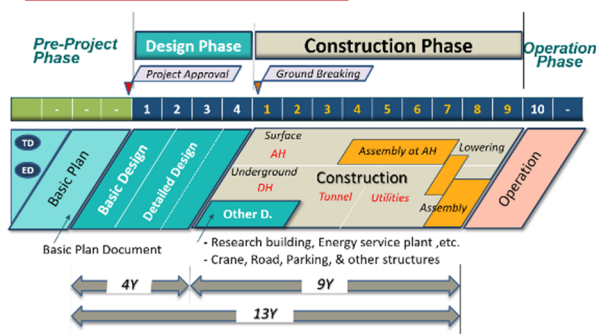


Figure 11: ILC 建設のマイルストーン.

4.2 まとめ

2013 年の TDR 発行以降も、ILC 建設に備えた技術開発や予備設計などの準備活動が精力的に継続されている。施設設計 (CFS) の分野においても、TDR からの建設コストの削減を図りつつ、来るべきプロジェクト始動、設計着手に備えて、より高品質で合理的な施設設計案の策定作業を進めているところである。

加速器施設の設計は、広範なユーザーの要求性能に耳を傾けながらの、もとより地道な作業であるが、世界最先端の加速器建設の礎になれば何より幸いである。

参考文献

- [1] “JLC Design Study”, KEK Report 97-1, April, 1997.
- [2] “Reference Design Report (RDR)”, ILC-Global Design Effort (GDE), 2007.
- [3] “Technical Design Report (TDR)”, ILC Global Design Effort (GDE), 2013.
- [4] “国際リニアコライダー施設 (ILC) の土木工事に関するガイドライン”, 土木学会岩盤力学委員会・国際リニアコライダー施設 (ILC) の土木工事に関する標準示方書策定小委員会, 2016.