

PROGRESS OF THE ILC CFS DESIGN

Masanobu Miyahara^{#,A)}, Atsushi Enomoto^{A)}, Kenji Hosoyama^{A)}

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

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0051

Abstract

The Global Design Effort [GDE] for the International Linear Collider [ILC] aims at the completion of Technical Design Report [TDR] in 2012. TDR investigates the most suitable design of the cost performance while developing RDR published in 2007. One of the major goals for Conventional Facility and Siting [CFS] team is to change the ML tunnel configuration from double tunnel to single tunnel. This report shows the various tunnel configurations in mountainous site which the Asian CFS team pushed forward. We did a systematic comparative study of construction, cost and schedule for eight variations of the ML-tunnel configuration. In this paper we also describe the progress of the ILC CFS design to show this technical examination results for TDR.

ILC 施設設計の現状

1. はじめに

国際リニアコライダー計画 (International Linear Collider 略称 ILC) の国際設計チーム (Global Design Effort, 略称 GDE) は、現在、各地域のサイト条件に立脚した工学設計書 (Technical Design Report, 略称 TDR) の完成を目指し総括的な技術検討を展開している。ILC の施設計画 (Conventional Facility and Siting, 略称 CFS) については、2007 年夏に提案された GDE の基準設計書 (Reference Design Report, 略称 RDR) で検討された標準案をベースに、米・欧・アジアの 3 地域のサイト特性に合致したコストパフォーマンスに優れた設計案を追及している。

TDR を纏めるにあたっての主要課題の一つが、メインライナック (ML) の加速器トンネルを、RDR の 2 トンネル方式 (ビームトンネル+サービストンネル) から 1 トンネル方式へ転換する技術検討である。欧米両地域は、敷地が極めて平坦でトンネル深度も比較的浅いため、大電力の高周波源や各種の基幹設備を地上にまとめて設置する方法を検討している。これに対し、アジア (日本) のサイトは山岳地帯での立地を想定しているため、欧米とは異なり地下構造物を主とした独自の計画案を模索している。

本稿では、GDE の施設設計の現状を踏まえ、主として ML トンネルの形状を 8 ケースに区分し比較検討したアジアチーム独自の検討結果について報告する。また、主加速器のトンネル工法については、RDR の標準設計である TBM (Tunnel Boring Machine) 工法に加え、NATM (New Austrian Tunneling Method) 工法の検討も実施した。地下構造物の形状や工法、工期及び建設コスト等について系統的かつ総合的に比較検討を行ったのは、アジア地域としては初めてで、TDR に向けた技術検討の重要な成果と思われる。

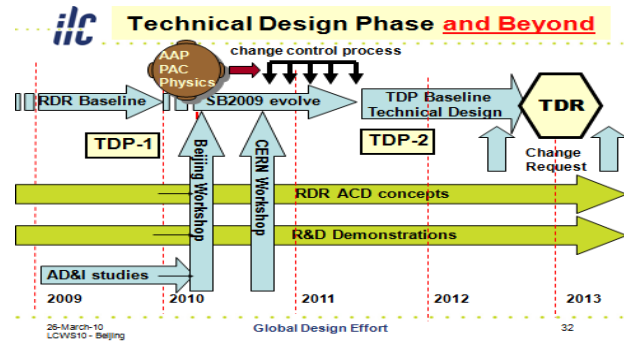


図 1: TDR へのマイルストーン

2. メインライナック計画案の経緯

2.1 RDR の標準設計

ILC の標準設計書 RDR に示されている ML のトンネル計画断面を図 2 示す。図の通り、ビームラインを設置するビームトンネルと高周波機器等を設置するサービストンネルの二つのトンネルから構成される計画案となっている。両トンネル間は、多数の導波管孔やケーブル及び冷却水孔等で連結される。

ビームトンネル

サービストンネル

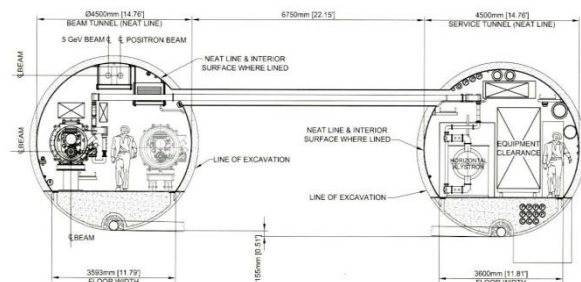


図 2: RDR の ML 断面計画

[#] masanobu@mail.kek.jp

2.2 欧米のシングルトンネル計画案

ヨーロッパとアメリカの両地域は、全長 50km に及ぶ広大な平地サイトを想定し、TBM 工法によるトンネル建設を基本案としている。いずれも、地下約 100m 前後の比較的浅い深度に計画しており、受変電施設や RF 電源施設、冷却水・ヘリウム低温設備などの基幹施設を地上施設として計画している。従って、これらの地上施設から地下トンネルへのアクセスは、ML トンネルに沿って 5 km 毎に設置される主縦坑(Vertical Shaft)に加え、約 2.5 km 毎に補助縦坑を設け高周波等を供給する計画となっている。

図 3 に示す通り、両地域共 TDP に向けて、RDR の基本的な機器レイアウトを踏襲した上で、RDR に比べると内空断面がやや大きいシングルトンネル断面を基本案として技術検討が進められている。

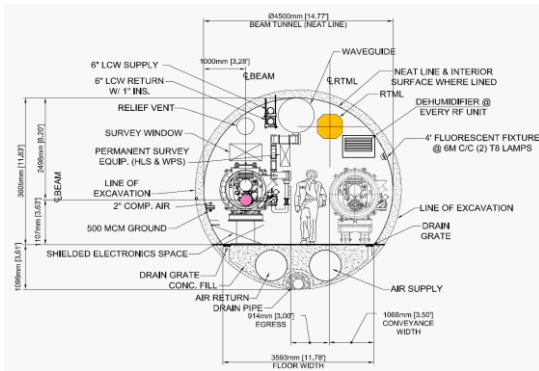


図 3：米地域のシングルトンネル断面計画

2.2 日本版シングルトンネル計画案

欧米案に対し、アジア地域では RF 電源を小型化し分散配置する DRFS システムを提案し独自の検討を進めてきた。2010 年には、山岳サイトを想定した建設案として大小二つのトンネルで構成する日本版シングルトンネル計画案を GDE に提起した。この案は、全ての加速器機器を単一のメイントンネルに集約するが、これと併行して地下水排水や冷却水などの配管路及び避難通路としての機能をもたせたサブトンネルも配置する独自の計画案であった。

メイントンネルの断面計画は、図 4 に示すコンパクトな円形断面を想定してスタートしたが、その後の技術検討の過程で、加速空洞を天井吊り下げ方式から床面設置方式への変更、RF 電源機器の放射線シールド対策などの課題が浮上し、内空サイズを含むトンネル断面計画の再検討を迫られた。

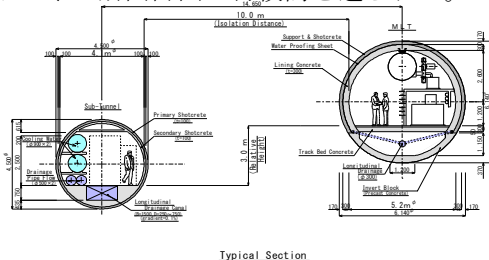


図 4：日本版シングルトンネル計画案

3. TDR に向けたアジア地域の技術検討

3.1 比較検討案の設定

既述の通り、現在 GDE においては RDR のベースラインを大幅に見直し、最終的には 2012 年度末に TDR(Technical Design Report)としての終結を目指している。この中で、特に CFS グループにとっては、ILC 加速器の中心施設となる ML トンネル断面のシングル化が最大のポイントとなっている。そこで、アジア地域特有の山岳サイトにおける最適な断面計画を求めるため、欧米の計画スキーム案を含めた様々なケースを想定し比較検討を行った。

表 1：比較検討ケースの設定

CASE	略称*	単複	工法	RF 方式	備考
Case-1	D-T-R	複	TBM	RDR	
Case-2	S-T-R	単	NATM		
Case-3	JS-T-X	*複	TBM	XFEL**	日本版 ST
Case-4	JS-T-K	*複	TBM	KCS***	日本版 ST
Case-5	JS-T-D	*複	TBM	DRFS	日本版 ST
Case-6	JS-N-D	*複	TBM		日本版 ST
Case-7	S-N-D	単	NATM		
Case-8	S'-N-D	単	NATM		

(注記)

- 1) 略称*：例 D-T-R(複線トンネル-TBM 工法-RDR 方式)
- 2) *複：サブトンネル併設の日本版シングルトンネル。
- 3) XFEL**：ドイツの DESY で建設中の European X-Ray Laser Project の略称。一つの加速器トンネル内にビームラインとクライストロンを収容、その他の電源機器や冷却設備等は地上施設として配置する。
- 4) KCS***：Klystron Cluster System の略称、米欧が推進する HIRF 方式で、トンネルにはビームライン機器のみを設置、大型クライストロン等は全て地上設置。

3.2 比較検討案の概要

比較検討案として絞り込んだ 8 ケースについて、各検討案の特性と概要を以下に列記し、各ケースの計画イメージを図 5 に示す。

Case-1：RDR 標準案。加速器は加速空洞が並ぶビームトンネルと、クライストロン等の高周波電源装置を設置するサービストンネルのダブルトンネルで構成する。日本の山岳サイトでの立地を想定するため、加速器トンネル沿いの約 5.0 km 毎にアクセスホールを計画。メイントンネル、サービストンネル共 TBM 工法で RDR と同じ内径 4.5m とした。

Case-2：CASE-1 と同様の RDR 方式とし、ビームトンネルとサービストンネルの二つのトンネルを一本の大断面トンネルに設置する案。トンネル断面は TBM 工法で、内径を 7.5m と仮定した。

Case-3：DESY-XFEL 方式の機器配置。単線トンネルにビームライン及びクライストロンを設置。地上に高周波電源を設置が、山岳サイトでは代わりに地下アクセスホールを拡大して収容する。メイントンネルは TBM 工法で、内径は DESY と同じ 5.2m 断面とした。地下水処理や避難路確保の観点から日本版シングル方式に準拠し内径 3.2m のサブトンネルを

併設するものとした。

Case-4 : 米国の KCS 方式による機器配置で、単線のビームトンネルのみを地下に設置し、高周波電源設備等を全て地上施設に設置する計画である。山岳サイトでは大規模な地上施設の建設が困難なため、地下のアクセスホール空洞の規模を拡大して設置するもの想定した。アクセスホールは約 2.5 km 毎に設置。メイントンネル TBM 工法、内径は米国案に準拠し 4.5m とする。CASE-3 と同様、日本版シングルトンネルに準拠しサブトンネルを併設するものとした。

Case-5 : DRFS 方式の機器配置による日本版シングルトンネル計画の原案。サブトンネル併設。約 5 km 以内毎にアクセスホールを配置するほか、約 610 m 毎に冷却空調設備等を収納する機械室（ローカルカバール）を設置。サブトンネルやアクセスホール及びローカルカバール等の地下構造物は、以下の CASE-6 についても共通の施設配置となる。尚、トンネル断面は、メイントンネル内径 5.7m、サブトンネル内径 3.7m とし、何れも TBM 工法、円形断面となる。

Case-6 : CASE-5 の機器レイアウトのまま両トンネル共 NATM 工法で施工する案。トンネル断面は NATM 特有の幌型（弾頭型）で、断面サイズは CASE-5 の TBM 断面に相当する断面規模を想定し、メイントンネル W4.7m, H5.7m、サブトンネル W=3.0m, H=3.3m とした。

Case-7 : DRFS 方式の機器配置のまま、NATM 工法による大断面単一トンネルとして計画する案。トンネル断面をビームラインと RF 機器ラインで分割利用するため、中央部に電源等の機器を放射線から防護するためのコンクリートシールド壁を設置。断面形状は扁平な弾頭型となり、W9.0m, H5.0m と想定。ローカルカバールは廃止する。

Case-8 : 機器配置や断面形状も CASE-7 と同様となるが、本ケースはビーム運転中に電源等の機器のメンテナンスができるようにコンクリートシールドを 3.5m 厚にし、断面サイズを W12m, H5.5m とした。

3.2 本検討対象の共通施設概要

前項の比較検討案は、主として ML トンネルの形状・規模のバリエーションの変化が特徴となっている。総工期や総工事費概算等の検討に当たっては、メインライナック以外の実験ホール大空洞やダンピングリング、セントラルリージョン部の BDS トンネル等多岐にわたる施設も対象となる。しかしながら、これらの全ての地下構造物をこの紙面で図示し詳述することは困難なため、以下に各々の施設の規模や概要を列記する。

- 1) **衝突実験ホール** : W40.0m, H30.0m, L120.0m の RDR 規模を想定。内部は吹付 3 層仕上げ程度を想定。実験ホール用アクセストンネル ; W7.2m, H10.2m
- 2) **ダンピングリング** : TBM 工法による円形断面、内径 5.0m、全長 3.2 km。サブトンネル NATM 工法、W3.3m, H3.0m。アクセストンネル; W7.2m, H10.2m
- 3) **BDS トンネル** : TBM 工法による円形断面、内径 4.5m、全長 5.8 km。

- 4) **ML 用アクセスホール** : 約 5.0 km 毎に設置。各ホール規模 W21.0m, H21.0m, L120m。掘削は NATM 工法+ベンチカット工法。吹付及び RB+PS。
- 5) **ML 用アクセストンネル** : NATM 工法による幌型断面、W7.5m, H8.0m、全長約 1.0 km 想定。アクセスホール毎に 1 本アクセストンネル設置を想定。
- 6) **ローカルカバール** : CASE-5~CASE-8 に必要な施設で、ML トンネルに沿い約 610m 毎に設ける比較的小規模の地下空洞。施工規模 W10.0m, H10.0m, L40m 程度で、NATM 工法+ベンチカット工法。

Case-1		Case-2	
RDR	D-T-R	RDR'	S-T-R
円形/ツインT		円形/シングルT	
Case-3		Case-4	
XFEL	JS-T-X	KCS	JS-T-K
円形/ダブルT		円形/ダブルT	
Case-5		Case-6	
DRFS	JS-T-D	DRFS	JS-N-D
円形/ダブルT		幌形/ダブルT	
Case-7		Case-8	
DRFS	S-N-D	DRFS	wS-N-D
幌形/シングルT		幌形/シングルT	

図 5 : 比較検討案のイメージ

3.3 比較検討結果（工期・工事費）

各検討案について所要工期、総工事費の概算を算出した。表 2 に、加速器トンネルのほか、実験ホールやアクセスホール等の地下空洞、アクセス用トンネル等地下構造物の全工程を各ケース毎に算定した結果を示した。TBM 工法においてはコンクリート覆工に比べてセグメント覆工が約 1 年短縮となっている。全体工期としては、最短で 6 年余り最長でも 7 年半と試算された。工期算定は工区数の設定条件によって変動するため詳細検討が必要となる。

表 2: 各ケース毎の所要工期算定結果

ケース名	工法	全工程(ヶ月)		
		Con 覆工	Seg 覆工	
CASE-1	D-T-R	TBM	74.1	61.1
CASE-2	S-T-R	TBM	90.0	72.5
CASE-3	JS-T-X	TBM	83.6	70.6
CASE-4	JS-T-K	TBM	84.5	71.7
CASE-5	JS-T-D	TBM	79.9	68.6
CASE-6	JS-N-D	NATM	87.2	-
CASE-7	S-N-D	NATM	78.0	-
CASE-8	wS-N-D	NATM	76.7	-

また、各ケースについて客観的な指標に基づいて工事費の試算・分析を行った。今回の検討では、計画案の詳細設計が概括的であるために比較検討案相互の相対的なコスト評価に力点を置いた。図 6 は、TBM 工法の場合の、内径寸法の大小及び施工長による単位長さ当たりの工事費を比較したものである。TBM によるトンネル掘削工事費については、施工ユニットの規模（施工長）によって施工単価が大きく影響を受けることがあらためて確認された。

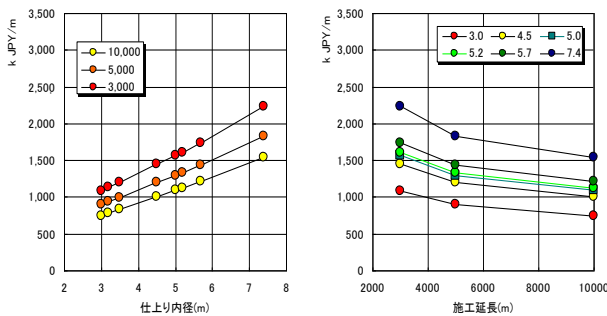


図 6: TBM 掘削の施工単価比較

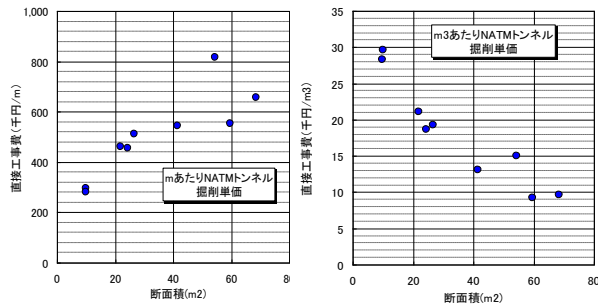


図 7: NATM 掘削の施工単価

図 7 は NATM 工法による掘削断面積の規模別による掘削単価の傾向を示したものである。直接工事費のみの比較ではあるが、NATM 工法では断面積が大きいほどコストが低くなる傾向がわかる。断面積が概ね 30 m²以下の小断面の場合は、単位長さ当たりの建設コストが高くなることが明らかになった。

3.4 比較検討結果のまとめ

今回の系統的な比較検討の結果、工期や工事費に関

して下記の傾向を抽出することができた。

- 1) TBM 工法による場合、覆工方式の違いによって建設工期に大きな差が生じる。
- 2) 小断面の NATM 工法、及び大断面の TBM 工法では、施工能率の低下により施工期間が長くなる。
- 3) 同一規模、同一条件のもとで比較した場合、建設コストは TBM に比べ NATM が有利な傾向となる。
- 4) 山岳サイトで KCS 方式を採用すると、アクセス用の空洞やトンネル数が増大し工事費増が顕著。
- 5) 日本版シングルトンネル計画案は、併設のサブトンネル施工費が加算され総工事費がやや増大する。
- 6) 何れの工法でも、単線と複線のコスト比較では、明らかに複線のケースがコスト高の傾向となる。

4. その他の技術検討の現状と課題

4.1 冷却水・空調設備計画

大深度地下での長大トンネルや空洞を利用した加速器実験施設の計画・設計にあたって、これらの地下空間から地上への熱エネルギー排出はプロジェクトの成否に関わる重要な技術課題の一つである。本計画施設の地下構造物全体での、200MW を超える大容量の熱エネルギーを制御するシステム構築については、欧米とアジア（日本）間では基本的に異なる技術検討が展開されている。欧米案は、大型のクライストロンや高周波電源設備を全て地上施設として建設し、約 100 m の立坑を経由して高周波供給システムを構築する計画である。一方これに対し、アジア（日本）地域では山岳サイトを想定していることから、大型の地上施設の建設が困難なためクライストロンや高周波電源設備を地下トンネル内に分散配置する DRFS システムを採用している。この高周波設備機器のレイアウトに対応して、冷却水設備の計画についてもクーリングタワーを除く大半の冷却・空調設備を地下トンネルに沿って分散配置し、地上と地下の間で冷却水を循環させる独自の冷却水供給システムを基本とした技術検討を進めている。

本報告では詳述しないが、現在、冷却水配管等の設置を主目的としたサブトンネルを併設する旧来の日本版シングルトンネルにおける技術検討の成果をベースに、冷却水設備や空調設備の機器想定、並びにローカルカバーンの配置、規模算定等の検討を継続している。今後は熱エネルギー収支モデルの詳細な精査と共に、サブトンネル機能を包含した大断面 NATM 工法による単一トンネル案を含めた新たなスキームでの、より詳細な熱エネルギー処理システムの構築に関する技術検討が求められている。

4.2 ヘリウム低温設備計画

超伝導加速空洞は、全長約 30km の地下トンネル内に配置され、2K の液体ヘリウムにより極低温に冷却、運転される。冷却に必要な 2K の液体ヘリウムは、トンネル内の約 5km 毎に配置される大型のヘリ

ウム冷凍プラントにより生成・供給される。各プラントには CERN/LHC 計画で開発・建設され運転中の世界最大の 2K ヘリウム冷凍装置に相当する大型の冷凍装置 2 台が設置され、各冷凍装置は左右の 2.5km の区間の冷却を担当し、全体で全長 5km の超伝導加速空洞の冷却を行う。我々が想定する山岳トンネル案では、これらのヘリウム冷凍プラントの主要な構成機器である 2K コールドボックス、4K コールドボックス、圧縮機、及び、超伝導加速空洞の室温への昇温を伴う長期間の運転停止時にヘリウムを回収して貯蔵する大容量の液体ヘリウム貯槽など、大部分の設備が大深度の地下空間に設置されることになる。このヘリウム冷凍プラントを収納する地下空間の大きさや形状は、それらを構成する大型の主要機器の大きさ、その搬入や保守の方法を十分に考慮して決定されなければならない。さらに、地下に設置する圧縮機用の冷却水の冷却塔の配置をどうするかなど、解決すべき多くの問題が山積している。

4.3 防災計画

本年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震は、東北沿岸部を中心に広範囲にわたり甚大な被害をもたらした。人的被害の大半は津波を要因としたものとされているが、マグニチュード 9.0 という巨大地震の破壊力の傷跡も随所に残された。

加速器施設の被害としては、茨城間北部に位置する東海村に建設され運用中であった J-PARC の実験施設も多大な被害を受けた。幸い、加速器トンネル内で作業中の人は緊急避難し人的被害は皆無であった。また、地下部に設置された実験機器については特に重大な損傷はなかったが、地上施設ではかつてない規模での被害を受け、現在復旧工事が鋭意進められているところである。（本学会の加速器土木ポスターセッションでの発表を参照）

今回の震災に限らず、地震国である日本の山岳サイトでの建設案を模索しているアジア（日本）の C F S チームは、大深度の加速器トンネルや実験ホール空洞における安全・防災計画については、従来から様々な角度から地下構造物における安全性・防災計画の重要性を提起してきた。ここでは詳細な報告はできないが、現在、日本版シングルトンネル計画案をベースにした防災計画のあり方についての基本的課題の抽出を行っている。これまでの検討結果の中で、特に火災や He 漏洩等の非常時において、サブトンネルが避難路として重要な機能を果たすことが簡易シミュレーション等によって検証することができた。今後、TDR 取りまとめに向けて、実験ホール空洞やアクセスホール空洞を含めた I L C 地下施設全体の防災シミュレーションが必要と思われる。また、全長 30km にも及ぶ前例のない大深度地下での避難・安全計画や防火・防災設備についての総合的な技術検討の展開が必要となる。

5. まとめ

今回の土木技術検討では、8 ケースに及ぶ多様な計画案を工学的かつ系統的に比較検討することが出来た。アジア地域 C F S チームとしては、従前にはない大きな成果と位置付けられる。しかし、本検討は ILC 計画施設全体から見ると、未だその一部に過ぎない。また、加速器を構成する各種機器のレイアウトや機能性、放射線遮蔽対策及び運転制御システム等、検討すべき課題は山積している。さらに、国内候補サイトの地域特性や地質地形条件などを反映した、より総合的かつ具体的な基本計画案の草案が TDR に向けての喫緊の課題と思料される。

参考文献

- [1] ILC GDE., “International Linear Collider REFERENCE DESIGN REPORT, Accelerator”, Aug, 2007, ILC Global Design Effort and World Wide Study
- [2] 先端加速器科学技術推進協議会技術部会・施設ワーキンググループ, 第 I 期活動報告書; “日本版山岳地帯シングルトンネル案の検討” 2010 年 3 月
- [3] 電源開発(株)., “将来計画加速器施設における地下構造物の建設計画に関する技術検討報告書” 2011 年 3 月
- [4] 財団法人建設物価調査会, “国土交通省土木工事積算基準書(道路・河川編) NATM 基準書” 平成 22 年度
- [5] 東日本・中日本・西日本高速道路(株); “土木工事積算基準 (TBM 積算基準) 平成 19 年版