

# CONCEPTUAL DESIGN OF ILC CFS IN MOUNTAINOUS SITE

Masakazu Yoshioka<sup>1A,B)</sup>

A) KEK, High Energy Accelerator Research Organization, and B) AAA, Advanced Accelerator Association Promoting Science & Technology, Technology Study Group, Facility Working Group  
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801

## Abstract

It was proposed to change from a 2-tunnel scheme in the ILC Reference Design Report to a single tunnel plan by the GDE, Global Design Effort in order to reduce the construction cost. Two proposals of RF source have been presented to realize this scheme. One is “Klystron Cluster System”, which moves every RF source related components from the underground tunnel to the above ground buildings. This would require that the surface topology be rather flat. Another one is the “Distributed RF System”, which does not greatly increase the above ground facilities, and instead every accelerator components are put into a single main tunnel. Instead of powering with large-scale klystrons, downsized modules are distributed throughout. We propose to make a single accelerator tunnel for active accelerator components based on the latter RF system and a sub-tunnel, in which cooling water piping is installed. The sub-tunnel can also be used for the emergency escape, underground water drainage, maintenance work and etc. This scheme fits to the Japanese mountainous site.

## ILC山岳地帯シングルトンネル案の検討

### 1. はじめに

国際リニアコライダー計画 (International Linear Collider, ILC) の加速器トンネル建設技術に関して、国際設計チーム (Global Design Effort, GDE) はベースライン設計として RDR (Reference Design Report) では2つの地下トンネルを建設し、それぞれにビーム加速のためのクライオモジュールと、クライストロンおよび変調電源を設置し、両トンネルは導波管連結孔で連結することになっていた。しかし2009年にその方針を変更し、トンネルを1本のみとすることが基本設計となった。理由はコスト削減である。1つのトンネルとするために、RF源の方式として、次の2つが提案されている。

- ①クライストロン・クラスター：クライストロンを地上建てやに集中設置し、導波管で地下に導く、
- ②DRFS (Distributed RF System)：分散小型クライストロンを、クライオモジュール近くにトンネル内に分散配置する。

日本のサンプルサイトは地質の関係から地形は丘陵/山岳地帯となる。そのため、地上ステーションと地下トンネルの標高差が部分的に数百メートルになるところもあり、導波管で高周波電力を地下に導く方式①は適用不可である (即ち、この方式は欧米のサンプルサイトにしか適用できない)。従って、方式②の開発を行なうことは、我が国のサイトに ILCを建設する場合は必須条件である。

次に、地下水処理や災害時の避難路確保を考慮して現実的に考えると、欧米のサンプルサイトでは可能とされている31km長もの大深度地下にシングルトンネルを掘削・運用することは、日本では難しいと考える。

以上のことから、先端加速器技術推進協議会・技術部会<sup>[1]</sup>のもとに設置した施設WGは、GDEの基本方針である、クライオモジュールとDRFSといった加速器主用設備を1つのトンネルに設置する、ということ踏まえながら、日本の山岳・丘陵地帯に適した加速器トンネルの概念設計を行なった<sup>[2]</sup>。

その日本版設計の3要素を以下に纏める。

- (1) GDE基本方針同様に、図1に示すように主リニアックトンネル (Main Linac Tunnel: MLT) に加速器機器を設置し、かつサブトンネルを併設する。

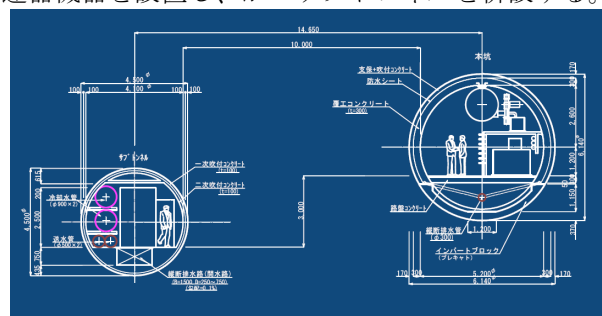


図1：主トンネル (右) とサブトンネル (左)

- (2) 山岳・丘陵サイトでは、前述の如く地表とトンネルの標高差が数百メートルの区域があることは避けられない。従って様々な加速器施設をできるだけ地下に設置することを基本とする。地表設備を最小限とするため、電気、機械、ヘリウム冷凍機設備など可能な限り地下施設とする。この方針は、自然環境保全の観点からも優れている。

- (3) 地下トンネル内の加速器で消費する電力は、水冷システムにより、最終的には地上に設置する冷却塔で大気中に放出される。その冷却塔設備をでき

<sup>1</sup> E-mail: masakazu.yoshioka@kek.jp

るだけ集約することにより設置箇所を減らし、かつ設置場所を自由に選択するために、このサブトンネルを活用する。サブトンネルに直径900mm程度の大口径冷却水配管（往復2本）を設置しする。この大型配管により、DRFSやヘリウム冷凍機のコンプレッサー等も含めた全リニアックの熱負荷を冷却する冷却水を、長距離にわたり移送することを可能にする。

このような基本方針により、地表設備と地下トンネルの接続に関して、日本の山岳地形に由来する種々の設計制約からほぼフリーになることが可能となった。

以上の前提条件のもとに、施設WGに以下の5班を編成して概念設計を行なった（カッコ内は班長）。なお全体コーディネートは福田（清水建設）が担当した。

- ・施設全体レイアウト：（四釜、熊谷組）、
- ・サブトンネルとアクセストンネル：（笹尾、鉄建建設）、
- ・メインライナックトンネル：（領家、大成建設）、
- ・地下水、湧水処理：（秋好、大林組）、
- ・衝突実験ホール：（阿子島、鹿島建設）。

本論文は以上の5つの班の作業結果を纏めた報告書<sup>[2]</sup>をWG主宰者の文責でまとめたものである。

## 2. 施設全体レイアウト

トンネルの標高レベルは次の3つの要件を考慮して決定する；

- ・衝突実験ホール空洞位置における最低土被り厚(100m以上)を確保すること、
- ・トンネル掘削安定性確保の観点より全長にわたり最低土被り厚(2D)を確保すること、
- ・近隣河川への地下水自然流下可能な勾配確保が可能であること。

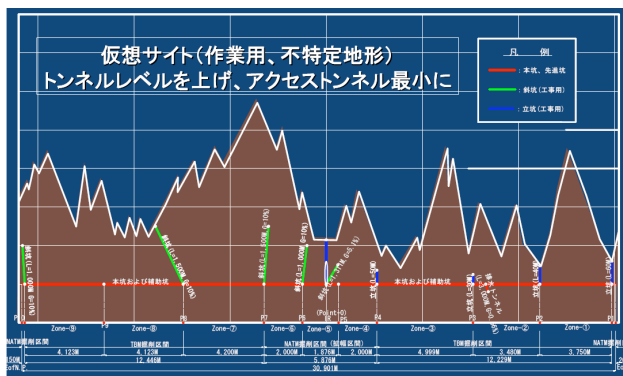


図2：建設時の施設レイアウト

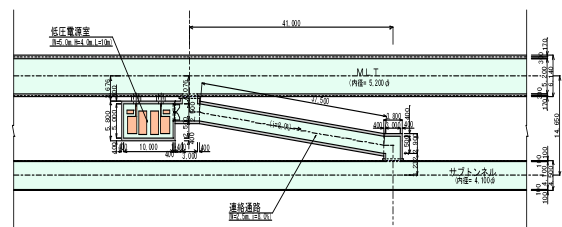
次に両トンネルの位置関係は以下の要素を考慮して決める；

- ・両トンネル離隔は、先行掘削するサブトンネルの水抜き効果を発揮できる位置であること、
- ・併設トンネルとしての安定確保のため2D程度の距離離隔をとること、
- ・MLTよりの排水を自然流下で受ける位置関係を保つこと。

これら諸要件を考慮し、図1に示すように、両トンネル離隔を、内空間水平距離10.0m、鉛直距離3.0mと設定した。

工事用のアクセスは実験空洞、排水トンネル建設も含めて斜坑を6坑、立坑を5坑とし、図2で示す工区毎にTBM（Tunnel Boring Machine）工法かNATM（New Austrian Tunneling Method）工法で掘削する。全長は30.9kmで計画し、中央部の約5.9km区間および端部がNATM工法区間とした。

サブトンネルとMLTは、図3に示すように500m毎に連絡通路で連結する。この通路は施設完成後は、避難通路、湧水処理配管、保守作業、各種サービスカバーン（図3は低電圧電源室が付随している例）など、本設計において極めて重要な役割を担う。なお、500mという間隔は暫定値で、今後詳細検討を経



て詰めていくべきものである。

図3：サブトンネルとMLT間の連絡通路

## 3. サブトンネル、アクセストンネル

サブトンネルとアクセストンネルは、建設時にも、建設終了後の供用時にも徹底的に利用する。

まずサブトンネルは、建設時には地質調査を兼ねたパイロットトンネルと位置付け、供用段階では、冷却水配管、坑内湧水用排水管を設置し、また非常時の避難路や保守作業用通路とする。

次にアクセストンネルは、MLTやサブトンネルの建設時にはTBM等の建設機器の搬入・搬出、ずり搬出、排水、換気等に使用する。土木工事終了後は加速器等の実験用機器の搬入に使用する。

アクセストンネルとMLTとの会合部には、カバーンを建設し、工事期間中にはTBM組み立て、発進用基地とし、その後はヘリウム冷凍機関連の機器設置機械室として活用する。

TBMの仕様は高速道路の避難坑などとして実績の多い掘削径φ4.5m（仕上り内径φ4.1m）を採用し、覆工はコストと工期を考慮し2層の吹付けコンクリート仕上げとし、覆工コンクリートは施工しない。工区割りアクセストンネルの位置は、1工区長を概略～4kmに分割し、工区端に斜路または立坑のアクセストンネルを設けてNATMで掘削することを条件に決める。TBM本体と付属台車は、アクセストンネル下部で組み立てた後に発進する。

図4に供用時の、サブトンネル断面内配置を示す。冷却水と排水配管はMLTとの連絡通路の反対側に配置することにした。

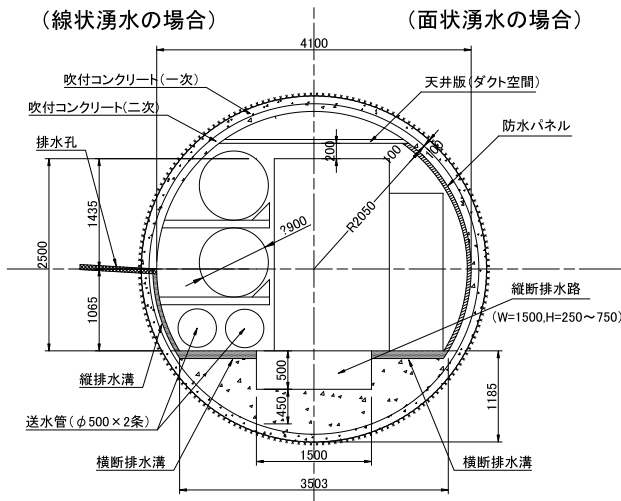


図4：サブトンネル断面図

サブトンネルとアクセストンネルの工事工程の主な項目についてまとめる；

- ・準備工事：アクセストンネル入口の基地造成期間は一箇所あたり一律3ヶ月とする、
- ・アクセストンネル掘削工事：立坑は10m/月、斜路は80m/月とする。またTBM組立坑道構築は一律3ヶ月、組立は一律1ヶ月とする、
- ・サブトンネル掘削工事：サブトンネルは地質状態の不確実性を考慮し施工中の地質調査、補助工法を含んで250m/月とする（花崗岩地帯での実績）。

#### 4. メインライナックトンネル

MLTの仕上がり内径はGDE基本設計を参考にし与条件としてφ5.2mとした。工法はサイトが比較的良好な地質地域が選定されることを前提とし、かつサブトンネルを先行掘削することにより、地質状況が事前に把握でき、水抜き効果が期待されることと、工期短縮をはかることも考慮しリニアック部はTBM掘削とする（図4、上図）。

一方、GDE設計では衝突点両側および最終収束部も含むエリアの仕上がり内径は、円形断面φ4.5mから幅6.2m～7.4m～8.5mの断面へと複雑に変化している。本検討においては図面通りに必要断面を確保するため、このエリアはNATM施工とすることとした。

MLTは放射線管理区域となるので、覆工厚と床版厚を30cmと仮定した。また坑内に漏水を発生させないため、床版部を含め全周防水工（不織布付き防水シート）を施工する。図4に示すように裏面排水により覆工に水圧を作用させない構造とし、集めた湧水は横断排水管により中央排水管へ導き、その後サブトンネルへと流下させる。従ってMLT内部はドライな状態に保つことが保障されることになり、サブトンネルを設置する大きな効用の一つとなる。

MLT掘削速度は、先行サブトンネル掘削により、地質リスクが明確化されるので補助工法を含み350m/月と仮定する。

またサブトンネルの掘削レベルは、MLTより3m下

げるのでMLT掘削の水抜き坑としての機能を果たし、MLT掘削時湧水量の大幅な低減が期待出来る。

ここで、我が国で高度に発展している情報化施工技術を駆逐することを強調しておきたい。これは地質不良部を的確に予測し計画掘進速度を確保するため、施工中の切羽前方探査やTBM機械データを用いて、リアルタイムで現場工事や設計見直しにフィードバックする技術である。我が国の地下土木工事ではこのような近代的工法が広く使われている。

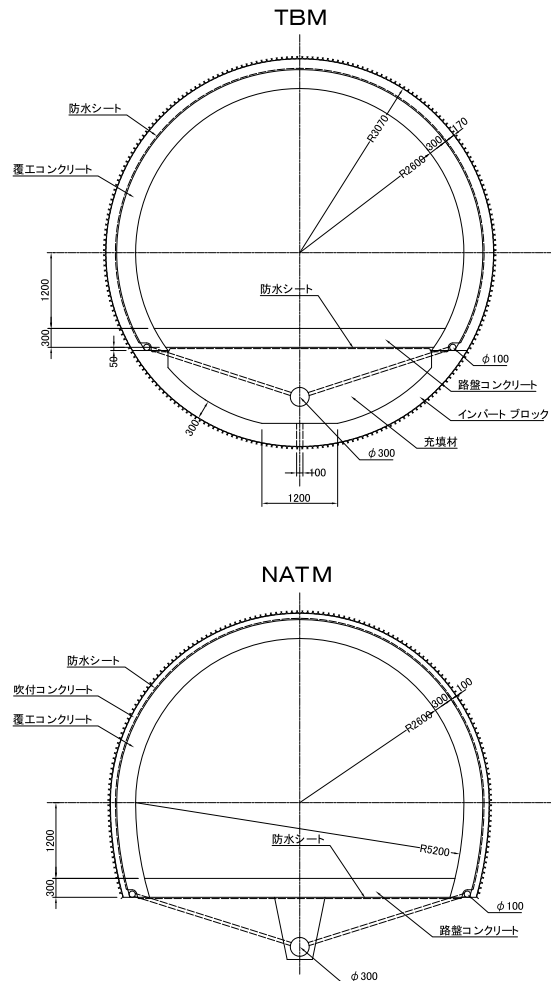


図5：MLT断面

#### 5. トンネル完成後の地下水処理

トンネル供用段階におけるトンネル内への恒常的な湧水量の予測は、サイトの地形、地質、気象条件などの多くの要因により異なるので難しいが、ここでは「最新の比湧水量データ（エネ庁1996）」をベースにして次のように仮定する。

- ・比湧水量=0.6m<sup>3</sup>/min/km（想定地質＝深成岩）
- ・安全率=1.5
- ・トンネル延長=31 km

つまりトンネル全長にわたる恒常湧水量は毎分28トンと想定し、その50%ずつがMLTとサブトンネルに発生すると仮定した。我が国で想定してるサンプルサイトの地質条件は良好であるので、この想定は安

全側であると考えられる。

さて、ここで想定した地下水の排水計画は、日本版設計の極めて魅力的なポイントなのである。欧米のシングルトンネル設計では、全て立坑から100mの揚程でポンプアップして排水する。実際、既存の大深度地下トンネルである、CERN/LHC、FNAL/ニュートリノ施設などがそうになっているが、万一長期の停電等の事故が発生すると、トンネルは水没する可能性があるため、電源の確保が厳重になされている。

一方、日本版の設計では、次に示すように、地下水排水は自然流下と小型ポンプのみの排水となるので、万一長期間動力が停止するような事故が発生した時も、サブトンネル床部の水位が上がる程度に留まる。先ずMLTの排水計画を述べる。

- ・ MLTにおいて地下水はトンネル内部のライニングの背面を通り、トンネル床部に設けた配水管に集められる。

- ・ 図6に示すように、配水管は500m毎に0.1%の排水勾配を作り、そこに作るピットに集める。

- ・ ピットからサブトンネルには500m毎の連絡通路の位置で自然流下させる。

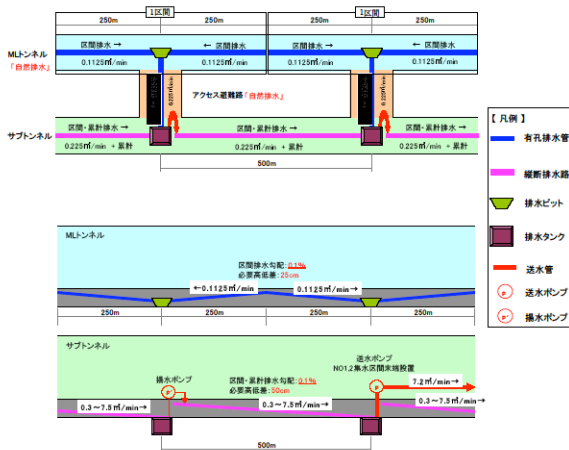


図6：MLTからサブトンネルへの排水計画

次にサブトンネルの排水計画をまとめる。

①サブトンネルにおける湧水；

- ・ 図3に示してあるが、経済性の観点からトンネル全周を防水シートで覆うのではなく、その代わりに湧水箇所のみ状況に応じて適切な排水処置を施す、

- ・ 例えば線状湧水の場合は排水孔を地山内に設け内壁面沿いの縦排水溝と路盤面の横断排水溝を経由して縦断排水路（幅1.5m、高さ0.25～0.75m、勾配0.1%）に排水する、

- ・ 面状湧水の場合には湧水箇所から路盤面まで設置した防水パネルで導水し横断排水溝を経て縦断排水路に排水する。

②全湧水処理；

- ・ 両トンネルの湧水は全てサブトンネルに集められ、サブトンネル内に500m毎に設置してある排水タンクに集める。

- ・ 31kmのトンネルのうち、隣接する河川に最短距

離で排水トンネルを建設できる箇所を自然放流箇所と設定し、サブトンネル内の排水タンクから隣接する排水タンクへ、小型排水ポンプを用いて送水しながら最終的に自然放流箇所に集積し、自然流下させる。

- ・ 小型ポンプは一般に農業用水等に使用する汎用型とし、揚程は4m程度ながら大容量の機種（渦巻き斜流ポンプ、電力4kW未満）を選定する。

以上が地下水排水のシナリオである。万一、長時間電力が停止するような事態にあっても、自然流下箇所からの自然排水のため、サブトンネルの排水タンクが溢れてサブトンネル床部が浸水する程度に留まる。

## 6. 衝突実験ホール

図7にRDR仕様の実験ホールカバーンの概念図を示す。ILCの衝突点は1箇所であるが、測定器は2式建設され、時間をシェアして交互に衝突点にローライン・ロールアウトする「プッシュプル」方式が想定されている。

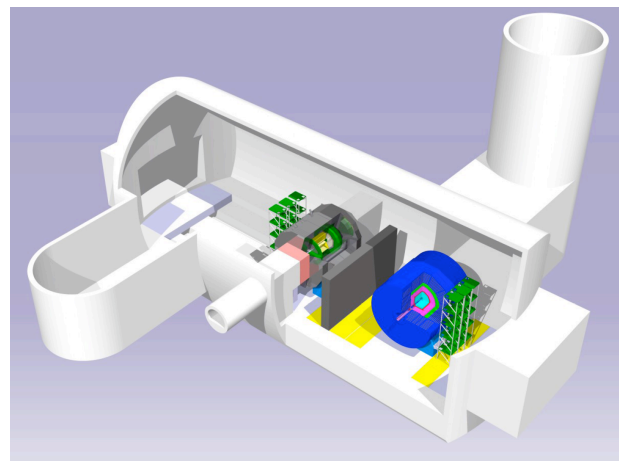


図7：実験ホール概念図（RDR仕様）

そのために実験ホールの形状は2式の測定器を建設し、かつプッシュプルが可能ないようにしなければならない。図7は大口径の縦坑を主たる搬入坑とする、LHCのCMS方式の考え方がベースにあるが、日本の地形、地質では搬入路として、斜路のアクセストンネルを利用する方が得策であり、今後、機器のインストール、組み立て方法と合わせて総合的な検討を行うことが必要である。

今回、WGで検討した衝突実験ホールの断面形状を図8に示す。断面は幅が30m、高さが40mで、長さは120mと長い。ところで、類似のスケールの大深度地下大空洞建設について、我が国では揚水式水力発電所の地下発電所大空洞建設の豊富な経験がある。それらの経験を踏まえれば、ILCのサイトとして想定している地質においては、技術リスクは少ないと考えている。今後、検出器グループと協議しながら詳細な検討を行っていく予定である。

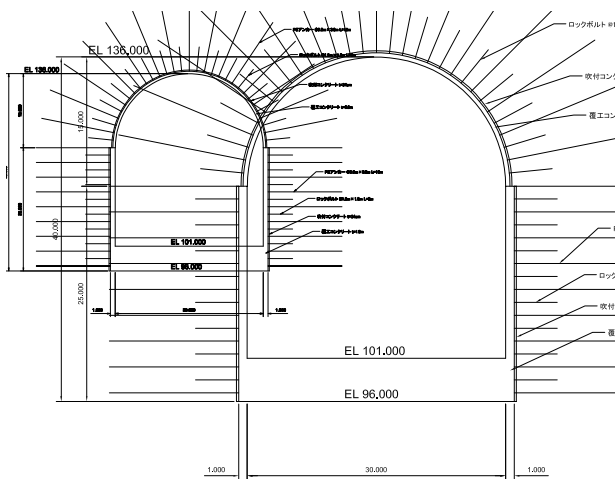


図8：衝突点空洞の断面図、長さ120m

## 7. 全体工程

本検討の前提条件では、工区毎の竣工までの期間には相当のバラツキがあり、最短で45ヶ月、最長で69ヶ月となった。今後はGDE設計標準とのさらなる摺り合わせを行ない、実際の地形・地質に合わせた現実的な工区分割方法なども含めて、詳細に詰めていかねばならない。

また、全体工程は土木・建築工事のスケジューリングだけで決めるべきものではなく、加速器機器や実験装置の建設、インストールおよび試験運転までも含めて考えなければならない。さらにはこのような装置系の開発、製造、ストックヤードや、研究者、技術者の作業環境などの検討もいずれ行なっていく必要がある。

## 8. 今後の計画

施設WGによる作業結果は、2010年3月末に開催されたGDE定例会議で報告された。そこで2010年6月1~3日にGDEとKEKのリニアコライダー推進室が共催で、この日本版設計に対する国際レビューを行なうことが決められ、実施された。その結果、本概念設計はGDEベースラインに沿っており、今後さらなる検討を行なうべきであるという結論にいたった<sup>[3]</sup>。

GDEの計画では2012年度内にTDR, Technical Design Reportをまとめることになっているので、日本版設計もそれに沿って実施しなければならない。そのためにKEKはCFSチームを拡充して当たっているところである。また、衝突点や実験ホールを含む中央部の設計は加速器、実験、施設の3者の共同作業が必要で、東北大学、東京大学、佐賀大学との連携も強めているところである。

本論分の基礎資料をまとめた施設WGの今後の機能としては、TDR作成を目標にKEKを中心としたチームの活動に対してレビューを行なうことが主体となる。

## 謝辞

本論文は1項にあげた作業チームの成果を筆者が代表してまとめたものである。検討結果はコーディネーターと班長以下チーム構成員全員、および施設WG参加メンバー全員の努力の結果であることは言を待たない。

## 参考文献

- [1] 先端加速器技術推進協議会(AAA) : <http://aaasentan.org/>
- [2] 施設WG、”Investigating the Single Tunnel Proposal in Japanese Mountainous Site”, 先端加速器技術推進協議会報告、2010年3月12日
- [3] M. Miyahara and A. Enomoto, “Status of Design Study on the ILC Conventional Facility”, Proc. of the 7<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 4-6, 2010, Himeji, Japan