

# ILC 施設

## 1. はじめに

ILC (International Linear Collider) の国際的な技術検討の中で、施設関係は、CFS (Conventional Facilities and Siting) という枠組みで扱われてきた。文字通り Siting は建設場所、その検討を意味している。2013 年に発表された ILC 技術設計書 (TDR) には、日米欧それぞれのサイト案での施設設計が併記されている。

TDR 発表後、ILC を取り巻く状況が大きく動いている。2012 年 7 月に CERN の LHC 実験にて待望のヒッグス粒子が発見され、その結果、ヒッグス粒子の精密実験に必要な衝突エネルギーは 250 GeV と判明した。同年 10 月には日本の高エネルギー物理学研究者会議 (JAHEP) が ILC をホストすることを提案、欧米の将来戦略策定や国際将来加速器委員会 (ICFA) の声明で支持が表明された。2017 年、JAHEP は ILC を 250 GeV ヒッグスファクトリーとして早期に建設することを提案、欧米の研究者コミュニティもこれを歓迎した。現在では、ILC は日本での実現を目指す国際的な計画として広く認識されている。

現在、ILC の実現に向けた取り組みにおいて、建設候補地として東北の北上山地が提案されている。これは 20 年以上にわたる研究者の詳細な検討結果によるものである。2000 年頃には国内 13 ヶ所が候補に挙げられ、2010 年に東北の北上山地と九州の背振山地に絞られた。2013 年に、JAHEP における ILC 戦略会議の下に組織された ILC 立地評価会議が比較検討を進め、北上山地を ILC 建設に最適と評価、公表した [1]。日本政府としてはまだ ILC 誘致や候補地を判断するには至っていないが、2013 年に国際共同設計チーム (GDE) を引き継いだ国際検討組織リニアコライダー・コラボレーション (LCC) は、以後の国際的な ILC 設計検討は北上山地を前提として進めることを決め、現在に至っている。このような背景の下に、より具体的な施設設計、土木設

計が進められてきた。なお、長らく使われてきた CFS という施設関係の枠組みを示す呼称は、最近では使わずに、より具体的な内容を示して、Civil Engineering and Infrastructure などとすることが多い。

## 2. 施設検討の経緯

### 2.1.1. 国際組織による基本設計

ILC の国際的な設計検討は、2005 年に発足した国際共同設計チーム GDE により進められ、2013 年の ILC 技術設計書 (TDR) にまとめられている。TDR では日米欧それぞれが自地域での ILC 実現を想定した記載となっており、ILC 施設について基本的な設計は共有しつつも、それぞれの地域特性に基づく 3 つの施設案が併記されている。欧米案はそれぞれ広大な平坦部での建設を想定しており、地下 100 m に加速器トンネルを設け、全てのアクセスは立坑による設計であった。一方の日本案では、約 50 km の直線施設を建設しうる場所として山間部を提示しており、斜坑を使った車両等によるアクセスを想定した施設案であり、次節に述べる土木学会、産学連携、候補地地域等の支援を得て概要がまとめられたものである。

TDR 後も施設設計についての協力が続けられている。年 2 回ペースで ILC の国際ワークショップがあり、主に加速器設計の進展に基づく対応について議論を重ねている。特に CERN においては、現在 LHC の高ルミノシティ化のためにトンネル拡張工事を行っている最中であり、現地視察を含め、情報共有などを通じた協力が得られている。

### 2.1.2. 産学連携による検討

先端技術を結集する ILC 計画において、産業界と学术界が協働し、設計検討、計画への理解を深めることは重要である。2008 年に設立された一般社団法人・先端加速器科学技術推進協議会 (AAA) [2] には、日本全国から 100 社を超える企業とおよそ 40 の学術機関が参加しており、産学連携による ILC 推進の母体となっている。ここ

では様々な部会が設定され活動している。ILC 施設に関しては、土木建設業界からの参画企業が協働し、課題を整理し、その対応を提言している。その内容は、地下トンネル・空洞の評価、地震・放射線・排水等の安全対策など多岐に渡る。また、ILC の地下施設設計のみならず、持続可能社会の観点でのまちづくり、省エネ技術の取り込み（グリーン ILC）など、ILC の実現に向けた幅広い分野での検討が進められている。

### 2.1.3. 候補地域における検討

建設候補地として提案されている東北地域では、2009年に東北 ILC 推進協議会が設立され、地域の学会、産業界、経済界、自治体の連携の要として活動している。2016年、この協議会の下に、地域の受け入れ体制構築を目指した「東北 ILC 準備室」が発足した。準備室には、4部門（広報、地域、技術、産業）、2専門部会（地下施設、マスタープラン）があり、特に「技術部門」、「地下施設専門部会」では、土木技術をはじめとする専門家により、北上山地の特性に基づく具体的な検討が進められた。ここでは、建設想定ルートでの電磁探査・弾性波探査およびボーリング調査など、詳細な地質調査、および現地踏査による地形調査が実施されている。これらに基づき、国際組織による施設計画に現地の性状を取り入れた施設の検討が進められていた。それを2019年に東北 ILC 準備室に KEK が協力して纏めたものが「東北 ILC 施設計画」[3]であり、土木学会・岩盤力学委員会により技術的に成立しているとの評価を受けたものである。

このように ILC 実現を目指した活動が着実に進められている中、2020年8月に国際推進チーム (IDT) が発足した。これに対応し、建設候補地として必要な取り組みを進めるために、「東北 ILC 事業推進センター」が発足した。この推進センターは、東北 ILC 準備室を発展的に解消して役割を引き継ぐものであり、より強固な地域産官学連携の下に、施設設計の具体化支援、地域インフラ整備、居住地域づくり、住民説明、環境アセスメント、海外研究者の受入、研究施設への地域資源

活用、加速器関連産業振興など、地域として関与しうる多岐に渡る事柄についての検討を進めることとしている。

### 2.1.4. 土木学会による支援

ILC は地下に作られる大型研究施設であることから、地下施設の設計・検討に当たっては、土木工学専門家の知見・指導が必須である。そのため、2004年、KEK は ILC 施設の設計・検討に関する技術支援を公益社団法人・土木学会に要請、土木学会は、岩盤力学委員会およびトンネル工学委員会による“国際リニアコライダー土木技術研究小委員会”を設置し、2006年から2013年の長期に渡り、地下トンネル、大空洞、防災など多岐に渡る専門部会での検討を通して ILC 計画への支援を行ってきた。その集大成として2014年に「ILC 施設の土木工事に関するガイドライン」[4]が取りまとめられている。

2019年には東北 ILC 推進協議会から北上山地の地質・地形に基づく「東北 ILC 施設計画」の評価が委託され、土木学会・岩盤力学委員会は、オールジャパン体制として広く国内大学の専門家を招集した“ILC 施設計画評価小委員会”を設置し検討を進めた。その結論として、“「東北 ILC 施設計画」は技術的成立性を担保しているものと評価、その内容は妥当であると結論する”との評価が示されている。

## 3. ILC 施設の設計要件

### 3.1. 加速器レイアウト

ILC 加速器の構成を Fig. 1 に示す。衝突点を中心に電子加速器系と陽電子加速器系が対向して設置される。中央部には電子源、陽電子源、ダンピングリング、そして検出器ホールとビームダンプが設置される。

ビームの流れを電子源から順を追って説明する。まず、電子源で生成され、5 GeV に加速された電子ビームは、斜めの輸送路を通して中央のダンピングリングに送られる。ここでは、電子用・陽電子用のリングを上下二段に重ねることで、地下トンネルを1つにまとめている。ダンピングリング

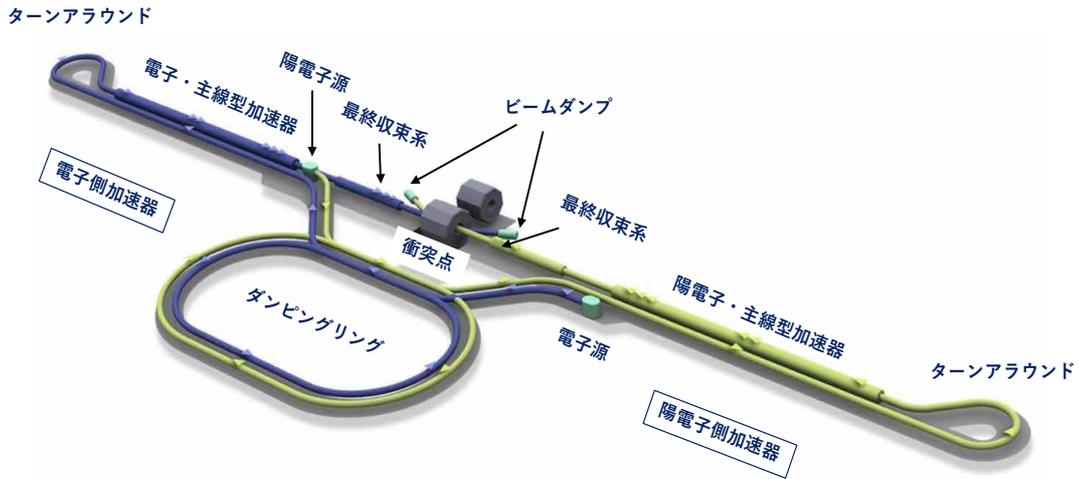


Fig. 1: ILC 加速器の構成

で高品質になった電子ビームは、リングから取り出されて電子側加速器トンネルを通り、端部にあるターンアラウンドまで送られて進行方向を反転、再び電子側加速器トンネルに入り、主線形加速器を用いて 125 GeV に加速される。その後、陽電子源部（後述）を經由して、最終収束系を通過してナノメートルの衝突ビームとなり、衝突点にて電子・陽電子衝突実験に使われる。衝突点を通過した電子ビームはビームダンプに吸収され役目を終える。

陽電子ビームは、電子側加速器の下流にある陽電子源で生成される。陽電子生成に必要なガンマ線をアンジュレータで作るために 125 GeV の電子ビームが必要であり、このような加速器レイアウトになっている。陽電子源以降の流れは、電子源と同じ（対称）である。陽電子生成方式には電子ビームを直接標的に当てる電子ビーム駆動型も検討されている。その場合、低エネルギーの電子加速器等が必要となり、陽電子源加速器システムを収める別個の直線トンネルを設けるなどの案が提案されている。ILC トンネルの端から端までの総延長は 20.5 km で、電子側加速器トンネルは 10.9 km、陽電子側は 9.6 km である(Fig. 2)。電子側は、陽電子源が挿入されているため、陽電子よりも長い。

### 3.2. 加速器からの設計要件

#### 3.2.1. 主線型加速器トンネルの交差角

衝突点での電子ビームと陽電子ビームの交差角は 14 mrad である。衝突点近傍では、衝突点に向かうナノメートルの衝突ビームと、対向して衝突点からビームダンプに向かう使用済みビームが同じトンネルに存在する。ここでは電磁石磁場など、ビームラインの干渉を避ける必要がある。そのため衝突点で有限の交差角を付けて対応することになるが、物理実験に必要なルミノシティ（衝突頻度）を維持するためビームを回転させ正面衝突状態にするクラブ空洞が必要となる。大きな交差角ではクラブ空洞への要求が厳しくなり現実的では無くなる。様々な検討の結果、交差角は水平方向に 14 mrad と決定された。主線型加速器と最終収束系が直線状にあると、将来、ビームエネルギーを上げて行く場合でも対応がし易い。そのため、これらのトンネルは連続した直線トンネルとなり、電子側と陽電子側トンネルの“交差角”も 14 mrad となっている。

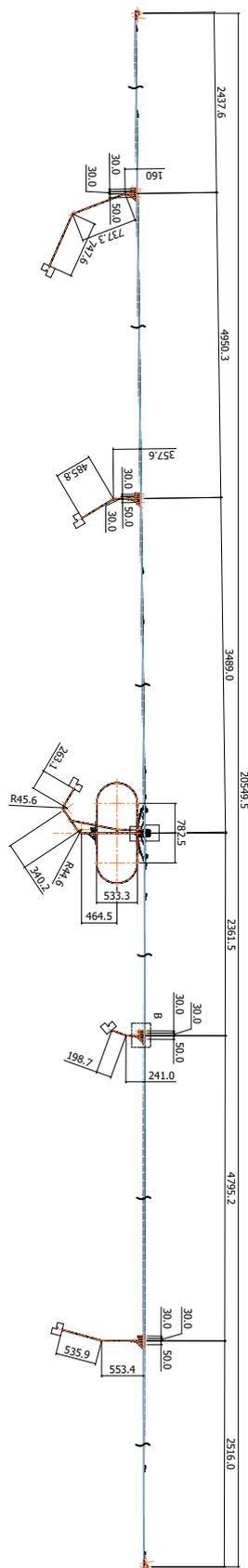


Fig. 2: ILC トンネル (全長 20.5km)

### 3.2.2. 加速器トンネルとジオイド

ILC の総延長は約 20 km と長く、ジオイドとの関係を考慮する必要が出てくる。ジオイドとは“地球の平均海水面に一致する重力ポテンシャル面”と定義されている。

主線型加速器では、超伝導加速空洞の冷却のために液体ヘリウムを伝送しなければならない。この伝送系をシンプルにすることは、クライオモジュールの列に渡って、液面に“傾き”を生じさせないこと、つまりはジオイドに沿ってクライオモジュールを設置することである。

一方、衝突ビーム調整を行う最終収束系では、ナノメートル衝突ビームへの影響を避けるべく、垂直方向に軌道変化の無い直線（レーザー・ストレイト）のビームラインとしている。つまり、電子 BDS、衝突点、陽電子 BDS が、垂直方向で同一直線上に配置されることになる (Fig. 3)。

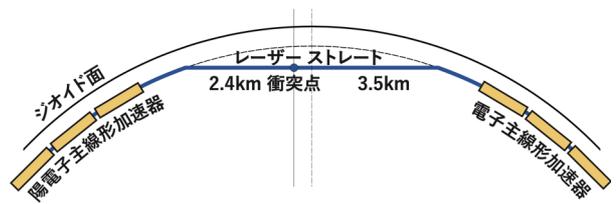


Fig. 3: ILC 中央部とジオイド

### 3.2.3. 加速器のアライメント許容度

加速器機器をトンネル内に据え付けた後、機器の高精度な基準座とレーザートラッカー等の測量機器を用いて微調整を行う。必要な位置精度は、以下の様に評価されている。全体として滑らかに繋がっている必要がある。

- 最終収束系： 20  $\mu$  m (rms)以内 / 200 m
- 主線型加速器： 200  $\mu$  m (rms)以内 / 300 m
- その他： 100  $\mu$  m (rms)以内 / 150 m

電磁石の微調によるビーム軌道変化を用いて、より詳細なアライメントを実施する (Beam based alignment; BBA) も行われる。主線型加速器のクライオモジュールにはリモート操作可能な位置調整用ムーバーが取り付けられており、ビーム運転中においても逐次 BBA を実施し、ムーバーを用いて位置の再調整を行う。

このように加速器機器には位置の微調整ができる機構を取り付ける。また、シム板等で機器の台座長を調整することも行う。これらのことを考慮しているが、床の仕上がり精度は cm 程度に収めることが望ましい。

### 3.3. 建設サイトの要件

#### 3.3.1. 全長・拡張性

リニアコライダーは、主線型加速器の延伸により、さらに高いエネルギーでの衝突実験が可能となる。これはトンネルを拡張できない円形加速器とは異なる、線型加速器の重要な特徴である。ヒッグスファクトリーとしての ILC に必要な衝突エネルギーは 250 GeV である。これを実現するために、ILC トンネルの総延長は 20.5 km が必要となる。衝突エネルギーが 500 GeV の場合での総延長は 33.5 km となる。将来、主線形加速器を延伸する場合、ターンアラウンド部は移設する。その他の既設部は変わらない。

ILC 建設候補地の要件の 1 つに、約 50 km の施設配置を見込めることが挙げられている。これは将来の加速効率改善などと共に 1 TeV に達することを想定したものである。

#### 3.3.2. 地盤振動の許容値

ダンピングリングを周回する間に、電子ビームと陽電子ビームは安定化すると共にナノメートルの衝突ビームに必要な高品質ビーム (低エミッタンスビーム) となる。この状態を維持して衝突点まで送ることが重要である。電子ビーム及び陽電子ビームは、それぞれ約 10 km の主線型加速器トンネルを往復して衝突点に到達する。つまり、別々の 20km の地盤振動の影響を受けて来たものを衝突させなければならない。ビームは衝突点で

7 nm に絞られて衝突する。地盤振動によりビームライン磁石が振動し、結果、ビームが受ける磁場強度に変化が生じる。最終的に衝突点でのビーム位置ズレとなり、素粒子実験に重要なルミノシティ (衝突頻度) の維持に大きな影響をもたらす。詳細なビームシミュレーションの結果、以下の様に地盤振動の許容値が設定された。

#### 主線形加速器および BDS

- 周波数 0.1 Hz 以下 : 振幅 10  $\mu$ m 以下
- 周波数 0.1 Hz 以上 : 振幅 100 nm 以下

#### 衝突点

- 周波数 0.1 Hz 以上 : 振幅 50 nm 以下

ここで、周波数 0.1 Hz 以下のゆっくりとした変動については、ビーム位置モニターによる軌道測定とステアリング電磁石による軌道補正を組み合わせたフィードバックで影響を抑えることが可能である。

一方、0.1 Hz 以上の周波数領域では、ステアリング電磁石による軌道補正フィードバックが効かないので、上記のような許容値の“静かな”トンネル地盤が必要である。土被りが少なく道路や河川からの振動の影響が予想される場所では、加速器機器に制振装置を取付けるなど、影響を緩和する対策を行う。

電子ビーム・陽電子ビームの衝突頻度を設計値に保つために、0.1 Hz 以上の領域でバンチ毎に高速に働く軌道フィードフォワードが、衝突点とターンアラウンド (電子および陽電子) に設置される。ILC のビームは、約 1300 個の電子の塊 (バンチ) が列をなし、その時間幅は 1 ms である。1 ms に対して振動は十分に遅く、1300 個のバンチはほぼ同じ振動の影響 (磁石のズレ) を受け、衝突点に送られてくる。衝突点の高速軌道フィードフォワードは、衝突で電子または陽電子バンチが受ける影響 (衝突後の位置ずれの大きさ) を検出し、最適の衝突を維持するように後続 (554 ns 後) の入射バンチ位置を補正するものである。そのためにはフィードバックシステムを固定する最終

磁石の振動（衝突点の床振動）が 50 nm 以下であることとされている。

ターンアラウンドの高速軌道フィードフォワードは、電子側・陽電子側それぞれの端にあるターンアラウンドの手前で、ターンアラウンドに向かうバンチの位置ズレを検出し、約  $1\mu\text{s}$  後に反転して戻ってきたビームに対し、そのズレを解消する補正を与えるものである。これにより、主線形加速器に入射するビームを安定化させる。

Fig. 4 に様々な地点における常時微動測定結果を示す。0.1 Hz から 1 Hz の範囲で振幅が許容上限値に近いものもあるが、山岳地域の堅固な岩盤帯を選定すれば常時微動は許容値を十分に下回ることが期待される。

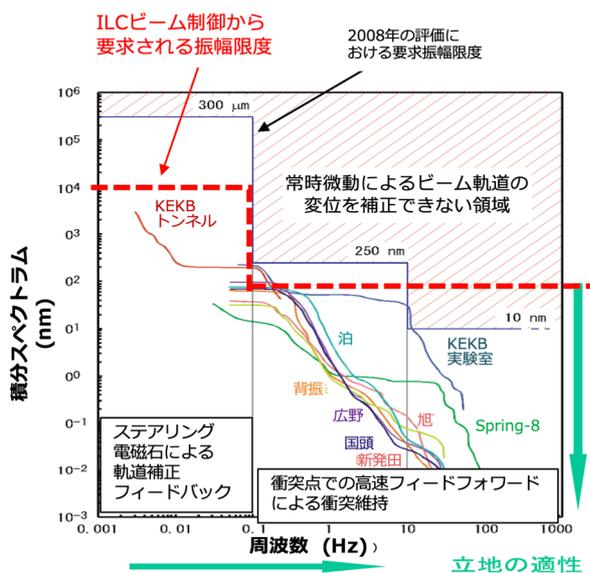


Fig. 4: 常時微動とビーム軌道補正限度

### 3.3.3. 地質・地形

ILC 建設候補地は、地盤振動の影響を受けにくい堅固な岩盤帯であり、長期間にわたる継続的変形が生じにくい岩盤性状を有すること、50 km の長距離に渡って概ね様な岩盤が得られることが望ましい。

トンネル掘削では、「断層」「破碎帯」の遭遇が大きなりリスクであり、遭遇した際には落盤や多量の

湧水噴出への対策が必要となる。堆積岩の山岳地帯は褶曲地層できていて地層が鉛直に立っていることが多く、地層境界や褶曲部では「破碎帯」ができやすい。花崗岩は火成岩であり、マグマが冷えて固結するときの割れ目が「節理」や「破碎帯」として残るが、大規模な地質不良部は比較的少ないと考えられており、同一地質で大きな岩体が存在している。候補地に関しては、大規模な花崗岩帯を有することを基本として選定が進められた。

加速器のルートを活断層の可能性が予見される“既知の断層が横切らない”ことも重要な条件である。また、30km 以内に活火山が存在しないことも立地評価の条件である。

国内では、平地に直線 50 km の ILC 建設を想定することは難しい。従って、国土の約 7 割を占める山間部に建設することになる。地表からの深さは地形に依存し、多くの場合において優に 100m を越えるため、立坑でのアクセスは難しく、主に斜坑によるアクセスとなる。斜坑は、加速器機器の搬入に加え、地下と地上の施設を繋ぐケーブル・配管等のルートでもあり、その長さは、全体の工事工程、コストに大きく影響する。

### 3.4. 候補地の地質・地形

ILC 立地評価会議で ILC 建設に最適と評価された北上山地は、南北 250 km、東西 80 km におよぶ非火山性の山地である。起伏が小さいならかな高原状地形が特徴である。ここには南北に連なる 3 つの花崗岩帯（人首、千厩、折壁）があり、衝突エネルギー 250 GeV での直線 20 km の領域はもとより、将来、50 km に延伸する場合でもそのほとんどが花崗岩帯に収まる (Fig. 5: 平面 (上図) 及び断面 (下図))。

#### 3.4.1. 地形による建設要件

2013 年に国際設計チームは北上山地を想定した検討を始めた。北上山地では起伏が小さく、深さ 100 m 程に衝突点を設定できることから、立坑アクセスとすることで検出器建設の大幅な効率改

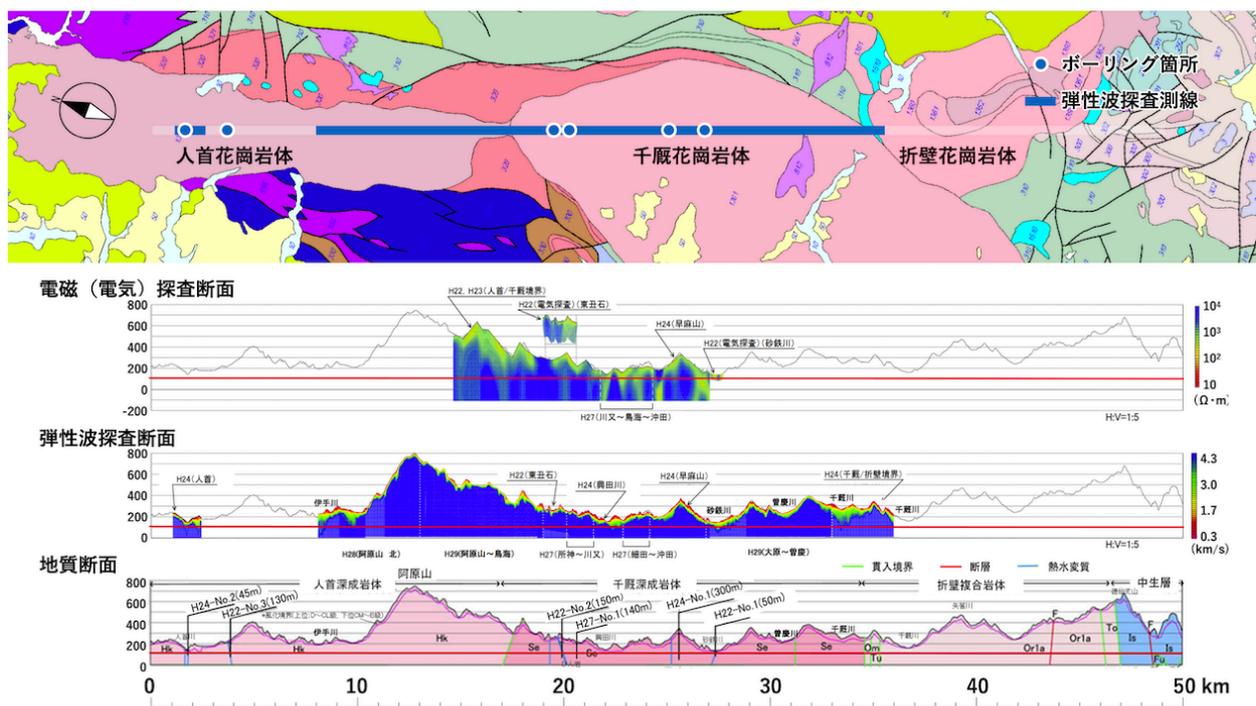


Fig. 5: 地質調査結果概要

善が期待できる。従って、衝突点においては立坑のアクセスを取り入れることが、以後の設計の基本となった。

衝突点以外からのアクセスについては、従来どおりの斜坑としている。その長さは加速器トンネルの深さに依存するため、トンネルは浅い方が好ましい。一方、幾つか小さな河川を横断する場所があり、そこでは安全を見込んで最低 20 m の岩盤厚みを確保することとしている。これらを取り組み、加速器トンネルは標高 110 m に設定された。

### 3.4.2. 地質調査

この節では、施設設計に必要な情報となる地質調査について紹介する。東北地域においては、2009年から 2017 年にかけて、東北大および岩手県により、弾性波探査、電磁 (電気) 探査、ボーリング調査が実施された。

#### 電磁(電気)探査

電磁(電気)探査は、衝突点候補を含む直線 13 km の範囲で実施されている。深度 100 m 以深の電

気抵抗率は概ね  $104 \Omega \cdot m$  以上と高い値を示すが、局所的に電気抵抗率が低い箇所 (河川付近) が見られ、水の入った割れ目の存在が疑われるが、ほぼ全域で割れ目の少ない健岩が広がっているものと予測されている。河川付近はより詳細な調査を行い、トンネル工事設計に反映する。

#### 弾性波探査

弾性波探査は約 30 km (ILC 500GeV) の範囲で実施されている。地表付近を除いて非常に速い弾性波速度が観測されており、地下には堅固な岩石が広がっていると推測される。

#### ボーリング調査

ボーリング調査は、50 km を想定したルートで、衝突点付近を含む 6 箇所で開催されている。加速器トンネルを想定する標高 110 m 付近のコアを採取すると共に、ボーリング孔を使った初期地圧測定など各種検層が実施されている。採取したコアからは極めて良好な花崗岩であることが確認されている (Fig. 5: 上図の丸印)。また、コアサンプルを用いた室内岩石試験 (一軸圧縮強さ、圧裂

引張強さ、超音波速度)により物理特性を確認すると共に、超音波速度測定の結果は弾性波探査と整合することも確認した。また、蛍光 X 線分析による成分分析も行われ、特に異常は無く“通常の岩石”との評価を得ている。

### 3.4.3. 施設計画案

東北地域では、東北 ILC 準備室 地下施設専門部会が中心となり、衝突点、アクセストンネル、加速器トンネル、地上および地下の設備施設など、北上山地の特性に基づく具体的な検討を進めてきた。この長年の検討を基に、東北 ILC 準備室が KEK と共にまとめたのが「東北 ILC 施設計画」(2019 年)である。これは ILC 国際設計チームによる加速器施設の仕様に、候補地固有の条件を加味したもので、主に土木に関するものである。この「東北 ILC 施設計画」の技術的成立性の評価が、第三者機関として土木学会に委託された。土木学会・岩盤力学委員会は、オールジャパン体制として広く国内大学の専門家を招集した“ILC 施設計画評価小委員会”を設置し検討を進め、その結論として、“「東北 ILC 施設計画」は技術的成立性を担保しているものと評価、その内容は妥当であると結論する”とした。

## 4. 地下施設

### 4.1. 加速器トンネルの設計要件

#### 4.1.1. 基準とするトンネル形状

地下の加速器トンネルには、加速器ラインと共に、その電源や冷却水系・電気系の設備、搬入路等の場所を確保しなければならない。例えば、主線型加速器では、高周波源を加速モジュールに沿って配置する必要がある。さらに、高周波試験時の立ち入りを可能とすると共に、ビーム運転中に放射線から高周波源を守るため、中央に放射線遮蔽壁を設けてトンネルを分ける必要もある。これらの要求をシンプルに満たすものとして、“かまぼこ型”断面が採用されている。これは次に示すトンネル工法の NATM 工法で可能となり、局所的な断面変更にも比較的柔軟に対応できる。

### 4.2. 土木工事

ILC 施設として求められる機能について 4 章で説明する前に、加速器トンネルや空洞をどのように建設するのかを紹介する。なお、詳細に関心がある方は土木関係の情報を検索して頂くこととして、ここでは ILC 施設の理解に役立つ程度に留めたい。

#### 4.2.1. トンネル工法

最も長い主線型加速器トンネルの施工は、TBM 工法、シールド工法、NATM 工法などが想定される。2013 年に発表した TDR では、主線型加速器トンネルの工法として、欧米案では TBM を、日本案では NATM を提示していた。欧米案では平坦なサイトを想定した立坑アクセスになり、一方、日本案では山岳サイトのため斜坑によるアクセスとしたことが主たる違いの元である。以下、各工法について簡単に説明する。

TBM 工法は円筒形の Cutter を回転させながら前進して岩盤を掘削する Tunnel Boring Machine を用いる。地山(半径方向)にグリッパを押して反力を取り、ジャッキで前進する仕組みである。掘削スピードは他の工法と比べて速いが、大型の掘削機は高価である。

シールド工法は、シールドと呼ばれる鋼鉄の筒の内部で掘削と同時にトンネル壁(セグメント)を作りながら進むものである。推進の反力はセグメントの端面にジャッキを押して得る。軟弱な地盤などに対応し、都市部での道路や地下鉄工事などで多く採用されている。当然 TBM よりも高価である。

NATM (New Austrian Tunneling Method) 工法は、発破や掘削機により掘削を進め、吹付けコンクリートとロックボルトにより地山の強度を利用してトンネルを保持する工法である (Fig. 6)。日本では 1980 年代から広く使われるようになり、現在の山岳トンネル(鉄道・道路など)のほとんどが NATM で作られており、十分な技術実績がある。

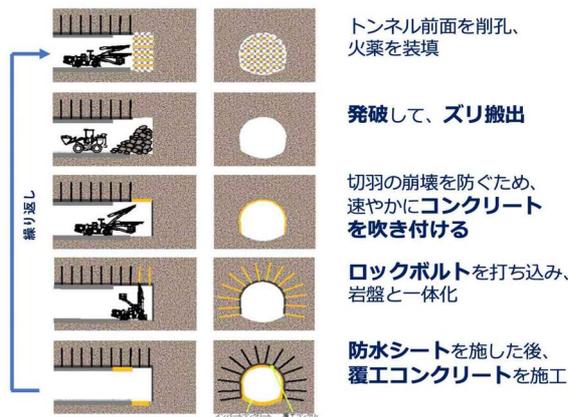


Fig. 6: NATM 工法の例

日本の山岳サイト案で NATM を選定した主な理由は次のようになる。

- アクセストンネルや立坑、検出器ホールおよび設備ホールは、そもそも NATM 工法で掘削される。
- 場所によって加速器トンネルの断面を広くしなければならない。
- 花崗岩は固く、TBM の掘削スピードが落ちることが予想されるが、工期短縮のために TBM の台数を増やすのはコスト的に難しい。
- NATM の場合、工区を最小 2.5 km まで分割できる。一方、TBM では工区を増やすと台数が多くなりすぎる。また、短距離の掘削ではコスト的に見合わない。

コスト、工期の評価を加えた総合的な検討の結果、日本の山岳サイト案におけるトンネル工法として NATM を採用することになった。

#### 4.2.2. 工事の手順

衝突点には、検出器を降ろすためとアクセス用の 2 つの立坑がある。また、ILC 全体で 5 箇所 of アクセストンネルがある。これらが地下施設工事の起点となる。

検出器ホール本体の掘削は、地上から立坑掘削を進め、検出器ホールの頂点部に到達してから本格的に始まる。順次、空洞上部から段を下げながら掘削を進める。検出器ホールの周辺にはアクセス用のトンネルが設けられる。この一部が検出器ホールに到達した後は、立坑とアクセストンネル両方を使って空洞の掘削工事を進める計画である。5 箇所のアクセストンネルは、ILC をほぼ等分するような位置にあり、並行して工事を進めることが可能である。地上からアクセストンネルの終点まで掘削が進むと、加速器トンネル側、アクセスホール側、それぞれに分かれて掘削を進める。加速器トンネルでは更に上流・下流の二方向に向かって掘削を進める。加速器トンネル・アクセスホールの土木工事後に施設設備、加速器の設置を始める。

#### 4.2.3. 湧水対策

加速器トンネルの上部と側部の覆工コンクリートと岩盤の間には防水シートがあり、湧水はその外側を通過して、床下の導水路に導かれる (Fig. 7)。この湧水を最寄りのアクセスホールに集め、アクセストンネルを経由してポンプにより地表まで強制排水する計画である (Fig. 8)。主線形加速器トンネルは、液体ヘリウムの伝送のために、ジオイド面に平行である。そのため、アクセスホールの集水槽へは、トンネル床下の導水路を深く取り自然流下させる方法、400m 毎に区切った導水路とポンプリレーにより強制的に送水する方法などが提案されている。

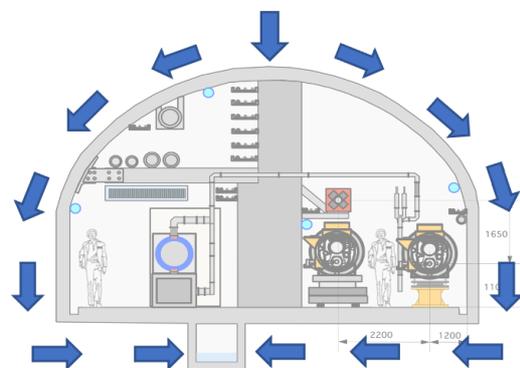


Fig. 7: トンネル側面の湧水の流れ

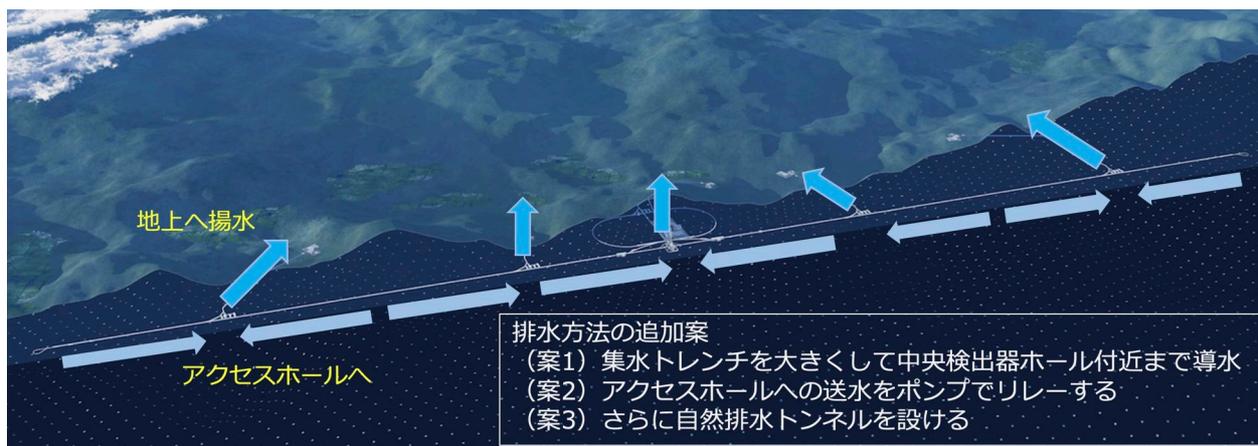


Fig. 8: 地下湧水の排出

中央区域(電子 BDS・検出器ホール・陽電子 BDS)は“レーザー・ストレイト”となっているため、検出器ホールに向けて 1/2,000 程度の下り勾配となり、自然流下で検出器ホール近くの集水槽に集める。検出器ホールからは、アクセストンネルを経由してポンプにより地表まで強制排水、もしくは排水トンネルを経由して自然排水する。

#### 排水トンネル

「東北 ILC 施設計画」では地下施設を標高 110 m 前後に想定している。そのため、より低い標高の河川に向けた地下湧水の排水専用トンネルを設けることで、自然流下による排水が可能となり、非常時における長期停電があっても、機器の完全水没を回避することができる。この排水トンネルは約 4km の長さになる。現在はオプションとして検討されている。

### 4.3. 加速器トンネル

#### 4.3.1. 電子源

電子源はダンピングリングの上流側に位置するため、e+BDS トンネルを利用して設置する。その結果、電子源の直線加速器と e+BDS ビームラインが並走する。

電子源の構成要素は、レーザー駆動 200 kV 直流電子銃、常伝導前段加速器、超伝導 5 GeV 加速器である。電子ビーム生成の要である電子銃レーザーは中央遮蔽壁を隔てた電源側に設けること

になるが、運転中も含めてレーザー室へのアクセスが可能となることが望ましい。また、超伝導加速器への液体ヘリウム供給ラインが短い方がコスト減となる。これらのことから、常時立入可能なアクセスホールに近い方が好ましい。TDR では電子源が e+BDS トンネルのダンピングリングに近い側(最寄りのアクセスホール PM-8 から遠い側)にあったが、電子源全体を PM-8 近傍に移動させることを検討している。

#### 4.3.2. 陽電子源

陽電子源の案としてアンジュレーター方式と電子駆動方式の 2 つがある。前者は偏極陽電子ビームが得られるが、電子側加速器による 125 GeV 電子ビームが必要であること、後者は単独で陽電子を生成出来るものの、無偏極ビームであることなど、それぞれ長所短所がある。本準備期間に ILC の実験計画に最適な方式を選択することとしているが、それから陽電子源の施設設計を始めるのでは、本準備期間で完成させる ILC 施設の詳細設計がまとまらない。そのため、現段階から双方の案に対して基本的な施設設計を進めている。

#### アンジュレーター方式

この方式では、まず 125 GeV の電子ビームを超伝導ヘリカルアンジュレーターに通して偏極ガンマ線を生成する。電子ビームは dogleg により 1.5 m シフトして BDS ビームラインに送られ

る。一方、ガンマ線は直進して陽電子標的に当たり、電子・陽電子対を生成する。この陽電子をキャプチャーリニアックで補足、偏向電磁石で電子と分離した後、ブースターリニアックで 5 GeV に加速してダンピングリングに送る。陽電子標的に使用されるガンマ線は全体の数%程であり、残りは約 2 km 直進してフォトンダンプで吸収される。従って、電子側 BDS トンネル内には、電子 BDS ライン、陽電子リニアック、ガンマ線ダンプラインの 3 系統が並走することになり、電源側も含めるとトンネル幅として 12 m 程度が必要となる。また、陽電子標的は約 1 m の遮蔽体で覆うなど対策が必要となる。

### 電子駆動方式

電子駆動方式では、陽電子標的に当てる電子ビームを作るために 3 GeV 程度の電子リニアックを必要とする。また、ダンピングリングでのバンチ構造を実現するビームを供給するために、高周波システム (特に電源など) は設置密度が高くなり、場所によっては加速器の両側に電源を配置するなどの対応が必要である。入射電子ビームによる標的部の放射線量もアンジュレータ方式よりも高めで 2 m 以上の遮蔽体を要する。これらを拡張した BDS トンネルに収める案と、別途、独立のトンネルで対応する案が検討されている (Fig. 9)。後者の場合、コスト増にはなるが、単独のシステムとなるため運転調整や保守がし易くなる。独立トンネルの“ILC 本体”への接続はリング入射路手前を想定しているが、接続角度など設計には自由度があり、建設地条件などから決定する。なお、電子駆動方式では偏極陽電子が得られない。そのため電子駆動方式で ILC を開始した場

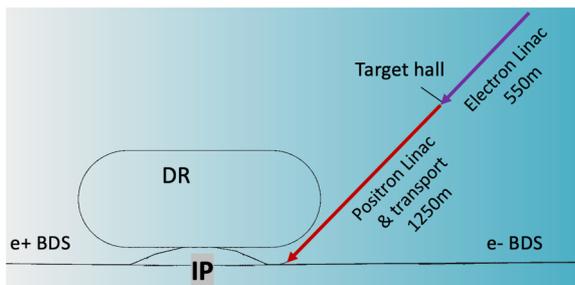


Fig. 9: 電子駆動方式陽電子源トンネル案

合でも、将来、偏極陽電子ビームを得るためにアンジュレータ方式に置き換えることが検討されている。しかしながら、ILC 稼働後に既設ビームラインの途中に大がかりな土木工事を実施することは、建設重機の搬入を考えても困難であり、あらかじめ将来の改造を見込んで、前述のアンジュレータ陽電子源の施設構造を確保しておくことが必要である。

### 4.3.3. ダンピングリング

ダンピングリングは ILC の中央部に位置する周長 3.2 km のレーストラック型の加速器である (Fig. 10)。電子・陽電子それぞれのリングを上下に重ねて配置することで、1 つのトンネルにまとめている。直線部は約 700 m あり、衝突点に近い側にはビームの入出射システムが設置され、反対側には超伝導高周波加速装置と超伝導ウィグラー電磁石が設置される。それぞれの直線部には遮蔽壁を隔てて電磁石を含む各種電源が配置される。

ILC では段階的にビーム強度を上げていく計画

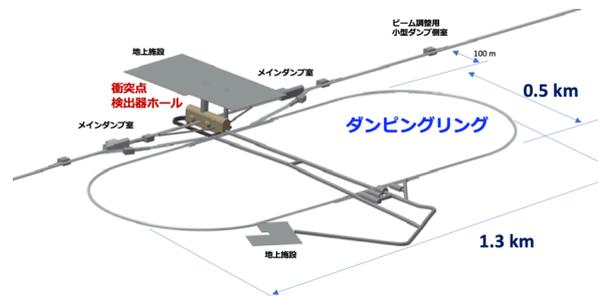


Fig. 10: ダンピングリング周辺

である。その際、陽電子リングでのビーム不安定性を緩和する対策として、第二の陽電子リングを設置し強度分散を図ることが提案されている。従って、あらかじめ 3 つのリングを重ねることを想定してトンネル形状を決めている (Fig. 11)。

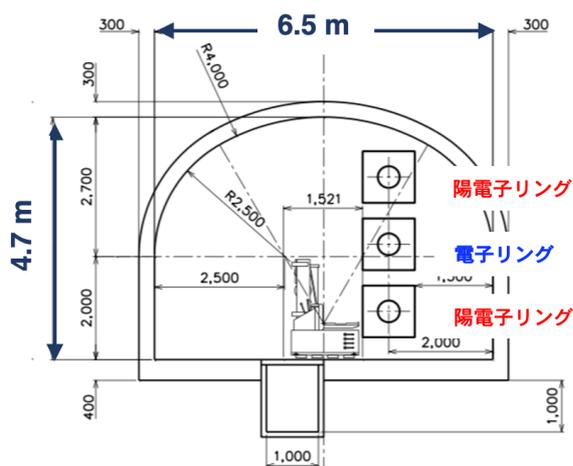


Fig. 11: ダンピングリングアーク部断面

ダンピングリングの電気機械設備は、衝突点側からの地下トンネルを経由するものと、地上からアクセストンネルを経由して地下のアクセスホールに収められるものとの2系統で賄う。後者は超伝導高周波加速機器や超伝導ウイグラー電磁石のための液体ヘリウム設備を含む。このアクセストンネルはダンピングリング・トンネル工事の起点となる。

#### 4.3.4. RTML

RTML (Ring to Main Linac) は中央部のダンピングリングで低エミッタンス化したビームを主線形加速器のスタート점에輸送するビームラインである。この輸送にはBDS・主線形加速器のトンネルを利用するが、装置の搬入路を確保するため、ビームラインの位置は中央遮蔽壁側部の高さ2.75 mに設定されている。ビームラインはILC最端部にあるターンアラウンドの手前で徐々に下がり、主線形加速器と同じビーム高さ1.1 mになる。ターンアラウンドは直径約60 mのループ状の輸送路で、中央遮蔽壁を持たない小断面のトンネルである。主線形加速器トンネルがターンアラウンドを越えるところまで延長されており、ここに電磁石電源を設置、避難路として活用する設計としている (Fig. 12)。主線形加速器トンネルの延長部分は、将来、主線形加速器を延伸する場合において、ILC 運転に対するトンネル工事の影

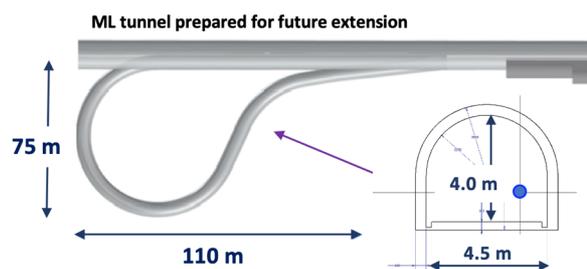


Fig. 12: ターンアラウンド

響を低減するためにも重要なものである。どの程度、延長部分を確保しておくかは詳細設計で決める。

ターンアラウンド後、主線形加速器に入るまでの区間には、バンチ圧縮システムがあり、6 mmのバンチ長をから0.3 mmまで圧縮する。その過程で、ビームは15 GeVまで加速される。

#### 4.3.5. 主線形加速器

電子ビームおよび陽電子ビームは、それぞれの主線形加速器 (超伝導線型加速器) を用いて衝突実験に必要なエネルギーまで加速される。主線形加速器の長さ、つまり、トンネルの長さは想定する衝突エネルギーで決まる。ヒッグスファクトリーとして開始するILCは250 GeVで、電子側トンネルが7.4 km、陽電子側トンネルが7.2 kmとなる。電子側が長いのはアンジュレータ陽電子源でのガンマ線生成で失うエネルギーを補うためである。このような規模の主線形加速器を直線で配置した場合、地球表面の曲がり (ジオイド) との差が大きくなる。全てのクライオモジュールを鉛直方向に対して直線上に配置してしまうと、液体ヘリウムに浸されない高周波加速空洞が生じてしまう。従って、主線形加速器はジオイド面に沿って設置される。

主線形加速器トンネルの基本断面を Fig. 13 に示す。内空断面は、幅9.5 m、高さ5.5 mのかまぼこ形 (馬蹄形) が採用されている。トンネルの中央にはコンクリートの遮蔽壁を設ける。厚みは1.5 mで、超伝導加速空洞の暗電流が加速されて作る放射線を遮蔽する。

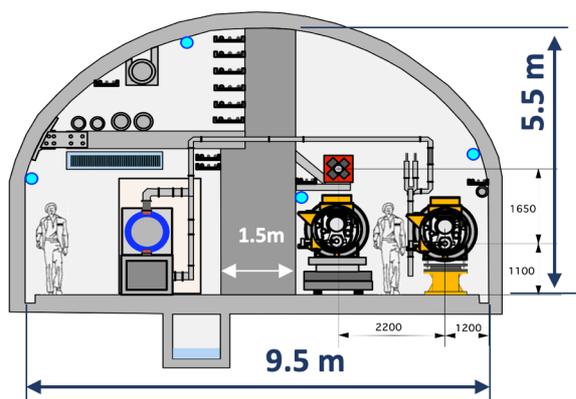


Fig. 13: 主線形加速器トンネル断面

トンネルの加速器側（加速器室）には、主線形加速器としてクライオモジュールが並び、遮蔽壁に近い方に機器搬入のための通路を確保する。その上方に RTML ビームラインが設置される。トンネルの電源側（電源室）には高周波発生装置（クライストロン及び電源）およびローカル変電設備がトンネルに沿って配置される。高周波発生装置の運転に必要な電力線・冷却水配管に加え、衝突点地上施設の中央変電所から ILC 各変電設備に配電するための 66 kV 配電ケーブルが敷設される (Fig. 14)。

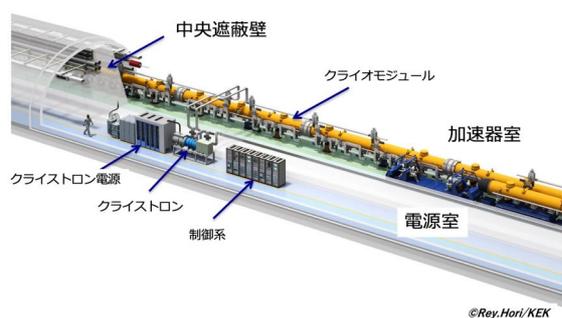


Fig. 14: 主線形加速器トンネル断面

#### 4.3.6. BDS（最終収束系）

主線形加速器で加速した電子（陽電子）ビームを衝突点に輸送するシステム（Beam Delivery System; BDS）で、ナノメートルの衝突ビームを

生成する最終収束系（Final Focus System）が含まれる。電子側 BDS トンネルにはアンジュレータ方式の陽電子源を組み込むため、陽電子側よりトンネルが長くなる。また、アンジュレータ方式では 125 GeV の電子ビームを使うことに起因するビーム軌道長の拘束条件があり、それを満たすために 583 m が追加されている。これらの結果、電子側 BDS のトンネルは 3.5 km、陽電子側 BDS は 2.4 km となっている。

既に電子（陽電子）源、RTML の節で述べているが、BDS トンネル内には、BDS ビームラインに加えて電子（陽電子）源、RTML も設置されるため、幅 12 m、高さ 6 m 程度のかまぼこ型トンネルが計画されている (Fig. 15)。

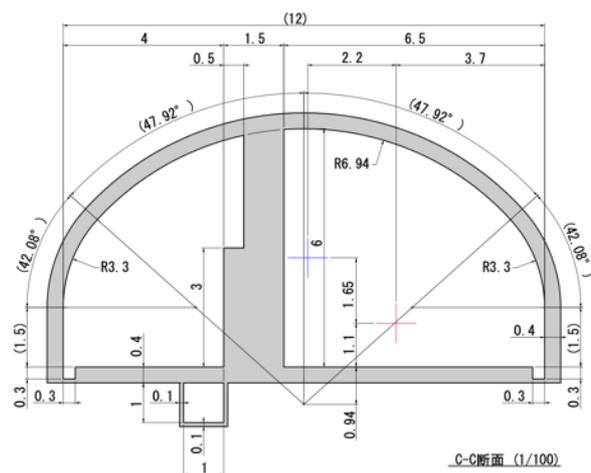


Fig. 15: BDS トンネル断面案

ナノメートルの電子（陽電子）ビームの生成とその衝突を安定に高い頻度で実現するためには、ビーム軌道を鉛直方向に曲げない（直進させる）ことが重要となる。このため、ジオイド面と平行に建設する主線形加速器トンネルとは異なり、BDS トンネルは鉛直方向に直線（レーザーストレート）として建設する。

#### 4.3.7. 衝突点・検出器ホール

2013年にILC立地評価会議が北上山地を最適と評価してから、北上山地の地形に合わせた検討が進み、衝突点直上に地上施設の設置が可能であり、TDR欧米案と同じ100m程度の立坑により検出器を分轄して搬入する案が国際設計チームのTDR改訂プロセスにより承認された。以前の案は幅11m、長さ1km以上の斜坑を使うもので、斜坑工事はもとより検出器を小さく分割して搬入・組立てるなど工期上の課題があった。立坑案では直径18m、長さ約100mの立坑を検出器ホールに直結、ここを通して分轄した検出器を4000tガントリークレーンを用いて降ろす計画である(Fig. 16)。同様の方法は、LHC加速器でのCMS検出器で実施された。CMSホールの工事期の様子をFig. 17に示す。

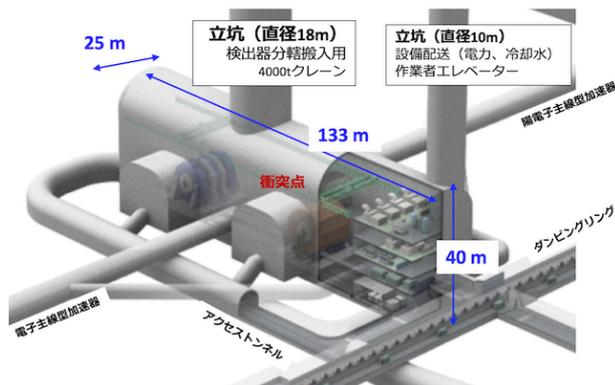


Fig. 16: 検出器ホール周辺のイメージ

ILCの検出器ホールでは、コンセプトの異なる2台の検出器(ILDとSiD)を収納可能な空間を確保する。これにホール内で必要となる施設設備の空間を加えると、検出器ホールの大きさとして、幅25m、長さ133m、高さ42mを見込む。施設設備の電力線や各種配管、アクセス用のエレベーター等、地上と地下を結ぶために直径10mの立坑を別途用意する。



立坑：直径20.5m&12m、深さ100m



検出器ホール: 地下100m, 幅27m, 高さ25m, 長さ53m

Fig. 17: LHC CMS 検出器ホール

#### 4.3.8. ビームダンプ

ILCには大小全部で15個のビームダンプが想定されている。それらは吸収するビームパワー(発生する放射線量)に応じた厚みのコンクリート遮蔽体で覆う必要がある。特にMW以上のビームダンプを設置する場合、大きな空洞を用意する必要がある。以下にビームダンプの種類を示す(Fig. 18)。

- ビーム調整用：60kW、9箇所
- ビーム調整用：400kW、2箇所
- 光子ダンプ：300kW、1箇所
- メインダンプ：17MW、2箇所
- Undulator 5+5Hz 運転：8MW、1箇所

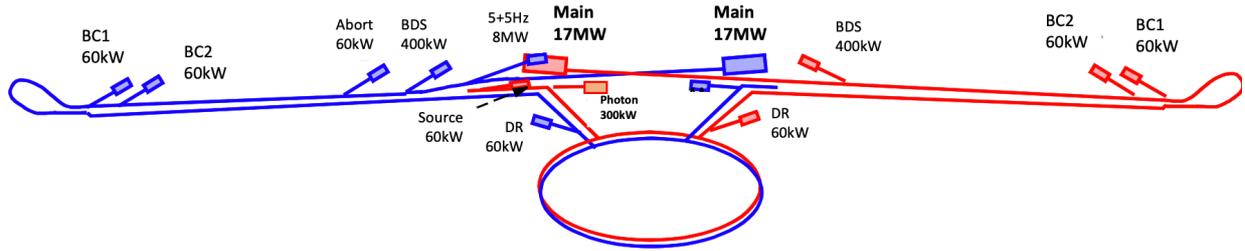


Fig. 18: ILC のビームダンプ

ビーム調整用ダンプ

電子源、陽電子源、ダンピングリング、主線形加速器の調整に使うビームダンプである。調整時はビーム出力を抑えて運用する。主線形加速器用が 400 kW、その他は 60 kW である。ビームダンプを収める空洞は加速器トンネルの側室として設置、そこまでの輸送ラインにあたる部分は加速器トンネルを拡幅する。側室はおよそ幅 20m、高さ 15m、奥行き 25m と見込んでいる (Fig. 19)。

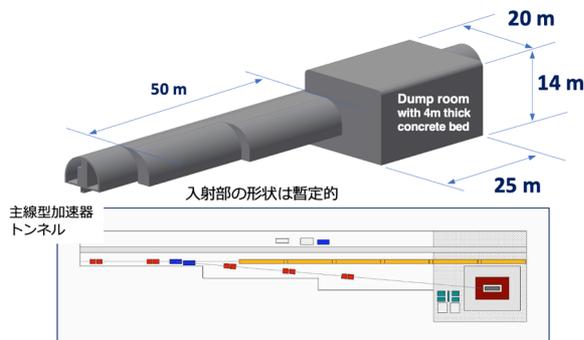


Fig. 19: ビーム調整用ダンプ空洞案

光子ダンプ

アンジュレータ方式の陽電子源で、陽電子標的を通過したガンマ線用のダンプである。ダンプ入射時のガンマ線密度を下げるため、標的からおよそ 2 km 飛ばす必要がある。その場所はダンピングリングからの斜めラインの交差部付近となり、比較的広い空間がある。その中に 1 m 程の遮蔽体で覆ったダンプを設置する。専用の空洞は必要ない。

メインダンプ

衝突実験に使われる電子（陽電子）ビームは、最終的に衝突点から 300 m 先に設置される主ビームダンプで吸収される。ビームダンプ本体は直径 2 m、長さ 11 m の水タンクになり、放射線を遮蔽するために 4 m 厚のボロン・コンクリートで覆う必要がある。この遮蔽体を含めた主ダンプ部を設置するために幅 17 m、高さ 20 m、長さ 40 m の空洞が必要となる (Fig. 20)。

ビームダンプに落とされる熱量は 14 MW になり、ビーム吸収体として水を循環して使う。この循環水の冷却システムをビームダンプの近くに設置する必要があるが、1 つの空洞に収めようとすると、不必要に大きく、特に上半分は無駄な空間になってしまう。AAA の協力でダンプ部の土木設計を進め、循環水システム側は小さな空洞を並べ、安全性を高めると共に工事の効率化を図ることとした (Fig. 21)。

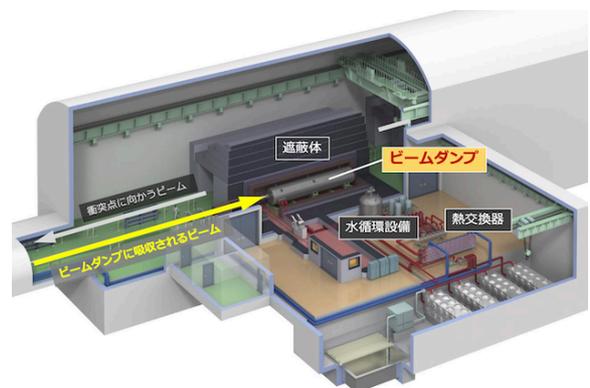


Fig. 20: メインダンプ施設のイメージ

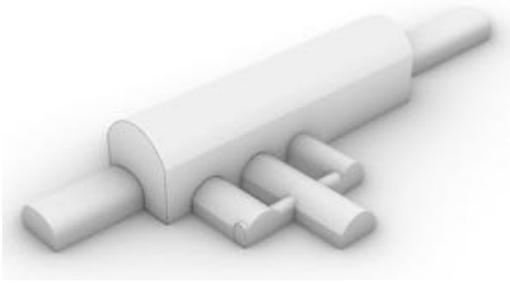


Fig. 21: メインダンプ空洞案

### Undulator 5+5Hz ダンプ

このビームダンプは特殊な運転モードである、アンジュレータ方式の陽電子源の 5+5Hz 運転で必要となる。要求仕様は 8 MW であり、メインダンプと同じシステム・地下空洞が必要となる。そのため、電子側 400 kW ダンプと兼ねる事を検討している。

#### 4.4. 地下へのアクセスおよび設備ホール

地下施設へのアクセスは、衝突点施設および主線型加速器トンネルに接続するアクセストンネルから行う。加速器支援設備（電気・機械・ヘリウム冷凍機など）の地上施設と地下施設の連結も、これらのルートを利用して実現される。支援設備を収める設備ホール（アクセスホール）は、アクセストンネルと加速器トンネルの連結部に設ける。

##### 4.4.1. 立坑

衝突点施設にはメインシャフト（直径 18 m）とユーティリティシャフト（直径 10 m）の 2 本の立坑を設ける（Fig. 22）。

メインシャフトは、主に検出器の搬入に使用する。立坑の地上部には可動式プラットフォームが取り付けられ、搬入時のみ開放される。検出器は地上のアセンブリホールで組立試験を行った後、分轄され、メインシャフトから地下に降ろされる。吊り荷重 4000 t のガントリークレーンが想定されている。

ユーティリティシャフトには、検出器ホールおよびダンピングリングの一部で使用する、電気・機械・ヘリウム冷凍機などのケーブルや配管を通し、それらの地上施設と地下施設を連結する。また、中央変電所で受けた電力を、地下トンネルを経由して、ILC 全体に供給するための特別高圧ケーブルも敷設される。ユーティリティシャフトには、検出器ホールにアクセスするためのエレベーターが設置される。

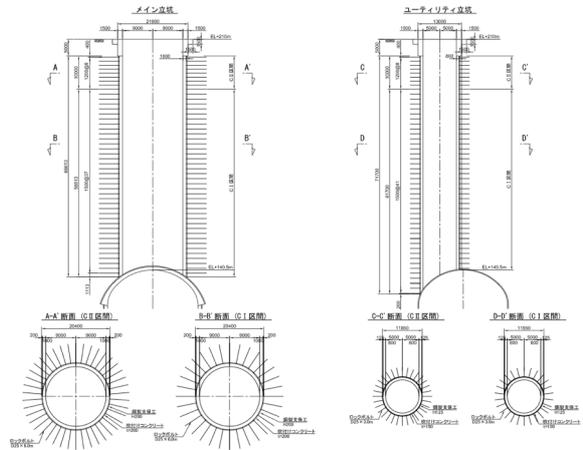


Fig. 22: 立坑断面

##### 4.4.2. アクセストンネル

主線型加速器において、液体ヘリウムを連続したクライオモジュールに送る場合、その輸送長は最大 2.5 km と設計されている。そのため、将来の主線型加速器延伸を見込みつつ、ヘリウム冷凍機設備をトンネルの両側 2.5 km を賄うように配置している。従って、地上施設からアクセストンネルを経由したアクセスホールの構成は、5 km 毎の配置となる（Fig. 23）。

アクセストンネル（Access Tunnel; AT）は、電子加速器側に 2 本（AT-8, AT-10）、陽電子側に 2 本（AT+8, AT+10）、中央のダンピングリング・検出器ホールに繋がる 1 本（AT-DR/DH）が計画されている。

アクセストンネルの斜度は、大型機器の搬入に支障が無い範囲でトンネル長が短くなるように、最

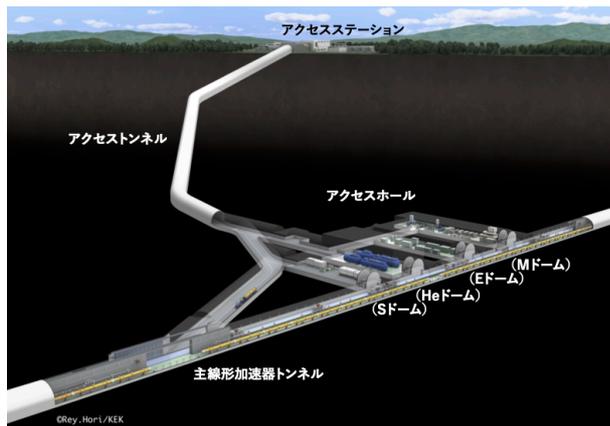


Fig. 23: アクセストンネル部の構成

大 10 %、平均 9 % の下り勾配と設定されている。トンネル長は、トンネル坑口とアクセスホールとの標高差でおおよそ見積もることができる。山間のためトンネル毎に坑口標高が変わるが、検討モデルでは平均 1 km 程度と想定している。工事車両の通行の利便性を考慮し、非常駐車帯および転換坑を概ね 300 m 間隔に設定することが検討されている。

アクセストンネルには、地上設備と地下設備ホールの機器を結ぶ、ケーブル、配管、ダクト等が敷設される。これに機器搬入のために必要な、幅 5 m、高さ 5.5 m の断面を確保する。これは液体ヘ

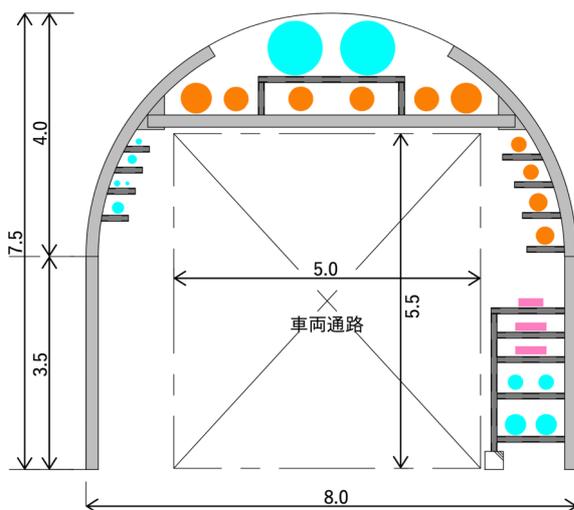


Fig. 24: アクセストンネル断面

リウム設備のコールドボックスが移動できる大きさである。配管等を含めた断面は、幅 8 m、高さ 7.5 m のかまぼこ型を計画している (Fig. 24)。なお、Fig. 10 に示した、検出器ホール・ダンピングリング接続のアクセストンネルについては、坑口から分岐点までの共通部 (延長 537 m) は工事車両の通行が輻輳するため、仕上がり断面幅を 10.0 m (非常駐車 帯部と同断面) に拡幅する。

#### 4.4.3. 設備ホール (アクセスホール)

アクセストンネルと加速器トンネルの接続部には、機械設備、変電設備、液体ヘリウム設備、その他のサービス設備を収める 4 つのドームで構成するアクセスホール (AH) を設ける (Fig. 25)。ホールの床面は水平とし、主線形加速器トンネルと同じ標高とする。各ドームの断面は、ヘリウム設備 (幅 20 m、高さ 12 m)、その他 (幅 14 m、高さ 12 m) を計画している。

アクセスホールへの立ち入りは、設備の保守点検のため、非常時を除いて加速器運転時でも可能とする。その先となる加速器トンネルへの入口は放射線安全対策の下で厳重に管理する。

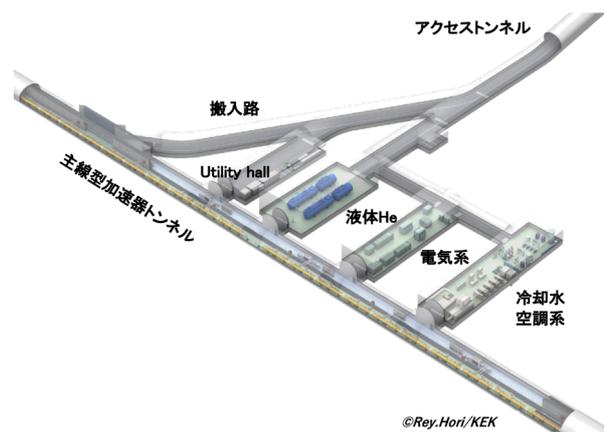


Fig. 25: アクセスホール構成

## 5. 地上施設

### 5.1. 衝突実験サイト

衝突点地上部の呼称は、特に決まっていないが、ここでは有識者会議の説明に合わせて“衝突実験サイト”とする。ここには、検出器の準備・組立を行うアセンブリホール、加速器および検出器の制御室、検出器ホールの地下設備と連結した冷却水・空調・ヘリウム設備、外部から商用電力を受け入れる中央変電設備および非常用自家発電設備などの施設が配置される。また、地下の検出器ホールへの立坑2本（直径 18 m と 10 m）が設置される。これらを含めた衝突実験サイトの面積は、約 100,000 m<sup>2</sup> になる (Fig. 26)。

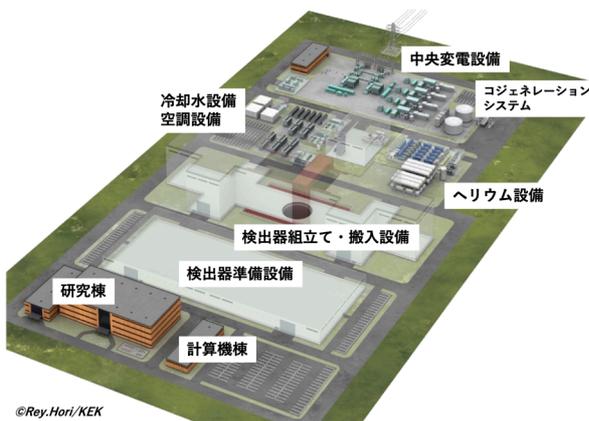


Fig. 26: 衝突実験サイト

### 5.2. アクセスステーション

アクセストンネル坑口部は、加速器トンネルへ至る進入路の拠点 (Access Station; AS) であり、地下設備と連結した、電気設備、機械設備 (冷却水・空調)、超伝導システム用ヘリウム設備、さらに地下アクセス用の制御棟などを設置する。アクセスステーションは、加速器に沿って約 5 km 毎に置かれ、全体で 5 箇所となる。各ステーションの面積は約 19,000 m<sup>2</sup> になる (Fig. 27)。

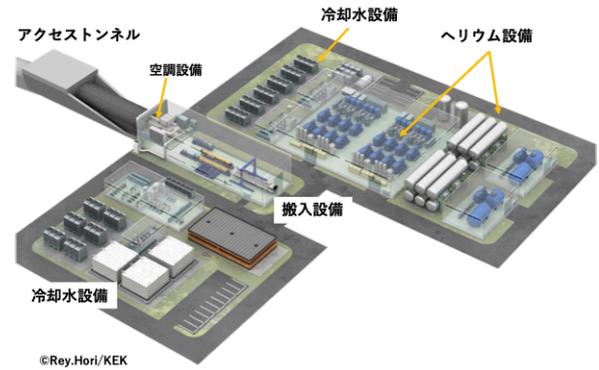


Fig. 27: アクセスステーション

### 5.3. 中央キャンパス

国際的に協働して建設する ILC の本部・研究棟を始め、データ解析の計算機センター、加速器および検出器を高度化する研究開発棟、広報・教育施設など、国際研究拠点としての機能が必要である。山間部に造成される衝突実験サイトは、ILC 加速器や検出器を稼働させるための施設を中心に構成されている。その広さには限りもあり、別途、“中央キャンパス”を設けることが想定されている。新幹線など主要駅からのアクセスが良い場所が望まれているが、より具体的に進めるには地元自治体との協議が必要であり、ILC 誘致に関する日本政府の前向きな意見表明などをもって始められるものと期待している。現在、KEK の事例を踏まえ、必要となる施設・設備の整理を進めている。

## 6. 設備関係

### 6.1. 電気設備

#### 6.1.1. ILC の電力負荷

ヒッグス粒子の詳細研究を行う ILC は 250 GeV で開始される。その総電力負荷は 111 MW となる。Table 1 は、TDR 後に 250 GeV に見直しが行われた後で再評価された電力負荷をまとめたものである [5]。将来の 500 GeV 化とルミ

Table 1: ILC の電力負荷 (Dec. 2019) [5]

	500 TDR	250-A	250-A' w/R&D	250-A Lx2	500@250	500 Lx2
Rep-Rate / Hz	5	5	5	5	10	5
Bunches / Pulse	1312	1312	1312	2625	2625	2625
Lumi / 10 <sup>34</sup>	1.8	1.35	1.35	2.7	5.4	3.6
Gradient / MV/m	31.5	31.5	35	31.5	14.7	31.5
Q <sub>0</sub> /1E10	1.0	1.0	1.6	1.0	1.0	1.0
ML E-gain / GeV	470	220	220	220	220	470
ML Power / MW	107.1	50.1	49.3	53.5	104.3	135.7
e- Src / MW	4.9	4.9	4.9	5.6	7.7	5.6
e+ Src / MW	9.3	9.3	9.3	10.2	12.4	10.2
DR / MW	14.2	14.2	14.2	22.2	31.0	22.2
RTML / MW	10.4	10.4	10.4	13.3	20.9	13.3
BDS / MW	12.4	9.3	9.3	9.3	9.3	12.4
Dumps / MW	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
IR / MW	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
Campus / MW	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
Gen. Margin/MW	5.1	3.3	3.2	4.0	5.6	6.3
Total	173	111	110	138	198	215

ノシティー増強運転 (Lx2) を想定した比較となっている。この積算では中央キャンパスの電力を 2.7 MW と想定し、更に総電力負荷の 3 % をマージンとして加えている。R&D とあるのは超伝導空洞の効率改善 R&D の効果を見込んだものである。これまでの国内での実績として、KEKB の前身である TRISTAN 加速器 (KEK) において、ピーク電力 96 MW の実績がある。ILC の開始時 (250 GeV) はその 1.2 倍、将来に 500 GeV ルミノシティー増強運転をする場合では約 2.2 倍となる。ただし、中央キャンパスが ILC 加速器サイトから離れた場所になれば、受電ルートは別に想定することになる。ILC 施設の電気の流れを Fig. 28 に示す。

### 6.1.2. 中央変電所

中央変電所にて電力会社からの 154 kV を受電する。受電環境は候補地の実情を踏まえて設定されるが、東北地域の案では、電力会社の受電点として 1 系統 (1 変電所) とし、バックアップ非常電源を ILC 中央変電所に備えることで対応としている。ここでは CERN に倣い独立な 2 受電点から取ることについて、現地の電力機関と協議を重ねたが、安全確実な系統連携が極めて難しくリスクを増大しかねないと判断になり、1 系統 + バックアップ非常電源の構成が提示された。中央変電所には 110 MVA のトランスを 2 基 (将来は 3 基) 設置し、154 kV を 66 kV に降圧する。これに停電時の非常用発電機を併設する。この非常用発電機として LNG コージェネレーションシステム (CGS) が提案されている。この CGS を

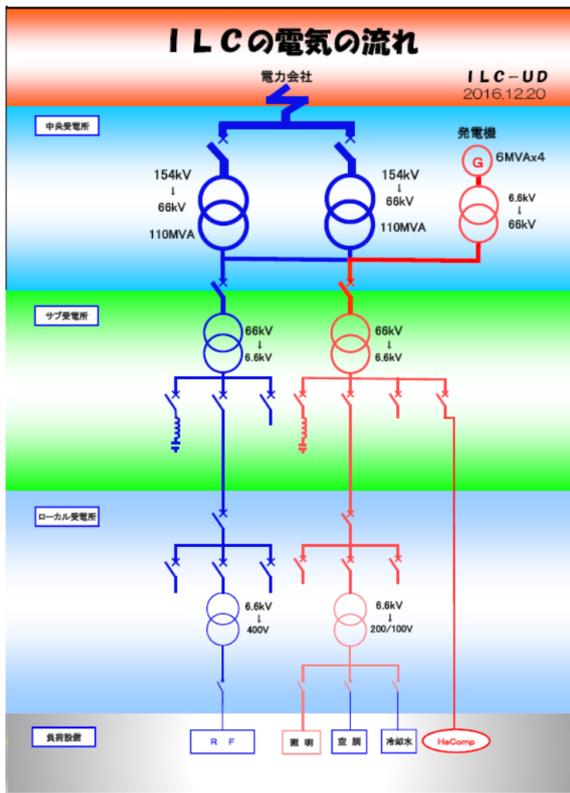


Fig. 28: ILC 施設の電気の流れ

常時運転とすることで、商用グリッド停電時に非常電源の起動に失敗する懸念を排除し、安全対応や装置維持に必要な電力供給を継続する。例えば、超伝導設備からヘリウムを回収するシステム、地下湧水の排水システムがこれに対応する。

### 6.1.3. サブ変電所

地下のアクセスホール（5 箇所）にはサブ変電所が設置される。中央変電所で降圧された 66 kV は、ユーティリティー立坑から地下に入り、そこから加速器トンネル（主に電源側）を經由して各アクセスホール（AH）のサブ変電所（SH）に送られる。将来、500 GeV に延伸した場合も同様であり、66 kV 特高配線ルートは 250 GeV 建設時に確保しておく (Fig. 29)。

サブ変電所では、受電した 66 kV を 6.6 kV に降圧する。これを地上アクセスステーション (AS) や加速器トンネルに設置される複数のローカル変電所に送る。サブ変電所ごとに賄う負荷電力が異なるが、1 箇所あたりおよそ 20~30 MVA になる。

### 6.1.4. ローカル変電所

ローカル変電所では、サブ変電所から送られてきた 6.6 kV を、3φ 400/200V、1φ 200/100V に降圧し、加速器および冷却水・空調・ヘリウムなどの設備に供給する。

電子側および陽電子側の主線型加速器トンネルには、サブ変電所が 2 箇所ずつあり、それぞれが加速器に沿って配置される約 10 箇所のローカル変電所、更に地上施設のローカル変電所を賄っている。これらのローカル変電所の負荷は、およそ 2~3 MVA である。

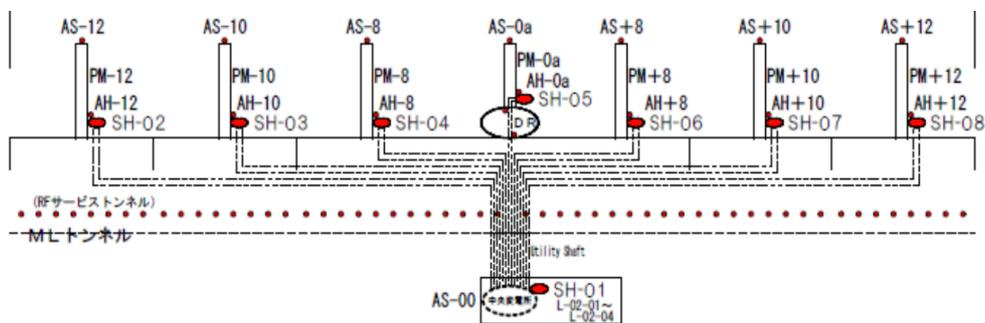


Fig. 29: 特高ケーブル地下配線

ダンピングリングでは、地下 2 箇所の直線部と地上のアクセスステーションにローカル変電所があり、それぞれ 5~6 MVA となる。

その他、衝突実験サイトについては、検出器の負荷電力も含めて約 8 MVA と見積もっている。なお、高調波フィルターは加速器装置毎に設置することを想定している。

### 6.1.5. 非常電源設備

中央変電所での非常用発電機は必須であり、緊急時の信頼性が確保されていなければならない。そのため複数台の小型発電機を常備配置することや、LNG コージェネ (CGS) の常時運転でバックアップすることが不可欠となる。これらの詳細設計は建設地の状況がより明確になった時点で実施するが、非常時の復旧手順は、7.4 節に示すように、蓄電池と非常用発電機を組み合わせたものを想定している。

## 6.2. 機械設備

### 6.2.1. ヘリウム設備

超伝導高周波加速空洞に用いられる液体ヘリウムを生成する設備は、地下のアクセスホールと地上のアクセスステーションに分散して設置され

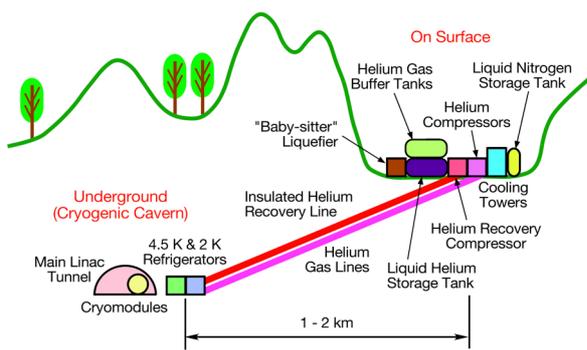


Fig. 30: ヘリウム設備の配置

る (Fig. 30)。地上には、ヘリウムタンク、圧縮機、冷却塔などの大型装置を配置し、地下には 4.5 K

および 2 K のヘリウム冷凍機を配置する。地上と地下は、ヘリウムガスのラインで接続され、地下では 4.5 K 冷凍機から 2 K 冷凍機、2 K トランスファーラインでクライオモジュールに繋がり、最終的に超伝導高周波加速空洞が 2 K 液体ヘリウムで冷却される。

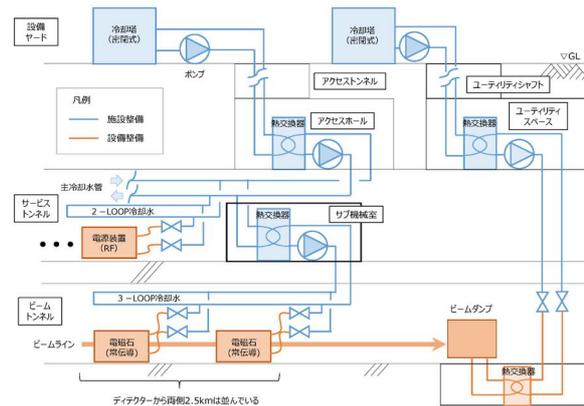


Fig. 31: 冷却水システム例

### 6.2.2. 冷却水設備

加速器装置を動かすための各種電源や、常伝導電磁石などビームライン上で熱を発生する機器の熱除去のために冷却水を用いる。Fig. 31 に冷却水システム構成例を示す。地上に冷却塔を設置し、地下のアクセスホールの熱交換器と接続する。地上とアクセスホールの高低差は 100 m を越える場合も想定されており、その圧力は 1 MPa を越えるため、熱交換器を入れて切り分けるなどの対応が必要となる。さらに負荷側への接続については、装置の要求仕様によって 2-LOOP または 3-LOOP 方式を選択する。厳しい温度制御を要求するものや放射線管理上区切る必要があるものは 3-LOOP 方式とする。

なお、主線型加速器など超伝導装置自体は、液体ヘリウムで冷却されており、クライオモジュールからの発熱もないが、高周波源などの電源の冷却に冷却水が使われる。

冷却水配管はアクセストンネルや加速器トンネル（電源側）を通る。その配管径は、限られたトンネル断面内に収まるよう最適化されなければならない。そのためには、冷却水温度を可能な範囲で高く設定し、冷却水行き還り温度差（ $\Delta t$ ）もできる範囲で大きくすることが望ましい。例えば、 $\Delta t$ を $30^{\circ}\text{C}$ とすることで、配管径やポンプ能力の低減を図ることが設計されている。

冷却塔は密閉式水冷方式を想定している。開放式水冷方式は大きさ、騒音、価格の点で優れているが、外気と直接接触により循環水を冷却させるため、外気や周囲の環境により循環水の水質が悪くなり、負荷側に影響する可能性がある。また、仮に補給水を地下湧水で賄う場合、工業用水や上水に比べてミネラル成分が多く、スケール対策（オーバーブロー、薬品、補給水処理）を施しても付着は免れない。プレート式熱交換器の内部の付着は致命的で閉塞に至ると、分解清掃や交換が必要となる。一方、密閉式水冷冷却塔においては、スケールは外部付着するので、目視点検が可能で対処が容易である。これらを踏まえ、初期費用、設置スペースは共に大きくなるが、密閉式水冷冷却塔を採用することとしている。

### 6.2.3. 給水設備

冷却塔の散水用途等で使用する工業用水必要量は水冷冷却塔において蒸発する量とブロー水量の合計となるが、それは放熱すべき熱エネルギーや冷却塔の設置されている地域の気候（温度や湿度）や ILC のビーム運転時期にもよる。1日当たりの最大使用量は 9,000 トンを想定している。ILC トンネルにおける恒常的な地下湧水を工業用水に利活用することとするが、湧水量の確認は実際にトンネル掘削を待たねばならない。鉄道技術研究所（現 公益財団法人 鉄道総合技術研究所）で開発された「水文地質学的な手法」に基づき、地形、トンネルルートおよび湧水比流量（河川の湧水流量を流域面積で除したもの）から予測した全路線の平均湧水量は、 $0.8 \text{ トン}/\text{min}/\text{km}$  で

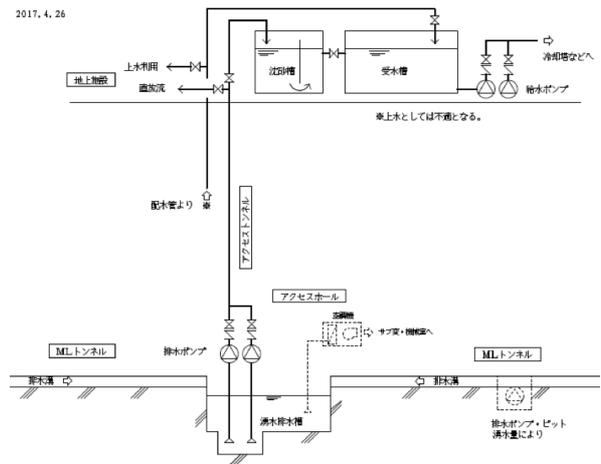


Fig. 32: 地下湧水の利用

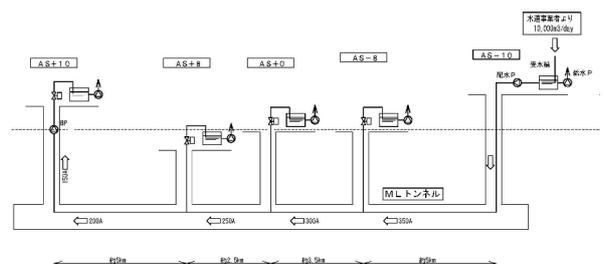


Fig. 33: 給水配水計画

ある。これは日量 23,000 トンに相当し、全ての工業用水を賄うことができる (Fig. 32)。しかしながら北上候補サイトの場合、地質が極めて緻密な花崗岩地帯であること、現地の年間降雨量が少ないこと、また近隣の道路トンネル工事の経験では湧水が少ないことなどから、この平均値より大幅に少ないことを想定している。そのため、地域で取水可能な複数箇所の地下水源から、最寄りのアクセスステーションまで送水することが検討されている (Fig. 33)。

### 6.2.4. 排水設備

排水は大きく分けて RI 管理排水、地下湧水排水、生活排水の 3 種類の排水がある。RI 管理排水は、ビームトンネル内で生じた排水で、放射化の恐れ

があるものとして検査を行い、安全基準に従って処理する。

地下湧水排水は、4.2.3 節の湧水対策に記述したように、トンネル外周を通り、床下の湧水導水路を経由してアクセスホールに集め、アクセストンネルから地上に揚水する。また、冷却塔の散水用に利用することを検討している (Fig. 32)。工事中に湧水量を見極めてシステムを決定する。

生活排水は言うまでも無く、地上施設での生活排水、地下施設でのトイレや手洗いの排水である。

### 6.2.5. 換気設備

ビーム運転中にビームがぶつかる場所、特にビームダンプや陽電子標的、では 2 次粒子による放射化がおこる。空気の密度は低く生成される放射能の量は少ないが、換気は空気中の放射能濃度を監視しながら行い、必要に応じて加速器トンネル内を内気循環させる。各区域境界 (ビームダンプ室、加速器トンネル、アクセストンネル坑口など) に排気フィルターを設置し、放射化の可能性のある塵埃を捕集、放射性物質を外に漏れ出さないようにする (Fig. 34)。

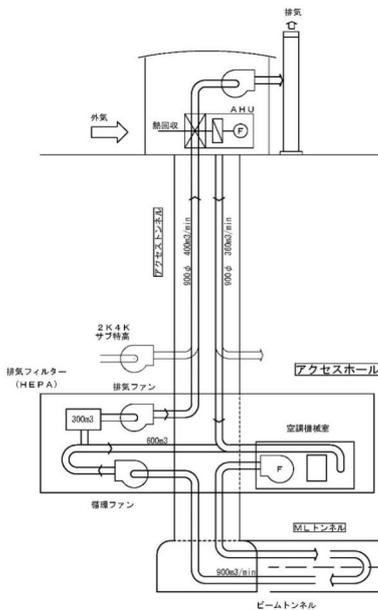


Fig. 34: 換気システム概要

換気の風速は、0.25~0.5 m/s 程度を想定している。これは、人の平均歩行速度が約 1.1 m/s であり、火災があった場合でも、煙に追いつかれないことを想定している。

### 6.2.6. 空調設備

地下に建設される ILC 加速器トンネルの周辺岩盤の温度は非常に安定であることが想定される。例えば、北上候補地では地下トンネル周辺の地山温度は 13.4 °C である。空調の設定温度は 18°C を想定している。トンネル内電源の熱は、大部分を冷却水で取り去るが、一部は空気中に放出され、電源室を温める。これを電源側トンネルに沿って配置するファンコイルユニットで除熱する計画である。トンネル内で達成される温度は加速器運転により場所によってばらつくことになるが、安定であれば問題にはならない。

## 7. 安全対策・環境影響評価

### 7.1. 放射線

ビーム運転中でも、検出器ホールとアクセスホールには立ち入る事ができるとしている。これらは検出器の運転や設備点検のために必要であり、放射線防護の基準を満たすように施設設計を行う。強い放射化が想定される場所では、放射線量に応じた十分な遮蔽体を設置するための空間が必要である。特に陽電子標的やビームダンプでは遮蔽体の厚みは 2~5m になり、大きな空洞が必要になる。これらの場所への立ち入りは、さらに厳しく管理される。なお、放射線管理区域境界をどこに設定するか、地下への入口か、加速器トンネルの入口かは、安全管理指針を策定する際に決めることになる。

### 7.2. 地震

ILC の設備・施設は、震度 7 に耐える様に設計することとしている。地下施設の耐震性能については、Table. 1 にあるように「ILC 土木工事に関するガイドライン」(土木学会) に基本方針が示されている。ここで L1, L2 地震動は以下の様に定義されている。

- L1 地震動：従来の耐震設計でも想定されていた地震外力にあたり、構造物の使用期間中に数回発生すると考えられる強さの地震を示す。
- L2 地震動：近傍で発生する大規模なプレート境界地震（東北地方太平洋沖地震など）に加えて、兵庫県南部地震時における内陸直下型地震による地震動も対象とした発生確率の極めて低い地震動を示す。

Table 1: 必要とされる耐震性能

土木学会提案 / ILC土木工事に関するガイドライン

対象	地震動	性能レベル	適用および備考
加速器トンネル	L1地震動	性能レベル I 無補修で機能維持	・避難路となるアクセストンネルが崩壊しない。 ・クライオモジュール等の基幹装置に損傷を与える剥落等を防止
	L2地震動	性能レベル II 早期に機能が回復	
実験ホール	L1地震動	性能レベル I 無補修で機能維持	・実験ホール空洞天井部岩塊の剥落による人命と検出器の防護 ・岩盤変位による実験機能・性能への致命的な影響防止
	L2地震動	性能レベル II 早期に機能が回復	

山岳トンネル覆工に要求される耐震性能 / 土木学会トンネル標準示方書

耐震性能	定義	適用および備考
性能レベル I	地震後にも補修せずに機能を維持でき、かつ過大な変形を生じない	地震後の構造物の損傷が十分に小さい範囲にとどまり、かつ地震後に実験機能に影響を及ぼすような変位を生じない
性能レベル II	地震後に補修を必要とするが、早期に機能を回復できる	補修に困難が伴う構造物の残留変形や部材の損傷が許容限度内におさまる
性能レベル III	地震によって構造物全体系が崩壊しない	修復不可能となったとしても、土圧等によって崩壊することはない

地下における地震振幅は、地上に比べ 1/2~1/4 になることがわかっており、さらに地震に対する尤度が高まる。例えば、(独) 防災科学技術研究所の強震度観測網 (KIK-net) の地震計データでは、東日本大震災での地下 100 m の測定は、地表に比べて 0.13~0.29 倍であった。Fig. 35 に幾つかの地点での測定データを示す。同じ深度では花崗岩類の方が加速度の減衰が大きいのが分かる。

なお、北上山地の中腹に国立天文台江刺地球潮汐観測施設がある。延長 250 m のトンネルに石英ガラス製の石英管ひずみ計が設置されているが、東日本大震災でも全く損傷を受けなかった。地震に対する影響は地表付近が大きい。アクセストンネル坑口付近の土木構造は、山岳道路トンネルなどの経験から大きな問題は無いと考えるが、地下と地上を繋ぐ設備配管には十分な注意が必要である。

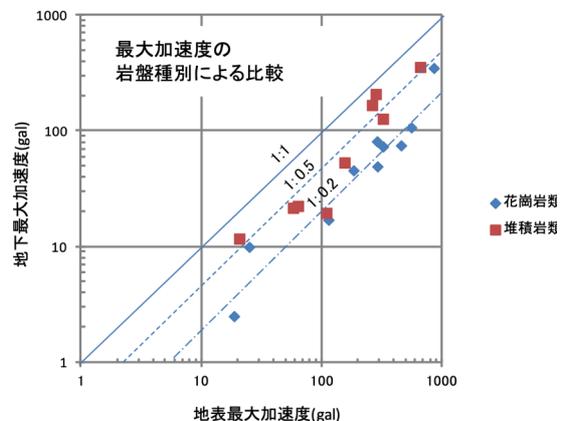
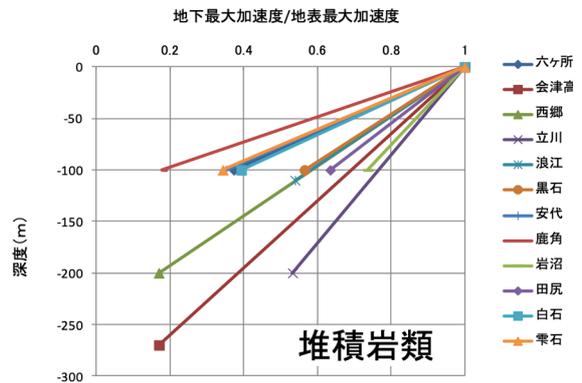
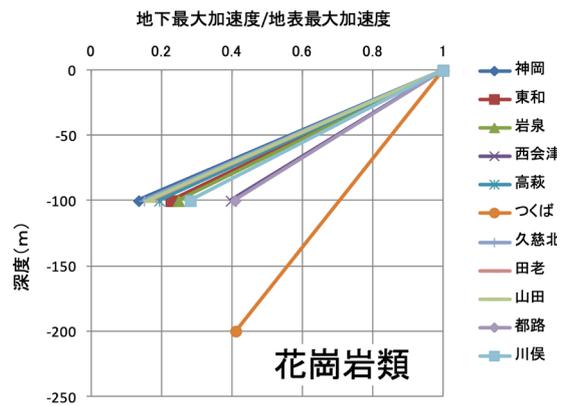


Fig. 35: 東日本大震災で観測された最大加速度と地盤

### 7.3. 火災

地下からの避難は、検出器ホールの立坑や 5 km 毎に設けられるアクセストンネルが最終的な経路となる。その地下起点までの到達経路として 2 方向を確保することを基本とする。例えば主線型

加速器トンネルでは中央遮蔽壁で分けられた2つの“トンネル”がこの役目を担う。万が一、片側のトンネルで火災が発生した場合、反対側のトンネルが避難路となる。遮蔽壁には約 400 m 毎に両トンネルを繋ぐドアを設ける。

#### 7.4. 停電

停電に対しては、作業者の安全、機器の保全を優先した対応を行う。避難のための照明・通信、加速器のモニター、地下水排水、さらに液体ヘリウムの回収などの電力が必要である。ILC では停電から 30 秒程度は蓄電池がカバーし、その後、非常用発電機に切り替える計画である。発電機は備蓄燃料のある限り運転可能ではあるが、東日本大震災における経験から少なくとも 3 日程度の備蓄が必要とされている。東北 ILC 推進準備室における検討では、供給電力の 10 %程度を、液化天然ガスを用いたコージェネレーションで常時賄い、緊急時に立ち上がらないなどの懸念を避けることが提案されている。

#### 7.5. 環境影響評価の指針

ILC 建設において、地上と地下に大規模な工事を行うため、環境アセスメントは極めて重要である。2013 - 2014 年には、候補地と想定する北上山地における環境アセスメントに向けた予備的調査を岩手県が実施している。

KEK は、2019 年から 2020 年度にかけて、環境アセスメントの外部専門家による「ILC 環境アセスメント評価アドバイザリーボード」を ILC 推進準備室の下に立ち上げ、計画段階及び実施段階の環境アセスメントの実施方法に関する議論をまとめた。そこでは、準備研究所期間の前半に戦略的環境アセスメントを実施し、後半で実施段階アセスメントを行い、ILC 建設着工前の環境アセスメントを完了することが提案されている [6]。

今後、関係者、関係団体との交流や協働を十分に図りながら ILC 施設の設計を進め、環境アセスメントのプロセスを円滑かつ適切に進めていくことが、ILC 計画の推進を図る上で極めて重要となる。

#### 参考文献

- [1] ILC 戦略会議：ILC 立地評価会議の結果について、<http://ilc-str.jp/topics/2013/08231145/>
- [2] 一般社団法人・先端加速器科学技術推進協議会 <https://aaa-sentan.org>
- [3] 東北 ILC 施設計画 [https://tipdc.org/assets/uploads/2020/12/Tohoku\\_ILC\\_shisetsu.pdf](https://tipdc.org/assets/uploads/2020/12/Tohoku_ILC_shisetsu.pdf)
- [4] 土木学会、国際リニアコライダー (ILC) 施設の土木工事に関するガイドライン、[http://www.geoeng.jp/2012R3\\_ILC.pdf](http://www.geoeng.jp/2012R3_ILC.pdf)
- [5] Updated power estimate for ILC-250, Dec.2019, <https://edmsdirect.desy.de/item/D00000001169675>
- [6] ILC 環境アセスメント評価アドバイザリーボード提言, [https://www2.kek.jp/ilc/ilc-tsushin/2021/02/08/strategic\\_environment\\_assessment\\_summary/](https://www2.kek.jp/ilc/ilc-tsushin/2021/02/08/strategic_environment_assessment_summary/)