

ILC 施設

1. はじめに

国際リニアコライダー (ILC) の施設とサイトについてお話する。最初に、リニアコライダー施設検討・設計の経過に簡単に触れておこう。

1.1. Technology Choice 「技術選択」まで

リニアコライダー計画は最初ドイツ、アメリカ、日本等において個別に提案されてきた。

日本における検討は 1980 年代後半から開始され、1997 年には JLC Design Study [1] としてまとめられている。この中でリニアコライダー施設については Chapter 17 Accelerator Tunnel and Facilities に、建設の重要な課題であるトンネル建設技術を中心に記述されている。

2000 年代に入り、それまで各国で個別に検討されてきたリニアコライダー計画を国際プロジェクトとして推進するため主加速器の建設技術を 1 本化することになった。DESY が提案していた超伝導加速空洞方式か日本やアメリカが提案していた常伝導加速空洞方式のどちらを採用するかである。

この技術選択に先駆けて、日本のリニアコライダー計画は、ACFA、JHEPC、KEK の共同で、2003 年 GLC Project [2] として発表された。この中の Chapter 5 Conventional Facilities、Chapter 6 Site、Chapter 7 Cost、7.3 Conventional Facilities は、JLC での検討や、サイトスタディグループ報告書[3]にまとめられた検討を出発点に、2001～2003 年度に加速器研究施設で行われたリニアコライダー施設検討会の結果をまとめたものである。ここでは、トンネルなどの地下施設のほか、地上施設、電気、冷却、空調設備の概要やコスト、建設スケジュールに至る総合的な検討が加えられた。

1.2. RDR

2004 年の技術選択会議は主加速器に超伝導加速技術を採用することを結論した。

この技術選択により、ILC の国際設計チーム Global Design Effort (GDE) が 2005 年に結成され、ILC の基本設計書 Reference Design Report (RDR) [4] が 2007 年に発表された。技術選択が RDR における施設設計に与えた第一の影響は、サイトに必要な全長が 30 km から 50 km になったことであった。

施設設計についてはアジア、アメリカ、ヨーロッパ 3 地域から実際のサイト (Sample Site) を抽出し設計を行った。その目的はそれぞれの地域に少なくとも 1 つ以上 ILC の建設可能なサイトが実存することを証明することであった。3 地域のサンプルサイトは結果として、いずれも 100m 以下の深度地下に加速器施設を建設することになった。ただ地表に関しては、欧米はほぼ平地なのに対して、アジア-日本のサイトは険しくはないが山岳であった。

地下施設の中で主要施設である主加速器トンネルについては、超伝導加速器本体を設置する内径 4.5 m の「ビームトンネル」とクライストロンや電源を設置する同じく内径 4.5 m の「サービストンネル」の 2 本のトンネルを、中心間距離約 11 m の間隔で TBM (Tunnel Boring Machine) 工法で掘削することとした。

これらの条件を想定して設計を行った結果、GDE は RDR で 3 つのどの地域においても大差ないコストとスケジュールで ILC の建設が可能であることを示した。

1.3. TDR

2008 年以降 GDE は更なる検討によるコスト削減の可能性をさぐり、2013 年 Technical Design Report (TDR) [5] として発表した。

ILC 施設に関する第一の課題としては、主加速器トンネルを 1 本、即ち「シングルトンネル」にすることであった。元々 RDR でクライストロンや電源を加速器本体と別のトンネルに配したのは、現在稼働中の多くのリニアックと同様に、運転中においてもクライストロンの交換や電源などの保守を可能にして、加速器の稼働率をあげるためであった。

「シングルトンネル」の可能性を追求するため、欧米はクライストロンとその電源を 2.5 km 分ずつまとめて地上に設置し、地上から地下の加速空洞に供給する Klystron Cluster System (KCS)方式を提案した。

一方、アジアー日本のサイトは山岳であり、地下のトンネルから地上施設までの距離が長くなることが予想されるため、欧米案を受け入れることができず、RDR の設計と同様に、クライストロンを分散して配置する Distributed Klystron System (DKS)方式を踏襲した。ただし、RDR のように独立した 2 本のトンネルではなく、1 本のトンネルの真ん中にシールド壁を設けた「2 ルームシングルトンネル」案を採用することにした。また、トンネル掘削工法は TBM 工法ではなく、断面を自由に設計でき加速器の収納効率のよい New Austrian Tunneling Method (NATM)工法を採用することにした。

このほか、TDR ではダンピングリング周長が 6 km から約半分の 3 km になる変更があった。

以下の各章では、施設設計条件となる加速器レイアウトや諸元、地下施設と土木技術、地上施設、主要設備、建設コストとスケジュールなどについて述べる。

2. 施設設計条件

施設設計に必要な加速器レイアウト、装置の使用電力と熱負荷等について概要を述べる。

2.1. 加速器設計の一環としての施設設計

加速器施設を設計するためには以下のような情報が必要である。

- ビームトンネルを設計するためには加速器本体及びビームラインコンポーネントのサイズに関する情報が必要である。
- サービストンネルを設計するためには加速器の各種電源や計測、制御機器のサイズに関する情報が必要である。
- また、電気室、冷却、空調などの機械室およびその設備の設計のためには、加速器の電力負荷及び熱負荷に関する情報が必要になる。

加速器の設計段階でも加速器担当者と施設担当者の情報交換をしっかりと行って、施設設計を加速器設計の一環として進めることが重要である。筆者は 2005 年の ILC 設計チーム結成以来、米国フェルミ国立加速器研究所 (FNAL)、スタンフォード加速器センター (SLAC)、スイスの欧州合同加速器研究所 (CERN) 施設部のメンバーとともに ILC 施設の設計に加わった。これらの研究所でも近年は施設スタッフが減りつつあるが、直近のプロジェクトだけでなく ILC などの将来計画について加速器エンジニアと一体になって検討していることが印象的であった。

以下の項では、ILC 加速器を施設設計に必要な情報に噛み砕いて説明したい。

2.2. ILC の全体レイアウトとサブシステム

ILC は電子 (e^-) と陽電子 (e^+) を衝突点 (IR) で衝突させる衝突型加速器である。ILC は電子線形加速器 (e^- Linac)、陽電子線形加速器 (e^+ Linac)、および、実験ホールの 3 つの部分から成る。 e^- Linac と e^+ Linac は 14 mrad の角度で交差しており、全長は約 30.5 km である。加速器は以下のサブシステムで構成される。

- 電子源 (e^- Source)
- 陽電子源 (e^+ Source)
- ダンピングリング (DR)
- RTML
- 主加速器 (ML)
- BDS

e^-/e^+ ビームはそれぞれ電子・陽電子源 (e^-/e^+ Source) から以上の順番で加速・輸送され BDS まで導かれ衝突する。以上のサブシステムのうち、電子・陽電子源、ダンピングリング、BDS は中央エリアに配置される。 e^-/e^+ ビームは RTML によってそれぞれ ILC の両端に輸送され、主加速器によって加速される。

2.3. 電子源のサブシステム

電子源は e^- BDS トンネル内に BDS コンポーネントと一緒に配置される。電子源は上流から、

- レーザー駆動直流電子銃
- 常伝導前段加速器
- 超伝導 5 GeV 加速器
- DR へのビームライン (LTR)

の4つのサブシステムによって構成される。電子源は BDS の一部とダンピングリングへの入射路の全長約 680 m を占めるに過ぎない。

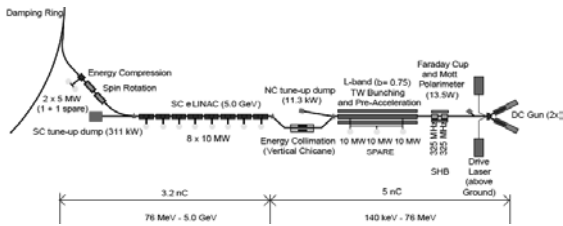


Fig. 2.3 電子源のレイアウト

2.3.1. レーザー駆動 200 kV 直流電子銃

200 kV 直流電子銃を2組設置する。

調整用のビームダンプを兼ねた 13.5 W のファラデーカップ（電流計）が設置される。

欧米のデザインではレーザーームは地上に設置する計画であるが、日本サイトでは電子銃に隣接した地下空洞内のサービストンネルに設置する。電子銃用高圧電源等もサービストンネルに設置される。

2.3.2. 常伝導 76 MeV Lバンド前段加速器

電子銃ビームのバンチ長を圧縮する部分である。

325 MHz 定在波型空洞の SHB (sub-harmonic buncher) 2 台とバンチャー機能を持つ 1.3 GHz 進行波型加速空洞で構成される。SHB でバンチ幅を 1 ns から 200 ps に、進行波型 5 セル空洞で 200 ps から 20 ps にし、2 台の 50 セル進行波型加速空洞で 76 MeV まで加速する。

前段加速器の最後にはエネルギー分析・コリメーション用偏向電磁石システムと 11.3 kW の調整用ビームダンプが設置される。

SHB の捕獲効率は 92% である。エネルギーコリメーションにより電子銃電流の 2/3 がダンピングリングに入射される。

サービストンネルには 325 MHz の高周波電源 2+1 台、1.3 GHz, 10MW クライストロン 2+1 台

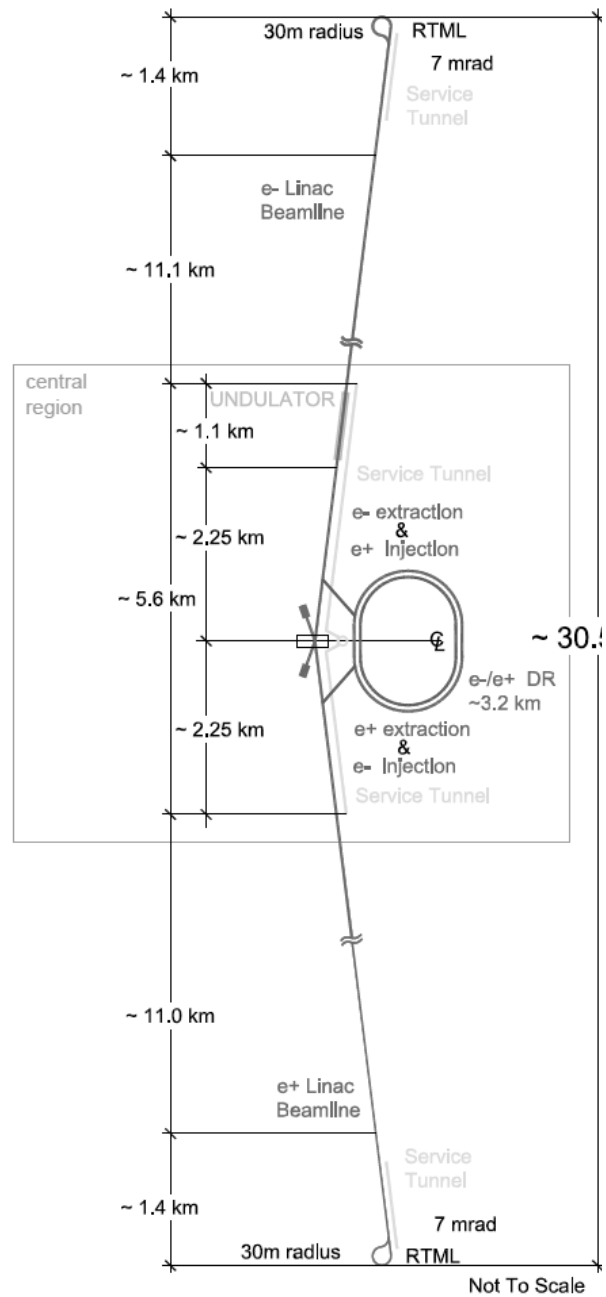


Fig. 2.2 ILC 加速器の全体レイアウト

とその電源、集束ソレノイド、偏向電磁石用電源等が設置される。

2.3.3. 超伝導 5 GeV ブースター

ダンピングリングのエネルギーまで加速する部分である。3 台の予備を含む 24 台の標準クライオモジュールから構成される。4 極電磁石は最初の 8 台とその後は 1 台おきのクライオモジュールに含まれる。

8台のクライストロンと電源等がサービストンネルに設置される。

2.3.4. 5 GeV ビームダンプ

熱負荷 311 kW。電子源の調整時だけ熱負荷を発生し、冷却が必要となる。

ビーム調整用のダンプは、電子源の他にも、こ陽電子源、ダンピングリング、RTML、主加速器など上流から下流にビームを調整していく各ステージに設置される。

2.3.5. LTR

5 GeV ブースター加速器からダンピングリングまでのビーム輸送系 LTR (Linac to Damping Ring)。偏向電磁石、4極電磁石、スピン回転用の1台の 8.3 m 長超伝導ソレノイド、エネルギー圧縮用の1台の 12.3 m 長超伝導加速モジュール等からなる。

2.4. 陽電子源のサブシステム

陽電子源は電子加速器に続く約 1 km のアンジュレータ/ドッグレグトンネルとその下流の BDS トンネル内に設置される。陽電子源の構成及び機能は電子源に比べてより複雑である。陽電子源は上流から、

- アンジュレータ
- 陽電子標的
- 陽電子捕獲部
- 常伝導前段加速器
- 超伝導 5 GeV 加速器
- LTR

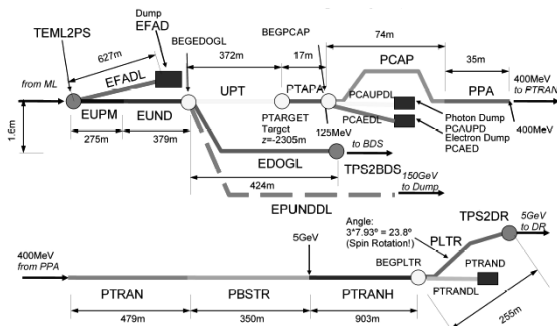


Fig. 2.4 陽電子源のビームライン

の6つのサブシステムから構成される。

このほか、陽電子加速器を電子加速器と独立して調整するための補助的陽電子源 KAS (Keep Alive Source)、ビームダンプ等が設置される。

2.4.1. 超伝導ヘリカルアンジュレータ

陽電子ビームは金属にガンマ線を当てたとき「電子対生成」現象によって発生する電子、陽電子対のうち陽電子だけを取り出して加速することによって得られる。このガンマ線は、「ヘリカルアンジュレータ」と呼ばれる超伝導ソレノイドコイルの中を、高エネルギーの電子ビームを回転させながら通過させることによって発生させる。

電子ビームには衝突に用いる電子ビームを利用する。ガンマ線発生による損失エネルギーは小さく、その分大目に加速しておけば、衝突実験用のビームとして用いても問題ない。

ビームラインは EUPM、EUND、EDOGL の3つのビームラインで構成される。

EUPM (Electron Undulator Protection and Matching)

電子加速器終端から 275 m のビームライン。電子加速器で加速されたビームをアンジュレータに導く集束電磁石、アンジュレータを保護するビームコリメーションシステム等が設置される。

EUND (Electron Undulator Section)

379 m。4.2 K の 4 m 長クライオモジュール (アンジュレータ長 3.5 m) 42 台に 0.4-0.8 T のヘリカルアンジュレータが設置される。集束は 12 m 毎の 4 極電磁石で行われる。

ここには、補助的陽電子源 KAS として約 40 m 長の S バンド (2600 MHz) 常伝導 500 MeV 加速器が設置される。KAS は1台の光陰極 RF 電子銃、3 m 加速管 8 本、50 MW クライストロン及び電源、RF パルス圧縮器 SLED からなる RF ステーション 4 台から構成される。

また、電子加速器終端から下流 627 m の間には電子加速器調整用のビームダンプが設置される。

EDOGL (Electron Dogleg)

陽電子生成用のガンマ線を出し終えた電子ビームは陽電子ビームラインと分岐して BDS に導かれ衝突実験に用いられる。

但し、衝突実験エネルギーが 250 GeV、即ち電子ビームエネルギーが 125 GeV 以下のときは、陽電子生成効率が著しく低下するので、e-Linac のみ 10 Hz 運転を行って、衝突実験用ビーム (≤ 125 GeV) とは別に、陽電子生成専用のビーム (150 GeV) を独立に加速する。この陽電子生成専用ビームは衝突には不要なので、パルス偏向電磁石により分離して 150 GeV ビームダンプに捨てる。

2.4.2. 陽電子生成及び捕獲部

ガンマ線を金属標的に当てて陽電子を発生させ、強力なソレノイド磁場で捕獲・加速する部分。標的を挟んで上流部の UPT と PTAPA ビームラインから構成される。

UPT (Undulator Photon to Target)

372 m。EUND で発生したガンマ線は UPT のコリメータを通り、1.4 cm 厚のチタン合金の陽電子標的に当てられる。ガンマ線の平均パワーは最大約 60 kW である。このうち標的で吸収されるのは最大約 4 kW である。標的を通過したガンマ線はフォトンダンプに捨てられる。

PTAPA (Positron Source Target Area and Pre-Accelerator)

標的で発生した陽電子はソレノイド磁場で捕獲され 125 MeV まで加速される。

短パルスガンマ線の熱衝撃破壊を避けるため、標的は巨大な回転ホイールでできている。

加速管は 1.27 m の定在波型加速管 2 本、4.3 m の進行波型加速管 3 本からなり、10 MW クライストロン 5 本で駆動される。加速管は 0.5 T のソレノイド電磁石の中に設置される。

標的と直後の強力なソレノイド磁石、1.3 m 長の Lバンド加速管は一体の陽電子捕獲ユニットとして設置される。この部分はビームにより放射化される装置の一つであるが、ビームダンプ等とは異なり、消耗部品として交換頻度が高い装置であり、遠隔操作によってビームラインから着脱、移

動する必要がある。退避装置のスペースや保管室も特別に設計しなければならない。

サービストンネルにクライストロン、電源、大電力のソレノイド電磁石電源が設置される。

2.4.3. 陽電子シケイン

標的で電子対生成により陽電子と同時に発生した電子は、180 度ずれた位相で陽電子と混合して加速される。陽電子とこれらの電子、標的を抜けたガンマ線を分離するのが「シケイン」の役割。

シケインは 74 m あり PCAP (Positron Source Capture Section) と呼ばれる。標的～シケインまではビームロスが多く、サービストンネル間のシールドは特別に設計しなければならない。

2.4.4. 常伝導 400 MeV Lバンド前段加速器

陽電子加速器では陽電子のエミッタンスが十分小さくなり、4 極電磁石による集束が可能となるには、400 MeV の加速エネルギーが必要である。このビームラインは PPA (Positron Source Pre-Accelerator) と呼ばれる。

前段加速器は 4.3 m の進行波型加速管 8 本から構成され、8 本の 10 MW クライストロンで駆動される。陽電子捕獲部と前段加速器の ≤ 400 MeV の部分では 0.5 T のソレノイド電磁石を加速管の外側に入れて陽電子ビームを集束する。

480 m のビームラインを経て 5 GeV ブースターに陽電子が輸送される。

2.4.5. 超伝導 5 GeV ブースター

400 MeV から 5 GeV まで加速する。

集束は 3 段階：

- (400-1083 MeV)
 - クライオモジュール 4 台
 - 9セルセル空洞 6 台
 - 4 極電磁石 (0.8-2.4 T) 6 台
- (1083-2507 MeV)
 - 標準クライオモジュール 6 台
 - 9セル空洞 8 台
 - 4 極電磁石 (0.6-1.4 T) 2 台

- (2057-5000 MeV)

標準クライオモジュール 12 台

9 セル空洞 8 台

4 極電磁石 (0.8-1.7 T) 1 台

8 台のクライストロンと電源等がサービストンネルに設置される。

2.4.6. ビームダンプとコリメータ

陽電子源に設置されるビームダンプは 9 台あるが、大容量のものは以下の 3 台である。

- 主加速器調整用ダンプ

熱負荷 400 kW、サイズφ400 x 2500、冷却水 114 l/min、シールド 100 mm 厚鉄、400 mm 厚コンクリート、要水素、トリチウム処理

- 5 GeV ブースター調整用ダンプ

電子用と同様 311 kW

- フォトンダンプ

熱負荷 320 kW、サイズφ100 x 1000、水圧 12 bar の冷却水。

ダンプの他に、コリメータ 16 台、ビームストップ：5 台が設置される。

2.4.7. LTR

5 GeV ブースターからダンピングリングまでのビーム輸送系。陽電子ビームのスピンを進行方向から垂直方向に変える役割とエネルギー幅を圧縮する役割を担う。

e-LTR と同様、偏向電磁石、4 極電磁石、スピン回転用の 1 台の 26.2 Tm (3.16 T x 8.3 m) の超伝導ソレノイド、エネルギー圧縮用の 1 台の 12.3 m 長超伝導加速モジュール等からなる。

多くの電磁石電源、2 台の 5 MW クライストロンと電源が加速器終端かビームライン脇のサービストンネルに設置される。

2.5. ダンピングリングのサブシステム

ダンピングリングは 3 つの役割を持つ：

- 縦、横両方向のエミッタンスを小さくする。
- 縦、横両方向のジッターを小さくする。

- 電子・陽電子源からのビームを遅らせてバンチ毎のフィードフォワードを可能にする

電子・陽電子リングは各々運転エネルギー 5 GeV、周長 3.2 km。レーストラック型で直線部の長さは 712 m、対向する 2 つの直線間の距離は 579 m。

一つのトンネルに陽電子リング (ビームラインは床面から 900 mm)、電子リング (同 2200 mm) の順に積み重ねて設置される。

BDS 側の直線部には入出射部、周長調整用シケインがある。対向直線部にはダンピング時間を短縮するための超伝導ウイグラー、エネルギー補償用の超伝導高周波空洞、ベータトロン位相調整用 4 極電磁石 (phase trombone) が設置される。

ダンピングリングには 3 つの運転モードがある：(1) 5 Hz、1312 バンチの低電力ベースライン、(2) 5 Hz、2625 バンチの高ルミノシティオプション、(3) 重心系衝突エネルギー 250 GeV 以下の低エネルギー実験における 10 Hz 運転。

高ルミノシティ運転でバンチ数が増えること

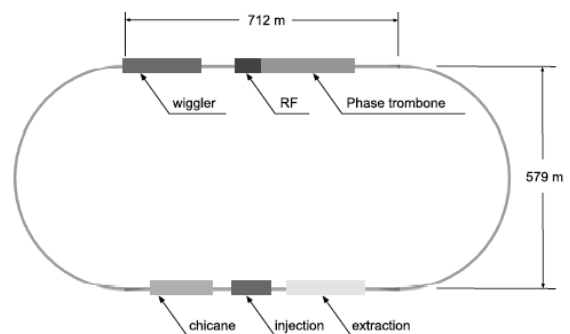


Fig. 2.5 ダンピングリングのレイアウト

により電子雲効果によるビーム不安定性が回避できない場合は電子リングの上に陽電子リングを追加する余地を残す (床面から 3500 mm)。

2.5.1. 超伝導ウイグラー

1 リング当たり、実行長 101.25 m (1.875 m x 54 台)、30 cm 周期。スペースとしては 60 台分用意すること (TDR, p.104)

2.5.2. 650 MHz 超伝導空洞

1 リング当たり 10 台。クライオモジュールは 1 セル空洞収容の直径 1.5 m、長さ 3.5 m。8 台で

必要な加速電圧 (14 MV) を供給。2 台予備。ウィグラー上流側に設置される。

10 Hz オプションでは空洞を 2 台追加し 22 MV を供給する。スペースとしては 16 台分用意すること (TDR, p.104, 114)

クライストロン/電源 5 組には地上からアクセスできること。

2.5.3. 常伝導電磁石及び電源

1 リング当たりの常伝導電磁石及び電源の総数はそれぞれ 2000 台近い。

- 偏向電磁石 4 種類、最大はアーク用の 2940 mm 長で 150 台。2 台の電源でアークごとに電流を供給。数が多いのは軌道補正用の 250 mm 長の磁石 304 台で、1 台 1 電源。このほか、分散補正用 1940 mm 長が 10 台、シケイン用の 940 mm 長が 28 台あり、各々まとめて電流が供給される。
- 4 極電磁石は 5 種類 841 台、1 台 1 電源。
- 6 極電磁石は 1 種類で 600 台、1 台 1 電源。
- キッカーは 42 台、セプタム電磁石は 4 台、1 台 1 電源。

電源室は直線部両端 4 か所に設置。但し、キッカー電源はキッカー直近に設置する。

軌道補正用の偏向磁石、4 極、6 極など数で大半 (1700 台以上) を占める電磁石には、リングに沿った 1 本の直流バスライン (水冷) から近くの DC-DC コンバータによって電流を供給する。これにより、ケーブルによる電力損失を低減する。

2.6. RTML

RTML (Ring to Main Linac) はダンピングリングから ILC 両端の主加速器上流端に至るビーム輸送ラインである。

電子加速器側ビームラインが 17,141 m、陽電子加速器側が 15,948 m ある。長さは異なるが、それぞれ以下のような機能を有している。

- ビーム輸送と主加速器への幾何学的なビームマッチング

- ダンピングリングで発生したビームハローを 10^{-5} 以下に落とす
- スピンの向きを垂直から実験に必要な方向に制御
- ビームのバンチ幅を主加速器での加速に必要な長さまで約 20~30 分の 1 圧縮

また、RTML にはビーム計測システム、フィードバック/フィードフォワードシステムが設置されビーム品質の維持に利用される。

RTML のビームラインは上流から、

- RTL (Ring to Linac)
- LTL (Long Transfer Line)
- TURN (Turn-around beamline)
- SPIN (Spin-rotation system)
- BC1 (Bunch Compressor 1)
- BC2 (Bunch Compressor 2)

の 6 区域で構成される。LTL は主加速器に平行する長い輸送路である。

ダンピングリングと BC1、BC2 の下流には調整用のビームダンプが設置される。



Fig. 2.6 RTML のレイアウト

2.6.1. RTL と LTL

主加速器ビームラインを標高 (EL) ± 0 mm とすると、LTL は EL1650 mm に設置される。

ダンピングリングの電子ビームラインは LTL と同じ EL1650 mm であるが、陽電子ビームラインは EL350 mm である。従って陽電子 RTL では垂直方向の dogleg 型ビームラインでビームラインを 350 mm から 1650 mm に上げている。

因みに、主加速器、BDS の床面は EL-1100 mm、ダンピングリングの床面は EL-550 mm である。また、主加速器のビームラインや LTL は真直ではなく EL=一定の曲線である。

2.6.2. Turn-around

オフセットした RTML のビームラインを ML に合わせるための水平、垂直の dogleg 型ビームラインに続いて、回転半径約 30 m の turnaround 偏向電磁石システムが設置される。

2.6.3. スピン回転

偏向角 7.9° の偏向電磁石の上下流に 5 T の超伝導ソレノイドコイルを 2 台ずつ伴ったシステム。

2.6.4. BC1/BC2

BC1 でバンチ幅が 6 mm から 0.9 mm に圧縮される (エネルギーは 5 ± 0.0055 GeV から 4.8 ± 0.068 GeV になる)。BC1 は 1 組の標準型 RF ユニットからなる。但しクライオモジュールは 3 台とも 8 空洞と 1 台の 4 極電磁石で構成される。

BC2 でバンチ幅が 0.9 mm から 0.3 mm に圧縮される (エネルギーは 14.9 ± 0.17 GeV になる) BC2 は 16 組の標準型 RF ユニットからなる。クライオモジュールは 3 台毎に 1 台の 4 極電磁石で構成される。

それぞれ、RF ユニットの downstream に 150 m の常伝導ウィグラー電磁石が設置される。

2.6.5. ビームコリメーション

LTL の入口で 2 組のコリメータにより横方向ビームハローを 3 ~ 4 オーダー低減する。

コリメータは 0.6 輻射長のチタン薄板可変スリットによるスポイラーと 20 輻射長の厚板固定スリットのアブソーバのセットにより構成される。ビーム電力は 220 kW なので 220 W が吸収される。

スポイラーでのエネルギー損失は小さいので冷却は不要であるが、アブソーバは最大 220 W の熱負荷が発生するので水冷する。

また、Turn-around 入口の水平方向 dogleg、BC1 のウィグラー部、BC2 のウィグラー部で各 2 セット、合計 6 セットのコリメータで進行方向のコリメーションを行う。

2.6.6. ビーム診断と加速器保護

ダンピングリング出口 (RTL)、主加速器入口 (LTL)、Turn-around 出口、BC1 出口、及び BC2 出口の 5 か所にビーム診断ステーションがある。

ダンピングリング出口 (RTL)、BC1 出口、及び BC2 出口の 3 か所にはパルス偏向電磁石による 220 kW のビームダンプがある。

2.6.7. サービストンネル

BC1、BC2 ラインは主加速器と同様のサービストンネルを必要とする。

2.7. BDS

電子加速器側は陽電子生成用アンジュレータビームラインの出口から衝突点、陽電子加速器側は主加速器出口から衝突点までのビームラインを BDS (Beam Delivery System) と呼ぶ。

全長は約 2250 m。14 mrad の角度で交差している。ビームラインは主加速器と異なり真直 (「レーザーストレート」と呼ぶ)。BDS は、

- 主加速器で加速された電子、陽電子ビームを最終集束点に輸送
 - 誤制御されたビームから検出器を保護
 - 検出器へのバックグラウンドノイズを抑える
 - 衝突エネルギー、電流、偏極度など、衝突前後のビームパラメータをモニターする
- 等の役割をもち、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
 - 最終輸送及び集束部
 - ビーム引出し及びダンプライン
- で構成される。

2.7.1. ビーム診断部

BDS 始点から 550 m までのビームライン。

誤制御された加速ビームからディテクタを含む BDS 機器を保護するコリメータに始まり、加

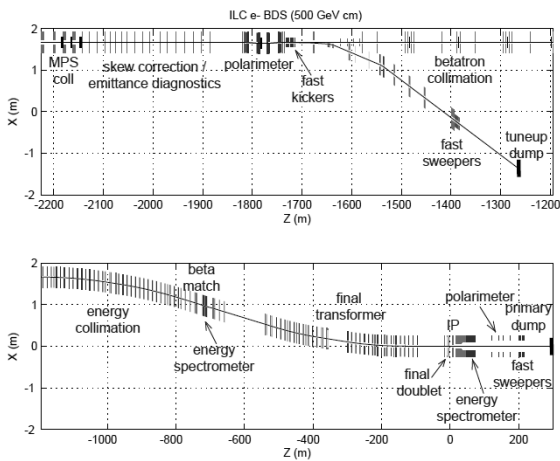


Fig. 2.7 BDSのレイアウト

速ビームの診断及び補正装置を装備し、最後にビーム調整及びアポート用電磁石が設置される。

アポート用キッカーは 300 ns 以下の立ち上りを持ちバンチ毎の制御が可能。

パルス偏向電磁石は 200 ms 以下の立ち上りを持ちバンチトレイン単位の制御が可能。

ダンプリーンは±10%のエネギーアクセプタンスを持つ。

2.7.2. ビームコリメーション部

BDS 始点 550 m から 1050 m までの約 500 m。

ビームサイズを大きくしてビームコリメーションに適切な個所を 2 か所設定している。

2.7.3. エネギーコリメーション部

BDS 始点 1050 m から 1650 m までの約 600 m。

エネギー分散を大きくしてビームコリメーションに適切な個所を 1 か所設定している。

2.7.4. 最終輸送及び集束部

BDS 始点 1650 m から衝突点 (2250 m) までの約 600 m。

最終集束システムに上流からのビームをマッチングさせる。

このセクションの中間点 (衝突点から約 330 m 上流) に、上流のコリメータセクションで発生するミュオンのバックグラウンドをブロックするための「ミュオンシールド」が設置される。シールド材料は 1.5 T で着磁した鉄のブロックである。

衝突ビームに影響を与えないように、ビームラインから右半分と左半分で磁場の向きを逆にして、ビームライン上で磁場が 0 になるようにする。シールド壁の厚さはビームラインに沿って 5 m。ミュオンが漏れないようにトンネル内壁から 0.6 m 外までの範囲を覆うようにする。シールド厚は 19 m まで増強できるようにトンネルを設計しておくこと。このシールドにより主加速器を調整中に実験室に立ち入りできる。

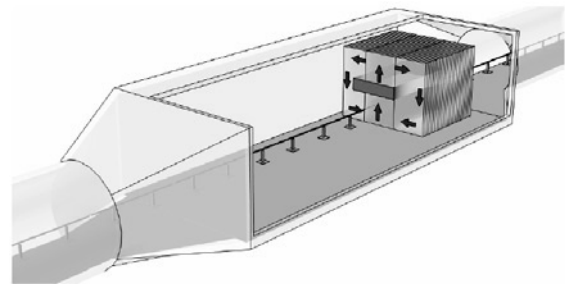


Fig. 2.7.4 ミュオンシールド模式図

衝突点の最終集束及び引出し用の超伝導磁石は 4 台のクライオスタットに設置される。

2.7.5. ビームダンプリーン

衝突したビームは大きな分散角とエネギー幅を持つ。高エネギーフォトンも発生する。従って幾何学的及びエネギーアクセプタンスが大きなダンプリーンが必要。ダンプリーン上流にはビーム診断システムが設置され、上流 2 台の 4 極電磁石は超伝導である。

ダンプリーンでのビームロス コリメータ 1 で 7.7 kW、コリメータ 2 で 17 kW、コリメータ 3 で 45 kW、コリメータまでのロスが 1.4 kW である。

ダンプリンの熱負荷は最大 18 MW。直径 1.8 m、長さ 10 m の容器でできた水ダンプリン。水圧は 10 bar、水温は 155°C まで上昇する。他の加速器室との間のシールドは鉄 50 cm、コンクリート 150 cm を要する。また、敷地境界のトリチウムによる水の汚染を防ぐため更に 2 m のコンクリートシールドが必要。

2.7.6. BDS トンネルに対する要求

BDS には 636 台の電磁石が設置され、86 台が超伝導電磁石である。衝突点の超伝導磁石は 4 台のクライオスタットに設置されるが、残りの小型超伝導 8 極電磁石は独立した小型冷凍機で冷却される。BDS に要求される室温の安定度は 0.5°C 以下、冷却水の安定度は 0.1°C 以下である。

2.7.7. 検出器

SiD と ILD、2 台のディテクタが交互に実験を行う「プッシュプル」方式で実験。ディテクタは可動プラットフォーム上に設置され 6 時間以内に移動を完了する。ビームラインへの設置精度は 1 mm 以下とする。プラットフォームは数十ナノメートルの振動安定度が必要である。

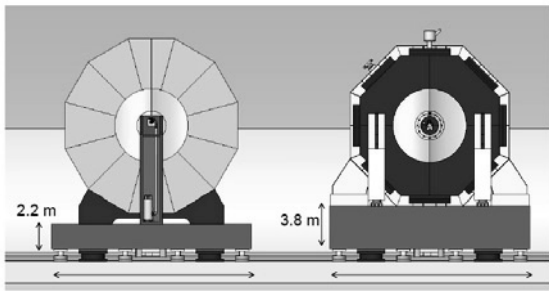


Fig. 2.7.7 ILD (左) と SiD (右)

SiD

Barrel 部が 4160 t、Endcap が $2450\text{ t} \times 2$ 個、合計 9060 t の重量がある。プラットフォームは高さが 3.8 m、床面積が約 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 必要である。プラットフォームが鉄筋入りのコンクリートと仮定すると重量は約 4500 t。ディテクターホールへの負荷は約 14000 t を考慮する必要がある。

ILD

2 つの Endcap と 3 分割された Barrel から構成される。Barrel の重量は $3500\text{ t} \times 3$ である。ディテクタの組立方は実験ホールへのアクセスの仕方異なる。LHC のように立坑でアクセスする場合には地上のアセンブリーホールで 5 分割された検出器を組立、試験したのち実験室に降ろして、最終組立を行う。この時 3500 t 以上のクレーンが必要となる。アクセスが斜坑の場合は 1 km 程度のトンネルをトラックで運搬することにな

る。この場合、大部分の部品はアセンブリーホールで組み立てることになるが、トラックの重量制限から、ヨークは分割して運搬し実験ホールで組み立てることになる。地上から運びこまなければならない部品の最大サイズは超伝導ソレノイドの直径 8.7 m で、トンネルのサイズを決める。

2.8. 主加速器

主加速器は 31.5 MeV/m の加速利得を持つ 1300 MHz の 9 セル超伝導加速空洞 (全長 $\sim 1\text{ m}$) を直線的に並べてできている。

2.8.1. 加速空洞の配列と冷却の単位

複数の空洞を 2K の液体ヘリウムで満たされた容器 (クライオスタット) に収容した加速器を「クライオモジュール」と呼ぶ。

- ILC 主加速器のクライオモジュールには 2 種類ある。9 台の加速空洞を収容した Type A と 8 台の加速空洞の真ん中に 4 極電磁石を配した Type B。クライオモジュールの全長はいずれも 12.652 m。
- 3 台のクライオモジュールを Type A - Type B - Type A のように並べたものを主加速器の加速ユニット「ML unit」と呼ぶ。ML unit の長さは 37.956 m。日本サイトにおける主加速器 RF 源は DKS 方式と呼ばれ、3 台の ML unit に対して 2 台の 10 MW クライストロンで RF を供給する。ルミノシティ増強オプションでは ML unit とクライストロンは 1 対 1 となる。

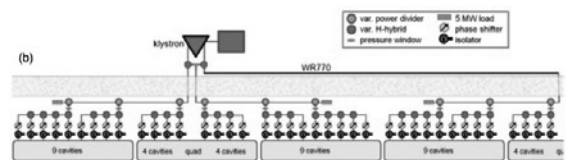


Fig. 2.8.1-1 TDR baseline における RF 供給

- ML unit を 4 台もしくは 3 台連結し最後に 2.5 m 長の cold-box を付けたものは「クライオストリング Cryo-string」と呼ばれ、加速空洞の最小の冷凍単位である。

- クライオストリングを約 2 km の長さに連結したものを「クライオユニット」と呼び、5 km 毎に設置する 5 MW の冷凍プラントで 2K に冷却する。

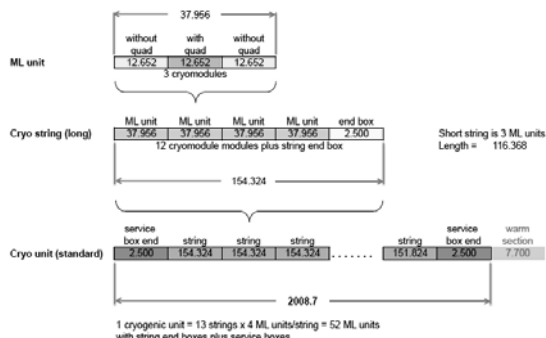


Fig. 2.8.1-2 Cryo-String と Cryo-Unit

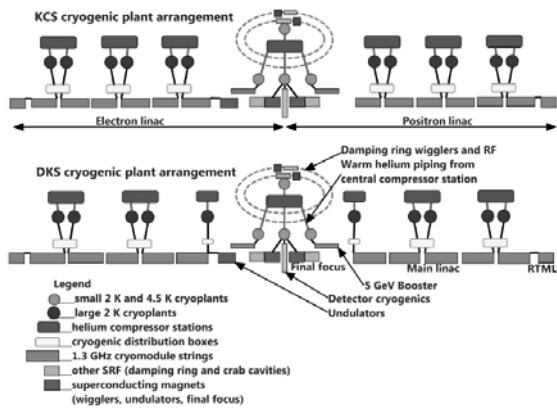


Fig. 2.8.1-3 5MW 冷凍プラントの配置

2.8.2. 電子・陽電子主加速器の加速ユニット

電子主加速器は 285 台、陽電子主加速器は 282 台である。陽電子生成用ガンマ線の発生によりエネルギーを損失するので加速ユニットが 3 台多い。

クライオプラントは LHC をモデルに約 5 km 毎に配置している。DKS 方式の baseline では 3 台の ML unit を RF 供給の単位とするため、3 台の ML unit で構成する Short string を最小の冷却単位として採用した。

主加速器の上流 1150 m 間には、BC1 に 1 台、BC2 に 16 台の加速ユニットが用いられるため、主加速器最上流のクライオユニットのストリングを減らしている。

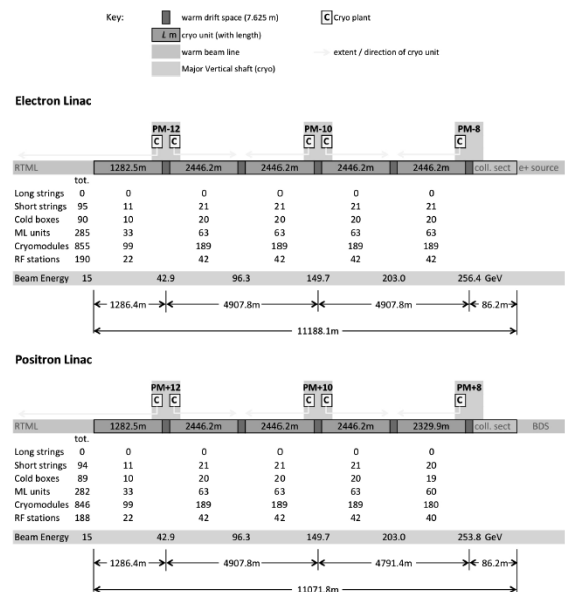


Fig. 2.8.2 DKS 加速ユニットの配列

2.9. ビームライン長と衝突タイミングの問題

電子加速器と陽電子加速器のビームライン長はそれぞれの加速器が独立していれば、電子ビームのバンチと陽電子ビームのバンチの衝突のタイミングを合わせるためには、ダンピングリングからビームを取り出すタイミングを調整すれば良く、特にそれぞれのビームラインの長さを気にする必要はない。しかし、ILC では陽電子ビームは電子加速器で加速した電子ビームを利用して生成しなければならないので、事情が異なる。

2.9.1. ビーム加速のタイムチャート

ILC は通常 5 Hz 運転を行う。5 Hz 即ち 200 ms 毎に 1 回、約 200 億個の電子/陽電子の塊 (バンチ) を 550 ns 間隔で 1312 バンチ (約 1 ms) 加速する。1312 個連続したバンチを「バンチトレイン」或は「パルス (ビーム)」等と呼ぶ。

1 ms のバンチトレインがどのように加速されるかイメージしてみよう。電子銃から出たビームは数 10cm 加速されるとほぼ光速に達するので、到達時間は距離を全て光速で除算すれば良い。

- 電子銃からダンピングリングまで約 700 m 程度なので 2 μs 余りで到達する。

- ダンピングリングではビームがダンピングするまで十分な時間蓄積しておく。ほぼ、5 Hz のパルス間隔に相当する 200 ms ぎりぎりまで蓄積する。
- ダンピングリングから、主加速器を経て、衝突点までの距離はおよそ 30 km であるが、光速ではわずか 100 μ s で到達する。

このように、ほとんどの時間ビームはダンピングリングの中にあることになる。

また、バンチトレイン（パルス）は約 1 ms なのでダンピングリングの外で加速される間は、ビームラインの端から端までを埋め尽くす。

2.9.2. 陽電子の生成

陽電子ビームは、主加速器で加速された電子ビームがアンジュレータで放射した高エネルギーの光子（ガンマ線）を金属に当てて生成する。このとき、光子を放射した電子は、陽電子ビームラインから分岐して衝突実験に用いられる。（図 d→b）

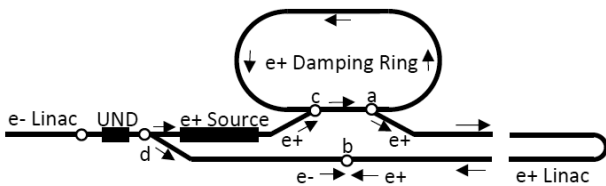


Fig. 2.9.3 e-/e+衝突と e+引出／蓄積タイミング

光子は標的に当てて陽電子となり陽電子ダンピングリングに蓄積される。（図 d→c）しかし、生成された陽電子は、その陽電子を生成した電子自身とは衝突させることはできない。なぜなら、生成された陽電子を加速し終えるまでには約 200 ms 時間がかかるからである。

即ち、生成された陽電子パルスは 200 ms 後に加速される次の電子パルスと衝突させる。

2.9.3. 衝突タイミングに関わる問題

陽電子ダンピングに蓄積された陽電子ビームに注目しよう。約 200 ms 蓄積すると、ビームが十分ダンピングしてエミッタンスが小さくなる。そこで、入射したときと同じように 550 ns 間隔で 1 バンチずつ引き出して、約 1 ms のバンチト

レインで加速して（陽電子を生成した電子の次に加速される電子パルスと）衝突させる。（図 a→b）この時、陽電子ビームを全部引出し終わらないうちに、この陽電子ビームと衝突させる電子ビームが生成した陽電子が、同じダンピングに入ってくることに気が付きだろうか。

ダンピングリングを出た陽電子が加速されて衝突点に達するまでの時間は約 100 μ s、一方陽電子のバンチトレインは 1 ms なので、最初の陽電子バンチが衝突点に達したとき約 10%のバンチはビームライン上にいるが、残りの 90%のバンチはまだリング内にいる。一方、電子ビームの先頭バンチが衝突点に達したとき、その電子ビームが生成した陽電子ビームの先頭バンチがダンピングリングに到達している。（db 間より dc 間のほうが短い）

そこで、どのように、この陽電子ビームをダンピングリングの開いたスペースに蓄積するかという問題が生じる。現在提案されているのは、空になった 10%のスペースにタイミングを合わせて入射していく方法である。

図のように、出射点 a で最初の陽電子バンチを取り出した「空きスペース」は陽電子が衝突点に達する間（図 a→b）に、ダンピングリングの中をグルグル回っている。この「空きスペース」が入射点 c に来た時、先頭の電子バンチが生成した陽電子が入射されるようにすれば、取り出される陽電子の空きスペースに次々と後続の陽電子が蓄積できるようになる。

この条件を、陽電子の最初の出射タイミングを $t=0$ として書くと次のようになる。

空きスペースが入射点 c を通過する時刻は

$$\frac{nC}{c} - \frac{nL_{ca}}{c}$$

である。ここで、 n は整数、 C はリング周長、 L_{ca} は入射点の距離、 c は光速である。

後続の陽電子バンチが入射点 c に達する時刻は

$$\frac{L_{ab}}{c} - \frac{L_{db}}{c} - \frac{L_{dc}}{c}$$

である。ここで、 L_{ab} は出射点から衝突点までの距離、 L_{db} は電子ビームの分岐点 (dogleg ビームライン入口) から衝突点までの距離、 L_{dc} は分岐点から入射点までの距離である。

これより、

$$L_{dc} + L_{ca} + L_{ab} - L_{db} = nC$$

の関係が条件となる。

2.9.4. TDR の軌道データ

EDMS に登録されている軌道データ、DKS 方式の陽電子加速器の長さ 11,071.8 m を用いると、

$$L_{dc} = 2604.466$$

$$L_{ca} = 178.520$$

$$L_{ab} = 29296.035$$

$$L_{db} = 2677.130$$

$$C = 3238.689$$

なので、

$$L_{dc} + L_{ca} + L_{ab} - L_{db} - 9C = 253.6 \dots$$

である。現状では、陽電子加速器側が 254 m 長いようである。最終的には、陽電子加速器を~127 m 短くするか、ダンピングリング周長を~28 m 長くするか等の方法でビームライン長を調節する必要がある。

3. 加速器のサイト

本章ではサイトに関する技術的問題点について述べる。TDR で検討されてきた日本の 2 つのサイトはいずれも「山岳サイト」と呼ばれている。非常に険しい山岳ではないが、欧米の平坦なサイトに比べると、立坑でのアクセスが困難な個所も生じる。

3.1. 加速器の性能と施設の安定化

縦方向に数十ナノメートルの電子ビームと陽電子ビームを安定して衝突させるためには、加速器のナノメートルでの位置の安定化が重要な課題となる。

安定化の方法は位置の変動の大きさと速さ (周波数) によって以下のように分類される。

- 速い変動—10 Hz 以上のランダムな変動 (振動) については制御できないので、振動が加速器に伝わらないように抑制しなければならない。このような振動は一般に地盤そのものの自然のノイズではなく、電気や機械による文化的なノイズの伝搬と考えられる。KEKB 日光実験室のような市街地でのデータを見ると、10 Hz 前後で数十 nm の振動が計測されたとの報告もあるが、山岳トンネルの場合ほどのデータも 1 nm 以下を十分クリアしているようである。

従って、このような速い振動に対しては、特に近くの施設設備や配管等からのノイズに注意を払う必要がある。

- 遅い変動—0.1 Hz 以下の遅い変動は加速器の位置をモニターして補正することができる。変動の大きさが数百 μm 以下の場合には遠隔操作によるムーバーを用いる。変動の大きさがこれより大きい場合は定期的な再アライメントを行う。通常山岳サイトの場合は、地盤条件が問題となるのは遅い変動である。
- 中間の速さの変動—0.1~10 Hz の間は、ビームに対して電氣的な速いフィードバックをかける。ILC の場合、ビームがサイト両端で turn-around して central region に戻るレイアウトを利用したフィードフォワードをかけることもできる。静かな山岳サイトの場合も 1 Hz 以下では数 nm~数百 nm の常微動が計測される場合もあり注意を要する。

3.2. ゆっくりとした地盤変動

0.1 Hz 以下の遅い地盤の変動は以下のような半経験式によって表すことができる。

y_1 - y_2 を距離 L 離れた 2 点における地盤の相対的な変位をとすると、ある時間 T 経ったのちのその相対的な変位量の統計的平均は

$$\langle (y_2 - y_1)^2 \rangle = ATL$$

で表される。ここで、 A はそれぞれの場所に依存する比例乗数である。

例えば、ムーバーの最大補正レンジを 300 μm として、100 m 離れた場所で 1 年間の間にこれを超える地盤変動について検討する。 $L=100$ (m)、 $T = 365 \times 24 \times 60 \times 60 = 2.628 \times 10^6$ (s)、 $\sigma^2 = (3 \times 10^{-4})^2$ を代入すると、 $A = 3.4 \times 10^{-16}$ が得られる。論文によると、 A 値は JPARC の加速器トンネルで 1.3×10^{-15} 、KEKB のトンネルで 4×10^{-17} 、東北地方の道路トンネルで 6×10^{-21} という報告がある。

3.3. 何故花崗岩が選ばれたか

サイト選定において、加速器の性能に影響するのは地質だけではなく、気候、地震など他の自然条件、また、電力、上下水の供給能力も重要である。また、加速器を用いる研究者を取り巻く社会的環境も重要である。これらの要件についてはここでは取り上げない。日本におけるサイトの検討は「サイトスタディグループ報告書」等を参考にされたい。

TDR で検討されたサイトは東北地方の北上サイトと九州地方の脊振サイトである。これらのサイトの地質は大部分が花崗岩である。花崗岩が選ばれたのは 50 km の長距離にわたって概ね一般的な岩盤が得られたためである。

山岳トンネルを掘削する場合、一番のリスクは「断層」「破碎帯」と呼ばれる部分の工事である。この部分では岩盤が自立しないので掘削によって落盤や湧水の大量噴出が起こる。「断層」のなかでも動く可能性のある活断層はさげなければならぬ。

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い。トンネルは地層を横切って掘削するが、このような地層の境界や褶曲部では「破碎帯」がしやすい。

花崗岩に破碎帯がないかというそうではない。花崗岩はマグマが冷えて固結した火成岩なので、固結するときの割れ目が「節理」や「破碎帯」として残り、湧水も少なくないと言われる。しかし、大規模な地質不良部が比較的少ないと考えられるのが、同一地質で大きな岩体が存在する花崗

岩体である。過去に大きな難工事の例もないとされている。

3.4. 地質の固さと建設工法

地質がもっとも柔らかい「土」や「砂」のサイトの例として KEK、DESY など多くの平地のサイトがあげられる。ILC のように 50 km もの長さが必要な場合地表につくるには困難がある。しかし、TDR でロシアは DUBNA の近郊でこのようなサイトを提案した。加速器トンネルを地下、電源室を地上におく SLAC や KEK など多くの加速器と同じ構造で、建設工事は「開削工法 (Open-cut 工法)」を用いる。

元々、超伝導方式のリニアコライダーは DESY が提案した TESLA 計画で、現在建設中の EuroXFEL として計画が継承されているが、このサイトは市街地にある DESY を含み、加速器トンネルは地下 10~20 m 程度に「シールドマシン」によって建設する。地下鉄のトンネル工事と同様の工法である。

TDR でヨーロッパの候補地となったのは CERN 近郊のサイトである。CERN をキャンパスとしつつ、50 km のトンネルを LHC 同様ジュラ山脈のふもと約 100 m の深さの岩盤に建設する計画である。これは、ILC の次の計画のひとつに上げられている CLIC のサイトと重なる。この地質は砂岩を中心としているが、砂岩といってもとても柔らかい種類である。TBM (Tunnel Boring Machine) で掘削するが、掘削スピードは日本の山岳トンネルに比べて 2~3 倍速い。LHC トンネルは、建設時は LEP トンネルとして掘削された。26.7 km のトンネルを 4 つの工区に分けて TBM で掘削したが、ジュラ山脈よりの工区では石灰岩の地質の区間で大量の湧水が発生し工事が難航した苦い経験をもつ。

TDR でアメリカの候補地となったのは、シカゴ郊外 FNAL を含む地下約 100 m、南北 50 km のサイトである。サイトは平地で堆積岩の地層は水平で滑らかである。帯水層もはっきりしていて、湧水はあるものの対策は立てやすいのではないかと推測される。トンネルはドロマイト (苦灰岩)

と呼ばれる堆積岩を掘削するが、シカゴ近郊を中心に用水路として多数のトンネル工事の実績があり、それによると日本での平均的な掘削スピードよりやはり2倍以上速いようである。

アメリカは FNAL サイトを候補に選ぶに当たって、FNAL を含む人口密度の低い西側5つのルートを検討したが、西側にいくに従って帯水層の下部の掘削地層が深くなることや、FNAL から離れる不利から FNAL ルートを選択した。興味をいただいたのは、採用されなかったが地表形状が彎曲した窪地 (~50 m) になっている検討ルートで、これは 50 km のレーザーストレート (真直) な加速器を建設すると、水平に対して中央部が約 50 m 窪むからである。ILC の主加速器はジオイド (地球の水平カーブ) に沿って建設することになっているので、今はその考慮は不要であるが、思わず「アメリカは広い」と感心したものである。

4. 地下施設

4.1. 全体レイアウト

ILC を実際のサイトにレイアウトする作業は進行中である。その手順は以下のように行われるであろう。

- 実験ホールの位置の決定。
- 加速器の全体配置
- 坑口の決定

実験ホールと BDS、ダンピングリングを含む中央エリアには特に安定した岩盤が要求されるので、優先されるべきであろう。

加速器のサイトへの配置は環境アセスと密接に結びついているので、自治体との協力を基礎に進めなければならない。

ルートと加速器レイアウトの概略は検討済みであるが、実験ホールの位置、ビームラインの深さを含め詳細なレイアウトの決定はこれからである。現在は後述するようにアクセスの方法も含め実験ホールのサイティングを検討している段階である。

4.1.1. 実験ホール

実験ホールは幅 25 m、高さ 42 m ある大空洞である。安定した空洞を建設するためには、まず地質が良好なしっかりした岩盤を選ばなければならない。また、構造的には最低空洞の高さと同程度のしっかりした岩盤が空洞の上に必要である。地表から健全な岩盤までは通常数十メートルあるので、IR の深さは地下 100 m 前後になる。一方、アクセスの利便を考慮すると、加速器全体としては可能な限り浅く配置したい。このような理由により、実験ホールは必然的に山岳サイトの山の頂付近が候補となる。

具体的な位置は地理、地形、土地利用状況、文化財の有無、自然環境の調査情報にもとづき、アクセスの方法、適当な坑口などを検討し、ボーリングなどで地質を最終的に確認したあと、環境アセスにより地元とのコンセンサスを経て決定されていくであろう。

4.1.2. 地下施設の全体配置

ILC の加速器は IR を中心として e-Linac と e+Lnac をサイトのどちら側に配置するか、ダンピングリングをどちら側に配置するか、合計4通りの配置が可能である。

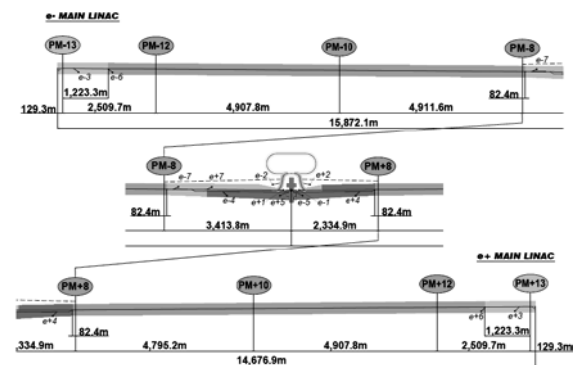


Fig. 4.1 地下施設全体レイアウト

これを決定するのは、坑口の位置である。坑口の利便性、即ち、道路、上下水等のインフラ整備状況が第一。次に、斜坑、立坑の長さが短いこと。

4.1.3. 坑口の決定

加速器の配置と密接に関連しているが、斜坑の場合は比較的自由に場所の選択が可能である。一

方、立坑は後述するように地上設備利用、安全、アライメントで重要な役割を果たすので、斜坑、立坑双方の有効利用を検討すべきである。

4.2. 地下構造物

4.2.1. 主加速器トンネル

NATM 工法で幅 11 m、高さ 5.5 m の「かまぼこ型」断面のトンネルを掘削する。加速器と電源はシールド壁で仕切られる。トンネルの大きさとして通常の 2 車線道路トンネルの大きさで、切羽での掘削機械の作業スペース、ズリ出しトラックの運搬スペースが十分あり、効率的に掘削できる。壁面は 30 cm 厚の覆工コンクリート仕上げ。

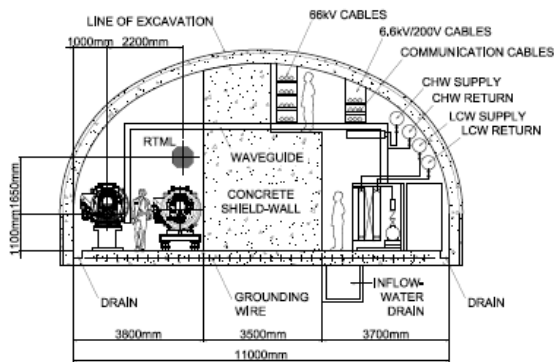


Fig. 4.2.1 主加速器トンネル断面図

4.2.2. アクセスタンネル

加速器へのアクセスとして TDR では斜坑を baseline としており、サイズは幅 8 m、高さ 7.5 m である。設備配管、トラック 2 台の走行を考慮して最低限の大きさを考えた。

実験ホールへのアクセスも TDR では斜坑を考えた。ILD の超伝導ソレノイドが運搬する最大のサイズ (直径 8.7 m) で、斜坑断面は幅、高さともに 11 m 必要である。

アクセスタンネル壁面は吹付けコンクリート仕上げである。

4.2.3. アクセスホール

アクセスタンネルと加速器トンネルが交差する約 5 km 毎のアクセスポイントに設置される。幅 20 m、長さ 180 m (床面積 3600 m²)、高さ 13 m

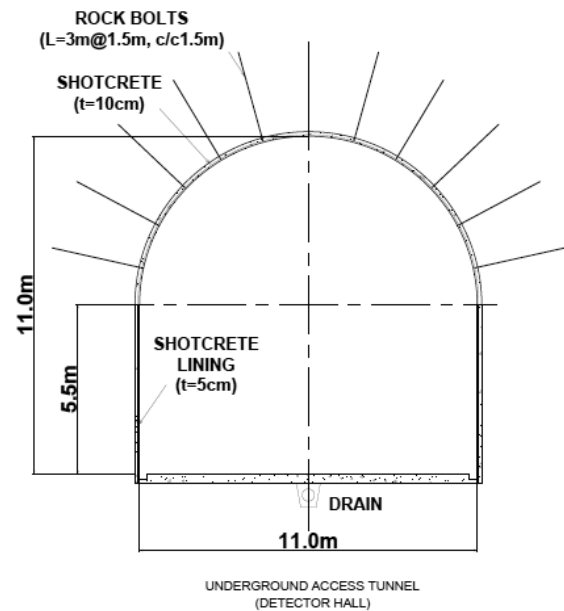
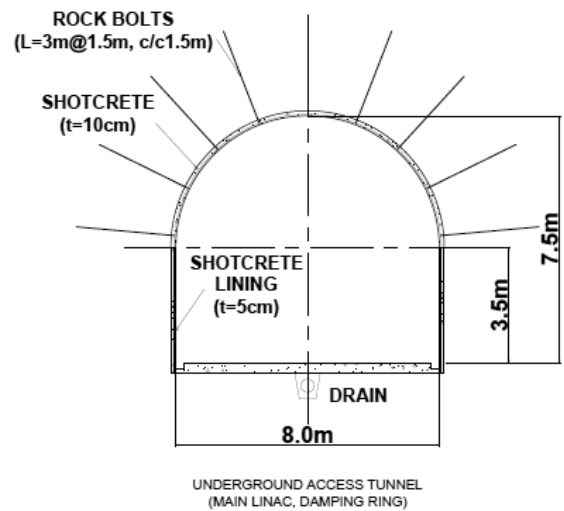


Fig. 4.2.2 アクセスタンネル断面：(上) 主加速器用 (下) 実験室用

の空洞。地下ホールには電気設備 (20 x 30 mm²)、給排水設備 (20 x 10 mm²)、冷却水設備 (20 x 20 mm²) のほか、He 供給設備 (20 x 51 mm²)、He コンプレッサー (20 x 41 mm²) も設置する場合を考慮した。それぞれの装置間には 5 m のスペースを設けた。He 供給設備はできるだけ加速器に近く、また、コンプレッサーは振動を考慮して加速器から一番遠く配置した。

地上には、冷却塔、空調設備、入出管理棟など最小限の建物、設備を設置する。

尚、地上の坑口から続くアクセストンネルは RDR など従来の設計ではアクセスホールを経て主加速器トンネルに取り付く設計となっていたが、加速器トンネルの工期短縮のため、アクセスホールを経ず直接加速器トンネルと交差させる。

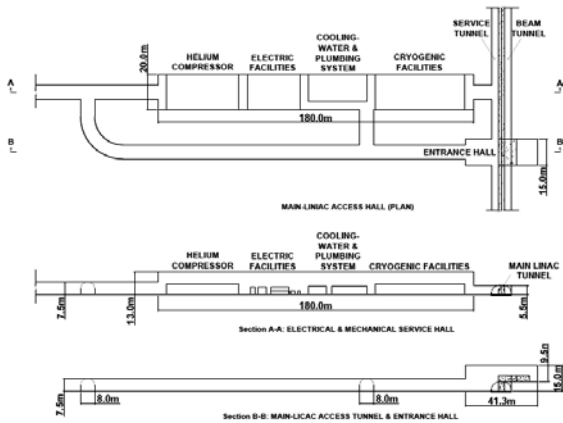


Fig. 4.2.3 主加速トンネルアクセスホール

4.2.4. 実験ホール

幅 25m、高さ 42m、長さ 142 m で、検出器維持のため、高さ 20.5 m (ILD)、18 m (SiD) の側室が両側に出ている。1 万数千トンの検出器・プラットフォームを移動する際の力学的変形まで考慮した構造設計が必要。

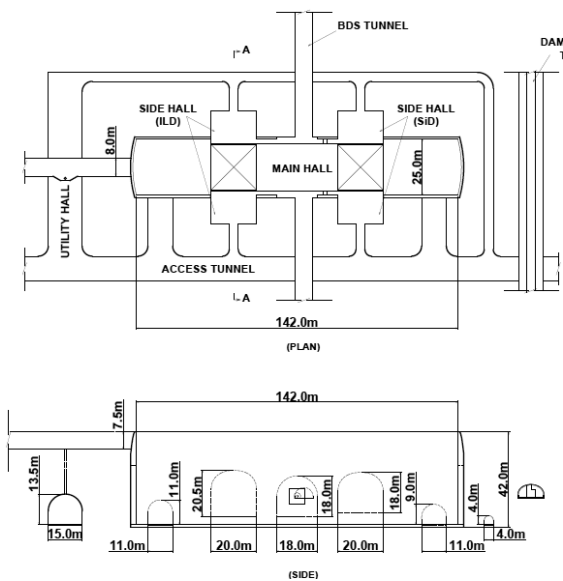


Fig. 4.2.4 実験ホール

4.2.5. ダンピングトンネル

超伝導 RF、ウィグラーを設置する直線部にはサービストンネルを要する。直線部 4 隅には大型電源室が配置される。

4.2.6. 電子・陽電子源トンネル

電子源のレーザー・電子銃室、常伝導及び超伝導加速器のサービストンネル、陽電子生成部の特別シールド室等が必要。

4.2.7. ビームダンプ

18 MW の主ダンプ 2 台、320 kW のフォトンダンプ、10 Hz 運転時の 150 GeV 電子ダンプの 4 台は常時ビーム負荷のあるダンプである。400 kW の主加速器調整ダンプ、RTML に設置される 220 kW の 5 GeV ビームダンプ用の側室も必要。

4.2.8. その他の地下構造物

主加速器を除く RTML、BDS にもサービストンネルが必要である。

4.3. 土木工事

土木学会による「ILC の土木工事に関するガイドライン」[6]等の専門的な詳しい解説があるので、ここでは、加速器研究者の眼から、工法の特徴や選択の理由や判断などに触れてみたいと思う。

4.3.1. トンネル工法

トンネルの掘削法としては TBM 工法と NATM 工法がある。

TBM 工法は TBM (Tunnel Boring Machine) という大型機械を用いる。TBM の先端は直径数 m ～十数 m の円筒形の cutter になっていて、これを回転させながら油圧の「スラストジャッキ」で前方の切羽に押付けることにより岩盤を掘削していく。「スラストジャッキ」を固定するための装置を「グリッパ」と呼ぶが、良好な岩盤ではこれを側方の岩盤に押付ける。一方、土砂のような軟弱地盤の場合は覆工コンクリートの端面に押し当てる。TBM は 1 m 程度掘削するごとにこの油圧

ジャッキを前方に引き寄せ、尺取り虫のように前進していく。TBMはレールの上を移動するが、動力は制御車両、駆動車、トランス、支保工事、送電用ケーブル、ずり（削った石）運搬用ベルトコンベヤーなどを担当するトレインが後ろにつづく。TBMは地盤によりオープン型/シールド型/混合型等を使い分ける。

NATM (New Austrian Tunneling Method) 工法は発破やドリルを用いて掘削する方法のひとつであるが、矢板工法などのように材木や鉄骨などによって内側から掘削した岩盤を支えるのではなく、吹付けコンクリートとロックボルトによって岩盤自身を補強して自立させる工法である。

トンネルの掘削法として TBM 工法を用いるか、発破やジャンボドリルを用いる NATM 工法を用いるかについては、岩盤の性質、掘削する距離、工期などを考慮して決めなければならない。

TBM の弱点は、地質の悪い破碎帯で本体がトラップされたり、高湧水帯において湧水処理ができなくなるリスクへの遭遇である。日本の工事の例でも、飛騨トンネル、鍋立山トンネル、青函トンネルなどでの難工事が知られている。加速器関係では LEP トンネル工事のトラブルが身近である[7]。花崗岩サイトは、主に硬質な岩盤で構成され全体としては良好な地質であると言われているが、局所的な破碎帯の存在は否定できないので、慎重な対策が必要と思われる。

それぞれの工法の弱点を改善する工夫もされている。TBM 工法では不良地質に対処するための TBM の改良や地質の前方探査によるリスクの回避などの技術。NATM 工法では多軸の大型ドリル機械による高速施工[8]や発破の工夫による地盤のゆるみ低減技術などである。

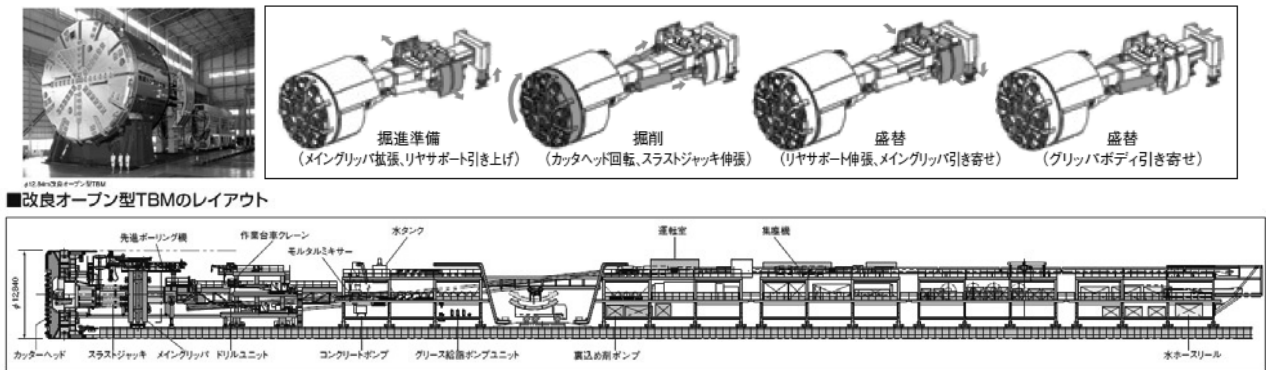


Fig. 4.3.1-1 TBM 工法 (川崎重工 (株) 装置・土木機械本部 TBM カタログより)

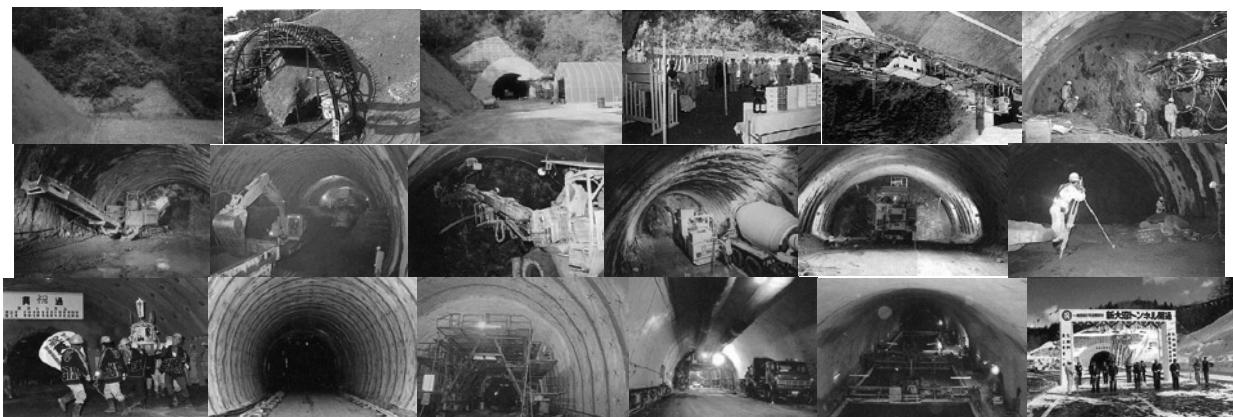


Fig. 4.3.1-2 NATM 工法 (北海道土木技術研究会資料より) 着工前→法面保護・捨砕施工→坑口面壁完成→安全祈願祭→抗外仮設備 (動力・給排水・濁水処理・吹付プラント) →発破→機械掘削→鋼製支保工建込→吹付コンクリート→ロックボルト→計測工→貫通式→二次覆工防水シート取付→断熱材吹付→覆工コンクリート打込→舗装工事・付帯設備 (照明、換気、非常設備) →開通式

TBM 工法と NATM 工法の一般的な特徴、長所、短所をまとめておく。

Table 1 トンネル工法と特徴

	TBM 工法	NATM 工法
機械	TBM	発破、ドリル
月進	250~350 m	100~150 m
影響(1)	地盤ゆるみ小	地盤ゆるみ大
影響(2)	騒音小	騒音大
補助工法の選択枝	TBM 内の限定された空間からの対処となり、選択枝は限定される	地質不良部への対策として多くの工法が適用しやすい
コスト	TBM 高価 10km 以上の距離を施工する場合経済的と言われる	安価
工期	施工速度は速いが、TBM の製作、組立、解体の期間を考慮する必要あり	施工速度は遅いが、準備が少ない
実績	道路、用水路など 150 以上程度	道路、鉄道多数

4.3.2. 主加速器シングルトンネル案

TDR ではコスト削減のため主加速器のトンネルの設計条件を見直しをすることになった。その一つは、RDR では加速器本体を収容するビームトンネルとクライストロンや電源等を収容するサービストンネルの「ダブルトンネル」であったものが、1本のトンネルにする「シングルトンネル」案に変わったことである。

欧米チームはLHCトンネルなどの経験があり、加速器トンネルは1本にして、電源を地表にまとめる KCS (Klystron Cluster System)でシングルトンネル案を提案した。

一方、日本では TBM 工法で完全な「シングルトンネル」とするのはリスクが大きい。因みに「ダブルトンネル」の場合は、片方を先行させ先進導抗の役割を兼ねる予定であった。また、山岳サイトでは地表に電源をまとめるという訳には簡単

にいかないで欧米案は採用できない。そこでまず、完全なシングルトンネルではなく、小径の水抜き及び設備配管を兼ねたサブトンネルを伴い、また、電源を百数十m毎地下のサブホールにまとめる「日本版シングルトンネル案」を代案として提案した。

更に、加速器トンネルには 30 cm 厚の覆工を全線に加えることにした。RDR においては、良質岩盤では数センチの吹き付けコンクリートで済ませ、20%程度と仮定した破砕帯や節理を伴う不良岩盤ではロックボルトや注液による補強や止水処理を行う計画であった。しかし、TDR では、加速器室の環境とトンネル周りの岩盤や湧水等の環境保護をより完全にする立場から、全面完全覆工を採用した。

4.3.3. TDR では NATM を選択

しかし、更に検討をつづけ、TBM としていたトンネル工法も含め見直すことにした。

JLC や ILC の RDR では、地下に入るアクセストンネルや立坑は NATM 工法で掘削するが、実験室やホールを除く地下の加速器トンネルは欧米と同様 TBM 工法で掘削する計画であった。TBM は掘削速度が速く、掘削による壁面の緩みも NATM に比べて小さいからである。

ただ、欧米に比べて岩盤が固く掘削スピードは半分以下が予想されることから、工期を揃えるため TBM の台数を倍にするコスト上のハンディを負っていた。

NATM を採用しなかった理由は岩盤の緩みや、掘削スピードであった。しかし掘削工程を考えると、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ので最低 5 km 程度は掘削させたい。また、TBM は地下のアクセスホール掘削後にしか発進できないが、NATM ならばアクセスホール掘削と平行して主加速器トンネルの掘削を進めることも可能である。岩盤の緩みは工法の改善と覆工を強化することで、地盤変動の基準を満足できるはずであると判断した。NATM の場合トンネル断面も自由になり TBM で提案せざるを得な

かったような複雑な構成にしなくてもよい。最後にコスト、工期の評価を加えた総合的なケーススタディと評価を行った結果、TDR では主加速器のトンネル工法として NATM を採用することにした。

4.3.4. 地下へのアクセス

主加速器の工法にならび、もう一つの選択に地下のトンネルへのアクセスの方法がある。欧米の平地サイトの場合は立坑しか解がない。人は非常時を除きエレベーター、物品はエレベーターかクレーンで運搬する。TDR では日本の山岳サイトでの地下へのアクセスは斜坑を用いるとしている。これは山岳地形が険しい場合を baseline としたためであるが、実際の場所ではトンネルの土盛りが浅ければ立坑の可能性もある。表のように、斜坑には車でアクセスできる利点があるが、一方、立坑にはアクセス距離が最短となるため冷却塔への配管が短く大幅なコスト減になるなどの利点がある。サイトの地形によって、ケースバイケースでの検討が必要である。このようなことから、実験ホールへのアクセスを最初の課題として、現在どちらの方法をとるか比較検討中である。

Table 2 斜坑と立坑の比較

	斜坑	立坑
人のアクセス	車	エレベーター、階段
運搬	車	エレベーター、クレーン
移動距離	約 10 倍	
設備配管	約 10 倍	
コスト	斜坑は長いが運搬には小径で事足りるため大差なし。	

4.3.5. アクセストンネル（斜坑）の工法

斜坑の工法としては通常 NATM を用いる。土木関係者には当たり前でも、われわれ部外者が最初聞かされて「なるほど」と思うことの一つだが、道路や鉄道のトンネルは水平ではなく通常必ず

下から上に若干傾斜をつけて掘削していく。湧水を自然排水するためである。

しかし、どうしても下に向かって掘っていかなければならない場合もある。ILC の地下へのアクセスがこの例である。この場合は湧水処理が問題になる。NATM 工法の場合は止水工事とポンプによる排水処理をしながら前進する。一方、TBM 工法を選択する場合は湧水による TBM 水没対策をしなければならない。本坑の前に水抜き坑を先進させたり、シールド工法を選択するのが確実であるが、いずれもコスト高となる。ここでも、工期、コストを考慮した選択に迫られる。

一例として青函トンネルと英仏海峡トンネルの比較が上げられる。青函トンネルは 53.85 km、1961.3 着工、1985 本坑貫通、1988 年開業、2016 年新幹線開業予定、トンネル建設費 7500 億円であった。一方、英仏海峡トンネルは 50.5 km、1986.5 着工、1990.12 トンネル貫通、1994.11 ユーロスター開業、しかし、総額 91 億ユーロ（約 1 兆 5000 億円）の債務により運営会社ユーロトンネルは破綻した。青函トンネルも最初 TBM で工事を開始したが地質不良により使用を断念した経緯がある。英仏海峡トンネルは、相対的にやわらかく安定した岩盤で高速施工を目指した結果である。TBM は月進 1,178 m/月を記録した。

4.3.6. 大口径立坑の工法

地下に運搬する装置で最大のものは実験ホールの検出器、主加速器のクライオモジュールなどである、検出器のソレノイドは直径 9 m 近くあり、斜坑で運搬するときはトンネル幅高さが 11 m、立坑をクレーンで下す場合は内径 18 m 必要とされている。また、クライオモジュールについては、斜坑は幅 8 m 高さ 7.5 m、立坑の場合は内径 15 m のサイズが要求されている。

このように、装置の運搬に立坑を用いる場合、断面は斜坑より大き目になる。口径が大きくなるほど壁面の自立が困難となり、そのための土留め工事や湧水処理が大がかりになる。また、斜坑工事との違いはズリ処理の違いである。斜坑の場合は切羽からトラックやベルトコンベヤーで次々

と運びだすことができるが、立坑の場合は作業スペースが限られるので、掘削とズリだし作業が平行して効率的にできないことがある。これが工期やコストに影響する。一般的に立坑は短くても高コストになる。

立坑工事には約 10 種類の工法がある。分類すると機械掘削と発破による掘削、上向き掘削と下向き掘削などに分けられる。ここでは、内径が 18 m ある ILC の実験ホールの立坑工事として検討対象となる、「ロックボルト／吹付け工法」と「ショートステップ工法」について説明する。

地表の土砂・マサ部については、サイトの状況によって別途工法を選択しなければならないが、ある程度の厚さがあると仮定した場合の工法としては、図のように、外径 25 m、内径 23 m、健全な岩盤に達する深さまでの金属ダイヤモンド壁による地中連続壁を構築し、その後内部の土砂を掘削、ズリだしする方法が考えられる。

健全な岩盤に達すれば＝吹付けコンクリートとロックボルトによる NATM 工法により掘り下

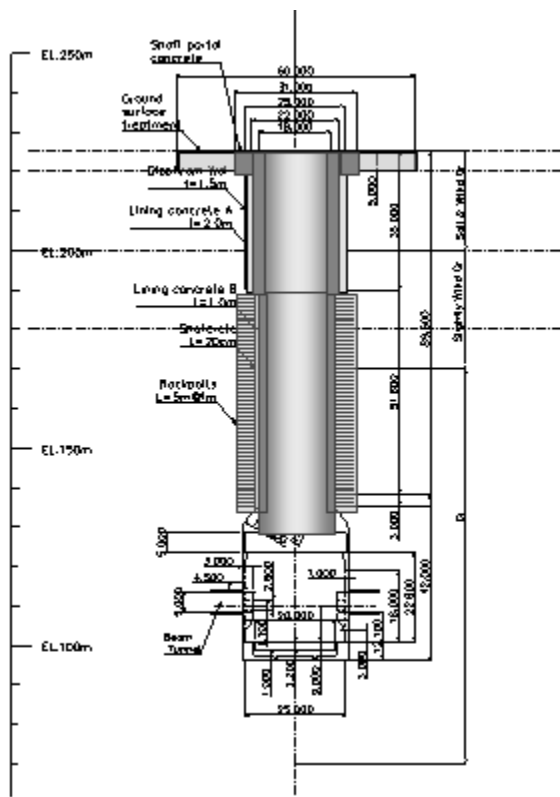


Fig. 4.3.6-1 NATM 工法による立坑工事

げていく。掘り終わったら、最後に地下から地上にむけて一気に覆工を行って完成させる。

これに対して、「ショートステップ工法」では、図のように、(1) シャフトジャンボによる岩盤への穿孔（せんこう）～装薬 (2) 発破 (3) ズリだし～裏面排水工～リング支保工～矢板工 (1) → (3) 繰り返す (7) 脱型～移動～組立～コンクリート打設の 1 連の工程からなるショートステップを繰り返しながら確実に掘り下げていく。1 ステップは 1.5 m～3 m とする。

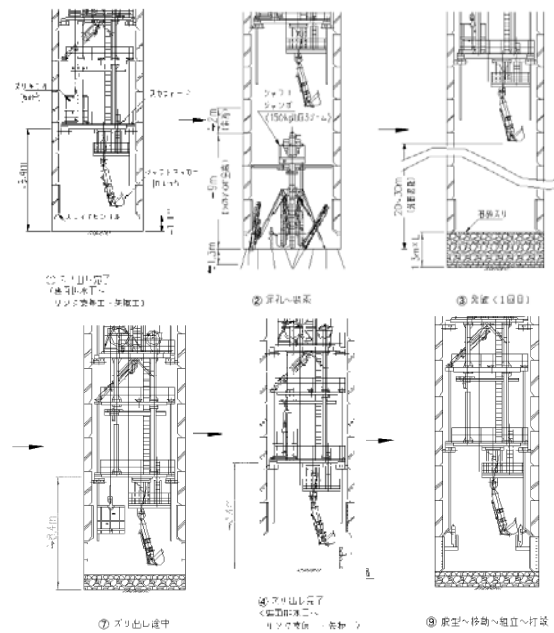


Fig. 4.3.6-2 ショートステップ工法

立坑があまり深くなく岩盤が健全であれば、「ロックボルト／吹付け工法」のコストパフォーマンスが高いと考えられる。

4.3.7. 小口径／中口径の立坑の工法

小口径の立坑は、地下に設置される加速器の GPS によるアライメント、He が漏れた場合の脱気口として必要である。小口径の立坑は小型のボーリングマシンで地上から連続的に掘削できるので低コストである。

5～10 m の中口径の立坑は地上冷却塔までの配管などの設備坑などに有用である。

このような立坑は、地下トンネル掘削後であれば、小径の立坑を最初に掘って、ズリを下方に落としながら立坑を掘削する「導坑先進拡大掘削工法」や「レイズボラ」工法が採用できる。効率的にズリ出しできる分コストパフォーマンスが高い。

4.3.8. 大空洞の土木工事

ILC の実験ホールは幅 25 m、高さ 42 m、長さ 140 m あまりの大空洞である。しかし、このような地下空洞は、地下発電所や石油備蓄基地などで数多く建設した実績があり、トンネルで見られたような難工事の例はない。これは、トンネルと違って場所が小範囲に限定されること、また、ボーリングなどによる地質調査をにより適切なサイトが選択できるからであろう。

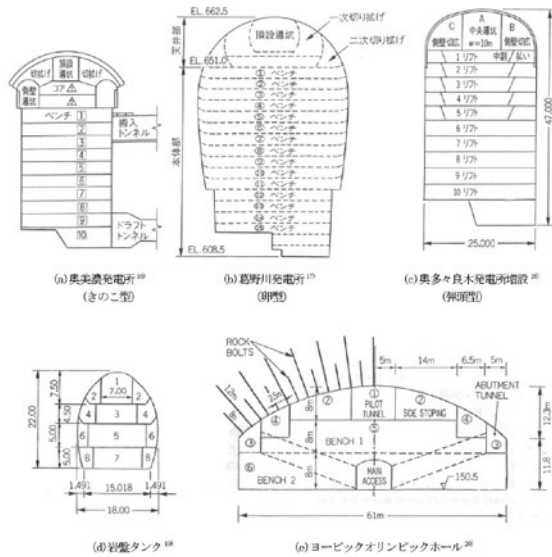


Fig. 4.3.8 大規模空洞の例と掘削順序 [6]

地下大空洞の掘削は図のように、天井のアーチ部から床に向かって、壁を NATM 工法によって補強しながら、段階的に掘り下げていく「ベンチ工法」を用いる。

壁の補強は吹付けコンクリートとロックボルトによるが、岩盤が不良だと健全な岩盤に達するまで長いアンカーを打設しなければならない。このアンカー工事は非常にコストが高いため、ボーリングによる十分な調査が必要である。

大空洞工事のため斜坑でアクセスする場合は、斜坑が天井部に取り付くように掘削する。このトンネルを頂設導坑と呼ぶ。

一方、立坑で大空洞に掘り進む場合は、立坑掘削に引き続き空洞を掘り下げていくので頂設導坑は不要である。

4.3.9. その他の空洞工事

加速器のビームライン設置に必要なトンネル幅は一定ではない。ビームダンプなどの側室が必要になる個所もある。このようなときに日本サイトのような丈夫な岩盤の場合は後でトンネルを拡幅することができる。

一方、CERN のような軟弱な岩盤ではシールド工法が中心となりトンネルを拡幅することは困難である。掘削口径の異なるシールドマシンを頻繁に使用することは不可能であるから、必然的にトンネルの幅が一番大きな装置が、あるいは複数のビームラインがある場合はそのビームライン幅が、数 km のトンネルの口径を決める。主加速器トンネルの内径が 5.2 m なのに対して、BDS トンネルが 8 m であるのはそのためである。

BDS トンネルは実験ホールのほかに、電子源、陽電子源を含み構造が様々ではないが、詳細な設計はこれからである。

4.3.10. 地下施設の配置精度

トンネル内の装置は必要な精度でビームラインにアライメントするがトンネルの内壁、床はビームラインに対して 1~2 cm の精度でできている必要がある。

また、2章で述べたように、ILC のビームライン、特に BDS から陽電子加速器側のビームラインの長さをぴったり合わせなければならない。最終的にはシケインを含む電磁石システムでビーム軌道を調整するが、トンネル長は数 cm~十数 cm で合わせる必要がある。

ビームラインの装置は RDR (III-233 ページ)によると、

Table 3 アライメント精度

	offset	roll
Source~RTML	150 μm /100 m	100 μrad
Main Linac	200 μm /200 m	20 μrad
BDS	150 μm /150 m	

の精度で設置される。

この精度を見ると主加速器では単純加算して 10 km で 1 cm である。

トンネルの蛇行は TBM の場合、例えば ±20 mm /300 m というデータが報告されているが、TDR ではトンネル内壁は厚く覆工されるので、内径の仕上がり精度はレーザー等による測量精度で決まるであろう。長さも同様であり、10 km 程度でも数 cm の精度は十分可能と思われる。

但し、問題はトンネルが多数の工区に分けて平行して建設されることである。このことは、トンネル掘削開始前に地下の各工区の想定ビームライン近傍にグローバルな基準座標が予め設置されていなければならないことを意味する。

近年は GPS による長距離の高精度測量システムの開発が進み、10 km 程度で 1~2 cm の相対位置精度は測量できるようである。この場合 GPS の地上座標を精度良く地下に移すことが必要である。小口径のアライメント用立坑はこの目的に有用と考えられる。

5. 電気設備

5.1. 電力負荷

5.1.1. TDR baseline の電力負荷と用途

電力負荷を ILC のサブシステム毎に示したのが下表である。主加速器 (Main Linac) の RF 電力 4.76 MW は DKS 方式によるもので、欧米の KCS 方式に比べ RF ユニットが少ない分小さな電力になっている。一方、日本サイトでは地上とのアクセスを平均約 1 km 長の斜坑としているため、空調、冷却、給排水動力の電力が多くなっている。表で Emergency とあるのは、設備電力の中で停電時でも最低限維持すべき電力を示す。

Table 4 ILC 電力負荷

Accelerator section	RF Power	Racks	NC magnets	Cryo	Conventional		Total
					Normal	Emergency	
e ⁻ sources	1.28	0.09	0.73	0.80	1.47	0.50	4.87
e ⁺ sources	1.39	0.09	4.94	0.59	1.83	0.48	9.32
DR	8.67		2.97	1.45	1.93	0.70	15.72
RTML	4.76	0.32	1.26		1.19	0.87	8.40
Main Linac	52.13	4.66	0.91	32.00	12.10	4.30	106.10
BDS			10.43	0.41	1.34	0.20	12.38
Dumps					0.00	1.21	1.21
IR			1.16	2.65	0.90	0.96	5.67
TOTALS	68.2	5.2	22.4	37.9	20.8	9.2	164

5.1.2. 地下アクセスホール変電所への送電

中央変電所で受電した電力は 66 kV に降圧されて 5 km 毎のアクセスホールサブ変電所に送電され、更に 6 kV に降圧されてローカルに配電される。送電ロスを検討すると、概略、数 10 km の送電には 66 kV、数 km の送電には 6 kV、数百 m の送電は数百 V の電圧を用いるところか。サブ変電所は 7 か所にあり、送電電力は下表の通りである。また、実際のサイトでの送電のイメージを図にしめした。サブ変電所への送電はサービストンネルを経由することを仮定した。

Table 5 サブ変電所への送電電力

PM	-12	-10	-8	ab	+8	+10	+12
MW	23	23	21	35	16	23	23

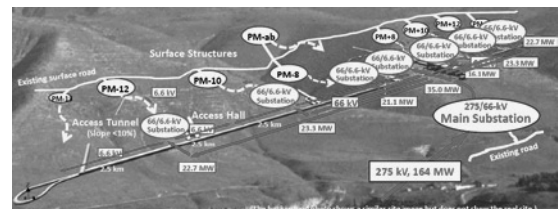


Fig. 5.1.2 サブ変電所への送電イメージ

5.1.3. ILC の運転モード／増強と電力負荷

ILC には衝突エネルギーや電流によっていくつかの運転モードの違いや増強オプションがあり、設備側の対応を整理しておく必要がある。

TDR の baseline では最大衝突エネルギー 500 GeV までの実験を行う。このとき、どのような運転モードにおいても総消費電力は 164 MW を超えない。衝突エネルギーが低い場合は、主加速器 RF 電力、冷凍機電力が減少する。但し、衝突エネルギーが 250 GeV 以下の場合、電子加速器のみ

10 Hz 運転を行って、衝突実験用電子ビーム（≦ 125 GeV）の他に、陽電子生成専用の 150 GeV 電子を 5Hz 分加速する電力が維持される。

ルミノシティ増強運転ではバンチ数が 1312 バンチから 2625 バンチに増え、加速電流が 5.8 mA から 8.8 mA に 50%増えるので、主加速器の RF 源が 50%増え、冷凍機電力等の増強も必要になる。電力は約 220 MW 必要である。

1 TeV 増強では主加速器が倍に延長される。2625 バンチモードで主加速器を 2 倍に増強すると主加速器電力は $\sim 100 \times \sim 1.5 \times 2 = 300 \text{ MW}$ となり、更に 200 MW 必要となるが、TDR では、運転モードを考慮して、総電力 300 MW 程度の運転を計画している。（TDR Table 12.6 参照）

Table 6 ILC 総消費電力

運転モード／増強	サイト総消費電力
Baseline（≦500 GeV）	≦164 MW
10 Hz、以下 250 GeV	≦164 MW
ルミノシティ増強	≦220 MW
1 TeV	≦300 MW

5.2. 受変電設備

受電の場所や受電電圧などは実際のサイトにおいて配電を受注した電力会社との協議によって決まるが、TDR では以下のように仮定した。下図にサイト送電の単結線図をしめす。

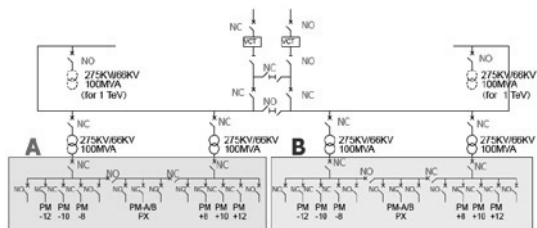


Fig. 5.2 サイト送電

5.2.1. 中央変電所

受電電圧は 275 kV で主特高受変電設備は施設の中央部に設ける。受電方式は本線、予備線の 2 回線受電とする。受電容量は 500 GeV ILC で 300 MW、1 TeV で 500 MW とする。

主変圧器の故障により供給支障を起こさないように n+1 の冗長構成とし、500 GeV で 100 MVA × 4 バンク設置し、1 TeV で 100 MVA × 2 バンク追加する。275 kV 変圧器は油入変圧器、開閉装置は屋外型 GIS 開閉装置を用いる。屋外ヤードは 120 × 80 m² 程度が必要。

5.2.2. アクセスホールサブ変電所

6 か所の主加速器アクセスホールと中央エリアにサブ変電所を設ける。主変電所～サブ変電所の配電電圧は 66 kV で、サービストンネル内を A、B 2 回線で配電する。66 kV 変圧器は油入変圧器、開閉装置は GIS 開閉装置を用いる。変圧器は各サブ変電所に 30 MVA × 2 台を設置し、中央エリアに 1 台予備器を保管する。無効電力補償用コンデンサを設置する。高調波フィルターは機器側。

5.2.3. 主加速器ローカル変電所

主加速器ではアクセスホールから上下流それぞれ約 2.5 km のエリアに 6 kV の電圧で配電する。クライオモジュール 6 台（2 ストリング、232 m）毎にローカル変電所を設ける。一般系統と防災負荷などの保安系統に区分する。無効電力補償、高調波フィルターは機器側で行う。

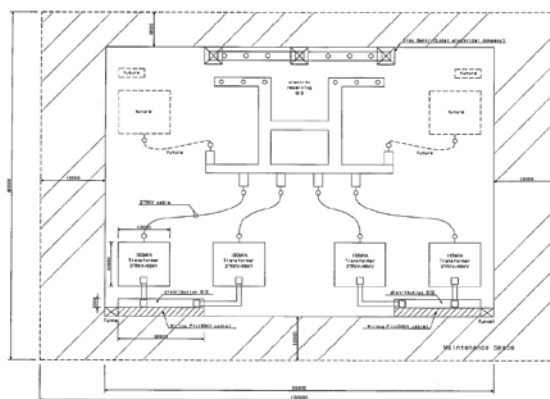


Fig. 5.2.1 中央変電所ヤード設計例

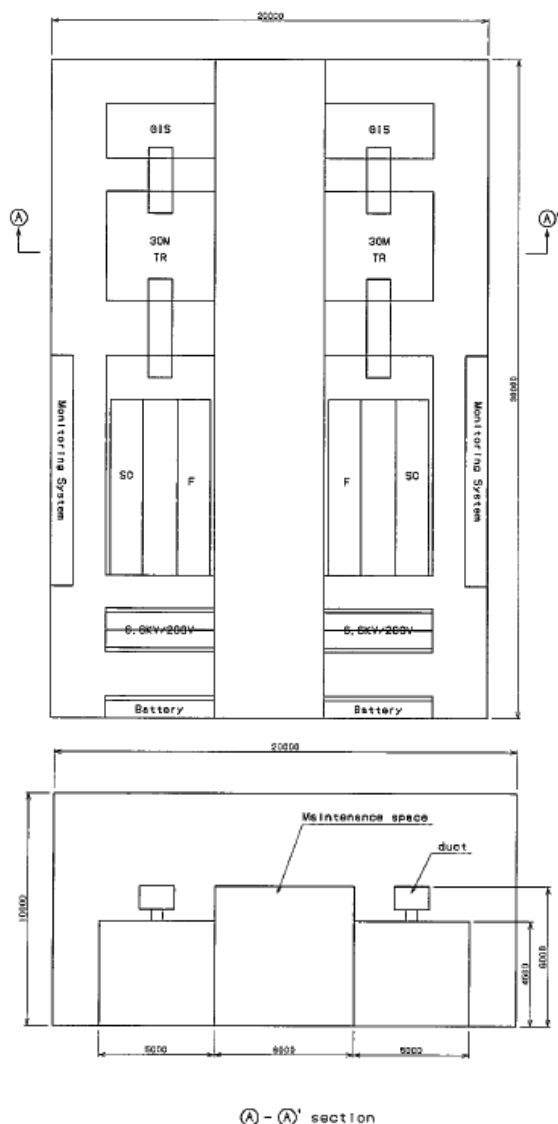


Fig. 5.2.2 66 kV アクセスホール変電所

5.3. 非常電源設備

5.3.1. 発電機

7か所のサブ変電所毎に 2 MW-6.6 kV 屋外ディーゼル発電機を設置する。発電負荷は火災停電時に必要な防災負荷、停電時の建屋維持、液体 He の維持等である。

5.3.2. 直流電源

受変電制御、非常照明用として、シール型鉛蓄電池 (MSE) 付の直流電源装置を備える。

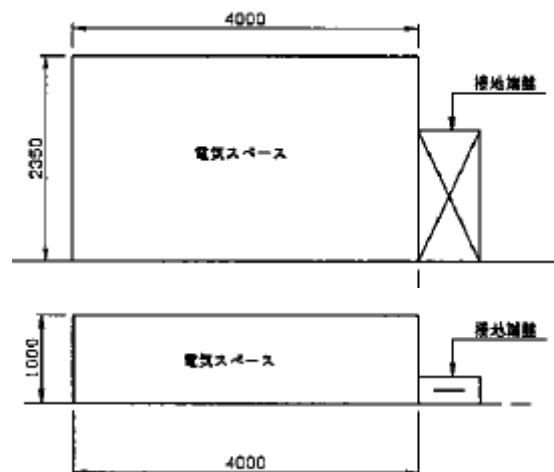


Fig. 5.2.3 6.6 kV ローカル変電所

5.3.3. 無停電電源装置

設備用制御機器、監視機器に必要な無停電電源装置は施設側、加速器制御に必要な無停電電源を加速器側でそれぞれ装備する。

5.4. 幹線設備

- 6.6 kV
RF 電源
冷凍機コンプレッサー
- ローカル変電電圧
動力 3φ200V
一般 1φ100-200V
その他加速器機器の仕様による

5.5. その他設備

被雷・接地設備、照明、コンセント、動力設備、設備監視システム、情報ネットワーク設備、電話、放送設備、安全設備についても所定の基準、法規などに従って設置する。

6. 冷却設備

サイトで受電した 164 MW の電力はすべて熱負荷となる。熱負荷の大部分は冷却水によって地上の冷却塔から大気中に放出される。また一部は空調設備によって大気中に放出される。ほとんどの電気設備は供給される電力をその場で冷却水か大

気中に熱に変えて放出するが、加速器の RF 源だけは電力を高周波として出力し、ビームにエネルギーを与えて、最終的にビームダンプで熱に代わる。冷却設備に対する熱負荷を下表に示す。

Table 7 ILC 熱負荷

Accelerator section	load to LCW	load to Air	Conventional	Cryo (Water load)	Total
e ⁻ sources	1.40	0.70	1.87	0.80	4.77
e ⁺ sources	5.82	0.64	2.27	0.59	9.32
DR	10.92	0.73	2.69	1.45	15.79
RTML	4.16	0.76	2.02	part of ML cryo	6.94
Main Linac	42.17	5.57	16.89	32.00	96.63
BDS	9.20	1.23	1.68	0.41	12.52
Dumps	14.00		1.12		15.12
IR	0.40	0.76	1.79	2.65	5.60
TOTALS	88.1	10.4	30.3	37.9	167

以上の表で load to LCW (low conductivity water) は冷却水（純水）で冷却する熱負荷、load to Air は空調の冷水で冷却する熱負荷、Conventional は設備系の熱負荷、Cryo は冷凍機の熱負荷である。Conventional と Cryo の熱負荷は大部分 LCW で冷却されるが、電気室を除き、機械室で室内に放出された熱は排気システムにより直接大気に放出される。

6.1. 冷却水システム

図のように地上の冷却塔で冷却水を製造する。外気湿球温度 27°C の条件で冷却水の供給温度は 31°C、還り温度は 42°C とする。

1 g の水の温度を 1°C 上げる熱エネルギー (1 cal) は 4.184 J なので、1 kW の熱負荷を毎分約 1.4 kg の水で冷却すると水の温度上昇は 10°C になる。この条件で ILC の総負荷 200 MW を冷却するためには毎分 280t の水を循環させる必要がある。ただし、加速器トンネル内の冷却水を直接地上に上げて冷却すると、装置冷却系に約 100 m の高低差による圧力 (1 MPa) とポンプ動力による送水圧力がかかる。これを避けるためアクセスホール内に熱交換器をいれて圧力の「縁切り」を

行う。冷却塔、熱交換器、ポンプ等の台数は必要台数 n+1 の冗長システムをとる。Baseline ではアクセスホール当たり約 20 MW の冷却/熱交換が必要であるが、ルミノシティ増強できるスペースを準備しておく。配管等のサイズはルミノシティ増強後の容量としておく。

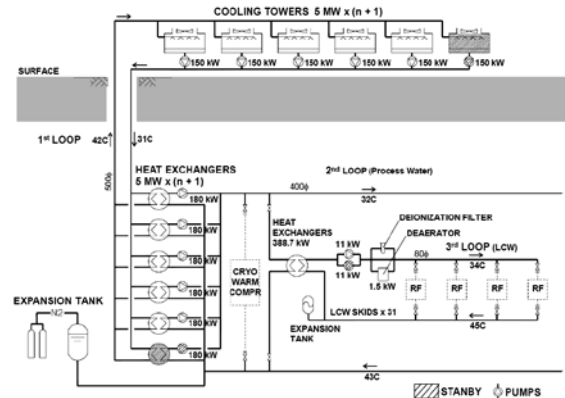


Fig. 6.1 冷却水システム

6.1.1. 2-loop 式と 3-loop 式の比較

アクセスホールからトンネル内への冷却配管は往復 2.5 km×2 の距離がある。このとき、図のように加速器に直接冷却水を供給する 2-loop 方式と、トンネル内の配管との間にさらに熱交換器を挟む 3-loop 方式がある。2-loop 式にした場合、装置側で水漏れがあると大量の水漏れ事故になる。熱交換器を入れる 3-loop 方式が一見コスト高に思われるがそうではない。装置に循環させる水は純水にしなければならないが、また、配管もステンレス配管が必要である。2-loop 式にすると長いトンネル全体を純水とステンレス配管にしなければならないためにかえってコスト高になる。

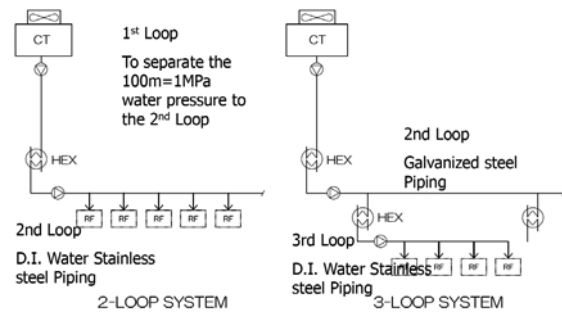


Fig. 6.1.1 ループ方式の比較

3-loop 目の熱交換器は主加速器では加速ユニット 6 台 (2 クライオストリング) 毎に熱交換器スキッドを設ける。装置を直接冷却する 3-loop 目の供給温度は 34°C、還り温度は 45°C の 11°C 温度差とする。

6.1.2. 冷却塔

冷却塔は図のように、密閉式空冷、密閉式水冷、開放式水冷の 3 タイプを比較すると、大きさ、騒音、価格の点で開放式水冷方式が優れている。但し、開放式であるため冷却用の補給水が必要になる。200 MW 全体で毎分約 10 t、1 アクセスホー

	A	B	C
TYPE	Closed-circuit Air-cooled Type	Closed-circuit Cooling Tower	Open Type Cooling Tower
UNIT SIZE (6MW UNIT)	59m × 10m	22m × 4m	12m × 4m
SPACE (for 200MW)	14,160m ²	5,870m ²	3,200m ²
NOISE (6MW UNIT)	95dB(A)	80dB(A)	75dB(A)
UNIT COST (for 200MW)	~25	~5	1

Fig. 6.1.2 冷却塔の比較

ル当たりでは毎分 1 t 程度である。実際のサイトでの給水条件を検討しなければならないが、花崗岩トンネルの湧水が平均 1 t /km /分程度であると言われているので利用できる可能性がある。

6.1.3. 冷水システム

冷水システムも冷却水システムと同様の 3 ループシステムだが地上に冷凍機を設置する。供給温度は 7°C、還り温度は 18°C とする。冷水はサービストンネル、あるいは電源室などの空調用ファンコ

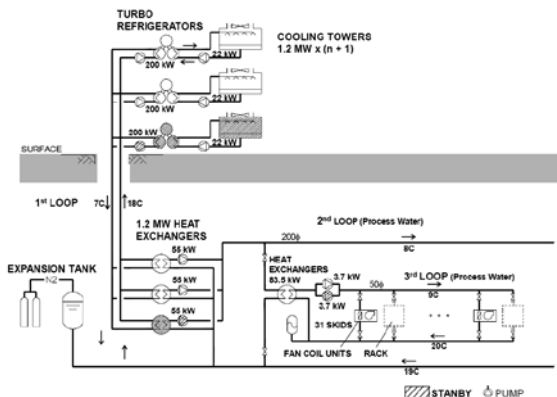


Fig. 6.1.3 冷水システム

イルユニットおよびラックの冷却に用いる。冷凍機は、省エネ、省 CO₂ 型のインバーターターボ冷凍機を採用する。3-loop 目の熱交換器は主加速器では RF 源の冷却と同様、加速ユニット 6 台毎に熱交換器スキッドを設ける。装置の容量、数、スペースについても冷却水システムと同様の余裕、冗長性、増強スペースを用意しておく。

7. 給排水設備

給排水はサイトの状況によるが、TDR では供給されるものと仮定した。飲用水は市水を水源とし、地上及び地下の受水槽に貯留し、給水ポンプでサイト内に供給する。

冷却塔補給水は地下湧水を砂ろ過し利用する。

地下トンネルの湧水はアクセスホールに集水後地上にポンプアップする。

加速器から漏水した装置冷却水等は管理排水とし、加速器トンネルピット内に充満するとポンプでアクセスホールに圧送し、RI モニターで放射線レベルを確認したのち、規定レベル以下の場合是一般湧水と同様に地上にポンプアップして排水する。規定レベル以上の場合ホールディングタンクに貯留して処理する。

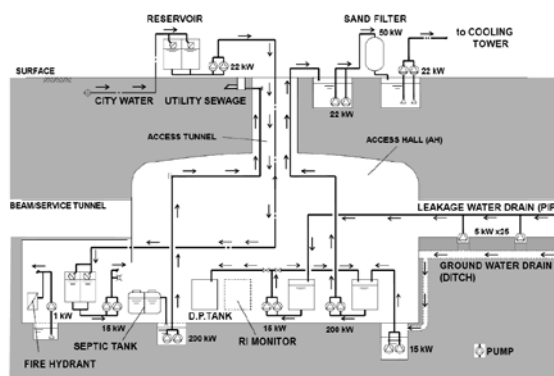


Fig. 7 給排水システム

トイレ排水は、浄化槽で処理し地上にポンプアップし下水道に放流する。

8. 空調設備

アクセスホールの上地上に設けた吸排気ファンで地下トンネル及びアクセスホールの吸排気を行う。吸排気の風量はダンパーで調整する。サービストンネルは若干陽圧、ビームトンネルは陰圧にする。排気システムは火災時の排煙システムを兼ねる。

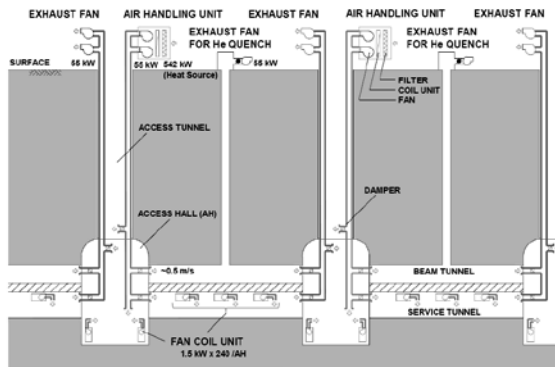


Fig. 8 空調システム

参考文献

- [1] KEK Report 97-1, April, 1997.
- [2] KEK Report 2003-7, September 2003.
- [3] KEK Report 2002-10, January 2003.
- [4] RDR
- [5] TDR
- [6] 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ガイドライン」平成 26 年 3 月
- [7] J. L. Baldy, Private communication.
- [8] 鉄道・運輸機構ホームページ。北陸新幹線五里ヶ峰トンネル (15.2 km) は 6 ブームガントリージャンボなどの大型機械の導入により平均月進 160 m、最大月進 281 m を記録した。