

Rey.hori/KEK

# ILC施設

照沼 信浩

高エネルギー加速器研究機構

加速器研究施設

応用超伝導加速器センター

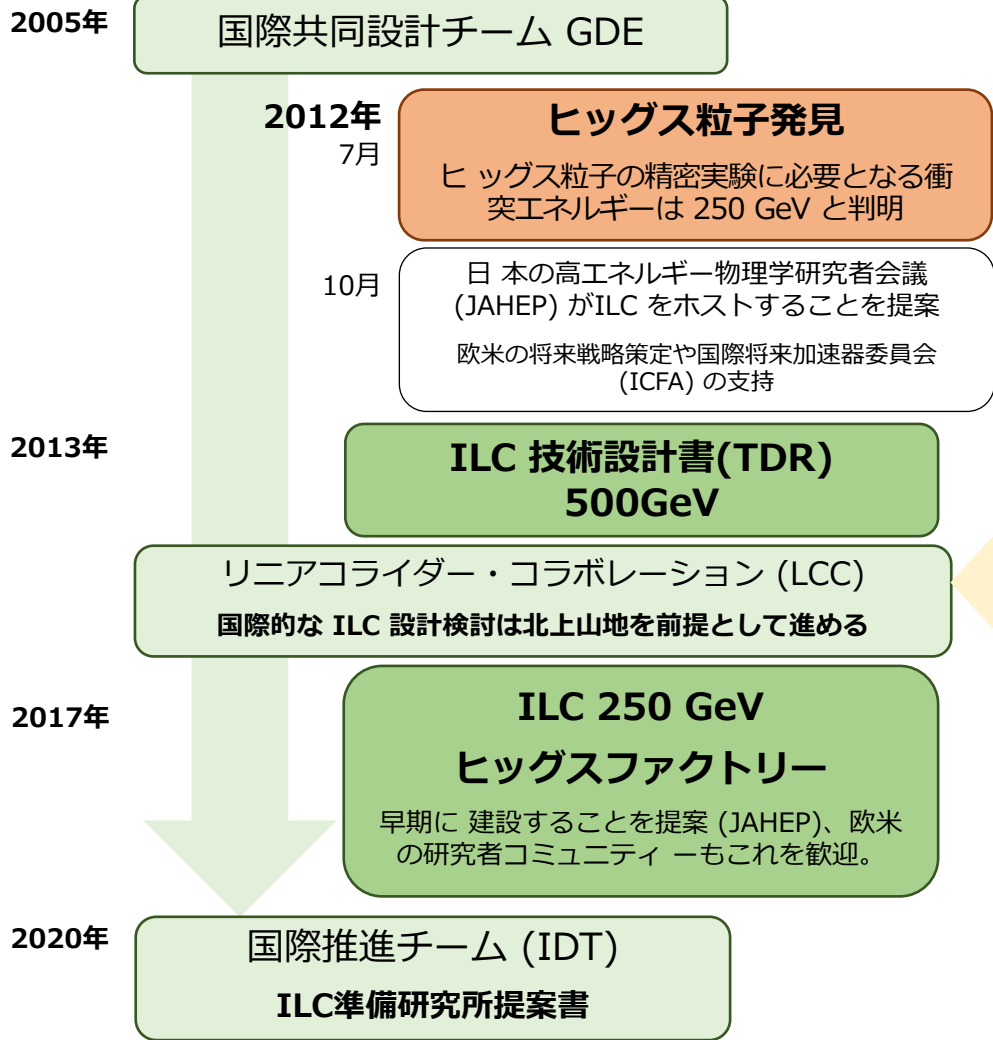
高エネルギー加速器セミナー OHO'21

# 1. はじめに

- ヒッグス粒子の精密実験を行うために実現を目指す ILC は、衝突エネルギー 250 GeV、**全長 20 km の大規模な加速器施設**である。
- 国内では**山間部に建設**することを想定、振動が少なく安定した**地下の堅牢な花崗岩帯**に加速器・検出器を設置する計画である。
- ILC施設の設計検討は、**ILC国際設計組織**、国内の**産官学連携によるILC計画検討組織**の協力で進められてきた。
- これらの施設設計の概要を紹介する。

# 2. 施設検討の経緯 - 背景

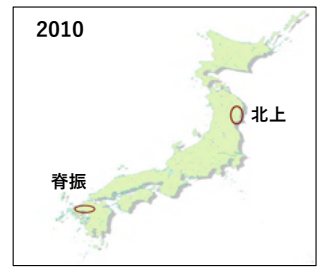
国際研究者組織



国内候補地の検討 (研究者)

2000年頃 国内 13ヶ所を候補に検討

2010年 北上山地と背振山地に絞る



2013年 1月 ILC 立地評価会議を設置 (JAHEP - ILC 戦略会議)

7月 国際レビュー  
8月 公表

**北上山地を ILC 建設に最適と評価**

現在、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。

# 2.1.1 国際組織による基本設計

2005年 国際共同設計チーム (GDE) 発足

2007年 基準設計書 (RDR)

2013年 **技術設計書 (TDR)**

日米欧それぞれの地域での案を併記

欧州および米国案：平坦部, 日本案：山間部

2013年 リニアコライダー・コラボレーション (LCC) 発足

## ■ 技術設計の熟成

### Change Request Process

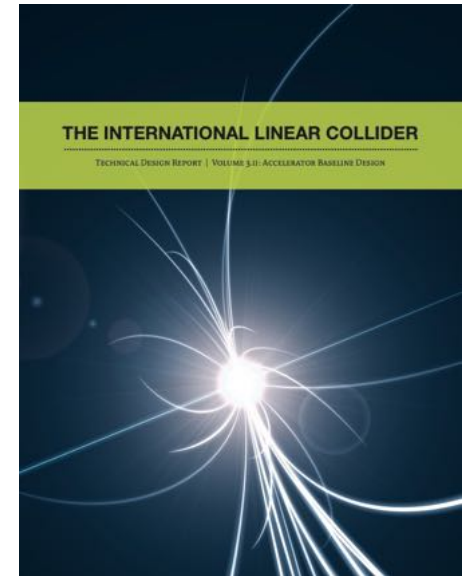
TDRの改訂を審議・確定



2020年 国際推進チーム (IDT) 発足

2021年 準備研究所提案書

詳細設計へ



施設に関わる Change Request

**ILC-CR-0003: Detector hall with vertical shaft access**

ILC-CR-0004: Extension of the Main Linac tunnels

**ILC-CR-0007: Adoption of the Asian design as sole baseline**

**ILC-CR-0009: Cryogenic Layout**

ILC-CR-0011: The rearrangement of undulator positron source

**ILC-CR-0012: Reduction of width of Linac Shield Wall and Tunnel Cross-Section**

ILC-CR-0013: Update of the ILC beam dump specifications

ILC-CR-0014: Cryogenic layout (2)

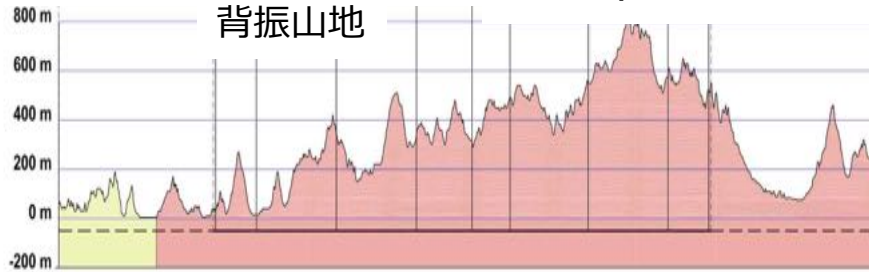
ILC-CR-0015: Kamaboko shaped positron BDS tunnel

**ILC-CR-0017: Orientation of electron/positron linacs**

ILC-CR-0018: Updated power estimate for ILC-250

# TDRに例示された日米欧サイト (おおよそのスケールを合わせて表示)

日本案 (山岳地形)

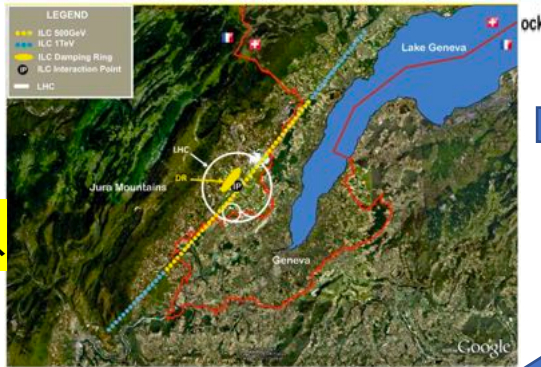


斜坑(・立坑)アクセス

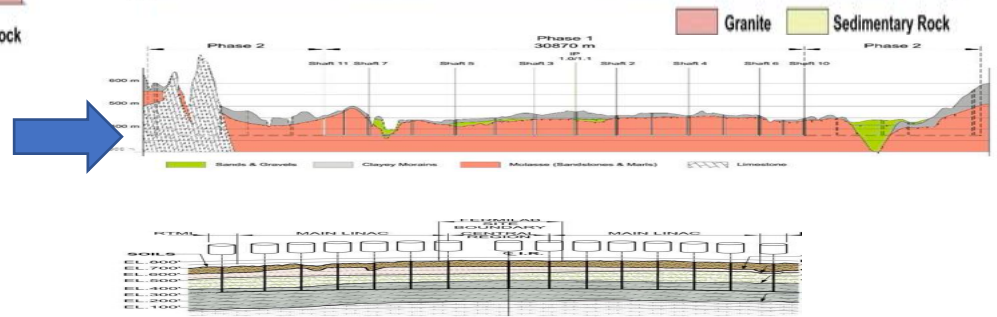
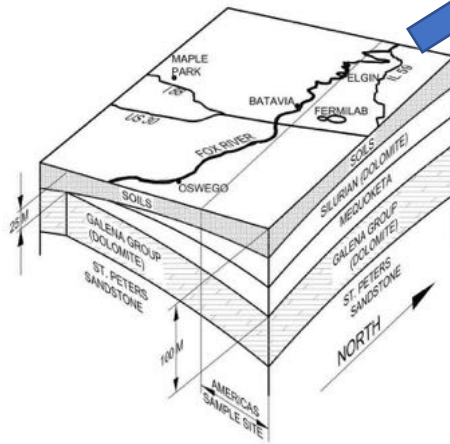
北上山地



欧州案  
(平坦地形)  
立坑アクセス



米国案  
(平坦地形)  
立坑アクセス



斜坑アクセス  
(~1 km)\*

- 車両での搬送が可能
- 避難の自由度が高い
- 距離が長くなる (10%勾配) ... 長い配管

立坑アクセス  
(~100m)\*

- 距離が短い。搬入はクレーン。
- 立坑は高価
- 避難はエレベータ(/階段), +退避室

\* 坑口から深さ100mまでのアクセス長

## 2.1.2 産学連携による検討

### ■ 先端技術を結集する ILC 計画

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が重要

### ■ 2008年 一般社団法人・先端加速器科学技術推進協議会 (AAA) 設立

- 日本全国から100社を越える企業、およそ40の学術機関が参加
- 産学連携による ILC 推進の母体
- 様々な部会が設定され活動
- ILC 施設に関して、土木建設業界からの参画企業が協働し、課題を整理、その対応を提言している。

地下トンネル・空洞の土木設計検討、地震・放射線・排水等の安全対策など多岐に渡る。

- さらに、持続可能社会の観点でのまちづくり、グリーン ILC (省エネ技術の取り込み) など、幅広い分野での検討が進められている。

## 2.1.3 候補地域による検討

建設候補地として提案されている東北地域での活動

- 2009年 **東北ILC推進協議会** を設立
  - 地域の学会、産業界、経済界、自治体の連携の要として活動
- 2016年、この協議会の下に **東北ILC準備室** を設置
  - **土木技術をはじめとする専門家による、北上山地の特性に基づく具体的な施設検討**  
(技術部門 地下施設専門部会)
    - ✓ 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を実施**
    - ✓ 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
  - 2019年に **「東北 ILC 施設計画」** をとりまとめ
    - ✓ 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
  - 2018年から地域住民との対話形式の説明会を開始
- 2020年、**東北ILC事業推進センター** が発足
  - 東北ILC準備室の役割を引き継ぐ、より強固な地域産官学連携を構築
  - **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**  
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

## 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 → **土木工学専門家の知見・指導が必須**
- 2004年、KEKから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

### 国際リニアコライダー土木技術研究小委員会 (2006 – 2013)

土木学会 岩盤力学委員会およびトンネル工学委員会

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

[http://www.geoeng.jp/2012R3\\_ILC.pdf](http://www.geoeng.jp/2012R3_ILC.pdf)

### ILC 施設の土木工事に関するガイドライン (2014)

- 2019年：東北 ILC 推進協議会より北上山地の地質地形に基づく「東北 ILC 施設計画」の評価委託

### ILC 施設計画評価小委員会 (2019.7 – 2020.3)

土木学会 岩盤力学委員会

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

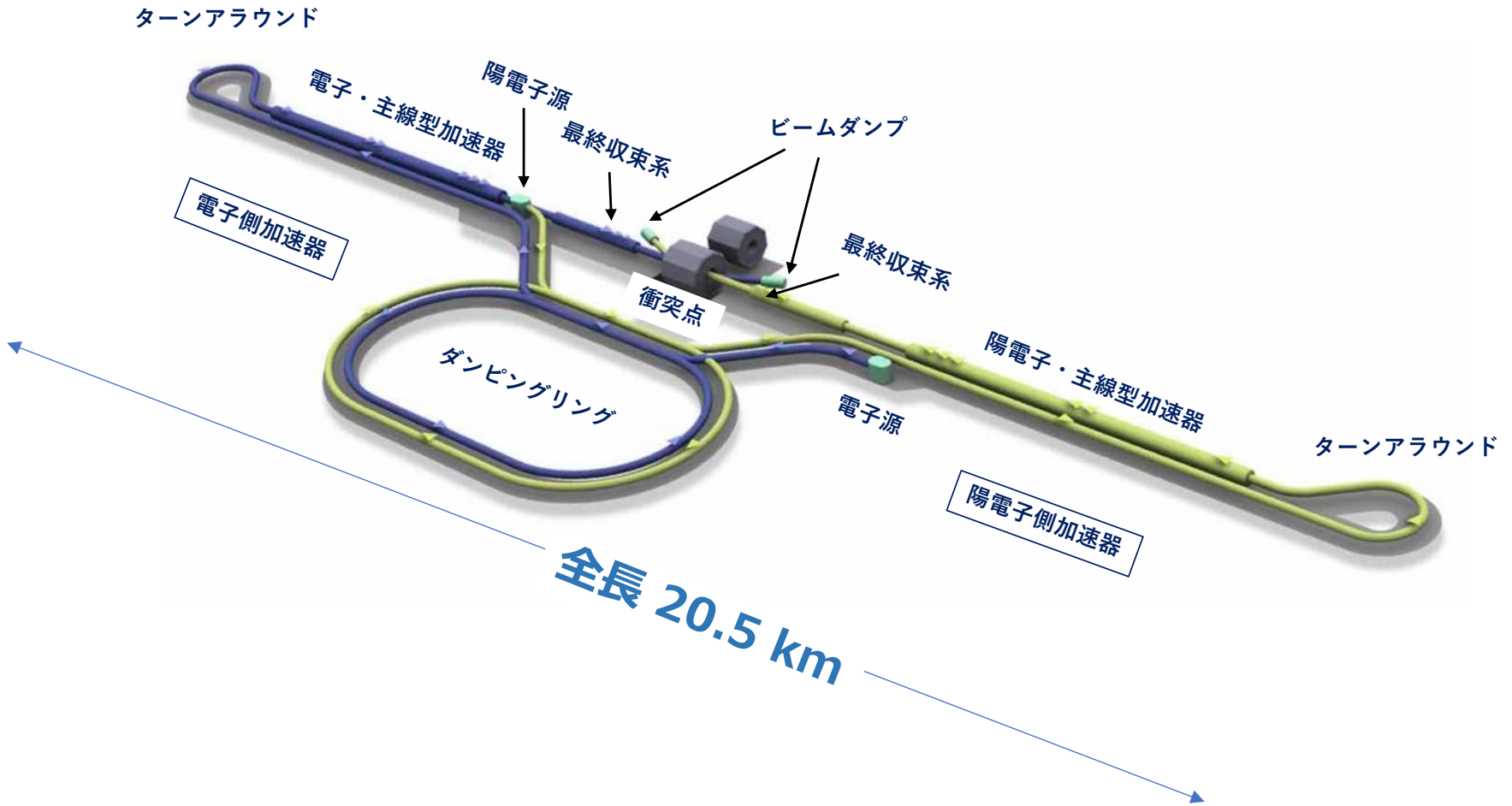
**“「東北 ILC 施設計画」は技術的成立性を担保しているものと評価、その内容は妥当であると結論する”**



# 3. ILC施設の設計要件

- 加速器レイアウト
- 加速器からの設計要件
- 建設サイトの要件
- 候補地の地形・地質

# 3.1 加速器レイアウト

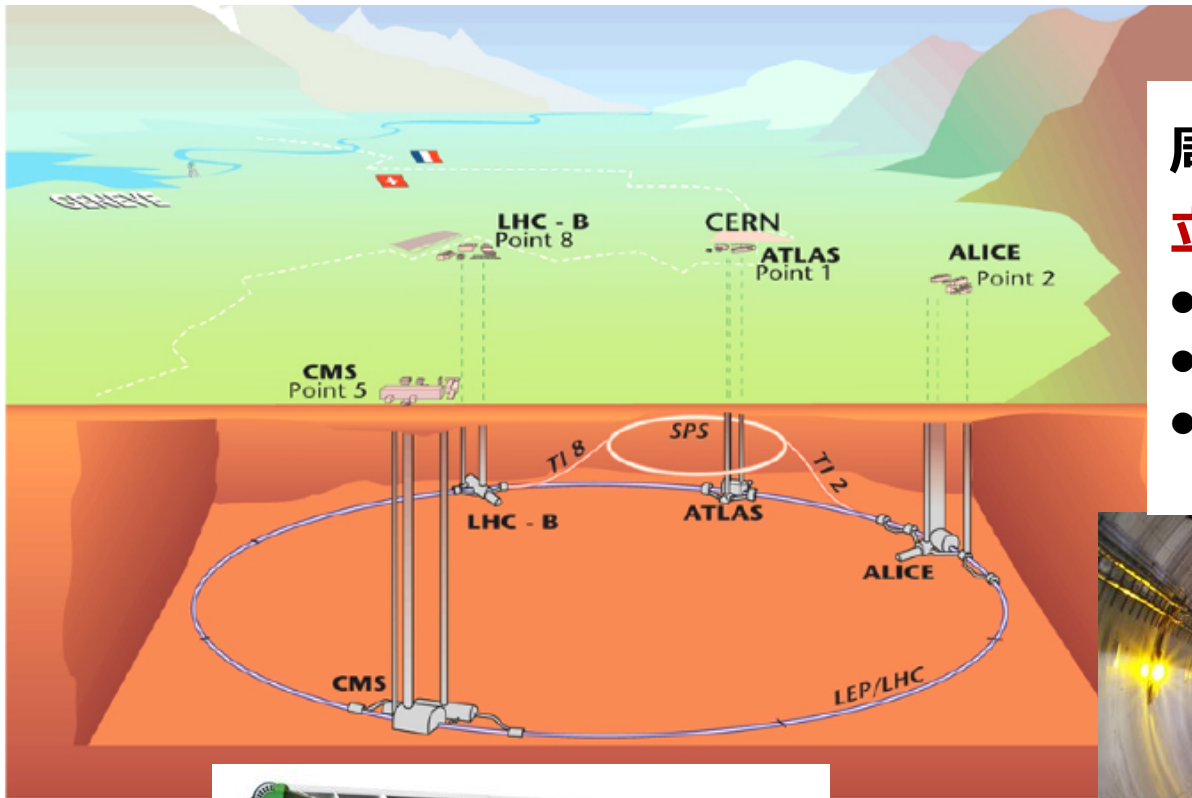


# 世界の主な大型加速器

- ほぼ**平坦な地形**に建設
- 多くは研究所敷地内に建設
- CERN, 特にDESYは市街地の下を通る



# CERN LHC (Large Hadron Collider)



周長 27 km, 地下 100 m

## 立坑からのみアクセス

- 装置搬入、冷却水・空調、電力
- 地下水もポンプで揚水（排水）
- 作業者は、約3.4 km毎の立坑（エレベータ）から。



March 27 2001

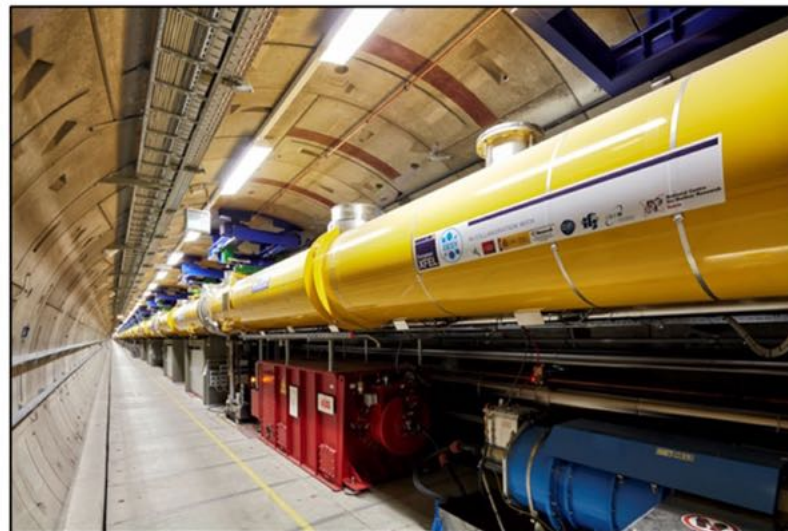
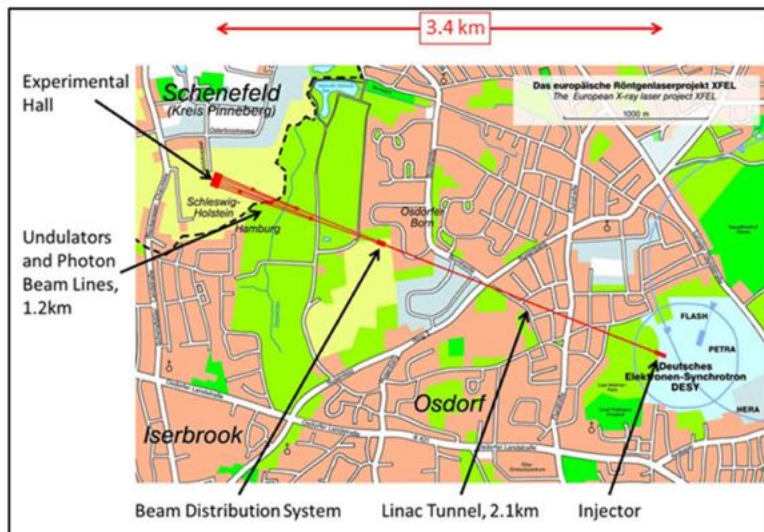


主トンネルは3台のTBMで掘削

# European XFEL

放射光利用施設

ILCと同じ技術による超伝導電子加速器



**市街地の地下20mを通る** 超伝導加速器トンネル長 2.1 km, 17.5 GeV



トンネルはTBMで掘削



# 国内の大型加速器

- 平坦な地形に建設
- 全て研究所敷地内に建設

J-PARCは沿岸部  
(岩盤まで杭打ち、Open-cut工法)



KEK TRISTANトンネルは、Open-cut工法で建設

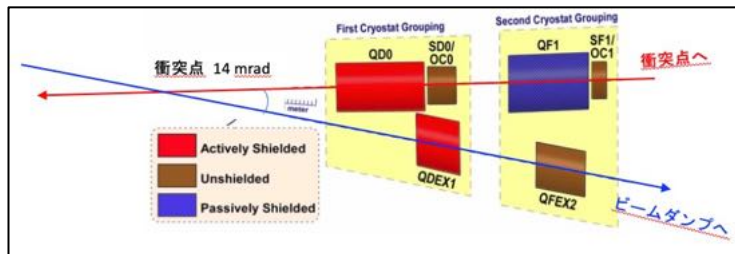


Spring-8は、山を削った表面、  
良質の岩盤上に建設 (地上施設)

## 3.2 加速器からの設計要件

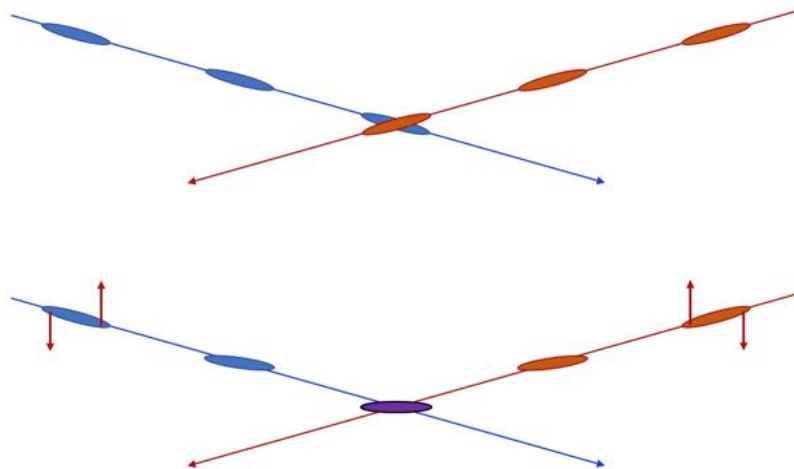
- 主線型加速器トンネルの交差角
- 加速器トンネルとジオイド
- 加速器のアライメント許容度

## 3.2.1 主線型加速器トンネルの交差角



衝突点前後のビームラインの干渉を避ける

→ 大きな交差角へ



ルミノシティを高く  
= クラブ空洞でバンチを回転  
空洞性能の限界

→ 小さな交差角へ

最適化 → 14 mrad

両翼の電子・陽電子トンネルに対しても 14 mrad としている

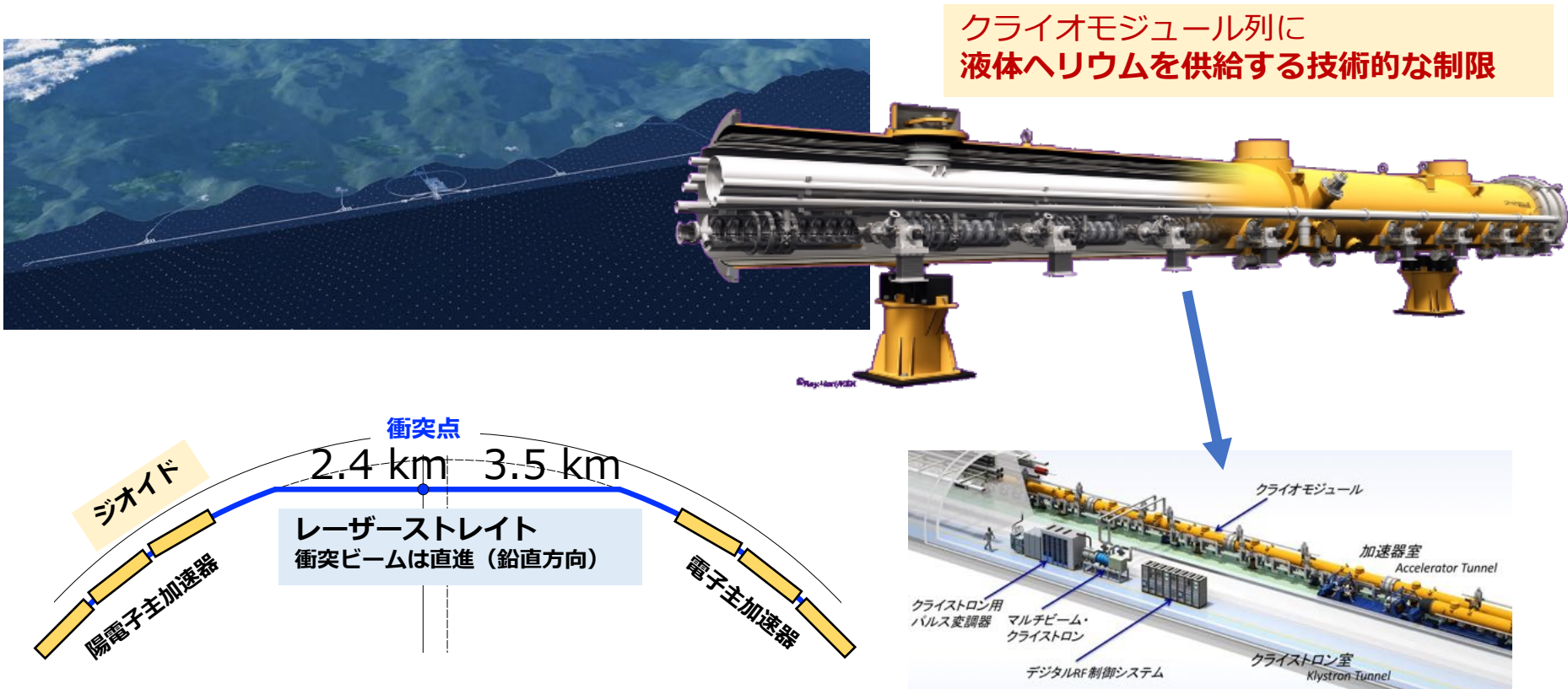




# 3.2.2 加速器トンネルとジオイド

## ILC加速器の配置（鉛直方向）

- 衝突ビームの最終収束系：ビーム軌道を鉛直方向に曲げないことが重要（直進）
- 一方、主加速器などの超伝導加速器はジオイドに沿った水平でなければならない



## 3.2.3 加速器のアライメント許容度

### ■ ビームシミュレーションにより評価

- 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
- 全体として滑らかに繋げる

### ■ 加速器の設置

- 初期設置精度は 0.3 mm 以下を要求
- トンネル完成後にビームラインの**基準ネットワークを構築**
- 加速器装置を設置。各装置には $\pm 10$  mm程度の位置調整機構

### ■ ビームを用いたアライメント

- **Beam based alignment; BBA**

電磁石の微調によるビーム軌道変化を用いて、より詳細にアライメントを実施

- **リモート操作可能な位置調整用ムーバー**

主線型加速器（クライオモジュール）、最終収束系電磁石（四極・六極）

## 3.3 建設サイトの要件

- 全長・拡張性
- 地盤振動の許容値
- 地質・地形

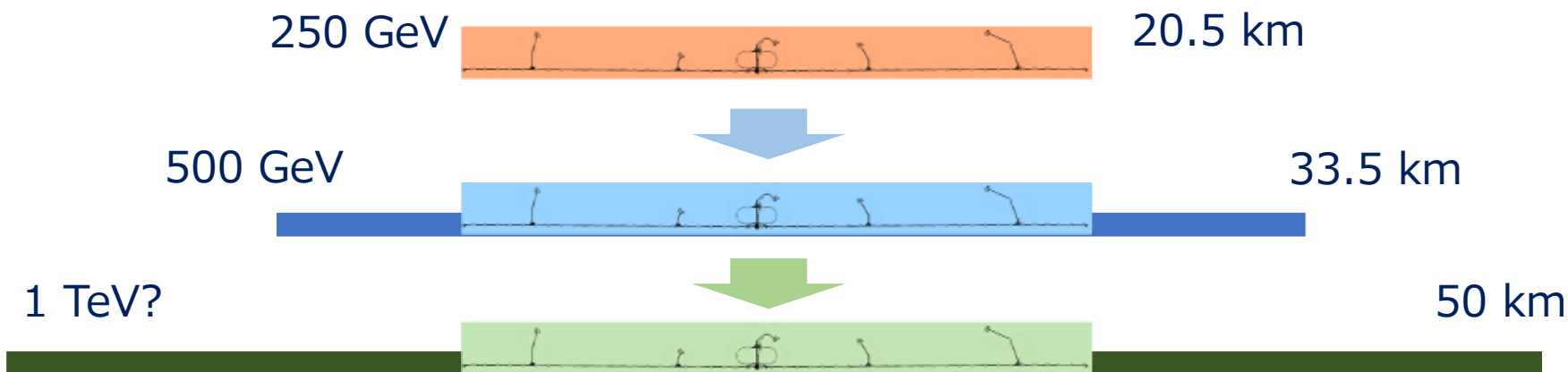
## 3.4 候補地の地形・地質

- 地形による建設要件
- 地質調査
- 施設計画案

## 3.3.1 全長・拡張性

リニアコライダーの特徴 → **拡張性（延伸が可能）**  
高エネルギー化の余地がある

立地検討条件：50 km の長距離に渡って概ね一様な岩盤を有すること



## 3.3.2 地盤振動の許容値

- 電子および陽電子ビームは、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。
- 地盤振動の影響（別々の20km） → 衝突点でのビーム位置ズレ
- ビームシミュレーションで地盤振動の許容値を評価

- 主線形加速器およびBDS

- 周波数 0.1 Hz 以下：振幅 10  $\mu\text{m}$  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

- **周波数 0.1 Hz 以下のゆっくりとした変動**

- 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

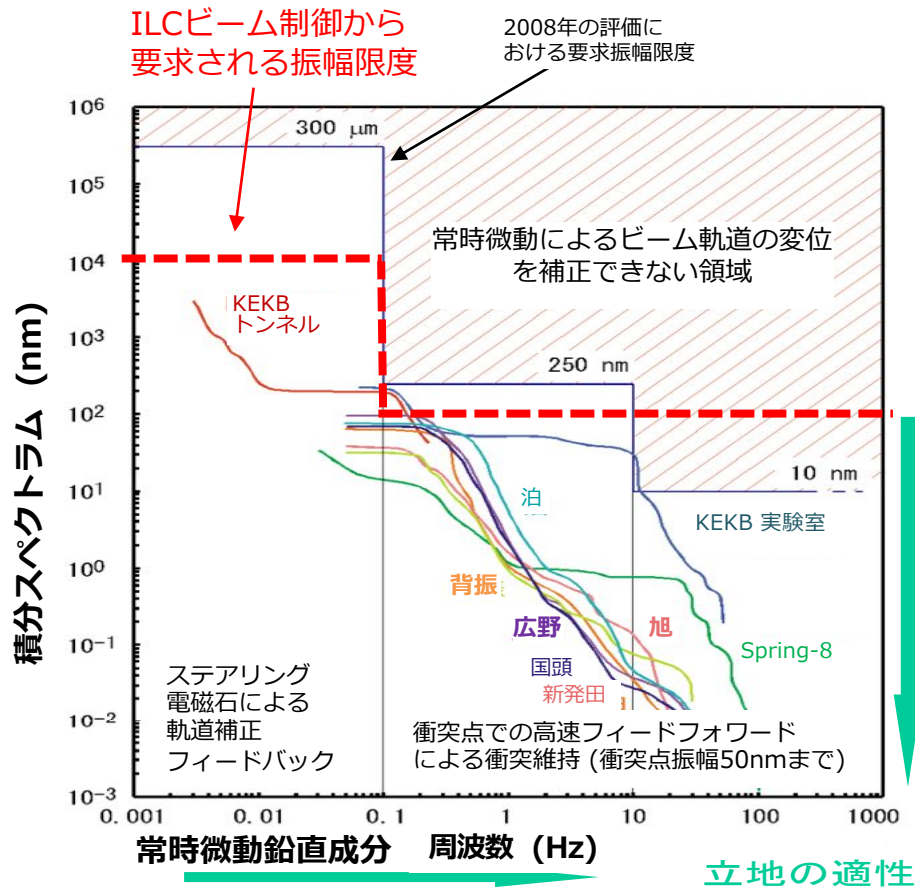
- **周波数 0.1 Hz 以上の領域**

- 軌道補正フィードバックが効かない → 許容値を下回る“静かな”地盤が必要

- 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。

# 常時微動とビーム軌道の安定性

土木学会Report /2008.3

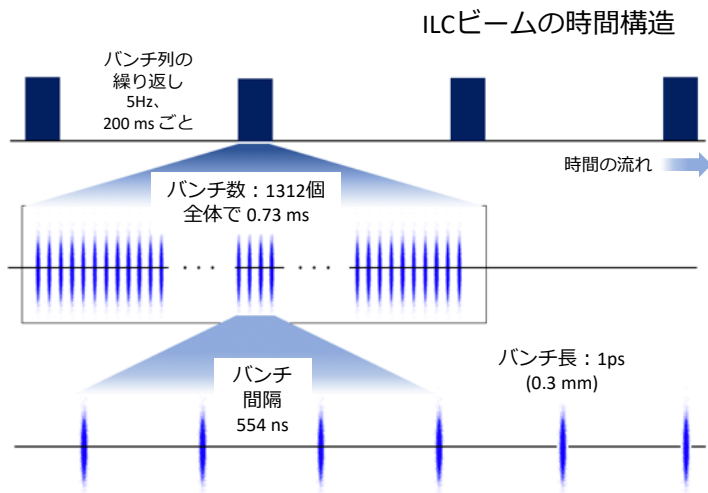


## 常時微動観測点の地質条件

観測点	所在地	地質	土被り
KEKBトンネル	茨城	沖積層	<10 m
KEKB実験室	茨城	沖積層	<10 m
Spring-8	兵庫	変斑レイ岩	-
新発田	新潟	頁岩	25 m
広野	福島	花崗閃緑岩	-
旭	愛知	花崗岩	50m
背振	福岡	変成岩	-
泊	青森	安山岩	14 m
国頭	沖縄	砂岩	30 m

**花崗岩**のような**堅い岩盤に立地**  
**常時微動は許容値を十分に下回る**

# ビーム軌道フィードバック



## ■ バンチ毎の位置を検出して補正

- 位置をモニターした時点でビームは過ぎてしまう。  
ビームは光速で移動→そのままでは間に合わない

### ① ターンアラウンド - ILCの両端で

- バンチ毎の位置補正が可能
- Uターン (約1μ秒)



### ② 衝突点でのビームフィードバック

- 地盤振動の影響はバンチ列全体でほぼ一様
  - 振動～数Hzに対して、ビーム幅 0.7 ms
- ビーム衝突後のビーム位置 (蹴られ具合) から入射のズレを評価
- 先頭バンチの位置ズレ → 後続バンチを補正



# 3.3.3 地質・地形

## ■ LC建設候補地の地質に求めること

- 地盤振動の影響を受けにくい堅固な岩盤帯
- 長期間にわたる継続的変形が生じにくい岩盤性状
- 50 km の長距離に渡って概ね一様な岩盤

## ■ トンネル掘削でのリスク

- 「断層」「破砕帯」の遭遇 → 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「破砕帯」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「破砕帯」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。

## ■ 立地評価の条件

- 大規模な花崗岩帯を有することを基本として選定
- 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
- 30km以内に活火山が存在しないこと
- 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

- **北上山地**：起伏が小さいなだらかな高原状地形。非火山性の山地。
- **検討地域**：南北に連なる 3つの花崗岩帯。50 km に延伸する場合、そのほとんどが花崗岩帯に収まる。

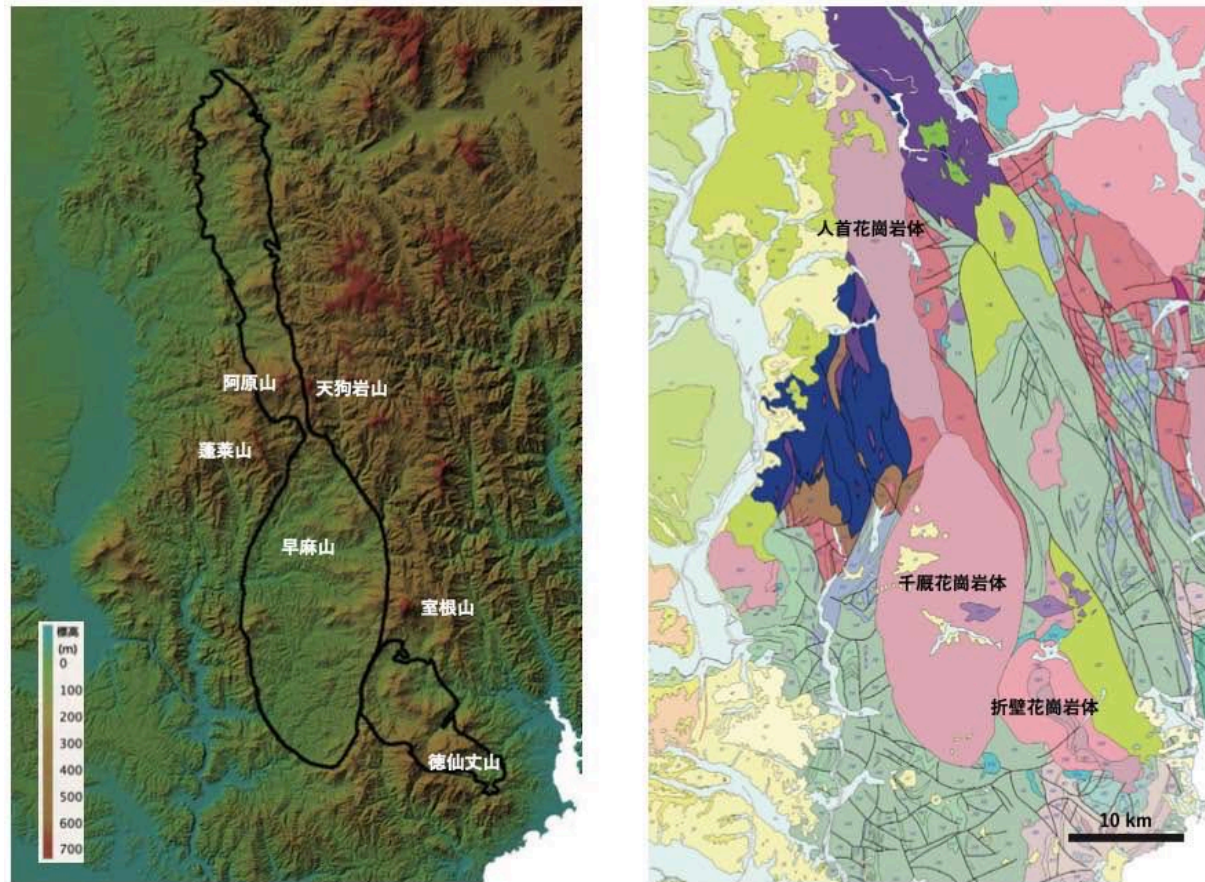
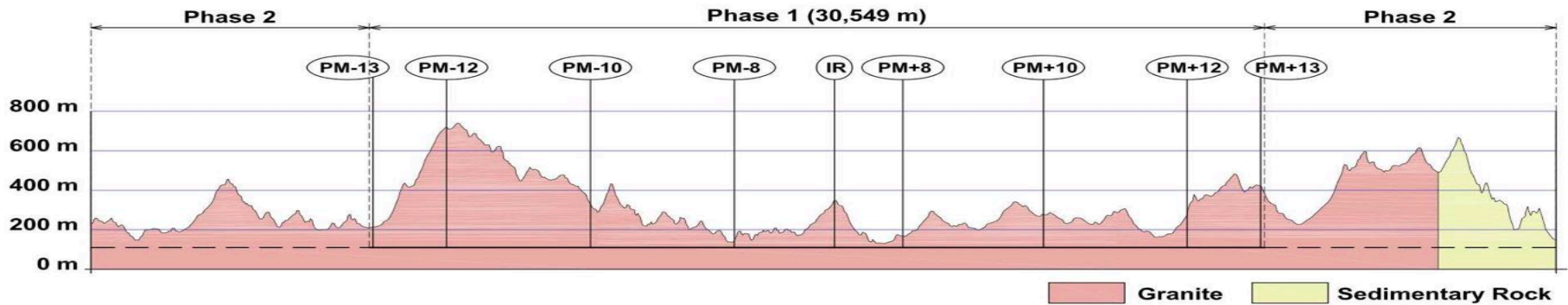


図 3.1: 北上サイトの地形図 (左図), 及び地質図 (右図)

「東北ILC施設計画」より抜粋

## 3.4.1 候補地の地形による建設要件



- 2013 年から国際設計チームは北上山地を想定して検討を開始。
  - 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**
  - **立坑アクセス**による検出器建設の大幅な効率改善が期待できる
- ✓ **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**とする。
  - その長さは加速器トンネルの深さに依存、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
- ✓ **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

2009 年から 2017 年にかけて、東北大および岩手県が実施

- **ボーリング調査**

直接サンプリング、物性試験

- **電磁探査**

水の存在、割れ目の推定

- **弾性波探査**

岩石の硬さ、連続性



H24-2 (人首花崗岩体; 孔口標高 146m)



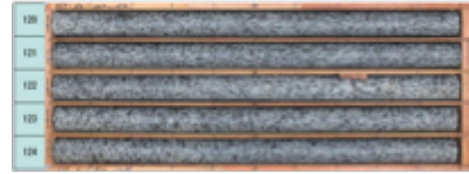
H22-3 (人首花崗岩体; 孔口標高 210m)



H22-2 (千厩花崗岩体; 孔口標高 214m)



H27-1 (千厩花崗岩体; 孔口標高 231m)



H24-1 (千厩花崗岩体; 孔口標高 346m)



H22-1 (千厩花崗岩体; 孔口標高 128m)



H22-1' (千厩花崗岩体; 孔口標高 130m)

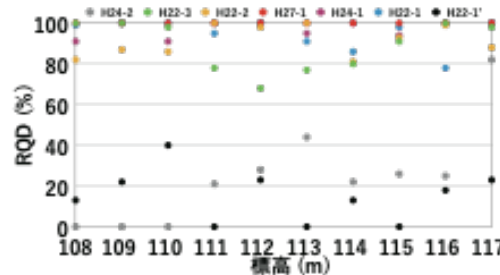


図 4.3: 標高 110m 付近のコア写真及び RQD (コア写真の数値は深度 (m) を示す)

# ボーリング調査

採取したコアから  
**極めて良好な花崗岩**  
 であることを確認

取り出したサンプル

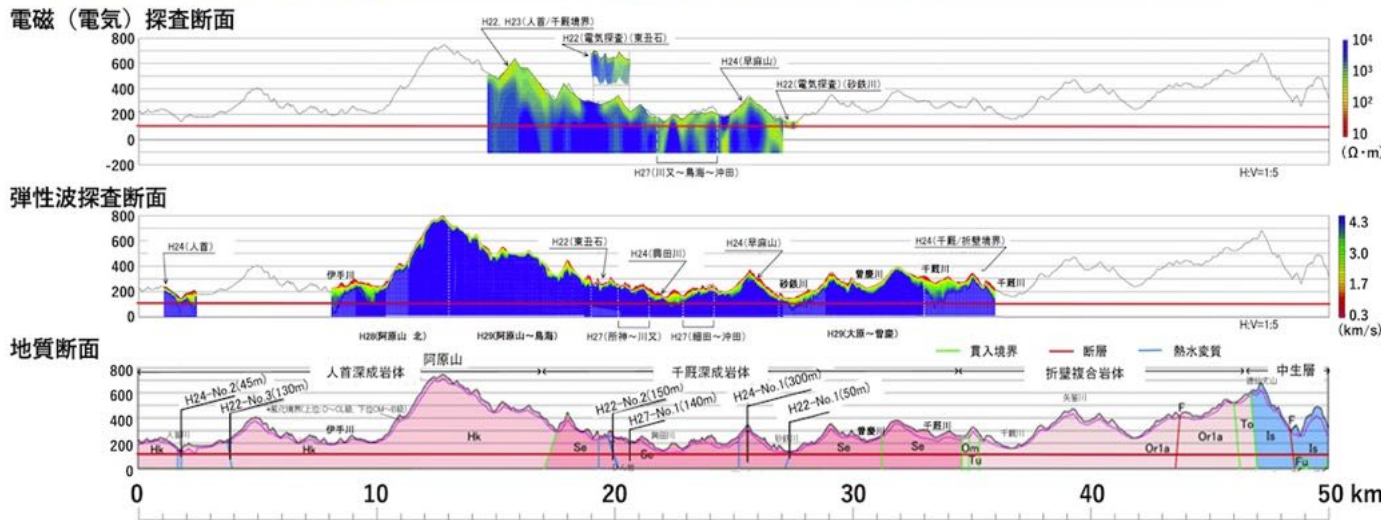
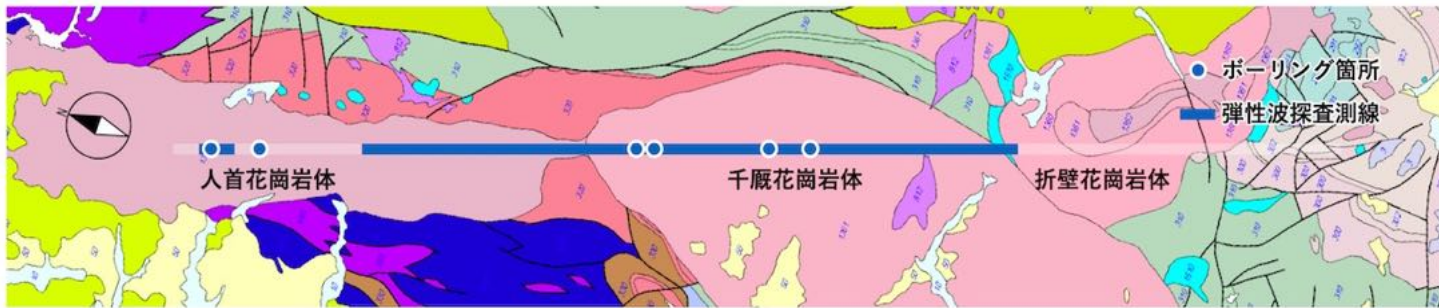
- **室内岩石試験** (東北大)  
 一軸圧縮強さ、圧裂引張強さ、  
 超音波速度
- **蛍光X線分析** (東北大)  
 (重金属含有量評価)
- **中性子照射試験** (KEK)  
 (放射化の評価)



特に問題になりそうなものは無い  
**通常の岩石**

# 北上山地の地質

「東北ILC施設計画」より抜粋



**弾性波探査**  
非常に速い弾性波速度を観測  
→ 堅固な岩石が拡がっている

## 電磁(電気)探査

- 局所的に電気抵抗率が低い箇所（河川付近）は水の入った割れ目の存在が疑われる。より詳細な調査を行い設計に反映する。
- 一方、**深度 100 m 以深**の電気抵抗率は概ね高い値を示す。（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**。

### 3.4.3 「東北ILC施設計画」

- 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、2019年、東北ILC準備室がKEKと共にまとめたのが「**東北ILC施設計画**」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、主に土木設計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た。
- 2020年3月、本委員会は “「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**”と評価した。

# 東北ILC施設計画 (2019)

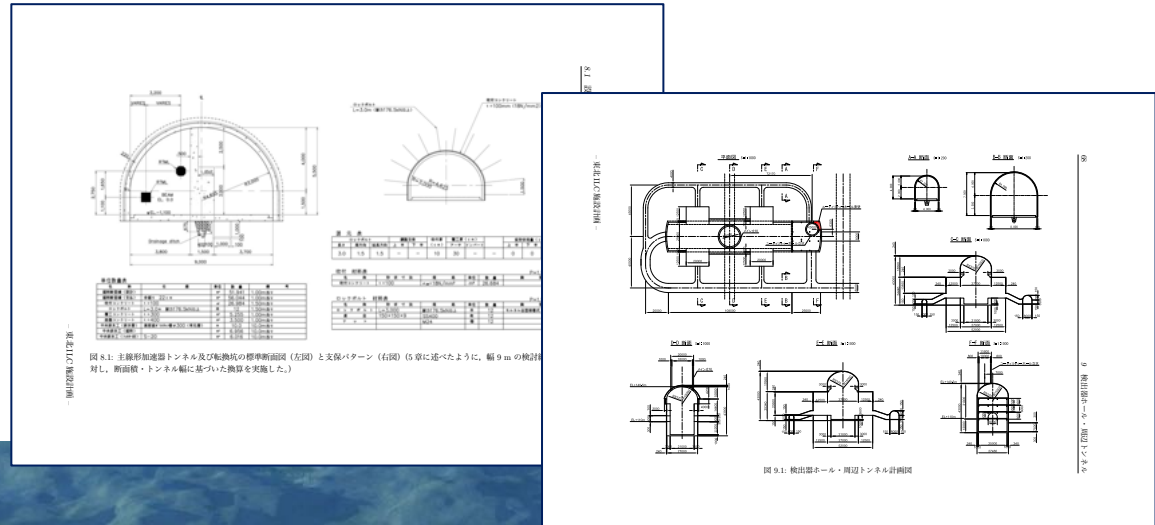
[https://tipdc.org/assets/uploads/2020/12/Tohoku\\_ILC\\_shisetsu.pdf](https://tipdc.org/assets/uploads/2020/12/Tohoku_ILC_shisetsu.pdf)

東北ILC施設計画

2020年10月

東北ILC事業推進センター

協力  
高エネルギー加速器研究機構



Rey.hori/KEK

## 4. 地下施設

- 加速器トンネルの設計要件
- 土木工事
- 加速器トンネル
- 地下へのアクセスおよび設備ホール



# 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

### ■ 主な加速器トンネル

- 加速器ライン
- 電源や冷却水系の設備エリア
- 搬入路

主線型加速器の高周波源やローカル変電所はトンネルに沿って配置する

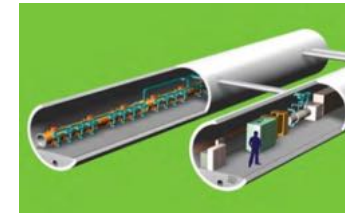
### ■ 中央の放射線遮蔽壁でトンネルを分ける

- 高周波試験時の立ち入りを可能とする
- ビーム運転中に放射線から高周波源を守る

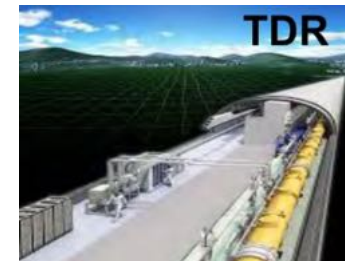
■ これらの要求をシンプルに満たすものとして、“かまぼこ型”断面が採用されている。

■ 局所的に側室・空洞を設ける。

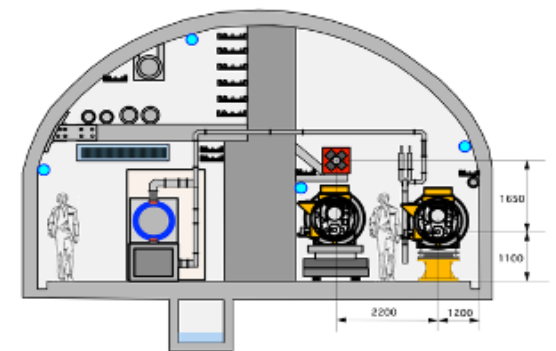
これらは次に示すトンネル工法の NATM 工法で可能となり、局所的な断面変更にも比較的柔軟に対応できる。



2007 RDR: ツイントンネル



2013 TDR: 単トンネル（かまぼこ形）



## 4.2 土木工事

### ILCのトンネル工事 ← 山岳トンネルの技術

(道路・鉄道トンネル)

### 検出器ホールなど大型空洞

← 地下発電所、石油備蓄基地など

国内の  
豊富な  
実績

### 道路・鉄道トンネルと異なる背景

- あらかじめ、地質・地形の良いところが選定されている

(良質の花崗岩帯) ← 工事リスクの低減

- ILC 20km: 約 5 km/工区, **アクセスポイント毎**に地下に向けて工事を開始

## 4.2.1 トンネル工法

### ■ TBM工法

- Tunnel Boring Machine（円形）
- 一般に掘削スピードが速いが、機械が高価
- コンクリートシールドを設置しながら進む。

### ■ NATM工法

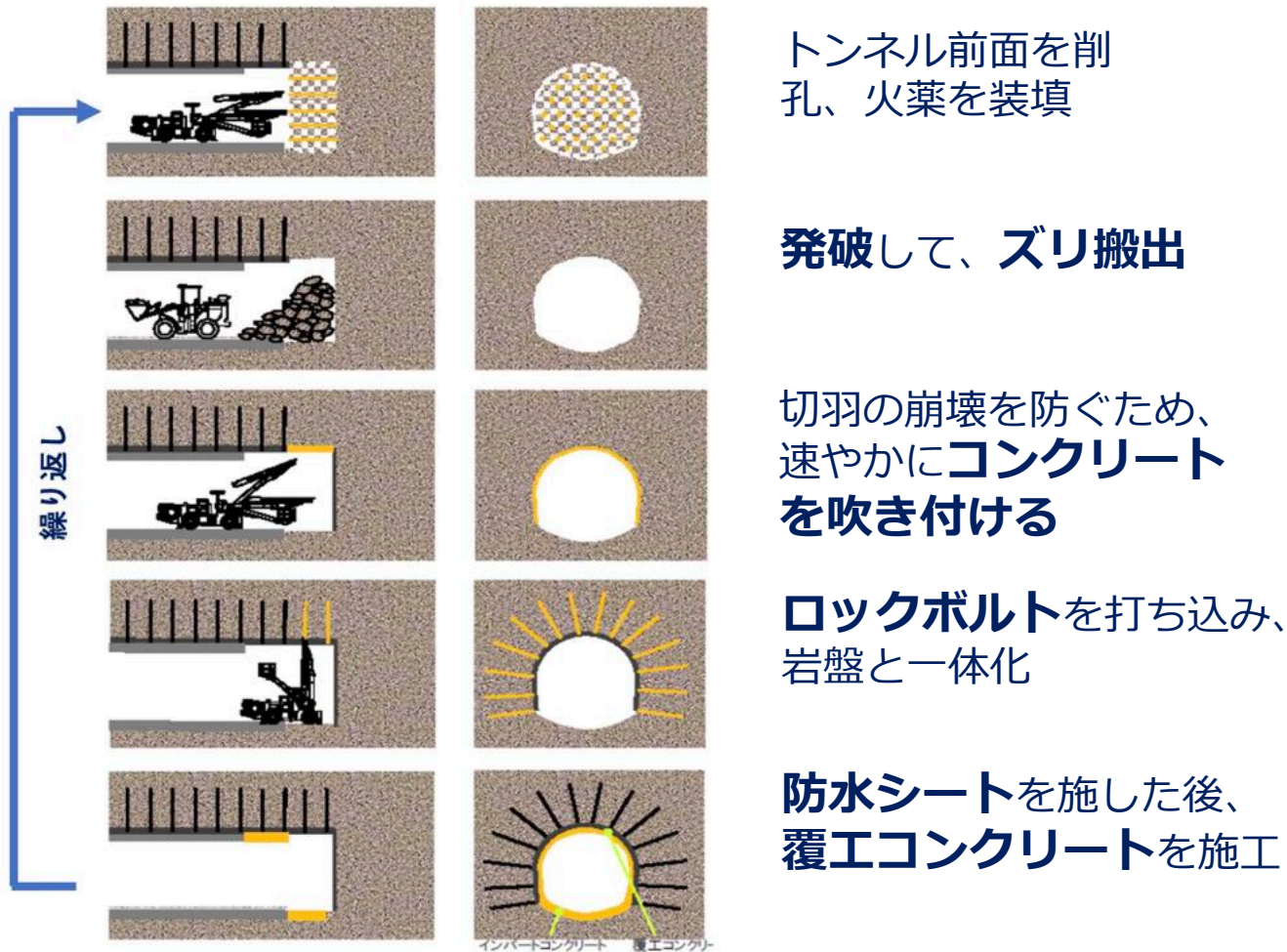
- 新オーストリアトンネル工法
- 比較的自由的な断面トンネル
- 発破や掘削機により掘削、吹付けコンクリートとロックボルトにより地山の強度を利用してトンネルを保持する。

## 日本でのILC建設にはNATMが最適

- 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

## 4.2.2 工事の手順

### 山岳トンネルの施工方法（NATM）イメージ



# 4.2.3 湧水対策

## 地下水（自然湧水）量の想定

2018年8月18日学術会議ILC検討委員会。技術検証分科会の資料より抜粋

### ILC地下構造物の地下水処理

<参考資料> 国内トンネルの湧水量実績例

岩種別トンネル湧水量一覧(工事中) /統計的予測 -日本トンネル技術協会調査1982y

岩種	坑口最大湧水量 (t/min)	貫通時の比湧水量 (t/min/km)	比湧水量の平均値 (t/min/km)
火山岩	9.0	1.7	0.6
深成岩	4.1	1.5	0.6
中・古成層	2.0	3.2	1.2
泥岩・砂岩	1.1	61.0	0.3
砂礫	0.6	1.4	-

➢ ILCサイト(花崗岩+堆積岩)での湧水量は、上表の工事中湧水量を参考にしつつ、土木学会等で推奨されている0.5t/min/kmに安全率2を乗じ、1t/min/kmと仮定し算出した。

工事中と恒常的湧水量の比較事例 /主な鉄道トンネル事例 -JRJT調査

線区	延長 (m)	貫通時期 (年・月)	工事中湧水量 (t/min/km)	恒常的な湧水量 (t/min/km)
津軽海峡線(青函トンネル)	53,850	S60.3	0.93	0.37
東北新幹線(八戸-新青森)	26,455	H17.2	1.66	0.60
東北新幹線(盛岡-八戸間)	25,808	H12.6	0.59	0.24
北陸新幹線(長野-金沢間)	22,251	H19.12	1.15	0.62

約1/2以下に減

2018.8.20

学術会議ILC検討委・技術検証分科会

50

北上候補地での湧水量は、「水文地質学的な手法考察」\*を参考に

およそ

**0.8 t/min/km**

と評価して排水設計に取り組むこととした。

実際はこれを大きく下回ると考えられている。

\* 公益財団法人 鉄道総合技術研究所

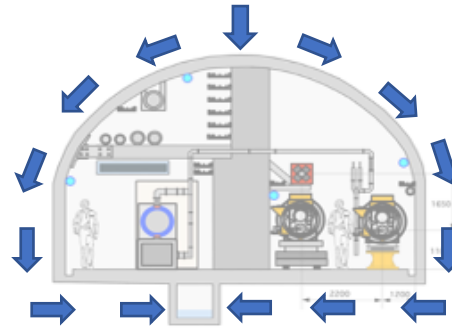
# ILC地下構造物の湧水処理

## 湧水量の仮定

およそ 0.8 t/min/km

全体湧水量：30,000 t/day

$26.2\text{km} \times 1,440 \times 0.8 = 30,180 \text{ t}$



- トンネル床板下部に設けた**湧水排水溝**を通して**アクセスホール**の地下水槽に集水、**ポンプで地上に揚水**、定期的に水質測定を行う。
- 地上に送水された地下水（湧水）は、濁水処理した後、一部を**冷却塔の散水**として利用

北上サイトの場合、緻密な花崗岩地帯、降水量が少ない地域、近隣の道路トンネル工事での湧水が少ないことなどから、予測より大幅に少ないことが想定されている。

地上へ揚水

アクセスホールへ

## 排水方法の追加案

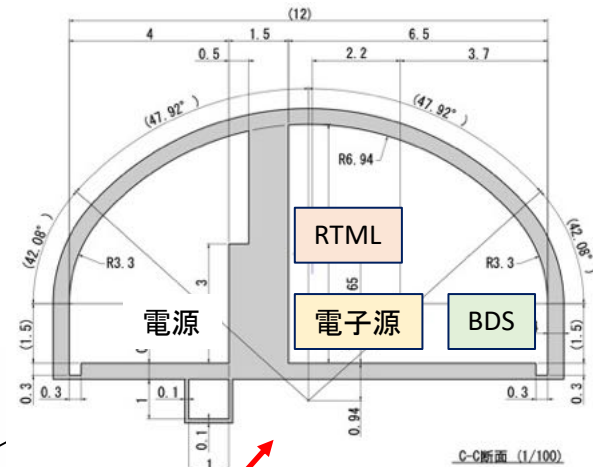
- (案1) 集水トレンチを大きくして中央検出器ホール付近まで導水
- (案2) アクセスホールへの送水をポンプでリレーする
- (案3) さらに**自然排水トンネル**を設ける

## 4.3 加速器トンネル

- 電子源
- 陽電子源
- ダンピングリング
- RTML ビーム輸送路
- 主線型加速器
- BDS 最終収束システム
- 衝突点・検出器ホール
- ビームダンプ

# 4.3.1 電子源

- 最終収束系、RTMLと共に、**BDSトンネルに収納**



# 4.3.2 陽電子源

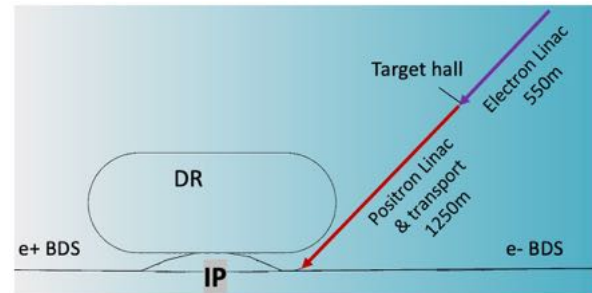
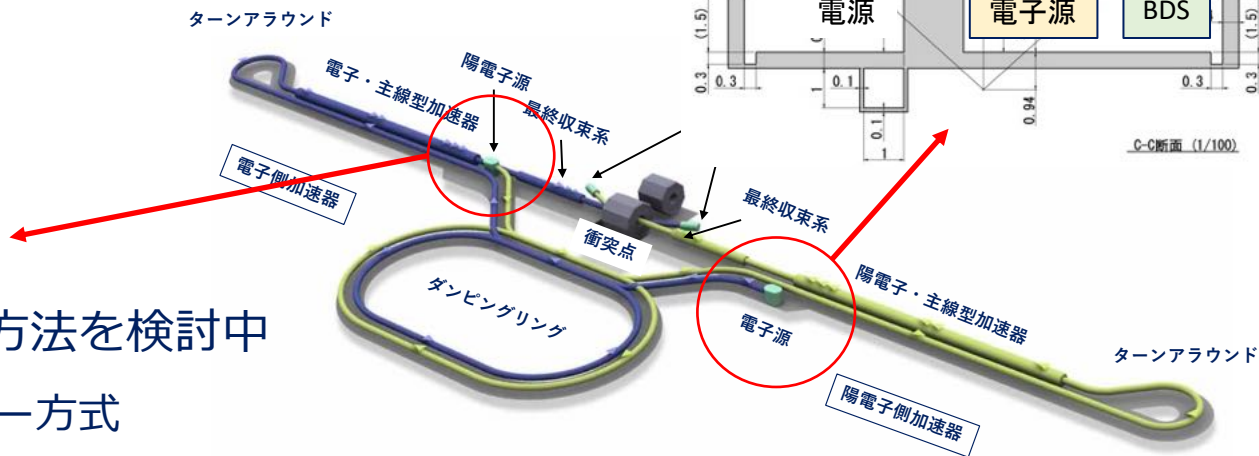
- 二つの陽電子生成方法を検討中

- アンジュレーター方式
- 電子駆動方式

- その戦略に応じて2つの設置パターンを検討している

案1 : BDSトンネルの幅を拡張して収納する

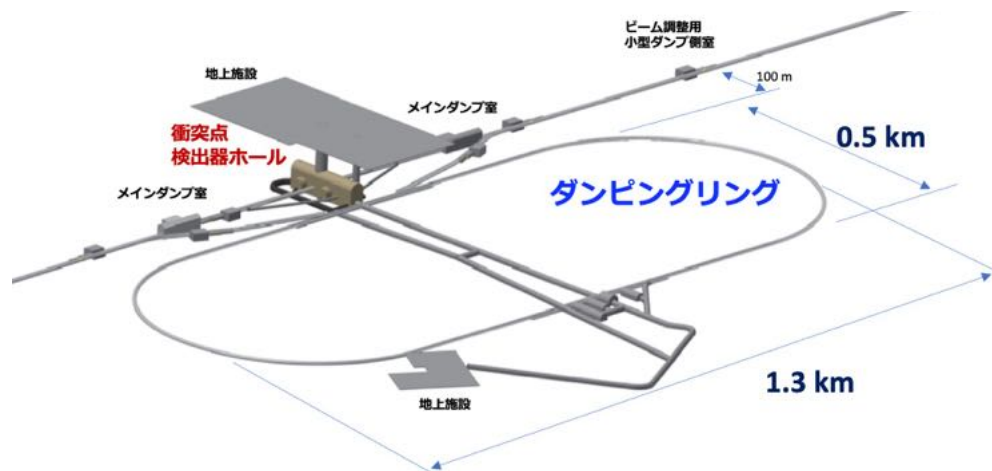
案2 : 電子駆動方式を別トンネルとする



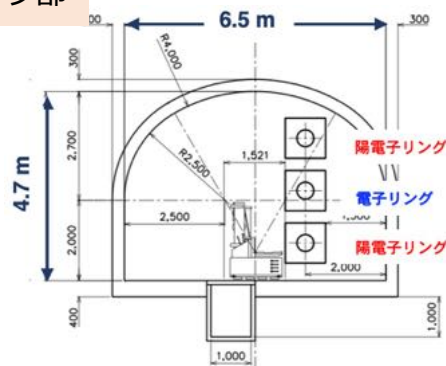


# 4.3.3 ダンピングリング

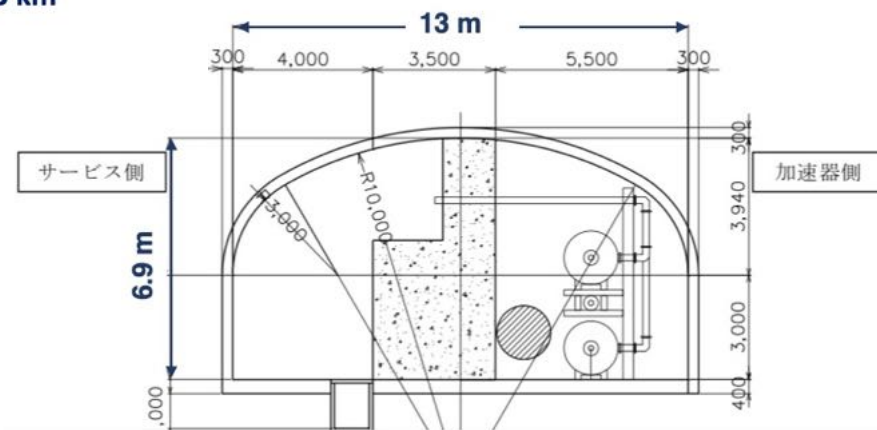
- 周長3.2km。電子リング、陽電子リングを重ねて設置（2段）
  - 将来、陽電子リングを追加の可能性（3段）
  - アーク部は単トンネル。直線部は中央遮蔽壁で電源室を確保（300m）



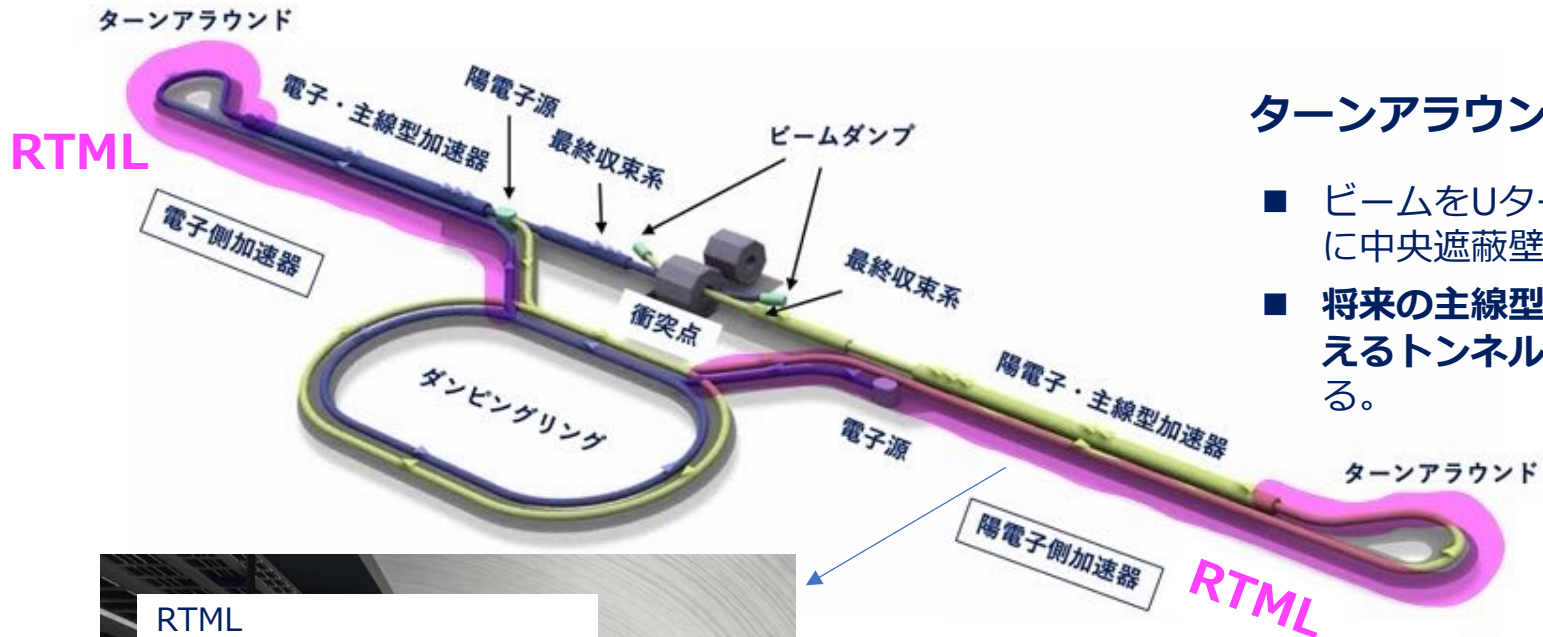
DRアーク部



DR直線部

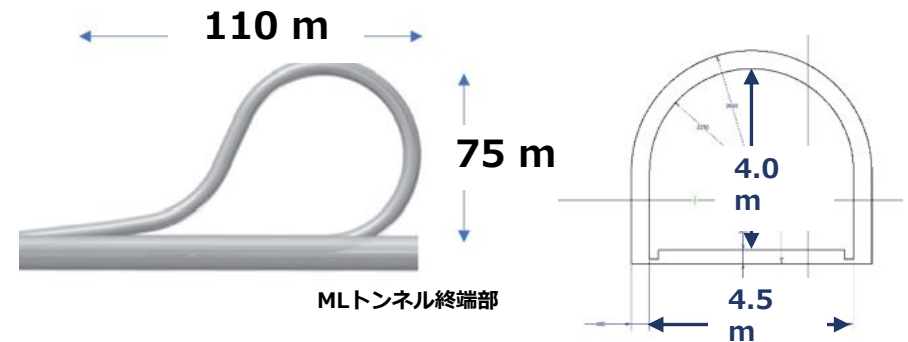


# 4.3.4 RTML (Ring To Main Linac)



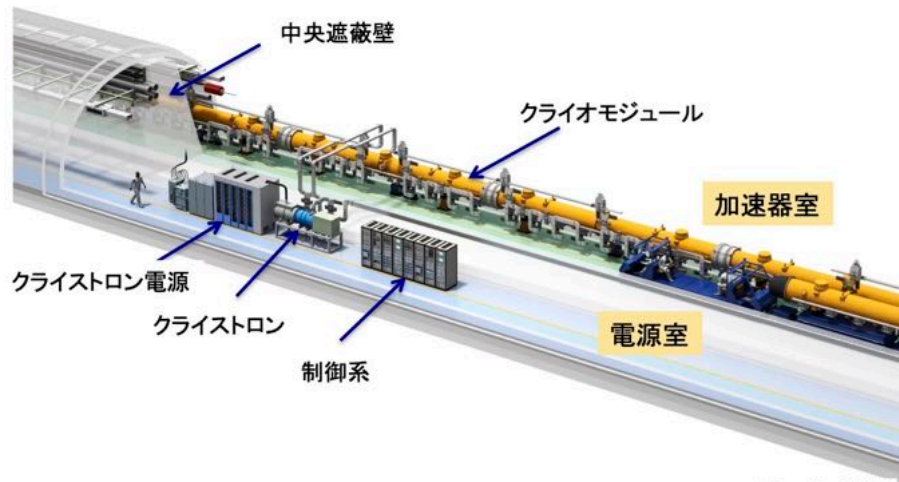
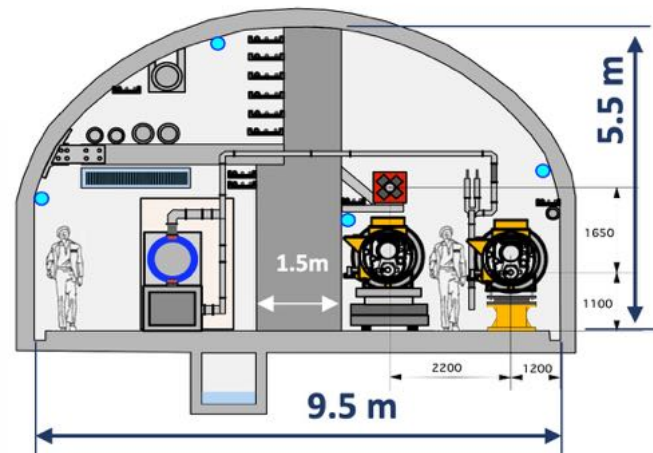
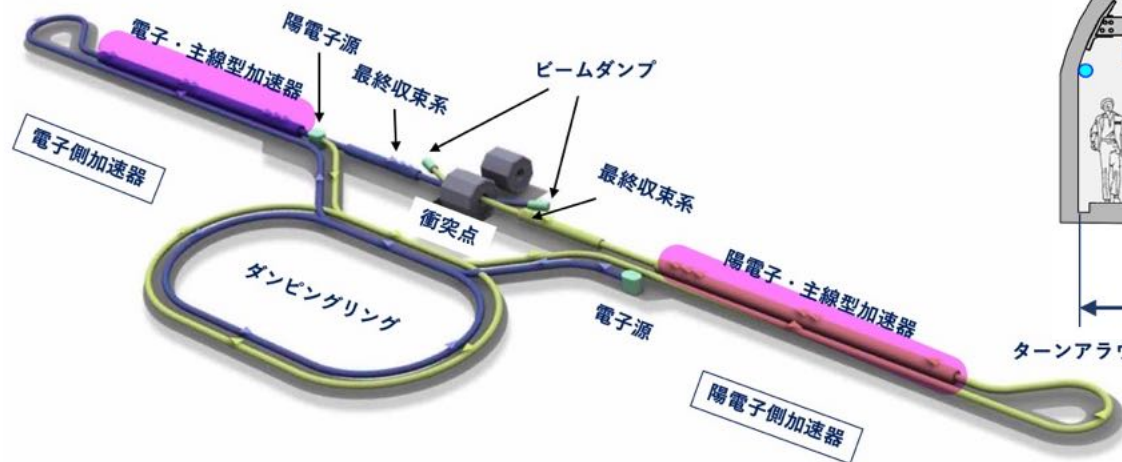
## ターンアラウンド

- ビームをUターンさせる部分に中央遮蔽壁は要らない
- 将来の主線型加速器延長に備えるトンネル延長部を設ける。



# 4.3.5 主線型加速器

ターンアラウンド



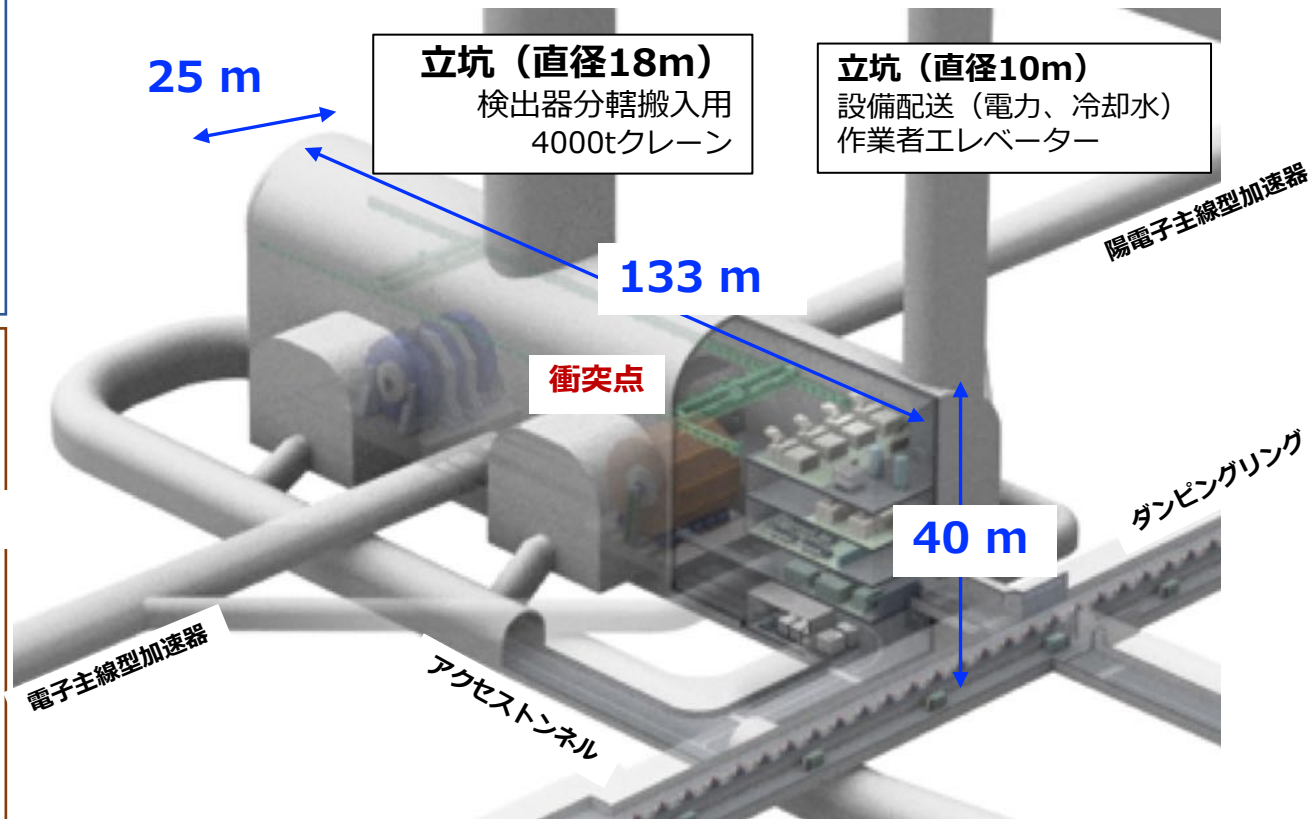
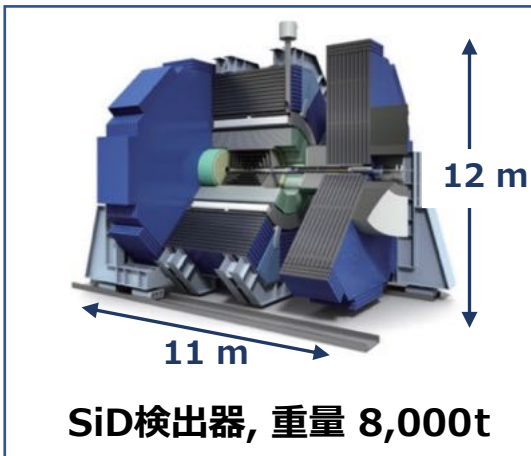
©Rey.Hori/KEK



# 4.3.7 衝突点・検出器ホール

2つの検出器（実験グループ）：ある期間ごとに衝突点に入れ替える

検出器ホール： **ビーム運転中でも立ち入り可能**（加速器部を除く）

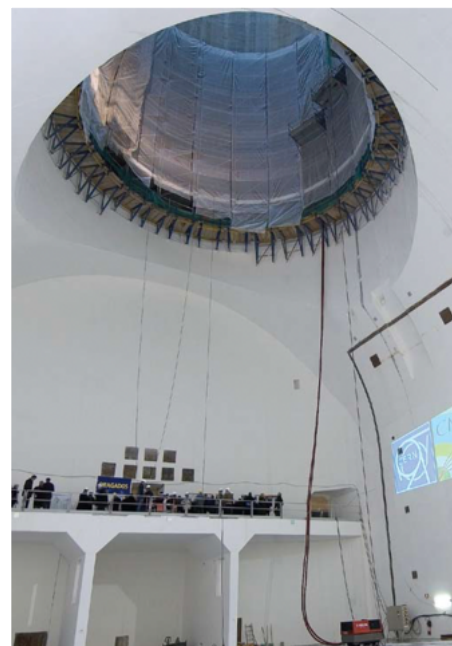


# (参考) LHC CMS実験ホール

(建設期)



**検出器ホール**  
地下100m、幅 27 m, 高さ 25 m, 長さ 53 m

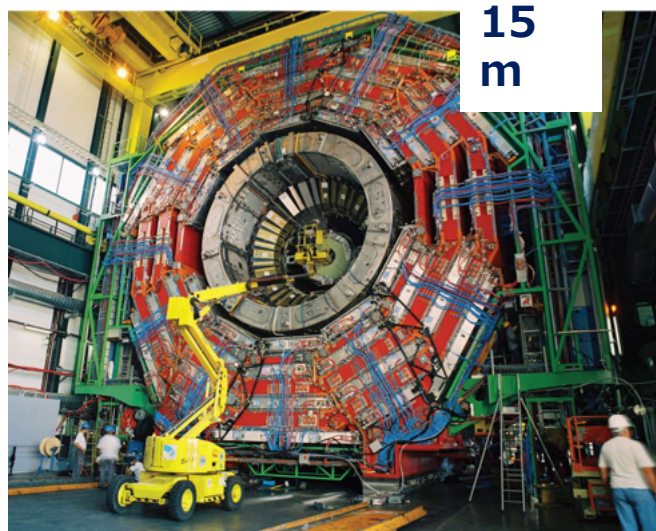
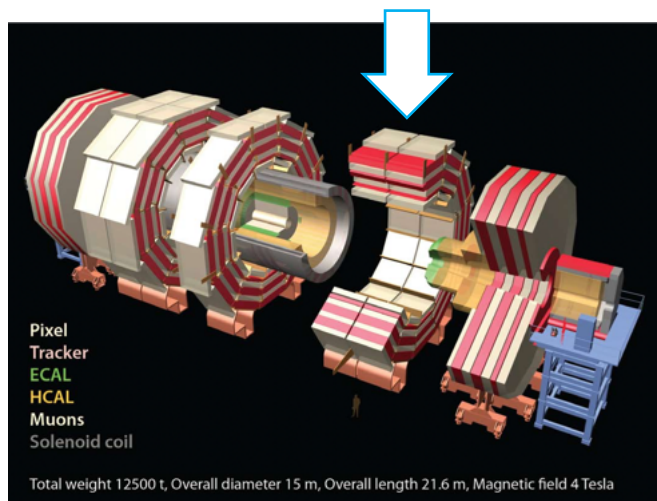


**立坑：**

- 直径 20.5 m
- 同 12 m
- 深さ 100 m

# (参考) CERN-LHC CMS検出器

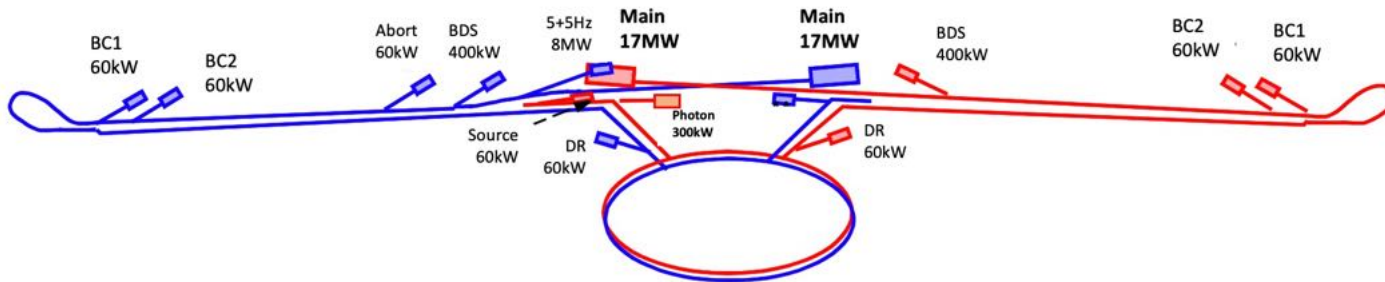
- CMS検出器: 15m X 21.6m, 12,500 t
- 分轄して **2,000 t のガントリークレーン**で降ろした。
- ILCは 4,000 t クレーンを想定。



CMS検出器 (ミュオン検出器部分)



# 4.3.8 ビームダンプ



種類		仕様 将来の1TeV実験として	
ビーム調整用	電子・陽電子	● 60 kW, 9ヶ所 ●	低強度ビームによる加速器調整。 比較的短時間または短期での利用。 既存の技術で十分
	電子・陽電子	● 400 kW, 2ヶ所	既存技術の多少の拡張。 Euro XFEL 主ダンプ 300kWは運用開始。 異常時のビームアボートにも利用する。
陽電子生成 光子用	光子	● 300 kW, 1ヶ所	Undulator陽電子源の場合に必要。 光子は曲げられないので特殊。
Undulator陽電子 源での10Hz運転用	電子	● 8 MW, 1ヶ所	Undulator陽電子源の場合に必要。 主ビームダンプと同じレベル。
主ビーム用	電子・陽電子	● 17 MW, 2ヶ所 含20%マージン	大強度ビーム 年間5000時間程度の連続運転を想定

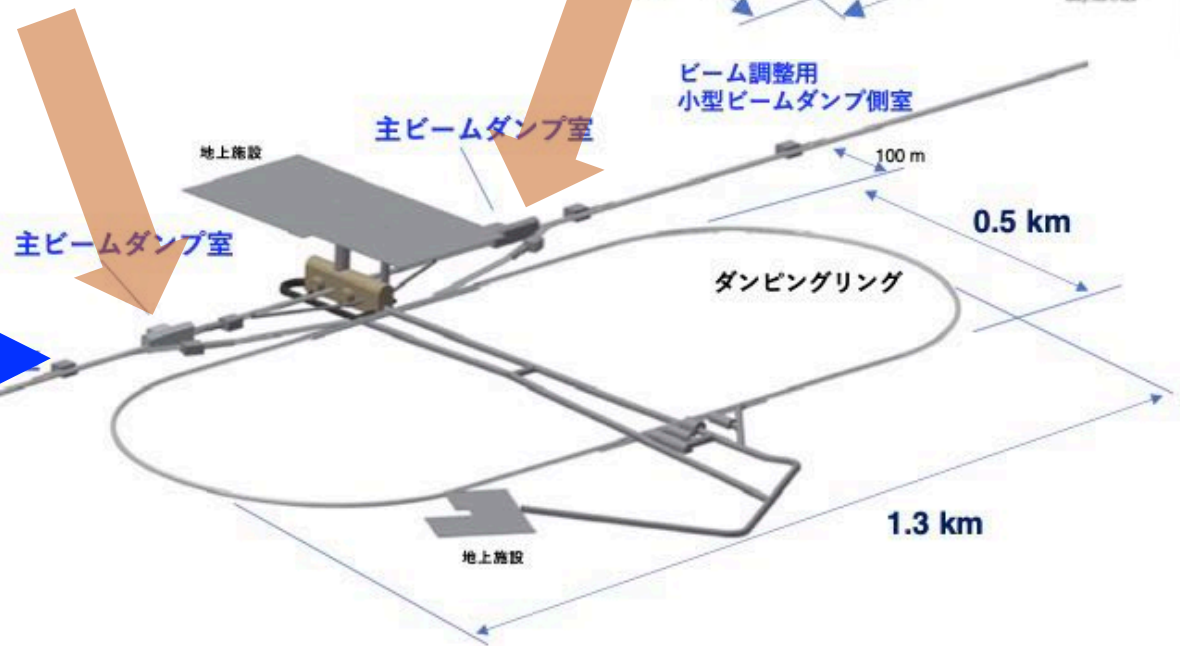
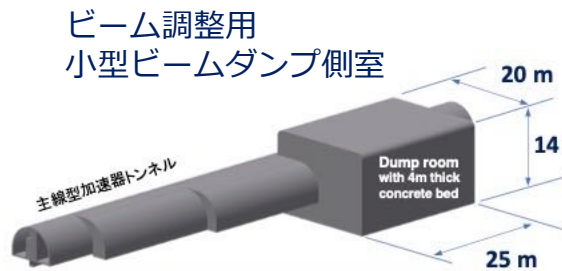
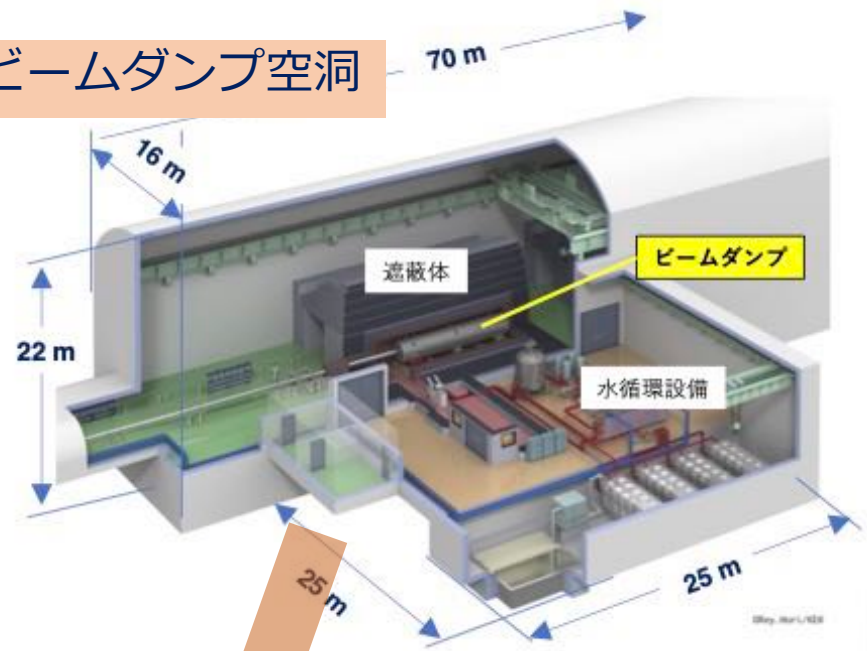
- パワーの小さなビームダンプ → 小型の遮蔽体 → 側室
- パワーの大きなビームダンプ → 厚い遮蔽体 → 大型のクレーン → **大きな空洞**



# 主ビームダンプ

- 電子・陽電子ビームの終着点
- 遮蔽体 (~ 5m厚) → **大空洞**
- ビーム吸収体である **水循環設備** を併設
- **特別な放射線管理区域**

主ビームダンプ空洞



# 4.4 地下へのアクセス

## 実験ホール（地上部）

- 入口での立ち入り管理、
- 放射線安全上の物品搬出管理

## アクセスステーション（地上部）

- 入口での立ち入り管理、
- 放射線安全上の物品搬出管理

- 立坑（エレベータ）
- アクセスタンネル（車両可）

## アクセスタンネル（車両可）

## 地下実験ホール（放射線管理区域）

- **ビーム運転時も立ち入り可能**
- 素粒子反応検出器2台を期間ごとに出し入りして実験を行う。
- **常時、作業者が滞在することを想定**
  - 実験中の検出器：状態維持、電源保守
  - 待機中の検出器：保守・高度化作業

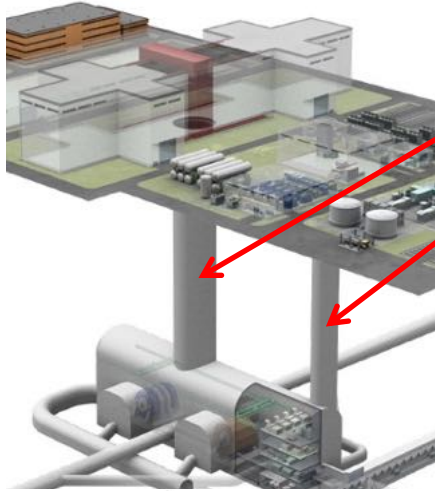
## 設備ホール（アクセスホール）

- 日常点検（ヘリウム冷凍機）、定期点検（その他）
- 加速器トンネルの入口に、放射線管理区域への入域管理施設を設置する。

## 加速器トンネル（放射線管理区域）

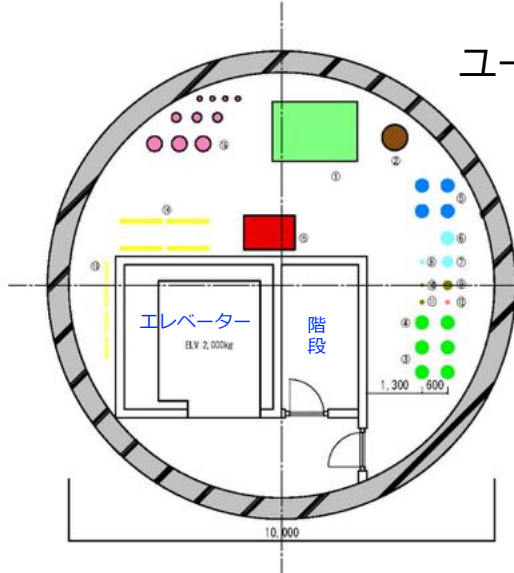
- **ビーム運転時は立入不可**

# 4.4.1 立坑（衝突実験サイト）



- **メイン立坑**：検出器を地下に降ろす。直径18m
- **ユーティリティー坑**：直径10m
  - 地上と地下の設備を繋ぐ。
  - 中央変電所で降圧した66kVをILC全域に送る
  - 地下へのアクセス（エレベータ、非常階段）
- 立坑の長さ 約70m

ユーティリティー坑検討図



ユーティリティーシャフト内配管

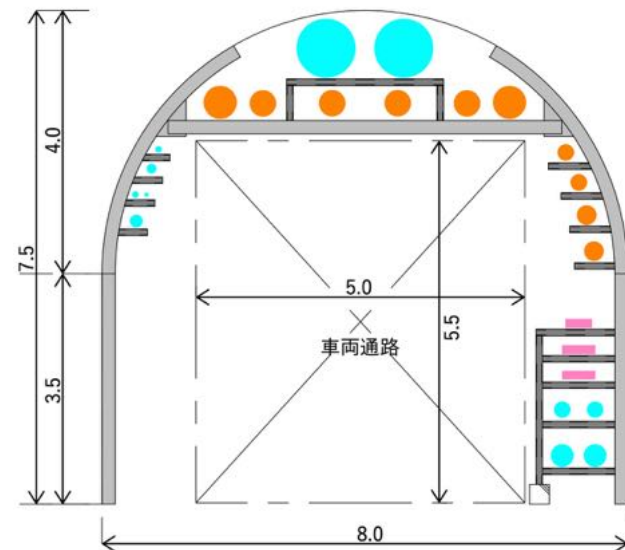
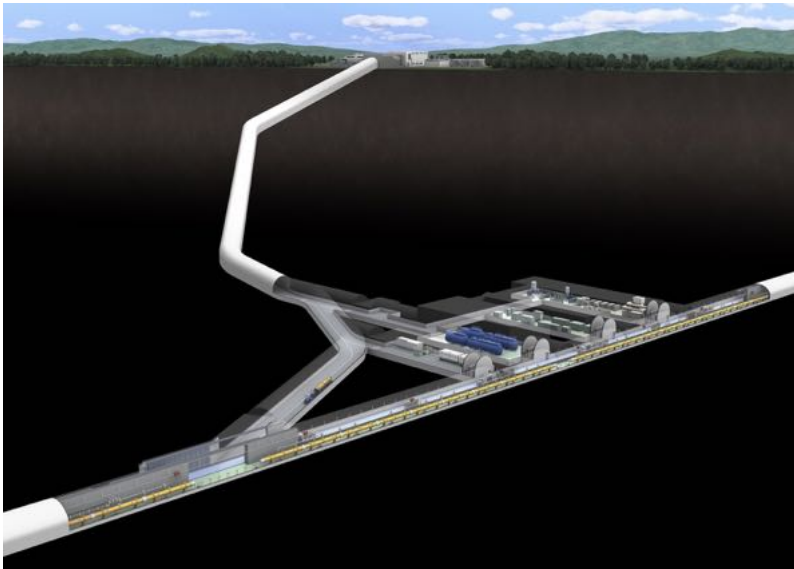
設備種類	番号	名称	仕様	員数
排気設備	①	排気 (外気) ダクト	2,000 x 1,400	1
	②	卸系排気ダクト	600φ	1
廃棄冷却水設備	③	冷却水管 (往・還)卸系系統	300A	4
	④	冷却水管 (往・還)卸系系統	300A	2
空調設備	⑤	冷水管 (往・還)	300A	4
給水設備	⑥	配水管 (給水)	300A	1
	⑦	配水管 (送水)	250A	1
〃	⑧	給水管	100A	1
排水設備	⑨	汚水排水管	200A	1
	⑩	生活排水管	65A	1
〃	⑪	R1排水管	100A	1
消火設備	⑫	消火管	100A	1
電気設備	⑬	低圧・弱電ラック	W500	4
	⑭	特殊ケーブルラック	W1,000	4
排気設備	⑮	排気ダクト	1,200 x 800	1
ヘリウム設備	⑯	ヘリウム管 (断熱あり)	250A	3
		ヘリウム管	200A	3
		ヘリウム管	90A	3
		ヘリウム管	90A	1



(例) CERN LHC CMS立坑：直径20.5m&12m、深さ100m

## 4.4.2 アクセストンネル

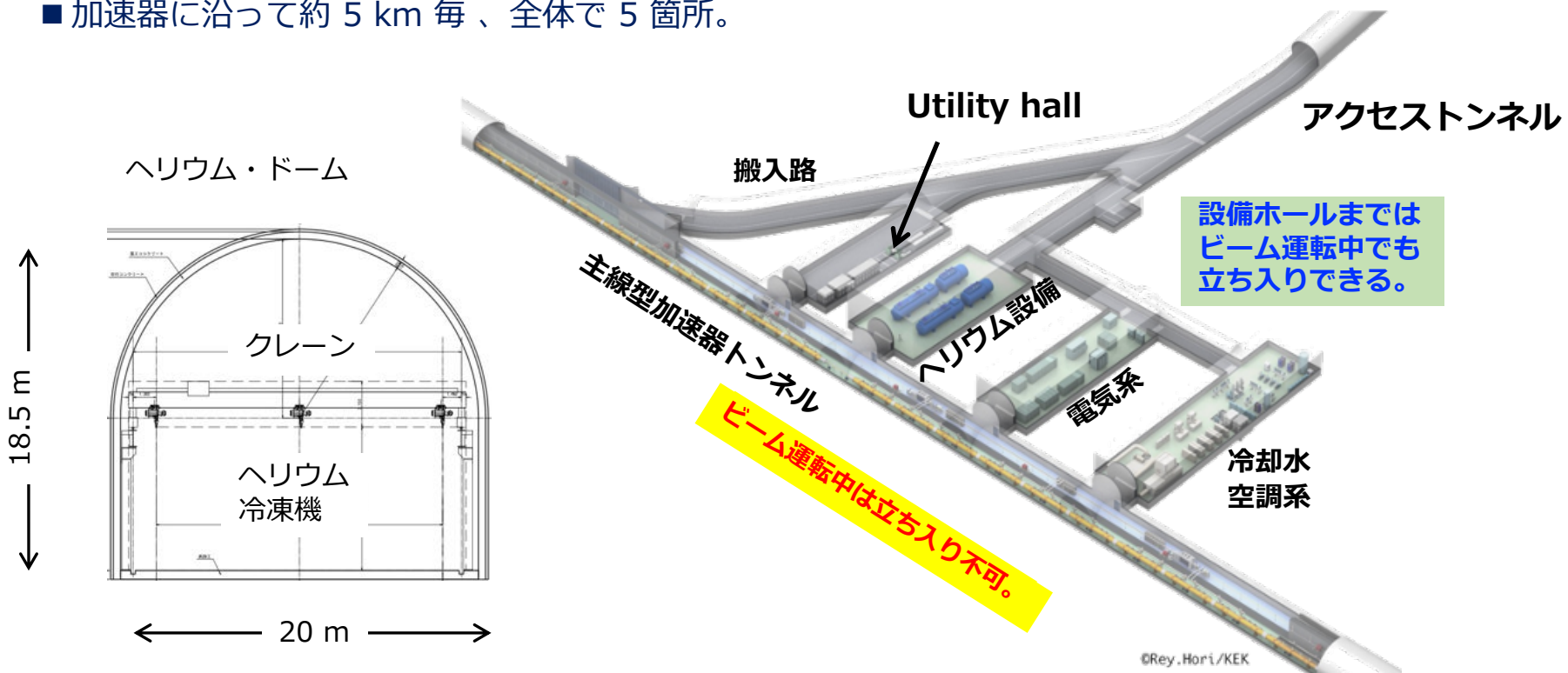
- 地下への搬入路、非常時の脱出路
- 最大勾配10%
- トンネル長は地上施設の設置場所に依存する。平均で 1 km 程。
- 地上と地下の設備を結ぶ：ヘリウム配管、冷却水配管、換気ダクト、送電ライン、各種ケーブル
- 将来のヘリウム・コールドボックス移動に備えた車両空間を確保



## 4.4.3 設備ホール (アクセスホール)



- 地下の加速器設備の拠点。
- ヘリウム冷凍機、冷却水・空調、電気設備 (サブ変電所)、湧水排水設備
- 加速器に沿って約 5 km 毎、全体で 5 箇所。

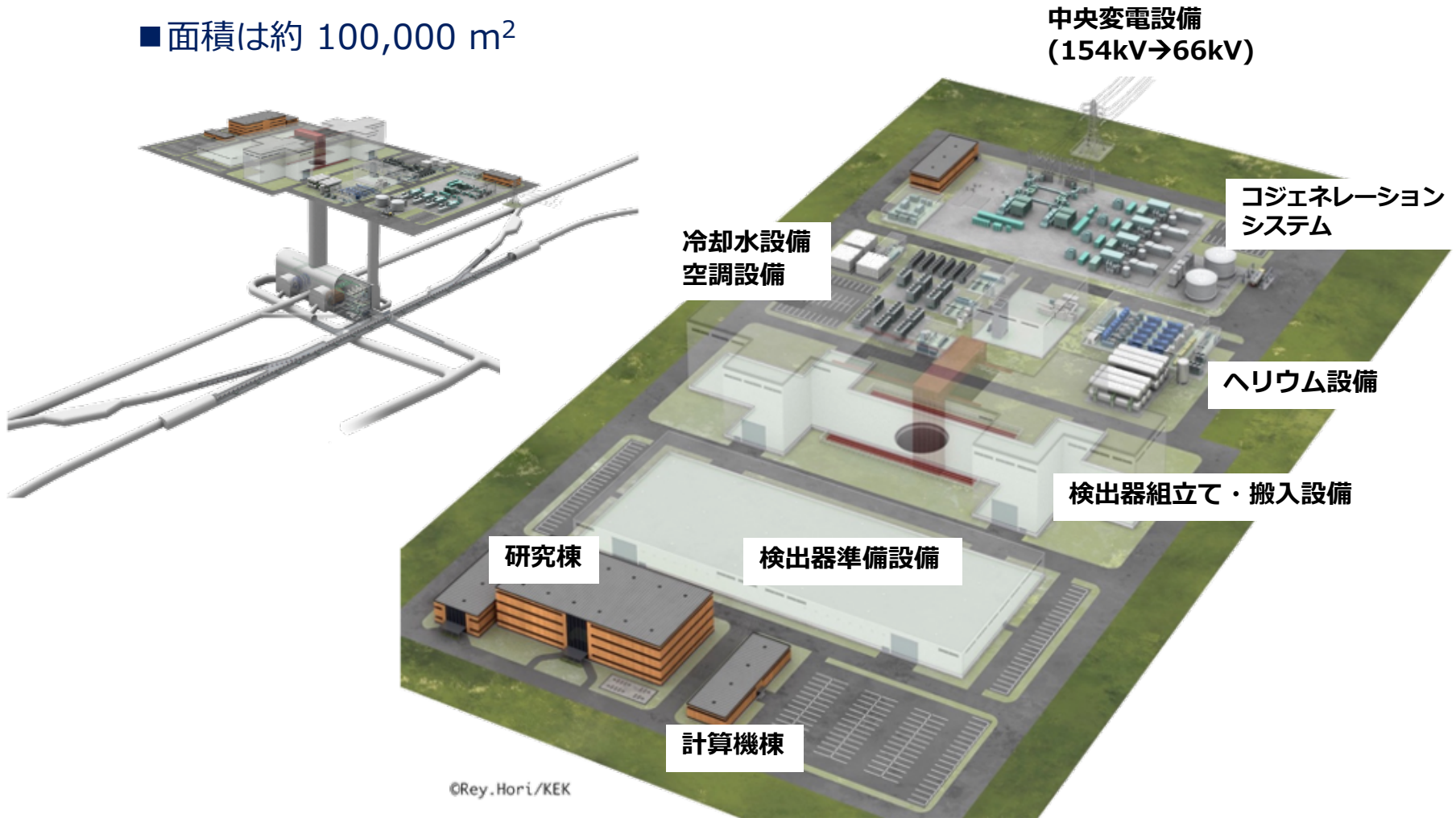


## 5. 地上施設

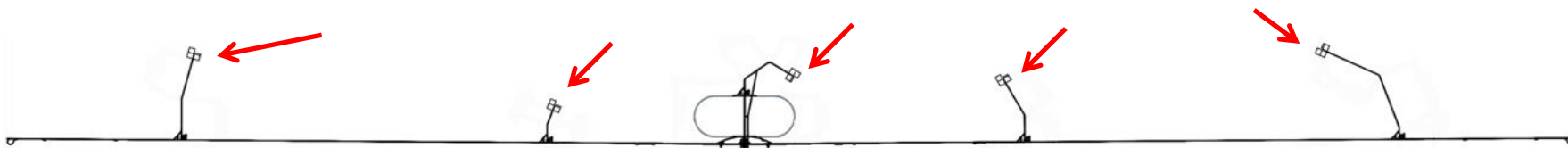
- 衝突実験サイト
- アクセスステーション
- 中央キャンパス

# 5.1 衝突実験サイト

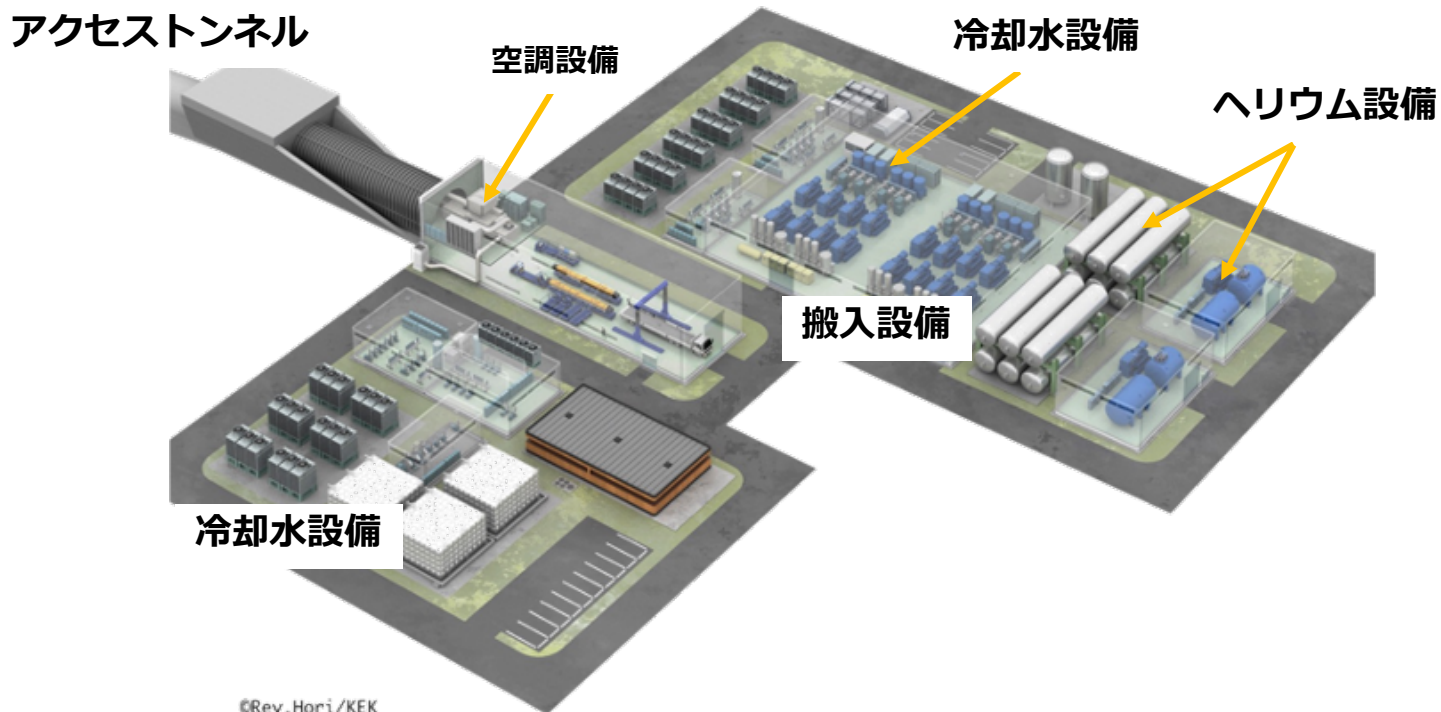
- 電力会社からの受電、検出器準備、地下設備との連携
- 面積は約 100,000 m<sup>2</sup>



## 5.2 アクセスステーション



- 加速器トンネルへの進入路（地下土木工事の始点）
- 地下設備と連結した、電気・機械設備を設置
- 加速器に沿って約 5 km 毎、全体で 5 箇所。各ステーションの面積は約 19,000 m<sup>2</sup>





## 5.3 中央キャンパス

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。

### 国際研究拠点としての機能

- ILC の本部・研究棟
- データ解析センター
- 加速器および検出器の研究開発棟
- …

### ■ 場所について

“北上サイトにおける中央キャンパスは、仙台・東京へのアクセス利便性を有し、研究・生活環境に優れた新幹線沿線の立地を強く推奨する”（立地評価会議）

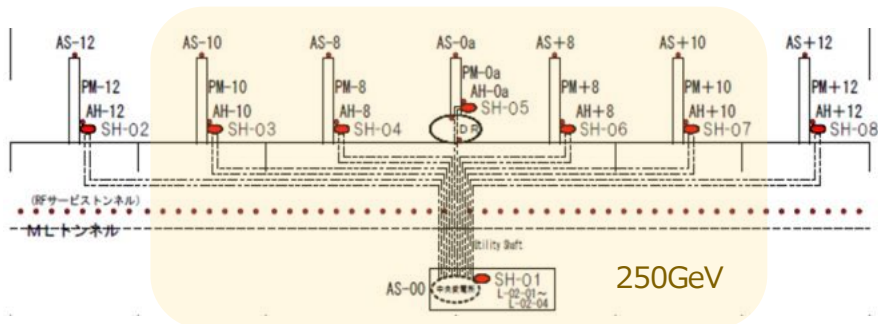
- 具体的に進めるには地元自治体との協議が必要
- ILC 誘致の様々な判断のもとで進められると期待する

## 6. 設備関係

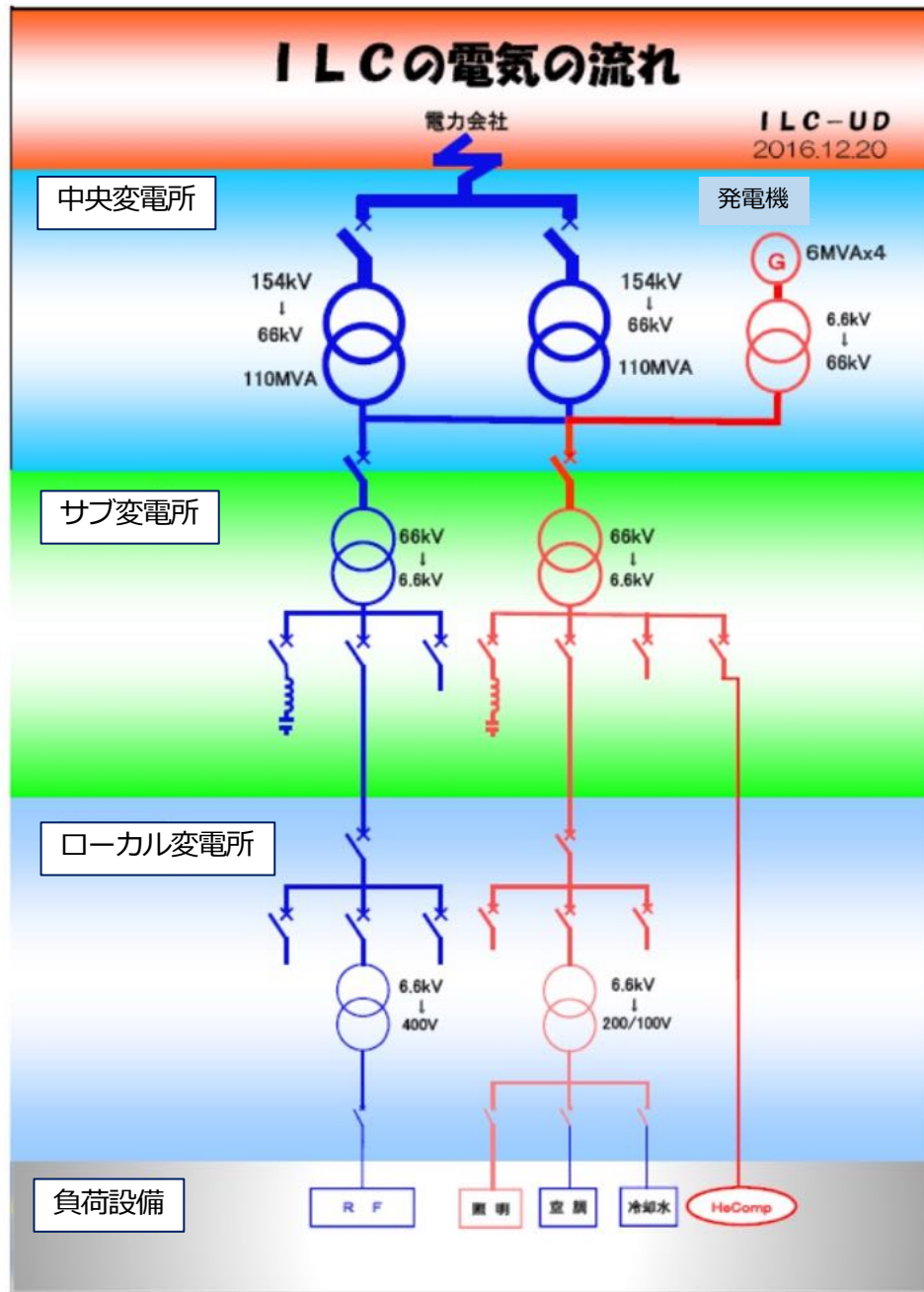
- 電気設備
- 機械設備

# 6.1 電気設備

- 衝突実験サイトの中央変電所で 154 kVを受電、66 kVに降圧。
- 地下トンネルで各サブ変電所に送電
- ローカル変電所に分配
- 加速器装置・設備



特高ケーブル地下配線  
(両端は将来の500GeV延伸の場合)



# ILCの電力負荷

Updated power estimate for ILC-250, Dec.2019,  
<https://edmsdirect.desy.de/item/D00000001169675>

	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
<b>Total</b>	173	111	110	138	198	215

- 250 GeV
- 500 GeV
- R&D : SRF効率改善効果
- Lx2 :  
ルミノシティー増強運転

中央キャンパス想定2.7MW

全体マージン 3%

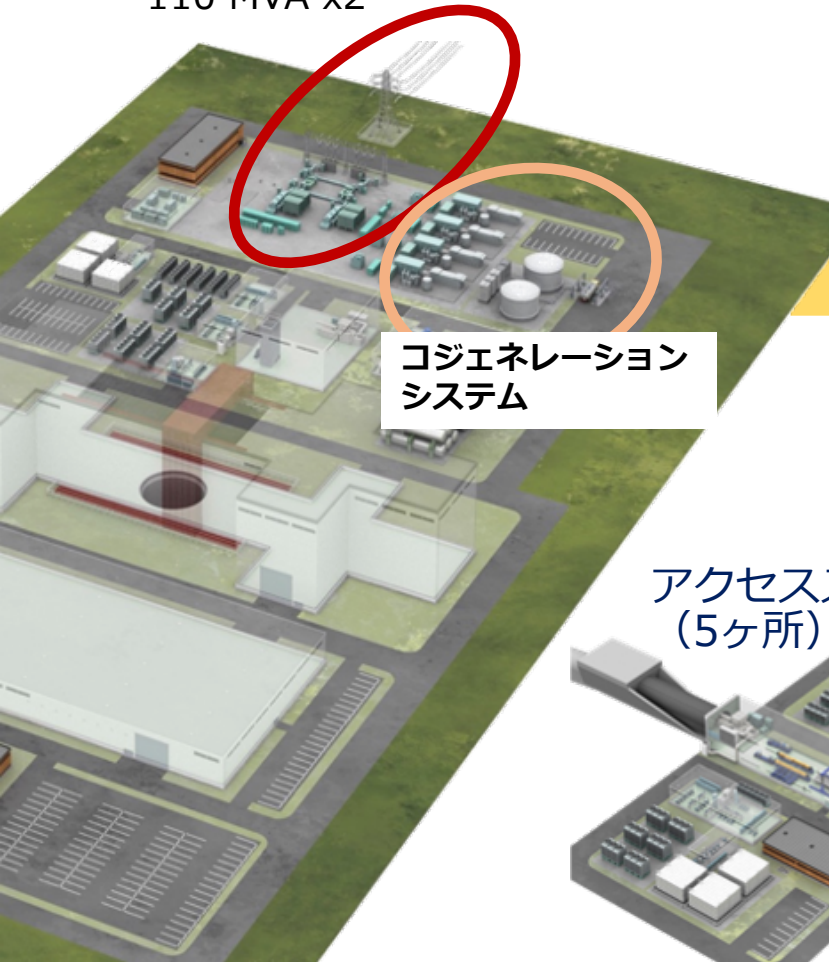
開始時

# 中央変電所

電力会社より受電

**154 kV → 66kV**

110 MVA x2



# サブ変電所 (5ヶ所)

**66 kV → 6.6 kV**

20~30 MVA



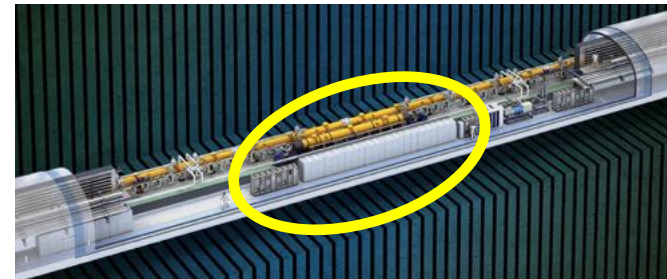
立坑・地下トンネル

アクセストンネル

アクセスステーション  
(5ヶ所)

ローカル変電所 (約40ヶ所)

**6.6 kV → 400/200/100 V** 2~3 MVA



©EY, Horii/KEK

## 6.2 機械設備

- ヘリウム
- 冷却水
- 給水・排水
- 換気・空調

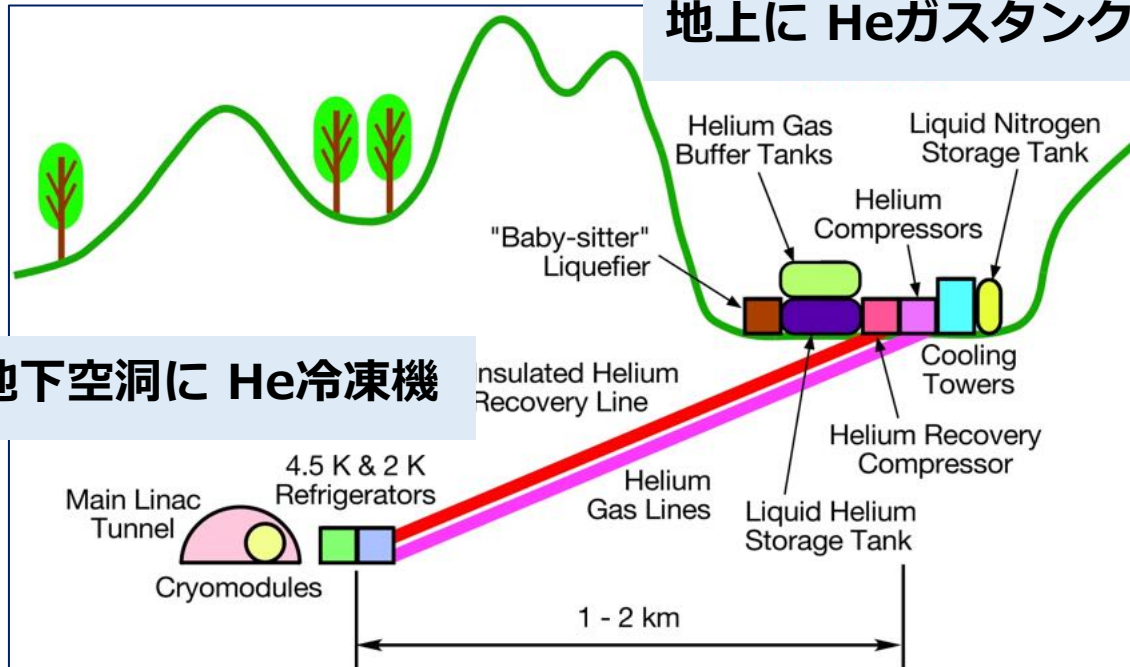
# 6.2.1 ヘリウム設備

地上に Heガスタンク



CERN LHC He Tank

地下空洞に He冷凍機



CERN LHC He冷凍機

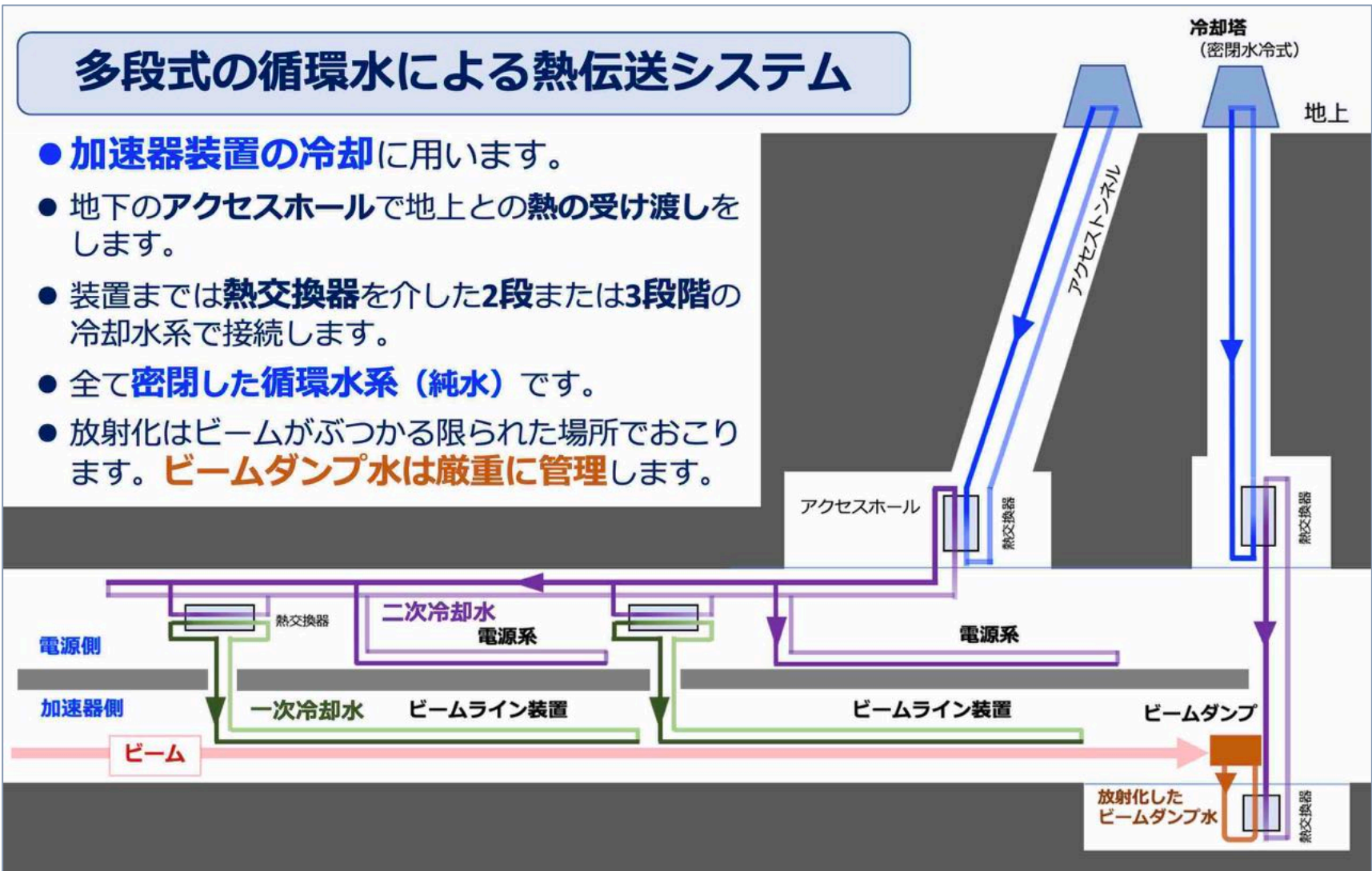


European XFEL He Tank

## 6.2.2 冷却水設備

### 多段式の循環水による熱伝送システム

- **加速器装置の冷却**に用います。
- 地下の**アクセスホール**で地上との熱の受け渡しをします。
- 装置までは**熱交換器**を介した**2段**または**3段階**の冷却水系で接続します。
- 全て**密閉した循環水系（純水）**です。
- 放射化は**ビームがぶつかる限られた場所**で起こります。**ビームダンプ水は厳重に管理**します。





## 6.2.3 給水設備

- 生活用水
- 冷却塔補給水（散水）
  - 1日当たりの最大使用量 9,000 トンを想定
  - トンネルにおける**恒常的な地下湧水を利用**する
  - 排水設備の設計で想定する湧水量 → 0.8 トン/min/km  
→ 日量 23,000 トンに相当
  - しかしながら北上候補サイトでは、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
  - 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**することを検討

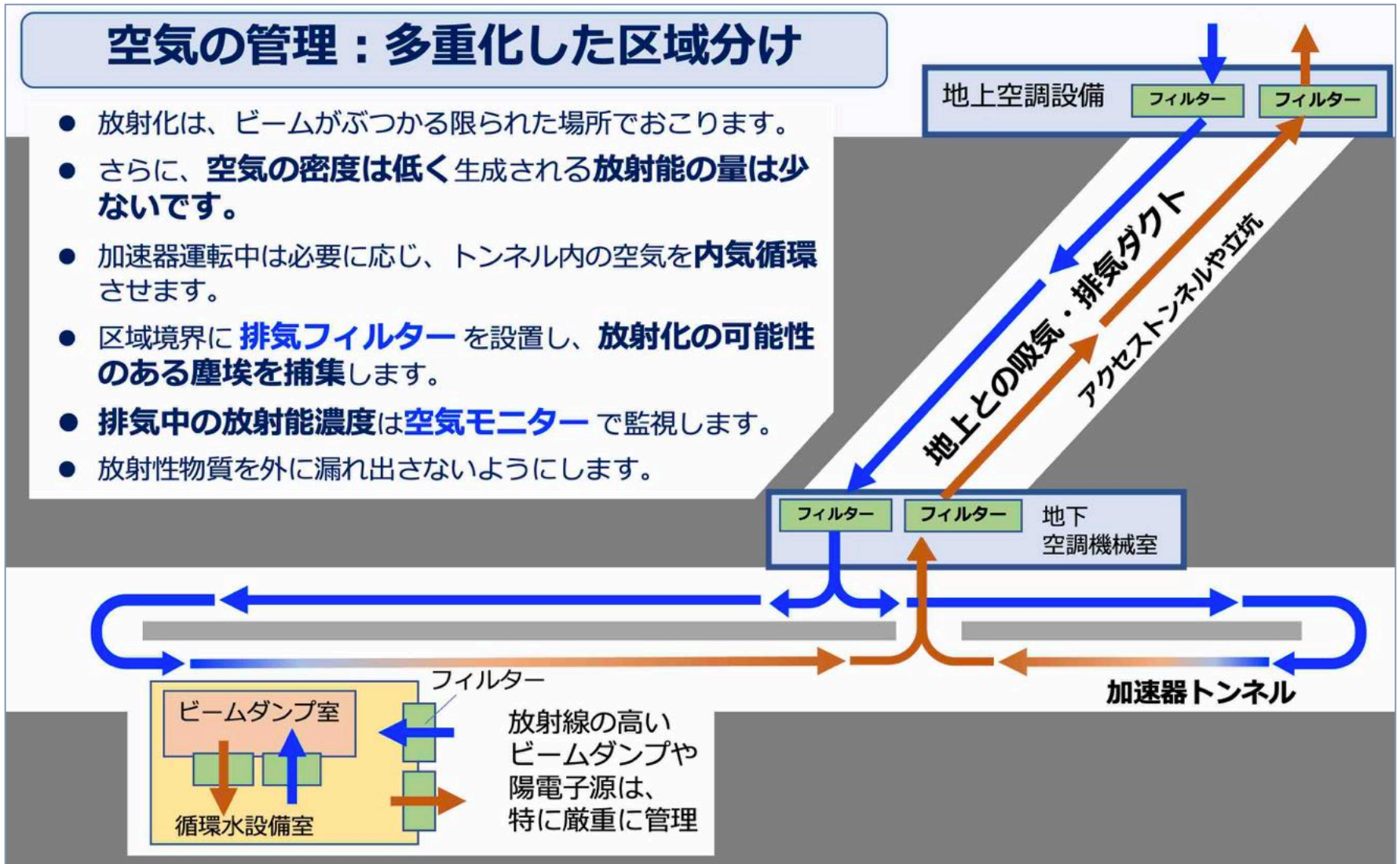
## 6.2.4 排水設備

- **RI管理排水**：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**：トンネル断面外周を通り、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。冷却塔の散水に利用することを検討。
- **生活排水**：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

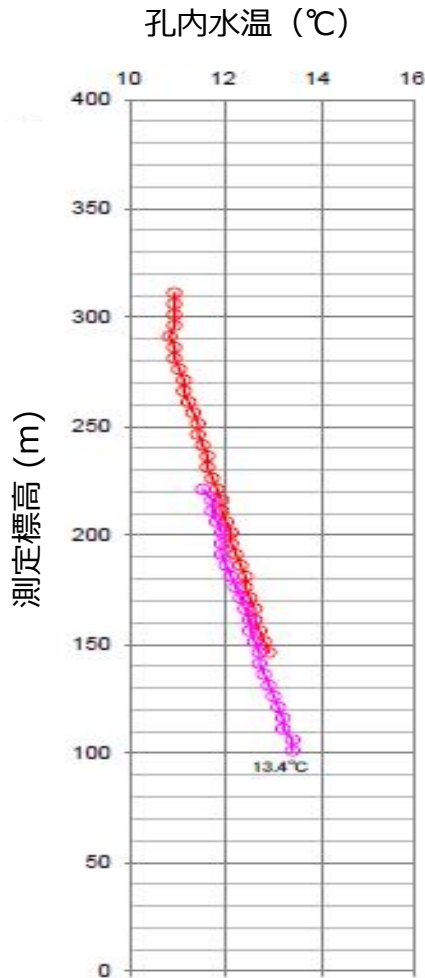
## 6.2.5 換気設備

### 空気の管理：多重化した区域分け

- 放射化は、ビームがぶつかる限られた場所でおこります。
- さらに、**空気の密度は低く**生成される**放射能の量は少ない**です。
- 加速器運転中は必要に応じ、トンネル内の空気を**内気循環**させます。
- 区域境界に**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**します。
- **排気中の放射能濃度は空気モニター**で監視します。
- 放射性物質を外に漏れ出さないようにします。



## 6.2.6 空調設備



北上候補地  
地下水温度測定結果

### ■ 地下に建設されるトンネル

- 周辺岩盤の温度は非常に安定

- 北上候補地での地山温度は 13.4 °C

- トンネル内の基準設定温度は 18 °C を想定

### ■ トンネル内電源の熱

- 大部分は冷却水で取り去る

- 一部は空気中に放出され、電源室を温める

- 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

### ■ トンネル内で達成される温度

- 加速器運転によりばらつくが、安定であれば問題はない。

## 7. 安全対策・環境影響評価

- 放射線
- 地震
- 火災
- 停電
- 環境影響評価

# 7.1 放射線

## 土木的視点での放射線安全対策

### ■ 基本的な考え方

- ILC運用時：トンネル躯体や地下水の放射化を問題ないレベルに留める
- プロジェクト終了後：機器を搬出、放射化したものを残さない

### ■ 放射化と遮蔽体

- ビームがぶつかる限られた場所が放射化（ビームダンプ、陽電子標的など）
  - 設備構造を多重化。コンクリート壁でトンネル外と区切る。

#### ■ 局所的に遮蔽体を設置して周辺放射化を抑える

- ビーム強度 → 遮蔽体の規模 → トンネル／空洞の大きさ

(遮蔽体は数m厚、鉄やコンクリートのブロック)

- **放射線の遮蔽・閉じ込めはトンネル内部の設備（遮蔽体など）が担う。**  
トンネル・空洞の壁コンクリートは補佐的なもの。

#### ■ 加えて、場所により**低放射化コンクリート**を利用する

- コンクリートの放射化：主たる放射性元素 → Co-60, Na-22, Eu-152

# 7.2 地震

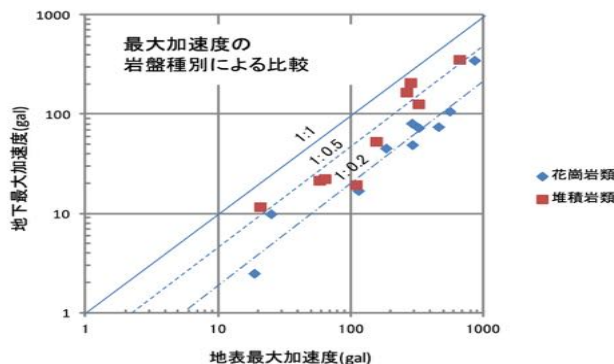
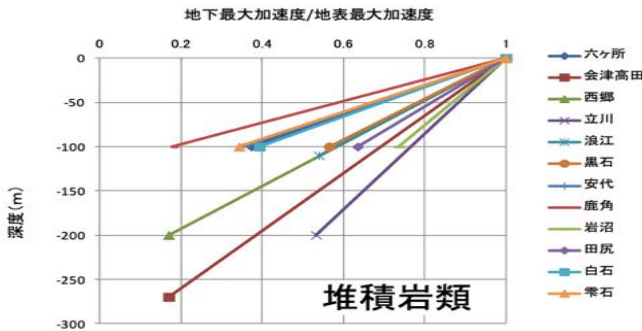
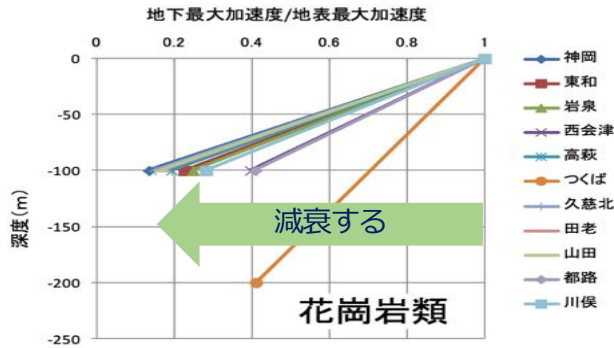
## ILC施設に求められる耐震性能の考え方

### 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	

- 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。** → ILC運用20年に数回の地震
- L2地震動：近傍で発生する**大規模なプレート境界地震**（東日本大震災など）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。

# 地震の振幅は、地上に比べ 地下では1/2~1/4 になる



東日本大震災で観測された最大加速度と地盤

## ■ 地下では地震に対する尤度が高まる。

(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。

■ 同じ深度では花崗岩類の方が加速度の減衰が大きい

## ■ 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

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**には十分な注意をはらう。

## 江刺地球潮汐観測施設の例

北上山地 阿原山中腹の延長 250mのトンネルに設置された国立天文台江刺地球潮汐観測施設の**石英ガラス製の石英管ひずみ計**は、東日本大震災でも全く損傷を受けていない。

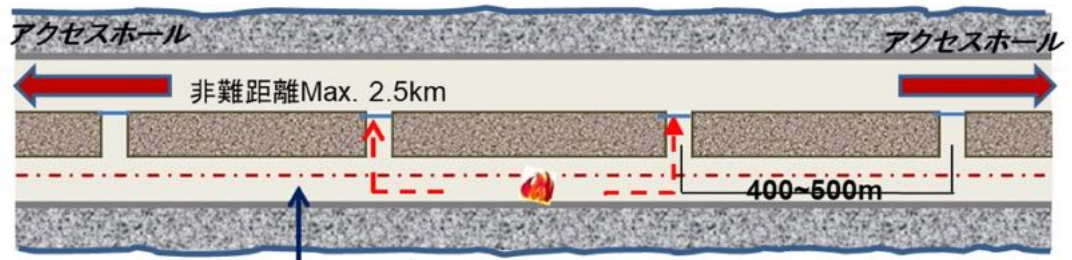
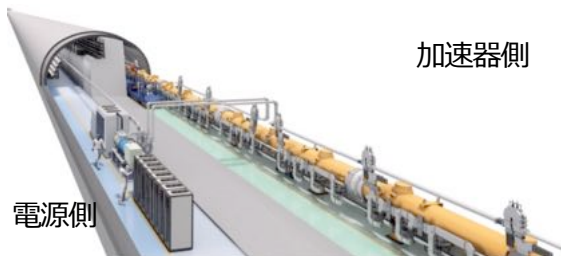


# 7.3 火災

## 作業者の避難

大規模地下施設であるCERN-LHCでの運用を参考

ILC での対応 (想定)	LHC での対応 (実績)
<p>1) かまぼこ型トンネル+中央遮蔽壁</p> <ul style="list-style-type: none"><li>● 非火災側に退避 → <b>2方向避難の確保</b></li><li>● 避難距離: &lt; 2.5 km + <b>アクセストンネル</b></li></ul> <p>2) 空気循環システム</p> <ul style="list-style-type: none"><li>● 空気の流れを<b>人の移動速度以下</b>に制御</li><li>● 火災時の停止</li><li>● 超伝導システム運用時は携帯型酸素ポンペを義務化</li></ul>	<p>1) 円形トンネル</p> <ul style="list-style-type: none"><li>● 非火災側に退避 → <b>2方向避難</b></li><li>● 避難距離: &lt; 3.4 km + <b>立坑100m 加圧避難室 + エレベータ</b></li></ul> <p>2) 空気循環システム</p> <ul style="list-style-type: none"><li>● 空気の流れを<b>人の移動速度以下</b>に制御</li><li>● 火災時の停止</li><li>● 超伝導システム運用時は携帯型酸素ポンペを義務化</li></ul>





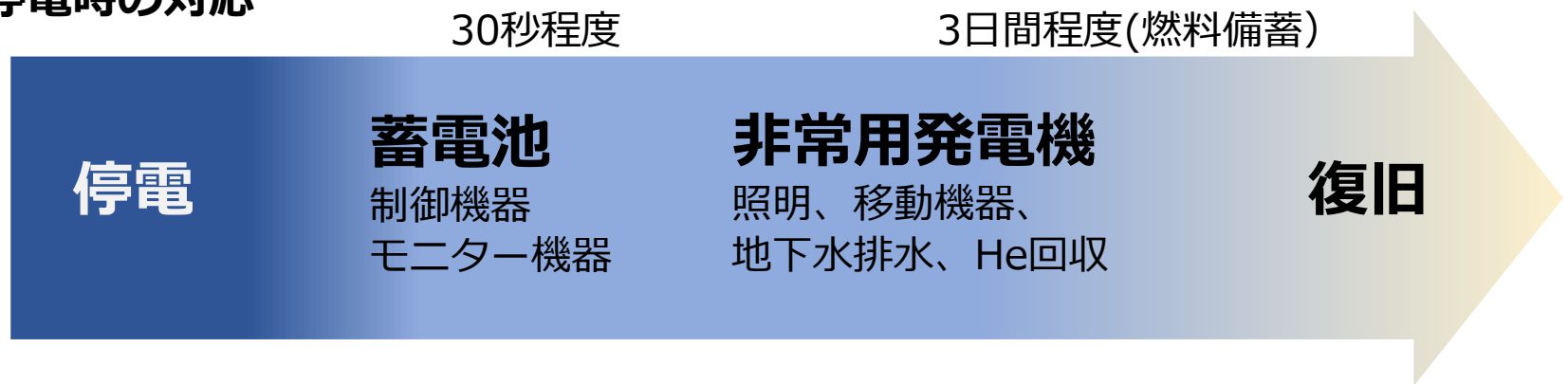
# 7.4 停電対策

- 大規模加速器施設であるCERN-LHCでの対応策を参考
- **非常用発電機**
  - **コジェネレーションシステムの検討**

常時運用しながら、非常時の立ち上げ不良リスクを避けることも可能
- **自然排水トンネル案**

北上サイトでは標高が低い河川へのトンネル湧水の排水が見込める

## 停電時の対応



## 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。
- KEKは、2019-2020年度に、**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 推進準備室の下に設置、環境アセスメントの実施方法に関する議論をまとめた。
- 事業計画が固まった段階で行う事業実施主体による環境アセスメント(実施段階アセスメント)より早期において、**事業実施段階に至るまでの意思形成過程(戦略的な段階)の段階で行うとされている戦略的環境アセスメント**の手法を導入した環境アセスメントを実施することが円滑かつ適切な計画推進のためには必要であるとの結論
- 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。

[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/)

# おわりに

技術設計書(TDR)以降、より具体的なILC施設の設計検討が進んでいる。

国際研究組織による検討の進展に加え、国内での具体的な検討、とりわけ、産学連携での取り組み、候補地組織の活動等による貢献は大きい。

ここに関係する方々の尽力に深く感謝を申し上げます。

