

検討されているリスクについて

道園真一郎・宮原正信

LCC (Linear Collider Collaboration)

KEK加速器研究施設



地震に対する対応

地震に対する対応:

- ・ 震度5強以上の地震が発生した場合、安全確保の上、可能な限り速やかに施設・設備の 点検を行う
- 法令報告の対象となる異常事態が発生した場合には、原子力規制委員会に連絡する (平成30年03月07日 原子力規制庁長官官房 総務課事故対処室 放射線規制部門 事務連絡が準用される)

地震による被害:

- 震度5以下:これまでの経験では、機器の健全性は保持。
- ・ 震度6以上:東日本大震災では東海地区(J-PARC)・つくば地区(KEKB等)も震度6弱のゆれ。
 加速器も真空リーク等の被害が出た。

加速器における地震のリスク:

- ・ 大きな地震が起きると、相対的にビーム位置が変動しインターロックが働く。
 → ビーム運転の停止 → それ以降は新たな放射能は発生しない。
- さらに大きな地震が生じると、各機器のインターロックにより停止。停電が起きると、全加速器が停止。
 - → 加速器の場合、運転停止後の継続的な冷却は不要。

(配慮するべきは、トンネル内に作業員がいた場合の避難、トンネルの地下水排水、ヘリ ウムの回収) →停電時の対策参照

検討されているリスク -ビームダンプ-

項目	リスク	回答	引用
ビーム ダンプ	1 ビームダンプ管理の多重化につ いて	ビームダンプ室は放射線管理の点からも多重化されて いて、冷却水・空気の管理が行われている。	
ビーム ダンプ	2ビームダンプの循環水について	250GeV ILCでは絶対圧力3気圧での運転も可能であり、 ビーム窓への圧力負荷も低減される。ビーム窓が破損 した場合の窓からの水の吹き出しは24m/s程度と見積 もられている。	
ビーム ダンプ	ビームダンプが壊れるとダンプ冷 3 ^{却水が吹き出てトンネル内を汚染 する恐れがあるが、その対策はさ れているか。}	ビームダンプ窓が破損した場合はダンプラインのビーム パイプ中に水が漏れだすが、インターロックによりダン プラインに設置するゲートバルブを閉めることで流出を 最低限に抑える。ビームパイプの水は回収バルブから ドレインに回収保管する。	設計などに ついて別資料 野村・技術的 実現可能性* P.124
ビーム ダンプ	4トリチウム水の取り扱い	ダンプラインへの漏水については、バルブでの遮断後、 ビームパイプからトリチウム水を回収・保管する。ダンプ 循環水システムでは配管接続部等の漏水拡散防止対 策を行い、万が一の場合でもドレインに回収し拡散を最 低限に抑える。	
ビーム ダンプ	ビーム負荷を分散させるため、電 子ビームをスイープするが、線速 5度は約400 m/sec となり音速を超 えるものになる。問題は生じない か。	電子ビームの窓上での線速度は音速を超えるが、例え 音速の何倍・何十倍となってもそれ自身問題になること はない。	野村•技術的 実現可能性 P.124

*野村・技術的実現可能性:平成27年度国際リニアコライダー(ILC)関連委託調査 ILC計画に関する技術的実現可能性等調査分析報告書 http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/038/gaiyou/1374357.htm 8月23日分科会で報告されたもの

検討されているリスク -ビームダンプ-

項目		リスク	回答	引用
ビーム ダンプ	6	ビームダンプのシステム の停止システムが50バ ンチ内で働かない場合	なんらかの原因でこの通報・停止システムが働かなかった場合でも、沸騰は窓付近ではなく、窓から2m 程度奥のshower maximum の地点で起こるので(電磁シャワーの性質)、ただちに窓が破壊されるわけではない。	野村•技術的 実現可能性 P.124
ビーム ダンプ	7	ビームダンプにより発生 する放射性物質の管理 問題	ビームダンプには放射性物質除去装置が付いて おり、放射性物質は分離され、地下に貯蔵され ることになる。長年にわたる放射能は、全てコン トロールされ、地上には全く影響が無いように計 画されている。しかし、これらの放射性物質の安 全管理は重要な課題である。	野村•技術的 実現可能性 P.125
ビーム ダンプ	8	ビームダンプシミュレー ションでは、高エネル ギーの粒子の計算はど のように行われているか。	物理モデルに基づく計算コードであるFluka を用 いている。LHC, LEP, LCLS, LCLS-II, EuroXFEL, SACLA, PAL-XFELなどの多くの高エネルギー加 速器施設の設計に使用されている。	別資料
ビーム ダンプ	9	水ダンプ以外の検討はさ れていないのか	耐熱耐応力の点からビーム吸収体にグラファイト、冷却にヘリウムガスを用いたビームダンプの評価を行った。放射線ダメージに加えて放射化したガス漏れ事故の対応が困難であり現実的では無い。水ダンプが最良と判断している。	別資料
ビーム ダンプ	10	SLACの水ダンプの運用 実績は?	最大750kWである。	別資料



窓交換 システム

貯水密閉

タンク

(窓交換時など)

万が一のための

ドレイン



熱交換器

放射化水

(閉循環)

循環水システム

フィルター

水素再結合器

ビームダンプ循環水施設室

ポンプ

日本学術会議 2018/9/13

放射線管理区域の

アクセストンネル/立坑(管理区域)

加速器トンネル

ビームダンプ循環水施設室

ビームダンプ室

多重化

・冷却水・空気の管理

・万が一の汚染拡散防止

ビーム吸収体(循環水)について

ビームダンプ2

	TDR ビームダンプ設計	ILC-250
ビームエネルギー	500 GeV	125 GeV
ビーム入射での 最大温度	循環水∶ 155℃ ビーム窓(1mm厚):74℃	循環水:73℃ ビーム窓(1mm厚):82℃
TDR後の検討 窓厚 → 最大5 mm	ビーム窓(5mm厚):110℃	ビーム窓(5mm厚): 115℃
必要な水圧	10気圧 (沸点180°C)	3気圧 # (沸点133℃)

損傷したビーム窓から水が吹き出す速度を評価(ベルヌーイの定理から) ■ ピンホールの場合

- ・ ビームパイプ(真空)へのリーク、凍結、融解、リークを繰り返す。
- 多くの経験がある事象。
- より大きな穴
 - 速度は低下する。最大としてピンホールの速度で拡散を評価する。

水の噴き出し速度 45 m/s 24 m/s

#: 通常、加速器で使う冷却水はポンプで圧送されて3気圧以上となる。

日本学術会議 2018/9/13

6

ビーム窓が壊れた場合への対応検討 ビームダンプ3



準備期間において、トリチウム水の回収作業を想定したダンプラインの詳細設計を行う。 日本学術会議 2018/9/13

トリチウム水の取り扱い

ビームダンプ4

トリチウムを含むシステムの例

- J-PARC 水銀標的:ILCと同等レベル
- 重水炉(ふげん)

³H 半減期12.3年 β壊変 最大**18.6 keVの電子**を放出 最大飛程:空気中 5 mm 水中 0.006 mm 外部被曝は無視できる 内部被曝に留意する

これらの漏水対策を含めた実績・経験を取り入れて、準備期間で詳細設計を行う。

事故の想定

■ 局所的な停電

- 水の循環は直ぐには止まらない。それに対してビームはミリ秒で停止。
- 安全管理/確認のために非常電源を用意

■ 循環水の配管や計器などの接続部から漏水

- 異常検出のためのモニター(温度、湿度、漏水、放射線量、...)の設置
- 二重配管、漏水受けや拡散防止カバーなどによる多重化→漏水の回収・保管
- 蒸発→室内空気:除湿回収、立ち入り前のモニタリング

■ ビーム窓の損傷による漏水

- ダンプラインの真空パイプ内に漏水。
- 多重化した高速ゲートバルブで遮断。
- 漏水受けや拡散防止カバーなどによる多重化→ 漏水の回収・保管

検討されているリスク –放射線・安全–

項目		リスク	回答	引用
放射線 ▪安全	1	システム異常時の停止	機器の異常を検知した場合、Machine Protection System(MPS)に通知されビームは停止する。	野村•技術的実 現可能性P.124
放射線 ▪安全	2	ILC加速器での主な放射 化	加速された電子が機器にあたり発生した二次粒子 により放射化が生じる。ビームダンプのダンプ水が 放射化水となるが密閉管理される。その他の機器 の放射化は素材元素の放射化であり、素材の内 部に留まる。	
放射線 ・安全	3	放射線安全対策	状態を監視し、異常時はヒーム停止。直接ヒーム が当たる機器は密閉構造。停電時はビームは停 止し新たな放射化は生じない。	
放射線 ▪安全	4	加速器の安全性は担保 されているのか。	加速器は放射線発生装置として原子力規制委員 会に申請され、安全系を含めて審議される。実際 の運転の前にも安全ロジックの実地検査など厳し い審査を受ける。	コミッショニング 4資料参照
放射線 ▪安全	5	ハドロン加速器と電子加 速器の違いについて	陽子などのハドロン加速器の場合は、物質に入射 した際の原子核との相互作用により核子が放出さ れる。 電子加速器の場合は、物質に入射した際の制動 放射により発生する光子(ガンマ線)が放射化の要 因。	別資料

検討されているリスク –放射線・安全–

項目		リスク	回答	引用
放射線 ・安全	6	放射線安全についての リスクはないか。	MLトンネルなど放射線レベルの低いエリアのトンネル構造(外周 コンクリート)は、一般的な土木構造物としての標準設計で十分な 遮蔽となる。陽電子源やビームダンプ部等、放射線レベルが高い エリアでは追加の局所遮蔽を行うことで放射線レベルを規制基準 未満に留めることができる。	別資料
放射線 ▪安全	7	,地下水などの放射化は 検討されているか。	ビームロスなどから仮定する地下水中のトリチウム濃度は、法で 規制している値60ベクレル/ccを十分下回るように設計される。	別資料
放射線 ∙安全	8	J-PARC事故のような 問題はないか?	J-PARC(東海村)の事故では、ビーム制御機器の異常により、 ビーム標的の損傷が生じ、これが密閉されていなかったために放 射性物質が放射線管理区域(実験ホール)に飛散した。これにより 放射線管理区域内にいた研究者(放射線作業従事者)が被曝した またこの一部が排風ファンの運転により意図せず外部に漏洩した。 ILCでこの事故と同様なことが起こらないように、安全に係わる制 御機器を多重化するとともに、ビームダンプなどの冷却水は密閉 された容器に収めて、これらを地下トンネルの区切られた部屋に 格納して排気を管理するなど、予め外部への飛散が無いように設 計されている。	別資料
放射線 ・安全	ç)火事に対する対応	万が一、片側のトンネルで火災が発生したと想定すると、反対側 のトンネル部が避難路となる。煙感知機が作動して、両トンネル間 にある二重の防火扉が閉鎖される(当 然ながら、避難には退避ドアとして使用)。	野村•技術的 実現可能性 P.154
放射線 ・安全	10	ヘリウムに対する安全 対策	酸素濃度が監視レベル以下になると緊急措置がとられ、警報音が 鳴る。主換気装置は非常モードに切り替わりトンネル上部からヘリ ウムガスはトンネル上部からアクセストンネル内の排気用立坑に より外部に排出される。 2018/9/13	野村·技術的 実現可能性 P.154 10

システム異常時の停止

放射線·安全1



日本学術会議 2018/9/13

ILC加速器での主な放射化

放射線·安全2

■加速された電子がビームラインの機器にあたる。■発生した二次粒子により周辺の機器も放射化する。



影響が大きいものは⁶⁰Co(半減期5.3年、1MeVのy線)および¹⁵²Eu



日本学術会議 2018/9/13

(半減期13.5年、1.4MeVのy線)

⁶⁰Co, ¹⁵²Eu, ...

放射線安全対策

放射線·安全3

■ 放射線遮蔽

- 地下トンネル外側(岩盤、地下水)の放射化が法令に定められた 濃度限度を十分に下回るように遮蔽体を設ける。ビームダンプな どは局所遮蔽。
- 直接ビームを受ける機器(ビームダンプ、陽電子標的)
 - 照射部を密閉する構造(万が一の飛散を防止)
 - 多重化管理(冷却水、空気)
- 状態監視 → インターロック → ビーム停止
 - 出入扉の状態(運転時の入室禁止を担保)
 - 非常停止ボタン(閉じ込め時のビーム運転開始の防止)
 - 放射線量
 - ビームの健全性(軌道、強度、エネルギー)
 - 制御機器の健全性(電磁石、高周波、冷却水、空調、...)

■ 停電·地震

- ビームが停止し、新たな放射化は生じない。
- 使用済み核燃料のように継続的な冷却(崩壊熱の除去)を要するような放射化物は無い。
- 必要な機器に予備電源を用意する。より安定な停止。
- 放射化が予想される機器(ダンプ冷却水系も含む)の耐震設計に 万全を期す。

検討されているリスク –加速器土木–

項目	リスク	回答	引用
加速器 土木	」停電時の対応はどのように ¹ なっているか。	停電時には、、緊急避難を含む防災機能維持、 地下水の地上への排水、地下部のHeガス対応 を想定しており、それに必要な非常電源を準備 する。	別資料
加速器 土木	2環境アセスメント	モデル候補地域においては、地域の自主努力と して予備環境調査が実施されており、検討を深 めている。	
加速器 土木	山岳トンネルエ事中に遭遇す 3る突発的な事態にどのように 対応するのか。	工事開始後に計画ラインの修正が出来ない特 性(直線性)から、工事中に遭遇する可能性のあ る事態をできる限り未然に回避する努力が大切。 突発的な湧水については、止水剤注入工事、水 抜きボーリングなどの対策が考えられる。	別資料
加速器 土木	4 ⁴ ではないか。	LHCのトンネルはILCより一回り小さいトンネルと なっていて、空きスペースを考えてもILCのもの の方が余裕がある。	別資料
加速器 土木	掘削工事で発生する土砂・ズ りの中に自然由来の重金属 が含まれていた場合にどのよ うに対応するのか。	事前調査に基づいてリスクを評価し、環境への 影響を避けるための対策を実施する。	別資料

検討されているリスク –加速器土木–

項目		リスク	回答	引用
加速器 土木	6	地質調査は行っているか	モデル候補地域においては、KEKからモデル候補地 域への委託調査および地域の自主努力としてボーリ ングや弾性波探査などの予備的な調査が実施されて おり、検討を深めている。	別資料
加速器 土木	7	'景観・騒音に対する課題	LHCでは、山の中腹に(傾斜地を切り込み、埋め込む ように)アクセスポイントを配置して、景観を損なわな いように配慮された場所がある。このような配慮を行 うことで景観・騒音の対策を取ることが可能。	別資料
加速器 土木	8	加速器機器の設置精度	トンネル床の精度はcm程度。この上に位置調整可能 な加速器機器が設置される。高精度の測量機器で [~] 0.2mm程度の精度で位置合わせを行う。	別資料
加速器 土木	9	常時微動などへの要求は 満たせるか	常時微動の周波数成分によって許容度は異なる。 ゆっくりした振動についてはビーム位置のフィードバッ クにより補正が可能である。周波数の高い成分は強 固な岩盤の地下深いところで許容値を満たす。	別資料
加速器 土木	10)地震対策	クライオモジュールについては参考としている欧州 XFELのクライオモジュール設計をさらに改良し、より 安全基準を高めた日本の高圧ガス保安法に対応した 耐震性が確保される。測定器についても地震による 変形が計算されており、強度は確保されている。	別資料

非常電源

加速器土木1

・東北太平洋沖地震時のような電源喪失という事態が起きた場合に、大半が 地下施設となるILC実験施設では、非常電源についてどのような計画・想定を されているか

【回答】:

- ・ 非常電源設備の主たる対応:
 - ・<u>緊急避難</u>を含む防災機能維持に必要な電力(非常照明、警報・通信システムなど)
 - ・地下水の地上への<u>排水システム駆動</u>に必要な電源(揚水ポンプ等)
 - ・<u>低温システムの安全</u>(液体He→ガス回収・備蓄に要する電力)(別資料参照)
- ・ 非常電源設備の計画概要:
 - ・全電力の<u>約10%</u>相当の非常電源設備を5箇所のアクセス・サブ変電所に分散設置。
 ・冗長化設備: <u>蓄電池(< 100 kW, > 15 分)</u>及び<u>非常用発電機(2 MW,</u> 稼働<30秒以内)。
- ◆ <u>モデル候補地域の状況に特化した検討: AAA・地域グループが検討を深めて</u> <u>いる。</u>

環境アセスメント

加速器土木2

ILC施設の建設規模では、周辺環境に対して大きな影響を与えると推量されるが、 環境影響評価(アセスメント)に対して、具体的にどのような取り組みをされているか。

【回答】:

- ILC施設建設に関する環境影響評価について:法に基づくアセスメントは求められていないが、ILC計画におけるサイト周辺の自然環境、社会環境への影響の大きさに鑑み、環境アセスメントを自主的に実施し、地域社会・住民の理解と共感を得ながらプロジェクトを推進する。
- 主なアセスメント対象項目:(詳細は次頁)
 - 工事に伴う騒音・振動・粉塵(大気)の影響調査
 - 工事により発生する地下水環境への影響調査
 - 動植物・猛禽類の生育環境への影響調査
 - 施設建設による景観・社会環境への影響調査
- モデル候補地域においては、地域の自主努力としての予備環境調査が実施されており、本調査における重点課題、地域の範囲、必要な期間などに関する検討を深めている。
 中央キャンパスサイト敷地面積が50haを超える場合、条例によってアセスメントの適用を受けることが想定されている。

環境アセスメント

本準備期間開始後に想定している環境アセスメント調査項目

項目	影響要因	調査内容
大気	工事中	気象
· · 取立	工事中・供用開始後(機械)	環境騒音
	工事中(車両)	道路交通量・交通騒音
作話	工事中・供用開始後(機械)	環境振動·地盤卓越振動
	工事中(車両)	道路交通振動
**	一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	既設井戸での採水
		既設井戸での水位測定
水の濁り	工事中	現地採水、水質検査
動物	工事中・供用開始後	現地調査
猛禽類	工事中・供用開始後	定点調査、現地踏査
植物相·群落	工事中・供用開始後	現地調査
景観	供用開始後	写真撮影
人触れ	供用開始後	ヒアリング、現地確認等

▶ 調査期間:当該規模では一般的に3年~5年の調査期間が必要とされている
 ▶ 調査費用:本準備期間の必要経費に計上されている

検討されているリスク –電子源–

項目	リス・	ク	回答		引用
電子源	1電子銃の偏極	SLC でl 上した。 している 極度909	は最終的に偏極度80%ま (これをILCの仕様として 。日本では名古屋大学 [・] %まで達成している。)	で向 採用 で偏	野村•技術的実現 可能性P.85
電子源	実証されてい。 て実験室規模 2ピオンデータで は世界に無い いか。	バンチあ るのは、全して特に でのチャン返し(マル で、実証機流)のみ のではな(Jlab)、 (Mainz) ビームを	5たりの電荷量はSLCと 変わらない。変わるのに レチバンチ構造及び平均 。SLC (SLAC)、CEBAF ELSA(Bonn 大)、MAMI 大)で物理実験に高偏極 と長期間供給した実績が	比、電 度あ。	野村•技術的実現 可能性P.85

検討されているリスク –陽電子源–

項目		リスク	回答	引用
陽電子源	1	偏極陽電子をILC250で使用す る意義は何か。	陽電子の偏極が可能になることはもちろん望ま しいが、陽電子の偏極が得られなくても、ILC で の素粒子実験の特徴が著しく損なわれることは ない。	別資料 野村·技術的実現可能 性P.99
陽電子源	2	γ線による電子陽電子対生成 方式による陽電子発生で想定さ れる(技術的)困難は何か。また どのようなタイムスケールで想 定される技術的困難を解決する ためのR&Dを進めるか。	標的は、熱集積を避けるため高速で回転しなけ ればならない。課題は標的材料の接合と真空中 での回転軸受けであるが、2年程度の開発でプ ロトタイプを製作する予定。	別資料
陽電子源	3	円偏向アンジュレータを用いた スキーム(MeV 光子の利用)は、 実用的可能性について疑問が ある。	この方式を実際に使うのは初めてであるが、原 理的問題は全く指摘されていない。アンジュ レータはプロトタイプが製作されて、十分な磁場 の得られることが実証されている。	Report on the ILC Positron Source, May 23, 2018. p12. https://edmsdirect.des y.de/item/D000000011 65115
陽電子源	4	熱的問題をクリアして、安定に 利用できるターゲットの設計の 目処が立っていないと推測され る。	ミリ秒以内の熱集積は標的の回転(100m/s)で 解決する。長時間の加熱の問題は、輻射冷却 による設計が進んでいる。250GeV用設計研究 により、発熱が5kWから2kW以下に下げられるこ とが判明し、標的車輪の設計が大幅に楽になっ た。今後2年間のプロトタイプ実験で実証可能。	Report on the ILC Positron Source, May 23, 2018. (Sec.2.1.3) https://edmsdirect.des y.de/item/D000000011 65115

検討されているリスク -ダンピングリング-

項目	リスク	回答	引用
ダンピン グリング	yンピングリングの低エミッタ ンス実現性	これらの技術については、第3世代光源において既に実 現または計画されている技術としてほぼ達成されている。	野村·技術的実 現可能性P.114
ダンピン グリング	2電子雲不安定性	電子雲不安定性に関する対策は、リニアコライダーのみ ならずリングコライダーにおいても重要であり、TDR vol.3-I にあるように、コーネル大のCESRを用いて国際的 なグループにより研究が行われた。ビーム電流は不安定 性の閾値の1/3で十分な余裕があり、かつ、SuperKEKB の運転によりこれが確認できる。	野村•技術的実 現可能性P.115
ダンピン グリング	RF 周波数のスケーリングと 3工学設計の必要性の評価と 課題	過去、同程度にスケールした高周波システム開発は多く 行われており、むしろ、周波数が上がることによる空洞サ イズの小型化などのメリットもある。必要な装置の工学設 計(詳細システム設計)は1~2年程度でできる。	野村•技術的実 現可能性P.116
ダンピン グリング	4ダンピングリングへの入出射	ILC の入射・出射システムにおいて重要な要素は、高速 キッカーのパルスの立ち上がり及び立ち下がり時間、パ ルス繰返し率、キックの振幅及び振幅安定性、長期信頼 性等である。これらのパラメータは個別のハードウェア開 発とATF に於けるビーム試験からパルス電源の長期信 頼性を除いてほぼ達成されている。	野村•技術的実 現可能性P.117
ダンピン グリング	陽電子リング-電子リング-陽 電子リングの最終的には三 5層構造となるが、振動や変形 等への脆弱性が問題になら ないか。	3 層構造は、機械的にはスタディが必要であるが、深刻 な問題は引き起こさないと考えている。実際に建設例 (LEP II)がある。なお、ILC の陽電子リングの1 本は、バ ンチ数を増やして電子雲の不安定性が増した場合に、陽 電子のリングを増やして対応するためである。(3層構造 にするかどうかは現段階では決まっていない。)	野村•技術的実 現可能性P.118

検討されているリスク –超伝導加速器–

項目		リスク	回答	引用
超伝導 加速器	1	輸送環境条件(振 動、衝撃、酸化等) に起因する性能低 下のリスク	クライオモジュールのトラック輸送については欧州 XFEL計画でパリからハンブルグまで実証されている。 超精密機器であるクライストロンについては、日本か らヨーロッパには海路で輸送されていて性能に問題 ないことが確認されている。	野村•技術的実現可 能性P.49 別資料
超伝導 加速器	2	高圧ガス保安法	日本の高圧ガス保安法は、基本的な指針において、 米国、欧州の高圧ガス規則/法と整合している。海 外で日本の高圧ガス保安法に適合可能な空洞など が製造されている。	別資料
超伝導 加速器	3	長期使用による性 能低下	(RI社からの回答)クライオモジュールの長期的な性 能低下は予想していない。当社のモジュールは、12 年以上にわたって顧客の装置内で性能低下すること なく動作している。(クライオモジュールの長期的な性 能低下の有無は、長期運転を開始している欧州 XFELの状況を見守る必要があるが、現在のILCでも 一定の予備モジュールをあらかじめ組み込んでおく スペースはある。))	野村•技術的実現可 能性P.49

検討されているリスク –超伝導加速器–

項目		リスク	回答	引用
超伝導 加速器	4	EXFELでの空洞の 性能と、現在の ILC-TDRでの 31.5MV/m運転の 現実性について	XFELでILCと同様の処理を行った場合(表面処理を 3回まで許容した場合、91%)の歩留まりで33MV/mが 達成できている。この実績から、SRF空洞技術として、 ILC計画として求める技術レベルに対して、総合的に 90%のレベルに達している。過去10年間の技術進歩、 性能向上を踏まえ、ILC建設段階では要求性能を満 足する見通しを持っている。	別資料
超伝導 加速器	5	空洞の性能が達 成されない場合の 対応	250GeV ILCでは新たに2.5%(8000台の空洞のうち200 台に相当)の余裕(全体で6%)で設計されている。ま た、電子側、陽電子側に600m程度の空きトンネルが あり、(予算は別途必要であるが)400台程度の空洞 の追加が可能である。	別資料
超伝導 加速器	6	冷凍機の規模	500GeVILCでの冷凍機の規模はLHCの2/3程度である。(ILC250GeVではLHCの1/3程度)	野村·技術的実現可 能性P.133
超伝導 加速器	7	ヘリウムの安全貯 蔵	LHC用のヘリウムは136トン。500GeVILCのヘリウム 量は84トンでありLHCより少ないが安全貯蔵に努め る。(ILC250GeVでの使用するヘリウム量は50トン程 度)	野村•技術的実現可 能性P.134

検討されているリスク –最終収束–

項目		リスク	回答	引用
最終収束	1	衝突点が狭く、検出器の鉄シー ルドがビームのシールドを兼ね ることになっているが、その場合 検出器がないとビームを出射で きないことが懸念される。	検出器が無くてもビームの出射は可能である。 原理的に壁を作ることも可能であるが、費用や 時間などから現実的では無いと考えられている。 (試運転時のみの問題である。衝突点までの ビーム試験には、検出器が置かれている必要 があるのは事実であるが、これが施設全体の試 運転のプログラムに大きな影響を与えるわけで はない。)	野村•技術的実現可能 性P.121
最終収束	2	衝突点が狭いために、新竹モニ ター(ビームサイズモニター)が 入れられないが、それによって、 ビーム制御上の制約が発生す る可能性がある。	ILC では、新竹モニターの使用は想定されてい ない(ビーム間クーロンカによるビーム偏向効果 ルミノシティ、ビーム輻射等を計測することに よってナノビーム調整を行う。ATF2で新竹モニ ターを使ったのは陽電子ビームがなかったため である。)	野村•技術的実現可能 性P.121
最終収束	3	ビームがナノサイズに常に絞れ ていることをルミノシティモニ ターだけで行うことには限界が ある。	ルミノシティモニターは十分高速・高感度で、こ れによるビームサイズ測定で基本的 には十分と考える。なお、そのほかに、ビーム同 志の蹴り角の測定、ビーム輻射の測定、衝突で 発生する電子・陽電子対の出射角分布の測定 なども、ビームサイズ測定の補助として役に立 つ。	野村•技術的実現可能 性P.121

検討されているリスク –準備期間–

項目		リスク	回答	引用
準備期間	1	現在のTDRで建設 がすぐできるレベル であるのか。	TDR はすぐに建設に着手するための文書ではなく、次 の段階として、準備期間での詳細設計を踏まえた EDR (Engineering Design Report)が、「すぐに作り出せる設 計書」と位置付けられている。	別資料
準備期間	2	人材育成は可能で あるか。	現在の47FTEからアクションプランでは日本の加速器 人員を122名にする想定(+75名)で毎年15-20名の人 員増。KEK・トリスタン建設での実績を参考に可能な想 定と考えている。	別資料
準備期間	3	準備期間の4年の 期間での開発事項	SRFについてはR&Dの成果も含んだ量産化技術、ハブ ラボ機能の実証、陽電子源ではターゲット・プロトタイプ による技術実証、ビームダンプではビーム窓試作・耐 久性及び保守技術評価、リモート化、安全系の設計、 検証を進める。	別資料
準備期間	4	ビームダンプと陽電 子源については準 備期間に完成でき る見込みはあるの か?	準備期間に最適化を行い、システムとしての完成を目 指す。実装されるのはトンネルが完成した後の建設期 6年目以降(準備期間と含めて10年)であり、さらに改 良の余地がある場合には改良を進めたうえで最良の ものを導入する。	別資料

検討されているリスク –コミッショニング–

項目		リスク	回答	引用
コミッショ ニング	1	衝突のタイミングを合わせる のは大変ではないか。	電子陽電子のリニアコライダーであるSLC(1989-1998)のビームの長さは 標準で1mm、最短時には0.5mm程度。ILCは0.3mm程度である。SLC以降、 ビーム調整の手法は格段に進歩しており、ビームを衝突させるタイミング調 整は問題ない。	/www- sldnt.slac.stanford.ed u/alr/slc.htm 野村・技術的実現可 能性P.99
コミッショ ニング	2	アンジュレータ方式の場合 の電子と陽電子のタイミング 合わせ	アンジュレータ方式の陽電子生成の場合、電子・陽電子衝突のタイミング 合わせのため、施設全体にわたる長さの条件が課せられる。必要な精度 は1mm前後であり、これは陽電子生成直後に置かれるシケインで微調整さ れる。とくに難しい技術ではない。	別資料
コミッショ ニング	3	衝突点でのビームフィード バック	ILC では電子と陽電子のビーム対ビーム偏向(beam-beam deflection)が あるので計測は容易である。ビーム間に1nm のズレがあると、ビーム対 ビームのキック角が100micro-rad 発生し、下流で100 ミクロンの大きな位 置信号として計測される。	野村•技術的実現可 能性P.109
コミッショ ニング	4	ILCでは長距離様々なシステ ムが配置されている。ビーム 制御に対する懸念はないか。	KEKBでは、4種類の異なるビームをパルスごとに入射していた。J-PARC やLHCではビームの入出射が複雑となっているが、安全に運転されている。	別資料
コミッショ ニング	5	ILCでルミノシティ想定やコ ミッショニング期間について どのような予定となっている か。	建設終了後は加速器調整に1年、その後、4年をかけて所定の衝突頻度ま で調整する予定である。	別資料
コミッショ ニング	6	リニアコライダーであった SLCでは仕様であるルミノシ ティを達成できなかった。同 じリニアコライダーで、SLCで の経験を生かすことが重要 ではないか。	SLC ではルミノシティは設計の半分しか到達しなかった。理由としては、 ビームウェーク場の影響が強い、アーク部分が平たんでなく調整がむつか しい、ビームコントロール技術が未熟、などがあった。設計上の違い(ビー ムウェーク場が弱い、アーク部が小さく平坦、など)やATF-2などの経験か ら設計ルミノシティへの到達は可能と考えている。	別資料

検討されているリスク –運転停止後–

項目	リスク	回答	引用
運転停 止後	廃止措置における具体的 1な作業方針はどのように なっているか。	機器は再利用を前提とし、組み込み・据 付の逆プロセスを取る。作業期間はイ ンストールと同様の4年を想定する。 ビームダンプについては、この期間内 に放射線レベルを見極めつつ、取り出 し、関連する法律に則して、適切な場所 にて処理・保管される。	別資料



日本学術会議 2018/9/13



ビームダンプ設計

ビームダンプ3



ビーム窓: チタン合金 (Ti6Al4V) 1mm厚で水10気圧に耐える設計 → 5mmまで許容可 日本学術会議 2018/9/13



ILC のビーム構造

ビームダンプ3



ビームダンプにおける安全インターロック ビームダンプ3 ビーム スイーパーは多重化 連続1312バンチ 554ナノ秒間隔 スイーパー ビーム ビーム ビーム窓から2.4m先で最大負荷 水温最大73°C(250GeV)

スイーパーが**故障してビームが一点に集中**すると厳しく仮定した場合、およそ 1000バンチで水が沸騰する。(ILC-250GeV)



高速ビームアボートシステム:多くの加速器で採用、十分な実績

• SuperKEKB 10-20マイクロ秒(ケーブル長で制限)

ビームダンプシミュレーションの信頼性

ビームダンプシミュレーションでは、125GeV,500GeVの粒子の計算はどのように行われているのか。また、誤差はどの程度と考えられるか。

【回答】

- ビームダンプのシミュレーションには物理モデルに基づく計算コードであるFlukaを用いている。Flukaは高エネルギー電子の主要な反応である制動放射の断面積については、理論モデルから評価し、中性子生成の主たる過程である光子の巨大共鳴の断面積を低エネルギー中性子の反応は実験値に基づく評価値を採用している。放射能を生成する主な反応は、125GeV電子のシャワーの中でも、1 GeV以下の光子や低エネルギー中性子の寄与が粒子数も多く、反応断面積も大きい。
- Flukaは、これまでにLHC, LEP, LCLS, LCLS-II, EuroXFEL, SACLA, PAL-XFELなどの多くの高エネルギー加速器施設の設計に使用されており、その運転時における測定データのとの比較が行われている。また、放射化、中性子生成、ミューオン生成のベンチマーク試験により、線量率、生成放射能、二次粒子束などの項目において比較が行われている。その差異は測定条件の不確かさも含めて概ね2倍程度となっている。

ビームダンプ8

Water beam dump以外の検討 ビームダンプ9

1枚あたり26kW

最大1000℃

330°C



- 比較的規模の大きい高圧ガスシステム、熱交換効率の問題
- グラファイトおよび周辺構造の放射化が厳しい。ダンプ自体の交換も。
- ビーム運転中のグラファイト劣化対策、検出方法が課題
- 放射化した高圧ガスの漏れ事故対応が困難 →現実的では無いと結論
ビームダンプの冗長化(案)

■不慮の故障に対応

- ■「放射化による復旧作業の制限=数年の停止」を回避
- 経験を積んで高度化する

■ 信頼性の向上、17MW(1TeV)等への技術確認

■ダンプラインに直列配置

- e⁺e⁻ビーム衝突で生じるBeamstrahlung光子(直進)を ビームダンプで受けるため。
- 2ndダンプは1stの直前に後から設置する。床工事等はあら かじめ必要。冷却水施設は共用(再利用)可能。





ビームダンプ10

SLACのダンプの水の放射化の精密分析とその際の実効的な投入パワーを教えてほしい。

【回答】

- SLACの2.2MW水ダンプの運用実績は750kW(2-mile LINAC最大パワーは900kW)になる。このダン プは、リニアック終端部のEnd Stationに設置されており、SLC衝突ビーム用のダンプ(水冷アルミ円柱 型で100kW)とは別のもの。また、2.2MW型の水ダンプがJLABのCEBAF加速器でも運用されており、 こちらの最大実績は728kWになる。
- SLACの2.2MW水ダンプについて、設置前試験が実施され、以下の様に報告されている。
 - 設置前試験での入射ビーム: 16.3GeV, 170kW
 - ダンプに使用する水: 純水(1MΩ-cm), 弱酸性pH6.2-6.5(CO2添加)
 - 水分解で発生する水素0.3L/(MW sec)は、H₂,O₂再結合器により回収。
 - (SLACおよび他機関での実験結果は理論モデル計算とよく一致している。)
 - 水中に生成する放射能: ³H, ⁷Be, 他に分オーダーの短寿命核(¹⁵O, ¹³N, ¹¹C)
- ビームダンプ容器及び配管は耐腐食性の観点からSUS-316Lを採用し、その腐食を抑えるために循環水中の塩化物は1ppm未満とされている。³H(半減期12年,β線20keV)は閉ループの一次循環水に蓄積・管理され、その放射線は水配管自体で遮蔽される。⁷Be(半減期53日,γ線480keV)はイオン交換樹脂で捕捉されるため、局所的な遮蔽で対応している。水ダンプ容器および循環系配管は、循環水による減肉を考慮して設計される。
- TDRの18MW水ダンプの基本設計には、SLACで2.2MW水ダンプの設計・運用を40年以上担当した 研究者が加わっている。



ハドロン加速器と電子加速器の違いについて

【回答】

陽子などのハドロン加速器の場合は、物質に入射した際の原子核との相互作用により核 子が放出される。

電子加速器の場合は、物質に入射した際の制動放射により発生する光子(ガンマ線)が放 射化の要因。

1.1 ハドロン加速器

高エネルギーの陽子や重イオンが物質に入射する と原子核内の核子との相互作用により核子を原子核 外に放出し(核内カスケード)、放出された核子が再 び原子核と相互作用をしながら個々の粒子のエネル ギーを下げながら粒子数を増やしていく現象を「核 外カスケード」と呼ぶ。核内カスケードでは高いエ ネルギーの核子を放出した後に蒸発過程によりエネ ルギーの陽子や中性子が放出される。高エネルギー

2. 機器や構造体の放射化

機器や構造体の放射化では、核内カスケード の残留核が最も重要であるが、材質によって は速中性子 (Al $(n,\alpha)^{24}$ Na) や、熱中性子による 反応 $(^{23}$ Na $(n,\gamma)^{24}$ Na) も考慮する必要がある。

<u>http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt2.html</u> 1999年 高エネルギー加速器セミナー 4A.加速器施設における放射線シミュレーション 平山英夫(KEK)

1.2 電子加速器

高エネルギーの電子が物質に入射すると制動輻射 により高エネルギーの光子を生成する。高エネルギー の光子は、電子対生成により、電子と陽電子を生成 し、生成した電子と陽電子がまた制動輻射により光 子を生成していく。この様に制動輻射と電子対生成 の繰り返しによって電子・陽電子及び光子がエネル ギーを失いながら数を増やしていく現象を「電磁力 スケード」と呼ぶ。光子のエネルギーが高い場合に は、主として電子対生成が起きるが、エネルギーが 下がっていくに従ってコンプトン散乱や光雷吸収の 割合が増加し、最終的には光電吸収により吸収され る。断面積は小さいが光核反応や光中間子生成反応 と呼ばれる反応によって中性子が生成される。第1.1 3. 放射化 電子加速器における機器や構造体の放射化は 制動輻射により生成した光子の核反応により 生じる。一般的に、ハドロン加速器に較べる と同じパワー当たりでは、電子加速器施設の 放射化の程度は二桁以上小さい。

放射線安全

放射線·安全6

放射線安全についてのリスクはないか。

【回答】

ILCのトンネル構造(外周コンクリート)は、一般的な土木構造物としての標準設計で検討されている。陽電子源やビームダンプ部等、放射線レベルが特に高いエリアでは局所遮蔽 を行う。



ビームダンプでの局所遮蔽

地下水の放射化

放射線·安全7

地下水などの放射化は検討されているか。

【回答】

- ILCのトンネル構造(外周コンクリート)は、一般的な土木構造物としての標準設計で検討されている。陽電子源やビームダンプ部等、放射線レベルが特に高いエリアでは局所遮蔽を検討。
- <水の放射化に関する検討>
- ILCのビーム損失(ビームロス)は1mあたり0.00175 mWと、これまでの加速器に比べ非常に小さい。 一方、加速電場の形成に伴って発生する暗電流(ダークカレント)による損失は0.11 W/mとビーム 損失に比べて大きく、遮蔽の評価は主に暗電流の損失に対して行われる。本計画では、暗電流値 を注意深く見積もり設計に用いている。その結果、トンネル壁(コンクリート厚30cm)と防水シートで 区画された、外側の地下水の放射能濃度は、放射線障害防止法が定める排水基準よりも十分低 いレベルにある。

<地下水の放射化評価に関する要素>

 ①ビームロス、②壁による二次粒子の遮蔽、③トンネル外部の水の量と流速、④水へのエネル ギー付与、⑤岩盤へのエネルギー付与、⑥エネルギー付与あたりの放射能生成量、⑦岩盤からの放射性核種の溶出

放射線安全

放射線·安全8

J-PARC事故のようなことはないか。

回答

J-PARC(東海村)の事故では、ビーム 制御機器の異常により、ビーム標的 の損傷が生じ、これが密閉されてい なかったために放射性物質が放射 線管理区域(実験ホール)に飛散し た。これにより、放射線管理区域内 にいた研究者(放射線作業従事者) が被曝した。またこの一部が排風 ファンの運転により意図せず外部に 漏洩した。

ILCでこの事故と同様なことが起こら ないように、安全に係わる制御機器 を多重化するとともに、ビームダンプ などの冷却水は密閉された容器に 収めて、これらを地下トンネルの区 切られた部屋に格納して排気を管理 するなど、予め外部への飛散が無い ように設計される。

http://www.nsr.go.jp/data/000104285.pdf

平成26年度に発生した原子力施設等の事故故障等

表3 放射性同位元素使用施設等の事故故障等の概要

発生日	施設名・件名	概要		
平成25年 5月24日	大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研 究機構(KEK)及び独立行 動法人日本原子力研究 開発機構 (JAEA)	平成25年5月23日、50GeVシンクロトロンからハドロン実験施設内の金標的に対して誤作 動によって大量の陽子ビームが照射された。これにより金標的から生成した放射性物質 がハドロン実験ホール内に飛散し、ハドロン実験施設内にいた作業者34名が計画外の被 ばくをした。さらに、事業者がハドロン実験ホールの排気ファンを運転したため、当該 放射性物質が管理区域外に漏えいした。 加えて、事業者は本事象が法令報告対象に該当しないと誤った判断をした背景から、原 子力規制庁への通報が平成25年5月24日となった。 平成25年6月18日及び平成25年5月24日となった。 平成25年6月18日及び平成25年8月12日(平成25年9月24日に当該報告の訂正報告がなされ た。)に、事業者から当該事象の原因と対策に係る報告があり、原子力規制庁にて評価 の上、平成25年8月21日、原子力規制委員会において当該事象の原因と対策に係る報告に 対する評価は了承された。 INES最終評価:レベル1		
平成25年 10月31日	公立大学法人 大阪市立大学 理学部	平成25年10月29日、大阪市立大学理学部RI室管理区域の廃止作業準備のため、同室のス ミア検査を行ったところ、トリチウム密封線源を貯蔵している貯蔵箱表面及び室内壁面 等においてトリチウム汚染が確認された。このことから、同大学が汚染検査範囲を管理 区域外に広げて検査をしたところ、管理区域外のドアノプ等においてもトリチウム汚染 を確認した。 なお、同大学は管理区域外の汚染は人体へ影響を与えるレベルではなく、管理区域のあ る建物の外部への漏えいもないと判断している。 平成26年3月20日、同大学から当該事象の原因と対策に係る報告があり、平成26年3月31 日現在、原子力規制庁は当該報告について評価中。		
平成25年 12月19日	国立大学法人 東京農工大学 農学部	平成25年11月22日、東京農工大学農学部放射線研究室の施設改修を行っていたところ、 地下埋設型貯留槽に接続する土中埋設配管の一本に破損が発見されを確認した。平成25 年12月2日から同大学は地中内の調査を開始し、平成25年12月9日、新たに2箇所の土中埋 設配管の破損を発見した。 その後、破損箇所付近の土壌を検査したところ、平成25年12月18日、管理区域外にある 破損配管直下の土壌からトリチウム及び炭素14が検出され、また検出された放射能が自 然放射能より高かったため、平成25年12月18日、同大学は放射性物質が管理区域外へ漏 えいしたと判断した。 なお、同大学は漏えいした放射性物質による人への被ばく及び周辺環境への影響はない と判断している。 平成26年3月31日現在、同大学は当該事象の原因等を調査中。		
平成26年 3月24日	国立大学法人 東京医科歯科大学	平成26年3月20日、東京医科歯科大学は、管理区域内において硫黄35を使用した実験途中 のサンプルが、平成26年2月19日及び平成26年3月18日に管理区域外の研究室に持ち出さ れたことを確認した。また、同大学はサンプルの一部が、医療ゴミとして廃棄または同 研究室の流しから廃棄されたことを聞き取り調査で確認し、同大学が同研究室の流し台 の排水溝まわりをスミヤ測定した結果、検出された放射能が自然放射能より高かったた め、平成26年3月24日、同大学は放射性物質が管理区域外へ漏えいしたと判断した。 平成26年3月31日現在、同大学は当該事象の原因等を調査中。		

日本学術会議 2018/9/13

https://ja.wikipedia.org/wiki/原子力事故の一覧

国際原子力事象評価尺度(こくさいげんしりょくじしょうひょうかしゃくど、英: International Nuclear and Radiological Event Scale, **INES**(イネス^[1]))とは、原子 力事故・故障の評価の尺度。国際原子力機関 (IAEA) と経済協力開発機構原子力機関 (OECD/NEA) が策定した。





概要 [編集]

国際原子力事象評価尺度は、原子力事故の共通評価を目的とした指標であり、1990年から試験的に運用された⁽²⁾。1992年に各国に対し正式採用が勧告され、日本でも1992年8月に採用している^[2]。

	影響の範囲(最も高いレベルが			
レベル	基準1 事業所外への影響	基準2 事業所内への影響	基準3 深層防護の劣化	参考事例
7 深刻な事故	放射性物質の重大な外部放出:ヨウ素131等価で数万テラベクレル以上の放射性物質の外部放出	原子炉や放射性物質障壁が壊滅、再建不能		 チェルノブイリ原子力発電所事故(1986年) 福島第一原子力発電所事故(暫定^[3]、2011年)
6 大事故	放射性物質のかなりの外部放出:ヨウ素131等価で数千から数万テラベ クレル相当の放射性物質の外部放出	原子炉や放射性物質障壁に致命的な被害		┏┏ ウラル核惨事(キシュテム事故)(1957年)
5 事業所外へリスクを伴う事 故	放射性物質の 限定的な 外部放出:ヨウ素131等価で 数百から数千テラベ クレル相当 の放射性物質の外部放出	原子炉の炉心や放射性物質障壁の重大な損傷		 チョーク・リバー研究所原子炉爆発事故(1952年) デウィンズケール原子炉火災事故(1957年) スリーマイル島原子力発電所事故(1979年) ゴイアニア被曝事故(1987年)
4 事業所外への大きなリスク を伴わない事故	放射性物質の 少量の 外部放出:法定限度を超える程度(数ミリシーベ ルト)の公衆被曝	原子炉の炉心や放射性物質障壁のかなりの損傷/ 従業員の致死量被曝		 フォールズSL-1炉爆発事故(1961年) 東海村JCO臨界事故(1999年) フルーリュス放射性物質研究所ガス漏れ事故(2008年) 等
3 重大な異常事象	放射性物質の 極めて少量の 外部放出:法定限度の10分の1を超える程度 (10分の数ミリシーベルト)の公衆被曝	重大な放射性物質による汚染/急性の放射線障害 を生じる従業員被曝	深層防護の喪失	 動燃東海事業所火災爆発事故(1997年) 東北地方太平洋沖地震によって福島第二原子力発電所で 起こったトラブル(暫定^[4]2011年)
2 異常事象		かなりの放射性物質による汚染/法定の年間線量 当量限度を超える従業員被曝	深層防護のかな りの劣化	 関西電力美浜発電所2号機・蒸気発生器伝熱管損傷 (1991年)等
1 逸脱			運転制限範囲か らの逸脱	 「もんじゅ」ナトリウム漏洩(1995年) 関西電力美浜発電所3号機・2次冷却水配管蒸気噴出(2004年)等
0+ 尺度以下	安全に影響を与え得る事象			 関西電力美浜発電所3号機2次系配管破損事故(2004年) 等
0- 尺度以下	安全に影響を与えない事象			 新潟県中越沖地震に伴う東京電力柏崎刈羽原子力発電所 での一連の事故(2007年)等
評価対象外	安全性に関係しない事象			

<u>http://j-parc.jp/HDAccident/images/setsumei_150403-05.pdf</u> J-PARCハドロン実験施設における放射性物質漏洩事故について

1-1

事故のあらまし

日本学術会議 2018/9/13

1-2

<u>http://j-parc.jp/HDAccident/images/setsumei_150403-05.pdf</u> J-PARCハドロン実験施設における放射性物質漏洩事故について

- ① 放射性物質を施設外及び周辺環境に 漏えいさせた
- ② ハドロン実験ホール内で作業者が 放射性物質を吸入し内部被ばくした
- ③ 国・自治体等関係機関への通報連絡 及び公表が遅れた

<u>http://j-parc.jp/HDAccident/images/setsumei_150403-05.pdf</u> J-PARCハドロン実験施設における放射性物質漏洩事故について

▶ ビーム取り出し電磁石電源の基板を交換し、誤作動対策を施しました。

- ▶ 旧標的を撤去し、気密容器に入れた新しい標的を設置しました。
 → 標的で生成された放射性物質を閉じ込めます。
- ←次ビームライン境界の気密を強化しました。
 → 放射性物質を一次ビームライン室内に閉じ込めます。
- ▶ 実験ホールの空気を監視し、 排気する場合はフィルタを通す設備を設置しました。 → 実験ホール内空気の排気を管理します。
- ▶ 実験ホール内に ディスプレイ、フラッシュランプ、スピーカを設置しました。 → 実験ホール内作業者に放射線モニタ情報を提供し、 事故発生時における迅速な退避を促します。

H27年1月に施設、機器の改修工事は、全て完了しました。

日本学術会議 2018/9/13

ILC 超伝導加速器・冷却システム ^{加速器±*1}

地上・地下機器配置及び全停電時非常対応に必要な機器

地上・地下に配置された冷凍機、超伝導加速器システム

停電・地震の影響事例

- (停電) 瞬時電圧低下が及ぼす事業中断リスク(NKSJ-RFレポート) http://www.sink-rm.co.jp/publications/pdf/101229 report.pdf
- 2010年12月8日に中部電力四日市火力発電所で生じた瞬時電圧低下(~50%、0.07秒)
- 東芝四日市工場(半導体製造工場):クリーンルームの空調設備が止まり一部の生産ラインが 停止。12月10日に復帰したが、2011年1-2月の出荷は最大二割減る恐れ(月額100億円程度の 減収とみられる。)

(停電)中央日報日本語版 https://japanese.joins.com/article/j_article.php?aid=239631

- 2018年3月9日にサムスン電子平沢(ピョンテク)工場で40分停電した。
- クリーンルームの清浄真空状態を維持できなくなった。半導体に蒸着装置に入っていた製品も 使用できなくなった。約50億円の損失。

(地震) 松山大学論集第29巻第4号(2017年10月) 伊東維年 熊本地震に伴う大手半導体メー カーの被害状況と復旧過程

- 半導体製造工程は、ナノメータレベルのパターン形成を行っているため振動に弱い。また、不純物を防ぐためのクリーンルームが必要。
- ルネサスセミコンダクタ:4月14日の地震後、5月22日に震災前の生産能力に復旧。(修繕費等の 損失~90億円)
- ・ ソニーセミコンダクタ:復旧まで3.5か月。(損失~160億円)

加速器土木1

工事中の突発事態への対応

山岳トンネルエ事中に遭遇する突発的な事態にどのように対応するのか。

【回答】ILC施設は、工事開始後に計画ラインの修正が出来ない特性(直線性)から、工事中に遭遇する可能性のある下記の事態をできる限り未然に回避する努力が大切。 1. 突発的、局所的な大量湧水の発生

- 2. 事前調査で掌握していない脆弱地層帯(破砕帯など)への遭遇
- <u>地質調査等における対応</u>:
- ・設計段階までに取得した地質・岩盤調査の入念な総合解析の実施。
- ・ 施工段階での、坑内からの長尺水平ボーリングによる前方探査の実施
- ・ 近傍および類似施設でのデータを活用した湧水量の予測
- 工事履行中に突発的事態に遭遇した場合の対応(事例):
- 突発的、局所的な大量湧水が発生:
 - 本坑又は補助作業坑からの止水注入工事や水抜きボーリングの実施
- 破砕帯などの脆弱部に遭遇:
 - 本坑内から、支保エやロックボルト等で地盤補強。
 - 迂回作業坑からの地盤補強や本坑トンネルに対するサポート工事。

加速器土木3

ILC地下構造物の地下水処理 TDRの検討・基本概念

(a) 道路トンネル

(b) 鉄道トンネル

(c) 水路トンネル

日本学術会議 2018/9/13

トンネル建設と排水システム概念図

ILC地下構造物の地下水排水処理 排水システムの概念

参考資料: 山岳トンネル-防水工法 施工標準

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	<mark>坑口最大湧水量</mark> _(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。

主なトンネルでの工事中と恒常的湧水量の比較事例 /鉄道トンネル事例 -JR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

ILCトンネルとLHCトンネルの比較

加速器土木4

ILCトンネルとE-XFELトンネルの比較 加速器±木4

ILC加速器トンネルの基本設計パラメータ 加速器土木6

e-LINAC

北上地域に合わせたILCトンネルと設備機器配置の設計s t u dy

東北s t u dy

加速器土木4

斜坑トンネル	長さ(m)
アクセストンネル*:	
- 幅: 8 m <i>,</i> 高さ: 7 m	
- 勾配 : < 10 %	
AT-10	1,503
AT-8	691
AT→DR	763
AT→DH	693
AT+8	283
AT+10	943
{Total Length}	{4 <i>,</i> 876}
自然排水路(Option)	4,335
- 直径: 3 m	
- 勾配:0.13%	
注:	

* アクセストンネル位置の最適化:

- 良質な岩盤・地質
- アクセストンネル長を最少化
- 一般道路へのアクセス長を最小化
- 自然排水が可能

トンネル最適化プログラム(TO T)
 による最適化
 (TO T開発 : CE RN -K E K -東北
 協力

重金属が含まれていた場合の対応 加速器±木5

掘削工事で発生する土砂・ズリの中に自然由来の重金属が含まれていた場合に どのように対応するのか。

【回答】:

仮に、トンネル等の掘削工事で発生する土砂・ズリの中に自然由来の重金属が含まれて いることが確認された場合、関係法令に則り環境への影響を防止するために必要な 対策を実施する。(関係法令:環境基本法、土壌汚染対策法、水質汚濁防止法、他)

対応の手順:

- <u>事前の詳細調査</u>: リスク評価・対策の設計等に必要な情報収集
 ◆ バックグラウント 値の把握: ●地下水 ②表流水 ③岩石・土壌
- ② リスク評価: サイト概念モデルを構築し、対策の設計に資する
- ③ <u>対策の設計</u>: ①搬送計画、②仮置き場の管理計画、③最終処分計画
- ④ 施工中調査: 地質調査、試料採取等による岩石・土壌の判定
- ⑤ <u>対策の施工</u>:現場内および周辺への重金属の飛散防止
- ⑥ <u>モニタリング</u>:施工後の対策効果の確認(バックグラウンド値との比較検証)
- 地域住民との緊密なコミュニケーション:
 - ・ 調査、リスク評価、対策の設計等の各段階毎に周辺住民や自治体などに報告。
 - 住民説明会等を含む説明文書の配布、有識者による検討会の実施等。

地質調査

加速器土木6

地質条件を全域で把握するのは困難であるが、どの程度の調査をしているのか。

【回答】:

モデル候補サイトにて、これまでに実施された地質調査: (AAA, 地域グループによる)

- 1. 地表踏査;ほぼ全域で実施
- 2. 弾性波探査: 地震波探査(全区間) 及び電磁波探査(約10km)
- 3. ボーリング調査:コアサンプリングによる各種試験など(5カ所@ILC250 域内)
- 4. 文献調查;活断層調查等

地質調査についての基本方針:

- 工事着手前(設計段階)の地質調査については、山岳地域の地形上の制約に加え、 地上での調査には費用対効果の側面から限界があることから、施設全体の設計 および工事契約に必要な適正規模の調査を実施する。
- 工事中のトンネル内からの前方探査ボーリングでの地質情報も加えて、 当初の設計や施工計画を見直しながら工事を進めることが求められる。

景観·騒音対策

加速器土木7

加速器の機器アライメントの精度はどの程度か

【回答】加速器機器のアライメント精度

- 加速器機器をトンネル内の設計場所付近に据え付けた後、機器の高精度な基準座とレーザートラッカーを使用して微調整を行うが、その位置調整の精度は
- 最終ビーム収束部(BDS):200mの区間内で、rms で20µm以内
- 主リニアック:60 0 mの区間内で、rms で200µm以内
- その他の場所:150 mの区間内で、rms で100µm以内
- である必要があり、その区間と隣の区間はなめらかにつながっている必要がある。
- 加速器機器には精密に微調整ができる機構を取り付けるので床の仕上がり精度はcm程度でよい。

B DS部の精度が厳しいが、世界の最先端放射光加速器のアライメント技術と経験を使用 する事によりクリアーできると考えている。その他の部分の精度はK E K の試験加速器で 十分にクリアーできて、実現している。 常時微動などへの要求は満たせるか

【回答】

加速器機器を揺らす地盤振動は、最終的に衝突点の約6nmの大きさのビーム同士の衝突頻度に大きな影響を与える。ビーム軌道に影響をおよぼすのは、マグネットの振動であり、主リニアックにおいてもクライオモジュール内部の4極マグネットの振動が問題となる。詳細なシミュレーションの結果、以下の様な地盤振動の許容値が設定されている。

主リニアックおよび最終ビーム収束部(BDS): 周波数0.1Hz以上の領域で振幅100nm以下。

(周波数0.1Hz以下の領域では振幅10µm以下。この周波数領域は軌道フィードバックで補正が可能である)

衝突点: 周波数0.1Hz以上の領域で振幅 50 n m以下。

これは、周波数0.1H z 以下のゆっくりと変動は、ビーム位置モニターによる軌道測定と軌道補正電磁石による軌道補 正のフィードバックにより許容値以下の変動に抑えられるが、0.1H z 以上の周波数領域では、軌道フィードバック 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て影響を緩和することが検討されている。

衝突の頻度を設計値に保つために、0.1Hz 以上の領域で高速に働く軌道フィードバック(フィードフォワード)が、 3箇所設置される設計である。ひとつは、衝突点に設置されるnm精度で軌道フィードフォワードされるもの、もうー つは、主リニアック端部のターンアラウンド部(2箇所)に設置される軌道フィードフォワードである。これによって地盤 振動の影響を受けた軌道を補正し、許容値以内に収める事が出来る設計である。

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	-
朝日	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すれば
 常時微動は許容値を十分に下回ると予想.

- ビーム軌道フィードバック
- ビーム繰り返し5H z (20 0 ms 間隔)のビーム通過位置のサンプリングからの軌道補正を行う ー>フィードバック帯域幅として0.1Hz – 1H z くらいが期待できる。

(超伝導補正マグネットの応答が遅いので比較的ゆっくりな補正スピードとなる)

ビーム位置モニター(B P M) → ビーム軌道計算 →軌道補正計算→補正マグネットにセット→軌道補正

R. J. Apsimon et al. / Physics Procedia 37 (2012) 2063 - 2071

日本学術会議 2018/9/13

地震対策

加速器土木10

加速器施設の耐震性について

- ILC加速器のなかで断熱設計のため耐震性がもっとも弱いと考えられるクライオモジュールについてISO3010の加振スペクトラムを用い、筑波地区の地上地盤強度と100年に1度規模の加速度を想定した耐震計算・設計を行なっており、ボルトのサイズアップなどの少しの改造で耐震性に問題がないことをLCC内で共有している。
- その他マグネットなどの加速器機器は海外のものであっても日本の耐震基準にそって設置するので耐震性を持たせる事ができる。
- 地下トンネル内では振動振幅が地上部の1/2から1/5に減少するので、大きな余裕度を持つことになる。地上部に大規模に設置されるヘリウム施設は、高圧ガス設備であり、その設置には耐震設計が義務づけられているので、耐震性をもっている。

測定器等の耐震性について

- 測定器に関しては、現在、有限要素法を用いた解析が行われており、地震の際の検出器の変形、 変位、応力などが調べられている。そのスタディをもとに、設計の最適化がなされる予定である。この解析で用いられている振動の強度としては建築物荷重指針(日本建築学会)およびISO3010に 従い、100年に一度の強い地震のものが用いられている。
- なお、測定器に付随する極低温ヘリウム冷却設備については、上述の有限要素解析結果に基づいて、高圧ガス保安法の許容スパン法などに準拠した設計を行う予定

ILC施設に求められる耐震性能(1)

➤ TDRでは、ILCプロジェクトの社会的使命の大きさを考慮し、自主的に所定の耐震 性能確保を目指す基本方針を定め、設計段階で対応することとしている。

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
	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。
加速器トンネル 	L2地震動	性能レベル Ⅱ 早期に機能が回復	・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
	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
実験ホール 	L2地震動	性能レベルⅡ 早期に機能が回復	・岩盤変位による実験機能・性能への 致命的な影響防止

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

地下最大加速度/地表最大加速度 地下最大加速度/地表最大加速度 02 04 0.6 02 0.4 0.6 0.8 🛶 六ヶ所 0 0 _____ 東和 📥 西郷 -50 岩泉 -50 →→ 西会津 —— 浪江 -100 ━━━ 高萩 ● 黒石 -100 ----つくば 安代 深度(m) -150 深度(m) 鹿角 ____ 久慈北 _ 岩沼 -150 _____田老 -200 田尻 ——山田 -250 -200 堆積岩類 ----川俣 花崗岩類 -300 -250

> 最大加速度の岩盤種別による比較 (pg) W¹⁰⁰ H¹⁰⁰ H¹⁰⁰

東北地域(岩手県6箇所を含む)を主 とした地震観測データより、地下での 最大加速度が地表に比べ大きく減衰 している事例が示されている。

地表面と地下100m以深での最大加 速度の比較データ

日本学術会議 2018/9/13

◆花崗岩類
■堆積岩類










測定器補足説明

- 地震による加速度応答スペクトラム ٠
 - 検出器は地下に設置されるが、組立は地上で行われるため、地下、地上、それぞれの加速 度応答スペクトラムを用いた計算を行う。衝突点の場所が最終的に決定すれば、その地点 での地盤・地下構造に特化したスペクトラムで最終確認を行う
- 免震機構 •
 - 検出器を支える脚部や、検出器が設置されるプラットフォームについて、免震機構を持たせ ることも考えられている
- 検討の現状(一部) ٠
 - 鉄リターンヨークとハドロンカロリーメーターの相対変位(下図右)と、その計算に用いた加速 度応答スペクトラム(下図左)







日本学術会議 2018/9/13

Undulatorで偏極陽電子を作る意義

偏極陽電子をILC250で使用する意義は何か。

【回答】

- 陽電子の偏極が可能になることはもちろん望ましいが、陽電子の偏極が得られなくても、
 ILC での素粒子実験の特徴が著しく損なわれることはない。
- 偏極陽電子を用いる利点は以下に挙げられる。
 - ヒッグス粒子生成反応を含む電子・陽電子の対消滅反応では、消滅後の中間状態である仮想光子または仮想Z粒子のスピンが1であるため、電子の偏極を決めると陽電子の偏極は足すとスピン1になるように自動的に選択される。そこで陽電子偏極がゼロであることを保証できれば、有効断面積を若干損するだけで測定精度に大きな差は生じない。陽電子偏極がゼロでない可能性が疑われる場合、系統誤差の原因になる。
 - 陽電子偏極があれば、この系統誤差を抑えられる。また、陽電子偏極は有効電子 偏極度を上げるので、新粒子探索の際の背景事象の抑制に有効。また、一旦新 粒子、新現象が発見された場合、その性質の絞り込みに有用。

陽電子源1

陽電子源オプションについて

γ線による電子陽電子対生成方式による陽電子発生で想定される(技術的)困難は何か。

【回答】

標的

- 1パルス(0.7ms、1312バンチ)内の熱集積を避けるため100m/sで回転しなければならない。これを 真空中で行うため、標的冷却は輻射冷却を用いることにした。
- 熱の移動は、回転チタン合金標的→(熱伝導)→回転軸→(輻射)→固定銅、となる。
- ILC250に特化し標的の厚さを7mm(TDRは14mm)にすると、陽電子の収量はほとんどかわらず、かつ標的上でのエネルギー放出が大幅に下がる(5kWから2kW以下)。
- 標的重量は50kg程度となる。
- Report on the ILC Positron Source, May 23, 2018.
- https://edmsdirect.desy.de/item/D00000001165115

陽電子捕獲

- 長パルスのFlux Concentratorは困難とみられる。
- 現在は最大磁場 1T 程度のQWT (Quarter Wave transformer) を考えている。その場合、収量(陽電子数/電子数)が問題であるが、現在のsimulationでは、1.36 ((原理的には、1.0で十分であるが、これまでの設計では1.5倍のマージンをとることになっており、その意味ではまだ1割足りない。)

超伝導加速器

輸送による性能劣化

SRF加速器1

輸送環境条件(振動、衝撃、酸化等)に起因する性能低下のリスク

【回答】

トラック輸送についてはパリからハンブルグまで実証されている。(国際リニアコライダー (ILC)計画に関する技術的実現可能性及び加速器製作における技術的課題等に関する調 査分析調査報告書(野村総研、2016年2月)P.49) また、精密備品であるマルチビームクラ イストロンは日本からヨーロッパXFELのサイトまで海路で輸送されている。



パリからハンブルグまで輸送されたE-XFELのクライオモジュール

日本学術会議 2018/9/13

高圧ガス保安法

超伝導空洞関連の機器は日本の高圧ガス保安法に準拠するはず。海外での分担に懸念 はないか?

【回答】

日本の高圧ガス保安法は、基本的には米国、欧州の高圧ガス規則/法と整合している。 六ケ所村で建設中のIFMIF(国際核融合材料照射施設)においては、国際協力でクライオモ ジュール製造を行っており、日本の高圧ガス保安法に適合した空洞などが製造されている。



EXFELでの空洞性能とTDR31.5MV/m運転

SRF加速器4

EXFELでの空洞の性能と、現在のILC-TDRでの31.5MV/m運転の現実性

【回答】

- 2007年から空洞性能向上のためのR&Dを進め、空洞性能は飛躍的に向上してきた。
- 欧州XFEL での実績として、表面処理を3回まで認めることにより、33 MV/m,Q 値>10E10 の達成率が90%を超えている。
- ・ 電界、Q値を総合し、ILCが求める技術レベルの90%レベルを達成している。



Lバンド(~1.3GHz) 空洞の性能向上(世界)



Eacc [MV/m]

日本学術会議 2018/9/13

2010年以降の世界の超伝導加速器

Project	Notes	# cavities	year
CEBAF-JLAB (US)	Upgrade 6.5 GeV => 12 GeV electrons	80	
XFEL-Hamburg (EU)	18 GeV e – for Xray Free Electron Laser	840	~ 2017
LCLS-II – SLAC (US)	4 GeV electrons –CW XFEL	300	~ 2019
SPIRAL-II (France)	30 MeV, 5 mA protons -> Heavy Ion	28	
FRIB – MSU (US)	500 kW, heavy ion beams	340	
ESS (Sweden)	1 – 2 GeV, 5 MW n-Source ESS - pulsed	150	
PIP-II–Fnal (US)	High Intensity p-Linac for Neutrino Beams	115	
ADS- (China, India)	R&D for accelerator drive system	> 200	
Global sum		> 2000	

Shanghai XFEL: > 500 to be added

H. Padamsee / ILCWS2015/ILC-School

超伝導空洞のマージン

SRF加速器5

空洞の性能が達成されない場合の対応

【回答】

250GeV ILCでは新たに2.5%(8000台の空洞のうち200台に相当)の余裕(全体で6%)で設計されている。また、電子側、陽電子側に600m程度の空きトンネルがあり、(予算は別途必要であるが)400台程度の空洞の追加が可能である。





日本学術会議 2018/9/13

TDRの検討レベル

準備期間1

現在のTDRで建設がすぐできるレベルであるのか。

【回答】

- ILC-TDR は、どこに建設するかなどの基本条件を固めることができない時点、そして、実現に向けた準備期間に入る前の段階で、国際協力によって、技術的に建設可能であることを示す為にまとめられている。
- 実現に向け青信号が示された後、TDR後の4~5 年間に準備期間に予算を伴って詰められるべき課題も明記されている。この点については、過去の国際的な技術レビューやコストレビューでも議論が重ねられている。ビームダンプ、陽電子源、SRF工業化準備、CFS 準備などが課題として挙げられており、これを受けて、KEKではILCアクションプランを作り、準備期間に必要な人材と研究開発課題がまとめている。
- これまでに、TDR において詰めが不十分であるとご指摘頂いている点については、準備期間における技術開発に向けた準備検討が進められており、できる限り定量的な成果報告に努めている。
- TDR はすぐに建設に着手するための文書ではなく、次の段階として、準備期間での詳細設計を踏まえた EDR (Engineering Design Report)が、「すぐに作り出せる設計書」と位置付けられている。

ILC-TDR から EDRへのガイドライン

- Technical Design Report (TDR)
 - (基本)技術設計書 (工学設計書とも呼ばれる)
 - Technical Design Phase におけるILC が必要とする技術開発およびILC
 技術設計をまとめたもの
 - 建設に向けた基本方針が合意され、建設を前提とした準備を進める 為の基本設計がまとめられている。
- Engineering Design Report (EDR)
 - (詳細)技術設計書
 - TDRの基本設計をもとに進められる詳細技術設計書。これをもとに建設を進めることができる設計書。
 - 建設、製造のための基本仕様、図面などが含まれる。
 - ・ ILC Project Implementation Plan Rev. C, 2015 を参照。

準備期間の研究開発

ILCアクションプランより抜粋。KEK内ワーキンググループにより、文部科学省がILC計画の実施を前提に諸 外国との交渉を始めることを決定した場合のKEKの対応をまとめたもの

https://www.kek.jp/ja/newsroom/2018/04/24/1200/

2004年からILCについての研究開発は行われており、最終的な詳細設計を行う。

表 1'. LC 加速器準備への技術課題、国際連携、人材分担比率

分野	テーマ	国際連携	準備期間 人材比率 国内・外
加速器設計	詳細設計・パラメータ最適化	LCC-ILC を中心とした連携	~1:2
超伝導高周波 (SRF)	量産製造技術・品質管理技術 超伝導材料、空洞特性(電界、共振特性) ハブ研究所機能 システム性能・安定化 (CM 国際輸送を含む性能・維持安定化等)	TTC協力(Global network) -日米コスト削減 R&D協力(JP&US) - KEK-STF (JP**) - E-XFEL 運転 (EU) - LCLS-II 建設 (US)	~2:1
ナノビーム	極小ビームの実現、安定な運用 ビーム制御技術(DR、RTML、BDS、BD)*	ATF 協力	~1:1
加速器要素 ・陽電子源(e+) ・ビームダンプ	e+: アンジュレーター駆動(偏極)方式または 電子駆動方式(バックアップ)、ダンプの熱バ ランス、冷却、安全	目欧 (KEK, DESY, CERN,)協力	日本中心
施設(CE/CF)	モデル(候補地)を想定した基本計画、 詳細設計、技術設計図面整備、環境調査・整備	KEK・国内候補地域連携	日本中心
共通技術支援	各種安全(放射線、高圧ガス、他) コミュニケーション・ネットワーク	国際安全基準の調整 ネットワーク国際調整	日本中心
管理・事務	ILC 準備活動、国際協力構築、広報 ILC pre-lab 設立、活動推進	ILC pre-lab と参加機関間で分担、 協力	日本中心

* Notes:

DR: Damping Ring, RTML: Return to Main Linac (beam line), BDS: Beam Delivery System, BD: Beam Dump CE: Civil engineering (土木・建築)、CF: Conventional Facility (電気・機械設備) **JP: Japan, EU: Europe, US: United States 日本学術会議 2018/9/13

準備期間の主な開発項目

領域	課題	概要	P1	P2	P3	P4
	ハブラボ 機能	空洞製造、クライオモ ジュール組立て、性能評 価の技術検証				
超伝導高周波設備	量産化	性能/コスト比の 高い 量 産技術検証				
	システム安定度評価	STF-2拡張、ビーム加速 評価				
	クライオモジュール 輸送	輸送前後での性能維持 検証				
	永久磁石開発	可変型偏向磁石開発				
ナノビーム	高速キッカー開発	DR入射取りだし用機器 開発				
	高速フィードバック(DR)	KEKBでの 試験				
	ナノビーム技術開発	ATFでのビーム技術開発				
	回転ターゲットプロトタイプ	アンジュレータ方式用				
限電之術	QWT	<u>アンジュレータ方式用</u>				
や勿 电 」 //示	回転ターゲットプロトタイプ	電子駆動方式用				
	Flux concentrator	電子駆動方式用				
ビームダンプ	ビーム窓	ビーム窓の設計試作、加 圧試験、耐久性の検証				
	ビーム窓交換システム	遠隔操作による作業設 計、試作				
	循環水システム	システム設計				
	安全システム	事故対策設計、動作試 験				
	CFS設計	放射線安全を含めたCFS 設計				

準備期間の研究開発

_表 3'. ILC-250 加速器・準備期間に必要な人材案 (FTE)1,

 جه	予備期間²)。	本準備期間 3)。		ILC 建設期	250-) 朝間 ⁴⁾ -,	付請⋶↩						
	現在₽	P1₽	P2₽	P3₽	P4₽	C1.	$C2^{\circ}$	بهو				
加速器:日↓	42	54⊬	74⊷	98⊷	<u>122</u> ₽	160.0	160 ₊ ³	1600	160+3	160.0	100 205	日:特に SRF 量産化技術実証・習熟要 ᠪᡎ
: 外国↩	≥ 20₽	280	41 ₽	<u>65</u> ₽	<mark>89</mark> ₽						1000	100
施設:日↓	3⊷	11.	11.	13.	17.	50¢ 60¢	50	50 60		日:中心的に推進。アウトソーシング活用+		
: 外国↩	10	3₽	5₽	5₽	5₽		外国:専門的協力↔					
共通:日+	2.	7₽	10 ⊷	13.	14.	100 110	110	日:中心的に推進↓。				
:外国₽	1.0	3₽	4₽	6₽	7₽	10043	1100	110¢	外国:専門的協力フ)↩			
管理:日↓	5⊬	8⊬	10 ⊷	14.	18.		75. 135.	日:中心的に推進↓				
: 外国₽	3.0	4₽	6₽	8₽	10.	'(p⊷		1350	外国:専門的協力。各地域での事務管理 🗛			
合計。	$\geq 77 \phi$	118e	161.	222e	282.	385.	610 _€ 3	÷				
補足説明:↩	補足説明:→											
1) ILC 準備期 オールマーク	1) ILC 準備期間における外国からの人材貢献比率を 20~40% レベルで増強する。そのうえで、政府間合意に基づく本計画・											
 建設での、 の 予備期間・ 	建設での、更なる外国からの真献増強に備える。↓ 9) 予備期期・現在の取れ組織が現在に備える。↓											
2) 」> 」> 」 」 3) 本進備期間	-2/ 〒MRAN町・現1504Xツ釉の1人の(̄短0075〜加加坯器2011用光子昇(004Xツ釉の八数/。↩ -3) 本準備期間:HLC 建設準備の為の予算を伴い人材がサポートされる。この実の数値には「国際的に推行中の加速実建設等」											
で、すでは	で、すでに培われている潜在的人材数は含まれていない。↓											
4) 建設期間:	4) 建設期間:ILC-TDR に記述されている労務数を FTE で表した人材数。→											
5) 日本において、超伝導加速空洞量産(工業化)技術およびハブラボ機能(計画統括、品質管理、性能評価)の実証のために												
人材養成を必要とする。↩												
_6) 欧米は、ILC 本準備期間までに、独自の計画(E-XFEL、LCLS-II など)のなかで、すでにその機能検証が実施されており、												
それぞれの研究所(DESY/INFN-LASA、CEA-Saclay/CNRS-LAL-Orsay、SLAC、Fermilab、JLab等)で、50~100人規												
────────────────────────────────────												
11 光地技術3	// デ理技術文技は、建設規に迅速な時期/12安(のツ、う復の映計課題。↓ ◎ Ⅱの理学能の設立進得/2まがまたまだけ、今後のプロミシュカト判断後2ヶ輪手											
	<u>- 0) - 1LU 町元//12/02 年間に U // こ八位 /3、 7 12 // ビア エンドキ的目接に依計。 /</u>											

90

₽.

ハブラボ機能の確立

CO I棟内のSRF試験設備およびクライオモジュール組立設備を立ち上げ運用し、ハブ研究所の機能の確立を行う。



量産化及びシステム安定度評価

STF加速器に新たにハーフサイズクライオモジュール3台、 ILCクライオモジュール3台を組立設置し 冷却運転、RFパワー運転、ビーム加速運転を行なって技術の確立を行う。 S I SIMME din. STF加速器トンネル access tunnel 既存設備 for air and water 2K Cold-box 212 **Cryomodule CM-2a** T I Station Carry hatch **Cryomodule CM-1** m x 9.4m Photo-cathode RFgunCapture Cryomodule CM1 CM2a CM3a CM3b CM2b V10 H. Hayano, 2/10/2013 **Capture cryomodule** 量子ビーム利用新機軸創出エリア STF加速器トンネル access tunnel 機器設置エリア for air and water クライオモジュール クライストロン 2K Cold-box 212 アンジュレーター 加速器遮蔽施設 CM-4, CM-5, CM-6 -The starter - 26.31 arry hatch Photo-cathode RFgun 逆コンプトン光発生装置 量子ビーム利用エリア 搬入口エリア CM3a CM2a CM2b CM3b V10 H. Hayano, 2/10/2013 トンネル拡張および ILCクライオモジュール3台設置・運転



A proposal: "Global SRF Cryomodule " Program

ドイツDE SY 研究所から、高性能が確認されているクライオモジュールを、高圧ガス適用させ、海上輸送を行い、 K E K のSRF試験設備で再度性能確認を行い、クライオモジュール輸入・輸送技術の確立を行う。 Objectives:

- Establish system-engineering to realize **Global Cryomodules** (globally compatible cryomodule) including:
 - Industrial technology, with optimum plug-compatibility/standardization,
 - Safety regulation (such as "high-pressure-code") with inter-regionally compatible authorization,
 - Gradient performance reproducibility after inter-regional transportation.

Global Cooperation:

- EU (AM) contributes a full cryomodule including manufacturing and performance test,
- EU (AM), and JP work together for inter-regional transportation and safety regulations to be compatibly authorized,
- JP contributes to the cryomodule performance test and to reproduce the performance,

Time-line:

• The program to be realized in the ILC main preparation phase of 4 year,







陽電子源の開発

ターゲットについては、大型・高速回転と高真空の両立が課題だが、過去の既存ターゲットや電子ビーム駆動用 ターゲット等の経験を合わせることにより、詳細な設計で高速回転・高真空・冷却技術において信頼性をもって実 現できる見通しを持てる。



準備期間の人材育成

準備期間2

準備期間の人材育成は可能であるか。

【回答】

KEKでは現在47FTEで加速器の研究開発を行っている。アクションプランでは日本全体で加速器人員 を122名にする想定である。(+75名) 毎年15-20名程度の人員増に相当する。KEKで1987年に運転が 始まったTRISTANでは1981年ころから毎年50名規模で職員数が増加していた。 加速器コミュニティの指標として加速器学会の正会員数を見ると2012年7月から2018年7月の6年間で 35%(230名)増加している。年間40名弱の純増に相当。加速器科学の応用分野が広がっている。 準備期間はILCの詳細設計を行う重要な時期であり、大学院生を含めた若手人材の貴重な育成時期 となる。大学や、企業との連携により多様な人材を集めることが可能と考えている。





日本学術会議 2018/9/13

タイミング調整

コミッショニング2

アンジュレータ方式の場合の電子と陽電子のタイミング合わせ

【回答】

アンジュレータ方式の陽電子生成の場合、電子・陽電子衝突のタイミング合わせのため、 施設全体にわたる長さの条件が課せられる。必要な精度は1mm前後であり、これは陽電 子生成直後に置かれるシケインで微調整される。とくに難しい技術ではない。



C_{DR}は3,238.68 mで、250GeV ILCではn=6である。 トンネルの長さはこの条件で決められており、電子側・陽電子側に各600m程度の超伝導 空洞が入っていない空きの部分がある。

加速器制御事例

コミッショニング4

ILCでは長距離様々なシステムが配置されている。ビーム制御に対する懸念はないか。

【回答】

KEKB(1998-2009)では、最上流の電子・陽電子入射器から4つのリングにビームを供給し ていました。このうち、放射光施設、KEKB-ハイエナジーリング、KEKB-ローエナジーリングに はパルスごとにビーム供給を切り替える入射(「同時入射」)が定常的に行われていた。ILC の場合は、電子・陽電子の加速器内の流れはシンプル(電子源→ダンピングリング→線形 加速器→衝突点)であり、ビーム制御の安全面からも懸念はないと考えている。 尚、加速器は放射線発生装置として原子力規制委員会に申請され、安全系を含めて審議 される。実際の運転の前にも安全ロジックの実地検査など厳しい審査を受ける。



ルミノシティの目標(コミッショニング期間など) コミッショニング5

ILCでルミノシティ想定やコミッショニング期間について説明してほしい。

- 【回答】
- ILC では、機器調整(コミッショニング)期間1年、測定器ロールイン後4年での設計ルミノシティ達 成を目指している。これは、KEKB や PEP-II など、これまでの加速器での実績を参考にしてスケ ジュール策定した。
- ILC では、これまでの加速器の運転の経験や、R&D を基に、各種ビームパラメータを慎重に選びながら、RDR, TDR の策定をしている。(SLCでの経験については次頁参照)

ILC での Luminosity 計画 (1年目は加速器コミッショニング)



SLCでの経験

コミッショニング6

SLCでは仕様であるルミノシティを達成できなかった。同じリニアコライダーで、SLCでの経験 を生かすことが重要ではないか?

【回答】

- SLCではSLDのdata taking開始から7年以上の運転の結果、設計Luminosityの約半分にまでしか到達しなかった。
- この原因としては、
 - 繰返し周波数は、設計値180Hz、運転値120Hz
 - バンチ強度の設計値が高すぎて、減衰リングおよびリナックでの不安定性の影響が大きかった。
 - これはすでに設計段階である程度予測されていた。
 - 最終的にはそれより低い強度(7x10¹⁰ → 4x10¹⁰)で、しかし設計より小さいビームサイズ(1.65x1.65µm → 1.5x0.65µm)で 運転され、十分に補われた。
 - アーク部分は、地形に沿って平坦ではなかったため、チューニングがむずかしかった
 - ビームコントロール技術が未熟であった

などが挙げられる

(see "SLC – The END GAME", R. Assmann, et.al. Proceedings of EPAC 2000, Vienna, Austria)

- ・ ILCでは
 - リナックのbeam dynamicsは、SLCではwake-dominatedであったが、ILCは低周波のためwakeの影響は弱い
 - アークは存在しない
 - SLC以後の加速器のbeam control / feedback 技術の進歩はめざましい
 - SLCの経験は貴重であるが、それに加えてATF2などの新たな経験もある。(local chromaticity correction, additional skew quads and octupoles, etc)



廃止措置

運転停.	止後1
------	-----

廃止措置における具体的な作業方針はどのようになっているか。

【回答】

<u>作業方針:</u>

- 再利用可能機器をILC地下施設から搬出し、地上建屋に保管し、再利用待機。
- ・ 放射化物(ダンプ等)は、国の基準に沿って処理する。
- 地下トンネル構造は現況封止。将来の再利用の可能性に備え維持。

<u>作業プロセス:</u>

 TDRで想定する組込・据付作業の逆プロセスをとり、機器の再利用を想定した作業を行う。
 作業期間は、インストレーション期間と同様の4年間を想定。放射化物の搬出は、 最後のプロセスとする。

作業内容見積もり:

- 物件費:インストレーション時の運搬据付機器・治工具および保管場所
- 人件費:インストレーション時の同様の人件費(4年間合計)を見込む
- 費用の国際分担については、今後の検討・交渉課題。