

第 2 回・第 3 回 有識者会議後の追加質問

1. ILC 計画の概要とこれまでの経緯

1-1. ILC 計画（ヒッグス粒子の精密測定）により得られる新たな知見・目標は何か。それは、巨額の投資をすることに見合う価値（費用対効果）があると国民に対して説明できるか。また、新型コロナ対応や気候変動対策などの喫緊の課題に直面している現状や日本の経済力などを踏まえても、今のタイミングでこれを進める必要性をどのように説明するか。さらに、他の大型研究に影響を与えうる予算規模のプロジェクトであるが、他の大型研究よりも優先されるものと説明できるか。（諸学問分野の大型計画を含めた ILC の位置づけに関する議論については、現状、日本学術会議のマスタープランでは重点大型計画に位置付けられておらず、文科省のロードマップにおいても申請が取り下げられている。）これらの点も含めて他の科学コミュニティや広く国民からの理解が得られているか。（参考：ILC への投資規模は ITER 計画開始時に見積もられたコストと同程度。）

【回答】

- (ILC の知見・目標) 真空のヒッグス場を研究することにより、インフレーションなどの宇宙の進化や、暗黒物質の解明などの標準理論を超える新しい素粒子現象を発見することが目標である。
- (費用対効果) 物質ではなく真空場（そして時空誕生）研究へのパラダイムシフトは、人類が探求してきた宇宙始まりの瞬間に繋がる研究である。科学技術を核として、若い研究者人材が世界から集まる環境を作っていくことは、日本が活力を取り戻すために有効である。CERN や ITER のような国際的な研究機関を日本に誘致し、それがアジア初の大型研究施設ハブとなって様々な研究人材の流れができることが、日本の将来や若手人材に計り知れないインパクトをもたらす。
- (何故今か？ 日本の経済力) 国際研究コミュニティが IDT のもとで、提案書を作成したので、これを審議していただくために、新型コロナ感染症の中で、有識者会議をお願いいたしましたことは、国際的な信義とはいえ、本当に申し訳ありません。コロナのパンデミックが終わり、世界が新しい秩序を模索するなかで、日本が科学技術でイニシアティブをとる機会となればと期待している。温暖化対策が重要なテーマであることは間違いない。その一方で温暖化をはじめとする多くの課題解決には、総合的な科学研究・科学技術基盤が必要であり、多彩な研究者が世界から集うファシリティーを ILC 計画に加えて、国際研究の中核としての価値を加えた理由がここにある。
- マスタープランでヒアリング対象に選定され、前回の有識者会議では学術的な価値を認めて頂いた。現在のマスタープランやロードマップでは、短いタイムスパンでの予算など、現実的なものが評価の基準になっている。ロードマップは、予算に繋がっているの理解できるが、マスタープランは、現行計画やその延長ではなく、もっと将来を見据えたものになるべきだと、学術会議では提案を行っている。
- 他の研究を圧迫する予算にならないように、新しい科学技術予算を開拓する努力を続け、

5-1 で述べる努力を今後も続けて、科学コミュニティの理解を得て行きたい。

- ILC に対する国民の理解は進んでいる。自国に国際的な研究機関がある研究の方が認知度や理解度が高いという調査結果が得られている。今後も、国民に向けて発信を続けて行くと共に、産業界、経済界の理解をさらに得て行きたい。

1-2. この3年間でコミュニティの中でも認識が大きく変わってきたとの説明があったが、2018年（有識者会議の最後のまとめ）から現在まで、以下(a)(b)の点についての変化はどのようなものか。またどのような事柄に基づいて変化したのか。

(a) 次の計画の進め方として、「Linear Colliderによる電子-陽電子衝突によるヒッグス粒子の精密測定」が最善であるということに関する世界中の研究者コミュニティの認識はどう変わったのか。（特にトップクォークの精密測定を目指すよりヒッグスの精密測定の方が効果が高いのか、それしかできないという消極的選択の結果なのか。）

(b) 「間接的な方法による暗黒物質等の探索」における250 GeV ILCの有効性についての世界中の研究者コミュニティの認識はどう変わったのか。（新たな知見が得られたのか。）

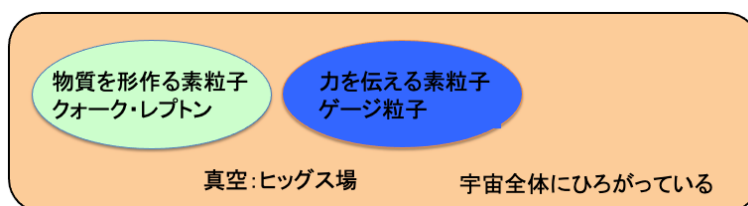
参考：「ILC計画の見直しを受けたこれまでの議論のまとめ」（平成30年7月 ILCに関する有識者会議）

P13 科学的意義

【回答】

(a) ヒッグス粒子の研究を通して、

「真空」に潜んでいる真空場の研究を行うことが、これからの鍵である。物質を形作る素粒子（電子やクォーク、トップクォークも）と力を伝える素粒子（光



など)の2種類が分かっていたが、ヒッグス粒子の発見によって、新しい第3極：それらを取り囲み、宇宙全体に広がる真空場が発見された。この真空場が変化することがインフレーションなどを起こし、暗黒エネルギーなどにも関係していると考えられている。

さらに、最近のLHCでの研究により、この真空場が安定ではなく、簡単なポテンシャルではない可能性が指摘された。このように、真空を研究することが極めて重要であることが認識され、これがILC250の提案に繋がり、欧州戦略2020でも、最重要事項にあげられている理由である。

(b) これまでの暗黒物質の直接探索、およびLHCでの暗黒物質探索の結果、従来暗黒物質と思われていた、WIMPと呼ばれる粒子に強い制限がついた。一方、宇宙観測などのデータのいろいろなアノマリーなどから、むしろ軽くて結合がかなり弱い粒子が暗黒物質である可能

性が強くなってきた。このような、比較的軽く結合の弱い暗黒物質を探す研究の重要性が増している。軽い暗黒物質は、軽いために直接探索が難しく、加速器実験での探索が望ましい。また、結合が極めて弱いため、バックグラウンドに埋もれやすく、ILC の様なクリーンな電子陽電子型実験の重要度が上がっている。

1-3. 250GeV ILC からの拡張に関して整理した説明が必要。拡張のシナリオや、委員からの質問にもあった、これまで研究者が説明していた予算と、エネルギー拡張のコスト、多目的化のコストとの関係を明確に説明していただきたい。

【回答】

- 衝突エネルギー拡張については、ヒッグス場・真空場の次に見るべきエネルギースケールが未知であり、これは 250GeV・ILC での結果から見えてくる。線形型加速器の利点は、エネルギーに合わせて加速技術を替えれば、エネルギーを高く出来る点にある。例えば、500GeV から 1TeV への拡張は、現在の超伝導加速技術で対応可能であるが、新しい技術を用いれば、より高いエネルギーへの拡張が可能になる。ILC の次のエネルギースケールは、ILC250 の成果を踏まえ、2050-2060 年以降の実現を目指して、国際的な議論で行う。
- ILC の多目的化は、多くの研究者に日本を研究拠点として研究を行ってもらい、多くの新しいイノベーションの源になるために必要である。どのような光源開発や、原子核研究施設、ナノビーム基盤が必要になるかは、現在ブレインストーミングをおこなっている段階である。ILC 加速器本体の建設開始に合わせて全てのプランを同時期に建設するのではなく、新しい研究提案を国際的に受け入れて追加していく予定であり、現在の総額に大きな影響を与えるものではない。
- 5-2 でも述べるように、加速トンネルやダンピングリングに付設の設備をつくるための空間の建設費用やトンネルの延長費用が、イニシャルコストとして必要になる。メイントンネルの場合、100m のトンネル建設費は 数億円であり、総額に大きな影響はない。

2. 技術的成立性及びコスト見積もりの妥当性（加速器等）

2-1. これまで有識者会議の議論のまとめや日本学術会議の所見で指摘のあった技術的課題に関して、説明の中では、「これまでの進捗」「今後の課題」などについて、「...実施中」「...進行中」「...を進める」といった記載であり、活動していることは示されているが、具体的な開発の進捗まで読み取れないところが散見される。そのため、現在の技術課題の達成度、課題解決のための具体的方法論及び 4 年後の技術の完成見通し（完成確率）について、各技術課題に関してより明確に説明をしていただきたい。

<指摘のあった技術的課題（ILC 加速器等）> ※有識者会議第 1 回 資料 4-1

ア. ビームダンプ、電子源・陽電子源、ビーム制御、ダンピングリング、測定器等の目標性能の明確化と工程表の検討

- ・窓の耐久性、定期交換技術、耐震性能等を含むビームダンプシステム技術の完成や放射性物質の漏出事故への備え
- ・多くの開発要素を含む2案が併記されている陽電子源について開発コストも考慮した方針の明確化
- ・目標性能を達成するためのビーム制御やダンピングリングの技術の確立 等

イ. 超伝導加速空洞の歩留まりや性能の向上、コスト検証、品質管理等

- ・設計性能の確実な歩留まりでの実現と更なる性能向上
- ・欧州 X 線自由電子レーザー (E-XFEL) のコスト上昇要因の検証
- ・参加各国から現物供給される超伝導高周波加速管の品質管理 等

ウ. 計画通り進まなかった場合の上昇コストとその対策の検討

- ・技術開発や製造工程が計画通り進まなかった場合のプランBやプランCの検討 等

【回答】

技術達成度を数字として表す為に、技術設計書（TDR）完成段階を 60%、ILC 建設前に必要とされる詳細技術設計書（EDR）完成段階を 100%として現在の状況を評価した。技術的な達成度を高めるためには、量産実証などが必要となるため、EDR 完成までに必要な予算は残された技術達成度の割合に比例しないことに留意が必要である。詳細については別資料を参照していただきたい。

ア. ビームダンプ、電子源・陽電子源、ビーム制御、ダンピングリング、測定器等の目標性能の明確化と工程表の検討

・窓の耐久性、定期交換技術、耐震性能等を含むビームダンプシステム技術の完成や放射性物質の漏出事故への備え

【現在の技術課題の達成度】

ビームダンプは 1TeV 衝突実験の 500GeV ビーム、ビームパワー17MW、のもとで設計している。ビーム窓の耐久性については、国内外の運用実績と負荷評価のシミュレーションの結果から、十分に尤度があり必要な技術課題は達成している。

ビームダンプ部は放射化により放射線量が高くなることから、ビーム窓の交換は機械的装置を遠隔操作して行うことになる。国内外で高出力ターゲット部を有する陽子加速器が稼働しており、それらのターゲット交換には同様の装置が設置されている。交換方法はそれぞれのターゲットやビーム窓の構造で異なるが、遠隔操作による交換技術は基本的に確立している。放射性物質の漏出事故対策として、ビームダンプと循環水設備は分けられた部屋の中に設置され、周辺との空気の入りも管理される。ビームダンプから水が漏れても施設外に拡散しないように、施設の床や壁は十分な厚みのコンクリートを設け、さらに金属のカバーを設けるなどの対策を行う。

ビームダンプシステム全体としての技術的達成度は 90%程度である。

【課題解決のための具体的方法】

Pre-lab のワークパッケージ WP-16 として窓交換や設備設計を含めたビームダンプの詳細技術設計を進める。窓交換等のプロトタイプによる確認や耐震設計、放射線安全対策に基づく施設設備の具体的な設計に取り組む。

【4年後の技術の完成見通し】

前述の具体的な設計および必要なプロトタイプの確認を行うことで、ILC のビームダンプに必要な技術は完成する。

・多くの開発要素を含む2案が併記されている陽電子源について開発コストも考慮した方針の明確化

プラン A としてのアンジュレータ方式とプラン B としての電子駆動方式が並行して開発されている。これは、後者が世界の多くの陽電子源で採用されているのに対して、前者は未経験ではあるが偏極陽電子を発生することができる点で高い物理的メリットがあるためであり、ともに開発を進めている。

【現在の技術課題の達成度】

アンジュレータ方式の場合の開発項目として、(a) アンジュレータ本体、(b) 回転標的、(c) 磁気収束、がある。このうち (a) は実機の仕様で必要な磁場強度が得られており 90% を超える達成度である。(b) については、材質（チタン合金）の電子ビームによる試験が行われ仕様を満たす結果が得られており、80% 程度完成している。現在最も遅れているのは (c) であり、70% 程度の完成度である。

電子駆動方式の開発項目は、(a) 回転標的、(b) 磁気収束、(c) 陽電子捕獲空洞、がある。(a) はタングステン（あるいはタングステン・レニウム）標的を、磁性流体を軸受けとして回転させるもので 90% 程度完成している。(b) は KEKB およびロシアのノヴォシビルスクの研究所での経験に基づいたフラックスコンセントレータと呼ばれるもので 90% 程度完成している。(c) としては、L バンドの定在波 APS（陪周期型）空洞を用いる。主要な課題は過渡的ビーム負荷の補償であり、90% 程度完成している。

【課題解決のための具体的方法】

アンジュレータ方式の (b) については熱計算を確認し、プロトタイプを製作する。(c) のパルスソレノイドはプロトタイプを製作し、(b) と合わせて、総合的モデルを製作、評価する。

電子駆動方式については、(a) 回転標的は順調に開発が進んでおり、準備研究所の早期に完了する。(b) フラックスコンセントレータはプロトタイプを製作する。(c) 捕獲空洞についても電源・高周波源を含めたプロトタイプを製作する。

【4年後の技術の完成見通し】

アンジュレータ方式については、特に仕様を満たすパルスソレノイドの実現に注力しなければならない。(b) 回転標的は十分な時間があれば実現可能と考えられ、実際の建設に間に合うと見られるが、方式選択は準備研究所の3年目頃に予定されており、それまでの期間は長くない。

電子駆動方式については、前記のようにプラン B として位置づけられており技術的に完成させる。

・目標性能を達成するためのビーム制御やダンピングリングの技術の確立 等

ここでは、ダンピングリングと、ビーム制御が目標性能に大きく影響を与える最終収束について述べる。

【ダンピングリングの現在の技術課題の達成度】

ILC のダンピングリングについては第 4 世代の放射光源でも同様の加速器が計画されているので（中には稼働中のものもある）、ダンピングリング自体の設計に技術的課題は無く技術的には 90% を超える達成度である。高速の入出射を行う高速キッカーについては KEK の ATF で実証しているが、最近、他の研究所で新たな技術も開発されている。

【ダンピングリングの課題解決のための具体的方法】

Pre-lab ワークパッケージ WP-14 として、最近開発された新たな技術を含めて ILC の高速キッカーの長期安定性試験を行なう。

【ダンピングリングの 4 年後の技術の完成見通し】

ダンピングリングの高速キッカーの長期安定性試験を行うことで、ILC の高速キッカーに必要な技術は完成する。

【最終収束の現在の技術課題の達成度】

ILC において衝突点でビームを小さく絞ることは重要であり、衝突点でのビーム同士の位置合わせも重要な技術要素になっている。KEK の ATF で国際協力により実施され 90% を超える技術達成度である。

【最終収束の課題解決のための具体的方法】

国際協力でビームモニター系などを持ち寄り ATF で引き続き安定化試験を実施する。

【最終収束の 4 年後の技術の完成見通し】

ATF での安定化試験で実証することで最終収束に必要な技術は完成する。国内外の若手研究者が ATF においてビーム調整技術を磨くことは、ILC 運転開始後にビーム調整の中核となる人材の育成にも大きく貢献すると考えている。

イ. 超伝導加速空洞の歩留まりや性能の向上、コスト検証、品質管理等

・設計性能の確実な歩留まりでの実現と更なる性能向上

【現在の設計性能・達成度】

超伝導高周波加速空洞については、TDR およびその後の European XFEL での空洞製造結果から主要な ILC の技術仕様に対して 90% を超える、又は 90% に迫る達成度を実現している。

【設計性能の確実な達成に向けた具体策】

Pre-lab のワークパッケージ WP-1 として、3 領域（欧・米・亜）に於いて、超伝導空洞を 40 台ずつ（合計 120 台、ILC での必要数の >1% 相当）製造し、量産技術を実証する。

【4 年後の技術の完成見通し】

TDR ベースの表面処理法による空洞性能の歩留まりを再実証する。また、新たな表面処理法による性能向上についても、TDR ベースの場合と同様に歩留まりを評価し、本建設に反映する。これらにより超伝導空洞に関する詳細技術設計が完成する。

・欧州 X 線自由電子レーザー (E-XFEL) のコスト上昇要因の検証

【European XFEL コスト上昇要因の確認】

European XFEL 完成時のコストは 13% の増加となったことが報告されている。

主要因は、

- (1) 国際協力における製造分担に基づく、各参加国における製造契約の立ち上げに、予想以上の時間を要し、結果的に建設期間が(< 1年間)延伸したことによる人件費の増加、
 - (2) 建設期に重なった社会・経済情勢の変化(市場の活況)に伴い、特に Civil Engineering の入札・契約高が上昇したこと(ホストとなったハンブルグ市公共インフラストラクチャーの大規模開発時期と重なった)、
- の2点である。

【コスト上昇への具体的対応】

European XFEL では、建設直前に想定した見積もり中心(中間)値に対して、プロジェクトの健全な推進の立場から約7%の予備費を想定し、プロジェクトの進捗に応じて国際協力連合(Confederation)・上部委員会が審査した上で追加費用を予算化するプロセスを導入した。このことで建設開始当初から予め検討された枠組みの範囲で、必要な予備費が具体的に執行された。この予備費は当初執行予算とは切り離し、進捗に沿って修正することへの現実的な方策となった。

【4年後の見通し】

建設当初から、適切な contingency は想定しても当初予算には含まず、建設の進捗を見ながら、必要予算を上部委員会でその都度審議して承認する方式は、不確定性の高い予算の膨張を抑制するには有効であるといえる。ILC Pre-lab の段階で、社会・経済の直近の状況をより正確に把握しつつ、コストを適切に見積もり、管理する方策を確定し、プロジェクト全体のコストの安定化を図りつつ、建設準備を完了させる。

・参加各国から現物供給される超伝導高周波加速管の品質管理 等

【これまでの品質管理実績】

欧米では、European XFEL および LCLS-II における超伝導高周波加速管(空洞)を多用した加速器が完成しており、超伝導空洞機器の品質管理技術が成熟していると考えている。

【課題解決のための具体的方法】

日本国内では、欧米で建設されている規模での超伝導加速器は実現しておらず、欧米と同水準の品質管理が成熟しているわけではないが、4年間の Pre-lab 期間中に40台の超伝導空洞を製造する(Pre-lab ワークパッケージ WP-1)ことで実績を持ち、同水準の品質管理技術の成熟度を目指す。

また、Pre-lab ワークパッケージ WP-2 ではクライオモジュール(CM)の品質管理の実証を目指し、各領域で製造、試験し、移送、CM 組み合わせ評価を実施する。

【4年後の技術の完成見通し】

WP-2 では、上記に述べた、各領域での個々の空洞および CM 2台ずつの全数検査後、各領域から1台ずつ CM を日本へ輸送し、性能を再確認し品質管理を徹底する。日本から各領域に返送し、そこで性能を再度確認することも可能とする。これらにより超伝導加速器部分の品質管理手法が完成する。

ウ. 計画通り進まなかった場合の上昇コストとその対策の検討

・技術開発や製造工程が計画通り進まなかった場合のプランBやプランCの検討 等

【これまでの実績】

SRF 技術 (ILC-Pre-lab, WP1, 2) について、欧米では、European XFEL および LCLS-II 計画における超伝導加速空洞および超伝導線形加速器技術が成熟し、性能、コストともに安定域に達している。陽電子源技術では、現在、(1) アンジュレータ方式をプラン A としつつ、(2) 電子源駆動方式をプラン B として、並行して開発が進行している。

【コスト上昇要因への対応】

Pre-lab WP-1 では、この期間中に製造する 40 台の超伝導空洞、2 台の CM 製造プロセスを通して、量産技術および品質管理の準備を完了できると考えている。超伝導加速空洞については、2 回の性能試験で歩留まり 90% の品質管理が求められているが、万が一未達成となった場合は、プラン B として 3 回目以降の表面処理プロセスを加えることで性能向上を図り、90% 以上の歩留まりを実現する。表面処理プロセスの改善・補強で達成率を向上することができればコストの上昇を抑制し、全体コストとのバランスをとることができる。

【計画通り進まない場合のプラン B】

超伝導加速空洞の性能達成率が期待通りに達成できない場合、表面処理を補強することが主な対応策 (プラン B) となる。これによるコスト増要因に対しては、達成率を 90% からさらに高めるべく努力し、表面処理などのコスト増に対応するコスト節約を進めバランスをとるべく対応する。また、クライオモジュールを配置しないトンネル部分が 600m 程度あり、(追加コストが必要だが) クライオモジュールを追加できるよう予め場所を確保している (超伝導加速器部分のプラン B に相当)。

陽電子源においては、アンジュレータ方式をプラン A とする。この技術開発・プロトタイプ開発の完成がより時間を要した場合、電子駆動方式をプラン B として早期に実現する。相対的には、ほぼ同様のコストで完成させることができると、判断している。

2-2. プロトタイプとみなされる European XFEL では、加速空洞単体で達成された平均値より十分低い加速電界 (24 MV/m) で実用運転がなされているようである。より高い加速電界 (31.5 MV/m) での実用運転を目指す ILC においては、安定運転のための適切なゆとりをどのように評価し見積もっているのか。

【回答】

European XFEL の運転電界は、当時の技術状況から 23.6 MV/m が選ばれた。2 社で製造し、そのうちの 1 社は ILC とほぼ同じ処理方法がとられ、多くの空洞が想定以上の良い性能を示した。これにより、ILC の TDR での処理方法が信頼性のあるものとして記述された背景がある。

ILC においては、 $35\text{MV/m} \pm 20\%$ の範囲の空洞を受け入れ、これは全製造の 90% の歩留まりであることを想定している。そのうえで、空洞は平均 10% 低い電界である 31.5 MV/m で運転する。これとは別に機器の故障を想定しつつ衝突エネルギーを確保するために、5.5% の余裕がある。また、クライオモジュールを配置しないトンネル部分が 600m 程度あり、(追加コストが必要だが) クライオモジュールを追加する場所を確保している (超伝導加速器部分のプラン B に相当)。

2-3. これまでの技術開発の成果で全体のコストダウンが見込まれるか、見込まれる場合、それはどの程度か。

【回答】

現在進めている超伝導高周波空洞材料の低価格化および高電界・低損失実現のための超伝導高周波空洞の表面処理が実用化された場合、ILC250GeVの加速器(Option A)コストに対して2.9~6%程度のコスト削減になると見積もっている。(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、https://warp.ndl.go.jp/info:ndl.jp/pid/11293659/www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/038/gaiyou/1374357.htm) また、これら以外のコスト削減技術開発を含めて最大限の効果を見込んだものの場合(Option A')、498億円程度(Option AとOption A'の差額)の削減を期待している。(国際リニアコライダー(ILC)に関する有識者会議 ILC計画の見直しを受けたこれまでの議論のまとめ)

2-4. ILC計画は欧州XFELの約10倍程度の規模の計画であり、同じコスト増割合でも金額的な影響も大きくなる。欧州XFELのコスト増分析では、建設期間の遅延と土木・建設費の一時的な高騰によるものとしているが、遅延の原因分析など、より丁寧な分析がなされていけば説明いただきたい。

【回答】

国際協力における製造分担に基づく、各参加国における製造契約の立ち上げに、より時間を要し、結果的に建設期間が(1年間)延伸したと聞いているが、詳細については情報が無い。

また、建設期に重なった社会・経済情勢の変化(市場の活況)に伴い、特に土木工事の入札・契約高の上昇(ホストとなったハンブルグ市公共インフラストラクチャーの大規模開発時期と重なる)があった。

2-5. 技術開発の観点から、FCCのFSとILC準備研究所の活動の関係はどのように整理されているか。(例えば双方で利用できる技術についてFCCのFSの成果を活用するなど、コミュニティにおいてどのような議論や検討が行われているか。)

【回答】

FCC-eeのFSはトンネルのサイト調査が主要課題となっている。長期将来計画であるFCC-hhについては、超伝導電磁石が課題となる。SRFはFCC-eeのリング内でもビームエネルギーを維持するために使用されるため、似たような項目であるが、周波数は低くまた運転条件も連続(CW)で異なる。広い意味では共通だが、共同研究するテーマとはなりにくい。研究者同士は国際会議やワークショップなどで分野ごとに交流があり、今後も技術開発で共有できるところがあれば当然協力して進めていきたい。

3. ILC 準備研究所提案書について

3-1. 資料 1-2 (第 2 回) の 6. ア. に関連して、提案される ILC 準備研究所の組織・運営や作業等について資料 2-5 (第 2 回) や資料 2-4 (第 3 回) 等に示されているが、もしこの ILC 準備研究所が法人として我が国において設立されるとするならば、その法人の種類に従って関係法令に従って組織・運営がなされる必要がある(たとえば、一般社団法人であれば、一般社団法人及び一般財団法人に関する法律に基づく必要がある。)、他方、国内外のさまざまな研究機関等による活動への参画も予定されていることから、組織・運営面での関与も想定されるところ、財政的な面も含めて法人に求められる要件がどのように満たされ(たとえば、仮に一般社団法人であるとすれば、「社員」、「社員総会」、「理事」、「理事会」、「監事」等やそれらの選任／開催等がどのように対応するのか等)、第 2 回資料 p.126 に示される組織構成や p.128 に示されるワークパッケージがどのように実現され得るのかについてより明確に示すことが可能であれば、その内容についてお伺いしたい。

【回答】

ILC 準備研究所の提案書では、ILC 準備研究所の組織・運用や作業は次のように想定している。ILC 準備研究所は、世界の研究機関の合意に基づく国際共同事業であり、必要な準備作業はワークパッケージとして参加する研究機関で分担してその研究機関の責任の元で実施する。ILC 準備研究所の最高意思決定機関は参加機関の代表からなる運営委員会であり、そのもとに所長以下の役員やスタッフが所属する 30 名程度の本部が置かれ、全体総括、調整の役割を果たす。KEK では、以上を前提に、ILC 準備研究所の本部の組織や権限について、日本の一般社団法人の組織形態によることが法的に許容されるかについての検討を弁護士法人に依頼した。ILC 準備研究所の運営委員会を「社員総会」とし、役員会と「理事会」の関係を整理したうえで、ILC 準備研究所の提案書に示された本部組織と機能を一般社団法人として実現することは法的に可能であるとの検討結果を得た。

ただし、この検討は法的な整合性を事前に確認するためのもので、実際の準備研究所設立においては、準備研究所に参画する研究機関との協議により、詳細な設計を行う予定である。

3-2. 国際的な協議の場を維持発展させる上で、準備研究所の段階的な開始を考えた場合、どの要素がまず必須と考え、それに伴う予算はどの程度必要か。

また、費用は準備研究所に参加する各国の研究所で分担するとされているが、欧州・米国の研究所の予算確保の見通しはどうか。

【回答】

- 一番重要な要素は、加速器に関係するワークパッケージの中で、超伝導加速空洞(SRF)に関係するものである。これが建設費用の半分を占めるものである。
- この SRF 関係の開発費用は、欧州／米国／日本の 3 極で、おのおの 15 億円程度(数年間の合計)の予算が必要である。研究所によっては、検査システムなどの新しいリソース

が必要であり、日本は、基盤整備に更に30億円程度が必要である。日本で必要となる額は、数年間の合計で、人件費も含め53億円程度である。

- 欧州／米国の研究所は、年間数億円ずつの予算は、十分対応可能な額である。さらに、これらのワークパッケージは、ILCのみならず加速器全般の基盤技術となるため、各研究所が積極的な参加を行う見通しである。

3-3. ILC本体に明確な見通しがない中で準備研究所の議論を始めた理由は何か。また、準備研究所提案書に記載されている「日本政府のホストに対する興味表明が引き金で実現に向けて動き出す国際プロジェクト」という見解は、どのような議論を経て導き出されたものなのか。

準備研究所に230億円もの費用を投資したにもかかわらず、技術面・コスト面のリスク評価を含めて国際合意等が整わず、本体に進まなくなった場合のリスクや説明責任を科学者としてどのように考えているか。

【回答】

- 国際素粒子研究コミュニティやICFAは、ILCの実現に向けて、工学設計的側面だけでなく、本体の見通しを付けるための国際的な政府間の意見交換や協議を進めるためにも準備研究所の存在が必要だと考えている。国際共同事業として工学設計を行い、より正確な必要資金の見積、国際仕事分担の妥当性などの情報を参加政府に提出することにより、意見交換が有効に推進すると思われる。準備研究所で実際の計画の一部を進めることで、計画全体の完成度とリアリティーを高めることができ、並行して政府間協議が進むにつれて各国の信頼感や問題意識の共有が増し、建設的な協議が可能になると期待できる。
- 日本のコミュニティがILCをホストする提案を示し、世界のコミュニティが日本のこれまでの研究実績などを踏まえ、その実現可能性があると判断している。また、日本政府は誘致を決定はしていないが、過去の文科大臣答弁や、議員連盟などが、可能性を否定せず、誘致に前向きとも思われる姿勢を国際コミュニティに示したこともあり、国際コミュニティの日本に対する期待は高い。政府間協議を始めるにあたって、ホストになる可能性のある日本に実現に向けたイニシアティブをとってもらいたく、スタートの引き金を引いてほしいと言う議論を経て出されたものである。
- イニシアティブをとることは、その結果国際協議で多くの責任を負って実行しなければならないということではない。あくまでも話し合いをはじめるための引き金である。
- ワークパッケージは、加速器技術の基盤技術であり、ILCばかりでなく、多くの応用が期待できる。SRFは光源開発など広い応用があり、ナノビーム技術など応用をふくめて、基盤技術の実用化（産業化）である。ILC本体ができなくても、それぞれのワークパッケージは開発価値があるものばかりである。そのような未踏の先端技術／応用研究を国際共同で進めていくことは、ILCを超えて、人類普遍の価値と考えている。

3-4. これまでの学術の大型研究では、まずは科研費や運営費交付金等で前段階の研究や技術開発・実証を積み上げ技術的成立性を見極めてから大型プロジェクトへと進んでいくが、今回の準備研究所の提案は、技術開発段階として技術的成立性

を見極める段階から準備研究所を作りプロジェクトとしてスタートしたいという計画に見えるが、なぜこのようなアプローチを取ろうとしているのか。

【回答】

- ILCについては、技術的な開発検証は、すでにGDE(Global Design Effort)で日本もその中核の一つとして貢献し、終了している。現段階では、技術的成立性は実質的に確立していると認識している。
- 準備研究所が目指すのは、これらの技術設計を実際に執行する際に必要な工学設計のレベルにまで高めることである。このプロセスは、ITERの経験からも分かるように、計画実行の最終決定前に不可欠であると考えている。
- 準備研究所と言う形に直ぐにはならなくても、このプロセスを進める必要があり、その為にはある程度まとまったリソースが必要となる。

4. 技術的成立性及びコスト見積もりの妥当性（土木及び環境・安全対策）

4-1. 耐震性能は、レベル1(L1)とレベル2(L2)の地震動強さで検討するとのことであるが、ILCではL1とL2に対してどのような耐震性能が要求されるのか。2011年東日本大震災で被災したKEKやJ-PARCの加速器施設はその性能を満たしていなかったのか。また、被災前と被災後の耐震設計や要求性能に違いはあるか。なお、この被災の復旧工事に要した経費と時間は概略でどの程度だったか。

【回答】

- L1及びL2は、土木学会が阪神淡路大震災後に土木構造物の耐震性能の照査に用いることを提言したものである。ILCの地下施設についても、土木学会による「ILC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(2012)」において同様の耐震性能指針が提案された。加速器・測定器および設備の耐震性能においても、それらに準ずる方針である。
- ILCでは、L1に対する耐震性能は、無補修で機能維持することを想定し、安全確認のみで運転再開可能であるものとする。L2に対しては、加速器・測定器に致命的な損傷はなく、地震後に補修を必要とするが早期に機能が回復可能であるものとする。
- KEK(つくば)及びJ-PARCの加速器施設では、東日本大震災以外での被害事例は無く、震度5の地震においても安全を確認した後に運転を再開している。従ってL1地震動に対する耐震性能を満たしている。
- 東日本大震災においては、地上では大きな被害が出たが、地下では漏水等はあったものの、加速器本体に致命的な被害は出なかった。KEK(つくば)の加速器は約3ヶ月後、J-PARC加速器は約9ヶ月後に暫定運転を再開し、本格復旧に向けた作業を進めた。これらの状況からL2に対する耐震性能を満たしていたと判断する。
- 耐震設計や要求性能について、KEKとして独自に定めた基準は無いが、設備毎に公的基準(例えばヘリウム設備では高圧ガス保安法など)に基づき対応している。
- 東日本大震災の復旧工事において加速器施設に要した経費は、約186億円である。これ

は入射器、KEKB、PF、ATF、J-PARC (MR) の加速器の合計である。

4-2. ILC への電力の調達はどのようにするのか、また周辺地域への影響があるのか。

ILC が稼働したとき、停止した時の電力ギャップは相当大きく、この点を既に検討されているのであれば説明していただきたい。

(例えば、水力発電を優先的に利用する、専用の発電所を新設する、電力会社と調整中、新電力を使うなど。)

【回答】

- 東北地域では ILC 施設の受電について、当該電力会社（東北電力ネットワーク（株））と検討を進めてきた。ILC 建設候補地域に近い変電所から 154kV を引き込み受電する計画である。
- 当該電力会社の 2020 年電力実績は年間最大 1400 万 kW、ILC の運転期間を想定する期間でみると、時季により最大電力は 1000~1200 万 kW と推移し、その日変動は 20%程ある。これに対し ILC 250GeV の電力は 11 万 kW(111MW)であり、2020 年実績の 0.8%に留まり、供給能力には十分な余裕がある。また、日変動・年変動に比べ、ILC の稼働時と停止時の変化量は十分に小さい。当該電力会社との検討においても ILC の電力量変化は問題にされていない。
- ILC は電力が逼迫する（電気代が高い）時期は停止し、必要な保守作業を行う。これは現在の KEK 加速器と同じ対応である。ILC の年間運転は約 9 ヶ月程度を想定している。
- KEK の過去の経験（最高値）はピーク電力で 96MW であり、ILC とおおよそ同規模の実績である。この規模の受電は工場やプラント等でも多数見受けられる。

4-3. 資料 2-1（第 2 回）の 4. (ア) に関して、「未計上であった以下の経費について、概略経費を試算」とあるが、未計上経費については、具体的にどの程度の額が見込まれると試算しているか。

【回答】

具体的な建設場所により経費は変わること、地域に関連した機微な内容によることから、額の公開は差し控えたい。公開されている建設コストが大きく増えるものではない。

(必要に応じて非公開かつ口頭による回答を行いたい)

4-4. ILC 運転に伴う放射線管理（高放射線環境におけるリモートハンドリングやトリチウム等の放射性物質が蓄積した水の管理等）について、技術的に確立しているか。また開発が必要な課題がある場合は、どのような点が課題であり、準備期間中に技術的確立する見通しは立っているか。

【回答】

- ILC の放射線管理は、SuperKEKB や LHC など既存の大型加速器における安全管理と同様に行うことができる。ビームダンプで受けるビームパワーは ILC-250GeV で 2.6MW であり、J-PARC (1MW) や ESS (5MW) など、大強度陽子ビーム加速器のターゲットでの類似の設備が

ある。

- ビームダンプ水の管理・設備での取り扱いは、既存の加速器施設でのターゲットやビームダンプの冷却水における取り扱いと同じであり、十分な実績があり技術的に確立している。
- ビームダンプは重要な装置であるため、保守方法については詳細設計書にしっかりと提示することが必要と考えている。そのため、準備期間において、優先して設計、プロトタイプによる試験を行うこととしている。

5. 学術的意義や国民及び科学コミュニティの理解

5-1. 資料 1-2 (第3回) の 2. ウ. (就中、「学術全体への影響の可能性や日本の中長期的財政状況も踏まえた理解・支持」) について、資料 2-3 (第3回) によれば、科学コミュニティの理解を図るものとして、「素粒子物理学分野を超えて」実施されるセミナー、シンポジウム等や(p.86)、「ILC を核に、素粒子研究だけでなく多彩な研究分野/施設の可能性を」として「多彩な分野への応用を目指して」「発信型から対話型へ共同利用型へ」ということであり、まずは、周辺分野に向けて理解を図ることが進められているようである。ご説明を拝聴する限りにおいては、ILC 計画の推進がなされるとすれば、財政面では追加的なものとされることが前提とされているようにも窺われたが、このような前提を排除してもなお、(自然科学のみならず人文学・社会科学の分野も含む) 他の多様な学術分野等を含めた「学術全体への影響の可能性」に関連して、科学コミュニティの理解を図る取組等がなされている、又はなされる予定であれば、その内容等についてお伺いしたい。

【回答】

ILC 計画は従来の学術予算を前提としていないことを改めて申し上げたい。新しい科学予算の獲得を前提として、

- ① 加速器技術を核とした国際研究プラットフォームを目指し、
- ② 国際大型共同研究／グローバルサイエンスシティを中心に、町づくり／イノベーションを加えた総合的（産官学）な計画として推進している。

その前提（排除している訳ではなく）で、学術界の皆様へ

- A) これにより、科学学術予算全体のパイが大きくなること、
 - B) 学術の国際化／国際拠点を日本に作る意義と価値、若手研究人材へのインパクト、
 - C) 国際関係の価値：先端技術の国際研究拠点に日本がイニシアティブをもつこと
- を今後も繰り返し丁寧に説明していきたい。同時に、①の先端プラットフォームに参加していただくことをお願いしていきたい。

5-2. 資料 (第3回) p.87 に「ILC を核に、素粒子研究だけでなく多彩な研究分野／施設の可能性を」とあり、説明でもいろいろな研究に使える Facility にしたいとの

話があった。また、そのための多数のビームラインは、ヒッグス粒子の研究とマシントimeを取り合うことはないとの説明もあった。

ビームラインの建設費用は、ILC 計画とは別にそれぞれのプロジェクトが調達すると理解しているが、多数のビームラインを使うようにするために、ILC 本体の初期設計を変更する必要はないのか、また当初経費に上乗せが出ることはないのか。

【回答】

- ILC の先端加速器を基盤に、世界中から最先端の加速器技術者が集結する国際研究プラットフォームを目指している。世界の加速器技術力を活かすために、また、多くの国際的な人材が多彩な研究テーマのために集まる国際研究拠点形成のために、いろいろな研究に使える Facility 化が必要である。
- ILC の多目的化、そしてどのようなビームラインや附属施設を設置するかについてはこれから考えていく段階であるが、いずれにしても ILC 本体の初期設計を大きく変えるような変更は考えていない。それらの多くは、初段の電子源からスプリットしたビームや、衝突後ダンプするビームを用いる予定である。それらの実験施設を設置する空間やトンネルの延長などは、当初の工事と同時に行うことでコストを下げることが可能である。そのコスト（トンネル工事）は 1-3 ですすでに述べたように、100m あたり数億円の規模であり、全体の予備費の中で対応可能である。

5-3. 欧州の FCC-ee の計画に関して、これを CERN で行うことになる場合は、欧州単独でやれるのか。それとも日本にも貢献を求められるのか、その場合、いつ頃の段階で、どの程度の規模が想定されるか。

【回答】

- 欧州戦略 2020 では、ILC は FCC-ee の前に稼働を始めることを前提として、「timely」が使われている理由がここにある。次の欧州戦略会議では CERN の次期計画の具体化について踏み込んだ話し合いが行われ、現在進行中の「FCC feasibility study」の結果と共に、ILC の進行状況が将来の欧州戦略を決定することになる。もし ILC に進展がなく、FCC-ee の可能性が見えてきた場合には、日本も含めた FCC-ee への世界の全面的参加は不可欠になると考えられる。
- FCC-ee を建設する場合、CERN の現状予算では、加速器本体は LHC 建設程度の努力でできても、トンネルなどの土木関連の資金はない。トンネル建設費は、現在 6 千億円あるいはそれ以上と見積もられている。CERN 執行部はメンバー国、非メンバー国からの資金確保の可能性を模索し始めた段階であるが、メンバー国が年間負担経費を超えた FCC 建設の特別出資を、特に研究所のあるスイスとフランスが、どこまで考えるかを探っている。非メンバー国のアメリカは、ILC の後継計画として、インフラへの参加可能性も含めて貢献を検討している。いずれにしても、LHC に対して非メンバー国が LHC で出資した時よりもはるかに高い比率での出資が必要となる。ILC が建設されなかった場合には、日本への出資期待は、より高いものとなると思われる。
- これ以外に、検出器の費用の分担がある。

5-4. FCC-ee で Top 対生成も可能であり、一方 ILC では Top 対生成のエネルギーまで行かないという説明があったと思うが、提示した FCC-ee のパラメータ、特に電力は Top のエネルギーでも正しいのか、それともさらに電力を要するのか。ILC のエネルギーを Upgrade したときに、Top に関しての両者の性能の比較はどうか。

【回答】

- 250GeV でのヒッグス場の研究によって、トップクォークの研究が極めて重要と判断された場合は、ILC でも加速空洞を加えることによってトップクォーク対生成の領域までエネルギーを増強できる。FCC-ee も加速空洞を追加することで増強が可能である。この増強にかかるコストは ILC の場合で約 1400 億円、一方 FCC-ee の場合は約 1350 億円で同程度の追加コストが必要となる。
- 両方のエネルギー増強にかかるコストと運転に必要な電力をまとめる。この表の加速器本体建設コストは、加速器自体の建設費用にトンネル建設費用を加えたものである。

	I L C		F C C-ee	
	250GeV	350GeV	240GeV	350GeV
加速器本体建設コスト	~5800億円	追加 ~1400億円	~1.2兆円	追加 ~1350億円
電力	~111MW	~135MW	~282MW	~354MW

5-5. Nb3Sn の超伝導磁石が技術的に困難であるという話があったが、これは加速器用の磁石での特殊性と、それを大量生産することの困難であって、ITER 等別の用途では実用化に至っているものもあるのではないか。

【回答】

- この Nb3Sn は、CERN が 2060 年度以降に考えている FCC-hh 計画に関係しているが、ILC 計画には関係しない。
- Nb3Sn は 1100A/mm² の電流密度 16T の磁場の発生に成功しており、実験への利用は可能である。ただし、セラミックであり利用が限られているため、工業的な量産がコストと品質管理の点で難しく、量産に応じてくれる線材メーカーがない。
- コストの管理を厳しく行う上で、この点は極めて重要であり、FCC-hh への利用は、別の高温超伝導素材を考えている。

5-6. 資料 2-3 (第 3 回) における FCC と ILC の建設コストの比較において、ILC の加速器建設コストが約 5,800 億円とされている。建設コストは、前回有識者会議において聴取した見積もりでは、本体及び測定器建設経費は約 7,300~8,000 億円でされていたが、5,800 億円は何を計上したもののか。約 7,300~8,000 億円との違いは。

【回答】

FCC-ee のコスト（加速器分の工事費、物品費）との比較を行うために、約 7,300～8,000 億円の ILC のコストのうち、検出器（15%）と人件費(13%)を除いた費用、約 5,800 億円をあげている。

6. 国際的な研究協力及び費用分担の見通し

6-1. 欧州にとっては、“ILC は欧州素粒子物理戦略 2020 の予備検証の位置づけ”であるようにも見えるがどうか。この位置づけであれば、理由をつけて、欧州に応分の負担を要求しても良いのではないか。

【回答】

一般論として、新規の加速器建設計画では先行する加速器による結果を十分吟味し、最適な戦略を検討することが当然である。その観点から、ILC で得られる結果は FCC など欧州独自の計画にも大きな影響を及ぼす。しかしながら、これをもって ILC は FCC の予備実験であると位置付けることは適当ではない。ILC には独立した十分な科学的意義があり、これは欧州の研究者にもよく理解されている。次世代の加速器はもはや一国で建設できる範囲を超えており、これからの素粒子物理学研究は世界的な協力のもとで進めることが不可欠である。ILC に対する欧州などからの貢献はこのような共通認識に基づいて行われるべきである。

6-2. 準備研究所の目的の一つとして政府間交渉の補佐が任務とあるが、具体的にどのような取組みを考えているか。その取組みの結果、国際費用分担における「鶏が先か卵が先か」という問題の解決に近づく可能性はあるか。その可能性がある場合は、何らかのマイルストーンを設定することができるか。

【回答】

政府間交渉に対して準備研究所が補佐すべき事項として、海外の研究コミュニティや研究機関に関する調査・情報提供、物理学や加速器技術に関する解説、研究所間の意見調整などが想定されるが、政府関係者の要請に応じて臨機応変・効果的に補佐できる体制が必要と考えている。「鶏と卵の問題」の解決には日本政府によって ILC 実施に対する興味を建設的に検討する意思の示唆が行われることと、それを他国政府が前向きに受け止めて可能な貢献の検討に進むことが必要である。準備研究所はこれに向けて可能なすべての活動を行うが、これが直接問題解決のきっかけになるものではなく、日本政府の判断が必要と考えている。準備研究所期間において政府間の協議を進めることは ILC の実現に向けて国際的信頼や協力関係の醸成に有効に機能するものであることから、準備研究所がこの補佐をすることはその重要な役割であると考えている。

6-3. ILC 実現のために CERN のコミットメントは必須であるように感じるが、その認識で正しいか。

【回答】

ILC 実現のためには CERN のコミットメントは不可欠と考えている。CERN は優れた加速器技術を保有し、長年にわたって大規模加速器を建設し成果を上げてきた経験がある。ILC にお

いてもその人材に参加してもらうことは大きな成功を収めるために重要である。CERN はまた欧州政府間組織として、欧州の素粒子研究活動をコーディネートする役割を持っている。欧州主要国は独自に貢献を検討する可能性があるが、欧州のより小さな国々が ILC に参加する場合は CERN を通じて貢献・参加することが現実的であると聞いている。

6-4. 適正な国際費用分担が成立するためには、関係する各国の研究機関や研究者が ILC の科学的な意義や資金の拠出について各国政府や自国民に働きかけ、支持・理解を得ていく必要があると考えるが、これまで日本以外の国でこういった活動がなされているか。また、進捗はどうか。

【回答】

米国においては研究計画について政府の意思決定に研究者コミュニティが関与する仕組み（スノーマスプロセス）が明確に定められている。6年に一度、世界中から提案を募集したうえで、多くの研究者が一堂に会し一週間にわたって活発な議論を繰り広げる会合が行われる。この結論を受けてエネルギー省（DOE）が素粒子物理学優先順位決定委員会（通称 P5 委員会）を開催し、研究計画の実施に向けた大きな方針を決定する。前回のこのプロセスの結果、2014年に報告書が発表され、この中で、「ILCの研究開発に参加し、日本が ILC を実施する場合はより大規模な参加を検討する」とされた。これに加えて米国では DOE の担当官が研究者の会合に頻繁に出席して議論の内容を把握している。そのため、研究者側から政府への特段の働きかけを行う習慣はない。

欧州では CERN が6-7年に一度行う欧州素粒子物理学戦略の取りまとめによって研究の大きな方向性が決められる。これも、世界中から寄せられた提案を参考にし、特別に設置された委員会において一年以上かけて議論が行われる。その議論の結果としての欧州戦略は、欧州各国政府代表者による CERN カウンシルの了解のもとに決定される。この過程では世界中から多くの研究者を集めた会合も行われる。2020年6月に公表された前回の欧州戦略において「日本の ILC がタイムリーに進む場合には欧州の素粒子物理コミュニティは協力することを望むであろう」とされた。CERN ではこのような仕組みに基づく意思決定が行われるが、ILC については、ヨーロッパからの貢献が CERN の枠を超えたものになることも想定されるため、関連する研究者が当該政府に直接説明することも行われたと聞いている。

6-5. 参考資料にある欧州素粒子物理戦略 2013 と同戦略 2020 の比較を見ると ILC に関する表現が変わっているが、「欧州の素粒子物理コミュニティは協力することを望むであろう（the European particle physics community would wish to collaborate）」の「協力する（collaborate）」という意味は、国際分担も含めた協力という理解か。また、2013 と 2020 で費用負担の考え方に変化があるのか。

【回答】

この場合の「協力する」とは ILC 計画の実施に協力するという意味にとらえており、当然、物的（in-kind）貢献などによって協力して建設を行うことを希望する意思表示と考えている。高エネルギー物理学における国際的研究協力では、発展途上国からの参加を除けば分担をしない参加は考えられない。参加する研究機関などは、むしろ積極的に分担を増やすべく

当該財政支援機関と交渉を行うことがよく行われている。2013年と2020年の欧州戦略でこのような考え方について変化があったとは考えていない。

7. 人材の育成・確保の見通し及びその他

7-1. TDR がまとめられてから時間が経過しているが、加速器の様々な構成部分の細部にわたる知見を有する人材は残っているのか、あるいは、次世代に継承されているか。

【回答】

加速器人材については、現在のコアメンバーのうち、2/3程度はTDR期から関与し、1/3程度は新たに入ってきた人材である。IDT-WG2の加速器関連メンバー48名のうち、TDRを経験している人数は35名であり、そのうち13人はTDRの加速器パートの編集者として名を連ねている。以上のことから、加速器の知見を持った人材の次世代への継承はうまくいっているといえる。

7-2. ILCに必要なコア人材の一部をCERNから確保することは可能か。可能な場合、実現するための条件は何か。

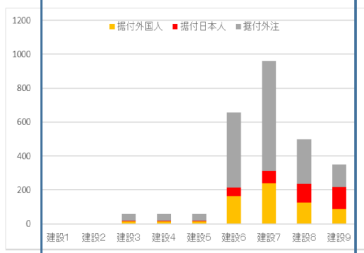
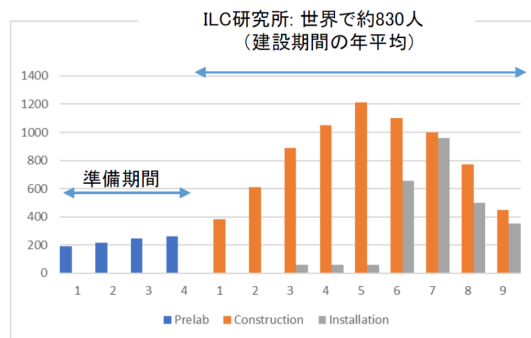
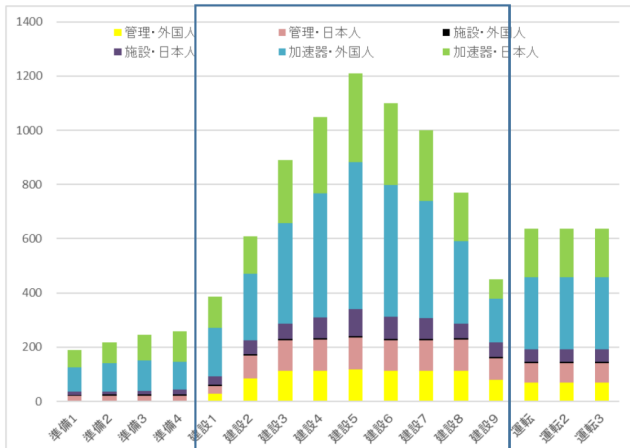
【回答】

- CERNがILC準備研究所の「創設」メンバーとなりうる研究所候補として、IDTが主導する話し合いに加わることを了承する限り、準備期間、建設期間ともに何らかの形で、人材貢献をする用意があると考えてよい。実際、CERNの所長はILCが実現するならCERNは貢献するという意向を示しており、現在のIDTの活動にもCERNはExecutive Boardや各WGに多くの人員を関与させている。このことは、欧州外の世界的プロジェクトにCERNが参加する場合は、CERNは欧州の地域ハブとして機能し、戦略的な調整と技術的支援を提供する、という欧州戦略の考え方に合致する。
- 欧州政府間組織であるCERNは政府間協議に参加するのが自然である。
- CERNからのILCに参加する人材の数、役割、時期等だけでなく加速器部品を含めた全体の貢献について決定するためには、他国のように政府間協議により合意に達し、CERNカウンシルの承認を受ける必要がある。

7-3. 人材の育成、確保が現実的なのかの観点で、準備研究所期間以降の施設側として確保する日本人スタッフ数をお示しいただきたい。

【回答】

ILC準備期間、建設期間、運用期間を通じての必要な人員の世界全体と日本分担分を以下の図で示す。左上が世界全体の据付を除く人員、左下が据付のための人員。右上が世界全体の人員で、右下が加速器と据付人員（据付外注は含まない）の日本分担分。点線から上は有期雇用等を想定する。準備期間に育成した人材が中核となり運転までつなげる計画となっている。



2. 技術的成立性及びコスト見積もりの妥当性（加速器等）詳細説明

2-1 ア. ビームダンプ、電子源・陽電子源、ビーム制御、ダンピングリング、測定器等の目標性能の明確化と工程表の検討

・窓の耐久性、定期交換技術、耐震性能等を含むビームダンプシステム技術の完成や放射性物質の漏出事故への備え

【現在の技術課題の達成度】

ビームダンプは1 TeV 衝突実験の500 GeV ビーム（ビームパワー17 MW）のもとで設計している。ビーム窓（チタン合金 Ti6V4Al）の耐久性については、国内外の運用実績と負荷評価のシミュレーションの結果から、十分に尤度があり必要な技術課題は達成している。ビーム通過で窓に落ちるパワーは135W であり、その応力は最大48MPa、チタン合金の引張強度450MPa に対し9 倍の尤度がある。窓の温度上昇は最高点で50°C程度に留まる。

放射線損傷の程度を評価するためにDPA（Displacement per Atom）という指標が使われている。ILC ビーム窓のDPA を見積もると、17MW ビームに対して0.2 DPA/年となる。J-PARC で問題なく運用されたTi6Al4V 製ビーム窓のDPA が、一桁大きい2 DPA と評価されていることから、同程度になるまでにおよそ10 年と見積もられる。定期的な交換を行うこともあり、ILC ビーム窓において放射線損傷が問題となる可能性は小さい。ILC-250GeV の場合では、ビーム負荷は上記の1/4 になるため、更に尤度が高まり十分な耐久性があると判断できる。

ビームダンプ部は放射化により放射線量が高くなることから、ビーム窓の交換は機械的装置を遠隔操作して行うことになる。その作業は窓ユニットの移動・位置合わせ、ダンプ容器への取り付け・取り外しである。国内外には高出力ターゲット部を有する陽子加速器が稼働しており、それらのターゲット交換には同様の装置が設けられている。交換方法はそれぞれのターゲットやビーム窓の構造で変わるが、基本的に遠隔操作による交換技術は確立していると言える。ILC のビーム窓は、水平に置かれた円筒形の水タンク容器の端面に取り付ける。交換作業時は、タンク内の水を循環水設備の専用部分に待避させ、窓部を開放できるようにする。ビームダンプから数m離れた場所の放射線量は低く、窓交換の準備や交換装置の遠隔操作を行う。ビームダンプの水タンク内では渦流を作り、ビームが当たる部分の水が常に入れ替わる様にする必要がある。この流れを作るためにタンクの給排水構造の設計が残されている。SLAC の2.2MW ダンプで実績があるが、準備期間で具体的設計を行い、プロトタイプによる確認を行う。

ビームダンプの耐震性能としては、配管等が損傷しないことが求められる。ビームダンプは、直径2 m 長さ11 m の水タンクと水循環設備からなるが、これらの耐震設計は既存の加速器における冷却水設備のものと大きな違いは無い。

放射性物質の漏出事故対策として、万が一ビームダンプから漏水することを想定した対策を検討している。ビームダンプおよび循環水設備は区分けされた部屋の中に設置され、周辺との空気の入りも管理される。漏れたビームダンプ水が施設外に拡散しないように施設の床や壁は十分な厚みのコンクリートを設け、さらに金属のカバーを設けるなどの対策を行う。ビーム窓が損傷し、ビームライン側の真空パイプ内に漏水した場合の対策としてライン上に自動遮断バルブを設ける。

【課題解決のための具体的方法】

Pre-lab のワークパッケージ WP-16 として窓交換や設備設計を含めたビームダンプの詳細技術設計を進める。定期的な窓の交換技術については、機械的設計を行いプロトタイプによる確認を行う。ビームダンプの水タンク内の渦流生成についても、タンク内の給排水構造の最適化設計を行いプロトタイプによる確認を行う。総合的なダンプ水循環設備の設計を完了する。耐震設計、放射線安全対策に基づく施設設備の具体的設計を行う。

【4年後の技術の完成見通し】

前述の具体的設計および必要なプロトタイプの確認を行うことで、ILC ビームダンプに必要な技術は完成する。

・多くの開発要素を含む2案が併記されている陽電子源について開発コストも考慮した方針の明確化

プラン A としてのアンジュレータ方式とプラン B としての電子駆動方式が並行して開発されている。これは、後者が世界の多くの陽電子源で採用されているのに対して、前者は未経験ではあるが偏極陽電子を発生することができる点で高い物理的メリットがあるため、ともに開発を進めているものである。Pre-lab 期間中に選択を行うが、仮に電子駆動方式を採用する場合でも、アンジュレータ方式を将来採用する可能性もあり、その開発が無駄になるわけではない。Pre-lab での開発予算としては、アンジュレータ方式に約 1.5 億円、電子駆動方式に約 4.4 億円を想定している。

【現在の技術課題の達成度】

アンジュレータ方式の場合の開発項目として、(a) アンジュレータ本体、(b) 回転標的、(c) 磁気収束、がある。このうち (a) は実機の仕様で必要な磁場強度が得られており、磁場誤差・設置誤差の影響を確認しているが、問題は無い。長尺のアンジュレータ（磁場長 230 m）についても、欧州の European XFEL で経験が積まれている。(b) については、材質（チタン合金）の電子ビームによる試験が行われ、仕様を満たす結果が得られている。標的の冷却には放射冷却を採用することになっているが、まだ設計段階である。当初、5 kW のエネルギーデポジットがあるため標的部のチタン合金と熱伝達のための銅の接合を設計していたが、2 kW ですむことが判明してチタン合金だけになったため、設計はより容易になっている。2000 rpm で回転させるが、軸受けとして磁気浮上を使用する。これには多方面の経験があるので特に問題は無い。現在最も遅れているのは、(c) である。パルスソレノイドを予定しているが、磁場の性質、熱の評価、機械強度、近接する回転標的への影響などの設計計算が行われている段階である。ピーク磁場 3T、flat-top 約 1 msec が要求される。

電子駆動方式の開発項目は、(a) 回転標的、(b) 磁気収束、(c) 陽電子捕獲空洞、である。(a) はタングステン（あるいはタングステン・レニウム）標的を、磁性流体を軸受けとして回転させるものである。冷却は水冷である。標的材質については、モデル計算により、温度上昇・最大応力・PEDD (Peak Energy Deposit Density) などが、過去の実績範囲内に収まることが示されている。もっとも重要な点は磁性流体による真空封止であるが、実機と同等な荷重を用いたプロトタイプ試験が行われ、良好な結果が得られている。(b) はフラックスコンセントレータを用いる。KEKB およびロシアのノヴォシビルスクの研究所での経験に基づ

いて、設計が行われた。現在、冷却の計算が行われている。ノヴォシビルスクの仕様に近いものであり、大きな問題はないと考えられる。(c)には、Lバンドの定在波 APS（陪周期型）空洞を用いる。主要な課題は過渡的ビーム負荷の補償であり、これは設計計算により十分確認できると考えている。

以上のほかに、両方式共通の課題として、標的寿命は有限なので、その付近の装置の遠隔操作による交換システムを設計する必要があるが、これは容易に実現可能である。

【課題解決のための具体的方法】

アンジュレータ方式の(b)については、Pre-lab 期間に、まず扇型の部分モデル（非回転）により熱計算を確認し、磁気ベアリングの製作試験をして、その上で実機サイズのプロトタイプを製作する（Pre-lab ワークパッケージ WP-6）。(c)のパルスソレノイドはプロトタイプを製作し、(b)と合わせて、総合的モデルを製作、評価する（Pre-lab ワークパッケージ WP-7）。

電子駆動方式については、(a) 回転標的は順調に開発が進んでおり、Pre-lab の早期に完了するとみられる（Pre-lab ワークパッケージ WP-8）。(b) フラックスコンセントレータは試作が必要（Pre-lab ワークパッケージ WP-9）。(c) 捕獲空洞は電源・高周波源を含めたプロトタイプを製作する予定である（Pre-lab ワークパッケージ WP-10）が、上記のようにビーム負荷の補償は計算で十分と考える。

【4年後の技術の完成見通し】

アンジュレータ方式については、特に仕様を満たすパルスソレノイドの実現に注力しなければならない。(b) 回転標的は十分な時間があれば実現可能と考えられ、実際の建設には間に合うと見られるが、方式の選択は Pre-lab 期間の3年目頃に予定されており、それまでの期間は長くない。

電子駆動方式については、前記のようにバックアップ方式として位置づけられており、技術の完成見通しは非常に高い。前項の「課題解決のための具体的方法」は技術の最終確認を行うことである。

・目標性能を達成するためのビーム制御やダンピングリングの技術の確立 等

ここでは、ダンピングリングと、ビーム制御が目標性能に大きく影響を与える最終収束について述べる。

【ダンピングリングの現在の技術課題の達成度】

ILC のダンピングリングでは水平方向 $5\mu\text{m}$ 、垂直方向 25 nm の規格化エミッタンスのビーム生成が要求されている。KEK で国際協力により研究開発を行っている先端加速器試験施設(ATF)のダンピングリングは低エミッタンスビームを生成するための試験加速器であり、ILC の要求を満たす垂直方向 $3\mu\text{m}$ 、垂直方向 15 nm の低エミッタンスビームの生成に成功している。また、第4世代の放射光源でも ILC と同程度のエミッタンスの加速器が計画されているので（中には稼働中のものもある）、ダンピングリング自体の設計に技術的課題は無いと考えられている。ILC で使用予定の高速キッカーの要素技術、および、高速キッカーを使ったビーム取り出しの実証実験も ATF で既に行われている。ただし、ATF では幾何学的な制約からキッカーを置くことが可能な場所が制限されており、高速キッカー試験は原理実証試験と

して特別なビームタイムを設けておこなったため、加速器運転で長期的に使用されているわけではない。

【ダンピングリングの課題解決のための具体的方法】

Pre-lab のワークパッケージ WP-14 としてダンピングリングの高速キッカーの長期安定性試験を行う。ビーム運転中に熱的な影響を受けない新たなビームラインを新設することを計画しており、このビームラインに高速キッカーを常時設置することで、キッカー自体の蹴り角、タイミング等の安定性の評価を行う予定である。また、近年、海外でも新たな加速器に高速キッカー技術を採用する例が出てきており、これらの高速キッカーも含めて評価を実施し、詳細技術設計を完成させる。

【ダンピングリングの4年後の技術の完成見通し】

これまで ATF で試験してきた高速キッカーシステム自体は既に ATF で原理実証試験が行われている。これに加え、他の加速器で開発が進んでいる高速キッカーシステムも同一の試験施設を使って試験することで、最も性能の良い高速キッカー技術を ILC に採用する。ダンピングリングの高速キッカーの長期安定性試験を行うことで、ILC の高速キッカーに必要な技術は完成する。

【最終収束の現在の技術課題の達成度】

ILC において衝突点でビームを小さく絞ることは重要であり、衝突点でのビーム同士の位置合わせも重要な技術要素になっている。ATF の最下流に位置する ATF2 ビームラインは ILC 焦点でのビーム収束技術、ビーム位置の安定化技術の研究を行うために作られたもので、垂直方向に約 40 nm (ILC と同程度の難易度) までビームを絞ることが出来ており、焦点に於けるビーム位置の安定性もフィードバック技術を使ってビームサイズの 1/10 以下に抑えている。ATF2 ビームラインではビーム誘導電磁場により引き起こされる焦点ビームサイズのビーム強度依存性の影響と、その抑制方法の研究を進めており、ILC の設計ビーム電荷での影響は制御可能であることも示された。その一方、長期的なビームサイズ、ビーム位置の安定化の実証が課題として指摘されている。

【最終収束の課題解決のための具体的方法】

ILC 焦点におけるビーム収束技術、ビーム位置を制御する技術は ATF での試験の結果、既に ILC に必要と考えられる最低限のレベルが保証されている。ATF は温度変化の影響を受けやすい環境下にある加速器であり、ビームサイズ、ビーム位置を長期的に安定化させることへの難易度は ILC より厳しい。ATF ではレーザー干渉計を使ったビームサイズ測定を行っている。長期安定性を実現するためにはレーザーを含めた測定装置を長期間にわたり安定に運用する必要がある。Pre-lab のワークパッケージ WP-15 では、国際協力によるインカインド貢献を主体とした ATF でのビーム安定性評価試験を実施する。ここでは、長期安定化試験を実施しつつ ILC のためのビーム制御技術開発（電磁石の多重極磁場の補正技術、更なるビーム誘導電磁場の低減技術の研究、機械学習を取り入れたビーム調整手法の構築など）を進める。

【最終収束の4年後の技術の完成見通し】

ATF での安定化試験実証を行うことで最終収束に必要な技術は完成する。また、ILC 建設後のコミッショニングを円滑に進めることも可能となる。国内外の若手研究者が ATF においてビーム調整技術開発に関わることで、ILC 運転開始後にビーム調整の中核となる人材を育成

する。

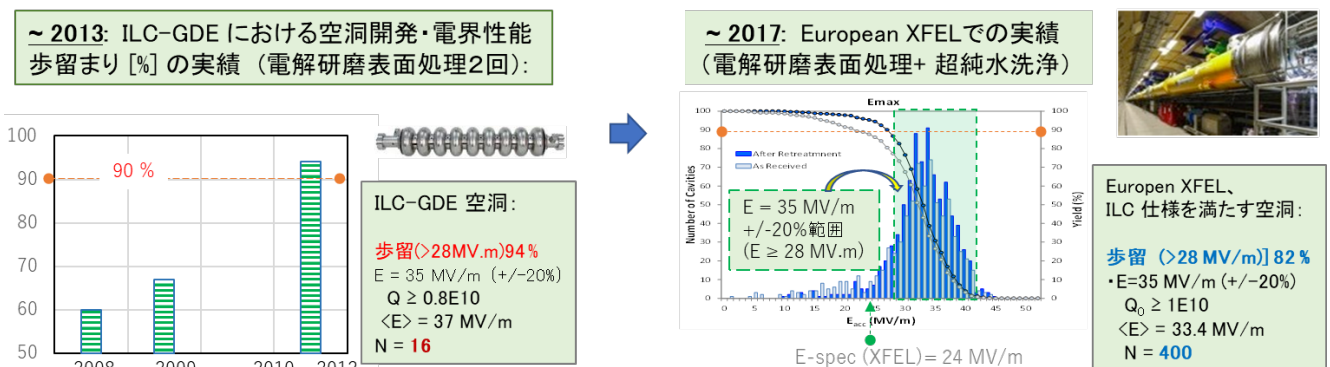
イ. 超伝導加速空洞の歩留まりや性能の向上、コスト検証、品質管理等 ・設計性能の確実な歩留まりでの実現と更なる性能向上

【現在の設計性能・達成度】

超伝導高周波加速空洞の設計性能（平均電界強度 >35 MV/m、分布 $\pm 20\%$ ）に対して、すでに TDR において、標準（規格）化された製造・評価条件を満たす試作機 16 台に対し、歩留まり 94%を達成した。

その後 European XFEL 計画において製造された空洞合計 800 台のうち、ILC の製造・評価条件と整合する 400 台（A 社が担当、電解研磨（EP）を実施）の空洞製造・評価において、European XFEL 空洞設計性能（ 26 MV/m = 23.6 MV/m +10%）に対し、要求性能を上回る平均電界性能 33.4 MV/m ($Q_0 \geq 1E10$) を達成し、ILC が求める平均電界性能 35 MV/m に対して 95%を超える量産実績を示した。

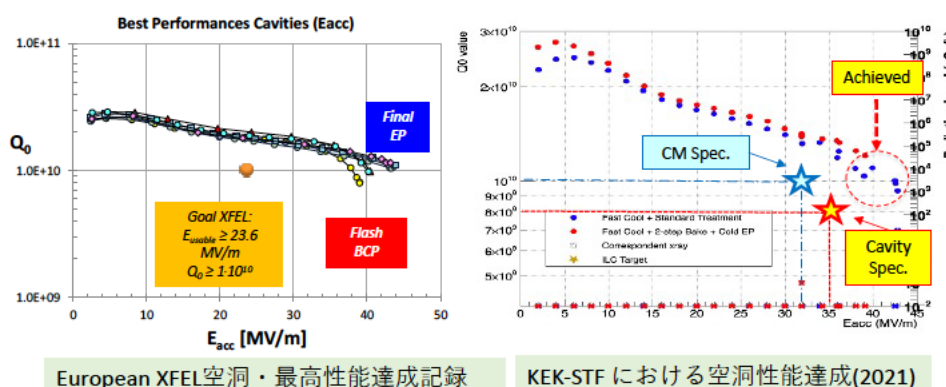
また、ILC が想定する性能分布 ($\pm 20\%$) から定まる性能下限 28 MV/m に対しては、2 回目までの表面処理で 82%、3 回目までを加えると 91%の歩留まりを実績として示した。European XFEL では、2 回目以降の表面処理では、電解研磨は行わず、高圧超純水洗浄のみのため、ILC と比較して（電界性能向上の観点からは）やや不利な条件での達成値である（下図参照）。（A 社の実績は、超伝導加速空洞のより長期的な性能向上への展望を開いた観点から、高く評価される）。



補足：European XFEL では B 社が担当した半数（400 台）については、表面処理工程を化学研磨（BCP）にとどめることで、European XFEL における電界性能要求（ 27 MV/m）を満足しつつ、より経済的な製造を実現した。これは、空洞単体での製造時の性能を、加速器全体としての要求性能に対して +10% と設定することが適切である実績を示しており、ILC 計画における空洞単体性能要求を、加速器での運転性能要求に対して、+10% と設定していることが適正であることをサポートしている。

欧州XFEL とILC超伝導加速空洞の性能要求と技術達成度

	European XFEL		ILC		Achieved at KEK	
	空洞	CM	空洞	CM	空洞	CM
<平均電界>	≥ 26	23.6	≥ 35	31.5	> 39	33
電界範囲	> 20	(TBC)	28 ~ 42 (+/- 20%)	25 ~ 38 (+/- 20%)		
Q_0	≥ 1.0×10^{10}	≥ 1.0×10^{10}	≥ 1.0×10^{10}	≥ 0.8×10^{10}	> 1.2×10^{10}	> 1×10^{10}



European XFEL空洞・最高性能達成記録

KEK-STF における空洞性能達成(2021)

【設計性能の確実な達成に向けた具体策】

Pre-lab のワークパッケージ WP-1 では、3領域（欧・米・亜）に於いて、超伝導空洞を 40 台ずつ（合計 120 台、ILC での必要数の >1%相当）製造し、量産技術を実証することを計画している。そのうちの半数を TDR ベースの工業化技術実証に当て、性能達成率を 3 領域で再検証する。残りの半数を ILC における近年の空洞高性能化・コスト削減開発研究に基づく製造・表面処理に当てるのが適切である（TDR 以降の実績に基づく）。1 回目の表面処理プロセスのみでは性能未達成となった空洞については、さらなる表面処理プロセスを実施することで性能向上を見込む。そのための効率的な手法を新たに見出し、コスト増加を抑制しつつ性能向上に取り組む。

10%の達成率向上に必要なコストは、ILC 計画全体の 1%レベルに相当すると見積もられている。現在のコスト見積もりの中で、空洞性能達成率を 90% とし、必要台数に対して +10% の製造を想定している。表面処理技術（回数含む）の向上によって、性能達成率の向上が、量的に見込まれれば 予備機として製造する+10% の比率を見直し（下げる）が可能となり、コストバランスをとることが可能となる。（項目（ウ）。参照）。

また、近年開発された新たな表面処理プロセスの一部を導入することで（低温電解研磨や熱処理の最適化など）、空洞性能の向上が見込めることから、TDR ベースの表面処理プロセスを改善することも試みる。上記で述べた各領域での空洞製造の半数（約 20 台/領域）は、このような量産技術・性能向上に充てられる。この改善に必要なコストは、ILC Pre-Lab の中で対応し、ILC 建設におけるコストは堅持できると考えている。

【4年後の技術の完成見通し】

TDR ベースの表面処理法による空洞性能の歩留まり≥90%を実証する。この際、表面処理プロ

セスなどの追加による成功率の向上についても定量的な結果を示し、実機製造時に発生する予期せぬ成功率の低下が起きた場合の対処法も確立し、技術の完成確度を高める具体方策（レシピ）を確立する。

一方、新たな表面処理法による性能向上についても、TDR ベースの場合と同様に歩留まり90%以上を達成し本建設に反映する。また、更なる表面処理の付加によって、歩留まりの向上が見込まれれば、性能向上・性能達成率と製造コストのバランスを（コスト増加なく）適切に保つことができる。

これらにより超伝導空洞に関する詳細技術設計が完成する。

・欧州 X 線自由電子レーザー (E-XFEL) のコスト上昇要因の検証

【European XFEL コスト上昇要因の確認】

European XFEL では、建設開始にあたり最新の社会・経済情勢を反映して改訂したコスト見積もりを基準とする。これに対して、完成時のコストは13%（1082 M€/1226 M€、下図参照）の増加となったことが報告されている。

主要因は、

(1) 国際協力における製造分担に基づく、各参加国における製造契約の立ち上げに、より時間を要し、結果的に建設期間が（＜1年間）延伸したことによる人件費の増加、

(2) 建設期に重なった社会・経済情勢の変化（市場の活況）に伴い、特に Civil Engineering 入札・契約高の上昇（ホストとなったハンブルグ市公共インフラストラクチャーの大規模開発時期と重なる）、

の2点である。

【コスト上昇への具体的対応】

European XFEL では、建設直前に想定した見積もり中心（中間）値に対して、プロジェクトの健全な推進の立場から約7%（78 M€/1160 M€、下図参照）の予備費を想定し、プロジェクトの進捗に応じて国際協力連合(Confederation)・上部委員会が審査した上で追加費用を予算化するプロセスを導入した。このことで建設開始当初から予め検討された枠組みの範囲で、必要な予備費が具体的に執行された。この予備費は当初執行予算とは切り離し、進捗に沿って修正することへの現実的な方策となった。

この方式は、国際機関としての CERN などでも採用されており、予算の肥大化を抑制し、実績に伴って見直していくことで、総合的に最も経済的にプロジェクトを運営する手法として評価されている。最初から、ある程度の contingency（約30%）を想定し、当初予算への組み込みを求めるアメリカ方式とは異なっている。

結果として、当初想定したプロジェクト建設成功に向けた見通し、および必要な予備費を適切に示したことになり、ILC に対しても参考となる。完成成功の見通しをより確実に把握することに貢献する。

【4年後の見通し】

建設当初から、適切な contingency は想定しつつ、当初予算には含まず、建設の進捗を見ながら、上部委員会が必要予算をその都度審議し承認していく方式は、不確定性の高い予算の膨張を抑制するには有効であるといえる。ILC Pre-lab の段階で、社会・経済の直近の状況

をより正確に把握しつつ、コストを適切に見積もり、管理する方を確定し、プロジェクト全体のコストの安定化を図りつつ、建設準備を完了させる。

European XFEL 建設予算の推移 (2005年ユーロを基準)					→関連: P.17,18
	TDR for Pre-XFEL start-up	TDR adjusted ¹⁾ for Full-Performance	Mid-Update ²⁾ during construction	Update Final	Rati
TDR → 完成	2006~2007	Feb. 2008 (調整)	建設(中間)	完成(前)	
合意/承認 年	July 2007 (Collab. Agree.)	Nov. 2009 (Council)	2012 (Council)	2015 (Council)	
準備	39M€	39M€	→ 39M€		
建設	849M€	986M€	→ 986M€		
コミショニング	50M€	50M€	→ 50M€		
リスク予算 (成功確度98%の為)	---	(+78M€: 提案のみ)	+78M€ (予算化)		
遅延等による追加				+66M€	
建設予算・合計	938M€ →	1,082M€ →	1,160M€ →	1,226M€	+13% ¹⁾ +6% ²⁾
ノート: 1) European XFEL 建設開始・当初予算総額中心値(成功確度・50%)に対する上昇率: 13% 2) European XFEL 建設中, Mid-Update (建設開始時・成功確度予想・98%値に改訂)に対する建設費上昇率: 6% 主な追加要因: 「土木・建築好況での一時的価格高騰」+「建設遅延(<1年)による労務費増加」					

51

・参加各国から現物供給される超伝導高周波加速管の品質管理 等

【これまでの品質管理実績】

欧米では、European XFEL および LCLS-II における超伝導高周波加速管（空洞）を多用した加速器が完成しており、超伝導空洞機器の品質管理技術が成熟していると考えている。

【課題解決のための具体的方法】

日本国内では、欧米で建設されている規模での超伝導加速器は実現しておらず、欧米と同水準の品質管理が成熟しているわけではないが、4年間のPre-lab 期間中に40台の超伝導空洞を製造する（Pre-lab ワークパッケージ WP-1）ことによって同水準の品質管理技術の成熟を目指す。

また、Pre-lab ワークパッケージ WP-2 ではクライオオモジュール(CM)品質管理の実証を目指し、各領域で製造、試験し、移送、CM 組み合わせ評価を実施する。

【4年後の技術の完成見通し】

WP-2 では、上に述べた、各領域での個々の空洞および3領域において CM 2台ずつの全数検査後、各領域から1台ずつ CM を日本へ輸送し、性能を再確認して品質管理を徹底する。日本から各領域に返送し、そこで性能を再度確認することも可能とする。これらにより超伝導加速器部分の CM 試験方法を含めた品質管理手法が完成する。

ウ. 計画通り進まなかった場合の上昇コストとその対策の検討

・技術開発や製造工程が計画通り進まなかった場合のプランBやプランCの検討 等

【これまでのコスト実績】

SRF 技術 (Pre-lab のワークパッケージ WP-1, WP-2) について、欧米では、European XFEL および LCLS-II 計画における超伝導加速空洞および超伝導線形加速器技術が成熟し、性能、コストともに安定域に達してしている。日本国内では、欧米と同水準の量産技術が成熟しているわけではないが、KEK (における in-house) で技術開発を蓄積し、量産時に起こり得る予期せぬ事態に柔軟に対応し、指針を発する技術力を蓄積している。

陽電子源技術では、現在、(1) アンジュレータ方式をプラン A としつつ、(2) 電子源駆動方式をプラン B として、並行して開発が進行している。

【コスト上昇要因への対応】

Pre-lab ワークパッケージでは、40 台の超伝導空洞の製造 (WP-1)、2 台の CM 製造 (WP-2) を通して、量産技術および品質管理の準備に達することができると考えている。

超伝導加速空洞については、2 回の性能試験で歩留まり 90% の品質管理が求められているが、万が一未達成となった場合は、プラン B として 3 回目以降の表面処理プロセスを加えることで性能向上を図り、90% 以上の歩留まりを目指す。表面処理プロセスの改善・補強で達成率を向上することができればコストの上昇を抑制し、全体コストとのバランスをとることができる。(項目 (イ)、参照)。

量産・建設時、歩留まり未到達リスクへの対応:



- ILC-TDR および European XFEL での実績 (左参照) から、35MV/m を 90% の空洞が達成できる (ILC 仕様達成) と想定しているが、歩留まりが 80% に留まった場合を想定したコスト増加のリスクを試算する:
- 未達成空洞 (20% 分) に、3 回目表面処理等を加える事で、その半分 (10%/20%) の性能を向上し、最終的な歩留まり 90% の実現を図る。(European XFEL の経験を参考としたモデル)。
- この追加作業コストを空洞製造費の 1/3 の比率と想定。

この結果:

- 空洞本体・総コスト (物件費) に対する増加比率:
 - $1/3 \times 0.2 = 0.067$
- [空洞+CM・総コスト (物件費)] に対する増加比率:
 - $+ 1/3 \times 0.2 \times 0.49 = + 0.0326 \rightarrow$ 約 3.3%
- **ILC 総コスト (土木等含む総物件費) に対する増加比率:**
 - $+ 0.00326 \times 0.29 = + 0.00095 \rightarrow$ 約 1%

$\rightarrow (0.29 = [\text{空洞} + \text{CMコスト}] / [\text{ILC250全体コスト}])$

CM は全数使用を想定していることから、試験段階において不具合が見つかった場合は、その原因追及を行うと同時に、後に続く CM の品質管理を更に徹底すべく、発生した不具合が一過性のものであるかどうか判断する。一過性のものであったと結論された時は、CM の 1/3 引き抜き検査を継続する。連続して不具合が発生した場合は、製造ラインを一時停止して原

因を解明、解決し、改めて適切な全数検査(<5%) での実績を踏まえた上で、1/3 率での低温・性能検査ルーティンを再開する。

(もし、性能を満たさないCMが発生した時は、改めて次の5%分を全数検査し、品質管理。良好な状況に戻ったと判断された時は、再び、1/3 モードとすることで、品質管理のループが定まる。)

【計画通り進まない場合のプランB】

超伝導加速空洞の性能達成率が期待通りには、達成できない場合、表面処理を補強することが主な対応策(プランB)となる。これによるコスト増要因に対しては、歩留まりを90%からさらに高めるべく努力し、表面処理などのコスト増に対応するコスト節約を進めバランスをとるべく対応する。CMについては、加速器トンネルに設置後の総合試験(コミッショニング)によって、システム性能が検証される。3領域において2台ずつのCM全数検査に加えて、各領域から1台ずつCMを日本へ輸送し、性能の再確認を実施。必要なら、日本から各領域に送り返し、そこでも性能を確認する。ここで技術の完成を見込む。また、クライオモジュールを配置しないトンネル部分が600 m程度あり、(追加コストが必要だが)クライオモジュールを追加できるよう予めする場所を確保している(超伝導加速器部分のプランBに相当)。

陽電子源においては、アンジュレータ方式をプランAとする。この技術開発・プロトタイプ開発の完成がより時間を要した場合、電子駆動方式をプランBとして早期に実現し、技術が成熟した段階で、プランAに移行することを計画に織り込んでいる。相対的には、ほぼ同様のコストで完成させることができると、判断している。