

10月10日の合同会議での質疑応答に関連する補足説明

平成 30 年 10 月 15 日

KEK ILC 推進準備室

10月10日に開催された国際リニアコライダーの見直し案に関する検討委員会（第24期・第7回）・同委員会技術検証分科会（第24期・第7回）合同会議において、参考人の発表とそれに関する質疑応答を傍聴いたしました。その中で、これまでの当方の説明が不十分であったと推察される点がいくつかありました。それらの点について、（1）電弱スケールの重要性と ILC の意義、（2）コスト管理、（3）線形コライダーと円形コライダーの比較、（4）ILC を 250 GeV にした理由の四つの観点から補足説明をさせて頂きたく、本資料を作成いたしました。今後の議論の一助となれば幸甚に存じます。

（1）電弱スケールの重要性と ILC の意義

現在の素粒子物理学では、電弱スケールの解明こそが最も重要な課題であると認識されている。素粒子物理学の究極の目標は、物質、力、そして時空の全てを一つの原理にまとめる究極の統一理論の完成であるが、それに至る道筋は全く未知で、複数の考え方が提唱されており、あるいは全く新しい原理が必要になる可能性もある。この道筋を決める鍵は、電弱対称性の破れの謎の解明で、ILC はそのための最適な実験施設である。時空概念の拡張の道に進むのか、物質構造の拡張の道に進むのか、それとも全く新しい原理が必要となるのか、250 GeV ILC は、ヒッグス粒子の精密測定や新粒子発見を通して素粒子物理学の進路を示し、宇宙創成の瞬間に向けた道を切り開く加速器である。

超対称性の証拠が見つければ、次の加速器のエネルギーがはっきりし、超対称性粒子の分光学の時代の幕開けになる。また一番軽い超対称性粒子は暗黒物質候補である。電弱スケールから大統一のスケールの中に、何も新しい物理がない大砂漠の存在が示唆され、超対称性粒子の精密測定を通して、一挙に強い力も含めた三つの力の大統一のエネルギーまで成り立つ超対称大統一理論を手になることになる。電弱スケールでの精密測定を望遠鏡として、砂漠の彼方、大統一スケールを超える物理を覗く道が開け、重力を含めた超大統一、究極理論が視野に入ってくる（8月10日：藤井参考人：発表資料 p.12：第一の道：究極理論へ一直線）。

一方、ヒッグスが複合粒子となった場合は、より深い階層の新しい素粒子とそれらを結びつける新しい強い力が存在することになり、TeV 領域を越えた所に重い複合粒子が多数存在することになる（ヒッグスは一番軽い π 中間子＝湯川粒子のよう

なもの)。重い複合粒子の分光学の時代が予見され、100 TeV クラスの陽子・陽子コライダー建設のインセンティブとなる。そして、その先に究極理論への新たな突破口が開ける（8月10日：藤井参考人：発表資料 p.12：第二の道：究極理論へ新たな突破口）。

ヒッグス結合の精密測定だけでなく、他のあらゆる実験でも標準理論からのズレが見えなかった場合は、ILC のエネルギーを増強しトップクォークの精密測定やヒッグスの自己結合の測定を行い、ズレを探す（10月1日：浅井参考人）。それでもズレが見えず、そして、トップクォークの質量が標準理論の真空の安定と準安定の境界にぴったりのっていることが判明した場合、標準理論が究極理論と直結している強い証拠となる（8月10日：藤井参考人：発表資料 p.12：第三の道：究極理論と直結）。これが偶然とすれば複数宇宙と人間原理、偶然でないならば全く新しい原理の存在が示唆される。ボトムアップアプローチからトップダウンアプローチへの大転換の契機となる（8月29日：相原参考人、10月1日：浅井参考人、10月1日：山内参考人：論点メモに対する補足説明 資料3-2 p.25）。

ヒッグス結合の標準理論からのズレのパターンから素粒子物理学の進路を決めるには、ヒッグス結合の理論モデルに依らない絶対精密測定が必要になる。これにはヒッグス自体を見ない反跳質量法による断面積測定が不可欠だが、これは始状態のエネルギーや運動量の不定性が大きい LHC のような陽子・陽子衝突では不可能である（8月10日：藤井参考人）。また、LHC でのヒッグス結合測定の精度は、複雑な構造を持つ陽子同士の衝突を用いるため、統計誤差ではなく系統誤差および比較すべき理論計算の理論誤差でリミットされ、今後の改善はあるにせよ、ILC の精度に達することはない（10月1日：浅井参考人）。

また、新物理の探索においては、あらゆる手段を重層的に組み合わせ、漏れの無い探索を行うことが重要である。LHC での超対称性粒子および重いヒッグス粒子の直接探索、ILC でのヒッグス結合の精密測定、そして ILC での LHC の死角にあるヒッグシーノのような超対称性粒子の直接探索を組み合わせることで、電弱スケールでヒッグスが宇宙を満たした理由としての超対称性探索は穴のない完全なものになる（10月1日の浅井参考人の説明）。

特に LHC で新しい粒子が見つからなかった現状では、新粒子は LHC での強い相互作用をしない考えが（例えば双子ヒッグス理論）新たに注目を浴び、新粒子との相互作用はヒッグス粒子のみで起きる可能性が高くなっている。この場合ヒッグス粒子の精密測定、特に見えない崩壊モードが唯一の発見への道筋となる。

ILC は、素粒子物理学の最重要課題である電弱スケールの謎の解明を通じて、未知の領域を切り開く実験施設である。ヒッグスの精密測定による標準理論からのズレとそのパターンの発見は、究極理論（ビッグバンの瞬間）へと一足飛びに迫る道を開く可能性をも秘めた画期的なものである。250 GeV ILC は、電子・陽電子反応の明快さに加え、偏極ビームという強力な武器を持ち、電子・陽電子コライダーとして、250 GeV をはるかに超える高いエネルギーへと展開する将来性を備え、将来の長きにわたって国際的に魅力的な施設であり続ける。

(2) コスト管理

大型計画では、計画実施時におけるコストの増大がしばしば問題とされてきた。ILC 計画立案においても、その点を重視し、技術面、体制面からの検討を続けてきた。

超伝導加速器に関するコストについては XFEL の調達実績、それ以外についても大型加速器（LHC、KEKB など）での実績を踏まえ、国際協力のもとでまとめられている（8月20日分科会資料6（非公開）P.3）。TDRにおける建設コストの算出方法や技術的成立性などについては、文部科学省の有識者会議に技術設計報告書（TDR）検証作業部会が設置され検証されている（「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」）。European XFEL、LCLS-II の経験や、これまでの加速器建設の経験から、コストの見積もりの精度は、我が国で建設された他の高エネルギー加速器と同じ程度と考えている。

一方、大型計画において、コスト増大のリスクを抑制するためには、しっかりしたマネジメント体制が必須である。研究者レベルでは、LCB が 2015 年に公表した ILC Project Implementation Planning (ILC PIP) の中で（8月21日：山内参考人）、ILC 計画を適切に実施するための体制およびマネジメントの検討結果が示されている。また、文部科学省の有識者会議に設置された体制及びマネジメントの在り方検証作業部会においても、これまでの大型計画の事例を挙げて検討がなされている（「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」）。これまでの海外との話し合いの中でも建設マネジメントの重要性の認識が共有されており、実際の組織設計やマネジメント人材調達の方法については、正式な国際交渉の段階での重要な交渉事項になると想定される。

(3) 線形コライダーと円形コライダーの比較

電子・陽電子コライダーとしてのヒッグスファクトリーには、全長 20 kmクラスのリニアコライダーと周長 100 km 程度の円形コライダーの二つの提案がある。我々は、素粒子物理学の長期的視野に立って、リニアコライダーが最適な選択であると考ええる。

リニアコライダーの大きな特徴は、電子・陽電子コライダーとしてのエネルギー拡張性と偏極ビームである。エネルギー増強は、単に主線形加速器の長さを延長するという手段に加え、その時点での最適な加速技術を用いることで、より効率的に行える。将来画期的な技術革新があれば、その恩恵に浴することができるので、電子・陽電子コライダーとしての将来性を念頭においた加速器である（10月 1日：山内参考人：論点メモに対する補足説明 資料3-2 p.26）。これは、とりわけ 250 GeV ILCでズレが発見され、新物理のエネルギースケールが既存技術あるいはその延長で可能な場合、遅滞なく新物理の電子・陽電子衝突による直接詳細研究を始められるという大きなアドバンテージとなる。

一方、円形電子・陽電子コライダーでは、電子・陽電子コライダーとしてのエネルギー拡張性は極めて限定的である。また、円形で高い偏極度の偏極ビームを実現するのは困難である。将来、そのトンネルを陽子・陽子コライダーに転用する計画もあるが、高磁場超伝導磁石の開発に成功することが前提であり、現時点で見通しが立っているわけではない（10月 1日：山内参考人：論点メモに対する補足説明 資料3-2 p.26）。

ILC のトンネルや周辺施設は将来の発展の基盤となる。一度作ってしまえば、新しい加速器技術を取り込み、段階的にエネルギーを上げていくことが可能になるので、今想定されている 20 年のプログラムをはるかに超え、CERN の発展のように、50 年、100 年と長いスパンで国際的な施設として世界の研究者を呼び寄せ続けることができる。

高エネルギー物理学は、ハドロンコライダーとレプトンコライダーを車の両輪として発展してきた。今後もレプトンコライダーを将来にわたって発展させていくには、エネルギー拡張性に優れたリニアコライダーを選択すべきである。

(4) ILC を 250 GeV にした理由

CERN の LHC 実験で 125 GeV にヒッグスが発見され、一方、13 TeV LHC 実験でヒッグス以外に新粒子が発見されなかったことにより、新物理発見ツールとしてのヒッグスの精密測定への期待がこれまで以上に高まった。ヒッグス生成反応の頻度が

最大となる 250 GeV は、ヒッグスを大量に生成し精密測定を行うのに最適のエネルギーである。そこで、ヒッグスの精密測定にフォーカスした 250 GeV ILC の早期実現が、国際的なコミュニティのコンセンサスとなった（10月 1日：山内参考人：論点メモに対する補足説明 資料 3-2 p. 25-26）。

一方、ILC には、そのクリーンな環境、偏極ビーム等により、LHC の死角にあるような新粒子を直接間接に発見する可能性がある。10月 10日の合同会議において、細谷参考人は、標準理論の粒子を使った間接的な新粒子探索の一例を紹介された。これは、250 GeV ILC における 5つのノーベル賞級発見の例として挙げたもの一つである（8月 10日：藤井参考人：発表資料 p. 13、5番目の例）。新粒子発見には、一般に高いエネルギーの方が有利だが、この例が示す重要な点は、むしろ 250 GeV でも十分なリーチがある点である。一方、ヒッグスの精密測定による新物理探索は、様々なタイプの新物理に感度があり、さらにそれらを区別できる一般性と有用性を備えている。ヒッグスの精密測定を主目的としつつ、新粒子の探索も並行して実施するのが効率的である。こうした観点から、ヒッグスの精密測定を最優先と考え、ILC を 250 GeV とするとの国際的コンセンサスに達した。

闇雲に高いエネルギーに上げるのではなく、250 GeV でヒッグスの精密測定を行い、新物理のエネルギースケールに関する指針を得てから、そこに至るエネルギー増強や次の加速器の計画を立てるのが最も費用対効果の高い戦略である。

文部科学省の ILC に関する有識者会議の素粒子原子核物理作業部会では、高エネルギー物理分野以外の近隣分野の委員を含めて、ILC の物理を深く議論していただいた。そこでも LHC の結果を踏まえると 250 GeV が今できるベストとご理解いただけたと考えている（8月 10日：中野参考人）