○　また、新粒子の探索については、2017 年末までの LHC の実験結果で新粒子が発見されなかったことから、LHC では探索が困難なため ILC で直接測定することが期待されていた新粒子（強い相互作用をしない超対称性粒子）が ILC で発見される可能性は低くなった。

○　なお、大きな質量欠損を伴う現象の観測等の間接的な方法※による暗黒物質や余剰次元等の探索については、250GeV ILC においてもその意義は余り下がらない。

※ヒッグス粒子のインビジブル崩壊や一光子現象、標準理論粒子の対生成における輻射補正等の測定

（2）コスト及び技術的成立性の検証

○　ILC 計画のコストについては、有識者会議で聴取した見直し後（250GeV ILC）の本体建設費と測定器関係経費は 7,355～8,033 億円（本体建設費 6,350～7,028 億円、測定器関係経費 1,005 億円）※と算定された。これに加えてコストの見積りの精度に関する不定性相当経費（約 25%）による追加的な経費が発生する可能性がある。

※見直し前（500GeV ILC）の本体建設費と測定器関係経費は 1 兆 912 億円（本体建設費 9,907 億円、測定器関係経費 1,005 億円）

○　また、年間運転経費は 366～392 億円※と算定され、その他付随経費として、準備経費 233 億円が新たに算定されたが、具体的に算定されておらず新たに計上が必要となる経費（具体的な立地に関わる経費等）が存在している。

※見直し前（500GeV ILC）の年間運転経費は 491 億円

○　さらに、コンティンジェンシー（予期せぬ出費のための予備費：プロジェクト経費（本体及び測定器建設経費＋運転経費）の約 10%）及び実験終了後の解体経費（年間運転経費の 2 年分程度）が新たに項目として明示された。

○　上記のコストの見積りは、研究者コミュニティにより見込まれている経費を取りまとめたものであり、コスト面でのリスクへの対応として、250GeV ILC への見直し、さらには超伝導加速空洞など研究開発等によりコスト削減が見込まれるなど「前回まとめ」から一定の進捗がみられる一方、技術リスク、工事期間延長リスク、市場リスクなど有識者会議が指摘する「コストのリスク要因や技術上の課題」等に伴う追加的な経費が発生するリスクへの十分な留意が必要である。

○　技術的な課題については、「前回まとめ」において性能実証が不十分と指摘されたビームダンプや陽電子源、電子源、ビーム制御、ダンピングリングの入出射システム等については

２．これまでの検討結果の概要

有識者会議やその下に設置した作業部会を通じて検証を行った科学的意義、コスト及び技術的成立性、人材の確保・育成方策、体制及びマネジメント、国際協力について、「前回まとめ」を踏まえつつ、現時点における ILC 計画の全体像として、これまでの検討結果を取りまとめた。その概要は以下の通り。

（１）科学的意義

○　2017 年末までの LHC の実験結果としては、ヒッグス粒子の発見以降様々な成果はあるものの、標準理論を超える新粒子（強い相互作用をする超対称性粒子の可能性がある粒子）や新現象（暗黒物質や余剰次元）の兆候は捉えられていない。さらに、LHC において 13TeV によるⅡ期計画が続く 2018 年末までに新粒子や新現象が観測される可能性は低いことが判明している。

○　その結果を踏まえて、国際的な研究者組織が、ヒッグス粒子の精密測定の重要性から、ILC は当初計画の 500GeV から衝突エネルギーを下げて 250GeV でヒッグスファクトリーとして運転を行うように見直したことを受けて、有識者会議では 250GeV ILC の科学的意義について検証した。

○　250GeV ILC による実験が最も優位性を有するのは、ヒッグス粒子と他の素粒子の結合定数の精密測定であり、これにより標準理論からのズレに素粒子ごとのパターンが見い出されれば、今後の素粒子物理学が進む方向性に示唆を与える可能性がある。例えば、暗黒物質の正体やヒッグス粒子が真の素粒子かどうかなど、現在の標準理論では説明が困難な課題に対し、解明の端緒を与える可能性がある。

○　衝突エネルギー250GeV ではヒッグス粒子の生成断面積が最大化されることに加え、LHC で新粒子の兆候が観測されず、250GeV ILC のヒッグス粒子の精密測定に有効場理論が利用できることが明らかになったことから、ヒッグス粒子の精密測定の実現可能性がより明確になった。

○　一方、500GeV から 250GeV へと衝突エネルギーを下げたことにより、トップクォークの精密測定については、衝突エネルギー350GeV が必要であることから、250GeV ILC では実験ができなくなった。

○　また、新粒子の探索については、2017 年末までの LHC の実験結果で新粒子が発見されなかったことから、LHC では探索が困難なため ILC で直接測定することが期待されていた新粒子（強い相互作用をしない超対称性粒子）が ILC で発見される可能性は低くなった。

○　なお、大きな質量欠損を伴う現象の観測等の間接的な方法※による暗黒物質や余剰次元等の探索については、250GeV ILC においてもその意義は余り下がらない。

※ヒッグス粒子のインビジブル崩壊や一光子現象、標準理論粒子の対生成における輻射補正等の測定

（２）コスト及び技術的成立性の検証

○　ILC 計画のコストについては、有識者会議で聴取した見直し後（250GeV ILC）の本体建設費と測定器関係経費は 7,355～8,033 億円（本体建設費 6,350～7,028 億円、測定器関係経費 1,005 億円）※と算定された。これに加えてコストの見積りの精度に関する不定性相当経費（約 25%）による追加的な経費が発生する可能性がある。

※見直し前（500GeV ILC）の本体建設費と測定器関係経費は 1 兆 912 億円（本体建設費 9,907 億円、測定器関係経費 1,005 億円）

○　また、年間運転経費は 366～392 億円※と算定され、その他付随経費として、準備経費 233 億円が新たに算定されたが、具体的に算定されておらず新たに計上が必要となる経費（具体的な立地に関わる経費等）が存在している。

※見直し前（500GeV ILC）の年間運転経費は 491 億円

○　さらに、コンティンジェンシー（予期せぬ出費のための予備費：プロジェクト経費（本体及び測定器建設経費＋運転経費）の約 10%）及び実験終了後の解体経費（年間運転経費の 2 年分程度）が新たに項目として明示された。

○　上記のコストの見積りは、研究者コミュニティにより見込まれている経費を取りまとめたものであり、コスト面でのリスクへの対応として、250GeV ILC への見直し、さらには超伝導加速空洞など研究開発等によりコスト削減が見込まれるなど「前回まとめ」から一定の進捗がみられる一方、技術リスク、工事期間延長リスク、市場リスクなど有識者会議が指摘する「コストのリスク要因や技術上の課題」等に伴う追加的な経費が発生するリスクへの十分な留意が必要である。

○　技術的な課題については、「前回まとめ」において性能実証が不十分と指摘されたビームダンプや陽電子源、電子源、ビーム制御、ダンピングリングの入出射システム等については

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）

（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。

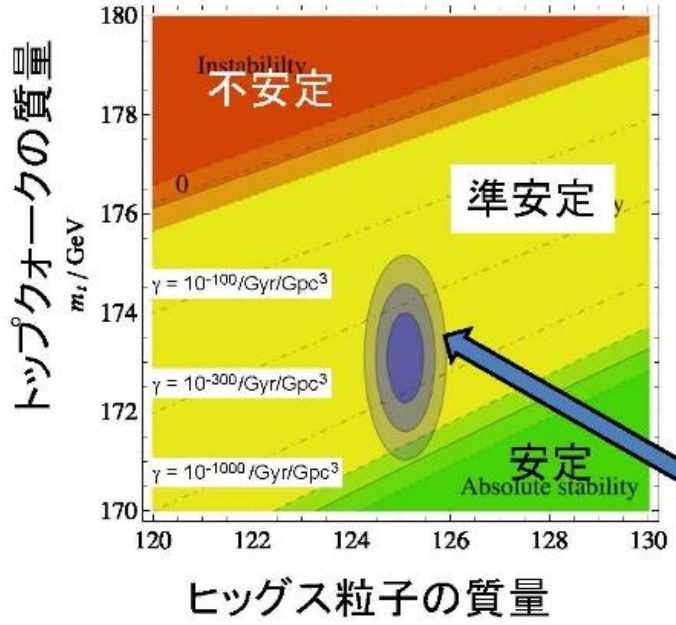
高エネルギー物理学は、ハドロンコライダーとレプトンコライダーを車の両輪として発展してきた。今後もレプトンコライダーを将来にわたって発展させていくには、エネルギー拡張性に優れたリニアコライダーを選択すべきである。

（4） ILC を 250 GeV にした理由

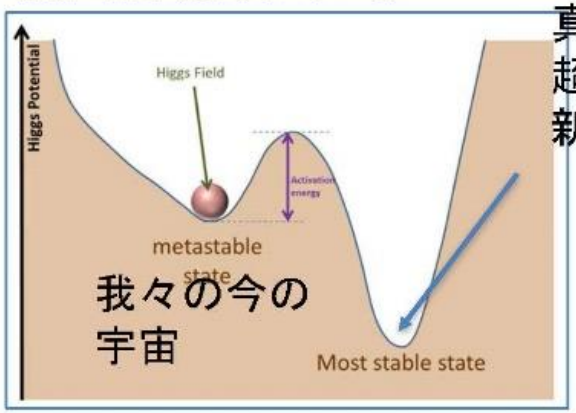
CERN の LHC 実験で 125 GeV にヒッグスが発見され、一方、13 TeV LHC 実験でヒッグス以外に新粒子が発見されなかったことにより、新物理発見ツールとしてのヒッグスの精密測定への期待がこれまで以上に高まった。ヒッグス生成反応の頻度が

それは悪夢でない。研究する上で、
「もう全ての登場人物を知っている」って言う大きな利点

新学術領域「時空と真空」



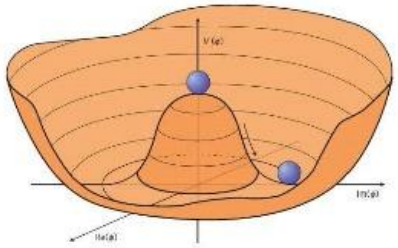
ヒッグス粒子を通して
「真空」を研究している



真空の構造解明
超高エネルギーでの
新現象の示唆

10^{11}GeVくらい？

2) 右巻ニュートリノ？
マヨラナ性、質量の測定
HK, double beta decay　他



3) トップダウン型
理論やLFV実験・陽子崩壊
と協力・　この真空を
どう安定させるか

1) ILC ヒッグスのポテンシャルの形の
研究→　インフレーションのタネ？
CMB,宇宙重力波検出と協力

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、漏れのな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。

資料２－１

10月11日付け追加質問に対する回答

平成30年10月15日
KEK　ILC推進準備室

10月11日付けで受け取りました追加質問5件について、以下のように回答いたします。囲みの部分が今回の回答部分です。

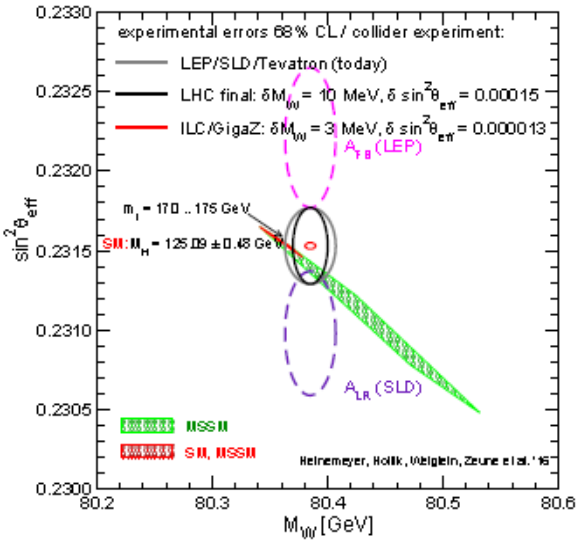
(1) ズレが見えなかった場合

ズレが見えなかった場合、ズレが本当にないことを確かめるため、エネルギーを下げLEP/SLC で行われた Z や W の精密測定を1000倍の統計でやり直しズレを探す。

「ZやWの精密測定」とは、具体的に何を測定し、LEP2の結果に比べてどういう違いが表れる／現れないことを想定して実験するのか説明していただければ幸いです。

ILC におけるヒッグスの精密測定において標準模型からのズレが見られなかった場合、次の段階では ILC のエネルギー拡張性を活かして ILC のエネルギーを増強し、まだ行われていない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、ズレを探すことが最も重要である。LEP/SLC で行われた W/Z の精密測定を 1000 倍の統計でやり直すのは、それでもズレが見えない場合の最終確認である。

W/Z の精密測定では、電弱精密測定量（EWPO）と呼ばれる一連の物理量を測定する。EWPO には W/Z の質量、W/Z の全崩壊幅、トップ質量、電子・陽電子衝突でのレプトンおよびクォーク対生成断面積およびそのビーム偏極依存性、ワインバーグ角等がある。標準理論を超える物理の効果は EWPO の測定値を標準理論でフィットした際の、フィットと測定値のズレとして現れる。



図は、横軸 W 質量、縦軸ワインバーグ角（の sin の自乗）で、2016 年時点での状況（グレーの楕円）、中心値が動かないとの仮定のもとに、HL-LHC 終了時点に期待される状況（黒の楕円）、さらに ILC で Z ファクトリー実験を LEP の 1000 倍の統計で行な

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）