

高エネルギー将来計画検討委員会の活動報告

2021年 - 2023年 期

将来計画検討委員会 委員一同

<https://www.jahep.org/fproject.html>

cfp2021@jahep.org

2023年（令和5年）11月10日

1 はじめに

将来計画委員は高エネルギー委員会からある日突然指名され、委員長は委員の互選で決めるのが通例である。今期の将来計画委員は2021年11月初旬に初召集され、浅井高エネルギー委員長より以下の任務が与えられた。

(A) 2030-2040年代の主要計画の検討

- (1) ILCの多角深化（技術応用や新しい仲間作り）
- (2) ILCと異なる将来計画とその基盤技術の検討¹

(B) 量子技術、AI、検出器技術の先端化

新奇の先端技術をどう素粒子実験に取り込むか

まるで水と油を混ぜるような超難題である。本記事は、実験屋・加速器屋・理論屋からなる総勢26名の委員が、この難題に取り組んだ奮闘歴である。

検討にあたり、シリーズで行った2回の（ヘビーな）アンケートの実施やタウンホール会合などでの議論で、コミュニティの方々から多大な協力をいただいた。その結果、本委員会として（任期終了ギリギリで）3つの成果報告資料を作成することができた。このうち2つ、次世代基幹計画（通称RGB）の検討報告書と先端技術の調査スライド資料はJAHEPホームページにて公開しているので、詳細はそちらを参照していただきたい²。

一方、委員会始動時から半年にわたって行った「ILCの多角深化の検討」に関する報告書は、次期将来計画委員会への引継ぎ内部資料とした。そのため、**本記事ではとくにILCの多角深化の検討内容を中心にその活動概要を一部紹介することで、今期の委員会の最終報告とさせていただきます。**現行実験を中核で推進している委員が「自分の実験の枠を超えて」高エネルギー実験の将来を真剣に考え、必死に議論し、次世代の形を模索してきた軌跡を少しでも知っていただければ幸いです。

2 ILCの多角深化の検討

委員会発足時から「そもそも論」と題して、我々高エネルギー物理学研究者が置かれている状況を共有しながらも、まずは委員同士が本音を言い合える雰囲気を作ることに努めた。最初の半年間で計15回の委員会と多数の個別班会合を開催し、ILCの課題の整理と実現に向けた方策についてざくばらんな議論を集中的に行った。一方、ILCは過去の将来計画委員会の答申でも最優先の将来基幹計画となっており、これまでもその実現に向けた価値の強化や施設の多角的な利用を含めて、様々な観点で検討がなされてきている。したがって、まずは複数の関係有識者を会合に招き、ILCに関する情報収集と現状把握を行うとともに、強化すべき点やその検討内容のさらなる深化に努めた。

今回はとくに「高エネルギー物理学研究者の枠を超えた広い視野での検討」を試みることにした。すなわち、近隣他分野から一般社会まで含めた新しい仲間作りの方策（価値の強化）、加速器等基盤技術の波及（技術の応用）、加速器施設の多角的な利用（施設の利用）と、様々なレイヤーを想定した検討である。委員会をこれに応じて「価値班」、「技術班」、「施設班」の3班に分け、それぞれの項目の深化を図った。

全ての可能性を網羅的に取り扱うことは難しく、また、一部の検討・考察事項に関してはさらに時間を費やして丁寧に精査すべきものもある。さらには現在、ILCを活発に推し進めているILC-JapanやIDTによる活動との齟齬や不用意な混乱を避けるため、本報告書は親委員会である高エネルギー委員会と次期将来計画委員会への引継ぎ内部資料（41ページの報告書）とし、一般公開はしないこととした旨、ご容赦いただきたいと思います。本記事でその一部を紹介することで本件に関する委員会の活動内容の雰囲気を感じ取っていただきたいと思います。

¹国内に自前の加速器プログラムを持つことを前提とする。

²<https://www.jahep.org/fproject.html>

2.1 価値の観点

ILC の課題の検証や価値の強化、真の国際科学研究所の在り方などに関しては、これまでに多くの検討がなされている。本委員会では、これらを踏まえて大所高所からの検討を行った。検討結果をキーワードと共に以下にまとめる。2022年6月の第1回 高エネルギー実験の将来を考える会（キックオフミーティング）でのスライドも参照されたい [1]。

- **なんと言っても「夢」「ワクワク感！」**
 分野が一丸となって、情熱を持って取り組むためには、コミュニティの誰もが「コレだ！」と同意する共通目標が必要である。一方で、夢と堅実さの両立も鍵となる。基幹計画として失敗のない着実な科学成果を求められることも重要な観点である。
- **夢の共有**
 夢の実現のためには、夢に価値を与えて国民や産業・国策と共有することが重要である（図1参照）。国際化や先端化なども共有可能な価値の一つである。なお、我々の苦手な価値項目や共有手段を、産業や他分野との共創によって克服していくのも有効な手立てであろう。
- **イケイケ分野との共創**
 価値を生み出すためのひとつの方策として、技術進展のめざましい「イケイケ分野」との共創があげられる。こうした分野の技術を積極的に取り入れつつ、我々の得意とする技術で貢献できれば真の共創となり、夢実現へグッと近づけるだろう。

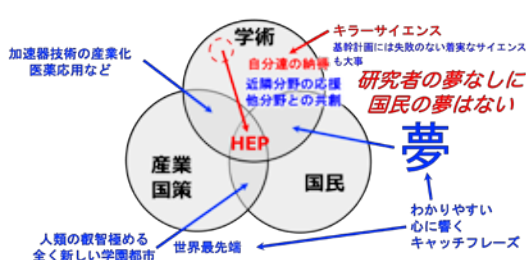


図1: 学術・国策・産業、そして国民にとっての価値。ビッグプロジェクトはどの立場・観点にとっても価値が認められる必要がある。

委員会では、たとえば文科省や政府が示す「イノベーションコモンズ」の各項目 [2] などでも参考にして、時代に合ったより大きなビジョンを捉え、意識や方策を更新する重要性も議論した。いずれにしても、ILC 推進のためには上記の3つのキーワードを実現しながら、図1の中央に寄せていくための努力が重要である。具体的な方策については、さらに時間を費やして様々な分野の有識者とも議論を重ね、検討をしていく必要がある。

2.2 技術の観点

ILC から派生する技術が産業界や学术界に应用できるか、これが ILC 推進のサポートとなるかを検討した。すでに ILC 推進者がこれまでにしてきた検討 [3, 4, 5] を参考にしながら、本委員会では各要素の深化と新たな項目の開拓を目的とした [1]。とくに図2にある ILC で用いる予定のニオブ超伝導による 1.3 GHz RF 加速空洞 (TESLA 空洞) からの波及と関連して、医療用 ^{99}Mo 製造、ホウ素中性子捕獲療法、自由電子レーザー (赤外, THz)、加速空洞の量子ビットへの応用、EUV リソグラフィなどを調査し、その技術的な近接性 (ILC 技術との関連度)、現実性 (他技術と比べた優位度)、将来性 (長期的な有望度) を評価し、内部資料にまとめた。



図2: 9セル TESLA 空洞 (写真: KEK)

すでに TESLA 空洞が利用されている場合もあれば、今後の拡大進展が期待される分野もある。ILC や FEL、産業での利用を目的として開発されている Nb_3Sn による 4 K での超伝導空洞が実現すると大規模な液体ヘリウム製造施設がなくても冷凍機による運転が可能となる。したがって、一般的な導入障壁が低くなるため、超伝導加速空洞がより広範囲に普及することが期待される。

一方、ILC のための技術開発は加速空洞だけではない。陽電子源、ナノビーム制御技術、大電力マイクロ波生成装置 (クライストロンなど) の高効率化などは、学術・産業・社会に様々な恩恵をもたらす要素がある。たとえば ILC でも重要な陽電子源は物性計測用にも応用することができるため、ILC に匹敵する大強度の低速陽電子施設の計画も提案されている。このような新規提案と ILC が互いの知見を生かし共創戦略を立てることも効果的かもしれない。また、クライストロンの高効率化は加速器全般に恩恵をもたらすと同時にカーボンニュートラルの観点でも重要である。

今回は ILC の技術波及を主題としたが、たとえば可搬型小型線型加速器による非破壊検査は、(ILC 以前の) リニアコライダー研究で開発が進んだ常伝導加速器技術から派生している。今回は ILC との近接性の関係や時間的な制約で扱えなかったが、偏極電子顕微鏡、加速器駆動核変換、排水・環境浄化、アスファルト硬質化、ナノセルロースなどの産業応用や低エミッタンス技術、ビーム

モニターと制御、ビームサイズ診断などの技術の波及効果も今後検討できるとよいだろう。

このような基礎技術の種や芽は、継続的な努力と技術継承を経て成長し、長い時間をかけて開花し、百花繚乱に我が国の根幹を支えている。今回、ILCの技術調査を通じて、素粒子実験のための加速器開発が幅広い社会貢献に繋がっていることを再認識できるよい機会となった。

2.3 施設の観点

ILC 施設が建設された場合、世界に類のない高品質かつ様々なエネルギーの電子・陽電子ビームを活用できる可能性が拡大する。そこで放射光やビームダンプや一部の（陽）電子利用など、本来の ILC の目的である衝突実験運用と並行して実現し得る活用方法の検討を行うことを目的とした。なお、ILCX [6] などでも議論されている施設を利用した素粒子実験や原子核実験の広がりに関してはステークホルダーに限られるため、今回は取り扱わないこととした。これまでにも ILC 施設利用について、短波長光子発生及びその利用、電子、陽電子、ミュオン、ニュートリノ、中性子、核医学、放射化学、プラズマ利用加速、ビームダンプでの様々な研究など、様々な提案、検討が行われてきた [3, 4, 5, 6, 7]。これらの検討結果をもとに施設班は、ILC 衝突実験の本体への影響が少ないことをベースとして、（陽）電子ビームの特徴である、高エネルギー (125 GeV)、高偏極 (~90%)、高品質 (energy spread ~ 0.1%) を重視した施設利用方法を議論した。その結果、以下の3つの施設利用を候補として、より詳細な検討を行った。

- 陽電子生成用アンジュレーターからの光子
- 自由電子レーザー (5+5 Hz 運転の 5 Hz を利用)
 - a. 電子入射器終端部・ダンピングリング手前 (5 GeV 電子ビーム)
 - b. バンチ圧縮器直後 (15 GeV 電子ビーム)
 - c. 主リニアック直後・Beam Delivery System 手前 (125 GeV 電子ビーム)
- ビームダンプ



図 3: ILC 加速器でのビームダンプ配置 [7]。青が電子、赤が陽電子で、四角が可能なビームダンプ位置を表す。

施設運用の議論は様々な専門知識が必要なため、これまで検討されてきた情報の整理と理解に多くの時間を費

やした。その結果、今回は定量的な評価や追加施設の必要性などを十分に議論することは難しい面があった。本来の科学目標であるヒッグスファクトリーとしての運用を最優先とすると、やはり施設の多角的利用は限定的なものになる。今後の検討においては、国際研究所としてより広範な施設利用、段階的な活用、共用運用の効率化などの手立てを練っていくことで、周囲からの理解や施設の価値をさらに高めることが可能であろう。

2.4 ILC 多角深化検討のまとめ

現在のところ、ILC に直接関わっていない委員が大半であったが、自分の実験を超えて ILC の実現方策について多くの時間を割いて議論できたことは、それだけでも価値のあるものであった。ILC が直面している多くの課題は、ILC に閉じた話ではなく、高エネルギー物理学、ひいては加速器科学全体の課題である。向かうべき次世代のエネルギースケールの精査や、量産も含めた技術の開発と成熟度の評価はもちろんのこと、施設の大型化、予算の肥大化、グローバル化、エネルギー・電力問題など、分野全体で知恵を絞り、課題を一つ一つ解決しなければ、高エネルギー物理学の将来の基幹計画の実現はいずれにしても困難である。この危機感を共有し、課題を精査し、対応や解決策を考えることは簡単なことではなく、当初は委員会内でも様々な異なる立場から多様な相反する意見もでた。今回の活動はそれらの無形の議論や共有意識を確立するための努力のうえに成り立っている。

今回の検討は、あくまで計画推進の主体となる研究者としての立場を軸足にして、「価値」、「技術」、「施設」の多角深化の観点で進めたが、実際には政府・官庁レベルの交渉、国際的な枠組みでの予算・リソースの分担などが実現に向けての本質的な課題であることは委員会でも認識している。一方で、計画提案の長期化によるコミュニティ内の熱量の低下、世代交代、社会情勢と価値の激変など、取り巻く状況が劇的に変わってきているなか、全世代の研究者自身が問題を正確に認識し、当事者意識をもって精査・判断し、渴望する将来計画を推進していくことが極めて重要であることは言うまでもない。

本記事では検討の一部を簡単に紹介したが、この内部資料が次期以降の将来計画に引き継がれ、さらに深化発展していくことを願っている。今後、コミュニティにも開かれた形で生産的な議論を重ね、その実現に向けた具体的な方策作りに繋がっていくことを期待している。最後に、本検討にあたり貴重な情報をいただいた岩下氏 (京大)、神門氏 (量研)、阿部氏 (KEK)、矢橋氏 (理研)、栗木氏 (広島大)、早野氏 (KEK)、照沼氏 (KEK)、横谷氏 (KEK)、山下氏 (岩手県立大)、飯嶋氏 (名古屋大) (順不同) にあらためて感謝申し上げる。

3 次世代基幹計画の検討

ILCの多角深化の検討に続いて、2022年4月からの約1年半はもう一つの委員会チャージであった「ILCとは異なる将来計画とその基盤技術」の検討を本格化した。詳細はJAHEPホームページにある報告書に全て記載されているため、ここでは簡単に概要だけ紹介する。

3.1 経緯と前提

今回の将来基幹計画の検討は、従来の枠組みや方針にとらわれず、あらゆる可能性を広げ、より柔軟に行うという点で、これまでのJAHEP答申や将来計画委員会の活動と一線を画すものとなっている。これは、これまでJAHEPが提案推進してきたILC計画が近未来に実現しない場合の再構築の要素も含んでいる。そもそも高エネルギー加速器実験の基幹計画は、学術的な価値と技術的な成熟度はもちろん、多くの学生や研究者がともに成果を出せる環境を与え、素粒子分野の質・量ともに向上させる使命を負える計画であることが要求される。また、近隣分野との共創や国民の理解などの価値強化の重要性も認識したうえで議論を進めた。

具体的な検討に際しては、委員会内で閉じるのではなく、大学・研究機関の学生や研究者とも広く意見交換しながら進めるべきである。そこでJAHEPコミュニティを主な対象としたシリーズ「高エネルギー物理実験の将来計画を考える」を行い、2回のアンケートとそのフィードバック懇談会、将来計画に特化した2泊3日の湯河原合宿(図4)やJPSシンポジウム、タウンホールミーティングなどを開催し、意見集約にも努めた。



図4: 湯河原合宿(2022年8月)の集合写真: 日本版Snowmassを掲げ、将来計画委員が中心となり、高エネルギー委員、過去の将来計画委員長、若手オブザーバ、理論研究者を招待して2泊3日の合宿を開催し、日本の将来計画について朝から晩まで議論した。

最終的に3つの検討項目(以下,R,G,B)を定義し、委員の専門性や興味に応じて班分けを行ったうえで具体的な調査と検討を行った。議論の継続性なども考慮し、委員が推薦する若手オブザーバ³を招聘し、各班の議論に参加していただいた。

³メンバーは報告書に記載しているため、ここでは割愛する。

3.2 "R","G","B"の検討

以下にそれぞれの検討内容の概要を簡単に紹介する。

R: 電子・陽電子コライダーの多角的検討

ヒッグス粒子の物理の深化やその先の物理的価値, multi-TeVまでを視野に入れた技術調査など、これまでと異なる実現方法の模索も含めて自由度をもって検討した。まずは物理、加速技術、国際情勢を議論したうえで実現可能性を高めるための具体的な課題として3つのシナリオ(早期実現戦略、エネルギー拡張性重視、価値の拡大強化)を描いた。本検討はこれまでのILC推進努力をさらに発展させる要素もあるため、歴史的な経緯や国際協調や技術的な観点での整合性も高い方針である。ただし、予算・人的規模はゴールドクラス(数千億(数千人))のグローバル計画のため実現への課題も多い。(将来的にはお釣りがくる可能性もあるが)一時的にはリソースの集中により国内実験の多様性が低下する懸念もある。

G: フレーバー物理を中心とする素粒子実験群の検討

どの観測量が有望か、別々の実験が物理の観点で横串で繋がるか、どのような施設が必要かの検討や、国際情勢の調査を踏まえた多様なフレーバー実験群の形成による基幹計画を検討した。この検討は多彩な物理と実験の多様性の担保、間接測定による新物理のエネルギースケールの決定可能性などの利点がある。測定量の多様性を担保することは、観測量の相関解析も含めたフレーバー物理の成果の最大化のためにも重要である。さらに早い実験実現サイクルは、人材育成と人材交流を促進させるメリットもある。現有施設を最大限利用し、これまでも実績のあるシルバークラス(数百億(数百人))を積み上げていくことで実現できる可能性が高い一方、エネルギーフロンティア実験をホストする道が一時的に閉ざされる可能性が高くなる懸念もある。

B: ミューオン加速とミューオンコライダーの検討

ミューオン加速技術の国内外の現状をレビューし、技術的な課題や将来性を議論し、ミューオン加速を軸にした将来を検討した。国際協力に加えて、日本の基幹計画となり得るかについて議論することも重要である。コライダーへの道筋は、長期的には魅力的ではあるが、十分な生成・冷却・加速の技術要素や放射線シールドやニュートリノ被曝などの安全面など、実現のための課題が山積している。したがって、種々の実験と技術開発を両輪で進めながらステップアップするステージング案をいくつか提示した。たとえば、 $e^- \mu^+$, $\mu^+ \mu^+$ コライダーがそれに相当する。コライダー実験の実現前の途中段階でシルバークラスの規模を活かした科学的成果と技術原理実証を積み重ね、より長期的な視野でゴールドクラスの高エネルギーフロンティア実験(グローバル計画)に繋げていく戦略を練る必要がある。いずれにしても将来基幹計画の検討に足る十分な技術立証ができるかが課題である。

3.3 次世代基幹計画検討のまとめ

各検討項目は、物理の方向性や要素技術の開発、タイムスケールやコストなどが全く異なるため、同じ土俵で議論するのは難しい面もある。また RGB は全てを網羅しているわけではないため、それ以外の将来の可能性も常に残しておくべきである。現実的な将来計画の推進を考えた場合、検討項目 RGB は互いに排他的な方針ではなく、学術的成果や技術発展、建設・運転コストや社会的情勢の変化などに応じて、各要素の優先度を柔軟に変化させ、共創する形の実現と発展が望ましい。すなわち、時間依存性のある係数をもつ固有状態の線形結合 ($c_R(t)R + c_G(t)G + c_B(t)B + c_X(t)X$, X は今回の検討以外) の最適化によって、科学的な成果、技術革新、社会貢献を最大化させるべきであろう。なお、今回は次世代基幹計画の可能性を多角的に検討したものであり、具体的な実効性を伴う「答申」の形をとっていない。今後、次世代の基幹計画の実現に向け、次期以降の委員会が主体となって議論をさらに深化するにあたり、今期の委員会として「継続的な議論と検討の深化」と「Implementation Plan の検討」を提言している。興味を持たれた方は報告書本体をご一読いただきたい。

4 先端検出技術の調査

委員会チャージ (B) の「先端検出技術の検討」のために先端化班を組織し、上記 RGB 検討と並行して調査を行った。先端技術の応用は新しい実験を可能にするだけでなく、新規参入者にとっても魅力的なため、高エネルギー実験分野として常にアンテナを張っておくことが重要である。そこで今回は様々な専門家の話や委員による文献調査の結果を共有したうえで、委員会内であらためて整理・議論し、スライド形式の資料にまとめた。ここではその概要だけ紹介する。

素粒子実験と親和性が高い先端技術の芽や種の多くは、KEK 測定器開発センターなど各所で開発や検討が進んでいる。本調査では、主に他の研究分野や産業界で急速に発展している技術や新興技術に焦点を当て、素粒子実験への応用可能性を検討した。調査したトピックの大半は4つのトレンド（量子センサー・デバイス、機械学習、新奇素材、計算・通信）の中に位置付けられる。具体的には原子系量子センサー、量子ドット、超伝導量子ビット、ペロブスカイト半導体、シリコンセンサー、量子計算、機械学習、計算機、集積回路と多岐に渡る技術を調査した。新奇技術とスケラビリティは必ずしも一致しない場合が多いため、臨機応変に使い分けるのが賢明である。詳細は JAHEP ホームページにあるスライド資料を参照されたい。

5 おわりに

多種多様な経験と属性をもち、考え方も異なる委員メンバーが共通の前提認識を確立し、我が国の高エネルギー物理実験の将来の構築という難題に立ち向かった。議論に費やした時間は、48回の委員会と各班会合を合わせて優に200時間を超えるが、最終的に3つの成果物をまとめることができた。これはひとえに多数の専門家のご協力、若手オブザーバーのご協力、そしてなによりアンケートやタウンホール会合などに積極的に参加し、議論に加わっていただいた JAHEP の皆様、加速器や理論の専門家のおかげである。委員一同、この場を借りて感謝申し上げます。今期は答申を更新しないかわりに自由に将来計画の可能性を検討することが許された面がある。次期委員会でも新しいチャージのもと、コミュニティとの対話を重視しながら、さらなる進展のために今期以上に奮闘していただきたい。ちなみに今期の最終委員会が出た委員の感想は、概して「大変だったけど、楽しかった。充実感しかない。」のようなものが多かった。研究者がこのような検討を自らやってみたいと思う分野の未来はきつと明るいはずである。いずれにしても次世代基幹計画の実現には、何より研究者の情熱が最も重要であろう。大規模な基幹計画は、次世代を担う若手研究者、実験現場を主導する中堅研究者、知識と経験のあるシニア研究者が協力し、一丸となって取り組めることが理想である。人材育成と技術継承、施設と予算の肥大化、グローバル化、エネルギー・電力問題などの種々の課題も柔軟な発想で解決していかなければならない。今回の地道な委員会活動が、高エネルギー物理学分野のさらなる飛躍に繋がることを期待している。

参考文献

- [1] 第1回 高エネルギー実験の将来を考える会 <https://kds.kek.jp/event/42229/>
- [2] 「イノベーション・コモンズ (共創拠点)」の実現に向けて、文部科学省 大臣官房文教施設企画 防災部計画課整備計画室 (2022) https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shisetu/062/1417904_00002.htm
- [3] ILC の多角的活用 2017 加速器 14 no. 4, (2017) 236–242.
- [4] ILC の多角的活用を考える会 II 2018 <https://conference-indico.kek.jp/event/52/> 加速器 15 no. 3, (2018) 132–138.
- [5] ILC の多角的活用を考える会 III 2018 <https://conference-indico.kek.jp/event/63/> 加速器 15 no. 4, (2019) 275–278.
- [6] ILCX2021, ILC Workshop on Potential Experiments <https://agenda.linearcollider.org/event/9211/>
- [7] 横谷馨, ILC の加速器と多角的活用, 日本物理学会 第 74 回年次大会, 2019 年, 九州大学