

大型研究計画に関する事前評価について（報告）

「高輝度大型ハドロン衝突型加速器（HL-LHC）による素粒子実験」
について

2018年（平成30年）8月30日

科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会
学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会

目 次

はじめに	3
------	---

「高輝度大型ハドロン衝突型加速器（HL-LHC）による素粒子実験」について

1. 計画の概要

(1) 概要	4
(2) 内容	5
(3) 実施体制	7
(4) 国内における検討経緯	9
(5) 国際的な動向	10
(6) 年次計画	11
(7) 予算規模	11

2. 計画の評価

(1) 研究者コミュニティの合意	12
(2) 計画の実施主体	12
(3) 共同利用体制	12
(4) 計画の妥当性	13
(5) 緊急性	13
(6) 戦略性	14
(7) 社会や国民からの支持	14

3. まとめ

(1) 総合評価	16
(2) 計画推進に当たっての留意点	16

用語解説	17
------	----

科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会

学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会 委員等名簿	21
-----------------------------	----

はじめに

文部科学省では、学術研究の大型プロジェクトへの安定的・継続的な支援を図るため、2012年度（平成24年度）に「大規模学術フロンティア促進事業」（以下「フロンティア事業」という。）を創設した。

この事業は、世界が注目する学術研究の大型プロジェクトについて、科学技術・学術審議会学術分科会研究環境基盤部会学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会（以下「作業部会」という。）が策定した学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想である「ロードマップ」*1等に基づき、社会や国民からの支持を得つつ、国際的な競争・協調に迅速かつ適切に対応できるよう支援し、戦略的・計画的な推進を図ることを目的としている。

この度、2017年（平成29年）7月に作業部会が策定した「ロードマップ2017」に基づく検討を行った結果、フロンティア事業の新規プロジェクトとして、「高輝度大型ハドロン衝突型加速器（HL-LHC）による素粒子実験」を選定した。

これに伴い、作業部会では、本プロジェクトの計画全体を確認し、今後のプロジェクト推進に当たっての留意点を明らかにする観点から、事前評価を実施した。

事前評価に当たっては、関連分野の専門家がアドバイザーとして参画し、本プロジェクトの実施機関からヒアリングを実施した。評価の観点は、①研究者コミュニティの合意、②計画の実施主体、③共同利用体制、④計画の妥当性、⑤緊急性、⑥戦略性、⑦社会や国民からの支持とし、観点別の評価を踏まえてここに総合的な評価結果を取りまとめた。

* 1 本作業部会においては、日本学術会議の「マスタープラン」が示す学術的意義の高い大型プロジェクトのうち、推進に当たっての優先度が高いと認められるものを選定し、「ロードマップ」として策定している。2017年（平成29年）7月には「ロードマップ2017」を取りまとめた。
(URL) http://www.mext.go.jp/a_menu/kyoten/1383666.htm

「高輝度大型ハドロン衝突型加速器（HL-LHC）による素粒子実験」 について

1. 計画の概要

(1) 概要

本計画は、欧州合同原子核研究機関（CERN）の加盟国 22 か国とオブザーバー国である日本、米国、ロシア等による国際共同プロジェクトとして、CERN が運営する大型ハドロン衝突型加速器（Large Hadron Collider, LHC）を高輝度化（High Luminosity-Large Hadron Collider, HL-LHC）し、陽子と陽子の衝突頻度（ルミノシティ）を大きく向上させることでデータ収集量を一桁増やすものである。これにより、現在の LHC よりも広い質量領域で新粒子の探索を行い、また、2012 年（平成 24 年）に CERN（ATLAS 実験・CMS 実験）で発見されたヒッグス粒子の性質の詳細な調査を行うことを目的とする。本計画で得られる成果は、暗黒物質や暗黒エネルギーに対する知見を与える可能性もあり、素粒子物理学のみならず宇宙物理学などの近隣学問分野の将来の方向性を決める上で重要なものとなる。また、本計画により、これまでに築き上げてきた我が国と欧米各国との信頼関係をより強固なものとし、研究者の国際社会における流動性を高めると同時に、我が国の国際社会における存在感をより向上させる。

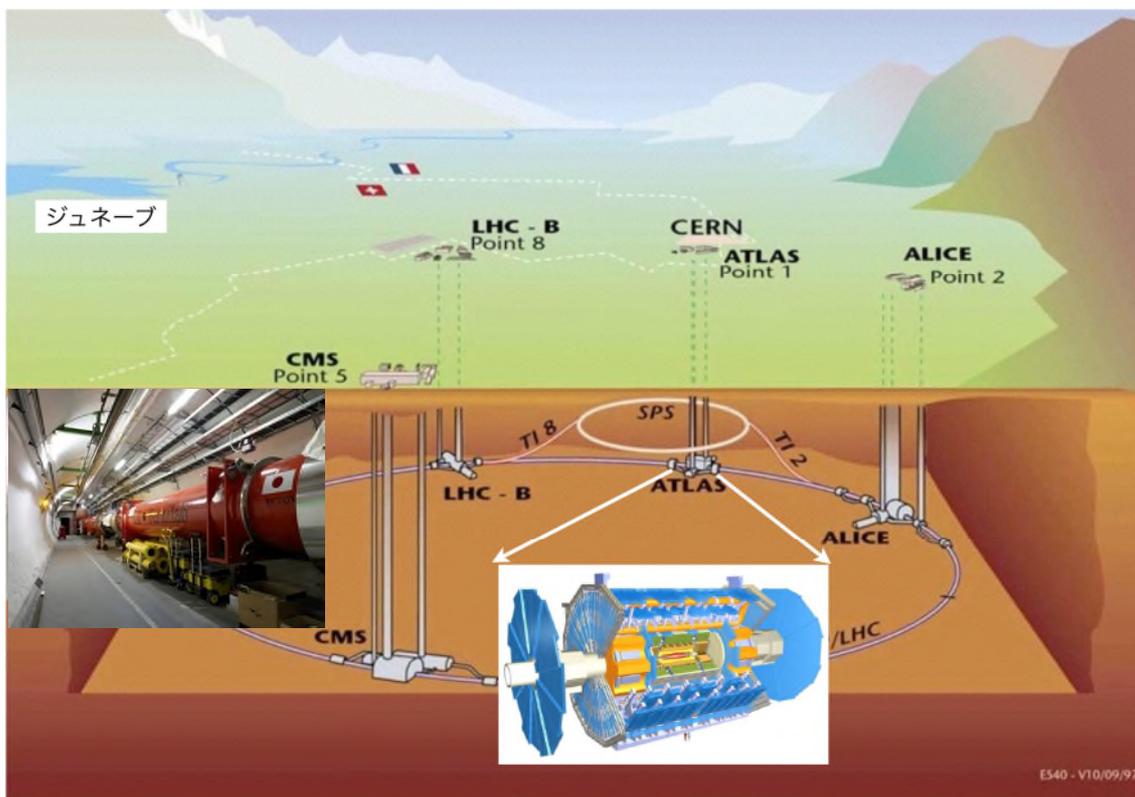


図1 LHC 加速器（リング）と ATLAS 検出器

(2) 内容

LHC 計画は、スイスとフランスの国境にまたがる場所に位置する CERN に建設された周長 27km の大型ハドロン衝突型加速器により、世界最高エネルギーで陽子と陽子を衝突させ、素粒子実験を行うものである。LHC 計画は 1994 年（平成 6 年）に CERN にて正式承認され、技術開発が始まり、その後 10 年近い建設期間を経て 2008 年（平成 20 年）に完成した。LHC 計画の目標は、標準模型で予言されながら唯一未発見であったヒッグス粒子の発見と、標準模型を超える物理法則の探求であり、2012 年（平成 24 年）に ATLAS 及び CMS 両実験グループがヒッグス粒子を発見したことから、現在は標準模型を超える物理法則の探索が大きな注目を浴びている。また、ヒッグス粒子の発見は 2013 年（平成 25 年）のノーベル物理学賞受賞に繋がり、世界中のマスコミに大きく取り上げられ、基礎科学の裾野を広げる役割を果たした。我が国は、1995 年（平成 7 年）に CERN 加盟国以外の国で最初に LHC 計画正式参加を決定し、加速器の整備、ATLAS 実験の推進、実験データ解析に必要な計算機資源に対して計画当初より多大な貢献をしてきた。

HL-LHC 計画は LHC 計画を発展させる計画であり、陽子と陽子の衝突頻度を上げてデータ収集量を一桁増やすことにより得られるビッグデータを利用し、未知の新粒子探索感度を大幅に向上させ、また 2012 年（平成 24 年）に発見したヒッグス粒子等をこれまでにない高い精度で測定し、標準模型を超える新たな物理現象の発見を目指すものである。HL-LHC 計画は CERN 加盟国だけでなく米国や中国においても素粒子物理学における最重要プロジェクトとして位置付けられており、2026 年の実験開始を目指し全世界的な協調のもと研究開発が進められている。日本グループは、これまでに築いてきた CERN 及び関係諸国との信頼関係に基づき、HL-LHC 計画の一翼を担うことが期待されている。

① 新粒子探索

HL-LHC 計画は、現在の LHC 計画での探索感度を格段に上げるために、ルミノシティを大きく向上させるものである。これにより、陽子中で大きな運動量を持つパートン同士の衝突数が増えるので、より重い粒子を探索できるようになる。重い粒子を生成する方法としては、加速器を大型化し、ビームエネルギーを増大させることにより、直接的に探索感度を向上させる方法があるが、コストが膨大になる。それに比べ、ルミノシティを向上させる方法は、低コストで実効的に衝突エネルギーの向上を図ることができるという利点を持つ。

標準模型を超える新しい物理の代表格とされている超対称性粒子理論をはじめ、複合粒子模型や未知のゲージ粒子の導入など、理論的に予言されている新粒子について、大幅に加速器及び検出器の探索感度を上げて探索する。また、宇宙全体の約 1/4 を占めると考えられている暗黒物質の直接生成とその発見も目指す。仮に新粒子（暗黒物質も含む）の兆候を掴んだ場合は、高統計を利用して直ちにその粒子の精査を行い、新たな物理法則の候補を絞り込む。これにより、将来的に素粒子物理学がどのような計画を実施していくべきかの指針を与えることが期待されている。

②ヒッグス研究

ヒッグス研究においては、結合定数、特に湯川結合定数の精密測定、第2世代粒子とヒッグス場との結合測定、自己結合定数測定等の測定を通して、存在理由が理論的には不明確なヒッグス場についての根源的な理解を深め、新しい物理の兆候を探る。ヒッグス場の存在理由が現在は不明瞭であるため、ヒッグス研究では実験結果が重要であり、測定精度の向上が欠かせない。そのためには、現在のLHC計画で達成しうるデータ収集量を大幅に増やす必要があり、この観点からもLHCを発展させるHL-LHC計画は重要である。

また、ヒッグス場の超高エネルギーでの振る舞いにより宇宙の安定性が決まるが、その振る舞いに強く関与するのがトップクォークである。トップクォーク研究を推進することでヒッグス場の振る舞いを間接的に検証し、宇宙の安定性という宇宙物理学との融合分野を発展させることも期待されている。

上記目的のため、HL-LHC計画では、加速器及びATLAS検出器の開発と製造を各国の分担と協力によって行う。国際共同プロジェクトである本計画において、我が国は以下の役割を担い、実験の性能向上を主導的に推進する。

i) 加速器

高輝度化に向けた加速器のアップグレードでは、陽子・陽子衝突点近傍でのビーム分離のために、高磁場の超伝導電磁石の新規導入が必要である。超伝導電磁石は我が国の得意分野であり、現在のLHC加速器建設の際にもビーム収束用の超伝導電磁石を我が国が米国と共同開発・建設した。歴史的経緯も踏まえ、超伝導電磁石の技術開発は医療応用など幅広い分野で大きな波及効果が期待できること、また、高磁場電磁石は将来のビームエネルギーを上げる計画(HE-LHCやFCC)への道を拓く重要な開発要素であり、これまでに築き上げてきた我が国と欧米各国との共同研究体制の強化を図る観点から、ビーム分離用超伝導電磁石の開発と製造を行う。加速器のアップグレードはCERNが主体となって行うが、CERN加盟国以外でも米国などとともに、我が国では大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構(以下「KEK」という。)がその役割を担う。

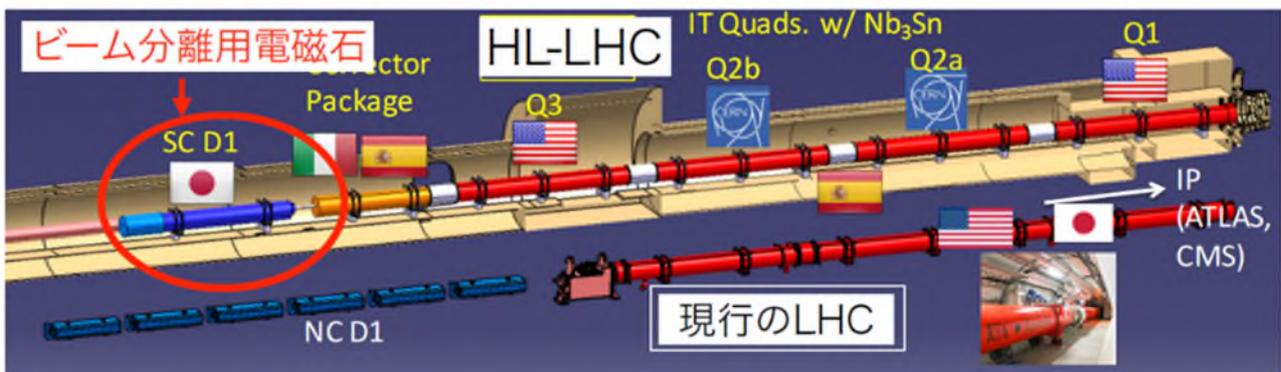


図2 加速器の日本担当予定部分

ii) ATLAS 検出器

高輝度化に伴い、検出器には微細化と放射線耐性の強化が要求される。本計画では、ATLAS 検出器のアップグレード計画として、荷電粒子飛跡測定用シリコン検出器、ミュオントリガー用検出器の電子回路の開発と製造などを我が国が主導する。どちらの検出器も現在の ATLAS 実験において我が国が製造・保守・運転を担当してきたものであり、高い技術力と経験を有することから、今回の検出器のアップグレードにおいても、我が国の貢献なしに予定どおりに完成させることは不可能である。検出器のアップグレードは、ATLAS 実験に参画する各国の研究機関による分担で行い、我が国からは KEK を含む 17 の研究機関が参画する。

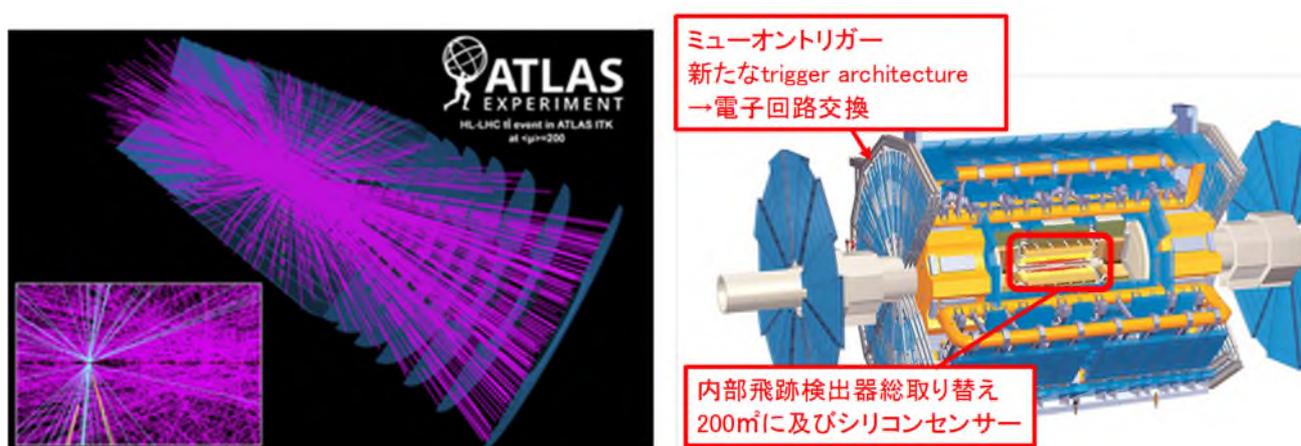


図 3 左) HL-LHC のシミュレーション。陽子・陽子衝突が毎秒 100 億回近く起こり、1 回の衝突当たり数万個の粒子が生成される。その中から新発見の信号を選び出す。

右) ATLAS 検出器の日本担当予定部分

日本グループは、これら製造した装置を CERN に搬入・設置し、HL-LHC 実験開始に大きく貢献する。実験開始後は、開発・製造した検出器群の運用・保守を日本グループが主体的に行い、検出器の較正・調整作業の後、得られたデータを逐次解析する。

(3) 実施体制

ATLAS 実験グループは 38 カ国 3,000 人からなる国際共同実験グループで、図 4 に示すように、実験代表者を中心として、実験に参画する研究者がサブグループを構築し、研究者の総意に基づいて実験を推進している。日本グループは、LHC 計画の当初から ATLAS 実験グループに参加しており、検出器の建設や運用、物理成果の創出を主導するなど運営と意思決定に重要な役割を果たしている。特に、各サブグループリーダーを日本人も務めるなど、実験グループの運営にも深く関与している。HL-LHC 計画における実施体制については、本体制が基本となる。

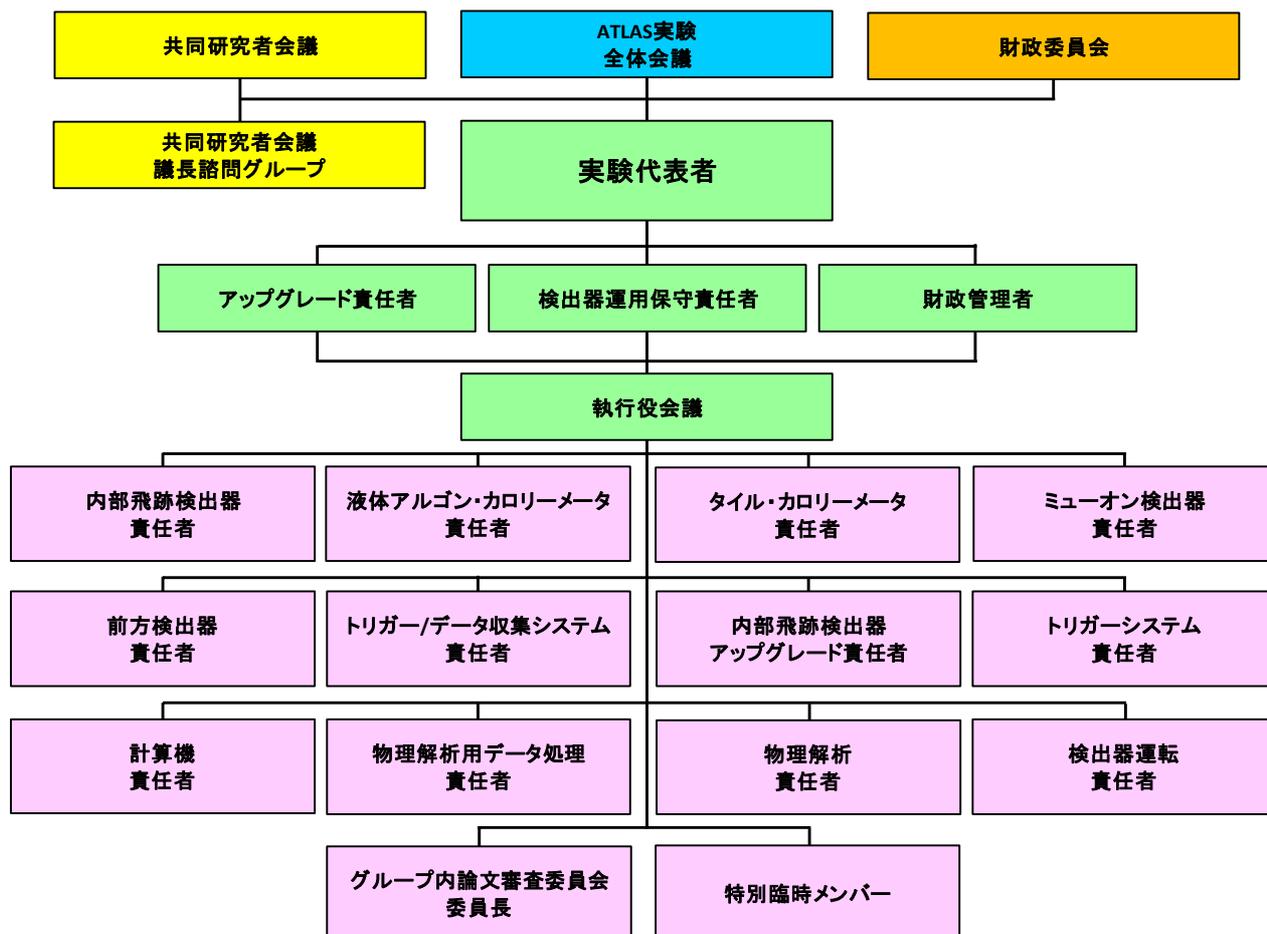


図 4 ATLAS 実験グループ組織図

ATLAS collaborationとして検出器のアップグレードを推進する。この中に約 150 名の日本人研究者が含まれ、ATLAS 日本グループを形成する。

加速器のアップグレードは CERN が主体となって実施する。CERN 加盟国は欧州を中心に 22 カ国であるが、HL-LHC 計画は加盟国及び日本、米国、ロシアなどのオブザーバー国からなる HL-LHC collaboration を結成し、国際共同プロジェクトとして推進する。

加速器のアップグレードでは日本担当分であるビーム分離用超伝導電磁石の開発・製造を、KEK が実施する。ATLAS 日本グループと緊密に連携し、KEK 超伝導低温工学センターが、ビーム分離用超伝導電磁石の開発と製造を担当する。

ATLAS 検出器のアップグレードは、ATLAS 実験に参加する世界中から集まった約 3,000 人の研究者と大学院生からなる国際共同実験グループで行う。ATLAS 実験遂行の国内組織は、KEK と東京大学を代表とする ATLAS 日本グループで、両機関を含む以下の 17 の大学・研究機関からなる。

ATLAS 日本グループ

KEK、筑波大学、東京大学、早稲田大学、東京工業大学、お茶の水女子大学、首都大学東京、信州大学、名古屋大学、京都大学、京都教育大学、大阪大学、神戸大学、岡山大学、広島工業大学、九州大学、長崎総合科学大学

本計画の遂行はこの組織が行い、取りまとめを KEK が行う。加速器の開発・製造及び検出器の開発・製造・運転のための予算についても、KEK を通して執行する。現在の LHC では、データ解析のための計算機システムを東京大学素粒子物理国際センターに設置しているが、HL-LHC を通じて継続して運用するため、その運営費・更新費は本計画には含まない。

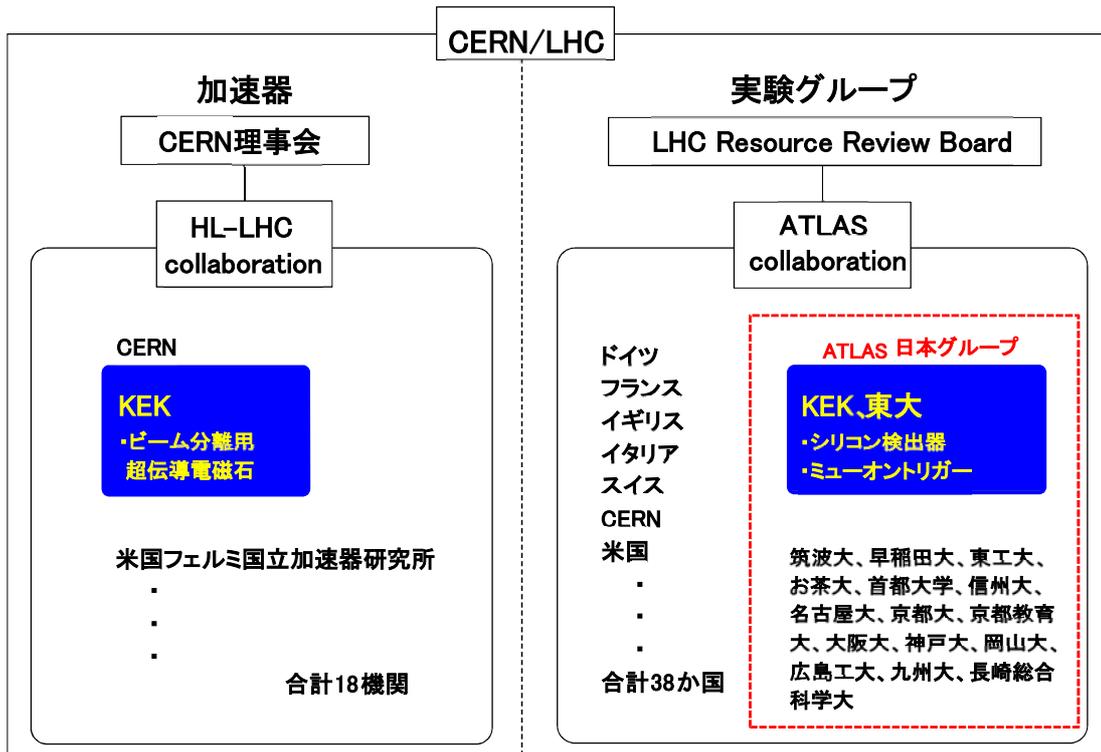


図 5 HL-LHC 実施体制図

(4) 国内における検討経緯

国内では、高エネルギー物理学研究者会議が設置した将来計画検討小委員会及び将来計画検討委員会において、我が国における高エネルギー物理学分野の将来計画を検討し、2012年（平成24年）と2017年（平成29年）にそれぞれ提言をまとめた^{*2}。その双方において、LHC及びそのアップグレードは国内の最優先計画の一つと位置付けられており、関係研究者コミュニティの中でも高い支持を得ている。また、本計画を推進する母体である ATLAS 日本グループは、国内の高エネルギー物理学研究グループの中で最大の規模であり、2016年（平成28年）の日本物理学会における講演数においても総数の1/4以上を占めている。この ATLAS 日本グループはその総意として、関係者コミュニティの支持を得つつ、過去10年以上、本計画のための開発を推進してきた。2013年（平成25年）には、KEKにおいて Eckhard Elsen 氏（当時 DESY；ドイツ電子シンクロトロン研究所所属）を議

長とした 10 人の外部有識者により、日本グループの HL-LHC 参画に対する国際レビューを実施し、本計画の内容が予算規模も含め適切であるとの評価を得ている*³。

2016 年（平成 28 年）に公表した KEK の将来計画の優先順位を決める Project Implementation Plan (PIP) *⁴では、ハイパーカミオカンデ計画のための大強度陽子加速器施設（J-PARC）の加速器のアップグレードが優先順位第 1 位、HL-LHC 計画が第 2 位に位置付けられた。その後、この優先順位については、ハイパーカミオカンデ計画と HL-LHC 計画のそれぞれの実施機関である KEK 及び東京大学宇宙線研究所並びに両プロジェクトのコミュニティ代表者による協議の場を設け、KEK で取りまとめた「KEK-PIP の優先順位そのものは変更しないものの、J-PARC に対する予算措置状況、HL-LHC に関する国際協力の進展等の状況に応じ、両プロジェクトの実現の順位は柔軟に取り扱うこと」として出席者全員の合意を得ている。

（5）国際的な動向

2013 年（平成 25 年）に公表された European Strategy for Particle Physics では、ヒッグス粒子発見を受け、エネルギーフロンティア実験にてヒッグス粒子の精査と未知粒子の探索から標準模型の適用限界を探ることが学術的に最も重要であるとし、LHC の性能を最大限発揮させるために、その発展計画である HL-LHC 計画を欧州の最優先プロジェクトと位置付けた。この戦略に基づき、日本グループは加速器・検出器双方の開発を進め、2016 年（平成 28 年）CERN にて HL-LHC 計画が正式承認された。現在は、加速器・検出器ともに技術開発から実機の製造段階に移行しつつある。

ATLAS 検出器アップグレードに関しては、これまで技術開発が我が国も含め世界規模で推進され、2018 年（平成 30 年）4 月に技術設計仕様書が完成した。現在は、CERN 加盟国の多くと米国エネルギー省（DOE）が検出器アップグレードに対して予算化を認めており、建設費総額の 71%が予算化されている。米国 DOE が設置する High Energy Physics Advisory Panel においても 2015 年（平成 27 年）の報告で、HL-LHC 計画を最優先プロジェクトの一つと位置付けている。

LHC はエネルギーフロンティア加速器として、現在はその ATLAS 実験と CMS 実験でのみ、未知重粒子の直接探索、ヒッグス粒子やトップクォークの研究が可能である。日本グループは、加速器と ATLAS 実験双方に対してこれまで大きな貢献をしてきた。国内の SuperKEKB や、ミューオンを使った実験、長基線ニュートリノ実験などは、フレーバーに関する物理研究が目的で、本計画とは素粒子物理学を発展させる上で相補的な関係にある。例えば、ヒッグス場の研究とフレーバーの研究が融合することで、物質を構成する素粒子の世代の謎に迫ることができる可能性がある。

* 2 「高エネルギー物理学将来計画検討小委員会 答申」（2012 年 2 月 高エネルギー物理学研究者会議）
URL: http://www.jahep.org/office/doc/201202_hecsubc_toushin.pdf

「高エネルギー物理学将来計画検討委員会 答申」（2017 年 9 月 高エネルギー物理学研究者会議）
URL: <http://www.jahep.org/files/20170906.cfp.pdf>

* 3 「LHC/ATLAS Upgrade Review」（2013 年 11 月 高エネルギー加速器研究機構国際レビュー）
URL: http://atlas.kek.jp/sub/Review/LHC_ATLAS_Report_final_amended.pdf

* 4 「KEK Project Implementation Plan (KEK-PIP)」（2016 年 6 月 高エネルギー加速器研究機構）
URL: <https://www.kek.jp/ja/About/OrganizationOverview/Assessment/Roadmap/KEK-PIP.pdf>

(6) 年次計画

2018年から2026年までは下記の工程で加速器及び検出器の技術開発、試験、製造を実施する予定である。これらの開発製造は主に我が国で行い、最終的に他国の担当する部品と結合して一体の測定器となることから、部所間の調整やビームを使った試験等を共同で行う必要があり、多くの研究者がCERNや米国フェルミ国立加速器研究所(FNAL)に滞在して研究を推進する。特に、2024年以降の設置・搬入時には、多くの研究者をCERNに派遣し、日本が担当する検出器群について、その設置、運用、調整作業で日本グループが中心となって進めることとなる。

HL-LHCの運転開始後(Run4)は、検出器の調整及び較正の作業から物理的な解析へ、その研究内容を速やかに移行させる。2027年以降は、年間 300fb^{-1} 程度のデータを収集しつつ、並行して物理解析を実施し、超対称性の発見や、ヒッグス粒子の精査による新物理の発見を目指すこととする。

区 分	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
	Run2	シャットダウン			Run3			シャットダウン(高輝度化)		Run4
加速器	実証機製造・試験			実機製造・試験						調整・運転開始
ビーム分離用超伝導電磁石	試作機製造・試験				輸送・現地組み立て試験		トンネル搬入・設置			
検出器	試作機開発・試験	実機製造工程確認		実機製造		試験・組み上げ作業	搬入・設置			運転
シリコンピクセル検出器	試作機開発・試験	実機製造工程確認		実機製造	構造体への組み込み		組み立て・試験	搬入・設置		運転
シリコンストリップ検出器										
ミュオントリガー		試作機開発・試験			実機製造・試験		設置・試験			運転

(7) 予算規模

建設予算総額 約 2,010 億円 (日本の分担：約 47 億円、3%程度、2019~2026 年度)

加速器 約 1,700 億円 CERN (加盟国) を中心に、HL-LHC collaboration 参加機関で分担。

うち、日本は 2019~2026 年度で計約 26 億円を分担。

検出器 約 310 億円 ATLAS 実験グループで分担。

うち、日本は計約 21 億円を分担。

※ 加速器、検出器いずれについても日本で担当部分を製造し、CERN に納める予定。

年間運用経費 約 250~820 億円/年

※ 加速器及び検出器の運用経費。(加速器の運用経費は CERN (加盟国) が負担。検出器の運用経費は ATLAS 実験に参画する全 38 か国が負担。)

うち、日本は ATLAS 実験参画の分担金等約 1.7 億円/年、ほか担当検出器の保守費等を負担。

2. 計画の評価

(1) 研究者コミュニティの合意

HL-LHC 計画において ATLAS 実験を推進する ATLAS 日本グループは、高エネルギー物理学の研究者グループ中最大規模の約 150 人を擁している。また、我が国の高エネルギー物理学研究者の集まりである高エネルギー物理学研究者会議の委員会では、同分野における我が国の将来計画が検討されており、2012 年（平成 24 年）及び 2017 年（平成 29 年）にまとめられた提言において、本計画が最優先計画の 1 つであるとされている。さらに、2016 年（平成 28 年）にまとめられた本計画の実施主体となる KEK の将来計画を示した Project Implementation Plan (KEK-PIP) においても高い優先度が確認されている。2013 年（平成 25 年）に KEK において実施された本計画への参画に係る国際レビューでは、予算規模も含めて妥当性が確認されている。以上のことから、研究者コミュニティによる本計画への合意は得られているものといえる。

(2) 計画の実施主体

HL-LHC 計画においては、加速器の高度化によるビームの増強と、それに耐えうる測定器及びデータ収集系の整備を国際協力によって進める計画であり、我が国としては HL-LHC 全体の実施体制の一部として参画し、KEK が代表機関となる。

KEK は、大学共同利用機関法人として関連分野コミュニティの意思を反映しつつ、最先端加速器システムの整備・運用を通じた基礎科学の推進を図っていることはもとより、現在の LHC 加速器建設に当たっても、国内コミュニティの取りまとめを担ってきた実績を有している。本計画においても加速器の高度化のうち、我が国が担当するビーム分離用超伝導電磁石の開発は、KEK が主体となって行う。また、検出器の高度化のうち、我が国が担当する ATLAS 検出器に係るシリコン飛跡測定器及びミュオントリガーの開発は、現在の ATLAS 検出器建設・運用の実績を活かし、国内 17 機関が ATLAS 日本グループとして行い、KEK がその取りまとめを行う。このように、本計画の実施主体は、これまで LHC における実験研究を着実に推進してきた実績を有しており、適切なものと考えられる。

なお、これまでも国際共同プロジェクトとして推進されている LHC 計画の ATLAS 実験において、我が国が実験グループの様々な階層において関与してきた実績に鑑みれば、HL-LHC 計画においても、引き続き我が国の関与が望まれる。

(3) 共同利用体制

ATLAS 検出器の高度化は、ATLAS 実験に参加する世界約 3,000 人の研究者や大学院生からなる国際共同実験グループによって行われる。また、HL-LHC における ATLAS 実験は、ATLAS 日本グループが国内 17 機関の総体として、我が国が担当する検出器群の運用、保守を担うとともに、検出器の較正・調整作業の上で取得データの逐次解析、公開を行い、それらを共同利用に供して行う。特に、実験研究によって得られたデータは、本計画に参画する全ての研究者が利用可能である。

このような体制は、CERN との間に締結する MOU に基づいて構築される体制であり、建設から運用まで我が国の関係機関間はもとより、参画する諸外国間での共同利用体制として、これまでの LHC における実績に鑑みても適切なものと考えられる。

(4) 計画の妥当性

LHC 計画の実績を踏まえ、引き続き CERN を中核とした強固な国際協力の下で実施体制を構築し、これまでに得られたヒッグス粒子発見等の研究成果をさらに発展させる物理的な目標を掲げる計画である。

国際協力体制として、我が国は、現在の LHC と ATLAS 実験の双方に対し、欧州を除けば最も早くに参画を決定し、大きな貢献を果たしてきたことから、引き続きの参画が求められている。

科学的意義として、ビーム粒子を正面衝突させて高いエネルギー領域を得るエネルギーフロンティアにおいては、LHC で展開される ATLAS 実験及び CMS 実験が、ヒッグス粒子を介した新現象の探索や新粒子の直接探索で最も高い可能性を持つものである。また、国内に対しては、J-PARC や SuperKEKB をはじめとする、強いビームを用いて精密測定を行う強度フロンティアと相補的な関係を構築しており、我が国における素粒子物理学の発展においても、それらの科学的意義を高める意味から、重要な役割を果たすことが期待される。

さらに、LHC の高度化を目的とする本計画に我が国が継続して参画することは、世界最先端のエネルギーフロンティアにおける実験研究の機会を我が国の若手研究者に提供し、将来を担う人材の育成に貢献するとともに、国内の強度フロンティアにおける研究と融合を果たすことで、我が国の将来の素粒子物理学分野の持続的な発展に貢献すると考えられる。

また、実験研究の基盤施設・設備が大型化する素粒子物理学分野において、本計画は国際共同研究として各国の得意とする技術や、人的・物的（金銭的）資源を集約して実現するものであり、我が国は、加速器の高度化に係るキーテクノロジーの提供や、社会的な波及効果も期待できる検出器の開発など、我が国が培い、国際的な競争力を有する技術やノウハウを十分に活かすことが可能である。

以上から、本計画は、国際協力、科学的意義、将来的な我が国の当該分野の競争力の発揮など、国際社会における我が国の役割・貢献を維持・強化するものとする。

(5) 緊急性

素粒子物理分野について、その標準理論を超える現象や粒子を探索することが、現在、世界的なテーマとなっている。LHC は標準理論の枠外にある粒子と相互作用する可能性のあるヒッグス粒子を大量に生成し、そのような現象を探索する場として、現段階において実質的に唯一の実験研究施設である。他方、現在の LHC において、ヒッグス粒子発見以降、新粒子発見には至っておらず、ビームの増強とそれに耐えうる検出器を速やかに整備することが、LHC に対する世界的な要請である。

HL-LHC 計画における我が国への国際的な要請は、これまでの実績を踏まえて早期に参加意思を表明することであり、本計画の中核である CERN から強く求められているところである。

建設に関して、HL-LHC 計画に係る加速器の高度化に向けては、最も重要な超伝導電磁石に係る構成要素の一つを担うことが期待されており、特に、ビームの分離に関して、我が国の超伝導技術がキーテクノロジーになっている。また、加速器の高度化に対応する ATLAS 検出器の高度化に向けては、飛躍的に増大するデータの解析に対応するべく、ヒッグス粒子の発見をはじめとする、現在の LHC による研究成果創出に貢献してきた、我が国の検出器を構成する設備群の高度化が期待されている。

以上の建設に関することを含め、本計画の円滑な推進に向けては、故障等の苦境を適時乗り越え、着実に LHC による実験研究を推進してきた、CERN の高いマネジメントが発揮されつつある中、主要各国からの貢献がほぼ固まりつつあること、並びに我が国に求められる役割が本計画の進捗に大きく左右することにも鑑みて高い緊急性がある。

これらのことから、我が国がこれまで培ってきた LHC における高い信頼度と発言力を維持すべく、時機を得た早急な対応が望まれるところである。

(6) 戦略性

HL-LHC 計画における加速器と測定器の高度化において、ビーム分離用超伝導電磁石は、我が国が世界をリードする超伝導技術に基づいて貢献するものであり、加速器の高度化全体において重要な要素を担うものである。また、さらには ATLAS 検出器のシリコン飛跡測定器及びミュオントリガーは、高統計データの取得と解析の実現に必須の要素であり、これらも我が国の豊富な経験・実績に基づいて貢献を果たすものである。

これらの貢献は、本計画において、我が国が国際協力体制を構築し、研究成果の創出に直結する役割を担うことを可能にするものである。また、我が国として世界最先端のエネルギーフロンティアにおける実験研究の機会を得るものであり、若手研究者を中心とする参画を通じて、将来を担う優秀な人材の育成・輩出はもとより、将来に向けて持続可能な我が国の素粒子物理学分野の発展をも可能とするものである。さらには、国際的な高い信頼度と発言力・存在感を確保することにもつながり、科学的な意義のみならず、国際社会における我が国と諸外国の連携強化にも寄与するものである。

以上のことから、本計画への参画は、我が国にとって様々な観点から戦略性を与えるものである。今後は、本計画における我が国の役割・貢献をより一層明確にすることが期待される。

(7) 社会や国民からの支持

2012 年（平成 24 年）の LHC におけるヒッグス粒子の発見は大きなニュースとなり、その成果に我が国が大きな貢献を果たしたことも広く報じられている。また、素粒子物理学分野における国内研究者のノーベル賞受賞等を背景に、超対称性による力の大一統や宇宙を構成する未知の物質への理解など、同分野の研究に対する国民の関心は高まってきているといえる。こうした中、我が国が引き続き本計画に参画し、国際的な評価につながる成

果の創出に参画することは、基礎科学全般に対する社会や国民からの更なる支持を得る上でも効果が期待され、科学を志し、次代を担う研究者の輩出にもつながることが期待されことから、本計画における我が国の取組・成果をより一層明確にすることが望まれる。

また、HL-LHC 計画を通じて発展が見込まれる加速器技術や検出器に使用される最先端技術は、がん治療用超伝導ガントリー磁石や医療用 PET（陽電子放出断層撮影）などへの波及効果が期待される。

3. まとめ

(1) 総合評価

HL-LHC 計画は、CERN が運用する LHC を高度化し、陽子・陽子衝突の頻度を上げることでデータ収集量を一桁増やすことにより、より広い質量領域において新粒子を探索するとともに、ヒッグス粒子が介する現象の詳細な測定等から、新物理の兆候を探るものである。

本計画の実施は、高エネルギー物理学コミュニティにおいて最大となる ATLAS 日本グループが担い、その取りまとめを KEK が行う。この実施体制は現 LHC の体制を引き継ぐものであり、これまでの実績に鑑みて本計画の遂行に支障はないと考えられる。

また、LHC の高度化に対して我が国は最も重要な構成要素の開発・整備を担っており、これを着実に遂行してこの国際共同プロジェクトに貢献することにより、国際的な協力体制を構築し、目標とする物理的成果の創出に直接関与するとともに、我が国が世界最先端の実験研究の機会を引き続き得ながら、国際社会における信頼度及び発言力を確保することにつながる。

他方、こうした貢献は、我が国が世界をリードする高い技術力なくしてはなしえない要素等、必要最小限度まで絞り込まれており、もし我が国の参画が遅れるような場合、計画全体への影響ばかりでなく、我が国への信頼性等を損なう恐れがあることに留意が必要である。

なお、本計画の遂行は、物質の起源や宇宙創成の謎に迫るものであり、さらには医療応用等への波及効果も期待され、社会や国民からの支持につながるものと考えられる。

以上を総合的に勘案し、本計画は積極的に進めるべきであり、早急に着手すべきであると評価する。

(2) 計画推進に当たっての留意点

HL-LHC 計画は国際共同プロジェクトとして推進されるものであり、LHC の高度化に際しては、我が国の責任によらざる予期せぬ建設工程の変更や所要経費の修正なども想定されるため、このような可能性に対して柔軟な運用体制を検討する必要がある。

また同時に、国際組織によって長期間の建設が進められる本計画において、我が国の若手研究者が、プロジェクトマネジメントやシステムズエンジニアリングを経験的に体験し、これらに合わせてリーダーシップを学ぶことで、キャリア形成ないし自己実現を成し遂げられるよう、国内の関連計画との間で積極的な人事交流を図るとともに、本計画を通じて得られる諸外国との連携や研究者のネットワークなどを活かし、従来に関連分野に限らない我が国の学術研究全体への貢献についての検討も必要である。

さらに、本計画に対する我が国の貢献が、国際社会において適切に認識され、今後も引き続き本計画の運用に深く関与することが望まれるとともに、我が国の分担が全体計画の中で重要な寄与となっていることが、社会や国民にもわかりやすいかたちで伝わり、その支持につながるよう、積極的な広報が必要である。

用語解説

○ ヒッグス粒子

素粒子の質量を生成する役割を果たしている粒子。ヒッグス粒子が作る「場」と素粒子が相互作用をすることによって、素粒子が質量を持つと考えられている。

○ 暗黒物質

宇宙の物質やエネルギーのうち、星など知られているものはわずか4%に過ぎず、残りは見えない物質やエネルギーであると考えられている。このうち光や他の物質とほとんど反応しないために観測できない物質を暗黒物質という。宇宙の全エネルギーの23%は暗黒物質が担っているとされる。

○ 暗黒エネルギー

138億年前に始まった宇宙膨張はいったん減速したが、70億年前からは加速していることが判明した。宇宙膨張を加速する正体不明のエネルギーにつけられた呼称。

○ 標準模型

素粒子とその反応を記述する理論体系で、2012年のヒッグス粒子発見により、その検証をほぼ終えた。現在、知られているほとんどの素粒子反応を説明することが可能であるが、暗黒物質や暗黒エネルギーなど標準模型では説明できない観測事実があるため、標準模型の枠外の物理法則があると信じられている。

○ パートン

電子やクォークなど、それ以上分割することができない素粒子の総称。例えば、陽子は3個のクォークからなっているのでパートンではない。

○ 超対称性

素粒子は、スピンと呼ばれる固有の性質を持つ。物質の根源となっているクォークや電子はすべてスピン1/2を持つ。力を媒介する素粒子はすべてスピン1を持つ。超対称性理論では、すべての粒子にスピンが1/2だけ違うパートナー粒子（＝超対称性粒子）の存在を予言する。超対称性粒子の一部は暗黒物質の候補となっている。また、超対称性が存在すると、電磁気力、弱い力、強い力の3つを統一的に記述、理解できると考えられている（力の大統一）。

○ 複合粒子

ヒッグス粒子が素粒子ではなく、複数の素粒子からなる複合粒子であるとする仮説。現在までの観測結果は測定精度の範囲内でヒッグス粒子が素粒子であることを示唆しているが、測定精度を上げると、複合粒子の性質を示す可能性がある。

○ ゲージ粒子

力を媒介する役目を担っている素粒子の総称。標準模型の枠内では、光子（電磁気力を媒介）、W 粒子と Z 粒子（弱い相互作用を媒介）、グルーオン（強い相互作用を媒介）の 4 種類が存在する。標準模型を超える新たな物理法則の仮説には、上記の 4 種類以外のゲージ粒子の存在を预言しているものがある。

○ 湯川結合定数

電子などのレプトンやクォークの質量を決めると考えられている、粒子とヒッグス場との反応の大きさ（結合）。

○ 第 2 世代粒子とヒッグス場との結合測定

物質の根源となっている電子やクォークの仲間は全部で 12 種類存在するが、その 12 種類の素粒子は、質量に従って 3 つの世代に分けられる。一番軽い素粒子のグループが第一世代、その次が第 2 世代、一番重いグループが第 3 世代。これまでに第 3 世代の粒子の湯川結合はニュートリノを除いて測定されているので、次なる目標は第 2 世代粒子の湯川結合を測定することである。

○ 自己結合定数

素粒子はヒッグス粒子が作る「場」と相互作用して質量を獲得する。ヒッグス粒子もヒッグス場と相互作用することで質量を持つ。ヒッグス粒子同士の相互作用のことをヒッグスの自己結合と呼ぶ。

○ トップクォーク

現在までに発見されている素粒子の中で最も重く、ヒッグス粒子より重い素粒子。

○ HE-LHC

High Energy LHC の略で、LHC トンネルを利用し、ビーム軌道を曲げるための双極電磁石の磁場を現在の 2 倍にすることで、ビームエネルギーを倍増させる計画。LHC の衝突エネルギーの設計値が 14TeV なのに対して、27 もしくは 28TeV を目指す。

○ FCC

Future Circular Collider（将来円形衝突型加速器）。周長 100km の円形加速器で LHC 実験の後継計画の一つ。HE-LHC 同様に、ビーム軌道を曲げるための双極電磁石の磁場を倍増できれば、衝突エネルギーは 100TeV になる。

○ ビーム分離用超伝導電磁石

陽子ビームの衝突地点近傍に設置される。ビームの軌道を微調整し、陽子・陽子衝突を発生させる。HL-LHC 用のものは現在の LHC で使われているものに比べて 20 倍以上の磁場エネルギーを保持する野心的なもので、我が国の得意技術である超伝導磁石を使う。

○ 荷電粒子飛跡測定用シリコン検出器

測定器の中で陽子・陽子衝突点に最も近い場所に設置し、荷電粒子の位置を測定する検出器であり、荷電粒子の飛跡や陽子・陽子衝突地点を測定する。検出器の中で最も高い位置分解能が要求され、かつ、最も放射線によるダメージが大きいので、最先端の技術が最も多く投入される。高い位置分解能達成のために検出器が微細化されるため、データ転送量も ATLAS 検出器全体の大部分を占める。

○ ミューオントリガー用検出器

素粒子の一つであるミュオンを検出するために、測定器の最外層に設置する検出器。ミュオンを検出したことを合図として ATLAS 検出器全体のデータ収集を開始させる役目を担い、測定器全体の時間基準となっている。

○ ハイパーカミオカンデ計画

東京大学宇宙線研究所の「スーパーカミオカンデ」を大型化し、総重量 26 万トンの水槽に約 5 万本の超高感度光検出器を備えた大型検出器を岐阜県飛騨市神岡町に建設する計画である。同時に、茨城県東海村の大強度陽子加速器施設 (J-PARC) を増強し、大型検出器と共同実験を行うことで素粒子の「大統一理論」に迫るニュートリノ研究を展開し、素粒子と宇宙の謎の解明に挑戦することも計画に含まれる。

○ 大強度陽子加速器施設 (J-PARC)

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究開発機構 (JAEA) が共同で施設を整備・運用している最先端研究施設。大強度陽子ビームを液体水銀、又は固体の標的に衝突させることによって発生する多彩な二次粒子 (中性子やミュオン、中間子、ニュートリノ等) を用いて、物質・生命科学、原子核・素粒子物理学等、基礎研究から新産業創出につながる応用研究に至るまで、幅広い分野での研究を推進している。

○ エネルギーフロンティア

粒子衝突型実験において衝突エネルギーを可能な限り高くして、人類が観測したことのない重い新粒子を探索することを「エネルギーフロンティア」という。一方、粒子の衝突頻度をあげることにより、稀な事象の観測や、高い統計量を利用して測定対象の測定精度を上げることを「強度フロンティア」という。

○ SuperKEKB

KEK つくばキャンパス内の地下トンネルに設置された周長約 3km の電子・陽電子衝突型円形加速器。小林・益川理論 (2008 年ノーベル物理学賞) の検証に貢献した KEKB 加速器からルミノシティを 40 倍向上させた。

○ ミューオンを使った実験

ミューオンは物質の根源となっている素粒子の仲間、第2世代に属して電荷を持つ。このミューオンを使って標準模型の枠外の現象を探索する実験が実施、計画されている。(スイスのMEG実験、J-PARCでのCOMET実験、g-2実験など)

○ 長基線ニュートリノ実験

J-PARCで作り出したニュートリノビームを、295km離れた岐阜県飛騨市神岡町にある東京大学宇宙線研究所のニュートリノ検出器「スーパーカミオカンデ」で検出する実験。

○ フレーバー

電子やクォークなど物質の根源となっている素粒子は、全部で12種類存在する。これら12種類の素粒子の違いをフレーバーと呼ぶ。ヒッグス粒子や力を媒介する粒子ではなく、これら12種類の素粒子を研究対象とすることをフレーバーの物理と呼ぶ。トップクォーク以外は比較的軽いので、重い未知粒子発見を目指すLHCのようなエネルギーフロンティア実験とは加速器や検出器の設計思想が異なる。

科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会

学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会 委員等名簿

学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会委員

(委員)

栗原和枝 東北大学未来科学技術共同研究センター教授

(臨時委員)

伊藤早苗 九州大学名誉教授、九州大学極限プラズマ研究連携センター顧問
中部大学客員教授

井本敬二 自然科学研究機構理事・副機構長、生理学研究所長

大島まり 東京大学大学院情報学環教授、東京大学生産技術研究所教授

川合知二 大阪大学産業科学研究所特任教授

小林良彰 慶應義塾大学法学部教授、慶應義塾大学社会科学データ・アーカイブセンター (SU) センター長

鈴木洋一郎 東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構特任教授

原田慶恵 大阪大学蛋白質研究所教授

※横山広美 東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構教授

(専門委員)

※田村裕和 東北大学大学院理学研究科教授

新野宏 東京大学大気海洋研究所客員教授

松岡彩子 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所准教授

観山正見 広島大学特任教授

安浦寛人 九州大学理事・副学長

アドバイザー

伊藤好孝 名古屋大学宇宙地球環境研究所教授

中野貴志 大阪大学核物理研究センター長

(敬称略、五十音順)

※ 田村委員、横山委員は、「高輝度大型ハドロン衝突型加速器 (HL-LHC) による素粒子実験」の利害関係者であるため、評価には参加していない。