

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

① 計画の概要

欧州合同原子核研究機関 (CERN) に建設された大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) を使った ATLAS および CMS 実験において、2012 年にヒッグス粒子が発見され、これが翌 2013 年のノーベル物理学賞に繋がった。LHC を 2024 年頃に高輝度化 (HL-LHC) し、ルミノシティ (衝突頻度) をあげることで、1 年間に収集するデータ量を 10 倍にする。これにより LHC よりも広い質量領域で新粒子の探索が可能になる。また、高統計での測定が可能になるので、LHC で発見したヒッグス粒子の性質などを詳細に調査する。

加速器の改造では、陽子・陽子衝突地点近傍でのビーム分離のために、高磁場の超伝導磁石の新規導入が必要である。超伝導電磁石は日本の得意分野であることから、このビーム分離用電磁石開発と製造を行う。

加速器の増強に伴い、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、および運用を主導していく。

加速器アップグレードは CERN が主体となって行うが、日本も高エネルギー加速器研究機構が中心となってその一端を担う。実験のアップグレードは、ATLAS 実験に参画する研究機関による分担で行い、日本からは高エネルギー加速器研究機構を含む 16 の研究機関が関与する。

加速器に関する日本グループの負担額は 27 億円程度、ATLAS 検出器改造に対しては 23 億円程度である。運転経費などの共通経費について、加速器部分については負担なし、ATLAS 検出器に関しては年間 2 億円程度である。

② 学術的な意義

現代の素粒子物理学には、力の統一、階層性問題、世代の謎、物質優勢宇宙、暗黒物質や暗黒エネルギーの存在、などの大きな謎が存在する。エネルギーフロンティア実験はこれらの謎に迫る有効な手段であり、LHC 実験のアップグレードは、ヒッグス粒子発見後の素粒子物理学を進展させ、上記の謎を解くためには不可欠である。

本計画によって得られる結果は、今後の素粒子物理学全体の進む方向を決める。他の学問分野に与えるインパクトも大きい。超対称性を発見することができれば、4次元時空とゲージ場という内部空間が結びつくことが実験的に示され、4次元時空の力学である重力と、その他の3つの力を統合する学問分野が創生される。同時に、暗黒物質の理解が進み、宇宙物理学の飛躍的な発展が期待できる。ヒッグス粒子やトップクォーク質量の詳細研究からヒッグス場の相転移の理解を深めることにより、宇宙論における初期宇宙研究を大きく前進させる。

一方で、加速器および検出器開発によるスピノフも様々な分野で期待できる。強磁場超伝導電磁石の技術開発は、超伝導技術の発展を促し、産業界との融和性が高い。他にも、HL-LHC では加速器トンネルと地上との間の超伝導送電を行う予定で、このための技術開発は、省エネルギー技術として幅広い分野で注目されているものである。また、シリコン検出器開発で取り組んでいる新型センサーは、初めての実用化を目指すもので、放射線耐性の高さと、廉価であることから、今後のスタンダードとなりうる。素粒子物理学のみならず、宇宙空間での使用など、幅広い分野での応用が期待される。

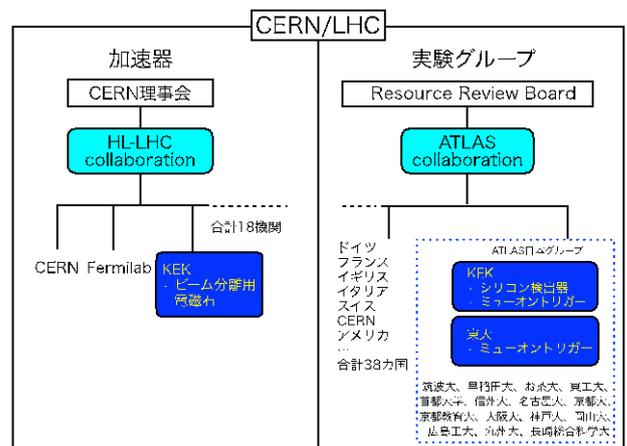
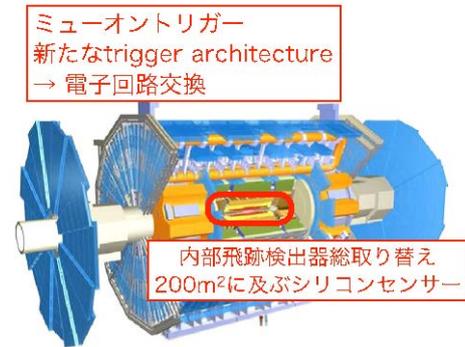
③ 実施機関と実施体制

LHC 加速器のアップグレードは CERN で実施する。CERN 加盟国は欧州を中心に 21 カ国であるが、HL-LHC は加盟国に加えて、日本、米国、ロシアなどの非加盟国を含む国際共同プロジェクトである。ATLAS 実験は、世界中から集まった約 3000 人の研究者と大学院生からなる国際共同実験である。

加速器への日本からの寄与は高エネルギー加速器研究機構が中心となる。以下で説明する ATLAS 日本グループとの緊密な連携のもと、高エネルギー加速器研究機構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 実験遂行の国内組織は、花垣和則 (高エネルギー加速器研究機構・教授) と浅井祥仁 (東京大学・教授) を代表とする、ATLAS 日本グループである。両機関を含む以下の 16 の研究機関からなる。

1. 高エネルギー加速器研究機構
2. 筑波大学
3. 東京大学
4. 早稲田大学
5. 東京工業大学
6. お茶の水女子大学
7. 首都大学東京
8. 信州大学
9. 名古屋大学
10. 京都大学



11. 京都教育大学、12. 大阪大学、13. 神戸大学、14. 広島工業大学、15. 九州大学、16. 長崎総合科学大学

本計画の遂行はこの組織が行い、取りまとめを高エネルギー加速器研究機構が行う。すなわち、測定器の開発・製造・運転のための予算は、高エネルギー加速器研究機構を通して執行する。現行 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 まで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。

④ 所要経費

日本の財政状況を鑑みて、CERN および ATLAS 実験グループと再三協議を重ね、マスタープラン 2017 で提案していた日本の分担内容を大幅に減らして、予算規模を半分程度に縮小した。その結果、日本の負担額は以下である。

加速器アップグレード：合計 27 億円

- ・ビーム分離用超伝導双極子電磁石の開発と製造 27 億円

ATLAS 検出器アップグレード：合計 23 億円

- ・シリコン荷電粒子飛跡検出器の開発と製造 14 億円
- ・ミュオントリガー回路開発と製造 9 億円

運営費

- ・加速器 負担なし
- ・ATLAS 検出器運用とアップグレードの共通経費 年 2 億円程度

加速器の全体経費は人件費や開発費等も含め約 1000 億円程度。ATLAS 検出器部分は、開発費や人件費を含まない建設費だけで約 320 億円である。

⑤ 進捗状況

本計画の建設費は総計 50 億円として 2019 年度概算要求を行った。その結果、大規模学術フロンティア促進事業として採択されたので、今回のマスタープランでは区分 II として申請した。ただし、2019 年度内示額は、要求額 7.61 億円の半分程度であったので、年次計画の微調整をしつつ、要求額に近い予算獲得を目指した努力を継続中である。

2019-2023 年

- ・ビーム分離用電磁石の製造と最終試験
- ・シリコンストリップセンサーの調達と試験
- ・シリコンピクセル検出器モジュールの製造試験と構造体への組み込み
- ・ミュオントリガー回路の開発と製造および試験

2024-2026 年

- ・ビーム分離用電磁石の搬入設置
- ・シリコン検出器とミュオントリガーの ATLAS への設置搬入と動作試験

2026-2027 年

- ・HL-LHC 運転開始
- ・加速器の調整
- ・検出器の調整、校正作業

2027 年以降

- ・年間 300fb⁻¹ 程度のデータを収集

2024 年以前の加速器および検出器要素の開発製造は、主に日本で行う。2024 年以降、特に 2024-25 年の設置搬入のタイミングでは、多くの研究者を CERN に派遣し、日本担当の検出器群については、その設置、運用、調整作業を日本グループが主導する。HL-LHC の運転開始後は、検出器の調整校正作業から物理解析へ、その研究内容を速やかに移行させ、物理データ解析においても日本グループの存在感を示す。

⑥ 社会的価値

2012 年のヒッグス粒子発見前後は、「ヒッグスフィーバー」と呼んでいいくらい、純粋基礎科学である素粒子物理学のことが大きくマスコミで取り上げられた。新聞やテレビ等で取り上げられる回数、一般啓蒙書の数、一般向け講演の入場者数などから判断すると、LHC が基礎科学の中では突出した注目度を持つことは間違いない。基礎研究が多くの人間の興味を惹き、その結果、科学や工学を目指す若者が現れる。これこそが、基礎科学の最も重要な社会的価値であり、この観点から、本計画は非常に高い社会的価値を有する。

ヒッグス粒子発見により素粒子物理学の教科書は修正が必要になった。本計画で得られる結果次第では、ヒッグス粒子発見以上の大幅な変更が教科書レベルで必要となる。本計画は、それくらいの学問的、知的価値を有する。

本計画における経済的・産業的価値については、「学術的意義」のところでも述べた通り、強磁場電磁石開発や、超伝導電送、そして最先端シリコン検出器開発のスピノフによる効果が大きく期待できる。

⑦ 本計画に関する連絡先

岡田 安弘 (大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構)