

J-PARC における高エネルギー実験の現状と今後

STATUS AND PROSPECTS OF THE HIGH ENERGY PHYSICS EXPERIMENTS AT J-PARC

松原綱之[#]

Tsunayuki Matsubara[#]

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

J-PARC is a unique, multi-purpose research facility that houses a MW-class high-intensity proton accelerator. It is jointly constructed and operated by the High Energy Accelerator Research Organization (KEK) and the Japan Atomic Energy Agency (JAEA), and conducts cutting-edge research in a wide range of fields, including particle physics, nuclear physics, material and life sciences, and nuclear engineering. It is expected that various achievements will continue to be made with the upgraded beam power that exceeds the original design. For the field of particle physics experiments, Japan is hosting and leading the world in experiments such as T2K/Hyper-Kamiokande, which aims to make precise measurements of neutrino oscillations; KOTO, which explores rare K meson decays; and COMET and Muon g-2/EDM, which perform rare muon decays and precise measurements. In this talk, an overview of the current status of these high-energy physics experiments at J-PARC is presented, and the physics objectives of each experiment, their current progress, and prospects are discussed.

1. はじめに

Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) は、メガワット級大強度陽子加速器を擁する世界的にもユニークな多目的研究施設である。日本原子力研究開発機構 (JAEA) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が共同で建設・運営している。リニアック、Rapid-Cycling Synchrotron (RCS)、主リングシンクロトロ (MR) の 3 つの加速器からなる加速器施設があり、近年、ビーム出力の大強度化によって当初設計を超えるビーム強度を達成した。これら加速器を用いて、素粒子物理学、原子核物理学、物質・生命科学、原子力工学など広範な分野で最先端の研究を展開している。

素粒子物理学分野では、陽子ビームから作り出された K 中間子・ニュートリノ・ミュオン・中性子などの大強度かつ高品質なビームを用いた国際的な高エネルギー実験が複数展開されている。本稿では、ニュートリノ実験施設、ハドロン実験施設、物質・生命科学実験施設の 3 つの実験施設で展開している高エネルギー実験の現状と今後について紹介する。

2. ニュートリノ実験施設

ニュートリノ実験施設 (Fig. 1) では、MR から速い取り出しモード (FX) で陽子を取り出し、超伝導電磁石で神岡方向に曲げ、グラファイト標的に当てて生成した π 中間子等を電磁ホーンで前方方向に収束、その崩壊からパルス状の大強度 ν 反 ν ビームを放射する。生成したビームは 8 つのバンチ構造を持ち、ピークエネルギーは約 0.6 GeV である。生成直後のニュートリノを前置と中間検出器で測定して、ニュートリノの方向、フラックス、安定性、反応断面積などの測定を行う。さらに 295 km 離れたスーパーカミオカンデ検出器で観測する。

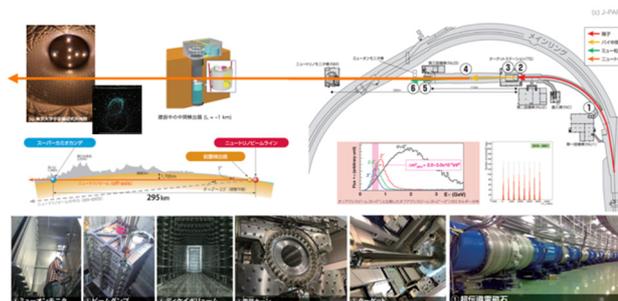


Figure 1: Beamline and experiments in the Neutrino Experimental Facility[1].

本施設を用いて Tokai-to-Kamioka (T2K) 実験が現在進行中である。T2K 実験は、電子型、ミュオン型、タウ型の 3 種類あるニュートリノの種類が飛行中に入れ替わる (存在確率が時間とともに振動する) 現象であるニュートリノ振動の性質を詳しく調べる実験である。ニュートリノ振動は、ニュートリノが質量を持ち、フレーバー固有状態と質量固有状態の量子的な重ね合わせで表されるときに起こる、音波におけるうなりのような現象である。T2K 実験は 2009 年度から測定を開始し、2013 年に世界で初めてミュオン型から電子型へのニュートリノ振動を発見した。2014 年からは反ニュートリノビームの生成を開始し、CP 対称性が破れていた場合に現れるニュートリノと反ニュートリノの振動確率の違いの測定を開始した。これまでに 90% の信頼度でニュートリノの CP 対称性の破れが示唆されており、もし見つければクォーク以外で初の CP 対称性の破れの発見となる。また、宇宙から反物質が消えた謎の解明につながる可能性もあると期待されている。

今後、2028 年にビーム強度の 1.3 MW 化の完了と現在建設中のハイパーカミオカンデの稼働開始を予定しており、MR のシャットダウン前に比べて約 20 倍早くデータ

[#] tsuna@post.kek.jp

2025年6月に139 ppb ($a_\mu = (1165920710 \pm 162) \times 10^{-12}$) という世界最高精度の測定結果を出して実験を完了した。ただし、理論予測が一貫しておらず、新物理かどうかの結論は出ていない。それに対し、J-PARC muon g-2 実験では、低エミッタンスミューオンビームを蓄積する世界初の手法で測定を行う。低エミッタンスミューオンビームの生成は、ミューオニウム負イオンを経由して μ^+ を冷やすという世界初のミューオン冷却とミューオン加速施設で実現される。2018年にミューオニウム負イオンの加速に成功し、2024年に世界初のミューオン冷却と加速の実証に成功した。装置を段階的に整備し、2030年にPhase I (460 ppb) の開始を目指している。また、将来的にPhase IIで100 ppbを目指す提案がある。ミューオン冷却と加速技術は、将来のg-2実験だけでなく、ミューオンコライダーやニュートリノファクトリーを実現するための技術として国際的にも注目度が高い[5]。

本施設のBL05では中性子基礎物理が行われている。その一例として、中性子寿命測定実験がある。自由中性子は寿命約15分で β 崩壊を起こすが、ビーム法(崩壊)とボトル法(消失)で異なる寿命の測定結果が得られており、中性子寿命問題と呼ばれている。実験上の誤りによるズレかどうかは未解決であり、もし両方が正しければ新物理の存在が示唆される。BL05では、従来の陽子の代わりに電子を検出する新しいビーム法による寿命測定を行なっている。冷中性子ビーム(20 meV)を40 cm程度の短いバンチに整形して1 m長のガス検出器に導入、電子線を検出する。パルスビームにより高S/N比での測定が可能となる。2016年から安定したデータ収集を開始、2025年には $\tau = 877.2^{+4.4}_{-4.0}$ 秒の結果を得た。今後ソレノイド磁場とマルチレイヤーTPCを用いてバックグラウンドを抑制することで、精度1秒での測定を目指している。BL05ではその他にも、未知の相互作用の探索実験への応用などを目指した新型中性子干渉計を用いた研究や、偏極中性子と偏極原子核を用いた時間反転対称性の破れ探索実験(NOPTREX)などの計画がある[6]。

本施設では、静止 μ 崩壊からのニュートリノを使用したステライルニュートリノの探索を目指すJSNS2-II実験も進行中である。ステライルニュートリノとは弱い相互作用すらしない仮説上のニュートリノであり、暗黒物質の候補の一つでもある。複数の実験でその存在が示唆されているものの決定的な証拠は見つかっておらず、見つければ新物理となる。先行実験はステライルニュートリノの存在を示唆した米国のLSND実験である。JSNS2-II実験では、高統計かつ高S/N比が得られるMLFの短パルス大強度ビームと、高検出効率かつ高いエネルギー分解能を持つGdシンチレータを用いることで、LSND実験より高い測定感度を持つ。2021-2024年に基線長24 mの検出器1基での物理ランを行い、現在データ解析が進行中である。基線長48 mの2基目の検出器も完成しており、今後2基での高精度測定を開始する予定である。結果が広く受け入れられていないLSND実験の完全な検証を、同じ検出原理で目指している。

5. J-PARC 全体の課題と将来への取り組み

近年の電気料金の高騰により運転時間が制約され、

各実験の運転時間の確保が困難になっている。この課題を解決する取り組みとして、加速器のグリーン化がある。例えば、ニュートリノビームラインに超伝導電磁石を用いることで、その消費電力を約2割に抑えた実現例がある。また、金属磁性体コアを開発してRFシステムに導入することで、その消費電力を半分に抑えた実現例もある。ビームパワー比で考えることも重要であり、MRの新電源によって、10%の電力増で2倍のビームパワーを達成した例もある。電力需要を抑える社会的な要請とプロジェクトの大型化を両立するために、引き続き加速器のグリーン化に取り組むことは分野にとって重要である。運転時間を確保するための別のアプローチとして、ストレッチャーリングの提案がある。これはMRからのビームをFXでニュートリノとストレージリングに取り出し、ストレージリングのビームをSXでハドロンに取り出すことで、従来は不可能であったニュートリノ実験施設とハドロン実験施設へのビーム供給の両立を可能とする案である。ストレージリングの建設には時間とコストを要し、シャットダウンを伴う場合には短期的なデメリットもあるが、長期的には魅力的なオプションである。

現在直面している課題に加えて、J-PARCでは年一回程度の内部ワークショップを開催して、将来計画について議論している[7-9]。物理、施設、技術の課題を踏まえて、次世代プロジェクトに移行するビジョンの確立と発展を目指している。

6. おわりに

J-PARCでは、世界に誇る大強度・高品質なビームを用いて、学術的にインパクトの大きい最先端の素粒子実験を複数展開している。国際的にも注目度が高く、世界中から多くの研究者が集い、実験への直接的な貢献や技術交流などの国際協力も進行中である。将来計画の議論も盛んに行っており、加速器と素粒子の研究者が力を合わせて、より一層と魅力的な成果を生み出す未来に期待したい。

参考文献

- [1] J-PARC website, <https://j-parc.jp/c/>
- [2] JAHEP 将来計画委員会勉強会オープンセッション「T2K/HK 実験」, <https://kds.kek.jp/event/55391/>
- [3] JAHEP 将来計画委員会勉強会オープンセッション「KOTO/KOTO-II 実験」, <https://kds.kek.jp/event/55395/>
- [4] JAHEP 将来計画委員会勉強会オープンセッション「COMET 実験」, <https://kds.kek.jp/event/55397/>
- [5] JAHEP 将来計画委員会勉強会オープンセッション「g-2 実験/Muon 加速」, <https://kds.kek.jp/event/55396/>
- [6] JAHEP 将来計画委員会勉強会オープンセッション「中性子実験」, <https://kds.kek.jp/event/55397/>
- [7] 第一回将来について考えよう (2023年3月31日, 4月10日), <https://kds.kek.jp/event/45982/>
- [8] 第二回将来について考えよう (2024年3月27日), <https://kds.kek.jp/event/50046/>
- [9] J-PARC シンポジウム 2024 (2024年10月14-18日), <https://j-parc.jp/symposium/j-parc2024>