

J-PARC ハドロン実験施設では、2026年4月に今年度最初のビーム利用運転が行われた。これまでのビーム強度を徐々に更新し、4月4日には101kWでおよそ1時間の連続運転を実施した。長年の目標であったMR加速器からの遅い取り出しでの100kW運転を達成できたことはJ-PARCとして一つの大きなマイルストーンに到達したことになる。

ハドロン実験施設の各ビームラインで様々な素粒子・原子核実験が行われている中、今回の報告では中性ビームライン (KL ビームライン) で KOTO 実験を推進しているハドロン KOTO サブグループの活動について取り上げる。

KOTO 実験

KOTO 実験は J-PARC ハドロン実験施設で行われている中性 K 中間子稀崩壊探索実験で、KEK・大阪大・山形大・防衛大 (日本)、シカゴ大 (米国)、台湾大・高雄師範大・彰化師範大 (台湾)、高麗大・全北大・釜山大 (韓国) が参加する国際共同実験である。探索の対象は中性 K 中間子が中性 π 中間子とニュートリノ・反ニュートリノ対に崩壊する過程 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ で、素粒子標準理論による崩壊分岐比は 3×10^{-11} という極めて稀な崩壊である。この過程は CP 対称性を直接破るプロセスで、理論的不定性が 2%程度と小さく、標準理論の予想と異なる実験結果が得られれば新しい物理効果の発見と言えるという魅力的なものであるが、実験的には困難を極める。始状態、終状態ともに中性粒子のみからなり、 π^0 の崩壊によって現れる 2 つの γ 線のみを信号として他には何もないことと限られた運動学制限とを合わせて、数多の背景事象の中からイベントを同定する必要がある。

図 1 に KOTO 検出器の全体図を示す。K 中間子は中性ビームラインによって導かれ、崩壊領域 (“Decay region”) まで飛来して π^0 を生成し、 π^0 は即座に崩壊して 2 つの γ 線を出す。電磁カロリメータ (“CSI”) によって γ 線のエネルギーと位置を測定し、周辺を覆う検出器は他に随伴する粒子が存在しないことを保証する。2 つの γ 線がビーム軸上で崩壊した π^0 から来ていると仮定して算出した崩壊点と π^0 の横方向運動量に基づきイベント同定を行う。

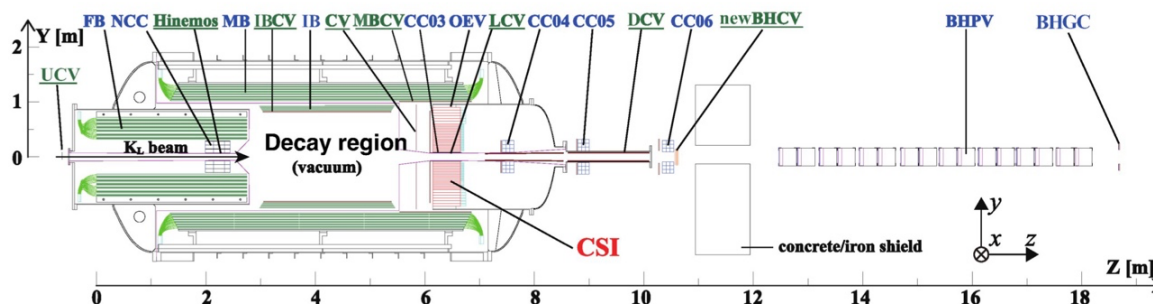


図 1 KOTO 検出器全体の側面断面図。主要部は円筒形の真空タンク内に設置されている。

KOTO 実験が公表している現在の最新探索結果は2021年に取得したデータの解析に基づくものである。図2は崩壊点位置と π^0 横方向運動量の相関図を示しており、各領域に赤字で記されているのは背景事象期待値で、信号領域内(図中の破線内)は0.252であった。黒点はイベント選別に残った事象で、信号領域内には観測されなかったことから、分岐比上限値 2.2×10^{-9} (90%信頼度)を与える結果となった[1]。これまでのKOTO実験による世界最高感度を更新するものである。

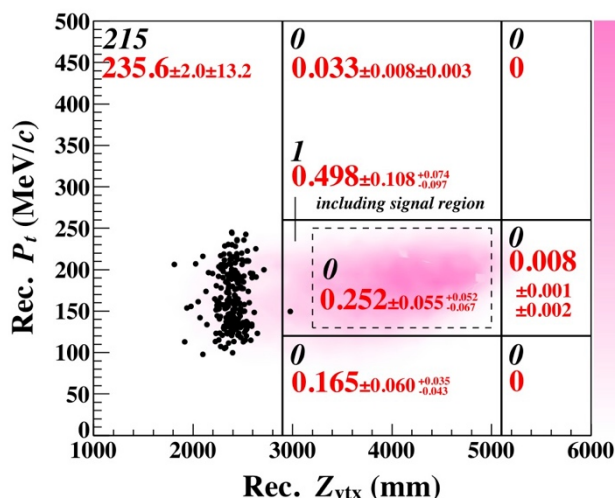


図2 2021年データ解析の最終プロット

KOTO 実験はその後もデータの蓄積を続け、さらなる感度で $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索を進めている。図3に現在までのデータ蓄積の様子を示す。上述の2021年ランの後、MR加速器の電源更新のための長期シャットダウンに合わせてビームラインや検出器、データ収集系(DAQ)を増強し、2024年からデータ収集を再開している。

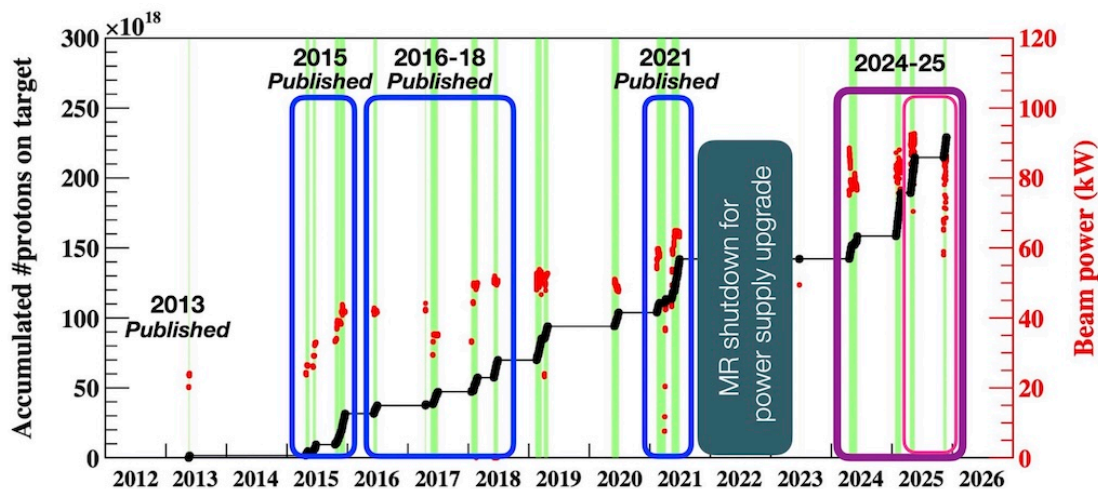


図3 KOTO 実験データ蓄積の履歴

DAQの増強としては、フロントエンドのA-D変換モジュール群は保持しつつ、実験当初から運用していたシステムを一新し、瞬時レートが高い大強度下でも99%以上の効率でイベントを取得できるような高速データ転送を実現している。加えて、データ圧縮や上位のイベント選別にGPUを利用し、より多くの背景事象コントロールデータや他の物理モードデータを同時に取得することを可能にした。ビームラインの増強としては、背景事象の一因となっている荷電K中間子の微量の混入(中性K中間子より5桁少ない)に対する策として、ビームラインに既存の荷電粒子掃き出し電磁石に加えて最下流にネオジム永久磁石を導入し、1桁以上の削減を確認している。これらの増強後に取得した2024年から2025年のデータ量は2021年の取得量

に対して約2倍に達した。データのクオリティチェックやさらなる背景事象削減のための深層学習解析の開発を経て、現在は背景事象数や感度の評価などの詳細な解析段階に入っている。

KOTO 実験では $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索の他に、 γ 線測定と余剰粒子の高効率検出という特徴を生かしたバイプロダクト物理解析も行なっている。最近では中性K中間子から一つの γ 線と未知の粒子（例えば暗黒光子）に崩壊する過程の探索結果を論文発表している[2]。

KOTO 実験は今後3～4年間のデータ蓄積により $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索感度 1×10^{-10} を超えて 10^{-11} 台に達することを目指し、標準理論を大きく上回る新物理効果の探索を進める。しかしながら、その先、標準理論で予測されるイベントを背景事象と分離できる統計量まで観測するには次世代実験を待つことになり、後述のKOTO II計画の検討につながっている。

付随する活動

KOTO 実験を行っている実験エリア (KL エリア) 内の各種インフラはハドロン KOTO サブグループによって整備されている。エリア内照明も同様で、2023年2月には従来の蛍光灯からLED照明への転換を実施している。この中の1基が通常の寿命より短い2年ほどで故障したことを契機に、高エネルギー中性子を含む放射線環境下での市販LED照明の寿命評価に取り組んでいる。KL エリアを中性子照射の場として活用し、サンプルLED照明を設置して故障の際の電流値や温度の振る舞いを調べ、メーカーに依頼して制御回路中の故障箇所を特定するなどの活動を行なっている。得られた結果について加速器学会でのポスター発表[3]などを行い、現在は放射線グループによる γ 線照射施設での評価実験に協力するなどの広がりを見せている。

KOTO II 計画

現在検討中のKOTO II計画は $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の世界初観測と25%精度での分岐比測定（標準理論分岐比の場合）を目指す実験である。KOTO 実験グループだけでなく、CERNでの荷電K中間子稀崩壊実験 (NA62) を実施してきた研究者たちも多数加わり、10カ国、75名が参加している。2023年にKaons@CERN、2024年にKaons@J-PARCと銘打ったワークショップを開いてK中間子物理の将来について理論・実験両面の議論を行い、協力してJ-PARCでの実験プロポーザル[4]を準備、2024年12月にJ-PARC PACに提出して2025年4月にStage-1採択を得た。2025年9月にはドイツ・マインツ大で行われた国際会議KAON2025のサテライトとしてKOTO IIワークショップ (図4) を開催し、実験全体や技術開発の議論を行った。



図4 KOTO IIワークショップ@マインツ大の様子

日欧の協力の一つとして、英国・ランカスター大とハドロン KOTO サブグループの若手スタッフを PI として英国・Royal Society の ISPF International Collaboration Awards 2024 を取得し、2025 年度から双方で KOTO II に従事するポスドクを雇用している。日本側の研究員は KOTO II だけでなく KOTO においてもランコーディネータや解析で中心的な役割を果たしている。

KOTO II の基本計画はハドロン実験施設の拡張計画と密接に関連しているが、実現可能な予算規模を考慮しながら、現在、プロジェクトの最適化を進めているところである。コラボレーションの体制構築が進み、ハドロン KOTO サブグループのメンバーは物理コーディネータの他、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 解析、ビームライン、真空などのワーキンググループの主宰としてプロジェクトの実現に向けた議論を進めている。また、 γ 線方向測定を可能にする新奇検出器の開発も手がけていて、総研大院生や韓国グループと共に進めており、また、韓国の学生や教員(分野外)の毎夏の研修の場にもなっている。

参考文献

- [1] Phys. Rev. Lett. 134, 081802, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.081802>
- [2] Phys. Rev. Lett. 136, 191802, <https://doi.org/10.1103/zyx1-y1bj>
- [3] Proc. of 22nd PASJ, pp. 759-764 (2025),
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2025/proceedings/PDF/FRP0/FRP020.pdf
- [4] <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.14827>