

J-PARCが拓くニュートリノ物理学

吉岡正和

高エネルギー加速器研究機構大強度陽子加速器計画推進部教授

高エネルギーの粒子を衝突させると、エネルギーが高いほど重い粒子を生成できる。このような実験によって標準理論を構成する粒子が次々に発見されてきた。建設中のJ-PARCはまだ謎の多い粒子、ニュートリノの詳細な観測に挑戦する。

加速器の飛躍的な進歩

宇宙が誕生して約137億年と言われる。その一角に人類が加速器をつくって100余年の歴史を重ねた。その一瞬ともいえる時間に、加速器は、新しいハドロン粒子をはじめとして基本粒子のクォークに至るさまざまな粒子を発見してきた。それは加速器性能の飛躍的な発展によってもたらされたものだ。

1897年にJ. J. トムソンが電子を発見したのは卓上のガラス真空管加速器であった。その後マイクロ波加速器が発明され、サイクロトロンやシンクロトロンが誕生した。それらはより高いエネルギーを目指して大型化され、さらに1970年代以降はビーム同士を衝突させる衝突型加速器が大きな役割を果たすようになった。現在、欧州合同原子核研究機関（CERN）では、周長27kmの陽子・陽子衝突加速器LHCを建設している。それに続き、全

長31kmの直線型電子・陽電子衝突加速器、国際リニアコライダー計画（ILC）の検討も国際協力で進んでいる。

わが国では、米国に伍して仁科芳雄が60インチサイクロトロンを建設したが、太平洋戦争で研究は頓挫した。戦後の空白期を耐えた西川哲治や北垣敏男らは、日本に加速器科学を再建し、高エネルギー物理学研究所（KEK、現在の高エネルギー加速器研究機構）に12GeV陽子シンクロトロン（PS）を建設した。その30年にわたる運転の最後に、つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験（K2K）を世界に先駆けて行ったことは特筆に値する。西川やその次の世代の研究者たちは、PSの経験を基にフォトンファクトリー、TRISTAN、KEKBを次々と建設し、日本は世界における加速器のフロントランナーとなった。

KEKBのルミノシティ（単位時間あたりの素粒子反応数に比例する量）はそれまでの

加速器の数百倍である。性能の2桁の飛躍は、加速器理論とハードウェア両面で研究者の創意が生かされ、メーカーの機器製造能力の信頼性が総合されて実現できたものだ。

ビーム強度100倍を目指す

われわれは今、茨城県東海村にKEK/JAEA（日本原子力研究開発機構）共同プロジェクトとして大強度陽子シンクロトロンJ-PARCの建設を進めている（図1、3）。入射リニアックと2段階のシンクロトロンからなるカスケード式で、PSの後継機として、その100倍以上のビーム強度を目指している。核破碎中性子による物質・生命科学、K中間子などの二次粒子を使ったハドロン物理、そして新たな長基線ニュートリノ振動実験T2Kなど、多彩な研究が行われる。

陽子ビーム強度を飛躍的に上げるためには、ビーム中の陽子が互いに電気力で反発しあうことによる空間電荷効果の理解と克服、そして同時にビームの入射・取り出し技術と高放射化環境における加速器機器の保守技術の開発が重要である。PSはビーム出力5キロワットであった。そこでのビームロスが出力の10%近い数百ワットに達していた。ロスしたビームは加速器機器を放射化^{*1}する。その放射化を局在化し、かつビーム入射・取り出しの効率を改善しつつ、機器の信頼性や保守技術の向上を図ろうとしている。これらのチャレンジは、シンクロトロンの基幹技術である電磁石、高周波加速、超高真空、ビーム診断およびそれらを束ねる高速制御などの全システムが安



図2 T2K実験。J-PARCで生成した人工ニュートリノをスーパーカミオカンデに向けて発射し、ニュートリノ振動を詳しく調べる。

定に動作してこそ実行できる。難しい加速器であっても各装置が安定に働き、パラメーターを着実に診断でき、そのうえでそれらを操作できれば、調整の成果は積み重なり、性能を上げることができる。その好例がKEKBである。PSは5年間で 1×10^{20} 個の陽子を標的に送り込んだ。J-PARCはそれを100倍規模にすることを目的としている。

T2K実験の目的と課題

T2KはK2Kの次世代実験である（図2）。その特徴の1つはニュートリノ・ビーム強度が100倍であること、もう1つは陽子ビーム入射方向に対して、 $2 \sim 3^\circ$ のOff-Axis 方向のニュートリノを選択的に使うことだ。この方向のニュートリノはそのエネルギーが振動に対する感度が最も高く、かつエネルギーの広がりが狭く、バックグラウンドを減らすことができる。K2K実験は世界初の長基線ニュートリノ振動実験であり、スーパーカミオカンデ（SK）の発見した大気ニュートリノ異常を人工ニュートリノを用いてニュートリノ振動による現象と確認した。ここでは $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ の“消失を観測”することにより $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ モードの振動を確認した。これを第一段階の発見だとすれば、T2Kはそれをさらに一歩進め、 ν_e の“出現を観測”することにより $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ モードを新たに観測する。もちろん、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ の振動パラメーターのさらなる精密測定も行う。

次にハードウェアの課題をあげよう。J-PARC加速器の配置は東海村敷地のさまざまな条件から決められた。一方、SKのある神岡の方向は動かさない。ど

うしてもビームをシンクロトロンの内側に曲げざるをえない。短い距離で強く曲げるため、世界初となる偏向と収束作用を併せ持った超伝導電磁石を採用し、研究者の創意とメーカーの技術力を総合して電磁石の量産を行っている。

全ビームを受け取るターゲット部（加速された陽子を衝突させてニュートリノを発生させる装置）近傍も課題である。ここは加速器と比較にならないほど強く放射化される。過酷な条件下で安定に働く機器の開発や保守技術が重要であり、リモート操作が必須となる。K2K実験では、ターゲット部の収束用電磁石の破損があった。この電磁石に流す250キロアンペアものパルス電流は強い電磁応力を生み、電流接続部に疲労破断をもたらしたのだ。T2Kではさらに高い320キロアンペアが必要である。担当者たちはK2Kの経験を生かしながら、慎重に開発を進めている。

将来へ

大きな挑戦を伴う加速器で当初見込んだ物理成果を生み出すまでには忍耐を要する。スイッチ投入してすぐに性能が出るものではない。加速器パラメーターを1つ1つ理解し、課題を解決しながら着実に性能を上げていきたい。KEKBは設計性能に達するのに4年近く要した。J-PARCではどうか。現在、私たちはその作業の初期条件を満たすべく、また忍耐のあと得られるであろう達成感を夢見ながら働いている。この加速器とT2K実験のチャレンジ最前線に若人が参加し、第二世代のニュートリノ振動実験を経験し、鍛え



図3 J-PARCの全景

られることによって次のステップ、第三世代の実験を考え、その実現に向けて進むことができるのではないだろうか。

- *1 放射化
安定軌道から外れた陽子ビームが電磁石などの機器に衝突すると、そこで原子核反応を起こし、放射性同位元素を作る。そのため機器はビームを停止しても強い放射線を出すようになる。
- *2 ν_μ
 μ ニュートリノ。物質を構成する粒子は3つのグループ（世代）に分けられ、ニュートリノには電子ニュートリノ（ ν_e 、第一世代）、 μ ニュートリノ（第二世代）、 τ ニュートリノ（ ν_τ 、第三世代）がある。別の世代のニュートリノに変化することを「ニュートリノ振動」といい、3世代が互いにどのように変化するのかが解明されていない。



吉岡正和（よしかお・まさかず）素粒子実験で学位取得後、実験物理の成果は加速器の性能次第ということがわかり、加速器専門となる。この30年間で、PETRA（DESY）、TRISTAN、KEKB、リニアコライダー開発と電子・陽電子衝突加速器一筋で来たが、2004年からJ-PARC担当となり、毎日つくばから東海村へ通っている。

図1 PSの100倍以上のビーム強度を目指すJ-PARCの50GeVシンクロトロン。2008年5月に加速器のビーム試験開始、2009年4月にニュートリノラインのコミッション開始予定である。

