始動した J-PARC パルス中性子施設の現状と今後

池田 裕二郎

(日本原子力研究開発機構 J-PARC センター 物質・生命科学ディビジョン)

Current Status and Future of the Initiated J-PARC Pulsed Neutron Facility

Yujiro Ikeda

Materials and Life Science Division, J-PARC Center, JAEA

ABSTRACT

Operation of the J-PARC pulsed neutron facility has started in 2008, and its performance has been demonstrated as expected. The facility is now operating at 100 kW beam power, and has succeeded a 300 kW test operation. According to the up-to-dated schedule, the beam power will reach to 1MW within 5-6 years after overcoming various challenges in accelerator and neutron source technologies.

Keywords: *J-PARC, MLF, pulsed neutron, accelerator, upgrade, schedule*

1. はじめに

J-PARC が 20kW のパワーで供用運転を始めてちょうど1年が経った。その間、J-PARC 施設運営では加速器、中性子源、実験装置、全てにおいてビームを受け入れる最初の喜び、初めて遭遇する新鮮な驚きと苦しみの連続であった。とは言え、内外の多くの利用者を迎えることができ、おおむね順調な滑り出しであった。平成21年も押し詰まった今、この原稿を執筆中に既に120kW パワーとなり、比較的安定に運転されている。12月7日には5分間を断続的に5回、さらに12月10日に1時間の短時間であるが、確実に300kW パワー運転を実証したとの報が続々と届いている。足かけ10年の歳月で建設した施設の性能を確かめることができたことは、これまで J-PARC 施設の構想段階から携わってきた一人として感慨深い。当面は約100kW で確実な運転を続けることになる。初期目標である1MWの10分の1とはいえ、パルス中性子施設として世界水準を越える高質なビームが利用に供されている。J-PARC の始動が本特集で熱気を持って報告されたように、既にサイエンスの成果が得られつつあることは、多くの期待の実現と、J-PARC が掲げたミッションである大きな成果創出に結びつく施設のポテンシャルの高さを十分に予感させる状況である。今後プロジェクトが目指す1MW パワーの達成には、さらにいくつかの技術課題を一つ一つ克服し、また迅速かつ慎重な努力の積み重ねが必要であり、道のりは生易しいものではないことは確かである。しかしながら、なんと楽しくしやり甲斐のあることであろうか。

J-PARC 加速器パワーと利用環境は利用者の最大関心事であろう。本特集の総括として本稿では、

最近 J-PARC センターが策定した今後5~6年間の加速器のパワー増強スケジュールを紹介しよう。

このスケジュールは、平成17年に設定した初期のパワー増強計画を一度総括し、この1年の加速器ビーム運転経験及び試験・調整で得た知見を踏まえ、かつ、予算化されたリニアックエネルギー回復スケジュールを考慮し、より現実的な今後のパワーアップシナリオとしてまとめたものである。これは、多くの期待を持って J-PARC 利用をサイエンス研究展開の中心に置いてきた利用研究者の研究計画、また今後利用展開を目指す企業などの産業界利用促進におけるマイルストーンの策定における目安として使われることを期待している。特に中性子源施設としては、米国 SNS や英国 ISIS など外国施設との熾烈な競争にあることは重要な観点として考慮した。

2. 加速器パワー増強のスケジュール

Fig.1 は、J-PARC センターが10月に取りまとめた今後5~6年の1MWに到るパワー増強計画曲線である。2つの曲線のうち平成26年度に1MWに到達している曲線が物質・生命科学実験施設(MLF)へ入射される3GeV シンクロトロン(RCS)からの出力である。もう一方の曲線は50GeV シンクロトロン(MR)の出力で、平成26年度に0.75MWに達する。両者は同時に成立することを前提として提示している。本稿では今後の中性子利用者のサイエンスを計画するうえでの基本情報である RCS 出力予測について、その考え方を中心に紹介する。Fig.1 では平成23年に入ってからしばらくの間MRの出力がRCSよりも高くなることが示されている。これは、MR のビームを

使うニュートリノ研究は、現実に欧米各国との熾烈な先陣争いとなっていることを踏まえ、先にゴールにたどり着くために少しでも早くニュートリノの積算を高めるため、加速器ビームロスの制約下で許される範囲内の運転を前提としたシナリオである。これは解き明かす物理の価値と同時に、物理を誰が解き明かすかがそのサイエンスプロジェクト成功の成否を握ることからの要請に基づく。是非とも J-PARC が栄光を勝ち取るためのシナリオである。

Fig.1 Power-up schedule of J-PARC accelerators.

さて、RCS の出力上昇曲線について少し詳細に説明しておきたい。大きく分けて今から平成 23 年度までのリニアックエネルギー回復の機器整備期間と、その後のビームロスを抑えながらの 1MW への出力上昇期間との 2 つの段階に分けられる。最初の期間では、リニアックのエネルギーを現在の 181MeV から 1MW 対応の初期設計値 400MeV とし、そのために空洞、電源等の必要機器の製作と整備を行う。平成 20 年度から予算化され、平成 21 年度中にほぼ発注作業が終了する予定である。既に 120kW 定常運転が達成されているが、400MeV 入射機器の整備が終わる平成 24 年度初めまでは、181MeV 入射で可能な限り出力を上げる努力を継続して行く。これまでのパラメータ検討によると、RCS におけるパワーの上限は、空間電荷効果の影響によるビームロスの制限からおおよそ 300kW と評価されているため、供用運転はその範囲での出力となる。100kW 以上の運転で必須な 6 極電磁石電源は平成 22 年夏に整備され、順次パワーを上昇させる計画である。

平成 24 年度からリニアック 400MeV 入射での試験を開始する。400MeV 対応の空洞、電源と同時に、イオン源、RFQ などを 1MW パワー対応機器に入れ替える。約 1 年間 400MeV 入射で安定な運転実績を積んだ後、平成 25 年度から 1MW 出力上昇期間に入る。そこから先平成 26 年度末までは、実際のビーム運転を行いながらいかにビームロスを抑えるか、パラメータの最適化、個々の要素の改善を施しながらの 1MW 出力への挑戦となる。

3. ビーム運転経験と加速器ビームパラメータ

この 1 年、平成 20 年 5 月の RCS の初ビーム受け入れ以来 1 年半の加速器調整試験、運転経験とその時々状態を見ながら、MLF、ニュートリノなどのユーザが一緒になって、今後のパワー増強の段階の踏み方を検討してきた。この間リニアックの初段加速器である RFQ の異常な放電による不調により、供用運転の最大パワーは 20kW 以下に抑えざるを得なく、また出力の不安定性では利用者に多大な迷惑をかけることとなった。J-PARC は供用に対する責任を最も重大と考え、RFQ に起因する加速器の不調の克服が最優先事項として多くの時間とエネルギーを投入した。バックアップ機を並行して整備するアクションとともに、現行機の真空度の大幅な改善、電圧印加モードの変更、モニター系の強化など、できる限りの回復措置により、幸いにしてほぼ当初の RFQ としての性能を回復した。今後は、100kW を超えて一歩一歩未踏の領域に入る。パワー増強には、今後待ち受けるであろう予測を超える事象への柔軟かつ迅速な対応力が問われる。シナリオとして Table 1 に示すパラメータをマイルストーンとして考えている。

Table 1 Lineac parameters and RCS power.

リニアック エネルギー [MeV]	181	181	181	400
イオン源 ピーク電流 [mA]	5	15	30	50
RFQ パルス幅 [μ s]	100	200	300	600
RCS パワー [kW]	20	100	300	1,000

既にこのパラメータで 100kW を達成している。12 月の 300kW 試験運転時のパラメータは Table 1 とは異なり、イオン源ピーク電流を 15mA、RFQ パルス幅を約 600 μ s として達成した。しかしながら、今後のパワーアップシナリオでは上記パラメータでの運転も試験してより安定な状態を模索することになる。

いずれにしても、今後はビームロスを抑制しながらの課題克服が基本となる。供用とのトレードオフとなる 400MeV リニアック機器の据付け時期は平成 24 年度の重要な検討事項である。また、現在試験実証を進めている MLF と MR へのパルス振り分け技術の質の向上は、Fig.1 で示した MLF と MR とが共存する今後のパワー増強シナリオ成立の必須条件となる。

4. 確実にパワーを受けるターゲットの課題

高出力短パルス陽子の入射で水銀ターゲット中に生ずる圧力波に起因するに水銀ターゲット容器のピッチング損傷に対して、これまでは 300kW 程度の陽子パルスでは、その入射ビームプロファイルが平坦に抑えられるならば、損傷による破損

確率は極めて低く抑制されるものと評価されてきた。従って、現状の第1号機ターゲット容器は、Fig.1 に示したパワー増強曲線に従う限り、平成24年度末までは、積算陽子ビームで問題となる材料損傷を合わせて考えても問題はないであろうと想定していた。しかしながら、実際の入射ビームプロファイルはガウス分布に近く、ターゲット容器中央部のエネルギー密度が想定より高いためにピッチング損傷が集中する。300kW 出力の状況は、損傷に対して十分に注意を払うレベルであると認識している。これは、先行している米国 SNS で寿命により交換した1号機の容器先端部の観測からも示唆されている。SNS の陽子ビームのピーク電流密度は、周波数の差及び陽子ビームプロファイルの差から J-PARC と比べてかなり低く抑えられ、現状の見積もりでは SNS の 1MW が J-PARC の 300kW に相当するとして良さそうである。このことから、加速器パワーが 300kW に達するまでに、水銀ターゲットの圧力波問題を解決した新型ターゲットの開発を前倒しで進めていく予定である。平成23年度までは、ターゲット容器のリスクを考慮して 200kW から 250kW 程度の運転が妥当な予測であるが、Fig.1 の曲線におおよそ沿うことができると考えている。

5. 300kW 運転の実証

平成21年12月10日(木)、午前10時45分から11時45分まで、加速器大強度試験として、RCS から MLF ターゲットまでの 300kW 連続1時間運転を達成した。Fig.2 は、その時のビーム出力表示である。このようなビーム出力状況は、以下のホームページで情報提供されている。

<http://j-parc.jp/MatLife/en/operation/>

試験運転は、現時点の MLF 中性子発生ターゲットの使用許可値が 250kW 相当の粒子数であるために、正時をはさみ2時間平均とし1時間積算量はその許可値以下を厳守した。300kW 試験は加速器パラメータの妥当性と加速器としての仕上がりを確認することを主眼とした。今後しばらくの供用運転では、これまで同様 100kW 相当を継続する予定である。大強度加速器の最重要課題はビームロス抑制であり、今後多くの課題を解決していくためには、大方針として加速器構成機器の過剰な放射化を絶対に避けなければいけないからである。

6. おわりに

10 年前に構想した野心的な J-PARC 中性子源概念を現実の性能として実感したことが、J-PARC 始動にあたっての総括そのものである。

時々刻々と状況は変化し、性能が回復し、さらに期待より早くよい運転状況が日々達成されている現状では、あまり悲観的な見通しを持つ理由はないが、1MW という高い目標に到達する技術挑戦の道程を冷静に考えれば、そう楽観することは許されない。まだ、我々は何も経験していないのであるから。

10 年前から構想し、熟慮を重ね、考えて、思い描いた施設が動き出した。作ることは常に過程、通過点にしか過ぎない。最終目標はサイエンスの成果、多くの優れた研究者に等しく与えられた機会から生まれる最高の成果であるが、その支えは、最高の実験能力を備えた施設の性能である。プロジェクトに係わった者として、施設の性能を実際のデータで確認する作業で喜びの毎日である。作ったものが挑戦的、野心的であればあるほど、思いの正しさが性能で実証されるのだ。

8 年前に警鐘をならし、水銀ターゲット健全性を確保すべく取り組んできたピッチング損傷対応について、R&D の方向性の正しさを確認できたことは特筆しておきたい。独自の概念を散りばめた水素モデレータシステムがその性能を示したことは施設建設チームの誇りである。ここでは、High Power 化と高分解能化における、施設の負荷とのトレードオフがあった。さらに、陽子ビーム輸送系であればビームロスフリーの輸送系の実証、中性子実験装置では、既存概念を打ち破る効率と分解能に加え、測定技術革新によるパルス中性子の特徴を最大限に引き出すことに成功した事実は、J-PARC の真髄である。測定の飛躍的な高効率化をもたらす飛行時間法によるエネルギー別の回折パターンの同時収集系の開発、複数エネルギーの非弾性散乱パターン情報の一挙収集、…。J-PARC が世界の中性子研究に革命を起こしつつある。素晴らしい施設が、J-PARC において今まさに始動した。

Fig.2 Beam monitor display at the time of the 300kW operation on December 10, 2009.