1. J-PARC で展開される中性子科学

大強度陽子加速器計画 (J-PARC) および物質・生命科学実験施設 (MLF) の概要

日本原子力研究開発機構 J-PARC センター 池田裕二郎

Yujiro IKEDA: Overview of Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) Project and Materials and Life Science Experimental Facility (MLF)

The J-PARC project has been conducted jointly by JAERI and KEK since 2001. This paper reports an overview and current status of the project. The high intensity proton accelerator consists of a 400 MeV Linac, a 3 GeV synchrotron and 50 GeV synchrotron to deliver MW level pulsed proton beam to experimental facilities. The MW proton power will provide an advanced scientific experimental research complex aiming at making breakthroughs in materials and life science with neutron and muon, nuclear and elementary physics, etc. Regarding the project being close to its completion in 2008, this paper describes the overview of J-PARC project with emphasis of the Materials and Life Science Experimental Facility, in which the MW pulsed neutron and muon sources, are placed to provide high quality neutron and muon beams to the world wide users.

1. はじめに

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) は共同して、物質科学、生命科学、原子核・素粒子物理および原子力科学の推進を目指して、大強度陽子加速器計画 (J-PARC : Japan Proton Accelerator Research Complex) を 2001 年より進めてきた。¹⁾⁻³⁾ J-PARC は、大電流の陽子を高エネルギーまで加速器、ターゲットに衝突させ、その際に発生する大強度の多彩な二次粒子を用いて、物質材料、生命物質の構造を調べる基礎科学、

原子核や素粒子の物理、さらに原子力技術の開発にかかわる基礎研究の 3 つの領域を軸に、学術から産業応用まで広範囲にわたる研究展開を目的とする多目的加速器施設である。J-PARC の加速器は、直線状のリナックおよびリング状の 3 GeV と 50 GeV の 2 つのシンクロトロンで構成される。それぞれの加速器から取り出される大強度の陽子ビームは、物質・生命科学実験施設 (中性子、ミュオン)、原子核 (ハドロン) 実験施設、ニュートリノ実験施設、および核変換実験施設の実験施設に導かれ、さまざまな利用研究に供する。図 1 に、J-PARC 施設の全体配置鳥瞰図を示

図 1 J-PARC 施設の完成予想図. (J-PARC site view at its completion.)

す。計画は2期に分けられており、3つの加速器および、物質・生命科学実験施設、原子核 (ハドロン) 実験施設の一部、ニュートリノ実験施設を第1期計画とし、平成13年度に建設に着手しいよいよ平成20年度にはすべての施設が完成する。核変換実験施設は第2期計画とし、国の評価を受けつつ第1期計画施設の建設終了後に改めて計画を推進することと位置付けられている。現在、平成20年度に物質・生命科学実験施設とハドロン実験施設、平成21年度にニュートリノ実験施設において利用研究を開始する予定で、建設および機器の最終試験が急ピッチで進められている。

2. J-PARC 施設の概要

2.1 加速器

J-PARCの加速器は、初段の400 MeVのリナック、3 GeV シンクロトロン (RCS)、50 GeV シンクロトロン (MR) の3つの加速器で構成される。⁴⁾ リナックで加速される電流333 μ A 陽子ビームはRCSに入射し、3 GeV まで加速され、最終的に最大1 MWのパワーとなる。パルス陽子ビームはRCSが25 Hzで出射し、物質・生命科学実験施設およびMRへ導かれる。RCSからのパルスの95%は物質・生命科学実験施設のミュオンおよび中性子ターゲットに輸送される。RCSからのパルスの一部は3.4秒に1回の割合で数パルス、平均で約5%がMRにけり出される。MRで50 GeVまで加速され、ハドロン実験施設とニュートリノ実験施設へ導かる。各加速器の概要を以下に示す。

1) リナック

リナックではイオン源でマイナス水素として取り出した陽子を順次、RFQ (四重極高周波加速器)、DTL (ドリフトチューブ線形加速空洞)、SDTL (サイド結合型ドリフトチューブ)、ACS (環状結合型ドリフトチューブ)、SCC (超伝導空洞) と異なる空洞を増加するエネルギーに対応させて加速する。繰り返し周波数は25 Hzで、第2期の核変換実験施設への入射には周波数を倍の50 Hzとして半分を入射する。現状では、その拡張が可能な設計で機器が製作されている。ピーク電流50 mAのマイナスイオンの水素をイオン源から引き出し加速するが3 GeV シンクロトロンの入射部では周回軌道の陽子ビームに合わせるために、荷電変換を行いプラスイオンである陽子として入射させる。

2) 3 GeV シンクロトロン (RCS)

RCSは、500 μ s 間隔でマイクロパルスが積み重なるようにした陽子パルスをリナックから入射し、3 GeV まで周長350 mの円周を周回させて加速する。パルスの周波数が25 Hzと通常のシンクロトロンと比べて速い繰り返しから、Rapid Cycling Synchrotron (RCS) と呼ばれる。25 Hzの各パルスは約600 ns時間間隔の2つの幅の狭いパルスで構成され (これを2バンチパルスと言う) ている。加速器は60台の四重極電磁石、24台の偏向電磁石と補正電磁

石で構成され、陽子ビームの最終的な出力は1 MWである。

3) 50 GeV シンクロトロン (MR)

MRは周長1600 mで、四重極電磁石216台と偏向電磁石96台、およびそれと同数の補正電磁石を用いてRCSで入射した陽子を50 GeVまで加速する円形加速器である。RCSからのパルスのうち84パルスに1回4パルスが振り分けられMRに打ち込まれ、約0.3 Hzのパルスを形成する。電流は15 μ Aでエネルギー50 GeVではビームパワーは750 kWとなる。加速されたビームは遅い取り出しによりハドロン実験施設へ、早い取り出しでニュートリノ実験施設へ出射する。

2.2 実験施設と研究

J-PARCの実験施設には、3 GeV 陽子を用いて生成するパルス中性子およびパルスミュオンビームを利用した物質科学、生命科学などの研究を行う物質・生命科学実験施設 (MLF)、⁵⁾ 50 GeV 陽子で生成するK-中間子を用いて原子核、素粒子物理研究を行うハドロン実験施設、および50 GeV 陽子を用いて発生させるニュートリノビームを295 km離れた岐阜県神岡町にあるスーパーカミオカンデまで飛ばしてニュートリノの研究を行うニュートリノ実験施設、さらに、第2期として超伝導空洞で増力したリナックで得られる600 MeV 陽子を用いて行う高レベル放射性核種の短寿命化のための核変換技術開発研究を行う核変換実験施設がある。ここでは、貴学会として最も関心があるであろうパルス中性子、パルスミュオンを擁する物質・生命科学実験施設を中心に紹介し、ハドロン、ニュートリノおよび核変換実験施設については、簡単に概要に触れるに止めることとする。

1) 物質・生命科学実験施設 (MLF) ⁵⁾

J-PARCの中心的な利用実験施設となる物質・生命科学実験施設では1 MWパルス核破砕中性子源 (JSNS : Japan Spallation Neutron Source) とミュオンターゲットが置か

図2 物質・生命科学実験施設の俯瞰図。(A cutaway view of the Materials and Life Experimental Facility (MLF).)

図3 中性子源中心部の構造。(A cutaway view of the JSNS central region.)

れ、高強度のパルス中性子とパルスミュオンが利用できる。図2に示すように中性子源ターゲットとミュオンターゲットが同じ3 GeV陽子ビームラインにそって設置される。黒鉛でできたミュオン生成ターゲットは中性子源の上流に置かれ、入射陽子ビームの約5%が反応で使われる。残りの95%はそのまま通過し水銀ターゲットに入射し中性子を発生させる。

中性子源施設

パルス中性子ビームは、大強度パルス陽子を入射し核破砕反応で生成する中性子を水素モデレータで減速し総計23本の放射上ビームラインにそって取り出す。3 GeVの入射陽子エネルギーは、最も中性子収率の高くなるエネルギー範囲である。水銀をターゲットに選んだ理由は、原子番号が高く核破砕反応で発生する中性子の収量が大いこと、常温で液体であるため固体では熱応力に耐えられない難点を克服しながら良好な除熱冷却性能を確保できること、さらに、陽子や中性子から受ける材料の照射損傷に起因する交換の必要がない、などの多数の優れた利点をもつことによる。1 MWパワーの中性子源建設は、技術、コスト、稼働率、利用効率、安全性など、全体的な施設のあり方など、技術的な課題の連続である。特に、高強度陽子パルスの入射で発生する水銀中の圧力波が起因するターゲット容器のピッティング損傷はターゲット寿命に影響するなど、未踏領域でのものづくりに伴って派生する新たな技術課題への挑戦の連続であったが、その課題を一步一步、着実に克服してきた。図3に中性子源中心部の構造を示す。

表1に、J-PARC中性子源性能を現在建設中の米国のSNSおよび英国のISIS第2ステーションと主要なパラメータについて比較する。それぞれ、陽子エネルギー、パルス繰り返し周波数が異なる。ISISのTS2では40 kWと低出力であるが低繰り返し10 Hzの利用ニーズに応える特色がある。SNSでは、1 GeV陽子エネルギー1.4 MWでJSNSと同様にMWクラスのパワーをもつ。JSNSはISISと比べて1桁近い高い強度で性能に与えるパワーの差は

表1 米国SNS、英国ISISとJ-PARC/JSNSの中性子源性能の比較。(Comparison of JSNS Performance with SNS in US and ISIS in UK.)

施設	日本JSNS	米国SNS	英国ISIS
入射陽子エネルギー (GeV)	3.0	1.2	0.8
陽子パワー (MW)	1.0	1.4	0.16
周波数 (Hz)	25	60	50
時間積分中性子束強度 ($\text{n/cm}^2/\text{s}/\text{sr}/\text{pulse}/\text{ev}$) $\times 10^{14}$	1.8	1.1	<0.1
パルスピーク強度 ($\text{n/cm}^2/\text{s}/\text{sr}/\text{pulse}$) $\times 10^{16}$	5.8	1.3	No Data
ビームライン数	23	24	17
稼動時期	2008.12	2006.6	定常運転中

歴然である。また、1.4 MW出力のSNSと比べて、出力は1 MWと低いが、積分強度では、結合型モデレータを単独で配置し、パラ状態100%の水素で大型円筒型モデレータ形状とするなど先進的なモデレータ概念の導入により、SNSより1.4倍高く、パルスピーク強度においては、パルス周波数が25 HzでSNSの60 Hzより低いこと、さらに、余分な中性子を効率的に吸収できるAIC合金でできたデカプラーの開発、パラ状態にそろえた低温水素の採用、Cdボイズンの選択など、モデレータ設計の最適化によりJSNSがパルス当たりのピーク強度はSNSと比べて3倍以上高い、パルス中性子源としての基本特性において優位性を実現するものである。

一方、JSNSの特徴は、実験装置の配置にもある。中性子源から合計23本の独立したシャッターをもつ中性子ビームラインが引き出され装置が設置される。利用ニーズが最も高い、積分強度を重視した結合型モデレータからの中性子ビームに大きな取り出し角度を配分したことは、世界のほかの中性子源装置と比べてJSNSを特徴付ける独自性である。実験装置の詳細およびJSNSが目指す研究に関しては、本巻に詳しく述べられている。

JSNSの建設は、利用施設としての性能優位性、競争力の追求はもとより、施設の安定で信頼性の高い運転を可能とするハイパワー対応の材料、熱、核反応などの技術課題の克服、放射化する機器の定期的な交換を円滑にする遠隔操作性、良好な利用環境の整備、加えて、大前提である施設の安全性確保など、多くの知恵と努力で結実し完成しようとしている。

ミュオン施設

あわせて、中性子とともにMLFを特徴付けるミュオン源について簡単に紹介しておく。パルスミュオン施設では崩壊ミュオンと表面ミュオンビームを利用する。図4にMLFに配置するミュオン施設を示す。パルスミュオン源としては現在最強のISISと比べて1桁以上強いビームが得られる。正ミュオンは軽い水素のように振る舞い、結晶中の原子にトラップされる性質、原子間磁場の相互作用を

図4 ミュオン実験施設の配置図. (Layout of the muon experimental region in MLF.)

スピン方向への陽電子を放出する、負ミュオンでは、原子番号は1つ少ない原子として振る舞う、さらに、電子の200倍の質量であることからミュオンが付着した水素は中性子粒子として見える、ことなど、多くのユニークな特徴がある。この性質を活かし、物質の磁性・超伝導、半導体の水素不純物効果、水素貯蔵・プロトン伝導体、エキゾチック化学種 $\mu\text{Z-1}$ 原子不純物、非破壊三次元元素分析、ミュオン触媒核融合などの、新物質探求、新デバイス探求、化学、考古学、環境エネルギーに関する産業応用など広い分野展開を進める。特に、表面ミュオンチャンネルでは、ミュオンの質量が電子より重い磁氣的に偏極している性質を活かした μSR 法による物質構造研究の進展に大きな期待がある。

2) ハドロン実験施設

MRから遅い取り出しである時間幅で連続的に取り出した陽子ビームをニッケル標的(水冷却式回転ターゲット: 85 rpm, 直径50 cm, 厚さ6 cm)に入射させ、発生するK中間子ビームを実験試料となる原子核に当てる。第1期ではビームチャンネルは1本であるが、第2期で増設される実験ホールでの実験の拡張を想定して数本のビームラインで構成される。

ハドロン実験施設で行われる重要な実験の1つとして、物質の重さ(質量)の起源を調べることがある。物質の重さは、陽子や中性子によって担わされている。陽子は素粒子であるクォークが3個集まってできているが、陽子の重さはクォーク3個のそれぞれの重さの合計の100倍にな

る性質が知られている。これは、陽子や中性子が集まってできる原子核の質量が結合エネルギー分少なくなる性質とは反対の現象で、この解明が重要な物理研究テーマとなっている。J-PARCではK-中間子ビームを用いてこれを調べることが計画されている。

3) ニュートリノ実験施設

ニュートリノ施設は、3.4秒に1回の割合で速い取り出しの高いピーク強度のパルス陽子ビームをヘリウム冷却の黒鉛標的に入射させる。そこで大量の π 中間子が発生させ、これを電磁ホーンという高い磁場の狭い空間で方向を収束させ、その π 中間子が崩壊する際に放出されるミュオンとニュートリノのうちニュートリノの放出方向を絞り、J-PARCから295 km離れたほぼ西の方向にあるスーパーカミオカンデに合わせる。 π 中間子の崩壊を促す領域はヘリウム雰囲気の高い容器でディケイボリウムと言い、地球の曲率を考慮して、すでに地中に埋設された。計画では、飛行中に μ ニュートリノがほかの種類のニュートリノ(電子ニュートリノ)に変化する振動現象を観測する。この実験は、最近まで行われていたK2K実験と呼ばれる、KEKつくばから神岡に向けてニュートリノを発射する実験と比べて、J-PARCではその100倍以上の強度のニュートリノビームを作り出し、振動実験を始め、精度の高い物理現象の観測とそれに基づく物理体系の探求を行う。

4) 核変換実験施設

施設は長寿命放射性核種となるマイナーアクチナイド(MA)の核変換する加速器駆動未臨界炉システムの炉物理を研究する物理実験施設と鉛ビスマスターゲットや構造材料の照射試験を行うターゲット工学試験施設からなる。物理実験施設ではレーザー荷電変換法を導入しリニアックの陽子ビームから10 W出力のビームを切り出して利用する。ターゲット工学実験施設では最大200 kWの陽子ビームを鉛ビスマスターゲットに入射しその陽子および中性子場で10 dpaに達する材料照射試験を行う計画である。

2.3 J-PARC 施設建設の現状

J-PARCプロジェクトは平成13年度から国の建設認可を得て、建設に着手した。14年度から建設サイトとなった原子力科学研究所の南地区での造成工事を開始した。平成17年度にはリナック、RCSのトンネルおよび建家の建築が終了し、MRのトンネルおよび電源棟、搬入棟などの建家の建設も平成18年度でほぼ終了した。物質・生命科学実験施設およびハドロン実験施設の建家建設工事は平成19年度初めに完了した。後から工事が始まったニュートリノ実験施設の工事も着々と進み20年度初めには終了する予定である。加速器装置・設備、利用施設の機器の製作は平成14年度から開始し、順次施設の据付を進めてきた。リナックでは平成18年秋までに機器の据付は完了し、平成19年1月に、当初のエネルギー181 MeVの加速試験

図5 J-PARC 実験施設の建設状況。(Pictures of construction and tests of the user facilities.)

に成功した。RCS 機器の据付は平成 19 年夏までに完了し、10 月からはリニアックからのビームを入射し 3 GeV エネルギーの加速に成功した。MR 機器の据付も順調に進み、平成 20 年 5 月からのビーム試験を予定している。

物質・生命科学実験施設のミュオンおよび中性子源機器の据付はこれまでにほぼ完了し、ビーム輸送系機器の一部は RCS の 3 GeV ビーム試験の最終ビーム確認の役割を果たした。中性子源では水銀ターゲット、低温水素モデルタ系の機器試験を進めている。平成 20 年 3 月までにすべての工事を終了し、平成 20 年 5 月のビーム受け入れ開始に向けて総合調整を進めている。これと並行して、中性子実験装置の建設も着実に進んでいる。これまでに原子力機構が 3 本、KEK が 1 本、茨城県が 2 本、競争的資金で 2 本のビームラインは平成 20 年 12 月から開始する利用実験に供する予定である。図 5 に J-PARC 実験施設建設および試験の状況を示す。一方、平成 20 年度の後半から、施設の部分的な共用運転を開始するにあたり、利用者が使いやすい利用の仕組みを作る作業を行っている。その概要は「MLF 利用者支援体制について」という題目で本特集号に収められるので参照していただきたい。

4. おわりに

J-PARC は、平成 13 年度に着工し、平成 20 年度からの利用開始を目指している。世界の情勢を見ると、次世代中性子源施設に関しては、米国オークリッジ国立研究所の SNS がすでに 2006 年に施設建設を完成し最初のビーム試験を開始し、2008 年に 1 MW の加速器パワーでの共用運転を計画している。また、英国ラザフォード・アップルトン研究所では、これまで世界最強のパルス中性子源 ISIS のパワーを増強するとともに新たに第 2 ターゲットステーションを建設して中性子利用環境の拡大のための建設が 2007 年に完成し、2008 年からの稼動を目指している。

一方、素粒子・原子核物理分野では加速器を用いたニュートリノ実験が、米国フェルミ国立研究所、欧州 CERN で開始されようとしており、国際的な競争が激化している。このように、すでに中性子、ミュオンを利用するナノテクノロジー、バイオテクノロジーに関連した物質科学、生命科学研究から、素粒子・原子核物理まで、J-PARC は国際的な競争と協調の大きな舞台として期待が高まっている。J-PARC の供用開始を目前に、施設の完成とともに国際公共財としての大型施設の利用しやすい仕組みを着実に整備し、世界の競争において最大の性能を発揮し、優れた成果を生み出す利用環境を提供していく所存である。

文 献

- 1) 永宮正治：「大強度陽子加速器プロジェクトの全体像」、日本物理学会誌 **56** [10], 727 (2001).
- 2) 提案書として、共同推進チーム、「大強度陽子加速器計画」、JAEA-Tech 2000-003 および KEK Report 99 (2000).
- 3) 大強度陽子加速器計画 (J-PARC) ホームページ, <http://j-parc.jp>.
- 4) High-Intensity Proton Accelerator Project Team, "Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Facility Project, J-PARC," JAEA-Tech 2003-044/KEK Report 2002-13 (2003).
- 5) 物質・生命科学実験施設建設チーム、「大強度陽子加速器プロジェクト、物質・生命科学実験施設機器技術設計書」、JAEA-Tech 2004-001 (2004).

プロフィール

池田裕二郎 Yujiro IKEDA

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

J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4 日本原子力研究開発機構内

2-4 Shirakata-shirane, Tokai, Naka, Ibaraki 319-1195, Japan

e-mail: ikeda.yujiro@jaea.go.jp

専門分野：中性子