

2. 放射線照射装置（線源）の進歩

J-PARC の大強度パルス中性子実験施設

一般財団法人 総合科学研究機構 (CROSS, J-PARC 特定中性子線施設登録施設利用促進機関)

鈴木 淳市

1 大強度陽子加速器施設 (J-PARC)

大強度陽子加速器施設 (Japan Proton Accelerator Research Complex: J-PARC) は、世界最高レベルの陽子加速器により様々な分野の最先端の研究を展開することを目的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) が茨城県東海村に共同で建設し運営する施設である¹⁾。

J-PARC は、現在、加速器施設、物質・生命科学実験施設、ハドロン実験施設、ニュートリノ実験施設の4つの施設で構成され、中性子、ミュオン、ニュートリノ等の二次粒子を用いた新たな研究手段を提供し、物質科学、生命科学、原子核・素粒子物理学等の分野の研究と開発を推進している。さらに、核変換実験施設を建設し核変換技術に関する研究と開発を行う計画も持つ。

加速器施設の加速器は、400 MeV リニアック、3 GeV シンクロトロン、50 GeV シンクロトロンの3つの加速器で構成される。そして、400 MeV リニアックと3 GeV シンクロトロンで加速された大強度パルス陽子ビームは、物質・生命科学実験施設のミュオンターゲットと中性子ターゲットに入射され、世界最高強度のパルスミュオンビームとパルス中性子ビームを生み出す。また、400 MeV リニアック、3 GeV シンクロトロン、50 GeV シンクロトロンで加速された大強度パルス陽子ビームは、ハドロン実験施設のターゲットとニュートリノ実験施設のターゲットに入射され、K 中間子、 π 中間子、ニュートリノ等を生み出す。

2 物質・生命科学実験施設 (MLF)

物質・生命科学実験施設 (Materials and Life Science Experimental Facility: MLF) は、中性子源と中性子実験装置、ミュオン源とミュオン実験装置から構成され

る中性子・ミュオン実験施設である。MLF では、中性子ビームとミュオンビームは、2008 年 5 月と 9 月にそれぞれ初めて生み出された。現在、BL01 から BL23 の 23 本の中性子ビームラインには 19 台の中性子実験装置が、また、D, U, S, H の 4 本のミュオンビームラインには 2 台のミュオン実験装置が設置され、物質科学、生命科学、原子核・素粒子物理学、材料科学、材料工学等の分野の研究と開発に利用されている。

3 パルス中性子源

MLF の中性子源は、毎秒 25 回の割合 (25 Hz) でパルス中性子ビームを生み出せるパルス中性子源である。3 GeV シンクロトロンで加速されたパルス陽子ビームを約 1 μ sec の短時間に水銀ターゲットに入射すると、水銀の原子核が破碎され、約 1 μ sec の短時間に多数の陽子や中性子が放出される。これらの中性子は、高エネルギーの中性子であるが、ターゲット容器の上側と下側に置かれた計 3 台の減速材 (モデレータ) により冷却され、中性子実験に適した低エネルギーの中性子になり、各減速材から水平面内に放射状に伸びた計 23 本の中性子ビームラインから取り出される。

ターゲット容器 (材質: ステンレス) は、水銀容器と水銀容器を覆う二重壁の保護容器からなる三重壁構造を持つ。水銀は、液体状態にあり、41 m^3/h の流量 (1 MW 定格出力運転時) でターゲット容器と熱交換器 (交換熱量: 550 kW) 間を循環し、重く密度が高い (多数の水銀の原子核を含む) 効率の良い中性子発生材としてだけでなく、冷却材としての役割も担う。また、ターゲット容器には、パルス陽子ビームが水銀ターゲットに入射したときにターゲット容器が受ける衝撃を水銀内にヘリウムの微小気泡を注入して和らげる工夫が施されている。

水銀ターゲットで発生した中性子を効率良く減速材に集めるために、水銀ターゲットと 3 台の減速材を取り囲むように中性子反射体が設置されている。中性子反射体はベリリウム (内側) と鉄 (外側) で構成される。

減速材には、中性子を効率良く冷却するため、パラ水素 99% 以上の超臨界水素 (約 20 K, 1.5 MPa) が利用されている。3 台の減速材は、結合型減速材 (Coupled

The Intense Pulse Neutron Facility at J-PARC
Jun-ichi SUZUKI (Comprehensive Research Organization for
Science and Society (CROSS)),
〒319-1106 茨城県那珂郡東海村白方 162-1
E-mail: j.suzuki@cross.or.jp

Table 1. Performance of the neutron moderators in MLF.

Type of moderator	Number of beam ports	Time-integrated neutron flux [10^8 n/cm ² /sec/MW]	Peak neutron flux [10^{12} n/cm ² /sec/eV/MW]	Neutron pulse width [μsec]
CM	11	4.6	6	92
DM	6	0.95	3	33
PM (Thick side)	3	0.65	2.4	22
PM (Thin side)	3	0.38	1.4	14

The time-integrated neutron flux and peak neutron flux show values at 10 m from the moderators. The peak neutron flux and neutron pulse width show values for neutrons with energy of 10 meV.

Moderator: CM), 非結合型減速材 (Decoupled Moderator: DM), ポイズン型減速材 (Poisoned Moderator: PM) である。これらの減速材により、中性子実験の目的に応じたパルス形状 (パルスピーク強度, パルス幅等) の異なる中性子ビームを生み出せる。これらの減速材の性能を Table 1 に示す。

大強度実験では、パルス幅がある程度広がってもビーム強度が高い中性子ビームが必要である。結合型減速材では、中性子反射体を利用して、1パルス当たりの時間積分中性子束とピーク中性子束で世界最高の中性子ビームを生み出すことができる。一方、高分解能実験では、ビーム強度をある程度犠牲にしてもパルス幅が狭い中性子ビームが必要である。中性子反射体と減速材の間をデカップラと呼ばれる中性子吸収板で仕切ると反射体内を經由して低エネルギーになった中性子が減速材に流入するのを抑えることができる。非結合型減速材では、銀・インジウム・カドミウム合金 (AIC) のデカップラを利用して、世界最高の 1 eV までのエネルギーの上限 (AIC の中性子吸収スペクトルで決まる) でシャープなパルス形状の中性子ビームを生み出すことができる。超高分解能実験では、さらにパルス幅が狭い中性子ビームが必要である。ポイズン型減速材では、非結合型減速材と同様の減速材容器にポイズンと呼ばれるカドミウムの中性子吸収板を挿入して減速材の実効的な厚さを薄くすることで、0.4 eV までのエネルギーの上限 (カドミウムの中性子吸収スペクトルで決まる) で非結合型減速材に比べてさらにシャープなパルス形状の中性子ビームを生み出すことができる。ただし、ポイズンは減速材容器の中心からずらして挿入されている。そうすることで、1台のポイズン型減速材から2種類の異なるパルス形状の中性子ビームを互いに反対方向に生み出すことができる。

Figure 1 に世界の主要パルス中性子実験施設の中性子強度を示す。MLF では、2009年12月に300 kW の陽子ビーム出力でパルス中性子の発生試験を行い、1パルス当たり結合型減速材から単位立体角に向けて放出された中性子の数が 5.1×10^{12} 個であることを確

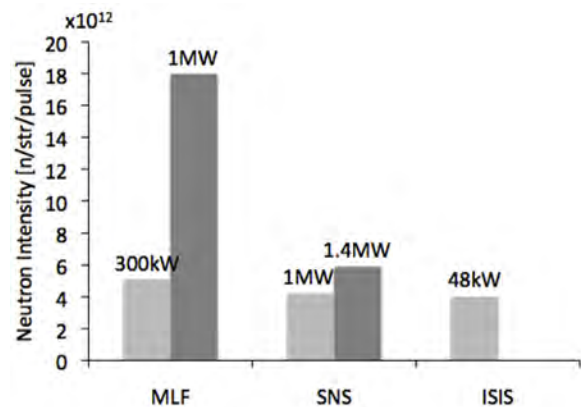


Figure 1. Neutron intensities of the world's major pulse neutron facilities.

認した。その中性子強度は、主要パルス中性子実験施設である米国オークリッジ研究所の SNS (陽子ビーム出力: 1 MW) の中性子強度 (4.2×10^{12} 個) と英国ラザフォード・アップルトン研究所の ISIS (陽子ビーム出力: 48 kW) の中性子強度 (4.0×10^{12} 個) を上回り、世界最高となった²⁾。その後、MLF の陽子ビーム出力は、500 kW まで上昇しているが、今後、定格出力の 1 MW (3 GeV, 25 Hz, 333 μA) に達すると、その中性子強度は、SNS (陽子ビーム出力: 1.4 MW (定格出力)) の中性子強度 (5.9×10^{12} 個) に対しても 3 倍以上になる予定である。このように、MLF は、加速器とパルス中性子源の工夫と最適化設計により、世界最高強度のパルス中性子ビームを利用できる施設となっている。

4 パルス中性子実験装置

MLF では、現在、Fig. 2 のようにパルス中性子実験装置が 19 台設置され、2 台建設中 (BL06, BL23) であ

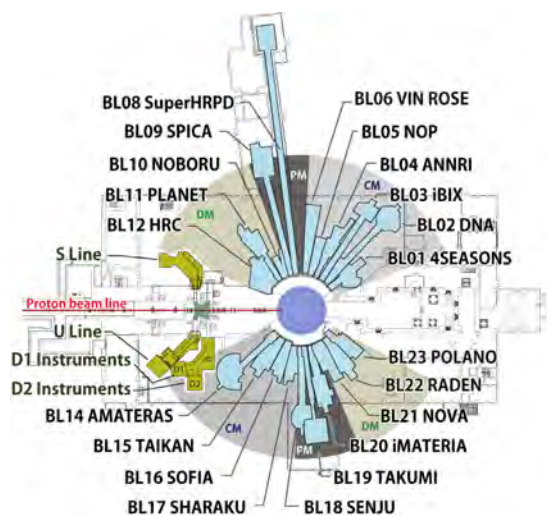


Figure 2. Layout of neutron and muon beamlines in MLF. The CM, DM, and PM denote the type of moderator.

る。これらの実験装置を中性子実験の目的により 4 つの装置群に分類し、キーパラメータやキーワードと共に Table 2 に示す。

原子・分子・スピンの運動を調べる装置群には、BL01, BL02, BL06, BL12, BL14, BL23 が含まれ、広いエネルギー領域での高効率・高エネルギー分解能の中性子分光測定に利用される。原子スケールの構造を調べる装置群には、BL03, BL08, BL09, BL11, BL18, BL19, BL20, BL21 が含まれ、微小試料の回折測定、超高压下での回折測定、in-situ 回折測定等に利用される。ナノスケールの構造を調べる装置群には、BL15, BL16, BL17 が含まれ、高効率の小角散乱測定や反射率測定に利用される。その他の装置群には、BL04, BL05, BL10, BL22 が含まれ、核データ測定、素粒子物理学実験、中性子源特性試験、中性子検出器・デバイス開発、透過像観察等に利用される。いずれの装置も世界最高強度のパルス中性子ビームを活かす工夫と設計により、その高い性能を国内外の学術界および産業界の多くの利用者に提供している。

MLF の中性子実験装置の利用は、2008 年 12 月に 6 台の装置 (BL01, BL03, BL08, BL10, BL19, BL20) から始まった。2011 年 3 月の東日本大震災では、MLF も大きな被害を受けたが、それを乗り越え、現在、19 台の装置で高い性能を活かした MLF ならではの成果が生み出されつつあり、今後の成果創出の展開が期待されている。

Table 2. Neutron Instruments in MLF.

BL	Key Parameters and Keywords
Spectrometry $S(q, E)$, $S(q, t)$	
BL01	$5 < E_i < 300$ meV, $\Delta E/E_i > 5\%$ at $E = 0$
BL02	$E_f = 2.02$ meV, $\Delta E/E_f > 0.08\%$ at $E = 0$ (Si(111)) $E_f = 7.4$ meV, $\Delta E/E_f > 0.09\%$ at $E = 0$ (Si(311))
BL06	1 psec $< t < 2$ nsec (MIEZE-type NSE) 0.1 nsec $< t < 0.1$ μ sec (NRSE)
BL12	$10 < E_i < 500$ meV, $\Delta E/E_i > 2.5\%$ at $E = 0$
BL14	$1 < E_i < 80$ meV, $\Delta E/E_i > 1\%$ at $E = 0$
BL23	$E_i \sim 50$ meV, $\Delta E/E_i > 4\%$ at $E = 0$, Polarized
Diffractometry $S(q)$	
BL03	$0.12 < q < 18$ \AA^{-1} , Single crystal
BL08	$0.14 < q < 21$ \AA^{-1} , $\Delta q/q > 0.035\%$, Crystalline powder
BL09	$0.05 < q < 63$ \AA^{-1} , $\Delta q/q > 0.08\%$, Crystalline powder
BL11	$1.5 < q < 30$ \AA^{-1} , $\Delta q/q > 0.4\%$, High pressure
BL18	$0.17 < q < 31$ \AA^{-1} , Single crystal
BL19	$1.3 < q < 13$ \AA^{-1} , $\Delta q/q > 0.17\%$, Materials engineering
BL20	$0.008 < q < 35$ \AA^{-1} , $\Delta q/q > 0.16\%$, Crystalline powder
BL21	$0.01 < q < 100$ \AA^{-1} , $\Delta q/q > 0.3\%$, Total scattering
Diffractometry and Reflectometry $S(q)$, $R(q)$	
BL15	$0.0005 < q < 20$ \AA^{-1} (Unpolarized), $0.0005 < q < 2.5$ \AA^{-1} (Polarized), SANS/WANS
BL16	$0.005 < q < 0.5$ \AA^{-1} , Reflectometry, Free interface
BL17	$0.005 < q < 2.5$ \AA^{-1} (Unpolarized), $0.01 < q < 1.2$ \AA^{-1} (Polarized), Reflectometry
Others	
BL04	1.5 meV $< E_i < 100$ keV, Nuclear data
BL05	$E_i < 20$ meV, Particle physics, Polarized
BL10	Characterization of the neutron source, R&D of neutron detectors and devices
BL22	$180 < L/D < 7500$, Transmission image, Polarized

“Polarized” denotes an option to use polarized neutrons.

〈参考文献〉

- 1) <https://j-parc.jp/>
- 2) F. Maekawa, M. Harada, K. Oikawa, M. Teshigawara, T. Kai, S. Meigo, M. Ooi, S. Sakamoto, H. Takada, M. Futakawa, T. Kato, Y. Ikeda, N. Watanabe, T. Kamiyama, S. Torii, R. Kajimoto, M. Nakamura, Nucl. Instrum. Meth. A, 620 (2010) 159.