J-PARC の 1MW パルス中性子源の概要

池田 裕二郎
(日本原子力研究所)

Overview of 1MW Pulse Neutron Source at J-PARC

Yujiro Ikeda
Japan Atomic Energy Research Institute

ABSTRACT

The design status of the 1 MW spallation neutron source (JSNS) in the J-PARC project is to be described with an emphasis of the particular features in terms of structural components which form the central part of target station. Also, this article is expected to give a guide of which following sections are treating in specific technical issues such as spallation reactions, moderator neutronics and its technology, and radiation shielding.

Keywords: J-PARC, 1MW spallation neutron source, Overview, Technical issues

1. J-PARC について

J-PARC は原研が高エネルギー加速器研究機構と共同で、原研東海研究所内に建設している世界最高の陽子ビーム強度をもつ加速器施設である。3GeV さらに 50GeV まで最大 1MW のパワーで陽子をパルス状に加速し、標的原子核に衝突させて中性子、中間子などの発生する 2 次粒子を利用し、原子核、素粒子等の物理、新物質、材料、生命科学など、最先端の研究を進める。加速器は、初段の 400MeV リニアック、3GeV シンクロトロン、及び 50GeV シンクロトロンで構成され、3GeV、1MW 陽子を物質・生命科学実験施設に、50GeV、0.75MW の陽子を原子核・素粒子実験施設及びニュートリノ施設に導く。さらに、400 MeV リニアックに超伝導加速器を追加し 600MeV 陽子を用いる核変換実験施設が第 2 期計画で建設予定である。複合加速器と利用施設をうまく組み合わせた多目的の一体施設として世界的に例のない試みである。Fig. 1 に完成時に予想される施設全体の鳥瞰イメージを示す。

Fig. 1 Bird's eye view of J-PARC facilities.

J-PARC の建設は平成 13 年度から始まり、平成 19 年度の完成、20 年度からの施設共用開始を予定している。既に、プロジェクトチームの提案を含めて国内外から多くの利用実験装置設置希望があり、その性能、規模に世界が注目している。

2. J-PARC 中性子源の性能

J-PARC の中心的な共用施設となる物質・生命科学実験施設は 1MW パルス核破砕中性子源とミュオンターゲットが置かれ、中性子とミュオンが同時に利用できる。ここで実現するパルス中性子源 (JSNS) の性能は、既存の加速器中性子源 ISIS と比べて 1 桁近い高い強度、原子炉中性子源 ILL と比べて時間積分強度は及ばないがパルスのピーク強度では 2 桁高い。また、現在米国で建設中の 1.4MW 出力の SNS と比べて、出力は 1MW と低いことが、パルス周波数は 25Hz で SNS の 60Hz より低いことから JSNS がパルス当たり 1.7 倍強い。積分強度においても、モデレータ配置の違いにより SNS より 1.4 倍強いもので、世界最高の性能である。最大の売り物は、世界最強となるパルス強度と 25Hz 運転による広いバンド幅の利用で見える対象の運動領域の拡大である。

3. 重要な設計概念

JSNS の設計の詳細については技術設計書を参照されたい。[1] ここでは、JSNS の性能を高めるために採用した基本概念を紹介する。また中性子特性に関わる部分については、引き続き章で具体的な記述がある。設計概念を構築する視点として、施設安全は基より、材料、熱、核反応、そして良好な利用環境の確保がある。可能な限り、概念のベースとなる判断、基準などを示す。

3.1 中性子源の全体機器構成、構造

まずは中性子源構成機器の構造概念の理解のために Fig. 2 をみてみよう。これは、現在の J-PARC/JSNS 製作設計図そのものから作成した 3 次元 CAD イメージである。全体は高さや直径がほぼ同じ長さの円筒形をしている。中性子を発生するターゲットはほぼ中央に位置し、そこに 25Hz のパルス状の陽子ビームが水平に入射する。ターゲット材料は循環する水銀で、エネルギー 3GeV の陽子との核破砕反応で陽子 1 個当たり約 60 個の中性子が発生する。発生した中性子のエネルギーを利用して適したエネルギーに反射減速するモデレータがターゲットの上に 2 台と下に 1 台配置される。モデレータに入る中性子を増やすためのモデレータの周りを反射体で囲む。さらにその外側に鉄の遮蔽体を円筒状に巻き、ステンレス製のヘリウムベッセルに納める。ベッセルの外側には生体遮蔽の鉄ブロックを主とした材料でほぼ満たされる。モデレータからの中性子はそこを基点として放射状に最大 23 本の中性子ビームラインの数として取り出される。中性子ビームを必要に応じて上下駆動で遮断するシャッターは生体者遮蔽体の中に設置される。陽子ビーム窓は陽子ビーム導入管とヘリウムベッセルの接合部に置かれ、真空境界およびヘリウムシールを兼ねると共に、陽子ビームモニターとして機能する。全体を収納する外側容器は直径約 10m の円筒形鉄ライナーである。このライナーの外周は、さらに生体遮蔽として厚さ 2m 以上の重コンクリートで覆われる。Table 1 に構成機器の主要パラメータを示す。以上が主要機器の基本構成であるが、それぞれの設計思想について、ポイントを紹介する。

Fig. 2 3D image of the JSNS target station. All components are drawn based on the current design. The target cart, and some of the neutron instruments are removed from the figure.

Table 1 Major parameters of the 1MW pulse neutron source target station

Parameter	Base Value
TARGET SYSTEMS	
Design power level on target	1MW
Number of neutron beam lines	23
Energy of proton beam	3GeV
Beam current	0.3mA
Repetition rate	25Hz
Pulse width	<1μs
TARGET ASSEMBLIES	
Front cross section of target VxH*	96x192mm
Beam spot size on target VxH	70x184mm
Normal peak current density	10μA
Target material	Hg
Hg operating temperature	119°C
Hg target operating pressure	0.5MPa
Hg power loading	0.5MW
Shell material	SS-316LN
Shroud cooling	SS-316LN
MODERATORS	
Number of moderators	3
Type of moderator	Coupled 1 Decoupled 1 Poisoned 1
Moderator material	H ₂
Viewed face	100x100mm ²
Pre moderator	H ₂ O
Container material	A6061-T6
Decoupler	Al clad AIC
Poison material	Al clad Cd
REFLECTOR	
Reflector material	Be(in), Fe(out)
Container material	A5083-o
Configuration	Nested cylinder
Coolant	D ₂ O
Height	1.2m
HELIUM VESSEL	
Material	SS-316
Atmosphere	He
Proton beam window material	A5083-o
Proton beam window coolant	H ₂ O
SHUTTER SYSTEM	
Number of single channel shutters	23
material	SS /Concrete
Drive system	Electrical
open/close position	Lowest close
CRYOGENIC SYSTEM	
Total H ₂ inventory	0.256m ³
Flow configuration for moderators	Parallel
Number of H ₂ circulators	2
Moderator in/out temperature	18K/21K
Moderator supply pressure	1.5MPa
Ortho Para converter	Yes
Pressure control system	Yes

3.2 核破碎水銀ターゲット

ターゲット材料として水銀を採用した。固体ターゲットは 1MW のパルスビーム入射による熱応力で破壊されるため、採用できないためだ。循環水銀をターゲットとし熱は熱交換機で除去することで熱的システムとして成立する。流動性により、必要に応じてダンプタンクに待避させ局所的な保管管理が可能であることから、ターゲット容器の交換時の放射線被曝は、固体ターゲットと比べて格段に少ない。すなわち積極的な放射線の管理がメリットとなる。さらに、多くの中性子を生産する観点では、核破碎反応での中性子の収率は原子番号の大きな物質ほど大きいので水銀が適している。一方、液体水銀であることから生ずる克服すべき課題がある。液体の熱膨張による圧力波に対する設計、水銀の循環に関わる閉じこめ技術の経験不足による未熟さである。圧力波に関しては、BNL の AGS 加速器を用いた実規模大の水銀模擬ターゲットによる実験で、圧力波を実験的に測定すると共に、その実験解析から設計評価の妥当性についておおよその検証が達成された。しかしながら、圧力波のオフライン実験の中で、圧力波が起因する容器内面に生ずるピittingが新たな、しかも重大な対処が必要な事象として観測された。この問題は、容器寿命に直結するため、現象解明と対処方法の検討、試験を継続している。米国 SNS も同様に水銀をターゲットとする設計で共通の課題であることが認識され、米国 LANL の WNR 施設を用いた陽子ビーム入射実験を行った。その結果、ピittingが同様に観測され、この問題が現実的な対応を迫られるきわめて重大なものとして提起された。その後、日米協力して集中的な検討努力を続けている。陽子ビーム実験は回数に制限があり、多くの情報を系統的に収集するには難しいことから、プロジェクトチームは圧力波とそれに伴うキャビテーションを模擬できる電磁衝撃試験器を開発し系統的な実験を開始した。パルス衝撃（電磁衝撃）のサイクル数の増加とともにピittingによる容器材料表面の浸食が進み状態が変化する。サイクル数が 100 万回を超すと一気に表面が削られてゆくことが観測された。現在も実験を継続し、硬化処理等の表面改質とともに、圧力波そのものを下げる方法など 1MW に到達するまでに行うべき技術開発に取り組んでいる。

3.3 モデレータと反射体

JSNS のモデレータ設計では、ユーザーが望む中性子を如何に効率的に引き出すかを常に念頭に置き進めている。モデレータの性能が中性子源の性能といっても過言ではない。

- ・超臨界水素 (20K, 1.5MPa) をモデレータ材料として選択した。これは、超臨界水素が 1MW の核破碎中性子の核発熱負荷に耐えられる材料で最も水素数密度が高いことが理由である。

- ・中性子特性の異なる 3 種類のタイプのモデレータを備えることとした。結合型モデレータでは、時間積分強度を高め、しかも最も多くの利用要求を満たすために、初めての試みとして円柱型の容器構造を採用した。さらにバラ水素の中性子反応特性を生かし、最適な体積を導出し、1 台の容器で合計 11 本のビームラインで強度の偏りのない中性子ビームを享受できるようにできたことを特筆しておきたい。また、米国の SNS の 2MW 相当の強度の比較において、1MW の JSNS は同等の性能を達成している。これは、JSNS での単独配置広角度取り出しのアイデアが優れているところと言える。(SNS では隣接する非結合型モデレータによる中性子吸収が結合型モデレータの強度低下を招いている。)

- ・低エネルギー側を抑制し、時間分解能を高めた非結合型 (デカップル) モデレータでは、1eV と高いデカップリングエネルギーを実現できる AIC 合金デカップラーに着目し、技術開発を精力的に進め、実機製作の見通しを得た。これは低出力中性子源では通常用いられてきたボロンのデカップラーが 1MW では材料として成立困難なことを受けて行った開発の成果である。しかしながら、AIC に含まれる銀が生成する高い誘導放射能の取り扱いのため、大型の遮蔽キャスクとそれをプラグと共に移動させる重量クレーン設備が必要となったことは、ネガティブな要素であった。最終的にモデレータの性能を優先させる判断をした。さらに、時間分解能要求に対応するポイズンドモデレータでは、Cd をその材料とする設計が完了した。

- ・モデレータの容器材料は低温での中性子照射損傷特性に優れている A6061 を使い、容器は低温水素の循環、外側容器の冷却、水素漏洩対策のための 4-5 重の容器、配管構造とした。Table 2 に

Table 2 Representative neutron flux from each moderator

Type of Moderator	Number of Beam Ports	Time-integrated Thermal Neutron Flux [n/s.cm ²]*	Peak Neutron Flux at 10 meV [n/eV.s.cm ²]*	Pulse Width in FWHM at 10 meV [us]
Coupled Moderator	11	4.6 x 10 ⁸	6.0 x 10 ¹²	92
Decoupled Moderator	6	0.95 x 10 ⁸	3.0 x 10 ¹²	33
Poisoned Moderator (Thicker Side)	3	0.65 x 10 ⁸	2.4 x 10 ¹²	22
Poisoned Moderator (Thinner Side)	3	0.38 x 10 ⁸	1.4 x 10 ¹²	14

* Values at 10 m from the moderators

中性子源性能の目安となるモデレータから 10m 位置での時間平均での中性子束の値を示す。モデレータ中性子特性、及びモデレータ設計の詳細については、それぞれ別の章で詳しく述べられる。

・反射体材料として中性子減速能の高いベリリウムを採用した。これは初期に検討した鉛が、溶融という問題があることが判明したためである。

3.4 遮蔽体, シャッター

発生する中性子を適切に遮蔽し周辺への放射線線量を実験者や運転保守要員に対する影響をなくすために中性子源遮蔽設計を行っている。3GeV から熱中性子までの広いエネルギーの中性子を効果的に遮蔽するために JSNS ではターゲットを中心として主として鉄 (約 4.5m 厚さ)、その外側に重コンクリート (約 2m 厚さ) を設けている。設計の基本指針、詳細な技術検討、評価は、続く遮蔽計算の章で取り上げられるので説明を省く。

3.5 ビームライン実験装置の配置

Fig. 3 に J-PARC 物質・生命科学実験施設の 1 階部分の鳥瞰図を示す。JSNS を中心として現在プロジェクトチームが設置を計画している装置の配置を試みた。全てのモデレータは両面から取り出されるので中性子源中心に陽子ビーム入射方向に対して角度約 40 度から 140 度の範囲で左右に放射状に装置ラインが延びている。中性子ビームラインの数は、周辺に置かれる実験装置の想定、

見込むモデレータの種類、隣り合うビームラインと幾何学的干渉、構造体の強度、さらにビームを遮断するシャッターの構造と駆動装置設置条件などを考慮して 23 本と決定した。

4. 今後の展開

我々の、これまでに検討で、技術、コスト、稼働率、利用効率、安全性等、全体的な施設のあり方を総合的に評価すれば、1MW パワーは既に限界に近い技術対象と判断せざるを得ない。これすらも、挑戦的な気の抜くことが許されないかなりしんどい事業であることを実感している。まずは、施設建設の完成を着実に目指して行きたい。

参考文献

[1] 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, JAERI-Tech 2004-001.

Fig. 3 View of the first floor of Materials & Life Experimental Facility. JSNS is located at the center.