中性子源特性試験装置 (BL10)

及川 健一, 原田 正英

(日本原子力研究開発機構 J-PARC センター)

NeutrOn Beam Line for Observation and Research Use (BL10)

Kenichi Oikawa and Masahide Harada

J-PARC Center, JAEA

ABSTRACT

NOBORU was constructed at beam-line no. 10 (BL10) of the Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) at J-PARC in 2007. The primary mission of NOBORU is facility diagnostics to study neutronic performance of Japan Spallation Neutron Source (JSNS). Validation methods of unique neutronics design features of JSNS are briefly reviewed.

Keywords: *Facility Diagnostics, Design Validation, Neutronic Performance*

1. はじめに

物質・生命科学実験施設 (以下, MLF) の入口ロビーに, 施設紹介のパンフレットが数種類置かれている. 実はそれらのパンフレットは, 毎年のように更新されている. その理由のひとつは, MLF において中性子及びミュオンの実験装置が毎年のように増えていっているからである.

中性子源特性試験装置 (以下, NOBORU) は, それら実験装置群の中で最初に建設された装置である. 2008 年 5 月 30 日には, MLF の核破砕中性子源 (以下, JSNS) が発した最初のパルス中性子を実測した[1]. 本装置建設の背景及び目的の詳細については以前に本誌で紹介し[2], また初期の装置利用の様子については, 本誌 2010 年の特集号で詳述した[3].

その後, 2011 年 3 月の東日本大震災や 2013 年 5 月の J-PARC ハドロン実験施設における放射性物質漏洩事故といった試練を乗り越え, 加速器出力の 1MW 到達ならびにその中性子特性試験が, いよいよ NOBORU の現実の目標に入ってきた. 『中性子源施設として自ら責任を持って中性子ビーム性能を把握し, JSNS という複雑で巨大なシステムを安定かつ安全に運転し, ユーザーに常時高品質かつ大強度の中性子を提供する』ことに資する, という NOBORU の存在意義を達成するために, 我々が行ってきた事を以下に書きとどめる事とする. なお本装置は, いわゆるテストポートとして様々な中性子散乱以外の利用研究が数多く実施されているが, それらは紙面の都合で割愛する.

2. 装置の特徴と測定・解析例

2.1 ビームラインの特徴

再び施設紹介のパンフレットを見てみよう. 最後の見開きページに, MLF の三次元イラストが描かれている. 『10』と記されている所には, 何やらテーブルらしきものだけがポツンと描かれている. 大きな真空チャンバーも無ければ, 検出器も備えられていない. これは本装置の特徴と言っていだろう. NOBORU の最大の武器は, 強固な遮蔽体に囲まれた実験室空間そのものである(Fig. 1).

Fig.1 The experimental room of NOBORU; 2.5 m in width, 3.0 m in length, and 3.0 m in height.

Table 1 Specifications of NOBORU.

Wavelength	$\lambda < 10.5 \text{ \AA}$ (1st frame)
Energy	MeV ~ meV (1st frame)
Resolution ($\Delta d/d$)	0.33 % @ $2\theta=170^\circ$
Neutron intensity (@14m @1MW)	$4.8 \times 10^7 \text{ n/s/cm}^2$ (< 0.4 eV) $1.2 \times 10^7 \text{ n/s/cm}^2$ (> 1 MeV) $1.2 \times 10^6 \text{ n/s/cm}^2$ (> 10 MeV)
Beam size	Maximum $10 \times 10 \text{ cm}^2$

装置の仕様を Table 1 に示す。これらの数値は、主としてニュートロニクス計算がその根拠であるが、次節よりその「中性子特性」をいかにして検証していったかを測定方法ならびに解析プロセスとして記す。

2.2 熱・冷中性子パルス特性

JSNS 全ビームラインの中性子特性等の数値データファイルは、J-PARC の web 上に公開されており、どこからでも誰でもダウンロード出来る[4]。フォーマットを極僅か修正すれば、そのまま McStas[5]の SNS_source.comp に読み込ませることも出来る。ただし、本データのパルス形状は、J-PARC 加速器の陽子ビームダブルバンチ構造を考慮していないため、数 eV 以上の共鳴領域では、実際のパルス形状を再現しない（つまり、シングルバンチの 1MW 相当で計算されている）。

パルス形状測定法については当初、池田らによるタイムフォーカシングを用いた測定方法[6]も検討したが、実験の第 1 の目的が『すでにある』計算値との比較である事、及びビーム強度も十分ある事から、通常の $2d\sin\theta = \lambda$ の条件の回折実験とした。また、ビーム強度上昇とともに確認試験を行う事を重視したため、あえて high- q 領域の回折強度が取れる低温測定とはせず、実験条件再現が簡便な室温測定とした。回折用検出器は現状で最も信頼がおけ、また検出器遮蔽もしやすい $\phi 1/2'' \times 10 \text{ cm}$ の ^3He の 0 次元検出器一本とした。ただし、結晶のアライメントについては 5 軸ゴニオメータを用い、 $2\theta=170^\circ$ に置いた検出器でロッキングカーブを測定することで試料の軸立てを行った。

冷中性子領域のパルス特性測定には、北大より提供して頂いた天然マイカを用いた。およそ 20 meV (2 Å) から 0.2 meV (20 Å) の領域でパルスデータが測定出来ている (Fig. 2)。20 meV より上の熱中性子領域では、マイカの結晶性（モザイシティと思われる）悪化から、急激な強度低下並びに計算値とのずれが顕著になるため、これより上のエネルギー領域のパルス特性評価には、BL18 (SENJU) グループからダイヤモンドの単結晶を借用した (Fig. 3)。

Fig. 4 には半値幅と 1/100 幅の計算値と実測値の比較データをまとめた。実測したパルス形状が計算値と非常に良い一致を示している様子は、原著論文[7]を参照されたい。

Fig.2 The measured diffraction patterns of mica at 300 kW. The lowest index (002) was diffracted by the 2nd frame neutrons.

Fig.3 The diffraction pattern of diamond at 200 kW. The highest index (18 18 0) is observable.

Fig.4 The obtained full-width at half-maximum ($fw_{1/2}$) and full-width at 1 percent-maximum ($fw_{1\%}$) are plotted in the figure with corresponding calculated pulse width $\Delta t_{1/2}$ and $\Delta t_{1\%}$.

入門講座ということで、論文には載せないような失敗例を最後にひとつ紹介する（実際には、試料選定においてはかなりの数のトライ&エラーを重ねている）。

Fig.5 The measured diffraction pattern of germanium rod and its background. Sample size was $\phi 8\text{mm} \times h 30 \text{ mm}$. Signal to noise ratio was good, but strong diffusive structure was also obtained.

Fig. 5 にゲルマニウムの単結晶を室温測定した時の回折パターンを示す。+マーク付きがロッキングカーブから軸立てした回折条件位置でのデータ、+マーク無しはそこから試料を 1° 回した位置で測定したバックグラウンドデータである。試料確認測定のつもりだったので、あまり長時間測定していないが、off-Bragg の位置でかなり強い diffuse がピークの裾に乗っている。しかも短波長領域では、その周期が徐々にずれて行っているように見える。MLF の単結晶回折装置 SENJU でどのように見えるか、試してみたいと考えている。

2.3 熱・冷中性子スペクトル

試料位置での熱・冷中性子のスペクトル測定を行うにあたり、モデレータからの直達中性子はたとえ数 kW でも強く、一般的な数気圧の ^3He 検出器では、カウントレートが追いつかず数え落としが起きる。そこで、熱・冷中性子のスペクトル測定では、 ^3He ガス圧を抑えたモニタータイプの ^3He 検出器（検出効率 $10^{-1}\sim 10^{-5}$ ）を複数台用意し、中性子強度に合わせて使い分けることとした。また、計数率が高くなると数え落としが生じる可能性があるため、ランダムパルスジェネレータの信号を用いて、不感時間の補正を行った。ランダムなパルスは、不感時間がなければ、単位時間あたりのカウントは一定になる。しかしながら、不感時間があると、その時間だけ単位時間あたりのランダムパルスのカウントが減少するので、その減少の割合に相当する分、中性子カウント数を補正している。

検出器位置での中性子束を得る関係式は次のとおりである。中性子のエネルギー E_n (eV) は、ターゲットへの陽子到達時間（正確には、陽子ビームを検知する陽子ビームラインのカレントトランスフォーマーからの信号）を 0 とし、検出器に到達した飛行時間 t_n (s) から導出する。単位時間当たりのカウント数 C (/s) とすると、飛行時間法により検出器で得られる単位時間・単位飛行時間当たりのカウント数 dC/dt_n (/s²) から、

$$\frac{d}{dE_n} \phi(E_n) = \frac{dC}{dt_n} \cdot \frac{dt_n}{dE_n} \cdot \frac{1}{\text{Eff}(E_n)}$$

という式により、検出器位置での単位時間・単位エネルギー当たりの中性子束 $d\phi(E_n)/dE_n$ (n/cm²/eV/s) が得られる。 $\text{Eff}(E_n)$ は、 E_n のときの検出効率を示す。 $\text{Eff}(E_n)$ は検出器固有のもので、低検出効率の検出器を用いる場合は、この絶対値を精度よく測る必要がある。筆者らは、所有するモニター類の検出効率としては、メーカー推奨値（カタログ値）を使わずに、購入後独自に測った値を使用している。

我々の目的は、線源強度の計算値と実測値とを比較することである。そのため、検出器位置での中性子束をいわゆる線源強度 $dS(E_n)/dE_n$ に変換する必要がある。その関係式は次式のようになる。

$$\frac{d}{dE_n} S(E_n) = \frac{d}{dE_n} \phi(E_n) \cdot \frac{1}{\text{Trans}(E_n)}$$

ここで、 $\text{Trans}(E_n)$ は、 E_n のときの輸送率を示す。この輸送率は、モデレータから検出器位置まで、ビームラインコンポーネントを含む幾何学的な形状（モデレータ表面積、検出器面積、コリメータ、スリットサイズ等）に起因するだけでなく、途中にある窓材のアルミニウム合金での散乱や吸収、

同様に途中にある空気などの散乱や吸収も考慮する必要がある。もし中性子ミラーがある場合は、その反射も考慮する必要がある（BL10 には、中性子ミラーはない）。これらを McStas や PHITS[8] によりシミュレーションし、最終的な輸送率を導出した。Fig. 6 は、アルミニウム合金（上）と空気（下）の透過率の計算値を示す。冷中性子領域では、一般的に吸収断面積が大きくなるため、中性子が吸収されやすい。

Fig.6 The calculated neutron energy dependence of transmission rates of aluminum alloy (upper) and air (lower)

Fig.7 The measured neutron spectrum compared with calculated one. Proton beam power was 4 kW.

これらの補正を施し、線源強度に変換された実測値を Fig. 7 に示す。縦軸の単位は、見やすくするために、単位エネルギーではなく、単位レサジーを使用している。‘レサジー’は、原子炉物理学では一般的なエネルギーの尺度であり、例えば文献[9]を参考にさせていただくと良い。計算値も合わせて示す。実測値の誤差は、10%以下である。計算値は、J-PARC の web 上のデータを元になっているが、線源集合体の冷却水種の違い (web データ: D₂O 体系、記載計算値及び実際: H₂O 体系) の補正を行っている。Fig. 7 を見る限り、非常に良い一致を示している。しかしながら、実は驚くべき結果である。これらの過程は、3GeV 陽子ビームの入射から出発し、水銀ターゲット、反射体、モデレータを経由して、ビーム孔を通り、meV の中性子が検出器に到達するまでである。強度も 2×10^{15} proton/s の陽子が、検出器位置では、 5×10^7 n/cm/s に変化する。それらエネルギーで約 12 桁、強度で約 8 桁に渡る事象が、計算と実験で、恣意的な調整パラメータもなく、一致するのである [10]。

さて、検出効率を低くすれば、中性子強度が上がって行っても測定できると期待したが、実際のところそうではなかった。大強度になるにつれ、検出器窓材のアルミニウムの放射化 ($^{27}\text{Al}(n,\gamma)^{28}\text{Al}$) により生成される ^{28}Al (半減期: 2.24 分) から発生する β 線 (最大エネルギー: 2.86 MeV) がバックグラウンドとなり、プリアンプでの中性子と β 線や γ 線の弁別が困難になるのである。特に、 ^3He ガスの少ない低検出効率のモニターほど、実効的な S/N 比が悪くなり、中性子イベント (^3He ガスの量に比例) とそれ以外のイベント (例えばアルミニウムの量に比例) との分離が難しくなることが分かっている。MLF のモニター開発チームで、この問題を解決するために、研究を進めている [11]。

2.4 熱・冷中性子強度測定

金箔の放射化法による中性子強度の測定は、古くから行われている一般的な測定方法であり、 $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$ 反応を利用し、中性子照射により生成された ^{198}Au (半減期 2.697 日) からの β^- 崩壊に伴う γ 線 (エネルギー: 主に 411 keV) を計数することで、中性子量を推定するものである。また、金の共鳴吸収の影響を除くため、カドミウムカバー有無の 2 回測定している。この測定方法は、金の吸収断面積が大きいことや、簡便かつ補正が少ないなど、利点が多い。反面、照射場の中性子スペクトルデータ (中性子強度のエネルギー依存性) が必要なことや、オンラインでの測定ができないことが欠点である。

BL10 での測定では、 $15 \times 15 \times 0.05 \text{ mm}^3$ の金箔を測定位置に置いて、10 分程度照射した。その後、ゲルマニウム検出器で、放射化した金箔からの γ 線を計数し、中性子強度へと変換した。

最初の測定は、4 kW 出力の時に、14 m 位置に

金箔を設置し、照射した。この測定から得られた中性子強度は、 $2.8 \times 10^7 \text{ n/cm}^2 @ 1 \text{ MW}$ であった (実験誤差は、5%。主に、陽子ビームモニターの精度)。計算値が、 $2.3 \times 10^7 \text{ n/cm}^2 @ 1 \text{ MW}$ (計算の統計誤差は、10%以下) だったので、良い一致を示している [12]。この測定で大事なのは、コリメータである。金箔照射を 2 度 (カドミウムカバーの有無) 同一条件で測定する必要があるために、測定条件が異ならないようにコリメータを再現良く設置する必要がある。また、その下流での ^3He 中性子モニターによる中性子スペクトルをその都度測定するなど、整合性のチェックができるように工夫している。

この金箔の測定は、現在でも定期的実施している。また、他の BL でも必要に応じ実施している。

2.5 陽子ビーム運転パラメータとの相関

中性子強度の陽子ビームの位置の依存性については、何度か加速器スタディ時に実測を行っており、ほぼ計算通りであることが分かっている。一方、中性子強度の陽子ビーム強度依存性は、単純な比例関係ではなく、陽子ビーム強度が増加するほど、中性子強度の増加量が減少していくことが明らかとなっている (Fig. 8 参照)。これは、水銀ターゲット容器のキャビテーション損傷を抑える必要から、陽子ビームの最大電流密度を抑えるために、水銀ターゲットに入射するビームプロファイルを加速器出力上昇に伴い拡げていることが原因である可能性が高い。今後も加速器出力の増強に合わせ、この中性子強度依存性を観測する必要があると考えている [13]。

Fig. 8 The measured neutron intensities and fitted curve with various proton beam powers. The measured values are normalized by the value at 0.06MW.

3. おわりに

特性試験装置の提案・建設に際しては、相当な逆風が吹き荒れましたが、何とか今日まで内外のユーザーと共に成果を出しつつやって来られました。すでに半数近くの当初提案者が本装置グループを去りましたが、1MW の大強度ビーム実測の実現まで、もう一息の頑張りと思います。

また、BL22 (螺鈿) 稼働開始により、イメージング実験課題が BL10 から無くなりますので、今後は多少課題審査倍率が下がると期待されます。他の装置群では実現不可能な、中性子散乱以外の実験アイデアのある方は、筆者までご相談頂ければ幸いです。

参考文献

- [1] 波紋 18, 159 (2008).
- [2] 波紋 17, 187 (2007).
- [3] 波紋 20, 34 (2010).
- [4] J-PARC MLF ホームページ
<http://j-parc.jp/researcher/MatLife/ja/instrumentation/index.html>
- [5] P. Willendrup et al., Physica B, **350** E73 (2004).
- [6] S. Ikeda et al., Nucl. Instr. Method **A239** 536 (1985).
- [7] K. Oikawa et al., JPS Conf. Proc. 1, 014012 (2014).
- [8] T. Sato, et al., J. Nucl. Sci. Technol. **50**, 913 (2013).
- [9] 原子炉工学大要, 長谷川修ら著, 養賢堂発行, 第8版 (1991).
- [10] M. Harada et al, Proc. Nucl. Sci. Technol **2** 872 (2011).
- [11] S. Takata et al., to be submitted in Proc. 2nd Int. Symp. Sci. J-PARC (2014).
- [12] F. Maekawa et al., Nucl. Instr Method **A620** 159 (2010).
- [13] M. Harada et al., to be submitted in Proc. 2nd Int. Symp. Sci. J-PARC (2014).