冷中性子ディスクチョッパー型分光器 AMATERAS

中島 健次, 河村 聖子

(J-PARC センター 物質・生命科学ディビジョン 中性子利用セクション)

AMATERAS - The Cold-Neutron Disk-Chopper Spectrometer

Kenji Nakajima, Seiko Ohira-Kawamura

Neutron Science Section, Materials & Life Science Division, J-PARC Center

ABSTRACT

AMATERAS is a cold-neutron disk-chopper spectrometer newly constructed in Materials and Life Science Facility in J-PARC. By combination of high-peak intensity from a H_2 -coupled moderator source and high-speed disk-choppers for both pulse shaping and monochromating, the spectrometer is designed to realize both high-resolution ($\Delta E/E_i = 1\% @ E_i = 20 \text{ meV}$) and high-intensity with high flexibility in cold-neutron region. Construction of AMATERAS has been completed in this spring and the spectrometer is now in commissioning phase.

Keywords: J-PARC, Chopper Spectrometer, Disk Chopper, Cold Neutron

1. アマテラス

アマテラス[1] (Fig.1) は, 物質・生命科学実験施設 (MLF) の中性子非弾性散乱装置の中で, 比較的低い数十 μeV から数十 meV のエネルギー領域を受け持つディスクチョッパー型分光器である. J-PARC の中性子源の高強度を享受しつつ高いエネルギー分解能と高い測定の自由度を持つ非弾性散乱装置である. その名前は, 装置のそのような特徴から測定の対象となる現象を「あまねく照らす」, 「あまた照らす」というところ由来する. 分光器の検討は 2003 年以前から行われ, 2005 年には実験装置設置詳細計画書が当時の実験装置計画検討委員会 (現在の中性子実験装置部会) に承認された. そして, 2006 年度には日本原子力研究

開発機構の装置として建設予算が認められ, 3 年間の建設期間を経, 2009 年春に完成した.

アマテラスは, 高分解能と高強度を実現するために, パルス整形チョッパーを装備したマルチチョッパー型分光器という形式を選択している. 分光器は, 線源としてピーク強度の高い結合型減速材を選択している. J-PARC, MLF の結合型減速材は, 特に 20 meV 以下の低エネルギー領域では, 非結合型減速材の 1.5 倍から 2.5 倍の高いピーク強度を持つ. もちろん, 結合型減速材はそのままパルスの時間幅や遅い時間まで続くテールが高いエネルギー分解能実現に不利になる. そのため, 試料近傍の単色化用チョッパーと共に線源の近傍に同等の性能を持つもう 1 台のチョッパーを配置し, それらを通して中性子ビームを試料に入射させることで, 結合型減速材の高強度のピーク部分だけを非結合型減速材に勝るような綺麗な形で切り出して使用しようというのがこの分光器のコンセプトである (Fig. 2). チョッパーの開口時間を最適化することで, 実験条件に合わせて強度と分解能を広い範囲で最適化できる高い自由度もこの分光器の特徴である. 同様の思想で作られた分光器には, アマテラスの他, ISIS 第 2 ターゲットステーションの LET, SNS の CNCS がある. これらは, アマテラスと同時期に計画され, アマテラス同様, 最近相次いで稼働を開始している.

さらにアマテラスでは, 四季や DNA でも取り入れている複数の入射中性子エネルギーを同時に利用して高い測定効率を実現する測定手法である Repetition Rate Multiplication (RRM) にも対応して

Fig.1 A 3D image of AMATERAS.

Fig.2 Schematic image of the concept of a chopper spectrometer with a pulse shaping chopper.

いる。3組の高速ディスクチョッパーは、全てを協調的に運転した場合でも複数個の入射中性子エネルギーが取り出せるように、それぞれの線源からの距離について正確に1:2:4の比になるように設置されている。また、この目的のためにはできるだけ広いバンド幅の中性子が通り抜けられるようにしなくてはならない。高速ディスクチョッパーのディスクの周速は、アマテラスが扱うエネルギー領域の中性子ではその速度と同程度になる。特に、2枚のディスクを組みにして互いに逆方向に回転させて開口時間を短くしている（Counter-Rotating）アマテラスの高速ディスクチョッパーの場合、中性子がきちんと通り抜けられるように、2枚のディスクの間を通過する中性子の飛行時間に合わせて互いのディスクの位相差をずらす必要がある。位相差は、ある特定の速度の中性子に対して最適化されるが、一方で、RRMで複数の入射エネルギーを利用する場合、広いエネルギー範囲の中性子が一度に利用できないと都合が悪い。そのため、最下流のディスクチョッパーは、2つのディスクの厚みがある回転中心部を上下にずらし互いのディスク先端部分を接近させてディスク間の飛行時間を短くして、そのような最適な位相差の違いを小さくし、広いバンドの中性子が十分な強度で通過できるように工夫している[2]。

アマテラスの主要なパラメーターをTable 1に示す。線源-試料間距離、試料-検出器距離は、達成できる最高分解能と試料位置での強度を最適化することで決定された値である。検出器は、できるだけ多くの立体角を覆うことを目標とし、散乱真空槽やそれを納める遮蔽体について、運用上の利便性や製作の困難さ、コストなどを睨んだ上で、この範囲となり、0.67 Srをカバーする。アマテラスで多くの需要が見込まれる非晶質、ソフトマターなどの研究から要請されるであろうできるだけ大きな Q の測定が可能のように、水平方向には180°分のスパンを確保した上で高い散乱角までカバーするようにした。この設計で、 E_i がアマテラスでもっとも得意な領域となる20 meVより低い

Table 1 Characteristic parameters of AMATERAS

Moderator	Coupled H ₂ (BL14)
Flight Path	$L_{\text{moderator-sample}}=30$ m $L_{\text{sample-detector}}=4$ m
Incident Energy	1-80 meV (at its best @ 1~20 meV)
Energy Resolution	$\Delta E/E_i \geq 1\%$ @ $E_i=20$ meV
Scattering Angle	Horizontal: $-40^\circ \sim +140^\circ$ Vertical: $-16^\circ \sim 22^\circ$
Fast Disk-Choppers	Radius: $R=300$ mm Revolution: $f \leq 350$ Hz No. 1 ($L_{\text{moderator-chopper}}=7.1$ m) 2 disks (Counter-Rotating) Slit width: 30 mm No. 2 ($L_{\text{moderator-chopper}}=28.4$ m) 2 disks (Counter-Rotating) Slit width: 10 & 30 mm No. 3 ($L_{\text{moderator-chopper}}=14.2$ m) 1 disk Slit width: 30 mm
Slow Disk-Choppers	Radius: $R=300$ mm Revolution: $f=12.5$ & 25 Hz Opening angle $0-175^\circ$ (variable) $L_{\text{moderator-chopper}}=9$ m & 13.7 m
Beam Transport	$3Q_c$ & $3.8Q_c$ Supermirror Curved Section: $L=19.6$ m, $R=2$ km
Detector System	^3He 1D-PSD 448 tubes (at the full installation) $\phi=1$ inch, $L=3$ m, $p=10$ atm

エネルギーで $\Delta E/E_i$ が最小で1%を切る。また、試料位置での中性子束では、 $\Delta E/E_i=1\%$ 時では、 $10^4 \sim 10^5$ (neutrons/cm²/sec), $\Delta E/E_i=3\%$ の条件で $10^4 \sim 10^6$ (neutrons/cm²/sec)程度になると予想される（いずれも1 MW時）。分解能共々これら分光器の設計上の性能が実現されているかどうかは現在コミッショニングにおいて機器調整を重ねながら検証を行っているところである。

2. アマテラスの機器

アマテラスは、多数の機器より成り立っている。これらの中でも主なものについて紹介していくことで、装置としてのアマテラスの概略を示したい。

2.1. ディスクチョッパー

アマテラスの心臓部と言えるのが、ディスクチョッパーである。線源から7.1 m、および、28.4 mの位置に置かれたそれぞれ2枚組のディスクを持つ高速ディスクチョッパー2台がパルス整形チョッパーを持つチョッパー型分光器としてアマテラスを成立させている主チョッパーである。さらに、RRMを用いる際に問題になる線源のパルスの遅い時間の部分からくる漏れを除去するために、1枚ディスクの高速ディスクチョッパーが、線源から14.2 mの位置に置かれている。

アマテラスでは、 $E_i=20$ meV以下の領域で1%までのエネルギー分解能を出せることが求められていた。そのためには、8 μ s以下の開口時間を実現

Fig.3 A fast disk chopper (No. 2) (left) and a disk (right) of AMATERAS.

する必要があった。直径 700 mm のディスクで 1 cm 幅のスリットを持ったディスクチョッパーでこの開口時間を実現するためには、350 Hz という回転速度が必要となる。その時、ディスクの周速は 780 m/s にも達し、ディスク内部は、170,000G 以上の加速度に耐えなくてはならない。アマテラスが計画された時、これだけの性能を持つディスクチョッパーは世界に存在しなかった。2004 年から開始された開発は、何枚もの試作ディスクやチョッパー本体の破損を繰り返しながら、最後はついに目標とする 350 Hz 回転に耐えられるディスクを製作することができ、アマテラスに装備された。

アマテラスには、高速ディスクチョッパーの他に 2 組の 25Hz、あるいは、12.5Hz で回転する低速チョッパーが装備されている。アマテラスの低速チョッパーには、通常の飛行距離が長い装置で求められるフレームオーバーラップを除去する機能と、RRM 等の運用で必要とされる狙った波長帯を取り出すバンドチョッパーとしての機能が求められ、アマテラスの多彩な実験モードに合わせた多様な運用が求められる。そのため、アマテラスの低速チョッパーは、互いに同方向に回転する 175°の切り欠き部を持ったディスク 2 枚が 1 組となっており、互いの位相の差を調整することで、実効的な開口角度が 0°から 175°まで変化させることができ、柔軟な運用に対応する。

2.2. 真空散乱槽

アマテラスの真空散乱槽は、容積が 59m³、差し渡し 8.5m、高さ 3.6m と MLF の中でも HRC や NOVA と並ぶかなり大きな真空タンクである。アマテラスでは、四季などと同様、検出器を真空槽内に配置し、試料から検出器まで何も遮りものがない一体の真空槽をなす形を採用している。そのため、真空槽は、冷凍機等の断熱真空槽の代わりにも用いられる。この真空槽は、粗引き用の大型のルーツポンプ付きスクリューポンプ（エリコンライボルトバキューム社製 SCREWLINE SP630F (RUVAC WSU2001 付き)）2 系統と大容量のクライオポンプ（エリコンライボルトバキューム社製 COOLVAC 30.000）の組み合わせで 5×10⁻⁵ Pa 以下の真空度まで到達することができる。アマテラスの真空槽は、2008 年夏に 3 分割されて東海村に運ばれ、MLF にほど近い建物内で最終的な組み立て

と真空試験が行われた後、MLF の実験ホールに搬入された (Fig. 4)。据え付けられた後、内壁はカドミウムで内張され、検出器や真空排気系が据え付けられた。

2.3. ガイド管

アマテラスのビーム輸送系は、スーパーミラーガイド管で構成され、試料位置でできるだけ低いバックグラウンドとできるだけ高い中性子線束を実現するように設計されている[3]。水平方向の形状は、線源での即発γ線や高いエネルギーの中性子を取り除き低バックグラウンドを実現するために、曲率 2 km の曲導管となっている。一方で、垂直方向の形状は、試料位置での線束をできるだけ高めるように設計されている。少ない反射で効率よく試料位置に中性子を集束させることのできる楕円形状を出発点として、注意深くシミュレーションを行い、最終的には、直線部分、楕円分、そして、その間に直線部と楕円部をなめらかにつなぐ遷移部分を組み合わせた形状となっている。さらにコストと製作期間をできるだけ押さえるために、スーパーミラーの臨界指数について最適化を行った結果、大部分は 3.0Q_c ミラーを用い、3.8Q_c のミラーは、曲導管の外周側と下流の収束部分などごく限られた部分だけで済ませることができた。アマテラスのガイド管のスーパーミラーは、当初 J-PARC センター内で製作されたミラーのみでまかなう予定であったが、コストや製作期間の最適化を進めていった上で、3.0Q_c ミラーなど比較的安価な部分については外部から購入する形で調達された。結果、アマテラスのガイド管は、J-PARC センター（日本）、Mirrotron（ハンガリー）、Xenox（フランス）それぞれで製作されたミラーを組み合わせた「国際的」なものになった。

2.4. 検出器

アマテラスは、検出器として 1 次元の位置敏感型検出器を用いている。検出器の直径は 1 インチであり、長さは 3 m、ガス圧は 10 気圧である。長尺の検出器を円筒状に配置する検出器の設置の仕方は、もっとも効率よく検出器の見込む立体角を

Fig.4 The scattering chamber of AMATERAS being carried in MLF experimental hall.

Fig.5 AMATERAS opened its beam shutter for the first neutron beam on 27 May, 2009.

大きくする配置[4]として、ILL や ISIS, そして、MLF でも多くの新しいチョッパー型分光器で採用されているが、アマテラスでもこれに倣った。これらの検出器は、全て真空槽内に設置されるため、検出器端部に真空の取り合いを持ち、リードアウト部分だけが大气に曝されるようなコネクターを装備している。アマテラスは、32 本毎合計で 14 個の検出器バンクを持つ。それぞれの検出器バンクの間は、奥行き 1 m のカドミウムで被覆された仕切り板で区切られている。現在、アマテラスは 266 本の検出器の調達が完了しており、8 バンク分の全てと 1 バンク分の 1 部が埋められ、水平面内で 4.7° ~ 111.7° の範囲をカバーしている。

2.5. 遮蔽体

アマテラスの遮蔽体は、他の分光器同様、鉄、ステンレス、コンクリート、ホウ酸レジン等から作られている。特に、検出器を備えた真空散乱槽が納められる分光器室遮蔽体の内側には、(株)フジタが開発したボロンモルタルが使用されている。これは、 B_4C を高濃度（アマテラスの場合は、重量比で 25%）で含むモルタルで、通常モルタルと同様の打設性状を持つ。アマテラスでは、バックグラウンド低減のため、通常施されるホウ酸レジン等の内張の代わりに、これを 35 mm 厚のパネルに加工し分光器室遮蔽体を構成するプレキャストコンクリートの内側に貼り付けて使用している。総体としての遮蔽体の製作コストは下げることができ、仕上がりも美しいものとなった。

3. アマテラスのコミッショニング

2006 年度から開始されたアマテラスの建設は、2009 年春に無事完了した。2009 年 5 月 27 日には、アマテラスは初の中性子ビームを受け入れた。以後、2009 年 11 月末までの 40 日弱の期間に、検出器調整、チョッパーシステム調整、試料位置のビームの評価、バックグラウンド調査と対策、試験測定といった実ビームを使った機器調整（コミッショニング）を行ってきた。まだまだコミッショニングは完全ではなく、分光器の性能を完全に引き出すには至っていないが、それでもアマテラスはその片鱗を見せ始めている。Fig. 6 は、 γ -ピコリン-N-オキシドの粉末試料を測定したものである。最下流

の No.2 高速ディスクチョッパーのみを 10 mm スリット、300 Hz で回転させた場合、及び、最上流の No.1 高速ディスクチョッパーを同時に 300 Hz で回転させてパルス整形を行った場合で、2 台の低速ディスクチョッパーで 40,000~80,000 μ 秒の第 2 フレームを切り取っている。 E_i について 3 meV から 1 meV まで複数のデータが取得できており、それぞれ独立に解析可能である。RRM により複数の E_i を入射させることで、異なる複数の分解能での測定が一度に行えることは、緩和時間の測定等、アマテラスが範囲に捉えるエネルギー領域で期待される測定にとって大きな魅力となるであろう。非干渉性散乱のピークから、弾性散乱位置での分光器の分解能が見込まれる。No.1, No.2 両方の高速ディスクチョッパーを回転させることでパルス整形が実現され、結合型減速材由来のテールが綺麗に整形されているのが分かる。また、 $\Delta E/E_i$ も 1.1% を達成し、12 μ eV の分解能が得られている。なお、この測定で用いられた試料の直径は 10mm で、この分解能の領域では試料の大きさからくる飛行時間の揺らぎが装置本来の分解能に対して無視し得ない。もう少し注意深い試料サイズを選択すれば、現状でもさらに高い分解能が実現されていることが確認できるであろう。メチル基の回転のトンネル励起が 4 本とも綺麗に観測できており、その励起エネルギーは、過去の測定結果[5]と一致する。

4. アマテラスの今後

冷中性子ディスクチョッパー型分光器・アマテラスは、一応の完成を見た。また、2009 年の 12 月からは、限られた日数ながら、一般課題の受け入れも開始している。しかしながら、コミッショニングはまだまだ途上であり、きちんとした性能を出して実験を行うためには、残された作業が多い。また、機器のいくつかもまだ未整備である。ユーザーの方々にはご迷惑をおかけするが、これらは、ビームタイムを割り当てられた一般課題の実施と平行しながら、我々装置グループの努力で早急に対応していきたい。また、装置本体以外にも現在標準的な 4 K の冷凍機しかない試料環境装置の整備についても課題である。データ解析用のソフトウェアについても、用意されている基本的な部分からさらに個々の研究に合わせて必要とさ

γ -Picoline-N-Oxide (powder) 1.1g $T = 4$ K

Fig.6 Observed spectrum from γ -Picoline-N-Oxide powder measured on AMATERAS at 100 kW operation.

れる部分については今後の整備である。これらの部分については、アマテラスを使ってくれるユーザーの方々とも協力して整備を進めていけないかと考えている。さらに、アマテラスは、3組の高速ディスクチョッパーと2組の低速ディスクチョッパーについて多彩な運転の設定が可能であり、極めて実験の自由度が高い。MLFで標準化されたイベントモードによるデータ測定と組み合わせることで、当初、我々が想定していなかったようなアマテラスの使い方もあり得る。このような部分も含めて、我々装置関係者の他にアマテラスを使ってくれるユーザーも含めてみんなでこの分光器を良いものに仕上げていければいいと考えている。

謝辞

アマテラスの検討、関連機器の開発、建設、コミショニングには、多くの関係者が関わっている。これらアマテラスの実現に関わっていただいた方々、現在の運転、維持を支えていただいている方々に感謝しつつその名前を挙げたい。梶本亮一 (J-PARC)、中村充孝 (同)、稲村泰弘 (同)、脇本秀一 (J-PARC、原子力機構)、長壁豊隆 (同)、柴田薫 (J-PARC)、高橋伸明 (同)、曾山和彦 (同)、丸山龍治 (同)、相澤一也 (同)、鈴谷賢太郎 (同)、鈴木淳市 (同)、中谷健 (同)、前川藤夫 (同)、及川健一 (同)、原田正英 (同)、吉田登 (同)、田中浩道 (同)、岩橋孝明 (同)、神原理 (同)、加倉井和久 (原子力機構)、佐藤卓 (東京大学)、伊藤晋一 (KEK)、目時直人 (原子力機構)、吉田勝彦 (神戸製鋼所)、仁井田浩二 (高度情報科学技術研究機構)、Ferenc Mezei (ハンガリー科学アカデミー)、Ruep E. Lechner、新井正敏 (J-PARC)。

参考文献

- [1] K. Nakajima *et al.*, J. Neutron Res. **15** 13-21 (2007).
- [2] M. Nakamura *et al.*, J. Neutron Res. **15** 31-37 (2007).
- [3] R. Kajimoto *et al.*, J. Neutron Res. **16** 81-86 (2008).
- [4] R. E. Lechner, J. Neutron Res. **16** 23-29 (2008).
- [5] S. Ikeda *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **60** 3340-3350 (1991).