

機関番号： 8 2 1 1 0  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間： 2008 ～ 2010  
 課題番号： 2 0 6 1 2 0 1 6  
 研究課題名（和文） 高効率パルス中性子非弾性散乱実験を実現する革新的中性子チョッパーの開発  
 研究課題名（英文） Research and Development of innovative neutron chopper to achieve the high efficient inelastic neutron scattering measurement  
 研究代表者  
 中村 充孝（NAKAMURA MITSUTAKA）  
 独立行政法人 日本原子力研究開発機構・J-PARC センター・研究副主幹  
 研究者番号： 0 0 3 7 0 4 4 5

研究成果の概要（和文）：複数の入射エネルギーを試料まで導くことで中性子非弾性散乱実験の測定効率を飛躍的に高める手法（Multi-Ei 法）を提案し、その実証実験に成功した。Multi-Ei 法の測定効率をさらに向上させるために、中性子スーパーミラーを貼付した新規スリットパッケージを有する新型フェルミチョッパーの研究開発を進めた。透過中性子強度が低エネルギー領域で顕著に増強されることを実証するなど、Multi-Ei 法のさらなる測定効率向上を達成することができた。

研究成果の概要（英文）：We proposed a new method to increase the efficiency of inelastic neutron scattering measurement utilizing the multiple incident energies (Multi-Ei method), and succeeded in the demonstration experiment. To further increase the efficiency of Multi-Ei method, we developed a new Fermi chopper with supermirror-coated slitpackage. We experimentally demonstrated that the transmitted intensity from a new slitpackage becomes stronger in lower energy region, and thus the improvement of efficiency in Multi-Ei method has been achieved.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：中性子散乱、物性物理（非晶質）

科研費の分科・細目：量子ビーム科学

キーワード：中性子散乱、パルス中性子源、チョッパー型分光器、J-PARC、量子ビーム

## 1. 研究開始当初の背景

本研究課題申請時に建設が進められていた大強度陽子加速器施設 J-PARC は、ビーム出力 1MW のパルス中性子源を実現するものであり、申請時に世界最高強度のパルス中性子源施設であった英国ラザフォードアップルトン研究所・ISIS 施設のビーム出力 (160kW) を遥かに凌ぐものである。J-PARC パルス中性子源により提供される大強度中

性子ビームは、我が国が誇る最先端量子ビームとしてその有用性に大きな期待が寄せられてきた。また、国外のパルス中性子源施設に目を向けると米国が SNS 施設（ビーム出力 1.4MW）を 2006 年に稼働させ、英国が ISIS-TS2（ビーム出力 0.3MW）を 2008 年稼働予定で建設を進めていた。その他、中国においても CSNS 施設の建設を決定するなど、大強度パルス中性子源施設をめぐって世

界的に熾烈な競争が繰り返されてきた。このような世界的な建設ラッシュの背景には、パルス中性子源に設置されたチョッパー型分光器から数多くの革新的な成果が発信されたことが大きく影響していた。

チョッパー型分光器を使った中性子非弾性散乱測定では、広い運動量・エネルギー空間でのダイナミクスを一挙に観測することが可能であるが、統計精度の良いデータを得るには申請時に世界最高強度であった ISIS 施設をもってしても、数十グラム以上の試料量と数十時間にも及ぶ測定時間を要し、このことが研究のさらなる進展を阻む要因にもなっていた。研究代表者はこれまでに、チョッパー型分光器の測定効率を高める工夫として、複数の異なる入射エネルギーを同時に中性子非弾性散乱測定に利用して飛行時間法における検出器の不感時間を少なくする方法（以下、Multi-Ei 法と呼ぶ）を提案し、J-PARC でのチョッパー分光器設計に反映させてきた。複数の入射エネルギーを同時に利用する Multi-Ei 法の適用により測定効率が向上することは十分見込まれるものの、従来のチョッパーを使用する限り、複数の異なる入射エネルギー全てに対して実験条件を最適化することが原理的に不可能であるという問題があった。

## 2. 研究の目的

Multi-Ei 法による測定において、複数の異なる入射エネルギー全てに対して実験条件を最適化することができないという問題点を解決するため、研究代表者らは中性子スーパーミラーをチョッパーのスリット部に適用した新型チョッパー（以下、MAGIC チョッパーと呼ぶ）を提案した。MAGIC チョッパーは、中性子透過材、中性子吸収材、中性子スーパーミラーの積層構造によりチョッパーのスリットが構成され、中性子エネルギーによって臨界角が異なる中性子スーパーミラーの特性を利用することで、実効的なチョッパーの開口時間幅を入射エネルギーに応じて連続的に変化させ、複数の異なる入射エネルギー全てにおいて実験条件を最適化できるという特徴を有する。本研究課題は、申請時まで検討を進めてきた MAGIC チョッパーの特性を実証することを主な目的としており、試作機による性能評価試験およびモンテカルロシミュレーションによる計算、中性子吸収材の積層技術の確立などを進め、実際のフェルミチョッパーに組み込むスリットパッケージ実機を作製することを目的としていた。

## 3. 研究の方法

### (1) Multi-Ei 法の実証実験

中性子スーパーミラーを具備していない直線型のスリットパッケージを、J-PARC 物質・生命科学実験施設の BL01 に設置されたチョッパー型分光器「四季」のフェルミチョッパーに組み込み、Multi-Ei 法の実証実験を実施する。

### (2) シリコン基板の機械的性質の試験

MAGIC チョッパーにおけるスリットパッケージの中性子透過材としては、中性子スーパーミラーを成膜することのできるシリコン基板を想定している。後述の応力・ひずみ解析を実施する上で必要なパラメータであるシリコン基板の引張強さや破断応力を引張試験によって評価する。

### (3) スリットパッケージの構造設計

600Hz 回転に耐えうるスリットパッケージ及びサポート枠の形状・寸法を決定するため、有限要素解析プログラムを利用して、応力計算を実施する。

### (4) MAGIC チョッパースリットパッケージの試作

(3)での計算結果に基づき、決定した寸法でスリットパッケージを試作する。中性子スーパーミラーを備えたパッケージと備えていないパッケージの2種類を作製する。

### (5) ロッキングカーブ測定

(4)で作製した2種類のスリットパッケージに白色中性子ビームを入射させ、透過ビームのロッキングカーブ測定を実施し、中性子スーパーミラーを具備したスリットパッケージの静的特性を評価する。

### (6) パルス同期型回転試験機の開発

MAGIC チョッパー運用時の性能評価を実施するためには、パルス中性子の発生周期と同期してスリットパッケージを回転させ、パルス白色中性子ビームの透過実験が必須である。市販のフェルミチョッパーシステムは非常に高価であり、上述の評価試験には適さないことから、最大回転数 150Hz のスリットパッケージ評価用パルス同期型回転試験機を開発し、完成させる。

### (6) パルス中性子による MAGIC チョッパー性能評価試験

(5)で開発したパルス同期型回転試験機を利用して、スリットパッケージの回転とパルス中性子の発生周期とを同期させたパルス白色中性子ビームの透過実験を実施する。実験結果を検証することにより、スリットパッケージ仕様最適化の開発サイクルを確立し、

MAGIC チョッパーの実機完成の目処を立てる。

#### 4. 研究成果

##### (1) Multi-Ei 法の実証実験に成功

2009年6月には、J-PARCのチョッパー型分光器「四季」においてMulti-Ei法の有用性を実証する実験に成功し(図1参照)、本研究開発を報告した学術論文(M. Nakamura et al., Journal of the Physical Society of Japan 78 (2009) 093002)は、当該論文誌のEditor's choice (2009年9月)に選ばれ、日本物理学会及びJ-PARCセンターからプレス発表された。このプレス発表に基づき、新聞にも大きく取り上げられた(科学新聞10月2日版2面)。本研究は国内外の中性子科学研究者および物性研究者に非常に大きなインパクトを与え、研究代表者らは様々な研究会での招待講演やレビュー誌への執筆依頼を受けた。現在稼動しているパルス中性子源のみならず、2017年頃の運転開始を目指して建設が進められているヨーロッパの大強度中性子源計画(ESS計画)においても、Multi-Ei法の採用が見込まれている。このように、研究代表者らが実証したMulti-Ei法は、中性子非弾性散乱実験における従来の常識を覆すものであり、今後広く国内外でスタンダードな測定手段として普及することが見込まれている。

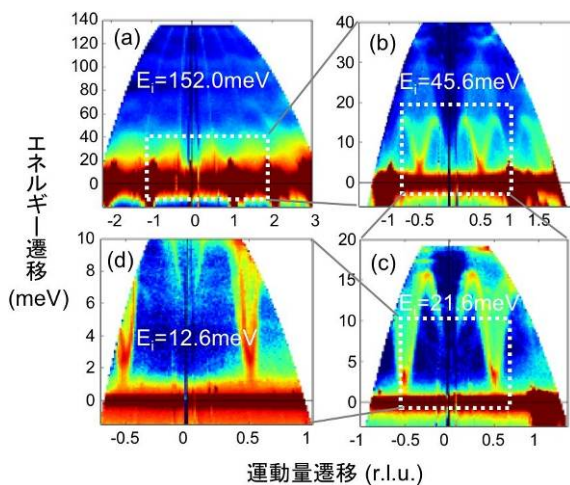


図1 Multi-Ei法で観測した非弾性中性子散乱データ。CuGeO<sub>3</sub>のダイナミクス情報を視覚化した4種類の二次元マップを1度の測定で同時に得ることに成功した。これらのデータは互いにズームイン・アウトの関係になっている。

##### (2) MAGIC チョッパー性能評価試験に成功

2009年度までに600Hzまでの高回転に耐えるスリットパッケージの設計を有限要素解析により最適化し、中性子スーパーミラーを含むパッケージと含まないパッケージの2種類の試作品を作製した。これらの試作品に

パルス白色中性子ビームを入射させ、透過ビームのロッキングカーブ測定を実施した(図2参照)。

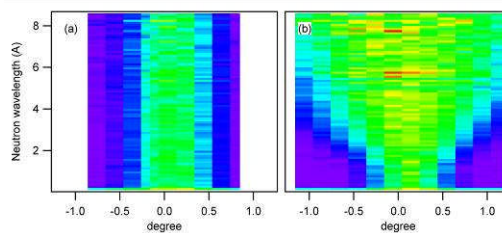


図2 スリットパッケージのロッキングカーブ測定。縦軸は入射中性子波長。(a)中性子スーパーミラーなし、(b)中性子スーパーミラーあり。

実際の運用時におけるスリットパッケージの特性評価試験を実施するために、パルス中性子発生周期と同期可能なスリットパッケージ評価用回転試験機の開発に着手し、実機を完成するに至った。この回転試験機を利用した新規スリットパッケージの中性子透過率測定等の特性評価をJ-PARC物質・生命科学実験施設のBL10に設置された特性試験装置「NOBORU」にて実施した。

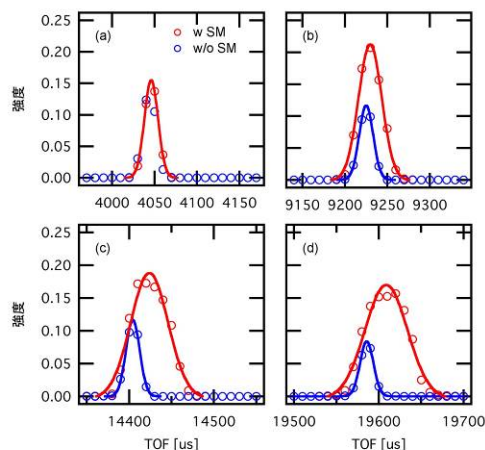


図3 スリットパッケージを透過したスペクトルの飛行時間依存性。赤丸は中性子スーパーミラーあり、青丸は中性子スーパーミラーなし。

図3は、スリットパッケージを100Hzで回転させ、その回転周期とパルス中性子発生周期を同期させたときの透過スペクトルの飛行時間依存性であるが、中性子スーパーミラーを備えたスリットパッケージでは、飛行時間が長い(入射エネルギーが低い)領域で、積分強度が大幅に増大していることがわかる。ピーク幅の増大はMAGICチョッパーのアイデアを着想した段階で予想できたものであるが、ピーク強度の増大は予期していなかった重要な効果である。スリットパッケージ

に入射する中性子ビームはある程度空間的に分散を持って広がっているが、中性子スーパーミラーの効果により、ビーム広がり抑制することができていると考えられる。図4に示した中性子スーパーミラーを具備することによる積分強度のゲインから、低エネルギー領域で20倍にも及ぶ強度ゲインが実現できていることがわかる。このことから、MAGIC チョッパーを用いることで、他国の追随を許さない大強度低エネルギーチョッパー分光器が実現できる可能性が出てきた。今後さらなる検討を続ける予定である。

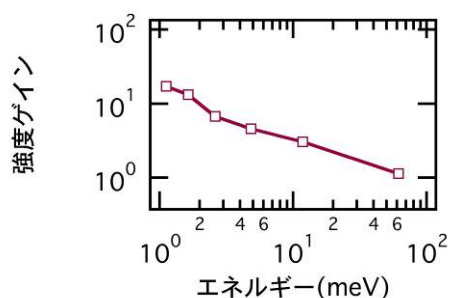


図4 中性子スーパーミラーを備えた新規スリットパッケージにおける強度ゲインのエネルギー依存性。中性子スーパーミラーを備えていない通常のスリットパッケージの値で規格化されている。

パルス中性子源から発生する中性子ビームの時間幅 $\Delta t_m$ のエネルギー依存性と実験で得られたチョッパー開口時間 $\Delta t_{ch}$ のエネルギー依存性を図5に示す。

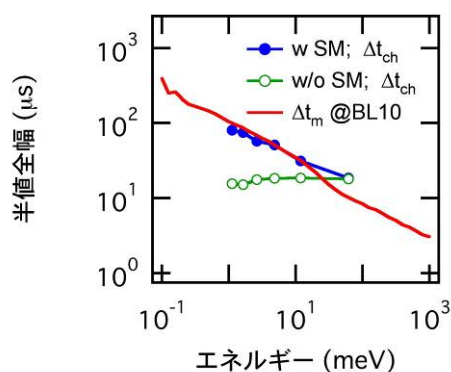


図5 スリットパッケージを100Hzで回転させた場合のチョッパー開口時間。青丸は中性子スーパーミラーあり、緑丸はスーパーミラーなし。赤線はパルス中性子源から発生する中性子ビーム（J-PARC 物質・生命科学実験施設 BL10）の時間幅。

チョッパー分光器による中性子非弾性散乱実験では、 $\Delta t_{ch}$ と $\Delta t_m$ がほぼ等しいときに実験条件が最適化される。中性子スーパーミラーを備えたスリットパッケージによって、ほ

ぼ全ての入射エネルギーで $\Delta t_{ch} \approx \Delta t_m$ が成立しており、通常のチョッパーでは実現不可能であった Multi-Ei 法における全入射エネルギーでの実験条件最適化は、MAGIC チョッパーにより達成可能であることが実証された。本研究開発によって、①Multi-Ei 法による高効率測定の実証、さらには、②MAGIC チョッパーによる高効率測定の実証がなされ、パルス中性子源における中性子非弾性散乱実験の効率を飛躍的に向上させることが可能となった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計10件)

① 動き出した J-PARC 中性子非弾性散乱装置「四季」 --中性子非弾性散乱実験の新規手法の実証--

梶本亮一、中村 充孝、稲村泰弘、水野文夫、横尾哲也、中谷健、新井正敏、藤田全基  
固体物理 第45巻 第2号 (2010)  
pp.1(79)-11(89). 査読無

② New Technique for Inelastic Scattering Measurement Is in Practical Use at J-PARC  
R. Kajimoto, M. Nakamura and M. Arai  
Neutron News Vol. 21 No. 1 (2010) 55-56. 査読有

③ A New Possibility of Dynamical Study on Solid State Ionic Materials by Inelastic Neutron Scattering  
M. Nakamura, K. Nakajima, Y. Inamura, S. Ohira-Kawamura, T. Kikuchi, T. Otomo and M. Arai  
Atom Indonesia 36 (2010) 116-120. 査読有

④ Novel Dynamics of Superionic Conducting Glasses Proved by Inelastic Neutron Scattering  
M. Nakamura, M. Arai, Y. Inamura and E. Kartini  
Journal of the Physical Society of Japan 79 (2010) Suppl. A 122-124. 査読有

⑤ 4次元空間中性子探査装置「四季」  
梶本亮一、中村 充孝  
日本中性子科学会誌「波紋」 Vol. 20, No. 1, 2010, pp. 8-12. 査読有

⑥ 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  
日本中性子科学会誌「波紋」 Vol. 20, No. 1,

2010, pp. 49-53. 査読有

⑦ Effect of interfacial roughness correlation on diffuse scattering intensity in a neutron supermirror  
R. Maruyama, D. Yamazaki, T. Ebisawa and K. Soyama

Journal of Applied Physics 105 (2009) 083527-1 -083527-8. 査読有

⑧ First Demonstration of Novel Method for Inelastic Neutron Scattering Measurements Utilizing the Multiple Incident Energies  
M. Nakamura, R. Kajimoto, Y. Inamura, F. Mizuno, M. Fujita, T. Yokoo and M. Arai  
Journal of the Physical Society of Japan 78 (2009) 093002-1-093002-4. 査読有

⑨ Study of the neutron guide design of the 4SEASONS spectrometer at J-PARC  
R. Kajimoto, K. Nakajima, M. Nakamura, K. Soyama, T. Yokoo, K. Oikawa and M. Arai  
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 600 (2009) 185-188. 査読有

⑩ Development of high-reflectivity neutron supermirrors using an ion beam sputtering technique  
R. Maruyama, D. Yamazaki, T. Ebisawa, K. Soyama  
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 600 (2009) 68-70. 査読有

[学会発表] (計 40 件)

① Present Status of the Fermi Chopper Spectrometer 4SEASONS at J-PARC (招待講演)

R. Kajimoto

The International Workshop on Neutron Applications on Strongly Correlated Electron Systems 2011

2011年2月24日

いばらき量子ビーム研究センター

② A New Possibility of Dynamical Study on Solid State Ionic Materials by Inelastic Neutron Scattering (招待講演)

M. Nakamura

International Conference on Materials Science and Technology 2010

2010年10月20日

インドネシア、セルボン

③ New Opportunities of Neutron Sciences Provided by MLF, J-PARC Over View of New Neutron Source & Instruments at MLF,

J-PARC (招待講演)

K. Nakajima

Annual Meeting of the Korean Physical Society

2010年10月20日

韓国、平昌

④ Recent Progress in Inelastic Neutron Scattering in J-PARC for the Study on Strongly Correlated Electron Systems

R. Kajimoto

Recent Progress on Spectroscopies and High-Tc Superconductors

2010年8月10日

東北大学 (宮城県仙台市)

⑤ New technique for inelastic neutron scattering measurement demonstrated on the chopper spectrometer 4SEASONS at J-PARC (招待講演)

R. Kajimoto 他7名

American Conference on Neutron Scattering 2010

2010年6月28日

カナダ、オタワ

⑥ A Neutron Focusing Device with Spheroidal Supermirrors

K. Soyama 他4名

International Workshop on Neutron Optics (NOP2010)

2010年3月17日

フランス、グルノーブル

⑦ First Demonstration of Multi-Ei measurement for Inelastic Neutron Scattering

M. Nakamura 他8名

19th meeting on International Collaboration of Advanced Neutron Source (ICANS-XIX)

2010年3月11日

スイス、グリンデルヴァルト

⑧ Starting-up of the Chopper Spectrometer 4SEASONS in J-PARC

R. Kajimoto 他27名

19th meeting on International Collaboration of Advanced Neutron Source (ICANS-XIX)

2010年3月11日

スイス、グリンデルヴァルト

⑨ A New Technique of Inelastic Neutron Scattering Measurement Utilizing Multiple Incident Energies

M. Nakamura

The 10th KOREA-JAPAN Meeting on Neutron Science

2010年1月24日

東北大学（宮城県仙台市）

⑩ Novel Dynamics of Superionic Conducting Glasses Proved by Inelastic Neutron Scattering

M. Nakamura 他2名

The 3rd International Conference on Physics of Solid State Ionics (ICPSSI-3)

2009年10月26日

熊本大学（熊本県熊本市）

⑪ AMATERAS Cold-Neutron Disk-Chopper Spectrometer in MLF, J-PARC

K. Nakajima

Trends in Cold Neutron Time-of-Flight Spectroscopy

2009年11月26日

フランス、グルノーブル

⑫ 4SEASONS: a high-intensity chopper spectrometer for inelastic neutron scattering at J-PARC/MLF

R. Kajimoto 他22名

XXI Congress and General Assembly of the International Union of Crystallography (IUCr2008)

2008年8月28日

大阪国際会議場（大阪府大阪市）

⑬ New Opportunity and Possible View from Neutron Spectroscopy at J-PARC

Kenji Nakajima

Workshop for a Nano Dynamics Beamline

2008年5月22日

SPring-8（兵庫県佐用郡）

〔その他〕

ホームページ等

<http://jolifukyu.tokai-sc.jaea.go.jp/fukyu/mirai/2010/pdf/14-5.pdf>

<http://www.jaea.go.jp/02/press2009/p09091001/index.html>

<http://j-parc.jp/MatLife/ja/news/091228.html>

<http://j-parc.jp/MatLife/ja/news/091228.html>

<http://j-parc.jp/MatLife/ja/news/091228.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村 充孝 (NAKAMURA MITSUTAKA)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・

J-PARC センター・研究副主幹

研究者番号：00370445

### (2) 研究分担者

曾山 和彦 (SOYAMA KAZUHIKO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・

J-PARC センター・研究主幹

研究者番号：90343912

中島 健次 (NAKAJIMA KENJI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・

J-PARC センター・研究主幹

研究者番号：10272535

梶本 亮一 (KAJIMOTO RYOICHI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・

J-PARC センター・研究副主幹

研究者番号：30391254