

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901
 研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2011 ～ 2012
 課題番号：23760825
 研究課題名（和文）
 共鳴領域中性子イメージング手法の開発
 研究課題名（英文）
 Development of neutron resonance imaging
 研究代表者
 富田 英生 (TOMITA HIDEKI)
 名古屋大学・工学研究科・准教授
 研究者番号：20432239

研究成果の概要（和文）：

先進ガン治療法であるホウ素中性子捕捉療法（BNCT）への適用を念頭に、BNCT で用いられる熱外中性子ビーム断面の2次元形状・強度を共鳴吸収フィルタとガス電子増幅器を用いて測定する手法の開発を行った。熱外中性子の共鳴吸収と競合する熱中性子吸収を抑える熱中性子遮蔽の最適化と信号読み取り回路系の構築を行い、パルス熱外中性子ビームを用いてプロトタイプ装置で得られる空間分解能を実験的に評価した。これをもとに共鳴フィルタの設計検討を行い、BNCT 熱外中性子ビーム照射場に対し、熱外中性子を空間分解能 5 mm で測定可能であること示した。

研究成果の概要（英文）：

An epithermal neutron camera based on energy-filtered imaging with gas electron multipliers was developed. Epithermal neutron imaging is achievable without time-of-flight detection of neutrons by using a resonance filter and a thermal neutron absorber. This technique is applicable to compact accelerator-based neutron sources. Epithermal neutron imaging was demonstrated using the Ag resonance filter and the B₄C sheet as a thermal neutron absorber. Coded aperture imaging for epithermal neutron was also investigated based on numerical calculation model of the camera.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

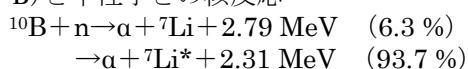
研究分野：量子ビーム計測工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：中性子イメージング、熱外中性子、ガス検出器、共鳴フィルタ

1. 研究開始当初の背景

先進がん治療法であるホウ素中性子捕捉療法 (Boron Neutron Capture Therapy: BNCT) は、悪性腫瘍細胞に取り込ませたホウ素 (¹⁰B) と中性子との核反応



に起因した α 粒子と ⁷Li により、腫瘍細胞を選択的に死滅させる治療法である。この ¹⁰B(n, α)⁷Li 反応は、熱中性子（エネルギー 約 0.025eV）に対し大きな断面積を有するため、

は、腫瘍部へ熱中性子を照射する必要がある。体外より熱中性子を照射した場合には、生体内に含まれる水中の水素原子核との弾性散乱により、人体表面から浅い位置にある体内の腫瘍部を除き、効率的な照射は困難であった。このため、熱中性子よりわずかにエネルギーの高い熱外中性子（エネルギー 数 eV～数 keV）を使用し、より深い位置にあるガン細胞を標的とする臨床研究が進められている。照射場における熱外中性子の空間分布を把握・制御できれば、患者の被曝量低減やよ

り効果的な治療が可能になると期待される。一方、共鳴中性子ラジオグラフィでは、測定対象物質を透過した熱外中性子のイメージングを行うことで、X線ラジオグラフィでは分析が困難な、高密度・高原子番号物質に囲まれた対象物質中の熱外中性子エネルギー領域に固有の共鳴を持つ元素のイメージングが実現できると期待される。

中性子回折や中性子ラジオグラフィのための冷中性子・熱中性子などの低エネルギー領域の中性子に対しては、高効率な中性子荷電粒子コンバータを有する高空間分解能イメージング手法が実用化されている。また、核融合プラズマ診断などのための高速中性子イメージング手法の開発はこれまでになされているが、熱外中性子は競合する熱中性子の反応断面積が大きく、中性子弾性散乱による反跳核のエネルギーも低いため、熱外エネルギー領域の中性子を選択的に検出する画像検出器の開発は進んでこなかった。

2. 研究の目的

熱外中性子の選択的な空間分布測定を目的として、共鳴フィルタとガス電子増幅器 (Gas Electron Multiplier: GEM) を用いた熱外中性子画像検出器を提案した。熱外中性子画像検出器の概念図を図1に示す。中性子反応断面積に固有の共鳴を持つ物質のうち、熱外中性子エネルギー領域に共鳴をもつフィルタ (共鳴フィルタ) を中性子が通過すると、共鳴に対応するエネルギーを有する中性子数が大きく減少する。共鳴フィルタ通過後の中性子数を中性子検出器により計数すると、共鳴フィルタ有無により各ピクセルにおいて得られるカウント差は、共鳴フィルタによって吸収された中性子数に対応する。このため、共鳴フィルタを2次元配置することにより、入射熱外中性子の空間分布を測定できる。ここで、共鳴フィルタ有無による有意な計数差 (熱外中性子の情報) を得るには、相対的に感度の高い熱中性子の遮蔽、ガンマ線に対する感度が十分低く、感度のばらつきの少ない中性子検出器が必要であり、本研究では ^{10}B コンバータを有するGEMを用いたプロトタイプ検出器を作製し、その特性を評価した。

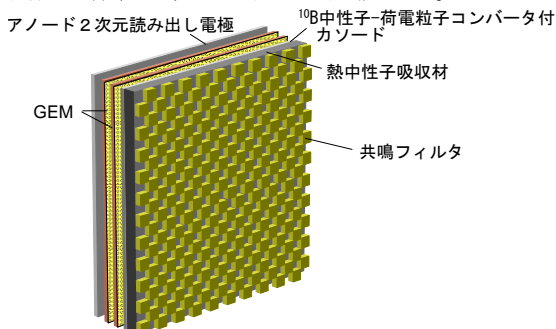


図1 共鳴フィルタと熱中性子吸収材を用いた熱外中性子イメージング装置の概念図

3. 研究の方法

熱外中性子イメージングのために、解の3項目を実施した。

(1) 中性子輸送計算に基づく検出器応答計算モデルの構築

粒子・重イオン輸送計算コード (Particle and Heavy Ion Transport code System: PHITS) を用いた中性子輸送計算に基づく検出器応答計算モデルを構築し、熱外中性子の共鳴吸収と競合する熱中性子吸収を抑えるための熱中性子遮蔽物質形状の設計検討を行った。

(2) 共鳴フィルタの設計・試作

検出器応答計算モデルをもとに熱外中性子イメージングのための共鳴フィルタの設計検討を行った。特に、熱外中性子源がビーム状とみなせない場合、その拡がり共鳴フィルタでの中性子の挙動に大きく影響する。そこで、符号化開口法に基づく共鳴フィルタ (コーデッド共鳴フィルタ) の形状について、設計検討を行った。

(3) プロトタイプ検出器の作製と熱外中性子イメージングの特性評価

^{10}B コンバータを有するGEMとAg共鳴フィルタを用いたプロトタイプ検出器を作製し、京都大学原子炉実験所電子線形加速器 (KURRI-LINAC) におけるパルス熱外中性子ビームを用いて、特性を評価した。また、これをもとにBNCT熱外中性子照射場に対する適用性を検討した。

4. 研究成果

中性子輸送のモンテカルロ計算モデルを構築し、熱外中性子の共鳴吸収と競合する熱中性子吸収を抑えるための熱中性子遮蔽物質形状の設計検討を行った。本検出器において、共鳴フィルタ有無による共鳴ピーク以下の低速中性子成分に対する感度の差異を抑制するために、熱中性子遮蔽材として ^{10}B を利用することとした。 ^{10}B 厚さを変化させて共鳴フィルタ有無の差から得た検出効率と、その検出効率に対する対象エネルギーの熱外中性子による寄与割合を計算した。結果を図2に示す。ここでは、共鳴フィルタとして、熱外中性子領域に共鳴ピークを有するAg, W, Coについて検討した。BNCT用中性子源 (Mix mode) では ^{10}B 層を厚くしていくと寄与割合が大きくなっていくが検出効率は減少していき、しだいに寄与割合も減少していった。これは ^{10}B 層が厚くなるに従って、検出器の低エネルギー中性子に対する応答が抑制されていき、相対的に検出効率中の熱外中性子寄与割合が増大した結果であると考えられる。このとき熱中性子遮蔽材は、厚くなりすぎると検出効率が低下してしまうことから、熱外中性子寄与割合が一定となる厚さの範

囲で最も厚いものとして、共鳴フィルタに Ag を用いる場合には、 ^{10}B 層厚さとして 0.1mm 程度が必要であると見積もられた。

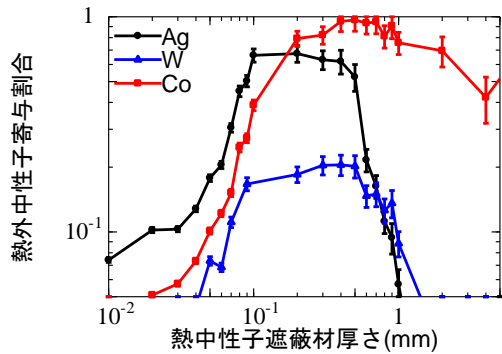


図2 熱中性子遮蔽材厚さと熱外中性子寄与割合の関係

次に、共鳴フィルタ (Ag, W, Co) の厚さに対する共鳴フィルタ有無の差から得た検出効率と、その検出効率に対する対象中性子による寄与割合を計算した。ここでは、熱中性子遮蔽材は導入せず、共鳴フィルタによる応答を計算した。共鳴フィルタ厚とともに検出効率は増加するが、熱外中性子寄与割合は減少する。共鳴フィルタ熱外中性子寄与割合が最大となる厚さはいずれも 0.1mm 程度であることが明らかとなった。

次に、測定対象中性子ビームの角度拡がりが無視できない中性子場に対しては空間分解能が低下するため、モンテカルロシミュレーション計算に基づき、熱外中性子イメージングに対するコーデッド共鳴フィルタの適用を検討した。符号化開口法では記録像 P 、線源強度分布 O 、開口パターン A 、復号化配列 G とすると再構成像 RO は以下のように表せる。

$$RO[i, j] = P * G = (O * A) * G$$

よって、コーデッド共鳴フィルタを用いる場合には、2次元中性子検出器で得られる熱外中性子像 (共鳴フィルタ有無の差より得られる記録像) を、デコーディングすることで、線源位置での熱外中性子空間分布を測定できる。コーデッド共鳴フィルタを用いた場合に検出器より得られる計数をモデル計算により求め、デコーディングによって熱外中性子画像を得た。開口面に設置するコーデッド共鳴フィルタは Ag 製で、開口パターンは M 配列を 4 周期並べたものとした。中性子源は図3に示すような $3 \text{ mm}^2/\text{pixel}$ の面線源 9 個を十字型に並べたものとし、京都大学原子炉の BNCT 用 epithermal mode 中性子スペクトルを模擬した。結果の一例として、コーデッド共鳴フィルタにより得られた像を図4に示す。入射中性子数が 10^9 neutrons の場合、開口穴径 $3 \text{ mm}\phi$ であれば、線源像に近い強度分布像が得られることがわかる。

入射中性子数を増加させていくと、計数統計に起因するばらつきが減少し、S/N比 (イメージング像の線源位置に対応するピクセルの平均カウントをシグナル、それ以外のピクセルの平均カウントをノイズとした比) が向上するが、入射中性子数が 10^{11} neutrons 程度となると、共鳴フィルタ形状に起因する不確かさ (クロストーク、共鳴フィルタカバー率など) により S/N比が制限されることが明らかとなった。

これにより、熱外中性子ビームが拡がりを持つ場合には、コーデッド共鳴フィルタが有用である見込みが得られた。しかし、コーデッド共鳴フィルタ形状の最適設計については、対象物形状および線源 (ビーム拡がり、エネルギースペクトルなど) に依存するため、今後の技術的課題と考えられる。

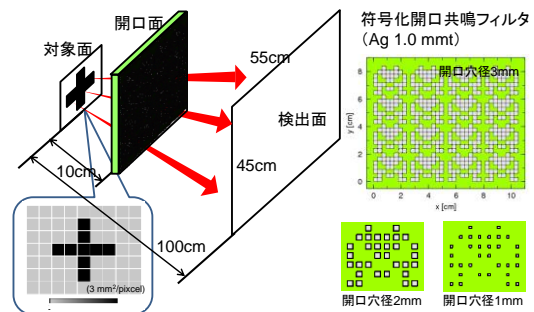


図3 コーデッド共鳴フィルタの計算体系

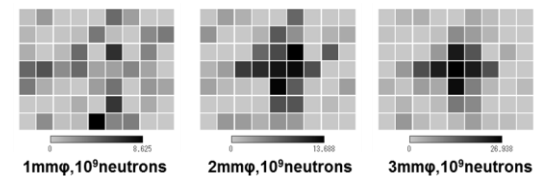


図4 コーデッド共鳴フィルタを用いて得られた再構成画像 (Ag 1.0mm 厚、開口穴径 1, 2, 3 mmφ の場合)

これらの検討をもとに Ag 製の格子状共鳴フィルタを有するプロトタイプ検出器を作製し、KURRI-LINAC パルス中性子源において、応答関数と空間分解能を実験的に評価した。図5に KURRI-LINAC パルス中性子源における実験体系を示す。生成されるパルス中性子ビーム ($\phi 22 \text{ mm}$) をプロトタイプ検出器の中心に照射し、格子状 Ag 共鳴フィルタ (図5(左)参照) を通過させた。 ^{10}B コンバータを有する GEM に基づく中性子画像検出器の二次元 8×16 channel の読出電極 (1ch. $3 \times 3 \text{ mm}$, 電極間隔 0.2 mm) により、Ag 共鳴フィルタの有無に対応する各チャンネルについて計数した。図6に測定された飛行時間スペクトル (a) とそれを元にして得られた応答関数 (b) を示す。共鳴フィルタによるディップが確認できる。中性

子フラックスが一様となっているビーム中心付近領域(4×4 channel)について、Ag 共鳴フィルタの共鳴ピークに対応する 5 eV 付近の中性子による計数のみを取り出した結果を図 5(右)に示す。表 1 に、実験結果と同一体系でのモデル計算結果を比較して示す。共鳴フィルタの有無に関わらず、計算値と比較して実験値の計数が大きいのが、これは中性子入射面以外の中性子遮蔽が不十分であったため、散乱中性子を計数したためと考えられる。一方、Ag 共鳴フィルタの有無で見られる計数の差は、実験と計算で一致することが示され、熱外中性子に対する検出効率は 5×10^{-4} counts/neutron と評価された。また、計算モデルとよく一致することが確認され、空間分解能 5mm 以下を実現できる可能性を得た。

以上の結果より、共鳴フィルタ法に基づく熱外中性子イメージング手法の基本特性と設計指針が得られた。今後、BNCT 照射場の熱外中性子測定への適用を進める予定である。

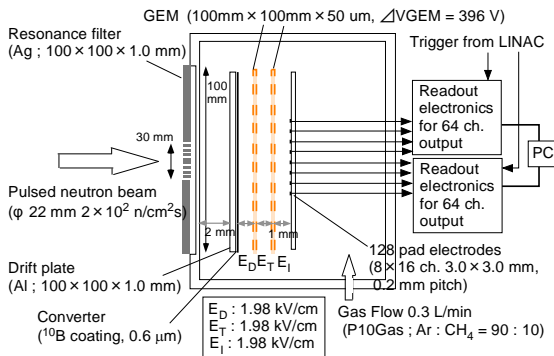


図 4 KURRI-LINAC における実験体系

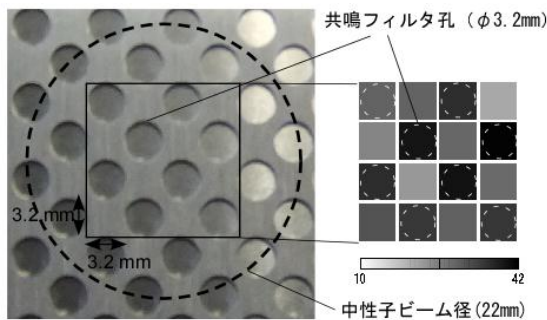


図 5 格子状共鳴フィルタの形状(左)とビーム中心付近での取得画像(右)

表 1 共鳴フィルタ有無の検出効率

	with Ag Filter ($\times 10^{-3}$ counts/neutron)	without Ag Filter ($\times 10^{-3}$ counts/neutron)	Difference ($\times 10^{-3}$ counts/neutron)
Exp.	1.69±0.08	2.23±0.09	0.5±0.1
Cal.	1.01±0.03	1.48±0.04	0.48±0.05

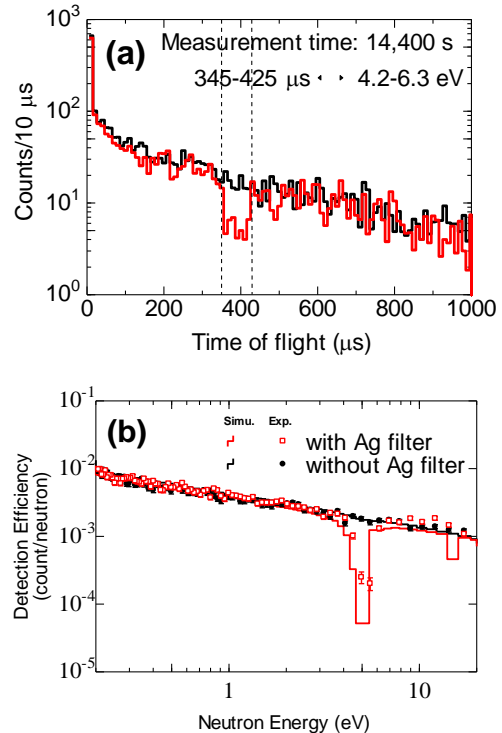


図 6 (a)飛行時間スペクトル、(b)応答関数

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 1 件)

① Hideki TOMITA, Chihiro SHODA, Jun KAWARABAYASHI, Tetsuro MATSUMOTO, Jun-ichi HORI, Shoji UNO, Masayoshi SHOJI, Tomohisa UCHIDA, Nobu FUKUMOTO and Tetsuo IGUCHI, *Journal of Instrumentation*, **7**, C05010, (2011) 査読有.

〔学会発表〕(計 11 件)

① 小林拓矢, 富田英生, 福本靖, 井口哲夫, 河原林順, 松本哲郎, 堀順一, 宇野彰二, 熱外中性子イメージングのためのコーデッド共鳴フィルタの設計検討, 日本原子力学会 2013 年春の年会, 近畿大学, 2013 年 3 月 26-28 日

② 小林拓矢, 富田英生, 井口哲夫, 河原林順, 松本哲郎, 堀順一, 宇野彰二, 熱外中性子イメージングにおけるコーデッド共鳴フィルタの適用検討, 第 27 回「放射線検出器とその応用」研究会, 高エネルギー加速器研究機構, 2013 年 2 月 5-7 日

③ 小林拓矢, 富田英生, 福本靖, 井口哲夫, 河原林順, 松本哲郎, 堀順一, 宇野彰二, ムディットラストギ, 熱外中性子イメージングにおけるコーデッド共鳴フィルタの開発, 日本原子力学会第 44 回中部支部研究発表会, 名古屋大学ベンチャーラボラトリ, 2012 年 12 月 13-14 日

④ H. Tomita, T. Kobayashi, J. Kawarabayashi, C.

Shoda, N. Fukumoto, J. Hori, T. Matsumoto, S. Uno, M. Shoji, T. Uchida, T. Iguchi, Development of Epithermal Neutron Imaging with Designed Resonance Filter, IEEE Nuclear Science Symposium 2012, Anaheim, California, USA, 2012年10月27日-11月3日

⑤小林 拓矢、富田 英生、Mudit Rastogi、照田 千尋、井口 哲夫、河原林 順、松本 哲郎、堀 順一、宇野 彰二、内田 智久、庄子 正剛、熱外中性子イメージングにおけるコーデック共鳴フィルタの適用検討、応用物理学会放射線分科会 第24回放射線夏の学校、つくばグランドホテル、2012年8月6-8日

⑥H. Tomita, C. Shoda, N. Fukumoto, J. Kawarabayashi, J. Hori, T. Matsumoto, S. Uno, M. Shoji, T. Uchida, T. Iguchi, Epithermal Neutron Imaging Using GEM Detectors with Resonance Filter, IEEE 2012 Symposium on Radiation Measurements and Applications (SOEMA2012), Oakland Marriott City Center, Oakland, California, USA, 2012年5月14-17日

⑦富田英生、照田千尋、福本 靖、河原林順、井口哲夫、松本哲郎、堀順一、宇野彰二、内田智久、庄子正剛、共鳴フィルタ法に基づくGEMを用いた熱外中性子画像検出器の開発(2)、原子力学会春の年会、福井大学、2012年3月19-21日

⑧富田英生、共鳴フィルタ法に基づく熱外中性子画像検出器の開発とBNCT照射場への適用検討、研究炉及び加速器中性子源を用いた中性子捕捉療法の高高度化に関する研究会、京都大学原子炉実験所、2012年2月17-18日

⑨福本靖、照田千尋、富田英生、河原林順、井口哲夫、松本哲郎、堀順一、宇野彰二、庄子正剛、内田智久、格子状共鳴フィルタを用いた熱外中性子画像検出器の基本特性評価、日本原子力学会中部支部第43回研究発表会、

名古屋大学、2011年12月13-14日

⑩照田千尋、富田英生、河原林順、井口哲夫、松本 哲郎、堀順一、宇野彰二、内田智久、庄子正剛、共鳴フィルタ法に基づく熱外中性子画像検出器の開発、第8回Micro Pattern Gas Detector研究会、近畿大学、2011年12月9日

⑪ Chihiro SHODA, Hideki TOMITA, Nobu FUKUMOTO, Jun KAWARABAYASHI, Tetsuo IGUCHI, Tetsuro MATSUMOTO, Jun-ichi HORI, Shoji UNO, Development of Epithermal Neutron Camera based on resonance energy-filtered imaging with GEM, 2nd International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors, Seaside Hotel MAIKO VILLA KOBE, 2011年8月29日-9月1日

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等 特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

富田英生 (TOMITA HIDEKI)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20432239

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし