

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18303

研究課題名（和文）中性子の入射位置・方向に依存しないスペクトル導出手法の確立

研究課題名（英文）Methodology for neutron spectrum measurement independent of position and direction of neutrons incident on detector

研究代表者

梶本 剛 (Kajimoto, Tsuyoshi)

広島大学・先進理工系科学研究科(工)・助教

研究者番号：70633759

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：有機液体シンチレータを用いたアンフォールディング法による中性子エネルギースペクトルの測定において、シンチレータに入射する中性子の位置・方向によって検出器応答が変化するため、入射中性子の位置・方向分布が定まっていない場合、その測定が困難となる。本研究では、シンチレータ中での中性子飛跡長から求まる面積でスペクトルを除するスペクトル導出手法を提案し、その妥当性を調査した。依存性がなくなることは無いが、アンフォールディング法の再現性と比較すると依存性を顧みる必要はない。手法を適用することで、高エネルギー加速器施設内でエネルギースペクトルを測定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

中性子の位置分布および方向分布が不明な場所で中性子エネルギースペクトルが測定できる手法を確立した。これにより、これまで測定が困難であった場所でのエネルギースペクトル測定が可能となる。そこで、高エネルギー加速器施設で実験を行い、手法を適用することでエネルギースペクトルを導出した。中性子の多い場所から少ない場所の複数点で測定し、これまで得られていた中性子の減弱データだけでなく、エネルギースペクトルの変化を観測できた。スペクトルの変化は効果的な中性子遮蔽設計をする上で重要な情報となる。

研究成果の概要（英文）：Methodology for measuring neutron energy spectrum by using organic liquid scintillator and unfolding derivation method was proposed in the neutron field with unclear positional and directional distributions. The difference of neutron response by the position and direction incident on the scintillator was verified from an experiment and simulations. By dividing the neutron responses by the length between entering and outgoing positions in the scintillator, the difference could not be eliminated, however, became negligibly smaller to uncertainty of the unfolding method. An experiment to measure neutron energy spectrum by applying this methodology was performed in a high energy accelerator facility.

研究分野：放射線計測

キーワード：中性子場 放射線遮蔽 高エネルギー加速器 有機液体シンチレータ アンフォールディング法

1. 研究開始当初の背景

加速器施設の放射線遮蔽設計では透過力が強い中性子の評価が不可欠である。近年は、粒子輸送モンテカルロコードが加速器施設の遮蔽設計に利用されるが、計算結果の信憑性確認のためには、ベンチマークデータ、特に、中性子エネルギースペクトルの測定値が求められている。しかしながら、10 GeV を超える加速器施設においては、実験値は 5 件[1-5]しか報告されていない。施設および測定場所が限られること、測定手法が確立されていないことが、実験値の蓄積を妨げている。

事前準備として、平成 27 年度に欧州原子核研究機構(CERN)の 24 GeV/c 陽子ビームを利用した混合粒子場施設(CHARM)で放射線遮蔽用実験値取得のために予備的な測定をした。検出器には、中性子と線弁別が可能であることから、上述の実験値 5 件の内 2 件[3, 5]でも使用されている有機液体シンチレータを用いた。アンフォールディング法による中性子エネルギースペクトルの導出を試みているが、測定場所での中性子方向分布が不明であり、シンチレータの感度は中性子入射位置・方向分布に依存することから、その導出は困難を極めている。しかしながら、データ解析を再検討したところ入射位置・方向分布に依存しない導出手法についての手掛かりを得た。

2. 研究の目的

本課題の目的は、中性子入射位置・方向分布が把握できない場所での中性子エネルギースペクトル測定手法の確立及び手法適用により高エネルギー加速器施設における中性子遮蔽に関するデータ取得である。手法は有機液体シンチレータを用いたアンフォールディング法による中性子エネルギー分布測定に適用される。

3. 研究の方法

本研究で確立する手法は、有機液体シンチレータを用いて測定した中性子スペクトルをアンフォールディング法でエネルギースペクトルに変換する手法の内、飛跡長から求まる実効的な面積で除した中性子応答関数行列を用いる。手法を適用する場合、ある体積に入射する中性子エネルギースペクトルとなり、これまで多くの報告例がある面を通過する中性子エネルギースペクトルとは異なる。図 1 に面入射であるフラックスとフルエンスの概念図を示す。

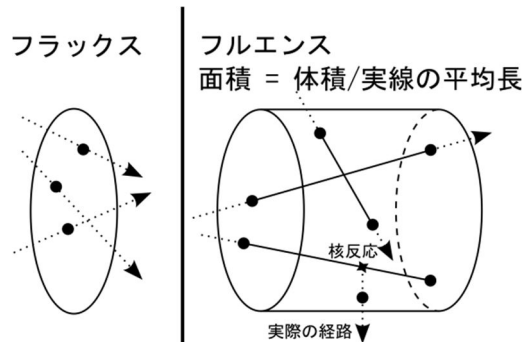


図 1 フラックスとフルエンスの概念図

(1) 手法の確立

シミュレーションコードを修正し、中性子応答と飛跡長を同時に計算するように改良する。修正したシミュレーションコードを用いて様々な入射位置・方向分布を持った中性子に対する中性子応答関数行列を計算し、行列を飛跡長の平均値で除する。

実験およびシミュレーションで入射位置・方向依存性の程度を求める。実験では、同じ場所でシンチレータの置く向きを変えて測定し、中性子フルエンスを導出する。用いるシンチレータの形状は円筒である。一方、シミュレーションでは、予め中性子フルエンスを計算し、その中性子フルエンスを用いて測定を模擬して導出する。入射位置・方向分布が実際とは異なる複数の応答関数及び飛跡長を用いた導出も行う。結果を比較し、差異を評価することで依存性がなくなることを確認する。

(2) 光出力値換算による光出力校正点取得

アンフォールディング法の精度向上に取り組む。アンフォールディング法を用いた中性子エネルギースペクトルの導出には光出力校正が不可欠であるが、これまで校正点を取得できなかった発光量：5 MeVee 以上の領域で校正点を取得する。バックグラウンド測定中に検出されるミュオン粒子測定から 1 点取得する。さらに、実際に中性子を測定する際にベト検出器と有機液体シンチレータを組み合わせることで陽子測定ができる場合がある。ベト検出器を用いることで E-E 検出器となり、陽子識別が可能、さらには、シンチレータでの陽子の最大発光量が得られる。発光量から光出力の換算は、ミュオン粒子および陽子測定の両手法ともに経験式を用いる。

(3) 中性子フルエンスの測定実験

手法を適用して中性子フルエンスを CERN の CHARM で測定する。CHARM の標的室に通じる通路中に有機液体シンチレータを設置する。標的室に近い地点から遠い地点での中性子フルエンスを測定することで、中性子減衰に関してだけでなく、スペクトルの形状変化を観測する。

粒子輸送モンテカルロシミュレーションコードの計算値と実験値を比較する．計算の幾何形状は、詳細となるよう構築する．遮蔽設計に利用される粒子輸送シミュレーションコードは複数あることから一つだけでなく複数を用いて計算し、検証する．

4. 研究成果

(1) 手法の確立

位置・方向分布依存性について検証した例として、図2に直径及び長さが5.08 cmの有機液体シンチレータに50 MeV中性子を入射させたときの応答関数の計算結果を示す．入射させる中性子の位置・方向分布は、シンチレータ平面に面積当たり一様に入射し、且つ、平面に対して垂直に入射する分布、平面及び曲面から面積当たり一様に入射し、且つ、シンチレータの方向に対して等方的に入射する分布の2種類を用意した．飛跡長で中性子応答関数を除することで、中性子応答関数の差異は小さくなっていることが確認できる．しかしながら、高発光量での差異がある．

応答関数行列を飛跡長で除しただけでは、位置及び方向依存性を小さくすることはできないが、解消することはできない．一方で、アンフォールディング法で生じる差異が大きく、それに対して、応答関数行列の違いが及ぼす差異は小さく無視できる程度であった．そのため現状では、応答関数行列を飛跡長で除することで中性子の入射位置・方向依存性が解消できる．今後、アンフォールディング法の精度が向上すればこの限りではない．

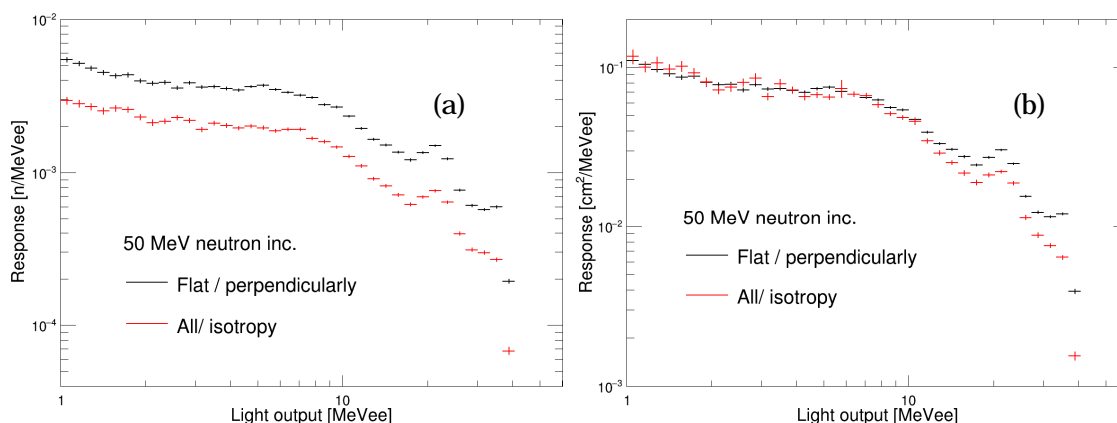


図2 中性子応答関数(a)と中性子応答関数を飛跡長で除した分布(b)

(2) 光出力値換算による光出力校正点取得

直径及び長さが5.08 cm, 12.7 cmの2種の有機液体シンチレータに対して実施した．ミュ粒子測定では約7および20 MeVeeの発光量で校正点を得られる．陽子測定では、50 MeVee以上の高発光量領域で校正点を得られる．

(3) 中性子フルエンスの測定実験

CERNのCHARMの標的室へ通じる通路に有機液体シンチレータを設置し、手法を適用することで中性子フルエンスを導出した．図3に中性子フルエンスを示す．複数の場所で測定し、番号が大きくなるほど標的室から離れた地点となる．中性子減弱に相当するフルエンス値の全体的な減少だけでなく、スペクトル変化も観測でき、これらは効果的な中性子遮蔽の手掛かりとなる．通路の上流から下流までフルエンスを測定した事例は皆無であり、高エネルギー加速器施設における中性子遮蔽において貴重なデータである．

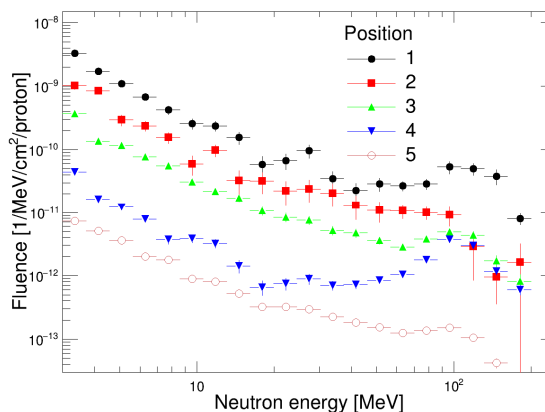


図3 CHARM 通路中での中性子フルエン

実験値との比較検証のために、粒子輸送モンテカルロシミュレーションコード: PHITS及びGeant4で詳細体系を構築し、中性子フルエンスを計算している．現状、計算途中であり、十カ月以上の膨大な時間がかかっている．

参考文献

- [1] H. Nakashima et al., J. Nucl. Sci. Technol. (Suppl.2), 1155—1160 (2002).
- [2] S. Agosteo, et al., Nucl. Instrum. Methods B 229 24—34 (2005).
- [3] N. Nakao, et al., Nucl. Instrum. Methods B 266, 93—106 (2008).
- [4] S. Agosteo, et al., Nucl. Instrum. Methods B 312 36—41 (2013).
- [5] T. Kajimoto, et al., Nucl. Instrum. Methods B 337, 68—77 (2014).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kajimoto Tsuyoshi, Sanami Toshiya, Nakao Noriaki, Froeschl Robert, Roesler Stefan, Iliopoulou Elpida, Infantino Angelo, Brugger Markus, Tanaka Kenichi, Endo Satoru	4. 巻 906
2. 論文標題 Reproduction of neutron fluence by unfolding method with an NE213 scintillator	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 141 ~ 149
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2018.07.079	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 梶本 剛, 佐波 俊哉, 中尾 徳晶, 李 恩智, 八島 浩, 松本 哲郎, 増田 明彦, 大山 隆弘, 長畔 誠司, 上養 義朋, 田中 憲一, 遠藤 暁, Froeschl Robert, Iliopoulou Elpida, Infantino Angelo, Roesler Stefan
2. 発表標題 CERN/CHARM における 24GeV 陽子を用いた遮蔽実験 (10) 有機液体シンチレータを用いた迷路中の中性子エネルギースペクトルの測定
3. 学会等名 日本原子力学会 秋の大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
スイス	欧州原子核研究機構		