

委託研究「光ファイバ中性子モニタリングシステムの開発」 (研究開発テーマ：先進放射線計測技術の開発) 研究成果報告概要

研究開発の概要

(研究実施期間) 令和2年度～令和3年度

(目的)

ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) 等で用いられる加速器中性子源装置で利用可能なオンライン中性子強度モニタとして、中性子場への擾乱が小さく、さらにガンマ線に不感で熱中性子のみに感度を有する光ファイバ型中性子検出器を用いたモニタリングシステムの開発を進める。特に、量子科学センターの20 MeV陽子サイクロトロンベースの中性子源では多くの高エネルギー中性子を含むため、高エネルギー中性子を含む場における耐性評価についても実施し、高線量の場合でも使用できるモニタの実現を目指す。

(必要性)

多くの小型・中型の中性子源施設が稼働し始め、中性子利用が広がりつつある。特に、BNCTは新しい放射線がん治療法として期待が高まっており、現在、頭頸部がんを対象に保険適用となっている。装置の健全性、照射の妥当性確認のためには、発生する中性子量のモニタリングは必須であるが、現状、BNCT装置を含む多くの中性子源施設のビームラインには、中性子強度モニタリングシステムが設置されていない。これらの中性子源施設で広く活用でき、高い信頼性を示す中性子強度モニタの開発が求められている。

(新規性)

当該研究で開発を進める光ファイバ型中性子検出器は、光ファイバの先端に中性子反応断面積の大きな ${}^6\text{Li}$ を含むLiガラスシンチレータの微小片を配し、シンチレータ内での中性子吸収反応に伴い発せられる発光信号を光ファイバを介して、光検出器である光電子増倍管 (PMT) 等で検出するというものである。一番の特徴は、非常に小型であるため、ほとんど照射場を乱すことが無いという点である。加えて、小型・安価であるため、検出プローブを複数設置することも比較的容易で、これにより空間分布の評価にも利用可能である。

(独創性)

シンチレータのサイズ、 ${}^6\text{Li}$ の含有量を制御することで中性子感度を調整可能で、BNCT照射場のような高強度中性子場においても数え落としを起こさず、中性子強度に対する出力直線性を担保できるという特徴がある。

また、シンチレータサイズを、 ${}^6\text{Li}(n,t)$ ・反応で放出されるトリトン粒子、 α 粒子の飛程より大きく、かつ、ガンマ線起因の高速電子の飛程よりは十分小さい数100 μm 程度とすることで、ガンマ線起因の信号波高は小さな値に抑制され、単純な信号波高弁別のみでガンマ線イベントを除き中性子のみの信号を観測することが可能となる。

(有用性)

LiガラスシンチレータといったLi含有透明シンチレータおよび高開口数光ファイバといった高効率光信号伝送系を採用することで、信号波高分布中に中性子イベントに起因するピーク構造を示すことを可能にした。これにより、ピークとなる信号波高値をモニタすることで、シンチレータ自身および光伝送系のゲインの変化を把握することが可能となり、中性子感度を一定に保ち、安定性の高い出力を示すことが可能となっている。

研究成果

感度・ダイナミックレンジの性能評価

中性子検出器の感度およびダイナミックレンジを評価するにあたり、4系統の光ファイバ型中性子検出プローブを準備し、サイクロトロン室、NRTおよびBNCTビームラインに設置した。当該システムで採用しているデジタル信号処理回路は1台でこれら4系統の信号を処理することが可能である。光ファイバプローブ部はある程度の中性子耐性が期待できるが、光電子増倍管および信号処理回路系は中性子照射による故障・誤作動も考えられるため、20 mの光ファイバを介し、中性子実験準備室ピット内に設置した。光ファイバ型中性子検出プローブは、図1に示すように、NRTおよびBNCTビームラインの減速材脇（CH1およびCH2）と各々の出力孔付近（CH3およびCH4）に設置した。

BNCTビームラインの出力孔には、高計数率でも出力線形性が得られることが期待される、高速応答のLiガラスシンチレータを使用した中性子プローブを設置し、その出力線形性を確認した。結果を図2に示すが、最大出力である $1 \times 10^9 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ となる陽子ビーム電流 $100 \mu\text{A}$ まで線形な出力を示すことが確認され、その感度は $4.8 \times 10^{-4} \text{ counts}/(\text{n/cm}^2)$ と評価された。

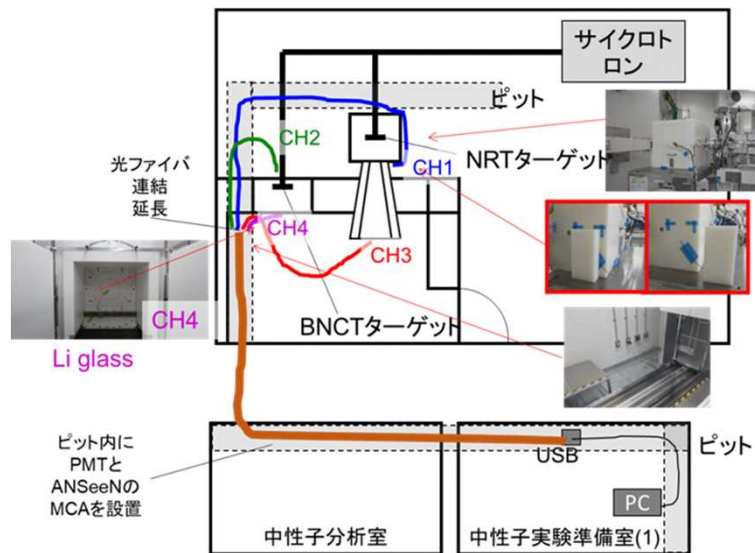


図1 設置した中性子検出プローブの配置図

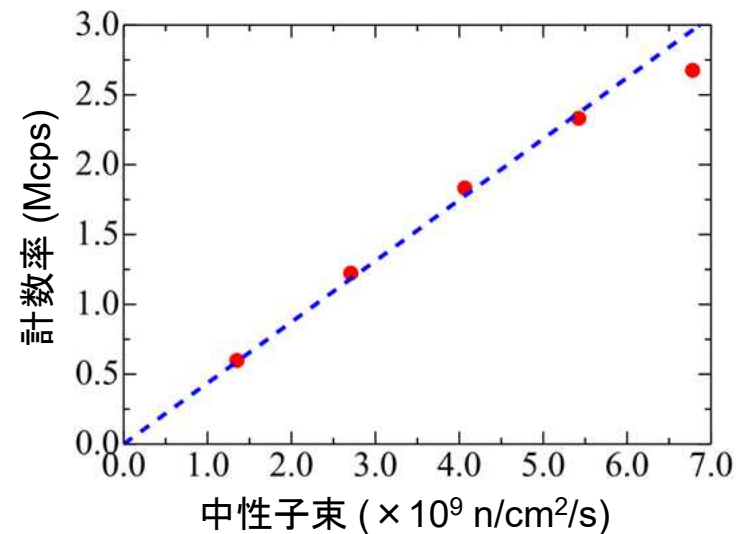


図2 Liガラスシンチレータを使用した中性子プローブの出力線形性

研究成果

耐放射線性の評価

開発している光ファイバ型中性子検出器の耐放射線性を確認し、長期の使用に耐えられるか、あるいはどの程度の照射で交換が必要かを判断するための基礎データの取得を行う。そこで、最も多く中性子照射が期待できるBNCTビームラインに設置したCH₄のLiガラスシンチレータを使用した中性子プローブを用いて、耐放射線性、特に中性子照射耐性について評価した。中性子照射耐性を評価する上で重要なこととして、プローブに対してどれだけ中性子が照射されたかを評価する必要がある。今回は、すでに評価済みである中性子感度を用いて中性子プローブそのもので中性子照射量を評価した。

Liガラスシンチレータを使用した光ファイバ中性子プローブを2020年9月3日にBNCTビームラインに設置した後、同一の光ファイバ中性子プローブに2021年9月3日、10月12日、10月13日、2022年1月25日、1月26日の合計6回の中性子照射試験を実施している。2021年10月12日に、NRTビームラインのコリメータ内に、2022年1月25日にそのさらに深部にプローブ設置位置を変更して照射試験を実施している。

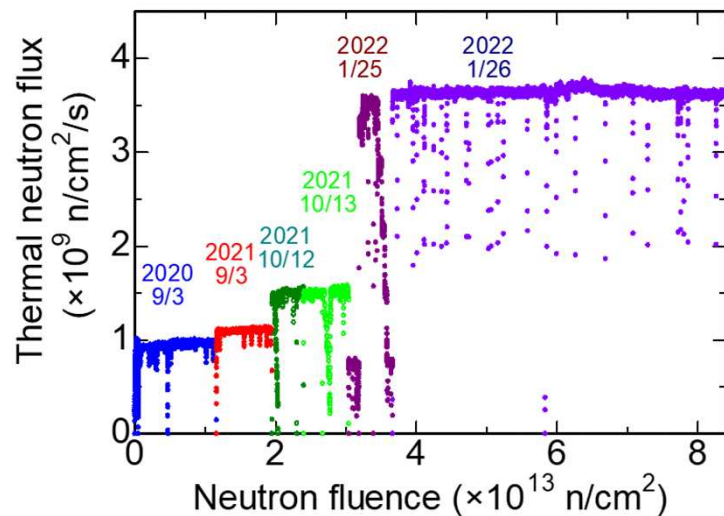


図3 性子プローブ照射位置における中性子束と照射した積算中性子Fluenceの関係

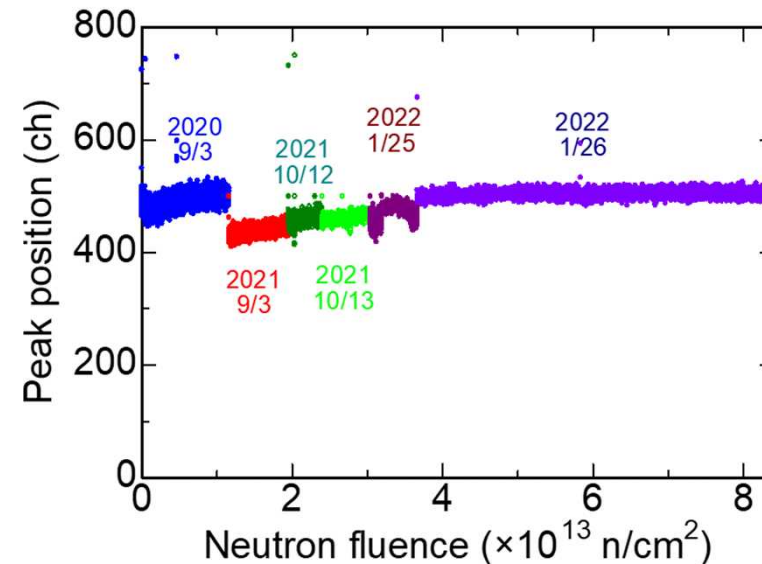


図4 中性子ピーク波高値と照射した積算中性子Fluenceの関係

研究成果

長期安定性評価

中性子モニタとしては、中性子を含めた放射線の照射の有無に関わらず、その状態が変化しないことが望ましい。中性子プローブを作製・設置して（2020年9月）から、1年半という時間ではあるが、その間の検出器の安定性を評価した。今回開発を進めている光ファイバ型中性子検出器プローブは、石英コアの光ファイバの先端にLiガラスシンチレータを紫外線硬化樹脂で接着し、 TiO_2 粉末を反射材としてコーティングした構造である。Liガラスシンチレータ（GS20）は長い歴史を持つシンチレータであり、短期間で劣化するとは考えられていないが、紫外線硬化樹脂との反応性も考えられるため、長期間の安定性を確認した。前節の中性子照射耐性の試験は、2020年9月3日から始め、2022年1月26日までの510日かけて実施している。その間の検出器の安定性を評価するため、中性子ピーク波高値と設置日（2020年9月3日）からの経過日数の関係を図5に示す。少なくとも500日程度では、検出器の特性は変化しないことが確認された。

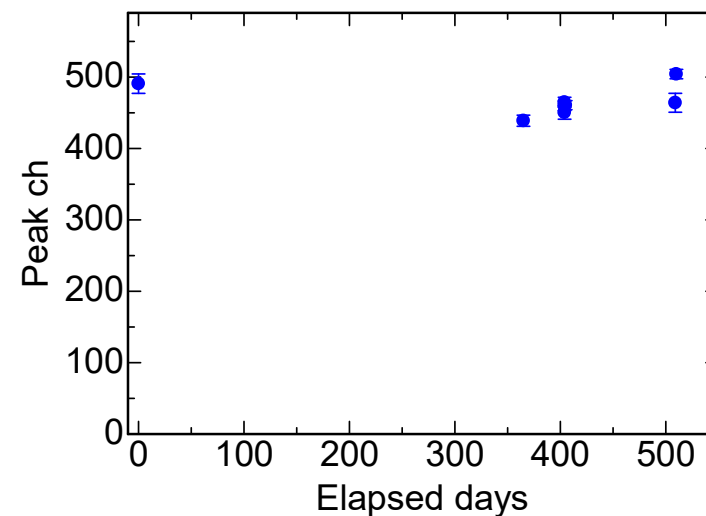


図5 中性子ピーク波高値と検出器設置からの経過日数の関係

研究発表

1. 2020.9.10、オンライン、第81回応用物理学会秋季学術講演会、Liガラスシンチレータを用いた光ファイバ型中性子検出器のガンマ線に対する応答評価、石川諒尚、渡辺賢一、山崎淳、吉橋幸子、瓜谷章
2. 2020.11.4、オンライン、IEEE NSS-MIC 2020、Evaluation of Gamma-ray Sensitivity of an Optical Fiber-based Neutron Detector Using a Li-glass Scintillator International conference、Akihisa Ishikawa, Kenichi Watanabe, Atsushi Yamazaki, Sachiko Yoshihashi, Akira Uritani
3. 2021.3.16、オンライン、第68回応用物理学会春季学術講演会、Liガラスシンチレータを用いた光ファイバ型中性子検出器の熱中性子感度および出力線形性、石川諒尚、渡辺賢一、山崎淳、吉橋幸子、瓜谷章
4. 2021.3.18、日本原子力学会2021年春の年会、Liガラスシンチレータを用いた光ファイバ型中性子検出器の γ 線感度評価、石川諒尚、渡辺賢一、山崎淳、吉橋幸子、瓜谷章

発表論文

1. Evaluation of the thermal neutron sensitivity, output linearity, and gamma-ray response of optical fiber-based neutron detectors using Li-glass scintillator, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. A, Vol. 1025, 166074, Feb. 2022, Akihisa Ishikawa, Kenichi Watanabe, Atsushi Yamazaki, Sachiko Yoshihashi, Shigefumi Imai, Akihiko Masuda, Tetsuro Matsumoto, Hiroki Tanaka, Yoshinori Sakurai, Mitsuhiro Nogami, Keitaro Hitomi, Akira Uritani, Hideki Harano
2. First experimental verification of the neutron field of Nagoya University Accelerator-driven neutron source for boron neutron capture therapy, Applied Radiation and Isotopes, Vol. 7, 042002, Feb. 2021, Kenichi Watanabe, Sachiko Yoshihashi, Akihisa Ishikawa, Shogo Honda, Atsushi Yamazaki, Yukio Tsurita, Akira Uritani, Kazuki Tsuchida, Yoshiaki Kiyanagi

青森県内への波及効果

BNCTに関しては、南東北BNCT研究センターで保険適用が始まったことに加え、青森県QSCでマウス・細胞照射を目的としたBNCT装置も稼働しており、今や東北地方がその発展の一翼を担っていると言っても過言ではない。特に、青森県QSCはBNCT基礎研究を実施可能な数少ない国内施設であり、本事業で開発を進める中性子モニタと青森県QSCのBNCT施設がけん引役となり、青森県六ヶ所村を中心としたBNCT基礎研究の研究拠点形成が期待される。