

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H03594

研究課題名（和文）加速器BNCT治療における総合的線量評価システムの開発

研究課題名（英文）Development of integrated dose evaluation system in accelerator-based BNCT treatment

研究代表者

石川 正純（Ishikawa, Masayori）

北海道大学・保健科学研究所・教授

研究者番号：80314772

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：熱中性子照射量をリアルタイムで測定可能なSOF検出器を改良し、異なる中性子増感物質を含むシンチレータを組み合わせることで、熱中性子量、熱外中性子量、ガンマ線量を同時に評価することが可能な新たなSOF検出器の開発を行った。
また、血中ホウ素濃度を直接評価する方法として、18F-BPA PET撮像中に同時に血中ホウ素濃度を測定するための腕部装着可能な小型PET装置を開発を目指した。当研究室で開発したPQD法を用いたDOI検出器を新たに開発した。4層に重ねたシンチレータを用いた実測での実験において、位置敏感型光電子増倍管の任意の位置における深さ方向の弁別能が十分であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

加速器BNCTでは、熱外中性子を主たる成分として照射することから、熱外中性子照射量をモニタできる検出器の開発が望まれている。本研究で開発を試みたマルチコア型SOF検出器では、熱外中性子量のみならず、熱中性子量、線量も同時に評価可能であることから、腫瘍への適切な線量投与量を把握するのみならず、正常組織への被ばく量も同時に推定可能となることから、臨床上非常に有益である。
また、本研究で開発を試みた腕部装着型PET装置では、18F-BPAを用いたPET撮像の際に腫瘍組織と正常組織の薬剤取込比率を直接評価することで、治療効果予測の精度を飛躍的に向上できると期待している。

研究成果の概要（英文）：We have developed a new SOF detector that can simultaneously evaluate thermal, epithermal, and gamma-ray doses by improving the SOF detector to measure thermal neutron fluence in real-time and combine scintillators containing different neutron sensitizers. In addition, we aimed to develop a small PET device that can be worn on the arm for simultaneous measurement of blood boron concentration during 18F-BPA PET imaging as a direct evaluation method of blood boron concentration. We developed a new DOI detector using the PQD method developed in our laboratory. We confirmed that the position-sensitive photomultiplier tube has sufficient depth discrimination capability at any position in an experiment using four layers of scintillators in actual measurements.

研究分野：放射線計測学

キーワード：SOF検出器 PQD法 DOI-PET BNCT 中性子計測

1. 研究開始当初の背景

ホウ素中性子捕捉療法 (Boron Neutron Capture Therapy; BNCT) は、ホウ素化合物を腫瘍細胞に集積させて中性子を照射することにより、ホウ素と中性子の核反応で生じるエネルギーにより腫瘍細胞を死滅させる放射線癌治療法の一つであり、近年、加速器を用いた BNCT 治療が実現可能な段階にまできている。BNCT では、腫瘍部におけるホウ素濃度と熱中性子束から吸収線量を評価しているが、加速器を用いた BNCT 治療では熱外中性子成分を多く含んでいるため、従来のように金の放射化学を用いた中性子照射量の評価が困難であることから、中性子を発生させるための陽子線ビーム電流量から中性子照射量を推測しているのが現状である。しかし BNCT 治療では、中性子ビームが照射される皮膚の耐用線量で中性子照射量を制御していることから、皮膚表面における中性子エネルギー成分ごとの照射量を測定できることが望ましい。当研究室では、熱中性子束をリアルタイムで測定するための SOF 検出器 (Scintillator with Optical Fiber Detector) を開発し、照射場の評価として熱中性子束分布測定などにおける有用性や、臨床におけるリアルタイム測定の有用性について報告してきた。SOF 検出器では中性子増感物質による核反応エネルギーを利用しているが、中性子増感剤の核種に応じてエネルギー応答が異なる。そこで本研究では、多数のプロープに異なる中性子増感物質を含むシンチレータを取り付けることにより、異なるエネルギー範囲での中性子束評価が可能な「マルチプロープ型 SOF 検出器」の開発が可能ではないかと考えた。

一方、BNCT では患部におけるホウ素 (^{10}B) 濃度も治療効果に大きく影響することから、線量評価では患部におけるホウ素濃度が必要となる。患部におけるホウ素濃度推定法として、BNCT の主力薬剤である BPA (ボロノフェニルアラニン) に ^{18}F を標識した ^{18}F -BPA を用いた PET (Positron Emission Tomography) 撮像を行い、腫瘍組織と正常組織の ^{18}F -BPA 取込比率 (T/N 比; Tumor-Normal Ratio) を算出することで治療効果予測と治療適用可否を判断している。また、腫瘍組織と血中の ^{18}F -BPA 取込比率 (T/B 比; Tumor-Blood Ratio) を算出することで治療時における血中ホウ素濃度から腫瘍におけるホウ素濃度を推定している。しかし、臨床 PET 装置の空間分解能では血管中のホウ素濃度を正確に評価することは難しく、また、撮影した PET 装置の機種によって評価値が異なるという問題点も指摘されている。研究分担者の小川原氏は、シンチレータ発光による信号のピーク値 V_p と積分電荷量 Q から信号弁別を行う PQD 法 (Peak-to-Charge Discrimination) を開発し、これまで不可能といわれていた LaBr_3 シンチレータの自己放射能 α 崩壊イベントを高精度に弁別することに成功した。この技術を応用することにより、減衰時定数の異なるシンチレータを 4 層に積層した DOI (Depth of Interaction) 検出器の可能性検討を行い、各層からの信号を正確に識別できることを確認している。そこで本研究では、 ^{18}F -BPA PET 撮像中に同時に血中ホウ素濃度測定が可能な腕部装着可能な小型 PET 装置を開発することにより、治療中における腫瘍ホウ素濃度推定に必要な T/B 比計測の高精度化を試みる。

2. 研究の目的

本研究では、BNCT における高度な線量制御を目的として、①マルチプロープ型 SOF 検出器の開発と、②腕部装着可能な小型 PET 装置の開発を目指す。また、派生研究として、③BNCT に関連した諸課題に関する考察を行う。

3. 研究の方法

①マルチプロープ型 SOF 検出器の開発

1) 中性子増感核種の選定と核反応に伴うシンチレータ発光量の考察

本研究では核データライブラリ JENDL-4.0 に収録されている全核種について核反応の反応断面積データを取得し、エネルギー領域別に積分することで、熱中性子領域、熱外中性子領域、高速中性子領域における平均反応断面積を計算し、各エネルギー領域について大きな核反応断面積を持つ核種の候補を抽出した。本研究でのエネルギー領域は熱中性子領域 (1 meV~0.5 eV)、熱外中性子領域 (0.5 eV~10 keV)、高速中性子領域 (10 keV~100 keV) として解析を行った。中性子捕獲反応により発生する荷電粒子の種類とエネルギーからシンチレータの発光量を推定することで、発光量の大きな核種を中性子増感物質候補核種として抽出する。核データライブラリ JENDL-4.0 から全核種の (n, p), (n, d), (n, t), (n, ^3He), (n, α) 反応により発生する粒子種および Q 値を取得し、核反応によるエネルギー付与を推定した。有機シンチレータは電離放射線により励起された蛍光分子の脱励起反応により蛍光を発する。消光効果が無視できる場合、シンチレータの発光量は電離放射線により付与されたエネルギーと比例関係となる。そのため、単位飛程長あたりに放出される発光量は、荷電粒子の線エネルギー付与 (Linear Energy Transfer: LET) を用いて表現できる。ここにクエンチング効果による消光を考慮した Birks を適用することで、現実的な発光量を推定した。

2) 有機シンチレータの荷電粒子による発光に関する検討

SOF 検出器で用いているプラスチックシンチレータの発光は、クエンチング効果のため、重粒子線線量に対して線形応答を示さないことが知られている。有機シンチレータの発光量は LET (Linear Energy Transfer) が大きくなるほど増加する傾向があるが、その応答は非線形であり、高 LET 領域ではクエンチングの影響が顕著となる。これは高 LET 領域では局所的に高密度に電

離が起こるため、それに応じて発生した高密度なシングレット励起状態の分子同士がフェルスター機構によりクエンチングを起こすためである。先行研究では、数 100 MeV/u の高エネルギーイオン線のトラック構造を表現する上で $(Z_{\text{eff}}/\beta)^2$ (Z_{eff} : 照射イオンの有効電荷、 β : 光速単位の速度) が LET より適しているという報告があることから、LET に代わるパラメータとして $(Z_{\text{eff}}/\beta)^2$ を用いた補正式を提案する。本研究では、広い範囲かつ多種の重イオンによる照射が必要となるため、放射線医学総合研究所の HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) を利用した。実験の体系を図 1 に示す。LET は Geant4 ver 4.10.9 を用いたシミュレーションから取得した。

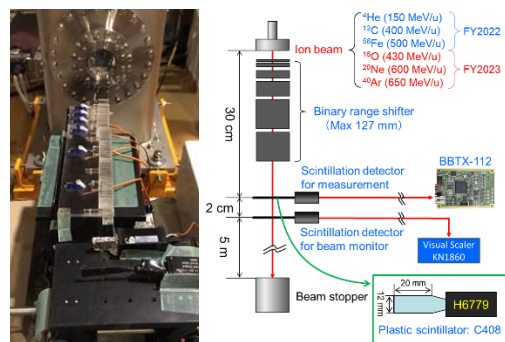


図 1 HIMAC を用いた実験の体系

②腕部装着可能な小型 PET 装置の開発

1) テーパー型シンチレータの基礎検討

先行研究において、上腕部の血中ホウ素濃度を定量可能な検出器体系についてシミュレーションによる検討を行ったところ、1.0 mm 以下の断面サイズのシンチレータ素子を 10 層以上積層した検出器が必要であることがわかった。しかし、シンチレータは素子を細かく分割するほどコストがかかり、検出効率が低下するという問題がある。一方、GSO:Ce シンチレータはチョクラスキー法で作成されるが、生成された結晶インゴットは結晶内に Ce 添加物の濃度勾配が生じることが知られている。そこで、単一結晶を作成する際に強制的に強い濃度勾配を持たせることで、Ce 添加濃度の違いから発光波形を変化させ、PQD 法を用いて DOI 情報を取得できると考えた。本検討では、図 2 に示すように単一結晶シンチレータに電子線または γ 線を照射した場合を想定し、粒子輸送モンテカルロ計算コード Geant4 を用いて推定値と真値の差分から推定精度評価を行った。

2) PET 検出器データ収集システムの開発

陽電子放射断層撮影法 (PET) では、視差誤差によって空間分解能が低下する。DOI (Depth-of-Interaction) 情報は、 γ 線と相互作用するシンチレータの深さ方向の位置を示すもので、視差誤差を低減することができる。先行研究では、4 層の GSO:Ce シンチレータを識別できる PQD (Peak-to-Charge discrimination) が開発された。本研究では、オンライン処理と PET への実装が可能であることを示すために、PQD を用いた DOI 検出器システムを開発する。検出器は、4 層の Gd₂SiO₅:Ce (GSO:Ce) 結晶と浜松ホトニクス社製位置弁別型光電子増倍管 (PS-PMT; R-8900-00-C12) で構成した。4 つの結晶は、公称 Ce 濃度が 0.5mol% と 1.5mol% のインゴットの上下両方から得たものである。結晶は光電面から 0.5mol% 下、0.5mol% 上、1.5mol% 下、1.5mol% 上の順に積層した (図 3)。各結晶の大きさは 2.5mm × 2.5mm × 6mm で、全表面を化学エッチングした。4 層の結晶ブロックは、PS-PMT と光学ガラスで結合した 1 面を除いて反射板で包んだ。信号波形の取得には Xilinx Zynq-7000 SoC と接続された 8ch 12bit 100 MSPS フラッシュ ADC を備えている特殊電子回路株式会社製 Cosmo-Z ボードを用いた。

PQD の性能は、主に波形の正確なピーク電圧の取得に依存するが、PS-PMT の出力信号はノイズを多く含むため、low-pass filter が必要不可欠である。そこで、PS-PMT からの波形をプリアンプで増幅し、フラッシュ ADC で A/D 変換した後、14 次の有限インパルス応答 (FIR) ローパスフィルター (カットオフ周波数 35MHz) を用いて高周波ノイズを除去した。

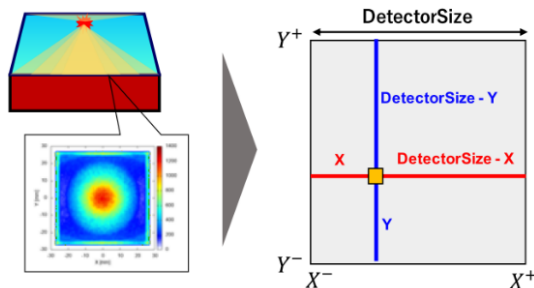


図 2 単一結晶を用いた位置弁別能の検討

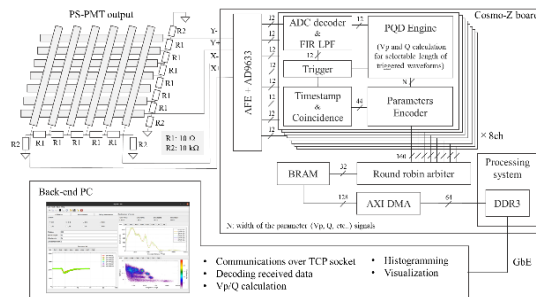


図 3 PET 検出器データ収集システムの概要

③BNCT に関連した諸課題に関する考察

1) BNCT 照射に伴う患者放射化量の推定

本検討では BNCT 治療用加速器中性子源として、京都大学複合原子力科学研究所の BNCT 用中性子照射装置 C-BENS の中性子エネルギースペクトルを用いた。体内における詳細な構成元素の割合と密度が必要となることから、ICRU No.44 より各組織の構成元素の割合および密度を取得した。また、歯科補綴材料による放射化と、血液中の ²³Na、³⁷Cl と骨中の ⁴⁸Ca を考慮した。放射化量の推定には、粒子輸送モンテカルロ計算コード PHITS ver.2.89 と DCHAIN-SP (ver. 2014) を用いた。熱外中性子ビームを 1.0×10^9 n/cm²/s (熱外中性子割合 93.7%、0.5 eV ~ 10 keV) で 1 時間

照射した際の実効線量率変化を DCHAIN-SP で計算し、患者から 1 m 離れた位置における実効線量率の変化を算出した。

2) Beam Shaping Assembly 最適化法の検討

本検討では、Beam Shaping Assembly (BSA) の同時最適化と計算時間の短縮の両立を目指して、遺伝的アルゴリズム(GA)と決定論的中性子輸送計算コードである CBZ を組み合わせた BSA 最適化システムを構築した。適応度関数には、IAEA-TECDOC-1223 の推奨ビームパラメータ基準をもとに、スカラー化法により作成した。被最適化個体は、それぞれ材料の種類と厚みを最適化パラメータとして所有しており、1 世代あたり 30 個体を 100 世代まで計算することで適応度関数の値を最大化するような最適個体を求めた。BSA に使用する材料は、各構成要素に求められる役割、材料費、放射化の影響を考慮して慎重に選定した。

4. 研究成果

①マルチプローブ型 SOF 検出器の開発

1) 中性子増感核種の選定と核反応に伴うシンチレータ発光量の考察

図 4 は、熱中性子領域、熱外中性子領域、高速中性子領域での平均反応断面積の和を表しており、 ^{10}B , ^3He , ^6Li などが比較的大きな反応断面積を有している。また、図 5 は、熱中性子領域、熱外中性子領域、高速中性子領域に対する感度比を表しており、 ^{32}S , ^{33}S , ^{65}Zn , ^{67}Zn などは熱外中性子領域や高速中性子領域にも比較的大きな感度を持っているため、これらのエネルギー領域での測定に適した核種であると言える。

中性子増感剤由来の発光(熱・熱外中性子)と γ 線や高速中性子由来の反跳陽子による発光(ノイズ)を弁別するためには、検出發光量の閾値を高く設定することが望ましい。しかし、自己遮蔽にともなうエネルギー損失により、発生する光子数の低下が懸念されることから、十分な信号量が得られる粒径と閾値の関係について検討した。粒径が小さいほど、閾値を高い値に設定しても高い光収率を維持しつつ、ノイズの影響を低減可能であることが示されたことから、粒径 10 nm とした時の選定した核種を含む中性子増感物質の検出發光量の閾値について検討を行った。図 6 に粒径 10 nm における選定核種の推定発光量の波高値スペクトルを示す。図 6 から、 ^{10}B , ^{14}N , ^{33}S に対する信号収率 80% を確保できる検出發光量閾値の値は、それぞれ 0.0676, 0.0645, 0.0760 MeVee であり、高速中性子により生成される反跳陽子信号との弁別が可能であることが示された。

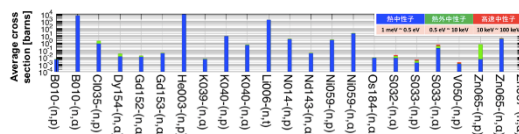


図4 平均反応断面積の大きさ

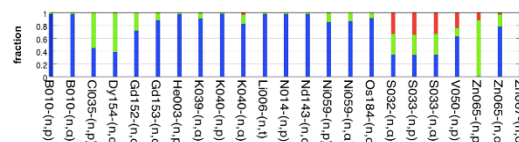


図5 エネルギー領域ごとの感度比

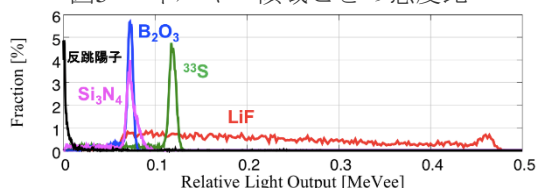


図6 粒径 10 nm の推定波高値スペクトル

2) 有機シンチレータの荷電粒子による発光に関する検討

図 7 にシンチレータの発光量と $(Z_{\text{eff}}/\beta)^2$ の関係を示す。LET を用いた場合に比べて、核種による依存性が改善されていることが分かる。しかし、Birks 式および Chou 式を拡張した関数によるフィッティングでは、Birks 式で $(Z_{\text{eff}}/\beta)^2 = 500$ 程度まで、Chou 式で $(Z_{\text{eff}}/\beta)^2 = 2,000$ 程度までしか良好なフィッティングと言えず、それよりも高い領域では著しく乖離する結果となった。その一方で、発光量と $(Z_{\text{eff}}/\beta)^2$ の関係は単純な指数関数によって比較的良好的に表現されていることから、有効電荷を用いることでクエンチング効果を単純な式で推定できる可能性が示唆された。

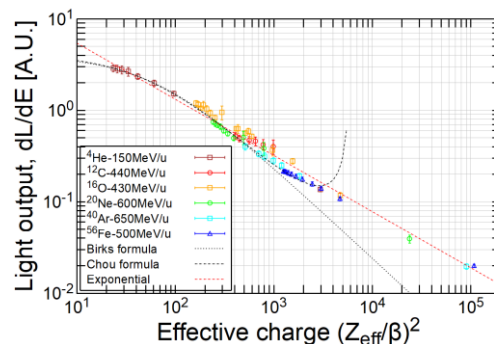


図7 照射粒子の $(Z_{\text{eff}}/\beta)^2$ と発光量の関係

②腕部装着可能な小型 PET 装置の開発

1) テーパー型シンチレータの基礎検討

テーパー型の単一結晶シンチレータの体系でのシミュレーション結果を図 8 に示す。誤差分布からを見ると、分布の中心が左にずれていることがわかる。また、各体系における深さごとの FWHM を図 9 に示す。中心からの距離が大きくなるほど、また Z 方向の位置が PMT から遠くなるほど変位が大きくなっていることがわかる。また、境界面で吸光することにより、Z 方向の位置が PMT から近いイベントの変位が小さくなっていることがわかる。FWHM は中心からの距離が大きくなっても一定であった。また、Z 方向の位置が PMT から遠くなるほど FWHM は大きくなった。境界面で吸光することにより、FWHM は増加した。

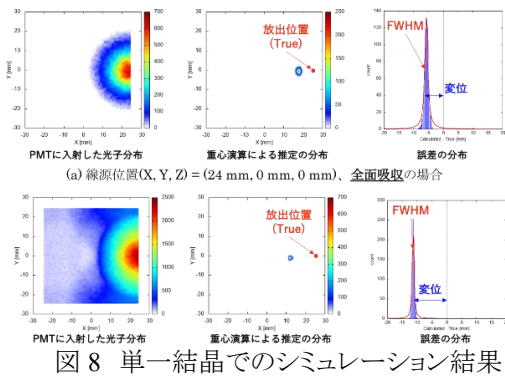


図 8 単一結晶でのシミュレーション結果

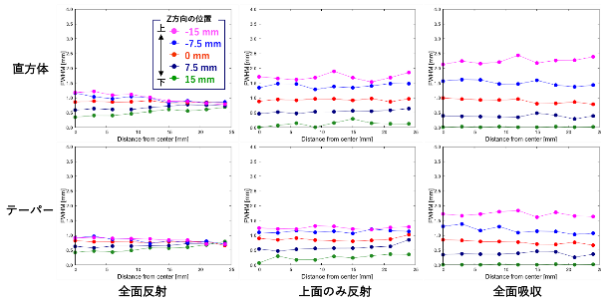


図 9 各体系における深さごとの X 方向 FWHM

2) PET 検出器データ収集システムの開発

図 10 および図 11 に製作したデータ収集システムを用いた実験体系と測定の一例を示す。第 1 層は、他の層よりもエネルギー分解能が悪いことが示された。各層で発生した可視光は、直接 PMT に向かう経路と、4 層目まで移動して反射して PMT に戻る経路の 2 つを通る。シンチレータの第 1 層で発生した光子では、この 2 つの経路の長さが大きく異なるため、エネルギー分解能が悪くなる傾向がある。しかし、本研究で開発した検出器システムのエネルギー分解能は、先行研究と同等であり、小動物の DOI-PET には十分であると考えられる。また、平均 $FOM_{\sigma 1D}$ (1 次元 Figure of Merit) は 1-2、2-3、3-4 の各層でそれぞれ 1.5、0.99、0.91、平均 $ER_{\sigma 1D}$ (1 次元 Error Rate) は 1、2、3、4 層でそれぞれ 3.50%、2.96%、13.3%、1.88% となった。これらは先行研究と同等であることから、DOI 検出器として必要な性能を満たしていると判断される。本研究では、phoswich 検出器の特徴である、層ごとに正規化ゲインが異なるという性質を利用した 2 次元 PQD を導入した。第 3 層の $ER_{\sigma 1D}$ は比較的悪かったが、2D PQD によって、全層で平均 $ER_{\sigma 2D}$ は 3% 以下、平均 $FOM_{\sigma 2D}$ は 0.9 以上となった。結晶の並び順をさらに最適化すれば、Q vs. V_p/Q 2D ヒストグラムの 2D マハラノビス距離が大きくなることによって、弁別能を向上させることができる可能性が示唆された。この最適化には、光学グリスの材質も含まれる。正規化ゲインが高いほど、DOI の識別性能は高くなることが確認された。これは、ゲインを上げると V_p の取得精度が向上し、 V_p/Q の変動が小さくなることに起因すると考えられる。したがって、PMT 出力を Cosmo-Z の入力範囲ぎりぎりまで増幅する低ノイズ、広帯域の TIA を設計すれば、PQD の性能を向上させることができると考えている。また、位置推定用の分圧回路を最適化することで、性能向上に寄与する可能性もある。しかし、今回の研究では、シンチレータをアレイ状に配置していないため、クロストークによる性能劣化が生じる可能性がある。

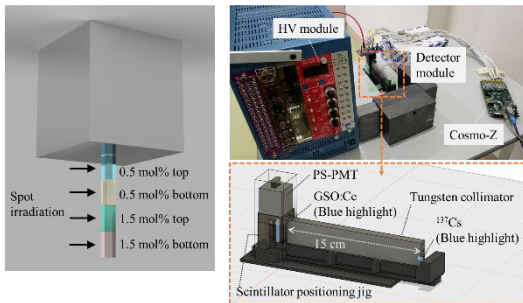


図 10 データ収集システムを用いた実験体系

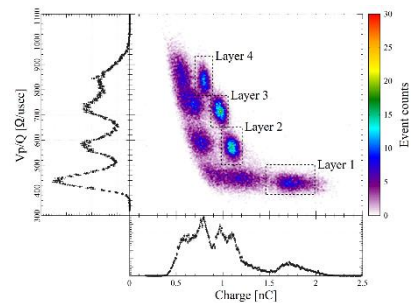


図 11 データ収集システムによる測定の一例

③BNCT に関連した諸課題に関する考察

1) BNCT 照射に伴う患者放射化量の推定

照射終了直後では、 ^{108}Ag による実効線量率が最も高いが、すみやかに減衰し 1 日以内に検出できないレベルまで減衰する。続いて ^{198}Au および ^{64}Cu の実効線量率が高いことが分かる。 ^{198}Au は半減期が約 2.7 日であり、10 日後でも約 7.7% の放射能が残留することから、患者が外出することによる公衆への被ばくが懸念される。照射終了 1 日後から 1 年間、患者から 1 m の位置に居続けた場合の実効線量は 241 μSv 、5 日後で 86.3 μSv となることから、公衆への被ばくは無視できる程度に低いと考えられる。

2) Beam Shaping Assembly 最適化法の検討

単純円筒体系のベンチマーク問題の結果から、中性子エネルギースペクトル、光子エネルギースペクトルの両方で PHITS と CBZ 間に概ね良好な一致が得られた。さらに、複雑円筒体系でのベンチマーク問題の結果からも、同様に良好な一致が得られた。また、CBZ の使用により、計算時間の大幅な短縮も達成された。このことから、カスタマイズした CBZ は、複雑な形状を持つ中性子源の設計最適化計算に適していることが示された。さらに、GA と CBZ を組み合わせた BSA 最適化の結果、高価な材料の有無を考慮した最適化計算において、共に IAEA の推奨値を満足する結果が得られた。最適個体では、モデレータに、Fluental+ TiF_3 または $\text{AlF}_3+\text{TiF}_3$ 、リフレクタに PbF_2+Pb 、コリメータに $\text{C}+\text{B}_4\text{C}$ または $\text{Pb}+\text{B}_4\text{C}$ 、熱中性子フィルタに LiF または Cd 、高速中性子フィルタに ^{60}Ni または Fe 、 γ 線フィルタに Bi を用いる組み合わせが適していることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 K Baba, T Kusumoto, S Okada, M Ishikawa	4. 巻 129
2. 論文標題 A simulation-based study on water radiolysis species for 1H+, 4He2+, and 12C6+ ion beams with multiple ionization using Geant4-DNA	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0054665	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 -
1. 著者名 K Baba, T Kusumoto, S Okada, R Ogawara, S Kodaira, Q Raffy, R Barillon, N Ludwig, C Galindo, P Peaupardin, M Ishikawa	4. 巻 11
2. 論文標題 Quantitative estimation of track segment yields of water radiolysis species under heavy ions around Bragg peak energies using Geant4-DNA	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1524
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-81215-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 G Chiba, H Handa, M Ishikawa	4. 巻 190
2. 論文標題 Improvement and benchmarking of the deterministic transport calculation code CBZ to design beam shaping assembly for BNCT	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Radiation and Isotopes	6. 最初と最後の頁 110465
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apradiso.2022.110465	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 -
1. 著者名 K Miyata, R Ogawara, M Ishikawa	4. 巻 23
2. 論文標題 Improvement of Crystal Identification Accuracy for Depth-of-Interaction Detector System with Peak-to-Charge Discrimination Method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 4584
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s23104584	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 M. Ishikawa, R. Ogawara, K. Baba, S. Ishiguri, H. Handa
2. 発表標題 Feasibility study on energy-dependent neutron flux monitor using multi-core SOF detector
3. 学会等名 19th International Congress of Neutron Capture Therapy (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Handa, G. Chiba, M. Ishikawa
2. 発表標題 Feasibility study on optimization of beam shaping assembly for accelerator-based neutron source for BNCT using deterministic particle transport calculation code
3. 学会等名 19th International Congress of Neutron Capture Therapy (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石川 正純、馬場 健太郎、小川原 亮、清水 尚音、櫻井 良恵
2. 発表標題 SOF検出器によるエネルギー領域別中性子束モニタ開発の基礎検討
3. 学会等名 第16回日本中性子捕捉療法学会学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 馬場健太郎、飯田光、石川正純
2. 発表標題 多芯型SOF検出器開発に向けた中性子エネルギー成分別照射量評価手法の検討
3. 学会等名 第16回日本中性子捕捉療法学会学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 馬場健太郎、石川正純
2. 発表標題 Scintillator with Optical Fiber (SOF)検出器と水ファントムを用いた中性子エネルギースペクトル推定手法の検討
3. 学会等名 第16回日本中性子捕捉療法学会学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Ishikawa, K. Baba, R. Ogawara, N. Shimizu, Y. Sakurai
2. 発表標題 Feasibility study on energy-dependent neutron flux monitor using multi-core SOF detector
3. 学会等名 2019 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Ishikawa, H. Tanaka, H. Kumada
2. 発表標題 Activity estimation during accelerator-based BNCT treatment
3. 学会等名 5th International Symposium on the System of Radiological Protection (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石川 正純
2. 発表標題 要望演題5 BNCT：マルチコアSOF検出器を用いたエネルギー領域別中性子束モニタの検討
3. 学会等名 日本放射線腫瘍学会第32回学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M Ishikawa, R Ogawara
2. 発表標題 Elimination of self-activity signals using peak-to-charge discrimination method for LaBr3 :Ce scintillator
3. 学会等名 5th International Symposium on the System of Radiological Protection (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石川正純、飯田光、千葉豪
2. 発表標題 決定論的粒子輸送計算コードCBZを用いた BNCT専用加速器中性子照射設備のBeam Shaping Assembly最適化
3. 学会等名 第 18 回日本中性子捕捉 療法学会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M Ishikawa, K Baba, R Ogawara, T Kusumoto, T Hamano
2. 発表標題 Feasibility study on quenching effect correction in organic scintillator for high-LET particles
3. 学会等名 2022 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K Miyata, M Ishikawa
2. 発表標題 Development of a Peak-to-Charge-Discrimination-based Depth-of-Interaction detector for the Positron emission tomography
3. 学会等名 2022 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

特になし

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
研究分担者	小川原 亮 (Ogawara Ryo) (00807729)	京都大学・化学研究所・助教 (14301)	

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
---------	---------