

ガン治療に用いるホウ素中性子捕捉療法（BNCT）装置からの 中性子照射発光を検出することで中性子分布イメージングを実現 ～新しい中性子分布計測法への応用に期待～

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院医学系研究科総合保健学専攻の山本 誠一 教授は、矢部 卓也 名古屋大学大学院博士後期課程学生、関西 BNCT 共同医療センターの呼 尚徳 博士、金井 泰和 博士、京都大学の小野 公二 博士・京都大学名誉教授、京都大学複合原子力科学研究所の田中 浩基 教授とともに、がん治療に用いるホウ素中性子捕捉療法（BNCT）装置^{注1)}からの中性子照射による発光を検出することで、中性子分布イメージングを実現しました。

BNCTは、ホウ素原子と中性子との核反応を利用して、がん細胞を内部から選択的に破壊・死滅させる治療法で、臨床利用が始まっています。臨床利用を効率的に進めるためには、BNCT 装置からの中性子分布を短時間で精度よく計測することが求められますが、測定に時間と労力を要するという問題点がありました。

本研究では、この問題点を解決するために、中性子照射で荷電粒子を発生するリチウムを含むシンチレータ^{注2)}を水中に配置し、BNCT 装置からの中性子を照射しながら、光学カメラでシンチレータの発光画像化を試みました。その結果、0.5 秒という短時間で、中性子によるシンチレータ発光の鮮明な画像を得ることに成功しました。この分布は、現在標準とされている線量測定法で測定された分布と一致しました。光学的手法を用いることで、短時間で BNCT 装置からの中性子分布を精度よく計測できることを示した世界初の成果です。

また、この研究成果に先駆け、シンチレータを用いなくて、水に BNCT 装置からの中性子を直接照射することで発生する、ガンマ線に起因するチェレンコフ光^{注3)}イメージングにも、世界で初めて成功しました。

これらの研究成果は、2021 年 12 月 27 日付アメリカ医学物理学専門誌「Medical Physics」と、2021 年 7 月 1 日付ヨーロッパ放射線計測学専門誌「Radiation Measurements」に、それぞれオンライン掲載されました。

【ポイント】

- ・がん治療に用いるホウ素中性子捕捉療法（BNCT）装置からの、中性子照射によるシンチレータ発光を利用し、中性子分布イメージングに成功した。
- ・開発した手法により、0.5 秒という短時間で、BNCT からの中性子分布を鮮明な画像として得ることができた。
- ・シンチレータを用いずに、水に BNCT 装置からの中性子を直接照射することで発生するガンマ線起因のチェレンコフ光をイメージングできることも明らかにした。

【研究背景と内容】

BNCTは、ホウ素原子と中性子との核反応を利用して、がん細胞を内部から選択的に破壊・死滅させる治療法で、すでに臨床利用が始まっています。臨床利用を効率的に進めるためには、BNCT 装置（図 1）からの中性子分布を短時間で精度よく計測することが求められます。しかし現状は、測定に金箔の放射化を測定する方法などが使われていますが、時間と労力を要するという問題点がありました。



図 1 関西 BNCT 共同医療センターに設置された BNCT 装置の中性子ビーム照射部の写真

これまでに、山本教授は、粒子線が水やアクリルブロック中で微弱光を発する「放射線照射による物質の発光現象」^{注4)}を発見し、この光を高感度カメラで撮像することで、粒子線が水などに与える線量分布を得ることができると実証してきました。今回、この手法を応用することで、中性子の線量分布を画像化できる可能性があることに着目し、BNCT からの中性子分布イメージングを試みました。

図2に中性子の線量分布を計測するために開発した、中性子線量分布イメージング装置の模式図を示します。BNCT 装置からの中性子線をコリメータで絞り、水容器に照射しました。この水容器の中に、リチウム（Li-6）を含むシンチレータを配置しました。リチウム（Li-6）は中性子を吸収し、核分裂によりアルファ線とトリチウムを発生します。発生したアルファ線とトリチウムは、シンチレータ中で発光しますので、この発光を側面に配置した光学カメラで撮像しました。

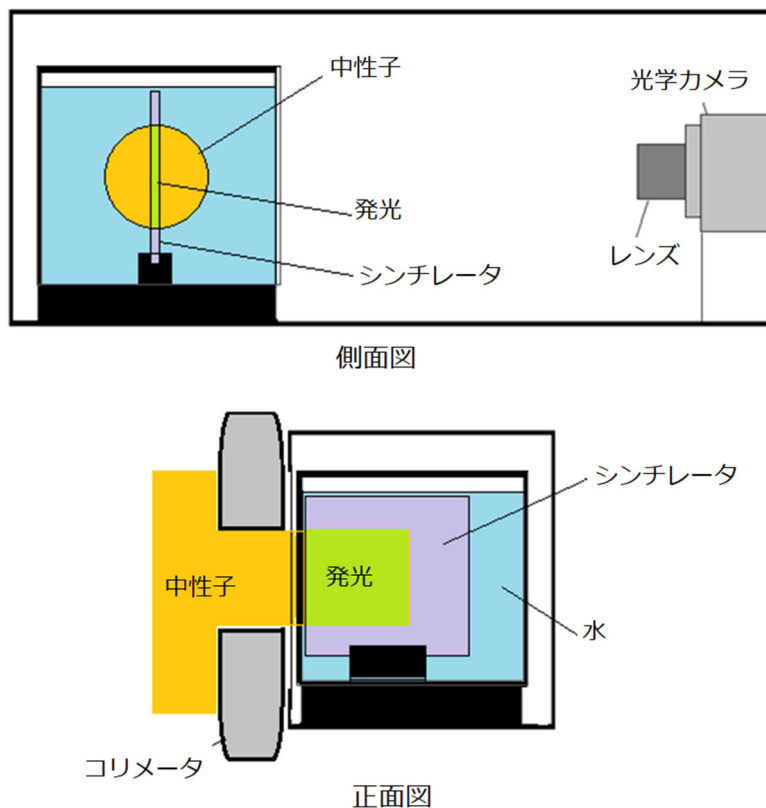


図2 中性子線量分布イメージング装置の模式図：側面図(上)と正面図(下)

図3に、開発した中性子線量分布イメージング装置を用いて得られた、中性子の線量分布画像を示します。画像の左から照射した中性子に対する画像ですが、中性子の照射時間は、わずか0.5秒で、このように鮮明な発光画像を得ることができました。

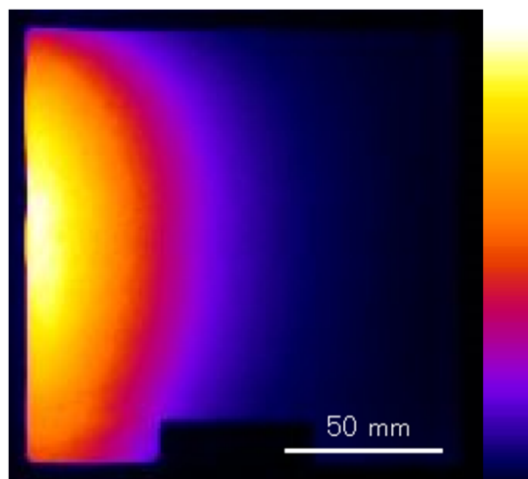


図3 中性子線量分布イメージング装置を用いて得られた中性子の線量分布画像

発光画像の深さ方向の輝度分布を調べると、金箔を用いて測定した中性子分布や、シミュレーションを用いて計算した分布と良く一致しました(図4左)。また発光画像の垂直方向の輝度分布でも、金箔を用いて測定した中性子分布や、シミュレーションを用いて計算した分布と良く一致しました(図4右)。

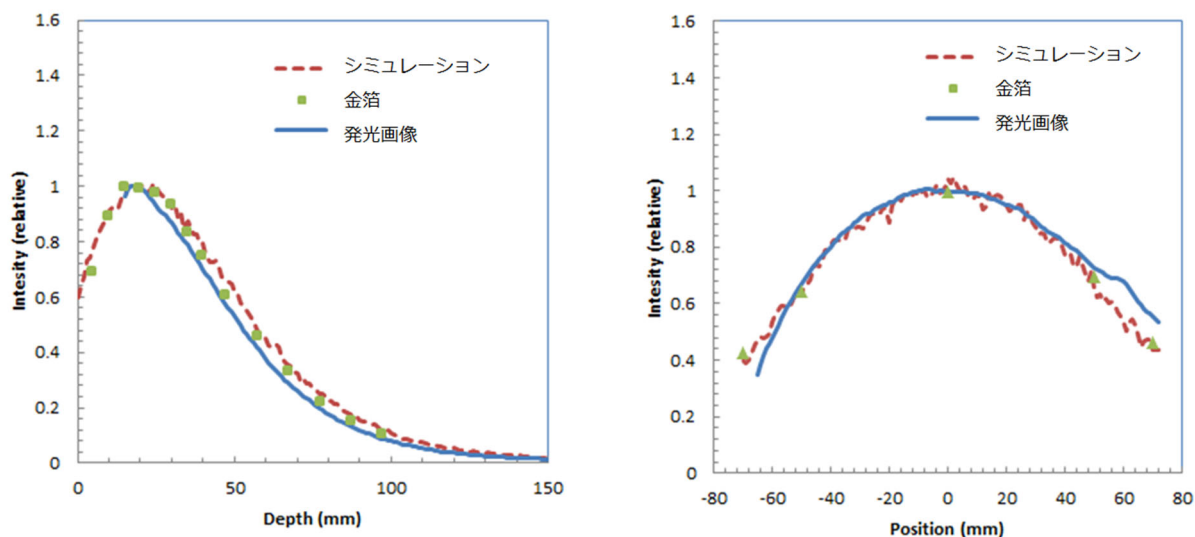


図4 計測された発光画像の水平方向の輝度分布:金箔を用いて測定した方法とシミュレーションを用いて計算した分布との比較:深さ方向(左)と垂直方向(右)

また、この研究成果に先駆け、シンチレータを用いずに、水にBNCT装置からの中性子を直接照射するイメージング実験も行いました。その結果、図5に示すように、中性子が水分子の水素原子に吸収された後に放出される、高エネルギーガンマ線(2.2MeV)によるチェレンコフ光をイメージングできました。これも世界で初めての成果です。

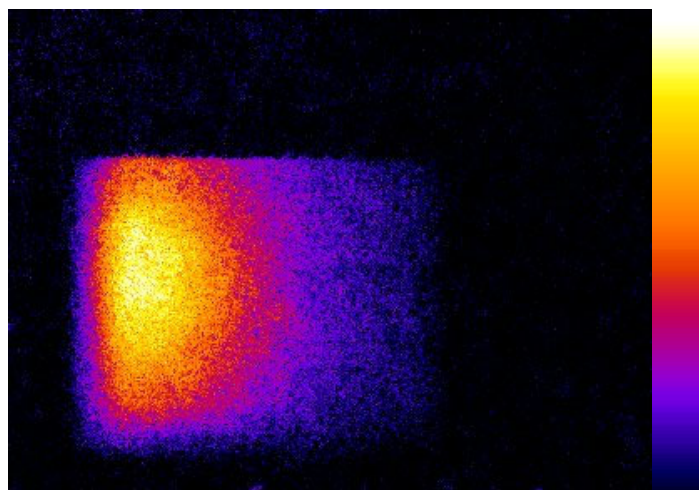


図5 水ファントムのみ照射して得られた、中性子を直接照射することで発生する、高エネルギーガンマ線に起因するチェレンコフ光画像

【成果の意義】

本研究は光学的手法を用いることにより、短時間で、BNCT装置からの中性子分布を精度よく計測することができることを明らかにした世界初の成果です。今後、本研究で得られた成果を元に、装置の製品化を目指します。

【用語説明】

注 1) ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) 装置 :

BNCT は、外部から照射する中性子と、がん細胞に取り込まれたホウ素が核反応を起こすことにより、がん細胞を選択的に破壊し死滅させる治療法で、その治療のための中性子を作り出し、照射する装置を BNCT 装置という。

注 2) シンチレータ :

放射線の照射で発光する物質。代表的なものに、ヨウ化ナトリウム (NaI (TI)) や硫化亜鉛 (ZnS (Ag)) などがある。

注 3) チェレンコフ光 :

従来から知られていた水の発光現象。一定以上のエネルギーの放射線を、水などに照射すると発光する現象で、パーヴェル・チェレンコフが発見し、ノーベル物理学賞を受賞した。

注 4) 放射線照射による物質の発光現象 :

従来、低いエネルギーの放射線照射では、水やアクリルは発光しないと考えられていた。しかしこの常識に反し、数年前に山本教授は、低いエネルギーの放射線照射で水やアクリルが発光することを明らかにした。

【論文情報】

雑誌名 : Medical Physics (アメリカ医学物理学専門誌)

論文名 : Optical imaging of lithium-containing zinc sulfate plate in water during irradiation of neutrons from boron neutron capture therapy (BNCT) system

著者 : 山本 誠一 (名古屋大学大学院医学系研究科総合保健学専攻 教授)、矢部 卓也 (名古屋大学大学院博士後期課程学生)、呼 尚徳 (関西 BNCT 共同医療センター 博士)、金井 泰和 (関西 BNCT 共同医療センター 博士)、小野 公二 (博士・京都大学 名誉教授)、田中 浩基 (京都大学複合原子力科学研究所 教授)

DOI : 10.1002/mp.15424

URL : <https://aapm.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/mp.15424>

雑誌名 : Radiation Measurements (ヨーロッパ放射線計測学専門誌)

論文名 : First measured optical image of Cerenkov-light in water during irradiation of neutron beam from boron neutron capture therapy (BNCT) system

著者 : 山本 誠一 (名古屋大学大学院医学系研究科総合保健学専攻 教授)、矢部 卓也 (名古屋大学大学院博士後期課程学生)、呼 尚徳 (関西 BNCT 共同医療センター 博士)、金井 泰和 (関西 BNCT 共同医療センター 博士)、小野 公二 (博士・京都大学 名誉教授)、田中 浩基 (京都大学複合原子力科学研究所 教授)

DOI : 10. 1016/j. radmeas. 2021. 106633

URL : <https://www. sciencedirect. com/science/article/pii/S135044872100144X?via%3Dihub>