

チェレンコフ光閾値以下の放射線照射による水の発光現象の発見

名古屋大学大学院医学系研究科 総合保健学専攻 山本 誠一*

It was believed that no light is emitted during irradiations of radiations to water with the energy at lower than Cherenkov-light threshold. Contrary to this scientific consensus, the author and collaborating researches discovered that light is emitted in water during irradiations of radiations and imaging of the light was possible. In this topic, the author describes the optical images for various types of radiations, characteristics and origin, and possible applications of the light emitted in water during irradiation of radiation at lower energy than the Cherenkov-light threshold. The author also describes the light emitted in other transparent materials and future prospect of the discovered light.

Keywords: luminescence, water, Cherenkov-light, threshold, particle ions

1 はじめに

チェレンコフ光は放射線計測などの分野で比較的良く知られた現象である¹⁾。高エネルギーのX線、ガンマ線、あるいは電子線がチェレンコフ光を発生することを利用して、放射線の発光画像が得られることが報告されている^{2,3)}。また水中に沈めた非常に強い放射能のCo-60などのガンマ線源からのチェレンコフ光は肉眼で観察することもできる。チェレンコフ光は放射線のエネルギーに対して閾値があり、水の場合、260 keVのエネルギー以下の電子線照射ではチェレンコフ光は発生しない、すなわち全く発光は生じないというのが常識であった¹⁻³⁾。

しかし、筆者たちは、偶然、チェレンコフ光閾値以下の放射線のエネルギーに対して水が発光することを、

陽子線を用いた実験中に発見した。この発見は、大変な驚きであった。その後、陽子線以外の放射線に対しても画像化を試み、この現象は、すべての電離放射線に共通する発光現象であることを確認した。さらに発光機序も明らかにした。今回、このあたりの研究経過を時系列的に報告するので楽しんで読んで頂ければ幸いです。

2 放射線照射による水の発光現象の発見

2.1 陽子線照射による水の発光

筆者は、チェレンコフ光閾値以下の放射線照射による水の発光現象の発見以前は、ポジトロン核種から放出されるポジトロンのチェレンコフ光イメージング研究を行っていた^{4,5)}。治療用の陽子線をアクリルブロックに照射し、核反応で生じるポジトロンを、照射終了後に高感度CCDカメラで撮像することにより、アクリル中のポジトロンの分布を画像化していた⁵⁾。

そんな中、粒子線照射中に撮像したら面白いだろうと考え、水ファントムに、チェレンコフ光閾値以下の100 MeVのエネルギーの陽子線（陽子線のチェレンコフ光閾値は460 MeV、2次電子のチェレンコフ光閾値は120 MeVでチェレンコフ光は発生しない）を照射している最中に、Fig. 1に示す高感度CCDカメラで陽子線ビームの当たっている部分を撮像した。実験前は、核反応で発生する高エネルギーガンマ線によるチェレンコフ光が、広がってぼんやり見えるかもしれないと予想していた。

しかし得られた画像は、予想とは全く異なり、Fig. 2(A)に示す、線量分布にほぼ等しい画像が鮮明に得られた⁶⁾。画像を解析したところ、Fig. 2(B)に示すように、飛程を正確に評価可能であることがわかり、未知の発光現象の発見ということで、すぐに論文にまとめて、有名な科学誌などに投稿した。大発見の論文は、すぐにアクセプトされると思っていたら正反対で、査読に回らなかったり、現象を信じてもらえなかったり、不純物の発光だろうから純水の純度を上げる必要があるなどのコメントがあったり、アクセプト

Discovery of light emitted in water during irradiation of radiation at lower energy than the Cherenkov-light threshold
Seiichi YAMAMOTO* (Nagoya University),
〒461-8673 名古屋市東区大幸南一丁目1番20号
TEL: 052-719-1559, E-mail: s-yama@met.nagoya-u.ac.jp

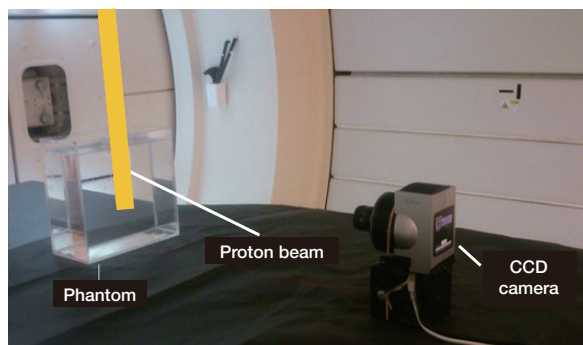


Figure 1. Optical imaging set up during irradiation of proton beam to water.

されるまでに何回か雑誌を変えて再投稿するなど、大変苦労した。しかし何とかアクセプトされて、次は陽子線以外の放射線でも発光するのか、確認の実験を行った。

2.2 炭素線照射による水の発光

次は炭素線を用いて、同じ方法で画像化を試み、発光画像が得られるか確認を行った。その当時は、なぜ発光するのか不明であったので、炭素線で発光するという確証がない状況で実験を行った。照射しやすいという理由で、241.7 MeV/n のエネルギーの炭素線を水に照射し、同じように高感度 CCD カメラを用いて照射中の水の発光を撮像した。その結果、Fig. 3(A) に示すように、鮮明な発光画像が得られた⁷⁾。しかし、水の浅い部分で発光が強くなっており、Fig. 3(B) に示すように、線量分布と異なる部分があった。理由は、測定したときには不明であったが、その後、炭素線で生成する2次電子のエネルギーがチェレンコフ光閾値より少し高く、水の浅い部分にチェレンコフ光が発生したためであることが判明した。

2.3 X線照射による水の発光

陽子線と炭素線で水が発光することが明らかになったが、これらの粒子線では、核反応で高エネルギーのガンマ線やポジトロンが発生するため、もっと単純な実験で水の発光を確認することを行った。実験は60 keV から120 keV の診断用 X 線装置からの X 線を水ファントムに照射し、発光画像を撮像するというものである。60 keV から120 keV の X 線は、電子線に対する水のチェレンコフ光閾値が260 keV であるので、チェレンコフ光は発生しないし、他にチェレンコフ光を発生するような高エネルギーの放射線も発生し

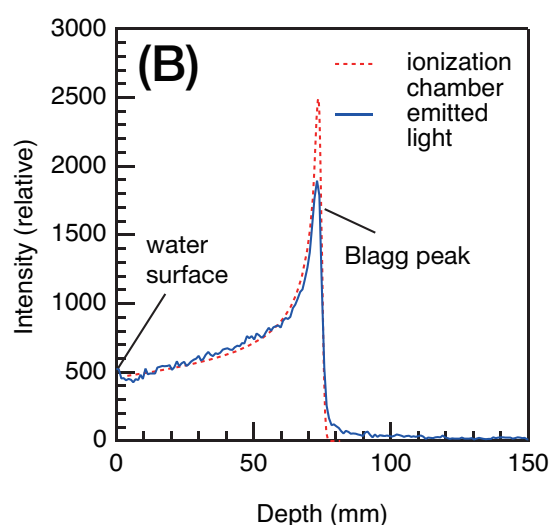
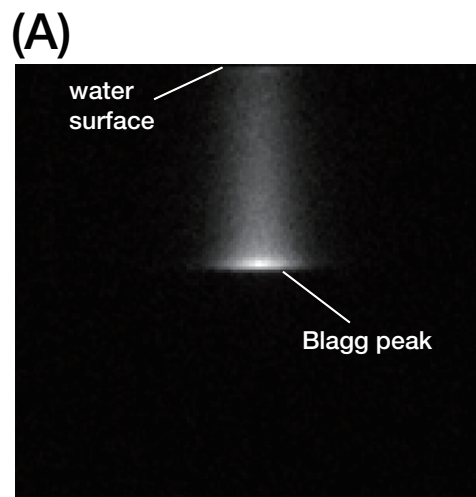


Figure 2. Measured emitted light image during irradiation of protons to water (A) and depth profile of image (B).

ない。同じ方法で X 線照射中の水の発光を撮像したところ、Fig. 4 に示すように、明瞭な X 線の分布を得ることができた⁸⁾。この実験でチェレンコフ光閾値以下のエネルギーの放射線照射で水の発光が起こることは間違いがないと確信した。

2.4 その他の放射線による水の発光

それ以外の放射線でも水は発光することを確認するために、アルファ線⁹⁾、ベータ線¹⁰⁾、ガンマ線¹¹⁾に対しても発光画像測定を行い、それぞれチェレンコフ光閾値以下のエネルギーの放射線照射で水の発光が起こることを確認した。

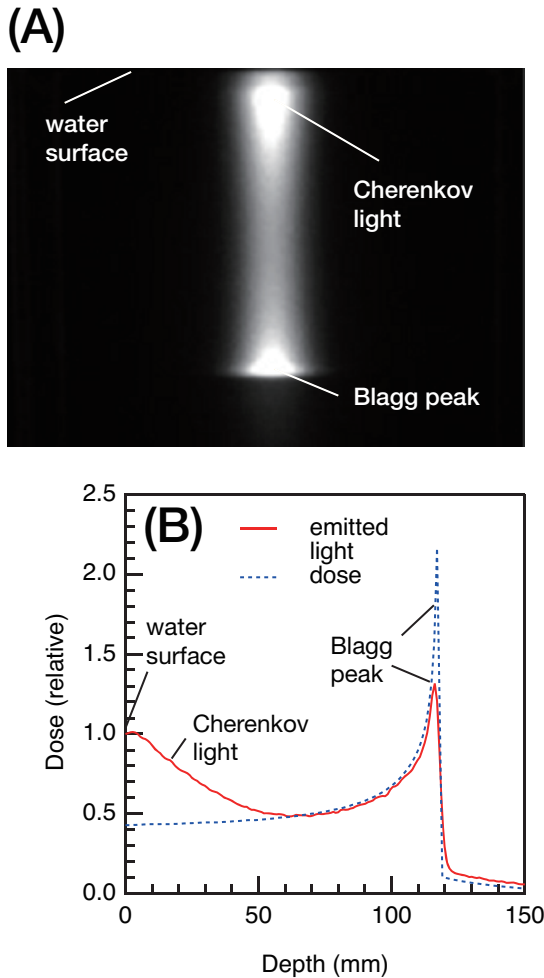


Figure 3. Measured optical image during irradiation of water by 241.7 MeV/n carbon ions (A), and depth profile of image (B).

3 水の発光の性質

3.1 不純物添加による発光量の変化

投稿論文のコメントや学会発表でのコメントで多かったのが、水の純度であった。精製水と水道水で全く発光が変わらなかったが、もっと純度を上げる必要があるなど、困ったコメントがあった。また水に含まれる気体が発光しているのだろうなどというコメントも学会発表中にあった。質問者や査読のコメントは、思い付きでいろいろとされるのだが、そのコメントは間違いだということを証明するのは極めて困難であった。水の純度を上げたり、水に含まれる気体の濃度を下げたりすることは極めて困難だからである。

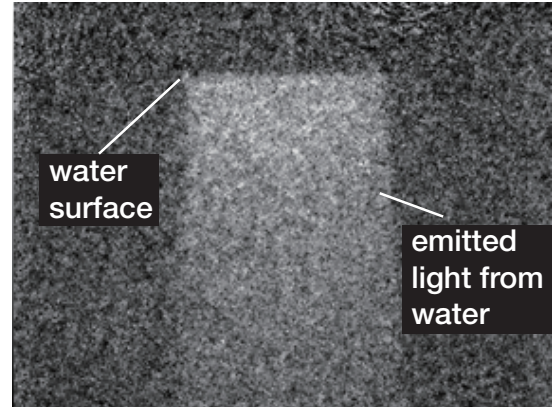


Figure 4. Emitted light image measured during irradiation of water by 120 keV X-rays.

そこで逆に、多量の塩化ナトリウムやブドウ糖、アルコールなどの不純物を加え、また多量の気体を含んだ水を撮像して、精製水と比べることを行った。その結果、ブドウ糖とアルコールでは、3%の濃度でも発光は変わらず、塩化ナトリウムのみ発光量が約15%増加する程度であることがわかった¹²⁾。一方で、酸素、水素などの気体の濃度を上げても、発光は、ほとんど変わらなかった。これらの結果から、水の発光は不純物にほとんど影響されず、非常に安定しており、不純物が発光しているのではないと確信した。

3.2 エネルギー直線性

チェレンコフ光の発光量は、閾値を持つ上に、Fig. 5(A)に示すように、放射線のエネルギーに対して非直線的に変化することが知られている。一方で、発見したチェレンコフ光閾値以下のエネルギーの放射線で生じる水の発光のエネルギー直線性は不明であった。そこで、X線のエネルギーを変えながら、発光量の変化を計測した。その結果、Fig. 5(B)に示すように、水の発光はエネルギーに対して直線性を有することが明らかになった¹²⁾。

3.3 発光量の評価

水の発光量は、チェレンコフ光やシンチレータの発光より小さいが、どの程度の発光か、不明であったので、発光量がわかっているプラスチックシンチレータと水に、放射線を照射し、発光量を比較することでエネルギー当たりの発光量である photon/MeV を算出した。その結果、水の発光量は、放射線の種類によらず、

実験的には、おおよそ 0.5 photon/MeV であることが明らかになった⁷⁻¹¹⁾。水の発光にシンチレーション光のプロセスを用い、等方に広がると仮定し、モンテカルロシミュレーションに組み込んで計算した分布と実験結果と比較すると、水の発光量は 0.15 photon/MeV という結果になり¹³⁾、おおよそ実験と一致した。

4 水の発光メカニズム

4.1 水の発光スペクトル測定

未知の発光現象を発見したが、その発光機序を明らかにすることは重要である。発光機序はそのスペクト

ルを測定することで明らかになるものと考え、分光器を用いて粒子線照射中の水の発光計測を行った。しかし分光器は、どれも感度が低く、全くスペクトルが得られなかった。そこで、高感度 CCD カメラに長波長透過フィルターを配置し、フィルターの波長を変えながら測定することで発光スペクトルを求めた。チェレンコフ光のスペクトルも同時測定できるように、チェレンコフ光閾値を少し上回るエネルギーの炭素線を水に照射して測定を行った。その結果、水の発光は Fig. 6(A) に示すように、 $1/\lambda^2$ の分布 (λ は波長) を示し、チェレンコフ光の理論的な発光スペクトルと一致した¹⁴⁾。一方で、チェレンコフ光のスペクトル測定結

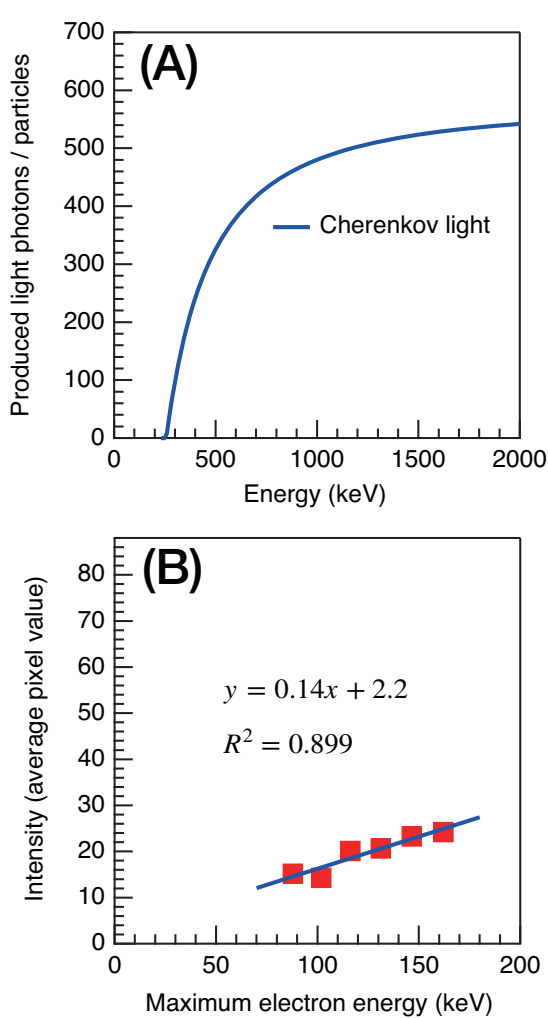


Figure 5. Calculated linearity with change in the electron energy for Cherenkov light (A) and measured linearity of the luminescence intensities with the X-ray energy (B).

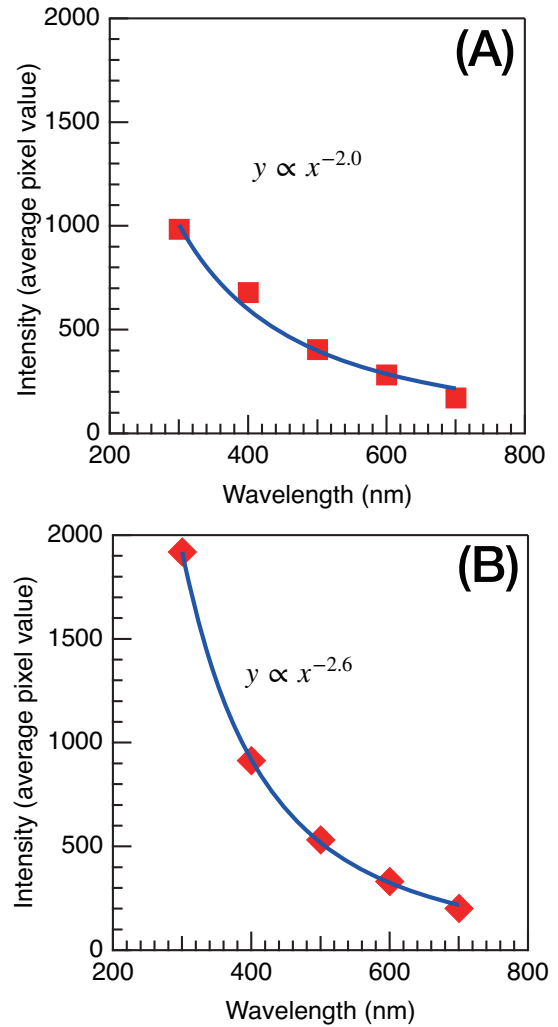


Figure 6. Light spectrum of the luminescence of water measured from carbon ion irradiation (A) and that of Cherenkov light (B).

果は, Fig. 6(B) のように, $1/\lambda^2$ より急な曲線になった. これは, 水の屈折率が, 波長が短い方が高くなるためと判明した¹⁴⁾.

4.2 発光機序

得られた発光スペクトルから, 水の発光は, チェレンコフ光の元になる光が, 打ち消しあって見えないと考えられていたものが, わずかに検出されたものであるとの結論にいたった. この場合, 発光に閾値がないので, 発光スペクトルは $1/\lambda^2$ の曲線になる. 模式図的に書くと Fig. 7(A) に示す状況が起こっており, 電子と水の分子中の電子が双極子相互作用により放出している電磁波を検出したものと考えられる. この電磁波は, ごく近傍で同時に生じるので, 位相の違う光同士が打ち消しあってすべて消えると考えられていた. しかし, 発光の一部は消えずに, 今回発見した水の発光として観察されたと考えられる. 一方で, この発光は, チェレンコフ光閾値を超えると, Fig. 7(B) に示すように, 位相のあった部分が前方方向に生じ, 打ち消し合

わない光が生じる. これがチェレンコフ光である. 筆者は, ここで説明した水の発光メカニズムは正しいと考えているが, 未だに, 新しい投稿論文に, この水の発光メカニズムを書くと, これは常識に反するので, 削除することとのコメントが来ることがある. アクセプトされるために仕方なく削除するが, なかなか苦痛である.

5 水以外の物質の発光

5.1 アクリルの発光

水の発光とともに, 従来は光らないと考えられていた透明な物質の発光画像計測も行った. まずアクリルの発光測定を行った. その結果, アクリルは水の約10倍の輝度で光り, 発光分布は水と類似であった. 発光スペクトルは短波長が多く, プラスチックシンチレータと類似であった⁶⁻¹¹⁾. アクリルの主な発光は, 水の発光とは違う発光メカニズム, おそらくシンチレーションであると考えている. 発光スペクトルは短波長が多く, プラスチックシンチレータと類似であった¹⁵⁾.

5.2 ガラスの発光

次に, ガラスの発光測定を行った. ガラスの発光はガラスの種類によって発光量と発光スペクトルが大きく異なることが明らかになった¹⁶⁾. 石英ガラスは水の約15倍の輝度で光り, 発光スペクトルは長波長が主であった. 石英ガラスの主な発光も, 発光スペクトルから考え, 水の発光とは違う発光メカニズム, すなわちシンチレーションであると考えられる. 一方で, 一般の窓ガラスに使われる板ガラス (フロートガラス) は水の数百倍の輝度で光り, 一般的なシンチレータとして使えることが明らかになった¹⁷⁾. 板ガラスは廉価で, 大きなサイズも作りやすく, これまでコストの関係で計測が困難であった放射線イメージングに利用できることが明らかになった¹⁸⁾.

6 発光現象の応用

6.1 粒子線の飛程測定への応用

粒子線治療に用いる陽子線や炭素線ビームを水に照射したときの発光画像は, ビームの飛程を正確に反映することは最初の実験ですでに明らかになっている^{6,7)}. その後も, 別の実験で数えきれないほど飛程の評価を行っているが, 発光の起点をどこにとるか, 視差誤差でブラッグピークが広がることがあるなどの間

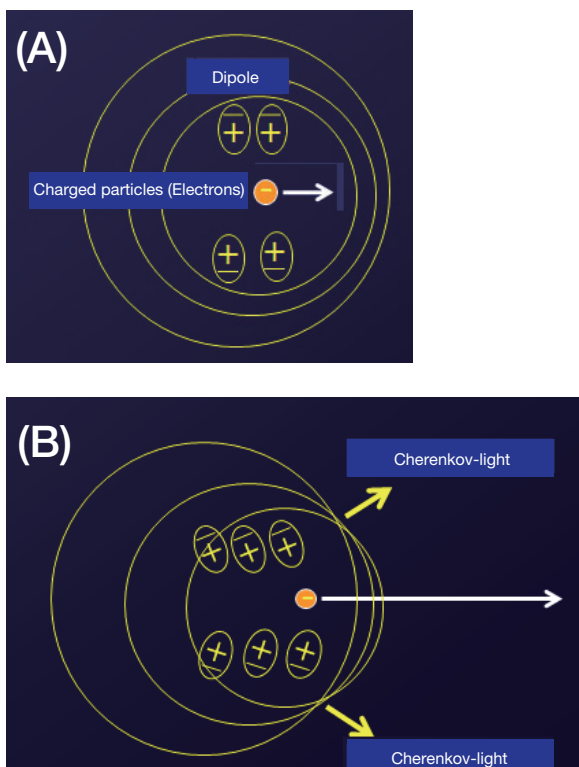


Figure 7. Schematic of the light emission mechanism of the luminescence of water at lower energy than the Cherenkov light threshold (A) and that of Cherenkov light (B).

題はあるものの、常に正しく評価されている。

6.2 粒子線の線量測定への応用

陽子線や炭素線ビームを水に照射したときの発光画像は、高エネルギーの即発ガンマ線や2次電子の放出するチェレンコフ光が含まれることがあり、線量画像とは異なる部分も観察され、線量測定への応用には、これらの補正が必要であることが明らかになった。そこで即発ガンマ線や2次電子の放出するチェレンコフ光をモンテカルロシミュレーションで推定し、減算することで補正したところ、陽子線、炭素線ともに線量画像に近づけることができた¹⁸⁻²⁰⁾。しかし、陽子線では補正後、ブラッグピーク付近でも発光輝度値が線量とほぼ同じになったが¹⁸⁾、炭素線では、かなり過小評価している²⁰⁾。おそらく炭素線では、ブラッグピーク付近で消光効果(クエンチング)が起こっているものと思われるが、この辺りを明らかにし、改善することは今後の課題の一つである。別のチェレンコフ光の補正法として、深層学習を用いて線量画像を推定する方法を試み、良好な結果が得られている²¹⁾。最近では、チェレンコフ光が偏光している性質を利用して偏光フィルターでチェレンコフ光成分を求める方法を試み、補正に成功し、またチェレンコフ光閾値以下で生じる水の発光は偏光していないことも明らかにした²³⁾。

7 水の発光現象研究の将来展望

論文発表には大変苦勞しながらも、これまで知られなかったチェレンコフ光閾値以下の放射線照射による水の発光が本当に存在することを明らかにできた。ほぼすべての放射線の発光画像計測を行い、電離放射線に共通の現象であることを明らかにした。あとは、この発光に関する大きなインパクトのある応用を見つけてことができればノーベル賞の可能性もあるのでは、と期待している。この現象を発見できたのは、偶然であり、単に運が良かったからである。この発見以降、色々な実験を思いつくままに行っている。まだ実験をやっていない放射線を求めて、最近ではJ-PARCのミュオンビームを水に照射して発光画像を撮像する実験を行い、興味深い結果が得られた²³⁾。また中性子線の画像化も進めている。

実験で、未知の現象が偶然に見つかる確率は極めて低いですが、予想通りの結果が得られても、論文になるので問題はない。むしろ予想通りの方が、論文は通りやすい。予想から外れると大発見になるし、予想通りだ

と論文発表できるので、とにかく思いついた面白い実験があれば、面倒がらずに行うようにしている。また、未知の現象が偶然に見つかる確率も、実験の数に、おそらく比例する。定年が近いが、可能な限り多くの実験を行い、論文発表や学会発表をしていきたいと考えている。

〈謝 辞〉

これらの成果が得られたのは、共同研究者や学生さんたちの協力があつたからです。研究に関係された皆様に心から感謝いたします。

〈参 考 文 献〉

- 1) J. V. Jelley, Cherenkov radiation and its applications, Pergamon Press, Oxford, U.K. (1958).
- 2) Y. Helo, A. Kacperek, I. Rosenberg, G. Royle, A. P. Gibson, Phys. Med. Biol., 59 (2014) 7107.
- 3) A. K. Glaser, R. Zhang, D. J. Gladstone, B. W. Pogue, Phys. Med. Biol., 59 (2014) 3789.
- 4) S. Yamamoto, T. Watabe, H. Ikeda, Y. Kanai, H. Watabe, Y. Ogata, K. Kato, J. Hatazawa, Ann. Nucl. Med., 28 (2014) 961.
- 5) S. Yamamoto, T. Toshito, K. Fujii, Y. Morishita, S. Okumura, M. Komori, Med. Phys., 41 (2014) 111913.
- 6) S. Yamamoto, T. Toshito, S. Okumura, M. Komori, Med. Phys., 42 (2015) 6498.
- 7) S. Yamamoto, M. Komori, T. Akagi, T. Yamashita, S. Koyama, Y. Morishita, E. Sekihara, T. Toshito, Med. Phys., 43 (2016) 2455.
- 8) S. Yamamoto, S. Koyama, M. Komori, T. Toshito, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 832 (2016) 264.
- 9) S. Yamamoto, M. Komori, S. Koyama, T. Toshito, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 819 (2016) 6.
- 10) S. Yamamoto, IEEE Trans. Radiat. Plasma Med. Sci., 1 (2017) 329.
- 11) S. Yamamoto, K. Kato, S. Abe, Appl. Radiat. Isot., 157 (2020) 109037.
- 12) S. Yamamoto, S. Koyama, T. Yabe, M. Komori, J. Tada, S. Ito, T. Toshito, Y. Hirata, K. Watanabe, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 883 (2018) 48.
- 13) T. Yabe, M. Sasano, Y. Hirano, T. Toshito, T. Akagi, T.

- Yamashita, M. Hayashi, T. Azuma, Y. Sakamoto, M. Komori, S. Yamamoto, *Phys. Med. Biol.*, 63 (2018) 125019.
- 14) S. Yamamoto, T. Akagi, T. Yamashita, J. Toivonen, M. Yamaguchi, M. Komori, N. Kawachi, *J. Phys. Commun.*, 2 (2018) 065010.
- 15) S. Yamamoto, T. Akagi, M. Yamaguchi, *J. Instrum.*, in press.
- 16) S. Yamamoto, R. Horita, T. Toshito, M. Komori, *J. Instrum.*, 13 (2018) P10021.
- 17) R. Horita, S. Yamamoto, K. Yogo, T. Toshito, M. Komori, *Biomed. Phys. Eng. Express*, 5 (2019) 045033.
- 18) T. Yabe, M. Komori, T. Toshito, M. Yamaguchi, N. Kawachi, S. Yamamoto, *Phys. Med. Biol.*, 63 (2018) 04NT02.
- 19) T. Yabe, M. Komori, R. Horita, T. Toshito, S. Yamamoto, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip.*, 888 (2018) 163.
- 20) T. Yabe, T. Akagi, S. Yamamoto, *Phys. Med.*, 74 (2020) 118.
- 21) T. Yabe, S. Yamamoto, M. Oda, K. Mori, T. Toshito, T. Akagi, *Med. Phys.*, 47 (2020) 3882.
- 22) S. Yamamoto, T. Yabe, T. Akagi, Y. Hirano, *Med. Phys.*, 48 (2020) 427.
- 23) S. Yamamoto, K. Ninomiya, N. Kawamura, Y. Hirano, *Sci. Rep.*, 10 (2020) 20790.

〈著者略歴〉

山本 誠一：名古屋大学工学部原子核工学科卒業後、島津製作所に入社し、PET装置などの医療機器の開発を行った。その後、神戸高専でいろいろな医用画像化装置開発を行うとともに医療機器開発担当ディレクターとして神戸医療産業都市構想に関連した仕事も行った。8年前に名古屋大学に移り、医用画像装置開発に加え、放射線治療中の画像化に関する研究をはじめた。最近、チェレンコフ光閾値以下の放射線照射で水が発光する現象を発見し、大変興味深いので精力的に研究を進めている。しかし、定年まで1年しかないので、何とかその後も研究を続けることができないかと悩んでいる。どなたか特任教員や研究員などの口があればぜひお教えください。