

一般セッション(口頭講演) | 2 放射線：2.4 医用応用

2024年9月18日(水) 10:00 ~ 11:45 会場 D62 (万代島ビル)

[18a-D62-1~6] 2.4 医用応用

古場 裕介(量研機構)、高橋 美和子(量研機構)

10:00 ~ 10:15

[18a-D62-1]

[第56回講演奨励賞受賞記念講演] 薄膜型ダイヤモンド検出器を用いたマルチオン照射の線エネルギー付与分布測定

○青木 勝海¹、米内 俊祐¹、武居 秀行¹、松本 卓己²、牧野 高紘¹、松本 真之介³、加田 渉² (1.量研機構、2.東北大、3.東京都立大)

◆ 英語発表

10:15 ~ 10:30

[18a-D62-2]

Evaluating Radiation Modulation Capabilities of 3D Printed PLA, ABS, and TPU with Different In-fill Densities and Phase Angles for Nuclear Medicine Applications

○(D)ToniBeth Guatato Lopez^{1,2,4}, James Harold Cabalhug², Emmanuel Arriola^{1,2,4}, Marynella Laica Afable², Ranier Jude Wendell Lorenzo², Alvie Asuncion Astronomo³, Fred Liza², Robert Dizon², Gil Nonato Santos⁴ (1.Department of Science and Technology, 2.Metals Industry Research and Development Center, 3.Philippine Nuclear Research Institute, 4.De La Salle University)

10:30 ~ 10:45

[18a-D62-3]

直交積層型PET検出器によるスケーラブルTOF-DOI検出器の提案

○大田 良亮¹ (1.浜ホト中研)

10:45 ~ 11:00

[18a-D62-4]

重粒子線治療の飛程検証PETによる腫瘍診断の可能性：ラット実証実験

○寅松 千枝¹、田島 英朗¹、脇坂 秀克¹、須藤 仁美¹、関 千江¹、生駒 洋子¹、菅野 巖¹、山谷 泰賀¹ (1.量子科学技術研究開発機構)

◆ 英語発表

11:00 ~ 11:15

[18a-D62-5]

Design of a sub-0.5 mm resolution mouse brain PET

○(P)HanGyu Kang¹, Hideaki Tashima¹, Taiga Yamaya¹ (1.QST)

11:15 ~ 11:45

[18a-D62-6]

[第30回放射線賞受賞記念講演] 「核医学応用物理」の実践：革新的PET装置のBench-to-Clinical研究

○山谷 泰賀¹、高橋 美和子¹、田島 英朗¹、吉田 英治¹、寅松 千枝¹、赤松 剛¹、錦戸 文彦¹、浜戸 アクラム¹、Kang Han Gyu¹、田久 創大¹、岩男 悠真¹、黒澤 俊介²、鎌田 圭²、吉川 彰²、羽石 秀昭³、菅 幹生³、川村 和也³、石橋 真理子⁴、今井 陽一⁵ (1.量研機構、2.東北大、3.千葉大、4.日本医大、5.獨協医大)

薄膜型ダイヤモンド検出器を用いたマルチイオン照射の 線エネルギー付与分布測定

Measurement of linear energy deposition distribution with diamond membrane detector in multi-ion beam therapy

量研機構¹, 東北大², 東京都立大³

○青木 勝海¹, 米内 俊祐¹, 武居 秀行¹, (D)松本 卓己², 牧野 高紘¹, 松本 真之介³, 加田 渉²

National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)¹,
Tohoku University², Tokyo Metropolitan University³

○Katsumi Aoki¹, Shunsuke Yonai¹, Hideyuki Takei¹, Takumi Matsumoto²,
Takahiro Makino¹, Shinnosuke Matsumoto³, and Wataru Kada²

E-mail: aoki.katsumi@qst.go.jp

QST では 2023 年 11 月から、炭素のみではなく酸素やネオンを使ったマルチイオン照射による臨床研究が開始された(骨軟部マルチイオン、jRCTs032220609)。炭素より線エネルギー付与 (Linear Energy Transfer: LET) が大きい酸素やネオンを併用することで、腫瘍中心部の線量平均 LET を上げることができ生物効果が高くなる。この治療照射法の品質保証・品質管理 (QA/QC) においては、従来の電離箱を用いた線量評価だけでなく LET の評価も重要である。現在 QST では、SOI (Silicon-On-Insulator) 半導体検出器を用いた測定・評価を進めている (A. Rosenfeld, *Nucl. Instr. Meth.* **809**, 156-170, 2016) が、マルチイオン治療の症例数を増加させる上では、放射線損傷による性能劣化の観点から放射線耐性に優れた検出器の開発が望まれる。本研究は、SOI 半導体検出器に比べ放射線耐性が高く、生体深度における LET 分布を取得できる検出器を開発することが目的である。

Si に比べて放射線耐性が高いダイヤモンド半導体検出器 (250 $\mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ の検出領域、層厚 50 μm) を用いて、HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) の治療室にて測定を実施した (図 1)。2024 年春の学術講演会では、3 つの入射強度 (強度 ID: 5/15/30) で測定した結果から強度を上げていくことでパイルアップの傾向が強くなることを報告した[1]。また、治療の最小強度 (強度 ID: 30) においてもパイルアップの傾向が強いことから、パイルアップが少なく測定できるように検出器サイズを小さくする必要がある。強度をさらに下げて測定を行い、パイルアップがより少なくなる強度を調査し、それぞれの強度における LET 分布を比較した (図 2)。今回はさらに、ビーム強度に対するダイヤモンド検出器の応答依存性について調べ、検出器サイズの最適化に向けた検討を行った。

【謝辞】

本研究の一部は、科研費 (JP22H03013) の助成を受けて実施された。

参考文献

[1] 青木 勝海 他, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会, [25p-12E-2], 2024 年 3 月 25 日.

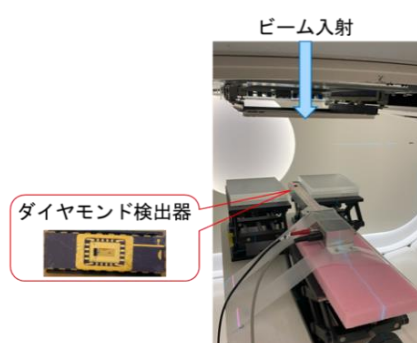


図 1. ダイヤモンド検出器と測定の様子

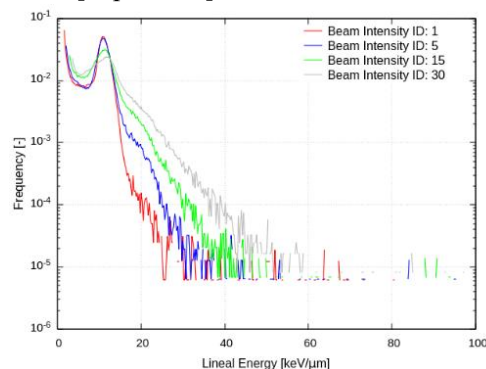


図 2. 350 MeV/u 炭素を、4 つの入射粒子強度で照射した時のそれぞれのスペクトル

Evaluating Radiation Modulation Capabilities of 3D Printed PLA, ABS, and TPU with Different In-fill Densities and Phase Angles for Nuclear Medicine Applications

Toni Beth Guatato-Lopez^{a,b,d}, James Harold P. Cabalhug^b, Emmanuel R. Arriola^{a,b,d}, Marynella Laica B. Afable^b, Ranier Jude Wendell R. Lorenzo^b, Alvie Asuncion-Astronomo^c, Fred P. Liza^b, Robert O. Dizon^b, Gil Nonato C. Santos^d

E-mail: tblopez@mirdc.dost.gov.ph

Abstract: The application of 3D printing technologies in the field of radiotherapy presents a novel approach to developing custom-tailored devices for radiation shielding and modulation. This study investigates the effects of varying in-fill densities and design structures on the empirical density and radiation attenuation properties of three common 3D printing materials: polylactic acid (PLA), acrylonitrile butadiene styrene (ABS), and thermoplastic polyurethane (TPU).

Using the water displacement method, we measured the empirical density of 3D printed samples with different in-fill patterns and densities. The results were used to assess the correlation between in-fill density and material density. Furthermore, mass attenuation coefficients were calculated using the XCOM and EpiXS software programs to determine the effectiveness of each sample in attenuating radiation. Varying printing infill densities and phase angles were included to also investigate the resulting attenuation characteristics of the material. These were all part of the DOE incorporated to fully understand the interaction of varied in-fill densities and phase angles.

The findings demonstrate that manipulating the in-fill density and design significantly impacts the density and, consequently, the radiation attenuation properties of the printed materials. PLA, ABS, and TPU samples with higher in-fill densities showed improved attenuation characteristics, making them potentially effective for use in radiotherapy applications where precise dose modulation is critical.

This study highlights the importance of optimizing 3D printing parameters to enhance the functional properties of printed materials for medical applications, paving the way for personalized and efficient radiotherapy solutions.

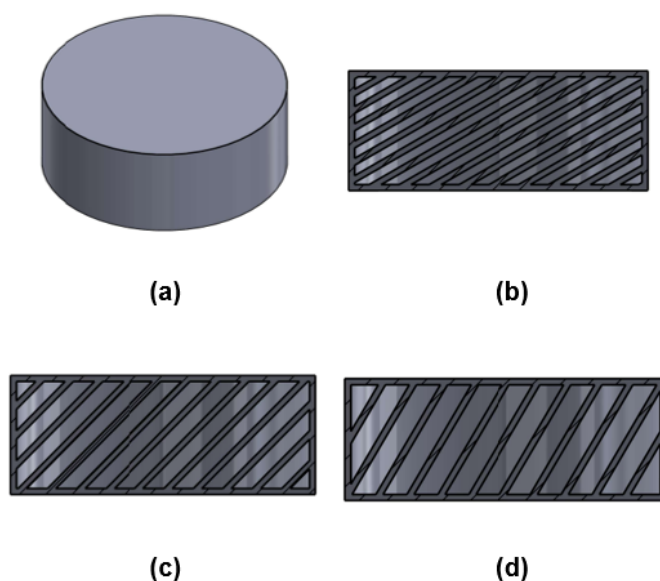


Figure 1: CAD Model of a Cylindrical Sample with varying Phase Angles at (b) 30 degrees, (c) 45 degrees and (d) 60 degrees.

直交積層型 PET 検出器によるスケーラブル TOF-DOI 検出器の提案

Proposal of scalable TOF-DOI detectors using orthogonally stacked 1D PET detectors

浜ホト中研¹ °大田 良亮¹

Hamamatsu Photonics K.K.¹, °Ryosuke Ota¹

E-mail: ryosuke.ota@crl.hpk.co.jp

陽電子断層撮像装置 (PET) は被写体内から放出される電子-陽電子対消滅ガンマ線を同時計数することで被写体内の薬剤の分布を可視化する装置である。PET 計測において、同時計数されたイベントに対して付加的な情報として検出器間のガンマ線の飛行時間差 (TOF) を計測することで画像のシグナルノイズ比が向上し、検出器内の相互作用深さ (DOI) を計測することで画像の均一性が向上するため、TOF-DOI の両情報を取得できる検出器が望まれる。特に TOF 性能として、同時計数時間分解能 (CTR) で半値全幅が 100 ps となるような検出器が今後求められている。通常 PET 検出器はシンチレータと光検出器で構成されるが、ガンマ線に対する十分な阻止能を確保するためには LSO のようなシンチレータで 20 mm 程度の厚みが必要となる。しかし、20 mm もの厚みを持つシンチレータの場合、シンチレーション光が光検出器に到達するまでの時間のばらつきが TOF 性能を律速し、CTR = 100 ps を達成するのが困難である。シンチレータ厚を短くすればシンチレータ内での光の拡散は抑制でき、CTR = 100 ps は可能であるが、今度は検出効率が低下するというトレードオフが存在する。

本発表では、下図にあるようなシンチレータの長手方向の一面に反射材を巻かないような 1 次元 PET 検出器を 2 個用意し、それらを直交に積層する検出器を提案する。この検出器構成により、検出器を積層させることで検出効率を損なうことなく、シンチレータ厚を 13 mm 以下程度まで低減することが可能になり、結果として TOF 性能が向上することが期待される。更にはシンチレータピッチに応じた DOI 情報も取得可能であり、高 TOF-DOI PET 検出器が実現される。本発表では検出器の基礎的な特性として、エネルギー分解能、xy 空間分解能、CTR 等を報告する。

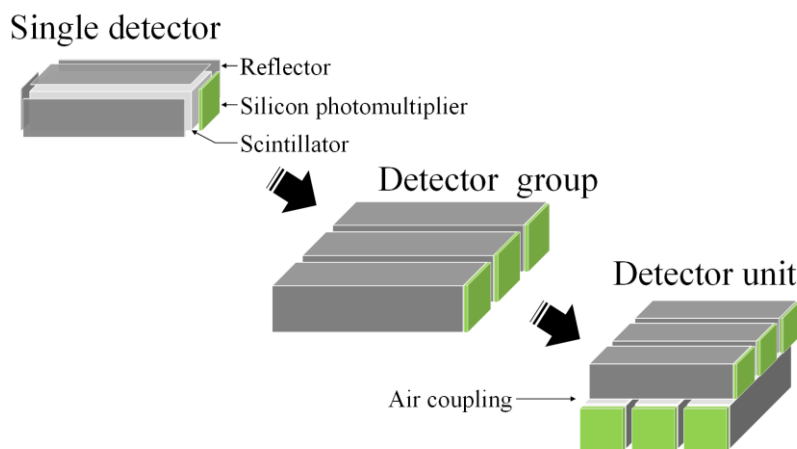


Fig. 1. A concept of the proposed detector.

重粒子線治療の飛程検証 PET による腫瘍診断の可能性：ラット実証実験

Feasibility of tumor diagnosis by means of range-verification PET in carbon-ion therapy: A rat demonstration

量子科学技術研究開発機構¹, [○]寅松 千枝¹, 田島 英朗¹, 脇坂 秀克¹, 須藤 仁美¹, 関 千江¹,
生駒 洋子¹, 菅野 巖¹, 山谷 泰賀¹

National Institutes for Quantum Science and Technology¹, [○]Chie Toramatsu¹, Hideaki Tashima¹,
Hidekatsu Wakisaka¹, Hitomi Sudo¹, Chie Seki¹, Yoko Ikoma¹, Iwao Kanno¹, Taiga Yamaya¹

E-mail: toramatsu.chie@qst.go.jp

In carbon ion therapy, tumor hypoxia imaging is required to optimize treatment plans for frequently changing tumor conditions, but it is impractical to execute hypoxia PET for every treatment fraction. Therefore, our idea is to use range-verification PET for tumor diagnosis. The range-verification PET visualizes positron emitters produced through nuclear fragmentation reactions in the patient body, and we expect that the biological washout speed of such positron emitters will reflect the tumor vascular conditions. In this work, we aimed at demonstrating the feasibility of this concept in a tumor model rat. Glioma cells were injected into the thigh of a rat. Two weeks later, magnetic resonance angiography (MRA) was performed as the standard of truth to determine the intratumoral vascular conditions. Then, the rat tumor was irradiated using the ^{12}C beam (~ 8 Gy) in the Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC). Immediately after the irradiation, range-verification PET was performed by using our original total-body small-animal PET system. In the range-verification PET measured for 10 min (Figure. 1-a, b). Figure 2-a shows the obtained PET image (10 min summed image), and heterogenous intensity region was observed in irradiated target tumor tissue. Difference in washout speed was clearly observed (Figure .2-b), and a high

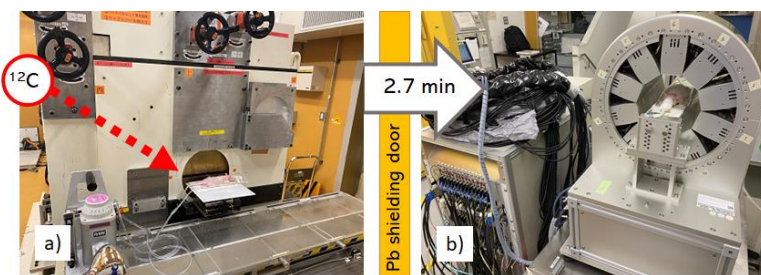


Fig.1 a) ^{12}C Irradiation to the tumour. b) Range-verification PET by TBS-PET

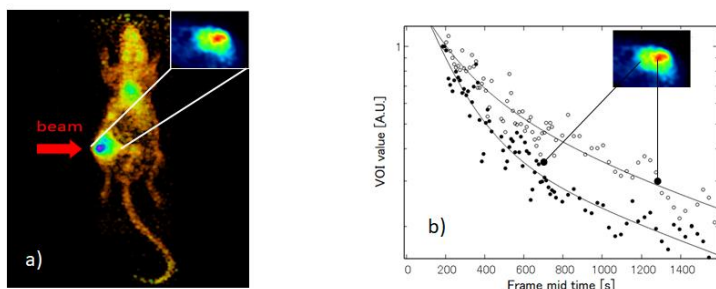


Figure 2. a) 10 min summed PET image. b) The time activity curves depends on region.

activity region corresponded to a poorly vascularized region in the MRA image. Different time activity curves were obtained depending on the high and low activity regions, which supported the feasibility of the use of range-verification PET for tumor diagnosis

Design of a sub-0.5 mm resolution mouse brain PET

[○]Han Gyu Kang¹, Hideaki Tashima¹, Taiga Yamaya¹

QST¹, E-mail: hangyookang@gmail.com

Spatial resolution is the most important factor for mouse brain dedicated positron emission tomography (PET). Previously, we obtained 0.55 mm resolution with small animal PET, however our original goal of sub-0.5 mm resolution was not realized because of the unoptimized crystal layer design. Here we proposed a mouse brain PET design with an optimized crystal layer design that can achieve sub-0.5 mm resolution. The newly proposed mouse brain PET design consists of a staggered 3-layer DOI detector using 0.8 mm crystal pitch. The geometry has a 48 mm ring diameter and 23.4 mm axial FOV. The PET has 2 rings each of which has 16 DOI detectors. We conducted GATE simulations to optimize the crystal layer design which can provide the best spatial resolution throughout the field-of-view. Three different crystal layer designs were used: (A) 4+4+7 mm, (B) 3+4+4 mm, and (C) 3+3+5 mm. To evaluate the spatial resolution, four NEMA ²²Na sources (D=0.25 mm) with spacing of 5 mm in the radial direction were used. With the optimized crystal layer design, we evaluated the imaging performance with a resolution phantom having six different rod diameters (0.45, 0.50, 0.55, 0.6, 0.7, and 0.8 mm). The PET images were reconstructed by using an OSEM algorithm. An energy window of 440-560 keV was used for the image reconstruction. Design (C) (3+3+5 mm) showed the best spatial resolution (0.42 mm at the center and 0.46 mm at the 5 mm radial offset) among the three. The 0.45 mm rods of the resolution phantom could be resolved with a valley-to-peak ratio of 0.573 ± 0.062 , which is under the Rayleigh criterion (0.735). In conclusion, our proposed mouse brain PET with the optimized crystal layer design provided sub-0.5 mm resolution. In the future, we plan to develop a prototype mouse brain PET scanner to validate the simulation results.

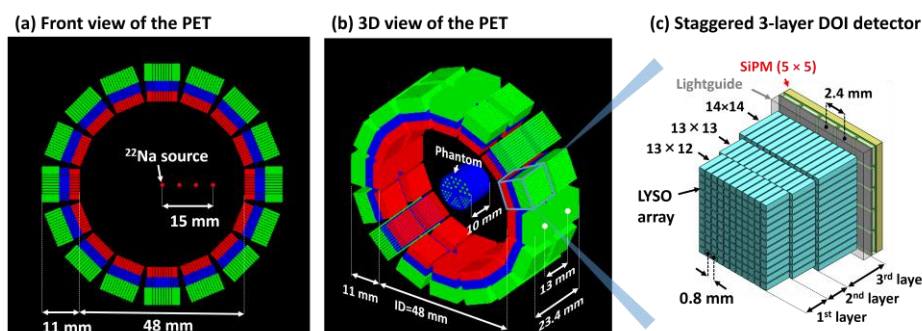


Fig. 1. (a) The front view (a) and 3D view of the proposed mouse brain PET system and (b) the developed small animal PET scanner.

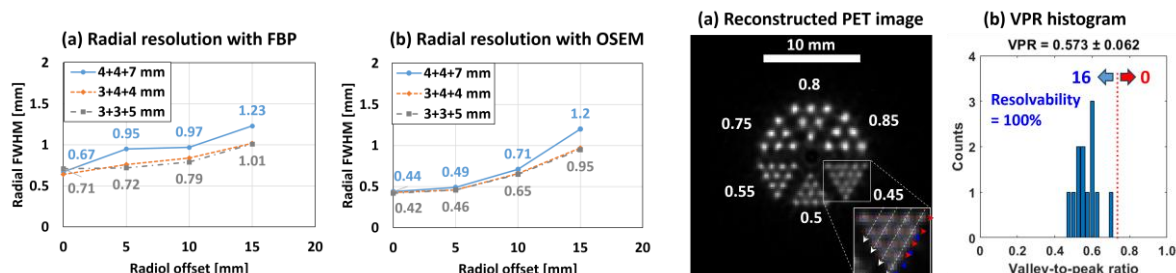


Fig. 2. The radial spatial resolutions of three difference crystal layer designs (a) Reconstructed PET image with the OSEM and (b) valley-to-peak ratio histogram of the 0.45 mm rod structures.

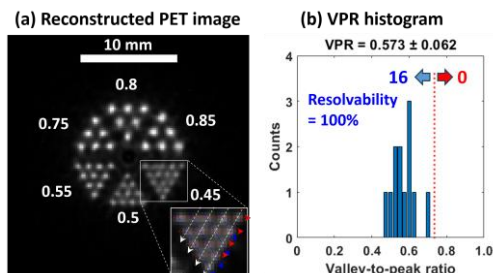


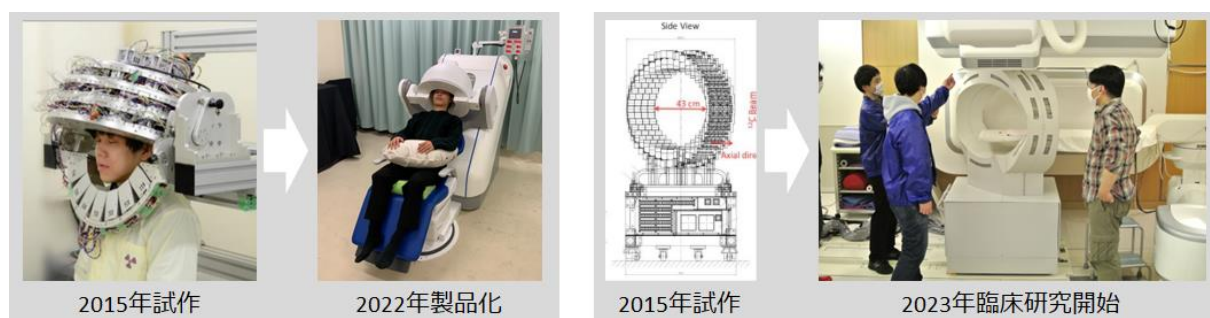
Fig. 3. (a) The phantom image with the OSEM and (b) valley-to-peak ratio histogram of the 0.45 mm rod structures.

「核医学応用物理」の実践：革新的 PET 装置の Bench-to-Clinical 研究 Practicing “applied physics in nuclear medicine”: Bench-to-clinical research on PET

QST¹, 東北大², 千葉大³, 日本医大⁴, 獨協医大⁵ ○山谷泰賀¹,
高橋美和子¹, 田島英朗¹, 吉田英治¹, 寅松千枝¹, 赤松剛¹, 錦戸文彦¹, 浜戸アクラム¹,
Han Gyu Kang¹, 田久創大¹, 岩男悠真¹, 黒澤俊介², 鎌田圭², 吉川彰², 羽石秀昭³,
菅幹生³, 川村和也³, 石橋真理子⁴, 今井陽一⁵

QST¹, ○Taiga Yamaya¹, et al. E-mail: yamaya.taiga@qst.go.jp

放射線計測研究が盛んな日本であるが、PET 装置の約 9 割を輸入に頼っており、核医学応用では世界に出遅れている。新技術による臨床課題の解決が切望されている中、応用物理学が果たすべき役割は大きい。そこで我々は、臨床に繋がる応用物理研究、すなわち Bench to Clinical (B2C) を意識した研究を実践することを目的に、中谷医工計測技術振興財団の助成のもと未来 PET 創造研究ユニットを立ち上げた。現在の PET は、体外に放出された放射線の数%しか検出できていない。世界的には主流の、検出器のトンネルを長くして立体角を高めるアプローチは、装置が高価格になるだけでなく、角度揺動による解像度劣化をさらに進めてしまう。そこで QST では、来る認知症 PET 時代に備えて、最も理想的な頭部専用 PET 装置を発明した。これは、世界初の半球状検出器配置を特徴とする PET 装置であり、従来の円筒型 PET 装置と比べ、最も少ない検出器数でも高い感度を維持し、角度揺動の影響を最小化できる。本装置は、(株)アトックスとの共同研究を経て、2022 年 1 月に「Vrain」として製品化に成功した。我々はこの成功体験を、これまでの PET の範囲を超えた新しい医学応用や技術進歩に繋げようとしている。具体的には、粒子線治療の照射野を可視化する OpenPET や、PET にコンプトンカメラ法を融合する Whole Gamma Imaging (WGI)、術中リンパ節診断のための鉗子型ミニ PET である^[1]。物理を応用「しようとする」と「する」には決定的な違いがあると思う。核医学応用物理研究は患者に届いてこそ意味を持つ^[2]。



革新的研究成果を患者に届ける Bench-to-Clinical の実例：ヘルメット型 PET (左) と OpenPET (右)

[1] 次世代 PET 研究報告書 <https://www.nirs.qst.go.jp/usr/medical-imaging/ja/study/main.html>

[2] 山谷泰賀, “健康長寿社会の未来は応用物理学会放射線分科会の本気度にかかっている!,” 放射線 (in press)