

NUCLEAR MEDICINE IN CLINIC

# 臨床核医学

2024

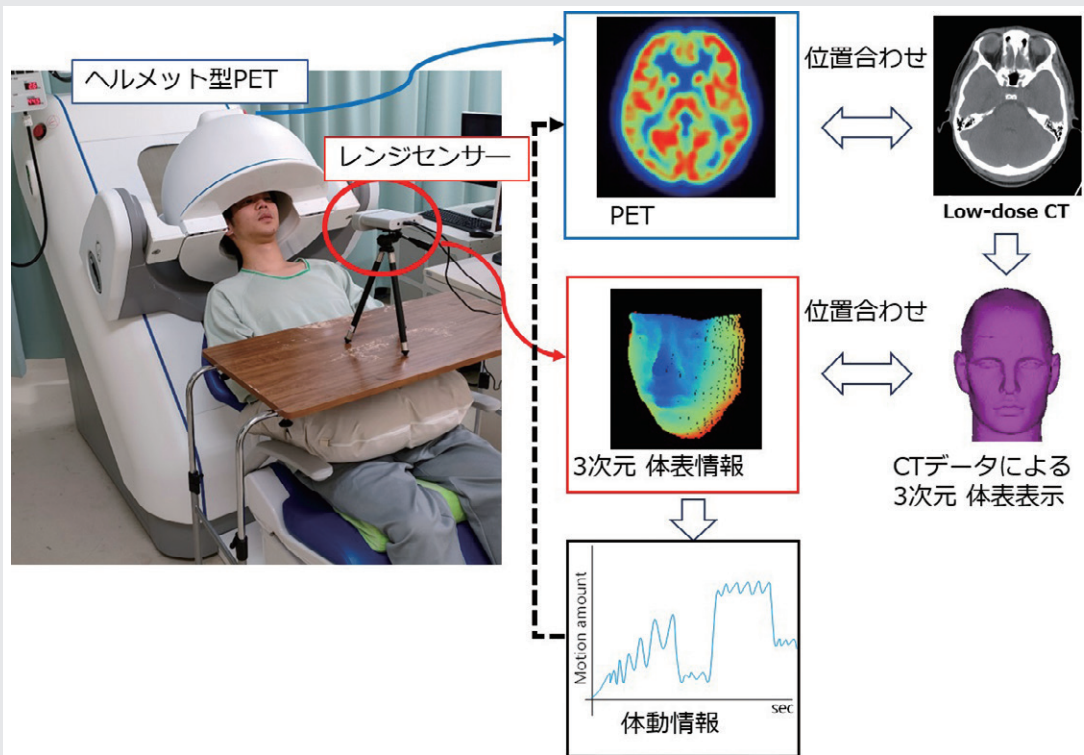
Vol.57 No.2

3月号 17~32頁

放射線診療研究会

1968年創刊通算278号(奇数月刊行)

http://www.meteo-intergate.com(本誌論文検索用)



See Page 21

ホームページ・Online版 [www.rinshokaku.com](http://www.rinshokaku.com)

- [症例報告] FDG-PET/CTが診断の契機となった再発性多発軟骨炎の一例 ..... 18  
原田 巽矢
- [技術報告] 円筒から半球へ ―ヘルメット型PETはこうして誕生した― ..... 21  
高橋 美和子
- [リレー講座] 専門医試験から学ぶ核医学の基礎と最近の話題  
Vol.10 核医学治療 ..... 25  
金子 恒一郎

## 症例報告

## FDG-PET/CTが診断の契機となった再発性多発軟骨炎の一例

A case of relapsing polychondritis that FDG-PET/CT triggered the diagnosis.

原田 巽矢 HARADA Tatsuya 須山 淳平 SUYAMA Jumpei 林 宏亨 HAYASHI Hiroataka  
 土生 奈菜子 HABU Nanako 竹下 祐平 TAKESHITA Yuhei 片瀬 七朗 KATASE Shichiro  
 横山 健一 YOKOYAMA Kenichi

Keywords : relapsing polychondritis, FDG-PET, type II collagen antibody

## 《はじめに》

再発性多発軟骨炎 (relapsing polychondritis: 以下 RP) は全身の軟骨組織と酸性ムコ多糖類を含む組織に慢性・反復性の炎症が起こる稀な疾患である<sup>1)</sup>。耳、鼻、目、関節、気管、心臓、血管などの軟骨組織やコラーゲンを多く含む組織に様々な症状が起こるが、臨床の特徴や経過に個人差が大きいため発症早期の診断が難しく、軟骨の破壊が進み症状が進行してから診断されることも多い疾患である。

今回 FDG-PET/CT を含めた画像診断により再発性多発軟骨炎の診断に至った症例を経験したため、文献的考察を含め報告する。

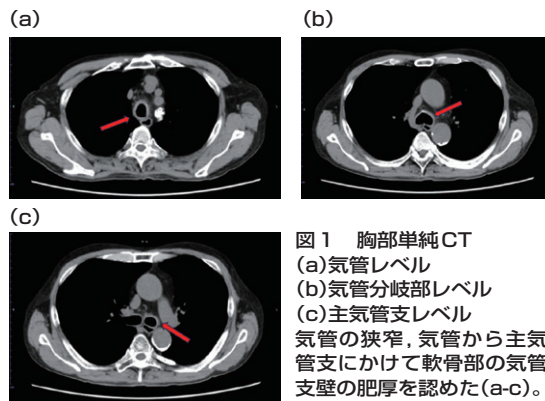
## 《症例》

【患者】 70歳代男性

【主訴】 咳嗽、労作時呼吸困難

【現病歴】 20XX年12月ごろに咳嗽、労作時呼吸困難が出現した。2週間ほど様子を見ていたが改善しないため当院呼吸器内科を受診した。胸部CT検査にて両肺に明らかな活動性病変は認めなかったが、気管から主気管支にかけて軟骨部の気管支壁の肥厚を認めたため精査加療目的に当院入院となった(図1)。

【既往歴】 眼窩尖端症候群、肥厚性硬膜炎、心房細動



【嗜好】 喫煙：20本/日×15年

【入院時現症】

身長168cm, 体重58kg

両側耳介の発赤・圧痛なし、軽度鞍鼻あり

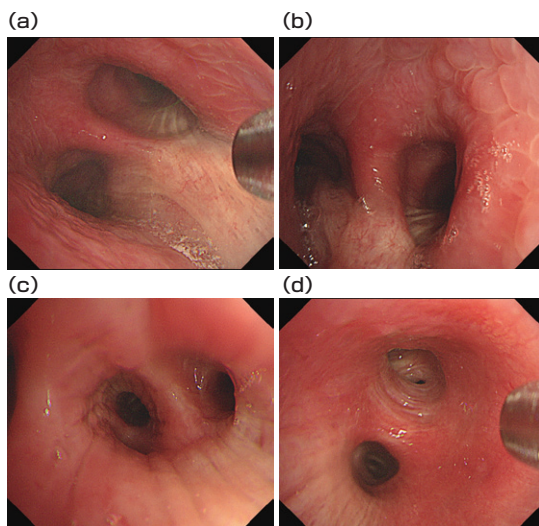
呼吸音：清、fine cracklesなし、肋骨、肋軟骨に疼痛なし

四肢関節の腫脹や疼痛なし

有意なリンパ節腫大なし

【血液検査】

Hb 11.8g/dl, Ht 35.0%, 赤血球  $328 \times 10^4 / \mu\text{l}$ , 血小板  $30.0 \text{万} / \mu\text{l}$ , 白血球  $6100 / \mu\text{l}$ , 血沈 71mm/1hr, Na 138mmol/l, K 4.8mmol/l, Cl 102mmol/l, BUN 15.3mg/dl, Cr 1.04mg/dl, 成人 eGFR (1.73) 53.6ml/min, 総蛋白 6.6g/dl, アルブミン 3.3g/dl, 総ビリルビン 0.5mg/dl, ALP 70IU/ml, AST 14IU/l, ALT 10IU/l, LDH 179IU/l, CRP 4.46mg/dl, IgG4 64.0mg/dl, 可溶性 IL-2レセプター



688U/ml, 抗核抗体 (-), PR3-ANCA (-), MPO-ANCA (-), II型コラーゲン抗体 46.7EU/ml(陰性:<20, 境界:20-25, 陽性:>25)

#### 【経過】

胸部CT検査で気管, 気管支壁の肥厚を認めたため, 気管支鏡下で気管支粘膜生検が実施された(図2)。粘膜の浮腫が強く, 組織診では浮腫状の気管支粘膜を認めたのみで軟骨成分は生検できなかった。血管炎や自己免疫性疾患, 悪性腫瘍等も原因として鑑別に挙げられたため, 全身検索のためFDG-PET/CTが施行された(図3)。FDG-PET/CTにて, 気管(SUVmax:5.9→6.9), 主気管支(SUVmax:9.1→9.6), 葉気管支レベル(左下葉気管支SUVmax:7.4→7.9, 右下葉SUVmax:6.1→7.8)に壁に沿った<sup>18</sup>F-FDG集積を認めた。気管レベルでは背側の膜様部部分は<sup>18</sup>F-FDG集積が欠損していた。また, 両側耳介軟骨や鼻軟骨にも軽度の<sup>18</sup>F-FDG

異常集積を認めた。

FDG-PET/CTの結果を踏まえ, 無症状ではあったがFDG-PET/CTにおいて両側耳介軟骨や鼻軟骨への<sup>18</sup>F-FDG集積を認めた点や軽度鞍鼻がみられた点, 胸部CT検査やFDG-PET/CTにおける気道軟骨炎の所見がみられたことから, 診断基準に基づき再発性多発軟骨炎と臨床診断された。血液検査でII型コラーゲン抗体が陽性であったことも再発性多発軟骨炎の診断を支持するものであった。

臨床診断の後, プレドニゾロン50mg/日による治療が開始された。ステロイド投与により自覚症状は改善傾向を認め, 治療後の胸部CTでも気管の狭窄, 気管から主気管支にかけて軟骨部の気管支壁の肥厚の軽減を認めた。その後徐々にステロイドの投与量は漸減されたが, 現在まで症状の再燃なく経過している。

#### 《考 察》

RPは全身の軟骨組織と酸性ムコ多糖類を含む組織に慢性・反復性の炎症が起こる稀な疾患であり, 厚生労働省の指定難病となっている。症状は全身の多岐にわたり, 出現頻度が高い順に耳介軟骨炎(80%), 眼症状(54.8%), 気道軟骨炎(50.8%), 多関節炎(44.4%), 鼻中隔軟骨炎(44.4%)などとされる<sup>2)</sup>。

発症率は10万人に0.35人と稀な疾患であり, 40~50代が好発年齢で, 男女差はないとの報告が多い<sup>3,4)</sup>。原因は明らかではないが, ①関節リウマチ・全身性エリテマトーデスなどの膠原病や骨髄異形成症候群などを合併すること, ②ステロイドや免疫抑制薬が効果的であること, ③軟骨にCD4陽性T細胞が浸潤していること, ④II型コラーゲンに対する自己抗体が存在することなどから, 自己免疫性疾患と考えられている<sup>4)</sup>。

上述のように, RPの病態にはII型コラーゲンの関与が指摘されている。II型コラーゲンは関節軟骨, 眼の硝子体などに存在し, 血液検査では約30%のRP患者やそのほか関節リウマチ(rheumatoid arthritis: RA)などでも検出される<sup>5)</sup>。II型コラーゲン抗体の感度・特異度はあまり高くないものの病勢と相関する傾向にあり, 陽性例では陰性例より重症化することが多いと報告されている<sup>2)</sup>。

炎症は再燃と軽快を繰り返しながら次第に進行し重篤化していくが, 生命予後に関しては8年生存率が94%とされている。しかし, 気道・心血管病変は重大な合併症であり, RPによる死因の約70%は気道障害によるとされる<sup>6)</sup>。そのため, 気道病変の有無が病勢に重要な要素であり, 病勢コントロールには的確な早期診断と治療開始が求められる。本症例の場合は, 気道病変を認めておりII型コラーゲン抗体の値も高かったため, 重症化リスクの高い症例であったと考えられた。

RPに対して標準的な治療プロトコルは確立されていないが, 一般的に軽症ではNSAIDs, 少量ステロイドを使用, 臓器病変を伴う中等度から重症では経口ステロイド中等量から高用量を使用, 効果不十分な場合にステロイドパルス療法を行うことが多い<sup>7)</sup>。本症例では気道病変による症状が強かったため, 比較的高用量のステロイド投与か

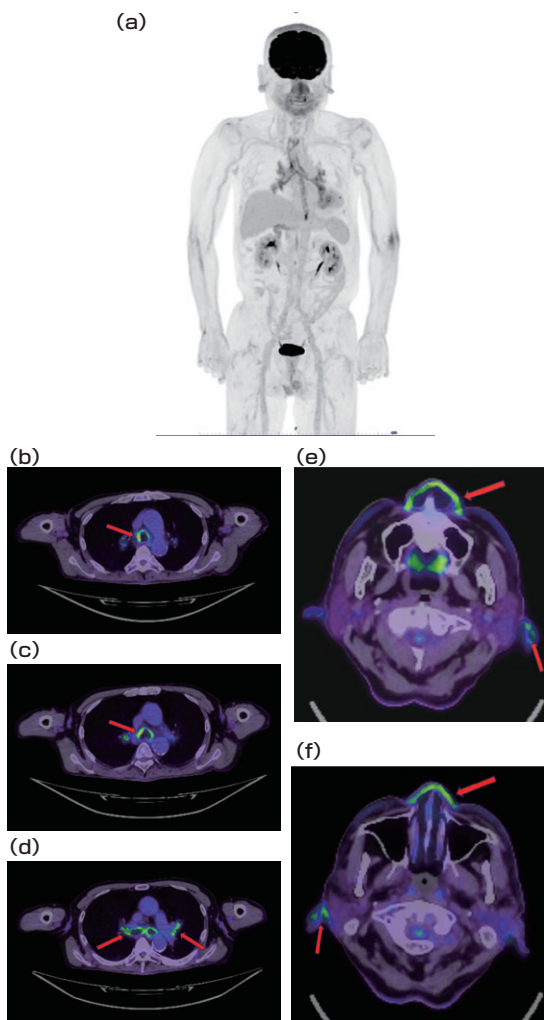


図3 FDG-PET (a)MIP正面像 (b-f)Fusion画像 水平断像 気管(SUVmax:5.9→6.9), 主気管支(SUVmax:9.1→9.6), 葉気管支レベル(左下葉気管支SUVmax:7.4→7.9, 右下葉SUVmax:6.1→7.8)に壁に沿った<sup>18</sup>F-FDG集積を認めた(b-d)。気管レベルでは背側の膜様部部分は<sup>18</sup>F-FDG集積が欠損していた(b)。また, 両側耳介軟骨や鼻軟骨にも軽度の<sup>18</sup>F-FDG異常集積を認めた(e,f)。



表1 診断基準

<ul style="list-style-type: none"> <li>・McAdam 基準</li> <li>下記の3つ以上が陽性</li> <li>1. 両側性の耳介軟骨炎</li> <li>2. 非びらん性, 血清陰性, 炎症性多発性関節炎</li> <li>3. 鼻軟骨炎</li> <li>4. 眼の炎症: 結膜炎, 角膜炎, 強膜炎, 上強膜炎, ぶどう膜炎</li> <li>5. 気道軟骨炎: 喉頭あるいは気管・気管支の軟骨炎</li> <li>6. 蝸牛あるいは前庭機能障害: 神経性難聴, 耳鳴, めまい</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・Damiani 基準</li> <li>1. 上記3つ以上が陽性の場合には必ずしも組織学的な確認は必要ない</li> <li>2. 上記1つ以上が陽性で, 確定的な組織所見が得られる</li> <li>3. 軟骨炎が解剖学的に離れた2か所以上で陽性で, ステロイド/ジアフェニルスルホンに反応</li> </ul>

図4 文献10より引用

ら開始し, 症状の改善に合わせ徐々にステロイド投与量を漸減した。現在維持量の少量ステロイド内服を継続し, 症状の再燃なく経過している。

RPの診断にはMcAdam基準またはDamiani基準が用いられることが多い(図4)<sup>1,7-10)</sup>。本症例を診断基準に照らし合わせると, ステロイドで治療反応性がみられたことや鼻軟骨炎による鞍鼻, 気道軟骨炎の所見を認めたことからDamiani基準を満たしており, FDG-PET/CTにおける両側耳介への<sup>18</sup>F-FDG集積を両側耳介軟骨炎陽性と捉えるとMcAdam基準も満たしていると考えられた。なお, 3つ以上の項目が陽性の場合には必ずしも組織学的な確認は必要ないとされる。

本症例では胸部CT検査で気管, 気管支壁の肥厚がみられたが, そのほかの臨床所見に乏しくはじめは診断に苦慮していた。FDG-PET/CTで気管軟骨の輪状部に一致した<sup>18</sup>F-FDG集積と両側耳介や鼻軟骨への<sup>18</sup>F-FDG集積がみられたことが契機となり, 組織学的な診断がされなくても臨床的に診断基準を満たすことができた。

過去の文献では, FDG-PET/CTは全身の軟骨組織への集積を一度に評価できるため, 自覚症状や身体所見に乏しい軟骨病変の同定に有効であり,<sup>18</sup>F-FDG集積の程度から生検部位を決定することでRPの組織診断の精度を向上できたと報告がある<sup>11,12)</sup>。また, RPの治療効果の判定には自覚症状の程度やCRP等の血液検査所見が用いられているが, ステロイド治療後のFDG-PET/CTにて<sup>18</sup>F-FDG集積の低下がみられることから, FDG-PET/CTはRPの治療評価の判定にも有用であるとの報告もある<sup>13)</sup>。そのため, FDG-PET/CTはRPの早期診断や治療評価の一助になると考えられた。

## 《結 語》

RPはその希少性や症状が多岐にわたる点から早期診断が難しい疾患である。FDG-PET/CTは<sup>18</sup>F-FDG集積の分布や程度から, RPの早期診断や治療評価判定の一助になると考えられた。

## 《文 献》

- 1) McAdam LP, M A O'Hanlan, R Bluestone et al. Relapsing polychondritis: prospective study of 23 patients and a review of the literature. *Medicine (Baltimore)*. 1976; 55: 193-215.
- 2) 平井信幸, 天野博雄, 山中正義, 他. 抗II型コラーゲン抗体陽性再発性多発軟骨炎の1例. *日皮会誌*. 2009; 119: 1985-1991.
- 3) Fukuda K, Mizobuchi T, Nakajima I et al. Ocular involvement in relapsing polychondritis. *J. Clin. Med.* 2021; 10: 4970.
- 4) Vitale A, Sota J, Rigante D et al. Relapsing polychondritis: an update on pathogenesis, clinical features, diagnostic tools, and therapeutic perspectives. *Curr Rheumatol Rep.* 2016; 18: 3.
- 5) Foidart JM, S Abe, G R Martin, et al. Antibodies to type II collagen in relapsing polychondritis. *N Engl J Med.* 1978; 299: 1203.
- 6) 園田広弥, 市村 洋平, 宮垣 朝光, 他. 過敏性肺臓炎を合併した再発性多発軟骨炎. *皮膚病診療*. 2013; 35: 841.
- 7) 鈴木 登. 再発性多発軟骨炎. *新薬と臨床*. 2020; 69: 395.
- 8) Damiani JM, Levine HL. Relapsing polychondritis--report of ten cases. *Laryngoscope*. 1979; 89: 929.
- 9) Mathian A, Miyara M, Cohen-Aubart F, et al. Relapsing polychondritis: A 2016 update on clinical features, diagnostic tools, treatment and biological drug use. *Best Pract Res Clin Rheumatol.* 2016; 30: 316.
- 10) 青木 孝司, 布袋 祐子. 間質性肺炎を伴った再発性多発軟骨炎の一例. *臨皮*. 2021; 75: 113-118.
- 11) Lei W, Zeng H, Zeng DX, et al. <sup>18</sup>F-FDG PET-CT: a powerful tool for the diagnosis and treatment of relapsing polychondritis. *Br J Radiol.* 2016; 89:20150695.
- 12) Okuda S, Hirooka Y, Itami T, et al. FDG-PET/CT and Auricular Cartilage Biopsy Are Useful for Diagnosing with Relapsing Polychondritis in Patients without Auricular Symptoms. *Life (Basel)*. 2021; 11:956.
- 13) Jing W, Jun F, Peng H, et al. Imaging features and clinical value of <sup>18</sup>F-FDG PET/CT for predicting airway involvement in patients with relapsing polychondritis. *Arthritis Research & Therapy*. 2023; 25: 198.

## 技術報告

## 円筒から半球へ —ヘルメット型PETはこうして誕生した—

## From cylindrical to hemispherical configuration — How helmet-type PET was born —

高橋 美和子 TAKAHASHI Miwako 赤松 剛 AKAMATSU Go 岩男 悠真 IWAO Yuma  
 田島 英朗 TASHIMA Hideaki 田久 創大 TAKYU Sodai 吉田 英治 YOSHIDA Eiji  
 山谷 泰賀 YAMAYA Taiga

Key words: Brain-dedicated PET, Time-of-flight, Motion correction

頭部専用PETの開発は2013年にスタートし、約10年の研究成果をもとに実用化に至った。現在の形に至るには、いくつもの分岐点があり、選択した道には新たな課題もあった。本稿では、こうした課題への取り組みや重要な方針決定に関わった研究を紹介する。

### 《1. 形状は円筒か半球か？》

PETは、検出器間距離が近いほど、感度が上昇し分解能も良くなる。現在の臨床用PETの検出器配置は全てリング状であるが、リングを小さくするだけでなく、頭部の形に合わせて半球状にしたらどうなるだろうか。その形状の表面積をPET検出器で覆うとすると、円筒部分(上下面を除く)は $2\pi r \times r = 2\pi r^2$  ( $r$  = 半径), 半球は $\frac{1}{2} \times 4\pi r^2 = 2\pi r^2$  であり同値となる。つまり、どちらの形状であっても同数の検出器でPET装置を作ることが出来る。放射線検出感度を推定したところ、円筒型で28%、半球型では42%となり、円筒型の1.5倍になることが分かった(図1)<sup>1,2)</sup>。このようにして、脳PETの理想形は半球状だというアイデアは、シミュレーションによって裏付けられた。これが、ヘルメット型PETの開発の第一歩となった。

### 《2. 補助検出器の場所は顎か後頭部か？》

PET計測の基本原理は、向かい合うペアの検出器で同時計測することにある。半球型の場合、頭頂部の検出器とペアを組む相手が少ないため、追加の検出器を顎の部分、もしくは後頭部に配置する案が挙がり、両タイプが可能なPET装置を試作した<sup>1,3)</sup>。具体的には、 $2.8 \times 2.8 \times 7.5 \text{mm}^3$ のGSO結晶

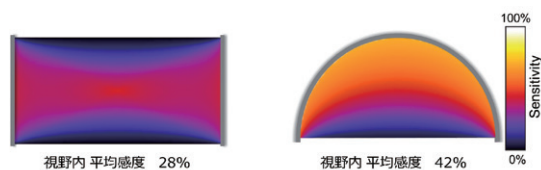


図1 検出器配置を円筒型(左), 半球型(右)にした場合のPET撮像視野内の平均感度をシミュレーションにより算出したところ、半球状で1.5倍高いことが分かった。

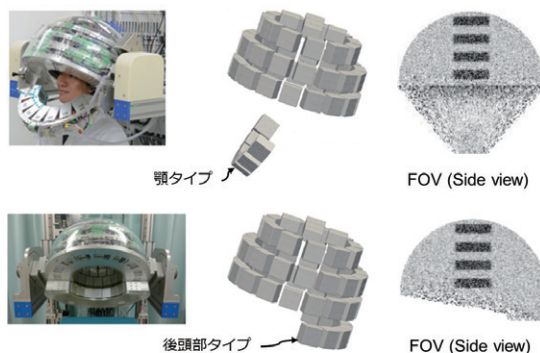
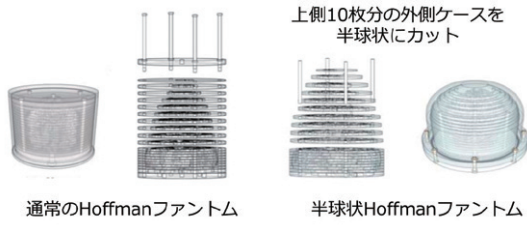


図2 顎タイプと後頭部タイプの追加検出器を備えたヘルメット型PET試作機の写真(左), 検出器配置の模式図(中央), シミュレーションにより作成したディスク・ファントム画像の側面像(右)。後頭部タイプのほうが、ノイズの少ないfield of view(FOV)が広いことが分かった。

を $16 \times 16$ 個に並べ、これを4層( $7.5 \times 4 \text{層} = 30 \text{mm}$ 長)に積み上げて検出器ブロックを作成した。この検出器ブロック47個を内半径25cmのように配置し、更に7個の検出器ブロックを顎もしくは後頭部に配置した(図2左・中央)。シミュレーションや実験を行ったところ、後頭部タイプにほうが感度が高く、有効視野も広いことが分かり(図2右)<sup>3)</sup>、後頭部に追加検出器を配置することに決定した。

### 《3. Hoffmanファントムが入らない。》

ヒト脳を模したファントムとして広く使用されているHoffmanファントムであるが、Hoffmanファントムの外形は円筒形をしており、ヘルメット型PETには入らない。そこで、Hoffmanファントムの内部構造、つまり脳部分は変えずに周囲の支持部分をヘルメット型PETに入るように削ることにした(図3)<sup>4)</sup>。円筒か半球かは放射能分布には無関係であるが、吸収や散乱への影響は多少なりともあるはずである。しかし、頭が円筒の人はいないはずなので、半球状のHoffmanファントムのほうがより本来の目的に合致しているとも言える。また、標準的な性能評価法としてNEMA (National



通常のHoffmanファントム 半球状Hoffmanファントム  
図3 内部の脳構造を維持したまま、従来の円筒の外形をもつHoffmanファントム(左)の外枠を削って、ヘルメット型PETの視野に収まるようにした(右)。

Electrical Manufacturers Association)規格があるが、全身用PETが想定されており、指定ファントムが入らない。そこで、ヘルメット型PETに収まるサイズのファントムを新たに作製し、計測コンセプトに忠実な修正法を開発した<sup>5)</sup>。

#### 《4. TOFかDOIか?》

Depth-of-interaction (DOI)は、検出素子内における深さ方向の放射線相互作用位置を意味する。つまり、結晶の深さ方向において、放射線をどこで検出したかという情報である。PETが検出対象とする消滅放射線は511keVのエネルギーであり、それを止めるには十分な長さのシンチレーション結晶が必要となる。多くの臨床用PET装置では、概ね20mmである。視野中央から入射してくる消滅放射線以外は、常に同時計測の2つ検出器の少なくとも1つの検出器には斜めに入射することになる。例えば、シンチレータ内での光電吸収の位置が結晶の下縁か上縁付近かによって同時計数線(LOR, line-of-response)が変化するため、DOI情報が分からないと解像度は劣化する(parallax error)。そこで、DOI情報を得るために、結晶を深さ方向に分割し、層ごとに異なる情報として抽出するDOI検出器を開発した。放射線を容積のある検出素子で捉えた3次元情報を2次元マップに投影するため、非常に高度な技術を要し、私達の研究グループが世界に先駆けて行ってきた研究の1つである<sup>6)</sup>。一方で、同時に開発を進めてきたTime-of-flight (TOF)検出器も世界トップレベルとなった<sup>7)</sup>。しかし、当時の技術では、DOI情報の取得とTime-of-flight (TOF)情報の同時取得が困難であり、どちらかを選択する必要に迫られた。シミュレーションの結果、結晶を薄くしてDOI情報なしでもparallax errorを抑え、失われた感度をTOF情報で補うことが、トータルとして最良の画質になることが判明し、DOIは諦めて、TOFに専念する決断をした。DOI検出器、TOF検出器(図4)それぞれで構成したヘルメット型PETを試作し、比較した結果、後者のほうが画質も良く、定量性も高いことが分かった(リカバリー計数で1.2倍良い)<sup>7,8)</sup>。しかし、これは単なるDOIかTOFかの違いではなく、後段の回路系の性能差の影響が大きいことも後日判明した。以上のように、ヘルメット型PETは長年の研究成果であるDOI検出器から、開発した世界最速(当時)のTOF検出器の搭載へと大きく舵取りし、TOF検出器のさらなる詳細な検討へと進んだ<sup>9)</sup>。

#### 《5. マルチリングか、本当に半球状にするのか?》

ヘルメット型とはいえ、直方体の検出器を半球

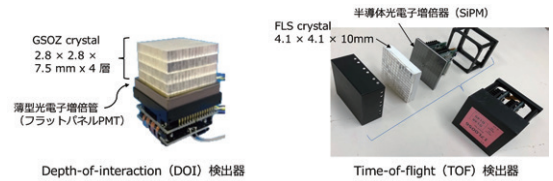


図4 DOI検出器とTOF検出器の概要図。DOI検出器では7.5mm長のシンチレーション結晶を4層に積層し、深さ方向の情報を取得した。TOF検出器ではparallax errorを抑えるため、PET用シンチレーション結晶としては短めの10mm長の結晶サイズにした。

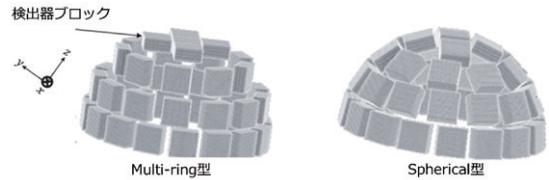


図5 リング径を小さくしながら積み上げるMulti-ring型(左)と右検出器面が球の中心点を向くSpherical型(右)の検出器配置モード図

状に並べるのは実は難しい。当初は複数のリングを、その半径を徐々に小さくして積み上げることで半球状構造にしていた(multi-ring型)(図5左)。しかし、DOI検出器ではなくTOF検出器を選択した以上は、検出器面が球の中心点を向く、真に半球状の配列(spherical型)(図5右)のほうがparallax errorを抑えることができる。しかも、感度もspherical型のほうがmulti-ring型よりも17%高い<sup>10)</sup>。ここに来て、リング状ではなく真に半球配置をとるといふ、PET開発史上、さらに未踏の検出器配置へと開発を進めることになった。

#### 《6. 座位か仰臥位か?》

ヘルメット型PETというコンパクトな構造をどう活かすのか。仰臥位の状態で撮像する従来の方法以外にも、座位での撮像であれば、全体としてコンパクトなPET装置が実現する。しかし、座位では撮像中の体動が起きやすいのでは、という疑問が生じる。そこで座位や仰臥位における人の頭の体動を計測したところ、背もたれを45度リクライニングした座位は、仰臥位と同等であることが分かった。体動の計測は、赤外線が対象物表面までを往復する時間から距離を計測するレンジセンサー(range sensor)を利用して、体動の3次元情報と時間情報を取得できるシステムを構築して行った(図6)。4名の健常ボランティアに、それぞれ20分の頭部の体動量を計測した結果、座位による体動への影響は少ないと判断し、座位型頭部PETの開発へと方針が決まった<sup>11)</sup>。

#### 《7. <sup>18</sup>F FDG-PETによる脳深部の小構造の描出に成功》

いよいよ座位型頭部専用ヘルメット型PETが完成し、健常成人ボランティア12例(24-46歳)に対して、FDG-PET臨床試験を行った(図7)。閉眼安静仰臥位でFDGを投与し、そのまま安静状態を維持し、30分後から比較対照として全身用半導体PETによる頭部撮像を10分間、投与45分後からヘルメット型PETにより10分間の撮像を行った。





図7 完成したヘルメット型PETと撮影中の様子

その結果、全身用PETと同等の脳FDG画像を得たが、脳の深い部分に位置する脳幹部や視床内部には全身用PETでは描出されないFDG集積を認めた。具体的には、中脳の黒質と赤核、視床の前核、背内側核であった。これらは、いずれの被験者でも一貫して容易に同定された(図8)<sup>12)</sup>。視床の外側域には、3~4か所の局所的なFDG集積を認めたが、その分布や集積程度は被験者間で一貫せず、確実な神経核の同定とは言い難かった。視床の外側域を構成する神経核は個人差も大きいことが報告されており、その影響もあって一貫した所見が得られなかった可能性もある<sup>13)</sup>。さらに、中脳~橋には、20代の被験者では描出されず、40代で明瞭にみられる局所的な集積を認め、死後脳の切片標本に基づく脳幹神経核に関する論文と見合わせたところ、縫線核の位置と形状に一致し、細胞数もFDG集積程度と相応することが分かり、縫線核を描出し得たと結論づけた<sup>12, 14)</sup>。

### 《8. 体動が空間分解能の鍵を握る?》

開発した体動計測法の位置精度は1mmで、体動計測のためのサンプリング頻度も毎秒10フレームと高精度である。実際の運用も、図9にあるように小さなレンジセンサーを被験者の前に置くだけで、体表に反射材などのマーカーを付ける必要はない<sup>15)</sup>。これだけ簡便に体動補正ができるのであれば、もはや、頭部や顎をバンドで固定する必要がないように思う。臨床試験では、従来通りの頭部固定した撮像の後、被験者に頭を動かしてもらいながらPET撮像を行い、開発した体動補正法の検証を行った。最大移動量は左右方向で約6cm、回転量では上下(頷く方向)方向に40度であった。このような体動のあるPET画像に対し開発した体動補正を行った結果、頭部固定時と同等の脳FDG画像を得た(図10)<sup>16)</sup>。さらに詳細にみると、頭部固定時の撮像よりも体動補正をしたほうが、わずかにだが、脳回や脳溝がより明瞭に同定された(図10下段)。

撮像中の体動は、これまではPETの画像劣化の

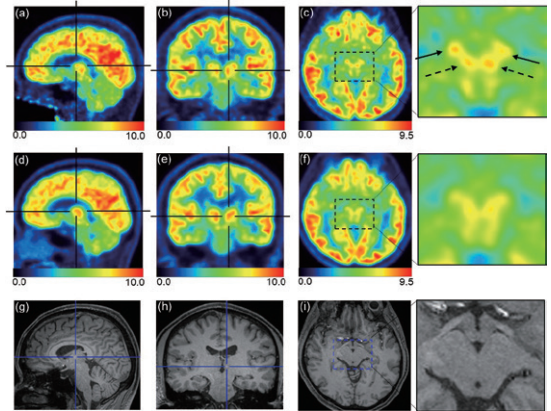


図8 ヘルメット型PET(a-c)、全身用PET(d-f)により得たFDG-PET画像、同日に撮像したMRI(g-i)の代表画像を呈示。左から1,2列目のクロスバーは、それぞれ視床前核、視床背内側核に対応する。左から3列目は中脳のスライスで、ヘルメット型PETの画像では、黒質と赤核がそれぞれ同定できる。Takahashi et al: EJNMMI Physics 9 : 69, 2022より引用(Licensed under CC BY 4.0)

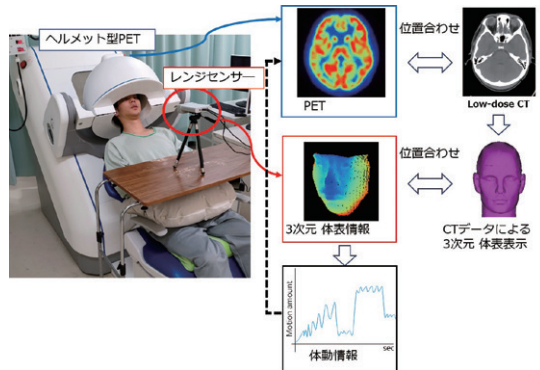


図9 開発した体動補正法の概要図 PET画像に位置合わせしたCT画像から体表情報を得る。これとレンジセンサーによって得た体表情報との位置合わせを行う。これによって、レンジセンサーとPETの座標を一致させることができる。レンジセンサーで体動を計測することで、PET画像を補正することが可能となる。Y. Iwao, Ann Nucl Med (2022) 36:904-912より引用(一部改変)(Licensed under CC BY 4.0)

要因であったが、今回の結果から、むしろ、空間分解能を向上できる可能性が示唆された。これは、データのサンプリング密度の向上による効果と考えられ、PET装置の黎明期には、装置を動かすということを実現されていた<sup>17)</sup>。1980年、田中栄一らは、不均等に配置した検出器のリングを回転させることでサンプリング密度を向上させるポジトロン方式を開発し、日本初のPET装置であるPositologica-Iに実装した。Positologica-Iの検出器は、12mm幅のBGO結晶を使用しており、空間分解能は視野中心において6mm full width at half maximum、つまり、検出器サイズの1/2の空間分解能であり、当時の世界最高値を達成した<sup>18, 19)</sup>。その後、空間分解能の追求は、小型化したシンチレータを弁別する方法の開発へと進み、現在は、固定された検出器が主流となっている。検出器の小型化に加え、体動補正の開発が進んだ今、装置ではなく体の動きをうまく利用した体動補正法は、より一層の高解像度化と、撮像中の頭部固定という負担を無く

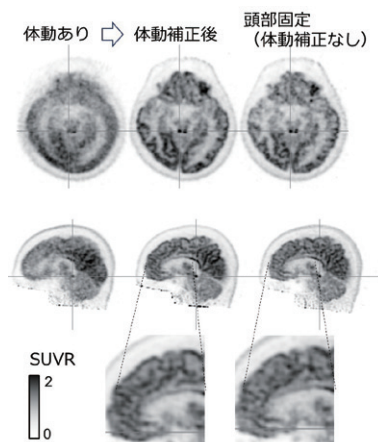


図10 臨床研究において、被験者に頭部を動かしてもらいながら撮像したFDG-PET画像(左)、その体動のある画像を開発手法で補正した画像(中央)、頭部をしっかりと固定して撮像した画像(右)。下丘レベルの断面像(上段)、矢状断面像(中断)と前頭葉部の拡大図(下段)。Y. Iwao, *Ann Nucl Med* (2022) 36:904-912より引用(一部改変)(Licensed under CC BY 4.0)

すことができる。より多くの患者さんに役立てられるよう、現在、体動補正法の実用化にむけて開発を進めている。

## 《9. まとめ》

脳の深部には、生存に必要な脳機能があり、さらに、外側を覆う大脳皮質と密に連携しながら全身の機能を制御する神経細胞が多く存在する。しかも脳は、頭蓋骨という狭い容器に収められているため、異なる機能領域が隣り合ったりする特殊な臓器である。情動障害や高次脳機能障害では、いまだに原因不明の疾患や、症状への理解が不十分な場合が多い。その病態を突き止めるのが医学の役割であるが、特に体の深部の情報を得るには、現在のところPETしかない。PETの精度が脳神経領域の医学進歩の基盤を担っており、今後も高精度PETの開発とその応用を追求していきたい。

## 《謝 辞》

本研究の一部は、株式会社アトックスとの共同研究として行った。

## 《参考文献》

- 1) Tashima H, Yamaya T. Proposed helmet PET geometries with add-on detectors for high sensitivity brain imaging. *Phys Med Biol*. 2016;61:7205-20. doi:10.1088/0031-9155/61/19/7205.
- 2) Ahmed AM, Tashima H, Yoshida E, et al. Simulation study comparing the helmet-chin PET with a cylindrical PET of the same number of detectors. *Phys Med Biol*. 2017;62:4541-50.
- 3) Tashima H, Yoshida E, Iwao Y, et al. First prototyping of a dedicated PET system with the hemisphere detector arrangement. *Phys Med Biol*. 2019;64:065004.
- 4) Akamatsu G, Tashima H, Iwao Y, et al. A 3-dimensional hemispherical brain phantom for compact dedicated brain PET scanners. *Biomed Phys Eng Express*. 2019;5:025013.
- 5) Akamatsu G, Tashima H, Yoshida E, et al. Modified NEMA NU-2 performance evaluation methods for a brain-dedicated PET system with a hemispherical detector arrangement. *Biomed Phys Eng Express*. 2020;6:015012.
- 6) Hirano Y, Nitta M, Inadama N, et al. Performance evaluation of a depth-of-interaction detector by use of position-sensitive PMT with a super-bialkali photocathode. *Radiol Phys Technol*. 2014;7:57-66.
- 7) Yoshida E, Tashima H, Akamatsu G, et al. 245 ps-TOF brain-dedicated PET prototype with a hemispherical detector arrangement. *Phys Med Biol*. 2020;65:145008.
- 8) Takyu S, Ahmed AM, Yoshida E, et al. Design study of a brain-dedicated time-of-flight PET system with a hemispherical detector arrangement. *Phys Med Biol*. 2020;65:035012.
- 9) Akamatsu G, Takyu S, Yoshida E, et al. Evaluation of a Hamamatsu TOF-PET Detector Module with 3.2 mm Pitch LFS Scintillators and a 256-channel SiPM Array. *IEEE Trans Radiat Plasma Med Sci*. 2021;5:645-50.
- 10) Abdella M, Ahmed HT, Yoshida E, et al. Investigation of the optimal detector arrangement for the helmet-chin PET - A simulation study. *Nucl Instrum Methods Phys Res A* 2017;858:96-100.
- 11) Iwao Y, Tashima H, Yoshida E, et al. Seated versus supine: consideration of the optimum measurement posture for brain-dedicated PET. *Phys Med Biol*. 2019;64:125003.
- 12) Takahashi M, Akamatsu G, Iwao Y, et al. Small nuclei identification with a hemispherical brain PET. *EJNMMI Phys*. 2022;9:69.
- 13) Mai JK, Majtanik M. Toward a Common Terminology for the Thalamus. *Front Neuroanat*. 2018;12:114.
- 14) Baker KG, Halliday GM, Törk I. Cytoarchitecture of the human dorsal raphe nucleus. *J Comp Neurol*. 1990;301:147-61.
- 15) Iwao Y, Akamatsu G, Tashima H, et al. Marker-less and calibration-less motion correction method for brain PET. *Radiol Phys Technol*. 2022;15:125-34.
- 16) Iwao Y, Akamatsu G, Tashima H, et al. Brain PET motion correction using 3D face-shape model: the first clinical study. *Ann Nucl Med*. 2022;36:904-12.
- 17) Ter-Pogossian MM, Mullani NA, Hood JT, et al. Design considerations for a positron emission transverse tomograph (PETT V) for imaging of the brain. *J Comput Assist Tomogr*. 1978;2:539-44.
- 18) Tanaka E, Nohara N, Tomitani T, et al. A Positron Emission Computed Tomograph: "POSITOLOGICA". *RADIOISOTOPES*. 1980;29:302-3.
- 19) 野原功全 ポジトロジーによるPET装置の開発. *Jpn,J Med Phys*. 2022;42:23-32.



## リレー講座

## 専門医試験から学ぶ核医学の基礎と最近の話題

## Vol.10 核医学治療

Basic knowledge and recent topics of nuclear medicine learned from the certification examination.  
Vol.10 Targeted radionuclide therapy

金子 恒一郎 KANEKO Koichiro

Key words: Targeted radionuclide therapy, Radioactive iodine therapy,  $^{177}\text{Lu}$ -DOTATATE peptide receptor radionuclide therapy,  $^{223}\text{Ra}$  dichloride therapy

## 《はじめに》

本稿では核医学治療に関する過去5年間(第15～19回)の専門医試験問題をピックアップし、解説を行う。Theranosticsの概念が一般的に知られ近い将来に本邦への前立腺癌に対する $^{177}\text{Lu}$ -PSMAを用いた核医学治療の導入が予定される中、放射線科医には核医学治療に関する更なる専門知識が要求されると考えられる。核医学専門医試験を受験される諸先生方の合格の一助になれば幸いである。

## 《過去5年間の出題傾向》

第15～19回において核医学治療に関する問題は計29題出題されている。その内訳は $^{223}\text{Ra}$ に関する問題が6問と最も多く、放射性ヨード内用療法(4問)、 $^{177}\text{Lu}$ -DOTATE PRRT(3問)の順に多く出題されている。薬剤の供給停止ないし販売終了となったZevalin( $^{90}\text{Y}$ )や $^{89}\text{Sr}$ に関する問題は各1問のみで、ここ3年間は出題されていない。その他には治療後の退出基準など法令に関する問題が3問、放射線核種に関する問題が1問出題されている。今回はこの19題を各核医学治療とその他の計6項目にわけて解説を行う。

## 《問題・解説》

## ① 放射性ヨード内用療法関連

## 問題(第19回)

バセドウ病の $^{131}\text{I}$ 内用療法のため甲状腺における有効半減期を求めたところ、6日であった。この場合の甲状腺における $^{131}\text{I}$ の生物学的半減期は何日か。1つ選べ。

- 4日
- 8日
- 12日
- 16日
- 24日

解答 e

## 解説

体内に取り込まれた放射性物質が呼気や汗、便や尿などの排泄により体外に排出される過程で体内の放射性物質が半分に減少するまでの期間を生物学的半減期と言う。物理学的半減期( $T_p$ )、生

物学的半減期( $T_b$ )、有効半減期( $T_e$ )との間には $1/T_e = 1/T_p + 1/T_b$ との関係が成り立ち、上記の式より生物学的半減期は24日と算出される。

## 問題(第18回)

バセドウ病に対する $^{131}\text{I}$ 内用療法の目標と前処置について、正しいものはどれか。1つ選べ。

- 甲状腺機能の正常化を目指すのが一般的である。
- 甲状腺機能の正常化を目指す場合には、内用療法の前処置が重要である。
- 吸収線量に基づく $^{131}\text{I}$ の投与は甲状腺機能を長期間正常化させる確実な方法である。
- 治療成績は甲状腺重量に大きく影響される。
- 前処置としてヨウ素制限をしなくとも治療効果は変わらない。

解答 d

## 解説

$^{131}\text{I}$ 内用療法の理想的な目標は甲状腺機能が短期間で正常になりその状態が長時間継続することであるが、そのための確実な投与量の決定方法は確立されておらず、機能正常を目指すか、早期の機能低下を目指して治療するか患者の意向を優先して決める必要がある。 $^{131}\text{I}$ 内用療法後の再発の頻度は15%程度とされ、短期間で甲状腺機能を低下させることを目指した場合は治療後6カ月～1年経過しても抗甲状腺薬を中止できない場合に再治療を検討する。甲状腺機能正常を目指した治療を行った場合は、1年以上経過して抗甲状腺薬を維持量まで減量できない場合や甲状腺腫の縮小が十分でない場合に再治療を検討する。 $^{131}\text{I}$ 投与量と治療効果の間に大まかな相関は見られるが、放射線感受性は個人個人で異なる。同一線量を投与した場合、 $^{131}\text{I}$ 内用療法の子後決定する最も重要な因子は甲状腺重量である。治療前のヨウ素制限(一般的に1週間前からは必須である。

## 問題(第16回)

甲状腺癌の $^{131}\text{I}$ によるアブレーションについて正しいのはどれか。1つ選べ。

- 18歳以下の患者では禁忌とされている。
- $^{131}\text{I}$  3.7GBqを外来で用いることができる。
- 頸部リンパ節再発のある症例が治療適応である。

- d. 甲状腺片葉切除後に残存している甲状腺組織を焼灼する。  
e. 遺伝子組み換え TSH により甲状腺ホルモン製剤を継続できる。

解答 e

## 解説

分化型甲状腺癌に対するアブレーションは $^{131}\text{I-NaI}$  1110MBq を外来で投与可能で、甲状腺(準)全摘術施行された症例の残存甲状腺組織の廃絶を目的とする。頸部リンパ節転移のある症例は適応となるが、遠隔転移のある症例は適応とはならず妊娠中の女性は禁忌である。遺伝子組み換え TSH はアブレーションにのみ補助薬として使用可能である。

## 問題(第15回)

甲状腺分化がんに対する RI 内用療法について、正しいのはどれか。1つ選べ。

- a.  $^{131}\text{I}$  による治療は、切除不能な局所進行性の分化型甲状腺癌が適応である。  
b.  $^{131}\text{I}$  による残存甲状腺破壊(アブレーション)は、切除不能な微小転移に対して施行する。  
c. 1.11GBq を投与するアブレーションは、退出基準を満たすため外来治療に際して特に注意点は無い。  
d. RI 内用療法後に $^{131}\text{I}$  の集積が陰性となった場合でも、治療効果は望めるため RI 内用療法は継続する。  
e. アブレーション後にサイログロブリンが増加した症例に対して、3.7 GBq を投与した。

解答 e

## 解説

甲状腺癌に対する RI 内用療法の適応として①分化型甲状腺癌(乳頭癌、濾胞癌)、②肺、骨などへの遠隔転移を認める場合、③非治癒切除例(術後に残存する腫瘍組織が存在する場合)、③術後再発例(局所、頸部リンパ節など)、④血清サイログロブリン高値の場合、⑤残存甲状腺の破壊目的(アブレーション)の場合が挙げられる。④のアブレーションは $^{131}\text{I-NaI}$  1110MBq を甲状腺(準)全摘術施行された症例の残存甲状腺組織の廃絶を目的とする。外来で施行可能であるが、投与後より種々の行動に関する制限や注意が生じる(詳細に関しては甲状腺癌の放射性ヨウ素内用療法に関するガイドラインを参照)。 $^{131}\text{I-NaI}$  の集積が陰性化した症例に治療効果は望めないため、施行しない。

② $^{177}\text{Lu-DOTATATE}$  PRRT 関連

## 問題(第19回)

ルテチウムオキシドトレオチド( $^{177}\text{Lu}$ )注射液(ルテテラ静注)について、誤っているのはどれか。1つ選べ。

- a. アミノ酸輸液を併用する。  
b. 物理的半減期は約6.6日である。  
c. 腎尿路経路により速やかに尿中排泄される。  
d.  $^{177}\text{Lu}$  の  $\alpha$  線により腫瘍増殖抑制作用を示す。  
e. ソマトスタチン受容体陽性の神経内分泌腫瘍の治療に用いられる。

解答 d

## 解説

$^{177}\text{Lu}$  は半減期6.73日の  $\beta$  線、 $\gamma$  線放出核種であり、 $^{177}\text{Lu-DOTATATE}$  はソマトスタチン受容体陽性の神経内分泌腫瘍の治療に用いられる。腎尿路系より排泄されるため、腎への被曝低減目的のアミノ酸製剤(ライザケア)の併用が必須である。

## 問題(第19回)

$^{177}\text{Lu-DOTATATE}$  治療について誤っているのはどれか。1つ選べ。

- a. 関連学会が作成した実施要綱により実施する。  
b. 一回の投与量は7.4GBq である。  
c. 8週間隔で最大4回まで投与する。  
d. 特別措置病室入室の隣室の実効線量を1週間につき1mSv 以下とする。  
e. 退出基準は患者体表面から1メートル離れた点の1センチメートル線量当量率で $18\mu\text{Sv/h}$  以下である。

解答 d

## 解説

特別措置病室以外に入院している患者が被ばくする実効線量が3月間につき1.3ミリシーベルトを超えないことが要件となる。その他は全て正しい。

## 問題(第15回)

膵神経内分泌腫瘍(neuroendocrine neoplasm, NEN)に対するソマトスタチン受容体シンチグラフィに関する以下の記載のうちで正しいものを1つ選べ。

- a.  $^{111}\text{In-pentetreotide}$  は、neuroendocrine tumor (NET) よりも neuroendocrine cancer (NEC) に強く集積する傾向がある。  
b.  $^{111}\text{In-pentetreotide}$  は、NET に対して、 $^{18}\text{F-FDG}$  よりも高い陽性率を示す傾向がある。  
c.  $^{111}\text{In-pentetreotide}$  は、NET に対して、 $^{123}\text{I-MIBG}$  よりも低い陽性率を示す傾向がある。  
d.  $^{111}\text{In-pentetreotide}$  は、Ki-67 指数の大きい NEN に対して、高い陽性率を示す傾向がある。  
e.  $^{111}\text{In-pentetreotide}$  が陽性の NEN は、陰性の NEN よりも予後が悪い傾向がある。

解答 b

## 解説

WHO2019分類では Neuroendocrine neoplasms (NEN) は組織学的に神経内分泌パターンを示す腫瘍を高分化と称し、Ki-67 指数が $<3\%$ 、 $3\sim 20\%$ 、 $>20\%$  の判定によりそれぞれ G1、G2、G3 と分類される。また形態学的に低分化で Ki-67 指数が20% を超える NEN を Neuroendocrine cancer (NEC) と呼ぶ。一般に病変の分化度が高くなるにつれ $^{111}\text{In-pentetreotide}$  の集積が強くなる(FDG 集積は弱く)なり、分化度が低くなるほど FDG の集積が強くなる( $^{111}\text{In-pentetreotide}$  は弱く)なる。従って NEN への $^{111}\text{In-pentetreotide}$  の集積率は $^{123}\text{I-MIBG}$  より高く、また $^{111}\text{In-pentetreotide}$  の NEC への集積は通常認められない。

③塩化ラジウム( $^{223}\text{Ra}$ )関連

## 問題(第18回)

塩化ラジウム( $^{223}\text{Ra}$ )による前立腺癌の核医学治

- 療について誤っているものはどれか。1つ選べ。
- 全生存期間を延長する。
  - 主な排泄経路は糞中である。
  - 外科的又は内科的去勢術と併用は必須である。
  - グレード3の好中球減少が認められたため投与を延期した。
  - 骨転移と肺転移がある去勢抵抗性前立腺癌患者は良い適応である。

解答 e

## 解説

$^{223}\text{Ra}$ の適応として骨転移のある去勢抵抗性前立腺癌であること、内臓転移が認められないこと、骨シンチグラフィで骨転移に一致する異常集積が確認されていること、初回投与前に骨髄機能が保たれていること(好中球 $>1500\text{uL}$ 、血小板 $>100000/\text{uL}$ 、ヘモグロビン $>10.0\text{g/dL}$ )、脊髄圧迫が存在する場合は投与前に適切な処置がとられていること、重度の肝および腎機能障害が存在しないことが挙げられる。 $^{223}\text{Ra}$ は全生存期間と症候性骨関連事象発現までの期間を延長する。 $^{223}\text{Ra}$ は主に糞中より体外に排泄される。

## 問題(第17回)

塩化ラジウム( $^{223}\text{Ra}$ )に関する記述のうち、正しいものはどれか。1つ選べ。

- アルカリ金属である。
- 壊変系列中に $\gamma$ 線を出さない。
- 糖代謝亢進部位に集積する。
- 物理的半減期は約3日である。
- 高頻度にDNA二本鎖切断をおこす。

解答 e

## 解説

$^{223}\text{Ra}$ はカルシウムと同族のアルカリ土類金属であり、半減期は11.43日である。体内においてカルシウムと同様に骨転移など骨代謝の亢進した部位に集積する特性を有する。 $\alpha$ 線放出核種であり、壊変系列中に $\gamma$ 線も放出する。高エネルギーの $\alpha$ 線により腫瘍細胞のDNA二重鎖を切断する。

## 問題(第17回)

塩化ラジウム( $^{223}\text{Ra}$ )の投与後1週間の注意事項として、誤っているものはどれか。1つ選べ。

- 使用後のトイレの洗浄は2回流すること。
- 公共の場への外出は可能な限り控えること。
- 入浴はその日の最後に行うことが望ましい。
- 患者の尿に触れる可能性がある場合は手袋を着用すること。
- 出血の際には、トイレトペーパーでふき取り、トイレに流すこと。

解答 b

## 解説

$^{223}\text{Ra}$ 投与1週間後の注意事項として下記の項目が挙げられる。

- ①患者が出血した場合の血液はトイレトペーパー等で拭き取り、トイレに流すこと。
- ②患者の尿や糞便に触れる可能性がある場合、またこれらで汚染された衣類等に触る場合は、ゴム製の使い捨て手袋を装着してから取り扱うこと。

- ③患者の血液等の体液が手や皮膚に触れた場合は、触れた箇所を直ちに石けんでよく洗うこと。
- ④性行為は控えること。
- ⑤投与後2~3日間は、患者と小児及び妊婦との接触は最小限にすること。
- ⑥入浴は、その日の最後に行うこと。また、入浴後の浴槽は洗剤を用いてブラッシング等によりよく洗うこと。
- ⑦投与患者が着用した衣類等の洗濯は、患者以外の家族等の衣類とは別に行うこと。血液や尿が付着したシーツ類や下着類については十分に予洗いをすること。
- ⑧男性患者においても排尿は座位で行うこと。
- ⑨使用後の便器等の洗浄水は2回程度流すこと。
- ⑩便器や床面等に糞・尿がこぼれて汚した場合は、トイレトペーパー等でよく拭き取り、拭いたペーパーはトイレに流すこと。
- ⑪排尿・排便後の手は、石けんでよく洗うこと。
- ⑫患者の排泄物、嘔吐物等が手や皮膚に触れた場合は、速やかに石けんで洗い、十分水洗すること。

## 問題(第17回)

塩化ラジウム( $^{223}\text{Ra}$ )による治療について誤っているものはどれか。1つ選べ。

- 骨転移のある去勢抵抗性前立腺癌が適応となる。
- 塩化ラジウム( $^{223}\text{Ra}$ )は全生存期間を延長する。
- 脊髄圧迫のある場合に治療効果が大きい。
- 1回投与量は体重1kgあたり55kBqである。
- 4週間ごとに1回、最大6回まで使用する。

解答 c

## 解説

脊髄圧迫が存在する患者に $^{223}\text{Ra}$ 治療を行う場合は投与前に適切な処置を行う必要があり、脊髄圧迫病変に対し治療効果が高いというエビデンスはない。他は全て正しい。

## 問題(第16回)

塩化ラジウム( $^{223}\text{Ra}$ )による前立腺癌の核医学治療について正しいのはどれか。1つ選べ。

- ホルモン非依存性前立腺癌の原発巣が治療適応である。
- 生命予後の改善は得られない。
- 症候性の骨関連事象の発現までの期間を有意に延長する。
- 吸収線量は肝臓が最も高値である。
- 主要な排泄経路は尿路である。

解答 c

## 解説

去勢抵抗性前立腺癌患者における骨転移病巣が治療の対象となり、全生存期間、症候性骨関連事象発現までの期間を延長する。生体内ではカルシウムと類似の挙動をとり、投与した $^{223}\text{Ra}$ の大部分が骨転移患部を含む骨組織に集積するため、骨組織の吸収線量が最も高い。主要排泄経路は糞中排泄である。

## 問題(第15回)

$^{223}\text{Ra}$ について誤っているのはどれか。1つ選べ。

- 壊変により $\alpha$ 線を放出し、 $^{219}\text{Rn}$ となる。



- b. 数回の  $\alpha$  壊変と  $\beta$  壊変の後、最終的には安定同位体の鉛となる。
- c. 骨転移のある去勢抵抗性前立腺癌の治療に用いられる。
- d. カルシウムとの類似性により、骨転移など骨代謝亢進部位に高集積を示す。
- e. 生存期間は延長しない。

解答 e

**解説**

内臓転移のない去勢抵抗性前立腺癌骨転移症例が治療適応となり、全生存期間、症候性骨関連事象発現までの期間を延長する。カルシウムと同族のアルカリ土類金属であるため生体内ではカルシウムと類似の挙動をとり、骨代謝亢進部位に高集積を示す。 $^{223}\text{Ra}$ の放射性改変を下記に示す。

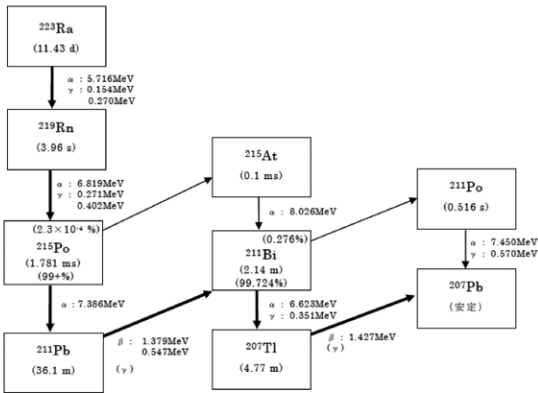


図1 Ra-223の放射性壊変

塩化ラジウム(Ra-223)注射液を用いる内用療法に適正使用マニュアル第一版より抜粋

**④ Zevalin ( $^{90}\text{Y}$ ) 関連**

**問題(第16回)**

イットリウム ( $^{90}\text{Y}$ ) イブリツモマブチウキセタンに関する次の記述のうち、正しいのはどれか。1つ選べ。

- a.  $^{90}\text{Y}$ の半減期は約6.7日である。
- b. 本薬剤はCD34に結合することで標的組織に集積する。
- c.  $^{90}\text{Y}$ から放出される $\beta$ -線の最大飛程は約100  $\mu\text{m}$ である。
- d. 本薬剤を調製する際は、 $^{111}\text{In}$ 標識時より反応時間を短くする。
- e.  $\beta$ -線が周辺細胞に照射され、障害を起こす現象をバイスタンダー効果という。

解答 d

**解説**

$^{90}\text{Y}$ の半減期は64.1時間の高エネルギー $\beta$ 線放射線核種で最大エネルギーは2.28MeV、組織内最大飛程は平均5.3mmである。イットリウム ( $^{90}\text{Y}$ ) イブリツモマブチウキセタン(ゼヴァリン $^{90}\text{Y}$ )に用いられているイブリツモマブ抗体はCD20抗原に対するマウス型IgG1k鎖モノクローナル抗体である。ゼヴァリン $^{90}\text{Y}$ の投与に先立ち、ゼヴァリン $^{111}\text{In}$ を投与し異常な生体内分布の有無の確認を行うが、ゼヴァリン $^{111}\text{In}$ の反応時間は30分でゼヴァリン $^{90}\text{Y}$ の5分より長い。

$\beta$ 線のエネルギーが比較的高いため腫瘍細胞に結合したゼヴァリン $^{90}\text{Y}$ から放出される $\beta$ 線が広い範囲に到達でき、血流やCD20発現が少ない腫瘍組織に照射が可能である。これはクロスファイヤー効果と呼ばれる。

**⑤ 塩化ストロンチウム ( $^{89}\text{Sr}$ ) 関連**

**問題(第15回)**

$^{89}\text{Sr}$  塩化ストロンチウムを投与された患者および家族への指導として誤っているのはどれか。1つ選べ。

- a. 患者の尿に触れる可能性がある場合は手袋を着用すること。
- b. 帰宅後3日間は専用の部屋で1人で就寝すること。
- c. 使用後のトイレの洗浄は2回流すること。
- d. 出血の際には、トイレットペーパーでふき取り、トイレに流すこと。
- e. 投与後数日間は、十分な水分を摂取すること。

解答 b

**解説**

$^{89}\text{Sr}$ は純 $\beta$ 線放出核種であり、投与後に専用の部屋へ隔離する必要はない。その他は全て正しい。

**⑥ その他**

**問題(第18回)**

次の放射性医薬品のうち、放出する $\alpha$ 線が核医学治療(RI内用療法)に使用されるものはどれか。1つ選べ。

- a. 塩化ラジウム ( $^{223}\text{Ra}$ ) 注射液 (ゾーフイゴ静注)
- b. 3-ヨードベンジルグアナジジン ( $^{131}\text{I}$ ) ( $^{131}\text{I}$ -MIBG)
- c. 塩化ストロンチウム ( $^{89}\text{Sr}$ ) 注射液 (メタストロン注)
- d.  $^{177}\text{Lu}$  ソマトスタチンアナログ注射液 ( $^{177}\text{Lu}$ -DOTA-TATE)
- e.  $^{90}\text{Y}$  イブリツモマブチウキセタン注射液 (ゼヴァリンイットリウム ( $^{90}\text{Y}$ ))

解答 a

**解説**

$^{223}\text{Ra}$ は骨転移を有する去勢抵抗性前立腺癌の治療薬として開発された世界初の $\alpha$ 線放出放射性医薬品である。 $^{131}\text{I}$ 、 $^{177}\text{Lu}$ は $\beta$ 線および $\gamma$ 線放出核種、 $^{89}\text{Sr}$ 、 $^{90}\text{Y}$ は純 $\beta$ 線放出核種である。

**問題(第17回)**

19. 核医学治療について、正しいものはどれか。1つ選べ。

- a. 介護者の線量拘束値は5mSv/件である。
- b. 公衆被ばくの線量限度は1mSv/件である。
- c. 甲状腺機能亢進症治療に用いられる外来での $^{131}\text{I}$ 投与量は1.11GBq以下である。
- d.  $^{131}\text{I}$ 投与後退出可能な1メートルの点における1cm線量当量率は10 $\mu\text{Sv/h}$ 以下である。
- e. 純 $\beta$ 線放出核種である $^{90}\text{Y}$ を用いた治療では、投与量に基づく退出基準が設定されていない。

解答 a

**解説**

核医学治療に際し、介護者及び公衆の抑制すべき線量は介護者：5mSv/件、公衆：1mSv/年で

ある。また甲状腺機能亢進症治療に用いられる外来での<sup>131</sup>I投与量は500MBq以下、<sup>131</sup>I投与後退出可能な1メートルの点における1cm線量当量率は30μSv/h以下、<sup>90</sup>Yを用いた核医学治療の退出基準に基づく最大投与量は1184MBqである。

**問題(第16回)**

法令に基づいた管理区域内に設置されている治療病室に入院することが必要となるのはどれか。1つ選べ。

- 甲状腺機能亢進症に対する<sup>131</sup>I内用療法
- 甲状腺癌の遠隔転移に対する<sup>131</sup>I内用療法
- 骨転移のある去勢抵抗性前立腺癌に対する<sup>223</sup>Ra内用療法
- 甲状腺癌の甲状腺全摘後アブレーションのための<sup>131</sup>I内用療法
- 悪性リンパ腫に対する<sup>90</sup>Y-イブリツモマブチウキセタン内用療法

解答 b

**解説**

甲状腺癌の遠隔転移に対する<sup>131</sup>I内用療法は一般に<sup>131</sup>I-NaI 3700~7400MBqを投与し、<sup>131</sup>I投与後の退出基準(投与量500MBq、1mの距離で30μSv/h)を超えるため核医学治療専用の病室への入院が必要である。甲状腺癌の甲状腺全摘後アブレーションのための<sup>131</sup>I内用療法に関しては患者毎の積算線量評価に基づく退出基準として1110MBqの投与量が示されている。<sup>223</sup>Raは患者毎の積算線量計算に基づく退出基準として1投与につき12.1MBq、<sup>90</sup>Yは投与量に基づく退出基準として1184MBqの最大投与量が示されており、いずれも外来で施行可能である。

**問題(第15回)**

放射性医薬品を投与された患者の放射線治療病室からの退出基準に関連する記載のうち、正しいのはどれか。1つ選べ。

- 放射性医薬品を投与された患者の退出基準を定めているのは、放射線障害防止法である。
- 退出基準には、投与量に基づく退出基準、測定線量率に基づく退出基準の二つのみが定められている。
- ヨウ素-131によるアブレーション治療については、投与量に基づく退出基準として5,550MBqの投与量が示されている。
- ラジウム-223の投与に関する退出基準として、1投与当たりの最大投与量として12.1MBqが示されている。
- ストロンチウム-89の投与に関しては、ベータ線のみを放出することを考慮して退出基準は定められていない。

解答 d

**解説**

放射性医薬品を投与された患者の退出基準は医療法により定められ、具体的には(1)投与量に基づく退出基準、(2)測定線量率に基づく退出基準、(3)患者毎の積算線量計算に基づく退出基準のいずれかに該当する場合には、退出・帰宅を認めることになっている。

<sup>131</sup>Iによるアブレーション治療は患者毎の積算線量評価に基づく退出基準として1110MBqの投与量が示され、<sup>89</sup>Srは投与量に基づく退出基準として200MBqの最大投与量が示されている。

**編集  
後記**

コロナ明けで都内、観光地だけでなく、国内の様々なところで外国人旅行者を見かけるようになった。初めて日本を訪れる外国人は観光だけでなく、食事、文化、日本人の人柄までを感じ取り、自国との違いに驚いているようである。こうした日本に来る外国人を取材した番組がYoutubeなどで紹介され話題になっている。Youtubeは一つこうした動画を見ると次々に同類の動画を紹介してくるのでつい目を奪われてしまう。興味深いのは高級和食を食べている観光客の動画で、とにかく心の底から「おいしい(very good, nice)」と叫んでいて、その表情は下手なグルメ番組でタレントがわざとらしく言っているコメントよりはるかに真実味がある。私がドイツ留学していた20年前に、現地のドイツ人らを家に招いて和食を何品かごちそうした時も同様の反応を示した。「こんなおいしいものを毎日食べているのか」と感激していたことが印象に残っている。我々はいくらおいしいものを食べても、もちろんおいしいとは感じててもここまで心底感動はしないだろう。このような動画は多くのチャンネルで50万再生を超えており、いかに日本人がそのような動画に興味を持って見ているかがわかる。それは、自分の所属する日本という国を評価してもらうことで我々自身が評価されていると思ひ、一種の優越感を感じるからであろう。日本にいれば何でもない行為でも海外から見れば大変よいことをしていると評価されることは多い。今の日本は経済的に他国から遅れをとり悲観しているが、今後観光立国として成長していくことで海外の多くの人から評価されることになる。他国にはない日本の独自の文化や慣習のすばらしさにもう一度目を向け、自信を持てれば日本にも明るい未来が待っている。

(編集委員長)



nihon  
medi+physics

処方箋医薬品<sup>(注)</sup>  
放射性医薬品・骨疾患診断薬

薬価基準収載

# クリアボーン®注

放射性医薬品基準ヒドロキシメチレンジホスホン酸  
テクネチウム (<sup>99m</sup>Tc) 注射液  
注) 注意-医師等の処方箋により使用すること

■効能・効果、用法・用量、警告・禁忌を含む使用上の注意等は、添付文書をご参照ください。

®登録商標



資料請求先

日本メジフィジックス株式会社

〒136-0075 東京都江東区新砂3丁目4番10号

製品に関するお問い合わせ先 ☎0120-07-6941

弊社ホームページの「医療関係者専用情報」サイトで  
SPECT 検査について紹介しています。

<https://www.nmp.co.jp> 2019年11月作成

## 核医学装置QC用線源

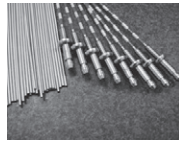
装置のデータ精度に心配ありませんか？

ガンマカメラ検出器  
精度管理用線源



<sup>57</sup>Co 370MBq

PET検出器用校正線源



<sup>68</sup>Ge

ドーズキャリブレーション用  
チェック線源



<sup>68</sup>Ge 37MBq

お問合せ・ご注文は



公益社団法人  
日本アイソトープ協会  
Japan Radioisotope Association  
放射線源課

〒210-0821

神奈川県川崎市川崎区殿町3-25-20

TEL: 044-589-5002 FAX: 044-589-5006

製品輸入元

株式会社 千代田テクノル **TECNOL**

〒113-8681

東京都文京区湯島1-7-12 千代田御茶の水ビル

URL: <https://www.c-technol.co.jp>

e-mail: [ctc-master@c-technol.co.jp](mailto:ctc-master@c-technol.co.jp)



SPECTRUM  
DYNAMICS MEDICAL

### D-SPECT Series

CZT 半導体搭載心臓専用ガンマカメラシステム



D-SPECT® CARDIO  
D-SPECT® VISTA

Changing the Shape of Nuclear Medicine

### VERITON Series

CZT 半導体搭載360度全身用ガンマカメラシステム



VERITON®  
VERITON-CT  
SPECT/CT

販売名称/医療機器認証番号:

D-SPECT カーディアック スキャナー システム/225ADBZX00049000

D-SPECT VISTA カーディアック スキャナー システム/303ADBZX00034000

フルディジタル半導体全身用ガンマカメラ VERITON-CT/230ADBZX00111000

フルディジタル半導体全身用ガンマカメラ VERITON-CT/301ADBZX00036000

Spectrum Dynamics Medical Japan 株式会社

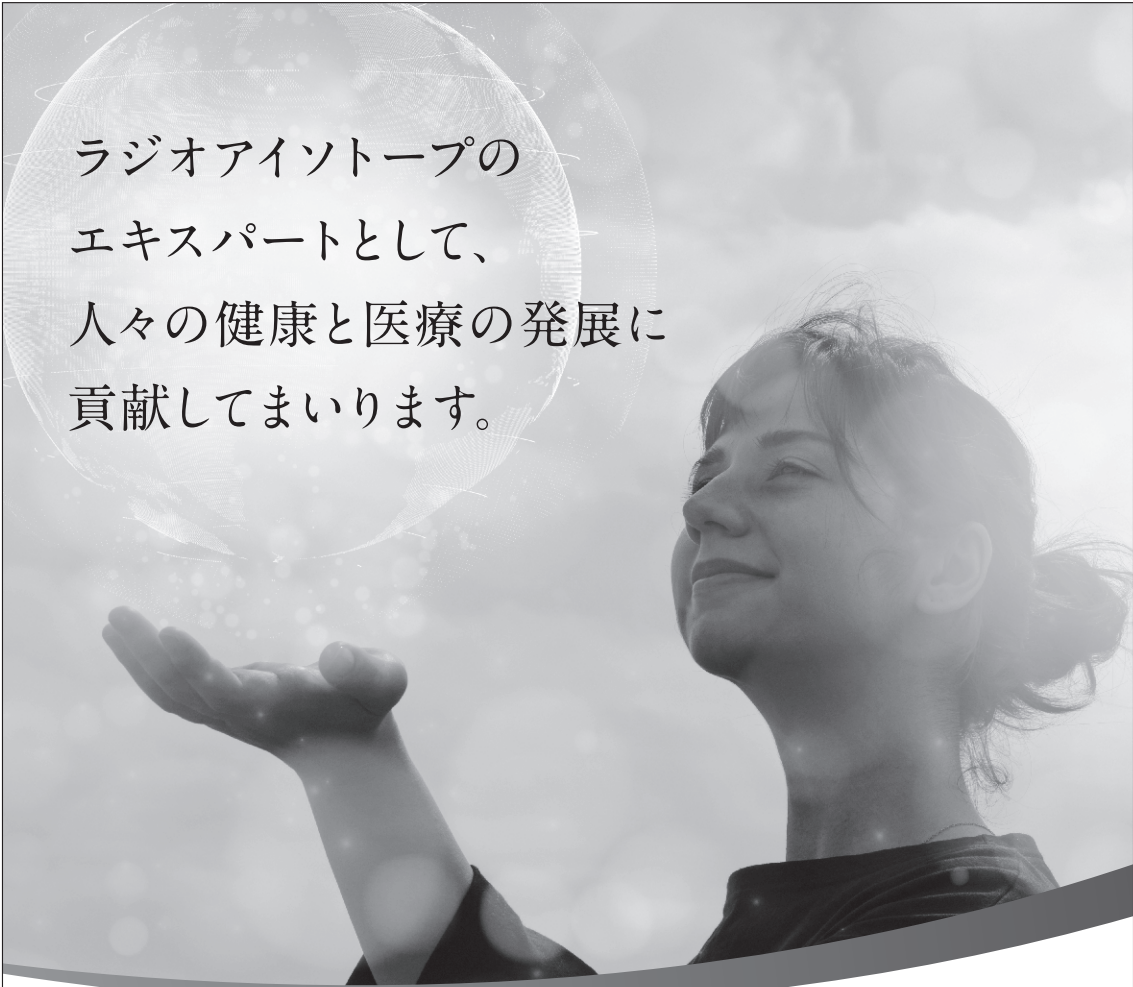
〒101-0047 東京都千代田区内神田1丁目5-13 内神田TKビル6階南

TEL: 03-5843-9304 FAX: 03-5843-9305

info@jpspectrum-dynamics.com

[www.spectrum-dynamics.com](http://www.spectrum-dynamics.com)



A black and white photograph of a woman with her hair tied back, looking upwards with a gentle smile. She is holding a glowing, wireframe globe in her open palm. The globe is surrounded by a soft, ethereal light and some faint, sparkling particles. The background is a bright, slightly cloudy sky.

ラジオアイソトープの  
エキスパートとして、  
人々の健康と医療の発展に  
貢献してまいります。

PDRファーマは、1968年 第一ラジオアイソトープ研究所の創業以来、  
半世紀に亘り、核医学の発展に寄与してきました。

高品質な診断用放射性医薬品（SPECT検査、PET検査）の迅速確実なデリバリーに加え、  
治療用放射性医薬品の分野を積極的に推し進め、  
診断薬と一体となった各種治療薬の更なる拡充を図っていきます。

ペプチドリームグループの革新的な創薬力により、  
最先端の放射性医薬品をグローバルに展開し、核医学の広がりに貢献してまいります。



**PDRファーマ株式会社**

〒104-0031 東京都中央区京橋2-14-1 兼松ビルディング  
<https://www.pdradiopharma.com> TEL.03-3538-3624

2022年5月作成

# Canon

それは未来を見据えた高画質。  
PET-CTは、いまデジタルを纏う。

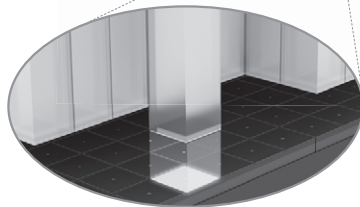
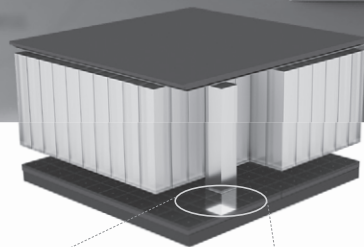


キヤノンメディカルシステムズは、将来にわたって幅広いニーズに応えるため、高画質と高い汎用性を併せ持つPET-CTを開発しました。最新技術を惜しみなく投入することで高画質と低被ばくを実現するとともに、医療従事者の安全や病院経営まで貢献します。最先端の技術をもっと多くの人に、新デジタルPET-CT Cartesion Prime 誕生です。

次世代デジタルPET-CT

## Cartesion Prime

【販売名】PET-CT スキャナ Cartesion Prime PCD-1000A 【認証番号】301ACBZX00003000



New Digital PET Detector

キヤノンメディカルシステムズ株式会社 <https://jp.medical.canon>

Made For life

放射線診療研究会会長

橋本 順

〒259-1193 神奈川県伊勢原市下糟屋143 東海大学医学部専門診療学系画像診断学

臨床核医学編集委員長

百瀬 満 (発行者)

〒162-0033 杉並区清水2-5-5 1F 百瀬医院 内科・循環器内科

TEL. 03-5311-3456 FAX. 03-5311-3457 E-mail: momose.mitsuru@twmu.ac.jp

臨床核医学編集委員

井上優介, 内山眞幸, 汲田伸一郎, 高橋美和子, 橋本 順, 丸野廣大, 百瀬敏光,

須山淳平, 鳥井原彰, 岩渕 雄, 稲木杏史, 伊藤公輝, 山崎香奈 2024年3月20日発行