ISSN 0912-5817

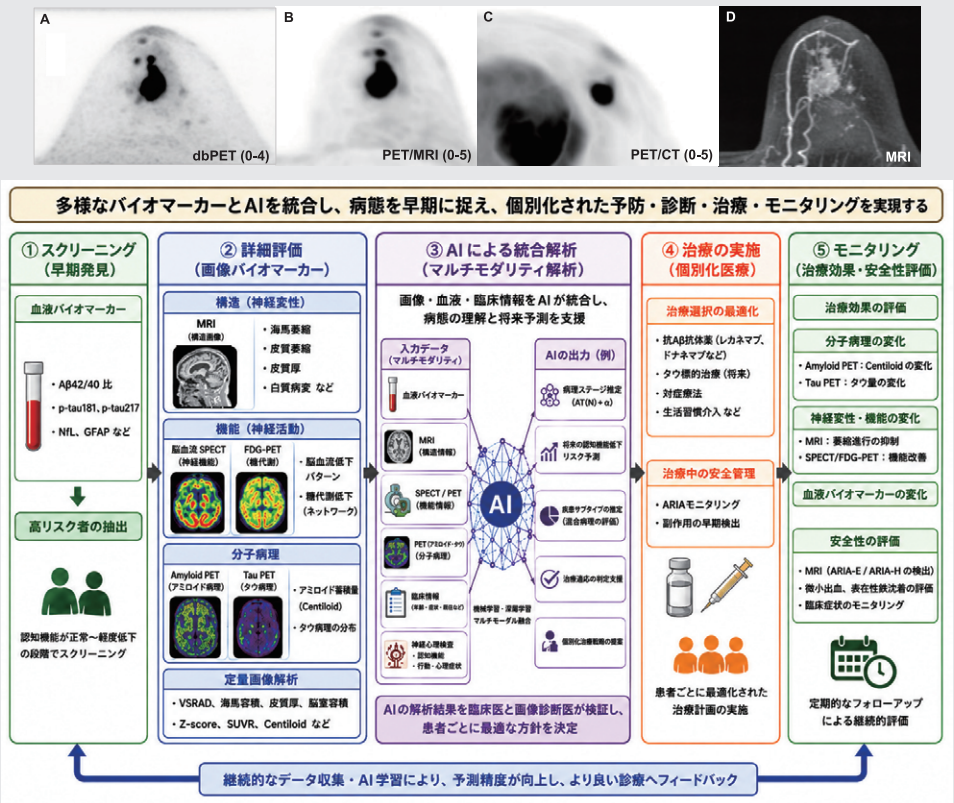
NUCLEAR MEDICINE IN CLINIC

臨床核医学

2026
Vol.59 No.6
11月号 81～96頁

放射線診療研究会

1968年創刊通算294号（奇数月刊行）
http://www.meteo-intergate.com（本誌論文検索用）



See Page 82,91

ホームページ・Online版 www.rinshokaku.com

[総　　説]乳房専用PET検査について再考する
—高精度機能イメージングの臨床的価値・レキシコン・将来展望—……82
三宅　可奈江

[リレー講座]今日の認知症診療を考える総括
画像バイオマーカーが切り拓く認知症の個別化医療……91
松田　博史

総　説

乳房専用PET検査について再考する
―高精度機能イメージングの臨床的価値・レキシコン・将来展望―

Reconsidering Dedicated Breast PET Examination: Clinical Value, Lexicon, and Future Perspectives

三宅　可奈江[1)]　MIYAKE K. Kanae　　板垣　孝治[2)]　ITAGAKI Koji

Key Words: Dedicated breast PET, breast cancer, diagnostic performance, lexicon, screening

《Ⅰ. 緒言》

乳がんは本邦女性における部位別悪性腫瘍罹患数の第1位であり，その早期診断と個々の病態・病状に応じた適切な診療を叶える上で，画像診断の役割は大きい。従来，乳癌の画像診断には，マンモグラフィ，乳房超音波（US），および乳房MRIが主たるモダリティとして用いられてきた。一方，核医学分野における^{18}F-fluorodeoxyglucose（FDG）を用いた全身用PET/CTは，全身の病期診断や遠隔転移・再発の検索において不可欠な役割を果たしている。しかしながら，従来の全身用PET/CTは空間分解能に限界があり，胸壁の呼吸性運動や，被検部と検出器との距離に起因する体感度の限界から，1cm未満の小さな乳がんや非浸潤性乳管癌（DCIS）に対する局所描出能は限定的であった。

これらの技術的限界を克服すべく開発されたのが，撮像対象を乳房に特化させ，検出器を被検部に極めて近く配置する臓器特異型PET装置，すなわち「乳房専用PET」（Breast-specific PET; dedicated breast PET［dbPET］およびPositron emission mammography［PEM］）である。本邦においては，2013年7月に「乳房専用PET検査」が保険収載され，10年以上が経過した。この間，検出器技術の進歩，読影用語体系の標準化（dbPET Lexiconの提唱），ならびに臨床・検診でのエビデンスの蓄積が進められてきた。

本総説では，当施設で使用しているリング型装置を中心に，乳房専用PETの臨床導入10年余の歩みを振り返るとともに，①技術的特徴，②読影標準化に向けた「dbPETレキシコン」の体系，③保険算定要件と実臨床での相補的役割，④任意型検診での活用，⑤新規機能イメージングへの応用について整理し，本検査法の臨床的価値と今後の展望について再考する。

《Ⅱ. 乳房専用PETの技術的特徴と検査法》

1. 物理的特長と装置形態の多様性（対向型 vs リング型）

乳房専用PET（breast-specific PET）は，全身用PETと比較して検出器を乳房に近接させることで高い幾何学的感度と空間分解能を得ることを目的に開発された。現在の乳房専用PETは，その検出器配置と撮像時の患者体位から，大きく対向型とリング型の2種類に分類できる。日本核医学会の「乳房専用PET診療ガイドライン2019」でも，この2方式を乳房専用PETとして扱っている[1)]。なお，文献上“dedicated breast PET”という用語が乳房専用PET全般を指す場合と，ring-shaped dedicated breast PETのみを指す場合があるため，本稿では対向型をpositron emission mammography（PEM），リング型をdbPETと表記する。PEMは2枚の平板状PET検出器を対向配置し，その間に乳房を保持して撮像することでcraniocaudal（CC）相当およびmediolateralあるいはmediolateral oblique（ML/MLO）相当の画像を取得することができる。初期のPEMではマンモグラフィに類似した圧迫を行う装置も用いられたが，現在国内で使用されているPEMGRAPHでは強い圧迫を行わず，乳房を軽く保持して検出器間隔を調整する。このため胸壁側を比較的深くFOVへ含めることが可能である。対向する2枚の検出器のみを使用するPEMでは，取得可能なline of response（LOR）の角度範囲がリング型と比較して制限される。したがって，PEMは単純なplanar imagingではなく3次元再構成が可能であるものの，いわゆるlimited-angle tomographyであり，検出器面内と面外で空間分解能が異なる。これに対しdbPETでは，患者を腹臥位とし，乳房を下垂させて乳房全周を取り囲むリング型検出器で撮像する。PEMに比してLOR欠損が少ないfully tomographic imagingが可能であるため，1回の撮像データからtransaxial，sagittal，coronalなど任意断面画像およびmaximum intensity projection（MIP）画像を作成できる。定量法にも違いがある。PEMでは既知放射能濃度のファントムから得られる校正係数をもちいてピクセル値をPEM uptake value（PUV）へ変換する。一方dbPETでは，emission dataから乳房表面の輪郭を抽出し，乳房内部を均一な軟部組織として扱うμ-mapを生成して減弱補正を行い，Standardized uptake value（SUV）を算出する。

2. 国内で使用される乳房専用PET装置の性能

2026年現在，国内ではPEMGRAPH（未来イメージング），ElmammoおよびBresTome（島津製作所）という，物理構造の異なる乳房専用PET装置が臨床使用されている。各乳房専用PET装置の使用を表1に示す。

全ての装置で全身用PET装置に比べサイズの小さいクリスタルが使用されており，高い空間分解

1）京都大学大学院医学研究科高度医用画像学講座　〒606-8507京都府京都市左京区聖護院川原町54
TEL：075-751-3760　FAX：075-771-9709　E-mail：kanaek@kuhp.kyoto-u.ac.jp
Department of Advanced Medical Imaging Research, Kyoto University Graduate School of Medicine
2）京都大学医学部附属病院放射線部

表1　乳房専用PET装置の特徴

Parameter	Model		
	PEMGRAPH	Elmammo Avant Class	BresTome
Vendor	Mirai Imaging Co., Ltd.	Shimadzu Corporation	Shimadzu Corporation
System type	PEM	Ring-type dbPET	Ring-type dbPET
Detector geometry	Opposed flat-panel	Cylindrical ring	Cylindrical ring
Crystal material	LuAG	LGSO	LGSO
Crystal size (mm³)	1.5 × 1.5 × 11	1.44 × 1.44 × 18 (4.5 × 4)	2.1 × 2.1 × 15
Photodetector	PMT	PMT	SiPM
No. of DOI layers	1	4	1
TOF capability	No	No	Yes
Detector aperture (mm)	100–250*	ϕ195	ϕ300
FOV (mm)	202.4 × 140.8 × 100–250*	ϕ182 × 103	ϕ264 × 162
Spatial resolution at 5-mm offset from the center of FOV (mm)†	up to 2.0	up to 1.5	1.0–2.5
Sensitivity at the center of FOV (cps/kBq)†	0.005	0.05–0.09	0.06–0.11

Abbreviations: PEM, positron emission mammography; dbPET, dedicated breast positron emission tomography; LuAG, lutetium aluminum garnet; LGSO, lutetium gadolinium oxyorthosilicate; PMT, photomultiplier tube; SiPM, silicon photomultiplier; DOI, depth of interaction; TOF, time of flight; FOV, field of view; cps, counts per second; kBq, kilobecquerel.
* Adjustable in 25-mm increments.
† Values obtained using a ^{22}Na point source according to NEMA NU 4-2008.

能を実現している。dbPETのようにリング径が小さい場合FOV辺縁の光子が結晶へ斜めに入射するため，クリスタル発光点の深さを特定できないとparallax errorが生じる。そのため，特にradial方向の空間分解能が悪化する。Elmammoで使用されているDOI（depth of interaction）検出器では深さ方向の情報を取得する事ができ，小さいリング径であっても視野内の均一な高空間分解能を維持する事が可能となる[2]。一方，BresTomeではbrain PETとしても使用できるようリング径がϕ300 mmへ拡大されている。リング径の拡大はシステム感度を低下させる方向に働くが，BresTomeでは検出器にsilicon photomultiplier（SiPM）を採用しtime of flight（TOF）情報を利用することで，信号雑音比を改善するよう設計されている。2026年に報告された日本核医学会多施設研究では，これら3装置を同一の乳房PET用ファントムと臨床撮像条件で直接比較している。dbPETはPEMより小球描出に優れる傾向を示した。一方，臨床的撮像条件では3装置すべてにおいてsphere-to-background ratioが8:1のϕ7.5 mm以上の球が描出可能であり，乳房専用PETという異なる装置構造の間でも微小病変を描出可能な画質が得られることが示された。また，すべての装置でAxial FOV中心より辺縁部では小球描出能が低下し，特にBresTomeでは短時間収取時のFOV辺縁でノイズの上昇が顕著であった[3]。これらの結果は，2023年に報告された2種のdbPET装置の比較の研究結果とも一致している[4]。

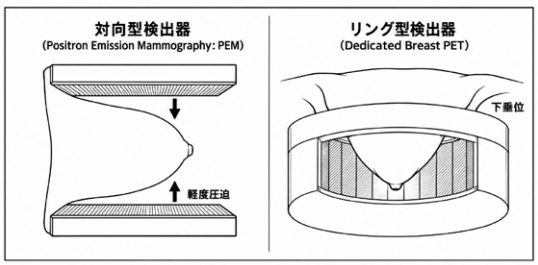


図1　乳房専用PETの種類
（A）対向型装置（PEM）：被検者は座位となり，2枚の平面検出器（パドル）で乳房を軽度圧迫して撮像を行う。（B）リング型・全断層型装置（dbPET）：被検者は伏臥位となり，専用寝台の開口部に片側乳房を自然下垂させ，無圧迫状態で3次元全断層撮像を行う。

3．再構成アルゴリズムと画像特性

乳房専用PETにおいても，全身PETと同様に画像品質は検出器性能だけで決まらず，収集時間と再構成条件に大きく依存する。Elmammoでは3-dimensional list-mode dynamic row-action maximum-likelihood algorithm（3D LM-DRAMA）が使用される。DRAMAは逐次近似型画像再構成法の一つであり，relaxation parameter（β）を導入することで，コントラストとnoiseのバランスを調節する。両者の良好なバランスが得られる条件について検討したファントム試験の結果が複数報告されているので，再構成条件を設定する際には参考にされたい[5,6]。

4．乳房専用PET装置の技術的注意点

乳房専用PET装置特有の欠点の一つに胸壁側のblind areaがある。Sasadaらは288病変のうち24病変（8.3%）がdbPETで描出されなかったと報告した[7]。非描出病変から胸壁までの距離は23.0 mmで，描出可能病変の38.5mmより有意に短かった。同様の問題は他のdbPET装置（MAMMI-PET）でも報告されている。TeixeiraらはStage I–III乳癌の234病変のうち，MAMMI-PETでは23病変（9.8%）が胸壁側のblind areaに存在し見逃された[8]。また，Hashimotoらの研究では，術前乳癌84病変について検討し，dbPETでは検出されず全身PET/MRIのみで検出された5病変が胸壁側のblind areaに存在したと報告した。この研究では寝台上のマットを20mmから5mmへ薄型化した後は胸壁側病変の検出率が改善した[9]。

胸壁側blind areaを改善する方法として，検出器開口径を大きくすること，検出器上のマット等を薄くし患者検出器間距離を近づけることが考えられる。O'Connorらは，MAMMI-PETの検出器側開口径を拡大するとともに，検出器上部のカバーやマットを薄型化することで，胸壁側のblind areaが約12mm減少（改善）したと報告した。一方で，胸壁側までFOV内に含めることにより心筋や肝臓の高FDG集積が検出器に近接し，一部症例ではcross-talkアーチファクトが認められた。このアーチファクトは画像再構成法の改良によって軽減可能であることも示されており，乳房専用PET

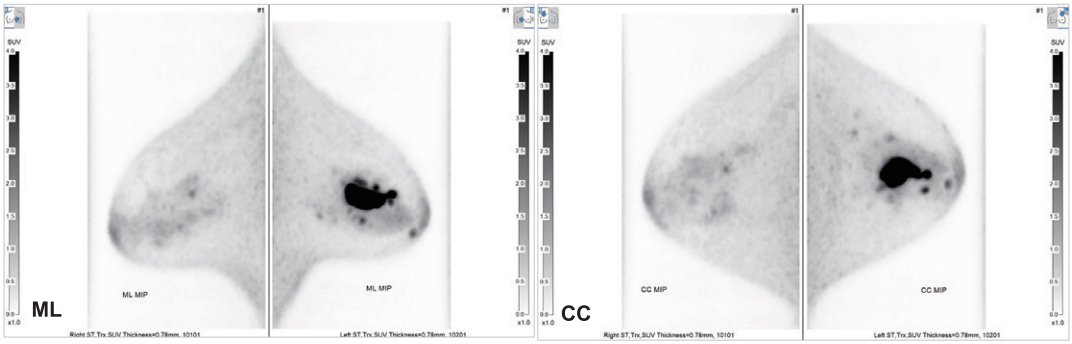


図2　^{18}F-FDG乳房専用PET（dbPET）の基本画像
Elmammoを使用し、斜伏臥位で片側乳房あたり10分間収集した最大値投影（MIP）画像。同一の収集データから、内外側方向（mediolateral view：ML）および頭尾方向（craniocaudal view：CC）の2方向のMIP画像を再構成している。左右乳房の画像を並列表示することで、左右の集積分布を容易に比較できる。当院では、原則としてSUV表示範囲を0〜4に統一し、SUVスケールバーを併記している。本例は、左乳房に浸潤性乳癌が指摘されている（詳細は図3で説明）。

における胸壁側の画質改善には，検出器開口径，寝台マットなどのハードウェア設計だけでなく，画像再構成を含むソフトウェア面の最適化も重要であることがわかる[10]。また，O'Connorらの研究結果はFDG以外のtracerを使用する際にはさらに重要となる。例えば^{18}F-Fluoroestradiol（FES）では肝胆道系への生理的集積が高いため，肝臓や胆嚢からのFOV外放射能が画質へ及ぼす影響をFDG以上に意識する必要がある。検出器と体幹部との間に十分な遮蔽を設けることは重要であるが，遮蔽板を厚くすれば患者検出器間距離が広がり，blind areaが増大するというトレードオフを十分に認識する必要がある。なお，2024年のSatohらの研究では，検出器リング径を単純に大きくしてもblind areaが解決しないことも示されている。Elmammoのリング径約195 mmに対し，BresTomeでは約300 mmまで拡大されたが，両装置で撮像された74患者131乳房を解析したところblind areaそのものは解消しなかったと報告されている[11]。

dbPETのもう一つの特徴的問題が画像ノイズである。乳房専用PETは高空間分解能で微小病変を描出できる反面，1 voxelあたりのカウントが少なくなりノイズが目立ちやすい。特にFOV辺縁ではLOR減少による感度低下，normalizationエラー，散乱補正の不安定性に加え，心筋などFOV外の高集積からのspill-inによりノイズが増大する。Satohらが行ったdbPETのdetector edgeにおける画質評価でも，detector edgeへ近づくにつれてコントラストが低下しノイズが増大する事が報告されている[12]。また，FOV外の高集積が画像ノイズに与える影響についてもelmammmoおよびBresTome両装置についてファントム試験の結果が報告されており，FOV外の模擬心筋集積が増加するにつれてノイズが増加する事が示されている[13,14]。したがって，dbPETの胸壁側病変を評価する際には，「病変がFOVに入っているか」というblind areaの問題だけでなく，病変がdetector edgeからどの程度離れているか，背景ノイズが増加していないか，さらに心筋などFOV外高集積の影響を受けていないかを考慮する必要がある。近年，こうした画像ノイズの低減を目的として，深層学習を用いた画像処理技術の応用も進められている。当院でも，残差ニューラルネットワーク（residual neural network）を用いたdbPET画像のデノイズ処理について，その実現可能性を報告している[15]。

5.当院の運用について

京都大学では2009年から2013年に先端医療開発特区NEDO projectの一環として島津製作所とプロトタイプ機を用いた橋渡し研究を行い，NEMA基準に基づいた性能評価にて極めて高い空間分解能と高い計数感度にあることを実証するとともに[2]，臨床応用に努めてきた[16-18]。2016年には検診施設であるハイメディック京大病院に島津製作所製リング型乳房専用PET装置（dbPET）Elmammoを導入，そして2020年には本院にElmammo Avanto Classを導入し，現在は乳房専用PET装置2台体制にて乳癌の検診・診療にあたっている。

当院における標準的運用フローでは，患者に規

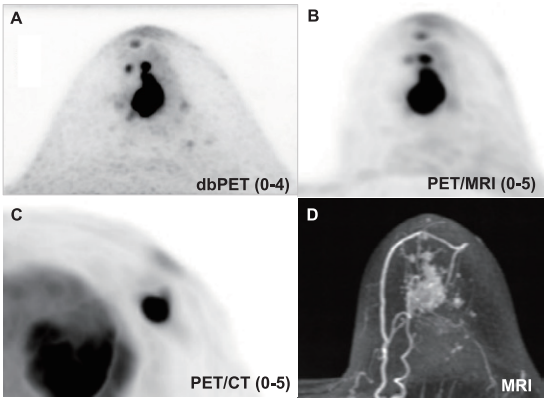


図3　HER2陽性浸潤性乳癌における各種PET画像の比較
70歳代女性。左乳房のHER2陽性浸潤性乳癌（浸潤性乳癌、非特殊型［NST］、ER陰性／HER2陽性）。
A：^{18}F-FDG乳房専用PET（dbPET）。Elmammoを使用し、斜伏臥位で片側乳房あたり10分間収集した最大値投影（MIP）画像。（図3と同一症例）
B：^{18}F-FDG PET/MRI。Signa PET/MRIを使用し、伏臥位で1ベッドポジションあたり10分間収集したtime-of-flight（TOF）再構成画像のスラブMIP。
C：^{18}F-FDG PET/CT。Discovery IQを使用し、背臥位で1ベッドポジションあたり3分間収集したスラブMIP画像。
D：造影MRI早期相。Signa PET/MRIを使用し、伏臥位で撮像したMIP画像。
主腫瘍の周囲に複数の娘結節を伴い、PETでは腫瘤状集積（mass uptake）と非腫瘤状集積（non-mass uptake）が混在する所見を呈する。PET画像の比較では、dbPETが周囲の娘結節を最も明瞭に描出しており、造影MRIに近い病変の広がりを示している。

定量のFDGを静注1時間後，まず全身PET/CT撮像（約15-25分）を行い，その後，約90分後から乳房専用PET（片胸5-7分）を撮像する。通常，FDG投与後2時間以内には検査を完了できることが多い。dbPETの撮像は斜伏臥位で行う。撮像側乳房のC領域（上外側領域）が撮像視野内に十分含まれるよう留意し，撮像側の上肢は体幹に沿って下ろし，対側の上肢は頭側に挙上する体位とする。全身PET/CT撮像と併用する場合，乳房専用PETの追加に際して放射性医薬品投与による追加被ばくを必要とせず，全身病期診断と局所高精細診断を一連の検査で実施できる。

dbPETの読影は，まずはwindow幅を固定表示したmaximum intensity projection（MIP）像を評価する。当院ではwindow幅をstandardized uptakevalue（SUV）で0から4に設定し，craniocaudal［CC］，mediolateral［ML］の2方向のMIP像を作成し，左右乳房を対にして表示する。またこのMIP像にはSUVのスケールも併せて表示する（図2）。このようにSUVを利用してwindowを固定表示することにより，肝臓などのメルクマールがない乳房のみの画像でも，集積の程度を一定の基準で視覚的に評価することが可能になる。MIP像の後に断層像を評価する。そして，後述するレキシコンを用いて，画質，背景乳腺，病変集積等を系統だてて評価する。

図3に，当院で撮像したdbPET，PET/MRIおよびPET/CTのPET画像を示す。各画像を比較すると，dbPETでは最も高精細に集積分布が描出されており，主腫瘍周囲の微小な病変集積も明瞭に識別できる。

《Ⅲ. 読影標準化に向けた「dbPETレキシコン（Lexicon）」と画像バイオマーカー》

乳房専用PETの普及には，集積像の解釈や読影レポートの記載を標準化し，施設間・読影者間で共有できる用語体系が不可欠である。当院では日米の核医学専門医，乳腺画像診断医，乳腺外科医らと協力し，ACR BI-RADSの概念を参考に「dbPETレキシコン」を提案した[19]。本レキシコンは，所見の記載を標準化するだけでなく，集積の形態・分布を考慮することによって良悪性の鑑別精度を高めることも目指したものである。

FDGは糖代謝を反映するため，乳癌のみならず，良性腫瘍や炎症性病変にも集積する。dbPETは小病変の検出に優れる一方[20]，良性病変に伴う微小集積も検出されやすい。また，胸壁近傍など撮像視野（field of view; FOV）の辺縁部では，ノイズの増加に伴う偽陽性所見が生じることがある。特に，有病率の低い検診では陽性的中率が低下しやすいため，良悪性の鑑別精度の向上が重要な課題となる。

FDGの集積程度を示すSUVmaxは，乳癌の悪性度や予後との関連が報告されている[21]が，集積程度のみで良悪性を鑑別することには限界がある。乳房専用PETの研究においてもFDG集積の程度のみでの良悪性鑑別には限界が示されている。Graña-LópezらはBI-RADS 4の60病変（18 malignant, 42 benign）を前向きに評価し，病変のFDG集積が背景乳腺の3倍以上を陽性とした場合の乳房専用PETの感度は50%，特異度は76%と報告した[22]。一方，空間分解能に優れた乳房専用PETでは，集積程度に加え，集積の形態や分布を評価することが診断精度の向上に寄与する可能性が示されてきた。

2011年，Narayananらは，対向型乳房専用PET（positron emission mammography; PEM）を用い，乳癌患者において副病変として検出された異常集積の形態・分布を解析し，これらの画像所見が悪性を予測する有意な因子となることを報告した[23]。リング型dbPETにおいても，Satohらは偶発的に検出された異常集積のうち，乳癌の76.9%がmassを呈した一方，非悪性病変ではfocusが多かったと報告した[24]。また，Sasadaらはmassやfocal／segmental non-mass uptakeと乳癌との関連を示した[25]。さらに，Masumotoら，Sakaguchiらより，腫瘍内集積の不均一性やrim uptakeと，核グレード，Ki-67，トリプルネガティブ乳癌などの病理学的特徴との関連も報告されている[26, 27]。

マンモグラフィ，超音波，MRIでは，BI-RADSなどの標準化された用語体系が，所見の記載や臨床判断の共有に重要な役割を果たしている。dbPETにおいても，画像所見を共通言語で記述することにより，読影医と紹介元医師との円滑な情報共有，患者への説明，施設間でのデータ比較・集積，教育，および読影の再現性向上が期待される。さらに，標準化された所見に基づくエビデンスの蓄積は，将来的な読影基準や診断アルゴリズムの確立に向けた重要な基盤となる。

以下に，当院が2021年に提案したdbPETレキシコンの評価項目を概説する。

dbPETレキシコン ver. 1.0[19]

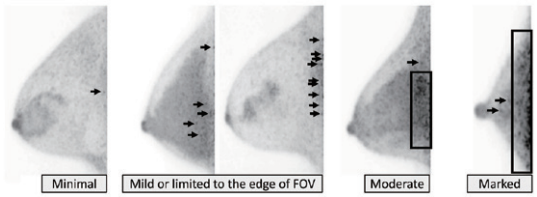
dbPETレキシコンは，主に，①画質（image quality），②背景乳腺集積（background fibroglandular uptake; bFGU），③病変集積（lesion uptake）の3つから構成される。画質と背景乳腺集積は全検査で評価し，病変を疑う集積が認められた場合には，病変ごとに所見を記載する。各領域には複数の評価項目が設けられ，それぞれ段階的なカテゴリーに分類される（表2，図4，5）。

表2　dbPET lexicon, version 1.0（文献19より一部抜粋）

dbPET lexicon, version 1.0 (文献より一部抜粋)			
Image quality	Noise	Minimal/ Mild or limited to the edge of FOV/ Moderate/ Marked	
	FOV	Full/ Almost full/ Partial/ Limited	
Background fibroglandular uptake (bFGU)	Extent	None/ Small/ Relatively small/ Relatively large/ Large	
	Intensity	Faint/ Mild/ Moderate/ Intense	
	Distribution	Homogeneous/ Heterogeneous	
	Symmetry	Symmetric/ Asymmetric	
Lesion	Focus	Single/ Multiple	
	Mass uptake	Shape	Oval/ Round/ Lobulated/ Irregular
		Internal pattern	Homogeneous/ Heterogeneous/ Rim uptake
	Non-mass uptake	Distribution	Focal/ Linear/ Segmental/ Regional/ Multiple regions/ Diffuse
		Internal pattern	Homogeneous/ Heterogeneous

画質

■ ノイズ



■ FOV (Field-of-view)

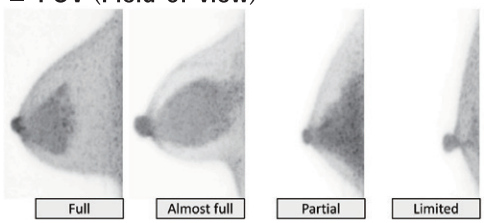


図4　画質評価に関するレキシコン。
画像ノイズ(noise)および撮像視野(field of view：FOV)に関する評価項目を示す。(文献19より転載)

画質(image quality)では，ノイズと撮像視野(field of view; FOV)を評価する。ノイズはその程度に応じて4段階に分類し，FOVは乳房後隙(retromammary space)を指標として，乳房がどの程度撮像視野内に含まれているかを判定する。リング型dbPETでは，装置の構造上，胸壁側に撮像困難な領域が生じるほか，視野辺縁部ではノイズが増加しやすい。これらは病変の見落としや偽陽性の原因となりうるため，画質評価は読影時のみならず，撮像時のポジショニングや品質管理の観点からも重要である。

背景乳腺集積(bFGU)では，集積を示す乳腺の量，集積程度，分布，左右対称性を評価する。正常乳腺組織にも生理的なFDG集積が認められるため，その程度や分布を把握することは，背景乳腺集積と病変集積の鑑別に役立つ。特に，左右非対称性や限局性の集積については，生理的集積の個人差も考慮して慎重に評価する必要がある。

病変集積(lesion uptake)は，点状集積(focus)，腫瘤状集積(mass uptake)，非腫瘤状集積(non-mass uptake; NMU)の3種類に分類し，いずれも部位と集積程度を記載する。Focusはおおむね5 mm未満の点状集積であり，単発または多発に分類する。Mass uptakeは三次元的な腫瘤状集積であり，形状(shape)と内部集積パターン(internal pattern)を評価する。NMUは明らかな腫瘤状形態を示さない5mm以上の集積であり，境界不明瞭な集積や点状集積の集簇などを含む。NMUでは，分布(focal，linear，segmental，regional，multiple regions，diffuse)および内部集積パターンを評価する。このように，集積程度に加えて形態や分布を系統的に記述することで，病変の特徴をより詳細に捉えることが可能となる。

なお，本レキシコンはFDGを用いたリング型dbPET画像に基づいて提案されたものである。FESなど他のトレーサーにおいても，病変の形態や分布に関する記述は応用可能と考えられるが，背景乳腺集積や生理的集積分布がFDGとは異なるため，その適用にはさらなる検証が必要である。

《Ⅳ. 保険適用と実臨床における相補的役割》

1. 保険適用要件と運用の実態

本邦における「乳房専用PET検査」は，2013年7月に診療報酬点数4,000点として保険収載された。算定のための主な要件は以下の通りである：

①他の画像診断(マンモグラフィ，超音波，造影MRI等)で病期診断，転移・再発の診断が確定できない乳がん患者を対象とすること(単なる良悪性鑑別や初期スクリーニング目的単独での保険算定は不可)。

②全身用のPET，PET/CT，またはPET/MRI検査と併せて，同日に受診・併用すること。

日本核医学学会からは，「乳房専用PET診療ガイドライン2019」(2019年公表，2020年4月修正版)が発行されている。

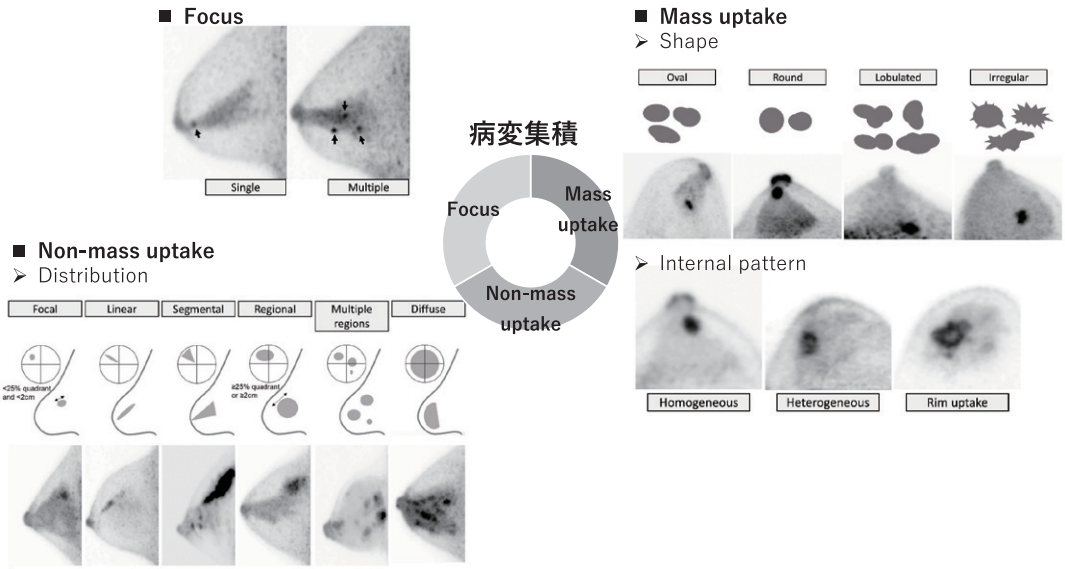


図5　病変集積に関するレキシコン。
病変集積は、点状集積(focus)、腫瘤状集積(mass uptake)、非腫瘤状集積(non-mass uptake)の3つに分類され、それぞれについて詳細な評価項目が定められている。(文献19より転載)

2. 臨床的有用性：広がり診断および治療効果判定

手術先行例における乳房画像診断の主な役割は，原発巣の広がりや副病変の有無を評価し，適切な術式選択に必要な情報を提供することである。

2011年，Bergらは，乳癌患者の術前評価において，対向型乳房専用PET（positron emission mammography; PEM）がマンモグラフィや超音波よりも副病変の検出に優れた診断成績を示すことを報告した[28]。また，造影MRIとの比較では，PEMは感度で劣るものの特異度で上回り，特に造影MRIの施行が困難な症例において有用な選択肢となりうることを示した。

当院においても，MRI非対応の金属製体内留置物，造影剤使用に支障のある腎機能障害や喘息，重度の閉所恐怖症などにより造影MRIの施行が困難な症例では，dbPETを代替的な画像診断法として活用している[29]。実際に，マンモグラフィや超音波では十分に評価できなかった広範な乳管内進展がdbPETによって明らかとなり，乳房全切除術の選択につながった症例も経験している。

また，造影MRIでは背景乳腺の生理的造影効果（background parenchymal enhancement; BPE）が強い場合，病変の描出や進展範囲の評価が困難となることがある。一方，FDG dbPETでは背景乳腺集積（background fibroglandular uptake; bFGU）が比較的軽度であることが多く，病変と背景乳腺とのコントラストを確保しやすい場合がある。このような背景乳腺の影響の違いも，dbPETが造影MRIを補完しうる理由の一つである。

近年，HER2陽性乳癌やトリプルネガティブ乳癌では術前薬物療法（neoadjuvant systemic therapy; NST）が広く行われており，治療早期の効果予測や治療後の残存病変評価における画像診断の重要性が高まっている。

FDG PET/CTによる早期代謝反応評価の有用性は広く検討されており，治療開始後1〜2サイクルにおけるSUVmaxやtotal lesion glycolysis（TLG）の減少率が，最終的な病理学的完全奏効（pathological complete response; pCR）と関連することが報告されている。さらに，HER2陽性乳癌を対象としたAVATAXHER試験[30]やPHERGAIN試験[31]では，治療早期のFDG PETによる代謝反応を指標として，治療強度の増強（エスカレーション）や軽減（デエスカレーション）を図る戦略が検討され，PETを用いた治療個別化の可能性が示された。

dbPETについては，Diwanjiらは，NST開始後わずか3週の時点でdbPETのSUVmax，SUVmean，SUVpeak，TLGなどの代謝指標が有意に変化し，DCE-MRIのvascularity/perfusionとは異なる相補的な治療反応情報を提供する可能性を報告した[32]。また，術前薬物療法後の残存病変評価では，その高い空間分解能により，従来の全身PET/CTでは描出困難な小さな残存病変の検出に寄与する可能性が報告されている[33-35]。Lenaertsらは，NSTを施行した41例42腫瘍を中央値105か月追跡し，治療前および治療中のdedicated PET/MRI指標はevent-free survival（EFS）と明らかな関連を示さなかったが，治療終了後の原発巣SUVmax，SUVpeak，SUVmeanがEFSと有意に関連したことから，NST後に残存する代謝活性が長期予後予測に有用となる可能性を示した[36]。ただし，微小な残存病変や糖代謝活性の低い病変を完全に除外することは困難であり，病理学的完全奏効の判定におけるdbPETの位置づけについては，さらなる検証が必要である。

3. 実臨床における限界と「マルチモダリティ統合診断」の必然性

乳房専用PETは高い空間分解能を有する一方，単独での診断には限界がある。特に，以下のような構造的・生物学的特性を理解したうえで画像を解釈する必要がある。

①撮像視野の制約による病変の見落とし

リング型dbPETでは，検出器の構造上，胸壁近傍に撮像困難な領域が生じる。このため，胸壁深部や胸筋近傍に位置する病変が撮像視野外となり，見落とされる可能性がある。また，撮像視野辺縁部ではノイズが増加しやすく，病変の検出や集積評価に影響することがある。

②組織型・糖代謝活性による偽陰性

FDG集積は腫瘍の糖代謝活性に依存するため，浸潤性小葉癌（invasive lobular carcinoma; ILC）の一部，低グレードの浸潤性乳癌，低グレードの非浸潤性乳管癌（ductal carcinoma in situ; DCIS）などでは集積が弱く，偽陰性となることがある。高い空間分解能を有するdbPETであっても，糖代謝活性の低い病変の検出には限界がある。

③良性病変や炎症性変化による偽陽性

FDG集積は悪性腫瘍に特異的ではなく，複雑性嚢胞（complicated cyst），乳管内乳頭腫などの良性病変や，授乳期乳腺にも認められる。また，針生検後の炎症性変化や肉芽組織によって高集積を呈する場合があり，偽陽性の原因となる。特に生検後早期の検査では，手技に伴う炎症性集積に注意が必要である。

以上より，乳房専用PETは単独で診断を完結させる検査ではなく，全身PET/CT，マンモグラフィ，超音波，造影MRIなどと相補的に用いることが重要である。各モダリティの長所と限界を理解し，形態情報と代謝情報を統合して評価する「マルチモダリティ統合診断（multimodality integrated diagnosis）」の中にdbPETを位置づけることで，その高い空間分解能を臨床診断に最大限活用できると考えられる。

《V. 任意型検診における活用》

本邦では2000年代から全身FDG PETを用いた任意型がん検診が行われてきたが，乳癌の発見率は0.18〜0.23%程度と報告され，乳癌検出能には限界があった[37-39]。dbPETは検出器を乳房に近接させることで全身PET/CTより小病変を描出しやすく，1 cm未満の乳癌においても検出能の改善が報告されている[20]。

京都大学では2016年6月から全身PET/CTを用いた任意型検診においてdbPETを導入している。dbPETは，全身PET/CTの後に同一投与のFDGで撮像するため，追加の放射性医薬品投与は不要である。受診者はデジタルマンモグラフィとトモシンセシス（DM-DBT），乳房超音波（US），dbPETを組み合わせて受診している。

Yugeらは，2016年6月から2020年12月までにdbPET，DM-DBT，USの3検査を受け，病理診断または1年以上の経過観察で最終診断が得られた女性1,083名，延べ2,156検査を後ろ向きに解析した[40]。この研究は，無症候性受診者を対象としてdbPETの検診成績を既存の乳房画像検査と直接比較した点に意義がある。

この期間に検出された乳癌は18例（浸潤癌10例，非浸潤性乳管癌［DCIS］8例）であった。浸潤癌の検出感度はdbPET 90%，DM-DBT 100%，US 90%であり，有意差は認めなかった。dbPETで見逃された浸潤癌1例は，FOV辺縁の胸壁近傍に位

置し，Ki-67が低いLuminal A型であった。

一方，DCISに対する感度はそれぞれ50%，75%，75%，乳癌全体では72.2%，88.9%，83.3%であった。なお，DCISに対する感度が相対的に低い点は，必ずしもdbPETが他法と比べて劣っていることを意味しない。低グレードDCISには進行リスクの低い病変も含まれ，過剰診断・過剰治療が議論されている[41]。dbPETの集積程度によってDCISのグレードを識別できる可能性を示した報告もある[42]。とくに検診では，病変の発見数だけでなく，受診者の負担や不利益も含めて評価すべきである。今後，進行リスクや長期転帰との関係を含む検証が望まれる。

dbPETの特異度は全期間で82.6%であったが，2018～2020年には85.9%となり，同期間のDM-DBT(81.0%)を有意に上回った。一方，USの特異度は91.2%であった。dbPETの特異度改善には，過去画像との比較が可能な反復受診者の増加，読影経験の蓄積，偽陽性への対策などが寄与した可能性がある。当施設では，7分で収集したデータを2分割し，疑わしい集積の再現性を確認することで，偽陽性の原因の一因であるノイズを，病変集積と区別する工夫を考案した[43]。また，レキシコンの整備により，画質と集積形態を系統的に評価する環境を整え，読影者が異なっても系統的に読影するための指針を定めたことも特異度の改善に貢献したと思われる。

過去に報告のあるPEMを用いた乳がん検診では，感度100%，特異度84.5%となっているが，装置が異なり，また対象に有症状者も含まれていることから[44]，当施設の結果と単純に比較することはできない。しかしながら当施設での検討は無症候性の被験者を対象とした，すなわち一般的な乳がん検診に近い母集団から結果を得たという点で，より検診の実態に即してdbPETの診断能を明らかにしたものであると考えられる。

このように，乳房専用PETを乳癌検診に応用する試みは日本を中心に報告され一定の成果をあげているが，現時点では国際的に標準的な乳癌検診法として位置づけられていない点に留意する必要がある。ACR Appropriateness Criteria(2024)では，中間リスク群，高濃度乳房（extremely dense breasts），高リスク群などに対する補助的検診（supplemental screening）においても，乳房専用FDG PETは「Usually Not Appropriate」に分類されている。

その背景には，FDG投与に伴う放射線被ばくの問題が大きい。加えて，偽陽性集積や，DCISおよび糖代謝活性の低い乳癌の見落としなど，診断上の課題もある。また，乳癌死亡率の低減効果を示すエビデンスも確立されていない。さらに，集団検診では費用対効果，検査へのアクセス，検査処理能力（スループット）も重要であり，高額な検査費用に加えて絶食やFDG投与後の待機時間を要するdbPETは，一般的な集団検診への導入には課題が多い。

一方，本邦でdbPETが任意型検診に導入されてきた背景には，アジア人のような比較的小さな乳房に適した装置特性に加え，全身PET/CTによる任意型がん検診がすでに普及しており，同一のFDG投与でdbPETを追加できるという事情がある。全身PET/CT検診自体にも放射線被ばくの問題があるが，日本人を対象としたリスク・ベネフィット解析では，50歳以上において検診による利益が放射線リスクを上回る可能性が示されている[45]。ただし，これは全身PET/CT検診の有効性や正当化が確立されたことを意味するものではなく，慎重な解釈が必要である。

当院の検討では，全身PET/CTにdbPETを追加した検診において，一定の乳癌検出能が示された。今後は，デジタルトモシンセシス（DBT）の簡略化の可能性や，乳房超音波を一次検査ではなく二次検査として位置づけることなど，検査の組み合わせや実施順序を最適化する余地があると考えられる。ただし，これらの検査の省略による診断精度への影響については，前向き研究などによる検証が必要である。

《Ⅵ. 新規分子イメージングトレーサー》

近年ではFDG以外の新規放射性医薬品を用いた機能イメージング研究が急速に進展している。エストロゲン受容体（ER）発現を直接可視化する^{18}F-Fluoroestradiol（FES）を用いたFES dbPETは，FDG低集積のER陽性乳がんの描出[46]，腫瘍内不均一性の描出[47]，さらには浸潤性小葉癌の術前内分泌療法の反応性予測に有用性が探索されている[48]。また，がん関連筋線維芽細胞（CAF）に発現するFAPを標的とした68Ga-FAPI-04を用いたdbPET[49]では，腫瘍対背景比が極めて高く，乳頭侵襲や皮膚浸潤の評価において有望な描出例が報告されている。これらの新規トレーサーは，FDGとは異なる腫瘍の生物学的特性を可視化するものであり，乳房専用PETの役割を，従来の病変検出から腫瘍の分子生物学的評価へと拡張する可能性を有している。

《Ⅶ. 結語》

本邦における保険収載から10年余りを経て，乳房専用PETは，単なる高分解能の局所PETから，読影所見の標準化に向けたレキシコンの整備を経て，保険診療や任意型検診において他の画像診断法を補完する検査へと発展してきた。

今後は，全身PET/CTや造影MRIとの相補的な役割の明確化，検診における低投与量プロトコルの検討，AI・ラジオミクスを活用した治療効果や病理組織学的特徴の予測，さらには新規分子イメージングトレーサーへの応用などを通じて，乳癌診療の精度向上に寄与することが期待される。

一方，半導体検出器やtime-of-flight（TOF）技術の進歩，さらには長軸視野型・全身PET装置の普及により，全身PETの感度や空間分解能は今後も向上すると考えられる。このような技術革新の中で，乳房専用PETには，高い局所空間分解能のみならず，乳房に特化した撮像の簡便性や，局所診断・治療手技との連携といった独自の価値が求められるであろう。

乳房専用PETの物理的特長と臨床的限界を十分に理解し，適切な症例選択のもとで他の画像診断法と相補的に活用することが，今後の乳癌個別化医療における重要な課題である。

《謝　辞》

本稿で紹介した研究および日常診療の遂行にあたり，ご指導・ご協力を賜りました京都大学医学部附属病院の中本裕士先生をはじめ，放射線診断科，放射線部および乳腺外科の関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

《文　献》

1）Satoh Y, Kawamoto M, Kubota K, et al. Clinical practice guidelines for high-resolution breast PET, 2019 edition. Ann Nucl Med 2021;35:406-

414.
2) Miyake KK, Matsumoto K, Inoue M, et al. Performance Evaluation of a New Dedicated Breast PET Scanner Using NEMA NU4-2008 Standards. J Nucl Med 2014;55:1198-203.
3) Satoh Y, Aoyama S, Itagaki K, et al. Comparison of image quality of breast-specific positron emission tomography between opposite-type and ring-shaped systems: insights from Phantom and clinical studies in a Japanese multicenter trial. Ann Nucl Med 2026;40:641-653.
4) Satoh Y, Hanaoka K, Ikegawa C, et al. Organ-Specific Positron Emission Tomography Scanners for Breast Imaging: Comparison between the Performances of Prior and Novel Models. Diagnostics (Basel). 2023;13:1079.
5) Satoh Y, Imai M, Hirata K, et al. Optimal relaxation parameters of dynamic row-action maximum likelihood algorithm and post-smoothing filter for image reconstruction of dedicated breast PET. Ann Nucl Med 2021;35:608-616.
6) Shiiba T, Katakami H, Naito A, et al. Optimizing LM-DRAMA parameters and non-local means filtering to improve small-lesion detectability in SiPM-based TOF breast PET. Phys Eng Sci Med 2025;48:1453-1461.
7) Sasada S, Masumoto N, Goda N, et al. Which type of breast cancers is undetectable on ring-type dedicated breast PET? Clin Imaging 2018;51:186-191.
8) Teixeira SC, Rebolleda JF, Koolen BB, et al. Evaluation of a Hanging-Breast PET System for Primary Tumor Visualization in Patients With Stage I-III Breast Cancer: Comparison With Standard PET/CT. AJR Am J Roentgenol 2016;206:1307-14.
9) Hashimoto R, Akashi-Tanaka S, Watanabe C, et al. Diagnostic performance of dedicated breast positron emission tomography. Breast Cancer 2022;29:1013-1021.
10) O'Connor MK, Tran TD, Swanson TN, et al. Improved visualization of breast tissue on a dedicated breast PET system through ergonomic redesign of the imaging table. EJNMMI Res 2017;7:100.
11) Satoh Y, Ishida J, Inui Y, et al. Can the Newer Model of Breast-Specific Positron Emission Tomography Reduce the "Blind Area"? Diagnostics (Basel) 2024;14:2068.
12) Satoh Y, Motosugi U, Imai M, et al. Evaluation of image quality at the detector's edge of dedicated breast positron emission tomography. EJNMMI Phys 2021;8:5.
13) Satoh Y, Imai M, Ikegawa C, et al. Effect of radioactivity outside the field of view on image quality of dedicated breast positron emission tomography: preliminary phantom and clinical studies. Ann Nucl Med 2022;3:1010-1018.
14) Shiiba T, Katakami H, Naito A, et al. Impact of 18F-FDG radioactivity outside the field of view on image quality in a SiPM-based time-of-flight dedicated breast PET scanner: a phantom study. EJNMMI Phys 2025;12:93.
15) Itagaki K, Miyake KK, Tanoue M, et al. Feasibility of Dedicated Breast Positron Emission Tomography Image Denoising Using a Residual Neural Network. Asia Ocean J Nucl Med Biol. 2023;11:145-157.
16) Iima M, Nakamoto Y, Kanao S, et al. Clinical performance of 2 dedicated PET scanners for breast imaging: initial evaluation. J Nucl Med 2012;53:1534-42.
17) Nakamoto R, Nakamoto Y, Ishimori T, et al. Diagnostic performance of a novel dedicated breast PET scanner with C-shaped ring detectors. Nucl Med Commun 2017;38:388-395.
18) Nishimatsu K, Nakamoto Y, Miyake KK, et al. Higher breast cancer conspicuity on dbPET compared to WB-PET/CT. Eur J Radiol 2017;90:138-145.
19) Miyake KK, Kataoka M, Ishimori T, et al. A Proposed Dedicated Breast PET Lexicon: Standardization of Description and Reporting of Radiotracer Uptake in the Breast. Diagnostics (Basel). 2021;11:1267.
20) Sueoka S, Sasada S, Masumoto N, et al. Performance of dedicated breast positron emission tomography in the detection of small and low-grade breast cancer. Breast Cancer Res Treat 2021;187:125-133.
21) Diao W, Tian F, Jia Z. The prognostic value of SUVmax measuring on primary lesion and ALN by 18F-FDG PET or PET/CT in patients with breast cancer. Eur J Radiol 2018;105:1-7.
22) Graña-López L, Herranz M, Domínguez-Prado I, et al. Dedicated breast PET value to evaluate BI-RADS 4 breast lesions. Eur J Radiol 2018;108:201-207.
23) Narayanan D, Madsen KS, Kalinyak JE, et al. Interpretation of positron emission mammography: feature analysis and rates of malignancy. AJR Am J Roentgenol 2011;196:956-70.
24) Satoh Y, Motosugi U, Omiya Y, et al. Unexpected Abnormal Uptake in the Breasts at Dedicated Breast PET: Incidentally Detected Small Cancers or Nonmalignant Features? AJR Am J Roentgenol 2019;212:443-449.
25) Sasada S, Masumoto N, Kimura Y, et al. Classification of Abnormal Findings on Ring-type Dedicated Breast PET for the Detection of Breast Cancer. Anticancer Res 2020;40:3491-3497.
26) Masumoto N, Kadoya T, Sasada S, et al. Intratumoral heterogeneity on dedicated breast positron emission tomography predicts malignancy grade of breast cancer. Breast Cancer Res Treat 2018;171:315-323.
27) Sakaguchi R, Kataoka M, Kanao S, et al. Distribution pattern of FDG uptake using ring-type dedicated breast PET in comparison to whole-body PET/CT scanning in invasive breast cancer. Ann Nucl Med 2019;33:570-578.
28) Berg WA, Madsen KS, Schilling K, et al. Breast cancer: comparative effectiveness of positron emission mammography and MR imaging in presurgical planning for the ipsilateral breast. Radiology 2011;258:59-72.
29) Fowler AM, Miyake KK, Nakamoto Y. Clinical Applications of Dedicated Breast Positron

Emission Tomography. PET Clin 2024;19:105-117.
30) Coudert B, Pierga JY, Mouret-Reynier MA, et al. Use of [(18)F]-FDG PET to predict response to neoadjuvant trastuzumab and docetaxel in patients with HER2-positive breast cancer, and addition of bevacizumab to neoadjuvant trastuzumab and docetaxel in [(18)F]-FDG PET-predicted non-responders (AVATAXHER): an open-label, randomised phase 2 trial. Lancet Oncol 2014;15:1493-1502.
31) Pérez-García JM, Gebhart G, Ruiz Borrego M, et al. PHERGain steering committee and trial investigators. Chemotherapy de-escalation using an 18F-FDG-PET-based pathological response-adapted strategy in patients with HER2-positive early breast cancer (PHERGain): a multicentre, randomised, open-label, non-comparative, phase 2 trial. Lancet Oncol 2021;22:858-871.
32) Diwanji D, Onishi N, Hathi DK, et al. 18F-FDG Dedicated Breast PET Complementary to Breast MRI for Evaluating Early Response to Neoadjuvant Chemotherapy. Radiol Imaging Cancer 2024;6:e230082.
33) Noritake M, Narui K, Kaneta T, et al. Evaluation of the Response to Breast Cancer Neoadjuvant Chemotherapy Using 18F-FDG Positron Emission Mammography Compared With Whole-Body 18F-FDG PET: A Prospective Observational Study. Clin Nucl Med 2017;42:169-175.
34) Sasada S, Masumoto N, Goda N, et al. Dedicated breast PET for detecting residual disease after neoadjuvant chemotherapy in operable breast cancer: A prospective cohort study. Eur J Surg Oncol 2018;44:444-448.
35) Koyasu H, Goshima S, Noda Y, et al. The feasibility of dedicated breast PET for the assessment of residual tumor after neoadjuvant chemotherapy. Jpn J Radiol 2019;37:81-87.
36) Lenaerts M, de Mooij CM, Houwers JB, et al. Prognostic value of molecular and radiologic characteristics on dedicated breast [18F]FDG PET/MRI in breast cancer patients treated with neoadjuvant chemo(targeted) therapy: a retrospective cohort study. EJNMMI Res 2025;16:6.
37) Minamimoto R, Senda M, Uno K, et al. Performance profile of FDG-PET and PET/CT for cancer screening on the basis of a Japanese Nationwide Survey. Ann Nucl Med 2007;21:481-98.
38) Kojima S, Zhou B, Teramukai S, et al. Cancer screening of healthy volunteers using whole-body 18F-FDG-PET scans: The Nishidai clinic study. Eur J Cancer 2007;43:1842-8.
39) Terauchi T, Murano T, Daisaki H, et al. Evaluation of whole-body cancer screening using 18F-2-deoxy-2-fluoro-D-glucose positron emission tomography: a preliminary report. Ann Nucl Med 2008;22:379-85.
40) Yuge S, Miyake KK, Ishimori T, et al. Performance of dedicated breast PET in breast cancer screening: comparison with digital mammography plus digital breast tomosynthesis and ultrasound. Ann Nucl Med 2023;37:479-493.
41) Sagara Y, Mallory MA, Wong S, et al. Survival Benefit of Breast Surgery for Low-Grade Ductal Carcinoma In Situ: A Population-Based Cohort Study. JAMA Surg 2015;150:739-45.
42) Graña-López L, Herranz M, Domínguez-Prado I, et al. Can dedicated breast PET help to reduce overdiagnosis and overtreatment by differentiating between indolent and potentially aggressive ductal carcinoma in situ? Eur Radiol 2020;30:514-522.
43) Yuge S, Miyake KK, Ishimori T, et al. Reproducibility assessment of uptake on dedicated breast PET for noise discrimination. Ann Nucl Med 2023;37:121-130.
44) Yamamoto Y, Tasaki Y, Kuwada Y, et al: A preliminary report of breast cancer screening by positron emission mammography. Ann Nucl Med 2016;30:130-7.
45) Murano T, Minamimoto R, Senda M, et al. Radiation exposure and risk-benefit analysis in cancer screening using FDG-PET: results of a Japanese nationwide survey. Ann Nucl Med 2011;25:657-66.
46) Jones EF, Ray KM, Li W, et al. Initial experience of dedicated breast PET imaging of ER+ breast cancers using [F-18] fluoroestradiol. npj Breast Cancer 2019;5:12.
47) Kitano Y, Miyake KK, Shimizu Y, et al. Intratumoral Heterogeneity of Primary Breast Cancer on 1 8 F-FES PET/CT and dbPET Anticipated a Heterogeneous Response to Chemotherapy. Clin Nucl Med 2025;50:541-543.
48) Switalla KM, Onishi N, Jones EF, et al. A prospective single-arm pilot study evaluating [F-18]fluoroestradiol dedicated breast PET in invasive lobular carcinoma after neoadjuvant endocrine therapy. Breast Cancer Research 2026;28:93.
49) Has Simsek D, Oflas M, Yilmaz R, et al. Combination of 6 8 Ga-FAPI-0 4 and Dedicated Breast PET (MAMMI PET) Outperformed Breast MRI and 18 F-FDG PET/CT by Revealing Nipple and Skin Involvement of Breast Cancer. Clin Nucl Med 2024;49:e290-e291.

リレー講座

今日の認知症診療を考える総括
画像バイオマーカーが切り拓く認知症の個別化医療

Imaging Biomarkers Paving the Way for Personalized Medicine in Dementia

松田 博史 MATSUDA Hiroshi

Key words：Imaging biomarkers; Amyloid PET; Blood biomarkers; Artificial intelligence; Personalized medicine

《はじめに》

認知症診療はこの20年間で大きく変化した。かつて画像診断の役割は，正常圧水頭症や慢性硬膜下血腫など認知機能障害を来す他疾患を除外するとともに，MRIでの海馬萎縮や脳血流SPECT・FDG-PETでの後部帯状回から楔前部，頭頂側頭連合野の機能低下を評価し，アルツハイマー病の臨床診断を支援することであった。しかし，これらは神経変性の結果を観察しているに過ぎず，生体内で病理そのものを評価することはできなかった。

その後，アミロイドPETやタウPETの実用化，さらに血液バイオマーカーの進歩により，アルツハイマー病は「症候群」ではなく「生物学的疾患」として診断される時代へ移行した[1]。加えて抗アミロイドβ（Aβ）抗体薬が臨床導入され，画像診断は診断支援だけでなく，治療適応の判定，安全性評価，治療効果判定にも不可欠な役割を担うようになった。

本稿では，認知症画像診断の変遷を振り返りながら，MRI，脳血流SPECT，PETが果たす役割を整理し，人工知能（Artificial Intelligence; AI）や血液バイオマーカーを含めた今後の認知症診療について考察する。

《認知症診療のパラダイムシフト》

認知症診療の最大の変化は，「症候学」から「病理診断」へと診断概念が変わったことである。従来，アルツハイマー病は認知機能検査や臨床症状を基盤として診断され，生前診断はあくまで「probable Alzheimer's disease」であった。しかし，アミロイドPETの登場により，生体内でAβ病理を直接評価できるようになり，さらにタウPETや血液バイオマーカーの進歩によって，分子病理に基づく診断が可能となった。

この流れを象徴するのが，2018年にNIA-AAが提唱したAT（N）フレームワークである[2)3)]。A（アミロイド病理），T（タウ病理），N（神経変性）を独立したバイオマーカーとして評価し，その組み合わせから病態を理解する考え方であり，アルツハイマー病を臨床症状ではなく生物学的病態として定義した点で画期的であった。

《MRI・脳血流SPECT・PETは何を見ているのか》

MRI，脳血流SPECT，PETは，同じ認知症を対象としながらも評価している生物学的現象は異なる。したがって，「どの検査が優れているか」を論じるのではなく，それぞれの特徴を理解し，相補的に活用することが重要である。

アルツハイマー病では，Aβ沈着が最も早期に始まり，その後タウ病理が進展し，シナプス障害，神経細胞脱落，脳萎縮，認知機能低下へと長い時間をかけて進行する。この時間軸の中で，最も早期の病理変化を描出するのがアミロイドPETである。Aβ病理を直接可視化できる唯一の画像検査であり，疾患修飾療法時代の中心的画像バイオマーカーとなっている。一方，タウPETは神経細胞障害との関連が強く，病期や疾患進行を反映する画像として期待されている。

脳血流SPECTは神経血管カップリングを利用し，神経細胞機能を評価する検査である。アルツハイマー病では後部帯状回から楔前部，頭頂側頭連合野の血流低下が特徴的であり，MRIで萎縮が明らかになる以前から異常を示すことが少なくない。また，レビー小体型認知症や前頭側頭型認知症では，それぞれ特徴的な血流分布を示すため，鑑別診断においても現在なお高い臨床的価値を有している。

MRIは神経細胞脱落の結果として生じた形態変化を評価する検査である。海馬や内側側頭葉萎縮の評価に加え，白質病変，微小出血，脳梗塞，正常圧水頭症などの合併病変を同時に評価できることが大きな利点である。

したがって，認知症画像診断は，病理（PET）→神経機能（SPECT）→神経変性（MRI）という時間軸を理解した上で，それぞれの画像バイオマーカーを適切に組み合わせることが重要である。

《AT（N）時代の画像診断と疾患修飾療法》

AT（N）フレームワークは，アルツハイマー病を臨床症状ではなく，生物学的病態に基づいて評価する考え方であり，現在の認知症診療の基本となっている。一方，脳血流SPECTはAT（N）には含まれていないものの，神経細胞機能を反映する機能画像としてFDG-PETと同様の情報を提供し，

日本医科大学健診医療センター治験・臨床研究推進室 〒113-0022 東京都文京区千駄木1-12-15
TEL：070-7036-0727 E-mail：mhiroshilab@gmail.com
Clinical Trials and Research Promotion Office, Clinical Imaging Center for Healthcare, Nippon Medical School



図1　未来の認知症診療（血液バイオマーカー・画像バイオマーカー・AIの融合）
血液バイオマーカーはスクリーニング，画像バイオマーカーは病態の可視化，AIは統合解析を行う。早期発見から治療，モニタリングまでのシームレスな連携により，個別化医療を実現する。画像・血液・臨床情報の継続的な蓄積が，AIの精度向上と新たなバイオマーカーの創出に繋がる。

実臨床では依然として重要な位置を占めている。AT(N)は研究のための概念であるが，日常診療ではMRI，SPECT，PETを総合的に評価し，患者の病態を多面的に理解する姿勢が重要である。

AT(N)を解釈するうえで注意すべき点は，アミロイドPET陽性が直ちに認知症を意味するわけではないことである。アミロイド沈着は認知症発症の10～20年前から始まるため，高齢健常者でも陽性例は少なくない。したがって，A陽性のみで認知機能低下の原因を判断することはできず，MRIやSPECTによる神経変性・神経機能の評価を併せて解釈する必要がある。

また，高齢者ではアルツハイマー病に加えて脳小血管病，レビー小体病，TDP-43病理など複数の病理が共存する混合病理が一般的となっている。このような症例では，一つの画像検査のみで病態を説明することは困難であり，各モダリティが提供する情報を統合して評価することが重要である。画像診断は複雑な病態を理解するための共通言語として，その重要性をさらに増している。

抗体療法の導入により，画像診断医の役割も大きく変化した。抗Aβ抗体薬では，治療開始前にAβ病理を確認することが必須であり，アミロイドPETは最も信頼性の高い画像バイオマーカーとして位置づけられる。一方，MRIは除外診断のみならず，アミロイド関連画像異常（amyloid-related imaging abnormalities：ARIA）の評価を担う検査となった[4]。特にFLAIR画像によるARIA-E，T2*強調画像やSWIによるARIA-Hの早期発見は，安全な治療継続のため極めて重要である。

さらに，画像診断は「陽性・陰性」を判定するだけでなく，病態を定量的に評価する時代へ移行している。MRIでは海馬容積や皮質厚，PETではCentiloid，SPECTではZ-score解析などの定量評価が日常診療へ導入されつつあり，治療効果や病態進行を客観的に評価する指標として期待されている。

《AI・血液バイオマーカーが拓く未来の認知症診療》

近年，血液バイオマーカーは著しい進歩を遂げており，血漿Aβ42/40比やリン酸化タウ（p-tau181，p-tau217，p-tau231），さらに神経細胞障害を反映するneurofilament light chain（NfL）やglial fibrillary acidic protein（GFAP）がアルツハイマー病病理を高い精度で反映することが報告されている[5]。今後は一次スクリーニングとして広く普及すると考えられるが，脳萎縮，脳血管障害，正常圧水頭症，ARIAなどは評価できず，画像診断の重要性が失われることはない。血液バイオマーカーと画像診断は競合するものではなく，それぞれの長所を生かした相補的な関係にある。

AIの進歩も認知症画像診断に新たな可能性をもたらしている。深層学習を用いた解析では，ルーチンMRIからアミロイド病理やタウ病理，さらには将来の認知機能低下を推定する研究が進められている[6][7]。また，Explainable AIの発展により，AIが診断根拠とした画像特徴を可視化できるようになり，画像診断医がその妥当性を検証すること

も可能となりつつある。

将来的には，MRIによる神経変性，脳血流SPECTやFDG-PETによる神経機能，アミロイドPET・タウPETによる分子病理，さらに血液バイオマーカーや神経心理学的検査をAIが統合解析し，患者ごとの病態を総合的に評価する時代が到来すると考えられる。しかし，そのような時代においても，画像診断医の役割が失われることはない。AIが提示した情報を臨床経過や他の検査結果と統合し，最終的な診療へ結び付けることは医師にしか担えない重要な役割である。

《おわりに》

認知症診療は，症候学に基づく診断から，生物学的病態を評価する時代へと大きく発展した。MRI，脳血流SPECT，PETは，それぞれ神経変性，神経機能，分子病理という異なる側面を評価する相補的な画像バイオマーカーであり，患者ごとの病態に応じて適切に組み合わせることが重要である。

今後は，血液バイオマーカーが初期スクリーニングを担い，MRIが神経変性や血管病変，ARIAを評価し，脳血流SPECTやFDG-PETが神経機能障害の評価や認知症の鑑別診断を補完し，抗体治療の適応判断など必要に応じてアミロイドPETやタウPETが病理を確認するという診療体系がさらに普及すると考えられる。そして，AIがこれらの多様な情報を統合解析することで，真の個別化医療が実現することが期待される。

画像診断は単なる補助検査ではなく，病態を可視化し，治療を支え，新たな画像バイオマーカーを創出する基盤技術である。認知症診療が新たな時代を迎えた今，画像診断医には，画像バイオマーカーの専門家として，多職種と連携しながら個別化医療を推進していく役割がこれまで以上に期待されている。

《文　献》

1）Therriault J, Schindler SE, Salvadó G, et al. Biomarker-based staging of Alzheimer disease: rationale and clinical applications. Nat Rev Neurol. 2024;20:232-244.
2）Jack CR Jr, Bennett DA, Blennow K, et al. NIA-AA Research Framework: Toward a biological definition of Alzheimer's disease. Alzheimers Dement. 2018;14:535-562.
3）Jack CR Jr, Andrews JS, Beach TG, et al. Revised criteria for diagnosis and staging of Alzheimer's disease: Alzheimer's Association Workgroup. Alzheimers Dement. 2024;20:5143-5169.
4）Cogswell PM, Andrews TJ, Barakos JA, et al. Alzheimer Disease Anti-Amyloid Immunotherapies: Imaging Recommendations and Practice Considerations for Monitoring of Amyloid-Related Imaging Abnormalities. AJNR Am J Neuroradiol. 2025;46:24-32.
5）Mielke MM, Fowler NR. Alzheimer disease blood biomarkers: considerations for population-level use. Nat Rev Neurol. 2024;20:495-504.
6）Christodoulou RC, Woodward A, Pitsillos R, et al. Artificial Intelligence in Alzheimer's disease diagnosis and prognosis using PET-MRI: A narrative review of high-impact literature post-Tauvid approval. J Clin Med. 2025;14:5913.
7）Zhang R, Sheng J, Zhang Q, et al. A review of multimodal fusion-based deep learning for Alzheimer's disease. Neuroscience. 2025;576:80-95.

編集後記

本年は，１年間を通して「今日の認知症診療を考える」をテーマにリレー講座をお届けしてまいりました。ご執筆いただいた諸先生方には，それぞれのご専門の立場から貴重な知見をご解説いただき，私自身も大変多くのことを学ばせていただきました。この場をお借りして，改めて心より御礼申し上げます。

本号では，松田先生に本講座の総括をご執筆いただき，認知症診療の現在と未来についてご解説いただきました。私たちは日頃，目の前の画像所見をどのように読み取り，診断へ結び付けるかに意識が向きがちです。日々の画像診断が認知症診療全体の中でどのような役割を担い，その先の治療や患者さんの生活にどのようにつながっていくのか，さらには今後の認知症診療がどのように変化していくのかを教えていただき，改めて考える貴重な機会となりました。

本リレー講座が，読者の皆様にとって認知症診療への理解を深め，新たな知見を得る一助となりましたら幸いです。

来年のリレー講座は，福島県立医科大学の福島賢慈先生にご担当いただき，循環器領域をテーマにお届けする予定です。私も大変楽しみにしております！

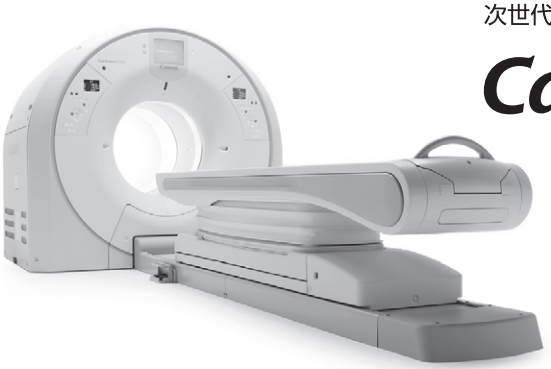
今後も，日々の診療に役立つだけでなく，各領域の全体像や将来展望を見渡せるような特集を企画してまいりたいと考えております。取り上げてほしいテーマなどがございましたら，ご意見をお寄せください。

本年も『臨床核医学』をご愛読いただき，誠にありがとうございました。皆様どうぞ良いお年をお迎えください。

編集委員長　須山 淳平

Canon

次世代デジタル PET-CT



Cartesion Prime

Luminous Edition

［一般的名称］X線CT組合せ型ポジトロンCT装置
［販売名］PET-CTスキャナ Cartesion Prime PCD-1000A
［認証番号］301ACBZX00003000

G000101

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

核医学装置QC用線源

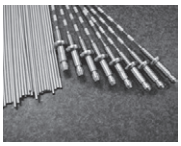
装置のデータ精度に心配ありませんか？

ガンマカメラ検出器 精度管理用線源



^{57}Co 370MBq

PET検出器用校正線源



^{68}Ge

ドーズキャリブレータ用 チェック線源



^{68}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 CHIYODA TECHNOL
〒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

SPECTRUM DYNAMICS MEDICAL

Changing the Shape of Nuclear Medicine

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

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／303ADBZX00054000
フルディジタル半導体全身用ガンマカメラ VERITON／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
infojp@spectrum-dynamics.com
www.spectrum-dynamics.com



放射性医薬品／アミロイドイメージング剤　処方箋医薬品[注)]　薬価基準収載

アミヴィッド®静注

AMYViD® Injection

AMYViD®
Florbetapir F 18 Injection

放射性医薬品基準フロルベタピル（^{18}F）注射液

注)注意－医師等の処方箋により使用すること。

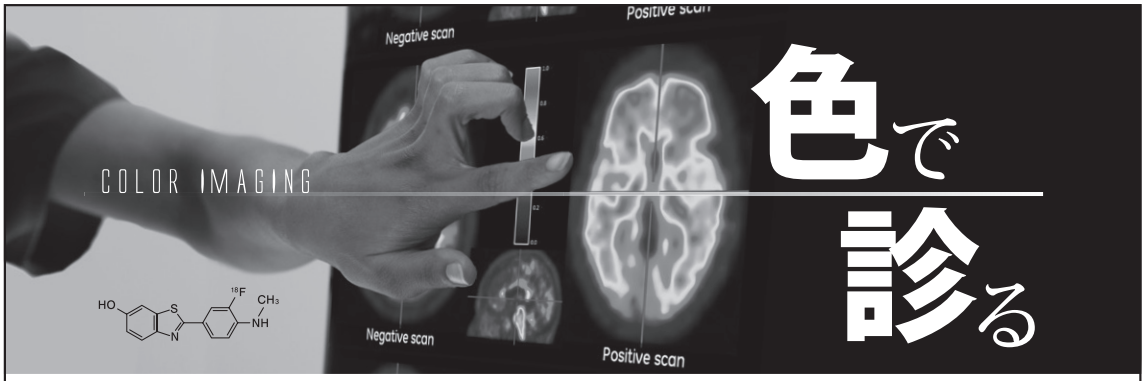
※効能又は効果、用法及び用量、警告・禁忌を含む使用上の注意等の詳細については、
電子添文をご参照ください。

アミヴィッド、AMYViDはAvid Radiopharmaceuticals, Inc. の登録商標です。

製造販売元
PDRファーマ株式会社
文献請求先及び問い合わせ先　TEL 03-3538-3624
〒104-0031 東京都中央区京橋2-14-1 兼松ビルディング

2024年6月改訂

nihon medi+physics



放射性医薬品・脳疾患診断薬　薬価基準収載

処方箋医薬品注）

ビザミル®静注

放射性医薬品基準フルテメタモル（18F）注射液　®：登録商標

注）注意―医師等の処方箋により使用すること

**2024年11月改訂（第5版）
*2024年 8月改訂（第4版）

2. 禁忌（次の患者には投与しないこと）

本剤の成分に対して過敏症の既往歴がある患者

*4. 効能又は効果

○アルツハイマー病による軽度認知障害又は認知症が疑われる患者の脳内アミロイドベータプラークの可視化
○抗アミロイドベータ抗体薬投与後の脳内アミロイドベータプラークの可視化

*5. 効能又は効果に関連する注意

〈アルツハイマー病による軽度認知障害又は認知症が疑われる患者の脳内アミロイドベータプラークの可視化〉
アルツハイマー病による軽度認知障害又は認知症の発症前診断を目的として無症候者に対して本剤を用いたPET検査を実施しないこと。アルツハイマー病による軽度認知障害又は認知症の発症予測に関する有用性は確立していない。

6. 用法及び用量

通常，本剤1バイアル（120～370MBq）を静脈内投与し，投与後60～120分に撮像を開始する。

7. 用法及び用量に関連する注意

撮像時間は，投与量，撮像機器，データ収集条件，画像再構成のアルゴリズム及びパラメータ等を考慮して決定すること。適切にバリデーションされたPET装置で撮像を行う場合，投与量185MBqにおける標準的な撮像時間は20分間である。

*8. 重要な基本的注意

〈効能共通〉
8.1 診断上の有益性が被曝による不利益を上回ると判断される場合のみ投与すること。
8.2 本剤を用いて撮像したPET画像の読影は，本剤を用いたPET検査に関する読影訓練を受けた医師が行うこと。

〈アルツハイマー病による軽度認知障害又は認知症が疑われる患者の脳内アミロイドベータプラークの可視化〉
8.3 アルツハイマー病による軽度認知障害又は認知症の診断は，軽度認知障害及び認知症に関する十分な知識と経験を有する医師が，本剤を用いたPET検査所見に加えて，他の関連する検査結果や臨床症状等に基づき総合的に判断すること。

9. 特定の背景を有する患者に関する注意

9.5 妊婦
妊婦又は妊娠している可能性のある女性には，診断上の有益性が被曝による不利益を上回ると判断される場合にのみ投与すること。
9.6 授乳婦
診断上の有益性及び母乳栄養の有益性を考慮し，授乳の継続又は中止を検討すること。
9.7 小児等
小児等を対象とした臨床試験は実施していない。
9.8 高齢者
患者の状態を十分に観察しながら慎重に投与すること。一般に生理機能が低下している。

11. 副作用

次の副作用があらわれることがあるので，観察を十分に行い，異常が認められた場合には投与を中止するなど適切な処置を行うこと。
11.1 重大な副作用
11.1.1 アナフィラキシー（0.2%）
アナフィラキシーを起こすことがあるので問診を十分に行い，投与後は十分に観察し，顔面潮紅，呼吸困難及び胸部圧迫感等の症状が認められた場合には適切な処置を行うこと。
11.2 その他の副作用

	1～5%未満	0.5～1%未満
循環器	潮紅，血圧上昇	——
消化器	悪心	——
精神神経系	——	頭痛，浮動性めまい
その他	胸部不快感	——

14. 適用上の注意

14.1 薬剤投与時の注意
本剤の投与ルート内の残留を防ぐため，本剤の投与に引き続いて日局生理食塩液を急速静注する。

15. その他の注意

15.2 非臨床試験に基づく情報
遺伝毒性試験のうち，細菌を用いる復帰突然変異試験及びマウスリンフォーマ*Tk*試験において，代謝活性化系の存在下で陽性の結果であった。

20. 取扱い上の注意

本剤は，医療法その他の放射線防護に関する法令，関連する告示及び通知等を遵守し，適正に使用すること。

21. 承認条件

医薬品リスク管理計画を策定の上，適切に実施すること。

22. 包装

185MBq（2mL）[1バイアル]

24. 文献請求先及び問い合わせ先

日本メジフィジックス株式会社 メディカルインフォメーション担当
〒136-0075 東京都江東区新砂3丁目4番10号
0120-07-6941（フリーダイヤル）

**25. 保険給付上の注意

本剤は，効能又は効果として「アルツハイマー病による軽度認知障害及び軽度の認知症の進行抑制」を有する医薬品に係る厚生労働省の定める最適使用推進ガイドラインに沿って実施される，アミロイドPET検査に使用される場合に限り，保険適用される。

26. 製造販売業者等

26.1 製造販売元
日本メジフィジックス株式会社　東京都江東区新砂3丁目4番10号

製造販売元
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
文献請求先及び問い合わせ先 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
PET検査について紹介しています。
https://www.nmp.co.jp

2025年4月改訂

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　須山淳平（発行者）　事務局長：中西章仁　担当：坂倉智紀，安達優子
編集事務局　〒181-8611　杏林大学医学部放射線医学教室
TEL. 0422-47-5511　FAX. 0422-76-0861　E-mail：nmkyorin@hotmail.com
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，
鳥井原彰，岩渕　雄，稲木杏吏，伊藤公輝，山崎香奈
2026年11月20日発行