

^{18}F -FDG PET 基礎読本

目 次

・刊行に寄せて

佐々木康人・iii

遠藤 啓吾・iv

・序

渡邊 直行・v

I. PET 原理と画像化の基礎

1. PET イメージングを支える基本的な科学と技術	4
1.1 陽電子 (Positron) と消滅放射線 (Annihilation Radiation) ・ 4	
1.2 同時計数 (Coincidence Detection) ・ 5	
1.3 PET イメージングプロセス ・ 7	
1.4 PET 用放射性同位元素 ・ 8	
2. PET 検出器	10
2.1 検出器配置 ・ 10	
2.2 ブロック検出器 (Block Detector) ・ 10	
2.3 シンチレーション結晶 (Scintillation Crystals) ・ 11	
2.4 2D モードと 3D モード ・ 13	
2.5 タイムオブフライト (Time of Flight, TOF) ・ 16	
2.6 小動物用前臨床 PET 装置 ・ 17	
3. 補正 (Correction)	19
3.1 偶発同時計数補正 (Randoms Correction) ・ 19	
3.2 不感時間補正 (Dead Time Correction) ・ 20	
3.3 散乱補正 (Scatter Correction) ・ 21	

3.4	ノーマリゼーション (Normalization) ・ 22	
3.5	減弱補正 (Attenuation Correction) ・ 23	
3.6	部分体積効果に対する補正 ・ 26	
4.	画像再構成 (Image Reconstruction)	28
4.1	フィルタ補正逆投影法 (Filtered Back Projection、FBP) ・ 28	
4.2	逐次近似画像再構成 (Iterative Reconstruction) ; 一般原則 ・ 29	
4.3	3D モード収集における画像再構成 ・ 36	
5.	画像表示 (Image Display)	39
5.1	PET 画像の表示 ・ 39	
5.2	CT 画像の表示 ・ 42	
5.3	PET/CT 画像 ・ 43	
5.4	最大密度投影画像 (Maximum Intensity Projection Image、MIP) ・ 44	
6.	定量 (Quantification)	46
6.1	計測された放射性崩壊事象から放射能濃度まで ・ 46	
6.2	動態モデリング (Kinetic Modelling) ・ 47	
6.3	標準摂取率 (Standardized Uptake Value、SUV) ・ 49	
7.	システム性能 (System Performance)	52
7.1	空間分解能 (Spatial Resolution) ・ 52	
7.2	感度 (Sensitivity) ・ 55	
7.3	計数率特性 (Count Rate Performance) ・ 56	
7.4	散乱分画 (Scatter Fraction) ・ 57	
8.	品質保証 (Quality Assurance、QA)	59
8.1	品質保証 (Quality Assurance、QA) ・ 59	
8.2	品質管理試験 (Quality Control Test) ・ 59	
8.3	PET イメージングで使用するその他の装置の品質管理 ・ 65	
9.	アーチファクト (Artefacts)	67
9.1	PET アーチファクト ・ 67	
9.2	PET/CT アーチファクト ・ 69	

Ⅱ. サイクロトロンと放射性医薬品製造の基礎

1.	PET 用放射性同位元素とその製造	78
2.	サイクロトロン	83
2.1	サイクロトロンの原理・84	
3.	放射性同位元素の製造	97
3.1	サイクロトロンのスタートアップ・97	
3.2	前照射（オプション）・97	
3.3	本照射（Main Irradiation）・98	
3.4	サイクロトロンのシャットダウン・100	
3.5	放射能収率（Activity Production Yields）・100	
3.6	$^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ ジェネレータによる放射能収率との比較と PET 用ジェネレータ・102	
4.	PET 用放射性医薬品の放射化学	105
4.1	PET 用放射性医薬品の製造や合成における基本段階・105	
4.2	^{18}F -FDG 製造・107	
4.3	臨床研究レベルの PET 用放射性医薬品の製造と合成・109	
4.4	標識収量（Labelling Yields）・111	
4.5	クロマトグラフィ（Chromatography）・111	
4.6	品質管理（Quality Control、QC）・113	
5.	放射性医薬品の供給	117
5.1	サイクロトロンの問題・117	
5.2	合成のエラー・118	
5.3	品質管理（QC）のエラー・118	
5.4	輸送の問題・118	
5.5	連絡体制と対応マニュアル・118	
5.6	定期的で予防的なメンテナンス・119	
5.7	サイクロトロンに必要な人員と費用・119	
5.8	必要な放射能の見積もりと製造計画・120	
6.	放射線安全	123

Ⅲ. PET 臨床とがん

1.	PET 検査における融合画像の必要性	127
1.1	PET と CT の融合画像の臨床的必要性・127	
1.2	画像融合の技術・128	
2.	^{18}F -FDG によるがんの画像化	132
2.1	^{18}F -FDG によるがん細胞の PET イメージング・134	
2.2	^{18}F -FDG の正常分布・140	
2.3	がん患者マネージメントにおける ^{18}F -FDG 以外の放射性医薬品・153	
3.	臨床現場での ^{18}F -FDG PET 検査	159
3.1	がんの有無を確認するために ^{18}F -FDG PET 検査は有用か？・159	
3.2	がんの TNM 臨床分類と病期分類・160	
3.3	がん患者の治療前の TNM 臨床分類への ^{18}F -FDG PET 検査の利用・164	
3.4	がん患者の治療後のマネージメントのための ^{18}F -FDG PET 検査の利用・165	
3.5	がん患者の治療中の ^{18}F -FDG PET 検査の利用・167	
3.6	放射線治療計画への PET/CT 検査の利用・170	
3.7	検診のツールとしての ^{18}F -FDG PET/CT 検査・171	
4.	PET/CT 装置における CT の付加価値	173
5.	さまざまな腫瘍における ^{18}F -FDG PET 検査	176
5.1	肺がん (Lung Cancer)・176	
5.2	リンパ腫 (Lymphoma)・182	
5.3	結腸・直腸がん (Colorectal Cancer)・187	
5.4	食道がん (Oesophageal Cancer)・189	
5.5	胃がん (Gastric Carcinoma)・190	
5.6	頭頸部がん (Head and Neck Cancer)・190	
5.7	乳がん (Breast Cancer)・194	
5.8	婦人科がん (Gynaecological Cancers)・195	
5.9	悪性黒色腫 (Melanoma)・196	
5.10	甲状腺がん (Thyroid Cancer)・199	
5.11	精巣がん (Testicular Cancer)・199	
5.12	腎臓がん (Renal Cancer)・201	
5.13	膀胱がん (Bladder Cancer)・202	

5.14	前立腺がん (Prostate Cancer) ・ 202	
5.15	肉腫 (Sarcoma) ・ 202	
5.16	肝胆膵がん (Hepatobiliary and Pancreatic Cancers) ・ 204	
5.17	脳腫瘍 (Brain Tumours) ・ 207	
6.	臨床 PET 検査の心臓病学と神経病学などへの応用	210
6.1	心筋 PET 検査 ・ 210	
6.2	脳 PET 検査 ・ 213	
6.3	感染と炎症イメージング ・ 220	
IV. PET 検査マネジメント		
1.	PET 検査の予定づくりと検査の流れの課題	225
1.1	投与放射線量準備 ・ 226	
1.2	PET 検査の予定づくり ・ 229	
1.3	準備 (投与) 室・待機室 ・ 231	
2.	PET 装置の品質管理 (Quality Control、QC)	233
2.1	毎日の品質管理 (QC) の手順 ・ 233	
2.2	定期的な品質管理 (QC) の手順 ・ 233	
3.	^{18}F -FDG による全身腫瘍 PET 検査	235
3.1	^{18}F -FDG PET 腫瘍検査に対する患者の準備 ・ 236	
3.2	^{18}F -FDG 投与放射線量、投与方法、 ^{18}F -FDG 分布時間 ・ 251	
3.3	データ収集手順 ・ 255	
4.	PET/CT 装置における CT 操作	263
4.1	PET/CT 装置を使用する際の規則とトレーニングの課題 ・ 263	
4.2	CT データ収集パラメータ ・ 264	
4.3	患者の動きと呼吸状態 ・ 267	
5.	PET/CT に特有な放射線安全	270
5.1	PET 装置と CT 装置における放射線源の相違について ・ 270	
5.2	CT イメージングにおける患者への放射線量 ・ 270	
5.3	CT におけるスタッフへの放射線量 ・ 273	
5.4	一般公衆への放射線被ばく ・ 276	

6.	画像再構成と画像表示	279
6.1	画像再構成・279	
6.2	画像表示・282	
7.	患者の退出手順	286
8.	^{18}F -FDG 脳 PET 検査マネージメント	288
8.1	^{18}F -FDG 脳 PET 検査の適用・288	
8.2	患者の準備・289	
8.3	分布時間・291	
8.4	位置決めとデータ収集・292	
8.5	画像再構成と処理・293	
8.6	画像表示・294	
9.	^{18}F -FDG 心筋 PET 検査マネージメント	295
9.1	心筋バイアビリティ PET 検査に対する患者の準備・297	
9.2	心筋 PET 検査に対する患者の位置決め・298	
9.3	放射性医薬品の放射エネルギー・299	
9.4	集積（分布）時間・300	
9.5	心筋 PET 検査に対するデータ収集パラメータとプロトコル・300	
9.6	画像再構成と処理・305	

V. ^{18}F -FDG 画像所見の基本的な考え方

1.	腎・尿路系 (Renal Tracts)	309
1.1	腎臓 (Kidneys)・309	
1.2	尿管 (Ureters)・311	
1.3	膀胱 (Bladder)・311	
1.4	尿路変更術後 (Urinary Diversion)・311	
2.	心血管系 (Cardiovascular System)	313
2.1	心臓 (Heart)・313	
2.2	血管 (Blood Vessels)・315	
3.	消化器系 (Gastrointestinal Tract)	317
3.1	食道 (Oesophagus)・317	

3.2	胃 (Stomach) ・ 318	
3.3	小腸 (Small Intestine) ・ 319	
3.4	結腸・直腸 (Colon and Rectum, Large Bowel) ・ 319	
3.5	肝臓 (Liver) ・ 322	
3.6	胃瘻造設と人工肛門 (Gastrostomy and Colostomy) ・ 323	
4.	筋・骨格系 (Musculo-Skeletal System)	324
4.1	褐色脂肪 (Brown Fat) ・ 324	
4.2	骨格筋 (Skeletal Muscle) ・ 326	
4.3	骨 (Bone) ・ 332	
4.4	関節 (Joints) ・ 333	
5.	生殖器 (Generative Organ)	335
5.1	女性の生殖器 (Female Generative Organ) ・ 335	
5.2	男性の生殖器 (Male Generative Organ) ・ 337	
6.	造血系 (Hematopoietic System)	338
6.1	脾臓・骨髄 (Spleen, Bone Marrow) ・ 338	
7.	リンパ系 (Lymphoid System)	339
7.1	ワルダイエル輪 (Waldeyers Ring) ・ 339	
7.2	肺門・縦隔リンパ節 (Hilar and Mediastinal Lymph Nodes) ・ 341	
7.3	HIV による持続性全身性リンパ節腫脹 (PGL) ・ 342	
8.	内分泌系 (Endocrine System)	343
8.1	甲状腺 (Thyroid) ・ 343	
8.2	副腎 (Adrenals) ・ 343	
9.	¹⁸ F-FDG 集積が弱い悪性腫瘍	344
10.	¹⁸ F-FDG 集積が強い良性腫瘍	346
10.1	良性耳下腺腫瘍 (Benign Parotid Tumours) ・ 346	
10.2	良性甲状腺腫瘍 (Benign Thyroid Tumours) ・ 346	
10.3	良性大腸ポリープ (Benign Colorectal Polyps) ・ 346	
10.4	乳腺 (Breasts) ・ 346	
10.5	前立腺腺腫 (Prostate Adenomas) ・ 347	

11. 強い ^{18}F -FDG 集積を引き起こす炎症組織	348
12. ^{18}F -FDG 集積が強い肉芽腫性疾患	350
13. 治療による影響	352
13.1 外科的介入（処置）・352	
13.2 化学療法後・355	
13.3 放射線治療・355	
14. 悪性腫瘍病変への ^{18}F -FDG 集積の程度に影響する要因	357
15. アーチファクト（Artefacts）	358
16. ピットフォールに嵌らないこと	362

VI. PET 検査の放射線安全

1. PET 用放射性同位元素からの放射線	365
2. CT 装置からの放射線	368
3. PET 用放射性医薬品の取扱いと投与された患者による放射線被ばく	371
3.1 バイアルと分注・371	
3.2 放射線源となる ^{18}F -FDG が投与された患者・377	
3.3 PET 施設 / 部門における他の放射線源・378	
4. PET 放射線源に対する放射線安全管理	380
4.1 汚染・380	
4.2 物質による放射線の遮蔽・381	
4.3 距離と時間による放射線の遮蔽・389	
5. 臨床作業量と作業空間の被ばくへの影響	394
5.1 臨床作業量・394	
5.2 作業空間・395	

6.	PET/CT 検査における被ばく線量の測定	402
7.	患者の放射線安全管理	407
7.1	^{18}F -FDG からの放射線量・407	
7.2	CT からの放射線量・407	
7.3	女性患者の放射線安全管理・408	
7.4	小児患者の放射線安全管理・412	
7.5	患者、家族などに対する放射線被ばくの助言・412	
8.	補足 PET/CT 検査に携わるスタッフに対する 放射線安全管理に係るガイドライン骨子	414

VII. CT (Computed Tomography)

1.	CT 画像	419
1.1	CT とは？・419	
1.2	CT は PET イメージングにどのように役に立つのか？・420	
1.3	CT 画像はどのように見える？・421	
1.4	CT 画像は何を意味するか？・421	
1.5	スライス (Slice) の概念・422	
1.6	CT 値スケール・423	
1.7	画像表示のための CT 値のウィンドウイング (Windowing) ーウィンドウ幅とウィンドウレベル・424	
2.	CT 装置に必要な構成要素ー総論	426
2.1	一般的な CT 装置・426	
2.2	理想的な CT 装置・427	
3.	CT データ収集	430
3.1	X 線の減弱・430	
3.2	ベールの法則・430	
3.3	X 線検出器・431	
3.4	投影 (プロジェクション)・432	
3.5	サイノグラム (Sinogram)・433	

4.	画像再構成	435
4.1	逆投影法 (Back Projection) ・ 435	
4.2	ブラーリング (Blurring) とフィルタ補正逆投影法 (Filtered Back Projection、FBP) ・ 435	
5.	CT 装置に必要な構成要素ー各論	440
5.1	X線管 ・ 440	
5.2	X線ファンビーム (X-Ray Fan Beam) の幾何学的形状とコリメーション (Collimation) ・ 444	
5.3	X線ビームフィルトレーション ・ 446	
5.4	検出器 ・ 448	
6.	スパイラル (ヘリカル) CT	452
6.1	スキャン時間短縮の必要性 ・ 452	
6.2	集電環 (Slip Ring) 機構 ・ 452	
6.3	スパイラル (ヘリカル) スキャン ・ 453	
6.4	スパイラル (ヘリカル) データの補間 ・ 456	
7.	マルチスライス CT 装置 〔Multi-Row Detector CT (MDCT)、Multi-Slice CT (MSCT)〕	458
7.1	マルチスライススキャンの概念 ・ 458	
7.2	体軸マルチスライス CT スキャン ・ 463	
7.3	スパイラル (ヘリカル) マルチスライス CT スキャン ・ 463	
7.4	マルチスライス CT スキャンの臨床的利点 ・ 464	
8.	CT 収集モード	467
8.1	スキャンプロジェクションラジオグラフ (Scan Projection Radiograph) ・ 467	
8.2	体軸スキャン ・ 467	
8.3	スパイラル (ヘリカル) スキャン ・ 468	
8.4	撮影条件自動調節機構 (Automatic Exposure Control、AEC) によるスキャン ・ 469	
8.5	拡大 FOV (Extended FOV) ・ 469	
9.	スキャンパラメータ	471
9.1	X線ビーム関連 ・ 471	

9.2	ガントリ	・ 472
9.3	実効検出器幅 (Effective Detector Width)	・ 472
9.4	テーブル送り (Table Feed) とスパイラルピッチ	・ 472
9.5	カバーすべき解剖学的範囲 (Anatomical Coverage)	・ 473
9.6	スキャン FOV	・ 473
10.	画像再構成パラメータ	474
10.1	コンボリユーションカーネル (Convolution Kernel)	・ 474
10.2	マトリックスサイズ (Matrix Size)	・ 474
10.3	再構成 FOV (Reconstruction Field of View, RFOV)	・ 474
10.4	画像幅 (Image Width)	・ 474
10.5	再構成インCREMENT (Reconstruction Increment)	・ 475
10.6	他の画像フィルタと過程	・ 475
11.	画質	476
11.1	画像ノイズ (Image Noise)	・ 476
11.2	空間分解能 (Spatial Resolution)	・ 478
11.3	Z 軸分解能 (Z-Axis Resolution)	・ 480
11.4	低コントラスト分解能 (Low Contrast Resolution)	・ 480
12.	アーチファクト (Artefacts)	482
12.1	CT 画像の主なアーチファクトの種類	・ 482
12.2	CT 画像のアーチファクトの原因	・ 484
12.3	アーチファクトを克服する方法	・ 489
13.	患者被ばく線量	491
13.1	CT 線量指標 (CT Dose Index, CTDI)	・ 491
13.2	重み付け CTDI (Weighted CTDI)	・ 492
13.3	容量 CTDI (Volumetric CTDI)	・ 492
13.4	線積分線量 (Dose Length Product, DLP)	・ 493
13.5	スキャンパラメータへの依存	・ 493
13.6	患者線量の指標としての CTDI と DLP	・ 493
13.7	臓器吸収線量 (Organ Absorbed Doses) と 実効線量 (Effective Dose)	・ 494
13.8	診断参考レベル (Diagnostic Reference Levels, DRLs)	・ 496

14. 品質保証 (Quality Assurance、QA) と品質管理 (Quality Control、QC) 試験	497
14.1 品質保証 (QA) プログラムの構造・497	
14.2 品質管理 (QC) 試験・497	
14.3 試験方法・499	
15. スタッフの放射線安全	502
15.1 CT 装置周囲の散乱線分布・502	
15.2 CT 装置周囲の線量率・503	
15.3 マルチスライス CT 装置に対する一般的な遮蔽要件・503	
15.4 CT 装置室のヒトへの対処・503	
16. 臨床手順とプロトコル	505
16.1 異なる臨床アプリケーションに必要な画質レベル・505	
16.2 異なるイメージングタスクの要件・505	
17. 画質と線量のバランス	510
17.1 ALARA 原則・510	
17.2 最適な画質と線量を決定する方法・510	
17.3 患者の大きさによる画質と線量の変動・511	
17.4 AEC (Automatic Exposure Control) システムの最適な使い方・513	
18. 断層解剖序論	515
18.1 断層解剖の専門用語・515	
19. 胸部の横断解剖	521
19.1 心臓と大血管・521	
19.2 胸部 CT 横断像・522	
20. 腹部の横断解剖	527
20.1 腹部の冠状断層像・527	
20.2 腹部 CT 横断像・527	
21. 骨盤の横断解剖	532
21.1 骨盤 CT 横断像・532	

22.	脳の断層解剖	535
22.1	脳の矢状断層像・535	
22.2	脳の横断像・539	
22.3	脳の冠状断層像・544	

VIII. PET 装置の最近の展開

1.	PET/MRI 装置のデザイン	551
2.	MR-based Attenuation Correction (MR-AC、MRAC)	554
3.	PET/MRI データ収集 (ワークフロー)	555
4.	PET/MRI の画像再構成	557
5.	PET/MRI の安全性	558
6.	PET/MRI の課題	559

● 参考文献・562 ● 索引・564 ● 著者紹介・587

● コラム目次

- | | |
|--|--|
| I. MTV と TLG・51
Harmonization・51 | VI. PET 診療に関する法令・364
PET 検査薬の種類と法令・379
PET 検査薬汚染物の廃棄・392
ICRP 勧告の職業被ばくの線量限度 2007 年
(Pub.103) 勧告・400
医療法施行規則の職業被ばくの線量限度・
400
ICRP 勧告の公衆被ばくの線量限度 2007 年
(Pub.103) 勧告・412
総合的規制評価サービス (IRRS)・415 |
| II. ^{18}F の検出・113 | VII. ^{18}F -FDG PET/MRI 検査の保険適用・560
可搬型 PET 装置・560 |
| III. 国際対がん連合の TNM 病期分類第 8 版
(2017)・163
固形腫瘍の治療効果判定・169
Pseudoprogression・170
がん検診・171
Lugano 分類・186
乳房専用 PET 装置・194
^{18}F -FDG PET 検査の悪性腫瘍に対する保険
適用・209
^{13}N -アンモニア心筋血流 PET 検査・213
アミロイド PET 検査・217
^{18}F -FDG PET 検査で保険適用されない疾
患・222 | |
| IV. ^{18}F -FDG 脳 PET 検査の保険適用・289
^{18}F -FDG 心筋 PET 検査の保険適用・296
心サルコイドーシス・297
心サルコイドーシスの炎症部位診断のため
の ^{18}F -FDG 心筋 PET 検査の前処置・298
^{18}F -FDG PET 検査の合併症・306 | |