

核医学機器工学概論4

PET/CT

PETCTについて学ぶ。

PET製剤について学ぶ。

SUVについて学ぶ。

PETCT viewer

(c:¥ に Color Lut フォルダをコピーしてから起動。)

PETCT.exe を起動し、open folderから同フォルダ内の
1～3いずれかのフォルダをドラッグドロップする。

しばらくすると、CT・PET・fusion像が描画される。

スライドバーで断面を可変できる。

左にあるカラーバーをドラッグすると明るさが調節できる。

image rotation startをクリックすると右下の画像が回る。

image rotation stopでとまる。

左下には検査情報。

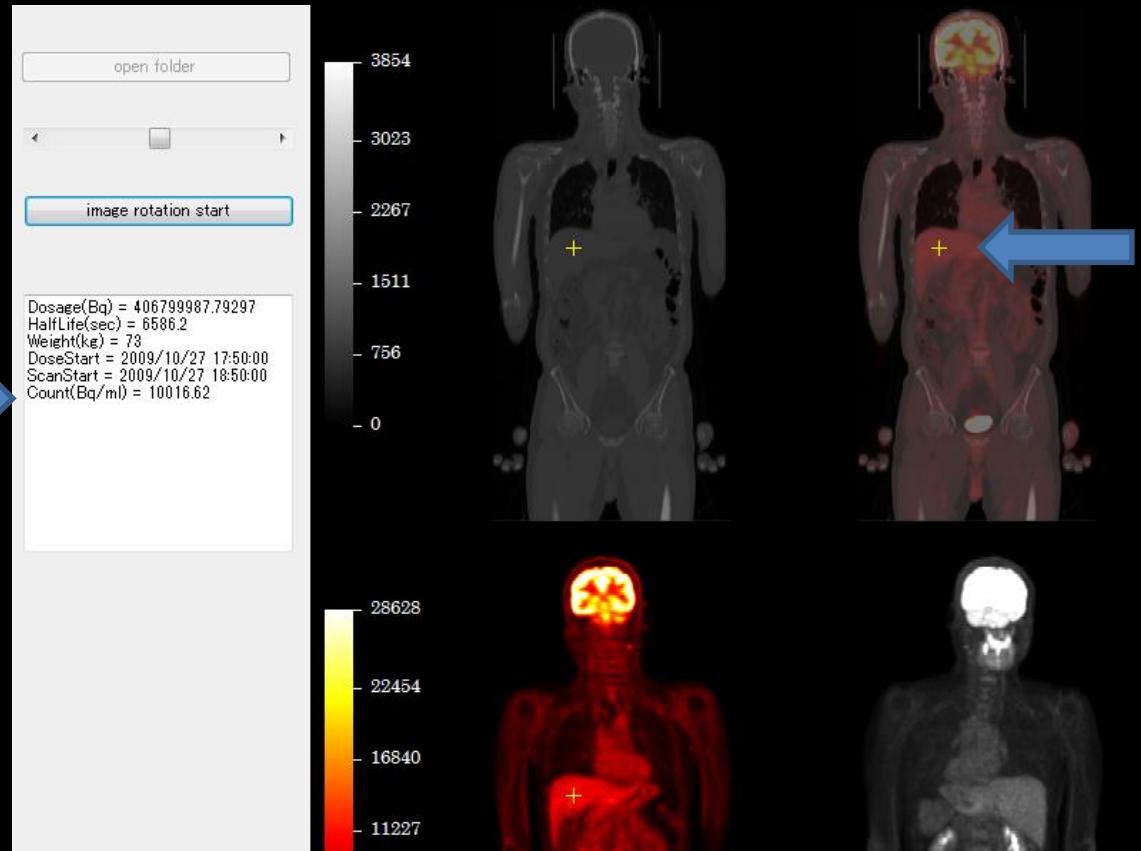
Dosage : DoseStart時に計測した全投与量

DoseStart : 薬剤投与時間

ScanStart : 撮像開始時間

CT・PET・fusion画像のいずれかをクリックすると、その部位の集積が表示される。クリックした点は黄色十字で示される。

クリックした
部位のカウント



クリックした
部位

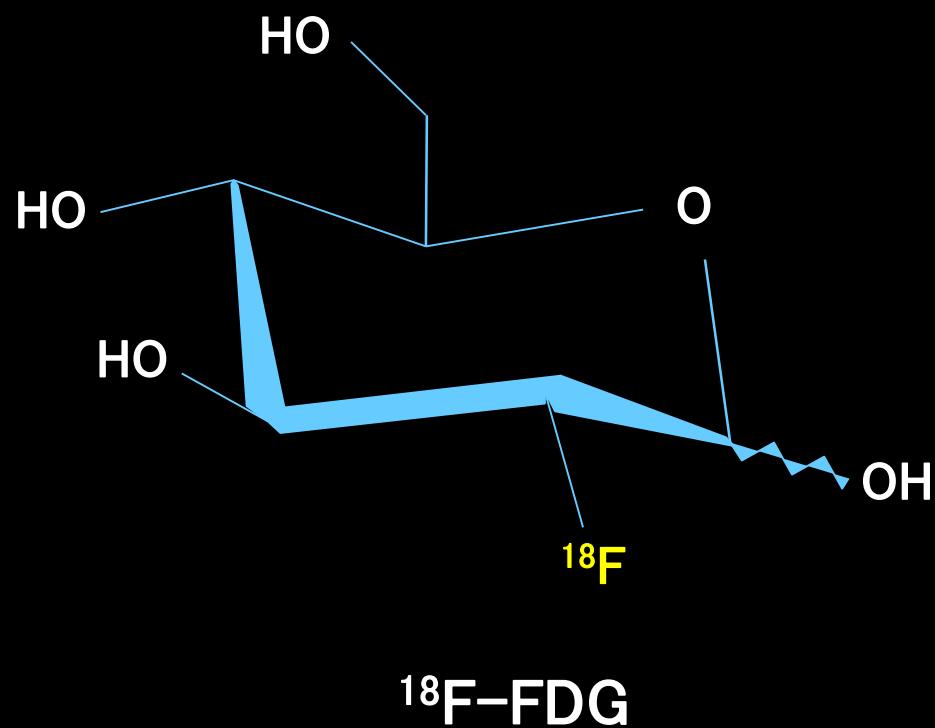
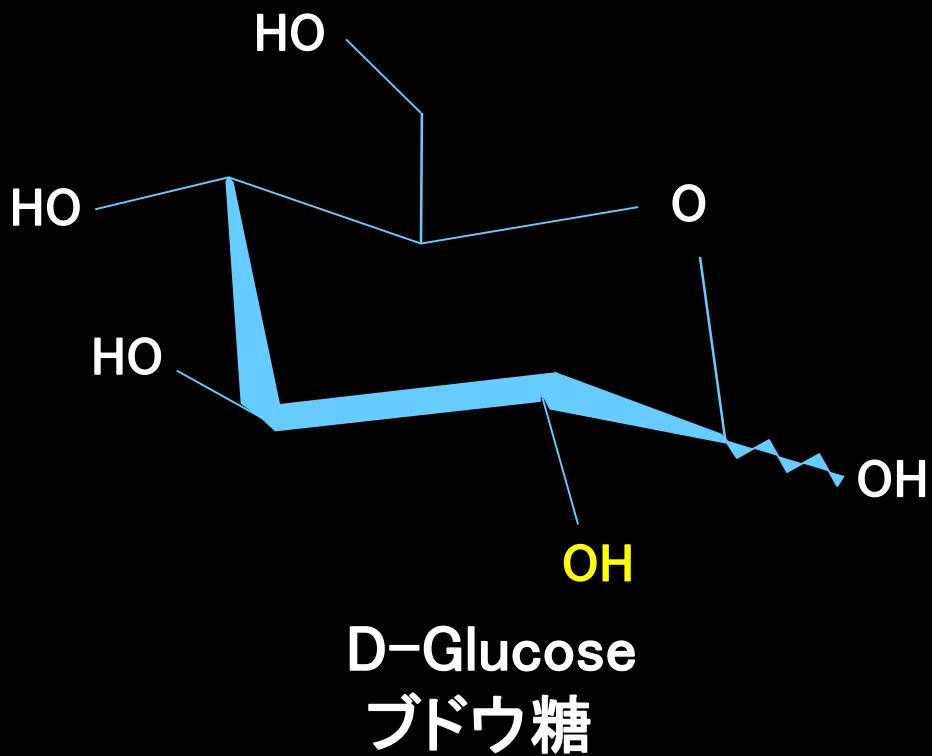
疾患例について、それぞれ病変部位のカウントとSUVを求めてください。

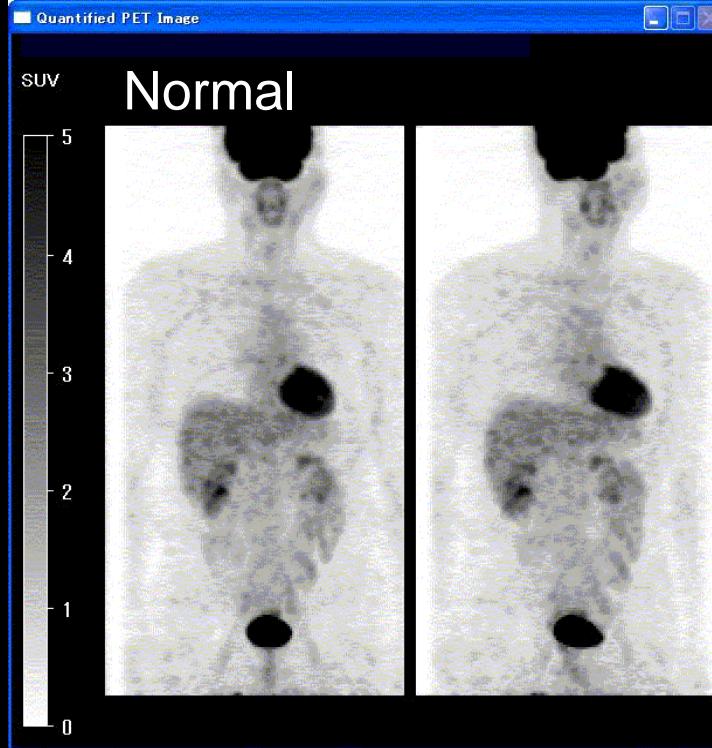
疾患例について、それぞれ病変部位
のカウントとSUVを求めてください。

近年のPET装置は3D収集が主である。
2D収集と3D収集について、利点・欠点
を比較してまとめてください。

SPECTとPETの性能を比較して下さい。

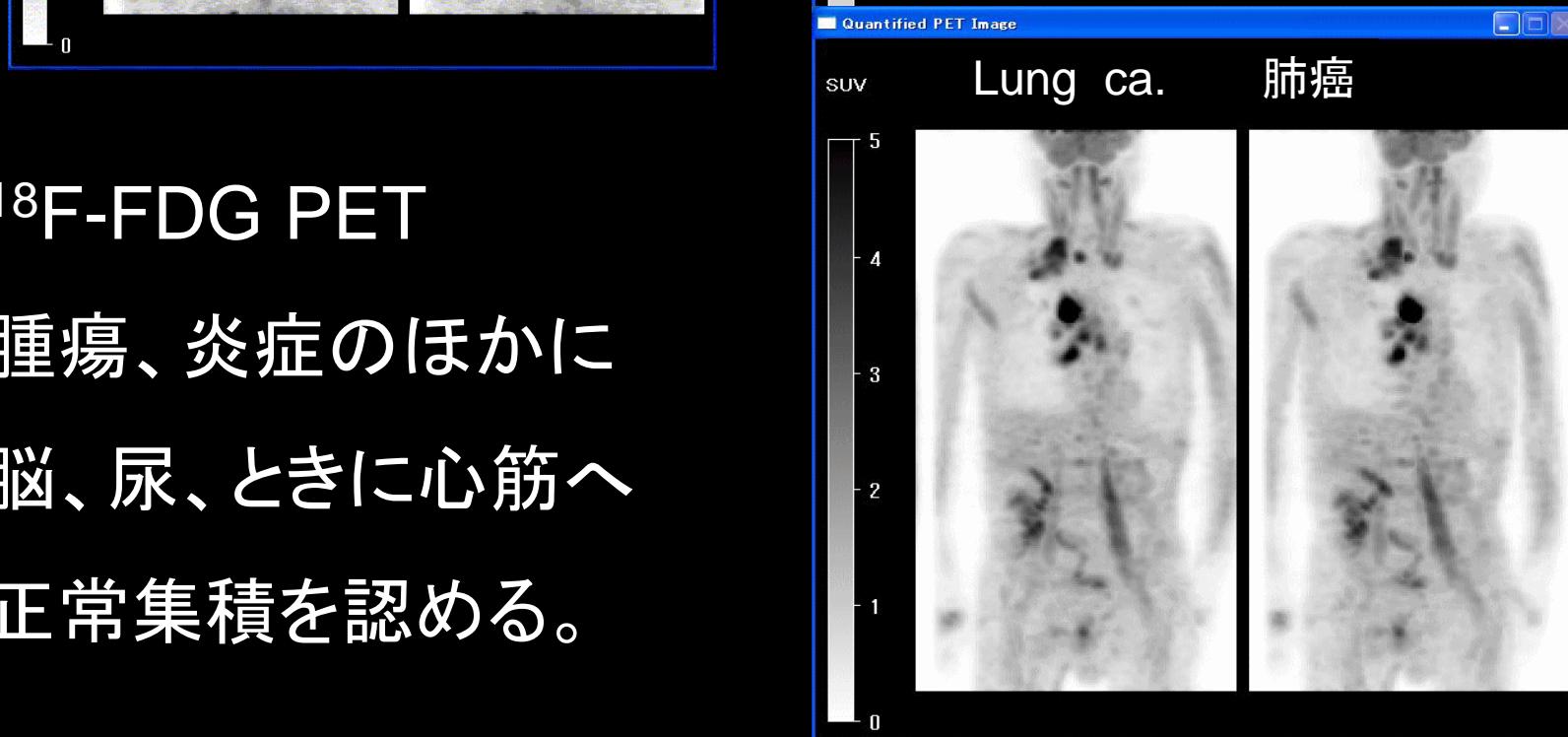
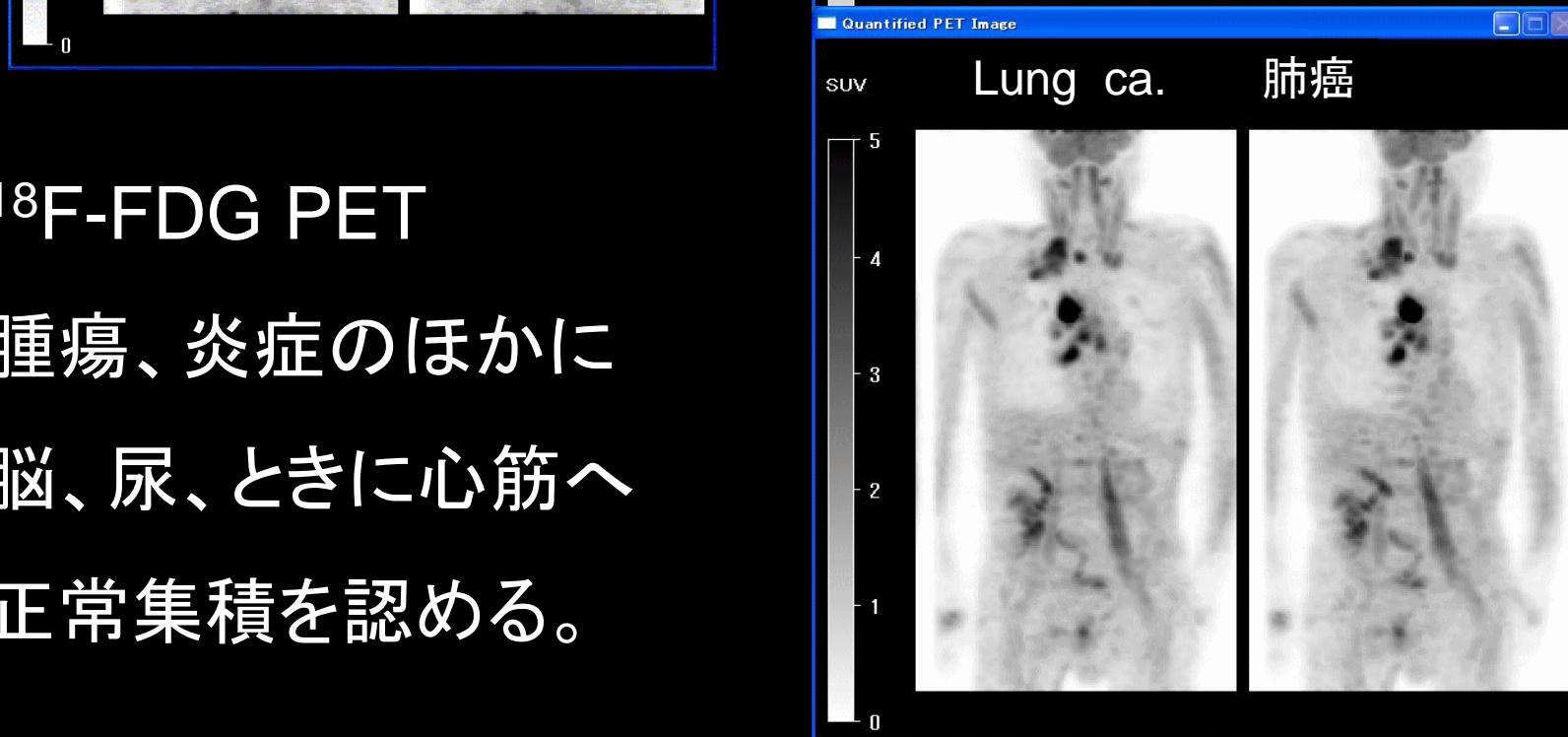
^{18}F -FDG (Fluoro Deoxy Glucose) は、ブドウ糖の類似物質(analog)で、ブドウ糖と同様に組織に摂取されるが、代謝されないので組織内に長く停滞し、脳や病変のブドウ糖定量画像収集に有用な薬剤となる。(ただし、肝細胞、高分化型肝細胞癌には取込まれにくい。)





^{18}F -FDG PET

腫瘍、炎症のほかに
脳、尿、ときに心筋へ
正常集積を認める。



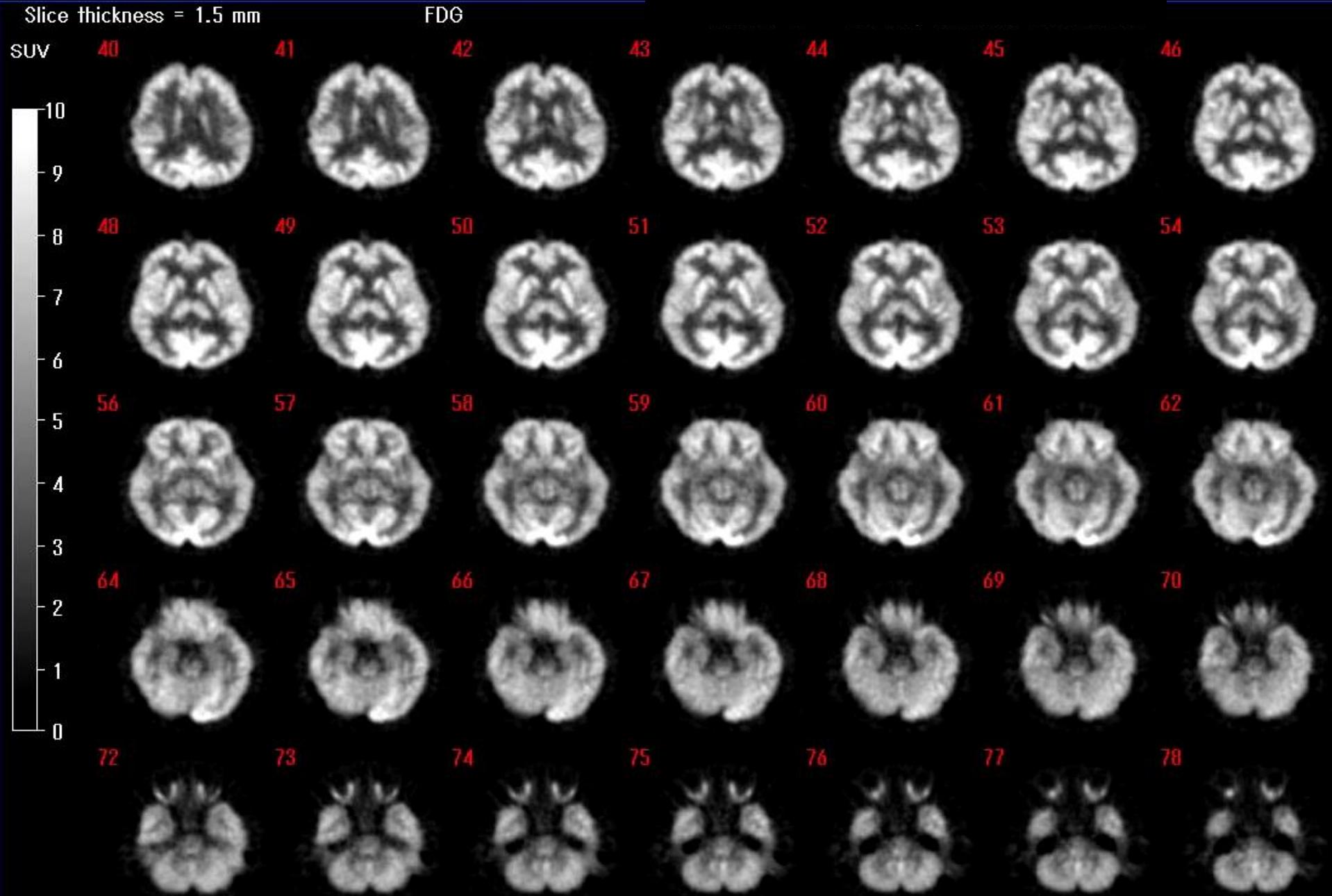
¹⁸F-FDG Brain PET 185MBq 静注1時間後 5分撮像

Slice thickness = 1.5 mm

FDG

185MBq 静注1時間後

5分撮像



一般的に、体内組織は、エネルギー源として脂肪酸を摂取し、ミトコンドリア内のベータ酸化回路で脂肪酸からATP(アデノシン三リン酸)を产生する。ベータ酸化回路はATP产生は多いが、酸素を多量に要求する。

癌細胞や炎症細胞など、急に出現した異常組織は、酸素を運ぶ赤血球の通路である血管が不備なので、酸素をあまり要求しない解糖系でATPを产生する。解糖系はATP产生量が少ないので、普通の組織ではあまり稼働していない。

そのため、PET検査で、ブドウ糖と類似物質の放射性薬剤FDGを使うと、腫瘍や炎症病変に集積し、さらに代謝されないので病変組織内に長く停滞し、画像化できる。

FDG-PET の 健康保険適用疾患

1. てんかん
2. 虚血性心疾患
心サルコイドーシス
3. 悪性腫瘍 (早期胃癌を除く)
(病理診断で悪性病変と確定した症例に限る)
4. 血管炎 高安動脈炎など
(平成30年から)

高安動脈炎

指定難病(330疾患ある)の一つ。登録患者 7000人
(原因不明疾患に対する医療費補助制度がある)
平成30年4月から FDG PET の保険適用。

9割が女性。好発年令は10~30才。若年女性。

若年女性で重症の頸部痛、頭痛、肩凝りの症例で、
CT等で大動脈弓の分枝血管に狭窄等の所見、
左右上肢での血圧測定値に左右差などあれば、
FDG PET/CT実施を。炎症血管にFDG集積あり。

治療法は、ステロイド(減量すると再燃しやすい)、
抗体医薬(トリシズマブ(アクテムラ) IL-6R)
(本来は関節リウマチ薬。高価。5000円/日))

11C-メチオニン

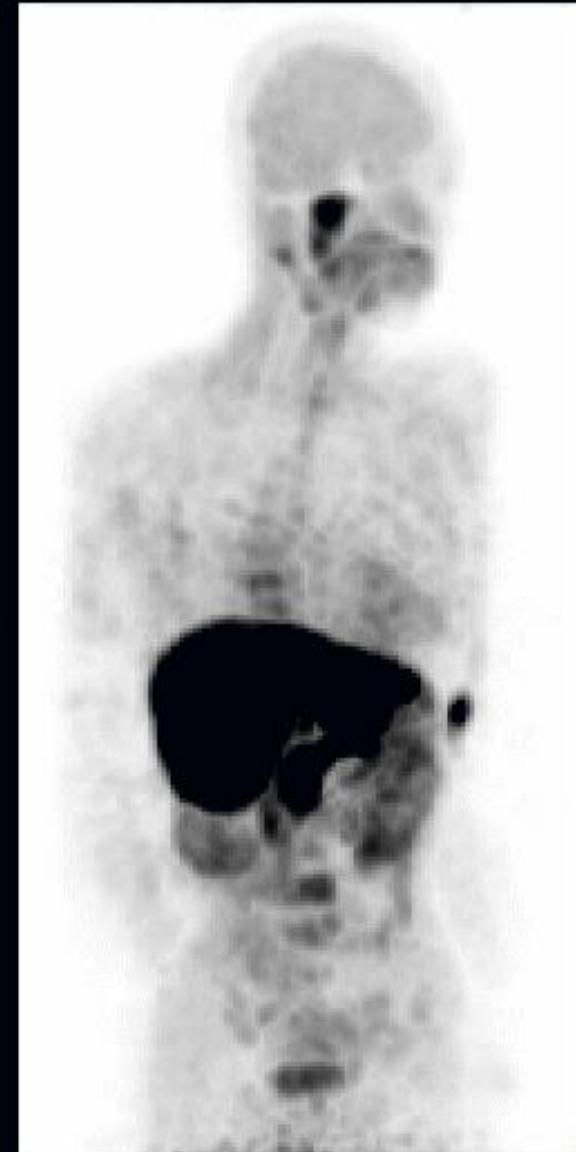
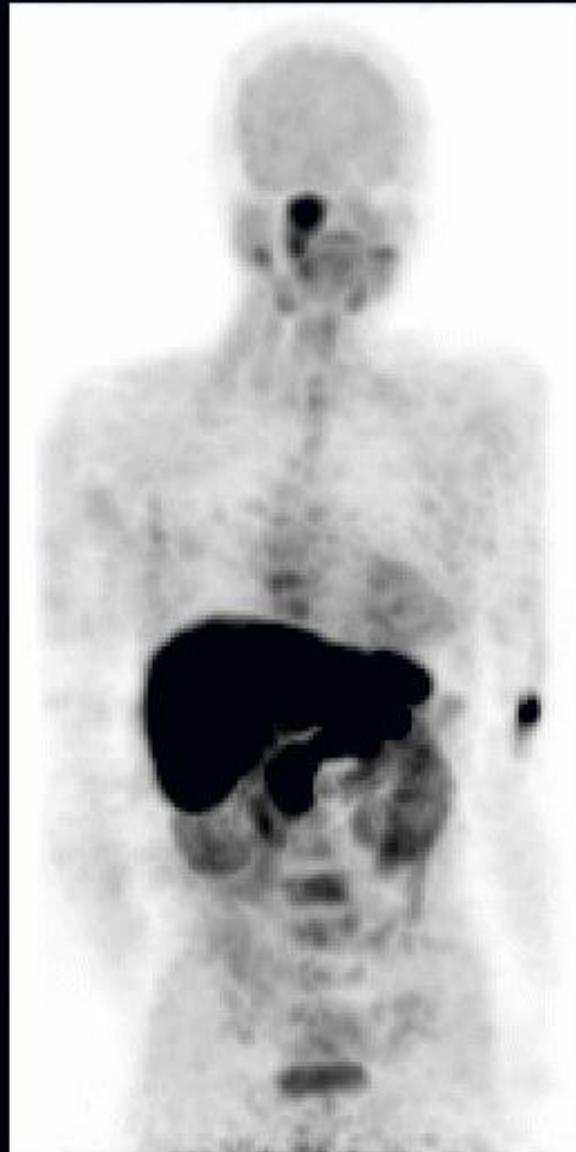
PET

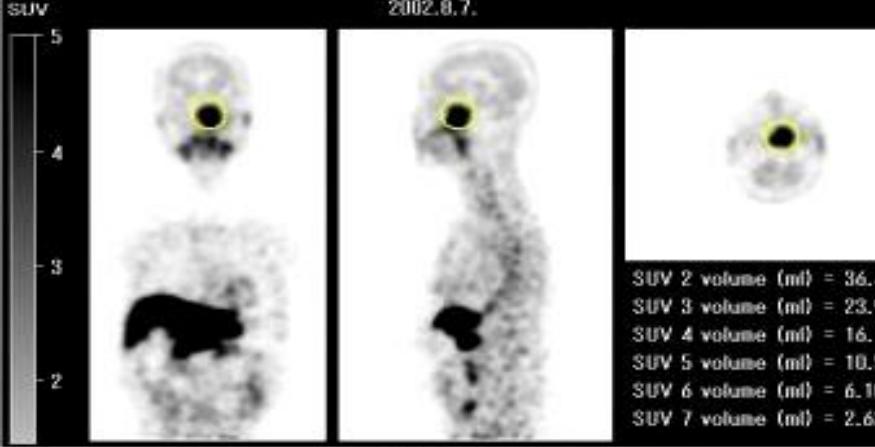
上咽頭癌

メチオニンは
必須アミノ酸

癌は細胞分裂が
盛んなので、
蛋白質の原料の
メチオニンを多く
消費して増大する

SUV

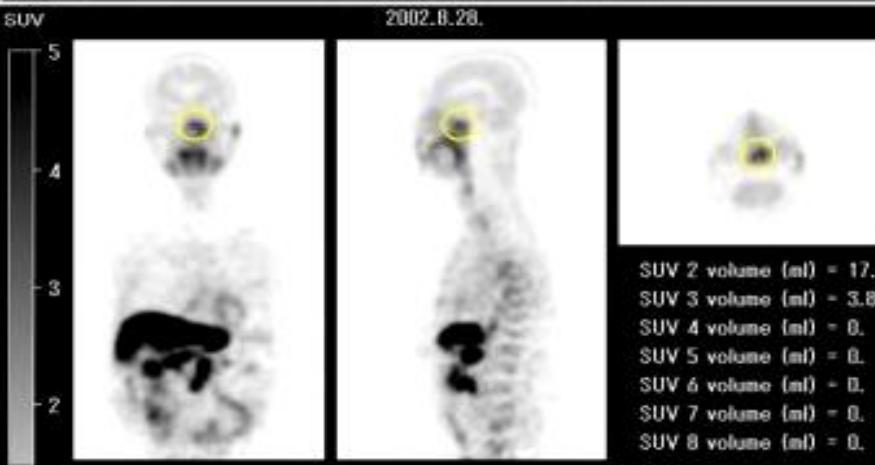




11C-Methionine PET

上咽頭癌 治療前

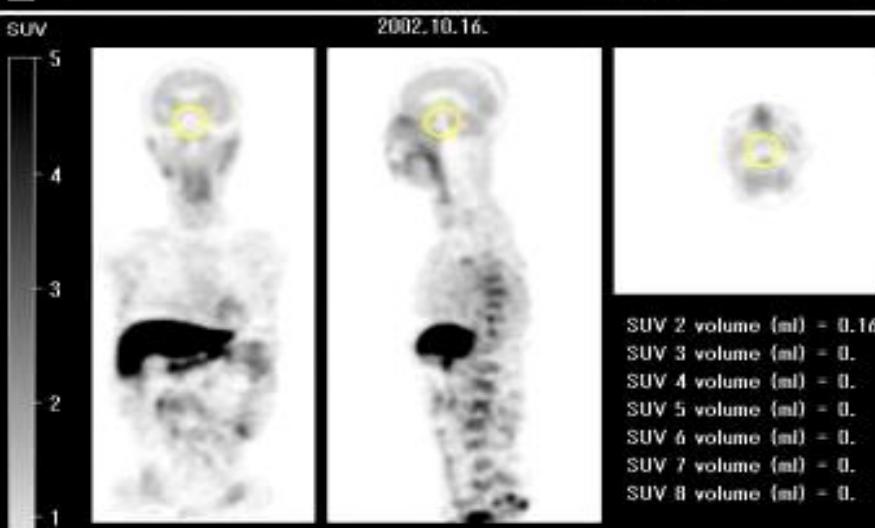
SUV = 36.4



放射線治療&化学療法 実施直後

解剖学的には腫瘍の大きさは変化ないが、
腫瘍の蛋白質合成能低下を確認。

SUV = 17.2



2ヶ月後に腫瘍の消失を確認。

SUV = 0.16

速やかな治療効果判定が可能。

SUV (Standardized Uptake Value)

病変の放射能濃度(Bq/ml)

=

体内平均放射能濃度(Bq/ml)

(投与量(Bq) / 体重(g))

分子と分母の放射能は時刻を合わせる
(半減期補正をする)必要がある。

病変の放射能濃度が体内平均の何倍か
を示す半定量値。正常値は1。
2.5~3以上を病的集積と考える。

人体の比重を 1g/ml と仮定し、

放射性薬剤が**全身に均一に分布する**
と仮定した濃度を基準にしている。

病変部位の濃度は、関心領域内の
最大画素値を用いる場合が多い。

半減期 Half life $T_{1/2}$

$$N = N_0 \times (1/2)^{(t / T_{1/2})}$$

崩壊定数 λ

1秒間に原子核が崩壊する割合

$$dN/dt = -\lambda N$$

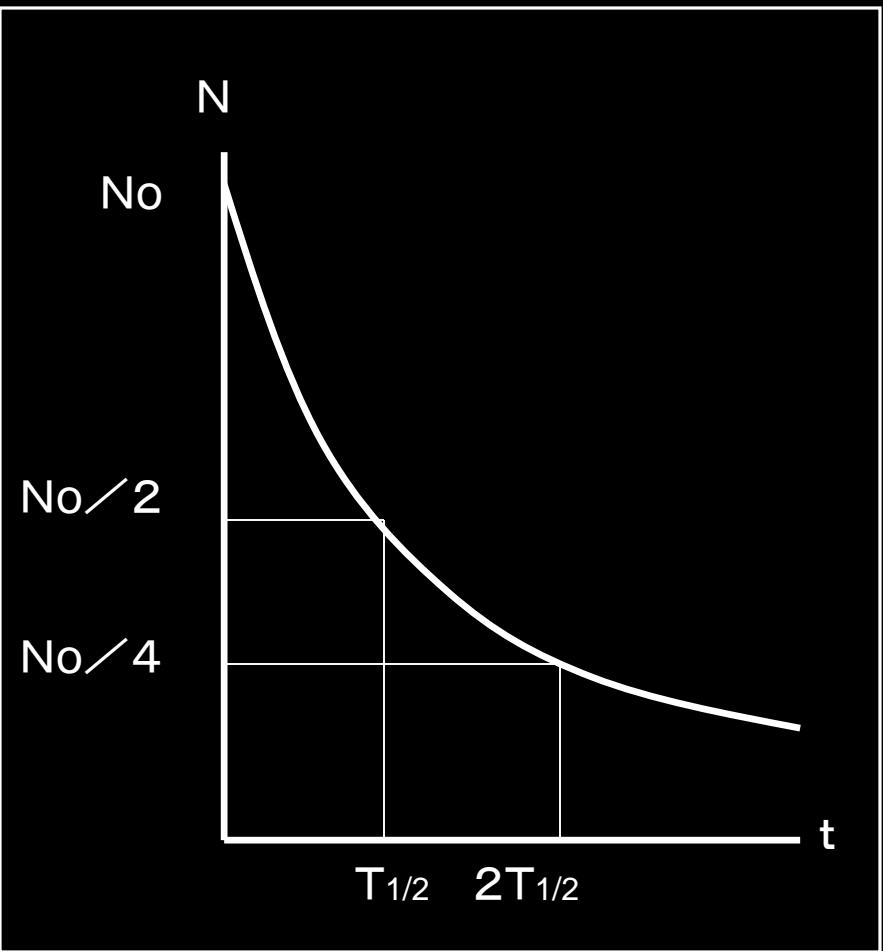
$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$N_0/2 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$1/2 = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\log(1/2) = \log(e^{-\lambda T_{1/2}})$$

$$\log 2 = 0.693 = \lambda T_{1/2}$$



10時に200 MBqであった¹⁸F-FDGを10時55分に患者に投与した。11時50分に撮影を開始し、13時40分に解析を行ったところ、病巣部の放射能測定値は12,000 Bq/cm³であった。SUV値はどれか。ただし、患者は身長150cm、体重50kgとし、人体の密度を1g/cm³、¹⁸Fの物理的半減期を110分とする。

1. 3 2. 6 3. 9 4. 30 5. 60

撮像開始時刻の11時50分における放射能を計算する。

患者体内の放射能は、 $200 \times (1/2) = 100 \text{ MBq}$

体内平均濃度は、 $100 \text{ MBq} / 50 \text{ kg} = 2000 \text{ Bq} / \text{ml}$

病変のSUVは、 $12000 / 2000 = 6.0$ （倍）

（SUVに定量的単位はない。SUVは半定量値である。）

ガンマカメラ

体内のガンマ線放出薬剤の分布(シンチグラム)を撮像する装置



骨シンチグラフィ

Bone scintigraphy

リン酸にガンマ線放出RIを標識した薬剤の分布図。
骨転移に強く分布。

肺癌の骨転移症例。

右肩甲骨、胸椎、腰椎

Bone metastases

尿中への排泄が多いので
尿路、膀胱が描画されている。

正面像



背面像



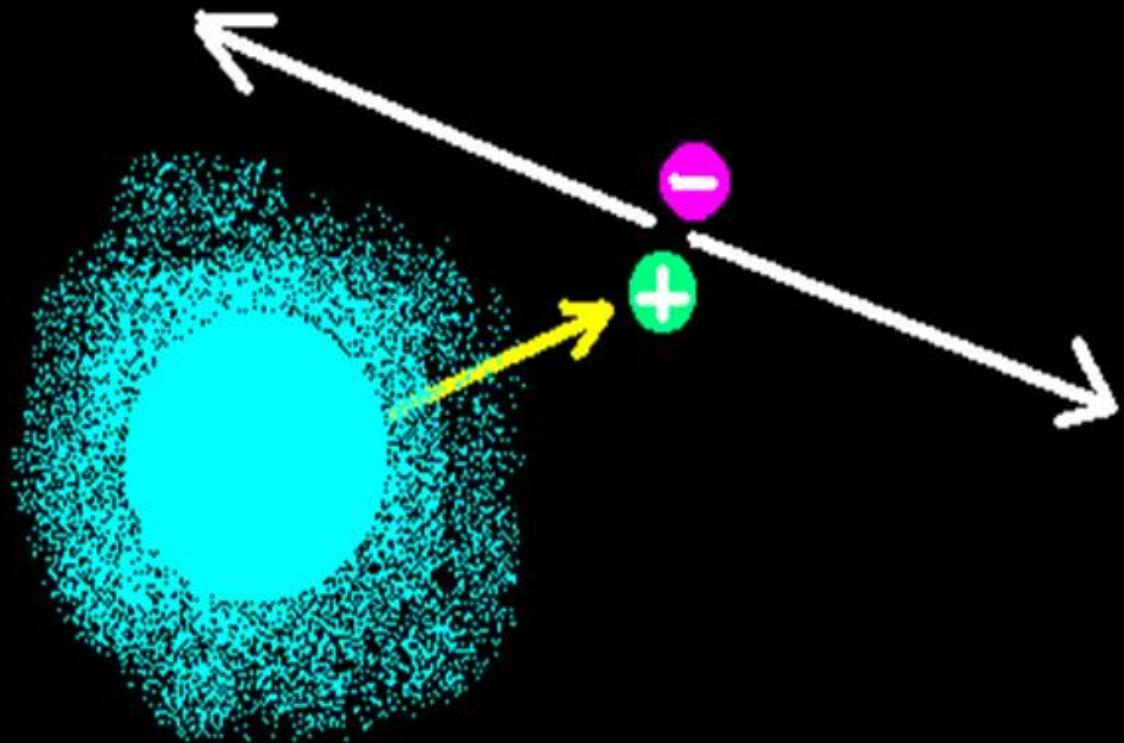
正面と背面のカメラで撮影した像が異なる理由は、人体がガンマ線を吸收、散乱させているため。
体表から深い部位ほど描画が薄い。

ポジトロンCT(PET)は、
脳や心筋などの血流量、糖代謝量、神経の量
などの定量もできる画像診断法である。



陽電子消滅 (annihilation)

陽電子(positron: 電子の反粒子。素粒子の一種)を放出する放射性核種の近傍において、陽電子と電子が結合して消滅し、1対の 0.51MeV の消滅放射線を反対方向に放出。



エネルギー保存則

電子質量 m_e は

$$E = m_e C^2 = 0.51 \text{ MeV}$$

の放射線になる。

(鉛4mmでエネルギーが半減する程度の電磁波)

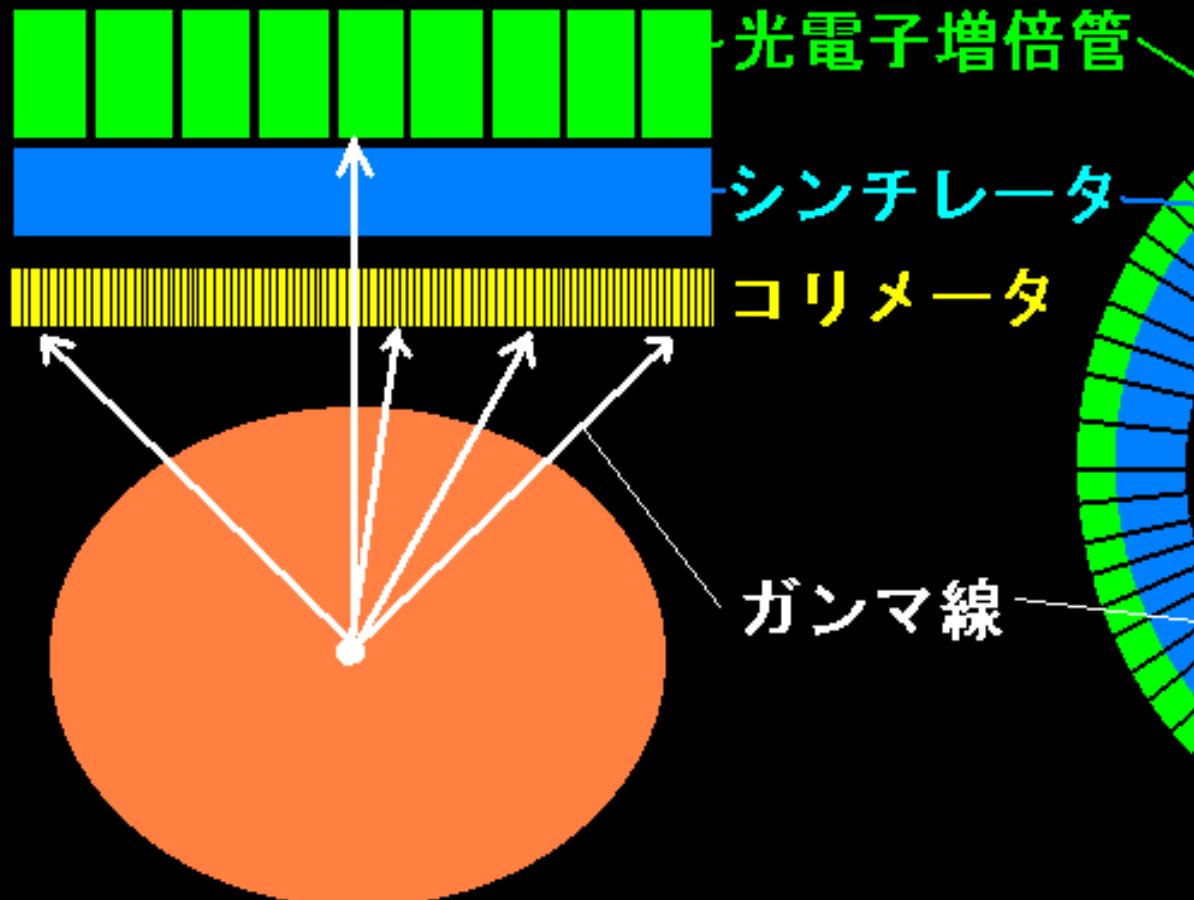
運動量保存則

2本の放射線は反対方向に放出

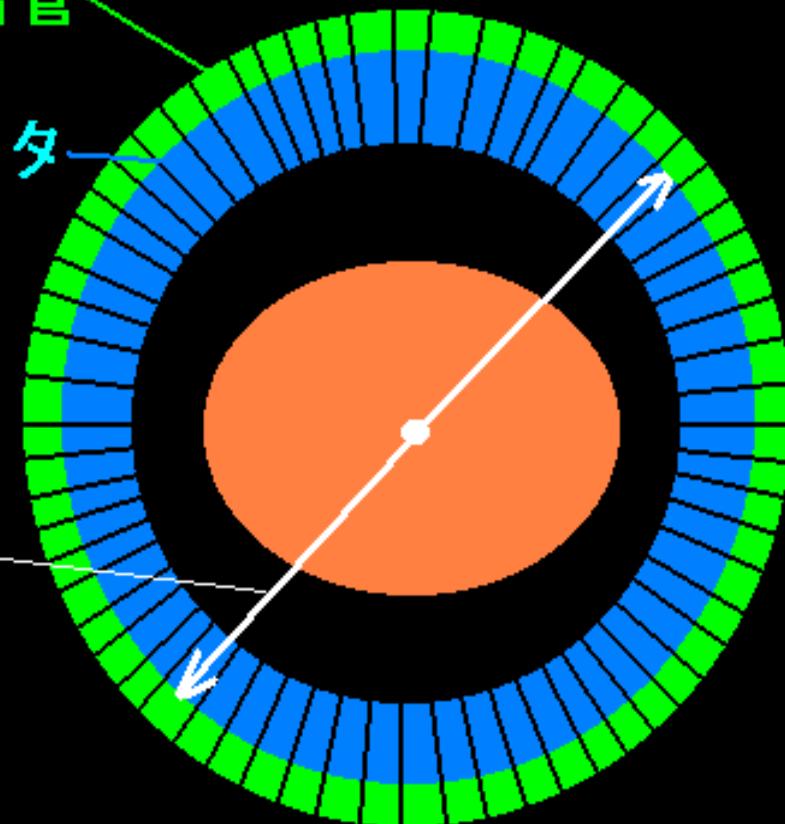
PETカメラは、コリメータがないので高感度。

コリメータは小さい孔を多数あけた鉛板。検出感度を下げる。

従来のシンチカメラ

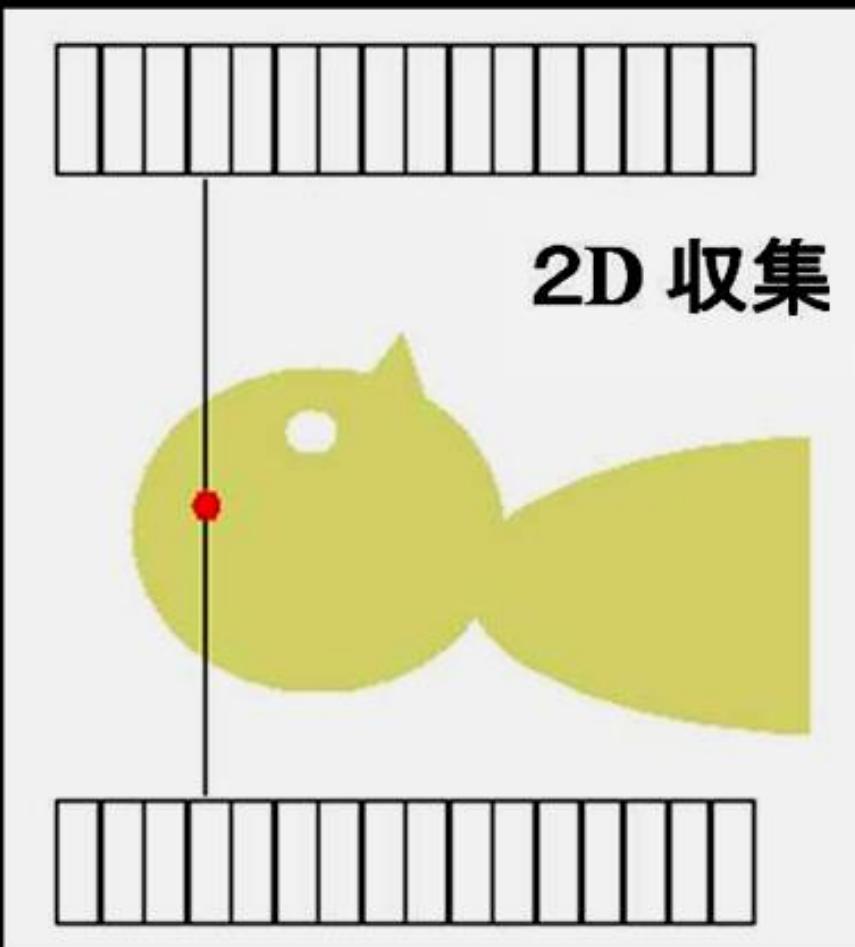


P E T

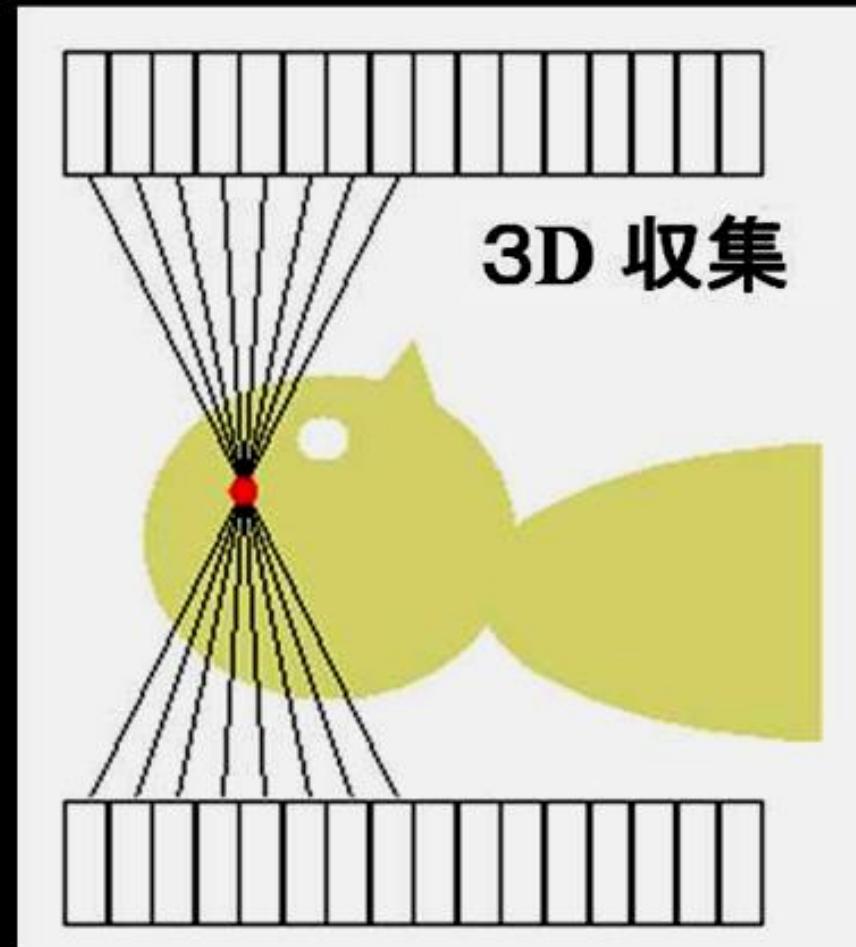


現在のPETはほとんど3次元(3D)収集

2次元(2D)収集と比べ、短時間で良好な画像を収集できる
(全身(頭部～大腿部)を15～20分程度で収集)。
コンプトン散乱線を収集しやすく、定量性の精度が低下する。



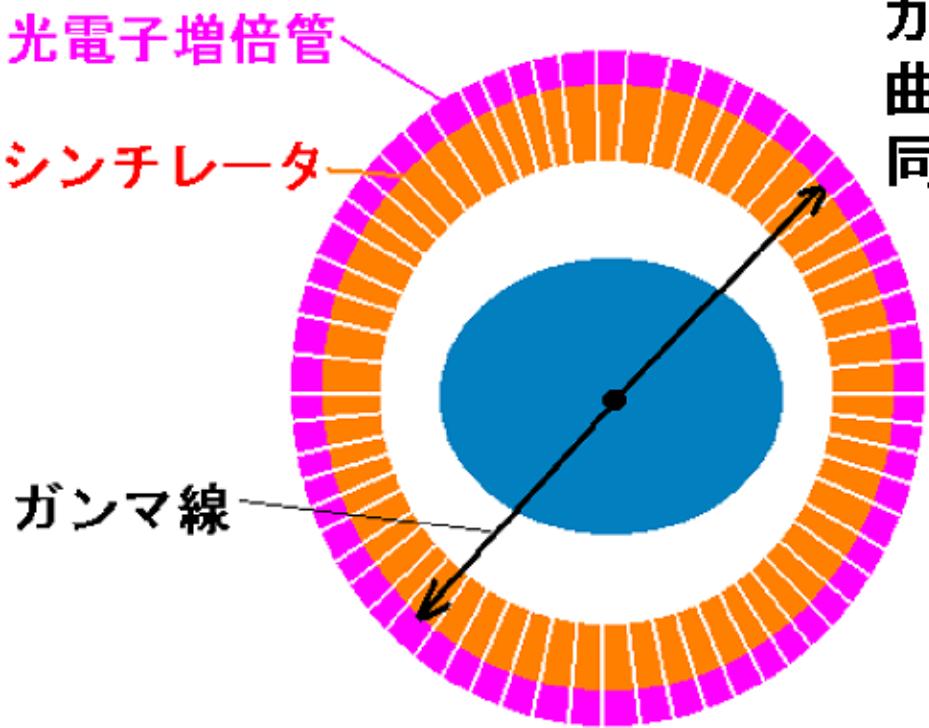
2D 収集



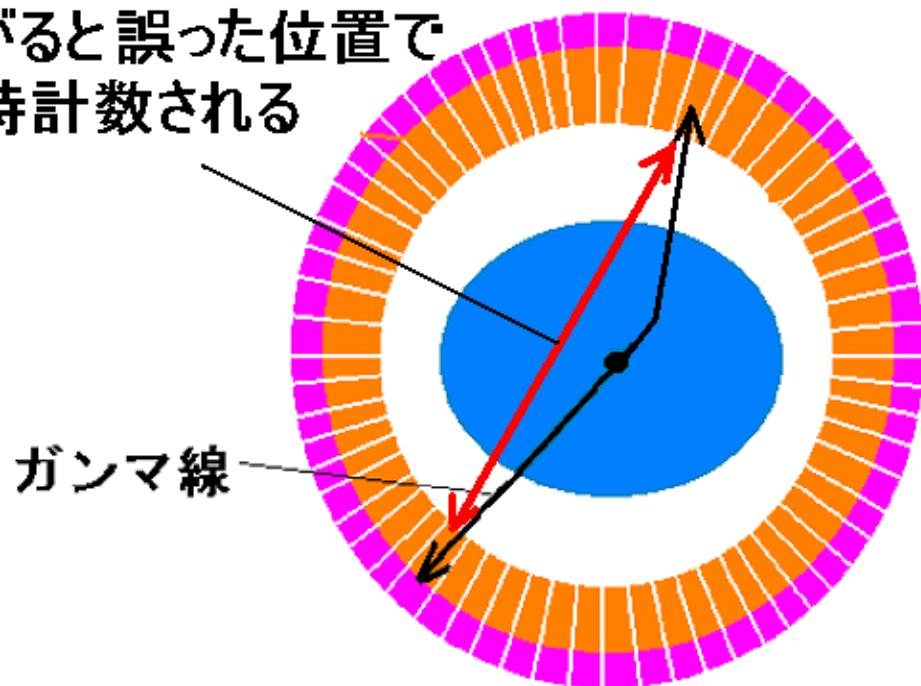
3D 収集

PETにも散乱線の影響がある。

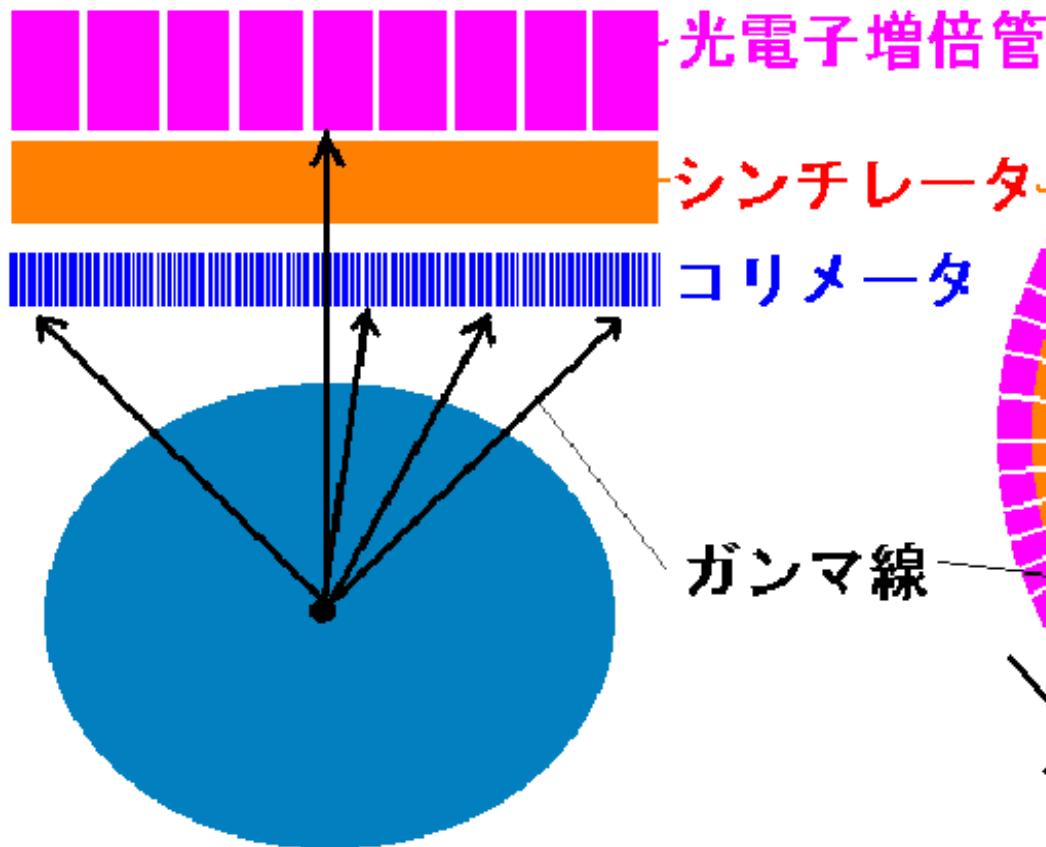
2D収集よりも3D収集の場合で、コンプトン散乱線成分が多くなる(約3倍)。



コンプトン散乱などで
ガンマ線の軌跡が
曲がると誤った位置で
同時計数される



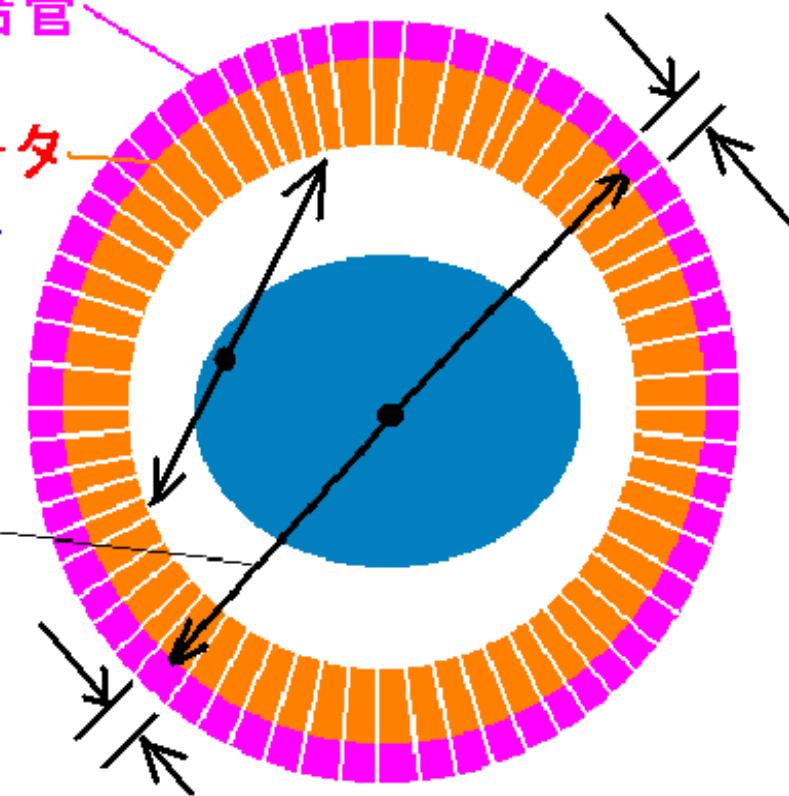
従来のシンチカメラ



SPECTとは逆に、
PETは画像の中心部ほど
分解能が良い。

(辺縁部からのγ線はシンチレーター
に垂直に入射しないので検出効率
が悪い)

PET



PET装置の分解能は
シンチレーターが小さいほど
向上する。

PETのリング径と分解能は
無関係

表 3・6 おもな PET 検出器用シンチレータ

シンチレータ	NaI (NaI : Tl)	BGO (Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂)	LSO (Lu ₂ SiO ₅ : Ce)	GSO (Gd ₂ SiO ₅ : Ce)	BaF ₂
実効原子番号	51	74	66	59	54
密度 (g/cm ³)	3.7	7.1	7.4	6.7	4.9
減弱係数 (cm ⁻¹)	0.34	0.92	0.87	0.66	0.48
発光量 (相対値)	100	10	75	18	8
光の減衰時間 (nsec)	230	300	40	30~60	0.8
エネルギー分解能 (%)	8	18	12	8	—

(注) 減弱係数は 511 keV の消滅放射線に対する値。

LSOは発光量が多い。 BGOは発光量が少ない。

光の減衰時間が短い LSO、 GSOは数え落しが少ない。

(同時計数分解時間が短い。 計数率直線性がよい。)

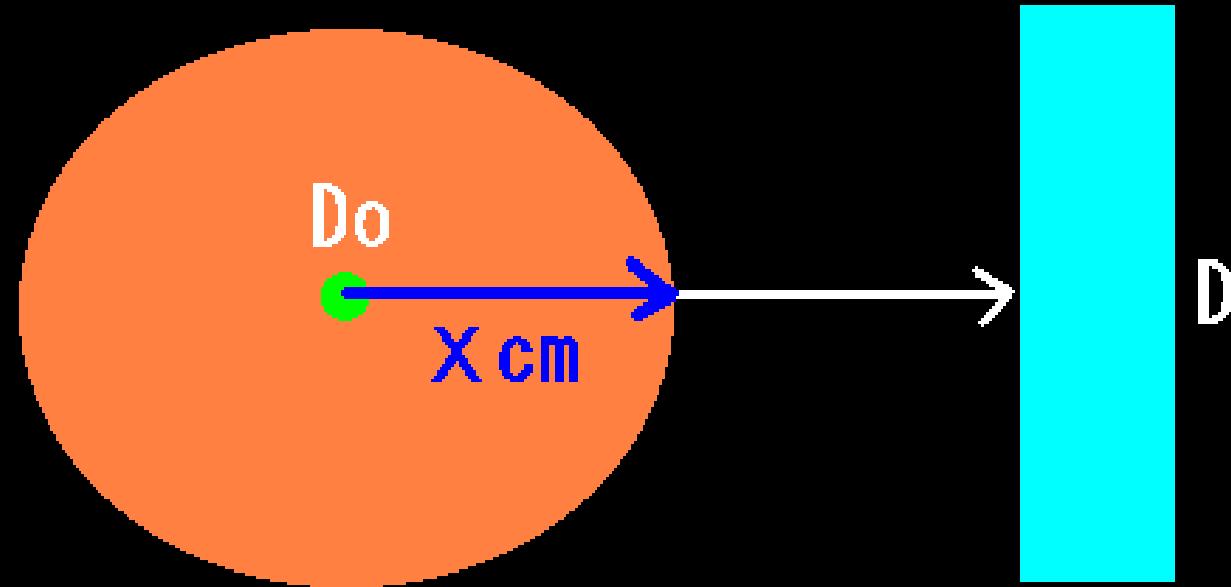
GSO, LSOはエネルギー分解能が良い。

(コンプトン散乱成分を除去しやすいので、分解能が向上する。)

従来のカメラでは体内の放射能分布の定量が困難

放射能の体内での減弱

$$D = D_0 \exp(-\mu x)$$



D_0 : 真の放射能 (Bq)

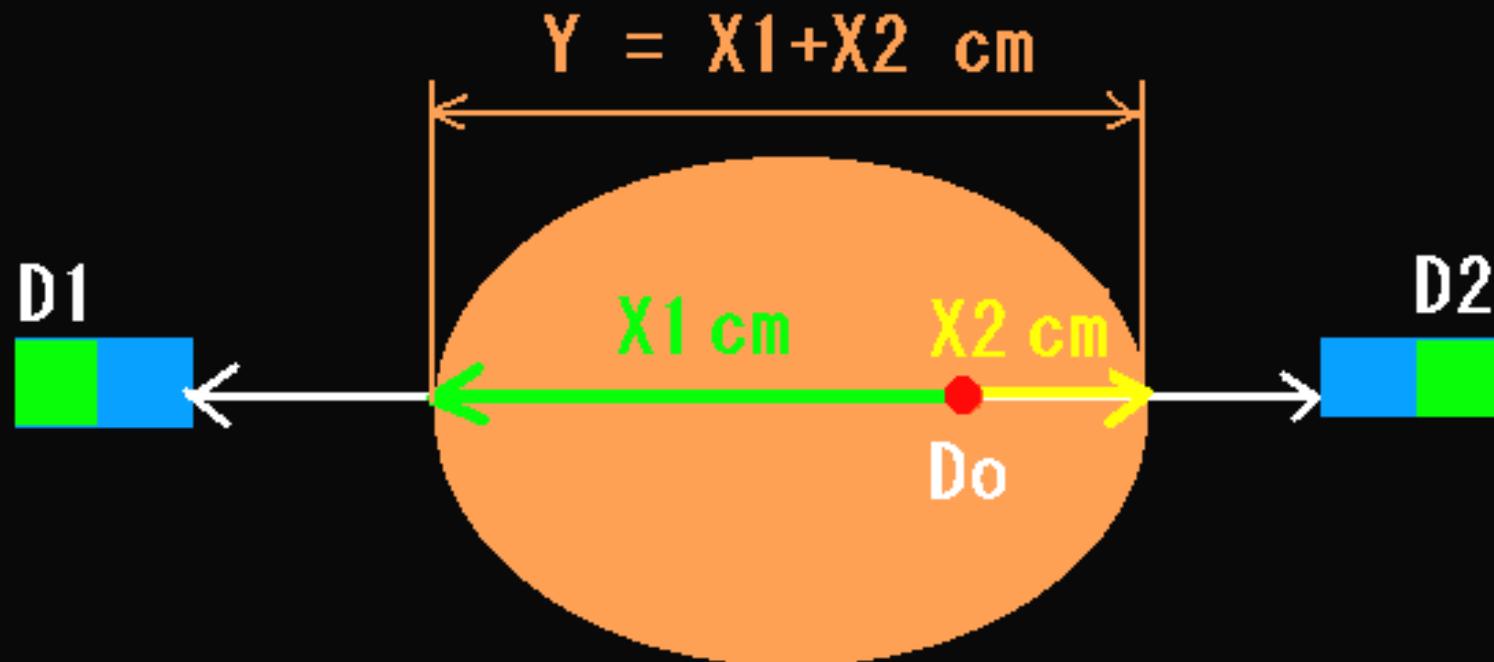
D : 放射能測定値 (Bq)

μ : 線減弱係数 (/cm)

シンチカメラ

PETは、CT画像で吸収補正を行うので

定量性が良い。



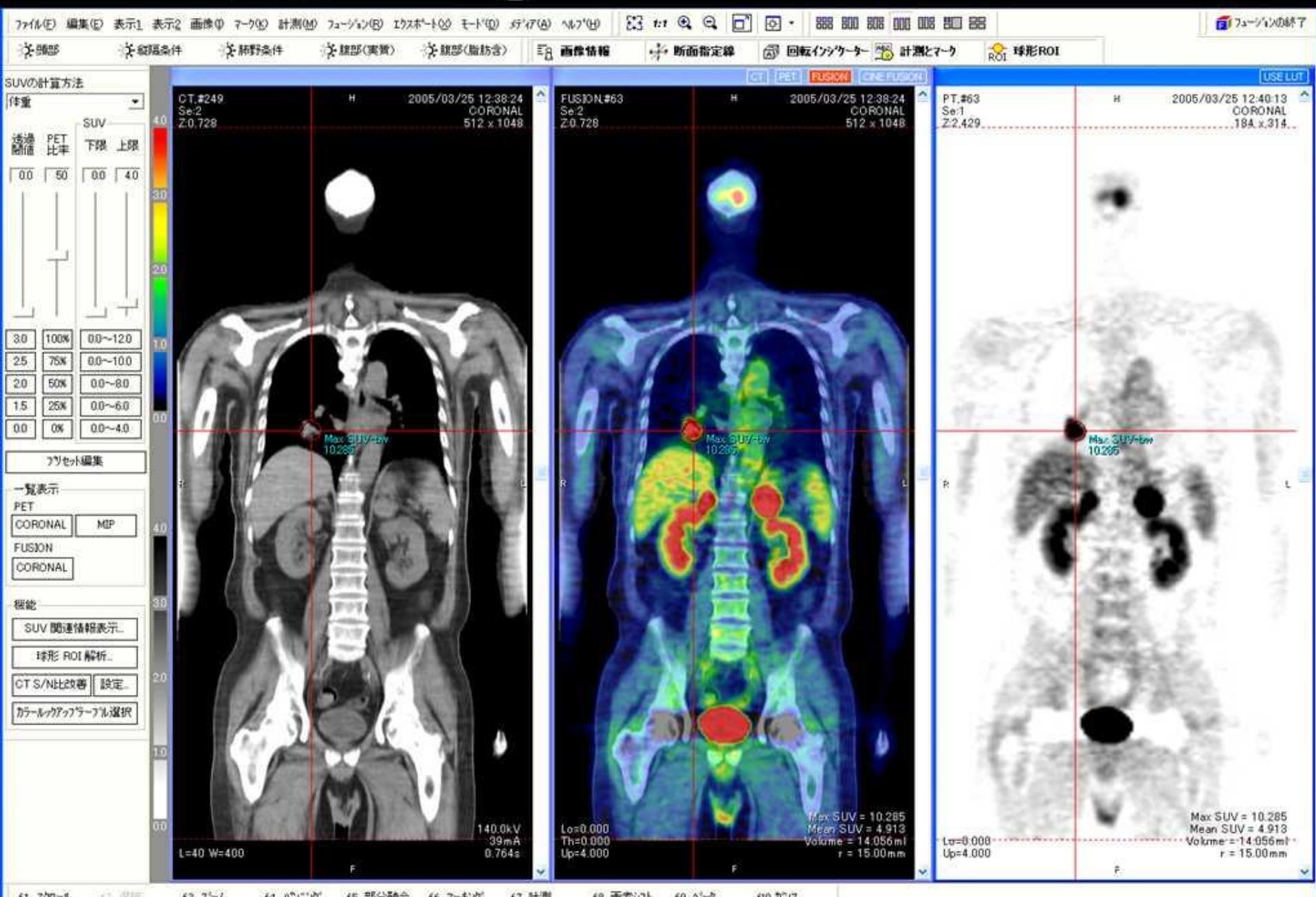
$$D_1 = D_o \exp(-\mu X_1)$$

$$D_2 = D_o \exp(-\mu X_2)$$

$$D_1 D_2 = D_o D_o \exp(-\mu (X_1 + X_2))$$

$$D_o = \sqrt{D_1 D_2 \exp(\mu Y)}$$

PET/CT画像 Lung ca.



CT値 (HU : Hounsfield Unit)

組織の密度に比例する値

CT断層像の画素値の基になる値は
体内の 各組織の線減弱係数 μ_t だが、
臨床的な理解度を容易にするために
 μ_t に比例した値がCTの画素値に使われる。

$$\text{CT値} = 1000 \times (\mu_t - \mu_w) / \mu_w$$

μ_w : 水のX線吸収係数（線減弱係数）

μ_t : 組織のX線吸収係数（線減弱係数）

空気のCT値 は -1000

$$1000 \times (\mu_{\text{air}} - \mu_w) / \mu_w = -1000 \text{ (HU)}$$

厳密には空気の線減弱係数 μ_{air} は0ではないが、水や人体組織と比べると極めて小さい値なので、CT値を計算する場合は $\mu_{\text{air}} = 0$ とする。

水のCT値 は 0 (比重1の密度が 0 HU)

$$1000 \times (\mu_w - \mu_w) / \mu_w = 0 \text{ (HU)}$$

水の2倍の線減弱係数の物質のCT値は 1000
(水の2倍の密度が 1000 HU)

$$1000 \times (2\mu_w - \mu_w) / \mu_w = 1000 \text{ (HU)}$$

P E Tで使用する陽電子放出核種

病院内のサイクロトロンで產生する

半減期(分) 合成放射性薬剤

酸素15 15-O 2分 O₂, CO, CO₂, H₂O

窒素13 13-N 10分 NH₃

炭素11 11-C 20分 ¹¹C-酢酸, ¹¹C-メチオニン

フッ素18 18-F 110分 FDG, FDOPA

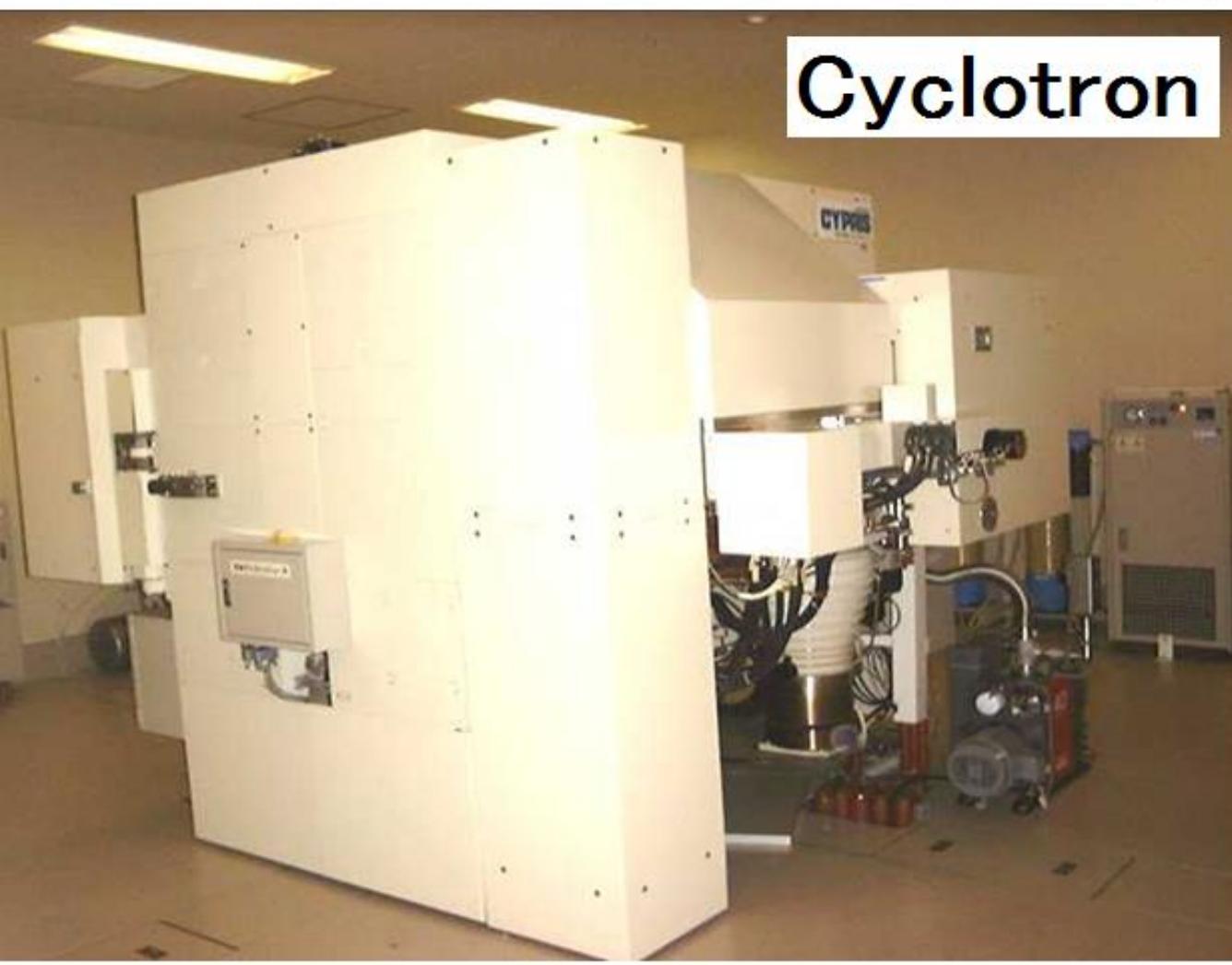
従来の検査で使用する放射性同位元素 の半減時間

99m-Tc 6.01 時間

67Ga 78.2 時間 (3.2日)

201TI 72.9 時間 (3.0日)

^{18}F	110 min	$^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})$ ^{18}F
^{15}O	2.04 min	$^{14}\text{N}(\text{d},\text{n})$ ^{15}O , $^{15}\text{N}(\text{p},\text{n})$ ^{15}O
^{11}C	20.4 min	$^{14}\text{N}(\text{p},\alpha)$ ^{11}C
^{13}N	9.97 min	$^{12}\text{C}(\text{d},\text{n})$ ^{13}N , $^{16}\text{O}(\text{p},\alpha)$ ^{13}N



Cyclotron

北大病院内の
サイクロトロン

巨大な電磁石
水素または重水素
原子核を加速して
元素に衝突させ、

陽電子を出す
RIを作っている。

陽電子放出核種の半減期(half-life)は短いので
PET検査の被曝(exposure)は少ない。

被曝の単位は シーベルト(Sv) ($mSv = 0.001Sv$)
体重1kgに 1J のエネルギーを受ける被曝が1Sv。
($1Sv = 1J/kg$) 一般的に、100mSv以下は、無害。

18F-FDG (185MBq) 4 mSv (膀胱 20 心臓 10 胎児 3)

11C-Methionine (370MBq) 2 mSv (膵、肝 7)

15-O-CO2 (3000MBq) 2 mSv (肺 11)

CT 7mSv ~ 10 ~

血管造影 7 mSv ~ 10 (1分で皮膚0.5)

胃、消化管造影 3 mSv

単純X線撮影 0.1 mSv(胸部) 0.2 mSv(骨盤)

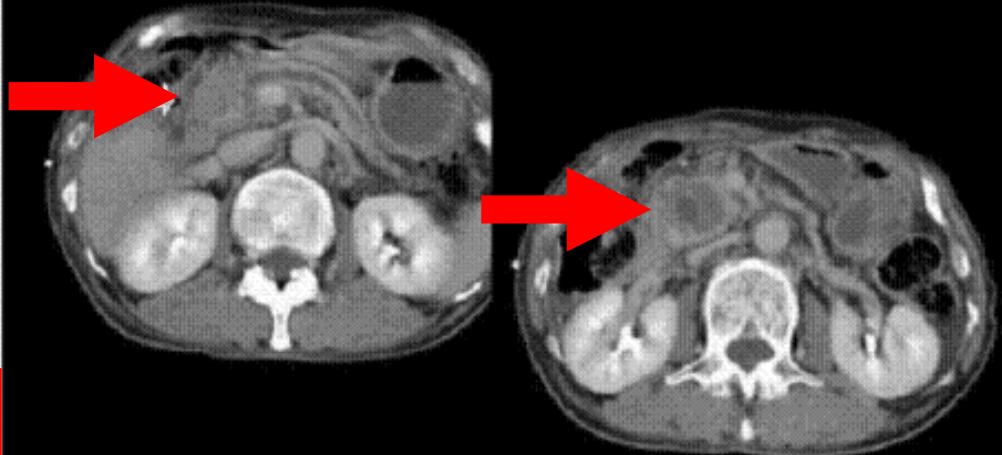
膵頭部癌 Panc. head ca.

食後に実施した FDG PET では、病変部の SUV 2.2 空腹時に再検査して SUV 3.4 に上昇。

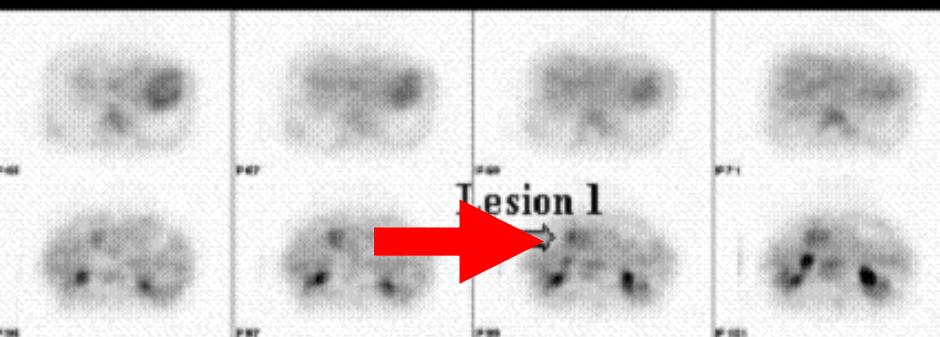
FDG-PETは、空腹時に行う。

症例3

腹部造影CT



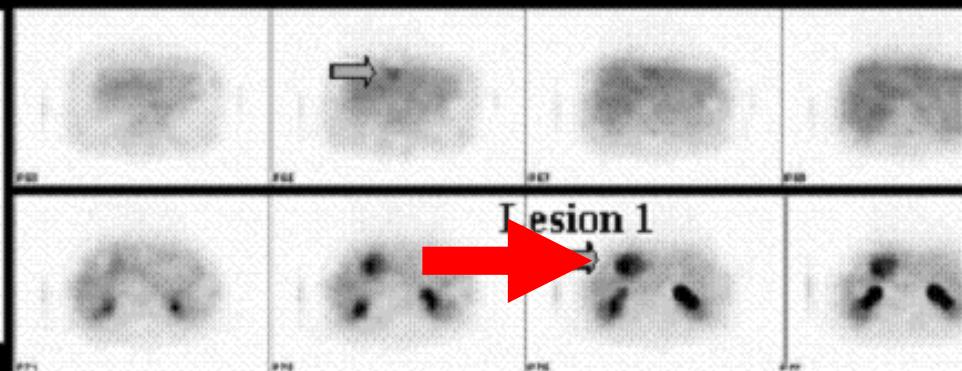
症例3：FDG-PET(1回目)



SUV 2.2 Lesion1 5029Bq/ml

前処置: 検査3時間前に食事(just after meal).
検査時血糖 BS 167mg/dl

症例3：FDG-PET(2回目)



SUV 3.4 Lesion1 8251 Bq/ml

前処置: 検査前夜より絶食(fasted all night).
検査時血糖 95mg/dl

テスト

解答

3

11時10分に200MBqあった¹⁸F-FDGを12時に患者(身長150cm、体重50kg)へ投与し13時にPET撮像を開始し、14時50分に解析を行い、病変部位を囲んだ関心領域の放射能は30000Bq/mlであった。病変のSUVはどれか。

- 1. 3
- 2. 7.5
- 3. 15
- 4. 30
- 5. 60

解答

5

¹⁸F-FDG PET検査について正しいのはどれか。

- 1. 早期胃がんは保険適応である。
- 2. ¹⁸F-FDG投与量を増やすと病変のSUVは低下する。
- 3. ¹⁸F-FDG投与3時間後から全身像を撮像する。
- 4. 撮像開始前に排便させる。
- 5. 検査前に食事をすると病変のSUVは低下する。

問題1

^{18}F - FDG PET の SUV 値で正しいのはどれか。

1. 血糖値が高いと腫瘍で高くなる。
2. 運動後に検査をすると筋肉で低くなる。
3. 皮下への注射漏れがあると脳で高くなる。
4. 投与から 1 時間経過すると腫瘍で一定となる。
5. ^{18}F - FDG が体内に均等に分布すると 1 になる。

問題2

^{18}F - FDG の集積性が低いのはどれか。

1. 大腸癌
2. 悪性黒色腫
3. 悪性リンパ腫
4. 頭頸部扁平上皮癌
5. 高分化型肝細胞癌

解答5