

# 核医学機器工学概論3

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。

スライダ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。

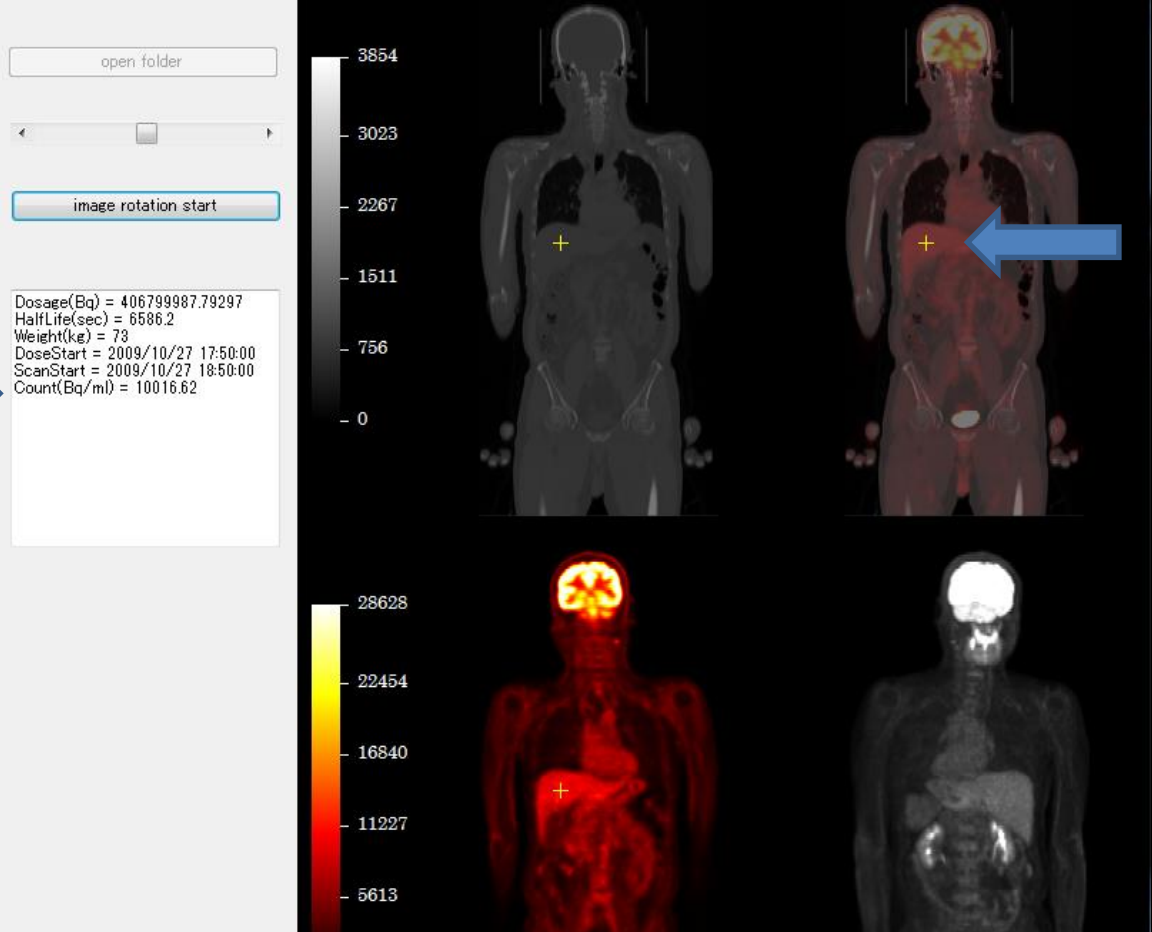
Dosage : DoseStart時に計測した全投与量

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 →



The screenshot displays a software interface for medical imaging. On the left, a control panel includes an 'open folder' button, a slider, and an 'image rotation start' button. Below these are technical parameters: Dosage(Bq) = 406799987.79297, HalfLife(sec) = 6586.2, Weight(kg) = 73, DoseStart = 2009/10/27 17:50:00, ScanStart = 2009/10/27 18:50:00, and Count(Bq/ml) = 10016.62. The main area shows four views of a human torso: a grayscale CT scan (top-left), a PET scan (top-right), a PET/CT fusion image (bottom-left), and a grayscale CT scan (bottom-right). A vertical color scale on the left of the top row ranges from 0 to 3854. A vertical color scale on the left of the bottom row ranges from 5613 to 28628. A yellow crosshair is visible in the center of the PET and fusion images. A blue arrow points from the text 'クリックした部位' to the yellow crosshair in the fusion image.

クリックした部位

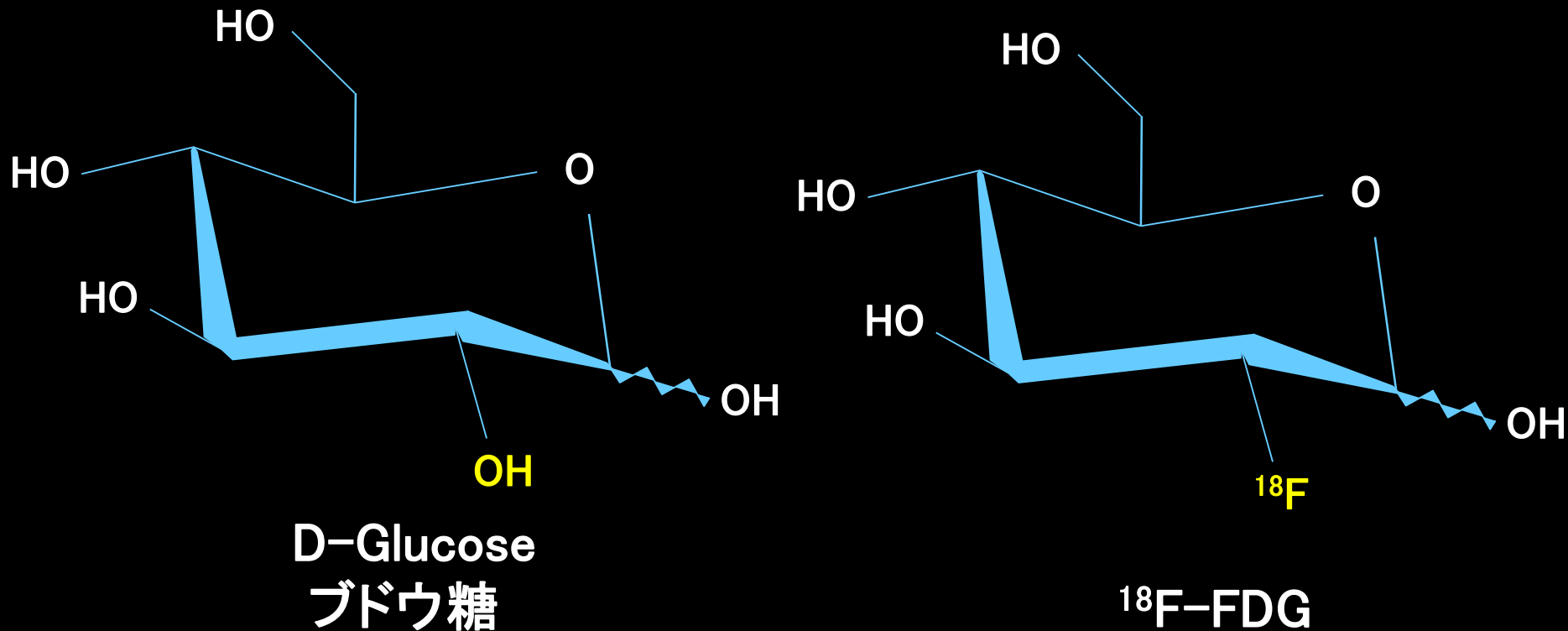
以上の操作をして課題をこなしてください。

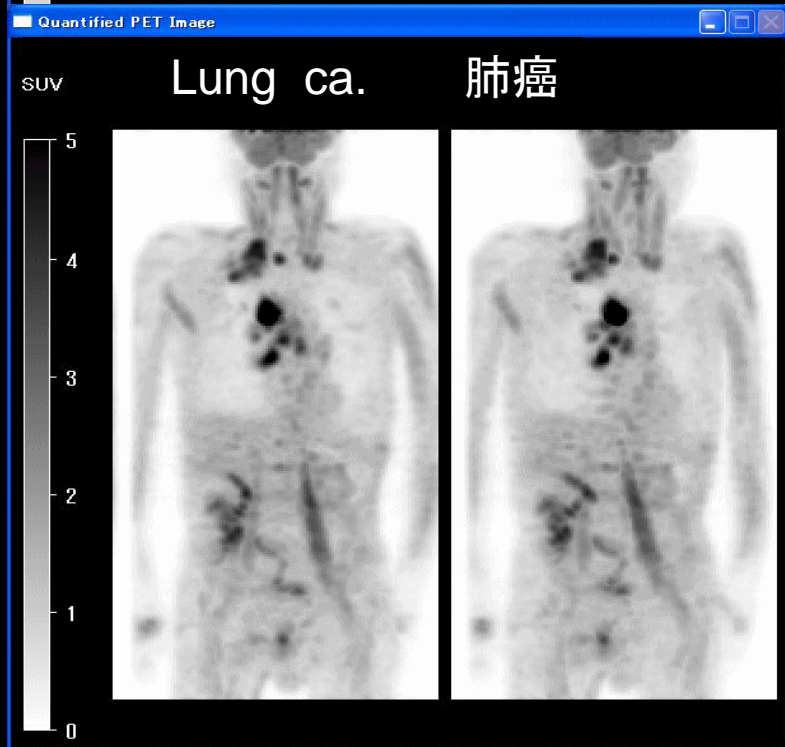
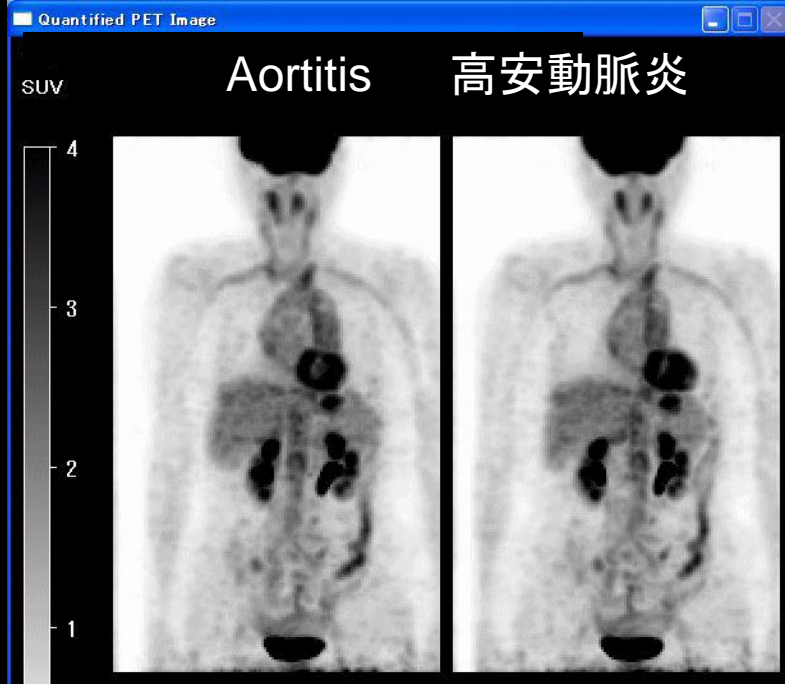
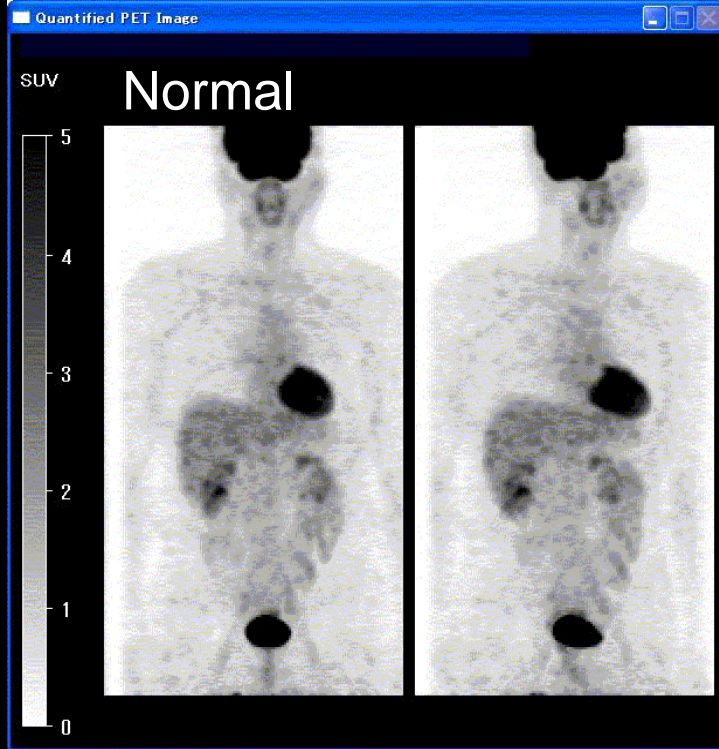
疾患例について、それぞれ病変部位のカウントとSUVを求めてください。

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。

$^{18}\text{F}$ -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<sup>1</sup>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。)

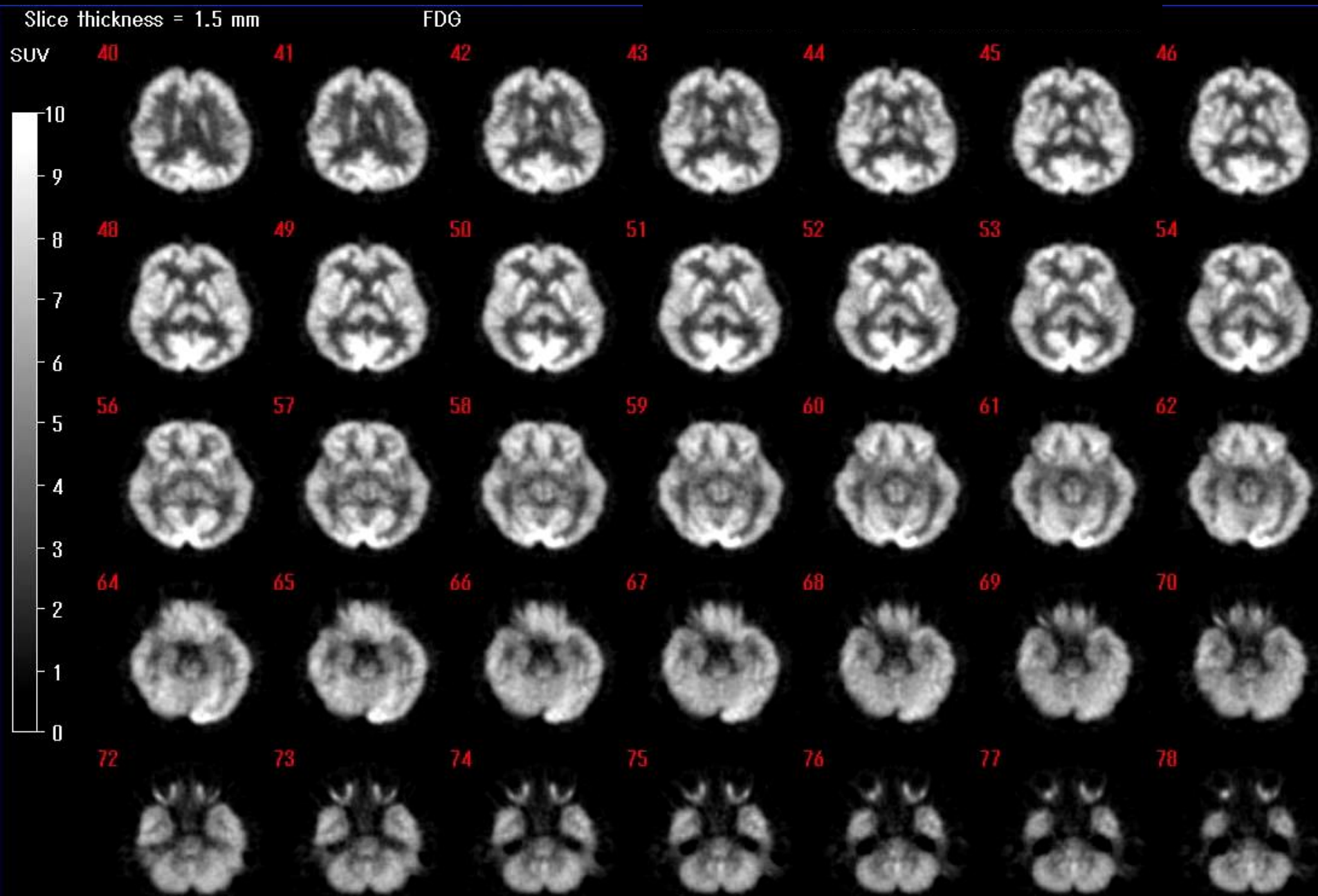




## $^{18}\text{F}$ -FDG PET

腫瘍、炎症のほかに  
脳、尿、ときに心筋へ  
正常集積を認める。

# $^{18}\text{F}$ -FDG Brain PET 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)を産生する。ベータ酸化回路はATP産生は多いが、**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を産生する。解糖系はATP産生量が少ないので、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。好発年齢は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

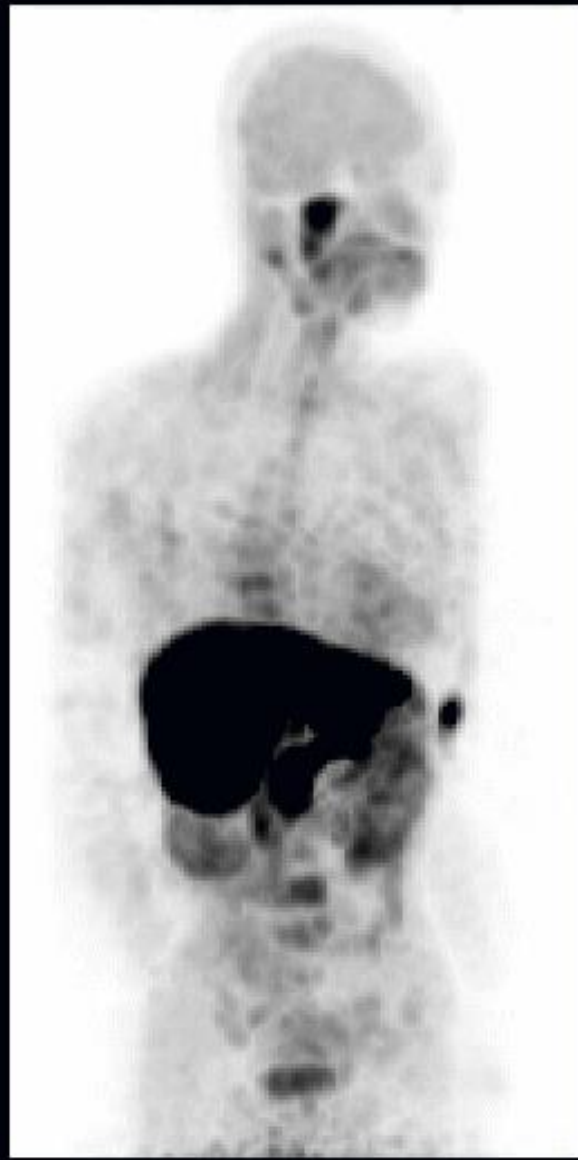
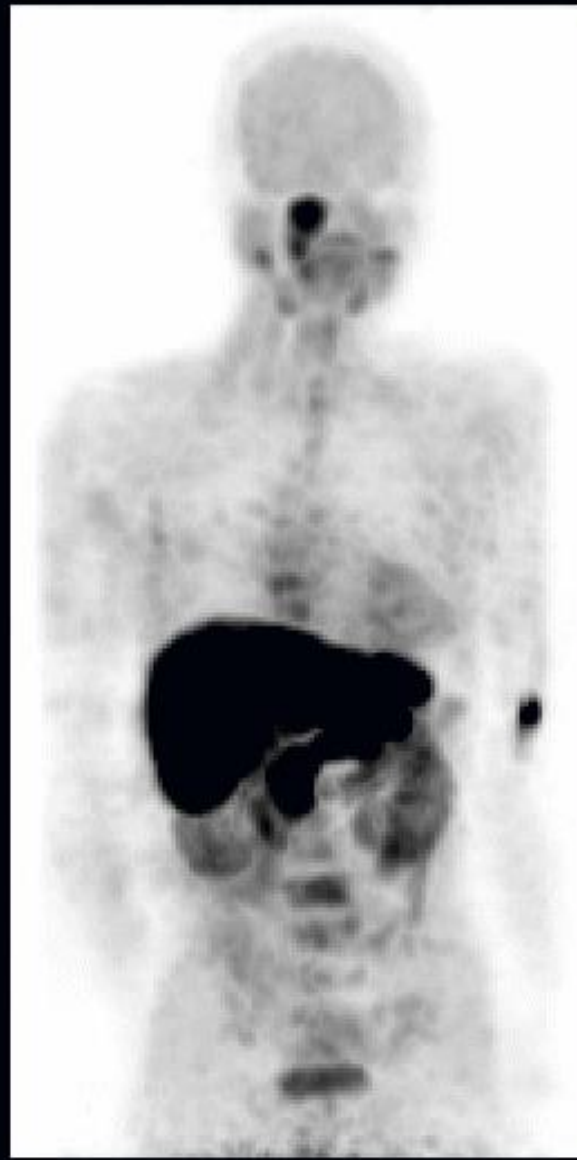
PET

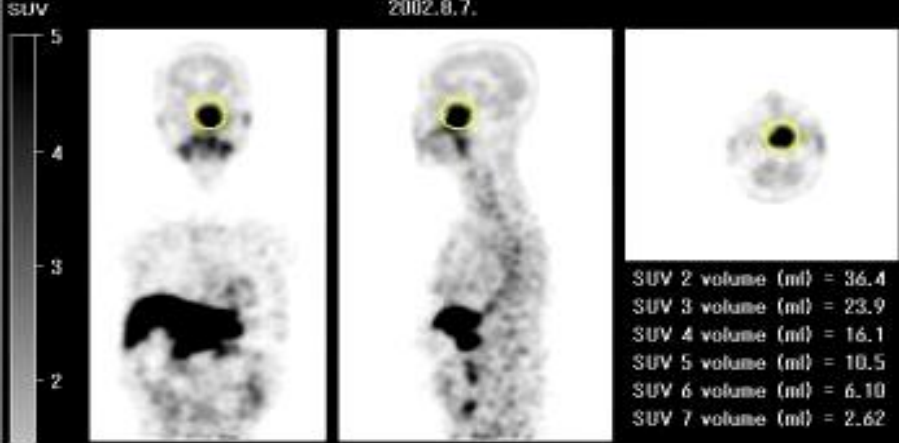
上咽頭癌

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





## $^{11}\text{C}$ -Methionine PET

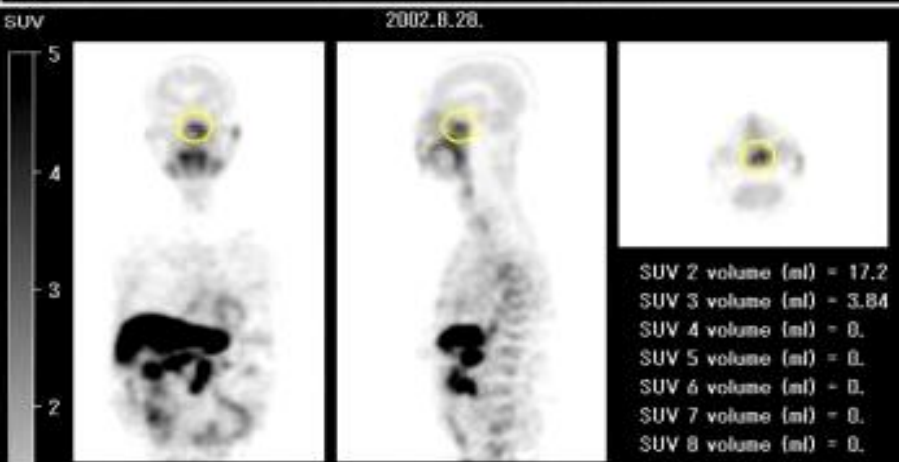
上咽頭癌 治療前

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  $1\text{g/ml}$  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**を用いることが多い。

# 半減期 Half life $T_{1/2}$

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

崩壊定数  $\lambda$

1秒間に原子核が崩壊する割合

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

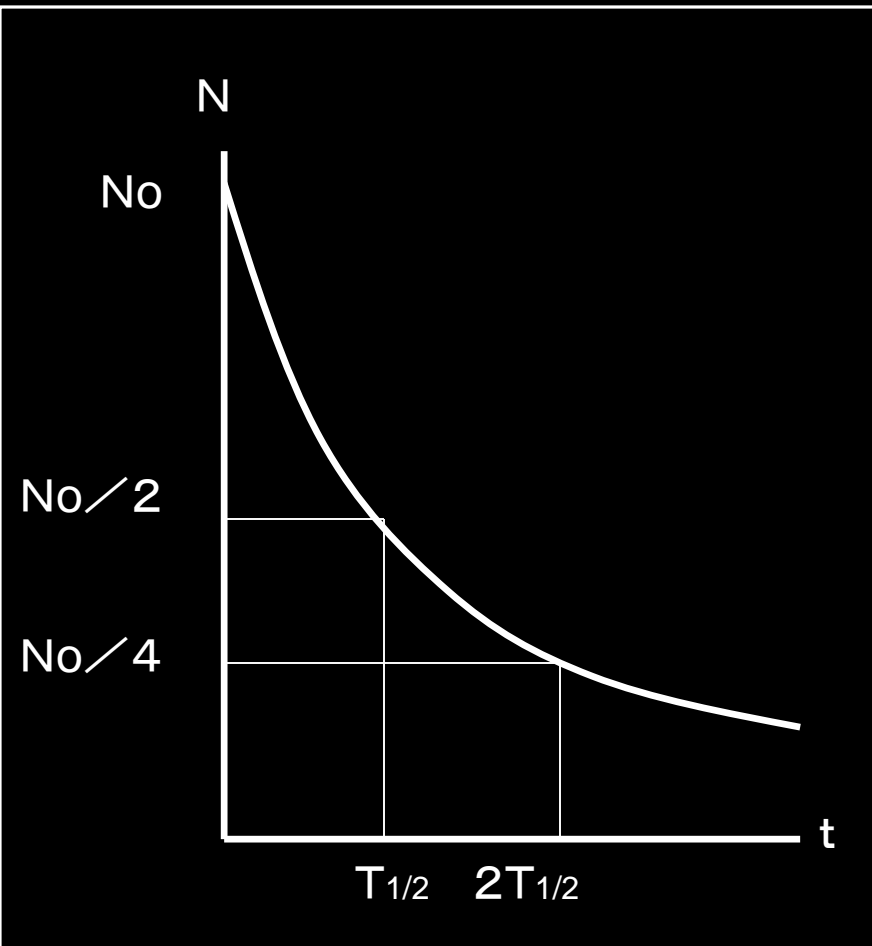
$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

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

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

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

$$\text{Log}2 = 0.693 = \lambda T_{1/2}$$



10時に200 MBqであった $^{18}\text{F}$ -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 $12,000 \text{ Bq/cm}^3$ であった。SUV値はどれか。  
ただし、患者は身長150 cm、体重50 kgとし、人体の密度を $1 \text{ g/cm}^3$ 、  
 $^{18}\text{F}$ 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。

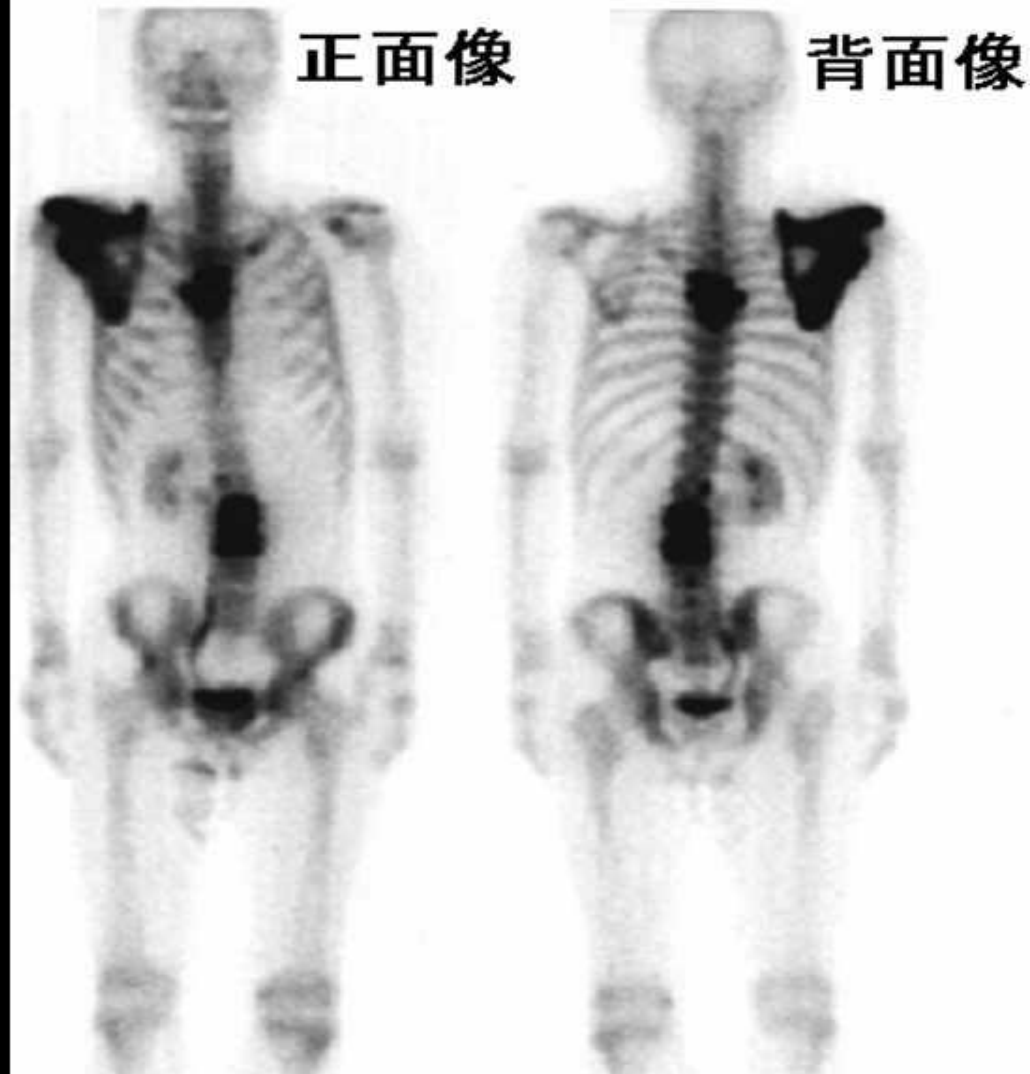
肺癌の骨転移症例。

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。



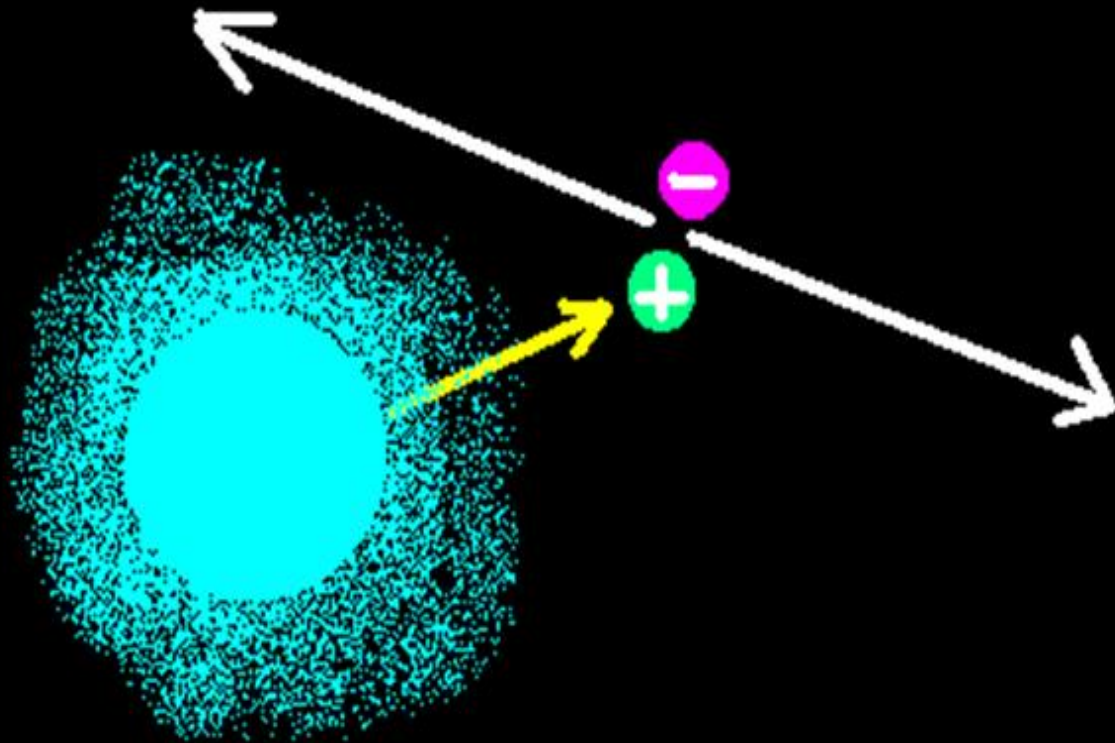
正面と背面のカメラで撮影した像が異なる理由は、人体がガンマ線を吸収、散乱させているため。体表から深い部位ほど描画が薄い。

**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 0.51 MeV 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。

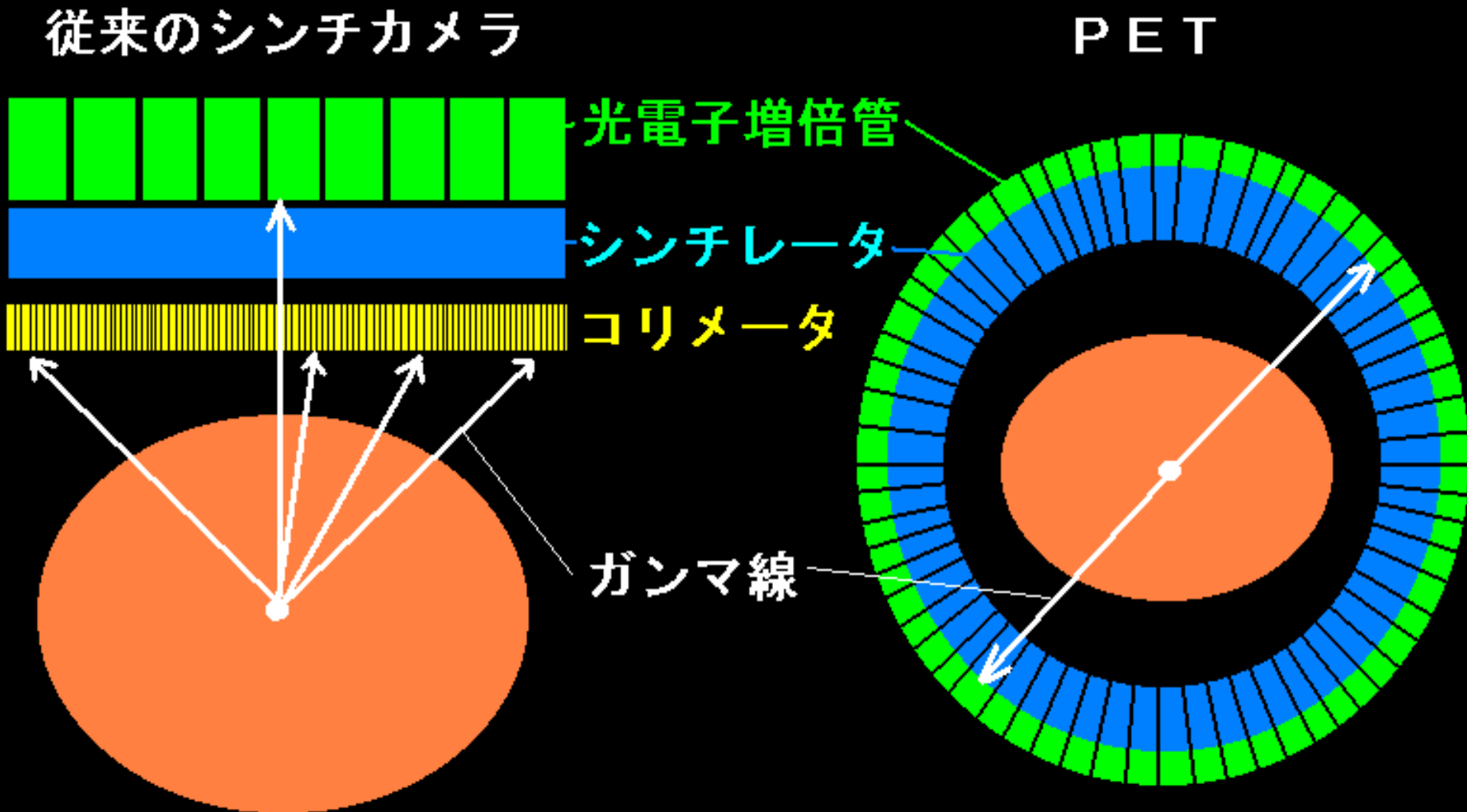
(鉛4mmでエネルギーが半減する程度の電磁波)

## 運動量保存則

2本の放射線は反対方向に放出

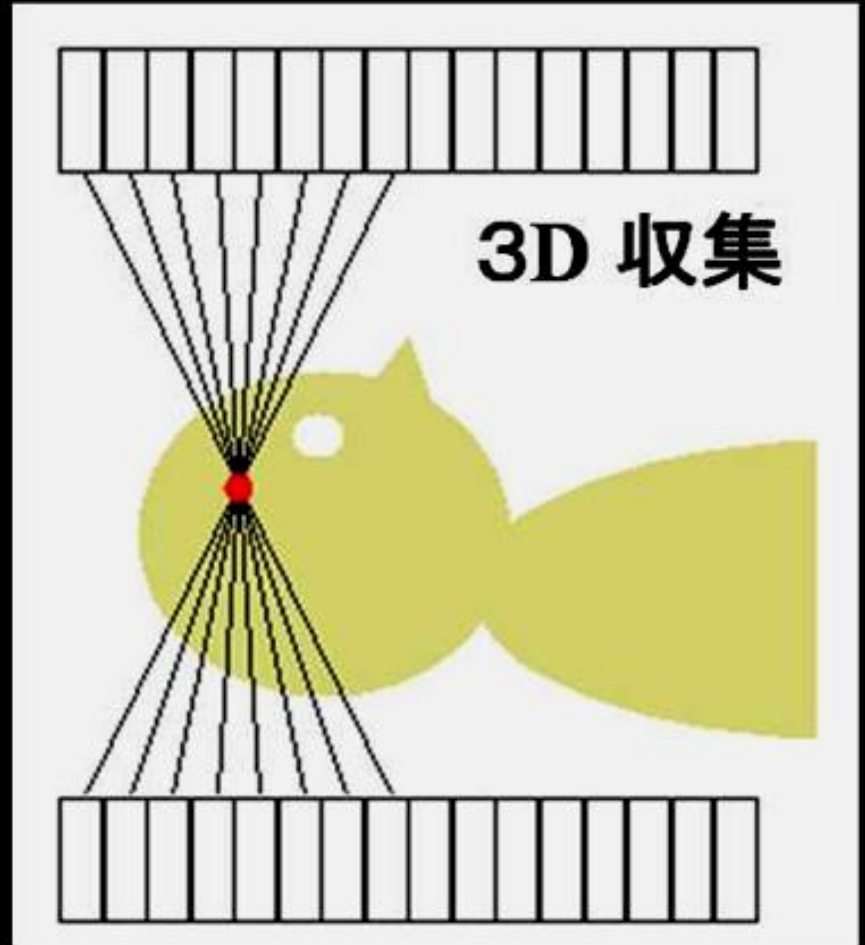
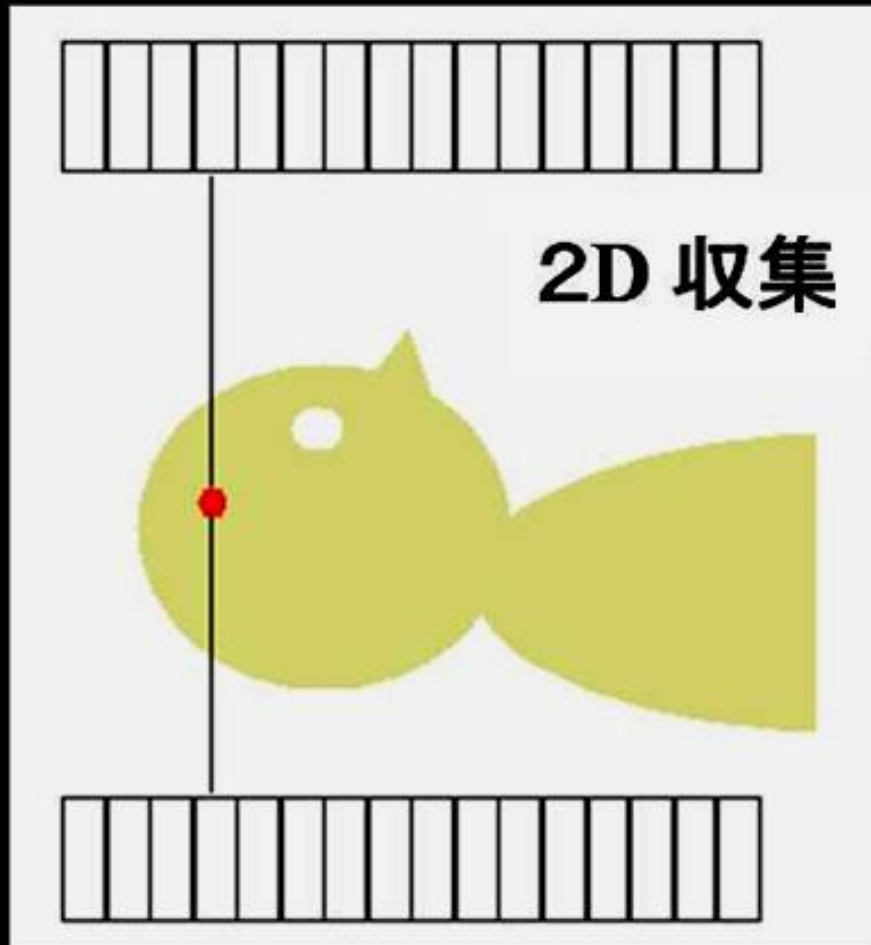
PETカメラは、コリメータがないので高感度。

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。



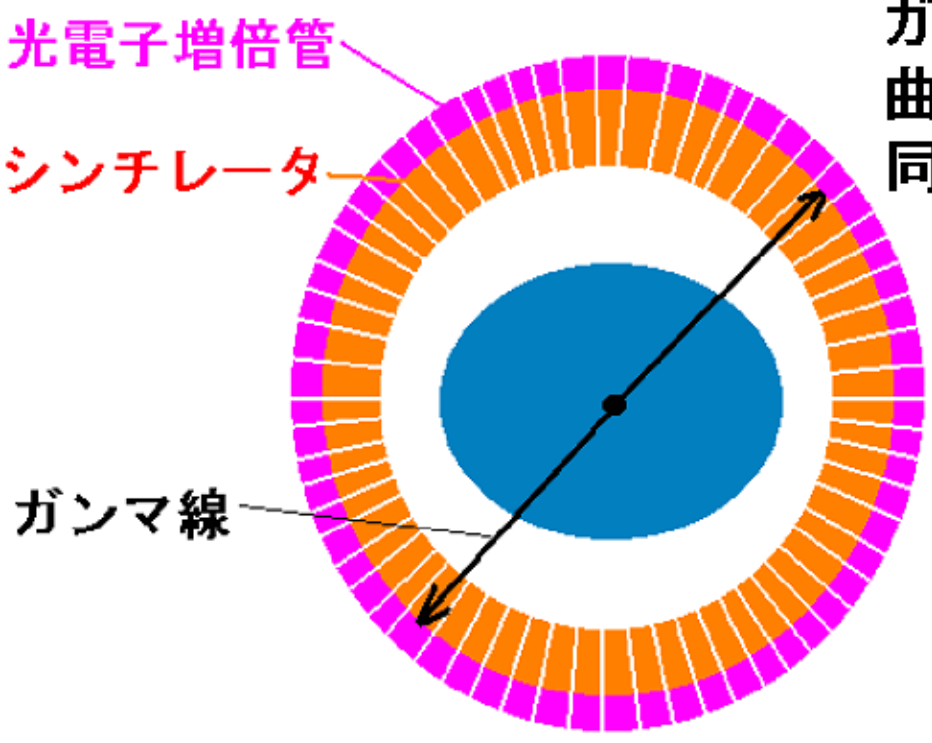
# 現在のPETはほとんど3次元(3D)収集

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。

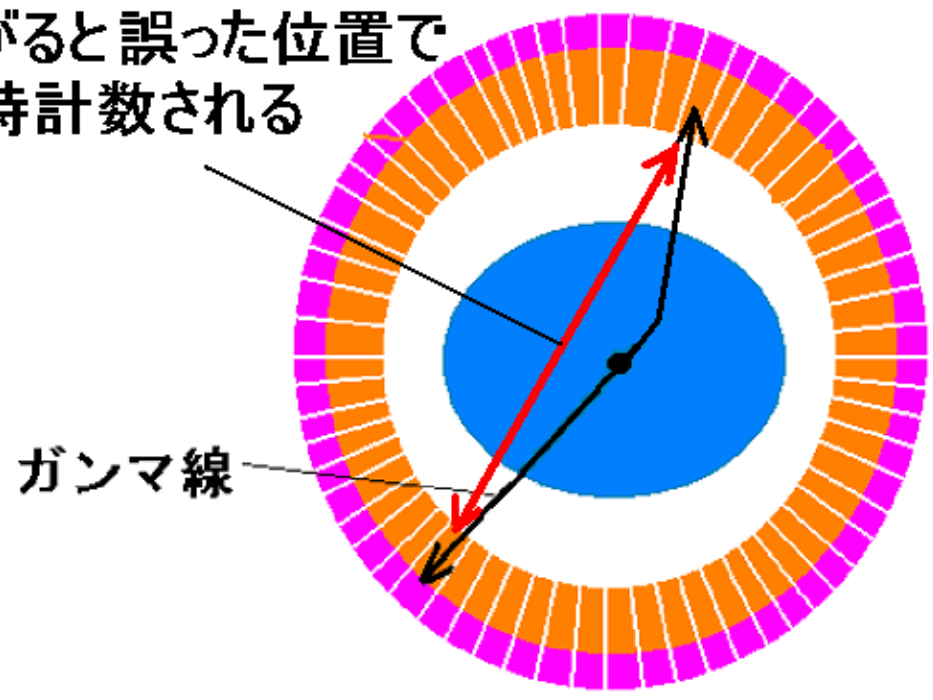


PETにも散乱線の影響がある。

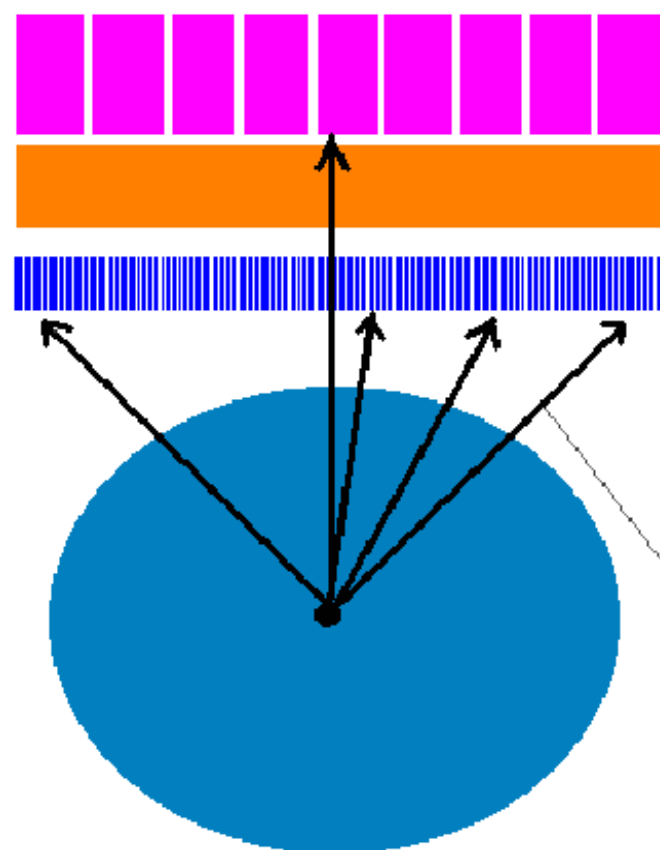
2D収集よりも3D収集の場合で、コンプトン散乱線成分が多くなる(約3倍)。



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



光電子増倍管

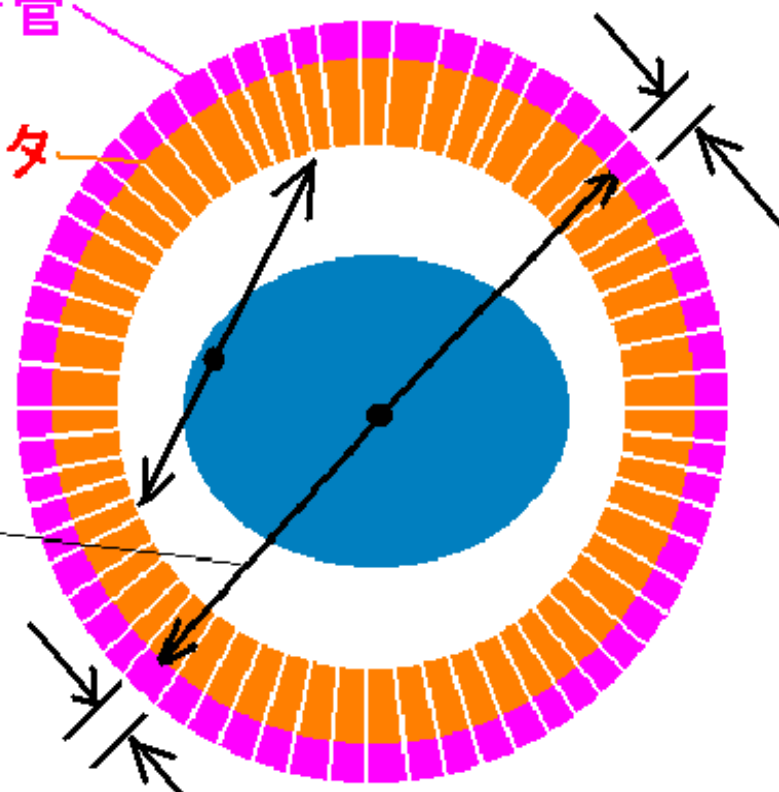
シンチレータ

コリメータ

ガンマ線

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 $\gamma$ 線はシンチレータ  
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 <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub> )	LSO (Lu <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> : Ce)	GSO (Gd <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> : Ce)	BaF <sub>2</sub>
実効原子番号	51	74	66	59	54
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	3.7	7.1	7.4	6.7	4.9
減弱係数 (cm <sup>-1</sup> )	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 511keV 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。)

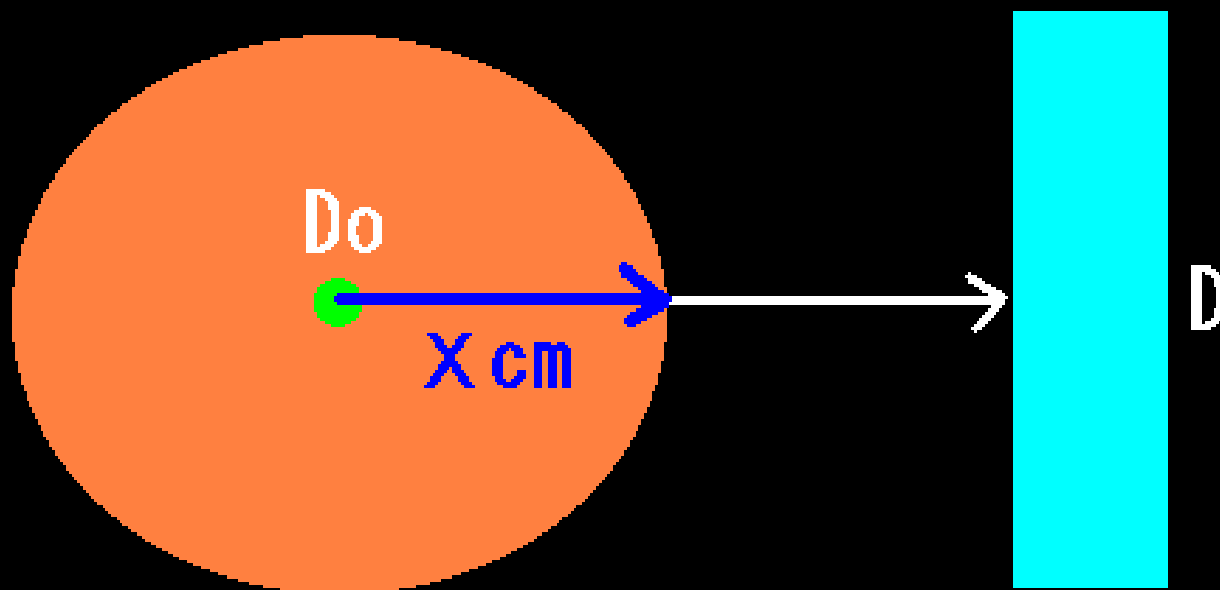
GSO, LSOはエネルギー分解能が良い。

(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

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



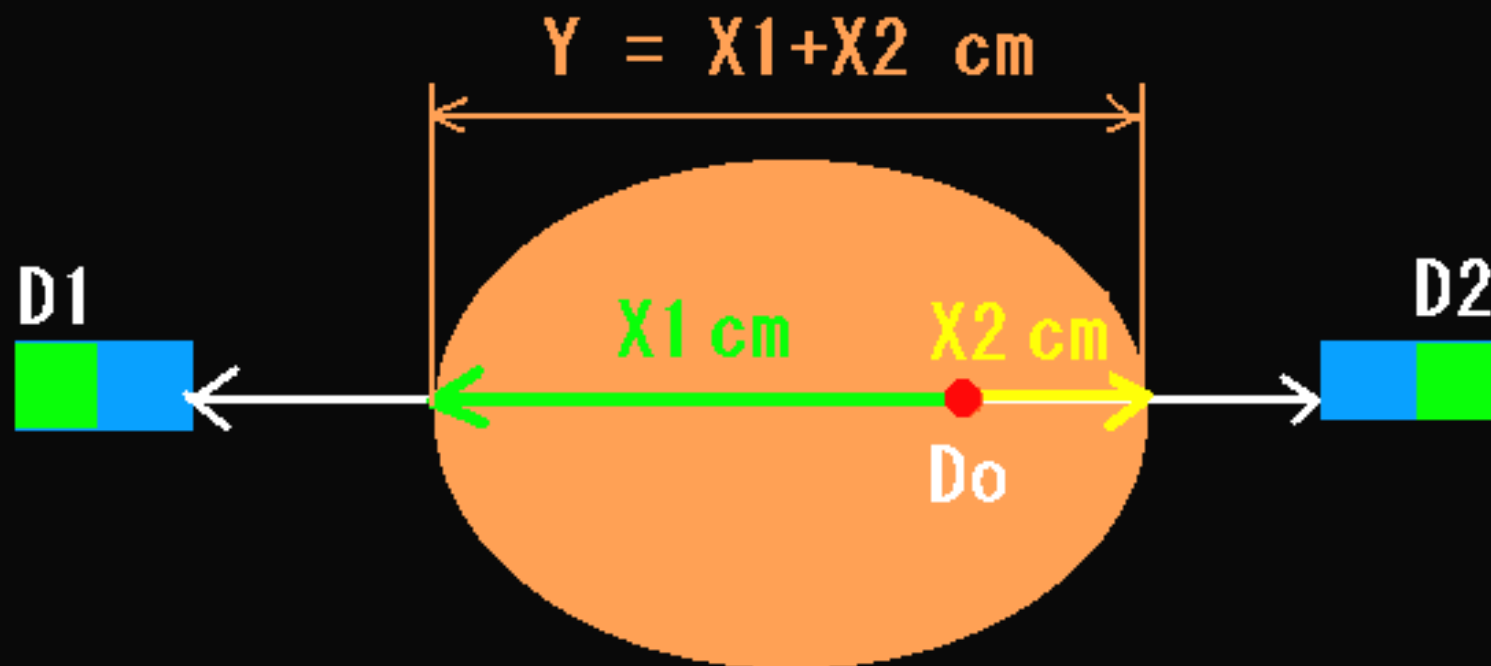
シンチカメラ

$D_0$  : 真の放射能 (Bq)

$D$  : 放射能測定値 (Bq)

$\mu$  : 線減弱係数 (/cm)

PETは、CT画像で吸収補正を行うので  
定量性が良い。



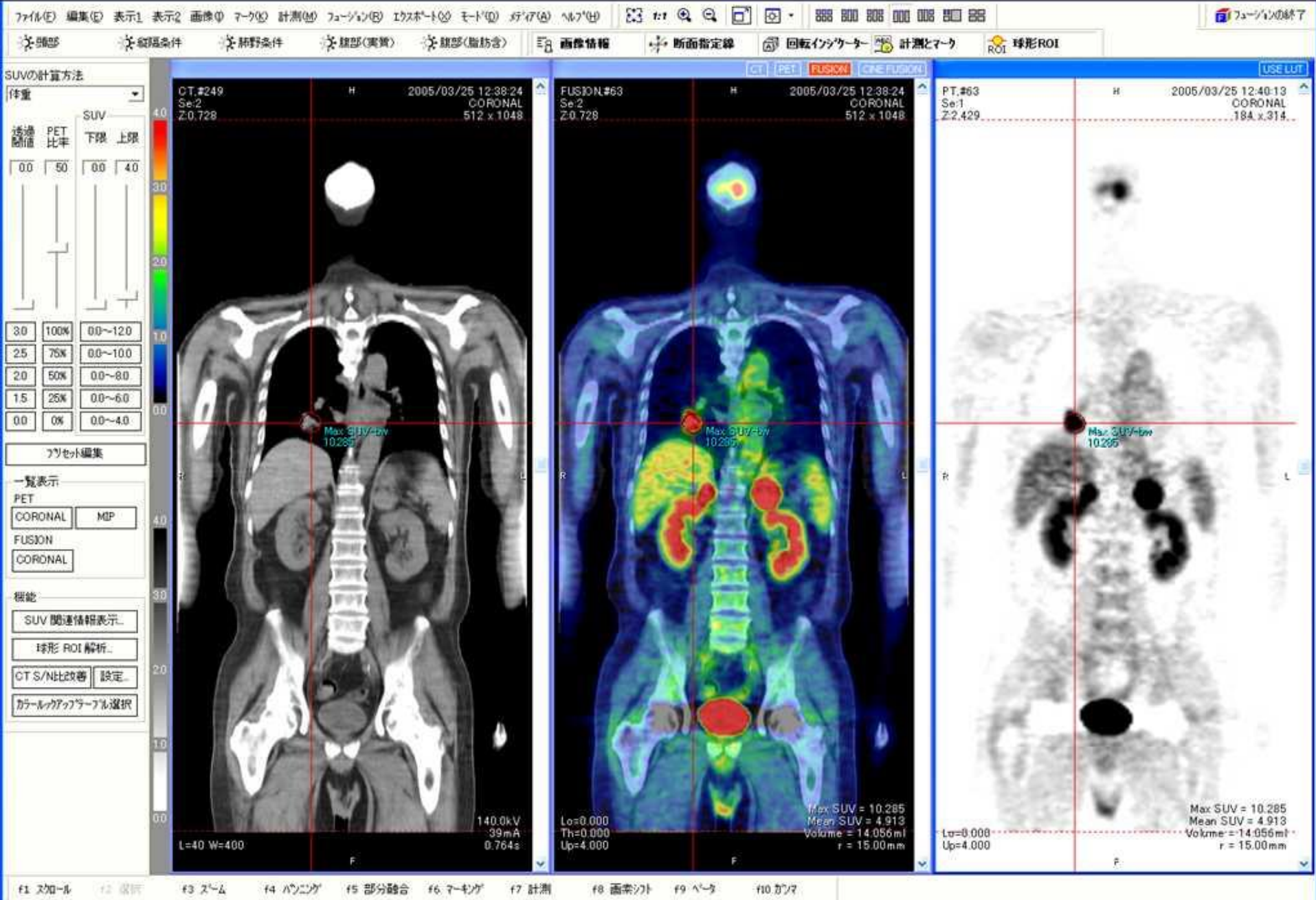
$$D_1 = D_0 \exp(-\mu X_1)$$

$$D_2 = D_0 \exp(-\mu X_2)$$

$$D_1 D_2 = D_0 D_0 \exp(-\mu (X_1 + X_2))$$

$$D_0 = \sqrt{D_1 D_2 \exp(\mu Y)}$$

# 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  $\mu_t$  だが、臨床的な理解度を容易にするために  $\mu_t$  に比例した値がCTの画素値に使われる。

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

$\mu_w$  : 水のX線吸収係数（線減弱係数）

$\mu_t$  : 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  $\mu_{\text{air}}$  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)

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

# PETで使用する陽電子放出核種

## 病院内のサイクロトロンで産生する

		半減期(分)	合成放射性薬剤
酸素15	15-O	2分	O <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O
窒素13	13-N	10分	NH <sub>3</sub>
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)

201Tl 72.9 時間 (3.0日)

$^{18}\text{F}$  110 min  
 $^{15}\text{O}$  2.04 min  
 $^{11}\text{C}$  20.4 min  
 $^{13}\text{N}$  9.97 min

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



## 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) ( $mSv = 0.001 Sv$ )  
体重1kgに1Jのエネルギーを受ける被曝が1Sv。  
( $1 Sv = 1 J/kg$ ) 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 (脾、肝 7)

15-O-CO<sub>2</sub> (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)

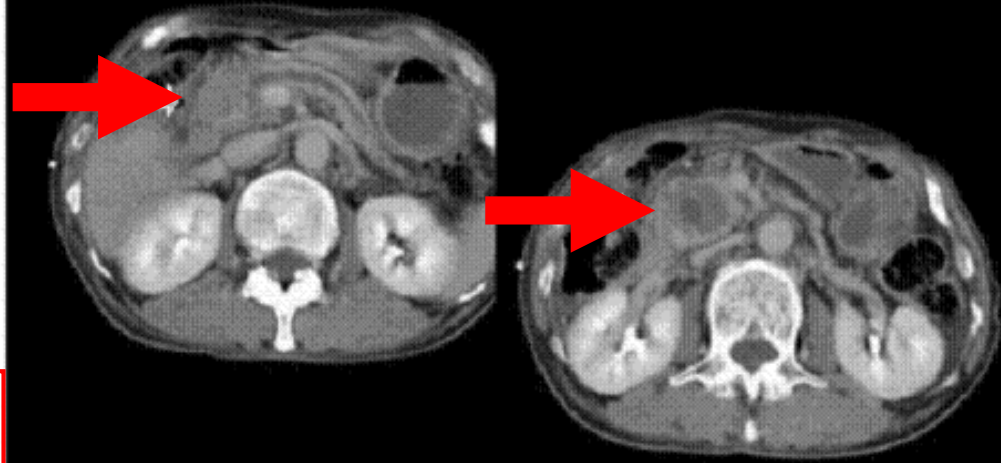
膵頭部癌 Panc. head ca.

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。

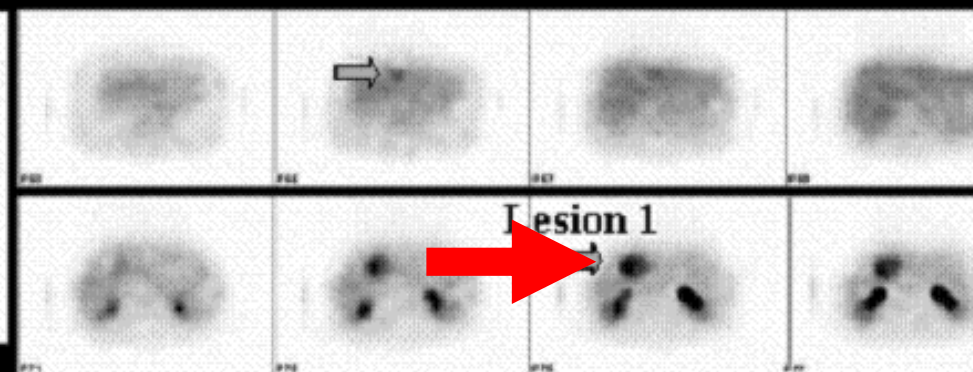
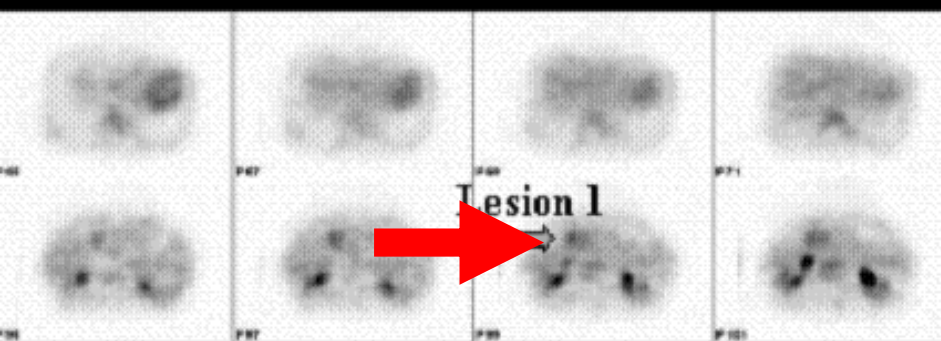
症例3

腹部造影CT



症例3: FDG-PET(1回目)

症例3: FDG-PET(2回目)



SUV 2.2 Lesion1 5029Bq/ml

SUV 3.4 Lesion1 8251 Bq/ml

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

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 $^{18}\text{F}$ -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

$^{18}\text{F}$ -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.  $^{18}\text{F}$ -FDG投与量を増やすと病変のSUVは低下する。
- 3.  $^{18}\text{F}$ -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

$^{18}\text{F}$ -FDG PET の SUV 値で正しいのはどれか。

## 解答5

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.  $^{18}\text{F}$ -FDG が体内に均等に分布すると1になる。

## 問題2

$^{18}\text{F}$ -FDG の集積性が低いのはどれか。

## 解答5

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