

# 検査4年 放射性同位元素検査技術学・核医学概論 水曜1講目

国家試験で核医学検査はほとんど出題されない。

放射線に関する問題は、最近是被ばくに関する  
出題が毎年2問程度。

物理系問題（情報、医用工学など）は10問程度  
出題あり。

物理系の過去問題を解説し、国試対策の講義を  
行います。

放射線の影響を最も受けにくいのはどれか。

1. 単球
2. 好酸球
3. 好中球
4. 赤血球
5. リンパ球

放射線の生物への影響とは、放射線によるDNAの損傷が最も重大。DNAが損傷すると細胞分裂ができない、または異常細胞が出現。赤血球にはDNAが無いので、影響がない。

輸血血液には放射線を照射する。赤血球には影響がなく、他人の白血球(白血球は核がある=DNAがある)が損傷し、輸血による他人の白血球で生じる免疫障害を予防できる。

実効線量を表す単位はどれか。

1. Bq

4. Gy

2.  $\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$

5. Sv

3. eV

**Bq(ベクレル) : 放射性同位元素(RI)の放射能の強さの単位**

放射性同位元素(RI)が、1秒間に放出する $\gamma$ 線や粒子線( $\alpha$ 線や $\beta$ 線や中性子線など)の数。

**C/kg(クーロン per kg) : 空中での放射線の強さの単位。**

空気1kgに1Cの電荷を発生させる放射線の強さが、1C/kg

**eV(エレクトロンボルト)** : X線やガンマ線や粒子線の強さの単位。放射線の強さ(放射線加重係数)。

**Gy(グレイ)** : 被ばくの単位。(物理的な被曝の吸収線量)

物質1kgに1J(ジュール)のエネルギーを吸収したのと等価の被曝の強さ。放射線の癌治療では、癌組織に、50~70 Gyを照射する。

**Sv(シーベルト)** : (病気でない健常な)人体の被ばくの単位

**実効線量**とは、医師や技師、患者の正常組織など、本来は被曝を受けることを避けたい部位に受けた被曝。

物理的に同じ放射線(Gyが同じ)でも、組織によって放射線の影響が異なる(**組織加重係数**)。

**実効線量(Sv) = 吸収線量(Gy) x 放射線加重係数 x 組織加重係数**

線量等量 (Sv) = 吸収線量 (Gy) x 線質係数 Q

等価線量 (Sv) = 吸収線量 (Gy) x 放射線加重係数 W

実効線量 (Sv) = 等価線量 (Gy) x 組織加重係数 T

### 放射線荷重係数(2007年勧告)

放射線の種類とエネルギー範囲	放射線荷重係数 $W_R$
光子, すべてのエネルギー	1
電子および $\mu$ 粒子, すべてのエネルギー	1
中性子エネルギー: $E_n$	
$E_n < 1 \text{ MeV}$	$2.5 + 18.2e^{-[\ln(E_n)]^2/6}$
$1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV}$	$5.0 + 17.0e^{-[\ln(2E_n)]^2/6}$
$E_n > 50 \text{ MeV}$	$2.5 + 3.25e^{-[\ln(0.04E_n)]^2/6}$
陽子および荷電パイオン, すべてのエネルギー	2
$\alpha$ 粒子, 核分裂片, 重原子核	20

臓器や組織の感受性の違いを補正する**組織加重係数** (**tissue weighting factor**) という係数があり、1人の人間が受けた線量(実効線量と呼ばれる)は各組織の受けた生物学的効果に比例する量の合計として定義される。

組織荷重係数 (2007 年勧告)

組織・臓器	組織荷重係数 $W_T$
乳房	0.12
骨髄(赤色)	0.12
結腸	0.12
肺	0.12
胃	0.08
生殖腺	0.08
甲状腺	0.04
食道	0.04
肝臓	0.04
膀胱	0.04
骨表面	0.01
皮膚	0.01
脳	0.01
唾液腺	0.01
残りの組織・臓器	0.12

職業被曝の線量限度 Dose limit

実効線量限度 Effective Dose limit

男性 100 mSv/5年 (50 mSv/年)

女性 5 mSv/3月

妊婦 内部被曝 1mSv/出産まで

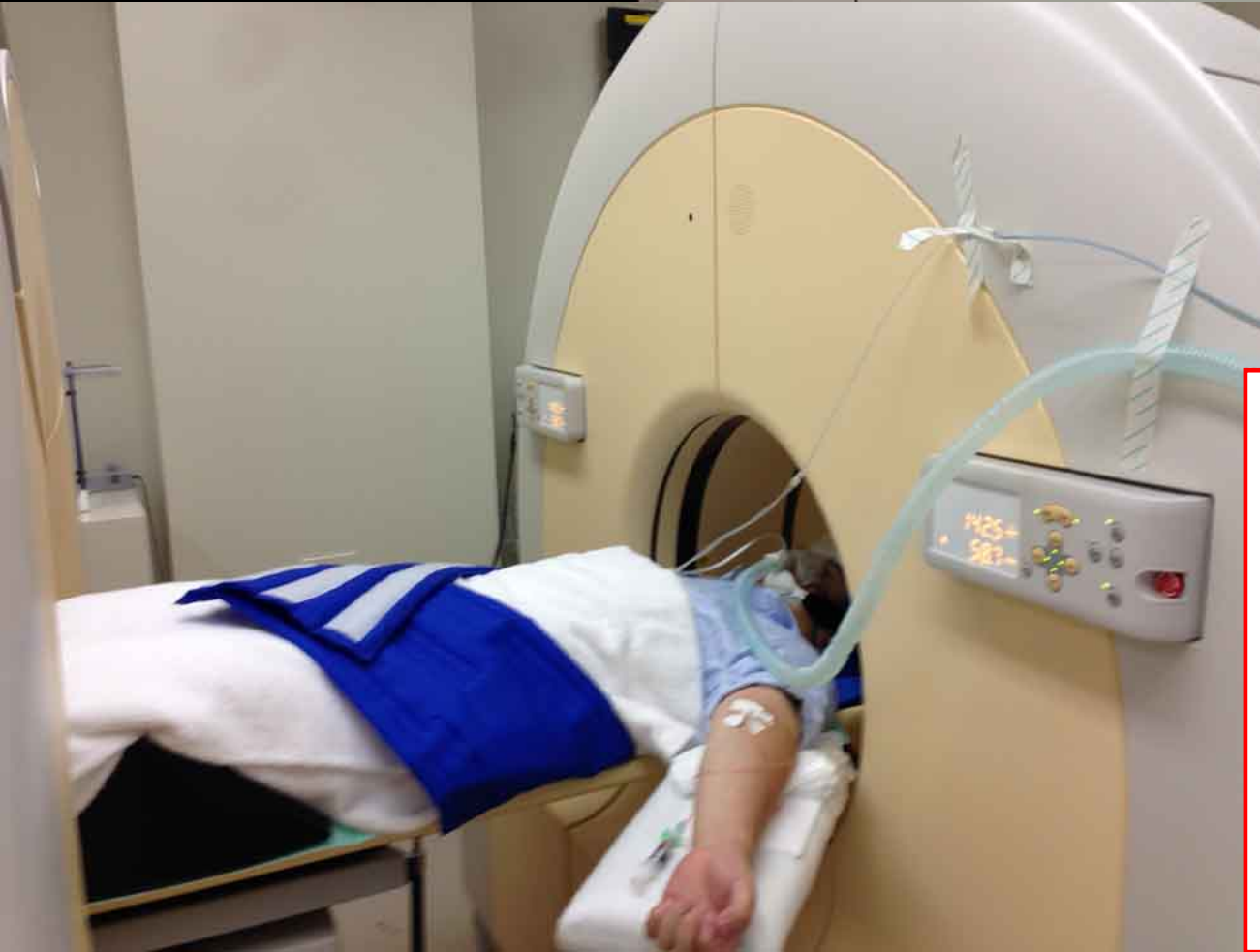
等価線量限度 Equivalent Dose limit

水晶体 100 mSv/5年

皮膚 500 mSv/年 (緊急 1000)

妊婦腹部表面 2mSv/出産まで

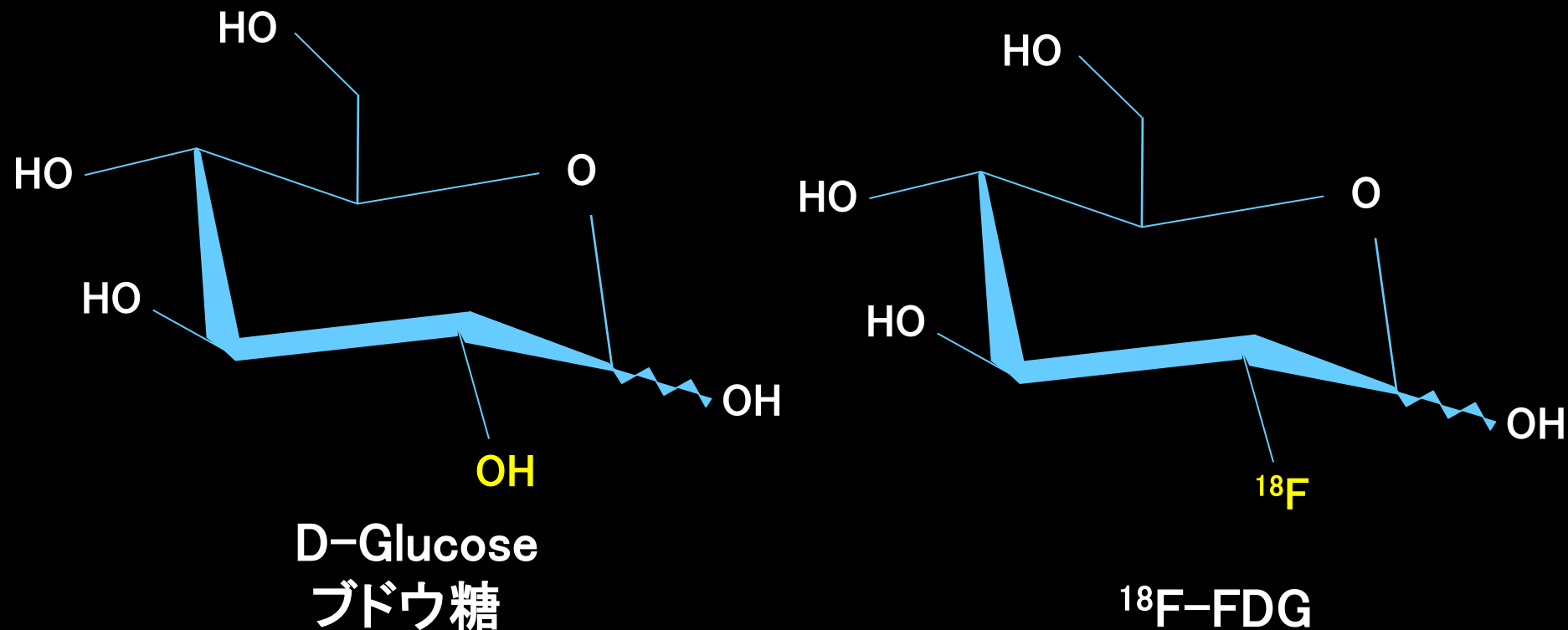
**北大病院  
核医学検査室  
PET/CT装置**

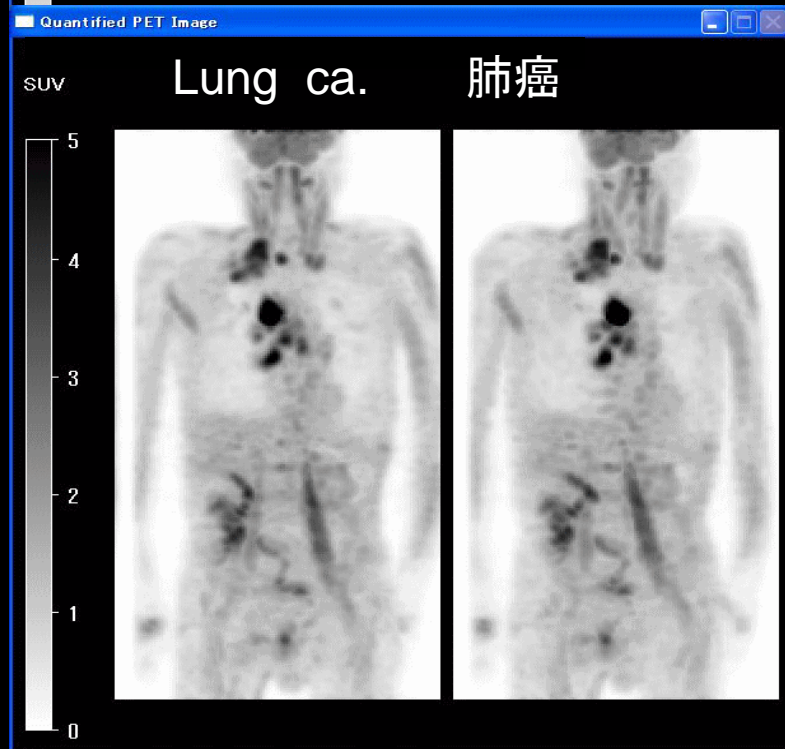
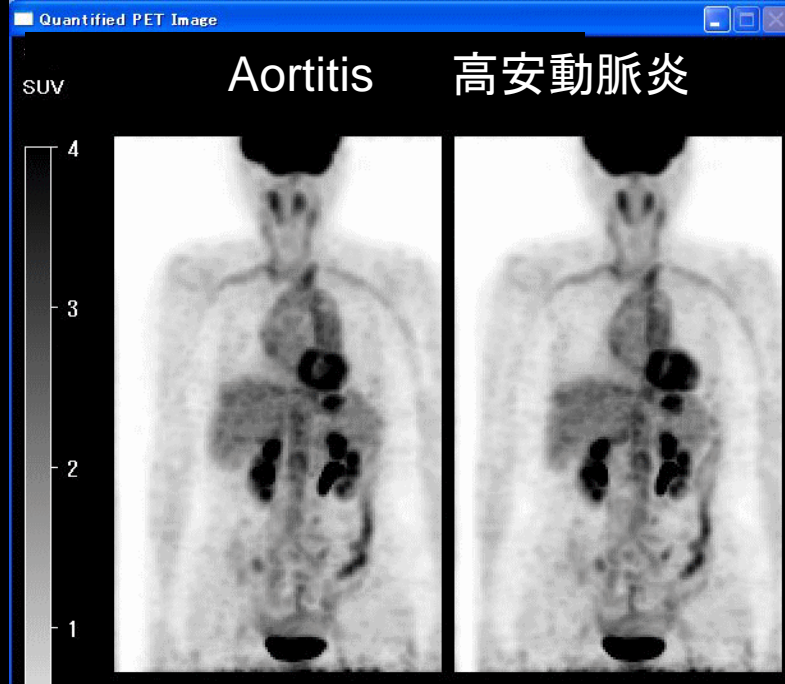
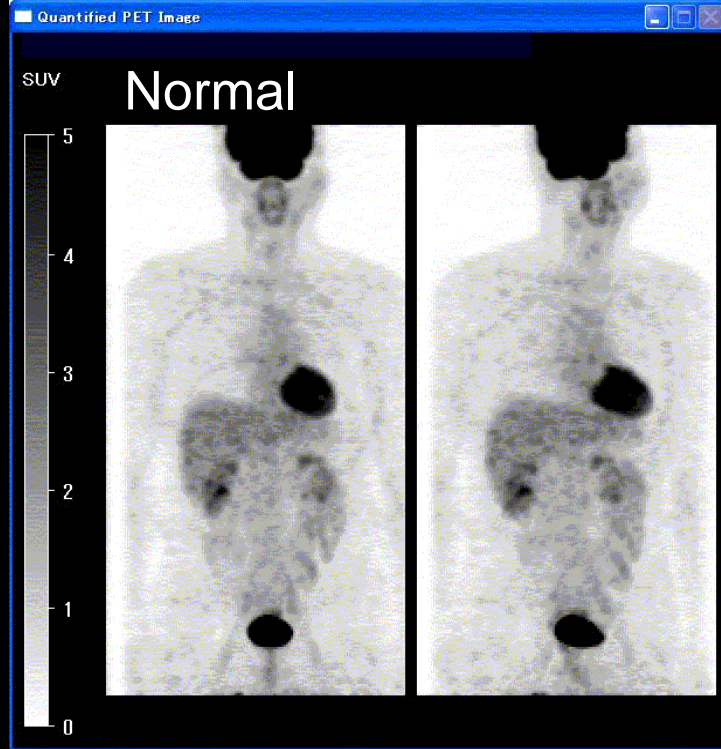


**PET:  
陽電子CT  
Positron  
Emission  
Tomography**



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

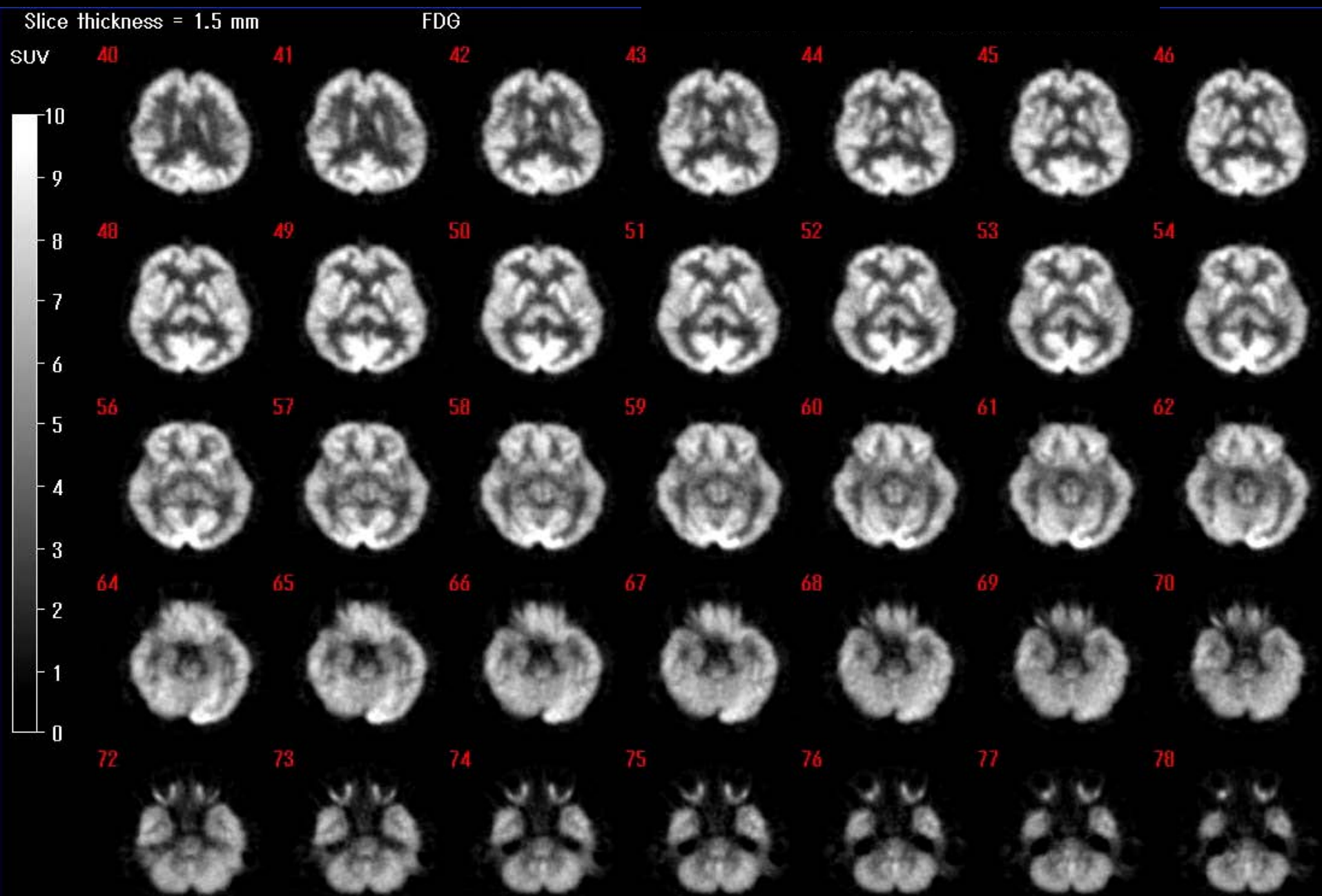
腫瘍、炎症のほかに  
脳、尿、ときに心筋へ  
正常集積を認める。

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。

# $^{18}\text{F}$ -FDG Brain PET 185MBq 静注1時間後 5分撮像



# 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)

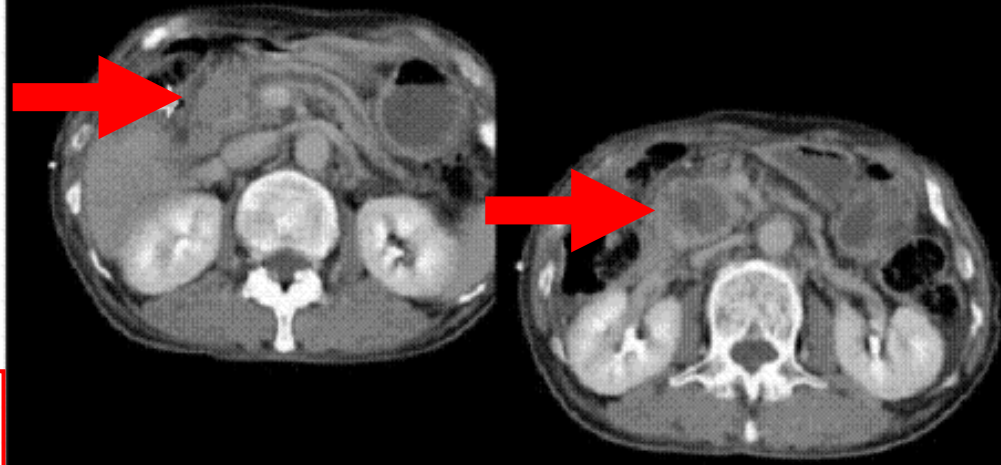
膵頭部癌 Panc. head ca.

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。

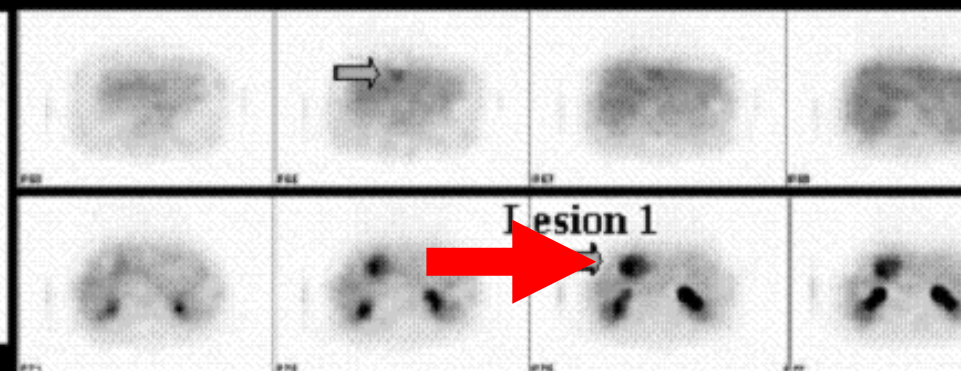
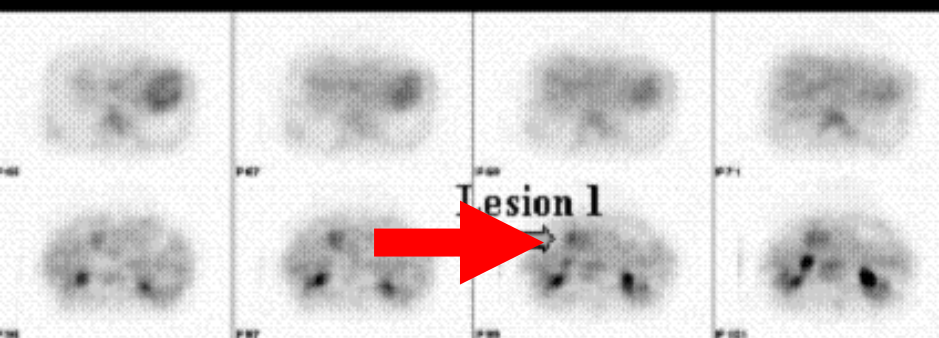
症例3

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

# 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。



# 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

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

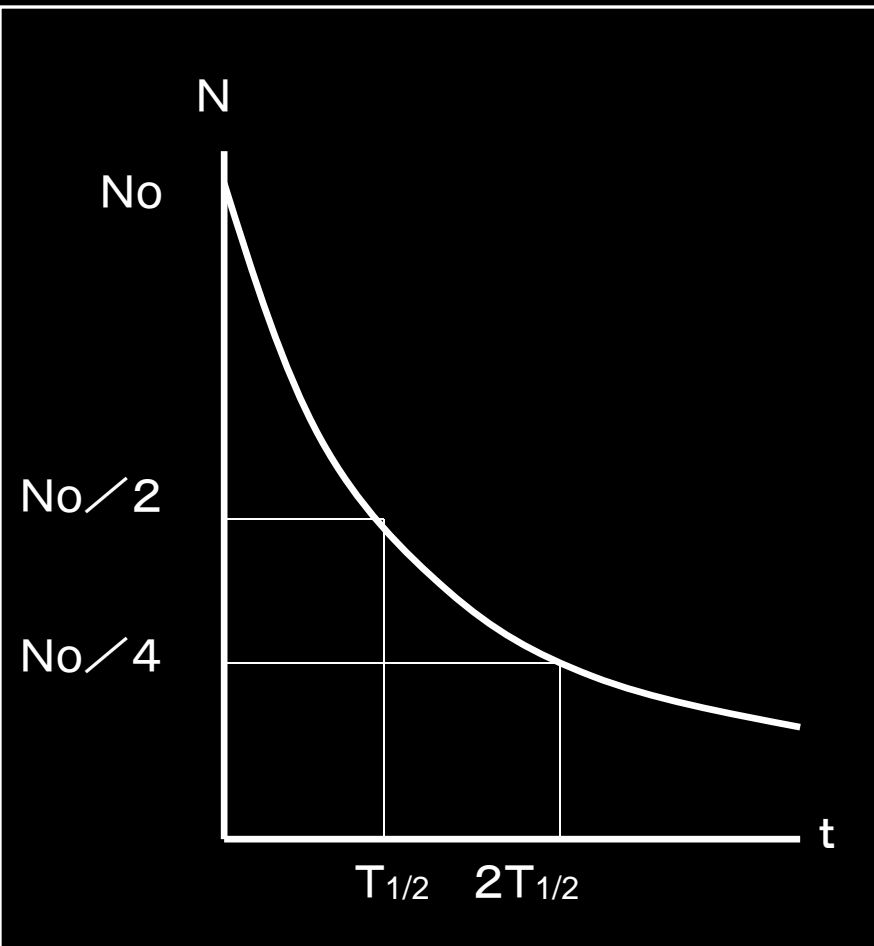
$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

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

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

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

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



$^{18}\text{F}$ -FDG PET 検査では、検査 6 時間前から患者に絶食および甘味飲料の中止を依頼するが、それが守られなかった状態で実施した  $^{18}\text{F}$ -FDG PET 検査は、どのような問題点が生じるか。

FDG の薬理的性質を基にして説明せよ。

$^{18}\text{F}$ -FDG はブドウ糖の類似物質である (2 点)。腫瘍や炎症病変にはブドウ糖が集積するので、類似物質の  $^{18}\text{F}$ -FDG も集積する。しかし絶食の前処置が守られないと  $^{18}\text{F}$ -FDG 投与時に患者血中のブドウ糖が多くなる (高血糖) (2 点)。高血糖状態では、腫瘍や炎症病変にはブドウ糖が多量に集積し、病変への  $^{18}\text{F}$ -FDG 集積量が減少するので (競合が生じる) (2 点)、PET 画像で病変の描出が低下し、SUV も低下するため (2 点)、病変の診断が困難になる (2 点)。

# 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。

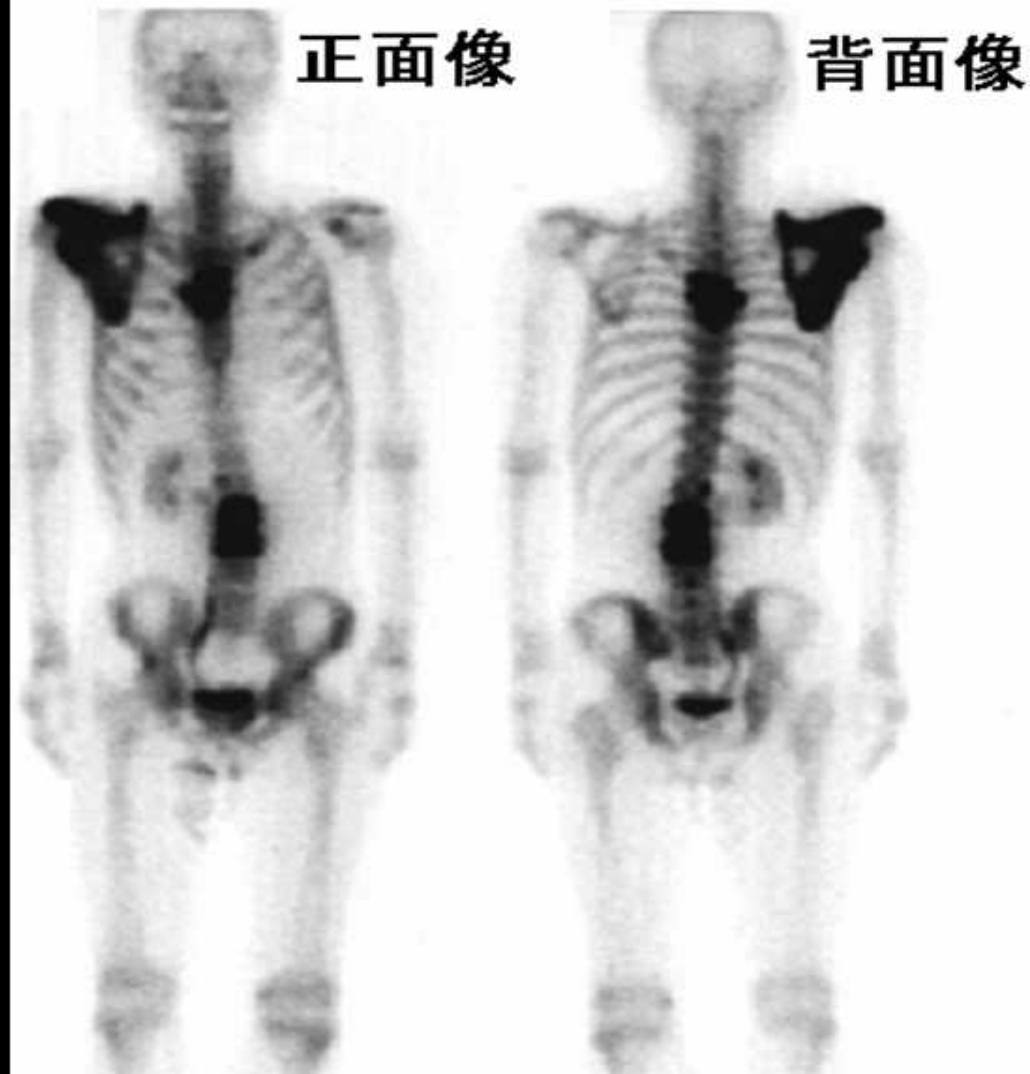
肺癌の骨転移症例。

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。

# 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  $0.51\text{MeV}$  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

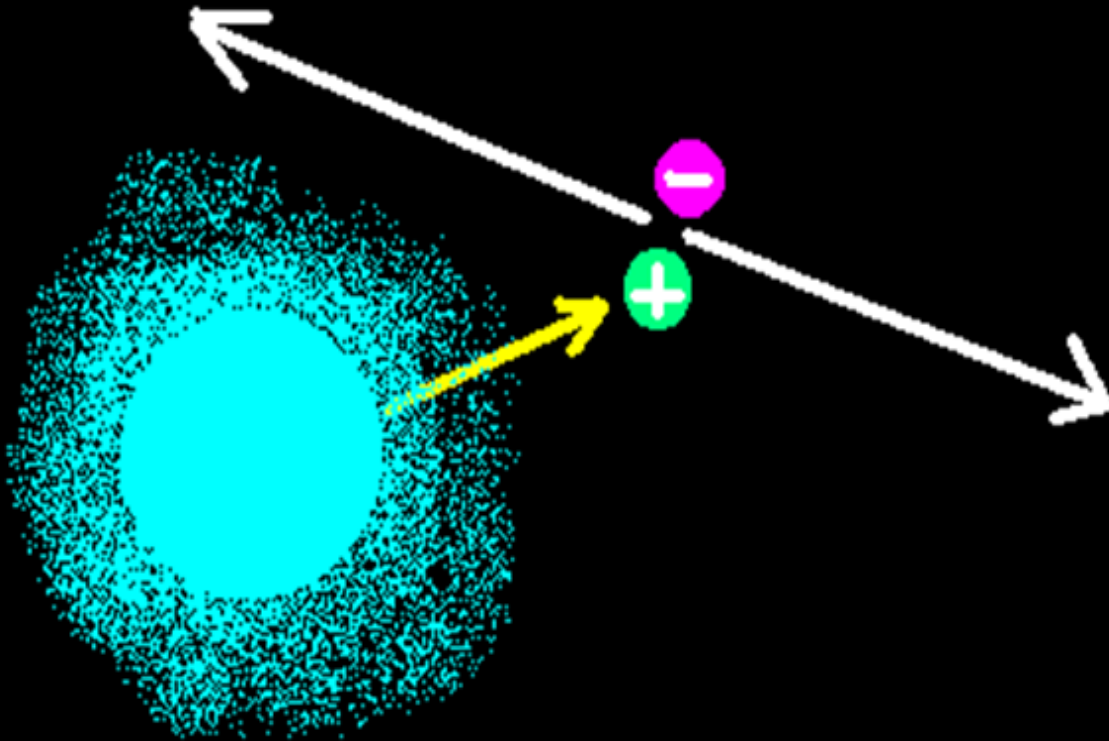
$$E = m_e c^2 = 0.51 \text{ MeV}$$

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本の消滅放射線は反対方向に放出



$^{18}\text{F}$  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。

**放射線 (Radiation) は、2種類ある。**

**1. 電磁波 ( X線、ガンマ線 )**

**= 空間の振動エネルギー**

**2. 粒子線 ( 電子線、陽電子線 など )**

**= 高速に飛ぶ粒子 ( 質量をもつ )**

**X線、ガンマ線より人体への影響が大きい**

**放射能 (Radio-activity) とは、**

**1秒間に放出される放射線の数。**

**放射能の単位は ベクレル (Bq)。**

電磁波(X線、ガンマ線、光線、電波など)  
は、空間の振動エネルギー。

空間 (Universe) とは何もない所ではない。  
空間とは、物理的実在物(構造物)である。  
空間構造の振動が、X線、ガンマ線、  
可視光線、電波 などの電磁波になる。

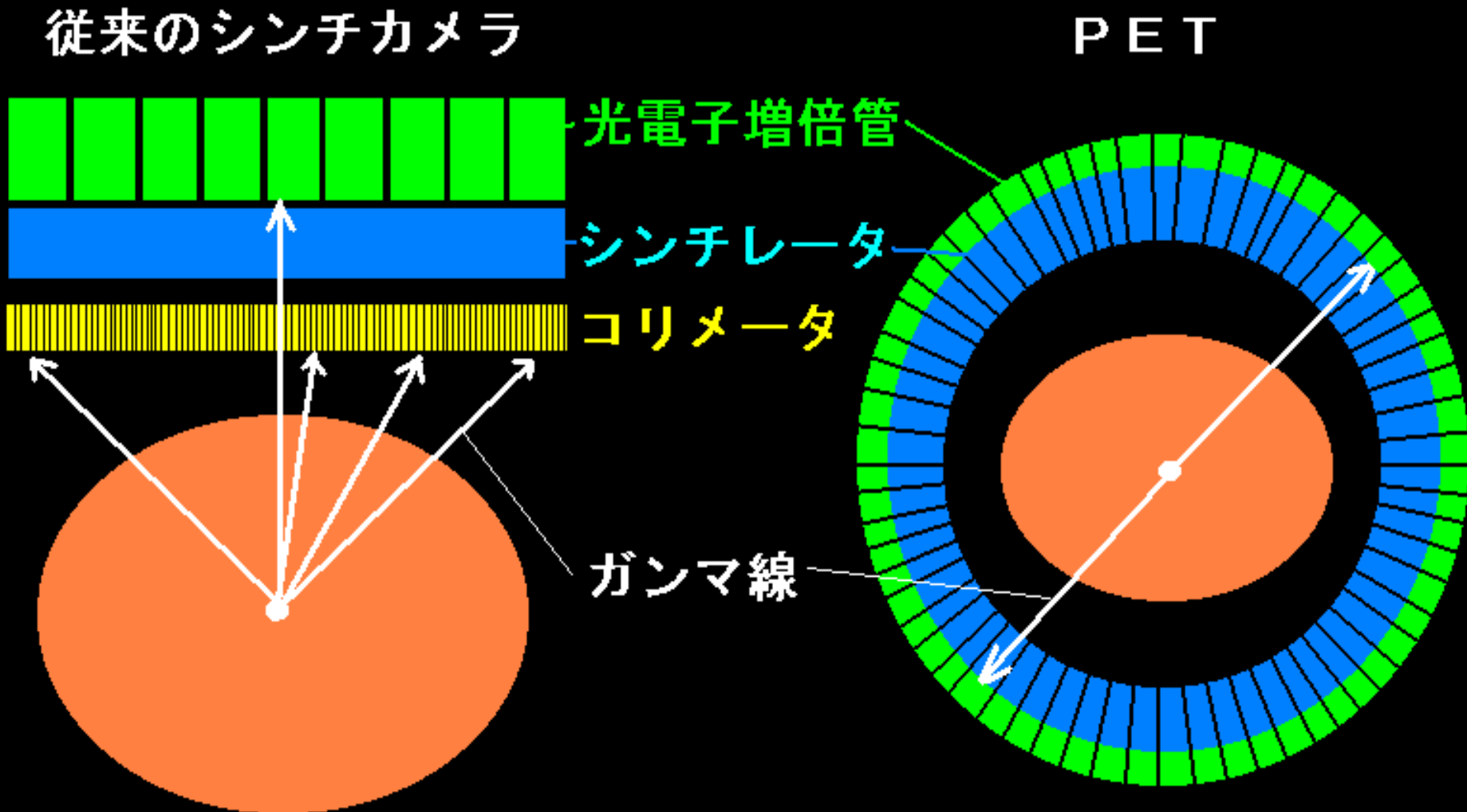
## 電磁波の名称と波長

X線, ガンマ線: 10 ピコ~10 ナノメートル  
可視光線 : 400~800 ナノメートル  
マイクロ波: 100 マイクロ~1 メートル

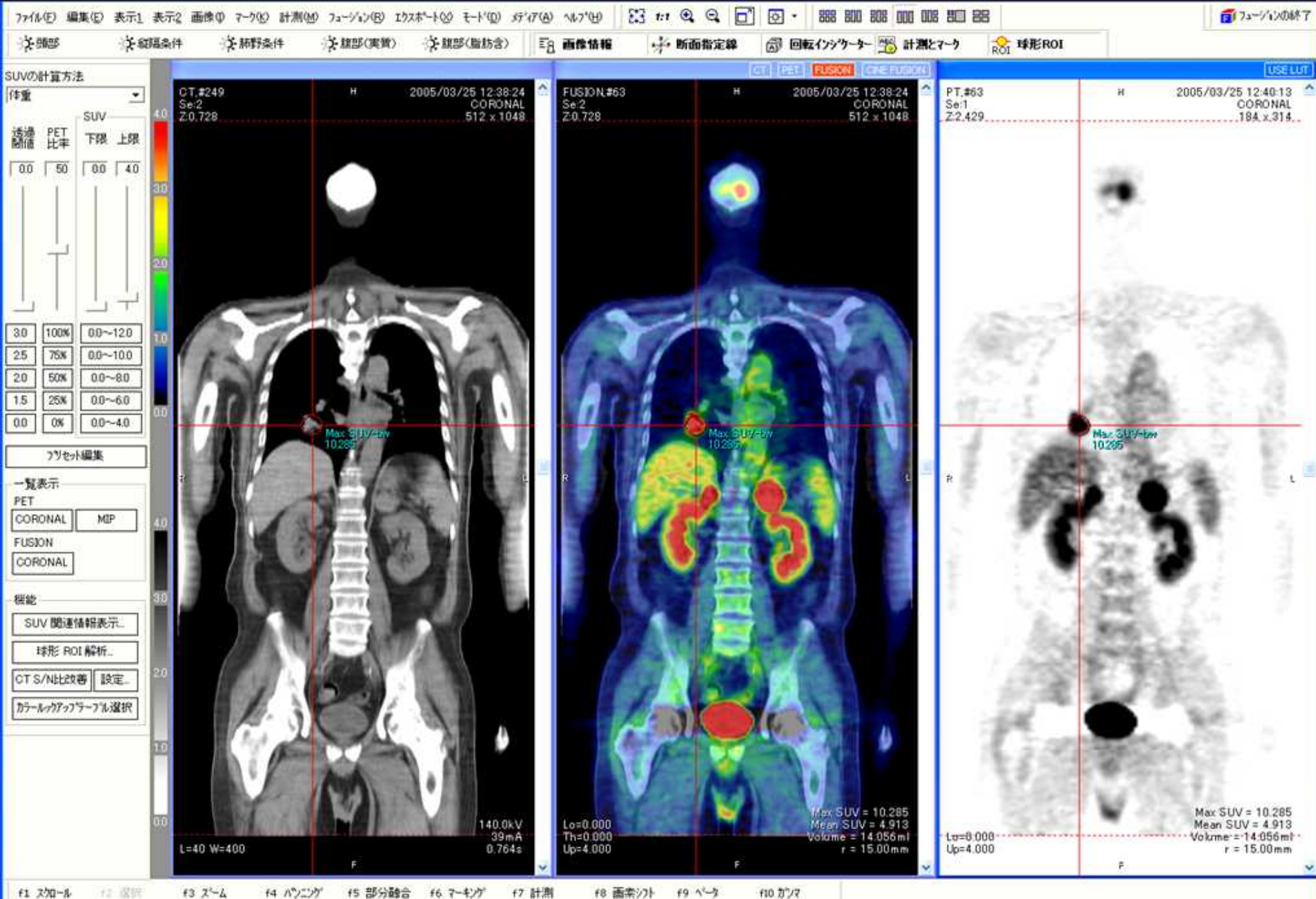


PETカメラは、コリメータがないので高感度。

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。



# 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)

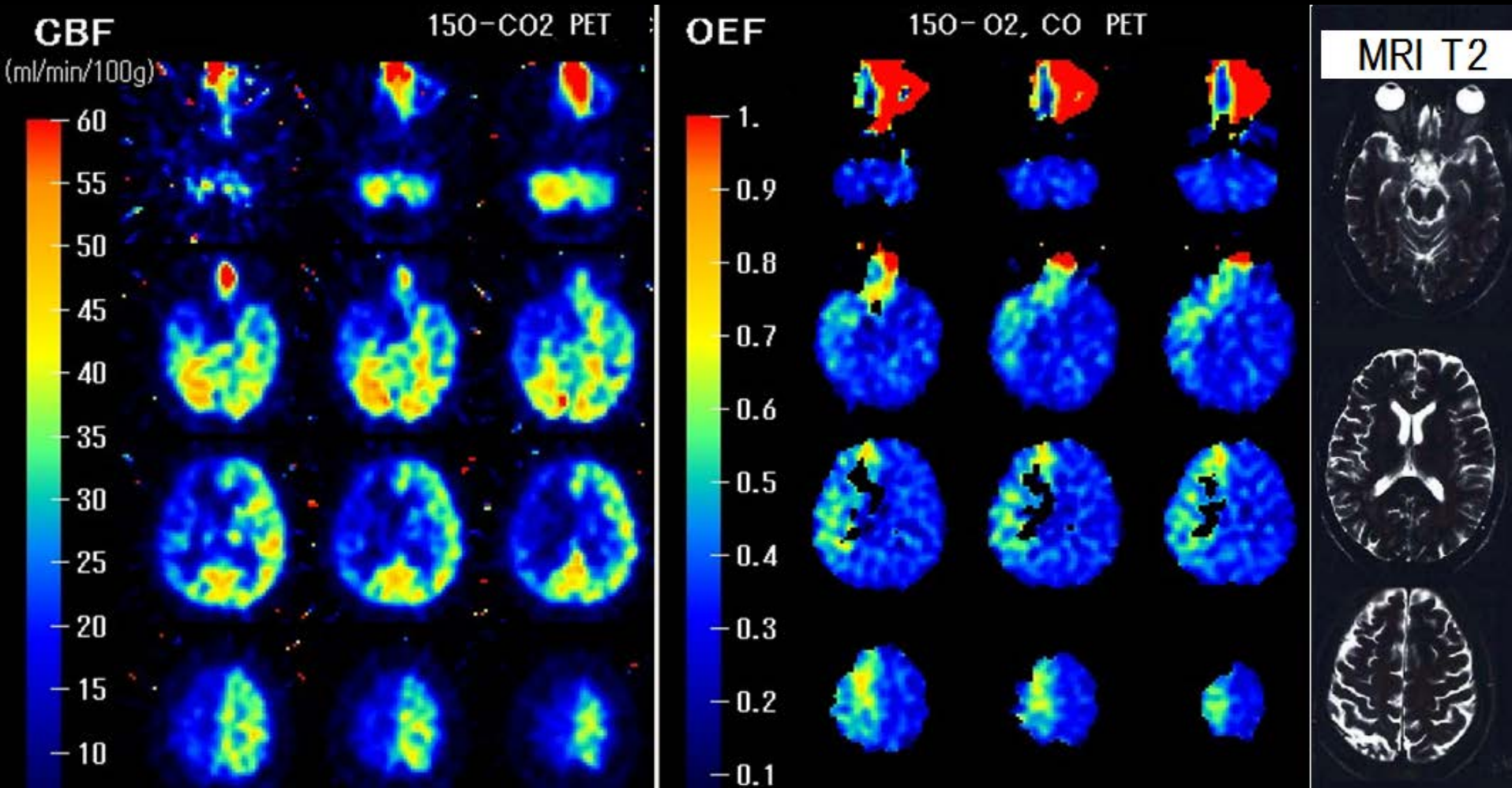
$$1000 \times (2 \mu_w - \mu_w) / \mu_w = 1000 \text{ (HU)}$$

$^{15}\text{O}\text{-CO}_2$ 、 $\text{O}_2$  脳PET 脳血流量CBF、酸素摂取率OEFを定量。

右内頸動脈高度狭窄症例。脳梗塞ではないが(MRI T2像は正常)、

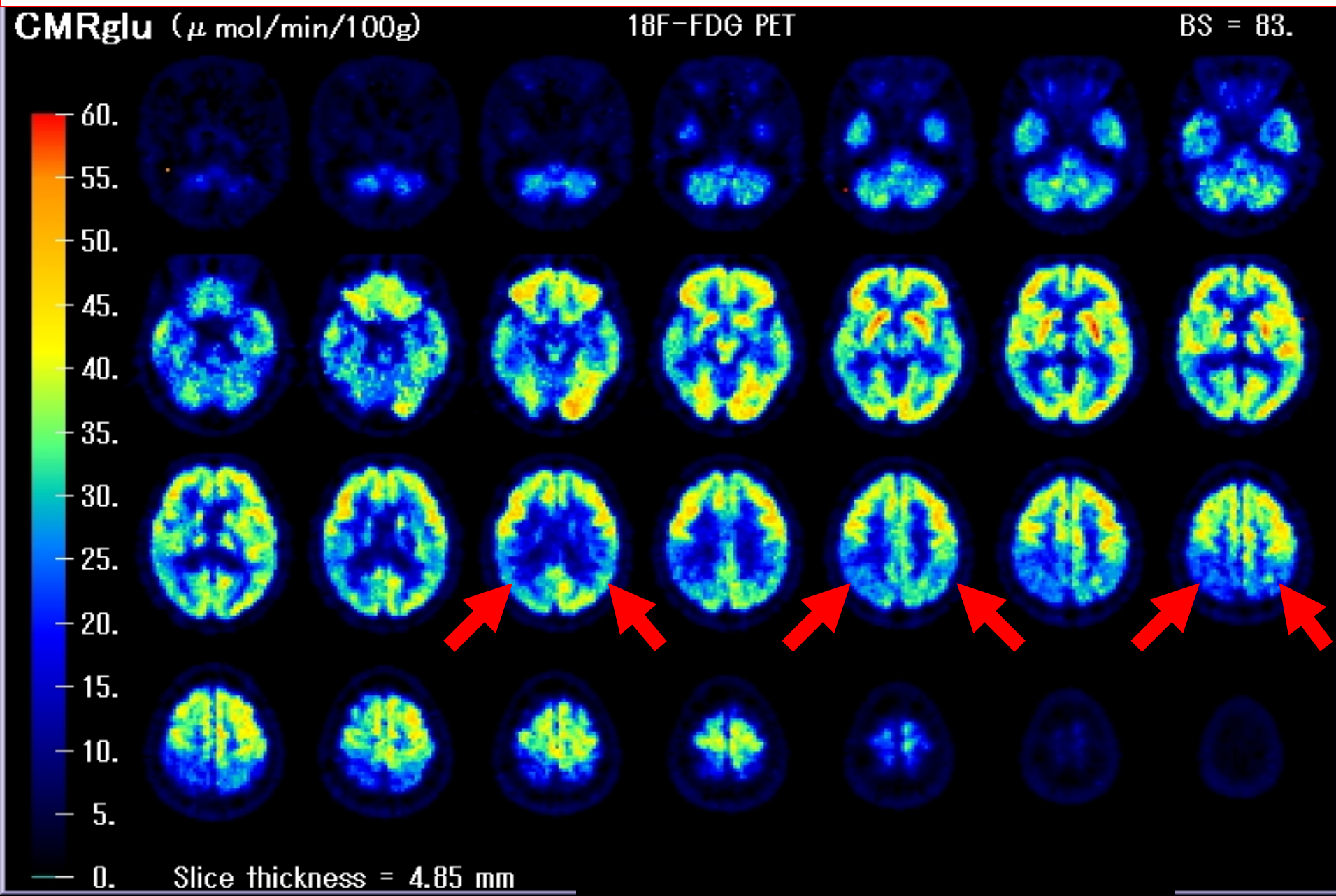
右ACA、MCA領域の 高度血流低下、酸素摂取率の亢進あり。

(貧困灌流 misery perfusion の状態)

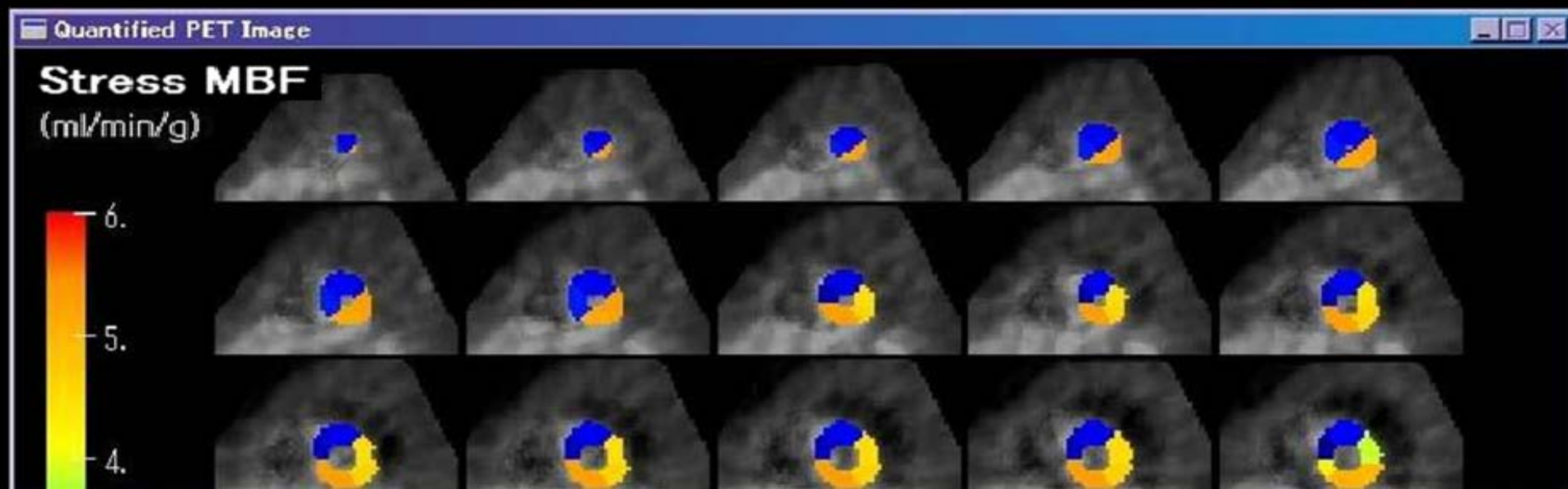
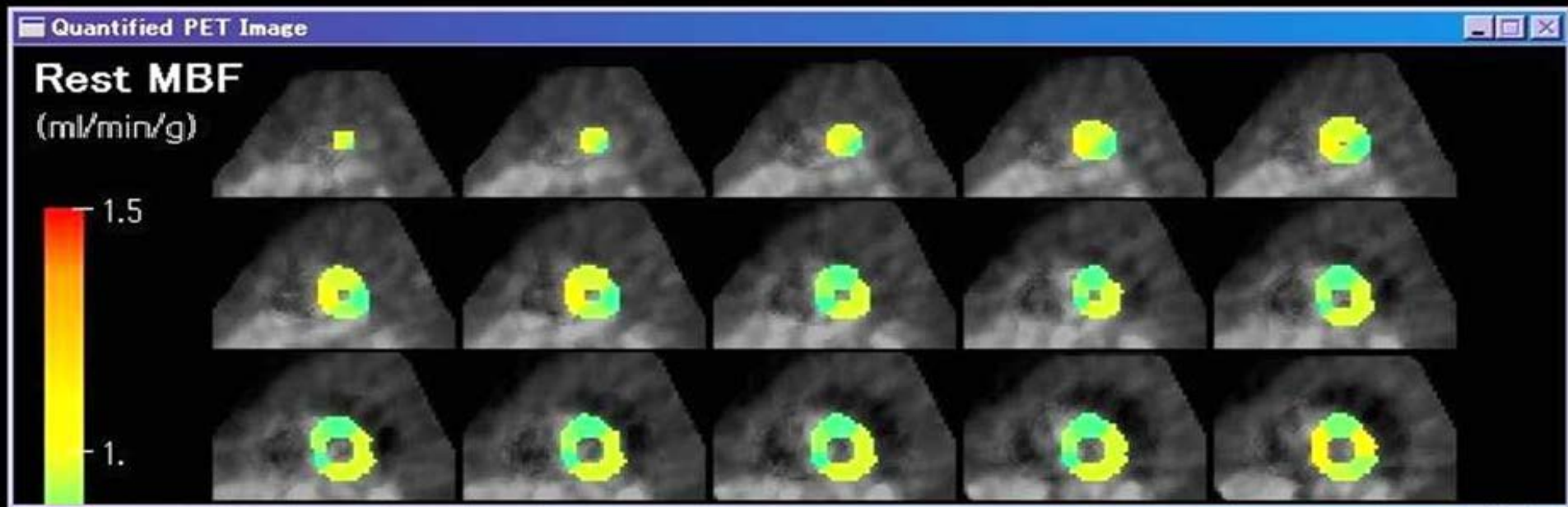


# $^{18}\text{F}$ -FDG 脳PET 脳のブドウ糖消費量を定量

若年性アルツハイマー病 左右頭頂葉の変性、糖代謝低下。



$^{15}\text{O}$ -H<sub>2</sub>O 心筋PET 安静状態では心筋血流MBFが正常でも  
薬剤負荷をかけると血流が低下する狭心症(angina)などを調べる。





## SPECT装置

## Single Photon Emission CT

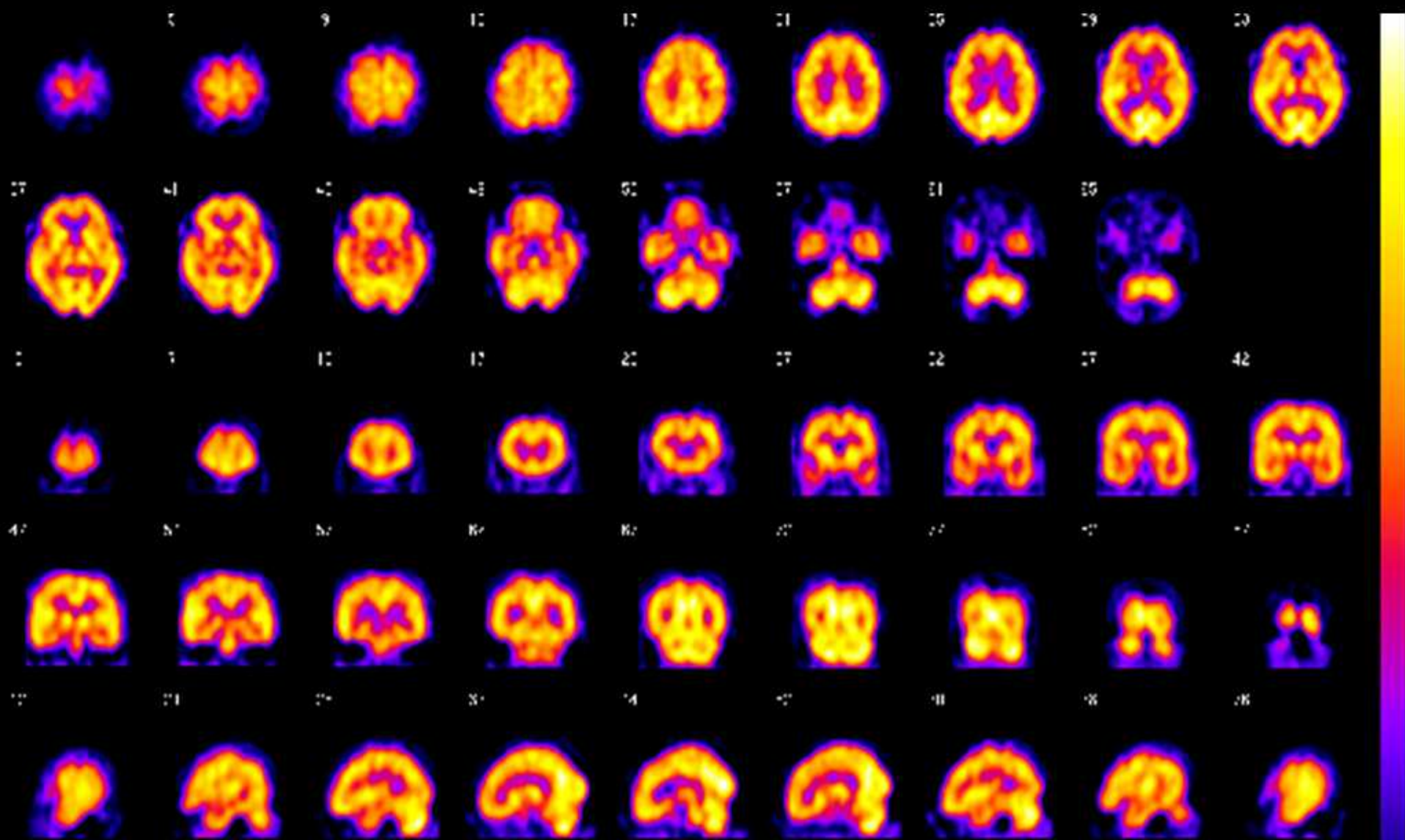
体内のガンマ線放出薬剤の  
分布(シンチグラム)の

断層像(CT)を撮像する装置



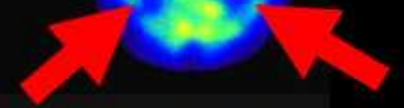
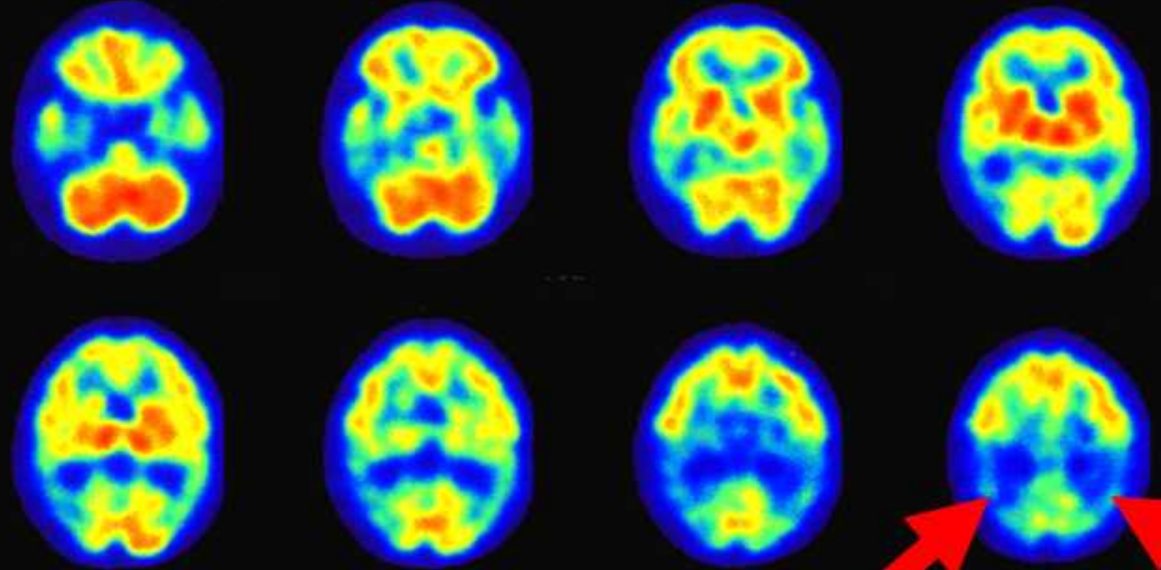
# $^{123}\text{I}$ -IMP Brain SPECT

覚醒剤(アンフェタミン)にRIを標識した薬剤の脳内分布像。

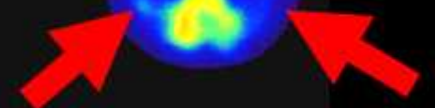
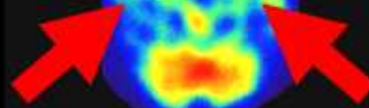
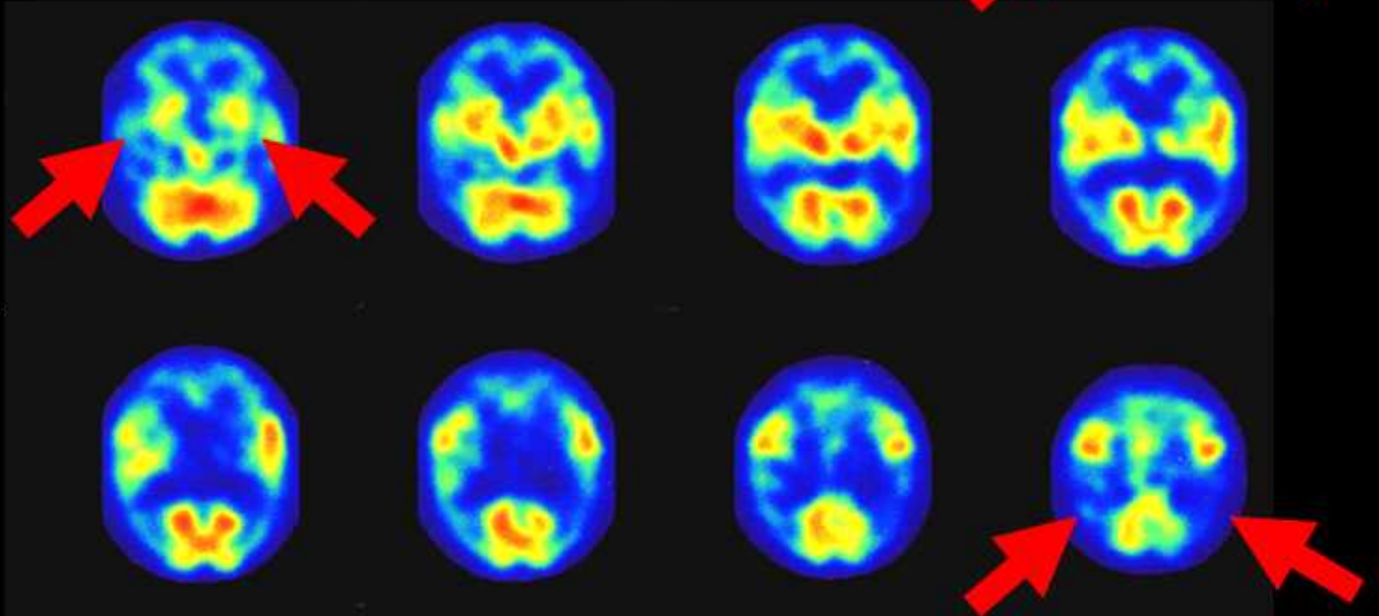


アルツハイマー Alzheimer 病 (若年(50歳代)で発症する痴呆症)  
左右対称性に、頭頂葉、側頭葉から脳が変性する。

早期

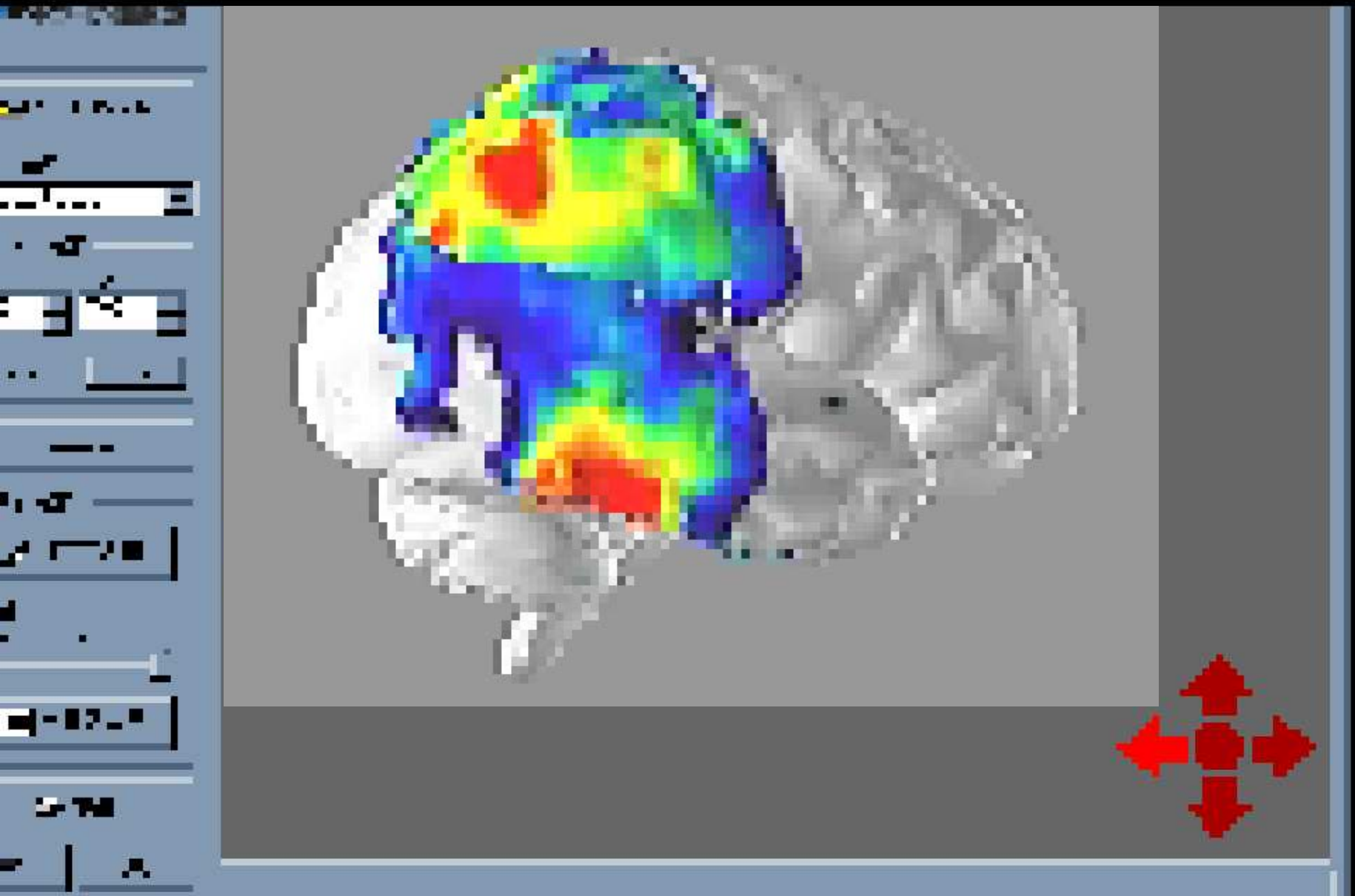


中期～後期



# アルツハイマー Alzheimer 病

脳血流 IMP SPECTで、血流の偏差値が低い部位をカラー表示

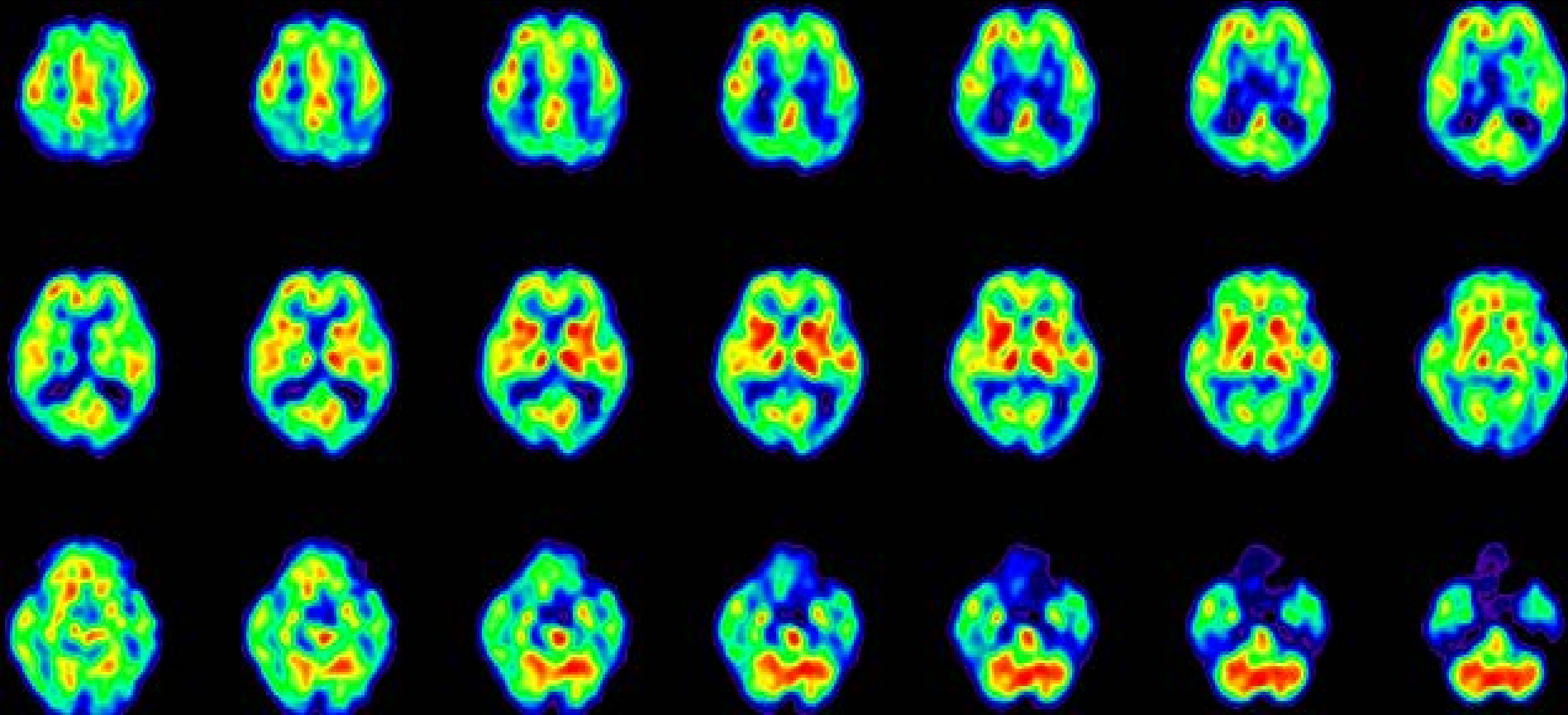


# 70代 認知症とパーキンソン病症状

左右の頭頂葉と後頭葉の血流に低下を示す。

びまん性レビー小体病。 脳組織の変性。

ときどき認める認知症の原因疾患。



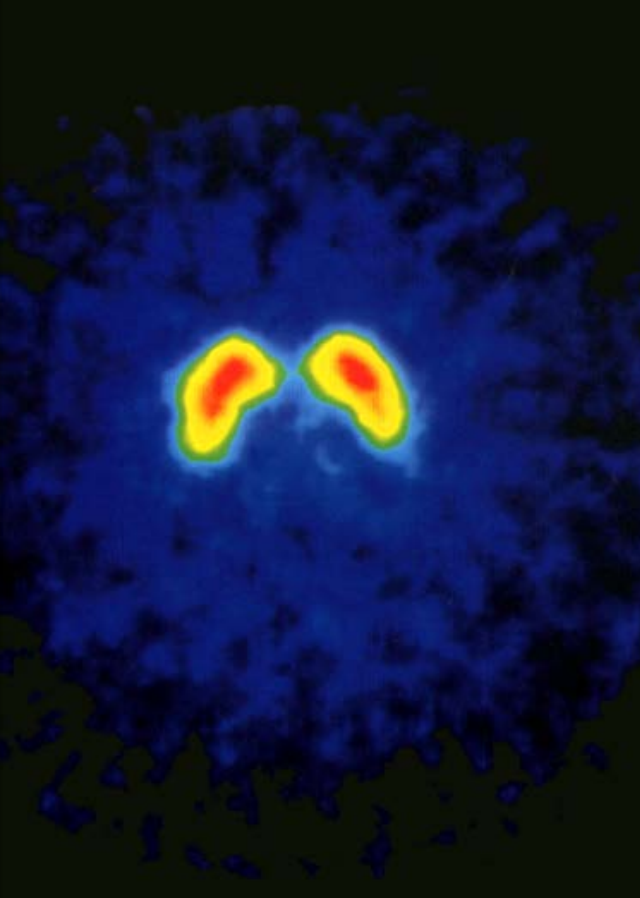
# びまん性レビー小体 (Lewy bodies) 病

レビー小体は、パーキンソン病の脳幹部神経細胞内の封入体で、パーキンソン病の病理学的特徴とされる。

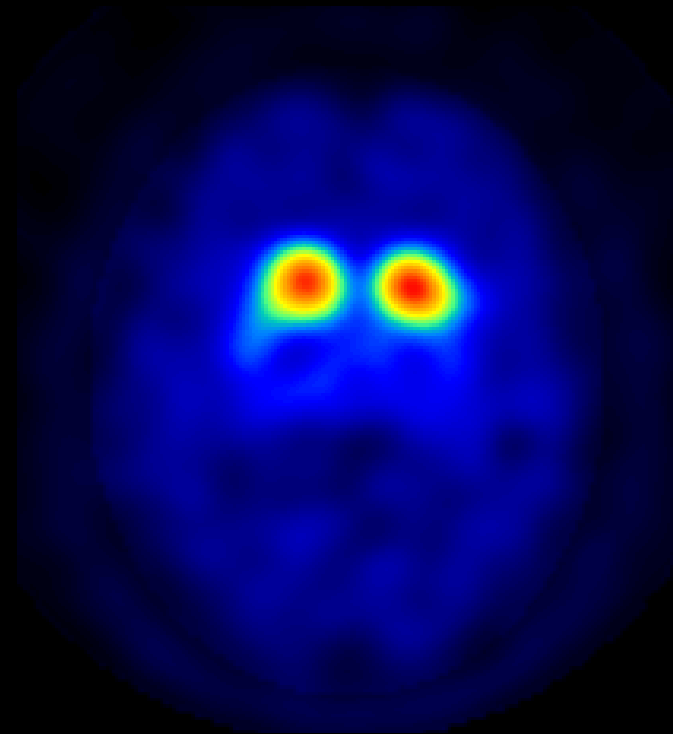
このレビー小体が大脳皮質にも多数出現し、臨床的に進行性の痴呆とパーキンソン症状を特徴とするものがびまん性レビー小体病といわれる。

初老期、老年期に発症し、記憶障害から始まって徐々に痴呆症状が目立つようになり、経過中、筋固縮や寡動を主とするパーキンソン症状が加わってくる。

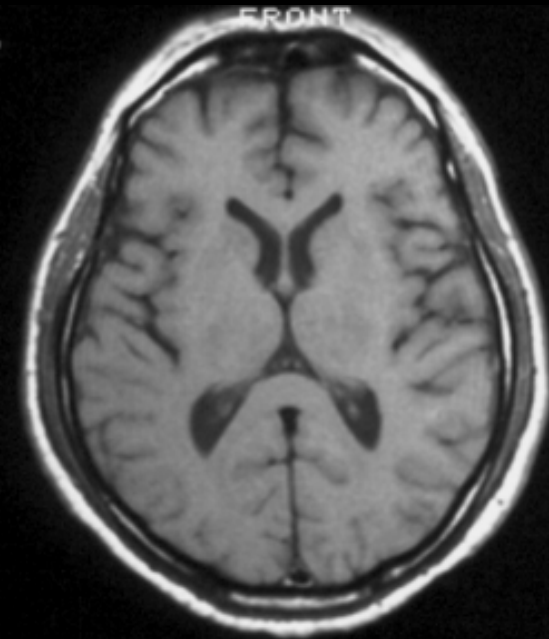
# パーキンソン病、レビー小体型認知症のSPECT画像 (基底核や線条体のドーパミン分布を画像化)



健常人

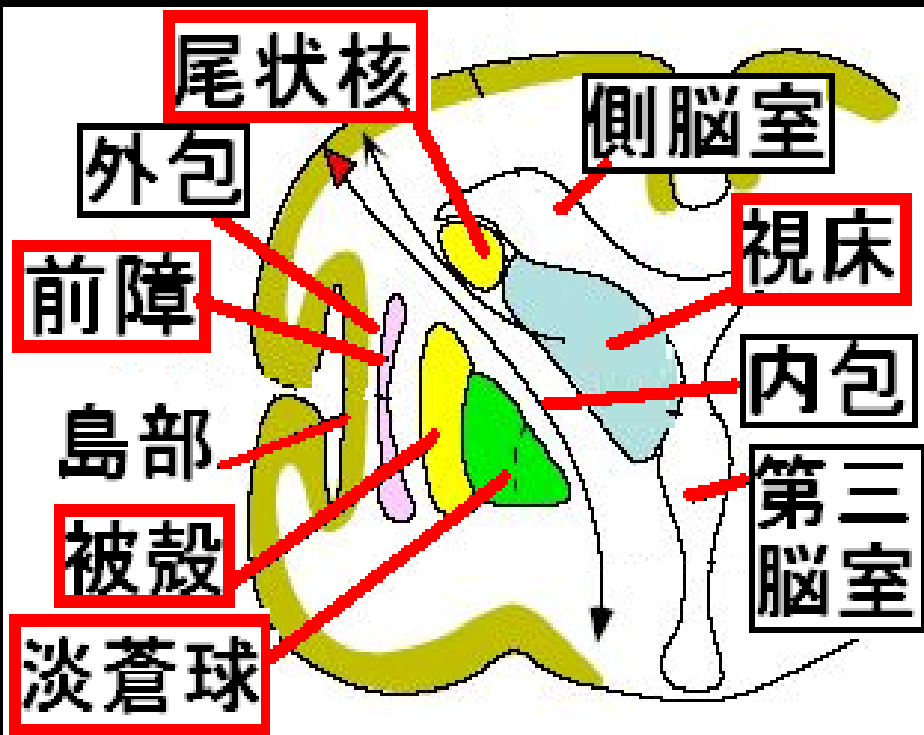
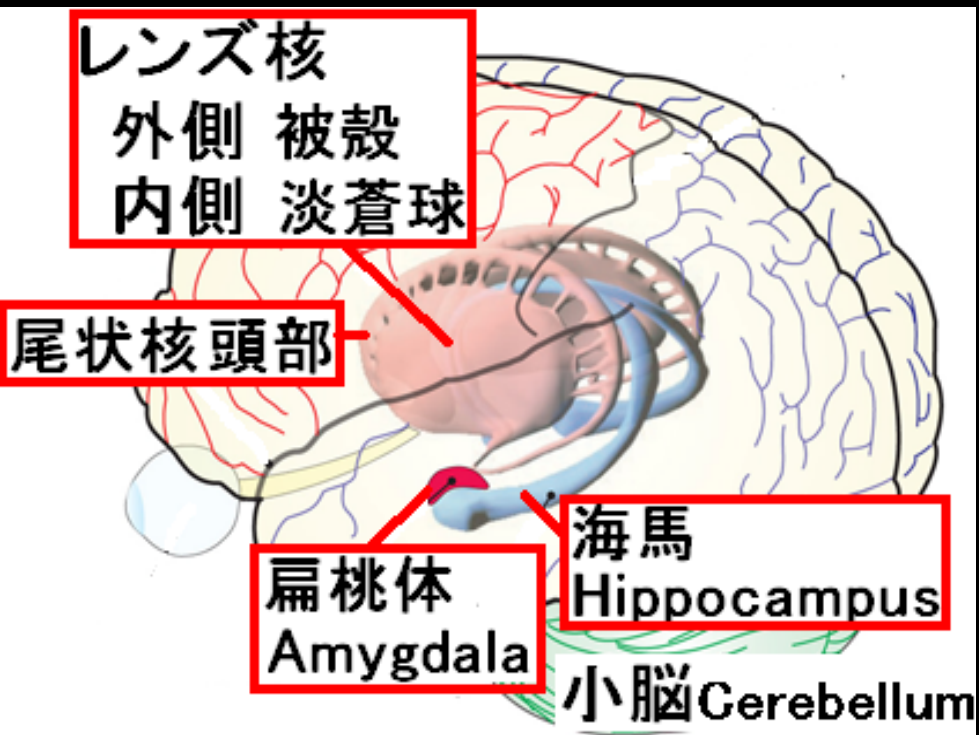


パーキンソン病  
基底核、線条体のドーパミン分布低下  
MRI では異常なし。



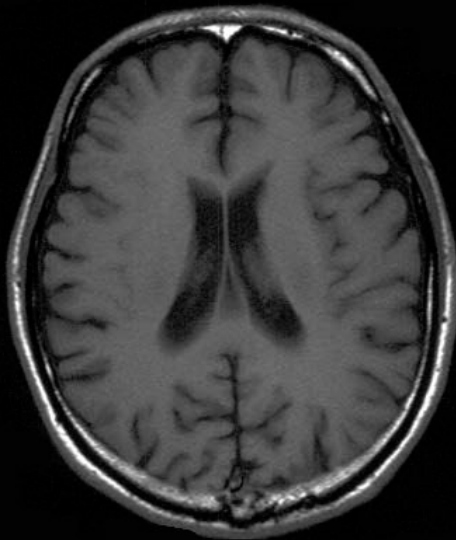
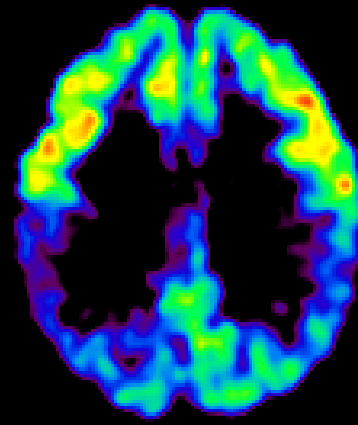
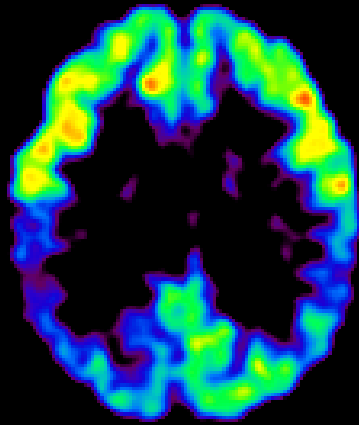
# 大脳基底核 Basal ganglia

皮質(脳神経細胞)下に白質があり、その奥の細胞核集団。  
線条体(被殻と尾状核)、淡蒼球、黒質、視床下核の総称。  
視床や大脳皮質、小脳へ情報を送り、円滑な運動を調整。  
基底核の障害: パーキンソン病、チック(突発的な瞬動や発声)。  
周囲の大脳辺縁系(海馬、扁桃体)は、記憶や自律神経を調整。

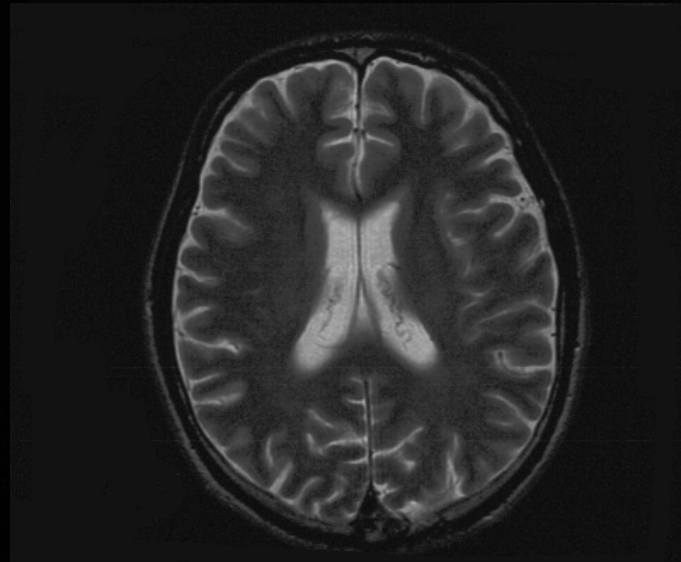


# アルツハイマー病(早期)

FDG PET



T1WI

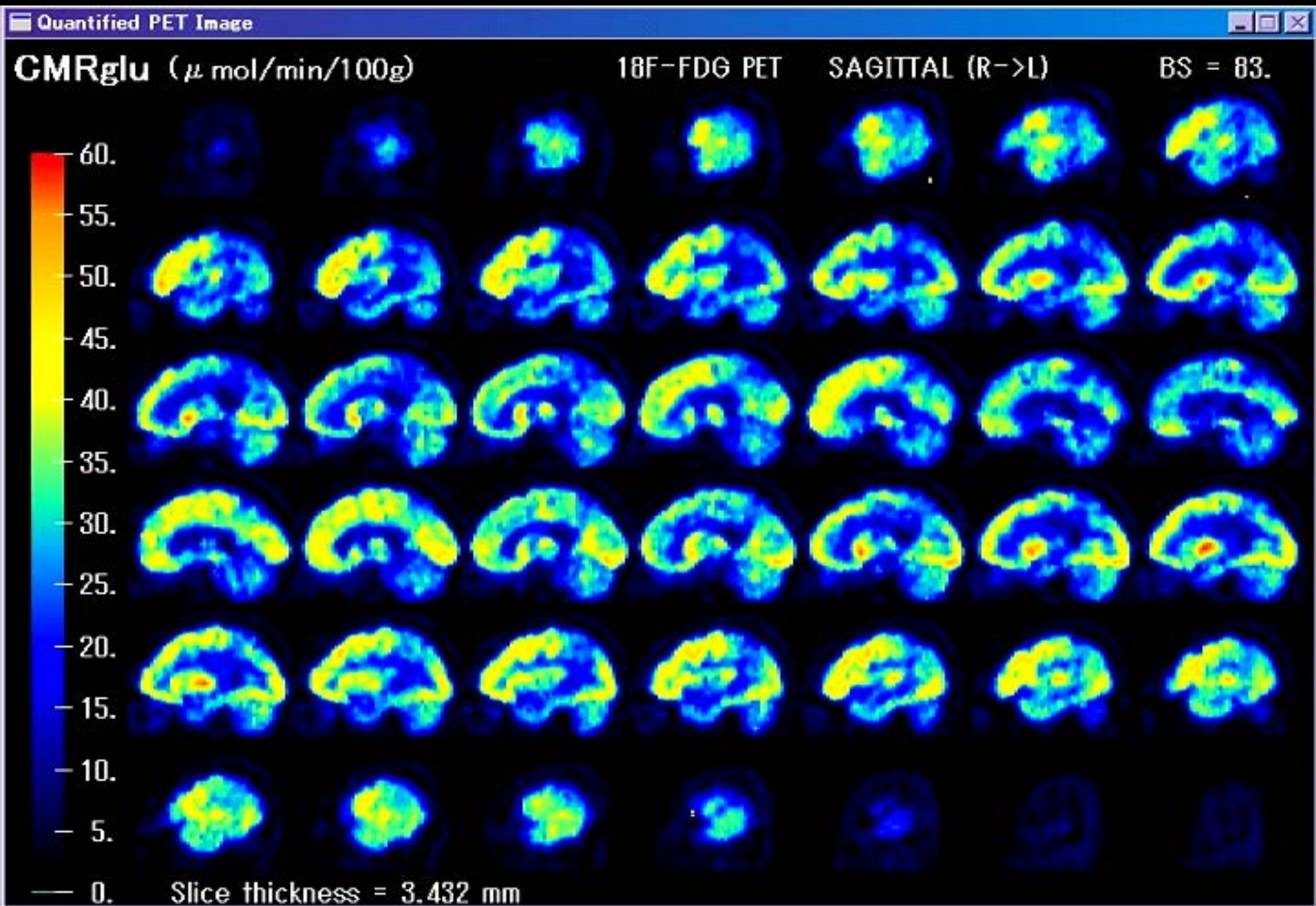


T2WI

55歳男性



# アルツハイマー病(早期)のPET画像



エックス線、CT、MRIなどの検査は、臓器の重さや形、水分や脂肪の分布などを画像化する。

臓器に解剖学的な異常が生じていない状態では所見は認めません。

老化に伴う変化は、臓器の解剖学的な異常がはじめに生じるのではなく、まず機能や代謝に低下が生じるので、核医学検査が最も敏感に異常を指摘できますが、画像が鮮明でない欠点がありました。

この問題を解決し、非常にきれいな核医学画像を撮るPET (ポジトロンCT) が最近普及しつつあり、老化に伴う機能や代謝の異常をより早期に見出せる検査が今後普及していくと期待します。

放射性ヨード( $^{131}\text{I}$ )を用いた甲状腺疾患の治療

RI 検査は、疾患の治療も行うことができる。

甲状腺組織はヨードを積極的に取り込む性質を持つ。

(甲状腺ホルモンの成分としてヨードが必要なため)

癌化、肥大化した甲状腺組織もヨードを積極的に取り込む性質を持つ。

$^{131}\text{I}$ は、ガンマ線のほかに電子線を放出するので

被曝の効果が大きく、甲状腺組織が破壊される。

バセドウ病(甲状腺機能亢進症)に対して $^{131}\text{I}$ 内服外来治療

甲状腺癌に対して $^{131}\text{I}$ 内服入院治療

# バセドウ病(甲状腺機能亢進症)に対する $^{131}\text{I}$ 内服外来治療

300MBq内服 ( $^{131}\text{I}$  は飲み薬)

全身被曝 45mSv

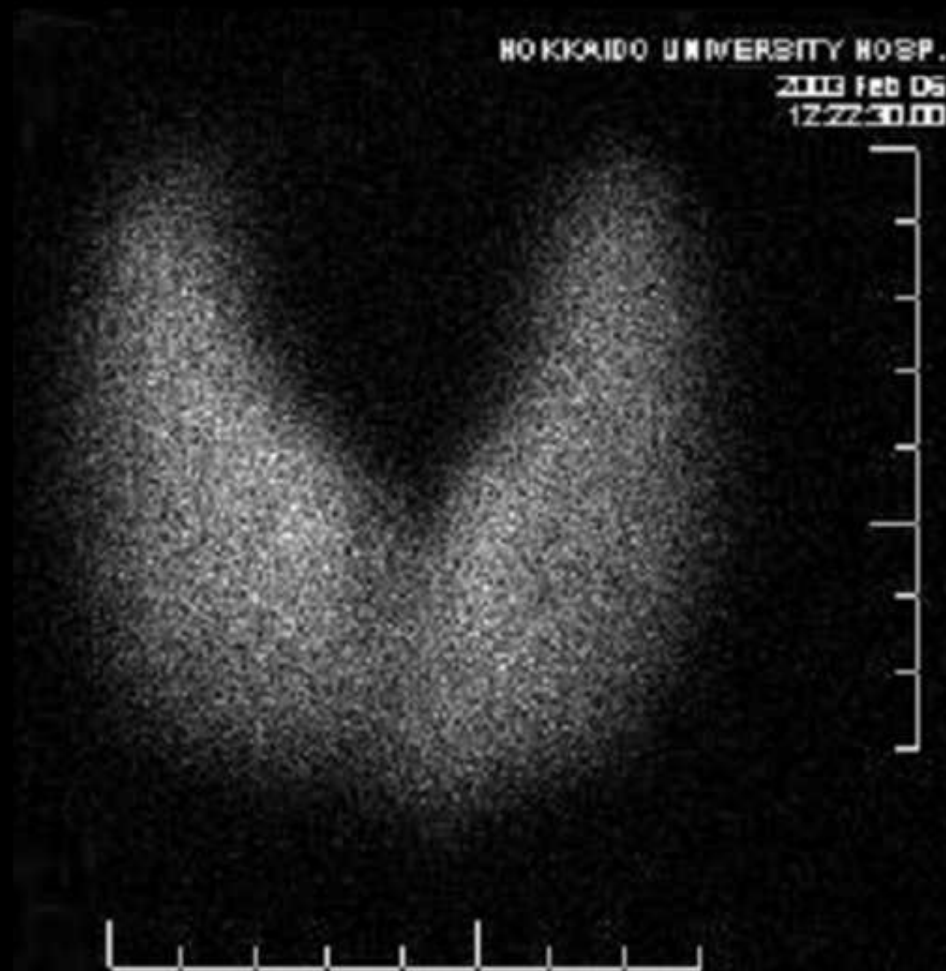
甲状腺被曝 150Sv

ベータ線による甲状腺以外の  
被曝は極めて低い。

内服後数ヶ月で甲状腺の  
萎縮、機能低下が出現。

ヨードは70%甲状腺に集積。

それ以外のヨードは速やかに尿へ  
排泄される。



$^{131}\text{I}$  は ベータ線とガンマ線  
を出す。  
( $\beta$  0.61MeV,  $\gamma$  0.36MeV)

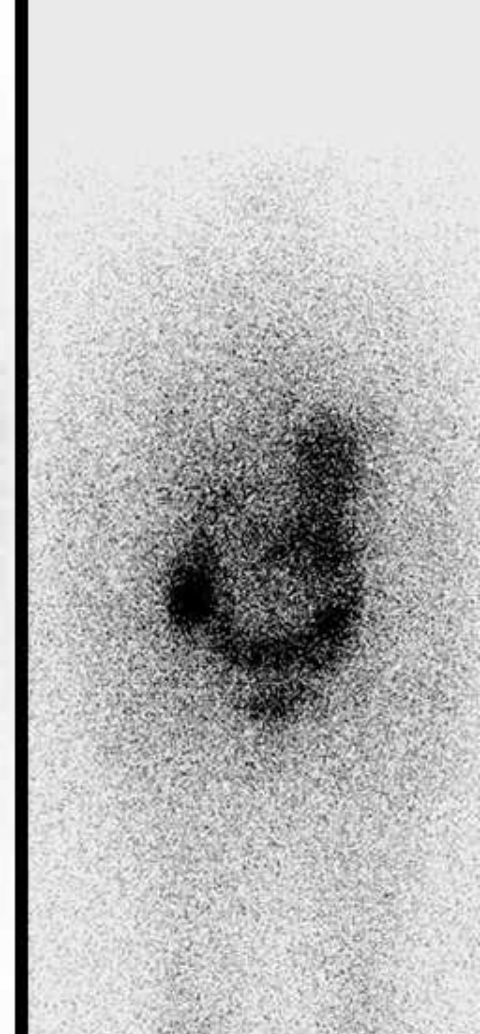
ベータ線で病変を消滅し、  
ガンマ線も出すので、体内の  
ヨード分布が画像化できる  
(シンチグラフィが撮れる)。

治療と治療効果判定が  
一度にできる。



治療時

$^{131}\text{I}$  5000MBq



治療後

Tracer dose  
scan

$^{131}\text{I}$  74MBq

# RIA (Radio Immuno Assay)

## 放射免疫分析法

ホルモン、抗原などの血液中微量タンパク質の量を測定する方法。

測定するタンパク質と同一の物質に<sup>125</sup>IでRI標識した物質(抗体)と、

測定するタンパク質と結合する抗体を、それぞれ一定量用意する。

その中に患者血液を入れて、

目的とするタンパク質を定量する方法。

## 【 RIA検査とは 】

抗原抗体反応(特定の決まったものどうしが反応する)を放射性物質に応用して、

採血のみで、微量な内分泌腺(ホルモン)等の測定や、癌の診断(腫瘍マーカー)をする検査。

ホルモンは、非常に微量な量でも人体に大きく作用し、身体のいろいろな諸器官の調整を行っています。

ホルモンや癌病変が出す物質(腫瘍マーカー)は、微量なために非常に測定しにくいものでした。

1959年放射性物質を用いた測定法をバーソンとヤローが開発し、ノーベル賞を受けました。

こうした原理は、RIA検査として応用され、ホルモンの異常発見、癌の早期発見に役だっています。

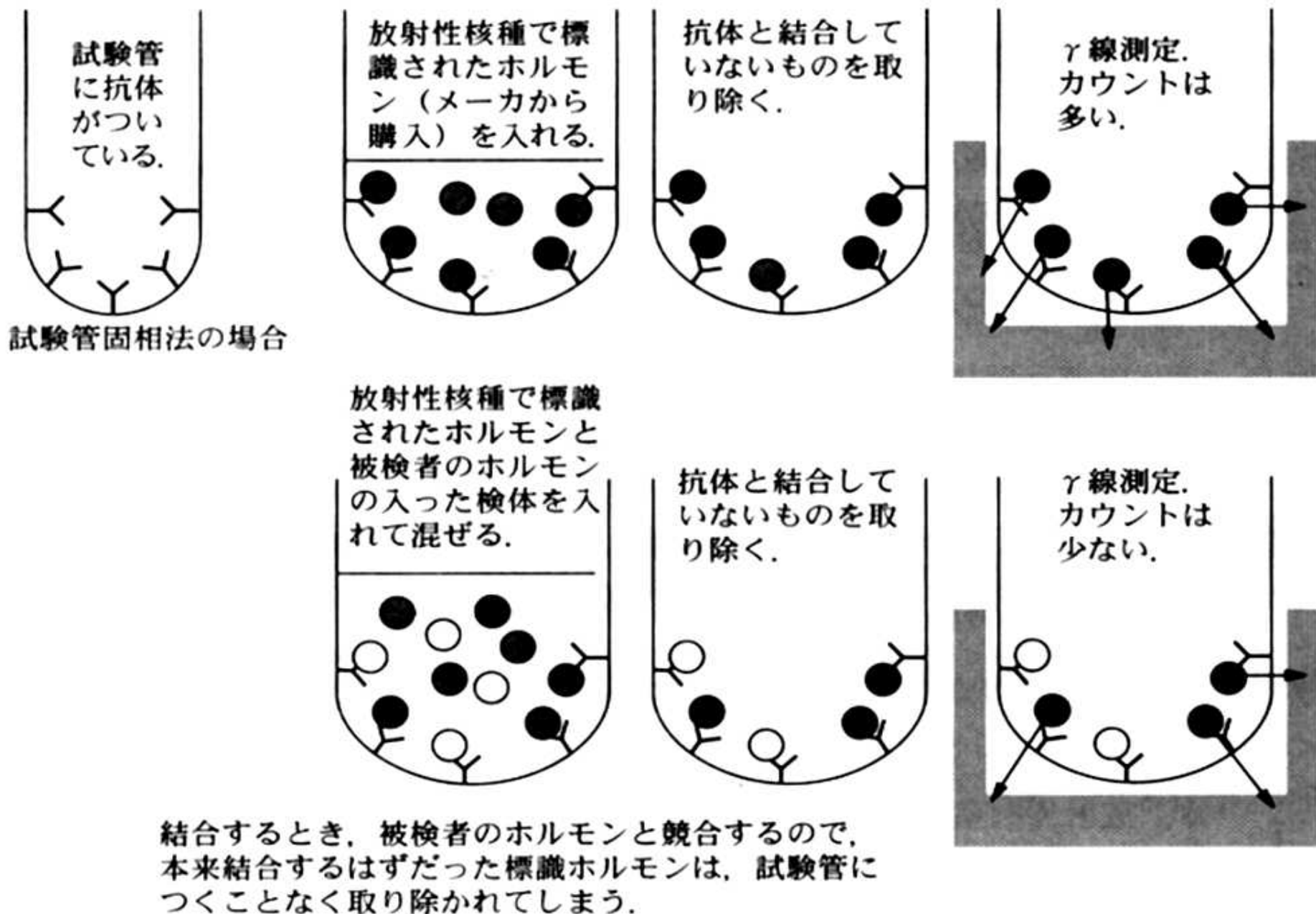


図 6・17 RIA 法の原理その 1



# 北大病院 RIA 検査室



# RIA 検査法の例 シフラ（肺癌の血液検査）

## サイトケラチン19フラグメント精密測定

シフラ

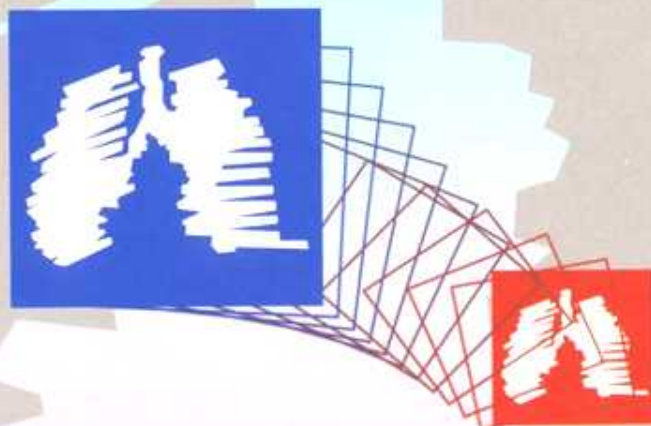
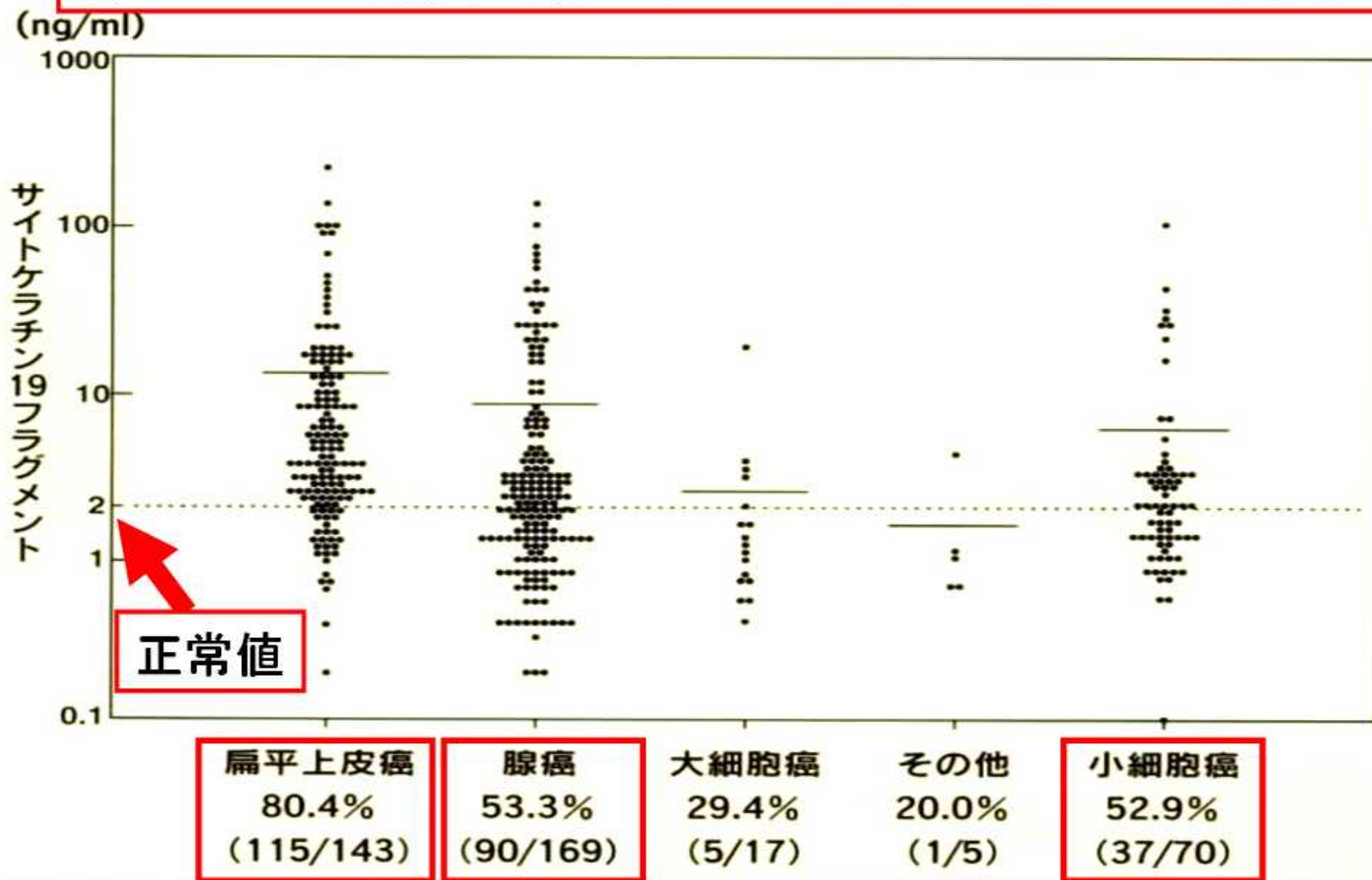


図10 肺癌における組織型別陽性率と測定値分布<sup>2)-4)</sup>

採血だけで、肺癌(特に扁平上皮癌)の診断が可能。



## 競合法 RIA (Radio Immuno Assay)

測定するタンパク質と同一の物質をRI標識したもの(抗原)と、測定するタンパク質を、一定量の抗体と競合反応させて、タンパク質を定量する方法。

## 非競合法 RIA ( IRMA イムノラジオメトリックアッセイ )

(サンドイッチ法)

測定するタンパク質の抗体をつけたビーズ玉と、測定するタンパク質の、もう一種類の抗体をRI標識したものを、患者血清に入れて、測定するタンパク質を、複数の抗体ではさんで反応させるので、サンドイッチ法とよばれたり、競合反応を利用していないので、非競合法 RIAともよばれる。

# 非競合法 RIA (サンドイッチ法) (IRMA)

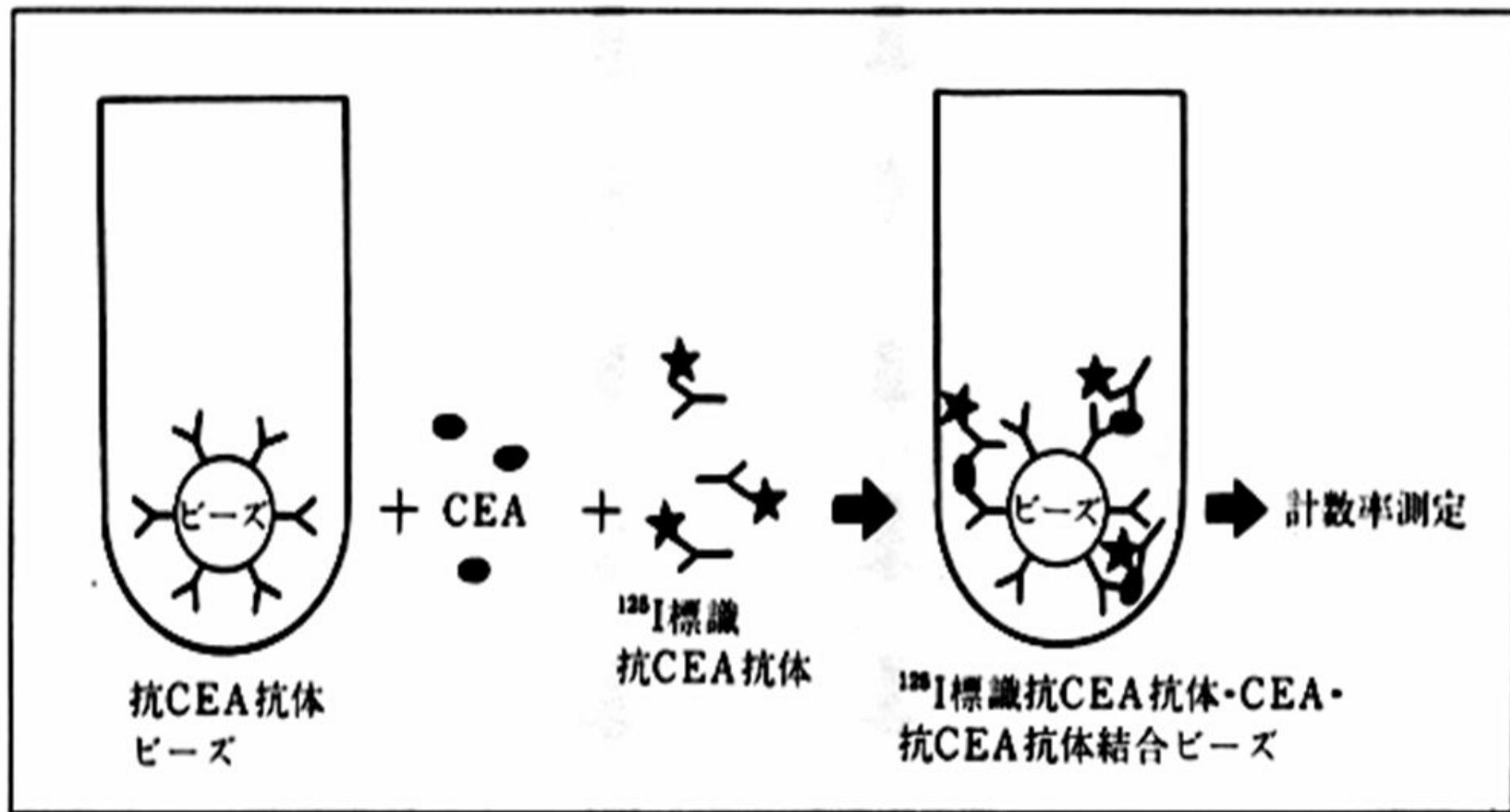


図 2-25 one-step 法 IRMA—CEA の測定原理

★  
Y :  $^{125}\text{I}$  標識抗体