

- 1) 電子の粒子性と波動性
- 2) 波としての電子と半導体
- 3) ナノの世界を見る
- 4) 医療と現代物理
- 5) 電気の流れるプラスチック
- 6) 超伝導・超流動を見る

現代物理学の考え方

その4

医療と現代物理

溝口憲治

医療用診断装置

超音波診断装置（エコー）

X線C T（**C**omputer **T**omography: 断層写真）

MRI（**M**agnetic **R**esonance **I**maging, NMR-CT）

PET（**P**ositron **E**mission **T**omography）/X線CT

超音波診断装置 エコー検査

超音波診断装置

超音波とは？

音声の振動数： $20 \sim 20\text{kHz}$

よりも

高い振動数を持つ全ての音波

比較：光は電磁波、電子は確率波

超音波の伝わりやすさ

空気中 《 液体や固体

例：○講義をする先生の声ー

聴き取りにくい(?空気中をゆっくり伝搬-四方八方に広がる)

○レールを伝わる音(叩く音、電車の音)

何km離れても良く聞こえる(高速-レール内に閉じ込め)

○魚群探知機

海底の魚の群れを捕らえる(液体中を速く-大気表面で反射)

超音波の速度と波長

空気中： 約 340 m/s

比較： 光は300,000,000 m/s

水中、固体中： 約 1,500 m/s

と波長

較：光は300,000,000 m/s

s

音

$$\text{距離} = 340(\text{m/s}) \times t(\text{s})$$

ド〜〜ン

光

超音波の速度と波長

空気中： 約 340 m/s

比較： 光は300,000,000 m/s

水中、固体中： 約 1,500 m/s

界面で屈折・反射

$$\lambda = v / f$$

歩幅 = 速さ / 時間あたりの歩数

波長 λ は、超音波の振動数 f と逆比例

3 MHz (3,000,000Hz) の時、波長は 0.5 mm

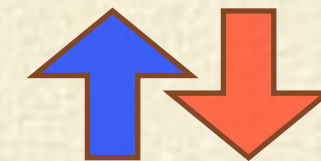
— 像の分解能を決める (1-30 MHz) —

超音波の発生と受信

スピーカーとマイク

音波は物質の振動（疎密波）

音波

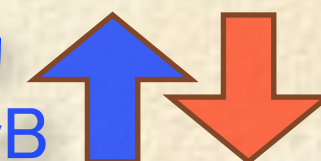


スピーカーのコーン紙の振動

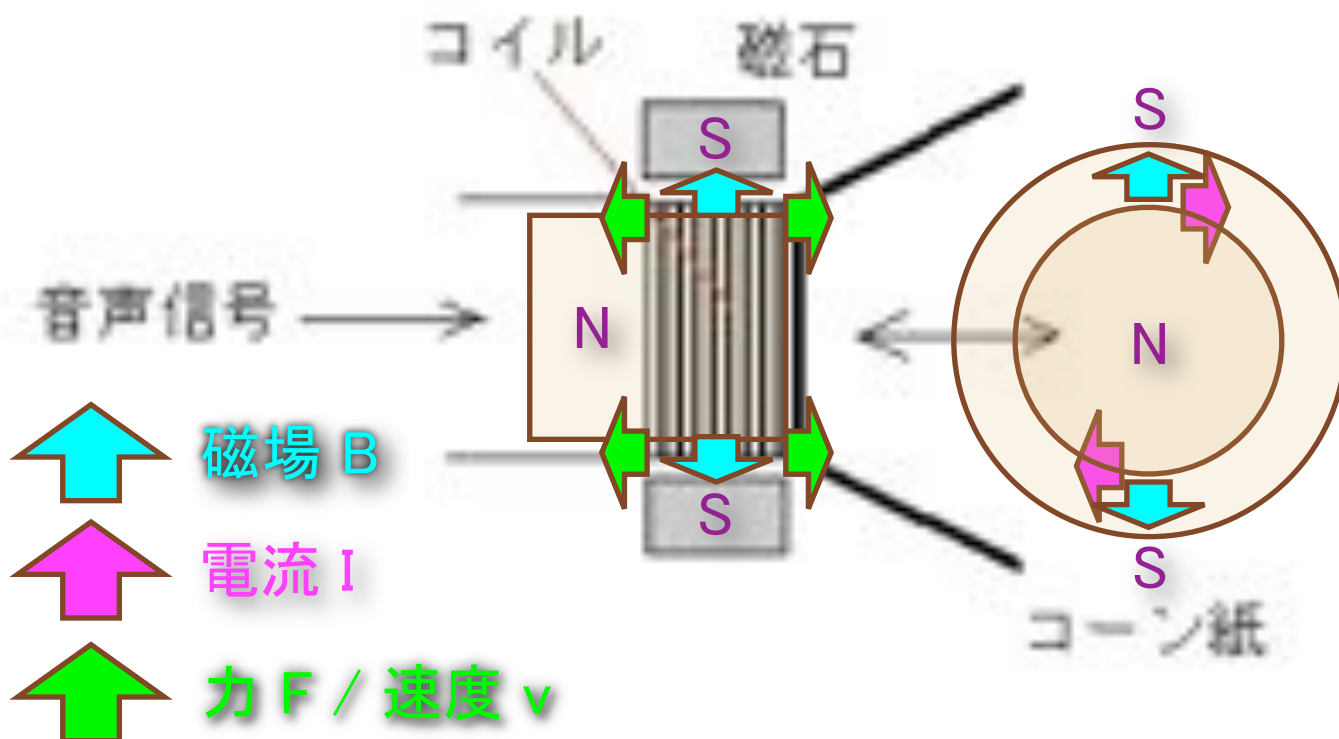
コイル(中の電子)が磁石の磁場中を動く

ローレンツ力

$$F \propto IB \propto evB$$



コイルに起電力/電流



超音波の発生と受信

圧電（ピエゾ）素子

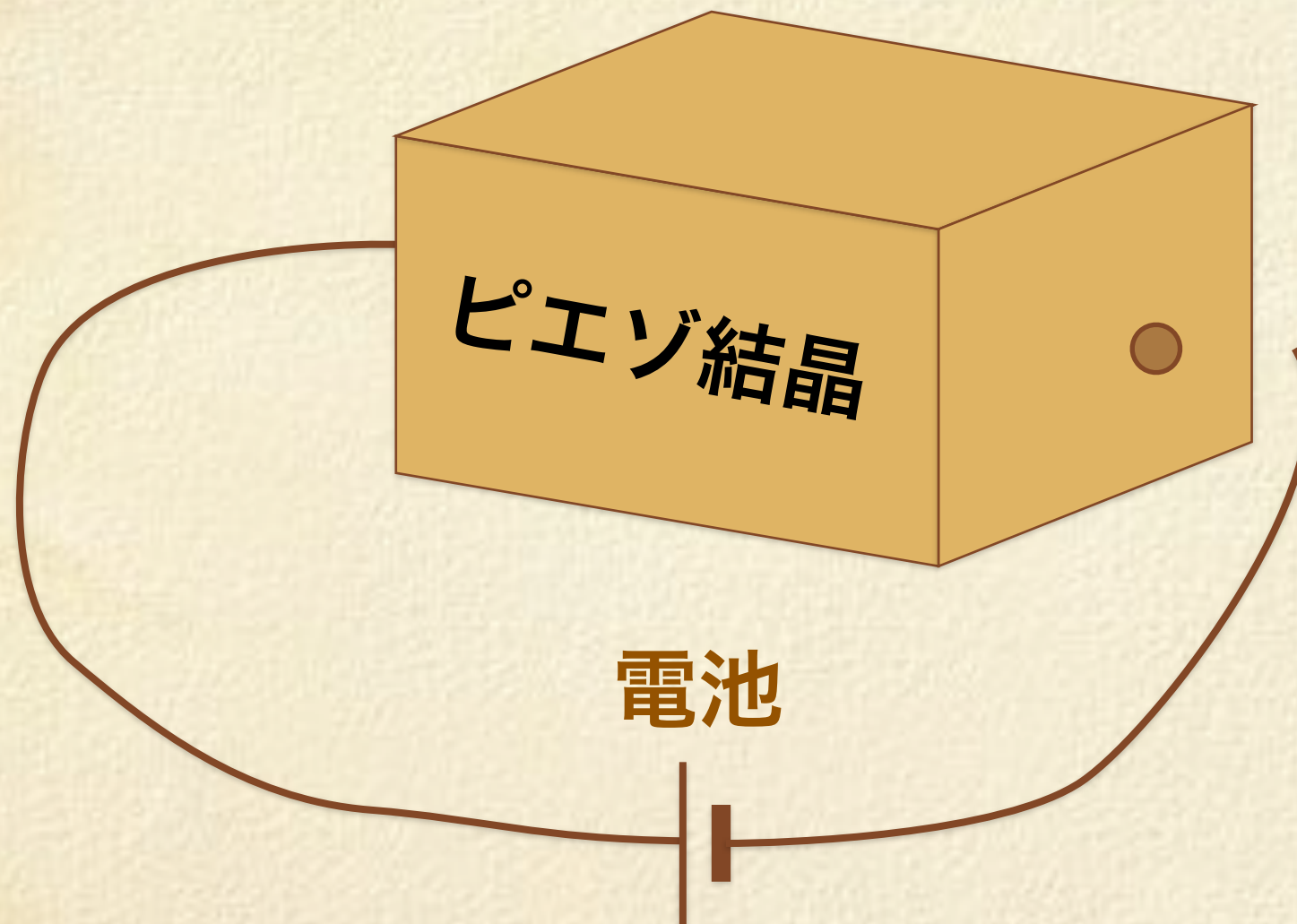
ハンマーで叩くと電圧が発生する強誘電結晶

逆に言うと、電圧を加えると歪む（伸び縮みする）結晶

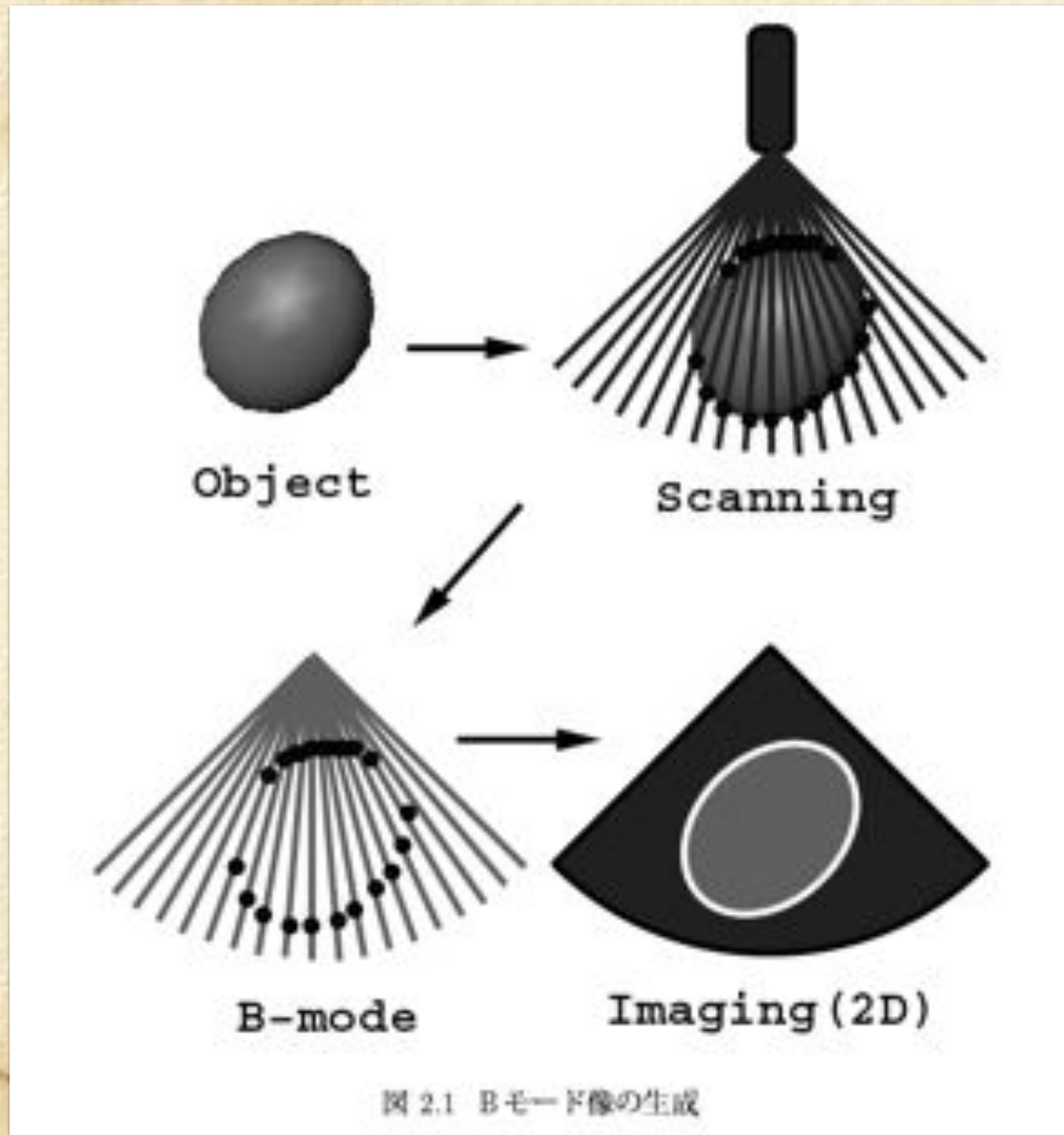
NbLiO_3 , PbTiO_3 など

電池 (数百ボルト)をつなぐと伸び縮みする結晶

圧電結晶 (ピエゾ素子)



一つの結晶で、超音波の発生と受信が可能



第143回 5月11日放送

「創意は無限なり」

～超音波診断機エコー～

日本で生まれた 初めての超音波診断装置



◆昭和51年に完成した世界初・
動画超音波診断機



◆開発の切っ掛けを作った
新米医師・和賀井敏夫さん



◆開発リーダー、
日本無線技術部
長・中島茂さん



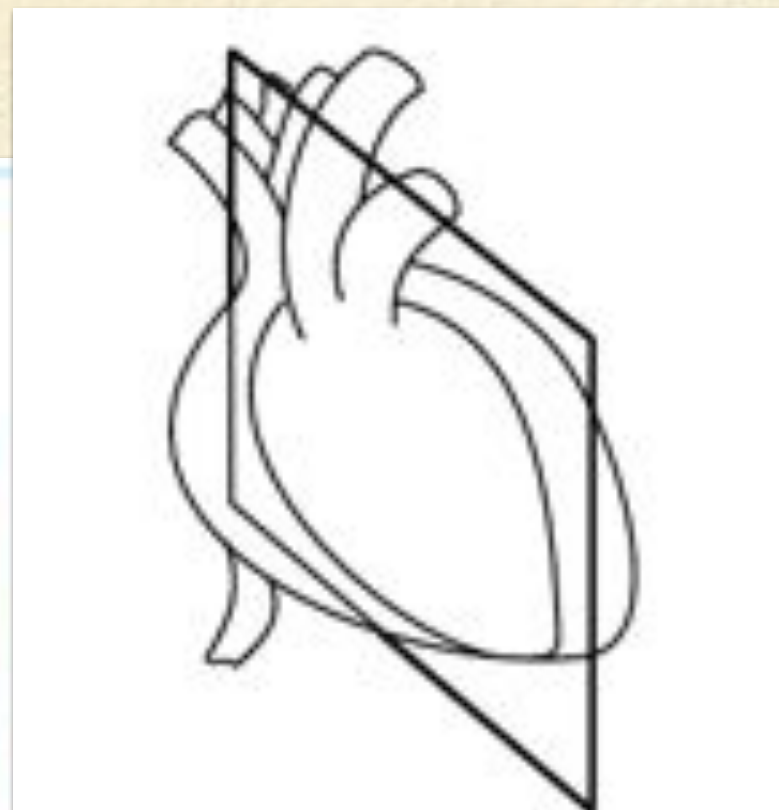
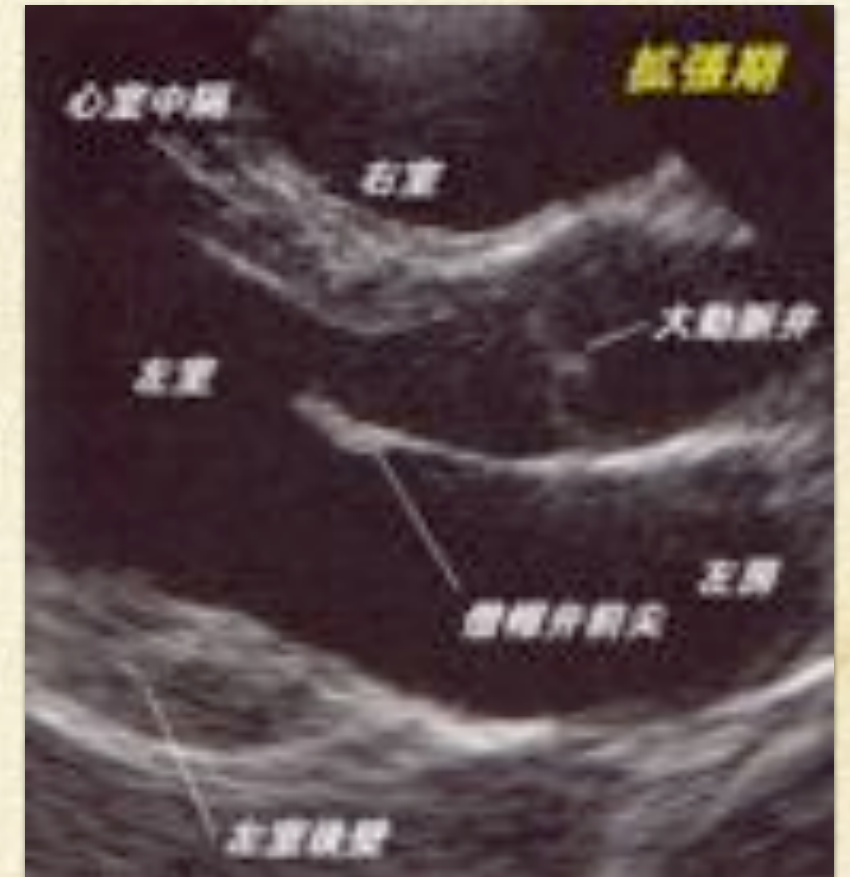
◆身体の断
面を映し出
すため風呂
桶実験を繰
り返した

心臓の動きと血流



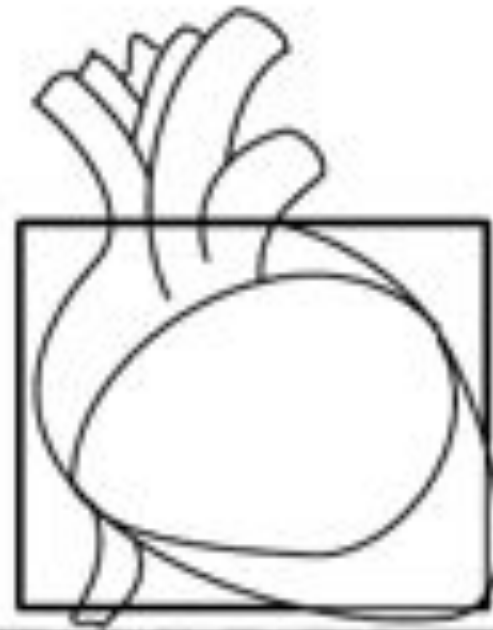
断層心エコー検査

下の写真は、心臓の縦の断面でみた断層心エコーの図です。左が拡張期、右が収縮期です。心臓の各部位がよくみえます。



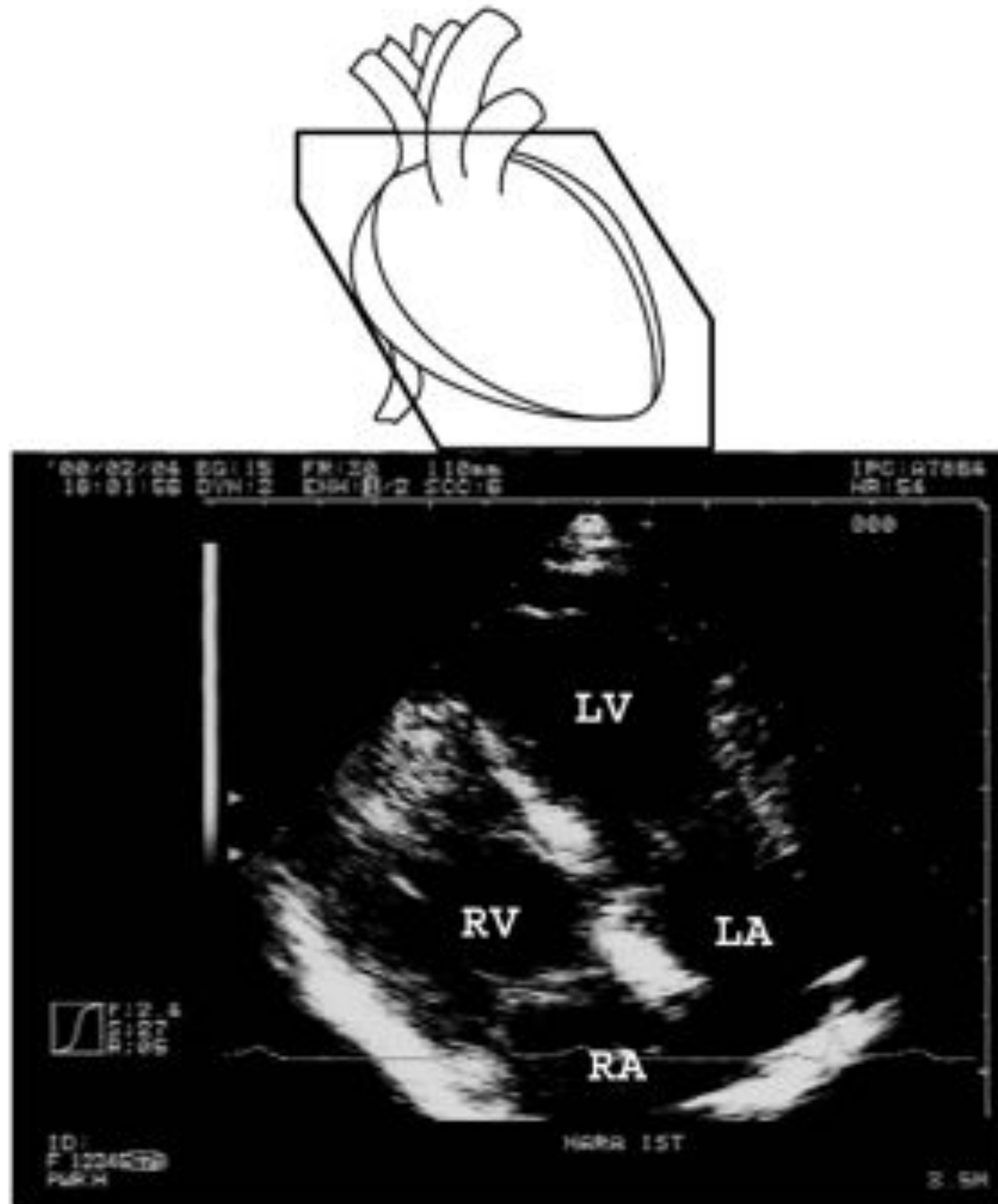
a miter





図中各略称は
 LV:左心室, ventricle
 LA:左心房, atrium
 RV:右心室,
 RA:右心房,
 AV:大動脈弁, aortic
 MV:僧帽弁 mitral

図 2.3 心臓短軸像



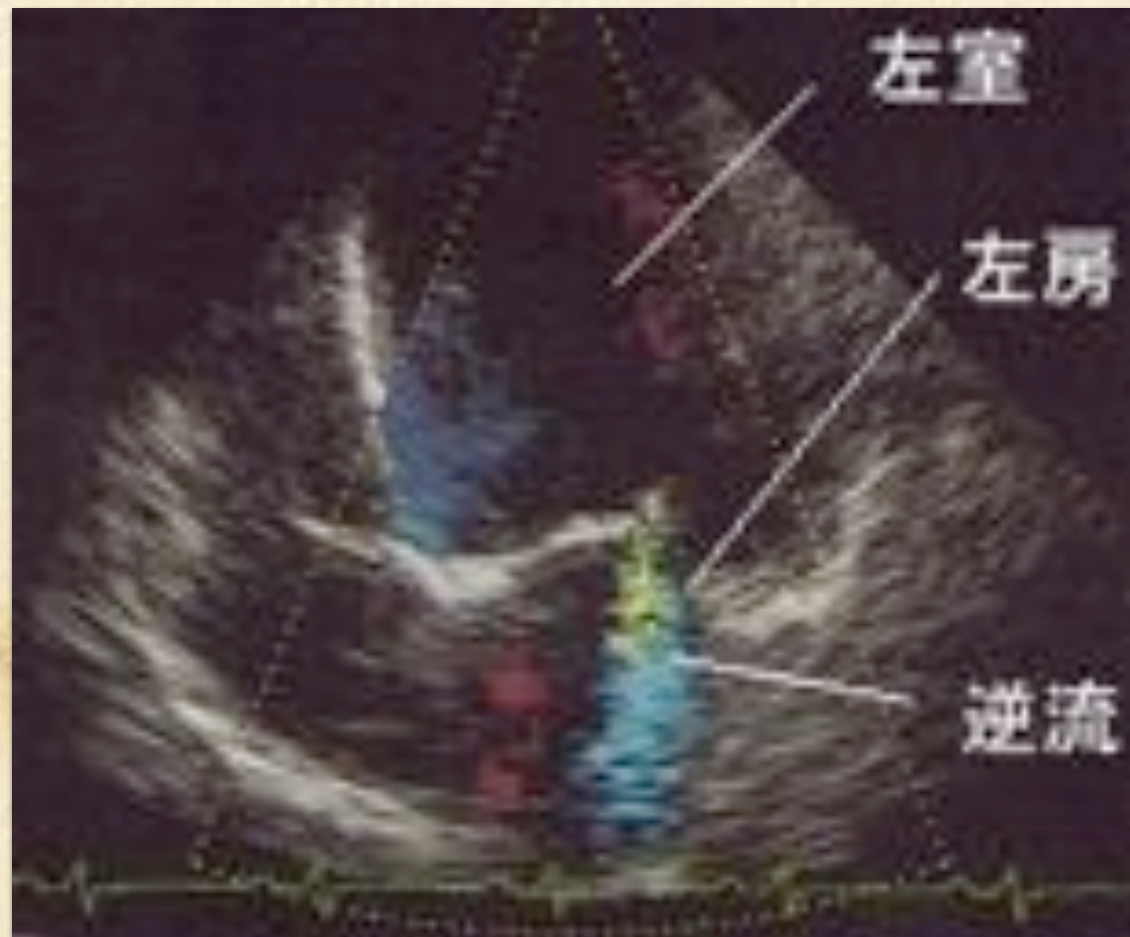
図中各略称は
 LV:左心室,
 LA:左心房,
 RV:右心室,
 RA:右心房,
 AV:大動脈弁,
 MV:僧帽弁

図 2.4 心臓四腔像

心臓の血流を見る ドップラー効果

pdf の時はshiftキーを押しながら・・・

<http://www.dainippon-tosho.co.jp/kou/kokoP/chpt05/chpt05.html>



カラー・ドプラー検査

右の写真は僧帽弁から血液が逆流する僧帽弁閉鎖不全の人の記録です。逆流としめしているところが青や緑の混じったカラーで光って見えます。カラードプラー検査は心臓内の血流の異常を発見するのに力を発揮します。

3D画像表示 I

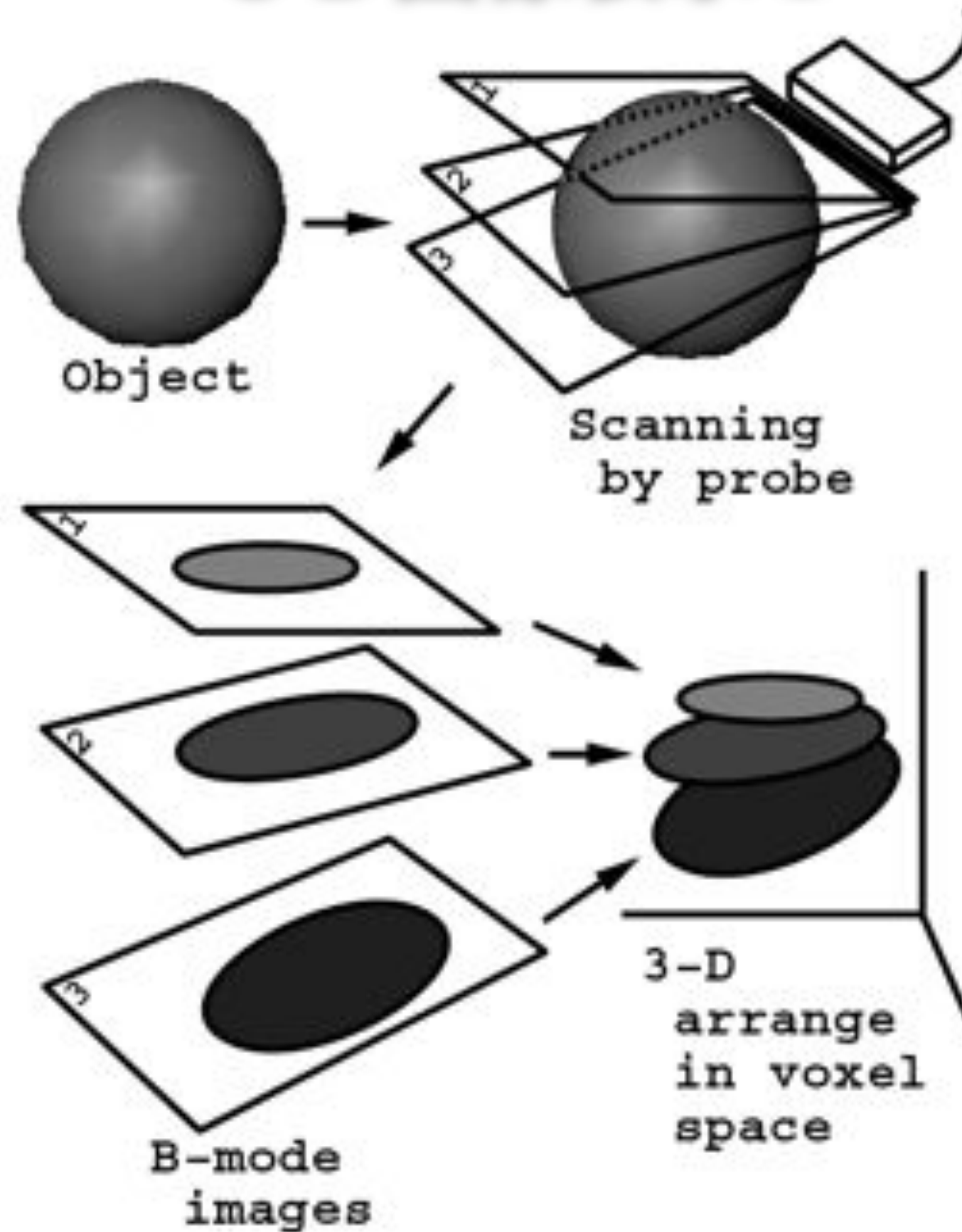


図 3.1 三次元超音波イメージング

3D画像表示 II

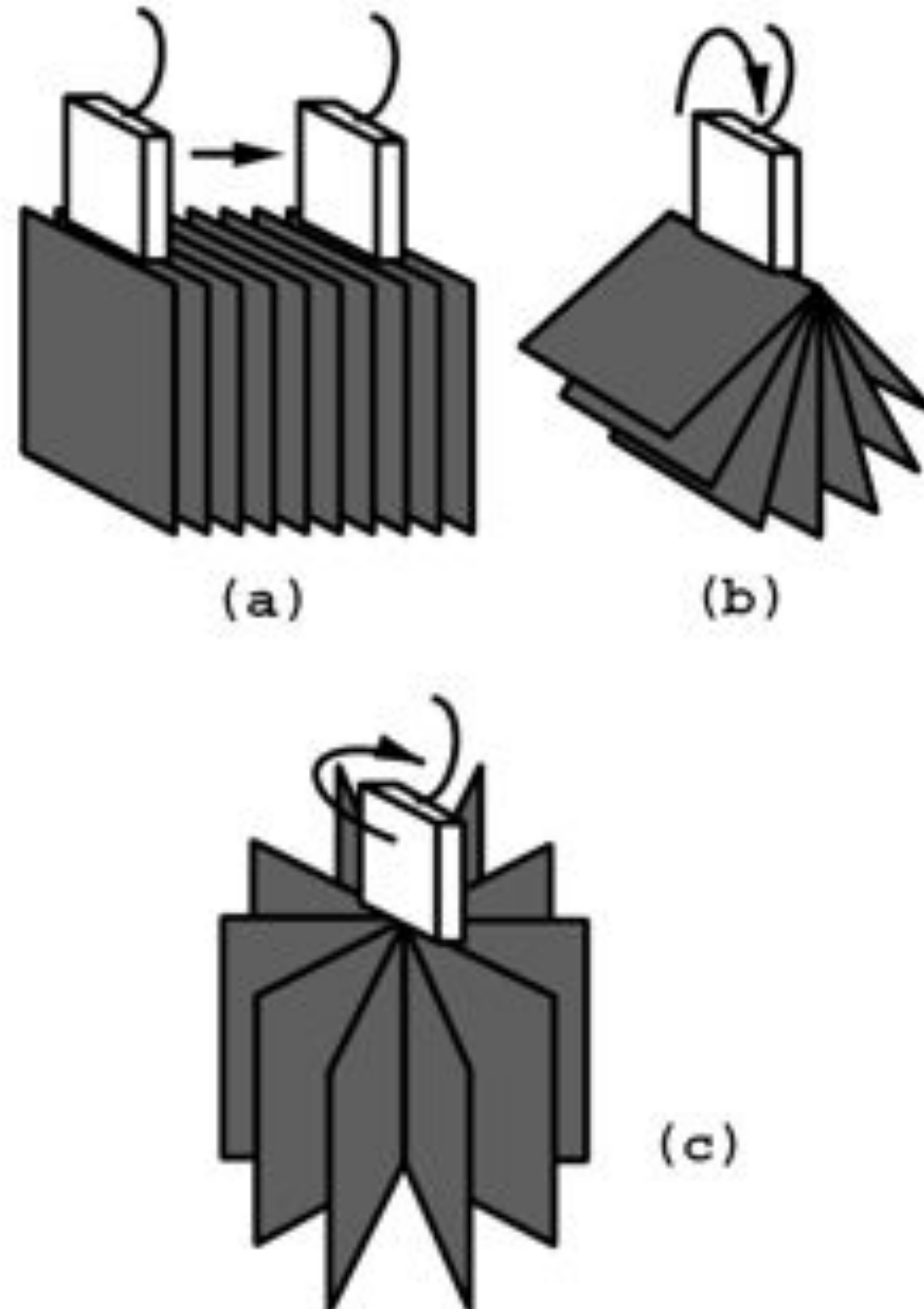


図 3.2 メカニカルスキャン: (a) リニアスキャンング, (b) ファンスキャンング, (c) ローテーションナルスキャンング

胎児の立体画像、動画

立体的な画像(3D)に加え、動画撮影(4D)



胎児の立体画像、動画



立体的な画像(3D)に加え、動画撮影(4D)



X線 CT 断層撮影装置

Computer Tomography



図1 透過像撮影の原理図

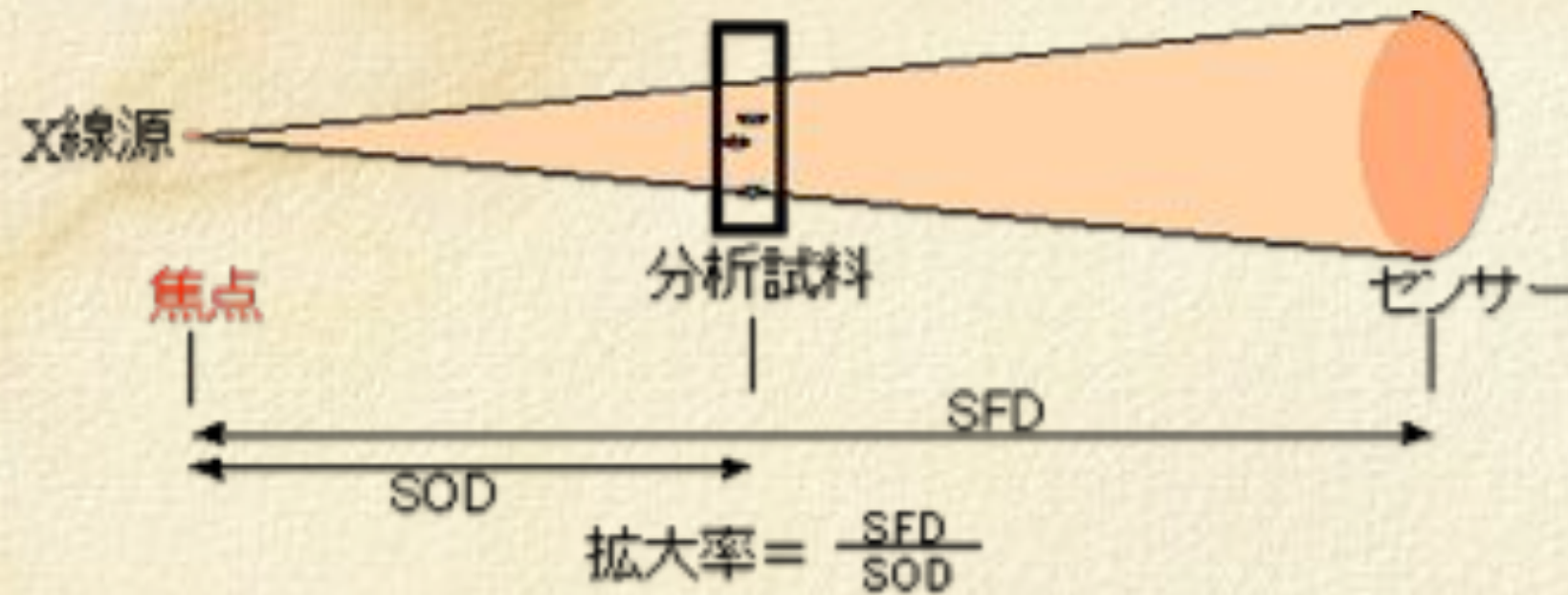


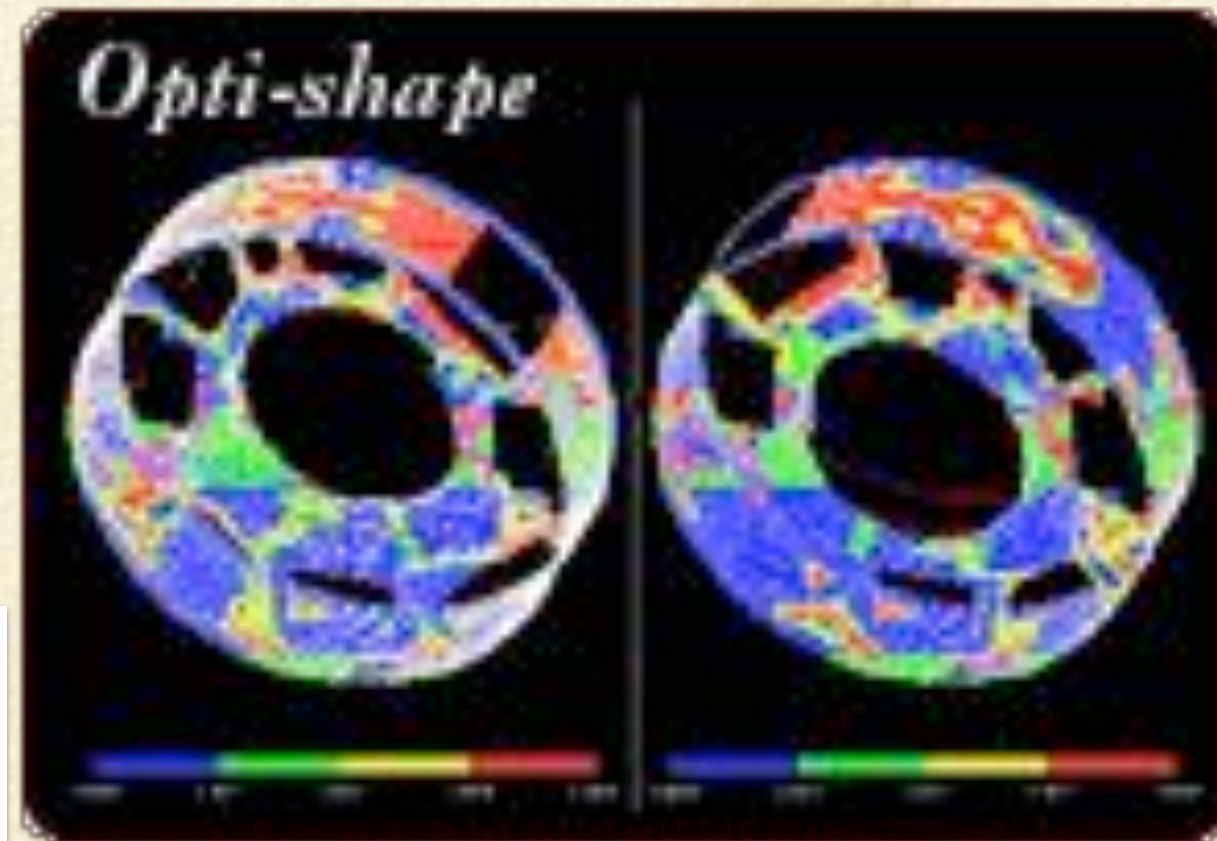
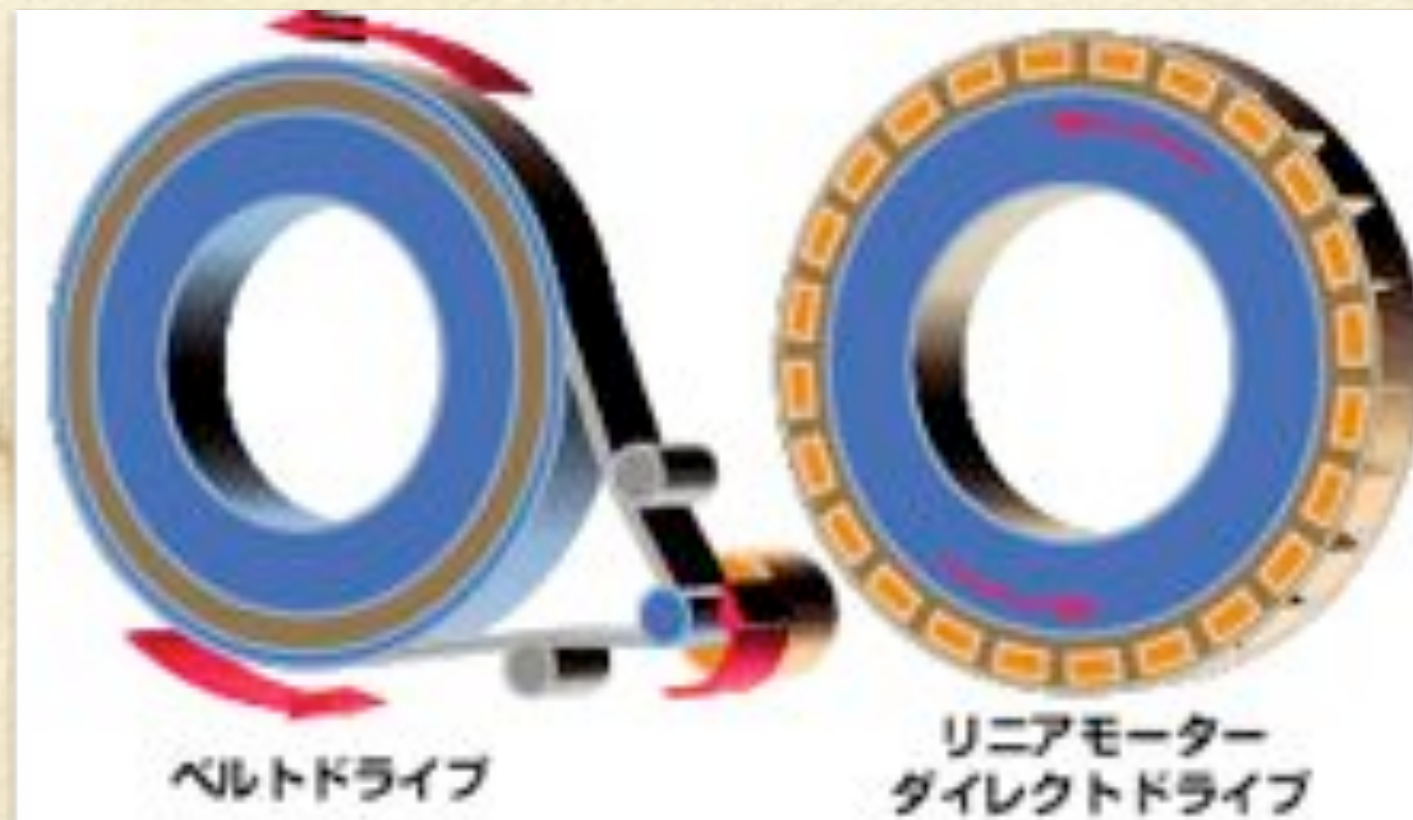
図2 CT断面撮影の原理図



X線 CT 断層撮影装置

$$mg = mr\omega^2, r \approx 0.5\text{m}, r\omega^2 = 0.5 \times 2\pi(2)^2 \approx 12.6 \text{ m/s}^2$$

0.5秒フルスキャンによる遠心力13Gを克服するために、スキャナ本体をシリンダ構造に。全ての部品をその内側に配置し、外へ飛びだす危険性を回避。シリンダに関しては“IDEAS”による応力構造解析と“Opti-shape”による形状最適化。

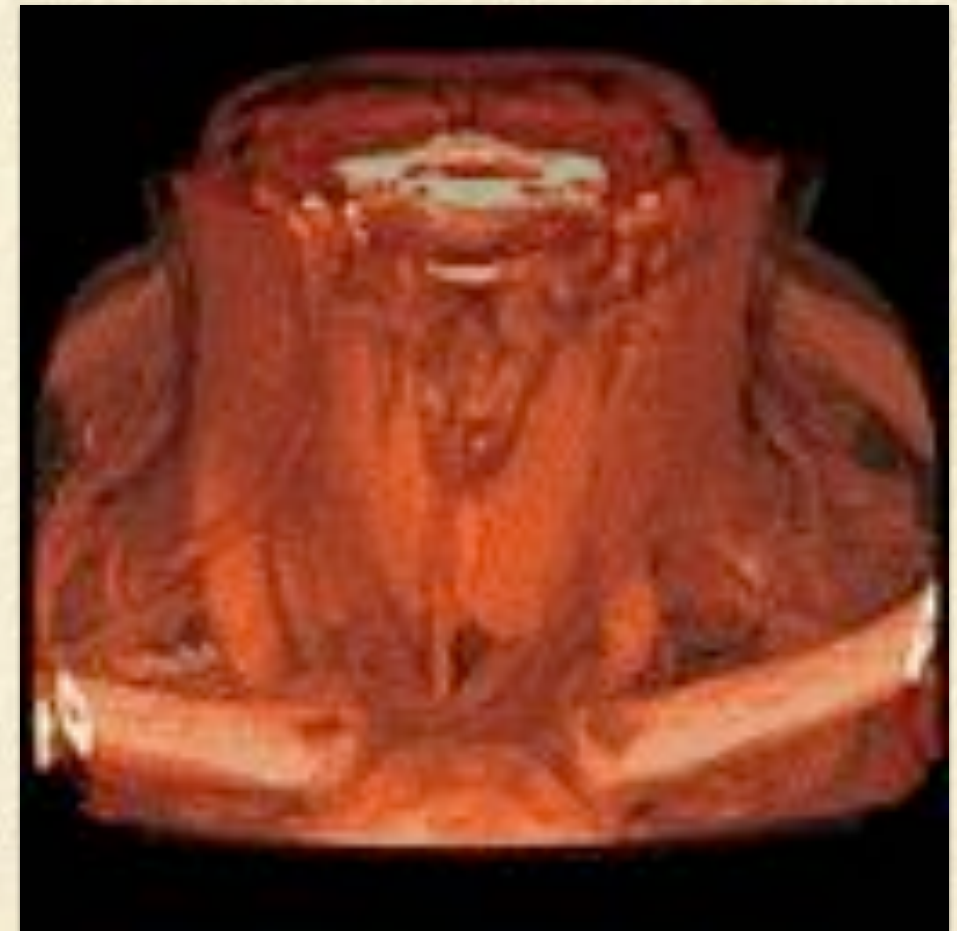


X線 CT 断層撮影装置

超高速画像処理プロセッサの搭載により、通常画像再構成時間は0.5秒、リアルタイム画像再構成は0.083秒(12フレーム/秒)を実現。



スライス厚は、1.2.3.5.7.10mmに加え0.5mmを標準搭載。ビームトリマにより0.4mmまで向上。



X線 CT 断層撮影装置



アキシャル断面
axial



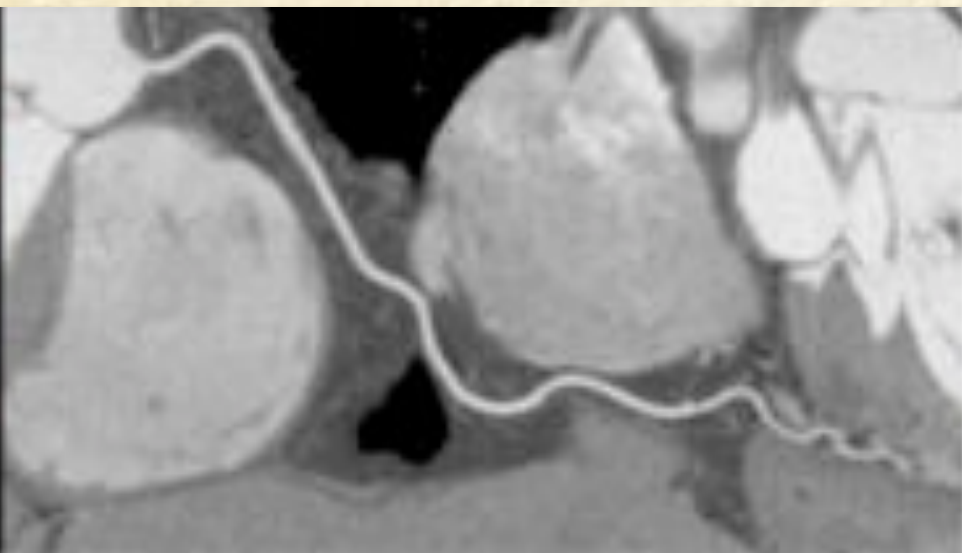
サジタル断面
sagittal



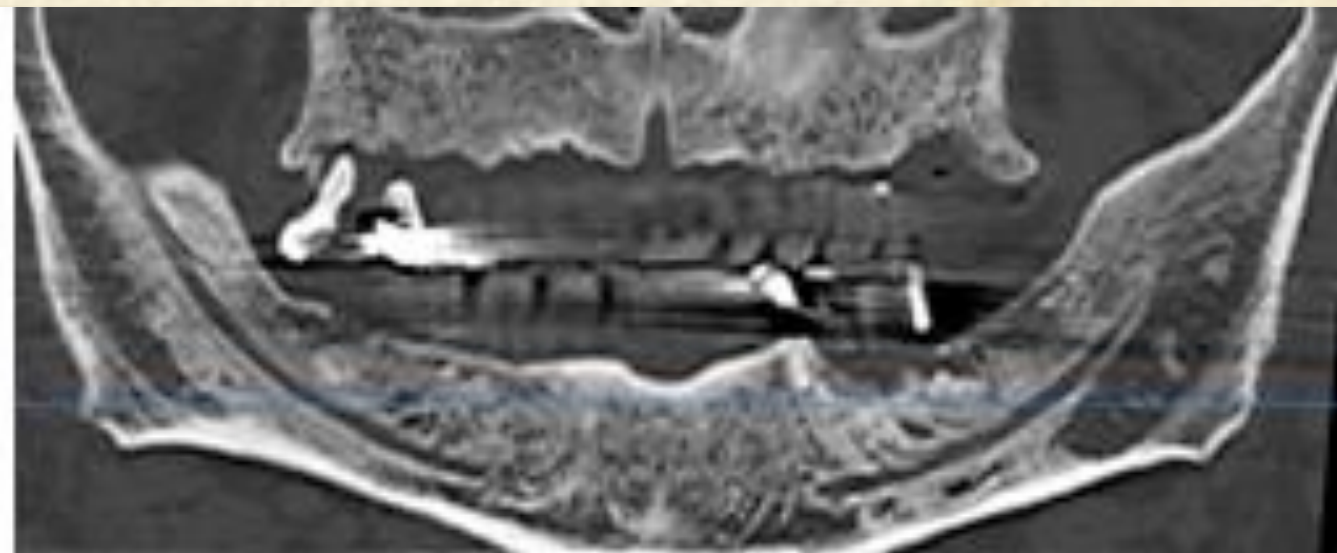
コロナル断面
coronal



オブリーク断面
oblique



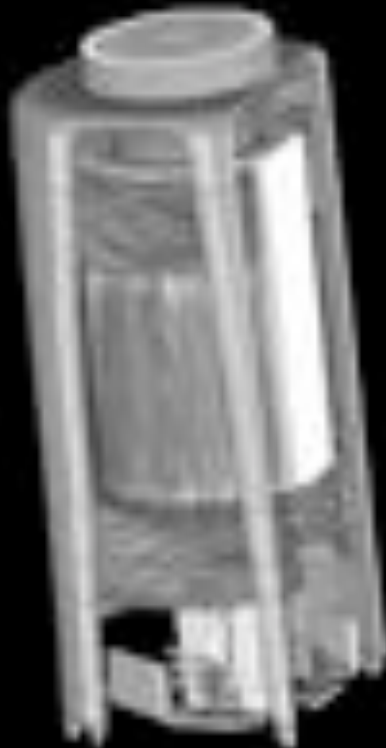
冠状動脈のカーブド断面
curved MPR



鎖骨のカーブド断面
curved MPR

X線 CT 断層撮影装置

〔携帯用4φモータの三次元CT像〕



マイクロフォーカスX線CTによる非破壊検査

◇非破壊

CTシステムを活用して、非破壊で検査。

◇クイックレスポンス

短時間で多断面のCT像を取り込む、クイックレスポンス。

◇わかりやすく・きれいな試験データ

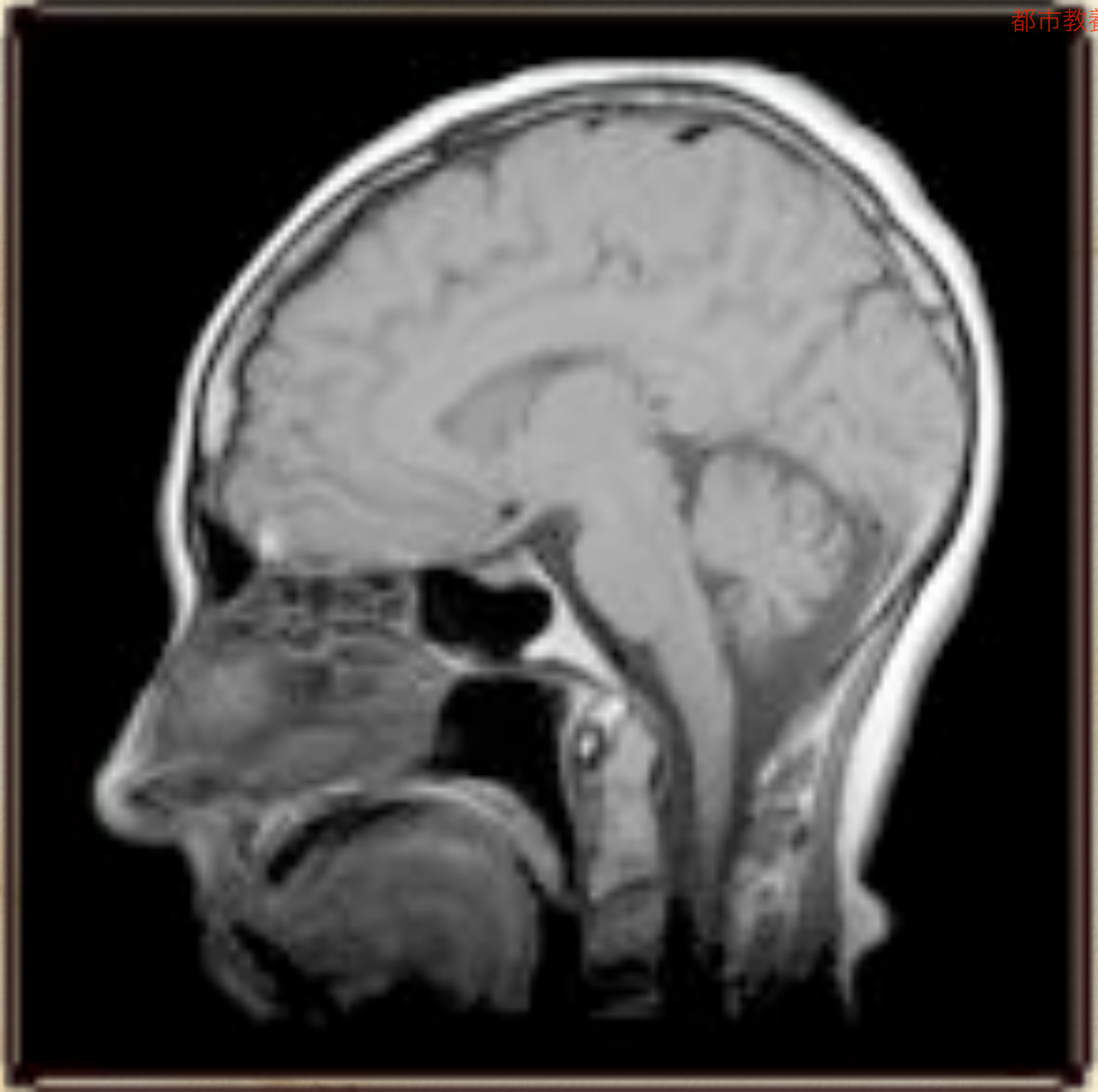
高分解能を実現し、高画質な試験データ。

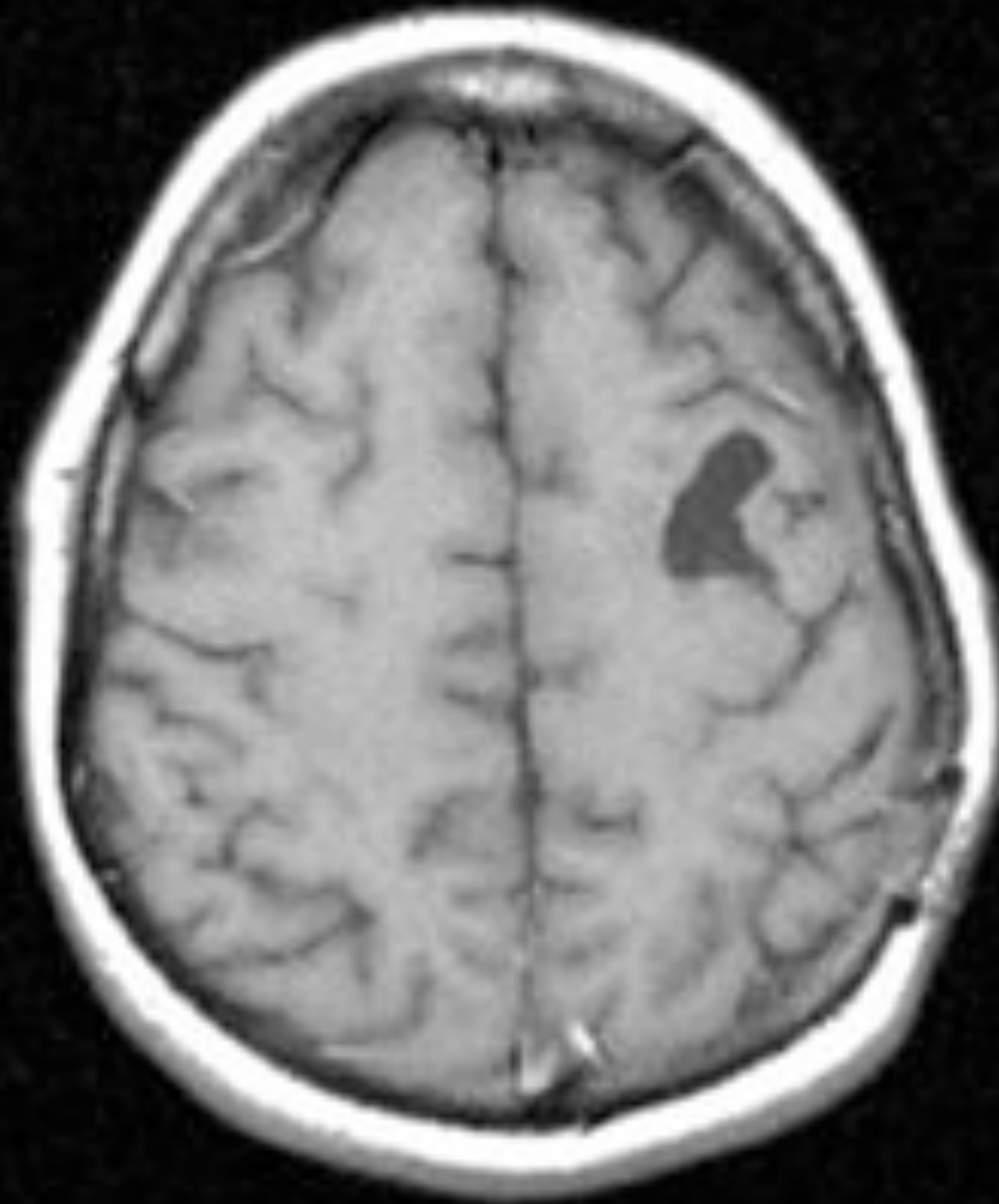


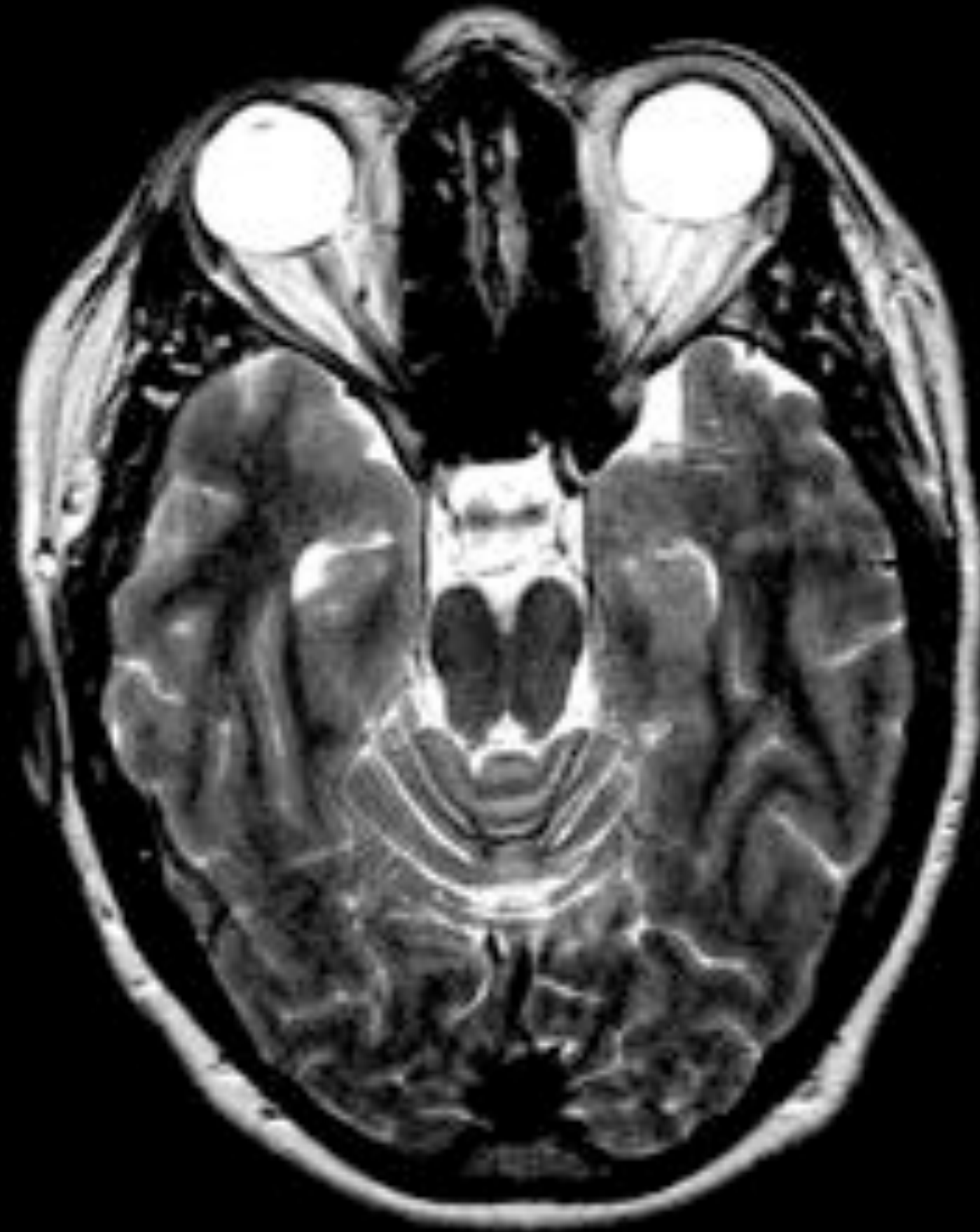
MRI

磁気共鳴断層撮影装置

生体内の水素原子核（陽子）の 濃度分布をNMR（核磁気共鳴） により観測





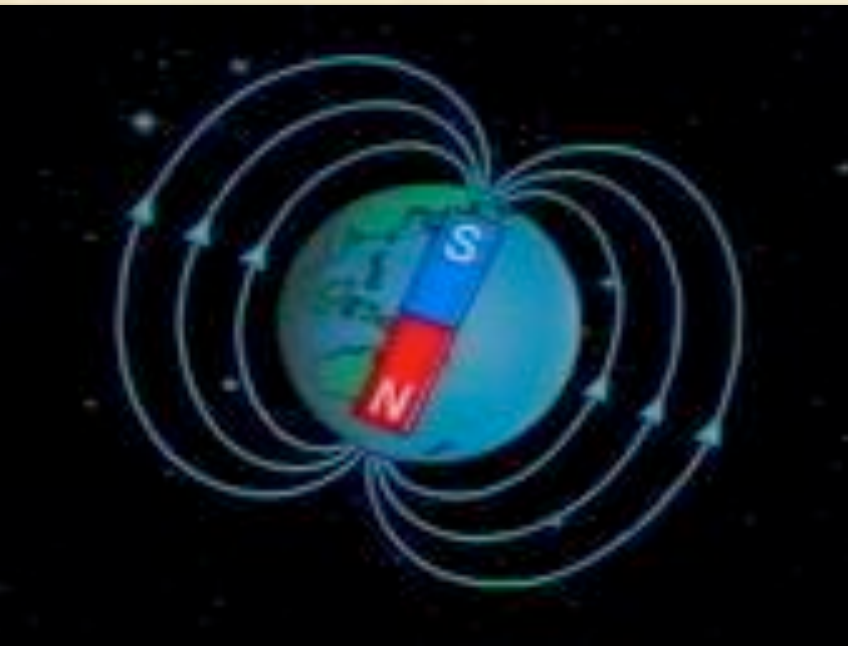
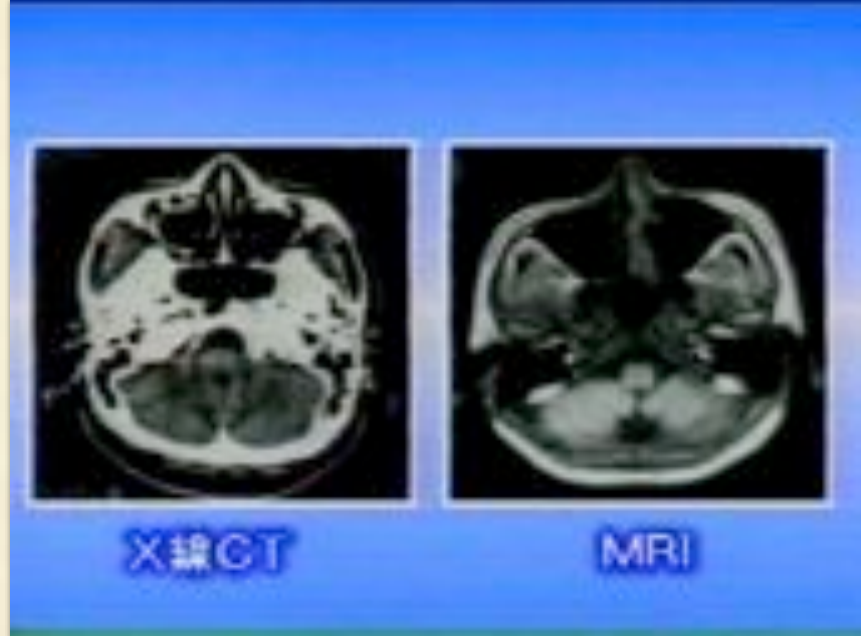
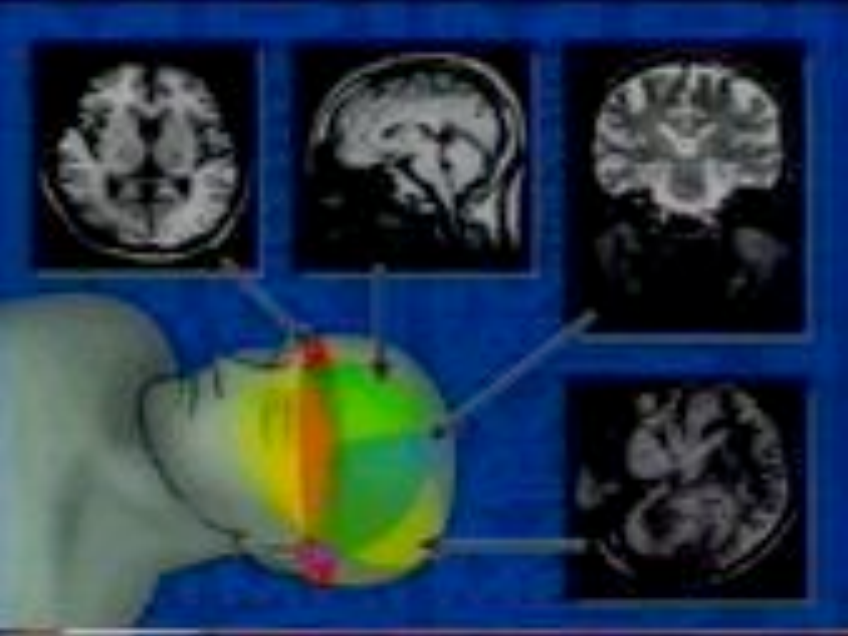




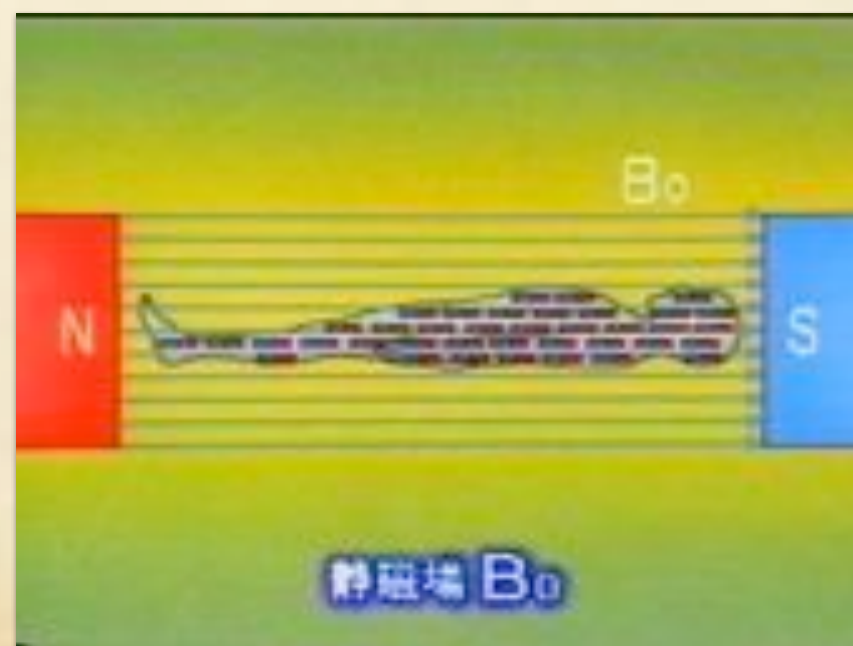
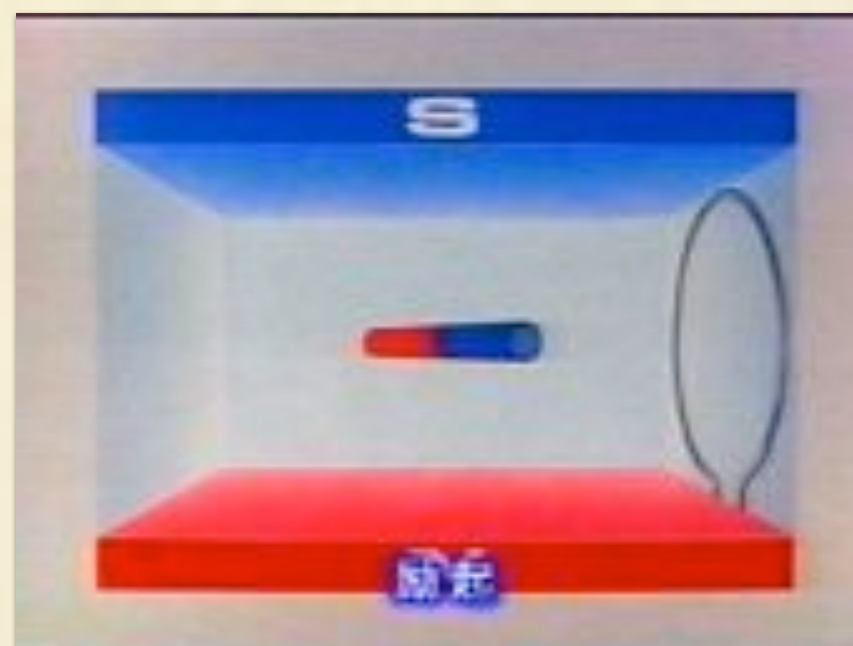
A photograph of a magnetic resonance imaging (MRI) machine in a clinical setting. The machine is a large, white, C-shaped structure with a patient bed extending from it. In the foreground, there is a control console with a computer monitor and various buttons. The background is a plain, light-colored wall.

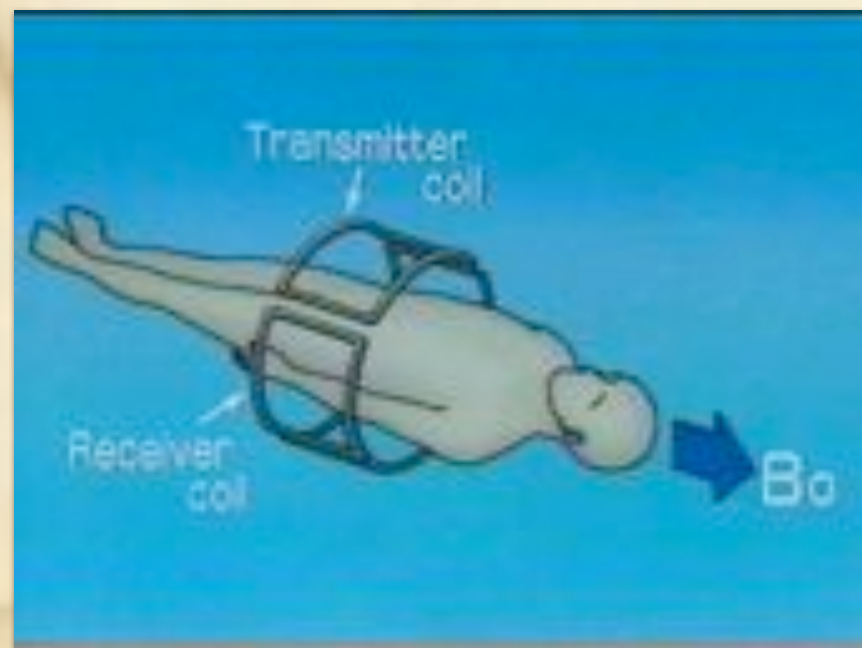
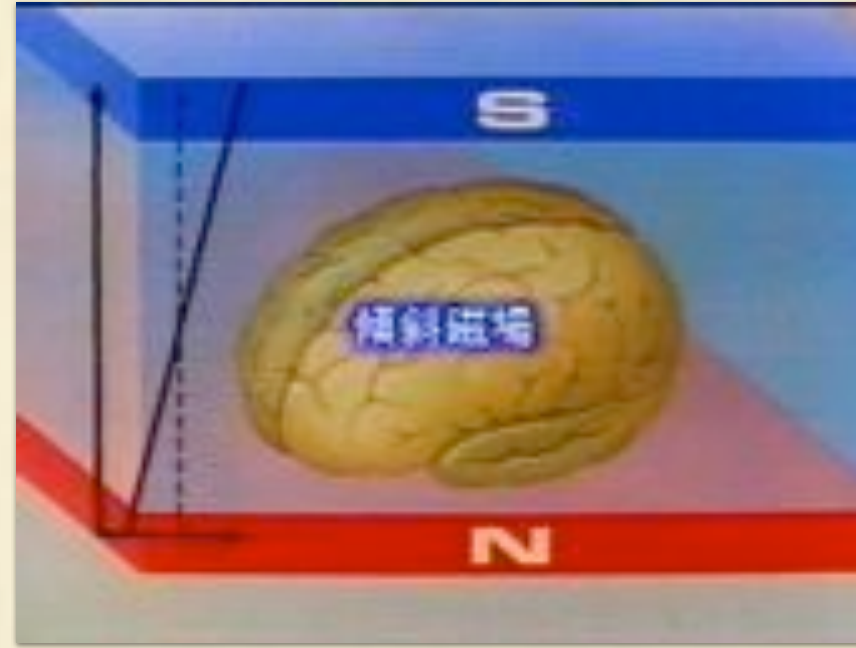
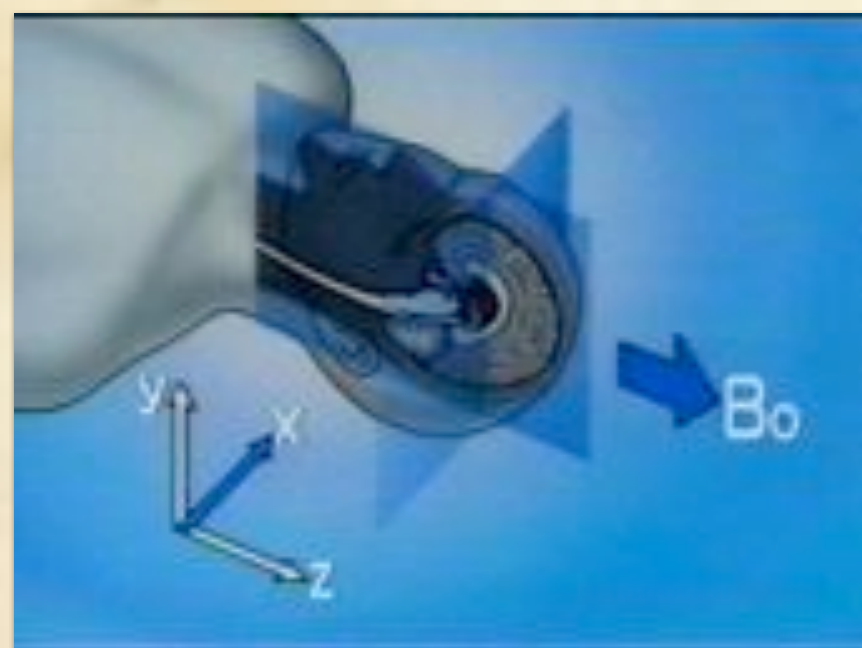
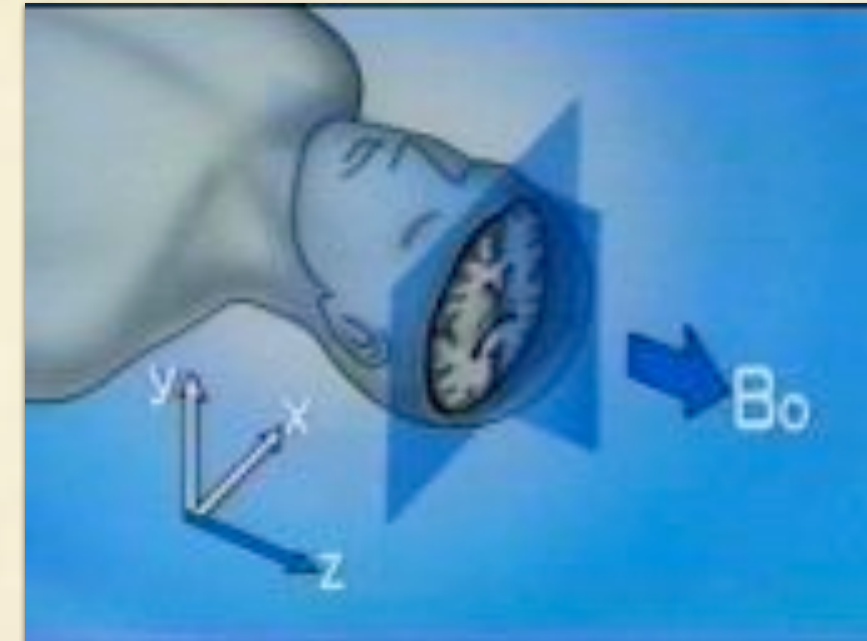
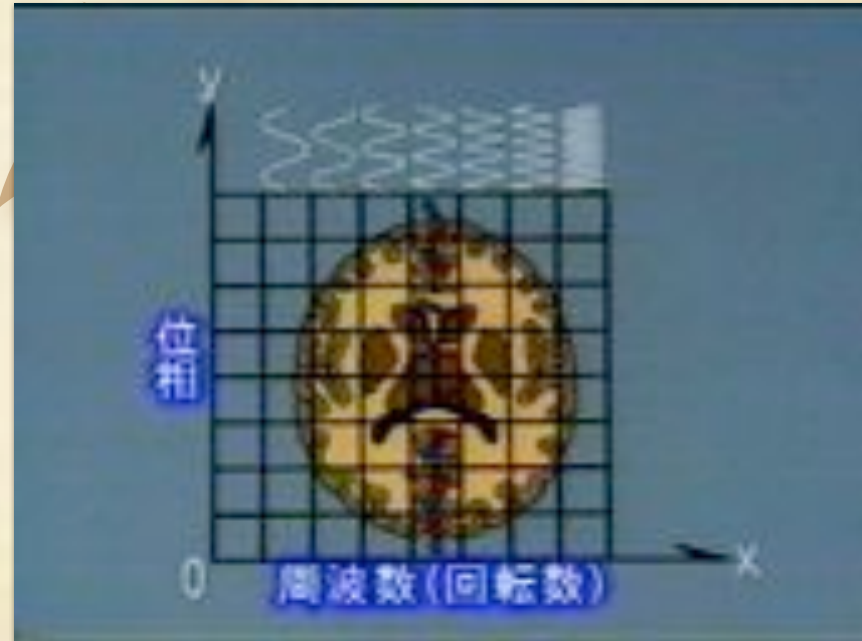
MRIの原理

（第1部）



1テスラ T = 10000 ガウス (G)
 地磁気 = 0.5 ガウス





PET/CT 断層撮影装置

Positron Emission Tomography

陽電子放射断層撮影：高診断能・低分解能

PET/CT 断層撮影装置

=

陽電子放射断層撮影：高診断能・低分解能

+

X線断層撮影：低診断能・高精度

陽電子(Positron)とは？

電子(Negatron?)と同じ質量、同じスピン
電荷は、 $+e$ (電子は、 $-e$)

1928年：ディラックが提唱、1932年：カール・D・アンダーソンが発見

電子の「反粒子」

電子と陽電子が遭遇すると、対消滅して

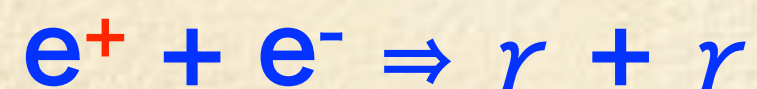
—対のガンマ線に変わる

(511 keV：電子の静止エネルギー： $2E = 2mc^2$)

PETの原理



放射性同位元素から出てくるポジトロン（陽電子）が電子と対消滅した瞬間に強い γ 線を2本出す。



運動量保存則を満たすような方向にでる。

運動量保存則



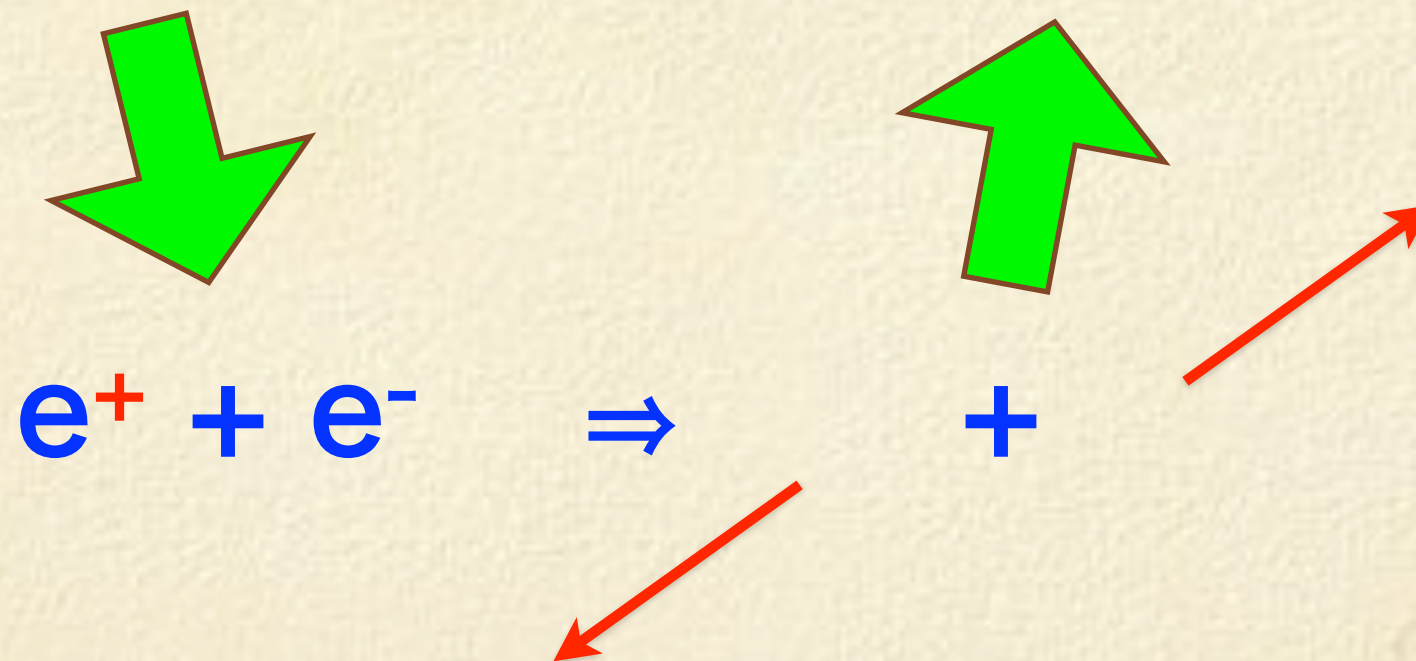
外力は働かない

2人が**静止**した状態 $\Rightarrow$ 2人が**運動**する状態

運動量保存則

2人が**静止**した状態 $\Rightarrow$ 2人が**運動**する状態

γ



運動量保存則を満たす

γ

PETに使われる薬

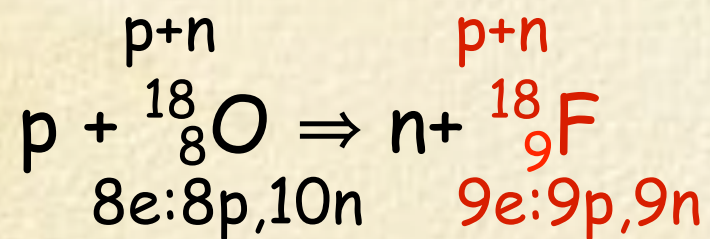
FDG（フルオロデオキシグルコース）

FDG = ブドウ糖 + 放射能

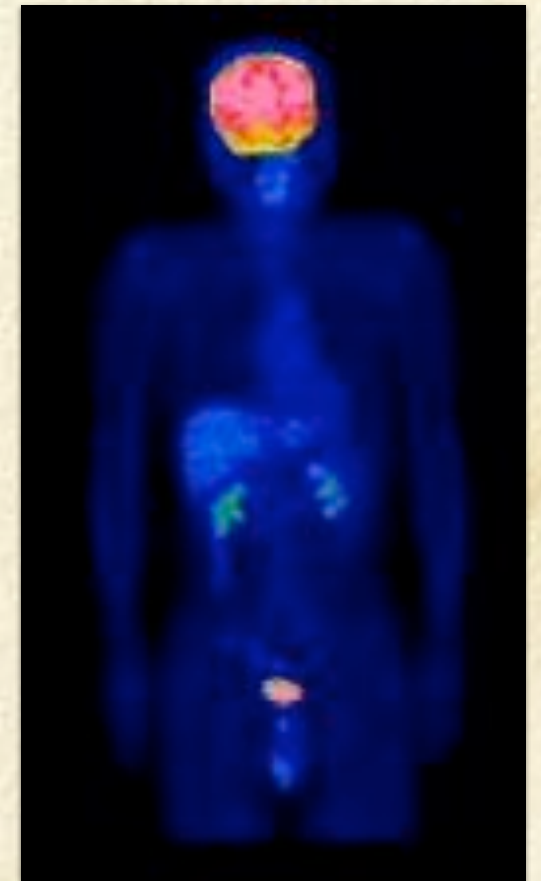
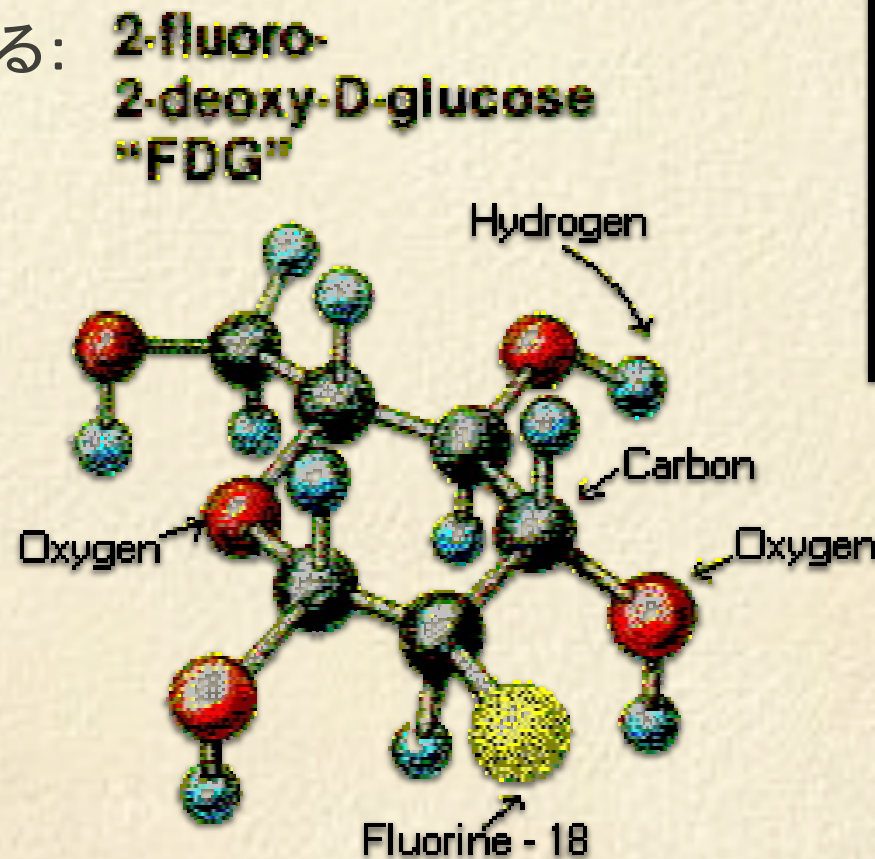
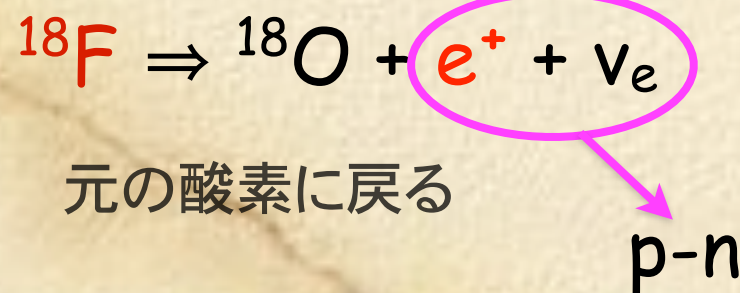
(^{18}F : 陽電子(positron)崩壊する核種。天然に存在するのは ^{19}F)
加速器（サイクロトロン等）で作る。

癌はブドウ糖をたくさん使う → FDGを注射すると癌が光る
右図のように正常でも光る部分（脳、尿（腎臓、膀胱））がある。

サイクロトロンで陽子(P)を加速してDGに当てる:



半減期: $t = 1.83[\text{hr}] \approx 110[\text{min}]$



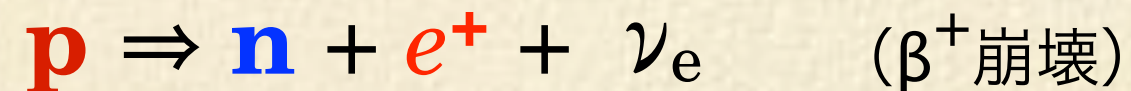
元素の種類 (性質) は何で決まる？

電子数

それでは

原子量 (原子の重さ) は？

陽子 (**p**, 電荷 $+e$) と中性子 (**n**, 電荷 0) の総数

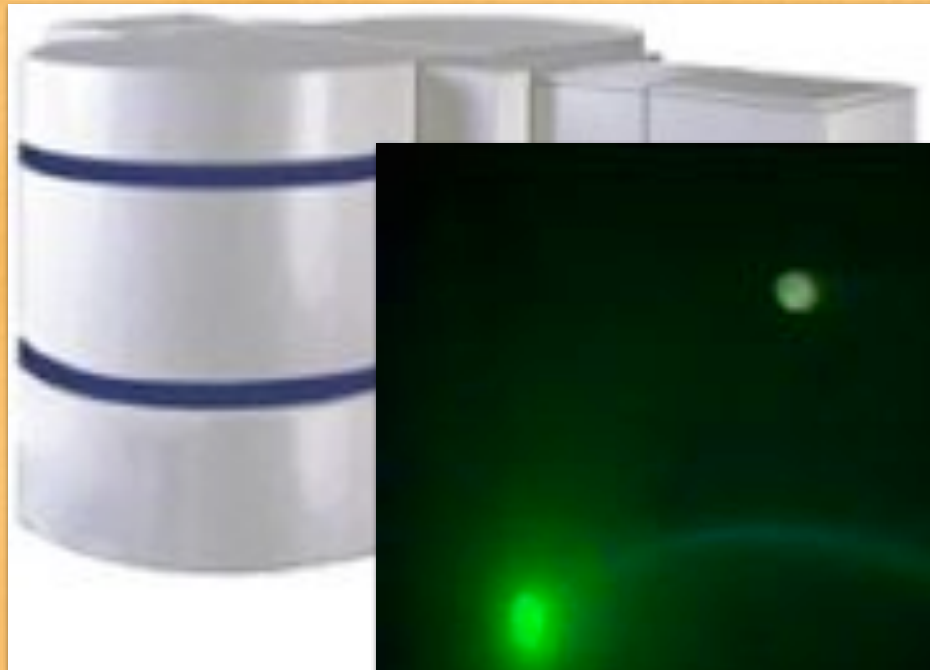


陽電子 電子ニュートリノ

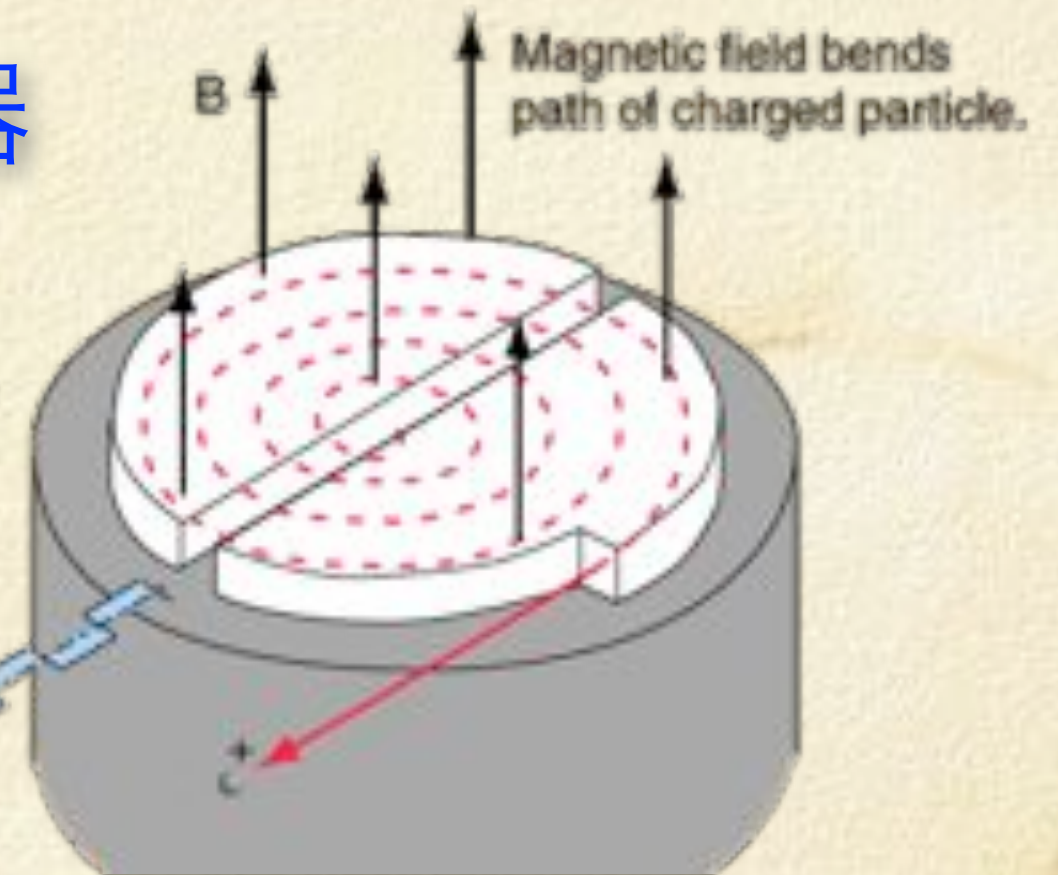
α 崩壊： ${}^4\text{He}$ の原子核(2p+2n)を放出

γ 崩壊： γ 線を放出 (原子の種類は変化しない)

サイクロトロン加速器



Square wave electric field accelerates charge at each gap crossing.



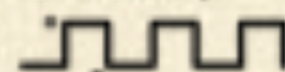
Hospital St



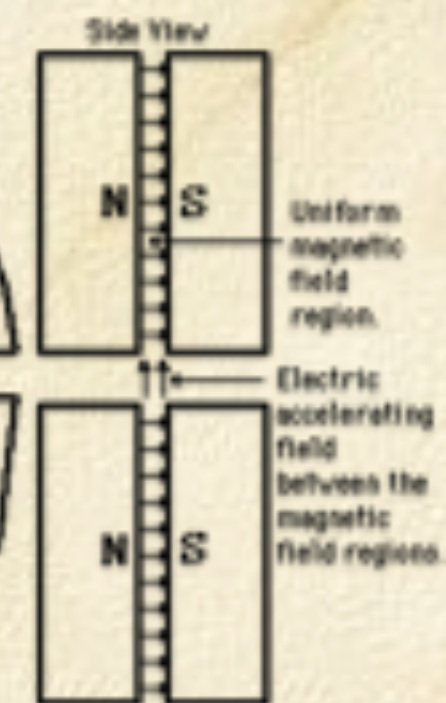
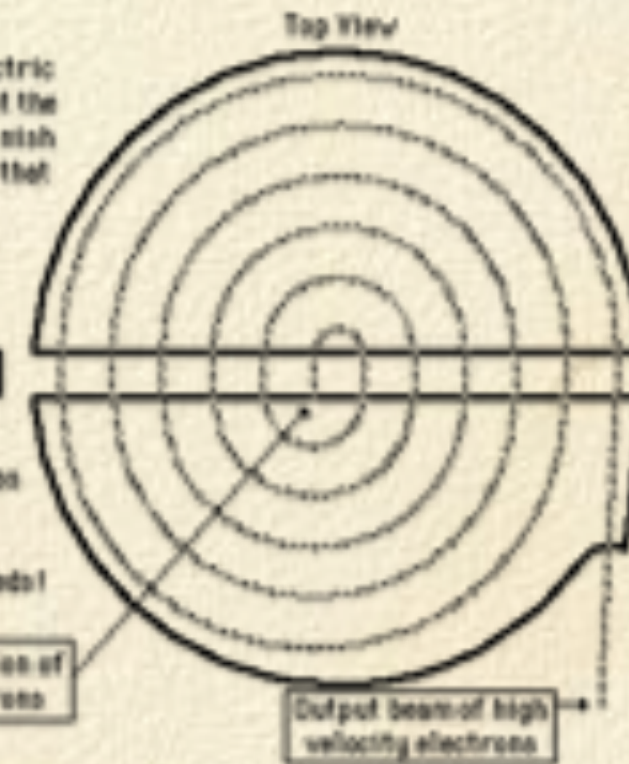
or

on/cyclotron.html

The accelerating electric field reverses just at the time the electrons finish their half circle, so that it accelerates them across the gap. With a higher speed, they move in a larger

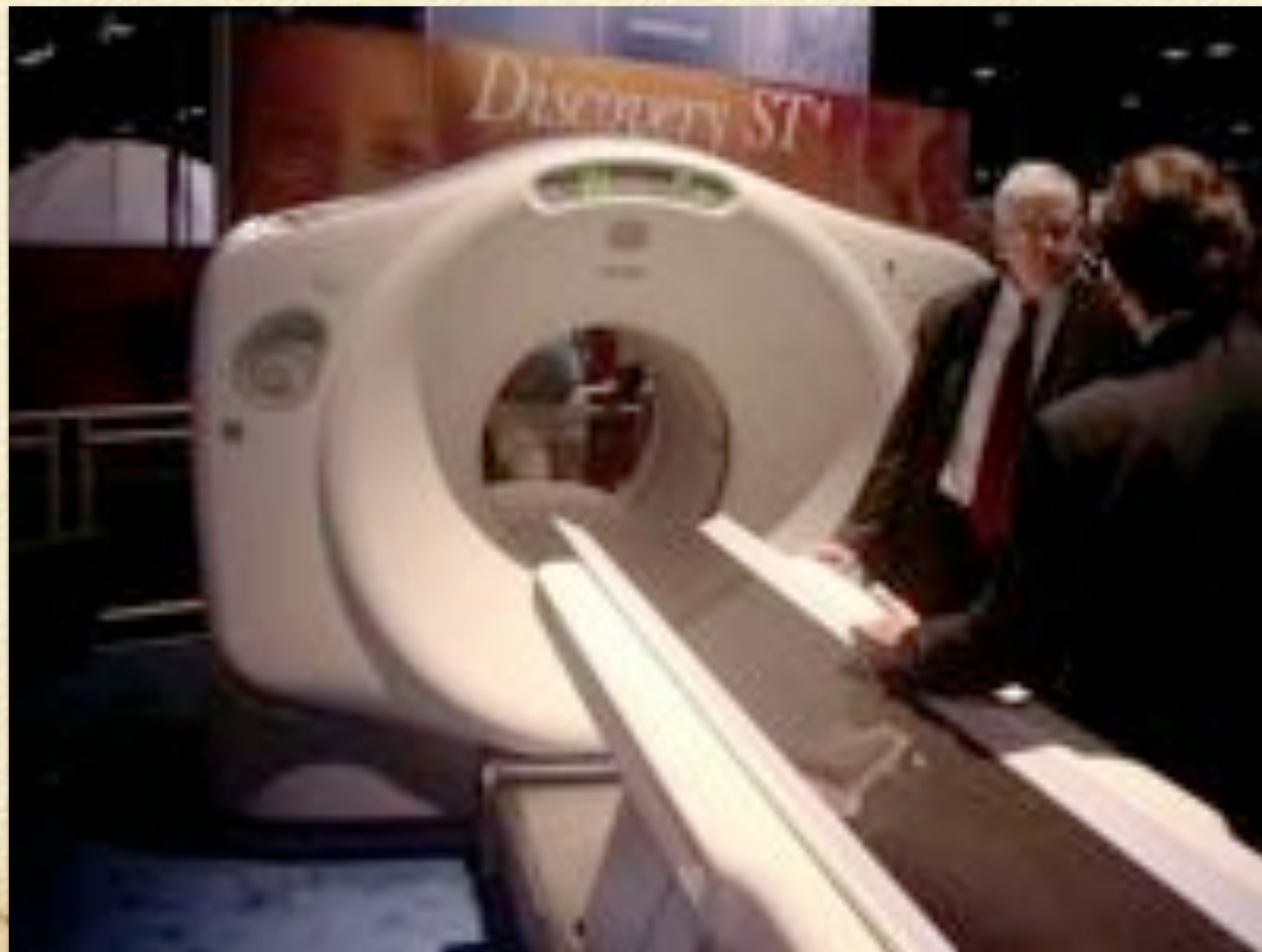


semicircle. After repeating this process several times, they come zinging out the exit port at high speeds!



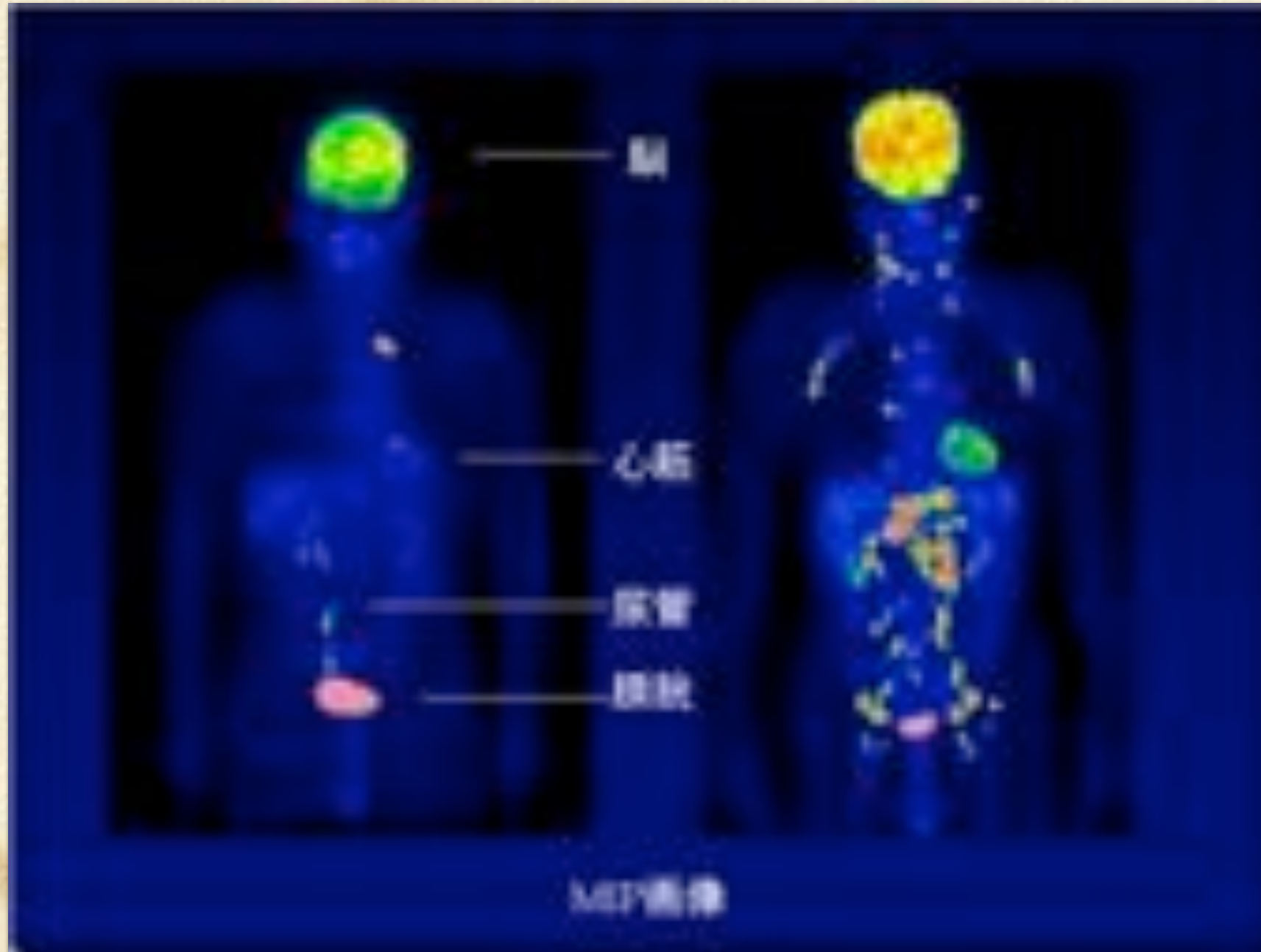
PET/CT

断層撮影装置



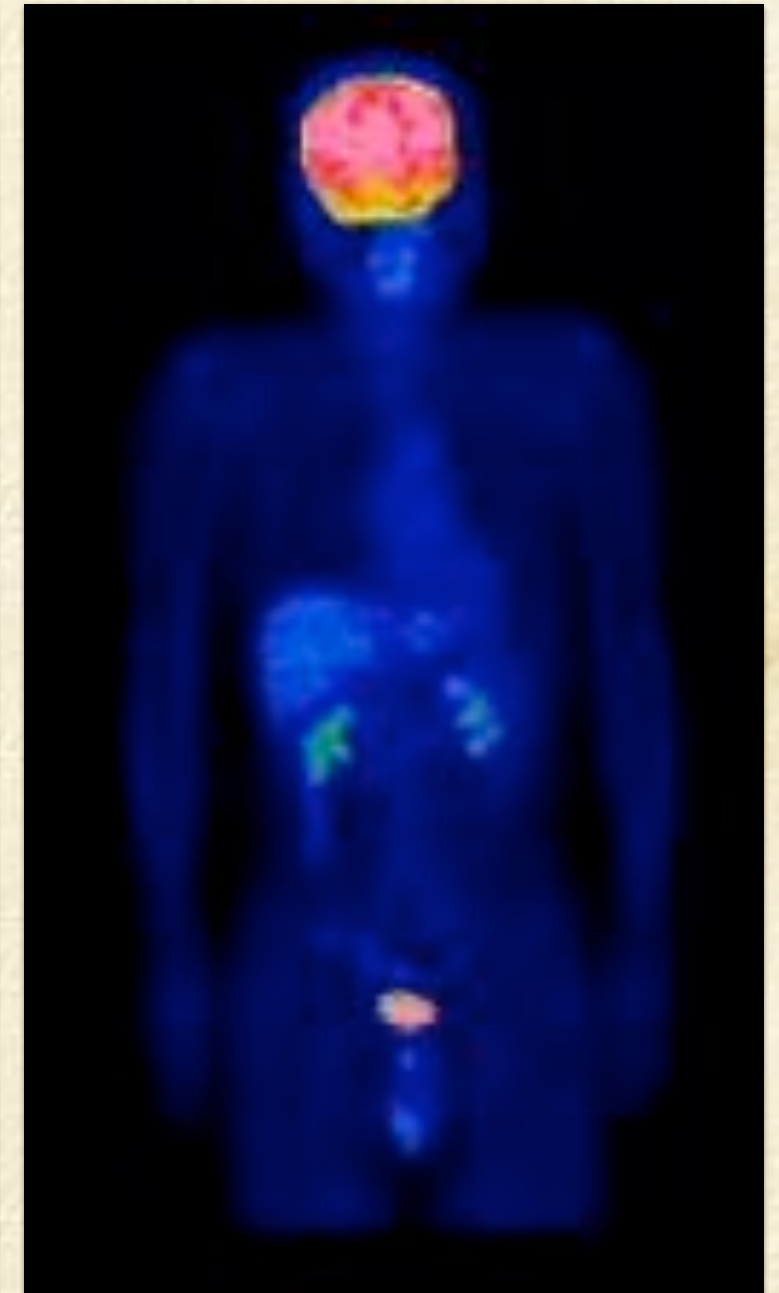
http://teleradiology.jp/MRI/o3_houkoku/RSNA2002/GE_PET_CT/

PET 診断例



肺ガン

リンパ腫

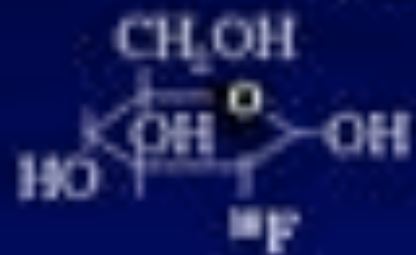


正常

癌とブドウ糖代謝

^{18}F -FDGの集積機序

2-deoxy-2-fluoro-D-glucose



Glucose transporter

FDG

Hexokinase

FDG

FDG-6-P

G-6-phosphate

癌細胞

FDG-6-Pがトラップ
(metabolic trapping)

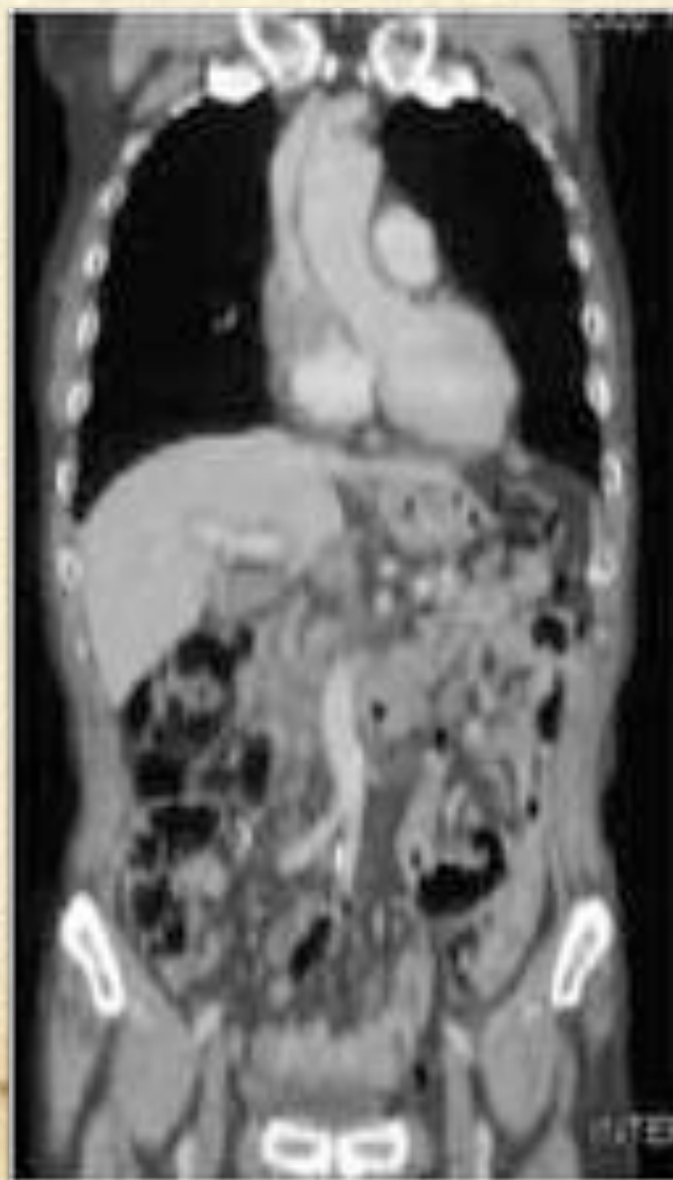
ほとんどの癌細胞は分裂増殖のため大量のエネルギーを要しており、その多くをブドウ糖に依存しているため、正常細胞の数倍から20倍のブドウ糖を取り込みます。単にブドウ糖に放射性同位元素を付けたのでは、解糖されて散らばってしまうので、代謝されないブドウ糖類似物質にF-18で標識したものがFDGです。これは東北大学の井戸達雄教授が約20年前に米国留学中になされた業績で、日本人として誇るべきことと思います。

臨床例

症例 1 悪性リンパ腫

左側のX線CT（冠状断像）だけでは病変がどこにあるのかわかりませんが、右側のPETでは青く見える部分がすべて病変であり、一目瞭然です。PETは空間分解能が劣るものの、病変の検出能に優れることがわかります。

X線CT



PET

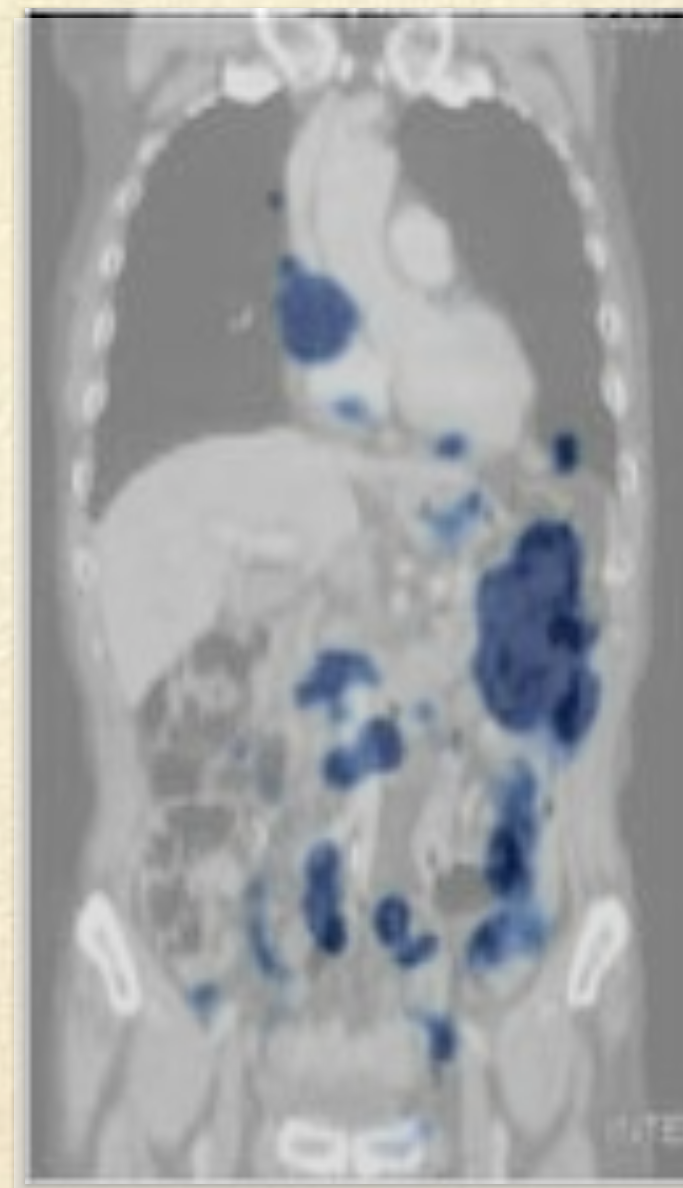


臨床例

症例 1 悪性リンパ腫

左側のX線CT（冠状断像）だけでは病変がどこにあるのかわかりませんが、右側のPETでは青く見える部分がすべて病変であり、一目瞭然です。PETは空間分解能が劣るものの、病変の検出能に優れることがわかります。

X線CT



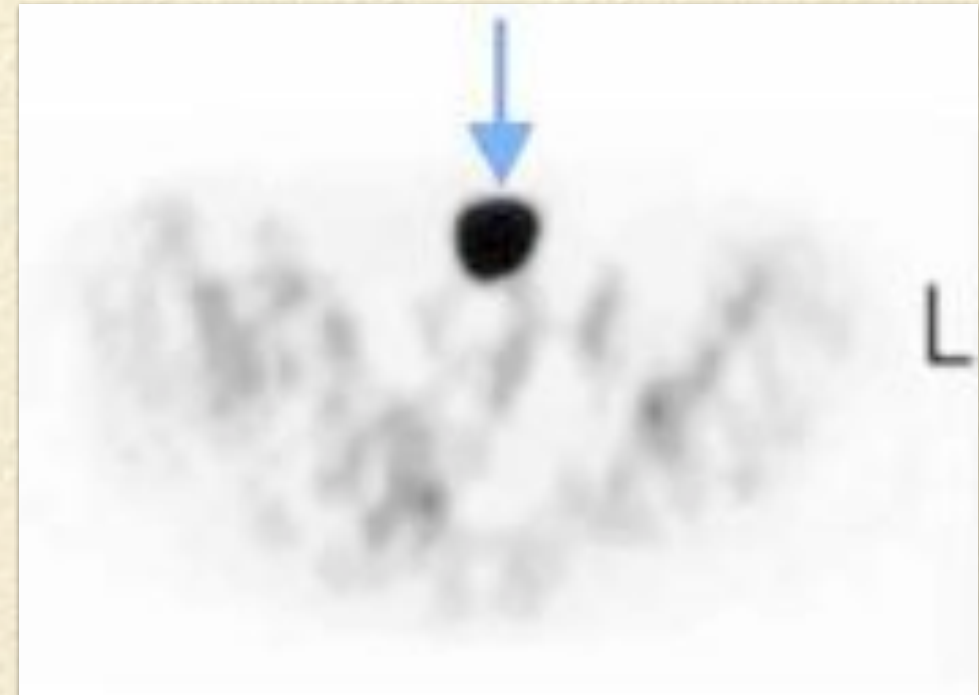
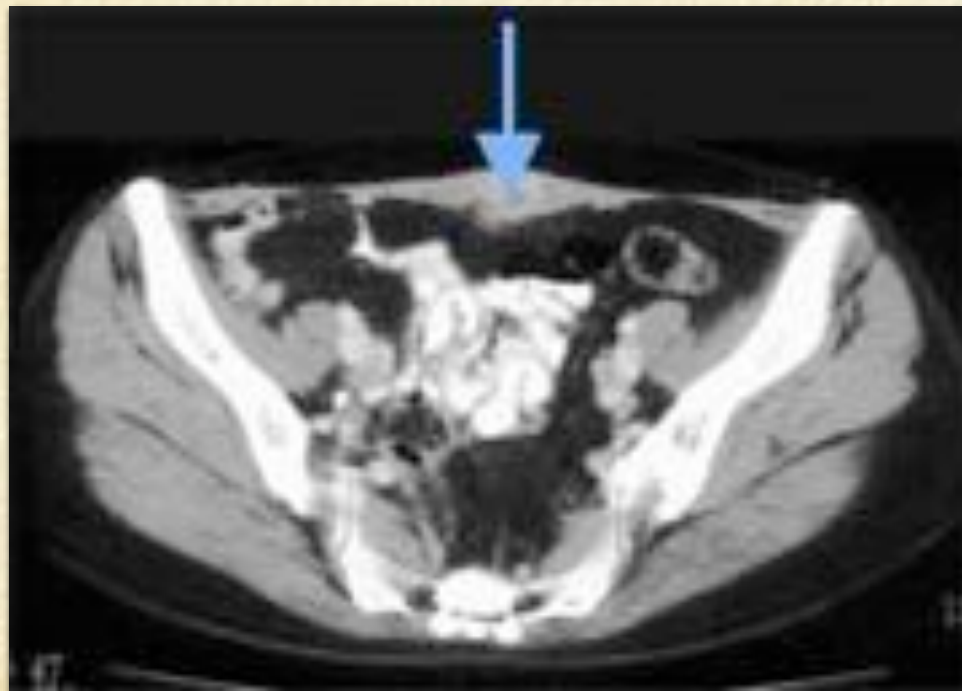
PET

臨床例

症例 2 大腸がんの手術後

経過観察中に腫瘍マーカー（CEA）が上昇してきましたが、X線CTでは病変が発見できませんでした。PETでは下腹部の筋肉内に強い異常集積が認められ、腹壁での再発と診断されました。CTをよく見ると、筋肉内に直径1 cm弱の淡い影が認められますが、ちょうど手術で切開した部分であり、転移と診断することは非常に難しいケースでした。

X線CT
PET



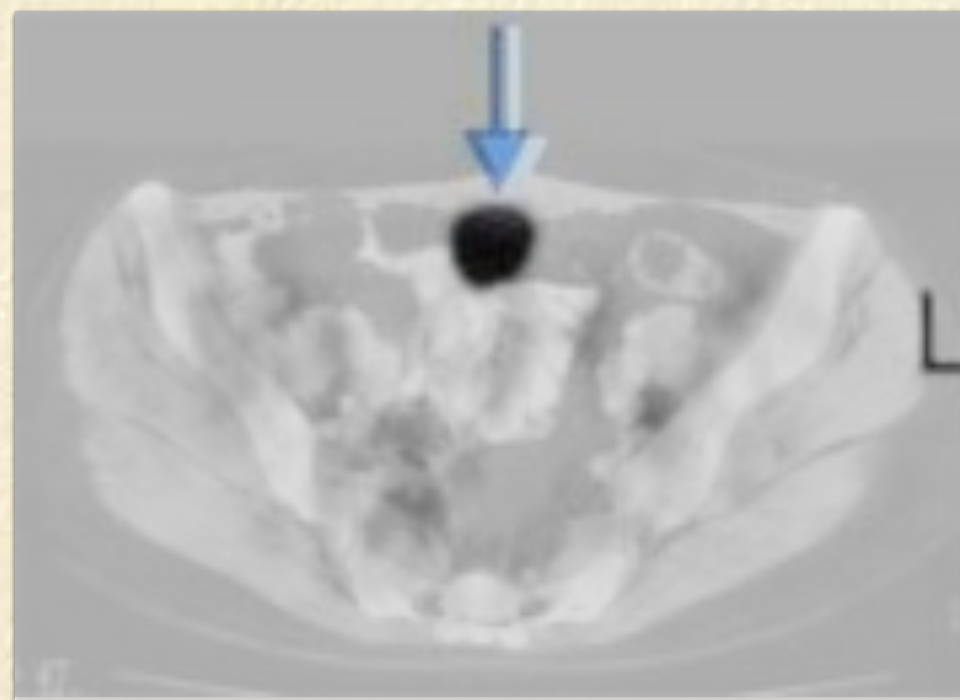
臨床例

症例 2 大腸がんの手術後

経過観察中に腫瘍マーカー（CEA）が上昇してきましたが、X線CTでは病変が発見できませんでした。PETでは下腹部の筋肉内に強い異常集積が認められ、腹壁での再発と診断されました。CTをよく見ると、筋肉内に直径1 cm弱の淡い影が認められますが、ちょうど手術で切開した部分であり、転移と診断することは非常に難しいケースでした。

X線CT

PET



「講義レポート」について

講義内容の感想文

皆さんのこれまでの人生で得て来た知識を総動員して、講義内容の自分なりの理解・考え方をまとめる

A4用紙 1頁 程度（表紙は不要）

提出：次回講義の終了時

講義に関するコメント等

<http://spinman.phys.se.tmu.ac.jp/lecture/>

ミラーサイト：

<http://kem3.com/esrp/lecture/>

メールアドレス：

mizoguchi@phys.se.tmu.ac.jp

kem@kem3.com