

現代物理学の考え方

その4

医療と現代物理

南方久和・溝口憲治

医療用診断装置

超音波診断装置（エコー）

X線CT（**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-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(レール内を高速で伝搬)

○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

波速：光は300,000,000 m/s

s



と波長

波速：光は300,000,000 m/s



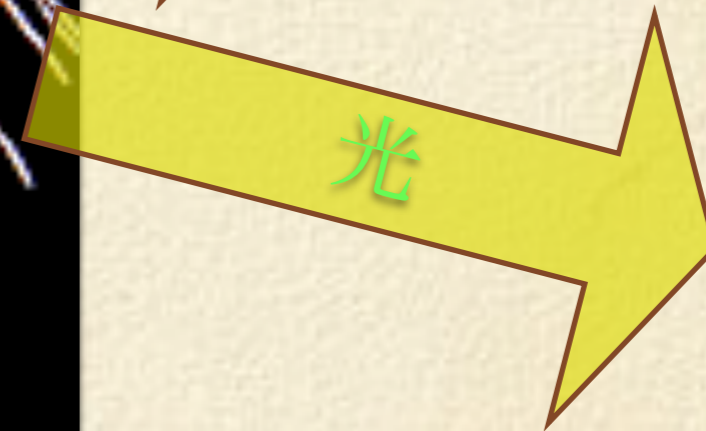
s

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

$$\lambda = v / f$$

波長 λ は、超音波の振動数 f と逆比例

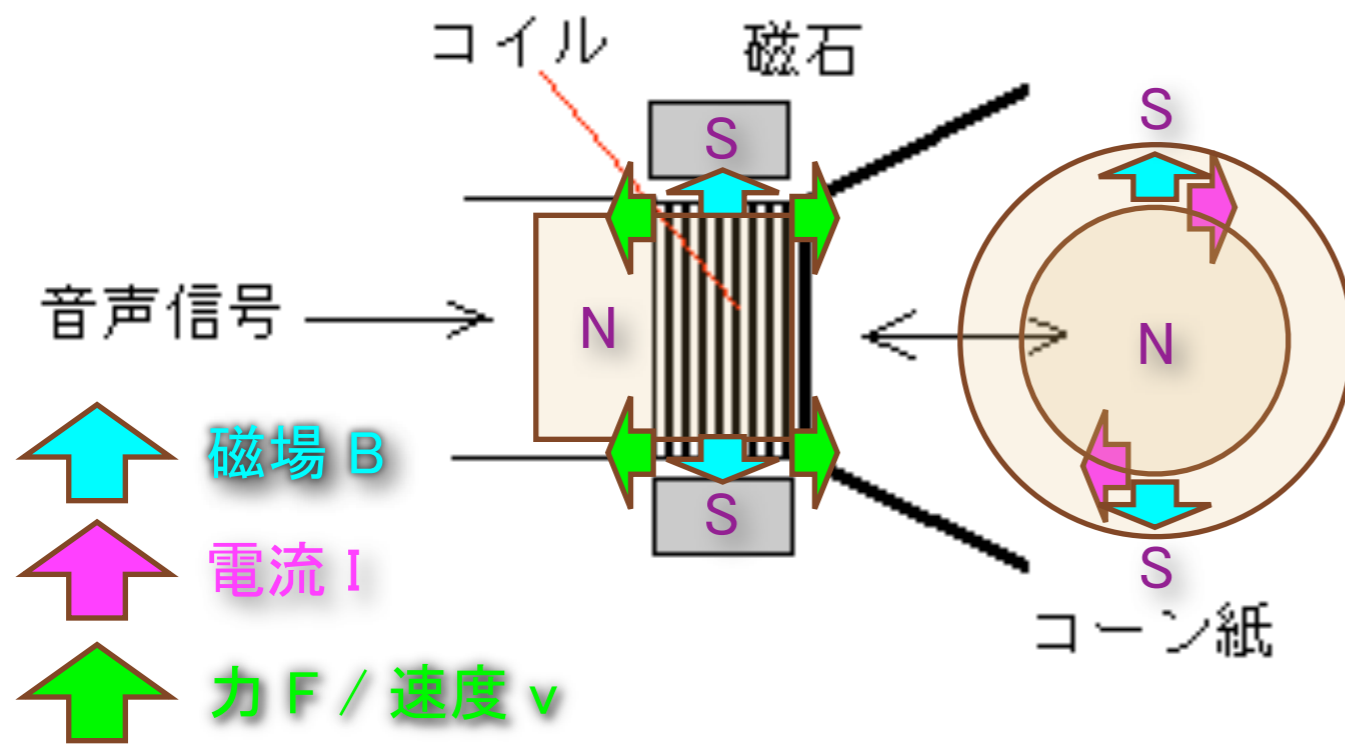
3 MHzの時、波長は 0.5 mm

— 像の分解能を決める (1-30 MHz) —

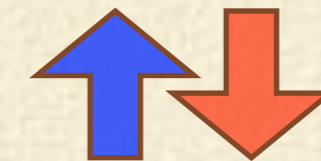
超音波の発生と受信

スピーカーとマイク

音波は物質の振動（疎密波）



音波

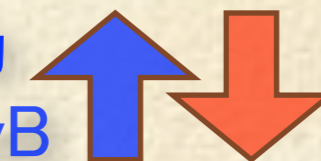


スピーカーのコーン紙の振動

コイルが磁石の作る磁場中を動く

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

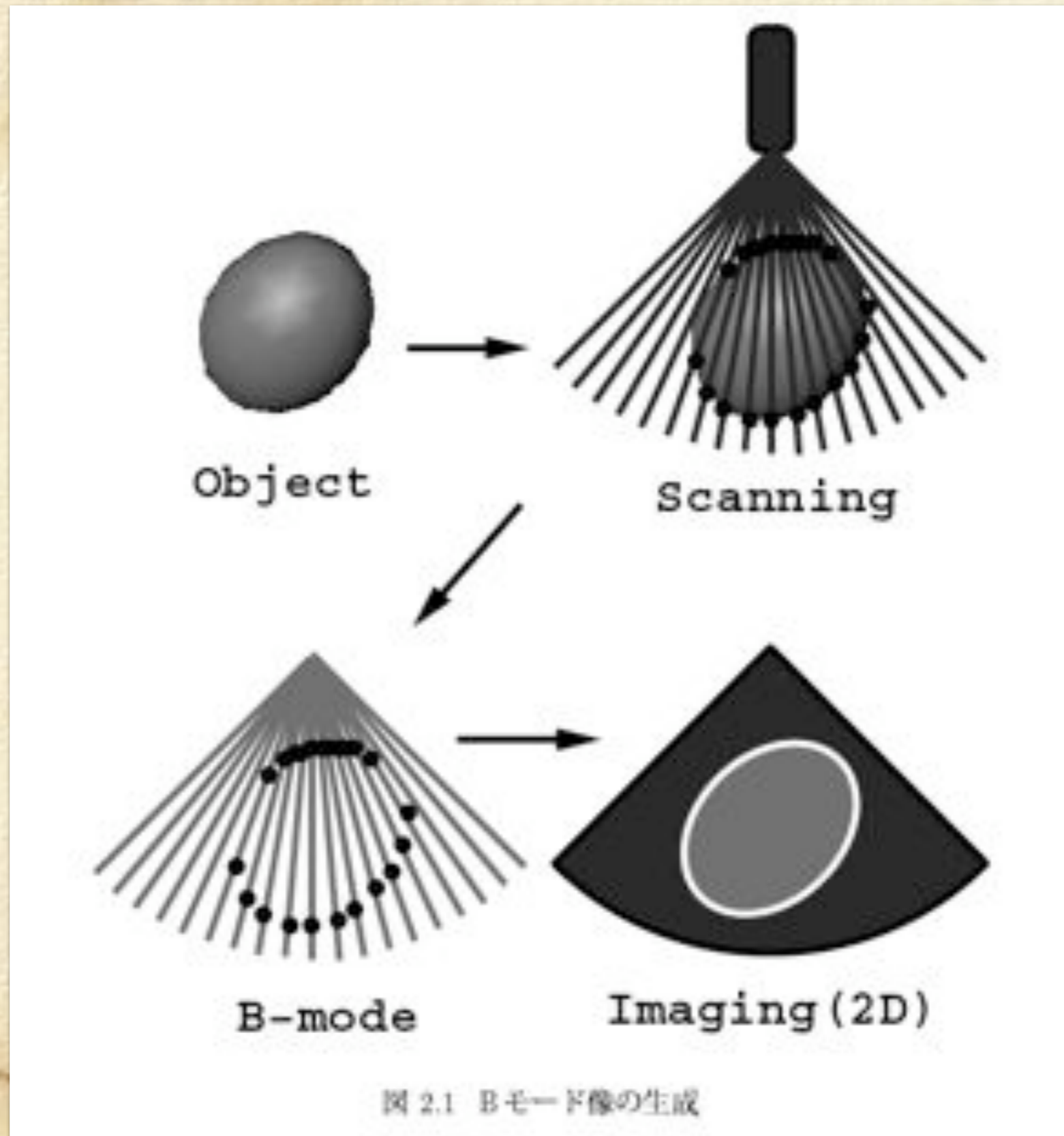
圧電（ピエゾ）素子

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

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

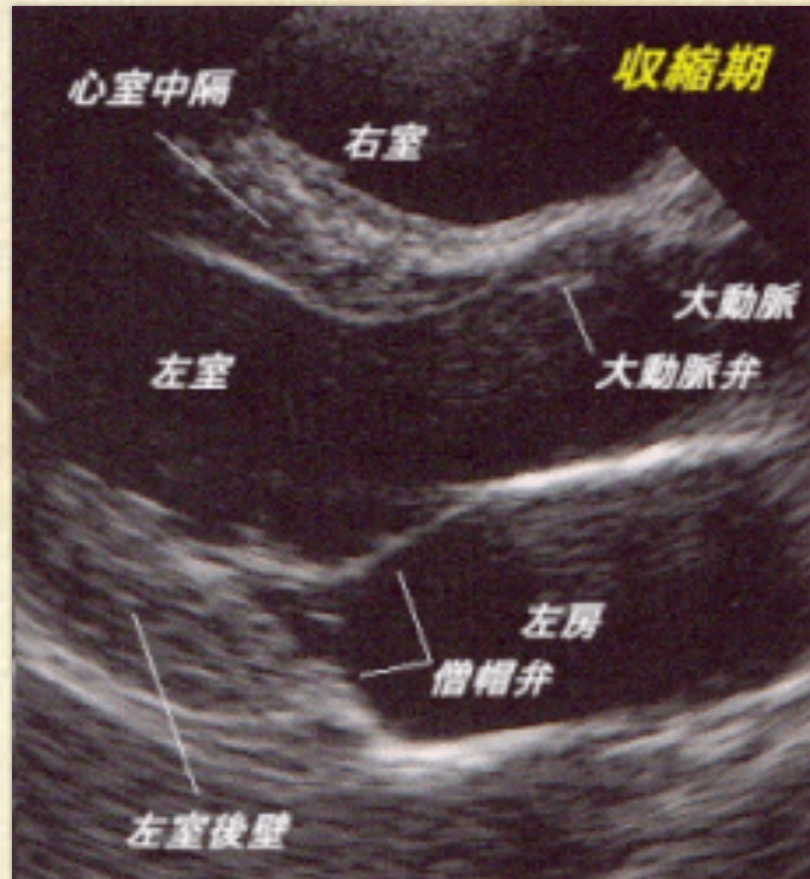


◆開発リーダー、
日本無線技術部
長・中島茂さん

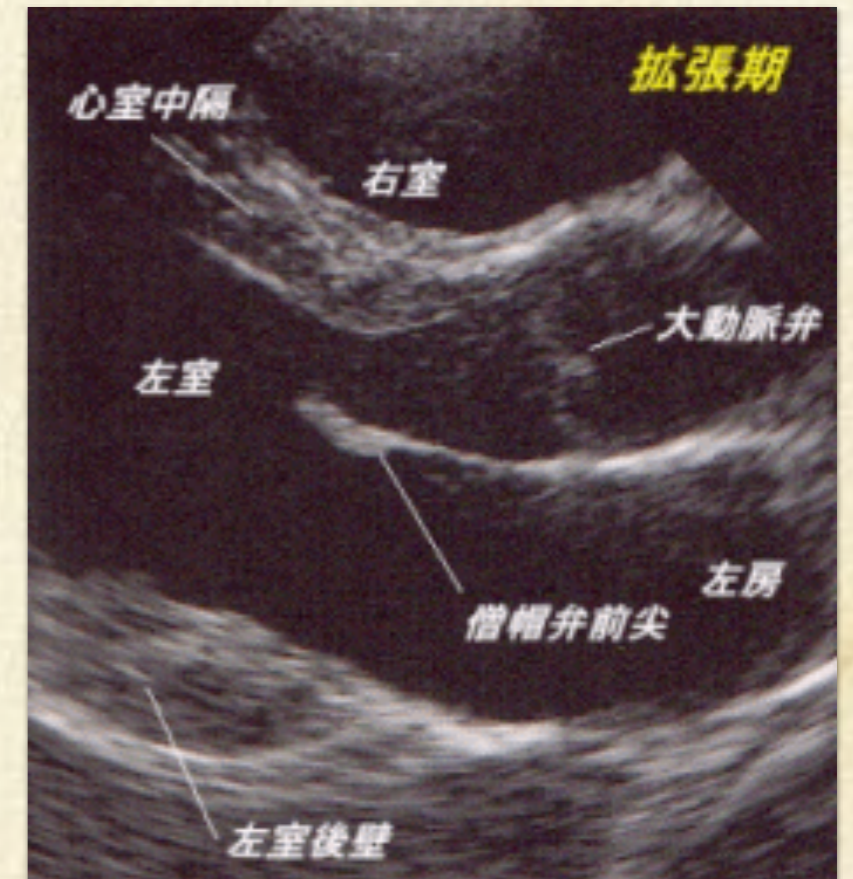
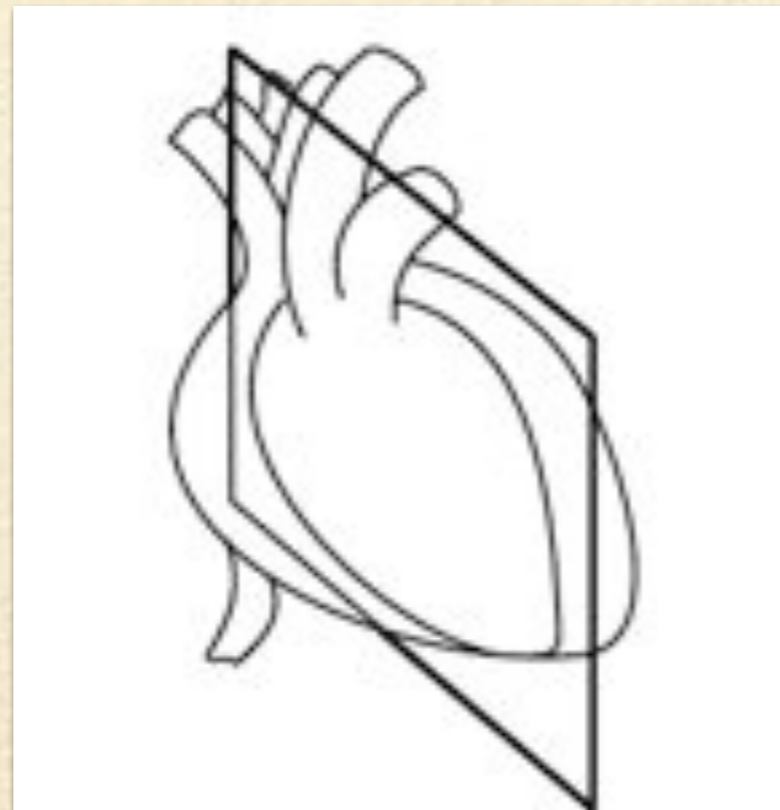


◆身体の断
面を映し出
すため風呂
桶実験を繰
り返した

心臓の動きと血流



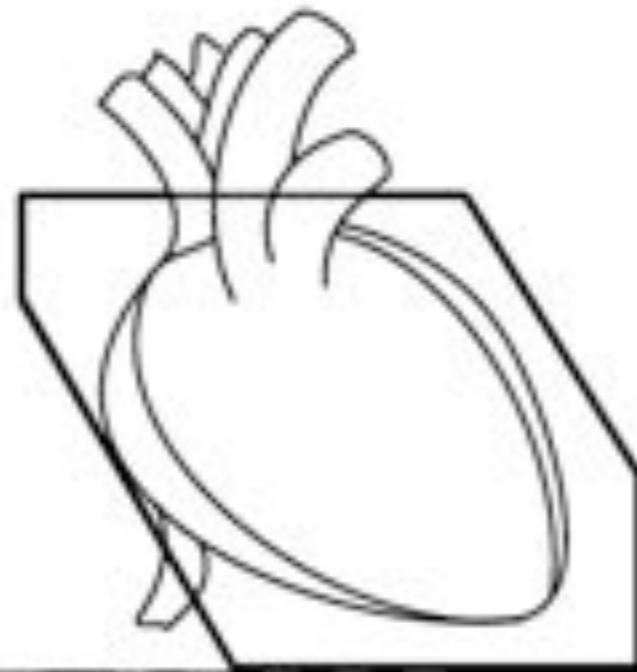
断層心エコー検査
 下の写真は、心臓の縦の断面でみた断層心エコーの図です。左が拡張期、右が収縮期です。心臓の各部位がよくみえます。





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 2.3 心臓短軸像



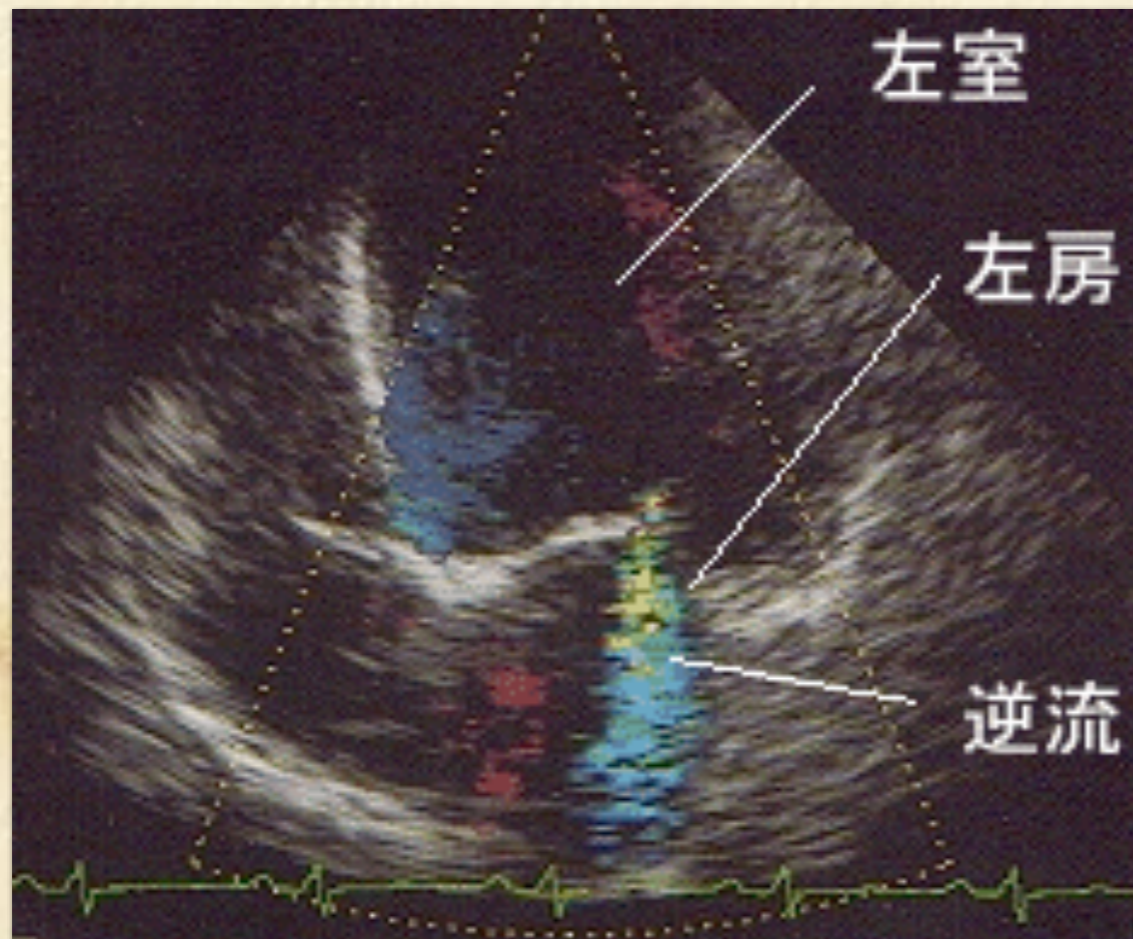
図中各略称は
LV:左心室,
LA:左心房,
RV:右心室,
RA:右心房,
AV:大動脈弁,
MV:僧帽弁

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。

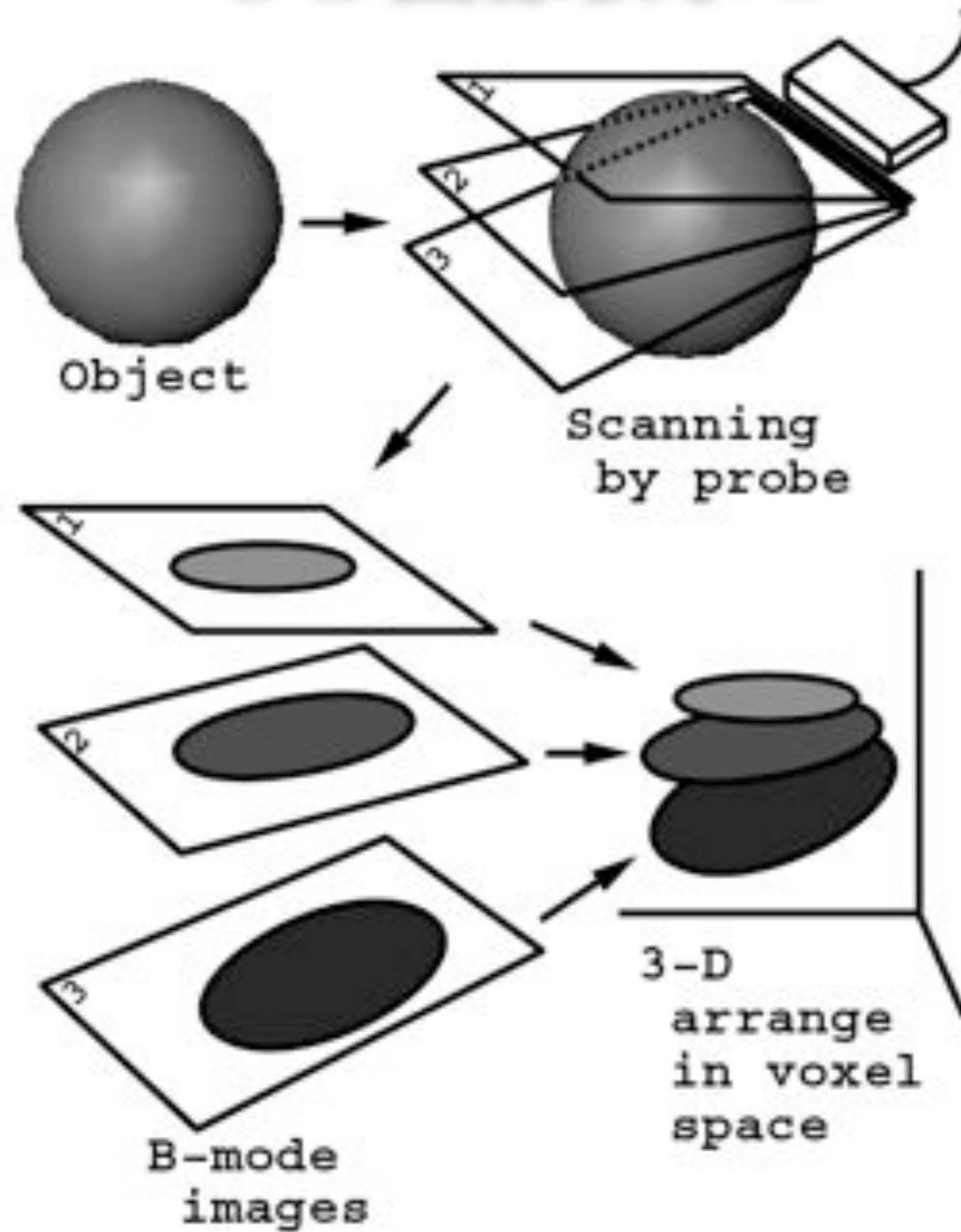


図 3.1 三次元超音波イメージング

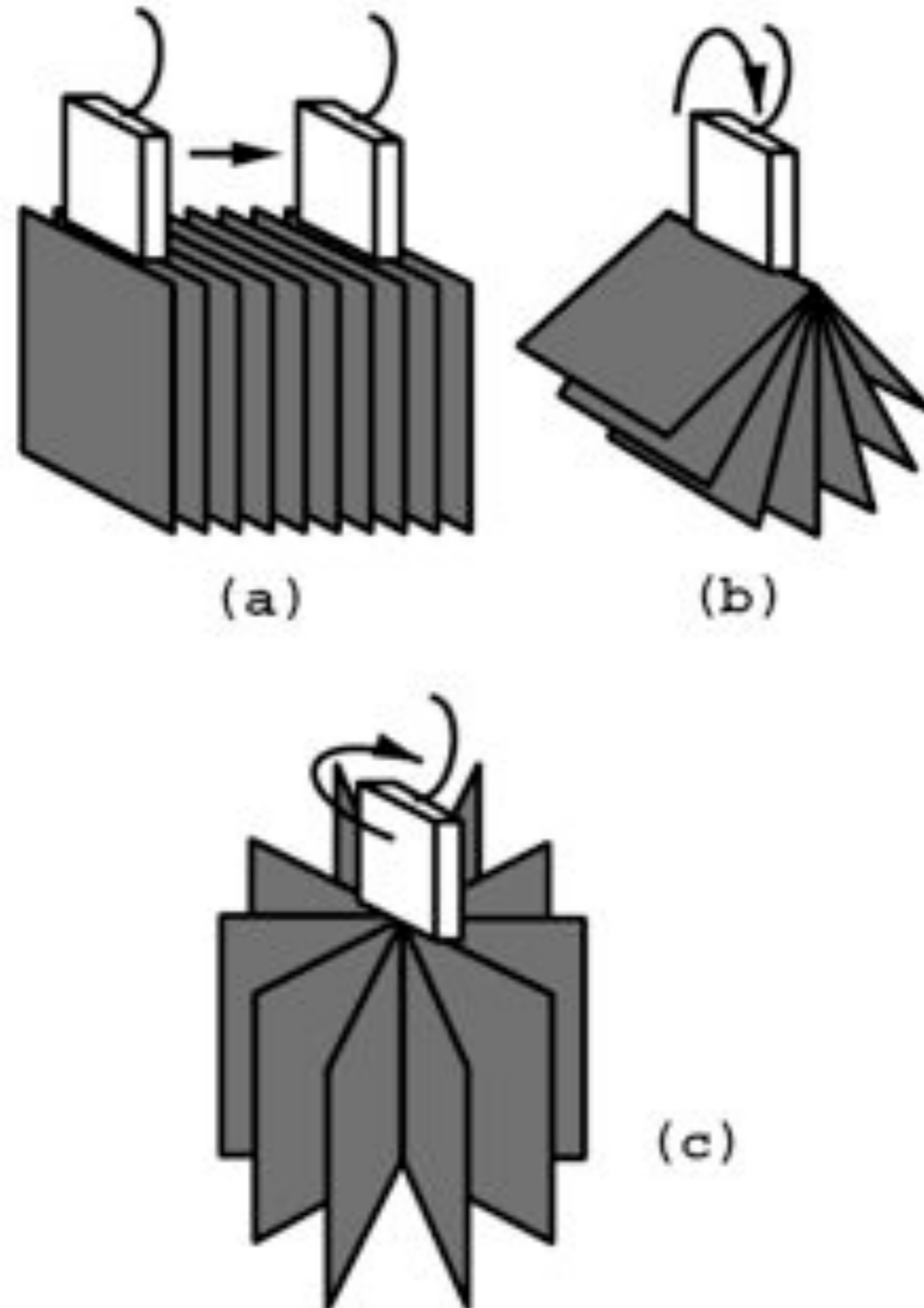


図 3.2 メカニカルスキャン: (a) リニアスキャンング, (b) ファンスキャンング, (c) ローテーションショナルスキャンング

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

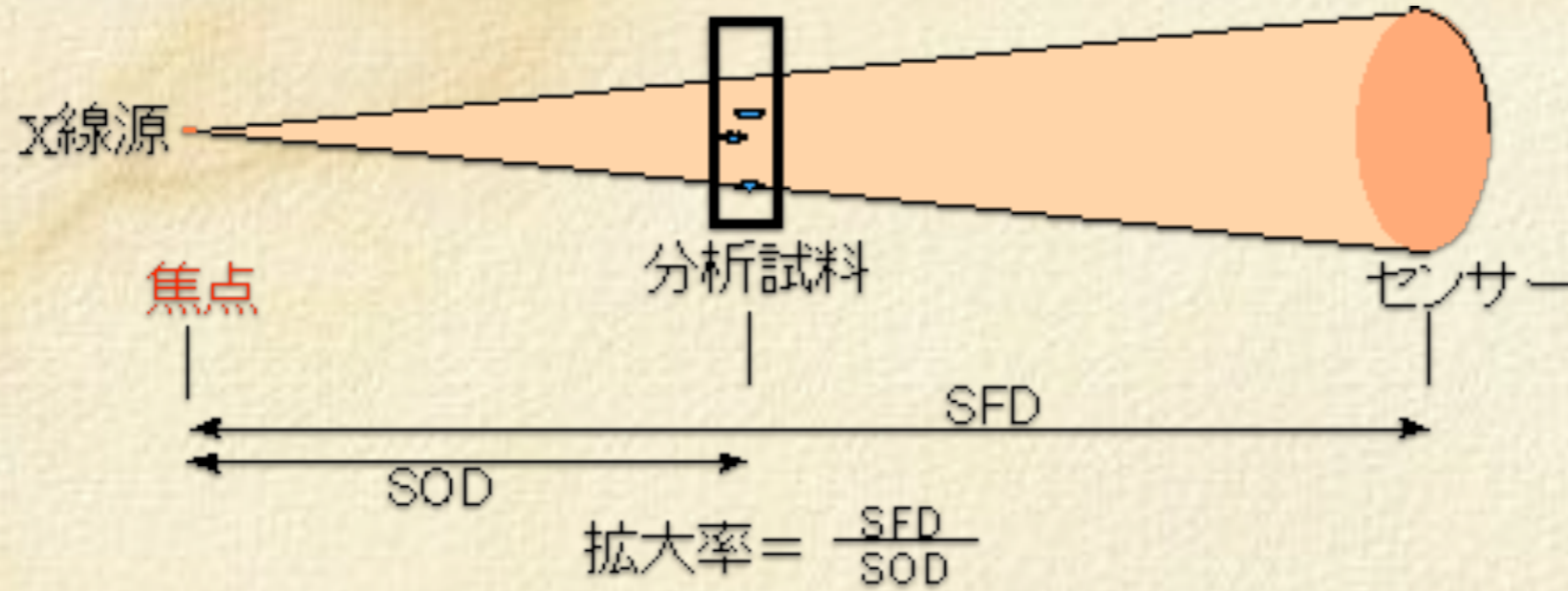
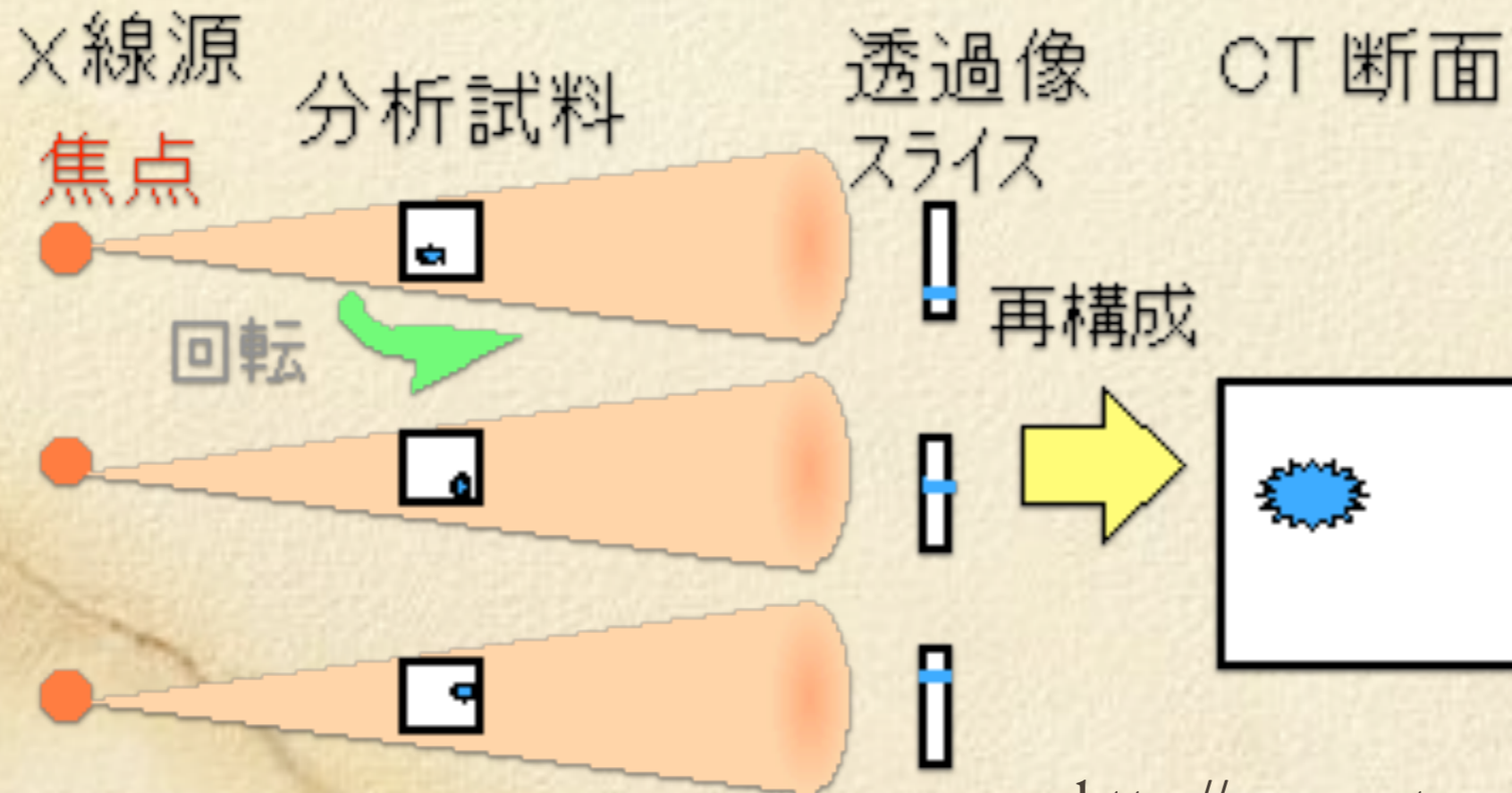
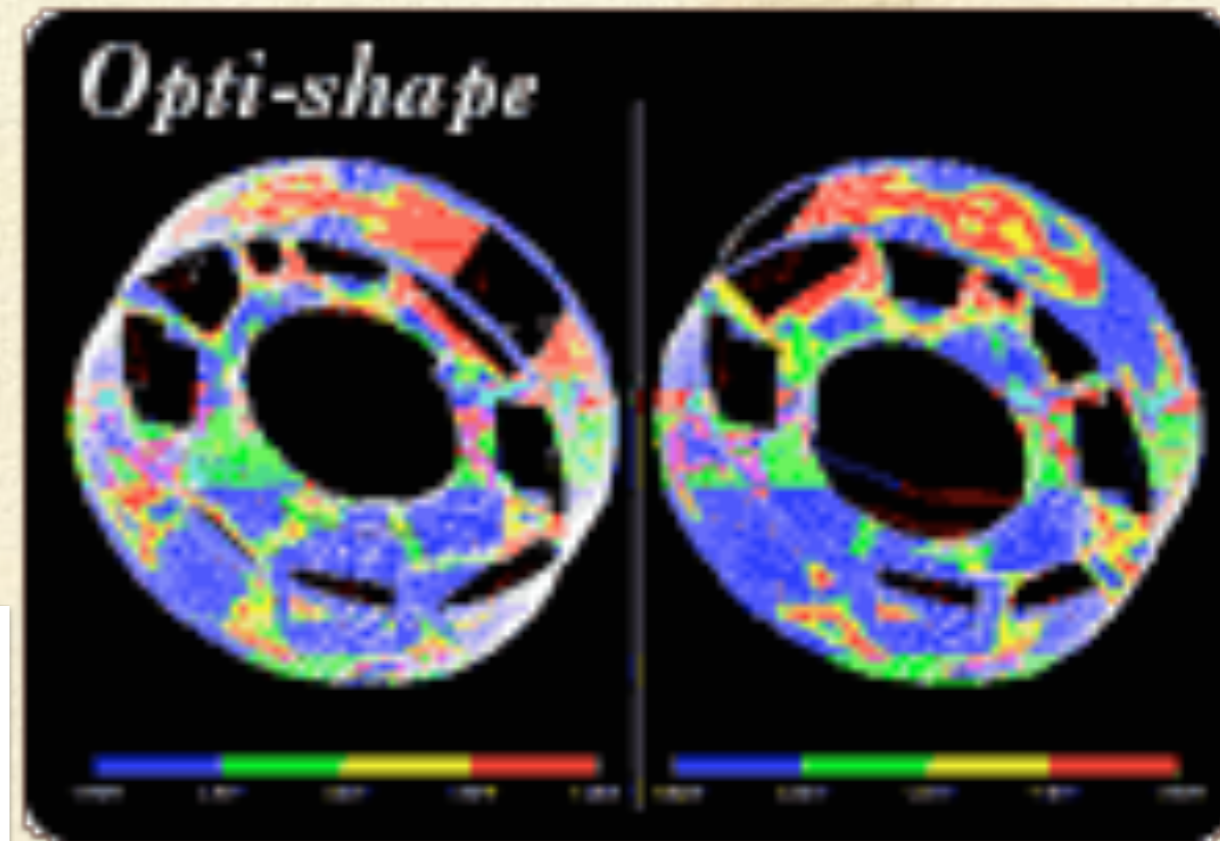
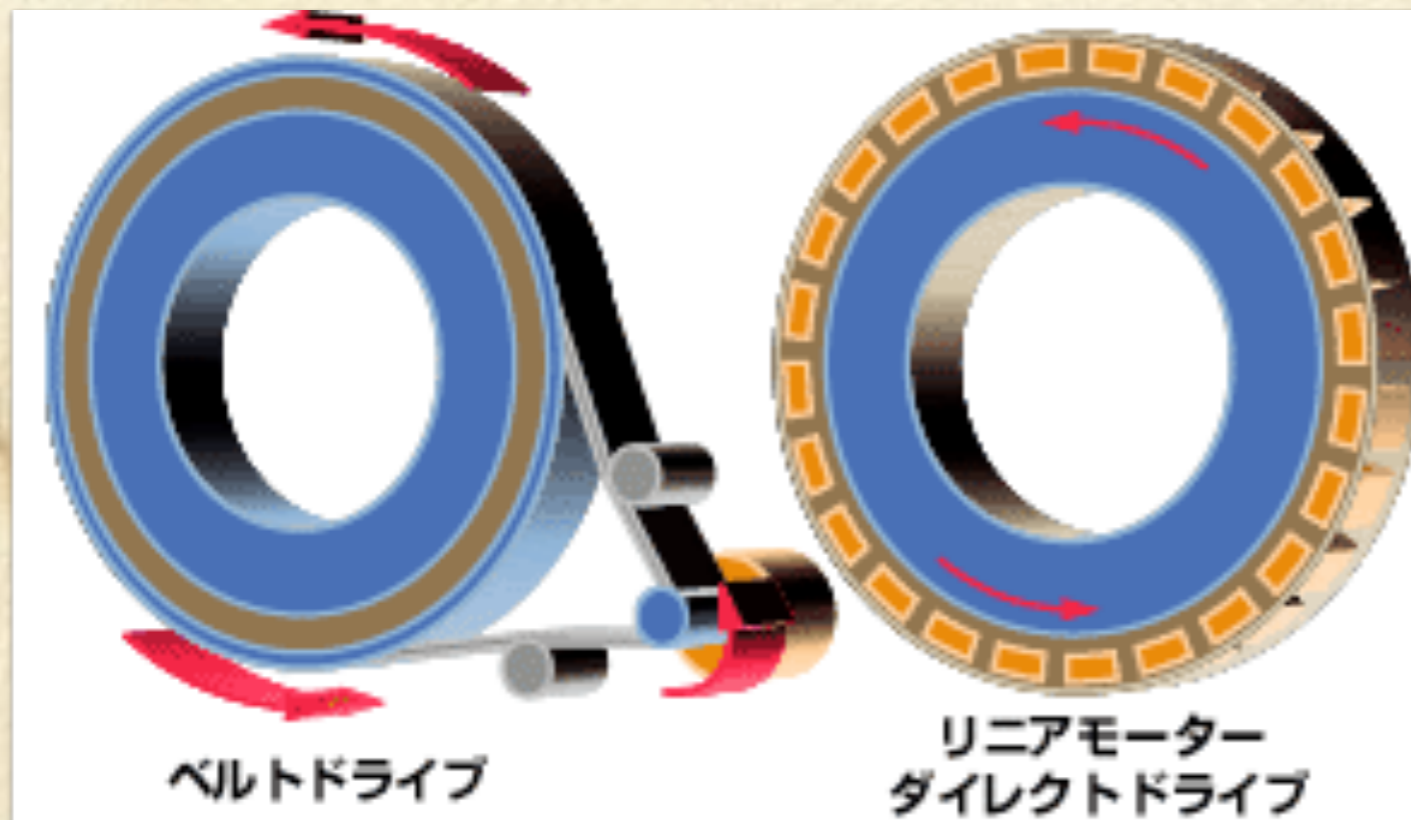


図2 CT断面撮影の原理図



X線 CT 断層撮影装置

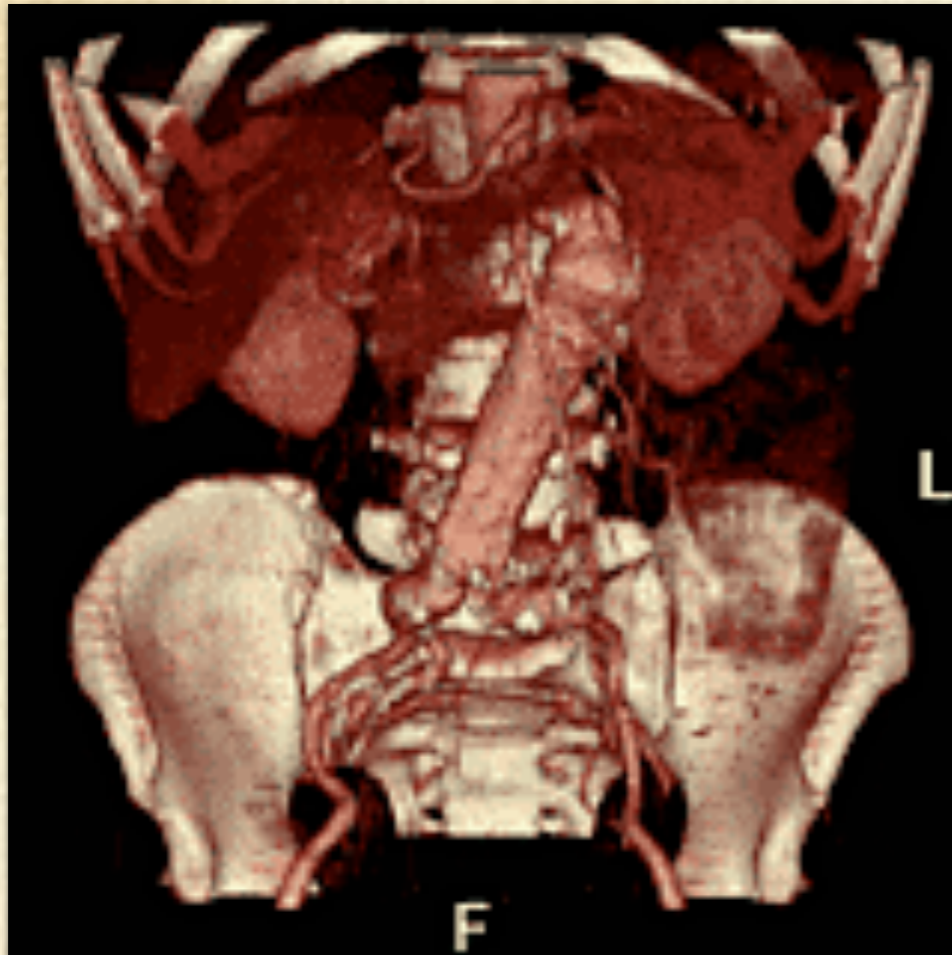
0.5秒フルスキャンによる遠心力13Gを克服するために、スキャナ本体をシリンダ構造に。全ての部品をその内側に配置し、外へ飛び出す危険性を回避。シリンダに関しては“IDEAS”による応力構造解析と“Opti-shape”による形状最適化。



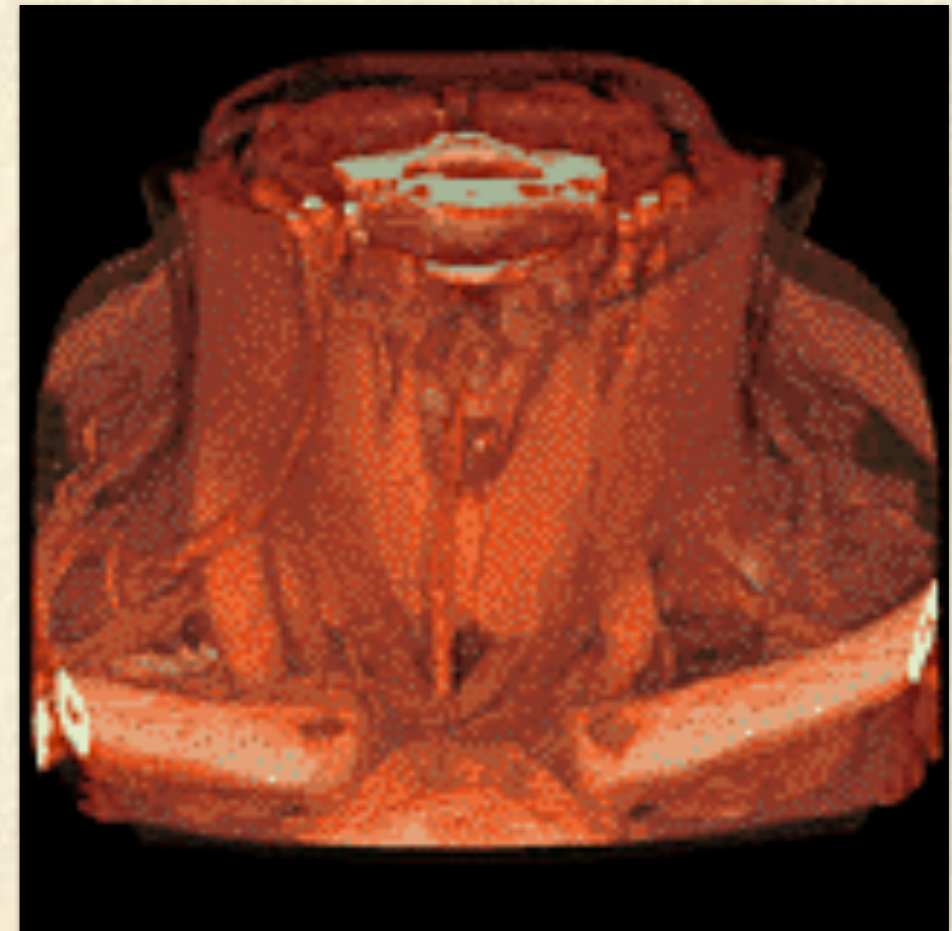


X線 CT 断層撮影装置

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。



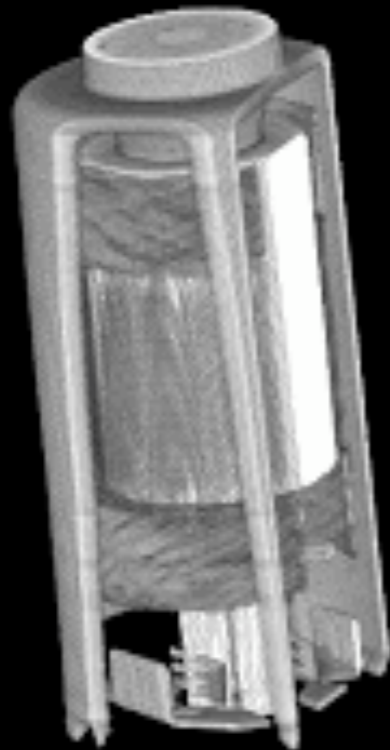
スライス厚は、1.2.3.5.7.10mmに加え0.5mmを標準搭載。ビームトリマにより0.4mmまで向上。





X線 CT 断層撮影装置

〔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

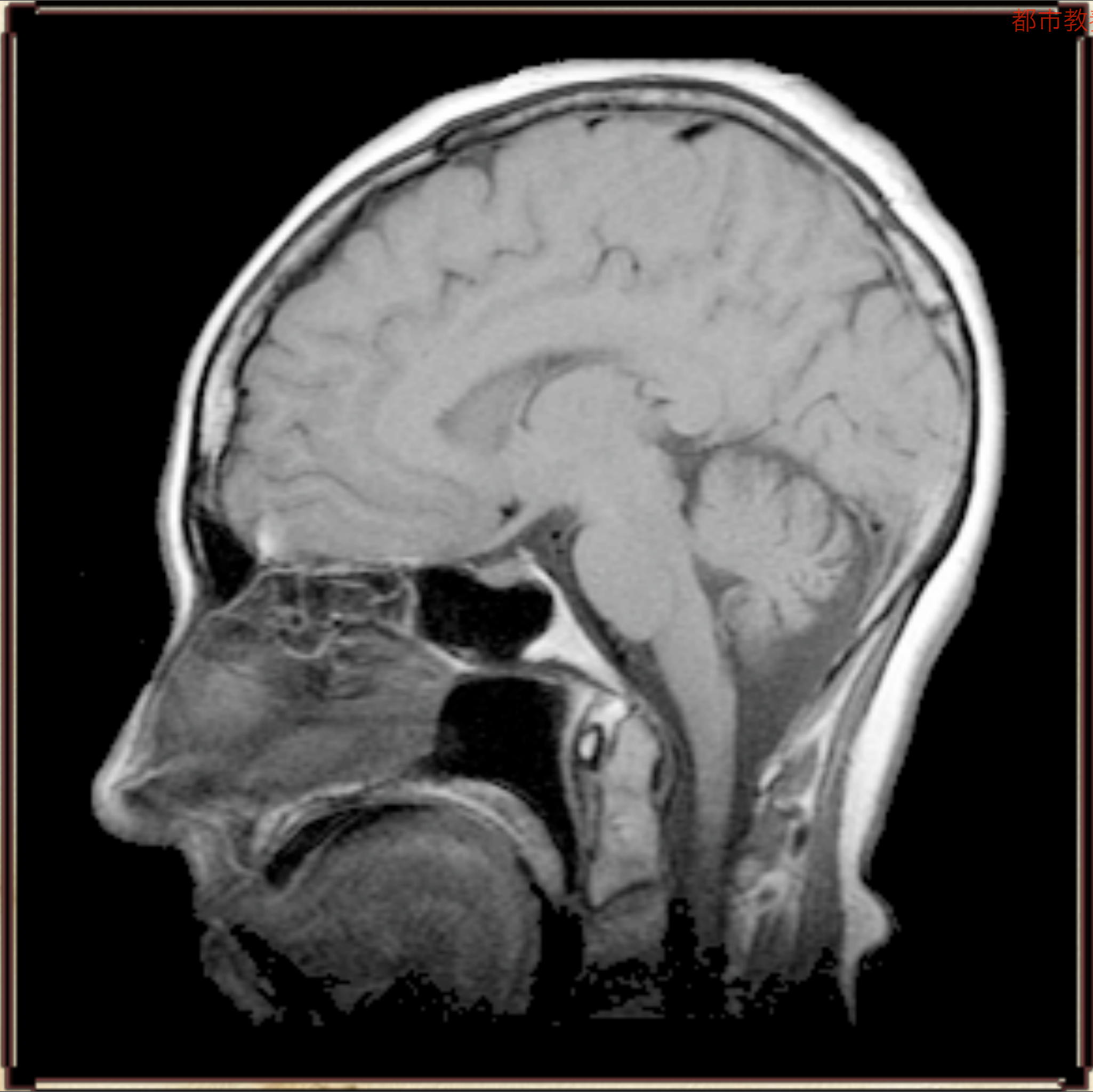
高分解能を実現し、高画質な試験データ。

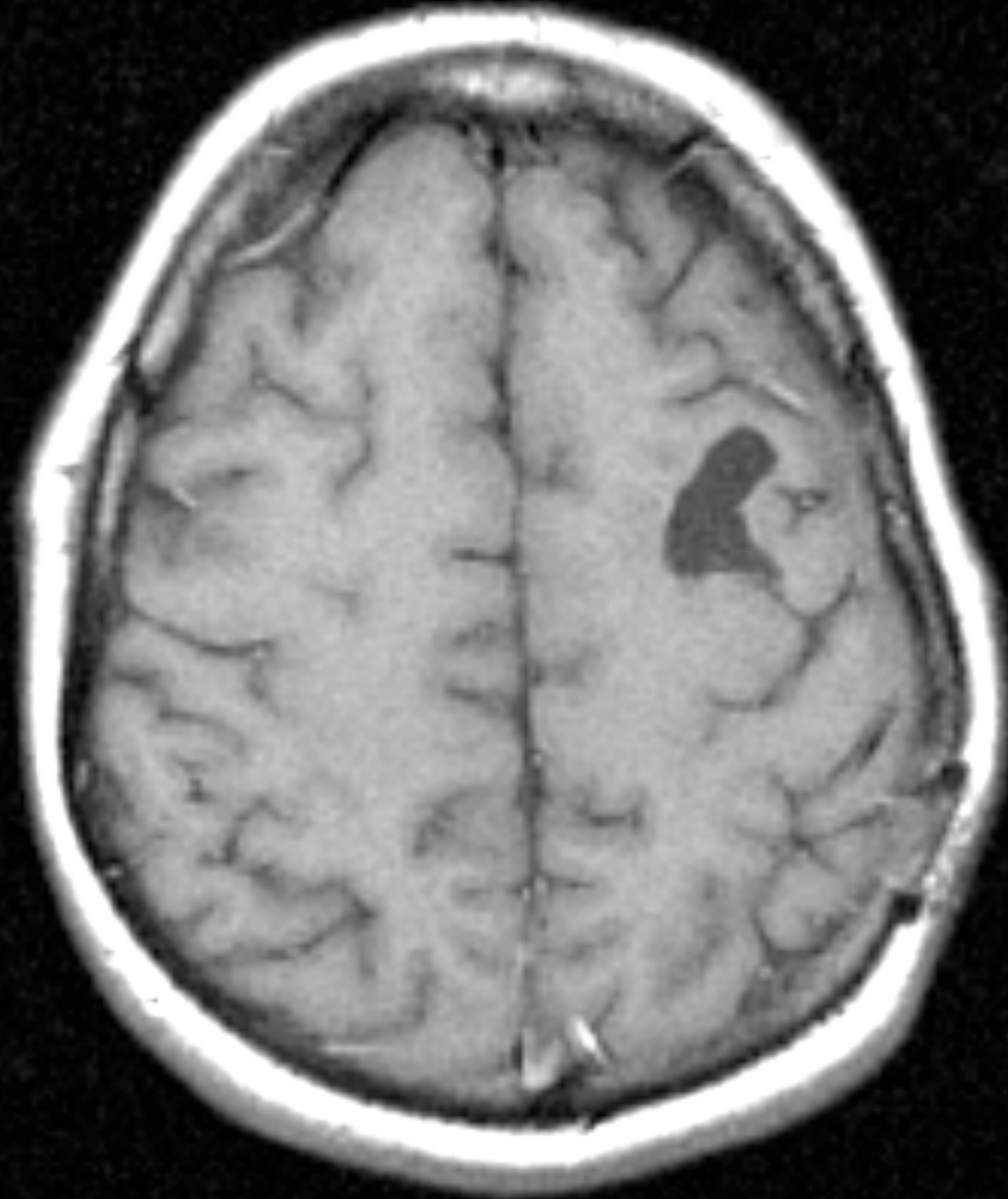


MRI

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





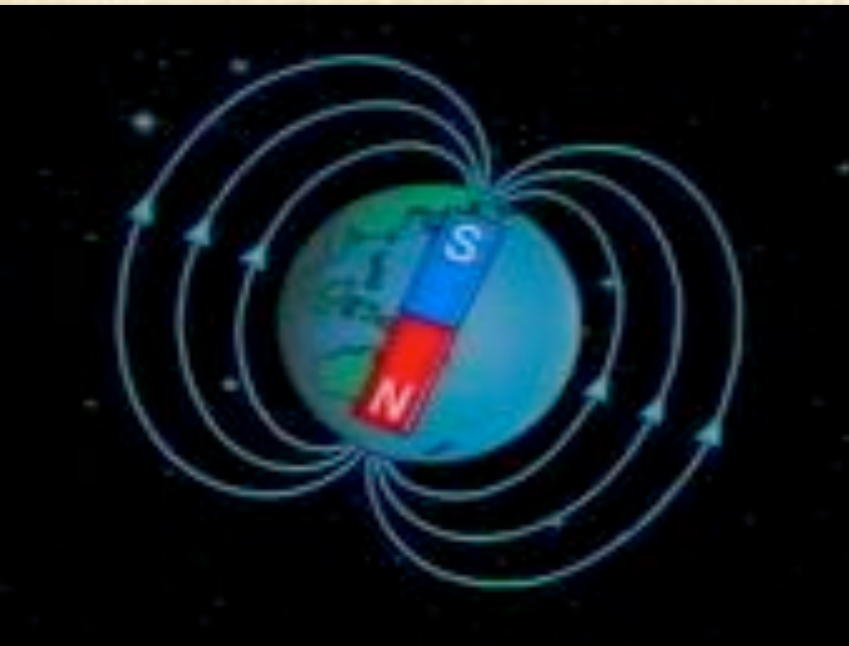
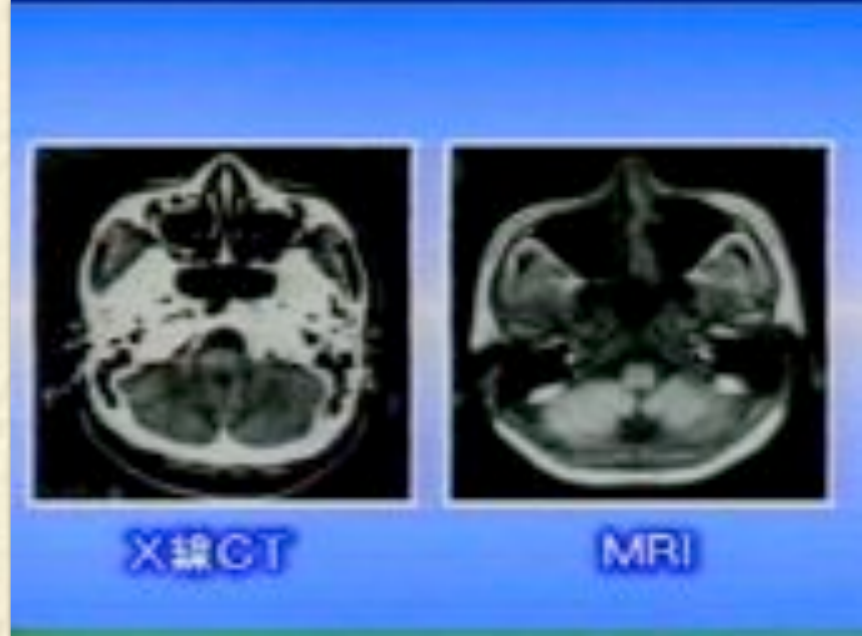
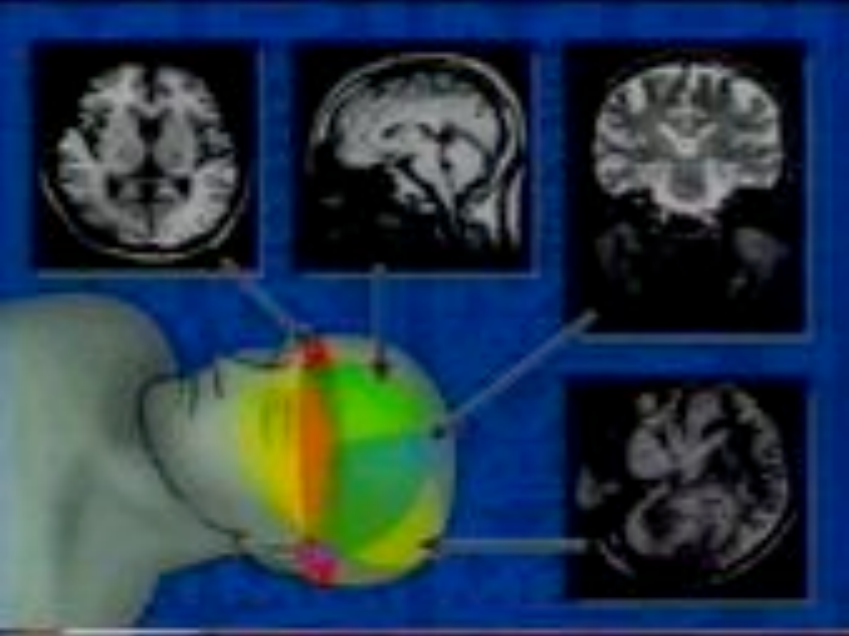




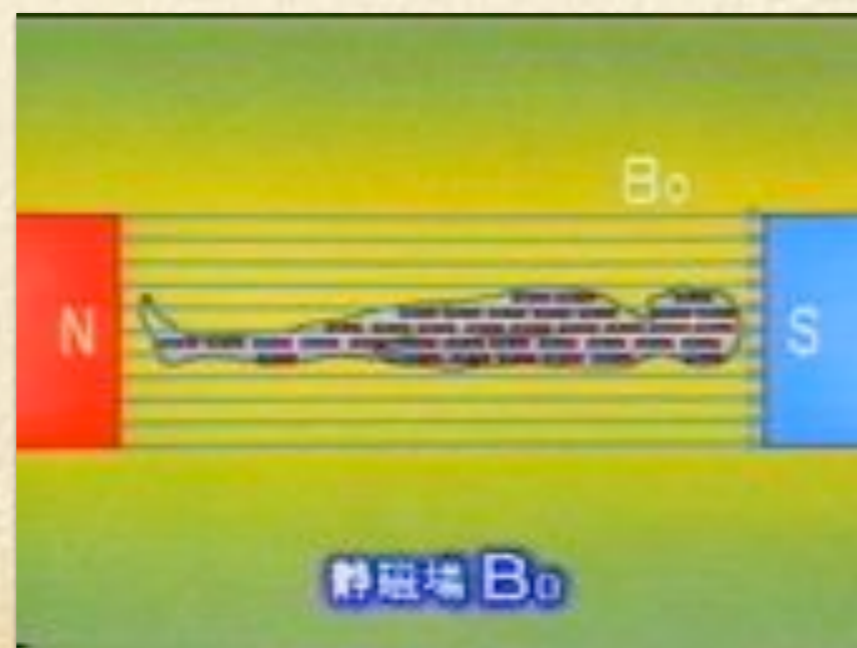
An MRI scanner in a clinical setting. The machine is large and white, with a patient bed extending from the gantry. In the foreground, there is a control console with a computer monitor and keyboard. The background is a plain wall with a light-colored panel.

MRIの原理

①(第1部)①

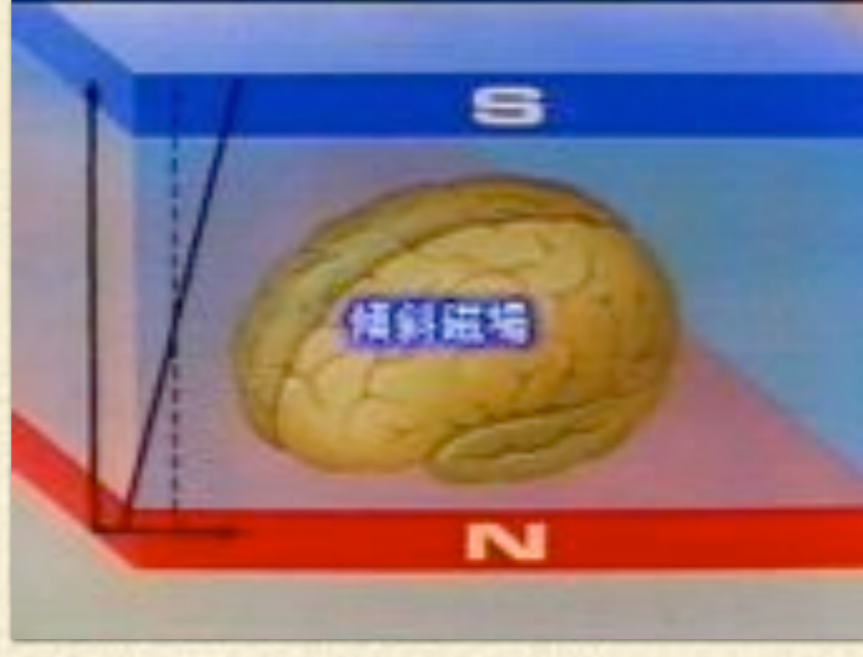
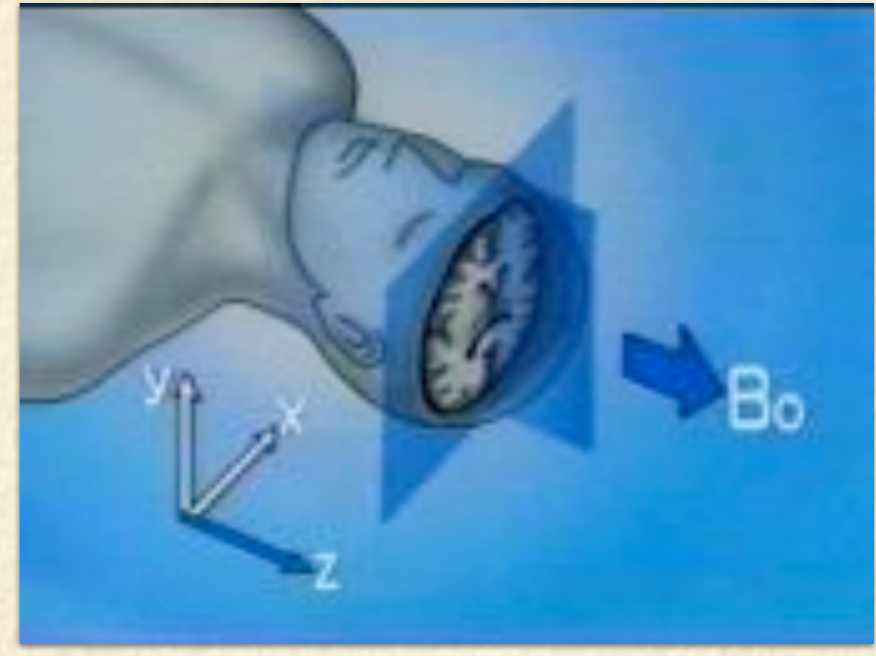
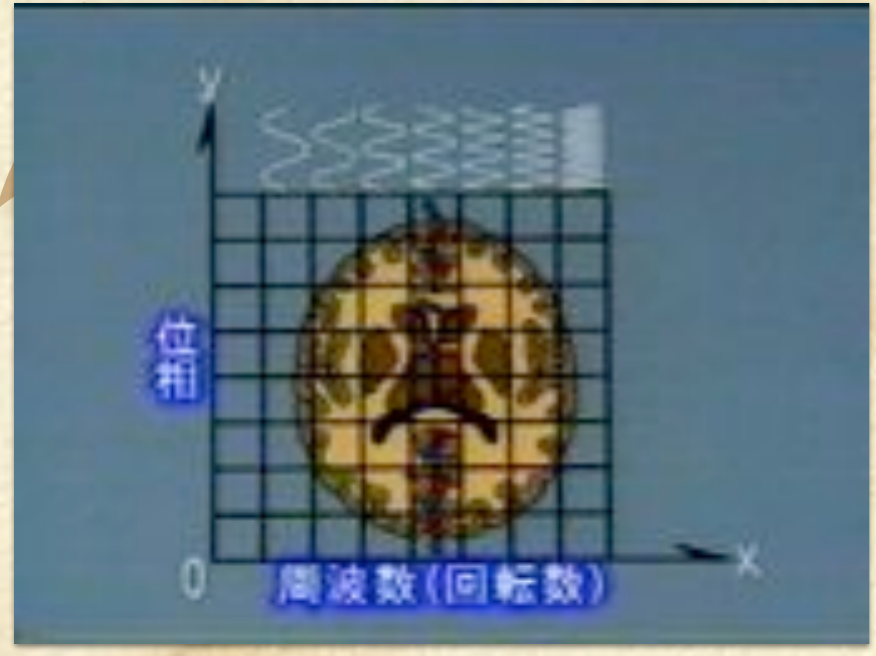


1 Tesla = 10000 Gauss (G)
 増圧機 = 0.5 Gauss



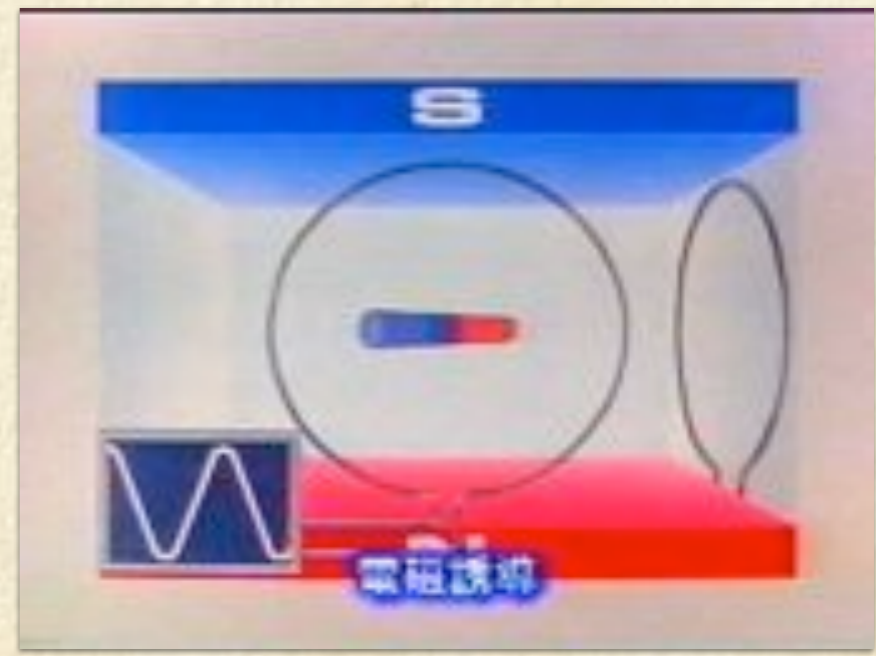
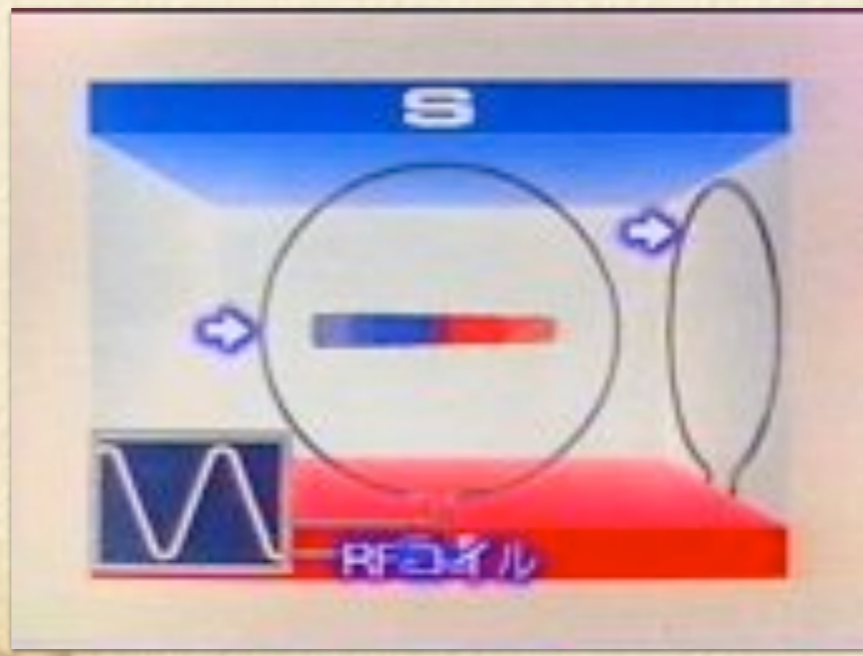
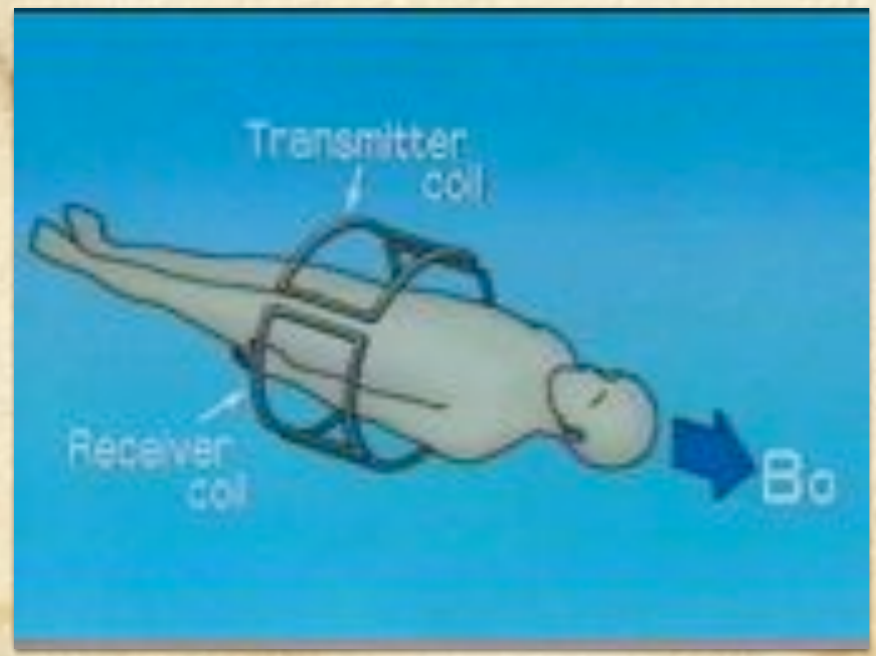
核磁気共鳴現象は原子核の棒磁石が Larmor 周波数の電磁波のエネルギーを吸収すること





3

MR像はどのようにして作られる?





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

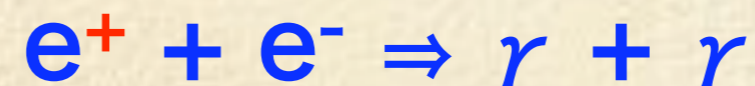
—対のガンマ線に変わる

(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。

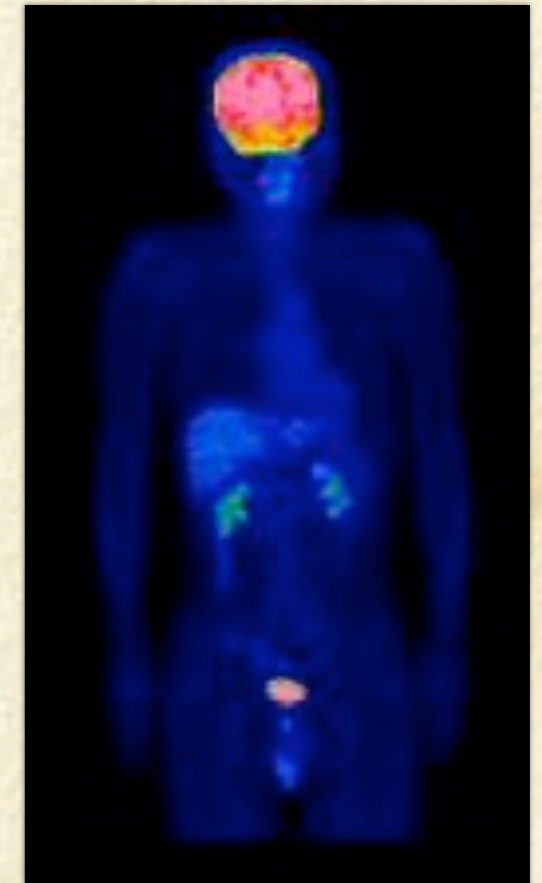
PETに使われる薬

FDG (フルオロデオキシグルコース)

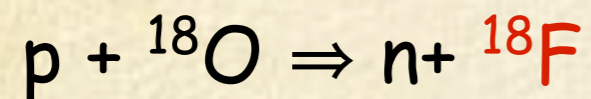
FDG = ブドウ糖 + 放射能

(^{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。

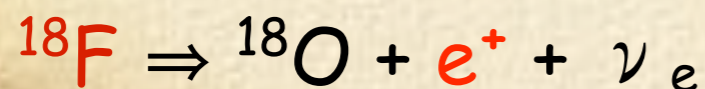
癌はブドウ糖をたくさん使う → FDGを注射すると癌が光る
 右図のように正常でも光る部分 (脳、尿 (腎臓、膀胱)) がある。



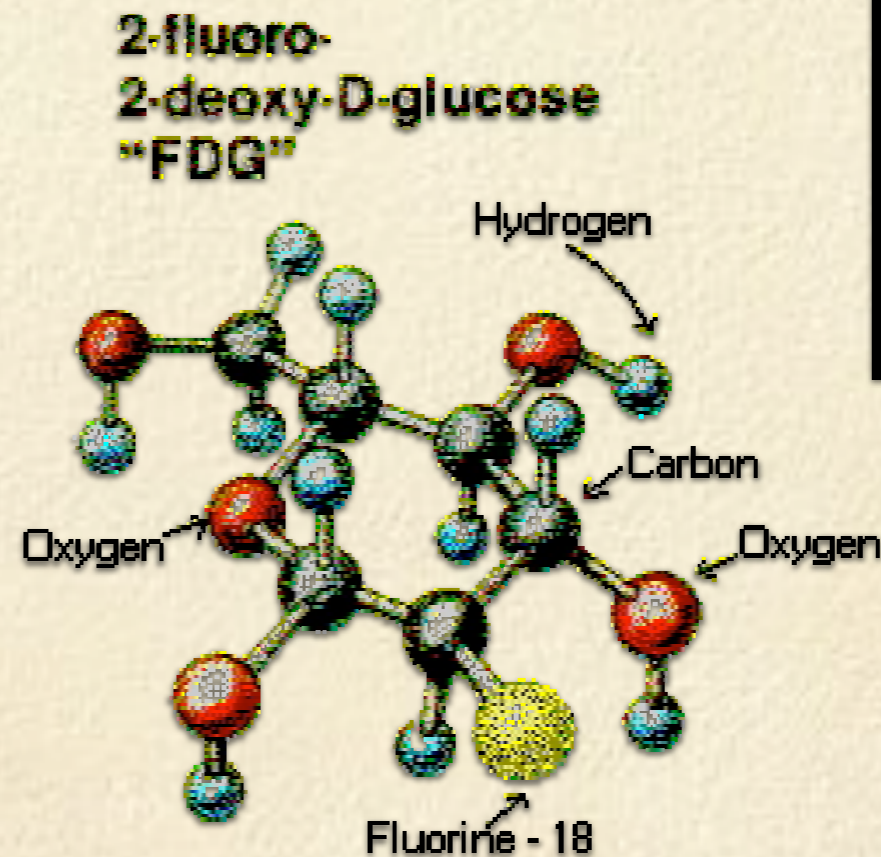
サイクロトロンで加速



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



元の酸素に戻る





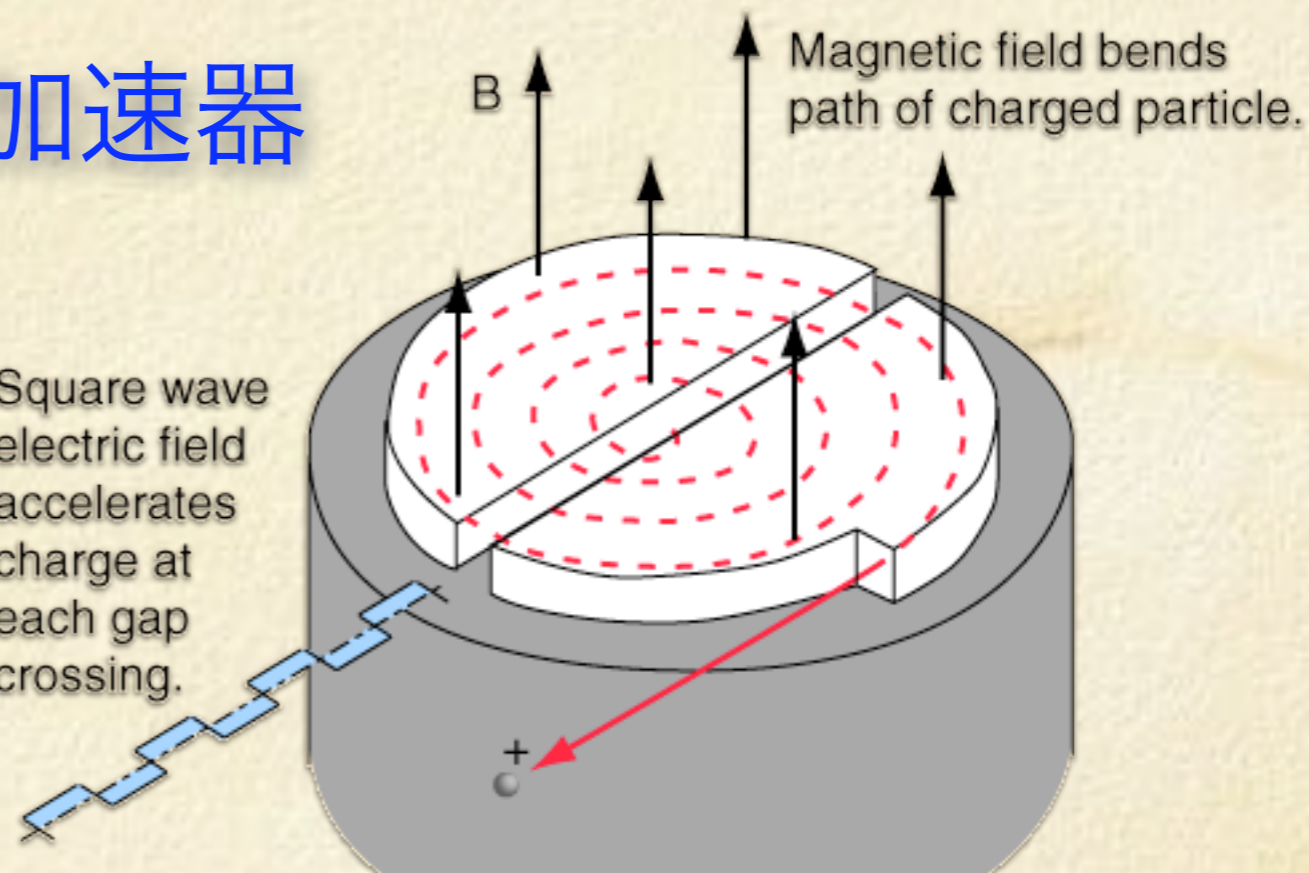
サイクロトロン加速器



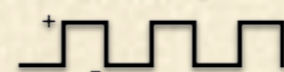
Hospital Style
Cyclotron proton accelerator

<http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/cyclotron/cyclotron.html>

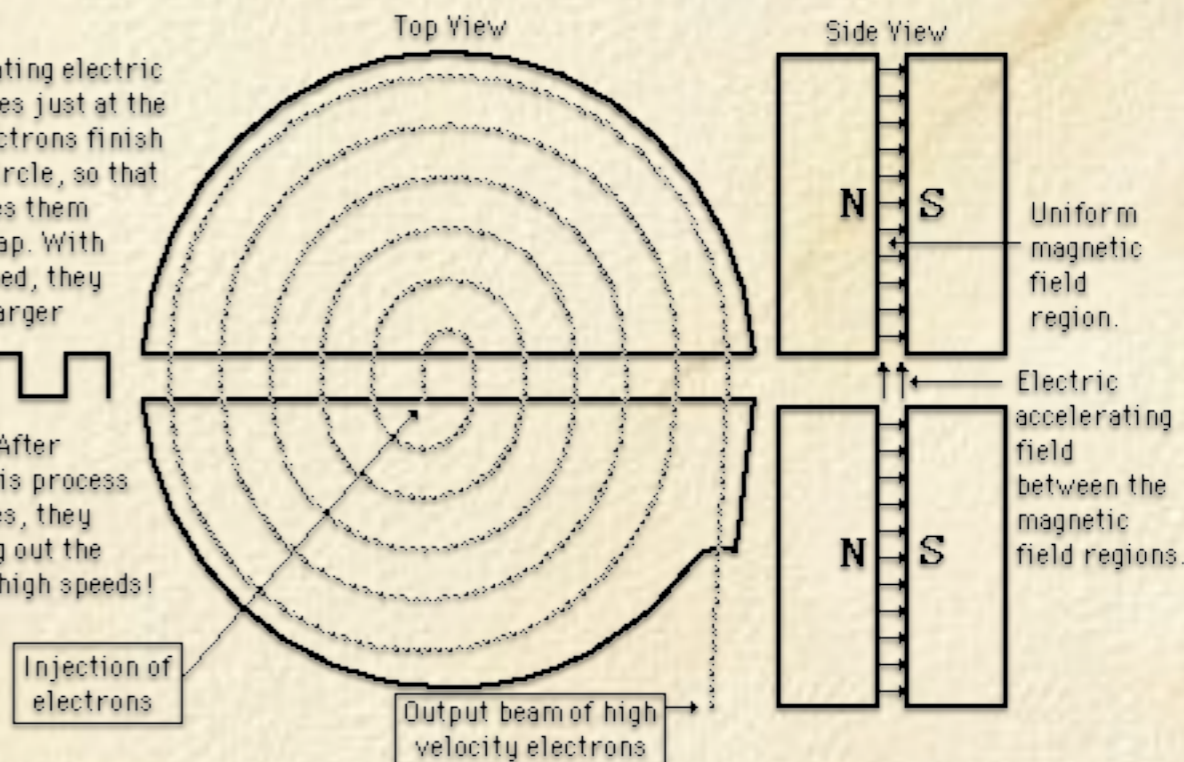
Square wave electric field accelerates charge at each gap crossing.



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

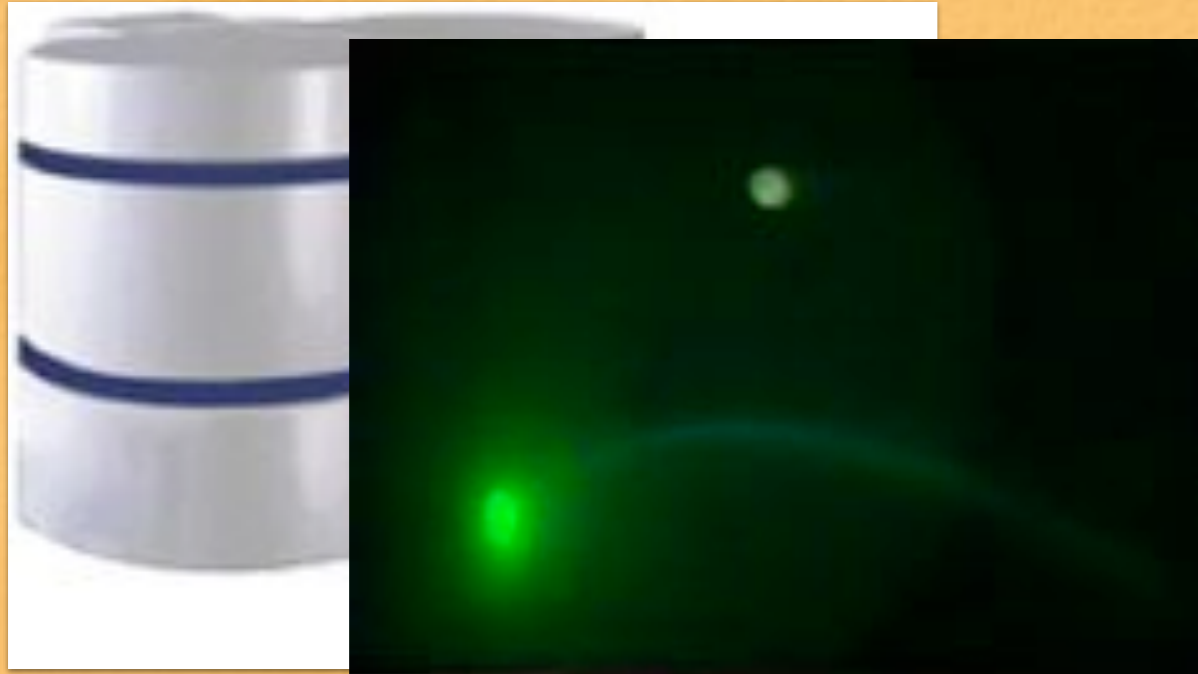


semicircle. After repeating this process several times, they come zinging out the exit port at high speeds!

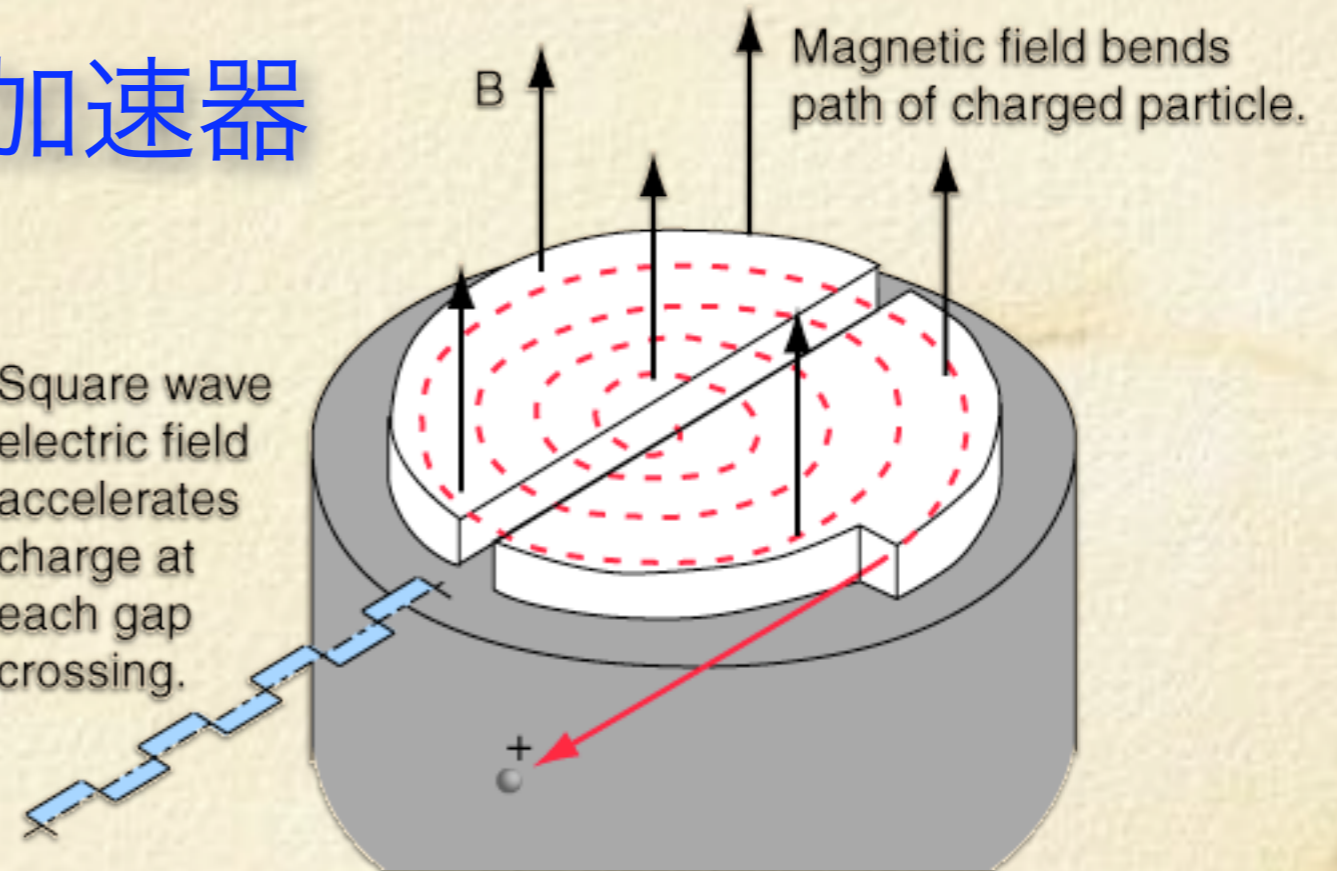




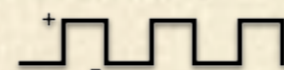
サイクロトロン加速器



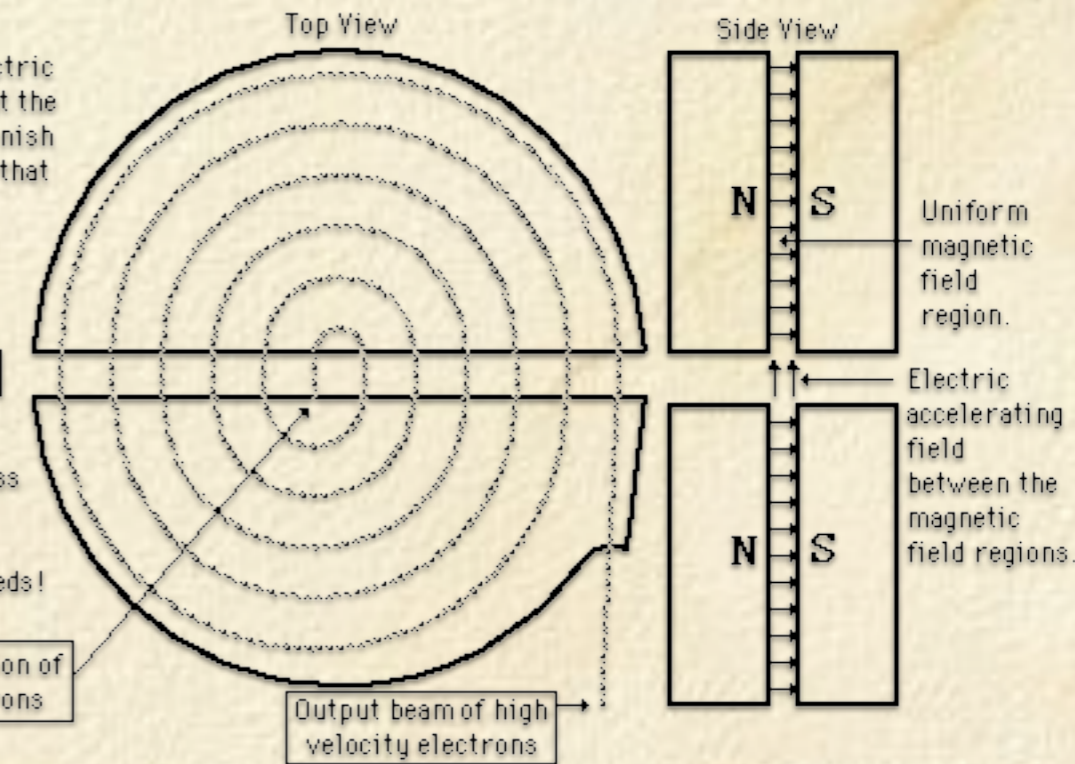
Square wave electric field accelerates charge at each gap crossing.



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



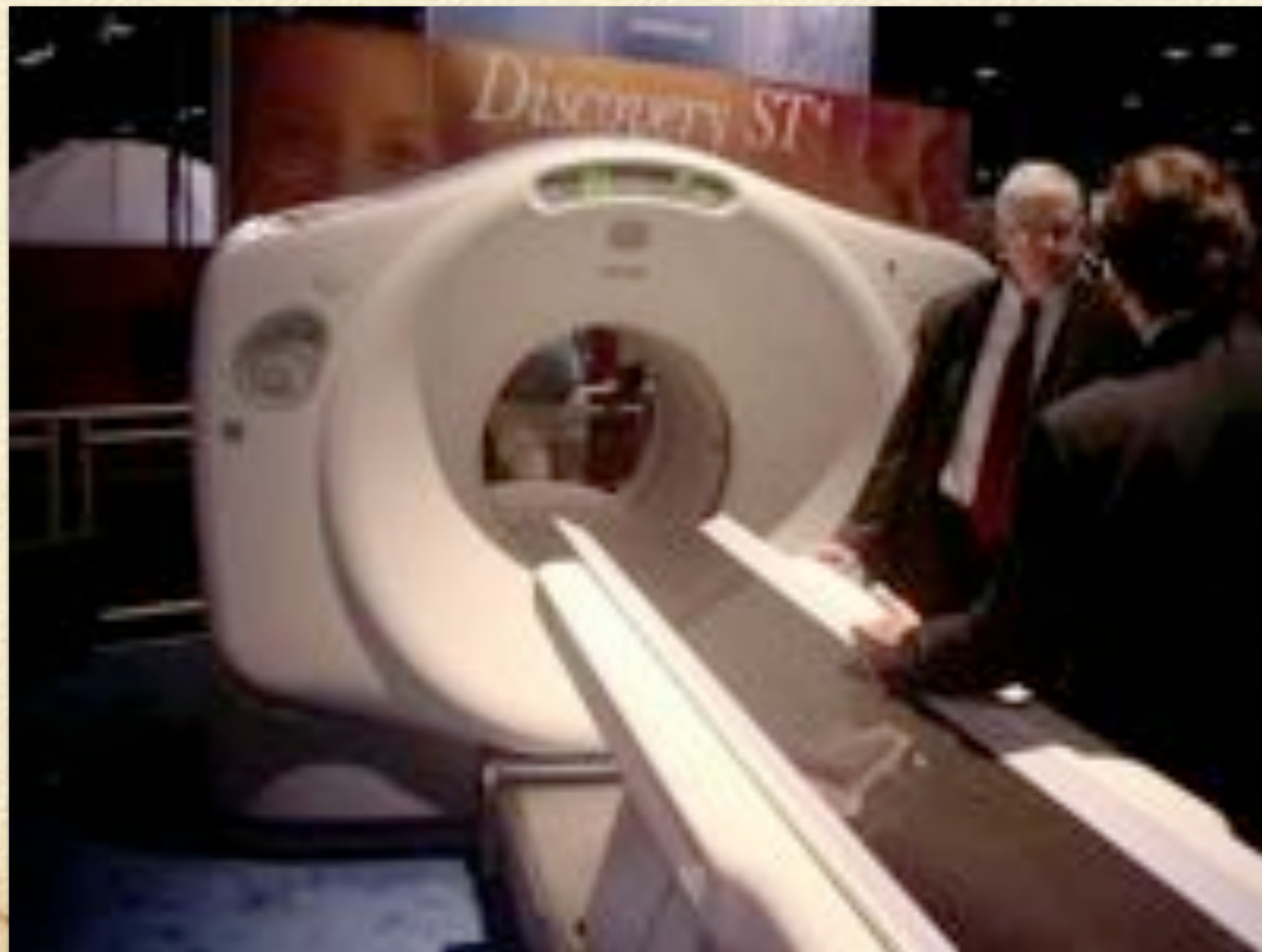
semicircle. After repeating this process several times, they come zinging out the exit port at high speeds!



<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/cyclotron.html>

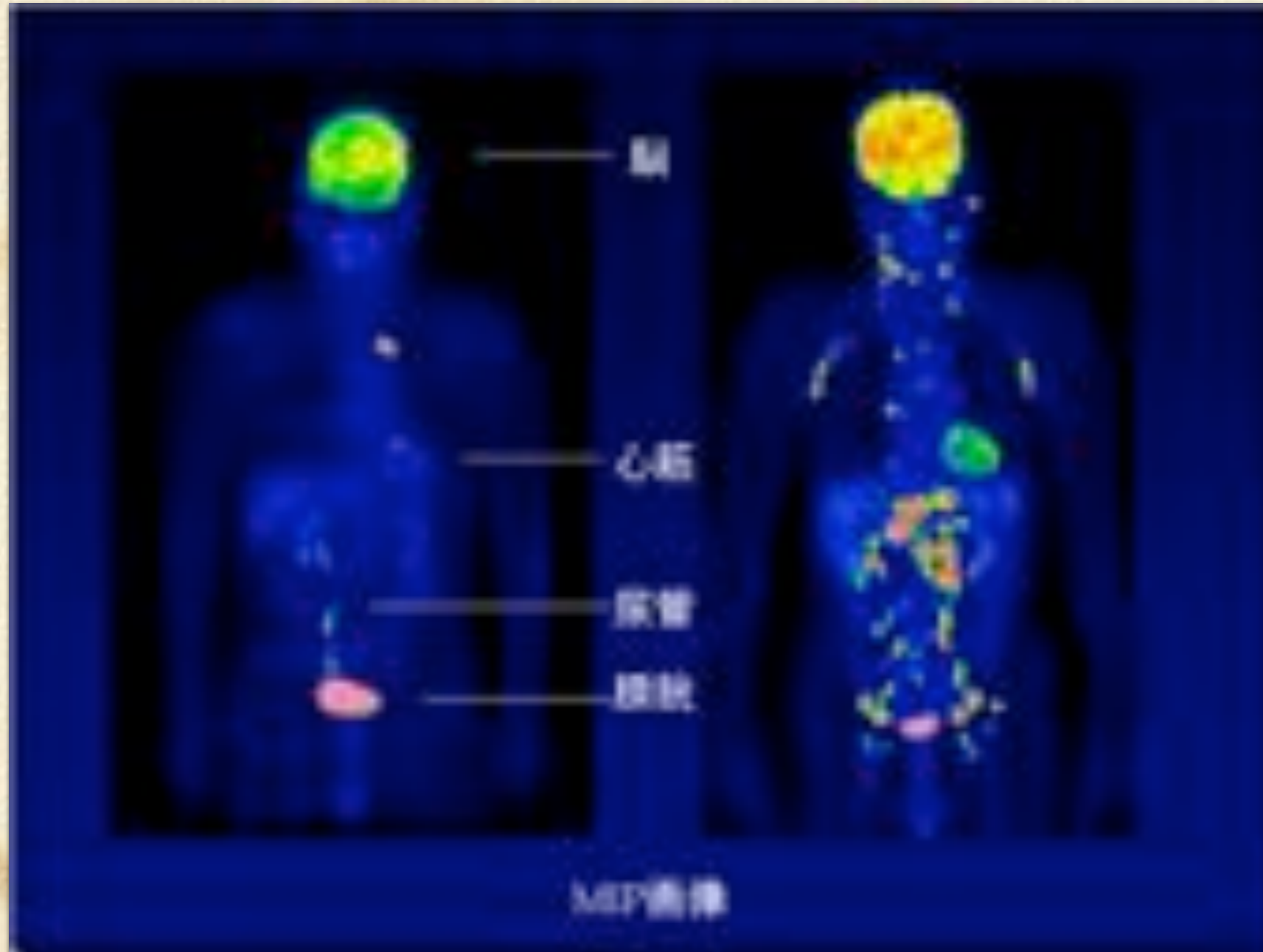
PET/CT

断層撮影装置



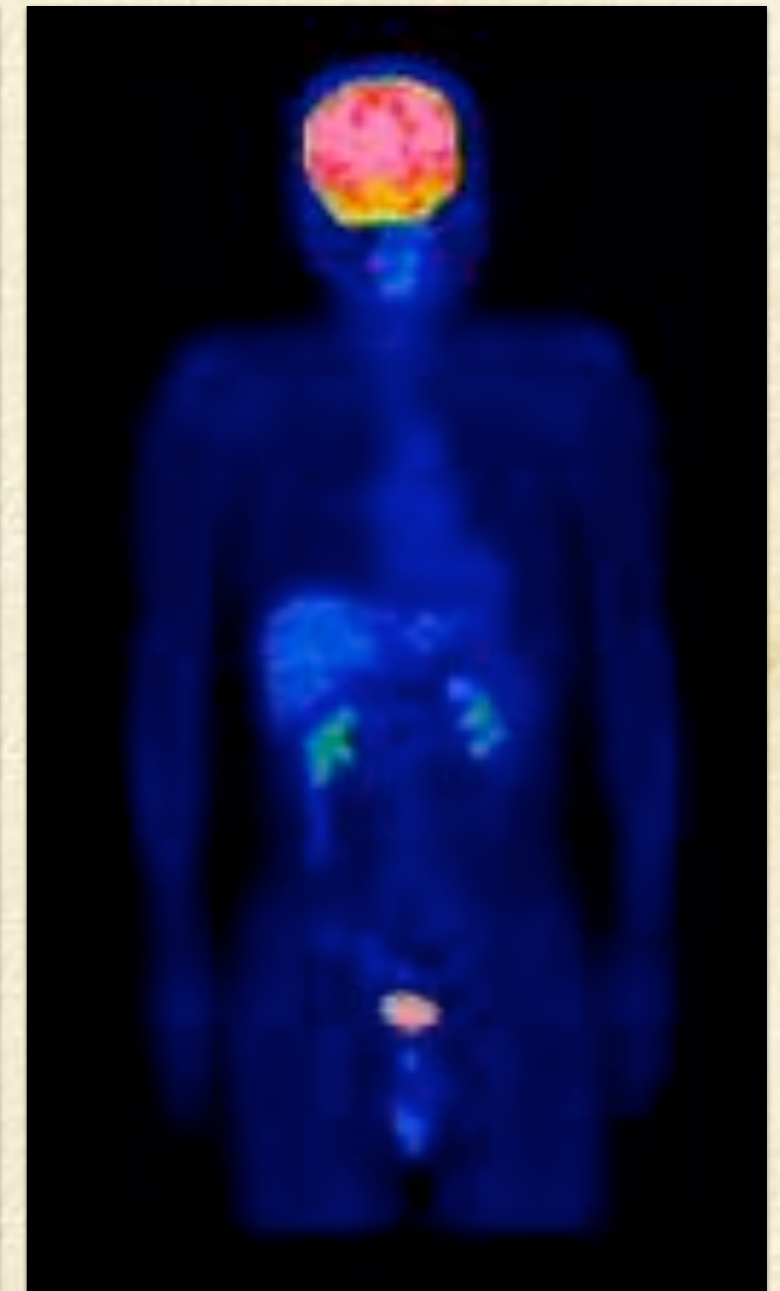
http://teleradiology.jp/MRI/03_houkoku/RSNA2002/GE_PET_CT/

PET 診断例



肺ガン

リンパ腫

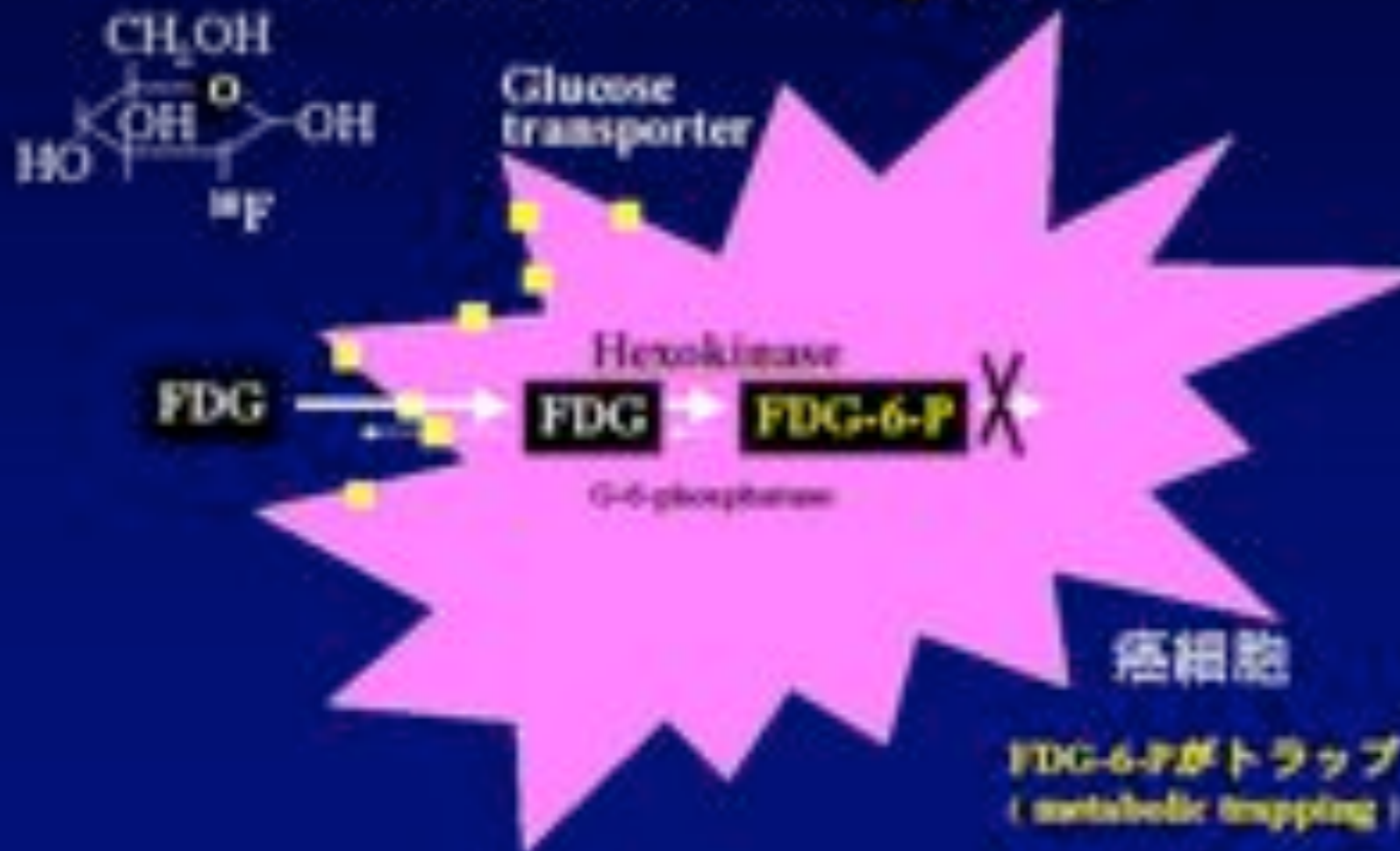


正常

癌とブドウ糖代謝

^{18}F -FDGの集積機序

2-deoxy-2-fluoro-D-glucose



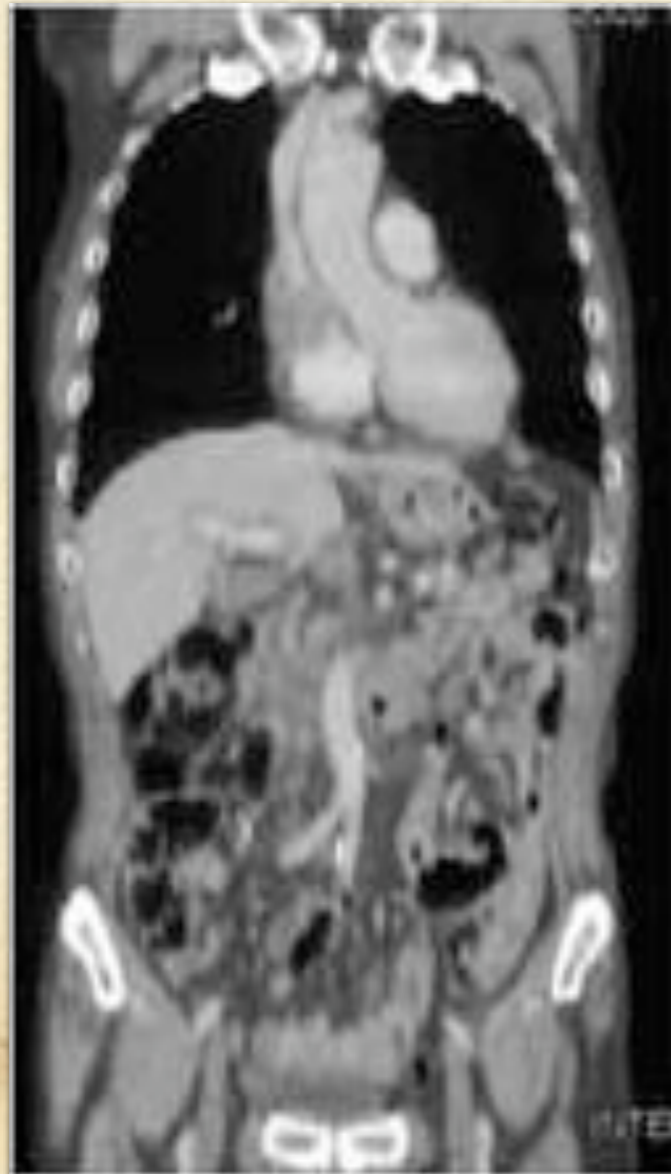
ほとんどの癌細胞は分裂増殖のため大量のエネルギーを要しており、その多くをブドウ糖に依存しているため、正常細胞の数倍から20倍のブドウ糖を取り込みます。単にブドウ糖に放射性同位元素を付けたのでは、解糖されて散らばってしまうので、**代謝されないブドウ糖類似物質にF-18で標識したものがFDG**です。これは**東北大学の井戸達雄教授**が約20年前に米国留学中になされた業績で、日本人として誇るべきことと思います。

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では黒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