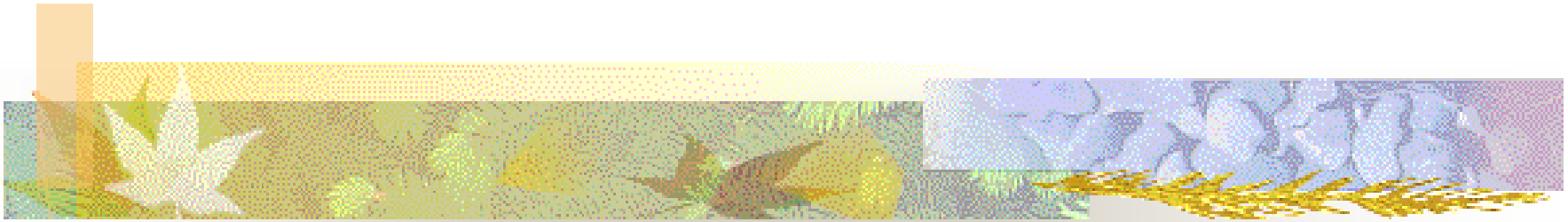
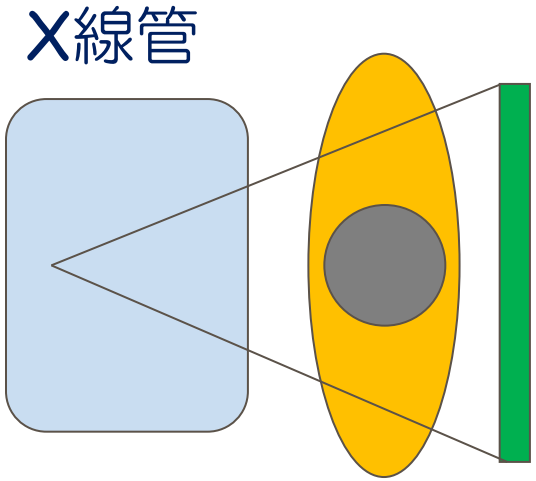
X線のエネルギー情報を用いたレントゲン



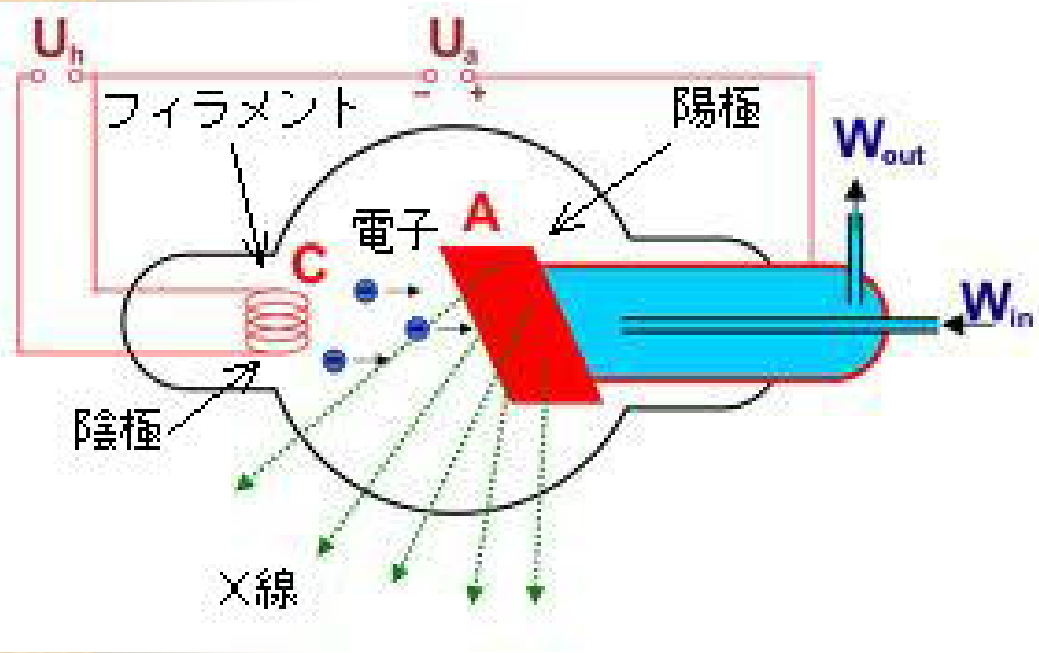
神野郁夫

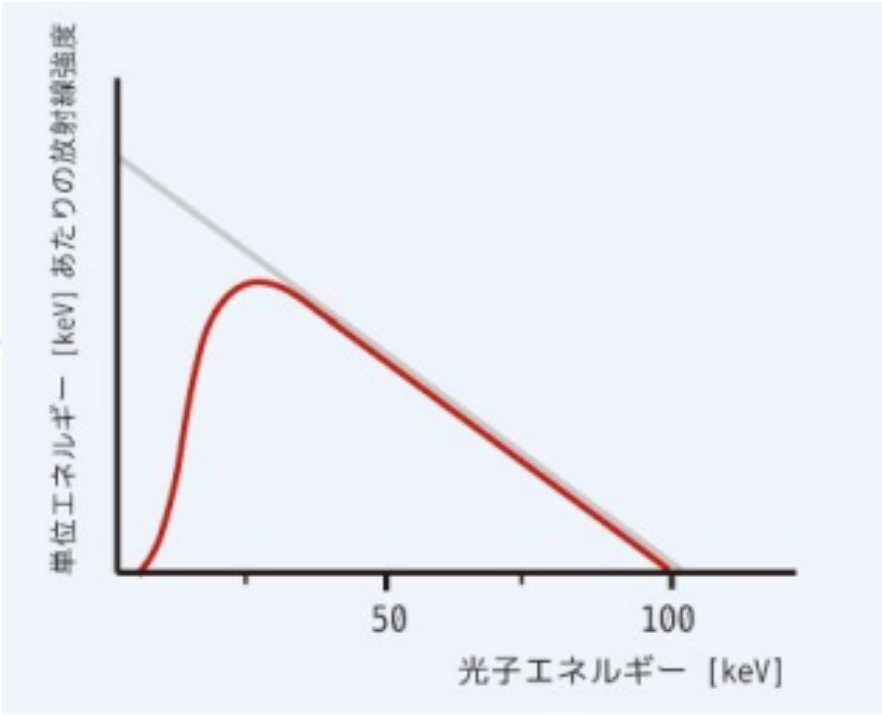
レントゲン撮影



X線検出器
(レントゲンフィルム,
フラットパネル検出器)

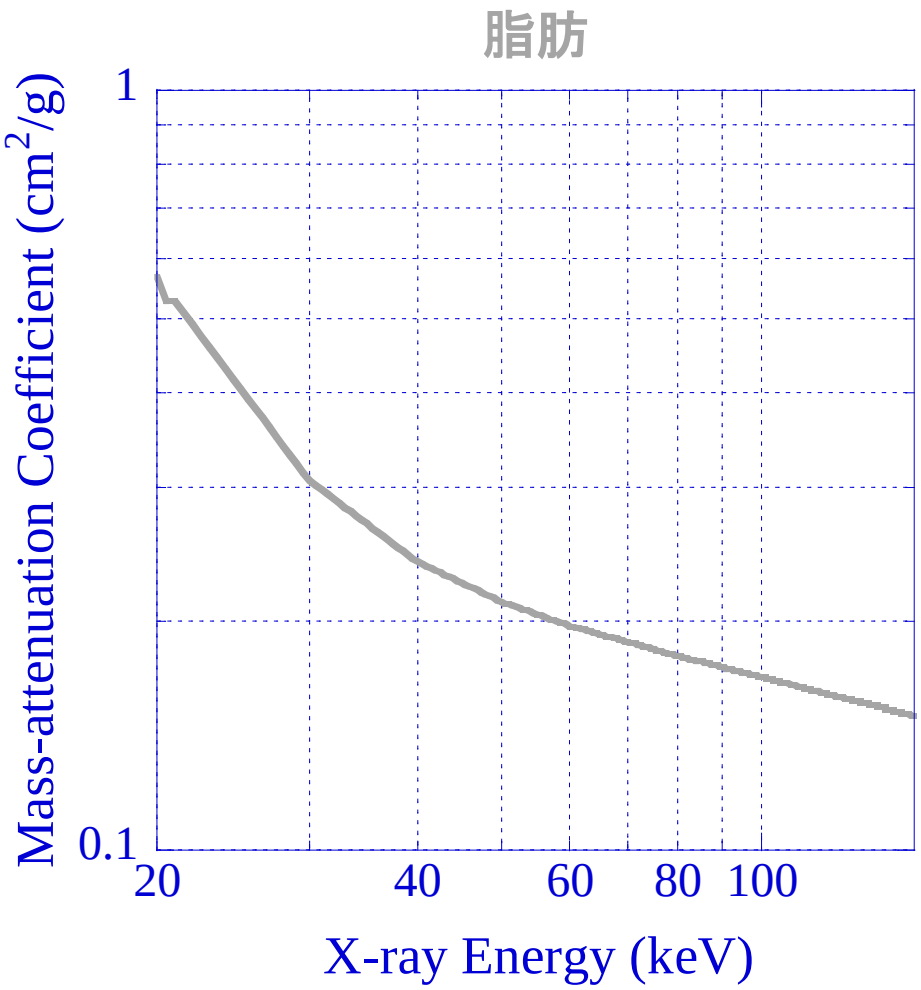
X線の発生





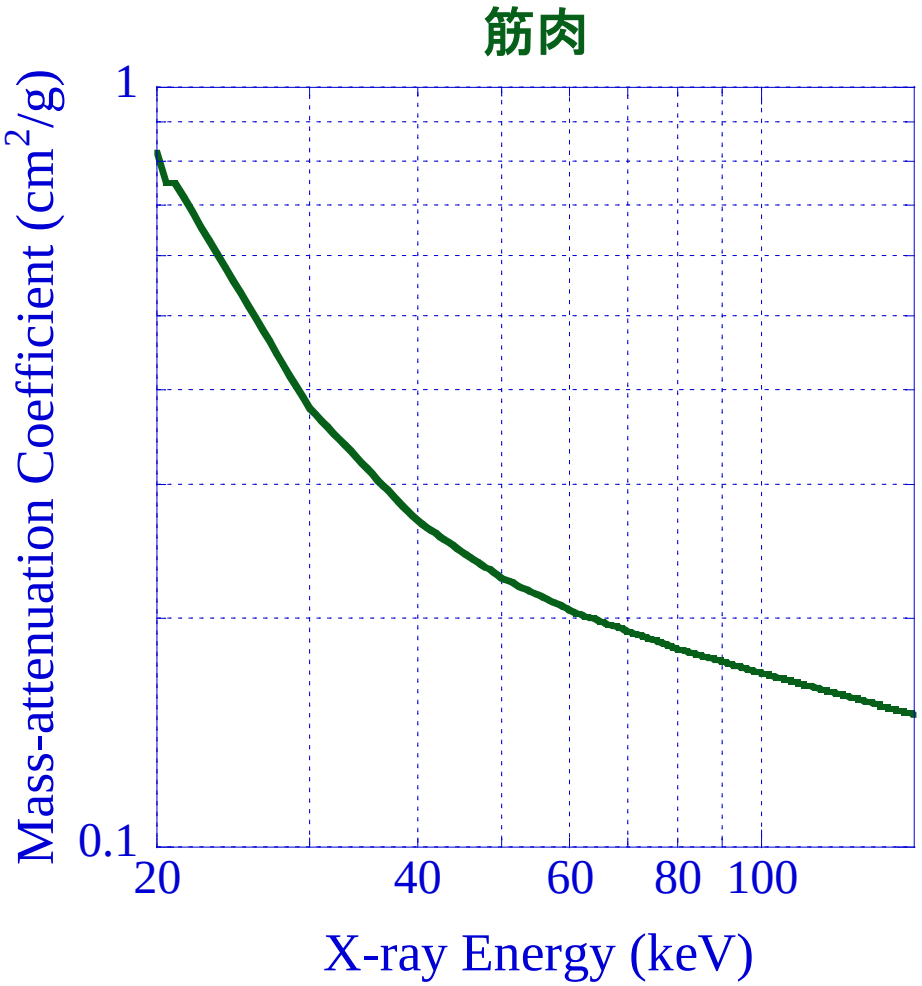
最大エネルギーからゼロまで連続分布.
低エネルギーX線は，空気で吸収される.

人体組織によるX線の吸収



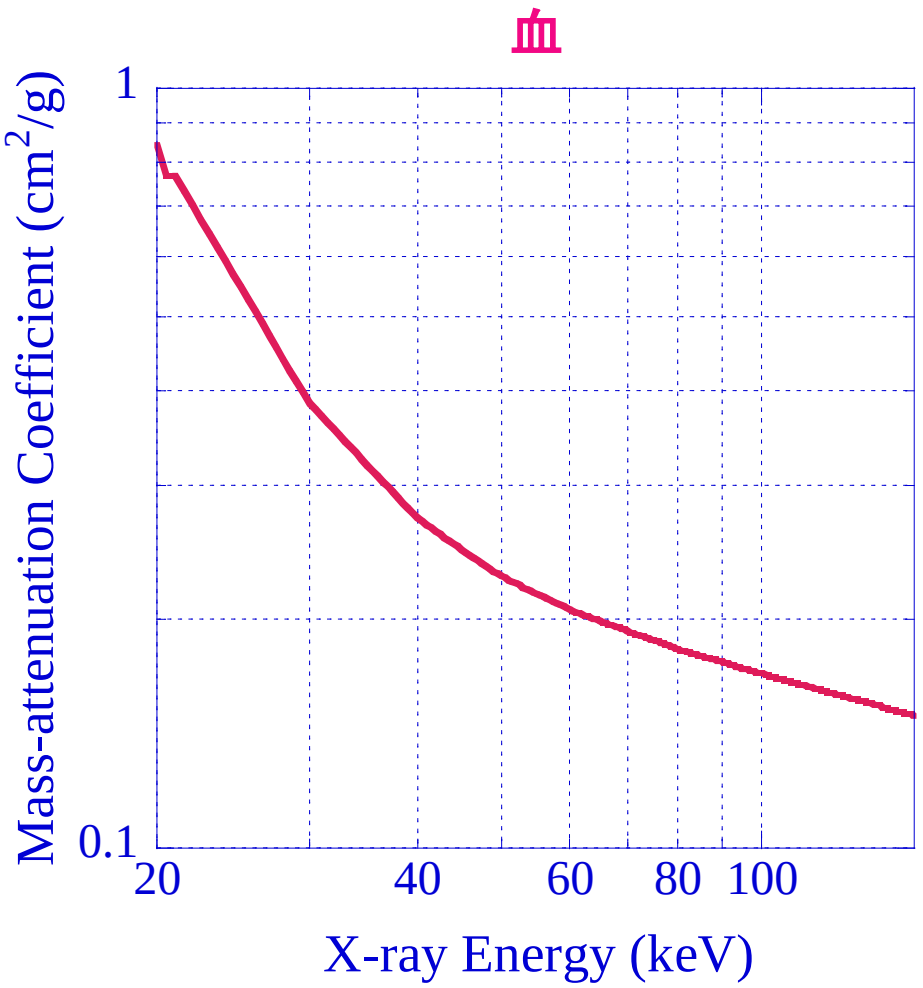
- $cm^2/g \times$ 密度g/cm^3 → cm^{-1}

人体組織によるX線の吸収

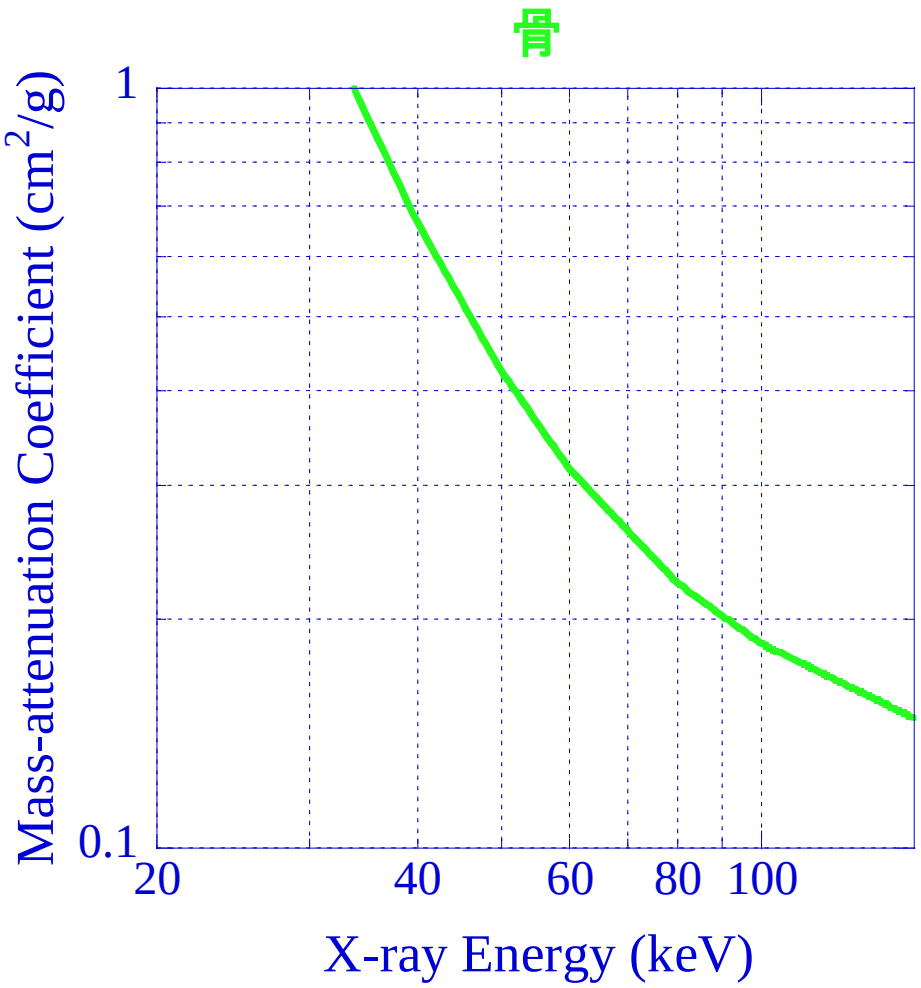


$$Y(E) = Y_0(E) \cdot \exp\left(-\frac{\mu(E)}{\rho}\rho^{*}t\right)$$

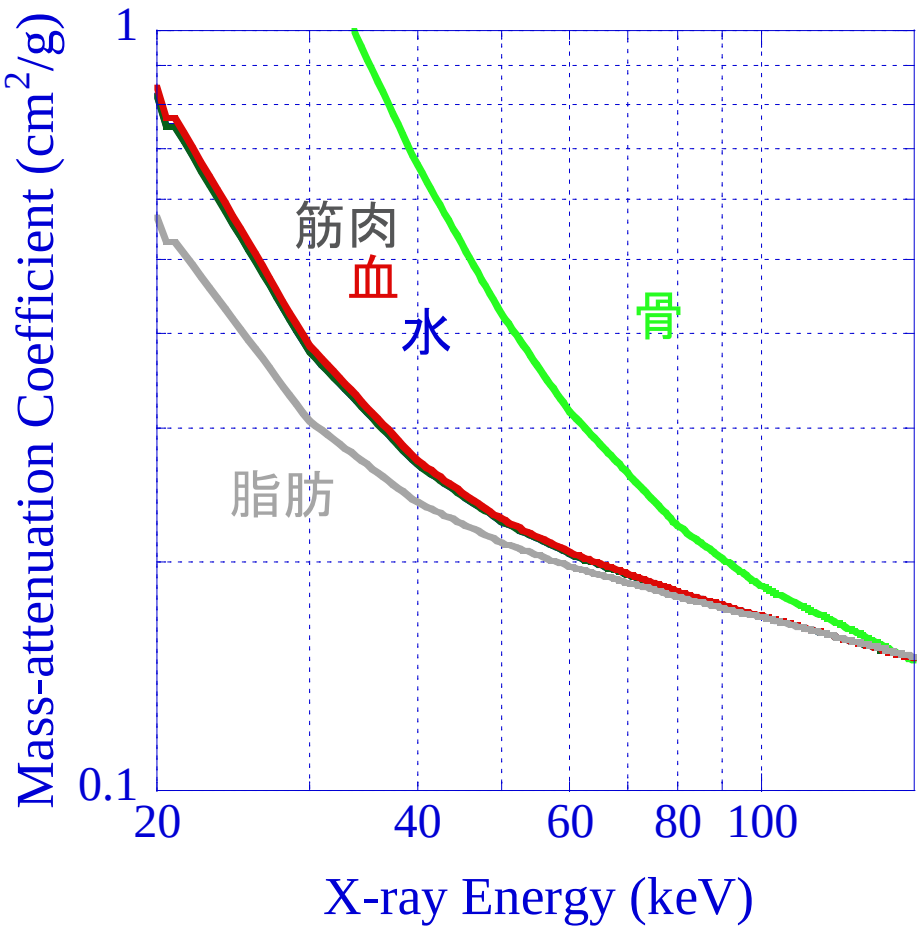
人体組織によるX線の吸収



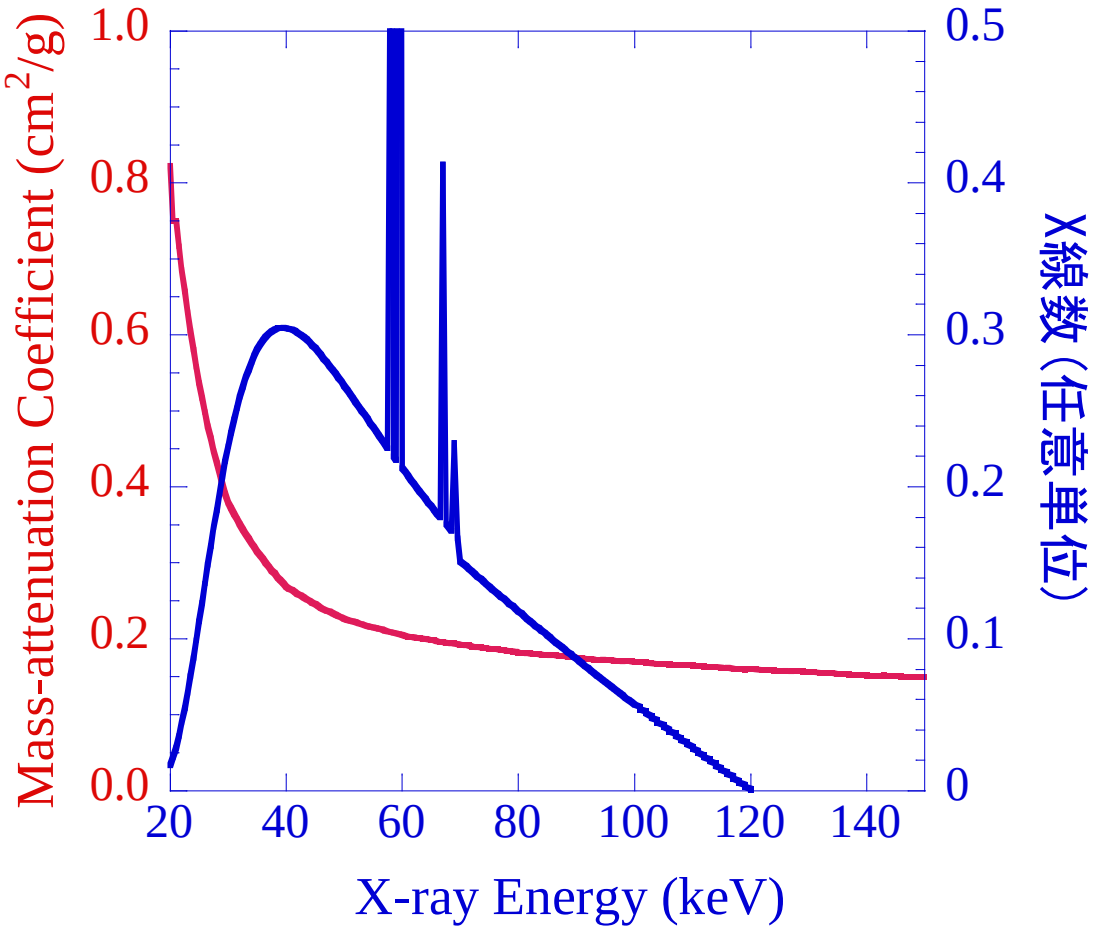
人体組織によるX線の吸収



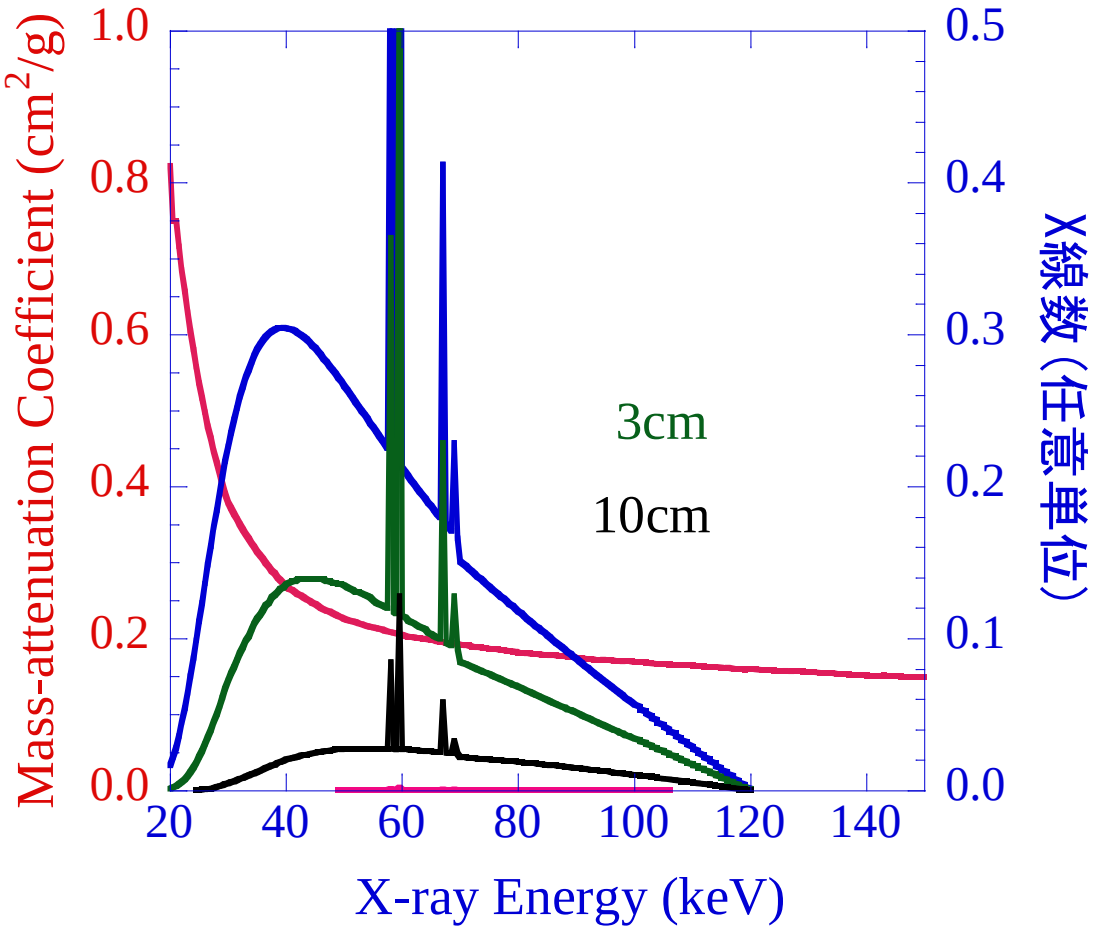
人体組織によるX線の吸収



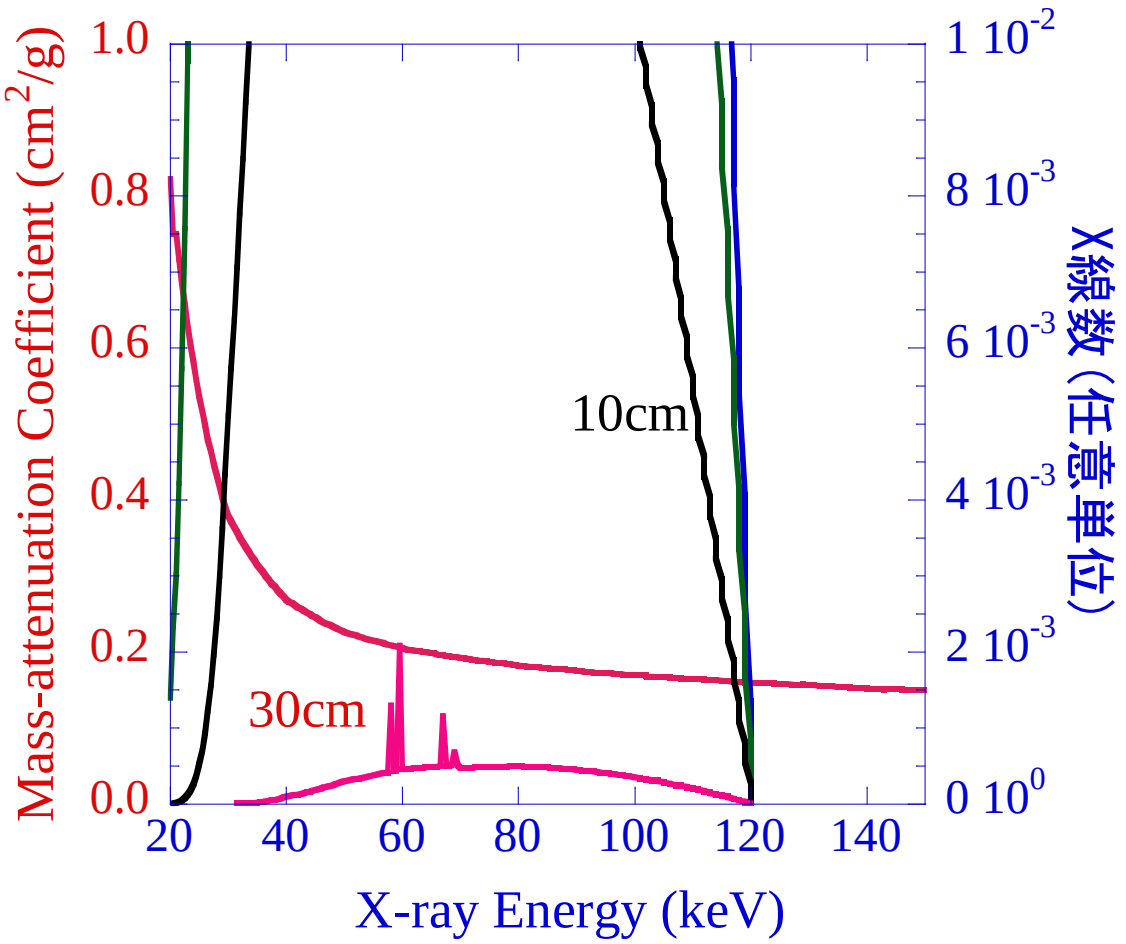
X線が人体を通過すると



X線が人体を通過すると



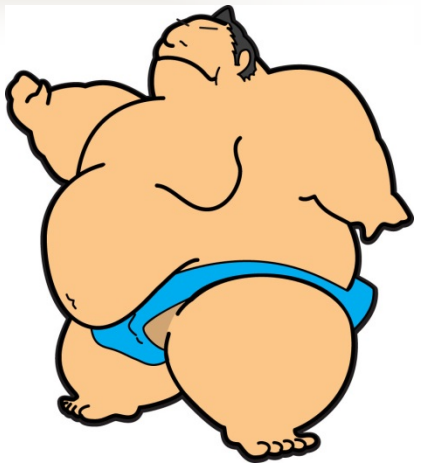
X線が人体を通過すると



ボクサーとお相撲さん

幅 10cm

幅 30cm



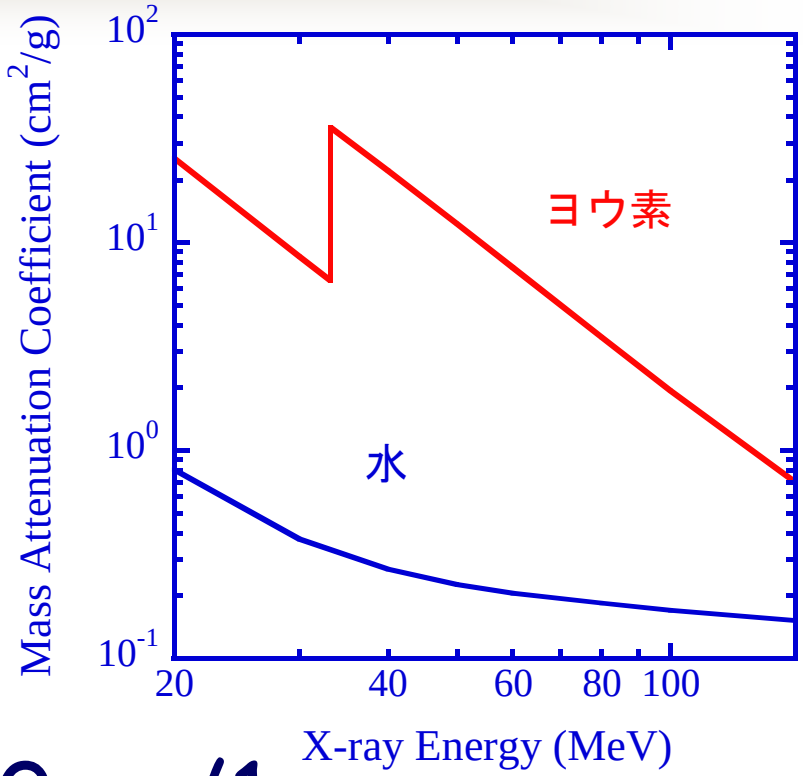
人体厚さ　(cm)	0	3	10	30
平均エネルギー(keV)	56.3	59.7	66.0	76.2

➡ ビームハードニング

電流測定：平均エネルギーのX線で測定している.

ヨウ素造影剤

- 100mlにヨウ素30g
  - 300mg/ml　無希釈
- 血液 6000ml→5mg/ml
- ヨウ素密度~5g/cm^3
- 10~600μm/1cm
- ガン中に血液10%　1~60μm/1cm

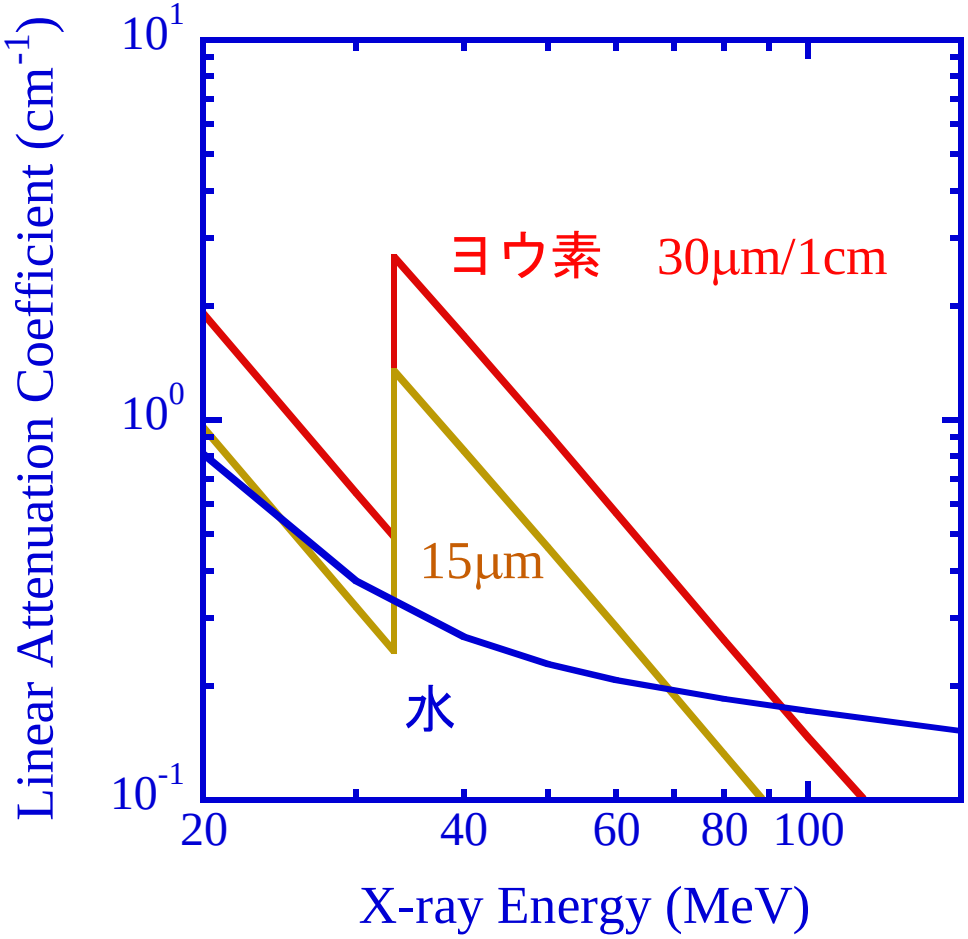


- $Y(E) = Y_0(E) \cdot exp\left(-\frac{\mu(E)}{\rho}\rho^{*}t\right)$

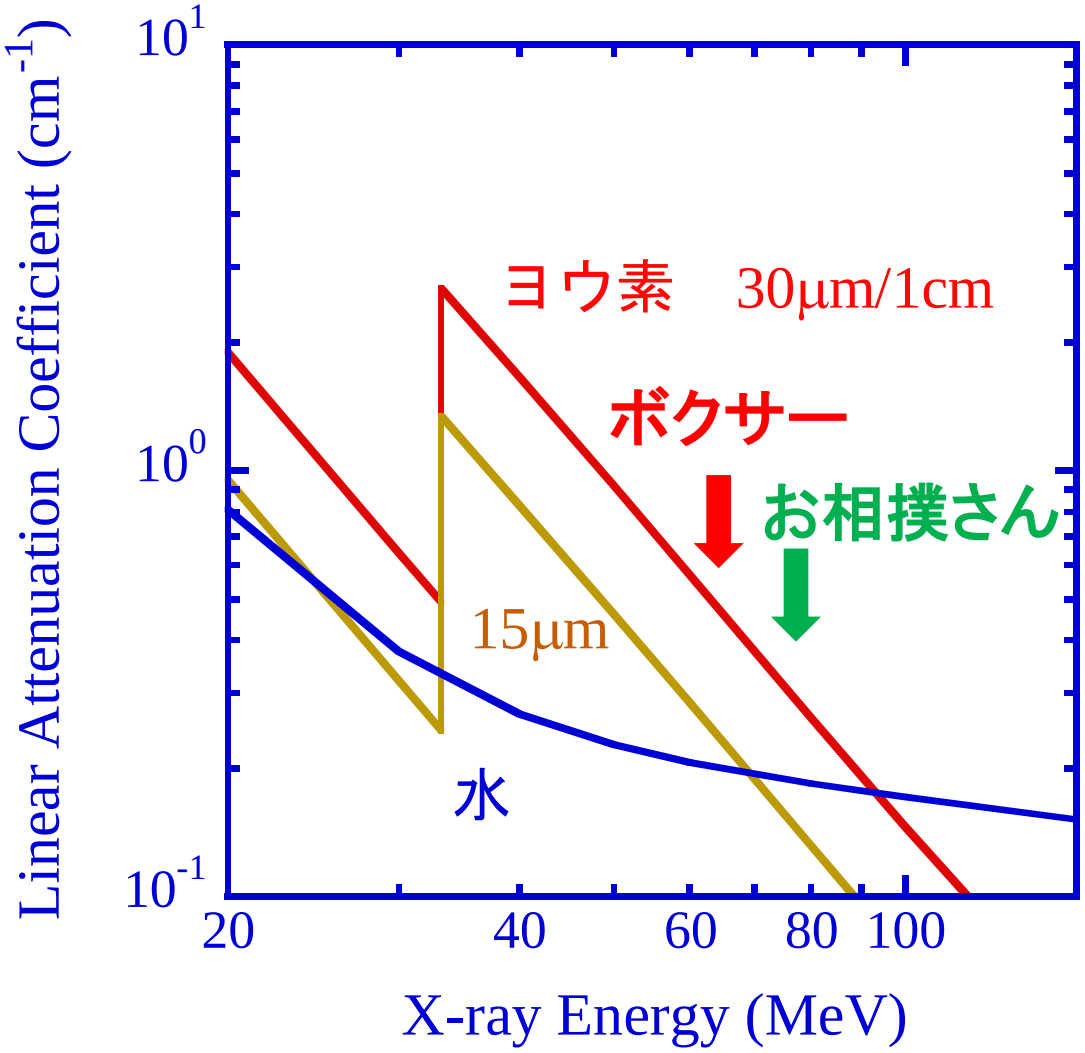
$\mu(E)/\rho$：質量減弱係数，ρ^{*}：実際の密度

エネルギーと線減弱係数

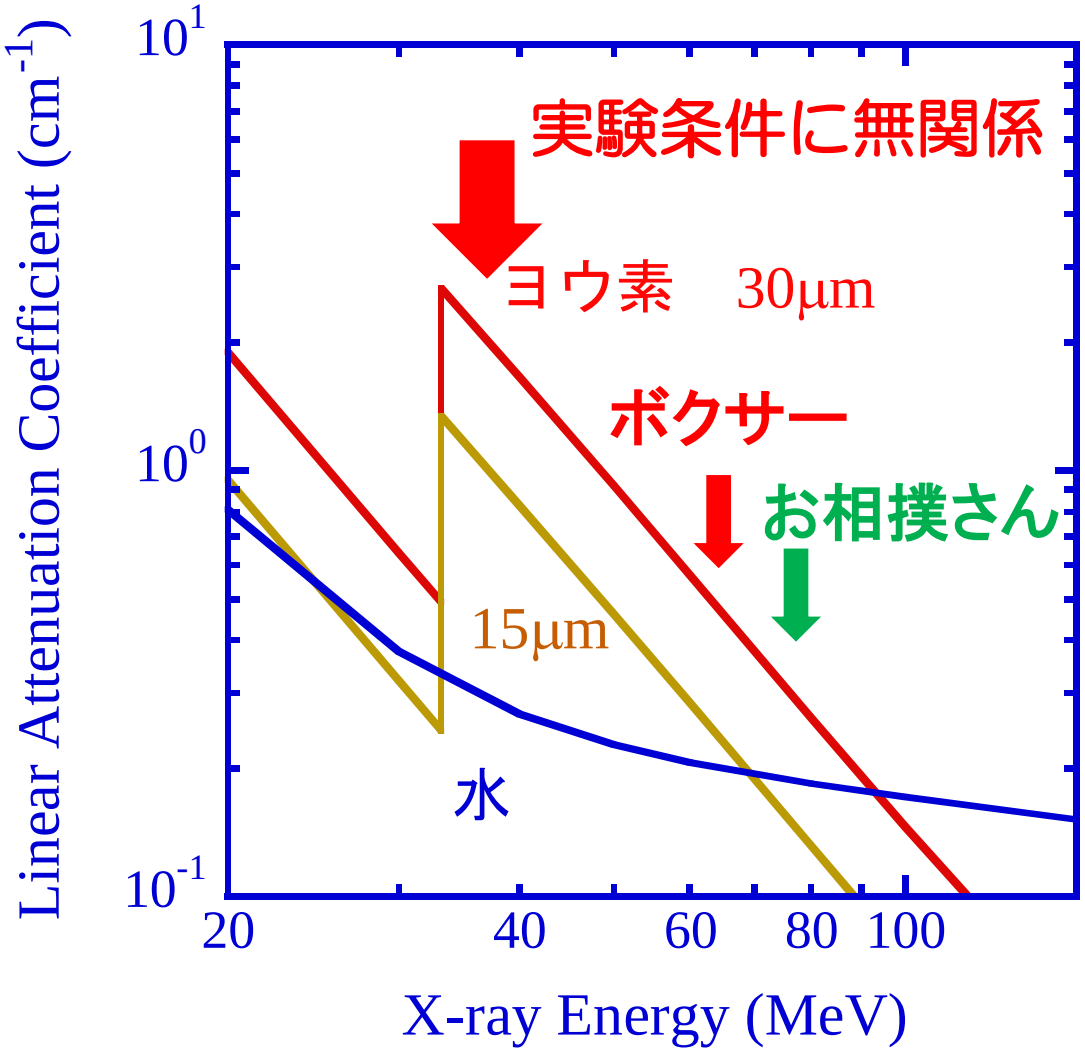
線減弱係数 $\mu(E) = \dfrac{\mu(E)}{\rho}\rho$ *



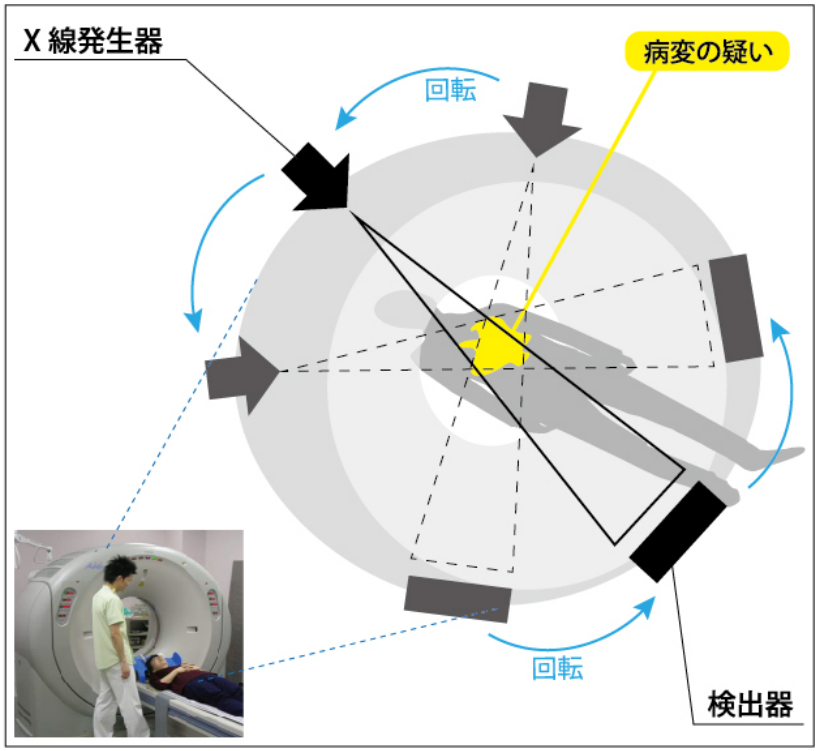
エネルギーと線減弱係数

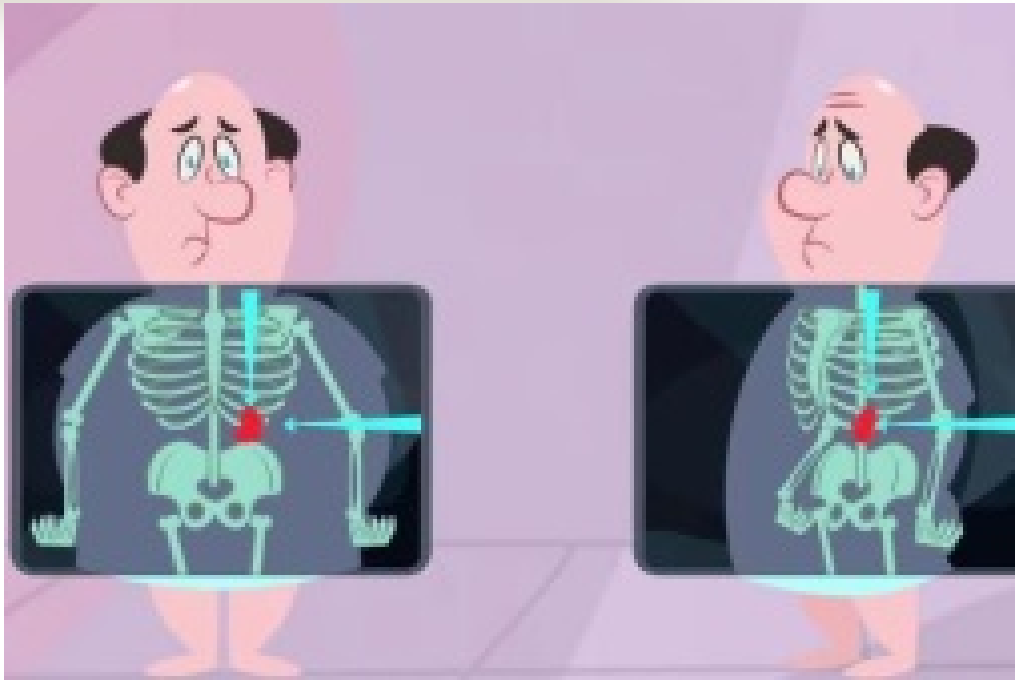


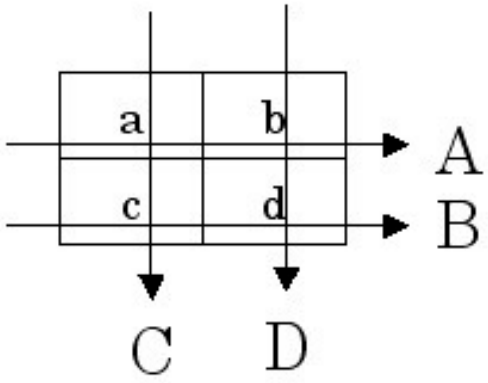
エネルギー情報を利用したレントゲン



コンピュータ断層撮影(CT)



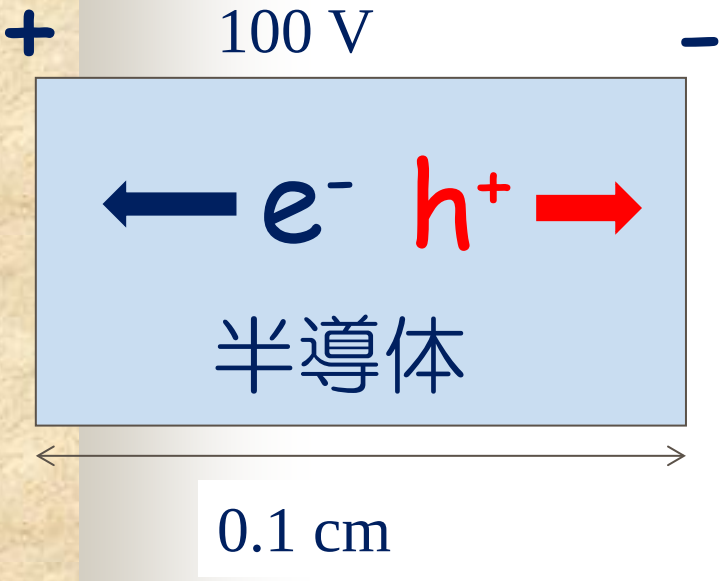




$$\begin{cases} a+b=A \\ c+d=B \\ a+c=C \\ b+d=D \end{cases}$$

フォトン・カウンティングCT

- 入射する個々のX線のエネルギー測定
- X線数　空気 10^9，人体 10^6 $mm^{-2}s^{-1}$
- 計数率限界　~0.5×10^6 s^{-1}



$$F = \frac{100V}{0.1cm} = 10^3 V/cm$$

正孔移動度　$\mu_h = 150 cm^2 V^{-1} s^{-1}$

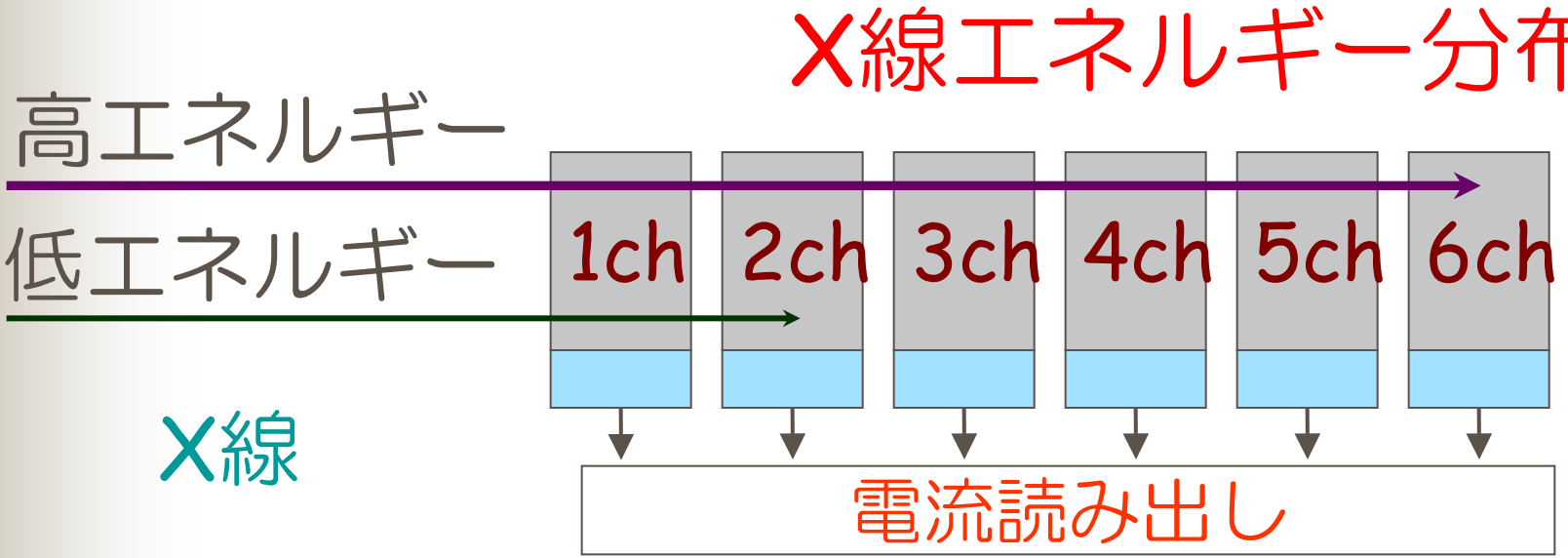
$$v_h = \mu_h F = 1.5 \times 10^5 cm/s$$

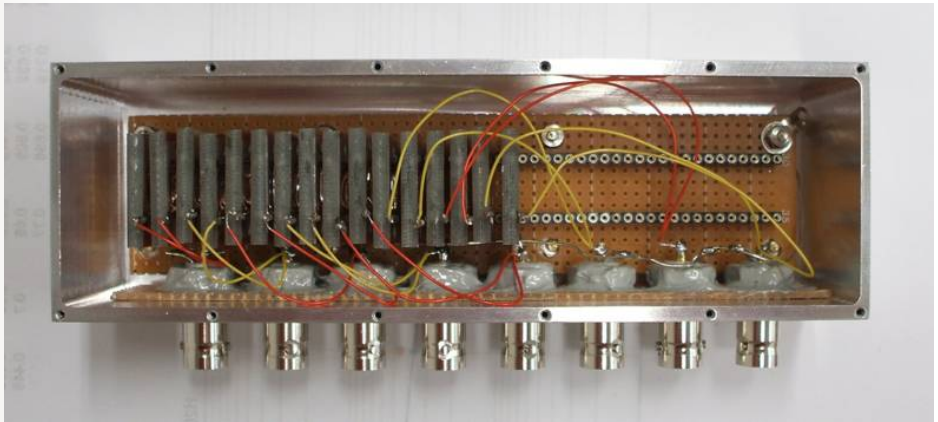
$$t = \frac{0.1cm}{1.5 \times 10^5 cm \cdot s^{-1}} = 6.7 \times 10^{-7} s$$

$$n = \frac{1}{6.7 \times 10^{-7} s} = 1.5 \times 10^6 s^{-1}$$

transXend 検出器

- X線を電流として測定　→





transXend検出器の応答関数

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \bullet \\ I_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{1,E_1} & R_{1,E_2} & \bullet & R_{1,E_6} \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ R_{6,E_1} & \bullet & \bullet & R_{6,E_6} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_{E_1} \\ Y_{E_2} \\ \bullet \\ Y_{E_6} \end{pmatrix}$$

測定値　I_j (j=1,6)

応答関数　$R_{i,j}$ (i,j=1,6)

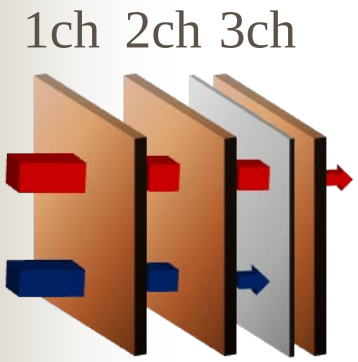
SAND II unfolding

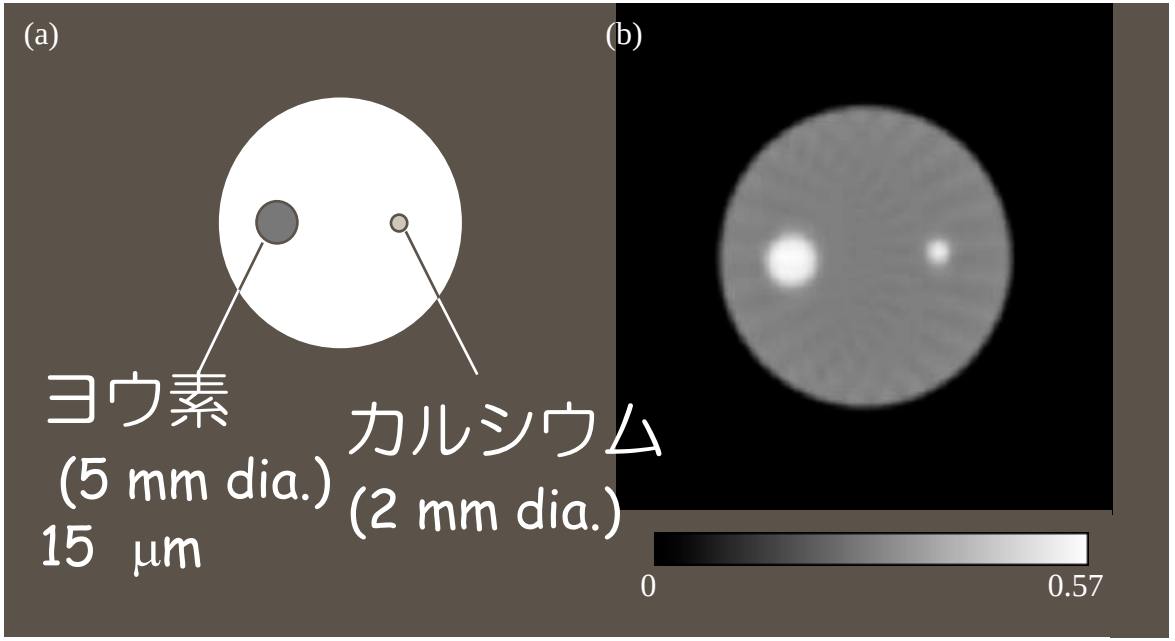
E-分布　Y_i (i=1,6)

	keV
E_1	20~27
E_2	28~33
E_3	34~39
E_4	40~50
E_5	51~65
E_6	66~80

transXend検出器で1回の測定

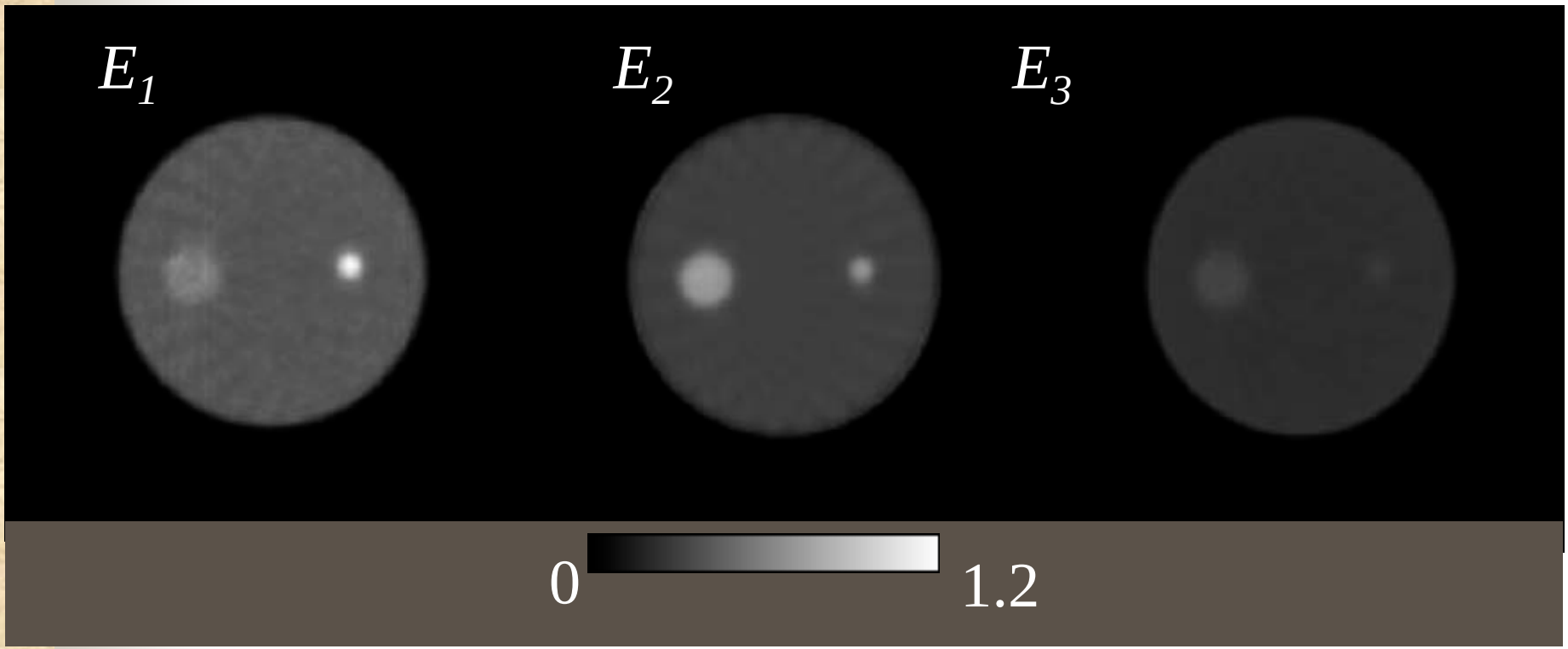
Si transXend
検出器





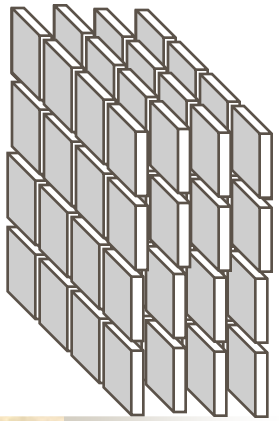
	E_1	E_2	E_3
keV	15-33	33-40	40-120

CT 画像



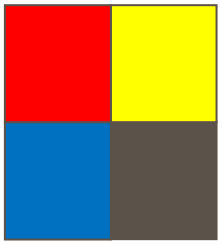
	E_1	E_2	E_3
keV	15-33	33-40	40-120

第3世代CT用transXend検出器

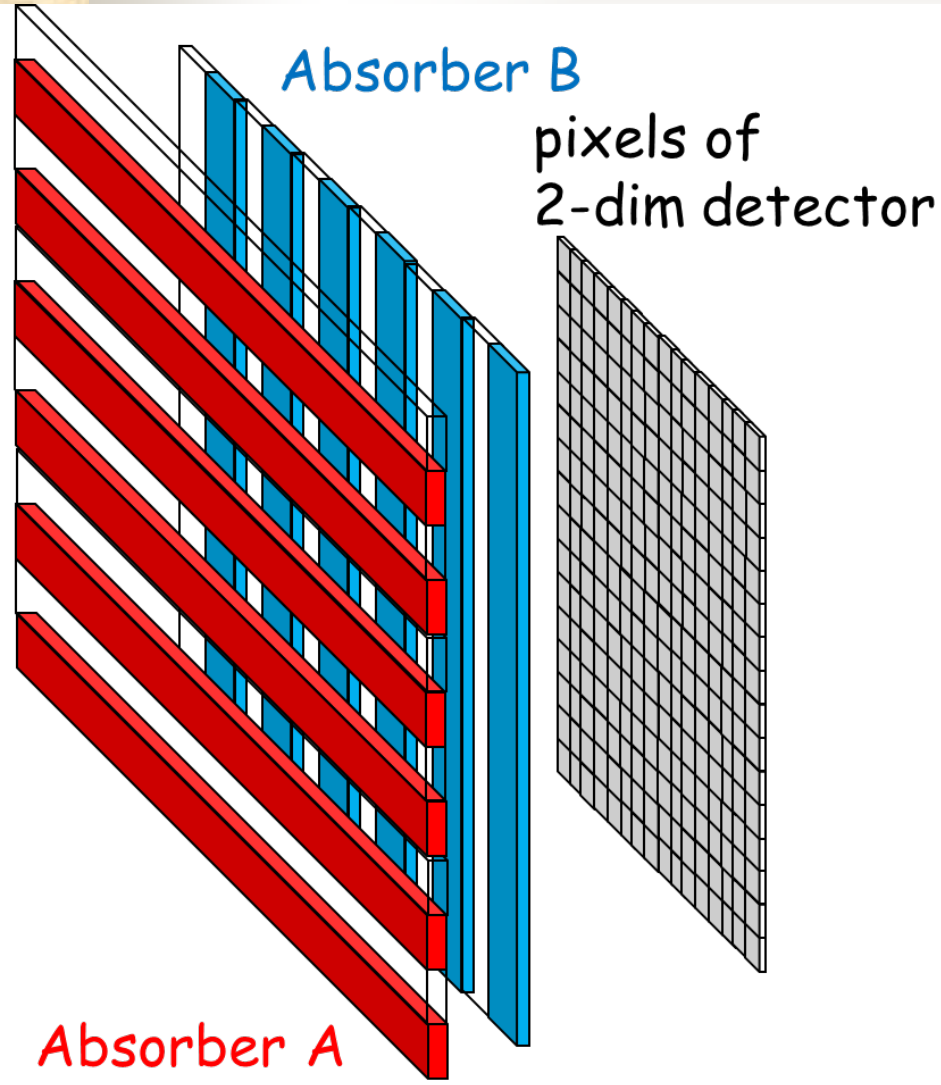


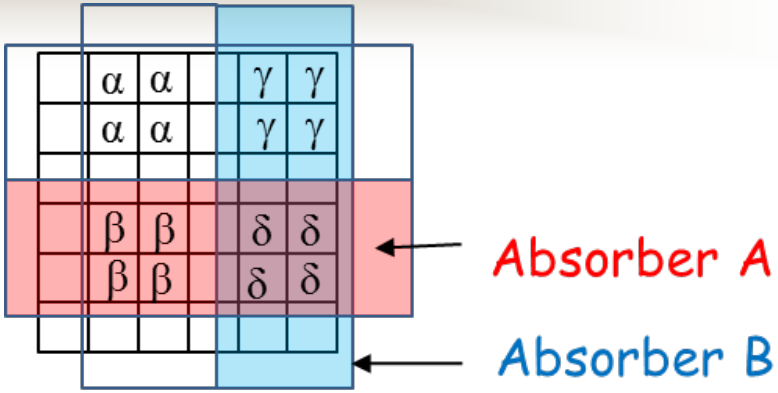
- transXend検出器の2次元配置
- 読出し回路数　→　膨大
- 要素検出器の寸法に制限

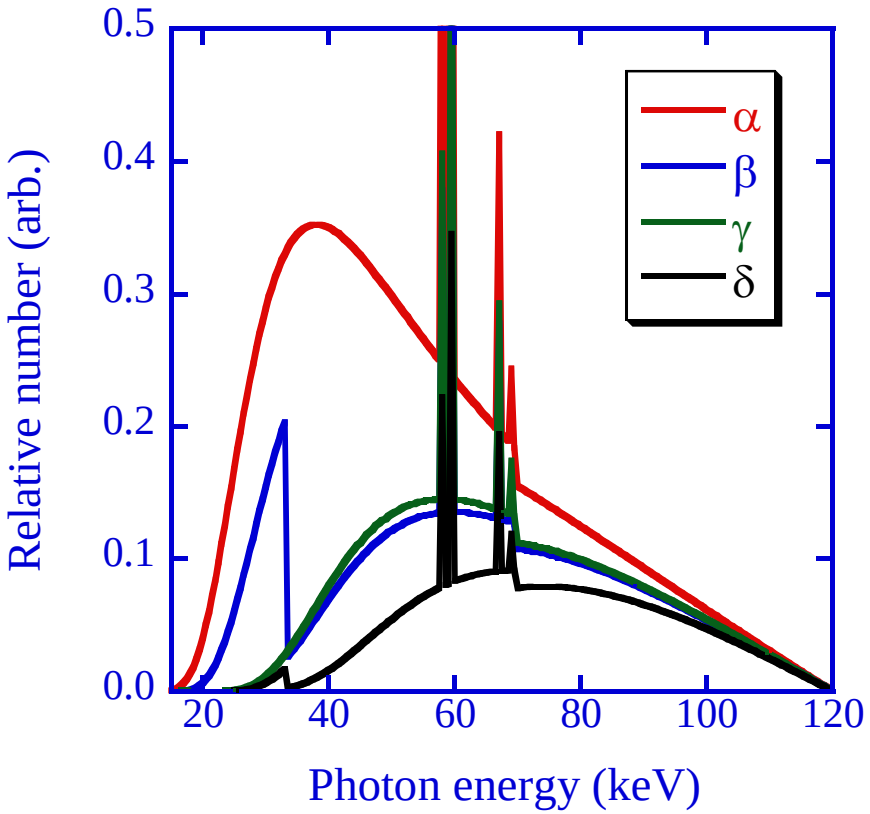
- 2次元検出器の使用
  - フラットパネル検出器，IP，TL板，etc.
  - X線エネルギースペクトル　変化



2種のリボン状吸収体

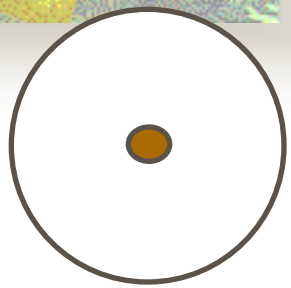






A: Sn 0.1 mm, B: Zr 0.2 mm

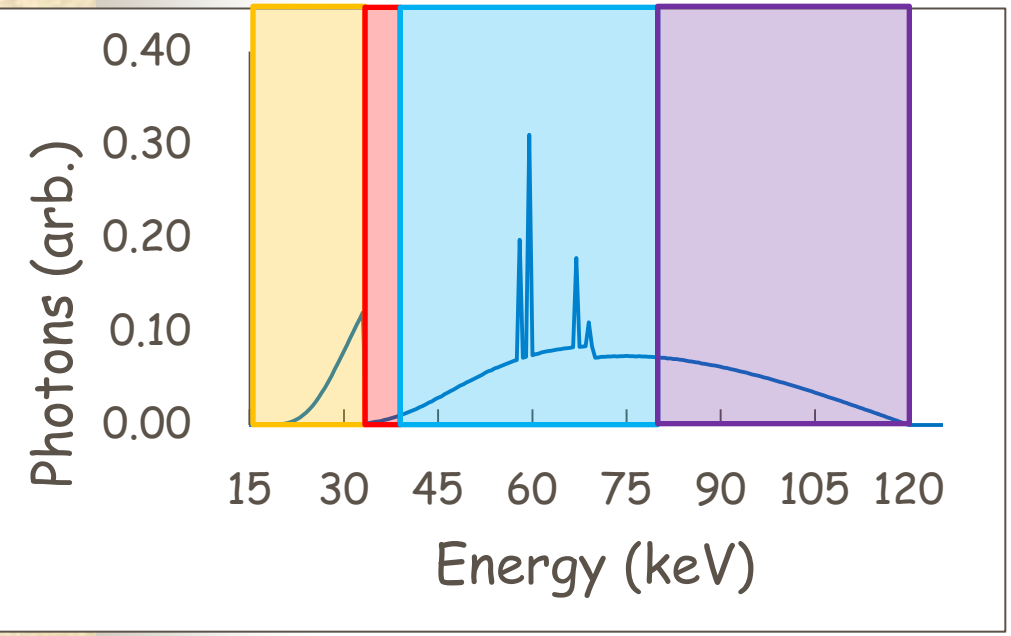
エネルギー分解CT

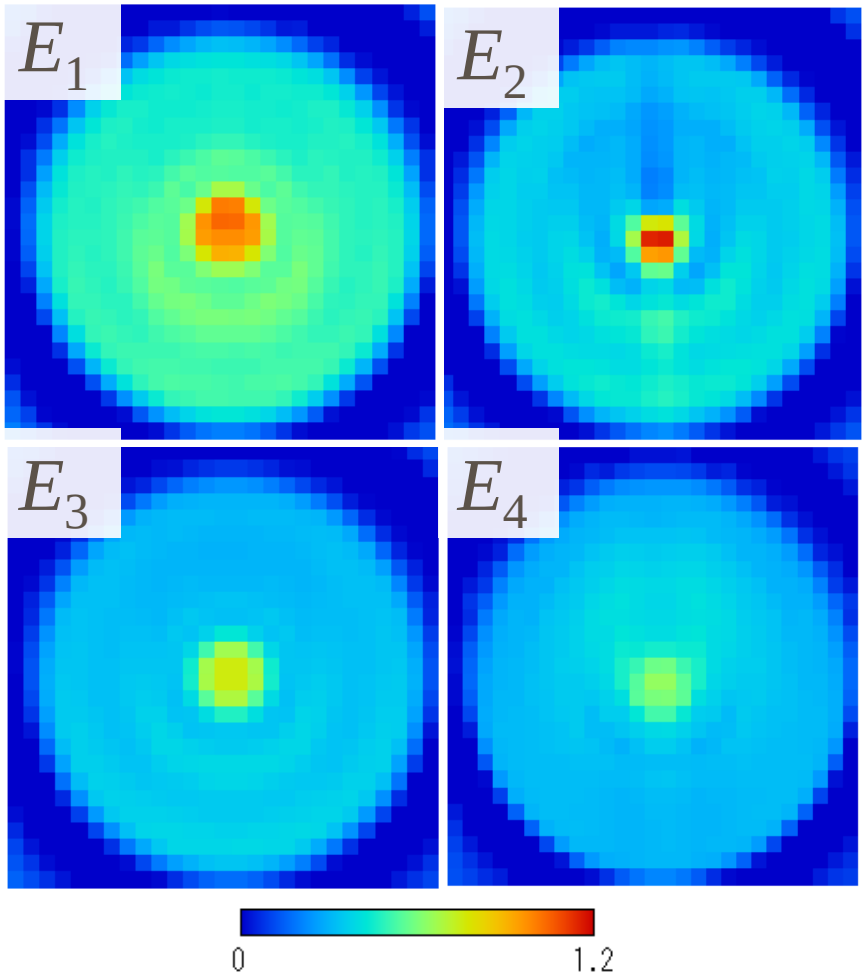


30 mm dia.

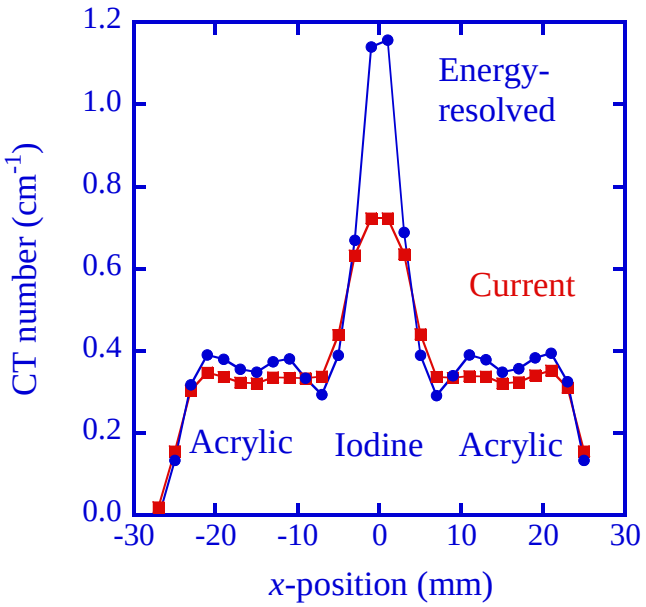
Iodine
30 μm/5 mm

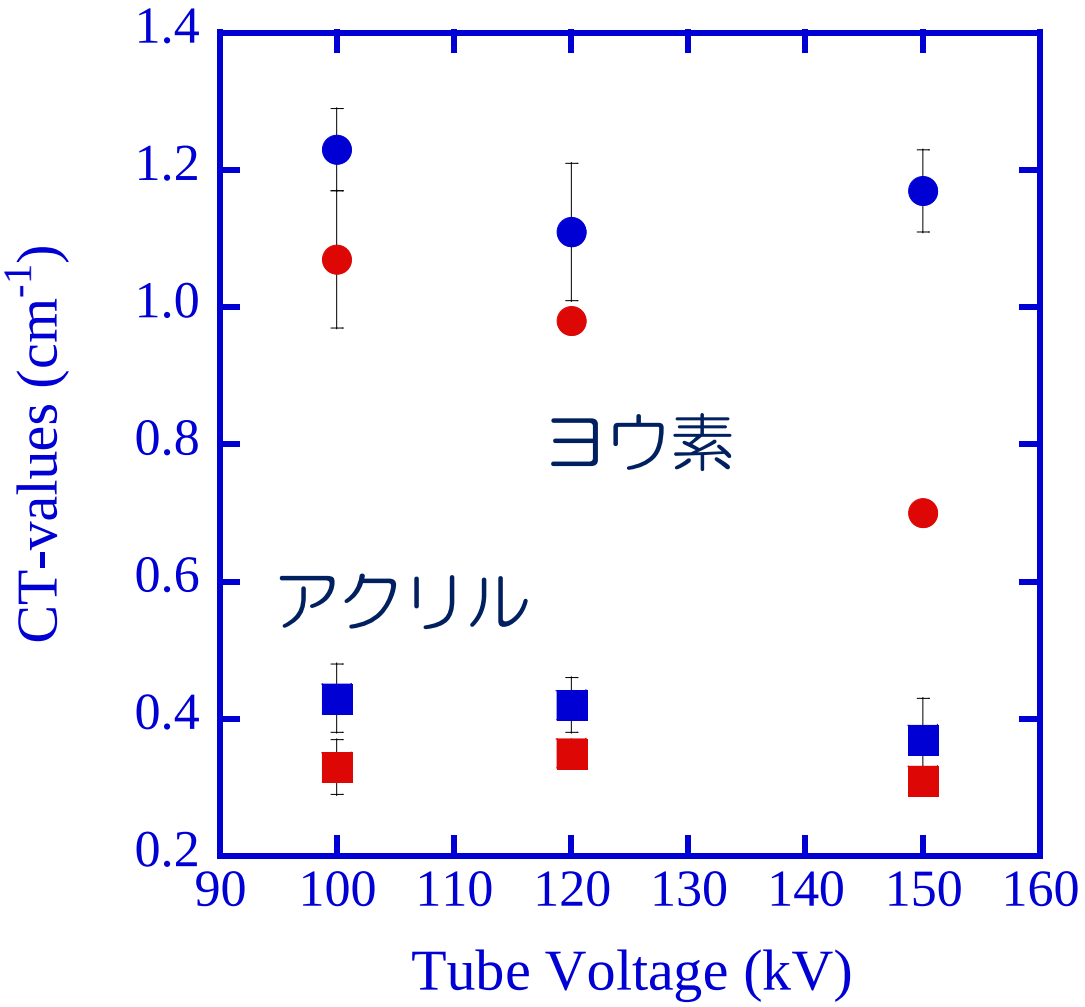
	E_1	E_2	E_3	E_4
keV	15.0 - 33.5	33.5 - 39.0	39.0 - 80.0	80.0 - 120.0





電流CTとの比較


1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
CT number (cm-1)
-30
-20
-10
0
10
20
30
x-position (mm)
Energy-resolved
Current
Acrylic
Iodine
Acrylic


1.4
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
CT-values (cm-1)
90
100
110
120
130
140
150
160
Tube Voltage (kV)
ヨウ素
アクリル

まとめ

- X線を用いた診断
  - 通常は，平均エネルギーのX線で診る.
  - お相撲さんのガンは，発見しにくい.
- エネルギー情報を用いた測定
  - 実験条件に無関係　一定のシグナル
- エネルギー分解CTの開発・実用化
  - 放射線物理の基礎→応用→医療