

# 放射線と環境

1. 放射線とは？
2. 環境応用
3. 放射線医療応用
4. 安全・セキュリティ応用
5. 品種改良

東京大学工学部システム創成学科

環境エネルギーシステムコース

上坂 充

レポート課題：講義の中から興味ある課題を選び(複数可)、A4 3ページ以上レポート作成して提出のこと。

# 単位の説明

小さい方		大きい方	
m (ミリ)	$10^{-3}$	k (キロ)	$10^3$
$\mu$ (マイクロ)	$10^{-6}$	M (メガ)	$10^6$
n (ナノ)	$10^{-9}$	G (ギガ)	$10^9$
p (ピコ)	$10^{-12}$	T (テラ)	$10^{12}$
f (フェムト)	$10^{-15}$	P (ペタ)	$10^{15}$
a (アト)	$10^{-18}$		

## エネルギーの単位

電子に1Vかけたときの運動エネルギー

$$1\text{eV (電子ボルト)} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$$

# 放射線とは？

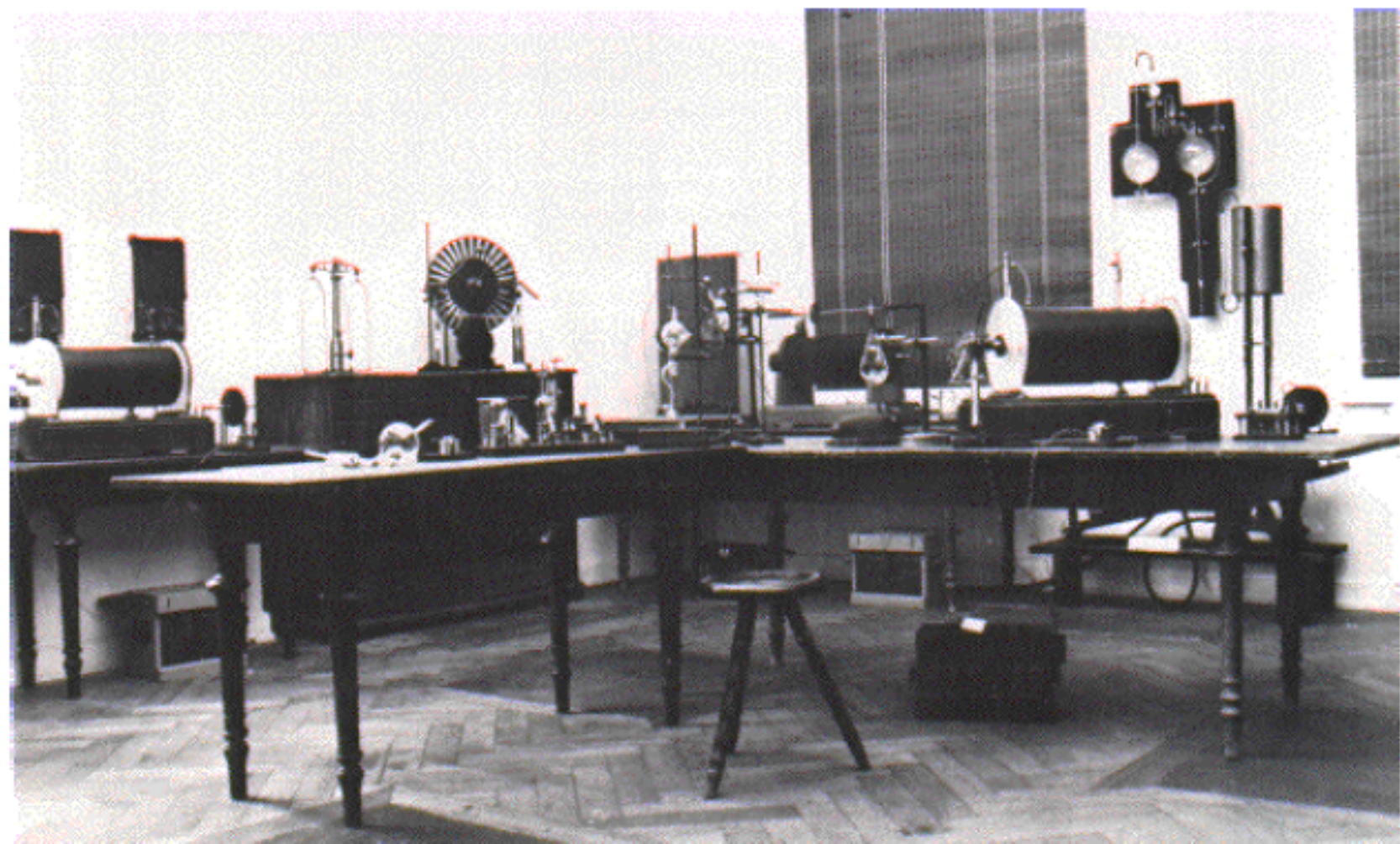
- 1 . 電子が発生する光・電磁波 . . . 低エネルギー (eV以下)
- 2 . 原子が発生する電子・X線 . . . 中エネルギー (keV程度)
- 3 . 原子核から発生する放射線- . . . 線-  
. . . 高エネルギー (MeV以上)

相対性理論より

$$E \text{ (エネルギー)} = m \text{ (質量)} c \text{ (光速)}^2$$

電子の質量	$9.1095 \times 10^{-31} \text{ kg}$	0.511 MeV
陽子の質量	$1.6727 \times 10^{-27} \text{ kg}$	938 MeV

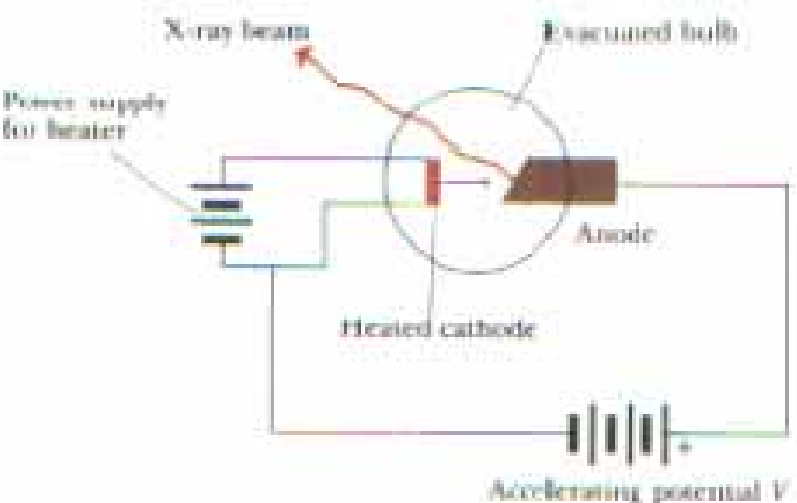
1895年



1895年



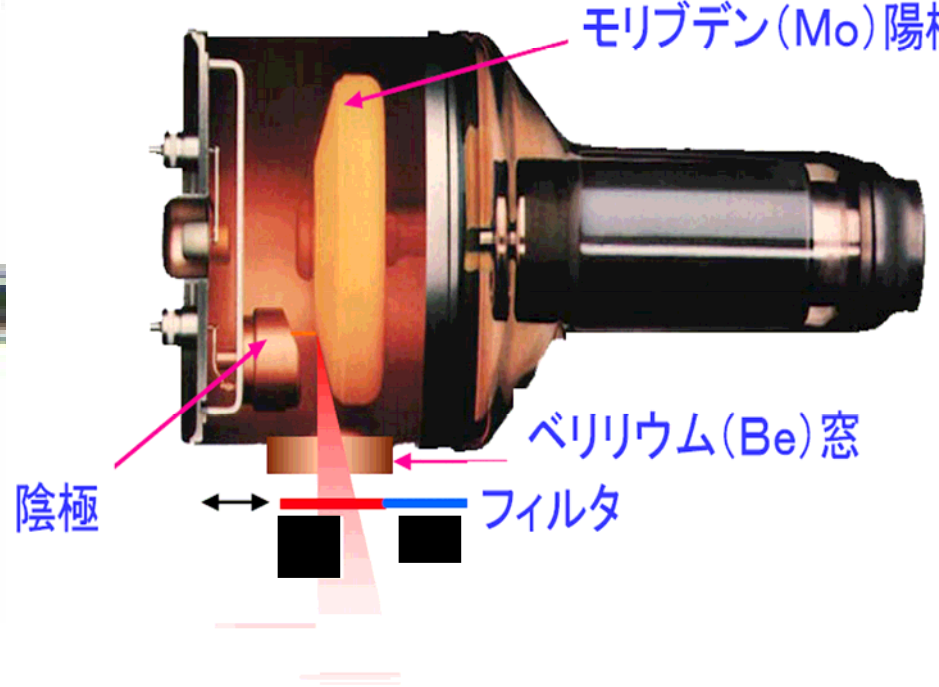
# 電子管X線源



(a)



(b)



# 光は電磁波である

## マクスウェル方程式

電場  $\vec{E}$  に関する法則

$$\text{クーロンの法則 } \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

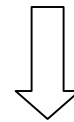
$$\text{電磁誘導の法則 } \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

磁場  $\vec{B}$  に関する法則

アンペール・マクスウェルの法則

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

磁力線の湧き出し無しの法則  $\nabla \cdot \vec{B} = 0$

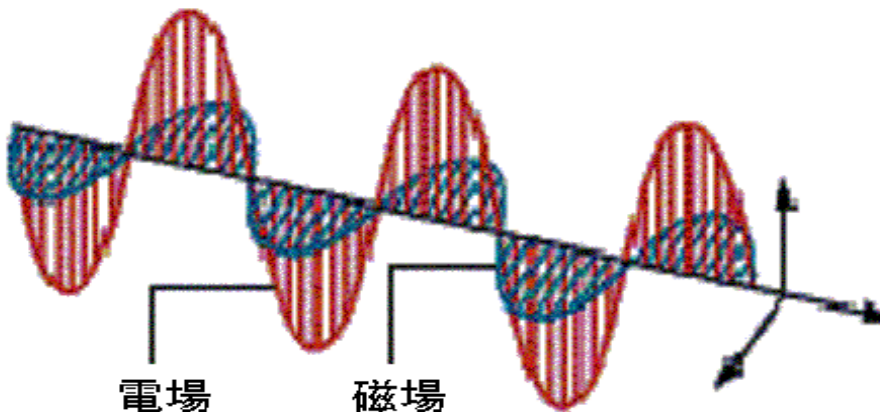


電磁波の方程式

$$\left( \nabla^2 - \frac{\partial^2}{c^2 \partial t^2} \right) \begin{pmatrix} \vec{E} \\ \vec{B} \end{pmatrix} = \vec{f}(\rho, \vec{J})$$

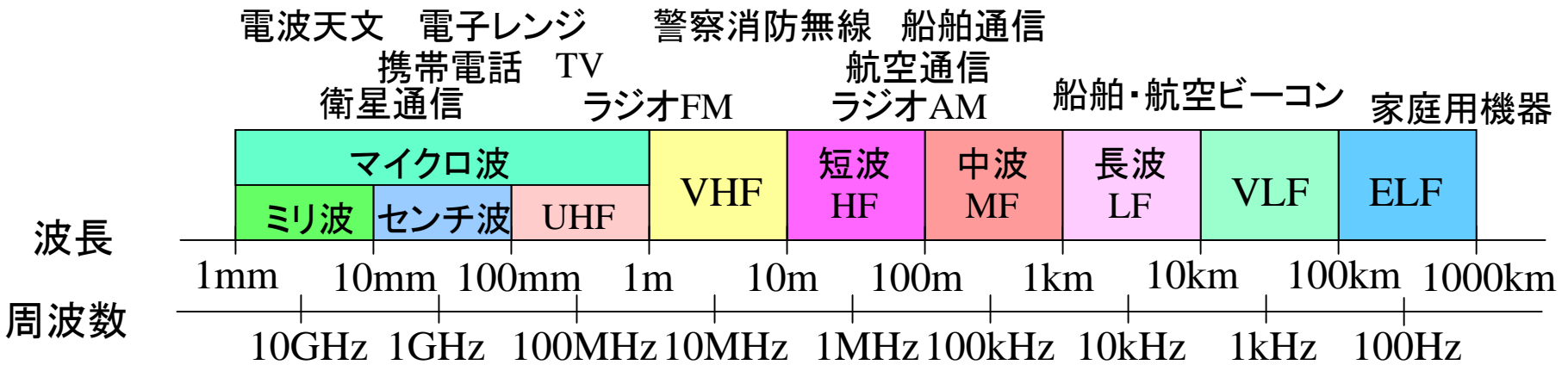
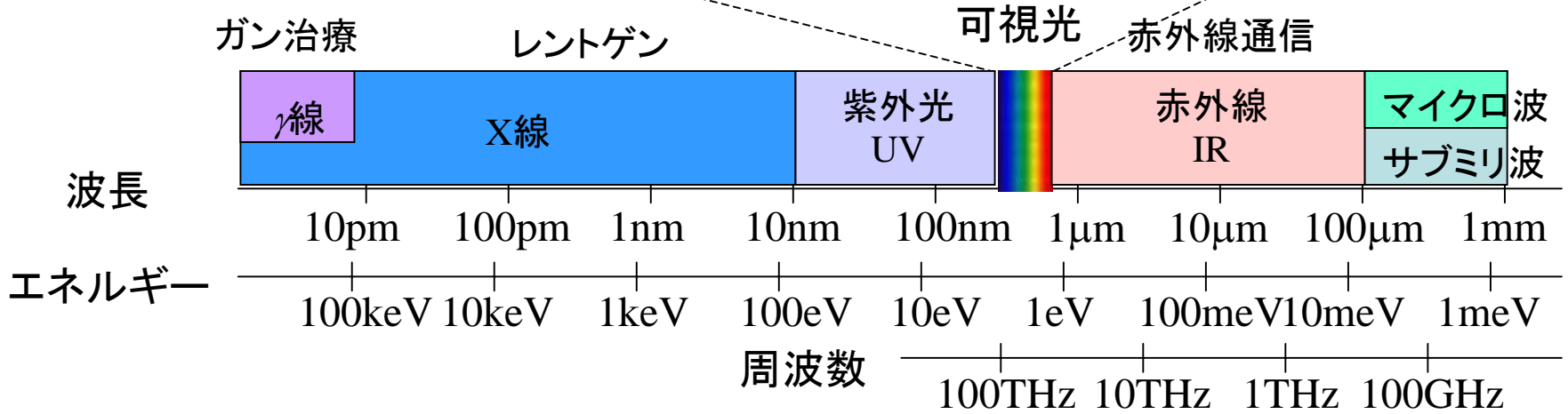
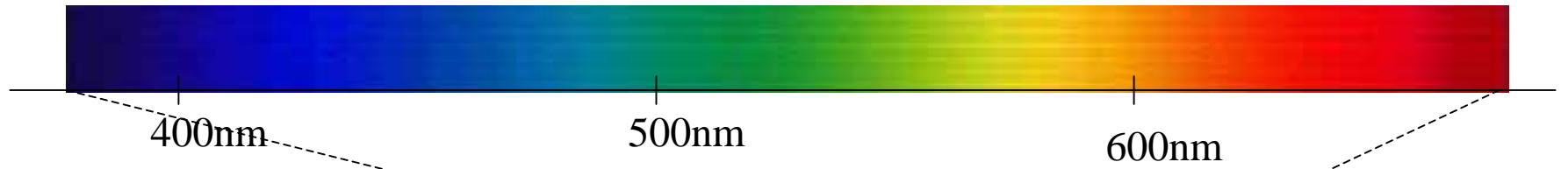
$$\begin{pmatrix} \vec{E} \\ \vec{B} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{E}_0 \\ B_0 \end{pmatrix} e^{i(k; \vec{x} - \omega; t)}, \quad k_i = \frac{2\pi}{\lambda_i}$$

b

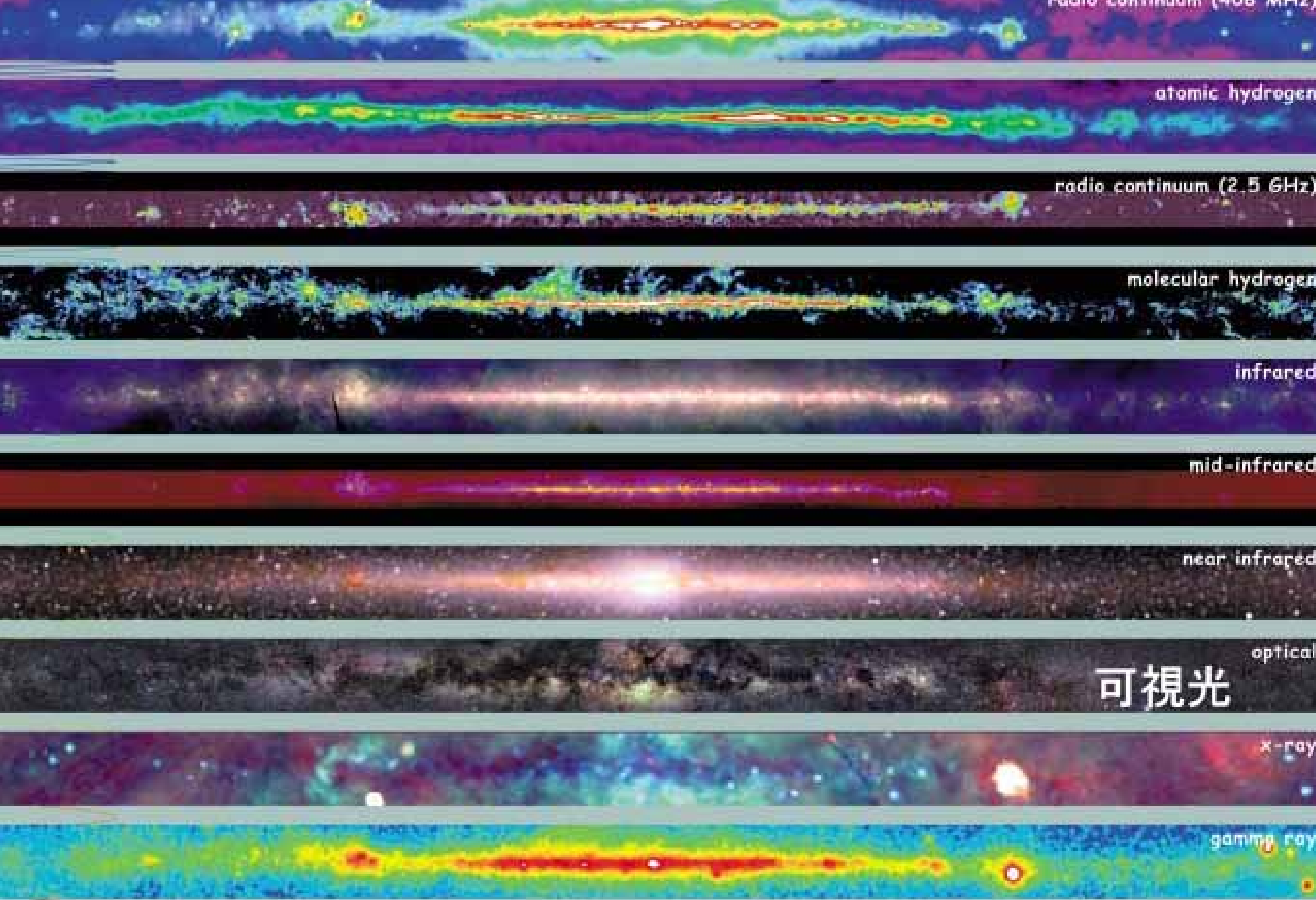


いろいろな波長の重ね合わせ

# 電磁波の波長と呼称







可視光

# Multiwavelength Milky Way

# 放射線はどれだけ危ないか

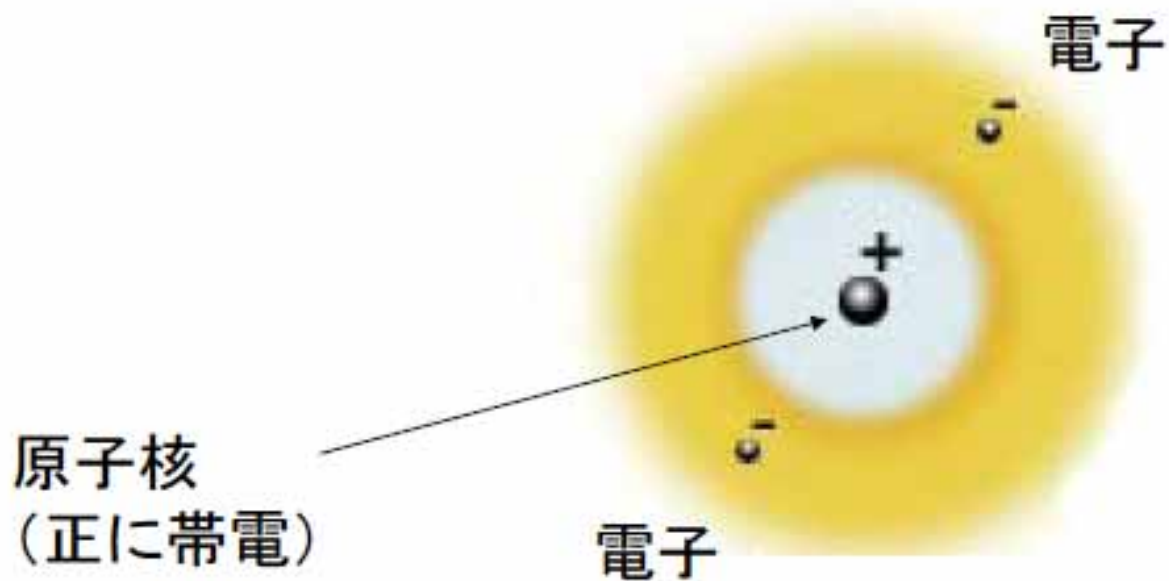
- 量
  - 線量
- 質
  - 線質
  - 放射線の種類
  - 単位長さを与えるエネルギーの大きさ

# 原子のモデル



とにかく小さな粒

1900



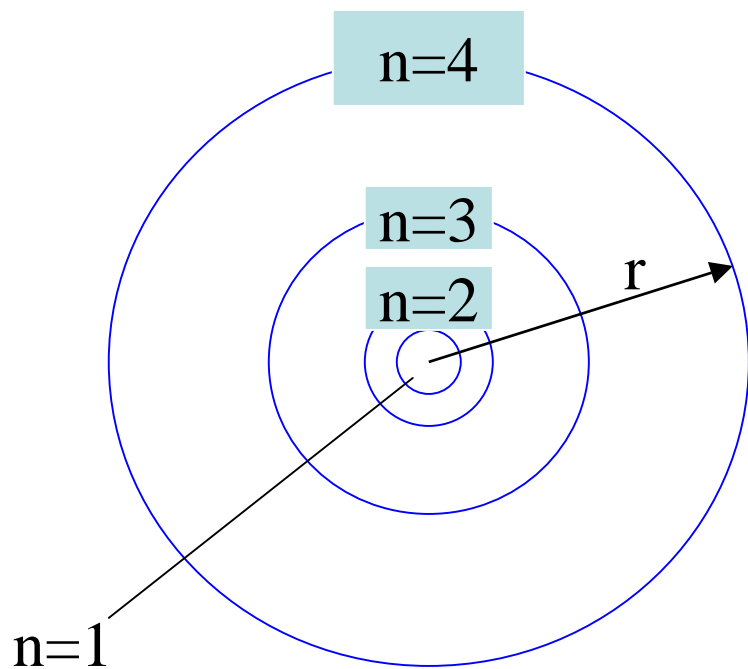
原子核  
(正に帯電)

電子

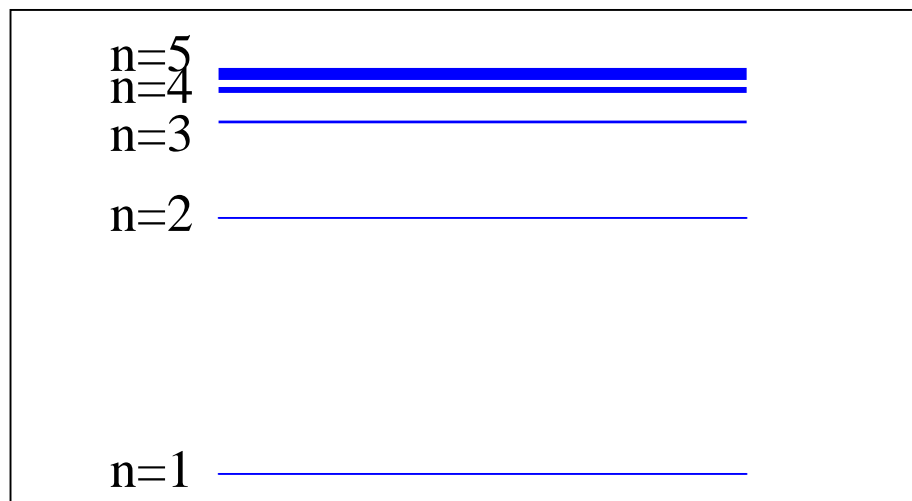
電子

# エネルギー準位と遷移

円軌道の場合、電子は半径 $r$ をとる。実際は角運動量が $h/2\pi$ の整数倍( $n$ 倍, $n$ :主量子数)をとる(量子化条件)から、軌道半径 $r$ は $n^2$ に比例する離散的な値のみをとる。原子もこれと同じく $-1/n^2$ に比例する離散的な値をとる。(エネルギー準位)



通常、原子は基底状態に存在するが光を吸収することで励起準位に遷移する。励起準位からは光を放出しながら下の準位に戻る。

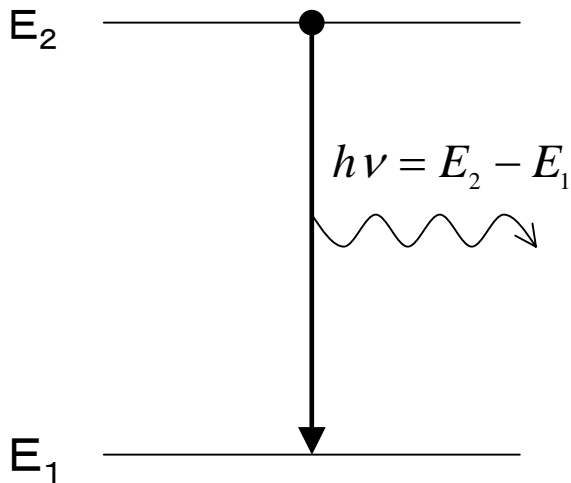


# 自然放出と誘導放出

Laser : **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

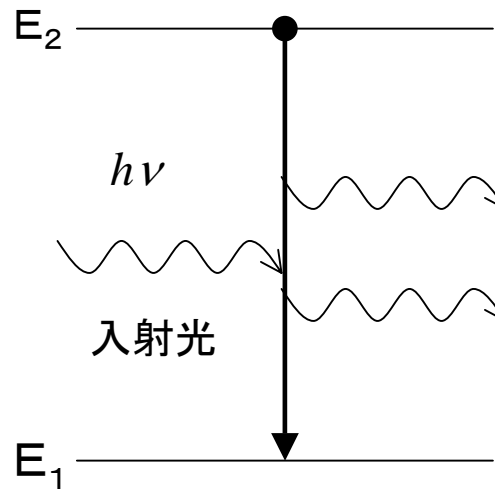
粒子(電子)のエネルギー準位 $E_1, E_2$ を考える。

自然放出



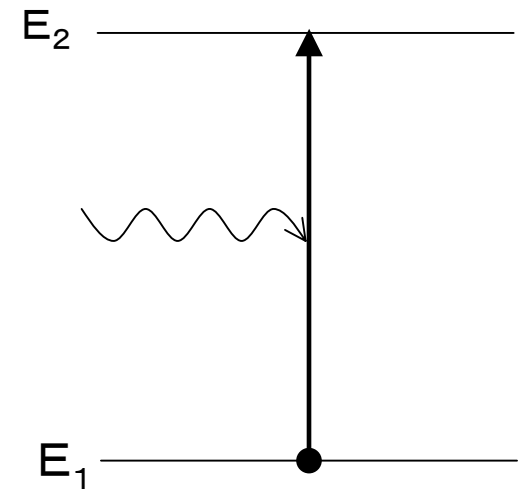
自然放出は $E_2$ から $E_1$ へ自発的な遷移によって起こる。

誘導放出



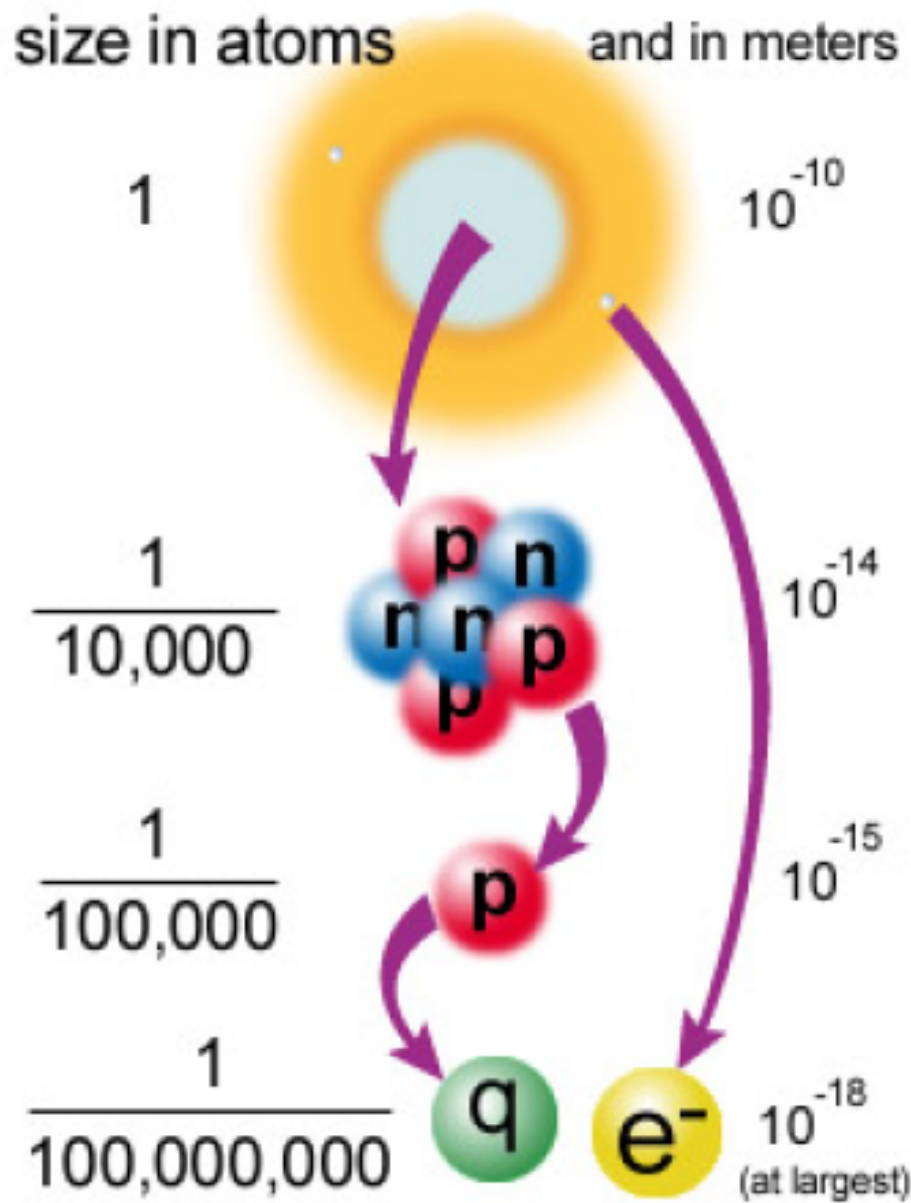
誘導放出は入射光からの刺激によって起こり、光増幅として利用される。

励起



吸収は入射光の刺激によって $E_1$ から $E_2$ への遷移が誘発されることによって起こる。

# 原子核を更に拡大して見ると。。。



# 原子核の崩壊(壊変)

- 放射性同位元素 (radioisotope: RI、**アイソトープ**)
  - 原子核は中性子と陽子からできている。
  - が、中性子と陽子の数のバランスが悪いと壊れてしまう。
  - 壊れるときに核の中身～粒子を放出する
- 崩壊はランダム
  - 一つ一つの崩壊がいつ起こるかはわからない

# 崩壊定数と半減期

- 崩壊定数  $\lambda$ 
  - 一個の原子核が単位時間あたりに崩壊する確率
  - いつも一定の割合で壊れていく
- 半減期  $T_{1/2}$ 
  - もとに存在した量が半分になるまでの時間



# $\alpha$ 崩壊

- $\alpha$  崩壊
  - $\alpha$  粒子 ( ${}^4\text{He}$ 原子核) が放出される (原子核が軽くなる)。
  - 放出される  $\alpha$  線のエネルギーは決まっている。

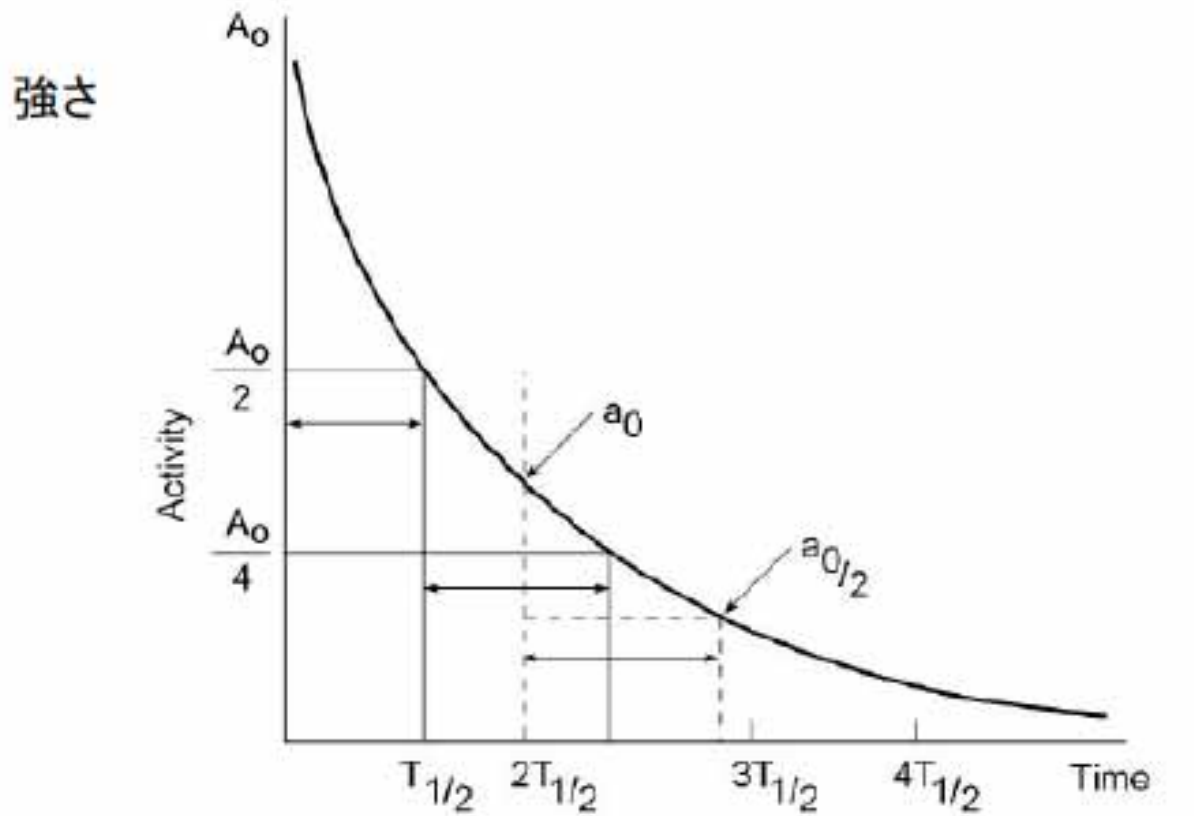
## $\beta$ 崩壊

- $\beta^-$ 崩壊(電子を出す)と $\beta^+$ 崩壊(陽電子を出す)
  - ニュートリノも放出

# $\gamma$ 崩壊

- 崩壊に伴い原子核が励起状態から安定する際に  $\gamma$  線が放出される。

# 放射能

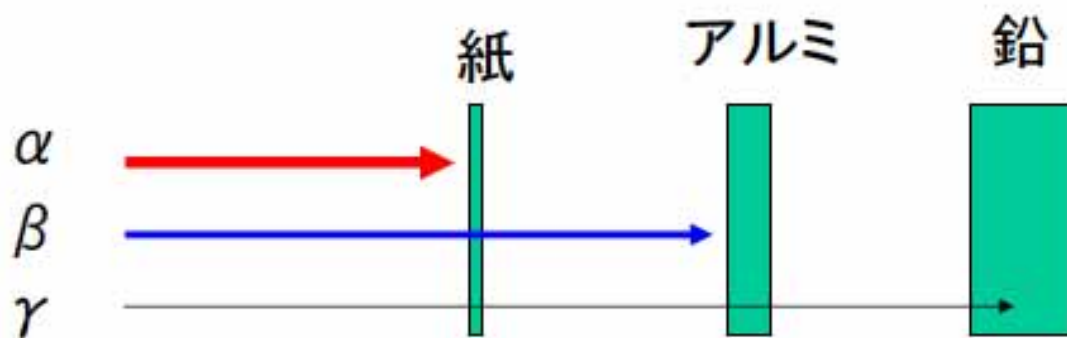


1分? 1時間? 時間  
1年? 100年

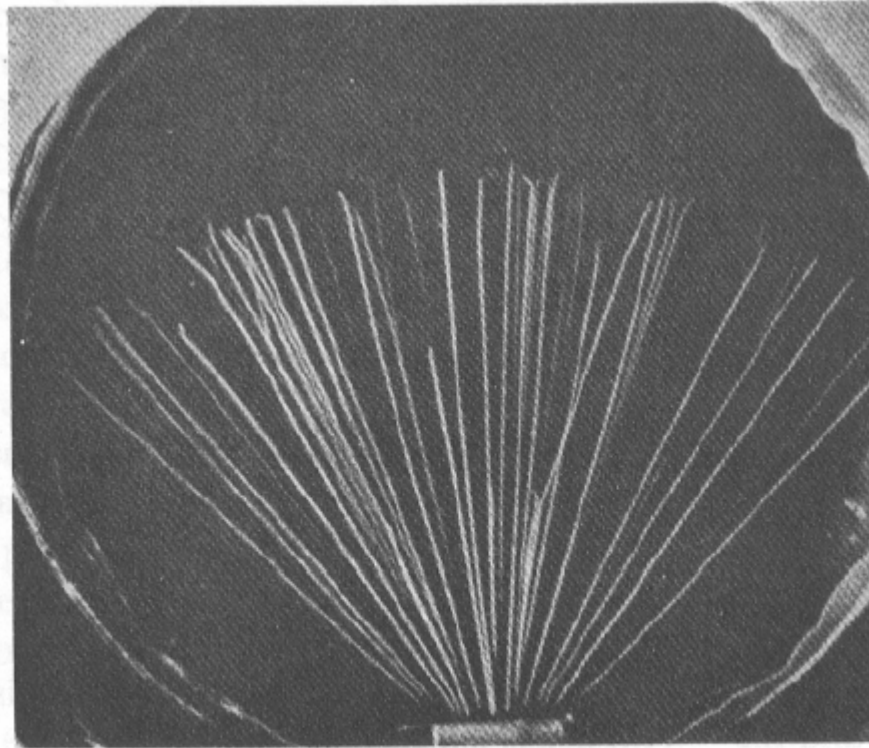
# $\alpha$ 線・ $\beta$ 線・ $\gamma$ 線

どう違うのか？

- 透過力が異なる。
  - $\alpha$ 線は、紙1枚でとまる。 $\beta$ 線は、アルミ板でとまる。 $\gamma$ 線は鉛でないととまらない。

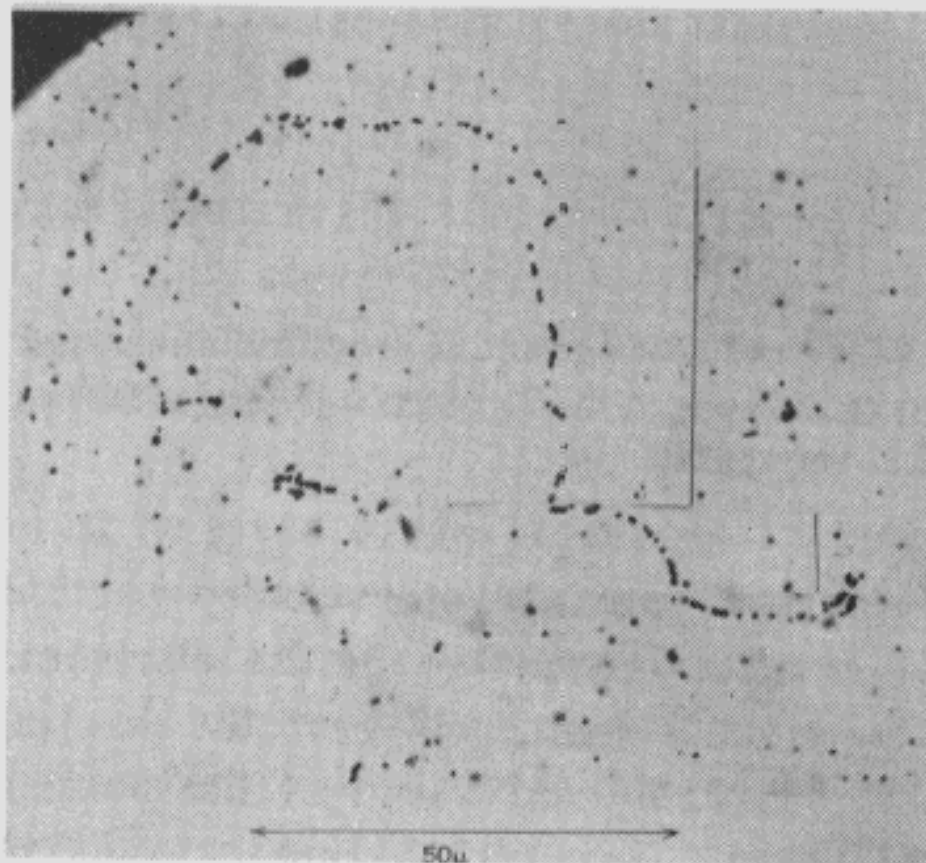


# $\alpha$ 線



**Figure 10-3.** Cloud chamber photograph of alpha-particle tracks from  $^{210}\text{Po}$ . (From F. Rasetti, *Elements of Nuclear Physics*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N. J., 1947.)

# $\beta$ 線

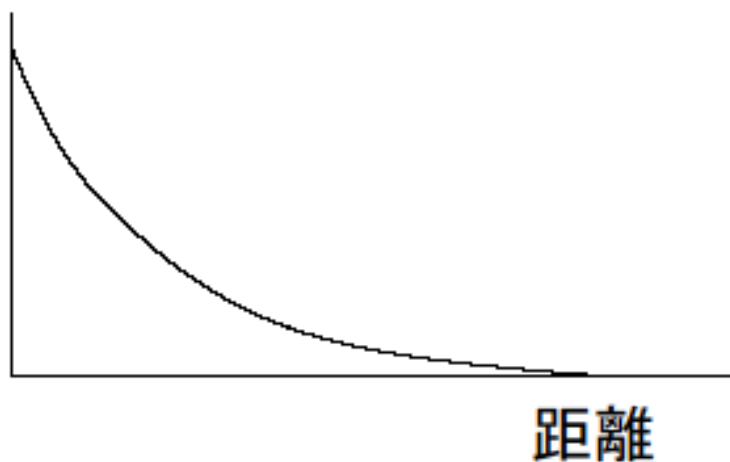


**Figure 13-6.** The tortuous path of an electron leads to an average range much shorter than the path length.

# $\gamma$ 線は物質を等価する際に少しずつ減ってくる

- 進む距離ごとにその数が一定の割合で減る。

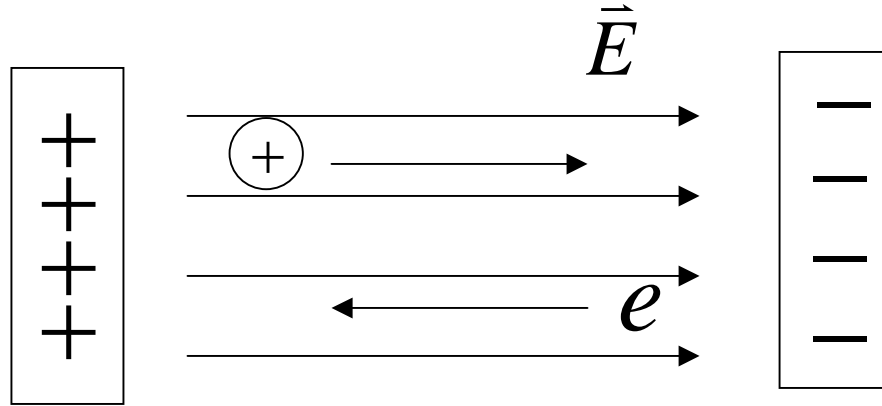
ガンマ線の数





# ビームの加速と制御

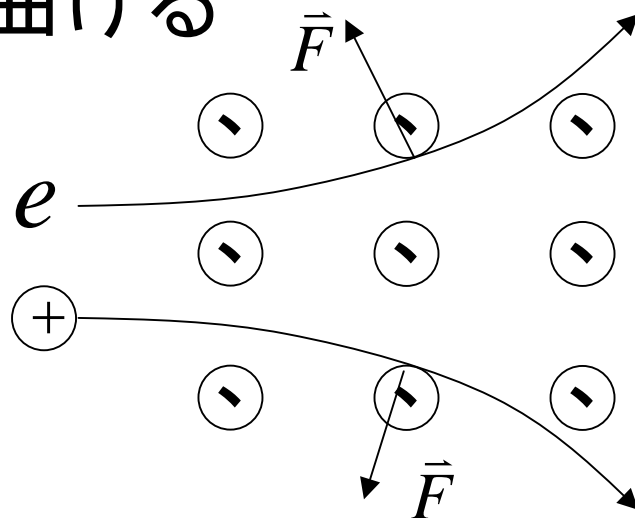
## 電場で加速する



連続に高い電圧をかけると放電してしまふ。  
真空ポンプを使っても数MVが限界。

そこで高周波を使うと  
100MV/m程度可能。  
放電する前に電場が変わるから。

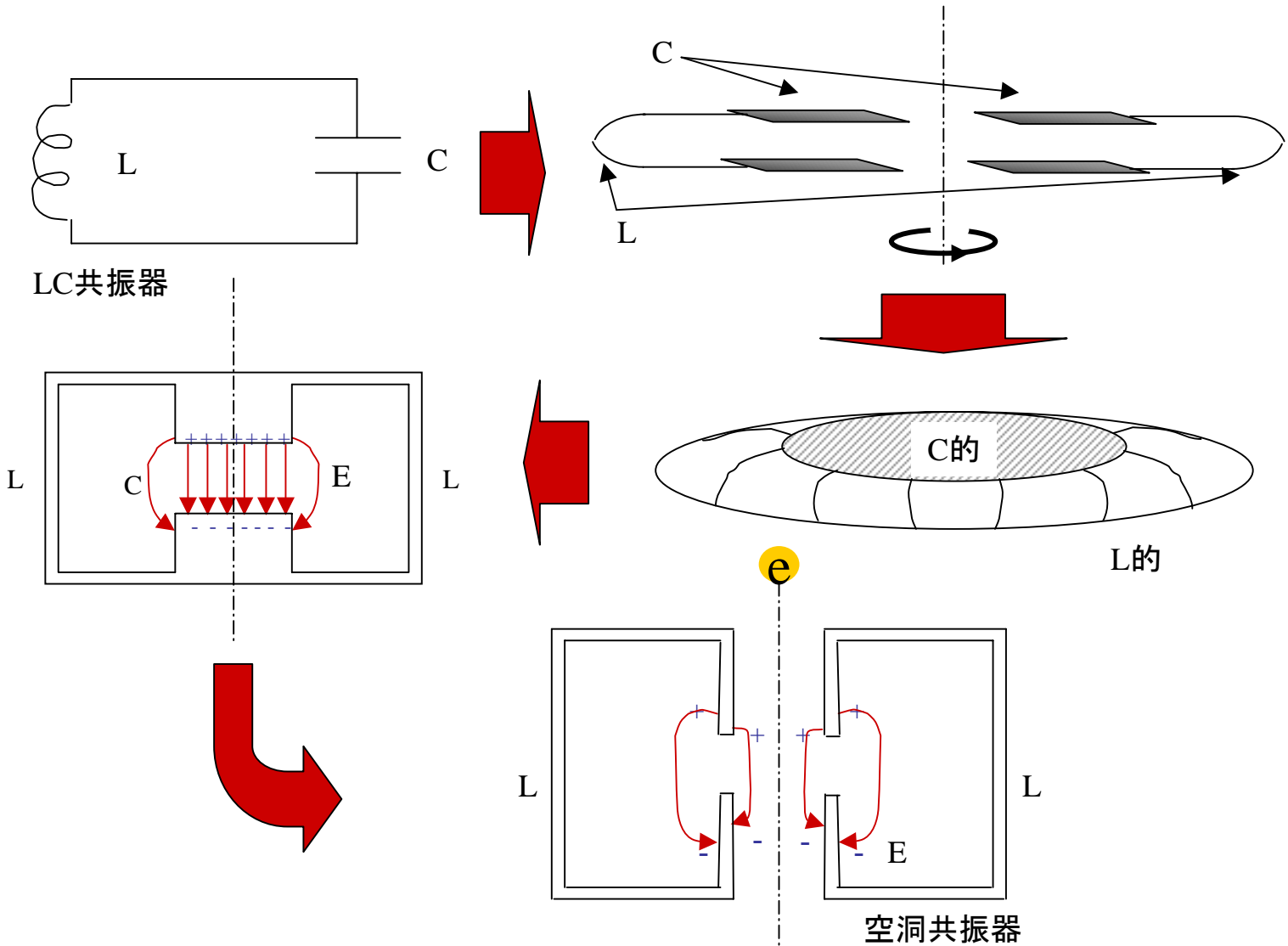
## 磁場で曲げる



## フレミング左手の法則

磁場

# 空洞共振器(立体回路)の電場で電子を加速



# 線形加速器ライナック

Linear Accelerator

東京大学原子力専攻

## Sバンド・ツインライナック



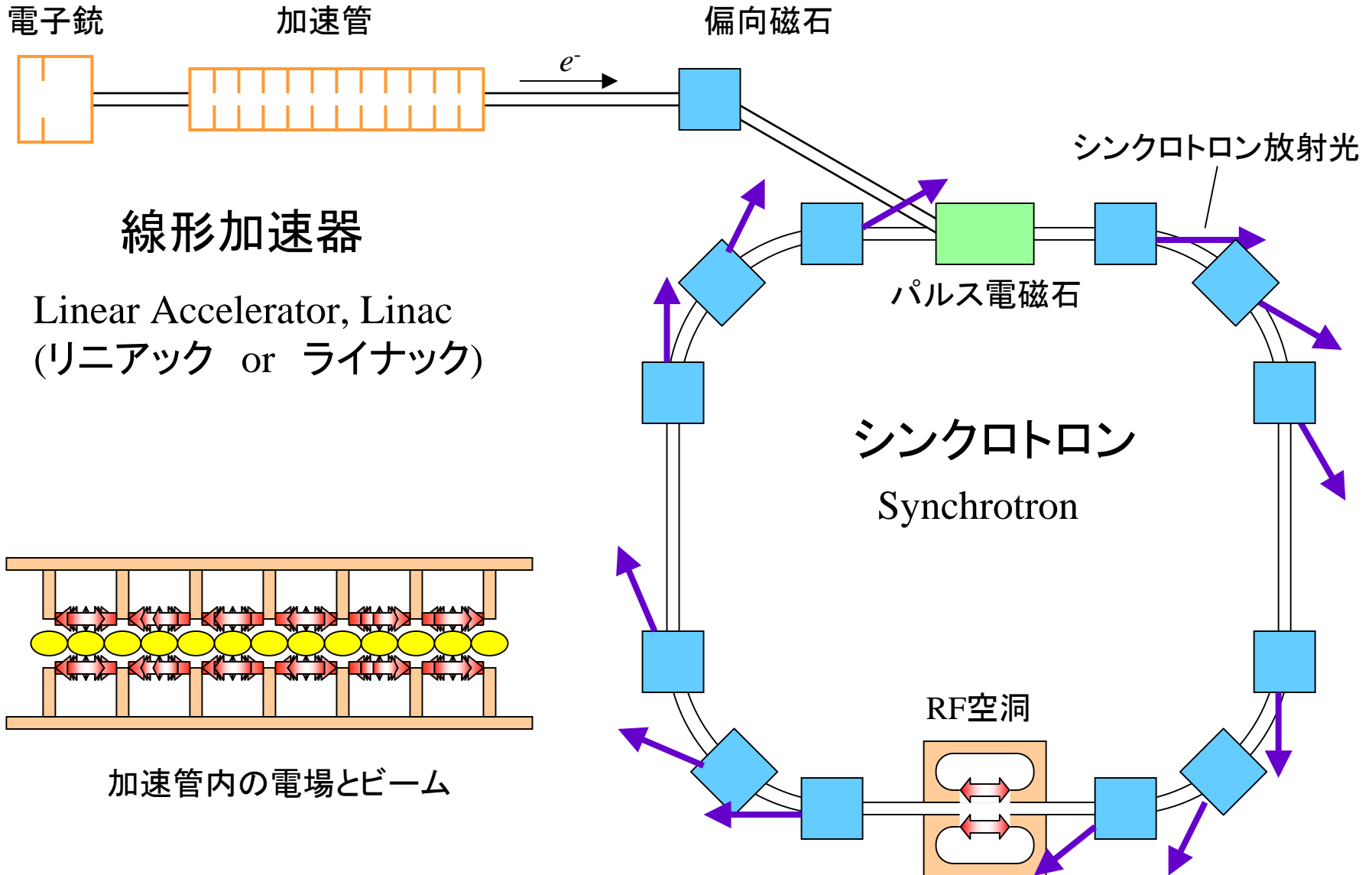
35MeV, 18MeVのフェムト秒電子ビームの生成。



▲新15MWクライストロンと導波管立体回路  
位相安定性・同期の向上

# 加速器の原理

電界で加速し、磁場で方向を変える



## 線形加速器

Linear Accelerator, Linac  
(リニアック or ライナック)

加速管内の電場とビーム

## シンクロトロン Synchrotron

RF空洞

シンクロトロン放射光

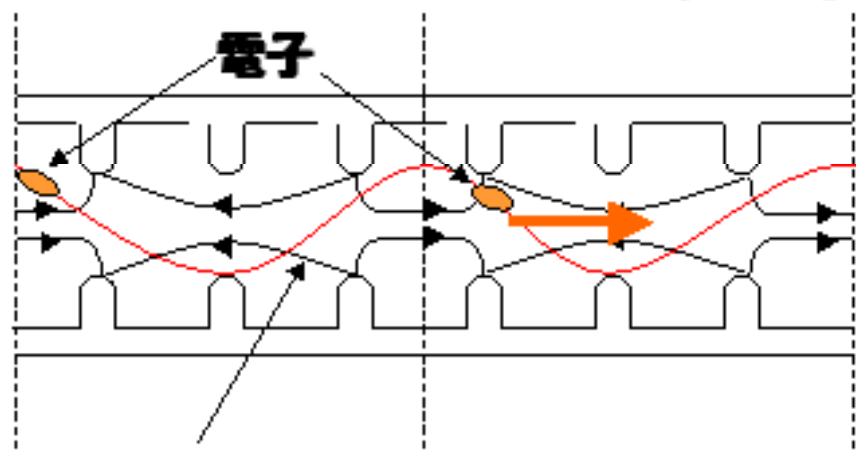
パルス電磁石

偏向磁石

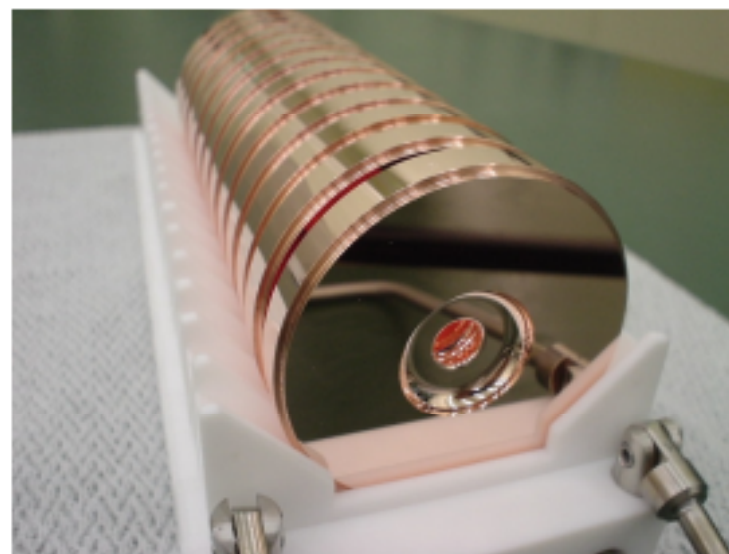
加速管

電子銃

# 加速器の原理



加速管内を**光速**で走る電磁波



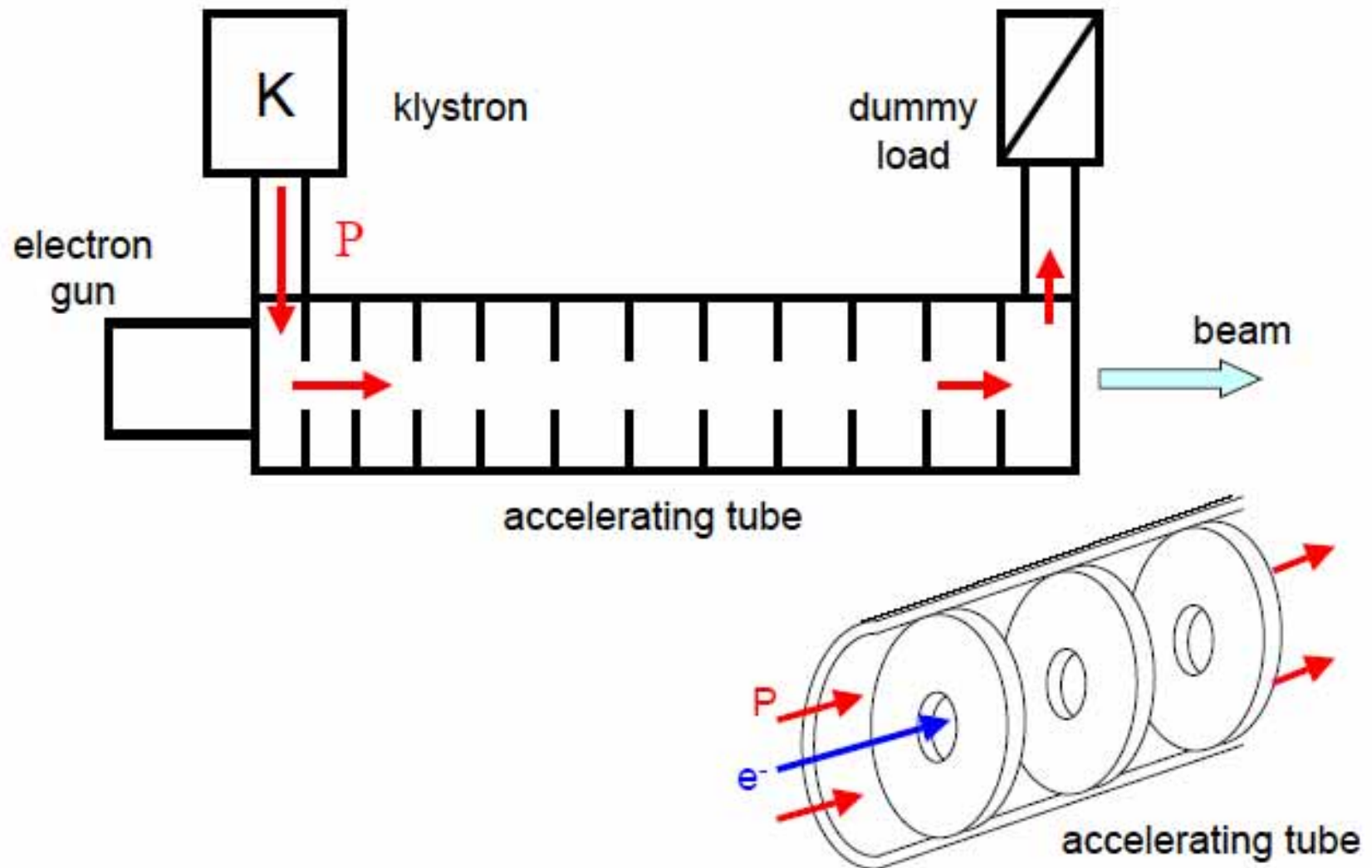
光速の電磁波で電子を加速する加速管  
(ダイヤモンド加工)

電子ビームは光速の電磁波に  
波乗りし加速される

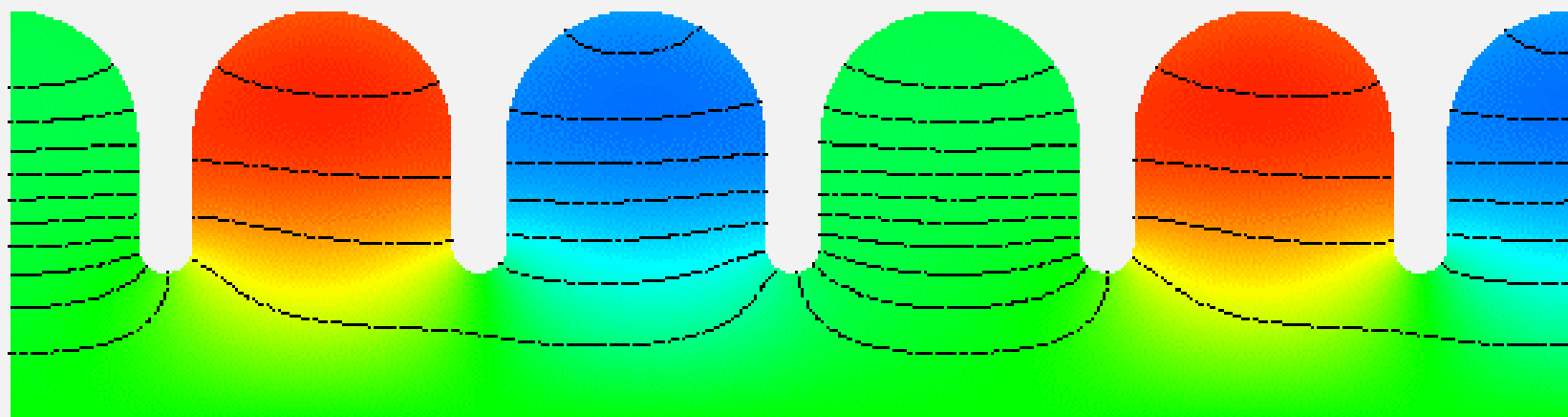


高波で浜に向かい進行するサーファー達

# 進行波型Linac

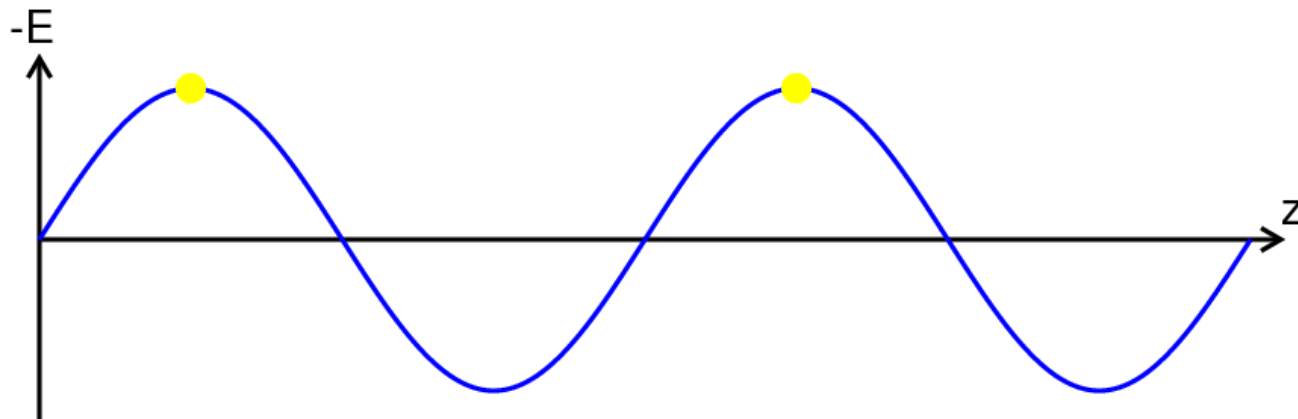
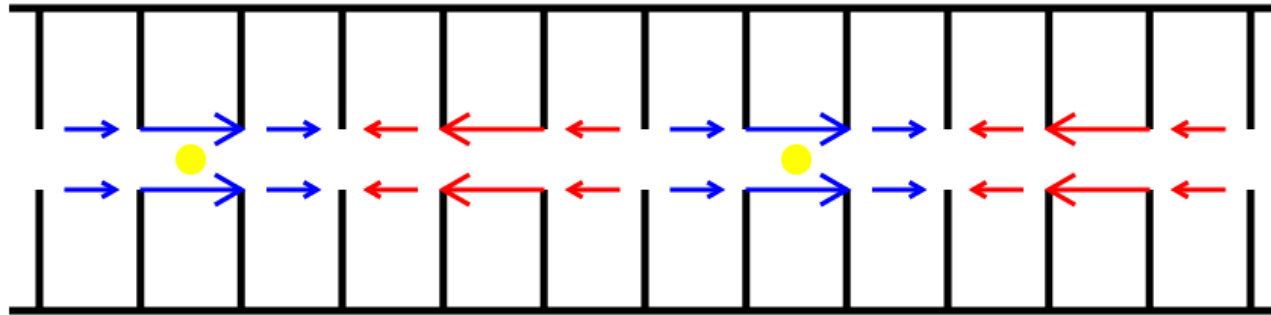


# 実際の電磁場分布



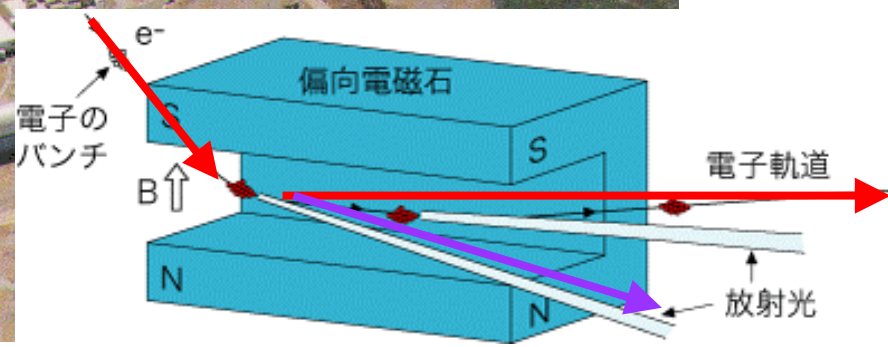
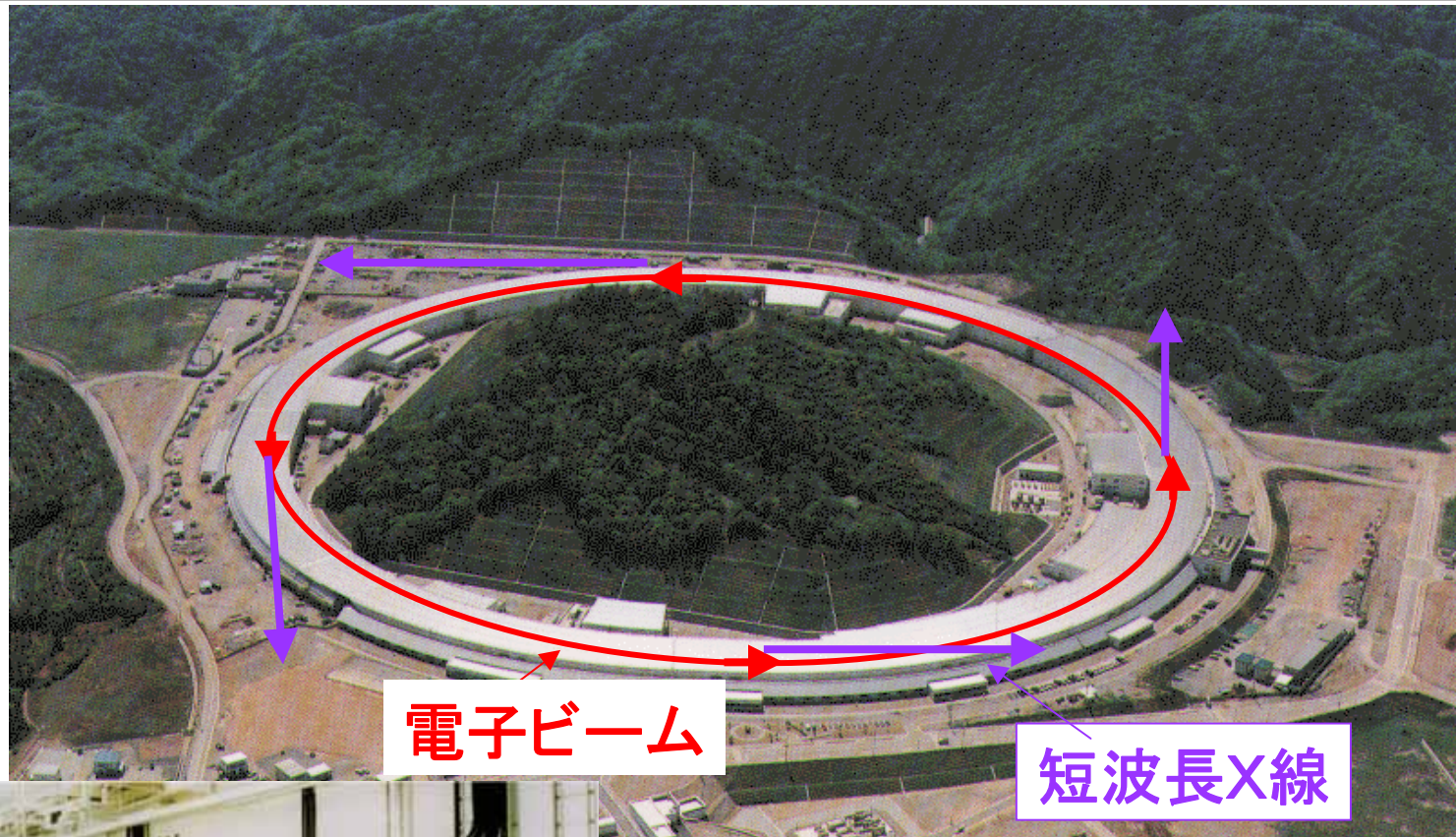
$2\pi/3$ モードの加速管中の電磁場の計算結果

# 進行波型 $2\pi/3$ モード

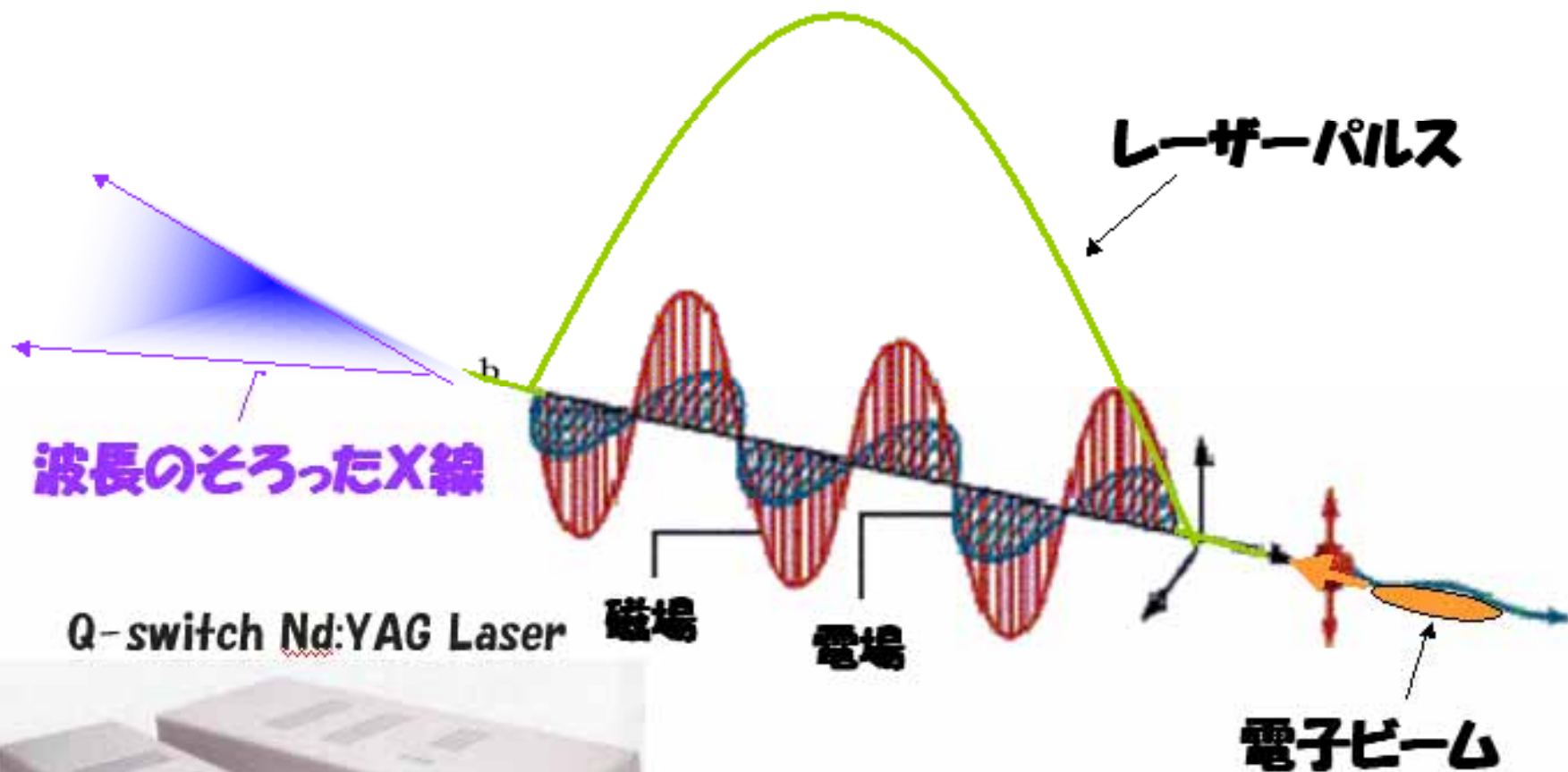




# SPring-8 (Super Photon ring 8GeV) スプリングー8



# 電子をレーザーにぶつけて波長のそろったX線を出す



Q-switch Nd:YAG Laser



手前→LABシリーズ、F

(Spectra Physics Quanta-ray Pro-290)

# 電子ボルト[eV]とジュール[J]とワット[W] = [J/s]

## 電子ボルト

粒子1個のエネルギー	$1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$	実はとても小さい
相対論( $E=mc^2$ )から重さの単位にもなる	$m_e(\text{電子}) = 0.511\text{MeV}$	
素粒子・原子・分子を変化させる指標	$m_p(\text{陽子}) = 920\text{MeV}$	
原子核反応を起こす粒子のエネルギー	MeV以上	
固体結合の原子を剥がすエネルギー	keV以上	
化学結合の剥がすエネルギー	eV以上	
熱運動のエネルギー	meV以下	

## ジュール、ワット

物をマクロに変化・破壊する指標

# 環境応用

## 1、有毒ガスの電子ビーム処理

- ・ビームの種類と相互作用の差異

## 2、環境ホルモンの電子ビーム処理

- ・ダイオキシンとは何か。

風



太陽

NOx

航空機



SO<sub>2</sub>

HCl

火山

硫酸  
硝酸

SOx  
NOx



船舶

SOx  
NOx  
HCl



工場

SOx  
NOx



自動車

森林



酸性雨



湖

河川

数百km~数千km

# 電子ビーム排ガス処理

## 酸性雨の被害が深刻な問題



旧西ドイツのシュバルツバルトにおける酸性雨等による森林被害



旧西ドイツのルール地方郊外にあるヘンテン城の石像  
(1702年製作)  
1909年撮影

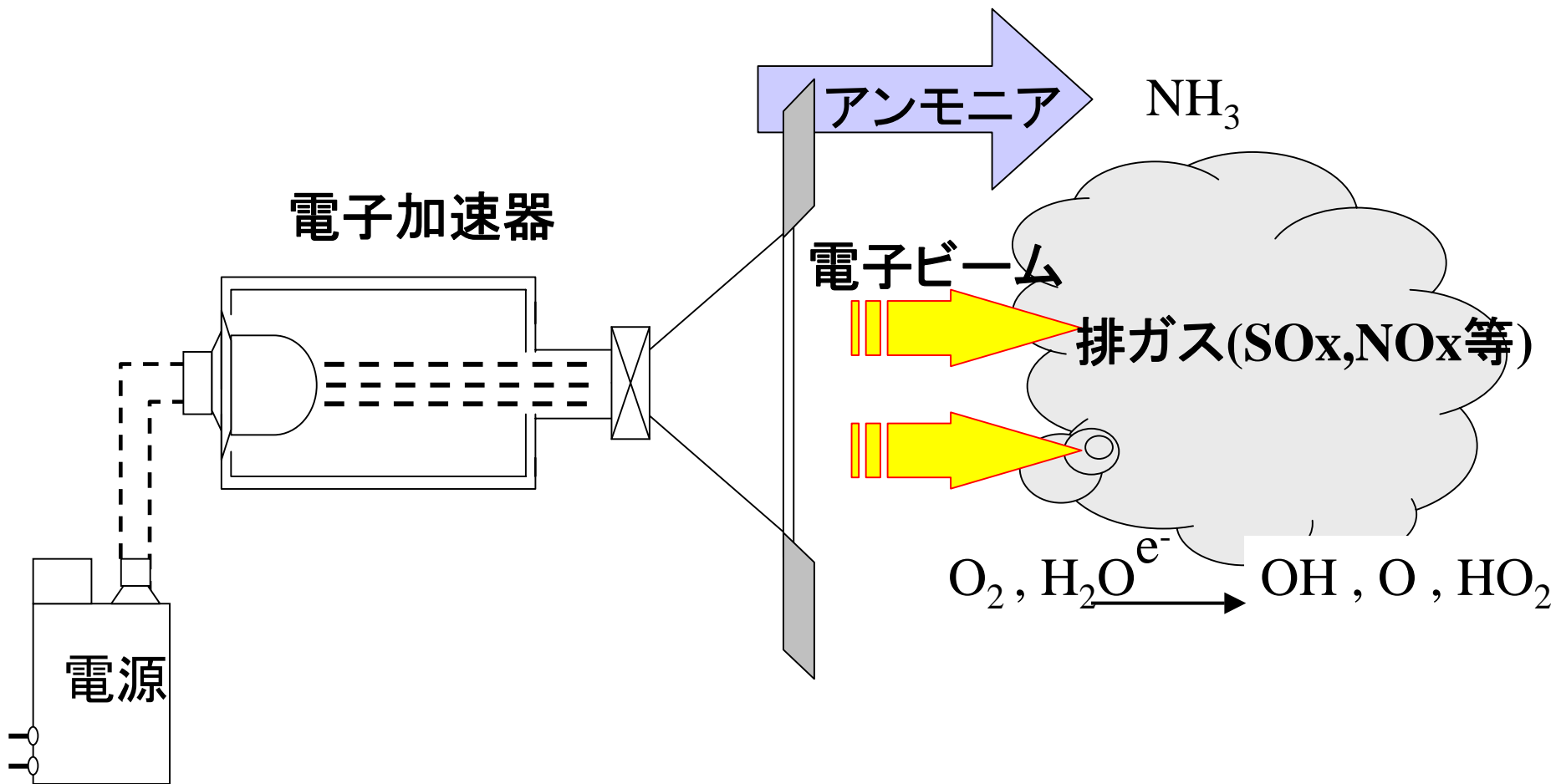
Ornament figure at the Herten Castle  
; Westfälisches Amt für Denkmalpflege.



1969年撮影  
(60年後の写真)

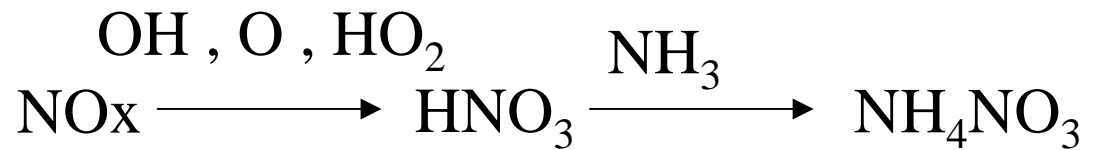
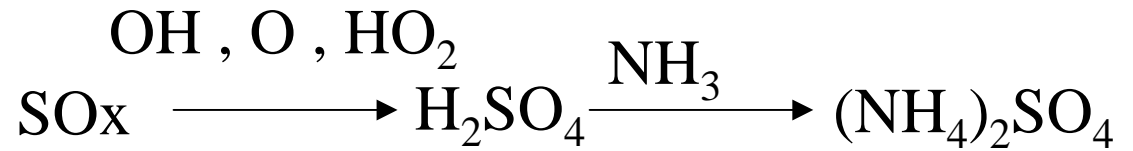
これらは火力発電所からの排煙中のSO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>が主な原因

電子ビームを照射しSO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>を除去  
副生品として硫安、硝安を回収  
ゼロエミッションに適合



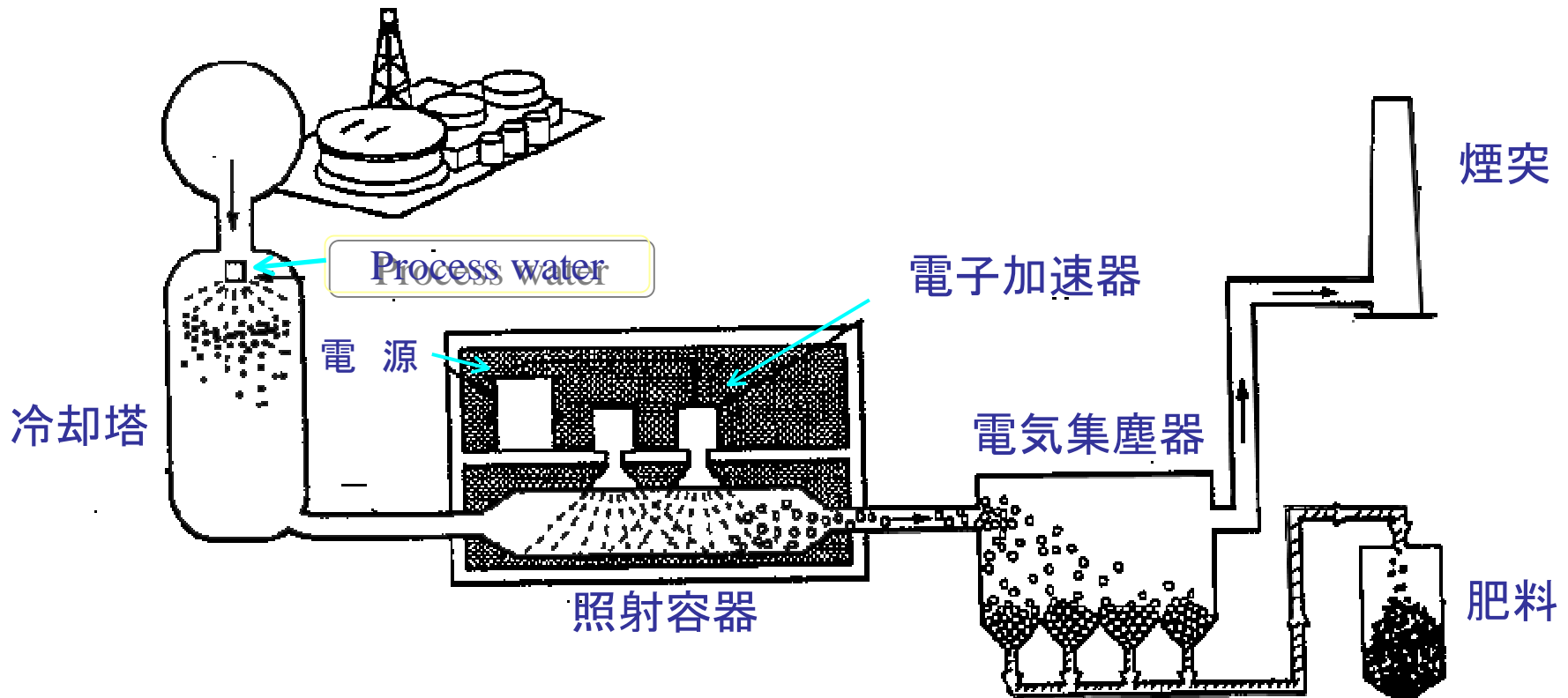
# 硫安、硝安の生成

副生品の硫安、硝安  
は肥料として利用





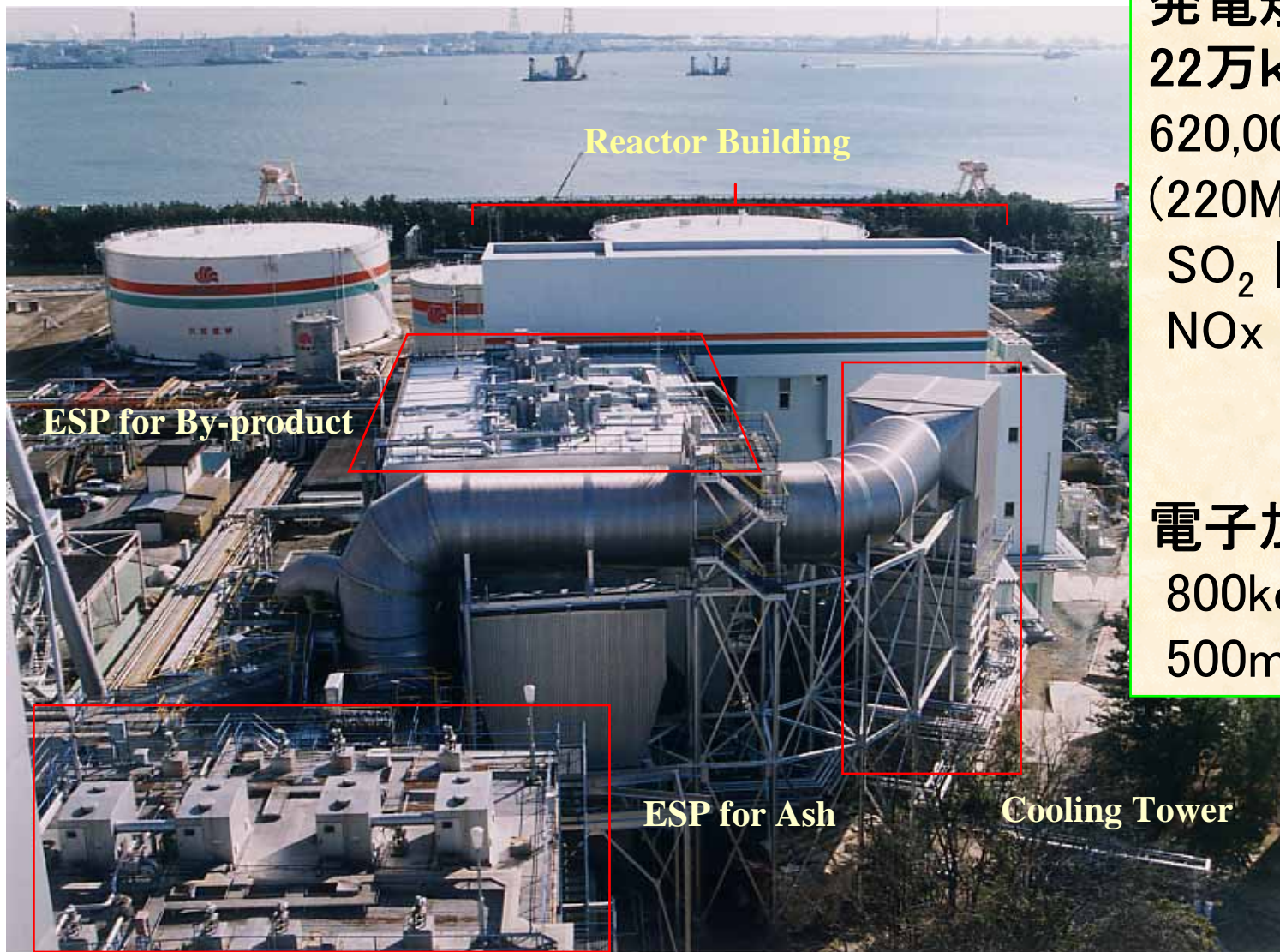
# 「放射線を利用した排ガス浄化の新しい方法」



除去率:  $\text{SO}_2$  90%  
温度:  $65\sim 70^\circ\text{C}$

線量:  $10\sim 15\text{hGy}$

# 中部電力に設置された電子線法による重油発電排ガス処理



**発電規模**

**22万kW**

**620,000m<sup>3</sup>/h**

**(220MWe)**

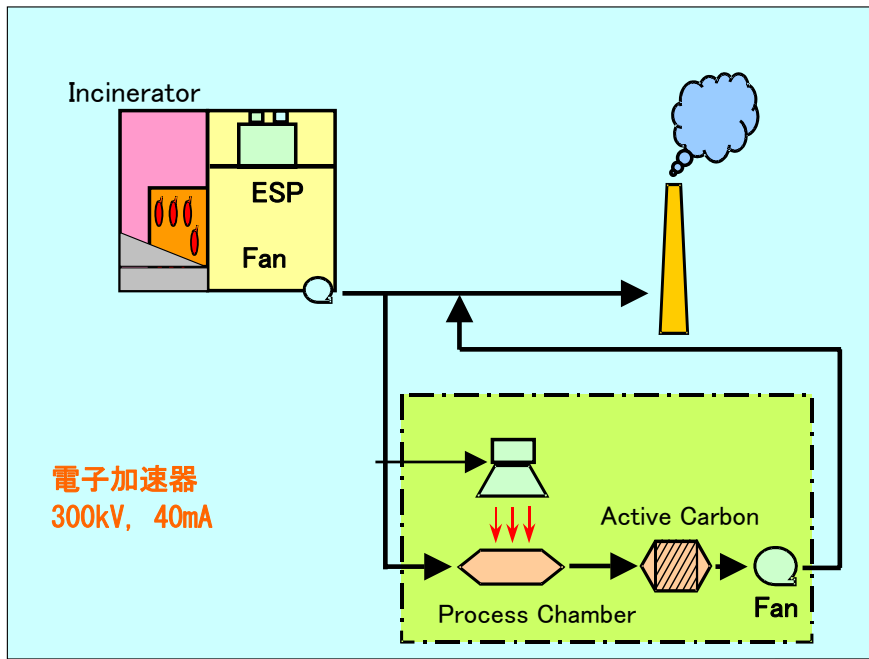
**SO<sub>2</sub> 除去 > 92%**

**NO<sub>x</sub> 除去 > 60%**

**電子加速器**

**800keV**

**500mA × 6基**



ゴミ焼却炉排ガスから電子線によるダイオキシン除去のパイロットプラント



𧄀(月)↙K↳嗶噴@凜標

Ṽo俳[𧄀]𧄀(月) 器oNべ哮兵(月) ii V ↗%些于%λ

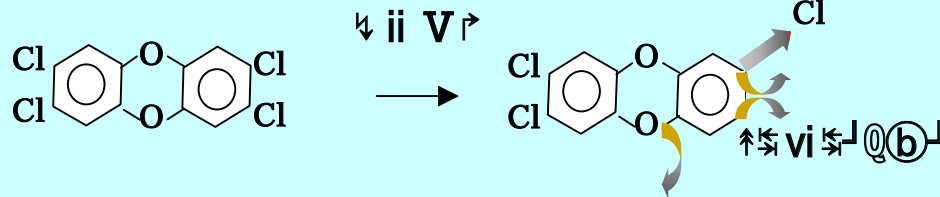
Ṽo吓𧄀ocal○QNo.NṼ收(月)o儁收(月)(18)Q&λ (↗24點噯卵噴)

Ṽo24點噯(14)兵(月)侯二FfmNo.+

Ṽo 侯↗↳ v iii (月)卷4.F噴<

ṼṼ (儁 II ↓ ↗VIIIK𧄀(月)佈@嗶噴F 5.剝 )

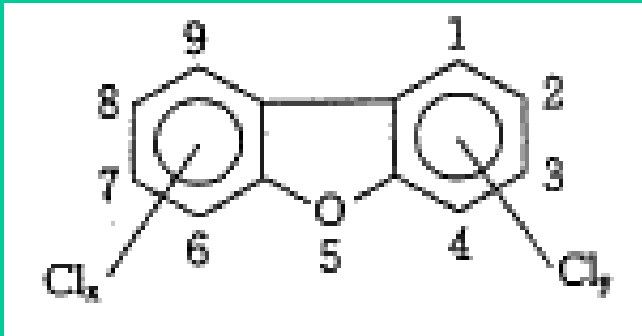
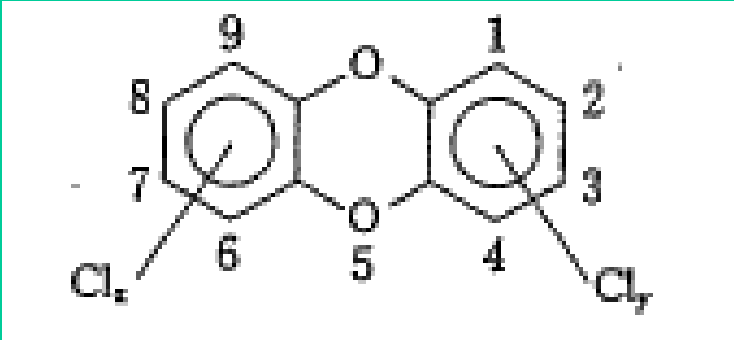
嗶佛%λ x %IV VII i 𧄀(月)



KJL'U'ijm D ①(18) ii 𧄀(月)viii  
↗ x %IV VII i 𧄀(月)

II Km ↗ I 𧄀(月)全儁

$X^{5/8}IV VII i$  𠵽𠵽



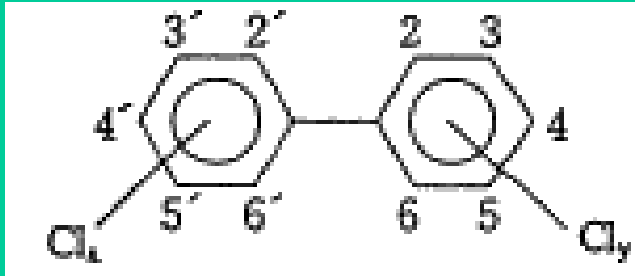
» ①(18) ii 𠵽𠵽viii 𠵽𠵽 - ii IV VII i 𠵽𠵽

ⓄPCDDs Ⓞ

$X^{5/8}IV VII i$  𠵽𠵽

» ①(18) ii 𠵽𠵽viii 𠵽𠵽𠵽𠵽

(PCDFs)



$L$  𠵽𠵽 ←  $K'''$  .

$L$  𠵽𠵽 ←  $K$  PCB ⓄCo-planarPCⓄ

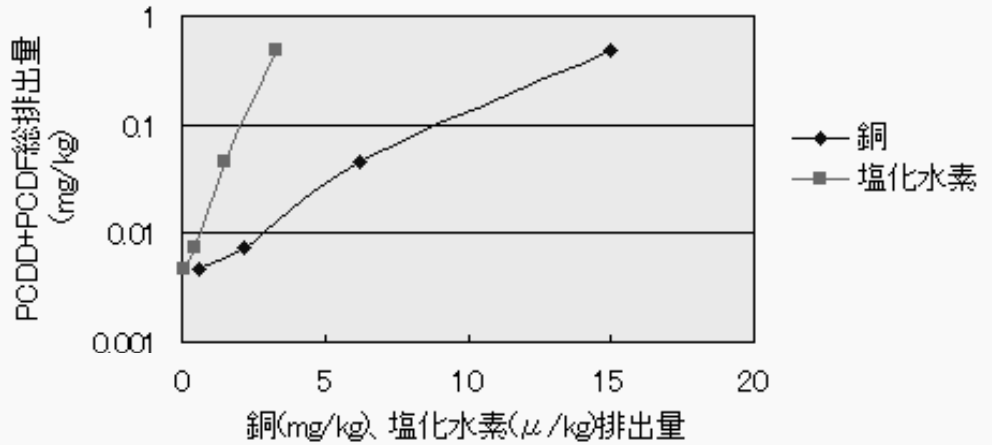


# × ⅤⅦ i ㊦㊧㊨㊩㊪㊫㊬㊭㊮㊯㊰㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿

- (1) ㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿ ㊦㊧㊨㊩㊪㊫㊬㊭㊮㊯㊰㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿
- (2) ㊦㊧㊨㊩㊪㊫㊬㊭㊮㊯㊰㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿
- (3) ㊦㊧㊨㊩㊪㊫㊬㊭㊮㊯㊰㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿
- (4) ㊦㊧㊨㊩㊪㊫㊬㊭㊮㊯㊰㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿
- (5) ㊦㊧㊨㊩㊪㊫㊬㊭㊮㊯㊰㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿
- (6) ㊦㊧㊨㊩㊪㊫㊬㊭㊮㊯㊰㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿
- (7) ㊦㊧㊨㊩㊪㊫㊬㊭㊮㊯㊰㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿

㊦㊧㊨㊩㊪㊫㊬㊭㊮㊯㊰㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿

90 ㊦㊧㊨㊩㊪㊫㊬㊭㊮㊯㊰㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿  
 ㊦㊧㊨㊩㊪㊫㊬㊭㊮㊯㊰㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿ CO ㊦㊧㊨㊩㊪㊫㊬㊭㊮㊯㊰㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿  
 ㊦㊧㊨㊩㊪㊫㊬㊭㊮㊯㊰㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿ 30ppm(17)  
 ㊦㊧㊨㊩㊪㊫㊬㊭㊮㊯㊰㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿ ㊦㊧㊨㊩㊪㊫㊬㊭㊮㊯㊰㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿



ダイオキシン類排出量と銅及び塩化水素排出量



ベ危区↑K↗  
v ↗ix K



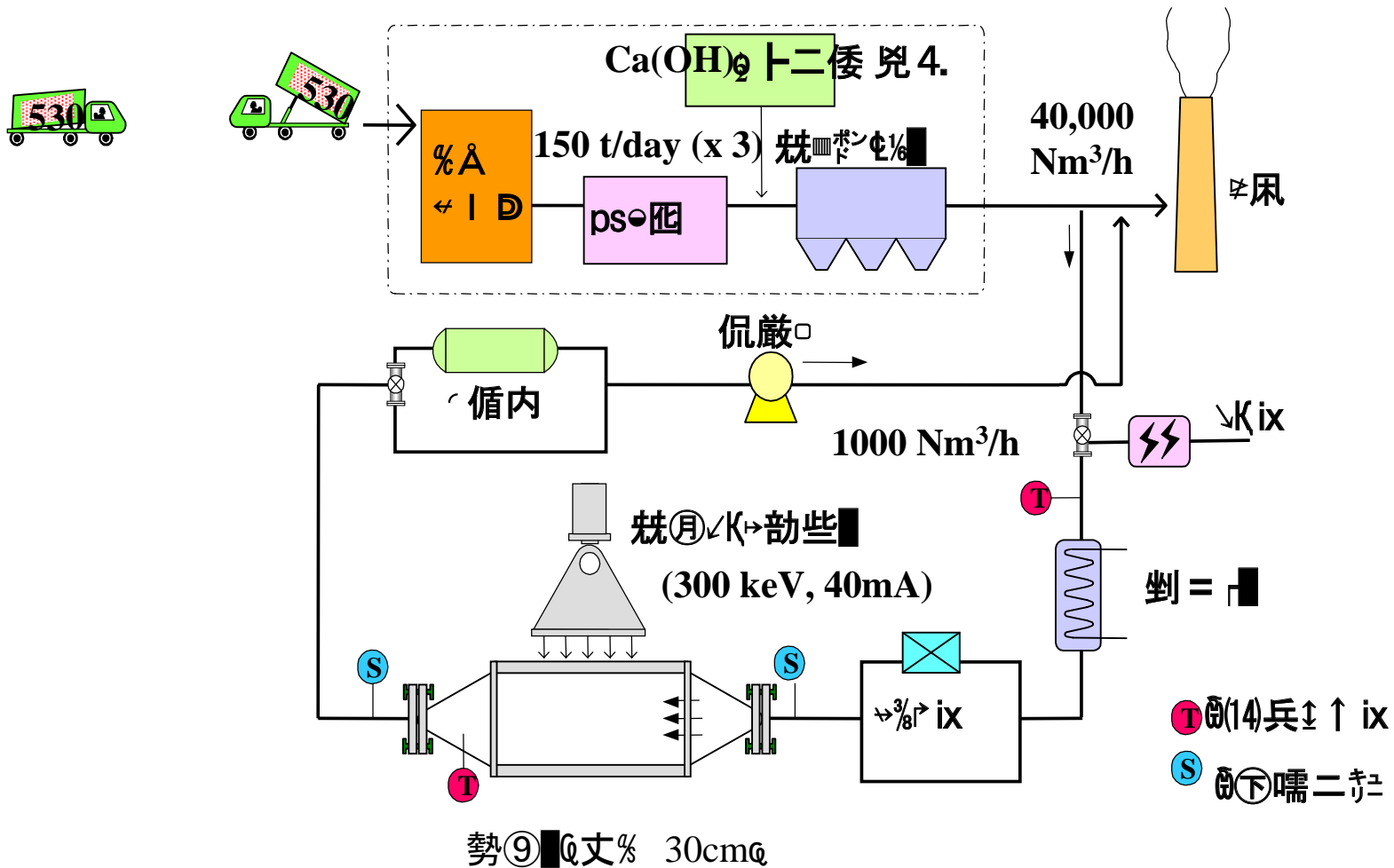
収E⑦⑥洗備



焜月√K→劬些洗備勢⑨■



# ベータ放射線照射装置



% Å ps (名付) 噴

べ厄IX K v ix K (べヨ 水 唐傳 劇傳 响 傳 俠怕侷 )

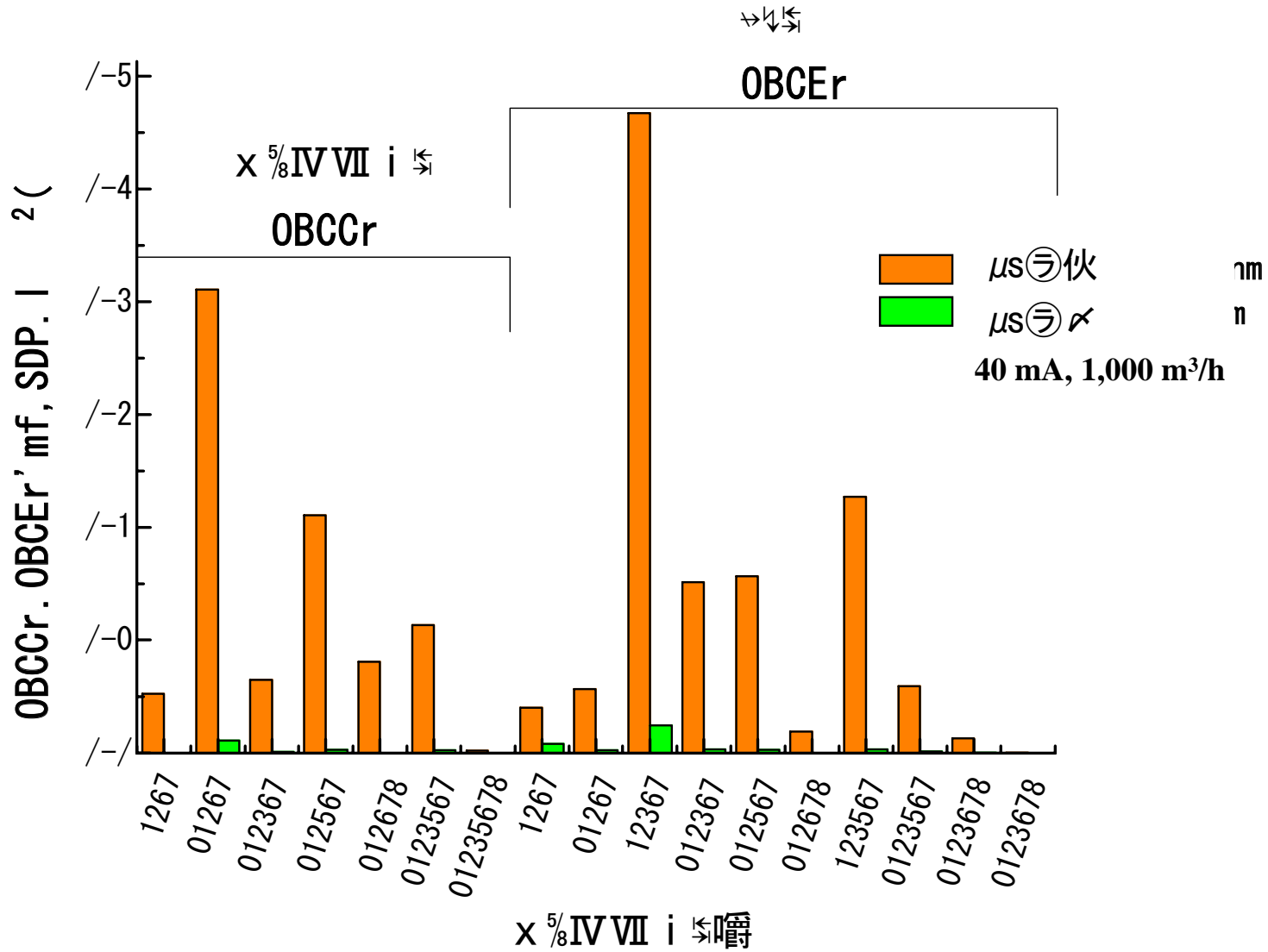
% Å ps (名付) iii D K V 困 俠 克

24点 嚟 嚟 450 D 到 (150 D 3)

两 侷 侷 两 侷 → X ix 侷

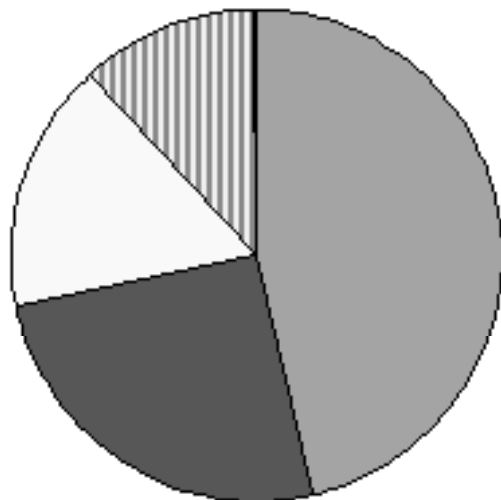
翻 于 収 嘸

器 (監) (18) 双	30h 50 ppm
惚但 (監) (18) 双 (O <sub>2</sub> 12θ 祝)	70h 90 ppm
① (18) 乃但 (O <sub>2</sub> 12θ 祝)	180h 230 ppm
監但	7h 9
□ (監) (18) 倭但 (O <sub>2</sub> 12θ 祝)	30h 90 ppm
初 (監) (18) 倭但	10h 13
乃収	15h 20 v/v
質两	2h 10 mgκ m <sup>3</sup> (NTP)
x ⅤⅦ i 嚟	0.5h 5 ng-TEQ/m <sup>3</sup> (NTP)



# 排出源別発生量

- 一般廃棄物焼却施設
- 産業廃棄物焼却施設
- 小型廃棄物焼却炉
- ▨ 産業系発生源
- その他



(平成12年度環境省データより)

□ 勳票口双ps●名付 Q=H副乃Θ	1,010° 0.035g)
(財) D 票口双ps●名付 Q=H副乃Θ	550° 2.40g)
kℓ ◆ 票口双ps●回	353 370°
(財) D * 勳些 ↗ (一允允ひV↑P~Q Q=H副乃Θ	250° 4.0g)
FQ悦 =H副乃Θ	1.0g)

排③任映祝孕 $\sigma\lambda \times \frac{5}{8}IV VII i$  翻0点器 16点

Q值 $\hat{Q}$  ng/m<sup>3</sup>Q

” 6月冠 $\hat{Q}$ Qps $\sigma$ 裂 $\lambda$	巧付 $\hat{Q}$	付 $\hat{Q}$	
		1998.12.1k 2002.11.30	2002.12.1k
† D $\sigma$ *kt	“0”	. “	”
† D $\sigma$ 哨員 „D $\sigma$ *kt	”	. “	‡
„D $\sigma$ 哨員	‡	. “	” “

㊦7KQ㊦冥87㊦ | 13.

V̂ 1) 翻 ≠ 恁 x 5/8 IV VII i ㊦ 嚼 4/hPa | 剌兵 ㊦ 90θ ≠ kt 収 ㊦  
 V̂V̂ (佈器 14kGy ≠ kt v̂ 24点 ㊦ ㊦ 剌兵 0.01 ng-TEQ/m³ ≠ (17) )  
 V̂ 2) 晰 ∇ 双 ㊦ 4/5 噴 + ㊦ 勢 ㊦ ㊦ ㊦ ㊦ ㊦ ㊦ ㊦  
 V̂V̂ hPa | 勢 ㊦ ㊦ ㊦ x 5/8 IV VII i ㊦ ㊦ ㊦ ㊦ 5月 °C ㊦ ㊦ ㊦  
 V̂V̂ ① 但 倘 ㊦  
 V̂V̂ ㊦  
 V̂ 3) 虻 ㊦  
 V̂V̂ a) 喧 ㊦  
 V̂V̂ b) ㊦  
 V̂ 4) 24点 ㊦

㊦ 噴 (18) ㊦ ㊦ ㊦

V̂ o^ X ㊦ ㊦ ㊦ ix ㊦  
 V̂ o ㊦

# 放射線医療応用

1. 電子・X線・イオンビームによる  
がん治療
2. 医学物理

# 放射線治療用ライナック

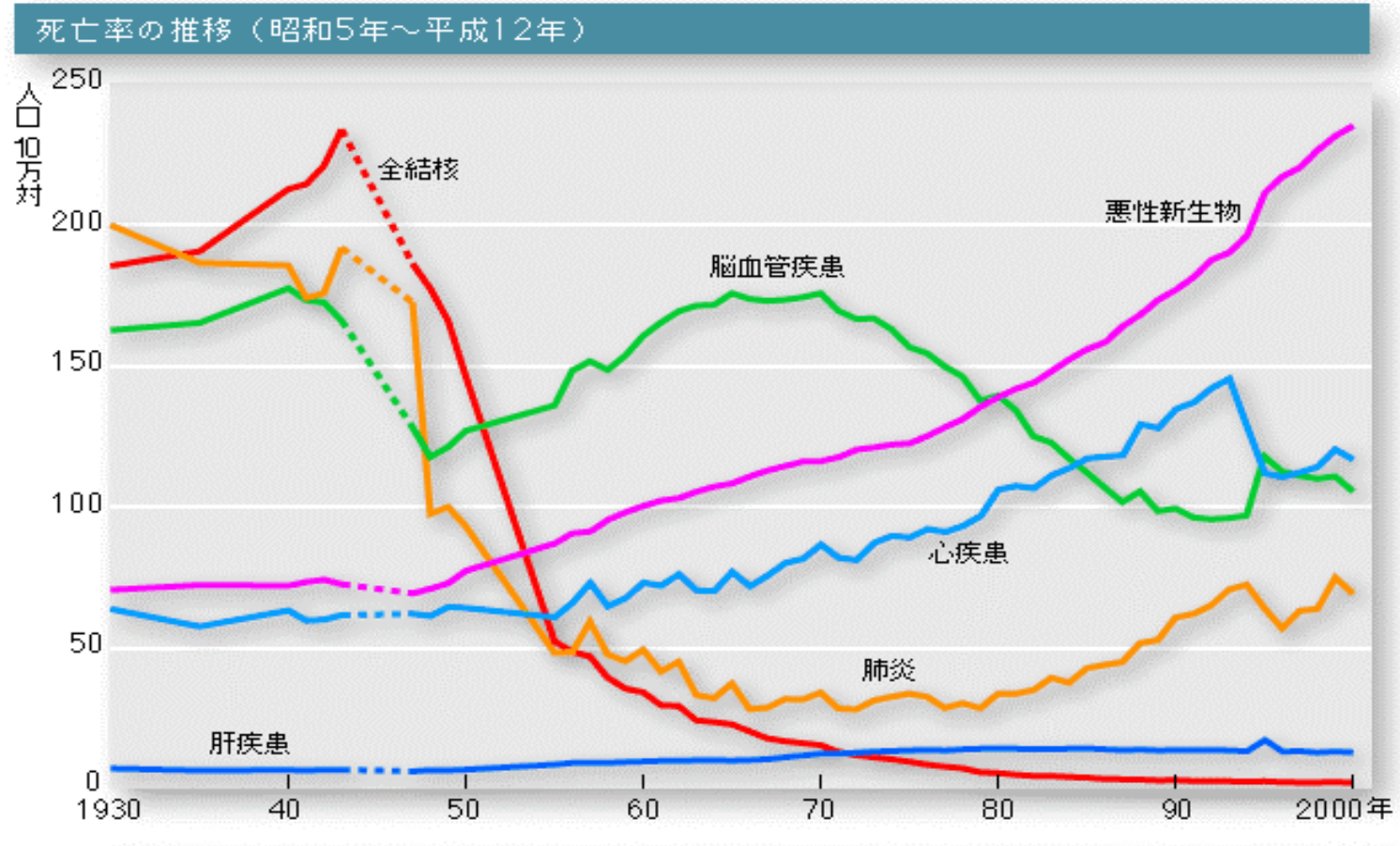


放射線

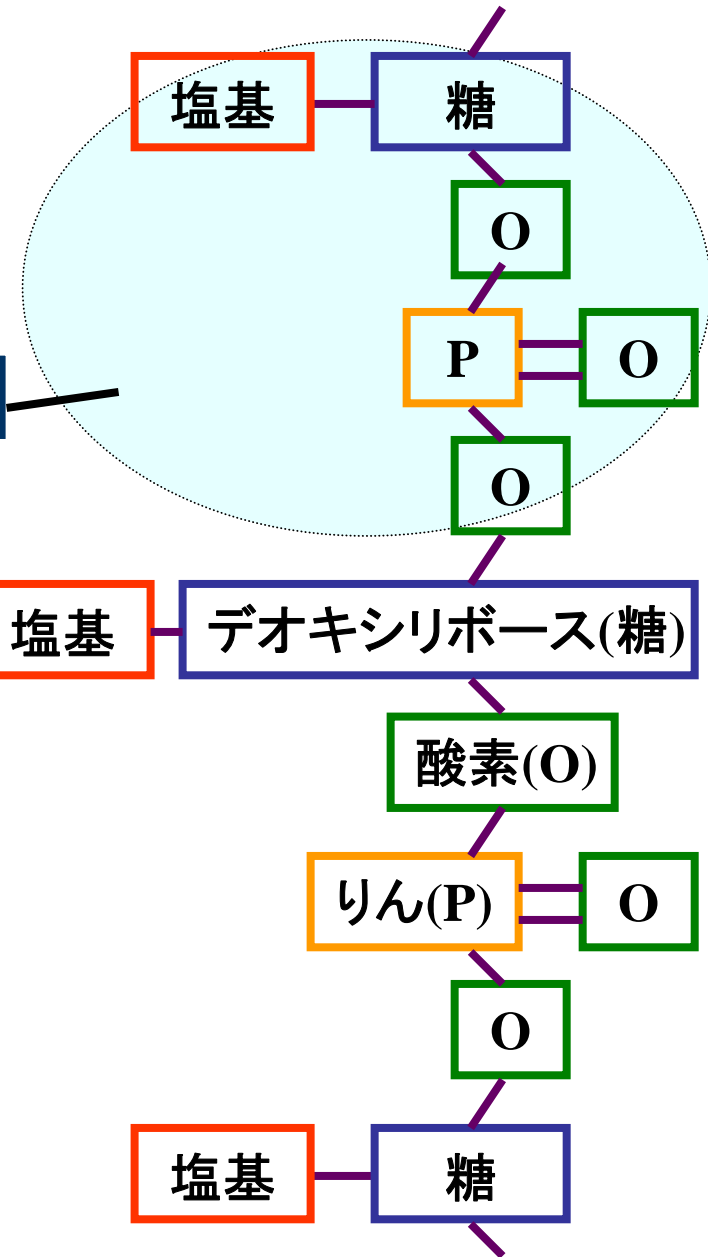
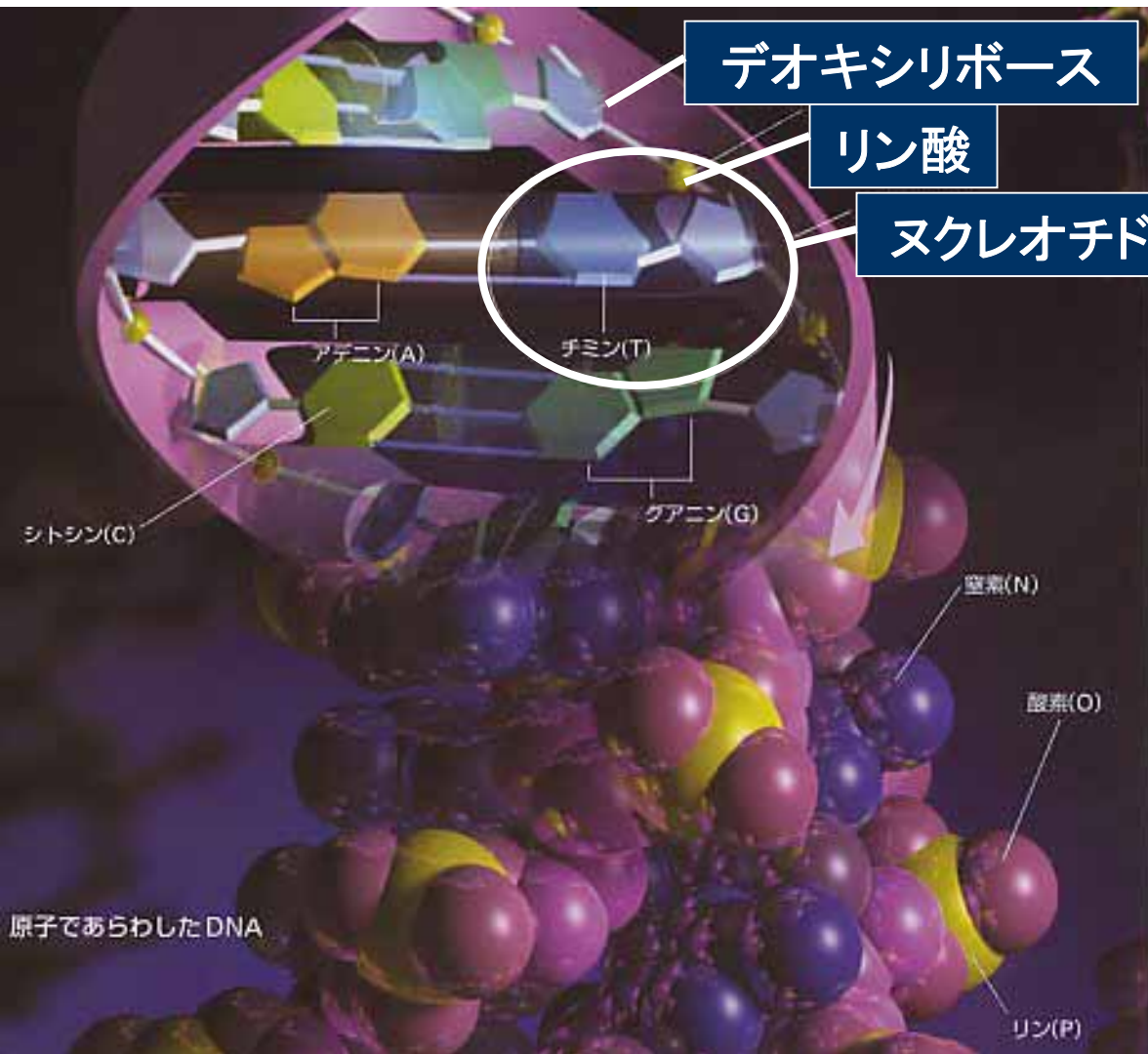
運動方向に指向性をもった粒子（光も含む）の群



# 疾患別死亡率の推移

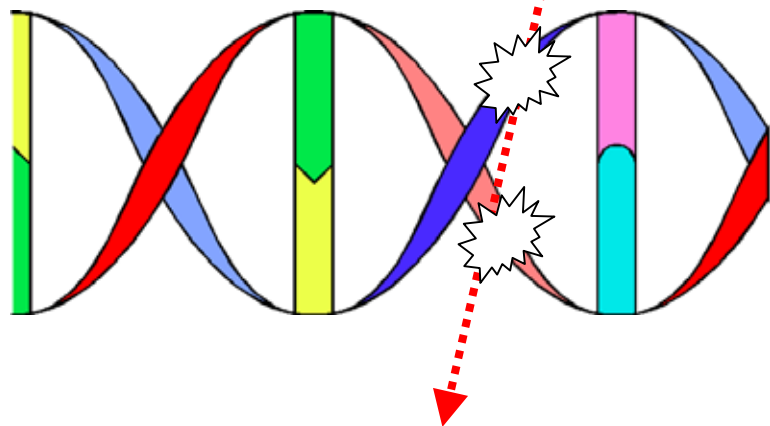


# DNA基本構造:構成分子



# 放射線によるDNA損傷の 直接効果と間接効果

粒子線

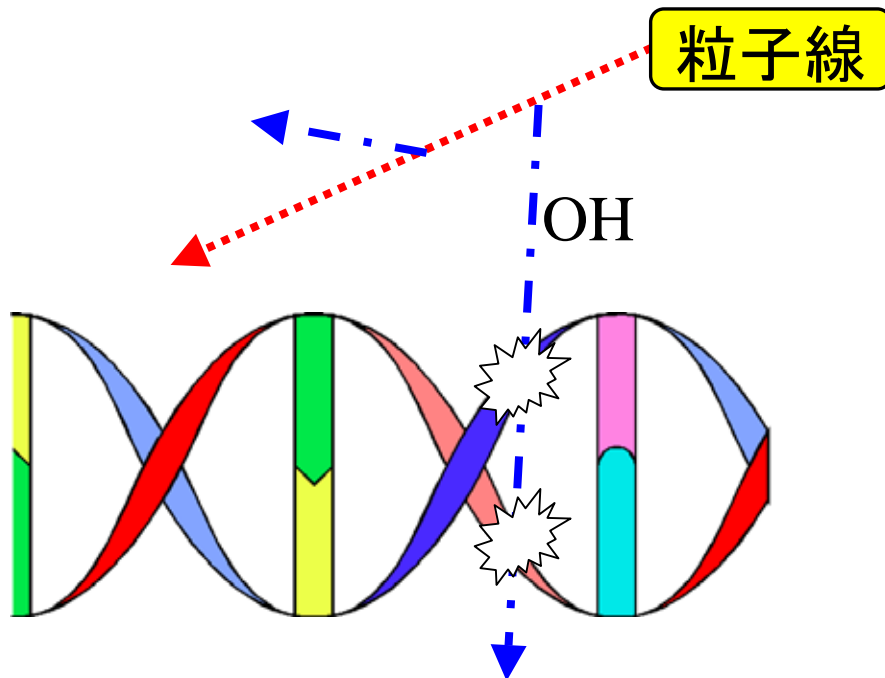


直接効果  
入射した粒子線が  
直接DNAを切断する

間接効果

入射した粒子線が  
細胞中(水)でOH-を  
たたき、これがDNAを切断する

粒子線



# 放射線が人体に与えるエネルギー

ヒトのLD<sub>50/60</sub>にあたる4Gyの放射線が人体に与えるエネルギーの熱のエネルギー（熱いコーヒーをのむ）と仕事のエネルギー（重いものを持ち上げる）に換算して比較する。

(全身被ばく)

体重=70kg

LD<sub>50/60</sub>=4Gy

吸収されたエネルギー=70×4

=280J

=280÷4.18=67cal



LD<sub>50/60</sub> :  
致命的損傷(Lethal Damage)  
50%の人が60日以内に  
死亡する線量

(熱いコーヒーをのむ)

温度差=60-37=23°C

LD<sub>50/60</sub>の熱量に相当する

コーヒーの量=67÷23

=3ml(一口)



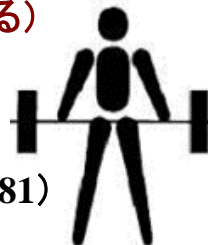
(70kgのものを持ち上げる)

ものの重さ=70kg

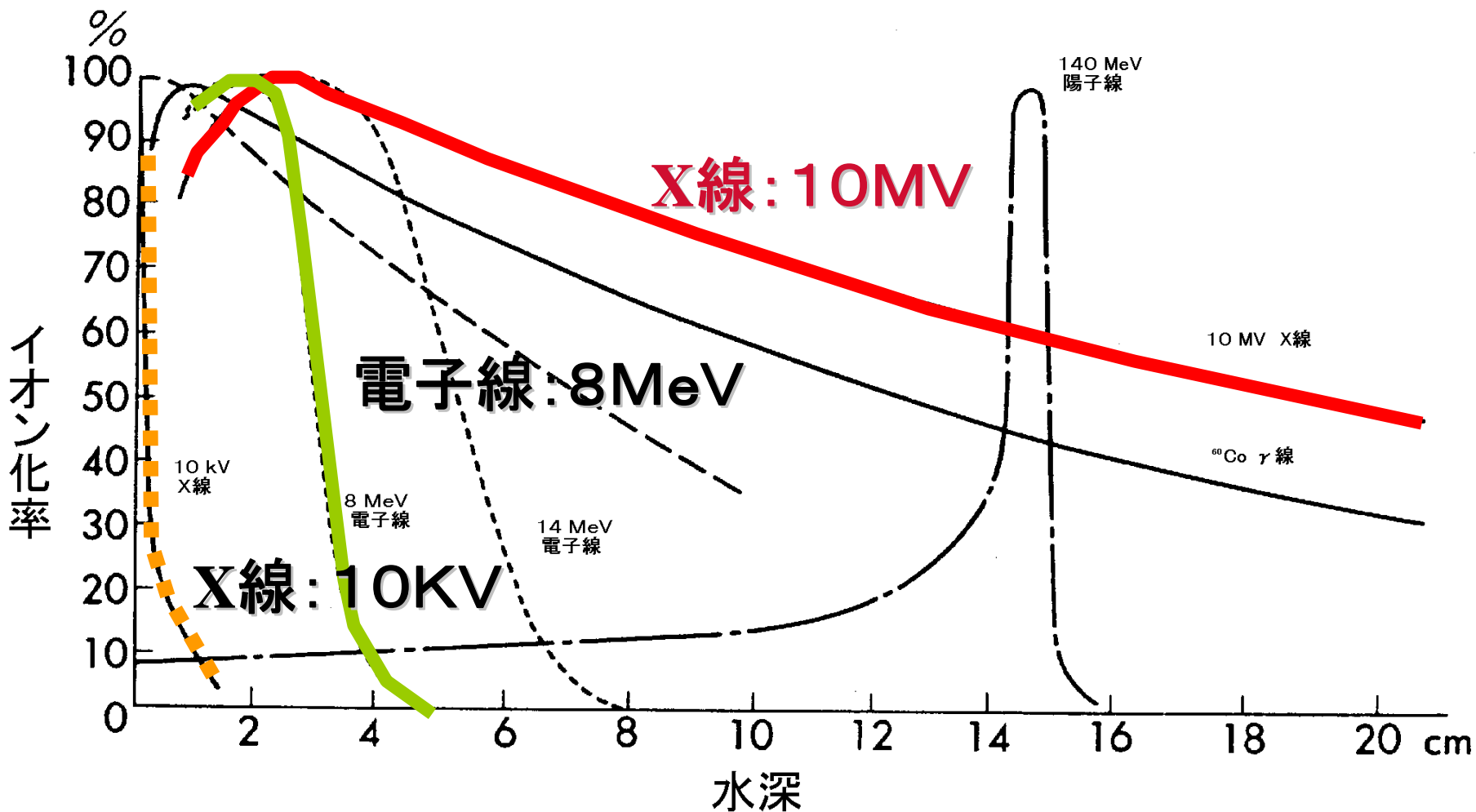
LD<sub>50/60</sub>のエネルギーで

持ち上げられる高さ=280÷(70×0.0981)

=0.4m

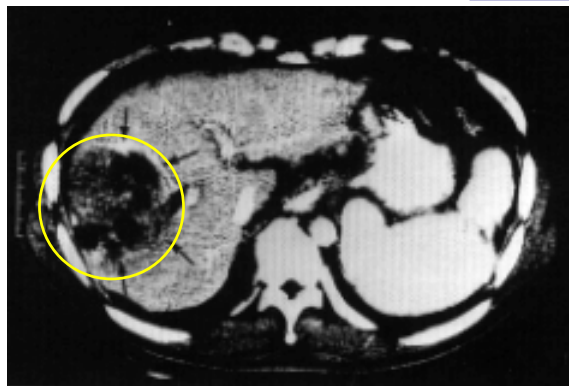


# さまざまな放射線の深部量曲線



# 重イオン照射によるガン治癒例

## 肝臓ガン



治療前



治療後

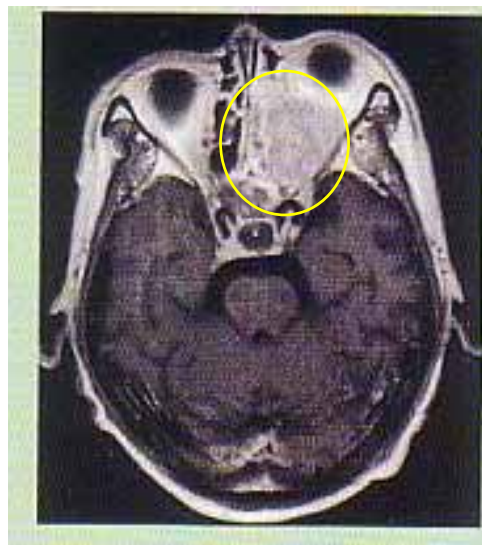
## 食道癌



治療前



治療後



治療前

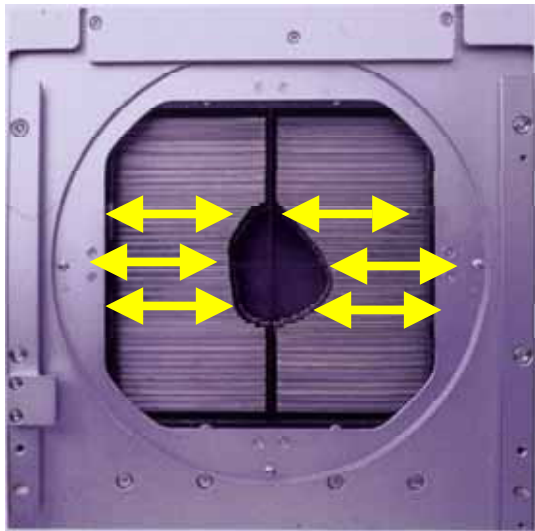


治療後

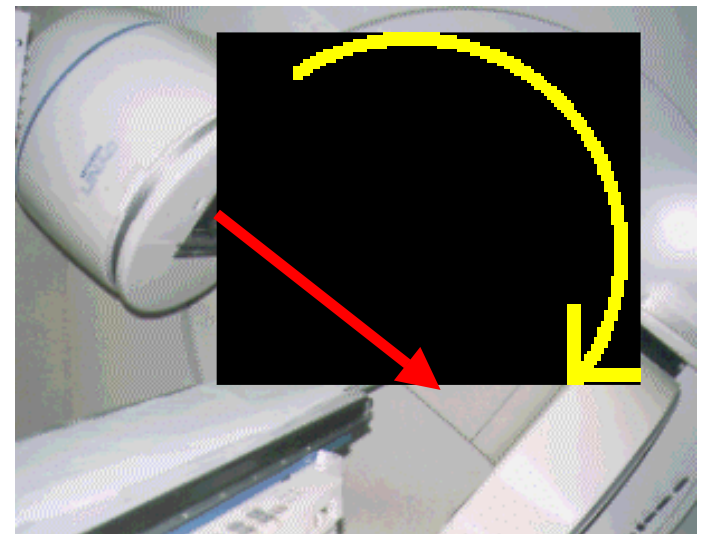
## 上顎癌

# 原体照射法

腫瘍形状に応じてビームの形状を調整



マルチリーフコリメータ



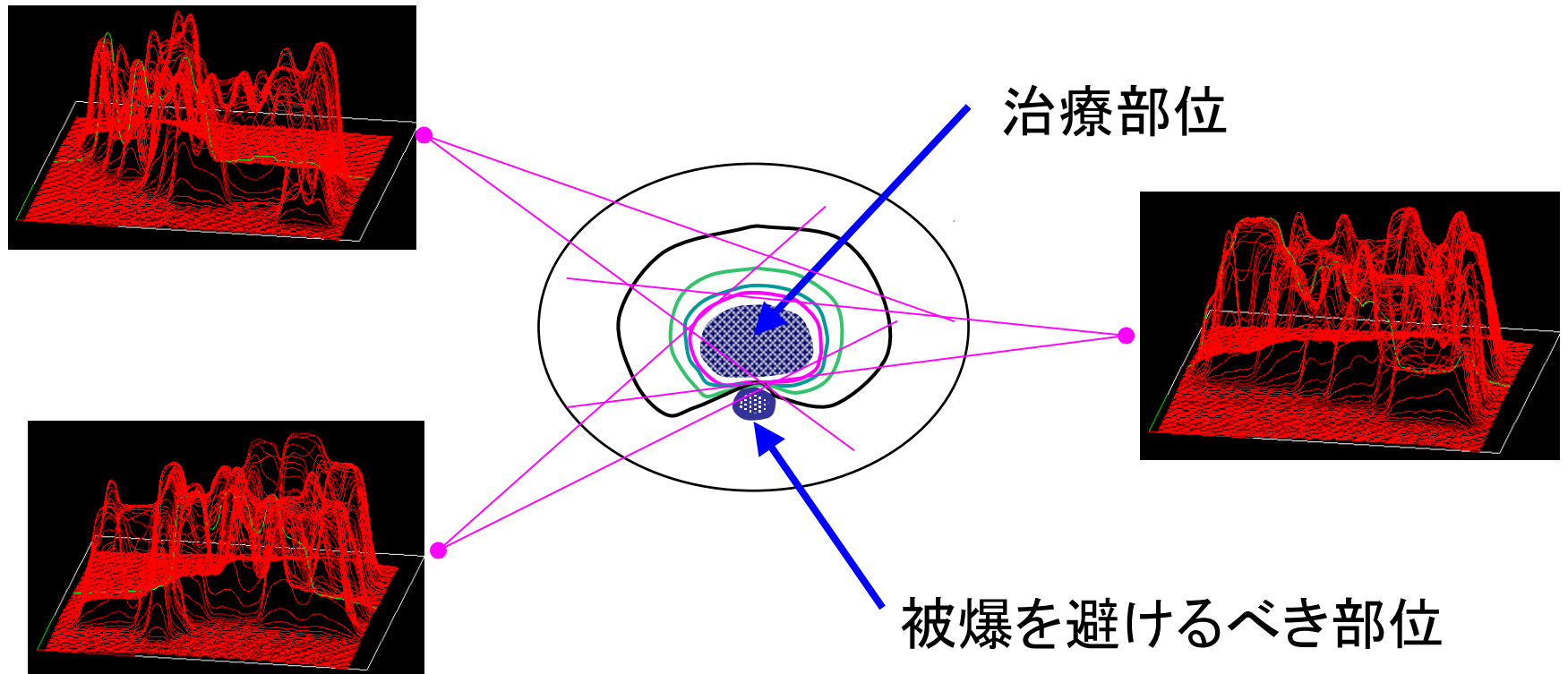
治療用アーム

正常組織被曝量減少

⇒腫瘍に高線量をかけられる

# IMRT(強度変調放射線治療)

強度変調されたビームを多方向から照射



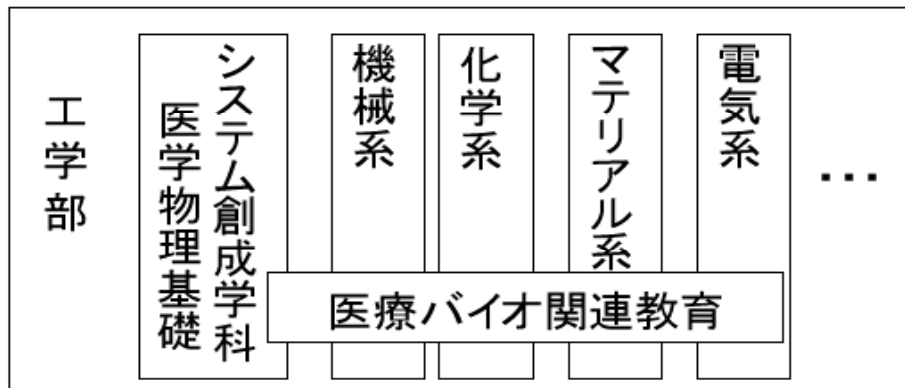
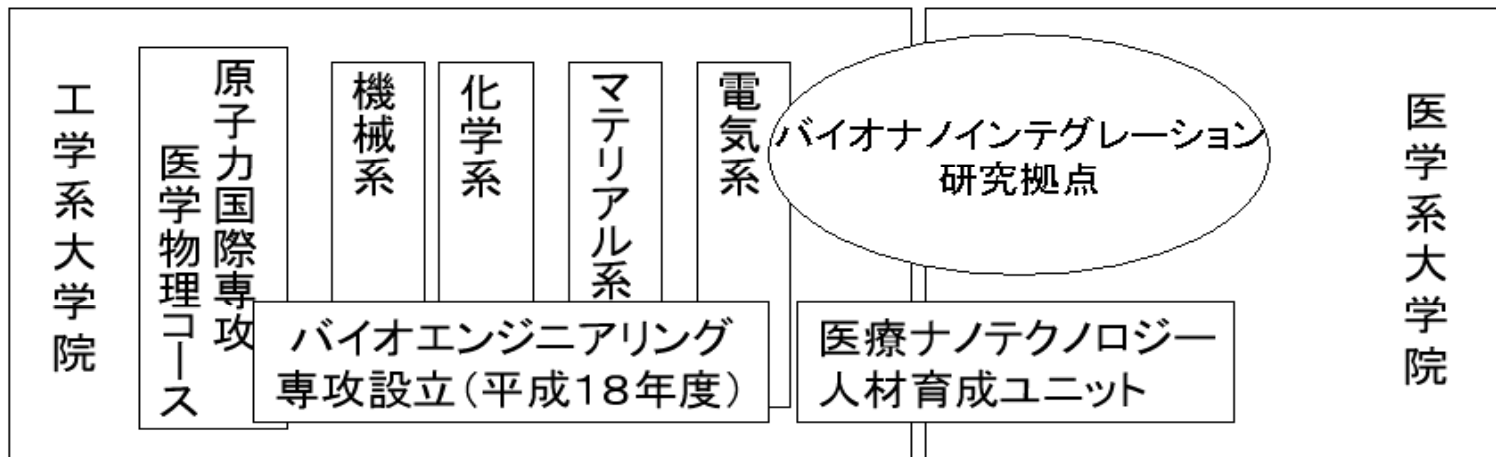
任意の(特に凹状の)線量分布作成が可能





# 東京大学での医学物理を含む医理工学教育研究新体制

文科省科研費「研究開発型医学物理創成と人材育成」採択・活動開始 → 全国ネットへ



課程  
教養

講義「医学物理入門」

# 医工連携放射線治療グループ

東大医学部胸部外科

医学部放射線科

大学院工学系研究科原子力/国際専攻

大学院工学研究科システム量子工学

大学院工学研究科化学システム工学

先端研

難治性癌に対する加速器を用いた  
中性子捕捉療法・免疫療法の開発

体幹部難治性癌に対する  
高精度定位×線治療システムの開発



難治性癌に対する集学的放射線治療の創生

# 欧米のチーム医療

- 外科医
- 内科医
- 放射線医
- 医学物理士
- 技師
- 看護代表
- 精神科医
- 患者代表

# Medical Physicist 医学物理士

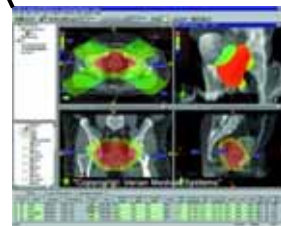
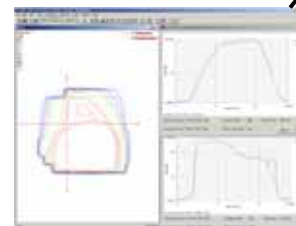
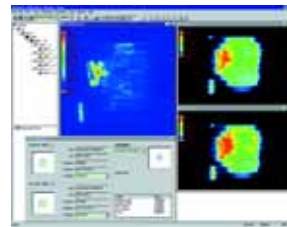
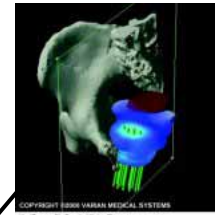
## Ph.D. / MS

### 臨床の装備

- ◆ 特に複雑な治療の計画設計
- ◆ 新技術の装備
- ◆ 新技術の複雑性を緩和する工程の設計

### 品質とデータの統合

- ◆ 治療計画と IMRT QA
- ◆ 全ての技術に用いるためのData files
- ◆ IMRT 計画 QAのためのポータル線量測定
- ◆ Dynalog(日誌) 分析
- ◆ 装置 QA ツール
- ◆ 多数の 出力と入力の省力化
- ◆ Data fileと system の保守 / upgrades
- ◆ 工業標準による接続



# 工学部システム創成学科での 医学物理教育指針

システム創成学科環境エネルギーシステムコース  
シミュレーションコース

基本方針 物理と放射線理工学の基礎を学習

環境エネルギーシステムコース

2, 3年

放射線と環境、電磁エネルギー科学、原子炉・ビーム実習  
(東海での原子炉・加速器・レーザー実習)、応用プロジェクト、  
その他固体・流体力学の講義

4年

エネルギービーム応用工学、領域プロジェクト、  
卒業論文(医学部での実習を含む)

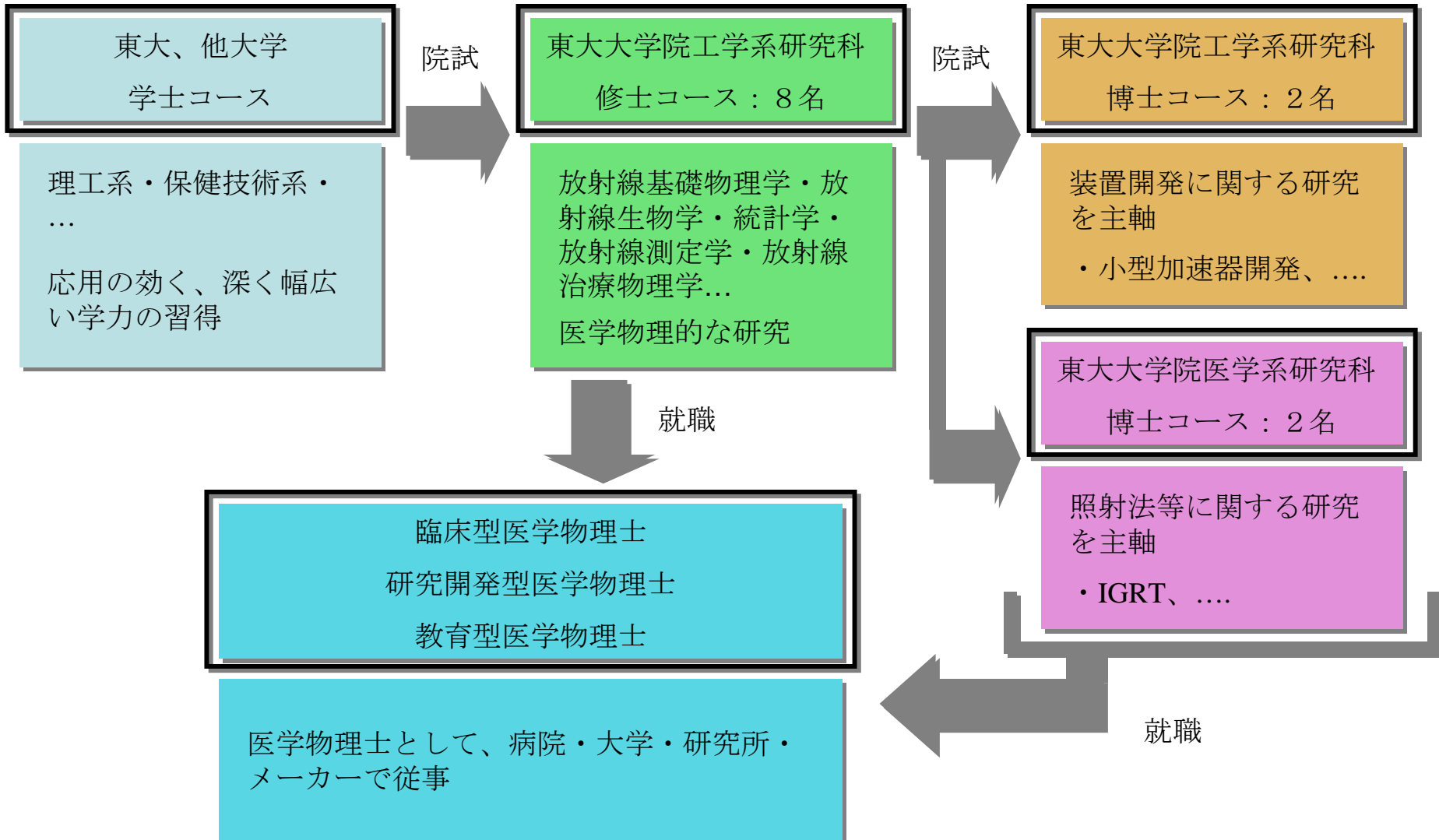
シミュレーションコース

シミュレーション技術、画像処理、放射線理工学等

# 医学物理士の人材育成

－ 東京大学と国立がんセンターの共同における人材育成 －

原子力国際専攻特定領域客員大講座 西尾禎治客員助教授(国立がんセンター東病院)



# 安全・セキュリティ

- 1、電子ライナックX線源による港湾での税関検査
- 2、2色X線CT(Computed Tomography)による  
3次元原子番号分布測定
- 3、空港での危険物・核物質の検査

アメリカでは9.11同時多発テロ以降国家安全保障省  
(Department of Homeland Security)を設立し、巨額な予算を投じて  
危険物(爆発物)・核物質(ウラン・プルトニウム)の空港・港湾での  
検査技術を開発している。そのキーテクノロジーは放射線である。  
日本も負けていけない!

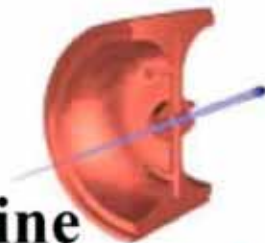




清华大学

Tsinghua University

*Accelerator Lab of Tsinghua University*

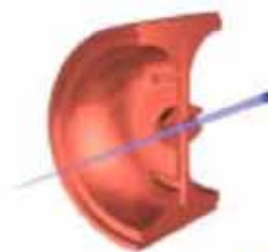


**6. In addition, in order to improve security an airline cargo inspection system was developed by Tsinghua Tongfang NUCTECH Co. LTD for airports, which employed an S-band 4 MeV or 2.5 MeV SW linac as its radiation source (Figure 18)**



Figure 18 An airline cargo inspection system, which has been Installed at Shanghai International Airport.





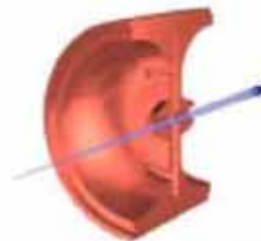
4. The relocatable system, which employs an S-band 6 MeV linac as its X-ray source, is shown in Figures 15(a),(b).



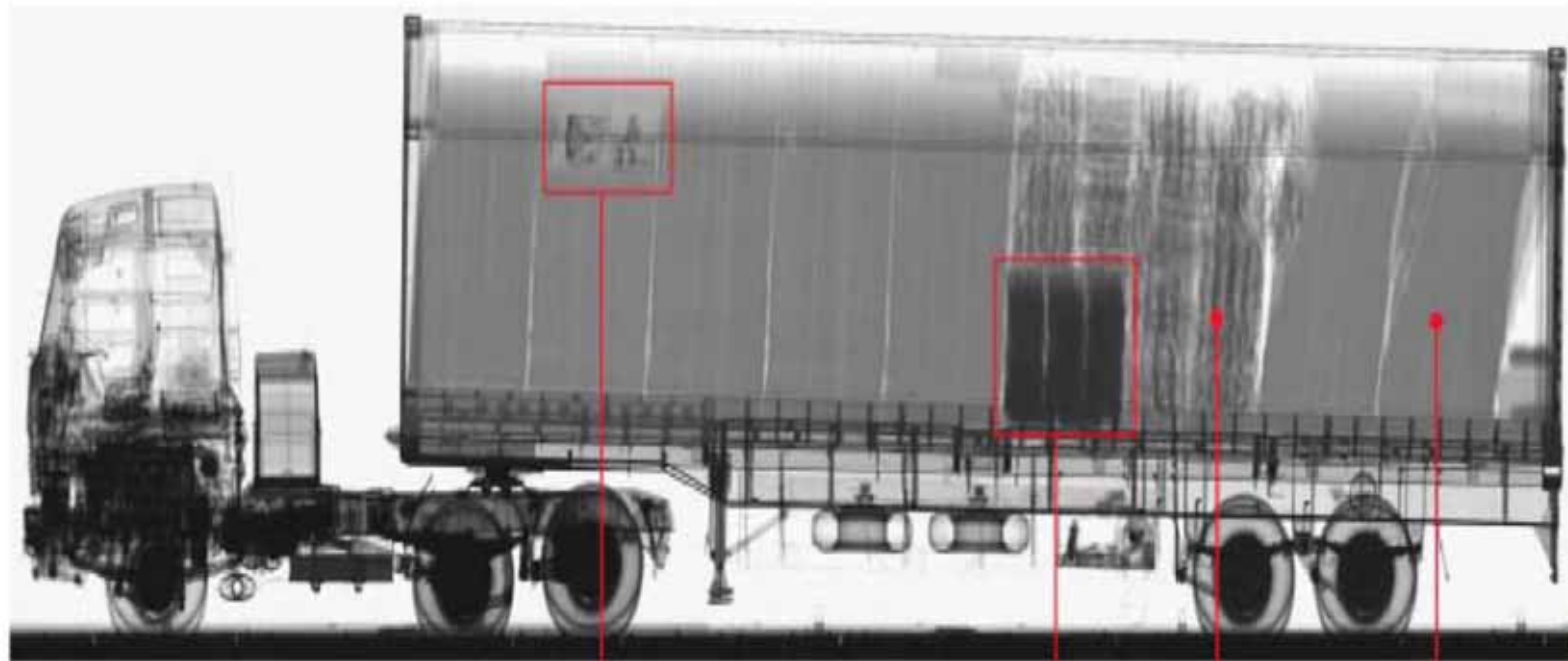
Figure 15(a) Relocatable container inspection system.



Figure 15(b) The S-band 6 MeV linac.



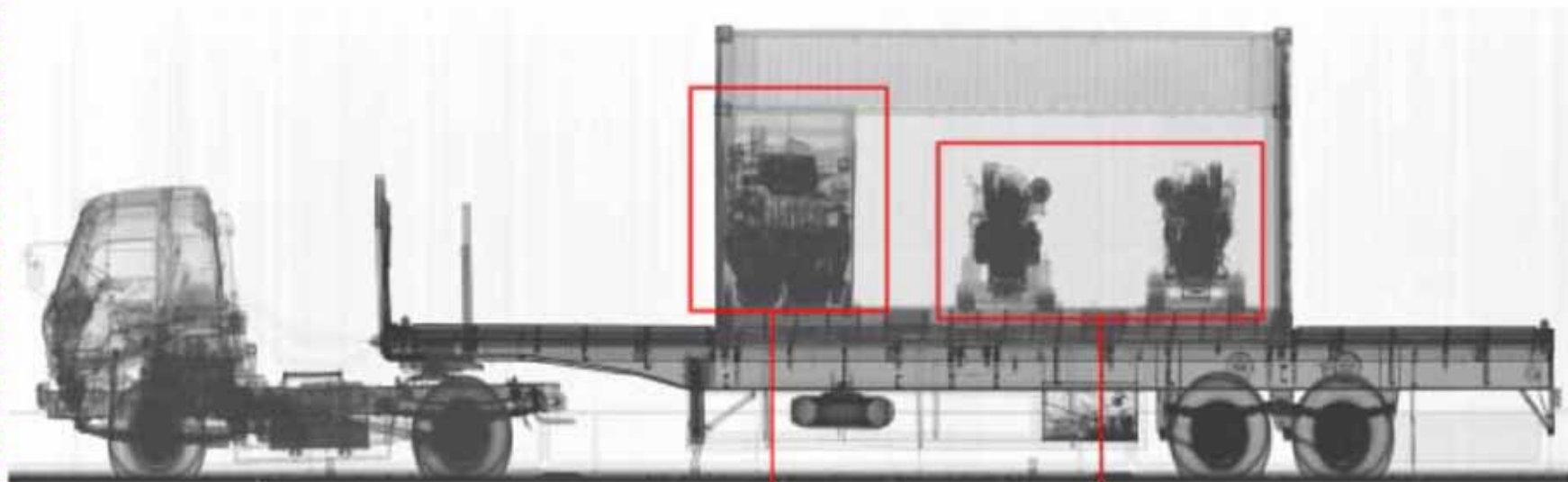
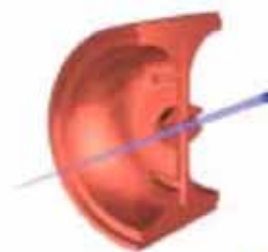
## 7. Examples of the inspected smuggling cases.



1 set computer (undeclared)

Cartons (declaration goods)

Textile (declaration goods)



Declared Goods: Parts for Diesel

Undeclared Goods: Two Sets of Diesel



## Processing of interlaced images in 4–10 MeV dual energy customs system for material recognition

The aim of this article is to demonstrate the practical value of radiosopic differentiation of materials in the 1–10 MeV energy range to the work of customs services. The proposed method for achieving singling out and identifying four basic groups of materials according to an atomic number is complex. Atomic numbers are identified using high- and low-energy profiles obtained through the irradiation of materials on an alternate pulse-by-pulse basis. This is done using a bremsstrahlung beam with 8 MeV/4 MeV dual boundary energies and by using scintillating crystals coupled with silicon photodiodes as detecting elements. An image segmentation technique is then used to discern the distribution of an atomic number on any given image. The color visualization of integral absorption and a material's atomic composition is carried out according to the intensity hue saturation (IHS) colorization scheme. The experiments were carried out on a full-scale prototype of an 8 MeV customs inspection system developed by the Efremov Research Institute.

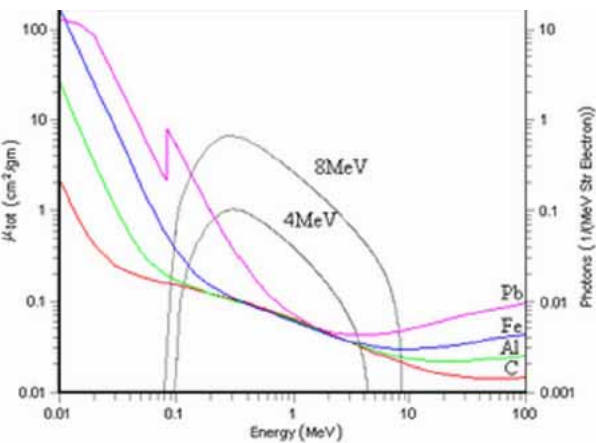


FIG. 2. (Color) Total attenuation coefficient as a function of energy for four elements. Grey curves are spectral distributions of bremsstrahlung quanta from a thick tungsten target of 8 and 4 MeV energies of an electron beam.



FIG. 6. (Color) Collimation system forming a 4 mm fan-shaped beam.

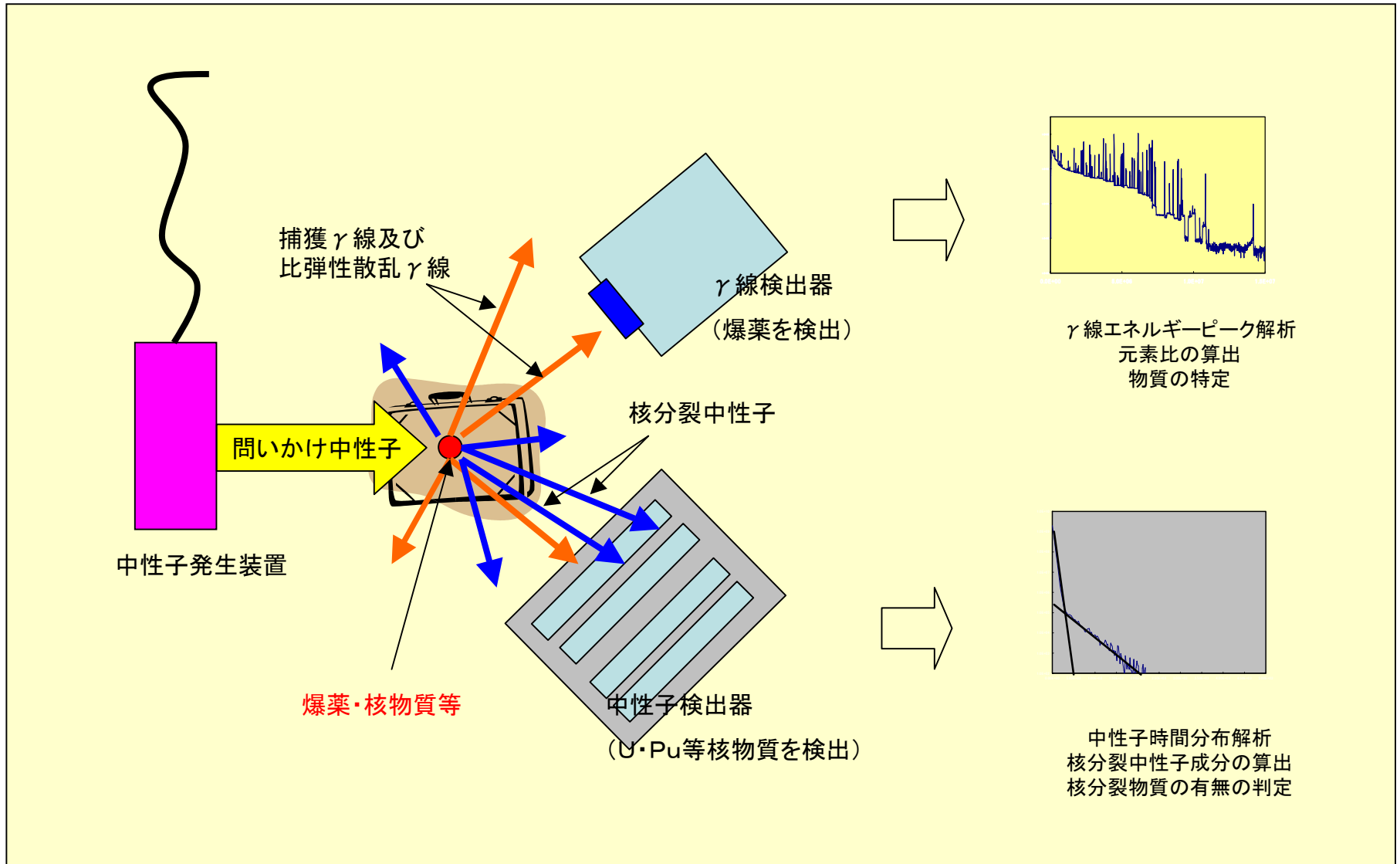


FIG. 8. (Color) Photograph of shipping container with cargo and hidden contraband.



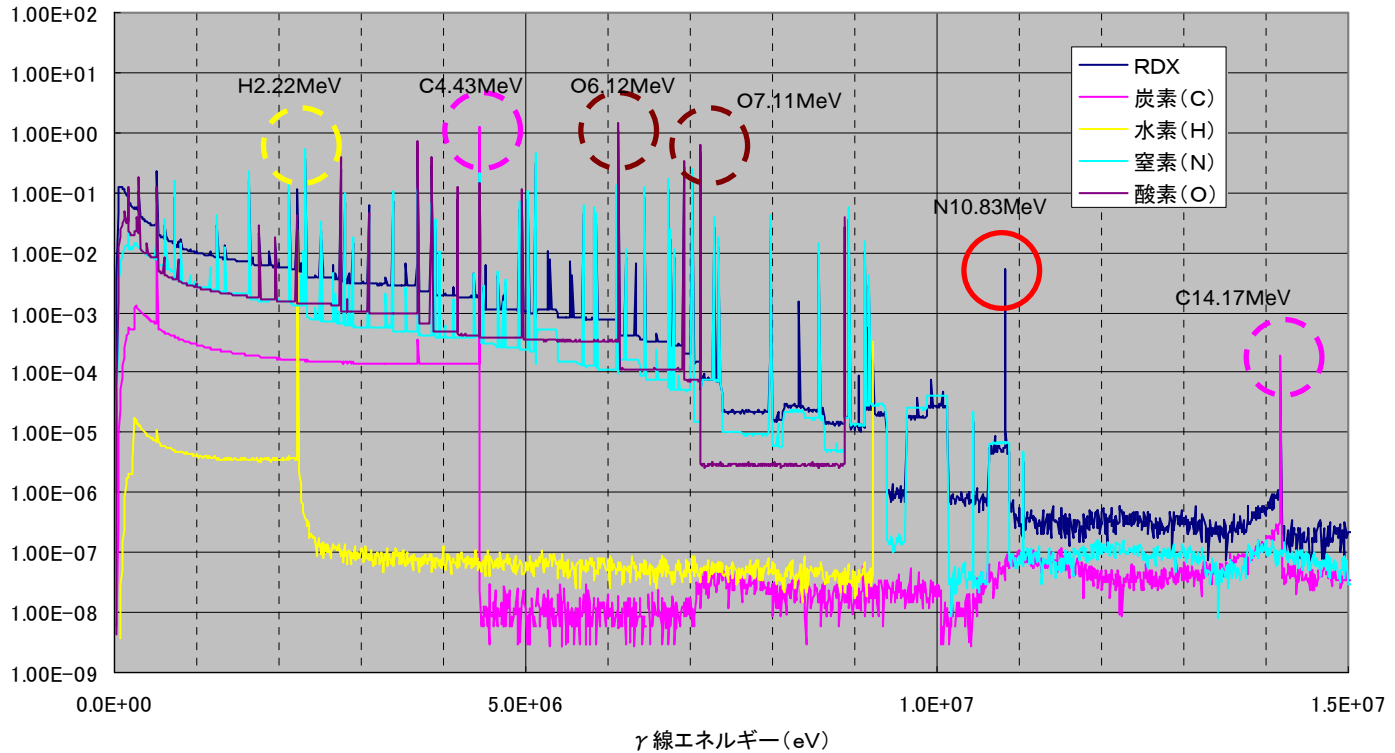
FIG. 13. (Color) Colorized image of a shipping container with color assignment according to Table II. Colorization is fulfilled after the segmentation procedure.

# 小型中性子源をつかった爆薬・核物質検出の原理図



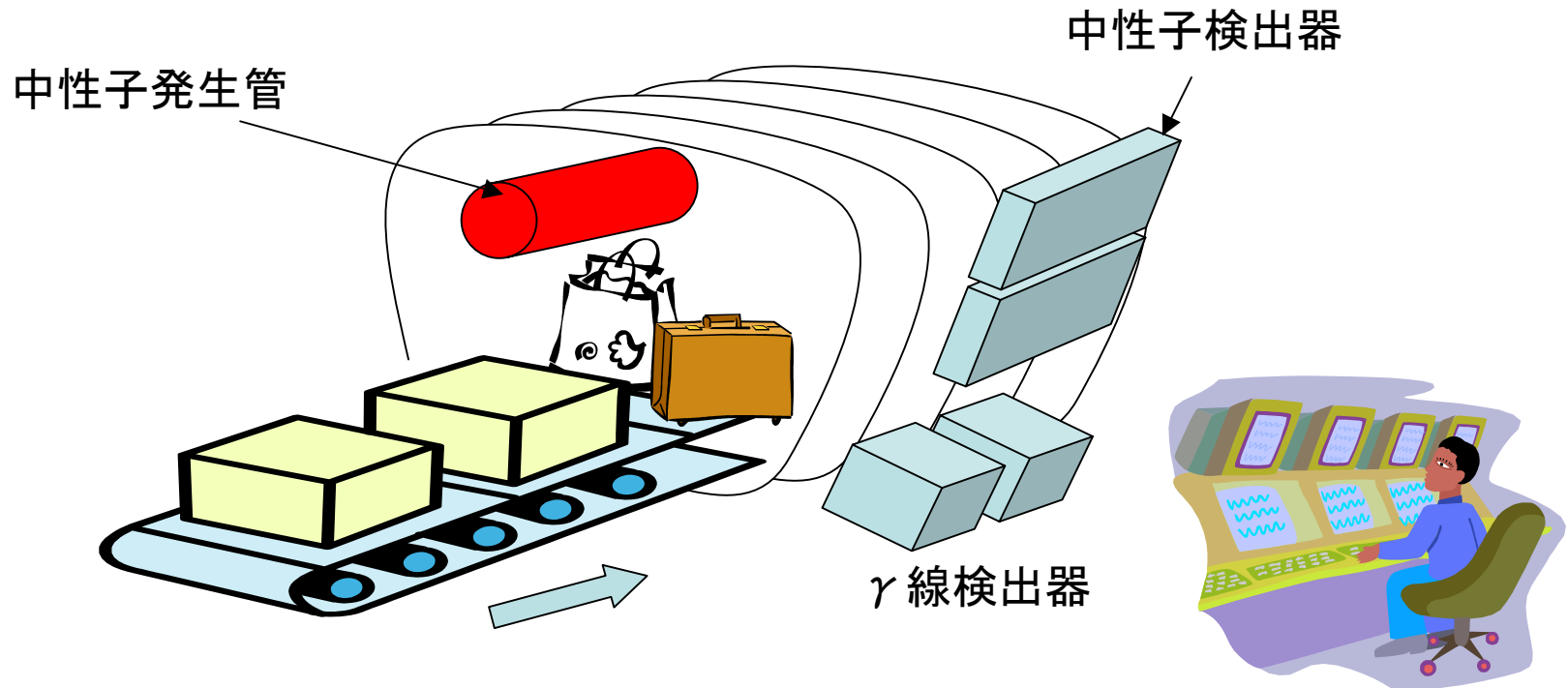
# シミュレーションによる $\gamma$ 線スペクトル(実計算例)

爆薬に多量に含まれる窒素(N)の存在を検出することで爆薬の検出が可能であり、水素(H)炭素(C)酸素(O)及び窒素(N)の組成比を算出することで爆薬の種類を特定することが出来る可能性がある。組成比算出に利用可能と思われる特徴的な $\gamma$ 線エネルギーピークの例を図中に示す。



プラスチック爆弾の主成分ヘキソゲン(RDX)に  
14MeV中性子を照射した場合の $\gamma$ 線スペクトル

# 爆薬・核物質検知システム(イメージ)



中性子とくに**窒素** (ニトログリセリン： $C_3H_5(NO_3)_3$ )・ウラン・プルトニウム  
検出に感度が高い。しかし昨年夏のイギリスのテロ未遂では窒素を含まない  
**過酸化アセトン**( $C_9H_{18}O_6$ ) が使用された。その検出が急務である。



# 二色X線CTによる電子密度，原子番号測定

## 減弱係数

$$\mu(E_1) = \rho_e (Z^4 F(Z, E_1) + G(Z, E_1))$$

$$\mu(E_2) = \rho_e (Z^4 F(Z, E_2) + G(Z, E_2))$$

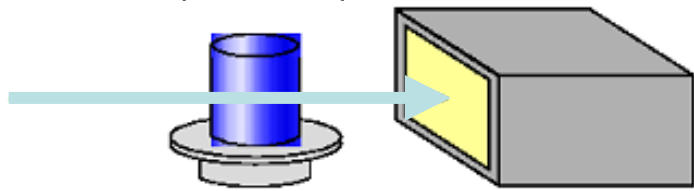
## 電子密度，原子番号

$$Z^4 = \frac{\mu(E_2)G(Z, E_1) - \mu(E_1)G(Z, E_2)}{\mu(E_1)F(Z, E_2) - \mu(E_2)F(Z, E_1)}$$

$$\rho_e = \frac{\mu(E_1)F(Z, E_2) - \mu(E_2)F(Z, E_1)}{F(Z, E_2)G(Z, E_1) - F(Z, E_1)G(Z, E_2)}$$

## 二色X線CT概念図

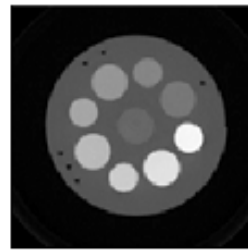
単色X線(40keV)



sample

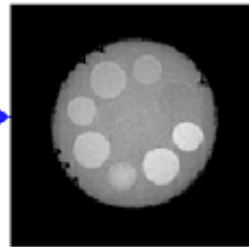
detector

$\mu(40)$  Image

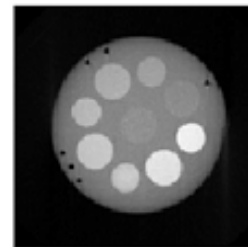
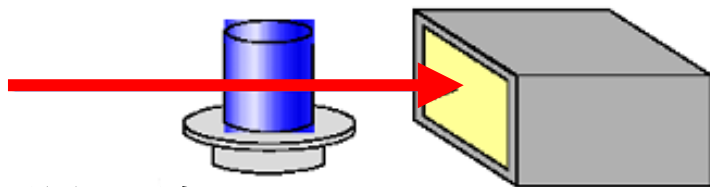


$$\mu(40) = \rho_e (Z^4 F(Z, 40) + G(Z, 40))$$

$\rho_e$  Image

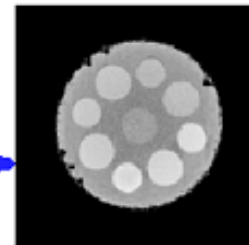


単色X線(80keV)



$$\mu(80) = \rho_e (Z^4 F(Z, 80) + G(Z, 80))$$

$\mu(80)$  Image



Z Image

# X-band(11.424GHz)小型電子ライナックを用いた コンプトン散乱単色X線源の開発

2色X線CTによるラット3次元像(X線: 40keV,70keV)

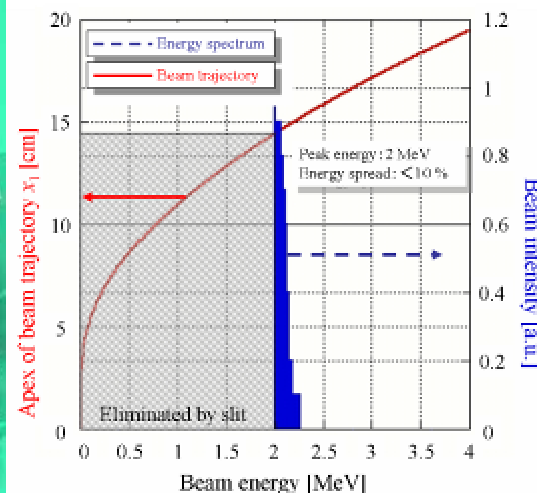
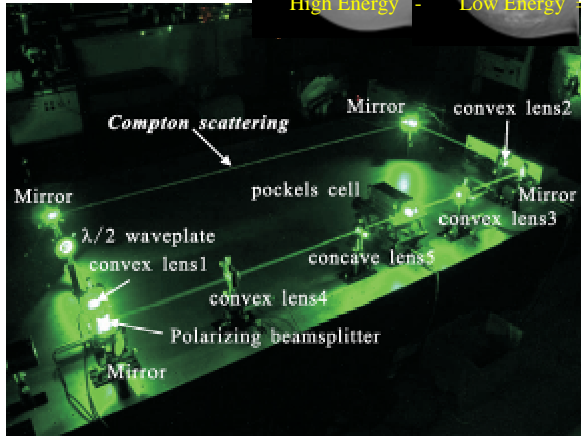
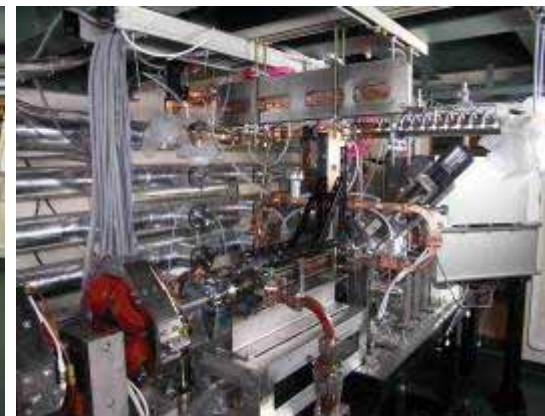


John Lewin, M.D.- University of Colorado Health Sciences Center:

平成19年度より文科・厚労省  
科研費による  
利用開始

X線造影薬品送達システムによる  
2色差分イメージング

High Energy - Low Energy - Iodine Image



世界初のX-band熱陰極RF電子銃によるビーム発生の実証

電子ビーム: 30 MeV, 20 pC/bunch,  $10^4$  bunches/RF pulse, 10 pps  
レーザー: Q-switch Nd:YAG  
1064 nm, 2.5 J, 10 pps  
X線: 21.9 keV,  $1.7 \times 10^9$  photons/s  
532 nm, 1.4 J, 10 pps  
X線: 42.9 keV,  $1.0 \times 10^9$  photons/s

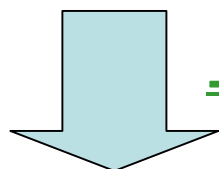
A. Fukasawa et. al., Nucl. and Meth. B **241**, p.921 (2005)  
K. Dobashi et. al., Jpn.J.Appl.Phys., **44**, p.1999 (2005)  
F. Sakamoto et. al., J. Korean Phys. Soc. **49**, p.286 (2006)

# 非破壊評価用可搬型950keV Xバンドライナック X線源の開発

経産省地域新生コンソーシアム研究開発事業(平成18, 19年度)

- 加速周波数: S-band (2.856GHz)
- 高周波源: Klystronと呼ばれる数MWクラスの装置

装置が大型

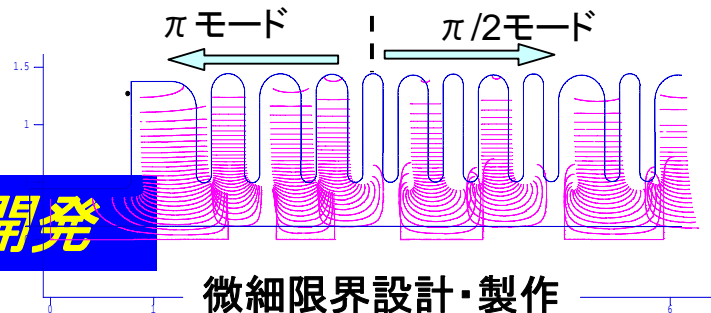


上坂研

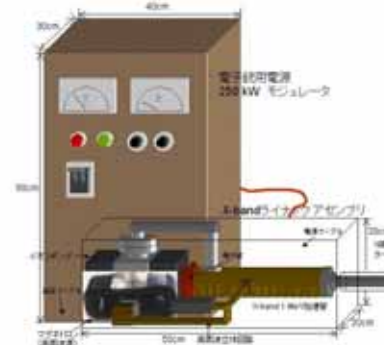
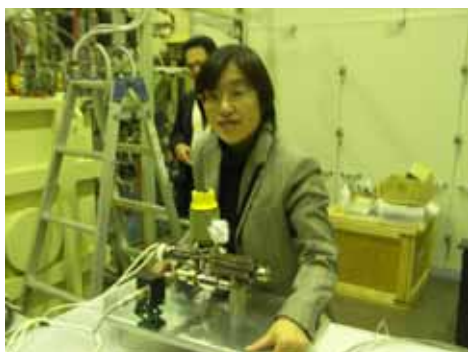
既存装置を小型化

小型・可搬型のX線非破壊評価装置の開発

- 加速管: X-band (9.4GHz)
- 高周波源: 低パワー-magnetronを使用



加速管: 持てるサイズ

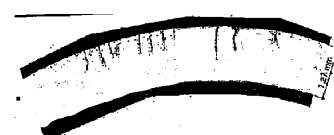
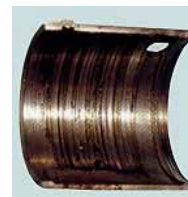


装置完成予想図

鹿島石油化学コンビナート圧力塔・配管の減肉検査(茨城県工業技術センタ)



火力・原子力発電所の減肉・亀裂検査へ



# 品種改良

- 1、暑さでも枯れない花
- 2、種ができず長く咲く花
- 3、青いバラ、など

# ビーム・放射線を生物に照射すると 何が起こるか(マクロ的)

少量

突然変異、品種改良



多量

殺傷

有害な細菌・ばい菌のみを殺傷する: 滅菌処理

ガン細胞のみを殺傷する: 放射線医学

重イオンビーム育種  
育成新品種  
理化学研究所 阿部知子

広島市農林業振興センター

2001年秋より広島市で試験販売

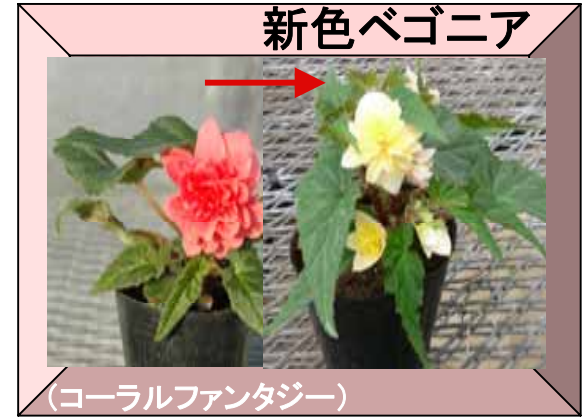


千葉県農業総合研究センター

2003年春より市販



苗を大量増殖中



2002年春より市販



2003年春より市販

サントリーフラワーズ(株)



2006年春より市販

# 植物の育種法

- 交配技術—殆どの栽培作物  
(メンデルの法則)
- 探索 (自然突然変異など)
- 遺伝子組換え技術
- **突然変異誘発技術**
  - 培養変異
  - 化学変異剤
  - 放射線



幻のクリスマスローズ  
1991年120年ぶりに日本人によって再発見された  
ヘレボラス・チベタヌス



青いカーネーション  
ムーンダスト

# ● 突然変異誘発技術

## 放射線

1895年: W.K.von Röntgen X線発見

1897年: Pierre & Marie Curie ラジウム・ポロニウムの発見

1904年: C.S.Gager ラジウム線の植物への影響

: M.Koerniche X線の植物への影響

1910年: T.H.Morgan

X線によるショウジョウバエの突然変異誘発成功

1927年: C.S.Gager

ラジウム線によるニンジンの染色体突然変異報告

1927年: H.J.Muller

X線によるショウジョウバエの突然変異を遺伝子レベルで  
証明(1946年ノーベル賞)

1934年: T.H.Goodspeed

X線による変異株を育成親としたタバコ新品種育成

1970年代  
新しい放射線  
重イオンビーム



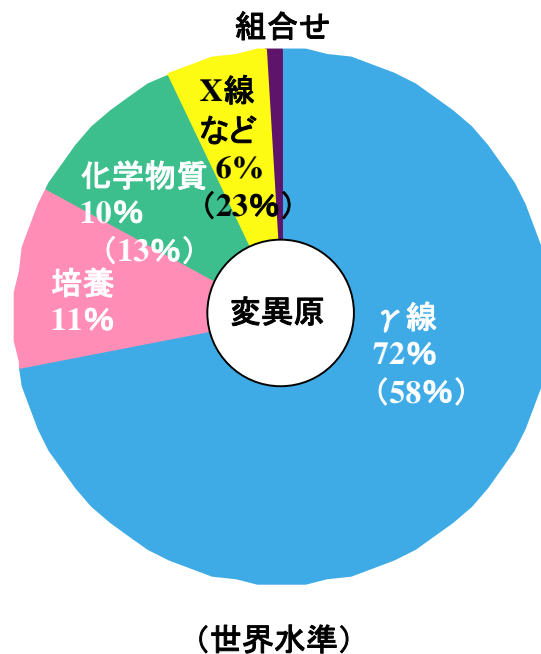
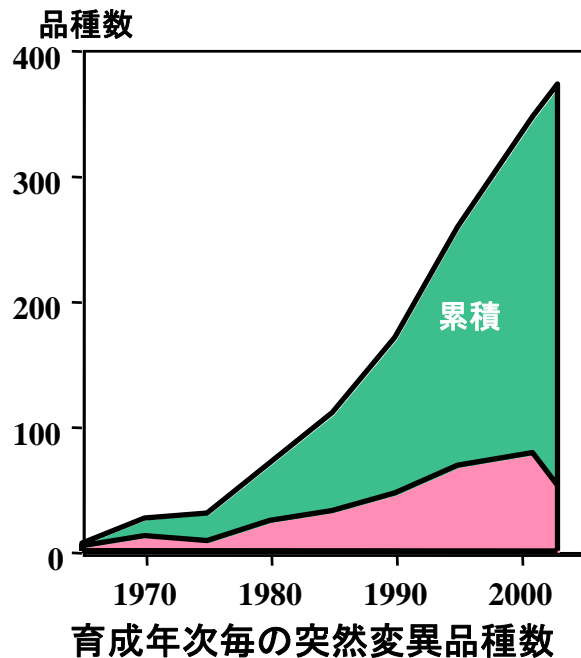
## ■突然変異誘発技術(日本における $\gamma$ 線利用技術の発展)

1960年 農水省放射線育種場 設立

1961年 ガンマフィールド照射開始 ( $^{60}\text{Co}$ , 88.8TBq, 2400Ci)

1964年 ガンマグリーンハウス ( $^{137}\text{Cs}$ , 4.81TBq, 130Ci)

1967年 ガンマルーム ( $^{60}\text{Co}$ , 44.4TBq, 1200Ci)



## イオンビーム

1986年 理研RRC完成

1987年 放射線高度利用研究計画策定

1989年 理研AVFサイクロトロン完成

植物照射の影響に関する基礎研究開始

(理研・原研・大学連合チーム)

1993年 原研高崎研TIARA完成

2001年 若狭湾エネルギー研究センターW-MAST完成

	Beam time (hrs)		Ion	Beam Energy	LET	Range in Water	Cooperation
	Total	Plant exp.		(MeV)	(keV/μm)	(mm)	
RARF	3400	72	C	1620	23	40	70
			N	1890	31	34	
			Ne	2700	63	23	
			Ar	3800	280	8	
			Fe	5040	624	4	
TIARA	2000	150	He	100	9	6.2	20
			C	320	86	2.2	
			Ne	350	433	0.6	
W-MAST		48	H	200	0.5	250	5
			C	660	41	9	

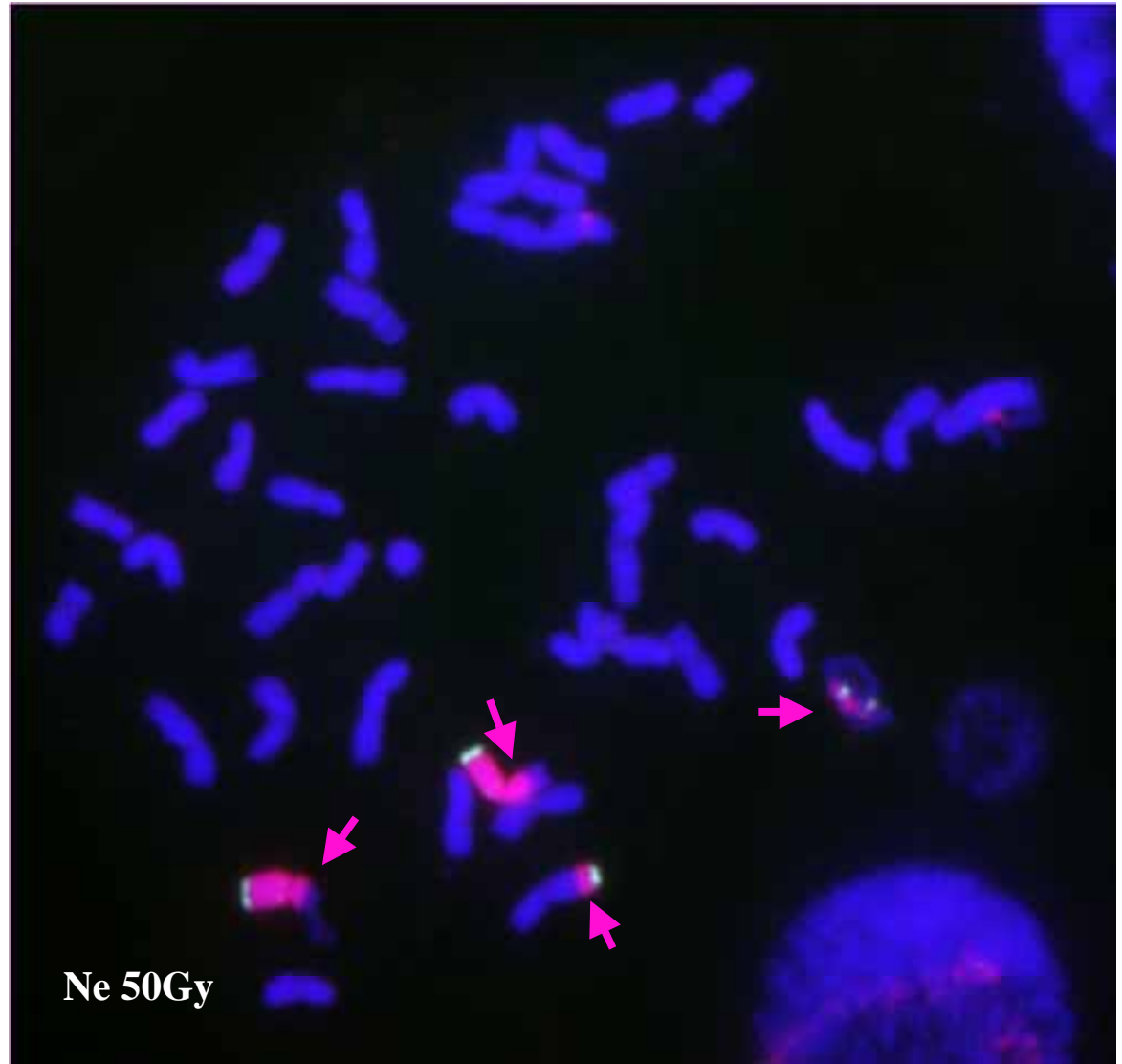


Red:GISH

Green:TaiI-family

コムギにオオハマニンニクの  
異種染色体を一組添加した系  
統を育成しました。  
染色体数は  
 $42+2=44$ 本となります。

乾燥種子にネオンビームを  
50Gy照射し、生存個体の根端  
細胞の染色体を観察しました。  
矢印は染色体切断部位を示し  
ます。2本の染色体では2カ  
所の切断が生じています。

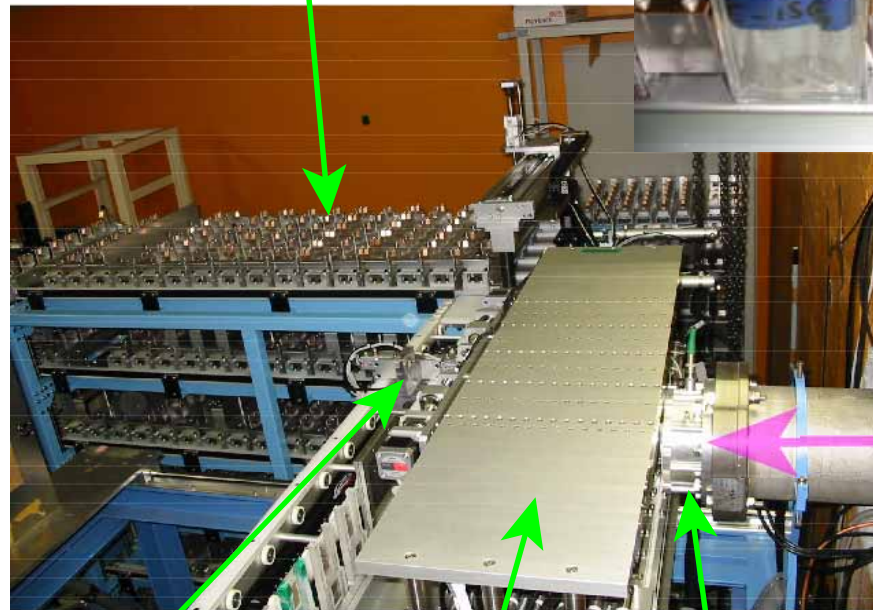


44本の染色体では44カ所の切断？

共同研究：鳥取大学



Automatic  
Sample Changer



Ionization  
Chamber 2

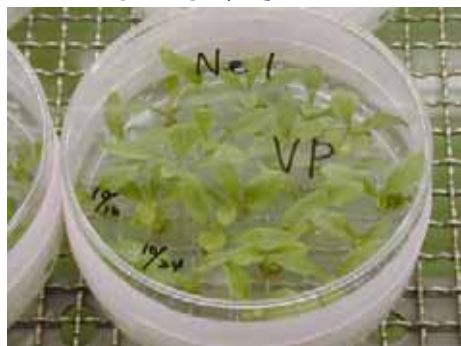
Range  
Shifter

Ionization  
Chamber 1

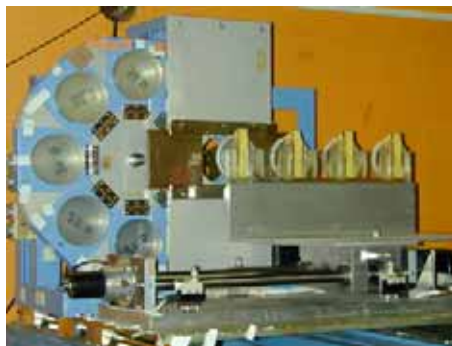
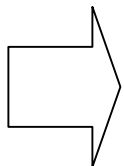
Beam

# プチ品種改良技術：一カ所だけ変える（育種年限の短縮）

## 無菌培養

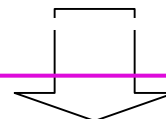
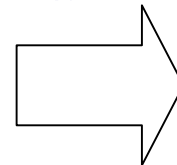


側芽培養



重イオンビーム照射 (生物照射一号機)

芽条変異誘発



## 温室育成

新品種候補(斑入り葉)



斑入り葉だけ

新品種  
(ローズ)



花の色だけ

変異株選抜・大量増殖



パープル従来品種

共同研究: サントリーフラワーズ

# コラボレーションフラワー 理研-サントリーフラワーズ製品



**サントリー花苗 入荷中!**

●ミモザアカシア (花付き) 8号鉢・販売(約):2m **7,800円**

**06年春物告知**

**サフィニア各種** 3号ポット **各298円**

- ローズベイン  
白色に、中心に向かって赤紫色の筋の入った花
- ホワイトベイン  
代表的な品種、隣りある赤紅色の中心の花
- パープル  
緑色の葉の間に中心の花
- パープルミニ

●ロベリア  
●ムーンシリーズ  
●雷樹イペリスファンタジア

●カーベット  
●カスミ草  
●エチア

**各150円** **各200円**

リサイクルしたガラスで  
100%の軽量化です。特大鉢 送料別、日本産



**サフィニア**

 <b>パープル</b>	 <b>バスタードピンク</b>	 <b>バイオレット</b>	 <b>ホワイト</b>	 <b>ローズ</b>	 <b>パープルミニ</b>	 <b>レッドミニ</b>	 <b>ライトブルーミニ</b>	 <b>バイオレットミニ</b>
 <b>グランパープル</b>	 <b>グランブルー</b>	 <b>フリームスエロー</b>	 <b>ロイヤルビクトリア</b>	 <b>ストロベリーミニ</b>	 <b>アメジスト</b>	 <b>ブライトピンクミニ</b>	 <b>ピンクベイン</b>	 <b>アメジストミニ</b>

2004年カタログ サフィニアローズ  
(2003年新色ローズベインを改名)

2005年8月4日 アイソトープ協会

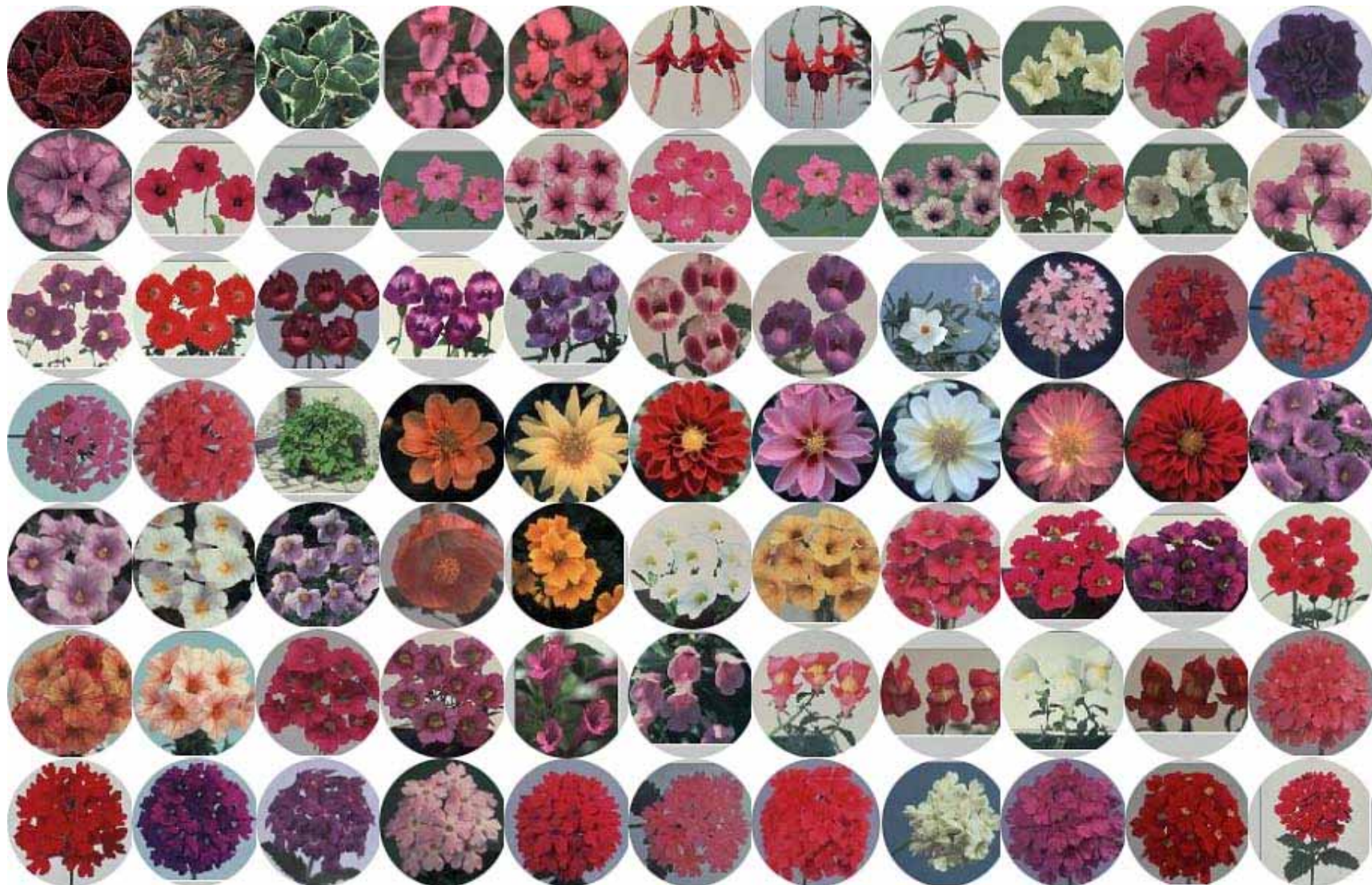
# 花の色を変える

農林水産先端技術産業振興センター (STAFF)  
(サントリー株式会社)

橋本 昭栄



# すべての色のある植物種は少ない。





# 花の色と色素の関係



## アントシアニン

←

→

ペラルゴニン

シアニン

デルフィニン

メタロアントシアニン

オーロン  
カルコン

フラボノイド

クロロフィル

ベタシアニン

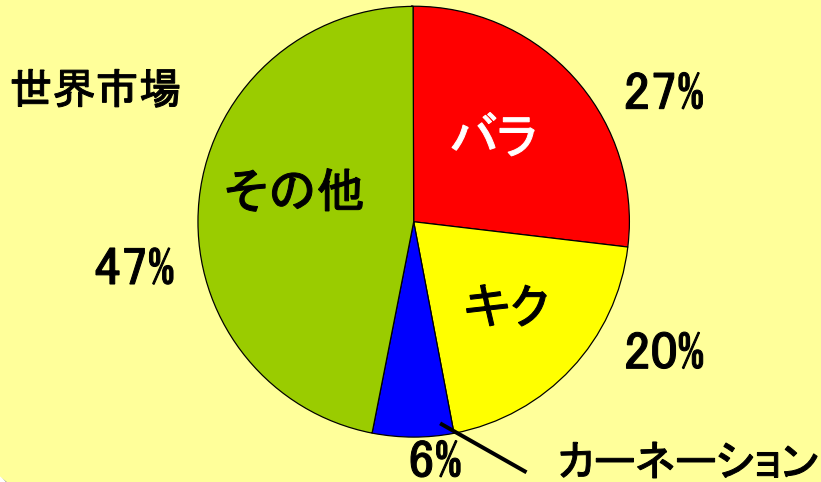
ベタキサンチン

カロテノイド

非フラボノイド

# 「バラ」について

## 3大切花の1つ



## 5千年以上の栽培の歴史

いままでに2万5千種の品種が作出されている。

(現存するのは6千～7千種)

## 多様な花色

赤・白・ピンク・黄色など多種多彩な花色の品種がある。

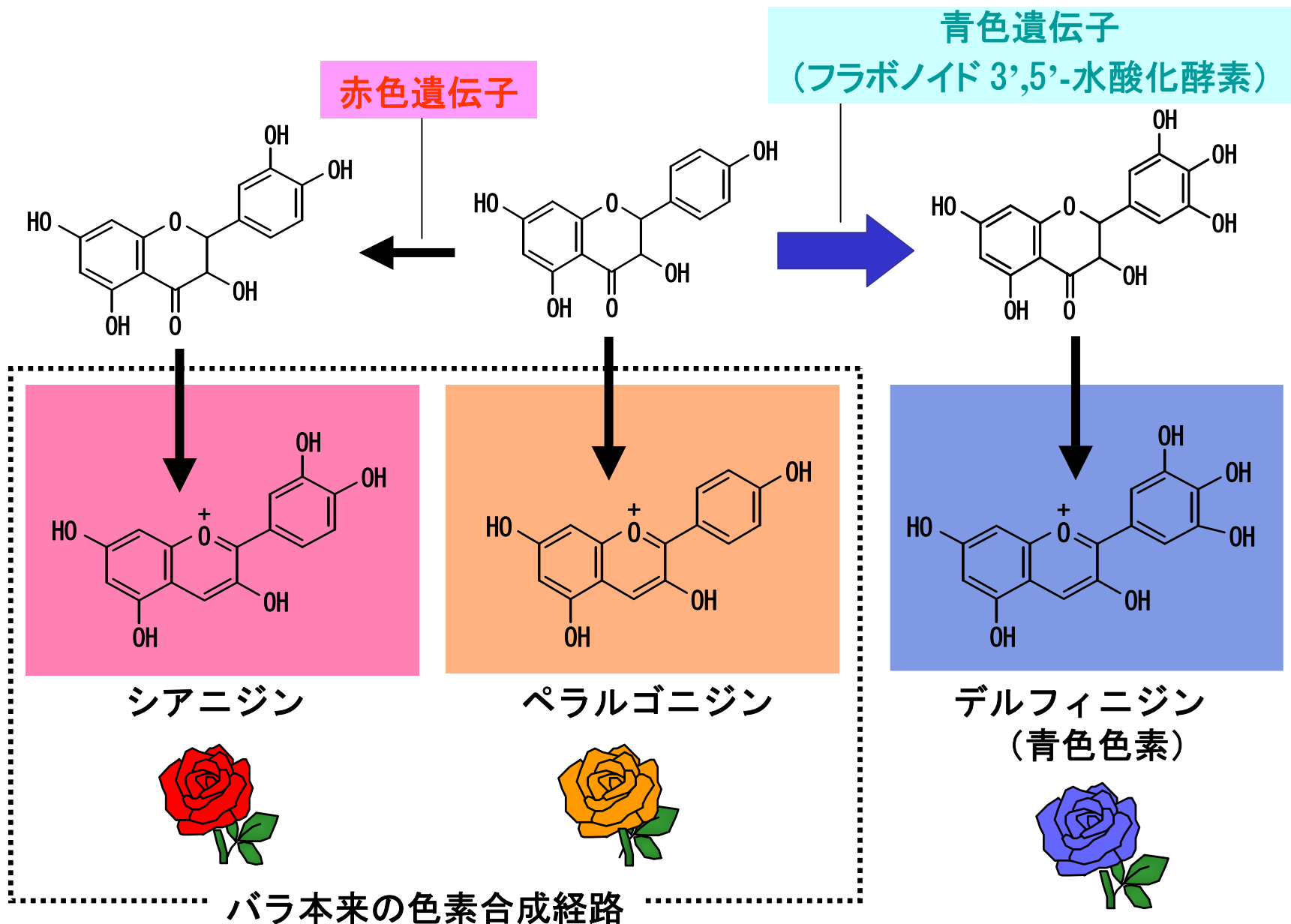
まだ、「青い」品種はない。

## 幻の「青いバラ」

英語で“BLUE ROSE”とは「不可能」の意味。

従来「青いバラ」を作るのは不可能とされてきた。

# バラにおける花色素合成の経路



# 花の色を決定する要因

## 1. 色素の種類/構造/量

## 2. 共存する物質

- フラボン、フラボノール(コピグメント効果)
- 金属イオン

## 3. 細胞内の環境

- 花弁液胞のpH

## 4. 細胞の形態

世界初、「青いバラ」誕生。



不可能の代名詞「Blue Rose」。サントリーは、先端技術応用研究所のチームを中心に14年の歳月を費やして、世界で初めて青色色素は100%天然の「青いバラ」誕生に成功。これはまだ夢の第一歩、もっと研究を重ね、もっと「青いバラ」に近づけて、わたしたちの感動はつづけます。

もっと青く。

サントリーは、「夢」に向かって挑戦をつづけます。

SUNTORY

# Roses were red, now looking blue.

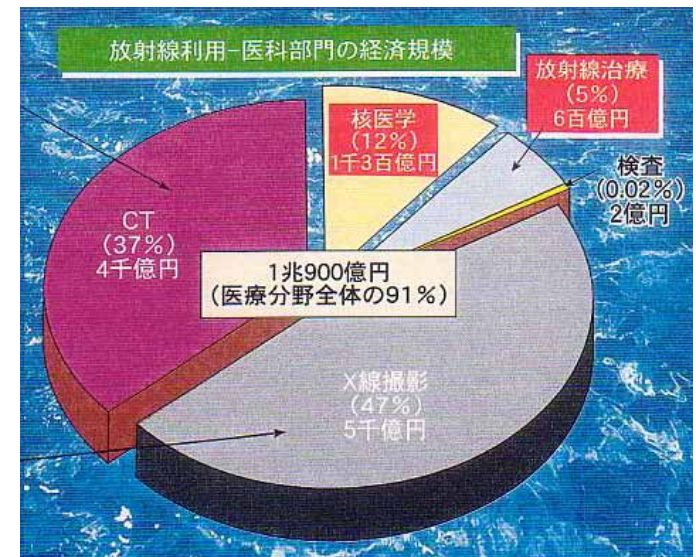
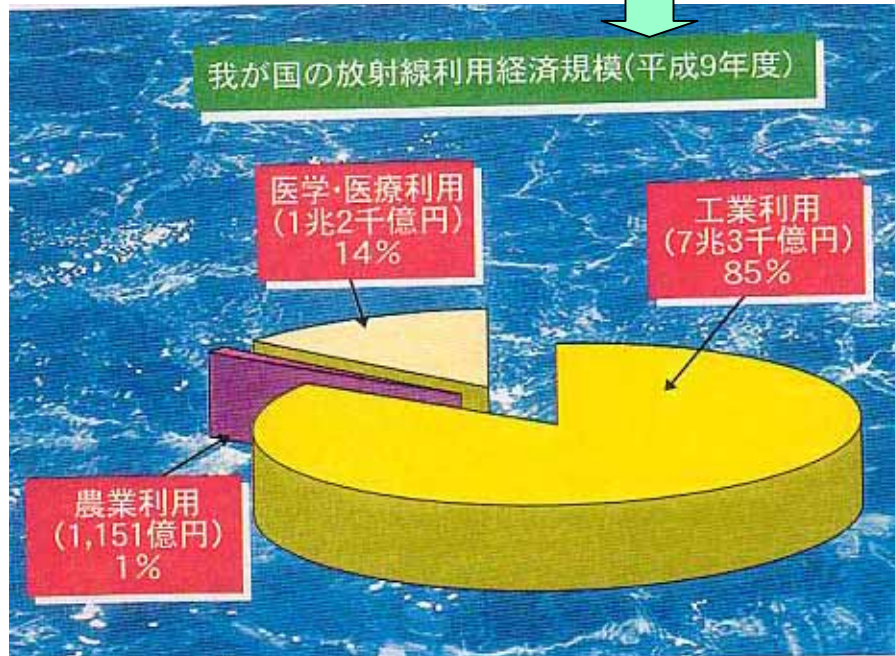
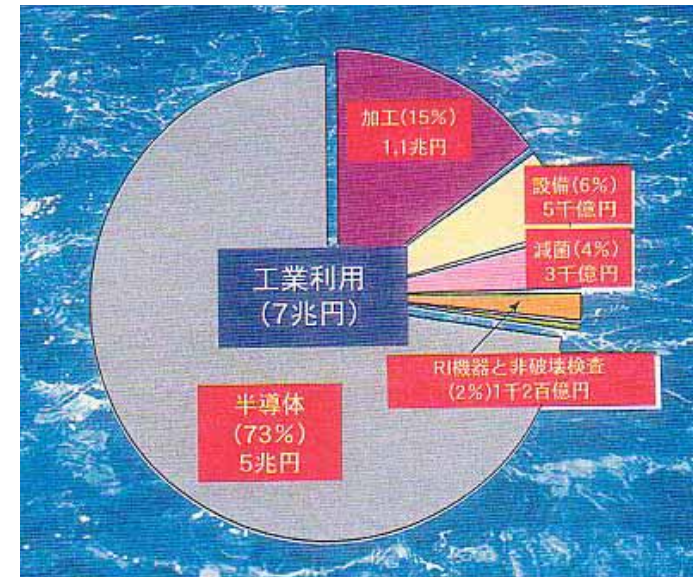
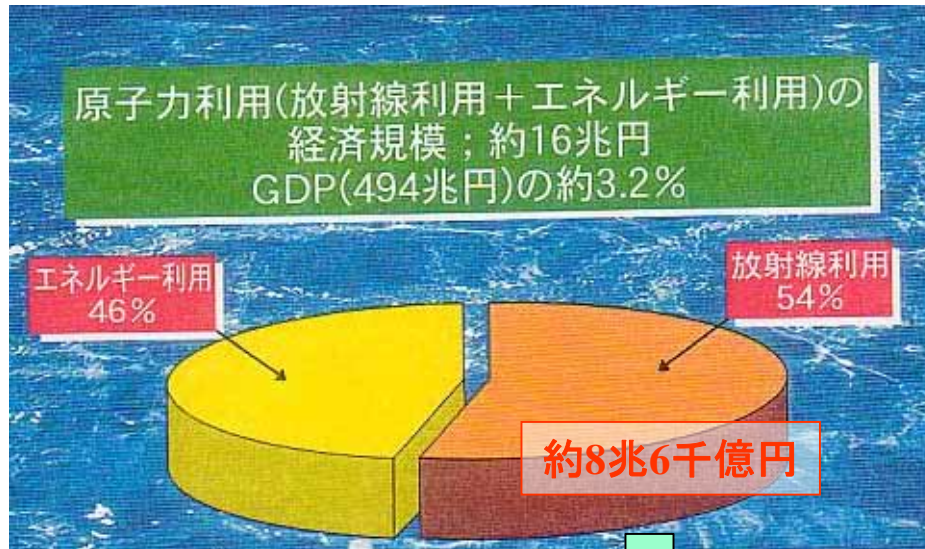
---



宿主

組換えバラ

# 放射線利用の経済規模



# 結び

放射線の危険を正確に把握・分析して  
制御して使用すれば、安全に人間社会に  
利益をもたらすことができます。

RiskとBenefitのバランスは工学の基本です。

そこには高いレベルの科学技術力に加え、  
技術倫理観も必要になってきました。

知らないで怖がる人でなく、知って判断して  
コントロールできる人になってください。