

放射線と環境 放射線利用

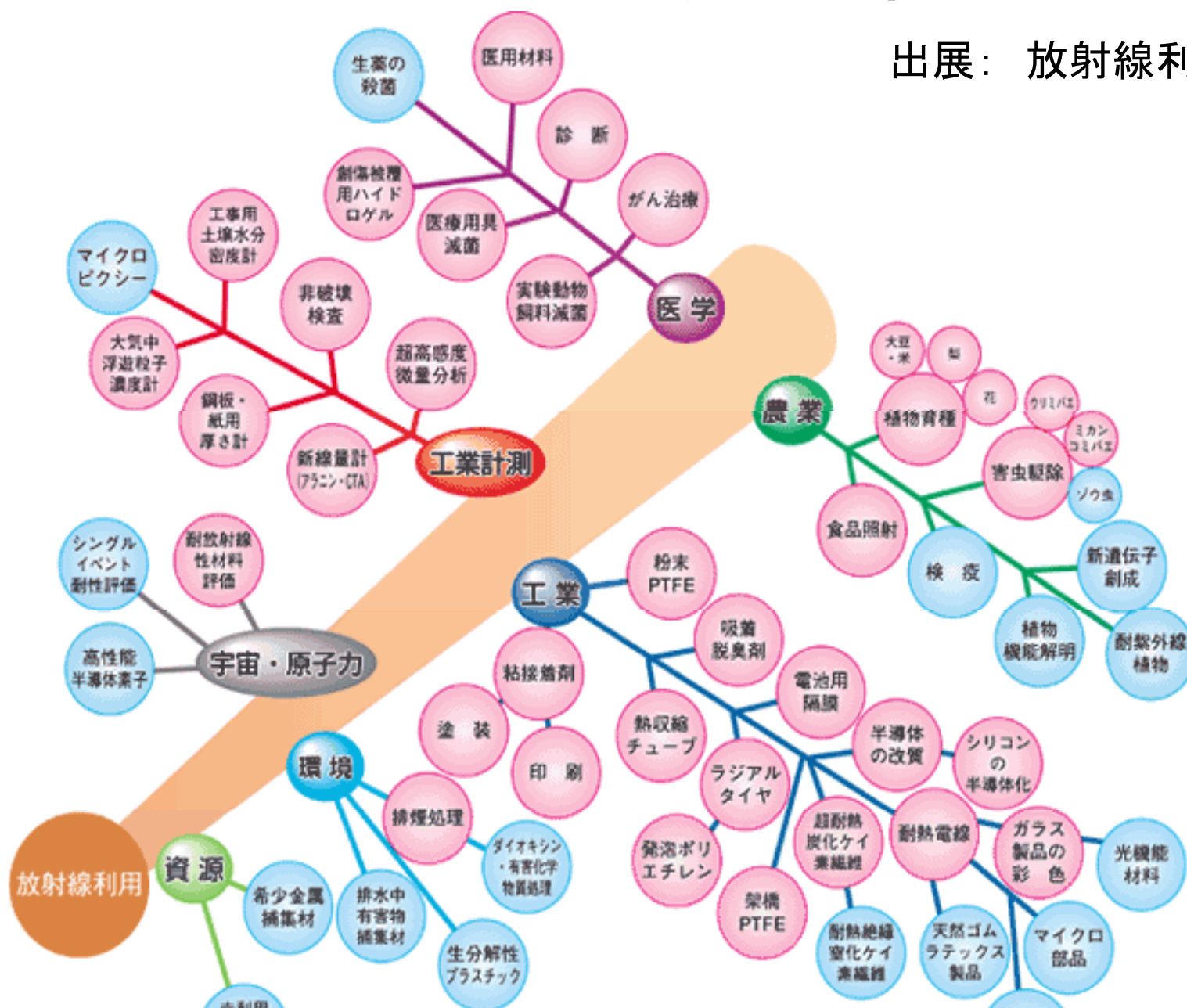
2015年6月19日

講義内容

1. 工業利用
2. 測定利用
3. 農業・食品利用
4. 医学・医療利用

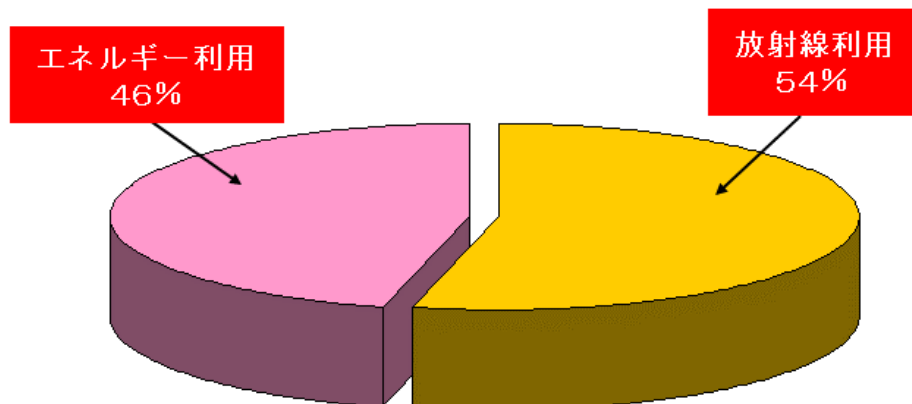
日本における放射線の利用

出展：放射線利用振興協会

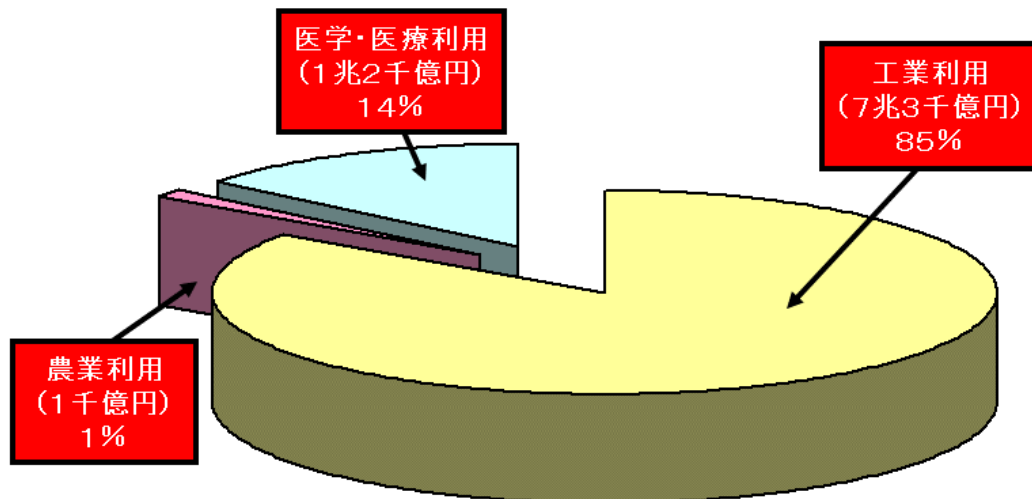


日本における放射線利用の規模

原子力利用(放射線利用+エネルギー利用)の
経済規模: 約16兆円
対GDP(494兆円)比 約3.2%

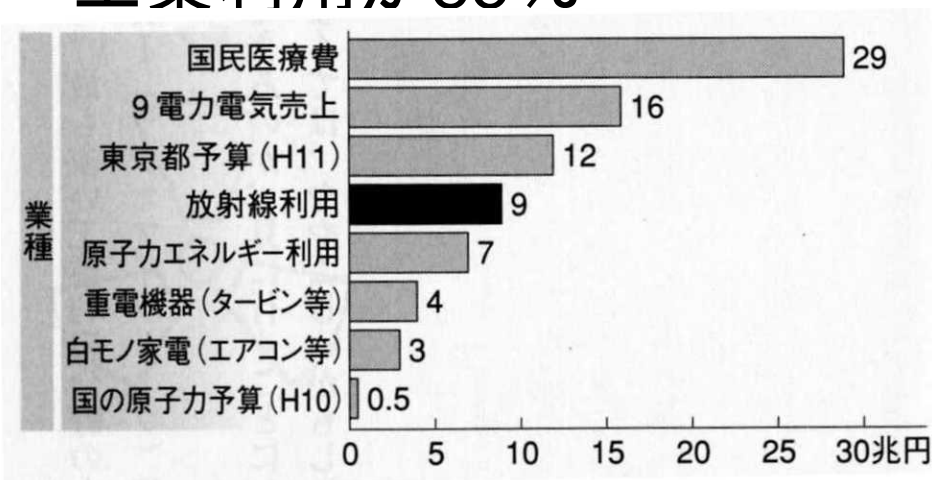


わが国の放射線利用経済規模(平成9年度)
約8兆6千億円



放射線利用の経済規模 は8兆5千億円(97年度)

- 原子力エネルギー利用の規模を上回る(米国では4倍)
- GDPの約1.7%
- 現在も拡大中
- 工業利用が85%



工業利用 の経済規模

半導体加工73%
それ以外の加工15%
照射設備6%
滅菌4%
など

分 野				出荷高 (億円)	小計 (億円)
(1)照射設備					4,274
	工業用	コバルト施設	8		
		電子加速器	274		
		イオン加速器	299		
	医療用	診断用×線装置	2,051		
		画像診断用医学装置	102		
		検査用核医学装置	2		
		放射性同位元素治療装置	18		
		医療用密封放射性同位元素	4		
		治療用粒子加速器	107		
		医療放射線関連装置及び製品	1,409		
(2)放射線計測機器等					654
		放射線測定器・RI装備機器 放射線防護用設備・機器			
(3)非破壊検査(RT)					312
(4)放射線滅菌					2,841
	ガンマ線		2,647		
	電子線		194		
(5)放射線加工					10,987
	橋かけ	タイヤ	10,146		
		電線・ケーブル	450		
		発泡体	179		
		熱収縮チューブ・フィルム	165		
		その他	2		
	分解	PTFE	5		
	硬化	塗装、表面加工、磁性材料	30		
	グラフト	電池隔膜、吸着剤	10		
(1)～(5)の合計					19,068
(6)半導体加工					53,559
(1)～(6)の合計					72,627



工業利用の大半は半導体加工

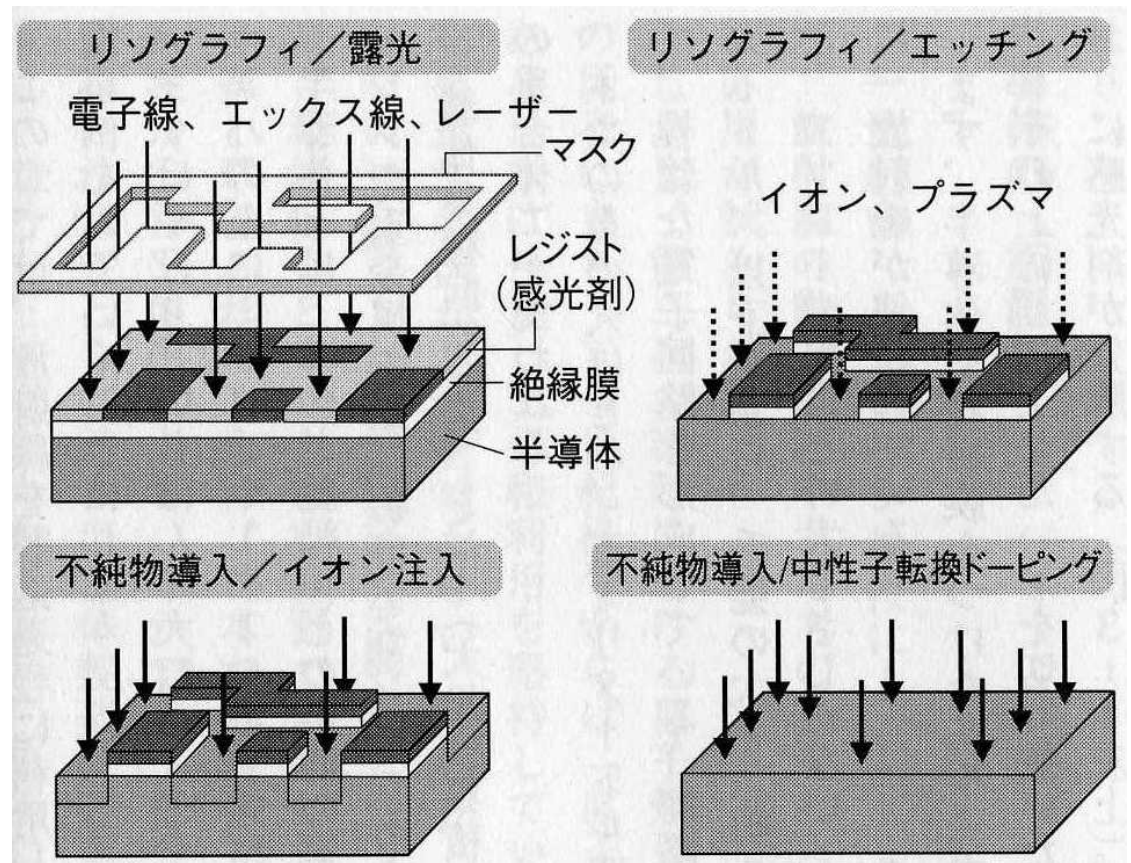
- ICやLSIの**集積度向上**のカギを握る技術

- フォトリソグラフィ
(一種の石版画)

- イオンエッチング
(一種の銅版画)

- イオン注入
(半導体素子の電気的性質を決める)

- 中性子転換ドーピング
($^{30}\text{Si} + n \rightarrow ^{31}\text{P}$ で均一なn型半導体を製造)



自動車産業も大口ユーザー

タイヤ	ゴムチューブ、インナーライナー、サイドウォール
電線・ケーブル	耐熱性電線、安全対策・排ガス対策電線、電線ケーブル
発砲プラスチック	車内の天井、インスタルメントパネル、エアコン用断熱材
性能テスト	エンジン・クランクシャフトの摩耗、オイル消費速度
各種電子部品	制御(エンジン、サス)、情報(ナビ、メーター)、安全性(ABS、障害物検知器)、快適性(エアコン、オーディオ)



エンジンルーム耐熱性電線



ラジアルタイヤ

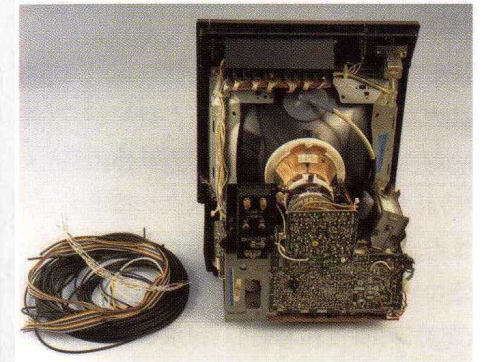
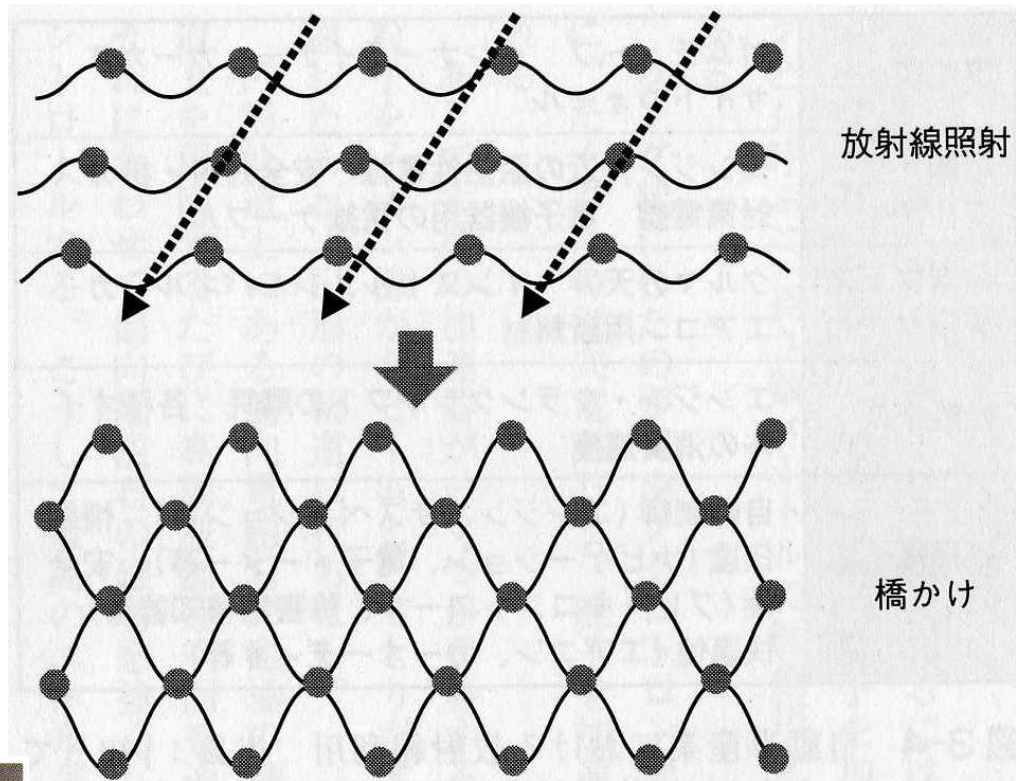


フロントパネル
(発砲プラスチック)

高分子鎖の「橋かけ」反応の利用



ラジアルタイヤ



耐熱電線・ケーブル



発砲シート



熱収縮チューブ

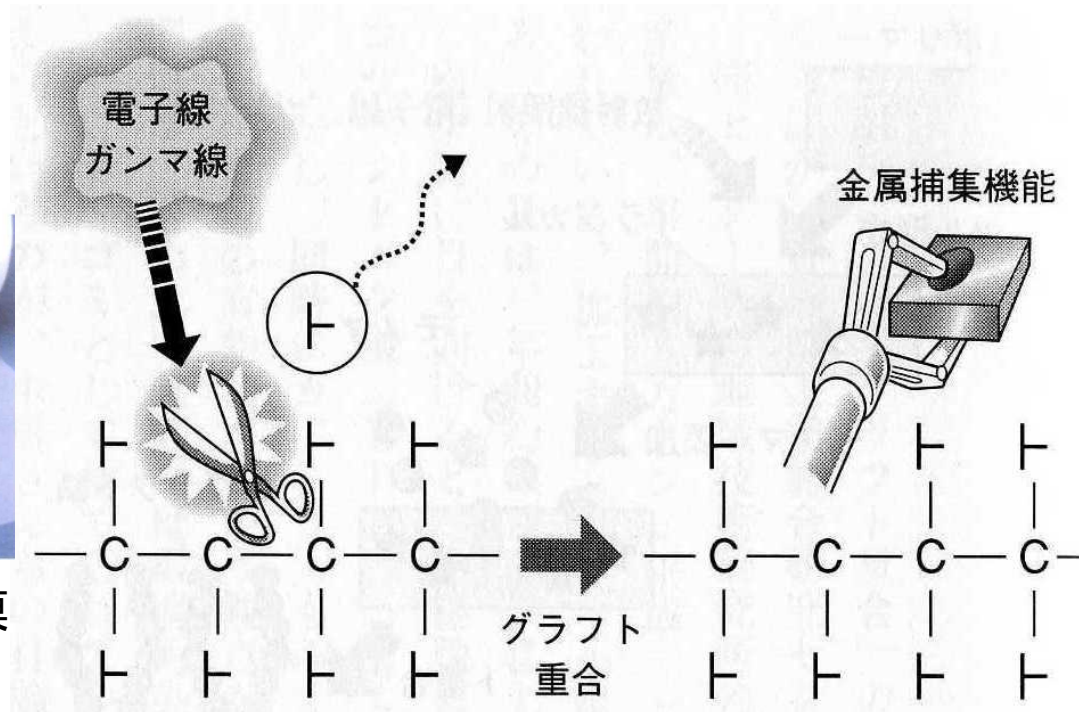


ハイドロゲル創傷被覆材

放射線グラフト重合の利用



ボタン電池の薄膜



空気浄化フィルター



消臭原糸を織り込んだ衣料品



プラットフォーム



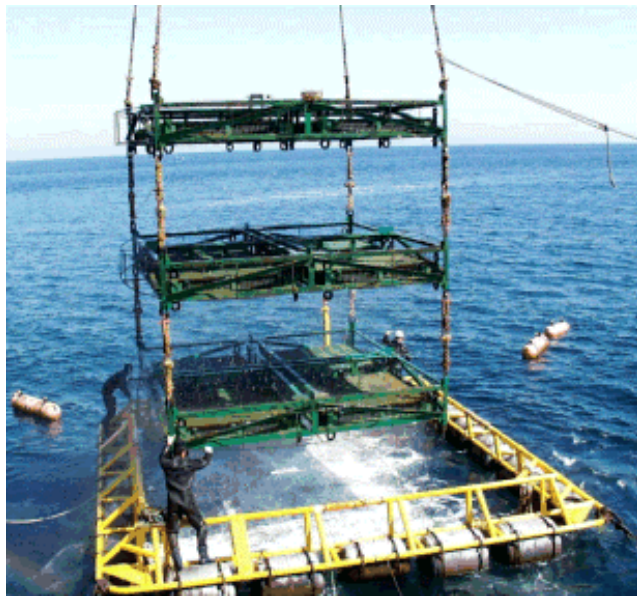
ごみピット

グラフト重合消臭剤を利用した
生ゴミ発電施設の悪臭対策

放射線グラフト重合の利用(続き)

- 金属吸着による資源の捕集 -

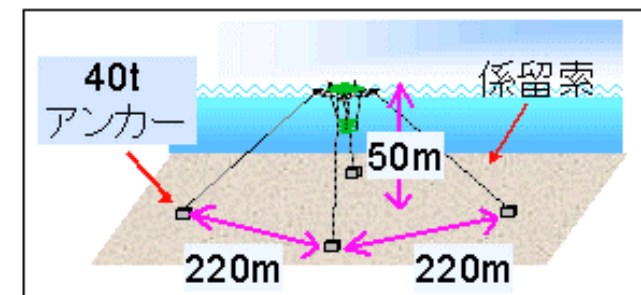
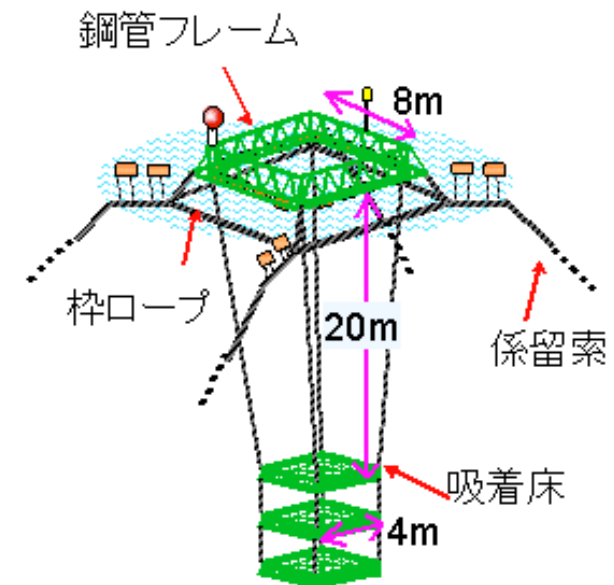
- 海水からウラン(資源量は利用可能な鉱石の1000倍)
- 海水からバナジウム(稀少金属)
- 温泉からスカンジウム



海水ウランの捕集作業



海水から回収したウラン

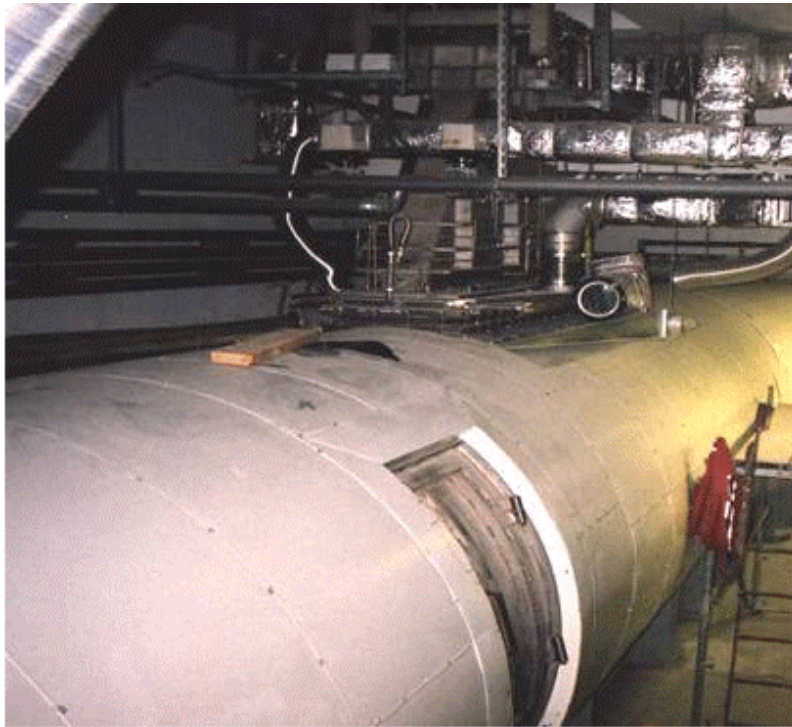


稀少金属の捕集作業

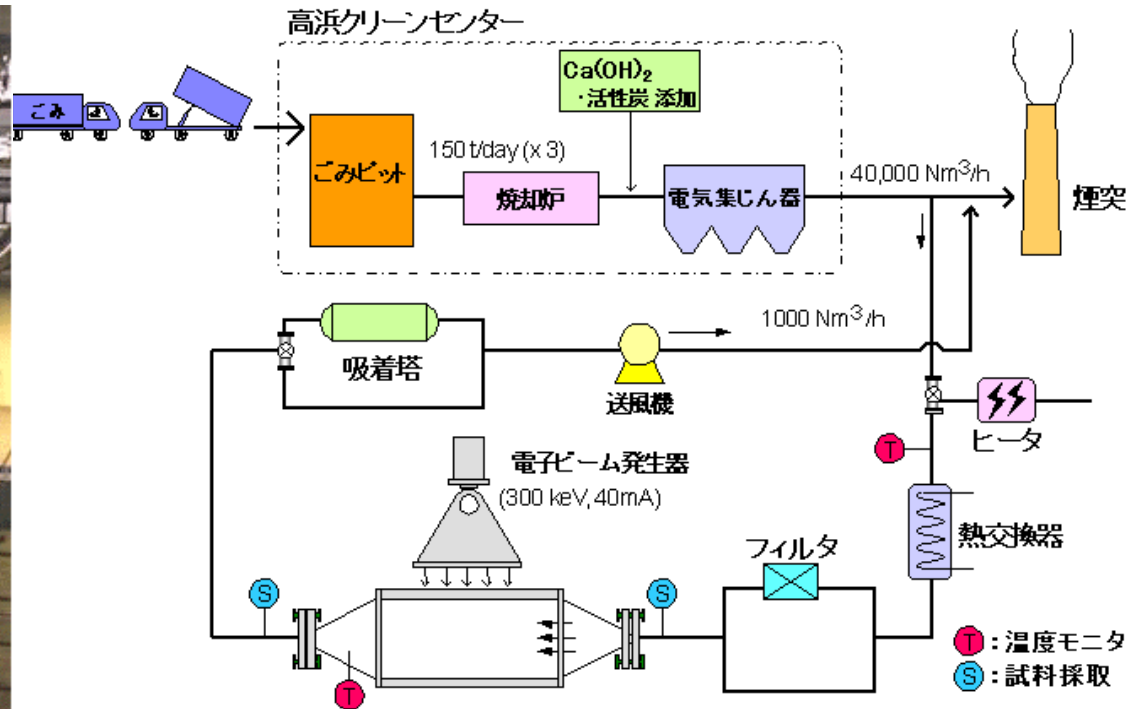
電子線による有害物質の酸化・分解

- 空気中や水中にできるラジカル作用 -

NO_x、SO_x、ハロゲン化炭化水素、ダイオキシンなど

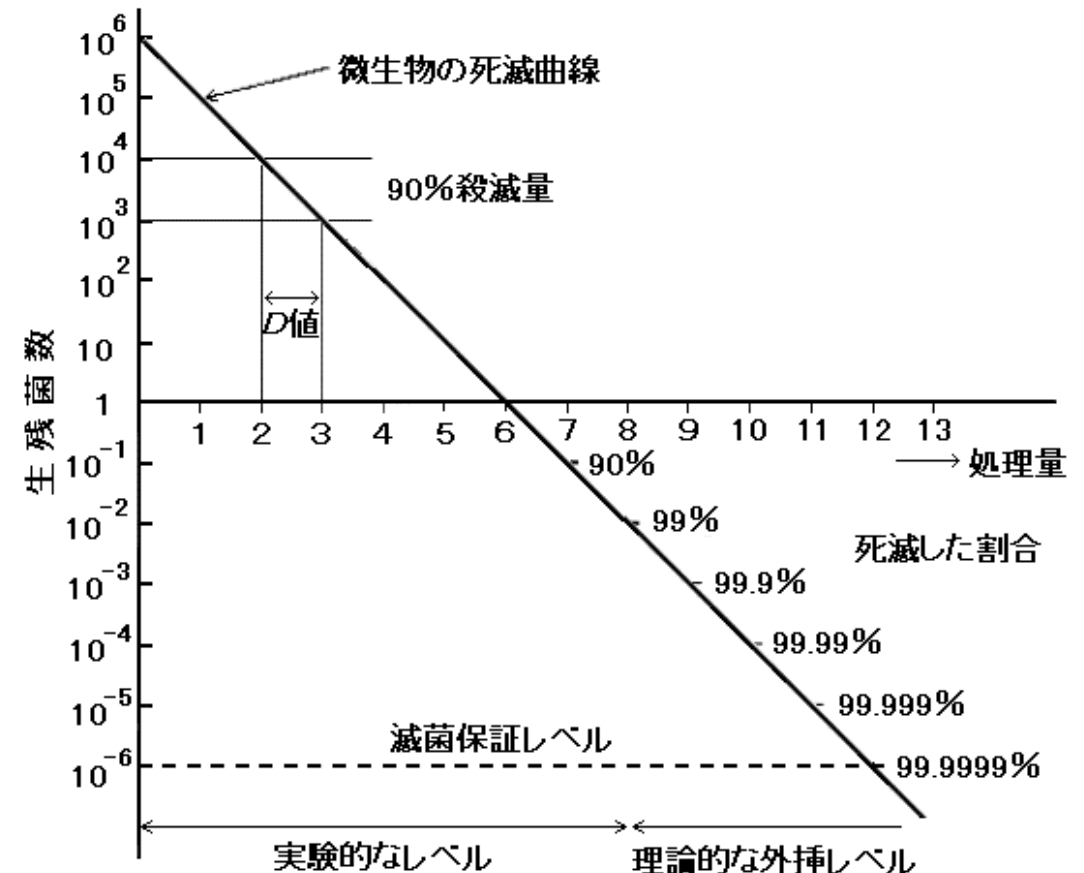


低質石炭火力発電所の排煙処理



ダイオキシン分解試験

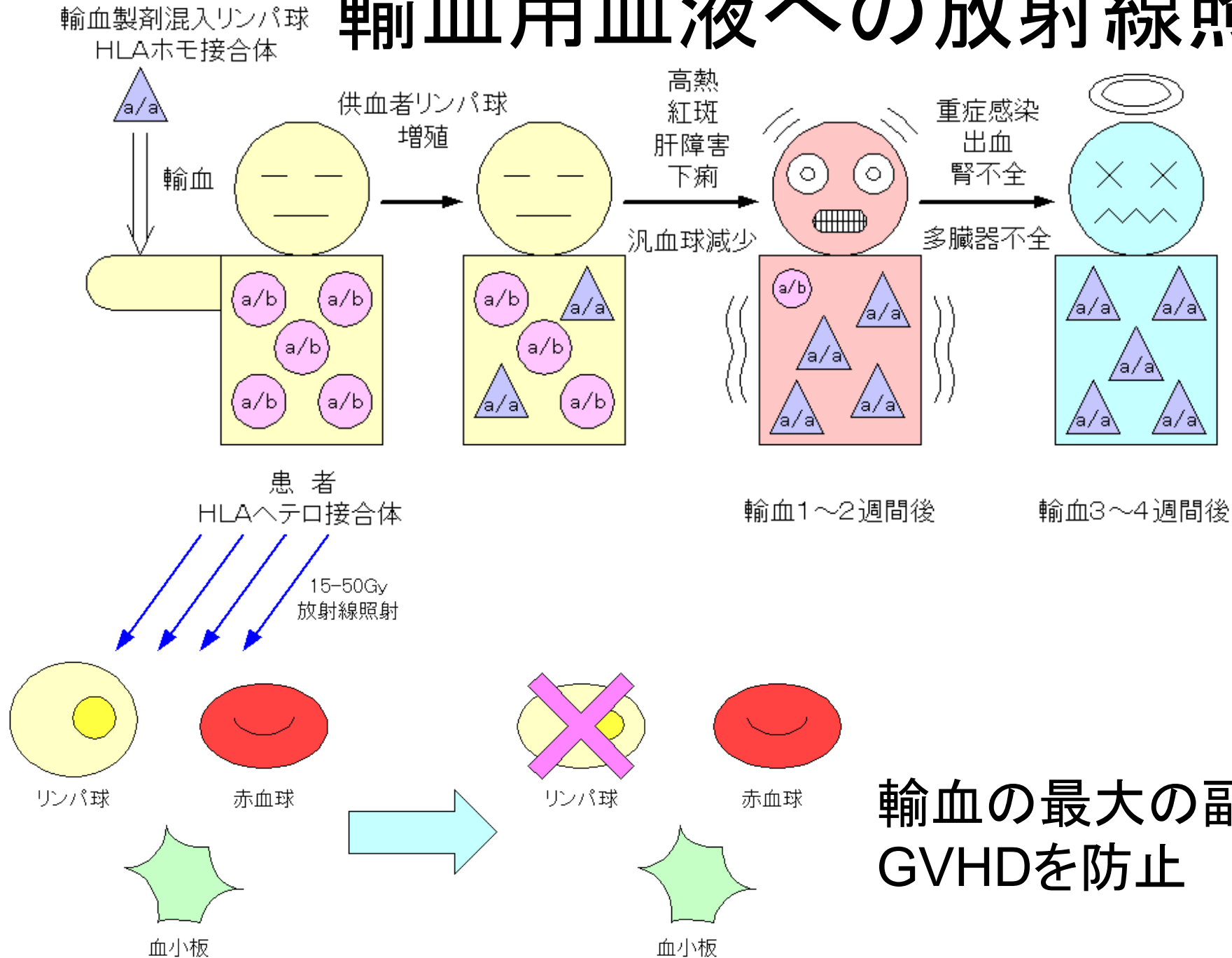
ガンマ線、電子線照射による殺菌・滅菌



滅菌保証レベル 10^{-3} : 採血用具、ガウンなど

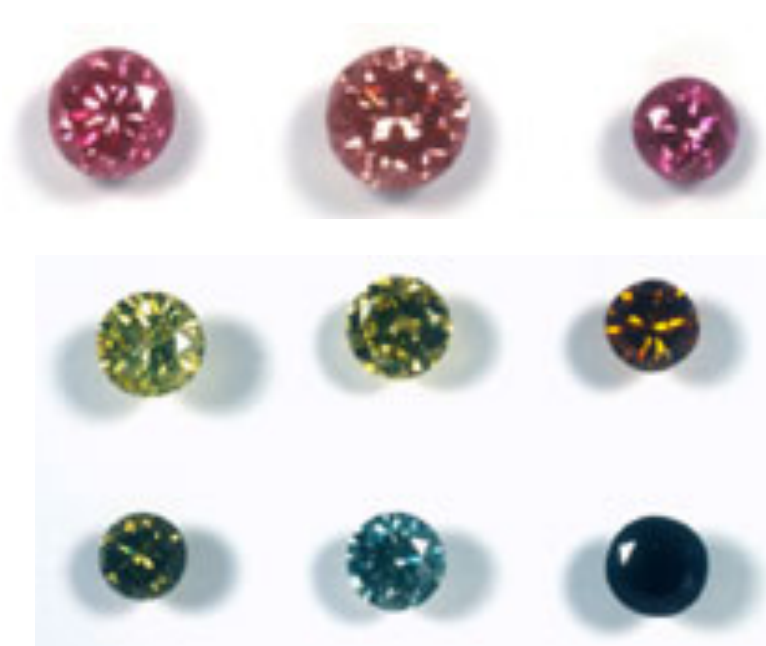
滅菌保証レベル 10^{-6} : 人工腎臓透析器、注射器、注射針、メスなど

輸血用血液への放射線照射



放射線による着色作用の利用

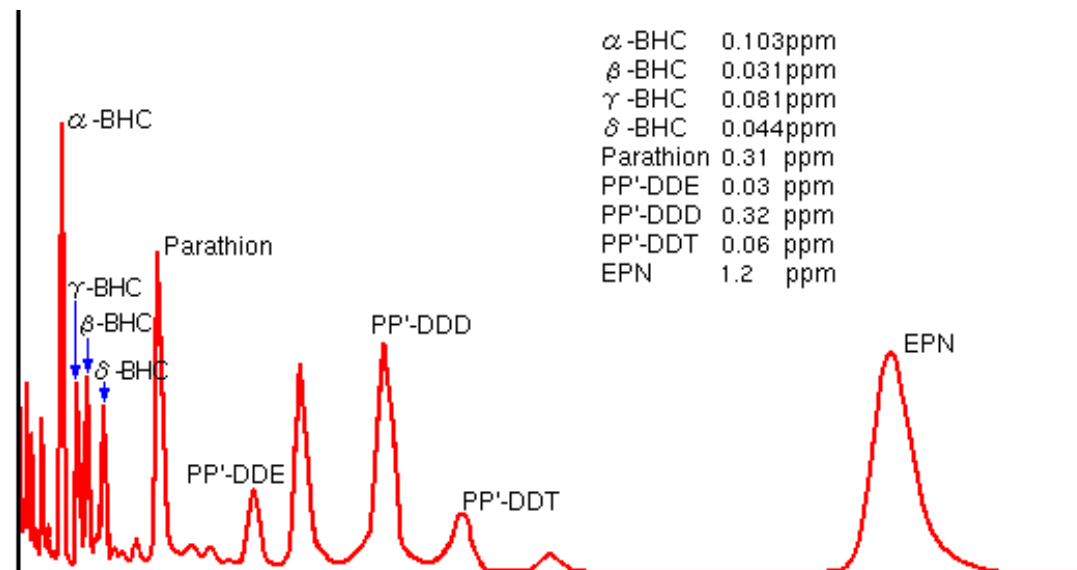
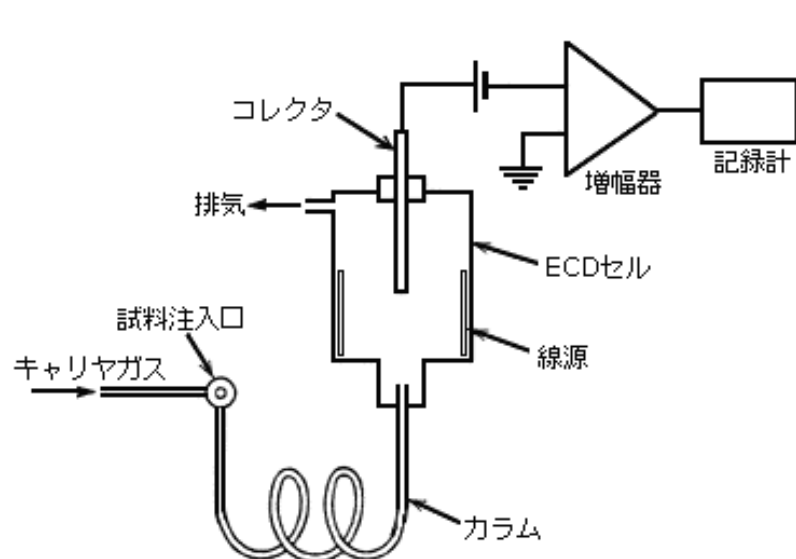
- ガラスの着色 → 薬品による着色と異なり高温で溶融すると着色が消える → 再利用できる
- 真珠やダイヤモンドトパーズの着色 → 付加価値



工業・農業における測定の例

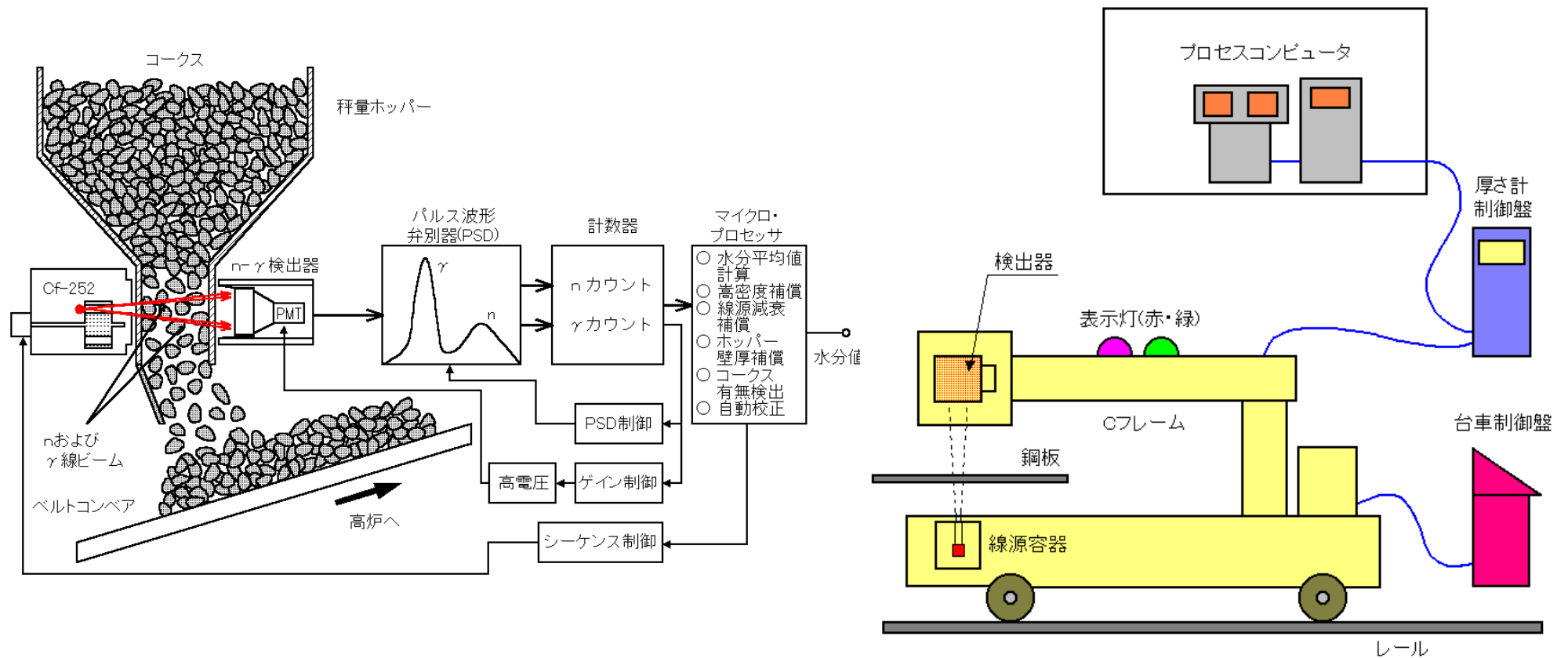


ジェットエンジンの非破壊検査



ECD付きガスクロマトグラフによる緑茶中の残留農薬分析

鉄鋼業における測定の実例



中性子とγ線とを同時利用
した高精度コークス水分計

鋼板の厚さ計測による品質管理

放射性同位体の割合を測って年代測定

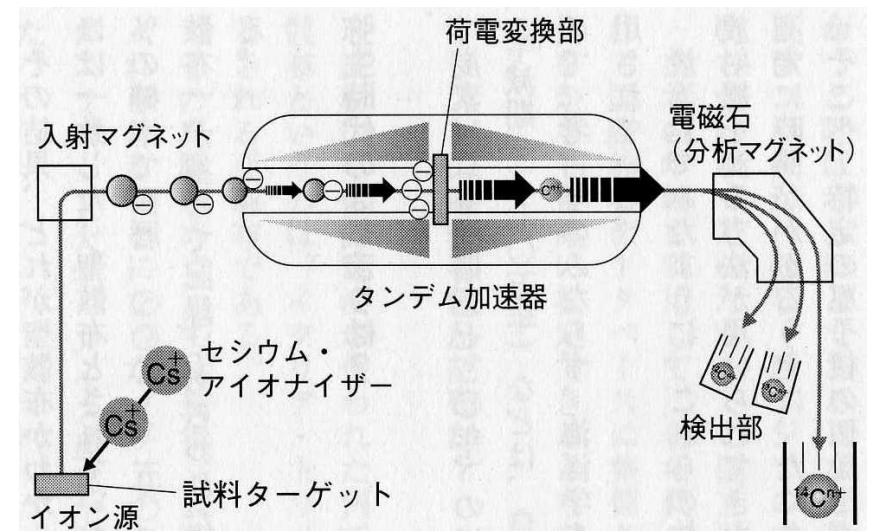
^{14}C 法： 遺跡から発掘される生物の遺体(木材、木炭、貝殻、骨など)の年代測定に利用(約300～5.5万年前まで測定可能)

- キリストの聖骸布とされていた亜麻布が95%の確率で1260-1390年のものと判明
- 縄文土器の年代が1万6000年まで遡ることが判明
- 古代のハスの実が2865～3255年前のものと判明

加速器質量分析法(AMS法)：

より高精度の年代測定が可能
(0.2mgの炭素で20年の精度)

- 弥生時代の開始は紀元前300年ではなく紀元前800年



自然放射線の吸収量による年代測定

熱ルミネッセンスを利用(TLD個人線量計と同じ原理)

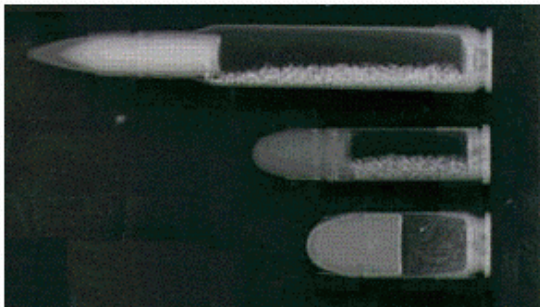
- 石英や長石などの鉱物が蓄積する自然放射線のエネルギーは期間に比例
- 土器の焼成や火山噴火などでリセットされることも利用
- 100年～100万年の広い範囲で測定可能
- 日本の前期旧石器遺跡の年代測定などに利用

不対電子の濃度を利用

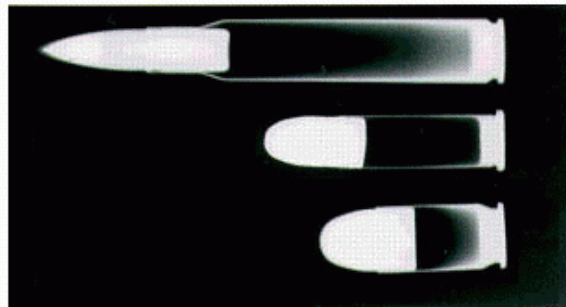
- 不対電子の濃度は吸収線量、つまり期間に比例
- 電子スピン共鳴法で測定
- 石英を含む遺物や歯、骨などを1000～数100万年前の広い範囲で測定可能

犯罪捜査などへの利用

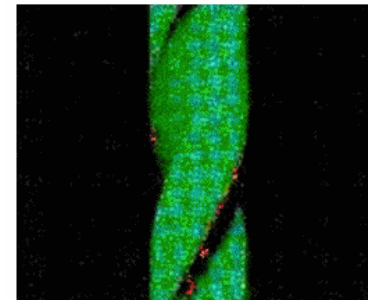
- ナポレオンの髪の毛1本を**放射化分析**にかけたところ、通常の13倍のヒ素を検出
- Spring-8を用いた**蛍光X線分析**で、カレー毒物混入事件の亜ヒ酸と容疑者宅で検出された亜ヒ酸が一致
- 空港の手荷物検査などで、通常のX線撮影では検出できない軽元素(爆薬や覚せい剤)を発見
- 蛍光X線元素マッピングによる物証確認



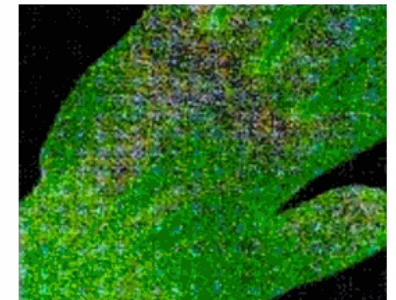
中性子ラジオグラフィ(NRG)像



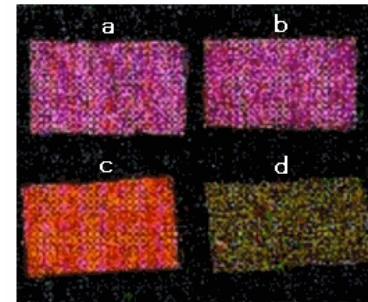
X線透過像



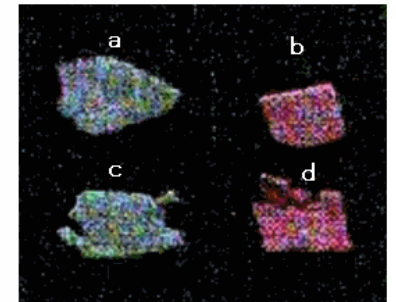
A. ドリルのマッピング



B. 手袋のマッピング



C. 布粘着テープのマッピング



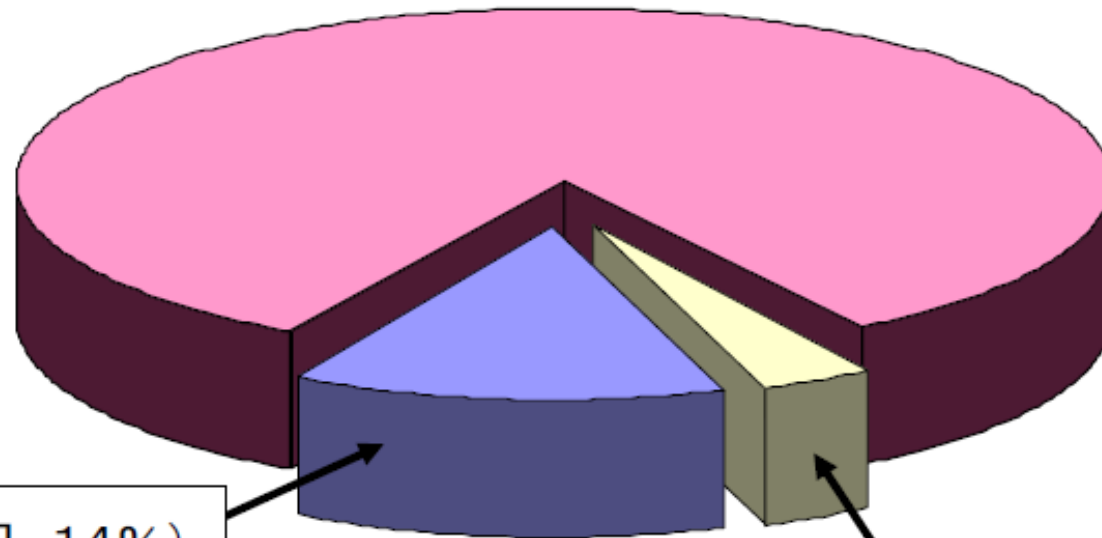
D. 大麻樹脂のマッピング

農業・食品利用の経済規模

放射線利用全体の1%に留まる → 今後伸びる可能性

突然変異育種(973億円、83%)

・イネ	: 937億円	・ナシ	: 30億円
・ダイズ	: 5億円	・モモ、キク等	: 1億円



照射利用(165億円、14%)

- ・食品照射: 19億円
- ・害虫駆除: 84億円
- ・殺菌・滅菌: 62億円

アイソトープ利用
(標識化合物などとして利用)
(29億円、3%)

農林水産業での放射線利用

利用方法	利用線種	作用原理
耐病性 (黒斑病－梨、うどんこ・ウイルス病－大麦、 白葉枯れ病・冷害－稲)	γ 線、イオンビーム	電離・切断
組成・生産性改良 (脂肪酸含有量－大豆、生産量増強－ 菌・微生物類)	γ 線、イオンビーム	電離・切断
色素改質(大豆、えのきだけ等)	γ 線、イオンビーム	電離・切断
自殖性(とうもろこし、茶等)	γ 線、イオンビーム	電離・切断
不妊化(ミバエ、ウジバエ等)	γ 線	電離・切断
発芽防止(馬鈴薯、タマネギ等)	γ 線	電離・切断
熟度調整 (トマト、洋ナシ、カキ、野菜、生薬、ウイスキー、 コーヒー豆等)	γ 線	電離・切断
乾燥助成(人参)	γ 線	電離・切断
防疫・保存 (穀類、果実、野菜、酵素、肉類、乾燥野菜)	γ 線、電子線	電離・切断
衛生化・腐敗防止 (包装材、生薬病院食等)	γ 線、電子線	電離・切断
選択的浄化(汚泥、土壌等)	γ 線、電子線	電離・切断
動植物内吸収挙動 (肥料、農薬、除草剤等)	γ 線	透過
流出挙動(肥料、農薬、除草剤等)	γ 線	透過
集魚器	β 線(Pm-147)	励起・蛍光・発光

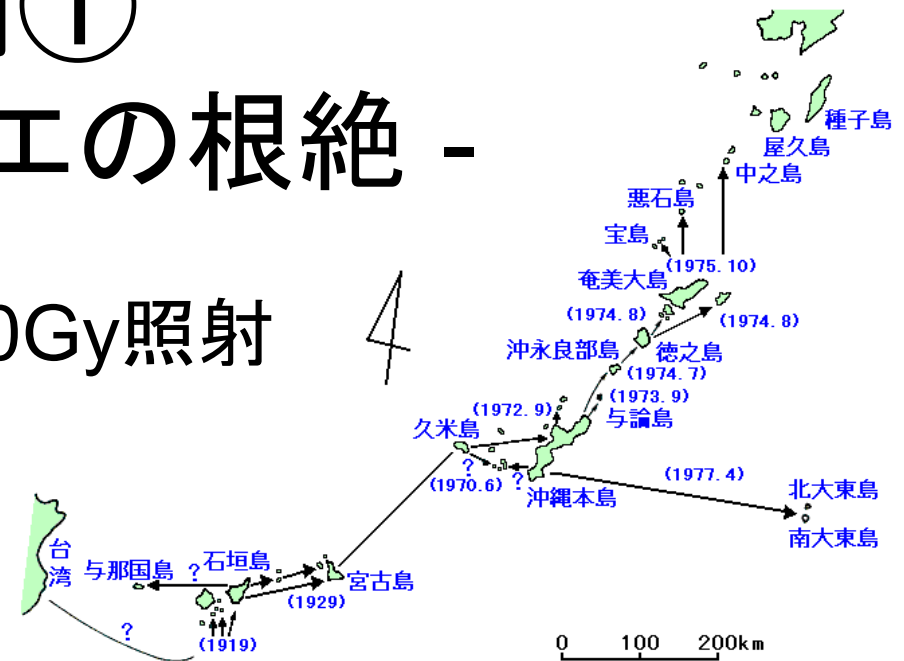
農業利用の例①

- 南西諸島のウリミバエの根絶 -

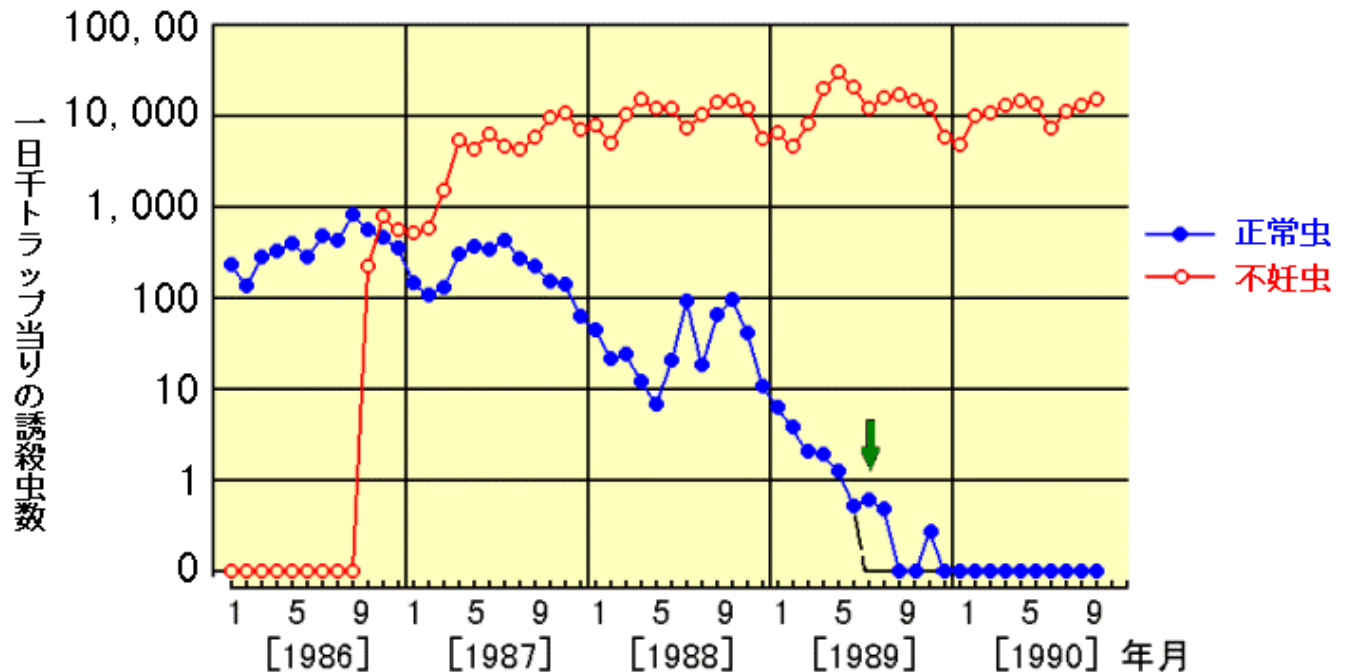
ウリミバエの蛹に ^{60}Co の γ 線を70Gy照射

→ 生殖能力が無い雄の成虫

→ 自然界に放すとやがて絶滅



100種類の植物に害



矢印は南大東島以外の地域がゼロとなった月を表す。

農業利用の例②

- 突然変異で品種改良 -

自然放射線による突然変異を
人工放射線で人為的に起こしている

突然変異を利用した作物育種
- 8品目、970億円



- イネ(17品種)
生産量:約37万トン
(全国:1千万トン)
売上高:937億円
(全国:2.7兆円、シェアは3%)
売上高1位:むつほまれ
(370億円)



(新品種)



(原種)

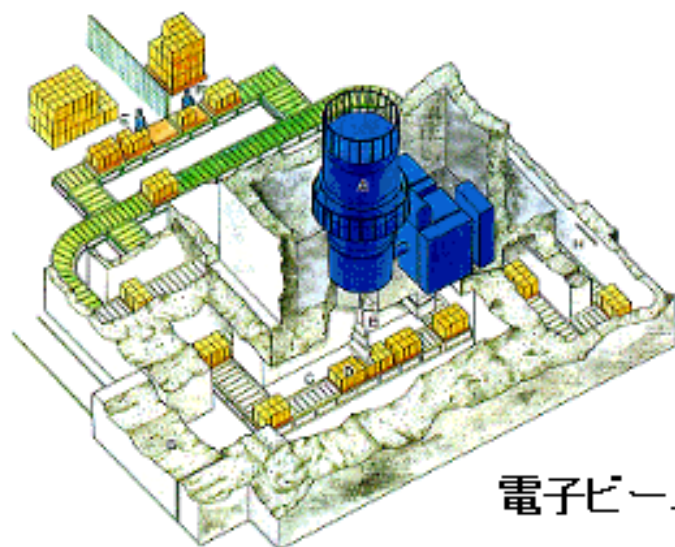
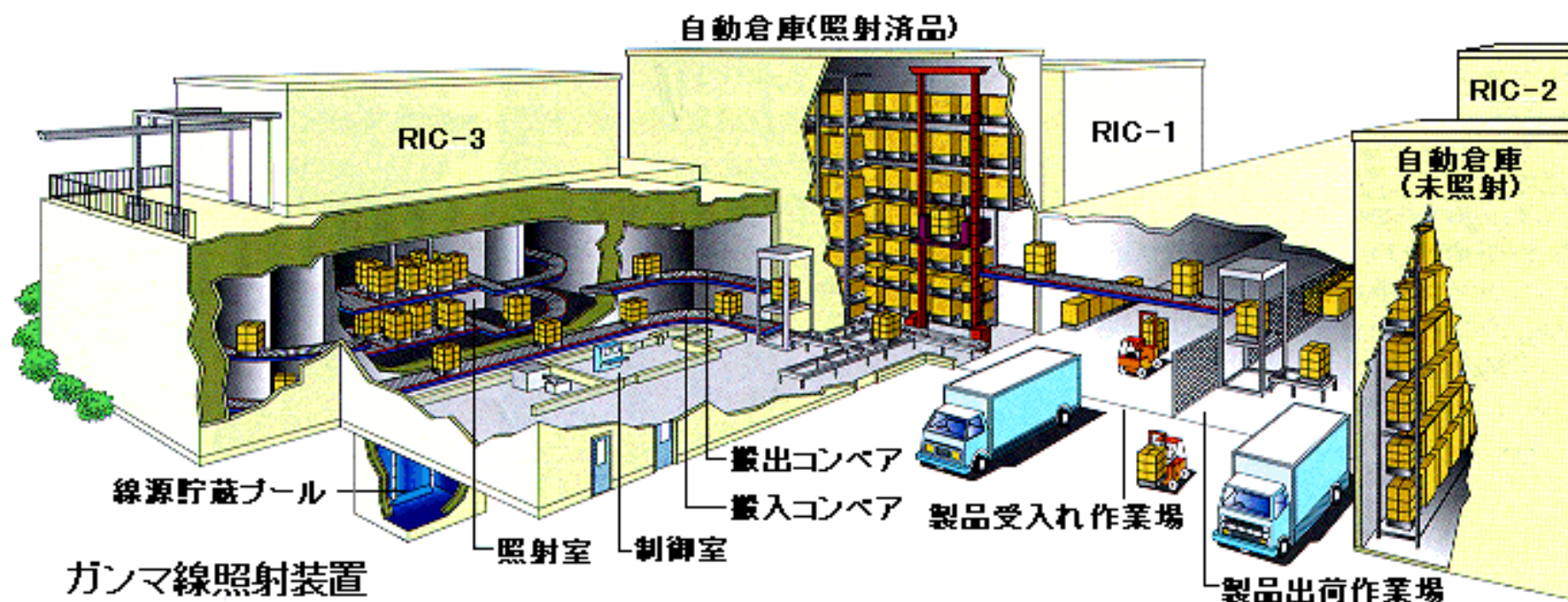
- ナシ:3品種(30億円)、ゴールド20世紀は29億円
- ダイズ(5億円)●イグサ(7千万円)●オオムギ(4千万円)
- モモ(1千万円)●キク(150万円)●リンゴ(100万円)

食品照射とは？

放射線の作用によって病原菌、病害虫、作物の細胞で細胞死が起こることなどを利用し、殺菌、殺虫、発芽抑制、熟成抑制などを行う技術の

目 的	線量(kGy)	対 象 品 目 例
低線量照射(1kGyまで)		
＊発芽防止	0.02～0.15	馬鈴薯、タマネギ、ニンニク、ほか
＊殺虫および害虫不妊化	0.10～1.0	生鮮果実、穀類、豚肉、ほか
＊熟度調整	0.50～1.0	熱帯果実、ほか
中線量照射(1～10kGy)		
＊食中毒防止	1.0～7.0	鶏肉、赤身肉、魚介類、卵白、ほか
＊貯蔵期間延長	1.0～7.0	鮮魚、魚肉加工品、畜肉加工品、イチゴ、ミカン、ほか
＊菌数低減(衛生化)	5.0～10.0	香辛料、乾燥野菜、乾燥果実、飼料原料、ほか
＊物性改良	1.0～10.0	多糖類の低粘度化、乾燥野菜、ウイスキーや焼酎の熟成促進、など
高線量照射(10～75kGy)		
＊完全殺菌	30～75	宇宙食、免疫不全病人患者食、ハイキング用無菌食(主に肉製品)、無菌動物用飼料、など

食品照射施設



電子ビーム照射装置

食品照射の例①

- ジャガイモの発芽防止 -

日本では唯一認可されている

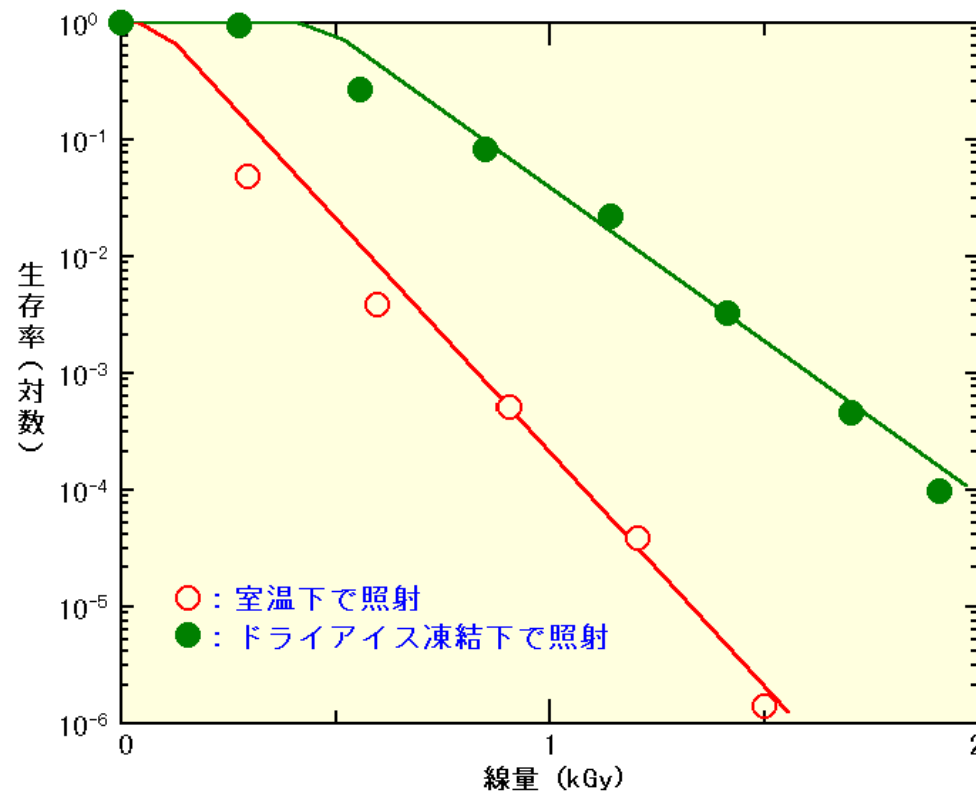


食品照射の例②

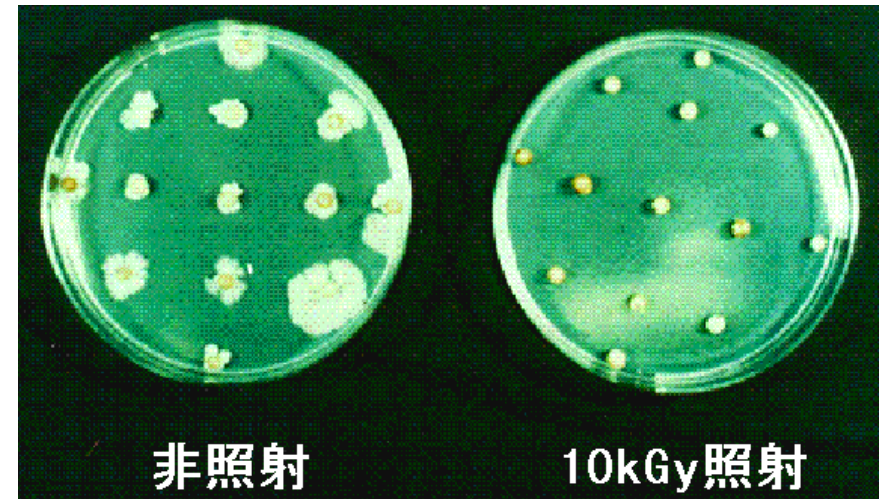
- 試験中、実用化検討中 -



グレープフルーツの殺虫



牛ひき肉中のO-157の殺菌



白胡椒の殺菌

世界の食品照射の現状

国名	食品類	推定処理量(トン/年)
アルゼンチン	香辛料、乾燥野菜	740
ベルギー	香辛料、冷凍魚介類	15,000
カナダ	香辛料等	5,000
チリ	香辛料等	450
チェコ	香辛料等	1,200
中国	ニンニク、香辛料等	80,000 以上
フランス	香辛料、乾燥果実、鶏肉等	25,000
ハンガリー	香辛料等	1,000
インドネシア	香辛料等	4,000
イスラエル	香辛料等	1,200
日本	馬鈴薯	15,000
韓国	香辛料、朝鮮ニンジン粉末	3,000
オランダ	香辛料、冷凍魚介類、チーズ	30,000
メキシコ	香辛料等	4,600
ポーランド	香辛料等	400
南アフリカ	香辛料、ニンニク等	12,600 以上
タイ	発酵ソーセージ、香辛料	1,000
ウクライナ	穀類	100,000 以上
イギリス	病人食、香辛料	若干量
米国	香辛料、果実、鶏肉等	60,000 以上

その他、約10カ国



タイで売られている照射ナム
(発酵豚肉ソーセージ)

発がん性を有する化学薬剤の使用制限で急速に普及

食品照射のメリットとデメリット

メリット

- 効果的・効率的な処理
- 包装後にも処理できる(2次汚染を防止)
- 食品衛生上問題になる病原性微生物のほとんどは比較的低い線量で殺菌できる(ウィルスを除く)
- 非加熱殺菌ができる
- 化学薬剤を使わないので環境負荷が小さい

デメリット

- 一部の食品に食味の低下(ある種の米)が発生
- 小麦などで加工性の低下(粘度の低下)
- 特定の栄養素の損失(ビタミンB₁)など

照射食品の安全性

照射食品の安全性は、以下の2つの観点で検討がなされている

毒性学的安全性

- － 照射した食品の急性毒性、慢性毒性、発ガン性、遺伝毒性、細胞毒性、催奇形性、変異原性等はどうか。

微生物学的安全性

- － 照射した食品に生残する微生物による影響はどうか。
- － 照射による微生物の突然変異はどうか。

加えて以下の観点での検討がなされている。

栄養学的適格性

食品の栄養は照射によりどう変化するのか。

☆なお、上記3つの観点を合わせて「健全性」と呼んでいる。

【参考文献】WHO「照射食品の安全性と栄養適性」(1994年)

古田雅一「照射食品の健全性」FFI J., 209(12), 1069(2004).

伊藤均 JAERI-Review 2001-029

照射食品の安全性評価

年 次	内 容
1961	FAO/IAEA/WHO 合同専門家委員会: 照射食品の健全性評価は食品添加物と同じ基準で行う。
1970	照射食品の健全性評価のための国際プロジェクト発足。 1980年迄。
1976	FAO/IAEA/WHO 合同専門家委員会: 食品照射は加熱処理と同様に物理的処理法であり、食品添加物としての扱いは妥当でないと勧告。
1977	FAO/IAEAの飼料の放射線殺菌に関する専門家会議で50kGyまで照射された動物飼料の安全性に問題がないと結論。
1980	FAO/IAEA/WHO 合同専門家委員会: 10kGy以下の照射食品は健全であると宣言。
1983	FAO/WHO 合同食品規格委員会: 10kGy以下の照射食品の一般規格を採択。
1992	WHO 専門家委員会: 10kGy以下の照射食品の健全性を再確認。
1997	WHO 専門家委員会: 10kGy以上の高線量照射食品についても健全であると宣言。

安全性についての研究結果は、
現在までは有害な影響を示していない

米国における認可状況

許可年	品目	目的
1985年	豚肉(生)	寄生虫抑制
1986年	青果物	成熟抑制
	全食品	殺虫
	酵素製剤	殺菌
	乾燥香辛料／調味料	殺菌
1990年	食鳥肉	病原菌制御 ※
1995年	冷凍肉(NASA宇宙食)	滅菌
1997年	赤身肉(冷蔵)	病原菌制御 ※
	赤身肉(冷凍)	病原菌制御 ※
2000年	卵(殻付)	病原菌制御 ※
	もやし用種子	病原菌制御 ※
2005年	貝類	病原菌制御 ※

※サルモネラ菌や腸管出血性大腸菌O-157への対策として、食鳥肉や赤身肉、卵などに照射が許可されているものである。

日本の状況

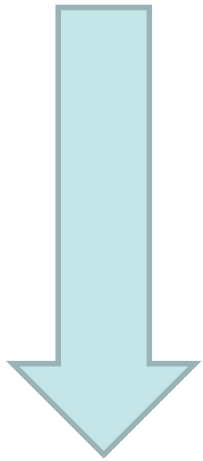
- 市民団体による反対運動
（放射線照射食品と放射能汚染食品の混同？）
- 内閣府原子力委員会「食品照射専門部会」の議論
報告書:<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2006/siryo40/siryo11.pdf>
- 科学的な評価の基に消費者が自ら判断して選択できる仕組みが必要（表示のありかた、検知技術）
- より一層の情報公開と対話、教育の充実が必要

放射線利用の最古参は医学・医療応用

～17世紀： 患者の言葉、外見、体液の状態のみで診断

18～19世紀： 解剖によって病理的変化の痕跡を発見

↑ 見えない敵と戦っているようなもの ↑



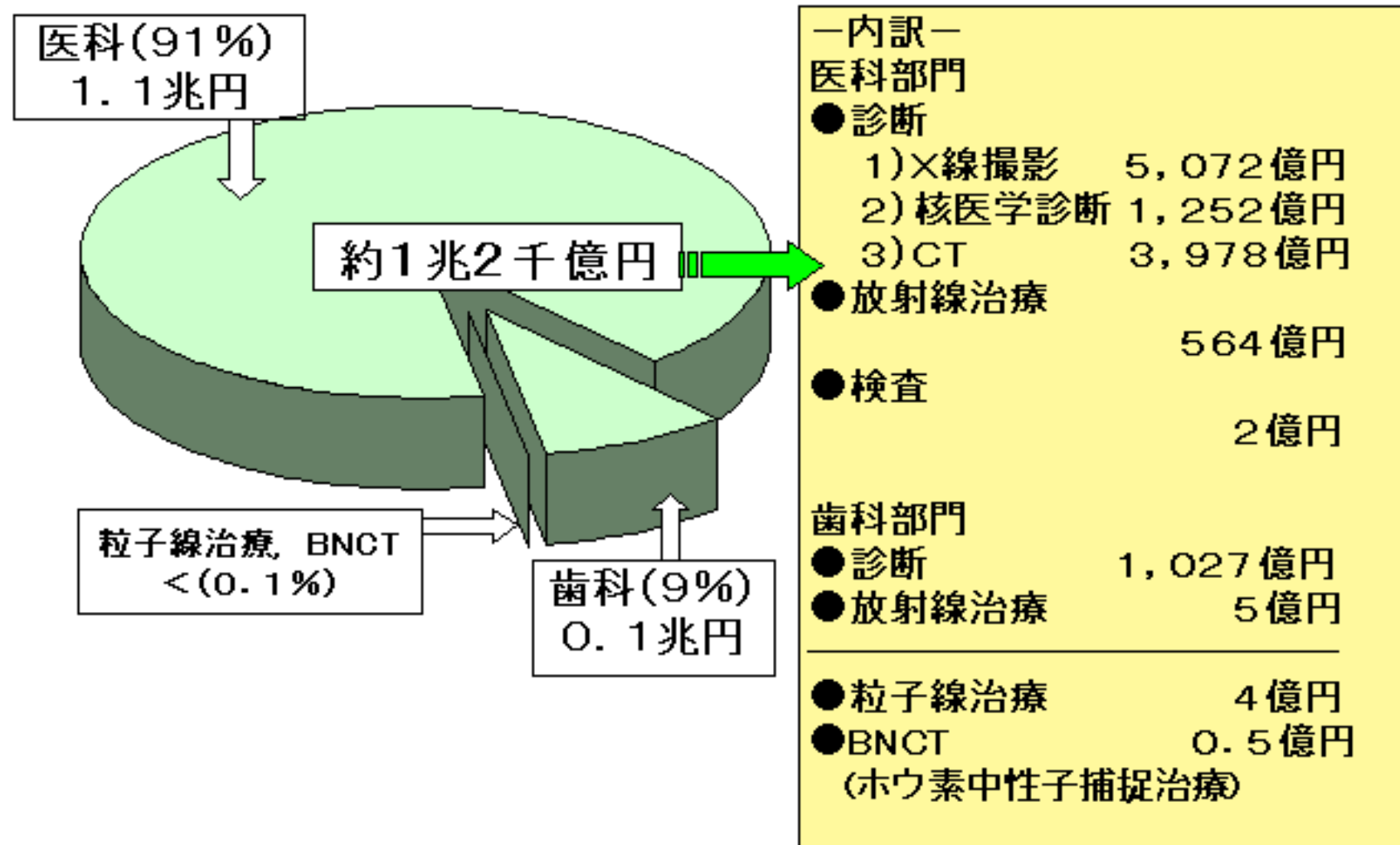
1895年



20世紀～： X線の利用開始
医学・医療に革命を起こした

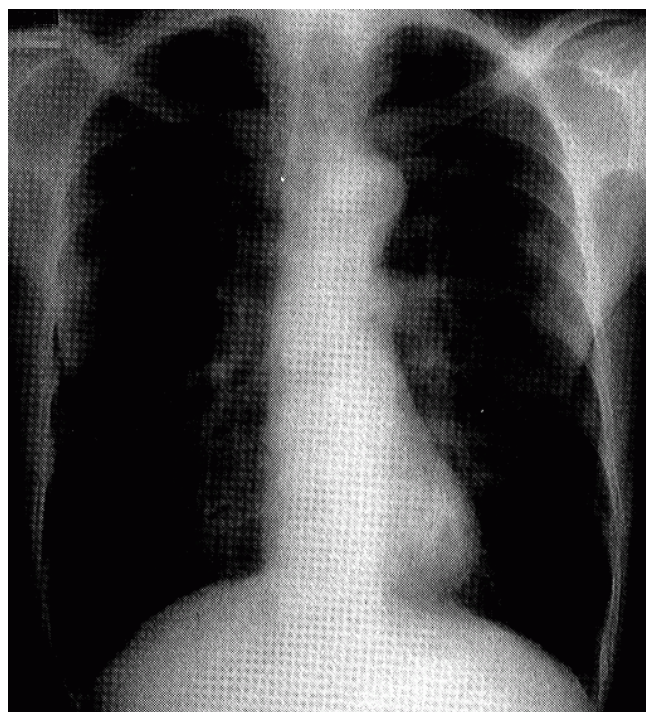
医学・医療利用の経済規模

「診断」と「治療」に大別される
現状では「診断」が圧倒的に多い

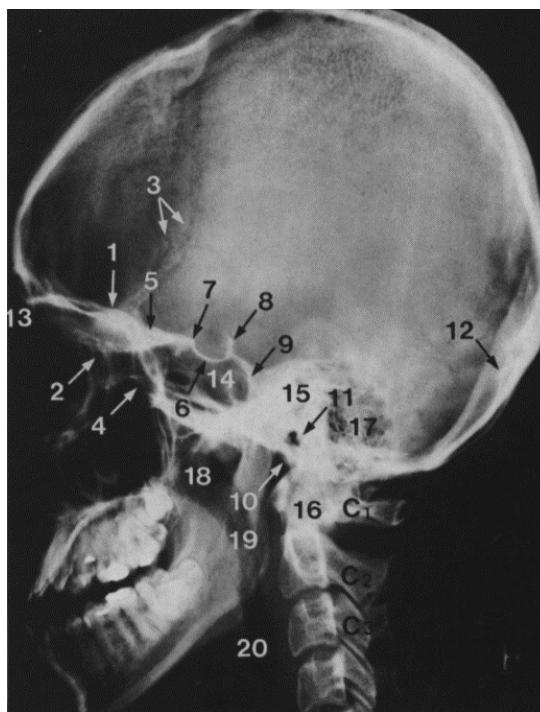


放射線による診断の例① -単純X線撮影-

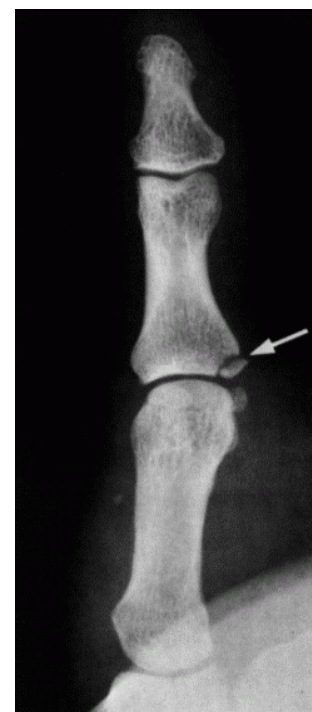
X線は水や筋肉にはある程度吸収され、骨にはかなり吸収され、金属のように重い物質中はほとんど透過しない



胸部



頭蓋骨

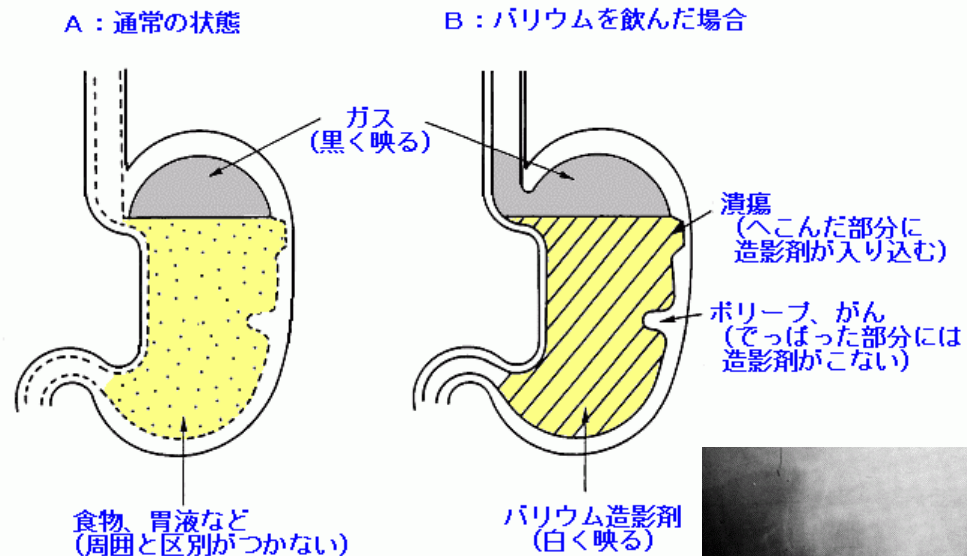


骨折

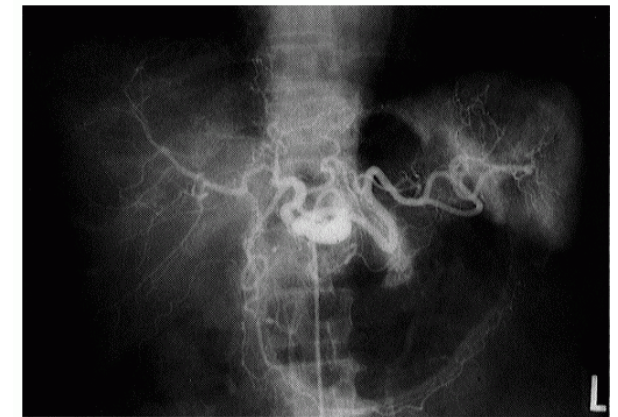
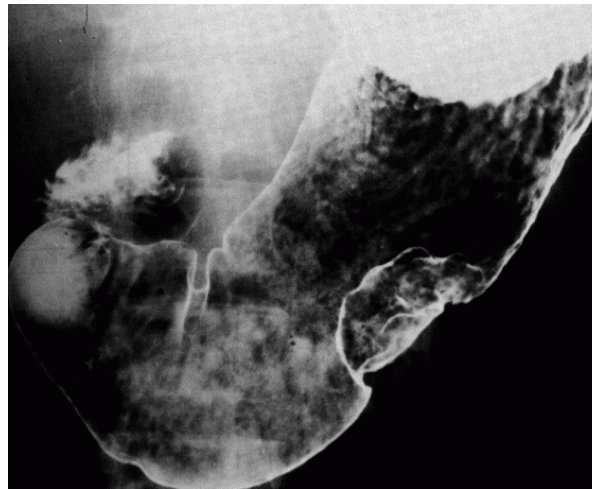
最近では、特殊な検出器で画像をデジタルデータとして取得し、計算処理により、詳細な診断が可能な撮影法が普及

放射線による診断の例② -X線造影撮影-

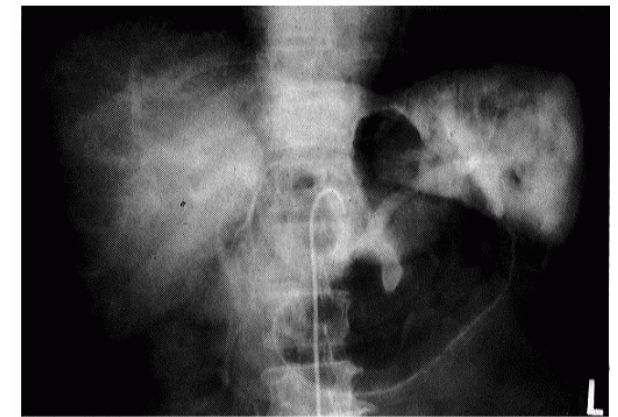
X線を透しにくい、あるいは透しやすい物質を併用(中空の部分に注入)して人工的に影をつくることによって、単純撮影ではほとんど情報が得られない部位を診断



胃(バリウム)



a. 動脈相

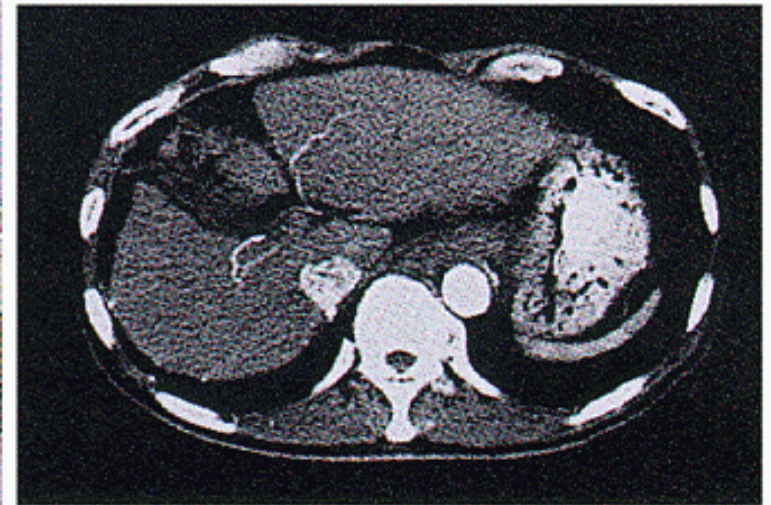
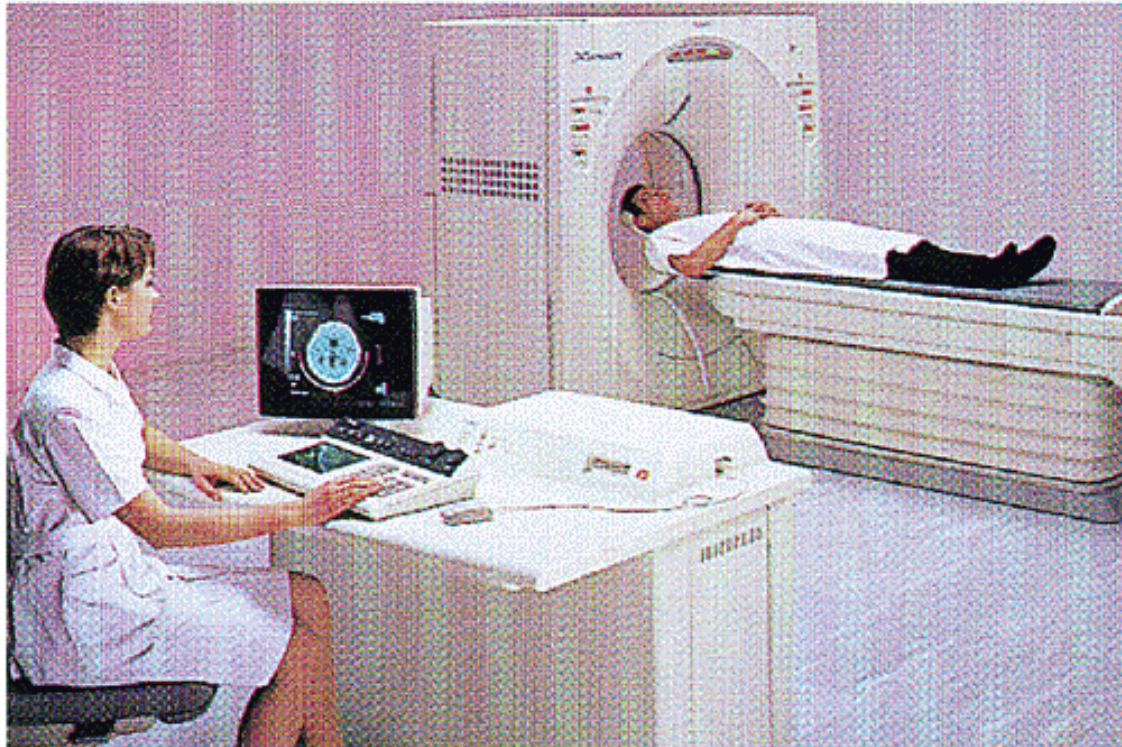


b. 静脈相

血管(ヨウ素)

放射線による診断の例③ - CT -

CT: Computed Tomography (コンピュータ断層撮影法)
被写体に多方向からX線を照射し、透過してきたX線強度分布を検出器で測定し、得られたデータから計算によって被写体内部のX線の透しやすさの分布を3次的に再構成



らせんCT走査像

放射線による診断の例④ -核医学診断法-

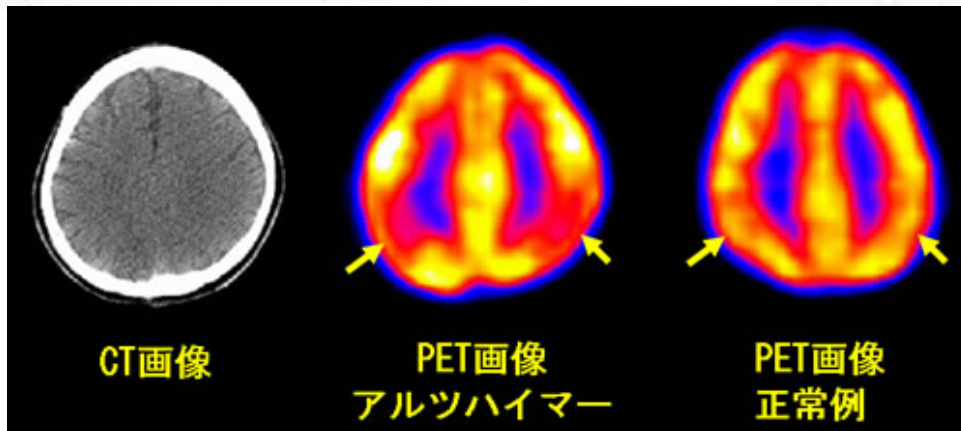
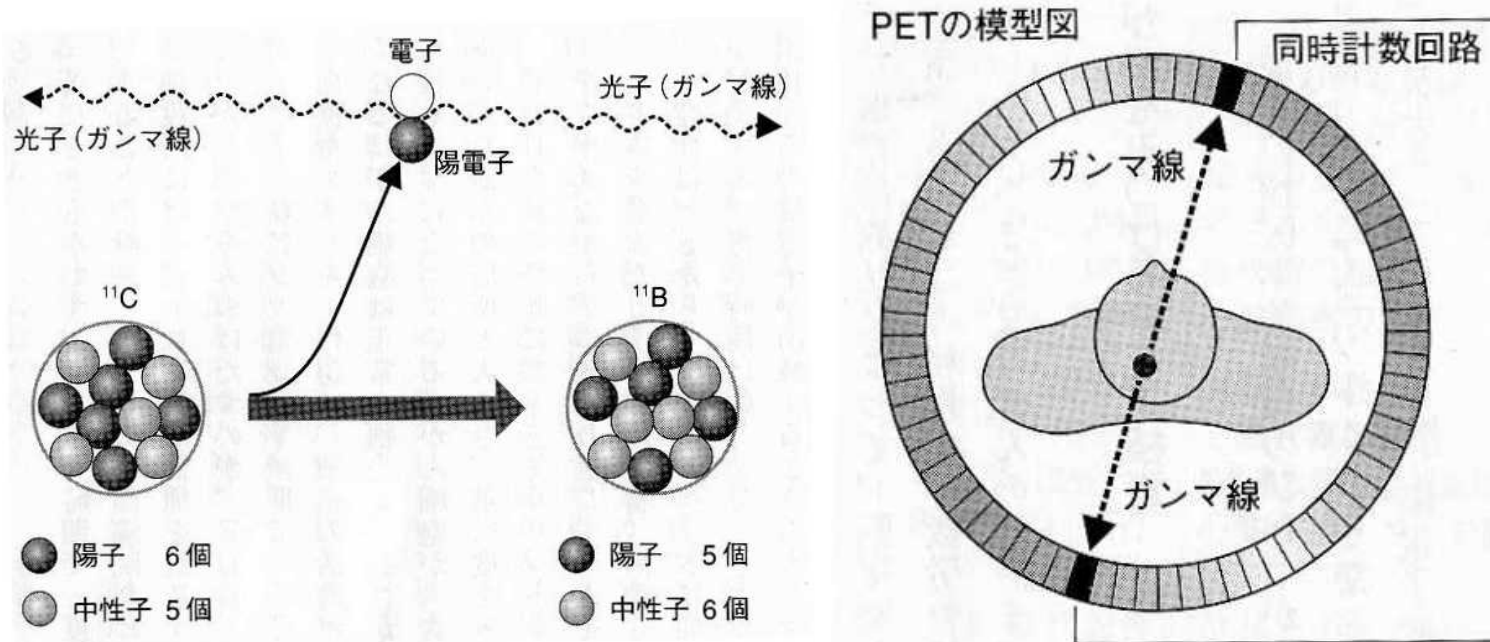
患者の体内に投与した放射性医薬品が特定の組織や臓器に取り込まれる。そこから出る弱いガンマ線を撮影する。

核種	半減期	放射線(MeV)	医薬品	疾患
^{99m}Tc	6.4時間	$\gamma(0.14)$	^{99m}Tc -HMPAO	脳血流
			^{99m}Tc -ECD	脳血流
			^{99m}Tc -MDP	骨病変
			^{99m}Tc -フチン酸	肝疾患
			^{99m}Tc -MIBI	心筋病変
^{67}Ga	78時間	$\gamma(0.091, 0.185)$	クエン酸ガリウム	腫瘍、炎症
$^{201}\text{Tl}^*$	72時間	$\gamma(0.135, 0.167)$	塩化タリウム	心筋病変、腫瘍
^{123}I	13時間	$\gamma(0.16)$	ヨウ化ナトリウム	甲状腺疾患
^{111}In	2.81日	$\gamma(0.17, 0.25)$	塩化インジウム	骨髄病変

*: ^{201}Tl の γ 線は放出割合が少ないので検査にはHgの特性X線(0.0708MeV)を使用する。

放射線による診断の例⑤ - PET -

PET: Positron Emission Tomography (陽電子放出型断層撮影法)
陽電子放出核種を投与して、消滅 γ 線を同時計測する。陽電子放出核種は半減期が短いので施設内の小型サイクロトロンで製造。



放射線によるがんの治療

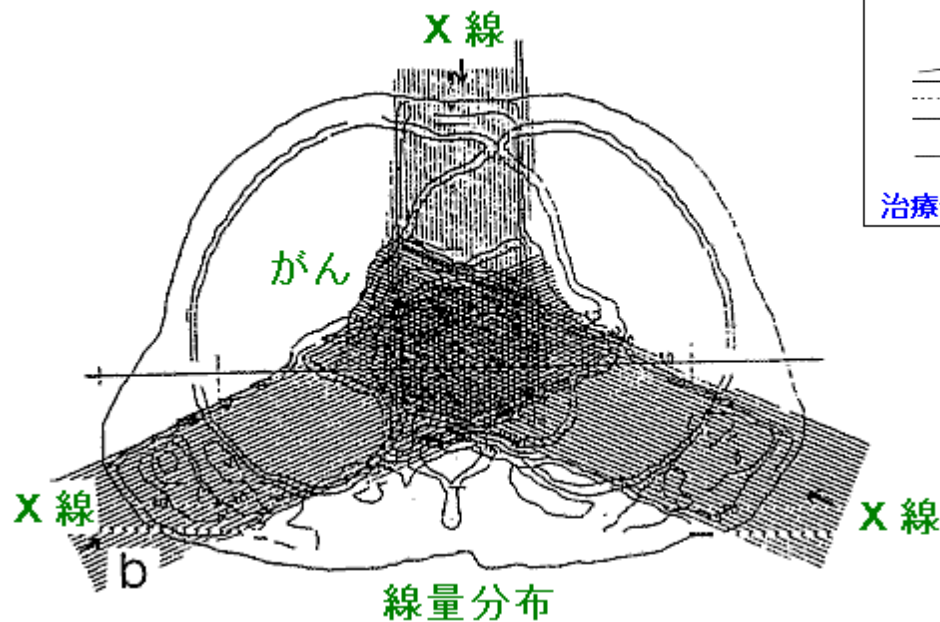
現在、がんは日本の死亡原因の約30%、2015年には50%との予測
がん細胞は正常細胞よりも頻繁に分裂を繰り返す

- ⇒ 放射線感受性が高いDNA分裂期に放射線に曝される確率が高い
- ⇒ 正常細胞への影響を抑えつつがん細胞を死滅させることができる

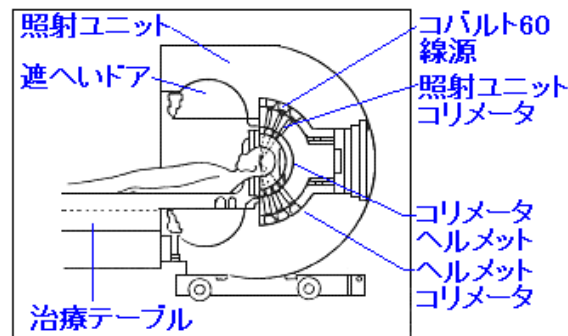
	外科療法	放射線療法	化学療法
適用	○ 早期がんから中等度進行がん(0-Ⅱ期のがん)まで ○ 病変が局所に限局	○ 早期がん(Ⅰ期)から手術不能の局所進行がん(Ⅲ期)まで ○ 病変が局所に限局	○ 主としてⅣ期の遠隔転移のあるがんおよび白血病 ○ 病変が全身に進展
長所	○ 根治性が高い	○ 機能と形態の欠損が少ない ○ 全身への影響が少ない ○ 早期がんの治療成績は外科療法と同等	○ 一般に病状緩解が得られ、延命効果があることもある。
短所	○ 機能と形態の欠損が大きい ○ 部位・患者の条件(年齢・合併症など)により適応に限界あり	○ 局所進行がんでは根治性は手術療法に劣る	○ 全身への影響が大きい(副作用が強い) ○ 根治性が低い

放射線によるがん治療の例① - 外照射 -

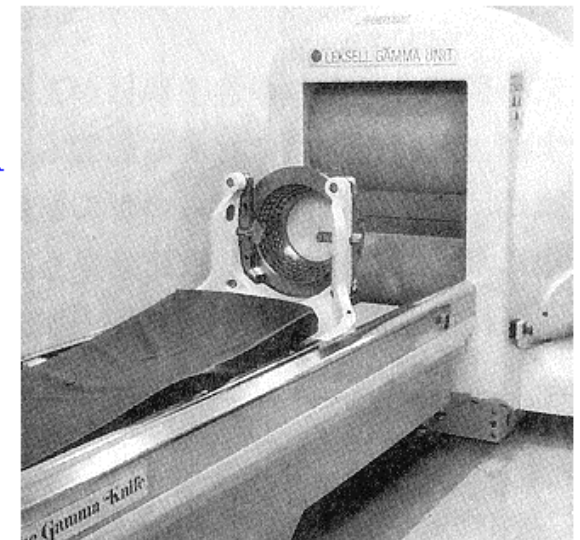
一般的にはX線、 γ 線、電子線を用いる。異なる方向のビームを照射することにより、これらのビームが交差した病巣部に大きな効果をあたえ、それ以外の正常組織への影響を低減させる(多門照射)。



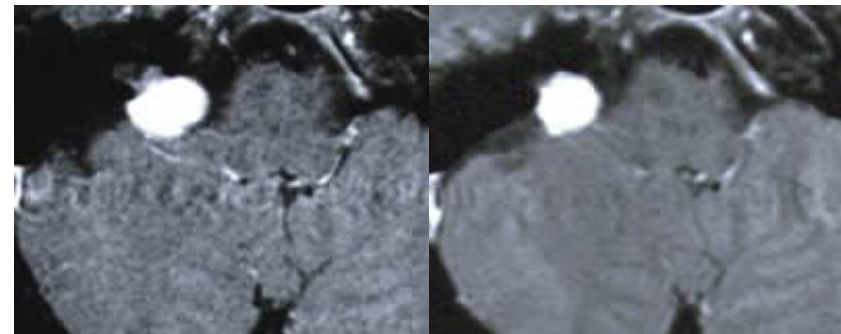
食道がんの多門照射



横断面図

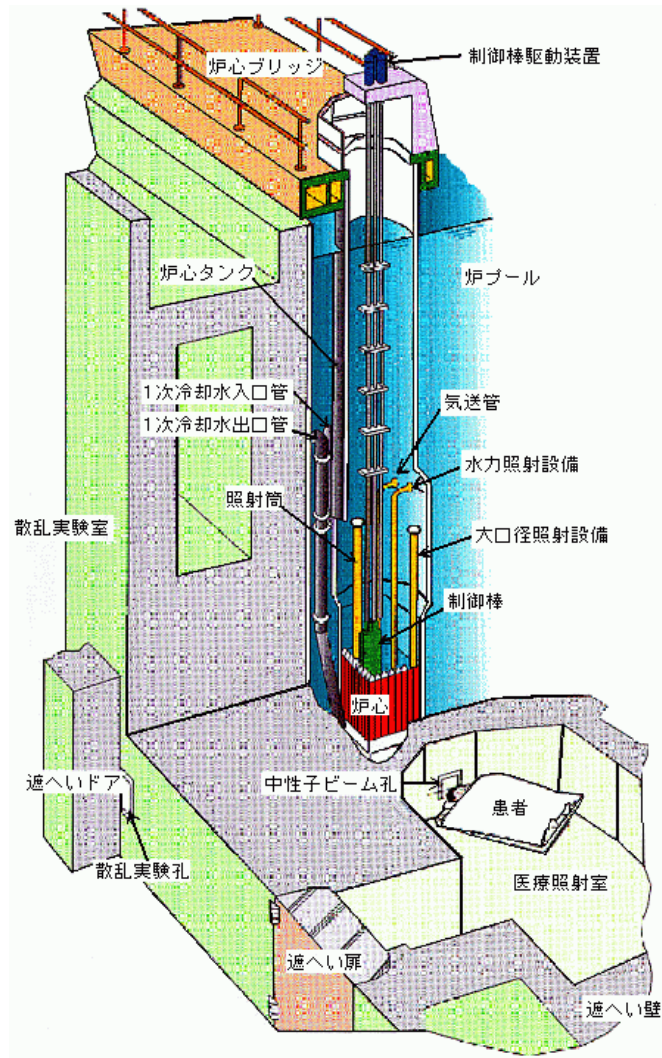


外観図

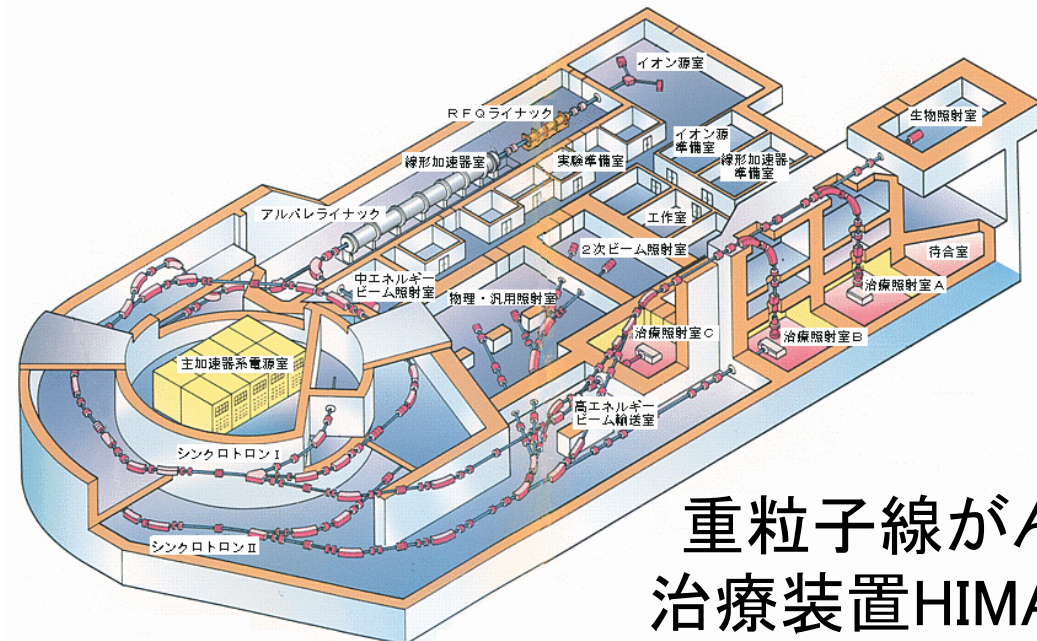
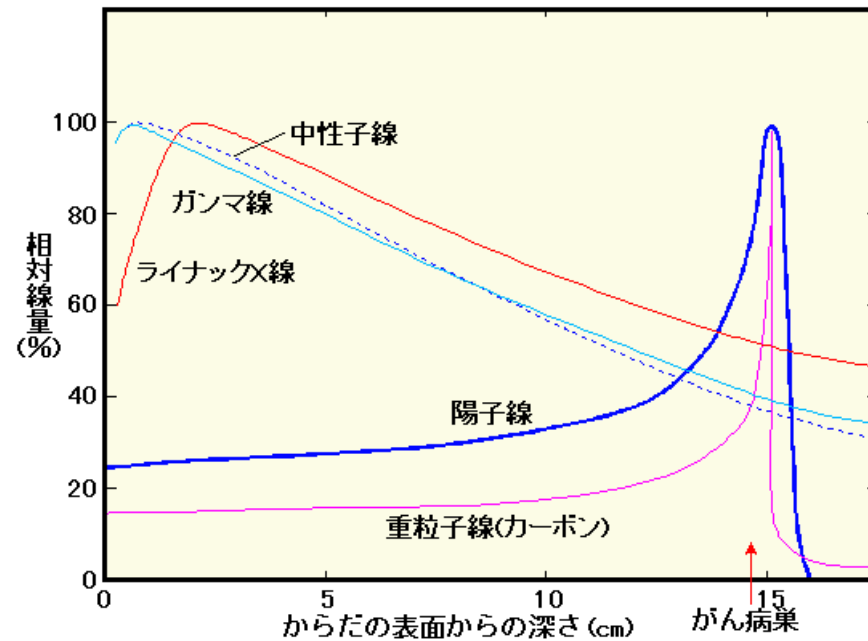


ガンマナイフによる脳腫瘍の治療

重粒子を用いた新しい外照射治療



医療用原子炉



重粒子線がん
治療装置HIMAC

放射線によるがん治療の例②

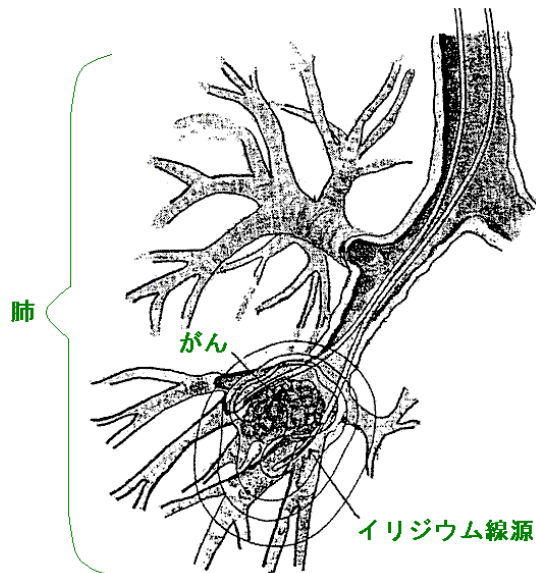
- 内照射、組織内照射、腔内照射、術中照射 -

内照射： 患者の体内に特定の放射性核種を投与し、がんに集中させて治療

組織内照射： 線源を組織に刺し入れる(舌がんや前立腺がん)

腔内照射： 腫瘍に線源をできるだけ近づけて照射(子宮や食道)

術中照射： 外科手術の最中に照射



気管支がんの腔内照射



治療前



治療後

組織内照射による口腔底がんの治療

医療被ばくの方

a. 正当化の判断

患者個人の健康状態の改善あるいは社会全体の保健上の便益と、被ばくによるリスク等とを考慮し、正味で便益の方が大きいことを確認する。放射線被ばくを伴わない代替手技によるリスク-利益とも比較。

（個人または集団について判断）

b. 最適化の判断

正当化が行われたのちに実施。患者個人及び集団の被ばく線量を、医療行為の価値を損なわない範囲内で最小限にする。

ICRPの勧告（ICRP Pub1）

（1）身体の検査部位にある組織の受ける線量を、その特定の患者について必要な情報を得ることと両立し得る最小限にまで減らすこと。

（2）必要な反応がほとんど確実に得られるような大きさの治療線量を身体の治療部位に与えること。

（3）身体その他の部位の被ばくを実行可能な限り制限すること。

c. 線量

制限は無い。拘束値などを設けてできるだけ低減の方向に。

医療被ばくの線量

	診断部位	診断1件あたり 実効線量(mSv)
撮 影	頭 部	0.10
	胸 部	0.07
	胃	3.3
	バリウム注腸	2.7
	腰 椎	1.4
	膀 胱	2.5
	股 関 節	0.34
集団検診	胸 部	0.05
	胃	0.60
透 視	胸 部	1.2
	胃	7.5
	バリウム注腸	4.1
	膀 胱	2.0
歯 科	口内法	0.029
	パノラマ	0.043
核医学	診 断	4.2

医療被ばくでは診断・治療を受ける際に被ばくした個人が医療行為から直接利益を受けるので他の被ばくのような線量限度を設けない。日本における医療被ばくによる国民1人当りの平均実効線量は、約2.4mSvとなっている。

放射線利用のまとめ

- 放射線の影響を正確に把握・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（工業、環境、学術、捜査、農業、食品、医療……）
- 放射線利用の規模はまもなくGDP比2%超え
- リスクと利益のバランスは工学の基本
- 科学技術力に加え、技術倫理感も必要
- 「知らないで怖がる人」から「知って判断してコントロールできる人」へ