

放射線化学バイオ応用理工学特論

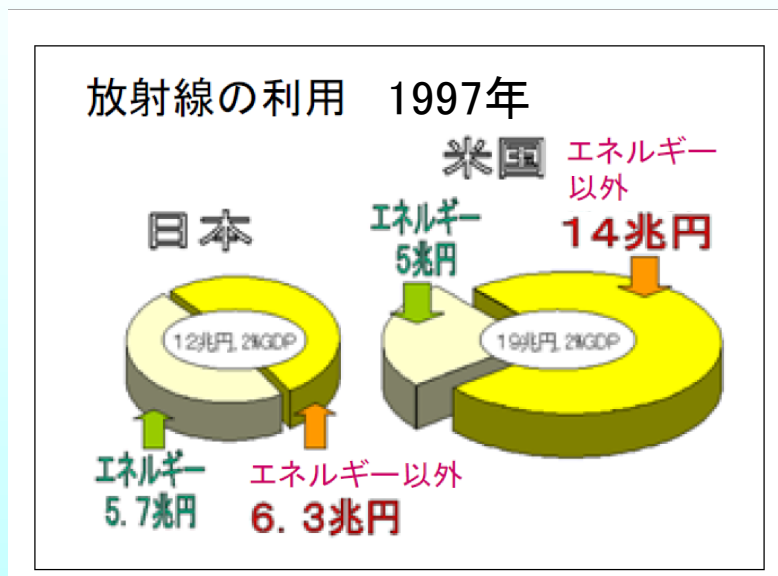
放射線利用と放射化学

秋吉 優史

発電以外の原子力利用

1997年に行われた調査では、原子力の発電としての利用の経済規模は5.7兆円なのに対して、工業・農業・医療での放射線利用の経済規模は6.3兆円となり、発電の経済規模を上回っていた。

その後、2005年頃に再度調査が行われたが、やはり発電以外の利用は発電と同等かそれ以上であった。



放射線の利用

放射線の工業利用

材料改質、重合反応、微細加工、イオン注入、非破壊検査

放射線の医療応用 ～診断～

透過X線撮影、CT、PET、血管造影、SPECT(単一光子放射断層撮影)

放射線の医療応用 ～滅菌～

手術器具、注射針、手袋、マスク、ガーゼ、チューブ、バッグ、医薬・化粧品原料など

放射線による年代測定

C-14 年代測定法、カリウム-アルゴン年代測定法など

放射線による計測

X線、 γ 線、中性子線透過撮影、X線回折、電子顕微鏡、EDX・オージェ電子分光・PIXE等による元素分析、WDX・EELS 等による化学状態測定、放射化分析、煙感知器、中性子水分計、陽電子消滅測定など

放射線の医療応用 ～治療～

X線、 γ 線による体外照射、小線源挿入による体内照射、放射性ヨウ素による甲状腺治療、陽子・重粒子線ガン治療、BNCT(ホウ素中性子捕捉療法)、ガンマナイフ

放射線の農業利用

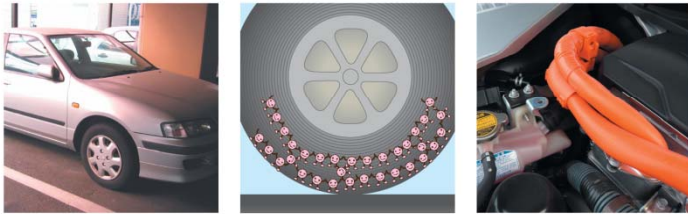
品種改良、不妊化による害虫駆除、ジャガイモの芽止め、香辛料などの殺菌(国外)、RIによるトレーサー研究など

放射線の工業利用

実用化事例での特徴

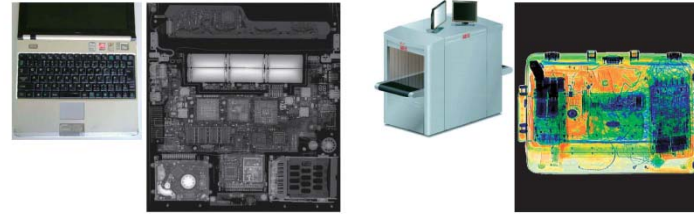
- 添加物なしで物性を改善（ラジアルタイヤ）
- 素材の形状を維持したまま、架橋により
 - 耐熱性改善（耐熱性電線）
 - 収縮性改善（熱収縮チューブ）
 - 粘性改善（発泡プラスチック）
- 素材の形状・物性を維持したまま、グラフト重合により導電性付与（電池用隔膜）
- 温度、雰囲気などの調節不要
- コストが安い

車で使われる放射線技術



車のさまざまなパーツには放射線による加工技術が使われています。
高速回転により地面と擦れるタイヤは放射線をあてて強くなったゴムで作られています。
また、エンジンルーム等高温になるところのコードも放射線によって熱に強くしたコードが使われています。

壊さないで中を調べる



放射線を使って撮影すると物を壊さずに中身を調べる事ができます。
この技術は、空港で行われている手荷物検査や、金属に欠陥がないかを調べる検査にも利用されています。

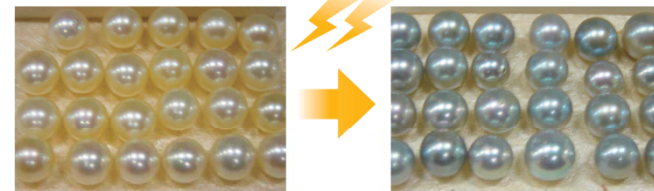
放射線に変化する繊維



電子線(放射線)を繊維(服の生地)にあてて、機能を高める技術が開発されています。
抗菌・消臭・防炎などの機能を天然繊維にもたせることができます。

色を変えて美しくする

放射線をあてると



真珠やダイヤモンドに放射線をあてて色を変えたり、美しくする事ができます

※放射線は物を通り抜けるため、放射線をあてた真珠やダイヤモンドに放射線が残ることも、真珠やダイヤモンドそのものから放射線を出すようになることもありません。

工業分野における放射線利用の現状

耐熱性電線

半導体素子

レジスト加工など

医療用具の滅菌

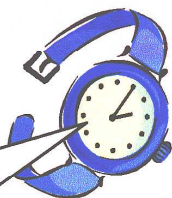
フロッピー
ディスク

熱収縮チューブ

クッション用発泡体

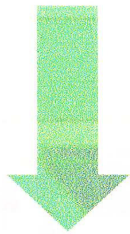
ボタン型
電池用隔膜

ラジアルタイヤ



ラジアルタイヤ

ボディープライ (高圧に耐えられるように有機繊維で補強されたゴム)



電子線照射

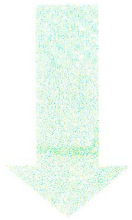
ゴムが架橋して、加熱・加圧の成形工程での補強繊維のずれやはみ出しを抑制

ゴム量の削減、品質の安定化



耐熱性電線

プラスチック被覆成形後の電線



電子線照射

架橋により耐熱性向上

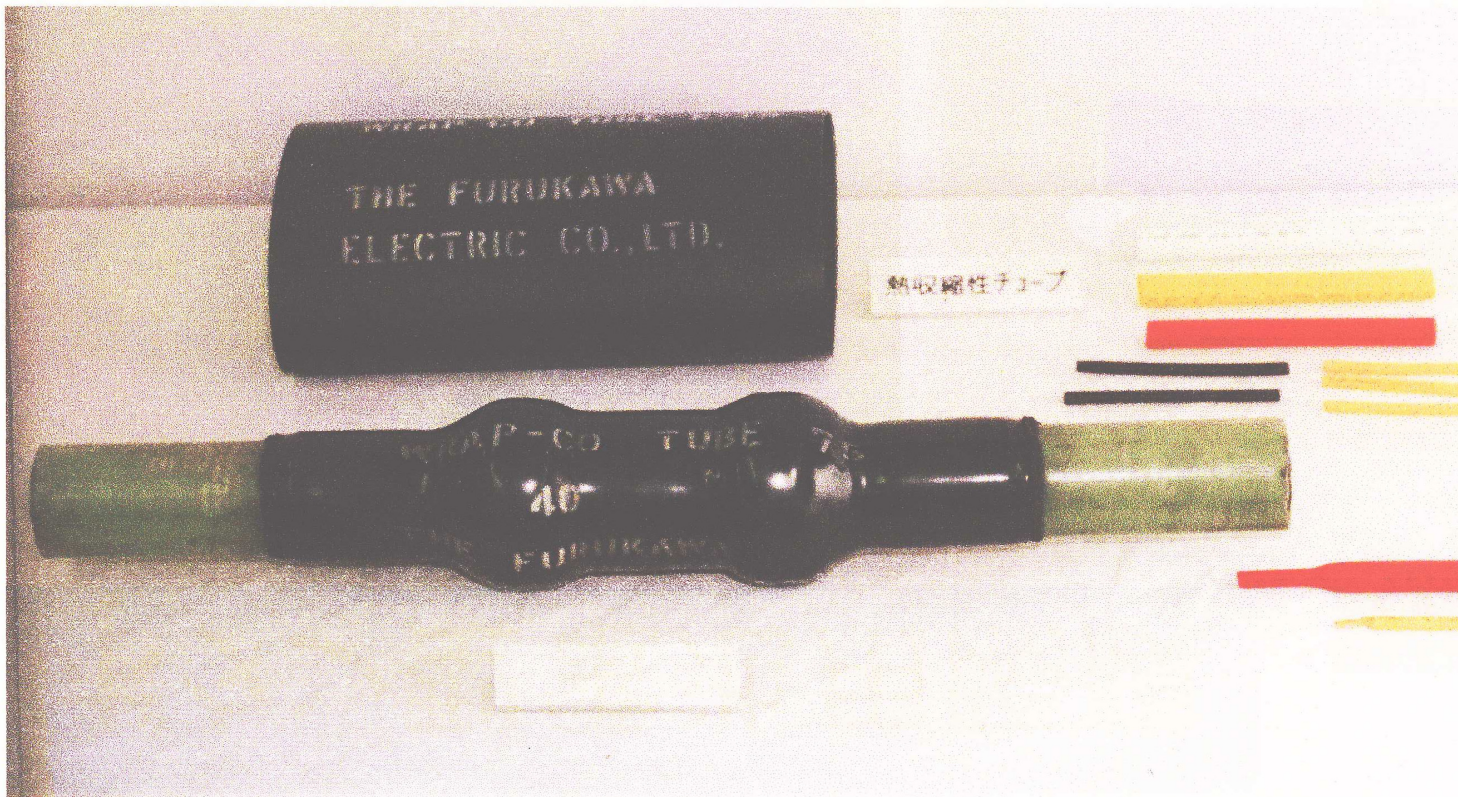
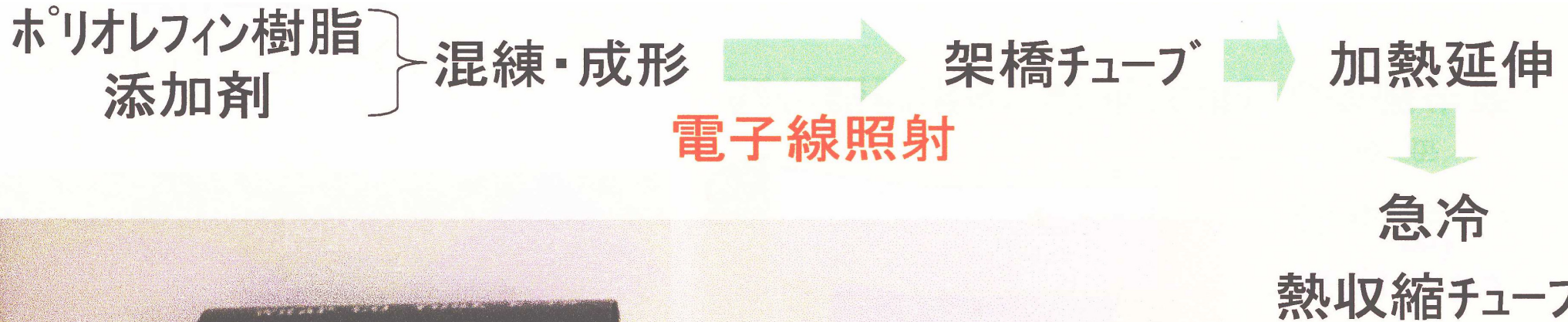
- ・適用樹脂の種類が広い
- ・難燃剤配合樹脂も架橋
- ・室温で、早い反応速度
- ・電線の性能が良い
- ・コストが安い



家電製品配線
自動車内配線等

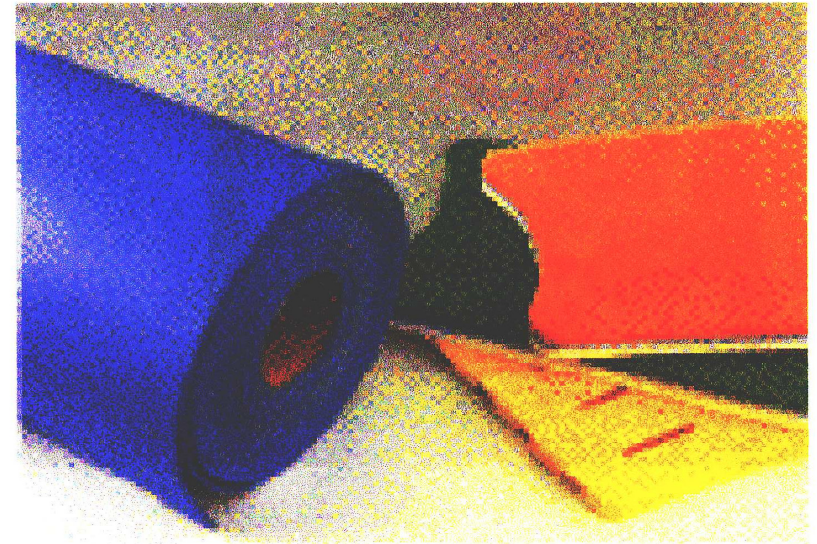
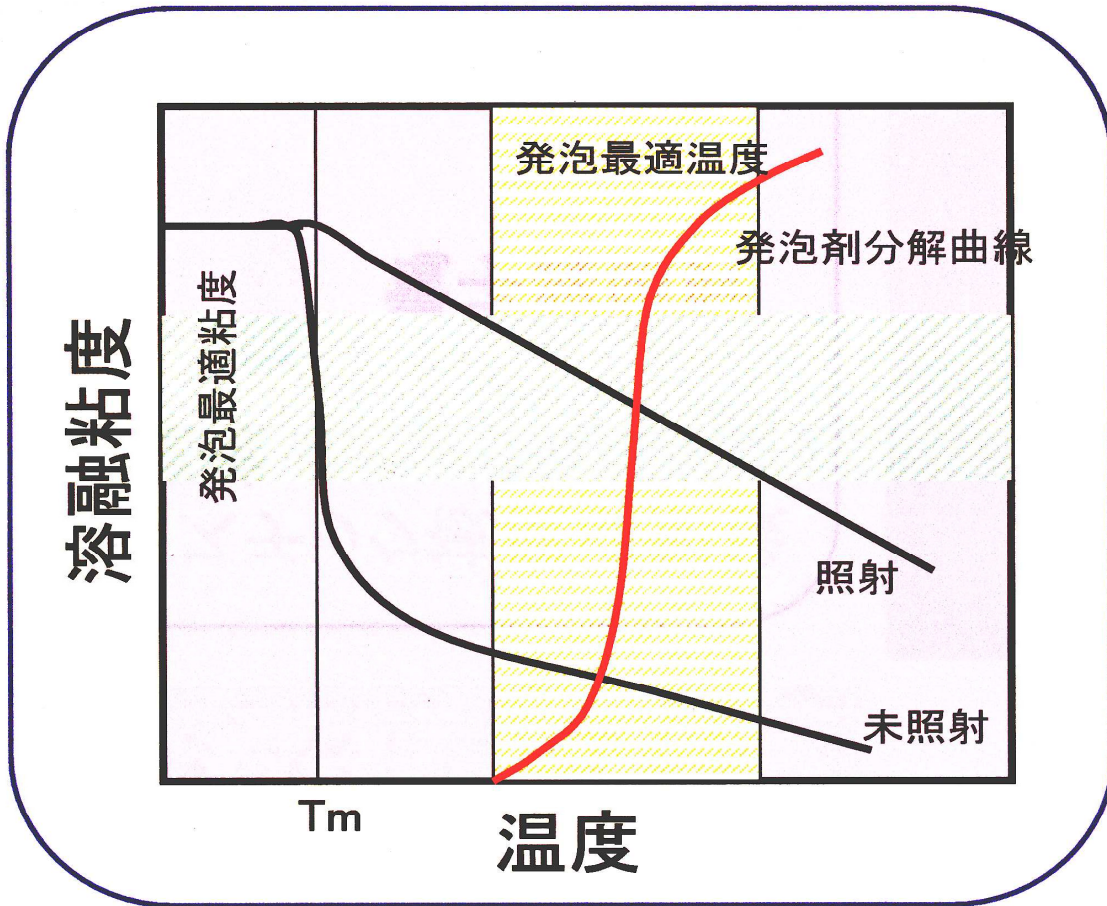
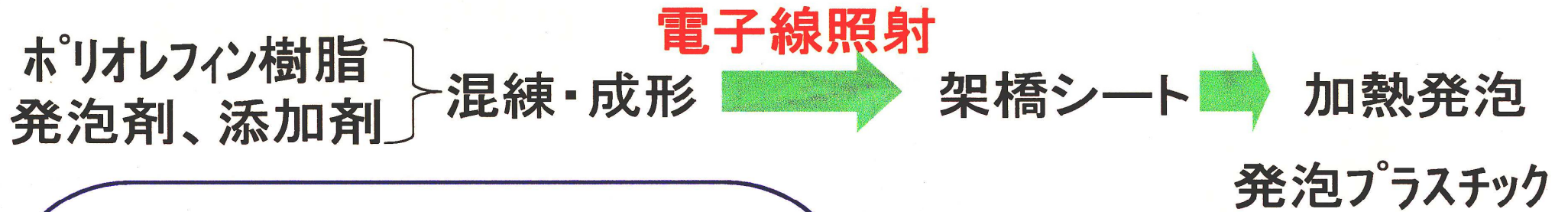
太物電線では放電破壊が起こる
設備投資が大きい

熱収縮チューブ



- ・自然収縮を防ぐ
- ・熱収縮率を高める
- ・耐熱性を高める

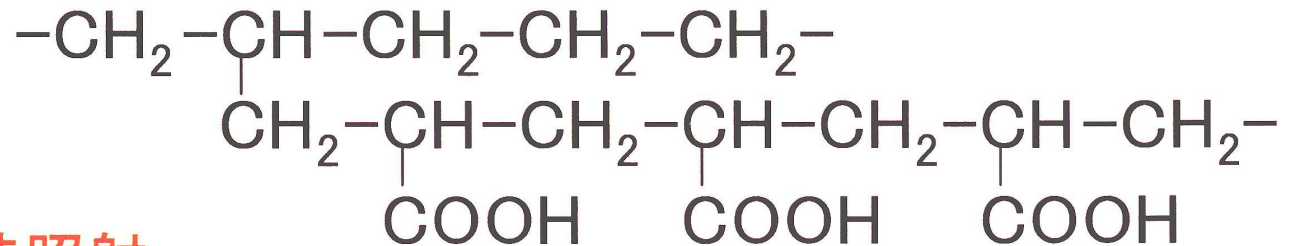
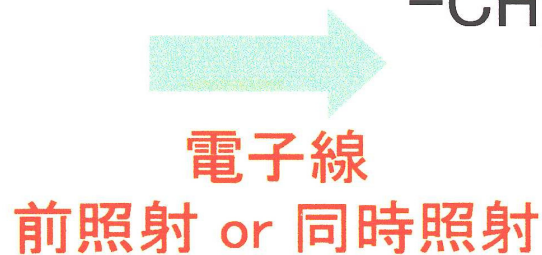
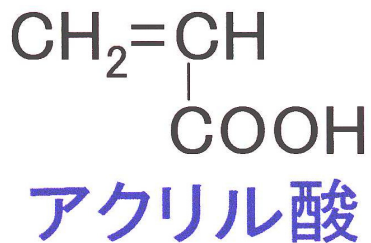
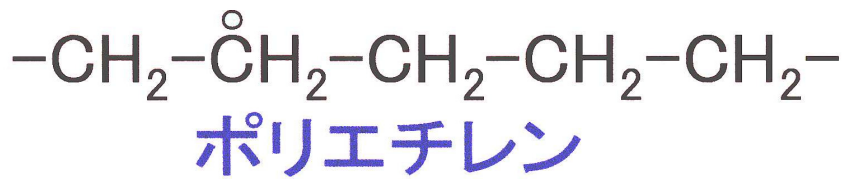
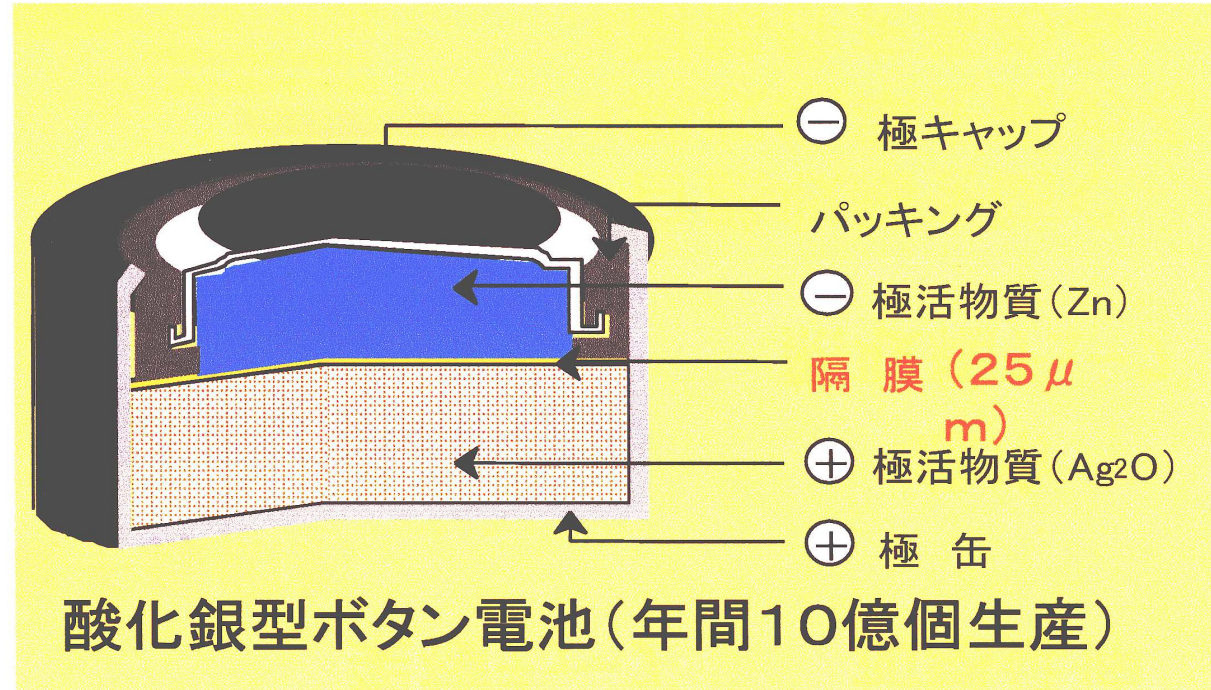
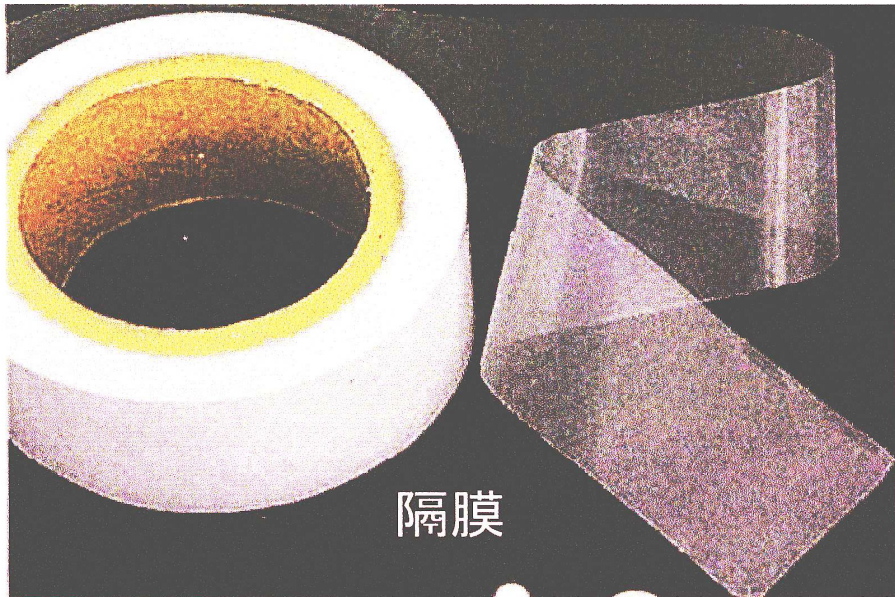
発泡プラスチック



発泡ポリエチレン

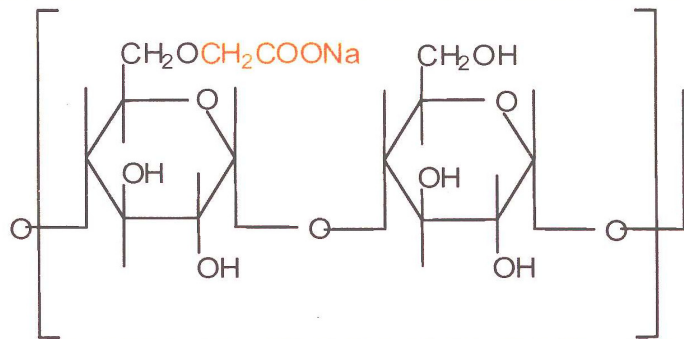
ボタン型電池用隔膜

グラフト重合

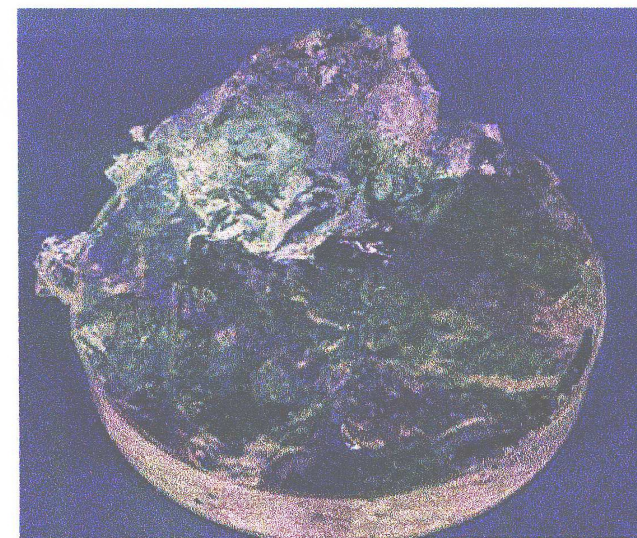


デンプン、セルロースの架橋

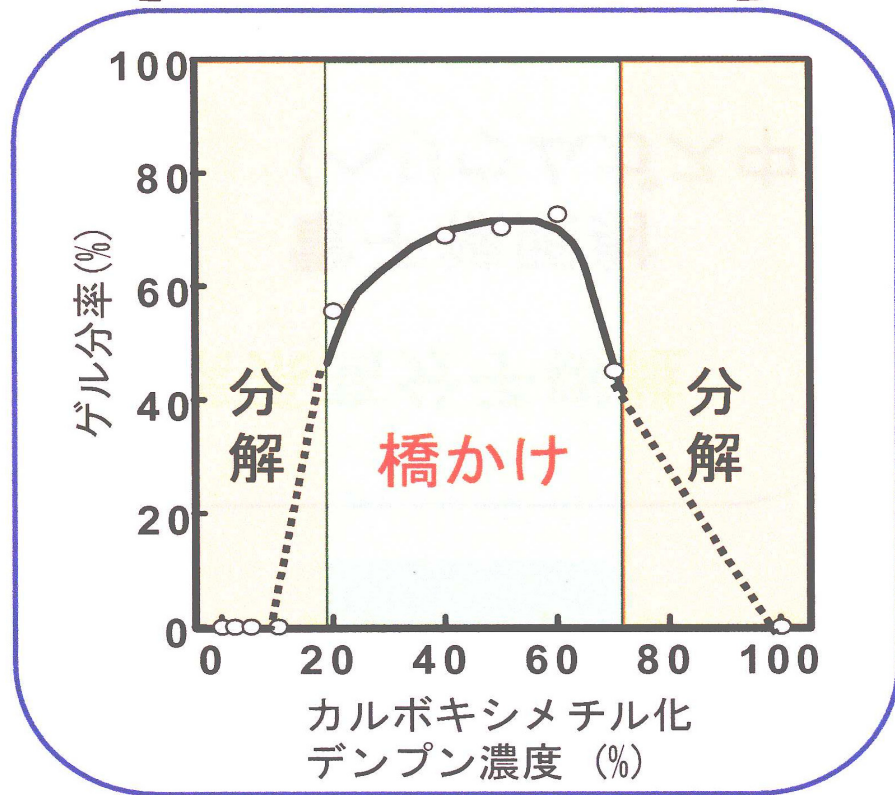
多糖類は放射線分解型天然高分子



化学修飾
濃度最適化



生分解性ハイドロゲル



床ずれ防止マット

光学的性質

透光性のある結晶の場合、波長による光の透過率の違いによって結晶状態を評価できる。

また、波長の短い光や放射線を当てることで励起された結晶構造が脱励起することにより特定の波長の光が放出される場合があり、その波長や強度から結晶構造を知ることができる。



天然の黄色(右)と他は照射トパーズの色
(Museum of Gems より)

特定の波長の光を色中心(color center)の生成などによって吸収するようになると、着色して見えるようになる。

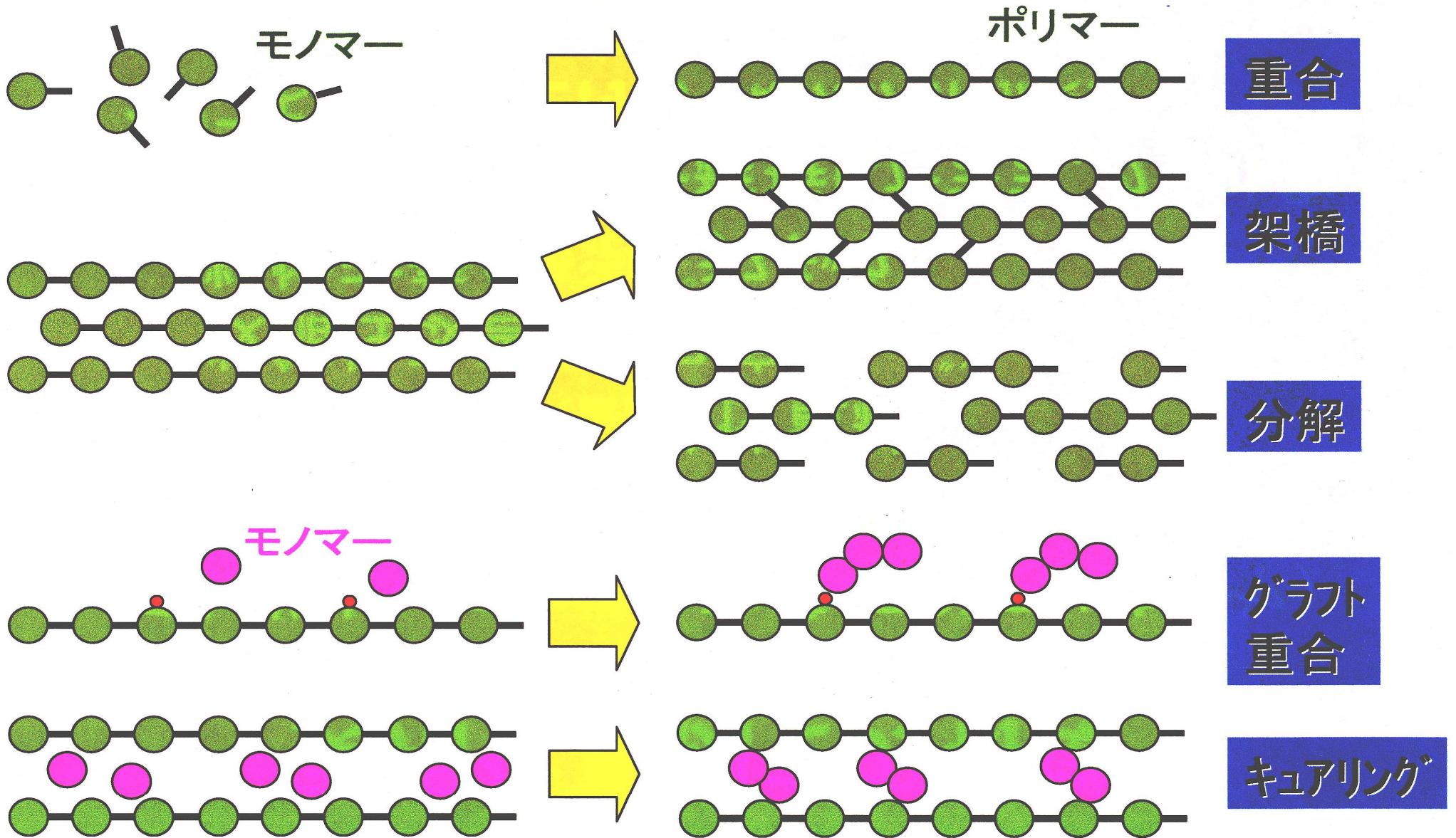
ダイヤモンドやサファイア、トパーズなど一部の宝石では照射により着色処理を行っている物がある。

さらに、反射光の波長が入射光の波長からシフトする、ラマン散乱を測定することで、結晶の振動準位や回転準位、電子準位を知ることができる(ラマン分光法)。

放射線化学プロセスの特徴

- 添加物が不要（クリーン）
- 加熱が不要（省エネルギー）
- 原材料の形状維持で機能化が可能
- 反応が早く、かつ制御（線量）が容易
- 原材料の特性に依存
- 高い設備コスト
- 許認可手続き

高分子の放射線化学反応



放射線による計測

X線回折

Laue や Bragg らによって確立された X線回折によって、結晶構造状態評価を行う上で無くてはならない非常に重要な格子面間隔の情報を得ることが出来る。

格子定数 × 空間群 → ある面指数の面

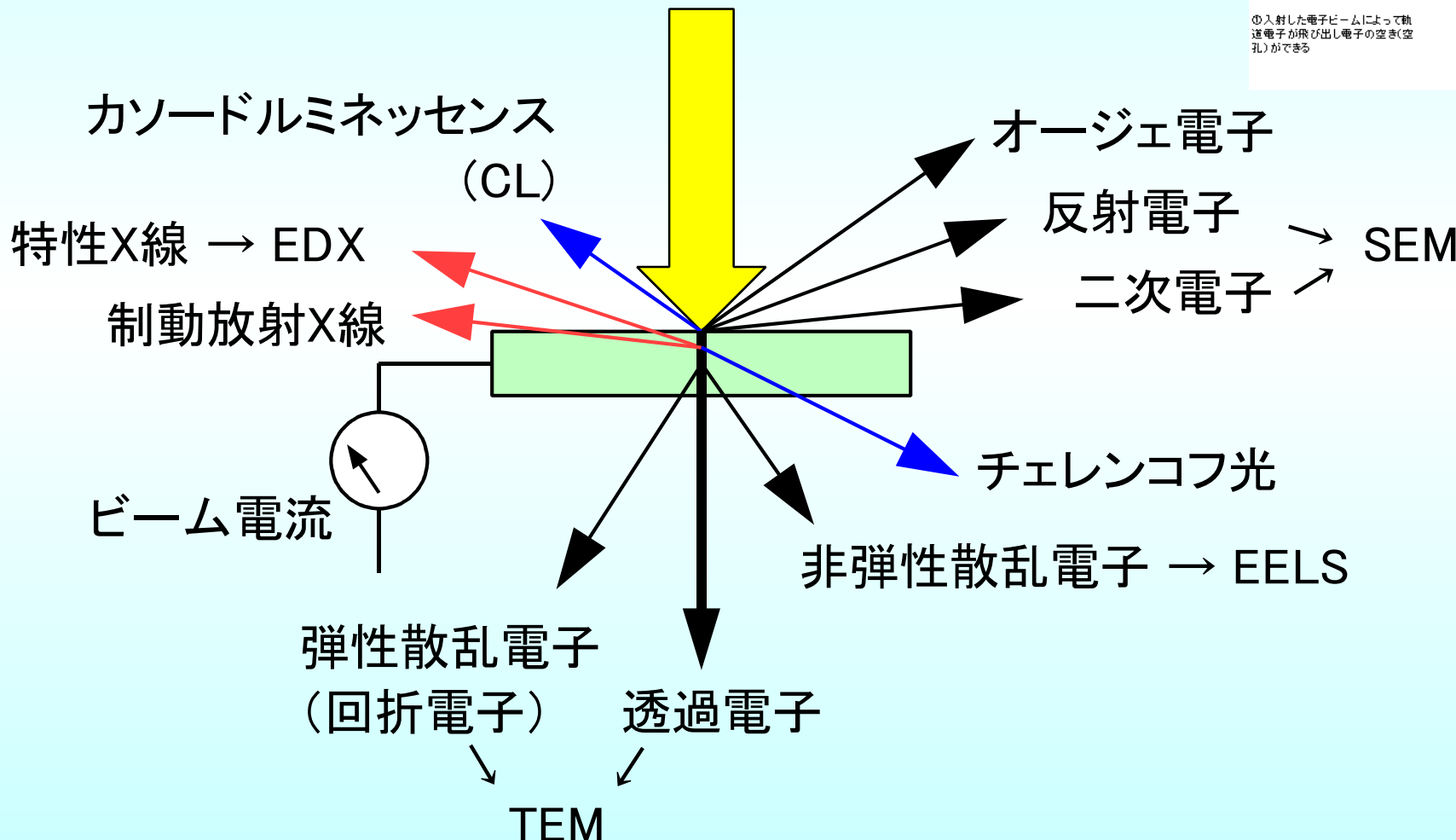
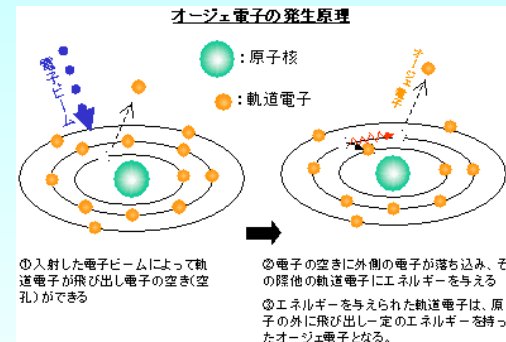
どのような対称性を持てばどのような面間隔を持つ格子面が存在しうるか
→ 230の空間群（結晶構造の対称性をまとめた集合）

様々な組成の結晶に対してこの格子定数と空間群をデータベース化
→ 測定されたスペクトルからどのような結晶であるかを知ることが出来る。

それぞれの回折ピークの詳細な解析（半値幅の変化やピークシフト、相対強度変化など）によって、結晶粒の分布状態や、特定の方向に歪みがかかるなどの応力状態を知ることなども可能となる。

電子線の入射で出てくるもの

入射電子

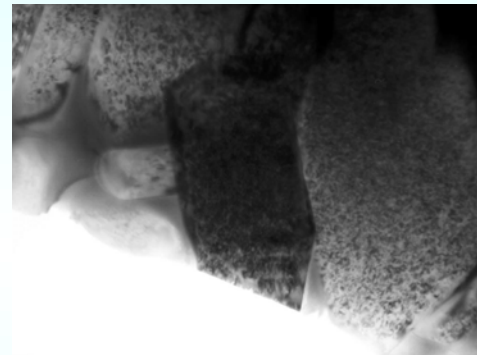


透過電子顕微鏡観察(TEM)

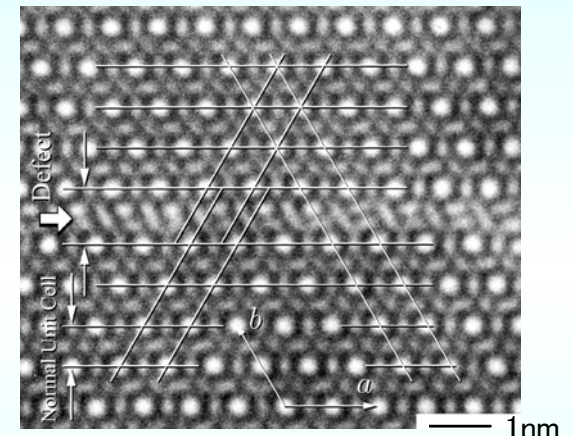
高倍率で結晶状態を観察可能であり、高分解能観察(HREM)では原子の配列状態を直接的に視覚的に知ることが出来る。



日立 H-9000 型 300kV TEM



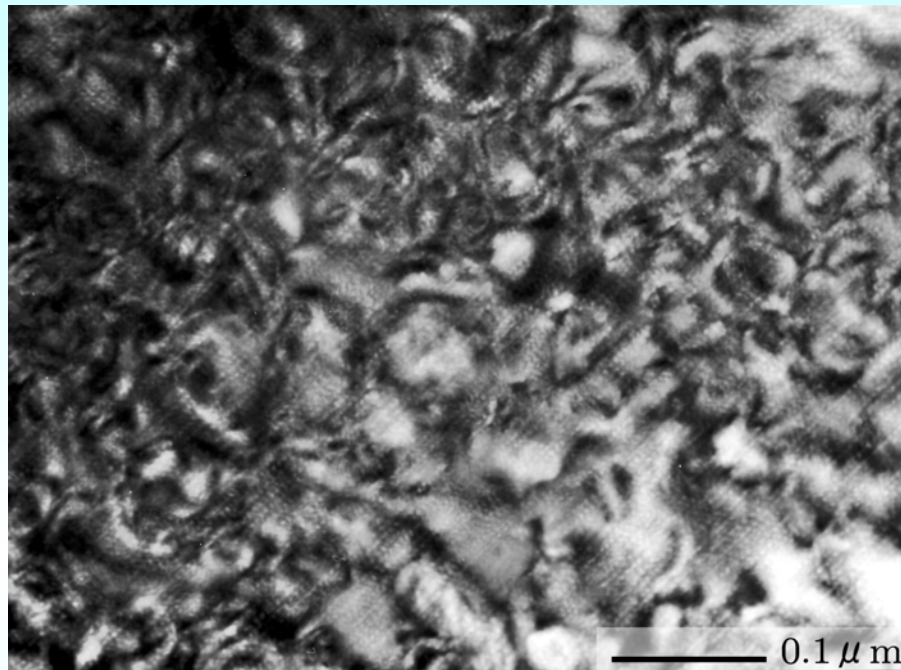
0.5 μm
中性子照射した $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ の
明視野(Bright Field)像



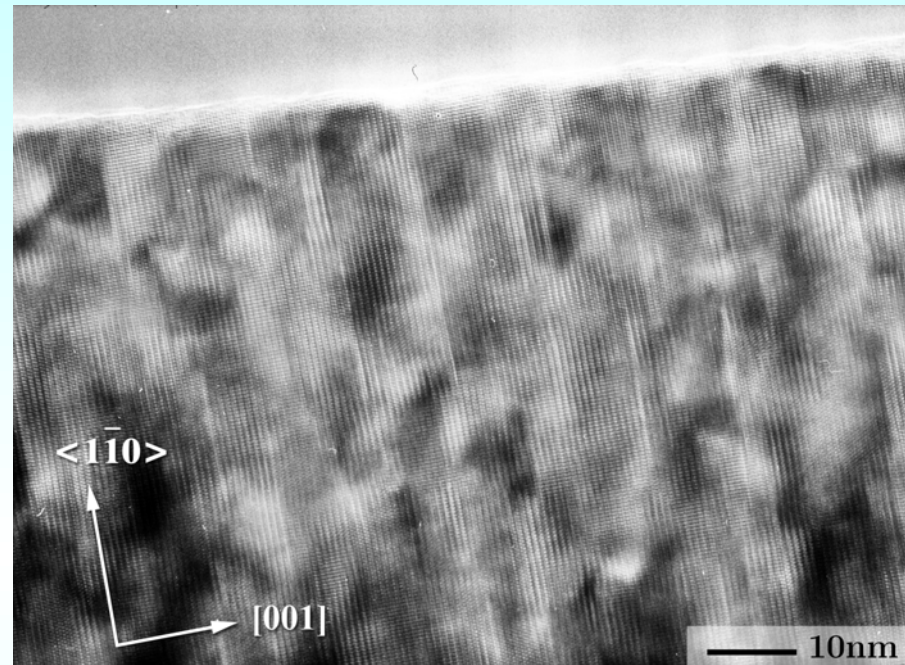
1nm
中性子照射した $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ 中の
格子欠陥構造高分解能像 (HREM)

ただし、本質的に原子の「規則的な配列状態」を視覚化する装置であり、個別の格子間原子や空孔を検知することは困難であり、アモルファス構造などは捉えることが出来ない。
また、試料調整が決定的に重要な役割を果たしており、いかに試料を電子線が透過しうる nm オーダーまで薄膜化するかが目的の観察を行えるかどうかの鍵を担っている。

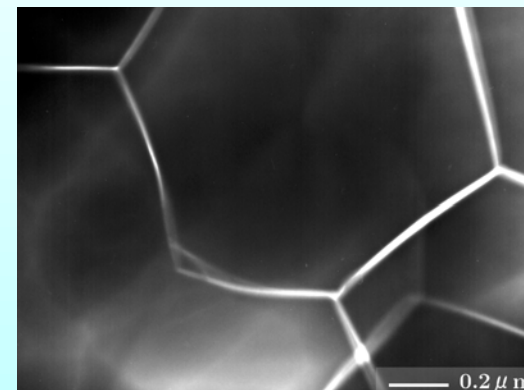
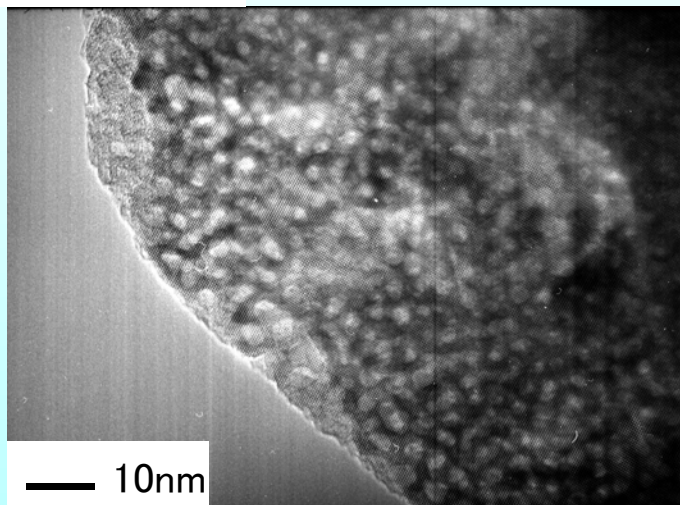
TEM 観察例



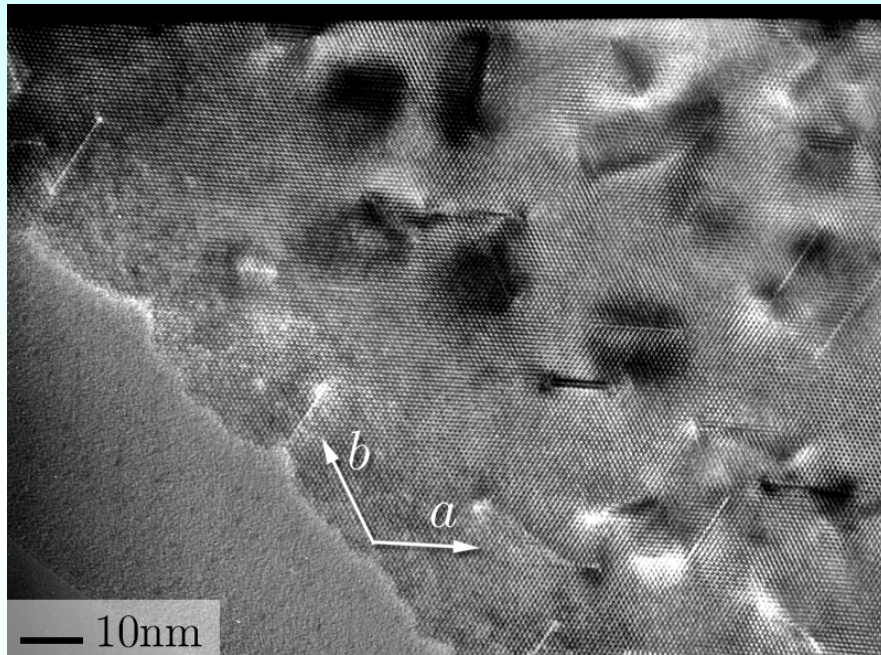
α - Al_2O_3 に導入された転位ループ
とボイド



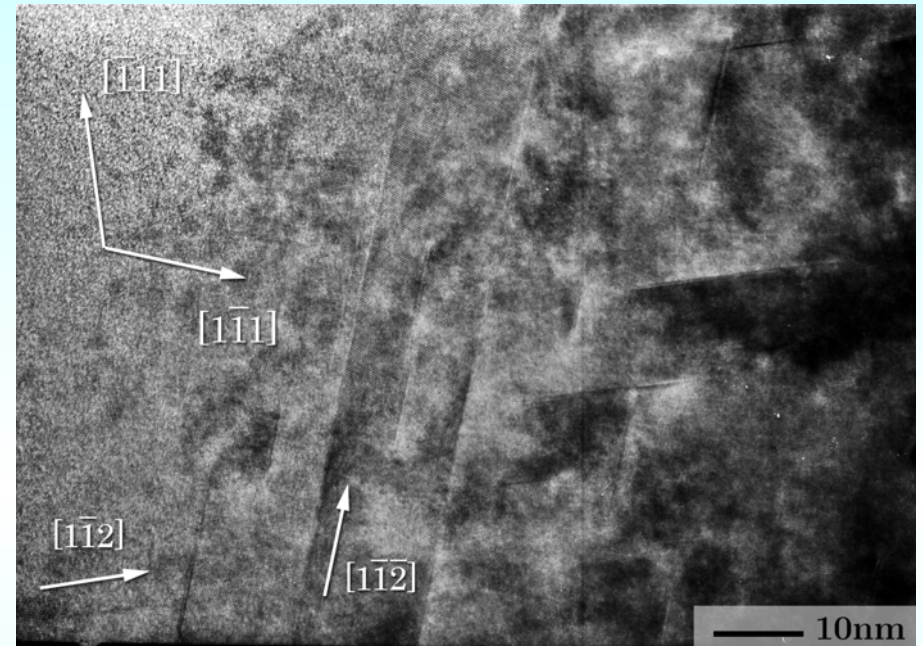
AlN に導入された転位ループ
(観察面は $\{100\}$ 面)と粒界クラック



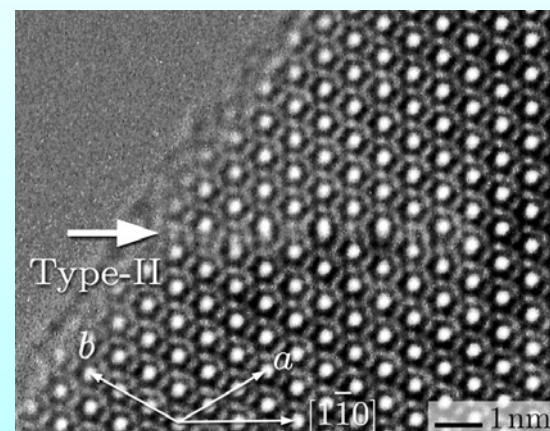
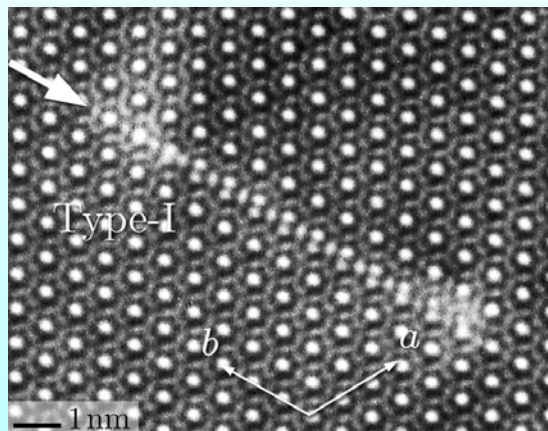
TEM 観察例



β - Si_3N_4 に導入された転位ループ
(観察面は(001)面)



β -SiC に導入された転位ループ
(観察面は(001)面)



陽電子消滅法

陽電子と電子とが対消滅を起こすと、2本の 511keV γ 線が反対方向に放出されるが、そのエネルギーは消滅時の陽電子と電子の運動量の分だけ 511keV からずれている。

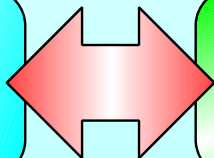
これをドップラーシフトと言い、物質中での電子状態を知る有効な手段として広く利用されている。

物質中に入射された陽電子が電子と対消滅するまでの寿命は、物質に依存するが 100ps~1ns のオーダーであり、消滅相手の電子の密度に大きく影響する。

材料が均一ではなく、陽電子が空孔やその集合体に捕獲されたとき、陽電子の寿命はこれらの欠陥のない試料に比べて長くなる。

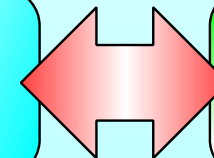
これは、局所的に欠陥のところで電子密度が低くなるためである。

空孔サイズ



陽電子寿命

欠陥の数



長寿命成分
の強度

放射光 X線分析

科学捜査一和歌山毒物カレー事件(1998)



図2 SPring-8 施設概観 (平成11年10月撮影)
 (提供: 高輝度光科学研究センター, URL: http://www.spring8.or.jp/JAPANESE/general_info/overview/intro.html)

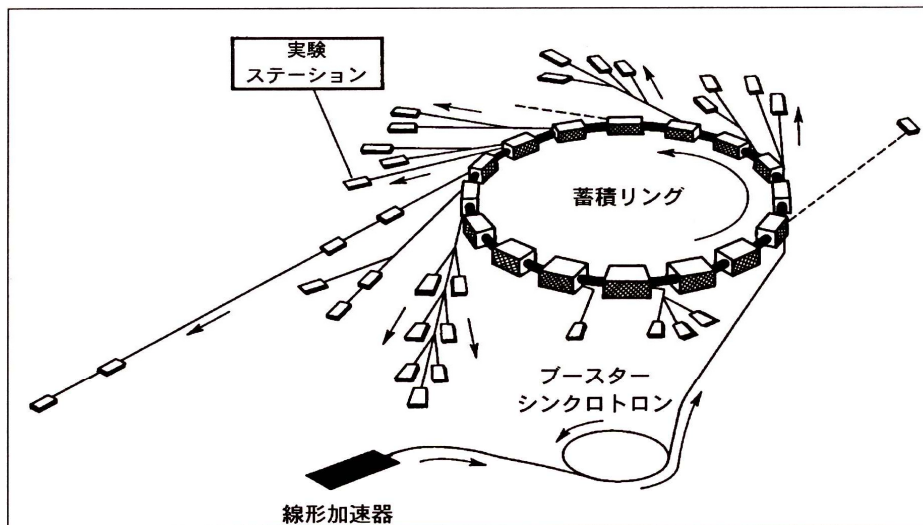


図6.1 放射光源の基本システム (ダレスベリー研究所, UK)

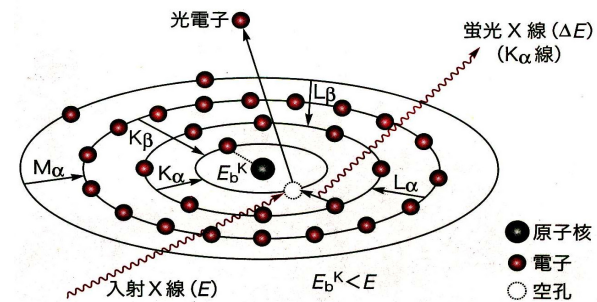


図2 蛍光 X 線分析の原理

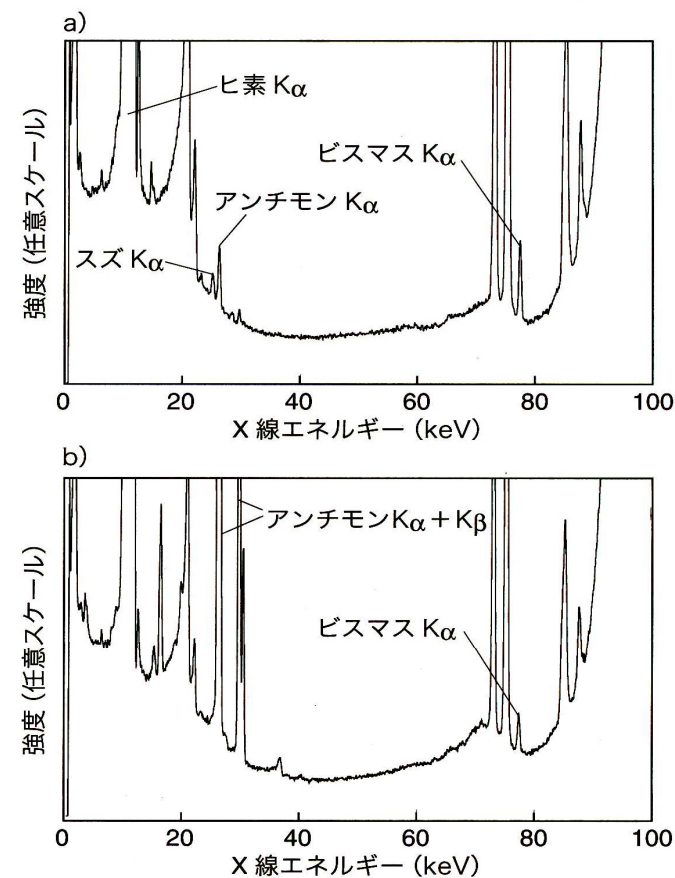
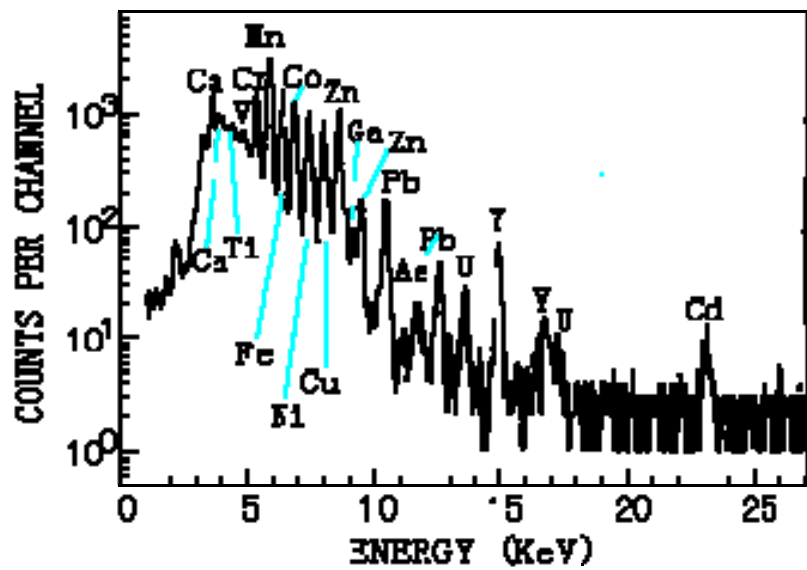
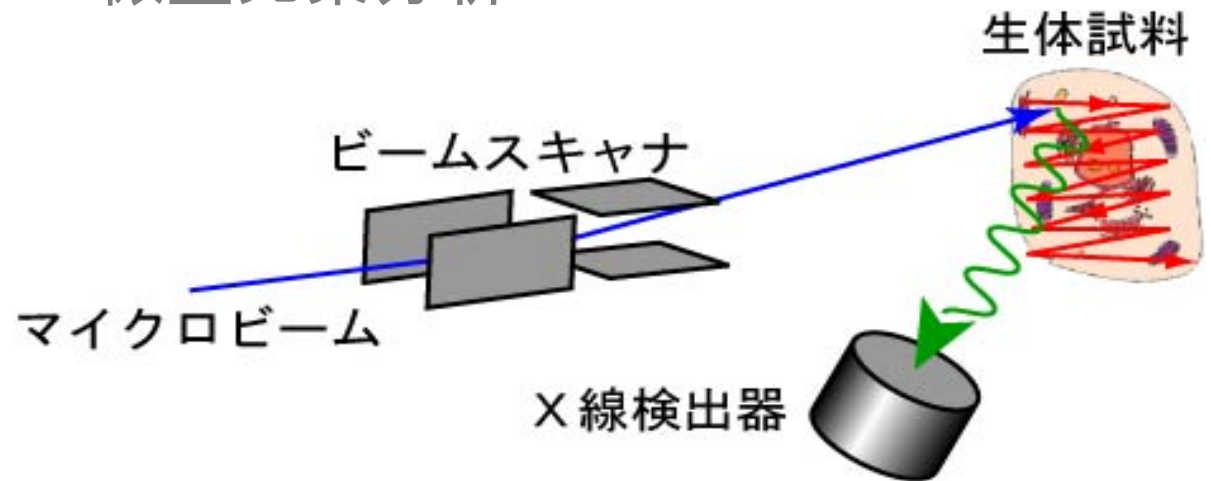
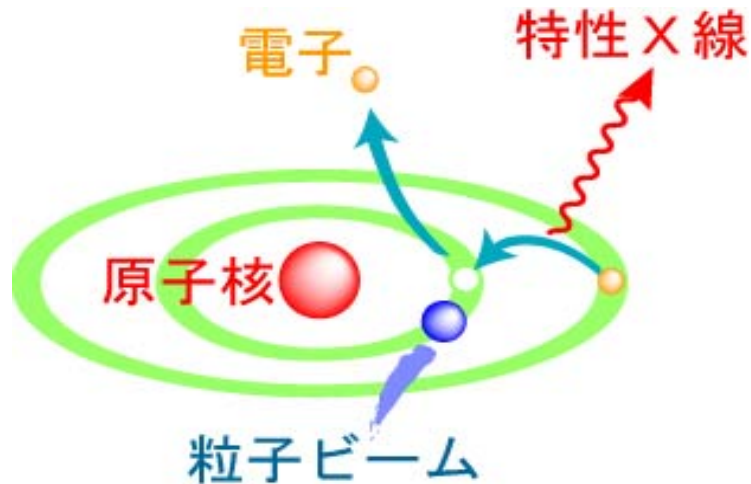


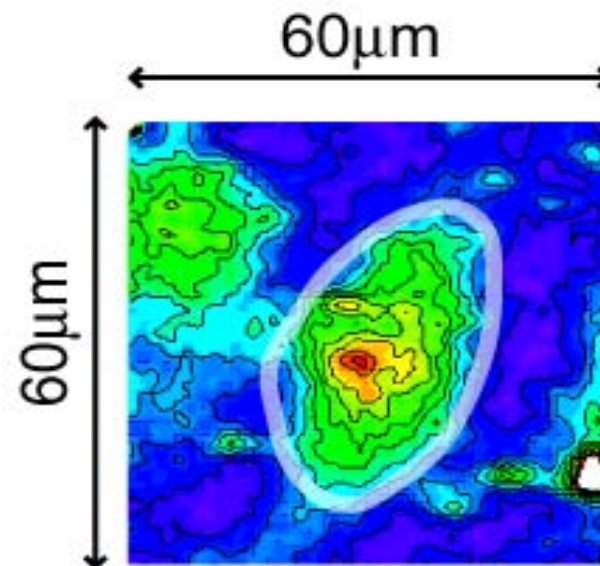
図4 産地の異なる亜ヒ酸の蛍光 X 線スペクトル
 a) 中国産, b) メキシコ産.

PIXE (Particle Induced X-ray Emission)

粒子線励起X線分析法 微量元素分析



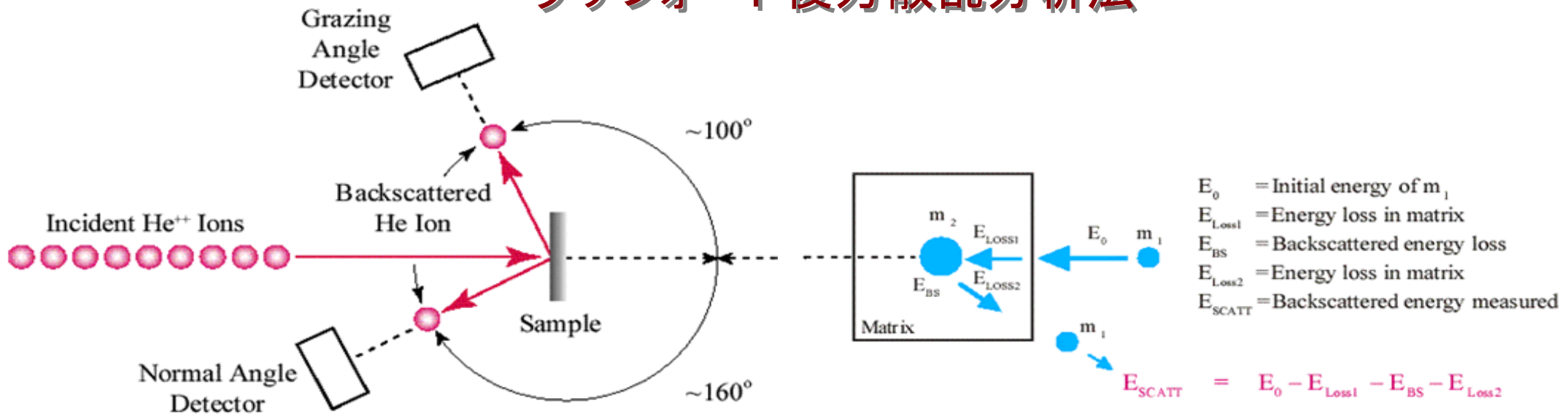
Solution Containing 200 ng of Various Elements



細胞中のリンの分布

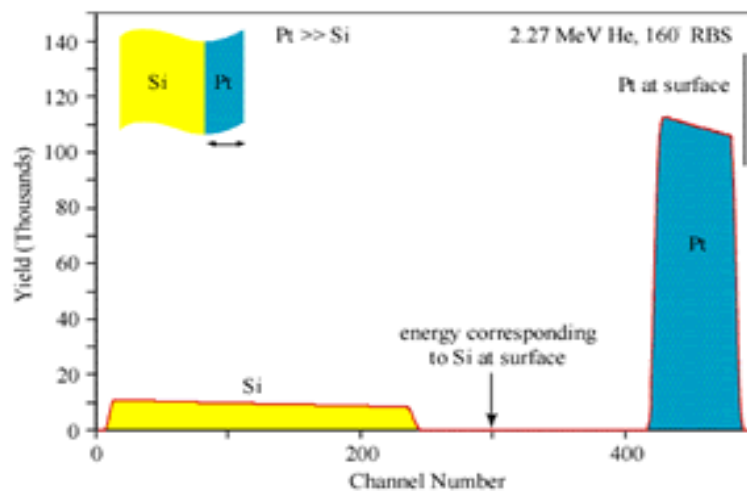
RBS (Rutherford Back Scattering)

ラザフォード後方散乱分析法



How to Interpret RBS Data

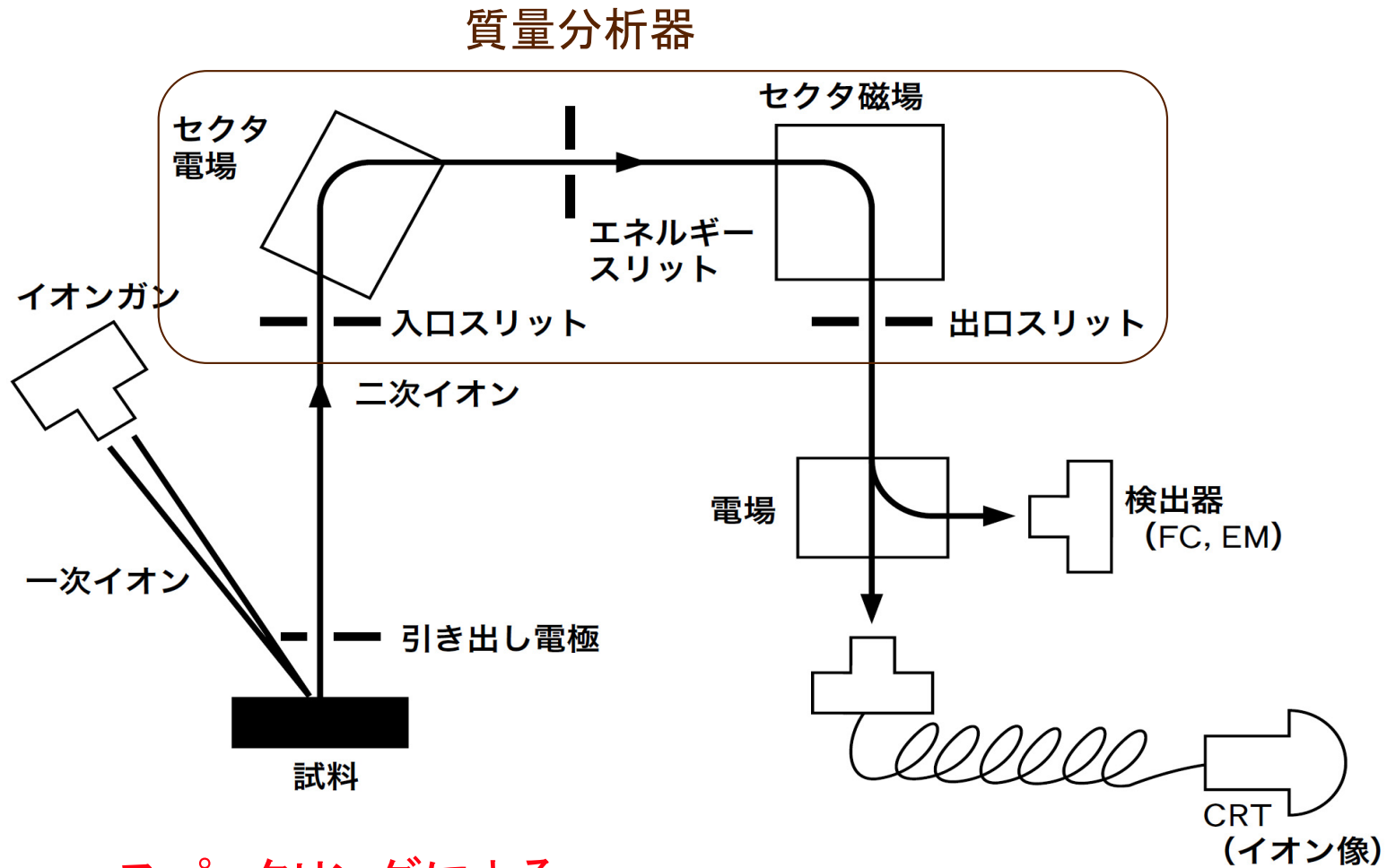
Pt on Si



- Channel number = Backscattering energy
- Surface is on the right (high energy) greater depths to the left (lower energy)
- Heavier elements produce larger peaks per unit concentration

Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS)

二次イオン質量分析法

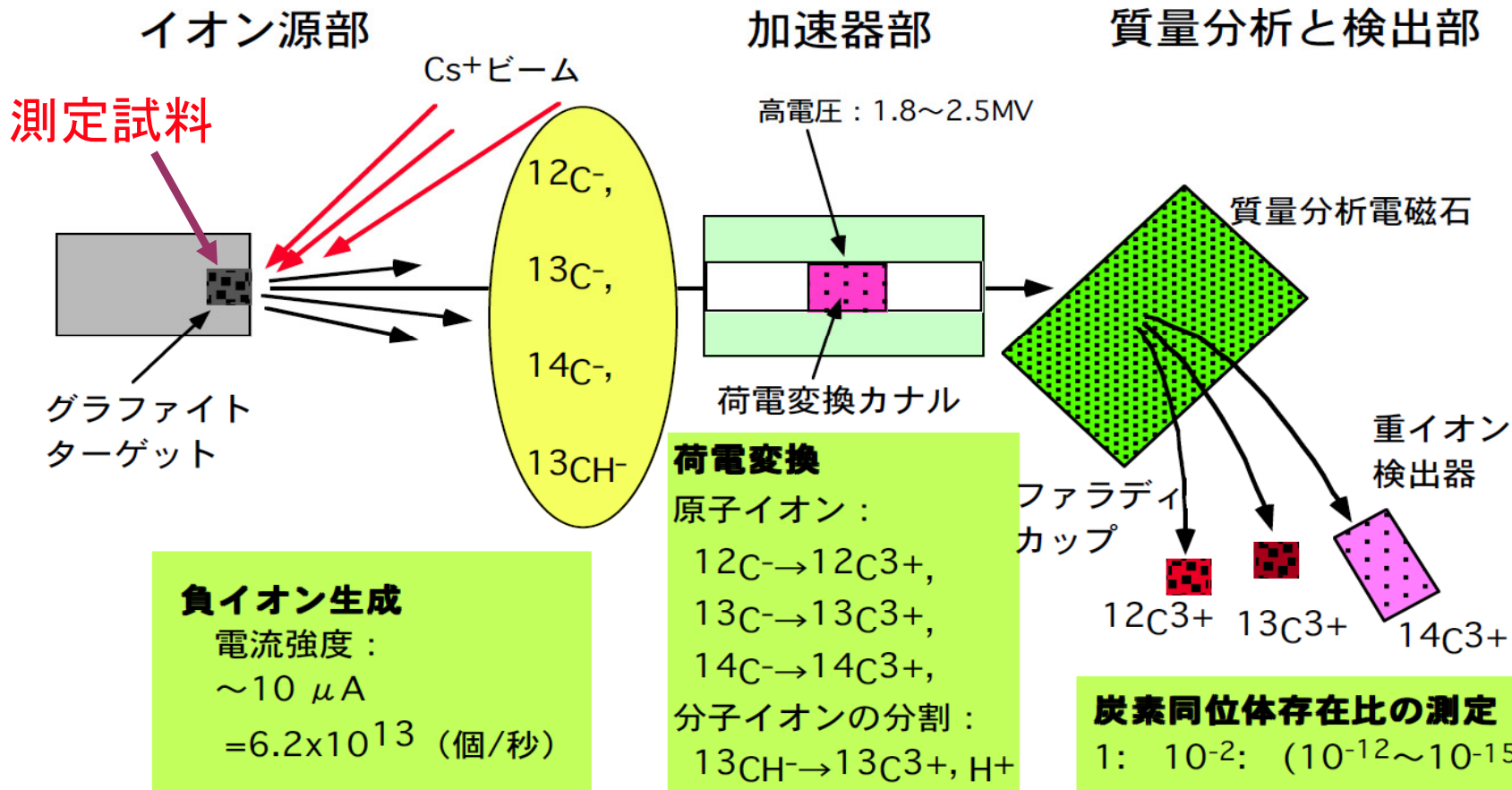


スパッタリングによる
二次イオン放出

AMS (Accelerator Mass Spectrometry)

加速器質量分析の原理

^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{129}I

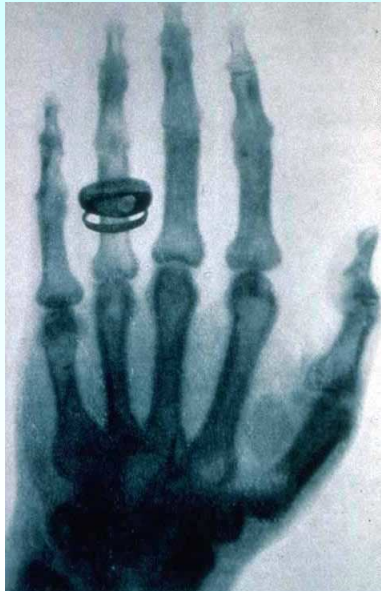


年代測定: 考古学、地質学、宇宙科学

同位体比: 環境学、薬物動態試験

放射線の医療応用 ～診断～

放射線を用いた診断



1896年に撮影された
レントゲン氏の奥さん
の手の透過写真

光子と物質の相互
作用の強さによっ
て濃淡が得られる

コンピュータ断層撮影(Computed Tomography)

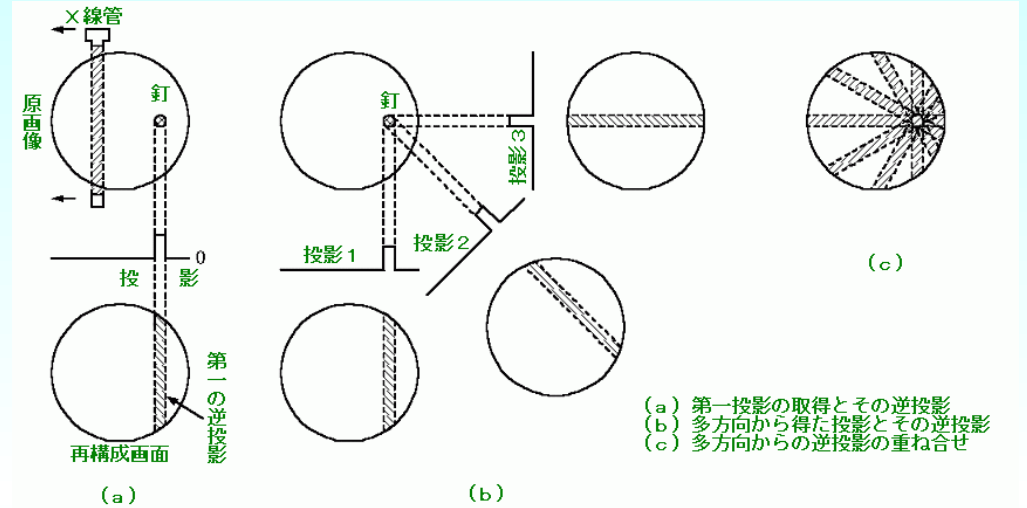
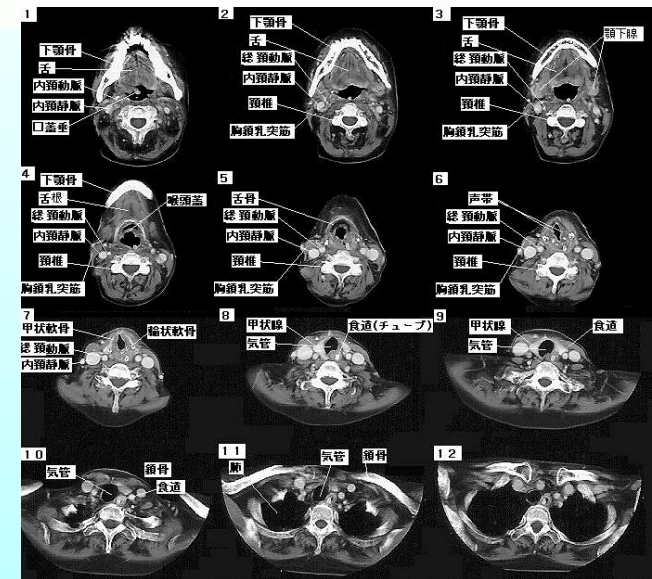


図1 X線CTにおける画像計算の原理(その1)

[出典] 舘野 之男、飯沼 武: 画像診断-基礎と臨床、コロナ社(1987年), p39

多方向から撮影したX線透過
像から立体的配置を再構成
するのがX線CT。
核磁気共鳴を用いたMRIと
は全く原理が異なる。

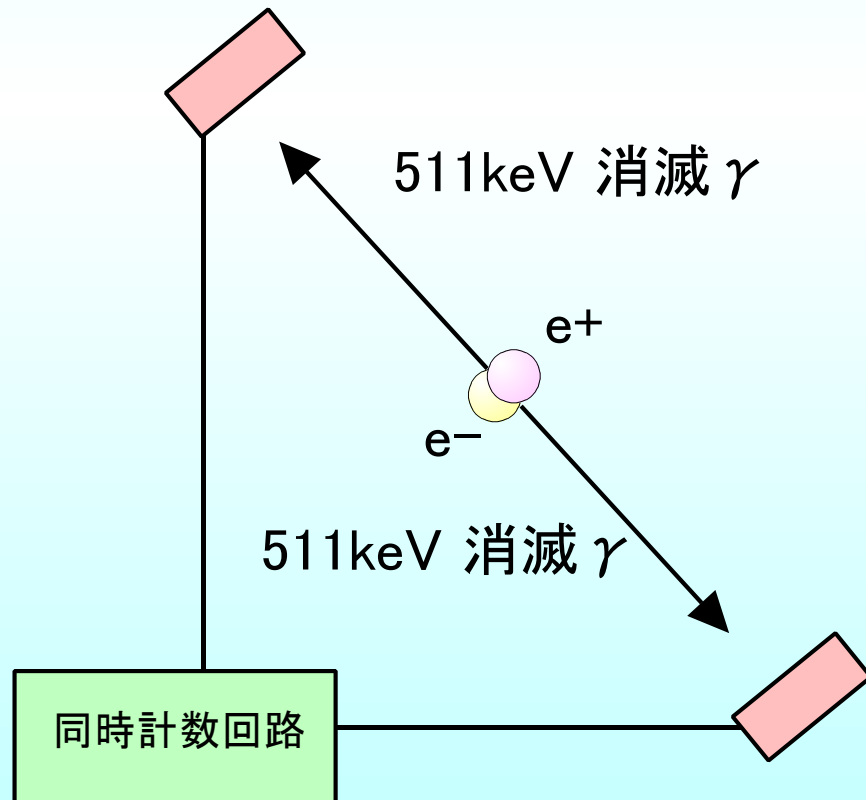


放射線を用いた診断

PET :陽電子放射断層撮影 (Positron Emission Tomography)

β^+ 崩壊する核種で標識された化合物を放射性トレーサーとして用いる。
 β^+ 核種の半減期は短い(O-15:2分、N-13:10分、C-13:20分、F-18:110分
など)ため、投与直前にサイクロトロン等を用いて製造される。

ブドウ糖代謝の指標となる
18F-FDGを用いたFDG-PET
検査が代表的。



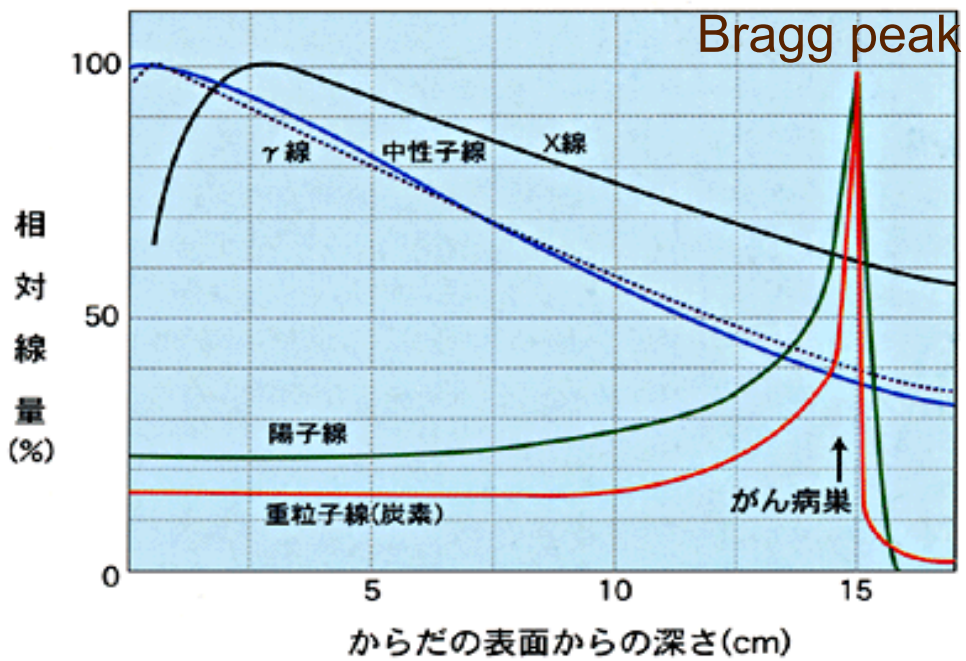
陽電子が電子と対消滅する際に放出する、
511keVの180° 方向に放出される2本の γ
線を、円周上に配置した検出器で検出し、
同時計数回路で処理することでどこで消滅
したのかを検出できる。

SPECT: 単一光子放射断層撮影 (Single Photon Emission
Computed Tomography)

体内に投与したRIから放出されるガンマ線を検出し、その
分布を断層画像にしたものである。

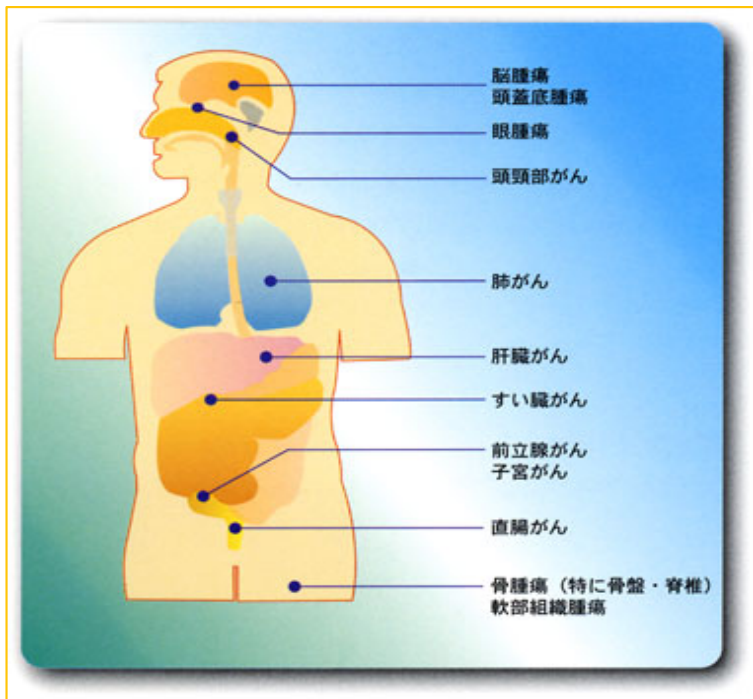
位置を特定するために検出器の前にコリメーターを必要
とする。

放射線の医療応用 ～治療～

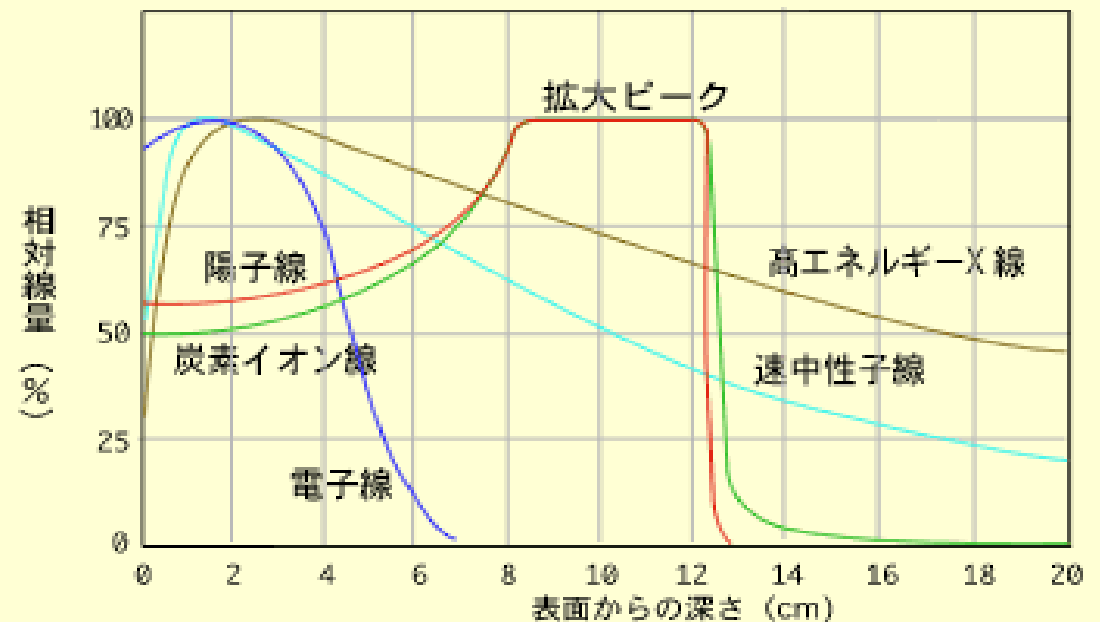


各種放射線の生体内における線量分布

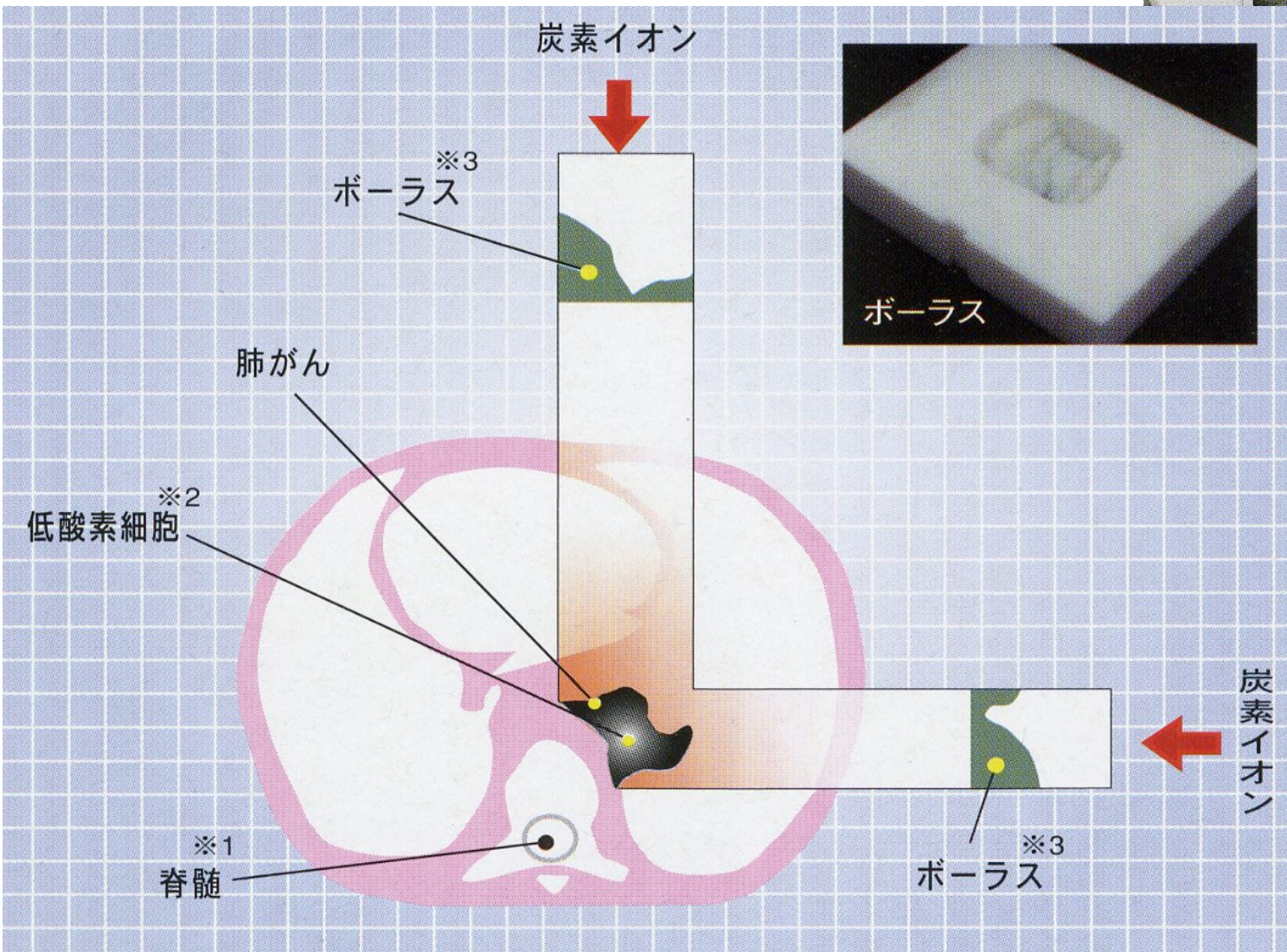
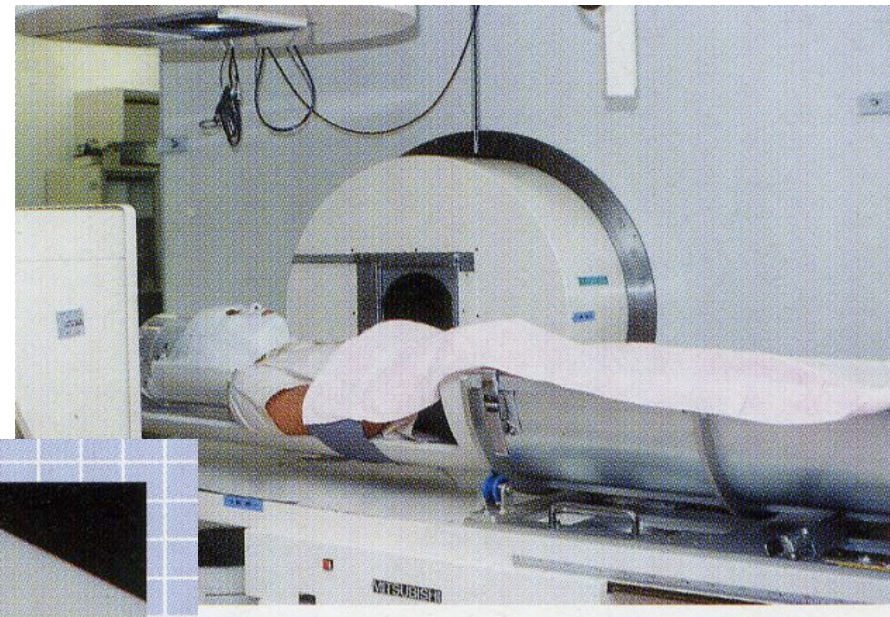
(放医研 HPより)



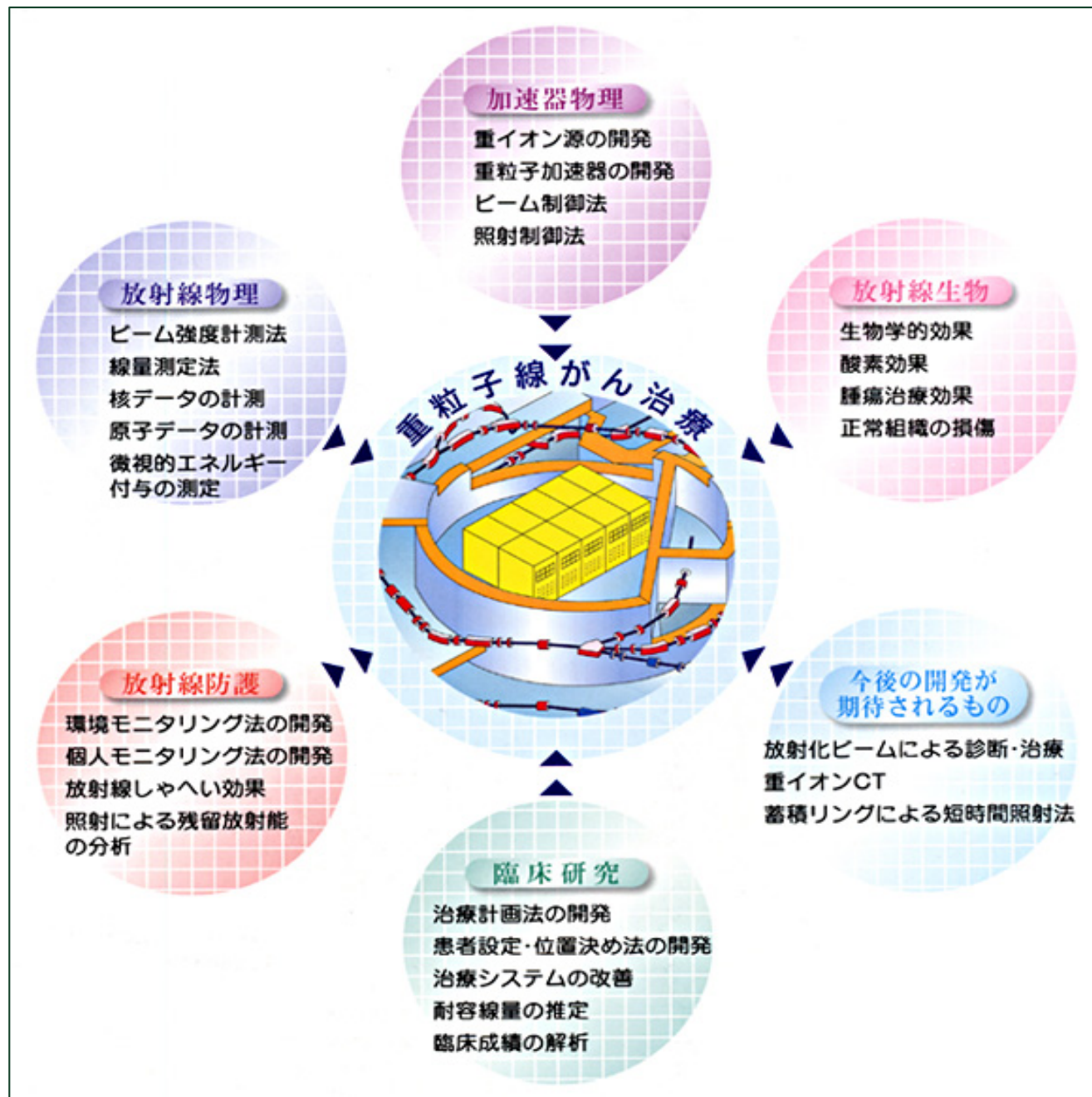
各種放射線の線量分布



HIMACによる照射の例



重粒子線がん治療に関わる分野の拡がり



放射線の医療応用 ～滅菌～

放射線を用いた滅菌



	ガンマ線	電子線	エチレンオキシド	高圧蒸気
設備	大型	大型	小～大型	小～中型
透過力	大（梱包可）	小（梱包可）	密閉不可	密閉不可
材料選択	耐放射線性	耐放射線性	耐圧性	耐熱・耐水性
滅菌温度	常温	常温	40～60℃	121℃
処理方法	連続式	連続式	バッチ式	バッチ式
処理時間	数時間	数十分	数時間	数時間
後処理	不要	不要	ガス抜き	乾燥
残留物	なし	なし	残留ガス	なし
滅菌確認	線量確認	線量確認	BI無菌試験	BI無菌試験

表1 滅菌法の特性比較

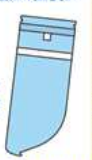
特性	滅菌法			
	γ線	電子線	EO(エチレンオキシド)	高圧蒸気
放射線エネルギー	電子線より小	γ線より大	-	-
放射線透過力	電子線より大	γ線より小	-	-
処理量/時	電子線より小	γ線より大	-	-
対象の材質	プラスチック, 繊維, 金属	プラスチック, 繊維	プラスチック, 繊維, 金属	耐熱性(～130℃)プラスチック, 繊維, 金属
対象の適合性	寡品目, 大量処理	寡品目, 大量処理 多品目, 少数処理	寡品目, 大量処理	寡品目, 大量処理
包装形態	最終包装状態で滅菌操作可能	最終包装状態で滅菌操作可能	EOガスの脱出が必要で、その後包装を完了する	蒸気の脱出が必要で、その後包装を完了する
制御要因	線量(コンベア速度に依存)	線量(コンベア速度, 電圧などに依存)	温度, 時間, 湿度, 濃度, 圧力	湿度, 圧力, 時間
工程保守管理	容易	γ線より容易	複雑	EOガスより容易
製品の安全性	残留物なく安全	残留物なく安全	EOガス残留の可能性あり	残留物なく安全
滅菌コスト	高価	γ線より安価	蒸気より高価	最も高価
設備コスト	最も高価	高価	かなり高価	比較的安価
対外関係	施設周辺の理解に幅がある	施設周辺の理解が得やすい	施設周辺の理解に幅がある	とくに問題はない



カネソン独自のインフレーション製法が、大切な母乳をしっかりと守ります。

カネソン母乳バッグは製造過程において、内部を一度も外気に触れさせない独自のインフレーション製法で製造しています。さらに、母乳を衛生的に保てるようガンマ線滅菌を施し、徹底した安全性を追求。この安全性のこだわりこそが、「冷凍母乳といえばカネソン母乳バッグ」の高い評価をいただいています。

フィルム素材を筒状に成型し、直後に外気に触れることなく真空状態に圧着。2枚重ね製法に比べ、内部を外気にさらすことがないので、異物や雑菌が入りにくいカネソン独自の製造方法です。



【出典】(社)日本アイントップ協会(編集、発行):放射線滅菌の現状と展望、1998年9月25日、p10

放射線の農業利用

食品を殺菌する

放射線を照射することによって、食品を健全な状態で長い期間保存できる技術を**食品照射**といいます。

昔から人々は、食品を長く貯えるために、塩漬けや干物などの工夫を行ってきました。最近では保存料などの薬剤も広く使用されています。しかし、それらの中には私たちの健康に害を与えたりするものもあってきました。そこで人の健康に害がない方法として食品に放射線をあてる「食品照射」が世界各国で使われるようになっていきます。

※現在、日本ではジャガイモへの照射のみが認可されています。



冷凍や生のまま、O157、サルモネラ菌など大部分の食中毒菌を殺菌できます。

※照射された放射線は食品を通り抜けてしまうため、照射した食品に放射線が残ることはありません。

新しい品種を生み出す

農作物に放射線を照射してできた突然変異種を利用することで、有用な品種の改良を行うことができます。



「レイメイ」

耐寒性があり寒い所で育つのに適していたが、育が高く、少しの風で倒れちゃう品種「フジミノリ」に放射線を照射して、本来の耐寒性に加えて背の低い倒れにくい品種「レイメイ」を作り出しました。



「ゴールド二十世紀」

鳥取県産の「二十世紀ナシ」はナシ黒斑病という病気にとってもかかりやすく、予防に多くの費用がかかっていましたが、放射線を照射した子孫の中から病気に強い新品種が誕生し、産地で急速に生産が普及しています。



「カーネーションの新種」

ピンク色のカーネーション「ビタル」に放射線を照射して、黄色、淡ピンク、濃紅色などの花色や花弁の形と数などで、変わった品種が得られています。

※照射された放射線は作物を通り抜けてしまうため、照射した作物やその子孫に放射線が残ることはありません。

農作物の害虫防除

南西諸島で大きな農業被害を与えていたウリミバエを根絶するために放射線がつかわれました。



ウリミバエ

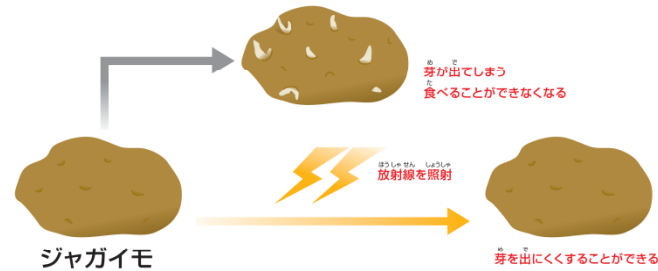


ゴーヤ・マンゴーなど

人口飼料で飼育したウリミバエを産卵させ、卵から幼虫を経て変身した何百万匹ものさなぎに放射線を照射して、不妊化(子供ができないようにすること)します。こうしてつくられた不妊虫を地上に放し、野生のウリミバエのメスと交尾させます。そのようにして生まれた卵はふ化しないので次の世代が育たず、ついに根絶します。

この結果、ゴーヤなど南西諸島の農作物が本土で食べられるようになりました。

ジャガイモの芽止め



日本では北海道・士幌町でジャガイモへの照射が実施されています。ジャガイモは収穫後、しばらくすると芽が出て食べられなくなります。発芽前のジャガイモに放射線を照射することで発芽を抑え、新鮮でおいしく食べられる期間を何ヶ月も伸ばすことができます。

※照射された放射線はジャガイモを通り抜けてしまうため、照射したジャガイモに放射線が残ることはありません。

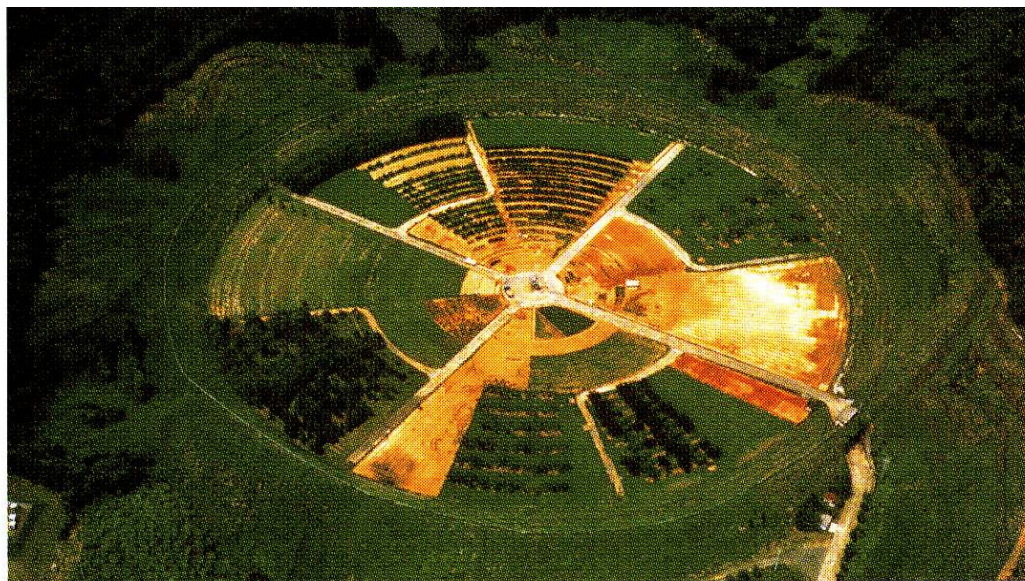


図 10 放射線育種場（ガンマーフィールド）
（出典：（独）農業資源研究所放射線育種場「パンフレット」，p.2. URL: <http://www.irb.affrc.go.jp>）

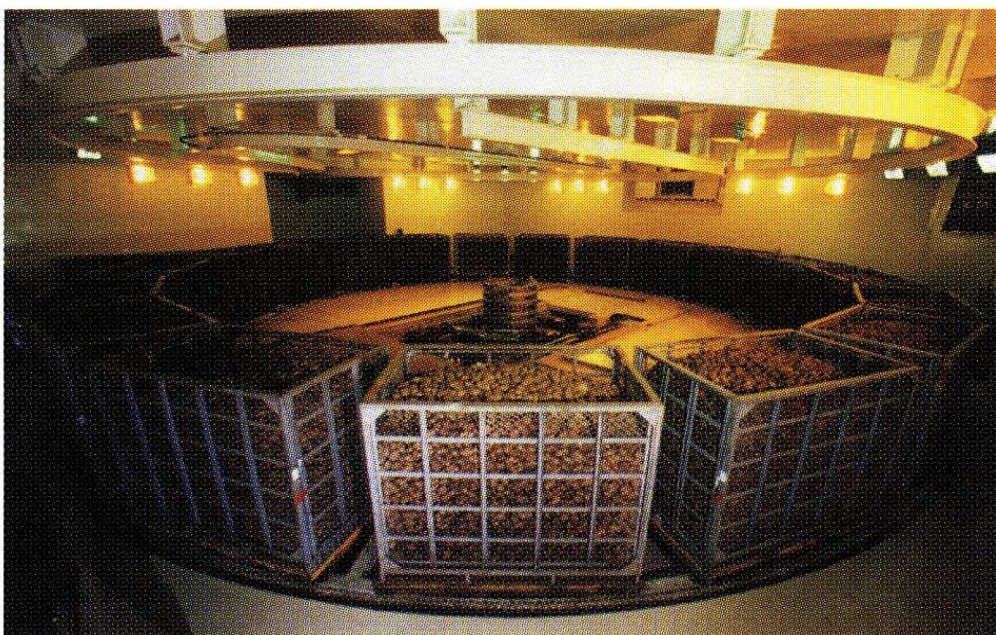


図 12 士幌町農協バレイシヨ照射施設

放射線でがんの細胞を撃退する

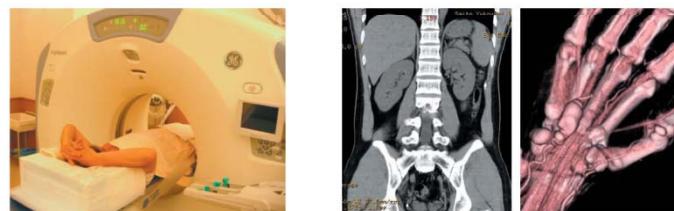
がん治療にはさまざまな方法がありますが、臓器や体のかたちを損なわず副作用の苦痛を避けられる点で放射線治療が最も注目されます。



放射線治療では、体内深くにある「がん病巣」目掛けてエネルギーを集中し吸収させることでがん細胞を撃退します。

エックス線でからだを透過する

エックス線を利用した人体の撮影では、体に傷を付けることなく体の中を知ることができます。病気の場所や大きさ、周りの臓器との位置関係など、痛みもなく短時間で写し出すことができるので、医学の中で広く利用されるようになり発展してきました。



エックス線をからだのまわりからあてて、通過してきたエックス線の情報をコンピュータで計算することでからだの中のどの部分でも写真を作ることができます。

からだの中を自由な方向で切り取った画像や三次元画像を見ることができます。

医療用具を滅菌する

むかしの注射器はガラス製で消毒するために注射針と一緒に煮沸滅菌して何度も使っていましたが、現在では出荷前に密閉された袋のまま、放射線で滅菌処理を行うことで、病院での手間を省き医療の合理化と衛生の増進に役立っています。



投薬瓶



各種医療機器

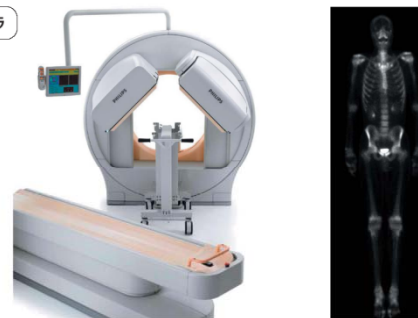
放射線滅菌の特長

- 密封した状態で均一に滅菌
- 残留する有害なものがない
- 多量の製品が連続で処理できる
- 効果は半永久的
- その他

放射線を出すクスリをからだに入れる

放射線医薬品という検査用の薬を飲んだり注射した後に、体の外から検査用のカメラで撮影して体の臓器の形や病気の有無を調べる検査です。

ガンマカメラ



放射線による年代測定

年代測定法の一例

天然放射性物質の性質を使って、
試料の年代を測定出来る

炭素14法

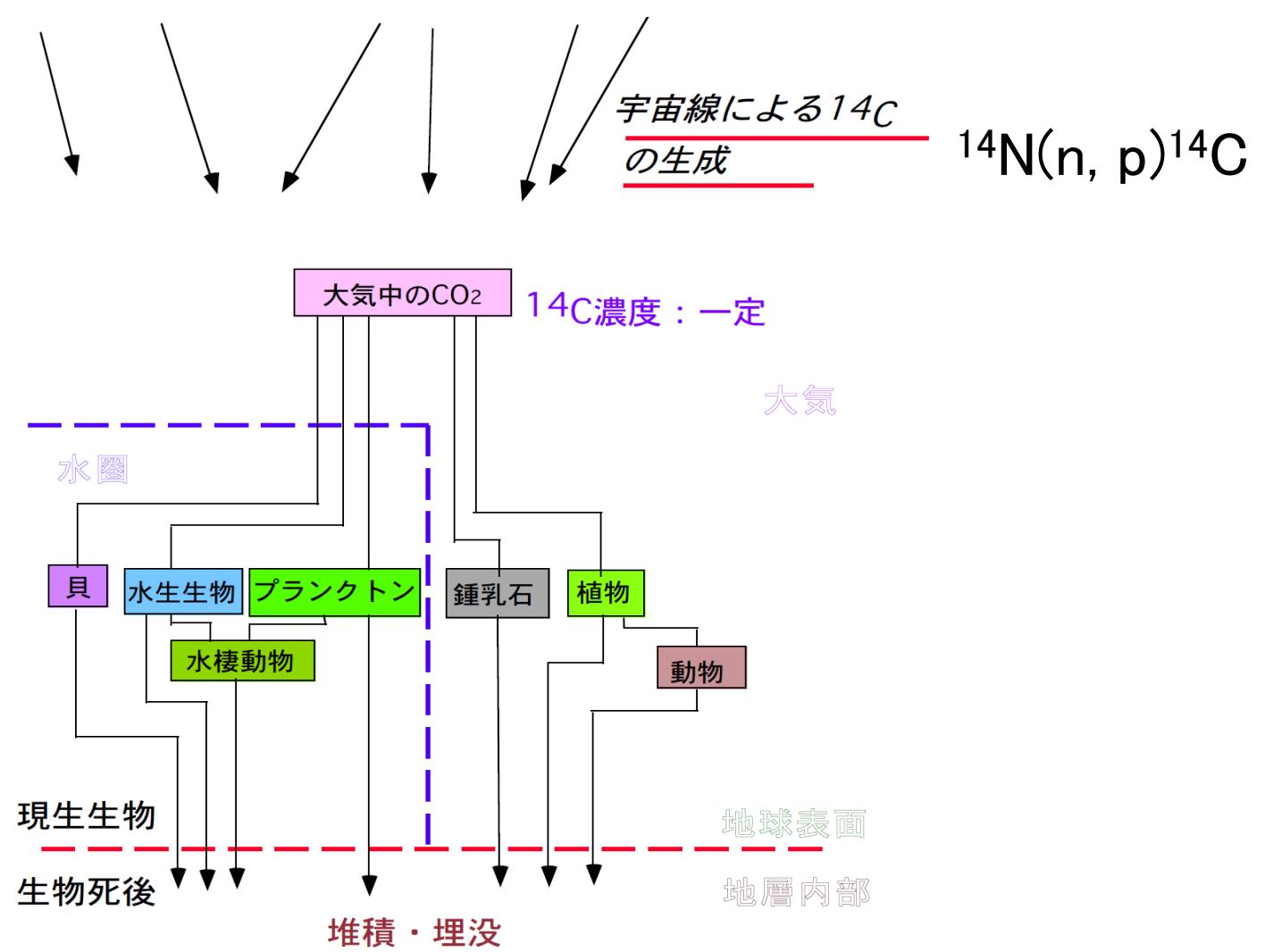
宇宙線により発生するC-14は、現在崩壊して減少する速度と釣り合っており、平衡状態となっている。このため、大気中のCO₂に含まれるC-14濃度は一定であり、現在生きて活動している生物中の濃度も一定である。しかし、生物が死んで代謝が停止すると、半減期5730年の崩壊に従ってC-14濃度は減少していく。このため、C-14濃度を評価すれば元になる炭素を取込んだ生物が死んでからの時間が分かる。

ただし、大気中の平行濃度は一定とは限らず、他の方法で年代が明らかな試料の測定から、若干大気中の濃度が変動していることが分かっている。

カリウム-アルゴン法

K-40は半減期12.5億年で壊変して、希ガス元素であるAr-40に変わる。気体であるAr-40は、岩石が熱せられると逸脱してしまうため初期値を0と考え、岩石が冷えてからは逸脱できずに岩石の中にたまっていくと考える。Ar-40は岩石を熱することにより集める事が出来るためこの量を測定すると、岩石が溶岩から固まってからの年代を測定できる。

ただし、変成作用などにより岩石が途中で熱せられると一部のAr-40が逸脱してしまうため、評価年代が若くなってしまう。U-Pb法などと併用すると逆に変成作用を受けた年代が評価できる。



^{14}C の供給はなくなり放射壊変により ^{14}C は減少する

^{14}C の減少の割合から生物死後の年代(年齢)が算出できる

図1 ^{14}C 年代測定法の原理図

表1 放射年代測定法の適用範囲および適用物質

放射年代測定方法	現在からさかのぼる適用年代(BP年)										地球外物質	火成岩・火成結核物	変成岩	堆積岩・堆積物	ガラス類	海洋性沈殿物	生物起源炭酸塩類	湖・河川堆積物	地上堆積物	地下水・海水	木片など有機物	骨・歯・角	陶器・煉瓦	
	プレカンブリア	古生代 中生代	第三紀	第四紀		完新世																		
	10 ¹⁰	10 ⁹	10 ⁸	10 ⁷	10 ⁶	10 ⁵	10 ⁴	10 ³	10 ²	10 ¹	1													
親・娘核種の放射性同位体比の利用																								
⁴⁰ K/ ⁴⁰ Ar ³⁹ Ar/ ⁴⁰ Ar ⁸⁷ Rb/ ⁸⁷ Sr ¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴³ Nd ²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb, ²³⁵ U/ ²⁰⁷ Pb, ²³² Th/ ²⁰⁸ Pb																								
宇宙線由来の放射性核種の利用																								
¹⁴ C ³ H/ ³ He ¹⁰ Be ³⁶ Cl ³⁹ Ar ⁵³ Mn																								
ウラン系列の放射非平衡を利用																								
²³⁰ Th/ ²³⁴ U ²³¹ Pa/ ²³⁵ U ²³⁴ U/ ²³⁸ U ²³⁰ Th過剰 ²³⁰ Th過剰/ ²³² Th ²³¹ Pa過剰/ ²³⁰ Th過剰 ²¹⁰ Pb U/He																								
放射線損傷を利用した年代測定																								
熱蛍光(TL)法 電子スピン共鳴吸収(ESR)法 フィッシュントラック																								

————— : 多方面で適用可能な範囲 - - - - - : 制限付きで確立された適用範囲 ◎ : 多用される
 - - - - - : 適用可能な範囲 ———— : 開発・研究中範囲 ○ : よく用いられる
 : 制限付きで適用可能な範囲 △ : 用いることが可能

天然の放射性核種

地球が誕生して約50億年、未だに天然の放射性核種が残る。

放射性核種の半減期則より

10半減期の後では元の1024分の1、

40半減期では1兆分の1 となるため、半減期の短い核種は既に消滅している。

壊変系列をつくる放射性核種

親となる核種の寿命が長く (U-238 45億年, Th-232 140億年)、
 α 崩壊に伴って質量数が親核種から4ずつ小さくなる。

系列を作らない核種

大気上層で宇宙線により ^3H (10^{18}Bq/y)、 ^{14}C ($1.3 \times 10^{15}\text{Bq/y}$) が生成される。

^3H は半減期12.3年、 ^{14}C は5730年と短い。

一方、地球誕生時から存在したものとして以下の核種などが知られている。

^{40}K	(半減期12.8億年, 天然のK中の存在比 0.0117%)、
^{87}Rb	(480億年、27.8%)
^{147}Sm	(1060億年, 15.1%)
^{148}Sm	(8000兆年, 11.3%)
^{115}In	(510兆年, 95.7%)
^{113}Cd	(9000兆年, 12.2%)
^{187}Re	(400億年, 62.6%)
^{144}Nd	(2100兆年, 23.8%)

放射線利用のまとめ

放射線の力を使わないと実現出来ない事がたくさんある!

物質を透過する能力

→ レントゲン写真、CT、非破壊検査

狙った場所にエネルギーを与える

→ 微細半導体加工、材料改質、ガン治療

物質内部の情報を知ることが出来る

→ 特性X線を用いた元素分析、X線回折、放射化分析

細胞のDNAにダメージを与える

→ 滅菌処理、品種改良、ジャガイモの芽止め

◎ 中性子線を当てる場合を除いて、核反応を起こして照射した相手が放射線を出すようになる「放射化」は起こらない。
(超高エネルギーのX線や電子線を除く)

● 許認可などの手続きが大変。