

2023年10月17日(火)
(一社)九州経済連合会 九州エネルギー問題懇話会
(一社)日本原子力学会九州支部
2023年度 エネルギー講演会

産業・暮らしを支える放射線応用技術

早稲田大学

理工学術院総合研究所・教授

理工学術院・先進理工学研究科・共同原子力専攻・教授

理工学術院・先進理工学部・応用物理学科・教授

鷺尾 方一

はじめに

この講演では、過去から多くの関係者が積み上げてきた放射線の利用を社会実装する取り組みや、その結果について、できるだけ客観的に俯瞰し、将来への期待・展望をお示ししてみたいと思います。



講演内容

- 放射線利用の歴史概観・経済規模
- 各種放射線によるプロセス概観
 - ✓ 電子線応用
 - ✓ X線(ガンマ線)応用
 - ✓ イオンビーム応用
- 今後のプロセス展望

えっ！こんなところにも
放射線が利用されて
いるの？



放射線利用の歴史概観

1895	レントゲン	X線の発見	レントゲン
1897	トムソン(J.J. Thomson)	電子の発見	トムソン
1898	ラザフォード	α 線の発見	
1898	キュリー	Ra、Poの発見	キュリー
1911	ラザフォード	原子の構造推定	ラザフォード
1931	ローレンス、スローン	線型加速器発明	
1932	ローレンス	サイクロトロン発明	
1932	コッククロフト、ウォルトン	静電型加速器発明	
1932	チャドウィック	中性子の発見	
1932	アンダーソン	陽電子の発見	
1933	バン・デ・グラーフ	バンデグラーフ静電加速器発明	
1935	湯川秀樹	中間子理論	
1948	ドール	放射線架橋の論文発表	
1952	チャールズビー	ポリエチレンの放射線架橋発見	
1956	ethicon社	腸線縫合糸の電子線滅菌開始	
		その後、ガンマ線滅菌	
1957	TE Connectivity	ポリエチレン熱収縮チューブ開発	
1960	GE社	架橋ポリエチレンテープ実用化	
1961	住友電工	電子照射ポリエチレン電線 製造開始	
		電子照射熱収縮チューブ 製造開始	

放射線利用の歴史概観

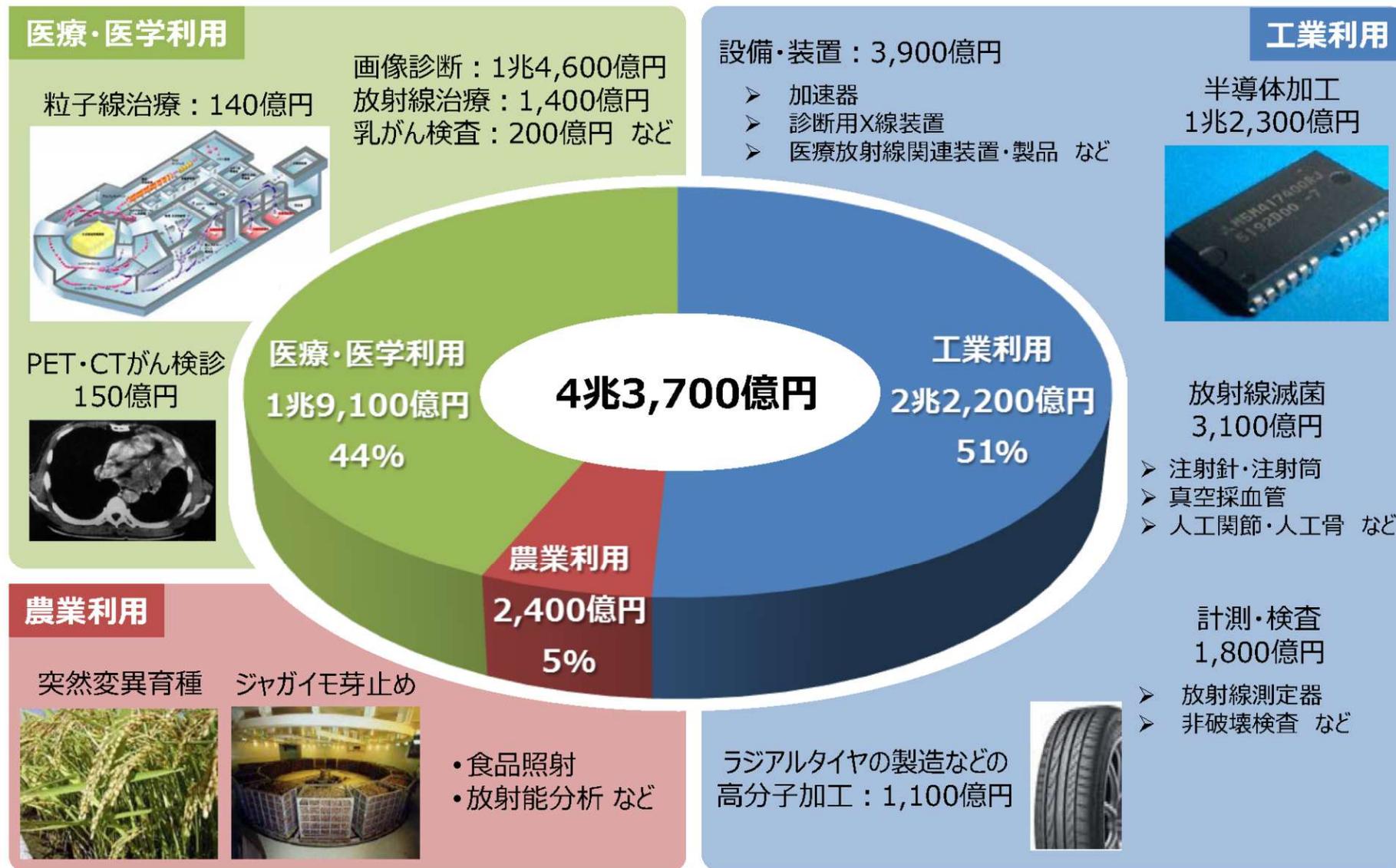
- 1963 日本原子力研究所 高崎研(現QST)設立 日本の放射線応用拠点開設
- 1969 国内最初のガンマ線受託施設開設(@栃木)
- 1970 ディスポ注射器、注射針のガンマ線滅菌承認
- 1970~ 電子照射技術を適用した、タイヤ、発泡プラスチックの生産開始
各種(架橋フィルム、リリースコート等)の電子硬化プロセス実用化
- 1971 第8改正日本薬局方に放射線滅菌が滅菌法の1つとして明記
- 1972 じゃがいもの芽止めに対するガンマ線照射許可
- 1973 日本メジフィジックス(株)設立 日本における放射性医薬品供給開始
- 1977 第1回放射線プロセス国際会議開催(@プエルトリコ)
- 1980~ FAO/IAEA/WHO 食品照射の健全性宣言(<10kGy以下)
- 1985 日本初のサイクロトロン利用技術サービス開始(@愛媛)
- 1986~ フランスで電子線を用いた食品照射実用化
TDKがEBフロッピーディスクの生産開始(現在は廃止)
- 1989 国内初の電子線受託施設開設(@つくば 鷲尾参画)

放射線利用の歴史概観(つづき)

- 1990～ 各種電子線プロセスの実用化
自動車用電線、トンネル内装鋼板、半導体への欠陥導入、PTFE分解、
電池隔膜、高機能グラフト膜、生分解プラスチック
- 1991 電子線架橋技術によるSiC繊維ハイニカロン開発上市
- 1991 日本で医療用具の電子線滅菌実用化(初の厚生省認可 鷺尾参画)
- 1992 血液製剤のリンパ球活性調整でガンマ線照射が実用化
- 1997 WHO食品照射の上限値(10kGy)を撤廃(<75kGy)
- 2000～ VOC、ダイオキシン除去テスト開始
- 2002 PET保険適用(糖代謝診断薬)
- 2006 日本で医薬品(点眼薬)の電子滅菌認可
- 2007 超低エネルギーEB装置実用装置(50kV)市場投入
- 2010 **PETボトルのインライン電子線滅菌**開始(S社熊本) (鷺尾参画)
- 2012 CERNでHiggs粒子発見(2013年にノーベル賞)(素粒子物理実験)
- 2015 ニュートリノ振動の発見で梶田隆章氏ノーベル物理学賞受賞(素粒子)

日本における原子力放射線利用の経済規模

平成27年度の放射線利用の経済規模



内閣府HPより引用

電子線応用技術

電子線は身近な
暮らしの中でたくさん
役に立っているのです！
加速器を使って、いろいろ
なことができます！



電子加速器 産業応用の際のすごさ

(NHVコーポレーションHPより、一部改変しています)

目的	具体例
素材の性質を改善する	はしかけ技術
	耐熱性をアップ
	強度をアップ
素材に新機能を加える	はしかけ技術、グラフト（接ぎ木）技術
	保水力を与える
	消臭効果を与える
	難燃性を与える
	形状の記憶機能を与える

電子線の目的別応用例（つづき）

NHVコーポレーションHPより抜粋（一部改変しています）

材料表面を固める	重合技術の応用
傷つき易い素材を保護	フィルムに電子線で固まる樹脂でコーティングして傷が付きにくくできる
より良い材料に改善する	はしかけの応用
高性能（高い耐熱性）材料へ	繊維強化・セラミックス複合材の強化繊維に用いられる炭化ケイ素に電子線を照射して、摂氏1500度以上の耐熱性が得られる。航空分野で利用されている
加工方法を改善する	温度を上げないで処理
熱に弱い材料も加工できる	電子線では温度を上げないでも処理可能。感熱紙のクリアコーティング等へ応用（熱くなると変色したり変形したり変質したりする材料の問題を解決してくれる。）

電子線の目的別応用例（つづき）

NHVコーポレーションHPより抜粋（一部改変しています）

高い生産効率		とてもエコな反応
	硬化処理速度を向上	樹脂の硬化でも熱乾燥に比べてとても短時間で固めることができる。生産性が向上し、省スペースに
	色を気にせず、重ねて加工	電子線は薄いものなら通り抜けるので、色のついたものでも重ねて加工できる
素材を扱いやすくする		分解技術
	バラバラに分解する	テフロンは粉状にするのは難しいのですが、電子線を照射すると微粉碎できるようになる
殺菌、滅菌する		DNA切断（イオン分子反応経由）
	滅菌する	医療用器具や飲料ボトルに付着した雑菌やウイルスを死滅させる
	殺菌する	包装材の殺菌にも電子線が応用できる

さて、今、日本の加速器が全部止まったら、 何が起こるか想像できますか？

以下にその例を挙げてみましょう

- ①半導体が一つもできなくなる。(イオン注入装置、格子欠陥導入装置)
- ②自動車のタイヤが作れなくなる。(電子線加速器)
- ③ボタン電池が生産できなくなる。(電子線加速器)
- ④がんの放射線治療のほとんどができなくなる。
(電子線加速器、サイクロトロン、シンクロトロン)
- ⑤がん検診の切り札の一つ、陽電子断層撮影ができなくなる。
(サイクロトロン)
- ⑥自動車のエンジンルームの配線材料ができなくなる。(電子線加速器)
- ⑦大型構造物の非破壊検査ができなくなる。(電子線加速器)
- ⑧高性能の床材の7割が作れなくなる。(電子線加速器)
- ⑨滅菌済み医療用具の品不足(電子線加速器)
- ⑩ペット飲料の生産問題(電子線加速器)
- ⑪熱収縮シートやチューブが作れなくなる (電子線加速器)



更に加速器があれば こんな色々なことも可能に・・・！



- ・イオンビームによる突然変異(新しい色の花や大輪の菊の創製、新種のお酒など)
- ・超耐熱性繊維の製造(SiC繊維、ボーイングの新型ジェットのエンジン部材)
- ・高性能の発泡プラスチック製造
- ・食品のポットライフの延長
- ・年代測定
- ・放射光応用
- ・最先端科学研究
- ・etc.

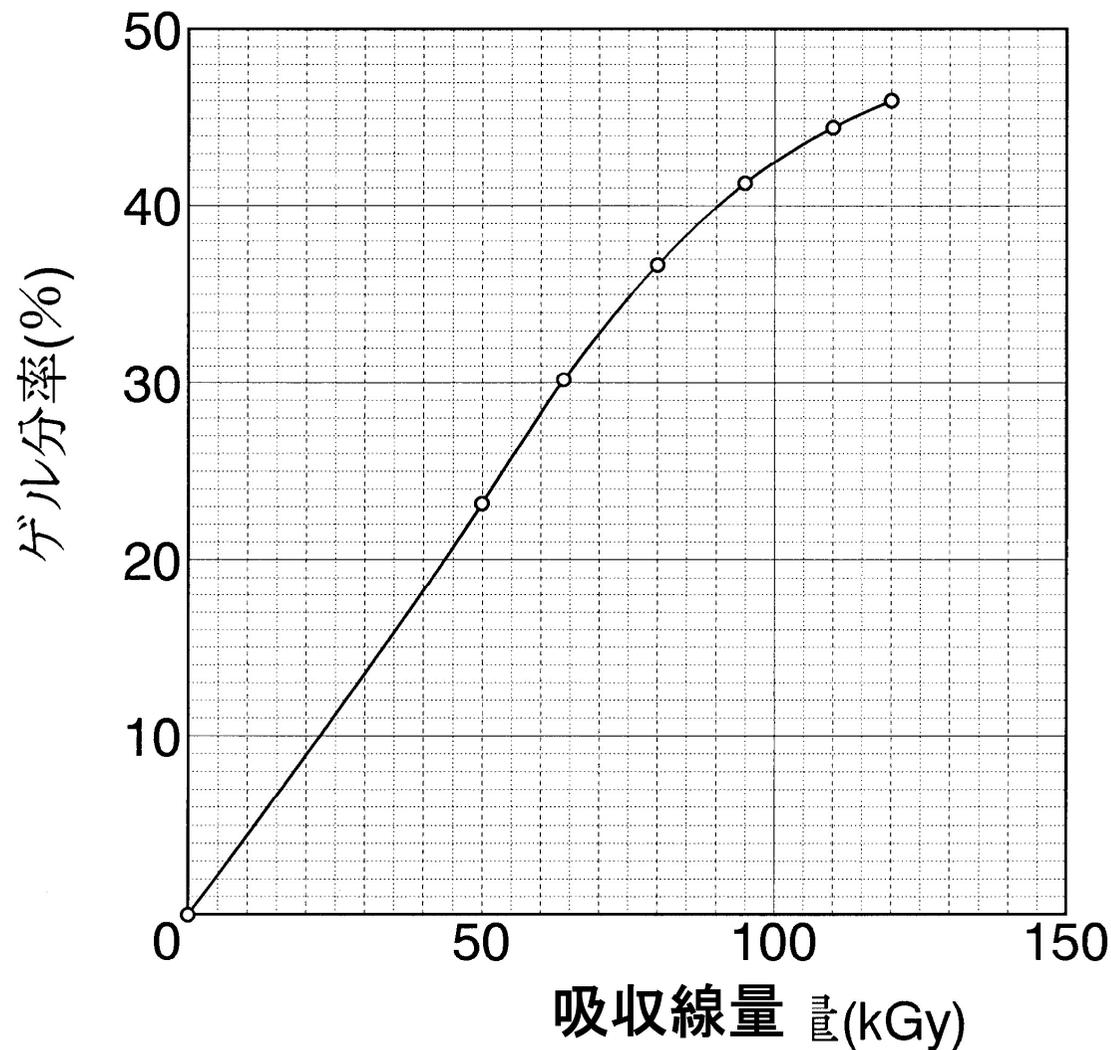
以下色々な放射線応用技術を紹介します。

ポリエチレンのはしかけ

ポリエチレンを照射して
はしかけを誘起する

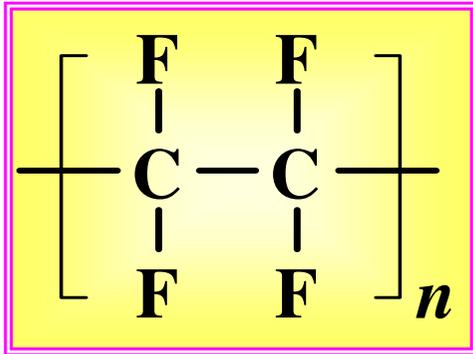
→ ゲルが生成
(耐熱性付与、形状記憶)

3次元の網目構造の実現

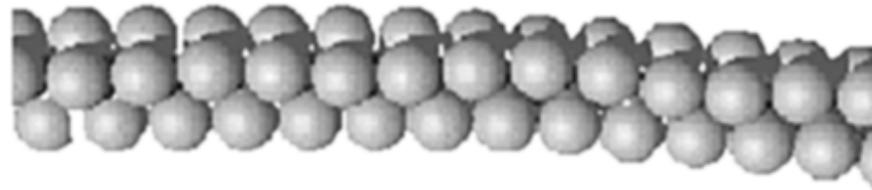


ポリエチレンの電子線架橋の一例

ポリテトラフルオロエチレン(PTFE-テフロン)の架橋



PTFEの構造



1938, Innovated by Dr. R. J. Plunkett [DuPont]

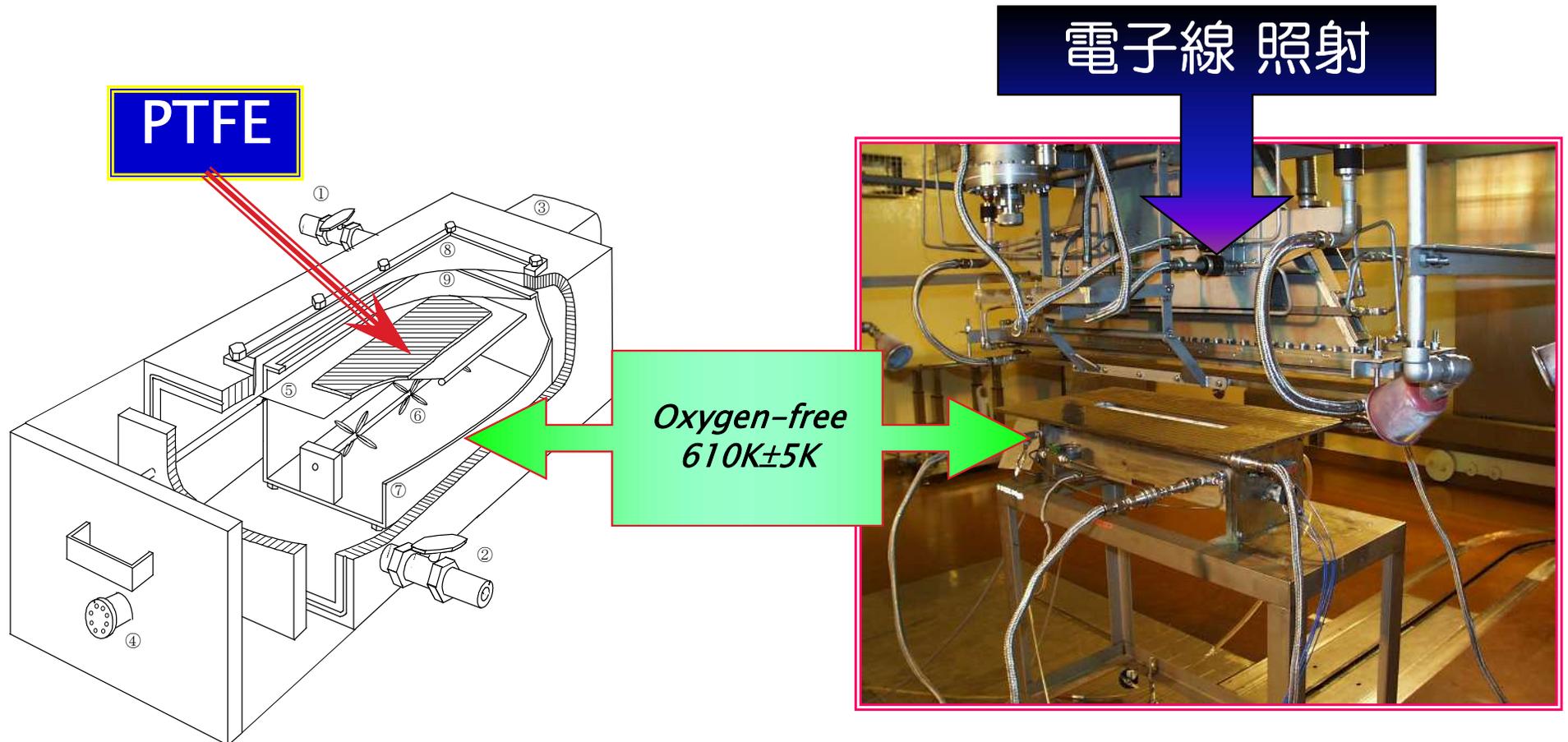
R. J. Plunkett (1941) U.S. Patent, 2,230,654

フライパンで有名な材料

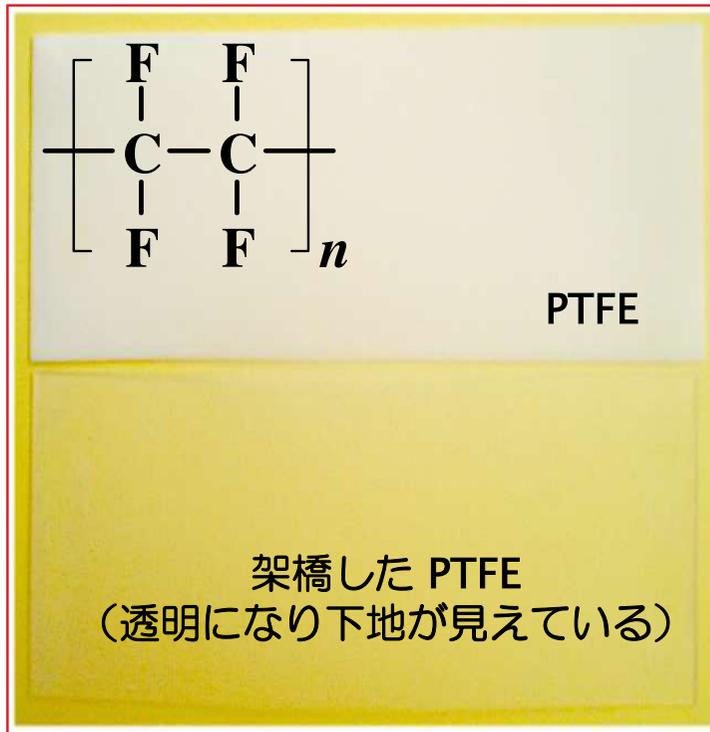
- 良好な耐熱性
- 優れた電気絶縁性
- 低摩擦性
- 優れた化学的安定性
- 不燃性
- 低摩耗耐性
- 低耐放射線性

- 密度: 2.1~2.2 g/cm³
- 融点: 600K
- 引張強度: 55MPa
- ヤング率: 127MPa
- 曲げ強度: 17.6MPa
- 曲げ弾性率: 0.59GPa
- 粘度(653K): 1~10GPa·s

PTFE架橋用の照射容器と電子線照射システム



高温、酸素がない状態で照射を行います



613K±10K (溶融状態)
Oxygen-free

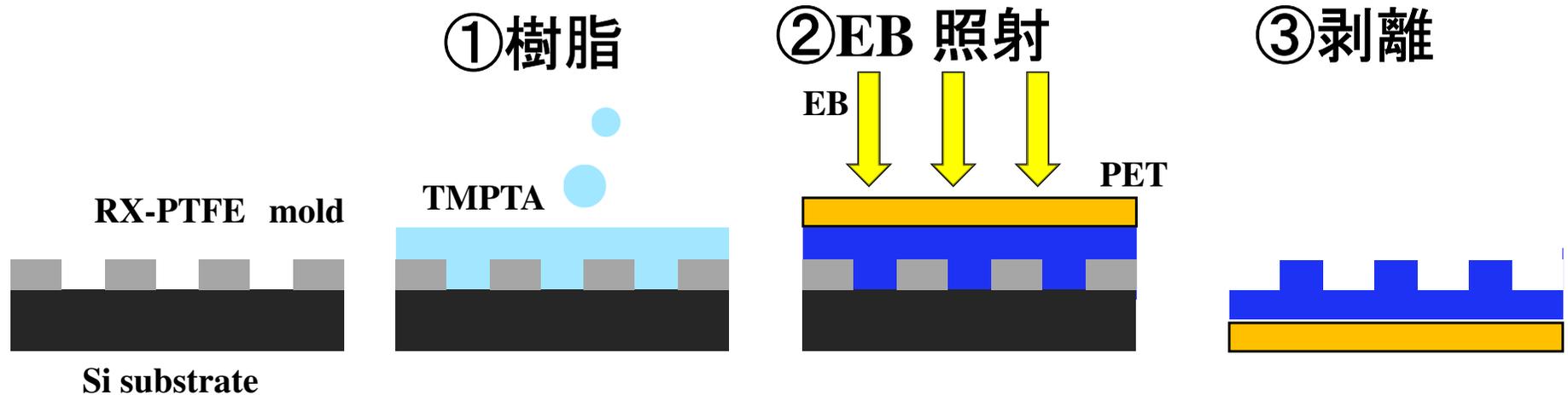
架橋 PTFEの性質

- アモルファス化
- 放射線耐性向上
- 機械特性の向上

イオンビーム・EB応用技術

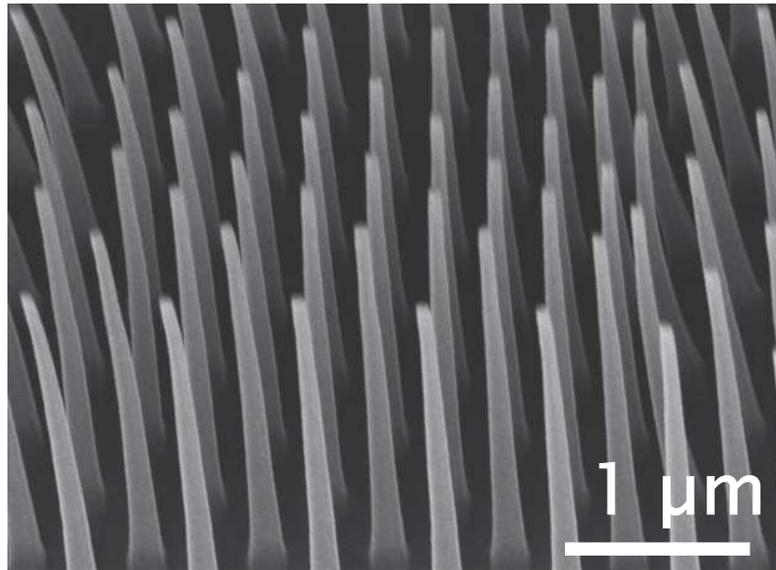
EB nanoimprint (電子線を使ったインプリント技術)

実験手順



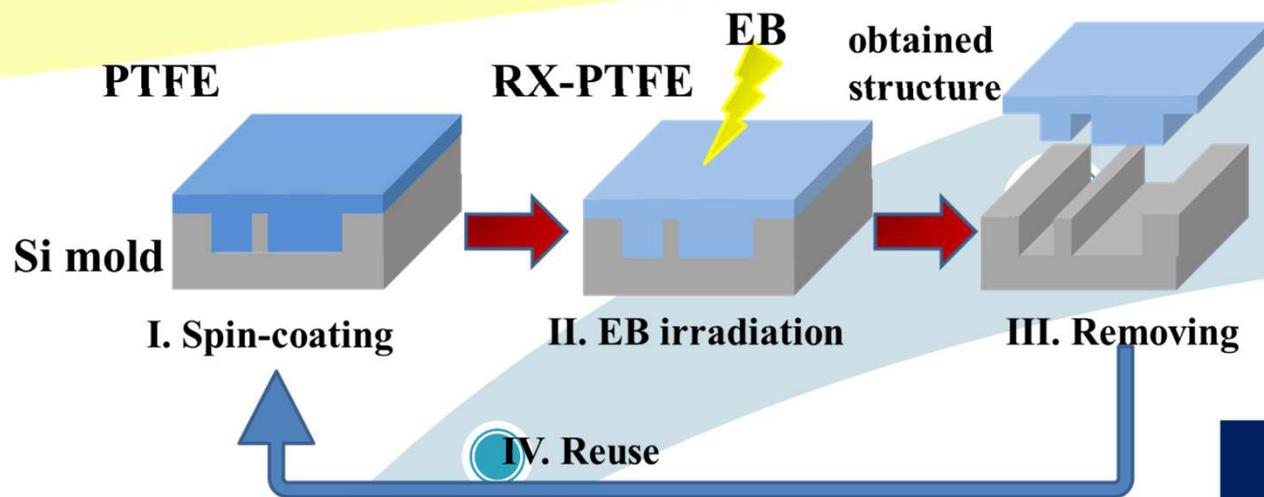
ナノインプリントによる微細構造の例

加速器ビームを使ったナノ・マイクロ構造体開発



EBナノインプリントによる微細構造体創製

イオンビーム・EB応用技術



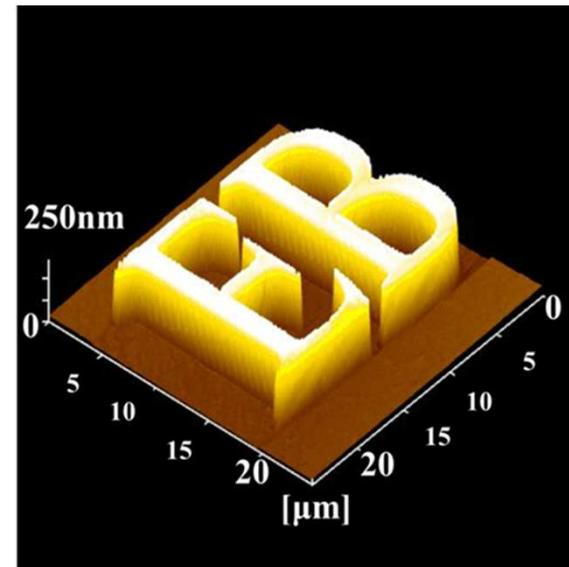
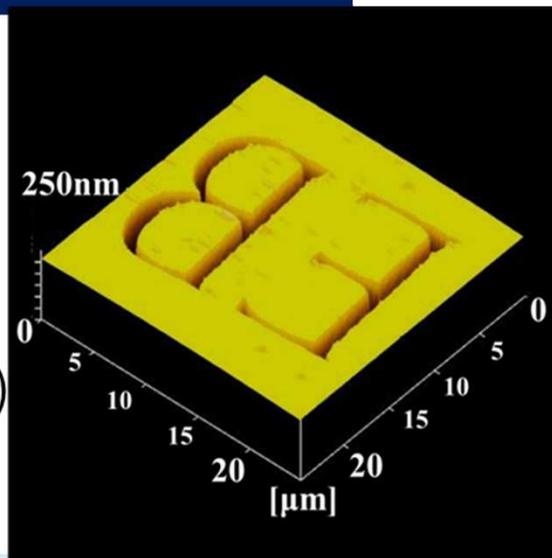
架橋PTFE
加工体創製

加工体は更に
応用可能

600kGy
→高精度加工

Traf Process

EB ナノインプリントによるRX-PTFE
マイクロ任意形状構造体の創製(AFM像)



電子線の応用分野一覧(抜粋)



- ・電線被覆の耐熱化、不燃化(グラフト技術)
- ・熱収縮チューブ、シート製造(架橋技術) → メモリーエフェクト
- ・発泡プラスチック製造(架橋技術) → 緻密な発泡
- ・ゴムの架橋(グリーンゴム強度増強) → タイヤ製造などに!
- ・塗膜硬化(UVと競合-重合技術)
- ・電池用隔膜(グラフト技術) → 電解質膜の大量製造
- ・殺菌、滅菌(DNA 2重鎖切断) → 医療用具滅菌
PETボトルインライン滅菌
- ・食品照射(日本以外 DNA 2重鎖切断) → 香辛料の滅菌
- ・排煙の脱硫・脱硝(イオン分子反応利用) → 公害対策
- ・水の清浄化(DNA 2重鎖切断、イオン化反応)
- ・プラスチックの架橋、改質(架橋) → 耐熱性・機械特性を向上
- ・半導体特製制御(格子欠陥生成) → あとから加工
- ・テフロンの架橋 → 耐放射線性の向上、摺動特性の向上

電子線を使った反応のありがたさ



- ・エネルギー消費が非常に少ない(すごくエコ)
- ・プロセス時間が非常に短い(秒単位、すごくエコ)
- ・公害対策がほとんどいらない(すごくエコ)
- ・重合反応、架橋反応など反応の自由度が高い
- ・エネルギー吸収の際に素材の色を全く問題にしない
- ・イオン化を経由する特別な反応を利用できる
- ・反応温度を種々選択できる(高温反応、低温反応など)

放射線照射の効率は、本当にそんなに良いの？

照射の際の反応量を考えるときには、どのくらいのエネルギーが、物質に吸収されたのか？ を考える必要があります。その単位を吸収線量といいます

吸収線量単位質量あたりに吸収される放射線のエネルギー量で定義されます。この単位には Gy(グレイ) という単位が使われます (Gyという単位はJ/kgと同じです)

物質に10kGy (=10kJ/kg)の吸収線量が与えられた場合、その熱量(温度上昇)はどのくらい？ (ほとんどのプロセスで10-30kGy程度の吸収線量が使われています)

水(比熱4.2J/K·g)に、10kGyの吸収エネルギーが与えられたらその温度上昇は僅か2.4°Cです。



どうして放射線が高効率なの？

物質のつくる分子間の結合は、比較的弱い力なんですよ
(それは電子同士の相互作用)に支配されているのです)

→その状態は、数eVのエネルギー(C-Hは大体4.3eV)

薬品や熱 によって与えられる物質の変化でも
この電子状態の変化 を利用。



分子に変化を与える直接的な方法は放射線を打ち込む！

このため、放射線によって与えられる効果は熱などに比べ
桁外れに効率が良くなるのです

電子線応用技術(高分子橋掛け)

このチューブ、熱を与えると、キュットと縮む！



超耐熱炭化ケイ素繊維

鷲尾・前川監修

EB技術を利用した材料創製と応用展開

シーエムシー出版 2016, pp.171-179も参照下さい

(航空機エンジン(GE社製)への採用ハイニカロンタイプS)

Advanced Materials Development / Ceramic Composites

Fabrication of SiC fiber

Si-containing polymer fiber

↓ EB irradiation up to 10MGy

Cured polymer fiber

↓ Pyrolysis in inert gas (~1500°C)

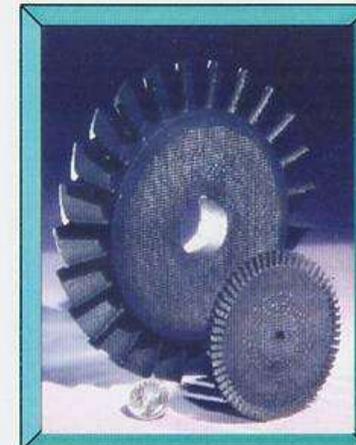
SiC Fiber

- Diameter : 14 μ m
- Tensile strength: 3GPa (300kg/mm²)
- Heat resistant : 1700°C
- Density : 2.7g/cm³



SiC fiber (Hi-Nicalon®)

Application of SiC fiber



Ceramic Matrix Composites



Space plane materials

EB 応用技術(重合) 化粧材(建材)

▶ ノンワックスフロアシート「EB-F」

DNP様商品

EBコーティング技術：電子線を照射することにより、樹脂を硬化させる技術。ウレタンやUV樹脂コーティング製品に比べ、傷や汚れ、日光などに強く、高耐久かつ実用性能、品質安定に優れている。また、製造工程での省エネルギー化やCO₂排出量削減、無溶剤塗工が可能な次世代型環境対応技術

鷲尾・前川監修

EB技術を利用した材料創製と応用展開

シーエムシー出版 2016, pp.182-188も参照下さい



強靱な塗膜で、擦り傷、汚れ、日光に強いEBコーティング層

導管・木肌の凹凸を創出する透明エンボス・オレフィンフィルム

樹種デザインを表現する木目柄印刷層

着色ベース・オレフィンフィルム

DNP様HPより

<http://www.dnp.co.jp/kenzai/product/brand/brand05/>

PETボトル用 EB滅菌システムの実用化

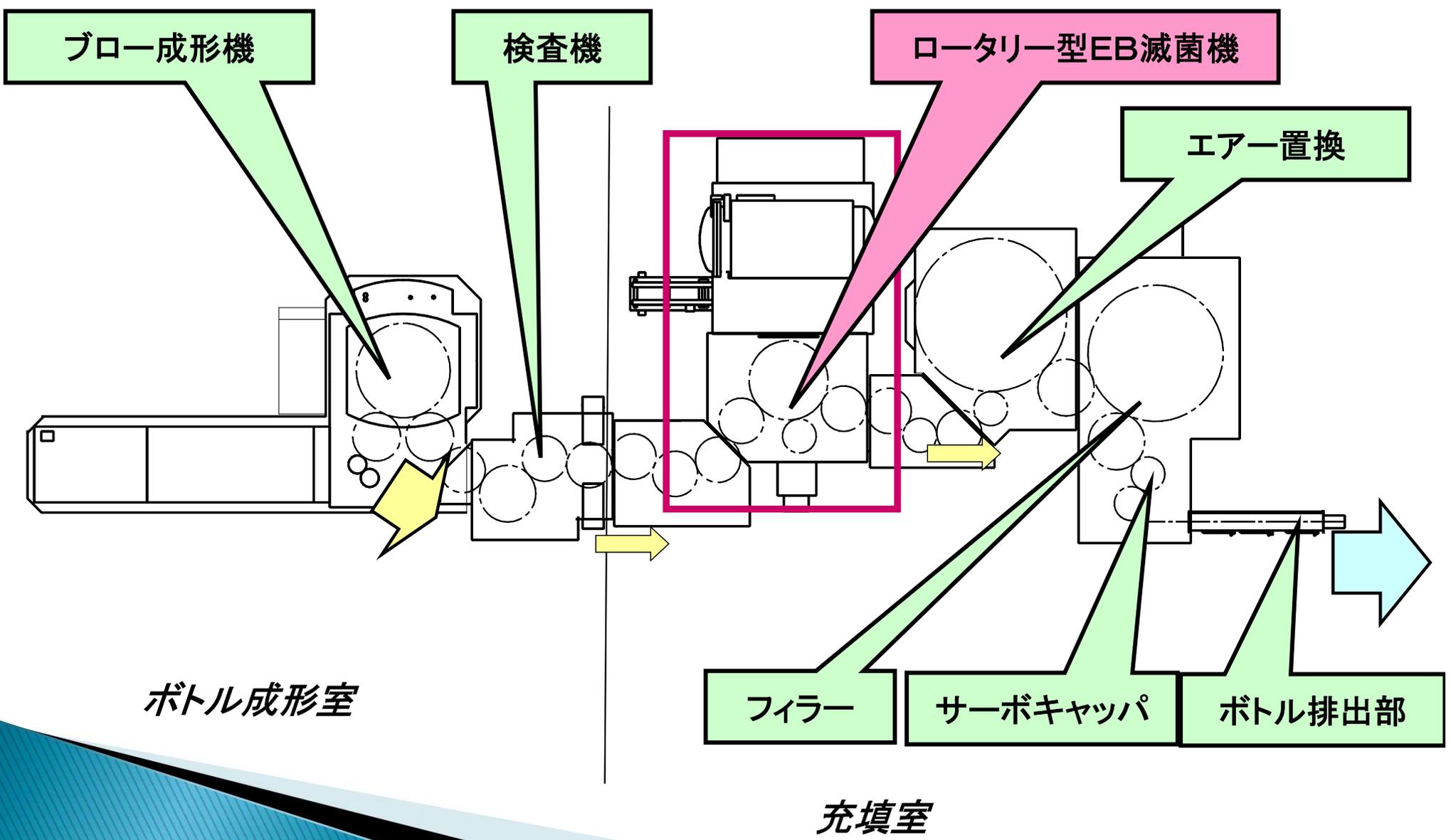


電子線加速器

世界初のPETボトル飲料用
EB滅菌方式 無菌充填システムが実用化されている。
(澁谷工業(株))

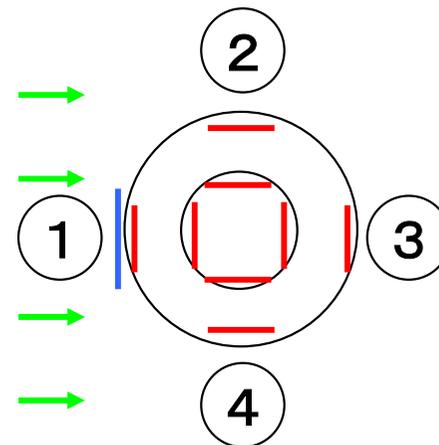


EB滅菌アセプ充填システムのレイアウト例



▶ 口部吸収線量とコールドスポット

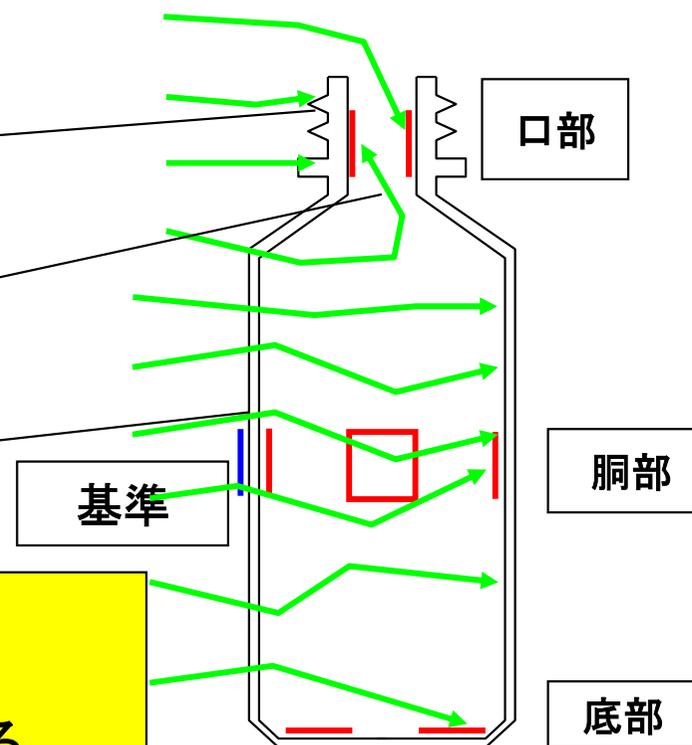
	①	②	③	④
口部内面	8.8kGy	8.8kGy	8.7kGy	9.1kGy
胴部内面	44kGy	30kGy	45kGy	30kGy
底部内面	32kGy	26kGy	32kGy	33kGy
基準位置	80kGy (胴部正面外側)			



口部は1mm程度の厚さがあるため
電子線が透過しない

口部は散乱によって回り込んだ
電子線が当たる

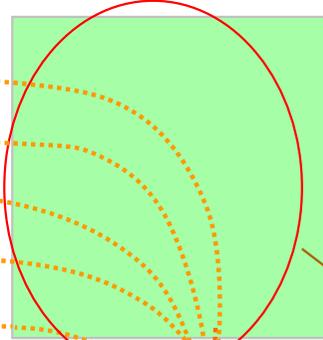
胴部0.1~0.3mm程度の厚さのため
電子線が透過する



口部内面が吸収線量の一番低い
コールドスポットとなる。
ここもきちんと照射して滅菌する必要がある

磁場による口部の照射効率UP

横から見た図

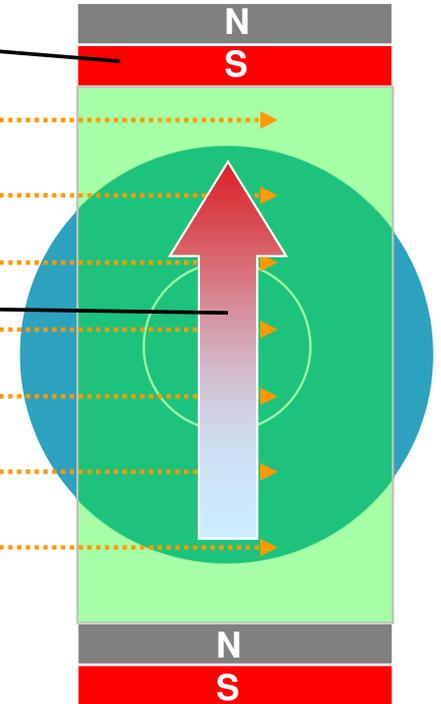


ボトル上部に磁石
を対向させ配置

磁場の向き

磁場により電子線が曲げられ、
口部内面に効率よく照射できる。

上から見た図



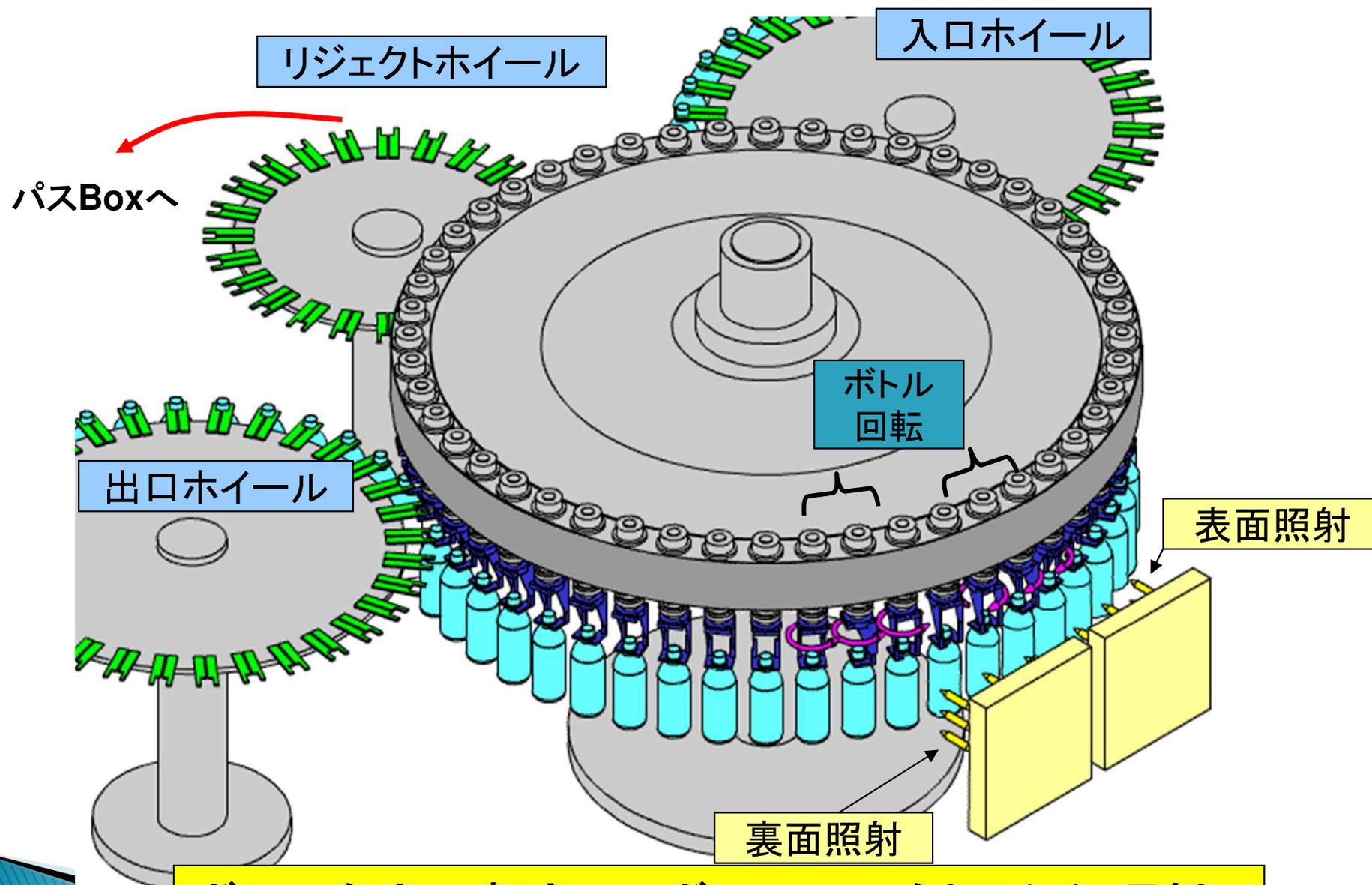
	磁石無	磁石有
電流(mA)	169	89
口部線量(kGy)	10.1	10.7
胴部線量(kGy)	79.5	43.5

→容器の収縮や変形を抑制しながら、
殺菌性能の向上が図れる。

→低い電流で口部内面線量が確保可能

真空 大気
チタン箱

EB滅菌機の動作



ボトルを半回転させ、ボトルの両側面から照射

放射光 (X線) の応用

X線を使って
すごい事ができるのです！



X線利用、そのすごいところは・・・

- ・透過度が高い
- ・とても細かいビームが使える(放射光)
- ・エネルギーをいろいろ選べる
- ・屈折、干渉効果を利用できる
- ・画像をとることも得意
- ・細かい加工へも応用可能(これを紹介)



これらの特徴から分析技術への展開で大きなインパクトがある
(和歌山の毒カレー事件などでも分析に使われました)

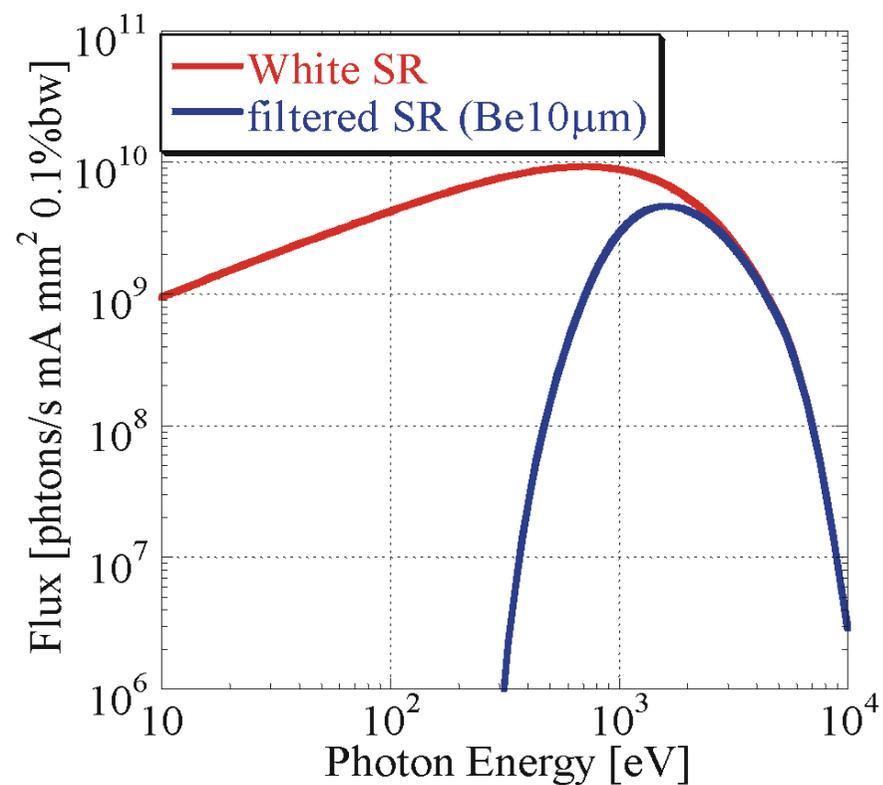
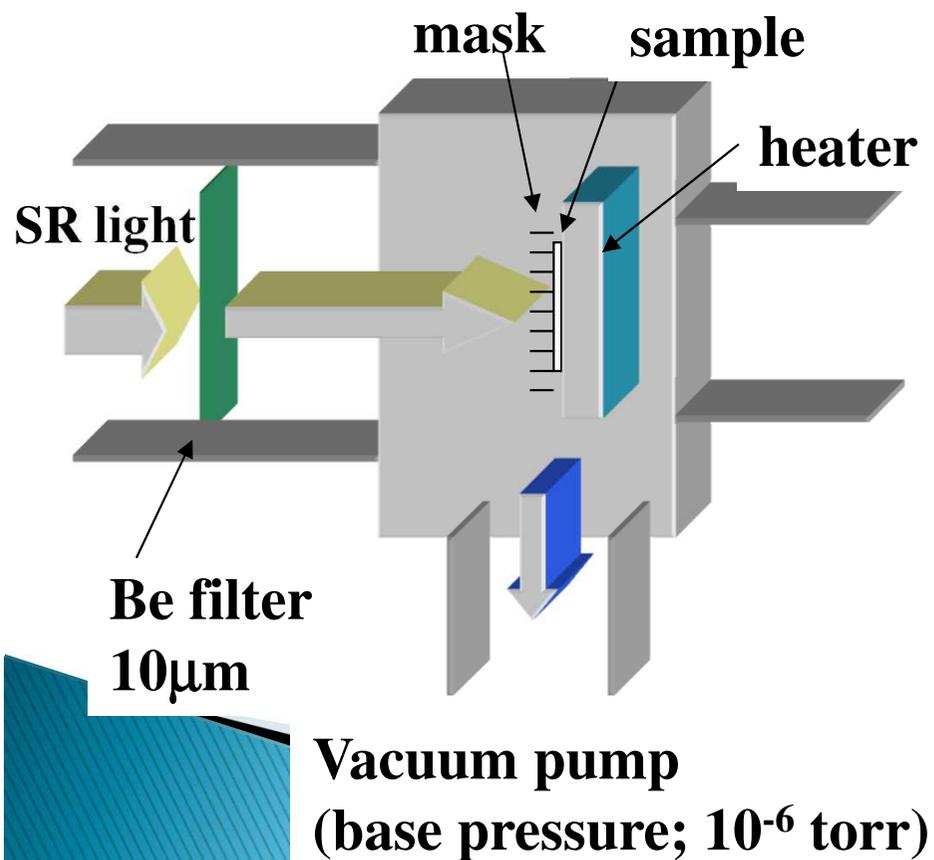
直接エッチングや最先端の半導体製造(EUVリソグラフィーと言います)などにも応用が可能です

放射光源

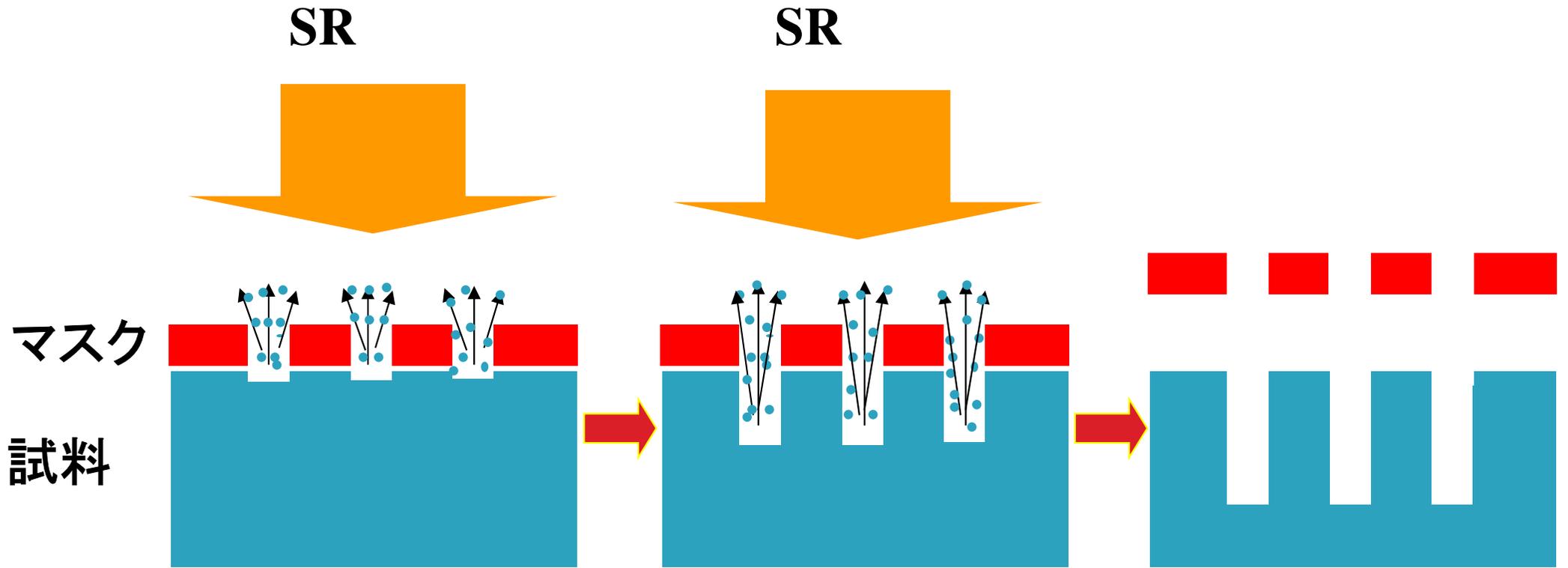
AURORA-2S

((株)住友重機械工業製)

- Max. Beam Current : 600 mA
- Electron Energy : 700 MeV

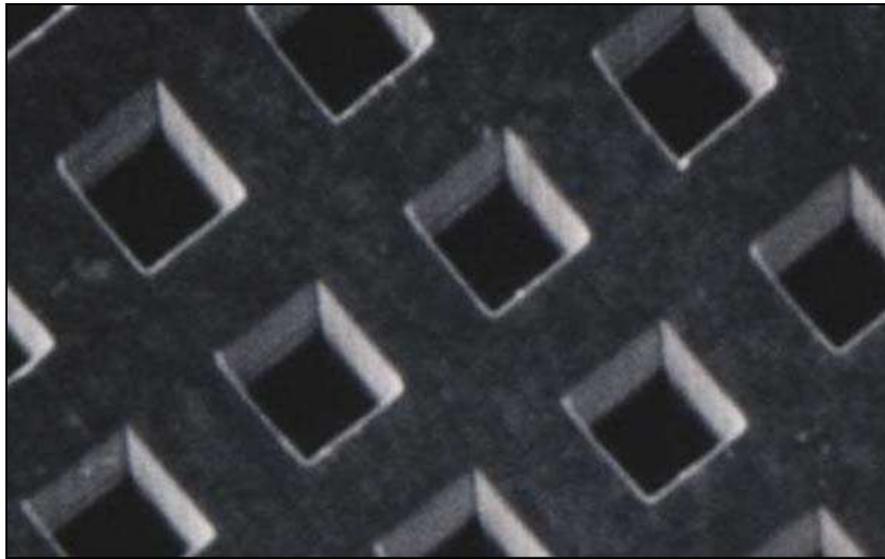


細かい構造を作る技術(TIEGA™)



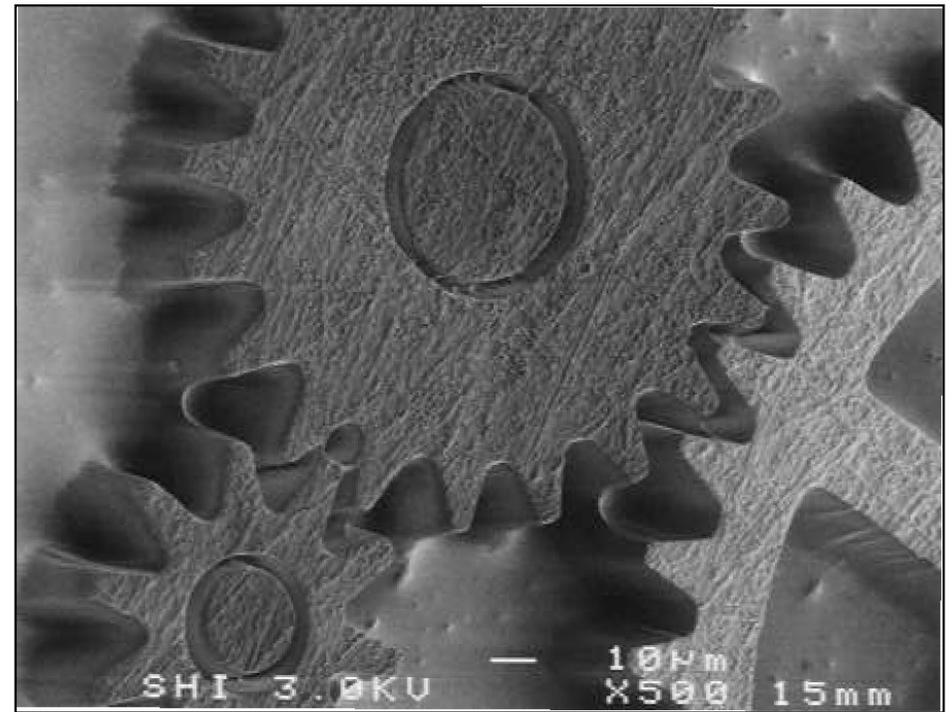
放射光を使って、直接材料加工ができる！

放射光で作った微細加工体の例



— 100 μ m

(a) マイクロフィルター



— 10 μ m

(b) マイクロギア

RX-PTFEから作製したマイクロパーツの電子顕微鏡写真

イオンビーム応用

次は車のエンジンのお話！



薄層放射化法によるエンジンの摩耗測定 (豊田中央研究所) 自動車のエンジン開発に大活躍！

Technique

加速器からの陽子線等による金属部材の表面の放射化

これで何やるの？

自動車のエンジンを作っている材料の、削れかたを短時間で測る

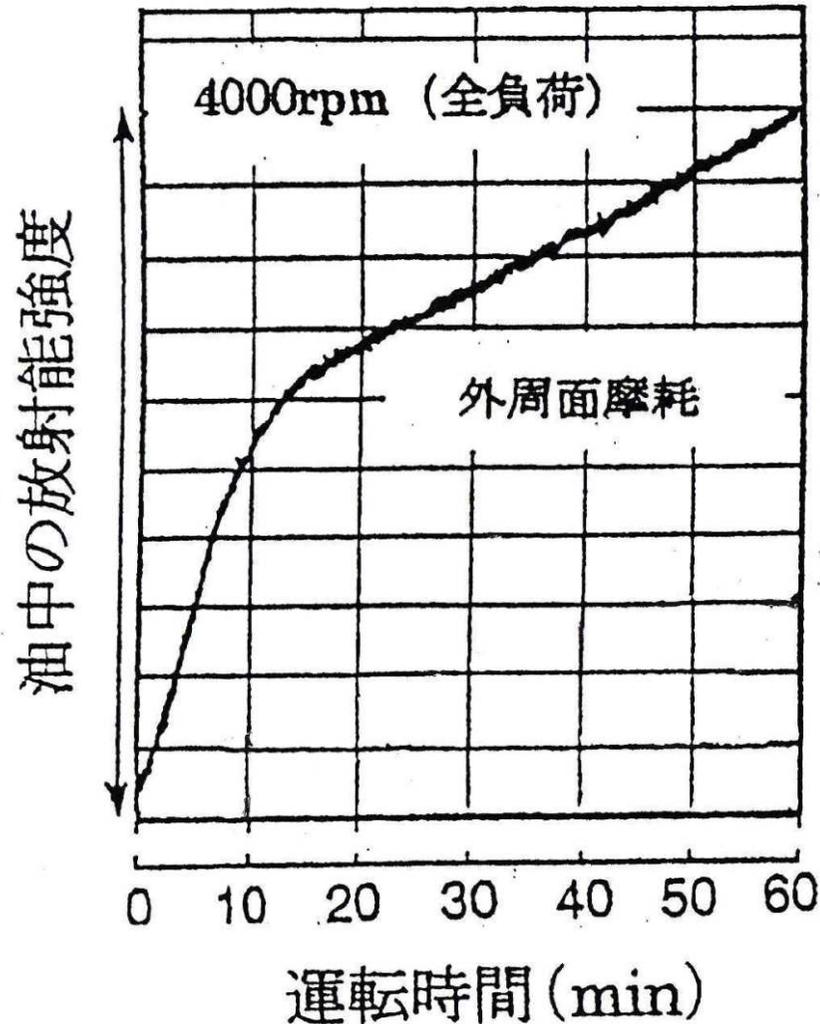
ピストンリング摩耗 ⇒ 分単位での摩耗特性解明

エンジンバルブ摩耗 ⇒ 摩耗の回転数依存性解明

エンジンオイル開発 ⇒ 高温高せん断粘度最適化

etc.

ピストンリング(トップリング)の外周面摩耗計測への応用例



ピストンリングの摩耗の状態を分単位で測定

(月刊「IONCS」26巻7号=イオンの科学と技術= より引用)

農業応用

植物の品種改良も！



イオンビーム変異誘発とイオンビーム育種

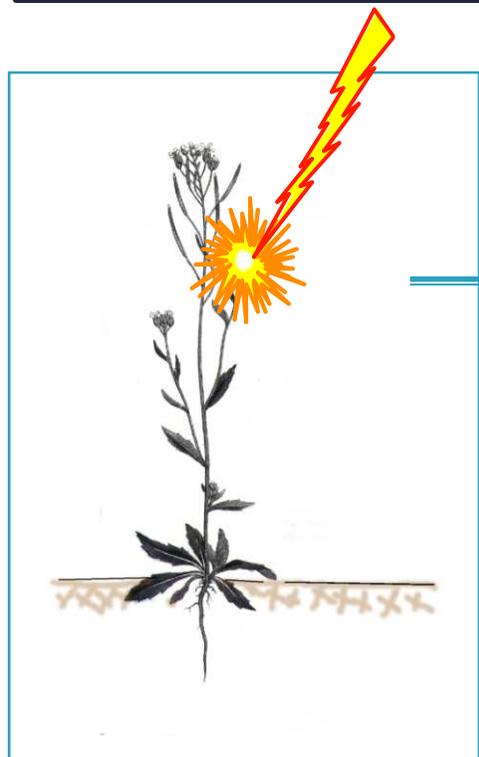


イオンビーム

DNA損傷

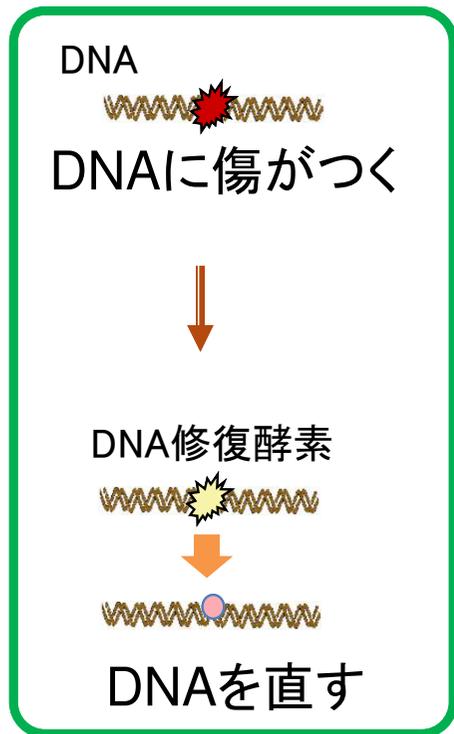
DNA修復

変異



生物

細胞



正常に修復

間違っ修復
変異DNA

変異遺伝子

変異体



有用品種
の作出・育種

イオンビーム育種



新花色キク
5品種
1998年発表
農業生物資源研究所



新花色カーネーション
8品種 2002年～
キリン研



無側枝性省力栽培ギク
3品種 2005年～
鹿児島県



新花色オステオスペルマム
2品種 2007年～
群馬県



高環境浄化能オオイタビ
2007年
広島大学



低Cd吸収性 コシヒカリ
2012年
農業環境技術研



低温肥大性 温室メロン
2011年
静岡県



新花色芳香シクラメン
2品種 2012年～
埼玉県



甘い香りの吟醸酒用酵母
2012年 群馬県

清酒醸造用酵母の品種改良



群馬県立群馬産業技術センターと共同開発
地域連携で吟醸酒製造に適した
新たな清酒酵母を開発



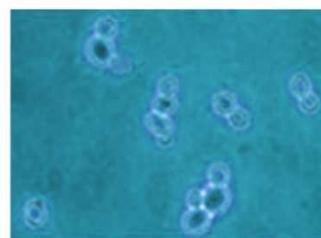
H24.12.10プレス発表



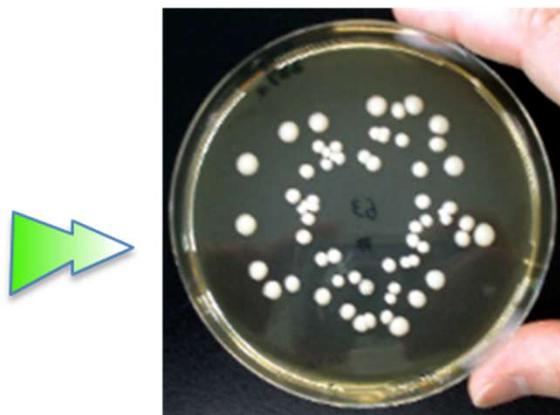
2000株以上の
イオンビーム照
射酵母を取得



香り成分の生成
量を指標に
優良株
35株選抜



試験醸造(白米60kg規模)
を3年間にわたり実施し、十
分な醸造適性がある1株を
最終的に絞り込み



優良新品種No. 227
カプロン酸エチル高生産株

県内の酒造蔵
に頒布



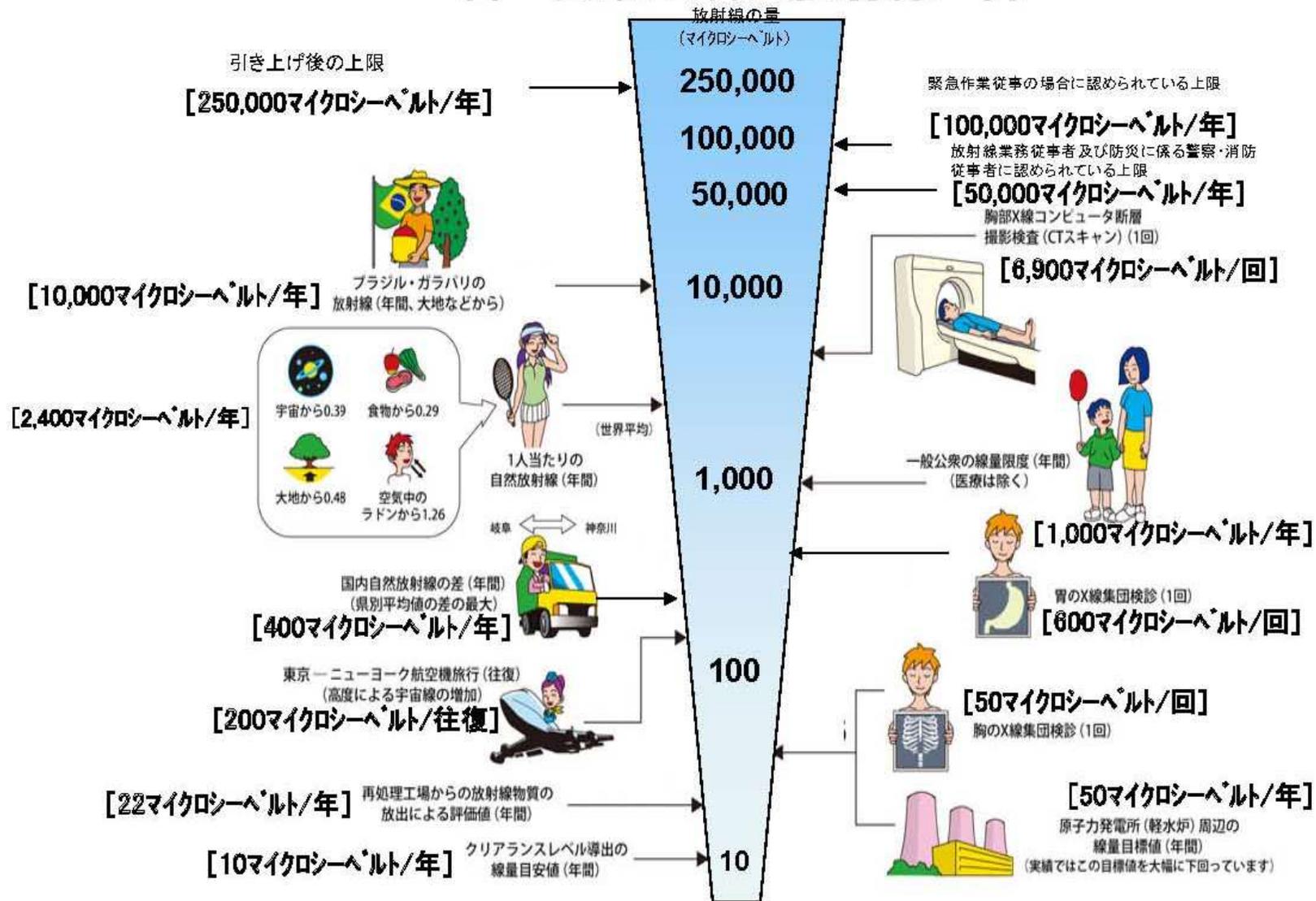
オール群馬の地酒

自然界にある放射線、医療における放射線



自然放射線の概要

《 日常生活と放射線 》



※ Sv【シーベルト】=放射線の種類による生物効果の定数(※) × Gy【グレイ】

※ X線、γ線では 1

資源エネルギー庁「原子力2002」をもとに文部科学省において作成

太陽光も放射線！？

UVインデックス ⇔ UV-A(315nm－400nm)
とUV-B(280nm－315nm)
の積分量

UVインデックスが8を超える日時がかなりある。
⇔ 真夏のつくば正午付近で出現率30%

UVインデックスが8のときのUV放射量は200 mW/m²

これは、 200×10^{-7} J/cm²·sec ⇔ 皮膚1mmで止まるとすると・・・
毎秒200mJ/kg → 200mGy/s(200mSv/s) となる。
全量が皮膚で吸収するわけでない(散乱等)ので、吸収確率を0.01としても
2mSv/s(30分で3.6Sv相当)の吸収線量に！！

→ 焼けるわけだ！！



自然放射線(^{40}K とU、Th)

^{40}K からの放射線

人の体内(体重60kg)にKが120 g 程度あるらしい。
このうちの0.0117 %が ^{40}K なので、14 mgの ^{40}K が体内にあることとなります

この ^{40}K から放出される放射線のエネルギーが人体に与えられる

ここから吸収線量を計算すると
1年間に人間は 0.157m Sv を ^{40}K から受け続けている。

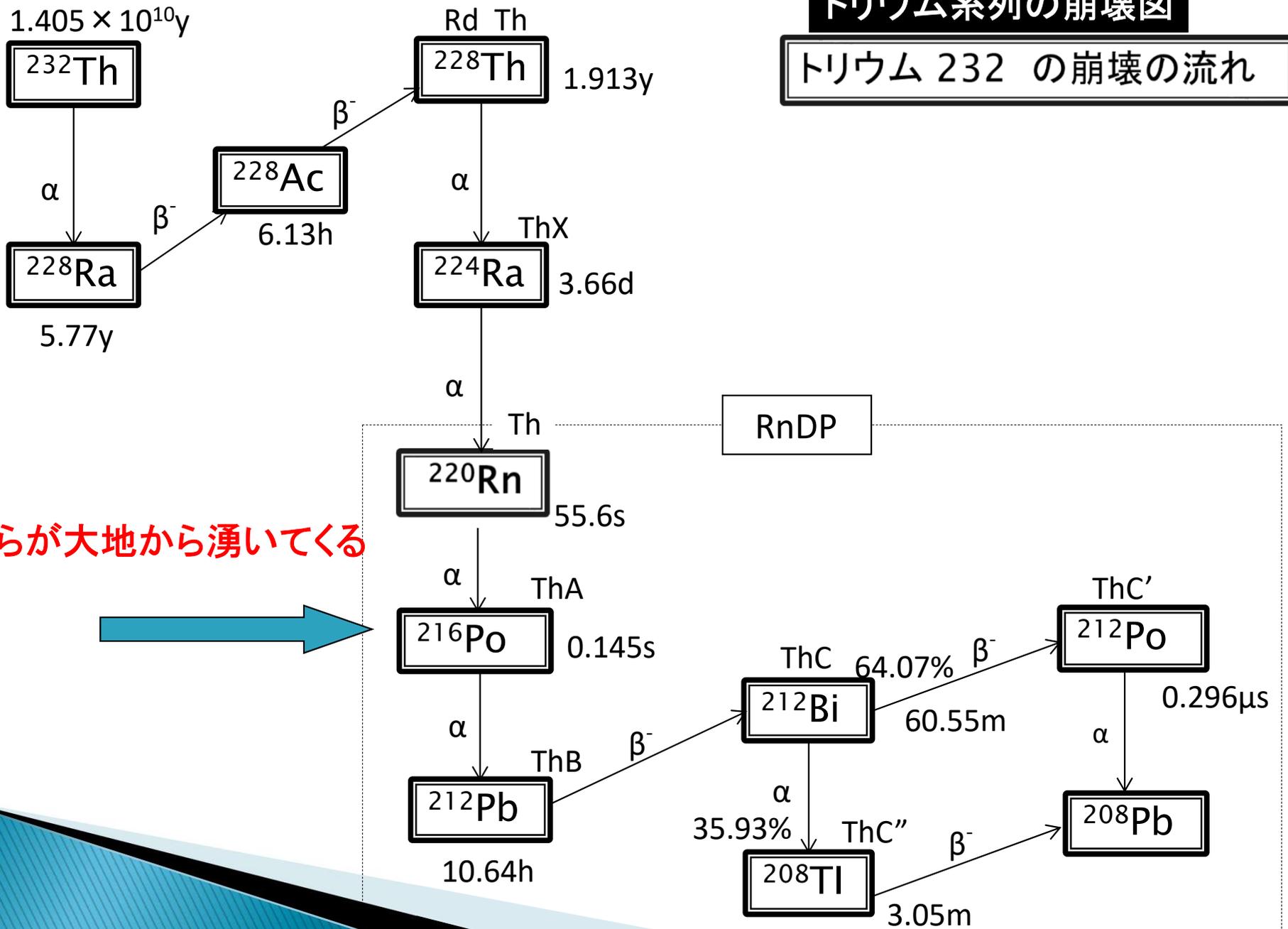
Kの同位体の存在比は、 ^{39}K が93.22 %、 ^{40}K が0.0117 %、 ^{41}K が6.77 %である。
このうち、 ^{40}K が天然の放射性核種で、半減期は 1.28×10^9 年もある。



地面の下には、たくさんのトリウムがあるんです

トリウム系列の崩壊図

トリウム 232 の崩壊の流れ



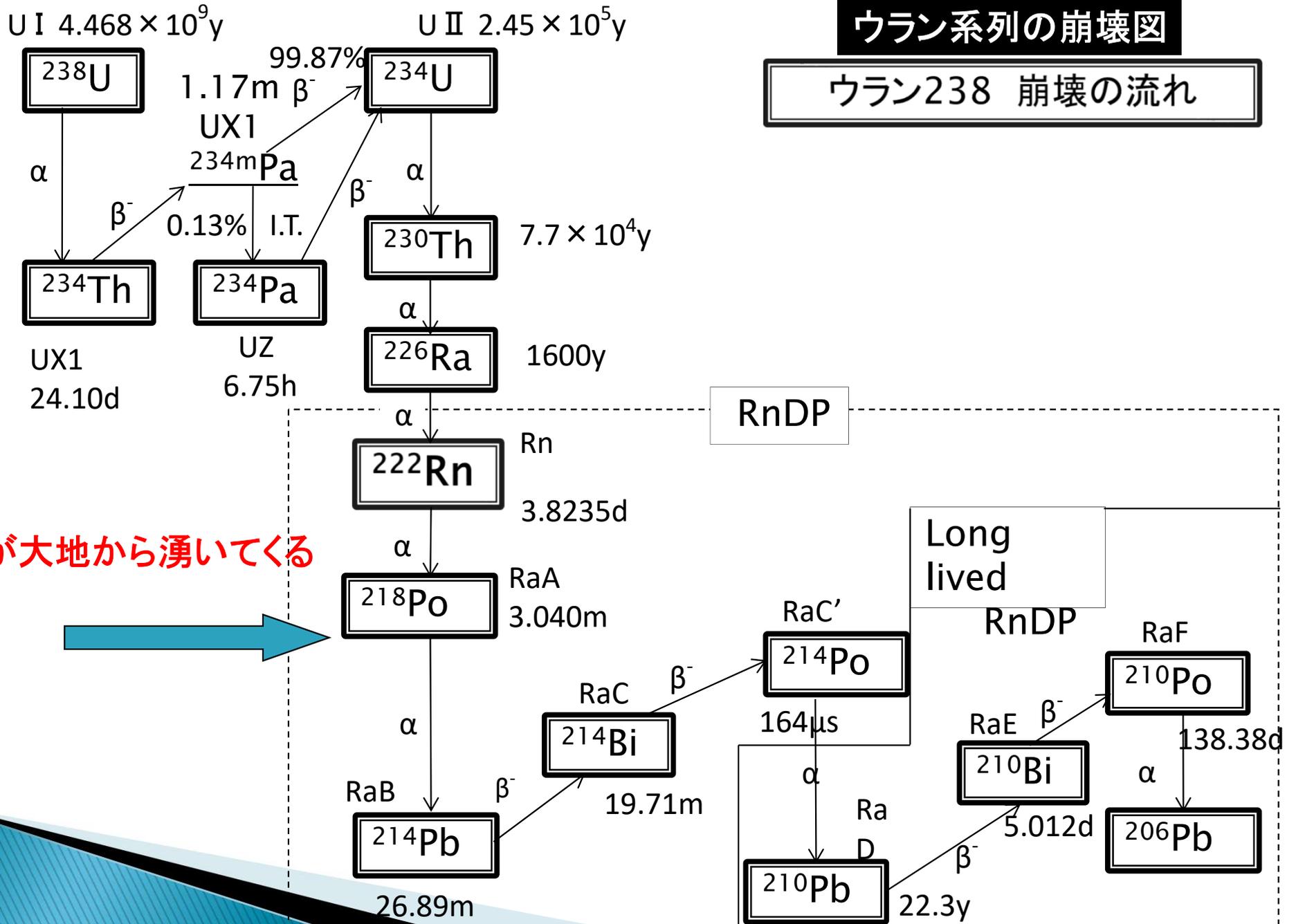
これらが大地から湧いてくる



地面の下には、たくさんのウランもあるんです

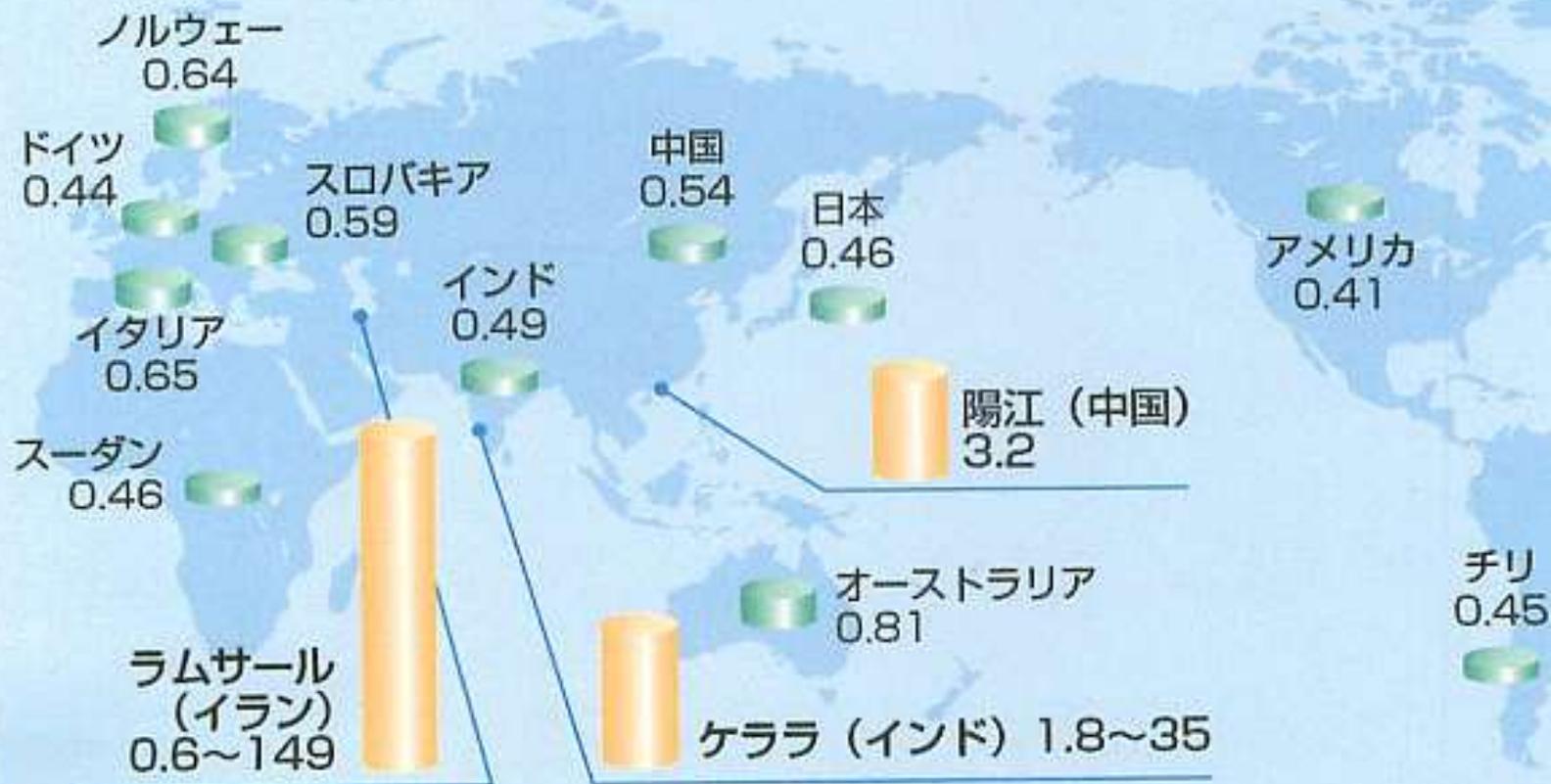
ウラン系列の崩壊図

ウラン238 崩壊の流れ



世界における大地からの放射線

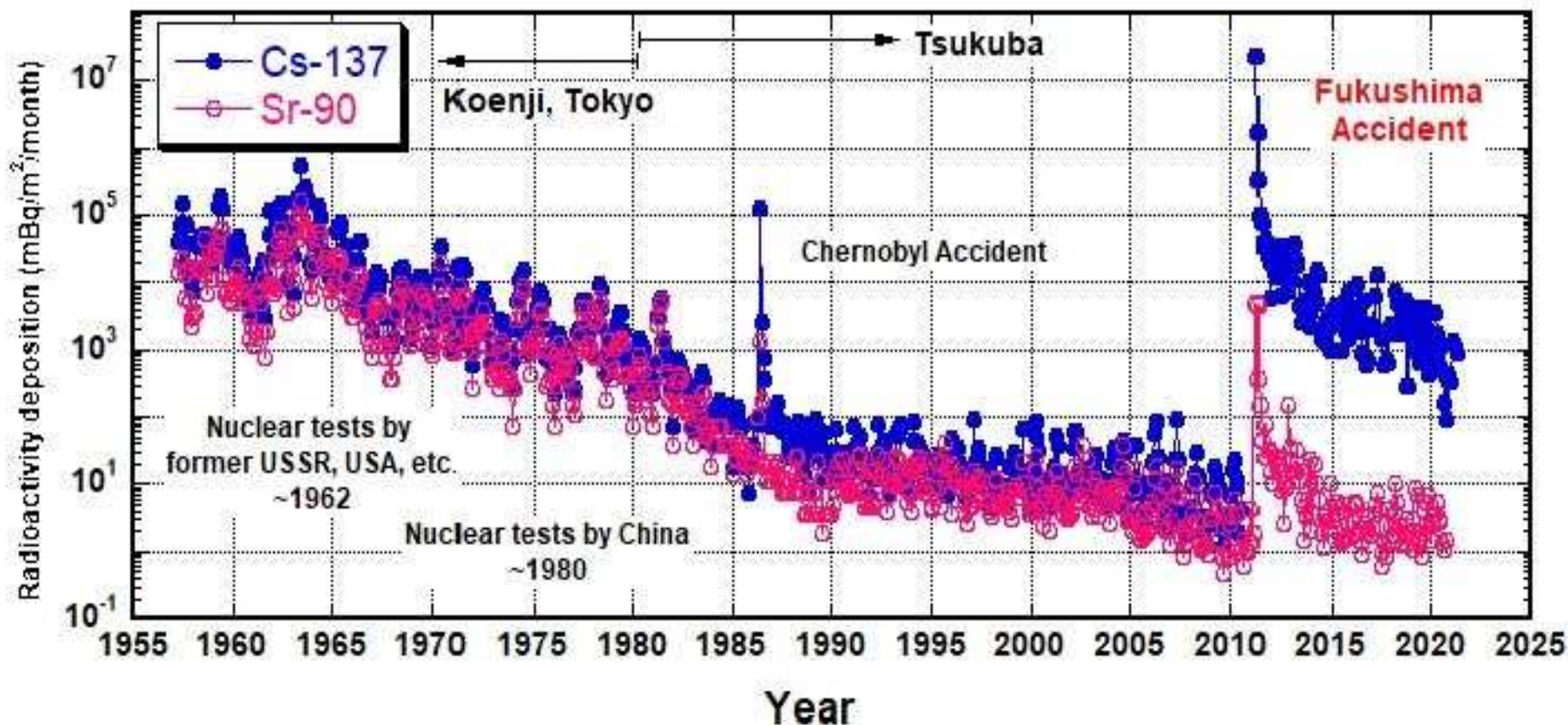
世界各国の大地からの年間平均自然放射線量（ミリシーベルト）
（国連科学委員会報告書（UNSCEAR 2000）から作成）



世界各地の大地から受ける年間自然放射線量（円柱は放射線量の大きさを示す）

大気圏核実験後と福島事故後の放射性物質の蓄積

Sr-90 および Cs-137 月間降下量



https://www.mri-jma.go.jp/Dep/ap/ap4lab/recent/ge_report/2021Artifi_Radio_report/2021Artifi_Radio_report.pdf

放射性物質の放出量

大気圏核実験(1957-1965)

^{131}I : 675,000 PBq
 ^{137}Cs : 948 PBq
 ^{90}Sr : 622 PBq
 Pu : 11 PBq
(α 線放出核)

チェルノブイリ

Total: 14,000 PBq
 ^{131}I : 1,800 PBq
 ^{137}Cs : 85 PBq
 ^{90}Sr : 10 PBq
 Pu : 0.1 PBq
(α 線放出核)

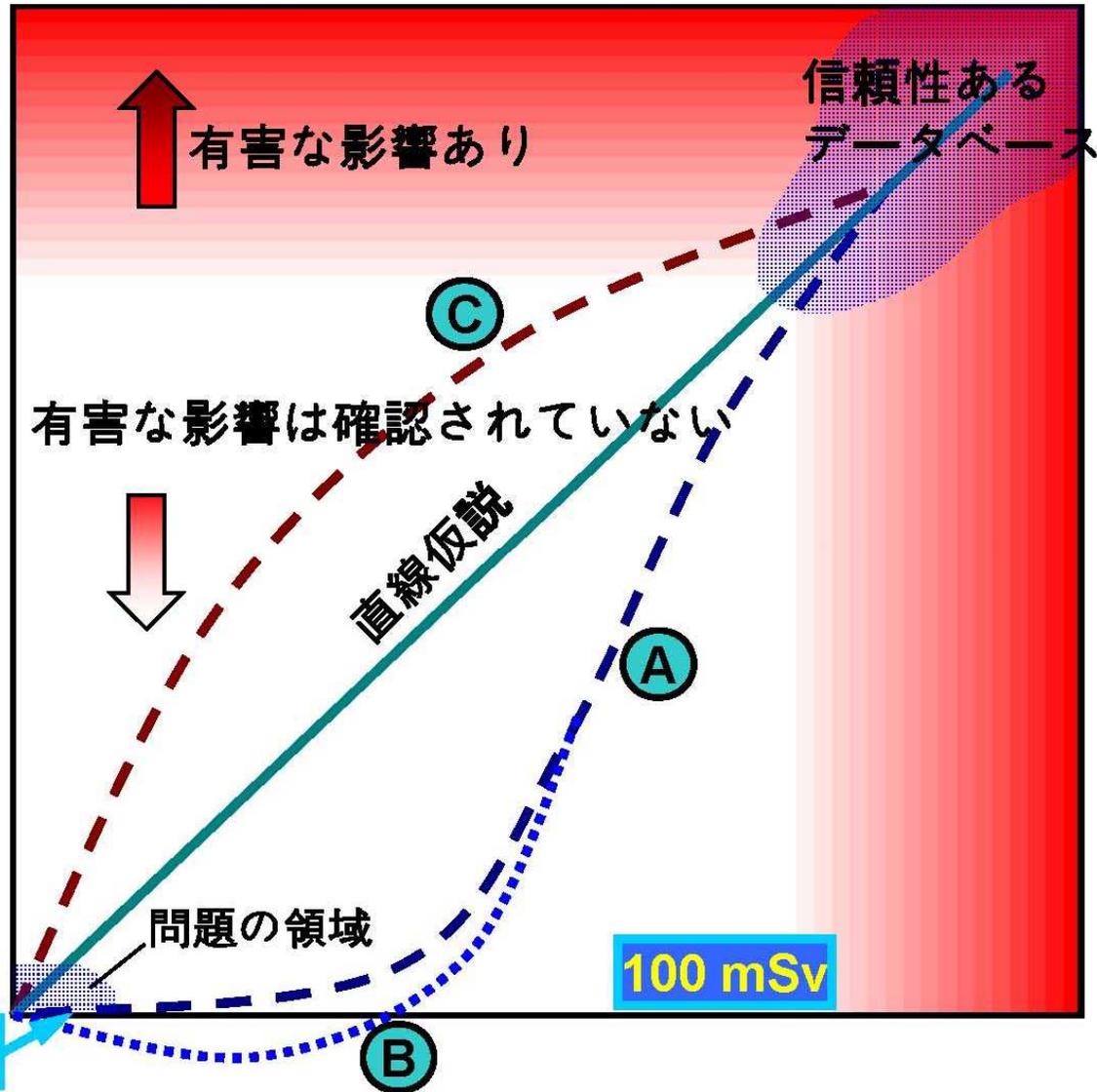


東電福島

^{131}I : 160 PBq (34.8g)
 ^{137}Cs : 15 PBq (4.7kg)
 ^{90}Sr : 0.14 PBq (28.0g)
 Pu : 0
(α 線放出核)

種々の仮説

晩発性放射線障害



低線量被ばくについての問題

放射線の被ばくを考えるときには、**線量率**と**総線量**の2つが大事

一度に100mSv を浴びた場合と、
1日に1mSvを100日あびた場合では
その効果は大きく違うはずですね・・

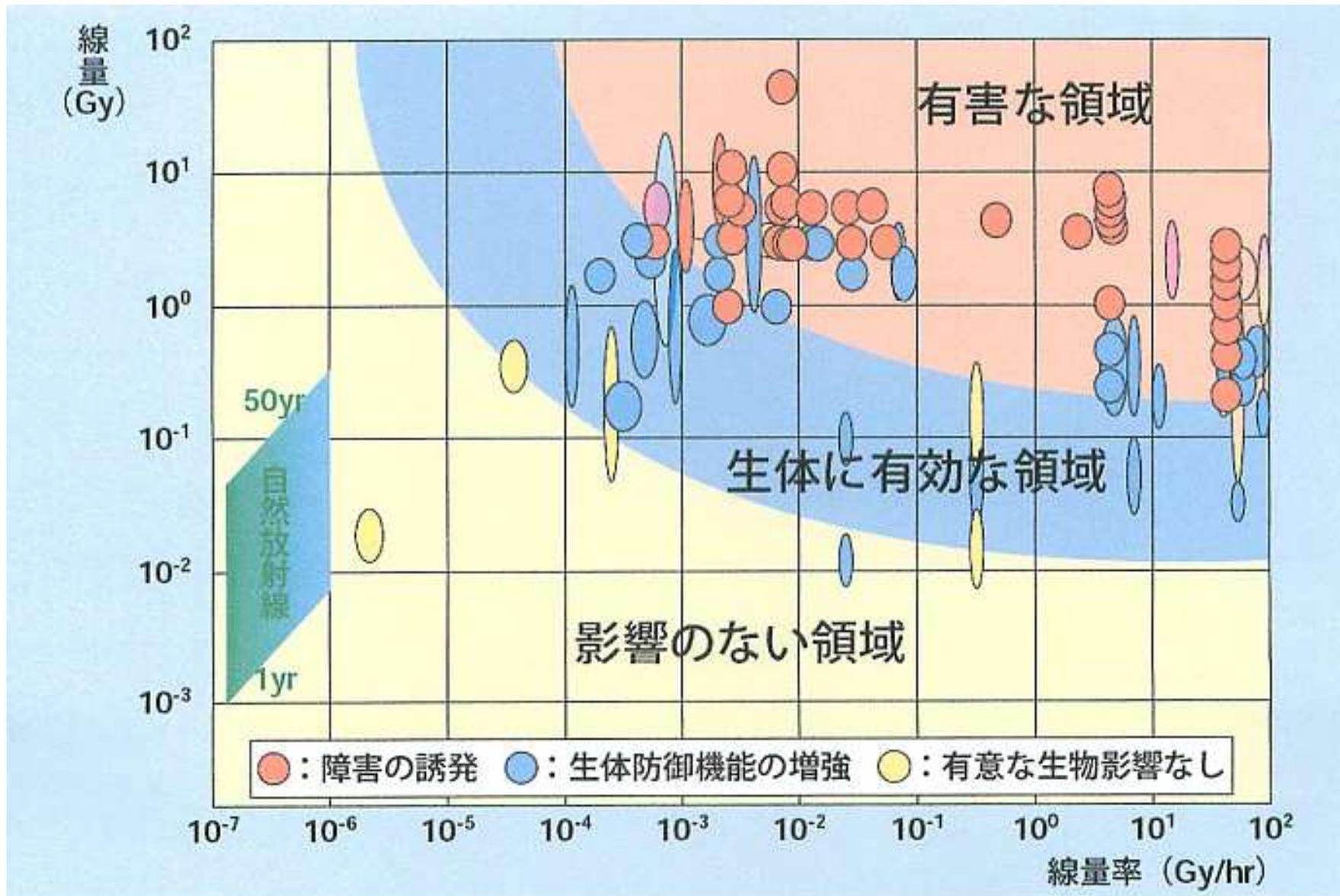
比較例

塩を一度に200g摂取 → 死んじやいそう！
塩を1日2gずつ100日摂取 → 大丈夫ですね！
塩を全く摂取しない → 死んじやいそう！



放射線の影響について、直線仮説というものがありますが、
それは到底正しいとは思えないんです！！

低線量、低線量率放射線の生体影響の概要



多数の実験結果が微量放射線の持つ効果を示す

電中研ニュース401より引用(2004年9月)

サイクロトロンという加速器 シンクロトロンという加速器 を紹介します



PET(陽電子断層撮影)用超小型サイクロトロン

HM-18



陽子18MeV／重陽子10MeV

HM-12

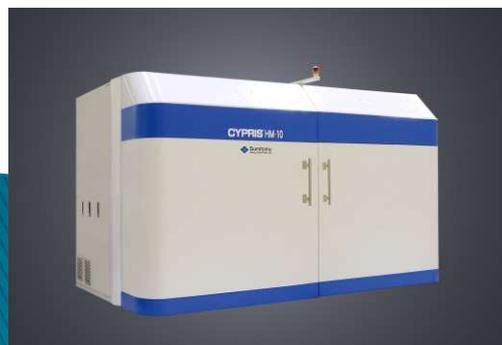


陽子12MeV／重陽子6MeV



HM-12S
(自己シールドタイプ)

HM-10



陽子9.6MeV／重陽子
4.8MeV
自己シールド

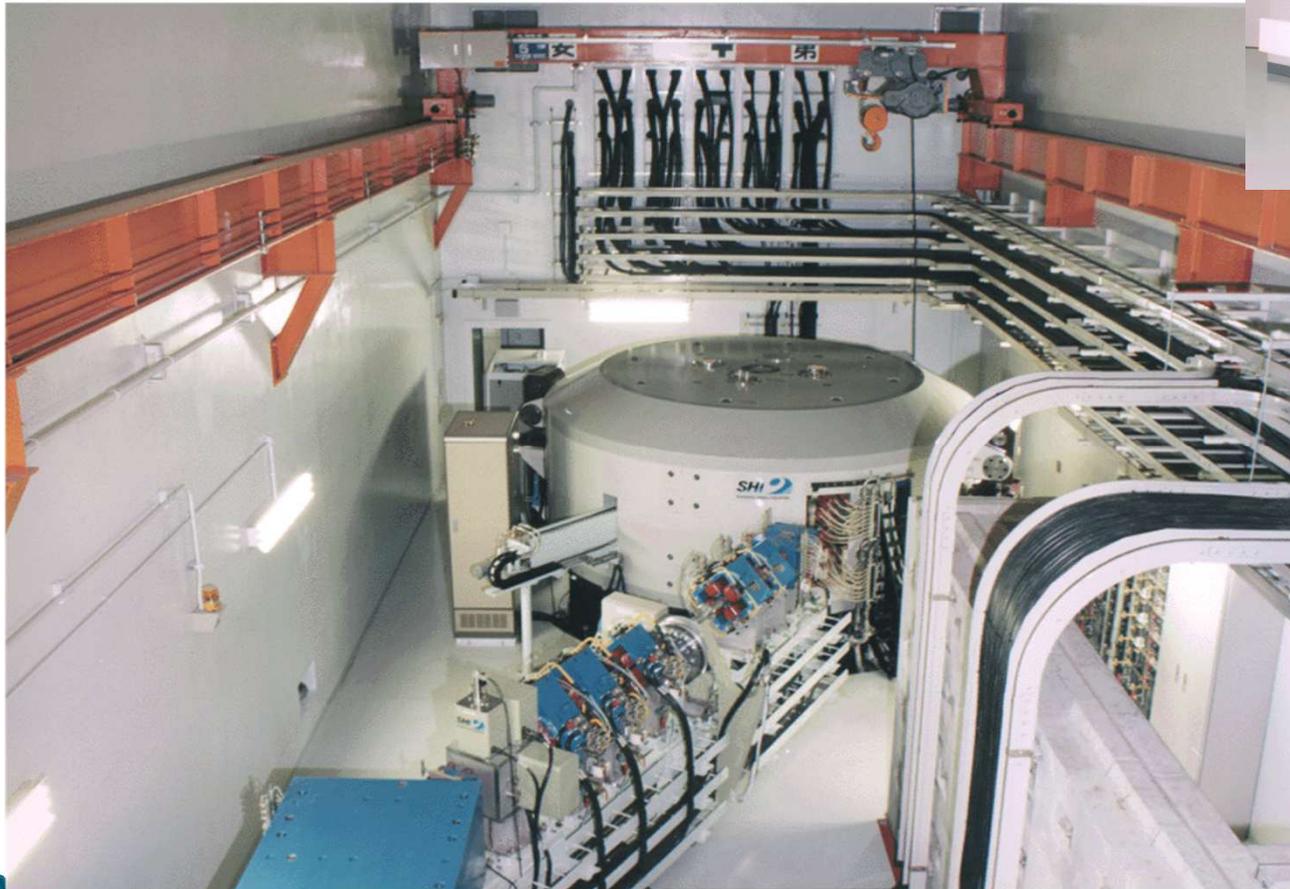
HM-7



陽子 7.5MeV／重陽子
3.75MeV
自己シールド

国立がんセンター東病院

陽子線治療装置用AVFサイクロトロン



完成:1997年

1998年より臨床運用を開始した。
病院内に設置された治療用加速器としては日本で2番目

K値=235

陽子を235MeVまで加速できます
重量は200トンもあります

第3世代 のシンクロトロン施設（日米欧）

施設名称	SPring-8	APS Advanced Photon Source	ESRF European Synchrotron Radiation Facility
設置者 設置場所	原研・理研 播磨科学公園都市	米国エネルギー省 アルゴンヌ(米)	ヨーロッパ 18 カ国 グルノーブル(仏)
エネルギー ビームライン 周長	8 GeV 62 本 1436 m	7 GeV 68 本 1104 m	6 GeV 56 本 844 m
年次計画	準備 建設 利用	1987~1989 1991~1997 1997~	1986~1988 1989~1994 1996~
		1986~1987 1988~1994 1994~	

ESRF @グルノーブル(フランス)



APS @アルゴンヌ国立研究所(アメリカ、シカゴ郊外)



Spring8 @ 西播磨



先端医療工学へ



がんによる経済的損失

- ◆がんで死亡する人は国内で年間32万人以上、新たにがんと診断される人はおよそ60万人
- ◆患者が外来や入院で治療を受けている時間や、死亡した人が平均寿命まで生きた場合に労働などで得られたはずの金額を計算すると、入院や通院による医療費が年間で3兆円余り、罹患者の50%が死亡することで失われている滅失利益が約7兆円
- ◆がんによる国の損失は年間約10兆円(日本のGDPの約2%)に上る。(2007年度の我が国の国内総生産(GDP)は、515兆0837億円、経済成長率は名目0.6%、実質1.6%)

検診によって早期に発見すれば、治すことのできるがんも増えているので、社会的コスト(Social Cost)削減という視点からもがん対策が必要です

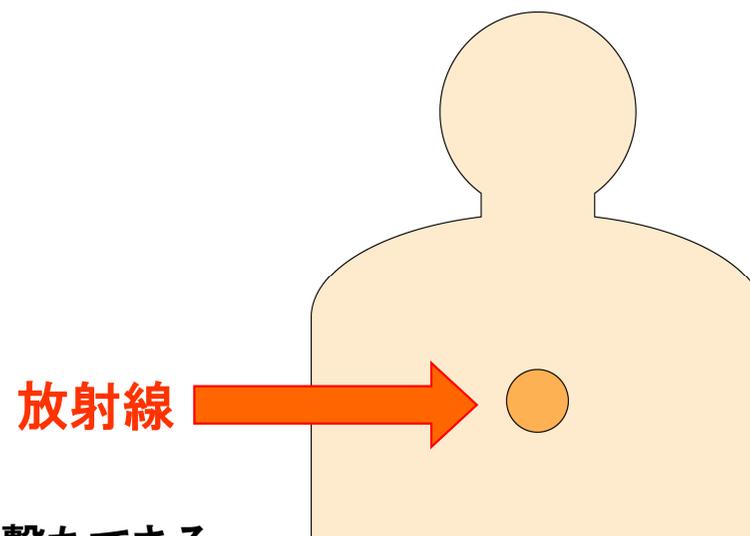
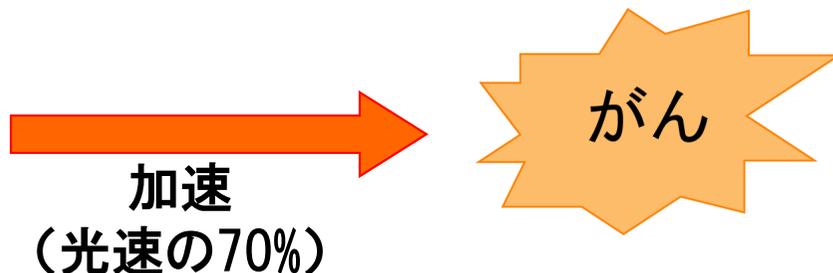
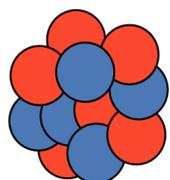
がんの治療法

治療方法	外科療法	化学療法	放射線療法	重粒子線治療
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ・早期～中等度の限局した病巣に対しては根治の可能性が高い。 	<ul style="list-style-type: none"> ・白血病やリンパ腫には高い確率で効果あり。 ・延命効果が見込める。 ・他療法後再発を抑える。 	<ul style="list-style-type: none"> ・手術が不能な病巣にも侵襲が低い治療が可能。 ・機能と形態を温存した治療が可能。 ・通院可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ・通常の放射線よりも生物効果が高く難治がんの治療が可能。 ・治療期間が短い。
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> ・機能・形態障害を残す場合がある。 ・社会復帰が困難な場合もある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・重篤な副作用が現れる場合あり。 ・晩発の2次発がんの可能性あり。 ・根治性が低い。 	<ul style="list-style-type: none"> ・まれに障害を残す場合がある。 ・わが国では適応が比較的少ない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・装置が高価。 ・世界に数か所(ドイツ、放医研、群馬、兵庫、佐賀、神奈川等)
在宅を含む治療期間(肝臓)	5～6か月	外科療法と併用	2～3か月	1～2週間 (治療照射そのものは1～2日)
照射回数			2Gy × 30回	60Gy × 1回

重粒子線治療は、手術をしないため、体にやさしく、早期の社会復帰ができる
QOL(生活の質)を重視した、現代社会の要望に応えた治療法

重粒子線がん治療とは

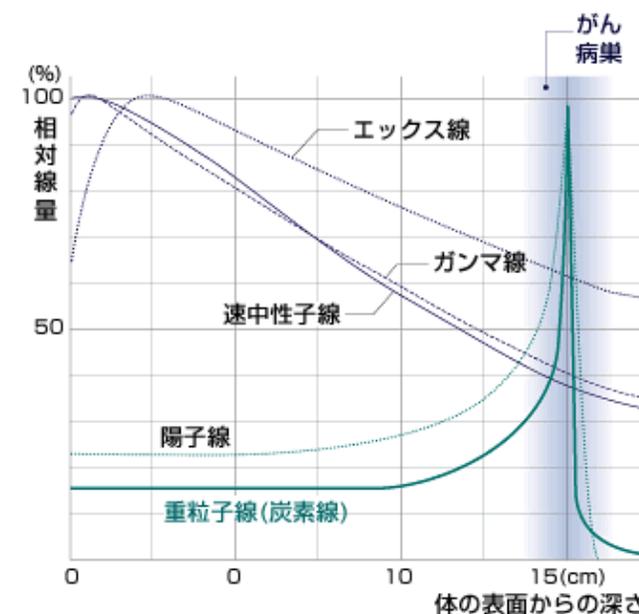
重粒子(炭素イオン $^{12}\text{C}^{6+}$)



- ▶ がんの位置、大きさや形状に合わせて線量を調節し狙い撃ちできる
- ▶ 線量の集中性が高い、あるいは細胞致死効果が高い
- ▶ がん病巣を集中的に攻撃し、切らずにがんを治す

手術をしないため、体にやさしく、早期の社会復帰ができる
QOL(生活の質)を重視した、現代社会の要望に応えた治療法

- ・痛みを伴わない
- ・臓器の機能や体の形態の欠損が少ない
- ・容姿、容貌を損なわず、傷跡も残らない
- ・高齢者にも適用できる
- ・副作用が少ない
- ・早期なら根治可能
- ・X線では治療困難な、深部がんにも適用できる
- ・社会復帰までの期間が短い



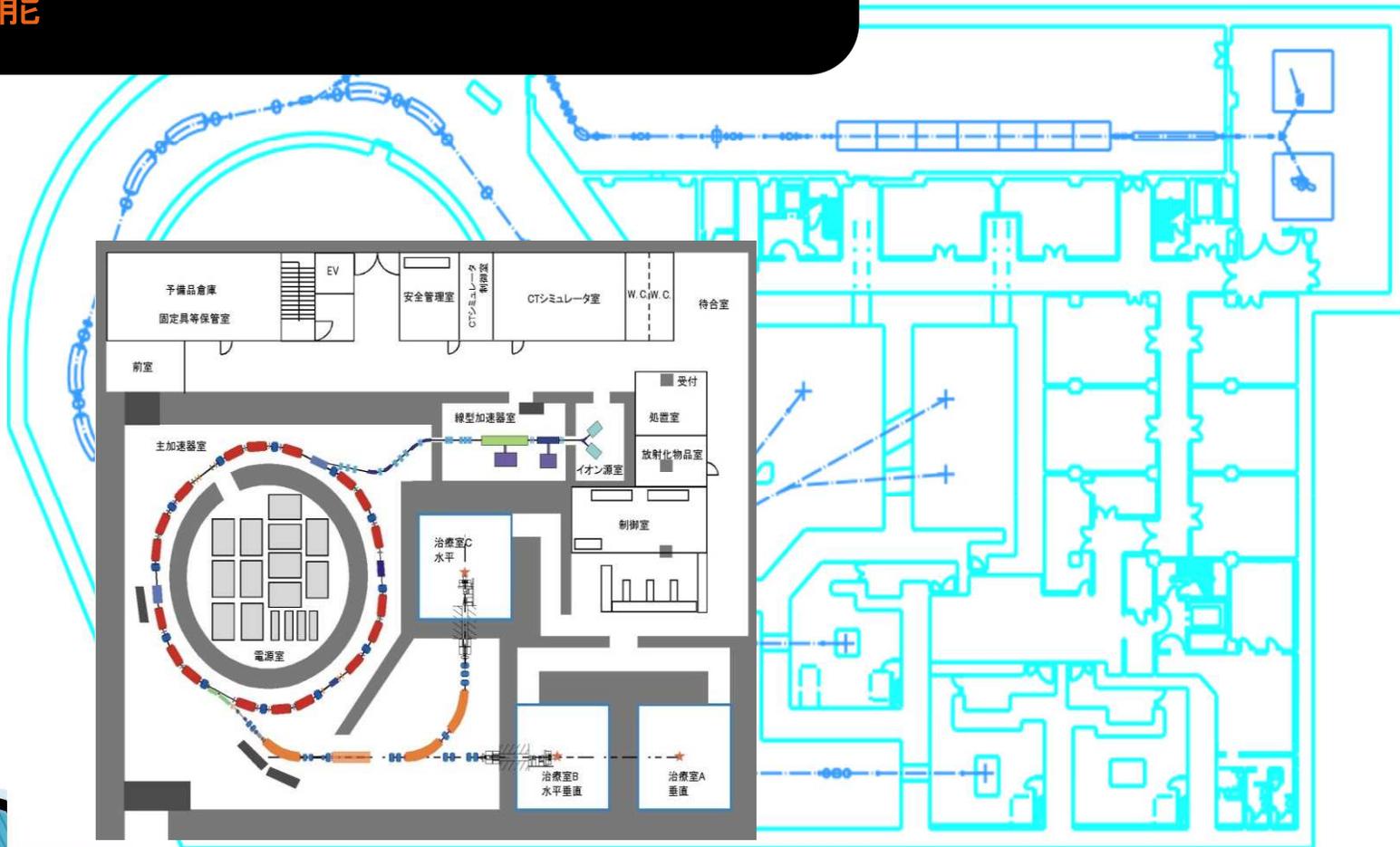
小型普及器(群馬大)と HIMACの比較

- 炭素線の治療専用装置を開発
- 大きさは1/3だが、HIMACと同じ治療が可能

電車1両

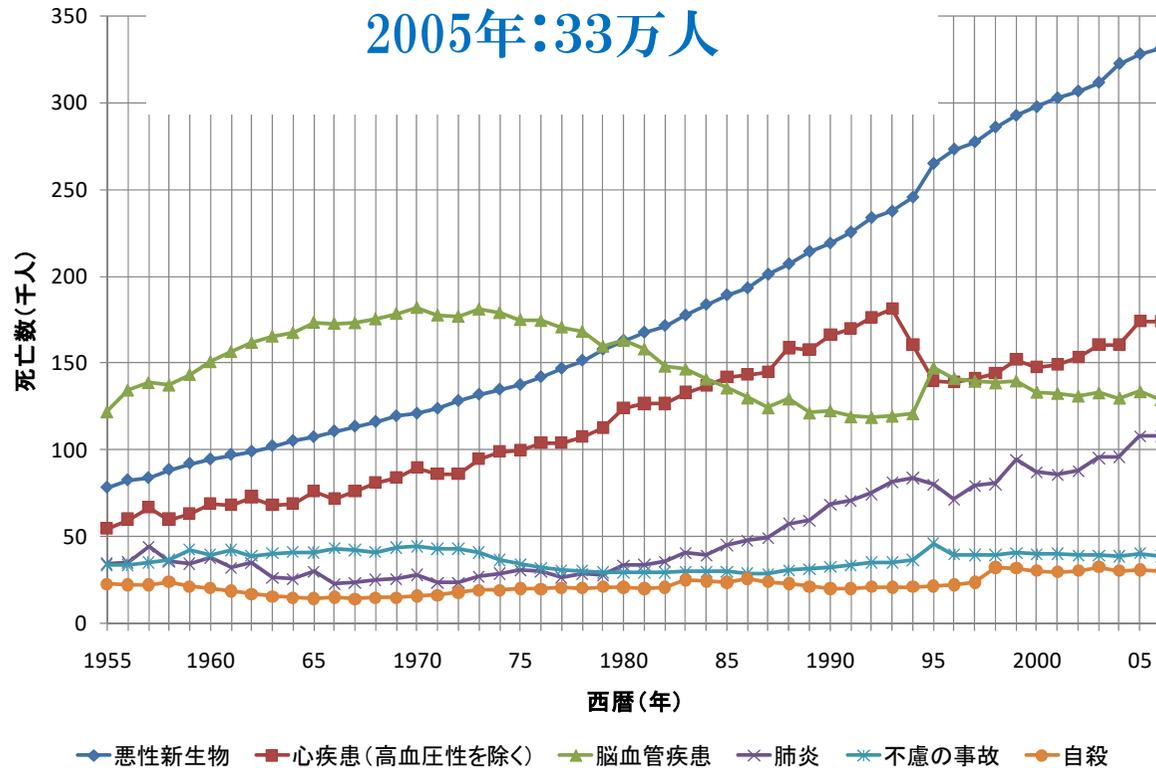


20m



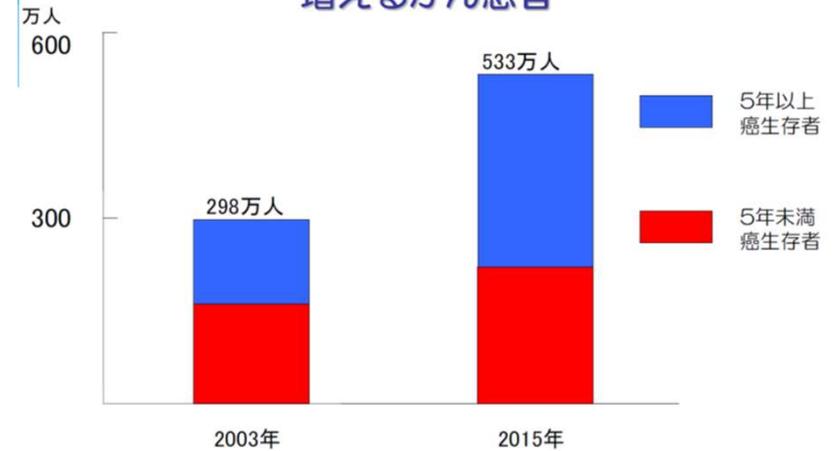
日本人の死因は・・・

がん死亡者数：増加傾向
2005年：33万人



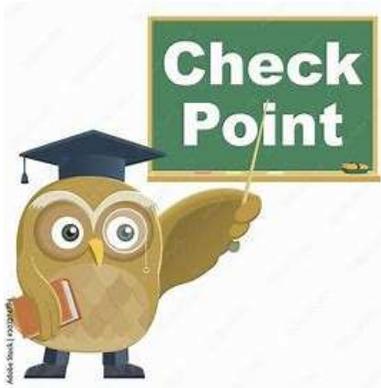
厚生労働省ホームページ 平成19年度「日本における人口動態 — 外国人を含む人口動態統計—」の概況 より

増えるがん患者



わが国のがん患者数は2015年にほぼ
倍増し2050年まで横ばいで推移する。
(厚生労働省がん研究助成金「がん生存者の社会的適応
に関する研究」2002年報告書)

- ◆男性ではおおよそ2人に1人、女性ではおおよそ3人に1人が一生のうちにがんと診断される。
- ◆男性ではおおよそ4人に1人、女性ではおおよそ6人に1人ががんで死亡する。

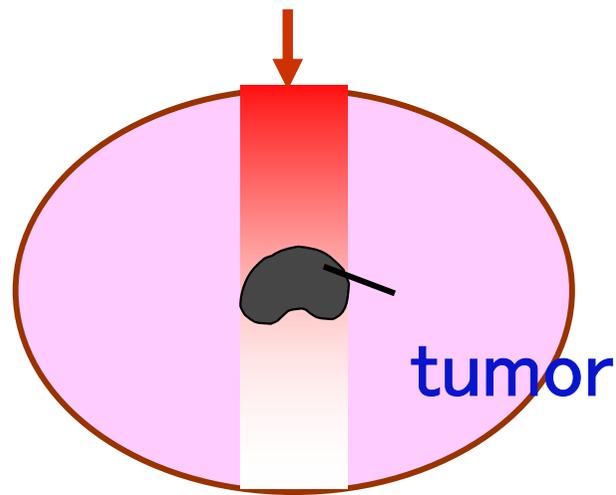


(重)粒子線治療のメリット

何が良いか？

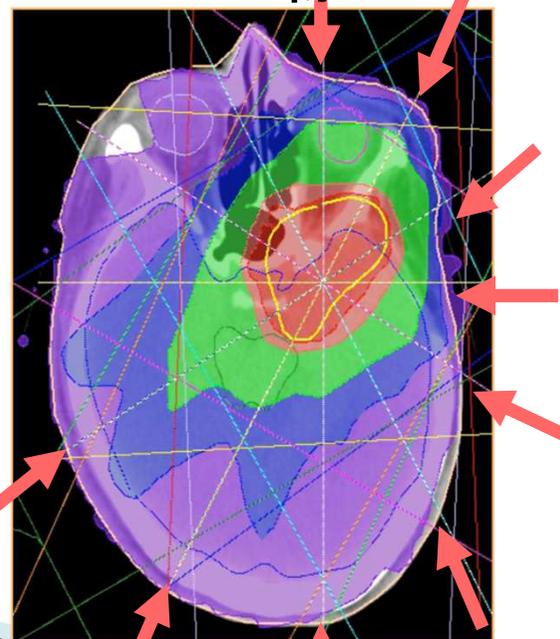
- 1. 物理的特長
 - ・ 進行方向の線量分布が良い(Bragg ピーク)
 - ・ 横方向の線量分布が良い(散乱が少ない).
(重粒子は特に散乱が少ない)
- 2. 生物学的特長
 - ・ RBE (Relative Biological Effectiveness、生物学的効果比)が大きい
 - ・ OER (Oxygen Enhancement Ratio、酸素増感比)が小さい
 - ・ 陽子線 & 重粒子線
 - ・ 重粒子線

X線と重粒子線の線量分布の比較

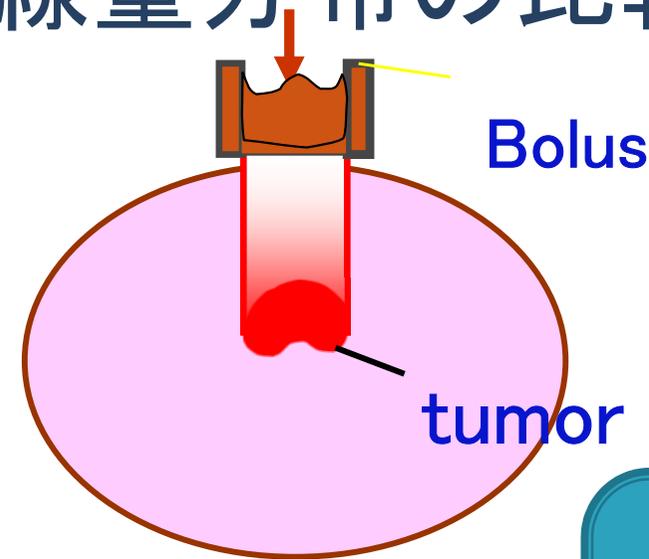


tumor

X線



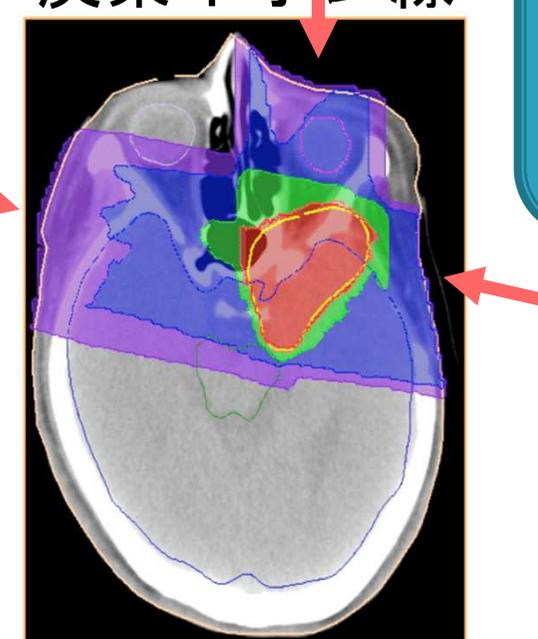
(9門照射)



Bolus

tumor

炭素イオン線



(3門照射)

線量がターゲットに集中

粒子線治療(生物学的効果)

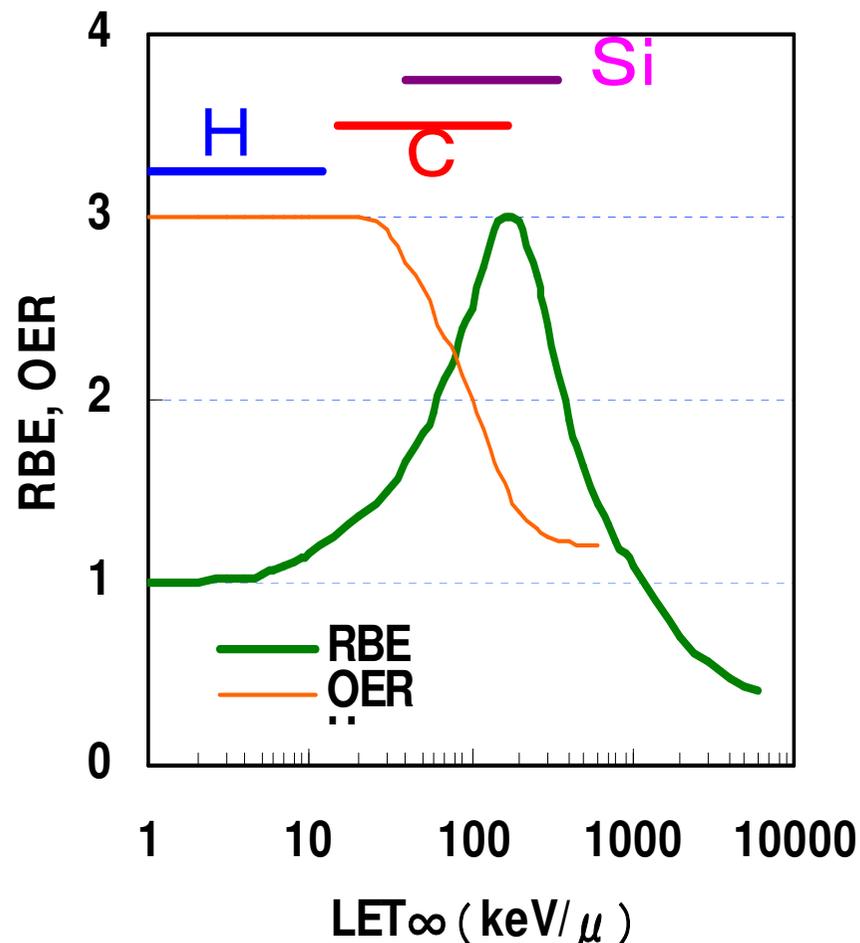
▶ 生物学的効果

- ▶ 重イオン = LETが大きい
 - RBEが大(大きい方が良い) ~ 2.5
 - (RBE: Relative Biological Effectiveness、生物学的効果比)

がん細胞を殺す能力が2.5倍

- OERが小(小さい方が良い)
- (OER: Oxygen Enhancement Ratio、酸素増感比)

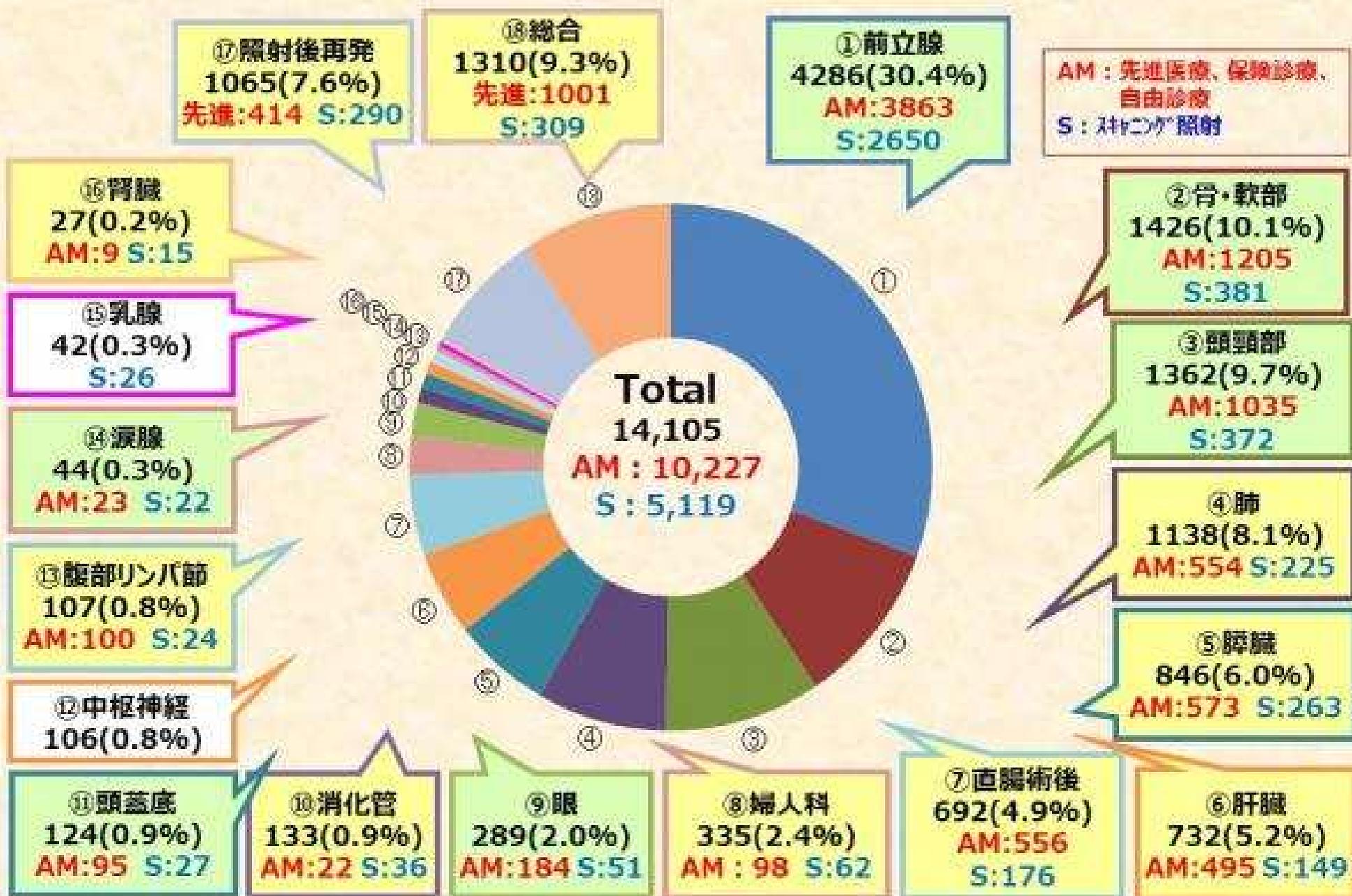
治療効果が血流に依存しない



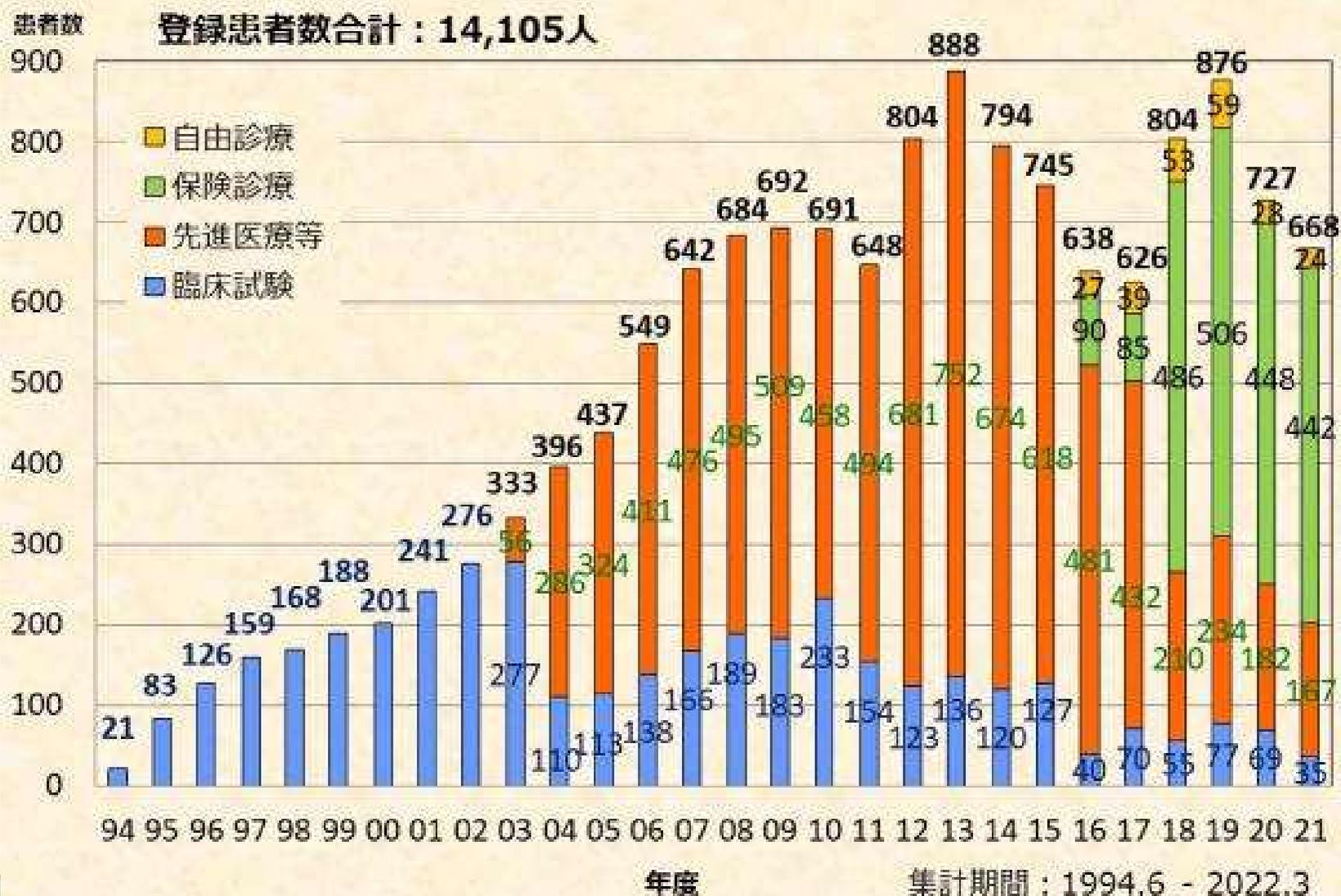
RBE and OER dependence on LET

QST病院における重粒子線治療の登録患者数

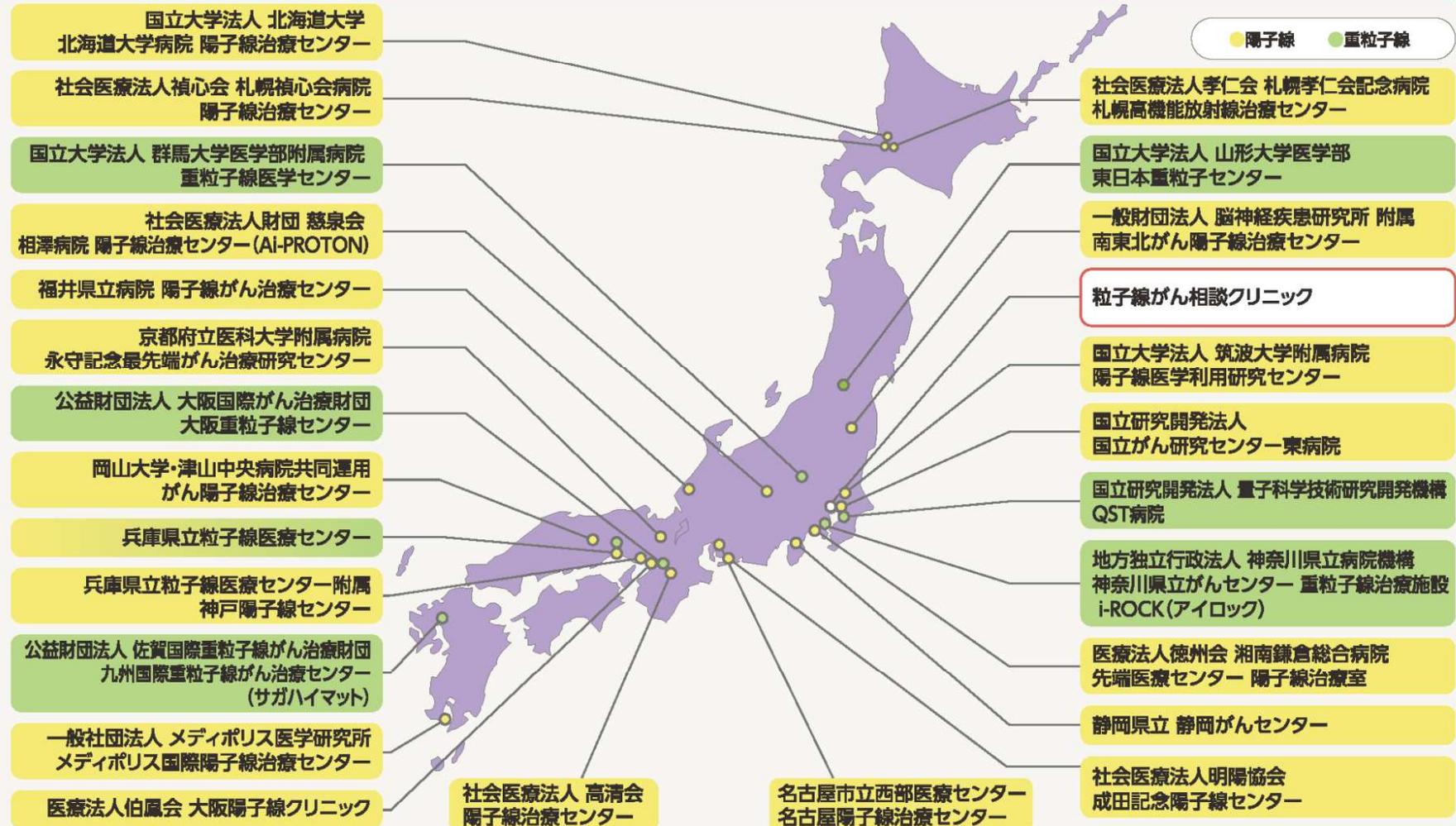
照射開始日：1994年6月～2022年3月



診療区分別登録患者数の推移

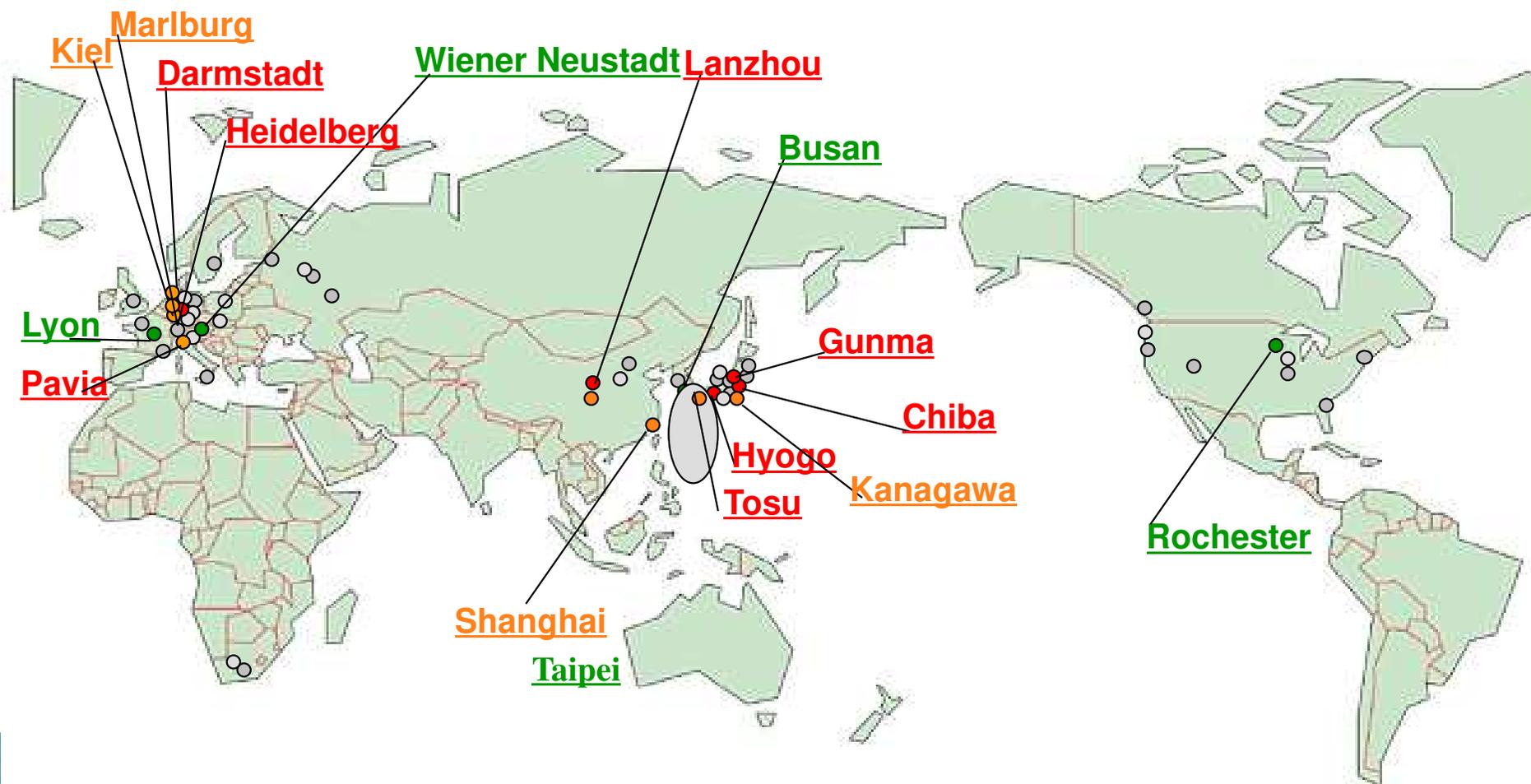


日本の粒子線がん治療施設 (2023年7月現在)



公益財団法人 医療原子力技術研究振興財団 冊子
体にやさしい 粒子線 がん治療 p25-26より引用

世界の重粒子線治療施設計画



終わりに



放射線応用技術(本当にエコなんですけれど)のこれからの展望

1. 歴史を振り返って

過去から、ずーっと順風で走ってきたものは?...

ポリエチレンの架橋

自動車タイヤ用ゴムの「はしかけ」も..

なぜ生き残った?

⇒ プロセスが簡単、他の方法ではコスト・品質が達成できなかった
ライフサイクル(使い終わったあとの処理など)が従来技術と変わらない

なくなってしまった、あるいはほとんど使われなくなった応用

フロッピーディスク製造(フロッピー自身がなくなった)

トンネル内装鋼板(日本中のトンネルにいきわたってしまった)

転写印刷技術(印刷技術がすごく発展して使う必要がなくなった)

王子製紙のスーパーミラー(使用後の処理に問題)

等

放射線応用技術のこれからの展望(2)

2. 生き残っている技術、生き残れる技術
社会インフラの底辺を支えているもの
他に代わる技術がコスト高あるいは性能が劣るもの

3. こんな応用なら生き残る？
放射線を使うだけでほぼできるもの(発泡ポリエチレンやはしかけフィルム)
放射線がなければできないもの ⇒ 分析、医療等
作ったものがずーっと使われるもの(半導体など)
環境負荷の小さな技術(水を使わない等) ⇔ PETボトル製造ライン

日本の巨大科学技術

J-PARCプロジェクト

JAEA & KEK プロトン+中性子科学

RIビームファクトリー

理研 不安定核、新元素

X-FEL

理研播磨 超短パルスX線

SuperKEKB

KEK 電子・陽電子衝突 標準理論を越えて

来るべきILC

日本国 & 世界各国 超伝導技術、材料技術
真空技術、大電力技術
国際的研究センターほか

放射線応用技術が発展した陰には、最先端科学での加速器の誕生が大きな意味を持っていた。その時(1930年代)は、加速器はただ核物理の実験装置！

本当に新しい放射線応用技術は実は最先端科学の中から生まれてくるのだとおもっています

謝辞

本講演を行うにあたり、数多くの方々から、御助言、資料等をいただきました。

特に、

住友重機械工業の加藤隆典様をはじめとする多くの皆様、

住重アテックスの山瀬豊様、

澁谷工業の皆様(特に中様、西納様)

大日本印刷の皆様

(株)環境浄化研究所の皆様

TPR(帝国ピストンリング)の山本様

QST-HIMAC 村上健先生

鷺尾研の歴代のメンバー

から、たくさんの資料、知識、情報を頂戴しました。ここに厚く俺申し上げます。



ご清聴ありがとうございました。

