

# 放射線の利用について



中西 友子

# 一般に説明されている放射線利用とその現状

放射線や放射性物質を利用する分野は着実に拡大してきている。今後とも進展していくためには、潜在的な利用者の技術情報や効用と安全性についての理解の不足を解消していくことが重要。

- ・ 医療・農業・工業・環境保全野、基礎研究など幅広い分野で放射線が利用されている。
- ・ 放射性同位体(RI)や放射線発生装置を利用する事業所は、国内で6,116カ所(平成23年3月現在)。

## ●医療分野例

- ・ イメージング  
(X線CT、PET等)
- ・ 放射線治療  
(X線、電子線、 $\gamma$ 線、中性子線、陽子線、重粒子線など)



CT機能とPET機能を有するPET-CT装置

(出典)原子力委員会  
新計画策定会議 資料

## ●農業分野例

- ・ 品種改良  
(花の新品種の開発)
- ・ 害虫防除  
(ウリミバエの根絶)
- ・ 食品照射  
(ジャガイモの発芽防止)など



パステル調の花色のオステオスペルマムの新品種

(出典)日本原子力研究開発機構

## ●工業分野例

- ・ 精密計測
- ・ 非破壊検査
- ・ 材料の改良
- ・ 半導体素子加工プロセス
- ・ 自動車タイヤ等(部品製造)
- ・ 医療用具(滅菌等)

## ●環境保全分野例

- ・ 窒素酸化物、硫黄酸化物等の分解、除去
- ・ ダイオキシンの要因となる揮発性有機化合物の分解等

## ●基礎研究分野例

- ・ 量子ビームによる研究
- ・ ナノテクノロジー
- ・ 高温超伝導材料の研究開発等



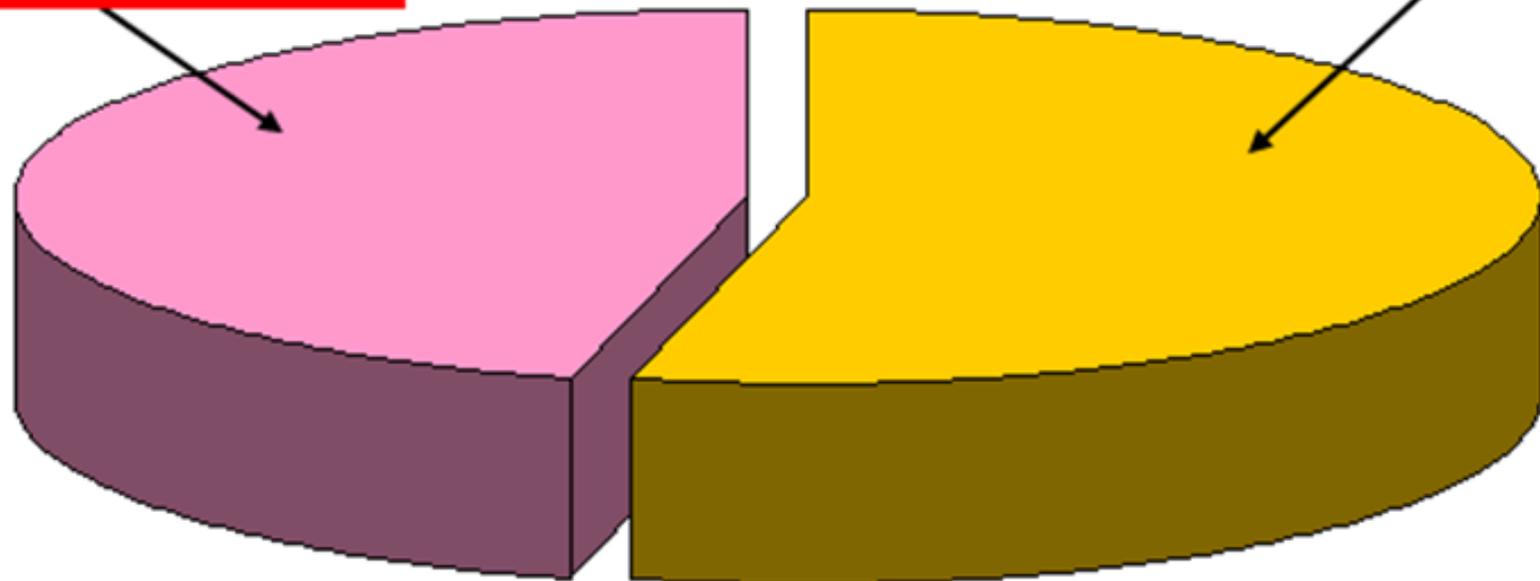
大強度陽子加速器施設J-PARC

(出典)日本原子力研究開発機構

## 原子力利用(放射線利用+エネルギー利用)

エネルギー利用  
46%

放射線利用  
54%



原子力利用の経済規模(1997年)

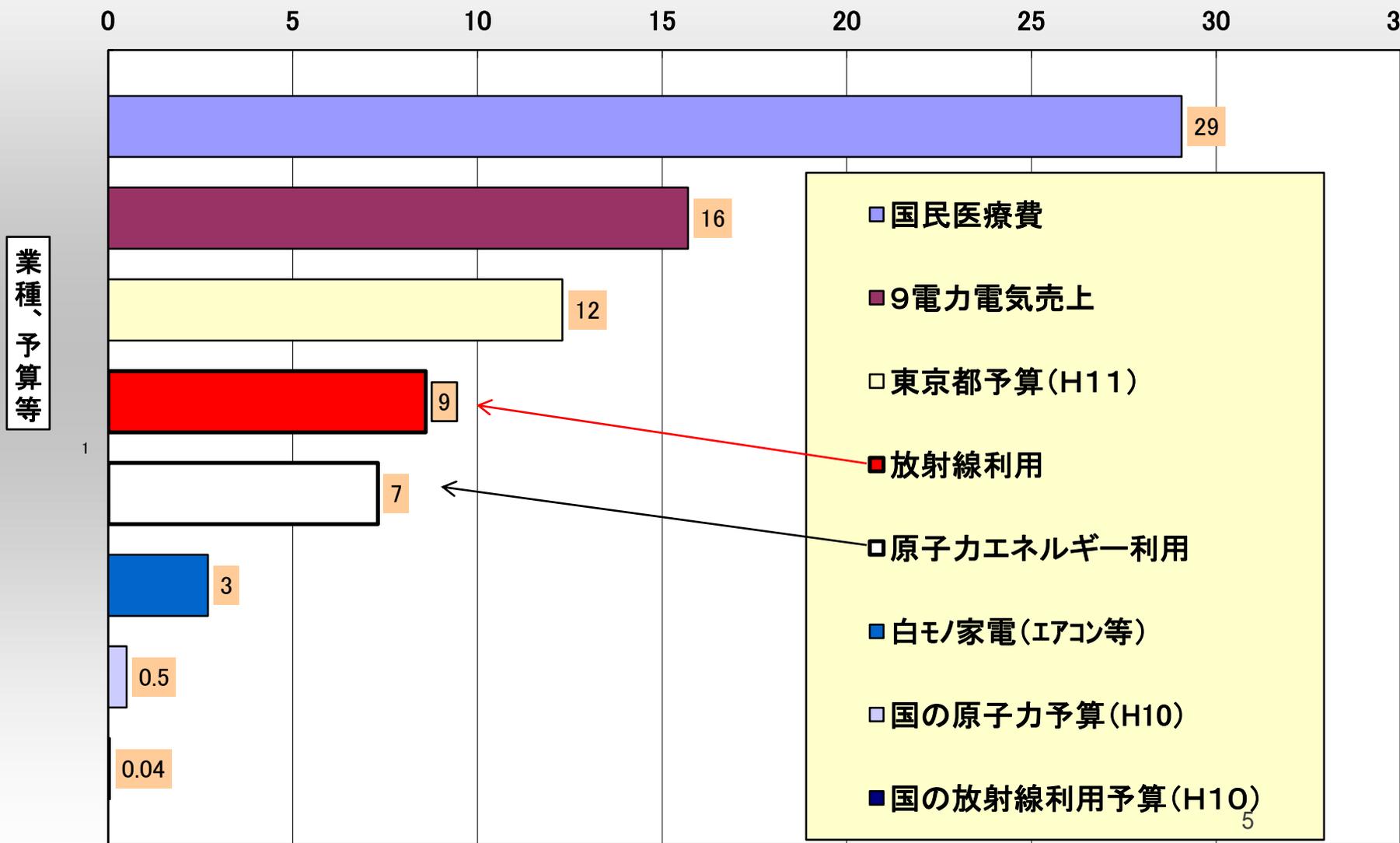
[出典]科学技術庁:パンフレット、「放射線利用の経済規模」(平成12年3月発行)

# 放射線利用経済規模

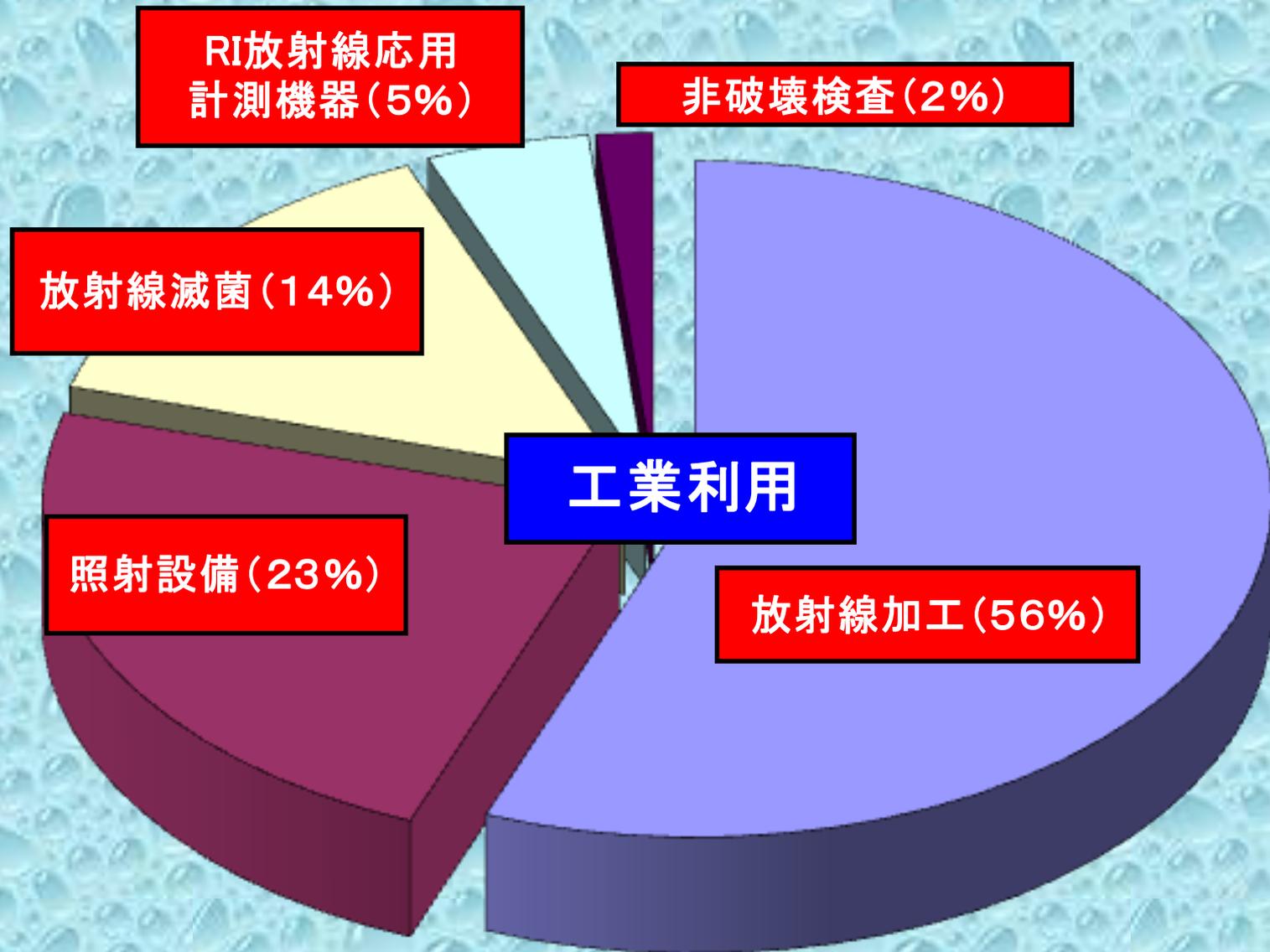
原子力利用	分野	経済規模 (億円)	割合
放射線利用	工業利用	¥73,217	85%
	農業利用	¥1,179	1%
	医学・医療利用	¥11,905	14%
	小計	¥86,301	54%
エネルギー利用	原子力発電	¥56,613	78%
	原子炉機材	¥5,773	8%
	燃料サイクル	¥2,918	4%
	建設・土木	¥1,094	2%
	発電機器	¥699	1%

# (参考:他業種との単純比較)

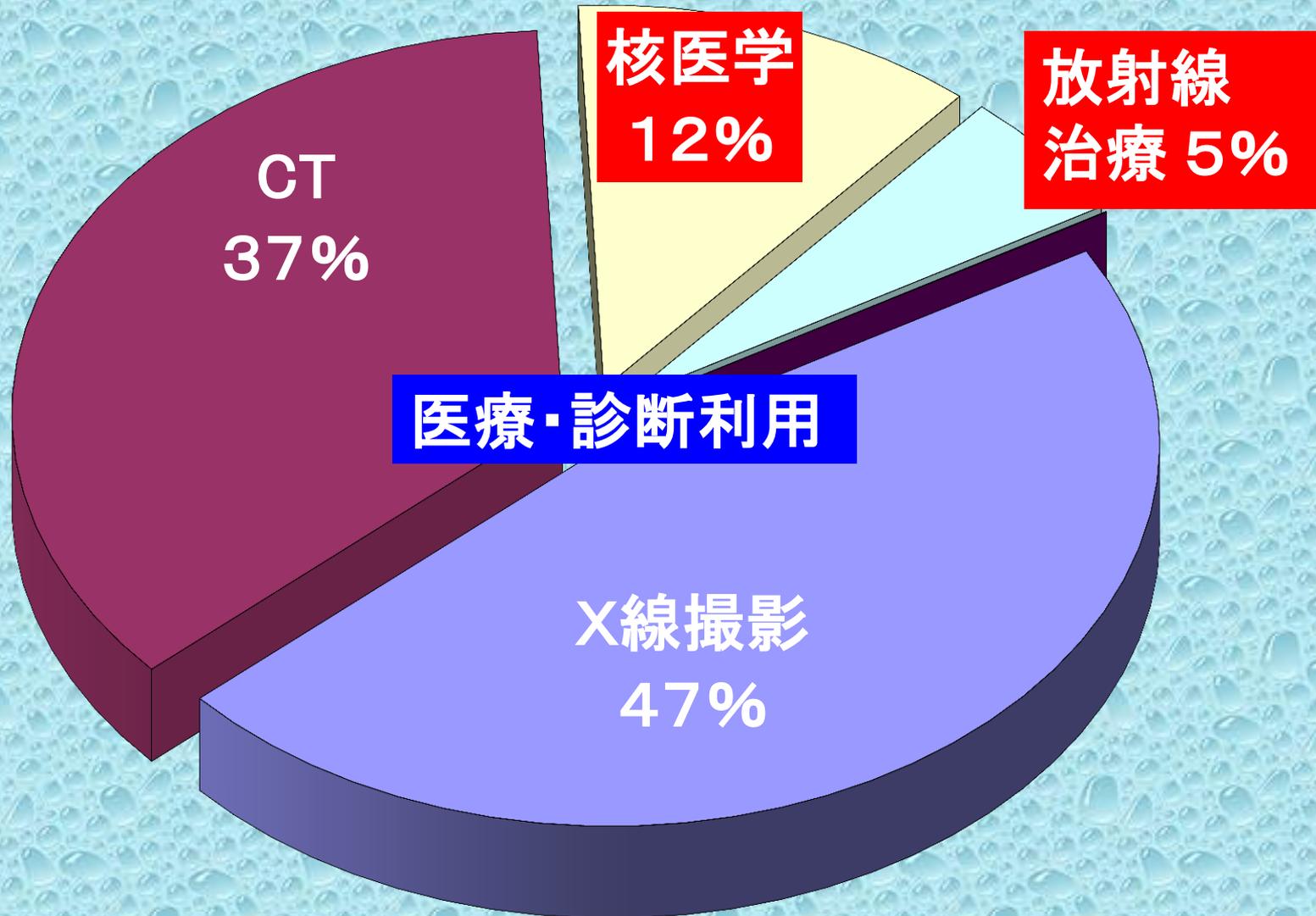
兆円



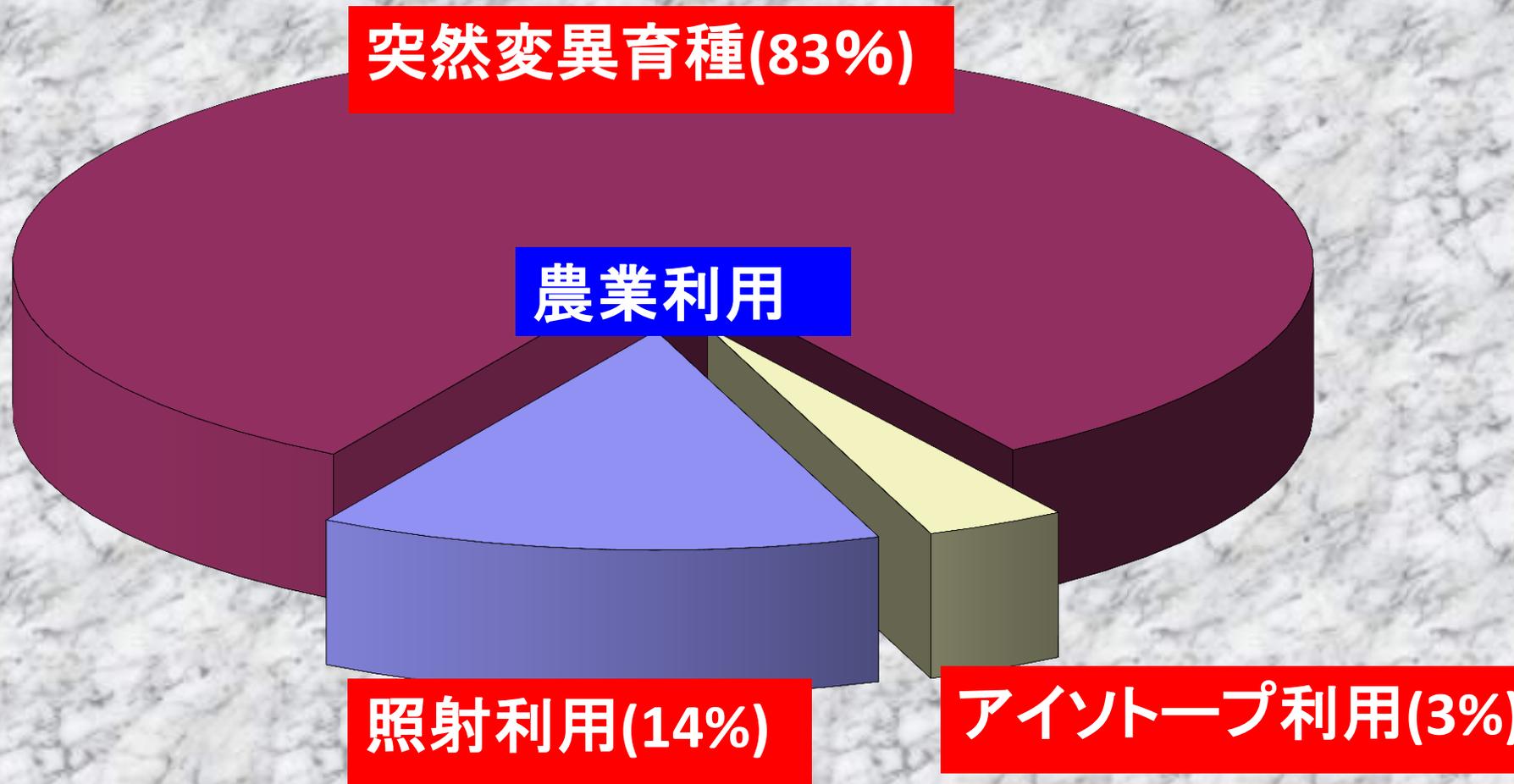
# 工業利用の内訳(1997年)



# 医療・診断利用の内訳(1997年)



# 農業利用の内訳(1997年)



# 工業における利用

## ●タイヤ加工 (ラジアルタイヤ)

放射線には分子を結び付け、より強い分子を作る働きがある。車のタイヤは放射線を照射することで弾性を保ちながら強度を高めている。



自動車ラジアルタイヤの経済規模  
(約1兆円)

[資料提供]日本原子力研究所 高崎研究所

## ●プラスチックの性質改良 (機能性ポリマー)

放射線には重合や架橋などの化学作用があり、ビート板や風呂マットなどの発砲ポリエチレンの品質強化、耐熱電線、耐熱炭化ケイ素繊維、熱収縮チューブ、機能性ポリマーの製造などに用いられる。



病院ベット用の機能性ポリマー、特定金属回収ポリマーなども開発されている。

## ●半導体加工

半導体の回路露光技術、不純物の導入などに放射線が使われている。放射線の工業利用の5割以上が半導体加工であることから、放射線利用の最大用途でもある。



最高品質の半導体は原子炉で製造される。  
リニアモーターカーの半導体も原子炉製。  
⇒原子炉が物質生産の現場になった。  
⇒かつて放射線照射協会が設立された。

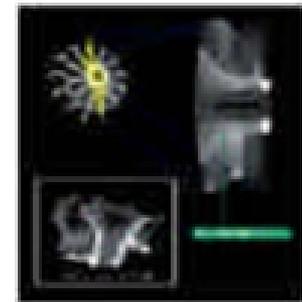
## ●厚みの測定

放射線の透過量から厚みが測定される。高温の金属板、濡れた紙など測定が困難な材料も測定できる。機械は殆どメンテナンスフリー。



## ●非破壊検査

放射線の透過力を利用し、コンクリート、鋳物、金属内部等が検査できる。



ジェット機エンジンや翼内部検査、造船所での溶接個所の検査などに使用されている。

⇒耐震性診断、エンジン開発、高温での水中ガス生成過程の検査などにも利用できる。

# 医療における利用

## ●X線検査

人体の密度の差から画像診断を行う。骨や内臓の検査、造影剤を用いた検査、X線CTなどがある。健康診断での検査項目にもなっている。



## 動物の治療

⇒ポータブルなX線検査器  
(飛行場での手荷物検査)

## ●核医学・がんの治療

PET診断：放射性同位体で標識した化合物を人体に投与して画像を得る。

放射線治療： $\gamma$ 線（ガンマナイフ）、重粒子線、中性子線などを照射する。

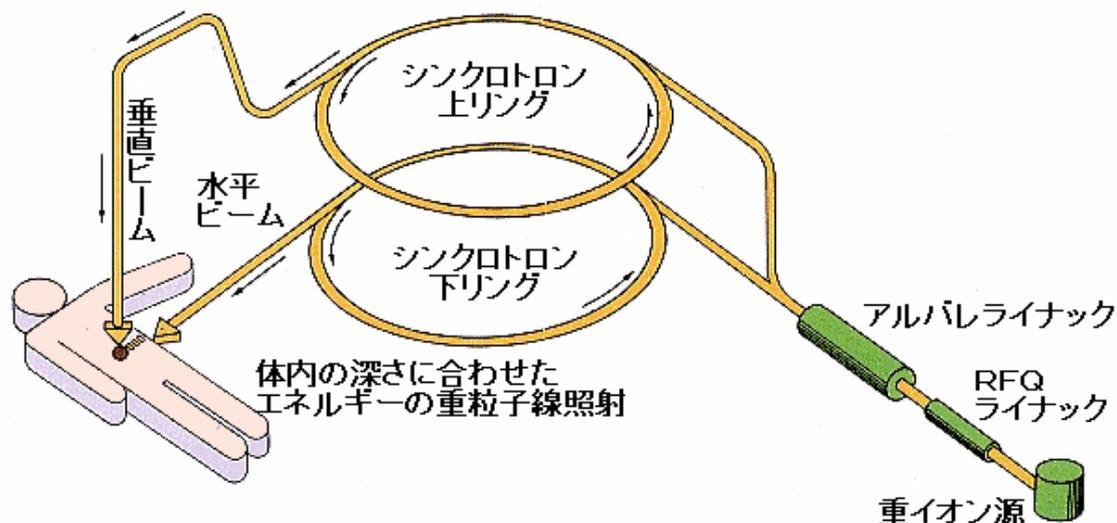
### 放射性薬剤の開発

⇒短寿命核種の製造  
+化合物の標識技術  
の開発

全自動合成器

問題点：

動物のPET診断



重粒子線がん治療装置概念図

## ● 医療機器の滅菌

放射線を照射することにより、加熱や有毒ガスを利用せずに殺菌が行える。

ディスポーザブルな注射器、注射針をはじめ、手袋、ナイフなどの手術用器具、人工臓器の滅菌に利用されている。

残留ガスが残らない。  
食品用の包装材は？



ディスポーザブル医療用具  
の経済規模(約 2,800億円)

[資料提供]日本原子力研究所 高崎研究所

# 農業における利用

## ● 品種改良

放射線を照射することにより、有益な特性をもつ新しい品種を作製する。

食品では、ナシの「ゴールデン20世紀」、グレープフルーツの「ルビー」など、花の新品種にも開発されてきた。



(新品種)



(原種)

**身近な放射線利用  
黒斑病に強いゴールド20世紀ナシ  
(経済規模29億円)**

[資料提供] 農林水産省農業生物資源研究所  
放射線育種場

# 【ガンマフィールド】

世界最大の放射線育種場

農作物、果樹、樹木の照射  
圃場と実験室の照射  
放射線強度が可変  
繰り返し照射が可能

ナシ、リンゴ、キク、米など



中央に $^{60}\text{Co}$ 線源設置、半径100m  
<http://www.irb.affrc.go.jp/shisetsu/>



a) 原品種「大平」



b) 原品種の緩照射と花器培養による花色変異品種

放射線育種によって作られた  
花色変異品種

[出典]放射線育種場テクニカルニュース No.43 p.1-2 (1993)

## ●害虫駆除

放射線を照射し不妊化したオスを大量に放ち、孵化しない卵を産ませ、害虫を根絶する。

殺虫剤を使用しないので環境への影響が少ない。



身近な放射線利用  
ウリミバエの根絶  
(経済規模84億円)

[出典] 農林水産省パンフレット  
「日本におけるウリミバエの根絶」

放射線育種と害虫駆除技術は日本が発展途上国へ提供している放射線利用の主要な技術である。

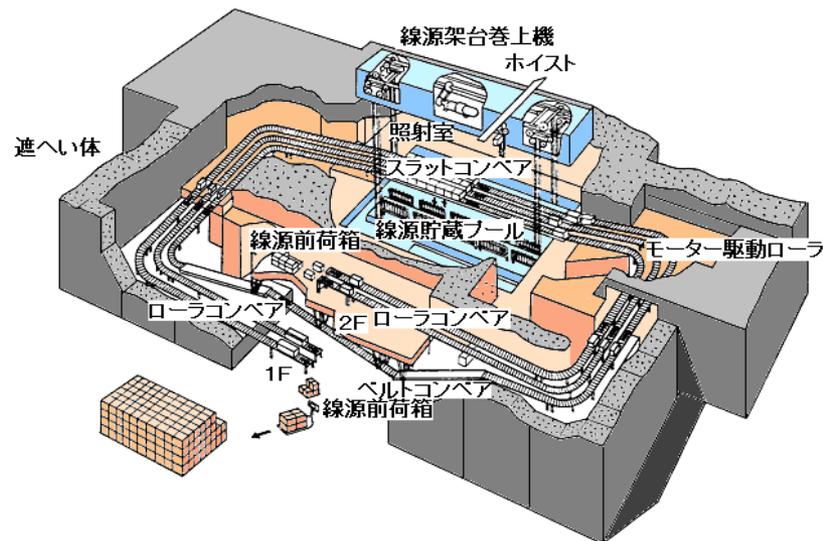
## ●食品照射

食品の腐敗原因となる細菌やカビを死滅させ鮮度の維持に効果がある。  
日本ではジャガイモのみ発芽防止に利用されている。

もともと軍事技術のひとつで宇宙食にも使用された。

WHOが2回報告書を出した。

農作物の輸出入の植物防疫が不要に。



ガンマ線照射施設の例  
(ラジェ工業株)

[出典]日本アイトープ協会(編):改訂3版アイトープ便覧、丸善(1984年12月)



ジャガイモ照射施設(北海道 士幌農協)

[出典]食品照射データベース (<http://takafoir.takajiperi.go.jp/>)

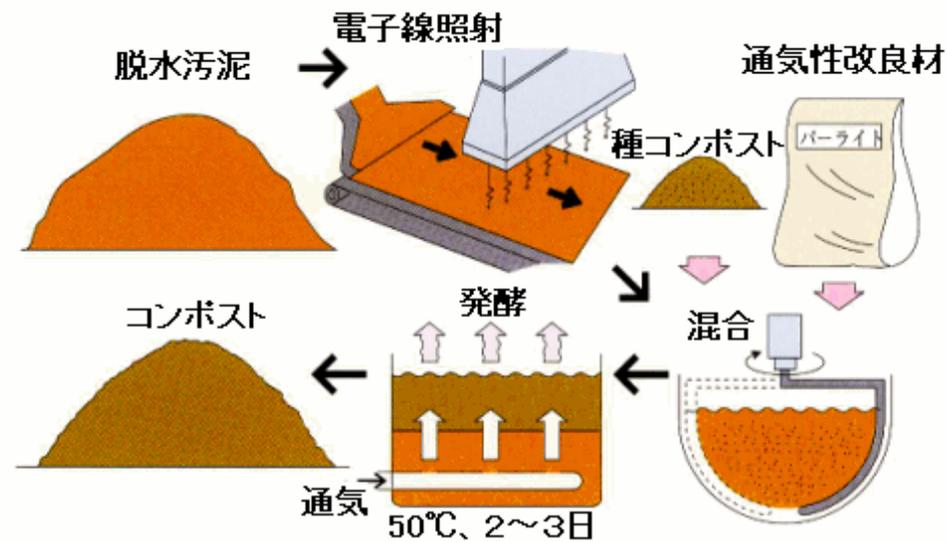
## その他の利用

### ●年代測定

遺跡から出土した遺物の中の炭素14の残存量を測定することから年代が測定できる。

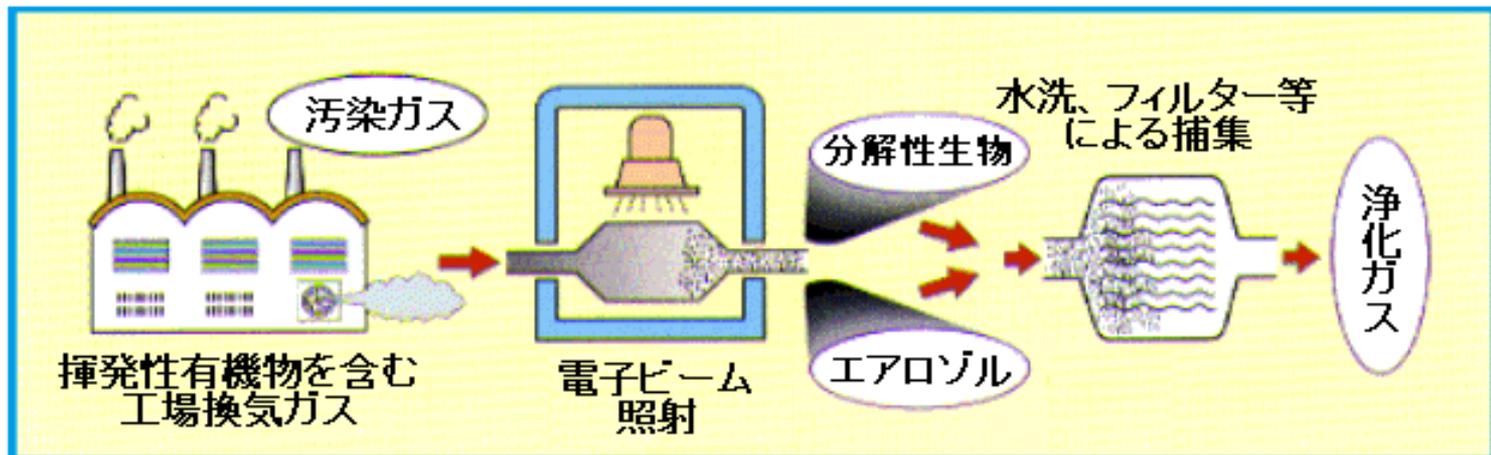
### ●下水汚泥

### ●排ガス処理



下水汚泥の電子線殺菌・コンポスト化の手順:下水汚泥を電子線殺菌した後、種菌を加えて発酵処理する。

## 下水汚泥の電子線処理



## 換気ガス中の揮発性有機物の電子ビーム処理

放射線は、科学技術、工業、医療、農業等の幅広い分野において利用されており、国民生活に大きく貢献。放射線利用の経済規模も原子力利用に並ぶものとなっている。

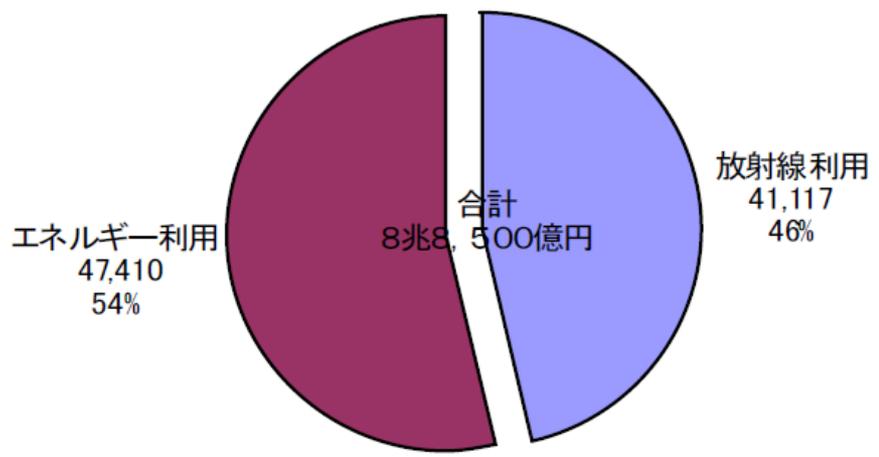
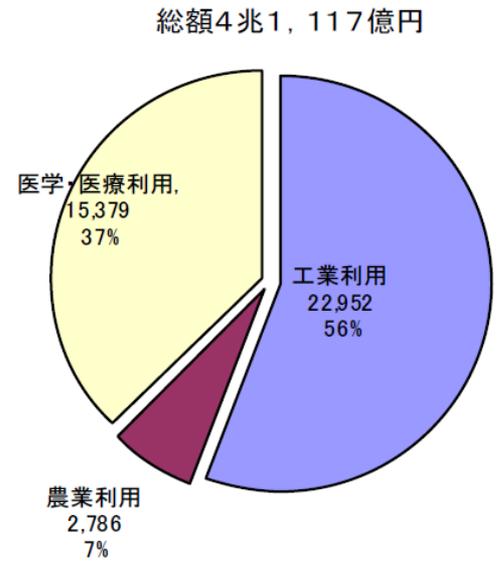


図 平成17年度：放射線利用とエネルギー利用の比較(億円)

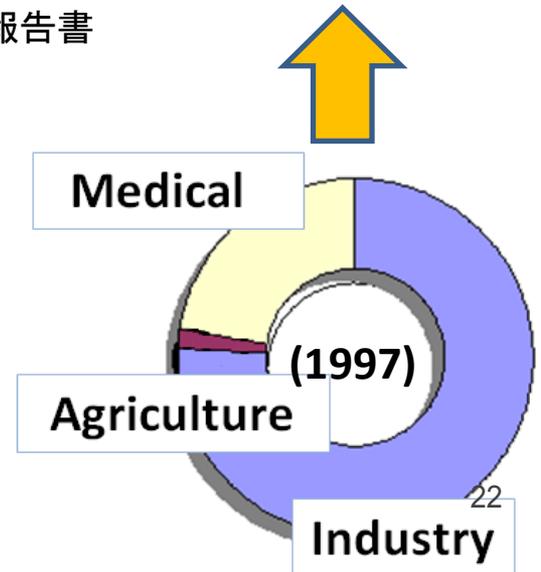


工業、農業、医学・医療分野における放射線利用経済規模(億円)

平成19年度放射線利用の経済規模に関する調査報告書

放射線利用—基盤技術として

- ・工業(分析、計測、材料開発等)
- ・医療(診断、治療、材料開発等)
- ・農業(育種、不妊虫放飼法、食品照射等)
- ・環境・資源(海水ウラン捕集技術、環境浄化技術等)



# 多様な放射線利用が推進する科学技術の世界

放射光

中性子

荷電粒子  
イオンビーム

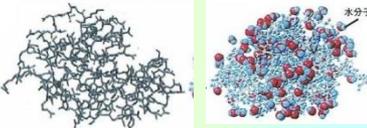
## ライフサイエンス

## ナノテク・材料

## 環境・エネルギー

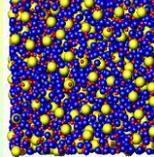
## 情報通信

### 学術研究 (基礎)



骨格構造を観測  
X線・中性子によるタンパク質構造解析。中性子では水素が見える。

水分子を観測  
水分子



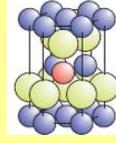
X線による骨格構造解析と中性子による水素観測により、水素吸蔵合金の水素吸蔵・放出メカニズムを解明する。

水素吸蔵合金の原子構造解析



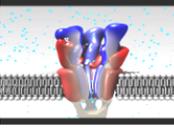
X線・中性子による構造と運動状態の解析から、未解決問題である高温超伝導機構を解明する。

高温超伝導体: 比較的高温で電気抵抗がゼロ



電子のスピンを制御する次世代デバイス(スピニエレクトロニクス)材料の構造特性などを解明する。

スピニエレクトロニクス材料(希薄磁性半導体)



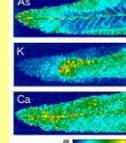
X線自由電子レーザーを使った構造解析では、試料を結晶化する必要がなく、結晶化が困難だった試料も研究対象に。

膜タンパク質構造解析



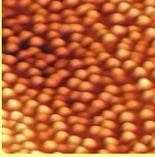
高密度水素貯蔵など様々な応用が期待されるカーボンナノチューブの構造と運動を観測する。

カーボンナノチューブの構造と運動



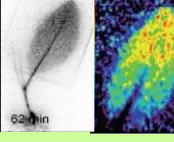
重金属汚染された環境の植物による消化機構を蛍光X線分析により解析。

右図はPhoton Factoryでの測定例  
重金属を蓄積する植物



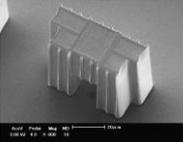
次世代半導体素子である量子ナノドットの成長過程をX線によりその場観察し、ナノドット中の原子組成分布を測定

量子ナノドットのその場観察



イオンビームを利用したイメージング技術により、植物の養分吸収・蓄積過程等を定量的に評価できる。

葉の光合成過程を観察



イオンビームにより、ナノサイズの加工が可能。半導体、生体材料などの改質、加工にイオンビームによる三次元ナノ構造物の製作



中性子ラジオグラフィにより、物体中の水分分布を観測できる。

燃料電池セパレータ内部の水分分布を観察



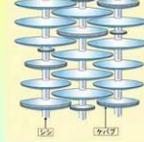
磁気観測を得意とする中性子により、次世代磁気記録媒体の開発研究を進める。

高密度磁気記録媒体の開発



重粒子線による放射線がん治療。がんの殺傷効果が高く、正常細胞へのダメージを少なくできる。

重粒子がん治療装置



高強度・高弾性率繊維の起源とされるシシケバブ構造の生成機構をX線・中性子小角散乱により解明する。

シシケバブ構造の強い繊維



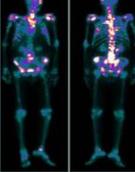
自己再生して機能を維持する自動車排気ガス触媒(インテリジェント触媒)のメカニズムをX線吸収分光により解明。

自己再生する機能性触媒の機構を解明



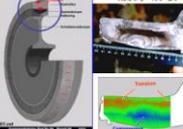
電子線照射により、ポリエチレンフィルムに電気を通す機能を付加し、小型電池用導電膜に適用。

ボタン型アルカリ電池隔膜を実用化



体内投与によるがんの治療や画像診断の他、血液の微量物質検査に放射性医薬品が使用される。放射性元素は原子炉や加速器で生産。

前立腺癌の骨転移



構造物中の歪み・応力分布を観測できる。X線では表面、中性子では物質内部の観測を行う。

疲労破壊  
残留応力解析により車輪破断の原因を究明



放射線グラフト重合により高機能化した高分子を燃料電池の電解質膜に適用。

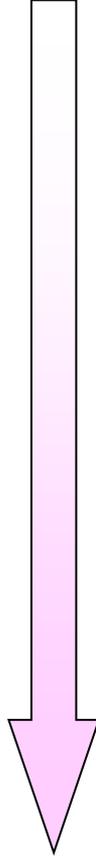
携帯機器向け燃料電池膜を実用化



中性子照射により、均一にリンが添加されたシリコン半導体を製造する。

定常中性子  
中性子ドーピングによる高品質シリコン製造

### 産業利用 (応用)



# 技術面からみた放射線とRIの利用

## ① 放射線(ビーム)の利用

分析技術：

高感度、絶対量の測定、  
多元素同時測定

標準試料、産総研

可視化技術：

非破壊動画(ex.油、水etc.)

RI製造技術：

## ② 放射性同位元素(RI)の利用

トレーサー実験(物の動き)

⇔ 蛍光イメージング

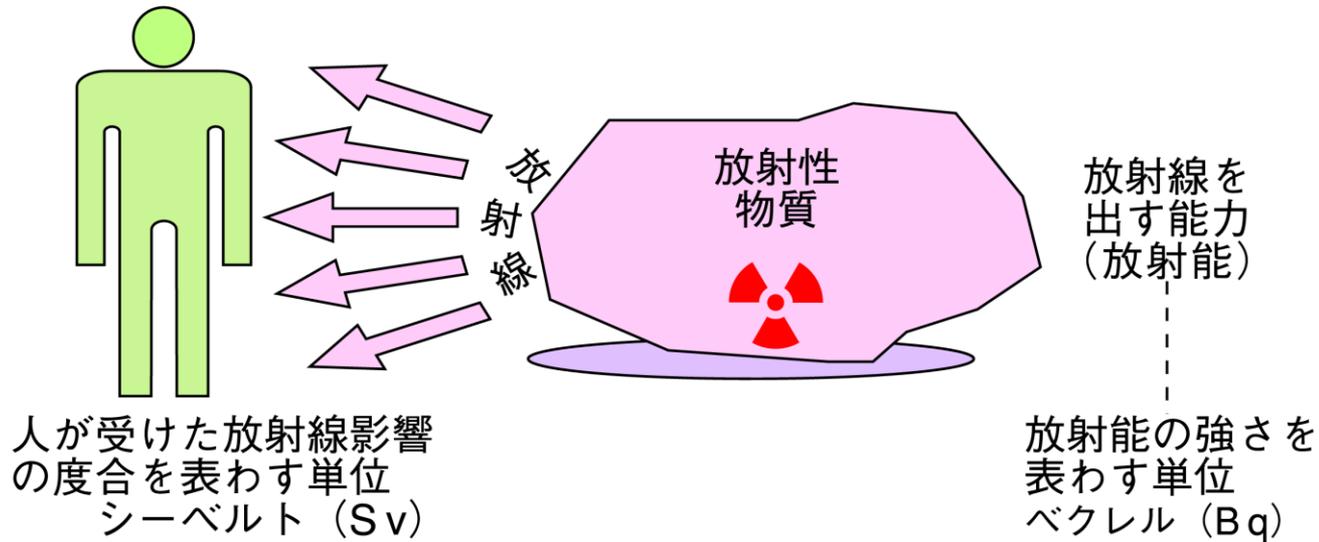
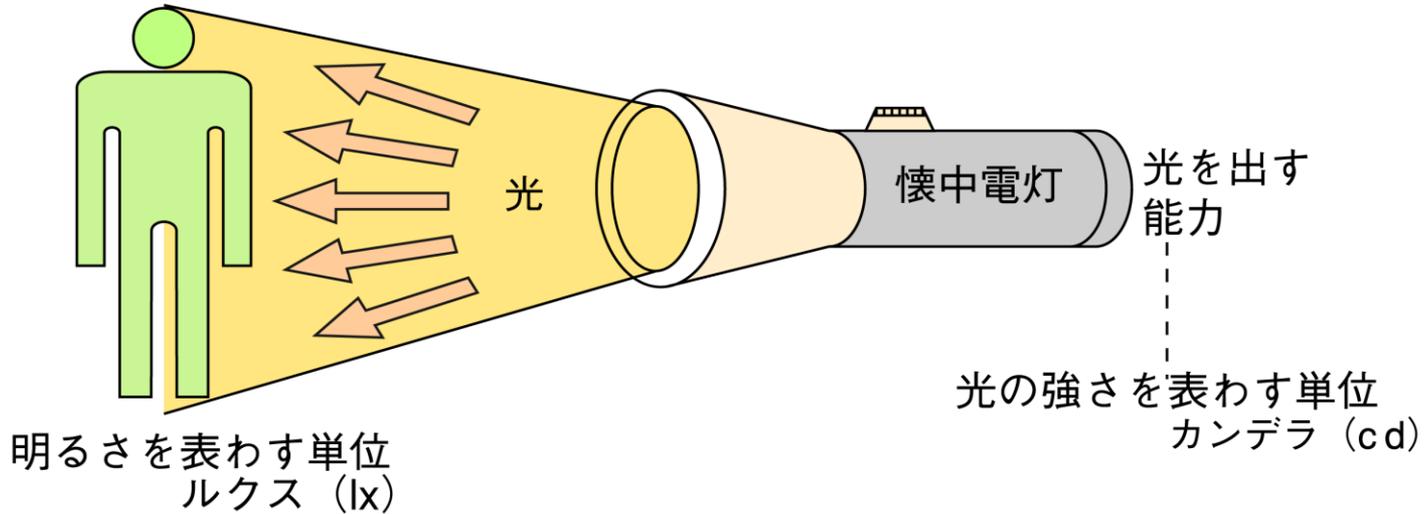
可視化技術：

非破壊動画

明条件下、画像の定量性

ポイント：大型機器だけでなく、身近で利用

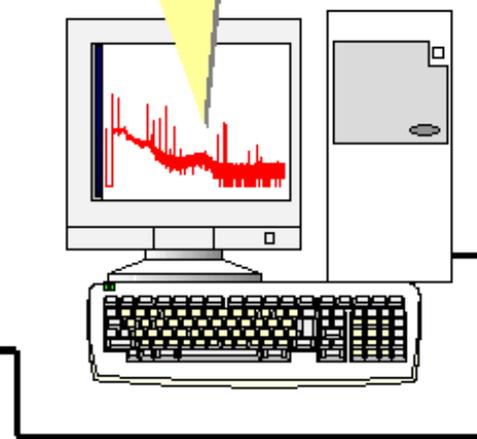
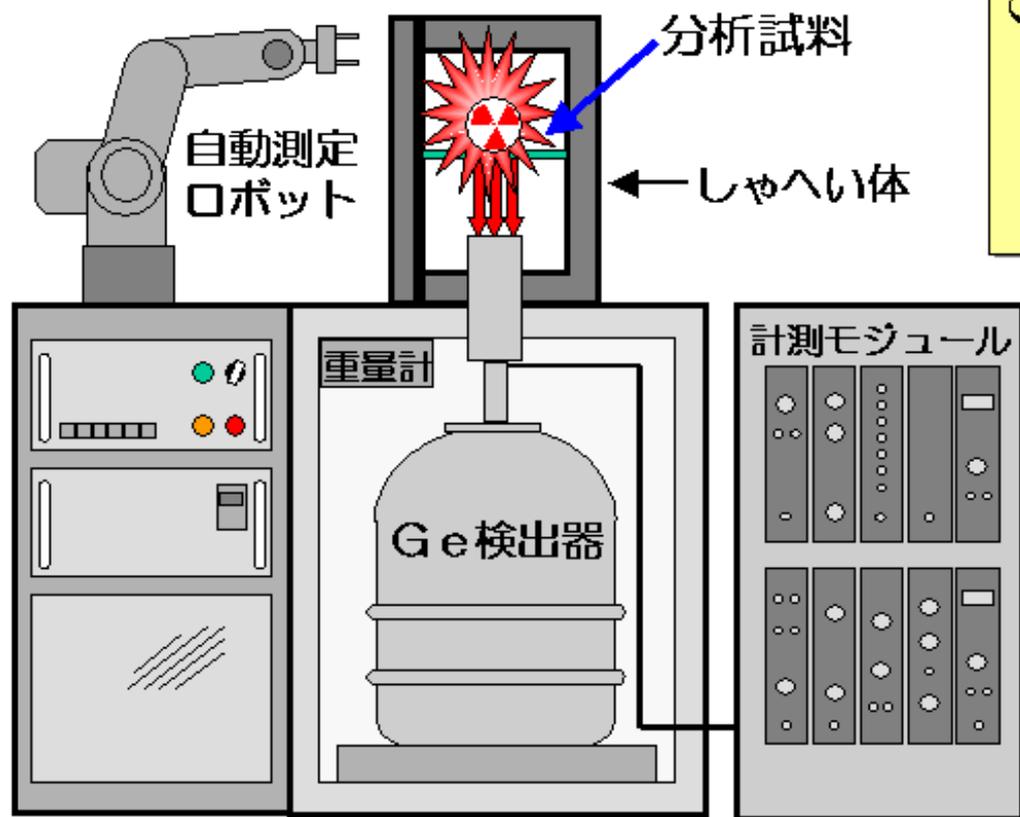
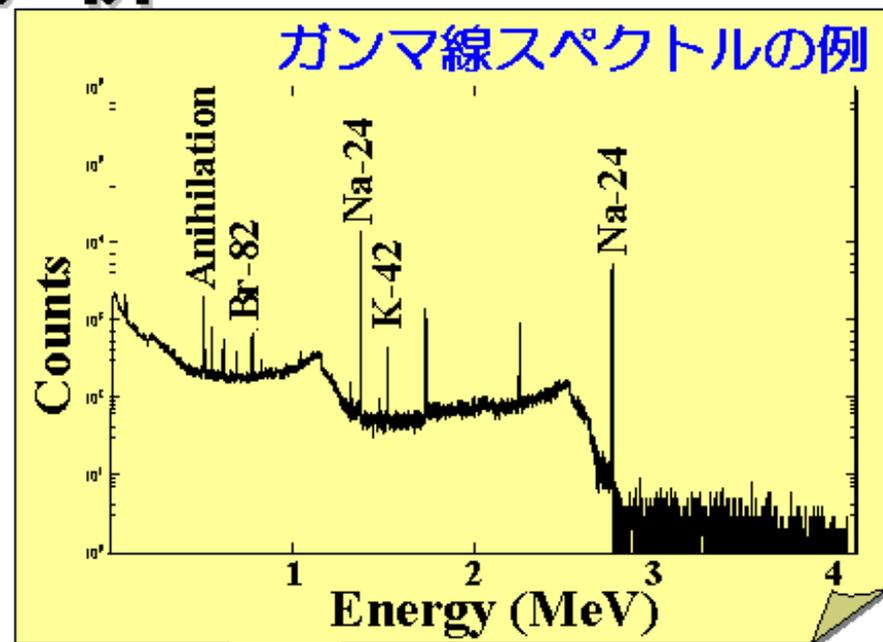
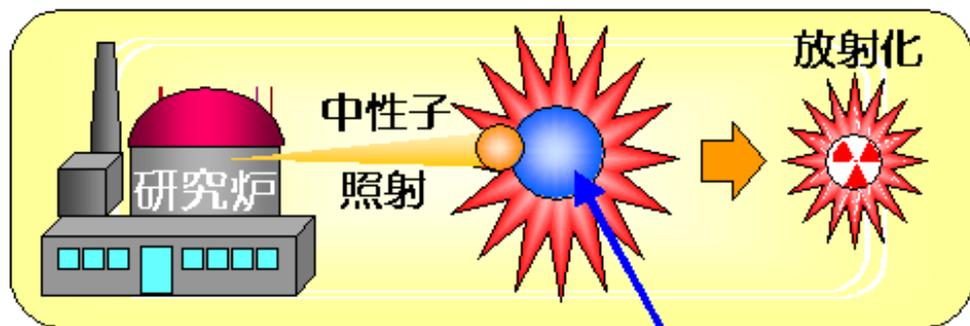
# 放射能と放射線



# 研究用原子炉(JRR3)



# 放射化分析



放射線計測装置

測定・解析用計算機

熱中性子による元素の検出感度<sup>2)</sup>

$(3\sim5) \times 10^{-13}$	Dy, Eu, In
$(1\sim4) \times 10^{-12}$	Co, Ag, Rh, V
$(6\sim9) \times 10^{-12}$	Mn, Br, I
$(2\sim5) \times 10^{-11}$	Th, Pr, Sc, Lu, Nb, Ga, Sm, Cu, Re, Ho, U, Al, Hf
$(6\sim9) \times 10^{-11}$	Kr, Ba, Au, Ar, Cs
$(2\sim5) \times 10^{-10}$	Se, Er, Cl, W, Zn, As, La, Na, Pd, Pt, Yb, Gd, Ge
$(6\sim8) \times 10^{-10}$	Os, Te, Nd
$(1\sim3) \times 10^{-9}$	Tl, Rb, Sb, Sr, Ti, Mo, Xe, Mg, Cr, Hg, Y, Tm, K
$(4\sim7) \times 10^{-9}$	Ru, Sn, Tb, Ni, Ta, F, Ca
$(2\sim4) \times 10^{-8}$	Si, Ne, Ce, P, Cd
$(4\sim5) \times 10^{-7}$	S, Bi
$(2\sim5) \times 10^{-6}$	Zr, Pb, Fe
$(2\sim6) \times 10^{-4}$	O, N
0.11, 0.33, 19.2	Be, H, C
該当放射性核種なし	He, Li, B

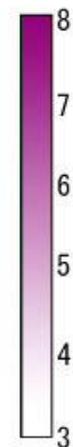
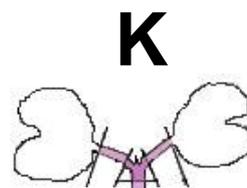
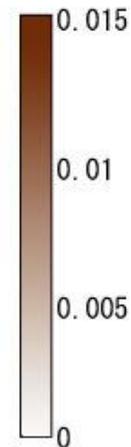
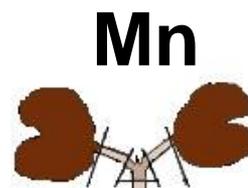
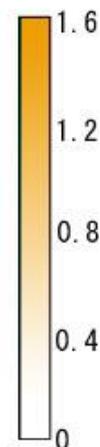
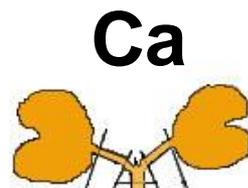
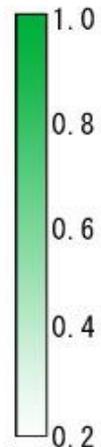
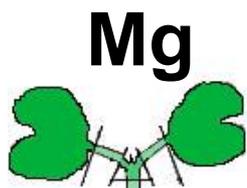
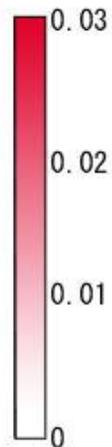
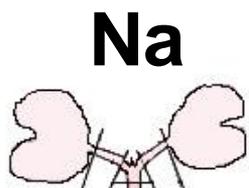
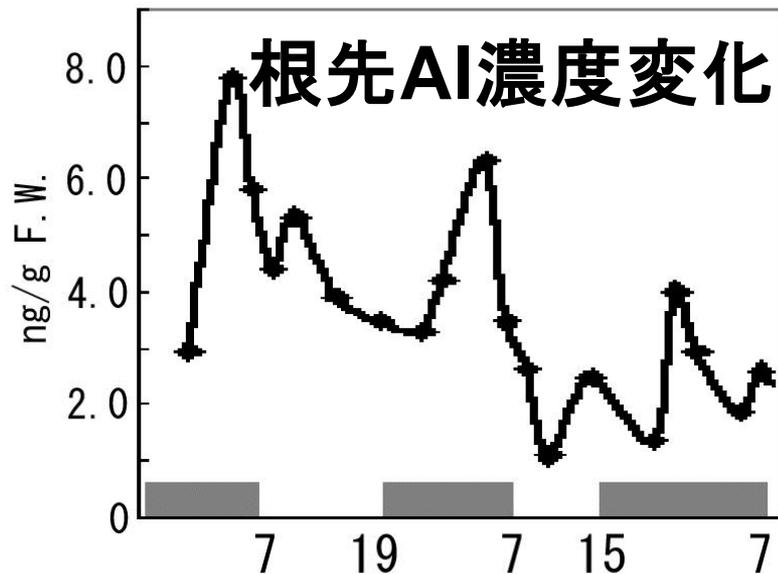
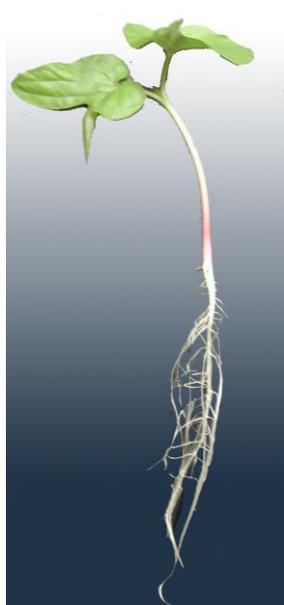
# 中性子利用分析の RoHS規制対象物質分析への有効性

RoHS: 電気電子機械に含まれる特定有害物質の使用制限に関する指令  
2006年7月より輸出が規制(特定有害物質を規定濃度以上含有する電子機器等)

規制対象	蛍光X線分析 非破壊分析	ICP/MS 破壊分析	放射化分析/ 即発 $\gamma$ 線分析 非破壊分析
<b>Pb, Hg, Cd</b> <b>Cr</b> (六価クロム) <b>Br</b> (有機臭素添加物)	○ 定量は困難 スクリーニング 分析として有用	○ 定量が可能 部品の 溶解が必要	◎ 定量が可能 Pbのみ測定不可 能

測定対象が電機電子機器であるので、非破壊分析である放射化分析・即発 $\gamma$ 線分析が有効

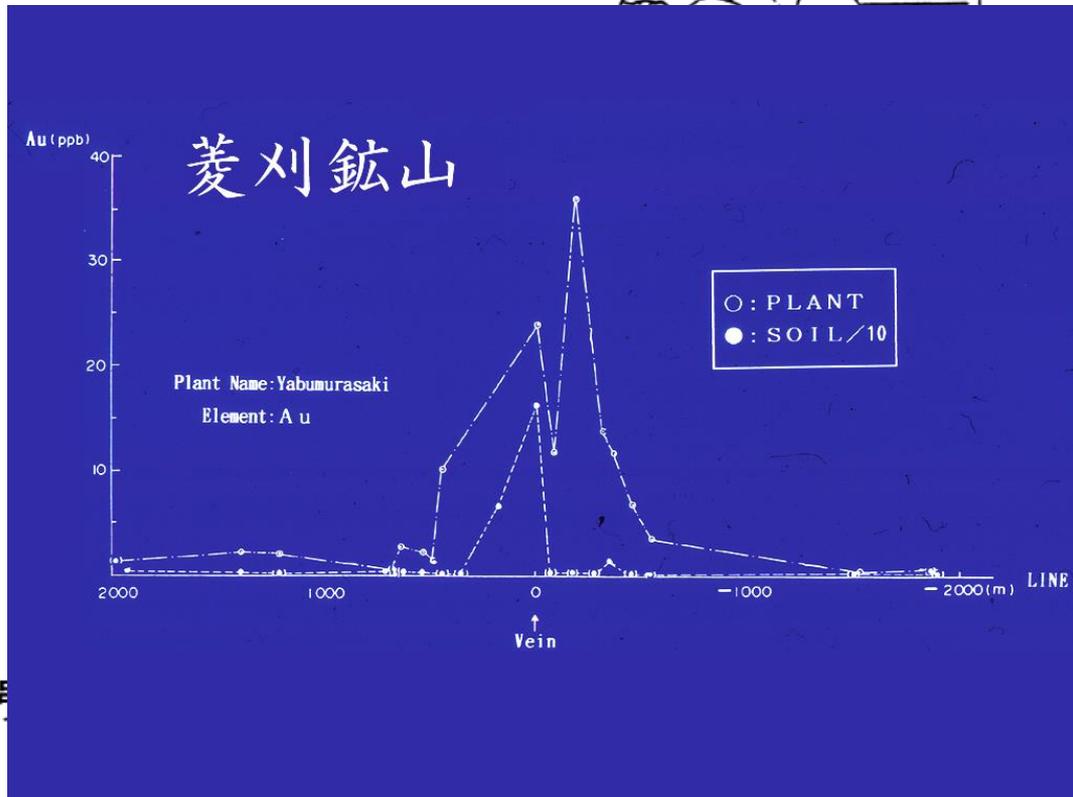
# アサガオ幼植物中の元素分布



Average value from 55h to 67h. Color bars : mg/g fresh weight

# 植物による金脈探索

植物の特定元素濃縮之舞



植物地化学探査調査地域位置図

# 放射化分析

広い応用範囲

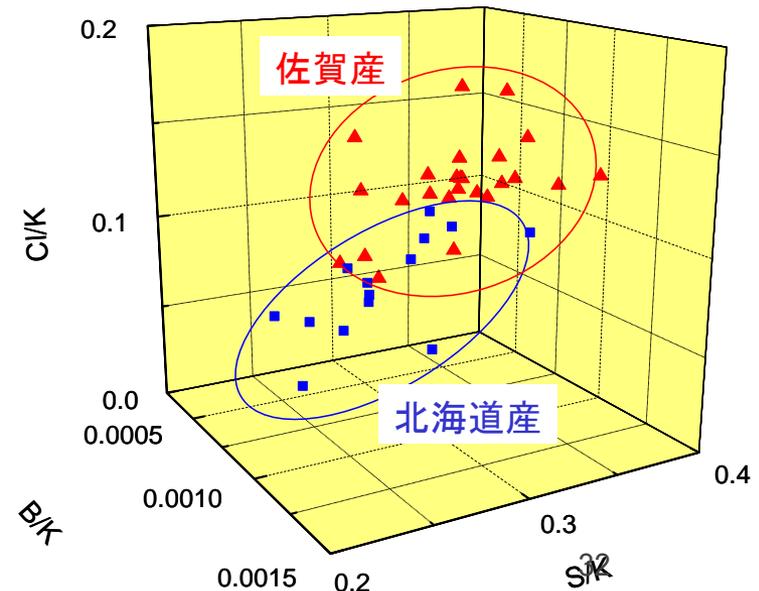
## 多元素同時測定が可能

- 非破壊分析: 絶対量を求める唯一の手段。  
例: 標準試料の分析値  
例: 鉱脈の探索(岩石の分析)
- 破壊分析  
放射化学的分離が必要。

環境試料分析の強力な手法

高い感度(特に重金属)

▪ 研究用原子炉使用



# 技術面からみた放射線とRIの利用

## ① 放射線(ビーム)の利用

分析技術: 高感度、絶対量の測定、**標準試料、産総研**  
多元素同時測定

可視化技術: 非破壊動画(ex.油、水etc.)

RI製造技術:

## ② 放射性同位元素(RI)の利用

トレーサー実験(物の動き)

⇔ 蛍光イメージング

可視化技術: 非破壊動画  
明条件下、画像の定量性

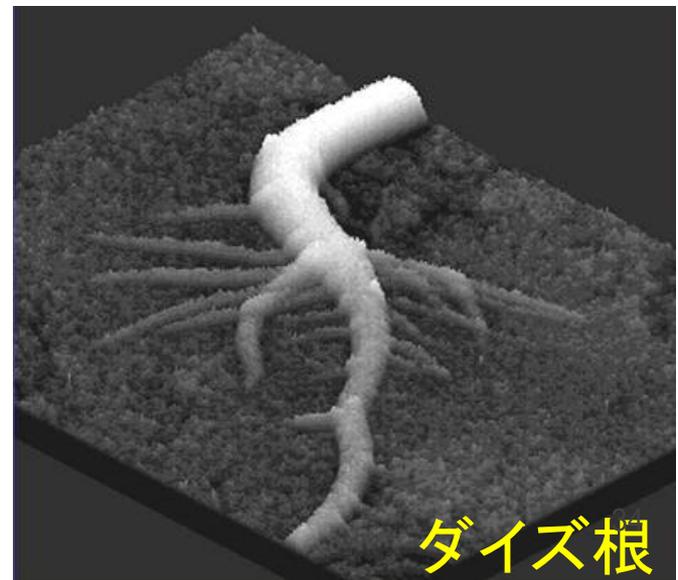
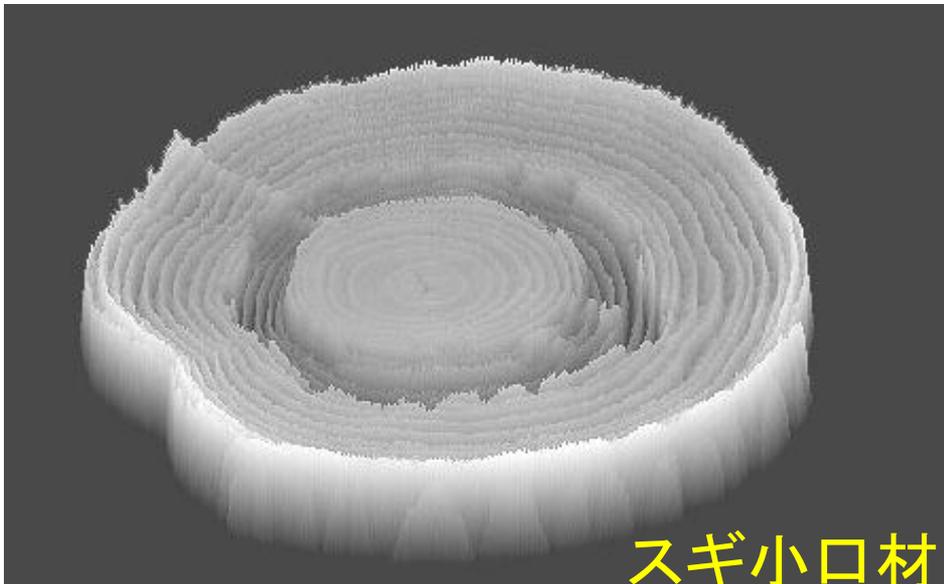
**ポイント**: 大型機器だけでなく、身近で利用

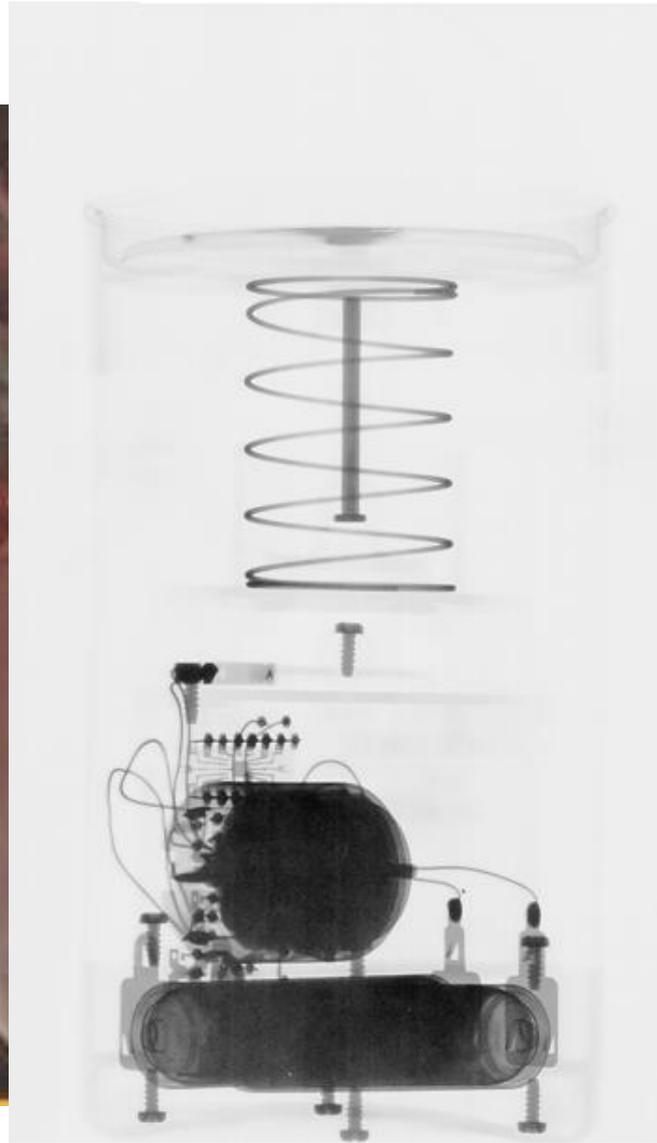
# 可視化技術

①明条件下、②定量性、③ミクロからマクロ、④動画が可能  
近年、蛍光イメージングが急激に発展←放射線の優位性

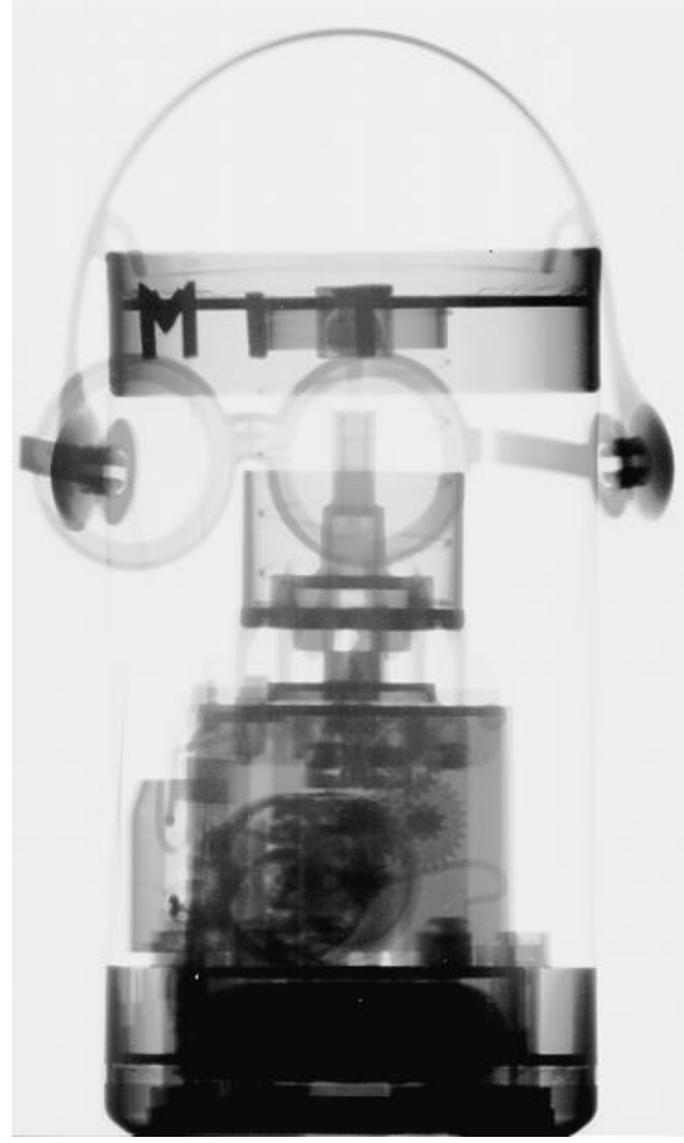
中性子線：水分像、燃料電池(DOEは前から実施)、  
飛行機、パーツ、古文化財、麻薬検査？ 原子炉、加速器

【植物中の水の分布】





X線

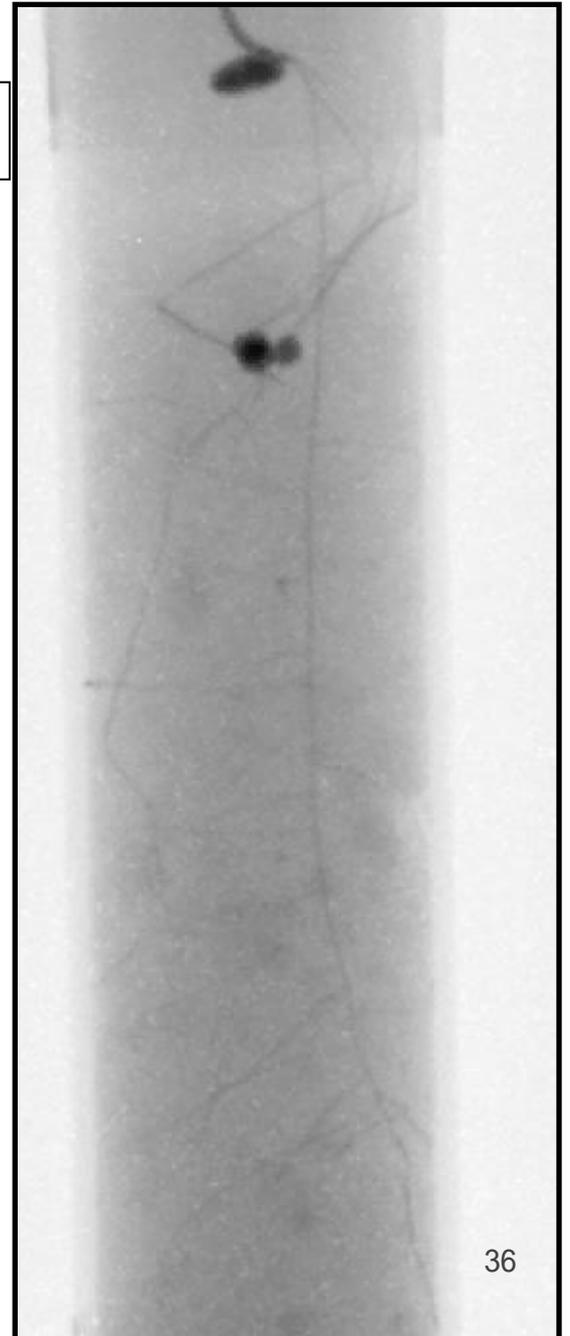


中性子線

ダイズ



コムギ



# 水中の化合物の動き

イネの根のグルタミン吸収 ( $^{14}\text{C}$ -Gln)

(83h→12s)



high

low

# 技術面からみた放射線とRIの利用

## ① 放射線(ビーム)の利用

分析技術: 高感度、絶対量の測定、**標準試料、産総研**  
多元素同時測定

可視化技術: 非破壊動画(ex.油、水etc.)

RI製造技術:

## ② 放射性同位元素(RI)の利用

トレーサー実験(物の動き)

⇔ 蛍光イメージング

可視化技術: 非破壊動画  
明条件下、画像の定量性

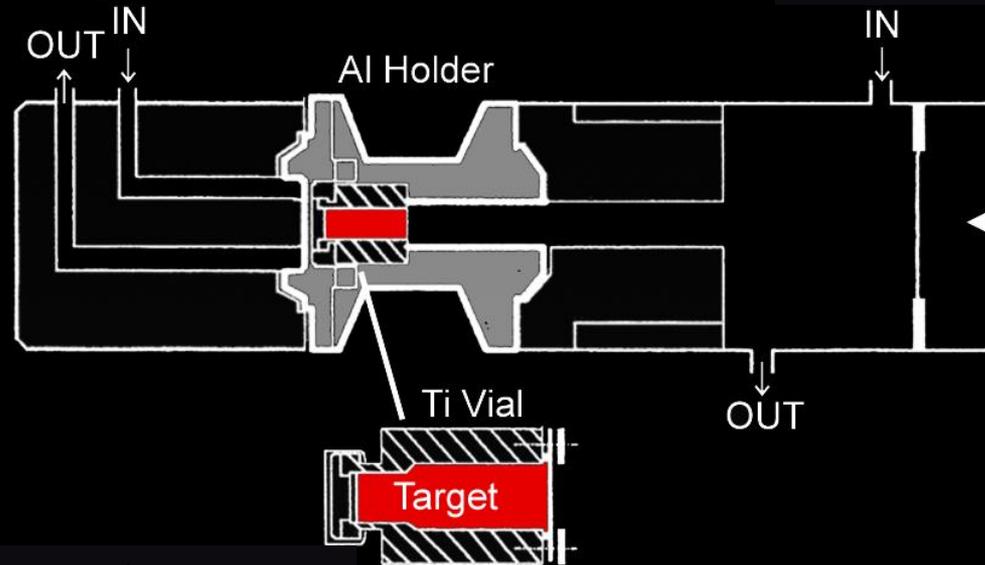
**ポイント**: 大型機器だけでなく、身近で利用

# フッ素-18水の製造 (半減期: 110m)

6g 氷

冷却水

He ガス



He ビーム

AlホルダーとTiバイアル



Tiバイアル



# Al フォイルを $\alpha$ 線で照射し $^{28}\text{Mg}$ を製造



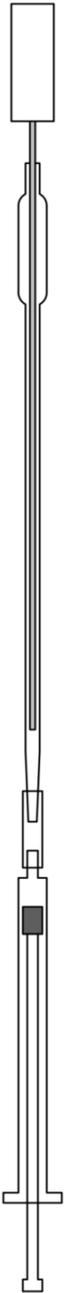
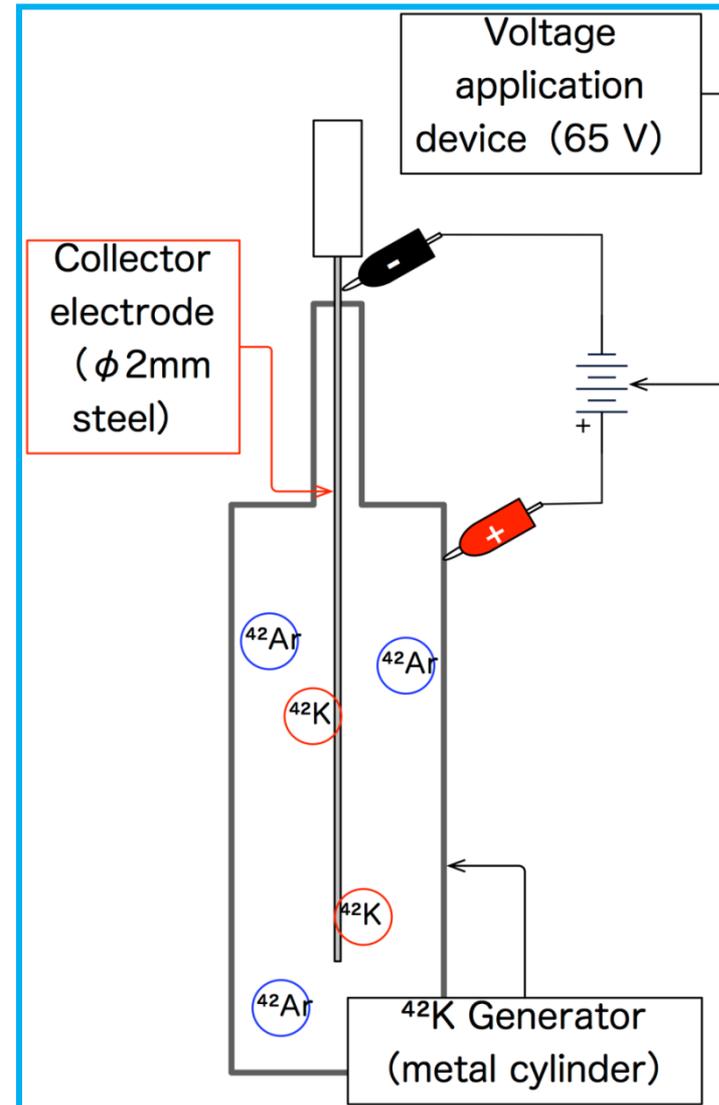
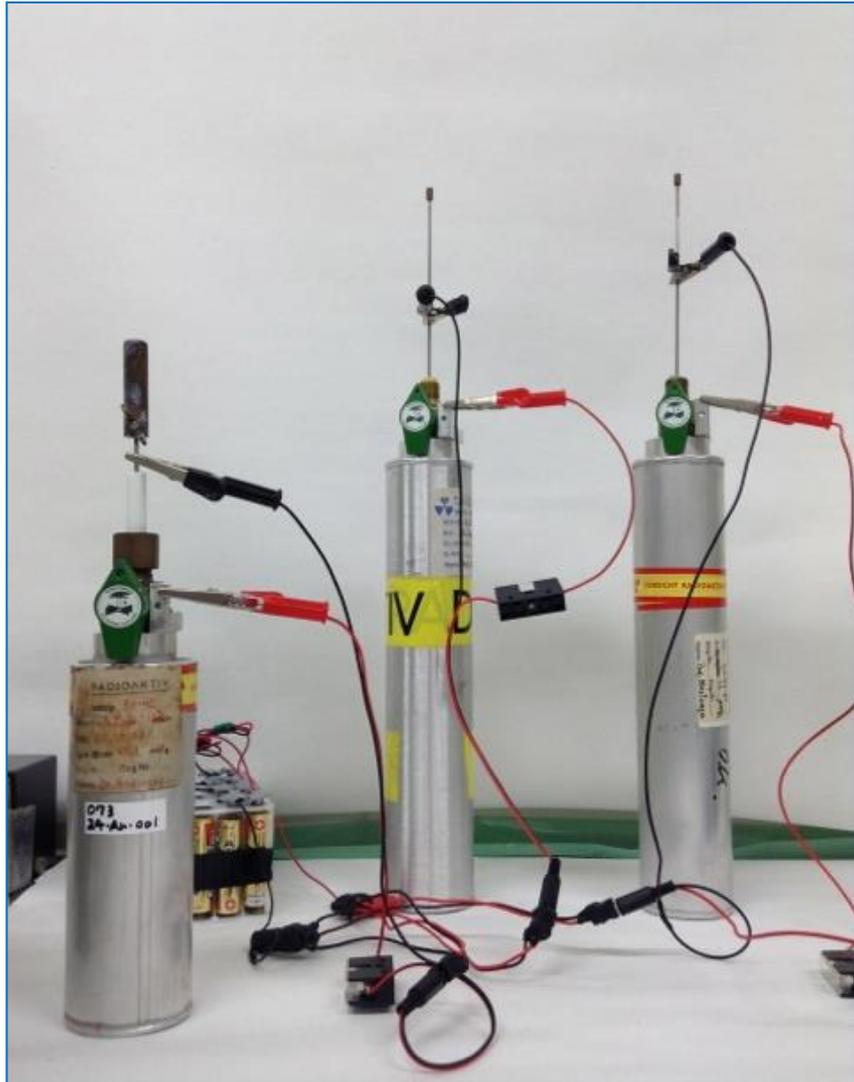
Al フォイル中に生成された  $^{28}\text{Mg}$  の精製  
マクロの Al フォイル中に生成された  $^{28}\text{Mg}$  が生成

化学分離

3M HCl 液に溶解  $\Rightarrow$  乾固させ 2M  $\text{NH}_4\text{SCN}$  液に溶解  $\Rightarrow$  Sep-Pak Plus tC18 カラムを通す ( $^7\text{Be}$  の除去)  $\Rightarrow$  AG50W-X4 カラム シュウ酸を通す ( $^{24}\text{Na}$  と  $^{28}\text{Al}$  の除去)  $\Rightarrow$  0.01M HCl 液を通し シュウ酸を除去  $\Rightarrow$  2N HCl 液で  $^{28}\text{Mg}$  を分離  $\Rightarrow$  HCl の除去

# $^{42}\text{K}$ (半減期: 12h) ジェネレータ

( $^{42}\text{Ar}$  ガスからのミルクキング)



# 技術面からみた放射線とRIの利用

## ① 放射線(ビーム)の利用

分析技術: 高感度、絶対量の測定、**標準試料、産総研**  
多元素同時測定

可視化技術: 非破壊動画(ex.油、水etc.)

RI製造技術:

## ② 放射性同位元素(RI)の利用

トレーサー実験(物の動き)

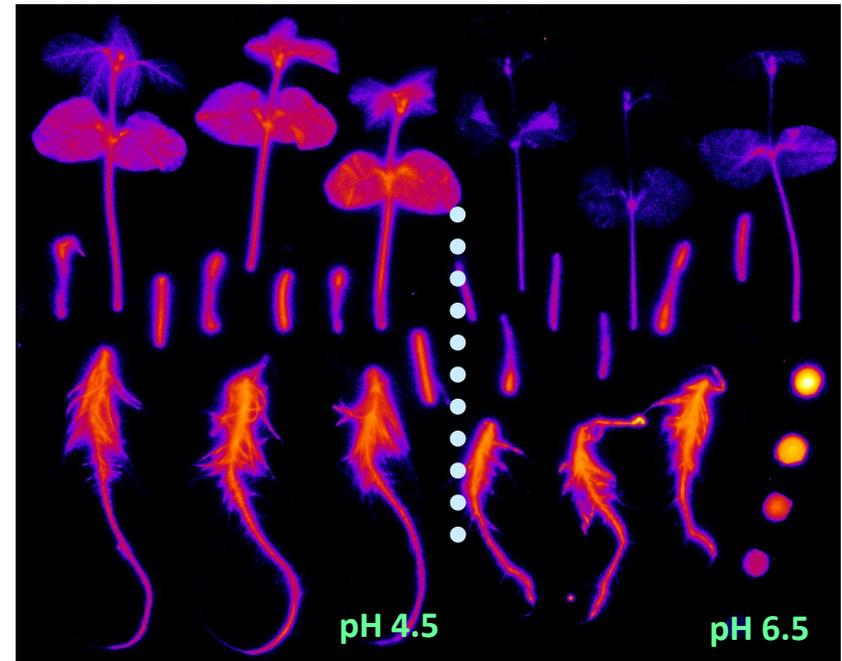
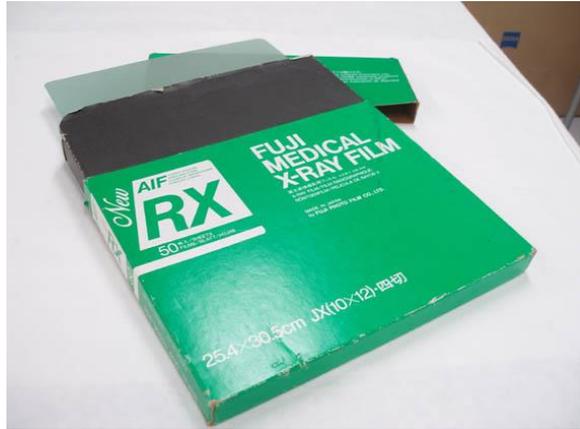
⇔ 蛍光イメージング

可視化技術: 非破壊動画  
明条件下、画像の定量性

**ポイント**: 大型機器だけでなく、身近で利用

# 従来のイメージング技術 ラジオグラフィー(コンタクト法)

## 1. X線フィルムを用いた方法



## 2. Imaging Plate (IP)を用いた方法



Slow uptake

$^{28}\text{Mg}$



$^{45}\text{Ca}$



low

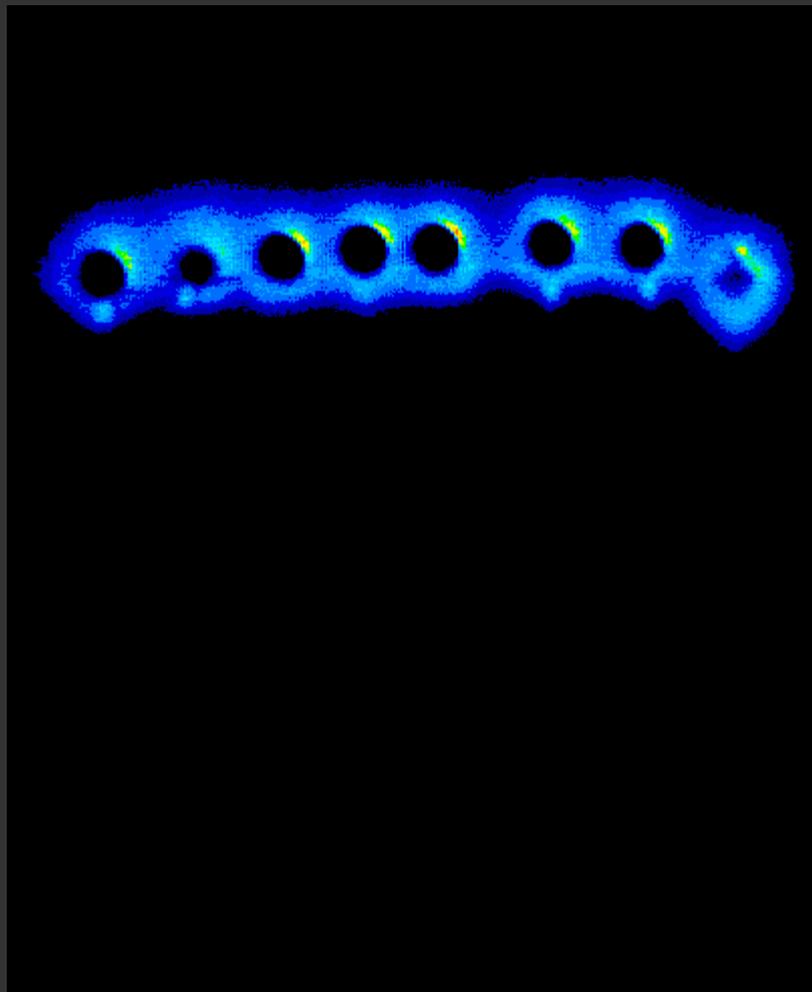
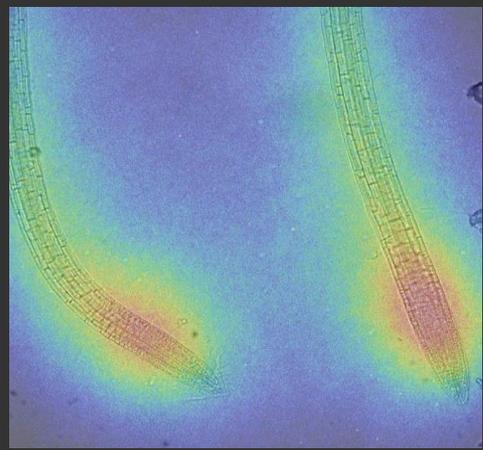
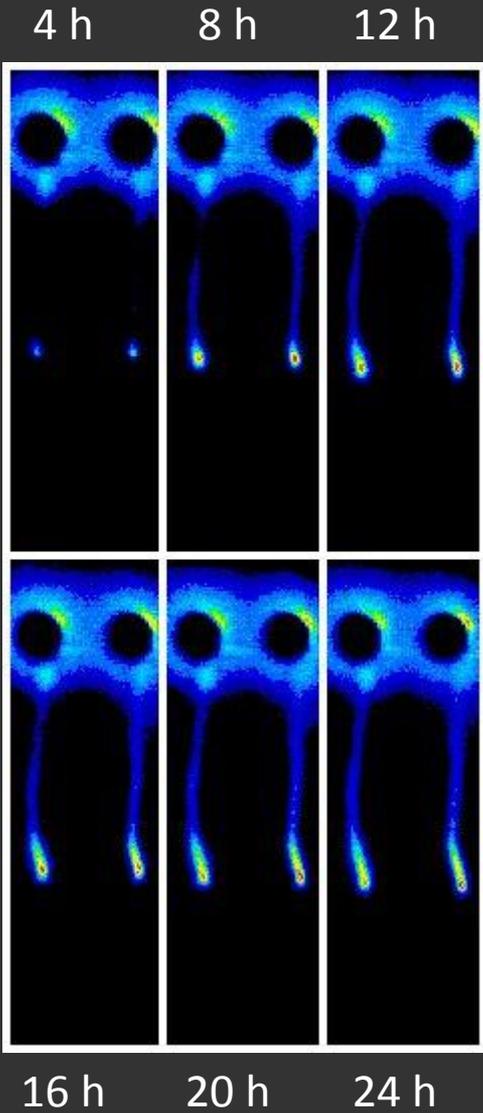
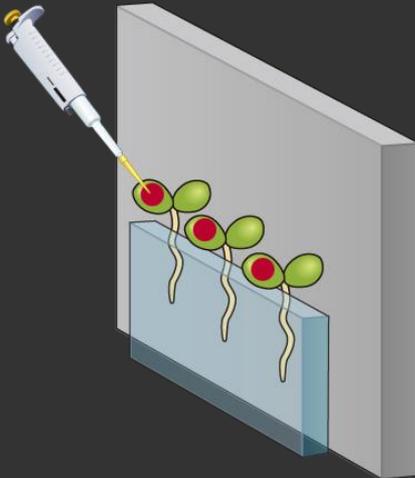
high



0

44 24 h

# $^{32}\text{P}$ (5 kBq/plant)



0 h  24 h

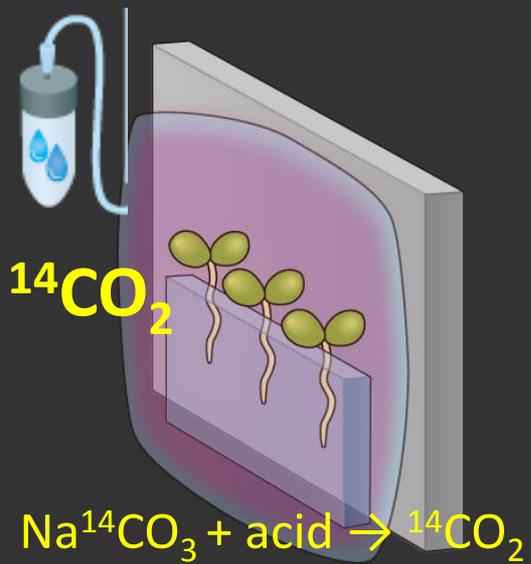
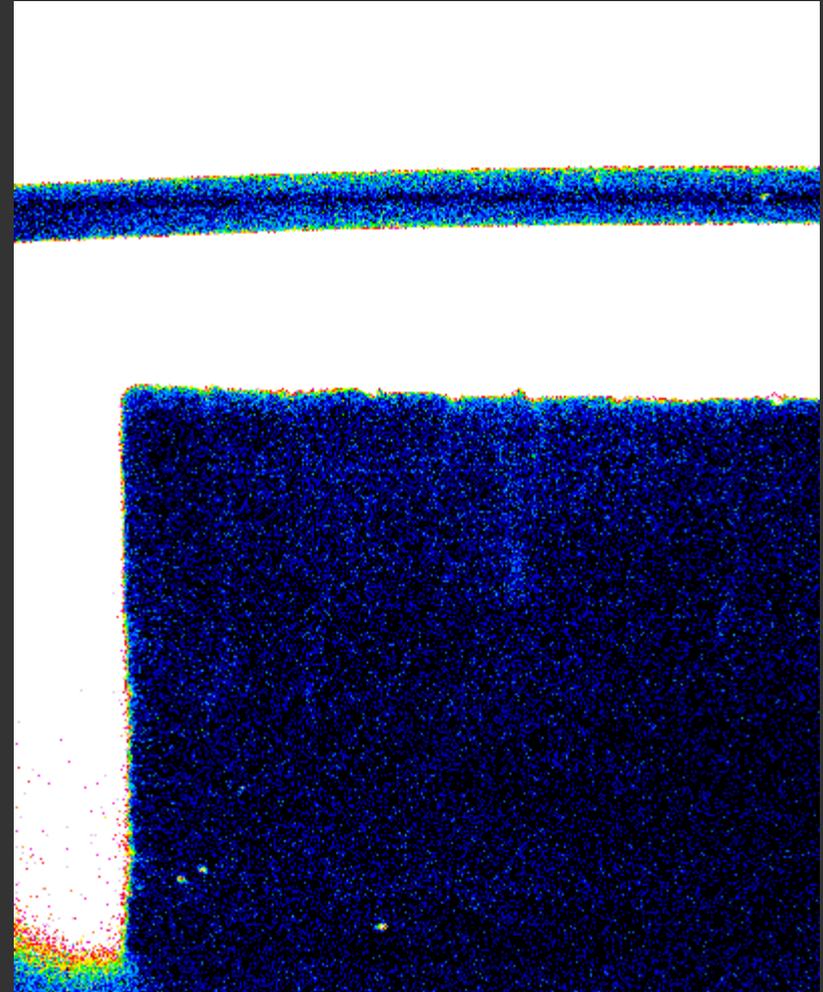
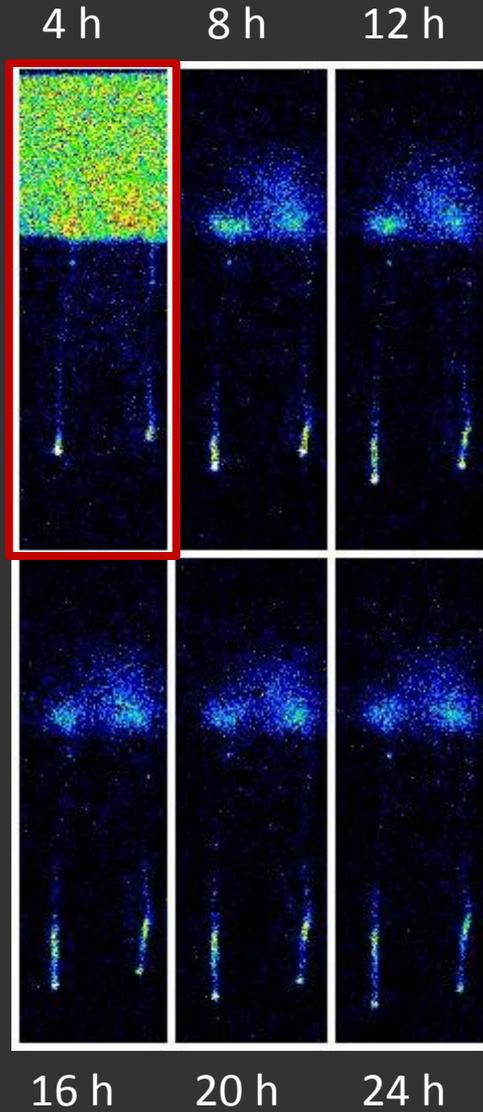
# macro-RRIS

$^{14}\text{CO}_2$   
5 MBq/total

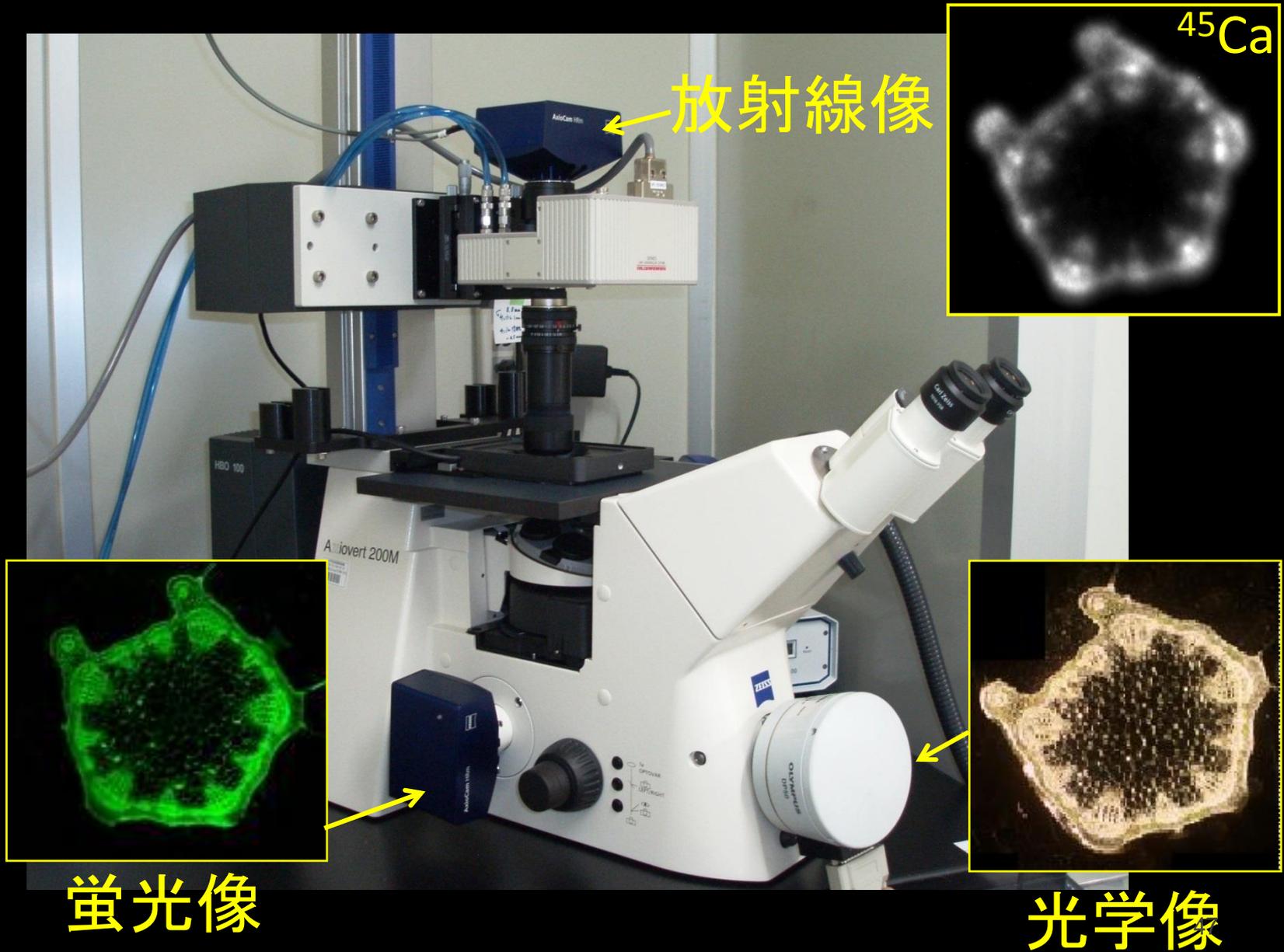
1 picture:  
exposure time: 15 m  
LED light: 45 m

total: 24 h (24 pictures)

$^{14}\text{CO}_2$



# マイクロ RI イメージングシステム



# 技術面からみた放射線とRIの利用

## ① 放射線(ビーム)の利用

分析技術: 高感度、絶対量の測定、**標準試料、産総研**  
多元素同時測定

可視化技術: 非破壊動画(ex.油、水etc.)

RI製造技術:

## ② 放射性同位元素(RI)の利用

トレーサー実験(物の動き)

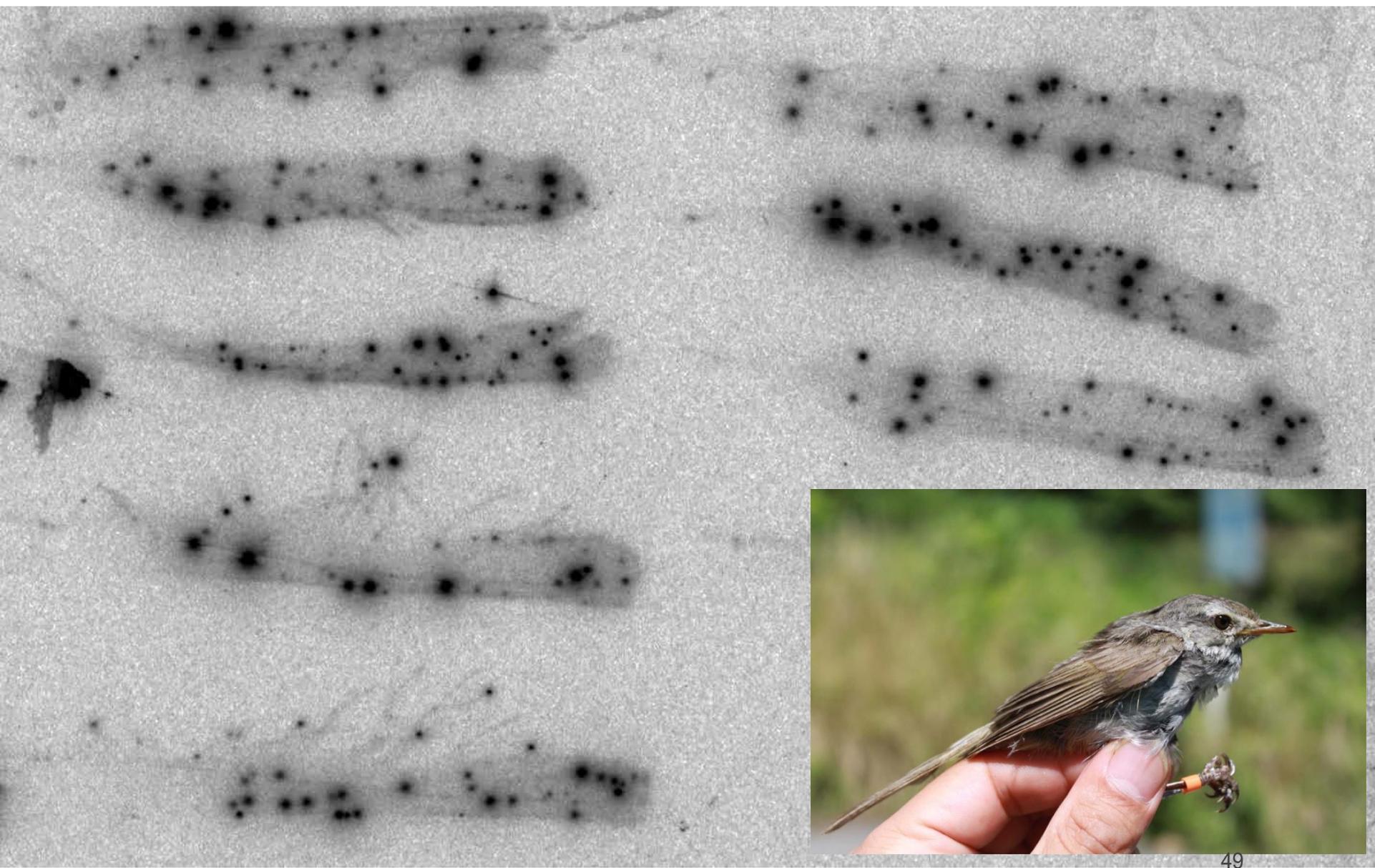
⇔ 蛍光イメージング

可視化技術: 非破壊動画  
明条件下、画像の定量性

福島放射能汚染

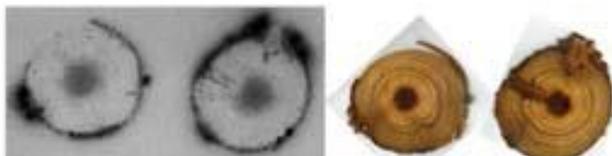
ポイント: 大型機器だけでなく、身近で利用

ウグイスの羽根(*Cettia diphone*) By Prof. Ken Ishida

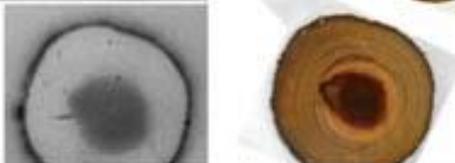


Height

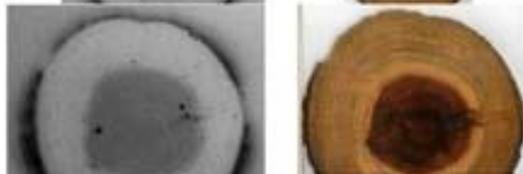
19 m



16 m



13 m



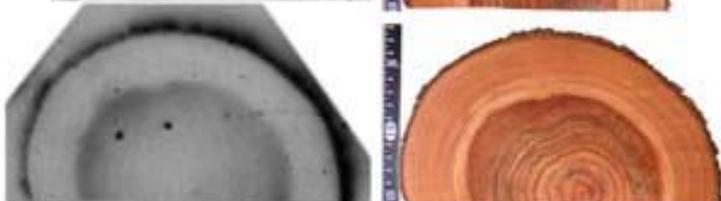
10 m



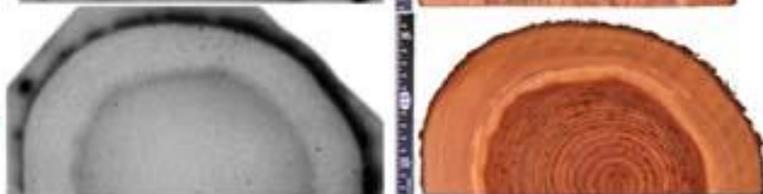
7 m



4 m



1.3 m



radiograph

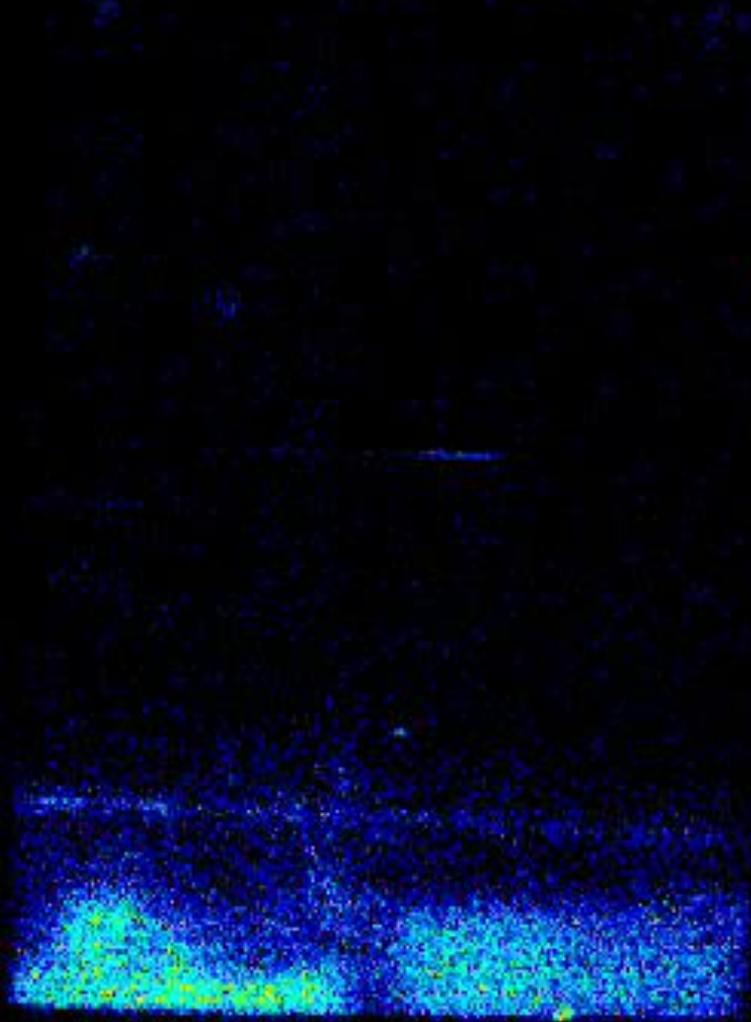
picture





水耕

土耕



水耕

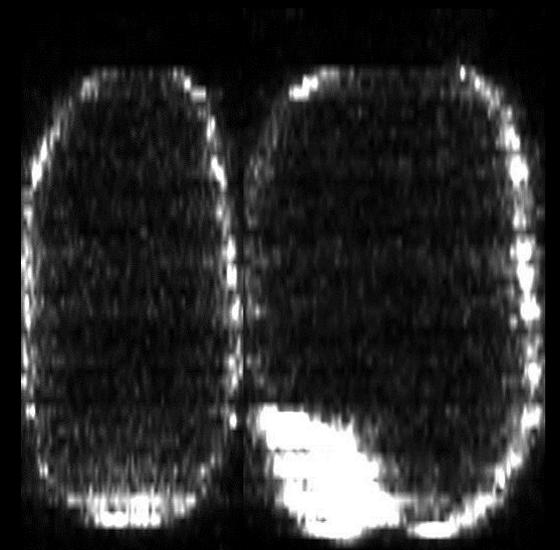
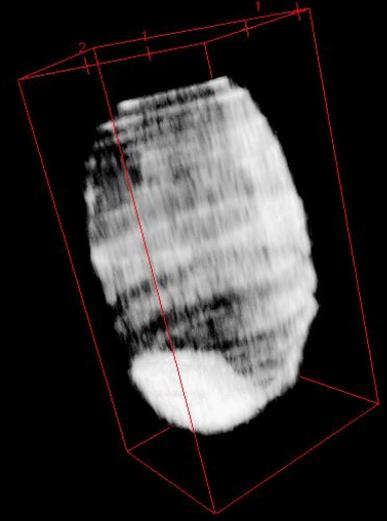
土耕

# 玄米中の $^{137}\text{Cs}$ 分布

イメージングプレート



開花後3, 5, 7, 9, 12, 15 日



$^{137}\text{Cs}$ 分布の3Dイメージ

# 技術面からみた放射線とRIの利用

## ① 放射線(ビーム)の利用

分析技術: 高感度、絶対量の測定、**標準試料、産総研**  
多元素同時測定

イノベーションのための  
「重要な科学技術のツール」  
であることを認識する必要がある。

トレーサー実験(物の動き)

⇔ 蛍光イメージング

可視化技術: 非破壊動画  
明条件下、画像の定量性

ポイント: 大型機器だけでなく、身近で利用



おわり