

# 量子ビーム科学・放射線利用の過去・現在・未来

平成29年1月31日  
(一財)放射線利用振興協会  
岡田 漱平

記述内容は、主に既発表の文献：

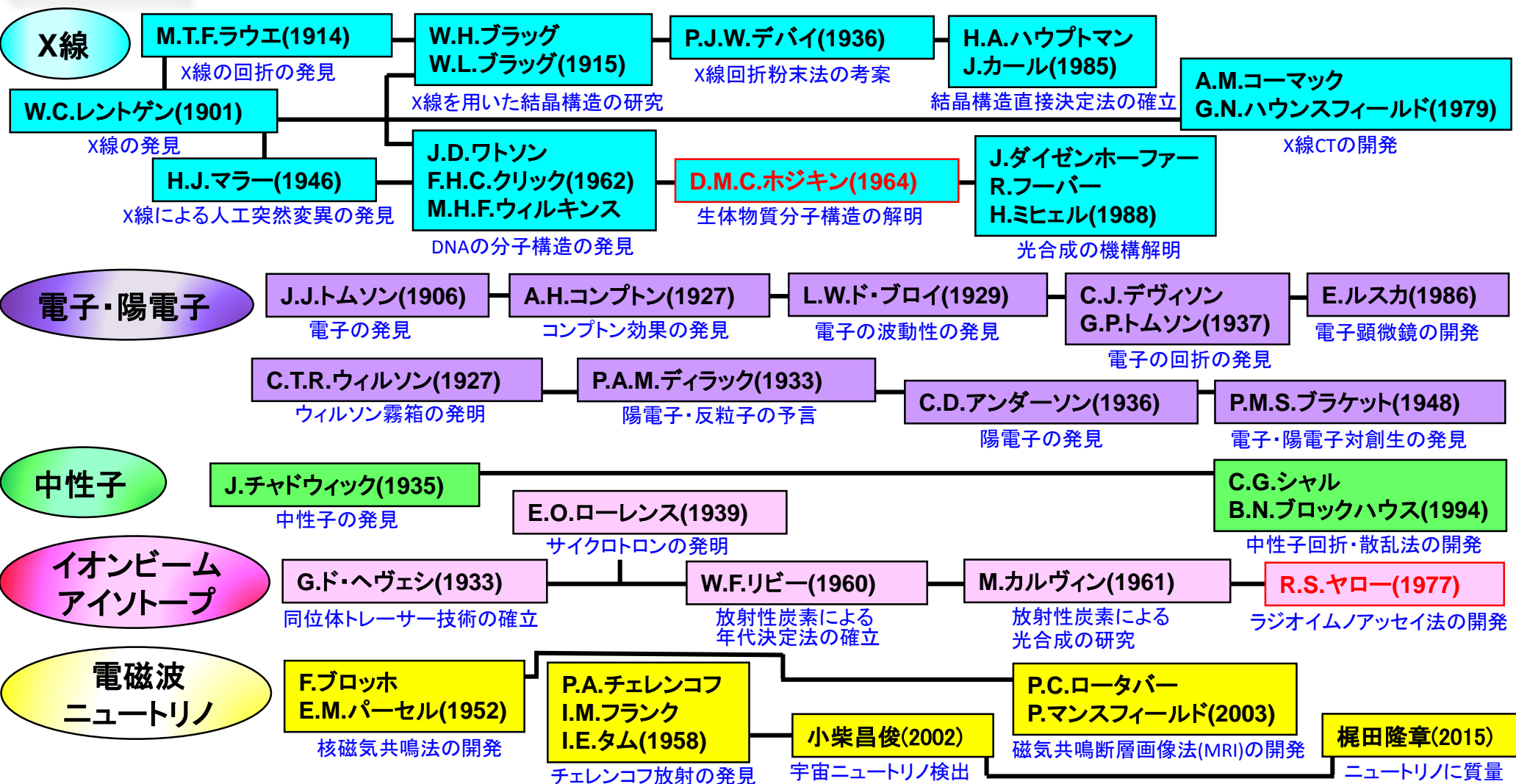
- 1) 岡田漱平、「ノーベル賞から見たQuBSの歴史～次のノーベル賞は？」、ANNUAL REPORT QuBS 2015 特別号「寄稿集」、pp.4-7 (2015)
  - 2) 岡田漱平、「産業利用の視点から見た陽電子ビーム」、放射線と産業、No.137、pp.37-40 (2014)
  - 3) 岡田漱平他(対談集)、『原子力の利用—エネルギーと放射線—専門家に聞く現状・課題・方向』(第5章「放射線の産業利用と先端科学」)、原子力システム研究懇話会、79頁～110頁(174頁)、(2011年9月30日)
  - 4) 岡田漱平、「量子ビームテクノロジー研究開発の概要とJ-PARC計画」、エネルギー・資源、Vol.30 No.5、pp.6-12 (2009)
  - 5) 岡田漱平、「量子ビーム計測の原理と最近の成果」、原子力技術教育(基礎講座)「最新計測技術の特別講演」、原子力機構 (2007)
  - 6) 岡田漱平、「量子たちの覚醒 ー量子ビームテクノロジーの基礎と最近の動き」、原子力eye、Vol.52 No.8、pp.2-7 (2006)
  - 7) 岡田漱平(共著)、『量子ビームテクノロジー革命』(第VI部「量子ビーム研究への招待」・第15章「量子ビームプラットフォームによる社会への貢献を目指して」)、シュプリンガー・ジャパン、215頁～231頁(250頁)、(2006年12月20日)
- 及び関連する講演資料に準拠していますので、古い情報が含まれています。

以上に加えて、(国立研究開発法人)量子科学技術研究開発機構からご提供いただいた情報には♥印を付けてあります。

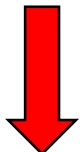
# I. 昔からイノベーションの有力な道具だった量子ビーム・放射線



	イオン
	中性子
	陽子
	ミューオン
	電子
	陽電子
	γ線
	放射光(X線)
	レーザー
	特性X線



- 医療(診断):レントゲン検査、X線CT(断層撮影)、PET(陽電子放射断層撮影)、MRI(磁気共鳴断層撮影)  
 ○医療(治療):X線治療、コバルト療法、アイソトープ治療、重粒子線治療  
 ○創薬 ○品種改良 ○先端材料開発(半導体、金属、高分子...)  
 ○基礎科学:物質科学、生命科学、宇宙科学、素粒子科学、環境科学、考古学...



はてなちゃん

わあ、偉い人たちがいっぱい！  
女性研究者もいるわ。

Copyright@Sohei Okada. All rights reserved.

放射線は科学の発展を通して、人々のくらしの  
すみずみにまで役立っているんだよ。

ラダはかせ<sup>3</sup>

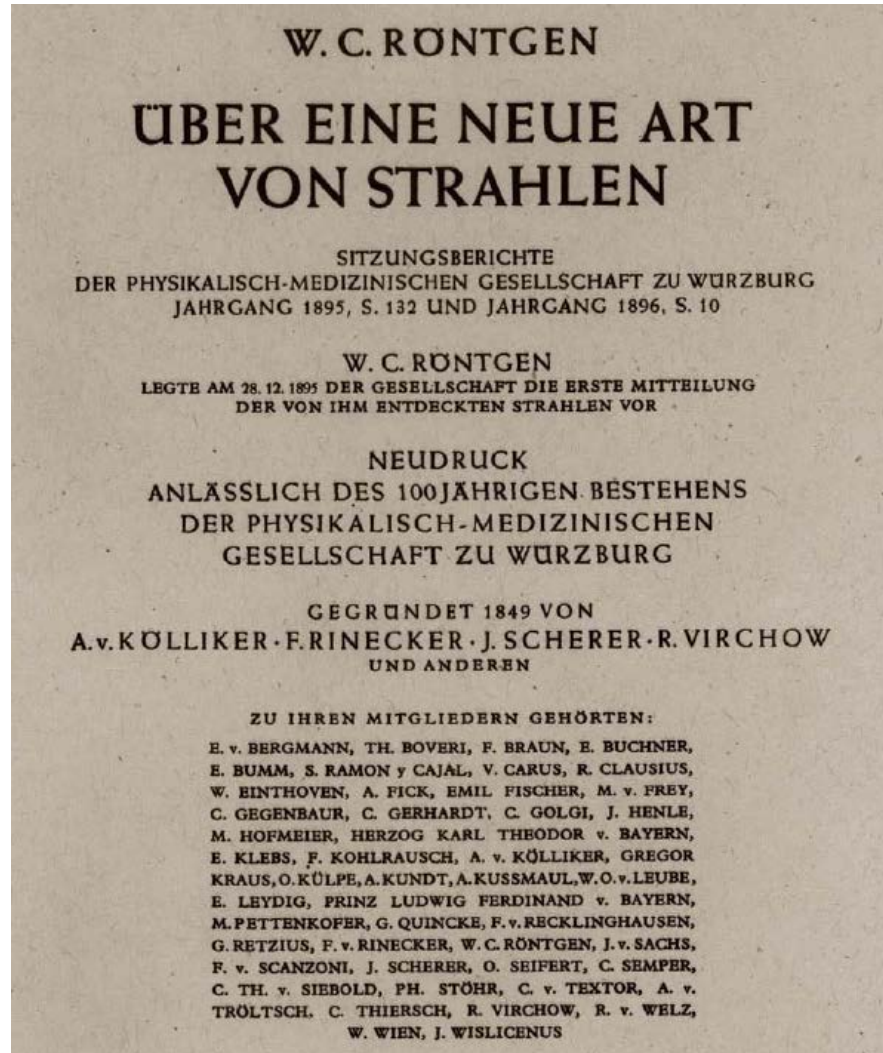
# 最初のノーベル物理学賞は放射線・量子ビーム分野から

X線

W.C.レントゲン(1901)

X線の発見

○X線を発見したレントゲンの受賞は1901年。  
○これはノーベル賞が創設された年。



# 量子はなぜテクノロジーの開拓に「使える」のか？

○量子は二重性(粒子性と波動性)を持つ。



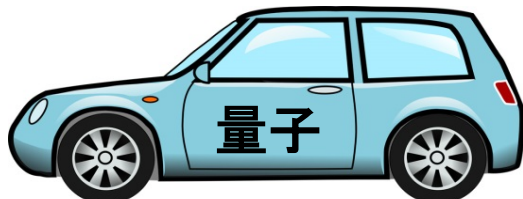
粒子としてふるまうこともあり



波としてふるまうこともある

○光に波長があるように、粒子にも波長がある(物質波という)。

○量子を自動車に、物質の構造を路面にたとえてみる。



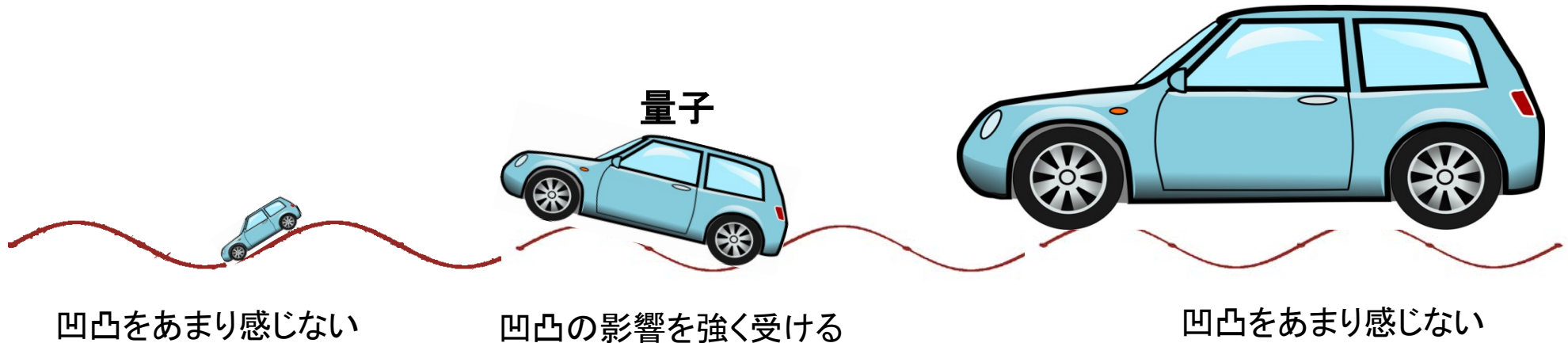
←  $\lambda$ (波長) →

粒子の場合は $\lambda = h / mv$   
( $h$ : プランク定数、 $m$ : 粒子の質量、 $v$ : 粒子の速さ)



物質の構造

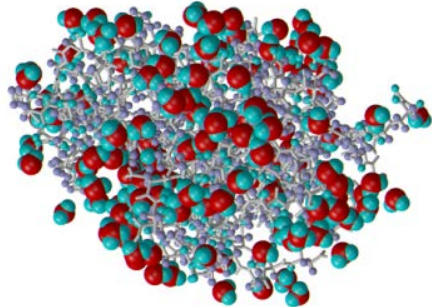
# 量子はなぜテクノロジーの開拓に「使える」のか？（続き）



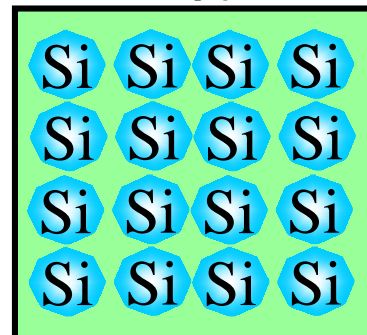
○自動車は自分の身の丈と同程度の路面の凹凸に大きく影響される。  
⇒量子は自分の波長と同オーダーの大きさを持った構造に敏感。

○原子や分子が形作る構造は、ちょうど量子の波長と同オーダー。

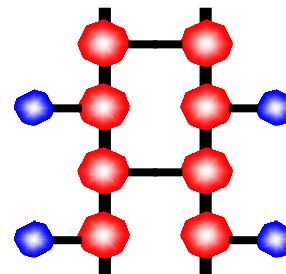
タンパク質



半導体



高分子



DNA



# 量子はなぜテクノロジーの開拓に「使える」のか？（続き）

## 量子ビームのはたらき

観る



原子・分子レベルで  
観察する

創る

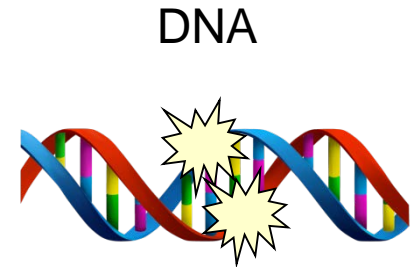
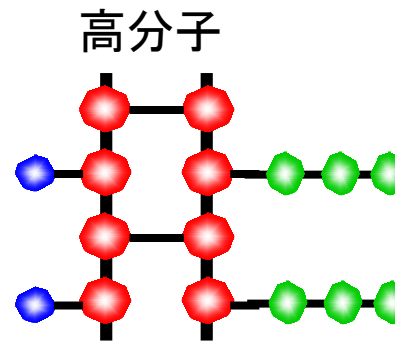
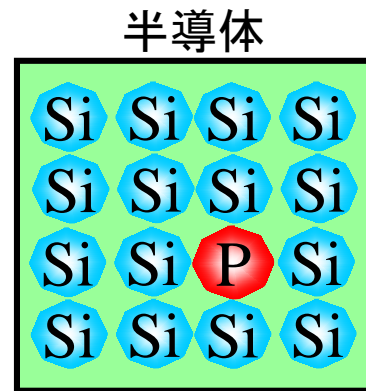
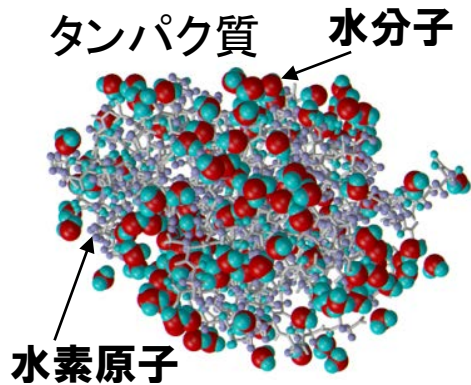


原子・分子レベルで  
加工する

治す



細胞レベルで  
治療する



（「観る」「創る」「治す」の原理については「付録」参照。）

# 量子の科学技術(私見)

## 知の探究

### <基礎科学>

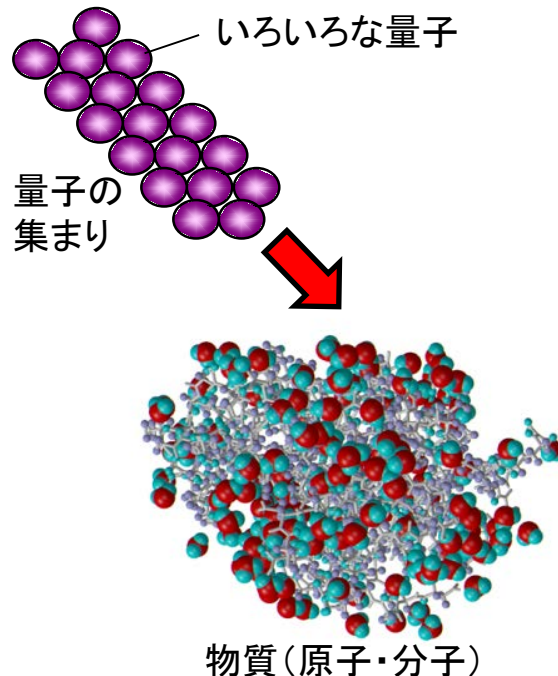
素粒子論・宇宙論  
など真理を探究する。



## テクノロジーの開拓

### <量子ビームテクノロジー>

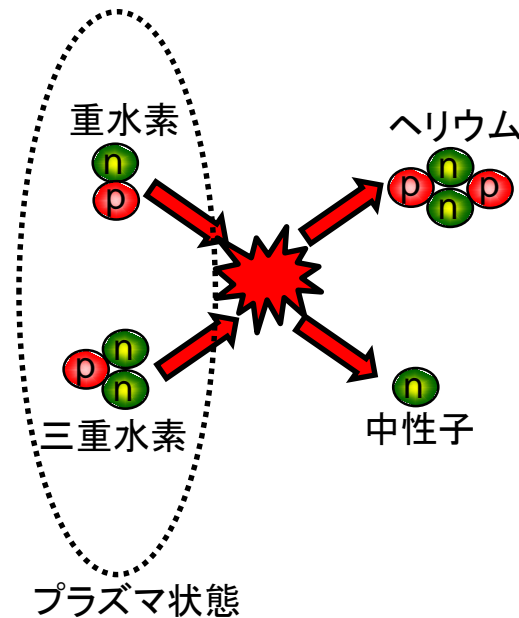
量子(電子や陽子などの粒子や電磁波である光量子)の集まりをビームとして扱い、物質の観察・ものづくり・病気の診断・治療などに使う。



## エネルギーの安定供給

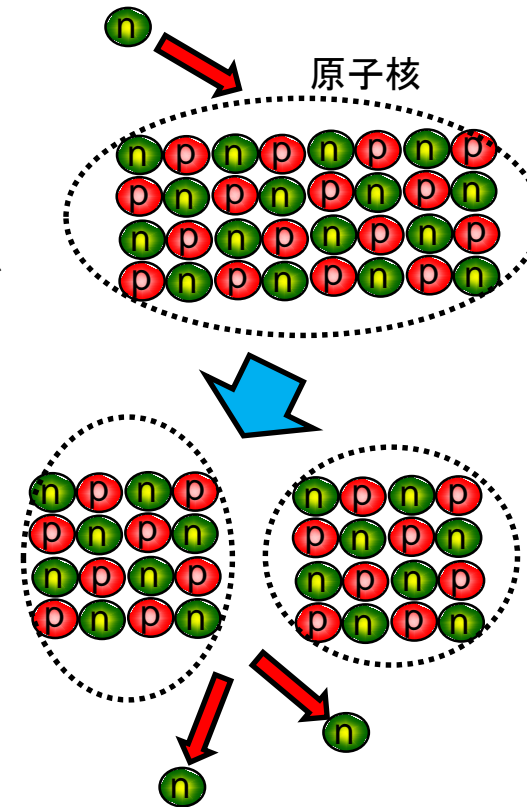
### <核融合炉>

量子(重水素と三重水素)の集まりをプラズマとして扱い、融合させてエネルギーを産み出す。



### <核分裂炉>

量子(中性子)を原子核にぶつけて分裂させ、エネルギーを産み出す。



# 量子と放射線(私見)

波長

10 pm

10nm

100 nm

10 μm

1 mm

1 km

量子

## 量子ビームテクノロジー

放射線



＜プラスの側面＞

asu(生命)をra(与える)  
命をはぐくむ太陽神

放射線利用

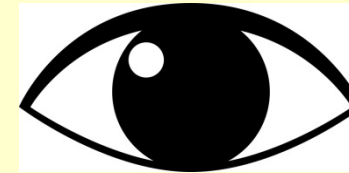
＜マイナスの側面＞

a(非)sura(天)  
熱さで大地を干上がらせる  
太陽神

放射線障害

(薬物と同じで扱い方によって毒にも薬にもなる)

紫外線・可視光・赤外線  
レーザー



高周波・電波



## Ⅱ. 実はかなり普及している放射線利用 —いのちと暮らしに密着し、さらにQOLの向上を目指す—



- イオン
- 中性子
- 陽子
- ミューオン
- 電子
- 陽電子
- $\gamma$ 線
- 放射光(X線)
- レーザー
- 特性X線

# 日本における放射線利用の経済規模

## 農業利用

2千8百億円

- ・害虫駆除、食品照射
- ・突然変異育種など



ジャガイモの発芽防止

## 医学医療利用

1兆5千億円

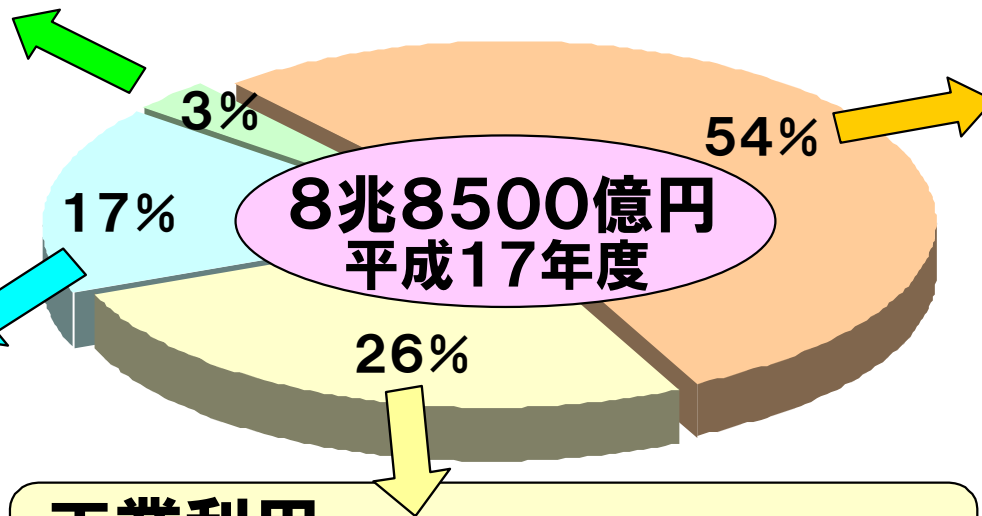
画像診断・治療: 5千億円  
乳がん検査: 2百億円  
PET検査: 82億円



CTスキャン断層撮影

## 放射線利用総額

4兆1117億円



## 工業利用

2兆3千億円

半導体: 1兆3千億円  
高分子: 1千億円  
設備: 4千6百億円  
滅菌: 1千7百億円  
計測・検査: 2千1百億円



タイヤ



半導体

## 原子力エネルギー 利用総額

4兆7410千億円

## 原子力発電



発電所



発電用タービン

平成17年度GDP  
: 503兆円

# その後実用化・商品化された「ものづくり」技術



高分子の橋かけ技術などを利用

γ線

電子



## ハイドロゲル創傷被覆材「ビューゲル®等」



## 超耐熱炭化ケイ素(SiC)繊維「ハイニカロン®」❤



## 放射線作用の理解を手助けする 学校教材用形状記憶性樹脂❤



# イオンビームの特性を活かした育種技術

無側枝性輪ギク  
新神2



NOx高吸収能化  
オオイタビ



新品種カーネーション♥



芳香シクラメンの新花色品種♥



新花色オステオスペルマム  
ヴィエント・フラミンゴ



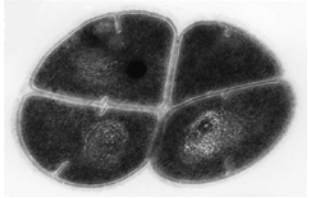
香りの高い  
吟醸酒酵母♥



イオン

放射線抵抗性細菌の遺伝子修復機構の解明研究  
を通して開発された遺伝子試薬

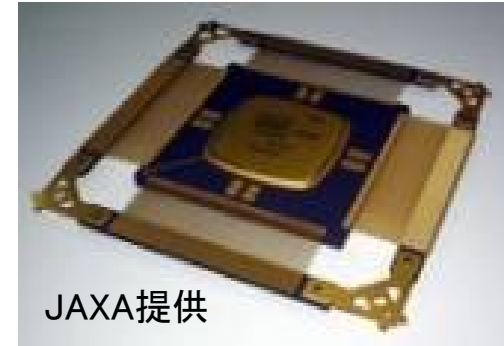
γ線



放射線抵抗性細菌



宇宙用マイクロプロセッサ開発  
(2012宇宙部品認定)♥

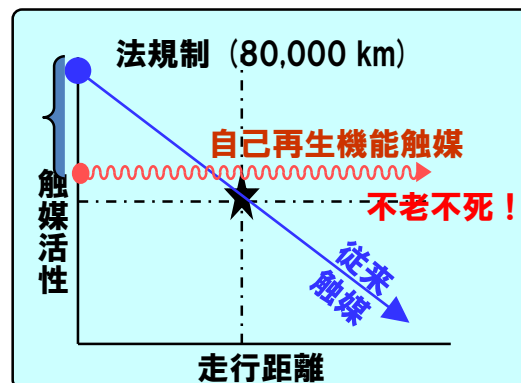


JAXA提供

イオン

半導体の放射線応答の解明研究を通して  
宇宙用マイクロプロセッサを開発

放射光による観察を通して自己再生を繰り返すスーパーインテリジェント触媒を開発

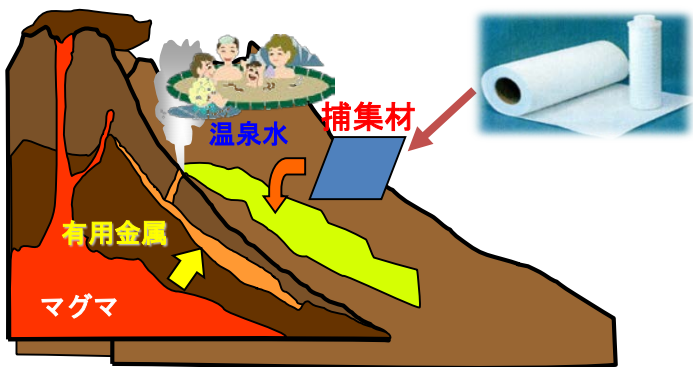
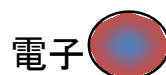


放射光(X線)

# 実用化を目指す「ものづくり」技術

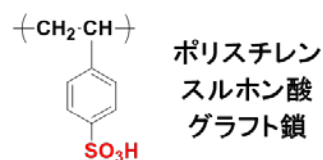
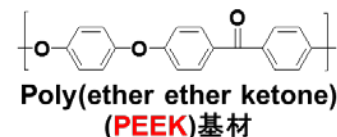


## 有用・有害金属捕集材の開発♥

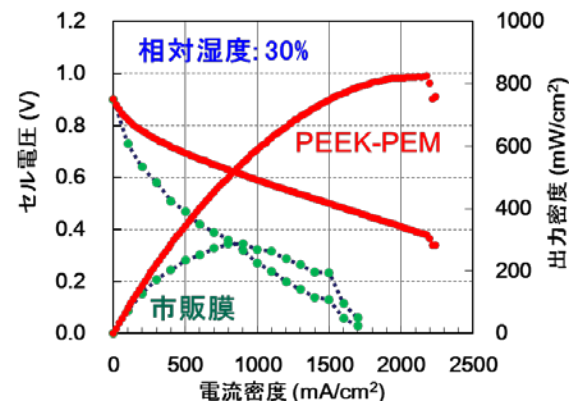


放射線グラフト重合法を用いて、温泉水や海水などから希少金属であるスカンジウム(Sc)、ジスプロシウム(Dy; 永久磁石に必須)等を捕集する材料を開発

## 燃料電池膜の開発♥

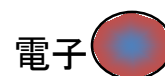


芳香族炭化水素(PEEK)電解質膜



最大出力密度: 824 mW/cm²

放射線グラフト重合法で作製した芳香族炭化水素(PEEK)電解質膜で、水素燃料プロトン型燃料電池膜として世界最高性能の出力密度を達成



## カーボンニュートラルなプラスチックの開発

植物由来のポリ乳酸の橋かけによる特性改善→地球温暖化の原因となっている二酸化炭素増加抑制



世界初の弾性ポリ乳酸(軟質塩ビの代替可能)

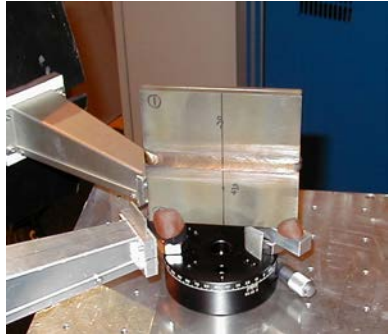
# 「観る」技術を駆使してQOLの向上を目指す



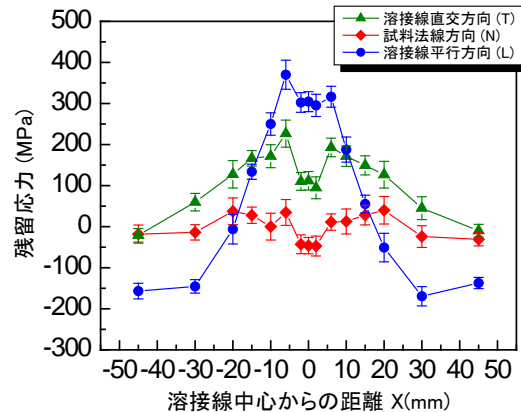
## 材料の健全性や物質の移行挙動を調べる

### 中性子回折で材料の残留応力分布を調べる

中性子



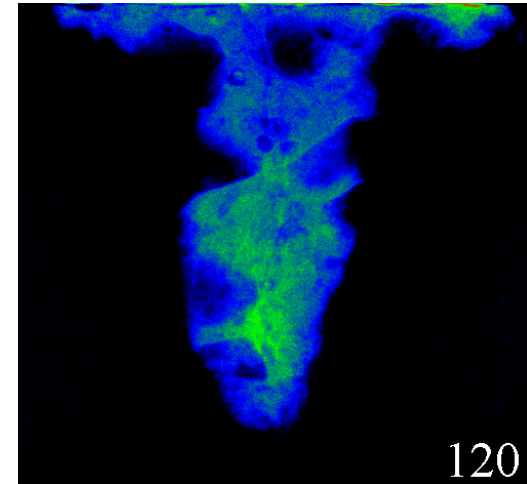
X開先突合せ溶接材



突合せ溶接材の残留応力分布

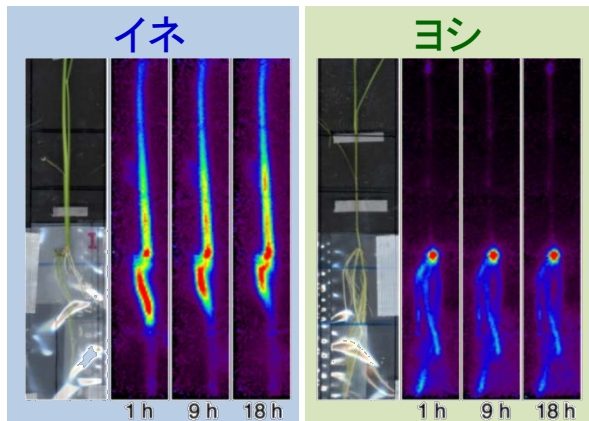
### 中性子ラジオグラフィーでコンクリート中の水分の移行挙動を調べる

中性子



### ポジトロンイメージングで植物中の物質の移行挙動を調べる♥

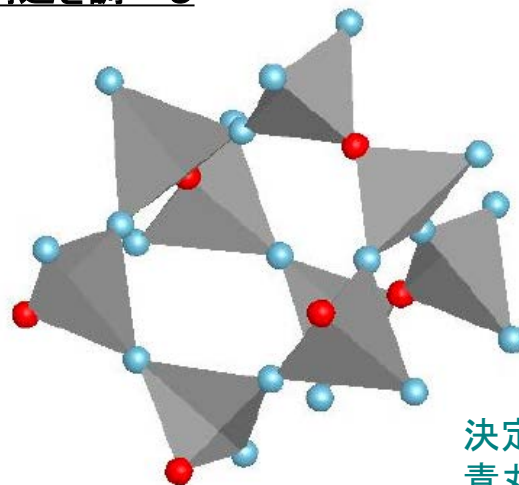
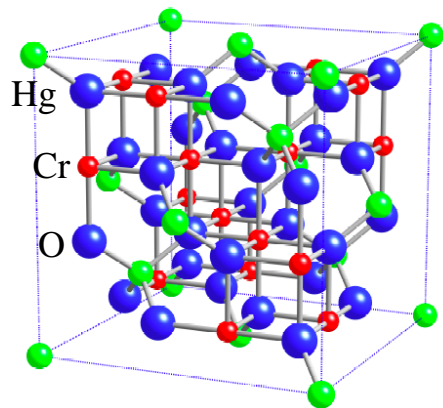
陽電子



ヨシの耐塩性機構を解明するため  
ナトリウムの移行挙動を調べた例♥

## 中性子による種々の分光法で物質の結晶構造やスピン構造を調べる

(例) 新規磁性材料 $\text{HgCr}_2\text{O}_4$ の結晶構造とスピン構造

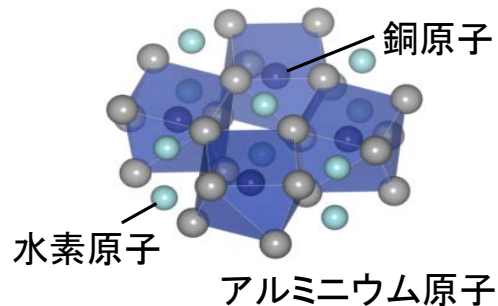


中性子

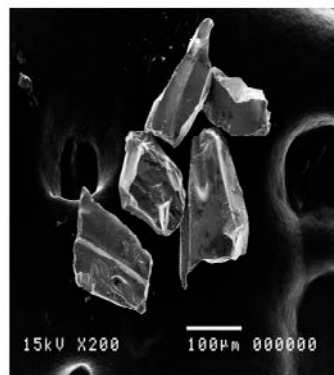
決定されたCrの結晶構造とスピン構造  
青丸が上向きスピン、赤丸が下向きスピン

## 放射光による種々の分光法で材料の機能発現メカニズムや物質創製プロセスを調べる♥

放射光(X線)



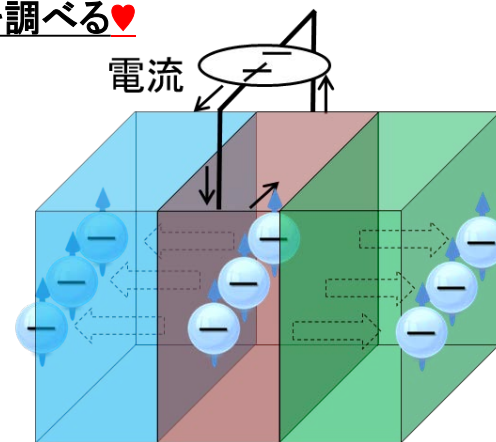
新規水素貯蔵材料の水素吸蔵メカニズム



高温・高圧技術を用いた窒化ガリウム(次世代省エネ材料として期待)単結晶の合成プロセス

## 偏極陽電子ビームを用いてスピントロニクス材料のスピン挙動を調べる♥

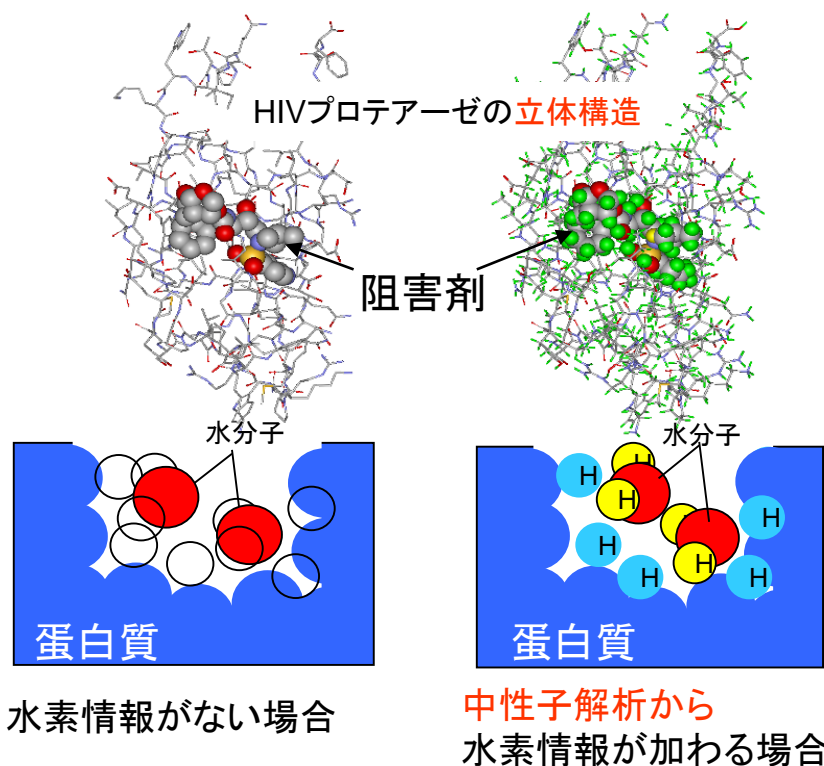
陽電子  
+



ビスマス 接合面 銀

(例) ビスマス(Bi)と銀(Ag)の接合体の電流印加接合部でスピンが配列するという説を実証

## 酵素を標的とした創薬開発の例

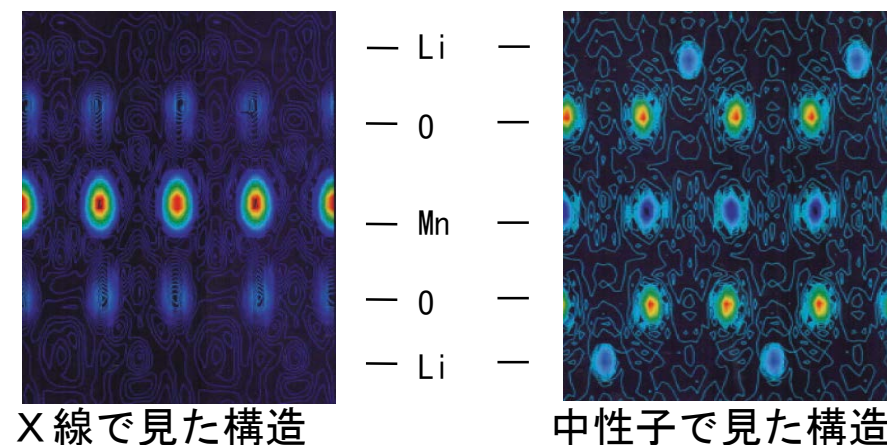


ポケットの表面にはたくさんの水素が存在する

創薬には中性子を用いて水素位置を決定することが重要

## 軽元素探索による新材料開発の例

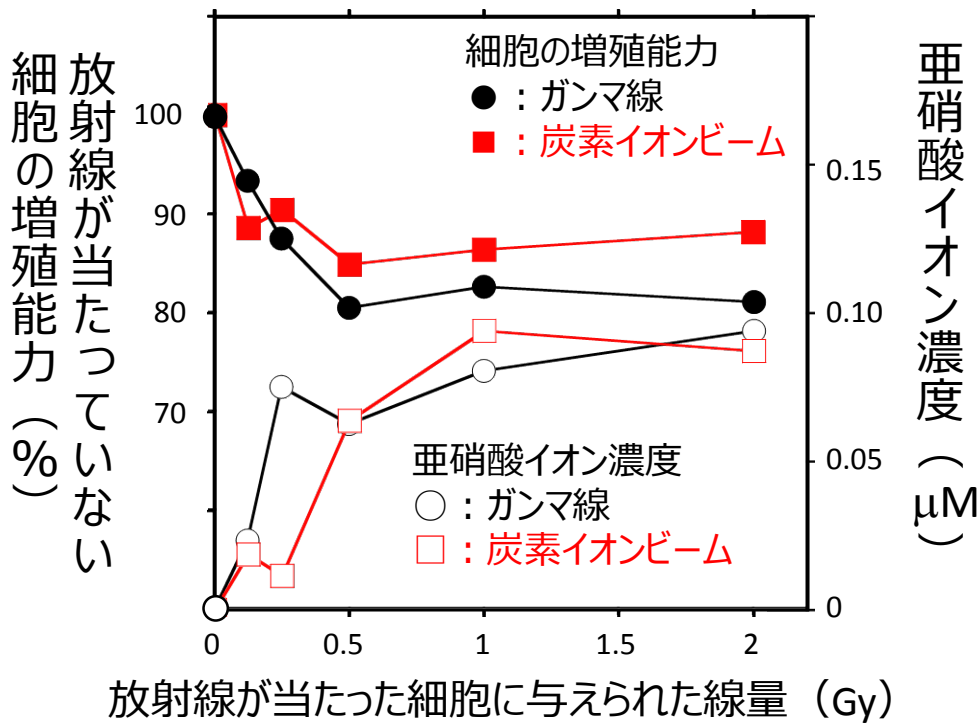
### リチウムイオン電池材料



リチウムのような軽い元素が見える

放射線誘発バイスタンダー効果の研究♥

イオン γ線



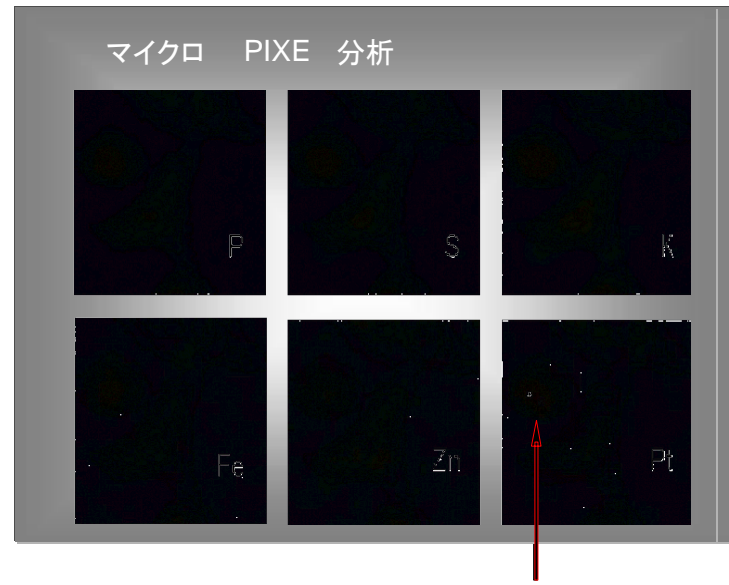
- 照射細胞の近くの非照射細胞では、放射線の種類には関係なく、一酸化窒素(NO)の合成量が増加するほど増殖能力が低下することを発見
- 細胞内NOの消去/合成抑制が放射線がん治療の副作用低減につながる可能性

マイクロPIXE(粒子誘起X線放出)による物質集積の研究

イオン

(例)抗癌剤の追跡

抗癌剤を添加して培養したヒト食道癌細胞  
抗癌剤(シスプラチン)



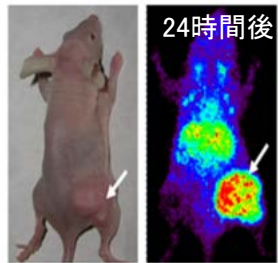
プラチナ元素の集積が見られた  
→抗癌剤の効果を予測する手法の研究

# 「治す」技術を駆使してQOLの向上を目指す

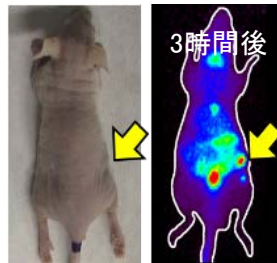


## 診断と治療に役立つRI-DDS(ドラッグデリバリーシステム)の創出♥ (診断と治療の一体化)

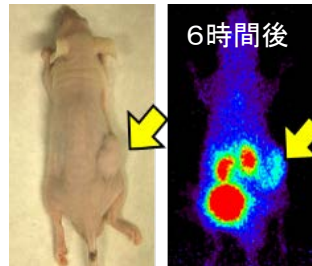
① イオン



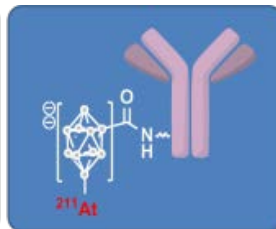
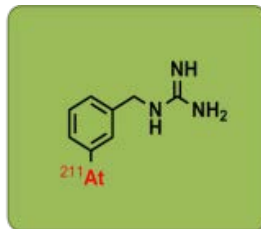
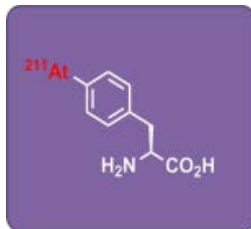
$^{64}\text{Cu}$ -DOTA-  
Trastuzumab  
肺がん移植マウス



$^{76}\text{Br}$ -MBBG  
褐色細胞腫移植  
マウス



$^{76}\text{Br}$ -BAMT  
大腸がん移植  
マウス



$^{76}\text{Br}$ 薬剤開発の知見を活かした治療用RI-DDS開発

## 手のひらサイズの非侵襲血糖値センサー♥

L



- 超小型マイクロチップYb:YAGレーザーと光パラメトリック発振器の組み合わせ
- 臨床に求められる測定精度を満たす非侵襲血糖測定技術を世界で初めて確立

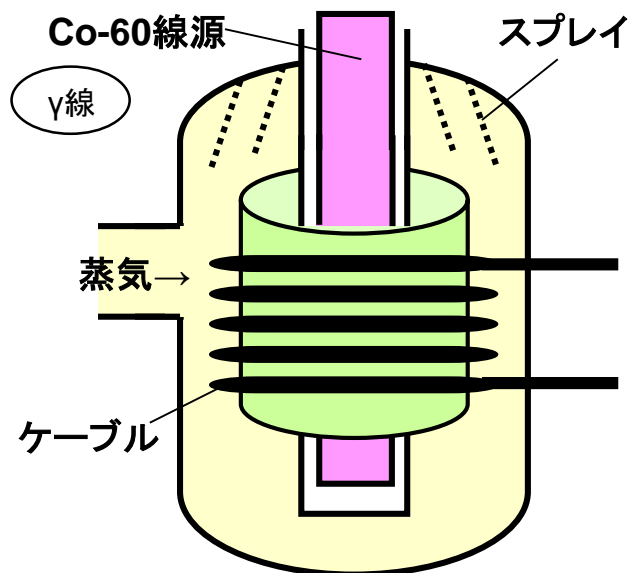
### Ⅲ. 原子力エネルギー利用にも援用される放射線科学 —核不拡散・核セキュリティへの応用の可能性も—



	イオン
	中性子
	陽子
	ミューオン
	電子
	陽電子
	γ線
	放射光(X線)
	レーザー
	特性X線

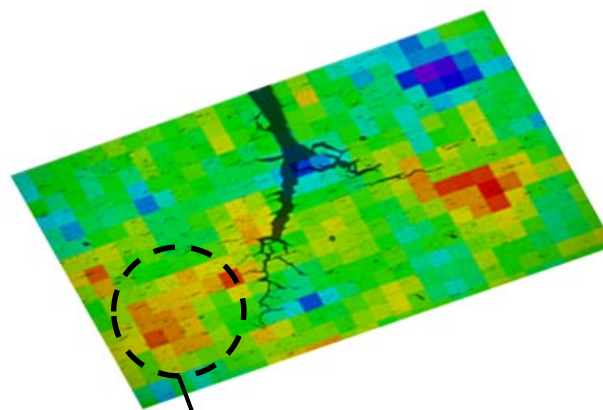


## 原子炉用電線・ケーブル類の健全性試験



LOCA時の複合環境模擬装置  
(SEAMATE-II)

## 陽電子マイクロビームによる応力腐食割れステンレス鋼のマイクロ診断



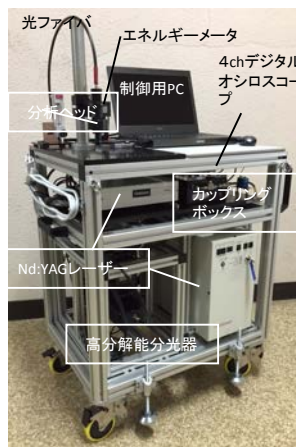
陽電子  
+

赤い部分: 亀裂先端部に空孔型欠陥が集中していることを示す

## レーザー及び光学手法 による炉内検査技術の 開発♥

L

小型化改良版可搬型  
ファイバ伝送LIBS(Laser  
Induced Breakdown  
Spectroscopy)装置



## ファイバーブラッググレーティング(FBG)光センサーの実装技術開発♥



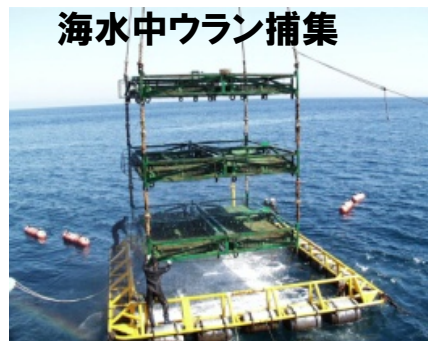
ナトリウム配管エルボ  
部分の繰り返し変形を  
現場にて監視すること  
に成功

L

# 原子力エネルギー関連物質を創る・加工する

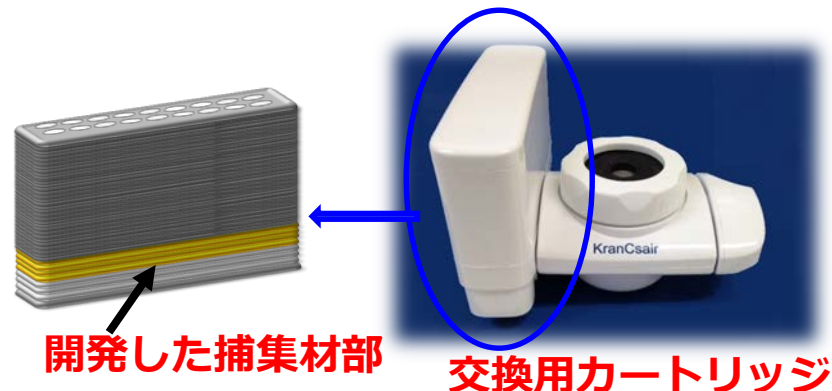


## 放射線グラフト重合で作製した資材による 海水中ウラン捕集技術の開発



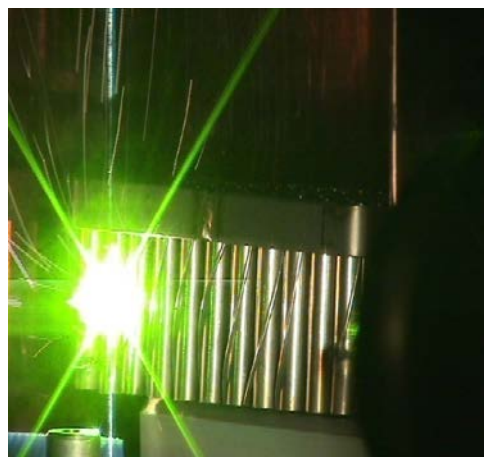
資源セキュリティのためのバーゲニングパワー

## 福島早期復興に貢献するセシウム捕集用給水器の開発♥

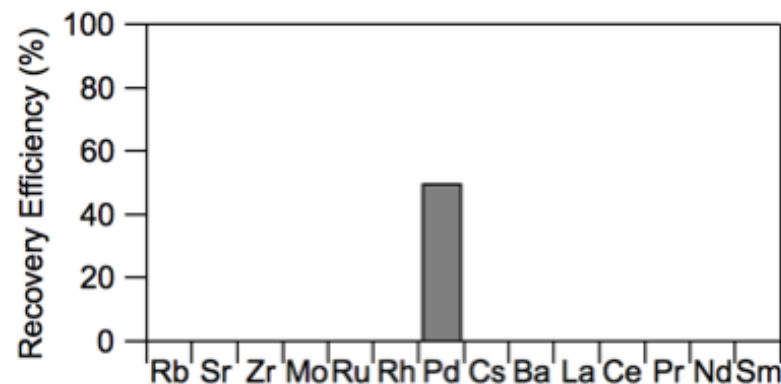


- 倉敷繊維加工(株)からH27年4月より飯舘村、東京電力、他個人向けに櫛葉町等に販売され、使用が開始された。

## 自由電子レーザー(FEL)による解体技術の開発



## レーザー照射による使用済み燃料からの白金族元素分離回収の研究♥

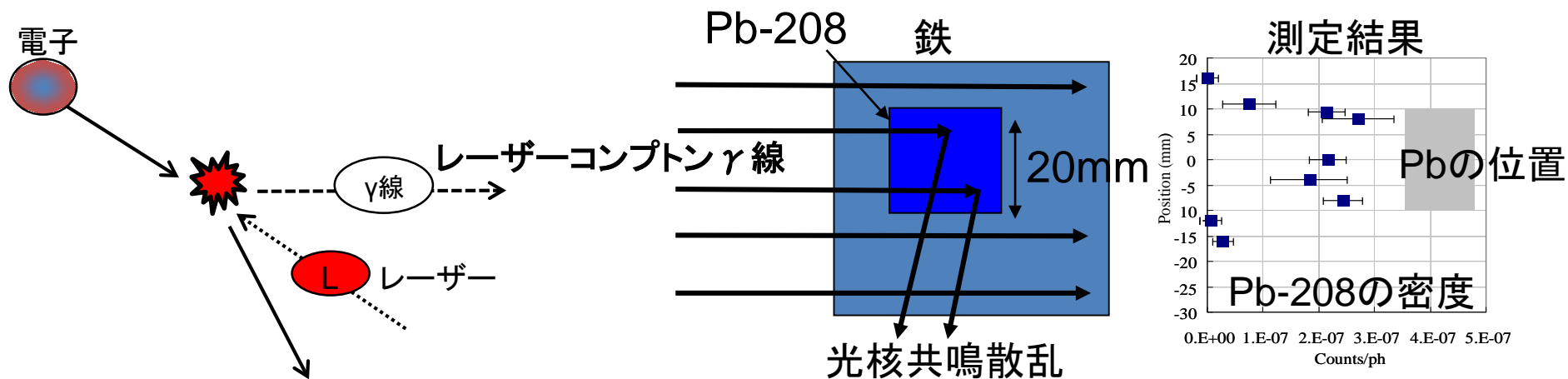


紫外パルスレーザー光を照射して模擬放射性廃液(14元素混合硝酸水溶液)からPdを選択的に回収

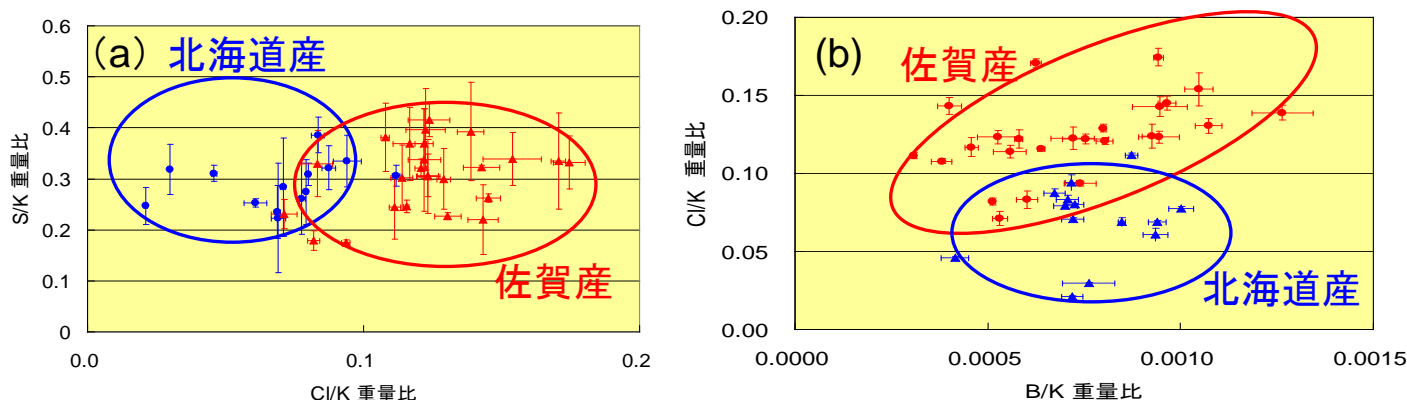


## レーザーコンプトン $\gamma$ 線による隠匿物質(ウランなど)の検出(核検認技術)

### 1.5cm四方の鉄中に隠蔽されたPbの検出による原理実証



## 中性子即発 $\gamma$ 線分析による物資の産地同定→黒鉛など核開発関連物質産地同定への応用の可能性

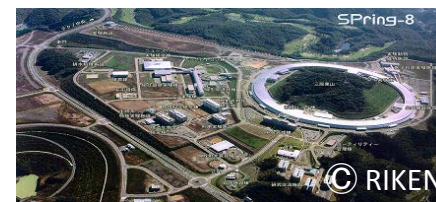


タマネギの元素濃度分布 (a) S/K - Cl/K, (b) Cl/K - B/K

(産地により不純物濃度比が異なる)

中性子

参考: 三重県毒入りカレー事件におけるヒ素中不純物分析(放射光による)



放射光(X線)

## IV. 量子ビーム・放射線利用のさらなる普及のためには



# 「観る」学問領域のノーベル賞と今後の狙い目



M.T.F.ラウエ(1914)

X線の回折の発見

P.J.W.デバイ(1936)

X線回折粉末法の考案

H.A.ハウプトマン  
J.カール(1985)

結晶構造直接決定法の確立

C.J.デヴィソン  
G.P.トムソン(1937)

電子の回折の発見

F.ブロッホ  
E.M.パーセル(1952)

核磁気共鳴法の開発

C.G.シャル  
B.N.ブロックハウス(1994)

中性子回折・散乱法の開発

○この領域では、ずいぶんノーベル賞が出ている。

○回折の発見や回折法の開発では、X線、電子、中性子でそれぞれ賞をとっている。でも陽電子回折が残っている。(最近、「**全反射陽電子回折**」が固体表面物理の有力な手段として注目され始めた。)

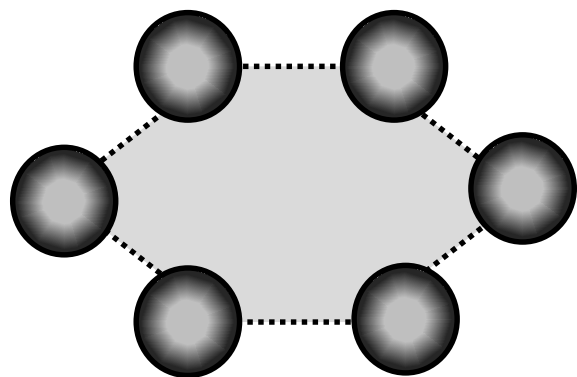
○電子雲と原子核の中間のサイズで観察すべき微視的構造があるようなら、ミューオン回折も実用性が見えてくるかも。(ドブロイ波長は $\lambda = h/p = h/mv$ )

○ミューオンは、すでに火山のマグマの観察に透過像を使うという試みがなされており、1Fの炉内観察手段としても有望視されている。ミューオンに限らず、有力な観察手段が得られれば人類の宝になる。

○観る手段は既存のものでも、それをうまく組み合わせることによって物質科学や生命科学に新たな地平を切り拓く可能性もある。(現在いろいろな解釈が乱立している「**超電導**」の原理について、量子ビームの複合利用による統一理論の構築に期待。)

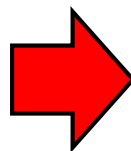
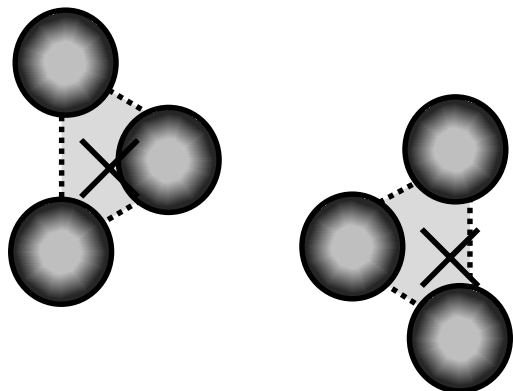
# 全反射陽電子回折の“すご技”

<最表面原子配列予想A>

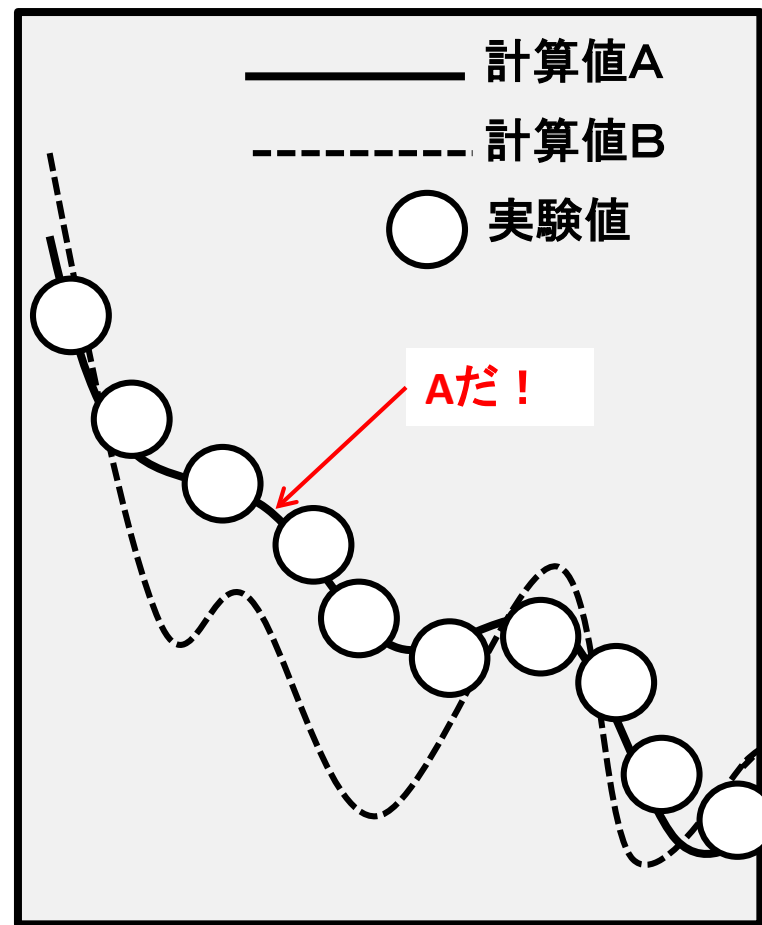


↑Aか？ ↓Bか？

<最表面原子配列予想B>



陽電子回折強度



陽電子入射角度

物質表面の第1層(最表面)の原子配列には“謎”が多い。

最表面の原子配列をピッタリと判定。

*Reprinted from*

# PHYSICAL REVIEW LETTERS

REFLECTION HIGH ENERGY POSITRON DIFFRACTION  
FROM A Si(111) SURFACE

A. Kawasuso and S. Okada

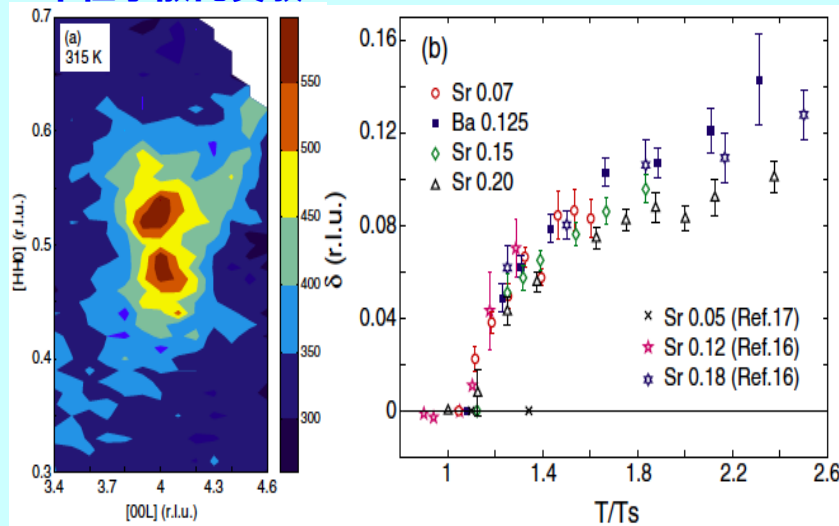
Volume 81, Number 13, 28 September 1998  
2695-2698

*Published by*  
THE AMERICAN PHYSICAL SOCIETY

# 量子ビームの複合利用による超伝導機構の解明に向けて

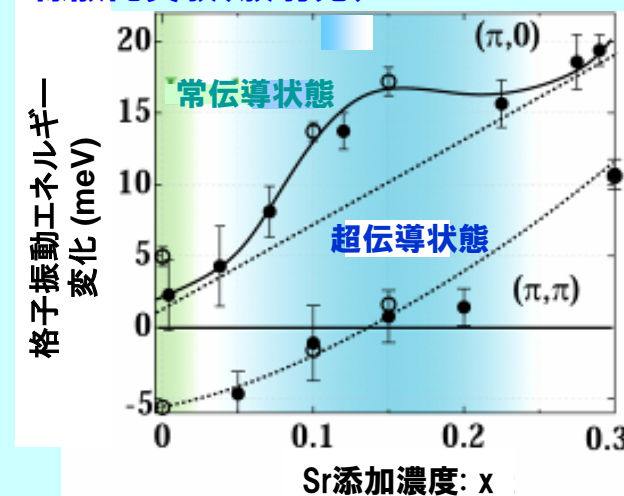
中性子とX線(放射光)を相補的に利用した高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ における格子異常の研究

中性子散乱実験



格子非整合な格子歪みは、超伝導を示す試料に普遍的であることを発見

X線散乱実験(放射光)



高温超伝導発現機構における格子振動の関与を指摘



超伝導の応用として期待される  
リニアモーターカー

- 中性子・放射光の相補的利用や、研究機関間の連携などによる横断的な取り組み
- J-PARCからの高強度パルス中性子ビームの利用

高温超伝導の発現機構解明への期待

# 「治す」学問領域のノーベル賞と今後の狙い目



E.O.ローレンス(1939)

サイクロトロン の発明

A.M.コーマック

G.N.ハウンスフィールド(1979)

X線CTの開発

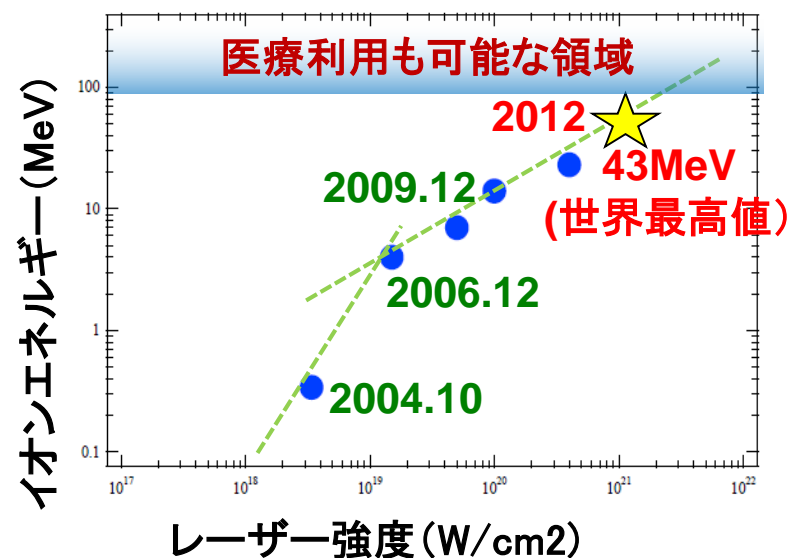
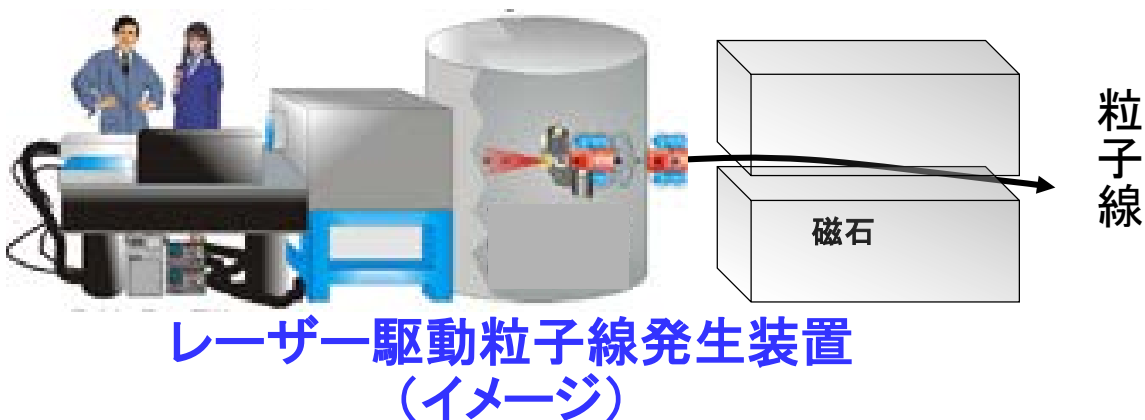
P.C.ロータバー

P.マンスフィールド(2003)

磁気共鳴断層画像法(MRI)の開発

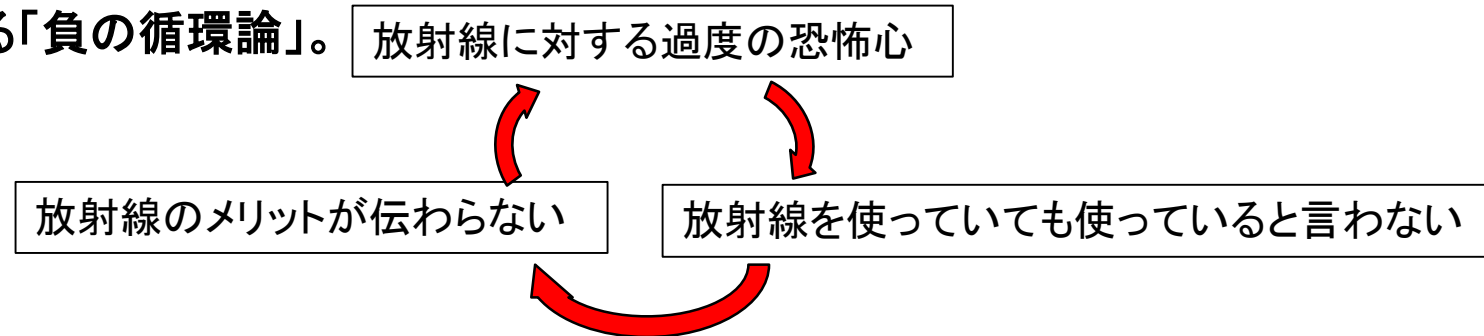
- この領域では診断法でいくつかノーベル賞が出ているが、そのものズバリの治療法では出ていない。
- 多くの治療法が量子ビームを使って実践されているのに。
- レーザー駆動加速(田島-ドーソンの式)による粒子線治療の早期実現が期待される。

## レーザーによる陽子加速研究♥



# 放射線利用普及のボトルネック

○放射線利用受容に対する「負の循環論」。



○放射線法は新物質を最初につくる契機にはなったが、他の方法（主に熱を使う方法）に取って代わられるという歴史を繰り返してきた（コストや既存インフラとの競合の問題）。  
⇒しかし、それは放射線が役に立たないことを意味するのだろうか？  
⇒ふたたび、ノーベル賞（「創る」学問領域における）について考えてみよう。

## ◆フラーレンの発見

H. クロトー  
R. スモーリー  
R. カール  
(1996)

レーザー蒸発クラスター分子線装置  
⇒極微量のC<sub>60</sub>(1985)



W. クレッチマー、D. R. ハフマン  
アーク放電法⇒大量のフラーレン(1990)

## ◆青色発光ダイオードの実現

赤崎勇  
天野浩(2014)

低速電子線照射 (LEEBI)  
⇒暗い発光



中村修二(2014)

高温焼鈍法⇒明るい発光

新物質発現のツールとしての量子ビーム・放射線の再評価が重要。

○イノベーションの有力なツールとして「科学史を塗り替える」研究の推進

○「ものづくり」の戦略的推進

- ・「新物質発現」の先駆的手段としての位置づけ  
⇒知財確保⇒他の手段との協働⇒「新物質」の普及
- ・「放射線ではできない物質」の創製⇒「放射線利用」の普及

○インフラとソフトの整備

- ・自己遮蔽型小型加速器などリスクの小さい廉価な新線源の開発。
- ・合理的規制。

# おわりに —まとめ—



## 創る・加工する

### 高温超電導材料

磁性材料

スピントロニクス材料

表面機能材料

省エネ材料

水素貯蔵材料

リチウムイオン電池

スーパーインテリジェント触媒

宇宙用マイクロプロセッサ

遺伝子試薬

観ることによって創れる



## 観る

中性子分光

中性子ラジオグラフィ

X線分光  
(放射光を含む)

電子分光

陽電子分光

ポジトロンイメージング

PIXEなどイオンビーム分光

ミュオン分光

X線診断

X線CT

MRI

骨シンチレーション検査

PET

創薬

抗がん剤の物質分布解析

バイスタンダー効果

観ることによって治せる



## 治す

X線治療

ガンマ線治療

粒子線治療

レーザー加速粒子線治療

BNCT  
(ホウ素中性子捕捉療法)

内用放射線治療(RI)

非侵襲血糖値センサー

海水中ウラン捕集技術

セシウム捕集用給水器

FELによる解体技術

白金族元素分離回収技術

電線・ケーブル類健全性試験

応力腐食割れミクロ診断

炉内検査技術

配管変形監視技術

核検認技術

疑惑物資産地同定技術



←原子力エネルギーへの援用

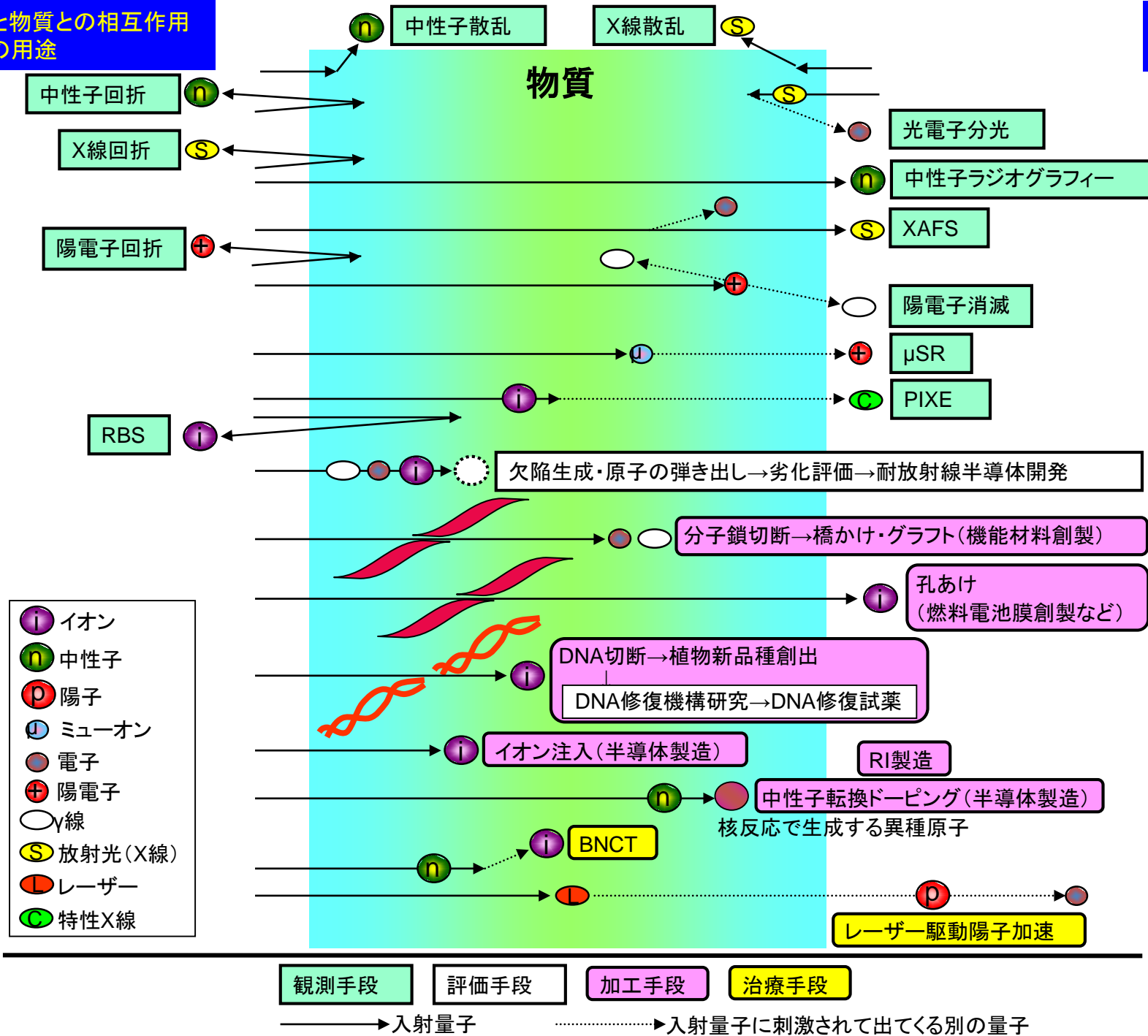


表1 量子ビームの特徴と用途

量子	質量 (MeV)	電荷	エネルギー	物質との相互作用	用途1 (観る・調べる：観察手段)	用途2 (創る・変える：加工・反応手段)	用途3 (治す：治療手段)	発生源 (例)
レーザー	0	0	0.1 eV ~ 100 eV (*4)	・透過① ・反射、干渉② ・励起、電離→原子間結合を切断③ ・高強度の場合、ターゲット中で強い電場を誘起。この電場で電子が加速され、さらに電子放出によって強い電界が誘起され、電子や重イオンが加速・放出される④ ・物質の波としての性質を利用してレーザー光の波で物質の構造等を操作する(量子制御)⑤	・レーザー顕微鏡① ・レーザー X 線顕微鏡(細胞の生きたまま観察)① ・材料表面の周期構造(X 線レーザーによる)② ・高速の現象(化学反応、生体での電子や物質の移動現象など)の観測②	・非熱加工(リングラフィ、高精度で飛散物の少ない加工などに利用)③(*11) ・特定の化学反応を誘起し、必要な生成物を効率的に得る③	・レーザーメス③ ・がん治療用超小型加速器(レーザー駆動粒子加速)④	半導体、CO <sub>2</sub> など(*15)に電子線や光を照射して発生。自由電子レーザー(FEL)はB 種と N 種とを交互に配置した磁場中で加速電子を蛇行させ、X 線レーザーは高出力レーザーを金属表面に照射して発生。
X 線放射光	0	0	数 eV ~ 100 keV	・透過① ・回折② ・弾性散乱、非弾性散乱③ ・光電効果④ ・励起、吸収(元素に特有：元素の種類に応じて異なるエネルギーの X 線などを放出)⑤ ・励起、電離→原子間結合を切断⑥	・X 線診断① ・X 線イメージング(X 線 CT：金属の残留応力や疲労の 3 次元内観測)② ・たんばく質等の構造解析(C、N、O 等の比較的重い元素に敏感：構造の骨格が分かる)② ・超伝導等の機構解明(格子振動観測)③ ・物質表面および内部の電子状態や化学結合状態観察③ ・元素の電子構造④ ・光電子イメージング(光電子ホログラフィや光電子顕微鏡：物質中の原子の結合状態を 3 次元的に観測)④ ・微量元素分析⑤	・リソグラフィ③ ・DNA 鎖の選択的切断(損傷修復機構解明)③	・がん治療(電子線をターゲットに照射し X 線に変換して用いる)⑤	電子をターゲットに照射して発生。放射光は円軌道などで電子が曲げられる時に発生。
ガンマ線	0	0	数十 keV ~ 2.4 GeV (*5)	・透過① ・励起、電離→原子間結合を切断② ・光核反応(逆コンプトン X 線の場合)③	・厚み計(紙、フィルム等)① ・非破壊検査(溶接部検査、航空機エンジン検査など)① ・核医学診断(ガンマカメラ、SPECT など)① ・半導体素子や高分子材料等の劣化評価(原子力、核融合、宇宙用)② ・素粒子の内部構造③(*5)	・高分子合成(燃料電池膜、有用・有害金属捕集材、生分解性プラスチック等)②(*12) ・品種改良(イネ等：ガンマフィールド)② ・食品照射(ジャガイモの芽止めなど)② ・医薬品の滅菌② ・害虫駆除(ワリミバエの不妊化等)②	・がん治療(医療用 F <sup>18</sup> 線源)② ・脳腫瘍等の治療(ガンマナイフ)②	Co-60 等の $\gamma$ 源
ニュートリノ( $\nu$ )	ゼロかほとんどゼロ(?)	0	数 MeV ~ 数 GeV	・ほとんど相互作用をしないで物質を透過。 ・種々の崩壊様式①	・ニュートリノ振動( $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ )を観測→ $\nu$ に質量があるか?(質量、宇宙創生の起源の探索、素粒子物理の標準理論の検証)①⑦			加速器(陽子)ターゲットからの 2 次粒子と、 $\pi$ 、 $K$ 、新物質の崩壊
電子( $e^-$ )	0.511	-e	数 eV ~ 101 GeV (*6)	・反射、透過① ・回折② ・弾性散乱、非弾性散乱③ ・励起、電離(元素に特有：元素の種類に応じて異なるエネルギーの X 線などを放出)④ ・励起、電離→原子間結合を切断⑤ ・電子-陽電子衝突⑥	・電子顕微鏡① ・表面原子配列② ・表面電子状態② ・表面元素分析(電子分光、オージェ電子分光)④ ・半導体素子や高分子材料等の劣化評価(原子力、核融合、宇宙用) ・素粒子物理⑤	・リソグラフィ③ ・高分子合成(燃料電池膜、有用・有害金属捕集材、生分解性プラスチック等)⑤(*12) ・電子線不融性(SiC 繊維、マイクロチューブ製造)⑤ ・有害物質分解除去(排液中の硫黄・窒素化合物、ダイオキシン等)⑤	・がん治療(電子線をターゲットに照射し X 線に変換して用いる)⑤	フィラメントからの熱電子放出
陽電子( $e^+$ )	0.511	+e	meV ~ 101 GeV (*6)	・反射、透過① ・回折② ・電子と対消滅③ ・電子-陽電子衝突④	・結晶構造解析① ・表面第 1 層の原子配列② ・原子空孔(結晶格子から原子が抜けた孔)映出③ ・電子状態解析③ ・表面第 1 層の元素分析(消滅誘起オージェ電子分光)④ ・素粒子物理④			<sup>22</sup> Na 等の $\beta^+$ 崩壊；加速器(電子)ターゲットでの電子・陽電子対生成
ミューオン	105.66	$\pm e$	meV ~ 50 MeV	・反射、透過① ・磁気的相互作用(進行方向に 100 % スピンがそろっている)② ・ $\mu^+$ 崩壊して $e^+$ を放出③ ・ $\mu^-$ 質量が大きい電子として振る舞う④	・ラジオグラフィ(溶鉱炉の釜の内壁残存厚さの計測で注目)① ・微視的な磁場の大きさやゆらぎ( $\mu$ SR 法)②③	・水素の電子と入れ替わり原子半径の小さい水素様原子を形成→ミューオン触媒核融合④		加速器(陽子)ターゲットからの 2 次粒子として
中間子 ( $K^0$ )	493.68	$\pm e$	220 MeV ~ 1.6 GeV	・種々の崩壊様式①	・CP 対称性の破れ(なぜ粒子と反粒子の数に大差があるのか?)の検証① ・質量、宇宙創生の起源の探索①		・パイ中間子によるがん治療が検討されたことがある	加速器(陽子)ターゲットからの 2 次粒子として
中間子 ( $B^0$ )	5279.0	$\pm e$	数 GeV	・種々の崩壊様式①	・CP 対称性の破れ(なぜ粒子と反粒子の数に大差があるのか?)の検証( $B^0$ と $B^0$ の崩壊時間の差を映出)①			エネルギーの異なる高エネルギー電子と陽電子との衝突

量子	質量 (MeV)	電荷	エネルギー	物質との相互作用	用途 (観る・調べる：観察手段)	用途2 (創る・変える：加工・反応手段)	用途3 (治す：治療手段)	発生源 (例)
陽子	938.27	+e	keV ～ 0.98 TeV (*7)	・透過① ・弾性散乱、非弾性散乱② ・励起、電離(元素に特有：元素の種類に応じて異なるエネルギーのX線などを放出)③ ・励起、電離、弾き出し④ ・核反応⑤ ・陽子—(反)陽子衝突⑥	・結晶構造解析(チャネリング)①(*10) ・陽子線ラジオグラフィ—①② ・表面元素分析(SIMS：2 次イオン質量分析)②(*10) ・表面近傍元素の深さ分布(RBS：ラザフォード後方散乱)①②(*10) ・細胞等の微小な領域の微量元素分析(PIXE：粒子誘起X線放出)③(*10) ・半導体素子の劣化評価(宇宙用、地上用)④⑤ ・材料損傷評価④ ・素粒子物理⑤	・ADS：加速器駆動核変換(長寿命核種の短寿命化)③(*13) ・PET 診断用 RI や放射性薬剤等の製造⑤(*14)	・がん治療④	水素ガスを電離させて発生させた水素イオンを加速
中性子	939.57	0	meV (冷中性子) ～ 数百 MeV (高速中性子) (*8)	・透過① ・回折② ・弾性散乱、非弾性散乱③ ・磁気的相互作用④ ・弾き出し⑤ ・核反応・核変換(放射化)⑥	・中性子ラジオグラフィ—(植物内の物質移動や燃料電池等機器内部の構造・動作状況の非破壊観察)① ・たばく質やメタンハイドレート等の構造解析(H、Li 等の比較的軽い元素に敏感)② ・構造物の残留応力解析② ・超伝導等の機構解明(磁気的ゆらぎ観測)③④ ・半導体窒素デバイス機構解明③④ ・水素吸蔵合金の水素結合状態解明②③ ・高分子構造等の動的観察③ ・半導体素子の劣化評価(宇宙用、地上用)⑤ ・材料照射(原子力材料材料損傷評価)⑤ ・非破壊放射化元素分析(開発γ線分析)⑤	・シリコンドーピング(パワーデバイス用のシリコン半導体製造)⑥ ・長寿命放射性核種の短寿命化のための核変換⑥ ・Mo-99 等の医療・診断用放射線源の製造⑤ ・医療用アイソトープ(Ir-192 等)の生産⑥	・脳腫瘍治療(BNCT：ホウ素中性子捕捉療法)⑤	原子炉；加速器(陽子、重陽子、イオン)ターゲットからの2 次粒子として： <sup>252</sup> Cf からの自発核分裂中性子や <sup>251</sup> Am-Be での(α, n) 反応による中性子
軽イオン ～ 重イオン (※1)	He (A～4) ～ Bi (A～209)  (※2)	-e (*1) ～+e (*2) ～+Ze (*3)	数十 eV ～0.1 TeV/ 核子 (*9)	・透過(透過性が良い)① ・弾性散乱、非弾性散乱② ・励起、電離(元素に特有：元素の種類に応じて異なるエネルギーのX線などを放出)③ ・励起、電離、弾き出し(局所的に大きなエネルギーを付与)④ ・物質注入(エネルギーを変えることにより、打ち込む深さを制御できる)⑤ ・核反応(異なる元素に変換)⑥	・チャネリング、SIMS、RBS、PIXE ①②③(*10) ・水素等軽元素の深さ分布解析(ERDA：反跳原子解析)② ・半導体素子の劣化評価(宇宙用)④ ・年代測定(炭素 14 原子の崩壊によるベータ線の検出、または加速器質量分析(AMS)による炭素 14 原子の直接定量分析)	・孔あけ(高耐久性水素燃料電池膜等)①④ ・新規有用遺伝子資源創出(新品種花卉、環境耐性植物等；突然変異誘発率が高い)④ ・DNA 二重鎖切断(損傷修復機構解明)④ ・イオン注入(半導体製造等)⑤ ・ボジトロン(陽電子)放出核種生成→ボジトロンイメージング(植物中の物質動態解明や PET 診断など)⑤ ・超重量元素合成⑤	・がん治療等④ ・血管再狭窄予防(Xe-133 イオン注入ステント)⑤	ガスや金属表面等を電離させ発生させたイオンを加速

表中用途欄の太字は、日本原子力研究開発機構において現在研究開発が進められ、あるいは予定されている項目、および研究開発を行い、技術移転した項目。 ←2006年現在

「用途」欄に記載された①、②、…は、同じ行の「物質との相互作用」欄の①、②、…に対応(どのような相互作用が応用されているかを表す)。

※1：研究分野によって定義が異なる。医学・バイオ分野では炭素以上のイオンを重イオンと分類。

A：原子量、Z：原子番号

※2：質量は、およそ 931.5 × A (MeV)。

\*1：原子に1 個電子が付着した状態(負イオン)。

\*2：原子から1 個電子を剥ぎ取った状態。

\*3：原子からすべての電子を剥ぎ取った状態(フルストリップイオン)。

\*4：半導体レーザー等では0.1～数 eV、自由電子レーザー (FEL) では数十 eV、X 線レーザーでは～100 eV。

\*5：本来的には原子核から放出される光子をガンマ線と呼び、エネルギーは数 MeV まで。ただし、電子と陽電子とが対消滅して放出される光子も消滅γ線と呼び、また、高エネルギー電子とレーザー(光子)を正面衝突させ、光子が電子からエネルギーをもらうことによって得られる高エネルギー光子を逆コンプトンγ線と呼ぶ。SPRING-8 を使って得られた 2.4 GeV の逆コンプトンγ線を水素を含むターゲットに照射することによって、ペンタクォーク(5 つのクォークから成る新素粒子)が発見された。

\*6：101 GeV は CERN の LEP で達成。

\*7：0.98 TeV は Fermilab の TEVATRON で達成(2007 年には CERN の LHC で 7 TeV を予定)。

\*8：LANL の WNR(800 MeV)、あるいは PSI の SING(590 MeV)で材料照射が実施されている。入射陽子エネルギーと同等の最大中性子エネルギーを有するスペクトル場を形成。

\*9：0.1 TeV/核子は Brookhaven の RHIC の Au イオンで達成(2008 年には CERN の LHC の Pb イオンで 2.76 TeV/核子を予定)。

\*10：He などの軽イオンを使うこともある。

\*11：極短パルスであれば蒸発で発生する熱が周囲に伝わるよりも早く加工が終了し、加工させようとしたところ以外に熱の影響を与えない。材料に熱の影響を与えない加工方法。

\*12：γ線や電子線を高分子に照射すると励起・電離により原子間の結合が切れて自由な結合手ができる。結合手同士が結びつくとき架橋(橋かけ)が起こり高分子は硬く強くなる。また、自由な結合手に他の分子が結びつくときグラフト(接木)が起こり、新たな機能が付与される。例えば、結びつく分子が導電性の場合には電池用の電解質膜が、金属と親和性のある場合は金属捕集膜ができる。大体において、かさのある材料を対象とする場合は透過性の高いγ線が、薄物や表面だけを対象とする場合は電子線がそれぞれ使われる。

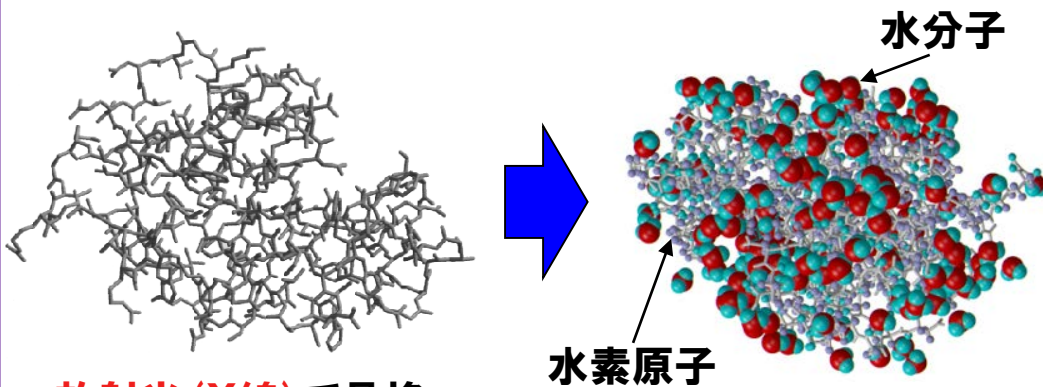
\*13：陽子を一次粒子として核分裂反応で中性子を生成し、中性子増殖系を形成して中性子核反応により核変換する。

\*14：PET 用 RI の生成では、<sup>18</sup>O(p, n)<sup>18</sup>F 反応によりフッ素 18 を生成し、FDG(フルオロデオキシグルコース)を標識。

\*15：ダタンを極わずか添加したシファニア結晶や半導体、CO<sub>2</sub> などのガス媒体。

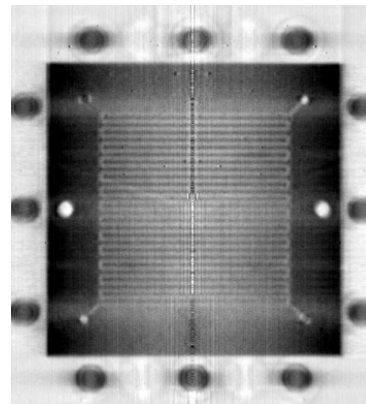


回折・散乱・吸収などの分光法で微細な構造を観る  
(例:タンパク質の構造)



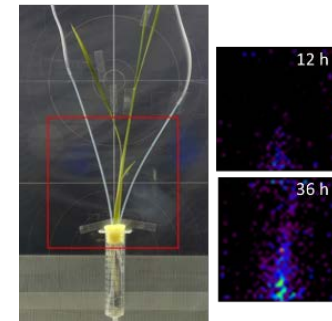
さらに、中性子で水素  
など軽い原子を観る

中性子イメージングで物質の  
挙動を観察する  
(例:燃料電池セパレータ内の  
水分の移動)

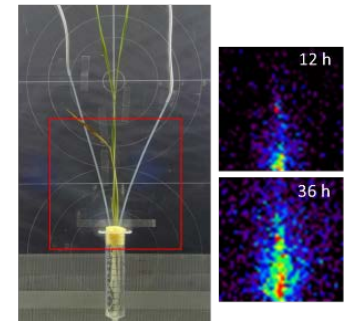


RIイメージングで物質の動きを追跡する  
(例:イネ中の放射性セシウムの移行♥)

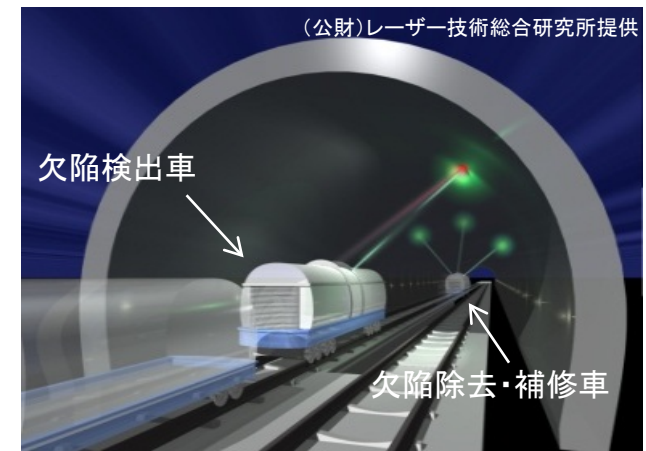
312-8系統



コシヒカリ



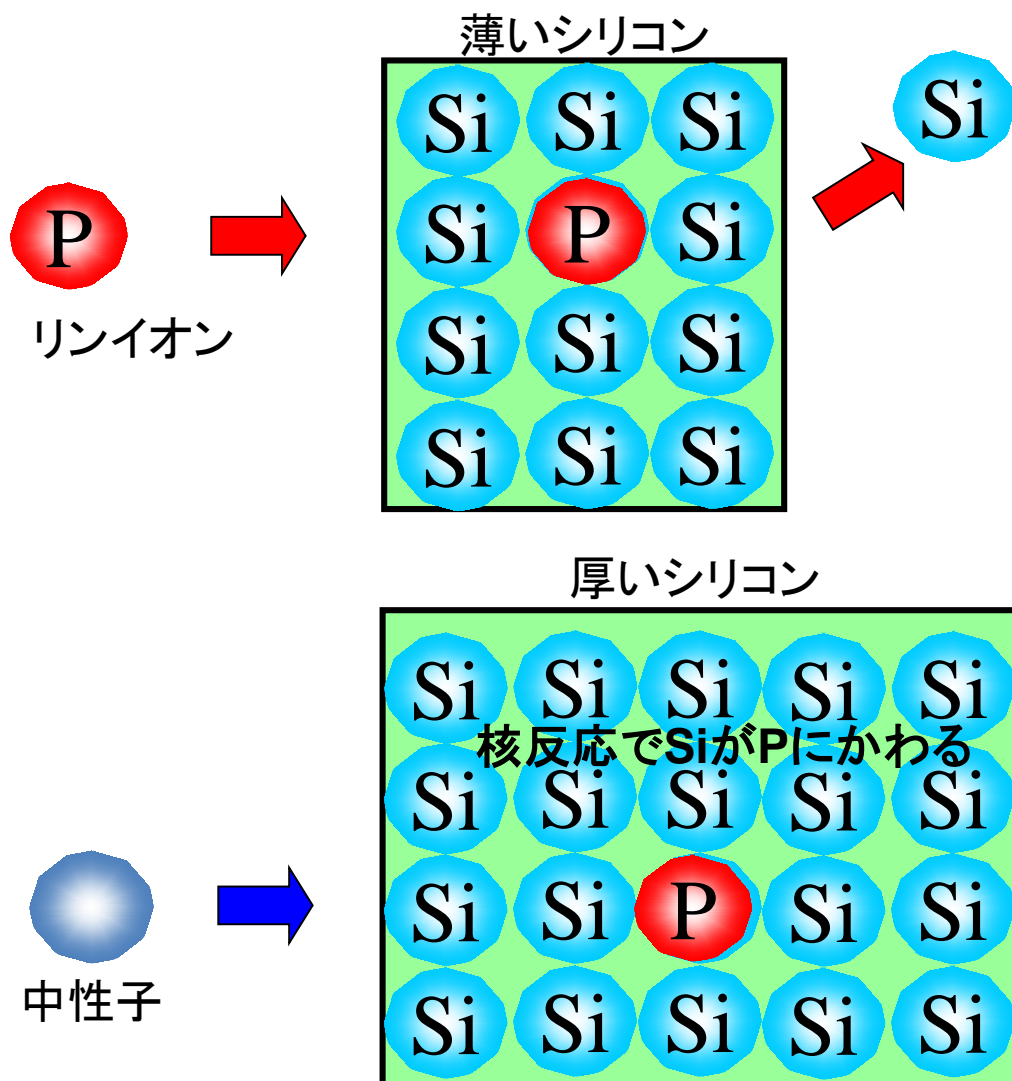
レーザーで構造物の脆弱部位を検出する  
(例:トンネル健全性評価♥)



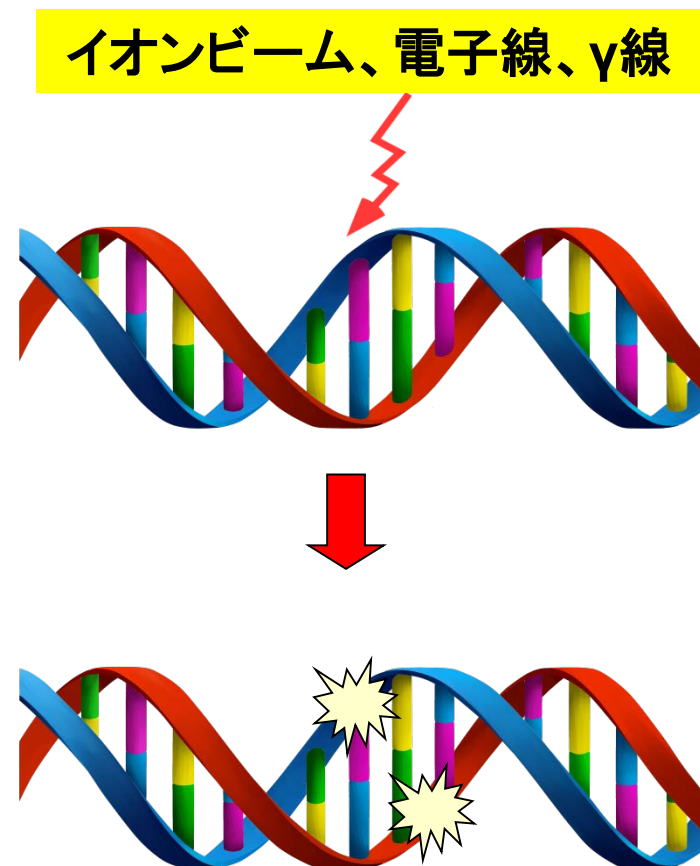
イメージ



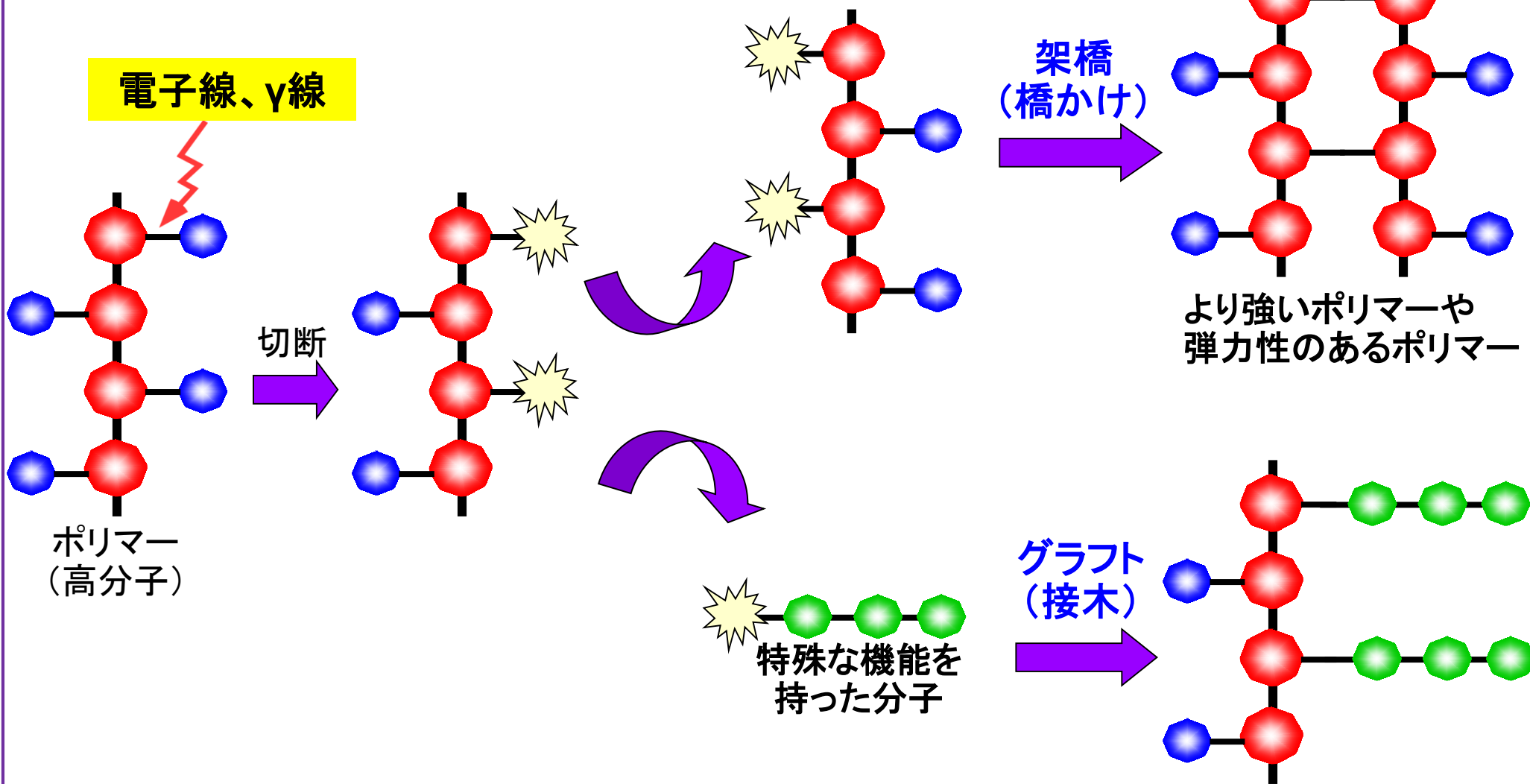
イオン注入や中性子ドーピングで半導体材料を製造する(例:シリコン半導体)



イオンビーム・電子線・ガンマ線でDNA損傷を起こさせ突然変異を誘発する(例:植物新品種の育種)



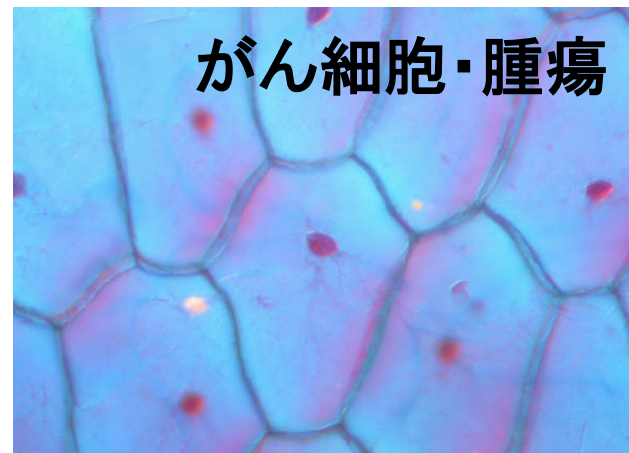
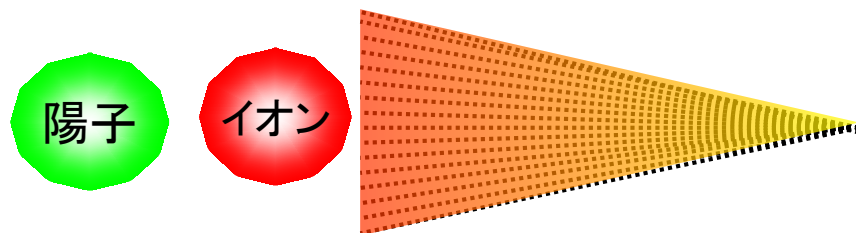
電子線やガンマ線で高分子をいったん切断して加工する  
(例: 架橋による強度増強やグラフト重合による新機能材料創製)



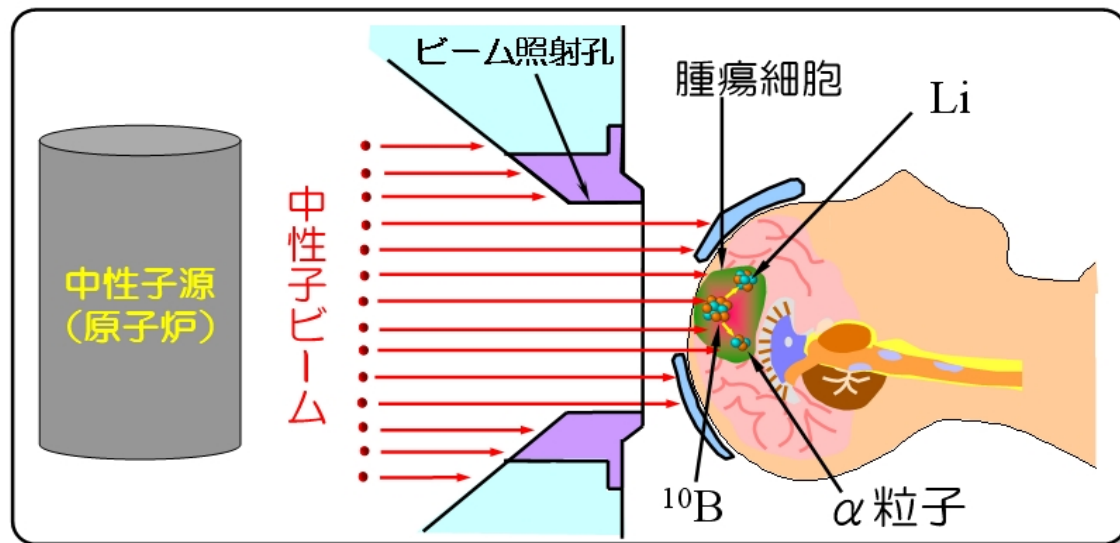
が金属を捕まえる性質ならば金属捕集材が、電導性ならば電導膜ができる



粒子線治療(陽子線やイオンビームで癌細胞を狙い撃ち)



BNCT(ホウ素中性子捕捉療法)



がんの内用放射線による治療  
(例:  $^{211}\text{At}$ による腫瘍の縮小♥)



生理食塩水

$^{211}\text{At}$ -MABG

量研機構よりH28年6月にプレス発表