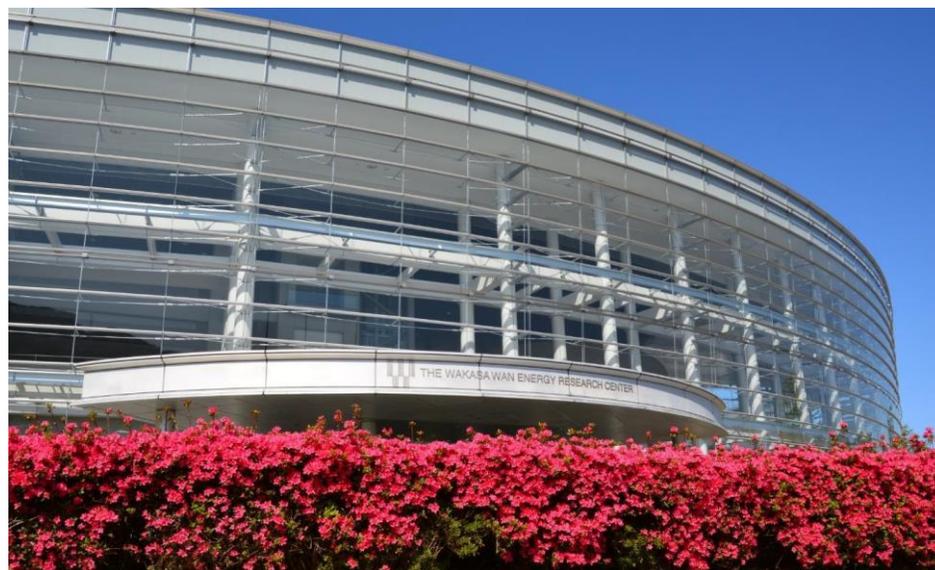


# 若狭湾エネルギー研究センターにおける 高エネルギービーム利用研究

（公財）若狭湾エネルギー研究センター  
岩瀬彰宏



1. はじめに (公財) 若狭湾エネルギー研究センターと**主要事業概要**
2. 若狭湾エネルギー研究センターにおける**イオン加速器施設**
3. **高エネルギーイオンビーム**を利用した各種研究
  - 陽子線がん治療研究
  - イオンビーム育種研究
  - イオンビームによる材料分析・改質研究
  - 宇宙用機器の放射線耐性評価
  - 原子力材料の放射線耐性評価
4. 原子炉廃止措置における**高強度レーザービーム**応用研究
5. **今後の展望**

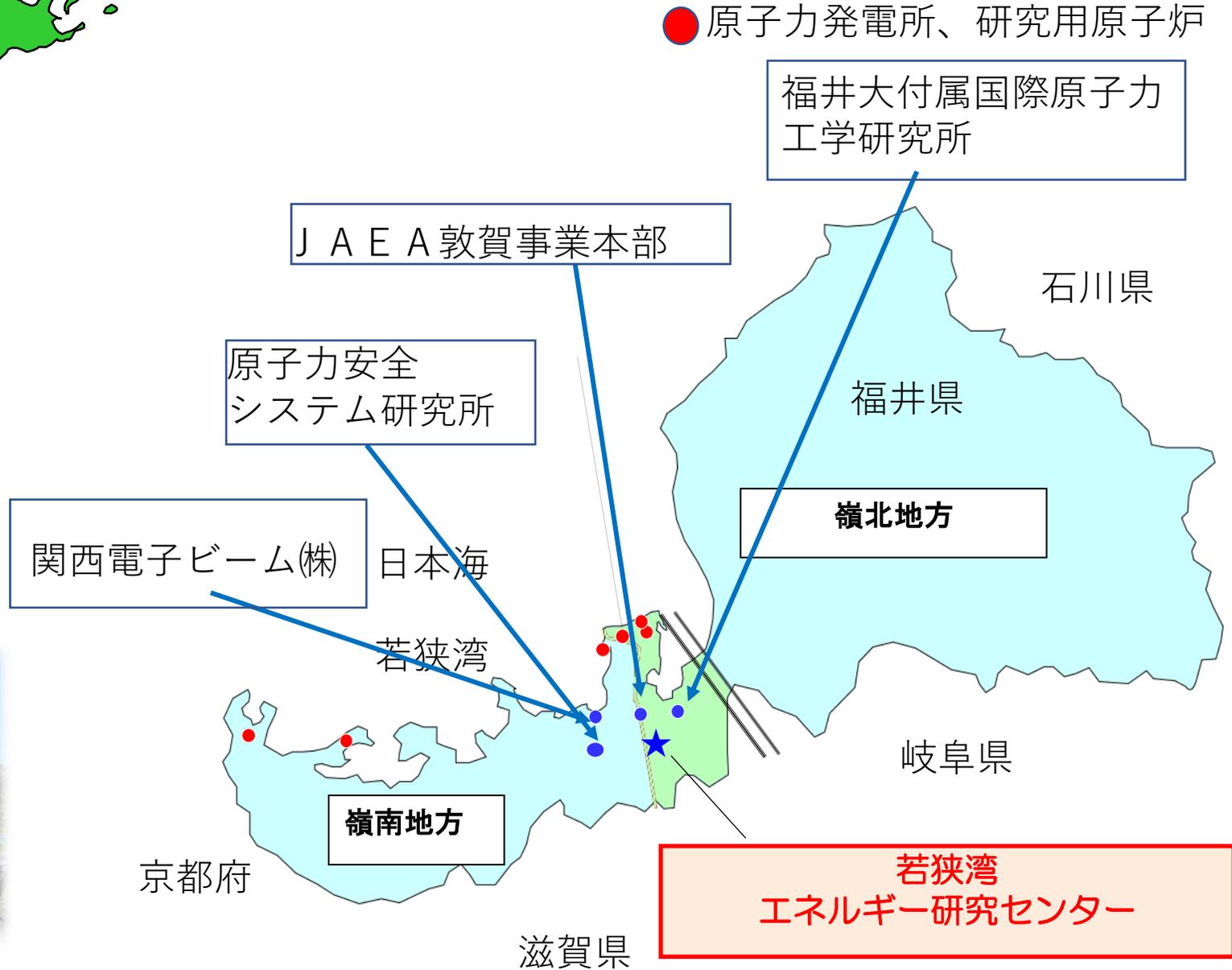
# 若狭湾エネルギー研究センターへのアクセス、周辺の原子力・放射線関連施設

大阪から  
湖西線特急（サンダーバード） 80分

東京から  
新幹線（ひかり）  
米原で北陸線特急（しらさぎ）  
乗り継ぎ 3時間

敦賀駅下車  
タクシーで15分

福井県敦賀市



# 若狭湾エネルギー研究センターの事業概要

## I 研究開発

### 1 加速器（高エネルギーイオンビーム）利用研究

- (1)粒子線がん治療研究 (2)イオンビーム育種研究 (3)材料分析・材料改質研究
- (4)放射線耐性研究（原子力材料、宇宙材料）

### 2 エネルギー開発研究

- (1)レーザー利用廃炉技術開発 (2)エネルギー有効利用研究（水素、太陽光）

## II 産業支援

### 1 技術・研究支援

- (1) 技術支援 (2)研究者・技術者との交流 (3)公募型研究資金による研究開発

### 2 新事業育成支援

- (1)新事業創出支援(事業規模に応じた補助金制度 ) (2)科学技術支援（50種類以上の科学機器利用・技術相談）

## III 原子力人材育成（福井県国際原子力人材育成センター）

### 1 国際原子力人材育成・IAEAとの人材育成に関する覚書締結 H25.10

国際原子力人材育成イニシアティブ事業、海外研究機関等との研究交流

### 2 国内原子力人材育成・原子力関連業務従事者研修・保修技術技量認定講習他

その他 SSH(スーパーサイエンスハイスクール) 研修

# 若狭湾エネルギー研究センターにおける 加速器設備と照射室

材料分析・材料改質、  
原子力材料・宇宙機器照射用  
ビームライン

10-200keV  
H, He, C, N, Ne, Ar, Kr

2台のイオン源  
シェンケル回路  
H 最大10MeV  
He 最大15MeV  
C 最大25MeV  
Ni, Cu, ( $^{15}\text{N}$ )

200kV イオン注入器

5MV タンデム加速器

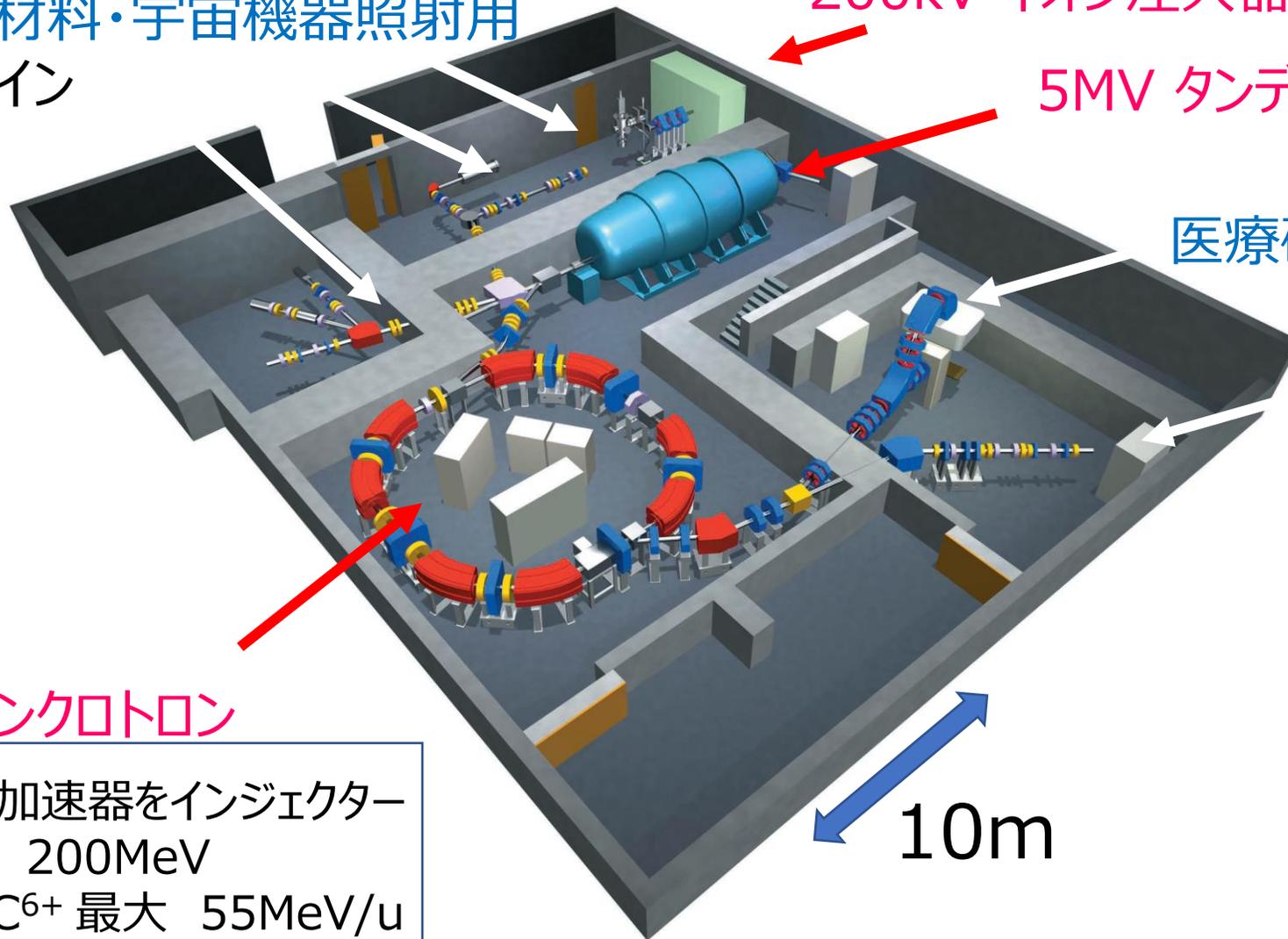
医療研究ビームライン

イオンビーム育種ビームライン  
宇宙機器照射ビームライン

シンクロトロン

タンデム加速器をインジェクター  
H 最大 200MeV  
 $\text{He}^{2+}$ ,  $\text{C}^{6+}$  最大 55MeV/u

10m



# 高エネルギーイオンビームが標的に与える効果の特徴

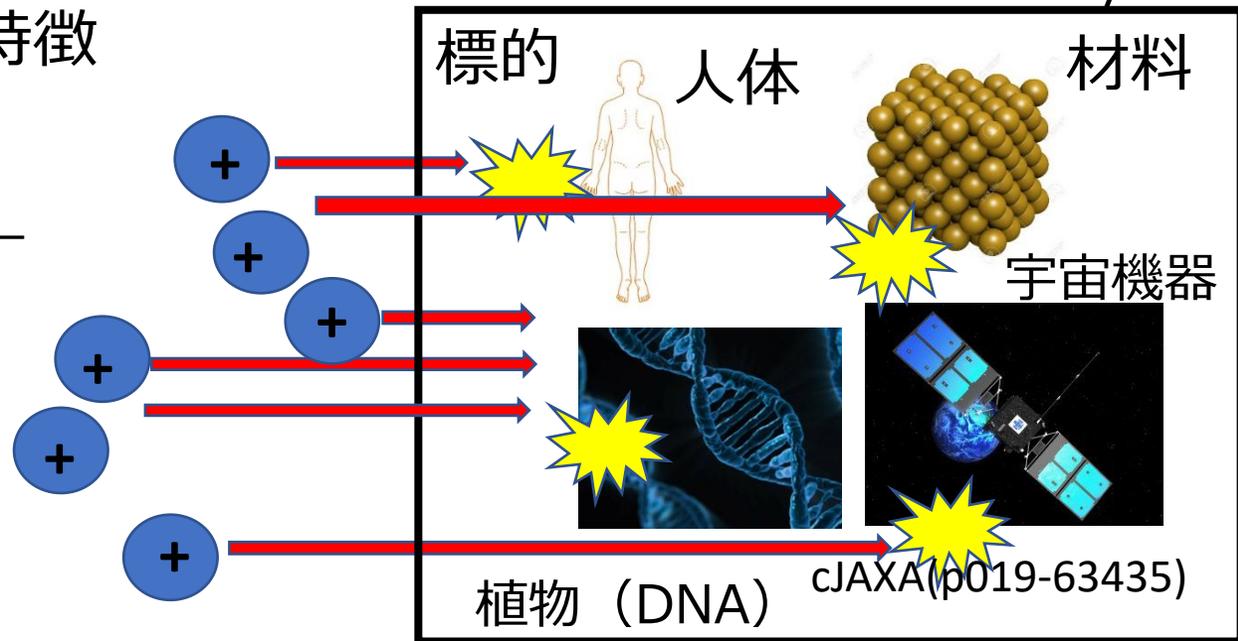


標的全体の結合エネルギーに比べると極めて  
わずかなエネルギー(100MeV~10<sup>-11</sup>J)

標的を構成する個々の原子や電子の  
結合エネルギーの1万倍~1億倍のエネルギー



イオンビームの当たった  
極く狭い領域にだけ  
短時間に高密度のエネルギーを  
与えることができる。  
熱の効果ではない。！！

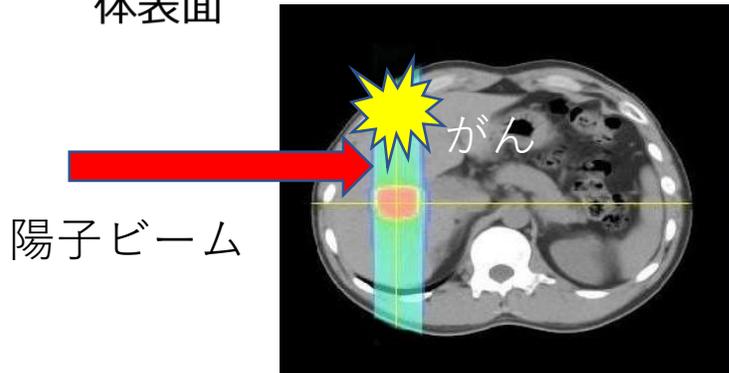
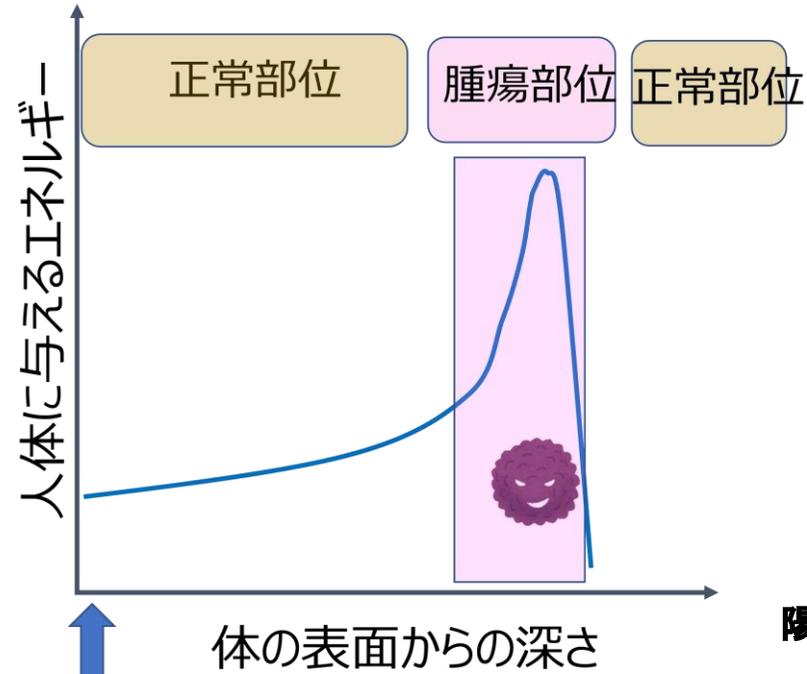


若狭湾エネルギー研究センターにおけるイオン加速器からの  
高エネルギーイオンビームを利用した研究・開発

- ✓ 陽子線がん治療 (がん細胞の破壊)
- ✓ イオンビーム育種 (突然変異、品種改良)
- ✓ 材料分析 (元素の種類や分布の分析)
- ✓ 材料改質 (ものの性質を変える)
- ✓ 宇宙機器・原子炉材料放射線耐性研究

粒子線によるがん治療の特徴

がん細胞にエネルギー付与、正常細胞への悪影響を減らす



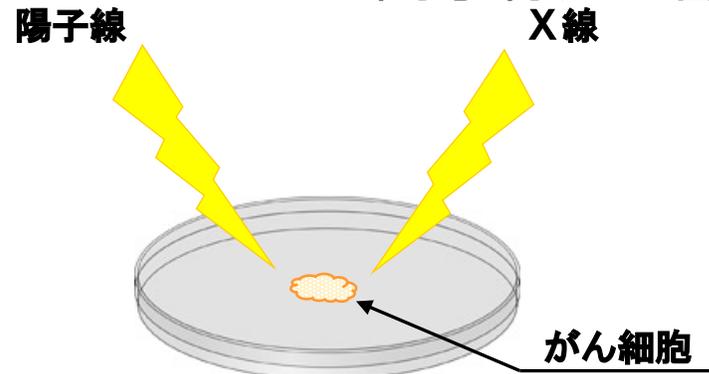
若狭湾エネ研治療ポート  
(2002-2009  
臨床研究実施)

技術移転

福井県立病院  
陽子線がん治療センター  
(2011年3月から治療開始)



陽子線がん治療高度化のための基礎研究



陽子線とX線をヒトがん細胞に併用照射

- ✓ 照射野拡大
- ✓ リアルタイム2次元線量分布測定システムや簡便かつ効率的陽子線量測定技術の開発

# イオンビーム育種研究

- ✓ イオンビーム照射により突然変異頻度を人為的に増加させる品種改良手法.
- ✓ 自然界では起こりにくい、大規模な突然変異の頻度が高まる

イオンビーム照射



DNA 損傷形成



不適切なDNA損傷修復



突然変異

DNA



高エネルギー  
イオンビーム

観賞用花 ビンカ



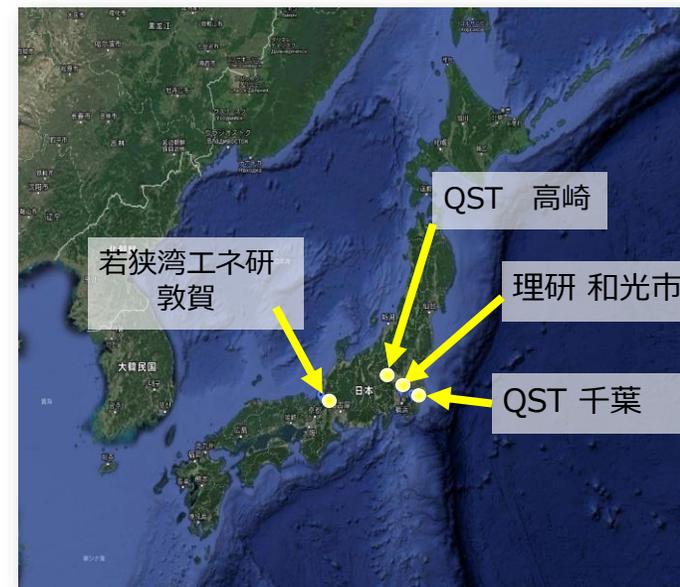
植物工場用レタス



イオンビーム照射



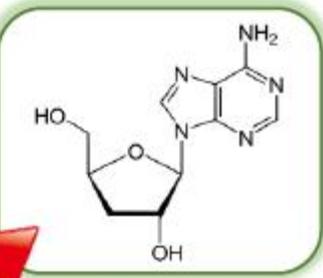
エネ研の加速器は、西日本で唯一のイオンビーム育種可能なイオン加速器



理化学研究所との共同研究として、変異誘発促進技術の開発や有用菌類の育種を推進

# 若狭湾エネ研に特徴的な真菌類、土壌細菌の イオンビーム育種

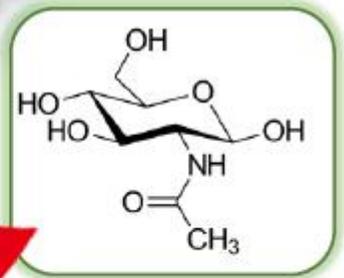
## 福井県での栽培に適した「酒米品種 山田錦」の育成 (福井県立大との共同研究)



コルジセピン

抗がん剤成分（コルジセピン）を  
通常より3倍近く作成できる真菌類  
（冬虫夏草）の開発

カニの甲羅（キチン）を分解して  
Nアセチルグルコサミン（ヒアルロン  
酸の元となる物質）を通常の70  
倍も作りだす土壌細菌の開発



N-アセチルグルコサミン



草丈が高く倒れやすい  
籾が穂から落ちやすい  
寒い秋には十分収穫できない



イオンビーム照射

草丈が低い（矮性）  
脱粒しにくい（難脱粒性）  
収穫期が早い（早生）



通常の山田錦

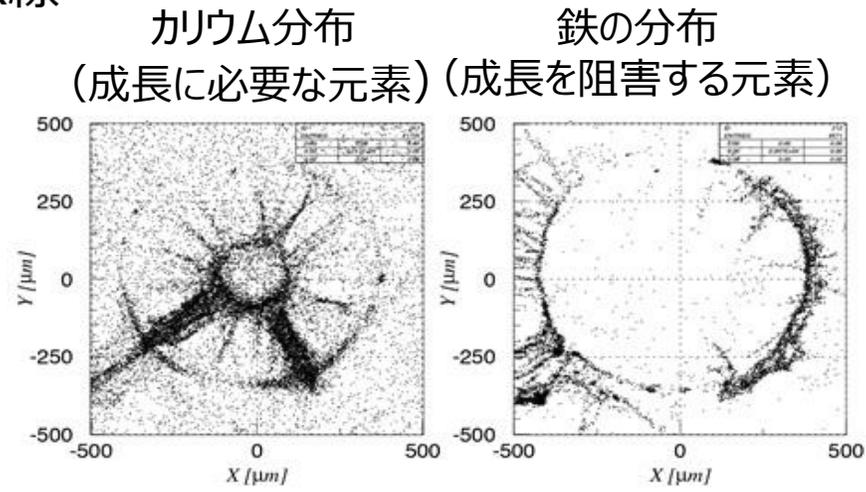
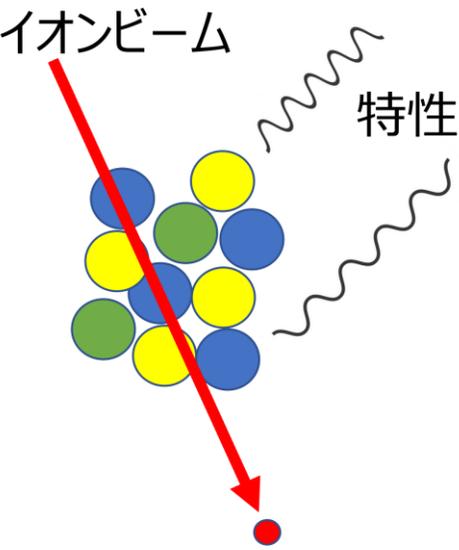


改良された山田錦

# イオンビーム材料分析研究 (PIXE、ERDA、RBS)

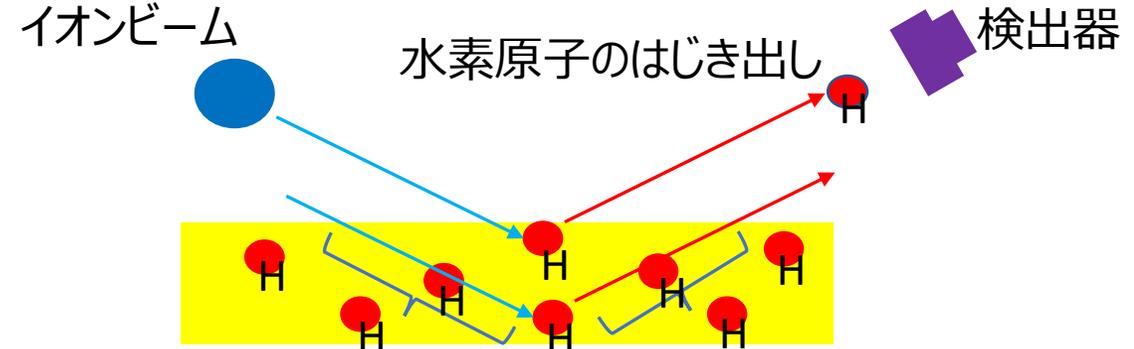
粒子励起X線分光 (PIXE) 法による  
植物や材料中の微量元素分析  
マイクロビームを用いた細胞レベルの二次元マッピング

個々の元素に特有なX線が放出される

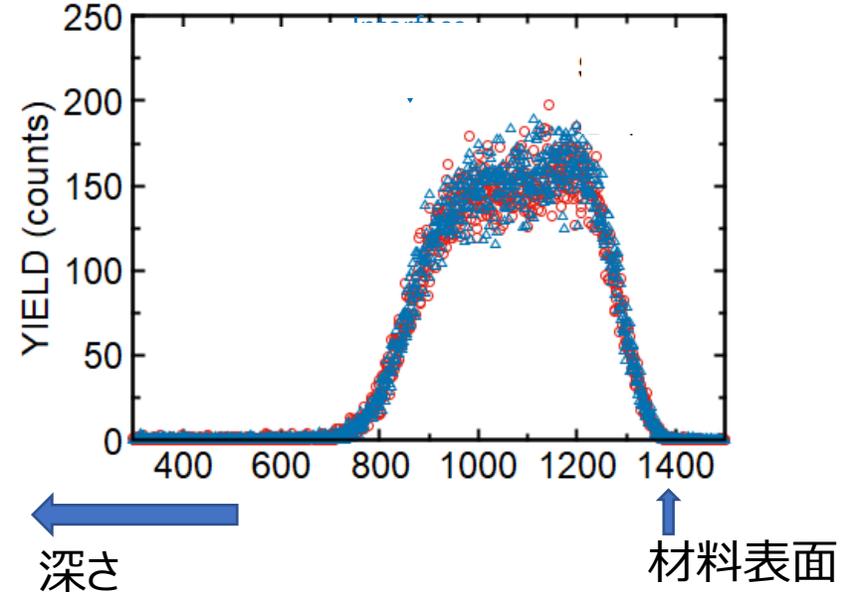


イネの根が取り込む金属元素の振る舞いを観測  
(福井県立大学との共同研究)

弾性反跳粒子検出法 (ERDA) 法による 10/19  
材料中の微量軽元素 (H, Liなど) 分析



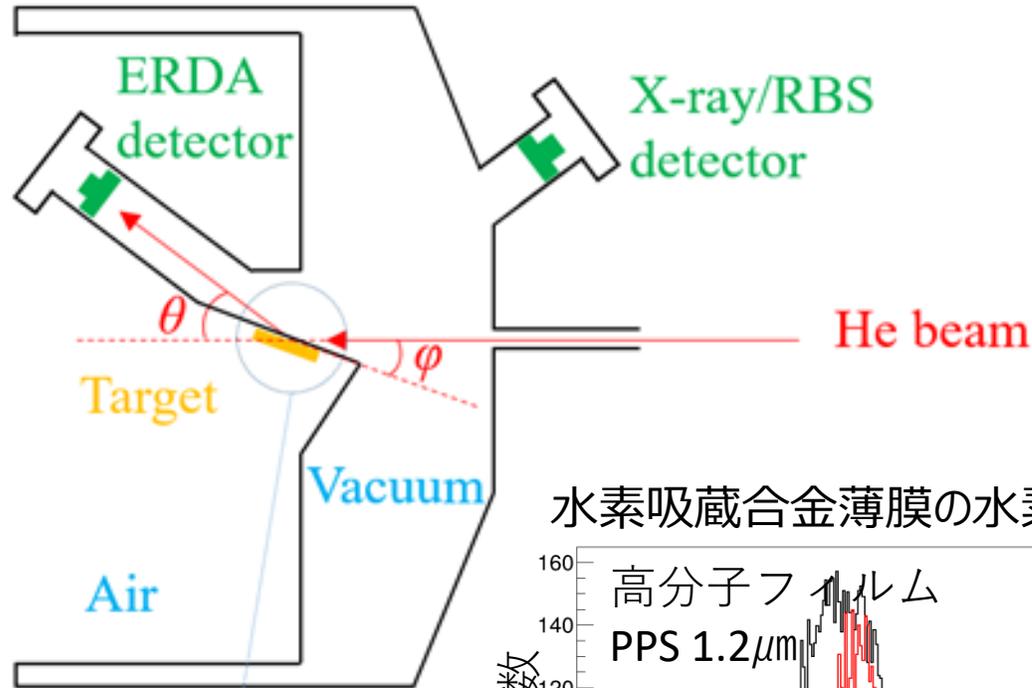
DLC膜の性質は、内部の水素の量に大きく依存



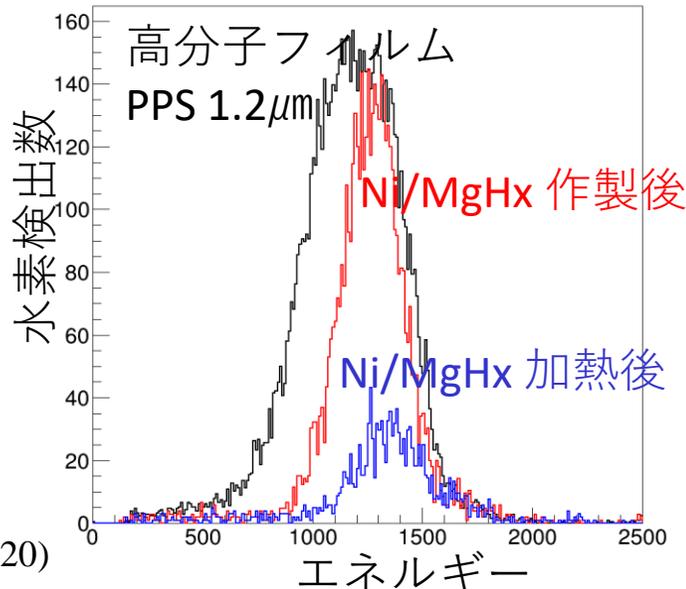
NIMB 502(2021)54-58 Fig.2

# 大気ERDA

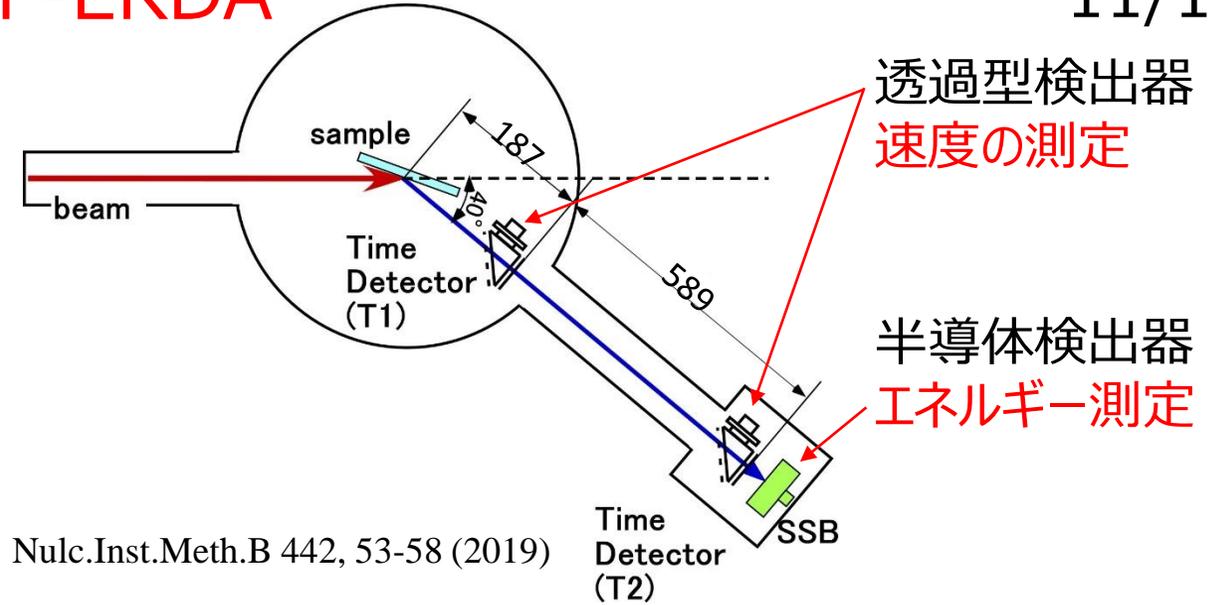
大気等のガス中に試料を設置したまま測定可能な装置を開発 Nulc.Inst.Meth.B 450, 135-138 (2019)



水素吸蔵合金薄膜の水素測定



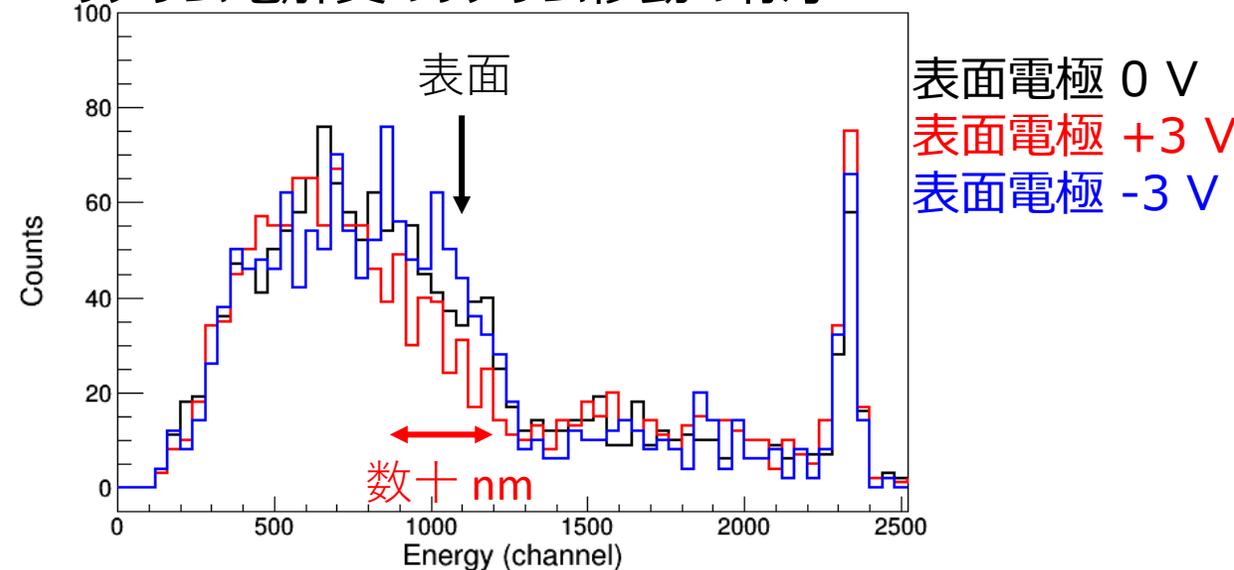
# TOF-ERDA



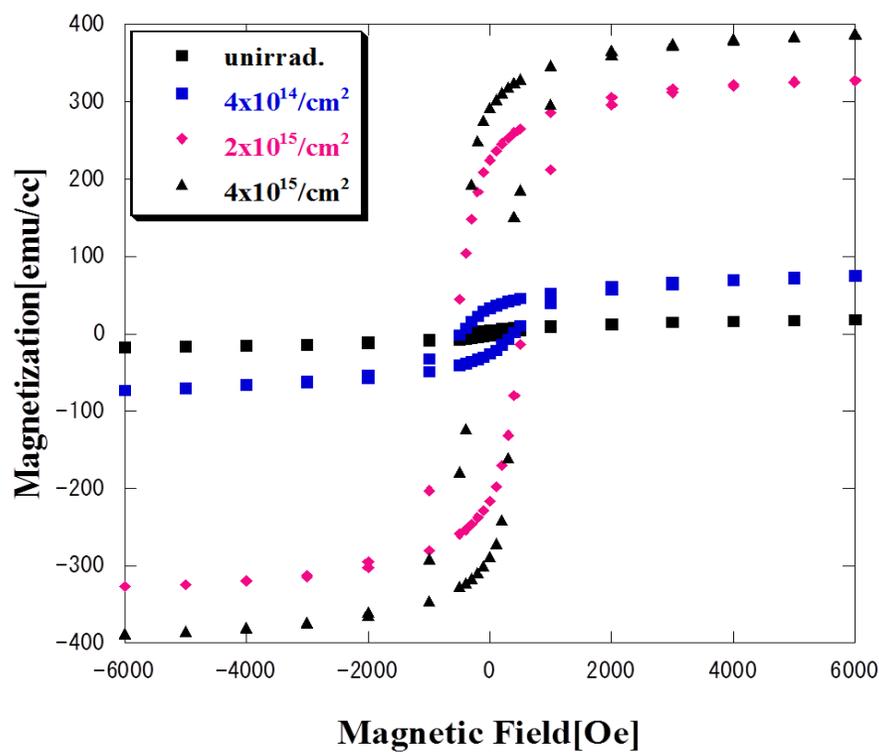
Nulc.Inst.Meth.B 442, 53-58 (2019)

$E = 1/2mv^2$ より質量を区別し粒子を特定できる

リチウム電解質のリチウム移動の様子



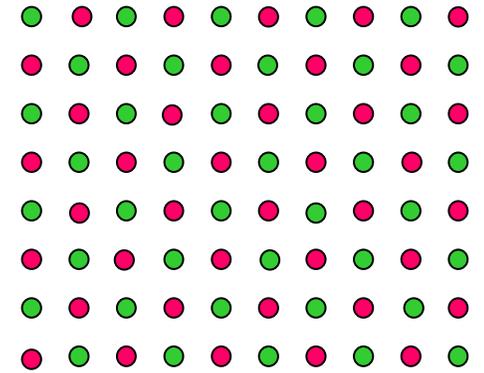
例) 鉄ロジウム合金 (FeRh、B2構造) の磁性改質  
(大阪府大との共同研究)



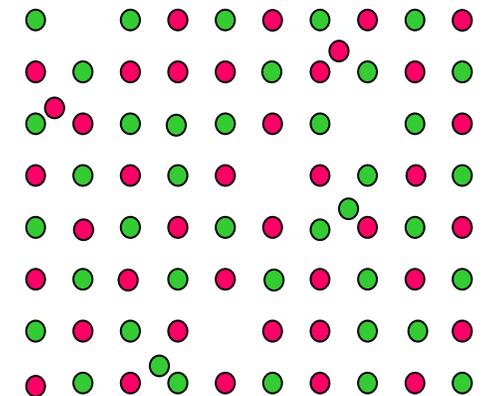
イオン照射により反強磁性  
から強磁性に変化

さらに照射を続けると結晶  
構造がFCCに変化して  
強磁性から常磁性に変化

イオンビームをあてる前は  
原子が規則的に配列



イオンビームにより原子が  
動かされ、結晶配列が変化



その他にも  
合金表面硬さ制御、半導体特性制御、  
超伝導体特性改質、水素貯蔵機能向上 など

## 宇宙機器の放射線耐性試験

宇宙空間で使用する太陽電池や各種半導体デバイスは、宇宙空間にとびかう放射線による影響を受け、性能が劣化したり誤作動が生ずる。

### 宇宙放射線



cJAXA(p100013466)

### ◆ シングルイベント効果

イオン1個により励起した電子の流れが誤作動を起こす

### ◆ トータルドーズ効果

イオンビームによる電気の蓄積が性能の劣化を起こす

### ◆ はじき出し損傷効果

原子のはじき出しによる結晶格子の乱れが性能の劣化を起こす

若狭湾エネルギー研究センターの**3種類のイオン加速器**は、宇宙空間の放射線を模擬するための広いエネルギー範囲の様々な種類のイオンビームを発生できるため、**宇宙機等に搭載する機器の放射線耐性評価**に大変適している。

今後の我が国の宇宙開発において、さらなる活用が期待される。

原子炉压力容器  
炉内構造物  
燃料被覆管  
核燃料



高速中性子  
熱中性子  
ガンマ線  
核分裂生成片

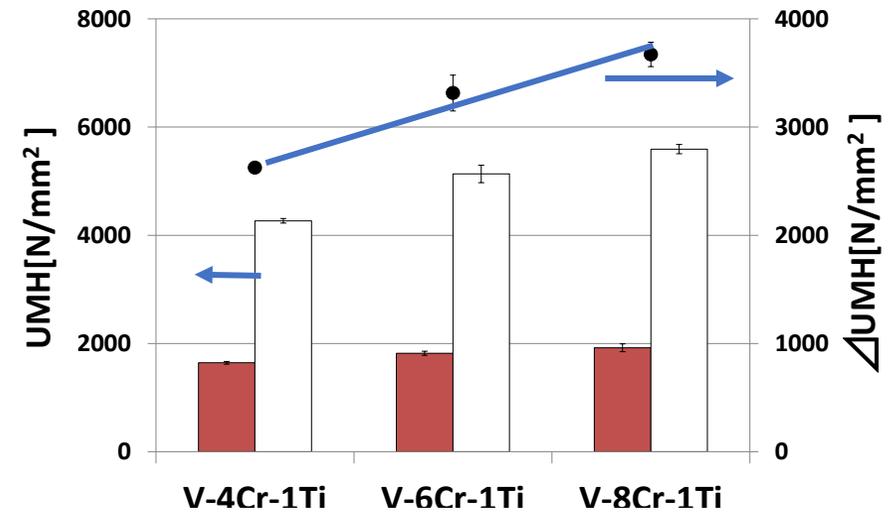
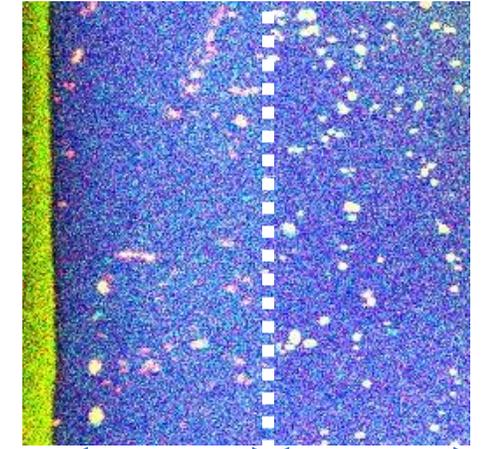
**照射効果**  
照射クリープ  
スエリング  
照射硬化・脆化  
照射誘起応力腐食割れ  
照射促進偏析

イオンビームによる  
模擬照射実験

研究用原子炉による  
中性子照射実験

照射効果機構の解明  
原子炉高経年化対策  
原子炉信頼性向上

Zr合金（燃料被覆管）  
へのイオン照射による  
析出物組成の変化  
（析出物のFe濃度が照射  
により減少）  
九州大との共同研究



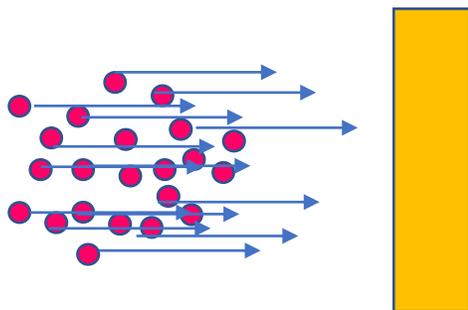
照射領域 未照射領域

核融合炉ブランケットの候補材・低放射化バナジウム合金の  
イオン照射による硬度変化 福井大との共同研究  
(赤：未照射材、白 照射材 ● 照射による硬度変化)

# 高強度レーザービームを利用した研究開発

LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)  
励起誘導放出による光増幅

レーザービーム（波長と位相がそろった光）の特徴  
指向性、収束性に優れる  
高密度のエネルギーを極短時間に材料に与える



波長1000nm、1 kW の場合  
光子1個のエネルギーは、たった1eV  
1秒間に $10^{22}$ 個程度の光子が標的にあたる

標的材料の一部の温度が  
融点を超える 切断  
沸点を越える 表面処理

原子力発電所の解体に伴う  
2次廃棄物を減らした材料の  
切断や除染作業に適している



大型配管切断のための  
機材開発



発振方式（連続、パルス）  
の違いによる除染の効率化

さらには、高強度レーザーの一般産業への  
活用も視野に、研究・開発

# 本講演のまとめ

高エネルギーイオンビーム、レーザービームが標的に与える効果の特徴は、

「**ビームの当たった極く狭い領域にだけ短時間に高密度のエネルギーを与えることができる**」  
ということである。

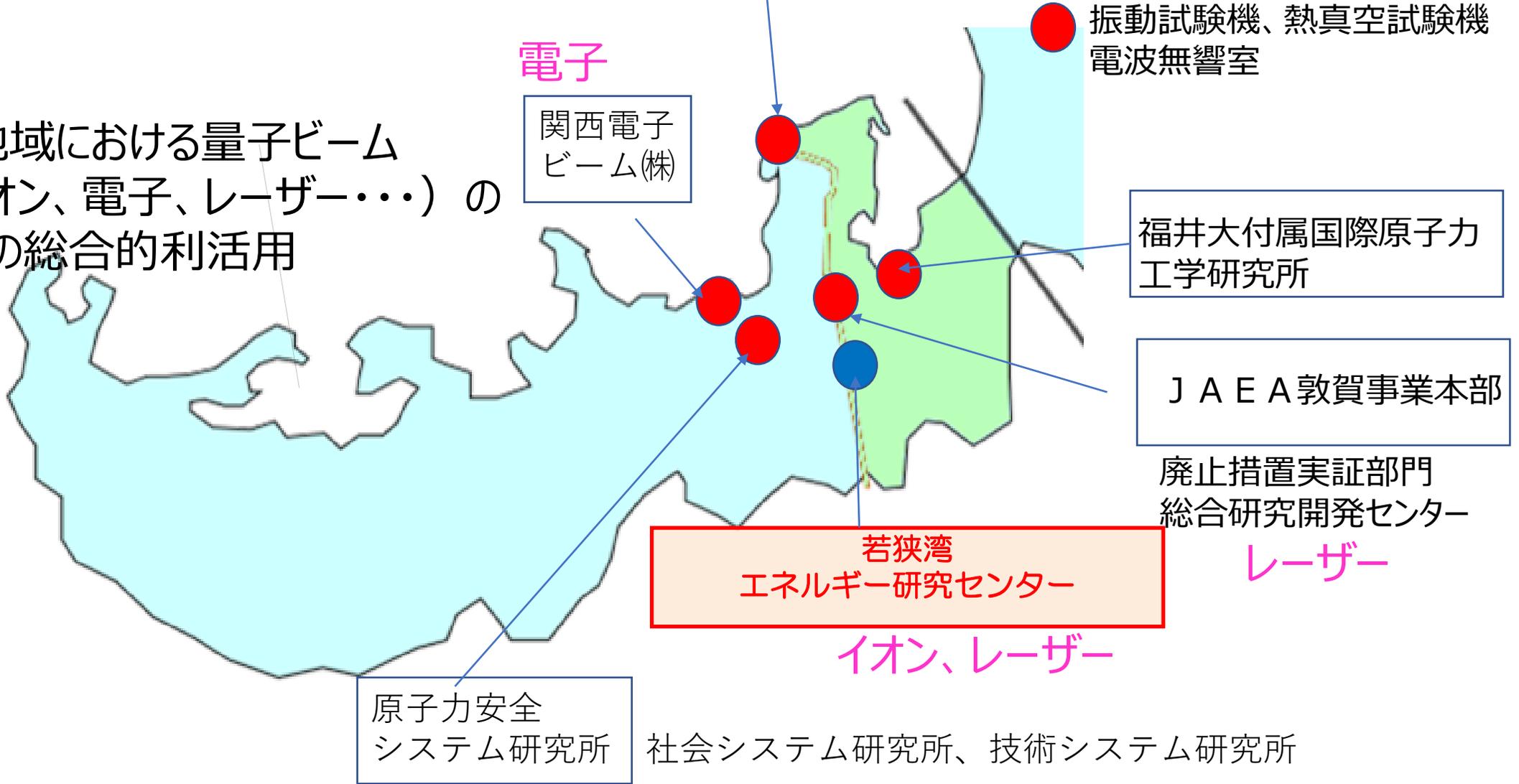
このようなビームの特徴を生かして、若狭湾エネルギー研究センターでは、3台のイオン加速器と高出力レーザーを用いて、多様な分野での高エネルギービーム利活用研究を実施している

- ✓ 陽子線がん治療（がん細胞の破壊）
- ✓ イオンビーム育種（突然変異、品種改良）
- ✓ 材料分析（元素の種類や分布の分析）
- ✓ 材料改質（ものの性質を変える）
- ✓ 宇宙機器・原子炉材料放射線耐性研究
- ✓ 原子炉廃止措置におけるレーザービーム応用

# 将来展望

宇宙用デバイスの放射線耐性評価  
(福井県工業技術センター、JAXA、  
他の放射線施設との連携)

(私見)  
福井県嶺南地域における量子ビーム  
(中性子、イオン、電子、レーザー...) の  
学術、産業への総合的利活用



社会システム研究所、技術システム研究所

(公財) 若狭湾エネルギー研究センター 各種お問い合わせ先

科学機器利用、製品開発等のご相談 企画支援広報部 [soudan@werc.or.jp](mailto:soudan@werc.or.jp)

補助金制度ご相談 産業育成部 [sangyo@werc.or.jp](mailto:sangyo@werc.or.jp)

品種改良ご相談 イオンビーム育種相談窓口 [ion-soudan@werc.or.jp](mailto:ion-soudan@werc.or.jp)

宇宙放射線模擬照射ご相談 照射支援室 [kkume@werc.or.jp](mailto:kkume@werc.or.jp)

上記も含め、当研究センター全般に関しては、

<http://www.werc.or.jp> をご覧ください (あるいは、“WERC”で検索)

**ご清聴、ありがとうございました**