

# 高崎量子応用研究所における 放射線・RI利用研究開発の現状

平成21年2月10日

(独)日本原子力研究開発機構  
高崎量子応用研究所  
量子ビーム応用研究部門(高崎地区)  
南波秀樹

# 高崎研究所/高崎量子応用研究所の役割

## ○第1回原子力長期計画(昭和31年)

■原子力の研究、開発および利用を進めるにあたっては、**動力としての利用面と放射線の利用面とを平行的に促進**するものとする。

## ○第2回原子力長期計画(昭和36年)

■放射線化学研究の中核機関設置を決定 **昭和38年高崎研究所設立**

—高崎研に大型施設を設置  
**ガンマ線照射施設**  
**電子線照射施設**



国内での現状  
**22の大型照射施設が稼働**  
**工場を中心に数百台が稼働**

## ○第7回原子力長期計画(昭和62年)

■放射線利用の一層の普及・拡大、技術の高度化  
**平成5年イオン照射研究施設(TIARA)を設置**  
—**放射線高度利用研究の開始**

## ○原子力政策大綱(平成17年)

■「量子ビームテクノロジー」技術分野の形成  
**日本原子力研究開発機構**  
**量子ビーム応用研究部門／高崎量子応用研究所 発足**

# 研究開発の経緯 — 主要な成果を中心として —

昭和38年(1963)      昭和50年      昭和60年      平成5年(1993)      平成17年(2005)      平成21年(2009)

高崎研設置

耐熱性電線

TIARA運転開始

高崎量子応用研究所設置

熱収縮チューブ

超耐熱性炭化ケイ素繊維

燃料電池用導電膜

ラジアルタイヤ

天然ゴムラテックス橋架け

高感度粒子線検出器

ボタン電池用隔膜

ハイドロゲル

創傷被覆材 蓄冷材

光機能材料

耐放射線性潤滑材

空気浄化フィルター

橋架けテフロン

カーボンニュートラル材料

ガンマ線、電子線  
イオンビーム

純水製造用電解膜

水中有用・有害金属捕集

電子線排煙処理

焼却炉中の有害金属除去装置

有機汚染物質分解除去

電線ケーブル経年劣化評価

CTA線量計

アラニン線量計

イオンビーム育種(カーネーション、キク)

半導体の劣化予測

重イオン細胞照射効果  
植物ポジトロンイメージング

加速器利用RI製造

土幌馬鈴薯照射施設      ウリミバエ不妊化照射施設  
(沖縄、鹿児島)

石炭燃焼排煙処理施設  
(ポーランド)

研究  
開発

材料

環境

計測

バイオ

技術  
支援

# 量子ビーム応用研究を支える研究開発拠点

## 高崎地区

### 高崎量子応用研究所



イオン照射施設 TIARA



ガンマ線照射施設



電子線照射施設

## 量子ビームプラットフォームの構築

量子ビーム複合利用

地域連携

大学・産業界等との連携

施設共用

## 関西地区

### 関西光科学研究所(木津・播磨)



大型放射光施設 SPring-8



極短パルス高強度レーザー照射施設

## 東海地区

### 東海研究開発センター

### 原子力科学研究所



大強度陽子加速器施設  
J-PARC



研究用原子炉 JRR-3

# 高崎量子応用研究所における研究開発の方向性

材料

環境

エネルギー

ライフサイエンス  
バイオテクノロジー

バイオ

材料開発  
材料評価

科学技術重点分野への貢献

電子

イオン

量子ビーム

陽電子

ガンマ線

陽子

医療応用

ビーム技術開発

ビーム技術

ラジオアイソトープ

加速器



ガンマ線照射施設



電子線照射施設



イオン照射研究施設(TIARA)

# 高崎地区組織・人員・予算の概要

人員（平成21年1月1日現在）

職員119人(任期付職員32人)

予算（平成20年度）

運営費交付金16.9億円

競争的資金1.8億円

照射料金収入等0.5億円

高崎量子応用研究所

職員60人(任期付職員12人)

管理部

放射線  
高度利用施設部

ビーム技術  
施設供用

競争的資金  
運営費交付金（科研費、受託等）

15.3億円

0.8億円

照射料金収入  
0.4億円

量子ビーム応用研究部門  
（高崎地区）

職員52人(任期付職員17人)

バイオ応用技術研究  
ユニット

バイオ

環境・産業応用  
研究開発ユニット

材料

1.4億円

0.9億円

特許収入等  
（平成19年度）  
0.1億円

先端基礎研究センター（高崎地区）

職員4人(任期付職員2人)

材料

0.2億円

本部組織等（高崎駐在）

職員3人(任期付職員1人)

産学連携推進部

人事部

経営企画部

核不拡散科学技術センター



# 最近の研究開発の成果

材料	環境	環境保全や資源確保に役立つ金属捕集材の開発	7
		環境にやさしいカーボンニュートラル材料の開発	8
	エネルギー	水素エネルギー利用の中核となる燃料電池膜の開発	9
		宇宙で用いる半導体の耐放射線性評価技術の開発	10
	材料評価	原子力用絶縁材料の寿命予測・劣化診断技術の開発	11
バイオ	ライフサイエンス バイオテクノロジー	世界最高レベルの収束度を持つ小型陽電子顕微鏡の開発	12
		世界初の「イオンビーム育種技術」の開発	13 14
		放射線抵抗性の機構解明	15
	医療応用	イネに吸収されたカドミウムの動態解析	16
		重イオン細胞照射効果の研究と医学・医療応用	17
ビーム 技術	ビーム技術開発	医療応用を目指したRIの研究開発	18
		数百MeV級重イオンマイクロビームの開発	19
		新ビーム開発とその利用	20

# 環境保全や資源確保に役立つ金属捕集材の開発

## 有用希少金属捕集 海水中のウラン捕集

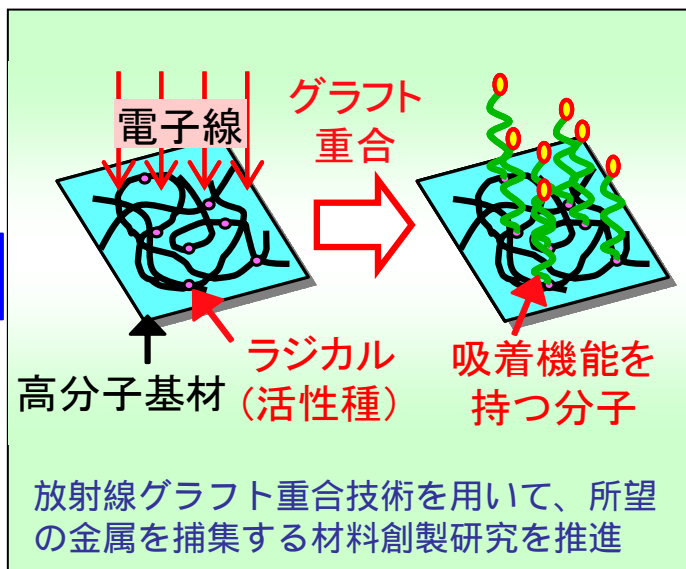


1kgのイエローケーキ回収を実証

## 温泉水中の スカンジウム捕集



草津温泉(群馬県)で捕集を実証  
平成20年10月プレス発表、  
NHK等で放映



## 表面処理に適用して 高性能材料開発



低損失ミリ波アンテナ基板  
平成18年9月プレス発表



ワイパーブレード  
低摩擦・高払拭性ワイパー用ゴム

## 有害金属除去

### ホタテ加工残渣中の カドミウム除去



## ビル空調用冷却 循環水から鉄を除去



小型・可搬式水質浄化装置を開発



# 環境にやさしいカーボンニュートラル材料の開発

## 環境浄化

### 家畜尿からの着色物質除去



処理前

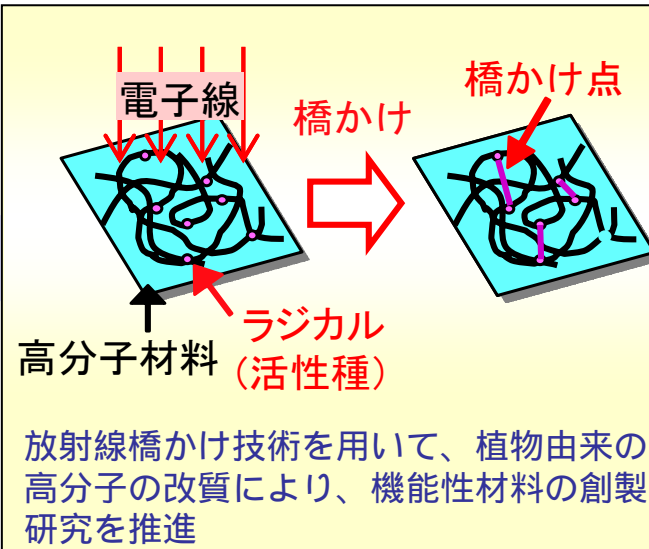
処理後

【群馬県地域結集型研究開発プログラム】

### 家畜排泄物処理（堆肥化）

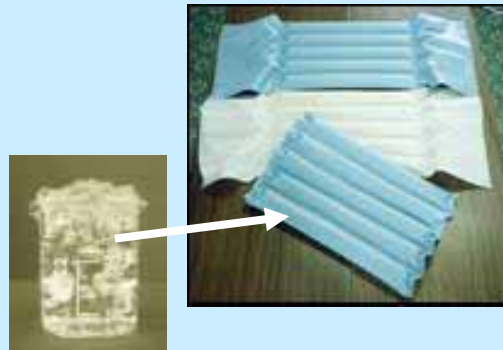


吸水材により発酵を促進



## 医療応用

### 床ずれ防止マット



生分解可能なマット充填ゲル

## 産業応用

### 透明熱収縮材



### 眼鏡用ダミーレンズ



白濁、熱変形が大幅に改善

### 柔らかい透明材料



軟質塩化ビニルの代替材料  
平成19年6月プレス発表

# 水素エネルギー利用の中核となる燃料電池膜の開発

## γ線、電子線による電解質膜の開発

### ○ メタノール用燃料電池膜

フッ素系樹脂にグラフト重合後に  
同時橋架けする放射線技術を確立

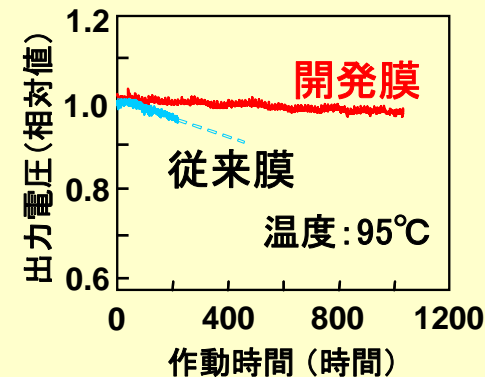
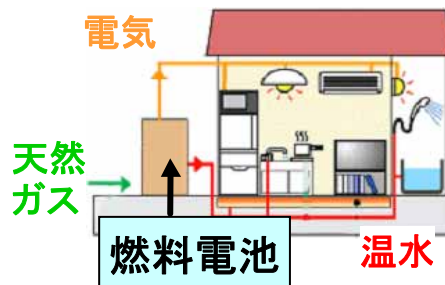


平成17年1月プレス発表

日東電工(株)との共同研究で実用化へ

### ○ 家庭用燃料電池に最適な高耐久性電解質膜の創出

熱・放射線2段グラフト重合技術を編み出し、耐熱性の  
芳香族高分子へのイオン伝導基の導入に成功



1000時間  
安定作動

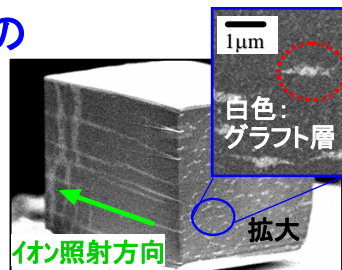
80°C、4万時間  
以上の安定  
作動に相当

家庭用燃料電池システムの本格普及に道筋 平成20年9月プレス発表

## イオンビームによる電解質膜の開発

### ○ イオン飛跡を利用して200nmの イオンチャンネル形成に成功

燃料電池自動車向け高温  
耐久性の電解質膜に展開



トヨタとの共同研究成果

## 今後の展開

### ○ γ線、電子線グラフト技術とイオンビームナノ 穿孔技術の複合利用

### ○ 中性子・陽電子による電解質膜構造・機能評価



# 宇宙で用いる半導体の耐放射線性評価技術の開発

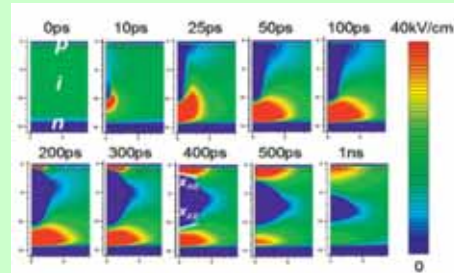
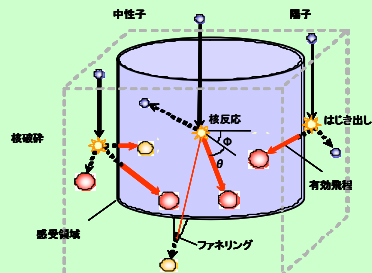
## 宇宙環境を模擬した 半導体の耐放射線性評価



集積回路の破壊箇所

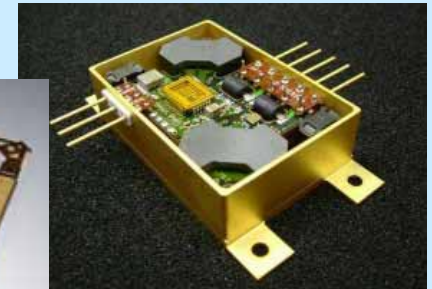
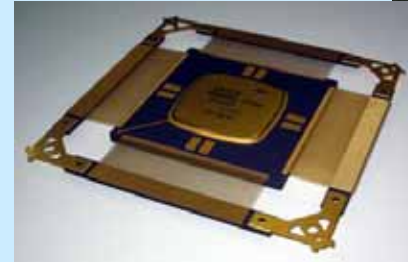
宇宙航空研究開発機構(JAXA)と  
密接に連携して評価技術を開発

## 半導体の放射線劣化・ 誤動作シミュレーション



大学等との連携協力の下、  
放射線劣化モデル構築を推進

## 新しい宇宙用半導体の開発

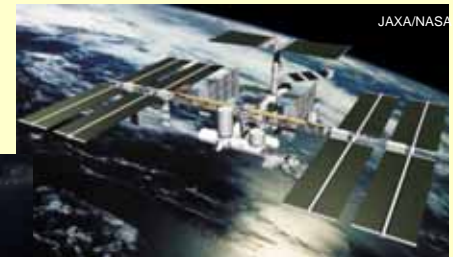


JAXA提供

世界最高性能の宇宙用マイクロプロセッサ等

## 人工衛星に搭載

月周回衛星「かぐや」



国際宇宙ステーション  
日本実験モジュール「きぼう」



# 原子力用絶縁材料の寿命予測・劣化診断技術の開発

J-PARC、ITER、原子炉で使用する高分子材料・機器類の耐放射線性評価  
寿命予測技術・劣化診断技術の開発



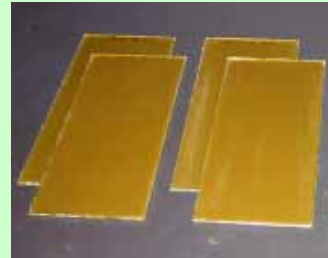
耐放射線性の  
ノンハロゲン高難燃  
ケーブル開発



冷却水管接続部の  
耐放射線性  
シール材開発



超伝導磁石用  
絶縁材の  
健全性確認



ガス発生が少ない  
超伝導コイル  
絶縁材料開発



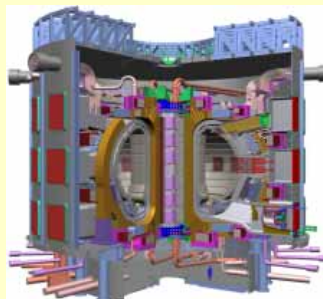
高経年化対策強化  
基盤整備事業を  
推進



プロジェクト推進、高経年化対策に貢献



J-PARC



ITER



(東京電力HPより)

原子炉

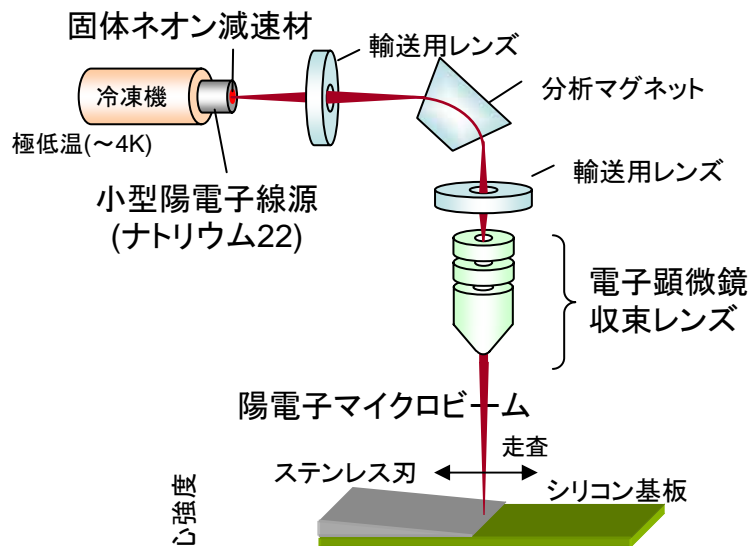
# 世界最高レベルの収束度を持つ小型陽電子顕微鏡の開発

—原子力材料のミクロな劣化診断が可能に—

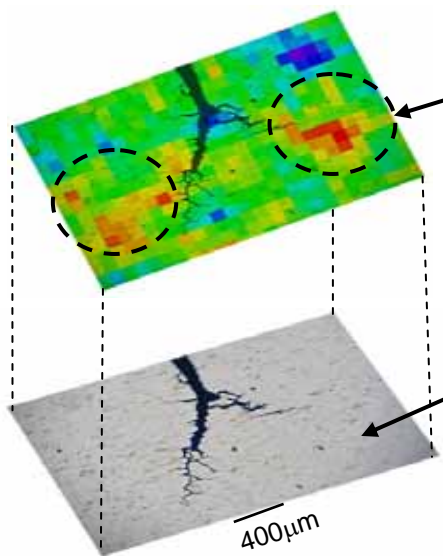
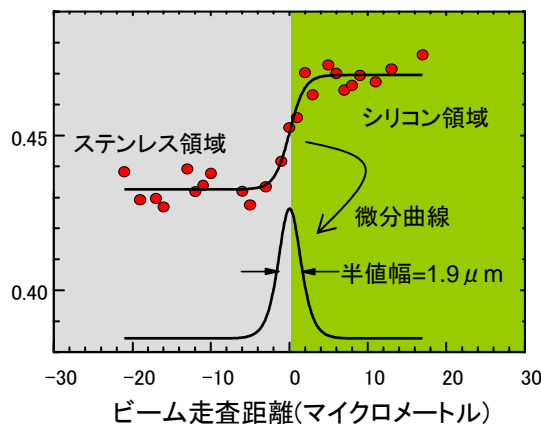
小型陽電子線源、固体ネオン減速材  
電子顕微鏡のビーム収束原理の応用



陽電子マイクロビーム(直径 $1.9\mu\text{m}$ )を  
形成し、ビームを試料面内で走査



消滅ガンマ線エネルギー分布の中心強度



消滅ガンマ線エネルギー分布  
中心強度の面内マッピング

赤い部分は、亀裂先端部に  
原子空孔型の欠陥が集中し  
ていることを示す

応力腐食割れ(亀裂)を  
生じたステンレス鋼の  
光学顕微鏡像

原子力材料局部や微小材料の劣化評価に適用

- 軽水炉ステンレス材の応力腐食割れ
- 高温ガス炉燃料被覆材の照射損傷

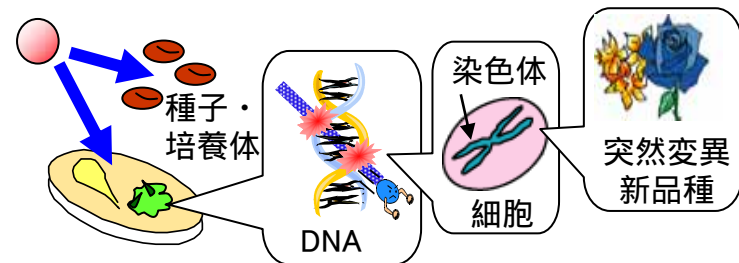
文部科学省・原子力システム研究開発事業

先端基礎研究センター 陽電子ビーム物性研究グループ

平成19年12月プレス発表

# 世界初の「イオンビーム育種技術」の開発

## イオンビーム



## イオンビーム育種技術の特徴を説明

1. 変異の誘発率が高い : 小さな施設・圃場での育成可能
2. 変異のスペクトルが広い : 新しい品種・変異体の獲得
3. 変異する箇所が少ない : 不要変異がなく、育種期間を短縮



カーネーション、キク等で実用化

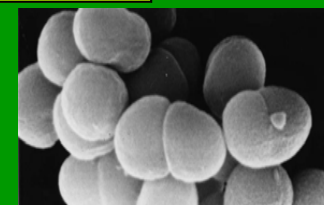
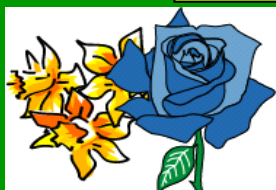


数種の遺伝子の特許化



作物への適用

## 地球環境の保全、食糧資源の確保、新産業の創成

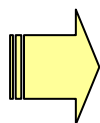




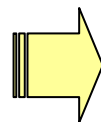
## ○夢のキクの創成に成功



イオンビーム



再照射



- ・ 4000万本、シェア10% 見込（平成20年度）
- ・ 全国20県 1 国外35団体 から許諾申請（平成20年度）

鹿児島県との共同研究

## ○地域連携で新花色品種を開発

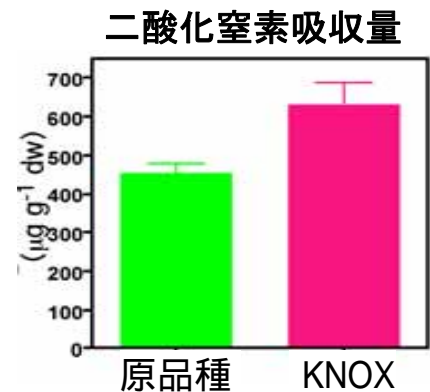


群馬県内で生産  
開始（H19年度）

群馬県及び県内の  
世界的育種家との  
連携

平成19年5月プレス発表

## ○世界初、環境浄化樹木の作出に成功



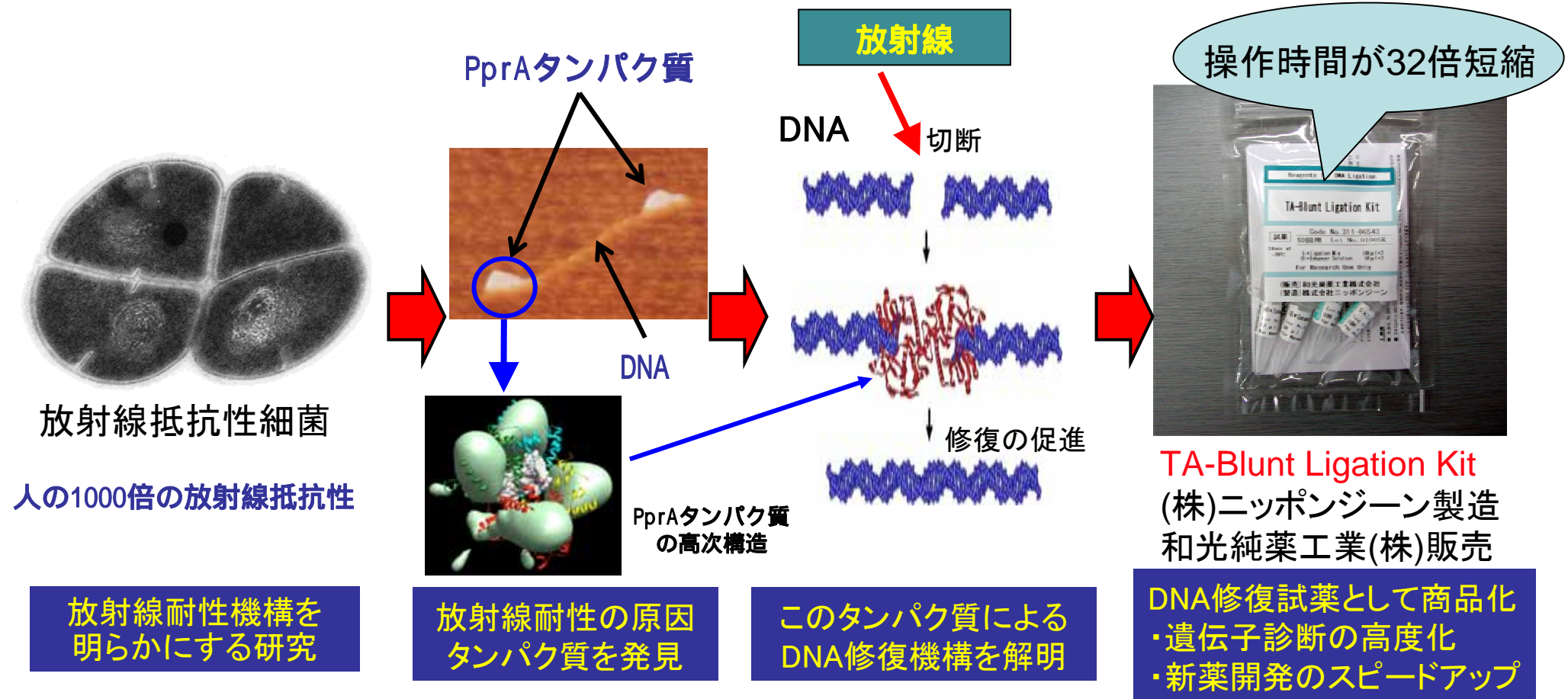
広島大学との共同研究

平成19年8月プレス発表

今までに品種登録・出願された24品種のうち、16品種がTIARAを利用

# 放射線抵抗性の機構解明

## — DNA修復促進試薬の実用化 —



Molecular Microbiology誌に掲載  
(平成16年10月)

平成18年1月プレス発表  
NHK科学番組で放映(平成18年2月)  
特許登録(平成20年4月)

# イネに吸収されたカドミウムの動態解析

食糧や環境の安全確保～カドミウムの土壌・食糧汚染問題への取り組み～

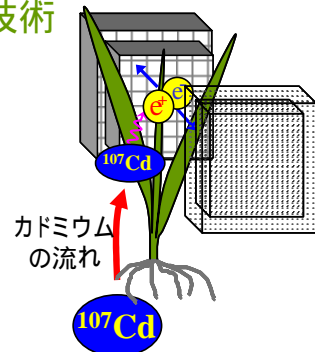
## 【課題】

- ・可食部へのカドミウム含量を抑制する栽培技術
- ・土壌に蓄積するカドミウムの浄化法

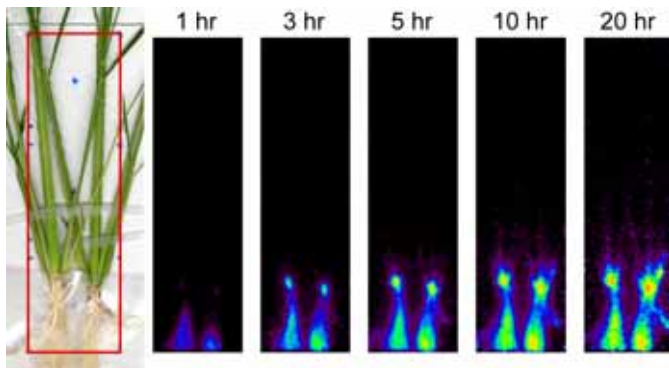


植物ポジトロンイメージング技術と $^{107}\text{Cd}$ トレーサーを利用し、イネなどの植物に吸収されたカドミウムの吸収・輸送・蓄積の動態を解明

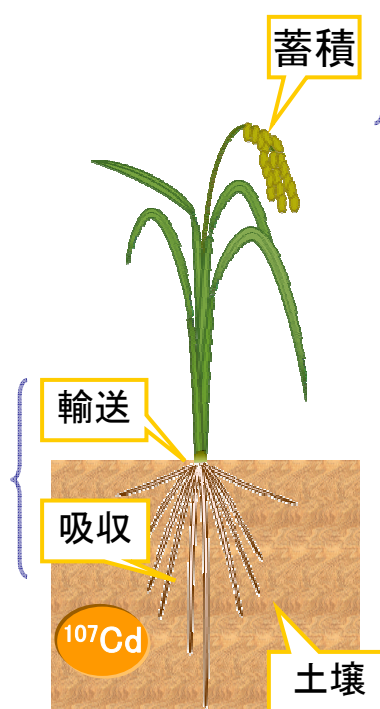
## 植物ポジトロンイメージング技術 (原子力機構独自技術)



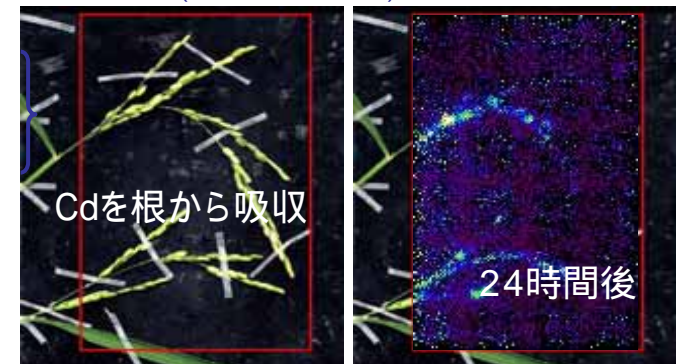
## 「イネがカドミウムを吸収・輸送する様子を初めて観測」 平成18年3月プレス発表



茎への到達時間: 1時間以内  
到達量: 与えたCdの約10分の1



「成熟したイネにおけるカドミウムの穂への集積を初めて観測(平成20年度)」



穂への到達時間: 約7時間  
到達量: 与えたCdの約100分の1  
Cdの移行(地上部): Znに近い動態



## 今後

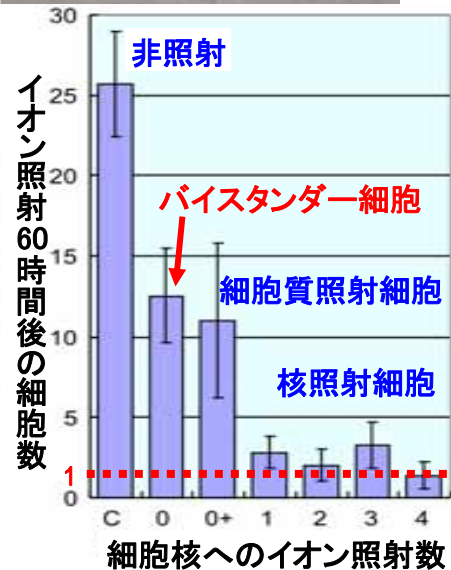
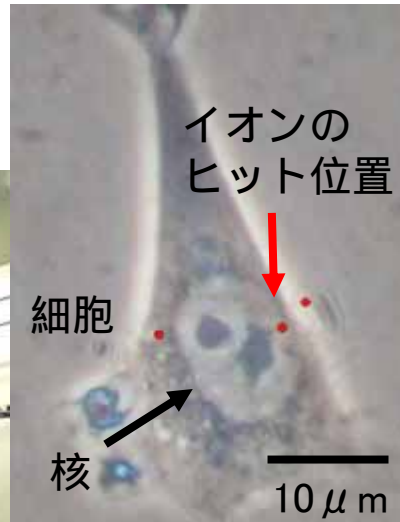
- ・カドミウム高吸収イネ品種と対照品種におけるカドミウム移行の相違解明
- ・カドミウム低蓄積イネや高蓄積イネの開発
- ・ダイズへのカドミウム蓄積動態解析への展開



# 重イオン細胞照射効果の研究と医学・医療応用

○群馬大21世紀COEとの共同研究

重イオン



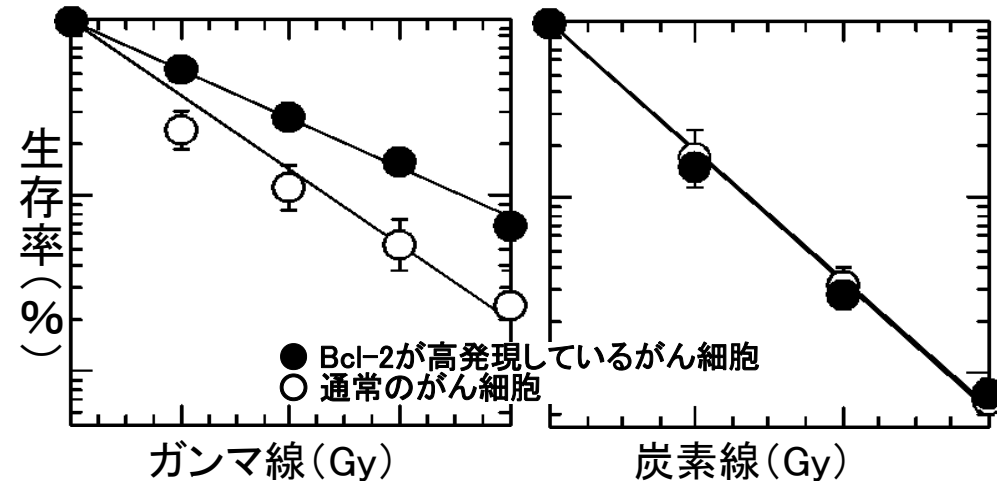
世界唯一の重イオンマイクロ  
ビーム細胞照準照射システム

『がん遺伝子Bcl-2の高発現』

○実際のがんの半数近くを占める

○アポトーシス(細胞の自殺)を抑制し、  
放射線に抵抗性を示す(死ににくい)

⇒通常の放射線治療が効かない



- 1.炭素線ではBcl-2の有無で生存率に差がない
- 2.炭素線の致死効果はガンマ線の3倍から5倍

平成20年6月プレス発表

Radiotherapy and Oncology誌  
に掲載(平成20年7月)

・がん遺伝子Bcl-2の高発現のためにガンマ線や  
X線などの通常の放射線治療が困難ながんには、  
重粒子線が有効

# 医療応用を目指したRIの研究開発



TIARA



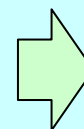
研究炉 JRR-3

国内で唯一加速器(荷電粒子)と原子炉(中性子)を利用したRI総合研究を実施



第3期科学技術基本計画  
大目標:生涯はつらつ生活

・超早期診断技術  
・診断と治療の一体化



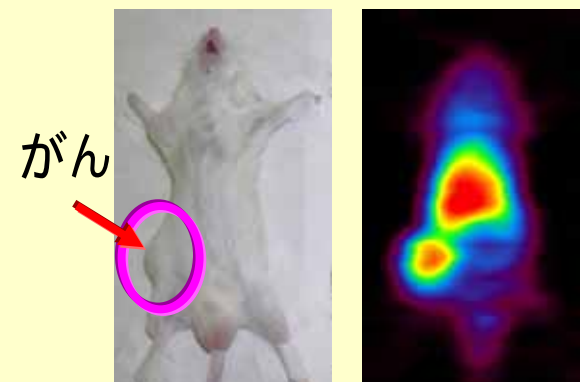
患者のQOL向上実現へ貢献

## 高機能化したがん診断・治療用RI標識薬剤の開発

- ・診断用 $^{76}\text{Br}$ の製造法・標識薬剤の開発
- ・治療 & モニタリング用 $^{64}\text{Cu}$ 、 $^{177}\text{Lu}$ 標識薬剤開発
- ・治療用 $^{186}\text{Re}$ 、 $^{188}\text{Re}$ 薬剤の開発



## $^{64}\text{Cu}$ 標識薬剤の治療効果試験



開発した薬剤の有用性確認

- 群馬大21世紀COEとの共同研究
- 京大、千葉大、東大との共同研究
- 平成20年度原子力基礎基盤戦略研究  
イニシアティブ採択

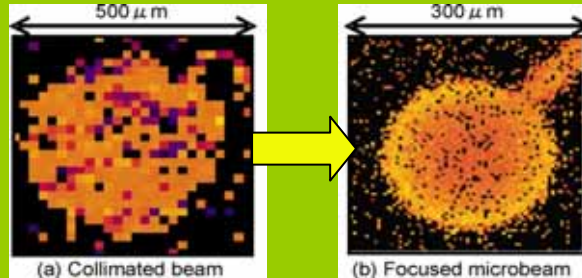
# 数百MeV級重イオンマイクロビームの開発

## 【高度技術を集積】

フラットトップ加速：エネルギー幅を狭小化  
磁石の精密温度制御：磁場変動が従来の1/100  
高精度一体化マイクロビームレンズ  
600ヒット/分以上の高速シングルイオンヒット

- ・世界最小の直径0.6ミクロンの260MeV-Neイオンマイクロビーム形成に成功（平成19年9月プレス発表）
- ・シングルイオンヒット

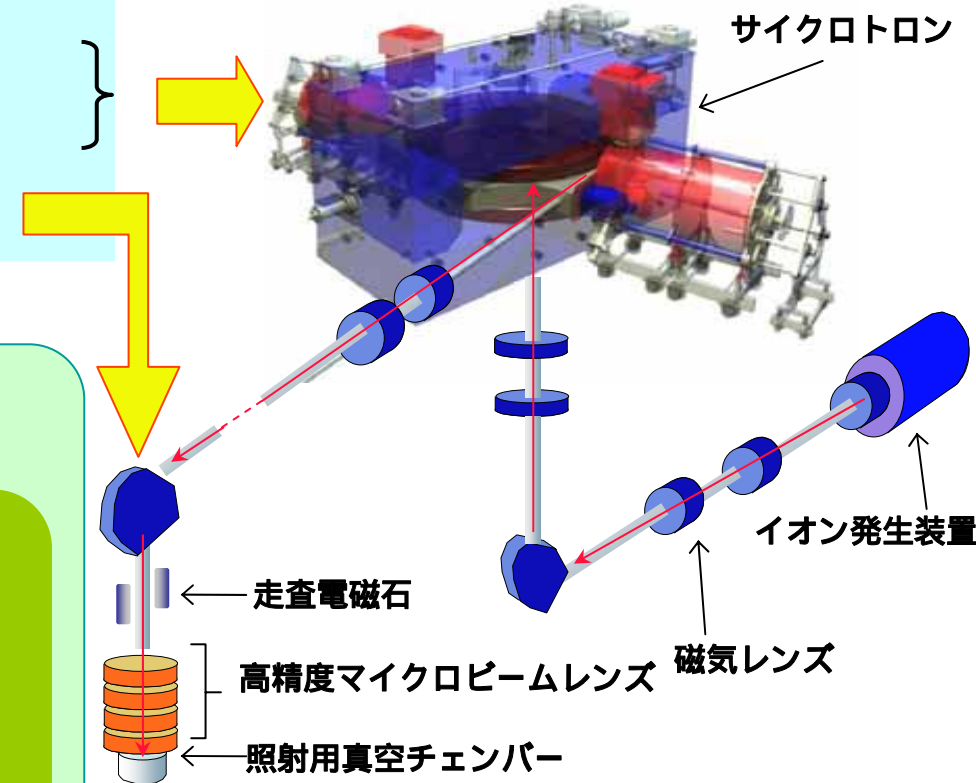
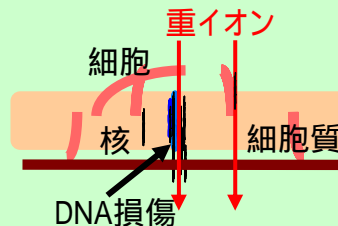
## 半導体のシングルイベント効果 マップの高分解能化



20μm 1μm

5μm間隔で狙い撃ち

- ・最先端デバイスナノ加工
- ・細胞核と細胞質の撃ち分け



集束・平行ビーム形成  
照準・深度制御技術

高速シングルイオンヒット

マイクロサージャリ  
(群馬大学21世紀COE、  
重粒子線治療施設)

低線量放射線影響研究  
半導体耐放射線性評価研究



# 新ビーム開発とその利用

## 超高分解能分析技術(マイクロPIXE)



試料照射部



アスベストの吸入によっ  
て発症したアスベスト肺



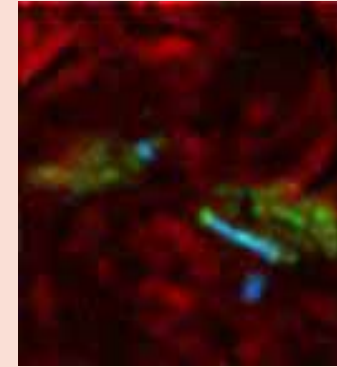
組織中のアスベスト



数ミリigramの検  
体中の多元素をマ  
イクロPIXE分析

従来は、大量(数グラム)  
の検体が必要

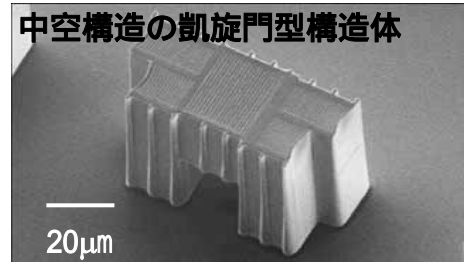
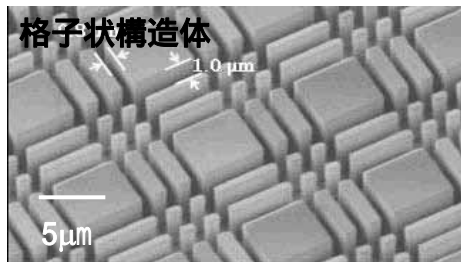
肺組織切片内のアスベスト  
の検出・種類の特定に成功



リン(赤)を含む肺組織、ケイ素(青)及びマ  
グネシウム(緑)を含むアスベスト(水色)

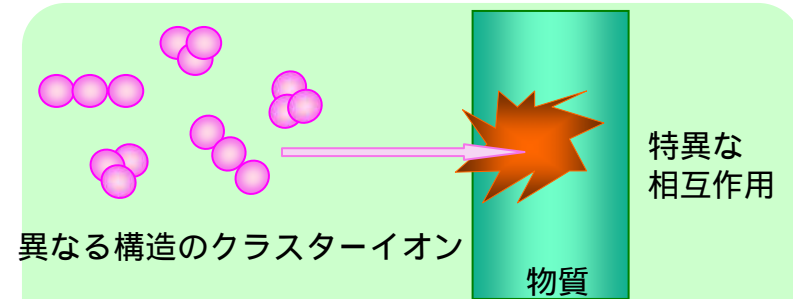
(平成20年11月プレス発表)

## 3次元微細加工を可能にするMeV級イオンマイクロビーム



プロトン・ビーム・ライティング技術で製作した3次元高分子  
構造体  
(平成19年2月プレス発表)

## クラスターイオンビーム生成・加速技術



Physical Review誌に論文発表(平成19年)  
(クラスター構造の相互作用への影響)

# 量子ビームを用いた医療応用の研究(群大医21世紀COE関連)

## 群馬大学21世紀COEプログラム 加速器テクノロジーによる医学・生物学研究

加速器工学と医学・生物学研究の融合による新しい細胞生物学研究分野の創出と世界最先端の医療技術の開発

### 最近の成果

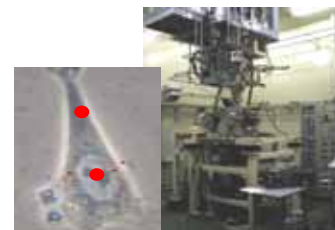
群馬大学重粒子線照射施設における超高精度イオンマイクロサージャリー治療システムの設計検討を完了

- ・加速器工学と医学・生物学研究の融合
- ・新しい細胞生物学研究分野の創出
- ・世界最先端の医療技術の開発

群馬大学小型重粒子線治療施設の整備

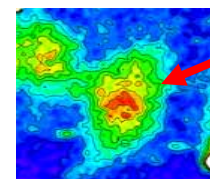
平成19年2月建設着工  
平成21年度臨床試験開始予定

(1)細胞内のピンポイント照射による医学・生物学研究  
:重イオンマイクロビーム細胞照射



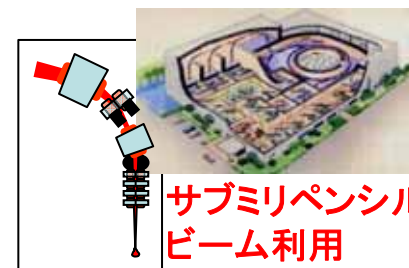
重イオンマイクロビーム細胞照射装置

(2)細胞内の微量元素分析による疾病発症機序の解明  
:大気マイクロPIXE



1個の細胞内  
元素分布(Pt)

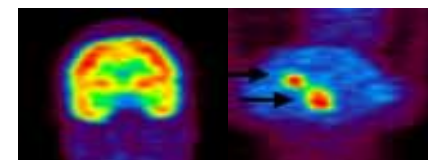
(3)高精度炭素イオンマイクロサージャリー治療  
:マイクロサージャリー技術の開発



サブミリペンシル  
ビーム利用

(4)新規RIの製造とがん診断・治療応用  
:イオンビームによる放射性核種の製造

$^{76}\text{Br}$ 、 $^{67}\text{Cu}$ 、 $^{64}\text{Cu}$   
画像診断    がん治療



# 群馬大学小型重粒子線照射施設の整備

— 重粒子線を利用した世界最先端医療技術の研究・開発 —

重粒子線治療「切らずに治すがん治療」

群馬大学

小型重粒子線照射装置技術実証機  
(世界最先端の医療技術の研究・開発)



がん疫学ネットワーク

連携

県保健医療計画  
三次医療計画の整備

重粒子治療に関する地域連携  
県民の健康・福祉向上

群馬県

県立がんセンター

県内医療機関

県民健康科学大学

人材育成・教育研究指導  
・診療体制 臨床試験

連携大学院  
共同研究

連携大学院  
共同研究

教育研究指導・基礎研究・応用研究

小型重粒子線治療装置共同研究プロジェクト

小型重粒子線治療装置開発

放射線医学総合研究所

21世紀COE「加速器テクノロジーによる医学・生物学研究」

重イオンマイクロビーム技術開発

日本原子力研究開発機構 高崎量子応用研究所  
(旧日本原子力研究所 高崎研究所)

# 大学・産業界等との連携/施設供用

## 大学との連携

### 群馬大学との連携大学院

**工学研究科**  
(客員教授・准教授 6名)  
環境保全化学講座  
先端機能材料講座

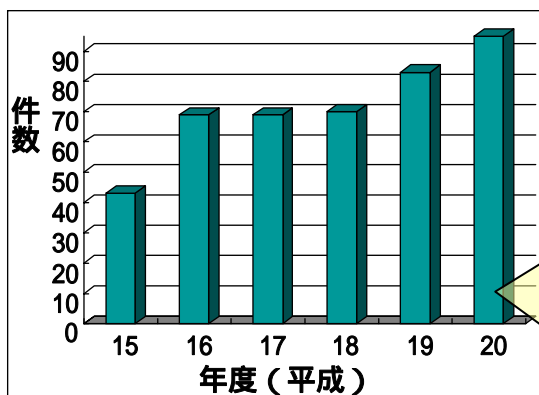
**医学系研究科**  
(客員教授 3名)  
生体機能解析学講座

全国の大学から学部学生、大学院生を積極的に受け入れ  
**次代を担う人材の育成**  
**延べ682人 (昭和40年度以降)**

全国の国公立大学と73件の共同研究を実施 (平成20年度)

## 産業界等との連携

共同研究の実施(民間企業、地方自治体、公的研究機関)



【平成20年度の共同研究相手方】  
材料分野: 日東電工㈱  
群馬県草津町  
宇宙航空研究開発機構 等  
バイオ分野: キリンアグリバイオ㈱  
群馬産業技術センター  
放射線医学総合研究所 等  
ビーム技術: ㈱神戸製鋼所  
分野 産業技術総合研究所 等

## 外部ユーザー施設利用

**外部利用比率**(平成19年度: 共同研究を含む)

### イオン照射研究施設

サイクロトロン	55.6%
タンデム加速器	63.0%
シングルエンド加速器	78.4%
イオン注入装置	70.5%
電子線照射施設	36.6%
ガンマ線照射施設	36.7%

## 施設共用促進

### 先端研究施設共用イノベーション 創出事業

明日を創り、暮らしを守る量子ビーム利用支援事業  
(平成19年4月開始)



# 地域連携・国際協力

## 成果の普及・技術移転

- ・オープンセミナー（シーズ紹介）
- ・技術説明会、相談会（県内外）
- ・技術講習会
- ・保有特許のデータベース化、公開
- ・技術移転ニュース発行



## 地域連携

### 群馬県地域結集型研究開発プログラム

環境に調和した地域産業創出プログラム（平成18年1月開始）  
畜産排水処理素材開発

### 地域資源活用型研究開発事業

越前和紙の技法とセルロースゲル等を活用した低収縮性和紙の開発  
（平成19年9月開始）

## 機関間連携

### 原子力機構、物材機構、理研の3機関連携

量子ビームを駆使した燃料電池システム用キーマテリアルの開発  
（平成18年12月開始）

## 国際協力

### アジア原子力協力フォーラム (FNCA)

Forum for Nuclear Cooperation in Asia

近隣アジア諸国との農業・工業分野における放射線利用の  
国際協力

### IAEAの原子力地域協力協定 (RCA)

Regional Cooperative Agreement for Research, Development  
and Training Related to Nuclear Science and Technology

農業・工業・医療等の分野におけるRI・放射線利用の国際  
協力

### 機関間協力

- ・ 米国エネルギー省
- ・ ドイツ重イオン研究所
- ・ マレーシア原子力庁
- ・ ベトナム原子力委員会
- ・ 韓国原子力研究所
- ・ 中国科学院

滞在した外国人研究者・技術者  
（2週間以上の受入）

世界37カ国、延べ665人  
（昭和55年度以降）

