

Women in Fusion and Science (WiFaS)

**HITACHI**

講演V（加速器）

# 加速器技術のがん治療への貢献

2025年12月10日

株式会社 日立製作所

研究開発グループ

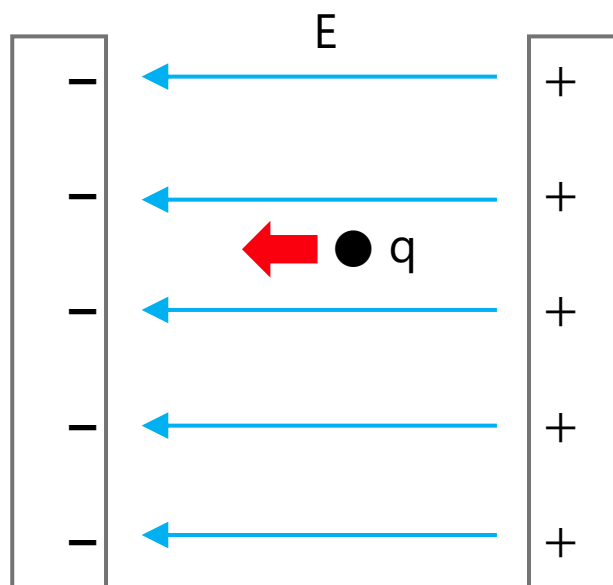
可児 祐子

# Contents

- **加速器技術**
  - 加速器の原理、主な加速器
  - 加速器技術の社会への貢献
- **がん治療における加速器技術**
  - がんの治療法
  - 放射線によるがん治療
    - 外部照射：粒子線治療
    - 内部照射：核医学治療
      - 電子線形加速器による核医学治療向け放射性核種(RI)製造
- **まとめ**

# 加速器の原理

加速器：電場や磁場を用いて電子や陽子などの荷電粒子を加速する装置



荷電粒子が受ける力  $F$ [N]

$$F = q \cdot E$$

$q$ ：荷電粒子の電気量 [C]

$E$ ：電場の強さ[N/C]

(参考)

[https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat\\_detail\\_08-01-03-02.html](https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_08-01-03-02.html)

<https://www.kek.jp/ja/accelerator>

## 主な加速器

分類	概要	代表例
静電加速器	電極間に直流高電圧を印加し、電位差で荷電粒子を加速する。	コッククロフト・ウォルトン型 ヴァンデグラフ型
線形加速器	低い電圧を直線状に繰り返しかけることで粒子を加速する。	電子線形加速器 陽子線形加速器
円形加速器	荷電粒子が磁場の中を通ると「ローレンツ力」を受けて軌道を曲げることができる性質を利用して、荷電粒子に円形の軌道を描かせながら加速する。	サイクロトロン シンクロサイクロトロン シンクロトロン ベータトロン

(参考)

[https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat\\_detail\\_08-01-03-02.html](https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_08-01-03-02.html)

<https://www.rd.ntt/se/media/article/0046.html>

# 加速器技術の社会への貢献

## 農業分野



イオンビーム照射による農作物・花卉の**品種改良**

- 人為的に突然変異を促進

## 産業分野



放射線による**滅菌・殺菌**

高分子材料の高機能化

- 結合の強化
- 半導体の製造

## 医療分野



**病気の診断**

- レントゲン、CTスキャン、PET検査

**がんの治療**

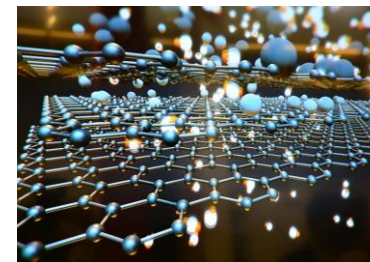
- X線、粒子線
- 治療用薬剤の製造

## セキュリティ分野



X線による空港などでの**手荷物検査**  
コンテナ内部の検査  
工業製品やインフラの**欠陥検査**

## 分析分野



**微量元素の分析**

- 「はやぶさ」が持ち帰った微粒子調査
- 分子や原子の**構造分析**

## 文化財分野

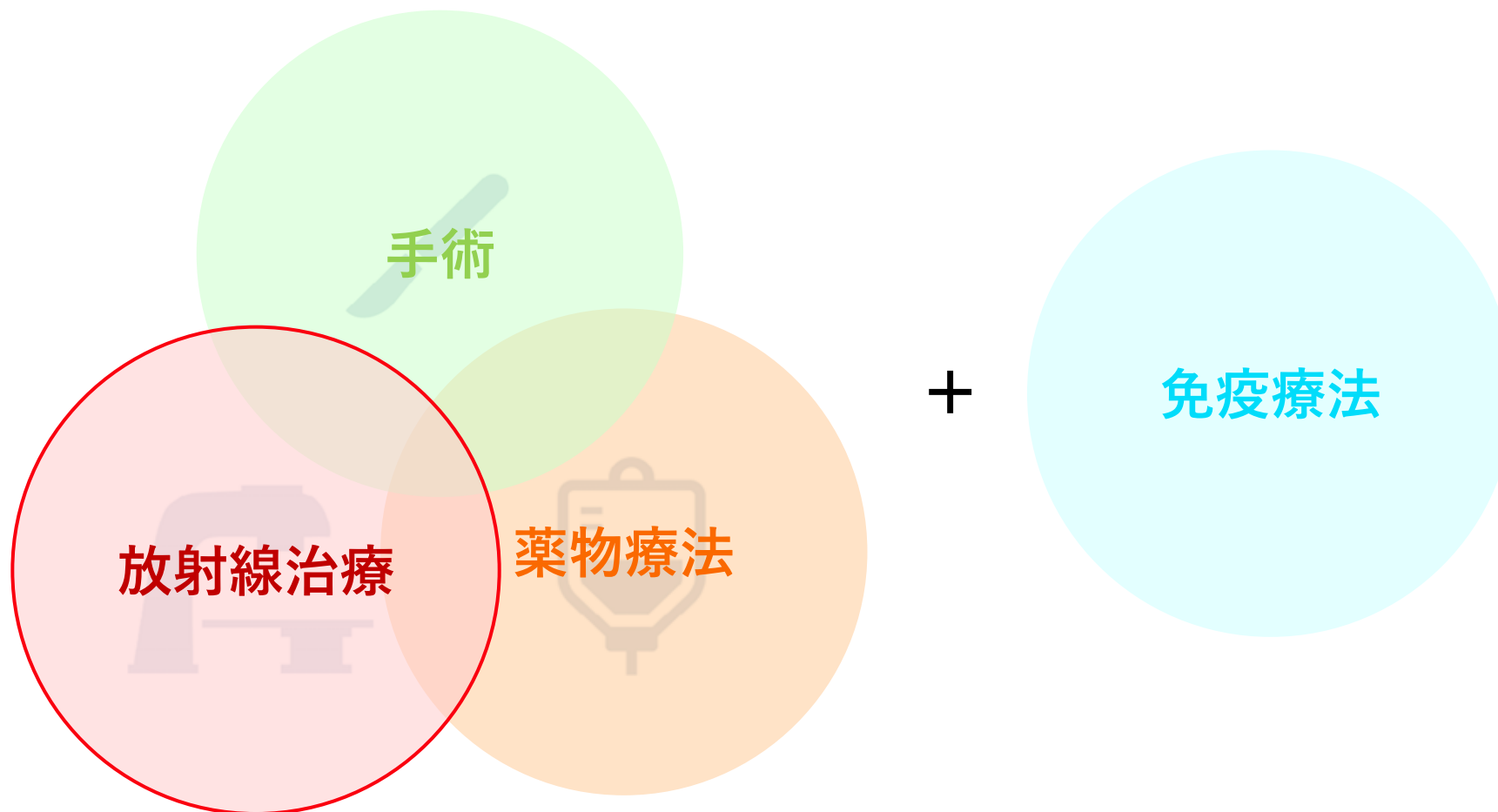


炭素14による考古学試料の**年代測定**  
ミュオンでピラミッド内部測定

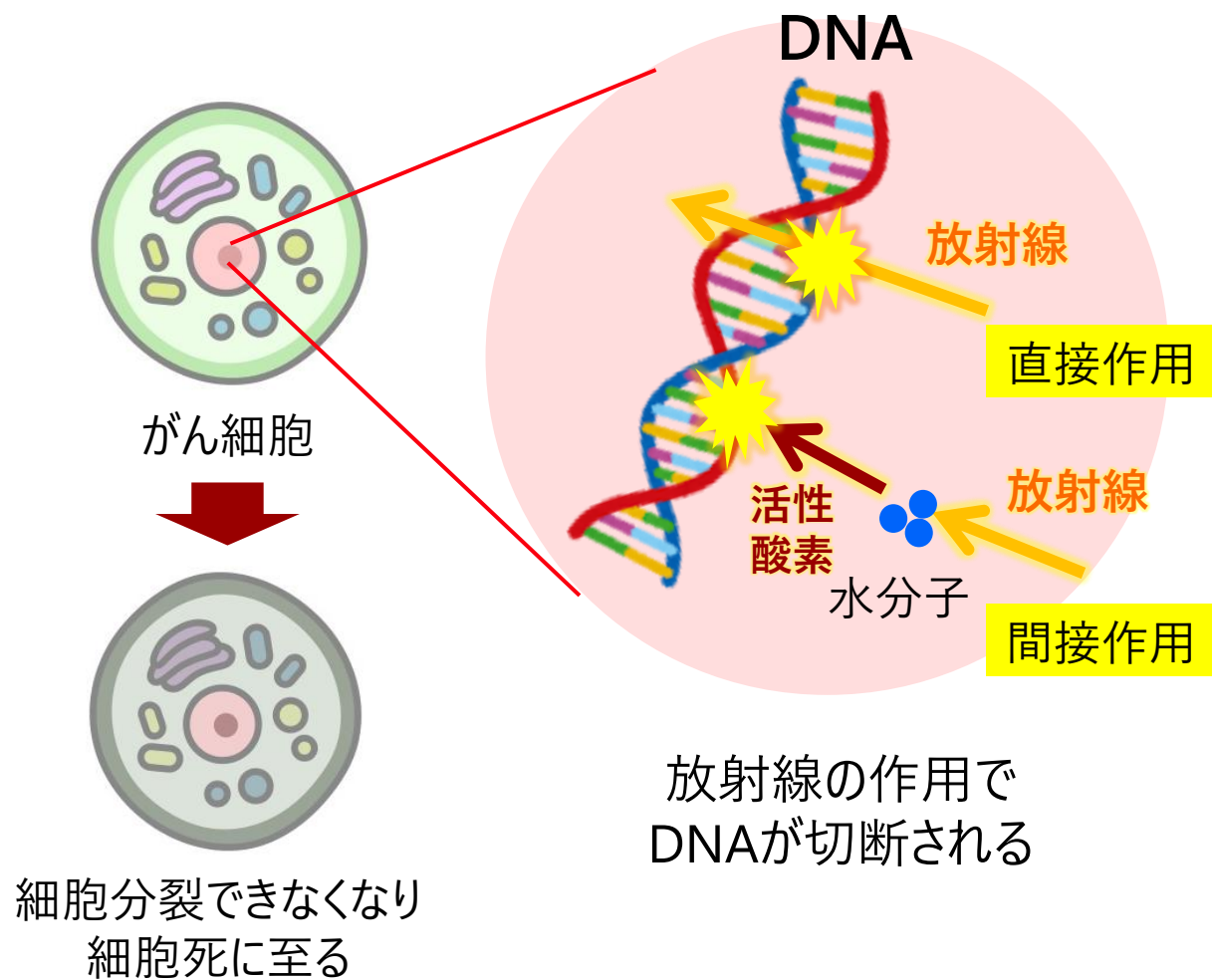
(参考)

[https://www.jema-net.or.jp/randb-archives/NP5703\\_201202.pdf](https://www.jema-net.or.jp/randb-archives/NP5703_201202.pdf)

[https://www.pasj.jp/Tree\\_Diagram/](https://www.pasj.jp/Tree_Diagram/)



# 放射線によるがん治療のメカニズム



## がん細胞

ダメージ修復力が弱い  
→繰り返し放射線を受けるとやがて死滅する

## 正常細胞

ダメージ修復力が強い  
→放射線を受けても回復する

## 放射線がん治療

### 体外から放射線を照射(外部照射)

切除困難な固形がんを治療

- X線治療
- ガンマ線治療
- 電子線治療
- 粒子線治療(PBT)
- 中性子線治療(BNCT)



### 体内から放射線を照射(内部照射)

体内に分散した転移がんを治療

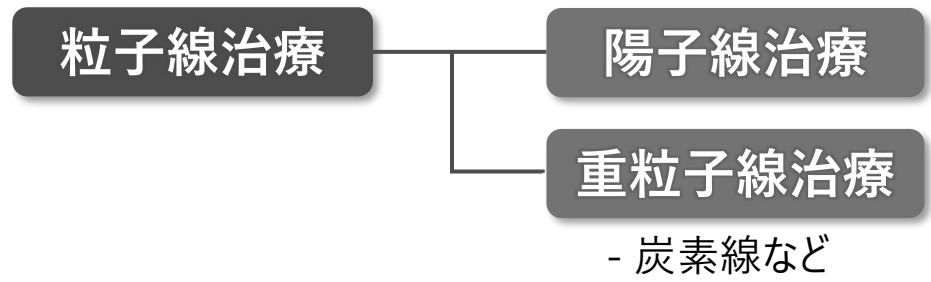
- 核医学治療  
(内用療法／標的放射線治療)

- ・ベータ線治療
- ・アルファ線治療



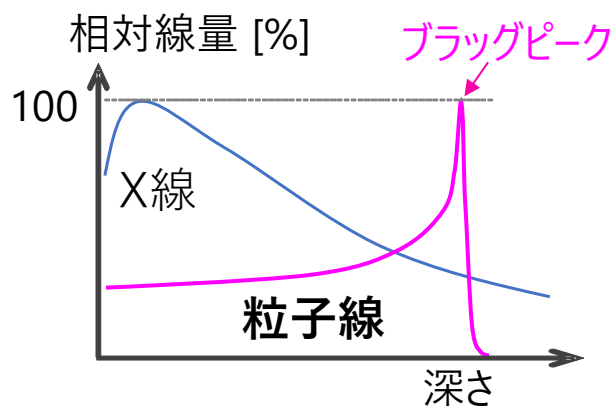
- 
- 密封小線源治療 (局所的な治療)

# 体外から照射：粒子線治療のしくみと特長

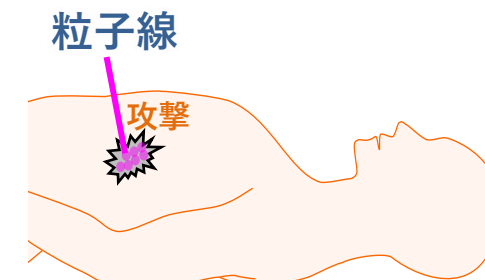


## ブラッグピーク

- ・表面近くではエネルギーをあまり放出しない
- ・停止する直前にエネルギーを放出  
組織に大きな線量を与える



ブラッグピークを患部に合わせて照射  
→ 患部への線量集中性を高める  
周辺の正常組織への影響を抑える



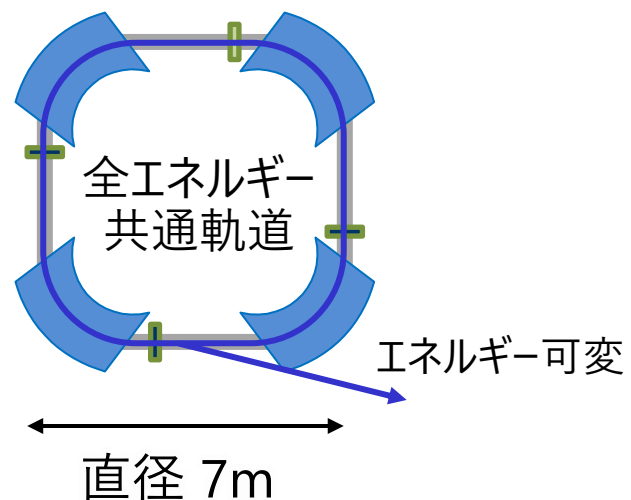
## 特長

- 通院で治療可能
- 患者負担が小さく副作用が少ない
- 保険適用が可能な対象あり

**生活の質(QOL)を維持した治療を実現**

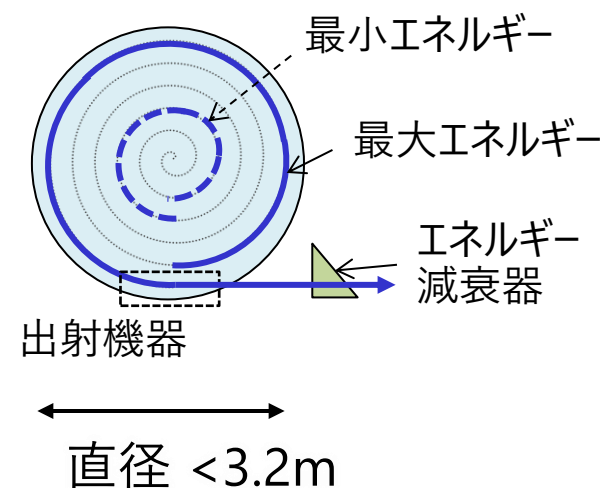
# 粒子線治療システム向けビーム加速器

## シンクロトロン



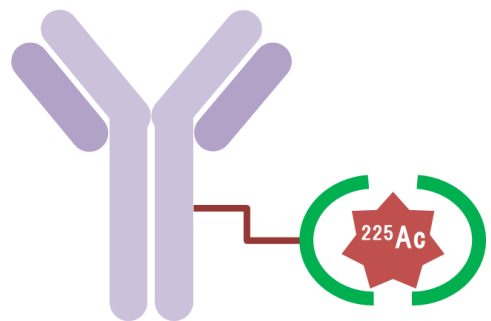
- 磁場可変(常伝導磁石)、大型装置
- エネルギー可変取り出し可
- 非連続出射

## サイクロトロン



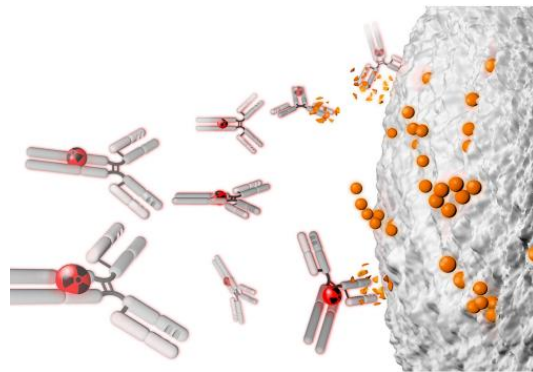
- 磁場一定(超伝導磁石)、小型装置
- 最大エネルギーのみ取り出し可
- エネルギー調整には減衰器が必要
- 連続出射が可能

# 体内から照射：核医学治療のしくみと特長



低分子薬  
ペプチド  
抗体等

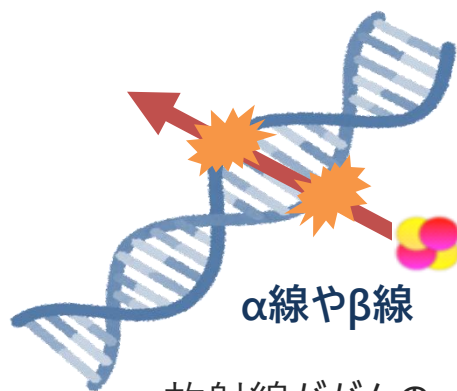
放射性核種



抗体等ががんに特異的に結合し  
放射線ががん細胞を攻撃



注射剤として投与



α線やβ線

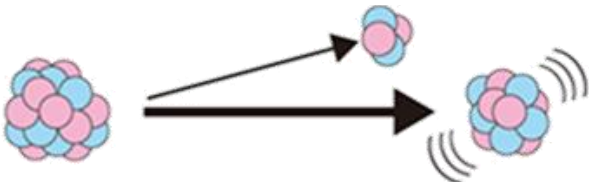
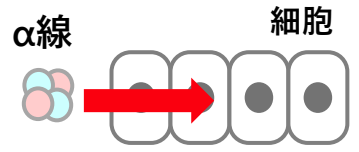
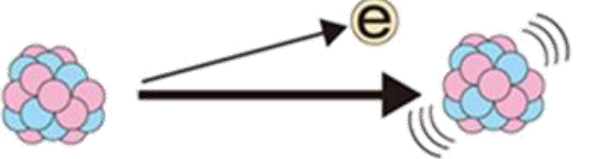


放射線ががんの  
DNA鎖を切断



## 特長

- 静脈注射による治療
- 通院で治療可能
- 高い治療効果
- 正常組織へのダメージが少ない
- 全身転移・血液がん・固形がんに適用

# 核医学治療で用いられる放射性核種

分類	説明	主な核種
α線核種	<p>アルファ線(He原子核)</p>  <p>α線</p>  <p>細胞</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 飛程が短い</li> <li>• 与えるエネルギーが大きい</li> </ul>	<p>At-211 Pb-212/Bi-212 Ra-223 Ac-225</p>
β線核種	<p>ベータ線(電子)</p>  <p>β線</p>  <p>細胞</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 飛程が長い</li> <li>• 与えるエネルギーが小さい</li> </ul>	<p>Y-90 I-131 Lu-177</p>
γ線核種	 <p>ガンマ線 (電磁波)</p>	

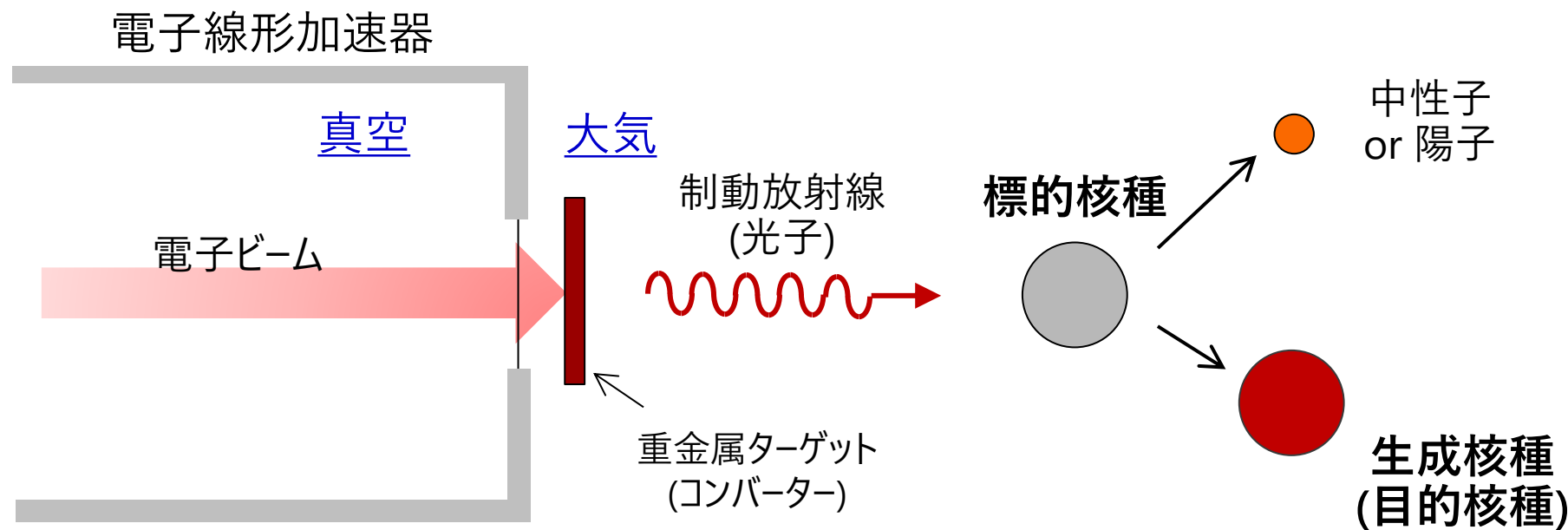
(参考・出典)

<https://www.ene100.jp/zumen/6-1-5>

[https://www.jastro.or.jp/medicalpersonnel/journal/JASTRO\\_NEWSLETTER\\_143\\_tokushu.pdf](https://www.jastro.or.jp/medicalpersonnel/journal/JASTRO_NEWSLETTER_143_tokushu.pdf)

[https://www.aec.go.jp/kaigi/teirei/2025/siryo26/1\\_haifu.pdf](https://www.aec.go.jp/kaigi/teirei/2025/siryo26/1_haifu.pdf)

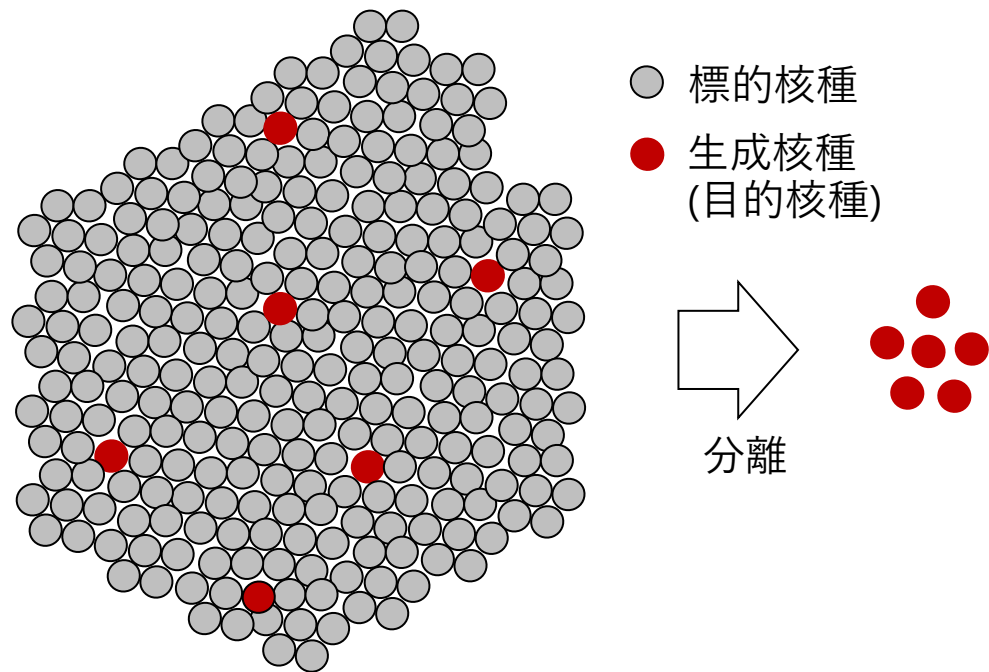
## 電子線形加速器による核医学治療向け放射性核種(RI)製造



- ① 電子線形加速器で電子を加速(例：20～40 MeV)
- ② 電子ビームを重金属ターゲットに照射して制動放射線(光子)を生成
- ③ 制動放射線(光子)が標的核種に照射され、光核反応により核種を生成

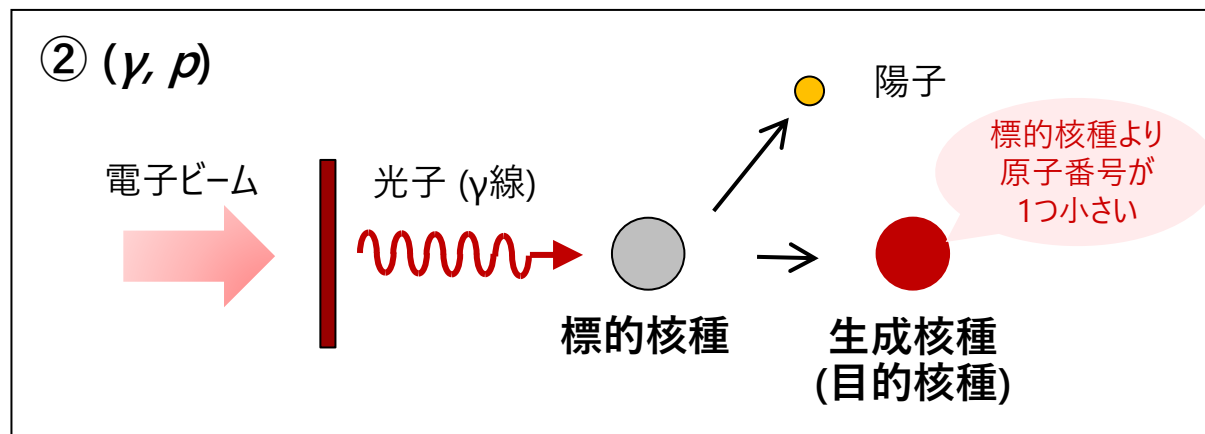
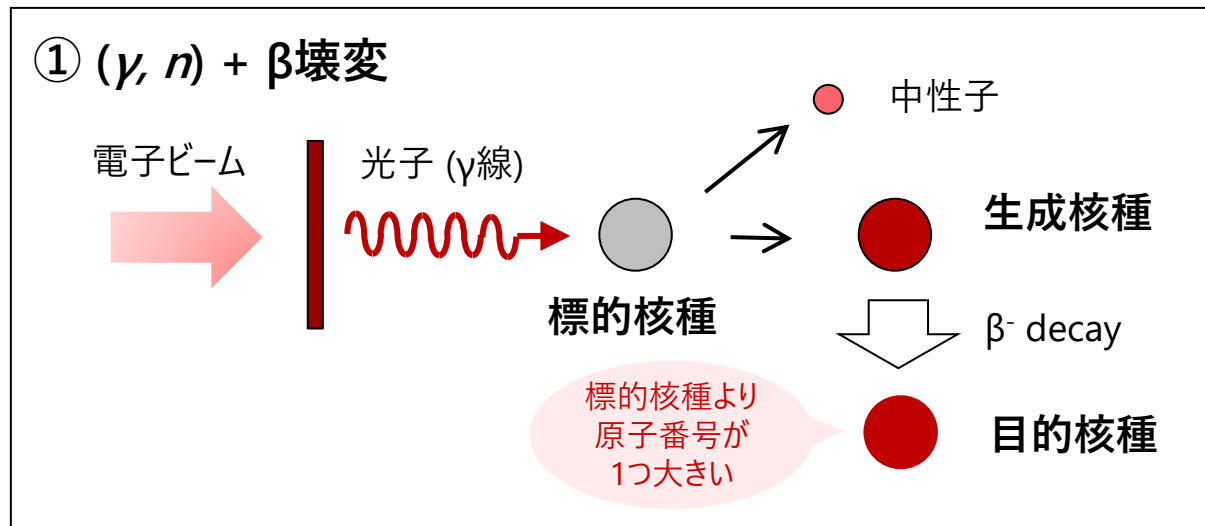
# 核医学治療向けRI製造に適した核反応の選定

## ■ 目的の核種をどうやって取り出す？



生成核種(目的核種)と標的核種が  
同じ元素(同位体)では分離が難しい  
→ 原子番号が変わる核反応を採用

## ■ 適した核反応



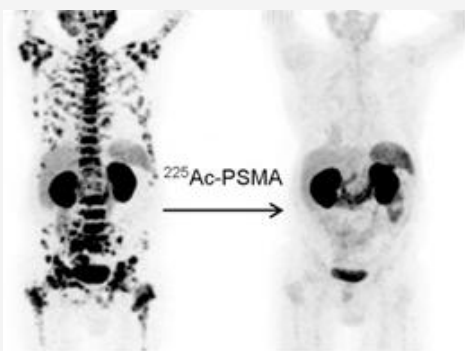
## 電子線形加速器で製造可能な医療用RI

標的核種	製造ルート	生成核種 (目的核種)	医療への適用
Mo-100	Mo-100( $\gamma, n$ )Mo-99, Mo-99 $\rightarrow$ ( $\beta$ -decay)Tc-99m	Tc-99m	診断 (SPECT)
Zn-68	Zn-68( $\gamma, p$ )Cu-67	Cu-67	診断 (SPECT) 治療 ( $\beta$ therapy)
Ge-70	Ge-70( $\gamma, 2n$ )Ge-68, Ge-68 $\rightarrow$ ( $\beta$ -decay)Ga-68	Ga-68	診断 (PET)
Hf-178	Hf-178( $\gamma, p$ )Lu-177	Lu-177	治療 ( $\beta$ therapy)
Ra-226	Ra-226( $\gamma, n$ )Ra-225, Ra-225 $\rightarrow$ ( $\beta$ -decay)Ac-225	Ac-225	治療 ( $\alpha$ therapy)

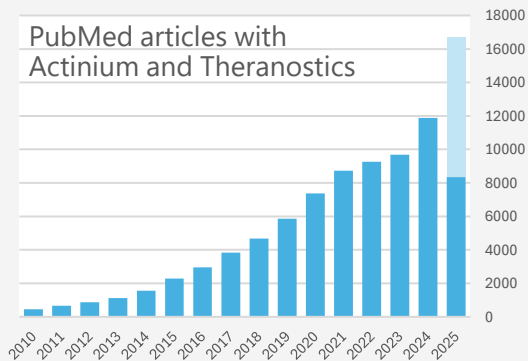
# Ac-225治療薬への期待と課題

## Ac-225治療薬への期待

- Ac-225治療薬の転移がん治療への有効性
- 医薬品想定市場 28.8 bn USD (2033年)  
(MEDraysintell社2024レポートより)
- 国内外の大手製薬メーカーや医薬品開発ベンチャーが積極投資
- Ac-225に関する研究/臨床開発件数が右肩上がりに増加 (ClinicalTrials.gov等より)



The Journal of Nuclear Medicine(2016) より



PubMedホームページより (2025.7.1時点)

## Ac-225治療薬の普及に向けた課題

- Ac-225の将来需要は現在の供給量(約78GBq/yr)の250倍と予測 (PanTera社レポートより)
- Ac-225の大量製造手法の確立とサプライチェーンの構築が必要
- 医薬品基準のAc-225を商用供給する企業・組織は限られる



## 光核反応によるAc-225製造に挑戦

### シミュレーション技術

- 核反応、核種生成
- 電子ビーム輸送
- 熱負荷、除熱

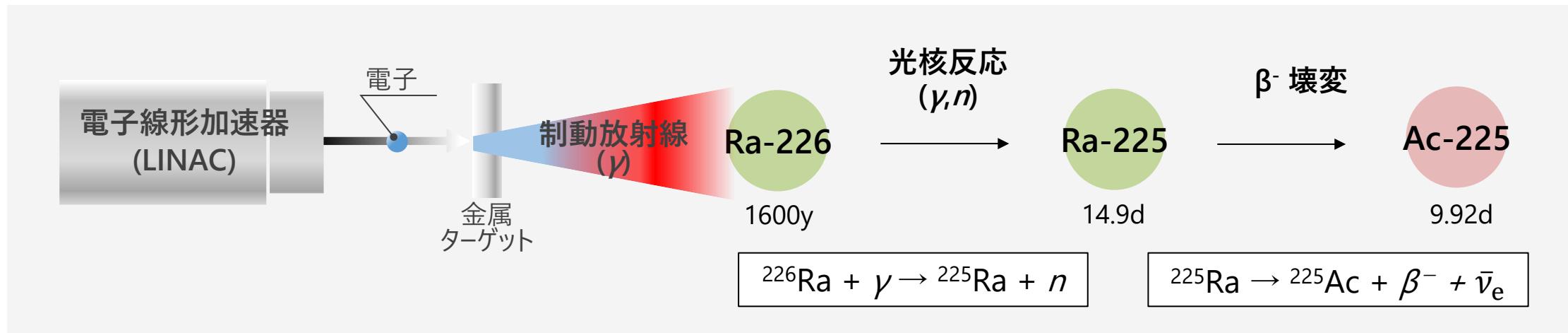
### リアルタイム ビームモニタ技術

- 高耐放射線
- 耐熱/電気ノイズ

### 放射性核種 取扱い技術

- α線核種取扱い
- 被ばく/遮蔽評価

# 光核反応による高純度Ac-225製造



## 他の光核反応

- $^{226}\text{Ra}(\gamma, 2n)^{224}\text{Ra} \rightarrow ^{220}\text{Rn} \rightarrow \dots$  :  $^{224}\text{Ra}$ (3.6 d) は $^{226}\text{Ra}$ とともにAc-225から分離可。長半減期子孫核種なし
- $^{226}\text{Ra}(\gamma, p)^{225}\text{Fr} \rightarrow ^{225}\text{Ra} \rightarrow ^{225}\text{Ac}$  : Ac-225 が生成 ( $^{225}\text{Fr}$ の半減期 : 4.0 min)
- $^{226}\text{Ra}(\gamma, pn)^{224}\text{Fr} \rightarrow ^{224}\text{Ra} \rightarrow ^{220}\text{Rn} \rightarrow \dots$  :  $^{224}\text{Fr}$  は  $^{224}\text{Ra}$  (半減期 : 3.3 min) に壊変

## 光核反応を採用するメリット:

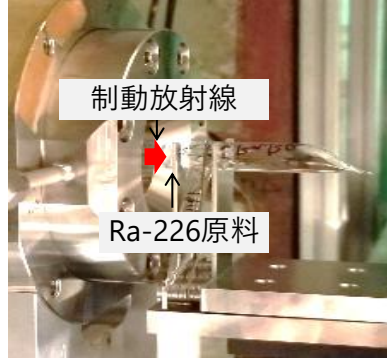
- **Ac-225以外の Ac同位体が生成しない** ⇒ 高純度Ac-225の生成
- **制動放射線を利用 : Ra-226ターゲットの大容量化が可能** ⇒ 量産に好適

# 電子線形加速器を用いたAc-225製造試験

## Ac-225製造試験

試験条件の一例 (2022)

- 加速エネルギー: 45 MeV
- 電流値(平均): 196  $\mu$ A
- 照射時間: 74 h



Ac-225 製造試験 (東北大学)

年度	試験内容	Ac-225製造量	Ref.
2019	原理検証試験	~300 Bq	1)
2020	製造試験、核反応断面積の評価	~370 kBq	2)
2021	製造試験、標識試験	~500 kBq	3)
2022	スケールアップ製造、品質評価	~4 MBq	4)
2024	スケールアップ製造、サンプル提供開始	~50 MBq	5)

1) Tadokoro *et al.*, J. Nucl. Med. 62 (supplement 1) 68, (2021), 2) Maeda *et al.* Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging 48, S1-S648 OP-0112  
 3) Maeda *et al.*, Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging (2022) 49, S1-S751. 4) Maeda *et al.*, SNMMI 2023, Chicago, USA, 2023.  
 5) 日立製作所 研究開発グループ 研究トピックス(2024/10/24) ([https://rd.hitachi.co.jp/\\_ct/17726291](https://rd.hitachi.co.jp/_ct/17726291)).  
 6) 日立製作所 ニュースリリース(2021/10/18) (<https://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2021/10/1018.pdf>).

## ニュースリリース<sup>6)</sup> (2021/10/18)

2021年10月18日  
 株式会社日立製作所  
 国立大学法人東北大学  
 国立大学法人京都大学

体内で放射線がん治療を行う「アルファ線内用療法」に必要な材料、アクチニウム225の高効率・高品質な製造技術を世界で初めて確立  
 体内に広く分散したがん有効な放射線治療方法の早期実用化に貢献

図1 アルファ線内用療法の原理

株式会社日立製作所(以下、日立)と、国立大学法人東北大学(以下、東北大学)、国立大学法人京都大学(以下、京都大学)は、放射線がん治療法の一つであるアルファ線内用療法に必要な、アム225(以下、アクチニウム)を、高効率・高品質に製造可能な技術を世界で初めて確立し、アルファ線内用療法は、がん細胞を破壊するアルファ線を放出する物質と、がん細胞に選択的に薬剤を組み合わせる治療薬(以下、アルファ線治療薬)を患者に投与し、体内からがん細胞を新しい治療法です(図1)。体内に広く分散したがん細胞など、既存の方法では治療困難な結果があることが知られ、早期実用化が期待されています。今回、三者はラジウム226(以下、ラ原料)とし、電子線形加速器を用いることで、分離できない不純物を生成せず、高品質なアクチニウム225を効率的に製造できる技術を開発しました。

## 研究トピックス<sup>5)</sup> (2024/10/24)

研究トピックス  
**アクチニウム225の大量製造に成功し、研究用サンプルの提供を開始**

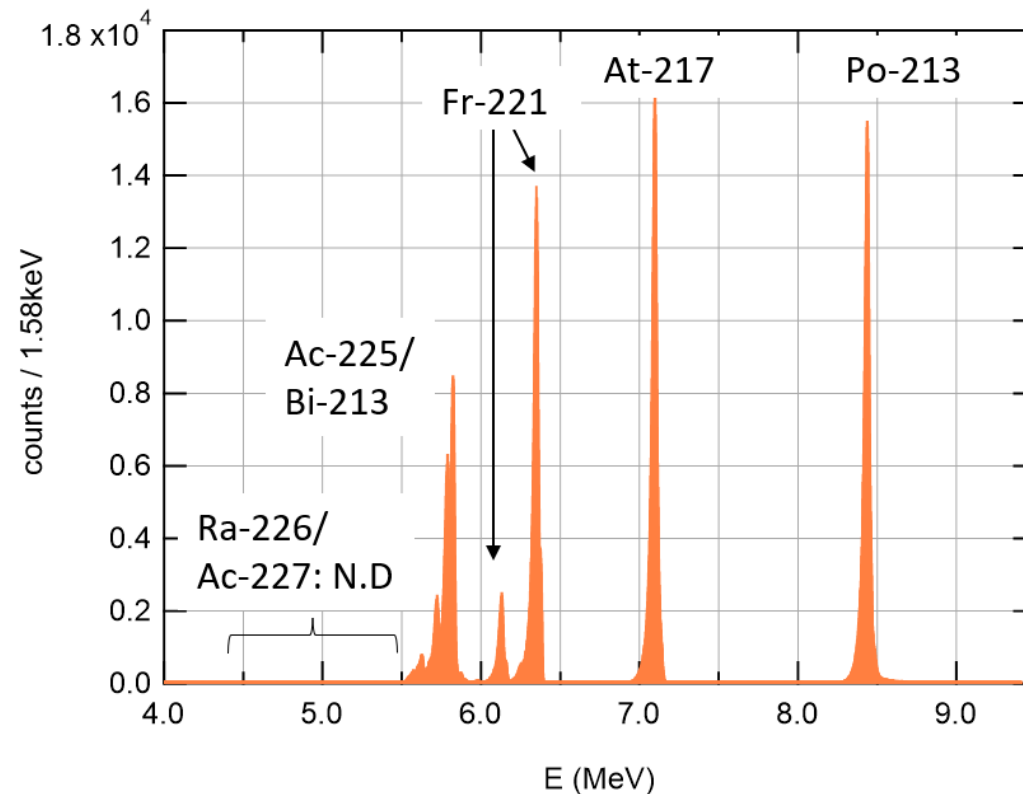
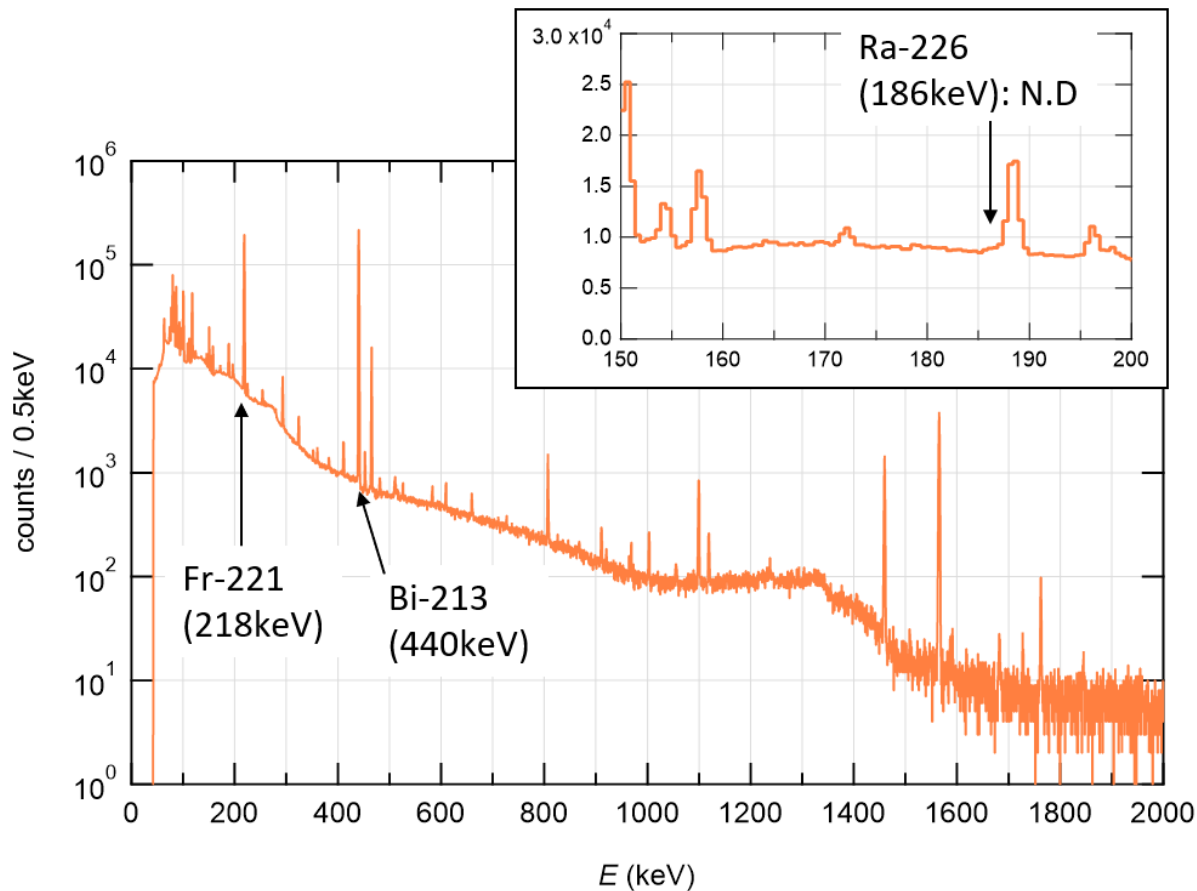
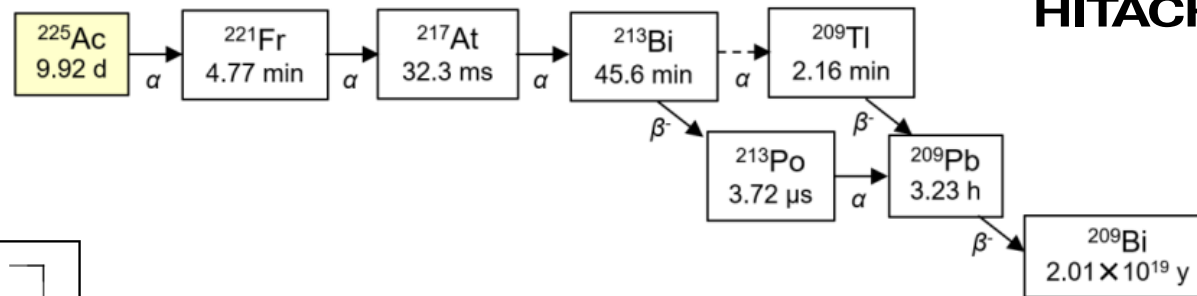
2024-10-24

高品質な放射性がん治療材料で治療薬研究を支援し、がん患者のQoL向上に貢献する

日立と国立大学法人東北大学(以下、東北大学)は、がんの放射線治療の一つである「アルファ線内用療法」に用いる材料となるアクチニウム225(以下、アクチニウム)の製造量を増加させる技術と、治療効果を高め副作用を軽減させる技術を開発し、このたび、製薬企業や研究機関向けに研究用のサンプル提供を開始しました(図1)。このサンプルは、国立研究開発法人国立がん研究センター(以下、国立がん研究センター)との共同研究により、共同開発したがん細胞の増殖を抑制する効果を確認しています。今後、日立はサンプル提供企業や研究機関との協力を進め、アクチニウム225製造技術の早期実用化をめざすと共に、アルファ線治療薬の研究開発を支援することで、がん患者のQuality of Life (QoL)の向上に貢献していきます。

図1 提供される研究用アクチニウム225サンプルの例

製造したAc-225のγ線、α線スペクトル\*



純度の高いAc-225の製造を確認

## これまでの開発成果と今後の計画



現在

### これまでの成果

- 光核反応方式によるAc-225製造の原理検証
- 高純度Ac-225製造を確認
- 研究用Ac-225サンプル提供

### 今後の技術開発

- 商用規模のAc-225製造へのスケールアップ
- Ac-225製造プロセスの遠隔操作・自動化・安定化
- 高線量な放射性物質の安全取り扱い

## まとめ

- **加速器技術は学術研究のみならず、社会の幅広い分野で活用されています**
- **新たな技術や新たな応用先を開拓し、“物理現象の理解～よりよい社会の実現”に貢献することを期待しています**

**HITACHI**