

原子力委員会  
2021.8.31 オンライン



第28回原子力委員会  
資料第1号

# 核医学用RI製造の基礎研究 —その現状と課題—

篠原 厚

大阪大学放射線科学基盤機構/大阪青山大学  
(一社)日本放射化学会 会長



# 自己紹介

## + 私の研究分野



### 主な職歴

氏名	篠原 厚	e-mail	shino@chem.sci.osaka-u.ac.jp
居室	大阪大学放射線科学基盤機構 附属ラジオアイソトープ総合センター(吹田本館)		
1985	大阪大学大学院理学研究科 博士後期課程修了		
1985	日本学術振興会特別研究員(PD)		
1987	名古屋大学助手 理学部化学教室		
1998	京都大学助教授 原子炉実験所		
1999	大阪大学教授 大学院理学研究科(化学専攻)		
2010-2011	大阪大学評議員		
2011-2015	理学研究科長・理学部長		
2016-2017	大阪大学ラジオアイソトープ総合センター長		
2018-2019	大阪大学放射線科学基盤機構・機構長		
2019-2020	大阪大学放射線科学基盤機構・副機構長		
2021-	大阪大学特任教授/大阪青山大学教授		

### 主な研究テーマ

- ・エキゾチックアトムの化学とその応用
- ・(超)重元素の核的・化学的性質
- ・放射性核種の医学利用
- ・福島原子力発電所事故に係わる環境放射能

### 趣味など

絵画、劇、映画、音楽の鑑賞、ねこ、剣道の観戦  
酒類の賞味、酒にあう肴の賞味、運動不足

、  
トム  
ます。

# 本日の予定(コンテンツ)

1. はじめに(自己紹介、本報告のポイント)
2. RIの医学利用について
3. RIの核医学利用に向けた基礎研究  
(阪大IRSの例を中心に)
4. RI製造供給の現状と課題
5. おわりに



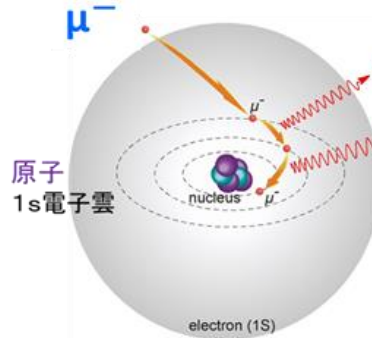
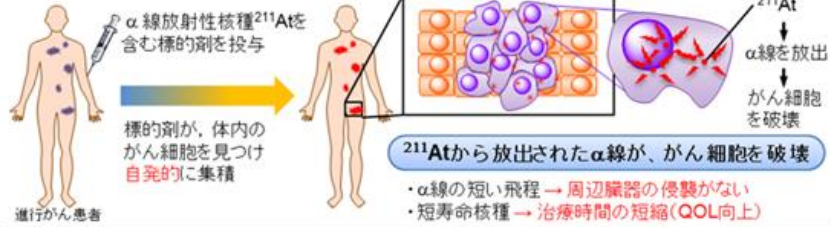
# 1. はじめに

- 自己紹介
- 本報告のポイント



# 放射化学が関連する最近のトピックスー RIとの関連

## α線内用療法とは



ミュオン原子の形成  
 ・エネルギーは200倍  
 ・軌道半径は1/200

加速器利用

## 宇宙地球試料分析

### 生命誕生の謎に迫る



太陽系形成とその発達過程の解明  
 生命材料有機物の探索

核医学用RI

# 放射化学はココに

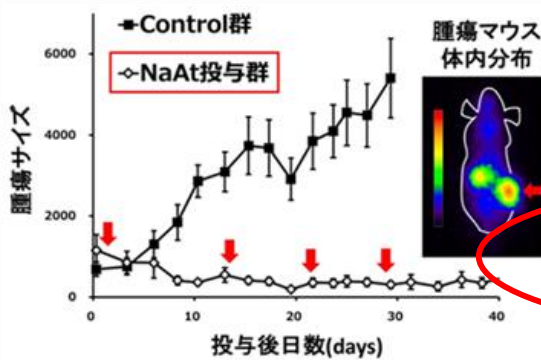
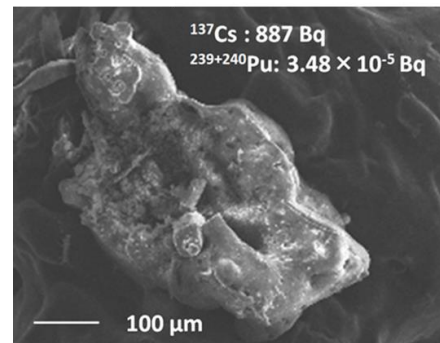
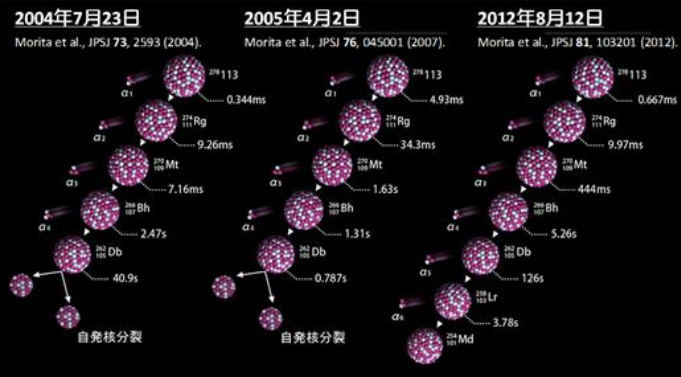


図1. アスタチン製剤の投与による腫瘍縮小効果(左)と腫瘍モデルマウスにおける腫瘍への高集積画像(右)

nature

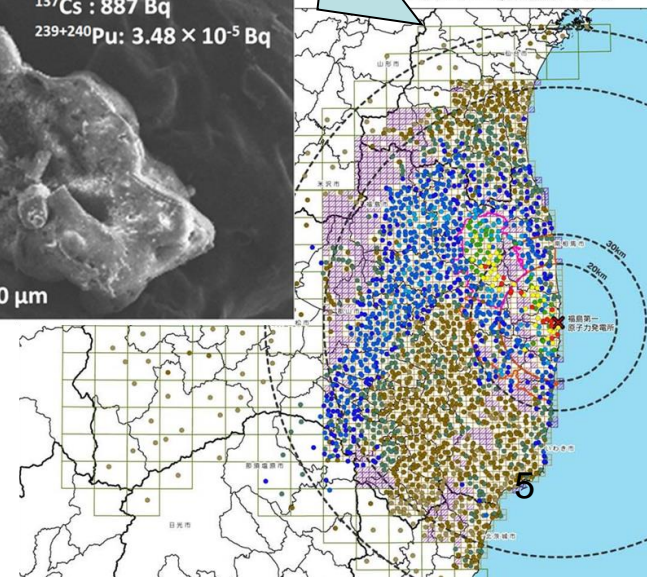


超重RI生成



トレーサーRI

## 137Csの土壌濃度マップ



# ■ 本報告のポイント

本課題は、これまでに、日本学術会議提言(2008.7.24)として「我が国における放射性同位元素の供給体制」も発出され、

- ✓ 加速器によるRI製造 QST(永津)、RIKEN(櫻井)
- ✓ 原子炉(JRR3)によるRI製造 JEAE(大井川)
- ✓ 国内の医療用RI供給状況 RI協会(北岡)
- ✓ アルファ線薬剤の世界と日本の状況 福島県立医科大(鷺山)
- ✓ 核医学診療の現状 RI協会(畑澤)

などの関連ヒアリングがすでになされている。

ここでは、大阪大学放射線科学基盤機構(阪大IRS)を例としてRI製造に関する基礎研究の現状を示し、主に今後の展開で課題となる以下の観点について検討する。

- RI人材の育成
- 放射線関連分野の科学的基盤の強化充実
- RI(+核燃)使用施設の老朽化への対応

## ■ まとめ

- 放射線やRIは、基礎科学やエネルギーはもとより、医療や産業利用では、もはや欠くことのできない必須のものとなっている。
- 新しい基礎科学や応用研究、福島事故等の人類的課題にも放射化学が大きく貢献する。
- 放射線人材の育成、学校や社会における放射線教育(我が国は世界で一番充実しているべき)において放射化学は大きな役割を果たす。

□ 人的資源の強化、RI施設の機能強化  
□ 放射線規制の合理的運用、安全文化  
□ 各種加速器、原子炉、大規模RI製造供給体制の国としての整備 ( $^{99m}\text{Tc}$ 、 $^{211}\text{At}$ 、 $^{225}\text{Ac}$ 、など)

研究者  
学術団体  
関連省庁・国

放射化学は基礎科学として、人類社会とその物質観(←元素の拡張)に寄与する。

サブアトムの世界を人類は享受するかどうか？これは、未来の人類の行動範囲に大きな影響を及ぼす。

## 2. RIの医学利用について

- 我が国におけるRI供給
- 核医学用の有用RI



# ● 学術研究におけるRI利用の推移

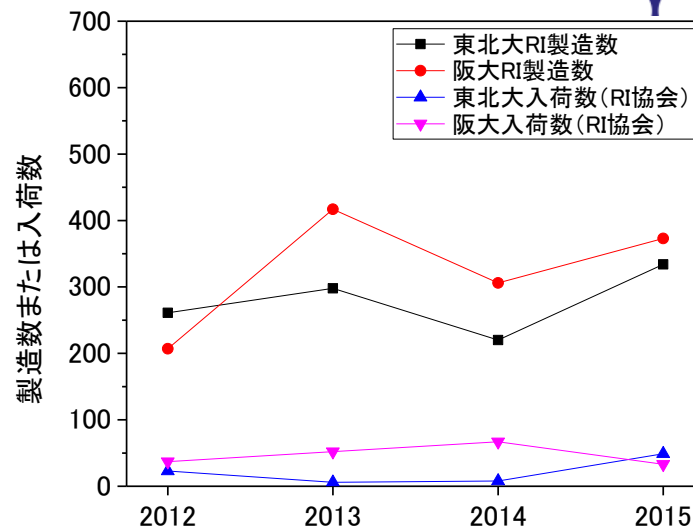
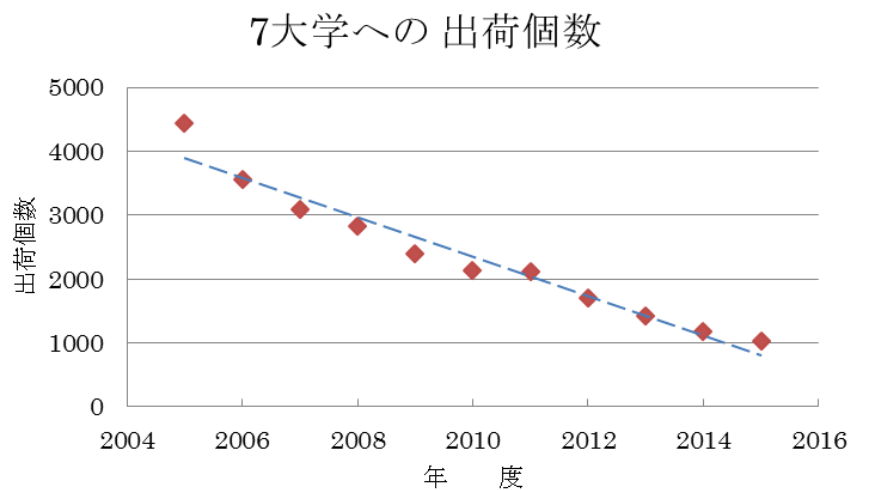


図. 北大、東北大、東大、名古屋大、京都大、大阪大、九州大の非密封RI出荷個数の合計の年次推移

図. 加速器を有する東北大と大阪大におけるRI製造量とRI入荷量の推移。**入荷は減少しているがRI製造(主に医学利用)が増加している。**

# ● 加速器製造できる医療用RIを用いた核医学診療の推進

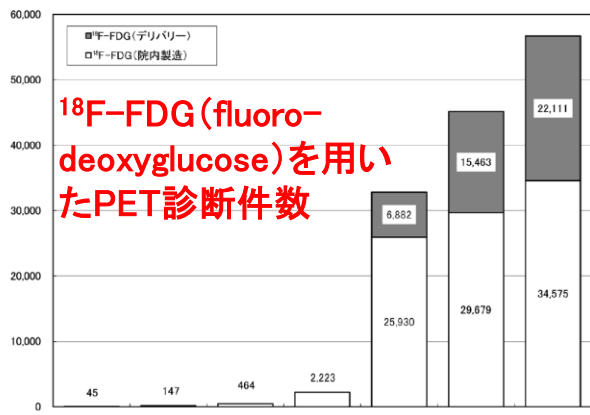
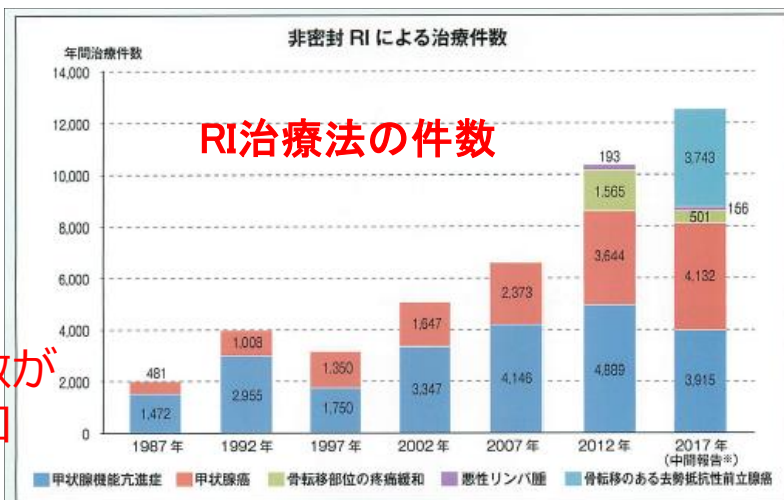


図8 <sup>18</sup>F-FDG 検査件数(月間)

近年、件数が大幅に増加

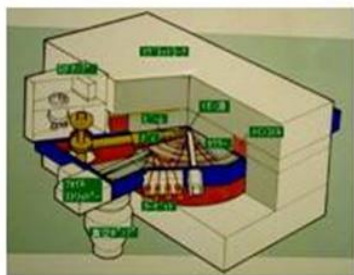


第8回全国核医学診療実態調査

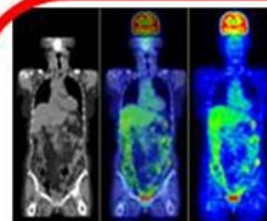
# ■ 最近の放射線治療の方向

RIイメージング  
(診断) PET

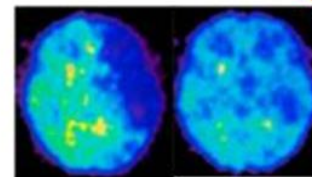
粒子加速器



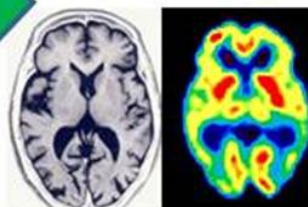
気体ターゲット  
照射  
 $^{18}\text{F}$   
 $^{11}\text{C}$   
 $^{15}\text{O}$   
 $^{13}\text{N}$



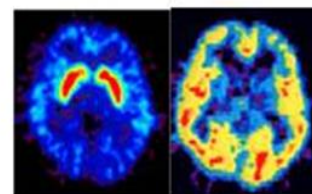
がんの早期診断



脳卒中の早期診断



認知症の早期診断



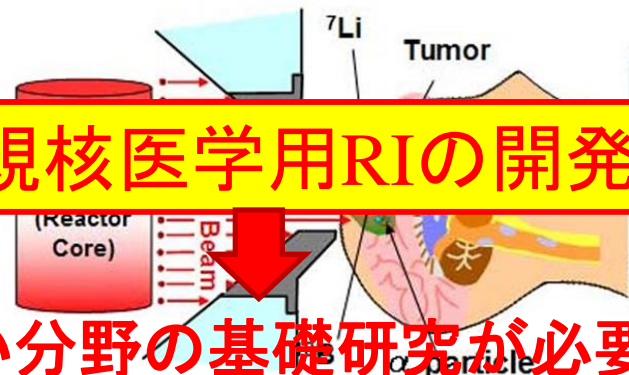
精神疾患の解明

診断  
+  
治療

セラノスティックス

(Theranostics =  
治療 Therapeutics + 診断 Diagnostics)

新規核医学用RIの開発



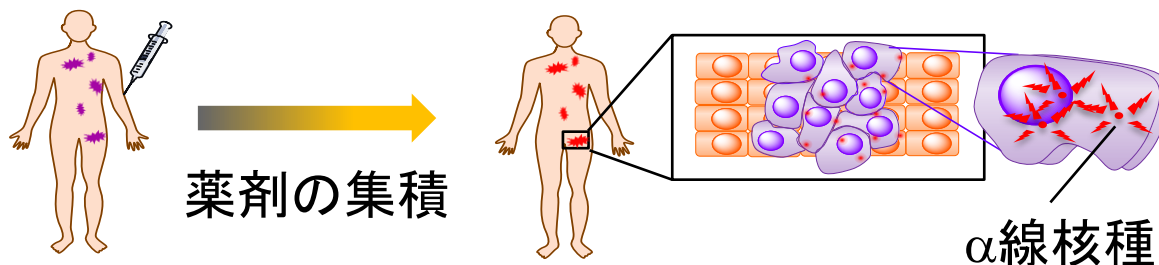
広い分野の基礎研究が必要

核医学療法 ( $^{131}\text{I}$ 、 $^{89}\text{Sr}$ 、 $^{177}\text{Lu}$ 、、、、)

放射線治療: ガンマ線ナイフ、陽子線・重粒子線治療、BNCT

# ■ アルファ線核医学治療法 (TAT)

- ・ **短寿命の $\alpha$ 線放出核種** (短い飛程、高いLET) をプローブとして使用  
 → 腫瘍に集積できれば、**高治療効果で副作用の少ない、革新的ながん治療が可能**

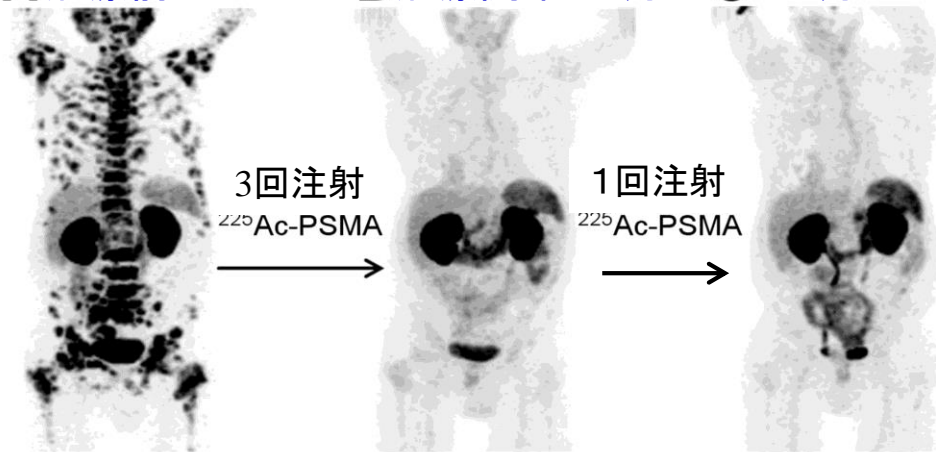


## 治療例(独ハイデルベルク大学病院): $^{225}\text{Ac}$ 薬剤

**A 治療前**

**B 治療開始2カ月**

**C 4カ月**



12/2014  
PSA = 2,923 ng/mL

7/2015  
PSA = 0.26 ng/mL

9/2015  
PSA < 0.1 ng/mL

治療前: 前立腺がんが多数の骨及びリンパ節に転移

治療後: 血液マーカー (PSA) 値が正常範囲まで低下

国内外で大きな注目

Kratochwil C JNM2016;57:1941-44.

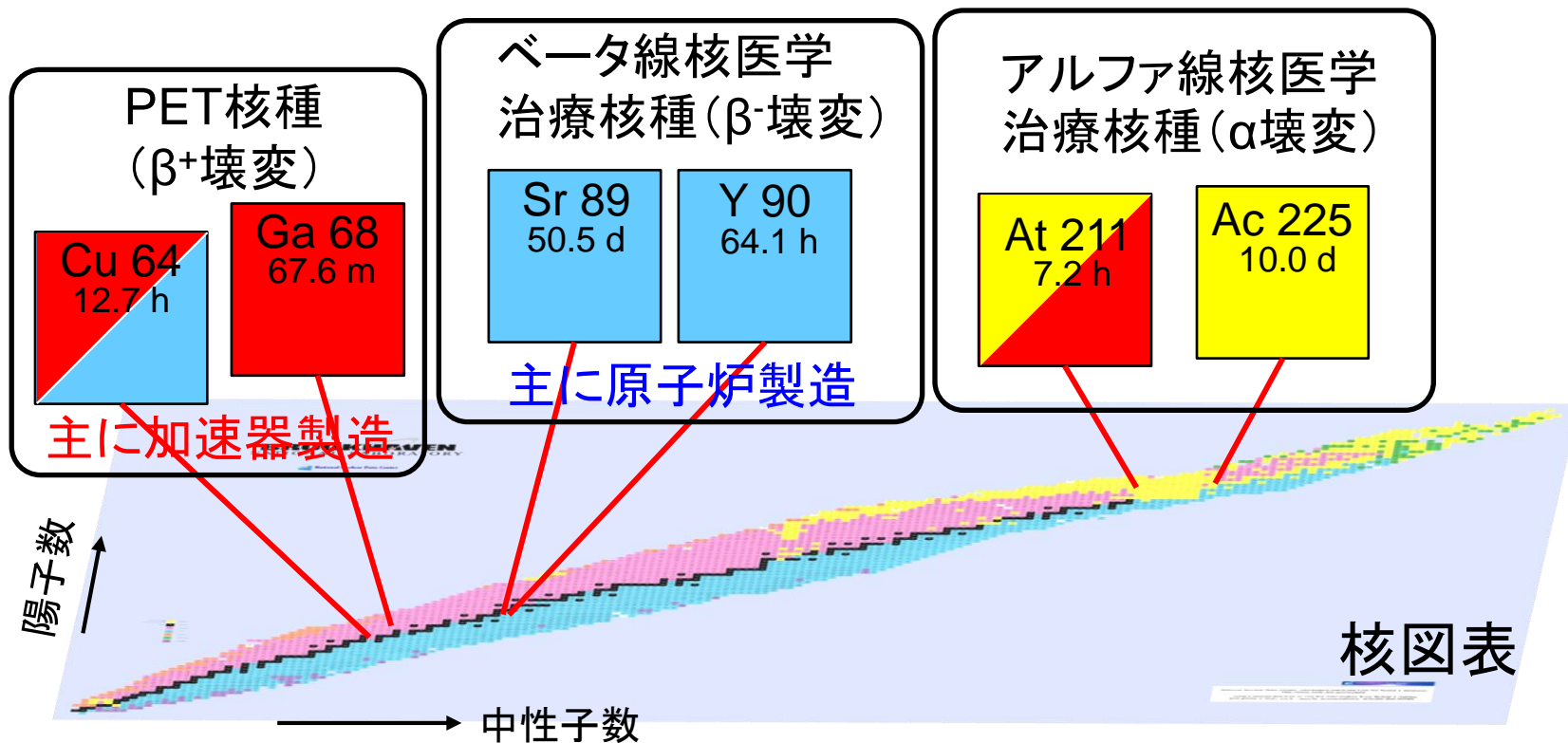
# 医学応用に向けたRI製造

核種製造: 新たな医学応用核種の製造技術開発、加速器・原子炉施設

分離精製: 供給核種の化学分離・精製法開発、標識法開発

→ 診断薬、治療薬の原料となる短寿命RIを供給

大規模・強放射能



加速器・原子炉(+人) ⇒ 核図表上の大部分のRIが製造可能

国外のRI製造用原子炉の  
経年化、老朽化

トラブルによる  
世界的な供給不足  
の多発

医療用RIの加速器による  
製造

製造方法	製造RI	医学利用
原子炉	Mo-99/Tc-99	診断
	Y-90、I-131、Xe-133、Re-186、 Lu-177、Ra-223、	治療
加速器	Cu-64、Ge-68/Ga-68、I-123、、	診断
	Sc-47、Cu-67、At-211、 Ac-225、、	治療
その他	Ac-225(ジェネレーター)、	治療

## 国際的な現状

- 加速器による医療用RI製造が世界的な潮流  
(米国、カナダ、、大規模製造供給体制が国策として進んでいる)
- 我が国では、RI製造供給体制が欠如 (過去に国策として排除)
- 最近、わが国でも加速器を用いたRI製造法についての幾つかの提案あり (最近、医療用RI(がん治療用4核種)の原子炉による国内製造の方針が出た。現状は加速器製造RIの供給が関連企業で一部あるのみ。)

 **早急にRIの国内製造供給体制の整備が必要 (研究の安全保障上も)**



# ■ 我が国の基礎研究におけるRI供給

最近注目されている新しい医療用RIと供給体制の要請

$^{223}\text{Ra}$ : 初のTAT薬剤として実用、すべて輸入による

$^{225}\text{Ac}$ : TATに向け最も研究が進んでいる、我が国では供給が課題

$^{211}\text{At}$ : TAT有力候補、我が国では加速器供給が可能、大規模化が課題

$^{177}\text{Lu}$ :  $\beta$ 線治療で最新、原子炉による製造のため輸入

$^{212}\text{Pb}/^{212}\text{Bi}$ 、 $^{230}\text{U}$ 、 $^{227}\text{Th}$ 、 $^{149}\text{Tb}$ 、 $^{149}\text{Pm}$ 、 $^{47}\text{Sc}$ 、 $\dots$  **開発途上、主にRI供給に課題アリ**

基礎研究の推進  $\Rightarrow$  研究レベルの多様なRI供給

 RIPF

医療応用研究  $\Rightarrow$  RI大量供給・安定供給

 RIPF + 国

 **社会実装(治療)**  $\Rightarrow$  RI大規模安定供給体制

 国 + 企業

## ■ 短寿命RI供給プラットフォーム(RIPF)

学術研究に短寿命RIを製造供給する国内の加速器施設の連携プログラム

(現状1)核物理研究センターにおける主な製造核種

Nuclide	Half life	Nuclear reaction	Q value(MeV)	Decay mode	Majour gamma(keV)
$^{52}\text{Mn}$	5.59 d	$^{50}\text{Cr}(\alpha, pn)^{52}\text{Mn}$	-12.95	EC(70.3%) $\beta^+$ (29.7%)	1434(98.3%) 511( $\beta^+$ )
$^{52}\text{Fe}$	8.275 h	$^{52}\text{Cr}({}^3\text{He}, 3n)^{52}\text{Fe}$ $^{50}\text{Cr}(\alpha, 2n)^{52}\text{Fe}$	-16.37 -15.64	EC(44.5%) $\beta^+$ (55.5%)	168.7(99.2%) 511( $\beta^+$ )
$^{61}\text{Cu}$	3.33 h	$^{58}\text{Ni}(\alpha, p)^{61}\text{Cu}$	-3.1	EC(38.6%) $\beta^+$ (61.4%)	283(12.2%), 656(10.8%) 511( $\beta^+$ )
$^{62}\text{Zn}$	9.26 h	$^{63}\text{Cu}(p, 2n)^{62}\text{Zn}$ $^{60}\text{Ni}(\alpha, 2n)^{62}\text{Zn}$	-13.26 -16.77	EC(91.6%) $\beta^+$ (8.4%)	507.6(14.6%), 548.4(15.2%) 596.7(25.7%) 511( $\beta^+$ )
$^{65}\text{Zn}$	244.1 d	$^{65}\text{Cu}(p, n)^{65}\text{Zn}$	-2.13	EC(98.6%) $\beta^+$ (1.4%)	1115.5(50.8%) 511( $\beta^+$ )
$^{124}\text{I}$	4.18 d	$^{124}\text{Te}(p, n)^{124}\text{I}$	-3.94	EC(75%) $\beta^+$ (25%)	602.7(61.0%), 1691.0(10.4%) 511( $\beta^+$ )
$^{210}\text{At}$	8.1 h	$^{209}\text{Bi}(\alpha, 3n)^{210}\text{At}$	-28.08	EC(99.8%) $\alpha$ (0.2%)	245.3(79%), 1181.4(99.3%)
$^{211}\text{At}$	7.21 h	$^{209}\text{Bi}(\alpha, 2n)^{211}\text{At}$	-20.33	EC(58.3%) $\alpha$ (41.7%)	687(0.24%)

# (現状2) 理研におけるRI製造実績一覧

(理研・羽場氏提供)

Nuclides	Z	T <sub>1/2</sub>	Accel.	Reactions	Research fields	Nuclides	Z	T <sub>1/2</sub>	Accel.	Reactions	Research fields
<sup>7</sup> Be	4	53.29 d	AVF	<sup>nat</sup> Li(p,xn)	Ind.	<sup>139</sup> Ce	58	137.640 d	AVF	<sup>nat</sup> La(p,xn)	Chem.
<sup>24</sup> Na	11	14.9590 h	AVF	<sup>nat</sup> Mg(d,x)	Ind., Med.	<sup>nat</sup> La(d,xn)					
<sup>28</sup> Mg	12	20.91 h	AVF	<sup>27</sup> Al(α,3p)	Chem.	<sup>141</sup> Ce	58	32.501 d	AVF	<sup>nat</sup> Ba(α,x)	Chem., Med.
<sup>42,43</sup> K	19	12.360 h, 22.3 h	AVF	<sup>nat,43,44</sup> Ca(d,x)	Ind., Med.	<sup>141m</sup> Nd	60	62.0 s	AVF	<sup>141</sup> Pr(d,2n)	Chem.
<sup>44m</sup> Sc	21	58.6 h, 3.927 h	AVF	<sup>nat</sup> Ti(d,x)	Ind., Med.	<sup>142</sup> Pm	61	265 d	AVF	<sup>141</sup> Pr(α,x)	Chem.
<sup>44</sup> Ti	22	49 y	AVF	<sup>nat,44</sup> Ca(d,x)		<sup>143</sup> Sm	62	66 s	AVF	<sup>143</sup> Sm(d,p,2n)	Chem.
<sup>48</sup> V	23	15.9735 d	AVF	<sup>48</sup> Sc(d,3n)	Ind.	<sup>143,144</sup> Eu	63	2.63 min, 10.2 s	AVF	<sup>144</sup> Sm(d,xn)	Chem.
<sup>48,51</sup> Cr	24	21.56 h, 27.702 d	AVF	<sup>nat</sup> Ti(p,xn)	Pharm. sci., Med.	<sup>144</sup> Gd	64	48.27 d	AVF	<sup>144</sup> Sm(α,2n)	Chem.
<sup>48</sup> Cr	24	21.56 h	AVF	<sup>nat</sup> Ti(α,xn)	Phys., Chem.	<sup>162,163</sup> Yb	70	18.87 min, 11.05 min	AVF	<sup>nat</sup> Gd( <sup>12</sup> C,xn)	Phys.
<sup>52,54</sup> Mn	25	5.591 d, 312.3 d	AVF	<sup>46</sup> Ti(α,2n)	Ind.	<sup>163,164</sup> W	74	2.75 s, 6.0 s	RILAC	<sup>144</sup> Sm( <sup>24</sup> Mg,xn)	Chem.
<sup>56,57,58</sup> Co	27	77.27 d, 271.79 d, 70.82 d	AVF	<sup>nat</sup> Cr(p,xn)	Pharm. sci., Med.	<sup>169</sup> Hf	72	3.24 min	AVF/RILAC	<sup>nat</sup> Gd( <sup>16</sup> O,xn)	Chem.
<sup>61</sup> Cu	29	3.333 h	AVF	<sup>nat</sup> Fe(d,xn)	Med.	<sup>170</sup> Ta	73	6.76 min	AVF/RILAC	<sup>nat</sup> Gd( <sup>19</sup> F,xn)	Chem.
<sup>65</sup> Zn	30	244.26 d	AVF	<sup>nat</sup> Zn(d,x)	Chem.	<sup>170</sup> Re	75	9.2 s	RILAC	<sup>152</sup> Gd( <sup>23</sup> Na,5n)	Chem.
<sup>66,67</sup> Ga	31	9.49 h, 3.2612 d	AVF	<sup>nat</sup> Cu(p,xn)	Phys., Chem., Biol., Med., Pharm. sci., Ind., Environ. sci.	<sup>172</sup> Hf	72	23.6 h	AVF	<sup>nat</sup> Yb(α,xn)	Chem.
<sup>67</sup> Cu	29	61.83 h	AVF	<sup>nat</sup> Cu(d,xn)	Chem., Ind.	<sup>172</sup> W	74	7.6 min	AVF/RILAC	<sup>nat</sup> Gd( <sup>22</sup> Ne,xn)	Chem.
<sup>69m</sup> Zn	30	13.76 h	AVF	<sup>nat</sup> Zn(d,xn)		<sup>174</sup> Re	75	2.40 min	RILAC	<sup>nat</sup> Gd( <sup>23</sup> Na,xn)	Chem.
<sup>74</sup> As	33	17.77 d	AVF	<sup>70</sup> Zn(p,α)	Pharm. sci., Med.	<sup>175</sup> Hf		70 d	AVF	<sup>nat</sup> Lu(p,xn)	Chem., Environ. sci.
<sup>75</sup> Se	34	119.779 d	AVF	<sup>70</sup> Zn(d,αn)		<sup>nat</sup> Lu(d,xn)					
<sup>85</sup> Sr	38	64.84 d	AVF	<sup>nat</sup> Zn(d,x)	Chem.	<sup>177,178a,179</sup> Ta	73	56.56 h, 2.36 h, 1.82 y	AVF	<sup>nat</sup> Hf(p,xn)	Chem., Environ. sci.
<sup>85</sup> Sr	38	64.84 d	AVF	<sup>nat</sup> Ge(α,xn)	Biol., Med., Pharm. sci., Environ. sci.	<sup>nat</sup> Hf(d,xn)					
<sup>85b</sup> Zr	40	7.86 min	AVF/RILAC	<sup>nat</sup> Rb(p,xn)	Environ. sci., Chem.	<sup>177</sup> W	74	135 min	AVF	<sup>nat</sup> Hf(α,xn)	Chem.
<sup>88</sup> Y	39	106.65 d	AVF	<sup>nat</sup> Rb(d,xn)	Chem., Biol., Med., Pharm. sci.	<sup>178m</sup> Ta	73	2.36 h	AVF	<sup>nat</sup> Hf(d,xn)	Chem.
<sup>88,89</sup> Zr	40	83.4 d, 78.41 h	AVF	<sup>nat</sup> Ge( <sup>16</sup> O,xn)	Chem.	<sup>178m</sup> W	74	6.40 min	AVF	<sup>nat</sup> Ta(d,xn)	Chem.
<sup>89m</sup> Zr	40	4.18 min	AVF	<sup>nat</sup> Sr(p,xn)	Chem., Ind., Pharm. sci., Med., Environ. sci.	<sup>180</sup> Re	75	2.44 min	AVF	<sup>nat</sup> Ta(α,xn)	Chem.
<sup>90m,90g</sup> Nb	41	7.8, 14.5 min	AVF/RILAC	<sup>nat</sup> Rb(α,xn)		<sup>181</sup> W	74	121.2 d	AVF	<sup>nat</sup> Ta(p,xn)	Chem.
<sup>90m,90g</sup> Nb	41	18.81 s, 14.60 h	AVF	<sup>89</sup> Y(p,xn)	Chem., Biol., Med., Pharm. sci.	<sup>181</sup> Re	75	19.9 h	AVF	<sup>nat</sup> Ta(d,xn)	Chem.
<sup>90</sup> Mo	42	5.67 h	AVF/RILAC	<sup>89</sup> Y(d,xn)	Chem.	<sup>182</sup> Ta	73	114.43 d	AVF	<sup>nat</sup> Hf(α,x)	Chem.
<sup>92m,95</sup> Nb	41	10.15 d, 34.975 d	AVF	<sup>89</sup> Y(p,n)	Chem., Ind., Pharm. sci., Med., Environ. sci.	<sup>182a,183,184m,184g</sup> Re	75	12.7 h, 70.0 d, 169 d, 38.0 d	AVF	<sup>nat</sup> W(d,xn)	Phys., Chem.
<sup>92,94</sup> Tc	43	4.23 min, 293 min	AVF	<sup>89</sup> Y(d,2n)	Chem.	<sup>183</sup> Re	75	70.0 d	AVF	<sup>nat</sup> Ta(α,xn)	Chem.
<sup>93m</sup> Mo	42	6.85 h	AVF	<sup>nat</sup> Sr(α,xn)	Chem.	<sup>180</sup> Os	76	93.6 d	AVF	<sup>nat</sup> Re(p,xn)	Chem.
<sup>93g,94</sup> Tc	43	2.75 h, 293 min	AVF	<sup>nat</sup> Ge( <sup>18</sup> F,xn)	Chem.	<sup>186</sup> Re	75	90.64 h	AVF	<sup>nat</sup> W(d,2n)	Med.
<sup>95</sup> Tc	43	20.0 h, 4.28 d	AVF	<sup>nat</sup> Zr(p,xn)	Phys., Chem.	<sup>188,189,191</sup> Pt	78	10.2 d, 10.87 h, 2,802 d	AVF	<sup>nat</sup> Os(α,xn)	Med.
<sup>95m</sup> Tc	43	61 d	AVF	<sup>nat</sup> Zr(d,xn)	Chem., Environ. sci.	<sup>203</sup> Pb	82	51.873 h	AVF	<sup>nat</sup> Ir(d,xn)	Phys.
<sup>99</sup> Rh	45	16.1 d	AVF	<sup>nat</sup> Mo(d,xn)	Chem.	<sup>206</sup> Bi	83	6.243 d	AVF	<sup>203</sup> Tl(p,n)	Med.
<sup>100m</sup> Pd	46	4.696 min	AVF	<sup>nat</sup> Zr(p,xn)	Phys., Chem.	<sup>206</sup> Fr	87	15.9 s	RILAC	<sup>nat</sup> Pb(p,xn)	Pharm. sci., Med.
<sup>104m</sup> Ag	47	33.5 min, 69.2 min	AVF	<sup>nat</sup> Zr(d,xn)	Chem.	<sup>209</sup> Fr	87	50.0 s	RILAC	<sup>nat</sup> Pb(d,xn)	Chem.
<sup>111</sup> Ag	47	7.45 d	AVF	<sup>nat</sup> Mo(d,xn)	Chem.	<sup>211</sup> At	85	7.214 h	AVF	<sup>209</sup> Bi(α,2n)	Pharm. sci., Med.
<sup>109</sup> Cd	48	462.6 d	AVF	<sup>93</sup> Nb(p,n)	Environ. sci., Chem.	<sup>214</sup> Fr	87	20.0 min	AVF	<sup>206,207,208</sup> Pb( <sup>11</sup> B,x)	Chem.
				<sup>93</sup> Nb(d,2n)	Chem.	<sup>214</sup> Ac	89	8.2 s	RILAC	<sup>197</sup> Au( <sup>22</sup> Ne,5n)	Phys.
				<sup>nat</sup> Zr(α,xn)	Chem.	<sup>222</sup> Ac	89	10.0 d	RRC	<sup>232</sup> Th( <sup>14</sup> N,xnyp)	Chem., Med.
				<sup>nat</sup> Mo(p,n)	Phys.	<sup>223</sup> Pa	91	1.50 d	AVF	<sup>233</sup> Th(p,4n)	Chem.
				<sup>nat</sup> Mo(d,xn)	Environ. sci., Chem.	<sup>236</sup> Np	93	1.54 x 10 <sup>5</sup> y	AVF	<sup>232</sup> Th( <sup>7</sup> Li,3n)	Environ. sci.
				<sup>95</sup> Mo(p,n)	Environ. sci., Chem.	<sup>245</sup> Fm	100	4.2 s	RILAC	<sup>206</sup> Pb( <sup>16</sup> O,3n)	Phys.
				<sup>nat</sup> Mo(d,xn)	Chem.	<sup>255</sup> No	102	3.1 min	AVF/RILAC	<sup>238</sup> U( <sup>22</sup> Ne,5n)	Phys., Chem.
				<sup>95</sup> Nb(α,2n)	Chem.	<sup>250</sup> Lr	103	22 s	RILAC	<sup>248</sup> Cm( <sup>12</sup> C,5n)	Phys.
				<sup>nat</sup> Zr(α,xn)	Chem.	<sup>251</sup> Lr	103	0.646 s	AVF	<sup>209</sup> Bi( <sup>48</sup> Ca,2n)	Phys.
				<sup>99</sup> Ru(p,n)	Chem.	<sup>250</sup> Lr	103	6.3 s	AVF	<sup>248</sup> Cm( <sup>14</sup> N,5n)	Phys.
				<sup>nat</sup> Pd(d,x)	Chem.	<sup>261a,b</sup> Rf	104	68, 1.9 s	AVF/RILAC	<sup>248</sup> Cm( <sup>18</sup> O,5n)	Phys., Chem.
				<sup>100</sup> Pd(p,n)	Chem.	<sup>262</sup> Db	105	34 s	AVF/RILAC	<sup>248</sup> Cm( <sup>19</sup> F,5n)	Phys., Chem.
				<sup>100</sup> Pd(d,xn)	Chem., Med.	<sup>265a,b</sup> Gg	106	8.5, 14.4 s	RILAC	<sup>248</sup> Cm( <sup>22</sup> Ne,5n)	Phys., Chem.
				<sup>102</sup> Pd(α,xn)	Biol., Med., Pharm. sci., Ind., Environ. sci.	<sup>266</sup> Bh	107	10.0 s	RILAC	<sup>248</sup> Cm( <sup>23</sup> Na,5n)	Phys.
				<sup>102</sup> Pd(d,xn)	Environ. sci.	Multitracer	-22		RRC	<sup>nat</sup> Ti( <sup>14</sup> N,xnyp)	

⇒基礎研究レベルのニーズにはある程度対応可←RIPFが活躍  
次ステップへはさらなる(大強度加速器、関連基礎研究、専用施設化)

# 3. RIの核医学利用に向けた 基礎研究

- RI製造における基礎研究
- IRSにおけるRI製造研究の例

## 研究開発の流れ

加速器RI製造

加速器を用いた  
医療用RIの製造、  
大量製造技術開発

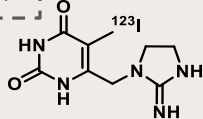


加速器

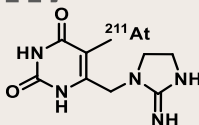
RI医薬品開発

様々なRI標識化合物

診断薬



治療薬



無機・錯体化学

有機合成化学

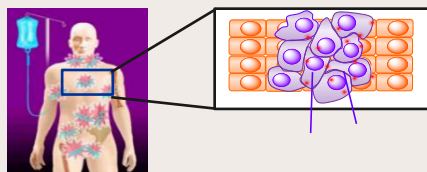
物理化学

核医学診断・治療法開発

核医学診断法の開発



核医学治療法の開発

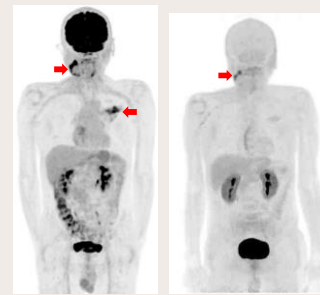


医工学(計測)

核医学

臨床試験

大学病院での治験



FDG-PET

FBPA-PET

社会実装

放射線医療イノベーション

企業

放射化学は重要な位置にある！

放射化学

核薬学

Atを例とした基礎研究

核種開発・  
大規模製造

RI分離精製法

RI標識法

At溶液化学

At気相化学

At標識法

### RI製造の基礎研究の推進

- ・ RIを取り扱える人材 (RI人材)
- ・ 非密封RI使用施設 (食動物遺伝子)
- ・ 関連分野間の連携とベースアップ

## At-211: 加速器で製造可能



半減期は7.2時間

## ● 化学的性質—化学分離精製法

### アスタチン(At): 放射性元素

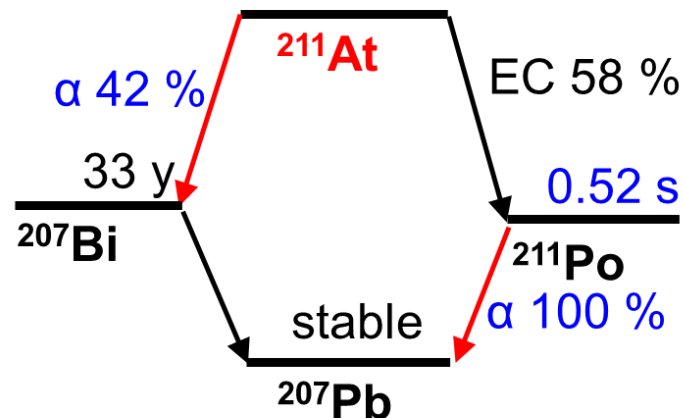
半減期は最長でも8時間

1																	18		
2																	2		
3	4											13	14	15	16	17	18		
H	He											B	C	N	O	F	Ne		
3	4											5	6	7	8	9	10		
Li	Be											11	12	13	14	15	16	17	18
11	12											13	14	15	16	17	18		
Na	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86		
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118		
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	113	Fl	115	Lv	117	118		
Lanthanides		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
Actinides		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103			
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

## ● 生成核反応の検討

- ・励起関数等の基礎データ
  - ・ターゲット物質、副生成物
- ⇒ 照射システム、照射条件

## ● 医学利用としての有効特性



実質的なα線放出: 100%

γ線放出率は低い → 治療

<sup>211</sup>At: 687 keV (0.3%)

<sup>211</sup>Po: 363 keV (1.6%) 570 keV (0.5%)  
898 keV (1.6%) 1065 keV (1.5%)

→ ヨウ素標識法が適用可能と期待

しかし、化学的性質はほとんど未知

- ・ターゲット物質からの分離・精製法
- 照射済みターゲットの特異性、
- ・化学的性質に関する基礎研究、

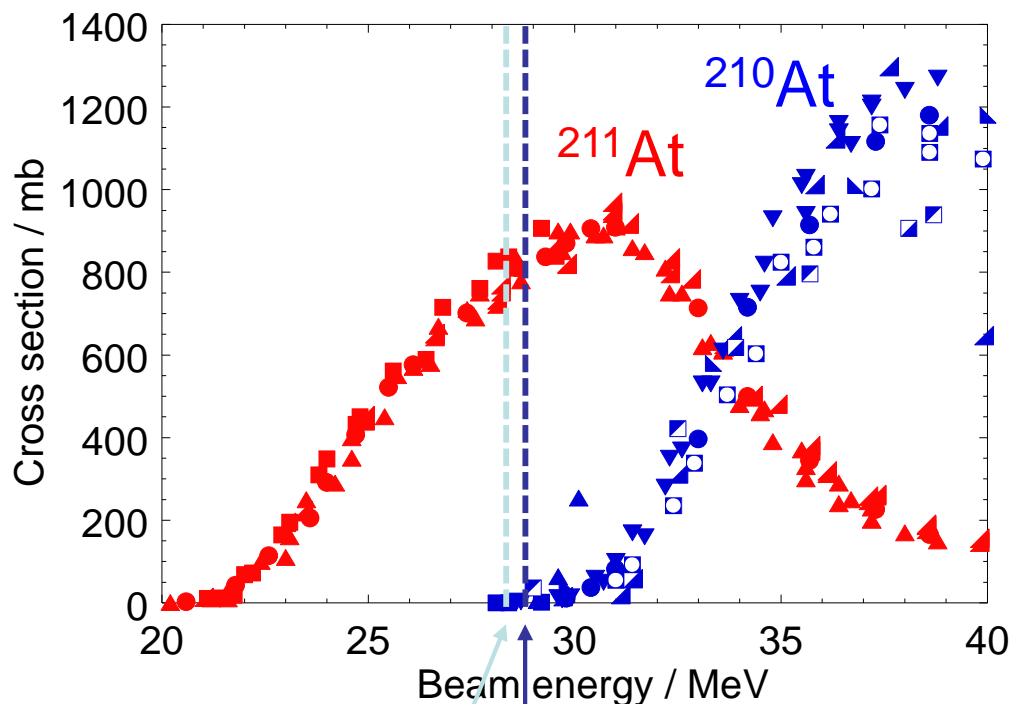
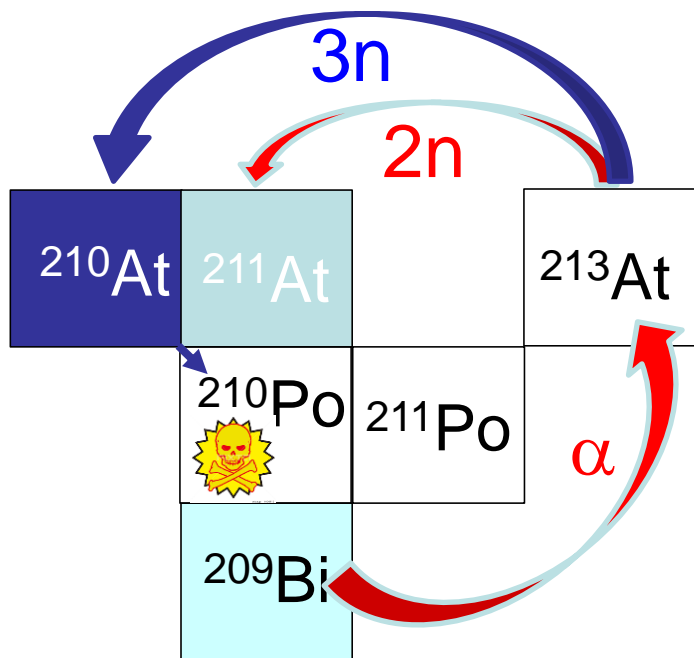


# ● $^{211}\text{At}$ の生成核反応、条件の検討

核反応:  $^{209}\text{Bi}(\alpha, 2n)^{211}\text{At}$   
 ビームエネルギー: 28.2 MeV  
 ビーム電流: 1-2 e $\mu$ A

励起関数測定は放射化学・核化学の少し昔の典型的な研究対象

$^{209}\text{Bi}(\alpha, xn)^{213-x}\text{At}$   
 励起関数



毒性の高い $^{210}\text{Po}$ の生成を避ける

→  $E_{\text{beam}} \leq 28.7 \text{ MeV}$

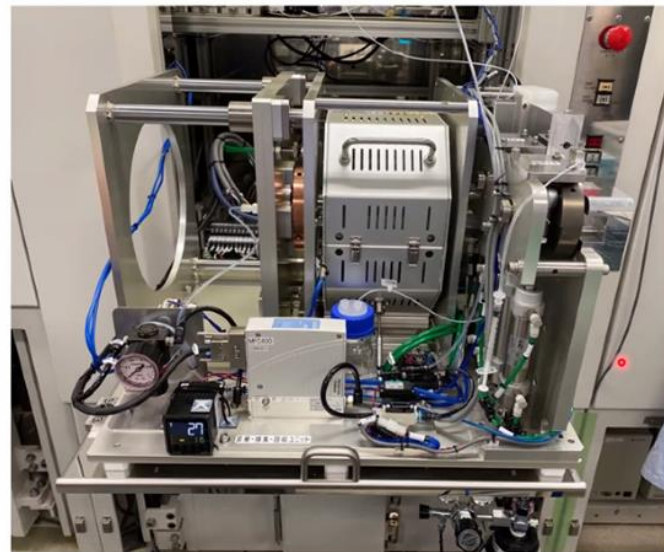
しきい値エネルギー  
 現在の入射エネルギー

# ● $^{211}\text{At}$ 化学分離精製 (乾式蒸留分離法)

Atの高い揮発性を利用して乾式分離

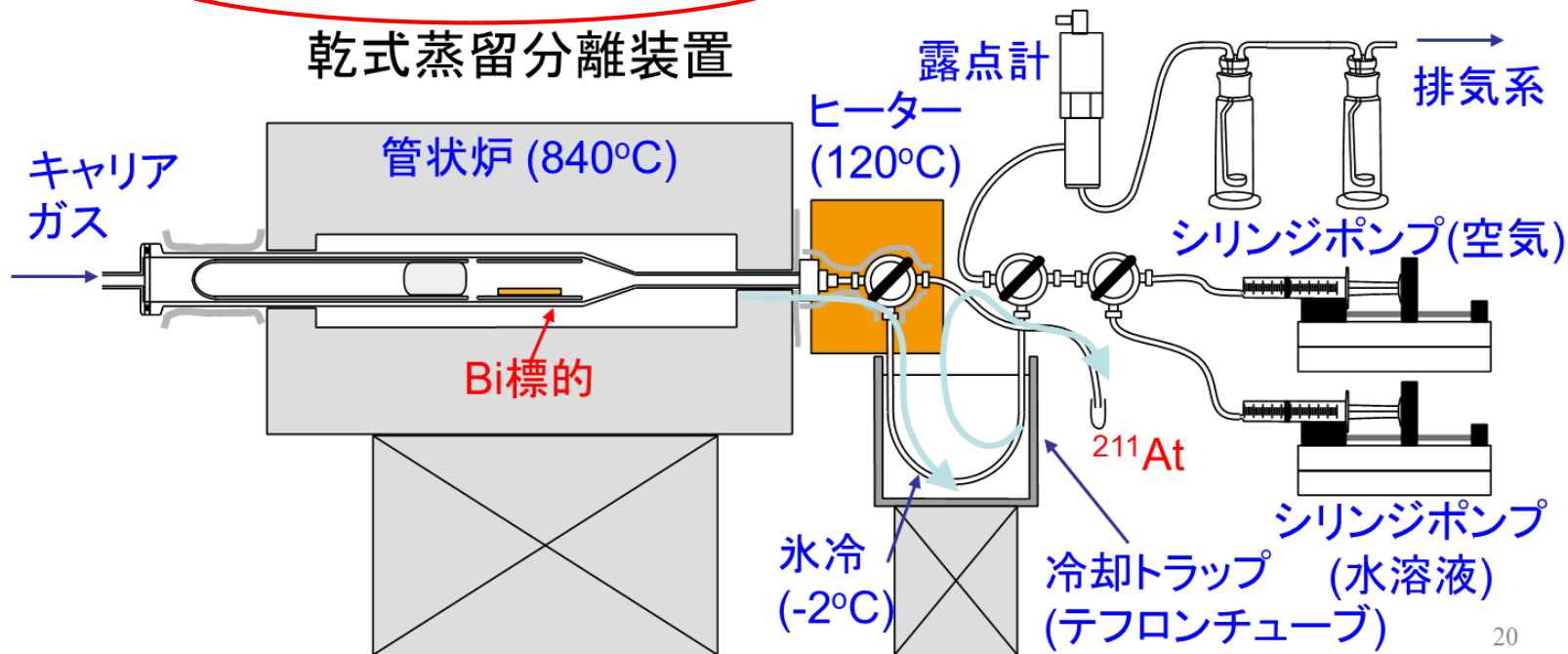
- ➡ 清浄なAt試料を調製可能
- ➡ 薬剤合成に好都合な溶液で供給  
 (水、メタノール、生食)

Atの化学的性質の理解⇒基礎化学



アスタチン自動分離精製装置

照射→ターゲットからの分離→**精製**→薬剤合成へ(標識)→



# RI製造研究例2: $^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th} (\rightarrow ^{225}\text{Ac})$ の分離精製

分離実験: 2019/7/29~8/27 (実質3週間), 13人参加(核化学者精鋭)



グローブボックス

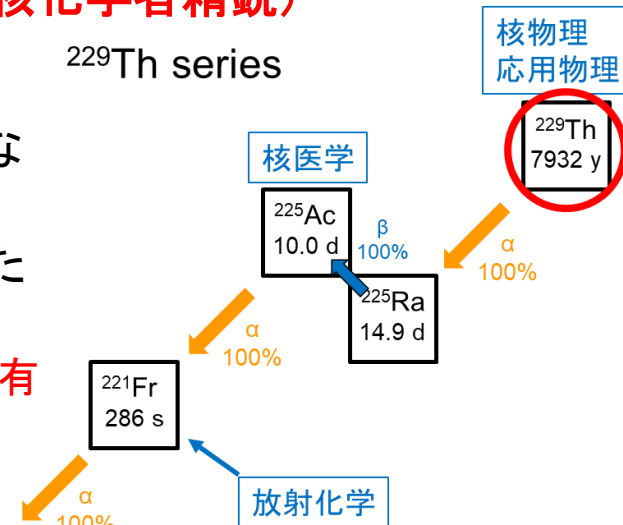
## 国内の $^{229}\text{Th}$ 保有量

共同利用に利用可能な $^{229}\text{Th}$ :  $\sim 20\mu\text{g}$  (大洗)

核医学の基礎研究のためには不足

$\rightarrow 5.5\text{g}$ の $^{233}\text{U}$  (JAEA保有提供) から $^{229}\text{Th}$ を分離  
(他には国内では、阪大、東北大、京大複合研などで少量保有)

$^{229}\text{Th}$  series



核物理  
応用物理

$^{229}\text{Th}$   
7932 y

核医学

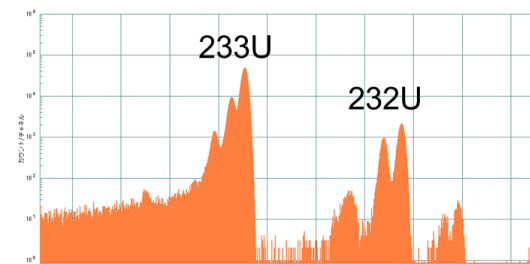
$^{225}\text{Ac}$   
10.0 d

$^{225}\text{Ra}$   
14.9 d

$^{221}\text{Fr}$   
286 s

放射化学

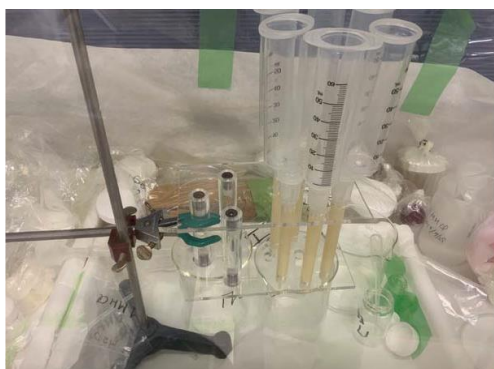
アルファ線スペクトル



$^{233}\text{U}$ , 5.5 g ( $^{232}\text{U}$ : 22.8 ppm)  
 $\Rightarrow$  ( $^{220}\text{Rn}$ ,  $\sim 103\text{ MBq}$ )



Rn(ゴールド)トラップ



陰イオン交換分離

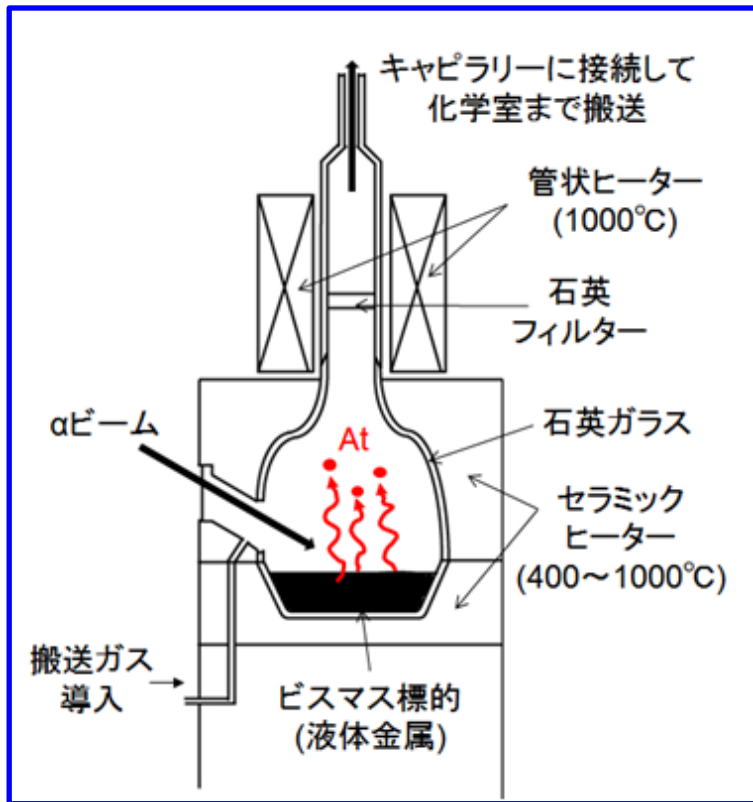
使用した試薬: 9M塩酸: 3.0 L,  
1M塩酸: 1.7 L など

at 東北大金研・アルファ放射体実験室  
(RI+核燃使用可)  
グローブボックス、  
Rnトラップの設置  
(不純物の $^{232}\text{U}$ から発生  
の $^{220}\text{Rn}$ が問題)

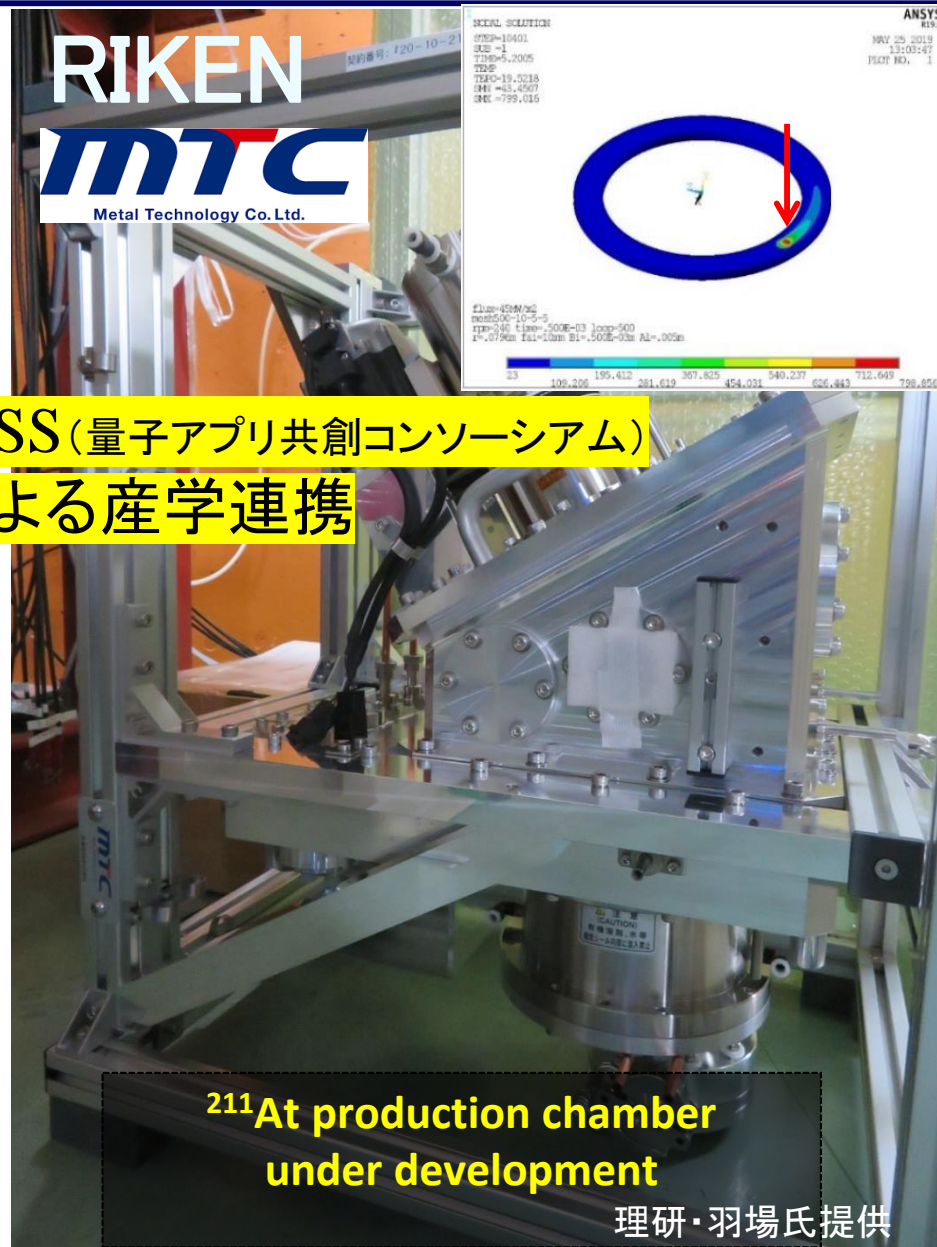
$\rightarrow$  UからThを分離  
+ 精製  $\rightarrow$   $\rightarrow$   
 $^{225}\text{Ac}$ を毎月抽出 $\leftarrow$

$^{229}\text{Th}$ , 約480  $\mu\text{g}$  (3.5 MBq)  
( $^{228}\text{Th}$ ,  $\sim 103\text{ MBq}$ 含む)

## 大規模化のコンセプト案 液体ターゲット系 → 開発中



- ・オンライン製造分離システム
- ・液体ターゲットの具体化
- ・揮発分離搬送→気相の化学挙動？
- ・大規模化、高レベルRI取り扱い







# 4. RI製造供給の現状と課題

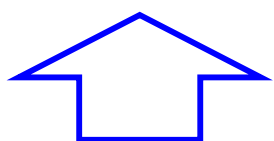
- RI人材と放射線施設の現状
- 課題へ取り組み



# RI製造基礎研究における課題

## RI製造における基礎研究(短寿命RI製造にポイント)

- ・製造法: 核反応→入射ビーム: 荷電粒子(p、 $\alpha$ 、HI、)、光(電子)、中性子  
⇒加速器の選択、(原子炉)、照射方法
- ・(製造)分離精製: 化学・物性研究→乾式法、湿式法、製造-分離オンライン、迅速自動化・プラント化の想定
- ・標識(+薬剤合成): 迅速高効率、汎用性 ⇒医学的基礎研究への接続
- ・分析手法: 核特性、検出系の検討・開発
- ・大規模化: 大電流加速器、ターゲット系、高レベルRI取扱、遠隔・自動化
- ・安全取扱い法、放射線管理、製造供給体制—専用施設の必要性



非密封RIを扱える各分野の研究人材  
 非密封RI(核燃料物質)取扱い施設

課題あり!

広い放射線関連科学のベースアップ ➡ 関連機関-大学研究室の連携

### 研究分野(要素)

放射化学・核化学、有機化学、無機・物理化学、核薬学、分析化学、原子核物理学、加速器科学・技術、放射線計測学、化学工学、ロボット工学、コンピュータ制御、等  
 放射線管理、、、放射線医学、核医学、放射線影響、薬理学、

# ■ 課題 — RI人材、RI施設

2006年現在：  
放射化学関連研究室を有する大学＝約35  
(放射化学関連授業提供大学・部局数＝約70)  
2020年現在：35 → 22? 大学(研究室)

大学・研究室の減少  
RI施設の陳腐化

↓  
アカデミア人材の不足  
人材供給能力の低下

→ 全国的な  
放射化学  
教育の  
機会減少

学校教育の中の放射線教育  
の位置づけ、上がらない  
(重要と言いながら弱い！)

放射化学技術・研究者  
(ものを触ったことのある人材  
＝RI人材)の必要性

## 巻頭言 RI人材募集中



篠原 厚  
Shinohara Atsushi  
大阪大学大学院 理学研究科 化学専攻  
大阪大学放射線科学基盤機構・機構長

この歴史あるニュースの巻頭言をお引き受けした際に、直ぐに頭に浮かびましたのは、筆者の恩師である音清輝先生が本誌の当に巻頭言に書かれた文章です。「若い研究者へ」というタイトルで、研究の独創性の重要性を説き、その進め方を独特の比喻で説いたものです(1981年6月号)。「鋼鉄主義」で名取りになるのではなく、「小鋼主義」で小さくても良いので家元になってほしいという内容でした。筆者の座右の銘でもあります。当時、多くの若手研究者の心にも届いたのではないかと思います。しかし、今、私たちの放射線・RI関連の分野は、このメッセージを受け取って貰いたい「若い研究者」の減少、人材不足が大きな課題となっています。

この分野は、放射能の発見後、急速に発展し、早期に社会との(特にネガティブな)関わりを持ってしまいました。科学・学問が人類にとって大きな変革をもたらすものであればあるほど、その発展の過程で社会との間に衝突が起こる(課題が生じる)のが常です。社会に変革をもたらすという意味では、今のAI技術がちょうど同様の状況にあるように思えます。原子力や放射能の世界も、新しいレベルの力、サブアトムの世界を受け入れるかどうかで、未来の人類の行動範囲に大きな影響を与えます。

研究面を見ると、これまでRIの主要なユーザーであった生物科学関連が激減した一方で、新しい量子ビーム利用、新元素の発見、医学・薬学分野での新規診断や治療等、夢のある基礎科学や応用研究が増えています。しかしながら、原子力のゴミ問題、福島事故における環境回復、廃炉、放射線障害・被曝の問題、またこれらを受けた放射線規制の在り方等も含め、避けて通れない大きな課題があります。このような人類的な課題解決は、将来の科学・技術の進歩に期待しているところが大きく、しっかりと人材育成が必要条件となります。たとえば、(政治面は抜きにして)もっと強い逆風社会になれば、大学の関連分野に優秀な学生が来るでしょうか? 人材の供給が減り、新世代どころか今の技術すら途絶えます。廃炉はできず、50基(世界では450基)以上ある原発は残り、その廃棄物問題もさらに先送り、長期的には基礎研究や社会に貢献していた関連技術もベースから崩れ、せっかく開かれたサブアトムの世界を享受する人類の未来の姿が変わるかもしれません。私たちがもっと長期的継続的な科学・技術のビジョンを持つべきですが、その大前提は教育でしょう。人類的課題に熱意を持って挑戦する若い人がどんどん出て来るような教育環境と社会環境が必要とされています。

人材の話題に戻りますが、ポイントは、やはり最初に人材(学生)に接する大学だと思えます。ただ、今、大学も大学人も弱っています。大学における教育・人材育成の充実には研究の活性化が必須ですが、この分野の研究の重要な場のひとつである非密封RIの取扱施設の維持が厳しい状況にあり、減少しつつあります。これを受け、日本学術会議の提言もあり、全国の非密封RI施設の連携拠点化の構想が検討されています。私たちの分野は、聞き直るならば、解決すべき人類的課題が山積み、すなわち人類の未来にとって重要な分野です。そして、夢のある研究や社会に貢献する応用が盛りだくさんの、今が旬の分野です。弱っている皆さん、連携し励まし合って、課題解決と併せて、最初の鋼を見つかる楽しい研究を進めましょう。そうすればきっと鋼を見つけた若い人が集まります。

2006年現在：  
放射化学関連研究  
(放射化学関連授業振  
2020年現在：35 →

大学・研究室の洞  
RI施設の陳腐化

↓  
アカデミア人材の  
人材供給能力の

↑  
学校教育の  
位置づけ  
(重要と言

放射化学技術  
(ものを触った  
=RI人材)の



篠原 厚

Shinohara Atsushi

(大阪大学大学院 理学研究科 化学専攻、  
大阪大学放射線科学基盤機構・機構長)

この歴史あるニュースの巻頭言をお引き受けした際に、直ぐに頭に浮かびましたのは、筆者の恩師である音在清輝先生が本誌の当に巻頭言に書かれた文章です。「若い研究者へ」というタイトルで、研究の独創性の重要性を説き、その進め方を独特の比喻で説いたものです(1981年6月号)。「銅鉄主義」で名取りになるのではなく、「小銅主義」で小さくても良いので家元になってほしいという内容でした。筆者の座右の銘でもあります。当時、多くの若手研究者の心にも届いたのではないかと思います。しかし、今、私たちの放射線・RI関連の分野は、このメッセージを受け取って貰いたい「若い研究者」の減少、人材不足が大きな課題となっています。

研究面を見ると、これまでRIの主要なユーザーであった生物科学関連が激減した一方で、新しい量子ビーム利用、新元素の発見、医学・薬学分野での新規診断や治療等、夢のある基礎科学や応用研究が増えています。しかしながら、原子力のゴミ問題、福島事故における環境回復、廃炉、放射線障害・被曝の問題、またこれらを受けた放射線規制の在り方等も含め、避けて通れない大きな課題があります。このような人類的な課題解決は、将来の科学・技術の進歩に期待しているところが大きく、しっかりとした人材育成が必要条件となります。たとえば、(政

人材の話題に戻りますが、ポイントは、やはり最初に人材(学生)に接する大学だと思えます。ただ、今、大学も大学人も弱っています。大学における教育・人材育成の充実には研究の活性化が必須ですが、この分野の研究の重要な場のひとつである非密封RIの取扱施設の維持が厳しい状況にあり、減少しつつあります。これを受け、日本学術会議の提言もあり、全国の非密封RI施設の連携拠点化の構想が検討されています。私たちの分野は、開き直るならば、

## 使用事業所の推移

R2 原子力白書

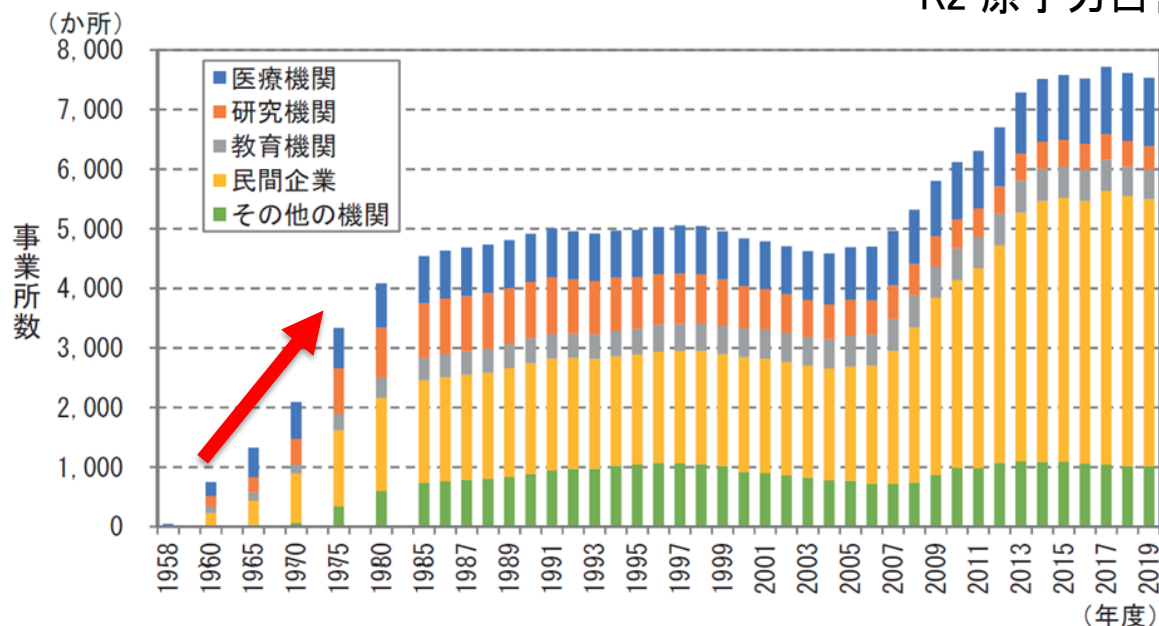


図 7-4 放射性同位元素を使用する事業所数の推移

1970～90年に使用施設が  
激増(30～50年経過)

→ 施設の老朽化、  
施設更新の時期

法規制強化への対応

2007年以降の増加は表示付  
認証機器の届出事業者(民  
間企業)の増加が主な増加  
の要因

大学の多数ある小規模施設は維持が困難に  
なりつつあるが、廃止する予算の確保も困難。  
大規模施設の拠点化と全国的な連携が必要  
とされている。(RIセンター長会議等で議論)



# 課題への取組

- 放射線やRIは、エネルギーはもとより、医療や産業利用では、もはや欠くことのできない必須のものとなっている。
- 特に、人類の健康長寿に貢献する医療用RIの製造、安定供給のための基礎研究には、放射化学をはじめとする放射線関連科学の活性化が必須である。
- 一方で、大学の関連講座は減少し、人材育成や教育研究にかかわる人的資源が危機的状況にある。また、放射線や原子力に対する風当たりはきつく、関連規制は厳しくなっているが、特に大学では、老朽化した施設の更新が出来ず厳しい状況にある。

人的資源の強化、放射線・RI施設の維持強化(機能集約・最適配置)、  
 人材育成・放射線教育、インフラ(加速器、原子炉等)整備・専用施設

国への要請・  
 提言の発信  
 (日本学術会議、  
 原子力規制庁、  
 文科省、原子力  
 委員会、…)

放射化学会の取り組み  
 →若手会員の活性化、  
 →ロードマップ  
 放射線科学の活性化  
 →教育部会の設置・活動

大阪大学の取り組み  
 →放射線科学基盤機構の創設  
 →産学連携の推進OPERA(QiSS)  
 →放射線を軸にした卓越大学院  
 →原子力規制人材育成事業

RI施設の取り組み  
 →RI施設の連携拠点化



## 例) 日本放射化学会の現状

## の支援体制が必須

1999年創設 URL=<http://www.radiochem.org/index-j.html>



The screenshot shows the homepage of the Japanese Radiochemistry Society (JNRS). The page features a navigation menu with 'HOME', '学会について', and '行事'. A blue-bordered box highlights the '学会の規模と概要' (Society Scale and Overview) section, which lists membership statistics and activities. Below this, the 'NEWS & INFORMATION' section displays two news items from February 5, 2020, and January 8, 2020, both mentioning the publication of a paper in the Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences, Vol. 20.

### 学会の規模と概要

**会員総数=374名、協賛企業=22社**  
(正会員=293、学生=47、名誉=14、永年=11名、外国人=6名)

#### 主な活動

- ・年会として討論会の開催
- ・機関誌「放射化学」、学術雑誌”J Nucl. Radiochem. Sci.”の発刊
- ・講演会、研究会等の開催
- ・研究の奨励及び業績の表彰、など

### NEWS & INFORMATION

New! ・ 2020年2月5日 [Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences, Vol.20](#)の論文1報が掲載されました

New! ・ 2020年1月8日 [Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences, Vol.20](#)の論文1報が掲載されました

# 研究分野・部会の活動



## ■ 討論会の研究主題例

S. 福島事故関連の化学・環境

1. 核化学

3. 放射化分析

5. 医薬・生物学におけるRI利用

7. 宇宙・地球化学、年代測定

9. その他(計測技術、原子力関連化学、核鑑識技術、)

S. 超重元素の化学

2. 環境放射能

4. 原子核プローブの化学

6. アクチノイド・バックエンド化学

8. 放射線教育、放射線防護

他分野研究者も参画

核化学分科会(部会)  
(活動例:核化学夏の学校)

放射化分析分科会(部会)  
(活動例:放射化分析研究会)

若手の会

原子核プローブ分科会(部会)  
(活動例:メスバウアー研究会)

環境放射能分科会(部会)  
(活動例:環境放射能研究会)

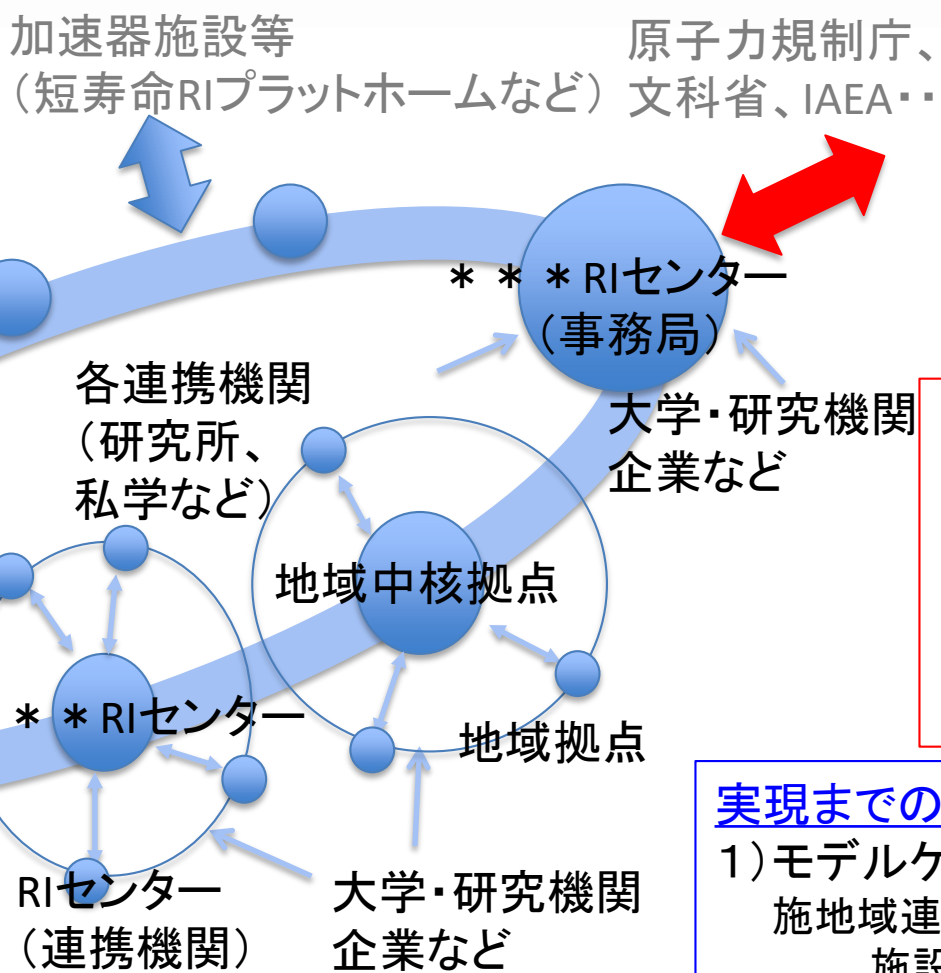
教育部会(新設)

・若手の奨励、キャリアパス教育  
・放射線教育教材の開発・DX  
・大学教育、人材育成支援  
・社会教育、アウトリーチ など

APSORC-IC(国際委員会) (+放射線教育フォーラム、)

# 非密封放射線施設のネットワーク型拠点化構想(案)

(日本学術会議・分科会小委員会＋全国RIセンター長会議)



- 目的:**
- 放射線教育・人材育成の機能強化
  - 特色有る教育研究の推進、新分野の創出
  - 地域拠点形成、施設の統廃合・機能集約
  - 全国RI関連施設配置の最適化(セキュリティー、リスク管理面の改善)

- 想定される機能:**
- ・各地域における大学・研究機関の放射線RI教育研究拠点
  - ・外交全般(規制庁、文科省、IAEA等国際機関)
  - ・企業の受け入れ(共同研究、産学連携)
  - ・将来構想、施設整備等の推進、予算要求など

## 実現までのロードマップ案

- 1) モデルケースの実施(重点テーマとして?) <3-4年間>  
 施地域連携による教育・共同研究、施設廃止のモデルケース  
 施設廃止の予算枠創設の提案(文科省→財務省)など
- 2) 中核拠点の選定、地域ネットワークの構築(段階的に)  
 ↓ 共同利用予算・人員、拠点整備予算など <~5年後>
- 3) 全国のネットワーク、研究分野拠点 <5~10年>  
 ↓

日本学術会議・提言(2017.9.6)  
 「大学等における非密封放射性同位元素使用施設の拠点化について」

## ・大学院高度副プログラム

放射線を使って研究を行う様々な分野の学生が他分野の知見を得るプログラム

## ・原子力規制人材育成事業

様々な分野の「知」を融合し、社会との共創で問題解決に当たることができる人材の育成

## ・福島県浜通り地域環境放射線研修

幅広い背景を持った全国の学生が浜通り地区に訪れ、環境放射線測定を行い、さらに地元の人との意見交換を通じて人文社会学的問題を認識する分野横断型の人材を育成

## ・JSTさくらサイエンスプログラム

放射線計測のスクールを開講、東南アジアの学生を受け入れ

## ・(博士人材育成プログラム)多様な知の協奏による先導的量子ビーム応用卓越大学院

次世代の量子ビーム応用技術の創出を先導する人材を持続的に育成、海外インターンシップなど多彩な分野横断教育

## ■国際原子力機関(IAEA)と大阪大学を幹事校とした国内大学・医療機関コンソーシアムの協定締結アジアの医療人材の育成



2020年2月28日 グロッシー事務総長が阪大来訪



### 原子力規制人材

#### 卓越大学院

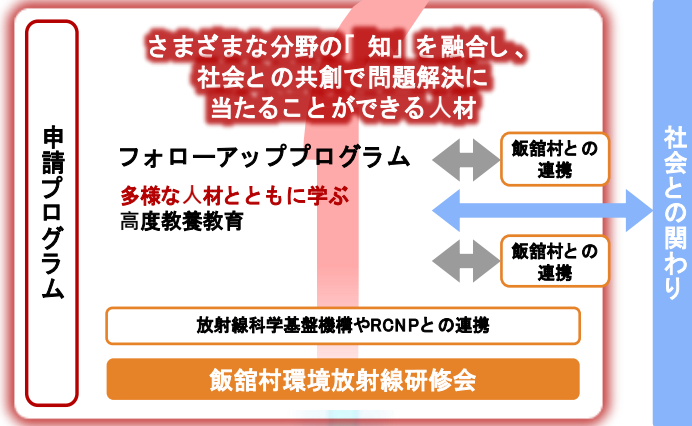
IAEAなどとの国際連携による国際的な視点

### 原子力規制人材育成事業

#### QiSS

企業との連携による産学連携の視点

#### 原子力規制人材



## 卓越大学院 PQBA





大阪大学  
OSAKA UNIVERSITY



OPEN 2021

# 4. おわりに



# ■ まとめと提言

- 放射線やRIは、基礎科学やエネルギーはもとより、医療や産業利用では、もはや欠くことのできない必須のものとなっている。
- 基本となる物質や技術(今の場合RI)は、基礎研究、医療、産業等の安全保障上も国としてベースは確保すべきである。
- 医学利用に期待される短寿命RIの製造供給のための研究開発には、広い関連分野の連携と放射線関連科学のベースアップが必要である。
- 放射線人材の不足、RI(+核燃)使用施設の老朽化が課題であり、その充実強化が必須である。

- 人的資源の強化、RI(+核燃)施設の機能強化
- 各種加速器、原子炉、大規模RI製造供給体制の国としての整備(企業との連携支援)
- 放射線規制の合理的運用、安全文化

学術団体  
 関連企業  
 関連省庁・国