

エネルギー問題に発言する会 講演座談会(2023/09/15)

# 核工学と核医学の融合 ～原子炉による医用RIの生成～

RI: Radioisotope(放射性同位体)  
(RIは和製英語であり、海外では通常用いられない)

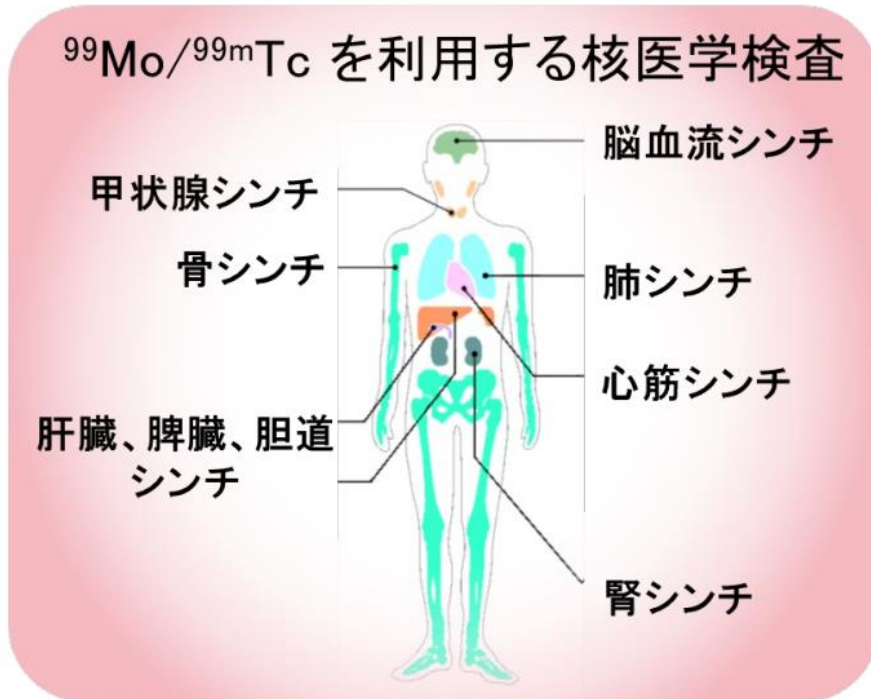
東京都市大学  
大学院総合理工学研究科 共同原子力専攻  
理工学部 原子力安全工学科

高木 直行

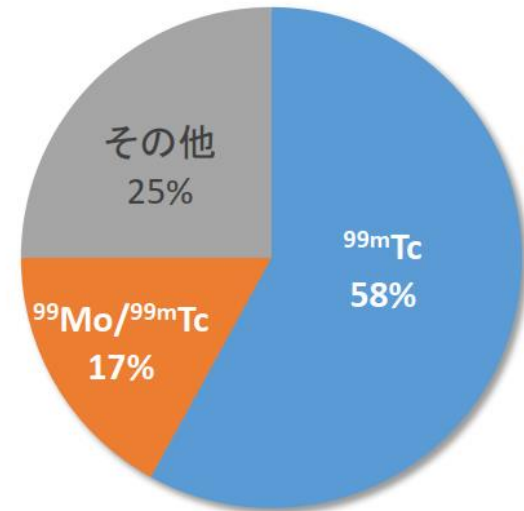


【モリブデンを取り巻く状況、今後の課題と要望】

# 核医学における $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ の利用



放射性医薬品の供給量(Bq)割合



アイソトープ等流通統計2020

- ・日本で流通している放射性医薬品に使用される核種の75%を $^{99\text{m}}\text{Tc}$ とその原料となる $^{99}\text{Mo}$ が占めている。
- ・日本における $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ 製剤の市場規模は150億円弱程度。

# 近年の医用RI国内供給量(使用量)

## 3 放射性医薬品 Supply of Radiopharmaceuticals

### 3.1 放射性医薬品の供給量 Amounts of Radiopharmaceuticals

•SPECTでの各種検査に使用  
•核医学診断の約8割を占める

#### 3.1.1 *in vivo* の供給量の推移(核種別, 年度別)

Amounts of Radiopharmaceuticals (for *in vivo* use) Supplied in Fiscal 2017-2021

(単位Unit: MBq)

Fiscal Year 年度	2017	2018	2019	2020	2021
核種 Nuclide					
<sup>18</sup> F	49,296,580	49,503,669	49,519,653	47,250,147	48,083,017
<sup>67</sup> Ga	2,411,290	2,100,860	1,891,921	1,627,926	1,486,734
<sup>81</sup> Rb- <sup>81m</sup> Kr(G)	620,490	622,525	612,720	589,225	602,545
<sup>89</sup> Sr	83,895	57,387	-	-	-
<sup>90</sup> Y	481,000	510,600	321,900	38,850	-
<sup>99</sup> Mo- <sup>99m</sup> Tc(G)	86,688,375	82,068,895	79,314,015	73,796,020	69,444,375
<sup>99m</sup> Tc	300,495,662	293,085,756	285,604,434	252,129,322	262,223,304
<sup>111</sup> In	340,545	370,057	385,300	321,315	369,265
<sup>123</sup> I	34,987,358	34,902,199	34,836,349	31,169,336	33,013,154
<sup>131</sup> I	15,245,295	15,684,208	16,381,251	16,036,004	15,568,805
<sup>177</sup> Lu	-	-	-	-	1,443,000
<sup>201</sup> Tl	13,234,456	12,987,851	12,268,016	10,901,828	10,789,607
<sup>223</sup> Ra	55,471	39,362	34,915	31,157	28,780
合計 Total	503,940,417	491,932,578	481,170,474	433,891,129	443,052,586

•骨転移のある前立腺癌のα線治療に使用  
•2016年認可以降急増

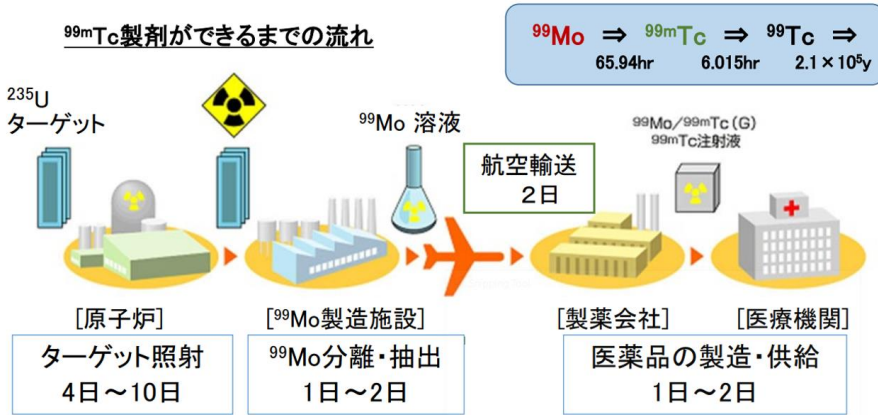
出典：アイソトープ等流通統計2022 日本アイソトープ協会

# 医用 RI 国産化に向けたこれまでの取り組み

- 日本学術会議(2008年7月)
  - 国内の安定供給体制確立について検討を行い、「海外の製造所のトラブルが我が国の医療に大きな影響を及ぼしており、安定供給が望まれる」と提言
- 内閣府官民検討会(2011年7月～)
  - 「我が国のテクネチウム製剤の安定供給」に向けてのアクションプランをまとめ、「国産事業者が主体となり、原子力機構と協力しつつ、今後5年程度でテクネチウム製剤の販売を始める国産事業の開始を目指すべき」と提言
- JAEA大洗JMTR(2012年～2017年)
  - 国産化に向けた技術的検討を本格化し、「つくば国際戦略総合特区・財政支援(特区推進費補助金)」の交付等を受けホットラボ内にMo-99/Tc-99m分離・抽出・濃縮試験設備を整備していたが、2017年にJMTR廃炉決定
- 日本学術会議(2018年8月)
  - 「研究と産業に不可欠な中性子の供給と研究用原子炉の在り方」で、国産化が急務のRIとしてMo-99があげられ、「少なくとも国内需要量の一部を国産化で確保することが重要」とのまとめ

医学診断用 Mo/Tc

# 現在のRI調達



6-day Ci : 精製施設を出た後、6日後の放射能を指す。製造から、実際に診療で使用するまでの減衰を考慮。



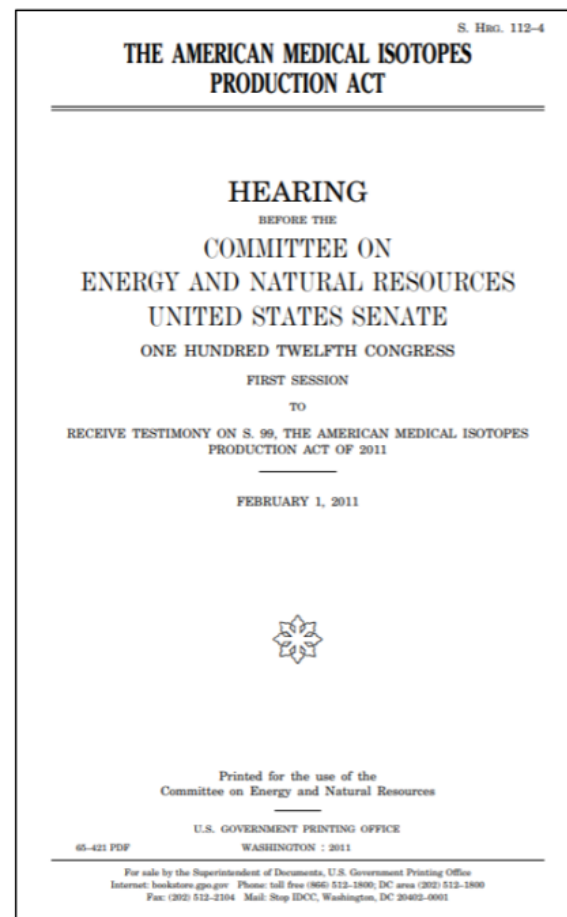
# 米国の $^{99}\text{Mo}$ 製造方法と国の助成制度①

## American Medical Isotopes Production Act (AMIPA) (米国医療用放射性同位元素製造法)

2011年2月1日発出

- 米国では1989年まで高濃縮ウラン(HEU)を使用して $^{99}\text{Mo}$ を生産していたが、**その後は国内需要の全量を輸入していた。**
- 2012年、高濃縮ウラン(HEU)を使用しない $^{99}\text{Mo}$ 生産技術の開発を支援し、国内供給の確立をサポートするために、米国エネルギー省国家核安全保障局(DOE/NNSA)は、DOEに属する**国立研究所等に資金授与を開始。**
- 2018年11月、NorthStar Medical Radioisotopesは、 $^{98}\text{Mo}$ ターゲットを使用した中性子捕獲技術を利用して、**約30年ぶりの国内生産を開始した。**

<https://www.energy.gov/nnsa/nnsas-molybdenum-99-program-establishing-reliable-domestic-supply-mo-99-produced-without>



# 原子炉での $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ 生成

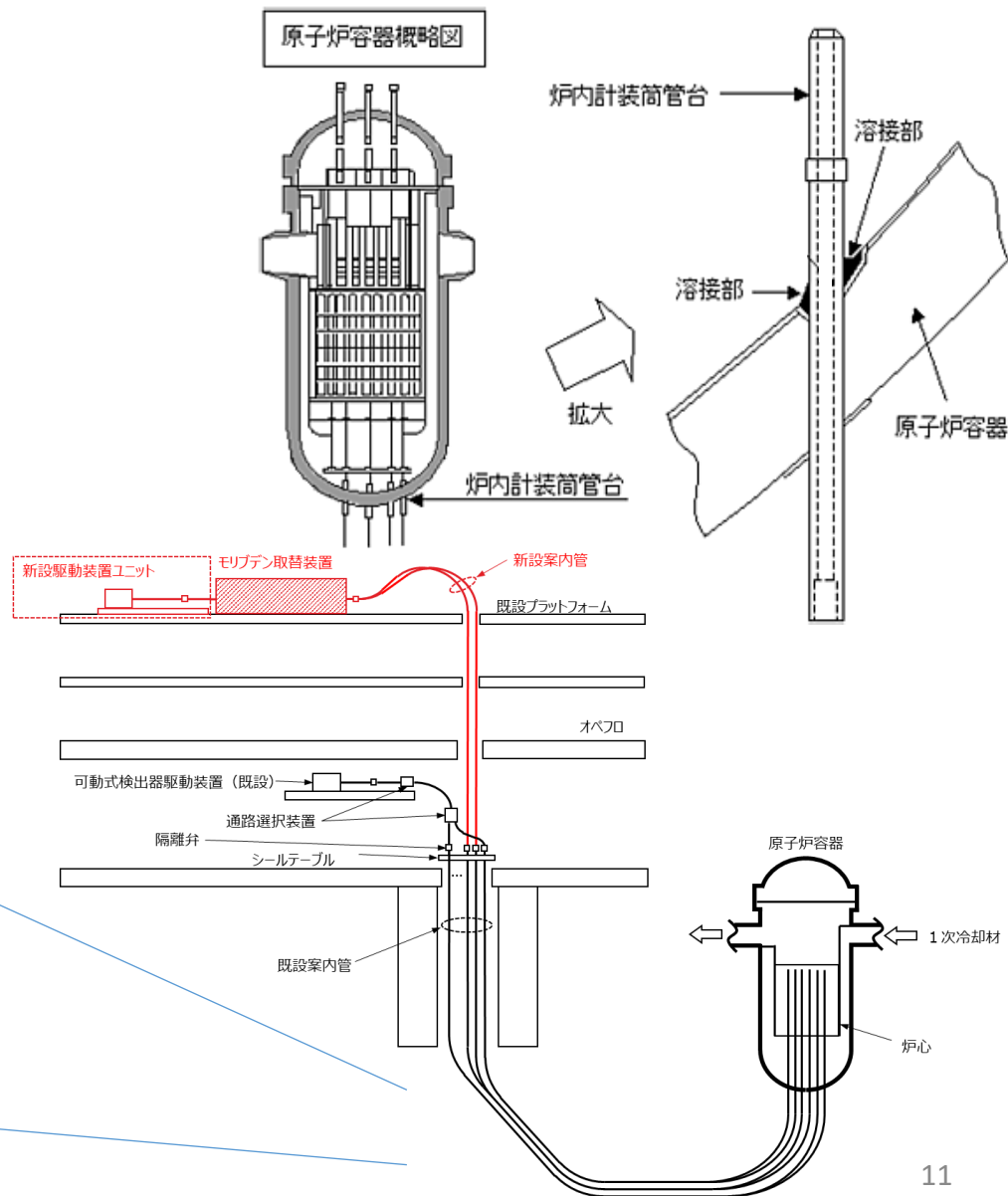
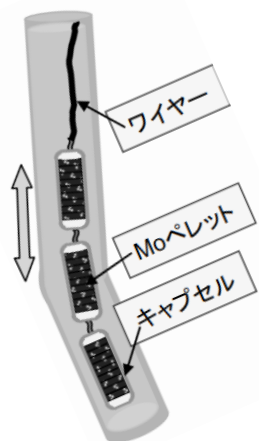
$^{92}\text{Tc}$ 4.25 m	$^{93}\text{Tc}$ 2.75 h ★43.5 m	$^{94}\text{Tc}$ 4.88 h ★52.0 m	$^{95}\text{Tc}$ ★61 d 20.0 h	$^{96}\text{Tc}$ 4.28 d ★51.5 m	$^{97}\text{Tc}$ $2.6 \cdot 10^6$ y ★90.1 d	$^{98}\text{Tc}$ $4.2 \cdot 10^6$ y	$^{99}\text{Tc}$ $2.11 \cdot 10^5$ y ★6.015 h	$^{100}\text{Tc}$ 15.46 s	$^{101}\text{Tc}$ 14.2 m	$^{102}\text{Tc}$ ★4.35 m 5.28 s
$^{91}\text{Mo}$ 15.49 m ★64.6 s	$^{92}\text{Mo}$ 14.84	$^{93}\text{Mo}$ $4.0 \cdot 10^3$ y ★6.85 h	$^{94}\text{Mo}$ 9.25	$^{95}\text{Mo}$ 15.92	$^{96}\text{Mo}$ 16.68	$^{97}\text{Mo}$ 9.55	$^{98}\text{Mo}$ 24. $\xrightarrow{n,\gamma}$	$^{99}\text{Mo}$ 2.7475 $\xleftarrow{n,2n}$	$^{100}\text{Mo}$ 9.63 $\cdot 10^{18}$ y	$^{101}\text{Mo}$ 14.61 m
$^{90}\text{Nb}$ 14.60 h ★18.81 s	$^{91}\text{Nb}$ 680 y ★60.86 d	$^{92}\text{Nb}$ $3.47 \cdot 10^7$ y ★10.15 d	$^{93}\text{Nb}$ 100 ★16.13 y	$^{94}\text{Nb}$ $2.03 \cdot 10^4$ y ★6.263 m	$^{95}\text{Nb}$ 34.991 d ★3.61 d	$^{96}\text{Nb}$ 23.35 h	$^{97}\text{Nb}$ 1.20 h ★52.7 s	$^{98}\text{Nb}$ ★51.3 m 2.86 s	$^{99}\text{Nb}$ ★2.6 m 15.0 s	$^{100}\text{Nb}$ ★2.99 s 1.5 s
$^{89}\text{Zr}$ 3.27 d ★4.161 m	$^{90}\text{Zr}$ 51.45 ★809.2 ms	$^{91}\text{Zr}$ 11.22	$^{92}\text{Zr}$ 17.15	$^{93}\text{Zr}$ $1.53 \cdot 10^6$ y	$^{94}\text{Zr}$ 17.38	$^{95}\text{Zr}$ 64.032 d	$^{96}\text{Zr}$ 2.80 $3.9 \cdot 10^{19}$ y	$^{97}\text{Zr}$ 16.744 h	$^{98}\text{Zr}$ 30.7 s	$^{99}\text{Zr}$ 2.1 s

- 原子炉でのMo-99生成は、これまでHEUによる核分裂法が主流
- 核不拡散の観点で原料ウランがHEUからLEUへ
- 生成効率低下、処理工程・廃棄物の問題から (n, $\gamma$ )法へ移行



# 図5 PWRでのMo/Tc生成法

- 原子炉容器を貫通して炉内外を行き来する「炉内計装系」の管を用いて、Mo原料を約7日間照射→取り出し
- 全長 3600mm の  $\text{MoO}_3$  ターゲット4本の照射により、1基のPWRで日本の週間需要量 (1000 Ci) の約 6 割を生成



がん治療用  $^{225}\text{Ac}$

## JHR Seminar

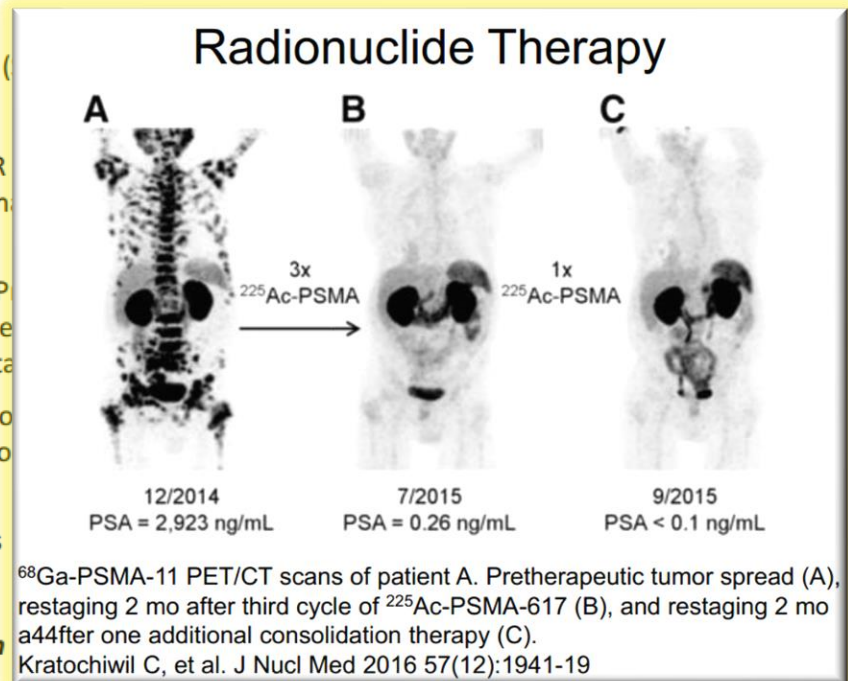
### The Jules Horowitz Reactor: A new high performance MTR (Material Testing Reactor) working as an International User Facility in support to Nuclear Industry, Public Bodies and Research Institutes.

Seminar at French Embassy in Japan (April 2019)

- 10h00-10h10: Welcome
- 10h10-10h15: Information on the Participants List (Embassy in Japan)
- 10h15-10h30: CEA presentation (Gilles Bignan, JHR interface, CEA / Patrick Blanc-Tranchesi, Nuclear Energy Division, CEA)
- 10h30-10h45: CEA experience in Radio-isotopes Production (Pierre Coulon, JHR Project Manager) start-up equipment and experimental facilities
- 10h45-11h15: Detailed presentation of the status of radioisotope productions and associated facilities (CEA)
- 11h15-11h45: Supply and Use of Radioisotopes in Japan (Adviser, JRIA)

**11h45- 13h00 Lunch**

- 13h00-13h20: Current Status of Radioisotope needs in Nuclear Medicine practice in Japan (Jun Hatazawa, President, JSNM)



2019年4月11日 仏ジュールホルビッツ炉セミナー@仏大使館  
⇒ 予備解析開始  
2019年5月23日 JAEA人形峠視察  
2019年6月14日 JAEA大洗塩月所長へ「常陽で生成可能」を報告  
2020年度 原子カシステム研究開発事業スタート

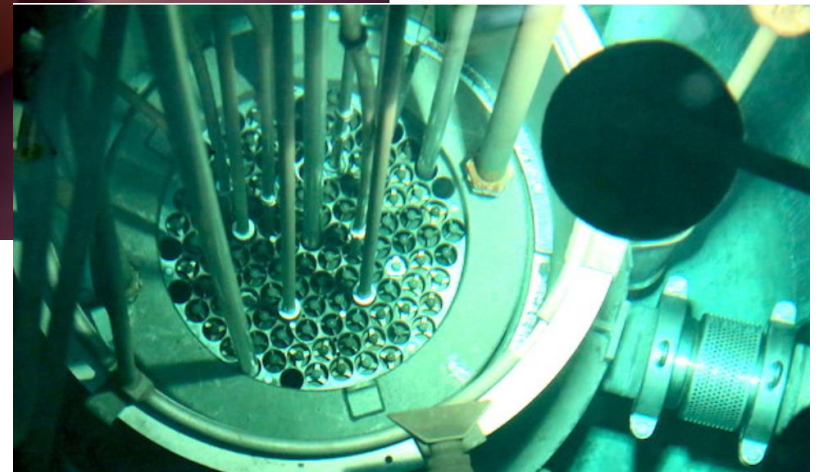


## 水銀から金をつくる「原子炉錬金術」を実証する！

</> 埋め込み

f シェア

🐦 ツイート

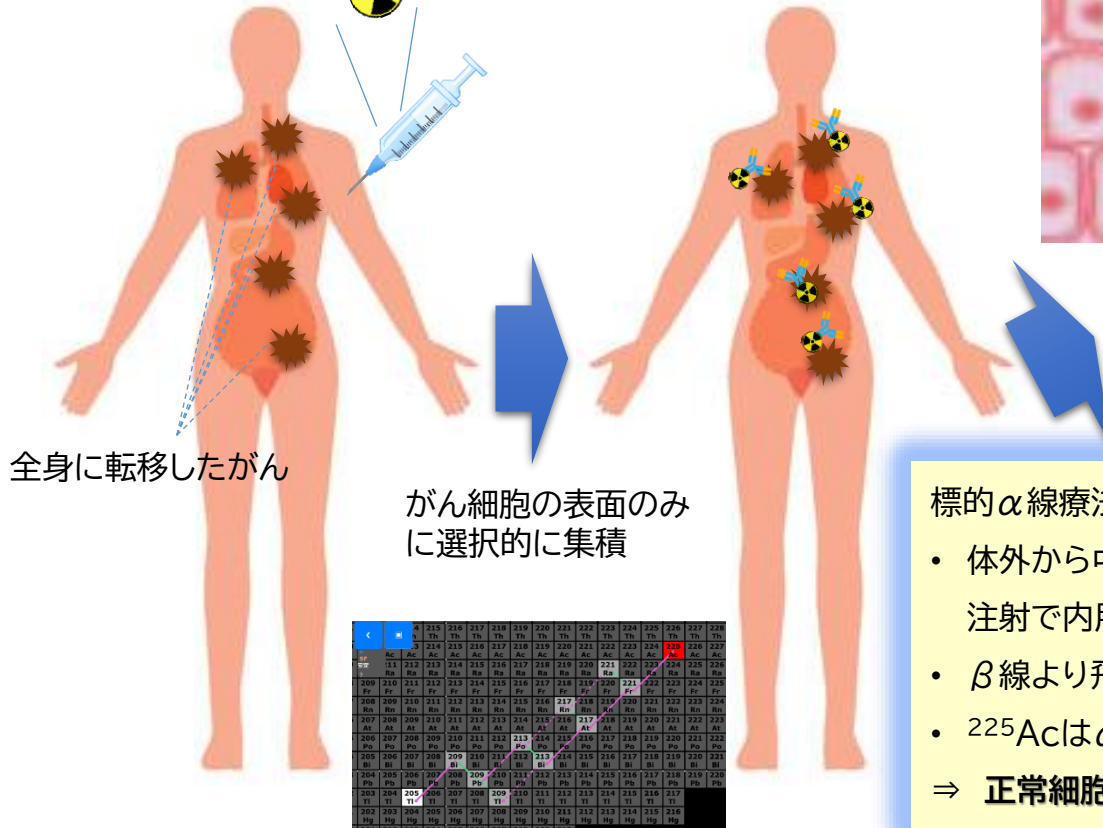
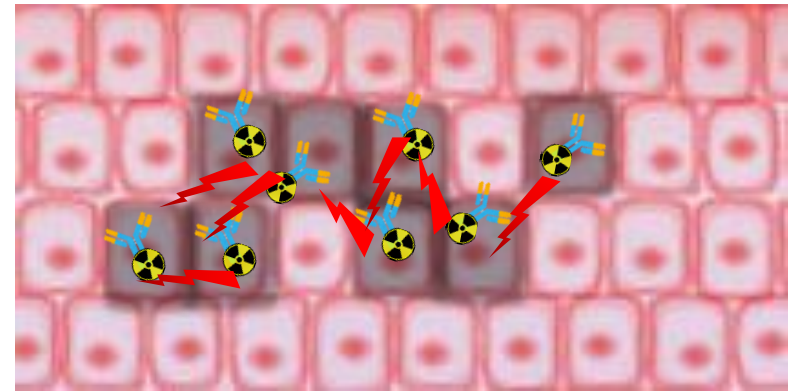


# 標的α線療法 Targeted Alpha Therapy (TAT)

がん細胞の表面に  
結合しやすい分子  
(Ligand)



$^{225}\text{Ac}$   
( $\alpha$ 線を放出する人工の放射性核種)



- がん細胞表面から $^{225}\text{Ac}$ が $\alpha$ 線を放出
- $\alpha$ 線は飛程短く、がん細胞を集中侵襲

標的 $\alpha$ 線療法の特徴:

- 体外から中性子や重イオンを照射する外部照射と異なり、注射で内用する内部照射
  - $\beta$ 線より飛程が短く、エネルギーを癌細胞に集中
  - $^{225}\text{Ac}$ は $\alpha$ 線を4回放出、エネルギー付与大
- ⇒ 正常細胞の損傷を最小限に抑えつつ、効果的治療が可能

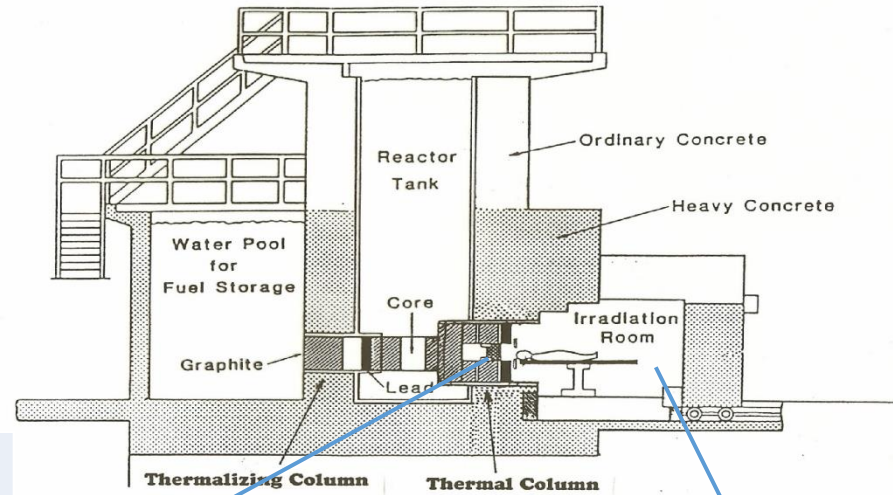
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
--	--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----



# 東京都市大学(旧武蔵工業大学) 原子力研究所(1959年～)でのBNCT研究



	Patients treated
1976	2
1977	12
1978	12
1979	7
1980	5
1981	5
1982	7
1983	13
1984	9
1985	1
1986	5
1987	11
1988	9
1989	10
Total	108



100kW出力TRIGA炉(TRIGA-II)

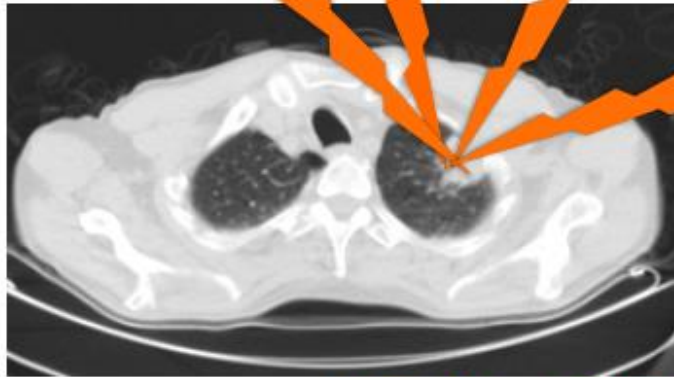


# 重粒子線治療やBNCTとの違い

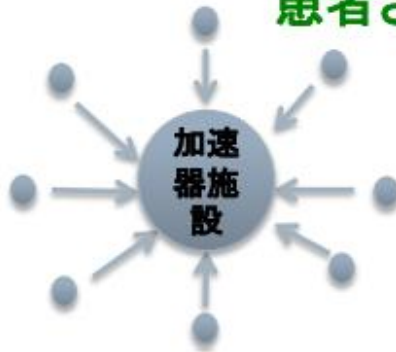
従来の重粒子線治療:  
重粒子線加速器による体外からの照射

アルファ線核医学治療:  
 $\alpha$ 線放出核種を投与し体内から照射

局所がんにも有効

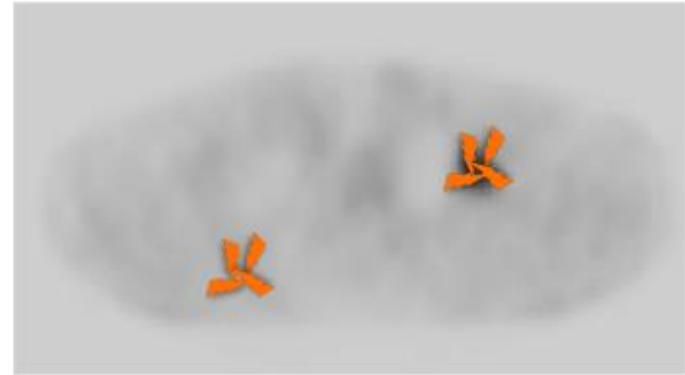


患者さんが移動

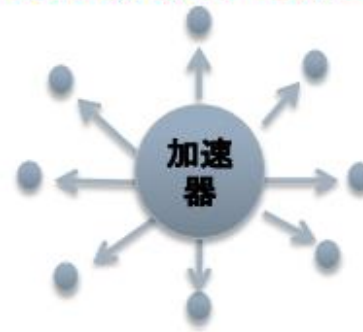


患者さんは加速器施設で加療

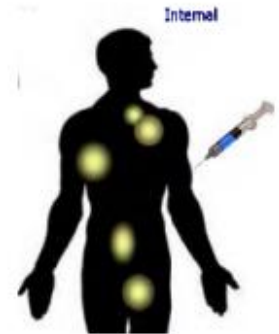
転移性病変にも有効



核種を各病院に輸送



患者さんは病院で加療



# 主なAc-225生成法

- 現生成法 U-233 stockpile中Th-229の崩壊  
→ 核兵器開発の産物。日本では不可。

- 新生成法1 高エネルギー陽子加速器でのTh-232核破砕法

- 新生成法2 低エネルギー陽子加速器でのRa-226(p,2n)法

- 新生成法3 電子線加速器でのRa-226 ( $\gamma, n$ )法

- 新生成法4 高速炉でのRa-226(n,2n)法

- 新生成法5 軽水炉でのTh-230長期照射法

原料

毎回照射

Th-232

不要

Th-232

必要

Ra-226

必要

Ra-226

必要

Ra-226

必要

Th-230

不要

# 世界のAc-225製造の状況

	$^{229}\text{Th}/^{225}\text{Ac}$ generator <b>既存法</b>	$^{232}\text{Th}$ Nuclear spallation	$^{226}\text{Ra}$ Neutron addition		$^{226}\text{Ra}$ Photon Nuclear Reaction	$^{226}\text{Ra}$ Nuclear Transmutation	$^{230}\text{Th}$ Neutron Addition
	$^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th} \rightarrow ^{225}\text{Ra} \rightarrow ^{225}\text{Ac}$	$^{232}\text{Th}(p,x)^{225}\text{Ra} \rightarrow ^{225}\text{Ac}$	$^{226}\text{Ra}(3n,2\beta)^{229}\text{Th} \rightarrow ^{225}\text{Ra} \rightarrow ^{225}\text{Ac}$	$^{226}\text{Ra}(n,2n)^{225}\text{Ra} \rightarrow ^{225}\text{Ac}$	$^{226}\text{Ra}(\gamma,n)^{225}\text{Ra} \rightarrow ^{225}\text{Ac}$	$^{226}\text{Ra}(p,2n)^{225}\text{Ac}$	$^{230}\text{Th}(3n,\alpha 2\beta)^{229}\text{Th} \rightarrow ^{225}\text{Ra} \rightarrow ^{225}\text{Ac}$  $^{230}\text{Th}(n,2n)^{229}\text{Th} \rightarrow ^{225}\text{Ra} \rightarrow ^{225}\text{Ac}$
Machine	$^{229}\text{Th}$ Solution Natural Process	Lage Scale Accelerator (>100MeV)	Nuclear Reactor		Linear Accelerator	Small Scale Accelerator (<25MeV)	Nuclear Reactor
Institution	ORNL TerraPower	Tri-Lab, NorthStar	ORNL Serva	ANL NIOWAVE	JRC, ZAG DKFZ	JAEA 都市大	
	JRC	TRIUMF	OBRINSK*	TRIUMF	SCK-CEN		
	IPPE	INR	JAEA 都市大	東大・日立 東北大	CNEA/IAEA		
	CNL	CERN	RESEARCH & APPLICATIONS Serva Energy teams with research reactor to produce cancer-fighting Ac-225 <small>Tue, Jan 27, 2020, 9:00PM Nuclear News</small>		HITACHI Imagine The Best	NPI	
			国内の原子カインフラを活用した 医用 Rf の自給技術確立に向けた研究開発 東京都市大学 TOKYO CITY UNIVERSITY 金沢大学 KANAZAWA 			QST・日本メジ	
Topic	現在主流の供給法 63 GBq/y	FDA DMF へ登録	R2~R4年度の原子カシステム事業で採択	原子力委員会によるアクションプラン (2026年度実証)	370kBqのAc-225製造に成功したとの報告	千葉県袖ヶ浦市創業拠点を竣工	R2~R4年度の原子カシステム事業で採択





JOINT IAEA-JRC WORKSHOP “SUPPLY OF ACTINIUM-225”  
IAEA, Vienna October 2018



**TOT12** INTERNATIONAL  
SYMPOSIUM

27 February – 2 March 2023  
Cape Town, South Africa



# 発電炉でのRI製造の特徴

- ビーム(中性子)束高 ( $\because \Sigma_f \phi \propto P$ )
- フルエンス高 ( $\because$  長期サイクル & 稼働率高)
- 照射体積大 ( $\because$  炉心体積大)
- 除熱能力大 ( $\because$  核燃料冷却)
- エネルギー収支優 ( $\because$  自律連鎖発熱反応)

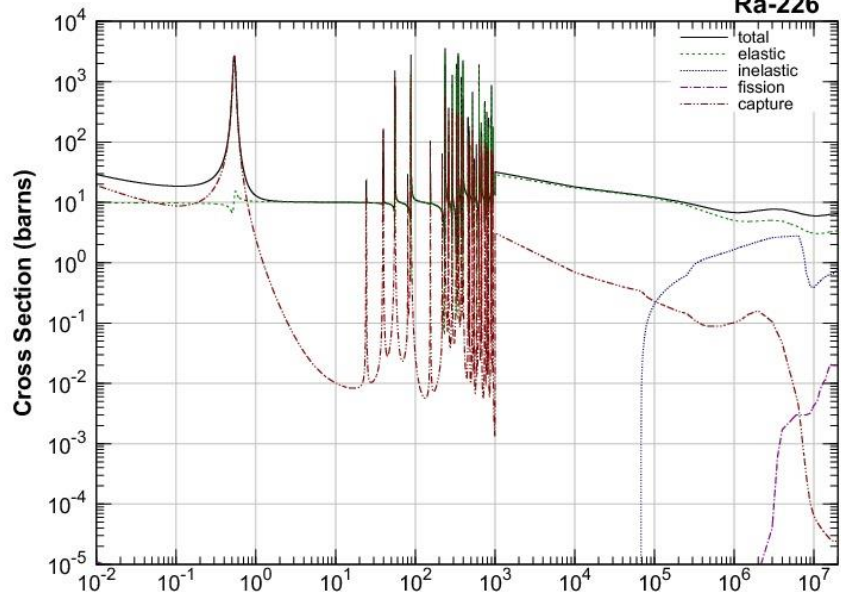
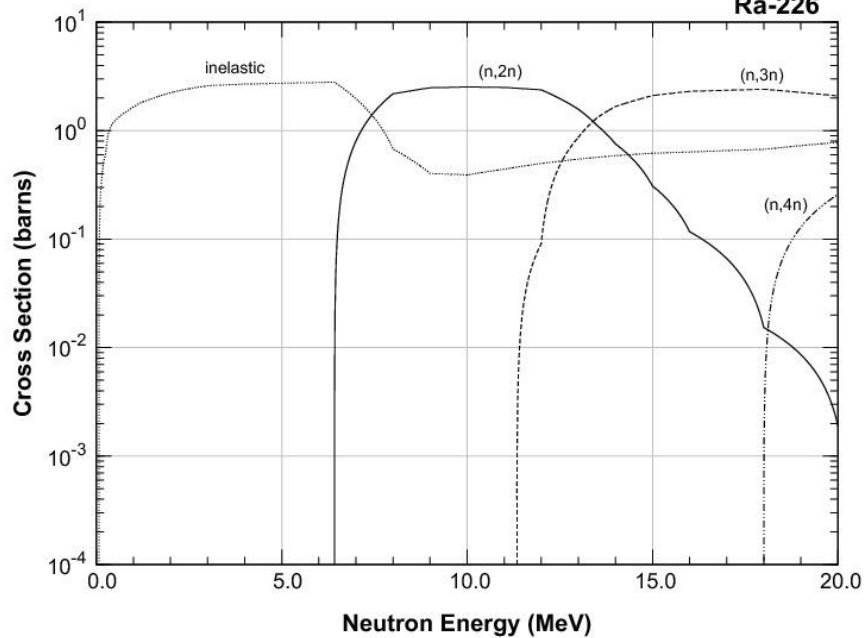
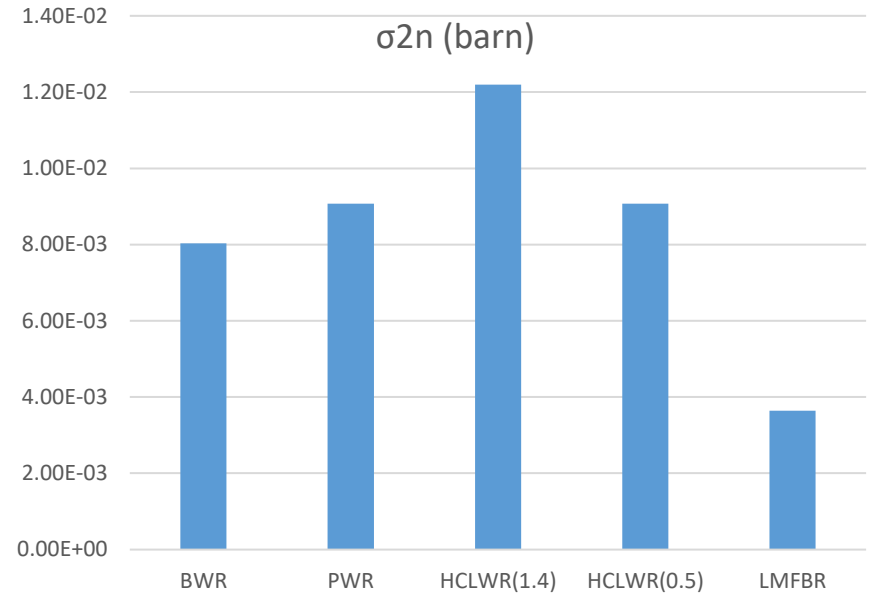
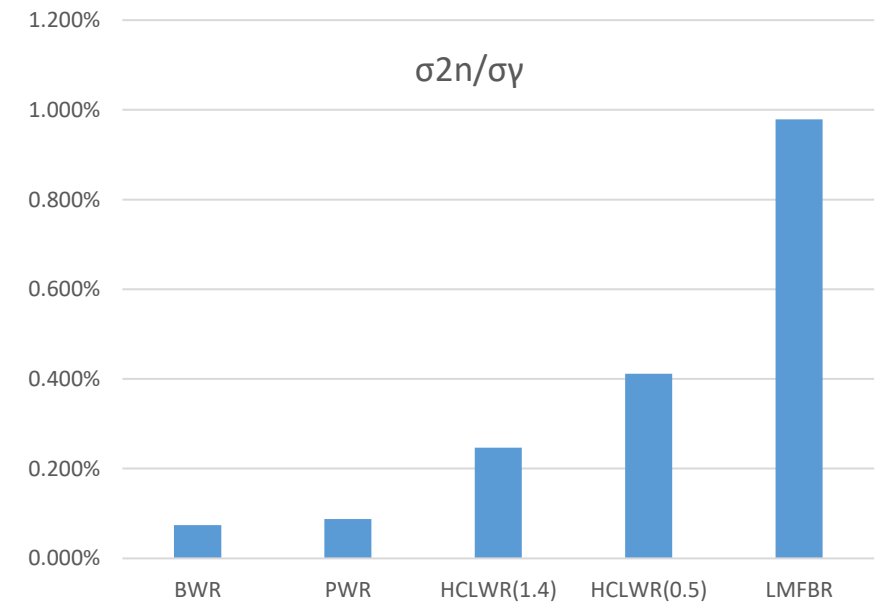
# どうやってAc-225をつくるか？

## Ra-226(n,2n)法

- Raを高速中性子で照射
- 高速炉は原子力先進各国が開発を行ってきたが、現在西側諸国で稼働中なのはJAEAの常陽のみ(他は、露、中、印)

224 Th 812ms	225 Th 8.72 m	226 Th 30.6 m	227 Th 18.718 d	228 Th 1.9131 y	229 Th 7880 y ★13.9 h	230 Th 7.54•10 <sup>4</sup> y	231 Th 1.063 d	232 Th 100 1.405•10 <sup>10</sup> y
223 Ac 2.10 m	224 Ac 2.9 h	225 Ac 10.0 d	226 Ac 1.225 d	227 Ac 21.773 y	228 Ac 6.15 h	229 Ac 1.05h	230 Ac 2.03 m	231 Ac 7.5 m
222 Ra 38.0 s	223 Ra 11.435 d	224 Ra 3.66 d	225 Ra 14.9 d	226 Ra 1600 y	227 Ra 42.2 m	228 Ra 5.75 y	229 Ra 4.0 m	230 Ra 1.55 h
221 Fr 4.9 m	222 Fr 14.2 m	223 Fr 22.00 m	224 Fr 3.30 m	225 Fr 4.0 m	226 Fr 49s	227 Fr 2.47 m	228 Fr 39 s	229 Fr 50.2 s

Diagram illustrating the production of Ac-225 from Ra-226 via the (n,2n) reaction. A yellow arrow points from Ra-226 to Ac-225, and a blue dashed box highlights the Ra-226 cell with the label (n,2n).

**Ra-226****Ra-226** $\sigma_{2n}$  (barn) $\sigma_{2n}/\sigma_{\gamma}$ 

# 常陽を用いた $^{225}\text{Ac}$ 生成

照射方法:

- 炉心中心の照射リグの中心にRaターゲットを装荷
- 60日間照射

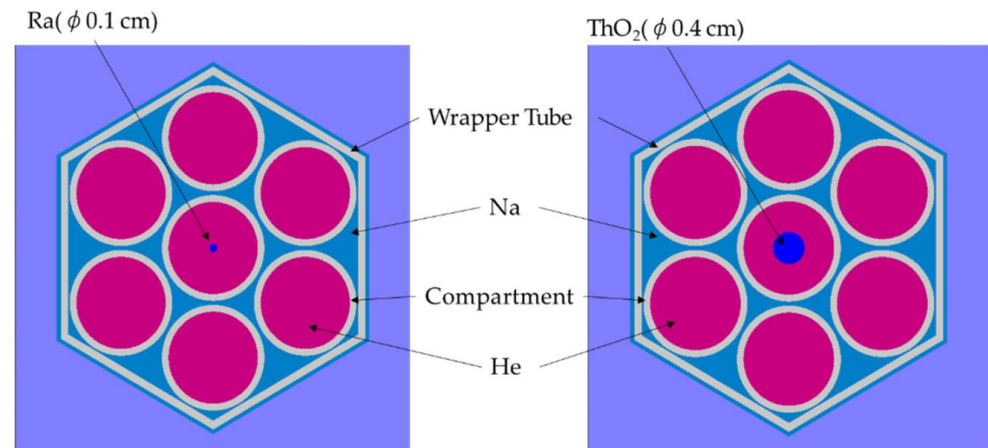
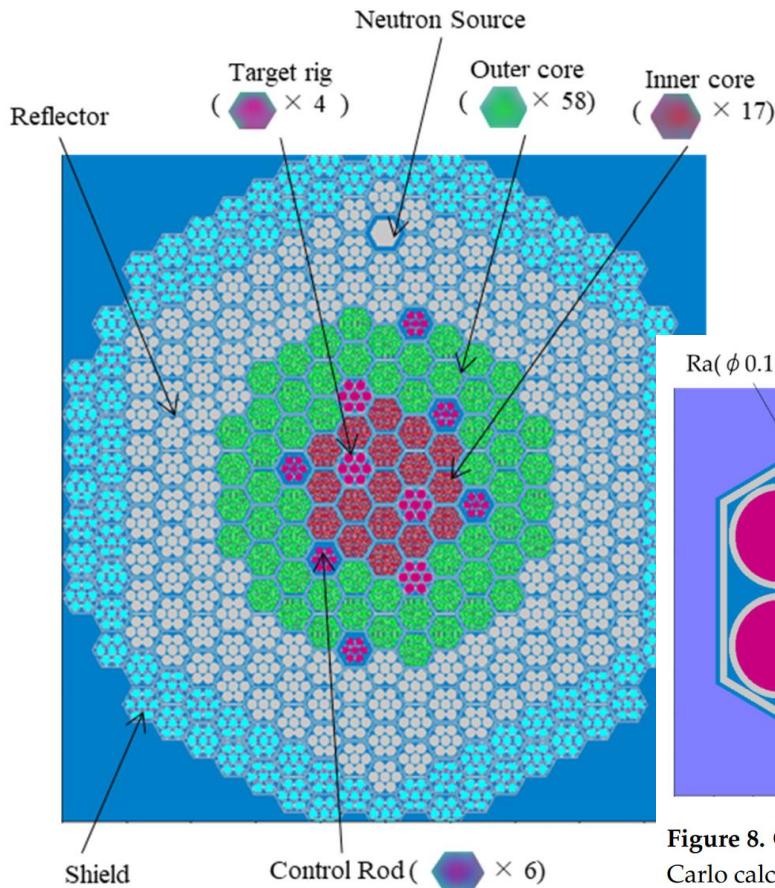


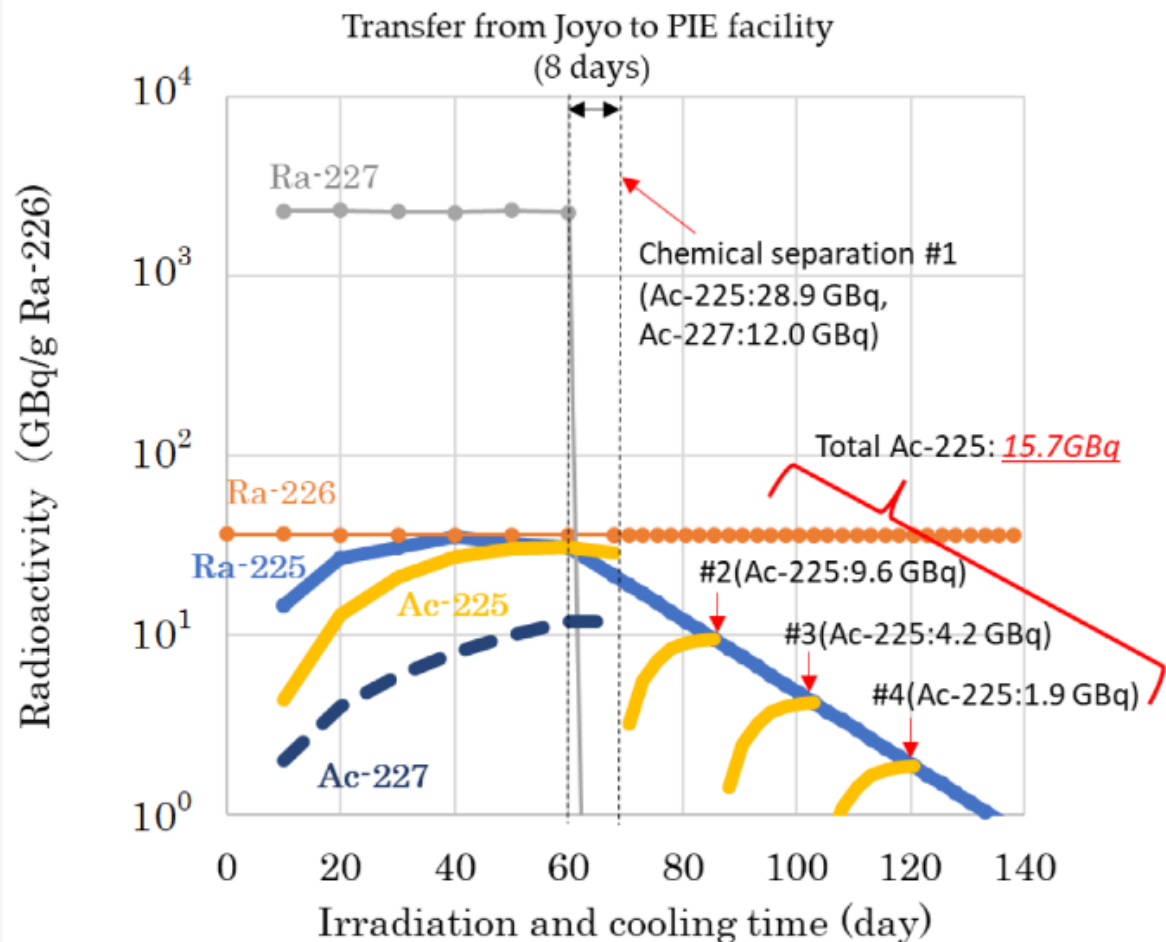
Figure 8. Cross-sectional view of the irradiation rig loading with the target material for 3D Monte-Carlo calculation (drawn by MVP input data) (Left: Ra-226, Right: Th-230).

Figure 7. Cross-sectional view of the Jojo core prepared for 3D Monte-Carlo calculation (drawn by visualization function of MVP).





**Figure 9.** Isotopic composition changes of Ra-226 (1 g) by neutron irradiation for 60 days in Joyo and pure Ac-225 production through succeeding Ra/Ac chemical separations.

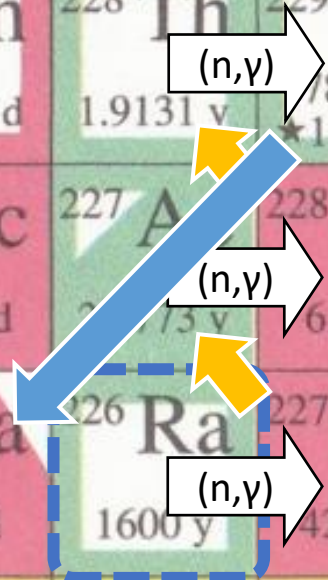
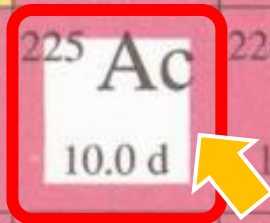


- 1gの $^{226}\text{Ra}$ を
- 60日照射+3回のAc/Ra分離で
- 年間約47 GBqの $^{225}\text{Ac}$ を生成
- これは現世界供給量の約70%に相当



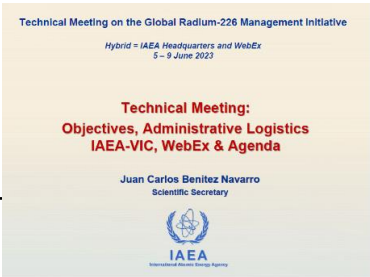


# 5) Ra-226(3n,2β)法

227 U 1.1 m	228 U 9.1 m	229 U 58 m	230 U 20.8 d	231 U 4.2 d	232 U 68.9 y	233 U 1.59•10 <sup>5</sup> y	234 U 0.0055 2.455•10 <sup>5</sup> y	235 U 0.720 7.038•10 <sup>8</sup> y ★ 25 m
226 Pa 1.8 m	227 Pa 38.3 m	228 Pa 22 h	229 Pa 1.50 d	230 Pa 17.4 d	231 Pa 3.28•10 <sup>4</sup> y	232 Pa 1.31 d	233 Pa 26.967 d	234 Pa 6.70 h ★ 1.17 m
225 Th 8.72 m	226 Th 30.6 m	227 Th 18.718 d	228 Th 1.9131 y	229 Th 7880 y ★ 13.9 h	230 Th 7.54•10 <sup>4</sup> y	231 Th 1.063 d	232 Th 100 1.405•10 <sup>10</sup> y	233 Th 21.83m
224 Ac 2.9 h	225 Ac 10.0 d	226 Ac 1.225 d	227 Ac 1.773 y	228 Ac 6.15 h	229 Ac 1.05h	230 Ac 2.03 m	231 Ac 7.5 m	232 Ac 1.98 m
223 Ra 11.435 d	224 Ra 3.66 d	225 Ra 14.9 d	226 Ra 1600 y	227 Ra 42.2 m	228 Ra 5.75 y	229 Ra 4.0 m	230 Ra 1.55 h	231 Ra 1.72 m



# ラジウム(放射性)の調達

調達先		実施状況	保有量
国内 	機構内	大洗研	30 mCi (1.11 GBq)
		その他	220 mCi (8.14 GBq)
	機構外	<ul style="list-style-type: none"> <li>外部機関の調査による国内線源の把握</li> <li>譲り受け候補の絞り込み</li> </ul>	177 mCi (6.55 GBq) 候補: 57 mCi (2.11 GBq)
海外	 IAEA Global Radium-226 Management Initiative	<ul style="list-style-type: none"> <li>参加登録済</li> <li>電子メールで確認済み</li> <li>2023/6/5~9 Technical Meeting(web)</li> </ul> 	全加入国: 100 Ci (3.7 TBq) 返答あり: 22 Ci (0.81 TBq) 最大保有機関: 27 Ci (1.0 TBq)

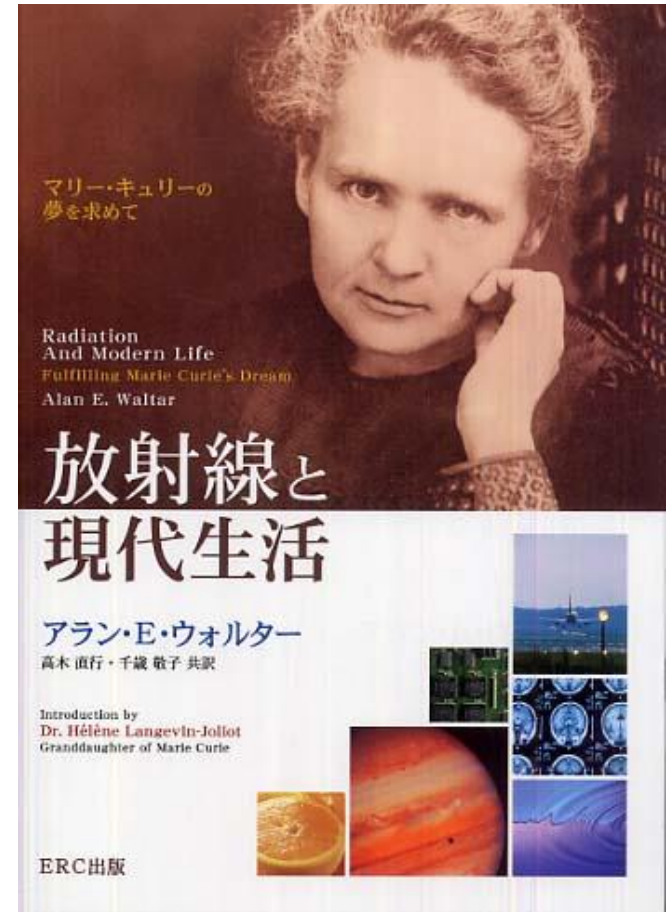
# 希少な原料物質 ラジウム( $^{226}\text{Ra}$ )

- 1898年にマリ・キュリー夫妻らが発見
- 半減期： 1600年
- 地球に5トン？と希少
- 近年は $^{225}\text{Ac}$ の原料として注目され入手はより困難に



代替核種：  $^{230}\text{Th}$  (75,000年)

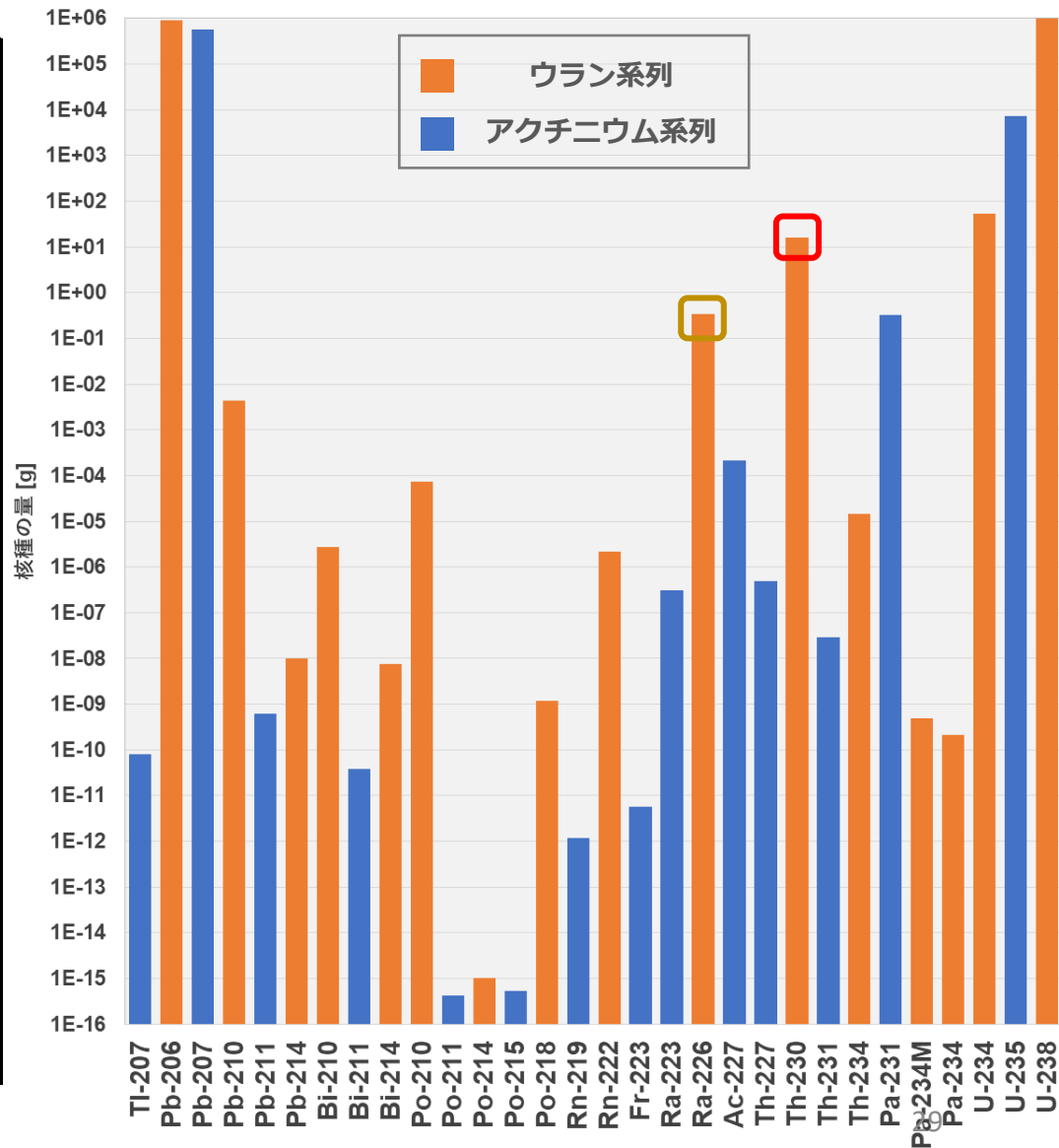
常に $^{232}\text{Th}$ と共存するため、  
調達には同位体分離技術が必要



# 天然ウラン1tonと放射平衡にある娘核種

天然ウラン1tonと放射平衡にある核種の量			
ウラン系列		アクチニウム系列	
核種	量	核種	量
U-238	993 [kg]	U-235	7.20 [kg]
U-234	53.4 [g]	Pa-231	330 [mg]
Pa-234	$2.17 \times 10^{-10}$ [g]	Th-231	$2.93 \times 10^{-8}$ [g]
Pa-234M	$4.81 \times 10^{-10}$ [g]	Th-227	$4.99 \times 10^{-7}$ [g]
Th-234	$1.44 \times 10^{-5}$ [g]	Ac-227	0.215 [mg]
Th-230	16.2 [g]	Ra-223	$3.04 \times 10^{-7}$ [g]
Ra-226	338 [mg]	Fr-223	$5.61 \times 10^{-12}$ [g]
Rn-222	$2.17 \times 10^{-6}$ [g]	Rn-219	$1.20 \times 10^{-12}$ [g]
Po-218	$1.20 \times 10^{-9}$ [g]	Po-215	$5.29 \times 10^{-16}$ [g]
Po-214	$1.04 \times 10^{-15}$ [g]	Po-211	$4.21 \times 10^{-16}$ [g]
Po-210	$7.42 \times 10^{-5}$ [g]	Bi-211	$3.74 \times 10^{-11}$ [g]
Bi-214	$7.56 \times 10^{-9}$ [g]	Pb-211	$6.31 \times 10^{-10}$ [g]
Bi-210	$2.69 \times 10^{-6}$ [g]	Pb-207	582 [kg]
Pb-214	$1.02 \times 10^{-8}$ [g]	Tl-207	$8.15 \times 10^{-11}$ [g]
Pb-210	4.35 [mg]		
Pb-206	894 [kg]		

(ORIGENを用いた計算結果)





# Ac-225をつくる代替原料：Th-230

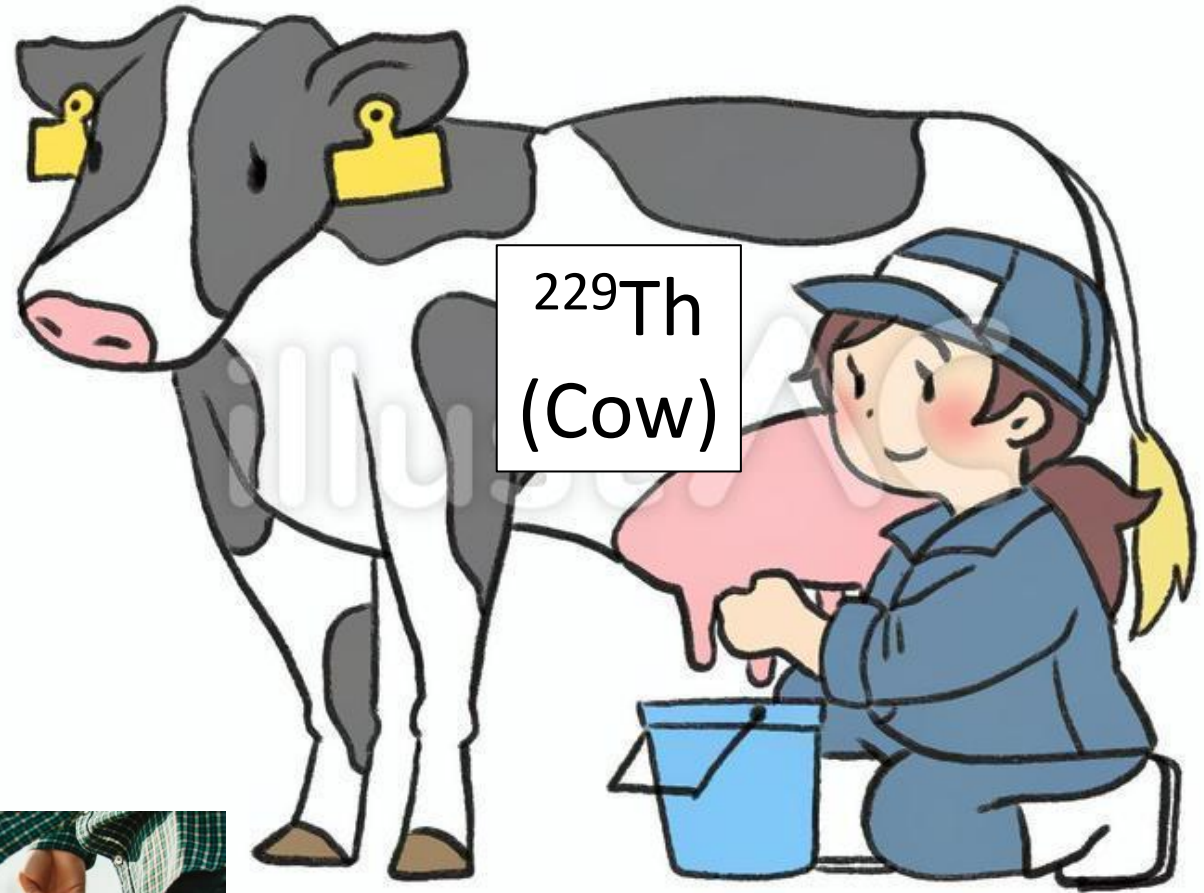
## Th-230(n,2n)法

- 同位体分離した $^{230}\text{Th}$ を高速炉常陽で長期照射
- 一旦、親核の $^{229}\text{Th}$ を生成すれば、後は照射不要、ミルキングのみで半永久的に生成

$^{224}\text{Th}$ 812ms	$^{225}\text{Th}$ 8.72 m	$^{226}\text{Th}$ 30.6 m	$^{227}\text{Th}$ 18.718 d	$^{228}\text{Th}$ 1.9131 y	$^{229}\text{Th}$ 7880 y ★13.9 h	$^{230}\text{Th}$ $7.54 \cdot 10^4$ y	$^{231}\text{Th}$ 1.063 d	$^{232}\text{Th}$ 100 $1.405 \cdot 10^{10}$ y
$^{223}\text{Ac}$ 2.10 m	$^{224}\text{Ac}$ 2.9 h	$^{225}\text{Ac}$ 10.0 d	$^{226}\text{Ac}$ 1.225 d	$^{227}\text{Ac}$ 21.773 y	$^{228}\text{Ac}$ 6.15 h	$^{229}\text{Ac}$ 1.05h	$^{230}\text{Ac}$ 2.03 m	$^{231}\text{Ac}$ 7.5 m
$^{222}\text{Ra}$ 38.0 s	$^{223}\text{Ra}$ 11.435 d	$^{224}\text{Ra}$ 3.66 d	$^{225}\text{Ra}$ 14.9 d	$^{226}\text{Ra}$ 1600 y	$^{227}\text{Ra}$ 42.2 m	$^{228}\text{Ra}$ 5.75 y	$^{229}\text{Ra}$ 4.0 m	$^{230}\text{Ra}$ 1.55 h
$^{221}\text{Fr}$ 4.9 m	$^{222}\text{Fr}$ 14.2 m	$^{223}\text{Fr}$ 22.00 m	$^{224}\text{Fr}$ 3.30 m	$^{225}\text{Fr}$ 4.0 m	$^{226}\text{Fr}$ 49s	$^{227}\text{Fr}$ 2.47 m	$^{228}\text{Fr}$ 39 s	$^{229}\text{Fr}$ 50.2 s 30

Diagram illustrating the production of  $^{225}\text{Ac}$  from  $^{230}\text{Th}$  via the  $(n,2n)$  reaction. The  $^{230}\text{Th}$  nucleus is highlighted with a blue dashed box, and the  $(n,2n)$  reaction is indicated by a white arrow. The resulting  $^{225}\text{Ac}$  nucleus is highlighted with a red box, and the  $\alpha$  decay of  $^{225}\text{Ac}$  to  $^{225}\text{Ra}$  is indicated by a white arrow labeled  $\alpha$ 崩壊.





$^{229}\text{Th}$   
(Cow)



$^{225}\text{Ac}$   
(Milk)

# Milking

# 日本の全患者数(年間10万人)分の $^{225}\text{Ac}$ を生成するには

照射原料の原料: トリウム( $^{232}\text{Th} + ^{230}\text{Th}$ ) 100ton



同位体濃縮



照射原料:  $^{230}\text{Th}$  100kg



原子炉(常陽 or 軽水炉)での長期照射



$^{229}\text{Th}$  100g

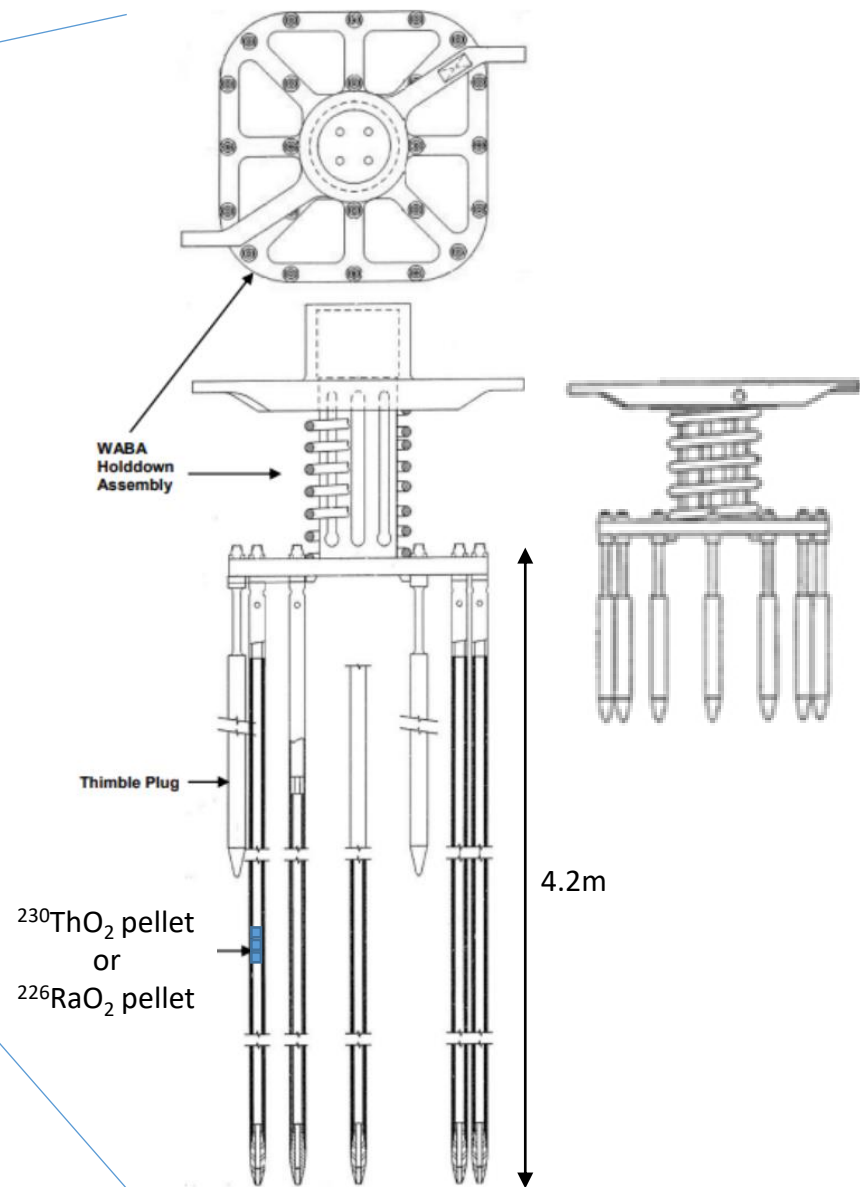
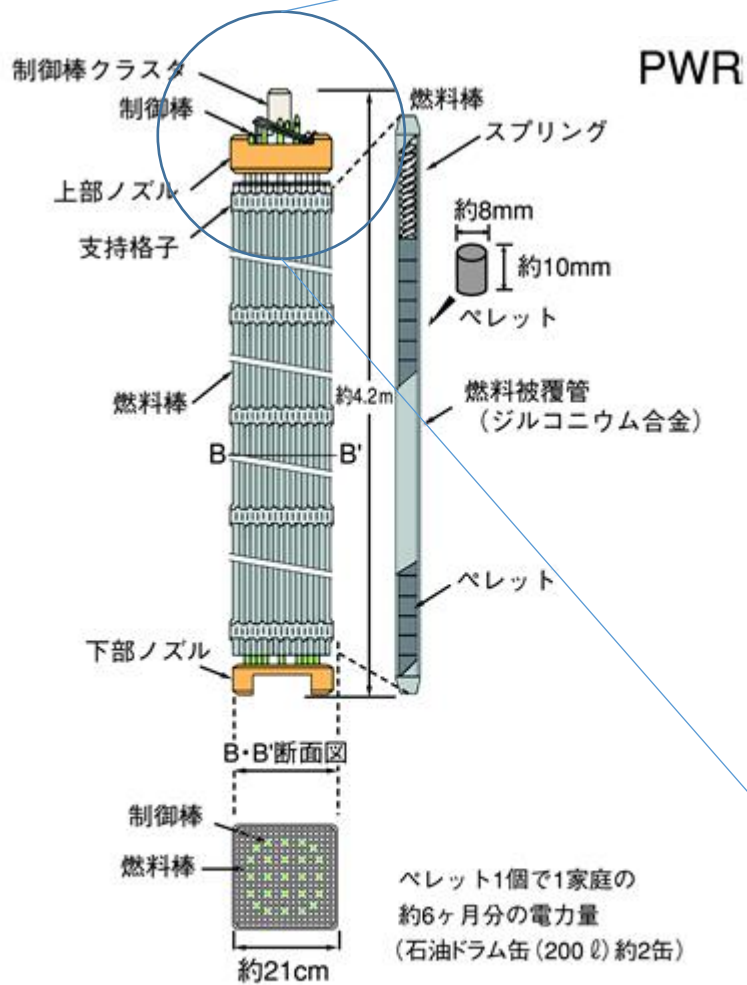


ミルクキング



年間10万人分(8TBq)の $^{225}\text{Ac}$ を半永久的に生成  
(年間売り上げ ~1000億円)

# PWRでのAc-225生成法

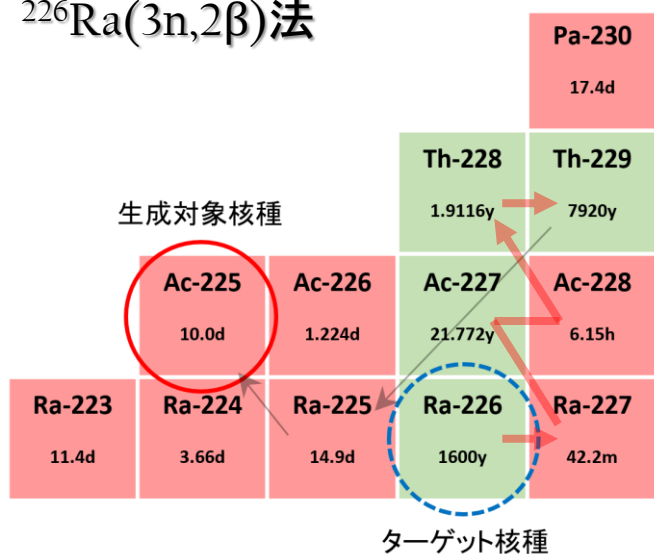


出典：資源エネルギー庁「原子力2005」他

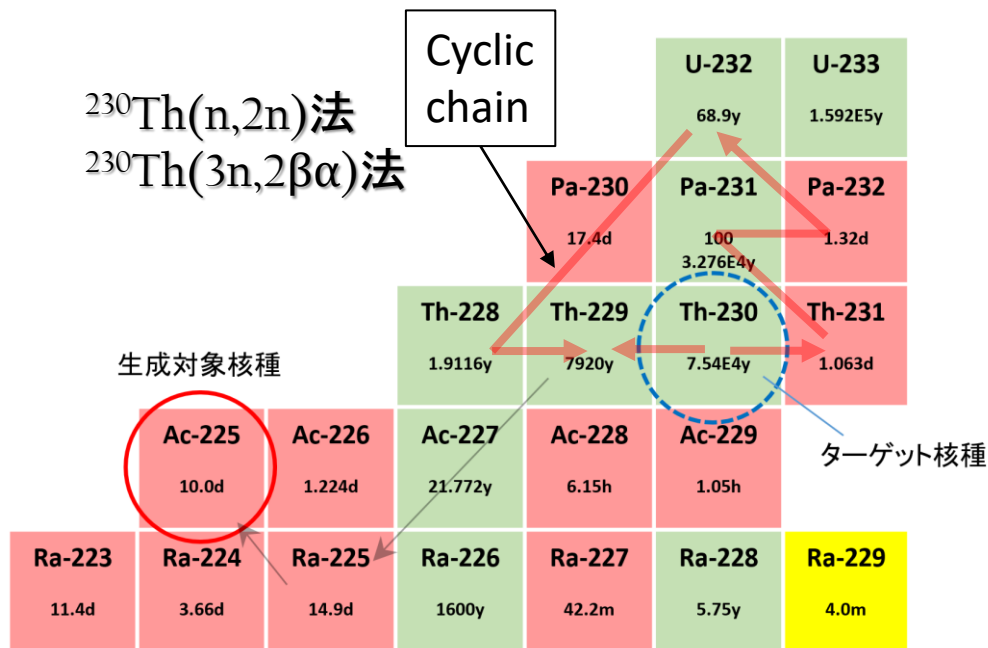
WABA Assembly

# 熱中性子炉(軽水炉)での $^{225}\text{Ac}$ 生成

$^{226}\text{Ra}(n,2n)$ 法  
 $^{226}\text{Ra}(3n,2\beta)$ 法



$^{230}\text{Th}(n,2n)$ 法  
 $^{230}\text{Th}(3n,2\beta\alpha)$ 法



- ターゲット(原料)核種は $^{226}\text{Ra}$ もしくは $^{230}\text{Th}$ (天然ウラン3ton中にそれぞれ1g, 50g)
- 高速中性子スペクトル下では、 $(n,2n)$ 法 ← 常陽炉心中心での照射
- 減速中性子スペクトル下では $(3n,2\beta)$ ,  $(3n,2\alpha\beta)$ 法 ← PWR, 常陽炉周辺での照射



# 文科省研究と 国のアクションプラン

● 別紙 令和2年度「原子力システム研究開発事業」採択課題

【課題名】

国内の原子力インフラを活用した医用 RI の自給技術確立に向けた研究開発

【ボトルネック課題解決型】

実施期間：令和2年度～令和4年度

【研究代表者・所属機関】 高木 直行・東京都市大学

【共同研究機関】 日本医用アイソトープ株式会社、金沢大学、三菱重工業株式会社、日本原子力研究開発機構

【目的】

国内の既設の原子炉を用い、診断用のRIとして最も需要の高いMo/Tcと、α内用療法向け短寿命α核種として近年その有用性が注目されているAc-225の二核種の生成と供給を行う、国内自給技術検討により既存炉・次世代高速炉の運用に係る研究開発を行う。

【課題概要】

我が国で利用されている医用RIはほぼ全量を輸入に依存している。そのため、製造所や輸送中のトラブル、自然災害、紛争、パンデミック感染症等により、RIの医学利用や関連する研究・開発に支障をきたすことがあり、医用RIセキュリティ(安定確保・供給)の強化が望まれている。また新たな悪性腫瘍の治療法として近年注目されている「α内用療法」向け短寿命α線源へのニーズも急速に高まっている。

本研究では、放射性医薬品の基礎研究や臨床応用を行う医学分野、実験用研究炉を有する原子力研究機関、PWR設計・製造を行うメーカーおよび核変換技術研究で実績のある大学の専門家が連携し、国内で既に設置されている商用炉や研究炉(具体的には商用PWRおよび高速実験炉常陽)を用いて、診断用のRIとして需要の高いMo/Tcと、α内用療法に用いられる短寿命α核種(Ac-225)の生成と供給を行う国内自給技術の確立に向けた技術開発を行うことを目的とする。

発電が主目的の軽水炉を医学分野へ活用すること、高速スペクトル炉の特徴を活かしたRI製造技術を開発することにより、診断・治療用RIの国内自給技術の社会実装を図るとともに、新型炉を含めた軽水炉・高速炉利用におけるイノベーションと原子炉に対する社会受容の改善を目指す。

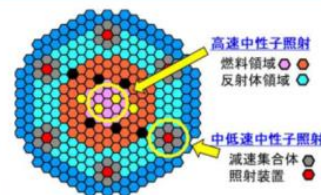
【期待される成果・発展性】

PWRでのMo(n,γ)法によるTc-99m生成技術

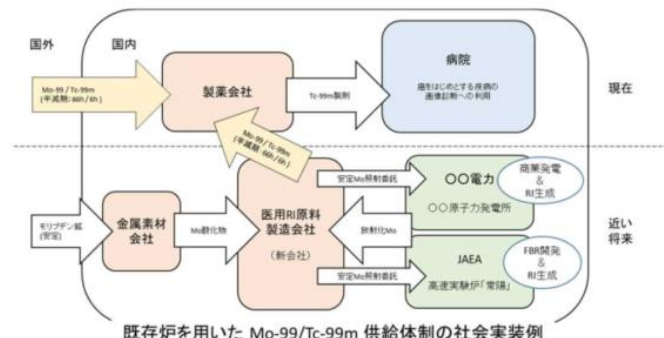
- ・ PWR 1基で国内需要量(約40TBq/週)の約半分を生成

「常陽」での Ra(n,2n)法によるAc-225生成技術

- ・ 常陽での1サイクル(60日)照射で現世界供給量(約60GBq/y)の約半分を生成



高速実験炉「常陽」でのターゲット装荷位置



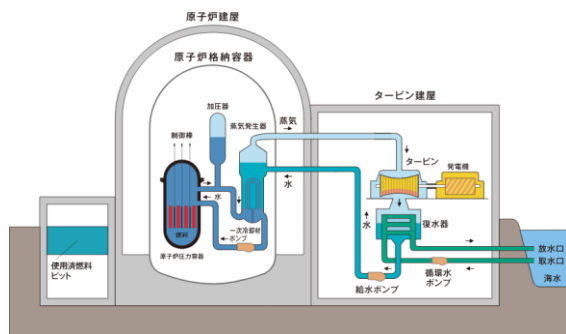
既存炉を用いた Mo-99/Tc-99m 供給体制の社会実装例

# R2年度採択課題の目標

対象 RI 炉型	診断向けMo-99/Tc-99m の生成・供給	診療向けAc-225 の生成・供給
軽水炉 (PWR)	Mo-98( $n, \gamma$ )法	Ra-226( $3n, 2\beta$ )法 Th-230( $3n, 2\beta\alpha$ )法
高速炉 (Joyo)	天然Mo ( $n, \gamma$ )法	Ra-226( $n, 2n$ )法
生成目標量	約500 Ci/week (現在の国内需要量の約半分)	約 1 Ci/year (現在の世界供給量の約半分)

# R2年度採択課題の主要成果

- 既設原子炉(PWR,常陽)での $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{225}\text{Ac}$ 生成特性を評価



PWR(加圧水型軽水炉)



高速実験炉「常陽」

## $^{99}\text{Mo}$ 生成

- 商業炉故の高稼働率により目標量を安定的に生産
- 国内需要に匹敵する供給可

## $^{225}\text{Ac}$ 生成

- 燃料集合体と一体化したRaもしくはTh-230の1回長期照射で半永久的にAc-225を生成

- 取出操作の時間が長く、不適

- 1gのRa、60日照射で現世界供給量の半分程度を生成



# 原子力委員会のRI推進アクションプラン

## 医療用等ラジオアイソトープ製造・利用推進アクションプラン

### アクションプラン策定の経緯

2022年5月31日原子力委員会決定

#### 核医学治療への期待

- ・ **「セラノスティクス」**  
(診断と治療を合わせて行う考え方やその手法) への注目の高まり

#### 国内の動き・課題

- ・ ラジオアイソトープの大量製造を可能とする**研究炉の再稼働**の動き  
一方、
- ・ 核医学治療を行う**病床数の不足**
- ・ ラジオアイソトープ製造・利用を推進する**人材不足**

#### 海外の状況

- ・ 製造・研究に**多額の投資**
- ・ 研究炉・加速器の**ネットワーク形成**を推進
- ・ ラジオアイソトープ及びその原料について**獲得競争**の様相

最先端の原子力科学技術により医療体制を充実し、国民の福祉向上に貢献するとともに、  
医療サービスの観点から経済安全保障の確保に寄与すべく、  
国産ラジオアイソトープを患者のもとへ届けるためのアクションプランを策定

### 10年の間に実現すべき目標

- ① **モリブデン-99/テクネチウム-99mの一部国産化**による安定的な核医学診断体制の構築
- ② **国産ラジオアイソトープによる核医学治療**の患者への提供
- ③ 核医学治療の**医療現場での普及**
- ④ 核医学分野を中心としたラジオアイソトープ関連分野を**我が国の「強み」**へ

### アクションプラン

#### (1) 重要ラジオアイソトープの国内製造・安定供給のための取組推進

- ・ JRR-3・加速器を用いたモリブデン-99/テクネチウム-99mの安定供給 (可能な限り2027年度末に国内需要の約3割を製造し、国内へ供給)
- ・ 「常陽」・加速器を用いたアクチニウム-225大量製造のための研究開発強化 (「常陽」において2026年度までに製造実証)
- ・ アスタチン-211実用化に向けた取組強化 (2028年度を目途に医薬品としての有用性を示す) 等

#### (2) 医療現場でのアイソトープ利用促進に向けた制度・体制の整備

- ・ 核医学治療を行える病室の整備 (特別措置病室等) (核医学治療実施までの平均待機月数について、3.8か月 (2018年) →平均2か月 (2030年))
- ・ トリウム-227・ガリウム-68等、新たな放射性医薬品への対応 等

#### (3) ラジオアイソトープの国内製造に資する研究開発の推進

- ・ 研究炉・加速器による製造のための技術開発支援 ・ 福島国際研究教育機構による取組推進
- ・ 新たな核医学治療薬の活用促進に向けた制度・体制の整備 等

#### (4) ラジオアイソトープ製造・利用のための研究基盤や人材、ネットワークの強化

- ・ 人材育成の強化 (研究人材、医療現場における人材等) ・ 国産化を踏まえたサプライチェーン強化 ・ 廃棄物の処理・処分に係る仕組みの検討 等
- 科学技術・イノベーション政策、健康・医療政策、がん対策の観点からも重要であるため、関係する政府戦略の方向性とも軌を一にして取り組む

# RI製造の国産化に向けた動き

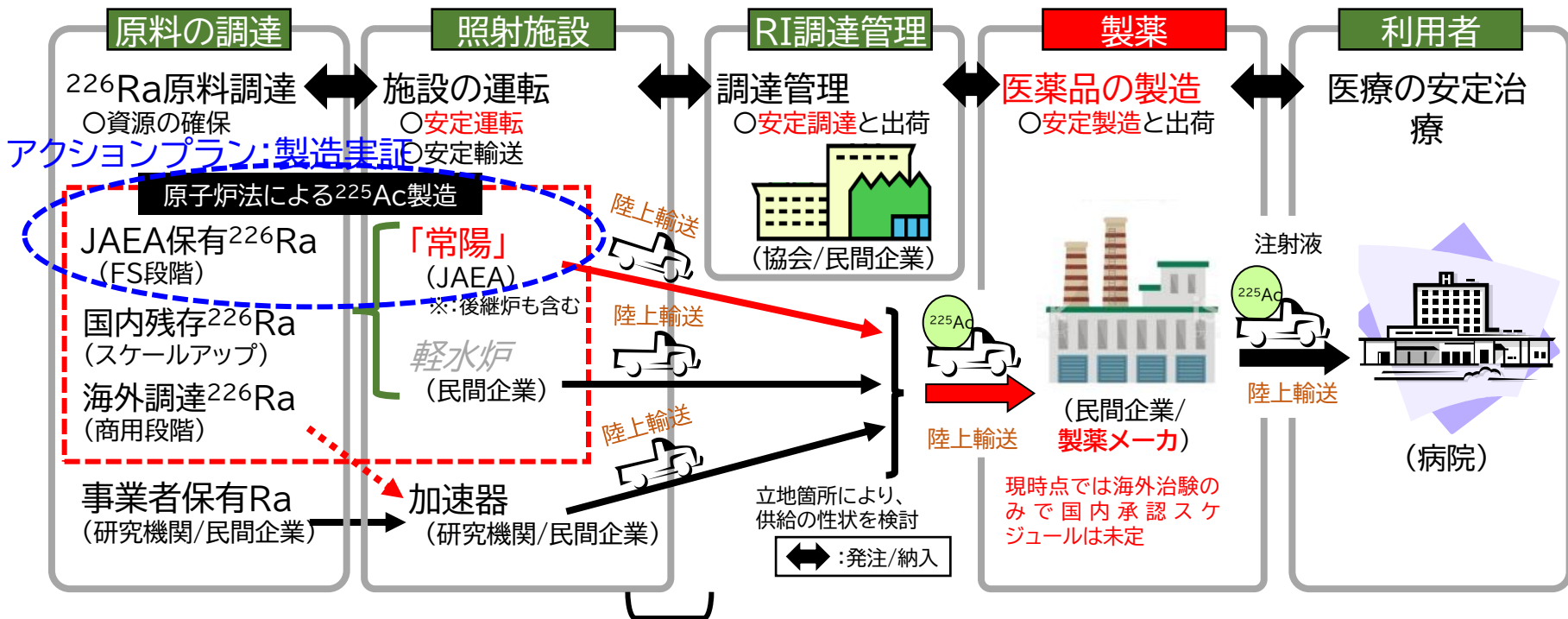
エネルギー資源や食品と同様に、医療分野でも国内自給率を高めRIの安定供給を図り医療体制を充実させることは国民の福祉向上に重要であり、これについては、東日本大震災以前から日本学術会議や内閣府官民検討会等が繰り返し指摘し、国産体制の強化に向けた提言がなされてきた。

特に政府が2021年6月18日に閣議決定した「**成長戦略フォローアップ**」において、内閣総理大臣(内閣府特命担当大臣[科学技術政策]と文部科学大臣)を担当として「試験研究炉等を使用したRIの製造に取り組む」旨が記載されたことから、経済安全保障の観点からもRIの製造・利用の方向性を確立する必要があるとの認識の下、同年末に**原子力委員会「医療用等RI製造・利用研究専門委員会**」が設置され、8回にわたる審議を経て「**推進アクションプラン**」(2022年5月31日原子力委員会決定)が公表された。

このアクションプランでは、重要RIの国内製造・安定供給のための取組推進として、「JRR-3・加速器を用いたMo-99/Tc-99mの安定供給(可能な限り2027年度末に国内需要の約3割を製造し、国内へ供給)」や「Ac-225大量製造のための研究開発強化(常陽において2026年度までに製造実証)」を行うプランが示された。加えて昨年には**参議院決算委員会(第204回国会)**や**参院内閣委員会**において、医療用RIの国内製造について戦略的に取り組む必要性や、そのための予算確保について議論が行われ、国産RIを安定供給し国民の福祉向上に向けた動きに前進が見られた。

これらを受け、JRR-3においては、2025年度までに $^{98}\text{Mo}(n,\gamma)$ 法(中性子放射化法)による $^{99}\text{Mo}$ の照射製造技術の確立を目指す取り組みが、また常陽では、新規制基準に対応するための工事とともに、2026年までのAc-225製造実証を目指して10mgオーダーのRa-226ターゲットやAc-225を回収する化学処理の準備が開始されている。

# $^{225}\text{Ac}$ 国産化全体像とアクションプランへの対応 ー分担と検討概要ー



## 現場レベルで対応すべき技術的課題

- ①  $^{226}\text{Ra}$ 取扱技術の確立(分離抽出・精製・再利用)
- ② 原子炉施設からの迅速払出し
- ③ 原子炉の安定運転
- ④ 創薬研究
- ⑤ 安定な輸送体制の確立

## 政策レベルで対応すべき課題

### $^{226}\text{Ra}$ の安定調達

工業規模での $^{226}\text{Ra}$ 精製、 $^{225}\text{Ac}$ 供給施設の建設  
内閣府、文科省、厚労省にインセンティブを要求？

JAEA、RI協会、中間事業者等で方針を決定し、責任分担を明確に対応する。



# 拡大が予想されるAc-225市場

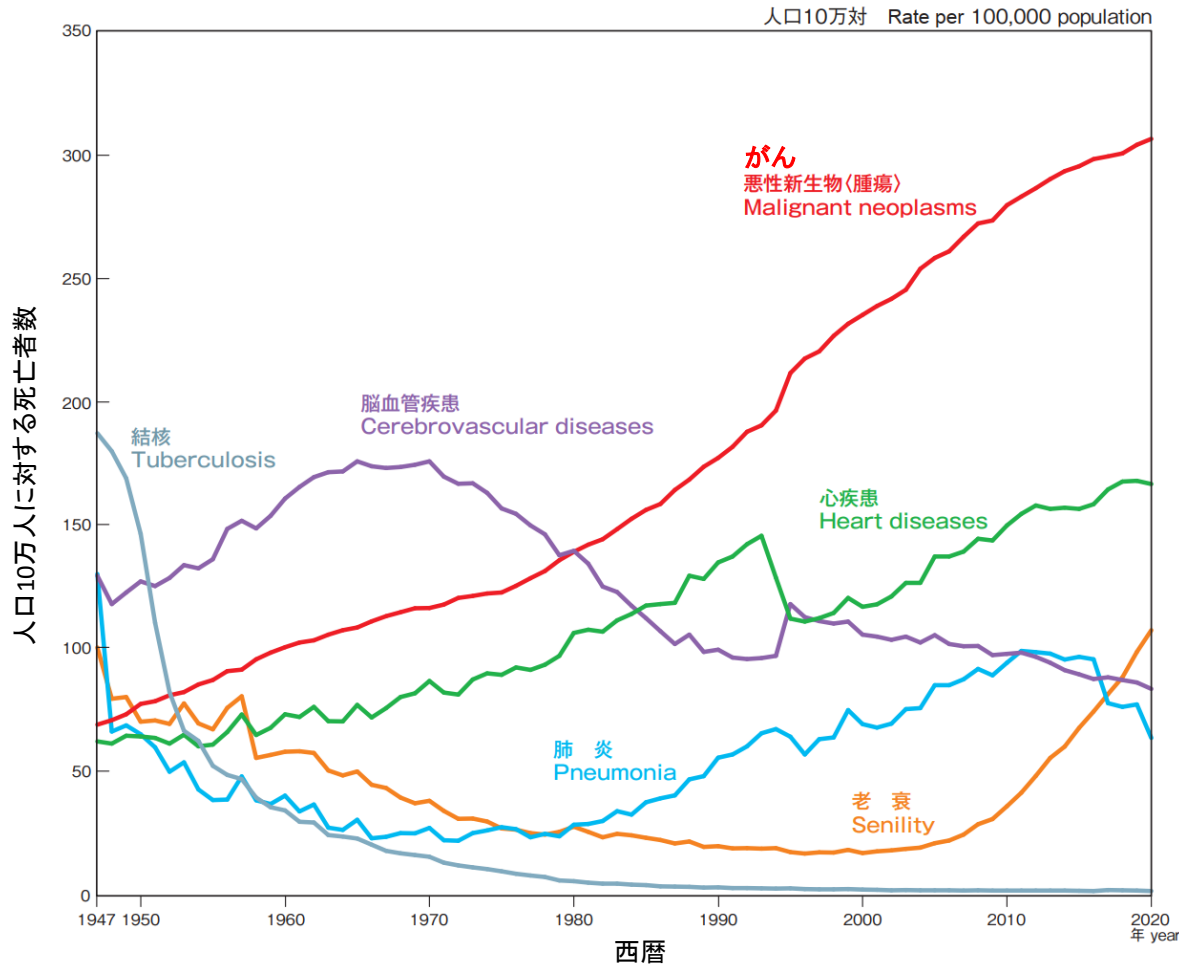


図1 主要死因の年次推移(西暦1947~2020年)

- 日本において、癌は死亡原因の第一位であり、2020年の死亡者数は約38万人に
- 心疾患や脳血管疾患に比べ2倍以上多く、国民の3人に1人は癌により亡くなる状況
- 最近では、Ac-225を標識する種々リガンド(特定の臓器や生体内組織に集積する性質のある何らかの化合物)が開発
- Ac-225医薬品の使用は膠芽腫(脳腫瘍)、ブドウ膜黒色腫(眼球の悪性腫瘍)、大腸がん、神経内分泌腫瘍、その他固形癌へも
- Ac-225治療対象患者数は今後増大する可能性



# Ac-225市場規模の予測

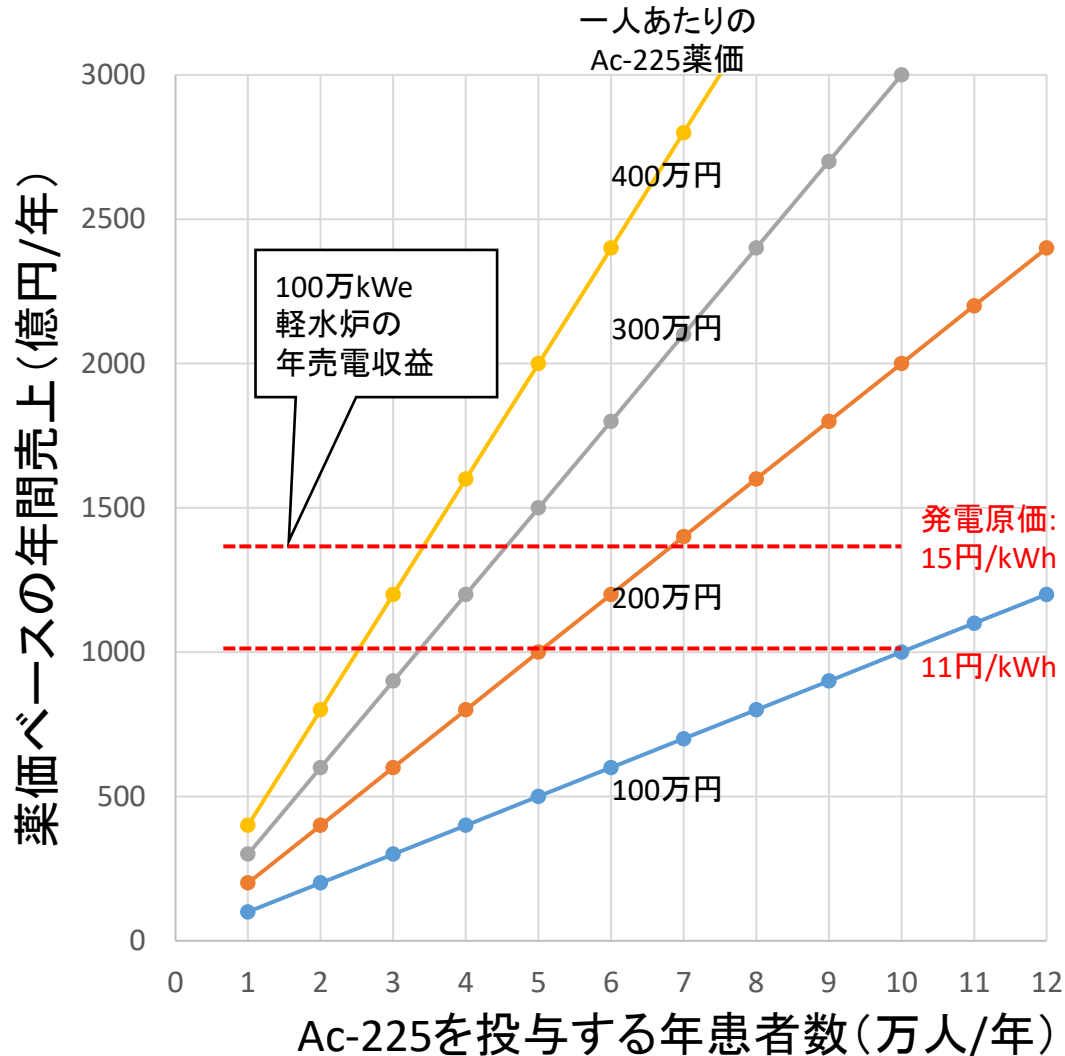
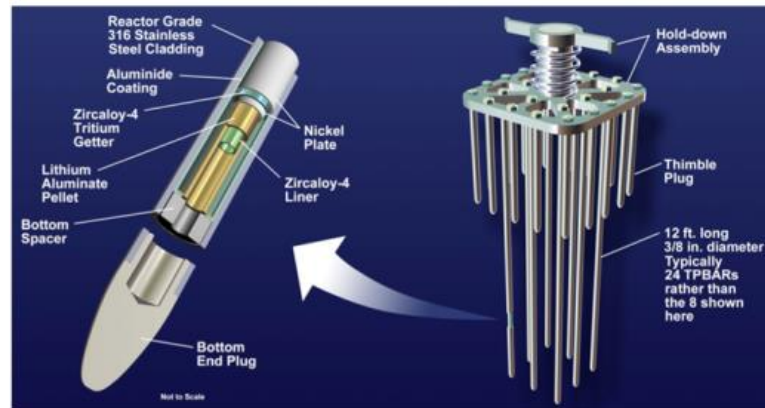


図3 予測されるAc-225の市場規模

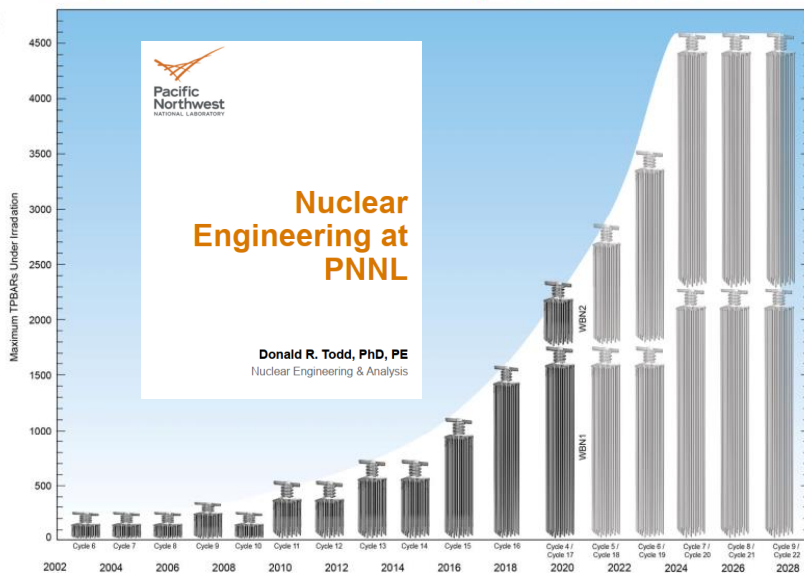
# 米は発電用PWRでTritiumを生産中

- 核弾頭を設計通りに機能させるにはトリチウムの定期的補充が必要
- 米国では、サバンナリバーサイト(SRS)等の専用生産炉で製造していたがDOEは1998年に原子炉閉鎖
- トリチウムは半減期12.3年で、年当たり5.5%減少→SRSに代わる生産法が必要
- 1988-1992年: 重水炉(HWR)、高温ガス炉(HTGR)、軽水炉(LWR)での生産を検討
- 1995-1998年: DOEは加速器または商用軽水炉の兼用利用(dual use)を検討
- DOEが選定したPNNLにて、TPBARを設計、試作、照射、照射後試験(PIE)を実施
- 2000年: その結果を受け、DOEは加速器法でなく軽水炉でのTPBARを選定
- 2002年: DOEはWatts Bar原子力発電所の運転認可を変更。NNSA(National Nuclear Security Administration=国家核安全保障局)のためのトリチウム生産を可能に
- このTPBARは単にトリチウムを生産する目的だけでなく、燃焼初期の過剰反応度を抑制する可燃性毒物(WABA, IFBA)の働きも持つ。(反応度価値はWABAよりやや大きい)

TPBAR(Tritium Producing Burnable Absorber Rod)



TPBAR Irradiation History and Plans at TVA



# カナダは発電炉でLu-177生産開始

- カナダ・ブルース原子力発電所の7号機で、Lu-177の商業生産が開始(フラマトムが昨年10/24にプレスリリース)
- ブルース原発の7号機(825MWe出力CANDU炉)に同位体製造装置を設置、Lu-177の商業的供給開始
- ターゲットは同位体濃縮したYb-176
- 生成されたLu-177は独ITMにて製薬し世界へ配布



**framatome**  
Healthcare

Owner(s)	Ontario Power Generation (OPG)
Operator(s)	Bruce Power
<b>Nuclear power station</b>	
Reactors	8
Reactor type	CANDU PHWR
Reactor supplier	AECL
Cooling source	Lake Huron
Thermal capacity	4 × 2832 MW <sub>th</sub> <sup>[1]</sup> (A 1-4) 4 × 2832 MW <sub>th</sub> <sup>[1]</sup> (B 5-8)
<b>Power generation</b>	
Units operational	1 × 823 MWe (NET A1) 1 × 823 MWe (NET A2) 1 × 816 MWe (NET A3) 1 × 806 MWe (NET A4) 1 × 822 MWe (NET B5) 1 × 817 MWe (NET B6) 1 × 825 MWe (NET B7) 1 × 817 MWe (NET B8)
Make and model	CANDU 791 (A 1-2) CANDU 750A (A 3-4) CANDU 750B (B 5-8)

# IAEAの “Rays of Hope” Initiative

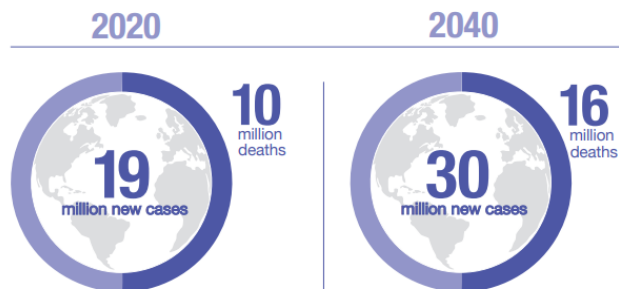


グロッシー事務局長（左）が岸田首相を表敬  
©Cabinet Public Affairs Office, Cabinet Secretariat



「Rays of Hope」を訴えかけるグロッシー事務局長（帝国ホテルにて） May 18<sup>th</sup> 2022

## The Global Cancer Burden



“  
Half of cancer patients who need radiotherapy in low- and middle-income countries do not have access to it. This is a sobering statistic. And it is unacceptable.  
— Rafael Mariano Grossi, IAEA Director General  
”

Over 70% of cancer deaths occur in LMICs.



Only 5% of global spending on cancer goes to LMICs.



About half of cancer patients require radiotherapy.

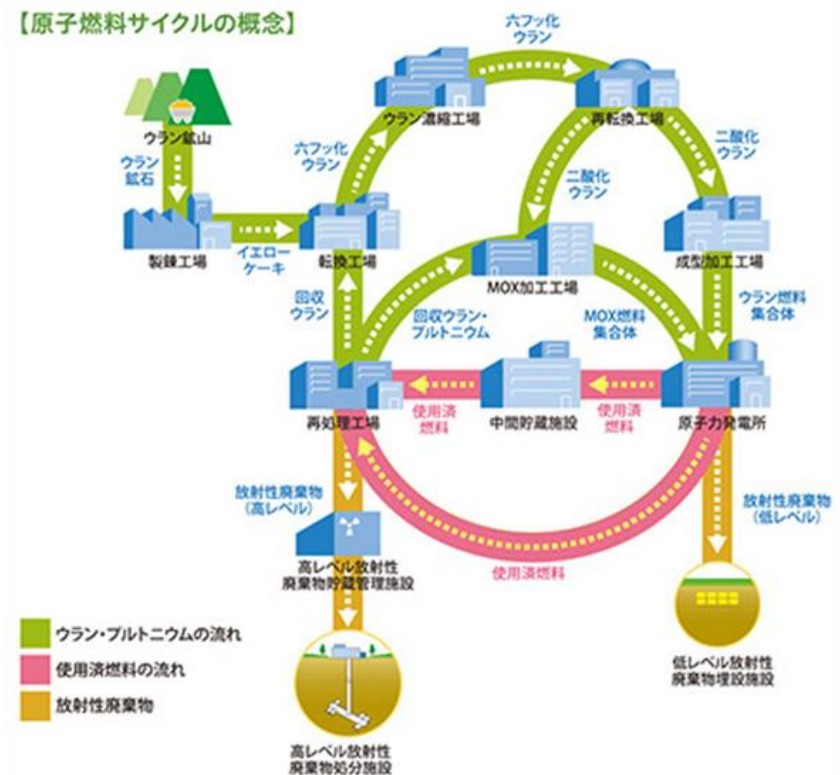
- IAEAは2022年2月にこの「Rays of Hope」イニシアティブを立ち上げ
- 特に放射線治療施設のない20の加盟国を中心にがんの放射線医療を支援していく方針



# 日本が本気になれば！

- 日本の原子力産業は半世紀以上前に始動
- これまでに、採掘、精錬、同位体濃縮、燃料加工、原子炉、再処理、廃棄物処分等、多様な技術が培われてきた
- 我が国で蓄積されてきた原子力技術を（失われる前に）応用し、 $\alpha$  内用療法に用いる $\alpha$ 線源をはじめとする医用RI製造に活用

【原子燃料サイクルの概念】



次世代革新炉の開発

高い安全性、課題克服を

エネルギーの安定供給、経済成長、脱炭素を目指す政府の政策実現に向け、本方は、原子力の推進を明確に示すこと。そのほか、政策の1つとして次世代革新炉の開発も推進する。東京大学工学部教授、高木直行氏は、安全性を確保しつつ革新炉のメリットを最大限に活かすには、また、原子力の推進が、原子力について、医学・宇宙開発への応用も幅広い研究取組も高木教授に求めたい。

政府のGX策方針原子力推進の推進を明確に示すこと。そのほか、政策の1つとして次世代革新炉の開発も推進する。東京大学工学部教授、高木直行氏は、安全性を確保しつつ革新炉のメリットを最大限に活かすには、また、原子力の推進が、原子力について、医学・宇宙開発への応用も幅広い研究取組も高木教授に求めたい。



東京都市大学教授 (工学博士)

高木 直行氏

メモ たかき・なおゆき=1963年生まれ。東京工業大学大学院原子核工学博士課程修了後、東京電力に入社。東電時代は主に高速増殖炉や核変換の研究開発に取り組んだ。2008年に東海大に移り、12年に東京都市大へ。研究領域は革新的原子炉から原子力の医学・宇宙への応用、放射性廃棄物の短寿命化まで幅広い。経済産業省革新炉ワーキンググループ委員。歌謡に「裏返するアメリカ」原子力のジレンマに直面して(日刊工業新聞社)など。

時流を問う

「かつての次世代炉開発は、安全性や効率に重きを置いたが、福島第一原子力発電所の事故を教訓として、次世代炉には、安全性を確保しつつ、原子力の推進が、原子力について、医学・宇宙開発への応用も幅広い研究取組も高木教授に求めたい。」

「CO<sub>2</sub>を出さない電源は原子力のほかに太陽光も風力もある。ただ、原子力にしかできないことがある。自然界にないものを生成し、それを人類に役立てる『核変換』という価値だ。原子力による医学への貢献が進み、社会でその有用性が実感されれば、人々の見方も変わってくるのではないか」

「核変換」で放射線医療にも

「CO<sub>2</sub>を出さない電源は原子力のほかに太陽光も風力もある。ただ、原子力にしかできないことがある。自然界にないものを生成し、それを人類に役立てる『核変換』という価値だ。原子力による医学への貢献が進み、社会でその有用性が実感されれば、人々の見方も変わってくるのではないか」

# まとめ

- a. エネルギー資源や食品と同様に、核医学診断/治療向け放射性同位元素(RI)の国内自給率を高め、安定供給、医療体制充実を図ることは国民の福祉向上に重要
- b. 日本は医用RIのほぼ全量を海外に依存しており、これを改める動きが昨年からあるものの、加速器や研究炉の利用に限定
- c. 稼働率が高く炉心体積の大きな発電用原子炉は、医用RIの安定供給に適したインフラ。大きな投資無しにRIを大量生産でき国内自給、さらには輸出の可能性も
- d. 特に、近年注目される標的 $\alpha$ 治療用Ac-225生成も可能で大きな市場規模も期待される
- e. 発電用原子炉を発電だけでなく、医用RI等、有用な物質生成を行うRI製造所として活用することを日本の新たな原子力戦略として推進  
⇒ 原子力産業の理解と発展を促す推進力にも



■ 特集

## 医療用放射性物質の国産化 供給途絶リスクの回避を目指 して全量輸入依存からの脱却 を図る

■ 99mTc及び225Acの臨床的展望、需給の現状及び市場

金沢大学附属病院 核医学診療科 稲木 杏吏

日本医用アイソトープ株式会社 代表取締役社長 諸岡 健雄

■ JRR-3を用いた診断用99Mo/99mTcの生成

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所

研究炉加速器技術部 研究炉技術課 課長 新居 昌至

■ PWRを用いた診断用99Mo/99mTcの生成

三菱重工業株式会社 原子力セグメント 原子力技術

部 新機軸推進グループ 主任 那須 拓哉

日本原子力研究開発機構 大洗研究所 環境技術開発

センター 材料試験炉部 廃止措置推進課 藤田 善貴

■ 「常陽」を用いた内用療法向け225Acの生成

日本原子力研究開発機構 大洗研究所 高速炉サイク

ル研究開発センター 高速実験炉部 高速炉照射課 課

長 前田 茂貴

日本原子力研究開発機構 原子力化学研究所 原子力

基礎工学研究センター 原子力化学研究グループ グル

ープリーダー 北辻 章浩

■ PWRを用いた内用療法向け225Acの生成

東京都市大学 理工学部 原子力安全工学科 教授 高木 直行



核医学・核工学シンポジウム

# がんを制する人工核種をつくる

～内用療法向け $\alpha$ 放出核生成技術の最前線～

開催日時： 2021/5/26(水) 13:00-17:00

開会の挨拶 (13:00-13:05)

(金沢大学 医薬保健研究域 教授 絹谷清剛氏)

第一部  $\alpha$ 内用療法の現状と期待 (13:05-14:00)

・核医学におけるRI内用療法の現状と展望

(金沢大学 医薬保健研究域 講師 稲木杏吏氏)

・ $\alpha$ 内用療法への期待

(日本医用アイソトープ株式会社 業務執行理事 諸岡健雄氏)

第二部 加速器による $\alpha$ 核生成技術 (14:05-15:35)

・加速器法1 各国の状況と陽子加速器によるAc-225生成

(量子科学技術研究開発機構 量子医科学研究所 部長 東達也氏)

・加速器法2 電子線形加速器を利用したAc-225の製造

(日立製作所エネルギーイノベーションセンター 田所孝広氏)

・加速器法3 サイクロトロンによるAt-211生成とAc-225輸入計画

(大阪大学 核物理研究センター 教授 福田光宏氏)

第三部 原子炉による $\alpha$ 核生成技術と総合討論 (15:45-16:55)

・原子炉法1 高速実験炉「常陽」によるAc-225生成

(日本原子力研究開発機構 高速炉照射課 課長 前田茂貴氏)

・原子炉法2 発電用軽水炉によるAc-225生成

(東京都市大学 原子力安全工学科 教授 高木直行氏)

・総合討論 (発表者、聴講者)

テレビ東京・BSテレ東 7ch

石川和男の危機のカナリア(2023/6/3) がん治療「原子炉由来」の時代？

