

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 α 放出核生成技術の最前線～
(2021/5/26)

発電用軽水炉によるAc-225生成

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



Ac-225生成法の例

- 直接法

Th-232(p, spallation)

Ra-226(p, 2n)

Ra-226(d, 3n)

- 間接法(親核U-233/Th-229生成)

Th-232(n, γ 2 β)



1.7MVペレトロン・タンデム加速器

- 間接法(親核Ra-225生成)

Th-232(p, spallation)

Ra-226(γ , n)

Ra-226(p, pn)

Ra-226(n, 2n)

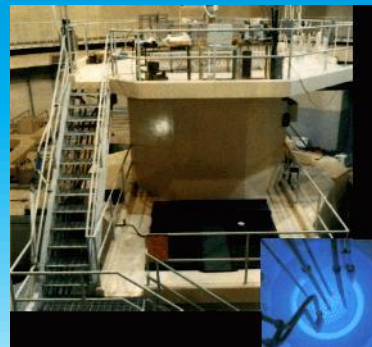
- 間接法(親核Th-229 生成)

Th-230(γ , n)

Ra-228(n, γ 2 β)

Ra-226(3n, 2 β)

Th-230(3n, 2 β α)



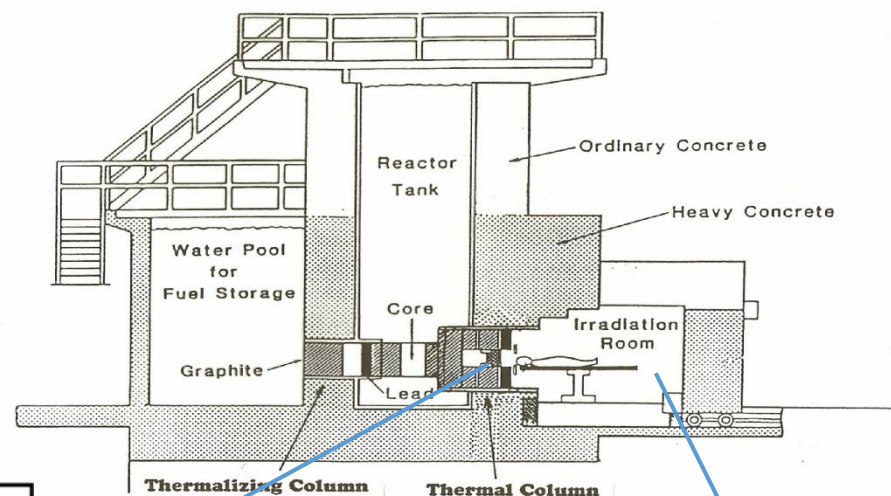
100kW出力TRIGA-II型原子炉

(東京都市大学 王禅寺キャンパス)

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



年度	照射件数	
	脳腫瘍	悪性黒色腫
昭和 51	2	
52	12	
53	12	
54	7	
55	5	
56	5	
57	7	
58	13	
59	9	
60	1	
61	5	
62	9	2
63	7	2
平成 1	5	5
計	99	9

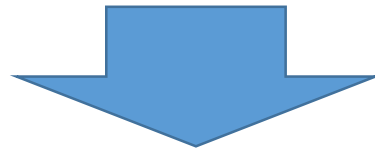


100kW出力TRIGA炉(TRIGA-II)



α 内用療法の特徴

- 体外から中性子や重イオンを照射する方式と異なり体内からの照射
- β 内用療法の β 線に比べて飛程が短く線エネルギー付与が大きい
- 多くの α 線源は複数回 α 線を放出するため1核種あたりのエネルギー付与が大



- 正常細胞の損傷を最小限に抑えつつ、近傍の腫瘍細胞への効率的照射が可能

JHR Seminar

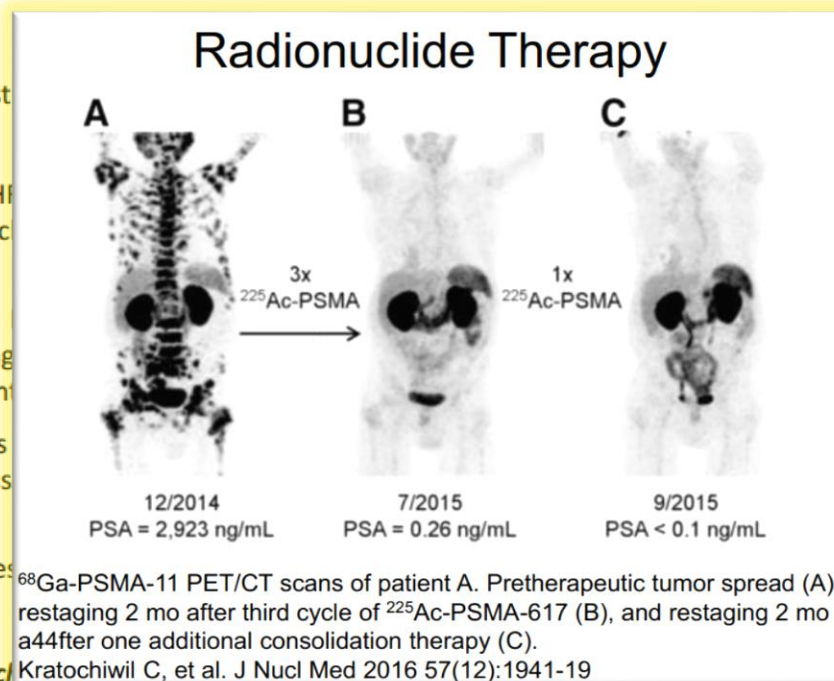
The Jules Horowitz Reactor: A new high performance MTR (Material Testing Reactor) working as an International User Facility in support to Nuclear Industry, Public Bodies and Research Institutes.

Seminar at French Embassy in Japan (April 2019)

- 10h00-10h10: Welcome
- 10h10-10h15: Information on the Participants List (French Embassy in Japan)
- 10h15-10h30: CEA presentation (Gilles Bignan, JHR interface, CEA / Patrick Blanc-Trancart, Nuclear Energy Division, CEA)
- 10h30-10h45: CEA experience in Radio-isotopes (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)



academist



水銀から金をつくる「原子炉錬金術」を実証する！

埋め込み

シェア

ツイート



水銀から金をつくる「原子炉錬金術」を実証する！



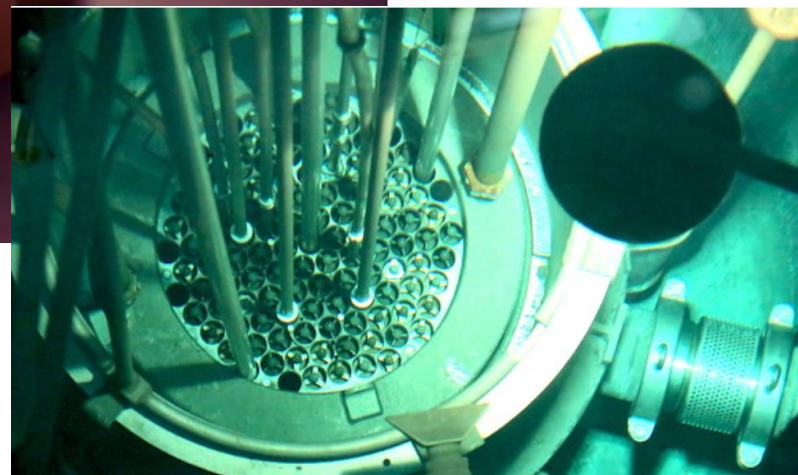
後で見る



共有



見る YouTube



● 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。

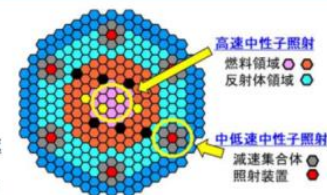
【期待される成果・発展性】

PWRでのMo(n,γ)法によるTc-99m生成技術

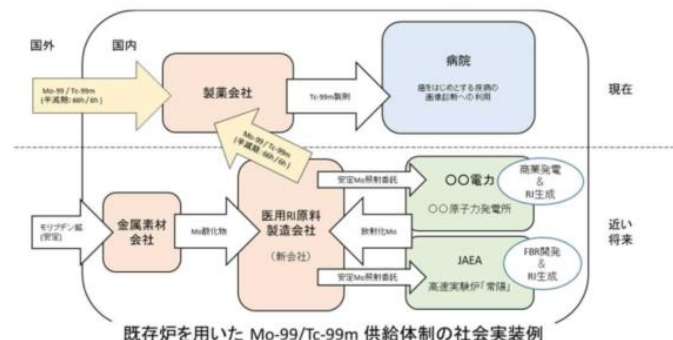
- ・ PWR 1基で国内需要量(約40TBq/週)の約半分を生成

「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

RI製造における発電用軽水炉の特徴

- 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)

1) Np-237崩壊法

- Ac-225はNp系列に属する核種
- Np-237の半減期は214万年であり太古に消滅 → 自然界からのAc-225取得は不可能
- しかし原発の普及により現在は人工Np系列が復活。使用済燃料中にNp-237が存在



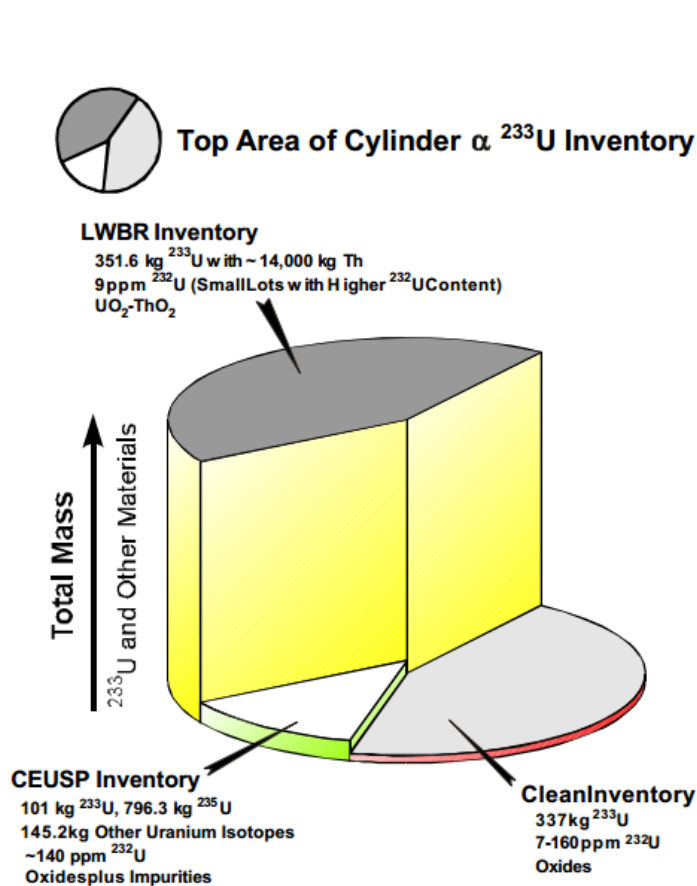
2) Th232(n,γ2β)/U-233崩壊法

- Uよりも豊富に存在するTh-232への中性子照射でU-233を生成
- U-233の崩壊からTh-229→Ac-225を得る方法

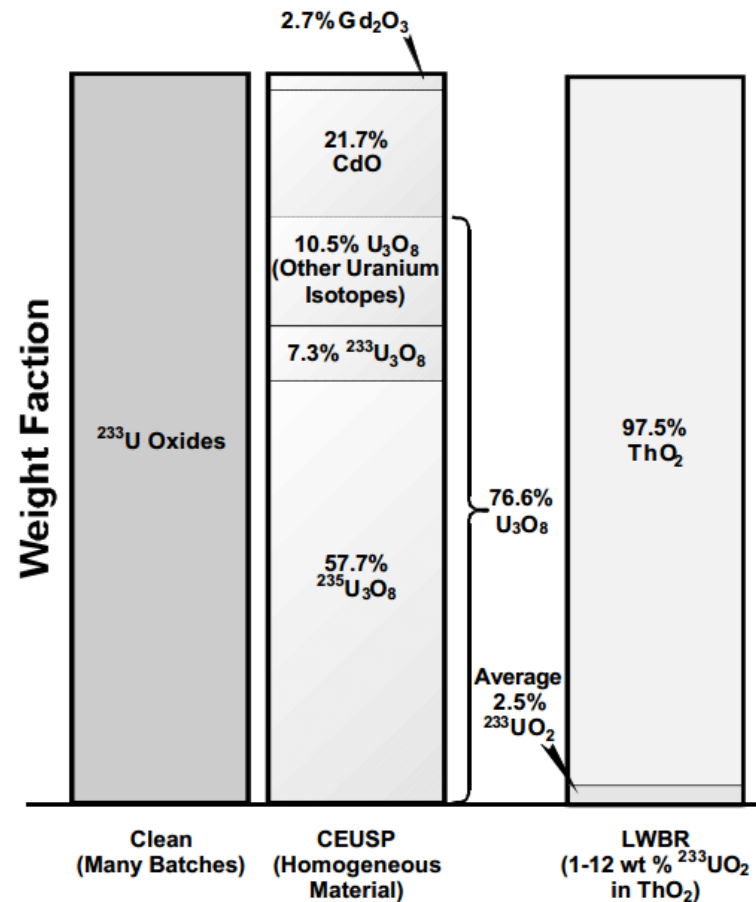
227 U 1.1 m	228 U 9.1 m	229 U 58 m	230 U 20.8 d	231 U 4.2 d	232 U 68.9 y	233 U $1.59 \cdot 10^5$ y	234 U 0.0055 $4.45 \cdot 10^5$ y	235 U 0.720 $7.038 \cdot 10^8$ y ★ 25 m	236 U $2.34 \cdot 10^7$ y	237 U 6.75 d	238 U 99.2745 $4.468 \cdot 10^9$ y
226 Pa 1.8 m	227 Pa 38.3 m	228 Pa 22 h	229 Pa 1.50 d	230 Pa 17.4 d	231 Pa $3.8 \cdot 10^4$ y	232 Pa 1.31 d	233 Pa 26.967 d	234 Pa 6.70 h 1.17 m	235 Pa 24.5 m	236 Pa 9.1 m	237 Pa 8.7 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 $7.54 \cdot 10^4$ y	231 Th 1.063 d	232 Th 100 $1.405 \cdot 10^{10}$ y	233 Th 2.83 m	234 Th 24.10 d	235 Th 7.1 m	236 Th 37.5 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	232 Ac 1.98 m	233 Ac 2.42 m	234 Ac 44 s	235 Ac 18.1 s
223 Ra 11.435 d	224 Ra 3.66 d	225 Ra 14.9 d	226 Ra 1600 y	227 Ra 42.8 a	228 Ra 5.75 a	229 Ra 1500 y	230 Ra 138.6 d	231 Ra 32.9 a	232 Ra 139.7 d	233 Ra 114.3 d	234 Ra 3.885 a

- 1tonのU-233崩壊から生成されるTh-229は約30GBq/y
- 膨大な量の核分裂性核種U-233が必要→日本では困難
 - U-233の有意量（1個の核爆発装置の製造の可能性を排除し得ない核物質のおおよその量）はPuと同じ8kg

Uranium-233 Inventories in DOE



US inventory of separated ^{233}U .



Chemical composition of the ^{233}U inventory.

3) Ra-228($n, \gamma 2\beta$)法

• 天然Thに付随するRa-228を原子炉で照射 → (n, γ)によりTh-229 → Ac-225を生成

• 1tonのTh-232にRa-228は0.4mgと僅少

227 U 1.1 m	228 U 9.1 m	229 U 58 m	230 U 1.50 d	231 U 17.4 d	232 U 3.28 $\cdot 10^4$ y	233 U 1.31 d	234 U 26.967 d	235 U 7.04 $\cdot 10^8$ y	238 U 4.468 $\cdot 10^9$ y
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 $\cdot 10^4$ y	232 Pa 1.31 d	233 Pa 26.967 d	234 Pa 8.72 m	235 Pa 1.773 y
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 $\cdot 10^4$ y	231 Th 1.063 d	232 Th 100 1.405 $\cdot 10^{10}$ y	233 Th 8.72 m	234 Th 1.773 y
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	233 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	232 Ra 1.72 m

4) Ra-226(n,2n)法

- Raを高速中性子で照射
- 不純物のAc-227も同時に生成されるが、照射後Ac/Raを分離
→Ra-225崩壊で純粋なAc-225生成
- スペクトルが硬く中性子束の高い高速炉利用が有利

224 Th 812ms	225 Th 8.72 y	226 Th 1.405 × 10 ⁵ y	227 Th 18.68 d	228 Th 2.916 y	229 Th 7.932 y	230 Th 7.538 × 10 ⁴ y	231 Th 25.52 h	
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

→ Ra-225崩壊で純粋なAc-225生成

• スペクトルが硬く中性子束の高い高速炉利用が有利

(n,2n)

5) Ra-226(3n,2 β)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 ⁵ y	234 U 0.0055 2.455•10 ⁵ y	235 U 0.720 7.038•10 ⁸ 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 ⁴ 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 ⁴ y	231 Th 1.063 d	232 Th 100 1.405•10 ¹⁰ y	233 Th 21.83m
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	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

Diagram illustrating the (n, γ) reaction path for Ra-226:

- Yellow arrows indicate (n, γ) reactions from 225Ac to 226Ac, 226Ac to 227Ac, and 227Ac to 228Ac.
- A blue arrow indicates a (n, γ) reaction from 228Ac to 229Ac.
- A dashed blue box highlights the Ra-226 isotope.



Contents lists available at ScienceDirect

Applied Radiation and Isotopes

journal homepage: www.elsevier.com/locate/apradiso



Reactor production of Thorium-229[☆]



Susan Hogle^{a,*}, Rose Ann Boll^a, Karen Murphy^a, David Denton^a, Allison Owens^a,
Tamara J. Haverlock^b, Marc Garland^{a,1}, Saed Mirzadeh^a

^a Divisions of Nuclear Security and Isotopes Technology, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831, United States

^b Chemical Sciences, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831, United States

H I G H L I G H T S

- Production of ²²⁹Th from irradiation of ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, and ²²⁷Ac is studied.
- Microgram quantities irradiated under high neutron flux for varying durations.
- Measured radionuclide yields lower than predicted but generally in uncertainty range.
- ORNL ²²⁹Th reserve can be increased by 450 MBq per gram of irradiated ²²⁶Ra.
- Large ²²⁷Ra cross section further results in production of ²²⁸Ra.

6) Th-230(3n,2βa)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 $1.59 \cdot 10^5$ y	234 U 0.0055 $2.455 \cdot 10^5$ y	235 U 0.720 $7.038 \cdot 10^8$ y ★ 25 m
226 Pa 1.8 m	227 Pa 38.3 m	228 Pa 22 h	229 Pa 1.50 d	230 Pa 7.4 d	231 Pa $3.28 \cdot 10^4$ 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 $7.54 \cdot 10^4$ y	231 Th 1.063 d	232 Th 100 $1.405 \cdot 10^{10}$ 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

Diagram illustrating the Th-230(3n,2βa) method. The table shows isotopes of Uranium (U), Protactinium (Pa), Thorium (Th), Actinium (Ac), and Radium (Ra) with their respective half-lives. A red box highlights 225 Ac (10.0 d). Arrows indicate decay paths: (n,γ) from 232 U to 232 Pa, (n,γ) from 232 Pa to 232 Th, (n,2n) from 232 Th to 231 Th, (n,γ) from 231 Th to 230 Th, and (n,γ) from 230 Th to 229 Th. A blue dashed box encloses 230 Th and 231 Th.

Ra-226($3n,2\beta$)法 Th-230($3n,2\beta\alpha$)法 の比較解析

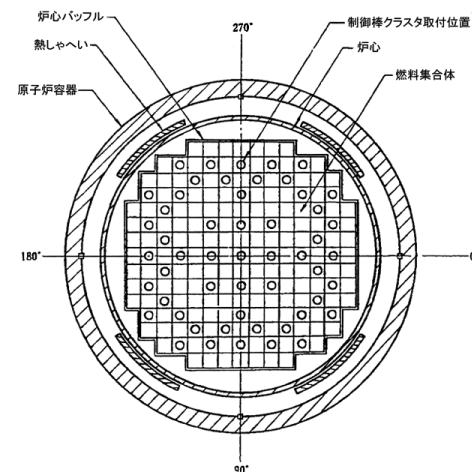
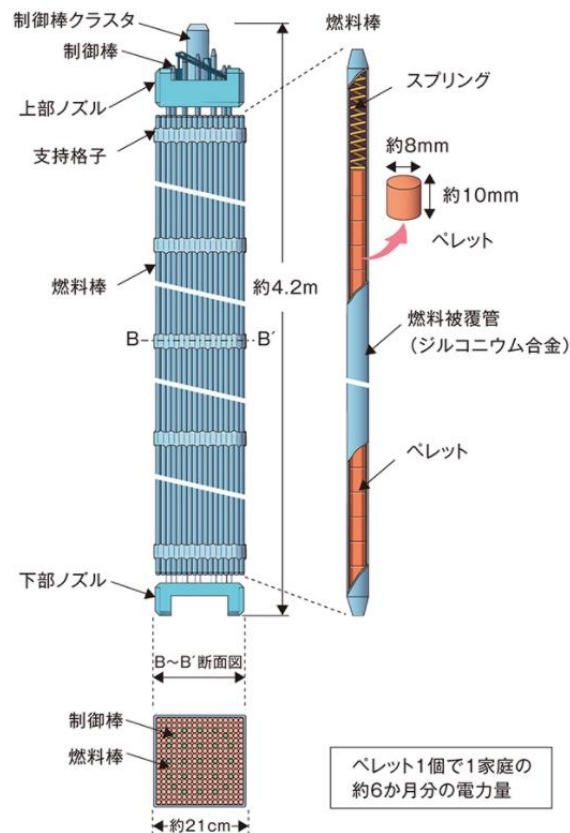
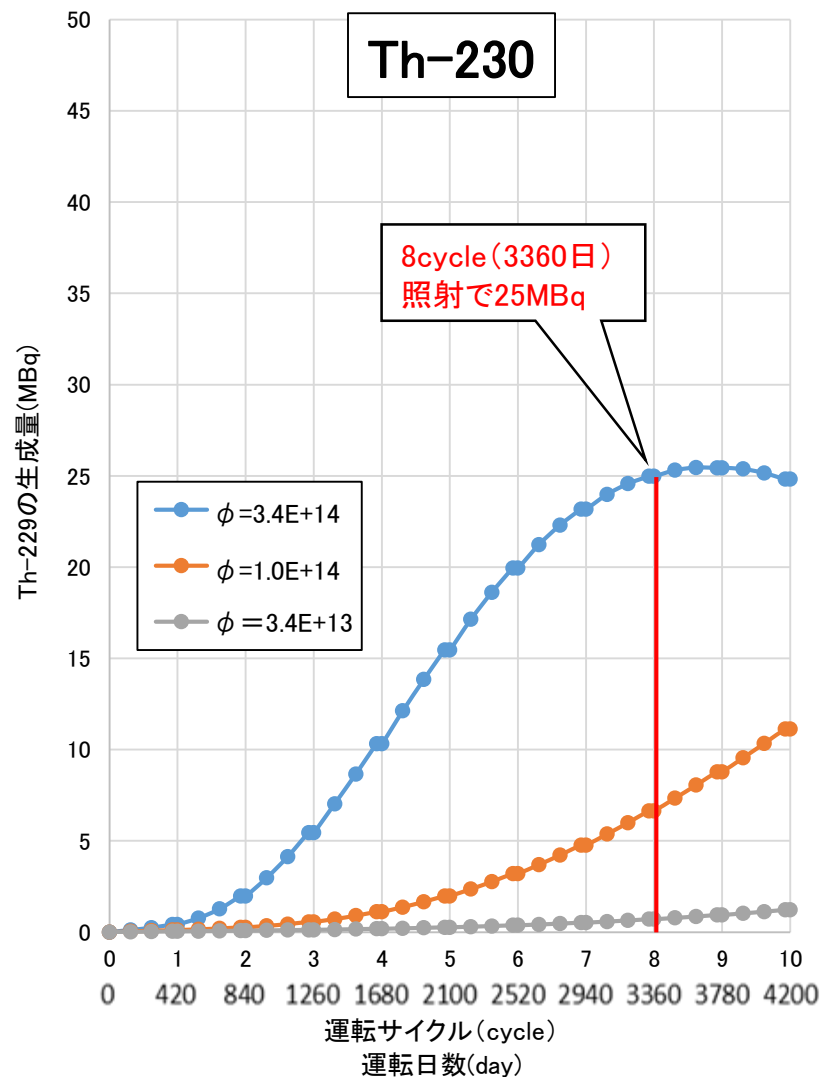
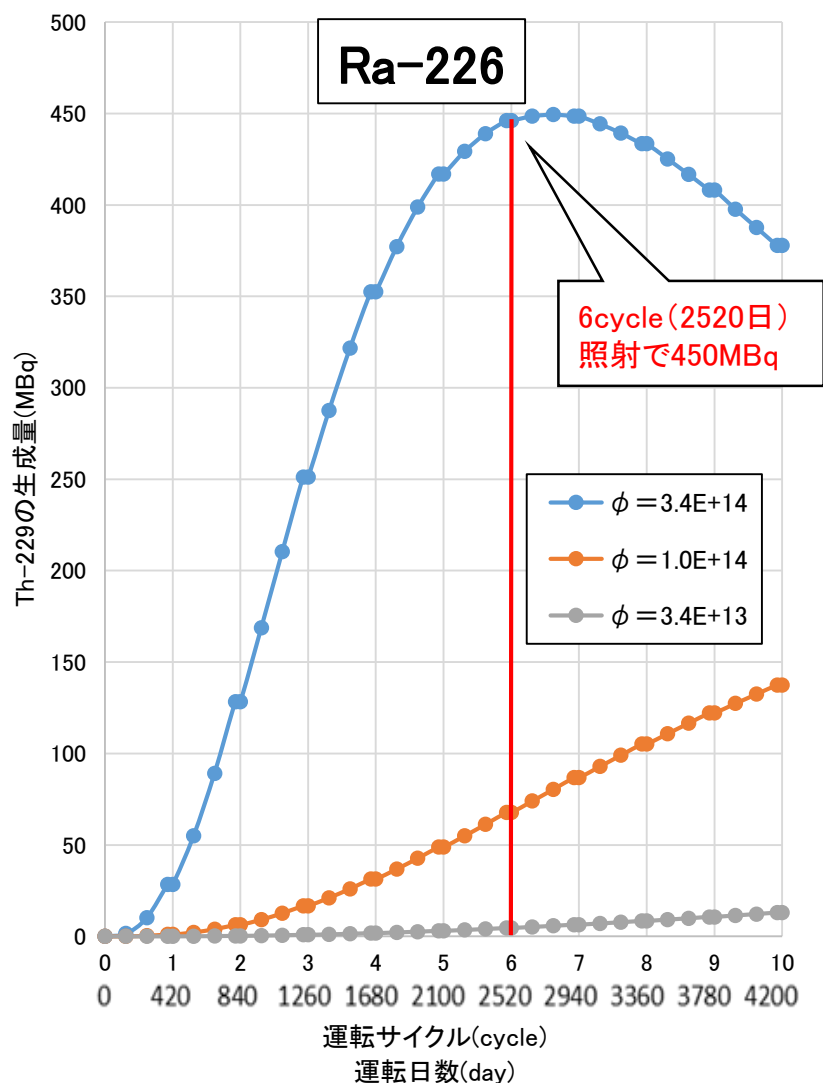


図3 加圧水型炉(PWR)の炉心配置図
[出典]日本原子力発電(株): 散貨発電所原子炉設置変更許可申請書(昭和55年8月), p.8-3-85

炉型	加圧水型軽水炉(PWR)
定格熱出力	2660[MWt]
電気出力	870[MWe]
燃料/集合体	濃縮度4.7wt%-UO ₂ 17×17型燃料集合体
運転サイクル	13か月運転+1か月冷却
照射核種	Ra-226単体、1gram Th-230単体、1gram
計算コード 核データライブラリ	ORIGEN2 JENDL-4.0
中性子束	3.4E+14[n/cm ² /s] 1.0E+14[n/cm ² /s] 3.4E+13[n/cm ² /s]

1g照射時のTh-229生成

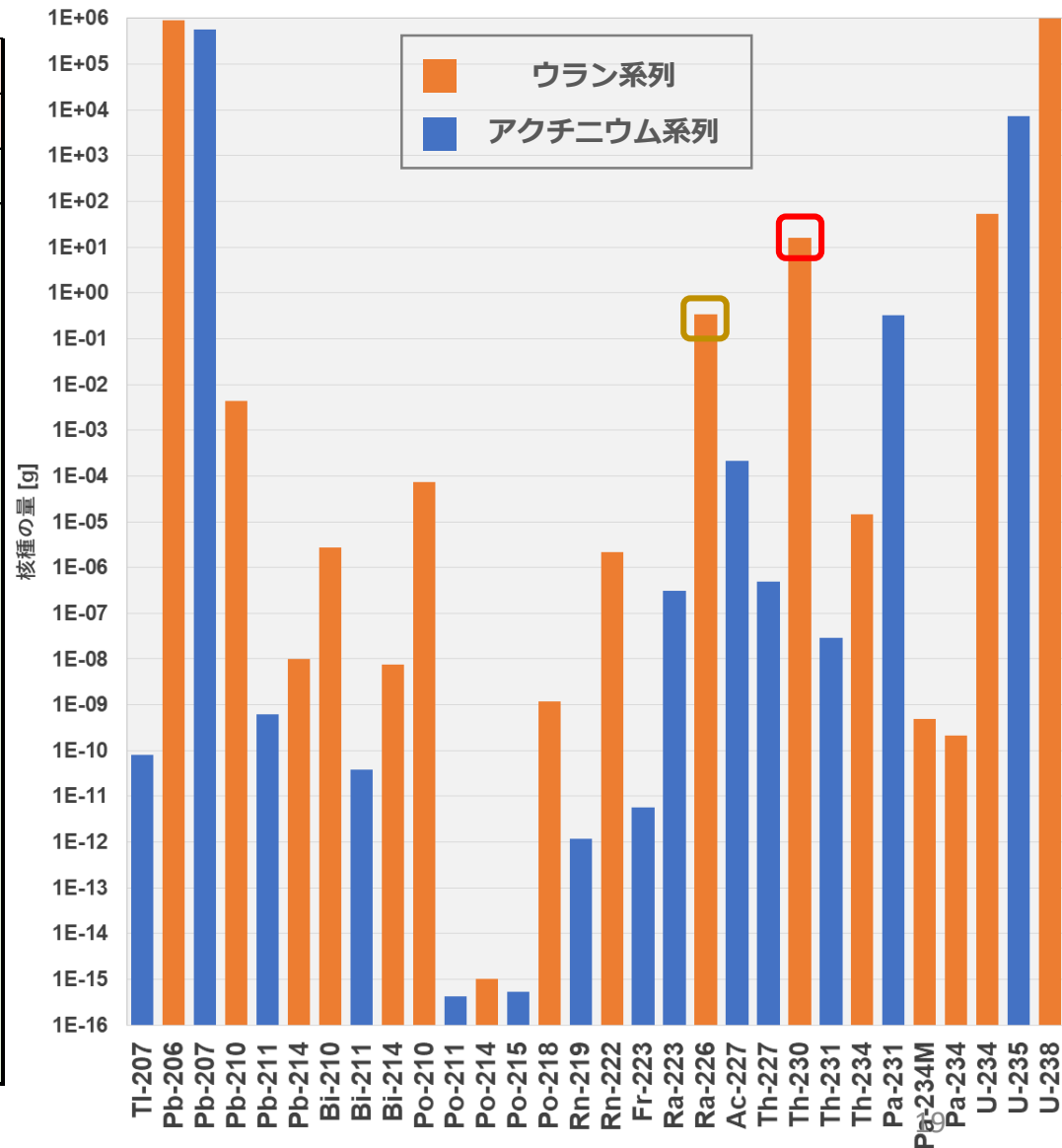


1cycle=420日(運転390日+定期点検30日)

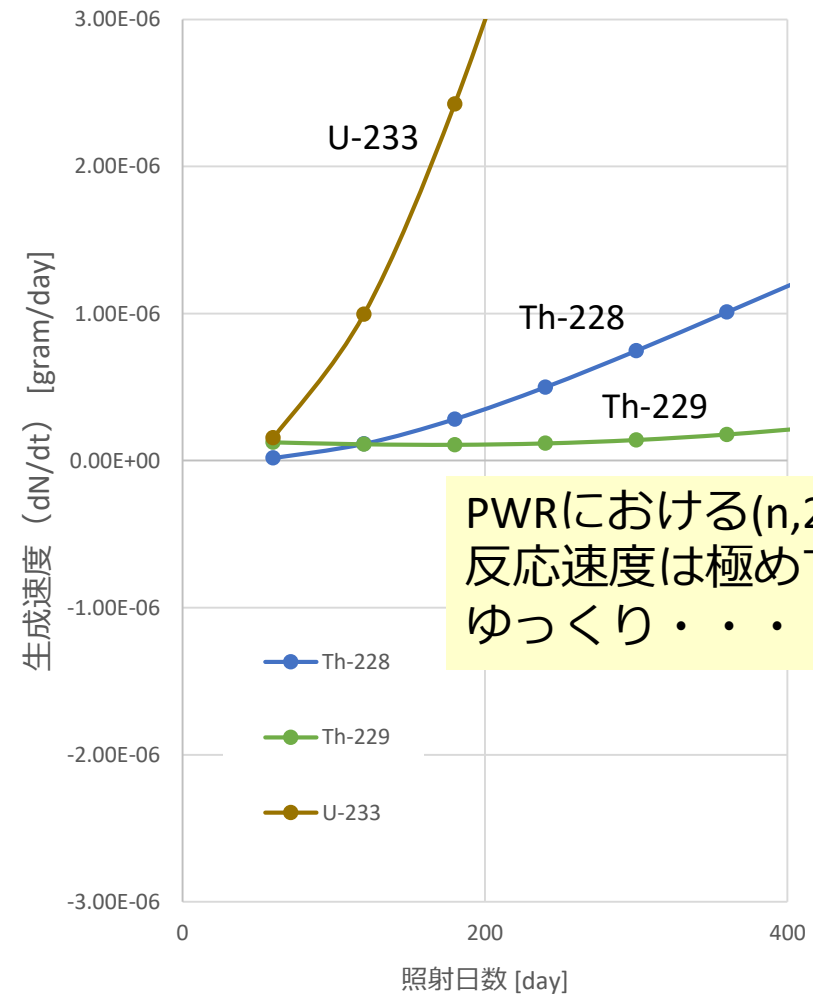
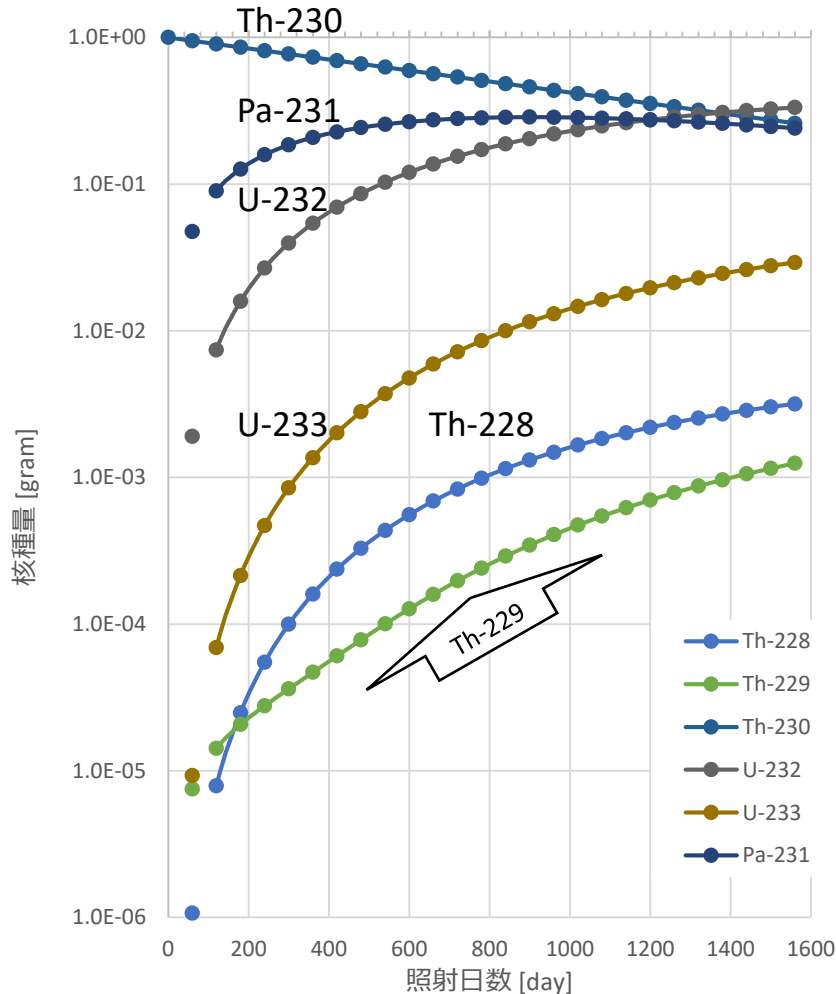
天然ウラン1tonと放射平衡にある娘核種

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	2.17×10^{-10} [g]	Th-231	2.93×10^{-8} [g]
Pa-234M	4.81×10^{-10} [g]	Th-227	4.99×10^{-7} [g]
Th-234	1.44×10^{-5} [g]	Ac-227	0.215 [mg]
Th-230	16.2 [g]	Ra-223	3.04×10^{-7} [g]
Ra-226	338 [mg]	Fr-223	5.61×10^{-12} [g]
Rn-222	2.17×10^{-6} [g]	Rn-219	1.20×10^{-12} [g]
Po-218	1.20×10^{-9} [g]	Po-215	5.29×10^{-16} [g]
Po-214	1.04×10^{-15} [g]	Po-211	4.21×10^{-16} [g]
Po-210	7.42×10^{-5} [g]	Bi-211	3.74×10^{-11} [g]
Bi-214	7.56×10^{-9} [g]	Pb-211	6.31×10^{-10} [g]
Bi-210	2.69×10^{-6} [g]	Pb-207	582 [kg]
Pb-214	1.02×10^{-8} [g]	Tl-207	8.15×10^{-11} [g]
Pb-210	4.35 [mg]		
Pb-206	894 [kg]		

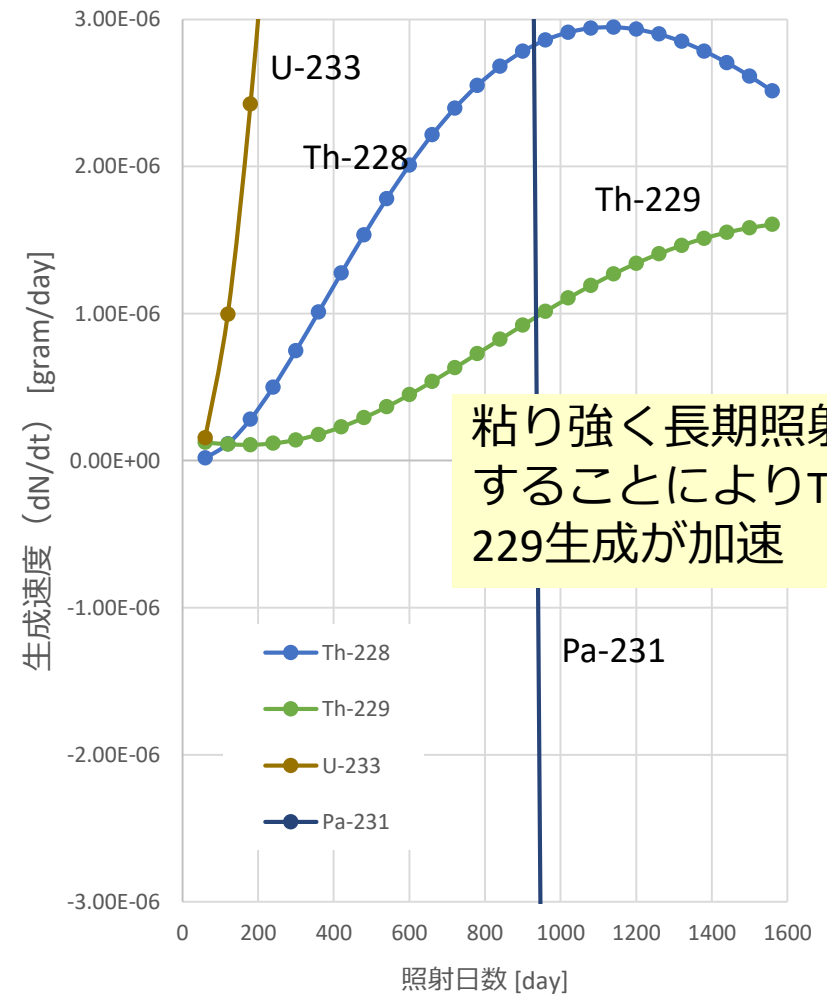
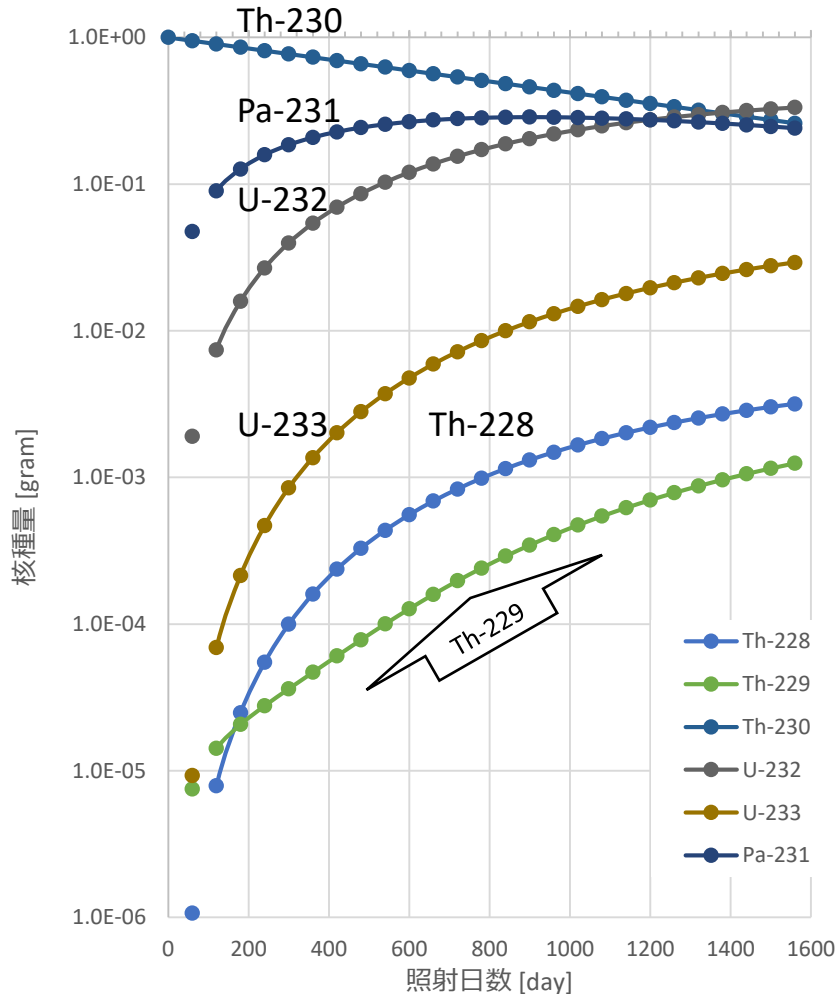
(ORIGENを用いた計算結果)



PWRでのTh-230照射によるTh-229生成

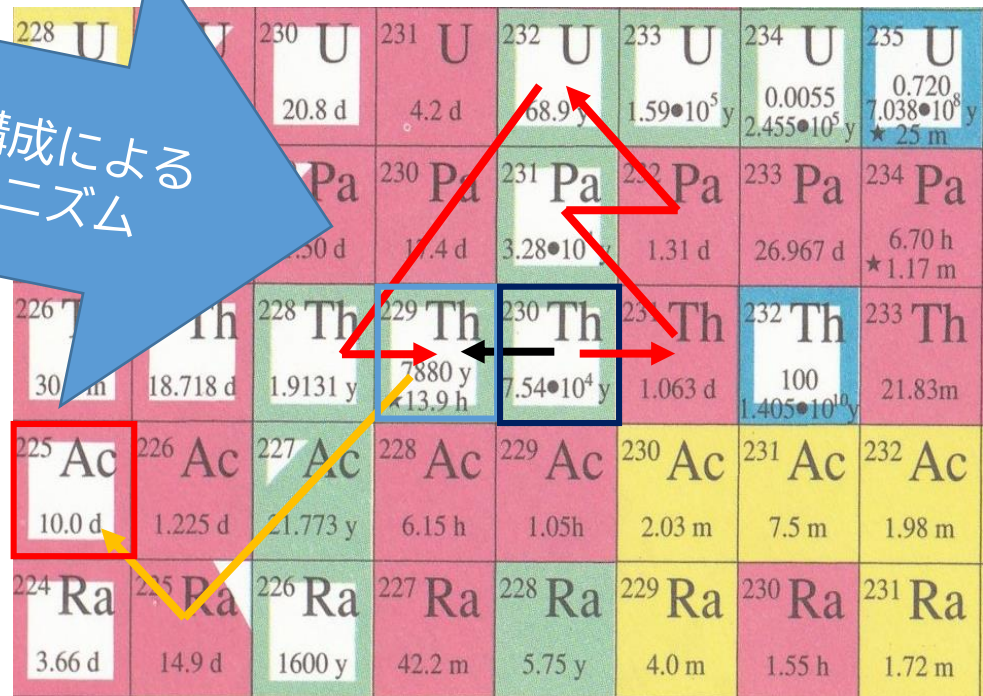


PWRでのTh-230照射によるTh-229生成



循環核変換チェーンを構成し 生成を加速するTh-230(3n,2βα)法

Cyclic chain構成による
生成加速メカニズム



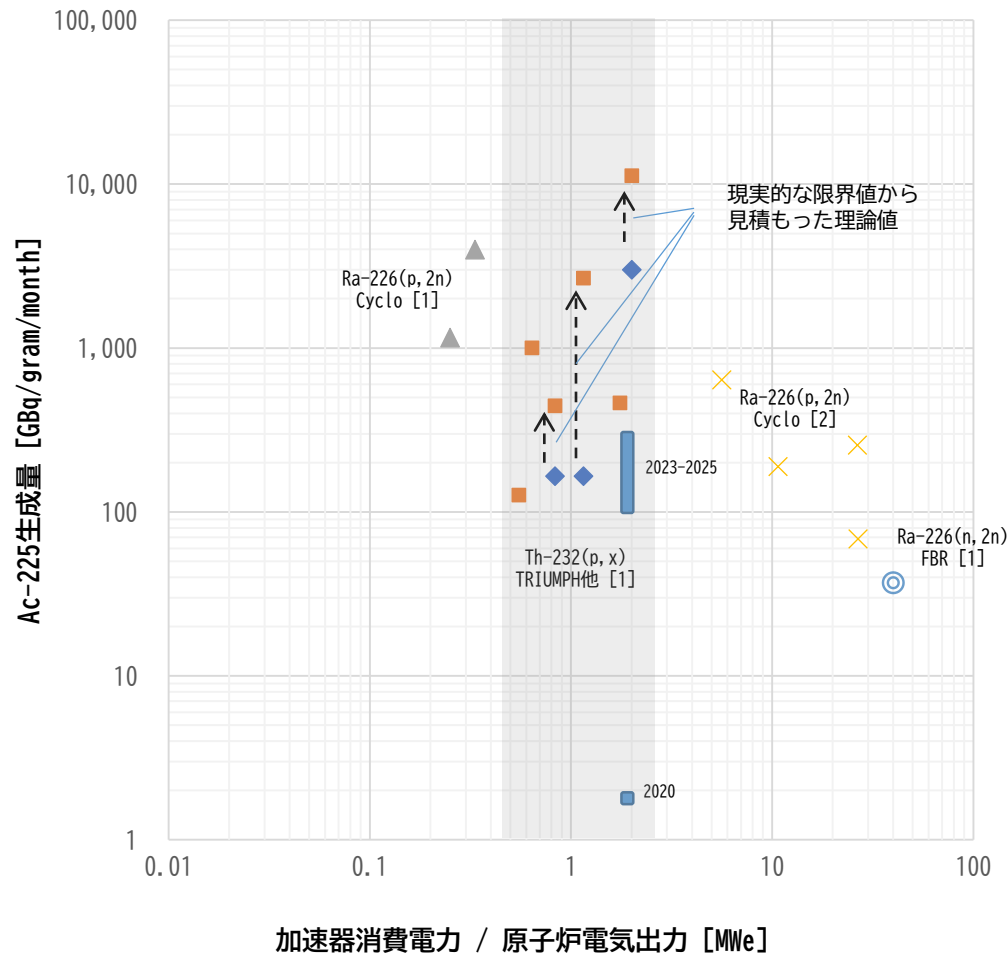
一群断面積 PWR (17×17型燃料集合体)		
核種	核反応	断面積
Th-230	(n, γ)	29.4[barn]
	(n, 2n)	4.6[mbarn]
Pa-231	(n, γ)	46.7[barn]
U-232	(n, γ)	2.9[barn]
Th-228	(n, γ)	36.5[barn]

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 (γ ,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

加速器や原子炉のAc-225生成能力

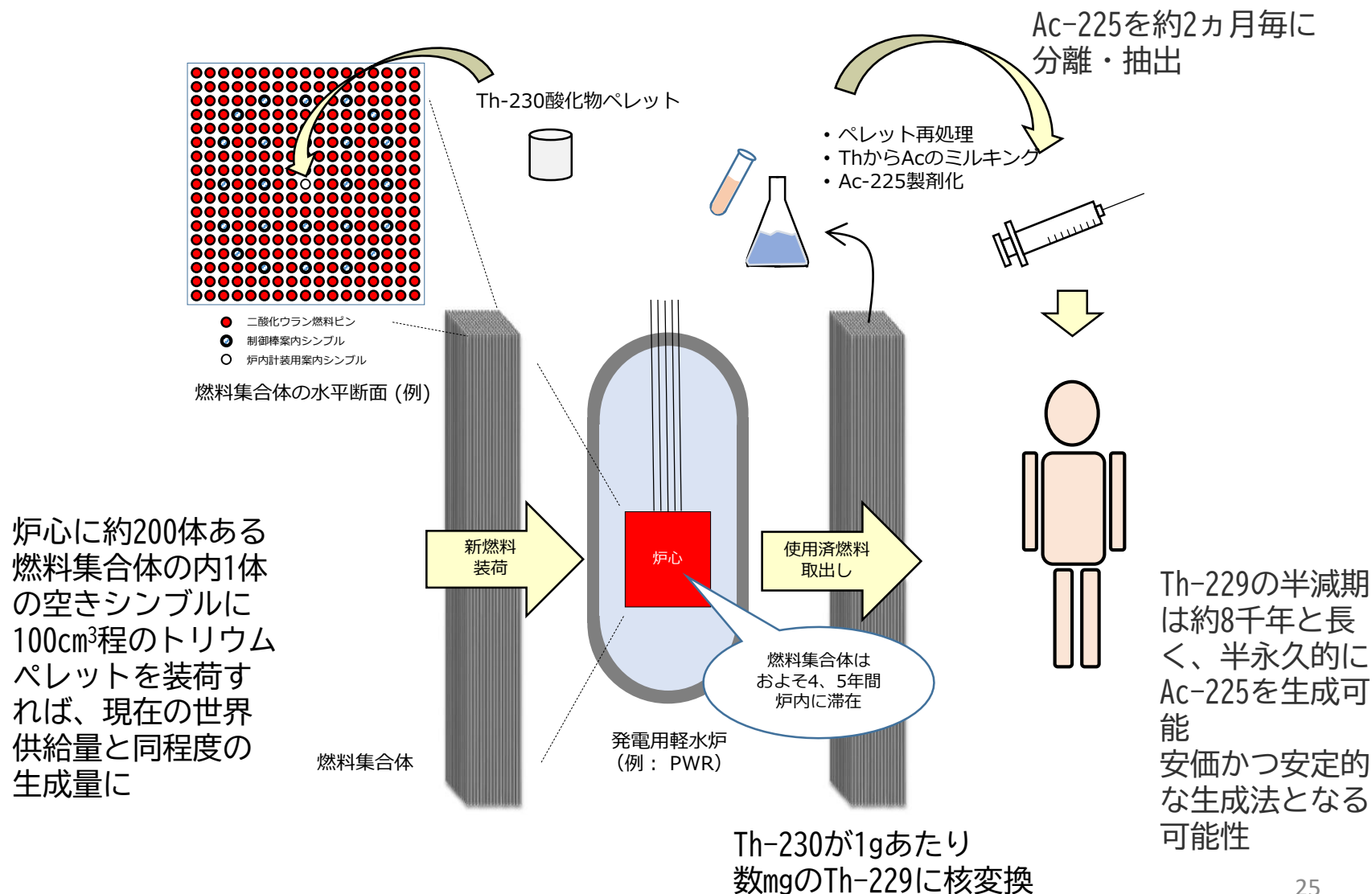


- 加速器消費電力：ビーム効率3%を仮定。負値。
- 文献[2]（黄色の×）はRa-226 をmg単位の少量照射、短時間照射（7～50時間）の実験値から1g、1ヶ月あたりの生成量を外挿
- 文献[1]（青、オレンジの□）の照射Th-232量は不明
- 右下FBRは高速実験炉「常陽」を想定。電気出力は正值。

[1] Andrew et.al. "Development of 225Ac Radiopharmaceuticals: TRIUMF Perspectives and Experiences" *Current Radiopharmaceuticals*, 2018, 11, 156-172

[2] C.Apostolidis et.al., "Cyclotron production of Ac-225 for targeted alpha therapy", *Applied Radiation and Isotopes* 62 (2005) 383-387

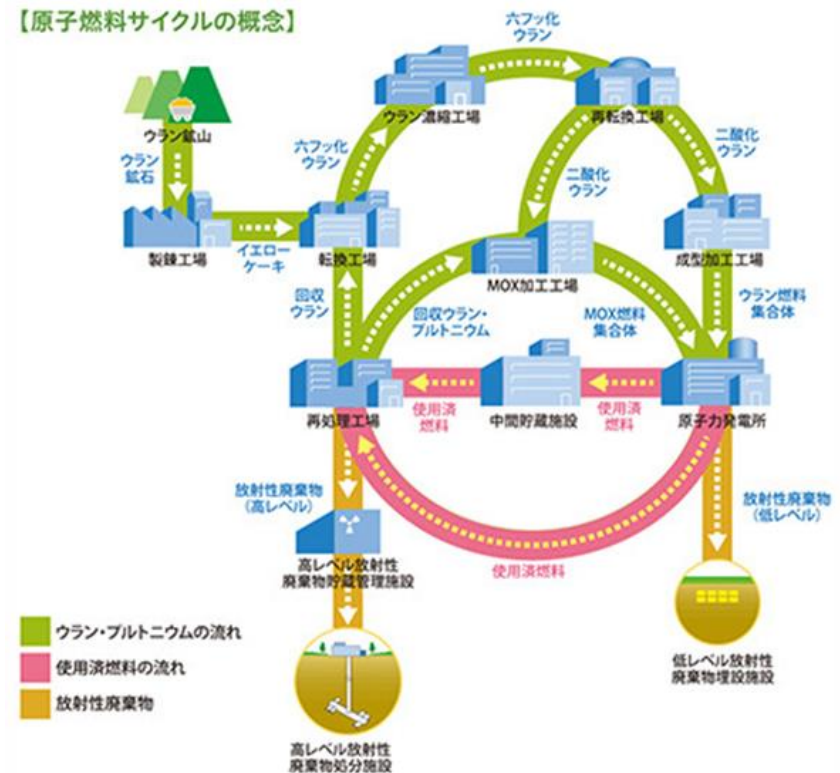
がん細胞を集中侵襲するアクチニウム225の量産技術を考案 —商用原子炉でトリウムを熟成、半永久的な供給を可能に—



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、 α 内用療法に用いる α 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】



Ac-225生成法の例

- 直接法

Th-232(p, spallation)

Ra-226(p, 2n)

Ra-226(d, 3n)

- 間接法(親核Ra-225生成)

Th-232(p, spallation)

Ra-226(γ , n)

Ra-226(p, pn)

Ra-226(n, 2n)

- 間接法(親核Th-229 生成)

Th-230(γ , n)

Ra-228(n, γ 2 β)

Ra-226(3n, 2 β)

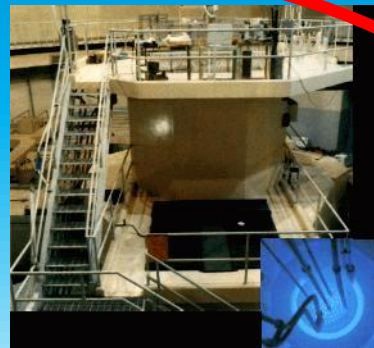
Th-230(3n, 2 β α)

- 間接法(親核U-233/Th-229生成)

Th-232(n, γ 2 β)



1.7MVペレトロン・タンデム加速器



100kW出力TRIGA-II型原子炉

(東京都市大学 王禅寺キャンパス)

日本の未来に

- モノづくり
- コトづくり
- ヒトづくり

Search:

Title / Keyword

Author / Affiliation

Processes

All Article Types

Search

Advanced

Journals / Processes / Special Issues / Production of Ac-225 for Targeted Alpha Therapy

IMPACT
FACTOR
2.753CITESCORE
1.8
SCOPUS

processes

Submit to Special Issue

Submit Abstract to Special
Issue

Review for Processes

Edit a Special Issue

Journal Menu

- Processes Home
- Aims & Scope
- Editorial Board
- Reviewer Board
- Topics Board
- Instructions for Authors
- Special Issues
- Sections & Collections
- Article Processing Charge
- Indexing & Archiving
- Editor's Choice Articles
- Most Cited & Viewed
- Journal Statistics
- Journal History
- Journal Awards
- Society Collaborations
- Conferences
- Editorial Office

Journal Browser

volume



issue



Special Issue "Production of Ac-225 for Targeted Alpha Therapy"

- [Print Special Issue Flyer](#)
- [Special Issue Editors](#)
- [Special Issue Information](#)
- [Keywords](#)
- [Published Papers](#)

A special issue of *Processes* (ISSN 2227-9717). This special issue belongs to the section "Pharmaceutical Processes".

Deadline for manuscript submissions: **31 October 2021**.

Share This Special Issue



Special Issue Editors

Prof. Dr. Naoyuki Takaki [E-Mail](#) [Website](#)

Guest Editor

Dept Nucl Safety Engn, Tokyo City Univ, Tokyo 113-8654, Japan

Interests: reactor physics; nuclear transmutation



Dr. Tatsuya Higashi [E-Mail](#) [Website](#)

Guest Editor

Department of Molecular Imaging and Theranostics, Institute for Quantum Medical Science (iQMS), National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST), Chiba 263-8555, Japan

Interests: nuclear oncology; PET oncology; radioisotope therapy



この研究は文部科学省の「国家課題対応型研究開発推進事業
（原子力システム研究開発事業）JPMXD0220354346」の助成
を受けて実施したものです。