

トリウムサイクルの核拡散抵抗性

— トリウムは核拡散に強い？ — 物質魅力度の観点から

東海大学 工学部原子力工学科 高木直行

第二回軽水炉・高速炉におけるトリウム燃料の利用ワーキンググループ

日 時:平成22年9月10日(金) 13:30~17:30

場 所:東京大学本郷キャンパス工学部8号館502大会議室

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

1

トリウムサイクルは核拡散に強い？

トリウム利用の特長

1. 核不拡散性の観点から

- 核物質に同伴する γ 線が強く核兵器利用に不向きなこと
- 核物質の発熱性が高く、核兵器利用に不向きなこと
- 核分裂性核種の単独抽出の可能性が低いこと
- 核物質の検知性が高いこと

山脇道夫・山名 元・宇根博信・福田幸朔(2005):特集 トリウム燃料サイクルの研究開発と動向 高い核拡散抵抗性と優れた特性を有するトリウム燃料サイクル(第1部). 日本原子力学会誌, 47(12), 802-821.

2

JAIFのHPでの記述

- とくに現在の「ウラン→プルトニウム」サイクルは、放射能が弱くて監視管理が困難なことが核不拡散上の問題となっているが、
- トリウム・サイクルでは、トリウム燃料の照射により生成するU-233は共存するU-232の娘核種による強いガンマ線を同伴する。
- これにより、核物質の取り扱いが技術的にむずかしくなり、また転用検知にも有効に作用することから、トリウム・サイクルの核拡散抵抗性が注目されている。

[JAIF] 躍進するアジアの原子力、インド共和国、日本原子力産業協会
http://www.jaif.or.jp/ja/asia/india_data2.html

3

ネット・新聞・書籍に躍る文字

- インターネット
 - プルトニウムなどの重い元素を生成しないので、核拡散・核廃棄物問題は大きく改善できる。
- 東奥日報(2009/9/23)
 - 最近、米国では 超党派で トリウム・サイクル検討の法案を議会に提出しようとする動きがある。 オバマ政権も、トリウム発電炉がプルサーマルに比べて核不拡散上優れていることが分かれば、わが国に対し、プルサーマルの代わりにその採用を求めてくることが十分予想される。
- 書籍タイトル
 - 核なき世界を生きる ～トリウム原子力と国際社会～

4

私の懸念

1. Thサイクルの主要fissileであるU-233も物理特性上は転用可能では。
2. U-233は照射後Th燃料の化学分離で単離可能
→ U-235爆弾に要求される高度な同位体濃縮技術が不要。
3. U-233はPuと異なり自発核分裂中性子が少ない。発熱も小さい。
→ Pu爆弾に必要な高度な爆縮技術が不要。ローテクのガンタイプで兵器製造可能。

5

転用難易性因子の比較

(γ 線量率を除く)

	臨界量	同位体濃縮	爆縮技術	発熱
U-235	48kg	必要	不要	ほぼ0
兵器級Pu	10kg	不要	必要	小
U-233	16kg	不要	不要	小

6

重元素の物理特性

同位体	半減期 (年)	裸の臨界質量 (kg, α相)	SF中性子 (個/kg/sec)	崩壊熱 (W/kg)
Pa-231	32,800	162	nil	1.3
Th-232	14.1×10^9	∞	nil	nil
U-233	159,000	16.4	1.23	0.281
U-235	700×10^6	47.9	0.364	6×10^{-5}
U-238	4.5×10^9	∞	0.11	8×10^{-6}
Np-237	2.1×10^6	59	0.139	0.021
Pu-238	87.7	10	2.6×10^6	560
Pu-239	24,100	10.2	22	1.9
Pu-240	6,560	36.8	1.03×10^6	6.8
Pu-241	14.7	12.9	49	6.4
Pu-242	376,000	89	1.7×10^6	0.1
Am-241	433	57	1.54×10^3	114
Am-243	7,380	155	0.9×10^3	6.4
Cm-244	18.1	28	11×10^9	2.8×10^3
Cm-245	8,500	13	147×10^3	5.7
Cm-246	4,700	84	9×10^9	10
Bk-247	1,400	10	nil	36
Cf-251	898	9	nil	56

出典： James A. Hassberger, Tom Isaacs, Robert N. Schock, "A STRATEGIC FRAMEWORK FOR PROLIFERATION RESISTANCE: A SYSTEMATIC APPROACH FOR THE IDENTIFICATION AND EVALUATION OF TECHNOLOGY OPPORTUNITIES TO ENHANCE THE PROLIFERATION RESISTANCE OF CIVILIAN NUCLEAR ENERGY SYSTEMS", Proc.ofGlobal2001 Paris (2001)

基礎データ

- 自発核分裂率
 - U-233 : 0.47 fissions/sec-kg.
 - U-232 : 720 fissions-sec/kg.
- 比放射能
 - U-233 : 9.636 mCi/g
 - U-233 + 1% U-232 : 212 mCi/g.

U-233

○半減期162,000年で天然に存在せず、Th-232から生成される核分裂性物質

- Th-232 + n -> Th-233
- Th-233 -> (22.2 min, beta) -> Pa-233
- Pa-233 -> (27.0 day, beta) -> U-233

9

保障措置上の扱い

表1 有意量

	物質	有意量	保障措置の適用対象
直接利用核物質	プルトニウム*	8kg	元素全体
	ウラン233	8kg	同位体全体
	ウラン(ウラン235 \geq 20%)	25kg	含有されるウラン235
	これに加え、適宜、混合物に対する規則を適用		
間接利用核物質	ウラン(ウラン235<20%)**	75kg	含有されるウラン235
	トリウム	20t	元素全体
	これに加え、適宜、混合物に対する規則を適用		

* プルトニウム238の含有量が80%未満のプルトニウムを対象

** 天然ウランおよび劣化ウランを含む

[出典](財)核物質管理センター(訳)、科学技術庁保障措置課(監修):IAEA/SF/INF/1(Rev.1)、IAEA保障措置用語集(1987)およびIAEA保障措置用語集 増補・改定版(1998)、p.48

10

強い γ 線源Tl-208の生成

- U-232 \rightarrow (76 yr, alpha) \rightarrow Th-228
 - Th-228 \rightarrow (1.913 yr, alpha) \rightarrow Ra-224
 - Ra-224 \rightarrow (3.64 day, alpha & gamma) \rightarrow Rn-220
 - Rn-220 \rightarrow (55.6 sec, alpha) \rightarrow Po-216
 - Po-216 \rightarrow (0.155 sec, alpha) \rightarrow Pb-212
 - Pb-212 \rightarrow (10.64 hr, beta & gamma) \rightarrow Bi-212
 - Bi-212 \rightarrow (60.6 min, beta & gamma) \rightarrow Po-212
alpha & gamma) \rightarrow **Tl-208**
 - Po-212 \rightarrow (3×10^{-7} sec, alpha) \rightarrow Pb-208 (stable)
 - **Tl-208 \rightarrow (3.06 min, beta & gamma) \rightarrow Pb-208**
- ✓ Ra-224の早い崩壊により生成される娘核種らは強い γ 線を放出
 - ✓ そのエネルギーの85%はTl-208(2.6MeV)による
 - ✓ γ 線量はU-232, Th-228の存在量に比例

11

鍵をにぎる随伴U-232

○U-233の生成に伴いU-232(68.9年)も生成

- a. $\text{Th-232} + n \rightarrow \text{Th-231} + 2n$
- b. $\text{Th-231} \rightarrow$ (25.5 hr, beta) \rightarrow Pa-231
- c. $\text{Pa-231} + n \rightarrow \text{Pa-232}$
- d. $\text{Pa-232} \rightarrow$ (1.31 day, beta) \rightarrow U-232

(n,2n)反応には高速中性子が必要

○燃料に微量の天然Th-230が存在する場合には

- a. $\text{Th-230} + n \rightarrow \text{Th-231}$
- b. 以下、同様

12

232 Cm	233 Cm	234 Cm	235 Cm	236 Cm	237 Cm	238 Cm	239 Cm	240 Cm	241 Cm	242 Cm	243 Cm	244 Cm	245 Cm	246 Cm	247 Cm
27.0s α 4.32s	28.8s α 4.65m	51 s	1.29m α 1.09h	2.12m α 43.4m	3.98m α 1.89d	2.4 h	2.9 h	27 d	32.8 d	162.79 d	29.1 y	18.10 y ★ 24ms	8500 y	4730 y	1.5
231 Am	232 Am	233 Am	234 Am	235 Am	236 Am	237 Am	238 Am	239 Am	240 Am	241 Am	242 Am	243 Am	244 Am	245 Am	246 Am
34.6 s α 3.28m	1.32 m	3.2m	2.32 m	10.3 m	3.6 m	1.22 h	1.63 h ★ 35 d s	11.9 h	2.12 d ★ 0.91ms	432.2 y	★ 141 y 16.02 h	7370 y	10.1 h ★ 26 m	2.05 h	★ 2
230 Pu	231 Pu	232 Pu	233 Pu	234 Pu	235 Pu	236 Pu	237 Pu	238 Pu	239 Pu	240 Pu	241 Pu	242 Pu	243 Pu	244 Pu	245 Pu
2.6m	8.6m	33.1m	20.9 m	8.5 h	25.3 m	2.858 y	45.2 d ★ 0.18 s	87.74 y	2.41•10 ⁵ y	6564 y	14.35 y ★ 23 μs	3.73•10 ⁵ y	4.956 h	8.08•10 ⁷ y	1
229 Np	230 Np	231 Np	232 Np	233 Np	234 Np	235 Np	236 Np	237 Np	238 Np	239 Np	240 Np	241 Np	242 Np	243 Np	244 Np
4.0 m	4.6 m	48.8 m	14.7 m	36.2 m	4.4 d	1.084 y	1.54•10 ⁵ y ★ 22.5 h	2.14•10 ⁶ y	2.117 d	2.3565 d	1.032 h ★ 7.22 m	13.9 m	5.5 m ★ 2.2 m	1.85 m	2
228 U	229 U	230 U	231 U	232 U	233 U	234 U	235 U	236 U	237 U	238 U	239 U	240 U	241 U	242 U	243 U
9.1 m	58 m	20.8 d	4.2 d	68.9 y	1.59•10 ⁵ y	4.46•10 ⁵ y	0.720 7.038•10 ⁸ y ★ 25 m	2.34•10 ⁶ y	6.75 d	9.2745 4.68•10 ⁵ y	23.45 m	14.1 h	18.4 m	16.8 m	3
227 Pa	228 Pa	229 Pa	230 Pa	231 Pa	232 Pa	233 Pa	234 Pa	235 Pa	236 Pa	237 Pa	238 Pa	239 Pa	240 Pa	241 Pa	242 Pa
38.3 m	22 h	1.50 d	17.4 d	3.28•10 ⁴ y	1.31 d	26.967 d	6.70 h ★ 1.17 m	24.5 m	9.1 m	8.7 m	2.3 m	1.77 h	26.6 s	17.3s	1
226 Th	227 Th	228 Th	229 Th	230 Th	231 Th	232 Th	233 Th	234 Th	235 Th	236 Th	237 Th	238 Th	239 Th	240 Th	241 Th
30.6 m	18.718 d	1.9131 y	7880 y ★ 13.9 h	7.54•10 ⁴ y	1.063 d	1.405•10 ⁴ y	100	21.83m	24.10 d	7.1 m	37.5 m	4.7m	9.4m	33.1s	11.2s
225 Ac	226 Ac	227 Ac	228 Ac	229 Ac	230 Ac	231 Ac	232 Ac	233 Ac	234 Ac	235 Ac	236 Ac	237 Ac	238 Ac	239 Ac	240 Ac
10.0 d	1.225 d	21.773 y	6.15 h	1.05h	2.03 m	7.5 m	1.98 m	2.42 m	44 s	18.1 s	5.55 s	7.57s	3.03s	1.60s	1
224 Ra	225 Ra	226 Ra	227 Ra	228 Ra	229 Ra	230 Ra	231 Ra	232 Ra	233 Ra	234 Ra	235 Ra	236 Ra	237 Ra	238 Ra	239 Ra

高速スペクトル化でU-232生成が多いのは...

半減期7万5千年のTh-230は自然界に存在するのは...

U-233にもある「グレード」

- PuはPu-240の割合で原子炉級、燃料級、兵器級、スーパー級などと分類されているが、U-233は随伴U-232の量で分類。
- 兵器級U-233 (Weapon grade)*
 - 随伴U-232濃度が5ppm (0.0005%)以下
- 低品位U-233 (Low grade)*
 - 随伴U-232濃度が50 ppm (0.005%)以上

*Clean U-233, Dirty U-233という呼び方もある。

U-233取扱いの困難さ

- U-232を伴うU-233が再処理されて数年間はTh-228が蓄積し、やがて平衡量に達する。この期間 γ 線量は増加し続け安定化する。
- 兵器級U-233(U-232の含有量5 ppm)からなる10kgの球体から1mでの線量率は、1ヶ月後に11 mrem/hr であり、1年後に110 mrem/hr、2年後に200 mrem/hrとなる。
- 従って、2年経過後のU-233でも25時間の作業で年間線量限度5 remを越えることとなり、通常の兵器製造で用いられるグローブボックスでの作業は困難である。

15

U-233取扱いの困難さ(2)

- 兵器として組み立てられた核爆弾では、タンパーやケースによる γ 線の遮蔽効果が期待できるが、それによる減衰率は10程度である。特に、近代的な軽量化された核爆弾ではその値を期待できない。
- さらに、ベリリウム反射材がある場合には $\text{Be-9}(\gamma, n)\text{Be-8}$ 反応により、中性子も加わる。
- U-232に伴う γ 線は、核弾頭の遠隔探知・追跡に利用可能である。
- 軽量化に配慮しなければ100ないし1000の減衰率達成も可能であり、遠隔探知は難しくなる。

16

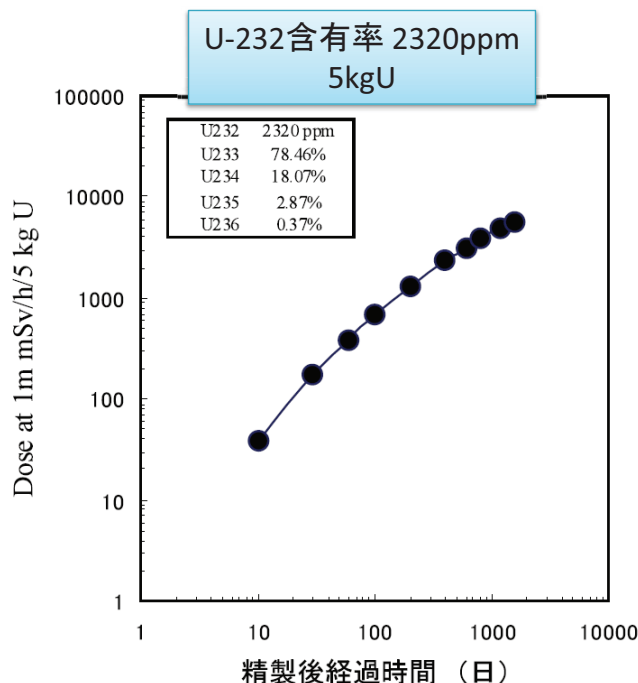
低グレードU-233取扱いの困難さ

- 意図的に低品位化したU-233 (0.5 - 1.0% U-232)は, 強い γ 線を放出する。
- 10kgの球体 から1mの位置での線量率は、1ヶ月後に11 rem/hr、1年後に 110 rem/hr そして2年後に 200 rem/hr と極めて高い。
- よってその取扱は遠隔操作で行わねばならない。
- この組成のU-233で組み立てられた核爆弾でもし減衰率1000を仮定したとしても接近可能時間は年間で25時間となる。

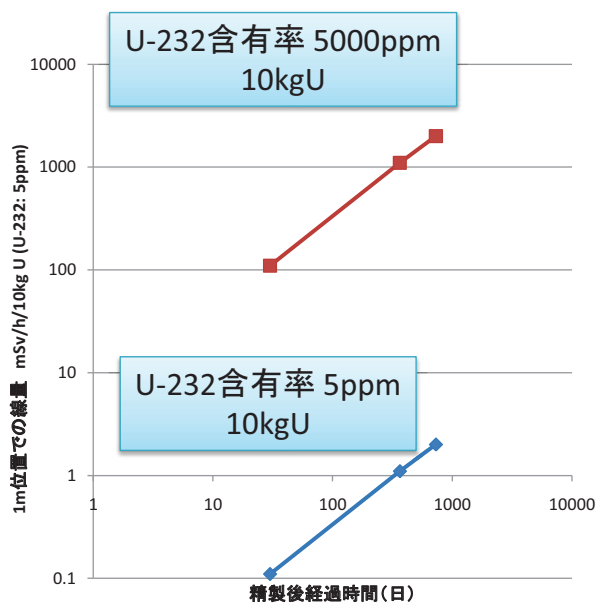


- 低グレードU-233の核爆弾原料転用は極めて考えにくい。

17



第1図 Th-²³³U 燃料から回収したU 5 kg から1 m 地点での空間線量(横軸は精製後の経過時間)



山崎道夫・山名 元・宇根博信・福田幸男(2005)・特集 トリウム燃料サイクルの研究開発と動向 高い核拡散抵抗性と優れた特性を有するトリウム燃料サイクル(第1部) 日本原子力学会誌, 47(12), 802-821.

18

低グレードU-233の特性

(α 及び中性子放出)

- 69年というU-232の短い半減期故、低グレードU-233の発熱量はかなり大きい。
- 1%のU-232を含むU-233は、兵器級Puの3倍の発熱量となり、同時に放射性毒性も高い。
- 加えてこの高い α 線量は、軽核との(α, n)反応により中性子を生成する。この効果は前述の γ 線による中性子生成より大きい。(Pu中のPu-240ほどではない)

19

中性子バックグラウンド

- よって爆弾の設計においては、軽核(Be, B, F, Li)と α 線的作用による中性子生成量は小さく抑えねばならない。
- しかしこの程度の中性子発生は爆縮タイプ爆弾に関しては問題とならない。低グレードU-233爆弾の中性子バックグラウンドはPuのそれより小さいためである。
- 一方、ガンタイプ爆弾に関しては、(α, n)反応を起こす軽核の含有率は1ppmのオーダーが要求される。
- この純度は、商業化されている分離技術でたやすく達成可能である。

20

U-232許容量

- 閉じたトリウムサイクルを構成する上で経済性上許容しうるU-232の存在範囲は1000 - 2000 ppm (0.1 - 0.2%)まで
- 特別な遮蔽を施したサイクル施設では0.5-1.0%のU-232の取扱が可能

21

U-232生成を回避するには

そもそも核分裂性核種U-233を生成する上で、不純物としてのU-232の生成は避けることができない。(但し、U-232随伴率はPu中の偶中性子核随伴率ほど大きくはない)

- $\text{Th-232} + n \rightarrow \text{Th-231} + 2n$
 - U-232を生成する最初の引き金となる (n,2n) 反応の閾値は約6.5 MeV で高エネルギー中性子が必要.
 - 従って、**Th-232ブランケット燃料が減速中性子**(特にTh-232の核分裂反応の閾値である 500 KeV以下)**の領域**に置かれるならば、この反応はほぼ無視できる
- $\text{Pa-231} + n \rightarrow \text{Pa-232}$
 - 次の引き金であるこの反応は熱中性子で非常に効率的に進むが、**Th-230含有率の小さいTh燃料を用いる**ことで回避可能

22

兵器原料としてのU-233魅力度

- 臨界質量はU-235より小さく、核特性はPuに類似している。
- U-233は γ 線や中性子の問題を伴うものの、優れた兵器原料である。
- 米国は1957年にTeapot METでU-233爆弾(core)の最初のテストを実施し、その後数回継続した。(テストの目的は明らかにされていない)
- インドは核兵器研究開発の一環としてU-233を製造しているとみられている。平和目的の原子力開発では公式にU-233製造を行っている。

23

米でのU-233製造実績

- USDOEにはハンフォードサイトでの「ThからのU-233製造」や「Purex施設でのU-233抽出」に関連する報告書が50,000冊存在。過去にはさらに多くあったが軍により破棄・隠滅。過去の計画全容は未だ不明。
- 2000年代初頭のハンフォードサイトの汚染実態調査に伴う過去の報告書分析より、「戦場で用いる戦術核(tactical nuclear weapon)の原料として兵器級U-233を製造する大がかりな計画あった」ことが明らかに。
- 1960年代には2.5～300ppmのU-232を含む複数のU-233製造技術が開発されていた。(1968～1969年の大量製造工程ではU-233/Thの重量比で0.19%のU-233が製造された模様)
- その後、U-232含有率を数ppmにできるようになり、U-233製造コストは低減した。コスト低減の理由は「リサイクルThを使用」したことにある。
 - ハンフォード再処理施設サイクル内を流れる「リサイクルTh」は再処理の度に不純物*が除去されるため、そこから生成されるU-233はよりクリーンに。
 - 新たな純粋Thを購入するより、Thをリサイクルして使用する方が安価。

* 訳注: U-232を生成する親核種となるTh-230

Hanfordで製造されたU-233の用途

- 爆弾の原料
 - U-233とPu-239はU-235より**爆弾の小型化が可能**
 - **歩兵隊向け砲弾**に適用可能？
 - Pu-239に対するU-233の有利性は「**Pu-239よりも低放射能**」
 - 被曝線量が許容でき陸軍歩兵隊による運搬が可能な**戦術核**
- 原子炉燃料
 - 製造されたU-233は、オークリッジ同位体部門へ輸送、売却
 - オークリッジは原子炉用トリウム酸化物燃料ペレット製造を試みたが、計画は途中で中止に
 - DOEの SHIPPING PORT 炉でのトリウム増殖炉サイクル
- 両者の製造上の相違点
 - 爆弾原料U-233には、不純物を最少化しPuよりも低放射能とする必要があり、Hanfordが払った努力には大きな違い有り。



Nrom Buske, Hanford Radioactivity in Salmon Spawning Ground, A report of Government Accountability Project, Aug. 2002 ²⁵

ハンフォードサイトでのU-233生産

- H-炉でのU-233生産
 - 23[ton]のThから30kgのU-233を生産
 - 1955年7月1日に最初の搬出
 - 1958年まではH-炉の中性子の1%はU-233の製造に消費
- Th消費量
 - 1968年 170t/y
 - 1971～'72年 24t/y
 - 1973年 20t/y
- N-炉でのU-233生産
 - 1978年に新たにN-炉が完成しU-233を生産

Nrom Buske, Hanford Radioactivity in Salmon Spawning Ground, A report of Government Accountability Project, Aug. 2002 ²⁷

まとめ

- 商業サイクルにおいてU232の存在は、経済性を悪化させる要因ではあるものの核拡散のポテンシャルを下げる効果を有す。 → 諸刃の剣
- 一方でU-233は兵器転用が可能で米で実績あり。
- さらに、同位体濃縮不要(化学処理のみで抽出可能)、ガンタイプ技術利用可、小型戦術核への適用性の特徴。
- U-232娘核の γ 線が「トリウムサイクル＝核拡散抵抗性高」の主張の決定打となり得るか、内的障壁・制度的障壁の総合的観点から精査要。