

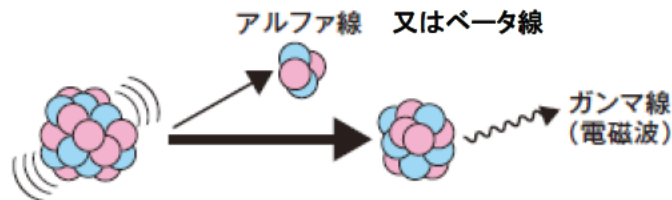
使用済燃料の放射能と対策

日本原子力研究開発機構
高速炉・新型炉研究開発部門

放射性核種と放射線の特性

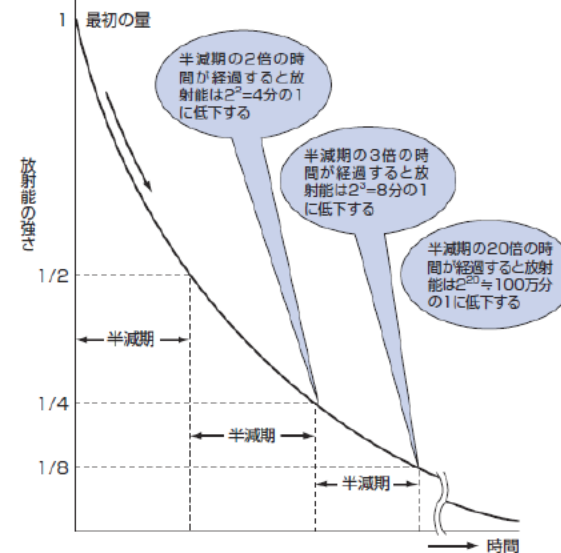
- 核種には、放射性核種と放射性を持たない核種(安定核種)がある。放射性核種は、放射線を放出しながら崩壊を繰り返し、最終的に安定核種に変化する。
- 放射性核種の放射能の強さは、一定の時間が経過すると半分に低下し、さらに一定の時間が経過するとその半分に低下する。放射能の強さがもとの半分になるまでの時間を「半減期」という。
- 放射線は、種類によって透過力が異なる。アルファ線は紙や皮膚の表面で止まるが、ベータ線は筋肉組織まで到達し、ガンマ線や中性子線は人体を透過する。

放射線の放出



出典: 電気事業連合会/原子力・エネルギー図面集2014

放射能の強さと物理学的半減期

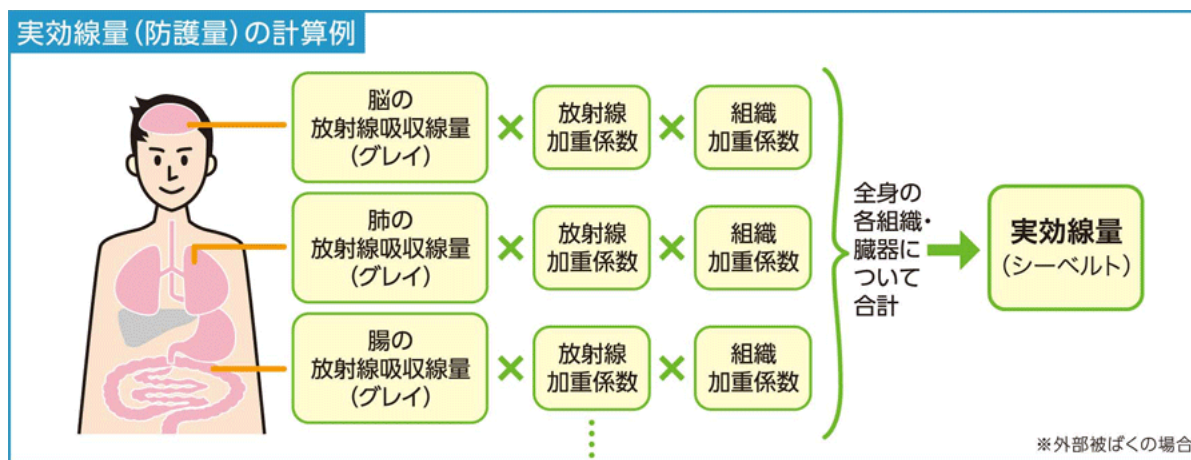


出典: 原子力発電整備機構/地層処分その安全性

放射線の人体への影響(確率的影響)



- 放射線の人体へ与える影響(確率的影響)は、身体全体が受ける「実効線量」の大小で評価される。
- 実効線量は、放射線の種類と人体各組織に対する放射線の影響の受けやすさの違いを「加重係数」の大小で考慮し、以下の様に求める。



加重係数

- 放射線は、その種類により透過力が異なり、人体等に当たったときの影響は、どれだけ放射線からエネルギーを受けたかで異なる。この違いを「放射線加重係数」の大小で表わす。
- 人体の放射線の影響の受けやすさ(感受性)は組織によって異なり、骨髄や生殖器官等の感受性は高く、骨表面や皮膚の感受性は低い。この違いを「組織加重係数」の大小で表わす。

放射線の種類と影響

	透過力 (空気中では)	同じ強さの放射線から受ける エネルギー密度と範囲
ガンマ(γ)線	大きい	密度 極小 範囲 大
ベータ(β)線	数10cm～数m	密度 小 範囲 中
アルファ(α)線	数cm	密度 大 範囲 局所



放射線加重係数	
放射線の種類	放射線加重係数
光子(ガンマ線、エックス線)	1
電子(ベータ線)	1
陽子	2
アルファ粒子、核分裂片、重い原子核	20

人体組織毎の放射線の影響の受けやすさ(感受性)

- 1: 造血組織(骨髄・脾臓・リンパ節)、生殖腺、胃腸上皮、胎児
- 2: 皮膚上皮、眼、血管、唾液腺
- 3: 腎臓、肝臓
- 4: 筋肉、関節組織、骨、脳、脂肪組織、神経組織

1→2→3→4の順で感受性が低くなる。

- 1 細胞再生系で幹細胞の分裂頻度が高い
- 2 細胞再生系で幹細胞の分裂がそれほど著しくない。
- 3 規則的には分裂しない。分化の程度はいろいろ。
- 4 分裂しない。高度に分化している。

[出典]吉井義一:放射線生物学概論[第2版](1922)

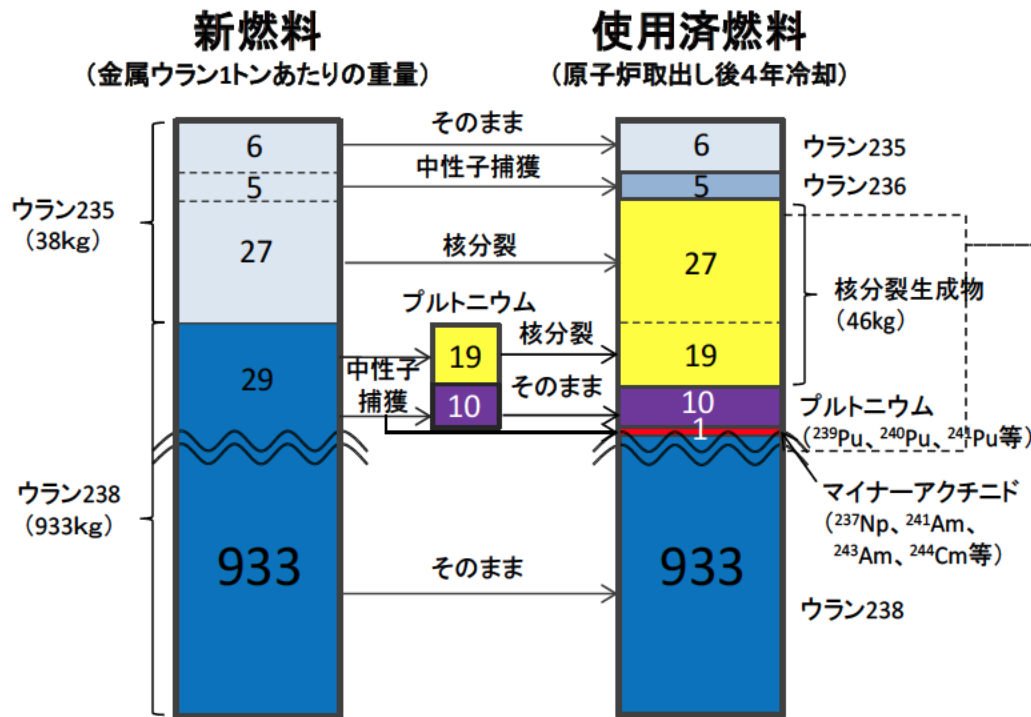


組織加重係数	
組織・臓器	組織加重係数
赤色骨髄・肺・胃・大腸・乳房・ 残りの組織	0.12
生殖腺	0.08
膀胱・食道・肝・甲状腺	0.04
骨表面・脳・唾液腺・皮膚	0.01

出典:ICRP Publication 103.2007

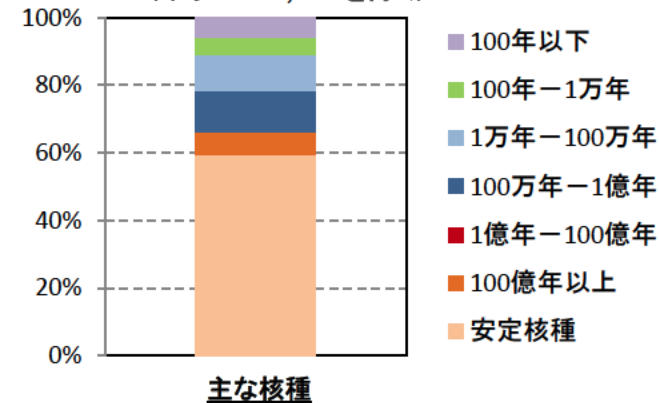
使用済燃料と核種

- 原子力発電により使い終わった核燃料のことを「使用済燃料」という。
- 使用済燃料には、燃え残りのウラン(U)約93%の他、ウランから生じたプルトニウム(Pu)が約1%、同様にUから生じたマイナーアクチノイド(MA)と称される放射性核種が0.1%、核分裂片の核分裂生成物(FP)が約5%含まれる。
- Pu、MA、及び一部のFPは長期間にわたり放射能を有する。



BWR/初期ウラン濃縮度3.8%/平均燃焼度4.5万MWd/t

使用済燃料の全核種の半減期の分布
(ウラン235,238を除く)



半減期	主な核種
100年以下	セシウム134・137、プルトニウム241・238、ストロンチウム90、プロメチウム147、キュリウム244等
100年～1万年	アメリカシウム241・243、プルトニウム240等
1万年～100万年	プルトニウム242・239、テクネチウム99等
100万年～1億年	ウラン236、ジルコニウム93、セシウム135、ネプツニウム237、パラジウム107、ヨウ素129等
1億年～100億年	なし
100億年以上*	ネオジウム144、セリウム142等

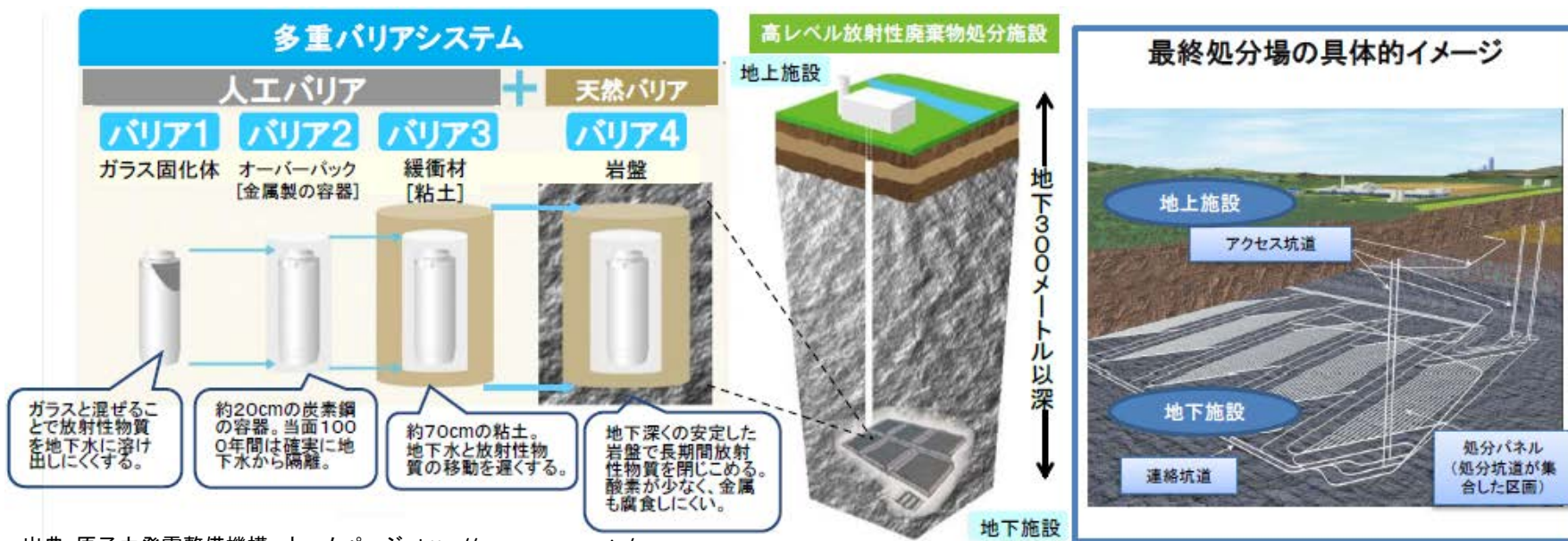
*超長半減期核種のため、理化学年表では安定同位体扱い

使用済燃料核種の特徴

- 人間が使用済燃料中の核種をまとめて体内に取り入れることは考えられないが、使用済燃料の放射能を概念的に示す尺度として、使用済燃料に含まれる全放射性核種が、口から体内に摂取されるとした場合の被ばく線量(潜在的有害度)が用いられる。
- 原子炉から取り出して数年の使用済燃料において高い潜在的有害度を持つ核種(ストロンチウム90、セシウム137等)は比較的半減期が短く(100年以下)、その後放射能が失われていくが、一部のU、Pu核種、アメリシウム(Am)核種等は半減期が長く、放射能を維持し続ける。
- このような核種が仮に人体内に取り込まれた場合、一部の核種は体外に排出されることなく、長期間にわたり骨、肝臓等に留まることとなる。

使用済燃料の地層処分

- 我が国においては、使用済燃料からPu、Uを回収・再利用し、その廃液をガラス固化して地層処分する方法が検討されている。
- 処分場は、核種のガラス固化体からの溶出性、地下水への溶解性を踏まえ、様々な現象を想定した上で、多重のバリアを設けることにより地表の生活環境に放射線の影響がないよう設計される。
- 他方、何百万年も放射性が継続する廃棄物が地下に存在することへの不安感等から、我が国における地層処分には必ずしも社会的認知・信頼が得られていない。
- 地層処分システムの安全確保を確実なものとすると共に、その潜在的な有害度そのものを減らす努力が必要である。



地層処分廃棄物の放射線量

- 地層処分場から放射性核種が生活環境に漏えいするような事象を想定した場合、その放射線量は想定する事象のシナリオによって異なる。
- 仮に、地下水が処分体の緩衝剤に浸透して容器が腐食し、ガラス組織中から放射性核種が地下水に溶け出し、岩盤中を移動して生活環境に到達する事象を想定した場合には、核種の半減期、地下水への溶解性、岩盤中の移動性を考慮すると、セレン79、セシウム135、MAの自然崩壊によって生成されるトリウム229が重要な核種となる。

放射性核種	分類	放出放射線	物理学的半減期	体内の主な滞在箇所 ^{※1,2}	有効半減期 ^{※3}
セレン79	FP	β線、γ線	29万5千年	肝臓(15%)、腎臓(5%)、脾臓(0.5%)	3日
セシウム135	FP	β線、γ線	230万年	全身 [※]	70日
トリウム229	-	α線、γ線	7340年	骨(70%)、肝臓(4%)、全身(16%)	骨(22年) 肝臓(2年) 全身(2年)

※1 環境省/放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料

※2 ICRP Publication 30, 作業者による放射性核種の摂取の限度(日本アイソトープ協会訳)

※3 体内に取り込まれた放射性物質は生体活動の中で排出される。

「有効半減期」は、これを考慮し、生体内に取り込まれた放射性核種の放射能レベルが元の半分になるまでの時間。

$1/\text{有効半減期} = 1/\text{物理学的半減期} + 1/\text{生物学的半減期}$

使用済燃料からのMA回収とリサイクル

放射性廃棄物の潜在的有害度を減少させる手段として、原子力機構ではU及びPuに加えて、MAを使用済燃料から回収し、高速炉によりリサイクルする方法を研究している。

【MA回収の目的】

- **処分体の潜在的な有害度の低減**: 地層処分される処分体からMAを取り除き、地下に存在する放射能(潜在的有害度)そのものを少なくすることで、放射性物質の存在期間を数百万年レベルから数百年レベルに短縮し、長期にわたる人々の不安を緩和する。
- **地層処分場設計の合理化**: 発熱量の高いMAを取り除くことで処分体の発熱を抑え、地層処分場設計における廃棄体の設置間隔を狭めることで、処分に必要な処分場面積を低減する。

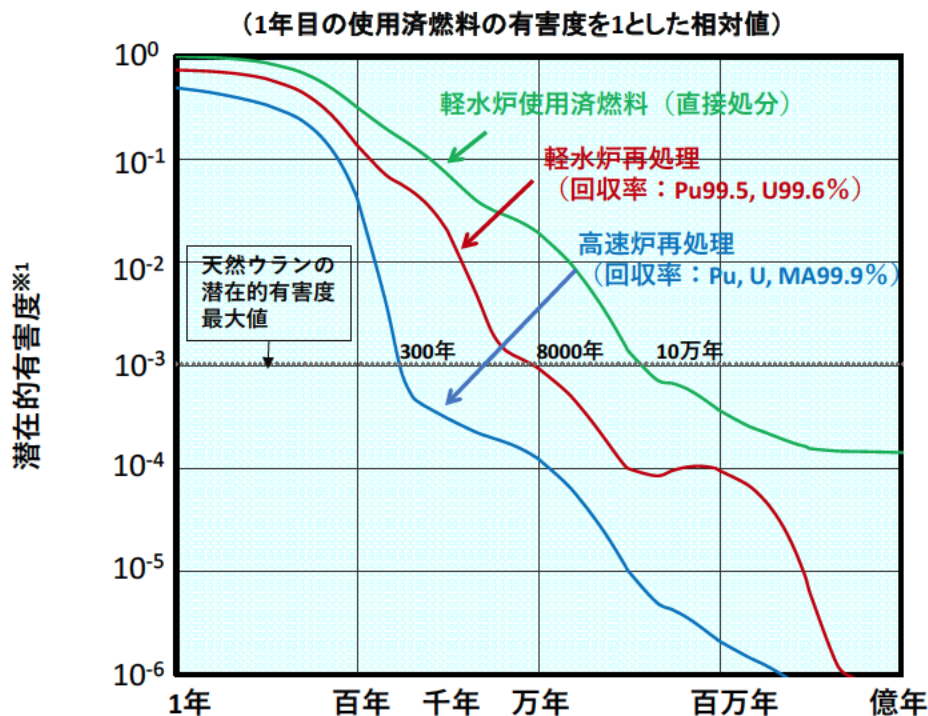
【高速炉によるMAリサイクル】

- **高速炉はMAを効率的に燃焼**できる。
- 軽水炉と比較した場合、高速炉の方が熱効率が高いため、単位発電電力量あたりの放射性廃棄物の発生量が少なくなる。

高レベル放射性廃棄物の潜在的有害度と放射能



- MAを回収・再利用することによって、放射性廃棄物中の放射性核種の潜在的有害度を低下させることができる。
- 原子炉から取り出し4年冷却させた後を基準として、使用済燃料をそのまま処分した場合（緑色の線）と、U、Pu、MAを回収した廃液をガラス固化し処分した場合の1000年後の潜在的有害度を比較すると、UとPuを回収した場合（紫色の線）には約8分の1、更にMAを回収した場合（青色の線）には約30分の1となる。
- 天然に存在するウラン鉱石（使用済燃料の起源となる量）の潜在的有害度のレベルまでの減衰時間を比較すると、U・Pu・MAを回収しない場合は約10万年、MAリサイクルでは約300年となる。



※1: 1GWの原子力発電所を1年間運転した時の使用済燃料、又はその再処理により発生する放射性廃棄物の潜在的有害度

※2: 1GW発電に必要な軽水炉燃料を製造するのに必要な重量の天然ウランの潜在的有害度の最大値

潜在的有害度試算の主要な前提条件※1

炉型	LWR (UOX)	LWR (プルサーマル)	FBR
			全炉心
1GW年あたり 炉心重量※2	約23.5t	UOX 約15.7t MOX約7.8t	約9.6t※5
燃焼度	4.5万MWd/t	4.5万MWd/t	89.1万MWd/t※5
熱効率	0.345	←	0.42
稼働率	100%	←	←
冷却期間	炉取出し15年※4	←	炉取出し4年
テイル濃縮度	0.25	←	-
再処理時の 元素回収率※3	U: 99.588% Pu: 99.452%	←	U, Pu, MA: 99.9%

※1: 理論値としての試算条件例であり、最新の設計値等とは異なる。

※2: 炉装荷時の重金属重量。 $1 \div (\text{炉心重量} \times \text{炉心重量} \times \text{燃焼度} \times \text{熱効率} \times \text{稼働率})$

※3: 回収されない元素は廃棄物側に移行すると仮定。直接処分の場合は全ての元素が廃棄物側に移行と仮定。

※4: 六力所保管燃料の冷却期間を想定

※5: 全炉心領域平均