

新外交イニシアティブ オンラインセミナー
2022年9月30日 19時～21時

高速炉で『核のゴミ』を減らす？
まやかしの高速炉開発と六ヶ所再処理工場との関係

高速炉で『ガラス固化体の隔離期間短縮と高レベル廃棄物減容』のトリック

今中哲二

京都大学複合原子力科学研究所

原子力安全研究グループ

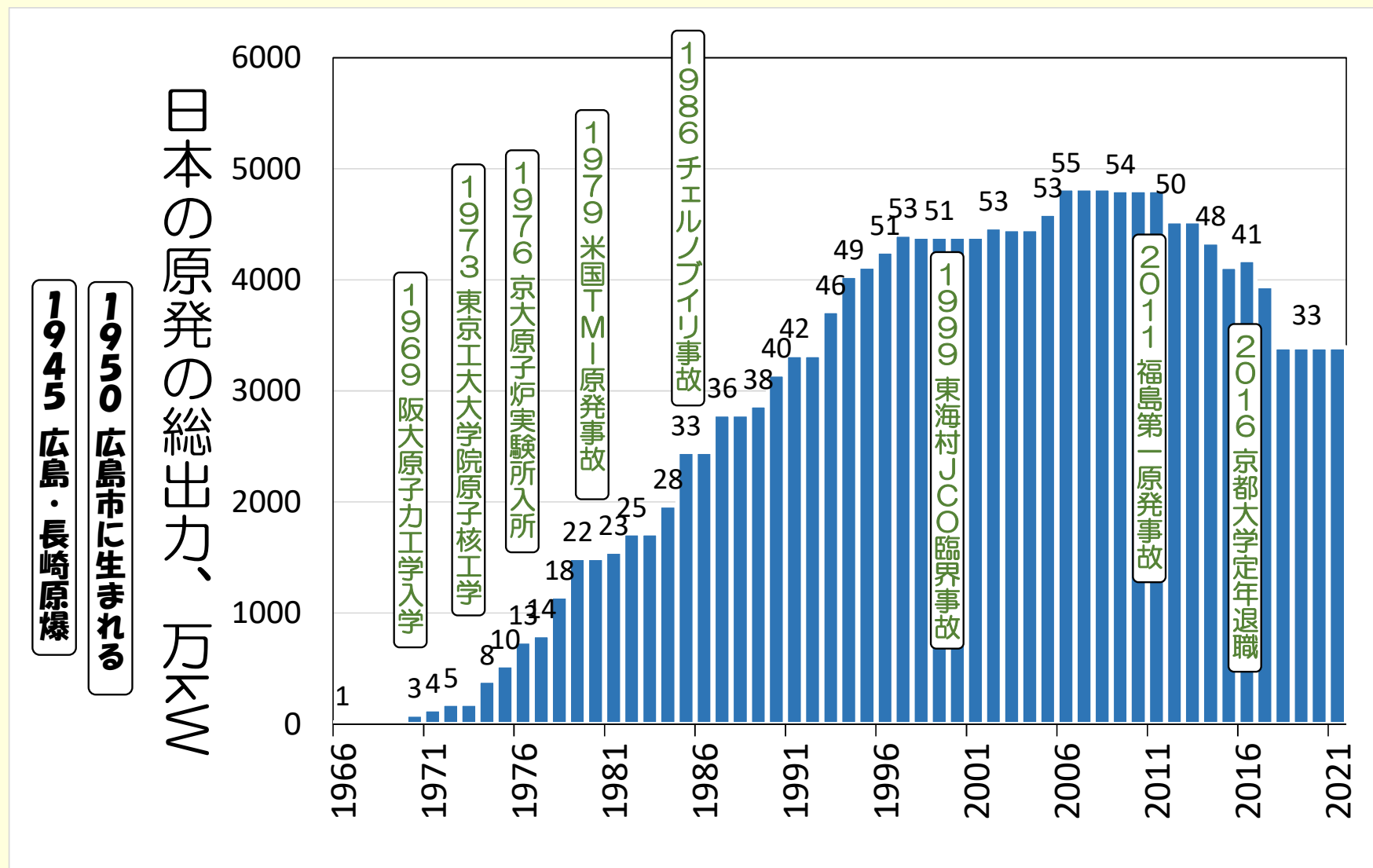
<http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NSRG/>

建設が始まって30年経っても
完成しない六ヶ所再処理工場



<自己紹介がてら>

広島で生まれて70年余り、原子力と付き合って50年余り



日本の原発の数と容量

大学に入った頃『2000年頃には、すべての原発は高速増殖炉になり、軽水炉はなくなる。21世紀半ばには核融合が主役になる』と教わった²

今日の話題

<前半：高レベル廃棄物・ガラス固化体問題>

- ガラス固化体の隔離期間8000年のトリック
- 高速炉で隔離期間300年のトリック
- 高速炉でMA燃焼のトリック

<後半：高速〔増殖〕炉を振り返る>

- 高速炉とは、高速増殖炉のはずだった．．．
- ことごとく失敗した高速増殖炉計画
- マボロシが踊っているような『革新炉』

< 「ガラス固化体」を調べたきっかけ >

2016年、名古屋の講演会で『ガラス固化体の隔離期間が最近 は8000年になっているが？』と聞かれて答えられなかった

核燃料サイクルの意義① 廃棄物の減容・有害度の低減

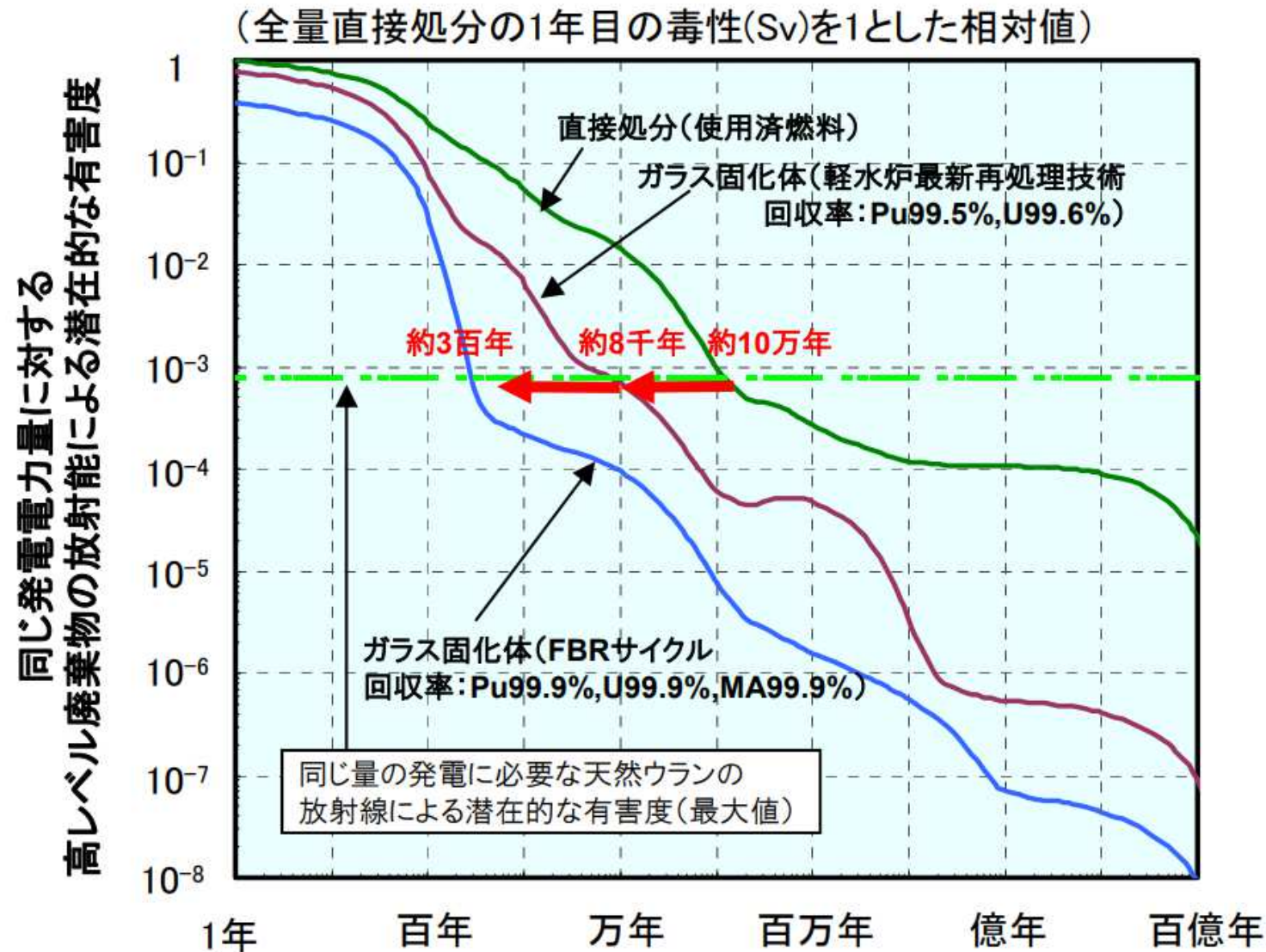
1. 軽水炉再処理により、高レベル放射性廃棄物の体積を約1/4に低減可能。また、放射能の有害度が天然ウラン並になるまでの期間を1/10以下にすることができる。
 2. 高速炉/高速増殖炉サイクルが実用化すれば、高レベル放射性廃棄物中に長期に残留する放射エネルギーを更に少なくし、発生エネルギーあたりの環境負荷を大幅に低減できる可能性。
- ※ 直接処分では、ウラン、プルトニウム、核分裂生成物等を全て含んだまま廃棄物となる。一方、再処理後のガラス固化体からは、ウラン、プルトニウムが除かれるため、放射能による有害度が低減される。
- ※ また、高速炉/高速増殖炉では、半減期の極めて長い核種を燃料として使用できるため、更に有害度の低減が可能となる。

比較項目		技術オプション	直接処分	再処理	
				軽水炉	高速炉
処分時の廃棄体イメージ					
発生体積比※1			1	約0.22	約0.15
潜在的有害度	天然ウラン並になるまでの期間※2		約10万年	約8千年	約300年
	1000年後の有害度※2		1	約0.12	約0.004
コスト※3	核燃料サイクル全体 (フロントエンド・バックエンド計)		1.00 ~ 1.02 円 / kWh	1.39 ~ 1.98 円 / kWh	試算なし ※高速炉用の第二再処理工場が必要
	処分費用		0.10 ~ 0.11 円 / kWh	0.04 ~ 0.08 円 / kWh	

2014年 総合資源エネルギー調査会 原子力小委員会 資料

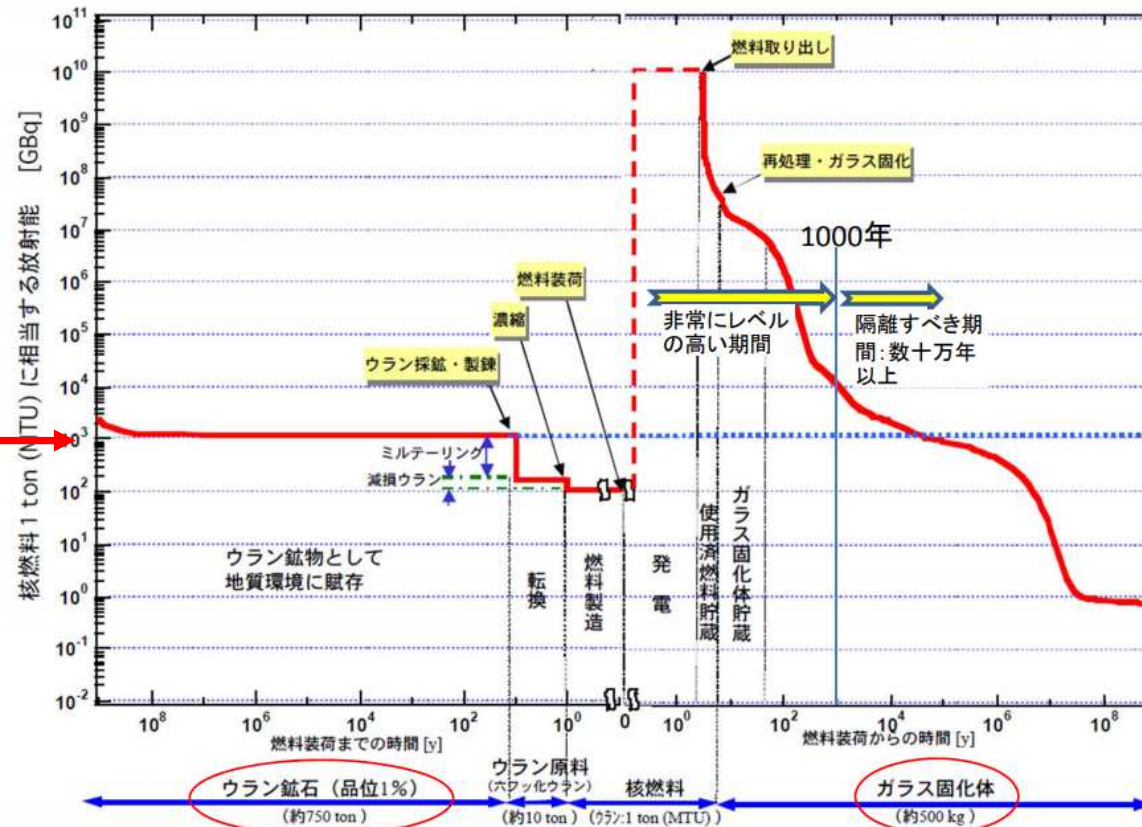
こんな図も出てきた

高速炉サイクルによる潜在的有害度の低減



以前はこんな感じだった 隔離期間は数十万年以上のはず

放射能の推移から眺めた高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)の特徴
(濃縮度4.5%の核燃料1MTU 相当)



$$1000\text{GBq} \div 750\text{ton} = 130\text{万Bq/kg}$$

福島原発事故
の最終処分場
での長期保管
は10万Bq/kg
以上

$$1000\text{GBq} \div 500\text{kg} = 20\text{億Bq/kg}$$

ガラス固化体の放射能は非常に長期間(数万年以上)高いレベルで残る
その間の人間社会の変化を予測することは困難
⇒人間による管理が失われても問題のない処分方法が必要

出典:「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性」—地層処分研究開発第2次取りまとめ— 総論 を編集

2012年1月 原子力委員会 新大綱策定会議 栃山資料

<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/sakutei/siryo/sakutei12/siryo1-1.pdf>

『数十万年以上→8000年』のトリック

ガラス固化体 1 本あたりの『Bq数から有害度指数』へ

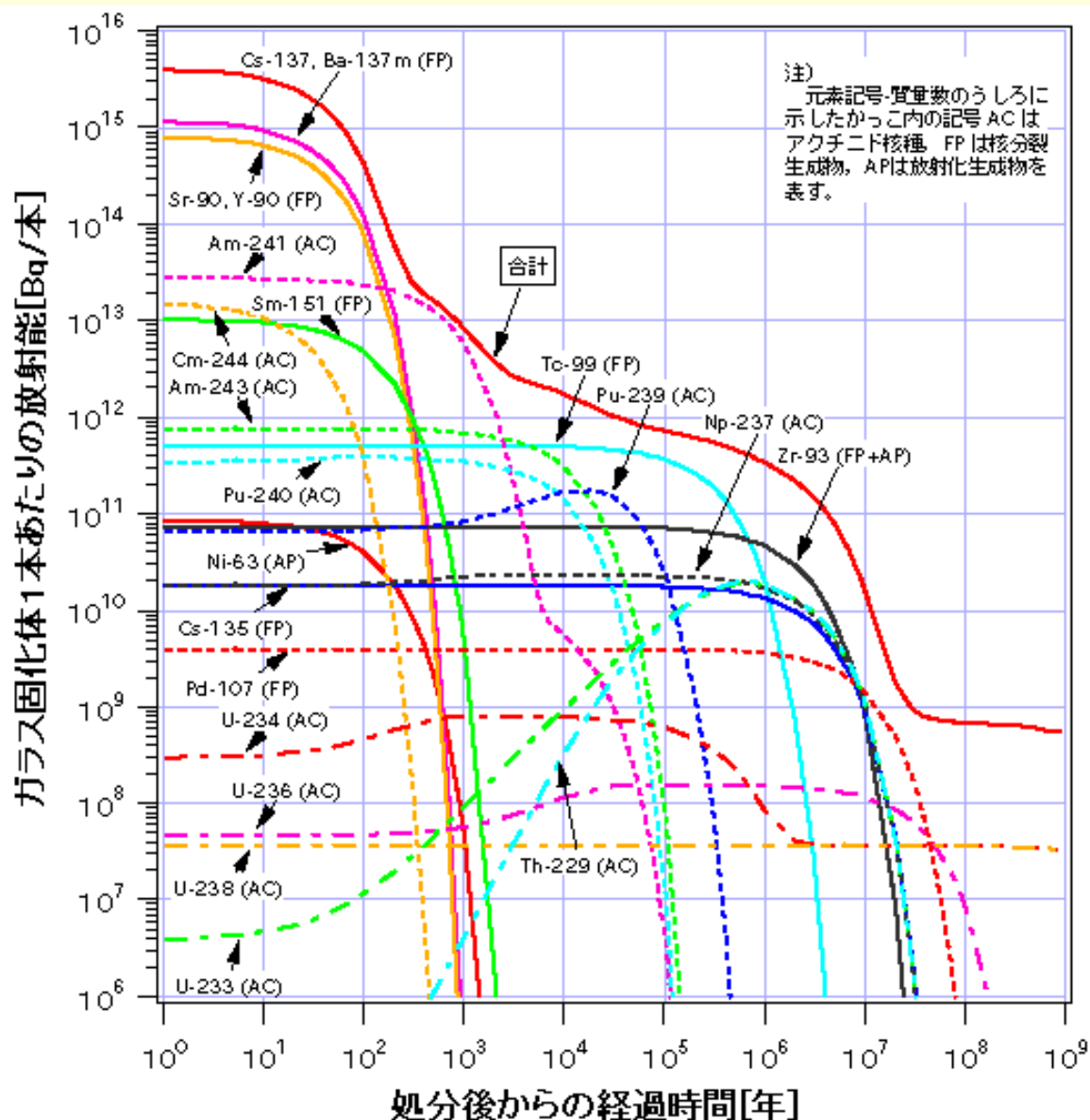


図1 国内再処理ガラス固化体の放射能の経時変化

https://atomica.jaea.go.jp/data/fig/fig_pict_05-01-01-03-01.html

●8000年～80万年で最も多いのは、半減期20万年のFP核種であるTc-99

●Bqに内部被曝換算係数 (Sv/Bq) を掛けて比較することにした

有害係数	Sv/Bq
Tc-99	6.4E-10
Am-241	2.0E-7
Am-243	2.0E-7
Pu-239	2.5E-7
Sr-90	3.1E-8
Cs-137	1.3E-8

Tc-99の相対的寄与は300分の1になった

『8000年→300年』のトリック

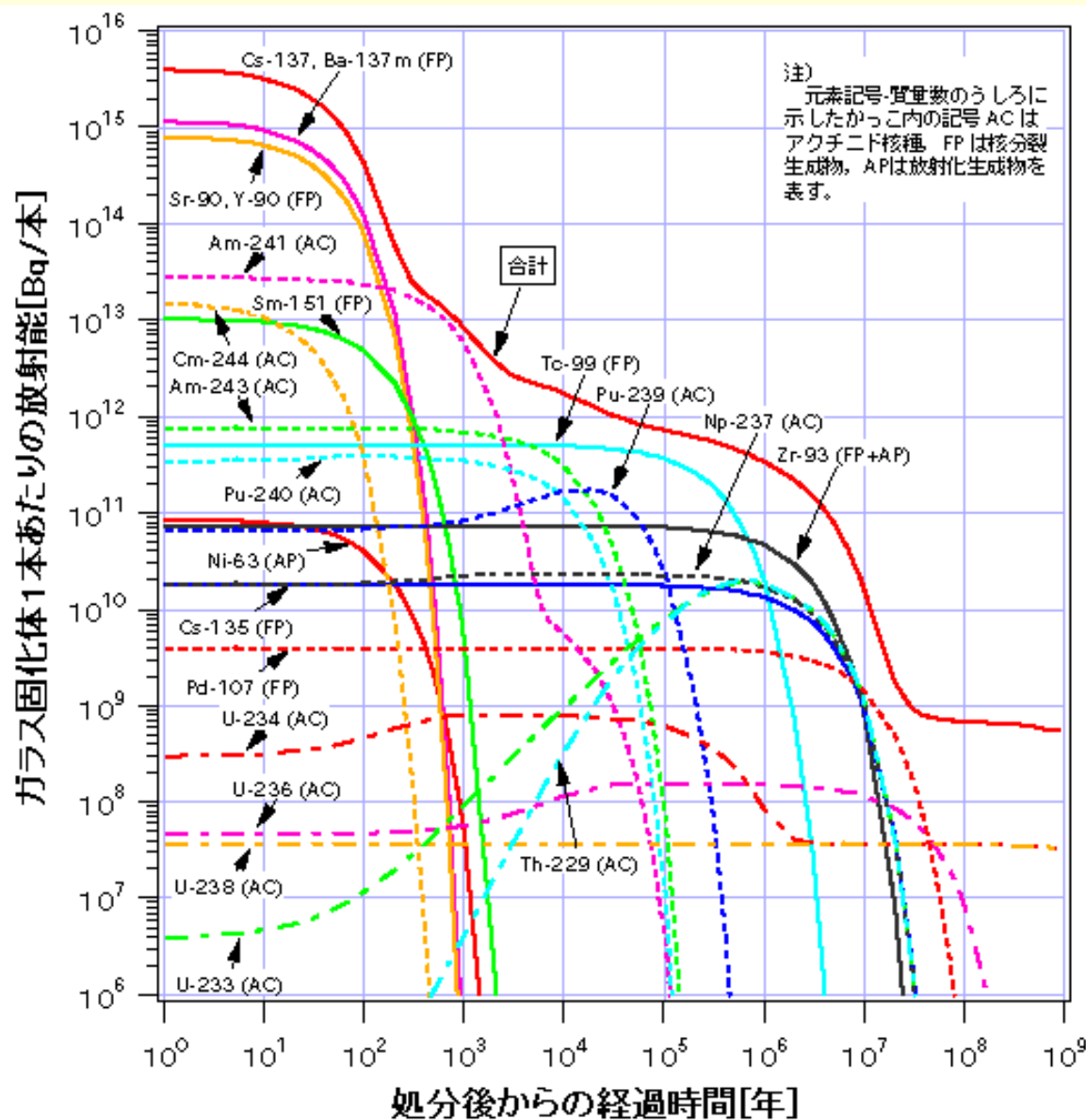


図1 国内再処理ガラス固化体の放射能の経時変化

● (Tc-99がなければ) 300年～2万年後
で最も多いのはAm-
241 (430年) とAm-
243 (7400年)

● 高レベル廃液から
MA (マイナーアクチ
ノイド) の99.9%を
回収する。

MA : Am241、Am243、
Np237、Cm244 etc.

マイナーアクチノイド (MA) とは

周期表：元素（原子）を軽い順に並べた表

1																	18
1 H	2																2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	*1	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	*2	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo

ウランは自然界に存在している
最も重たい元素。ウラン235の
原子核には、92個の陽子と
143個の中性子が含まれている。

*1 ランタノイド:	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
*2 アクチノイド:	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

- ◆ベータ崩壊では『中性子が電子を出して陽子に変身』し元素番号が1つ増える。
- ◆アルファ崩壊では『陽子2個と中性子2個の塊が飛び出て』元素番号は2つ減る。

使用済み燃料中の放射性核種の内訳

PWR 燃焼度 45GWd/tHM、5年冷却

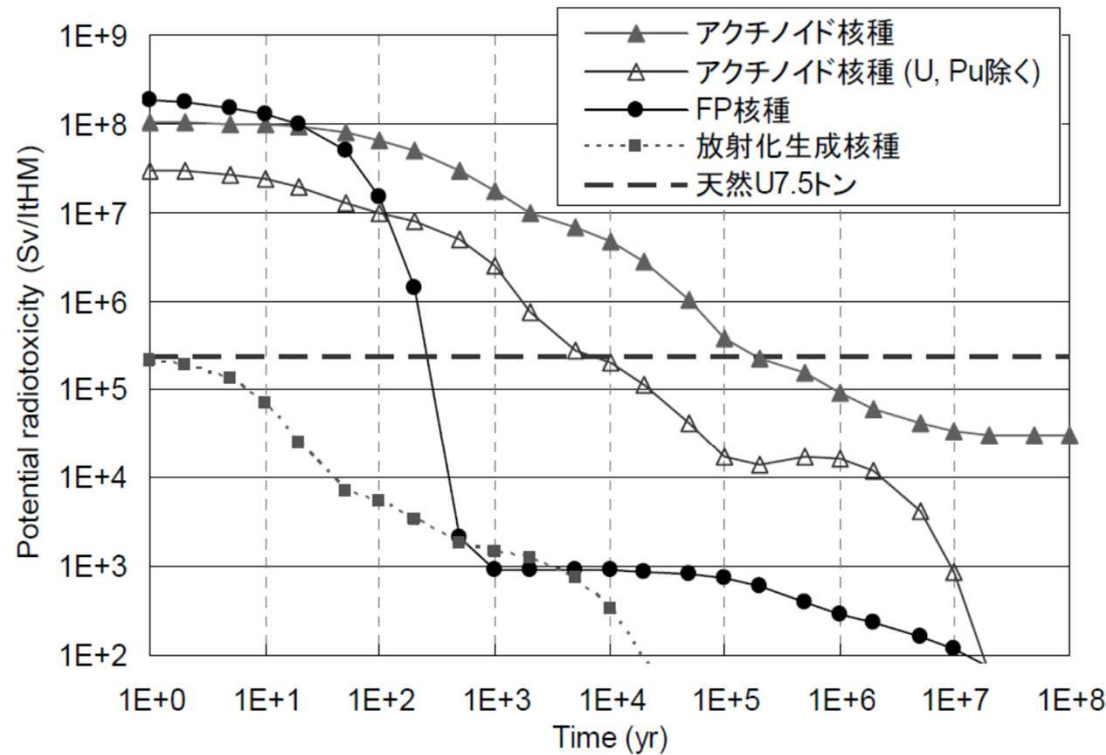
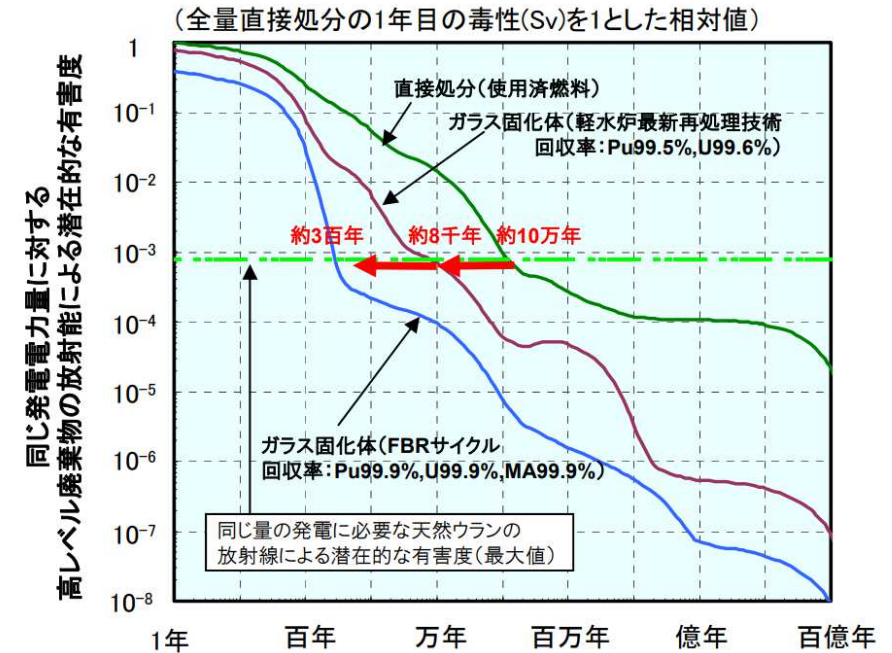


図 5 軽水炉燃料サイクルにおいて発生する放射性核種の潜在的放射性毒性
(新燃料 1 トンに規格化)



先に示したものと同一図

JAEA-Data/Code 2010-012

＜天然ウラン1.5トンと同じ危険度指数になるには＞

1. 使用済み燃料のままだと約10万年
2. プルトニウムとウランを回収すると約8000年
3. さらにMAを回収すると約300年

MAやPuの回収率99.9%は可能か？

1999年11月 「地層処分研究開発第2次取りまとめ 分冊3」 JNC TN1400 99-023

表 5.3.1-1 ガラス固化体インベントリの計算条件

			JNFL [1,2,3]	COGEMA [4]	BNFL [2]	TVF [5,6]	
燃焼条件	炉型	—	PWR	PWR	PWR	PWR	
	濃縮度	%	4.5	3.5	3.35	4.0	
	比出力	MW/MTU	38.0	30.0	27.1	35.0	
	燃焼度	MWD/MTU	45,000	33,000	33,000	28,000	
	運転日数	日	1184.21	1094.0	1217.71	800.0	
再処理条件	炉取出後の冷却期間	年	4.0	3.0	5.0	0.5	
	燃料中の核種の 移行率	U	%	0.422	0.15	0.116	0.60
		Pu	%	0.548	0.67	1.256	0.66
		H, C, Cl, I	%	0.0	0.0	0.0	0.0
		希ガス	%	0.0	0.0	0.0	0.0
		その他	%	100.0	100.0	100.0	0.0
	構造材の移行率	全核種	—	1.0/264.5	1.0/264.5	0.0	0.0
固化条件	再処理から固化までの冷却期間	年	0.0	1.0	1.0	5.0	
	固化体発生量	本/MTU	1.25	0.73	0.556	1.0	
	ウラン等価量	MTU/本	0.8	1.37	1.8	1.0	
固化後貯蔵	貯蔵期間	年	50	50	50	50	

[1] 日本原燃株式会社 (1992a) : 六ヶ所再処理・廃棄物事業所 再処理事業指定申請書。

[2] 日本原燃株式会社 (1992b) : 六ヶ所事業所 廃棄物管理事業許可申請書。

[3] 日本原燃株式会社 (1996) : 再処理施設における放射性核種の挙動 (平成8年4月)。

[4] 電気事業連合会 (1995) : COGEMAガラス固化体について。

[5] 動力炉・核燃料開発事業団 (1980) : 再処理施設設置承認申請書。

● これまでの知見からは、UやPuの回収率は99.5%といったところか。

● MAの回収技術は、これから開発するようだ。

● その昔 (1988～) MAや貴金属を回収するオメガ計画があったが。 . 11

『天然ウラン並み』と言われても 天然ウランの危険度もたっぷり大きい

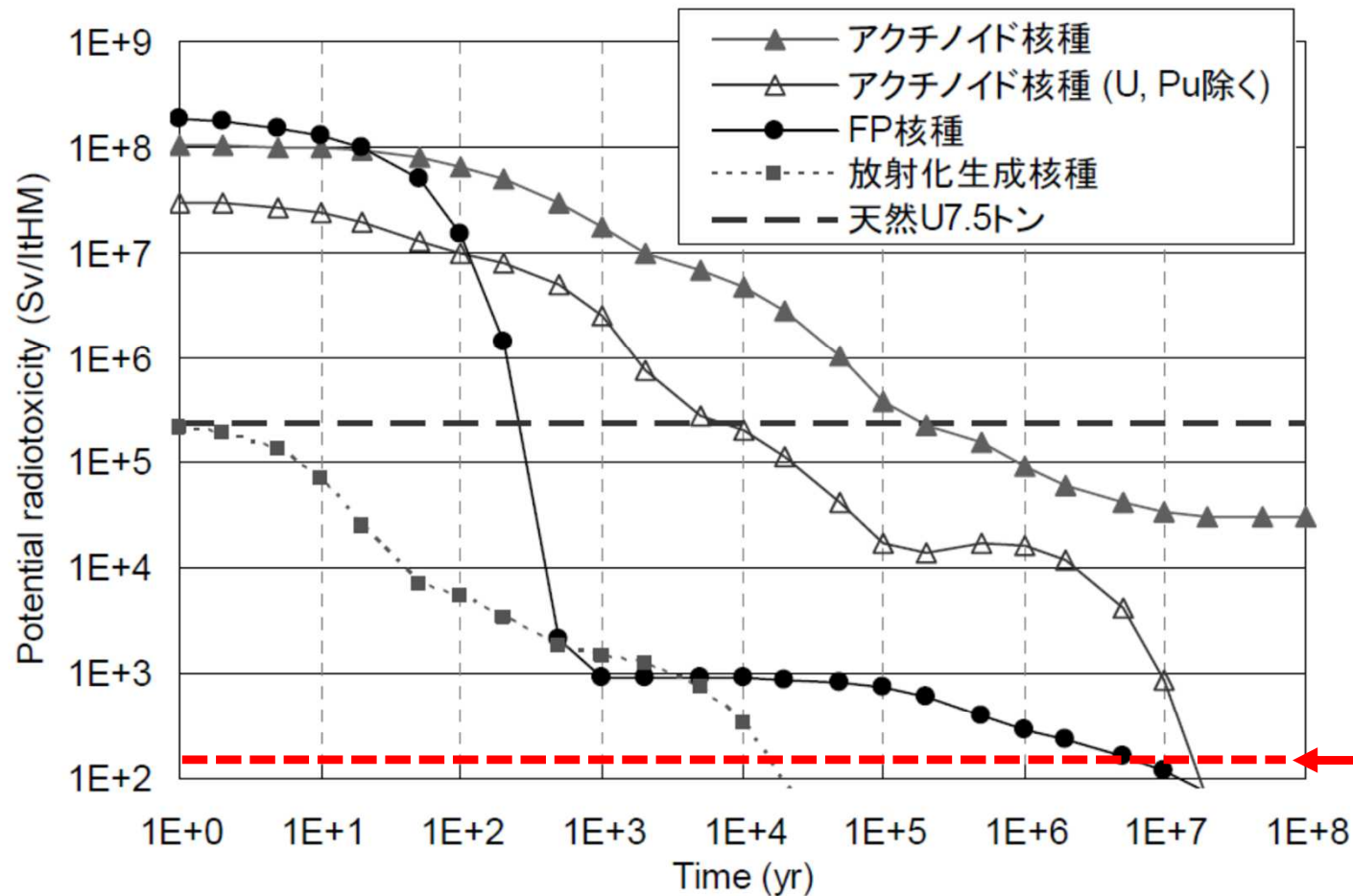


図 5 軽水炉燃料サイクルにおいて発生する放射性核種の潜在的放射性毒性
(新燃料 1 トンに規格化)

**1000万Bq/kg (10億Bq/トン) の
セシウム137汚染物の危険度：130Sv/ton**

『隔離期間は8000年や300年』 トリックやマジックのまとめ

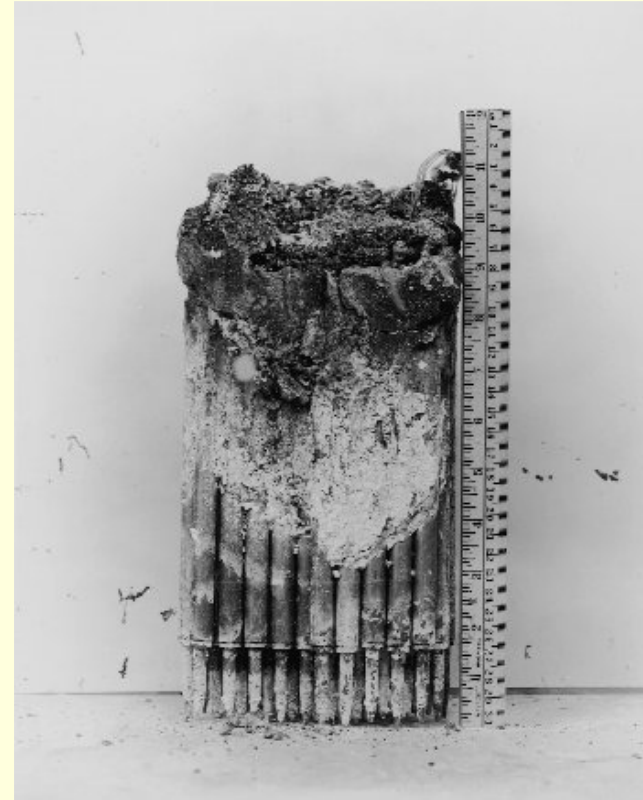
1. 重量の違いを無視して話を作っている：ウラン鉱石750トンとガラス固化体500kg.
2. 放射エネルギー（Bq）ではなく、危険度指数（Sv）で比較：Tc99の相対危険度が300分の1になった.
3. MAの回収技術は開発中：99.9%は実績値ではない.

世界最初の原子力発電は 高速増殖炉だった

EBR-1 : 濃縮U金属燃料、NaK冷却、電気出力200kW



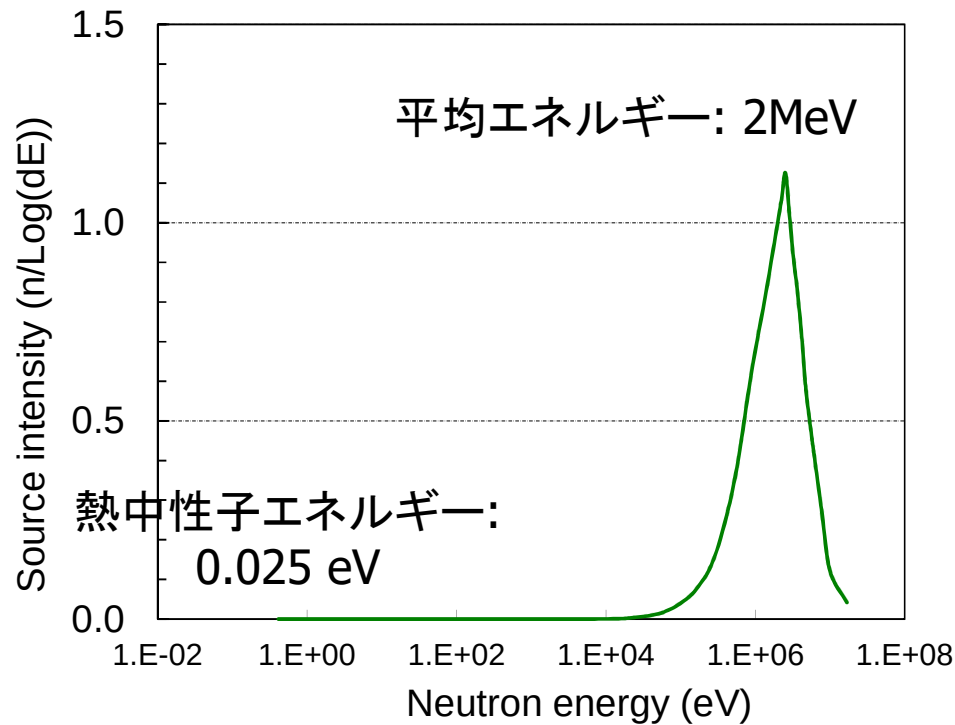
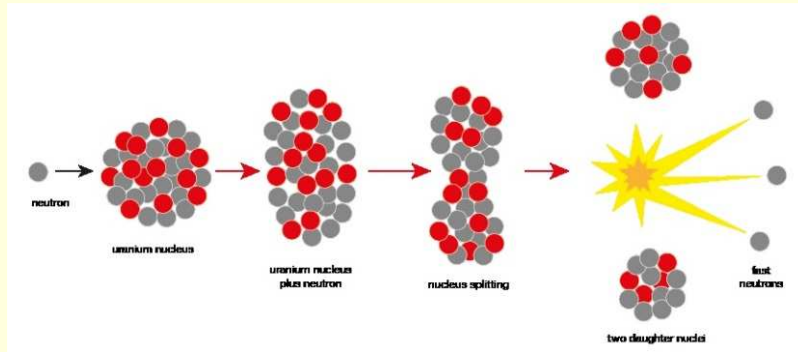
1951年12月20日
EBR-1が灯した4つの電球



1955年11月29日
炉心の部分熔融事故

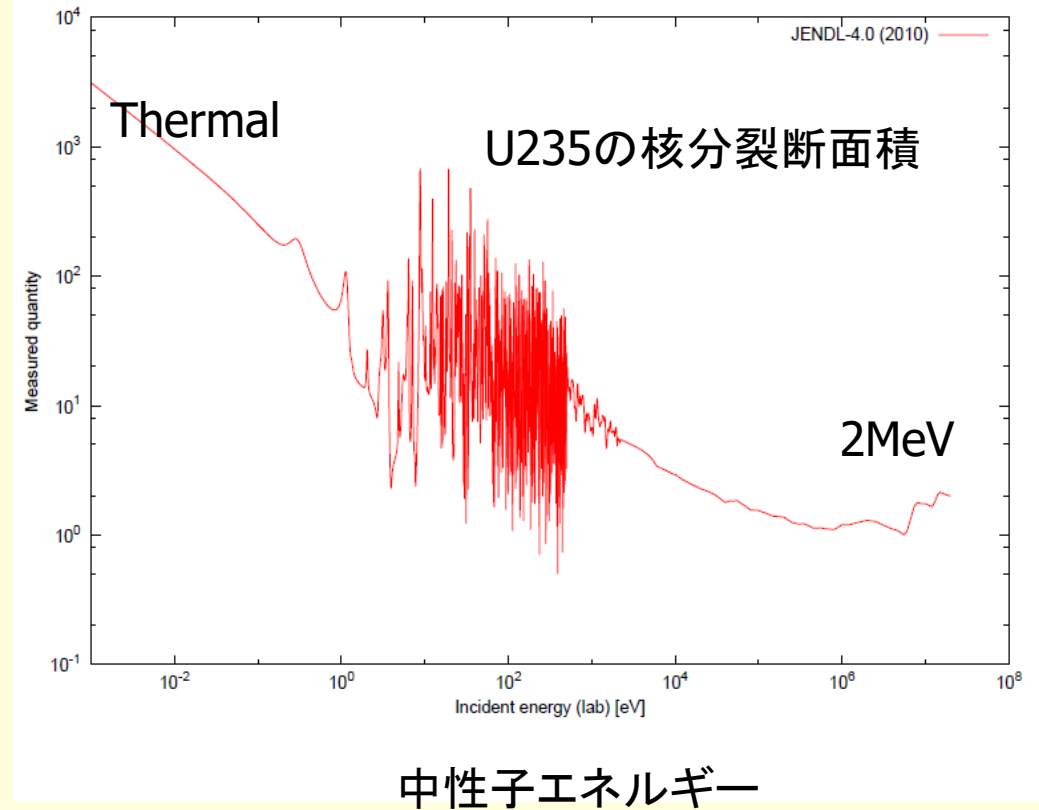
**増殖炉の目的は、ウランの99.3%であるウラン238を
プルトニウムに変えてエネルギー源として有効利用すること**

<Basicな話：その1> 中性子エネルギーと核分裂断面積



核分裂で発生する中性子のエネルギースペクトル

断面積の単位
1 barn = 10^{-24} cm²

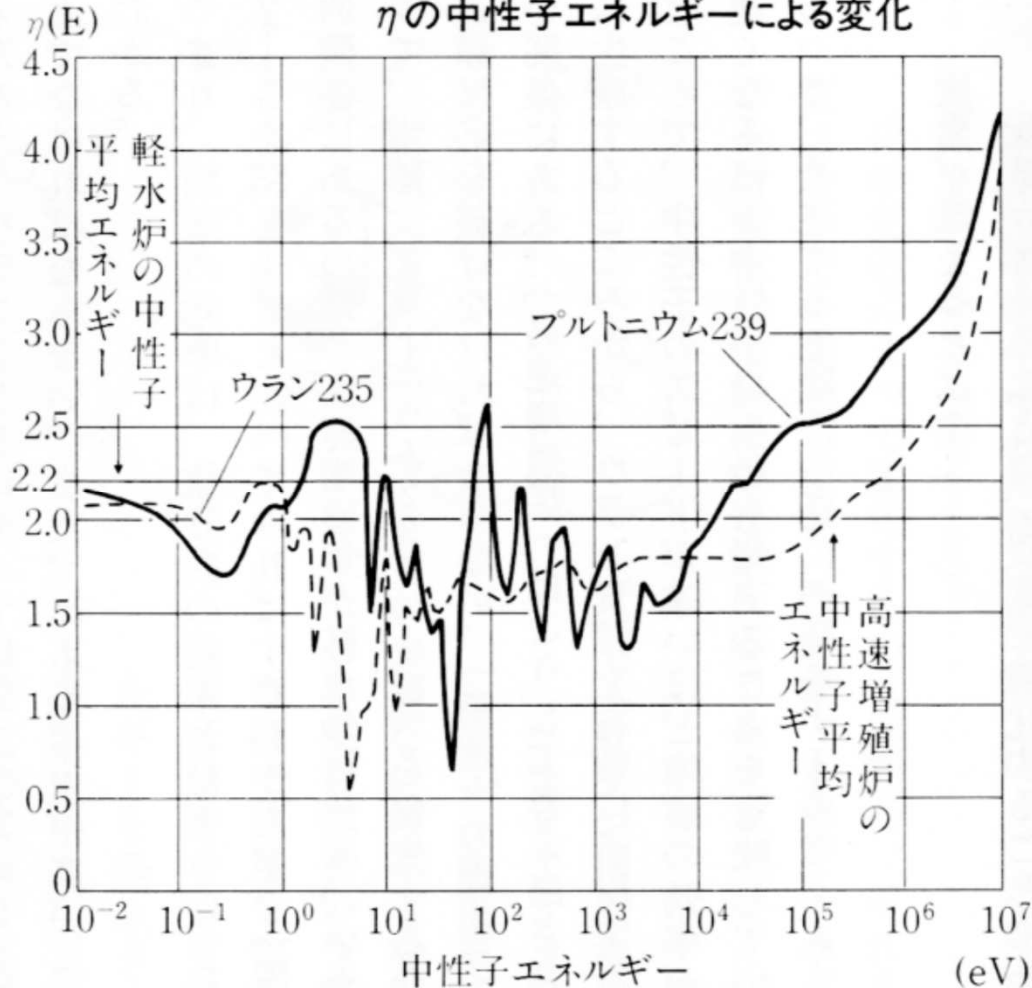


- 軽水炉では、中性子を減速して、熱中性子領域で連鎖反応を維持する。
- 高速炉では、中性子を減速させず、数100keV領域で連鎖反応を維持する。

<Basicな話：その2>

中性子捕獲反応当りに放出される中性子数： η 値

図2-5 ウラン235およびプルトニウム239の
 η の中性子エネルギーによる変化



J・J・ドゥデルスタット, L・J・ハミルトン, 成田・藤田共訳
『原子炉の理論と解析(上)』現代工学社, 1982より作成

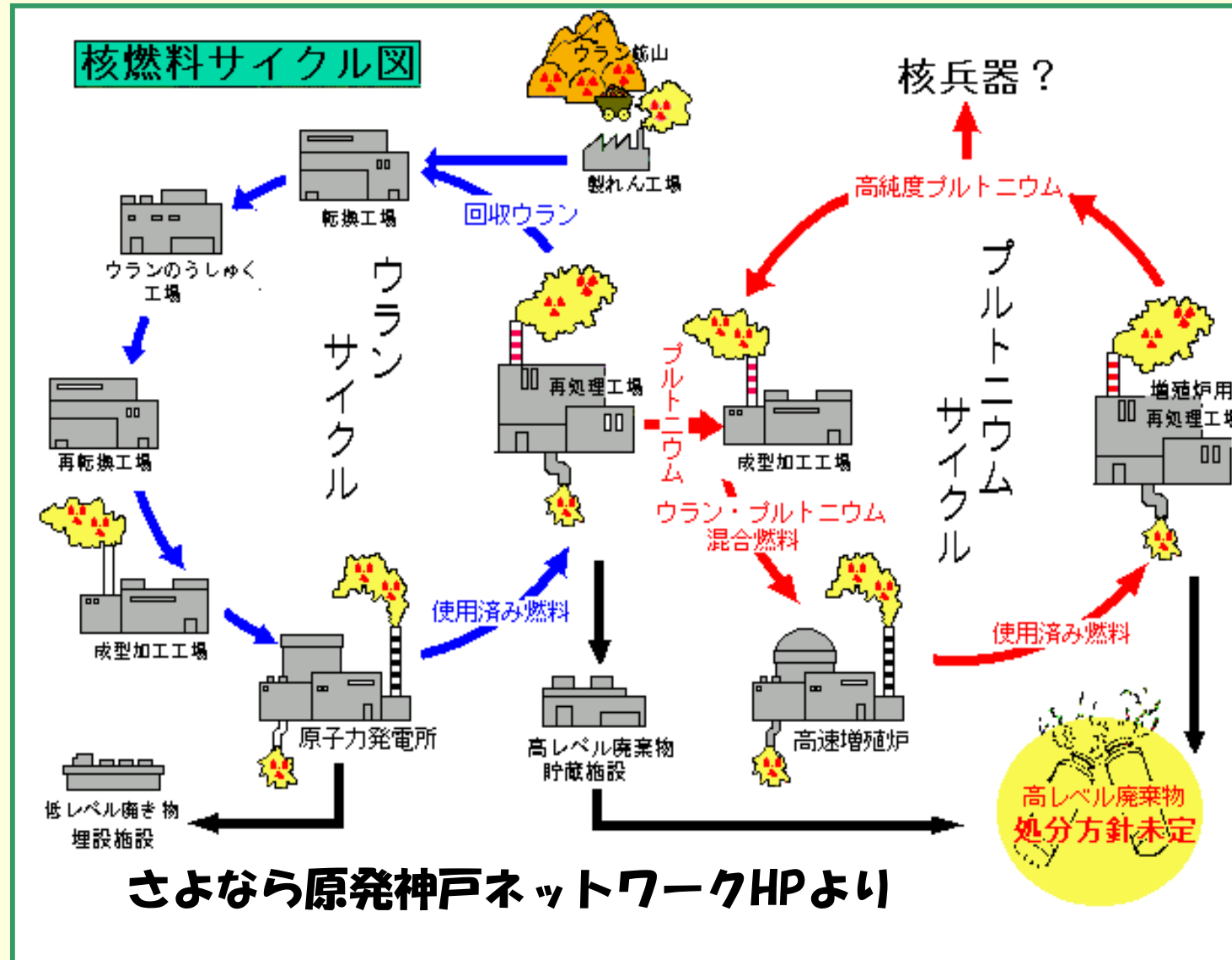
$$\eta = \frac{\sigma_{fis}}{\sigma_{cap} + \sigma_{fis}} \nu$$

ν : 核分裂当りに放出される中性子数

<増殖の条件>

- 核分裂連鎖反応の維持に中性子ひとつが必要.
- 増殖のためにはU238に吸収されるもうひとつ中性子が必要.
- 漏れたい構造材に吸収される分を考えると『増殖には $\eta > 2.5$ 』が必要.

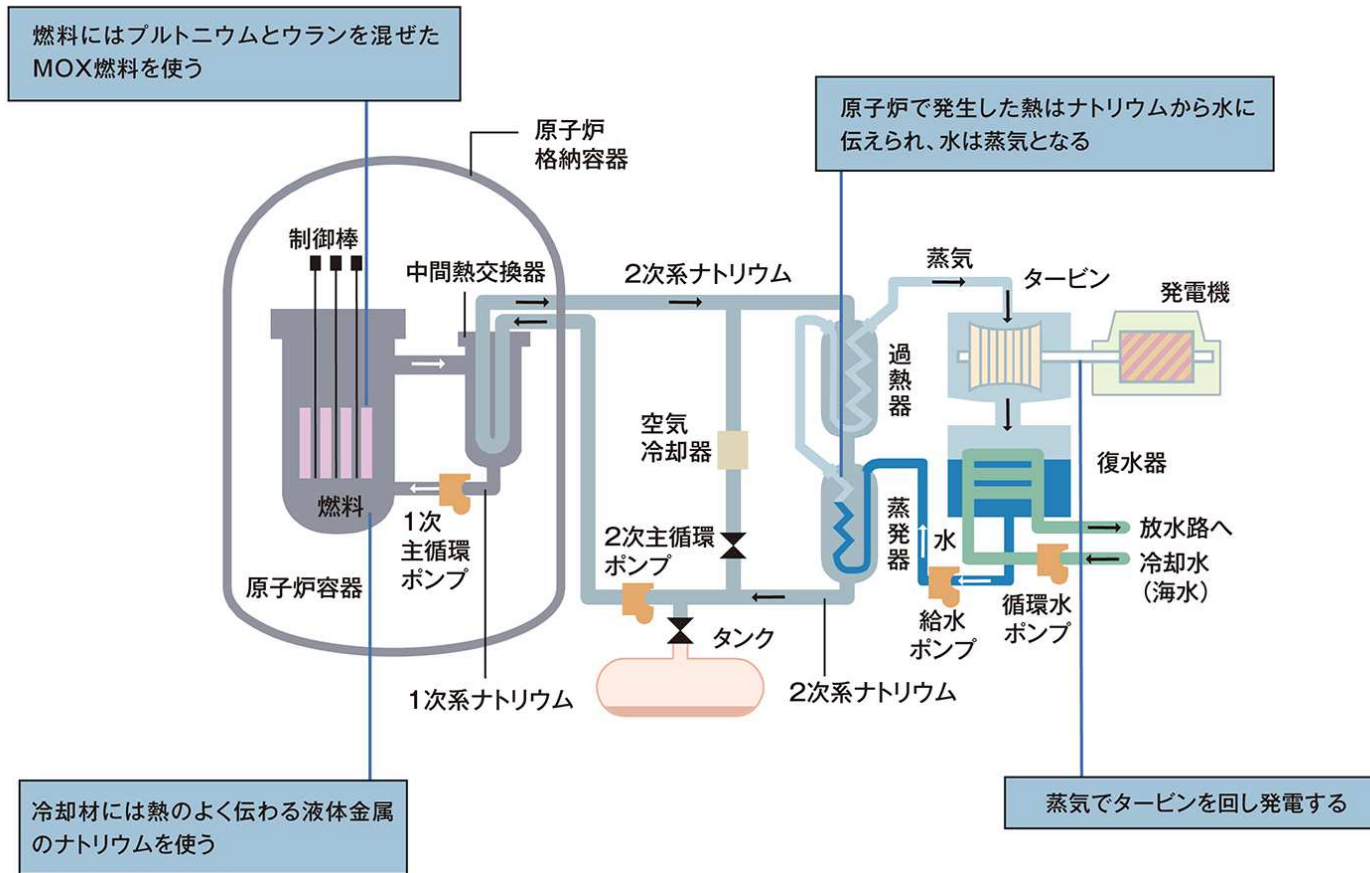
核燃料サイクル



核燃料サイクルの要は、使用済み燃料からプルトニウム取り出す『再処理工場』とプルトニウムを燃やした以上に生み出す『高速増殖炉』だった

もんじゅの仕組み

電気出力28万kW



1985年10月 着工

1994年4月 臨界

1995年8月 初発電

1995年12月 Na漏洩事故

2003年1月 名古屋高裁金沢支部の設置許可無効判決

2005年5月 最高裁逆転判決

2007年5月 改造工事終了

2010年5月 運転再開

2010年8月 燃料取扱機器炉心落下事故

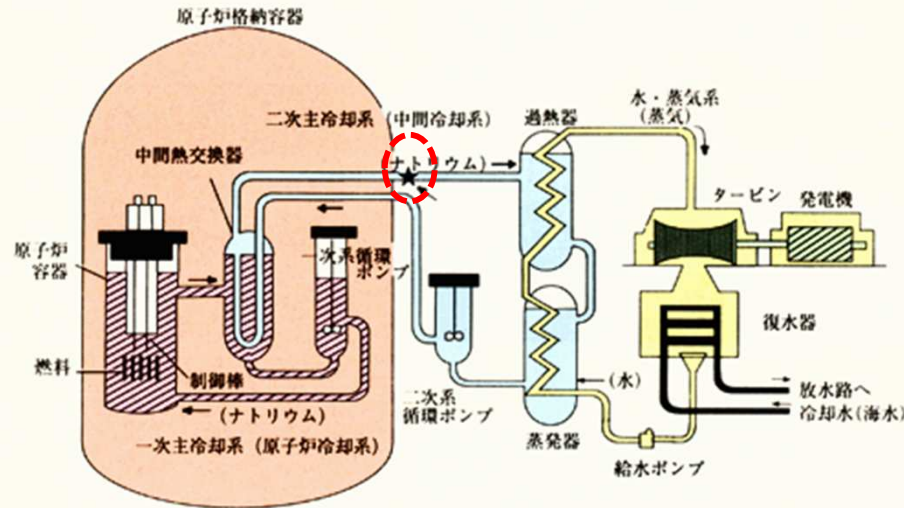
2012年11月 約1万件の点検漏れ発覚

2016年12月 廃炉決定

電事連HPより

かかった費用は1兆円を越えるそうだ
廃炉費用も4000億円とか...

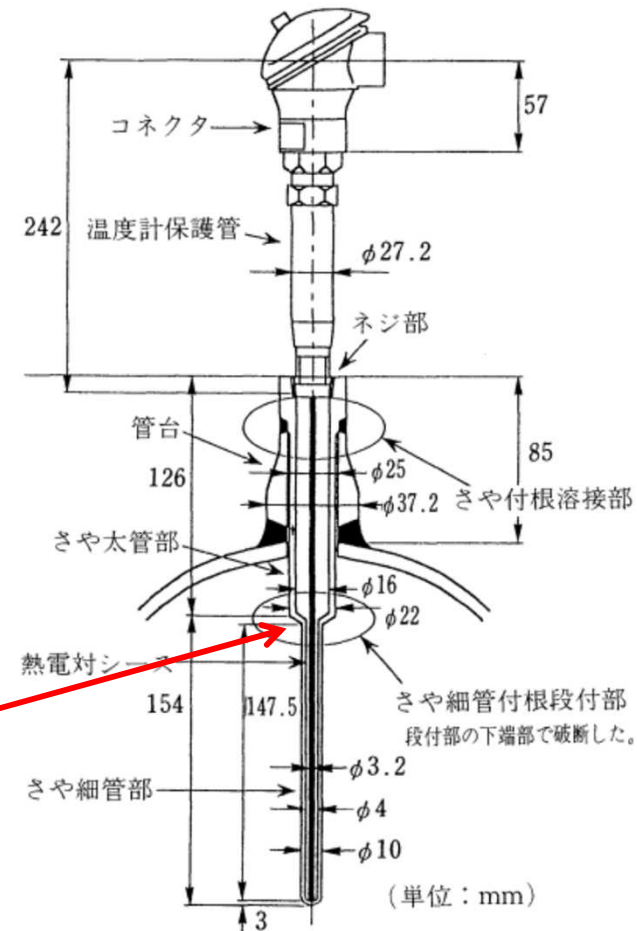
もんじゅ火災事故で覚えていること



**2次系Na配管熱電対温度計
のさや管が折れた**

図1-1-1 高速増殖原型炉「もんじゅ」の仕組み

★：漏えい箇所



<あるNHK番組の記憶>



さや管はステンレス丸棒からの旋盤加工で（たぶん大田区の）町工場に依頼した

◇町工場のオッチャン「角に丸みを入れないと振動で折れるよ」

◇動燃担当者「設計図通りに作って下さい」

世界の主な高速増殖炉

	原子炉名	電気出力 kW	開始	停止 廃止	備考
日本	もんじゅ	28万	1994	2016	1995 Naもれ事故
米国	フェルミ	6.1万	1963	1972	1966炉心溶融事故
	CRBR	38万	—	—	1983計画中止
フランス	フェニックス	25万	1973	2010	1989出力異常
	S・フェニックス	124万	1985	1998	1987燃料庫Naもれ
英国	PFR	27.2万	1974	1994	1987蒸気発生器破断
ドイツ	SNR-300	31.2万	—	—	1991完成後中止
旧ソ連	BN-350	13.5万	1973	1998	多数回のNaもれ事故
	BN-600	60万	1981		運転中
	BN-800	88万	2015		運転中

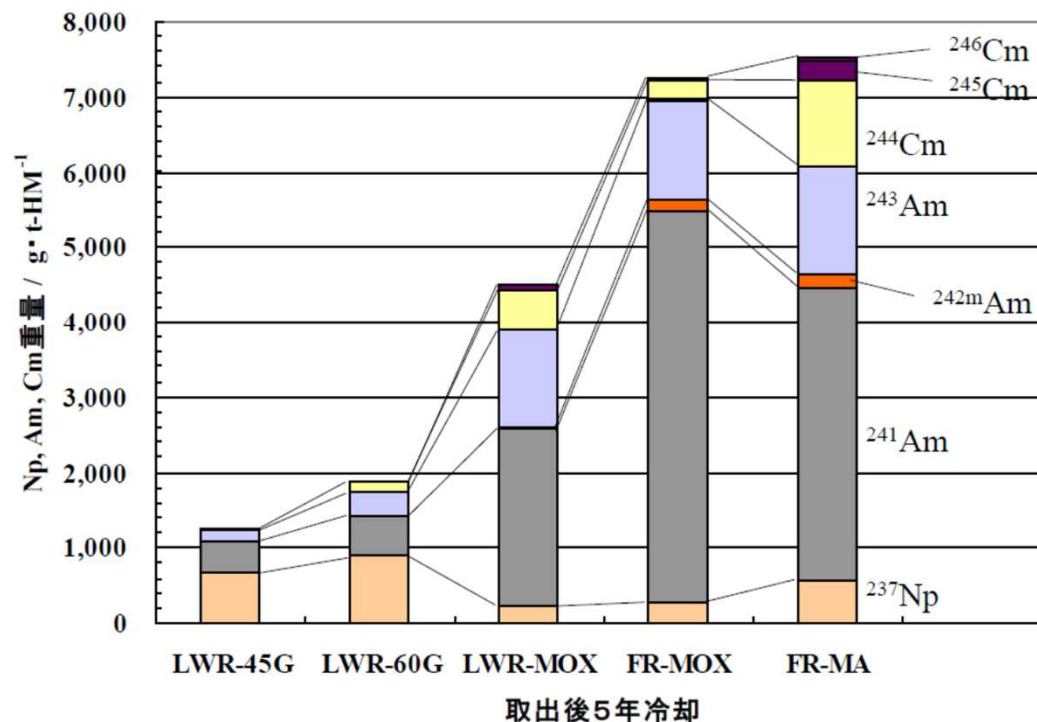
液体ナトリウムを取扱う大変さ

- 化学的な反応性が大きい
 - 水に接触すると爆発的に反応
 - 空気に触れると燃え出す
 - コンクリートと激しく反応
- 不透明なので炉心の目視ができない
- 固まらないよう停止中も暖めておく必要
 - 停止していてもずっと1万kWの電気が必要
- 一次系は中性子放射化で近づけない
 - Na^{23} (n,g) Na^{24} : 半減期15時間
 - Na^{23} (n,2n) Na^{22} : 半減期2.6年

これからの高速炉は「高レベル廃棄物減容」や「MA消滅処理」で活躍するんだとか...

- MA消滅処理をするには新たな再処理工場が必要
- 高速炉で、ホントにMAが消滅するの？

使用済み燃料中のマイナーアクチノイドの重量組成



2018/8/10

経産省 第12回高速炉開発会議
戦略WG 資料

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/kosokuro_kaihatsu/kosokuro_kaihatsu_wg/pdf/012_02_00.pdf

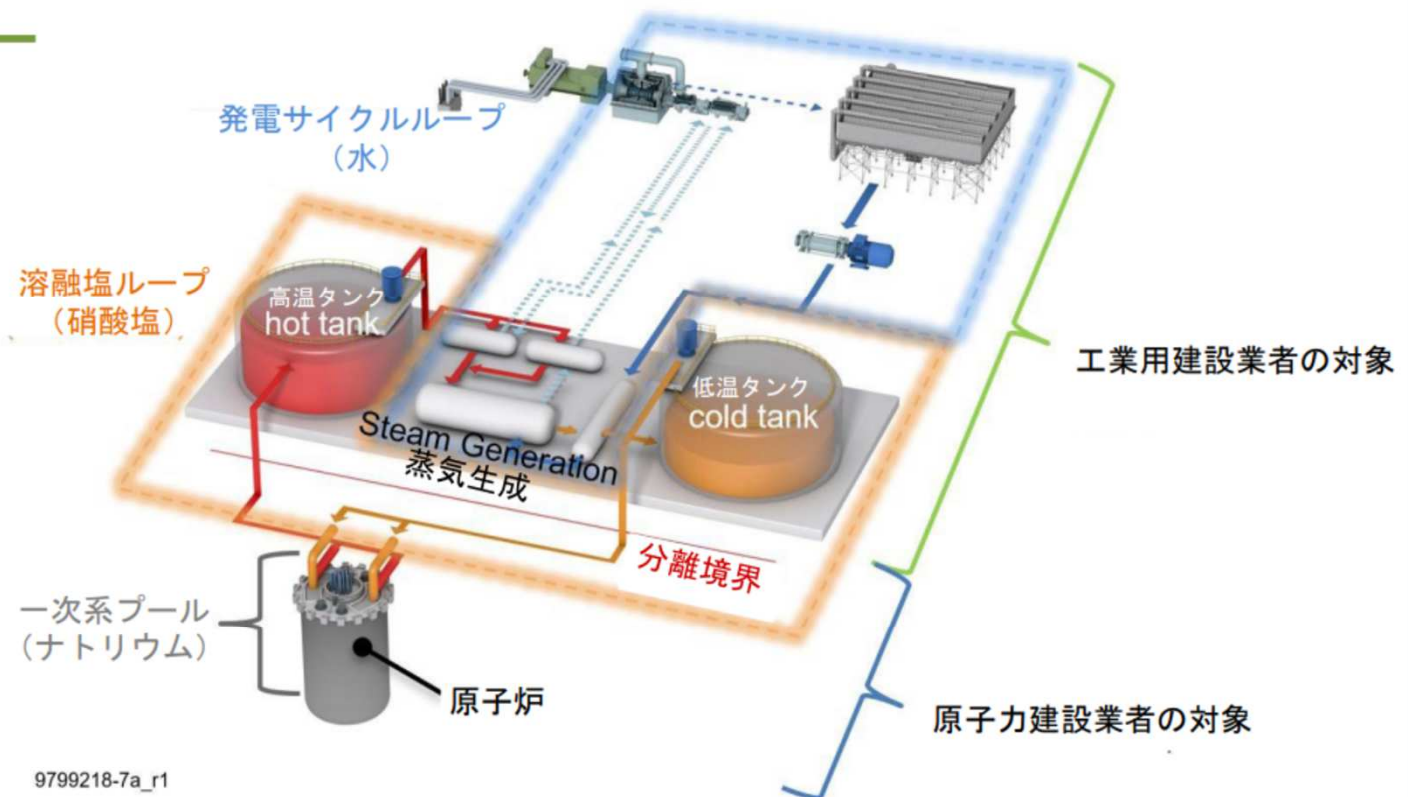
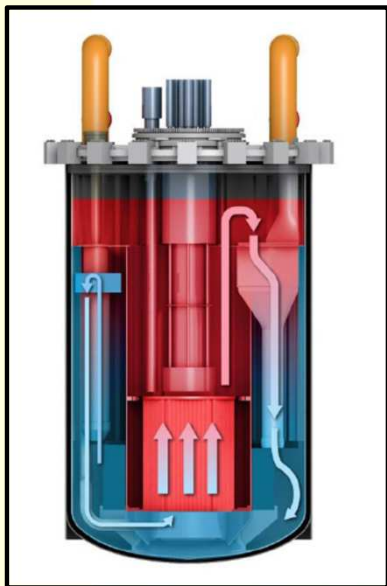
高燃焼度、MOX燃料使用により高次化が進む(MA量は増加する)

MOXは最初からPuが入っているので、MAの生成量が大きい！

MA消滅処理の目的だけなら、軽水炉燃料に混ぜればいい！

マボロシが踊っているような革新炉(1) Terra Powerの高速炉

統合エネルギー システム (IES)



SUBJECT TO DOE COOPERATIVE AGREEMENT N-ON-E D00E09054
Copyright© 2022 TerraPower, LLC. All Rights Reserved.

6

NATRIUM

TerraPower

6

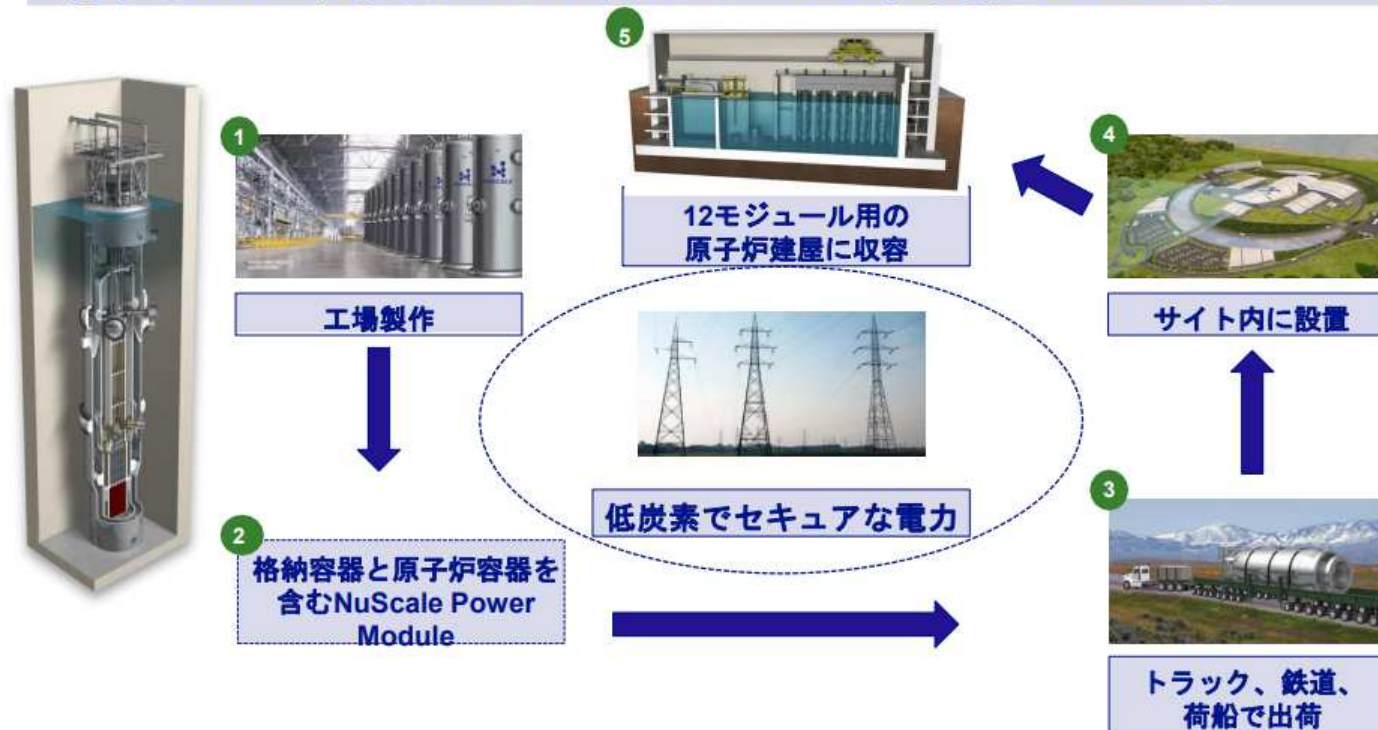
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/kakushinro_wg/pdf/002_04_00.pdf

経産省 革新炉WGのHPで、TerraPower幹部プレゼン(22/5/19)のビデオを眺めたが、燃料やら構造やら原子炉の基本仕様が全く分からなかった。

マボロシが踊っているような革新炉(2) NuScaleのSMR

建設・運転の新しいアプローチ

NuScaleは、NPMユニットを自社でモジュール製造してサイトに出荷することで、原子力のサプライチェーンに革命を起こしている



https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/kakushinro_wg/pdf/002_06_00.pdf

経産省 革新炉WGのHPで、NuScale幹部のプレゼン(22/5/19)のビデオを眺めた。
以前から「使用済みのモジュールをどうするのか」知りたかったが言及はなかった。

マボロシが踊っているような革新炉(3)

核融合も“革新炉”だそうで驚いた

実燃料で持続的な燃焼反応の実証
熱出力 50万kW, エネルギー増倍率10(外部加熱5万kW)

約30m

日、欧、米、ロ、印、中、韓が
共同で建設中

サイト: フランス
サン・ポール・レ・デュランス市

ITER機構(国際機関)を2007
年に設立
各国国内機関(実施機関)が
構成機器を分担して製作
QSTは日本の国内機関

建設開始 2007年
初プラズマ運転 2025年
実燃料運転 2035年

ITERプロジェクト

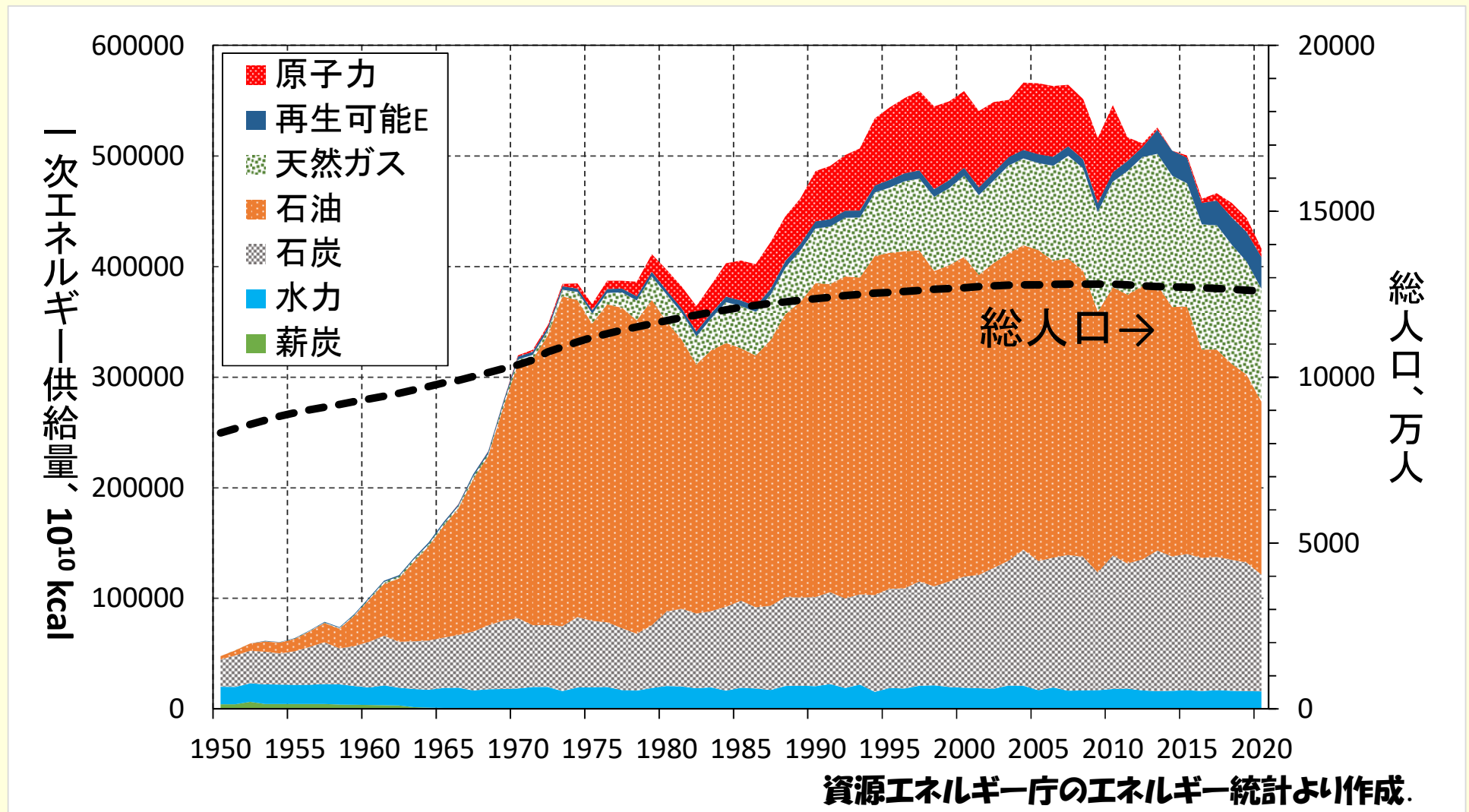
ITER 2016 EDITION
TOKAMAK
& PLANT SYSTEMS

ビゴ機構長
多田
副機構長

[https://www.fusion.qst.go.jp/fusion-energy-forum/topics/topics2021/zentai2021/KURIHARA.Kenich\(Lecture\).pdf](https://www.fusion.qst.go.jp/fusion-energy-forum/topics/topics2021/zentai2021/KURIHARA.Kenich(Lecture).pdf)

昨年秋の自民党総裁選で、高市早苗さんが『これからのエネルギーは小型核融合炉』と演説していた事情がなんとか理解できた。

日本のエネルギー需要の変遷



**事故が起きたら周り30kmで人が住めなくなるようなものまで
使って電気を作る必要があるのか？
何がホントに大事なのかももう一度考えてみよう！**