

ガラス固化体の隔離期間は8000年???についてのメモ

9月2日に名古屋で講演会を行ったとき、高レベル廃棄物地層処分の問題をやっている参加者から、『ご存知と思うが、地層処分によるガラス固化体の隔離期間が最近では8000年になっているが...』という質問を受けた。地層処分の隔離期間は20万年から100万年というのが、私の頭の中の常識だったので、『8000年のことは知りません』と答えた。

地層処分の話は、『20万年後に放射能が漏れて、近くに住んでいる人の被曝量が毎年?? μ Svになります』といった感じで、どうにもリアリティーがもてないので、ガラス固化体や地層処分についてこれまでマジメに調べたことはない。でも、『20万年から100万年』→『8000年』というのは、原子力屋として“説明責任”があるような気がするのでカラクリを調べてみた。

☆ 『8000年』の出处

まずは、“高レベル廃棄物”+“地層処分”でネット検索するとそれらしい資料がワンサカ出てきた。以下は、発表者「資源エネルギー庁」の平成25年のパワポの中の1枚である。

図1



※1 数字は原子力機構概算例。直接処分時のキャニスタを1としたときの相対値を示す。
 ※2 出典：原子力政策大綱。上欄は10Wtを発電するために必要な天然ウラン量の潜在的有害度と等しくなる期間を示す。下欄は直接処分時を1としたときの相対値を示す。
 ※3 原子力委員会試算(2011年11月)(割引率3%のケース) 軽水炉再処理については、使用済燃料を貯蔵しつつ再処理していく現状を考慮したモデルと、次々と再処理していくモデルで計算。 8

http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denkijigyoyou/houshasei_haikibutsu/pdf/25_01_s01_00.pdf

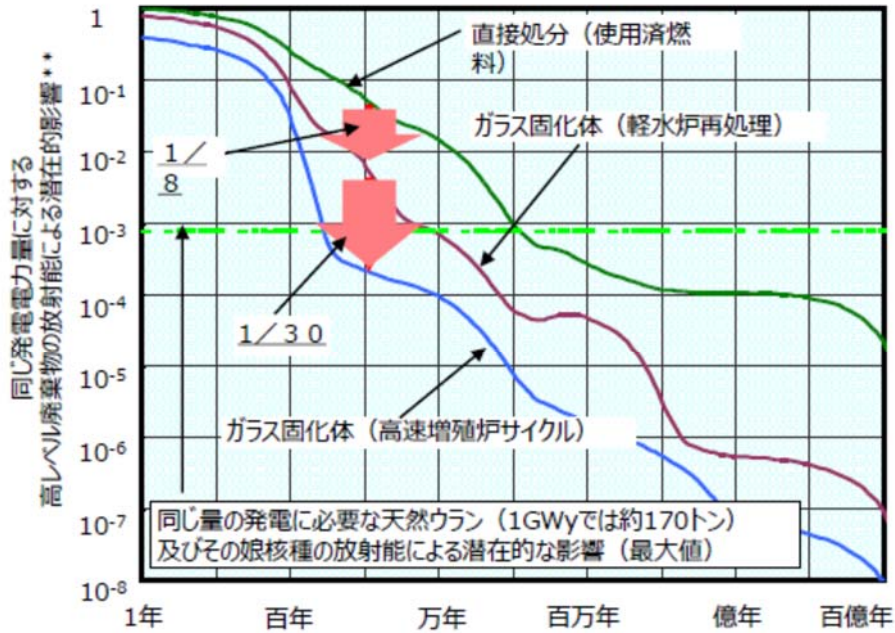
たしかに、「直接処分：約10万年」、「軽水炉ガラス固化体：約8000年」となっている。さらにもものすごいのは「高速炉ガラス固化体：約300年」である。300年といえば、低レベル廃棄物ドラム缶埋設処理の管理期間が、たしか300年だった。『地層処分なんて、いらんじゃん!』とってしまう。

- 注意その①：10万年、8000年、300年というのは『隔離期間』ではなくて、『潜在的有害度が天然ウラン並みになるまでの期間』となっている。

私の頭にある『ウラン鉱石並み』ではなさそうである。

同じパワポに、潜在的有害度の経年変化について、以下のような図があった。ガラス固化体の危険度が、緑の線（天然ウラン及びその娘核種）まで減少するのに、直接処分は10万年、軽水炉再処理ガラス固化体は8000年、高速炉再処理固化体は300年、ということらしい。

図 2

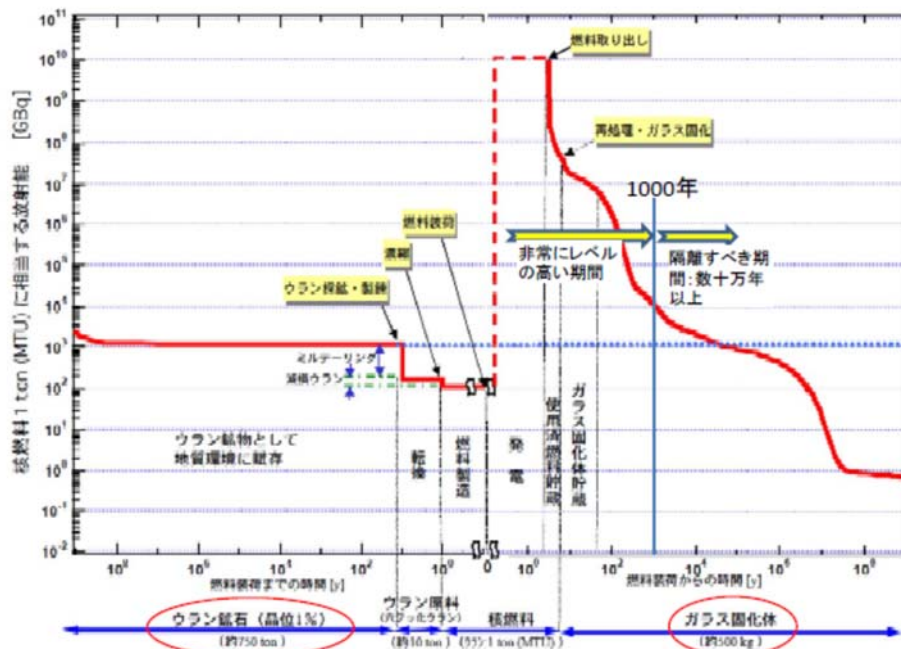


** 高レベル放射性廃棄物と人間との間の障壁は考慮されておらず、高レベル放射性廃棄物の実際の危険性ではなく、潜在的な有害度を示している。使用済燃料の1年目の潜在的影響を1とした相対値。

- 注意その②：“緑の線”は、もともとの危険性（縦軸1）に比べ、約1000分の1のところを引いてある。ガラス固化体はもともととんでもなくおっかないものなのに、その1000分の1で大したことはなくなる、となっているのも変である。

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)

図 3



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

<http://www.aec.go.jp/fjicst/NC/tyoki/sakutei/siryu/sakutei12/siryu1-1.pdf>

ネットを調べると、ガラス固化体の潜在的危険度について、図3もよく出てきた。図3をじっと眺めると、『隔離すべき期間：数十万年以上』と注が入っている。

放射能の減衰の様子も図2と図3で異なる。図3の縦軸単位は、核燃料1トンに相当する放射能量(Bq)で、図2では、潜在的な有害度の相対値になっている。図2では、軽水炉ガラス固化体の危険度が天然ウランと同等になるのに約8000年であるが、図3では数万年と微妙に違っている。

☆ 『20万～100万年』→『8000年』のカラクリ

◆カラクリ①：危険度比較対象の目くらまし

今中の頭の中は、『ガラス固化体の危険度がウラン鉱石並みになるのに20万から100万年』であった。図1や図2ではわかりにくいですが、図3を眺めて分かったのは、最近の比較対象は、“ウラン鉱石並み”ではなく、“1トンのウラン燃料を製造するために掘り出したウラン鉱石が持っていた危険度(放射能量)』である。図3に従うなら、品位1%のウラン鉱石750トン分だそうである。天然ウランとその娘核種7.5トンの放射能量を計算してみると 1.05×10^{12} Bq(ウラン系列： 1.02×10^{12} 、アクチニウム系列： 3.5×10^{10})となり、図3の赤線と一致した。(トリウム系列はどう扱っているんだろう?? とりあえず無視。)ウラン鉱石1kg当りにすると $1.05 \times 10^{12} / 750 / 1000 = 140$ 万Bq/kgとなる。これがどれくらいのものかいうと、福島第1原発周辺に予定されている中間貯蔵施設では、10万Bq/kgを越える汚染物は、特別扱いで保管されることになっている。天然のウラン鉱石並みといっても大変な放射能濃度である。

図3のカラクリのミソは、750トンというウラン鉱石ひと山分の放射能量とウラン燃料1トン(ガラス固化体1.25本)分の放射能量とを比較していることである。軽水炉使用済み燃料を1トン処理すると、ガラス固化体が500kgになるそうなので、数万年たって、ガラス固化体の放射能が“天然ウラン並み”になったときの重さあたりの放射能量は、 $10^{12} \text{Bq} / 500,000 \text{g} = 200$ 万Bq/g=20億Bq/kgである。この濃度がどの程度のものか、デカすぎて私には見当がつかない。図3を作った(学者の)栃山さんが『隔離すべき期間：数十万年以上』と注釈した所以であろう。

図4は、ガラス固化体中の放射能の内訳の推移である。黒の点線は、今中が加えた“天然ウラン相当”で、ガラス固化体合計(赤線)との交点は約5万年である。交差する時点で固化体の中で一番多い核種が、核分裂生成物であるTc-99(テクネシウム99、半減期20万年)であることに留意してほしい。

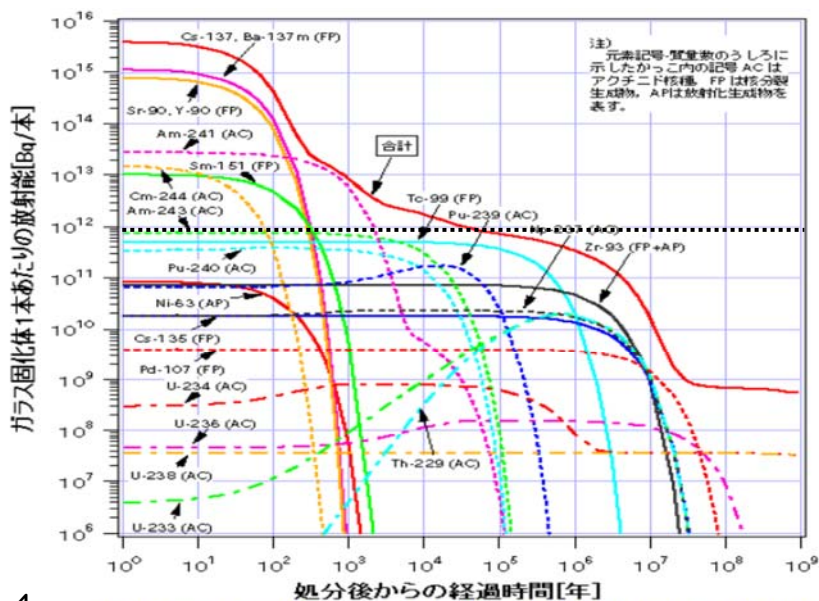


図4 国内再処理ガラス固化体の放射能の経時変化

【出典】核燃料サイクル開発機構：一層処分研究開発第2次取りまとめ報告書、分冊2 地層処分の工学技術、III-9(1999年11月26日)

http://www.rist.or.jp/atomica/data/fig_pict.php?Pict_No=05-01-01-03-01

図5は、図3の元の図（サイクル機構、第2次とりまとめ、1999年）に、“ウラン鉱石1トン当りの放射能量”を赤の点線で入れたものである。使用済み燃料1トン中の放射能が“ウラン鉱石並み”になるには1000万年近くが必要であることを示している。

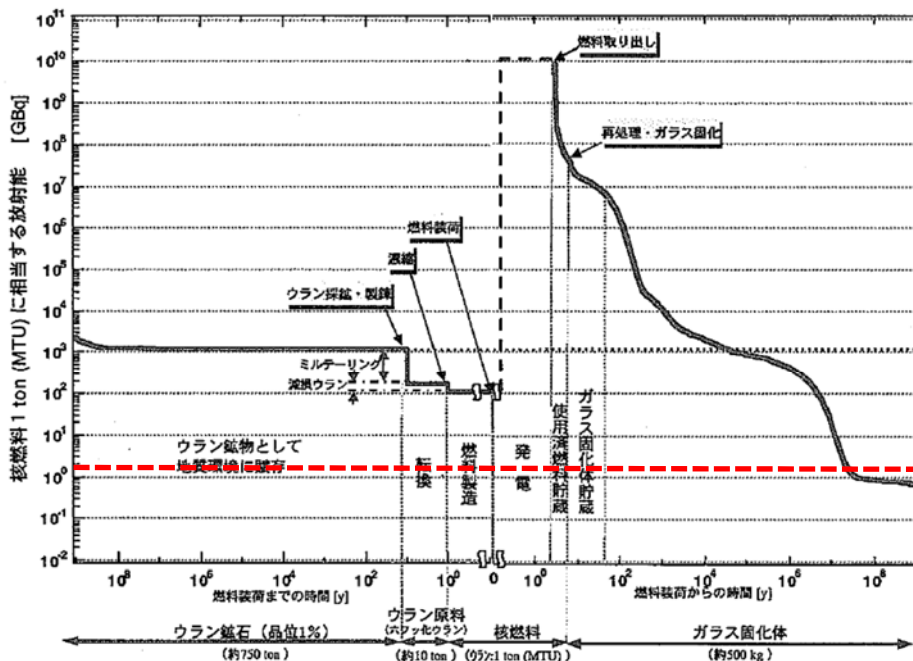


図5 放射能の推移から眺めた高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の特徴（濃縮度4.5%の核燃料1MTU相当）

<http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JNC-TN1400-99-020.pdf>

◆カラクリ②：潜在的な有害度の導入による目くらまし

1999年の“地層処分第2次とりまとめ”の折には、8000年という数字はまだ出てなかったようだ。その数字が出てきたのは、2005年に発表された“原子力政策大綱”の策定会議と思われる。2004年10月7日の資料に図2と同じ図があった（図6）。（この図の回収率は、ホントかなあ〜...と思わせる。）

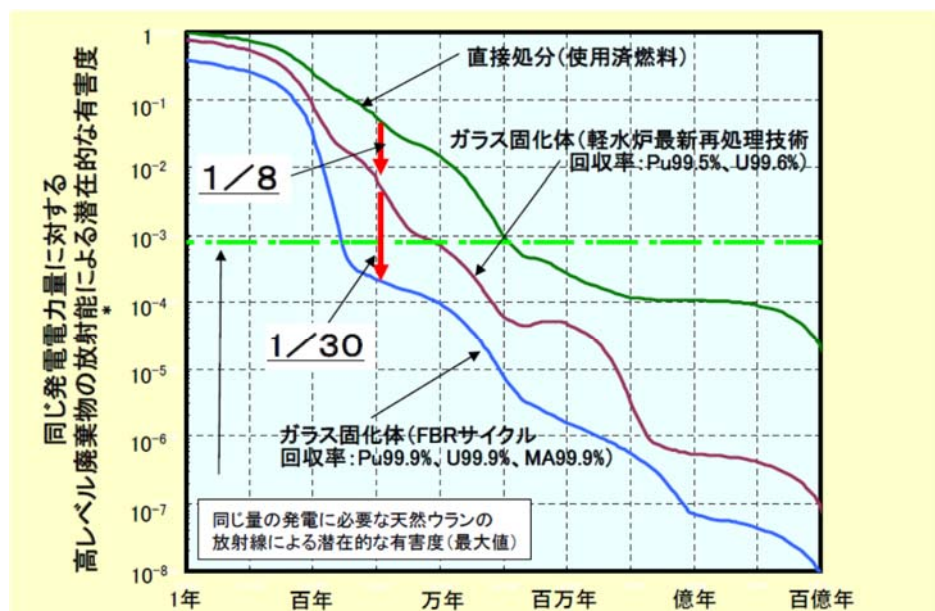


図6

* 高レベル放射性廃棄物と人間との間の障壁は考慮されておらず、高レベル放射性廃棄物の実際の危険性ではなく、潜在的な有害度を示している。使用済み燃料の1年目の潜在的な有害度を1とした相対値。

<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/sakutei2004/sakutei09/siryu13.pdf>

『潜在的な有害度』とはなんぞや、と思って調べてみると、JAEAの『使用済核燃料の潜在的放射性毒性評価のためのデータベース』(2010)というレポートがあった。

<http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Data-Code-2010-012.pdf>

潜在的有害度とは、(放射エネルギー: Bq) × (経口摂取の内部被曝換算係数: Sv/Bq) を指標にするとのこと。(その昔は、廃水基準値まで希釈するのに必要な水の量を指標にしていたはずだが…) 図7はそのレポートのサワリの図である。縦軸は、ウラン燃料1トン分のガラス固化体に含まれる各種の放射能をそれぞれの換算係数で重み付けして和を求めたものである。JAEA レポートで用いられている換算係数を表1に示した。天然ウラン7.5トン分の“潜在的有害度”を計算してみると、 2.37×10^5 (Sv/天然U7.5トン) となり、図7の横線と一致した。

アクチノイド核種 (U, Pu を除く) の曲線は約 8000 年のところで、天然 U7.5 トンと交差している。また、FP 核種の曲線は約 300 年で天然 U7.5 トンと交差している。このようなデータが、軽水炉ガラス固化体 8000 年、高速炉ガラス固化体 300 年の元ネタであろう。

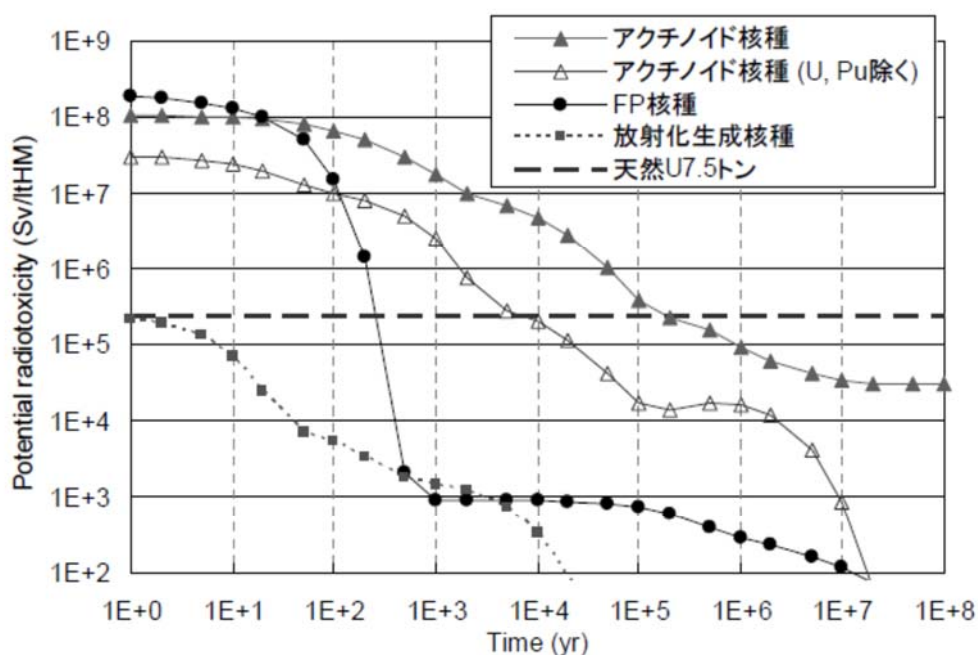


図7 軽水炉燃料サイクルにおいて発生する放射性核種の潜在的放射性毒性 (新燃料1トンに規格化)

縦軸が Bq のままの図4と、縦軸が潜在的有害度の図7との際だった違いは、FP核種の寄与がガタッと減ったことである。図4で、1万年から50万年で一番大きいのは Tc99 であるが、換算係数の導入により、(たとえば半減期 7370 年の Am243 の換算係数 2×10^{-7} に比べると、Tc99 は 6.4×10^{-10} なので) 約 300 分の 1 の寄与になる。

◆カラクリ③：優秀な日本の群分離技術?の目くらまし

もうひとつの目くらましは、図6にあって、図2には記載のない『回収率』である。軽水炉ガラス固化体で 99.5、99.6%、FBR 固化体で 99.9%というウラン、プルトニウム、アクチノイドの回収率になっている。化学の現場には疎い今中であるが、99.5%とか99.9%という回収率はかなりアヤシイ。表2に『第2とりまとめ・分冊3』に出ている値を示す(回収率は、1 - 移行率)。軽水炉ガラス固化体 8000 年、FBR ガラス固化体 300 年という値は、回収率しだいなので、そのうち、再処理の化学に強そうな先生に聞いて見よう。

表 1 アクチノイド核種の換算係数

核種	半減期	原子量	換算係数 (Sv/Bq)	核種	半減期	原子量	換算係数 (Sv/Bq)
4n 系列				4n+2 系列			
<i>Cm-248*</i>	3.4E+5y**	248.07	7.7E-7	<i>Cm-246</i>	4.73E+3y	246.07	2.1E-7
<i>Pu-244</i>	8.08E+7y	244.06	2.4E-7	<i>Cm-242</i>	162.8d	242.06	1.2E-8
<i>Cm-244</i>	18.1y	244.06	1.2E-7	<i>Am-242</i>	16.02h	242.06	3.0E-10
<i>Pu-240</i>	6.564E+3y	240.05	2.5E-7	<i>Am-242m</i>	141y	242.06	1.9E-7
<i>U-240</i>	14.1h	240.06	1.1E-9	<i>Pu-242</i>	3.733E+5y	242.06	2.4E-7
<i>U-236</i>	2.342E+7y	236.05	4.7E-8	<i>Pu-238</i>	87.74y	238.05	2.3E-7
<i>Th-232</i>	1.405E+10y	232.04	2.3E-7	<i>Np-238</i>	2.117d	238.05	9.1E-10
<i>Th-228</i>	1.9131y	228.03	7.2E-8	<i>U-238</i>	4.468E+9y	238.05	4.5E-8
<i>Ac-228</i>	6.15h	228.03	4.3E-10	<i>U-234</i>	2.455E+5y	234.04	4.9E-8
<i>Ra-228</i>	5.75y	228.03	6.9E-7	<i>Pa-234</i>	6.7h	234.04	5.1E-10
<i>Ra-224</i>	3.66d	224.02	6.5E-8	<i>Th-234</i>	24.1d	234.04	3.4E-9
<i>Bi-212</i>	1.009h	211.99	2.6E-10	<i>Th-230</i>	7.538E+4y	230.03	2.1E-7
<i>Pb-212</i>	10.64h	211.99	6.0E-9	<i>Ra-226</i>	1.6E+3y	226.03	2.8E-7
				<i>Bi-214</i>	19.9m	214.00	1.1E-10
				<i>Pb-214</i>	26.8m	214.00	1.4E-10
				<i>Po-210</i>	138.376d	209.98	1.2E-6
				<i>Bi-210</i>	5.013d	209.98	1.3E-9
				<i>Pb-210</i>	22.3y	209.98	6.9E-7
4n+1 系列				4n+3 系列			
<i>Cm-245</i>	8.5E+3y	245.07	2.1E-7	<i>Cm-247</i>	1.56E+7y	247.07	1.9E-7
<i>Am-241</i>	432.2y	241.06	2.0E-7	<i>Cm-243</i>	29.1y	243.06	1.5E-7
<i>Pu-241</i>	14.35y	241.06	4.8E-9	<i>Am-243</i>	7.37E+3y	243.06	2.0E-7
<i>Np-237</i>	2.14E+6y	237.05	1.1E-7	<i>Pu-243</i>	4.956h	243.06	8.5E-11
<i>U-237</i>	6.75d	237.05	7.6E-10	<i>Pu-239</i>	2.411E+4y	239.05	2.5E-7
<i>U-233</i>	1.592E+5y	233.04	5.1E-8	<i>Np-239</i>	2.3565d	239.05	8.0E-10
<i>Pa-233</i>	26.967d	233.04	8.7E-10	<i>U-235</i>	7.038E+8y	235.04	4.7E-8
<i>Th-229</i>	7.34E+3y	229.03	4.9E-7	<i>Pa-231</i>	3.276E+4y	231.04	7.1E-7
<i>Ac-225</i>	10d	225.02	2.4E-8	<i>Th-231</i>	1.063d	231.04	3.4E-10
<i>Ra-225</i>	14.9d	225.02	9.9E-8	<i>Th-227</i>	18.72d	227.03	8.8E-9
<i>Bi-213</i>	45.59m	212.99	2.0E-10	<i>Ac-227</i>	21.773y	227.03	1.1E-6
<i>Pb-209</i>	3.253h	208.98	5.7E-11	<i>Ra-223</i>	11.435d	223.02	1.0E-7
				<i>Fr-223</i>	21.8m	223.02	2.4E-9
				<i>Pb-211</i>	36.1m	210.99	1.8E-10

*斜体は親核種として選ばれた核種を意味する。 ** 3.45x10⁵を意味する。

潜在的放射性毒性に影響のある核分裂生成物 29 核種の換算係数

	核種	半減期	崩壊定数 λ_i (s ⁻¹)	原子量	換算係数 C_i (Sv/Bq)	子孫核種を考慮した換算係数 $C_{i,ss}$ (Sv/Bq) *1	子孫核種を考慮した重量あたりの毒性(Sv/g)
1	Se-79	2.95E+5y	7.4456E-14	78.92	2.9E-9	2.9E-9	1.65E+0
2	Rb-87	4.75E+10y	4.6241E-19	86.91	1.5E-9	1.5E-9	4.81E-6
3	Sr-90	28.78y	7.6319E-10	89.91	2.8E-8	3.07E-8	1.57E+5
4	Zr-93	1.53E+6y	1.4356E-14	92.91	1.1E-9	1.21E-9	1.13E-1
5	Nb-94	2.03E+4y	1.0820E-12	93.91	1.7E-9	1.7E-9	1.18E+1
6	Tc-98	4.2E+6y	5.2296E-15	97.91	2.0E-9	2.0E-9	6.43E-2
7	Tc-99	2.111E+5y	1.0405E-13	98.91	6.4E-10	6.4E-10	4.05E-1
8	Rh-102	207d	3.8756E-08	101.91	2.6E-9	2.6E-9	5.95E+5
9	Ru-106	1.0235y	2.1460E-08	105.91	7.0E-9	7.0E-9	8.54E+5
10	Pd-107	6.5E+6y	3.3792E-15	106.91	3.7E-11	3.7E-11	7.04E-4
11	Ag-110m	249.79d	3.2117E-08	109.91	2.8E-9	2.8E-9	4.93E+5
12	Cd-113m	14.1y	1.5578E-09	112.90	2.3E-8	2.3E-8	1.91E+5
13	Sb-125	2.7582y	7.9633E-09	124.91	1.1E-9	1.30E-9	5.00E+4
14	Sn-126	1.0E+5y	2.1965E-13	125.91	4.7E-9	5.07E-9	5.33E+0
15	Te-127m	109d	7.3601E-08	126.91	2.3E-9	2.47E-9	8.61E+5
16	I-129	1.57E+7y	1.3990E-15	128.90	1.1E-7	1.1E-7	7.19E-1
17	Cs-134	2.0648y	1.0638E-08	133.91	1.9E-8	1.9E-8	9.09E+5
18	Cs-135	2.3E+6y	9.5498E-15	134.91	2.0E-9	2.0E-9	8.53E-2
19	Cs-137	30.07y	7.3045E-10	136.91	1.3E-8	1.3E-8	4.18E+4
20	Ce-144	284.893d	2.8160E-08	143.91	5.2E-9	5.25E-9	6.19E+5
21	Pm-146	5.53y	3.9719E-09	145.91	9.0E-10	9.0E-10	1.48E+4
22	Sm-146	1.03E+8y	2.1325E-16	145.91	5.40E-08	5.4E-8	4.75E-02
23	Pm-147	2.6234y	8.3725E-09	146.92	2.60E-10	2.6E-10	8.92E+03
24	Sm-147	1.06E+11y	2.0721E-19	146.91	4.90E-08	4.9E-8	4.16E-05
25	Sm-151	90y	2.4405E-10	150.92	9.8E-11	9.8E-11	9.54E+1
26	Eu-152	13.537y	1.6226E-09	151.92	1.4E-9	1.4E-9	9.00E+3
27	Eu-154	8.593y	2.5561E-09	153.92	2.0E-9	2.0E-9	2.00E+4
28	Eu-155	4.7611y	4.6133E-09	154.92	3.2E-10	3.2E-10	5.74E+3
29	Ho-166m	1.2E+3y	1.8304E-11	165.93	2.0E-9	2.0E-9	1.33E+2

*1 斜体は短寿命子孫核種の影響がある核種。(表 7)

表2 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.
- [6] Kawamura et al. (1990) : Characterization of High Level Waste Glass, Ceramic Transactions, Vol.9, pp.469-481.

◇ まとめ

名古屋の講演会での問題提起を受けて、『再処理ガラス固化体の地層処分隔離期間は 8000 年』を調べてみた。軽水炉ガラス固化体 8000 年、FBR ガラス固化体 300 年の出处や根拠はだいたい分かった。私からしたら『地層処分のタメにするお話』として作られたようなもので、『再処理ガラス固化体の隔離期間は 20 万から 100 万年』という基本的認識を変える必要はなかった。

福島原発事故を経験している私たちにとって、“生活環境から隔離すべき放射性廃棄物”として現実的なのは、汚染地域の指定廃棄物 (8000Bq/kg 以上) や特定廃棄物 (10 万 Bq/kg 以上) である。表1の換算係数を使うと、10 万 Bq/kg のセシウム 137 の潜在的有害度は 1.3Sv/ton となる。図6の相対値で表すと 6.5×10^{-9} となり、図から下にはみ出てしまう。仕方ないので、それを 10 倍した 100 万 Bq/kg の潜在的有害危険度を、図7に赤い点線で示した。

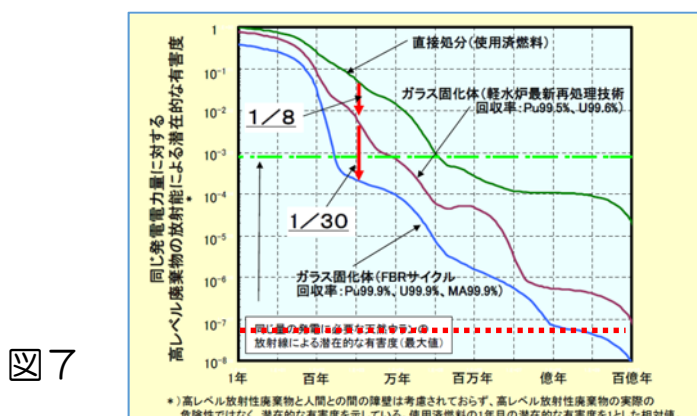


図7

当局サイドの8000年や300年の話がいい加減そうだとはいえ、高レベル放射性廃棄物問題に対して、私自身が明確な方針を持っているわけではない。『少なくとも、これ以上増やさないようにしましょう』とは言っているが、これまでに出来ちゃったものをどうするか悩ましい限りである。

以上、ご参考まで (2016.11.13 訂正)