

燃料サイクルの比較

－ エネルギー、廃棄物および経済性の観点から －

○ 以下の3つのサイクルについて、エネルギー発生量、廃棄物の毒性および経済性の観点から比較を行いました。(表1にまとめ)

- ・ 軽水炉ワンススルー
- ・ プルサーマル (リサイクル回数：1回)
- ・ FBR (リサイクル回数：3回)

1. 電気エネルギー発生量

○ 軽水炉ワンススルーの場合、天然ウラン1トンから約154kgの軽水炉装荷用の濃縮ウラン燃料(U-235濃縮度3.2%)を作り出すことができます。炉内ではこのうち、U-235約3.7kgとU-238から変換したPu-239約1.5kgの合計約5.2kgが燃焼し、約1.7GWd^{注)}の電気エネルギーを取り出すことができます。(図1)

注) GWdはエネルギーを表す単位で、1GWd = 24×10^6 kWhである。

○ プルサーマルの場合、天然ウラン1トンから、1回目の軽水炉サイクルではワンススルーと同様約1.7GWdの電気エネルギーを、2回目のプルサーマルサイクルからは約0.8GWdの電気エネルギーを取り出すことができます。これは、U-235、炉内でU-238から変換したPu-239、およびMOX燃料中のPu-239の合わせて約8kgが燃焼した結果で、合計約2.5GWdになります。(図2)

○ FBRで3回リサイクルを行った場合、約32GWdの電気エネルギーを取り出すことができます。これはU、Pu計約84kgが燃焼した結果です。(図3)

○ 天然ウラン1トンからの電気エネルギー発生量は、以下の順となります。

FBR > プルサーマル > 軽水炉ワンススルー

○ 参考として、FBRで無限回リサイクルを行った場合の電気エネルギー発生量を図4に示します。FBRで無限回リサイクルを行った場合には、約190GWdの電気エネルギー発生量となります。

2. 廃棄物の毒性

2. 1 軽水炉ワンススルー

○ 軽水炉ワンススルーの場合、使用済燃料とテイルウラン^{注)}を含むウラン系廃棄物の2種類の廃棄物が発生します。廃棄物の大部分を占めるのは放射能の低いテイルウラン(約846kg)ですが、放射能の高い使用済燃料が約154kg発生します。(図1)ウラン系廃棄物には、テイルウランの他、転換や UO_2 加工工場でロスとして発生する廃棄物が含まれます。

注) テイルウランとは濃縮の際に発生する廃品ウランと呼ばれるもので、一般にU-235の濃度が0.25%程度と天然ウランのそれに比べ低くなっている。

○ 使用済燃料中には、ウランの他にストロンチウムやセシウムなどのように放射能が高く半減期が数十年と比較的短い核分裂生成物(FP)、ネプツニウムやプルトニウムなどのように放射能はFPに比べ低いものの半減期が数万年から数百万年単位である超ウラン元素(TRU)の2種類が存在します。

○ 使用済燃料とウラン系廃棄物の単位電気エネルギー当りの合計の毒性^{注)}は、取り出し後数百年までは主にFPが、その後は超ウラン元素が支配的となります。(参考1)

注) 各放射性同位体の放射性濃度を、飲料水に対する最大許容濃度で割った値で、各放射性同位体を最大許容濃度まで希釈するのに何立法メートルの水を必要とするかということの意味する。

2. 2 プルサーマル

○ プルサーマルの場合、1回目の軽水炉サイクルから、主にFPとウラン系の廃棄物の2種類の廃棄物が発生します。このうちFPがガラス固化体の中に閉じ込められます。2回目のプルサーマルサイクルからは、主にFP(ガラス固化体中)とU、Pu系廃棄物が発生します。U、Pu系廃棄物は、MOX加工や再処理工場で主にロスとして発生する廃棄物です。ガラス固化体中の放射性物質(ガラス固化体中の代表的な放射性核種の組成を表2に示す)の量は約9kgとなります。(図2-1、図2-2)

○ ガラス固化体とU、Pu系廃棄物とウラン系廃棄物の合計の毒性は、軽水炉ワンススルーの場合と同様、取り出し後数百年までは主にFPが、その後は超ウラン元素が支配的となります。(参考2)

○ プルサーマル燃料を再処理して回収した P u は、P u 組成の劣化（高次化）が問題となり、プルサーマルで多重リサイクルが難しくなるため、F B R での利用が得策と考えられます。

2. 3 F B R

○ F B R で 3 回リサイクルを行った場合、主にガラス固化体と、M O X 加工と再処理の両工程において取り出される U、P u 系廃棄物の 2 種類の廃棄物が発生します。ガラス固化体中の放射性核種の量は約 9 8 k g となります。（図 3）

○ ガラス固化体と U、P u 系廃棄物の合計の毒性は、軽水炉ワンススルーやプルサーマルの場合と同様、取り出し後数百年までは主に F P が、その後は超ウラン元素が支配的となります。（参考 3）

○ F B R では組成が劣化（高次化）した P u を効率良く燃やすことができます。さらに、炉心燃料とブランケット燃料を混合して利用する場合、この組成劣化も進まなくなります。

2. 4 毒性の比較

○ 単位電気エネルギー当りの毒性は、以下の順となります。（図 5）

軽水炉ワンススルー＞プルサーマル＞F B R

○ 参考として、F B R で無限回リサイクルを行った場合の廃棄物発生量を図 4 に、廃棄物の毒性の内訳を参考 4 に示します。

3. 将来の経済性

○ 原子炉の建設費については、軽水炉の建設費は今後下がると想定されていますが、F B R の実用化にあたっては、2 次ナトリウム系の削除、中間熱交換器のコンパクト化、免震などの技術開発を行うことにより、軽水炉並みのコスト達成を目標としています。（表 1）

○ サイクルコストについては、高燃焼度化、再処理や M O X 加工プロセスの高度化、免震工法などを取り入れた F B R サイクルが約 0. 9 円/k W h で最も安くなると期待され^{注)}、続いて軽水炉ワンススルーの約 1. 0 円/k W h、プルサーマルの約 1. 1 円/k W h の順と

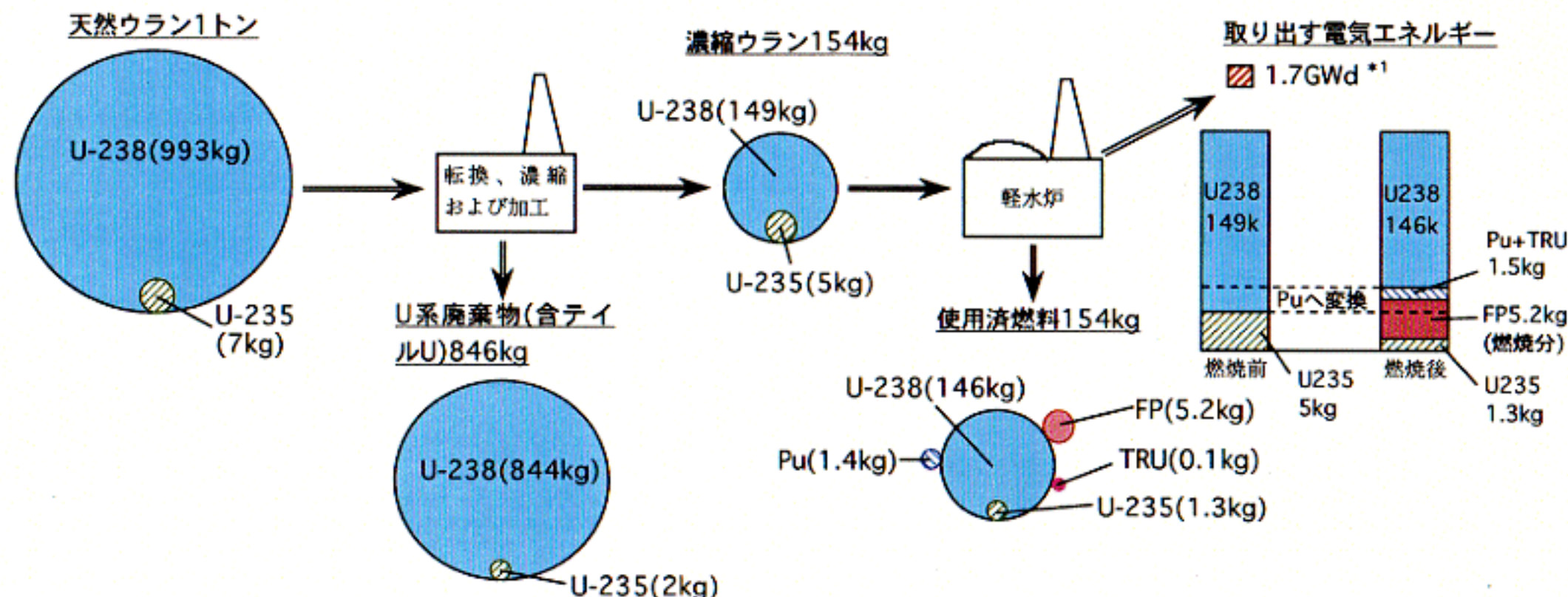
なります。(表1)

注) 第3回FBR懇談会資料(第3-4号)を参照のこと。

○ トータルの発電コストでは、このサイクルコストの差が現れますが、その差は各々僅かに1~2%程度で、有意な差はありません。(表1)

図1 軽水炉ワンスルーサイクルの場合（燃焼度：約32GWd/t）

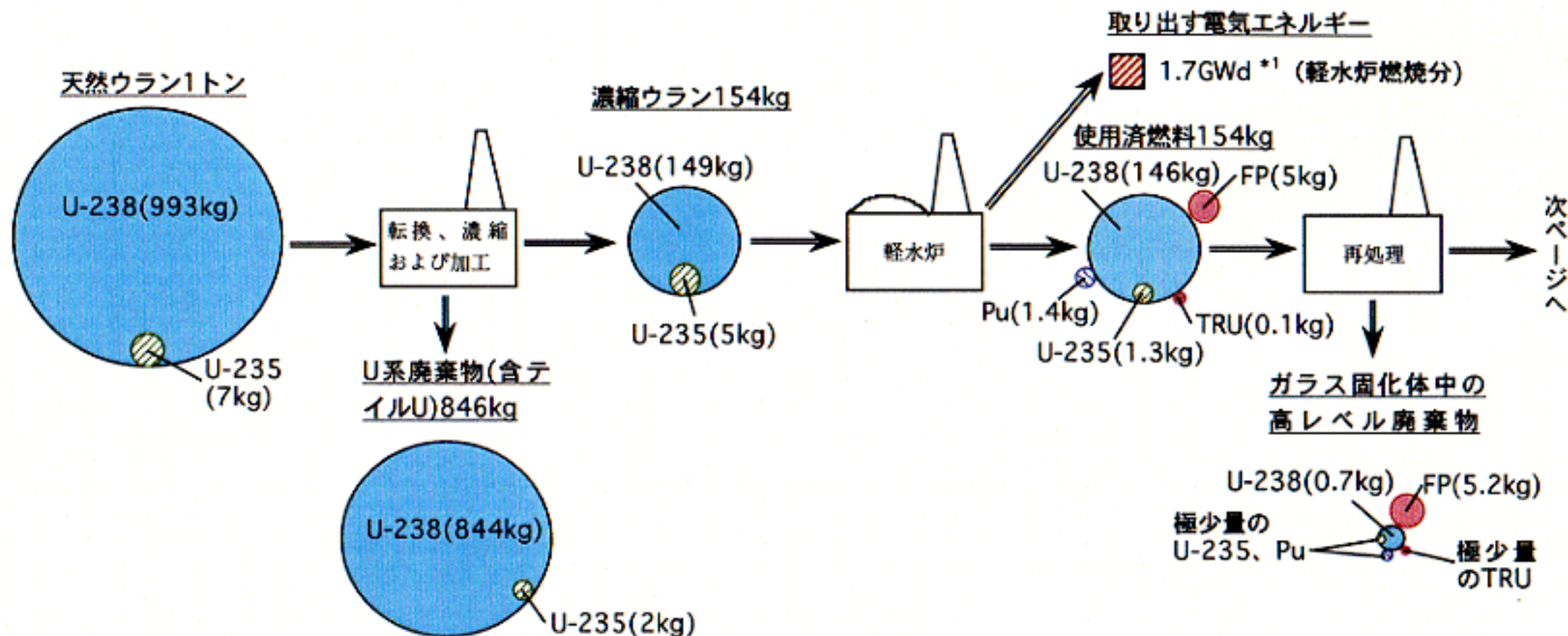
天然ウラン1トンから約1.7GWdの電気エネルギーを取り出すことができ、1トン^{*2*3}の廃棄物が発生する。



- *1) 電気エネルギーとして取り出せるのは、U-235約3.7kgおよび原子炉内でU-238から変換したPu-239約1.5kgが燃焼した量で、これは約1.7GWdに相当する。GWdはエネルギーを表す単位で、1GWd = 24×10^5 kWh。
- *2) 製錬済みの天然ウランを出発物質と仮定しているため、製錬時に発生する廃棄物（残土など）は含めていないが、濃縮工程から発生するテイルウランは廃棄物として含めた。（テイルウランとは濃縮の際に発生する廃品ウランと呼ばれるもので一般にU-235の濃度が0.25%程度と天然ウランのそれに比べ低くなっている。）主な廃棄物の形態は使用済燃料である。
- *3) 廃棄物発生量は重量で評価しており、容積として即ちドラム缶の発生量などとは異なることに留意。

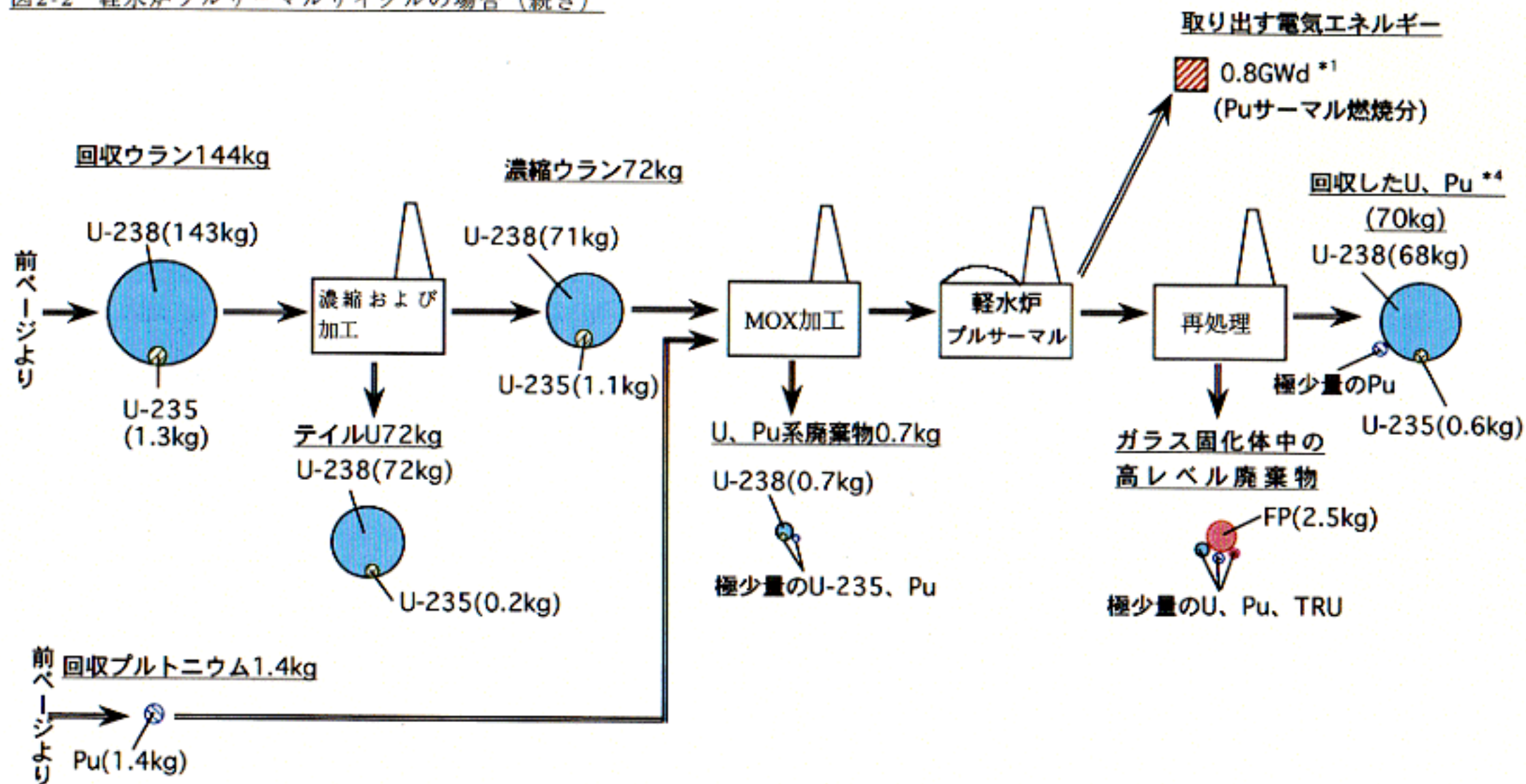
図2-1 軽水炉プルサーマルサイクルの場合（燃焼度：約32GWd/t、リサイクル回数：1回）

天然ウラン1トンから約2.5GWdの電気エネルギーを取り出すことができ、約930kg^{*2*}の廃棄物が発生する。



- *1) 電気エネルギーとして取り出せるのは、主にU-235、原子炉内でU-238から変換したPu-239、およびMOX燃料中のPu-239の合わせて約8kgが燃焼した量で、これは約2.5GWdに相当する。
- *2) 製錬済みの天然ウランを出発物質と仮定しているため、製錬時に発生する廃棄物（残土など）は含めていない。また、プルサーマル燃料を再処理して最終的に回収する約70kgのUとPuは廃棄物には含めない。主な廃棄物は濃縮工程から発生するテイルウランおよび再処理工程から発生する高レベル廃棄物（ガラス固化体中）である。
- *3) 廃棄物発生量は重量で評価しており、容積として即ちドラム缶の発生量などとは異なることに留意。
- *4) プルサーマルサイクルの場合、Pu組成の劣化（高次化）が問題となり、多重リサイクルが難しくなる。

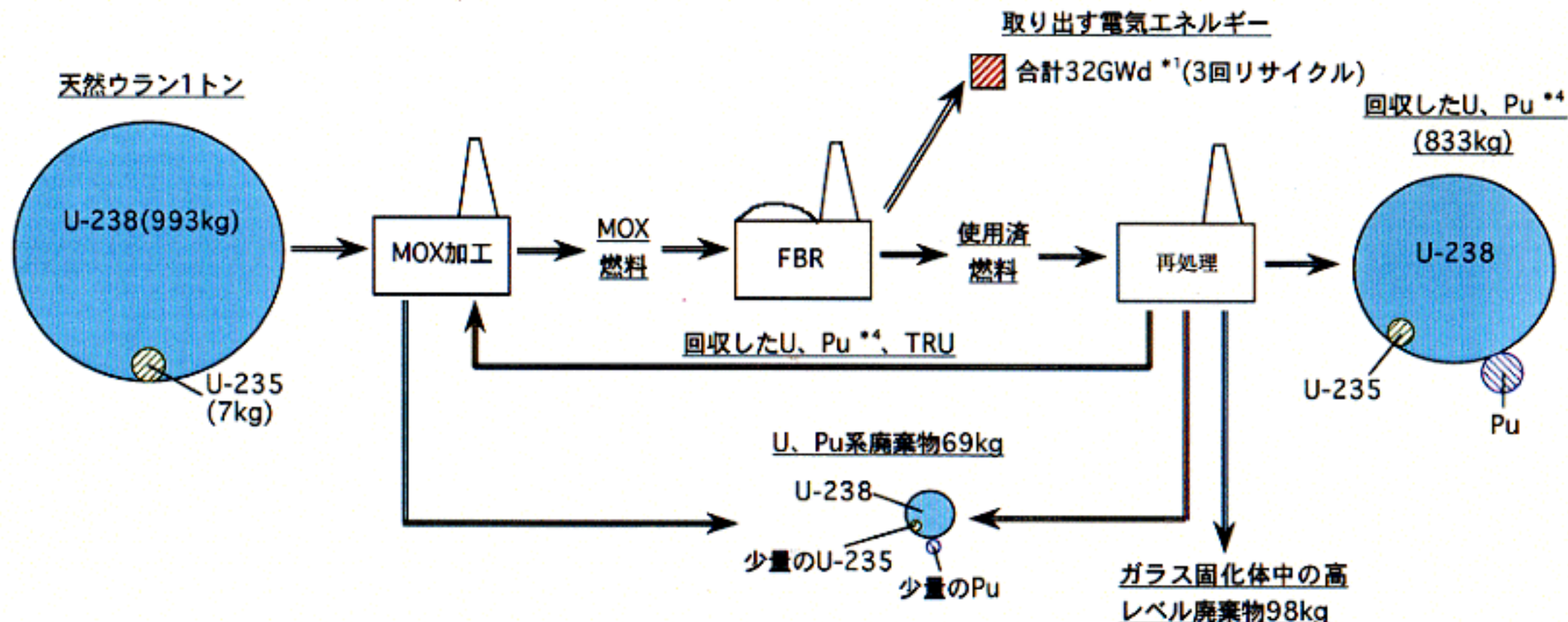
図2-2 軽水炉プルサーマルサイクルの場合（続き）



プルサーマルサイクルで取り出した電気エネルギーの合計
約2.5GWd：1.7GWd(軽水炉燃焼分)+0.8GWd(Puサーマル
燃焼分)

図3 高速増殖炉サイクルの場合（燃焼度：約74GWd/t、リサイクル回数：3回）

天然ウラン1トンから約32GWdの電気エネルギーを取り出すことができ、約170kg^{*2*}の廃棄物が発生する。



*1) 電気エネルギーとして取り出せるのは、主にU-235、原子炉内でU-238から変換したPu-239、およびMOX燃料中のPu-239の合わせて約84kgが燃焼した量で、これは約32GWdに相当する。

*2) 製錬済みの天然ウランを出発物質と仮定しているため、製錬時に発生する廃棄物（残土など）は含めていない。また、3回リサイクル後に再処理して最終的に回収する約833kgのUとPuは廃棄物には含めない。主な廃棄物は加工と再処理工程からロスとして発生する(U+Pu+TRU)廃棄物の合計約69kg（加工と再処理工程でのロス率は各々1%、2%と仮定）および高レベル廃棄物（ガラス固化体中）98kgである。

*3) 廃棄物発生量は重量で評価しており、容積として即ちドラム缶の発生量などとは異なることに留意。

*4) FBRでは組成が劣化（高次化）したPuを効率良く燃やすことができる。炉心燃料とブランケット燃料を混合して利用する場合、この組成劣化も進まなくなる。

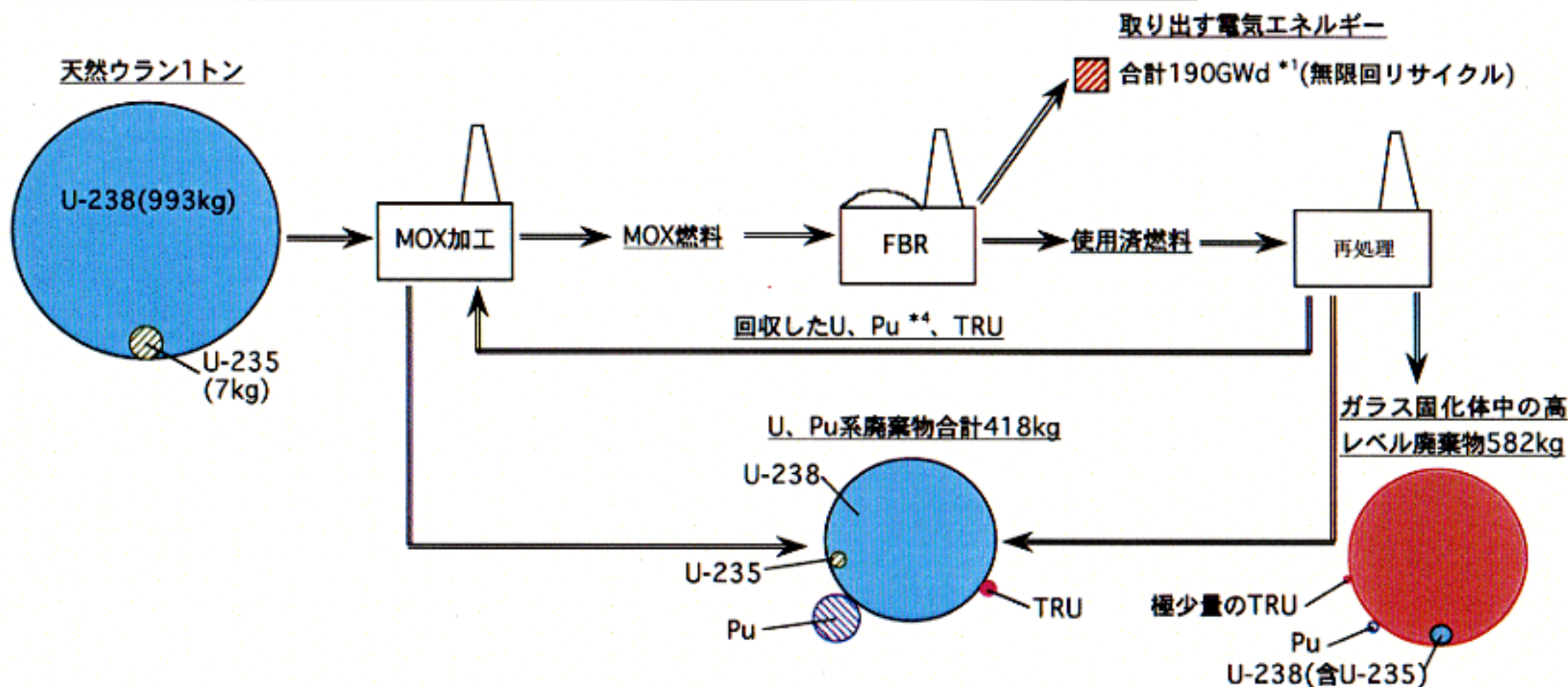
FP(84kg)



少量のU、Pu、TRU

図4 高速増殖炉サイクルの場合（燃焼度：約74GWd/t、リサイクル回数：無限回）

天然ウラン1トンから約190GWdの電気エネルギーを取り出すことができ、1トン^{*2}^{*3}の廃棄物が発生する。



- *1) 電気エネルギーとして取り出せるのは、U-235および原子炉内でU-238から変換したPu-239の合わせて約500kgが燃焼した量で、これは約190GWdに相当する。GWdはエネルギーを表す単位で、1GWd = 24×10^6 kWhである。
- *2) 主な廃棄物は、無限回リサイクルした場合の加工と再処理工程からロスとして発生する(U+Pu+TRU)廃棄物の合計約418kg（加工と再処理工程でのロス率は各々1%、2%と仮定）および高レベル廃棄物（ガラス固化体中）582kgである。
- *3) 廃棄物発生量は重量で評価しており、容積として即ちドラム缶の発生量などとは異なることに留意。
- *4) FBRでは組成が劣化（高次化）したPuを効率良く燃やすことができる。炉心燃料とブランケット燃料を混合して利用する場合、この組成劣化も進まなくなる。

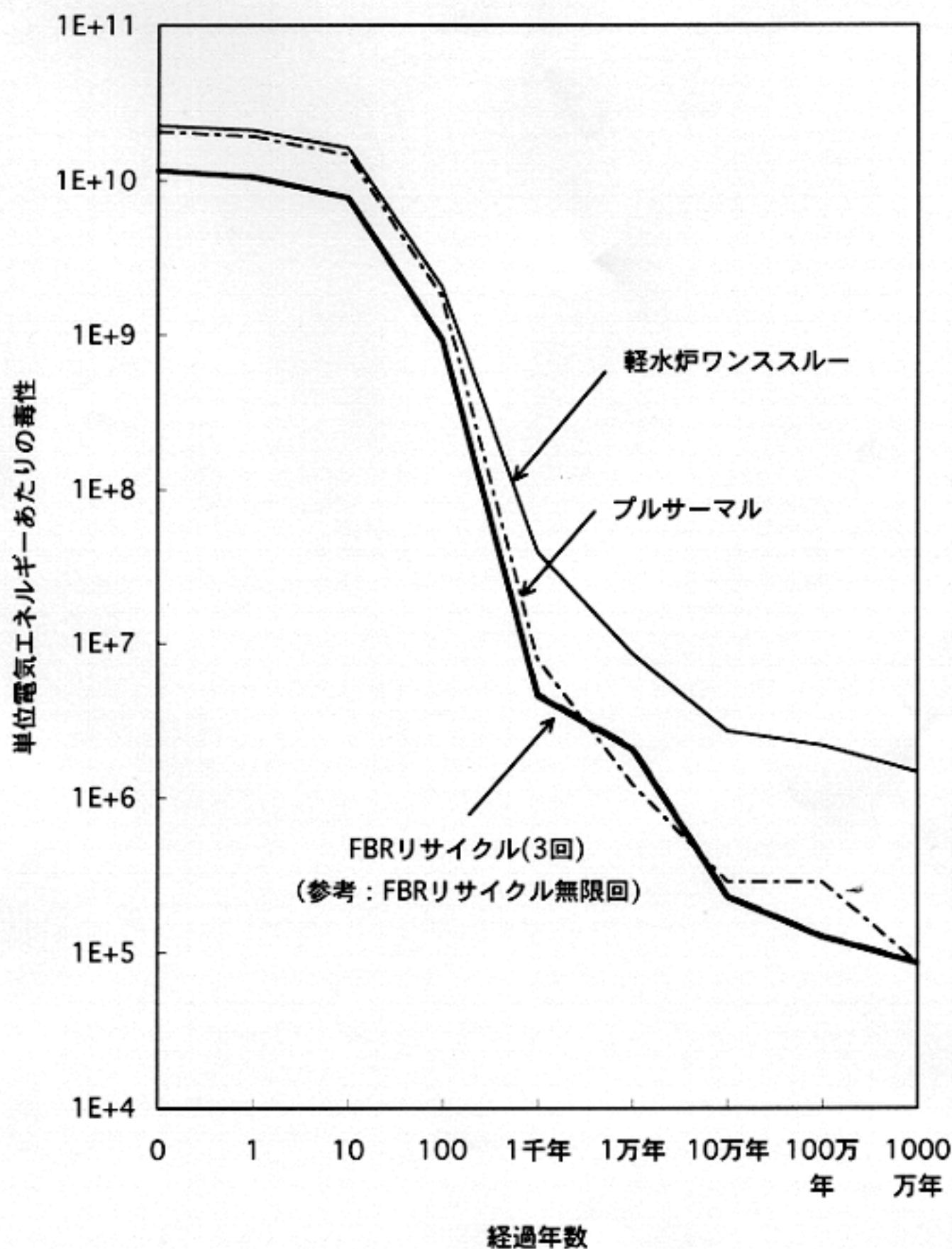


図5 各サイクルから発生する主な廃棄物の
単位電気エネルギー当りの毒性の比較

表1 各燃料サイクルの比較

シナリオ	電気エネルギー発生量 ^{*1} (GWd)	主な廃棄物の単位電気エネルギー当りの毒性	将来の経済性 ^{*2} 上段：発電コスト 中断：サイクルコスト 下段：原子炉建設
軽水炉ワンススルー	1.7	単位電気エネルギー当りの毒性を比較すると、毒性の小さい順からFBR（3回、無限回）、プルサーマル、軽水炉ワンススルーとなる。 （図5）	約6.8円/kWh ^{*3} 約1.0円/kWh ^{*3} 30万円/kWe ^{*3}
軽水炉プルサーマル （1回リサイクル）	2.5		約6.9円/kWh ^{*3} 約1.1円/kWh ^{*3} 30万円/kWe ^{*3}
FBR （3回リサイクル）	32		約6.7円/kWh ^{*4} 約0.9円/kWh ^{*4} 30万円/kWe ^{*4}
（参 考） FBR （無限回リサイクル）	190		約6.7円/kWh ^{*4} 約0.9円/kWh ^{*4} 30万円/kWe ^{*4}

*1) エネルギー発生量は、各々天然ウラン1トンから発生する量である。

*2) 2030年の燃料サイクルコストを対象とした。

*3) 発電コスト、サイクルコストおよび原子炉建設費は、いずれも推定値である。サイクルコストについては、第3回懇談会資料第3－4号中の「軽水炉再処理リサイクルのサイクルコスト1.1円/kWh」を基に、「軽水炉ワンススルーは軽水炉再処理リサイクルより約10%安い」（The Economics of the Nuclear Fuel Cycle, OECD/NEA, 1994）および「プルサーマルは軽水炉再処理リサイクルと同等または若干安い」（Plutonium Fuel an Assessment, OECD/NEA, 1989）というOECD/NEAの評価結果を拠り所に、推定したものである。

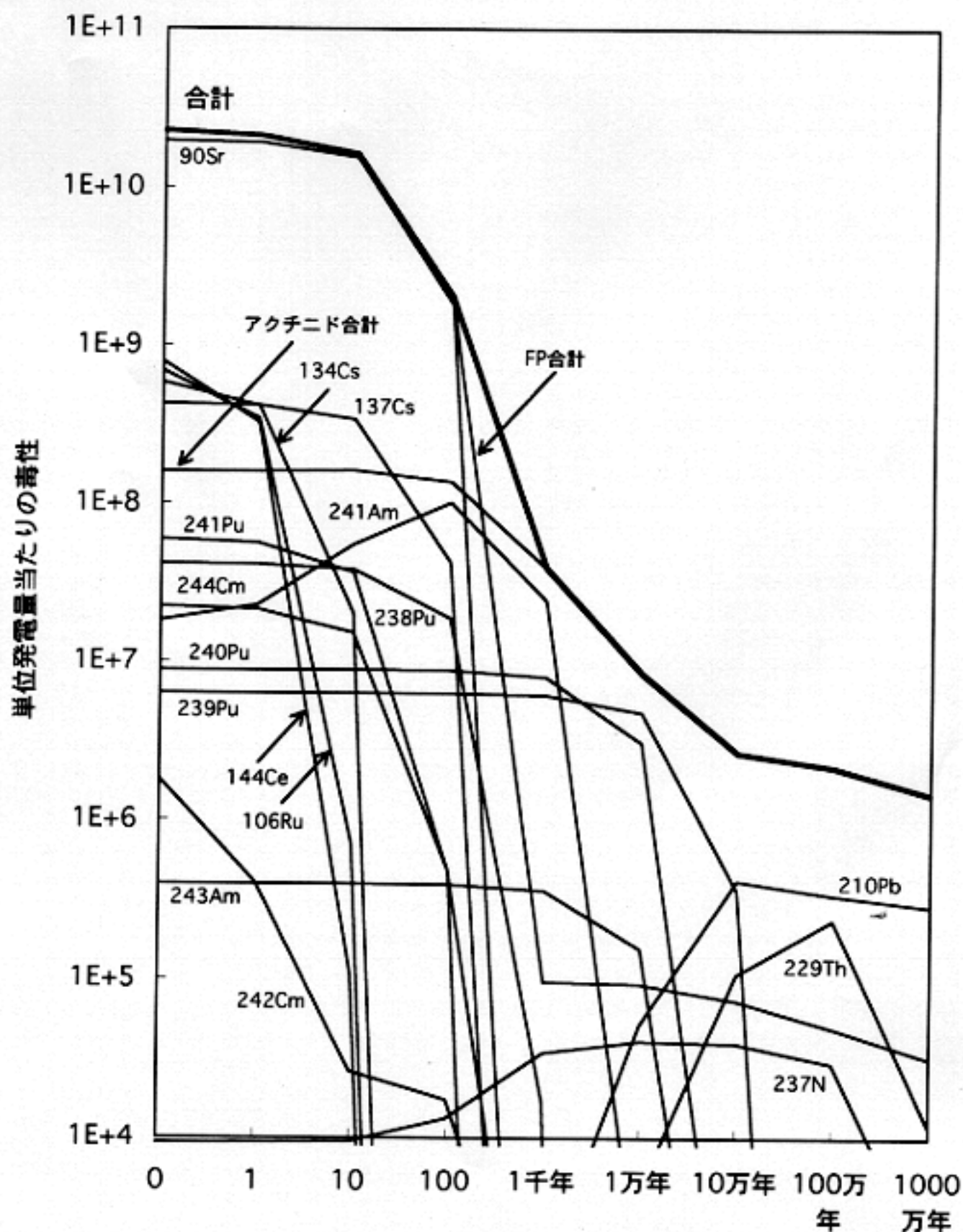
*4) 動燃試算値。第3回懇談会資料第3－4号中の「FBRリサイクルのサイクルコスト0.9円/kWh」を引用。発電コストと原子炉の建設費も動燃試算値である。

表2 ガラス固化体中の生物学的に重要な放射性核種

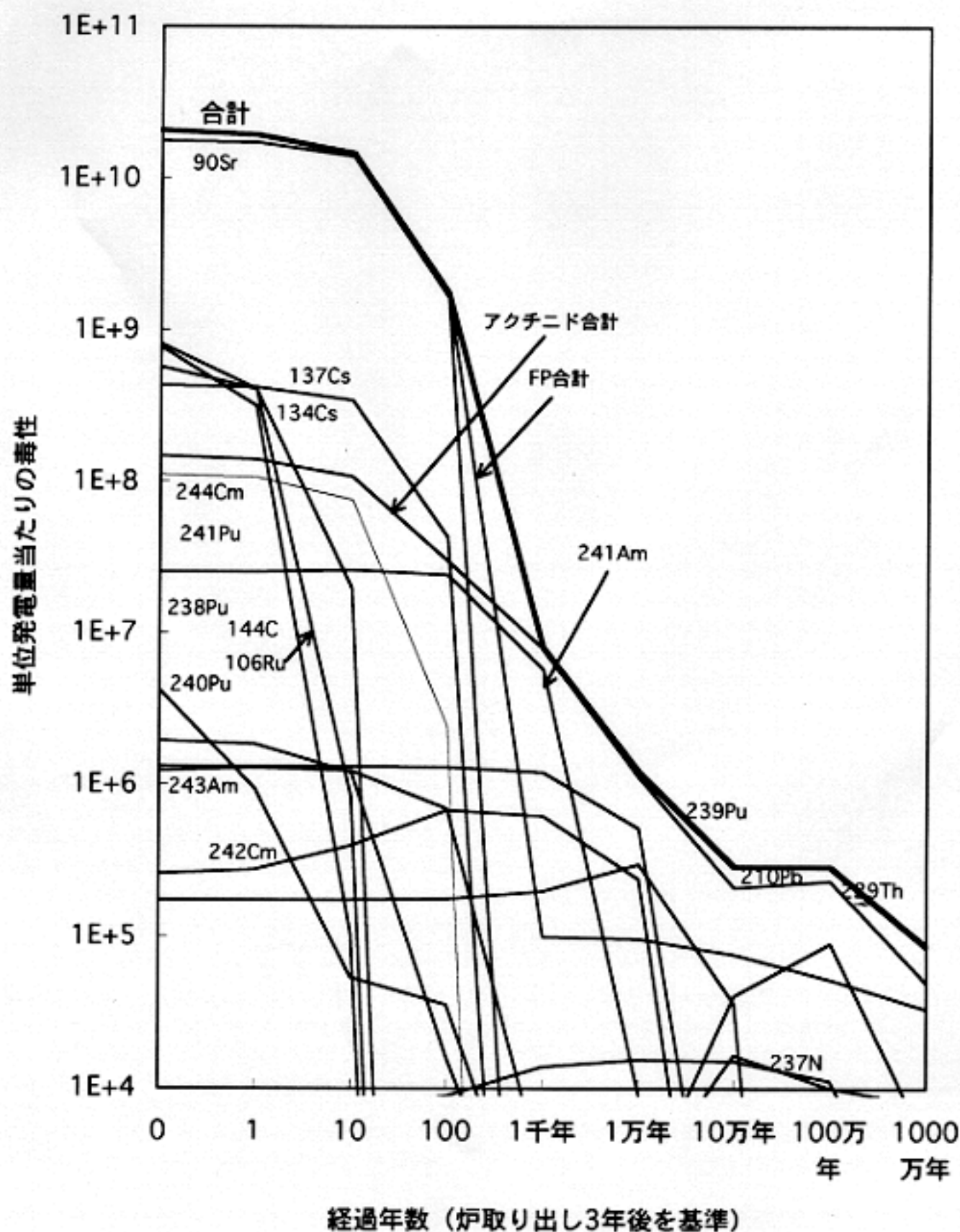
放射性核種	半減期	放射能 (Ci / キュニスタ) (原子炉から取り出し後の期間)			
		10年	10 ² 年	10 ³ 年	10 ⁴ 年
⁸⁹ Sr	50.5日	0	0	0	0
⁹⁰ Sr	29年	1.4×10 ⁵	1.5×10 ⁴	3.5×10 ⁻⁶	0
⁹⁰ Y	64時間	1.4×10 ⁵	1.5×10 ⁴	3.5×10 ⁻⁶	0
⁹¹ Y	58.6日	0	0	0	0
⁹³ Zr	9.5×10 ⁵ 年	4.3	4.3	4.3	4.3
^{93m} Nb	12年	1.8	4.3	4.3	4.3
⁹⁵ Zr	65.5日	0	0	0	0
⁹⁵ Nb	35.1日	4.3×10 ⁻⁵	0	0	0
⁹⁹ Tc	2.13×10 ⁵ 年	3.2×10 ¹	3.2×10 ¹	3.2×10 ¹	3.2×10 ¹
¹⁰⁶ Ru	369日	1.3×10 ³	0	0	0
¹⁰⁶ Rh	2.18時間	1.3×10 ³	0	0	0
¹²⁵ Sb	2.73年	1.6×10 ³	0	0	0
¹²⁶ Sn	10 ⁵ 年	1.3	1.3	1.3	1.3
¹²⁹ I	1.59×10 ⁷ 年	1.8×10 ⁻⁴	1.8×10 ⁻⁴	1.8×10 ⁻⁴	1.8×10 ⁻⁴
¹³⁴ Cs	2.06年	1.9×10 ⁴	0	0	0
¹³⁷ Cs	30.1年	2.0×10 ⁵	2.4×10 ⁴	2.3×10 ⁻⁵	0
¹⁴⁴ Ce	284.4年	3.5×10 ²	0	0	0
¹⁴⁷ Pm	2.62年	1.8×10 ⁴	8.1×10 ⁻⁷	0	0
¹⁵⁴ Eu	8.6年	1.0×10 ⁴	2.1×10 ²	0	0
²¹⁰ Pb	22.3年	0	1.7×10 ⁻⁶	1.6×10 ⁻⁴	6.5×10 ⁻³
²¹⁰ Po	138.4日	0	1.7×10 ⁻⁶	1.6×10 ⁻⁴	6.5×10 ⁻³
²²⁶ Ra	1600年	2.5×10 ⁻⁷	2.6×10 ⁻⁶	1.6×10 ⁻⁴	6.5×10 ⁻³
²²⁹ Th	7340年	9.6×10 ⁻⁸	1.7×10 ⁻⁶	1.6×10 ⁻⁴	1.3×10 ⁻²
²³⁰ Th	7.7×10 ⁴ 年	4.9×10 ⁻⁵	7.4×10 ⁻⁵	8.8×10 ⁻⁴	8.1×10 ⁻³
²³¹ Pa	3.25×10 ⁴ 年	5.7×10 ⁻⁵	5.7×10 ⁻⁵	6.0×10 ⁻⁵	8.8×10 ⁻⁵
²³³ U	1.58×10 ⁵ 年	3.4×10 ⁻⁵	3.4×10 ⁻⁵	3.5×10 ⁻³	3.6×10 ⁻²
²³⁷ Np	2.14×10 ⁶ 年	8.1×10 ⁻¹	8.1×10 ⁻¹	8.8×10 ⁻¹	8.8×10 ⁻¹
²³⁸ Pu	87.8年	2.4×10 ²	1.2×10 ²	2.8×10 ⁻¹	0
²³⁹ Pu	2.439×10 ⁴ 年	3.8	3.8	4.7	9.6
²⁴⁰ Pu	6540年	1.0×10 ¹	2.0×10 ¹	1.8×10 ¹	7.3
²⁴¹ Pu	15年	7.4×10 ²	1.1×10 ¹	7.2×10 ⁻¹	3.4×10 ⁻¹
²⁴¹ Am	433年	4.1×10 ²	3.8×10 ²	8.1×10 ¹	3.4×10 ⁻¹
²⁴³ Am	7370年	4.0×10 ¹	4.0×10 ¹	3.7×10 ¹	1.7×10 ¹
²⁴² Cm	163日	1.6×10 ¹	1.1×10 ¹	1.8×10 ⁻¹	0
²⁴⁴ Cm	17.9年	4.0×10 ³	1.3×10 ²	0	0

原典：NUREG (1979) 表A-1のデータ

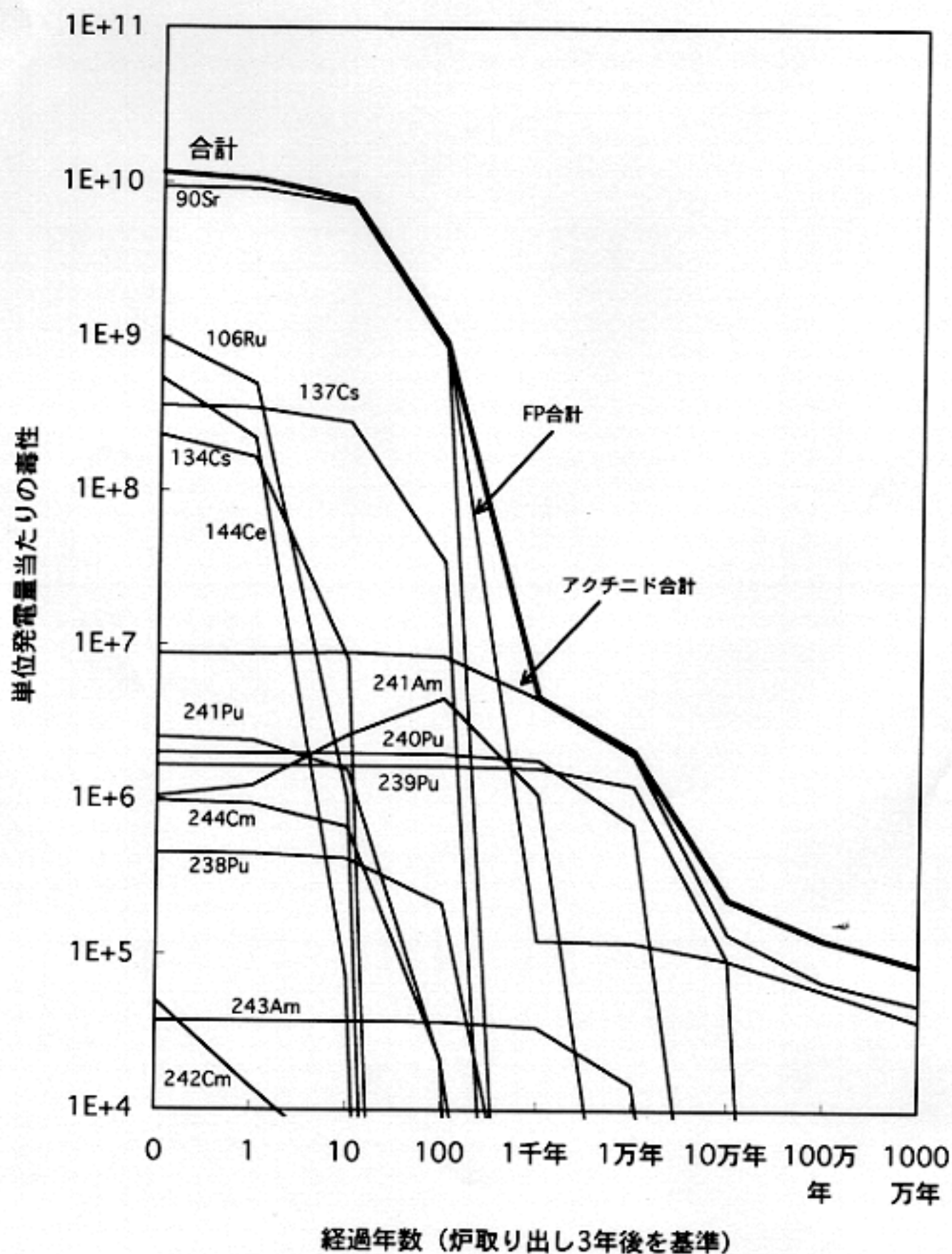
出典：D.G. ブルッキンス「放射性廃棄物処分の基礎」表4-1

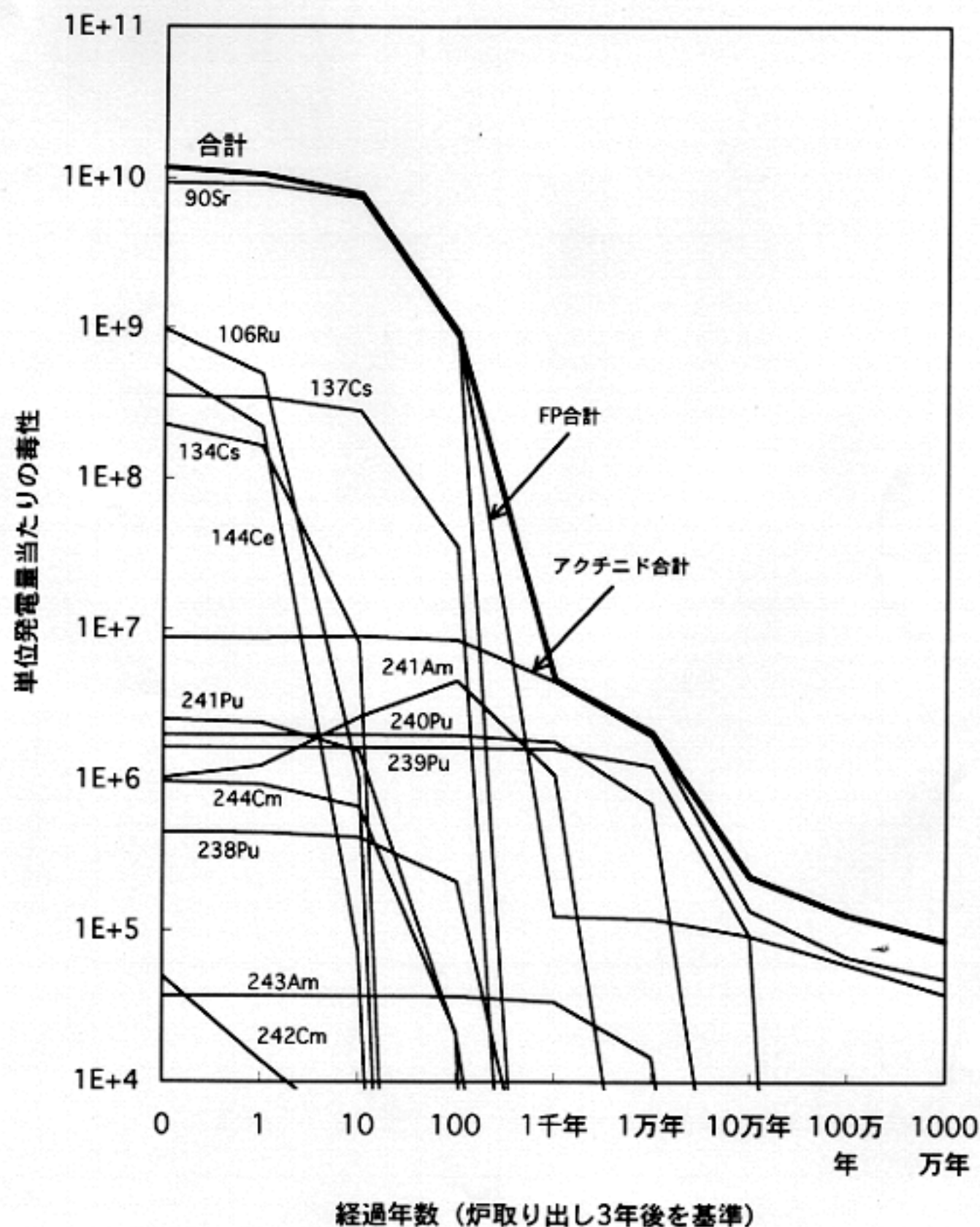


参考 1 軽水炉ワンスルーで発生する
廃棄物の毒性の内訳



参考2 プルサーマルサイクルから発生する
廃棄物の毒性の内訳





参考4 FBRリサイクル（無限回）から発生する
廃棄物の毒性の内訳