

戦略調査セミナー
報告(1)

OECD/NEA/NDCにおける
“廃棄物政策に対する先進的核燃料
サイクルオプションの影響評価”

平成18年3月2日

次世代原子力システム研究開発部門
池上 哲雄

内容

1. 検討の背景、目的、経緯等
2. 検討対象核燃料サイクル
3. マスフローの検討
4. 発生廃棄物
5. 処分場の性能評価
6. 経済性評価
7. 結果のまとめ

検討の背景

◇ 現在OECD加盟諸国では、使用済み燃料の直接処分あるいは再処理後にガラス固化体を地層処分することが計画されている。

◇ 核燃料サイクルオプションとしていくつかの案があるが、

- ・原子炉の特性が改善されるにつれ、廃棄物の放射能レベルや量が変わってくる。

- ・分離変換技術を併用した高速or熱中性子炉やADSのような新型燃料サイクルは核廃棄物の性格を大きく変える可能性を有している。

- ・燃料製造や再処理の過程で発生する低レベル、中レベルの廃棄物の種類や量は燃料製造や再処理の過程で用いられる技術により大きく変わる。



◇ その選択は処分される廃棄物の特性に大きな影響をもたらす。

検討の目的(使命)

- ・ 先進的核燃料サイクルから発生する放射性廃棄物特性の評価
- ・ 先進的核燃料サイクルから発生する放射性廃棄物をソースタームとしての処分場性能評価
- ・ 廃棄物管理あるいは廃棄物処分の観点から新たなオプションあるいは方向性を見極め



これまでは廃棄物に対する関心は比較的小さかった。
廃棄物の観点から核燃料サイクルオプションを考える
という新しい試み

検討経緯等

〈参加国〉 12カ国、2国際機関

ベルギー、フィンランド、仏、独、(イタリア)、(オランダ)、日、韓、スペイン、スイス、英、米、IAEA、EC

〈開催経緯〉

2003年2月に第1回専門家会合開催、以後合計7回開催。
2006年春に報告書発行。

検討対象、検討方法についてコンセンサスを得るのにかなりの議論を必要とした。



- ・参加国間で核燃料サイクルシナリオが異なる。
- ・参加メンバーの専門分野が多岐(分離、核変換、廃棄物処理、地層処分)にわたる。

検討対象核燃料サイクル

大きく分けて3つに分類(9つの基本核燃料サイクルと4つの変形サイクルの合計13ケース。最初にPu、次にMAを燃焼。)

1. 現在実用化されているもの及びその延長

1a. ワンスルー (レファレンス)

1b. PWRでのPu1回リサイクル

1c. PWRでのPuとNpの1回リサイクル

1d. DUPIC

2. 部分的閉サイクル

2a. PWRでのPuマルチリサイクル

2b. PWRでのPuとAmのマルチリサイクル

2c. PWR+FRでのPuとAmのマルチリサイクル(Amはターゲットで)

2c var. PWR+FRでのPuマルチリサイクル(Am, Cm は貯蔵)

3. 完全閉サイクル

3a. FRでのTRUマルチリサイクル(IFR)

3b. 階層型での全アクチニド燃焼(Puは全てFRとLWRで燃焼)

3b var. 階層型での全アクチニド燃焼(FRをスキップして直接ADSへ)

3cv1. FRでの全アクチニドリサイクル(Gen-IVガス冷却高速炉を想定)

3cv2. FRでの全アクチニドリサイクル(EFRを想定)

前提条件

(1) 想定した原子炉型

- PWR : EPR
- FR(MOX燃料) : EFR
- FR(金属燃料) : IFR
- FR(炭化物燃料) : Gen-IV(仏)
- ADS : Pb-Bi 冷却窒化物燃料

(2) 再処理での回収ロス : 0.1%

(3) その他

- Amターゲットはリサイクルしない。
- Am, Cmの遅延リサイクルはせず。

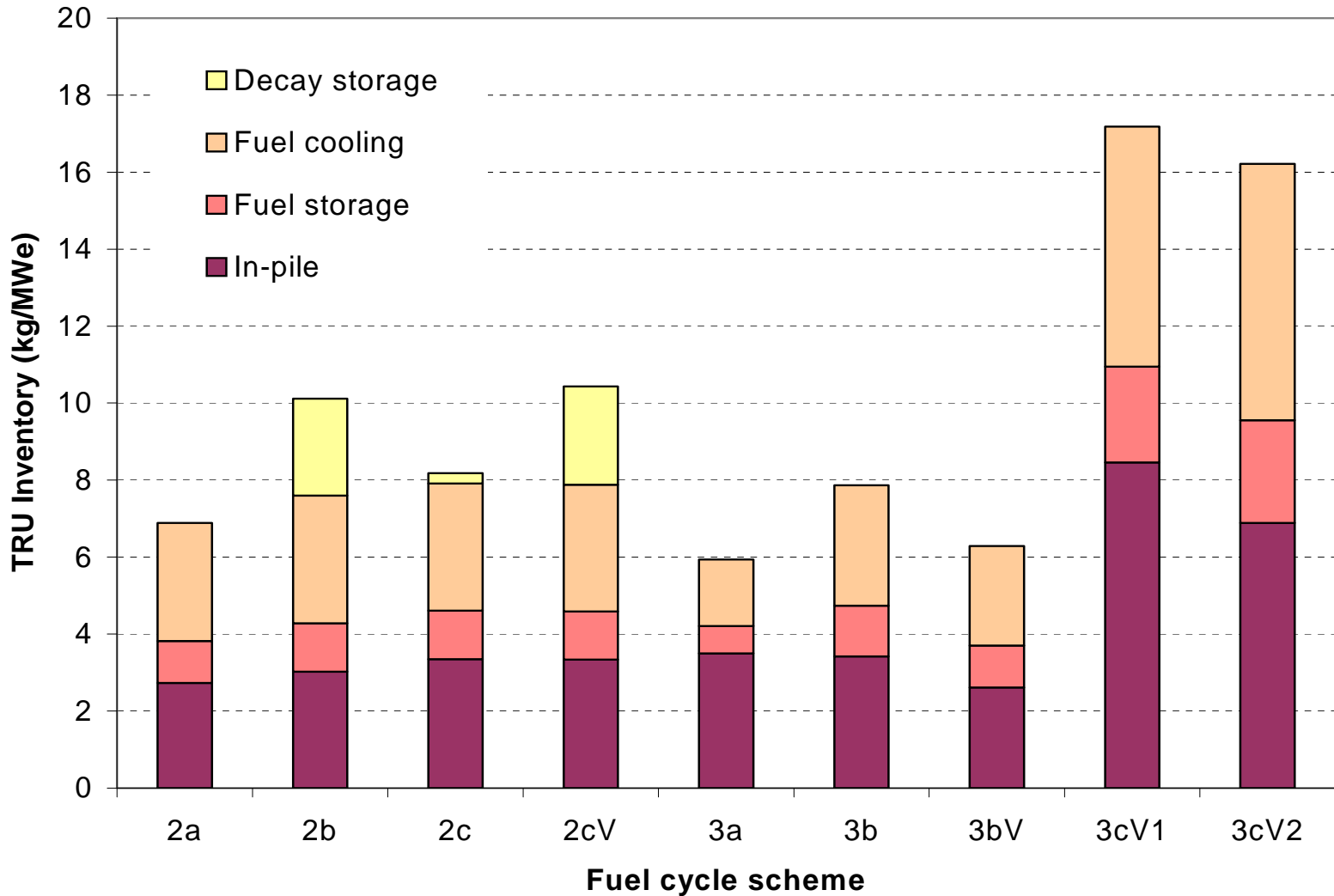
(4) 各核燃料サイクルのマスフローは平衡状態にあるとする。

(5) 核拡散抵抗性はスコープ外とするが、必要な場合は分離して得られた純粋なPuの総量を用いて評価する。

(6) 核燃料サイクル間の比較は単位発電量当りに規格化して行う。

マスフロー検討

TRUインベントリー



- ・部分的閉サイクル及び完全閉サイクルのTRUインベントリーは大きくなる。(1a、1bのTRUインベントリーはそれぞれ0.6、1.3 kg/MWe)
- ・特に完全閉サイクルでは in-pile インベントリーが大きくなる。

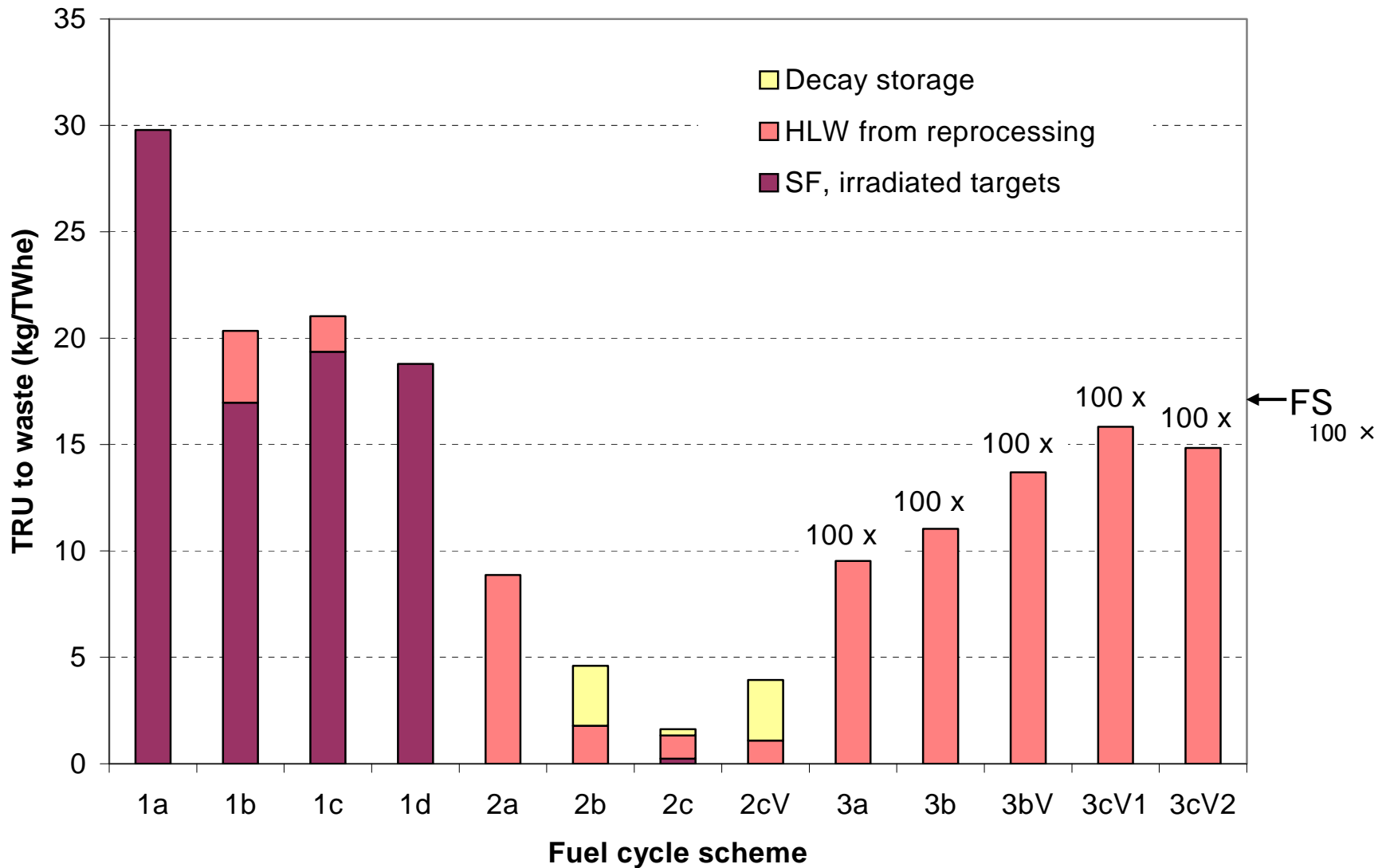
Shut-down phase で重要となる。

HLW中のHMとFP量 (kg/TWhe)

| Scheme | Spent fuel | | HLW, wet processing | | HLW, dry processing | | Irradiated targets | | Decay storage | Total | |
|--------|------------|-----|---------------------|-----|---------------------|----|--------------------|-----|---------------|-------|-----|
| | HM | FP | HM | FP | HM | FP | HM | FP | HM | HM | FP |
| 1a | 1920 | 130 | - | - | - | - | - | - | - | 1920 | 130 |
| 1b | 210 | 15 | 5.06 | 116 | - | - | - | - | - | 215 | 131 |
| 1c | 201 | 14 | 3.40 | 116 | - | - | - | - | - | 205 | 130 |
| 1d | 1933 | 130 | - | - | - | - | - | - | - | 1933 | 130 |
| 2a | - | - | 10.71 | 128 | - | - | - | - | - | 10.71 | 128 |
| 2b | - | - | 3.62 | 129 | - | - | - | - | 2.82 | 6.44 | 129 |
| 2c | - | - | 2.17 | 101 | - | - | 0.25 | 2.3 | 0.30 | 2.72 | 103 |
| 2cv | - | - | 2.17 | 101 | - | - | - | - | 2.85 | 5.02 | 101 |
| 3a | - | - | 1.43 | 78 | 0.23 | 40 | - | - | - | 1.68 | 118 |
| 3b | - | - | 1.81 | 112 | 0.04 | 6 | - | - | - | 1.85 | 118 |
| 3bv | - | - | 1.91 | 103 | 0.10 | 19 | - | - | - | 2.00 | 122 |
| 3cv1 | - | - | - | - | 0.76 | 86 | - | - | - | 0.76 | 86 |
| 3cv2 | - | - | 0.79 | 98 | - | - | - | - | - | 0.79 | 98 |

HMについては、1aと比較して、1b、1cは1/10、部分的閉サイクルで1/200~1/700、完全閉サイクルで~ 1/1000。但し、HLWで支配的となるFPは完全閉サイクルで約30%減少。

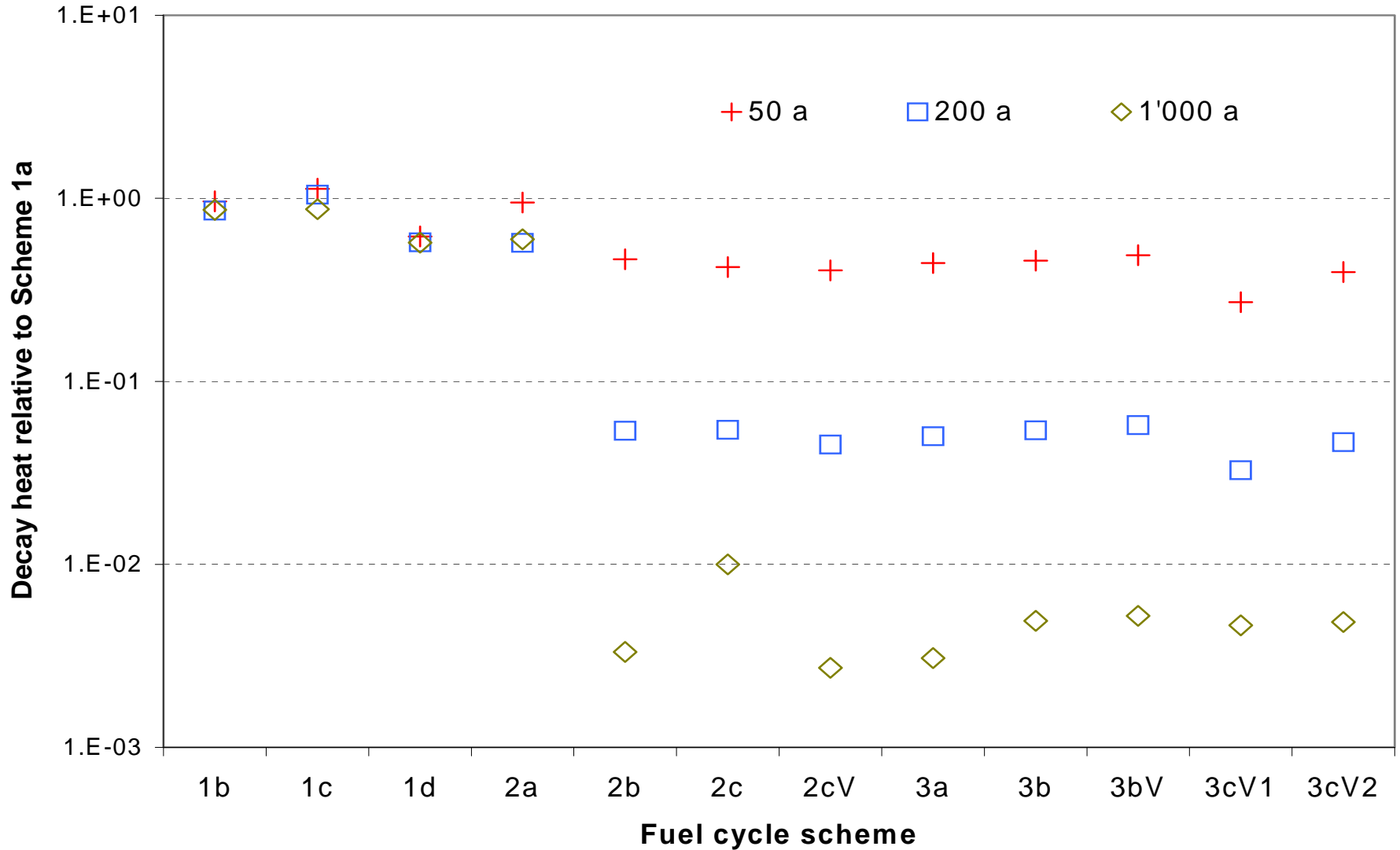
廃棄物中へのTRUロス



1aと比較して、1b、1c、1d は約1/3減少するだけで、部分的閉サイクルはファクター3~20減少。完全閉サイクルは1/100を達成可能。

TRUロスは潜在的毒性の目安

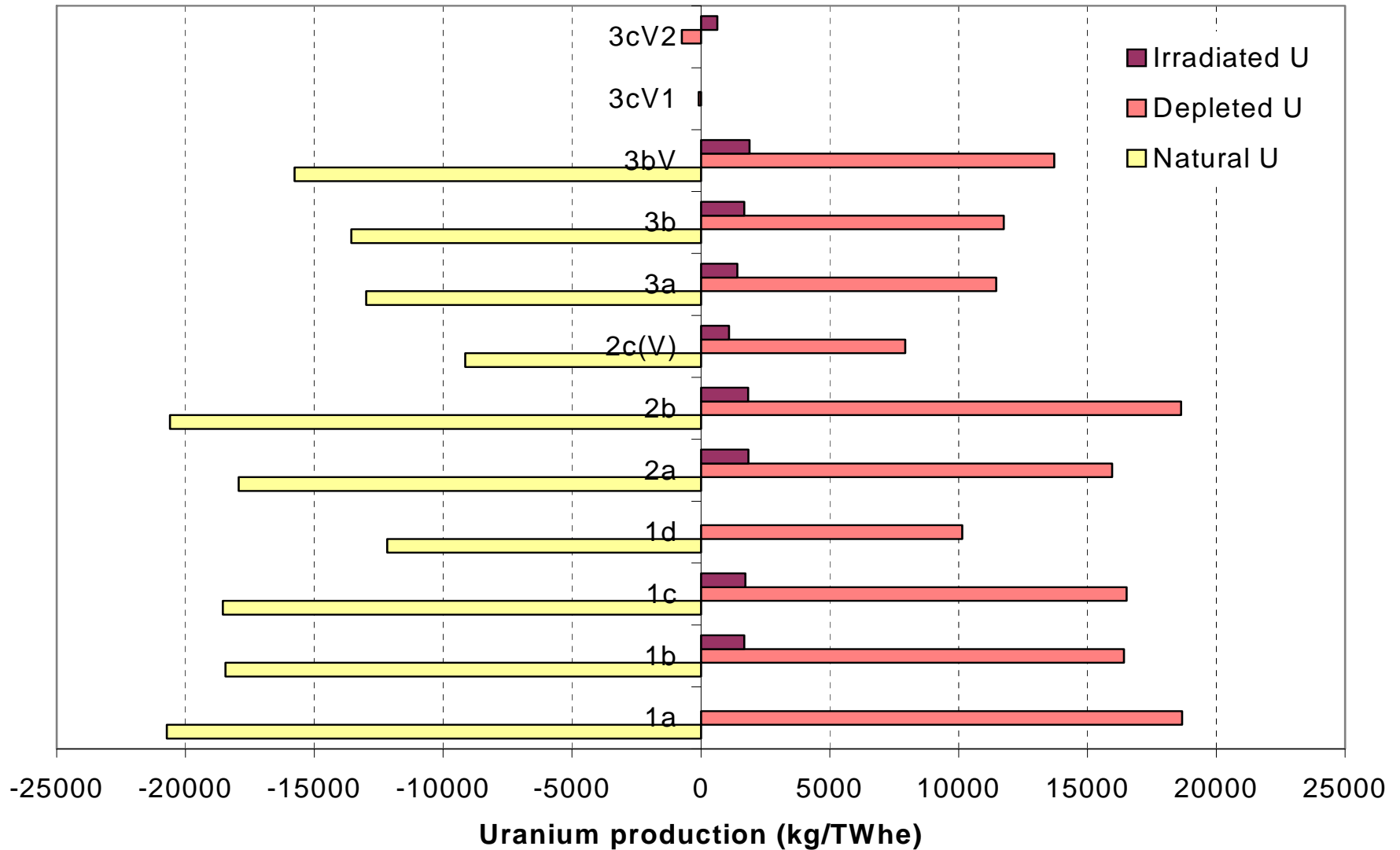
崩壊熱(スキーム1aで規格化)



- ・MA management をしないスキームでは冷却期間をとっても減少しない。
- ・50年冷却(地層処分時期)ではFPの効果が支配的なためスキーム間の差は小さい。
- ・冷却期間延長(例えば200年では1/20~1/30)の効果は大きい。

ウランのマスバランス

(負の値は消費を意味する)



残留ウラン (irradiated U 及び depleted U) は長期的には廃棄物と考える必要がある。

天然ウラン消費量(ワンスルーとの相対値)

| 1b | 1c | 1d | 2a | 2b | 2cv | 3a | 3b | 3bv | 3cv1 | 3cv2 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| 0.89 | 0.90 | 0.59 | 0.87 | 0.99 | 0.44 | 0.63 | 0.65 | 0.76 | 0.004 | 0.036 |

注) 3cv1、3cv2 は劣化ウランを使用

FS : 0.005

- ・PWRでのPuマルチリサイクル(2a、2b)は資源有効利用にはあまり寄与しない。
- ・熱中性子炉サイクルの中では唯一DUPIIC (1d)が資源有効利用に寄与する(40%)。
- ・全FRサイクルはワンスルーと比較して2桁以上の寄与がある。(3cv2は回収ウランをリサイクルしないとしているため3cv1より消費量大きい。)

分離Pu量 (kg/TWhe)

(核拡散抵抗性の一つの目安として)

| 1b | 2a | 2b | 2c | 2cv | 3b | 3bv |
|----|----|----|----|-----|----|-----|
| 23 | 69 | 72 | 80 | 80 | 67 | 22 |

注) 1a、1c、1d、3a、3cv1、3cv2 では純粋なPuは分離されない。

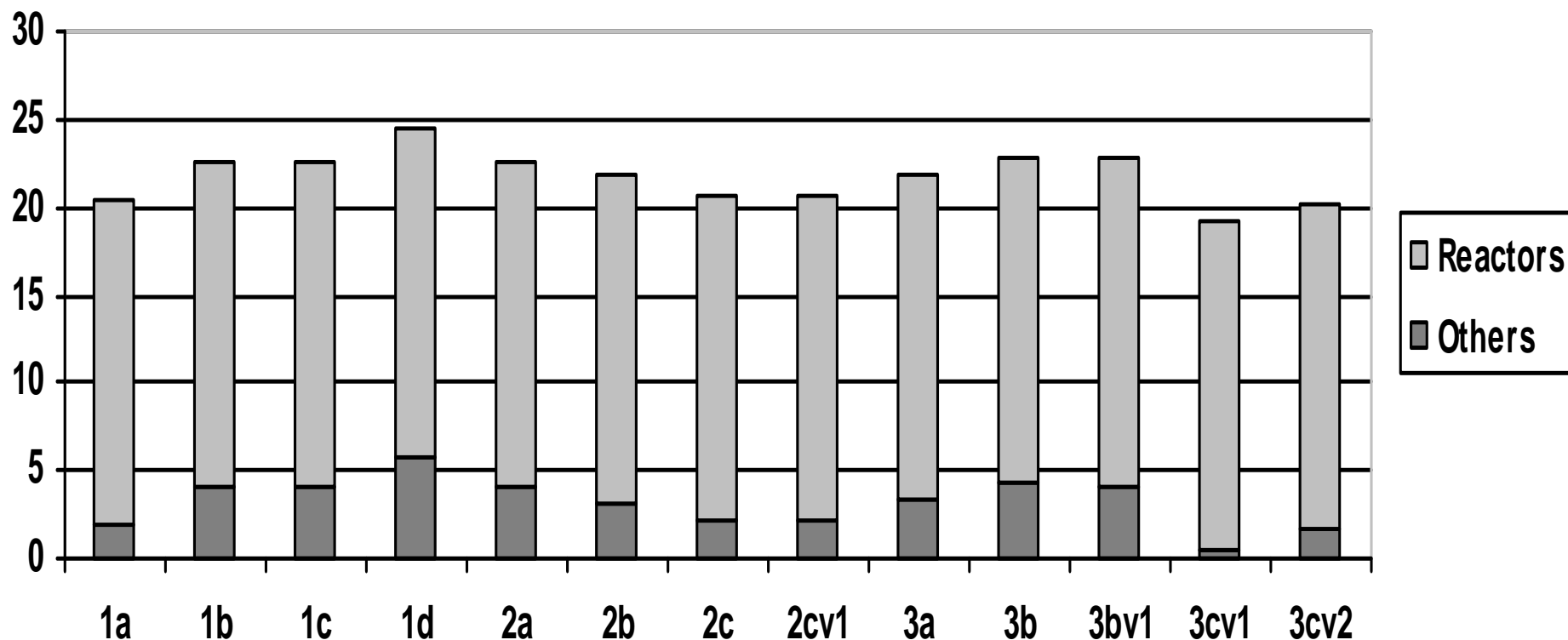
純粋なPuの分離がない(1a、1c、1d、3a、3cv1、3cv2)、比較的少ない(1b、3bv)、多い(2a、2b、2c、2cv、3b) の3つのグループに分かれる。

発生廃棄物

廃棄物の分類

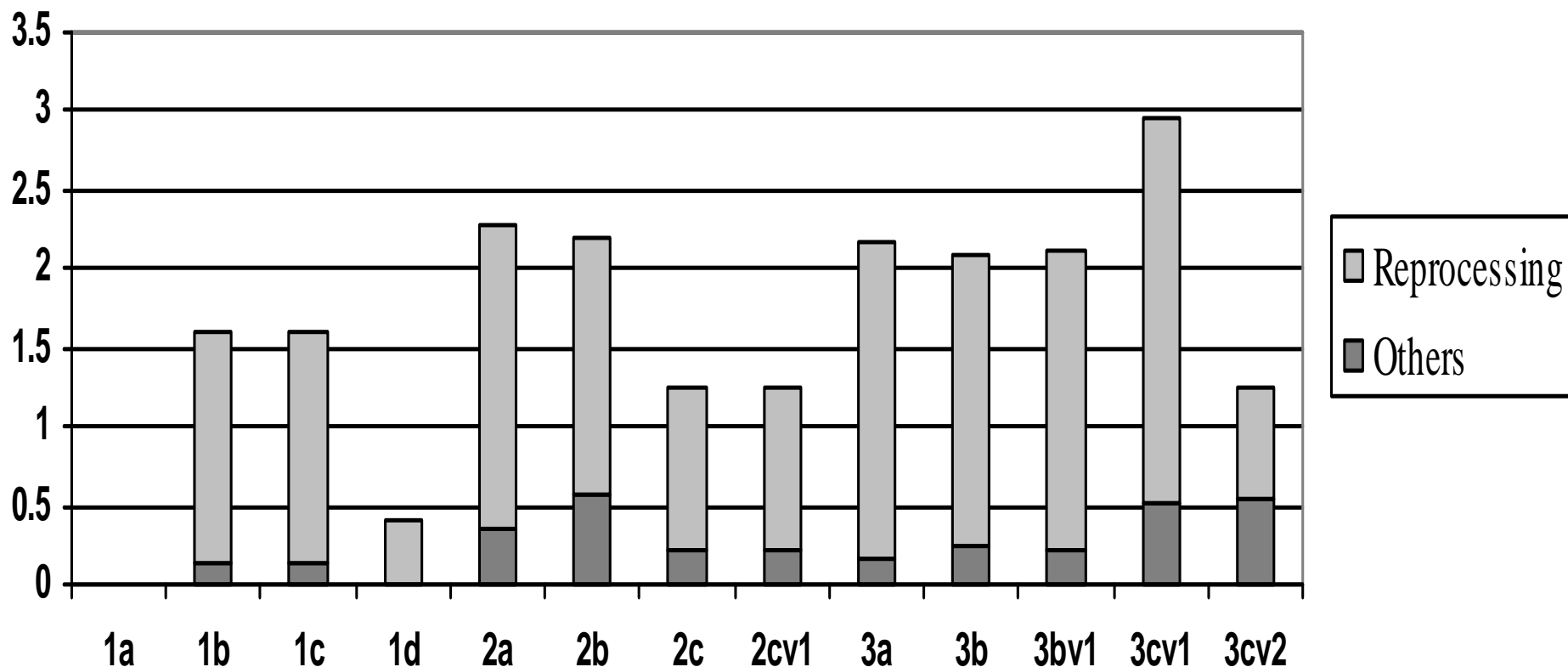
| 種類 | 定義 |
|--|---|
| HLW (deep geological disposal) | <ul style="list-style-type: none">・再処理の過程で発生する高放射性廃液、大部分はFPだがアクチニドも含む。・大量の崩壊熱発生を伴う放射能レベルを持つすべての廃棄物・廃棄物とされた使用済み燃料 |
| LILW-LL (低・中レベル-長寿命) (geological disposal) | <ul style="list-style-type: none">・輸送等の取り扱い時に、放射性核種を含むが故に遮蔽を必要とするが発熱に対する対応をほとんど必要としない廃棄物・半減期 > 30年・発熱量 < 2kW/m³ |
| LILW-SL (低・中レベル-短寿命) (surface disposal) | <ul style="list-style-type: none">・放射性核種を少量しか含まないため、輸送等の取り扱い時に遮蔽を必要としない廃棄物・半減期 < 30年・放射能量 < 400 Bq/g (長寿命 α 核種)・発熱量 < 2kW/m³ |

LILW-SL(短寿命低・中レベル廃棄物)の 発生量比較 (m³/TWhe)



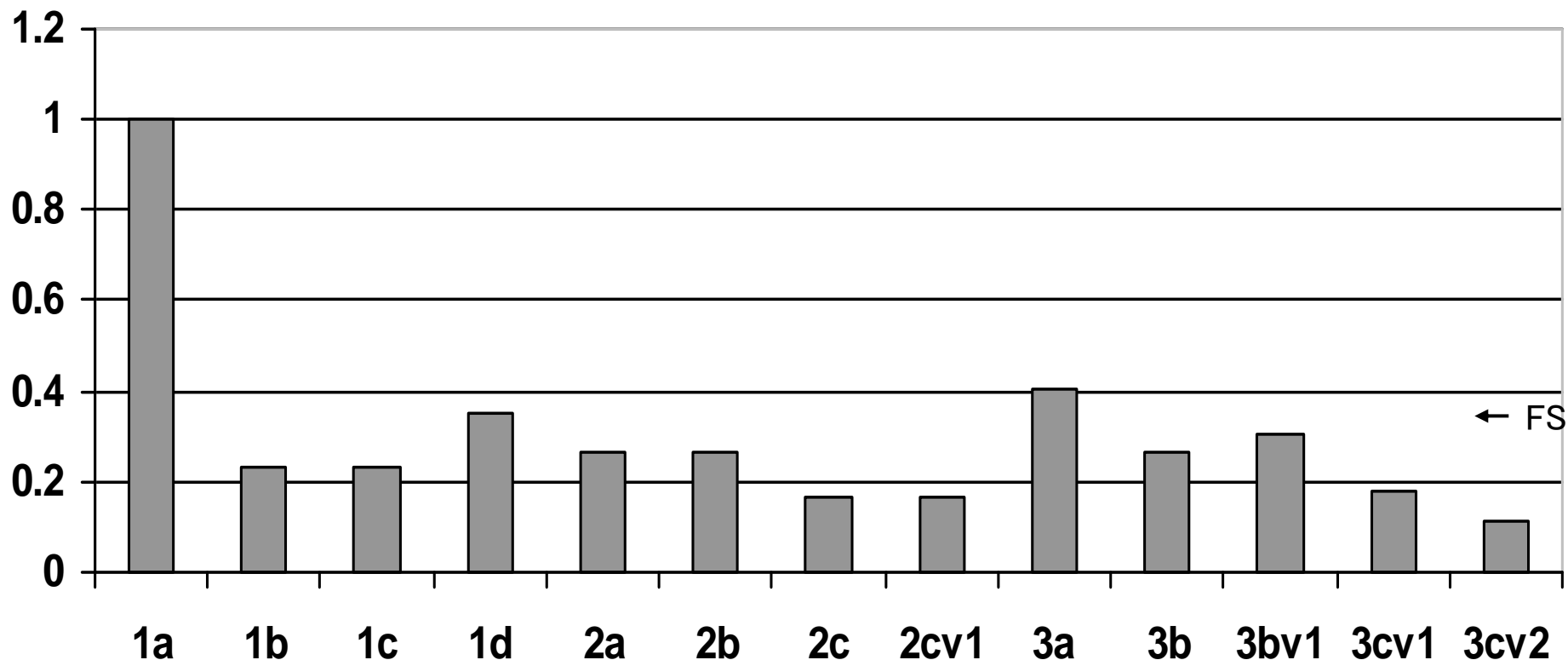
- ・実データが乏しいこともあり、結果として核燃料サイクルオプション間の差は小さくなっている。
- ・原子炉からの発生が支配的である。

LILW-LL(長寿命低・中レベル廃棄物)の 発生量比較 (m³/TWhe)



- ・再処理からの発生が支配的である。
- ・分離工程が多いほど発生量が多くなる傾向がある。
- ・LILW-SLと同様、2次廃棄物の実データが乏しいため不確定要素が大きい。

HLW(高レベル廃棄物)の発生量比較 (m³/TWhe)



- ・ワンスルー直接処分をやめるだけで約1/3に減少。
- ・Conditioning (処理)技術がHLW量を決定する重要因子。

- ・廃棄物種類間でファクター約10の差がある。
 - LILW-SL : 20-25 m³/TWhe
 - LILW-LL : 1.5-3 m³/TWhe
 - HLW : 0.12-0.4 m³/TWhe

処分場の性能評価

性能評価対象燃料サイクル

以下の4ケースの解析を行う

1a : ワンスルー

1b : PWRでのPu1回リサイクル

2a : PWRでのPuマルチリサイクル

3c var.1. : GCFRでの全アクチニドリサイクル

粘土層、岩塩層、花崗岩層、凝灰岩層

解析条件(一部の特例を除き)

- ・ ^{129}I は固化体中に0.1 %存在する。
- ・処分までの冷却期間は50 年。
- ・乾式再処理からの固化体は湿式再処理からの固化体と同じ扱いとする。

発熱の影響(1/3)

必要掘削距離の比較(花崗岩層) t.l.e : Temperature limit exceeded

| Scheme | Cooling time (year) | Container load | Waste production (cont./TWhe) | Excavation (m/TWhe) | Total excavation (m/TWhe) | Ratio |
|--------|---------------------|----------------|-------------------------------|---------------------|---------------------------|-------|
| 1a | 50 | 3UOX | 1.33 | 9.92 | 9.92 | 1 |
| 1b | 50 | 1MOX | 0.44 | t.l.e | t.l.e | - |
| | | 1Glass | 2.59 | 4.92 | | - |
| | 75 | 1MOX | 0.44 | 5.37 | 9.51 | 0.96 |
| | | 1Glass | 2.59 | 4.15 | | |
| 2a | 50 | 1Glass | 3.99 | 8.37 | 8.37 | 0.84 |
| 3cv1 | 50 | 1Glass | 1.18 | 2.36 | 2.36 | 0.24 |

FR完全閉サイクルの必要掘削距離はワンスルーの1/4

発熱の影響(2/3)

処分場ギャラリー長の比較(粘土層)

バッファー内面温度:100°Cの場合

| | unit | 1a | 1b | 2a | 3cv1 | 3cv1 (Cs,Sr分離) |
|------------------|--------|------|------|------|------|-------------------|
| 使用済燃料 | #/TWhe | 3.98 | 0.44 | - | - | |
| HLW容器 | #/TWhe | - | 2.59 | 3.99 | 1.18 | 0.71 |
| HLW発熱量(50年後) | W/TWhe | 2110 | 2031 | 1997 | 571 | 12.5 |
| 処分場ギャラリー長 | m/TWhe | 7.03 | 6.77 | 6.66 | 2.02 | 0.76 |
| 処分場ギャラリー長 相対値 | - | 1 | 0.96 | 0.95 | 0.29 | 0.11 |

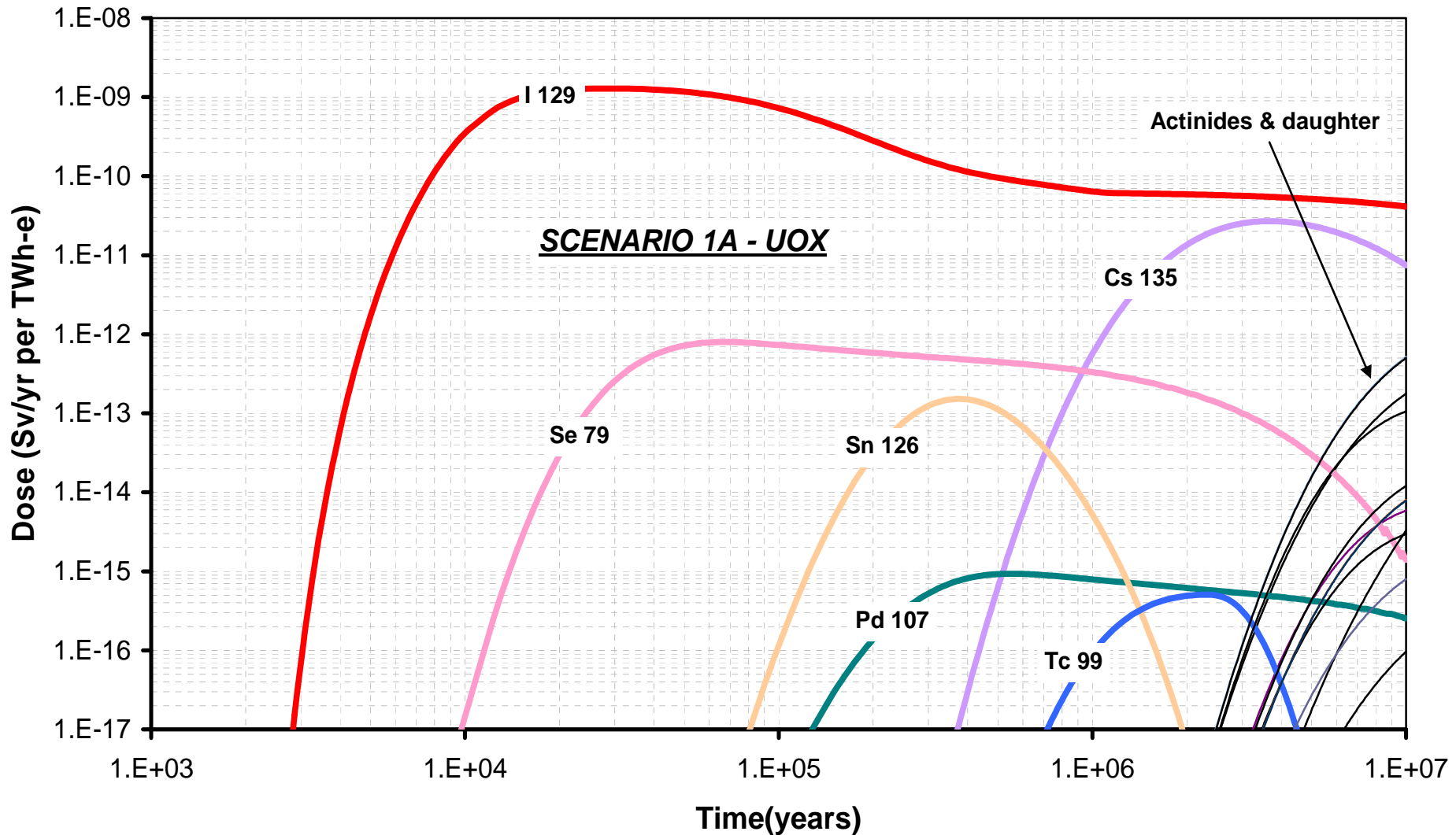
- ・PuのリサイクルのみではHLW発熱量は減少しない。
- ・FR完全閉サイクルでは処分場ギャラリー長がワンスルーの1/3.5となる。
- ・さらにCs、Srを分離すると処分場ギャラリー長がワンスルーの1/9となる。

発熱の影響 (3/3) 冷却期間の効果

| | | 1a | 1b | 2a | 3cv1 |
|-------------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| HLW発熱量 (W/TWhe) (50年後) | A | 2110 | 2031 | 2000 | 571 |
| | 1aとの相 対値 | 1 | 0.963 | 0.948 | 0.271 |
| HLW発熱量 (W/TWhe) (200年後) | B | 591 | 506 | 337 | 19.3 |
| | 1a、50年 冷却との 相対値 | 0.280 | 0.240 | 0.160 | 0.009 |
| AとBの比 | | 3.57 | 4.01 | 5.93 | 29.6 |

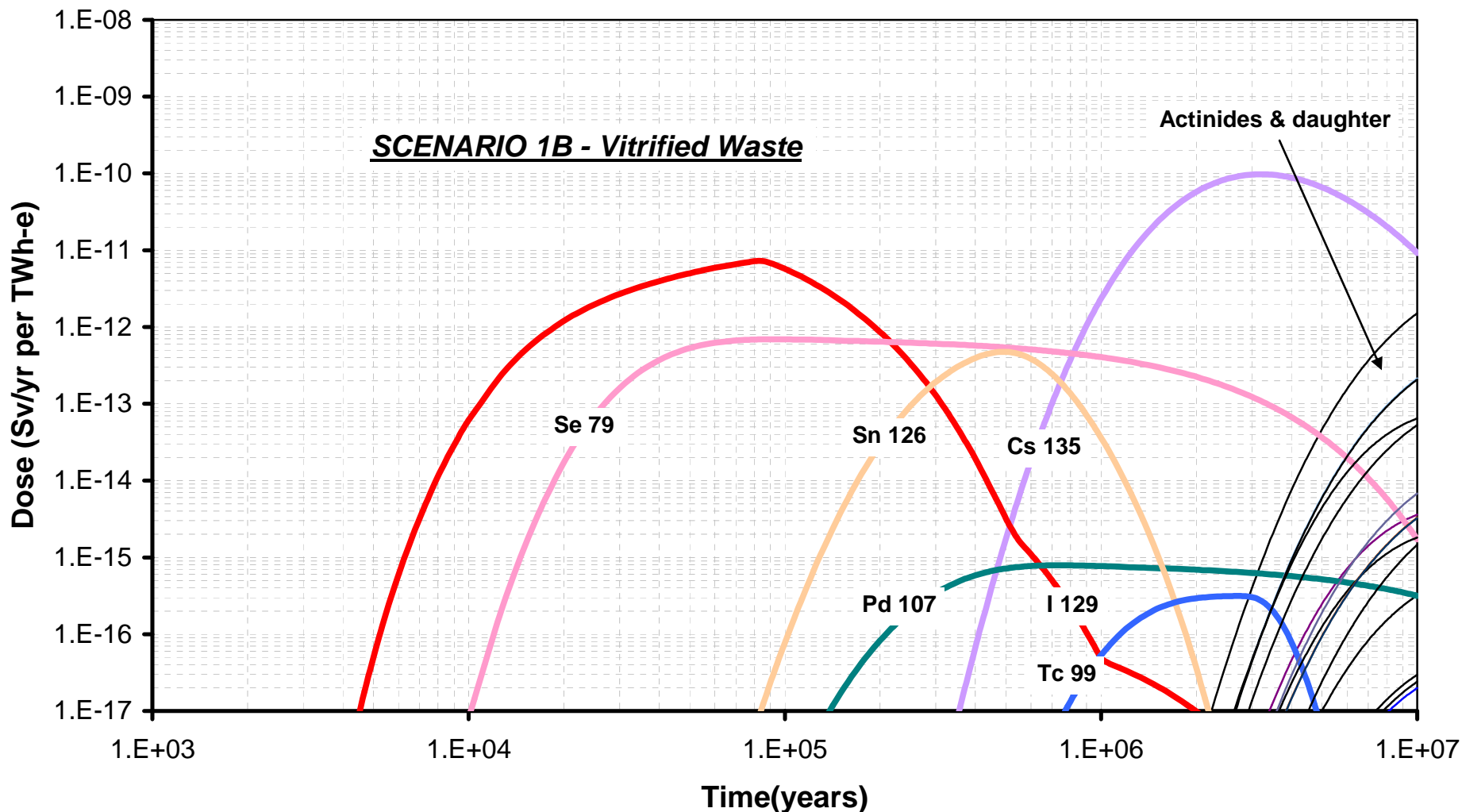
- ・冷却期間を50年から200年に延長すると使用済燃料の発熱量は1/3.6となる。
- ・FR完全閉サイクルの場合は(FPが主成分であるため)これが1/30となる。

花崗岩層での性能評価結果 (scheme 1a)



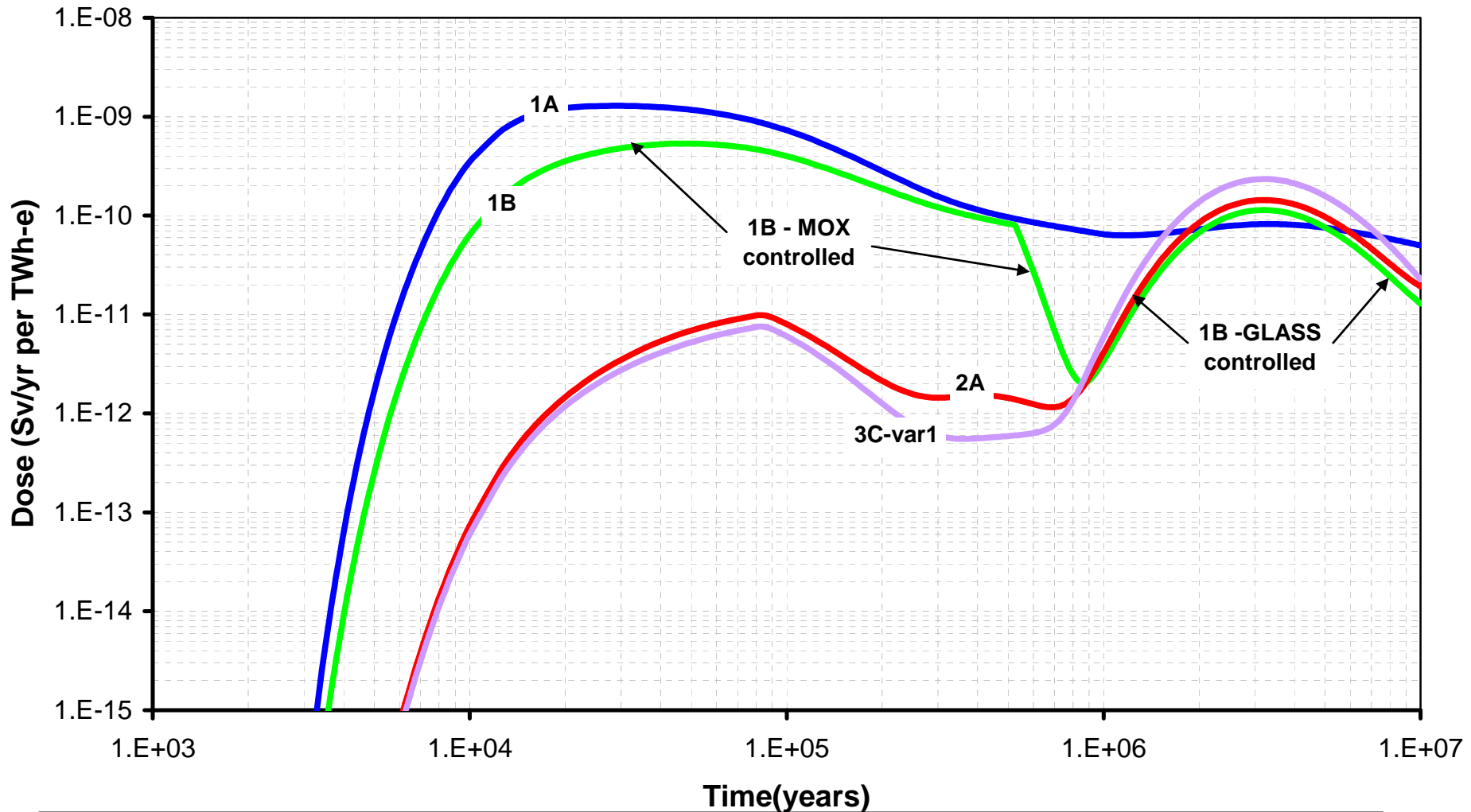
- ・線量のピークは ^{129}I で支配され、100万年後は ^{135}Cs が顕著となる。
- ・アクチノイド及びその娘核種からの線量が顕著となるのは1000万年以降。

花崗岩層での性能評価結果 (scheme 1b固化体)



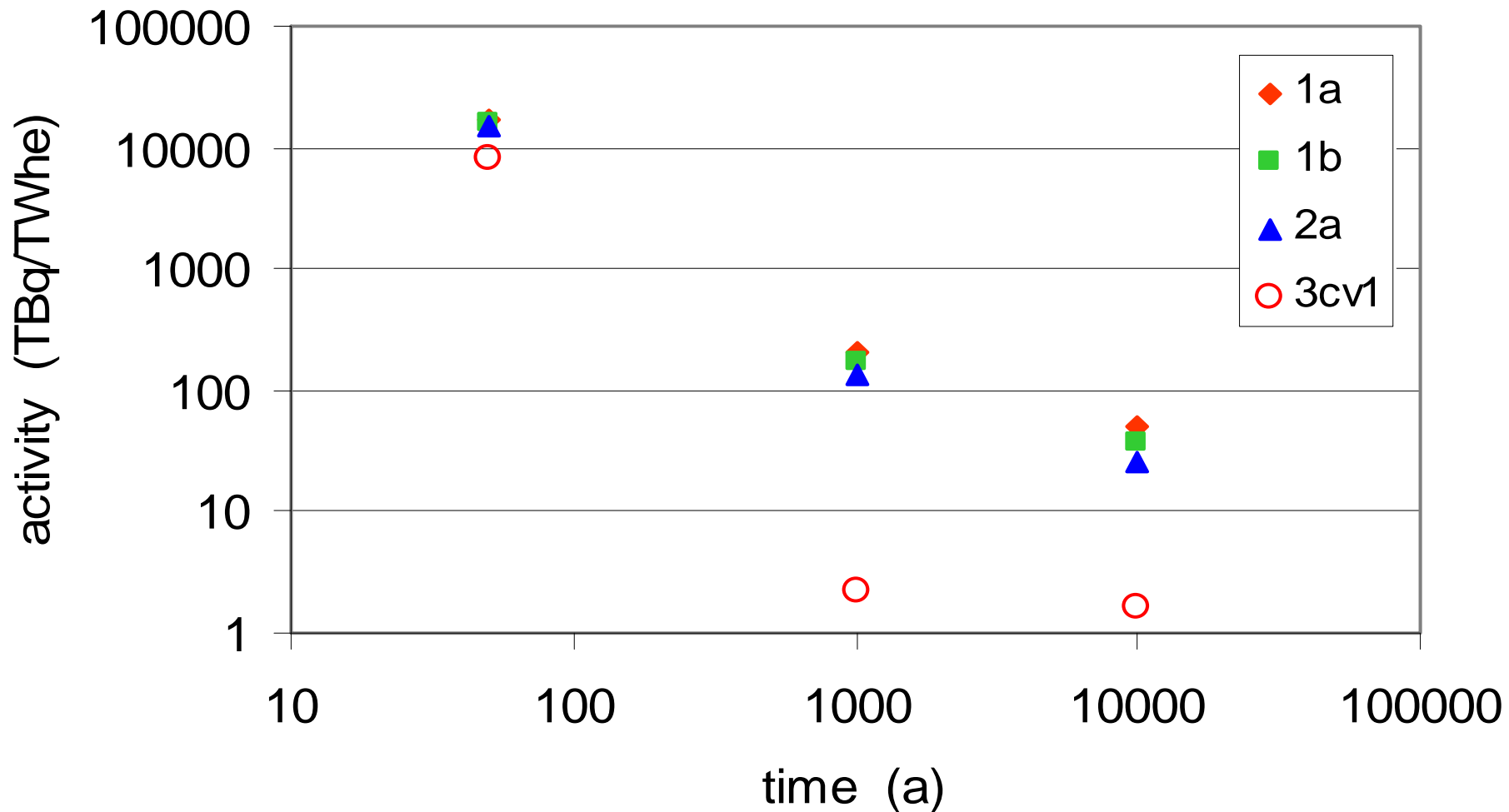
- ・ ^{129}I の含有量が0.1%であるため、それによる線量は1aより小さい。
- ・scheme 2a、3cv1についてもFP量がほぼ同じたため(ファクター2以内)、この図とほぼ同じ様子となる。

花崗岩層での性能評価結果(4つのschemeの比較)



- ・ピーク線量に関しては、scheme間に大きな差は無い。
- ・ 2a、3cv1、1bのガラス固化体はFP成分が似ているため同じ挙動を示す。
- ・ 1bの場合、80万年まで支配的となるMOX燃料と100万年以降顕著となるガラス固化体の重ね合わせである。

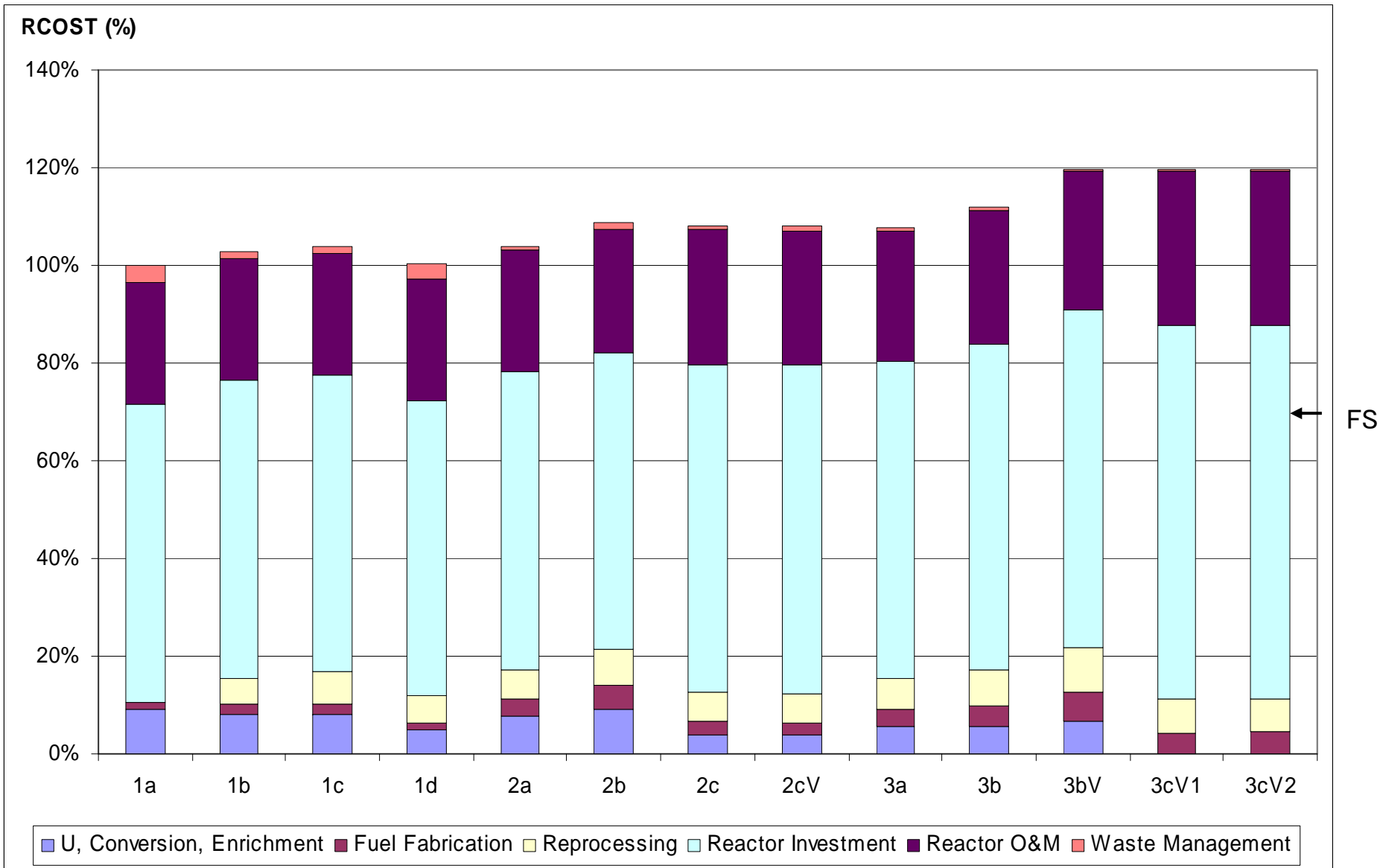
HLWの放射能



FR完全閉サイクルの放射能の減衰は早いので、人間侵入シナリオの可能性が小さくなる等の処分場シナリオの展開にも影響する。

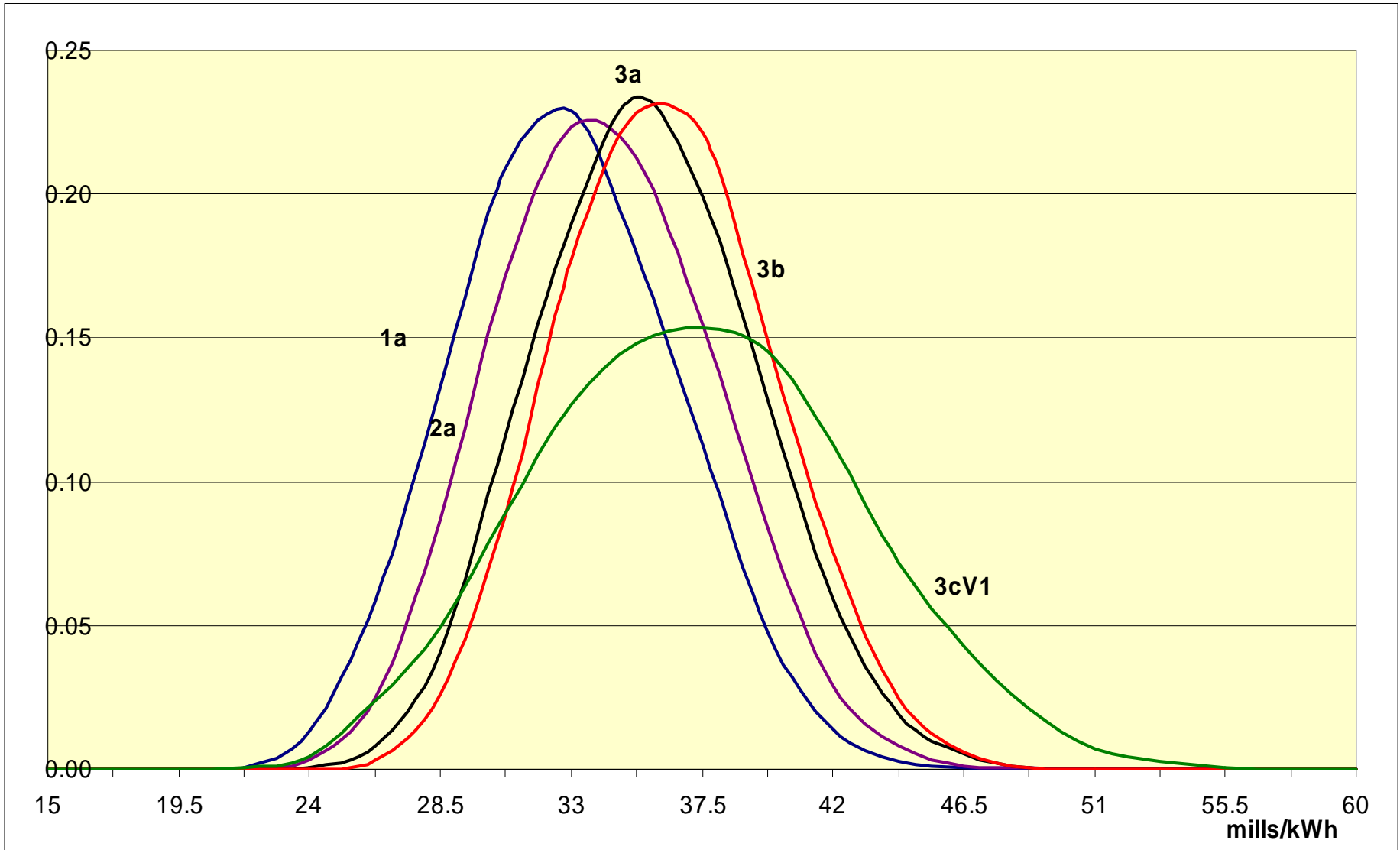
經濟性評價

発電コストの比較(ノミナル値ベース)



検討対象核燃料サイクルはすべてワンスルーの120%以内である。

単価の不確定幅を考慮した発電コストの分布



単価の不確定幅を考慮すると完全閉サイクルがワンスルーより安くなる可能性は否定できない。

結果のまとめ (1/4)

マスフロー

- ・完全閉サイクルにすることにより、ワンスルーと比較してHLW中のHM量を3桁以上削減可能である。
- ・高速炉は発電効率が高いので、軽水炉から高速炉への移行はFP発生量を抑え、結果としてHLW量を約30 %削減する。
- ・廃棄物中へのTRUロスが完全閉サイクルにすることによりワンスルーの1/100に削減可能。部分閉サイクルは1/3～1/20の削減であるが、実用化が容易である。一方、高速炉完全閉サイクルのTRUインベントリはワンスルーより1桁以上大きく、核変換政策がフェーズアウトになった時は残留TRUインベントリに対する対策が必要となろう。
- ・多重リサイクル燃料の高崩壊熱と高中性子発生は再処理と燃料製造に影響を与える。再処理に関しては、湿式フローシートの改善または乾式法の導入が必要となる。
- ・MAマネジメントを行うとワンスルーと比較してHLWの崩壊熱は減少するが、通常的地層処分時点(50年冷却)ではファクター2～4の減少である。一方、冷却期間を長くすることは大きな効果があり、200年冷却ではファクター20～30減少する。

結果のまとめ (2/4)

- ・天然ウラン必要量に関しては、ワンスルーと比較して新型軽水炉サイクルが約10%削減可能であり、DUPICは顕著な(40%)削減が可能である。高速炉導入によりさらに削減可能で、完全高速炉サイクルでは2桁低減する。
- ・軽水炉を用いるすべての核燃料サイクルは大量の残留ウランを生成する。長期に亘る貯蔵は廃棄物管理上の重要事項となる。

発生廃棄物

- ・廃棄物処理 (conditioning) 技術は再処理から発生するHLW固化体量を決定する重要ファクターである。先進分離法、特に乾式法から発生する廃棄物に対しては新たな処理法が必要となろう。
- ・高レベル廃棄物はワンスルーをやめれば大きく減少(約1/3)する。完全閉サイクルでは1/10に減らすことも可能。
- ・LILW-SL(短寿命の中・低レベル廃棄物)の大部分は原子炉から発生し、LILW-LL(長寿命の中・低レベル廃棄物)の大部分は再処理から発生する。核燃料サイクル間の差異は小さい。また、実データが乏しいため不確定幅が大きい。

結果のまとめ (3/4)

地層処分

- ・先進核燃料サイクルから発生するHLWはワンスルーから発生する使用済燃料より発熱量が小さい。特に完全閉サイクルの場合、発熱量の減少により50年冷却の粘土層の場合、処分場ギャラリー長は1/3.5に減少し、さらにCs、Srの分離により1/9に減少する。
- ・地層処分されたHLWに起因する被ばく線量は核燃料サイクル間で大きな差異はない。ワンスルーと比較して最大1/8減少するが、これは ^{129}I が分離されているため、 ^{129}I も地層処分されるとするとほぼ同じになる。
- ・硬岩層及び粘土層の場合、アクチノイド核種が生物圏へ出てくるのは数百万年以降で且つ極めて少量である。
- ・完全閉サイクルの場合、処分されるアクチノイド量が極めて少ないため数百万年以降の被ばく線量は幾分低くなる。
- ・完全閉サイクルの放射能減衰は早いので、人間侵入シナリオの可能性が小さくなる等の処分場シナリオの展開にも影響する。

結果のまとめ (4/4)

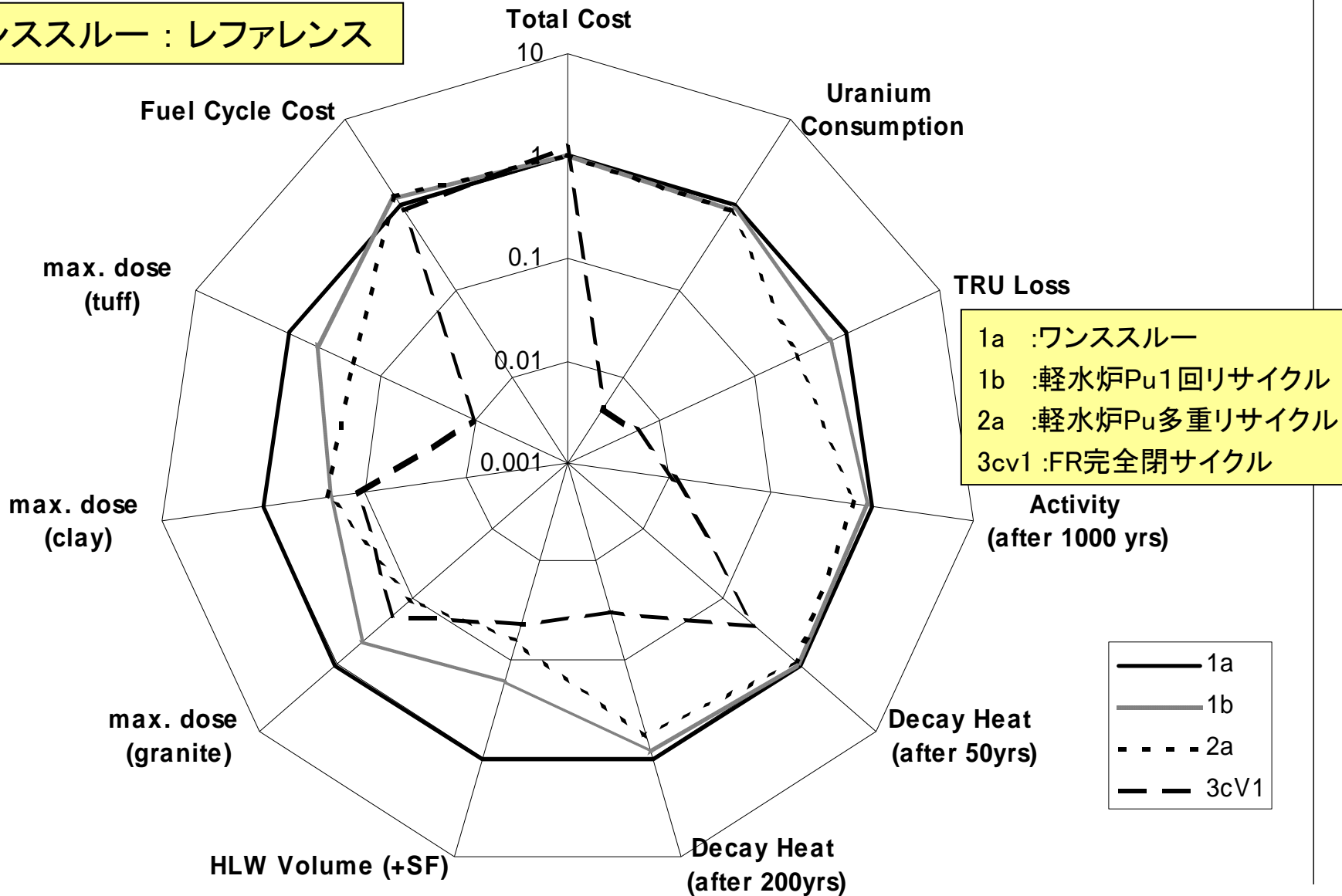
経済性

- ・検討対象核燃料サイクルの発電コストはすべてワンスルーの120%以内であり、原子炉のコストが発電コストの大部分を占める。
- ・燃料サイクルコストは核燃料サイクルオプション間でファクター2程度の差があり、(完全閉サイクルが安い)サイクルプロセスが簡単なほど安くなる傾向がある。
- ・経済性評価に用いた単価の不確定幅を考慮すると、先進核燃料サイクルがワンスルーより安くなる可能性は否定できない。

許容されるコストの範囲内でウラン資源を節約し、安全性のレベルを保ちつつ地層処分の負荷を低減可能な先進核燃料サイクルを設計可能であり、ウラン資源や地層処分の負荷に関する多様な政策選択が可能である。

総合評価(ワンスルー、LWRでのPu1回リサイクル、 LWRでのPu多重リサイクル、FR完全閉サイクル)

ワンスルー：レファレンス



OECD/NEA/NDCにおける

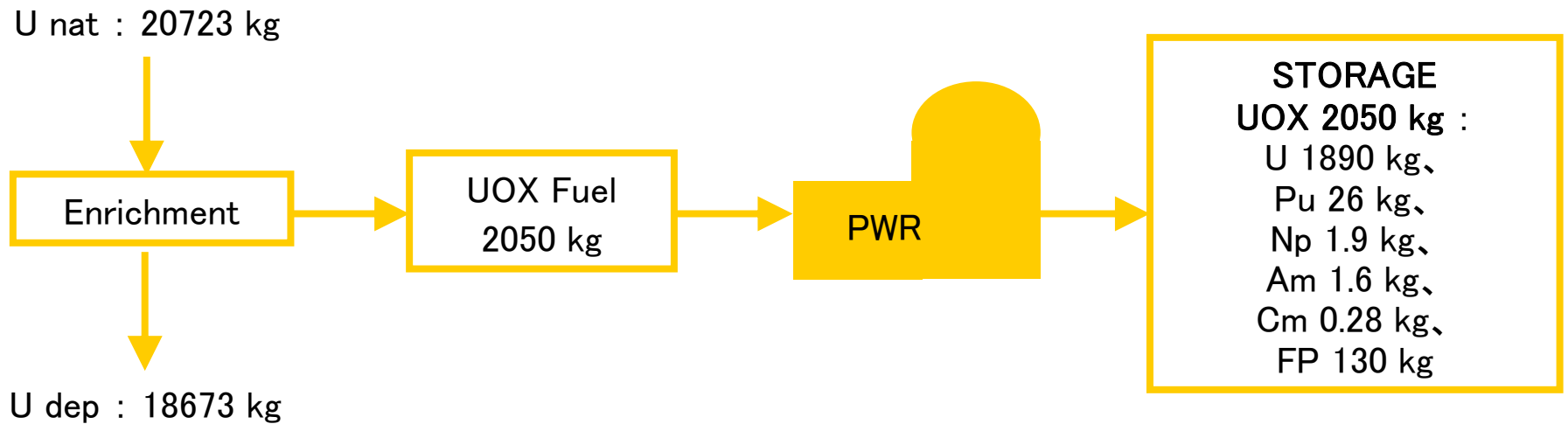
“廃棄物政策に対する先進的核燃料サイクルオプションの影響評価”

参考資料

Scheme 1a

Open cycle (Once through)

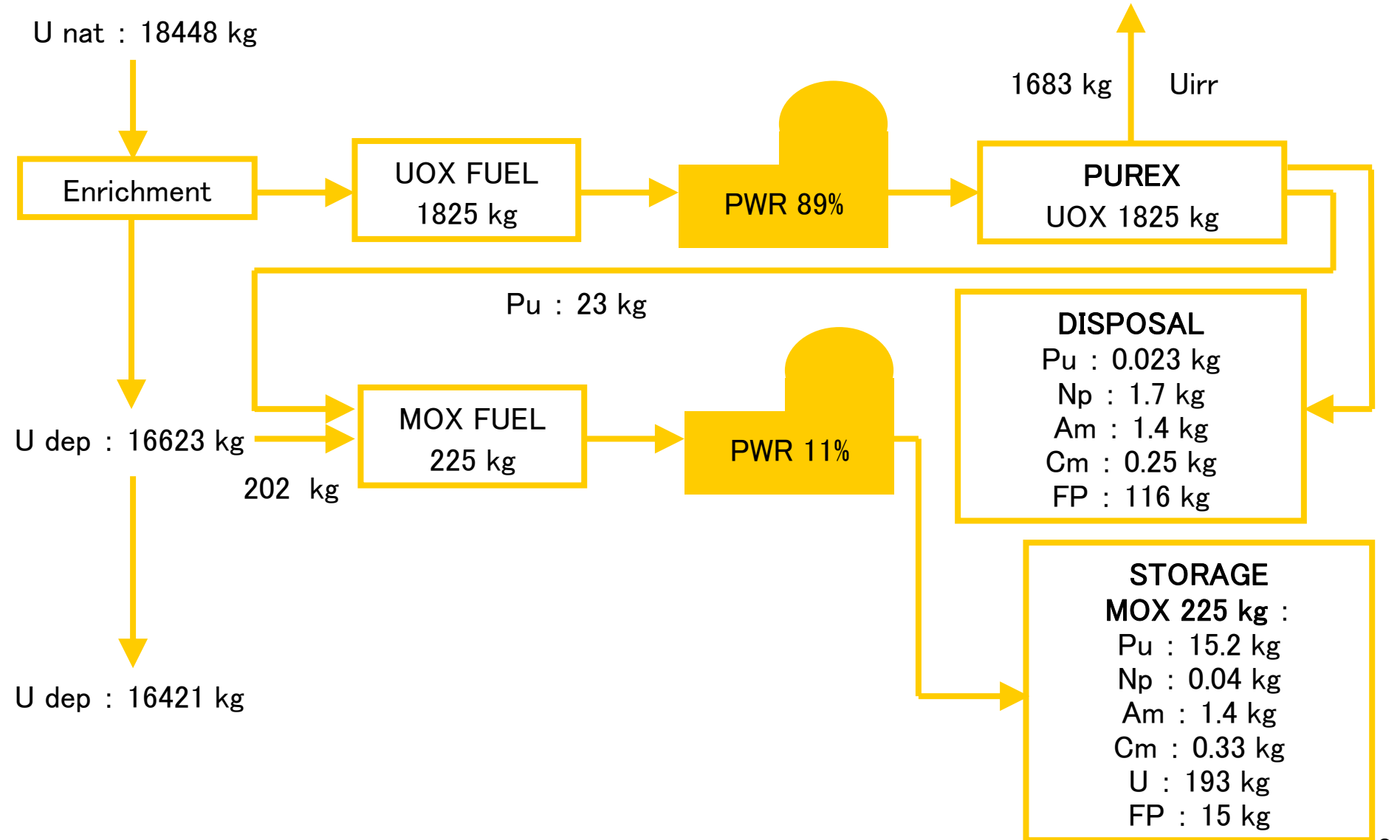
Fuel Characteristics and Mass Flows (kg/TWhe)



Scheme 1b

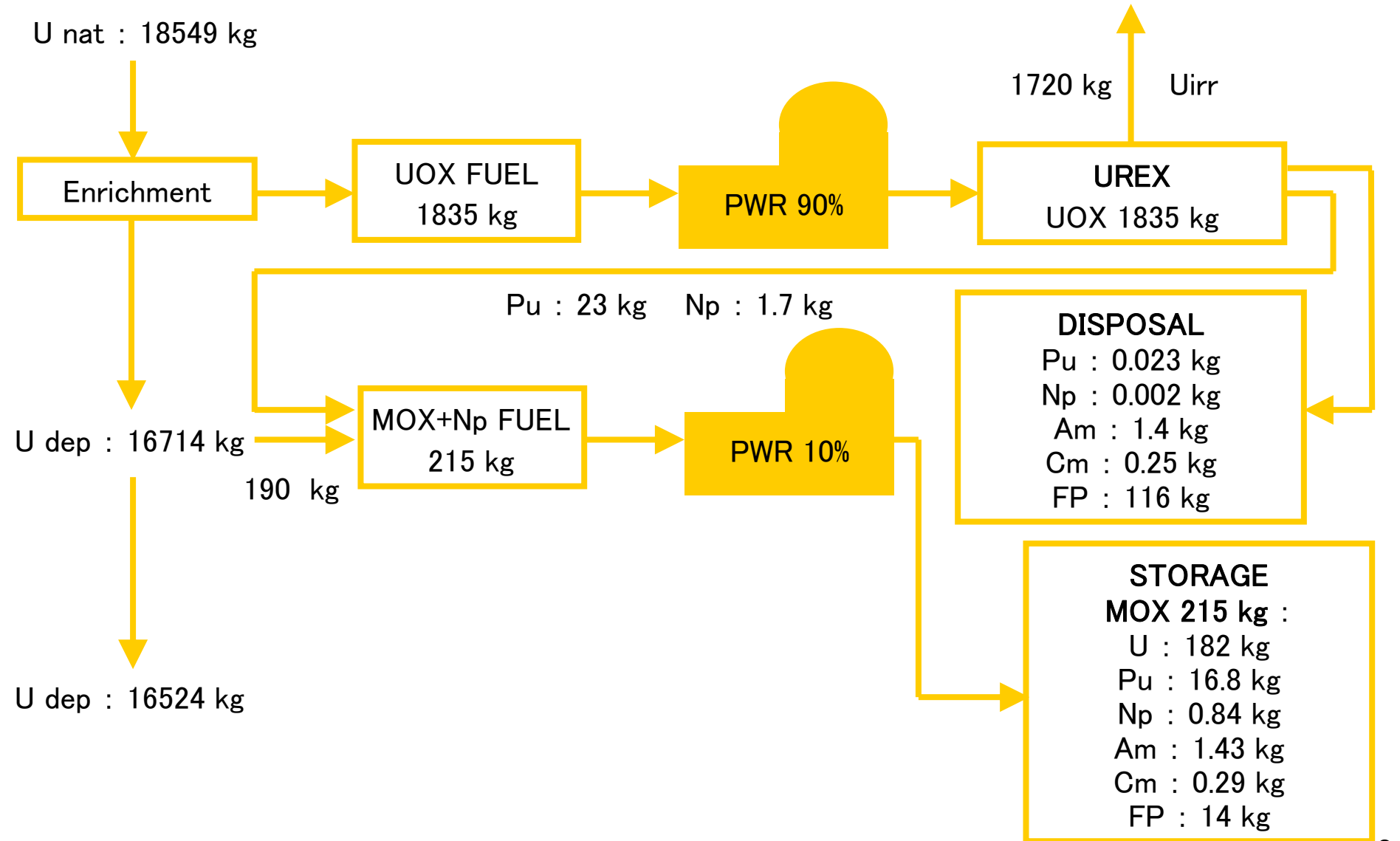
UOX reprocessed (PUREX) – Pu once cycling in MOX

Fuel Characteristics and Mass Flows (kg/TWhe)



Scheme 1c

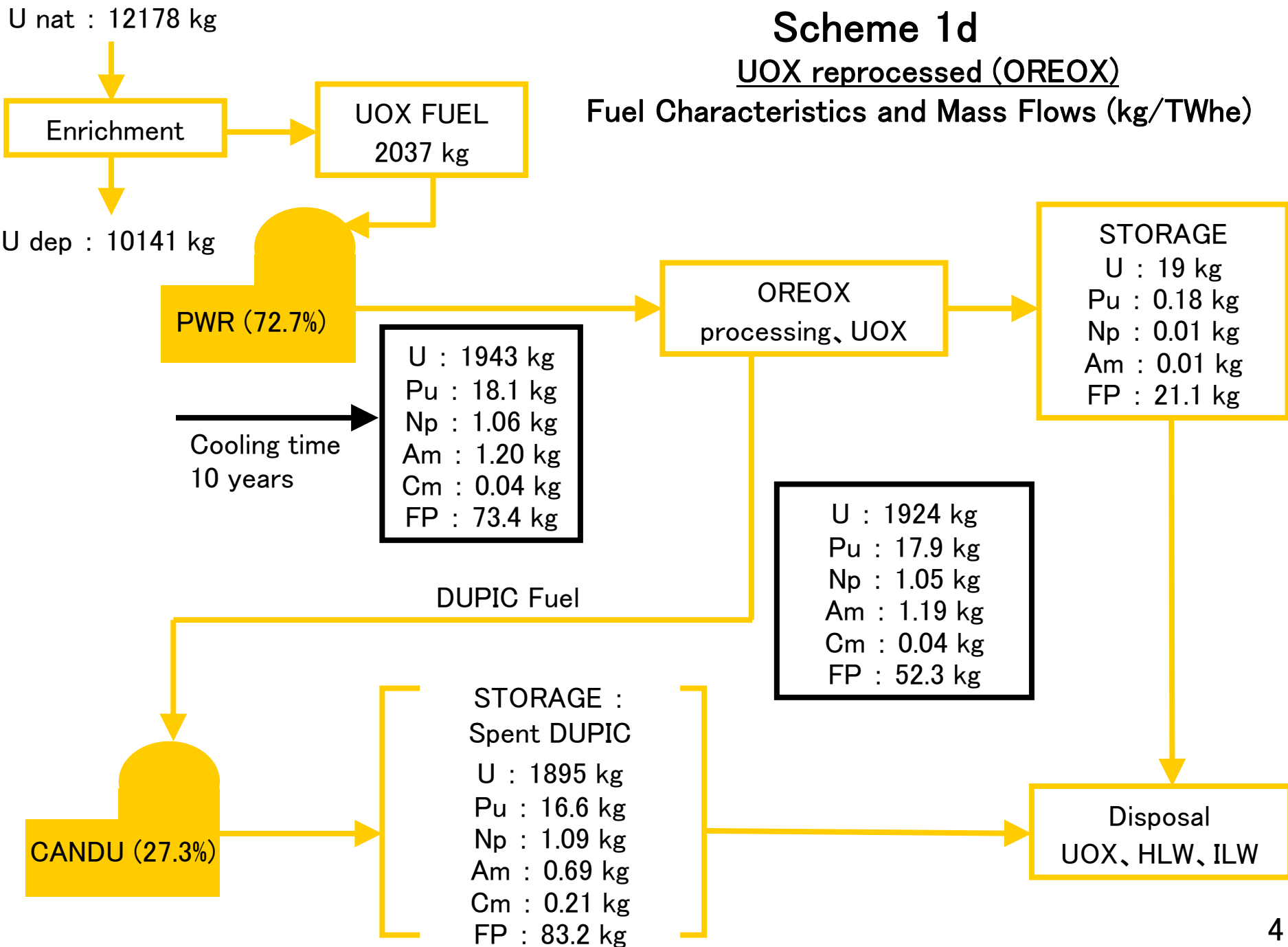
UOX reprocessed (UREX) – Pu,Np once cycling in MOX
Fuel Characteristics and Mass Flows (kg/TWhe)



Scheme 1d

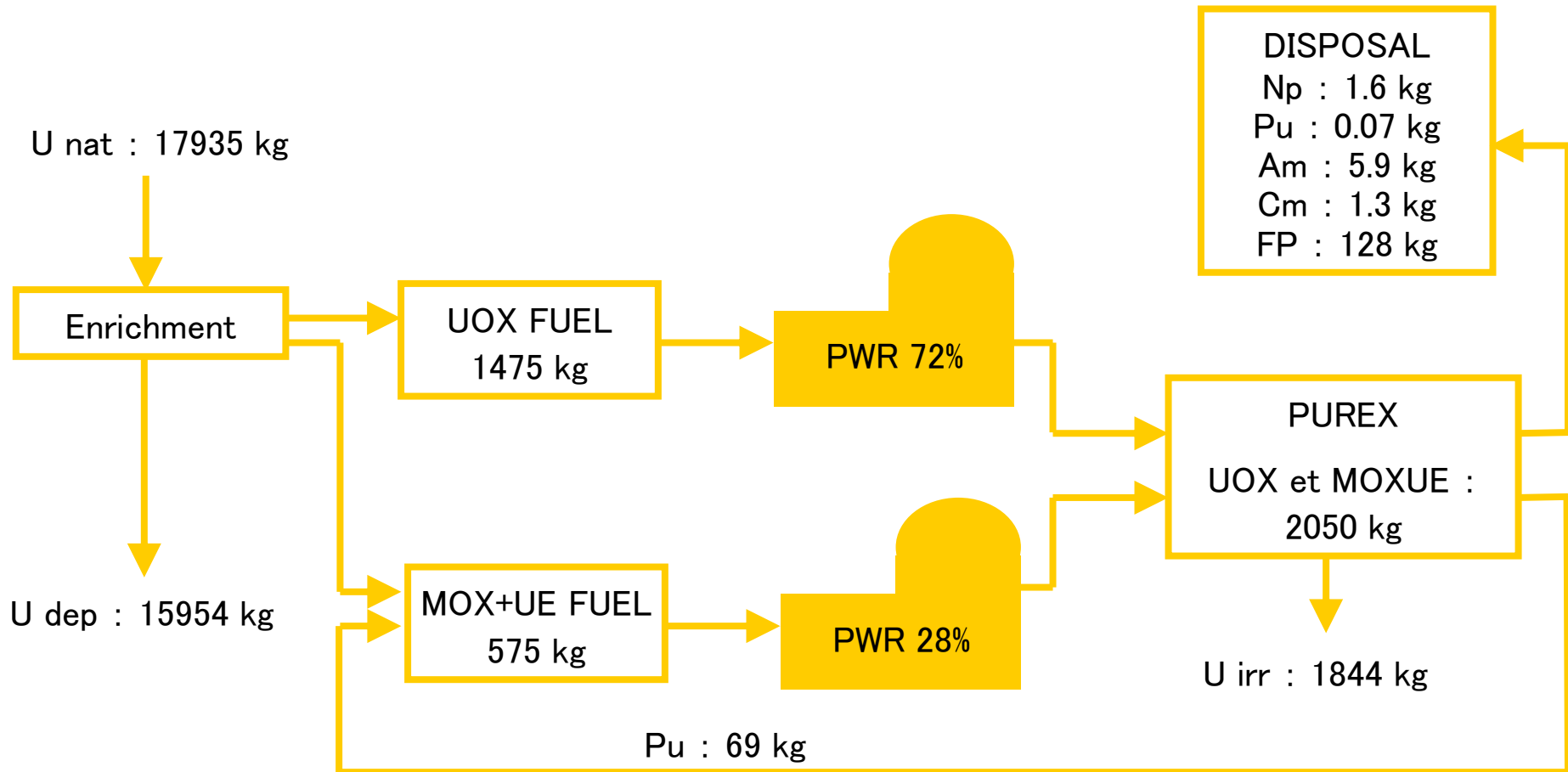
UOX reprocessed (OREOX)

Fuel Characteristics and Mass Flows (kg/TWhe)



Scheme 2a

UOX and MOX-EU reprocessed (PUREX) – Pu recycling Fuel Characteristics and Mass Flows (kg/TWhe)

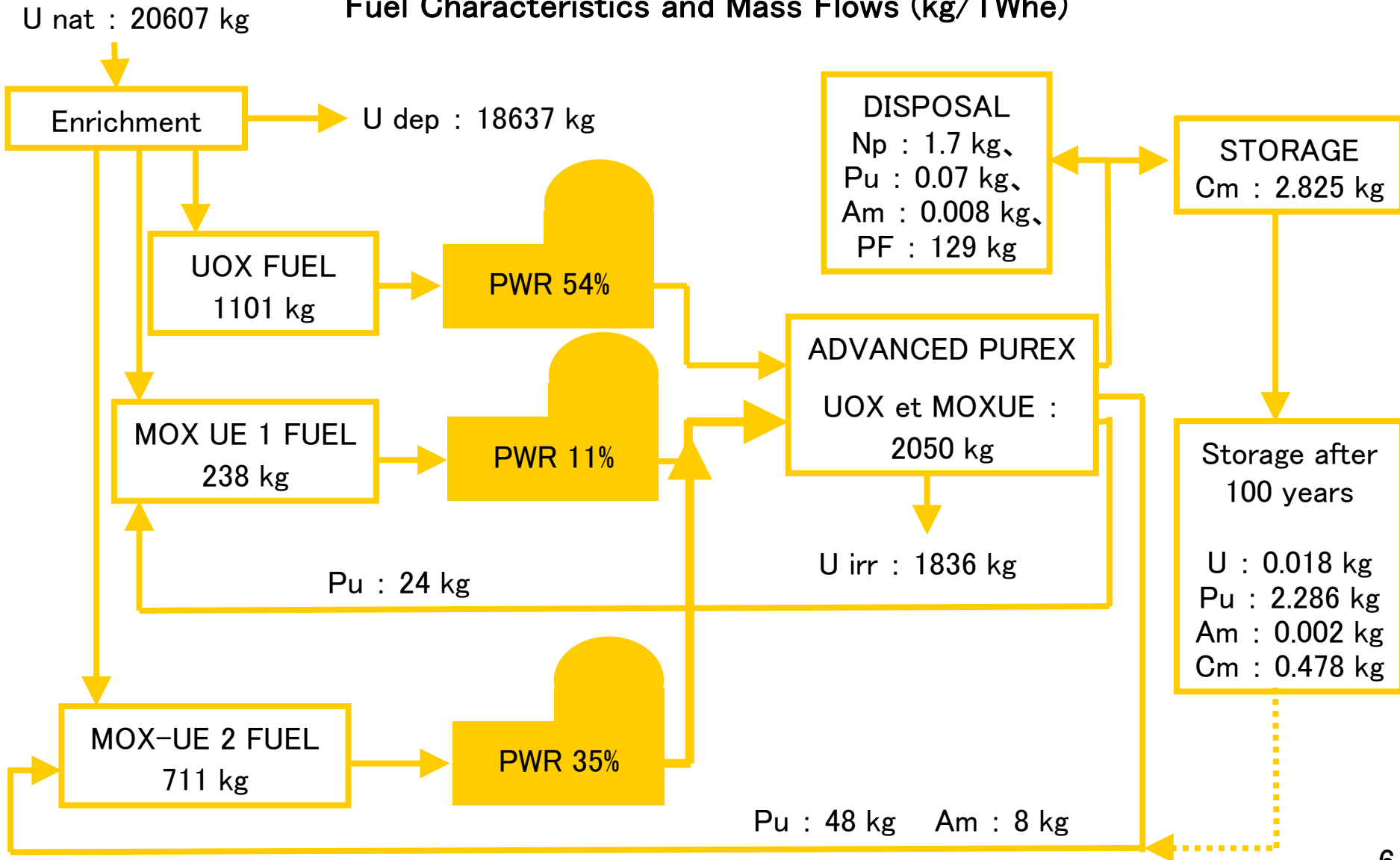


Scheme 2b

UOX and MOX reprocessed (Advanced PUREX) – Am and Cm Partitioning

– Cm storage – Pu and Am recycling in MOX-EU

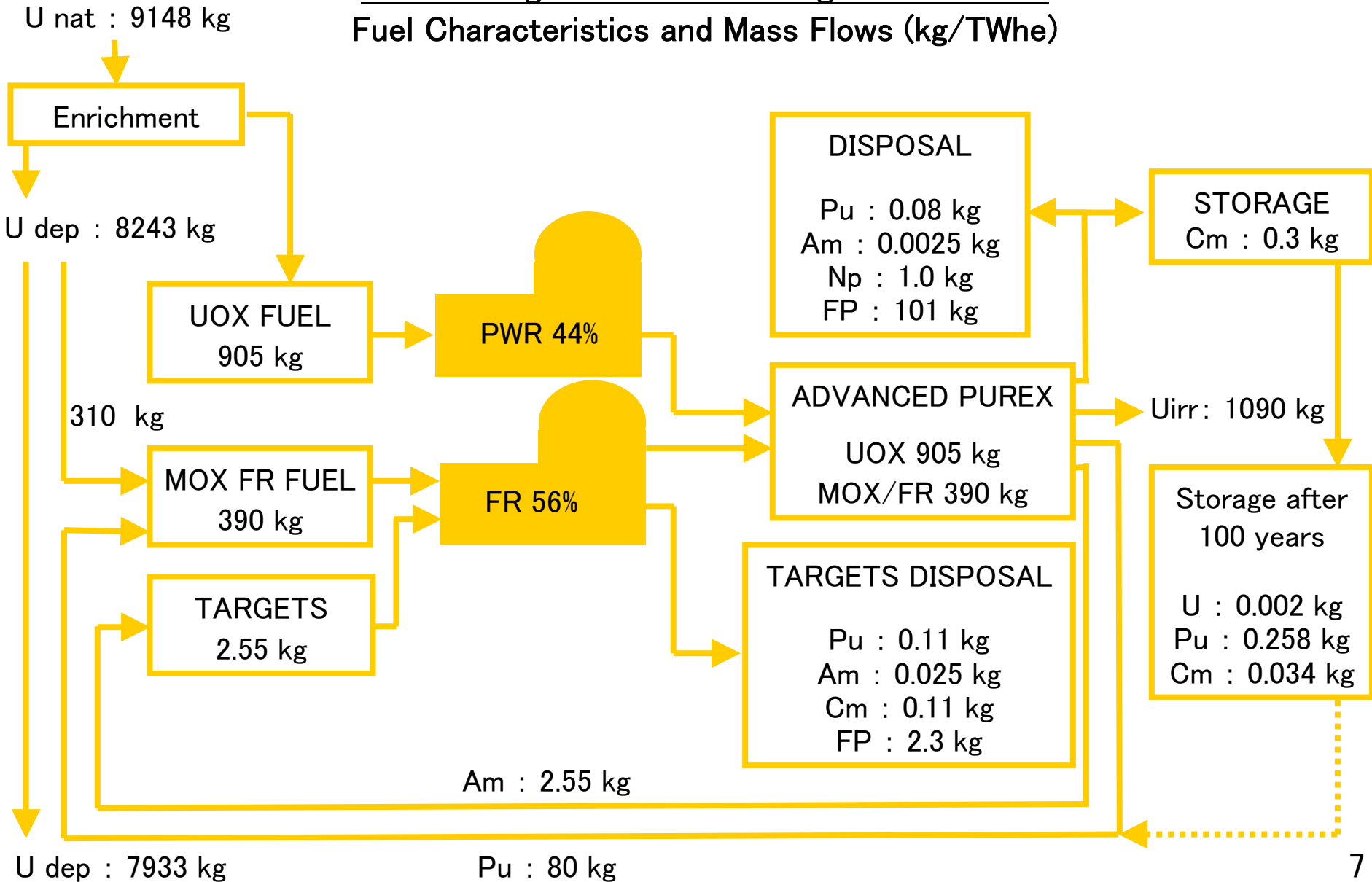
Fuel Characteristics and Mass Flows (kg/TWhe)



Scheme 2c

UOX and MOX reprocessed (Advanced PUREX) – Am and Cm Partitioning

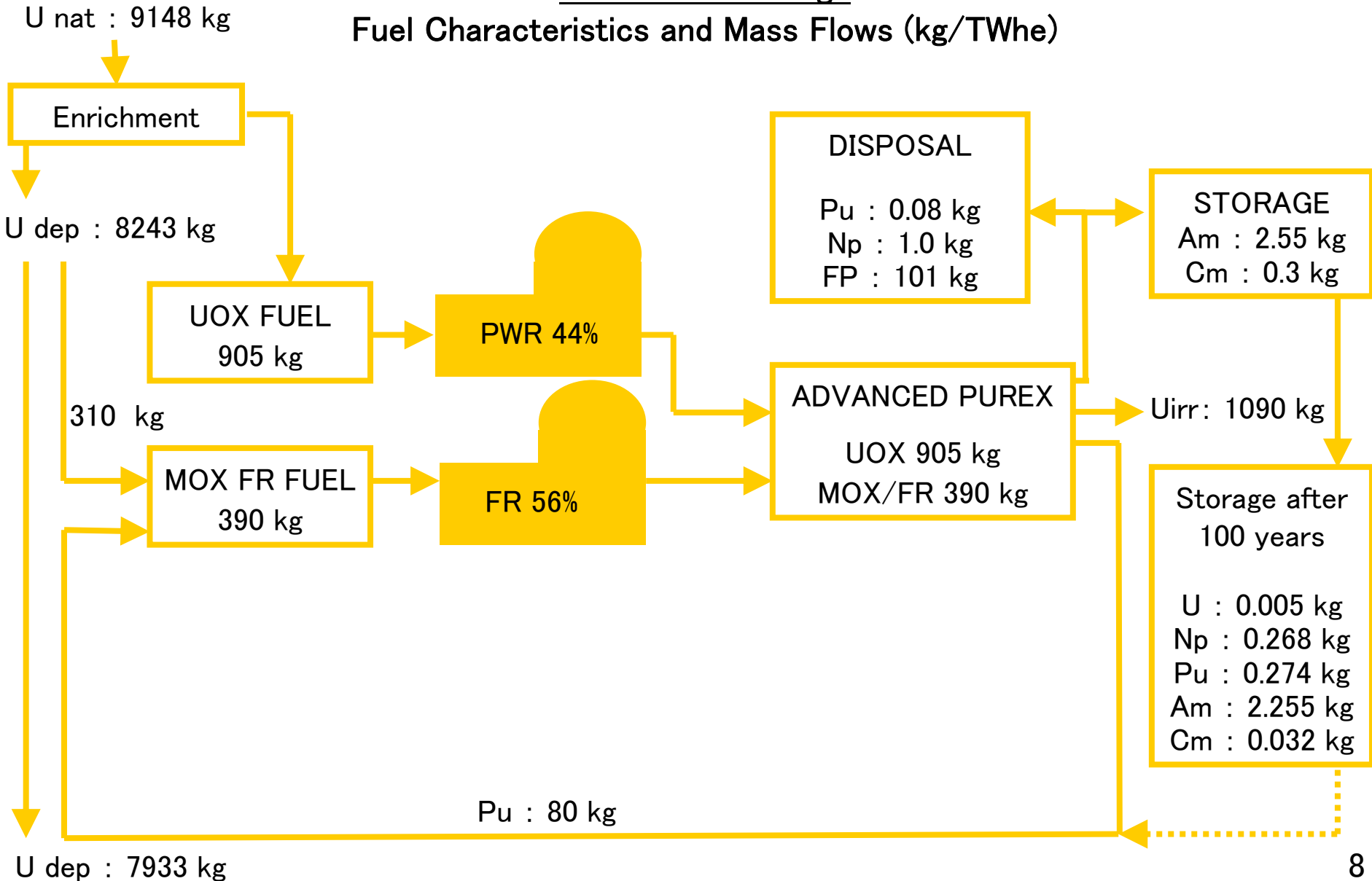
– Cm storage – Am once through transmutation
Fuel Characteristics and Mass Flows (kg/TWhe)



Scheme 2c variant

UOX and MOX reprocessed (Advanced PUREX) – Am and Cm Partitioning – Am and Cm storage

Fuel Characteristics and Mass Flows (kg/TWhe)



Scheme 3a

“TRU Burning in FR”

UOX reprocessed (UREX) – Metal reprocessed (PYRO)

– TRU partitioning and homogeneous transmutation

Fuel Characteristics and Mass Flows (kg/TWhe)

U nat : 12991 kg

Enrichment

UOX FUEL
1513 kg

PWR (63.2%)

UREX(UOX)
(Uirr : 1413 kg)

FP, HM losses

Pu + MA

WASTE

U : 1.588 kg
Pu : 0.084 kg
Np : 0.0027 kg
Am : 0.0060 kg
Cm : 0.0026 kg
FP : 117.5 kg

U dep : 11478 kg

FR (36.8%)

PYRO(⁷⁸Ac–²²Zr)

Actinides

Disposal

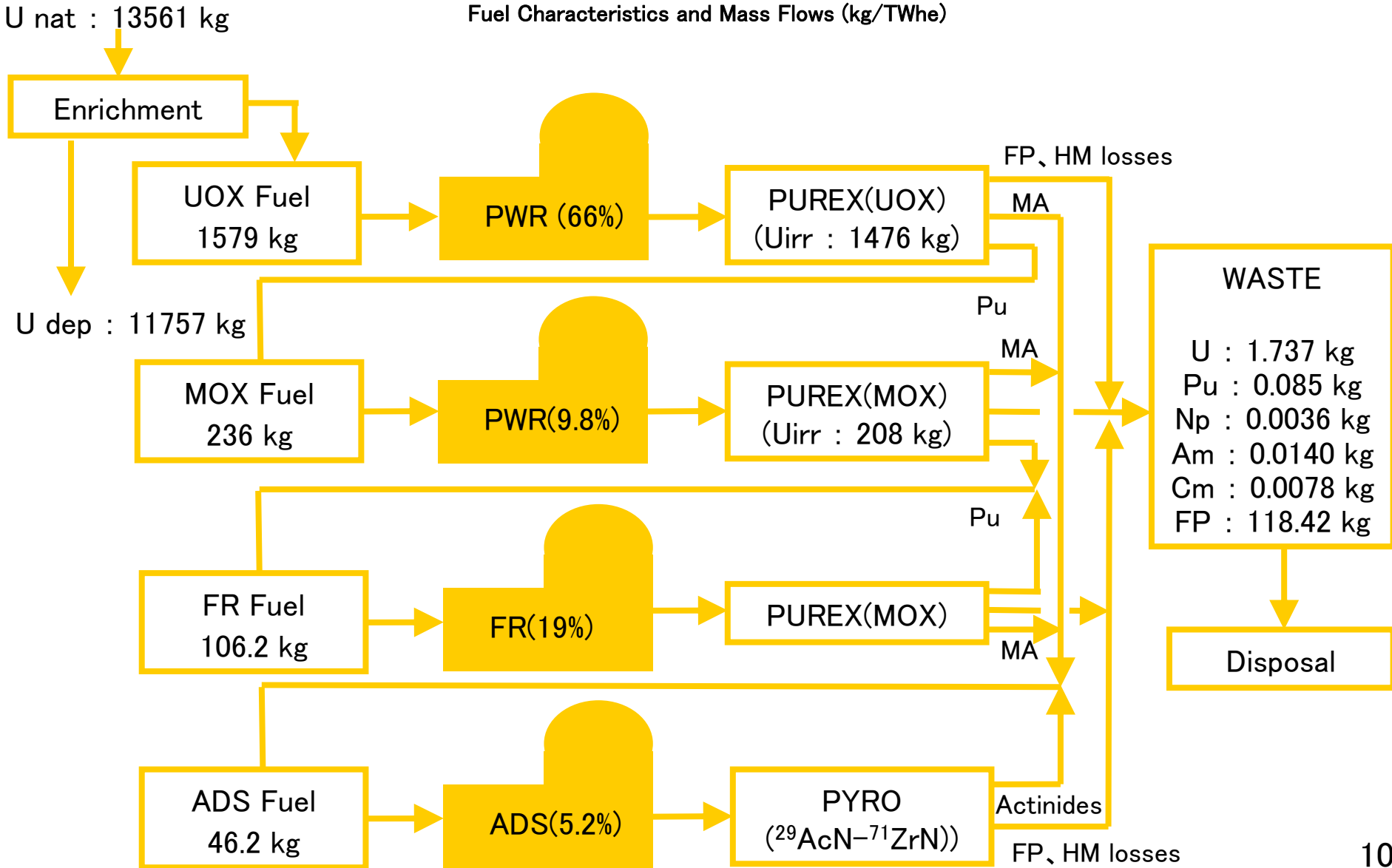
FR FUEL
289 kg

Scheme 3b

“Double Strata”

UOX and MOX reprocessed (PUREX) – Pu once recycling in PWR (MOX) – Pu multi recycling in FR Metal reprocessed (PYRO) – TRU partitioning and homogeneous transmutation – ADS fuel reprocessed (PYRO°)

Fuel Characteristics and Mass Flows (kg/TWhe)



Scheme 3b variant

“Double Strata”

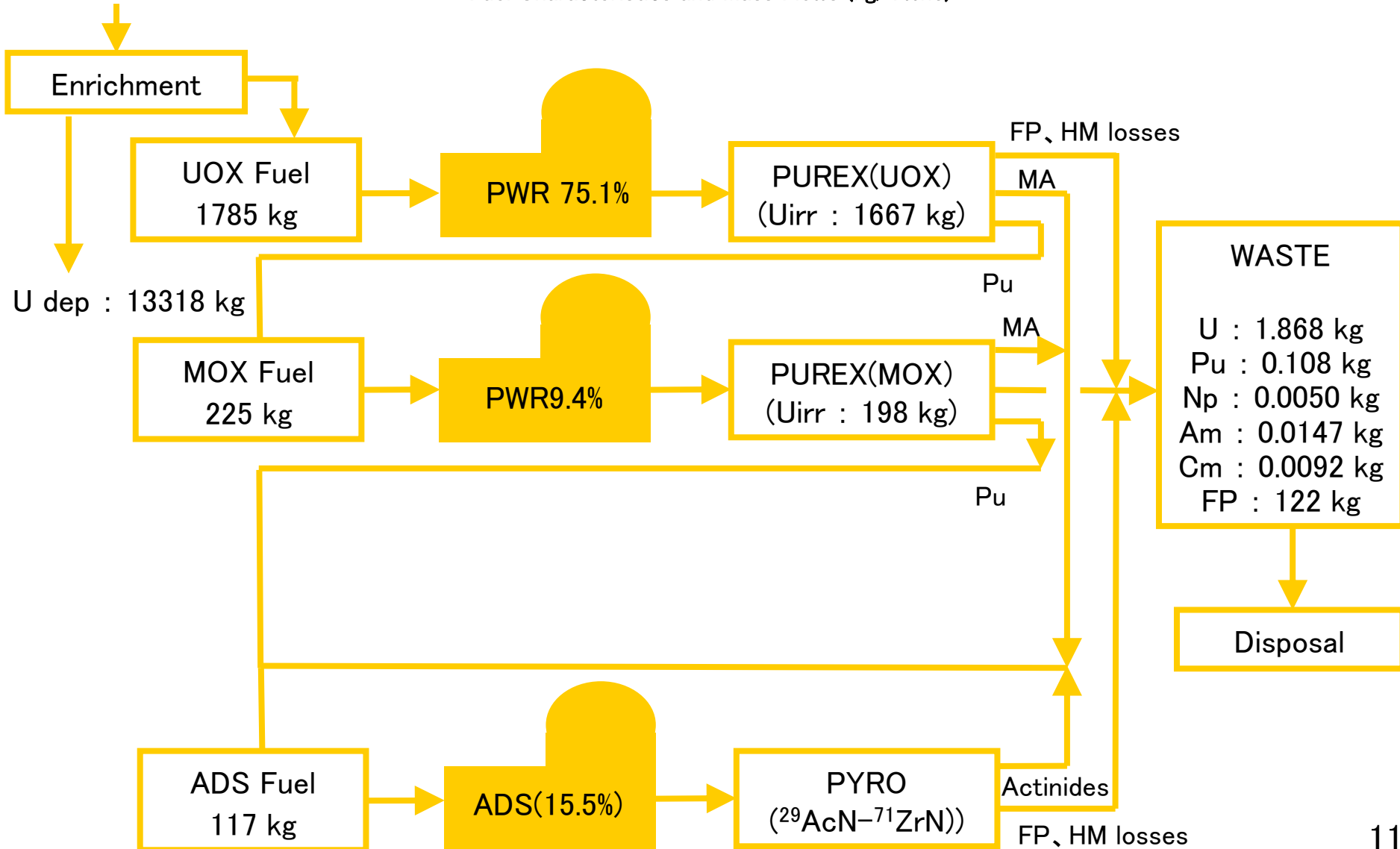
UOX and MOX reprocessed (PUREX) –TRU partitioning and homogeneous transmutation – ADS fuel reprocessed

(PYRO)

Fuel Characteristics and Mass Flows (kg/TWhe)

U nat : 15328 kg

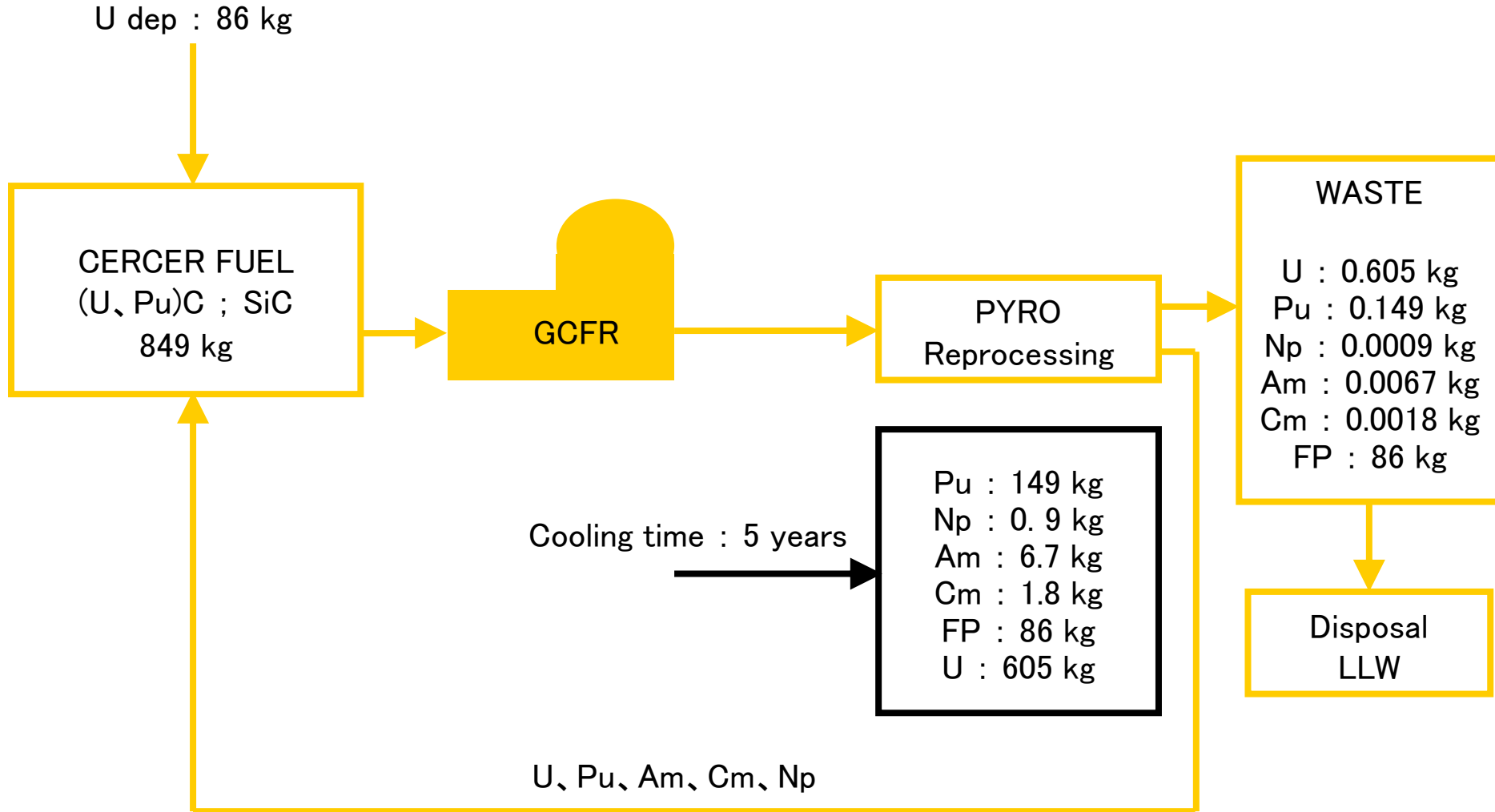
U dep : 13318 kg



Scheme 3c variant 1

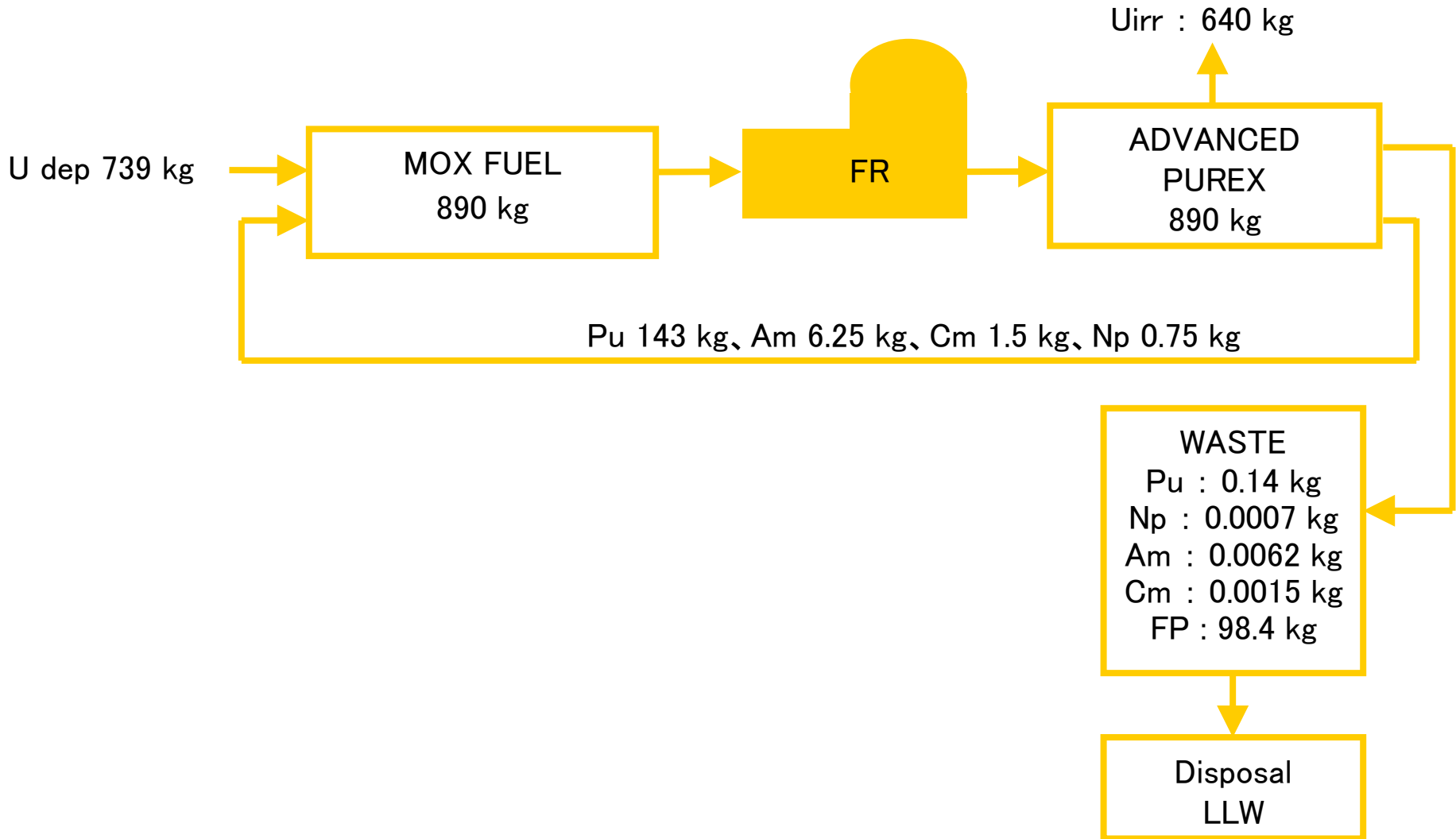
Carbide reprocessed (PYRO) – TRU partitioning and homogeneous transmutation

Fuel Characteristics and Mass Flows (kg/TWhe)

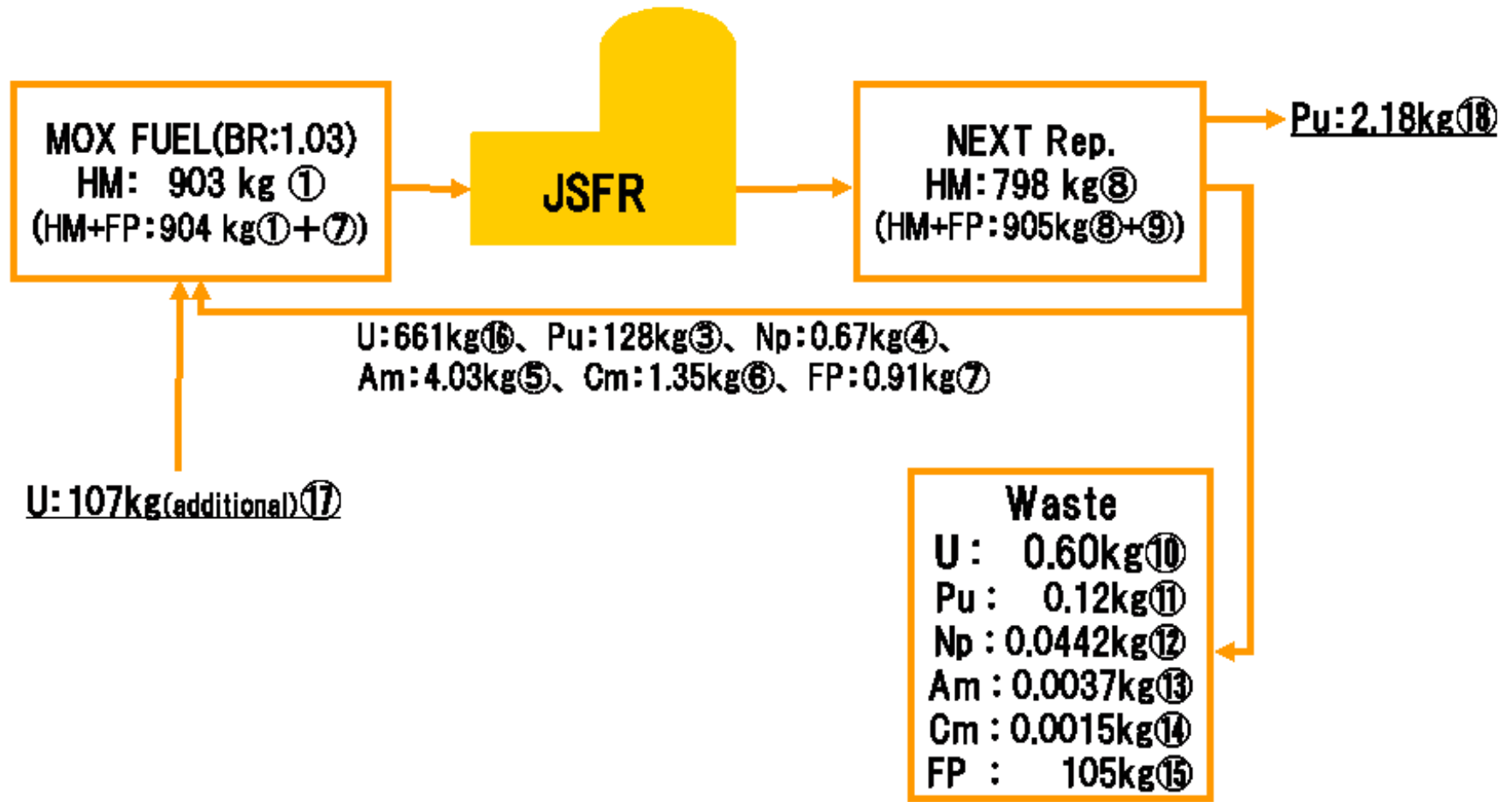


Scheme 3c variant 2

MOX reprocessed (Advanced PUREX) – TRU partitioning and homogeneous transmutation Fuel Characteristics and Mass Flows (kg/TWhe)



FSにおけるNa冷却MOX大型炉-先進湿式再処理-簡素化ペレット製造



- 注1) BR=1.028炉心での平衡サイクルを想定
- 注2) 単位は kg/TWhe
- 注3) U(irr)は、FSでは再利用して装荷燃料にする
- 注4) リサイクルするPu,Np,Am,Cm,FPについては、装荷燃料に必要な分を表記
- 注5) FPの廃棄物への移行率は99%を想定

CEAのPu(+MA)マルチリサイクル概念(集合体の概要)

MOX (or MIX)

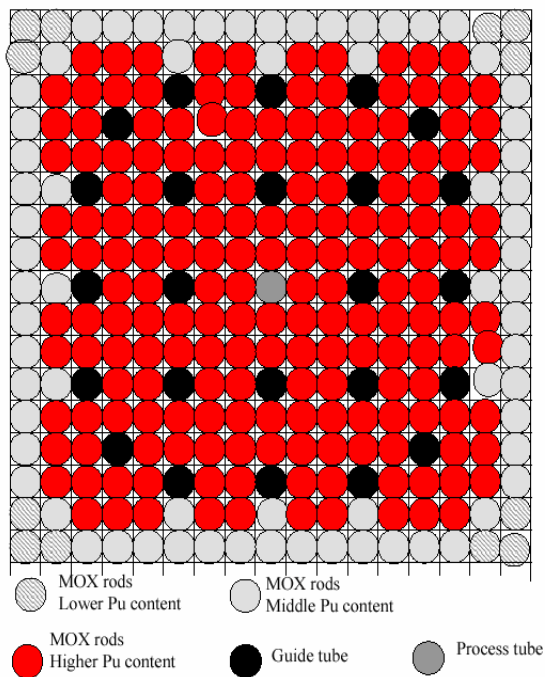
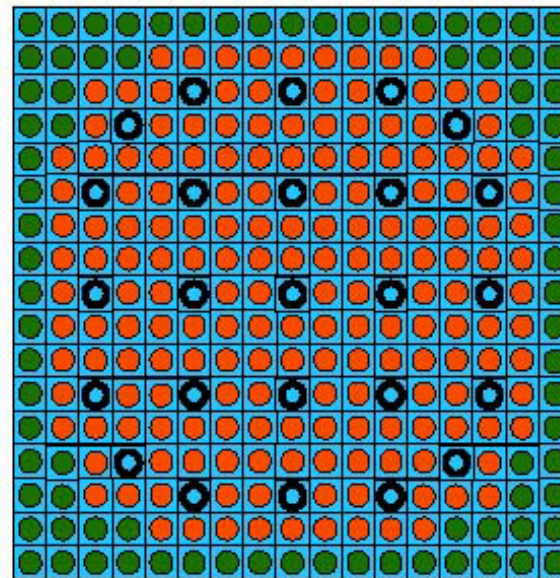


Figure 1: MOX fuel design

CORAIL Assembly

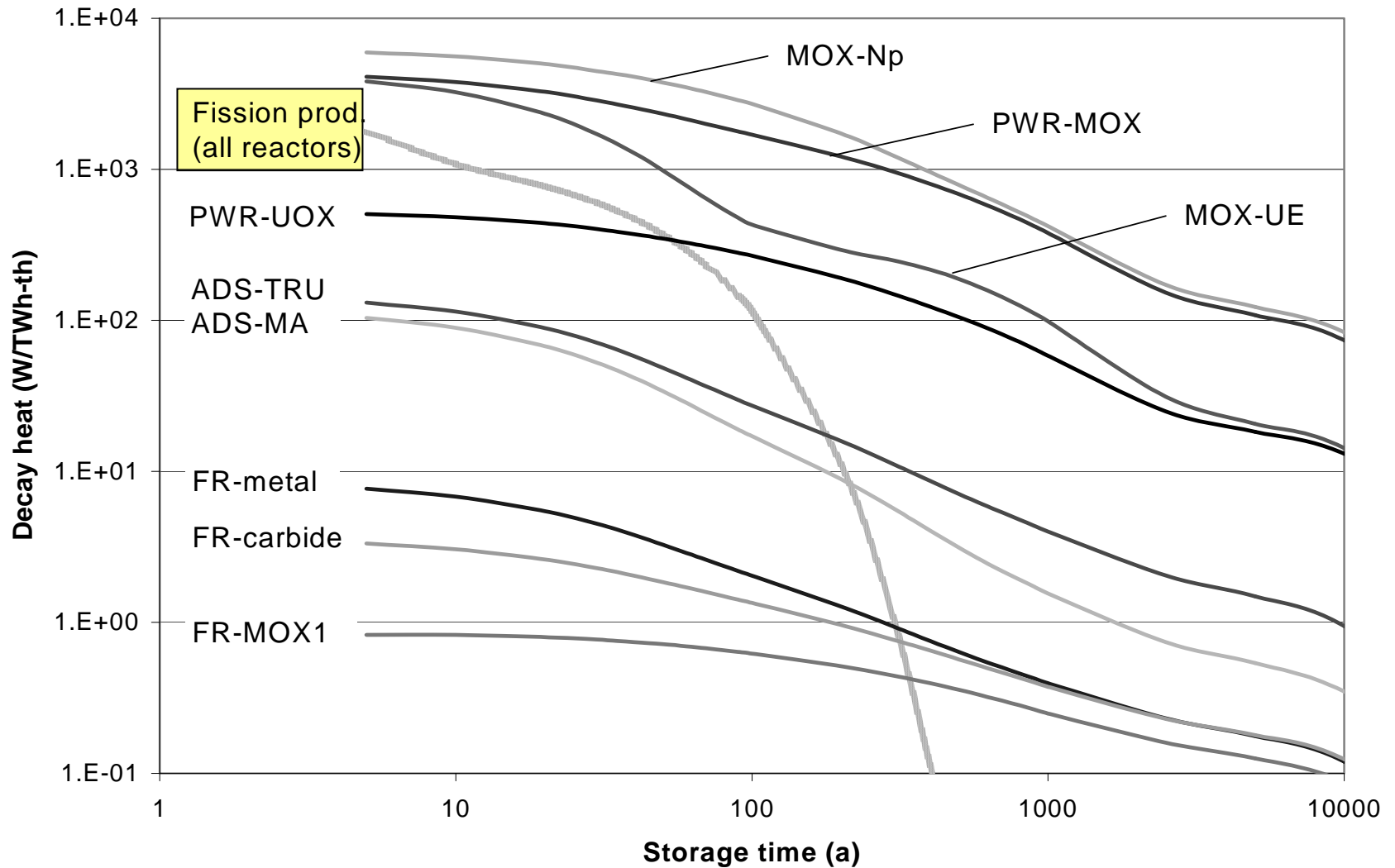


- MOX rods (with depleted U)
- UO₂ standard rods
- Guide tubes

1. 通常のMOX燃料集合体。(U濃縮度0.25%、Pu富化度10.4%)
2. 集合体の周辺領域は熱中性子束が高いため、周辺部にPu富化度の低いMOXを配置し、出力を平坦化。
3. MIX燃料とは、MOX中のUを減損Uでなく濃縮Uとし、Puの富化度を下げたもの。
4. フルMOX炉心では中性子スペクトルが硬化し、制御が困難になるので、1)過減速とするか、または2)濃縮ウランを用いてPu富化度を下げることが有効。→2)の具体化がMIX燃料
5. U濃縮度3.8%、Pu富化度2%のフルMIX燃料炉心では、正味のPu生産をゼロにでき、Puのマルチリサイクルが可能。

1. 濃縮UOX燃料(U濃縮度4.8%)を内側に、MOX燃料を外側に配置。(U濃縮度0.25%、Pu富化度8%)
2. 左記のMOX集合体に比べて、MOX燃料の割合が少なく、スペクトル硬化や必要fissile量の増大を防いでいる。
3. 正味のPu生産をゼロにでき、Puのマルチリサイクルが可能。
4. 但しMIXに比べて、マルチリサイクル時のサイクル内Puインベントリは大。

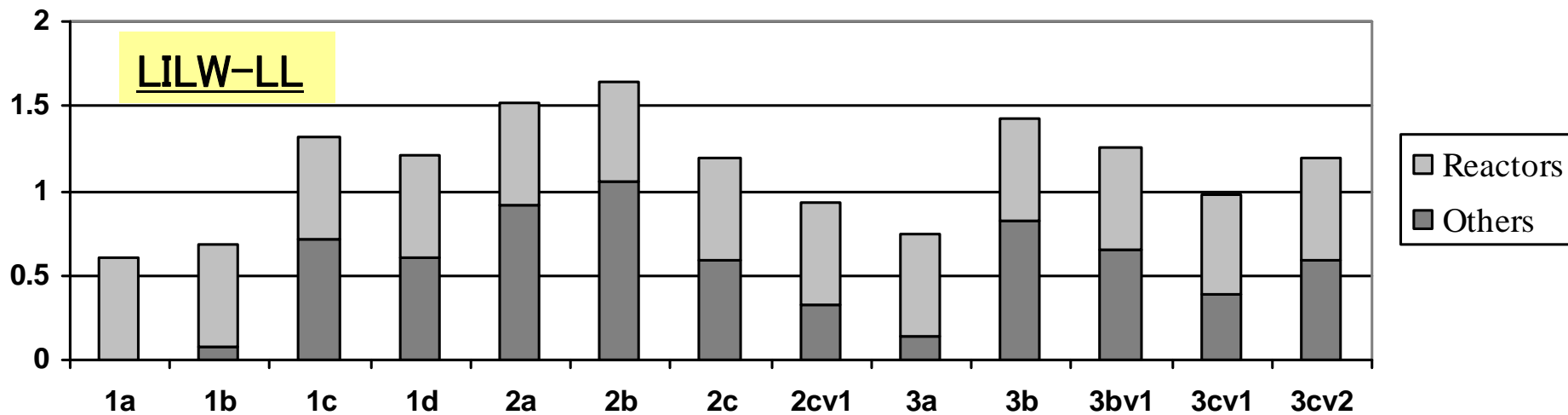
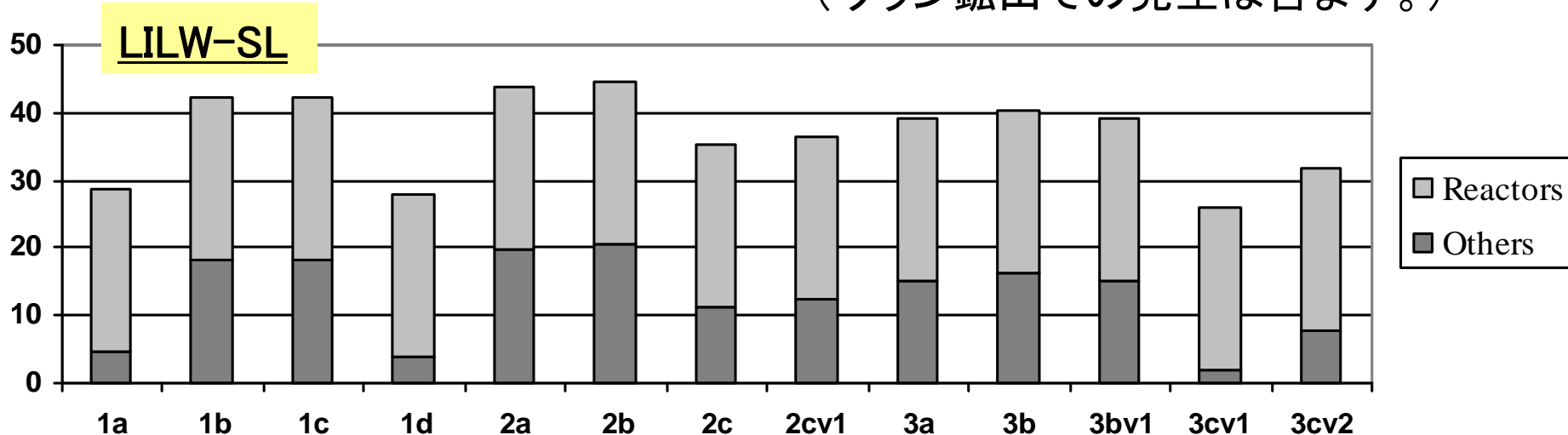
廃棄物中アクチニドの崩壊熱変化



ワンスルーと比較して、PWRでのPuリサイクルは増加するが、FRリサイクルは2桁以上減少。FRリサイクルでも地層処分時期(50年冷却)ではFPの寄与が大きい。

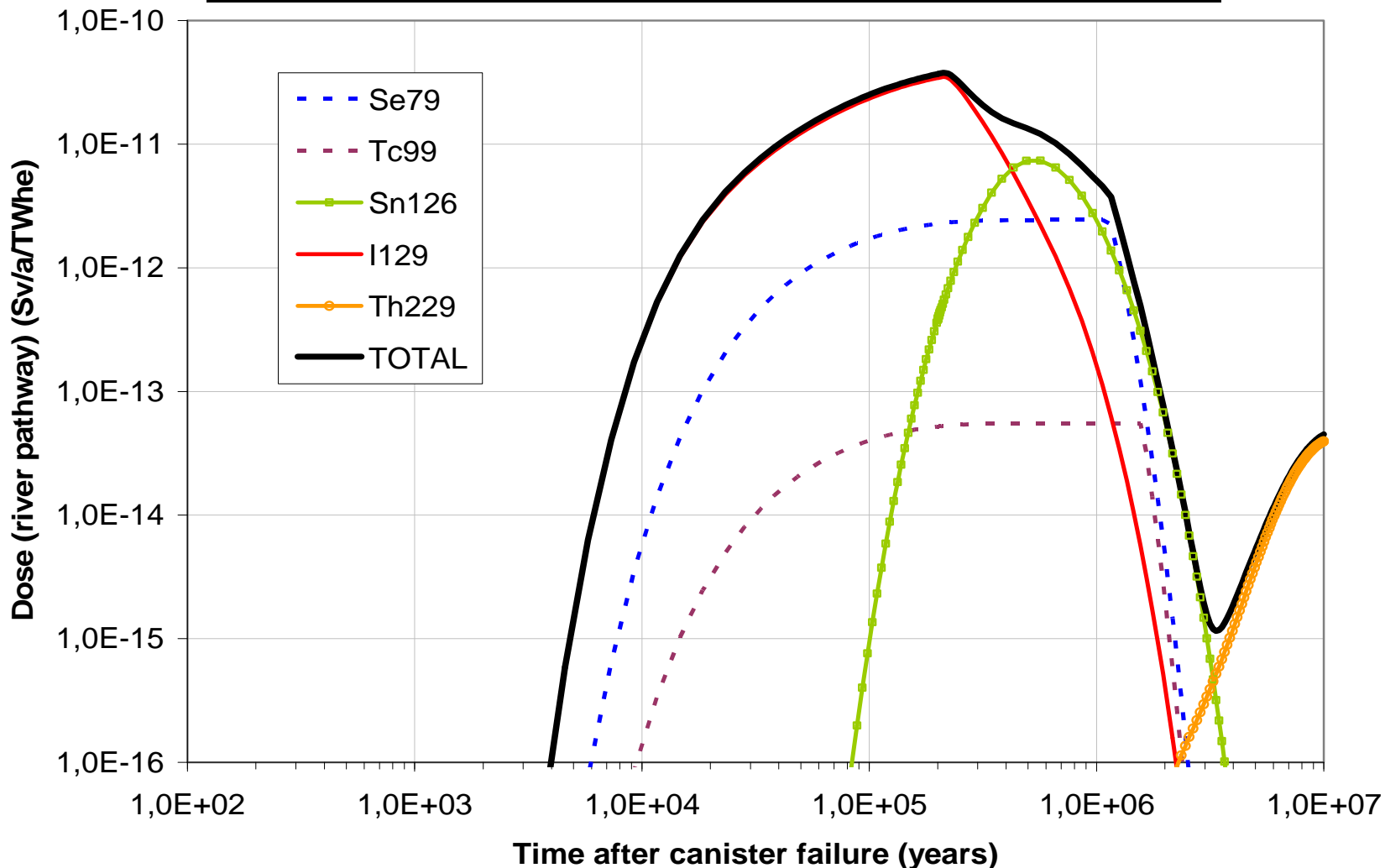
デコミッションでの廃棄物発生量比較 (m³/TWhe)

(ウラン鉱山での発生は含まず。)



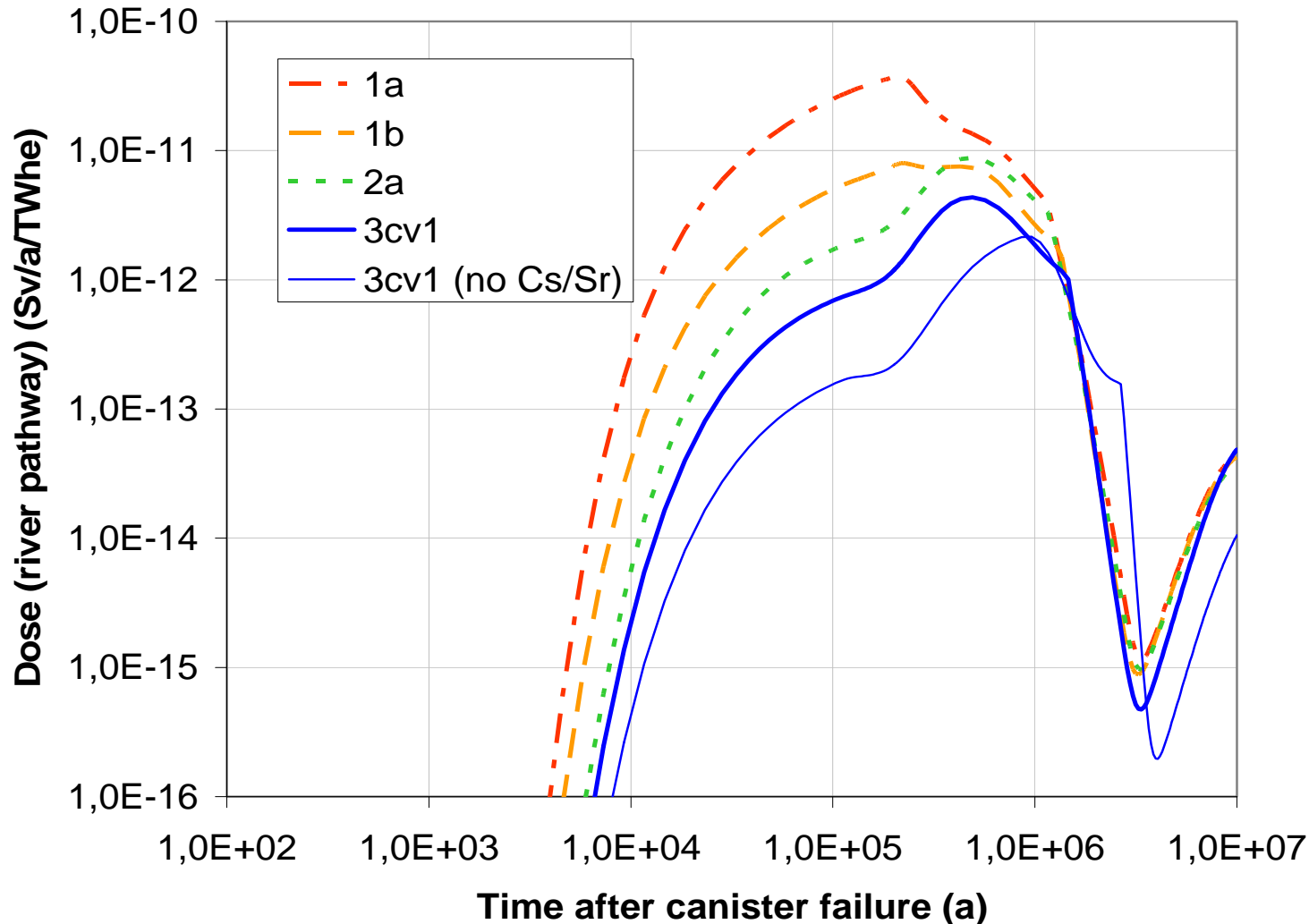
原子炉からの発生が多い。

粘土層での性能評価結果 (scheme 1a)



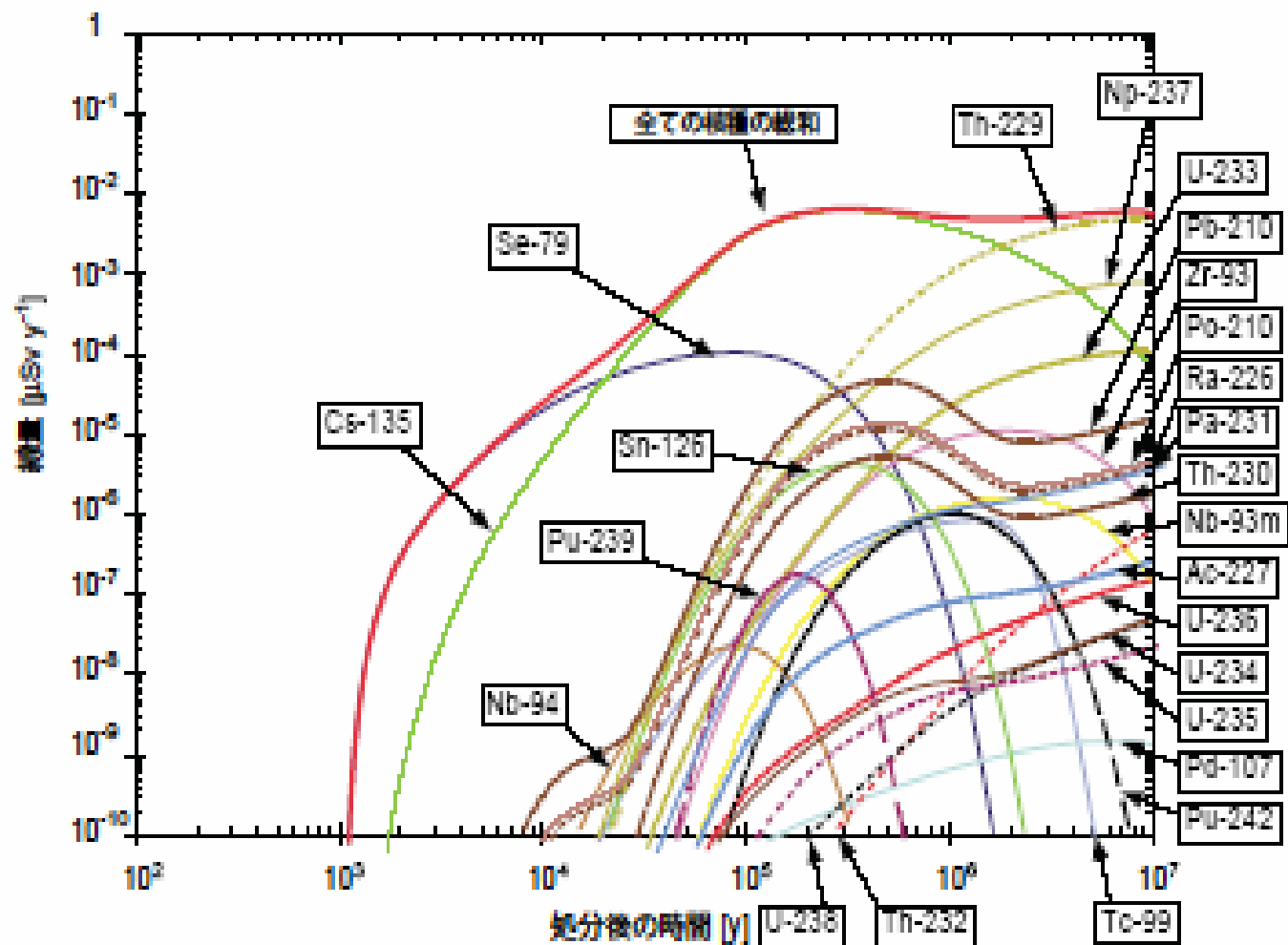
- ・線量のピークは ^{129}I で支配される。
- ・アクチニド及びその娘核種は地層への吸着が強いため、線量への影響が出るのは数100万年以降。

粘土層での性能評価結果(4つのschemeの比較)



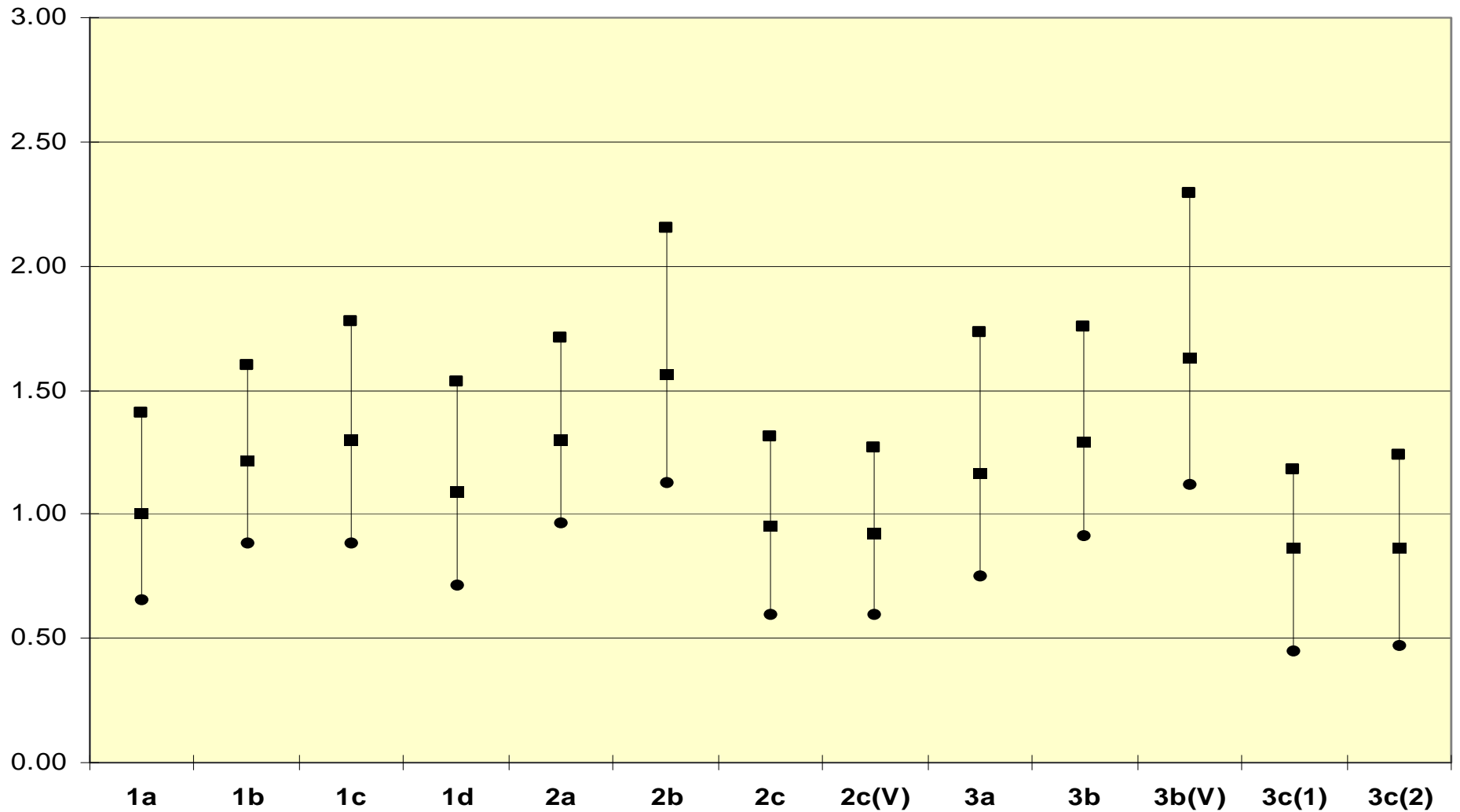
- ・シナリオ間に顕著な差は無い。
- ・1aは ^{129}I が100%含まれるためピーク値が高くなる。
- ・Cs、Sr分離の3cv1はコンパクトな処分により溶解度制限の寄与が強まるため。

H12レポートでの安全評価結果例



(a) 母岩からの核種移行率の線量への換算結果

燃料サイクルコストの範囲



- ・燃料サイクルコストは核燃料サイクルオプション間でファクター2程度の差がある。
- ・サイクルプロセスが簡単なほど安くなる傾向がある。(FR完全閉サイクルが安い。)

原子炉サイクルのパラメータ

| Reactor | Thermal power (MW) | Net electric power (MW) | Electrical efficiency (%) | Fuel | Fuel burn-up (GWd/tHM) | Storage/cooling time (year)* |
|------------|--------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------------|------------------------|------------------------------|
| PWR-UOX | 4250 | 1450 | 34.1 | UOX | 60 | 2/5 |
| PWR-MOX | 4250 | 1450 | 34.1 | MOX | 60 | 2/5 |
| MOX-UE | 4250 | 1450 | 34.1 | MOX-EU | 60 | 2/5 |
| CANDU | 2159 | 713 | 33.0 | DUPLIC | 15 | 2/- |
| FR-MOX | 3600 | 1450 | 40.3 | MOX | 140 | 2/5 |
| FR-HBU | 3600 | 1450 | 40.3 | MOX | 185 | 2/5 |
| FR-metal | 1575 | 600 | 38.1 | $^{78}\text{Ac}-^{22}\text{Zr}$ | 140 | 1/2 |
| FR-carbide | 2400 | 1158 | 48.3 | (U,Pu)C-SiC | 100 | 2/5 |
| ADS-MA | 377 | 119 | 31.6 | $^{29}\text{AcN}-^{71}\text{ZrN}$ | 150 | 1/2 |
| ADS-TRU | 850 | | | AcN-ZrN | 150 | 1/2 |

* : 1d の冷却期間は10年、また 3a、3b、3bv の冷却期間は4年。

ユニットコストの例

| | | <i>Unit</i> | <i>Lower Bound</i> | <i>Nominal Value</i> | <i>Upper Bound</i> | Source | |
|----------------------------------|-------|-----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--|------------|
| Overnight Cost | PWR | \$/kWe | 1,200 | 1,600 | 1,900 | [5] | |
| | CANDU | \$/kWe | 1,200 | 1,600 | 1,900 | same as PWR | |
| | FR | \$/kWe | 1,200 | 1,900 | 2,300 | LB: same as PWR as a target NV, UB: 20% higher than PWR | |
| | ADS | Reactor | \$/kWe | 1,200 | 1,900 | 2,300 | same as FR |
| | | Accele- ra- tor | \$/Wbeam | 5 | 15 | 20 | [2] |
| | GCFR | \$/kWe | 1,200 | 1,900 | 2,300 | same as FR | |
| | LMFR | \$/kWe | 1,200 | 1,900 | 2,300 | same as FR | |
| Load Factor | PWR | % | 85 | 90 | 95 | 5% higher than in [2] considering recent developments | |
| | CANDU | % | 85 | 92 | 95 | LB, UB: same as PWR NV: 2% higher than PWR | |
| | FR | % | 80 | 85 | 95 | LB, NV: 5% lower than PWR UB: same as PWR | |
| | ADS | % | 75 | 80 | 85 | LB, NV: 5% lower than FR UB: 10% lower than FR | |
| | GCFR | % | 80 | 85 | 95 | same as FR | |
| | LMFR | % | 80 | 85 | 95 | same as FR | |
| Fixed charge rate for investment | | %/year | 6 | 9 | 12 | [5] | |
| Fixed charge rate for D&D | | %/year | 8 | 8 | 8 | [2] | |
| Annual Rx O&M cost rate | | %/year | 3 | 4 | 5 | [5] | |

經濟性評估結果

| Scheme | 1a | 1b | 1c | 1d | 2a | 2b | 2c | 2c(V) |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Reactor Cost | 27.84 | 27.84 | 27.84 | 27.68 | 27.84 | 27.84 | 30.77 | 30.77 |
| Fuel Cycle Cost | 4.37 | 5.30 | 5.68 | 4.77 | 5.68 | 6.84 | 4.14 | 4.04 |
| Waste Mgt. Cost | 1.13 | 0.68 | 0.68 | 1.35 | 0.56 | 0.61 | 0.36 | 0.35 |
| COE (mills/kWh) | 32.21 | 33.14 | 33.52 | 32.45 | 33.52 | 34.68 | 34.91 | 34.81 |
| RCost | 1.00 | 1.03 | 1.04 | 1.01 | 1.04 | 1.08 | 1.08 | 1.08 |
| TRU Loss (kg) | 29.78 | 20.34 | 21.04 | 18.79 | 5.00 | 4.60 | 1.63 | 3.93 |
| Rloss | 1.000 | 0.683 | 0.706 | 0.631 | 0.168 | 0.155 | 0.055 | 0.132 |

| Scheme | 3a | 3b | 3b(V) | 3c(1) | 3c(2) |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Reactor Cost | 29.76 | 29.90 | 29.90 | 35.01 | 35.01 |
| Fuel Cycle Cost | 5.07 | 5.65 | 7.13 | 3.75 | 3.76 |
| Waste Mgt. Cost | 0.49 | 0.57 | 0.73 | 0.31 | 0.30 |
| COE (mills/kWh) | 34.84 | 35.54 | 37.03 | 38.76 | 38.77 |
| RCost | 1.08 | 1.10 | 1.15 | 1.20 | 1.20 |
| TRU Loss (kg) | 0.10 | 0.11 | 0.14 | 0.16 | 0.15 |
| Rloss | 0.003 | 0.004 | 0.005 | 0.005 | 0.005 |