

高レベル廃棄物管理に対する 分離変換技術導入効果の検討

日本原子力学会
「分離変換・MAリサイクル」研究専門委員会主査
井上 正
(電力中央研究所)

1. 背景：高レベル廃液中の長半減期核種と量 (軽水炉UO₂燃料；燃焼度43GWd/t)

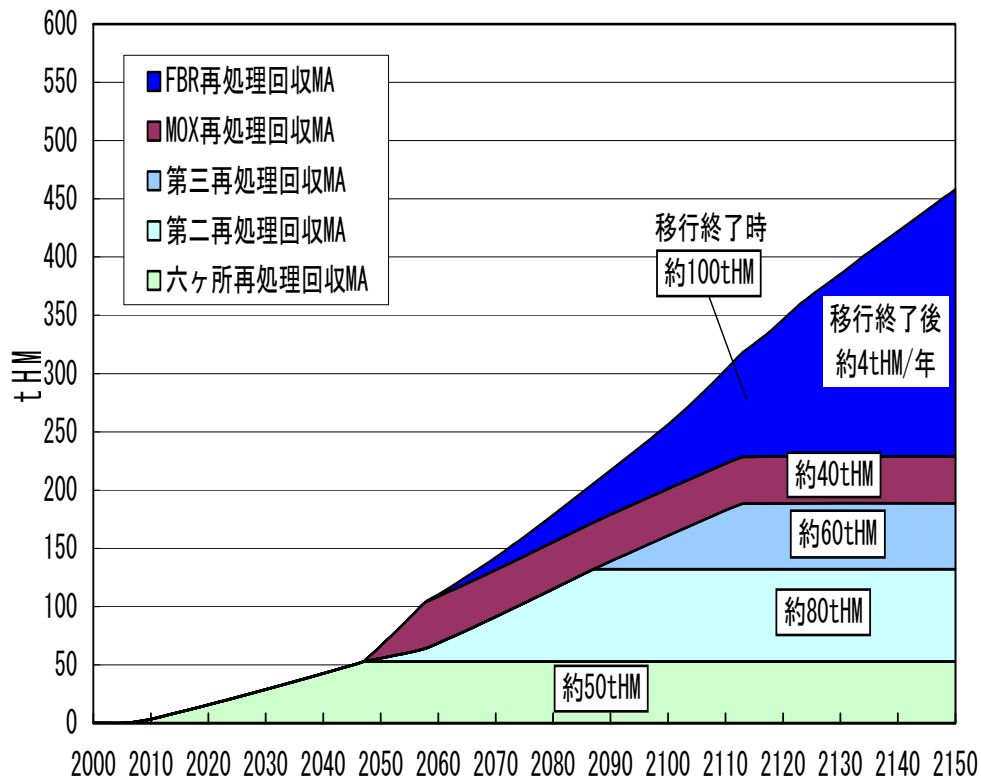
	核種	半減期	使用済燃料1tHM当たりの 含有量 ¹⁾ (g)	使用済燃料1tHM当たりの 発熱率 ¹⁾ (W)
主な TRU	Np-237	214万年	582	<0.1
	Pu-238	87.7年	1.13	0.6
	Pu-239	2.44万年	31.3	<0.1
	Pu-240	6570年	13.0	<0.1
	Pu-241	14.4年	6.6	<0.1
	Am-241	433年	413	<u>47.1</u>
	Am-243	7400年	136	0.9
	Cm-244	18.1年	38.9	<u>110</u>
主なFP	Se-79	6.5万年	6.63	<0.1
	Sr-90	29.1年	617	<u>550</u> ²⁾
	Zr-93	153万年	926	<0.1
	Tc-99	21.3万年	994	<0.1
	Pd-107	650万年	282	<0.1
	Sn-126	10万年	30.5	<0.1
	I-129	1570万年	2.33 ¹⁾	<0.1
	Cs-135	230万年	487	<0.1
	Cs-137	30.0年	1419	<u>580</u> ³⁾
	Sm-151	90年	13.1	<0.1

1) UO₂-LWR、43GWd/t、取り出し後5年、再処理によりPuは99.5%除去後、Iは1%が高レベル廃液へ移行すると仮定

2) 娘核であるY-90を含む、 3) 娘核であるBa-137mを含む

1. 背景:原子力利用に伴うマイナーアクチノイド元素の蓄積

	六ヶ所	第二再処理	第三再処理	MOX再処理	FBR再処理	移行期F再
再処理量	3.2万tU	3.5万tU	2.3万tU	0.5万tHM	3.1万tHM	1.6万tHM



(e) 回収MA量の推移

MAの取り扱い量

- 六ヶ所再処理工場: 50t
- 次期軽水炉ウラン燃料再処理施設: 140t
- 軽水炉MOX燃料再処理施設: 40t

(参考)

移行完了後の高速炉再処理で
取り扱われるMA量は約4t/年

2. 目的と概要

□ 目的:

廃棄物管理の観点からの分離変換技術の導入効果を、いくつかの条件をパラメータとして変化させ、定量的に示す。

□ パラメータ:

- 発電用原子炉システム: **4種類** (次ページ参照)
- 再処理までの冷却期間: **5年 と 20 年**
- 再処理スキーム:

PUREX、MA回収、MA分離・FP群分離、MA回収とFP群分離(分離変換)

□ 上記のパラメータに応じた廃棄体の量と特質を明らかにし、これらの廃棄体の処分に要する面積を求める。

□ 本検討の結果は、発電用原子炉システムからの廃棄体のみを扱うため、結果は核変換システムの種類に左右されない。

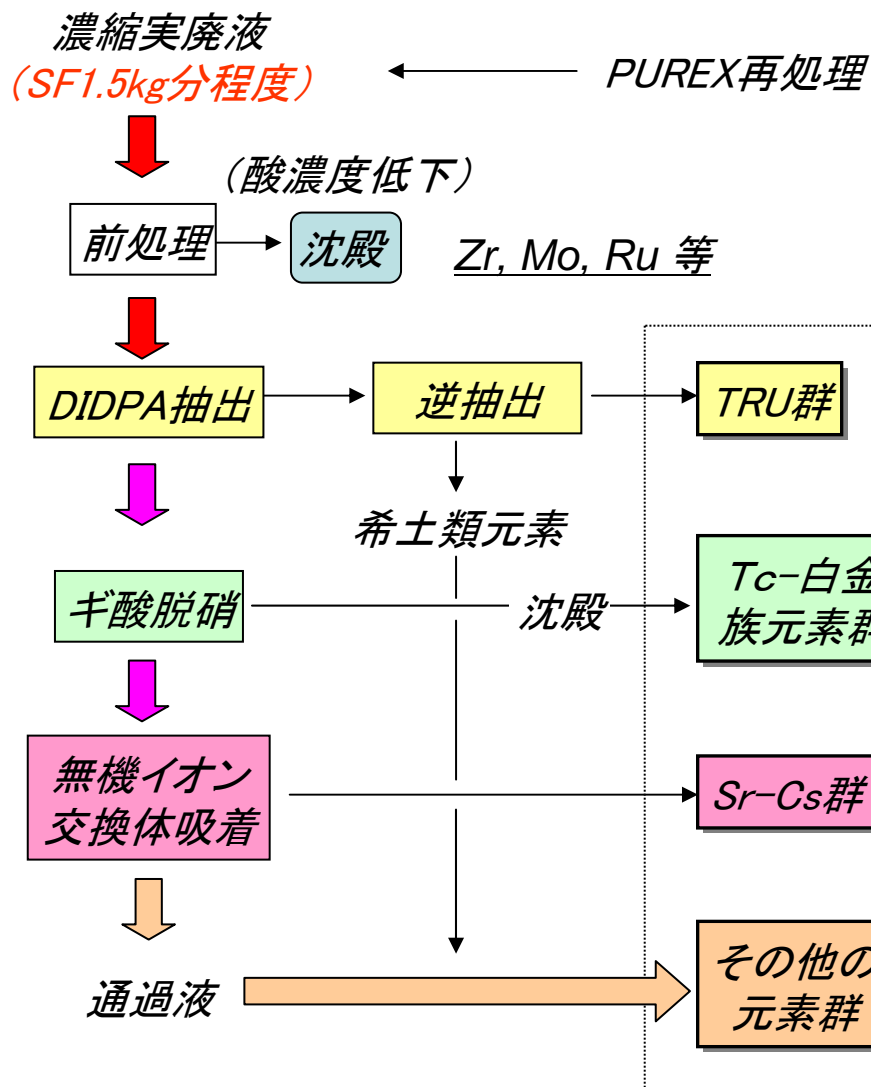
- ◆ (基本的に、MA核変換の結果余分に生じるは高レベル廃棄物の量は、発電用原子炉システムからの廃棄体に比べて少ない)

3. 対象とした原子炉システムと燃焼・崩壊計算

発電用原子炉システム	燃焼度	U-235濃縮度 又は Pu富化度	MA の割合	発電効率
UO ₂ -LWR	43 GWd/t = 36MW/t X 1,194d	4.10%	0.00%	34.00%
MOX-LWR	43 GWd/t = 36MW/t X 1,194d	6.10%	0.10%	34.00%
Pu-FBR	79 GWd/t = 72MW/t X 1,095d	17.30%	0.30%	38.50%
TRU-FBR	147 GWd/t = 44MW/t X 3,335d	19.60%	0.90%	42.50%

- ❑ 燃焼コード: ORIGEN-2
- ❑ 断面積ライブラリ: ORILIBJ32 (JENDL-3.2に基づく)
- ❑ 再処理までの冷却期間: 5年及び20年

4. 4群群分離プロセス



開発の現状

実液で元素分離性能を確認

模擬液とで元素挙動に差はない

プロセス、廃棄物等の評価を実施

- ・二次廃棄物では、廃溶媒(リン)とNa廃棄物

PUREXでの発生量の40%程度にもなる

- ・プロセスのさらなる効率化も重要

4. 再処理スキーム:4つのオプション

(1) 従来型PUREX法 (Process-R)

- UとPuの回収率 : 99.5 %.
- HLWとして通常のガラス固化体が生じる

(2) FPの群分離はせずにMAのみ回収・核変換 (Process-A)

- 上記PUREX法で生じる高レベル廃液からMAを回収し核変換
- MAの回収率 : 99%
- MAをほとんど含まないガラス固化体が生じる

(3) MAはリサイクルせずにFPとともに群分離 (Process-F)

- 上記PUREX法で生じる高レベル廃液を5つの群に分離
(詳細は次ページ)

(4) MA回収・核変換とFP群分離の双方を導入 (Process-P)

- MAを回収し核変換、FPを5つの群に分離

4. 再処理スキーム:

群分離 (Process-F,P) に適用した分配割合

群分離工程における主な元素の分配割合

元素	(a) アクチノイド	(b) ランタノイド	(c) 前処理沈殿	(d) Sr, Ba	(e) Cs, Rb	(f) Tc-白金族	(g) 2次廃棄物
Sr	2E-8	2E-4	5E-5	0.99	5E-5	0.01	2E-11
Y	0.01	3E-3	5E-5	5E-5	2E-9	5E-6	0.98
Zr	1E-4	8E-3	0.99	1E-8	5E-13	1E-6	2E-3
Mo	3E-7	6E-4	0.95	5E-7	2E-8	0.05	2E-3
Tc	5E-10	0.02	2E-3	1E-6	1E-6	0.98	4E-8
Ru	4E-5	0.03	0.40	0.03	3E-6	0.53	4E-3
Pd	5E-5	0.02	1E-3	0.09	5E-6	0.89	4E-3
Cs	5E-11	6E-5	5E-5	5E-10	1.00	1E-6	5E-12
Ba	2E-8	2E-4	5E-5	0.99	5E-5	0.01	2E-11
La	3E-4	1.00	5E-5	9E-5	5E-9	1E-5	1E-4
Ce	3E-3	1.00	5E-5	9E-5	5E-9	1E-5	1E-3
Nd	0.02	0.98	5E-5	9E-5	5E-9	1E-5	1E-4
U	1.00	5E-6	1E-4	5E-5	2E-9	4E-6	1E-3
Np	1.00	1E-4	1E-4	5E-4	2E-8	4E-5	5E-5
Pu	0.98	1E-4	0.02	1E-5	5E-10	4E-5	5E-5
Am, Cm	1.00	1E-4	5E-5	5E-5	2E-9	5E-6	3E-8

10% < x

1% < x < 10%

5. 廃棄体:

4つの再処理スキームで生じる廃棄体種類

使用済燃料

Process-R

従来型
PUREX

ガラス固化体

MA: マイナーアクチノイド

FP: 核分裂生成物

Ln: ランタノイド

Process-A

MA回収

MA無し
ガラス固化体

+

MAの核変換

Process-F

FP群分離

ガラス固化体
(Ln+MA)

ガラス固化体
(Se,Zr,Nb,
Mo,Te)

焼成体
(Sr, Ba)

焼成体
(Cs, Rb)

合金廃棄体
(Tc,Ru,Rh,
Pd, etc.)

Process-P

MA回収 +
FP群分離

ガラス固化体
(Ln)

ガラス固化体
(Se,Zr,Nb,
Mo,Te)

焼成体
(Sr, Ba)

焼成体
(Cs, Rb)

合金廃棄体
(Tc,Ru,Rh,
Pd, etc.)

+

MAの核変換

5. 廃棄体:

Process-R and A のガラス固化体本数の算定

□ 「Process-R」(従来型PUREX) と 「Process-A」(MA回収) で生じるガラス固化体の本数算定に用いた条件:

- 体積: **150 リットル** ($40\text{cm}\phi \times 120\text{cm}^H$)
- 重量: **400 kg**
- 廃棄体酸化物の最大割合: **15 wt%** (60 kg)
- モリブデン酸化物 MoO_3 の最大割合: **3 wt%** (12 kg)
- 固化体製造時の最大発熱: **2.3 kW/本**
- 処分場のバッファ材(ベントナイト)の最高温度: **100 °C**

ABAQUSコードを用いた伝熱計算を実施

「第2次取りまとめ」の硬岩系竖置き概念で固定:

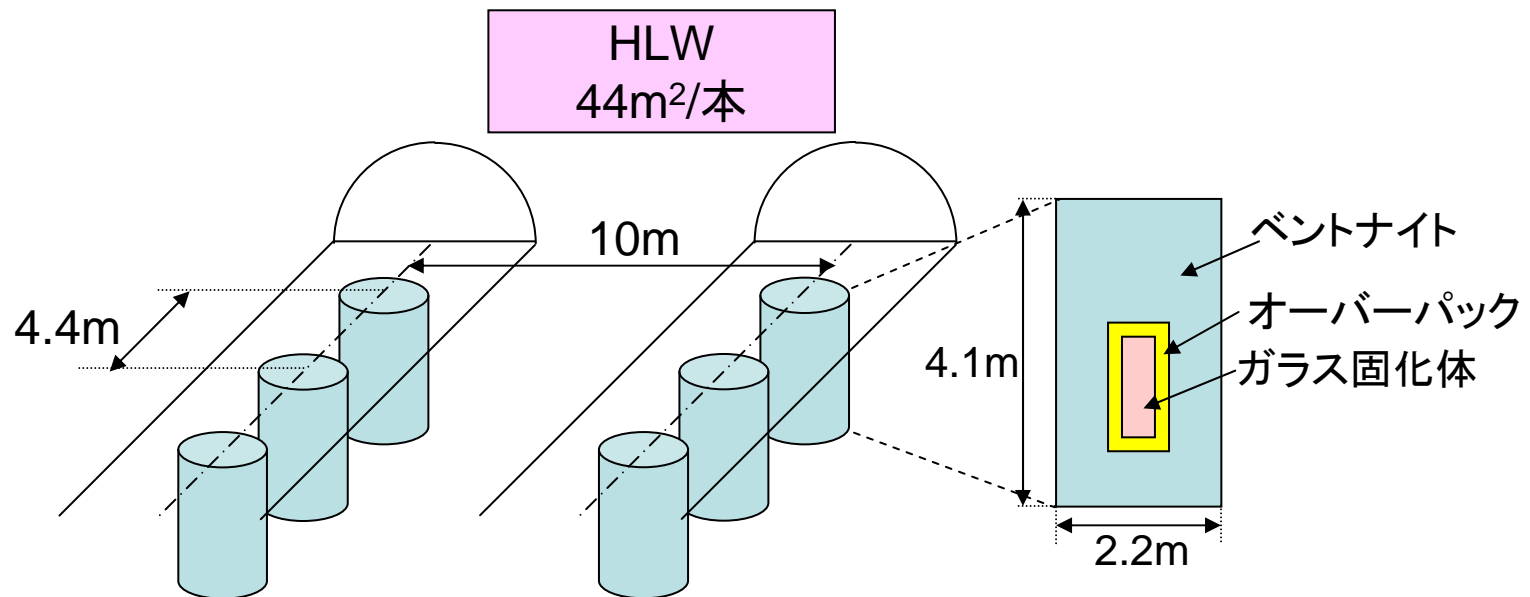
- ✓ 廃棄体ピッチ: **4.4 m**
- ✓ 処分坑道の間隔: **10 m**
- ✓ 処分坑道の深度: 1,000 m
- ✓ 再処理後、処分までの冷却期間: **50 年**

(再処理までの冷却期間に左右されずに一定)

5. 廃棄体:

Process-R and A の廃棄方法

「第2次取りまとめ」の硬岩系縦置き概念

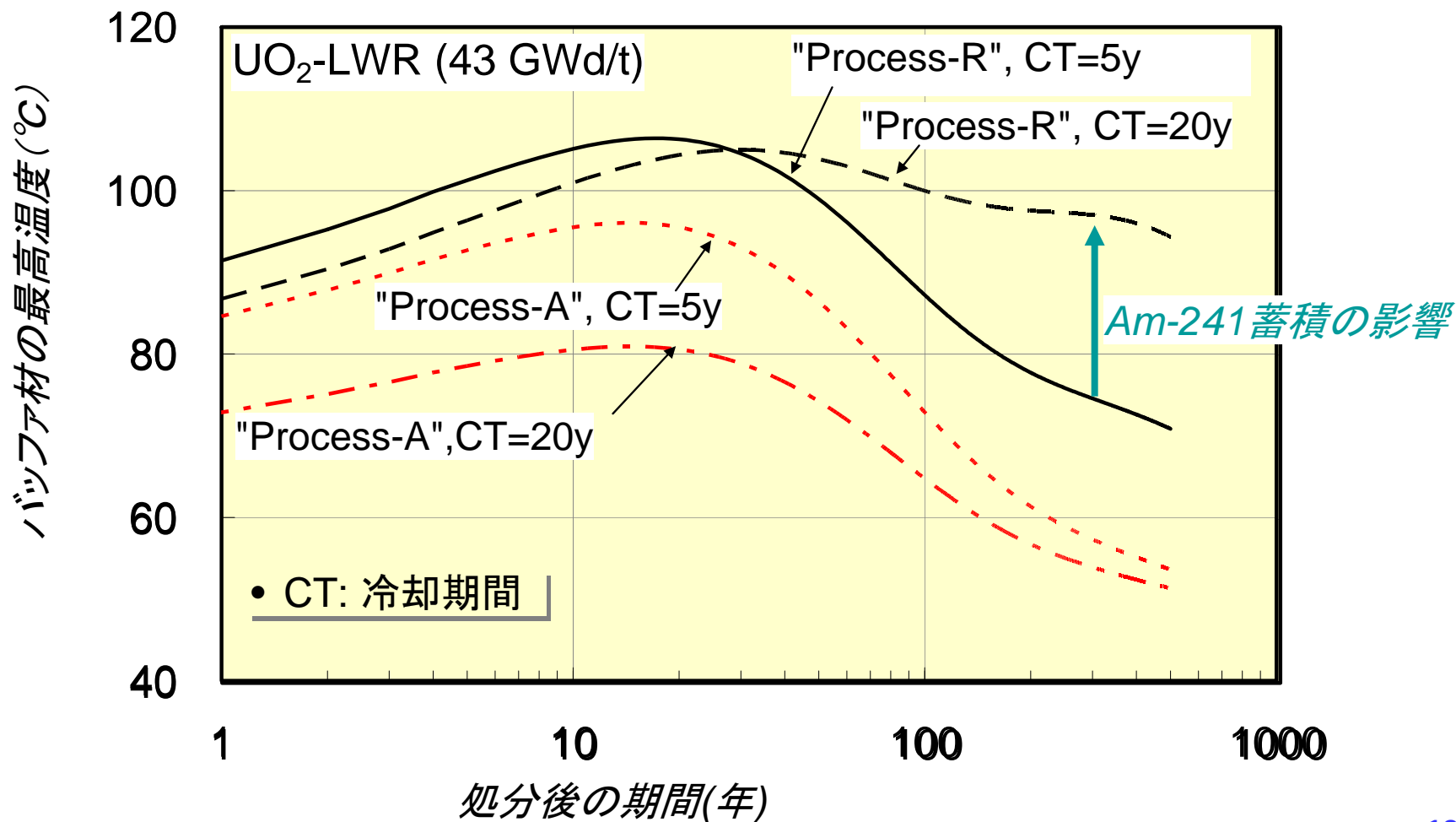


◆ 処分までに50年の冷却期間

5. 廃棄体:

バッファ材の温度変化 (UO_2 -LWR)

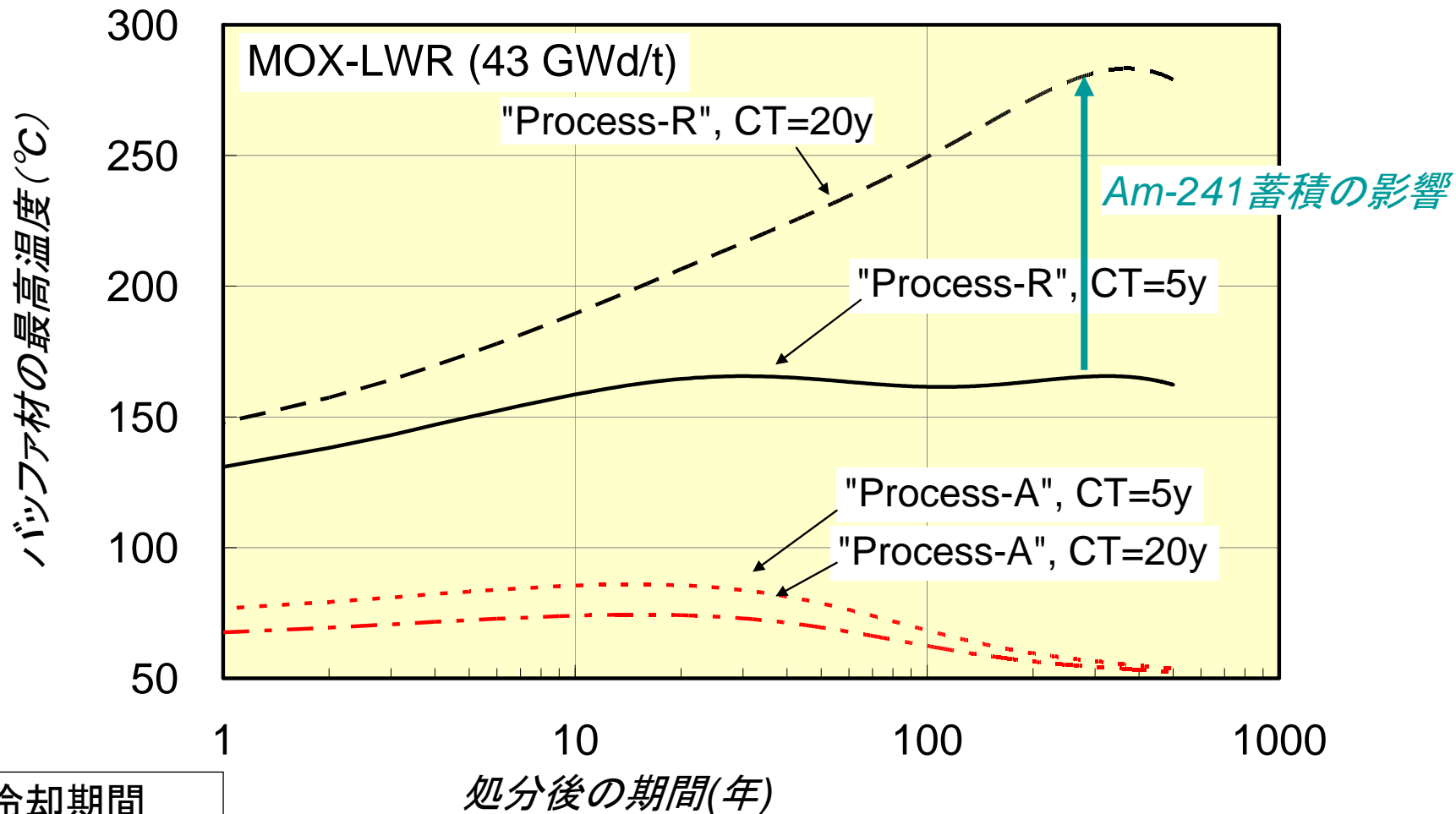
- 1 tHM で規格化
- 最高温度が 100°C 以下になるように廃棄物元素の含有量を調整する



5. 廃棄体:

バッファ材の温度変化 (MOX-LWR)

- Am-241 蓄積の影響大
- 最高温度には処分後約300年で到達



5. 廃棄体:

ガラス固化体発生本数の算定

発電用原子炉システム	Process	冷却期間	各条件により算定されるガラス固化体発生本数			
			酸化物制限 15w%	MoO ₃ 制限 3w%	製作時発熱 制限2.3 kW	バッファ材 温度制限100 °C
UO ₂ -LWR	R	5 年	2.45	1.54	2.67	<u>3.19</u>
		20年	2.49	1.54	1.25	<u>3.12</u>
	A	5年	2.39	1.54	2.47	<u>2.65</u>
		20年	<u>2.40</u>	1.54	1.02	1.87
MOX-LWR	R	5年	2.59	1.41	4.47	<u>6.44</u>
		20年	2.75	1.41	2.62	<u>12.52</u>
	A	5年	<u>2.36</u>	1.41	2.31	2.16
		20年	<u>2.36</u>	1.41	0.82	1.56
Pu-FBR	R	5年	2.17	1.21	2.62	<u>6.02</u>
		20年	2.29	1.21	1.64	<u>10.25</u>
	A	5年	<u>1.98</u>	1.21	1.75	1.78
		20年	<u>1.99</u>	1.21	0.68	1.27
TRU-FBR	A	5年	<u>1.73</u>	1.09	1.23	1.48
		20年	<u>1.74</u>	1.09	0.57	1.05

5. 廃棄体:

Process-F and P の廃棄体

□ FP群分離 (Process-F) と 分離変換 (Process P) の廃棄体

(a), (b) ランタノイド (及び アクチノイド): ガラス固化体, 150 リッター, 400 kg
廃棄対象元素酸化物の最大含有量: **35 wt%** (140kg)

発熱性FP、Mo酸化物、白金族が含まれないので、廃棄対象元素の高密度充填が可能と仮定

Process-Fでは MAが含まれているので、温度制限も考慮

(c) 前処理沈殿: ガラス固化体, 150 L, 400 kg
廃棄対象元素酸化物の最大含有量: **35 wt%** (140kg)
MoO₃の最大含有率: **8 wt%** (32 kg)

(d) Sr, Ba: 焼成体, 14 リッター, 廃棄対象元素5.3 kg

(e) Cs, Rb: 焼成体, 14 リッター, 廃棄対象元素4.5 kg

(f) Tc-白金族: 金属廃棄体, 7.5 L, 60 kg
廃棄対象金属の最大割合: 4wt%, 2.4kg

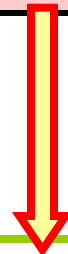
(g) 2次廃棄物: 放射能濃度が低いので、本検討では無視

5. 廃棄体:

Process-F and Pで生じる廃棄体本数の算定

1TWhの発電量で規格化した発生廃棄体本数

発電用原子炉システム	冷却期間	Process-F	Process-P	両プロセスに共通な廃棄体			
		(a)+(b) Ln+MA	(b) ランタノイド	(c) 前処理沈殿	(d) Sr, Ba	(e) Cs, Rb	(f) Tc-白金族
		高充填ガラス固化体 (150L)			焼成体 (14L)		合金 (7.5L)
UO ₂ -LWR	5 年	0.93	0.31	0.55	1.97	2.44	5.91
	20 年	2.29	0.31	0.55	2.11	2.17	5.91
MOX-LWR	5 年	5.83	0.29	0.50	1.87	2.65	8.32
	20 年	12.07	0.29	0.50	2.06	2.37	8.33
Pu-FBR	5 年	5.67	0.24	0.43	1.58	2.77	7.44
	20 年	10.01	0.24	0.43	1.73	2.55	7.45
TRU-FBR	5 年	---	0.22	0.39	1.51	2.40	6.69
	20 年	---	0.22	0.39	1.63	2.21	6.69



MoO₃ 制限(8w%)が決定要因

酸化物制限 (35w%)が決定要因

処分後のバッファ材温度制限 (100°C)が決定要因

- Process-F (MA回収なしのFP群分離)で生じるガラス固化体の本数は、Am-241の発熱に大きく影響を受ける

6. 廃棄体の定置に要する面積の算定: 新規廃棄体の定置方法

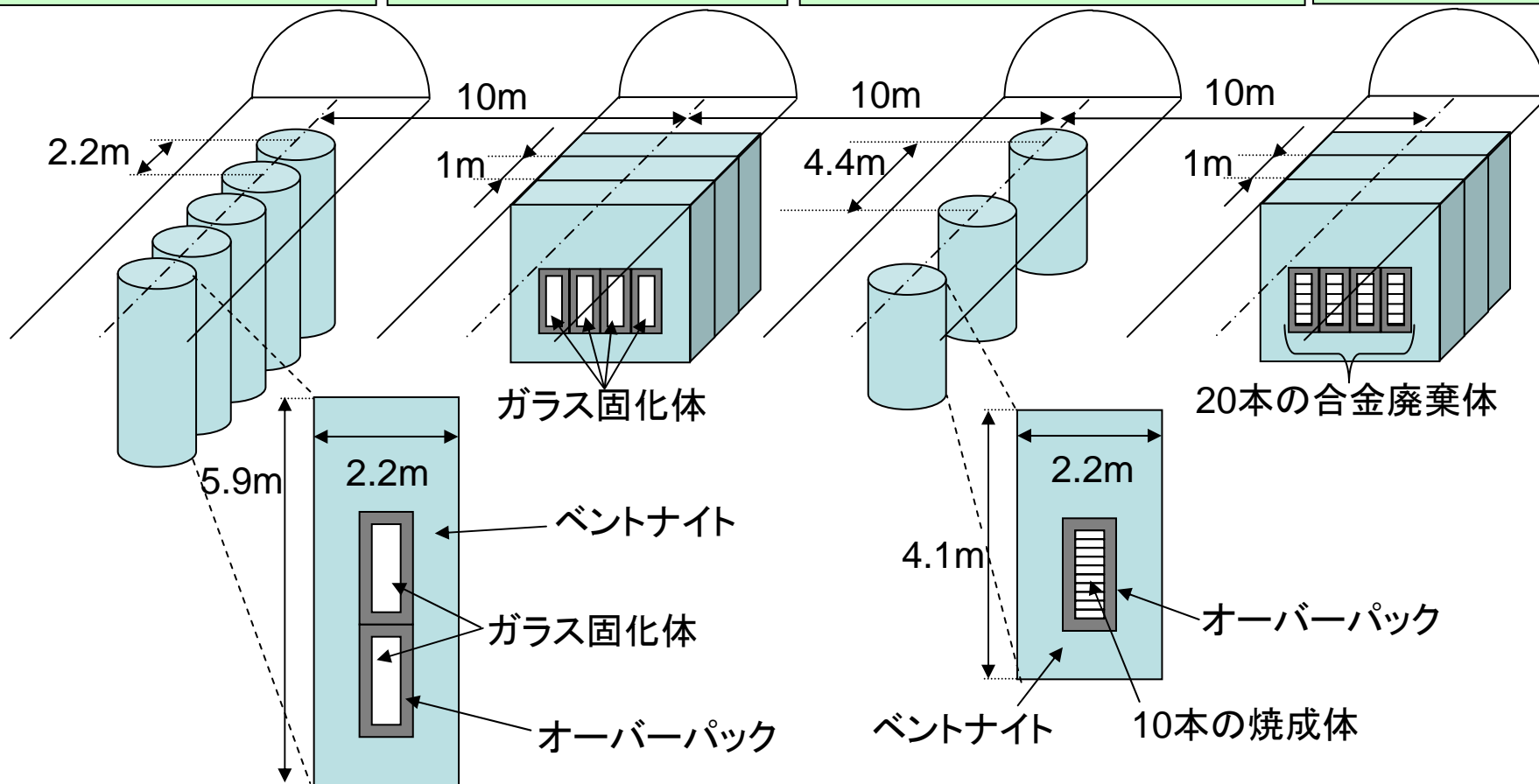
MA回収後は長期発熱が小さいため、 8W/m^2 ($350\text{W}/44\text{m}^2$)を目安に処分できるものとした

(b) ランタノイド (ガラス)
11 m^2 /本
冷却: 3~34年

(c) 前処理沈殿 (ガラス)
2.5 m^2 /本
冷却: 0~7年

(d),(e) Sr+Ba, Cs+Rb
(焼成体) 4.4 m^2 /本
冷却: 90~150年

(f) Tc-白金族
(合金) 0.5 m^2 /本
冷却: 0~5年



6. 廃棄体の定置に要する面積の算定:

Process-F and -Pで生じる廃棄体の定置面積

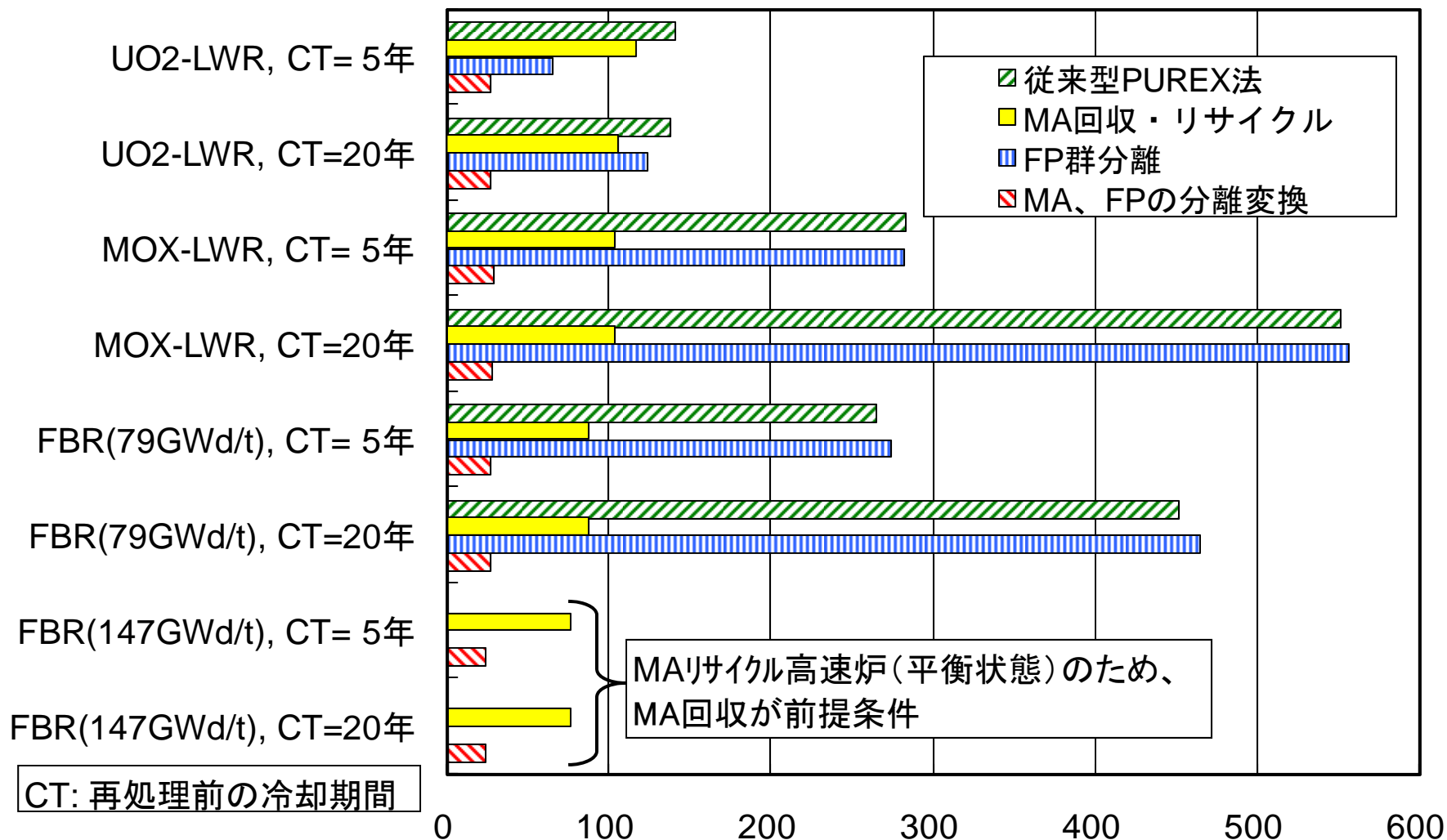
1TWhの発電量で規格化した定置面積(m²)

発電用原子炉システム	冷却期間	Process-F	Process-P	両プロセスに共通な廃棄体			
		(a)+(b) Ln+MA	(b) ランタノイド	(c) 前処理沈殿	(d) Sr, Ba	(e) Cs, Rb	(f) Tc-白金族
		高充填ガラス固化体 (150L)			焼成体 (14L)		合金 (7.5L)
UO ₂ -LWR	5 年	<u>40.8</u>	3.36	1.37	<u>8.68</u>	<u>10.74</u>	2.95
	20 年	<u>100.8</u>	3.36	1.37	<u>9.29</u>	<u>9.54</u>	2.96
MOX-LWR	5 年	<u>256.6</u>	3.14	1.26	<u>8.24</u>	<u>11.66</u>	4.16
	20 年	<u>531.1</u>	3.14	1.26	<u>9.06</u>	<u>10.44</u>	4.17
Pu-FBR	5 年	<u>249.5</u>	2.69	1.08	<u>6.94</u>	<u>12.20</u>	3.72
	20 年	<u>440.5</u>	2.69	1.08	<u>7.63</u>	<u>11.21</u>	3.72
TRU-FBR	5 年	---	2.41	0.97	<u>6.63</u>	<u>10.58</u>	3.34
	20 年	---	2.41	0.97	<u>7.19</u>	<u>9.74</u>	3.35

- Process-F (MA回収なし) の場合は、ランタノイド (Ln)+MAのガラス固化体が支配.
- Process-P (MA回収あり) の場合は、Sr-Cs焼成体が支配.

6. 廃棄体の定置に要する面積の算定:

1 TWhの発電で生じる廃棄体の定置に要する面積



単位発電量あたりに生じる高レベル廃棄物の定置に要する面積 (m² / TWh)

7. 結論

- Puを燃料に用いる場合、MA(特にAm-241)の核変換は重要なポイント
- UO_2 燃料でもMOX燃料でも、MA核変換とSr-Csの冷却後の廃棄を組み合わせることで、廃棄体の定置に要する面積を大幅に低減できる可能性がある
 - 例えば、従来型の軽水炉とPUREX再処理の組み合わせでは、58GWe × **30年**で約**2 km²**の定置面積が必要であったが、分離変換の導入で、軽水炉でも高速炉でも、同じ面積で58GWe × **150年**に相当する発電で生じる廃棄体を受け入れることができる
- 今後の課題:
 - 廃棄体システムの妥当性に関する検討
 - 新規に生じる廃棄体の成立性
 - 処分方法の構造力学的考察
 - MA核変換で生じる廃棄体の影響
 - 処分場縮小による経済効果と分離変換導入によるコスト上昇の比較検討

8. チェック・アンド・レビューへの提言(研究専門委員会での検討より)

■ 分離変換技術の意義

- 放射性廃棄物の処理・処分の合理化への寄与については、定量的に効果を評価すること
 - ☞ 分離工程の付加によるコスト増加と処理処分コスト削減効果
 - ☞ 対象核種や回収率目標の設定の妥当性
 - ☞ コスト以外の新たな評価指標の必要性
- 分離技術、加速器技術等の高度化などによる他分野への波及効果

■ 開発ステップの策定

- FBRサイクルの技術開発計画との関係(での位置付け)、分離変換技術導入シナリオ・開発ステップの明示
- 開発ステップの策定にあたり要素技術開発の課題とそのハードル、現状技術レベルの的確な把握の重要性
 - ☞ MA、Sr/Csの分離や貯蔵の技術、核変換用燃料、ターゲットの研究開発、遠隔操作によるこれら技術の成立性、操作性、核データ等の基盤整備
 - ☞ 当初計画あるいは前回のC&Rに対する現在の状況
 - ☞ 海外諸国の分離変換技術の位置づけと技術開発の進展(米: GNEP, 仏: 新廃棄物法)

■ 人材育成、国際協力

- 優秀な人材を集めるための夢を語れる技術に
- 分離変換技術の基盤研究は人材育成に適した課題

■ 情報発信

- 内外への我が国の分離変換技術開発計画とその成果等の発信