

プルサーマル松江市勉強会

平成21年1月29日

九州大学 出光一哉

発電用軽水型原子炉施設に用いられる 混合酸化物燃料について（1/3MOX報告書）

	1/3MOX報告書	中電島根 2 号炉
プルトニウム含有率 (ペレット最大)	約 1 3 %	約 1 0 %
核分裂性プルトニウム 富化度 (ペレット最大)	約 8 %	約 6 %
炉心装荷率	1 / 3 程度まで	1 / 3 228体 / 560体 10944 / 33600本
最高燃焼度 MWd / t	4 5 , 0 0 0 ウラン燃料を越えない範囲	4 0 , 0 0 0

従来の設計を大幅に変更することなしに使用可能

発電用軽水型原子炉施設に用いられる 混合酸化物燃料について（1/3MOX報告書）

－留意点－

- ・ ペレットの融点及び熱伝導度が低下する
- ・ ペレットのクリープ速度が増加する
- ・ 核分裂生成ガス放出率がウランペレットより若干高め
- ・ ペレット内のプルトニウム含有率の不均一が製造時に生じる可能性がある

本日の主要論点

- Pu富化度
- 制御棒の安全裕度
- Puスポット
- 海外での実績
- 使用済みMOX燃料の今後について
- 最終処分について

プルトニウム含有率と 核分裂性プルトニウム富化度

- プルトニウム含有率

$$\frac{\text{プルトニウムの全重量}}{\text{ウランとプルトニウムの全重量}}(\%)$$

- 核分裂性プルトニウム富化度

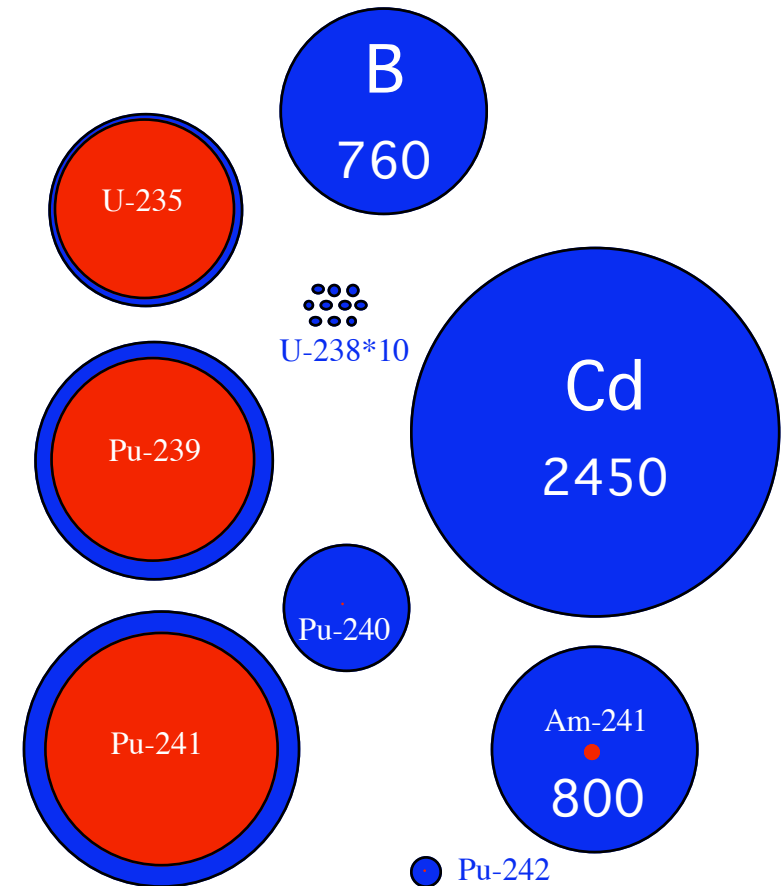
$$\frac{\text{核分裂性プルトニウムの全重量}}{\text{ウランとプルトニウムの全重量}}(\%)$$

核分裂性プルトニウム：Pu-239、 Pu-241

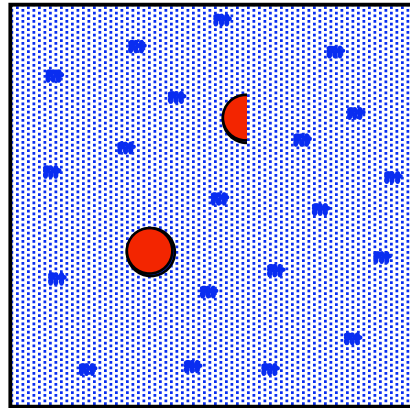
非核分裂性プルトニウム：Pu-240、 Pu-242

ウランとプルトニウムの同位体

核種	熱中性子吸収断面積 (核分裂断面積) バーン
U-235	680 (577)
U-238	3 (0.0005)
Pu-239	1017 (741)
Pu-240	289 (0.08)
Pu-241	1378 (950)
Pu-242	19 (0.2)

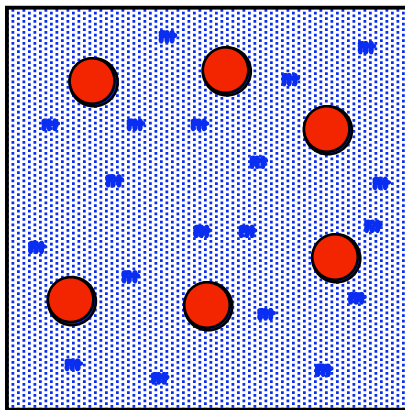


燃料の核分裂能力(1)

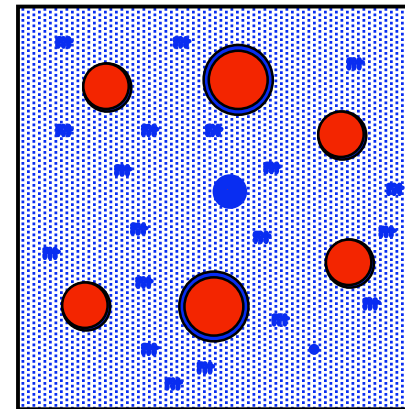


天然ウラン U-235 0.72%
軽水炉では臨界にできない

濃縮ウラン3.0%

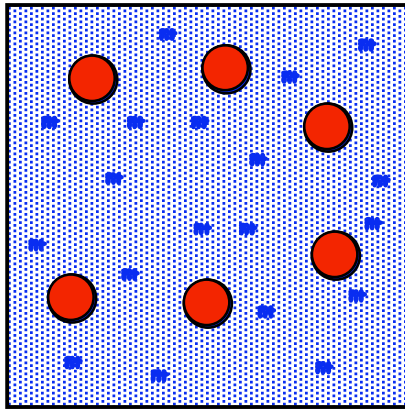


MOX
(濃縮度3.0%相当)

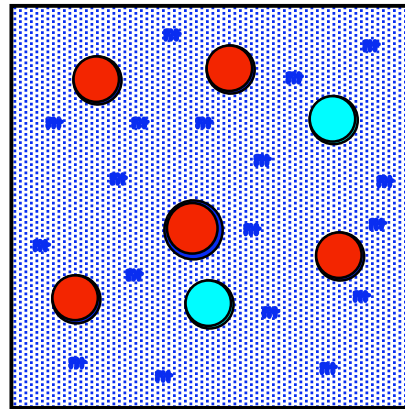


燃料の核分裂能力(2)

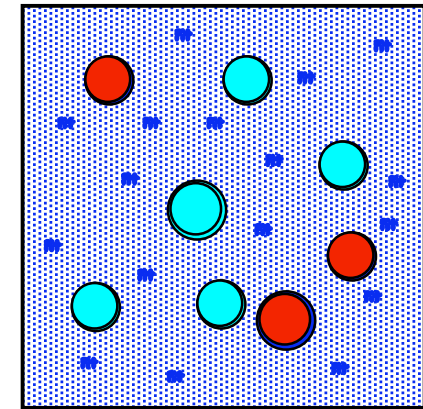
濃縮ウラン3.0%



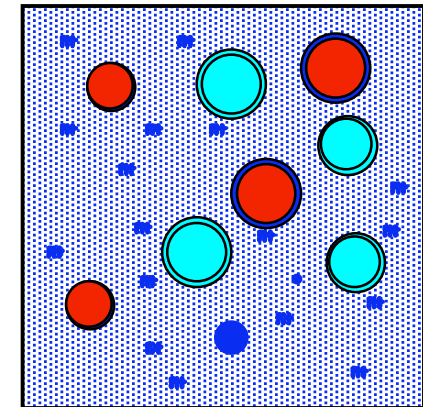
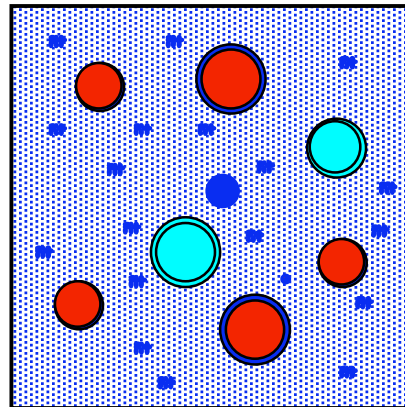
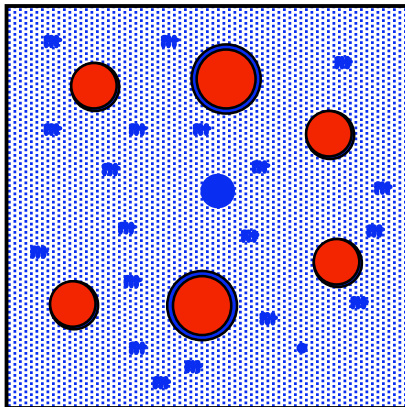
燃焼中期



燃焼末期



MOX



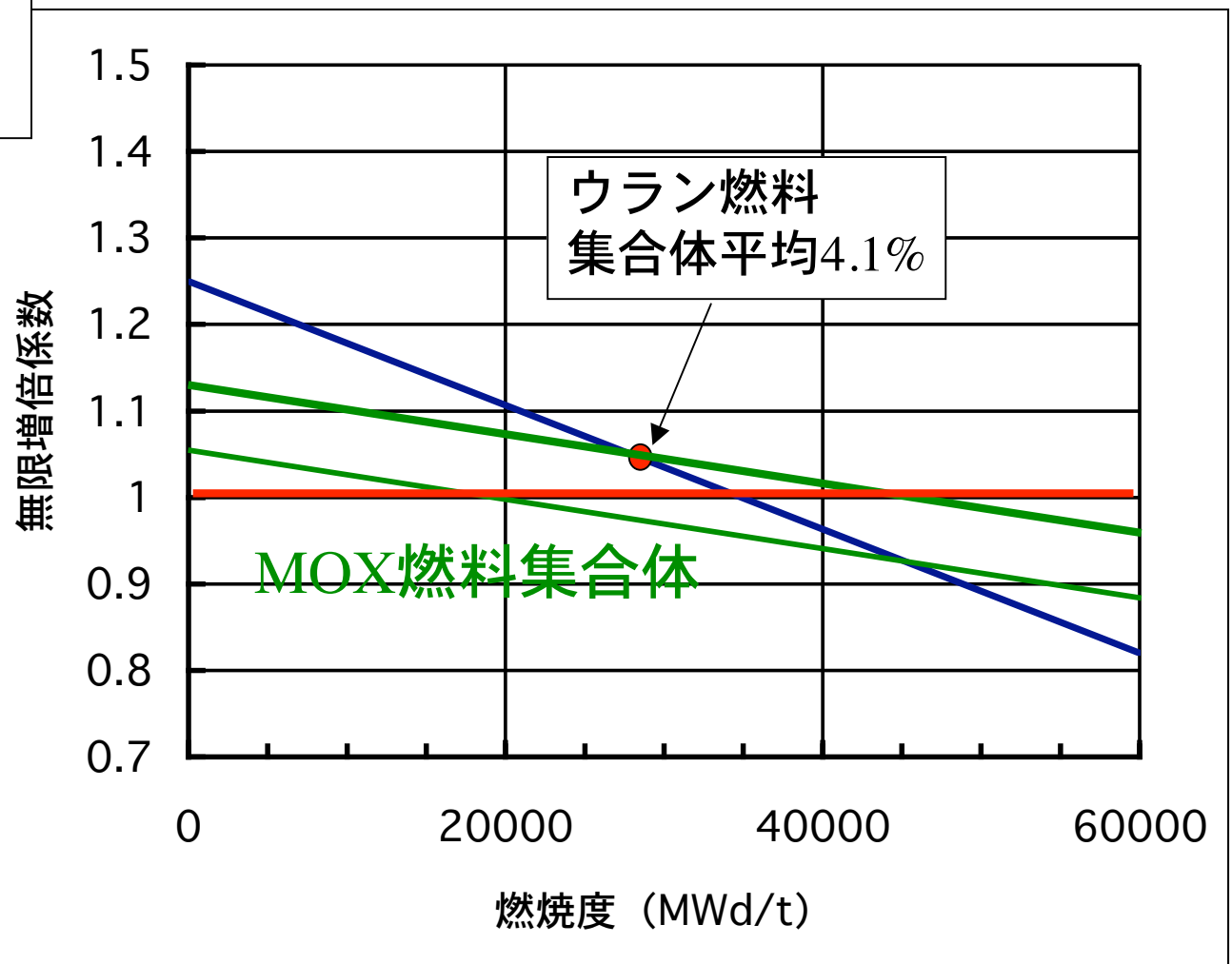
古い燃料だけでは臨界維持困難

MOX初期濃縮度の決め方（PWRの場合）

集合体の無限増倍係数は
燃焼とともに低下する

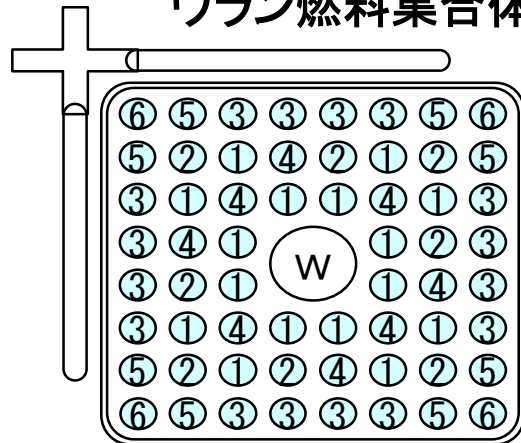
MOX燃料の無限増倍係
数の低下はウラン燃料
に比べて小さい

MOX燃料の集合体平均
がウラン燃料の4.1%
と同等になるよう初期
富化度を調整



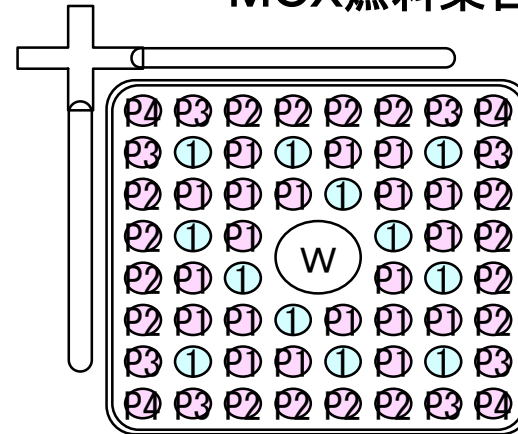
MOX燃料集合体内のプルトニウム含有率分布

ウラン燃料集合体の例



- ① : 最高濃縮度燃料棒
- ⑥ : 最低濃縮度燃料棒
- ① ~ ⑥ : この順で濃縮度が小さくなることを示す
- Ⓜ : ウォータロッド(1本)

MOX燃料集合体の例



- ① : ウラン燃料棒
- Ⓜ : 最高Pu富化度MOX燃料棒
- Ⓜ ~ Ⓜ : この順でPu富化度が小さくなることを示す
- Ⓜ : ウォータロッド(1本)

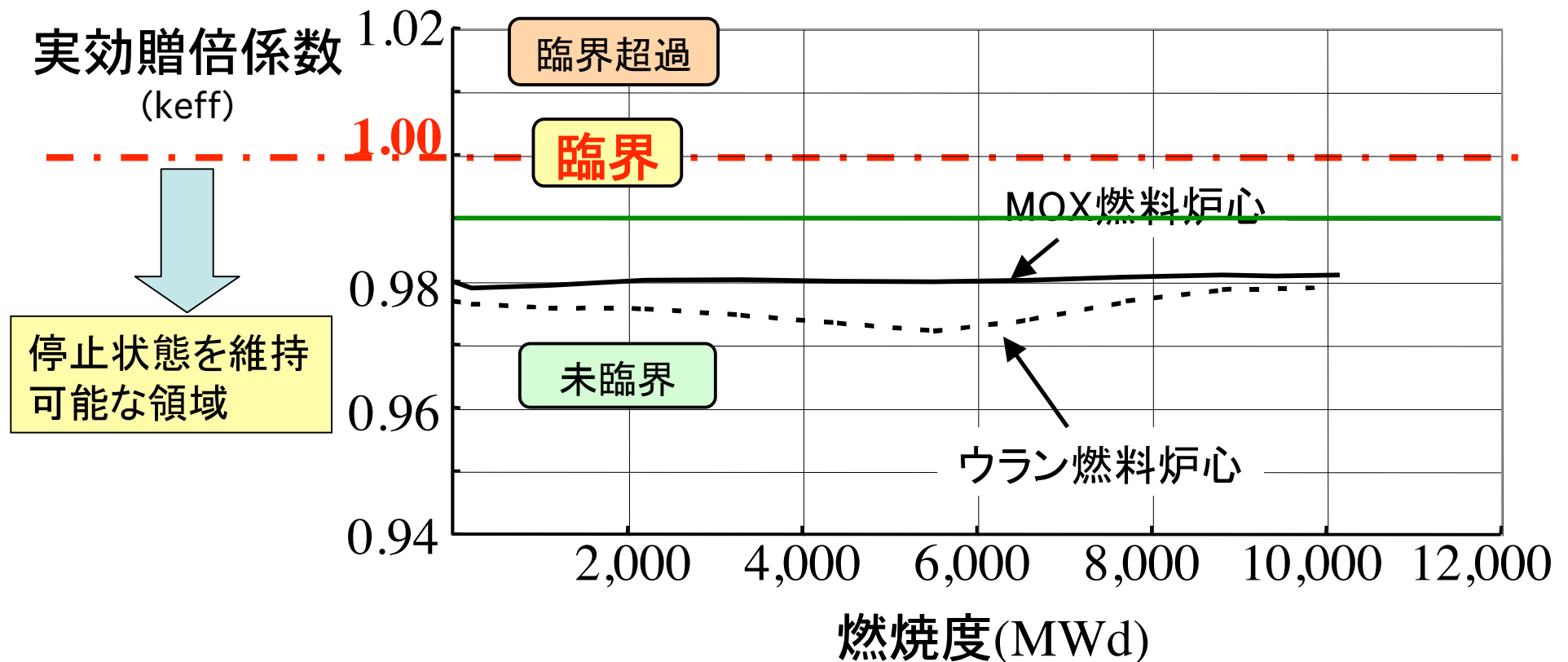
MOX燃料集合の仕様

	ウラン燃料 (高燃焼用)	MOX燃料 (島根2号)
集合体最高燃焼度 (MWd/t)	55,000	40,000
平均濃縮度(wt%)	3.7	3.0相当
燃料形式	9×9	8×8
燃料棒本数	72または74	60 (内MOX48)
燃料棒有効長(m)	3.7	3.6 ^{MOX燃料棒}
ペレット密度 理論密度に対する割合	97%	95% ^{MOXペレット}

停止している原子炉の停止状態を維持する機能

MOX燃料装荷炉心でも、従来のウラン燃料炉心と同様に、停止状態を維持することが可能。

島根 2 号機解析例



ペレット内のプルトニウム含有率の不均一 ープルトニウムスポットについてー

- ペレット内のプルトニウムスポットは $400\mu\text{m}$ (0.4mm) 以下とする

最大スポット（観察結果）MIMAS法（フランス） $214\mu\text{m}$

SBR法（イギリス） $100\mu\text{m}$

- 定格運転時

スポット内の温度上昇は数 $^{\circ}\text{C}$

初期に消滅

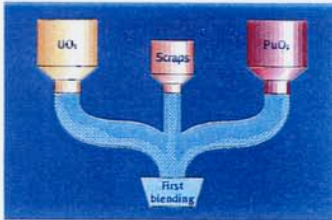
- 異常時

燃料破損の判断基準への影響なし

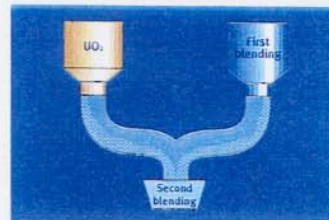
(NSRRでの試験 $400\mu\text{m}$ 、 $1100\mu\text{m}$ のスポット共存)

燃料製造方法（メッロクス社）

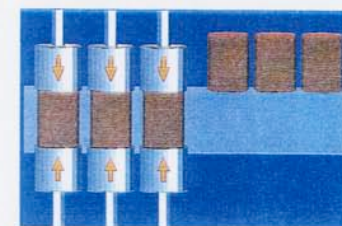
The A-MIMAS fuel fabrication process



Pu+U粉末混合



MOX粉末+U粉末混合



3 Pressing or pelletizing



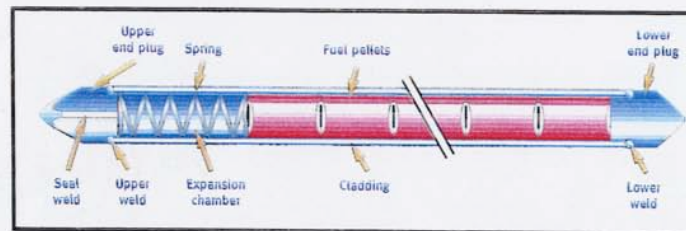
4 Sintering



5 Grinding



6 Rod cladding



7 Light water type fuel rod



燃料製造方法（SL社）



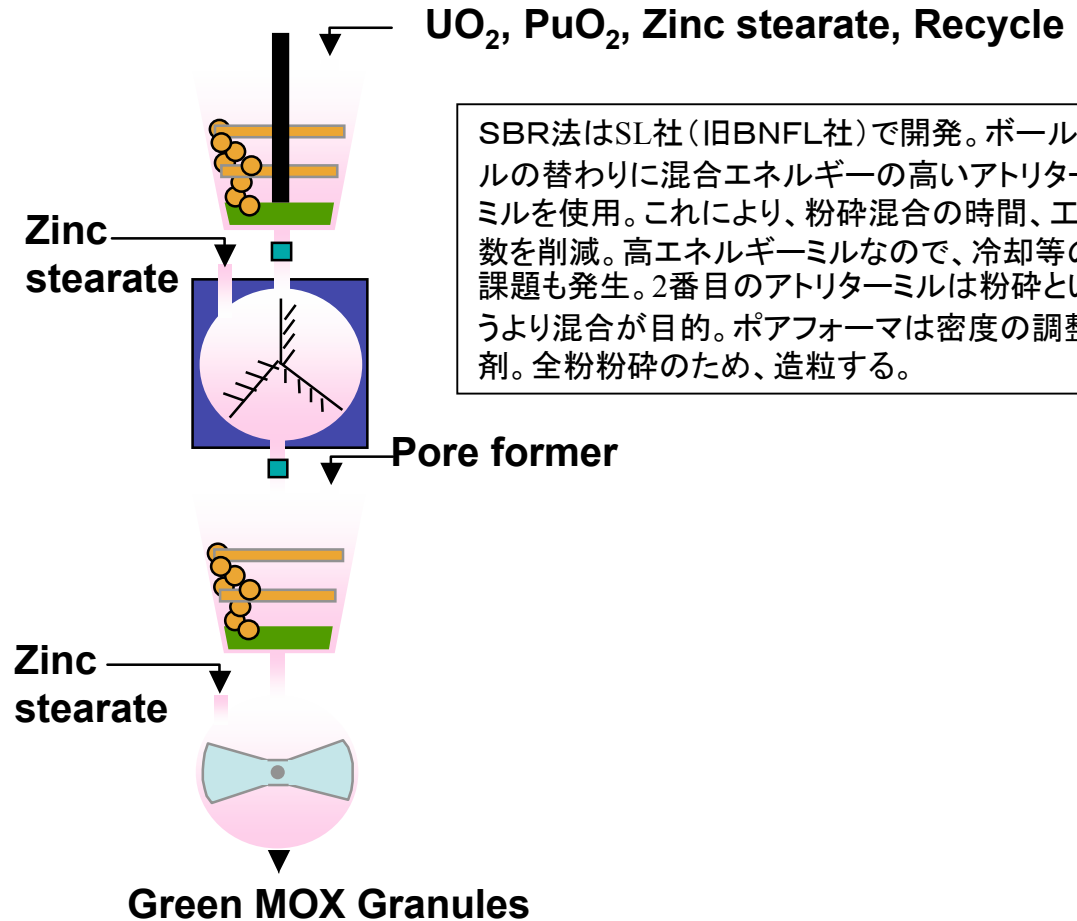
ATTRITOR MILL
アトライタ

Attritor Mill
(50kg)

Blender
(150kg)

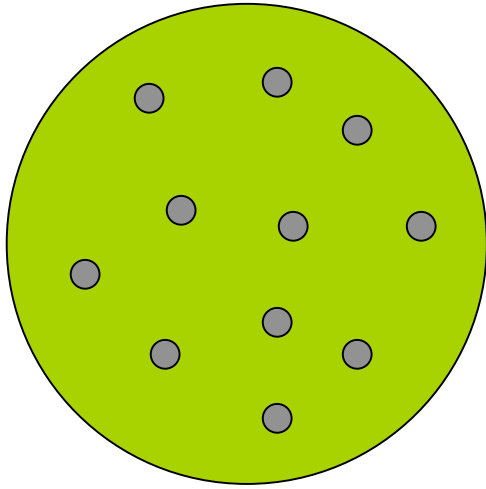
Attritor Mill
(50kg)

Spheroidiser
(50kg)



SBR法はSL社（旧BNFL社）で開発。ボールミルの代わりに混合エネルギーの高いアトリターミルを使用。これにより、粉碎混合の時間、工数を削減。高エネルギーミルなので、冷却等の課題も発生。2番目のアトリターミルは粉碎というより混合が目的。ポアフォーマは密度の調整剤。全粉粉碎のため、造粒する。

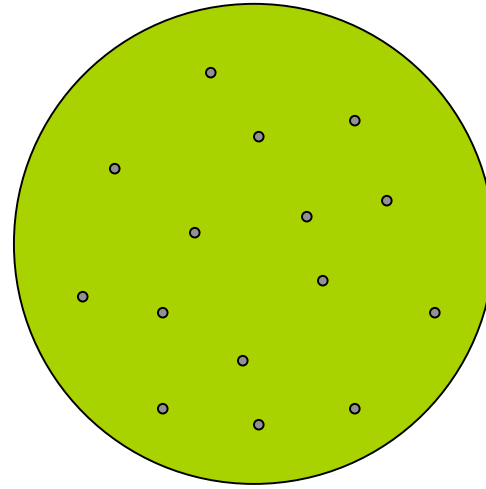
Puスポットの生成状況



二段混合法 (MIMAS)

プルトニウムスポット大

最大214 μm



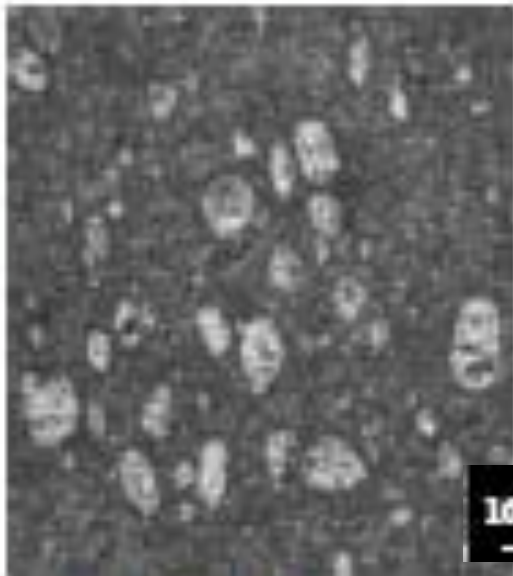
一段混合法 (SBR)

プルトニウムスポット小

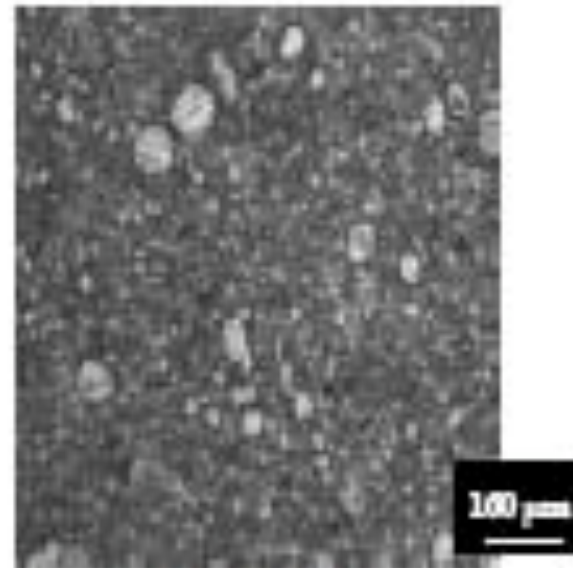
最大100 μm

プルトニウムスポットの仕様: <400 μ

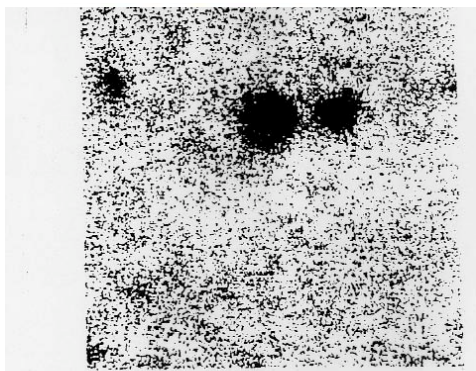
Puスポットの生成状況



顕微鏡写真



Optimised



α オートラジオグラフ

MIMAS法の最適化
(ふるい操作)

30μm以上25%→10%以下

Puスポットの燃焼

外周部
低温

23,200MWd/t

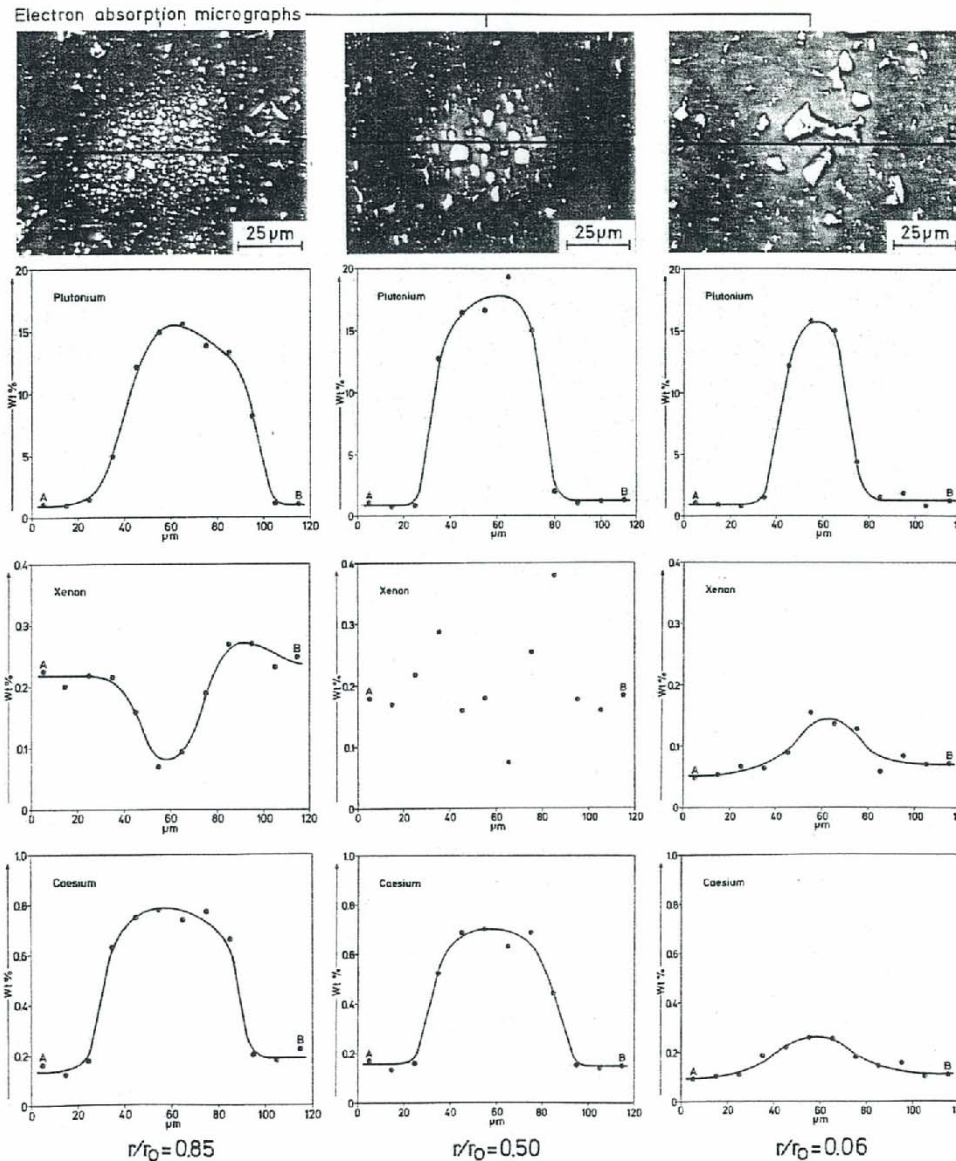
燃焼によって
Puスポットが
分解される

中心部
高温

Pu

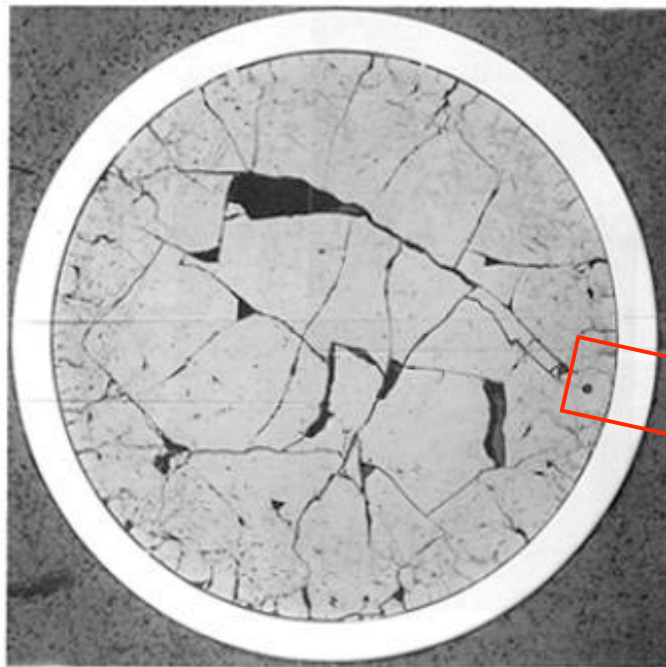
Xe

Cs



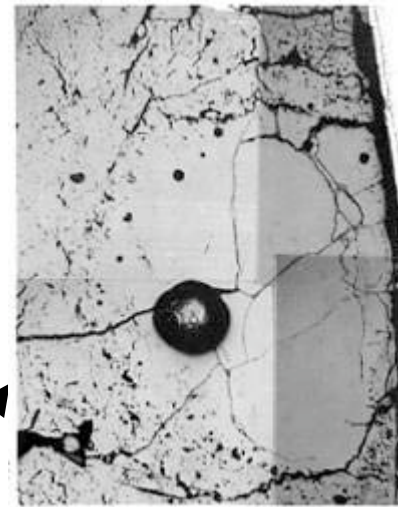
NSRR試験 1100 μ mスポット

- ペレット表面に人為的に付着させたPuスポット部の局所的な溶融が認められたが、反応度投入事故時の破損限界に対してPuスポット有無により有意な差がなかった

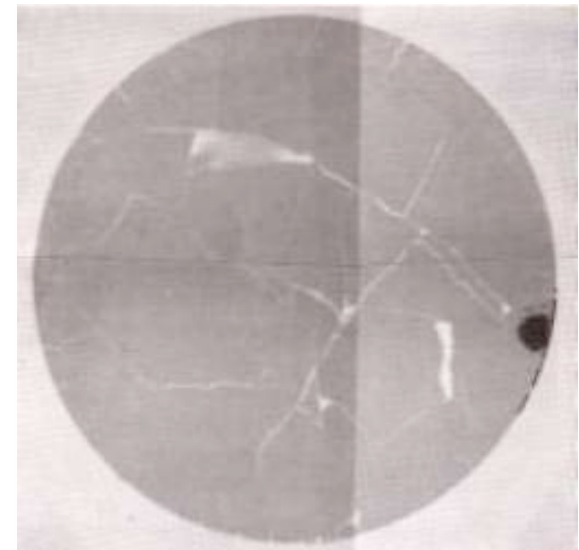
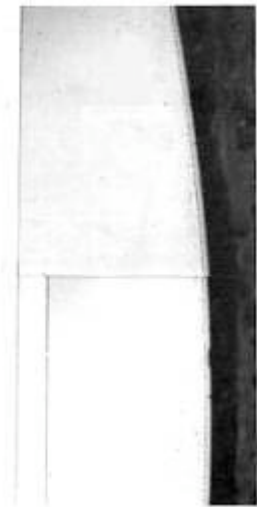


1mm
—

100%—1100 μ mPuスポット付き燃料の
ペレット金相試験結果(パルス照射後)



100 μ m
—



< α オートラジオグラフ>

MOX燃料使用の実績

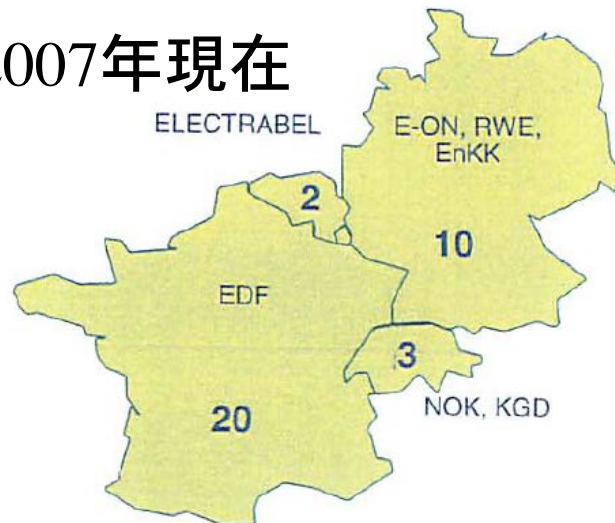
島根 2 号炉の数十年分の実績

集合体数



In United States

2007年現在



In Europe

35 "moxified" reactors

国（発電所）	2004年末	2007年末
フランス(21基)	2,270	2,894
ドイツ(15基)	1,828	2,220
ベルギー(3基)	305	321
スイス(3基)	304	392
アメリカ(6基)	91	95
イタリア(2基)	70	70
インド（2基）	10	10
オランダ(1基)	7	7
日本(2基)	6	6
スウェーデン(1基)	3	3
計（56基）	4,894	6,018
*ふげん	772	772

フランスのMOX利用

- 58基の原子炉運転中 6300万kW（88％：2007）
- 40 gCO₂/kWh（日本は約400 g/kWh）
- 20基の原子炉でプルサーマル実施中（世界一）

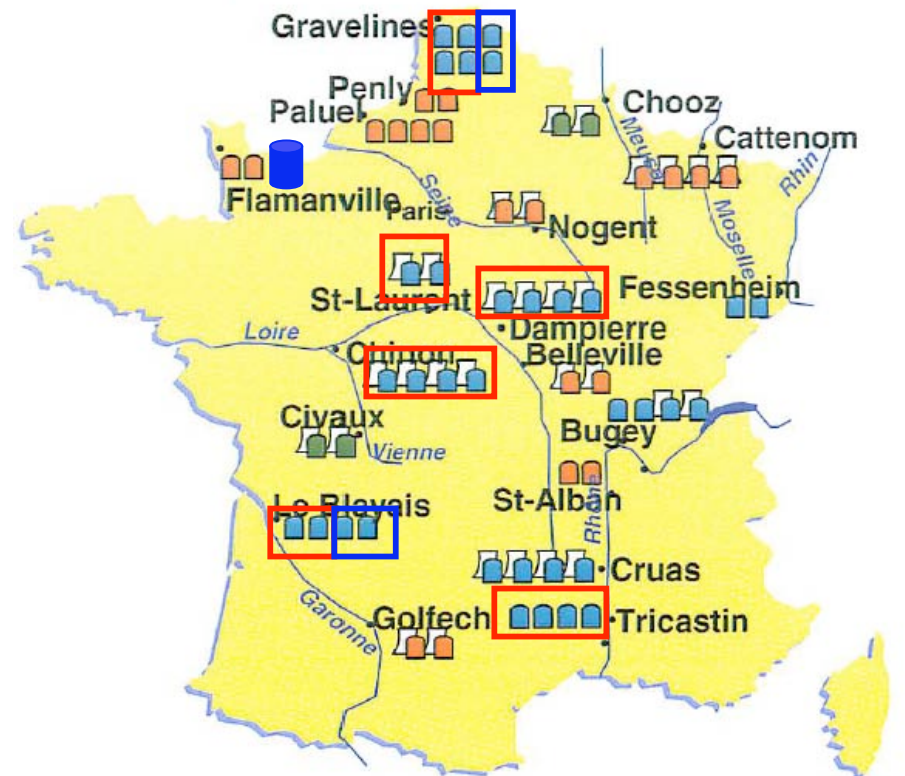
追加ライセンス

Gravelines 5,6 (2007.11.3)

Le Blayais 3,4 (2009)

*Flamanville EPR

Type	CP0 CP1-2	P 4 P' 4	N4
Power	900 MW	1,300 MW	1,500 MW
Number	34	20	4
Color			



MOX燃料使用の実績

－出力、燃焼度、装荷率－

国	発電所	出力 万 kW	MOX装荷 開始	燃焼度 MWd/t	装荷率 %
ベルギー	ドール 3	105.8	1995	49,000	20
ドイツ	グンドレミンゲン(B)	134.4	1996	55,000	26
	ネッカー 2	136.5	1998	50,000	27
	イザール 2	145.5	1998	45,000	33
	ブロックドルフ	144.0	1989	50,000	33
	グローンデ	143.0	1988	50,000	33
	ウンターバーサー	135.0	1984	50,000	31*
	フィリップスブルク 2	142.4	1988	50,000	23
スイス	ゲスゲン	102.0	1997	52,000	36
中国電力	島根 2	82.0	2010予定	40,000	32

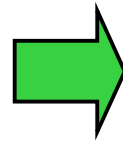
まとめ

- プルトニウムを使用するにあたって、ウラン燃料と大きく異なることはありません。
- 積極的に使用することによって、エネルギー資源を有効に利用することができます。

1,000kg (約 6 体)
使用済みウラン燃料

Pu 10kg

回収U 960kg

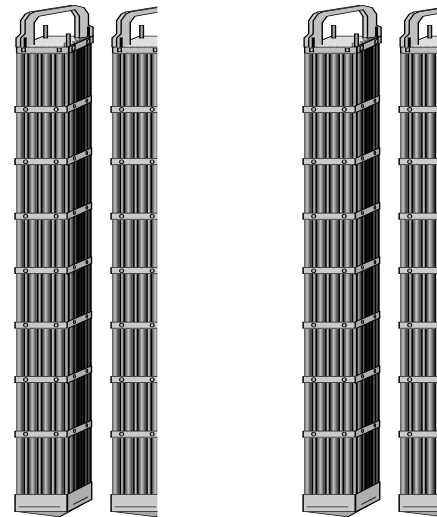
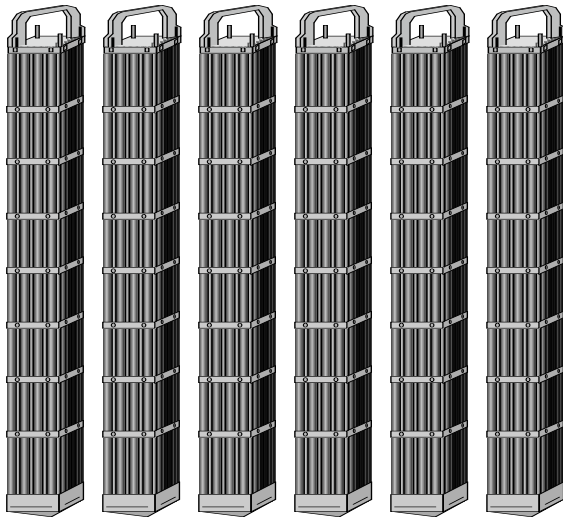


MOX燃料

180kgPu (1.4体)

ウラン燃料(3%濃縮)

250kgU (1.4体)



使用済みMOX燃料の今後について

2010年から第2再処理工場について検討

再処理方法の高度化

対象使用済み燃料

軽水炉使用済み燃料

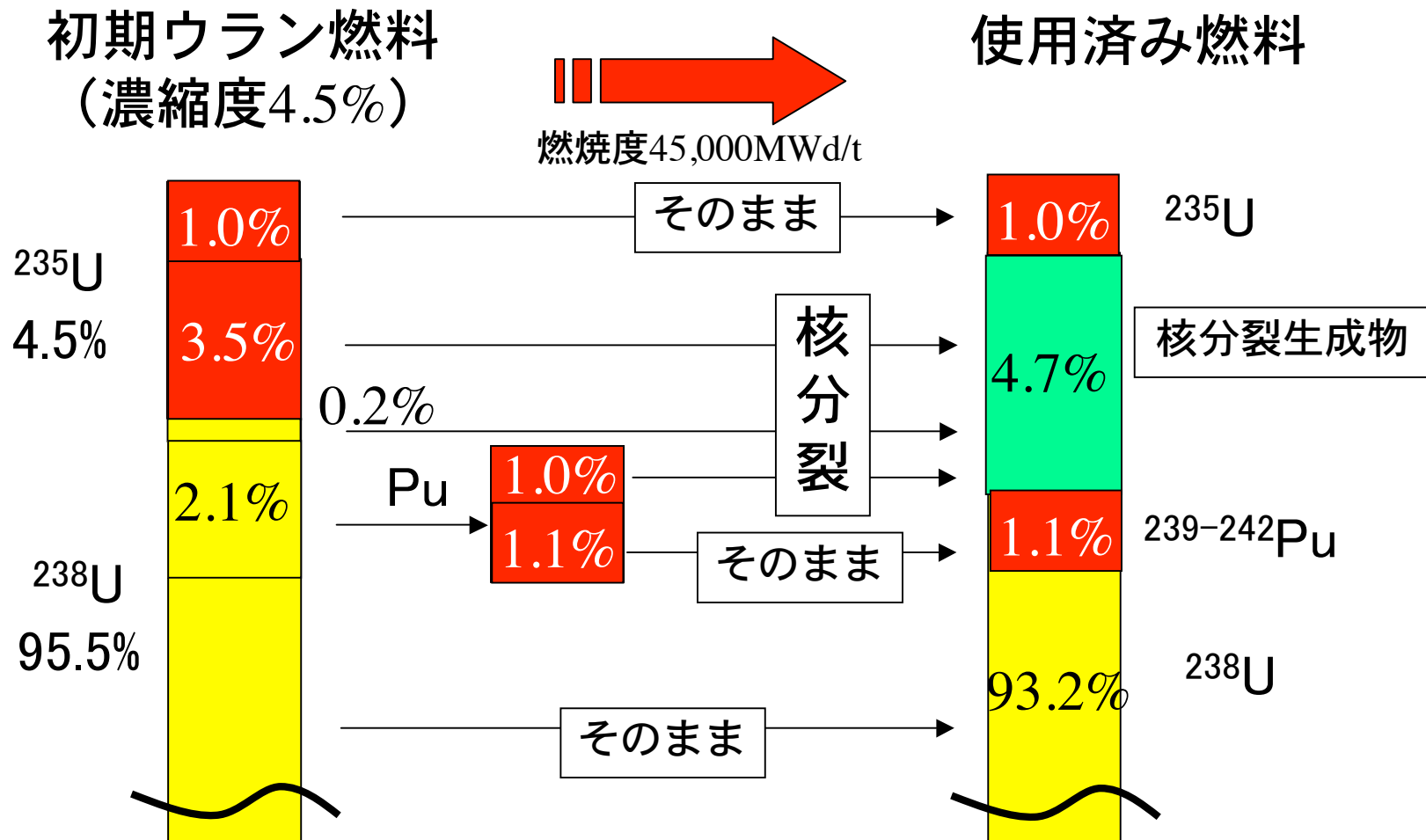
軽水炉MOX使用済み燃料

高速炉使用済み燃料

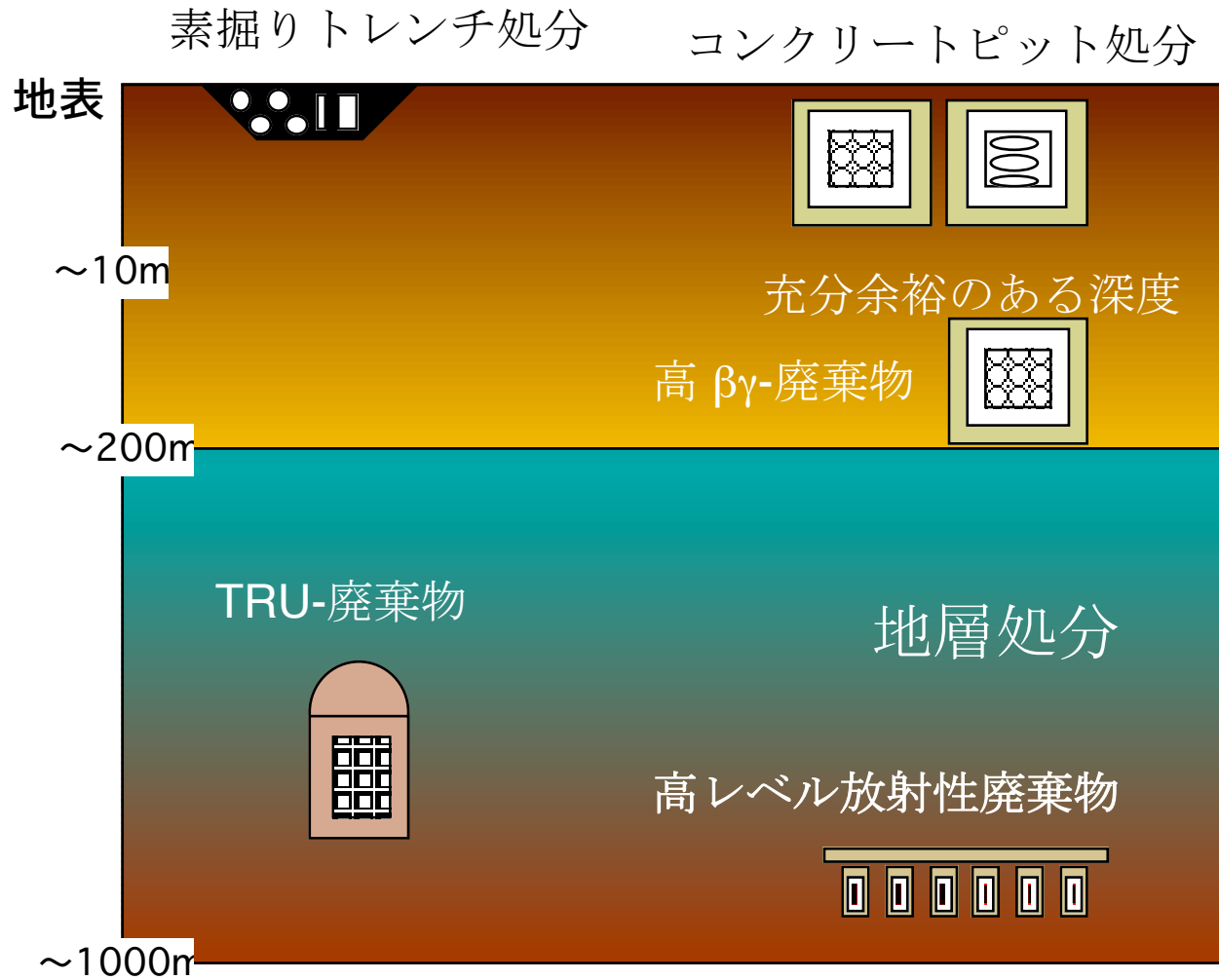
MOX (Pu含有率30%程度)

金属燃料

軽水炉におけるウラン燃料の変化



最終処分について



米国の状況

ユッカマウンテンの処分場の構成(米国)

処分容量: 70, 000t

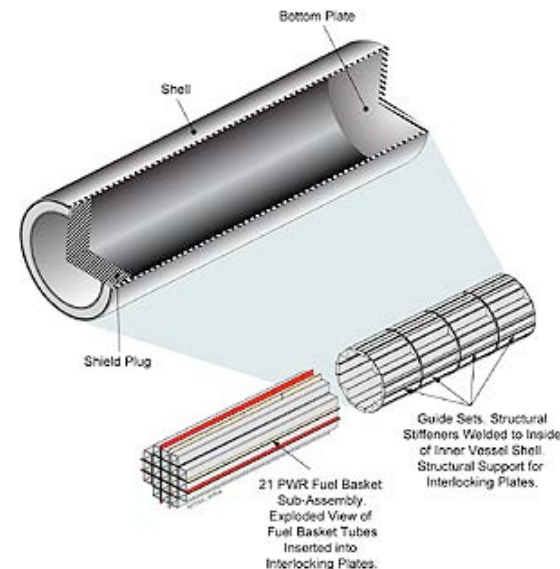
処分対象廃棄物:

民間の使用済燃料が63,000t

DOE保有の使用済燃料が2,333t

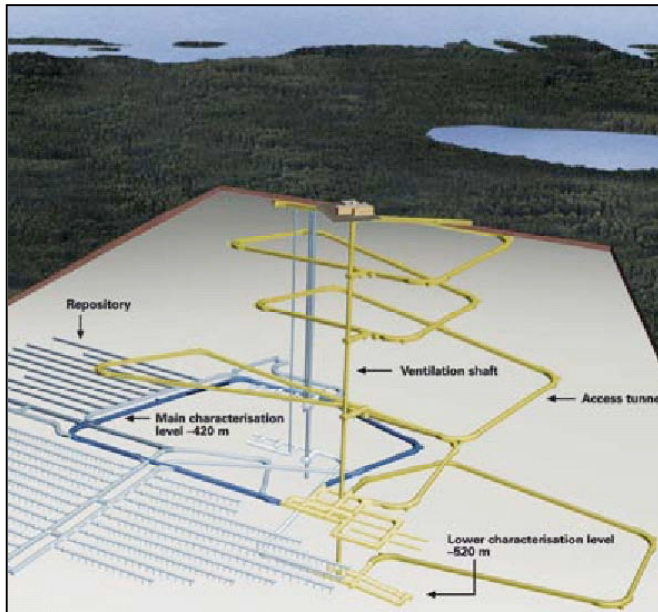
再処理によるガラス固化体が4,667t(軍事、民間の再処理)

再処理することにより処分容量を数倍にできる
(DOE, EPA)



フィンランド

- 最終処分場 オルキルオト地区 地下500m
- 地下研究施設(ONKALO)建設中
- 処分場は2020年操業開始予定 使用済み燃料6500t



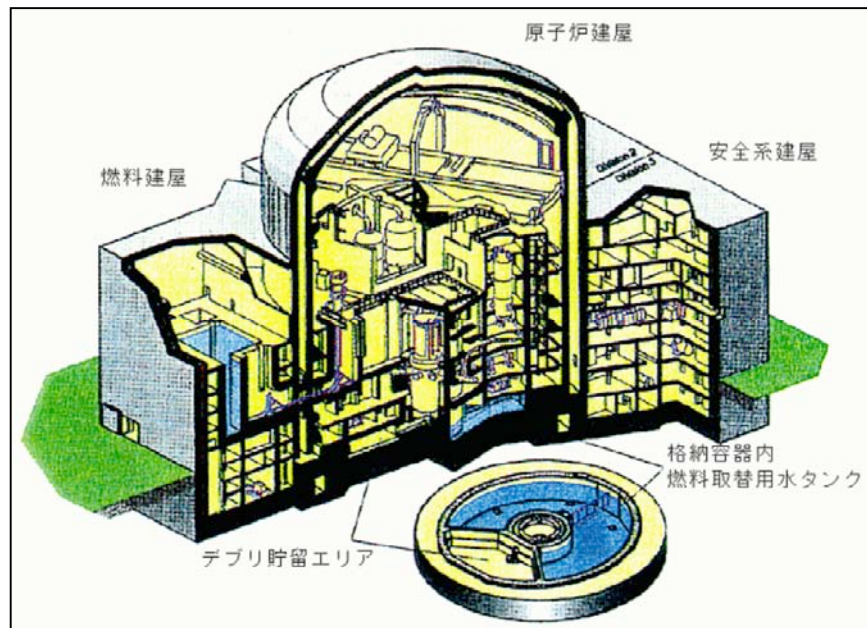
ONKALO



坑道入り口

フィンランドのEPR導入

- 4基の原子炉を運転中
- EPRの導入（オルキルオト3号）160万kW



EPR: 欧州加圧水型炉



フィンランドでの原子炉建家建設現場
外側容器（左）は外部からの
航空機衝突防壁の役目もある

スイス

- 5基の原子炉で337万kW 発電電力の32%、60%水力
- 3基でプルサーマル実施中（2007装荷で終了）
- 2006年に海外再処理委託契約終了
上院の意向で再処理を10年凍結
- 各発電所で使用済み燃料中間貯蔵



後ろの足場のある建物
使用済み燃料貯蔵施設(増設)
(1000体分)



冷却塔から出る水蒸気