

# プルサーマル女川 3号勉強会

平成21年9月5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	東北電力女川3号炉
プルトニウム含有率 (ペレット最大)	約13%	約10%
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	45,000 ウラン燃料を越えない範囲	40,000

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
- 核分裂生成ガス放出
- 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

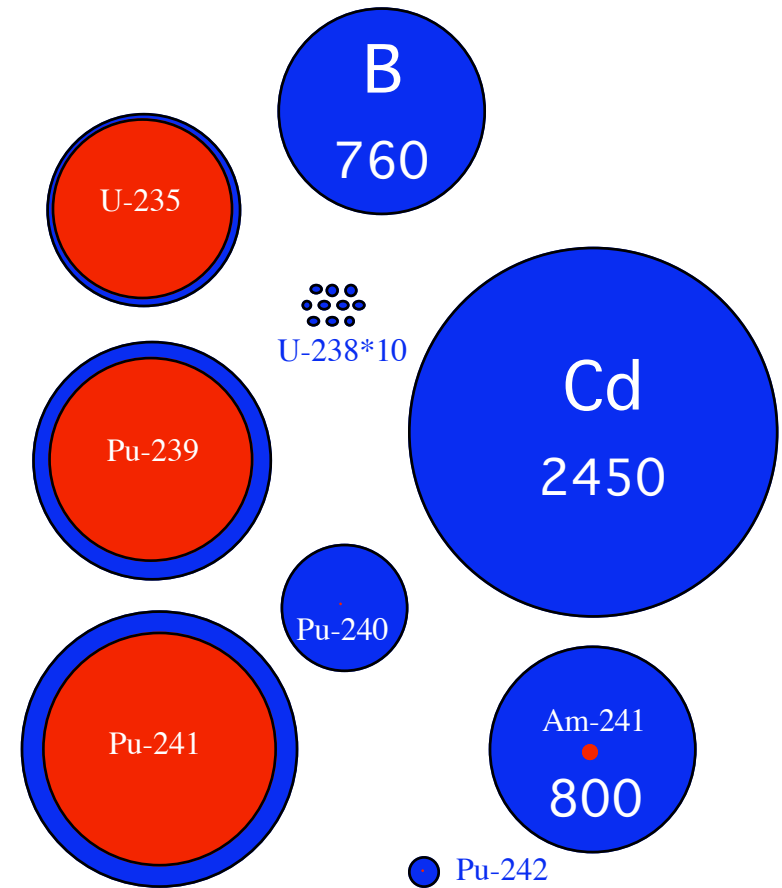
$$\frac{\text{核分裂性プルトニウムの全重量}}{\text{ウランとプルトニウムの全重量}} (\%)$$

核分裂性プルトニウム：Pu-239、 Pu-241

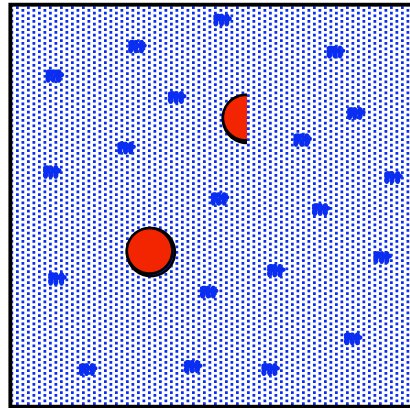
非核分裂性プルトニウム：Pu-240、 Pu-242

# 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)

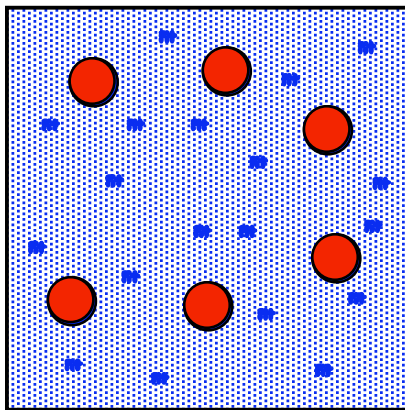


# 燃料の核分裂能力(1)

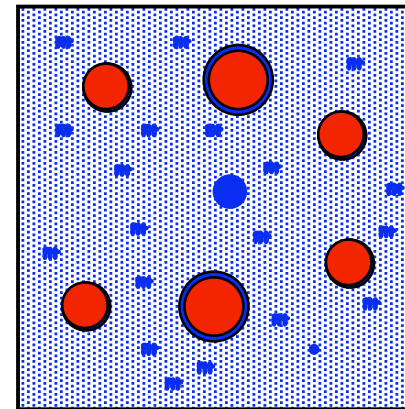


天然ウラン U-235 0.72%  
軽水炉では臨界にできない

濃縮ウラン3.0%



MOX  
(濃縮度3.0%相当)

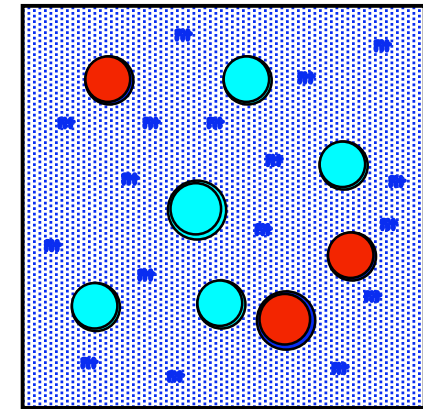
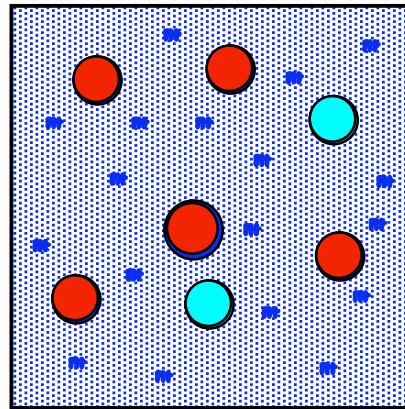
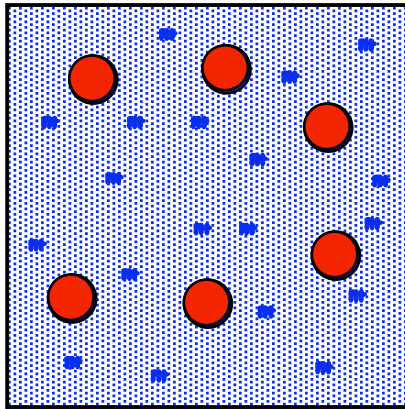


# 燃料の核分裂能力(2)

濃縮ウラン3.0%

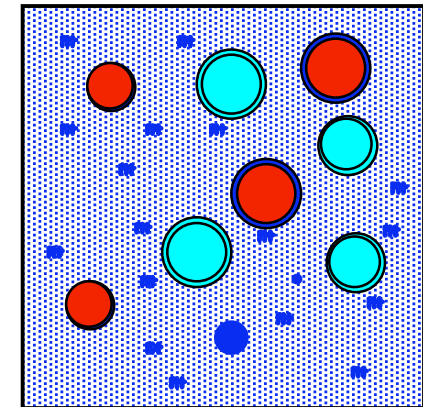
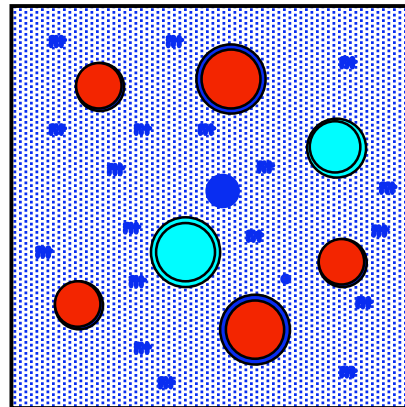
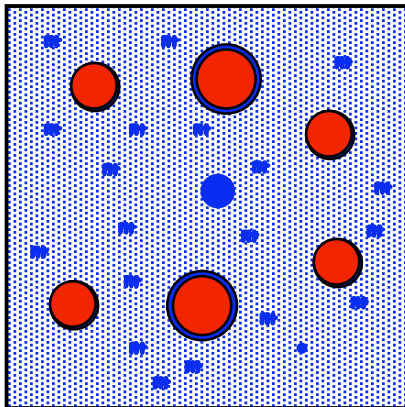
燃焼中期

燃焼末期



MOX

古い燃料だけでは臨界維持困難



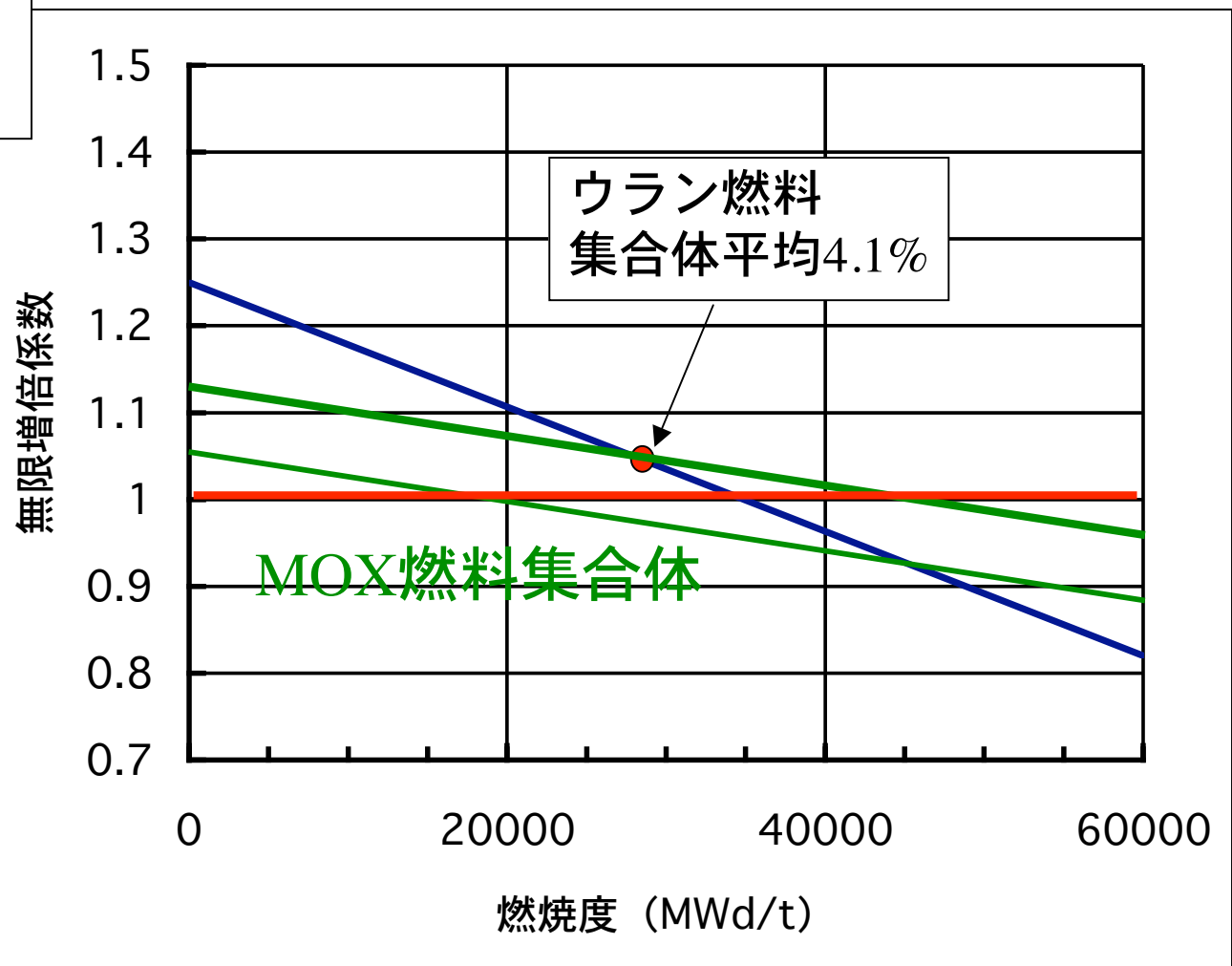


# MOX初期濃縮度の決め方 (PWRの場合)

集合体の無限増倍係数は  
燃焼とともに低下する

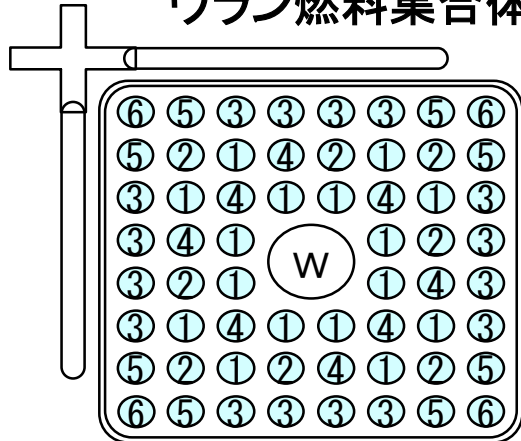
MOX燃料の無限増倍係  
数の低下はウラン燃料  
に比べて小さい

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



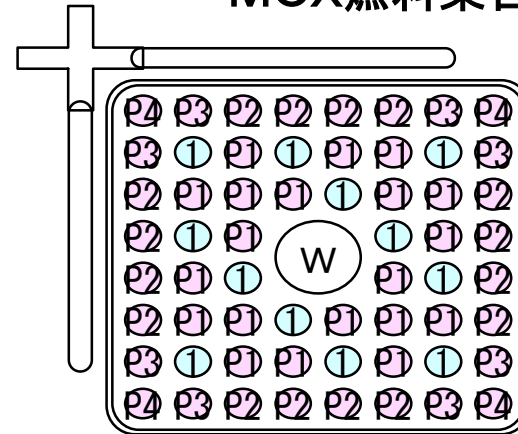
# MOX燃料集合体内のプルトニウム含有率分布

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
- P1 : 最高Pu富化度MOX燃料棒
- P1 ~ P4 : 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)

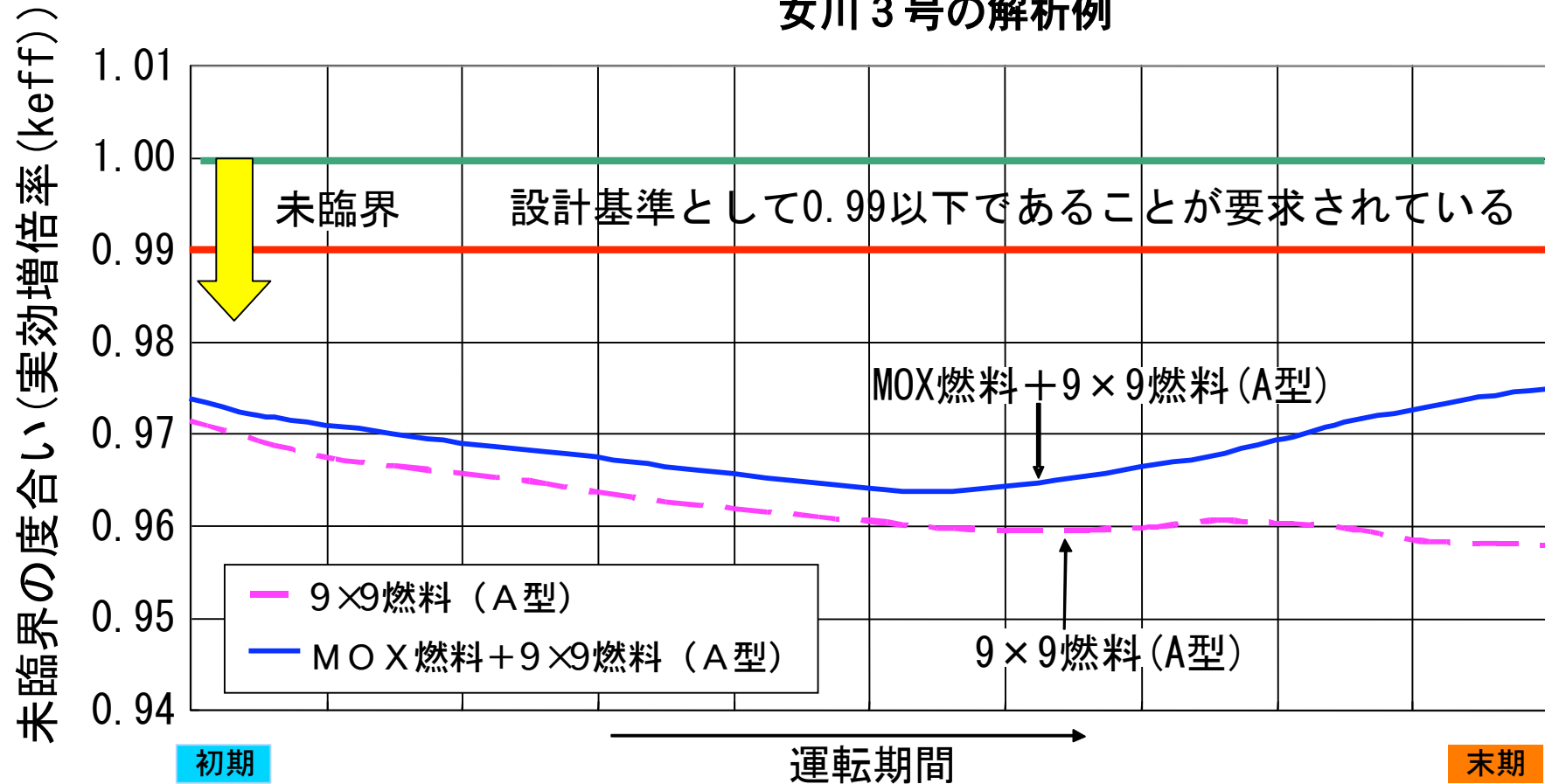
## MOX燃料集合体の仕様

	ウラン燃料 (高燃焼用)	MOX燃料 (女川3号)
集合体最高燃焼度 (MWd/t)	55,000	40,000
平均濃縮度(wt%)	約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 <sup>MOX燃料棒</sup>
ペレット密度 理論密度に対する割合	97%	95% <sup>MOXペレット</sup>

# 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。

女川3号の解析例



## 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 $400\ \mu\text{m}$   
( $0.4\text{mm}$ ) 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

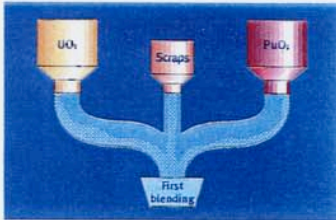
スポット内の温度上昇は数 $^{\circ}\text{C}$   
初期に消滅

- 異常時

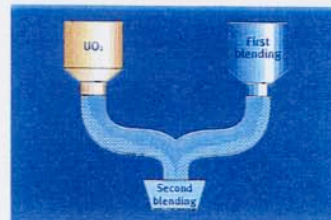
燃料破損の判断基準への影響なし  
(NSRRでの試験  $400\ \mu\text{m}$ 、 $1100\ \mu\text{m}$ のスポット共存)

# 燃料製造方法（メッロクス社）

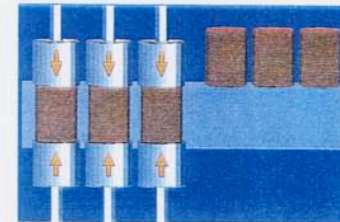
## The A-MIMAS fuel fabrication process



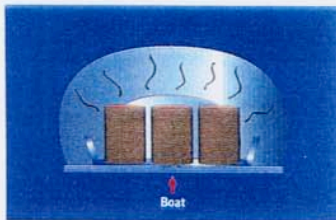
Pu+U粉末混合



MOX粉末+U粉末混合



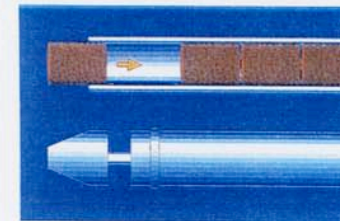
3 Pressing or pelletizing



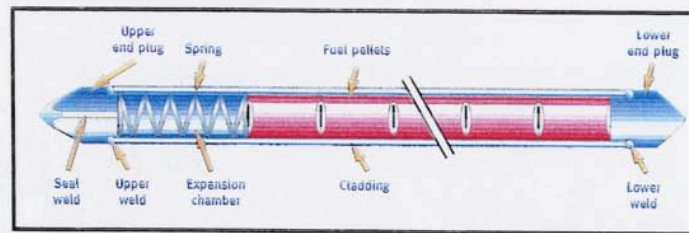
4 Sintering



5 Grinding



6 Rod cladding



7 Light water type fuel rod



# 燃料製造方法 (SL社)



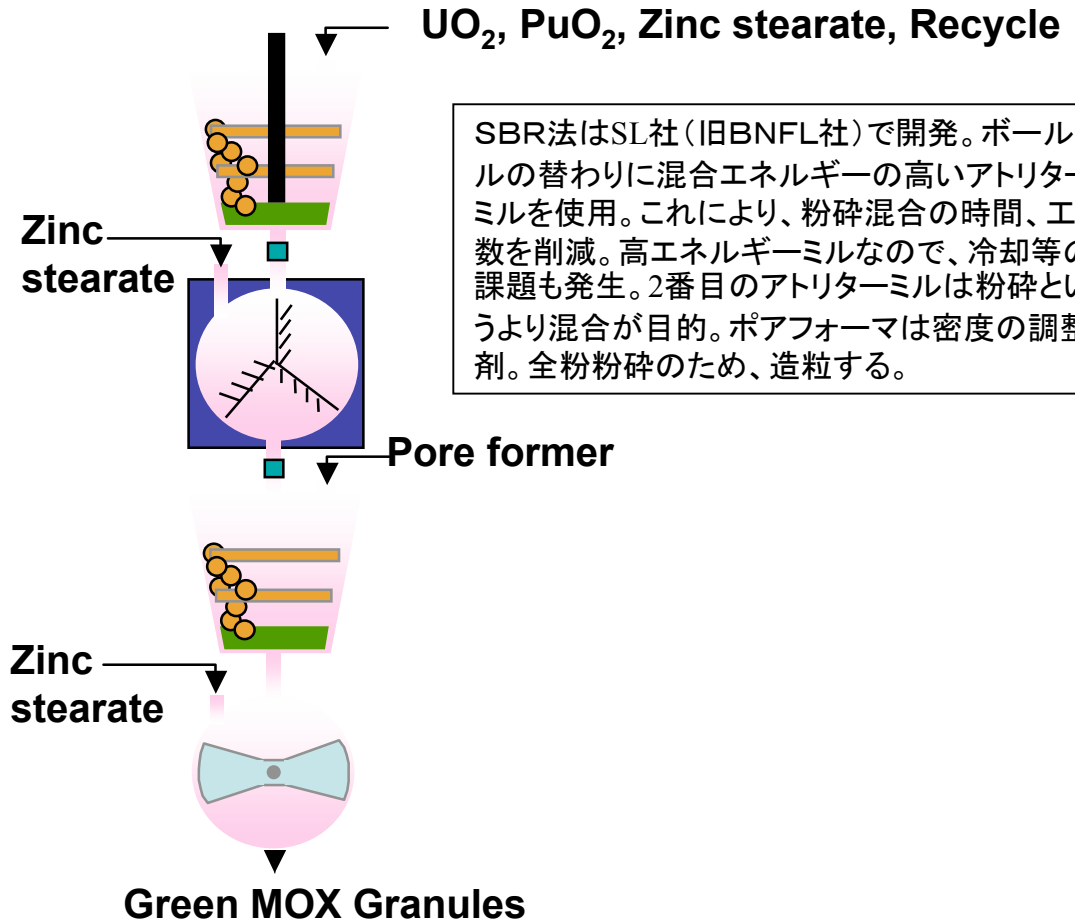
ATTRITOR MILL  
アトライタ

Attritor Mill  
(50kg)

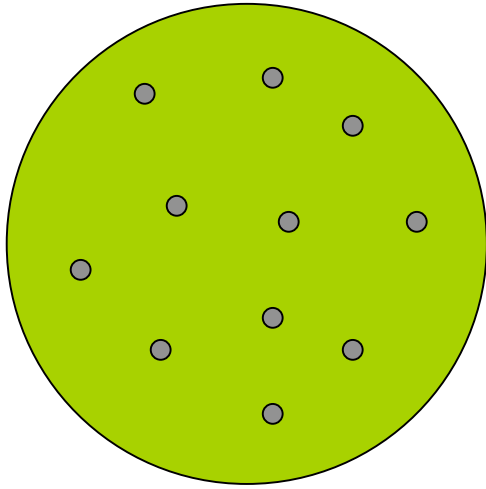
Blender  
(150kg)

Attritor Mill  
(50kg)

Spheroidiser  
(50kg)



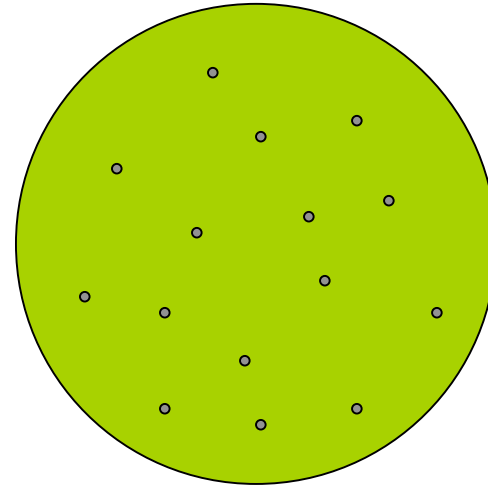
# Puスポットの生成状況



**二段混合法 (MIMAS)**

**プルトニウムスポット大**

**最大214 $\mu$ m**



**一段混合法 (SBR)**

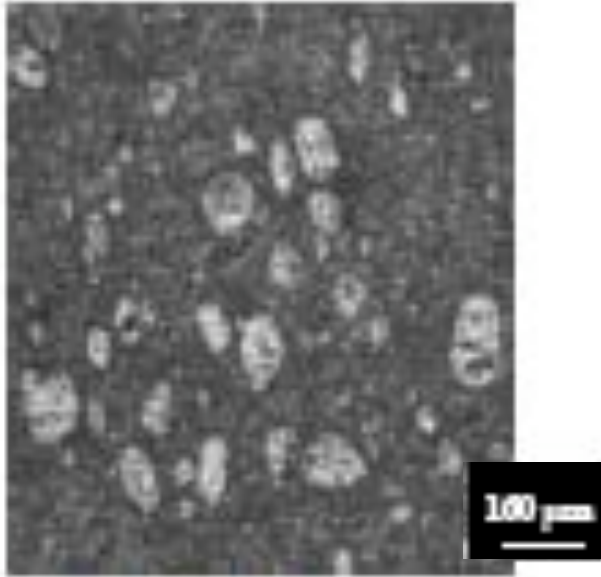
**プルトニウムスポット小**

**最大100 $\mu$ m**

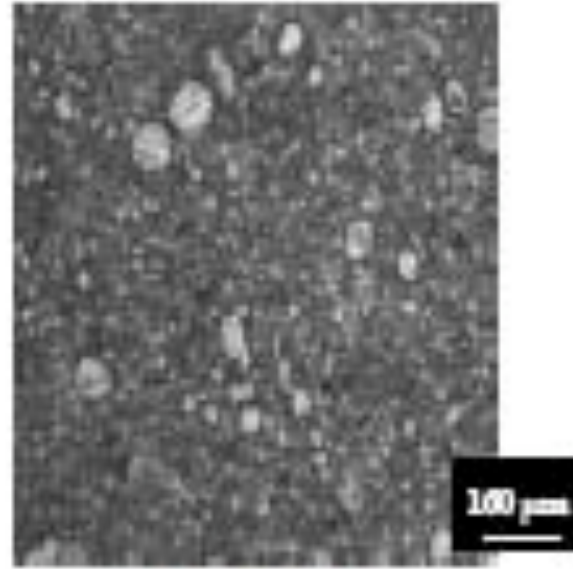
**プルトニウムスポットの仕様: <400 $\mu$**



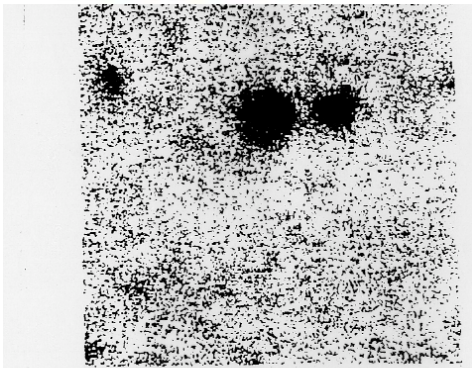
# Puスポットの生成状況



顕微鏡写真



*Optimised*



$\alpha$ オートラジオグラフ

MIMAS法の最適化  
(ふるい操作)

30 $\mu$ m以上25% $\rightarrow$ 10%以下

# Puスポットの燃焼

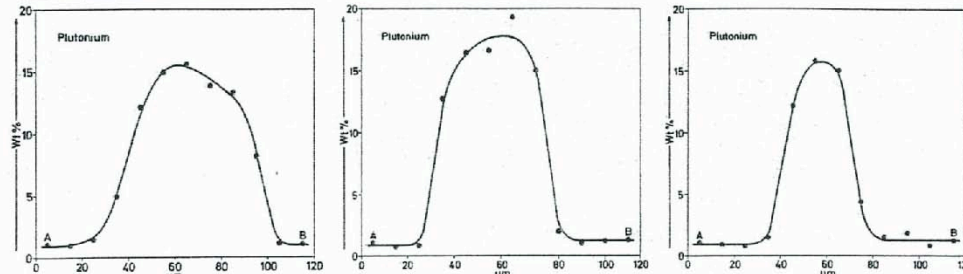
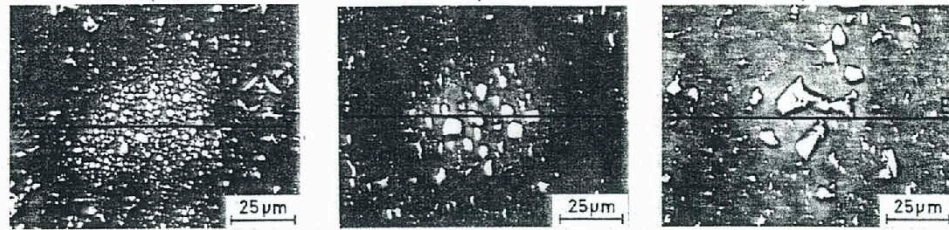
外周部  
低温

中心部  
高温

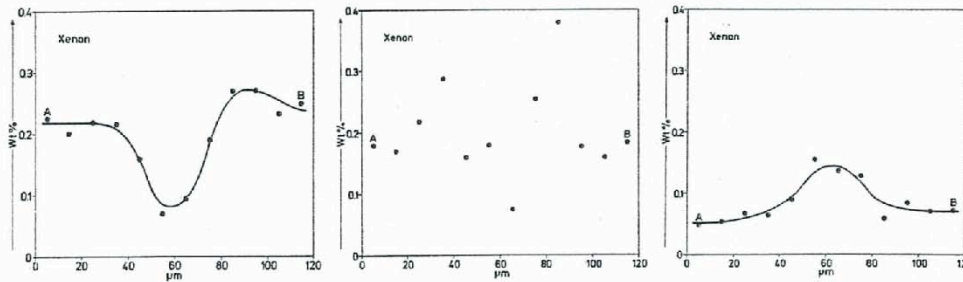
23,200MWd/t

燃焼によって  
Puスポットが  
分解される

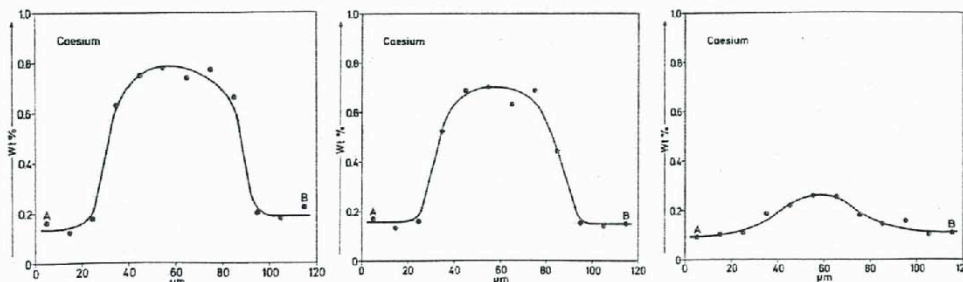
Electron absorption micrographs



Pu



Xe



Cs

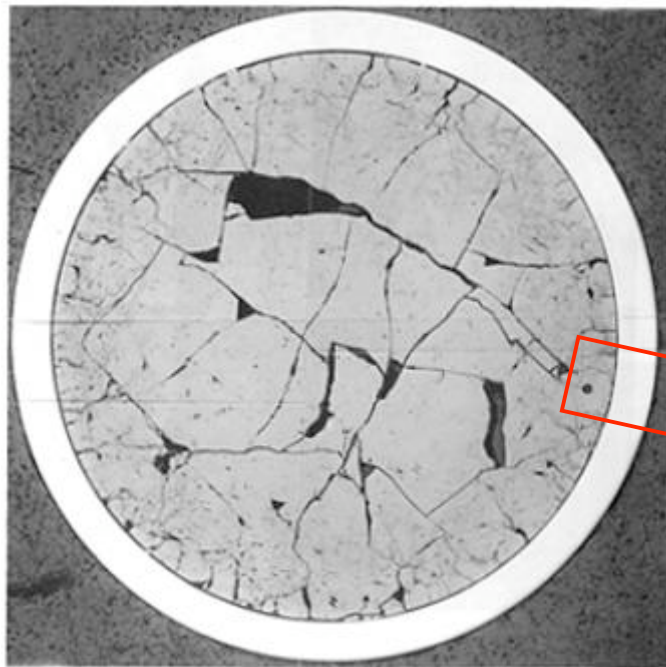
$r/r_0 = 0.85$

$r/r_0 = 0.50$

$r/r_0 = 0.06$

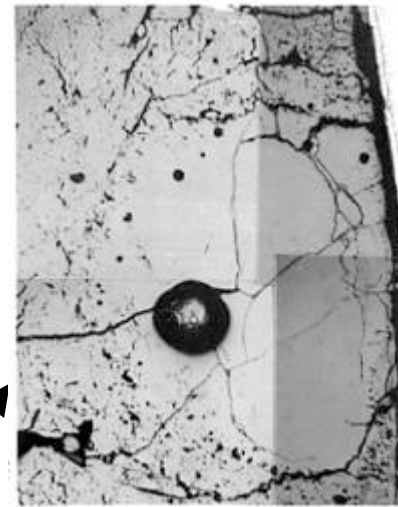
# NSRR試験 1100 $\mu$ mスポット

- 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

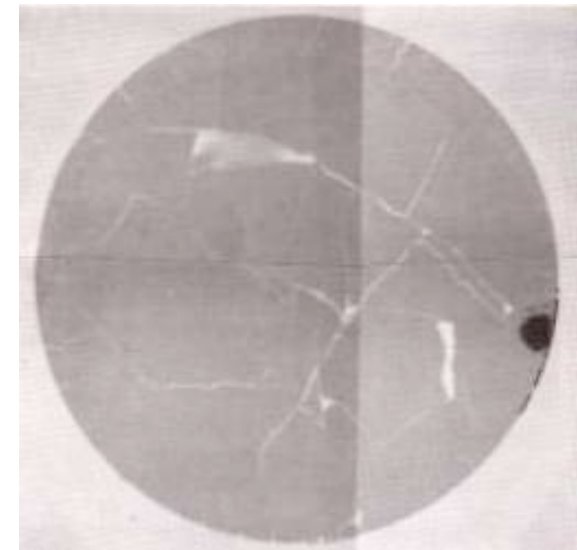
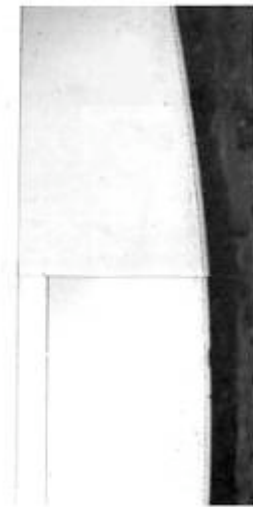


1mm

100% - 1100 $\mu$ m Pu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)



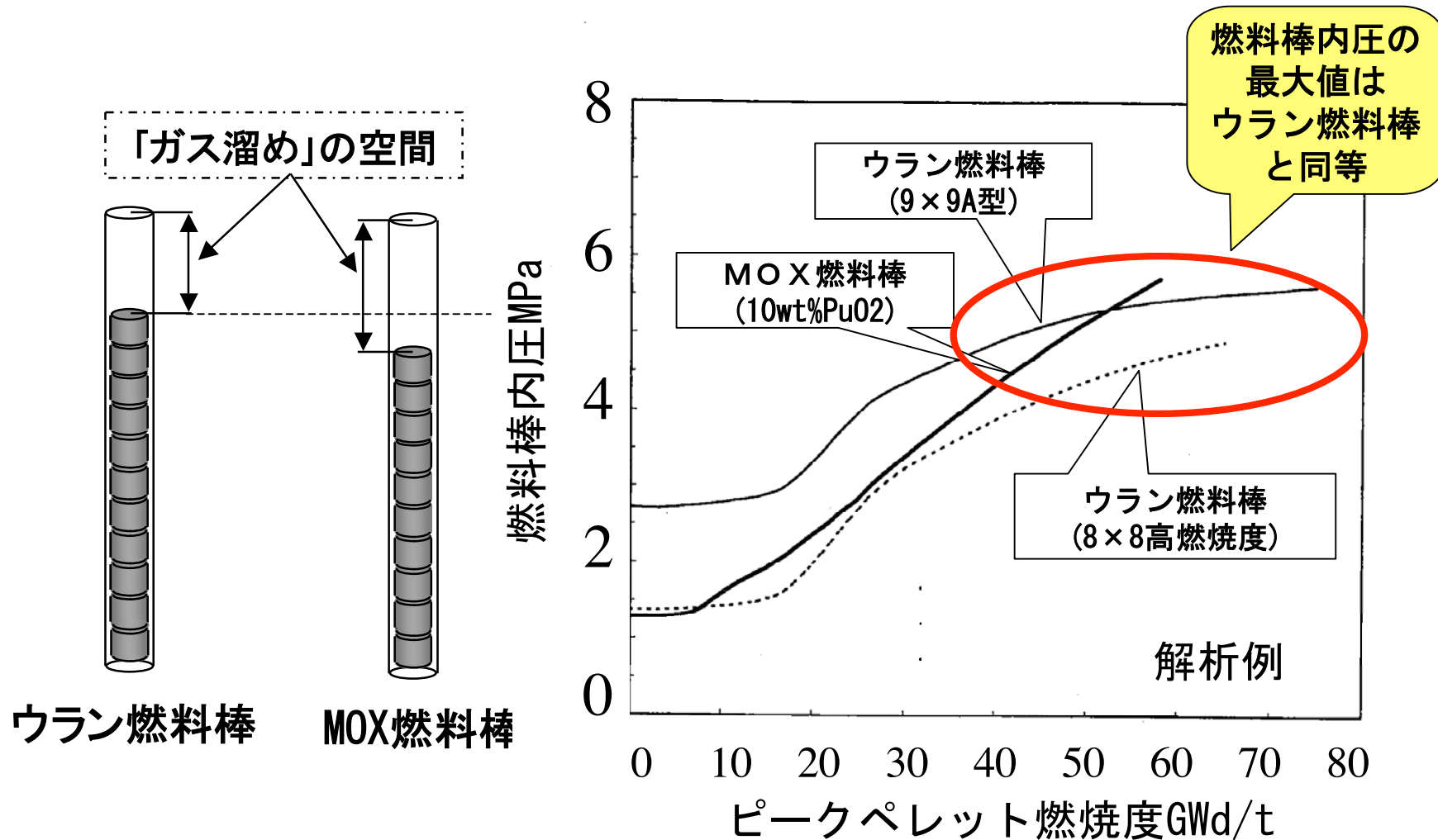
100 $\mu$ m



< $\alpha$ オートラジオグラフ>

# 核分裂ガス放出

燃料棒内に核分裂生成ガスが異常に充満して  
燃料棒を傷めないか



# 核分裂ガス放出モデル

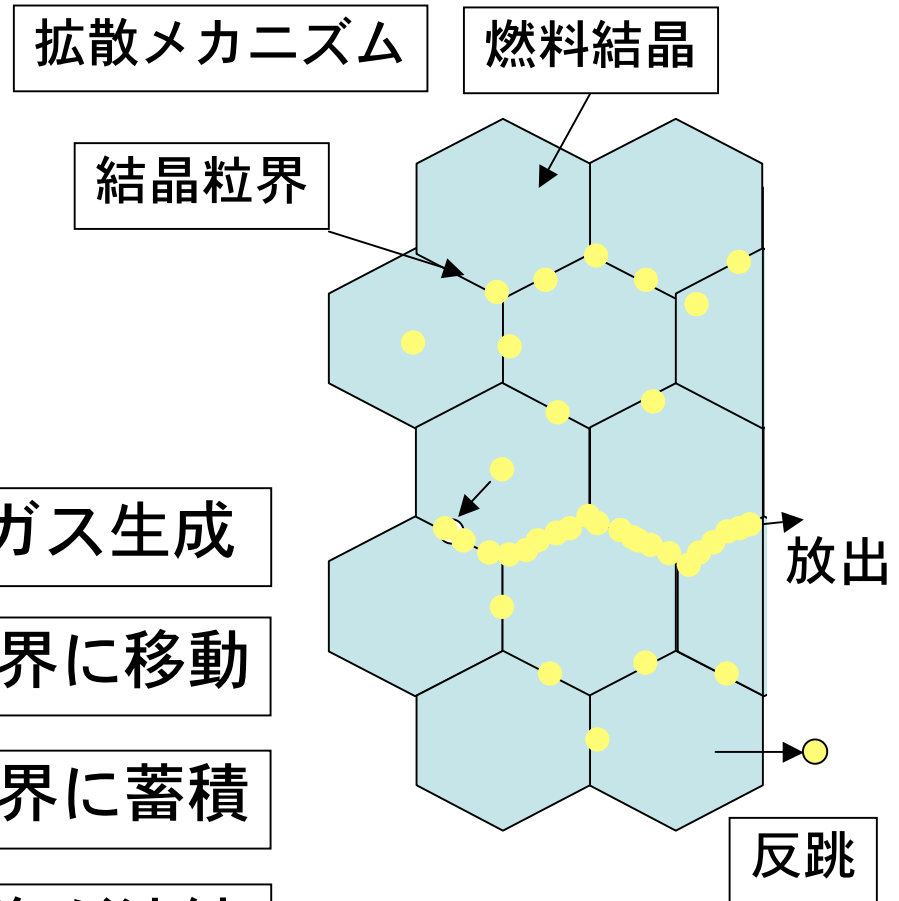
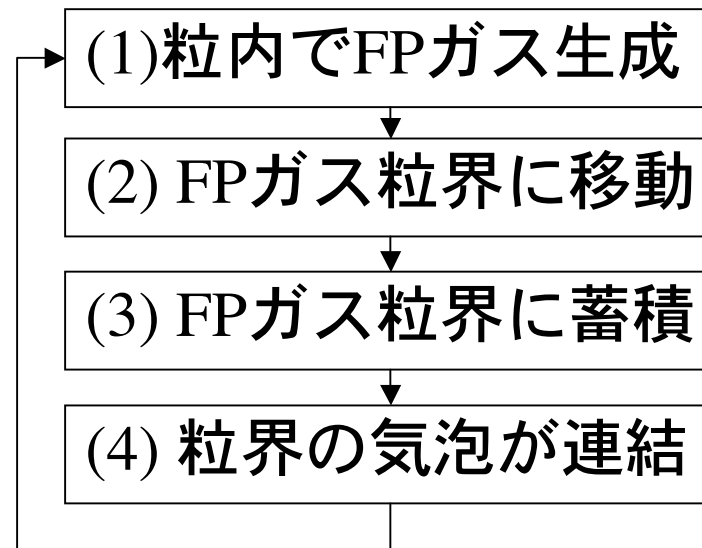
- FPガスは下記のメカニズムで放出される

中高温領域：拡散メカニズム

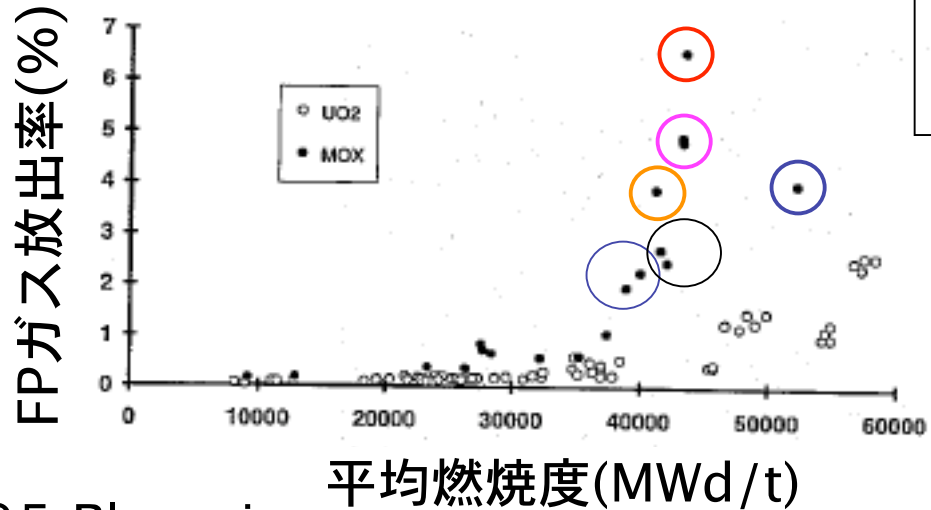
低温領域：反跳、たたき出し

- 解析プログラム

FINE、FPAC



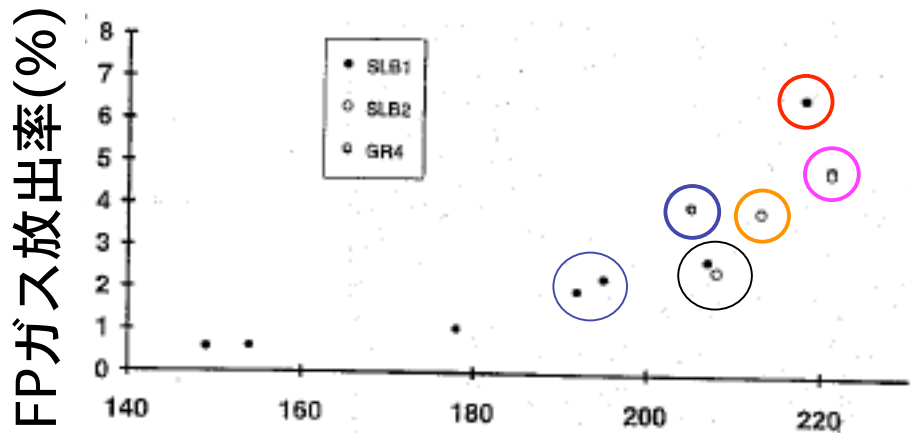
# 核分裂生成ガス放出率測定結果



燃焼度と共に放出率上昇  
MOX燃料の方が高め

予測の範囲内

IAEA1995-Blanpain



FPガス放出率は  
燃焼末期での線出力  
の影響を受ける

第3サイクルにおける線出力(W/cm)

# 核分裂生成ガス放出率測定結果

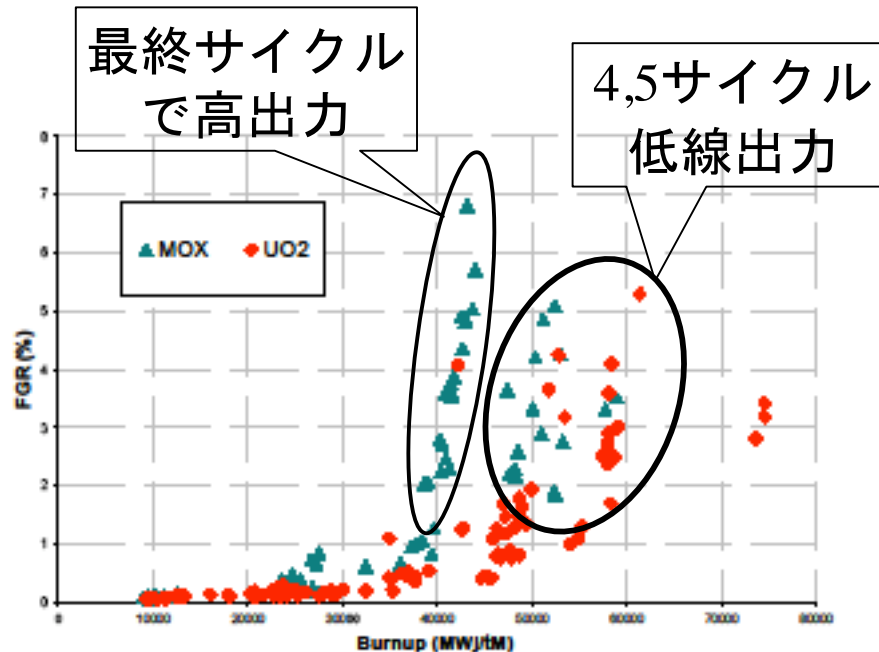


Figure 1. Fractional fission gas release as a function of burnup (French EDF 17x17 900 MWe reactor data)

ANS2004-Blanpain

Proceedings of the 2004 International Meeting on LWR Fuel Performance  
Orlando, Florida, September 19-22, 2004  
Paper 1075

## 追加データ

- MOX燃料特有のFPガス放出の増加はみられない。
- 4、5サイクル使用の高燃焼度燃料においても、異常なFPガス放出は起きていない。  
(最終サイクルで低線出力運転)
- FPガス放出率の増大傾向は主に線出力の影響によるもので、燃焼度の進行によるものではない。

# MOX燃料使用の実績

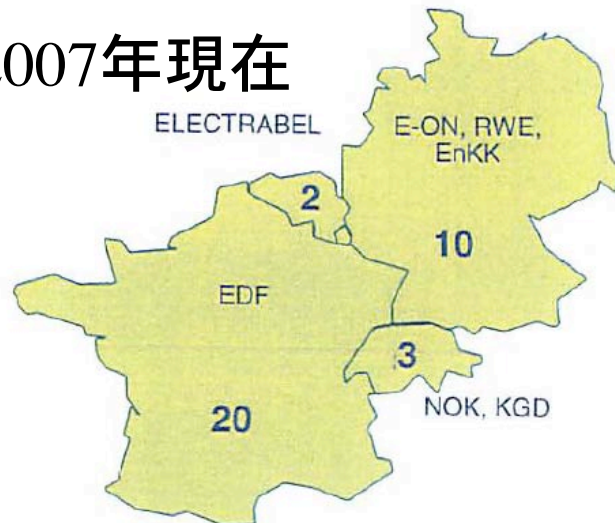
## 島根 2 号炉の数十年分の実績

## 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 gCO<sub>2</sub>/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）

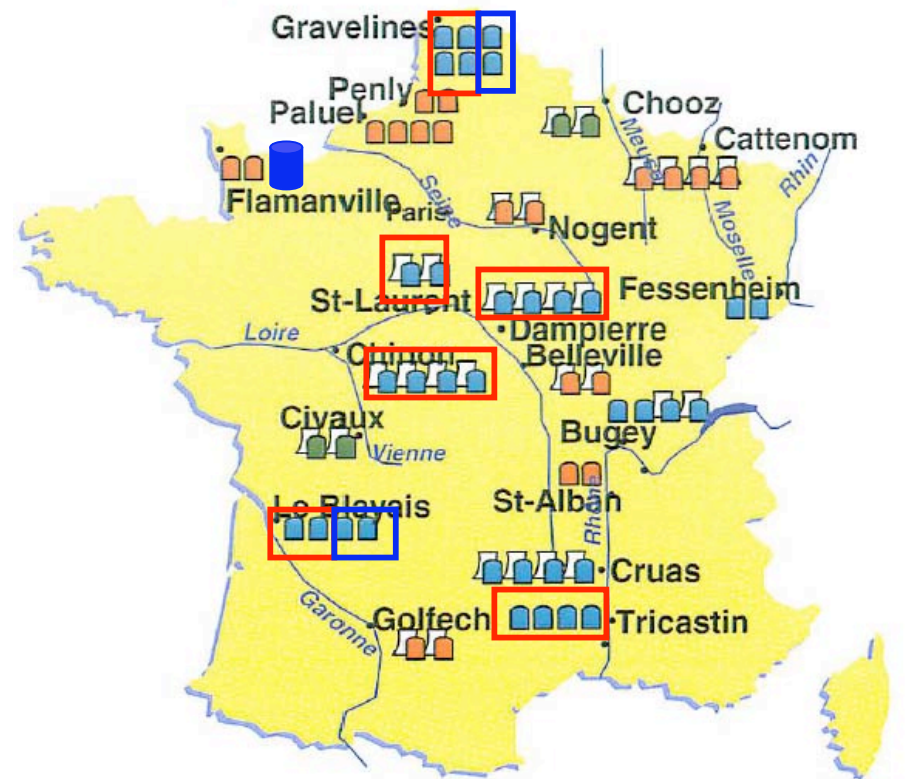
- 追加ライセンス

Gravelines 5,6 (2007.11.3)

Le Blayais 3,4 (2009)

\*Flamanville EPR

Type	CP0 CPI-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	<b>55,000</b>	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
	ウンターベーサー	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	<b>36</b>
東北電力	女川3	82.5	2015 までに導入	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)

