

2 安全審査事項

論点8 燃料健全性への影響

論点8-1 ペレット中心温度

○検討課題

MOX燃料は、ウラン燃料よりペレットの融点が低下し、熱伝導率も小さくなり、燃料中心温度が上昇する傾向にある。燃料の健全性を保つことはできるのか。

○過去に本県や他道県に寄せられた意見

- ・ プルトニウムは、ウランのように簡単に実験が行えず、データが決定的に不足しており、事故時の評価が十分に行われているとは思えない。
- ・ プルトニウム含有率の違いによって、数十度から約100℃ウラン燃料より融点が低くなる。
- ・ MOX燃料は熱伝導度が約5%小さくなる。それだけ熱を伝えにくく、燃料温度が上がりやすくなる。
- ・ 燃料中心温度、燃焼に伴う融点が低下する傾向にあるが、大きな温度差はなく、制限値の温度に対して十分な余裕がある。

○東北電力株式会社の講じる対策または見解

- ・ MOXペレットは、二酸化プルトニウム (PuO_2) 含有率が高い程、熱伝導度が低くなって温度が上がりやすくなり、同時に融点は低くなることから、 PuO_2 含有率が上限の10重量% (以下 wt%) であるMOXペレットについて評価を行っている。
- ・ PuO_2 含有率が10wt%のMOXペレットの燃料使用開始時の融点は約2740℃であり、純粋なウランペレット (2805℃) の場合に比べ幾分低下する。(設置許可申請書 8-3-19)
- ・ また、最近の融点測定によれば、燃料の使用に伴う融点の変化は小さいことが確認されているが、保守的に約1年 (10000MW d/t) あたり 32℃低下すると仮定して比較する。
- ・ MOX燃料集合体において、燃料使用期間を通じてのMOXペレットの最高温度は約1660℃である。9×9燃料集合体におけるウランペレットの最高温度約1550℃よりは上昇するが、常に融点に対して約1000℃程度余裕があり、燃料の健全性は保たれる。(表 8-1, 図 8-1 参照) (設置許可申請書 8-3-20)
- ・ 参考として、MOX燃料集合体中のウランペレットの最高温度は約1800℃である。(図 8-1 参照)

○国の見解 (安全審査結果)

- ・ 以下のとおり、安全審査の要求事項を満足していることを確認している。

(安全審査書 P7 最終段落より)

MOX燃料は、核分裂生成ガス放出率がウラン燃料に比べ若干高め傾向であることから、燃料棒の伝熱特性の低下及び燃料棒内圧の上昇がウラン燃料に比べ大きくなる特徴がある。MOX燃料では、ウラン燃料で従来より行われている初期ヘリウム加圧、ペレットの高密度焼結に加え、MOX燃料棒のプレナム体積を大きくしている。これにより、燃料中心温度は、燃料寿命を通じて融点に対して低く抑えられ、また、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時においても、燃料棒内圧によるMOX燃料の燃料被覆管の応力は許容応力を超えないように設計される。

論点 8-2 燃料棒内圧

○検討課題

MOX燃料はウラン燃料より、ペレットからの核分裂生成ガスの放出率が高く、燃料棒の内圧が上昇することで、燃料棒の健全性が損なわれるのではないか。

また、反応度急昇事故時の試験が行われていないのではないか。

○過去に本県や他道県に寄せられた意見

- ・ 燃焼度が増えていくに従い、どのように内圧が変化していくのかが不明ではないか。最高燃焼度に達したとき、核分裂生成ガスが何%になるかが不明ではないか。
- ・ 気体状の核分裂生成物（FP ガス、通称「死の灰」のうち気体状のもの）がペレットから漏れやすい。
- ・ ウラン燃料よりFPガスが多く出やすく、燃料棒内の圧力が高くなる。
- ・ 反応度急昇事故時の試験が行われていない。

○東北電力株式会社の講じる対策または見解

[燃料棒の内圧について]

- ・ MOX燃料はウラン燃料棒に比べて熱伝導度が低くなり、ペレット中心温度が高くなるため（論点 8-1 参照）、FPガス放出率が高くなると考えられる。また、MOX燃料はプルトニウム等の α 崩壊によるヘリウムガスの生成量および放出量が多くなる。
- ・ このため、燃料棒内に溜まるガスの増加による燃料棒内圧の上昇を抑える目的で、MOX燃料棒ではガス溜め用空間（プレナム）体積を9×9燃料のウラン燃料棒に比べて大きくしている。（プレナム部体積/燃料部体積：MOX燃料棒=0.13、9×9燃料のウラン燃料棒=0.09）（図 8-2 参照）
- ・ PuO₂含有率が高いほどペレット中心温度が高くなり、FPガス放出率、Heガス放出率が増加し、内圧が高くなることから、評価は保守的にPuO₂含有率が上限の10wt%であるMOX燃料棒について行っている。
- ・ 燃料強度上、最厳しくなるのは燃料棒の内圧と外圧の差が最大となるときである。外圧（=原子炉の圧力）は約7MPaであるため、燃料棒の内圧が最も低い燃料使用開始時に内圧と外圧の差が最大となるが、この場合でも、MOX燃料の燃料被覆管に生じる応力は許容応力の約60%程度と十分余裕がある。
- ・ また、MOX燃料集合体において、燃料取出し時の燃料棒内圧は、MOX燃料棒で約5.7MPa[abs]、外圧（約7MPa[abs]）を超えない。この値は9×9燃料集合体のウラン燃料棒内圧約5.6MPa[abs]と比較しても大きな差はない。参考にMOX燃料集合体のウラン燃料棒の取出し時の内圧は約6.0MPa[abs]である。（表 8-2、図 8-3）
- ・ このように、FPガス放出率やHeガス放出率の増大を考慮しても、燃料棒内圧は9×9燃料集合体のウラン燃料棒の場合と大きな差はなく、燃料棒内圧によるMOX燃料の燃料被覆管の応力は許容応力を超えないため、燃料棒の健全性は保たれる。（設置許可申請書 8-3-20（4））

[反応度投入試験について]

- ・ 反応度投入事象時の影響については、事象の模擬ができる実験として（旧）日本原子力研究所の原子炉安全性研究炉（NSRR）を用いた実験及び米国のSPERT実験が行われており、溶融・脆化の破損しきい値はウラン燃料と同等であり、破損形態も同じであると報告されている。（表 8-3 参照）

○国の見解（安全審査結果）

- ・以下のとおり、安全審査の要求事項を満足していることを確認している。

（安全審査書 P7 最終段落）

MOX燃料は、核分裂生成ガス放出率がウラン燃料に比べ若干高めの傾向であることから、燃料棒の伝熱特性の低下及び燃料棒内圧の上昇がウラン燃料に比べ大きくなる特徴がある。MOX燃料では、ウラン燃料で従来より行われている初期ヘリウム加圧、ペレットの高密度焼結に加え、MOX燃料棒のプレナム体積を大きくしている。これにより、燃料中心温度は、燃料寿命を通じて融点に対して低く抑えられ、また、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時においても、燃料棒内圧によるMOX燃料の燃料被覆管の応力は許容応力を超えないように設計される。

論点 8-3 プルトニウムスポット

○検討課題

プルトニウムとウランを混合してMOX燃料を作るときに、プルトニウムの固まり（プルトニウムスポット）ができる場合があるといわれているが、燃焼の際に燃料棒の健全性が損なわれるのではないか。

○過去に本県や他道県に寄せられた意見

- ・ プルトニウムスポットができることは確かであり、燃料の健全性にどのような影響を与えるかは、必ずしも十分に解明されていない。
- ・ フランスのMIMAS法は、イギリスのSBR法に比べプルトニウムスポットがしやすいとされている。
- ・ プルトニウムスポットは、MOX燃料中のプルトニウム含有率が大きいほど数も大きさも増す。それだけFPガスの放出率が増加すると考えられている。
- ・ プルトニウムスポットからガス状の核分裂生成物の放出率が多くなり、MOX燃料とウラン燃料の焼きむらも生じるので燃料破壊が起こりやすくなる。

○東北電力株式会社の講じる対策または見解

- ・ プルトニウムスポットがあると、その部分では他の部分より核分裂数が多くなり、局部的な発熱量やFPガスの放出率が高くなることが考えられる。
- ・ しかしながら、以下の通り、MOXペレット中に生じるプルトニウムスポットは十分小さく、燃料健全性に与える影響は無視し得るものである。
- ・ プルトニウムスポットの影響についての実験、解析結果を以下に示す。

【燃料破損への影響】

国内（NSRR）および海外（米 SPERT 実験）の試験用原子炉を用いた実験が行われている。

NSRR では、MOXペレットに直径 400 μ m、1100 μ m の 100wt%PuO₂を、米 SPERT では、ウランペレットに直径 550 μ m の 100wt%PuO₂を埋め込み、プルトニウムスポットが存在した場合を模擬して反応度投入試験を行った。その結果、いずれも燃料破損への影響はないことが確認された。

【ペレット温度の上昇】

400 μ m のプルトニウムを仮定した解析では、プルトニウムスポットとそれ以外の領域の温度差は数十度程度と小さい。

【FPガス放出率の増加】

MIMAS法で製造されたMOX燃料について、FPガス放出率を測定した結果、ウラン燃料との差異はみられなかった（図 8-4、8-5 参照）。

【燃料棒内圧の上昇】

上記のようにFPガス放出率に差異がないため、内圧の上昇にも影響はない。これらの実験、解析結果より、直径 400 μ m 程度のプルトニウムスポットが存在しても、ウラン燃料と比べて顕著な影響はないことを確認している。

- ・ MOXペレットの製造にあたっては、燃料健全性に影響を与えない範囲として、プルトニウムスポットの直径で400 μ m以下となるよう仕様を定めて製造管理を行なう。
- ・ なお、現在、加工事業者で採用している製造方法（MIMAS法、SBR法）では、実際のプルトニウムスポットの大きさは最大でも等価直径200 μ m以下であることが報告されている（図8-6、8-7(1)(2)参照）。

○国の見解（安全審査結果）

- ・以下のとおり、安全審査の要求事項を満足していることを確認している。

（安全審査書 P8）

MOX燃料は、燃料ペレット内にプルトニウム含有率の不均一が生じる可能性があるが、この不均一性は燃料の健全性に影響を与えない範囲で管理される。

【参考】

MIMAS法：

最初比較的高い PuO₂ 含有率のMOX粉末をボールミル（円筒形のセル内にMOX粉末と金属製のボールを投入し、セルを回転）で粉碎混合することで均質化処理を行う（1次混合）。さらにUO₂粉末を混合して攪拌機にて均質化処理を行い（2次混合）ことで所定のPuO₂含有率に調整する。

SBR法：

1回の混合で所定のPuO₂含有率のMOX粉末を得るために、アトリターミル（MOX粉末と金属製のボールを攪拌機により強制的に攪拌）によって粉碎混合を行うことで均質化を行っている。

表 8-1 ペレット最高温度

	MOX ペレット (PuO ₂ 含有率 10wt%)	ウランペレット (9×9燃料 (A型))
燃料使用開始時	約 1,470℃	約 1,520℃
(中間)	約 1,660℃	約 1,550℃
燃料取出し時	約 1,320℃	約 780℃
中間時の融点	約 2,650℃	約 2,700℃
ペレット融点の下限	約 2,560℃	約 2,630℃

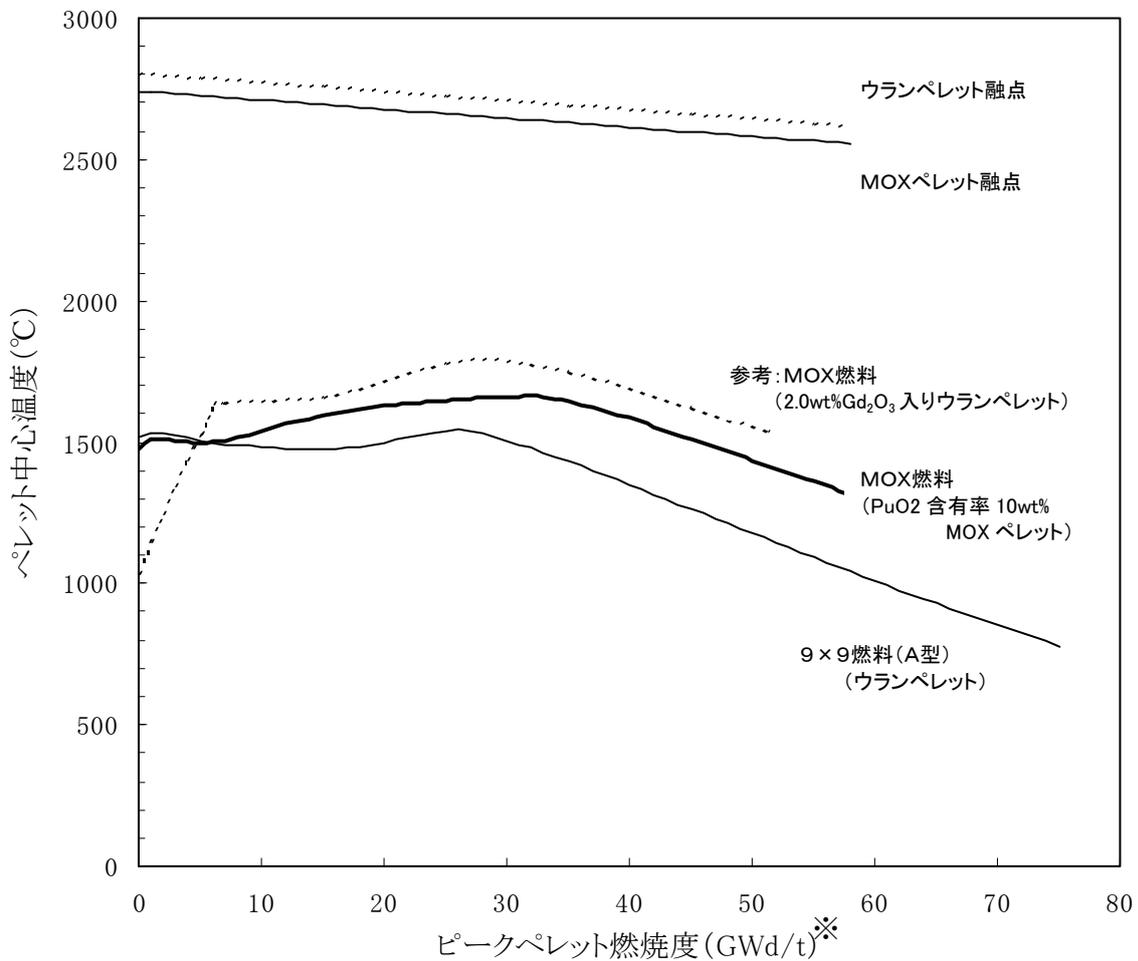
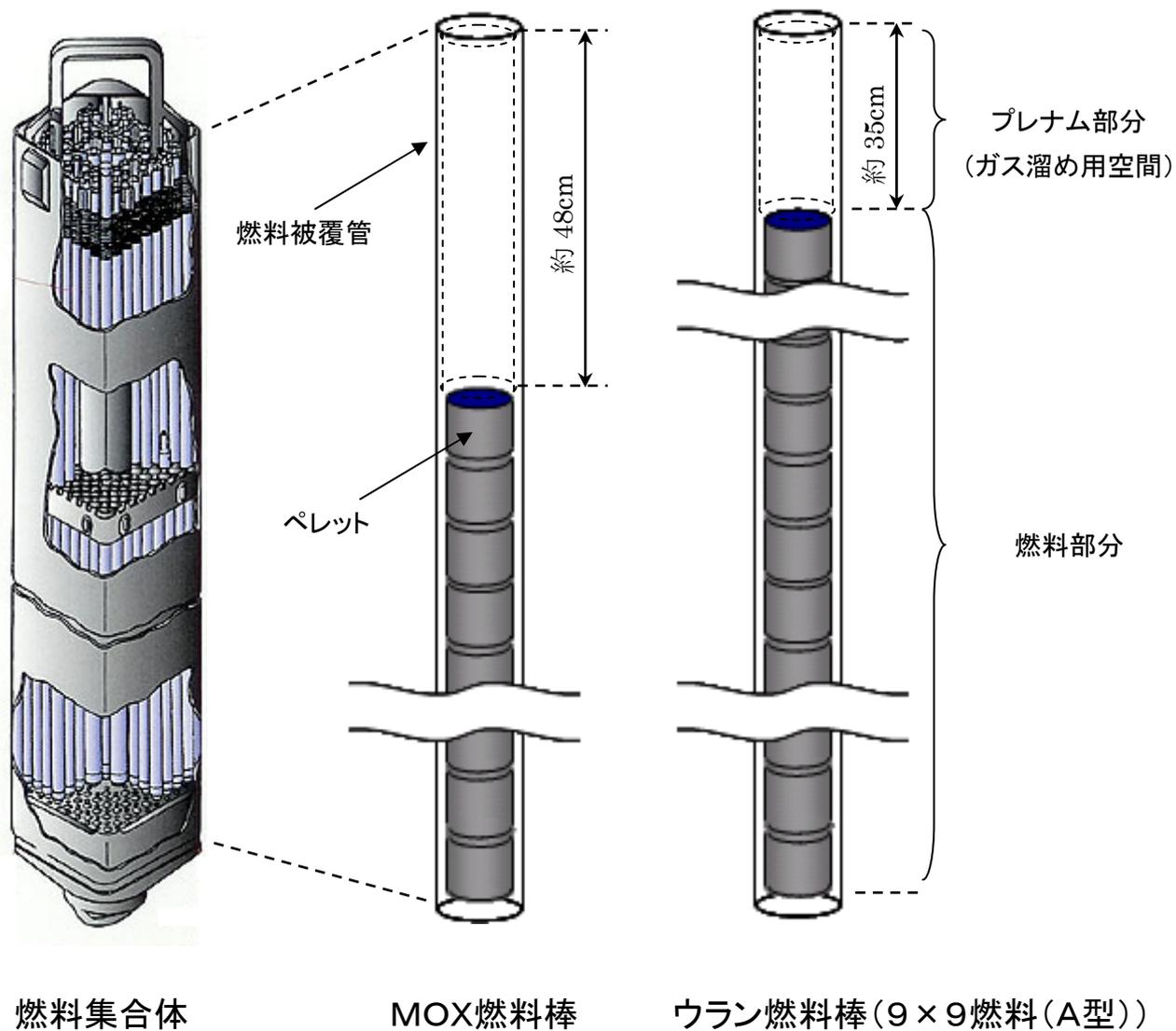


図 8-1 ペレット中心温度推移

※ピークペレット燃焼度：燃料集合体を構成するペレットのうち、最も燃焼の進んだものの燃焼度。



プレナム体積比 = プレナム部分体積 / 燃料部分体積

MOX燃料棒 : 0.13

ウラン燃料棒(9×9燃料(A型)) : 0.09

図8-2 燃料棒のプレナム体積比

表 8 - 2 燃料棒内圧解析結果

	MOX 燃料棒 (PuO ₂ 含有率 10wt%)	ウランペレット (9 × 9 燃料 (A型))
燃料使用開始時	約 1.3 MPa[abs]	約 2.7 MPa[abs]
(中 間)	約 3.6 MPa[abs]	約 4.1 MPa[abs]
燃料取出し時	約 5.7 MPa[abs]	約 5.6 MPa[abs]

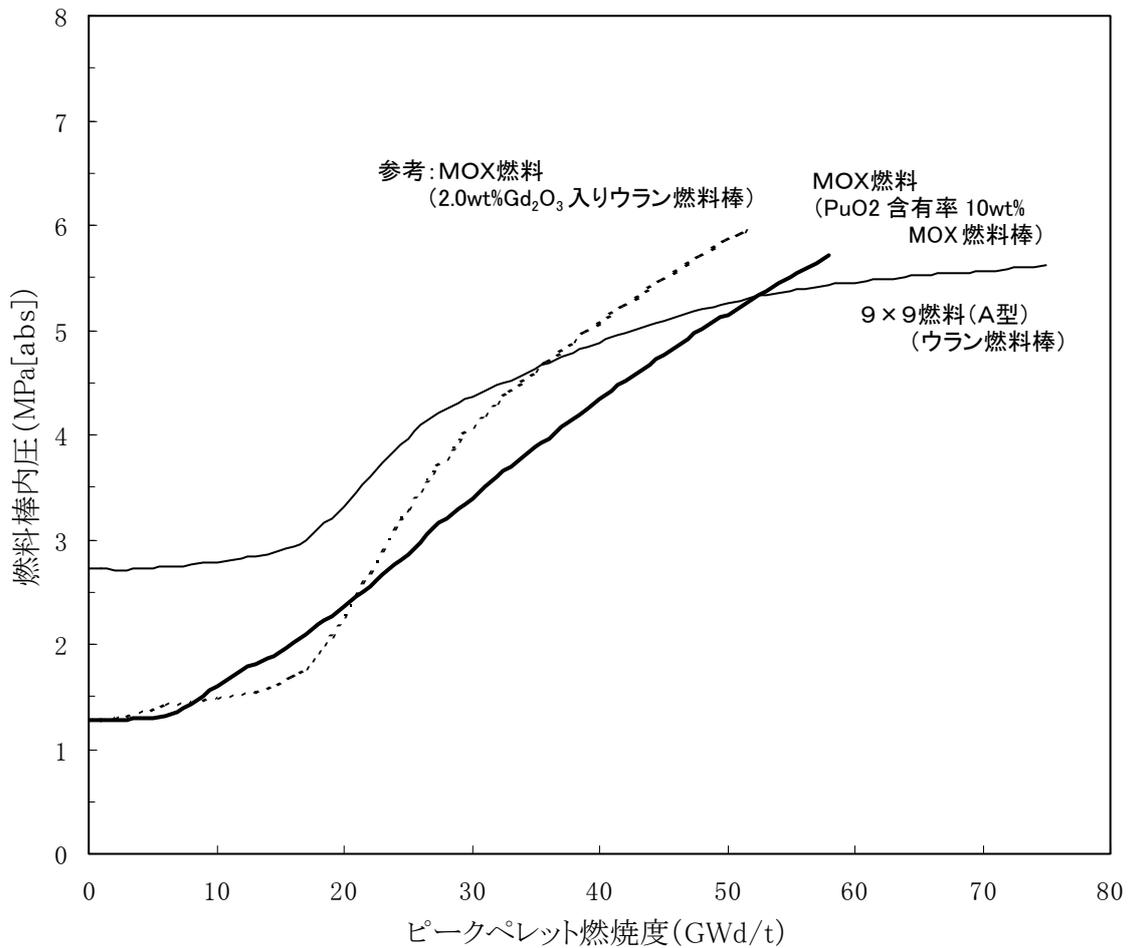
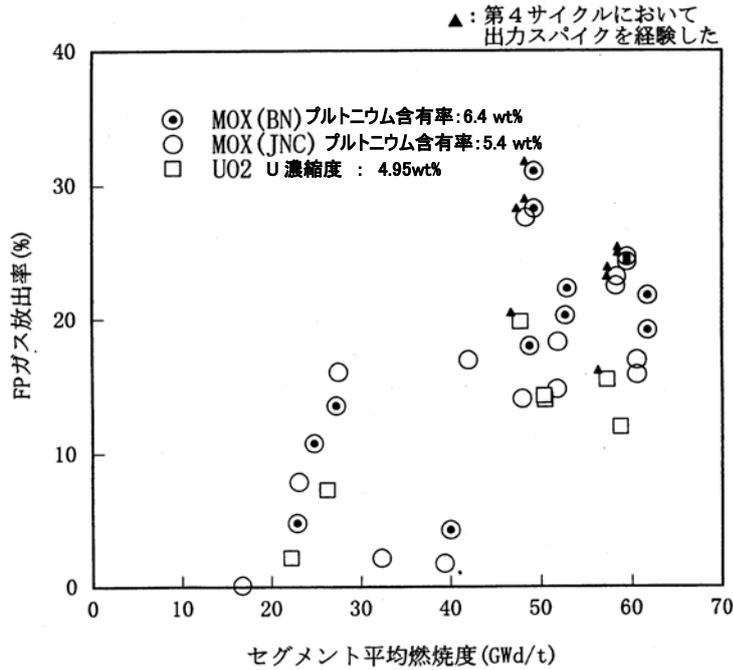


図 8 - 3 燃料棒内圧の燃焼度依存性

表 8-3 MOX 燃料に関する反応度投入試験について (BWR 関連)

試験項目	実施団体	実施期間	試験概要	関連文献
SPERT (アメリカの反応度投入事象模擬試験炉) 実験	・アメリカアイダホ国立工学研究所	1970年	<ul style="list-style-type: none"> ・MOX 燃料の溶融・脆化の破損しきい値はウラン燃料と同等 ・550 μ m のプルトニウムスポットが存在しても機械的エネルギーの発生は無い 	<ul style="list-style-type: none"> ・W. G. Lussie, "The Response of Mixed Oxide Fuel Rods to Power Bursts", IN-ITR-114, April (1970) ・M. D. Freshley, et al., "Behavior of Discrete Plutonium-Dioxide Particles in Mixed-Oxide Fuel During Rapid Power Transients", Nuclear Technology Vol.15 August (1972)
NSRR (JAERI (現 JAEA) の反応度投入事象模擬試験炉) 実験	・JAERI (現 JAEA)	1985年～ 1999年頃	<ul style="list-style-type: none"> ・400 μ m、1,100 μ m のブルスポット付きMOX燃料でも溶融・脆化の破損しきい値はウラン燃料と同等 	<ul style="list-style-type: none"> ・日本原子力研究所「NSRR 実験プログレスレポート・17」、JAERI-M 89-097 (1989) ・T. Abe, et al., "Failure Behavior of Plutonium Uranium Mixed Oxide Fuel Under Reactivity-Initiated Accident Condition", Journal of Nuclear Materials, 188 (1992)
CABRI (フランスの反応度投入事象模擬試験炉) 実験	・フランス原子力庁	1996年～ 1997年	<ul style="list-style-type: none"> ・MOX燃料のPCMI破損しきい値はウラン燃料と同等 	<ul style="list-style-type: none"> ・F. Schmitz, et al., "RIA Tests in CABRI with MOX Fuel", proceeding of IAEA International Symposium, Vienna, May 1999, IAEA-SM-358/23
照射済みATR-MOX燃料のNSRRにおける反応度投入試験	・PNC (現 JAEA)	～1999年頃	<ul style="list-style-type: none"> ・5本のATR-MOX燃料 (燃焼度約20Gwd/t) のRIA試験を行い全て破損無し。 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料安全研究 1999、JAERI-Review 2000-010、日本原子力研究所 ・燃料安全研究2000、JAERI-Review 2001-013、日本原子力研究所



MOX(BN):
ベルゴ・ニュークリア社で
MIMAS 法により製造された
もの。

図 8-4 FPガス放出率の測定結果

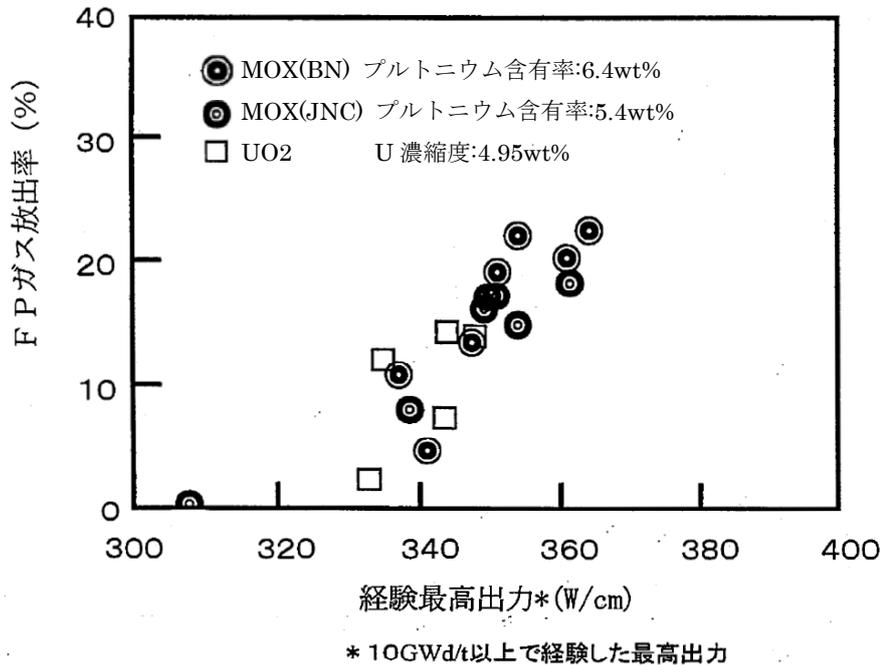
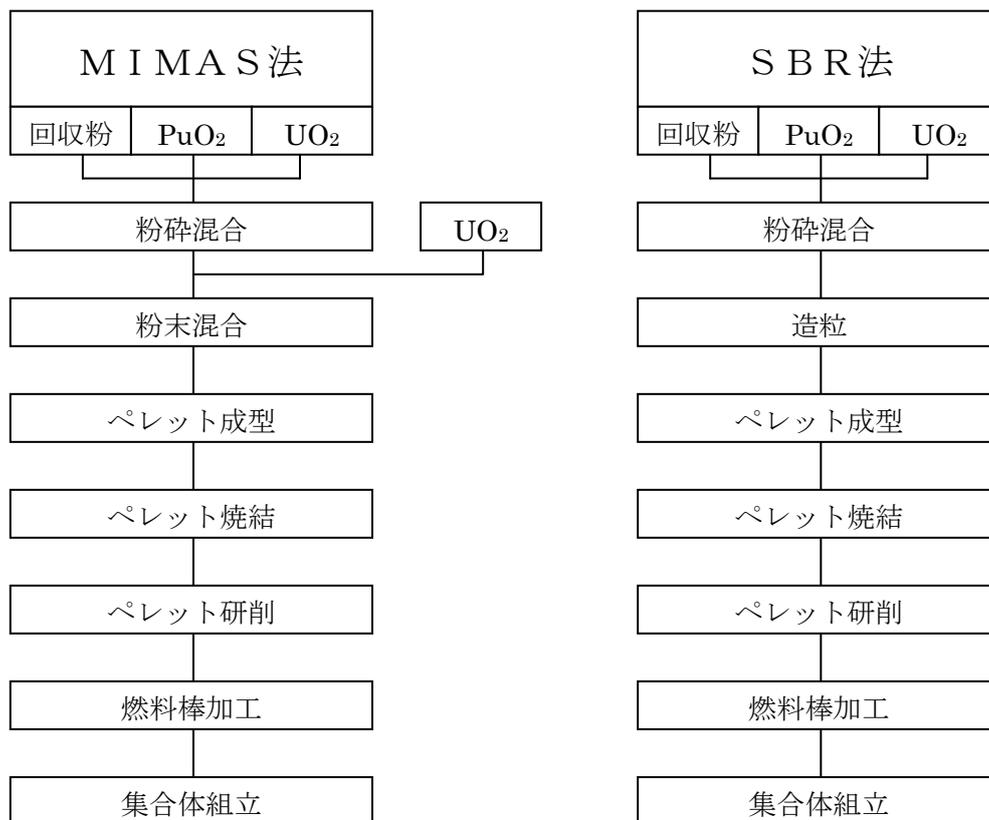


図 8-4 のデータを, 取り出しまでに経験した最高出力で整理したもの。
(第 4 サイクルにおいて出力スパイク*を経験したデータを除く)

図 8-5 FPガス放出率と経験最高出力

※: 第 4 サイクル照射中に制御棒操作によって操作前と比べて局所的に一部出力上昇 (約 10%以上) があつたもの。



- ・一次混合
PuO₂ 粉末 20～30%，UO₂ 粉末 80～70%のボールミルによる混合。
- ・二次混合
ダブルコーン機械混合により最終富化度に調整。
- ・造粒工程無し。
- ・混合を二段階に分けて行うので均質性がよい。

- ・アトリターミルにより PuO₂ 粉末と UO₂ 粉末を混合粉砕し、一回の混合で最終富化度に調整。
- ・造粒工程有り。
- ・アトリターミルによる攪拌混合であるため Pu 粒子は微小化される。

図 8-6 MOX 燃料加工工程

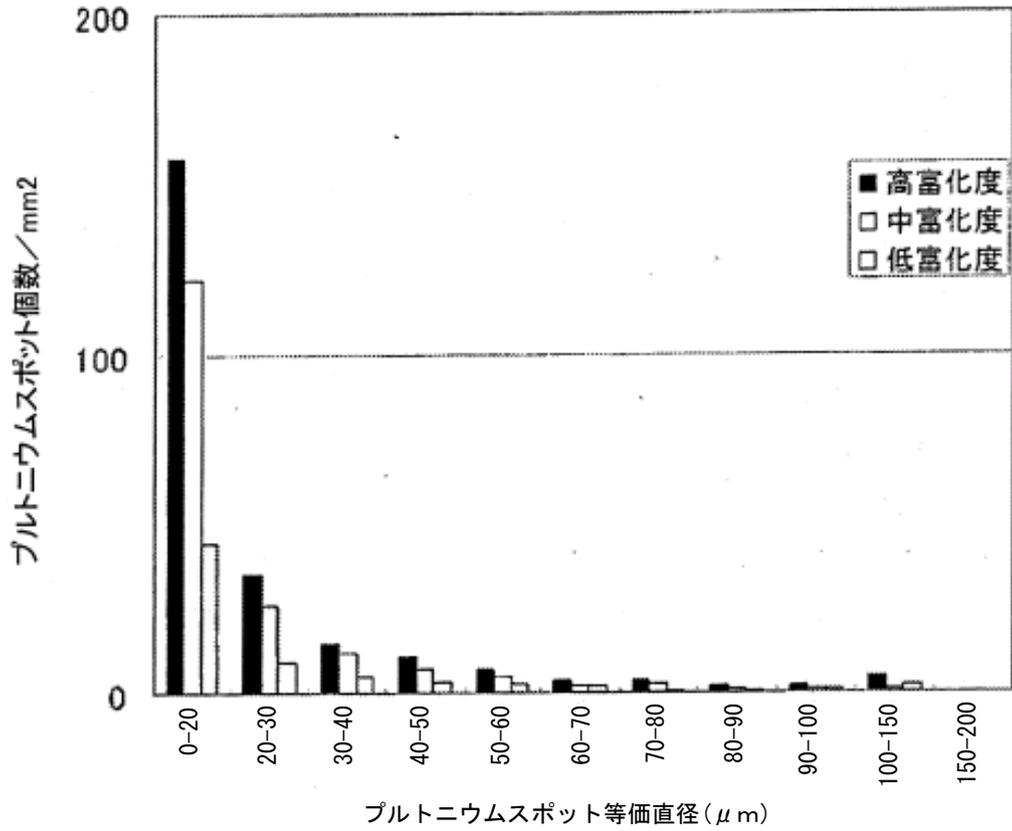


図8-7(1) プルトニウムスポット径の分布 (MELOX社: MIMAS法)

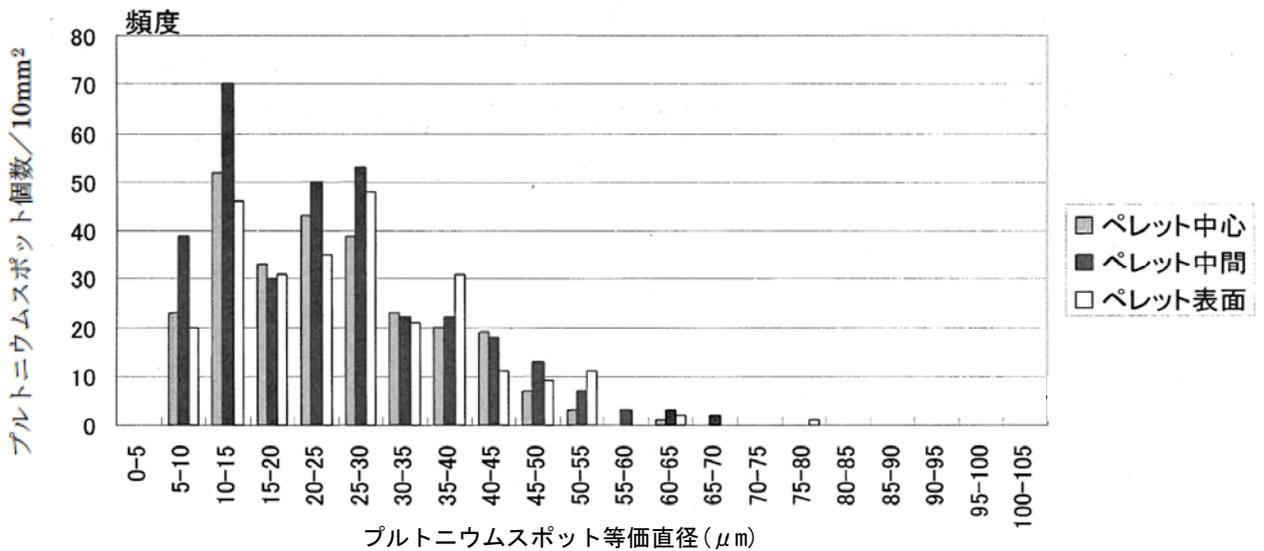


図8-7(2) プルトニウムスポット径の分布 (SL社: SBR法)