

(2) MOX 燃料の使用前 (MOX 燃料の製造、輸送・搬入、貯蔵) 【論点 2-1~2-3】

① 海外における MOX 燃料の製造 (論点 2-1-1) [3/24]

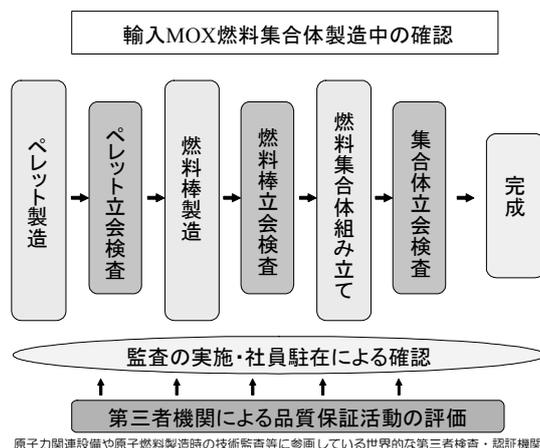
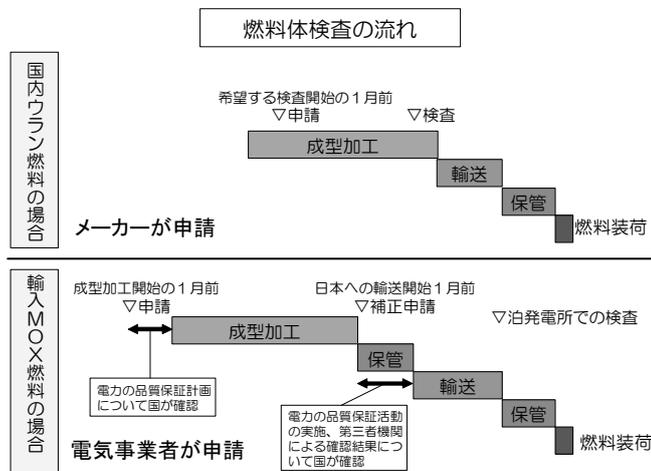
【海外における MOX 燃料の製造において、過去にはデータ改ざん等があったが、品質保証上問題ないか。】

◇ MOX 燃料とウラン燃料の違い

MOX 燃料	ウラン燃料
海外のプルトニウムを使用する MOX 燃料については、海外の燃料加工事業者により、海外の工場にて製造する。	国内に2社ある PWR 燃料製造メーカーにより、国内の工場にて製造する。

○ 北電株の講じる対策

- 国内メーカーが MOX 燃料加工事業者に対し十分な技術能力を有していることを確かめた上で、国内メーカーと契約を締結する。
- 国の通達に基づき、輸入燃料体検査申請の提出に先立ち、MOX 燃料加工事業者に対して評価を行うとともに、製造中監査を行う。
- MOX 燃料の製造期間を通じて、社員を MOX 燃料加工工場に駐在させ、工程ごとに検査 (立会、記録確認) を実施するとともに、製造状況及び品質保証活動の確認等が適切なものであるかについて、第三者機関の評価を得る。
- 万一の品質保証に係る異常事態が発生した場合の連絡体制を定める。



□ 各立場(反対・賛成)のご意見

反対の立場	賛成の立場
<ul style="list-style-type: none"> ・英国原子燃料会社(BNFL)が製造したペレットで検査データの捏造が組織的に行われたので、今後も繰り返される可能性がないのか ・評価を行う第三者機関は、どこが指名するのか。独立性に問題ないのか。 	<ul style="list-style-type: none"> ・BNFL の不正を踏まえ、燃料検査制度が見直されており、品質保証上の問題はない。 ・フランス MELOX 社では、ペレット1個に対して約 80 個の試験項目があり、そのほとんどが自動化され、μm以下の精度で測っていることから、人為的な不正の余地はない。

● 有識者検討会議の検討・評価

- 国の輸入燃料体検査制度は、英国原子燃料会社(BNFL)のデータ改ざんでの検査体制の問題点等を踏まえ、国による事前確認等が強化されている。
- 国内外の燃料使用実績では、MOX 燃料特有の破損事例は確認されていない。
- 国の輸入燃料体検査に関する通達(平成 14 年 7 月 31 日付け平成 14・05・16 原院第 2 号)に基づき、契約する国内メーカーによる MOX 燃料加工事業者の技術能力の確認、北電(株)駐在社員による製造状況等の確認、北電(株)が指定する第三者機関による独立性を保った客観的な評価により、品質保証体制を確立することとしている。
- 品質に関する問題発生時は、MOX 燃料加工事業者から国内メーカーに確実に情報が伝達される連絡体制を定めるとしている。
- フランスの MOX 燃料加工事業者である MELOX 社では、製造されるペレットの試験がほとんど自動化され μm 以下の寸法精度で計測・確認しており、人為的な不正の余地がない。
- なお、国内では、日本原燃(株)が青森県六ヶ所村に MOX 燃料製造工場を建設する予定であり、国に事業許可申請中である。(平成 24 年 10 月操業開始予定)

<<検討結果>>

国の通達に基づき、海外の MOX 燃料加工事業者に対する事前の評価、製造中の監査、電力会社社員による工程毎の検査などを実施するとともに、品質保証に係る問題発生時の連絡体制を定めるとしている。また、品質保証活動に関して第三者機関の客観的な評価を受けるとしていることから、この対策が適切に履行され、国等による確認、評価等が徹底されることにより、輸入 MOX 燃料の品質は確保されると考える。

<法的事項>

電気事業法(第 51 条)、MOX 燃料体に係る輸入燃料体検査について(平成 14 年 7 月 31 日付け平成 14・05・16 原院第 2 号)

② 輸送時の安全対策 (論点 2-2-1) [4/24]

【MOX 燃料は、新燃料の段階でもウラン燃料より放射線が強く、崩壊熱が大きい。燃料集合体の強度は低下しないのか。また、事故に備え、輸送容器の安全性確保をはじめ、どのような安全対策を講じるのか。】

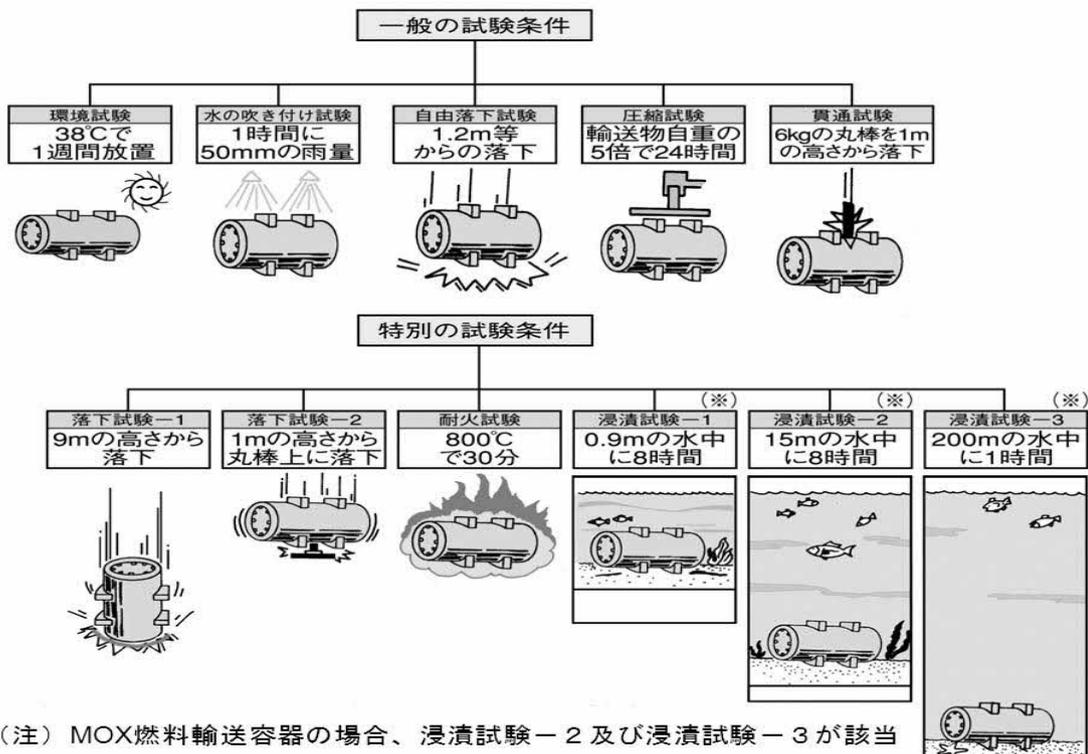
◇ MOX 燃料とウラン燃料の違い

MOX 燃料	ウラン燃料
<ul style="list-style-type: none"> ウラン燃料より放射線量率や発熱量が大きい。 燃料集合体表面の線量率 約 11mSv/h 発熱量 約 1kW/体 	<ul style="list-style-type: none"> 放射線量率のごく小さく、発熱もない。 燃料集合体表面の線量率 約 0.04mSv/h

○ 北電 (株) の講じる対策

- 国際的な安全基準、要件を満たす専用の輸送船、IAEA によって国際的に定められた要件を満たす専用容器を使用する。
- MOX 燃料の輸送の際には、関係機関と連携を図り、以下のテロ対策、事故に備えた安全対策を講じて実施する。
 - 専用輸送船の使用
 - 護衛官の乗船
 - 武装護衛船による護衛
 - 厳重な施錠・封印 など
- 輸送中に MOX 燃料の温度が高くなり材料強度が低下するため、燃料集合体に加わる力を制限する。

MOX 燃料輸送容器の安全性



□ 各立場(反対・賛成)からのご意見

反対の立場	賛成の立場
<ul style="list-style-type: none"> ・輸送時の安全については、一応の対策が施されているが、核燃料が原子力施設から出て一般社会と接触する局面があるので、社会に対する災害のリスクが増大することは否定できない。 ・「危険物船舶輸送及び貯蔵規則」では、核分裂性輸送物が「告示で定める場合に臨界に達しないこと」を求めている。輸送物の未臨界性についても検討すべき。 ・輸送容器や船舶の安全対策のみならず、核物質防護の問題が重要であり、どのような警備体制のもとに輸送が実施されるか十分検討すべき。 	<ul style="list-style-type: none"> ・輸送時の放射線量、温度ともに原子炉で使用されているときに比べれば低く、輸送時に掛かる力を制限すれば燃料の健全性に影響を与えることはない。 ・海上輸送にあたっては、国際的な安全基準、要件を満たす専用の輸送船と輸送容器を使用して行われ、日米原子力協定など、国際的な核物質防護の要件を十分に満足するよう実施されることから、輸送時の安全性は確保される。

● 有識者検討会議の検討・評価

- 輸送中の燃料集合体の温度は最大で 300℃程度になり、燃料集合体の構成部材の強度は場所により4割～9割程度に低下するが、輸送取り扱い時に加速度計を設置し MOX 燃料に加わる力を4G(重力加速度の4倍)程度に制限することにより、燃料の健全性を確保することとしている。
 なお、北電(株)の評価では輸送容器の表面温度は 54℃であり法令に定める基準値 80℃を満足している。
- 輸送時の事故に対しては、放射性物質の漏えいによる災害の発生防止の観点から、輸送容器は、落下、火災、水没などの事態に遭遇しても十分耐えられるよう、「危険物船舶運送及び貯蔵規則」及び「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則」で定める技術基準に適合する、9 m の高さからの落下、30 分・800℃の環境、水中(15mに8時間、200mに1時間)に沈めても容器の健全性が確保できるものを使用するとしており、船舶は、衝突や座礁を避けるため衝突予防レーダーを備えるとともに、万一の場合でも、船内に水が浸入しにくい二重船殻構造を有し、火災に備え広範囲に消火設備を有するなど、国際海事機関(IMO)で定める最高の安全基準を満足する船舶を使用するとしている。
- 輸送物の未臨界性については、前述の両規則の規定に基づき、輸送容器を落下、耐火、浸漬の試験条件の下に置いたものを、内部の空間について水の浸入または浸出があり、かつ、中性子増倍率が最大となる配置および減速状態にあり、かつ、密封装置の周囲に厚さ 20 c mの水による中性子の反射があることを条件に安全解析を行い、臨界に達しないものとして、国の確認を受けて容器承認を取得しているものを使用するとしている。
- テロ対策に関しては、使用済 MOX 燃料より未使用の MOX 燃料の輸送中に関して対策が充実されるべきであり、その対策としては、日米原子力協定や核物質防護条約等の国際約束に基づき、専用輸送船の使用、護衛官の乗船、武装護衛船による護衛、厳重な施錠・封印など、必要な防護措置を取ることとしている。

<< 検討結果 >>

輸送中には MOX 燃料の温度が高くなることにより燃料集合体の構成部材の強度は場所により低下するが、輸送中の燃料集合体に加わる力を制限しながら輸送することで燃料の健全性を確保することとしている。

輸送時の事故に対しては、放射性物質の漏えいによる災害の発生防止の観点から、輸送容器は、落下、火災、水没などの事態に遭遇しても十分耐えられるよう、「危険物船舶運送及び貯蔵規則」及び「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則」で定める技術基準に適合するものを使用し、船舶は、衝突、座礁、火災などの事態に対して国際海事機関（IMO）が定める安全基準において最高の水準に適合するものを使用することとしている。

輸送物の未臨界性については、前述の両規則の規定に基づき安全解析を行い、臨界に達しないものとして、国の確認を受けて容器承認を取得している輸送容器を使用することとしている。

輸送時のテロ対策についても、日米原子力協定や核物質防護条約等の国際約束に基づく措置を講じるとしている。

したがって、これらの対策を適切に講じることにより、MOX 燃料輸送時の安全性は確保されるものと考えている。

< 法的事項 >

原子炉等規制法（第 59 条）、核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則、船舶安全法（第 28 条）、危険物船舶運送及び貯蔵規則

< 国の安全審査 >

ウラン燃料と比べた場合、MOX 新燃料は表面からの線量当量率が高いので、燃料工場から発電所への輸送には使用済燃料輸送容器と同等な容器を使用し放射線を遮へいする対策により、安全な取扱いがなされているかを審査する。

<コラム④ 燃料輸送時のテロ対策について>

MOX 燃料の海上輸送における安全対策として、国際海事機関 (IMO) や日米原子力協定により国際上の約束が定められています。

これに従って事業者は、核物質の防護措置として、専用輸送船の使用、護衛官の乗船、武装護衛船による護衛、厳重な施錠・封印、オペレーションセンターによる輸送船の位置と積み荷の状況の監視、慎重な輸送船経路の選定、緊急時以外無寄港、特別な連絡体制の構築等を実施することになっています。

輸送時には核ジャックされないよう、国際上の約束に基づき、輸送船は以下のように護衛されることになっています。

- (1) 公海上においては武装した 2 隻の輸送船が相互に護衛しながら航行する。
- (2) 各武装輸送船には、例えば英国原子力庁警察隊から派遣される、護衛任務に必要な教育訓練を受けた武装護衛官が乗船する。

このような対策により、核物質防護体制が確立されているため、輸送船が核ジャックされるようなことはないと考えられます。

燃料輸送時のテロ対策

ウラン燃料 (防護対象区分 ^(注) :区分Ⅲ)	使用済ウラン燃料 (防護対象区分 ^(注) :区分Ⅱ)	MOX 燃料 (防護対象区分 ^(注) :区分Ⅰ)	使用済 MOX 燃料 (防護対象区分 ^(注) :区分Ⅱ)
新燃料輸送時のみ専用輸送船 ・二重船殻構造 ・衝突予防レーダー ・消火設備 等	専用輸送船の使用 ・二重船殻構造 ・衝突予防レーダー ・消火設備 等	専用輸送船の使用 ・二重船殻構造 ・衝突予防レーダー ・消火設備 等	専用輸送船の使用 ・二重船殻構造 ・衝突予防レーダー ・消火設備 等
護衛官の乗船は無し	護衛官の乗船は無し	護衛官の乗船	護衛官の乗船は無し
武装護衛船による護衛は無し	武装護衛船による護衛は無し	武装護衛船による護衛	武装護衛船による護衛は無し
封印	厳重な施錠・封印	厳重な施錠・封印	厳重な施錠・封印
情報管理	情報管理	情報管理	情報管理

(注) 原子炉等規制法において、核物質防護における重要度に応じて3段階にランク分けられて具体的な防護措置が定められている。区分Ⅰが一番厳しい。

③ 作業時の被ばく(論点2-2-2) [5/24]

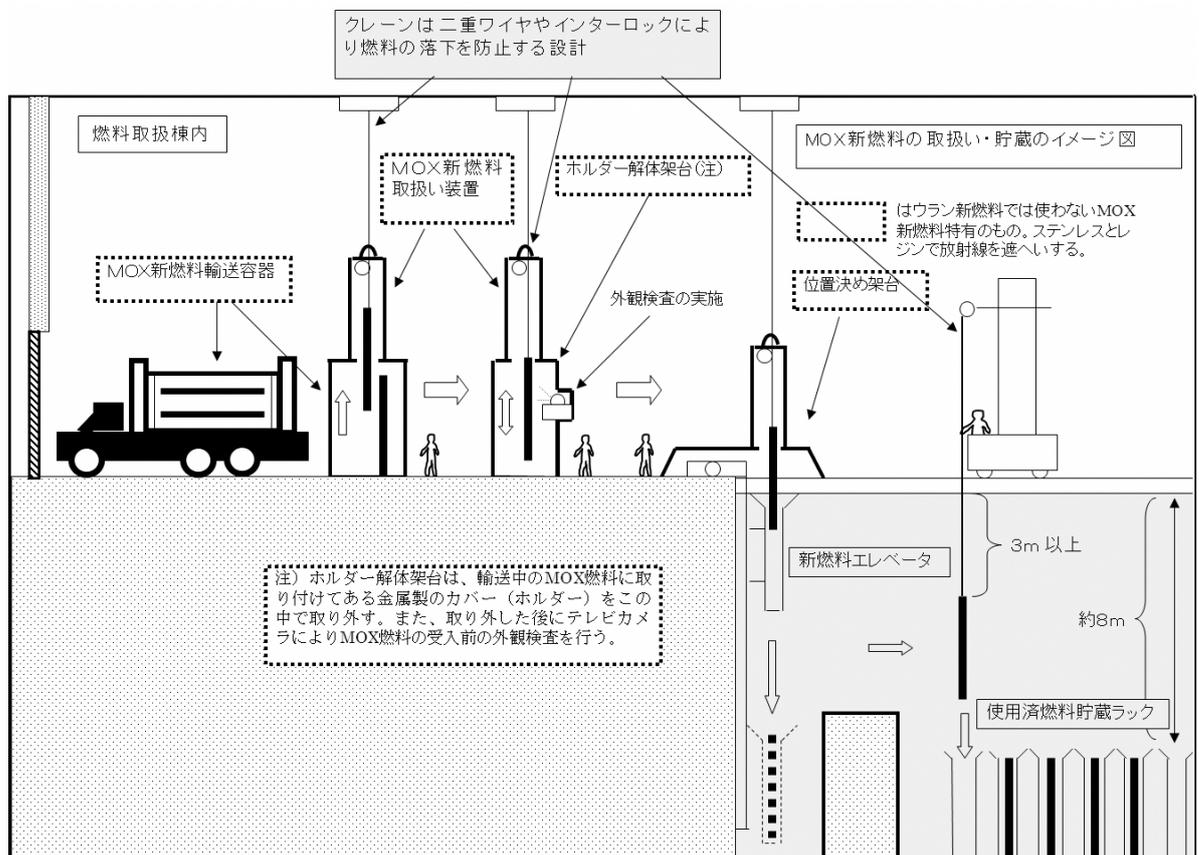
【MOX 燃料は、新燃料の段階でもプルトニウムを含むため、ウラン燃料より放射線が強い。また、プルトニウムは崩壊によりアルファ線を出す。燃料輸送物の陸揚げ、陸上輸送、建屋搬入、開梱、検査時において作業員への被ばくが大きくなるのではないかと。また、事故があった場合、ウラン燃料と比較して影響の及ぶ範囲が拡大するのではないかと。】

◇ MOX 燃料とウラン燃料の違い

MOX 燃料	ウラン燃料
<ul style="list-style-type: none"> ・ウラン燃料より線量率や発熱量が大きい。 ・燃料集合体表面の線量率 約11mSv/h 	<ul style="list-style-type: none"> ・放射線量率はごく小さい。 ・燃料集合体表面の線量率 約0.04mSv/h

○ 北電梯の講じる対策

- MOX 新燃料の受入れは、発電所専用港での陸揚げ、発電所構内の陸上輸送、燃料取扱棟への搬入まで、輸送容器に収納された状態で実施する。
- 燃料取扱棟に搬入された後、輸送容器からの燃料取出し(開梱)、外観検査、貯蔵設備である使用済燃料ピットへの貯蔵まで、遮へい能力を有する取扱い設備を使用して実施。
- 作業員は、一連の作業において、アラーム付線量計をつけて被ばく線量を確認。
- 燃料の取扱いは、二重ワイヤーやインターロックにより落下防止の措置を施したクレーンを使用している。また、MOX 燃料はペレットに焼き固められているため、万一、燃料が落下しても、MOX 燃料が飛散することはなく、作業員の被ばくは過大にはならない。



□ 各立場(反対・賛成)からのご意見

反対の立場	賛成の立場
<ul style="list-style-type: none"> ・燃料表面の線量率はウラン燃料の 300 倍近くあり、扱いにくい。さらに、再処理から時間を経たプルトニウムを使用した場合、プルトニウム 241 のベータ崩壊によるアメリシウム 241 の割合が増え強いガンマ線を出し、作業時の被ばく量を増大させる。 ・表面線量率のデータはどのような「古さ」のプルトニウムを使ったのか、明らかにすべき。 ・計画被ばく線量は最大でどのくらいになると推定しているか、被ばく線量を示すべき。 	<ul style="list-style-type: none"> ・MOX 燃料は、ウラン燃料よりも放射線量率が高く、取り扱いに注意が必要だが、遮へいを施すため被ばくのおそれはなく、検査時には、専用の検査装置を使用して作業者の被ばくを防ぐ。その後は燃料ピットに納め、以後、水の遮へいの中で取り扱われるので被ばくの心配はない。 ・万一、取扱中に新燃料を落下させ、燃料が破損するような事故が起きたと仮定しても、燃料は陶器状に焼き固められており、核燃料物質が飛散するようなことはない。

● 有識者検討会議の検討・評価

- MOX 燃料はプルトニウムのアルファ崩壊によるアルファ線も放出するが、アルファ線は遮へいが容易なため、作業時の被ばくについては、プルトニウム 241 のベータ崩壊により生じるアメリシウム 241 からのガンマ線や、プルトニウム 238 からの中性子線について注意が必要である。ガンマ線や中性子線に係る被ばく対策として、陸揚げ、陸上輸送時には専用輸送容器による遮へい、建屋搬入、開梱、検査時には専用の MOX 新燃料取扱い装置による遮へいを行い、使用済燃料ピットへ貯蔵するまで遮へい状態を維持するとともに、作業の自動化、遠隔化等を図ることにより、作業エリアの線量率をウラン燃料と同等に抑えることが可能である。
- 輸送容器の線量当量率は法令に定める基準値以下であることを確認したのち搬入し、開梱時に使用する MOX 新燃料取扱い装置等はステンレス及び樹脂により放射線を遮へい、使用済燃料ピットでは遮へいに必要な水深 3m 以上を確保することで、作業場所の被ばく線量率をウラン燃料と同等の 0.04mSv/h 以下に抑えるとしている(管理値 = 0.15mSv/h)。
 なお、被ばく線量は、今後、MOX 燃料搬入に係る作業計画を作成し見積もっていくことになるが、遮へい等の措置を適切に講じることにより管理値以下とすることは十分可能である。
- 作業中に使用するクレーンは、二重ワイヤーやインターロックにより輸送容器又は燃料の落下を防止する設計とすることとしており、また、万一、燃料の落下事故が発生した場合も、MOX 燃料ペレットが陶器のように焼き固められているため核燃料物質が飛散するようなことはないと考える。
- 燃料集合体の表面線量率のデータは、再処理後 2～5 年経過したプルトニウムを代表的な組成として検討しており、その場合、燃料集合体の平均的なプルトニウムは 9%、ペレット最大含有率は 10.6% である。
 なお、再処理で取り出した直後のプルトニウムは、約 12% のプルトニウム 241 を含んでいるが、プルトニウム 241 は半減期 14 年でベータ崩壊してアメリシウム 241 となる。アメリシウム 241 は核分裂に際して中性子を無駄食いするため、再処理後、年数が経過したプルトニウムを使用する場合は、MOX 燃料中のプルトニウム含有率を高める必要があることを考慮し、ペレット最大含有率を 13% で制限している。

<<検討結果>>

MOX 燃料はウラン燃料と比べ燃料集合体表面の線量率が高くなるが、陸揚げ、陸上輸送、建屋搬入、開梱、検査時を経て、使用済燃料ピットへの貯蔵に至るまで、遮へい状態を維持するとともに、作業の自動化、遠隔化等を図っていることから、これらの対策を適切に講じることにより、作業エリアの線量率をウラン燃料と同等に抑えることが可能であると考えます。

また、作業中の事故については、高所からの落下に耐え得る輸送容器を使用し、クレーン等についても落下防止の設計を行うとしており、万一、落下事故が発生した場合も、MOX 燃料ペレットが陶器のように焼き固められ飛散しにくい構造であることを考えると、これらの対策に加え、作業員の被ばく線量管理を適切に行うことにより、ウラン燃料と比べて作業員の被ばくが問題になることはないものと考えます。

<法的事項>

原子炉等規制法(第 35 条)、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則

<国の安全審査>

ウラン新燃料と比べた場合、MOX 新燃料は表面からの線量当量率が高いので、燃料工場から発電所への輸送には使用済燃料輸送容器と同等な容器を使用し放射線を遮へいする対策により、安全な取扱がなされているかを審査する。

④ 貯蔵設備の未臨界性 (論点 2-3-1) [6/24]

【MOX 燃料には自発核分裂を行うプルトニウム 240 などが含まれており中性子を発生し、またプルトニウムの核分裂断面積が、ウランより大きいので、貯蔵時に臨界になりやすくなるのではないか。】

◇ MOX 燃料とウラン燃料の違い

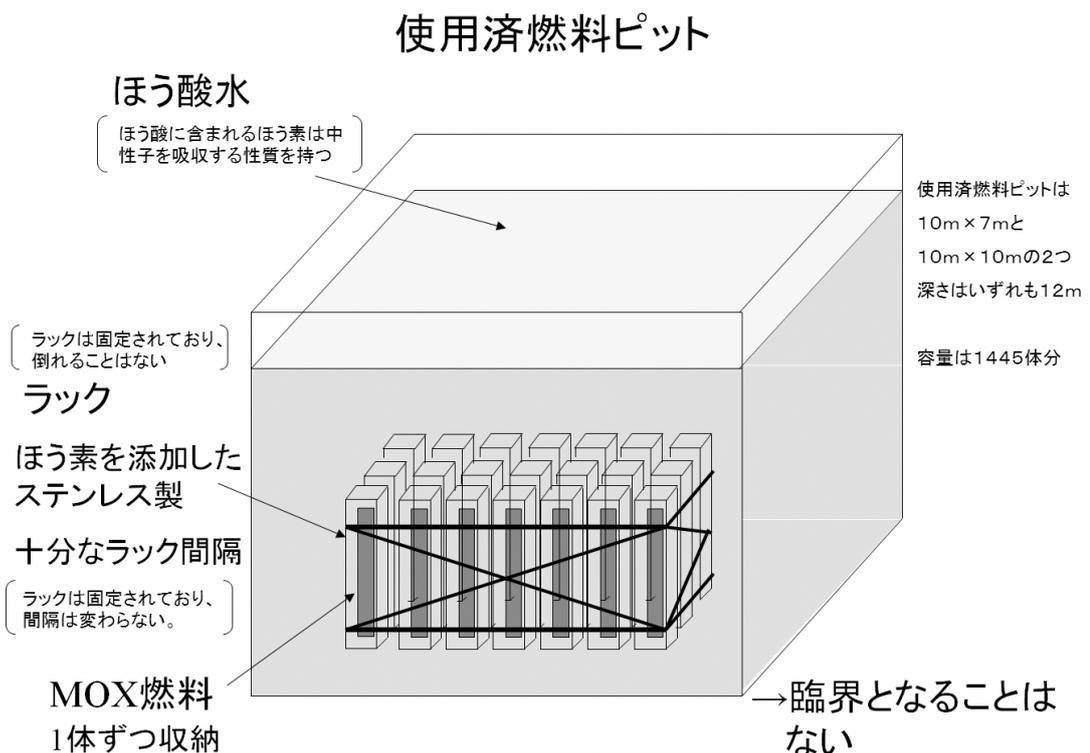
MOX 燃料	ウラン燃料
<ul style="list-style-type: none"> ・プルトニウム 239 とプルトニウム 241 はウラン 235 より核分裂しやすい。 ・また、プルトニウム 240 は自発核分裂をしやすい。 <p><核分裂のしやすさ> プルトニウム 239:ウラン 235 の 1.3 倍程度 プルトニウム 241:ウラン 235 の 1.6 倍程度</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ウラン 235 が中性子を吸収して核分裂する。

○ 北電株の講じる対策

- MOX 燃料は新燃料のときでも、中性子を吸収しやすいほう酸水で満たした使用済燃料ピットの底に固定したラック中に1体ずつ入れて保管する。
- このラックは、ほう素を混ぜたステンレスでできており、ラック同士の間隔を十分離しているため、たとえ MOX 燃料がすべてのラックに入ったとしても臨界になることはない。
- なお、自発核分裂があっても臨界になっていない限り連鎖反応は起きない。

実効増倍率	MOX	ウラン	基準値
(1のとき臨界)	0.948	0.970	0.98 以下

※ 純水中に無限に燃料が並んでいるという、現実よりも臨界になりやすい条件で計算。



□ 各立場(反対・賛成)からのご意見

反対の立場	賛成の立場
<p>・再処理施設などと異なり、原子炉の付属施設での臨界事故のリスクは小さいものとする。</p>	<p>・MOX 燃料の反応性はウラン燃料(濃縮度 4.1%)と同等なので、ウラン燃料に比べて臨界になりやすいということはない。</p> <p>・自発核分裂があっても実効増倍率が1にならないが、使用済燃料ピットにおける貯蔵について、より臨界になりやすい条件を与えて臨界計算を行っても実効増倍率の基準値(0.98)を下回る。</p>

● 有識者検討会議の検討・評価

- MOX 燃料に含まれるプルトニウム 239、プルトニウム 241 はウラン 235 より核分裂断面積が大きく(核分裂しやすい)、核分裂の際に放出される中性子数も多いものの、熱中性子吸収断面積が大きく(核分裂の連鎖反応を妨害する)、熱中性子を吸収する効果の方が大きいことから、MOX 燃料はウラン燃料よりかえって臨界になりにくい。
- また、MOX 燃料に含まれるプルトニウム 240 は自発核分裂により中性子を放出するが、自発核分裂があっても、実効増倍率が1にならないが、計算の結果、MOX 燃料の実効増倍率(0.948)は、基準値(0.98)を下回っており、かつ、ウラン燃料の実効増倍率(0.970)よりも小さい。
- 貯蔵の際は、中性子を吸収しやすいほう酸水で満たした使用済燃料ピットの底に、臨界管理上十分な間隔を保持したラック中に保管することとしており、臨界の計算を行うにあたっては、より臨界になりやすい条件設定として、プルトニウム含有率を上限の13%とし、燃料が入ったラックが純水中に無限に並んでいると仮定し、また、計算に含まれる誤差などの影響を考慮しても臨界になることはないと考えられる。
なお、実際には使用済燃料ピットは、常時、ほう酸水で満たされているため、更に臨界になりにくい。

<<検討結果>>

MOX 燃料に含まれるプルトニウム 240 は自発核分裂により中性子を放出し、また、MOX 燃料に含まれるプルトニウム 239、プルトニウム 241 はウラン 235 より核分裂しやすく、核分裂の際に放出される中性子数も多いものの、核分裂の連鎖反応を妨害する効果のほうが大きく、MOX 燃料はウラン燃料よりかえって臨界になりにくい。

MOX 燃料の貯蔵は、中性子を吸収しやすいほう酸水で満たした使用済燃料ピットの底に、臨界管理上十分な間隔を保持したラック中に保管することとしており、臨界に関する検討については、より臨界になりやすい条件を設定しても基準値以下であることから、貯蔵設備の未臨界性は確保されるものとする。

<法的事項> 原子炉等規制法(第 26 条)、安全設計審査指針(指針 50)

(1) 一般的事項⇒(2) MOX 燃料の使用前⇒(3) MOX 燃料の使用⇒(4) MOX 燃料の使用後⇒(5) 全般的な事項
 ①燃料健全性への影響① (論点2-4-1) [7/24]

(3) MOX 燃料の使用(原子炉内における使用)【論点2-4】

① 燃料健全性への影響①(論点2-4-1) [7/24]

【ウラン燃料の燃焼過程で生成されたプルトニウムが燃料中に存在する状態と、人工的にプルトニウムを混ぜる MOX 燃料では燃焼特性が違うのではないかと。MOX 燃料は、燃焼ペレットの融点が低下するとともに熱伝導率が小さくなり、燃料中心温度が上昇する傾向にある。燃料の溶融など健全性に影響があるのではないかと。また、燃焼が進むと融点が低下することがないのか。】

◇ MOX 燃料とウラン燃料の違い

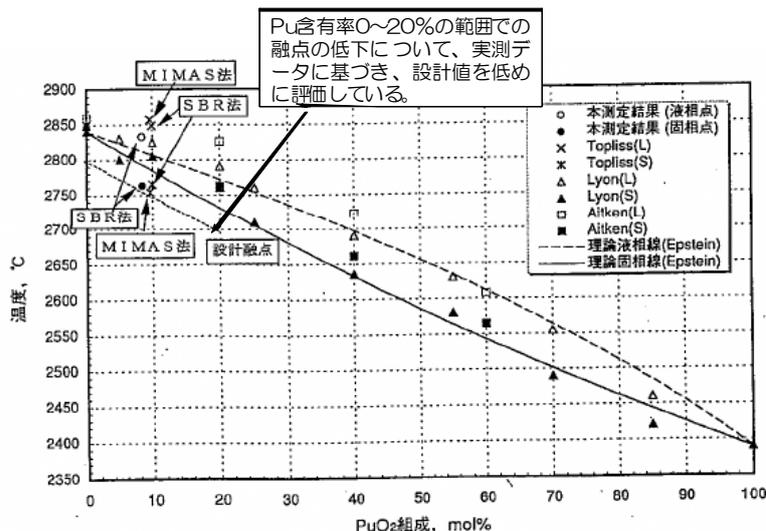
MOX 燃料	ウラン燃料
<ul style="list-style-type: none"> ペレットの溶ける温度はプルトニウムの添加に伴って低下し、含有率 13% の場合の融点は約 2,730℃。 燃焼に伴う融点低下はウランペレットと同程度以下である。 熱伝導率はプルトニウムの添加に伴って低下するが高温域ではわずかである。 	<ul style="list-style-type: none"> ペレットの溶ける温度(融点)は約 2,800℃。 燃焼に伴い、融点が 10GWd/t 当たり 32℃ の割合で低下していく。

○ 北電株の講じる対策

通常運転時及び制御棒が意図せず抜けることなどにより出力が上昇する万一の異常時にも、ペレットが溶けることのないよう、ペレット中心温度(最も温度が高くなる)には制限を設けており、制限を越えないよう異常時には原子炉が自動停止する設計としている。

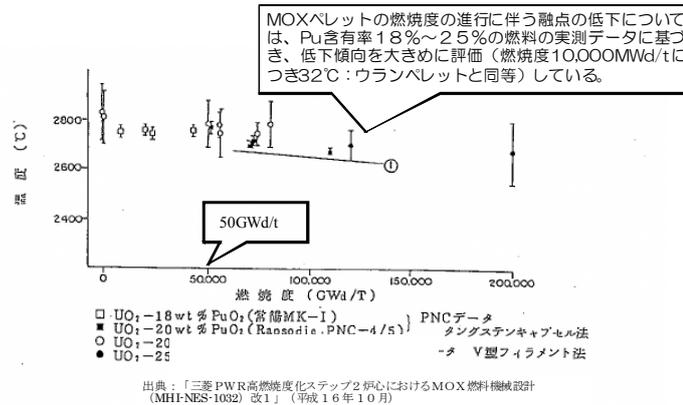
- <ペレット中心温度>
- 通常時 : 1,740℃
 - 異常時 : 2,230℃
 - 制限値 : 2,500℃

Puの添加による融点の低下



出典: 「三菱PWR高燃焼度化ステップ2炉心におけるMOX燃料機械設計(MHI-NES-1032)改1」(平成16年10月)

二酸化プルトニウムの照射に伴う融点低下の測定データ



□ 各立場(反対・賛成)からのご意見

反対の立場	賛成の立場
プルトニウムは、ウランのように簡単には実験が行えず、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。	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。

● 有識者検討会議の検討・評価

- プルトニウムの含有率が高くなると融点が下がる傾向にあるが、含有率 13% の場合の融点は約 2,730°C である。燃焼に伴う融点の低下は、実験データを大きめに評価してもウランと同程度である。
- 北電(株)が計算したペレット中心部の温度(最高温度)は 2,230°C であり、融点(2,730°C)から余裕を持って低く設定した制限値(2,500°C)を十分下回る設計としている。また、万が一の異常時においても、制限値を上回らないよう自動停止する設計としている。
- 原子力安全委員会の報告書「発電用軽水型原子炉施設に用いられている混合酸化燃料について」では国内外の試験、実験データに基づき、プルトニウム含有率 13% 以下(ペレット最大)、集合体最高燃焼度 45,000MWd/t(ウラン燃料を越えない範囲)、MOX 燃料装荷比率約 1/3 以下の条件の範囲においては、冷却材喪失事故、反応度投入事象などの異常時も含め、従来のウラン炉心の設計、評価手法の妥当性が確認されている。
- 事故時の評価についても、例えば、MOX 燃料の被覆管はウラン燃料と同じであり、また、冷却材喪失事故時の燃料棒内圧については、MOX 燃料の特性を踏まえた解析が行われている。

<<検討結果>>

MOX 燃料は、ウラン燃料と比較して燃料の融点が下がり、熱伝導率も下がる傾向にあることが実証されているが、使用を予定しているプルトニウムの含有率 13% において、事故時も含め従来のウラン炉心の設計、評価手法の妥当性が確認されており、最高温度となる燃料中心部の温度が制限値を十分に下回る設計としていることから、異常時でも燃料が溶融することはなく、安全性にとって重要な燃料の健全性は確保されるものと考えます。

<法的事項>
 原子炉等規制法(第 26 条)、安全設計審査指針(指針 12)

<国の安全審査>
 MOX 燃料の融点は、ウラン燃料の融点に対してわずかに低くなるが、通常運転時や運転時の異常な過渡変化時に、燃料が溶ける温度より十分低い温度にとどまるかを審査する。

② 燃料健全性への影響②(論点2-4-2) [8/24]

【MOX 燃料はウラン燃料と比較して、燃焼が進んだ段階でペレットからの核分裂生成ガスの燃料棒内部への放出率が高い傾向が見られるという知見が得られている。燃料棒の内圧がより上昇し、燃料そのものや被覆管が破損するなど影響があるのではないか。】

◇ MOX 燃料とウラン燃料の違い

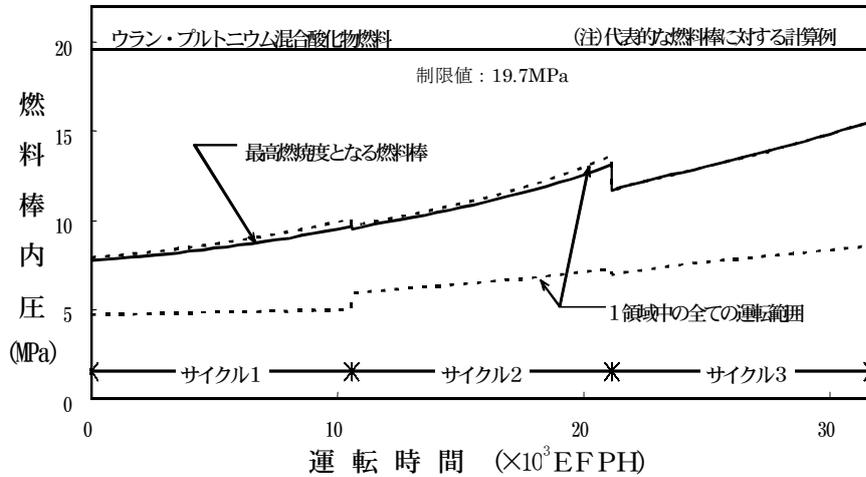
MOX 燃料	ウラン燃料
ウランよりも気体状の核分裂生成物(希ガスやヨウ素)の蓄積が速い。プルトニウムはアルファ崩壊し、アルファ粒子はヘリウムガスとなって内圧を増加させる。	ペレット内で発生した気体状の核分裂生成物(希ガスやヨウ素)は燃焼が進むにつれ、ペレットから出てきて燃料被覆管との隙間に蓄積し、燃料棒内圧を増加させる。

○ 北電株の講じる対策

- 燃料棒の内圧は使用中の全期間を通じて過大にならないことを確認している。
- 燃料棒の製造時には燃料棒内圧と冷却材圧力の差を小さくして被覆管にかかる力を軽減し、また、ペレットから被覆管への熱伝達を良くするためヘリウムガスを封入しているが、熱伝導率低下による影響の出ない範囲で封入の圧力を、同じ設計のウラン燃料よりも少なくしている。

□ 各立場(反対・賛成)のご意見

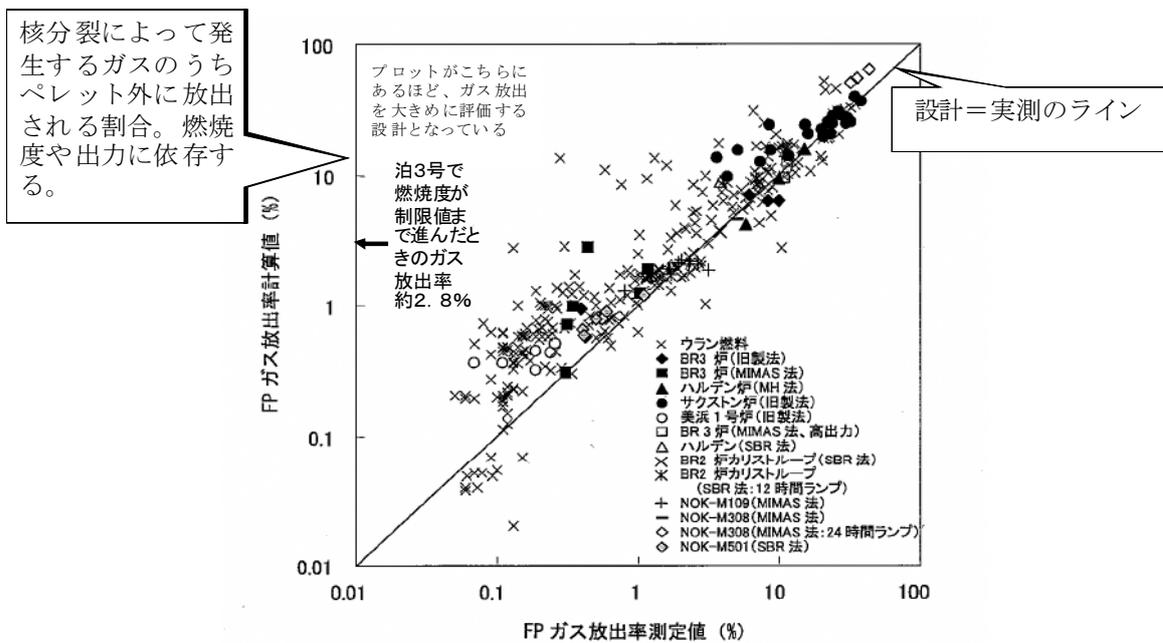
反対の立場	賛成の立場
<ul style="list-style-type: none"> ・燃焼度が増えていくに従い、どのように内圧が変化していくのかが不明ではないか。 ⇒P.41 の上のグラフを追加 ・最高燃焼度に達したとき、核分裂生成ガスが何%になるかが不明ではないか。 ⇒P.41 の下のグラフのとおり、泊3号機の数値を追記 	<ul style="list-style-type: none"> ・内圧対策として、製造時に封入するヘリウムガスが同じ設計のウラン燃料よりも少なくしている。 ・核分裂ガスの放出率は、最終サイクルでの出力率等に依存するので、必ずしも MOX 燃料の放出率が高くなるわけではない。 ・通常運転時に内圧の増加が燃料の健全性に影響を及ぼすとは考えられない。



燃料棒内圧の変化

EFPH: 原子炉が定格出力を出していると換算した時間
 (MOX燃料は3サイクル使用すると原子炉から取り出す)

実用炉、試験炉での燃料照射データを用いたMOX燃料の核分裂生成ガス放出率の検証例



出典: 「三菱PWR高燃焼度化ステップ2炉心におけるMOX燃料機械設計 (MHI-NES-1032) 改1」 (平成16年10月)

● 有識者検討会議の検討・評価

- MOX 燃料はウラン燃料と比較して、核分裂生成ガスの燃料内部への放出率が高い傾向にあるという知見がある。燃料棒の内側と冷却材との圧力差を小さくすることにより、被覆管に与える圧力を軽減するとともに、ペレットから被覆管への熱伝達を良くするためにヘリウムガスを封入しているが、ウラン燃料と比較して核分裂生成ガスの増加分を考慮し、熱伝導率低下の影響の出ない範囲でヘリウムガスの量を少なくしている。
- 運転時間が増える(燃焼度が上昇する)に伴い、燃料棒内圧は上昇するが、MOX 燃料は3サイクル使用すると原子炉から取り出すこととしており、その期間では制限値(19.7MPa)以下であることが確認されている。
- 今までの MOX 燃料の試験から得られたデータを取り入れた燃料設計の解析プログラムにより、泊3号機の燃料棒の健全性が確認されている。

<<検討結果>>

MOX 燃料は、ウラン燃料と比較して、核分裂生成ガスの燃料棒内部への放出率が高い傾向にあるという知見があるが、燃料棒の内圧の上昇を考慮して燃料棒の封入ガスの圧力を減少させることとしていることから、燃料、被覆管への影響はほとんどなく、燃料の健全性は確保されるものとする。

<法的事項>

原子炉等規制法(第26条)、安全設計審査指針(指針12)

<国の安全審査>

MOX 燃料の融点は、ウラン燃料の融点に対してわずかに低くなるが、通常運転時や運転時の異常な過渡変化時に、燃料が溶ける温度より十分低い温度にとどまるかを審査する。

③ 燃料健全性への影響③(論点 2-4-3) [9/24]

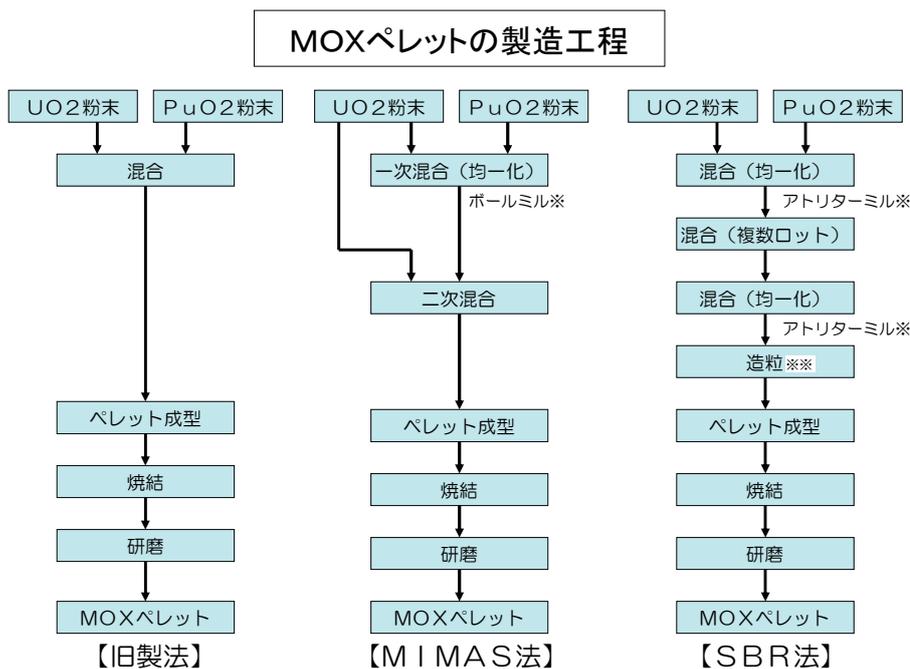
【プルトニウム粉末とウラン粉末を混合してペレットをつくる時にプルトニウムの固まり(プルトニウムスポット)ができるといわれている。燃焼の際に健全性に悪影響を与えないか。】

◇ MOX 燃料とウラン燃料の違い

MOX 燃料	ウラン燃料
MOX 燃料の製造においては、二酸化プルトニウム粉末と二酸化ウラン粉末を混合するため、極微細なプルトニウムスポットができる場合がある。	ペレット材料が二酸化ウラン粉末のため、プルトニウムスポットは生じない。

○ 北電㈱の講じる対策

近年の MOX ペレット製造では、二酸化プルトニウム粉末と二酸化ウラン粉末の混合方法を工夫して、均一性の向上が図られている。MOX 燃料の製造にあたって、二酸化プルトニウム粉末と二酸化ウラン粉末がよく混ざるよう工夫したペレット製造法を採用する。



※ : ボールミル、アトリターミルは粉碎混合装置であり、MOXペレットの均一性の向上が図られる。
 ※※: 造粒とは、均一化を終えた後に、プレス機への供給時の流動性を良くするためのもの。

□ 各立場(反対・賛成)のご意見

反対の立場	賛成の立場
<ul style="list-style-type: none"> ・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できやすいとされている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・近年の MOX ペレット製法(MIMAS 法及び SBR 法)では、均一性の向上が図られており、プルトニウムスポットは基準値の 0.4mm 以下の 0.2mm 以下としている。 ・旧日本原子力研究所での、厳しい(スポットが大きい)試験において破損が起きないことを確認している。

● 有識者検討会議の検討・評価

- 最近の MIMAS 法等では、ペレット成形前に、二酸化プルトニウム粉末と二酸化ウラン粉末とを専用装置により、十分に粉碎混合していることから均一性が向上しており、MOX 燃料中に大きなプルトニウムスポットは発生しないとされている。
- MIMAS 法のプルトニウムスポット径に関する報告書を確認しても、SBR 法に比べプルトニウムスポットの最大径は大きいですが、後述の ASTM 規格の 400 μm 以下を満たしていることを確認している。

プルトニウムスポット径報告例

	MOX ペレット MIMAS 法	MOX ペレット SBR 法
プルトニウムスポット径	214 (μm) 未満	100 (μm)

出典: I.R.Topliss et al., "Measurement and analysis of MOX Physical Properties", Technical Committee Meeting on Plutonium and Uranium in Water Reactor Fuel, Windermere, UK, July 1995

- ASTM(米国材料試験協会)規格により軽水炉に使用される MOX 燃料のプルトニウムスポットの大きさは 400 μm 以下と規定されているが、日本原子力研究所(現日本原子力研究開発機構)の実験では、規格より大きい 1,100 μm 相当の酸化プルトニウム粒子(スポット)1個を表面に埋め込んで模擬実験を行っても、プルトニウムスポットによる被覆管破損しきい値への影響がないことを確認している。

<<検討結果>>

最近の MIMAS 法等による製造では MOX ペレット燃料の均一性が向上しており、大きなプルトニウムスポットは発生しないとされている。

また、試験研究機関の模擬実験において比較的大きいプルトニウムスポットによる燃料被覆管への影響がなかったことが確認されていることから、燃焼の際の悪影響はほとんどなく、燃料の健全性は確保されるものと考えられる。

<法的事項>

電気事業法(第 51 条)

④ 燃料健全性及び原子炉の制御性への影響 (論点 2-4-4) [10/24]

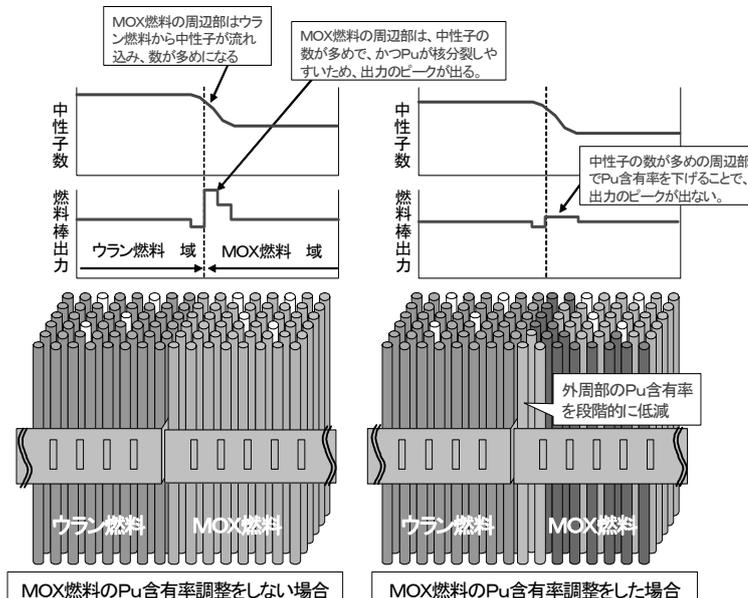
【プルトニウムはウランと比較して熱中性子を吸収しやすいため、MOX 燃料がウラン燃料と隣り合うとウラン燃料から MOX 燃料に中性子が流れ込み、MOX 燃料集合体外周部の燃料棒出力が高くなりやすい。出力分布が不均一になり、燃料の健全性や原子炉の制御性に影響があるのではないか。】

◇ MOX 燃料とウラン燃料の違い

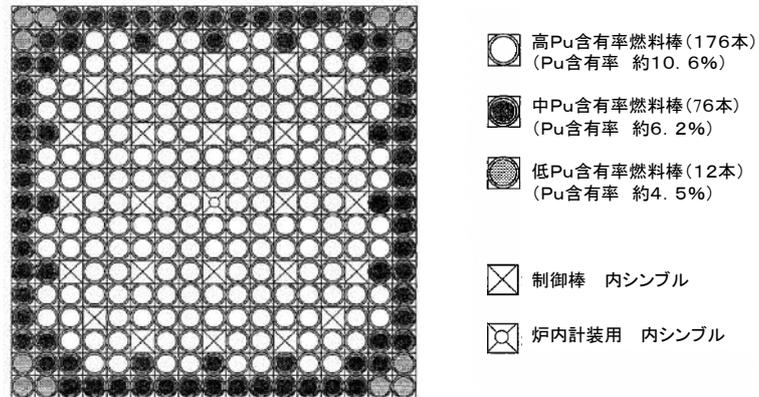
MOX 燃料	ウラン燃料
<ul style="list-style-type: none"> ウラン燃料に比べ、中性子が核分裂に使われる前にプルトニウムに吸収されてしまう割合が多いことから、原子炉内の MOX 燃料では、ウラン燃料に比べ、中性子の数が少なめとなる。 その結果、MOX 燃料の外周部(ウラン燃料との境界付近)では水が高い所から低い所に流れるように、周りのウラン燃料から中性子が流れ込む プルトニウムはウランよりも核分裂しやすいため、MOX 燃料の外周部では、燃料棒の出力が相対的に高くなる傾向にある。 	(左記参照)

○ 北電機の講じる対策

- MOX 燃料集合体の外周部(ウラン燃料との境界付近)においては、プルトニウム含有率を下げ、燃料棒内の核分裂を抑えることで、当該箇所に出力のピークが生じるのを防止する。
- 燃料取替え後の原子炉の起動時、及び運転中において1ヶ月に1回、出力の分布を測定し、設計どおりであることを確認する。万が一、出力が不均一になり、あらかじめ決めてある運転上の制限値を超えた場合には原子炉を停止する。



MOX燃料集合体における燃料棒毎のプルトニウム含有率の配置例



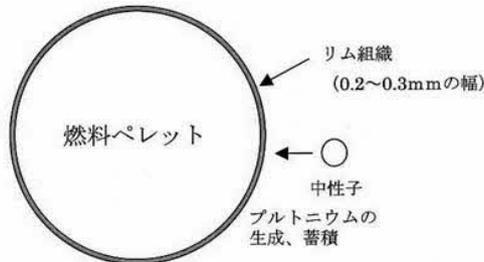
□ 各立場(反対・賛成)のご意見

反対の立場	賛成の立場
<p>・ 燃焼度の異なる燃料が増え、燃料入れ替えの作業ミスの可能性が高くなる。その場合、制御棒引き抜けなどの事故が重なった場合、解析する必要はないのか。</p>	<p>・ MOX 燃料の外周部において、プルトニウムがウラン燃料に比べ、核分裂しやすいために燃料棒の出力が相対的に高くなるが、燃料棒中のプルトニウムの含有率を下げることにより、出力分布の均一を図っている。</p> <p>・ 解析評価により、出力が均一になっていることを確認している。</p>

● 有識者検討会議の検討・評価

- ・ ウラン燃料集合体と MOX 燃料集合体の境界では、MOX 燃料集合体外周部に中性子が多くなり、プルトニウムがウランに比べ核分裂しやすいことから、外周部燃料棒付近で出力のピークが生じることになるので、外周部にプルトニウムの含有率の低い燃料を配置することにより、原子炉内出力分布の平坦化を図る。
- ・ 上記のとおり、炉内の燃料集合体、MOX 燃料集合体の燃料棒の適切な配置により、原子炉内出力分布が不均一にならないことについては、解析評価により確認している。
- ・ 北電機は、1ヶ月に1回、出力の分布を測定し設計どおりであることを確認するとしている。万が一、出力が不均一になり、あらかじめ決めてある運転上の制限値を超えた場合には原子炉を停止するとしている。
- ・ 燃料取替作業にあたっては、手順書に従い、集合体の番号が打たれた刻印と装荷位置の関係が計画どおりであることを、燃料装荷中および装荷後において複数人間が複数回の確認をすることで誤装荷を防止する。また、原子炉の臨界を達成した時点で出力を上昇させる前に出力分布を確認することとしている。

- 燃料を高燃焼度まで燃やしたとき、ペレットの表面において局所的にさらに燃焼が進み組織の変化(リム組織と呼ばれる)が起きる場合があるが、燃焼後の MOX ペレットを取り出して観察した結果、ウランペレットと同等であるとの報告がなされている(High Burnup PWR BWR MOX fuel performance : A review of BELGONUCLEAIRE Recent Experiment Programs : Proceedings of the 2004 International Meeting on LWR Fuel Performance)。



<<検討結果>>

プルトニウムはウランと比較して熱中性子を吸収しやすいことから、MOX 燃料集合体外周部の燃料棒出力が高くなるのを防ぐため、MOX 燃料集合体中にプルトニウム含有率の異なる燃料棒を適正に配置し、原子炉内の出力分布を平坦化できることを解析評価により確認している。

また、誤装荷の防止や出力を上昇させる前に出力分布を確認するなど、燃料の健全性及び原子炉の制御性確保の措置を実施することとしていることから、燃料の健全性及び原子炉の制御性に与える影響はほとんどなく、安全性は確保されるものと考えられる。

<法的事項>

原子炉等規制法(第 26 条)、安全設計審査指針(指針 11)

<国の安全審査>

PWR の場合、MOX 燃料棒を3種類程度にして配置の工夫等により、原子炉内のばらつきを小さく抑えるよう設計されているか審査する。

(1) 一般的事項⇒(2) MOX 燃料の使用前⇒(3) MOX 燃料の使用⇒(4) MOX 燃料の使用後⇒(5) 全般的な事項
 ⑤ 燃料健全性、原子炉の制御性及び設備健全性への影響① (論点 2-4-5) [11/24]

⑤ 燃料健全性、原子炉の制御性及び設備健全性への影響①(論点 2-4-5)
 [11/24]

【プルトニウムはウランより熱中性子を吸収しやすいことから、MOX 燃料の採用により、相対的に、制御棒の熱中性子の吸収割合の減少や、ほう酸水中のほう素の熱中性子吸収割合が低下し、制御能力(効き)が低下する傾向がある。原子炉の制御性などへの影響に対し、燃料の適切配置やほう素濃度調整で十分なのか。また、事故、地震時など緊急時の停止余裕は十分確保されているか。】

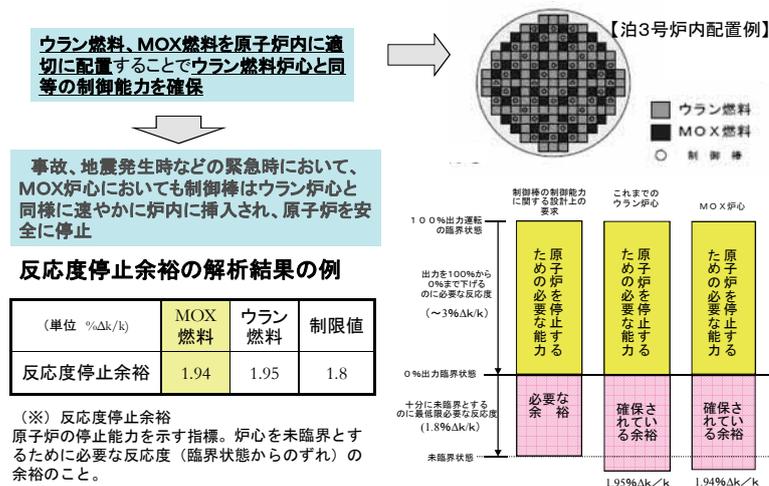
◇ MOX 燃料とウラン燃料の違い

MOX 燃料	ウラン燃料
<ul style="list-style-type: none"> ウラン燃料に比べ、中性子が核分裂に使われる前にプルトニウムに吸収されてしまう割合が多いことから、原子炉内の MOX 燃料では、ウラン燃料に比べ、中性子の数が少なめとなる。 このため、制御棒やほう酸水中のほう素が中性子を吸収する割合が低下し、制御能力(効き)が低下する傾向がある。 	(左記参照)

○ 北電㈱の講じる対策

- 制御棒の制御能力(効き)については、制御棒位置に MOX 燃料をなるべく配置しないなど、MOX 燃料とウラン燃料とを原子炉内に適切に配置することにより、ウラン炉心と同等の原子炉制御能力(反応度停止余裕)を確保する。
- ほう素の制御能力(効き)が低下することに対しては、燃料取替用水ピットのほう酸水中のほう素濃度を 3,000ppm から 3,200ppm に上昇させることにより、ウラン炉心と同等の原子炉制御能力を確保する。
- 燃料取替後の原子炉の起動時において、制御棒やほう素の制御能力(効き)を測定し、設計どおりであることを確認する。

MOX 炉心における制御棒による制御能力



□ 各立場(反対・賛成)のご意見

反対の立場	賛成の立場
<p>・ほう酸水注入装置が作動しなかった場合の、事故の経過の解明を行うべきではないか。</p> <p>・ほう素濃度を 3,200ppm に高めた場合、バルブや弁の固着の心配はないか。TMI(スリーマイル島)事故が起きたとき、ほう素結晶による固着により加圧器逃がし弁が開いたまま閉じなくなった。</p>	<p>・制御棒による反応度停止余裕がウラン炉心と同様に制限値を満足していることから、事故、地震時などの緊急時においても、制御棒によって原子炉を停止させる能力は十分確保されている。</p> <p>・ほう素の制御能力が低下することについては、ほう素濃度を 3,200ppm に上昇させ、ウラン炉心と同等の原子炉制御能力を確保する。</p>

● 有識者検討会議の検討・評価

- ・ 制御棒による制御能力の効きについては、プルトニウムはウランよりも熱中性子を吸収しやすいことから、相対的に低下することになるが、制御棒位置に MOX 燃料をなるべく配置しないなど燃料の配置の工夫により、反応度停止余裕はほとんど変わらない。
- ・ MOX 燃料使用時であってもウラン燃料の場合と同様に、緊急停止の条件に達し、制御棒の落下が始まると約 2 秒で制御棒は挿入され、原子炉は停止する。
- ・ また、ほう酸水のほう素濃度をウラン炉よりも上昇させる(3,000→3,200ppm)ことにより、中性子の吸収効果を高め、緊急時に原子炉を安全な状態にして停止することができる。なお、ほう酸水を注入するための高圧注入ポンプなどは二重化されており、万一故障が発生したときでも機能を失うことがない。ほう酸は 10℃でも 6,000ppm(ほう素換算)まで溶けるため、ほう酸の析出は問題とならない。

<<検討結果>>

プルトニウムはウランよりも熱中性子を吸収しやすいことから、MOX 燃料の採用により、相対的に制御能力(効き)が低下する傾向にあるが、解析評価により MOX 燃料とウラン燃料とを原子炉内に適切に配置するとともに、ほう酸水のほう素濃度をウラン炉心よりも上昇させることにより、ウラン炉心と同等の原子炉制御能力を満たしていることから、緊急時の停止余裕はウラン炉心と同様、十分確保されるものと考える。

<法的事項>

原子炉等規制法(第 26 条)、安全設計審査指針(指針 14~18)、安全評価指針

<国の安全審査>

プルトニウムはウランよりも熱中性子の吸収率が大きいことから、その分、制御棒に吸収される熱中性子の割合が減るため、その性質を考慮した設計(MOX 燃料集合体の装荷位置の工夫等)が行われている。これを踏まえて、ウラン炉心と同等の安全性が確保されているかを審査する。

＜コラム⑤ 反応度停止余裕について＞

原子炉の中では、燃料ペレットの中のウランやプルトニウムに中性子を吸収させることによって核分裂を起こし、熱エネルギーを発生させています。

原子炉の出力を変えるには、中性子の数を増減させる必要があります、その役割をするのが制御棒です。制御棒には中性子を吸収する働きがあり、この働きによって核分裂の数をコントロールしています。原子炉の出力を下げるときには制御棒を原子炉の中に挿入し、上げるときには引き抜きます。止めるときには、制御棒を全て原子炉の中に挿入します。

制御棒が原子炉を停止させる能力は、「**反応度停止余裕**」という数値で表します。この反応度停止余裕とは、原子炉を停止させる能力に加え持つべき余裕のことであり、コンピュータを使用した解析計算の結果がこの値以上あれば、十分安全に原子炉を停止させる能力があることとなります。

MOX 燃料を使うと、ウラン燃料だけで発電する場合と比べてプルトニウムの量がやや多くなり、プルトニウムはウランよりも中性子を吸収しやすいので、制御棒と中性子を奪い合う形になり、結果として、一般的には制御棒の効きがわずかに悪くなる傾向となります。

しかし、制御棒位置に MOX 燃料をなるべく配置しないなど、燃料を原子炉の中で適切に配置することにより、制御棒が原子炉を停止させる能力については、ウラン燃料のみの原子炉と同等に、必要とされる余裕分も含めて十分に確保できることが確認されています。

さらに、原子力発電所の運転開始前には実際に制御棒の効き具合を測定し、十分余裕があることを確認する検査を行った上で運転に入ることから、問題はないと考えられます。

⑥ 燃料健全性、原子炉の制御性及び設備健全性への影響②(論点 2-4-6) [12/24]

【プルトニウムはウランより熱中性子を吸収しやすく、また共鳴吸収(中性子の減速途中での吸収)も大きい。MOX 燃料の採用により、熱中性子の割合が減少することから、出力の上昇がより急峻になり、原子炉の制御が不安定になるなど影響があるのではないかと。また、操作ミスなどにより制御が不能になることはないのか。】

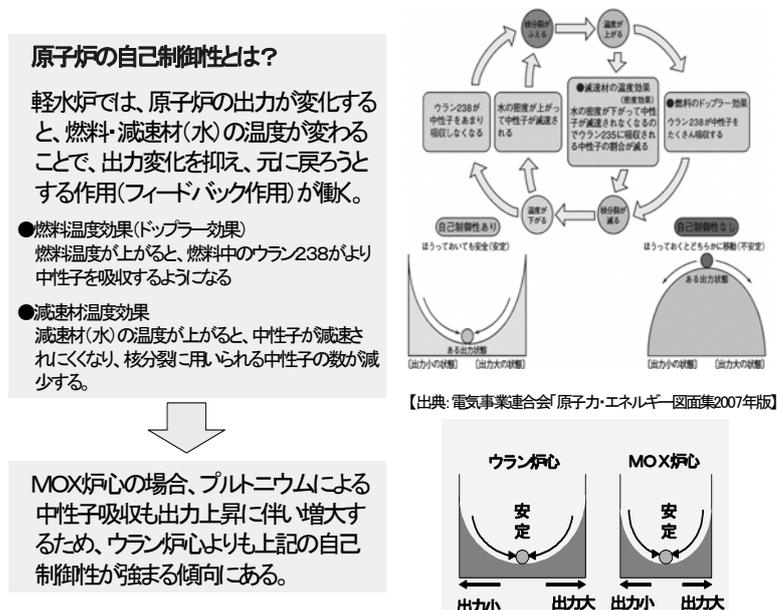
◇ MOX 燃料とウラン燃料の違い

MOX 燃料	ウラン燃料
<ul style="list-style-type: none"> ・プルトニウムがウランに比べ、中性子を吸収しやすいことに起因し、MOX 燃料の混在する原子炉では、出力の変化(上昇・下降)を抑え、元に戻ろうとする作用(フィードバック作用)が大きくなる(自己制御性が強まる)傾向にある。 ・プルトニウムがウランよりも核分裂しやすいことに起因し、核分裂連鎖反応のサイクル(中性子寿命)が短くなる傾向にある。 	(左記参照)

○ 北電協の講じる対策

- MOX 炉心の自己制御性はウラン炉心よりも大きくなる傾向にあり、原子炉の制御が不安定になるようなことはない。
- ウラン炉心と MOX 炉心の炉心特性の違いが発電所の運転面に与える影響はなく、安全評価の結果に与える影響も小さく問題とはならない。
- 発電所は、人間が操作ミスを行っても、原子炉が自動停止するなど、より安全な状態となるよう設計されている(フェイルセーフ)ことから、ウラン炉心の場合と同様に、操作ミスにより制御が不能になることはない。

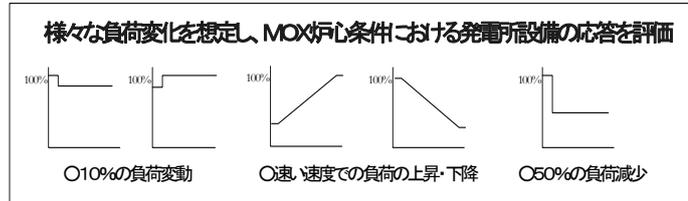
MOX燃料炉心における原子炉の自己制御性



(1) 一般的事項 → (2) MOX 燃料の使用前 → (3) MOX 燃料の使用 → (4) MOX 燃料の使用後 → (5) 全般的な事項
 ⑥ 燃料健全性、原子炉の制御性及び設備健全性への影響② (論点 2-4-6) [12/24]

ウラン炉心とMOX炉心の炉心特性の違いが 発電所の運転制御に与える影響

MOX炉心の特長(自己制御性が強い)が、
発電所の運転制御に与える影響は
どうか?



全てのケースにおいて、MOX炉心とウラン炉心での発電
所設備の応答の差が小さく、MOX炉心の特長の違いが
発電所の運転制御に与える影響はない。

□ 各立場（反対・賛成）のご意見

反対の立場	賛成の立場
<ul style="list-style-type: none"> ・プルトニウム燃料の場合、遅発臨界の幅はウランの 1/3 の程度であり、即発臨界になりやすい。 ・即発中性子寿命、遅発中性子割合の表に燃焼度の違いがわかるようにしてほしい。 ⇒P.53 の表のとおり燃焼度を追記 ・何らかの原因で制御棒が抜けるなどして反応度が加わった場合の安全性について検討すべきである。 	<ul style="list-style-type: none"> ・MOX 燃料は復元力が強く、不安定になりにくい性質をもっている。 ・発電所は、人間が操作ミスを行っても、原子炉が自動停止するなど、より安全な状態となるように設計されていることから、ウラン炉心の場合と同様に制御不能になることはない。

● 有識者検討会議の検討・評価

- 制御棒が飛び出し、原子炉の出力が急上昇するような事故想定において、MOX 炉心では中性子寿命が短いため出力上昇が早まるが、燃料温度効果(ドップラー効果)により、ウラン 238 やプルトニウム同位体が中性子を吸収する効果が大きくなることから、核分裂反応が抑制され出力上昇が抑制されることになり、その効果はウラン炉心に比べ大きくなる。
- 逆に、主蒸気管破断事故など原子炉冷却材の温度が急激に下降した場合に、MOX 炉心はウラン炉心に比べ核分裂が進む事象については、解析評価によりウラン炉心と MOX 炉心で挙動に大きな違いはないことが確認されている。
- MOX 炉心でも運転制御に差はなく、操作ミスなどの人為的過失(ヒューマンエラー)が発生したとしても、原子炉が自動停止するなど、より安全な状態となるよう設計されている(フェイルセーフ)ことから、ウラン炉心の場合と同様に、運転制御が不能になることはない。

- プルトニウムは即発中性子寿命が短い、遅発中性子割合が小さいという特徴をもつものの、1/4MOX 炉心※という条件で炉心全体をみればこの特徴は薄まっている。最大の反応度値を持つ制御棒1本が、炉心の外に飛び出すことを想定した解析は、この炉心条件を踏まえて行われている。MOX 炉心は出力上昇が速くなる一方、逆に自己制御性が働いた後の出力降下は速くなるが、この程度の差であれば、ウラン炉心と事象の推移に大きな違いがない。※MOX 燃料の割合が炉心全体の 1/4

泊3号機の安全評価解析において使用している即発中性子寿命、遅発中性子割合

	ウラン炉心 (55GWd/t)	1/4MOX 炉心
即発中性子寿命 (秒)	9×10^{-6} 9×10^{-6} : 炉心寿命初期 (0 MWd/t) 9×10^{-6} : 炉心寿命末期 (14,800MWd/t)	$5 \times 10^{-6} \sim 6 \times 10^{-6}$ 5×10^{-6} : 炉心寿命初期 (0 MWd/t) 6×10^{-6} : 炉心寿命末期 (14,800MWd/t)
遅発中性子割合 (%)	0.43~0.48 0.43: 炉心寿命末期 (14,800MWd/t) 0.48: 炉心寿命初期 (0 MWd/t)	0.40~0.43 0.40: 炉心寿命末期 (14,800MWd/t) 0.43: 炉心寿命初期 (0 MWd/t)

<<検討結果>>

制御棒の飛び出し事故、主蒸気管破断事故などにより、原子炉内の温度が急に変動した場合、元の状態に戻ろうとする自己制御性は、MOX 炉心の方がウラン炉心に比べ強まる傾向にあること、MOX 燃料が運転制御に与える影響は小さいことを解析評価により確認していることから、原子炉の制御性が不安定になることはなく、制御性は確保されるものとする。

また、操作ミスなどの人為的過失（ヒューマンエラー）が発生したとしても、原子炉が自動停止するなど、より安全な状態となるよう設計されている（フェイルセーフ）ことから、ウラン炉心の場合と同様に、運転制御が不能になることはない。

<法的事項>

原子炉等規制法(第 26 条)、安全設計審査指針(指針 13、14)、安全評価指針、反応度導入事業に関する評価指針

<国の安全審査>

炉内の水の温度が変化すると、出力も変化する(この出力変化の割合を反応度係数という)。水温が上昇すると出力は低下し、逆に水温が降下すると出力は増加する。この作用を「固有の安全性」といい、むしろ MOX 炉心の方がウラン炉心よりも、その作用が強いが、その影響を考慮しても異常事象及び事故の評価結果が制限値内となるかを審査する。

(1) 一般的事項⇒(2) MOX 燃料の使用前⇒(3) MOX 燃料の使用⇒(4) MOX 燃料の使用後⇒(5) 全般的な事項
 ⑦設備健全性への影響 (論点2-4-7) [13/24]

⑦ 設備健全性への影響(論点2-4-7) [13/24]

【核分裂の際、プルトニウムはウランより高速中性子の発生量が多い。金属材料は中性子の照射を受けると脆くなるが、MOX 燃料の採用により、原子炉容器が傷みやすくなるなど設備の健全性や耐久性に影響が生じ、老朽化を早めるのではないか。】

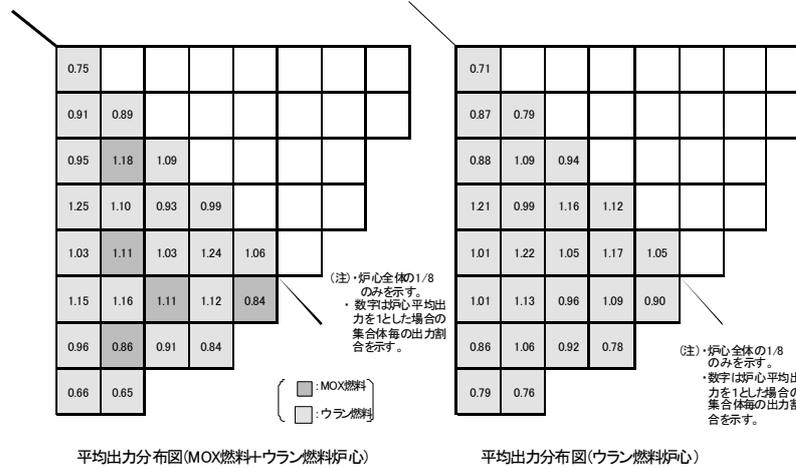
◇ MOX 燃料とウラン燃料の違い

MOX 燃料	ウラン燃料
MOX 燃料はウラン燃料に比べ、高速中性子の発生量が多い。 プルトニウム 239:2.87 個/核分裂 ウラン 235 :2.43 個/核分裂	(左記参照)

○ 北電機(株)の講じる対策

- 原子炉容器の中性子照射量の変動は、核分裂あたりの高速中性子の発生量だけではなく、それぞれの燃料の出力にも左右される。MOX 燃料を装荷したからといって、必ずしも原子炉容器への中性子の照射量が多くなるわけではない。
- 運転中の原子炉容器への中性子照射量は、解析により評価する。また、原子炉容器内部の試験片を定期的に取り出して、照射量の累積値を実測により確認するとともに、強度試験を行って原子炉容器材料の健全性を確認する。

MOX燃料炉心とウラン燃料炉心の出力分布の比較



	中性子照射量 (n/cm ²) (40年経過時点)	
	ウラン燃料炉心 (55Gd/t燃料装荷炉心)	MOX燃料炉心 (55Gd/t+1/4MOX燃料装荷炉心)
原子炉容器内面	8.68 × 10 ¹⁹	7.42 × 10 ¹⁹
原子炉容器1/4板厚	5.00 × 10 ¹⁹	4.24 × 10 ¹⁹
原子炉容器3/4板厚	1.12 × 10 ¹⁹	9.32 × 10 ¹⁸

□ 各立場(反対・賛成)のご意見

反対の立場	賛成の立場
<ul style="list-style-type: none"> ・照射脆化は圧力容器壁の材質中に含まれるリンや銅などの不純物に大きく依存するので、監視試験片データの公開などが重要である。 ・試験片の数が不足しているのではないかと。 	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉容器と燃料の間には高速中性子を減速させるために十分な冷却水が存在しており、健全性や耐久性に影響が生じる恐れはない。 ・MOX 燃料とウラン燃料の原子炉容器への中性子照射量の解析によると、MOX 燃料炉心の方が中性子の照射量が少なくなっている。

● 有識者検討会議の検討・評価

- ・ 高速中性子は水と衝突してエネルギーを失うので、10 数cmしか移動しないことから、原子炉容器は外周部以外の燃料からの、中性子の影響は受けない。
- ・ 泊3号機で標準的な、MOX 炉心、ウラン炉心における原子炉容器への中性子照射量を比較した結果、出力分布の違いから、MOX 燃料炉心がウラン燃料炉心に比べ下回ることを解析評価により確認している。
- ・ 北電㈱は、原子炉容器内の6組の試験片を計画的に取り出して、照射量の累積値の評価、試験片の強度試験を行い、中性子照射による材料の脆化などを確認することとしている。
- ・ なお、試験片のデータは、定期安全レビュー報告書のなかで公開されている。
- ・ 試験片の取り出し計画は MOX 燃料になっても変わるものではないため、試験片の数が不足することはない。

<<検討結果>>

MOX 燃料はウラン燃料に比べ高速中性子の発生量が多いが、MOX 燃料を部分的に配置しても炉心外周部の出力が必ずしも上がる訳ではないことから、原子炉容器への中性子の照射量が一概に多くなるとはいえない。

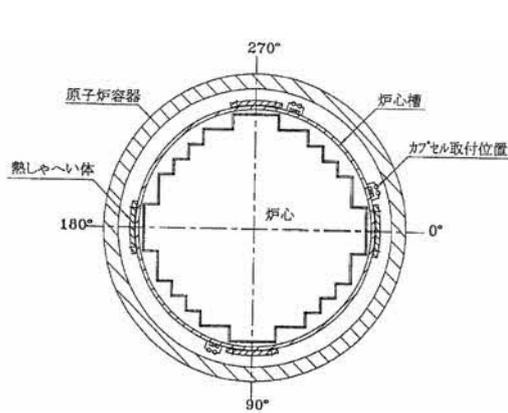
また、運転中の原子炉容器内部の試験片を取り出し、原子炉容器材料の健全性を確認することとしていることから、設備の健全性や耐久性に影響が生じ、ウラン炉心と比べ老朽化を早めることはないものとする。

<法的事項>
 原子炉等規制法(第26条)、安全設計審査指針(指針20、22)、日本電気協会の電気技術規程

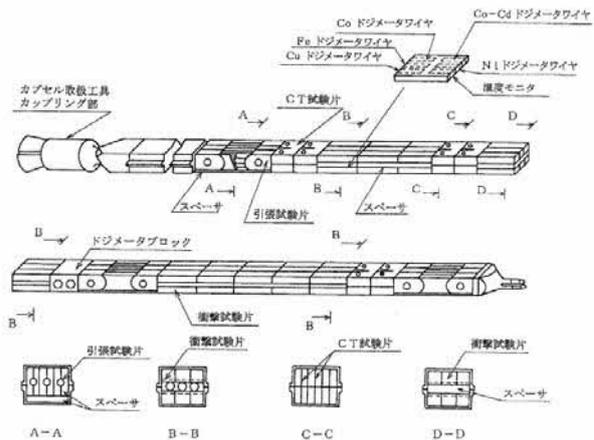
＜コラム⑥ 原子炉容器の健全性確認について＞

運転中の原子炉容器の健全性は、カプセルに収納した「試験片」を炉心槽と原子炉容器の間に挿入し、それを計画的に取り出して試験を実施し、実際の運転条件下における中性子照射等の影響の程度をチェックすることによって確認されています。

原子炉部材への影響について、炉心からの中性子を受けると脆化することが知られているため、衝撃試験、引張試験、及び破壊靱性試験により脆化の程度などを測定し、問題がないことを確認しています。



泊3号機熱しゃへい体及び試験片入りカプセルの配置図



泊3号機試験片を収納するカプセル