

伊方発電所3号機 1次冷却材中のよう素濃度の上昇について

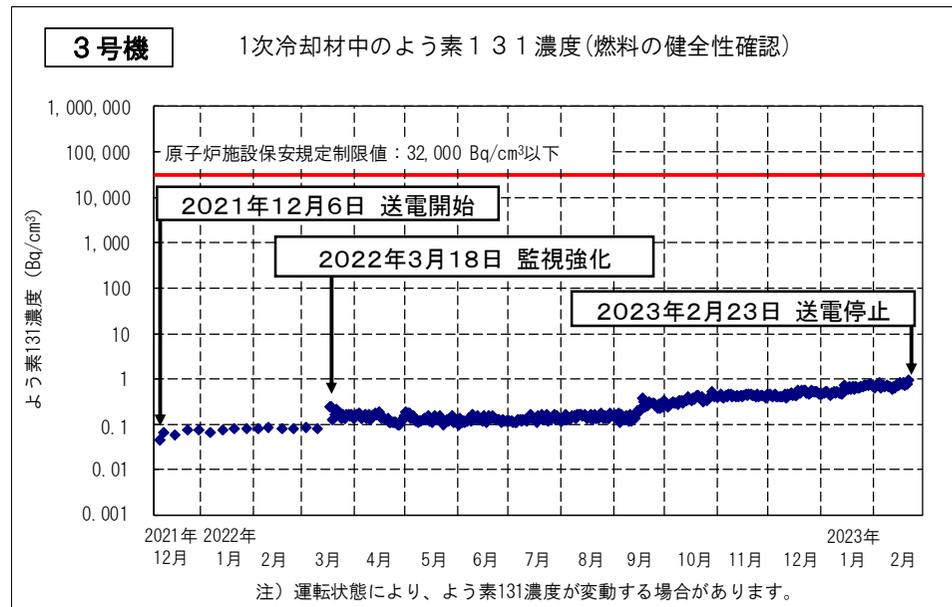
令和5年4月25日
四国電力株式会社



- 1. 事象発生状況**
- 2. よう素濃度上昇に係る調査(漏えい燃料の調査)**
- 3. 詳細調査**
- 4. 推定原因および対策**

1. 事象発生状況

- 伊方発電所 3号機は通常運転中のところ、令和4年3月18日17時43分、定例の1次冷却材中のよう素131濃度の測定において、測定値が通常値(0.085Bq/cm³)の約3倍(0.25Bq/cm³)に上昇していることを確認したことから、監視を強化し、保安規定に定める運転上の制限値(32,000Bq/cm³)を十分下回っていることを確認しながら運転を継続した。
- その後、令和4年9月18日に1次冷却材中のよう素131濃度が0.39Bq/cm³に上昇したが、3号機第16回定期事業者検査(以下、「定期検査」)のために令和5年2月23日に運転を停止するまでの間の最大値は0.92Bq/cm³であり、保安規定に定める運転上の制限値を十分下回っており、安全上の問題はなかった。
- 本事象は、燃料集合体からのよう素131の漏えいによるものと考えられることから、原子炉容器からの燃料取出後、燃料集合体全数(157体)について SHIPPING 検査を実施した結果、燃料集合体2体に漏えいが認められ、当該燃料集合体(以下、「漏えい燃料」という。)2体に係る調査を実施した。
- また、本事象に伴い、定期検査時の機器開放作業等において燃料集合体から漏えいした放射性物質が大気中に放出されたが、伊方発電所では平常時から適切に管理したうえで放射性物質の放出を行っており、今回の放出量についても保安規定や安全協定の目標値を十分下回っていることから、環境への放射能の影響はなかった。



(詳細は参考資料 1、2、3、4 参照)

- なお、本件について、調査結果をまとめた報告書を愛媛県に提出し、令和5年4月10日に公表済み。

2. よう素濃度上昇に係る調査(漏えい燃料の調査)

(1) シッピング検査

- 1次冷却材中のよう素131濃度の上昇は、燃料集合体からの漏えいによるものと考えられることから、漏えい燃料を特定するため、原子炉容器から取り出した燃料集合体全数（157体）についてシッピング検査を実施した。
- その結果、2体（燃料集合体番号：MS3M32、MS3M34）に漏えいが認められた。
- なお、漏えい燃料2体の燃料タイプは17×17 A型ステップ2高燃焼度燃料（以下、「従来A型燃料」という。）であり、第11～13、16サイクル※において使用したガドリニア濃度6wt%のガドリニア入り燃料集合体であった。

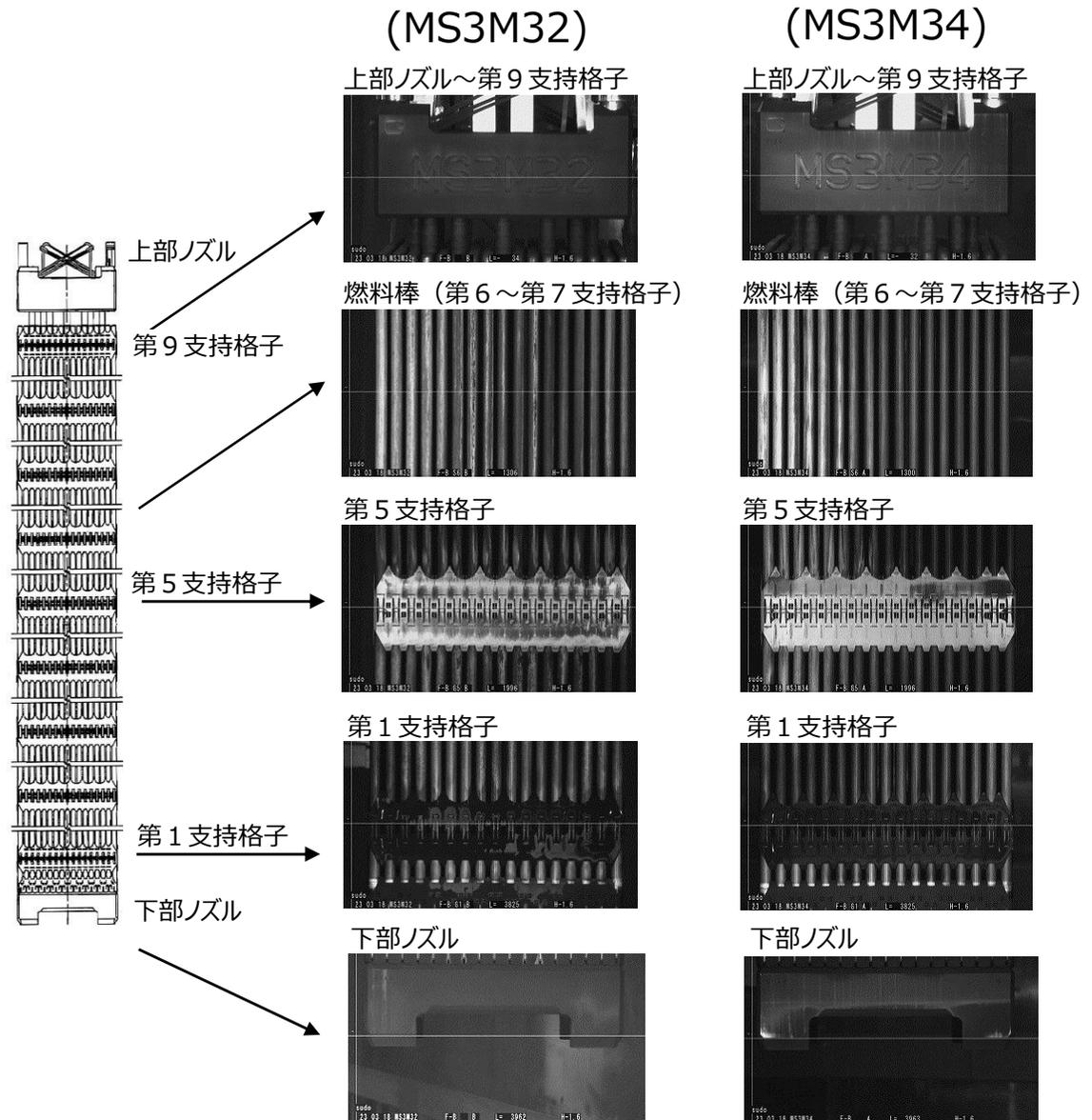
（詳細は参考資料5、6、7、8、9、10参照）

- ※（参考）伊方発電所3号機の運転期間（送電開始～送電停止）と過去の漏えい燃料発生状況
- 第11サイクル 平成19年10月17日～平成20年 9月 7日
 - 第12サイクル 平成20年11月 8日～平成22年 1月 7日（漏えい燃料1体が発生した運転期間）
 - 第13サイクル 平成22年 3月 4日～平成23年 4月29日
 - 第14サイクル 平成28年 8月15日～平成29年10月 3日
 - 第15サイクル 平成30年10月30日～令和 元年12月26日
 - 第16サイクル 令和 3年12月 6日～令和 5年 2月23日（今回漏えい燃料2体が発生した運転期間）

2. よう素濃度上昇に係る調査(漏えい燃料の調査)

(2) 外観検査

- 漏えい燃料 2 体について、水中テレビカメラを用いて外観を検査した結果、燃料棒等に損傷および変形は認められなかった。



3. 詳細調査

漏えいが発生した原因を究明するため、要因分析を行い、詳細調査を実施した。

(1) 設計に係る過去の知見等の調査

- 燃料漏えいに係る過去の知見の燃料設計等への反映を調査した結果、いずれも適切に反映されていることを確認した。

(2) 製造履歴、取扱履歴および運転履歴の調査

a. 製造履歴調査

- 漏えい燃料 2 体の製造履歴を製造時記録等により確認した結果、各々の構成部品毎に定められている検査の結果は全て判定基準を満足しており、異常は認められなかった。
- 第16サイクル開始時点で使用可能であった、漏えい燃料 2 体と同時期に製造した従来 A 型燃料（6体）、漏えい燃料 2 体と製造時期が異なる従来 A 型燃料（56体）についても確認した結果、異常は認められなかった。

b. 取扱履歴調査

- 漏えい燃料 2 体について、発電所受入後の取扱状況を新燃料受入検査記録、新燃料装荷前検査記録、燃料集合体外観検査記録、および燃料装荷・取出時の荷重記録により確認した結果、異常は認められなかった。

c. 運転履歴調査

- 漏えい燃料 2 体が装荷されていた第11～13、16サイクルの出力履歴および 1 次冷却材水質履歴について確認した結果、全て保安規定に定める運転上の制限値または基準値を満足しており、異常は認められなかった。

(詳細は参考資料 1 1、1 3、1 4 参照)

3. 詳細調査

(3) 超音波、ファイバースコープによる調査 (1 / 3)

a. 超音波調査 (漏えい燃料棒の特定)

- 漏えい燃料 2 体について、漏えい燃料棒を特定するため、燃料集合体内の全ての燃料棒 (燃料集合体 1 体あたり264本) に対して超音波調査を実施した結果、各漏えい燃料において、それぞれ漏えい燃料棒 1 本を特定した。当該燃料棒の位置は、燃料集合体の外周に近いコーナー部であった。

燃料集合体 番号	MS3M32	MS3M34	(過去事例※) MS3L24
漏えい 燃料棒	1本(ウラン燃料棒)	1本(ウラン燃料棒)	1本(ガドリニア入り燃料棒)
漏えい 燃料棒位置	<p>P-03</p> <p>A面 Q P O N M L K J I H G F E D C B A 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 D面 B面 C面</p>	<p>O-02</p> <p>A面 Q P O N M L K J I H G F E D C B A 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 D面 B面 C面</p>	<p>C-15</p> <p>A面 Q P O N M L K J I H G F E D C B A 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 D面 B面 C面</p>



※伊方発電所 3 号機第12回定期検査にて漏えいが確認された事例

(詳細は参考資料 1 5 参照)

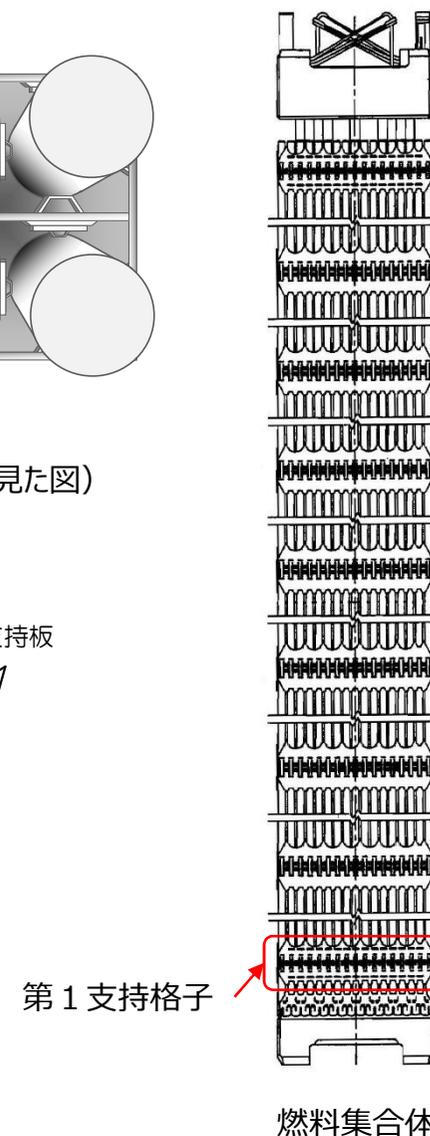
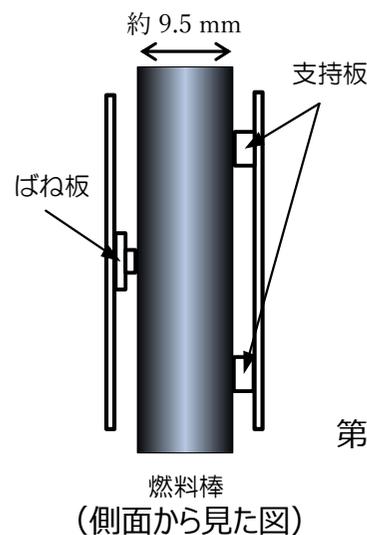
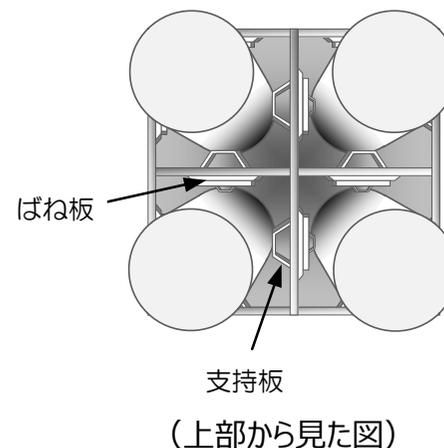
3. 詳細調査

(3) 超音波、ファイバースコープによる調査 (2 / 3)

b. ファイバースコープ調査 (特定された漏えい燃料棒の外観検査)

- 漏えい燃料棒 2 本について、燃料棒表面および支持格子部の異常の有無を確認するため、漏えい燃料棒の全長（支持格子内部含む）に亘り、ファイバースコープによる調査を実施した結果、漏えい燃料棒 2 本とも、燃料棒表面および第 2～9 支持格子部において異常は確認されなかったが、第 1 支持格子内において支持板やばね板と燃料棒の間に隙間や入り込み（以下、「隙間等」という。）が認められた。
- また、漏えい燃料 2 体の中で、それぞれ漏えいが認められた燃料棒 1 本以外の全ての燃料棒について、第 1 支持格子内をファイバースコープにより調査した結果、漏えい燃料棒以外に隙間等の異常は認められなかった。

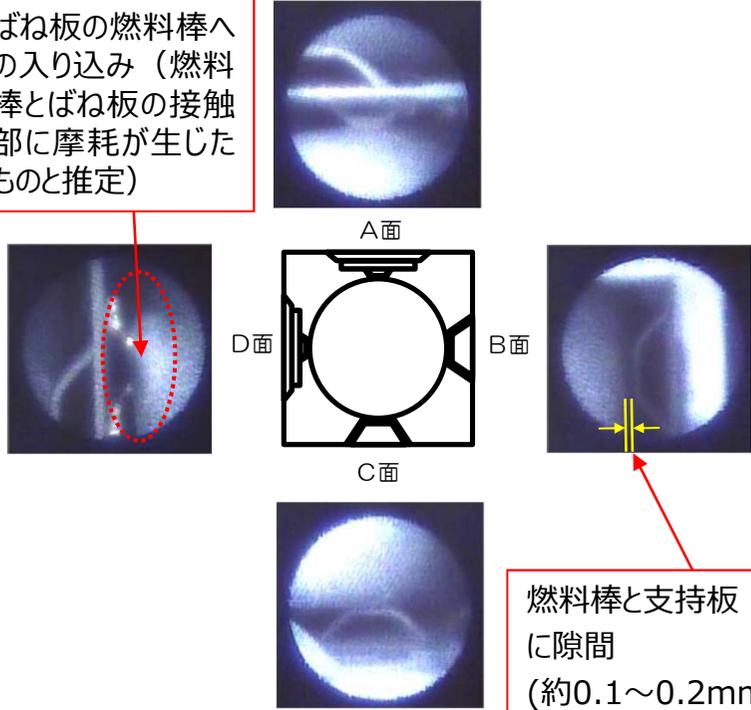
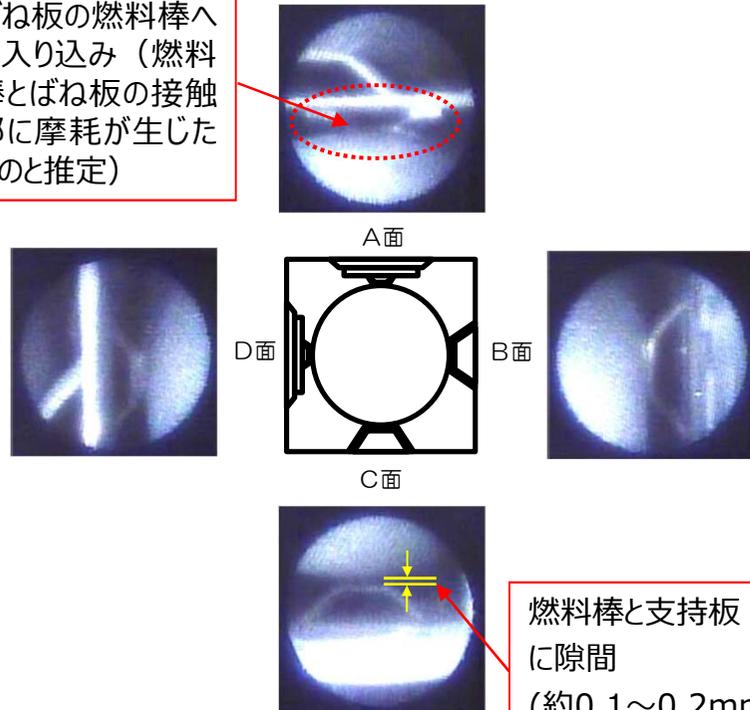
(詳細は参考資料 1 6 参照)



3. 詳細調査

(3) 超音波、ファイバースコープによる調査 (3 / 3)

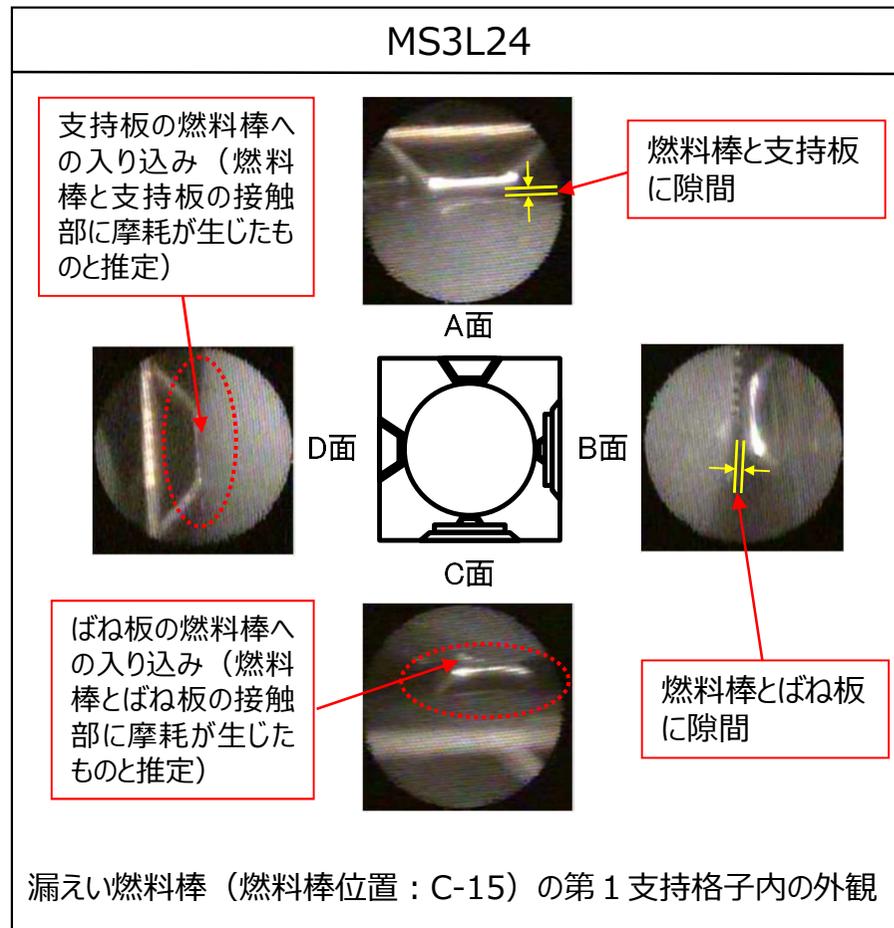
b. ファイバースコープ調査 (特定された漏えい燃料棒の外観検査)

MS3M32	MS3M34
<p data-bbox="235 518 510 726">ばね板の燃料棒への入り込み (燃料棒とばね板の接触部に摩耗が生じたものと推定)</p>  <p data-bbox="761 1093 1075 1236">燃料棒と支持板に隙間 (約0.1~0.2mm)</p> <p data-bbox="235 1292 1086 1332">漏えい燃料棒 (燃料棒位置 : P-03) の第 1 支持格子内の外観</p>	<p data-bbox="1153 518 1429 726">ばね板の燃料棒への入り込み (燃料棒とばね板の接触部に摩耗が生じたものと推定)</p>  <p data-bbox="1702 1093 2016 1236">燃料棒と支持板に隙間 (約0.1~0.2mm)</p> <p data-bbox="1153 1292 2004 1332">漏えい燃料棒 (燃料棒位置 : O-02) の第 1 支持格子内の外観</p>

3. 詳細調査

(4) 伊方発電所における過去の漏えい事例の調査

- 伊方発電所 3号機第12回定期検査において、従来 A 型燃料でガドリニア濃度 10wt% のガドリニア入り燃料集合体 1 体に漏えい（以下、「前回の漏えい燃料」という。）が発生しており、今回の漏えい燃料 2 体と同様、第 1 支持格子内において隙間等が認められた。
- 前回の漏えい燃料の漏えい発生メカニズムに対する検討結果は、以下のとおりであった。
 - ✓ 第 1 支持格子内の支持板やばね板と燃料棒の接触が一部離れる事象が発生した場合には、1 次冷却材の横流れによる燃料棒の微小な振動により、燃料被覆管の摩耗が発生する可能性が考えられる。
- なお、伊方発電所第 1、2 号機においても、過去に 8 体の漏えいが発生しているが、いずれも燃料タイプは 14×14 型燃料集合体であり、燃料集合体の設計、構造等が異なることから、今回の漏えいとの類似性はない。



3. 詳細調査

(5) 従来A型燃料の漏えい要因調査（1 / 4）

今回の漏えい燃料 2 体および前回の漏えい燃料がいずれも従来 A 型燃料であることを踏まえ、従来 A 型燃料の漏えい要因調査を実施した。

a. 従来 A 型燃料に係る知見

従来 A 型燃料については、過去に起こった第 1 支持格子における燃料棒の微小な振動に伴う燃料被覆管の摩耗による漏えい事例（他プラントを含む）を踏まえた知見として、以下のことが分かっている。（以下、「従来 A 型燃料に係る知見」という。）

- ✓ 下部ノズルの構造により、燃料集合体の第 1 支持格子内において 1 次冷却材の流れによる燃料棒の振動が大きくなる可能性のある位置があること
- ✓ 下部ノズルや第 1 支持格子等の構造により、圧損や構造の異なる燃料との隣接に伴い更に振動が大きくなる可能性があること
- ✓ 燃焼が進むことにより第 1 支持格子内の支持板やばね板と燃料棒の接触が一部離れる事象が発生しやすくなること、および燃料被覆管の摩耗がある程度進行する可能性があること

なお、ガドリニア入り燃料棒については、第 1 支持格子内の支持板やばね板と燃料棒の接触が一部離れる事象の発生に加え、ウラン燃料棒と比較して外径減少が大きいことにより、第 2 支持格子等で僅かに隙間が発生することで燃料棒の振動が大きくなる可能性があること

（詳細は参考資料 1 1、1 2 参照）

3. 詳細調査

(5) 従来A型燃料の漏えい要因調査 (2 / 4)

b. 従来A型燃料の漏えい対策の実施状況

【改良A型燃料の採用】

- 当社は、従来A型燃料の漏えい対策として、従来A型燃料に係る知見を踏まえ、下部ノズルや第1支持格子等の構造を改良したA型燃料（以下、「改良A型燃料」という。）を採用している。
- 現在、従来A型燃料から改良A型燃料への置き換えを順次進めているが、これまでの使用において、改良A型燃料の漏えいは発生していない。

<改良A型燃料>

- ・下部ノズル構造の変更 (図1)
- ・第1支持格子位置の変更、下部端栓の長尺化等 (図2)

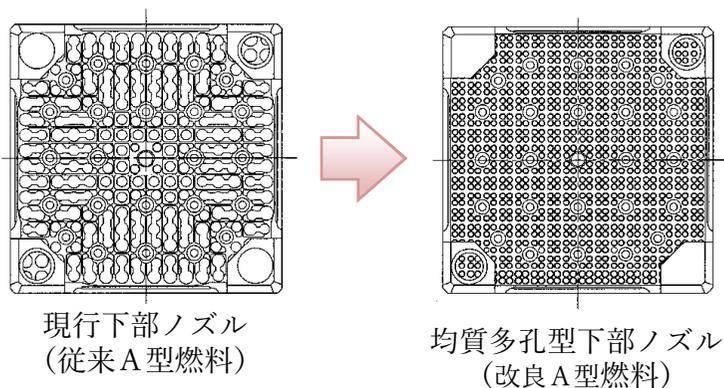


図1 下部ノズルの比較

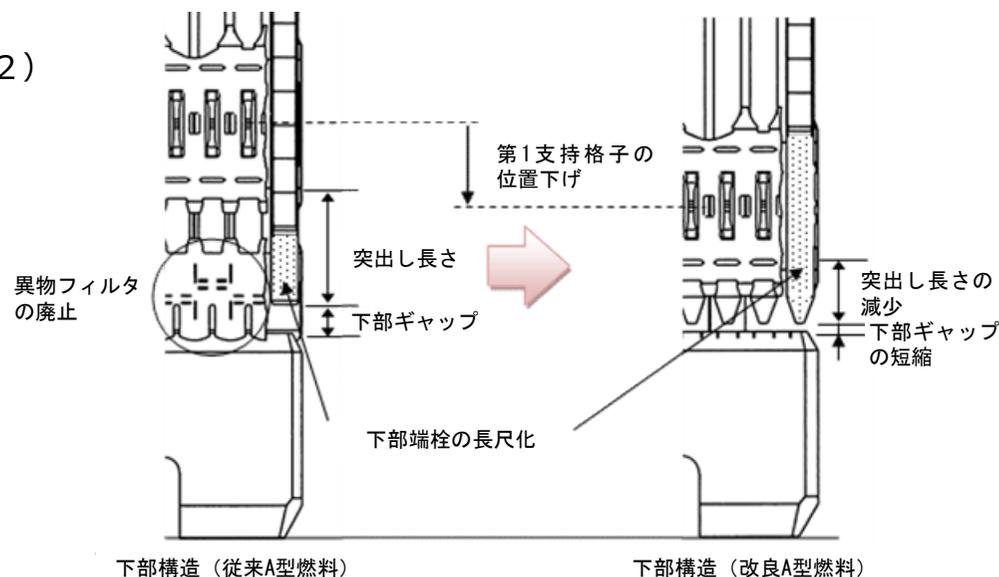


図2 第1支持格子位置、下部端栓形状等の比較

3. 詳細調査

(5) 従来A型燃料の漏えい要因調査 (3 / 4)

b. 従来A型燃料の漏えい対策の実施状況

【従来A型燃料に対する運用上の対策】

- 第13サイクル以降、従来A型燃料の使用にあたっては、以下の運用上の対策を講じることで、従来A型燃料の漏えい発生の可能性の低減に努めてきた。
 - 従来A型燃料に係る知見を踏まえた炉心配置上の配慮
 - 原子炉への装荷前のファイバースコープによる第1支持格子内隙間等の確認（以下、「隙間等の確認」という。）を抜き取りで実施

- こうした運用上の対策を実施した結果、第13～15サイクルで従来A型燃料の漏えいは発生しなかったが、第16サイクルにおいて2体の漏えいが発生したことから、漏えいにつながる可能性のある要因について、共通要因調査を実施した。

(詳細は参考資料 1 7 参照)

3. 詳細調査

(5) 従来A型燃料の漏えい要因調査 (4 / 4)

c. 共通要因調査

- 今回確認された漏えい燃料 2 体および前回の漏えい燃料を比較し、共通要因の有無について改めて調査したところ、以下の共通要因が認められた。
 - ① ガドリニア入り燃料集合体で発生したこと
 - ② 燃烧が進んだ高燃烧度域で発生したこと (4 サイクル使用)
 - ③ 4 サイクル目で炉心最外周に装荷されていたこと
 - ④ B 型燃料 (圧損や構造の異なる燃料) 1 体と隣接していたこと

- これらのうち、共通要因①については、ガドリニア入り燃料集合体であることは共通しているものの、以下のことから、漏えいにつながる共通要因となる可能性は低いと考えられる。
 - ✓ ガドリニア入り燃料棒とウラン燃料棒の双方で漏えいが発生していること
 - ✓ 過去に他プラントでは、ウラン燃料集合体でも今回の漏えいと同様に燃料集合体の外周に近いコーナー部で漏えいが発生しており、ガドリニア入り燃料集合体特有の事象ではないこと

(詳細は参考資料 1 8 参照)

3. 詳細調査

(6) 追加調査 (1 / 3)

- (5) 従来 A 型燃料の漏えい要因調査で得られた共通要因②～④について、漏えいにつながる可能性を確認するため、追加調査を実施した。

a. 高燃焼度域における使用実績調査

- ✓ これまで伊方発電所 3 号機において使用した従来 A 型燃料のうち、3 サイクル以上使用し、燃焼の進んだ 150 体の実績について調査した結果、共通要因②～④全てに該当するものが 23 体あり、そのうち 3 体（今回の漏えい燃料 2 体および前回の漏えい燃料 1 体）で漏えいが確認されている。
- ✓ なお、共通要因②～④のうち、2 つ、または 1 つに該当するものは 111 体あったが、いずれも漏えいは確認されていない。

使用サイクル数	最終サイクル 装荷位置	体数	最終サイクル B 型燃料との隣接の有無	
			B 型隣接あり 【共通要因④】	B 型隣接なし
4 サイクル 【共通要因②】	炉心最外周 【共通要因③】	4 4 体 (3 体)	2 3 体 (3 体) 共通要因②～④	2 1 体 共通要因②、③
	炉心最外周以外	1 8 体	1 0 体 共通要因②、④	8 体 共通要因②
3 サイクル	炉心最外周 【共通要因③】	0 体	0 体 共通要因③、④	0 体 共通要因③
	炉心最外周以外	8 8 体	7 2 体 共通要因④	1 6 体 共通要因無し

() 内は漏えい燃料体数。赤字は共通要因②～④全てに該当するもの、青字は共通要因②～④のうち、1 つ、または 2 つに該当するもの。

3. 詳細調査

(6) 追加調査 (2 / 3)

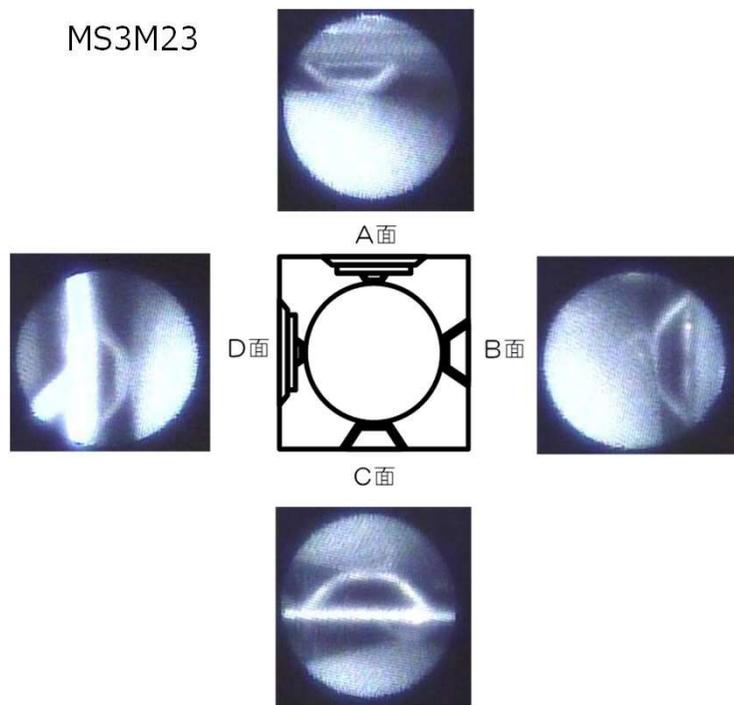
b. 同じ使用履歴の燃料集合体に対するファイバースコープ調査

更に、共通要因②～④全てに該当した場合の漏えいにつながる可能性を詳細に確認するため、第16サイクルで装荷されており、漏えい燃料2体と製造時期および使用履歴が同じで共通要因②～④全てに該当する燃料集合体全数（6体）を追加調査の対象として選定し、従来A型燃料に係る知見から燃料棒の振動が大きくなる可能性があるとして評価されている位置をファイバースコープにより確認した結果、漏えい燃料棒に見られたような隙間等の異常は認められなかった。

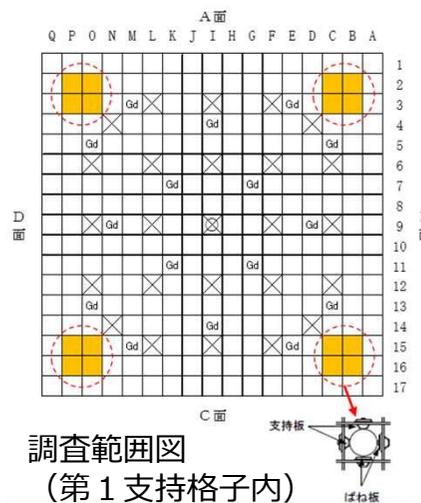
ファイバースコープ追加調査対象燃料

製造時期	同製造時期燃料の装荷体数（漏えい燃料2体を除く）	燃料集合体番号	燃烧度
平成17年5月	6体	MS3M23	約54.1 GWd/t
		MS3M24	約54.2 GWd/t
		MS3M25	約54.2 GWd/t
		MS3M26	約54.4 GWd/t
		MS3M31	約54.3 GWd/t
		MS3M33	約54.3 GWd/t

【ファイバースコープ追加調査結果】



例：健全燃料棒（燃料棒位置：O-02）の第1支持格子内の外観



3. 詳細調査

(6) 追加調査 (3 / 3)

c. 追加調査まとめ

- 使用実績調査の結果、共通要因②～④全てに該当する23体のうち漏えいが確認されたのが3体であること、また、ファイバースコープ調査を実施した6体には漏えい燃料棒に見られたような隙間等の異常は認められなかったことから、共通要因②～④全てに該当した場合でも、必ずしも漏えいにつながるものではないことが分かった。
- また、共通要因②～④のいずれかの要因が該当しない場合では漏えいが確認されていないことから、共通要因②～④の重畳を避けることで、漏えいの発生を完全に防ぐことは難しいものの、漏えいの発生を低減できる可能性があると考えられる。

(7) これまでの従来 A 型燃料の漏えい対策の有効性確認

- 従来 A 型燃料の運用上の対策としては、これまで共通要因②～④の重畳を避けるような配慮はしていなかった。
- また、今回の漏えい燃料 2 体は、漏えいが発生した第16サイクルの原子炉への装荷前（3号機第15回定期検査）において隙間等の確認の対象とはなっていなかった。
- 以上のことから、共通要因②～④の重畳を避けるような炉心配置上の配慮や漏えい燃料 2 体を対象に原子炉装荷前の隙間等の確認を実施していれば、漏えいの発生を完全に防ぐことは難しいものの、今回の漏えい燃料 2 体の発生を防ぐことができた可能性があると考えられる。

3. 詳細調査

(8) 他の燃料タイプの調査

- 伊方発電所 3 号機では他の燃料タイプとして、改良 A 型燃料、B 型燃料、ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料（以下、「MOX 燃料」という。）を使用している。
- このうち、改良 A 型燃料は、従来 A 型燃料に係る知見を踏まえ、下部ノズルや第 1 支持格子等の構造を改良した A 型燃料であり問題ない。
- また、B 型燃料、MOX 燃料は、従来 A 型燃料と下部ノズルの構造が異なり、第 1 支持格子内における 1 次冷却材の流れによる燃料棒の振動が起こる可能性は小さいことから、問題はない。

4. 推定原因および対策

○推定原因

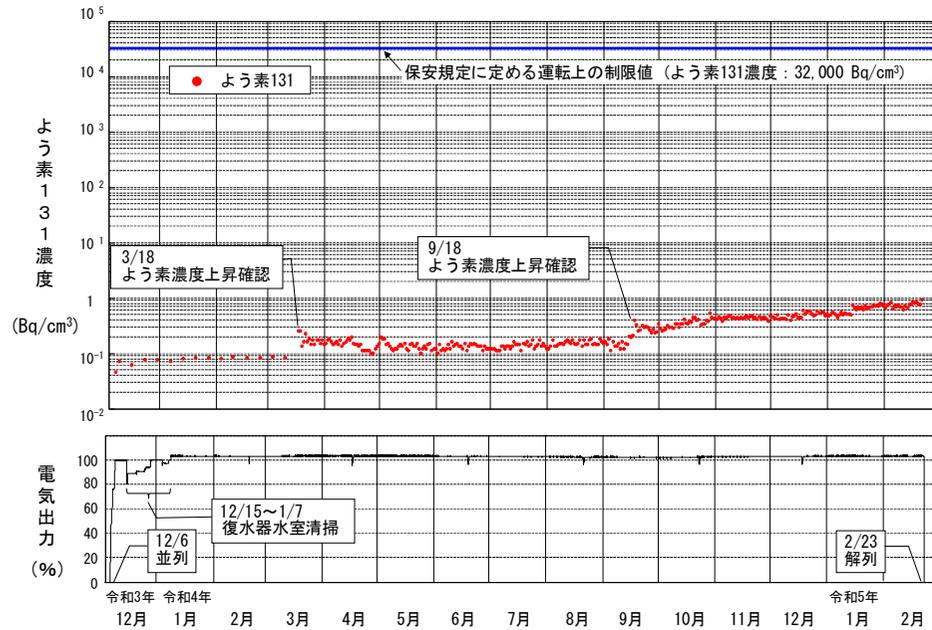
- 今回の漏えい燃料 2 体は従来 A 型燃料であり、支持格子の燃料棒保持力が低下する高燃焼度域において、炉心最外周で使用したことや従来 A 型燃料とは圧損や構造の異なる燃料と隣接するなどの条件が重畳したことで、燃料棒と支持板およびばね板の接触が一部離れ、1 次冷却材の流れにより燃料棒の微小な振動が発生し、燃料被覆管の摩耗によって微小孔（ピンホール）が生じたものであると推定した。
- また、従来 A 型燃料に対する運用上の対策は、漏えい発生の可能性を低減させることを目的に過去の漏えい事例の知見を踏まえて策定したものであり、不確実性があることから、漏えい発生を防ぐことはできなかった。

○対策

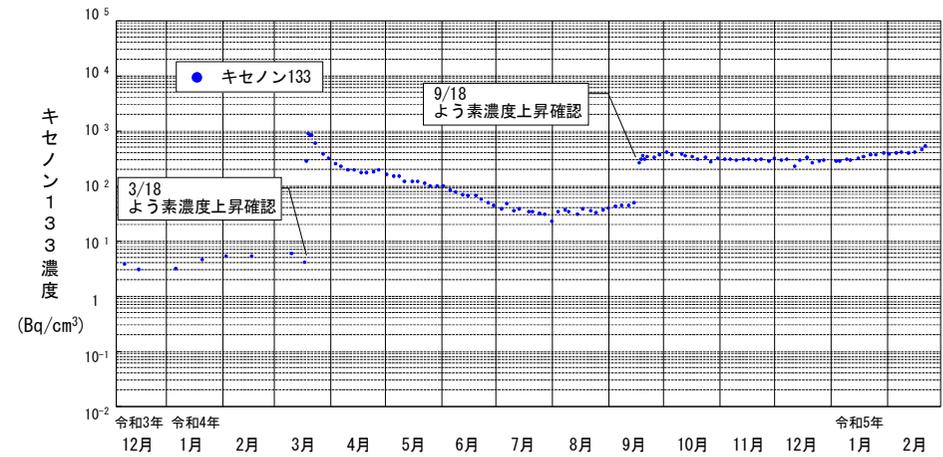
- 現在当社が保有する再使用可能な従来 A 型燃料（40 体）については、更なる対策を講じて使用することも考えられるが、従来 A 型燃料の漏えいが再度発生したこと、また合計 3 体の漏えいが発生したことを踏まえ、伊方発電所 3 号機での漏えい発生を可能な限り低減させるため、今後、使用しないこととする。
- また、当社は、従来 A 型燃料の漏えい対策として設計を改良した改良 A 型燃料を既に採用しており、引き続き、改良 A 型燃料を使用する。
- なお、漏えい燃料の保管中に使用済燃料ピット水へ漏れ出る放射性物質はごくわずかと考えられ、また、使用済燃料ピット水を適宜浄化するとともに定期的に放射能を測定しており、適切に管理できることから、漏えい燃料 2 体は、他の使用済燃料と同様に、再処理施設へ搬出されるまでの間、使用済燃料ピットに保管する。

以降は参考資料

(参考資料1) 運転中のよう素131濃度およびキセノン133濃度

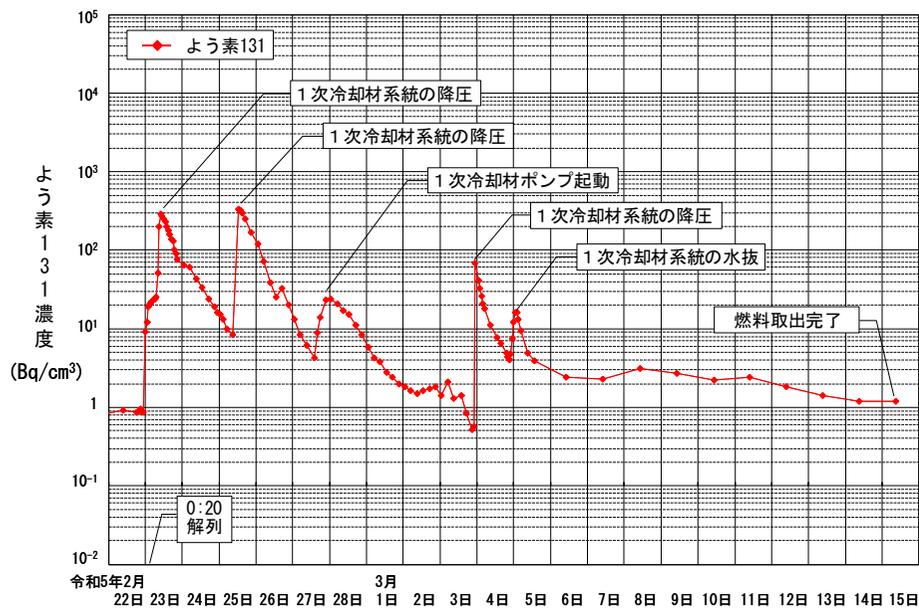


運転中のよう素131濃度

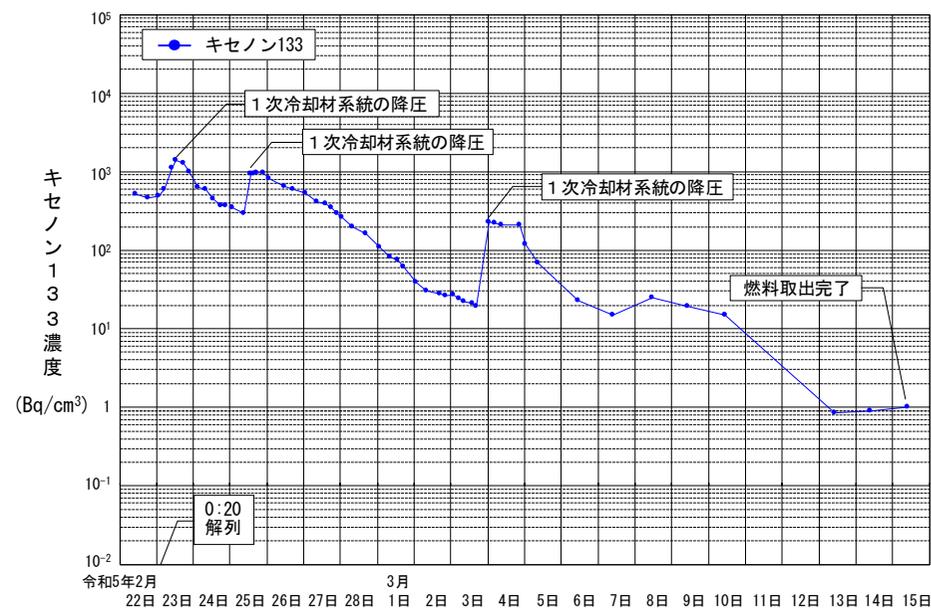


運転中のキセノン133濃度

(参考資料2) 停止操作中のよう素131濃度およびキセノン133濃度



停止操作中のよう素131濃度



停止操作中のキセノン133濃度

(参考資料3)伊方発電所からの放射性物質の放出実績と線量評価結果(1/2)

- 本事象以降に伊方発電所3号機から放出された放射性物質の放出量は、保安規定に定める年間の放出管理目標値に対し、よう素は1/1,000以下、希ガスは1/2,000以下である。液体トリチウムは、放出管理の基準値に対し、1/2程度である。

【放出実績】

放射性物質の種類	本事象発生以降の放出量※1	年間の放出管理目標値※2	至近5年実績 (平成29～令和3年度)
よう素	$4.6 \times 10^6 \text{Bq}$	$7.7 \times 10^9 \text{Bq}$	検出限界値未満
希ガス	$1.5 \times 10^{11} \text{Bq}$	$3.7 \times 10^{14} \text{Bq}$	検出限界値未満 ～ $2.0 \times 10^8 \text{Bq}$
液体(トリチウムを除く)	検出限界値未満	$3.8 \times 10^{10} \text{Bq}$	検出限界値未満
液体(トリチウム)	$2.9 \times 10^{13} \text{Bq}$	$5.7 \times 10^{13} \text{Bq}$	$4.4 \times 10^{12} \sim 4.0 \times 10^{13} \text{Bq}$

※1 本事象発生以降に伊方発電所3号機から放出された放出量(通常運転中の放出量を含む。)

よう素：令和5年4月4日9時30分現在
 希ガス：令和5年4月4日9時現在
 液体(トリチウムを除く)：令和5年4月4日9時現在
 液体(トリチウム)：令和5年2月28日現在

※2 よう素、希ガスおよび液体(トリチウムを除く)は、放出管理目標値、液体(トリチウム)は、放出管理の基準値を示す。これらは伊方発電所から放出する放射性物質の年間の管理目標値または基準値で、周辺環境に影響を及ぼさないことが国の安全審査において確認されている。

(参考資料4)伊方発電所からの放射性物質の放出実績と線量評価結果(2/2)

- 敷地境界で一般公衆へ与える線量は、国の指針に定める線量目標値（50μSv/年）より十分小さい安全協定に定める年間の努力目標値（7μSv/年）の1/200以下であり、令和3年度実績と同程度であるため、周辺的环境や公衆への影響はない。

【線量評価結果（放出実績から算出した敷地境界での線量）】

放射性物質の種類	本事象発生以降の放出量からの評価線量※3	国の指針に定める線量目標値※4	安全協定に定める努力目標値※5	令和3年度の放出量からの評価線量
よう素	$2.3 \times 10^{-4} \mu\text{Sv}$	50μSv/年	7μSv/年	0μSv
希ガス	$1.6 \times 10^{-3} \mu\text{Sv}$			0μSv
液体	$2.5 \times 10^{-2} \mu\text{Sv}$			$1.8 \times 10^{-2} \mu\text{Sv}$
合計	$2.6 \times 10^{-2} \mu\text{Sv}$			$1.8 \times 10^{-2} \mu\text{Sv}$

※3 よう素および希ガスは、年間の標準気象を用いての参考評価。

液体は、3号放水口での当該期間の希釈水量を年間の希釈水量として参考評価。

※4 発電用軽水炉型原子炉施設周辺の線量目標値に関する指針（旧原子力安全委員会）に示される線量目標値。

原子力発電所では、この線量目標値を達成するための年間の放射性物質の放出量を「放出管理目標値」として発電所毎に定め、この値を超えないように管理しているほか、放射性物質の放出を合理的に達成可能な限り低く抑えるようにしている。

※5 安全協定において定められた伊方発電所の敷地境界での線量の努力目標値。

(参考資料5) シッピング検査の概要

【シッピング検査】

燃料検査ピットに設置されている検査容器（シッピングキャン）内に燃料集合体を1体ずつ入れ、容器内に窒素ガスを送り込み、循環させてガス中の放射能濃度を測定するとともに、容器内の水の放射能濃度を測定して、燃料集合体の漏えいの有無を判定する検査。

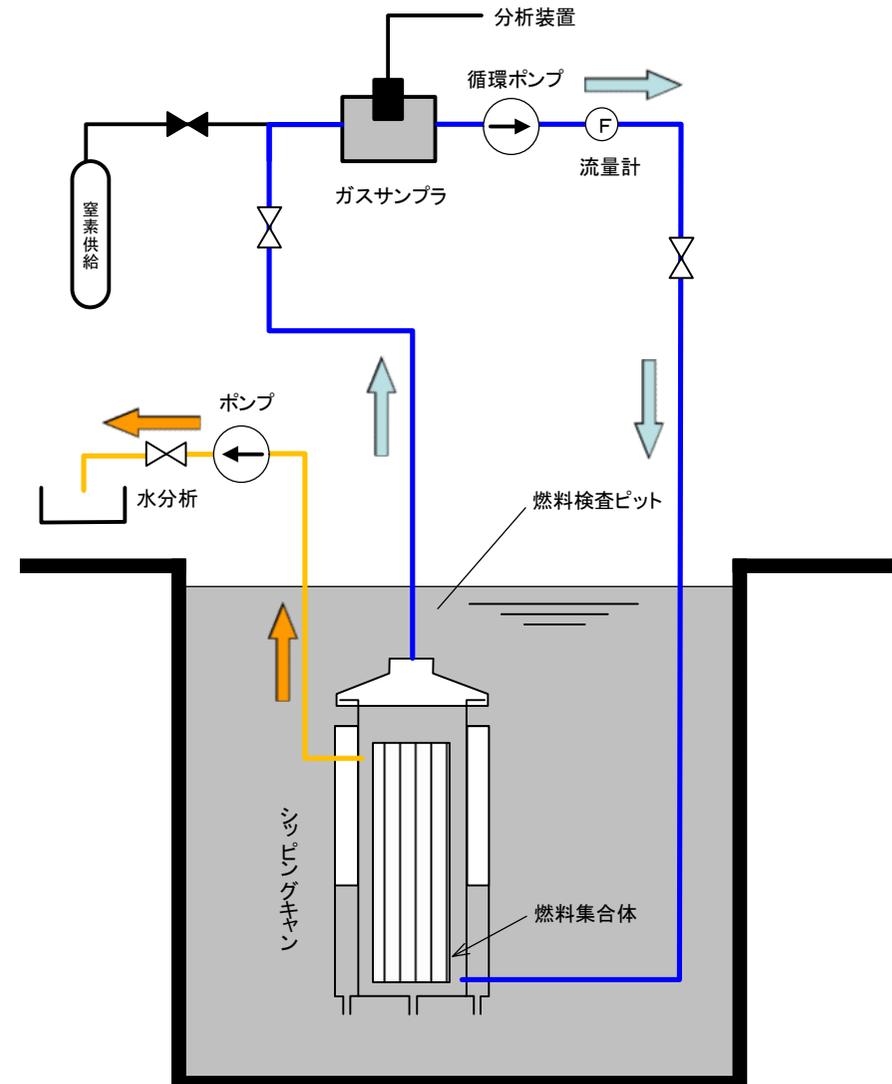
■ ガス分析検査

窒素ガスをシッピングキャン下部から流入、循環させ、分析装置により放射能濃度（キセノン133※）を測定し、漏えいを判定する。

■ 水分析検査

ガス分析検査終了後のシッピングキャン内の水を採取し、放射能濃度（よう素131、セシウム134およびセシウム137※）を測定し、漏えいを判定する。

※ 燃料の核分裂で発生する放射性物質



【 シッピング検査装置による燃料検査イメージ図 】

(参考資料6)シッピング検査結果

【シッピング検査結果※1】

(ガス分析)

c p m比	キセノンピーク比	判定	結果
2以下	—	漏えいなし	157体
2を超え3以下	1.5以下		
3を超える	1.5を超える	漏えい	0体
	—		

c p m比 : 測定中のガスに含まれるキセノン133の放射線計数率の上昇度合いを表す。測定は16分間行い、最初の4分間と最後の4分間の計数値の比により算出する。

キセノンピーク比 : 測定中のガスに含まれるキセノン133の放射線が顕著に測定されたかの度合いを表す。キセノン133の放射線エネルギーを中心にピークの放射線計数値(ピーク面積)と、その他核種による放射線計数値(バックグラウンド面積)の比により算出する。

(水分分析※2)

判定条件	判定	よう素131	セシウム134	セシウム137
$A_n / \bar{A} < 2$	漏えいなし	155体	155体	155体
$2 \leq A_n / \bar{A} < 5$	漏えいの疑い	0体	0体	0体
$5 \leq A_n / \bar{A}$	漏えい	2体	2体	2体

A_n : 燃料集合体nのよう素131、セシウム134およびセシウム137の個々のカウント数

\bar{A} : A_n の平均値に A_n の検出限界の平均値を加えたもの(ただし A_n のきわだって大きなものを除く)

【「漏えい」と判定された燃料集合体の分析結果】

項目		「漏えい」と判定された燃料	
		MS3M32	MS3M34
ガス分析	c p m比	2.6	1.5
	キセノンピーク比	0.19	0.05
水分分析	よう素131評価値 (A_n / \bar{A})	38.20	13.54
	セシウム134評価値 (A_n / \bar{A})	448.22	318.39
	セシウム137評価値 (A_n / \bar{A})	453.34	339.61



※1 ガス分析または水分分析のどちらかで漏えいと判定された燃料は「漏えい」と判定する。

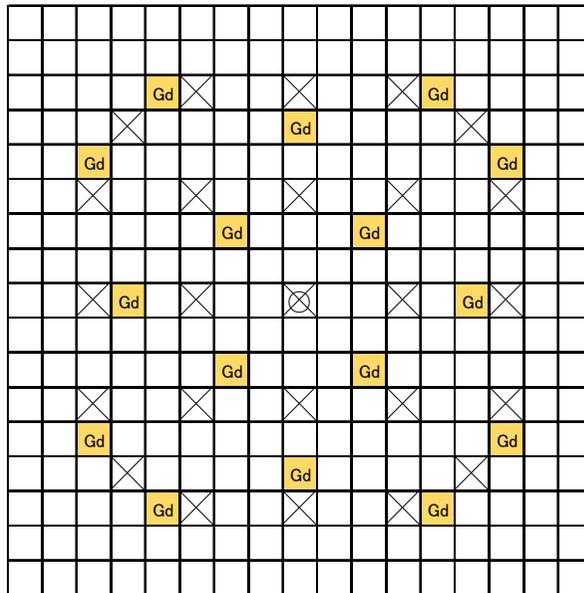
※2 ガス分析が終了した後に検査容器内の水を採取し、水分分析を実施する。

(参考資料7)漏えい燃料の概要

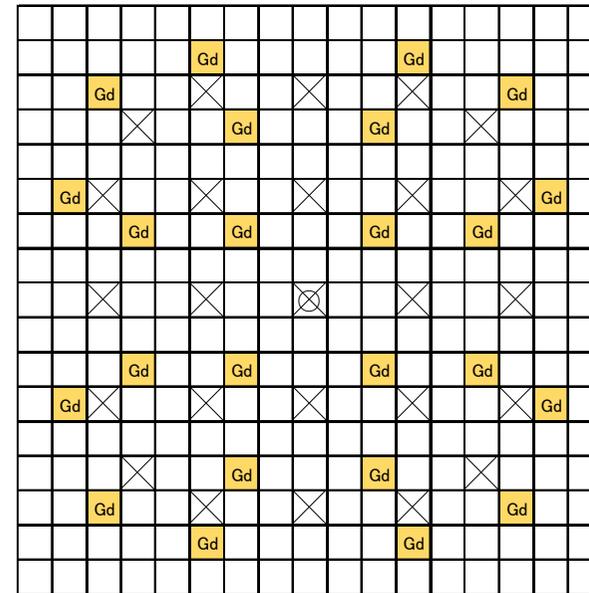
よう素濃度等上昇年月日	令和4年3月	令和4年3月	(過去事例) 平成21年11月
燃料集合体番号	MS3M32	MS3M34	MS3L24
燃料タイプ	17×17A型ステップ2 高燃焼度燃料(従来A型燃料)		同左
全長	約4m		同左
全幅	約21cm×約21cm		同左
支持格子数	9個		同左
初期濃縮度	4.8wt%		同左
ガドリニア濃度	6wt%		10wt%
燃料棒	約3.6m		同左
燃料 被覆管	材質	ジルコニウム基合金	同左
	外径	約9.5mm	同左
	肉厚	約0.6mm	同左
製造時期	平成17年5年		平成16年5月
装荷時期	平成19年10月～平成23年5月、 令和3年9月～令和5年3月 (第11～13、16サイクル)		平成17年3月 ～平成22年1月 (第9～12サイクル)
燃焼度 (よう素濃度等上昇時点の燃焼度)	約54.4 GWd/t (約49.2 GWd/t※)	約54.1 GWd/t (約49.0 GWd/t※)	約54.3 GWd/t (約53.6 GWd/t)

※令和4年3月18日時点での燃焼度

(参考資料8) ガドリニア入り燃料集合体の燃料棒配置図



ガドリニア濃度6wt%
(MS3M32、MS3M34)



ガドリニア濃度10wt%
(MS3L24)

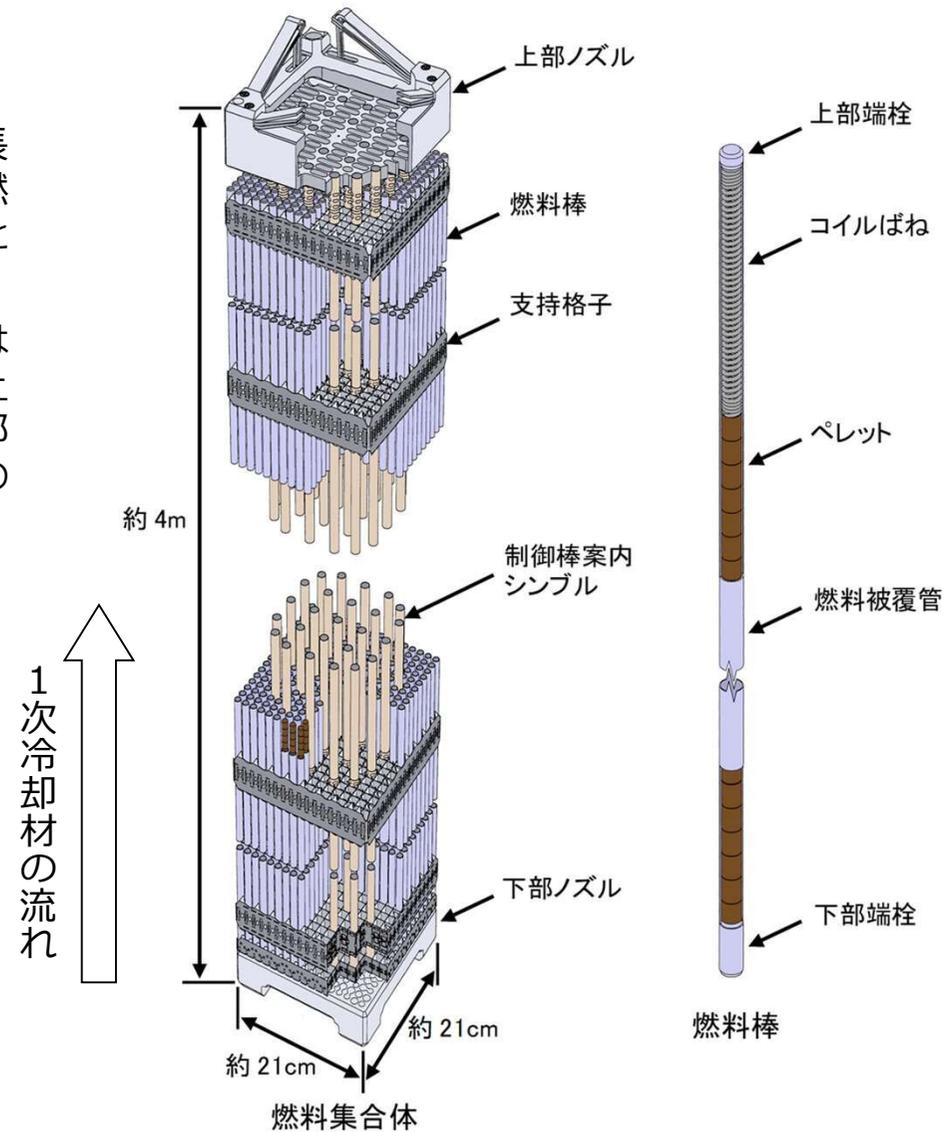
- | | | | |
|---|--------------|---|-------------|
|  | 燃料棒 |  | 炉内計装用案内シンブル |
|  | 燃料棒(ガドリニア入り) |  | 制御棒案内シンブル |

(参考資料9) 燃料概要図

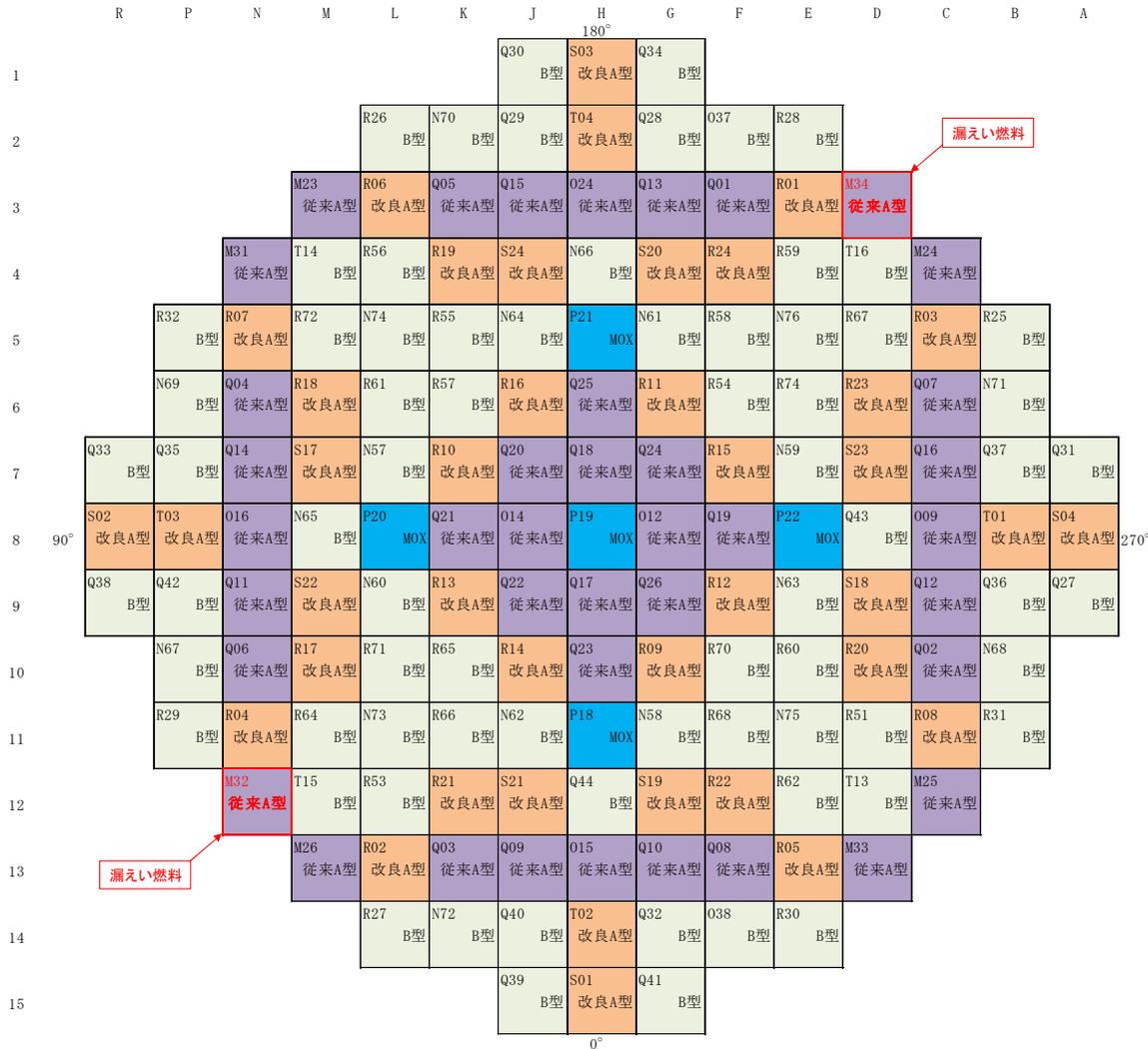
【燃料集合体】

ウラン酸化物をペレット状に焼き固め、約4mの長さのジルコニウム基合金の燃料被覆管に封入した燃料棒を、原子炉への装荷および取出しに際し一体となって取り扱えるように束ねたもの。

伊方発電所3号機で使用する燃料集合体は264本の燃料棒を四角の格子状に束ねており、上下に1次冷却材が通る穴のあいた上部ノズル、下部ノズルを、中間には燃料棒の間隔を保持するための支持格子を取り付けた構造になっている。



(参考資料10) 第16サイクル 炉心装荷位置図



上段：燃料集合体番号
中段：燃料タイプ

従来A型：A型ステップ2高燃焼度燃料（従来A型燃料）
 改良A型：A型ステップ2高燃焼度燃料（改良A型燃料）
 B型：B型ステップ2高燃焼度燃料
 MOX：ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料



(参考資料11)燃料漏えいに係る要因分析図(1/2)

事象	要因	因子	調査内容	調査方法・結果	評価	
燃料漏えい	設計	バブルジェット	炉内構造	設計資料等の調査	・漏えい燃料は第16サイクルでバブル板に接する位置(N-12,D-3)に装荷されていたが、伊方発電所3号機は建設当初からアップフロー化されているため、問題ない。	×
		グリッド フレットイング (従来A型を除く)	燃料構造	設計資料等の調査	・流水試験により特異な支持格子の振動が生じないことを確認しており、問題ない。 ・燃料棒を保持する支持格子ばね力を安全側に設定して評価しても、燃料被覆管の摩耗量は0.05mm以下と、被覆管肉厚(0.57mm)の10%以下より小さいことを確認しており、問題ない。 ・改良A型燃料は従来A型燃料に係る知見を踏まえて設計改良しており、問題ない。 (従来A型燃料については、「従来A型燃料に係る知見調査」参照。)	×
			異物	設計資料等の調査	・異物流入阻止性能の高い異物フィルタおよびスカート付き下部ノズルを採用しており、設計上の考慮がなされていることを確認した。	×
		クリーブコラプス	過大応力	設計資料等の調査	・燃料棒は製造時にHeで適切に加圧する設計となっており、また焼きしまりの少ないペレットを採用しているため、問題ない。	×
		ペレット・被覆管の相互作用	過大応力	応力評価	・漏えい燃料の被覆管応力評価は最大58N/mm ² であり、被覆管耐力(447 N/mm ²)に対して十分余裕があることから、問題ない。	×
	製造	燃料被覆管の水素脆化	Ni付着	製造履歴調査	・燃料棒挿入時に支持格子表面の成分(Ni)が付着しない組立て方法を採用しているため、問題ない。	×
			ペレット水分	製造履歴調査	・製造時記録および工場立会検査報告書等により、製造時に異常のないことを確認した。	×
		製造時の欠陥		製造履歴調査	・製造時記録および工場立会検査報告書等により、製造時に異常のないことを確認した。	×
				材質調査	・材料証明書により、規定の材料が使用されていることを確認した。	×
	取扱	取扱不良	過大応力	取扱状況調査	・新燃料受入検査記録により、外観等に異常のないことを確認した。 ・新燃料装荷前検査記録、燃料集合体外観検査記録および取扱時の荷重記録に異常は認められなかった。	×
	運転	炉心特性の異常	出力履歴	運転履歴調査	・第11, 12, 13, 16サイクルの運転パラメータに異常は認められなかった。 (熱流速熱水路係数、核的エンタルピ上昇熱水路係数)	×
		燃料被覆管の腐食	環境応力	運転履歴調査	・第11, 12, 13, 16サイクルの1次冷却材水質に異常は認められなかった。	×

※次項へ

【評価】○：可能性あり △：可能性を否定できない ×：可能性なし

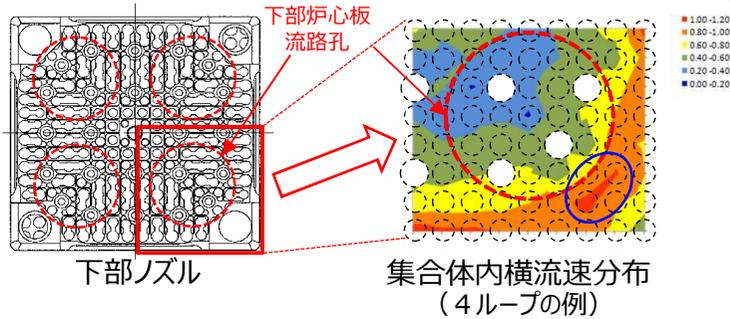
(参考資料11) 燃料漏えいに係る要因分析図(2/2)

事象	要因	因子	調査内容	調査方法・結果	評価
	※前項より その他		外観調査	・ファイバースコープ調査において、第1支持格子内の支持板やばね板と燃料棒の間に隙間や入り込みが認められたことから、第1支持格子内の支持板やばね板と燃料棒の間に燃料棒の微小な振動による燃料被覆管の摩耗が発生する可能性が考えられる。	△
			従来A型燃料に係る知見調査	<p>「高燃焼度17行17列型燃料集合体を使用するに当たっての評価結果の国への報告について」（原燃発第10-147号 平成22年6月11日 四国電力）から得た知見は以下の通り。</p> <ul style="list-style-type: none"> 過去に他プラントで連続して発生した第1支持格子における燃料棒の微小な振動に伴う燃料被覆管の摩耗による漏えいは、下記4つの要因の重畳により燃料棒の振動が大きくなり、燃料被覆管の摩耗が進展して微小孔が生じたものと推定されている。 <ol style="list-style-type: none"> 燃料集合体下部構造により、燃料集合体の第1支持格子内のコーナー部（16箇所）において、1次冷却材の流れが大きくなる 圧損や構造の異なる燃料との隣接により、燃料集合体下部での1次冷却材の流れが大きくなる 炉心中央領域の1次冷却材の流れが大きい位置への装荷 燃焼が進むことにより第1支持格子内の支持板やばね板と燃料棒の接触が一部離れる事象が発生しやすくなること、および燃料被覆管の摩耗がある程度進行する可能性があること なお、ガドリニア入り燃料棒については、第1支持格子内の支持板やばね板と燃料棒の接触が一部離れる事象が発生に加え、ウラン燃料棒と比較して外径減少が大きいことにより、第2支持格子等で僅かに隙間が発生することで燃料棒の振動が大きくなる可能性があること 伊方発電所3号機を含む3ループプラントにおいては、(1)、(2)、(4)の要因は4ループプラントと共通しているものの、(3)に対応する1次冷却材の流れが4ループプラントに比べて小さいため、同様のメカニズムで漏えいが発生する可能性は低いと評価している。 	△
			共通要因調査	<ul style="list-style-type: none"> ガドリニア入り燃料集合体で漏えいが発生したことが共通しているが、 <ul style="list-style-type: none"> ガドリニア入り燃料棒とウラン燃料棒双方に漏えいが発生している 過去に他プラントでは、ウラン燃料集合体でも今回の漏えいと同様に燃料集合体の外周に近いコーナー部で漏えいが発生しており、ガドリニア入り燃料集合体特有の事象ではないことから、漏えいにつながる共通要因となる可能性は低いと考えられる。 漏えいが高燃焼度域（4サイクル使用）の時点で発生していることが共通している。 4サイクル目で炉心最外周に装荷されていたことが共通している。 B型燃料1体と隣接していることが共通している。 	×
					△
					△
					△

【評価】○：可能性あり △：可能性を否定できない ×：可能性なし

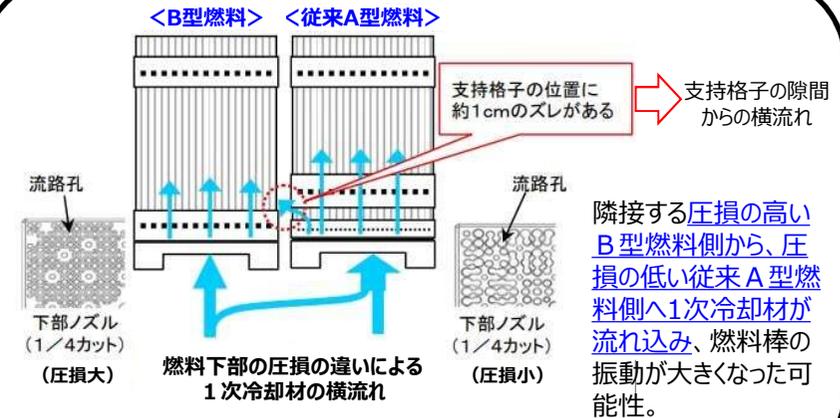
(参考資料12) 従来A型燃料に係る知見

① 集合体内流動要因

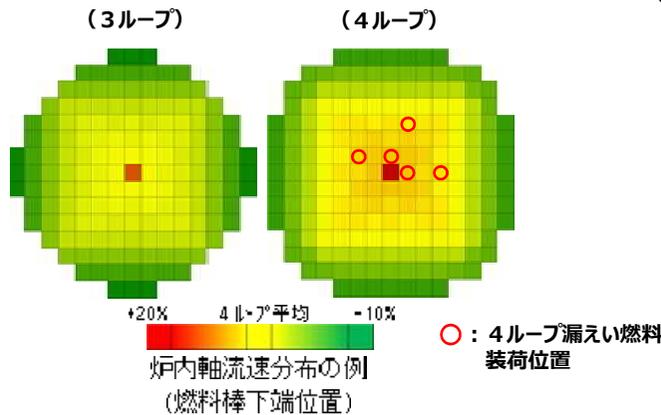


下部炉心板流路孔周縁部の集合体外側付近
(青丸付近)で横流れが強い傾向があり、
これにより燃料棒の振動が大きくなった可能性。

② 隣接燃料による流動要因

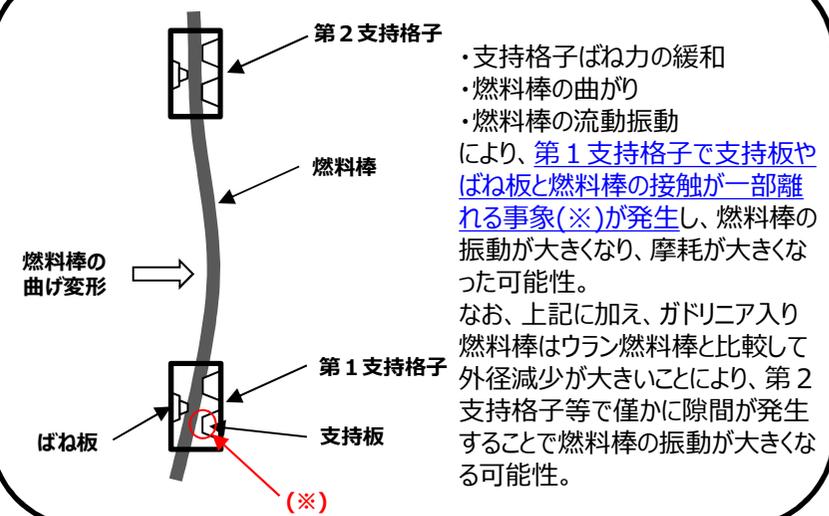


③ 炉内流動要因



炉中央領域の流速が大きい位置に装荷されたことにより、燃料棒の振
動が大きくなった可能性。
(3ループ炉心は4ループ炉心より、平均流速が約10%遅い)

④ 構造、照射要因



(参考資料13) 製造履歴、取扱履歴調査結果

【製造履歴調査結果】

構成部品	調査項目	調査結果※1
燃料棒	溶接部の健全性、ヘリウム加圧力、表面汚染、外観、寸法、内部構造	異常なし
ペレット	濃縮度、化学成分、外観、寸法、密度	異常なし
燃料被覆管	化学成分、欠陥、金相、機械的性質、耐食性、外観、寸法、熱処理条件	異常なし
コイルばね	化学成分、機械的性質、外観、寸法	異常なし
端栓	化学成分、機械的性質、耐食性、外観、寸法	異常なし
上部ノズル	化学成分、機械的性質、外観、寸法	異常なし
下部ノズル	化学成分、機械的性質、外観、寸法	異常なし
支持格子	化学成分、機械的性質、外観、寸法	異常なし
異物フィルタ	化学成分、機械的性質、外観、寸法	異常なし
燃料集合体	外観、寸法、燃料棒配列	異常なし

※1 製造時記録等により確認。

【取扱履歴調査結果】

3号機定期検査等		取扱年月	調査結果※2
新燃料受入れ		平成17年 8月	異常なし
第10回定期検査	装荷	平成19年10月	異常なし
第11回定期検査	取出	平成20年 9月	異常なし
	装荷	平成20年10月	異常なし
第12回定期検査	取出	平成22年 1月	異常なし
	装荷	平成22年 2月	異常なし
第13回定期検査	取出	平成23年 5月	異常なし
第15回定期検査	装荷	令和 3年 9月	異常なし

※2 新燃料受入検査記録、新燃料装荷前検査記録、燃料集合体外観検査記録、および燃料装荷・取出時の荷重記録により確認。

(参考資料14) 運転履歴調査結果

【運転履歴調査結果】

(1) 出力履歴

項目	制限値※1	第11サイクル	第12サイクル	第13サイクル	第16サイクル
熱流束熱水路係数※2※3	≤2.32	1.924	1.962	1.992	1.905
核的インパル ^o 上昇熱水路係数※2※4	≤1.64	1.550	1.553	1.591	1.572

※1 保安規定に定める運転上の制限値。

※2 100%出力運転中の最大値を記載。

※3 原子炉内の最大となるペレットの出力と平均的なペレットの出力の比。原子炉内の局所的な出力の歪みを示すパラメータ。

※4 原子炉内の最大となる燃料棒の出力と平均的な燃料棒の出力の比。原子炉内の水平方向の出力の歪みを示すパラメータ。

(2) 1次冷却材水質履歴

項目	基準値※5	第11サイクル	第12サイクル	第13サイクル	第16サイクル
電気伝導率	1~40 μ S/cm (温度25 $^{\circ}$ C)	19~29	9~30	14~30	10~29
pH	4~11 (温度25 $^{\circ}$ C)	6.3~7.5	6.1~7.7	6.0~7.6	6.0~7.9
塩素イオン	≤0.15ppm	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
溶存酸素	≤0.1ppm	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
溶存水素	15~50 cm ³ -STP/kg \cdot H ₂ O	25~26	25~27	25~27	25~30

※5 保安規定に定める基準値。

(参考資料15)超音波調査概要(1/2)

- 超音波調査は、漏えいが認められた燃料集合体に対し、使用済燃料ピットの使用済燃料ラック上に設置する装置を用いて、漏えい燃料棒内に浸入した冷却水の存在を超音波パルスの減衰により検知し、漏えい燃料棒を特定する調査である（図1）。

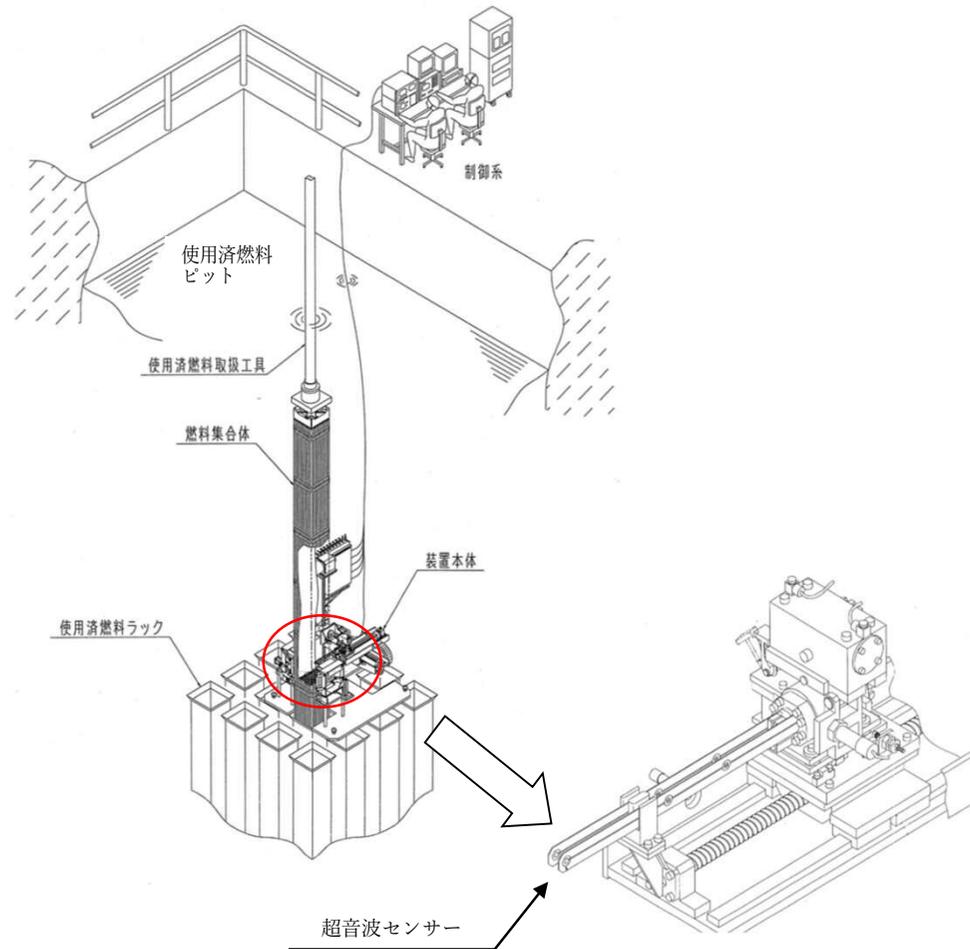


図1 超音波測定装置概要図

(参考資料15)超音波調査概要(2/2)

- 当該装置は、マニピュレータにより超音波プローブを燃料棒の間げきに挿入し、プローブ発信子から超音波を発信する（図2）。
- 発信された超音波は、水および燃料被覆管を伝搬した後、超音波プローブの受信子で受信される。
- 超音波は燃料棒内の水によって吸収され減衰するため、測定された超音波受信強度を健全燃料棒と比較評価することで、燃料棒への浸水の有無を判定し、漏えい燃料棒を検出する（図3）。

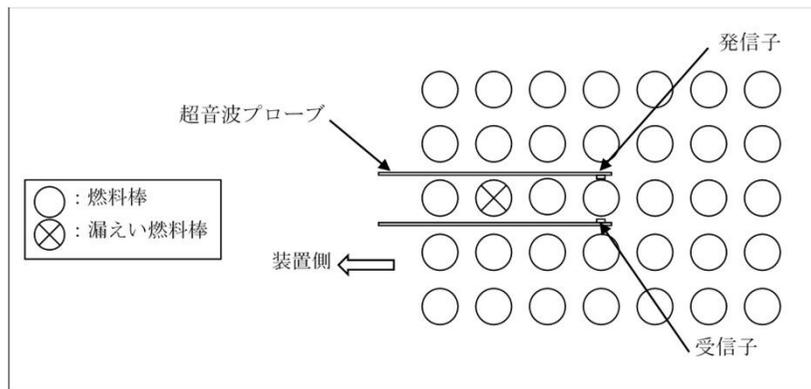


図2 超音波プローブ挿入状況

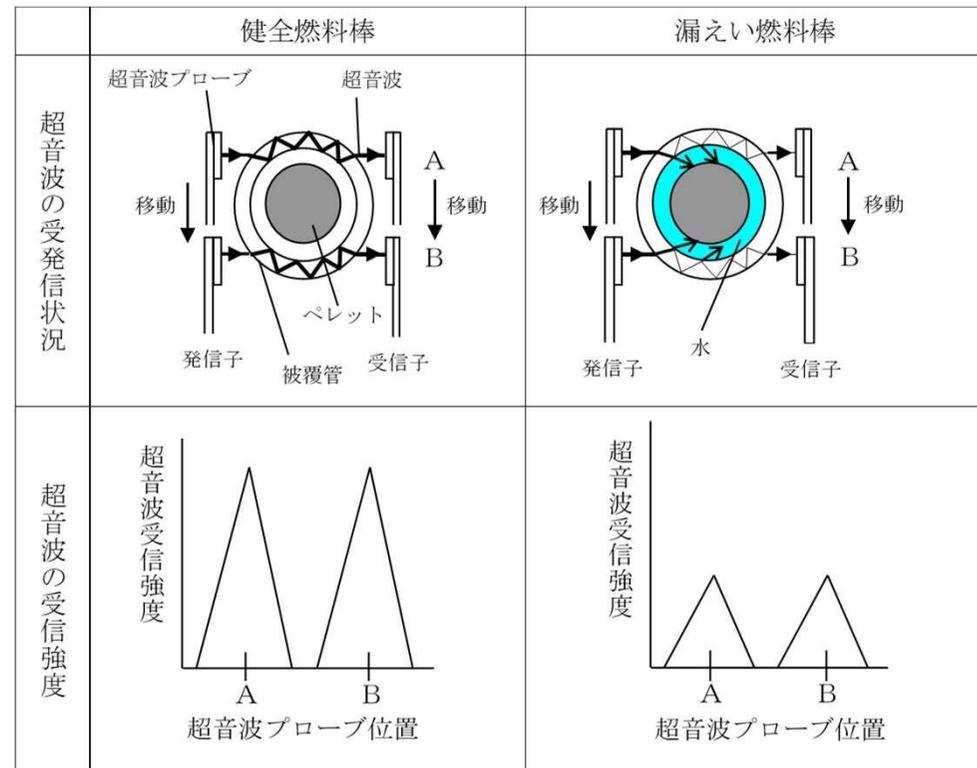


図3 超音波による検出原理説明

(参考資料16)ファイバースコープ調査概要

- ファイバースコープ調査は、超音波調査にて特定された漏えい燃料棒等について、ファイバースコープを用いて燃料棒表面および支持格子部を観察するものである（図1）。

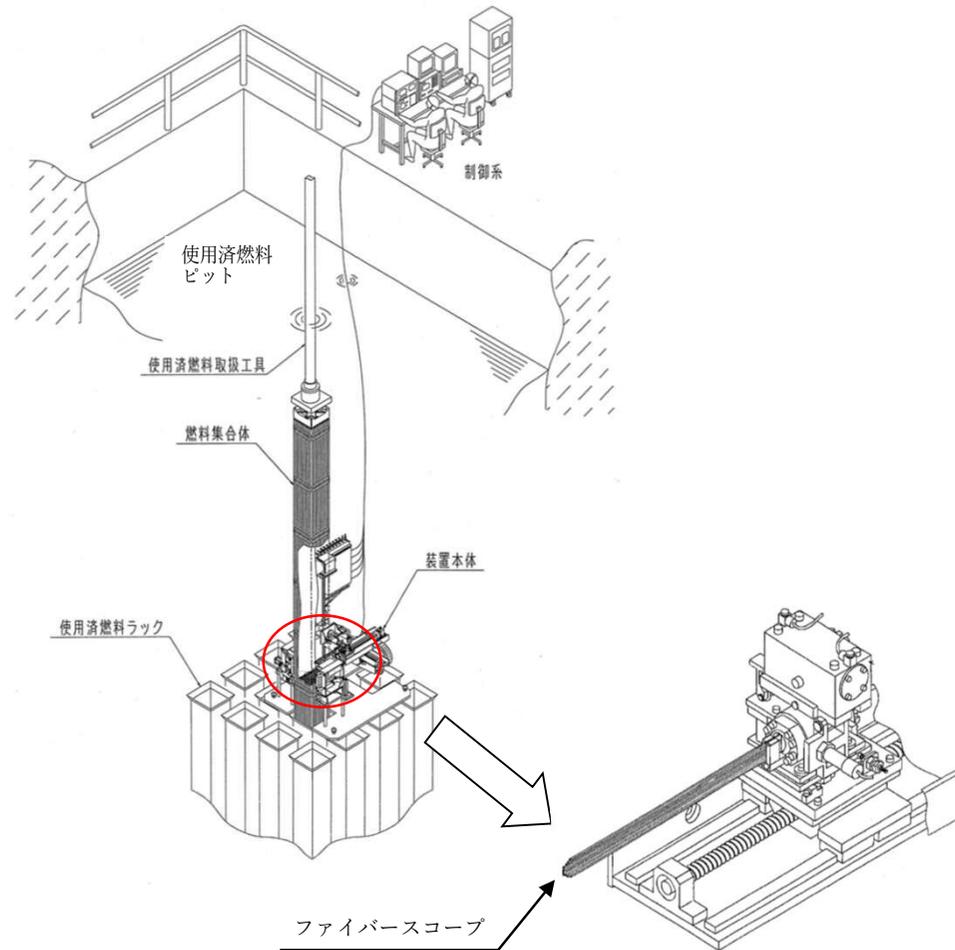


図1 ファイバースコープ装置概要図

(参考資料17)従来A型燃料に対する運用上の対策(1/2)

【炉心配置上の配慮】

1 次冷却材の流れによる燃料棒の振動への影響をできるだけ低減するなどの観点から、下記を実施している。

- ✓ ガドリニア入り燃料棒については、第1支持格子内での隙間発生に加え、ウラン燃料棒と比較して外径減少が大きいことにより、第2支持格子等で僅かに隙間が発生することで燃料棒の振動が大きくなる可能性があることから、燃焼の進んだ（最終サイクル）ガドリニア入り燃料集合体（10%）は、念のため、Lコーナー位置に装荷しない※1（図1）
- ✓ 1次冷却材の流れによる燃料棒の振動が大きくなるよう、1次冷却材の流れの大きな炉心中央位置に装荷しない（図2）
- ✓ 圧損や構造の異なる燃料と隣接して装荷する場合は、燃料集合体下部における1次冷却材の流れが大きくなるよう、3面以上の隣接やL字隣接等、隣接面数が多くなる位置には装荷しない（図3）

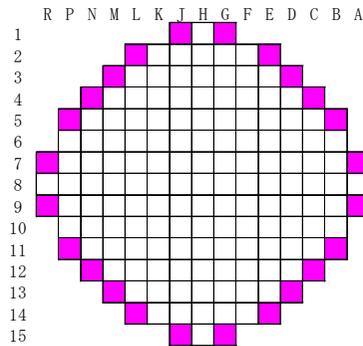


図1 Lコーナー位置

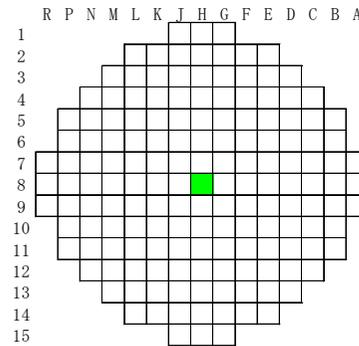
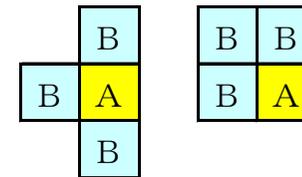


図2 炉心中央位置

【3面隣接】 【L字隣接】



A : 従来A型燃料
B : B型燃料（圧損や構造の異なる燃料）

図3 避けることが好ましい隣接条件の例

※1 「高燃焼度17行17列型燃料集合体を使用するに当たっての評価結果の国への報告について」（原燃発第10-147号 平成22年6月11日 四国電力）に基づく。

(参考資料17)従来A型燃料に対する運用上の対策(2/2)

【原子炉への装荷前のファイバースコープによる第1支持格子内隙間確認】

- 次サイクルで使用する予定があり、かつ2サイクル以上装荷された従来A型燃料について、原子炉への装荷前に、ファイバースコープにて第1支持格子内の燃料棒の支持部と燃料棒の間に隙間等がないことを抜き取り確認している※1。
- なお、第16サイクル燃料装荷前(3号機第15回定期検査)においては、使用する予定のあった62体の中から10体が抜き取り確認対象となっていたが、今回の漏えい燃料2体は確認対象とはなっていなかった。

燃料装荷前の第1支持格子隙間等確認実施結果

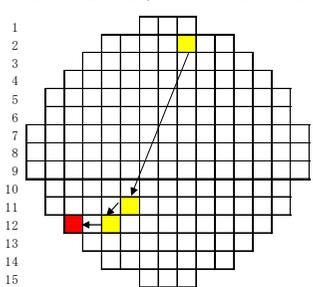
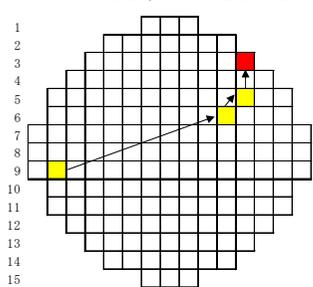
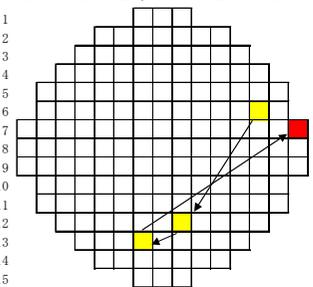
3号機	対象体数	抜き取り体数※2	結果
第13回定期検査	66体	11体	良
第14回定期検査	60体	10体	良
第15回定期検査	62体	10体	良

※1 「高燃焼度17行17列型燃料集合体の使用に当たっての確認について(指示)」(平成22・02・03原院第3条第3号平成22年2月5日 原子力安全・保安院)に基づく

※2 抜き取り確認の対象燃料は、燃料被覆管の摩耗の進展に影響を及ぼす可能性のある「燃焼度」、「装荷回数」および「装荷位置」を考慮して選定している。具体的には、次サイクルで使用する予定のある燃料であって、かつ2サイクル以上装荷された燃料のうち、装荷回数が同じ、かつ炉内の装荷位置が対称であった燃料を1グループとし、それぞれのグループから最も燃焼が進んだ燃料を選定している。

(参考資料18) 共通要因調査

※令和4年3月18日時点での燃焼度

よう素濃度等上昇発生年月	令和4年3月	令和4年3月	平成21年11月	共通性評価		
燃料集合体番号	MS3M32	MS3M34	MS3L24			
漏えい燃料集合体	ガドリニア入り燃料集合体 (ガドリニア濃度 6wt%)	ガドリニア入り燃料集合体 (ガドリニア濃度 6wt%)	ガドリニア入り燃料集合体 (ガドリニア濃度10wt%)	△	ガドリニア濃度は異なるものの、ガドリニア入り燃料集合体で漏えいが発生している。	
漏えい燃料棒 (燃料被覆管)	ウラン燃料棒 (ジルコニウム基合金)	ウラン燃料棒 (ジルコニウム基合金)	ガドリニア入り燃料棒 (ジルコニウム基合金)	×	ガドリニア入り燃料棒とウラン燃料棒の双方で発生しており、共通性はない。	
製造履歴	問題なし	問題なし	問題なし	×	各々の構成部品毎に定められている判定基準を満足しており、異常は認められなかった。	
使用履歴	燃焼度 (よう素濃度等上昇時点の燃焼度)	約54.4 GWd/t (約49.2 GWd/t※)	約54.1 GWd/t (約49.0 GWd/t※)	約54.3 GWd/t (約53.6 GWd/t)	○	高燃焼度域で発生しており、いずれも4サイクル使用している。
	装荷位置	炉心最外周 (N-12) 	炉心最外周 (D-3) 	炉心最外周 (A-7) 	○	装荷位置は異なっているものの、炉心最外周に装荷されていたという共通性がある。 なお、今回の漏えい燃料2体については、使用されたサイクル（第11～13、16サイクル）において炉心の対称位置に装荷されており、使用履歴は同じである。
	圧損や構造の異なる燃料との隣接	B型燃料1体および改良A型燃料1体と隣接	B型燃料1体および改良A型燃料1体と隣接	B型燃料1体と隣接	○	いずれもB型燃料1体と隣接していた。なお、改良A型燃料は隣接する従来A型燃料に影響を及ぼさない設計となっている。