

原子力発第09229号
平成22年 2月 5日

愛媛県知事
加戸守行 殿

四国電力株式会社
取締役社長 千葉 昭

伊方発電所第3号機 燃料集合体からの放射性物質の漏えい
に係る報告書の提出について

平成21年11月19日に発生しました伊方発電所第3号機 燃料集合体からの放射性物質の漏えいにつきまして、その後の調査結果がまとまりましたので、安全協定第11条第2項に基づき、別添のとおり報告いたします。

今後とも伊方発電所の安全・安定運転に取り組んでまいりますので、ご指導賜りますようお願い申し上げます。

以 上

伊方発電所第3号機

燃料集合体からの放射性物質の漏えいについて

平成22年2月

四国電力株式会社

1. 件名

伊方発電所第3号機 燃料集合体からの放射性物質の漏えいについて

2. 事象発生の日時

平成21年11月19日16時50分頃（確認）

3. 事象発生の設備

原子炉本体 燃料集合体

4. 事象発生時の運転状況

通常運転中

5. 事象発生の状況

伊方発電所第3号機(定格電気出力890MW)は、通常運転中のところ、平成21年11月19日16時50分頃、定例の1次冷却材中の希ガス濃度*1の測定においてキセノン(Xe-133)濃度が通常値の約5倍に上昇しているのを確認したことから、1次冷却材中の放射能濃度に対する監視を強化し、運転を継続した。

運転継続中、1次冷却材中のキセノン濃度は緩やかな漸増傾向を示したが、よう素濃度は、保安規定に定める運転上の制限値($3.2 \times 10^4 \text{ Bq/cm}^3$)に比べて十分低い濃度(約 0.2 Bq/cm^3)で推移し、有意な変動は認められなかった。

その後、第12回定期検査のために停止操作中のところ、平成22年1月7日10時20分頃、1次冷却材中のよう素濃度およびキセノン濃度が通常よりも高いことが確認され、その後のよう素濃度の推移においても変動が認められた。

(添付資料-1)

本事象は、燃料集合体からの漏えいと推定されることから、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*2を実施し、漏えい燃料を特定するとともに、漏えい燃料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放射性物質が放出されたが、伊方発電所では平常時から適切に管理したうえで放出を行っており、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。

(添付資料-2)

*1 希ガス

燃料の核分裂反応で生成するキセノン(Xe)等の放射性のガス

*2 シッピング検査

使用済燃料ピットに設置されている検査容器内に燃料集合体を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(キセノン133)を測定するとともに、検査容器内の水を採取し、水中の放射能濃度(よう素131、セシウム134、137)を測定して、燃料集合体からの漏えいの有無を判定する。

6. 事象の時系列

平成21年

11月19日

16時50分

1次冷却材中のキセノン濃度が通常値の約5倍に上昇しているのを確認

1次冷却材中の放射能濃度に対する監視を強化し、運転を継続

平成22年

1月 6日

20時24分

負荷降下開始

1月 7日

0時20分

解列

2時40分

原子炉停止

10時20分

1次冷却材中のよう素濃度の有意な変動を確認

1月13日

9時 6分

燃料取出開始

1月15日

14時46分

燃料取出終了

1月17日

9時45分

シッピング検査開始

1月22日

12時00分

シッピング検査終了

燃料集合体1体(燃料番号:MS3L24)に漏えいを確認

7. 漏えい燃料に対する調査

(1) シッピング検査

燃料集合体からの漏えいが推定されたことから、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。この結果、燃料集合体1体（燃料番号：MS3L24）について、漏えいが認められた。また、第12サイクルで使用していた残り全ての燃料集合体（156体）については、漏えいのないことを確認した。

（添付資料－3）

なお、当該燃料は第9～12サイクルにかけて使用したA型ステップ2高燃焼度燃料である。

（添付資料－4）

(2) 外観検査

漏えいが認められた当該燃料について、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。

（添付資料－5）

8. 詳細調査

燃料集合体からの漏えいが発生した原因を究明するため、詳細調査を要因分析図に従い実施した。

（添付資料－6）

(1) 設計に係る過去の知見等の調査

バッフルジェット等の燃料漏えいに係る過去の知見の燃料設計面に対する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・取扱履歴等の調査

a. 製造履歴調査

漏えいが認められた当該燃料について、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判定基準を満足しているとともに、各パラメータのバラツキ等に特異な点はなかった。

なお、当該燃料と同時期に製造（第12領域*³）した他の燃料（25体）、その後製造した燃料（第13～第15領域、102体）についても、製造時データを確認した結果、異常は認められなかった。

*3 領域

同一時期に製造した燃料集合体の集まり

b. 取扱履歴調査

漏えいが認められた当該燃料について、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

漏えいが認められた当該燃料が装荷されていた第9～12サイクル運転中の出力履歴および1次冷却材水質履歴について確認した結果、異常は認められなかった。

(添付資料－7)

(3) 超音波、ファイバースコープによる調査

a. 漏えい燃料棒の特定

漏えいが認められた当該燃料について、燃料集合体内の全ての燃料棒(264本)に対し、超音波調査を実施した結果、漏えい燃料棒1本(燃料棒位置:C-15)を特定した。

(添付資料－8, 9)

b. 漏えい燃料棒に対するファイバースコープ調査

漏えいが認められた燃料棒の全長(支持格子内部含む)に亘り、ファイバースコープによる詳細調査を実施した結果、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等が認められた。なお、漏えい燃料棒のその他の部位に、隙間等の異常は認められなかった。

(添付資料－10)

c. 第1支持格子内の全燃料棒に対する調査

漏えい燃料棒(燃料棒位置:C-15)の第1支持格子内において隙間等が認められたことから、第1支持格子内全ての燃料棒についてファイバースコープにより調査した結果、隙間等の異常は認められなかった。

(添付資料－11)

9. 詳細調査結果を踏まえた検討

(1) 燃料漏えいの発生メカニズムについて

詳細調査結果において、当該燃料棒の第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等が認められたことから、第1支持格子内における燃料被覆管の摩耗により漏えいに至ったものと推定される。ここでは、その発生メカニズムについて検討した。

a. 第1支持格子内における浮き上がり等の発生について

燃料棒は支持板とばね板により寿命を通じて保持される設計となっているが、照射による支持格子のばね力低下に加え、燃料棒曲がりなど他の要因が重畳すると、燃料棒と支持板またはばね板の接触点の一部に浮き上がりが発生し、これを起点に摩耗が進展する可能性が考えられる。

このため、照射による燃料棒曲がりデータをもとに燃料棒曲がりにより発生する力を評価した結果、浮き上がりを発生させるだけの力は生じないことから、浮き上がりが発生する可能性は十分低いものと考えられる。

また、浮き上がりが発生した場合の摩耗の進展への影響を評価した結果、摩耗の進展は非常に緩やかで限定的であると考えられる。

(添付資料－12)

b. 燃料被覆管の摩耗に係る検討

燃料被覆管の摩耗に影響を及ぼす要因として、1次冷却材の流れによる振動が考えられることから、燃料集合体断面内での1次冷却材の流れについて調査した。

調査の結果、今回漏えいが発生した燃料棒位置付近で、横流れ強さが比較的大きいことを確認した。

(添付資料－13)

c. まとめ

以上の検討結果より、何らかの要因により、第1支持格子内において支持板またはばね板と燃料棒との間の一部に浮き上がりが発生した場合には、1次冷却材の横流れによる微小な振動により、燃料被覆管の摩耗が発生する可能性が考えられる。

(2) 他の燃料集合体に対する追加調査

漏えい燃料棒の第1支持格子内において隙間等が認められたことから、他の健全なA型ステップ2高燃焼度燃料に対し、ファイバースコープによる追加調査を実施した。

追加調査の対象燃料選定にあたっては、上記検討において摩耗の進展が影響していると考えられることから、摩耗の進展に影響を及ぼす可能性がある以下のパラメータを考慮した。

- ・照射によるばね力緩和（燃焼度）
- ・水力振動にさらされる時間（照射期間）
- ・装荷位置（炉心中央、周辺部での使用）

また、調査範囲は、1次冷却材の横流れが相対的に大きい第1支持格子内コーナー部の16本について実施した。

(添付資料－14)

a. 使用履歴等に係る追加調査

摩耗の進展に影響を及ぼす可能性のあるパラメータ（使用履歴等）に漏えいにつながるような要因の有無を調査するため、漏えい燃料と同一時期に製造（第12領域）されたA型ステップ2高燃焼度燃料の各グループから、最も燃焼が進んだ代表的な3体について追加調査を実施した。

①漏えい燃料と同様な使用履歴等をもつ燃料集合体8体のうち、漏えい燃料を除いた最高燃焼度の燃料集合体（MS3L21）

②漏えい燃料と燃焼度、照射期間が同程度であるが、使用履歴が異なる燃料集合体16体のうち、最高燃焼度の燃料集合体（MS3L01）

③同じ製造時期であるが、使用履歴等が異なる燃料集合体2体のうち、最高燃焼度の燃料集合体（MS3L26）

調査の結果、全ての燃料集合体において第1支持格子内の支持板またはばね板と燃料棒との間に隙間等の異常は認められなかった。

（添付資料－15）

b. 製造時期に係る追加調査

また、念のため、その後製造されたA型ステップ2高燃焼度燃料を対象に、製造時期毎に最も燃焼が進んだ代表的な3体について追加調査を実施した。

①第13領域から、最高燃焼度の燃料集合体（MS3M03）

②第14領域から、最高燃焼度の燃料集合体（MS3N21）

③第15領域から、最高燃焼度の燃料集合体（MS3O29）

調査の結果、全ての燃料集合体において第1支持格子内の支持板またはばね板と燃料棒との間に隙間等の異常は認められなかった。

（添付資料－15）

c. まとめ

以上から、漏えい燃料と追加調査したA型ステップ2高燃焼度燃料との間において、使用履歴等に漏えいにつながるような要因は認められなかった。また、製造時期についても同様に、漏えいにつながるような要因は認められなかった。

(3) 他プラントの漏えい燃料との比較

他プラントにおいて漏えいが発生したA型ステップ2高燃焼度燃料と今回の漏えい燃料との間において、製造履歴、使用履歴等に係る、漏えいにつながるような共通した要因の有無を調査した。

その結果、製造履歴においては、支持格子等の部材に共通ロットが使用されているが、いずれも判定基準を満足しているとともに、各パラメータのバラツキ等に特異な点はなかった。

また、使用履歴等においても、比較的高燃焼度域で漏えいが発生しているという点が共通しているものの、当社で実施した高燃焼度域の燃料集合体に対する追加調査で異常は認められなかったことから、高燃焼度に直接起因しているものとは考え難い。

以上より、同一設計燃料に係る他プラントの類似事象と今回の漏えい燃料の間に、漏えいにつながるような共通した要因は認められなかった。

(添付資料－16)

10. 推定原因

- 製造履歴において、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いるとともに、各パラメータのバラツキ等に特異な点はなかった
- 取扱および運転履歴に異常は認められなかった
- 漏えいが認められた燃料集合体に対するファイバースコープ調査を実施し、漏えいが認められた燃料棒以外に、隙間等は認められなかった
- 摩耗進展のメカニズムを検討した結果、現在得られている知見では摩耗が発生する可能性は十分低いことが確認された
- 他の燃料集合体に対する追加調査結果において、漏えいが認められた燃料集合体と同様の異常は認められず、使用履歴等においても漏えいにつながるような要因は認められなかった
- 同一設計燃料における他プラントの類似事象との間に漏えいにつながるような共通した要因は認められなかった

以上のとおり、燃料漏えいにつながるような要因は認められなかった。

このため、今回の燃料集合体からの放射性物質の漏えいは、燃料集合体の設計または製造に共通する要因によるものではなく、第1支持格子内における燃料棒と支持板またはばね板の接触面で、当該燃料固有の何らかの要因により燃料棒の微小な振動による燃料被覆管の摩耗が進展し、燃料棒に微小孔（ピンホール）が生じた事象であると推定される。

11. 対策

- 漏えいが認められた燃料集合体（燃料番号：MS3L24）は燃焼が進んだ燃料であり、再使用しない。

また、漏えいが認められた燃料集合体と同一時期に製造されたA型ステップ2高燃焼度燃料（第12領域）については、製造履歴等を調査した結果異常は認められなかったものの、念のため使用を見合わせる。

なお、当該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、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。

- 燃料からの漏えいの有無は1次冷却材中のよう素濃度を監視することによって検知することが可能であることから、今後とも、よう素濃度が原子炉施設保安規定に定める運転上の制限を十分下回っていることを、監視していくこととする。
万が一、今回と同様な事象が発生したとしても、その後の摩耗の進展は非常に緩やかで限定的であることから、保安規定に定める1次冷却材中のよう素濃度を監視することにより、運転上の制限値を逸脱することなく運転の継続が可能であり、プラントの安全性は確保できる。
- なお、他プラントにおいて漏えいが発生したA型ステップ2高燃焼度燃料に対して計画されている照射後試験（PIE）に当社も参画し、試験結果を踏まえて必要な対策を講じる等により、燃料の信頼性向上を図っていくこととする。

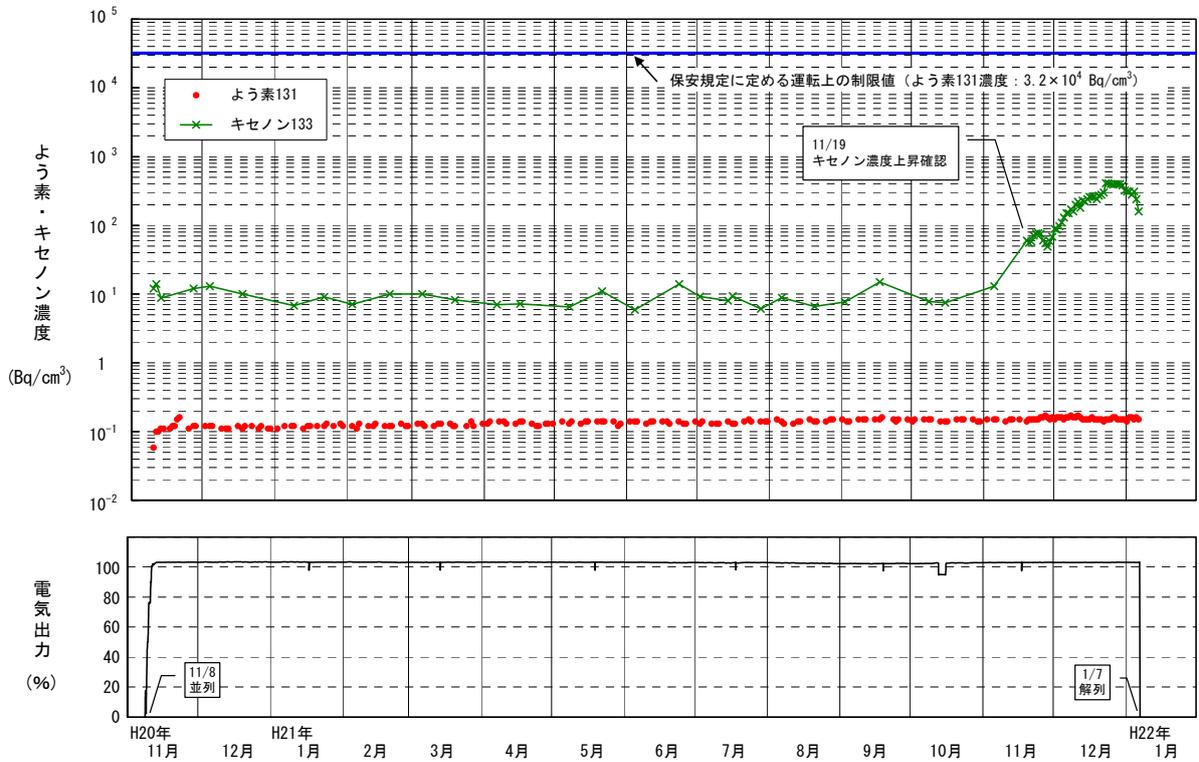
以 上

添 付 資 料

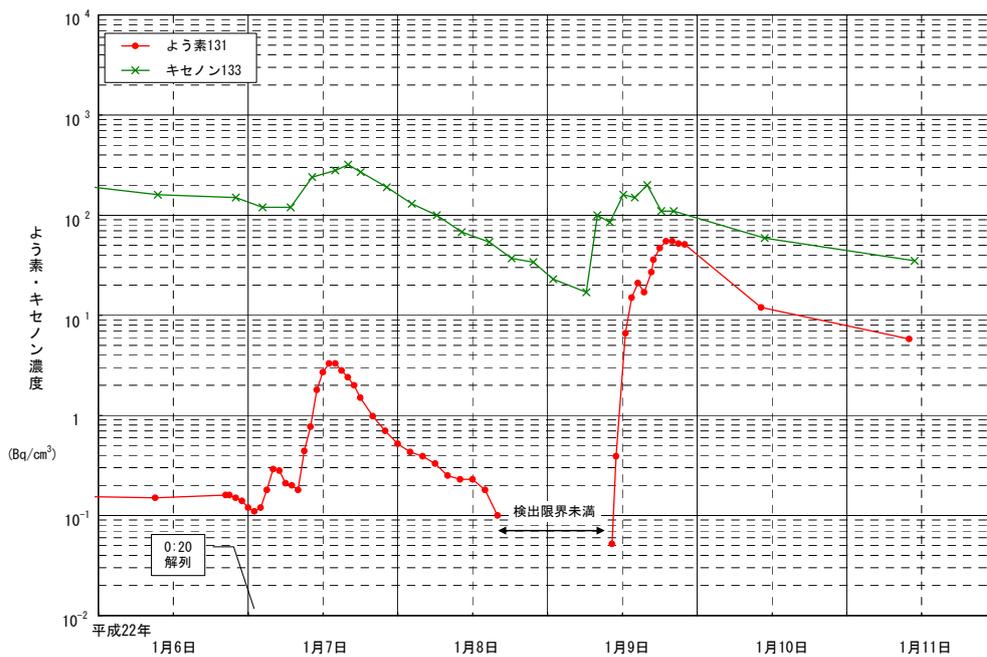
- 添付資料ー 1 伊方3号機 第12サイクル 1次冷却材中の放射能濃度の推移
- 添付資料ー 2 伊方発電所からの放射性物質放出量の管理（保安規定）
伊方発電所から放出された放射性物質による環境への影響評価
（安全協定）
- 添付資料ー 3 シッピング検査結果
- 添付資料ー 4 漏えい燃料の概要
- 添付資料ー 5 漏えい燃料の外観検査結果
- 添付資料ー 6 燃料漏えいに係る要因分析図
- 添付資料ー 7 漏えい燃料に係る製造・取扱履歴等調査結果
- 添付資料ー 8 超音波およびファイバースコープによる漏えい燃料の調査概要
- 添付資料ー 9 超音波による漏えい燃料調査結果
- 添付資料ー 10 漏えい燃料棒に対するファイバースコープ調査結果
- 添付資料ー 11 漏えい燃料（第1支持格子内）に対するファイバースコープ
調査結果
- 添付資料ー 12 浮き上がりの発生に関する検討
- 添付資料ー 13 燃料集合体下部の流況について
- 添付資料ー 14 ファイバースコープ追加調査範囲について
- 添付資料ー 15 ファイバースコープ追加調査結果について
- 添付資料ー 16 他プラントの漏えい燃料との比較

伊方3号機 第12サイクル 1次冷却材中の放射能濃度の推移

(1) 運転中



(2) 停止操作中



伊方発電所からの放射性物質放出量の管理（保安規定）

本事象に伴う放射性物質の放出量は、保安規定に定める年間の管理目標値に対し、希ガスは6,000分の1以下、よう素は800,000分の1以下である。

【放出実績】

放射性物質の種類		本事象に伴う放出量	年間の放出管理目標値*1
気 体	希ガス	2.3 × 10 ¹¹ Bq	1.5 × 10 ¹⁵ Bq
	よう素	9.9 × 10 ⁴ Bq	8.1 × 10 ¹⁰ Bq
液 体 (トリウムを除く)		検出限界以下	1.1 × 10 ¹¹ Bq

*1 伊方発電所から放出する放射性物質の年間管理目標値で、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。

希ガス：平成22年2月4日9時現在

よう素：平成22年2月1日9時30分現在

液 体：平成22年2月4日9時現在

伊方発電所から放出された放射性物質による環境への影響評価（安全協定）

本事象に伴い放出された放射性物質から評価される敷地境界での線量は、安全協定に定める年間の努力目標値の1,000分の1以下であり、環境への影響はなかった。

【環境影響評価】

放射性物質の種類		本事象に伴う放出量からの評価線量 *2	安全協定で定める努力目標値 *3
気 体	希ガス	4.0 × 10 ⁻³ μSv	合計で7 μSv/年
	よう素	5.1 × 10 ⁻⁶ μSv	
液 体		0 μSv	
合 計		4.0 × 10 ⁻³ μSv	

*2 希ガスおよびよう素は年間の標準気象を用いての参考評価

*3 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

SHIPPING検査結果

1. 「漏えい」と判定された燃料

燃料番号：MS3L24 計1体

2. 検査日

平成22年 1月17日～ 1月22日

3. 検査結果

(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	156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	1体
	—		

※c p m比 : 測定中の放射能計数率の上昇度合いを表す。

キセノンピーク比 : 循環ガスに含まれるキセノン133のピークの有無を表す。

(水分析)

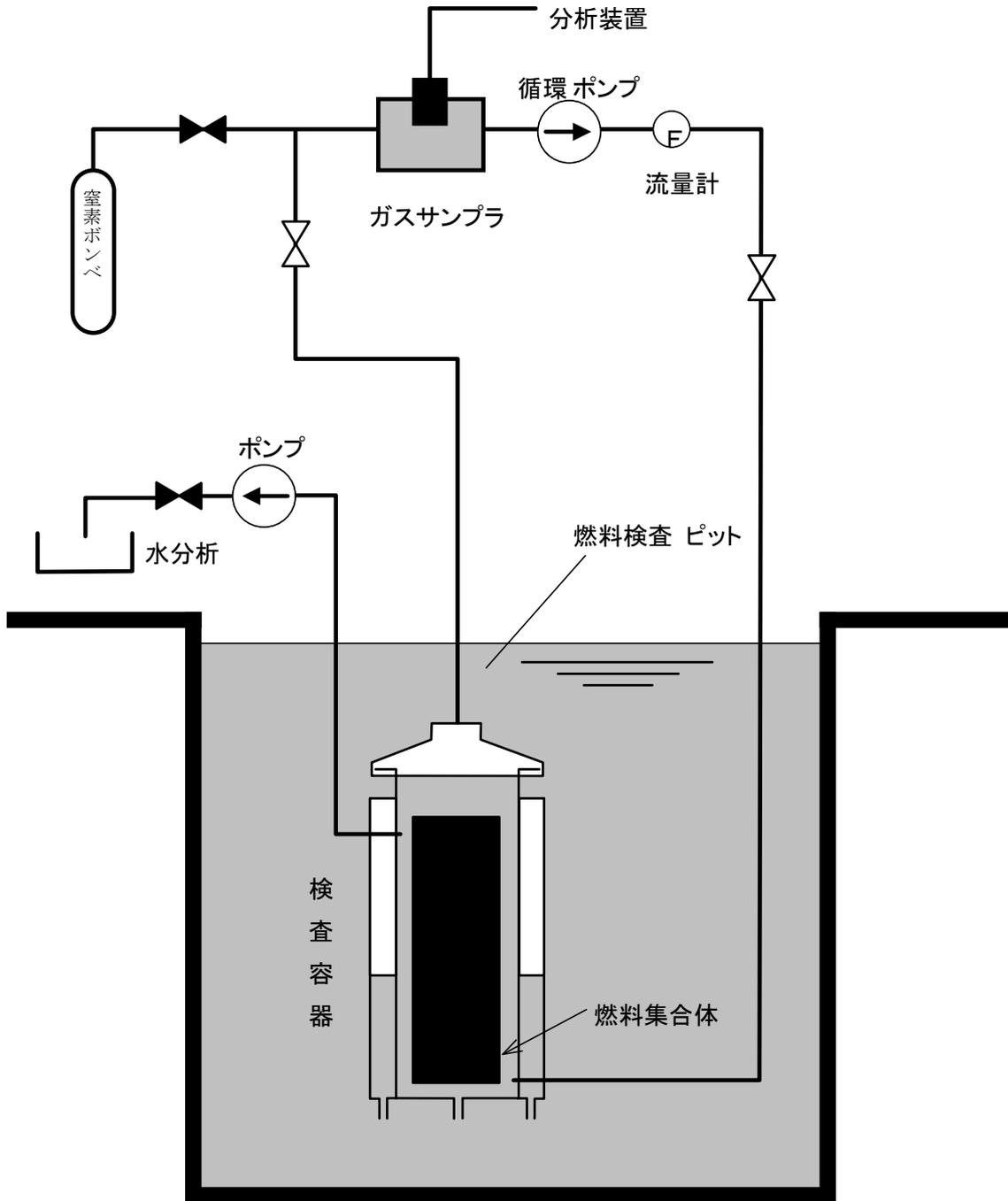
判定条件	判定	よう素 131	セシウム 134	セシウム 137
$A_n / \bar{A} < 2$	漏えいなし	156体	156体	156体
$2 \leq A_n / \bar{A} < 5$	漏えいの疑い	0体	0体	0体
$5 \leq A_n / \bar{A}$	漏えい	1体	1体	1体

 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 のきわだつて大きなものを除く)

4. 当該燃料集合体の分析結果

項目		漏えいと判断された燃料
		MS3L24
ガス分析	c p m比	24.20
	キセノンピーク比	3.62
水分析	よう素 131 評価値 (A_n / \bar{A})	284.5
	セシウム 134 評価値 (A_n / \bar{A})	209.9
	セシウム 137 評価値 (A_n / \bar{A})	209.1

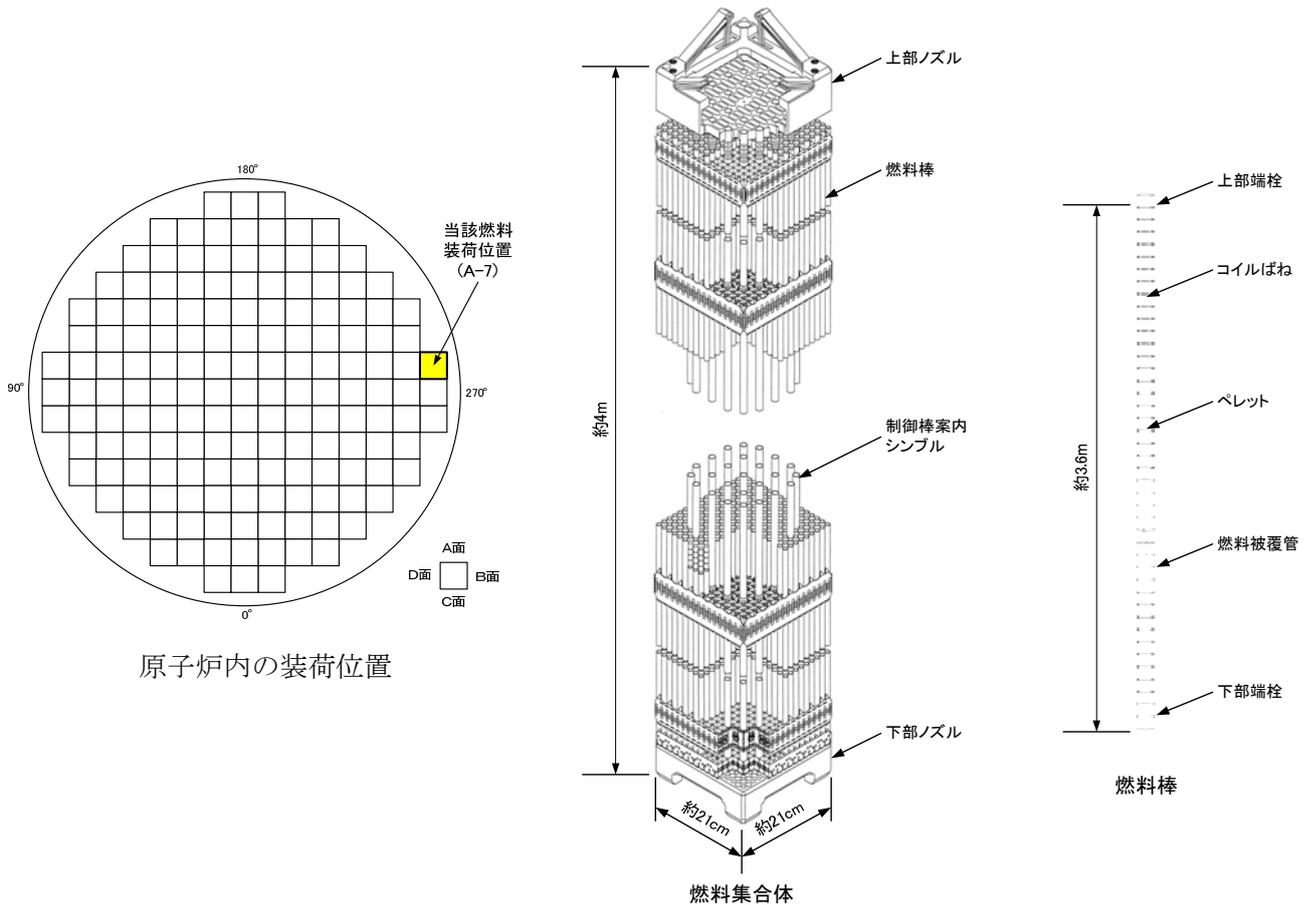
SHIPPING検査概要図



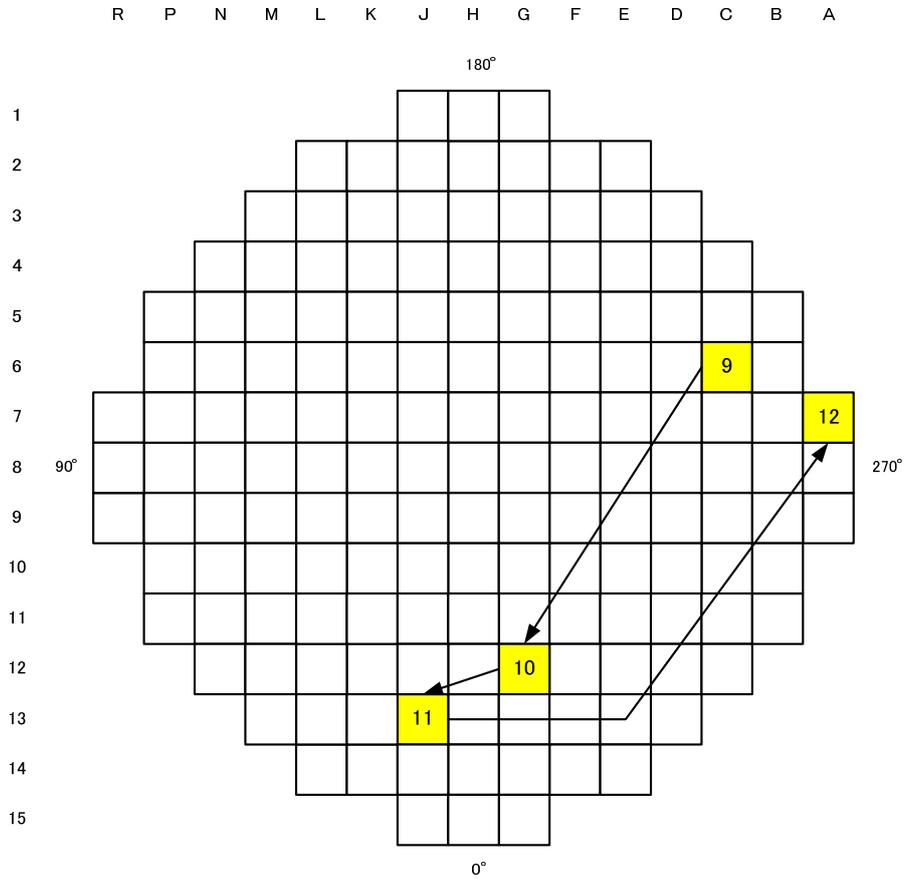
漏えい燃料の概要

1. 燃料の概要

燃料番号		MS 3 L 2 4
燃料タイプ		17×17型 (A型ステップ2高燃焼度燃料)
全長		約4m
全幅		約21cm×約21cm
支持格子数		9個
初期濃縮度		4.8wt% (ガドリニア入り)
燃料棒		約3.6m
燃料被覆管	材質	ジルコニウム基合金
	外径	約9.5mm
	肉厚	約0.6mm
製造時期		平成16年5月
装荷時期		平成17年3月～平成22年1月 (第9～12サイクル)
燃料集合体燃焼度		約54.3 GWd/t



2. 各運転サイクルの炉心装荷位置



(図中の数字は装荷時の運転サイクル)

燃料漏えいに係る要因分析図

事象	要因	因子	調査内容	調査方法・結果	評価	資料	
燃料漏えい	設計	パuffersジェット	設計資料等の調査	・当該燃料は第12サイクルでパuffers板に接する位置 (A-7) に装着されていたが、伊方3号機は建設当初からアッパフロー化されているため、問題ない。	×	—	
		グリッドフレティング	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。	×	—	
	製造	異物フレティング	設計資料等の調査	・異物対策 (異物フィルタ等) を施した燃料であり、従来型燃料に比べ異物流入阻止性能が向上していることを確認した。	×	—	
		ペレット・被覆管の相互作用	応力評価	・当該燃料の被覆管応力評価は最大56N/mm ² であり、被覆管耐力 (477 N/mm ²) に対して十分余裕があることから、問題ない。	×	—	
燃料漏えい	製造	燃料被覆管の水素脆化	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。	×	7	
		製造時の欠陥	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。	×	7
			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。	×	7	
		輸送時の取扱い	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。	×	7	
	運転	炉心特性の異常	新燃料受入状況調査	・新燃料受入検査記録等により、外観等に異常のないことを確認した。	×	7	
		燃料被覆管の腐食	運転履歴調査	・第9, 10, 11, 12サイクルの運転パラメータに異常は認められなかった。 (熱流束熱水路係数、核的エンタルピ上昇熱水路係数)	×	7	
	その他	燃料被覆管の腐食	出力履歴	材料調査調査	・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。	×	7
			燃料棒応力	運転履歴調査	・第9, 10, 11, 12サイクルの1次冷却材水質に異常は認められなかった。	×	7
		その他	燃料棒応力	取扱履歴調査	・これまでに実施した燃料集合体外観検査記録および取扱い時の荷重記録に異常は認められなかった。	×	7
			その他	外観調査	・ファイバースコープによる調査において第1支持格子内の支持板やばね板と燃料棒の間に隙間等が認められたことから、第1支持格子内における燃料棒と支持板またはばね板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。	△	9, 10

【評価】 ○：可能性あり △：可能性を否定できない ×：可能性なし

漏えい燃料に係る製造・取扱履歴等調査結果

1. 製造履歴調査結果

構成部品	調査項目	調査結果
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
被覆管	化学成分、欠陥、水素化物方向性係数、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	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
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

2. 取扱履歴調査結果

当該燃料の取扱履歴について、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。

定検等		取扱年月	調査結果
新燃料受入れ		平成 1 6 年 8 月	異常なし
第 8 回定検	装荷	平成 1 7 年 3 月	異常なし
第 9 回定検	取出	平成 1 8 年 5 月	異常なし
	装荷	平成 1 8 年 6 月	異常なし
第 1 0 回定検	取出	平成 1 9 年 9 月	異常なし
	装荷	平成 1 9 年 1 0 月	異常なし
第 1 1 回定検	取出	平成 2 0 年 9 月	異常なし
	装荷	平成 2 0 年 1 0 月	異常なし
第 1 2 回定検	取出	平成 2 2 年 1 月	異常なし

3. 運転履歴調査結果

(1) 出力履歴

項目	制限値	第 9 サイクル	第 10 サイクル	第 11 サイクル	第 12 サイクル
熱流束熱水路 係数	≤ 2.32	2.030	1.966	1.924	1.962
核的エンタルピー上昇 熱水路係数	≤ 1.60	1.573	1.546	1.550	1.553

※出力運転中の最大値を記載

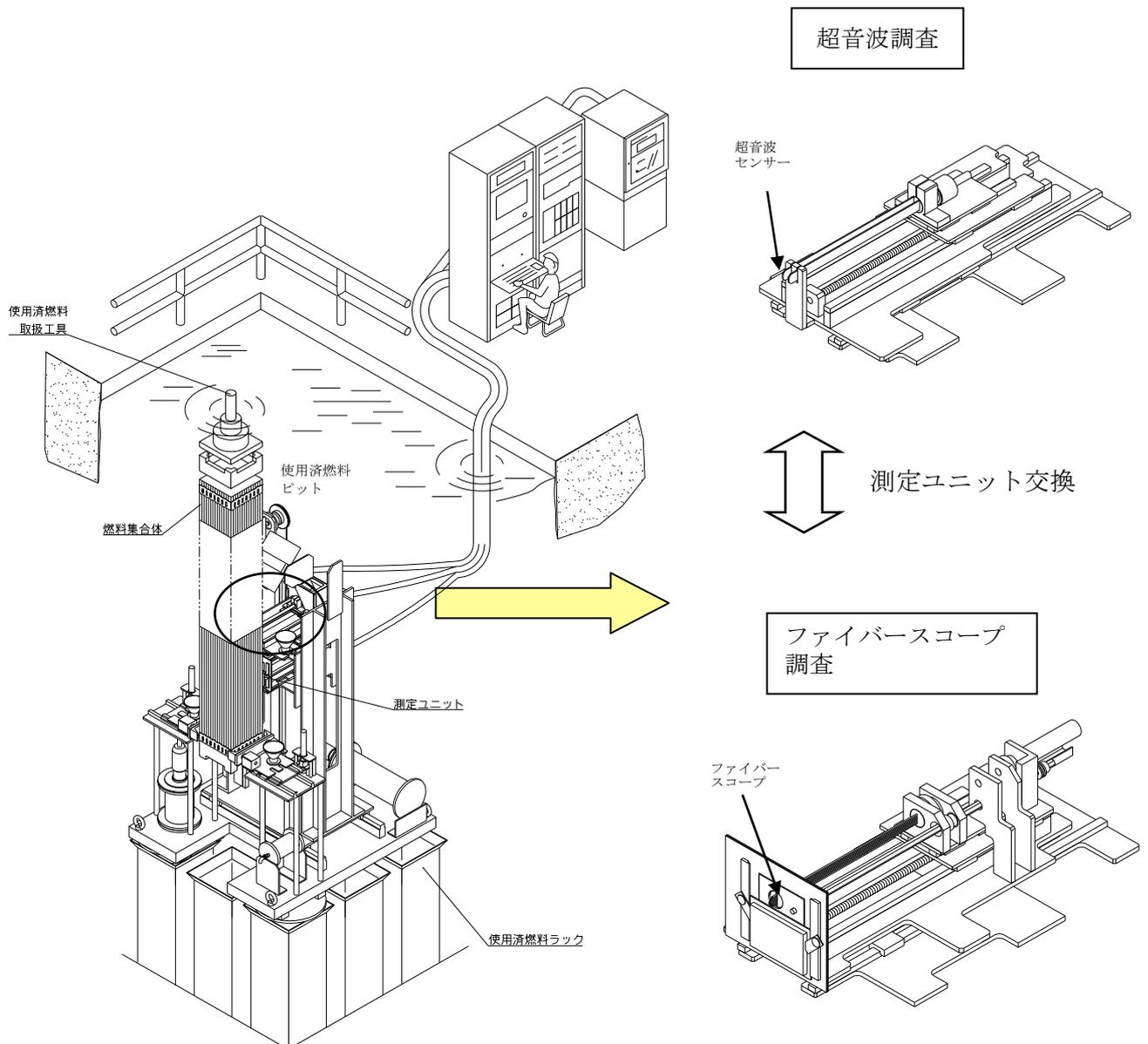
(2) 1 次冷却材水質履歴

項目	基準値	第 9 サイクル	第 10 サイクル	第 11 サイクル	第 12 サイクル
p H	4～11 (温度 25℃)	6.3～7.6	6.0～8.3	6.3～7.5	6.1～7.7
塩素イオン	$\leq 0.15\text{ppm}$	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
溶存酸素	$\leq 0.1\text{ppm}$	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005

超音波およびファイバースコープによる漏えい燃料の調査概要

超音波による漏えい燃料棒調査（超音波調査）は、漏えいが認められた燃料に対し、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ものである。

また、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被覆管表面および支持格子部を観察するものである。



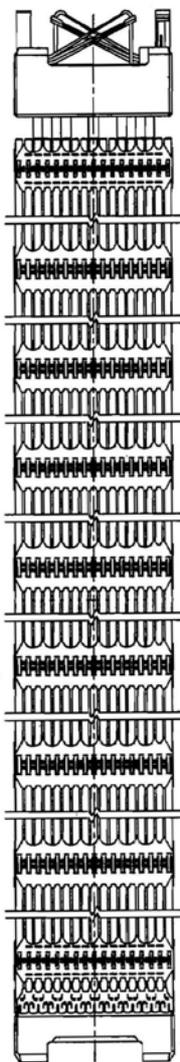
超音波による漏えい燃料調査結果

1. 対象燃料

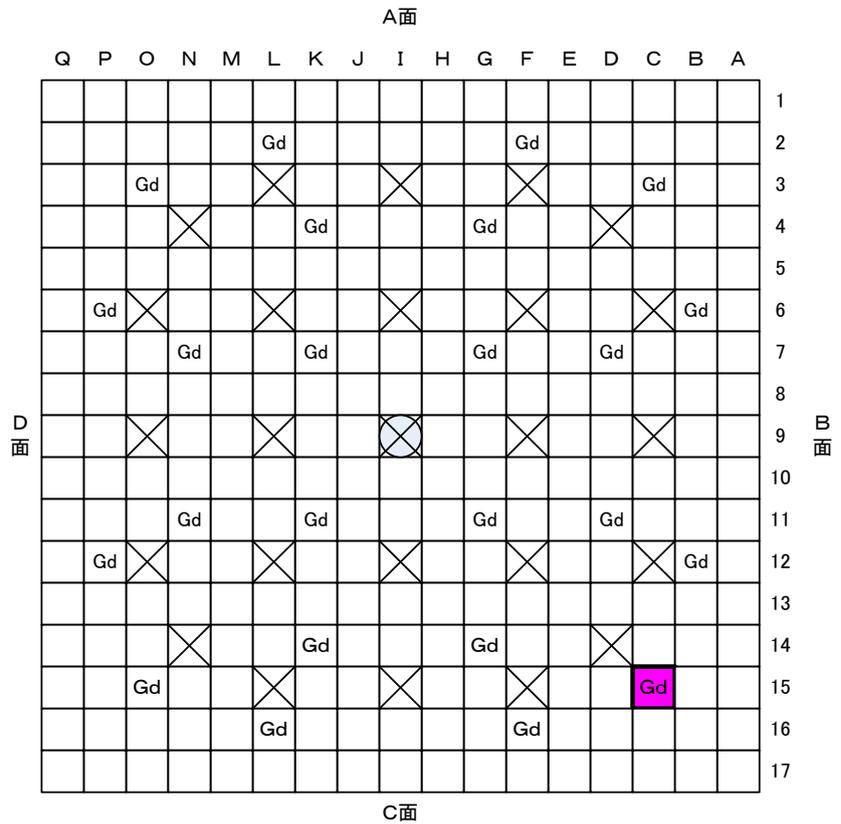
燃料番号 : MS 3 L 2 4

2. 調査結果

漏えい燃料棒 1 本 (燃料棒位置 : C - 1 5) を特定した。



燃料集合体



- | | |
|---|---------------------------------------|
| <p>□ 燃料棒</p> <p>□ Gd 燃料棒 (ガドリニア入り)</p> <p>■ Gd 漏えい燃料棒 (ガドリニア入り)</p> | <p>⊗ 炉内計装用案内シムル</p> <p>⊗ 制御棒案内シムル</p> |
|---|---------------------------------------|

(上から見た図)

漏えい燃料棒に対するファイバースコープ調査結果

1. 対象燃料

燃料番号：MS 3 L 2 4 （漏えい燃料棒位置：C－1 5）

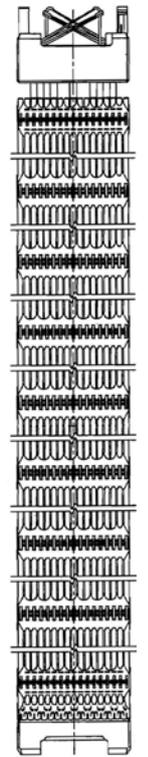
2. 調査範囲

漏えい燃料棒の全長（各支持格子内部含む）に亘り、漏えいにつながるような傷等の有無について調査した。

3. 調査結果

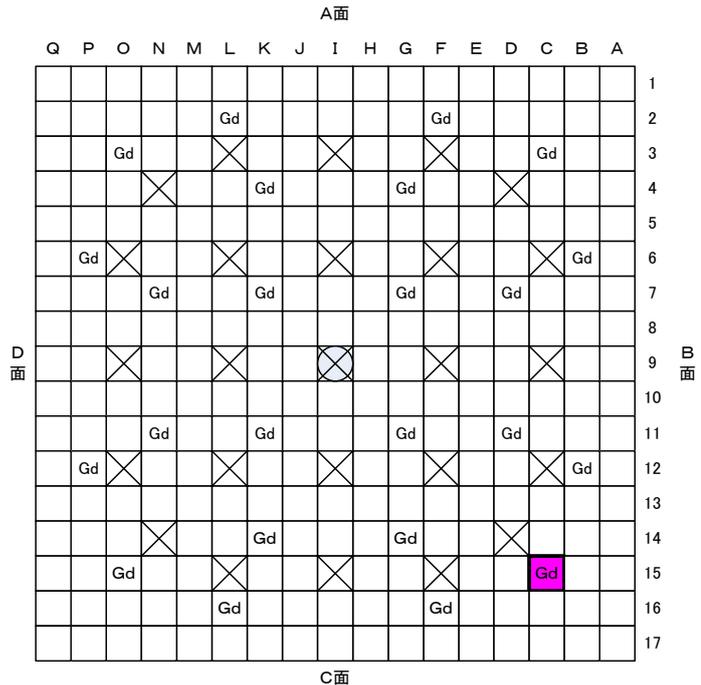
第 1 支持格子内において、漏えい燃料棒と支持板およびばね板との間に隙間等が認められた。

なお、漏えい燃料棒のその他の部位に、異常は認められなかった。



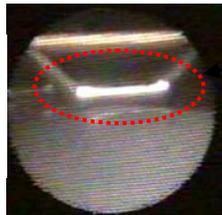
第1支持格子

燃料集合体

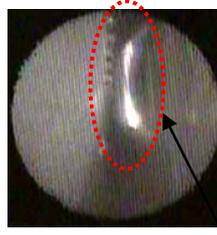
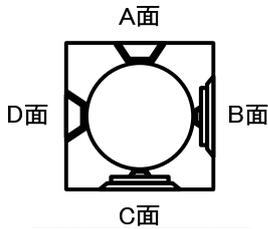
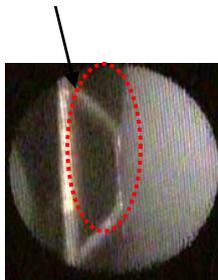


- 燃料棒
- Gd 燃料棒(ガドリニア入り)
- Gd 漏えい燃料棒(ガドリニア入り)
- X 炉内計装用案内シムル
- X 制御棒案内シムル

燃料棒と支持板の接触部に摩耗が生じたものと推定

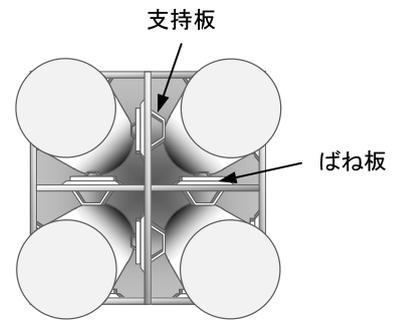
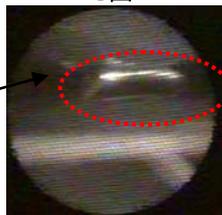


燃料棒と支持板に隙間

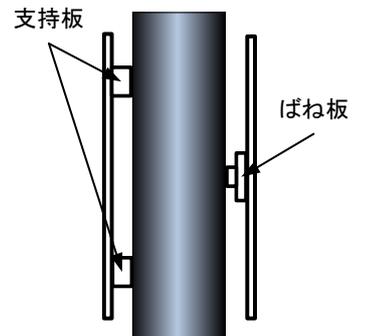


燃料棒とばね板に隙間

燃料棒とばね板の接触部に摩耗が生じたものと推定



(上部から見たイメージ図)



燃料棒
(側面図)

図1 漏えい燃料棒 (C-15)、第1支持格子内の外観

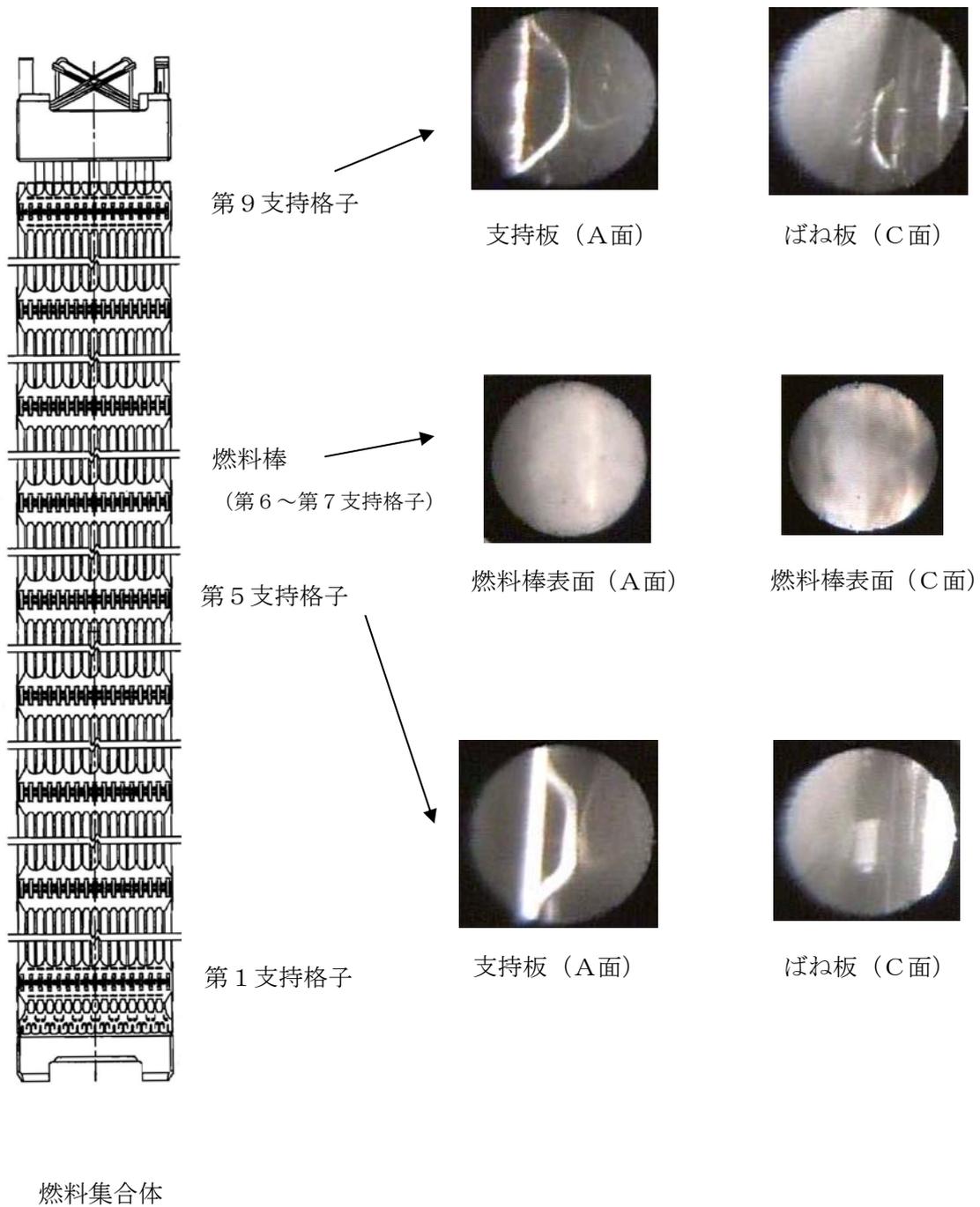


図2 漏えい燃料棒（燃料棒位置：C-15）の調査結果（代表例）

漏えい燃料（第 1 支持格子内）に対するファイバースコープ調査結果

1. 対象燃料

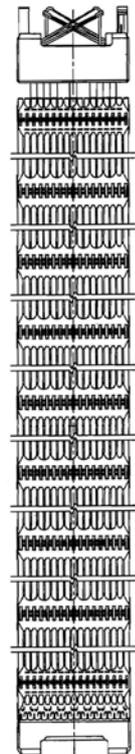
燃料番号：MS 3 L 2 4

2. 調査範囲

第 1 支持格子内の燃料棒全数に対し、燃料棒保持状況を確認する。

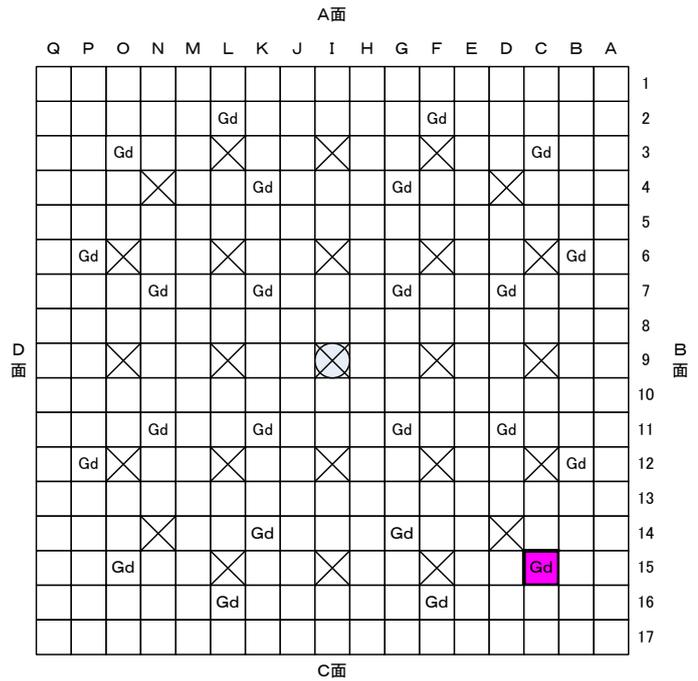
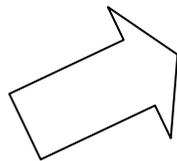
3. 調査結果

隙間等が認められた燃料棒（燃料棒位置：C－1 5）以外に、隙間等は認められなかった。



第1支持格子

燃料集合体



- 燃料棒
- Gd 燃料棒(ガドリニア入り)
- 漏えい燃料棒(ガドリニア入り)
- X 炉内計装用案内シンプル
- X 制御棒案内シンプル

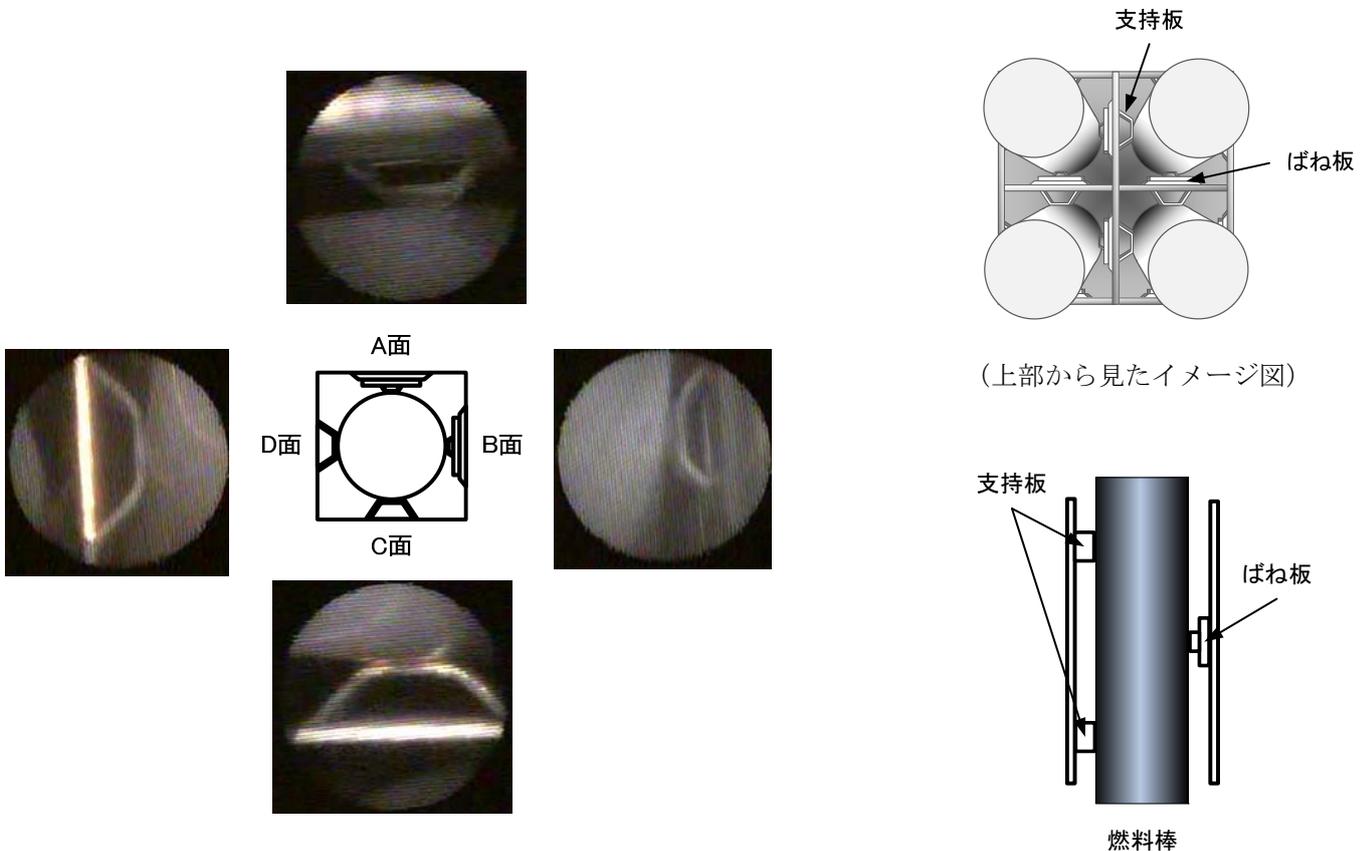


図1 健全燃料棒、第1支持格子内の外観 (代表例：C-3)

(側面図)

浮き上がりの発生に関する検討

1. 浮き上がり（リフトオフ）発生の要因について

リフトオフは、図 1 に示すように、燃料棒と支持格子との相対的な傾きにより、一方の支持板またはばね板に浮き上がりが発生する事象である。

リフトオフ発生の要因として考えられる項目およびその評価結果を表 1 に示す。評価結果より、支持格子のばね力が低下した場合には、リフトオフを発生させるのに必要なモーメント*¹が低下するため、燃料棒曲がりなど他の要因と重畳してリフトオフが発生する可能性があることが確認された。

2. リフトオフ発生の可能性について

燃料集合体を模擬した解析モデルを用いて、支持格子による燃料棒保持部にモーメントを付与する解析を行った。照射に伴うばね力緩和を考慮し、第 1 支持格子でのばね力残存率をパラメータとした解析の結果、第 1 支持格子でリフトオフが発生するモーメントはばね力の残存率に比例することが分かった。リフトオフ発生モーメントが最も小さくなるのは、ばね力の残存率が最も小さくなる燃料集合体の寿命末期であるが、評価に用いるばね力の残存率は安全側に寿命末期の半分として、リフトオフ発生モーメントを求めた。

一方、燃料棒には、その照射成長と支持格子による燃料棒拘束力によって照射中に曲がりが発生する。実機における燃料棒の曲がり量から、支持格子による燃料棒保持部に作用しているモーメントを、燃料棒曲がり評価モデルで推定することができる。燃焼に伴い曲がりのモーメントは小さくなる傾向にあるが、寿命末期のリフトオフの可能性に対し安全側の評価とするため、照射がある程度進行した第 1 サイクル末時点での支持格子による燃料棒保持部でのモーメント(0.3%タイルボウ*²時)を求めると、上記のリフトオフ発生モーメントの半分程度と小さいことがわかった。

3. リフトオフ発生後の摩耗の進展

第 1 支持格子部の被覆管摩耗減肉量について、リフトオフによる摩耗の進展への影響を評価するため、仮に第 4 サイクルの最初からリフトオフが発生し、第 4 サイクルのワークレートが 1.7 倍*³になったとして摩耗減肉量を評価した結果でも、リフトオフがない場合に比べて被覆管摩耗減肉量の増分は被覆管肉厚の 1.1%程度であり、燃料棒の健全性の目安である被覆管肉厚の 10%に比べても十分小さい。

4. まとめ

燃料集合体の構造解析モデルによる解析で求めた第 1 支持格子位置でのリフトオフ発生モーメントに比べ、実機で生じるモーメントは 0.3% タイルボウ時でも小さいことから、リフトオフが発生する可能性は非常に小さいものと考えられる。また仮に発生したとしてもその後の摩耗の進展は非常に緩やかで限定的であると考えられる。

* 1 モーメント

ある基準点のまわりに物体を回転させる力のはたらき

* 2 0.3% タイルボウ

燃料棒曲がり分布における、母集団の 99.7% の上限に相当する燃料棒曲がり量

* 3 ワークレート

摩耗体積を評価する際に用いる値で、単位時間あたりの荷重×すべり長さに相当する。

$$\text{摩耗体積 (V)} = \text{比摩耗量 (W}_s\text{)} \times \text{ワークレート (W}_r\text{)} \times \text{時間 (t)}$$

ここで、リフトオフが発生した場合の第 1 支持格子位置でのワークレートを評価した結果、ワークレートは約 70% 増加する。

表1 リフトオフ要因分析

要因分析		評価結果	判定
製作不良	支持格子ばね力不足	製造時データの調査の結果、問題ないことが確認された。	×
	支持板接線直角度不良	製造時データの調査の結果、問題ないことが確認された。	×
照射による影響	支持格子ばね力の低下	ばね力が低下するとリフトオフが発生する可能性あり。	△
	燃料棒曲がり	燃料棒曲がりが大きくなることによりリフトオフが発生する可能性あり。	△
	集合体曲がり	解析による評価の結果、これまでの曲がり実績の範囲では、単独ではリフトオフはしない。	×

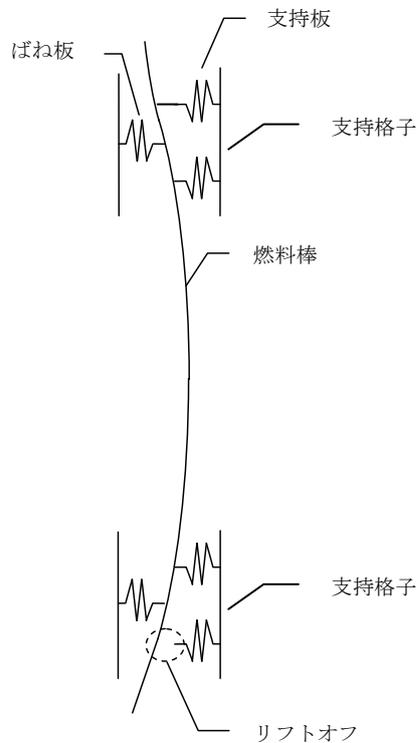


図1 リフトオフの概要

燃料集合体下部の流況について

1. 目的

漏えいが発生した原因調査のため、数値計算による燃料集合体の下部流況に着目して、検討を行った。

2. 検討内容

下部炉心板には、1次冷却材が通過する流路孔が設けられており、図1に示すように、今回漏えいが認められた燃料棒は流路孔の周辺部に位置している。燃料集合体内部に1次冷却材が流入する過程において、流入当初は流路孔直上で軸流速が大きいですが、その後、1次冷却材が燃料集合体内部を上昇し、軸流速が平坦化していく過程で横流れが生じ、この横流れが、燃料棒の漏えいに何らかの影響を与えている可能性が考えられる。そこで、燃料集合体の下部の流況を、数値計算による流体解析により評価した。

解析条件

- ・ 常温
- ・ 平均流速：5 m / s
- ・ モデル化範囲：図2

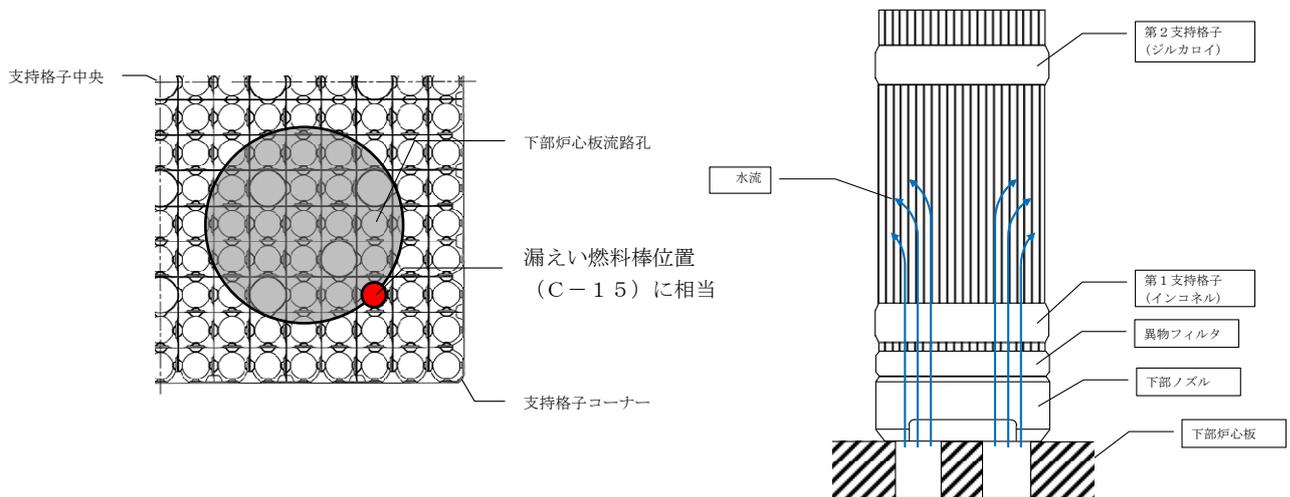


図1 下部炉心板流路孔と漏えい燃料棒との位置関係

図2 数値計算による流体解析モデル化範囲

3. 検討結果

流体解析の評価結果に対し、燃料棒周りの横流れ強さに着目した整理を行った。

その結果、図3に示すように、漏えい燃料棒位置及びその近傍において、燃料棒を振動させる横流れ強さが燃料集合体内の全燃料棒の平均値に対して約1.7倍と相対的に大きいことが確認できた。

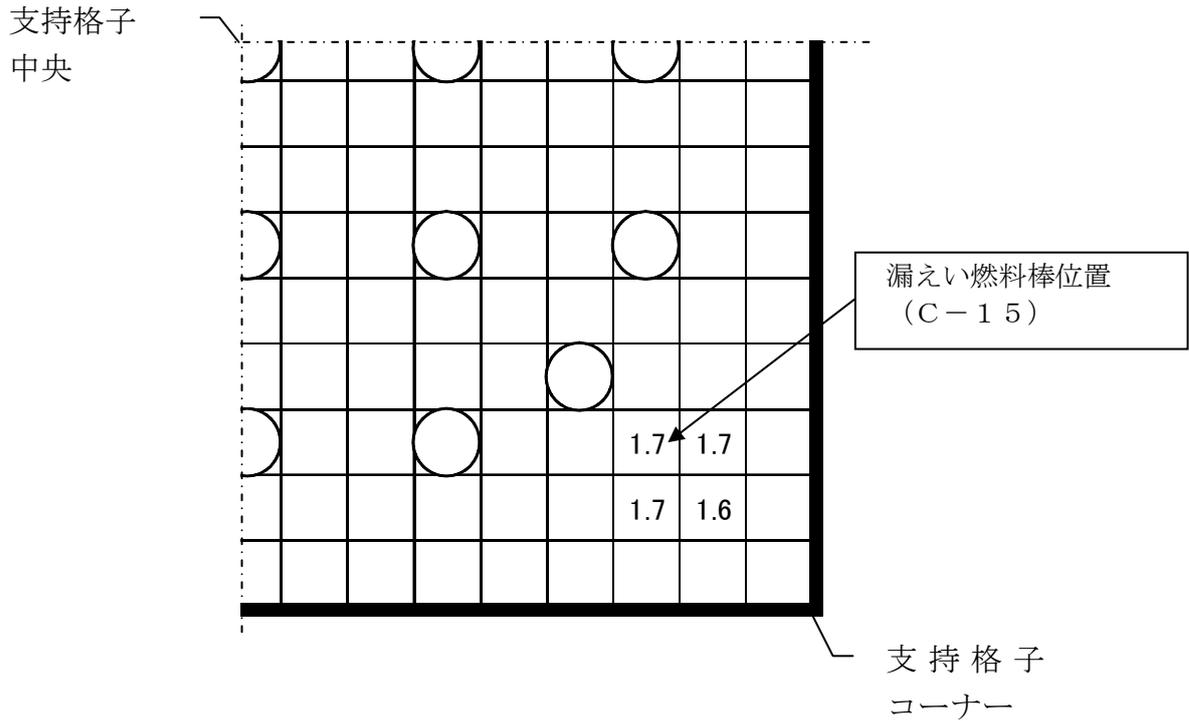
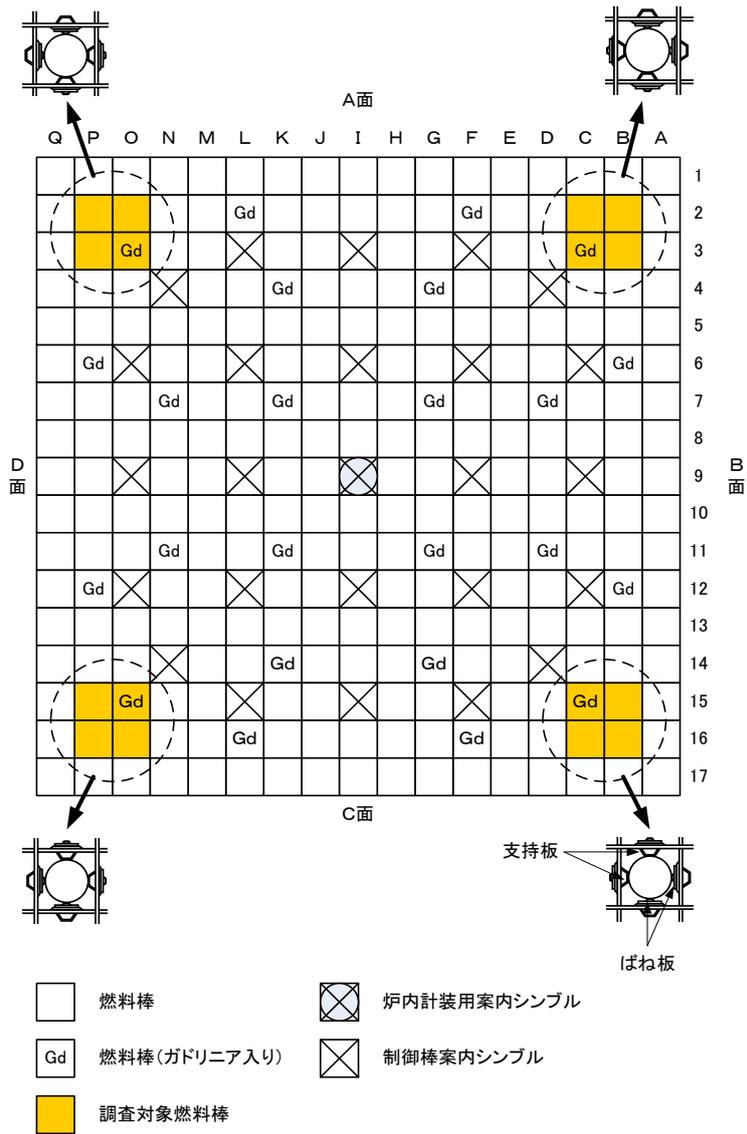


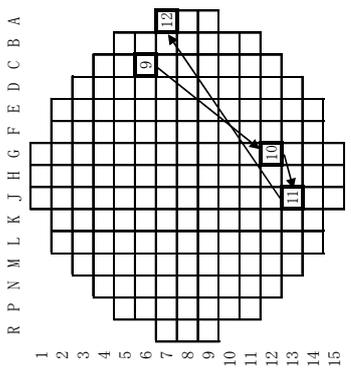
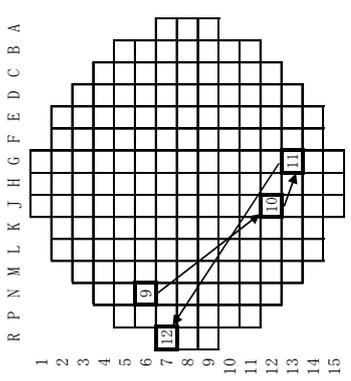
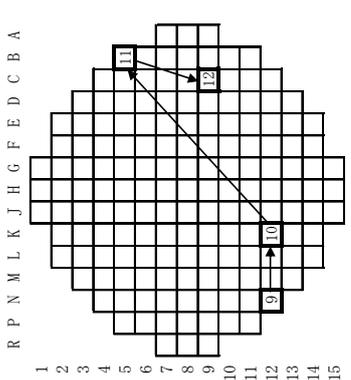
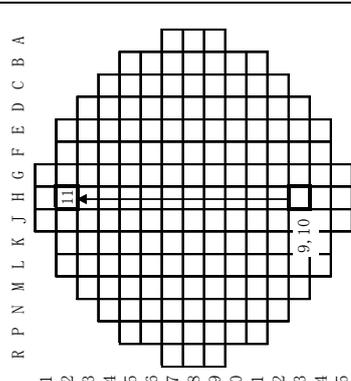
図3 燃料棒周りの横流れ強さの相対値
(燃料集合体内の全燃料棒の平均値を1とした場合の相対値)

ファイバースコープ追加調査範囲について

1. 調査範囲

燃料集合体下部の流況に対する評価結果から、今回の漏えい燃料棒位置（C-15）を含む1次冷却材の横流れ強度が相対的に大きい第1支持格子内各コーナー部の16本を調査対象とする。



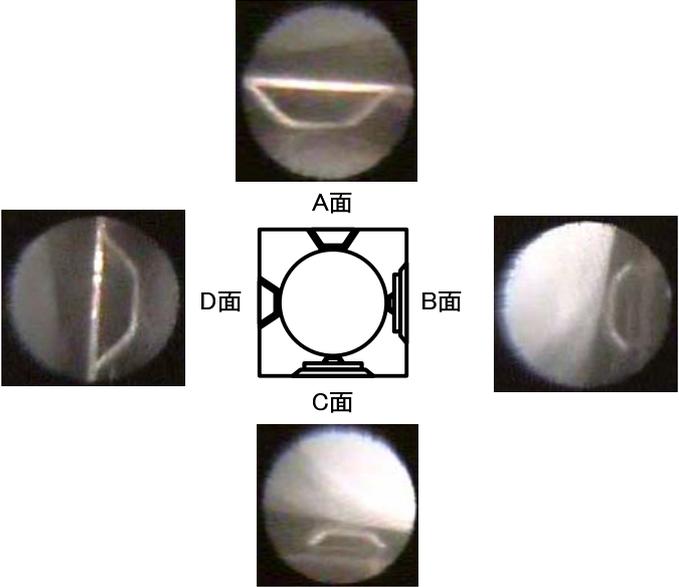
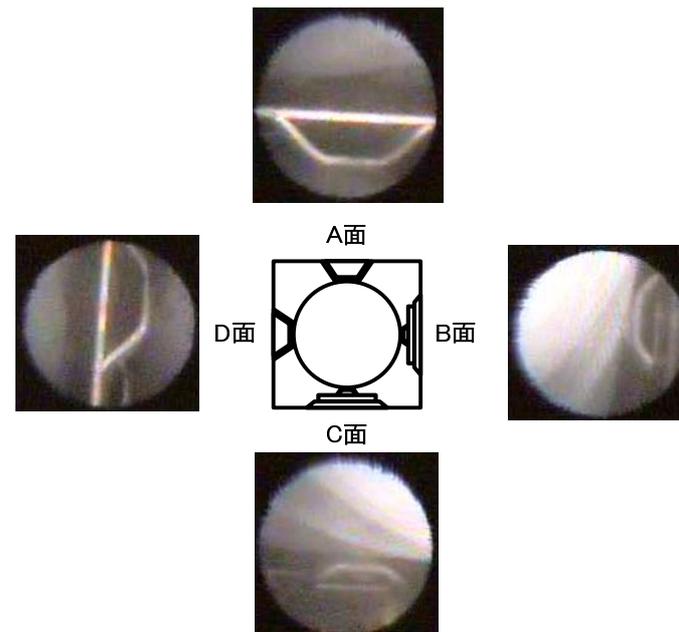
製造領域		第12領域			
体数		26体			
製造時期		平成16年 5月			
燃料番号	MS3L24	MS3L21	MS3L01	MS3L26	
燃焼度	約54.3 GWd/t	約54.1 GWd/t	約53.9 GWd/t	約46.5 GWd/t	
照射期間	4.3年	4.3年	4.3年	3.1年	
装荷位置 (注) 数字は装荷時の運転サイクルを示す。					
備考	漏えい燃料	漏えい燃料と同様な使用履歴等をもつ燃料集合体のうち、最高燃焼度の燃料集合体	漏えい燃料と燃焼度、炉内滞在時間が同程度であるが、使用履歴が異なる燃料集合体のうち、最高燃焼度の燃料集合体の燃料集合体	漏えい燃料と同じ製造時期であるが、使用履歴が異なる燃料集合体のうち、最高燃焼度の燃料集合体	

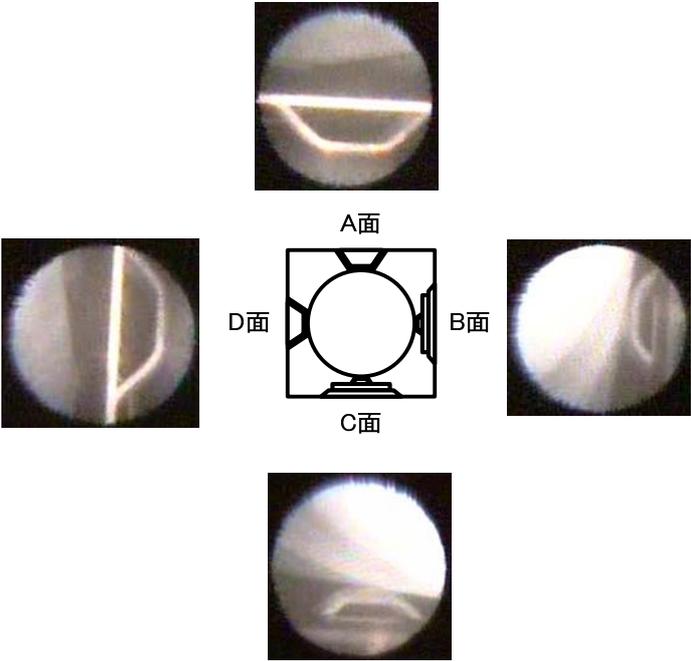
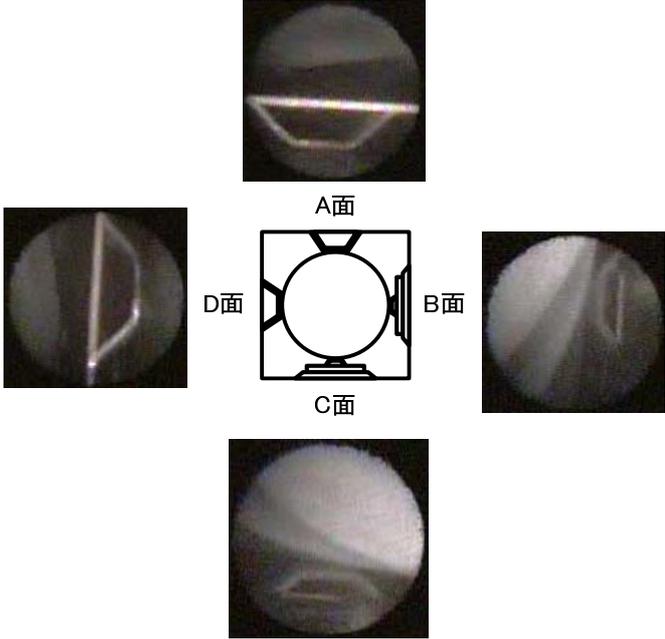
製造領域	第13領域	第14領域	第15領域
体数	34体	32体	36体
製造時期	平成17年 5月	平成18年 6月	平成20年 1月
燃料番号	MS3M03	MS3N21	MS3O29
燃焼度	約48.3 GWd/t	約33.6 GWd/t	約19.9 GWd/t
照射期間	3.2年	2.1年	1.2年
<p>装荷位置</p> <p>(注)数字は装荷時の運転サイクルを示す。</p>			
備考	第13領域の燃料集合体のうち、最高燃焼度の燃料集合体	第14領域の燃料集合体のうち、最高燃焼度の燃料集合体	第15領域の燃料集合体のうち、最高燃焼度の燃料集合体

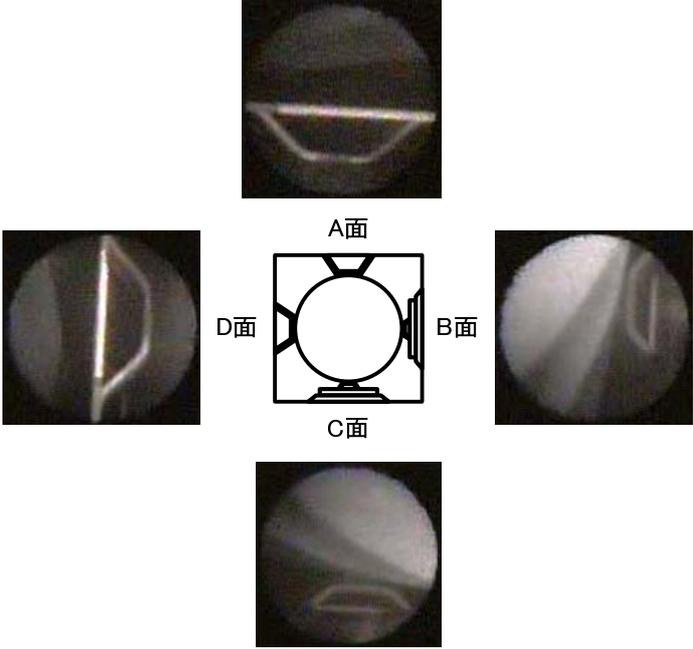
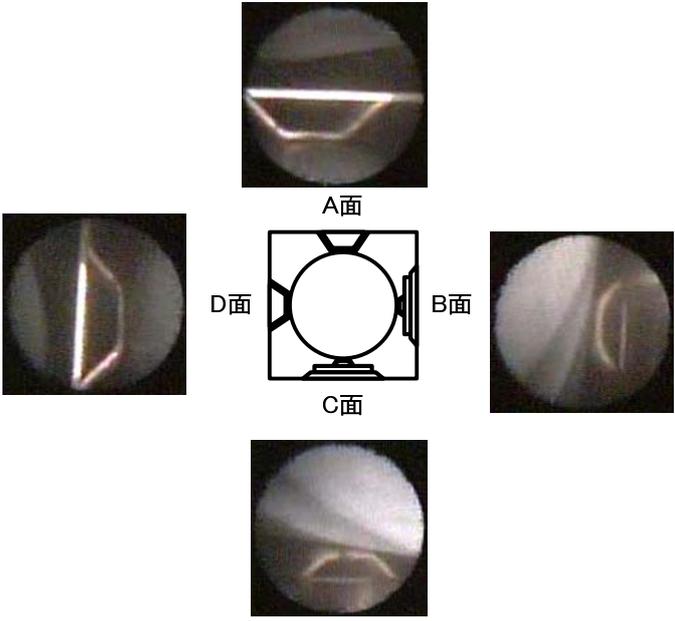
ファイバースコープ追加調査結果について

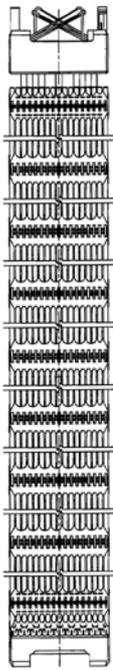
1. 調査結果

選定した燃料集合体に対し、第1支持格子内各コーナー部の16本を調査した結果、隙間等の異常は認められなかった。以下に各燃料集合体の代表的な観察結果を示す。

燃料番号	観察例 (燃料棒位置 : C-15)	調査結果
MS3L21		異常なし
MS3L01		異常なし

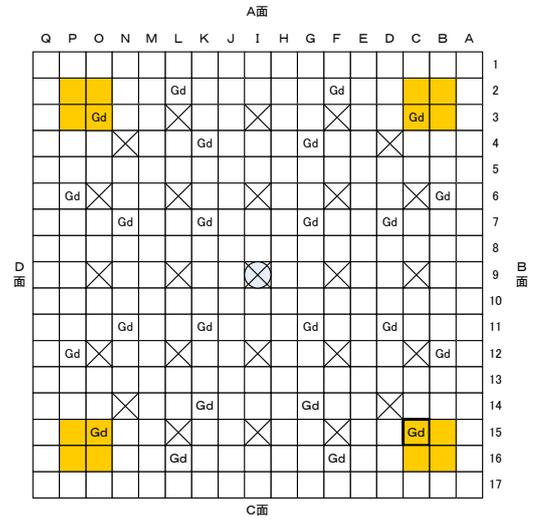
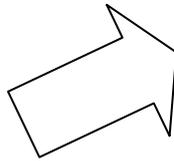
燃料番号	観察例 (燃料棒位置 : C-15)	調査結果
MS3L26	 <p>A面</p> <p>D面 B面</p> <p>C面</p>	異常なし
MS3M03	 <p>A面</p> <p>D面 B面</p> <p>C面</p>	異常なし

燃料番号	観察例 (燃料棒位置 : C - 1 5)	調査結果
MS 3 N 2 1		異常なし
MS 3 O 2 9		異常なし

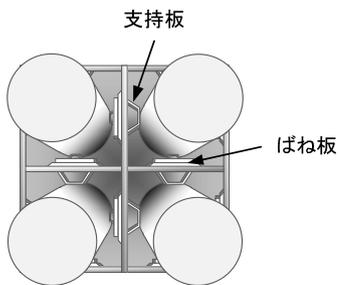


第1支持格子

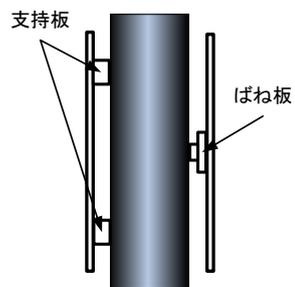
燃料集合体



- 燃料棒
- 炉内計装用案内シンプル
- Gd 燃料棒(ガドリニア入り)
- 制御棒案内シンプル
- 調査対象燃料棒



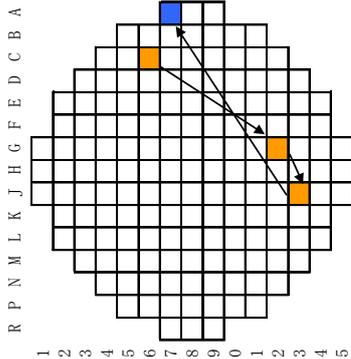
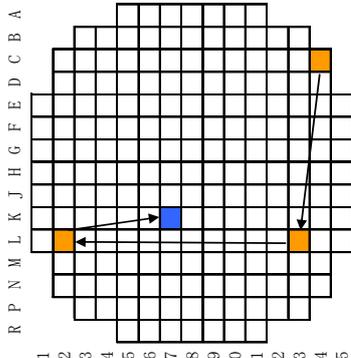
(上部から見たイメージ図)



燃料棒

(側面図)

他プラントの漏えい燃料との比較

項目	伊方3号機 (燃料集合体番号：MS3L24)	他プラント	共通性評価
プラントタイプ	3 ループ	4 ループ	×
漏えい燃料棒 (被覆管)	ガドリニア入り燃料棒 (ジルコニウム合金)	ウラン燃料棒 (ジルコニウム合金)	×
燃料集合体 燃焼度	約54.3 GWd/t	約47.1 GWd/t	△
照射期間	約4.3年	約3.6年	×
使用履歴等	炉心周辺部 (A-7) 	炉心中央部 (K-7) 	×
	装荷位置	装荷位置に共通性はない	両者とも比較的高燃焼度域で発生
製造履歴	問題なし	問題なし	両者に共通する特異な点はない。