

原燃発第10 - 146号  
平成22年 6月11日

経 済 産 業 省  
原子力安全・保安院長  
寺 坂 信 昭 殿

四国電力株式会社  
取締役社長 千 葉 昭

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  
評価結果の報告について

平成22年4月28日付「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について（指示）」（平成22・04・23原院第5号）に基づき、評価結果をとりまとめましたので、別紙のとおり報告いたします。

別紙：3ループプラントでの17×17A型55GWd/t燃料使用時における  
燃料漏えい対応策の評価結果について

3ループプラントでの  
17×17A型55GWd/t燃料使用時における  
燃料漏えい対応策の評価結果について

平成22年6月

四国電力株式会社

## 目 次

1. はじめに
  
2. 4ループプラントにおける17×17 A型燃料漏えいに係る報告
  2. 1 調査結果に基づく推定要因
  2. 2 試験、解析による評価に基づく推定要因、推定メカニズム
  2. 3 対策
  
3. 3ループプラントの評価結果
  3. 1 推定メカニズムによる評価
  3. 2 3ループプラント燃料漏えい実績による推定メカニズムの考察
  
4. 3ループプラントでの対応策
  
  
- 添付資料ー1 4ループプラントにおける燃料漏えいの実績
- 添付資料ー2 原子炉内一次冷却材流速の比較
- 添付資料ー3 3ループプラントにおける摩耗体積の評価
- 添付資料ー4 3ループプラント炉心中心位置における摩耗体積評価
- 添付資料ー5 3ループプラントにおける漏えいの実績との比較
- 添付資料ー6 3ループプラントにおける燃料漏えいに関する仮説  
(ガドリニア入り燃料棒の漏えいに関する推定要因での評価)
- 添付資料ー7 A型燃料の漏えい原因と対策及び55GWd/t燃料における対策

## 1. はじめに

本資料は、平成22年4月28日に原子力安全・保安院より発出された「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について（指示）」（平成22・04・23原院第5号）に基づき、17×17A型55GWd/t燃料（以下「17×17A型燃料」）を使用する4ループプラントにおいて発生している燃料漏えい事象に係る報告を踏まえ、同型の燃料を3ループプラントの原子炉に装荷して使用する際に、漏えいが生じないための対応策が必要かどうかを評価した結果及び評価結果に基づく対応策を報告するものである。

### 【17×17A型燃料を使用している3ループプラント】

- ・北海道電力：泊3号機
- ・四国電力：伊方3号機
- ・九州電力：川内1，2号機

## 2. 4ループプラントにおける17×17A型燃料漏えいに係る報告

17×17A型燃料を使用している4ループプラントにおいて、平成20年以降、燃料漏えいが続いて発生しており（3プラント、集合体5体（燃料棒7本）、関西電力において、これらについて要因調査が行われるとともに、試験、解析による評価が行われ、以下のとおり、一連の燃料漏えいについて、推定要因、推定メカニズム等に関して原子力安全・保安院に対して報告されている。

### 2. 1 調査結果に基づく推定要因

4ループプラントでの燃料漏えい実績は、以下の共通した特徴があり、過去の燃料漏えい事象の事例調査の結果から、今回の一連の燃料漏えいの要因として、同一型式の燃料集合体のコーナー部にある燃料棒の最下部支持格子部におけるフレッティング摩耗であることが推定されている。

（添付資料－1）

①漏えいした燃料の集合体燃焼度は、約37,000～47,000MWd/tの範囲内である。

②漏えいが発生した際の燃料の原子炉内での配置は、炉心の中央から4列目までの位置（炉心内の一次冷却材流速が比較的速い位置）である。

③漏えいしていた燃料棒は、燃料の外周に近いコーナー部に位置している。

④漏えい燃料棒7本のうち4本で、最下部支持格子において、支持格子と燃料棒の間に隙間等が認められている。

なお、いずれの燃料漏えいにおいても、一次冷却材への放射性物質の漏えいはごくわずかであること及び環境への放射性物質の影響もないことから、安全上の問題はないことが確認されている。

### 2. 2 試験、解析による評価に基づく推定要因、推定メカニズム

上述の推定要因を確認するために燃料集合体内の一次冷却材の流動解析等の様々な試験、解析及び評価を行った結果として、4ループプラントにおける17×17A型燃料の漏えいのメカニズムは、原子炉内の一次冷却材の流れ、燃料集合体内の流れ（隣接燃料による影響）などの影響と、支持格子の燃料棒保持力が中性子照射にともない低下する影響等が重なったことにより、燃料棒の振動が大きくなり、その状態で燃焼が進んだことから、摩耗が進展して微小孔（ピンホール）が生じたものによると推定されている。

具体的な推定要因としては、以下の4つである。

① [集合体内流動要因]

燃料集合体断面内の横流れ強度が、下部炉心板流路孔周縁部の集合体外側で大きめであり、この横流れにより燃料棒の振動が大きくなった可能性がある。

② [隣接燃料による流動要因]

複数の圧損や構造の異なる燃料との隣接により、17×17A型燃料の炉心入口での流況が変化し、燃料棒の振動が大きくなった可能性がある。

③ [炉内流動要因]

炉心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がある。

④ [構造、照射要因]

最下部支持格子の支持板、ばね板と燃料棒との接触が一部離れる事象（リフトオフ）が発生することで、燃料棒の振動が大きくなり、摩耗が大きくなった可能性がある。

ガドリニア入り燃料棒については、外径減少が大きいことにより、中間部支持格子燃料棒保持部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り、摩耗が大きくなった可能性がある。

## 2. 3 対 策

漏えい実績及び推定要因、推定メカニズムから、4ループプラントにおいては、漏えいの原因が判明するまで17×17A型燃料について、

①これまでに漏えいが発生した燃焼度以上とならないよう、燃焼度を管理する。

②炉心中心位置には装荷しない

こととしている。また、一連の燃料漏えいに対する一次冷却材の流れの影響を緩和するために、燃料設計の一部変更について検討を行うこととし、現在実施している照射後試験で得られる知見について、今後の燃料設計に活用することとしている。

### 3. 3 ループプラントの評価結果

4 ループプラントにおける17×17 A型燃料漏えいに係る報告を踏まえ、3 ループプラントにおいて17×17 A型燃料を使用する際に、同様の観点から、燃料漏えいが発生する可能性があるかどうか評価した。

#### 3. 1 推定メカニズムによる評価

##### (1) 原子炉内の一次冷却材の流れの違いによる推定

4 ループプラントでは、17×17 A型燃料集合体内部での一次冷却材の横流れが、構造（燃料集合体下部における圧損等）の異なる集合体との隣接の影響とも相まって、原子炉内の一次冷却材の流れが比較的速い位置（炉心中央領域）において大きくなったことを推定要因としてあげている。

3 ループプラントでは、プラント特性の違いから、原子炉内の一次冷却材の流れが4 ループプラントと比較して全域にわたって遅く、特に4 ループプラントで燃料漏えいが連続して発生している炉心中央領域より速い位置は、炉心中心位置の1箇所のみである。

このことから、3 ループプラントにおいては、フレットニング摩耗の推定要因とされている燃料集合体内部での一次冷却材の流れが4 ループプラントと比較して相対的に小さく、燃料漏えいが発生する可能性は低いと考えられる。

（添付資料－2）

##### (2) 解析による評価結果

4 ループプラントでの燃料漏えいに対して行われた解析等で得られた推定メカニズムについて、3 ループプラントに対して評価した。なお、原子炉内の一次冷却材の流れ以外の条件については、4 ループプラントと異なるものはないため、解析条件として同じものとした。

###### ①炉心内全域に対する評価

原子炉内の一次冷却材の流れが4 ループプラントより遅いことから、集合体内での横流れ、隣接燃料の影響が緩和され、その結果、3 ループプラントでの摩耗体積は、4 ループプラントよりも相対的に小さくなることがわかった。

（添付資料－3）

###### ②炉心中心位置に対する評価

上述のとおり、3 ループプラントにおいては、原子炉内の一次冷却材の流れが遅いことから、相対的に摩耗体積は小さくなるが、炉心中心位置の1箇所のみ4 ループプラントで燃料漏えいが連続して発生している炉心中央領域より原子炉内の一次冷却材の流れが速いことから、3 ループプラント炉心中心位置に

における17×17A型燃料の摩耗体積について評価した。

その結果、現実的な炉心中心位置での燃料使用方法を考えた場合、3ループプラントでの摩耗体積は、燃料漏えいが発生している4ループプラントの炉心中央領域よりも相対的に小さくなることがわかった。

(添付資料-4)

### (3) まとめ

4ループプラントにおける燃料漏えいに係る報告内容、すなわち一連の燃料漏えいについての推定要因、推定メカニズム等から評価した結果として、現時点において、3ループプラントで17×17A型燃料を使用する際には、4ループプラントと比較して燃料漏えいが発生する可能性は低いと考えられる。

## 3. 2 3ループプラント燃料漏えい実績による推定メカニズムの考察

### (1) 4ループプラント推定メカニズムの適用性評価

これまでに、3ループプラントにおいて17×17A型燃料の漏えいは1例(1プラント、集合体1体(燃料棒1本))あり、この実績と4ループプラントでの推定メカニズムを比較した。

その結果、漏えい燃料に対して実施したファイバースコープでの観察で、4ループプラントで認められた最下部支持格子位置における支持格子と燃料棒の間の隙間等が確認されているものの、

- ・漏えい燃料が1例のみであり、また高燃焼度まで到達したウラン燃料に対するファイバースコープ観察にて異常が認められていない
- ・燃料漏えいの発生燃焼度が異なる(ほぼ最高燃焼度まで燃焼が進んだ時点で発生)
- ・炉心内で最も流速の遅い最外周部(バッフル板Lコーナー位置)で漏えいしている

ことなど、3ループプラントでは、4ループプラントの一連の燃料漏えいと状況が異なることから、一次冷却材の流速以外の要因も影響している可能性が考えられる。

(添付資料-5)

### (2) 推定メカニズムの考察

3ループプラントで発生した燃料漏えいがガドリニア入り燃料棒であったことから、仮に4ループプラントで報告されているガドリニア入り燃料棒に関する漏えいの推定要因(外径減少が大きいことによる中間支持格子燃料棒保持部での僅かな隙間の発生の可能性)を当てはめて評価した。

(添付資料-6)

その結果、中間支持格子燃料棒保持部に僅かな隙間が発生したと仮定した場合にのみ、摩耗体積が大きくなることから燃料漏えいに至る可能性がある結果となったが、

- ・ これまでの3ループプラント及び4ループプラントにおける漏えい燃料棒に対するファイバースコープ観察では、中間支持格子燃料棒保持部における隙間等は確認されていないこと
- ・ 先行照射燃料に対する照射後試験の結果から、ジルカロイ支持格子の拘束力緩和率はインコネル支持格子に比べて大きいものの、燃料棒振動への影響はわずかであること

から、4ループプラントにおいて漏えいが発生した17×17A型燃料に対して進められている照射後試験へ参画する等、本仮説の妥当性の確認を含めて、今後とも原因究明に努める必要がある。

#### 4. 3ループプラントでの対応策

3ループプラントでは、上述の評価結果から、17×17A型燃料を原子炉に装荷して使用する際に、4ループプラントで推定されているメカニズムと同様の漏えいが生じる可能性は低いと考えられるが、3ループプラントにおいて1例のみではあるものの、同型燃料の漏えいが発生していることを踏まえ、念のために、漏えい原因が判明するまでは、炉心運用上、以下の点を考慮することとする。

##### 【炉心運用上の考慮事項】

ガドリニア入り燃料集合体（10%）は、念のため、燃焼の進んだ（最終サイクル）燃料集合体はLコーナー位置へ装荷しない。

なお、燃料からの漏えいの有無は一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、万一、燃料漏えいの疑いが生じた場合には、平成22年2月5日付け原子力安全・保安院指示に基づき監視を強化し、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確認していくこととする。

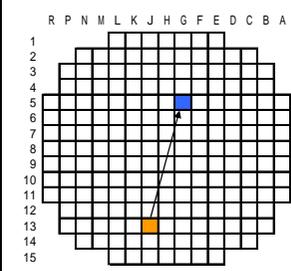
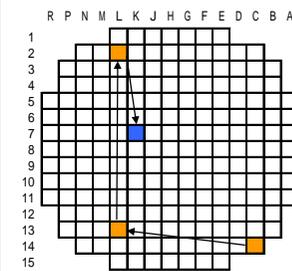
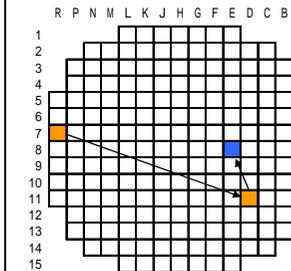
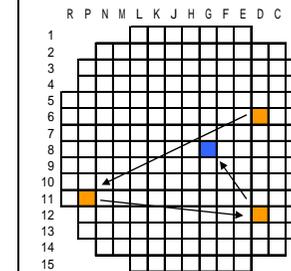
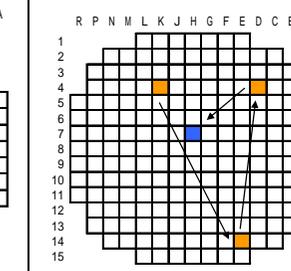
燃料の漏えいについては、過去において様々な要因により発生しており、その都度、燃料設計を改良するなど、漏えい発生の可能性を可能な限り低減するよう努めてきている。

（添付資料－7）

今回の17×17A型燃料で発生した一連の燃料漏えいについても、必要な照射後試験が進められており、この試験結果等に基づく知見を踏まえて必要な対策を講じる等により、今後とも燃料の信頼性向上を図っていく。

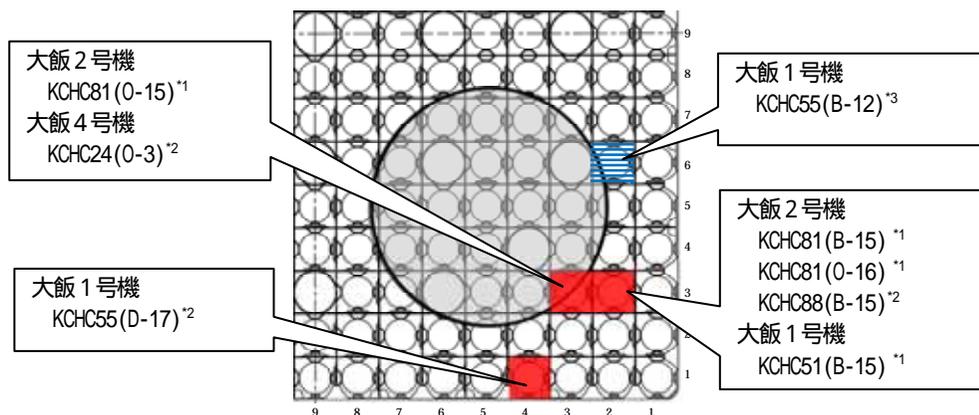
以 上

4ループプラントにおける燃料漏えいの実績

		大飯4号機	大飯2号機			大飯1号機	
プラントタイプ		4ループ					
燃料番号		KCHC24	KCHC81	KCHC88	KCHC51	KCHC55	
漏えい燃料棒 (被覆管材質)		ガドリニア入り燃料棒 (ジルコウム基合金)	ウラン燃料棒 (ジルコウム基合金)	ウラン燃料棒 (ジルコウム基合金)	ウラン燃料棒 (ジルコウム基合金)	ウラン燃料棒 (ジルコウム基合金)	
使用履歴等	燃料集合体 燃焼度	約37.6GWd/t	約47.1GWd/t	約40.8GWd/t	約46.5GWd/t	約46.5GWd/t	
	照射期間	約2.3年	約3.6年	約2.8年	約3.3年	約3.3年	
	装荷位置	炉心中央領域 (G-5) 	炉心中央領域 (K-7) 	炉心中央領域 (E-8) 	炉心中央領域 (G-8) 	炉心中央領域 (H-7) 	

添1-1

[ 漏えい燃料棒位置 ]



\*1: 隙間等を確認  
\*2: 隙間等は認められず  
\*3: 漏えいは認められないが隙間等を確認

### 原子炉内一次冷却材流速の比較

3 ループプラントでは、原子炉内の一次冷却材の軸流速が 4 ループプラントに比べて炉心内全域にわたって小さく、4 ループプラントで漏えいが発生している炉心中央領域の軸流速より大きいのは、図 1 に示す通り炉心中心位置のみである。

また、3 ループプラントと 4 ループプラントの軸流速の差を図 2 に示すが、これからも、3 ループプラントでは中心位置を除き炉心全域にわたり軸流速は 4 ループプラントより小さいことがわかる。

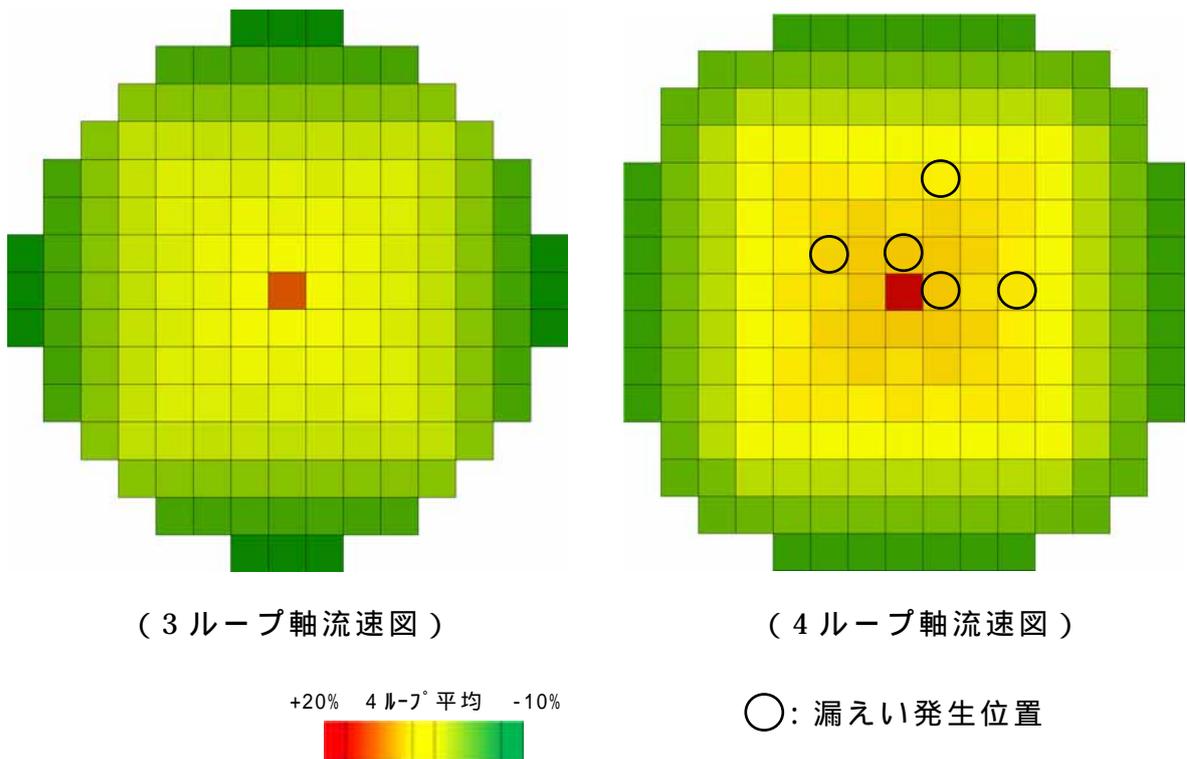


図 1 軸流速の比較 ( 3 ループ及び 4 ループプラント )

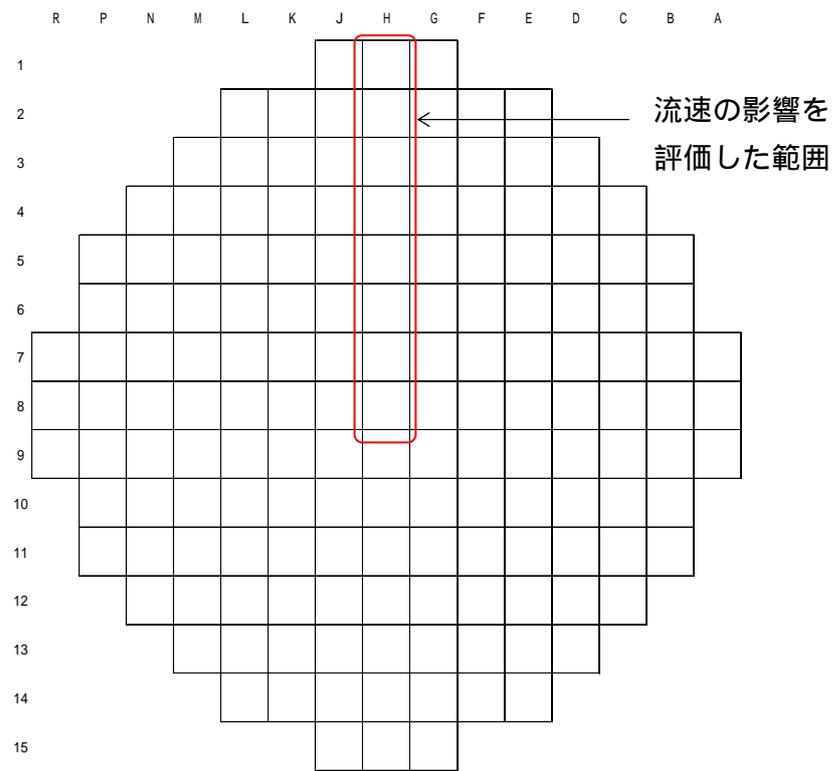
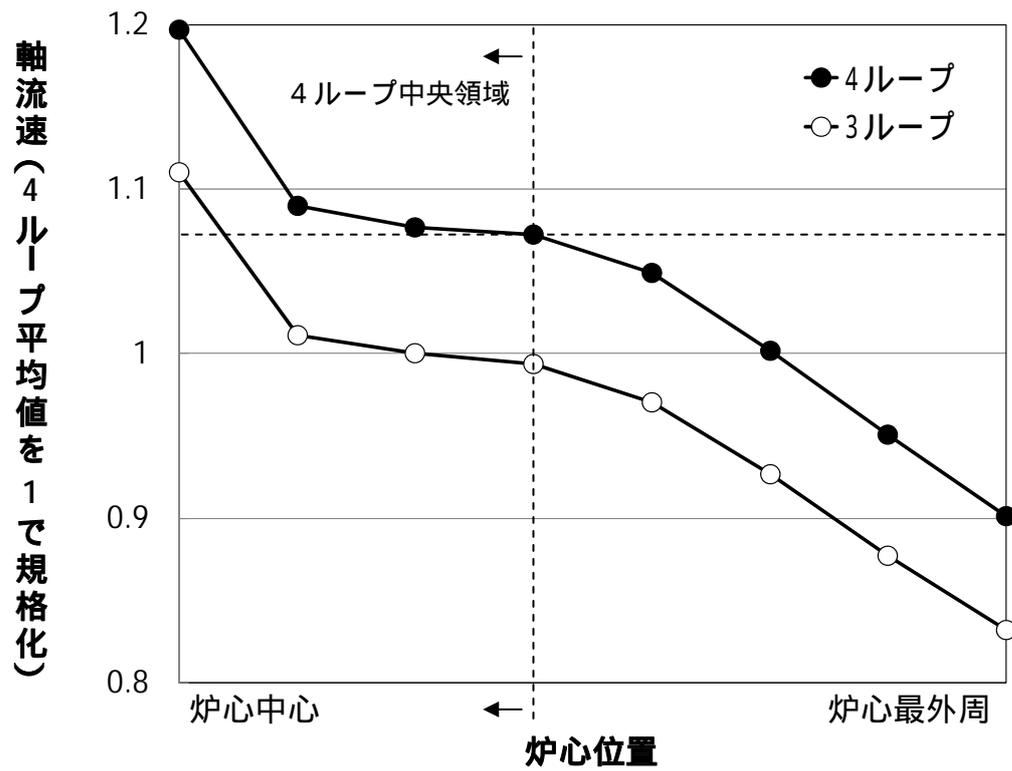


図2 4ループ炉心と3ループ炉心の軸流速分布比較  
(炉心H列での比較)

### 3 ループプラントにおける摩耗体積の評価

#### 1 . ワークレート\* の評価

添付資料 - 2 に示す軸流速の差に基づき、3 ループプラントにおける燃料棒摩耗体積の評価を行うため、燃料集合体内流動要因及び隣接燃料要因を考慮して、燃料棒振動のワークレート評価を実施した( 図 1 )。

その結果、3 ループプラントでは、燃料集合体内全域にわたって、ほぼ軸流速の差に比例するかたちで、4 ループプラントに比較してワークレートが小さいことがわかる。

\* ワークレート: 燃料棒が支持格子の支持板 / ばね板と接触しながら振動する際の荷重 × 滑り距離 ( 単位時間当たり )、すなわち時間当たりの仕事量。

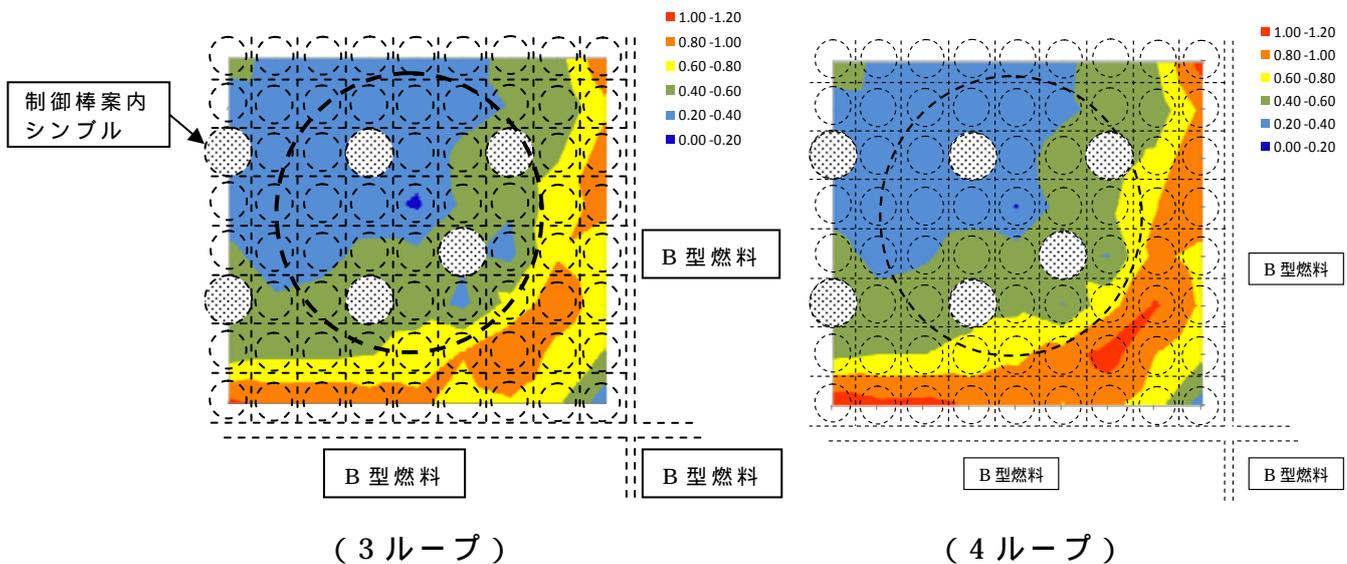


図 1 3 ループプラントと 4 ループプラントにおけるワークレート図

## 2. 摩耗体積評価

3 ループプラントにおける摩耗体積評価について、上記 1. で評価したワークレート及び 4 ループプラントでの解析条件を用いて行い、4 ループプラントでの摩耗体積と比較するとともに B 型燃料隣接面数による摩耗体積への影響を評価した ( 図 2 )。

その結果、図 2 に示すとおり、摩耗体積は 4 ループプラントと比較して小さいことがわかる。なお、3 ループプラントにおいても、B 型燃料隣接面数が少なくなるにつれ、摩耗体積は若干減少する。

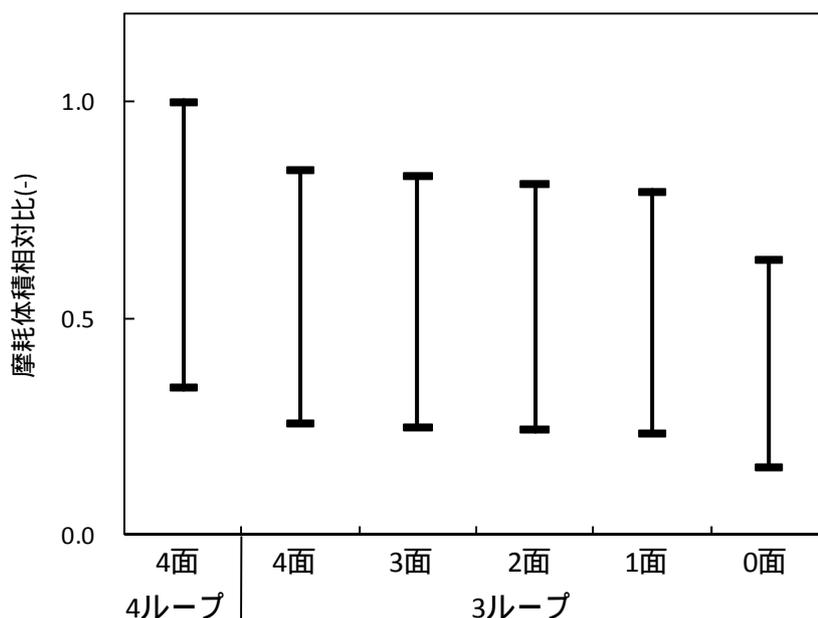


図 2 摩耗体積評価結果の比較 ( B 型燃料隣接面数 )  
( 4 ループの摩耗体積を 1.0 とした時の比 )

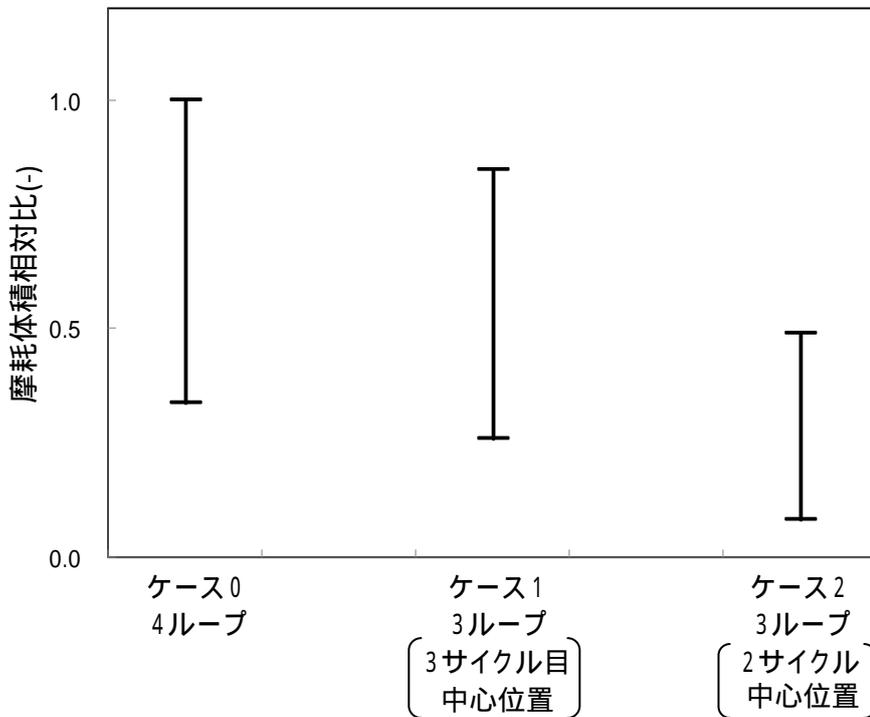
### 【評価条件】

- ・ 3 サイクル照射を仮定した。
- ・ A 型燃料の 3-2 位置のウラン燃料棒について、第 2 サイクル初期に支持格子による燃料棒保持部でのリフトオフが発生したものと仮定した。
- ・ 最下部支持格子部の摩耗体積がギャップ相当に達した時点で、振動増大によるワークレート増加を考慮した。
- ・ 比摩耗量データとして長時間流動振動試験ないしは支持格子 - 被覆管摩耗要素試験のデータ範囲を考慮した。
- ・ 流速は、それぞれ炉心中心の隣接位置の流速を用いた。
- ・ 隣接面の影響については最終サイクルの条件を変更して比較した。

### 3 ループプラント炉心中心位置における摩耗体積評価

3 ループプラント原子炉内の一次冷却材の流れは、4 ループプラントと比較して全域にわたって遅いが、4 ループプラントで漏えいが発生している炉心中央領域に比べて流速が速い箇所として唯一炉心中心位置があることから、3 ループプラントでの炉心中心位置における摩耗体積を評価した( 図 1 )。

評価の結果、3 ループプラントの炉心中心位置に 1 サイクル装荷された場合、摩耗体積は 4 ループプラントの場合に比べて小さいことがわかる。また、現実的に考えて、中心位置に連続して 2 サイクル装荷されることはあまりないが、そのような場合を仮定して評価しても摩耗体積は 4 ループプラントの場合に比べて小さいことがわかる。



ケース	ループ	装荷履歴
ケース0	4ループ	3 サイクルとも炉心中心の隣接位置に装荷、B 型 4 面隣接
ケース1	3ループ	3 ループの平均流速位置に 2 サイクル、その後、炉心中心位置に 1 サイクル装荷、いずれも B 型 4 面隣接
ケース2	3ループ	炉心中心位置に 2 サイクル装荷、B 型 4 面隣接

図 1 摩耗体積評価結果の比較 ( 中心位置の影響 )  
( 4 ループの摩耗体積を 1.0 とした時の比 )

【評価条件】

- ・ 3 サイクル照射を仮定した。
- ・ A 型燃料の 3-2 位置のウラン燃料棒については、第 2 サイクル初期に支持格子による燃料棒保持部でのリフトオフが発生したものと仮定した。
- ・ 摩耗体積がギャップ相当に達した時点で、振動増大によるワークレート増加を考慮した。
- ・ 比摩耗量データとして長時間流動振動試験ないしは支持格子 - 被覆管摩耗要素試験のデータ範囲を考慮した。

### 3 ループプラントにおける漏えいの実績との比較

3 ループプラントでこれまでに発生している漏えいは 1 例 ( 1 体 : ガドリニア入り燃料棒 1 本 ) のみであり、4 ループプラントにおける漏えいと比べて状況が異なる。

漏えい燃料に対して実施したファイバースコープでの観察結果で、最下部支持格子位置において支持格子と燃料棒間に隙間等が確認されており、4 ループプラントで発生しているフレットング摩耗による漏えいと共通する状況もあるが、3 ループプラントにおける漏えい発生状況の 4 ループプラントとの相違は以下のとおりである。

4 ループプラントではウラン燃料と 10% ガドリニア入り燃料ともに漏えいが発生している ( 5 体 : 7 本 ( ウラン燃料棒 6 本、ガドリニア入り燃料棒 1 本 ) ) のに対して、3 ループプラントでは、10% ガドリニア入り燃料のみで漏えいが発生している ( 1 体 : ガドリニア入り燃料棒 1 本 ) 。また、3 ループプラントにおいて高燃焼度まで到達したウラン燃料についてファイバースコープにて最下部支持格子位置の観察を実施したが、支持格子と燃料棒間に隙間等は確認されなかった。

4 ループプラントでは漏えい発生時期が 37GWd/t ~ 47GWd/t で発生しているのに対して、3 ループプラントでは 54GWd/t とほぼ最高燃焼度まで進んだ時点で発生している。

上記 の実績について、図 1 に示すが、母集団の差を考慮しても、3 ループプラントにおける漏えい発生確率は低く、また傾向も異なることがわかる。

4 ループプラントでは炉心中央領域にて漏えいが発生しているが、3 ループプラントでは図 2 に示す通り炉心中央部での漏えい発生はなく、最外周のバッフル板 L コーナー位置で発生している。

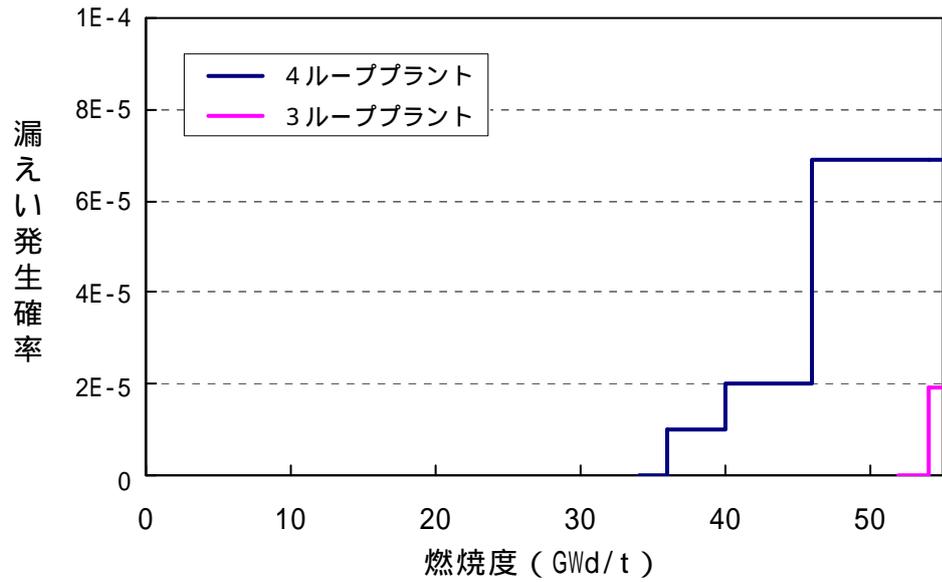


図1 漏えい発生確率の比較（3ループ及び4ループプラント）

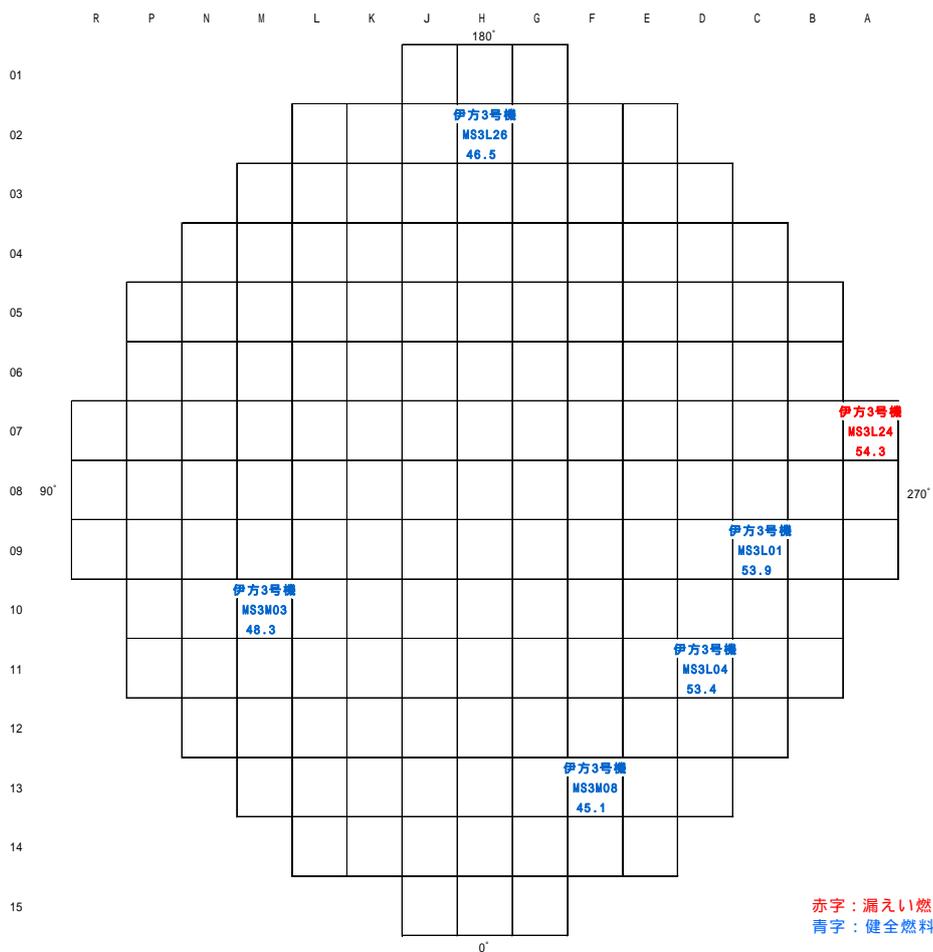
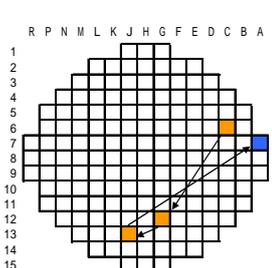
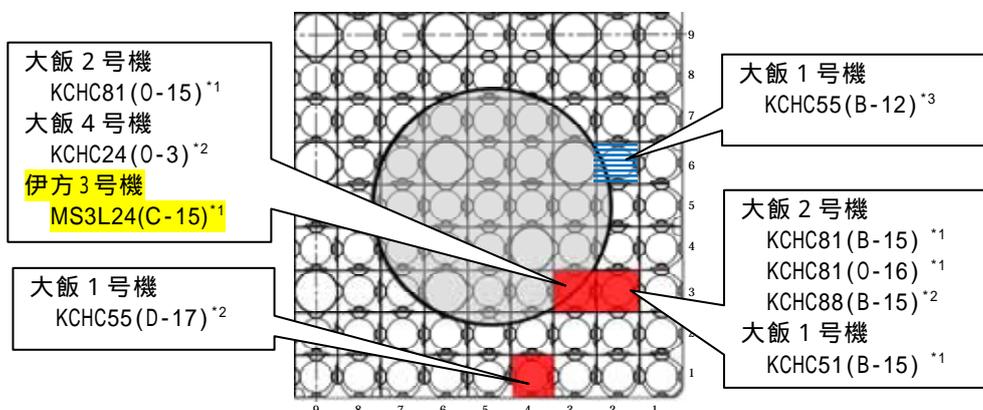


図2 3ループ漏えい燃料 / 健全燃料（45GWd/t 燃焼度以上）炉心位置

【参考】3ループプラントにおける燃料漏えいの実績

		伊方3号機	4ループプラントとの共通性評価	
プラントタイプ		3ループ	×	流速、流量等に差がある。
燃料番号		MS3L24	-	
漏えい燃料棒 (被覆管材質)		ガドリニア入り燃料棒 (ジルコニウム基合金)	×	特に偏りはない。 3ループ：ガドリニア入り燃料棒1本 4ループ：ウラン燃料棒6本、ガドリ ニア入り燃料棒1本で発生
使用 履 歴 等	燃料集合体 燃焼度	約54.3GWd/t	×	漏えい発生燃焼度領域が異なる。 3ループ：ほぼ最高燃焼度まで燃焼 が進んだ時点 4ループ：37～47GWd/t
	照射期間	約4.3年	×	4ループプラントは3年前後で漏えい が発生している。
	装荷位置	炉心最外周部 (A-7) 	×	装荷位置に共通性はない。 3ループ：炉心最外周部 (バッフル板Lコーナー位置) 4ループ：炉心中央領域

[ 漏えい燃料棒位置 ]



\*1：隙間等を確認

\*2：隙間等は認められず

\*3：漏えいは認められないが隙間等を確認

3 ループプラントにおける燃料漏えいに関する仮説  
( ガドリニア入り燃料棒の漏えいに関する推定要因での評価 )

3 ループプラントで発生した燃料漏えいは、ガドリニア入り燃料棒の漏えいであり、4 ループプラントにおける漏えいに関して報告されている以下の推定要因を当てはめて評価した。

【 4 ループプラントでの推定要因 】

・ ガドリニア入り燃料棒については、外径減少が大きいことにより、中間支持格子燃料棒保持部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り、摩耗が大きくなった可能性がある。

1 . ガドリニア入り燃料棒の外径減少について

ガドリニア入り燃料棒は、比較的低出力であることから、ウラン燃料棒に比べて燃料棒の外径が減少しやすい傾向にある。

3 ループプラントにおいて燃料漏えいが発生した燃料集合体について、ガドリニア入り燃料棒等の外径を評価した結果を図 1 に示すが、最終サイクルに出力の低いバッフル板 L コーナー位置へ装荷されたことから、外径減少がより大きい傾向となっていることがわかる。

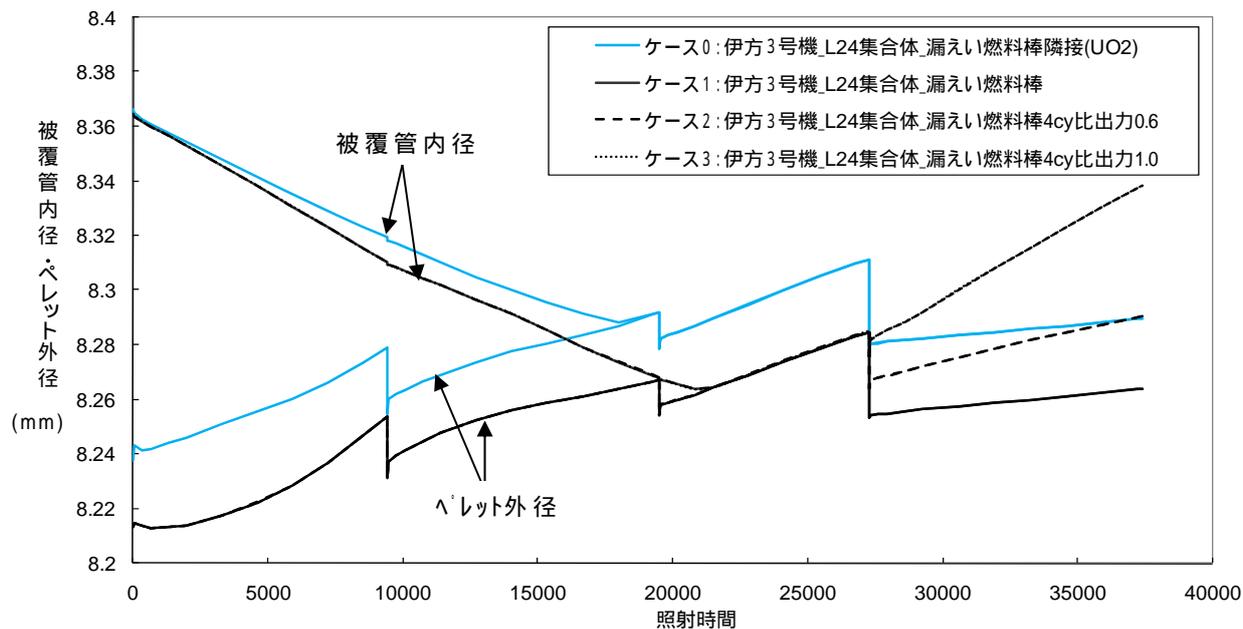
なお、仮に当該燃料集合体を最終サイクルに出力の高い箇所に装荷した場合においては、外径はそれほど小さくならない評価結果となっている。

2 . 推定メカニズムによる摩耗体積評価

3 ループプラントにおいて漏えいが発生したのは、10% ガドリニア入り燃料集合体であり、図 2 に示すとおり、ワークレートの比較的大きい位置 ( 集合体内外周部 ) にガドリニア入り燃料棒が配置されている。なお、6% ガドリニア入り燃料集合体については、ワークレートの大きな位置にガドリニア入り燃料棒は配置されていない。

ここで、3 ループプラントの漏えい燃料集合体の装荷位置の履歴を考慮した摩耗を評価した ( 表 1 及び図 3 )。

その結果、万一、中間支持格子燃料棒保持部において、上述のガドリニア入り燃料棒の外径減少の効果により僅かな隙間が発生したと仮定した場合においてのみ、摩耗体積が貫通摩耗相当となる結果となった。



ケース	燃料棒	出力履歴*
ケース 0	伊方 3 号機 L 2 4 漏えい燃料棒の隣接燃料棒 (ウラン燃料棒)	実際出力履歴 (比出力約 0.24)
ケース 1	伊方 3 号機 L 2 4 漏えい燃料棒 (ガドリニア入り燃料棒)	実際出力履歴 (比出力約 0.26)
ケース 2	同上燃料棒	炉心中央位置に装荷したと仮定 (最終サイクル比出力 0.6)
ケース 3	同上燃料棒	同上 (1.0)

\* ( ) 内は比出力：対象燃料棒のサイクル燃焼度 / 炉心のサイクル燃焼度

図 1 3 ループプラントでの漏えい燃料棒外径変化図 (下から 2 番目のグリッド)

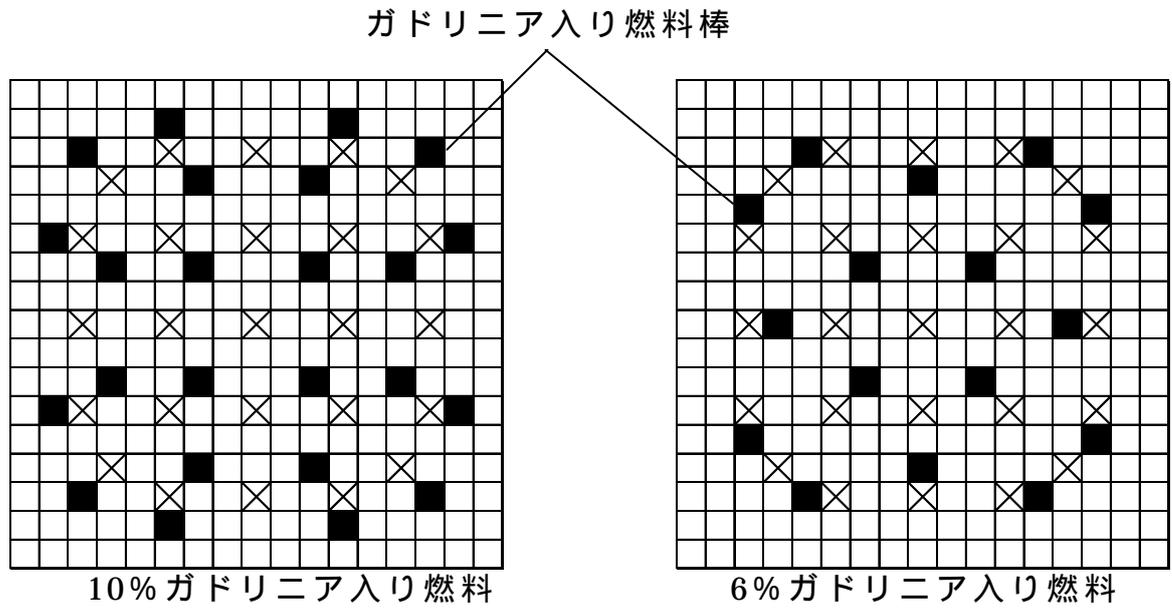


図 2 ガドリニア入り燃料集合体内のガドリニア入り燃料棒の配置図

表 1 3 ループプラント漏えい燃料棒 摩耗評価

【評価条件】

- (1) L24 の炉心装荷履歴を考慮して評価を実施。
- (2) 対象燃料棒はワークレートの比較的大きい3-3位置のガドリニア入り燃料棒（漏えい燃料棒）とした。
- (3) 評価ケース  
 下表に示す3条件で評価を実施した。その他の解析条件は以下の通りである。
  - ・ 流体力モーメント低減によるリフトオフ発生の遅れを考慮した。
  - ・ 比摩耗量データとして、長時間流動振動試験ないしは支持格子 - 被覆管摩耗要素試験のデータを考慮した。

ケース No.	中間支持格子でのギャップ発生	最終サイクルでの炉内装荷位置
ケース 1	中間部グリッドギャップ仮定	実機と同様に、外周位置に装荷。 (L コーナー装荷、B 型燃料 1 体と隣接)
ケース 2	中間部グリッドギャップなし	同上
ケース 3-1	中間部グリッドギャップなし	炉心中央領域に装荷された場合 (B 型燃料 1 体隣接)
ケース 3-2	中間部グリッドギャップなし	炉心中央領域に装荷された場合 (B 型燃料 4 体隣接)

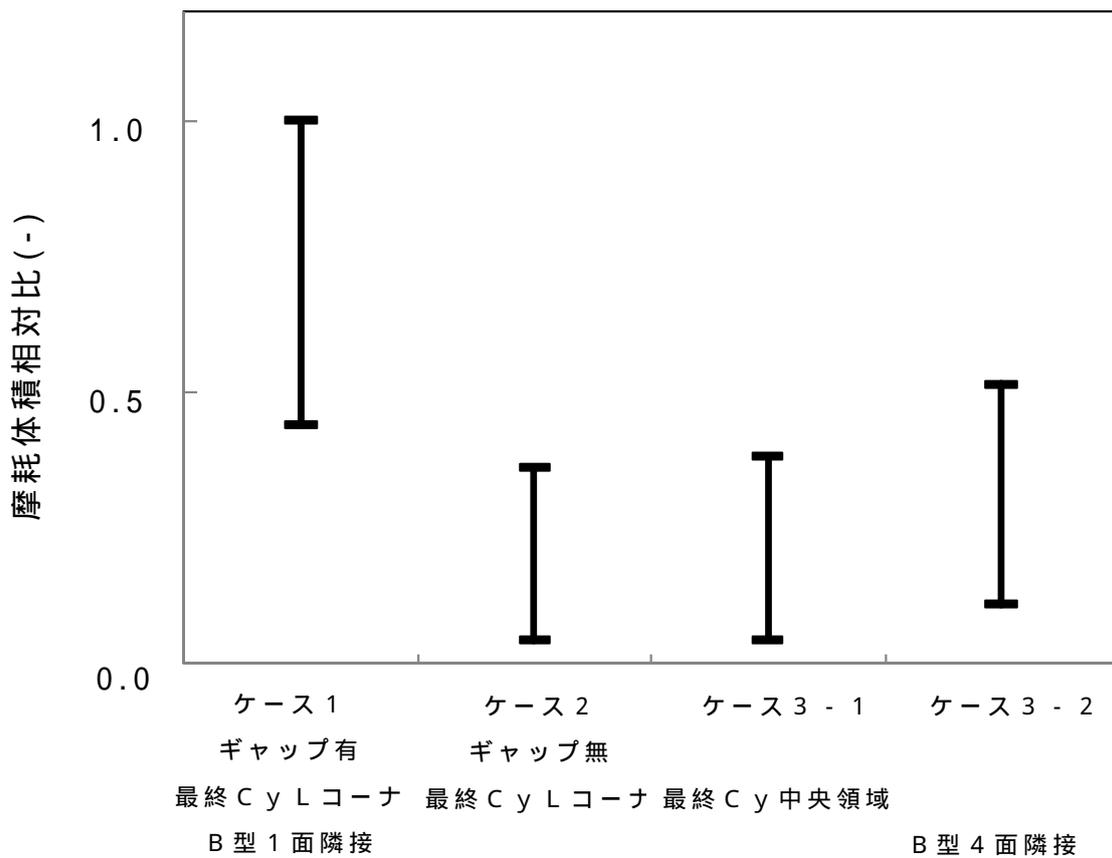
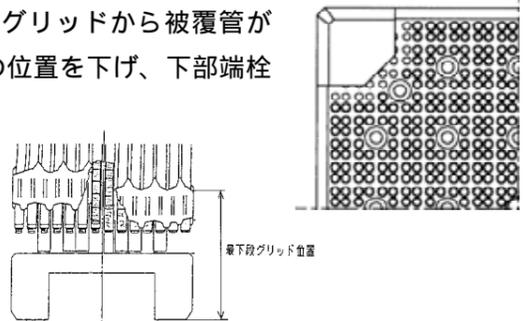
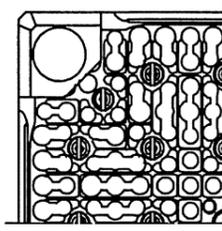
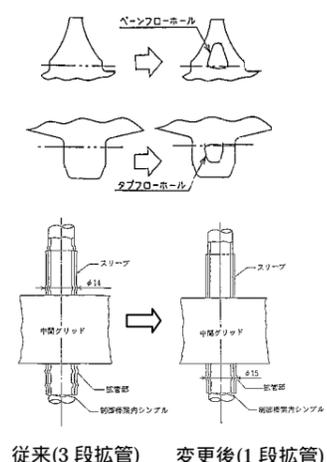
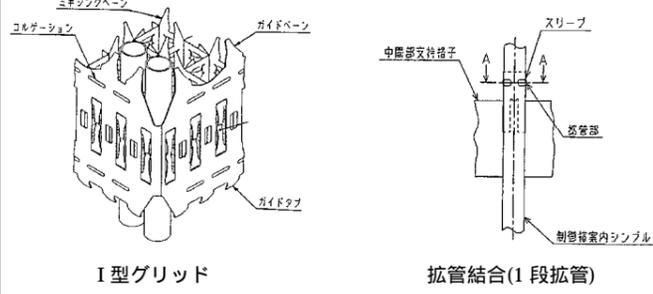


図 3 3 ループプラントガドリニア入り燃料棒の摩耗体積評価結果  
(摩耗体積は、貫通摩耗体積を 1.0 とした場合の相対比)

A型燃料の漏えい原因と対策及び 55GWd/t 燃料における対策

	過去の燃料漏えい	17×17 39 / 48GWd/t 燃料でのリーク対策	17×17 55GWd/t 燃料でのこれまでの漏えい対策 (39 / 48GWd/t 燃料での対策を維持・改良)	
燃料漏えい対策	<p>異物 フレットイング (異物により、被覆管が損傷)</p> <p>1) 下部グリッド位置の変更...下部グリッドから被覆管が露出しにくい様に下部グリッドの位置を下げ、下部端柱を長尺化</p> <p>2) 異物対策下部ノズル...下部ノズルにフィルタ機能を持たせるため、下部ノズルの流路孔を細径化、多孔化</p> 	<p>・低圧損下部ノズル+グリッド型異物フィルタの採用...ジルカロイグリッド採用による圧損増加を抑えるため低圧損下部ノズルを採用。グリッド型異物フィルタ採用により従来と同等以上の異物トラップ性能を確保。</p> 	<p>(参考) 55GWd/t 燃料での性能改良点</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・燃料棒全長を長くし、燃料棒内圧上昇を抑制。</li> <li>・被覆管材料をジルカロイ-4 から MDA あるいは ZIRLO に変更し、被覆管の耐食性を向上。</li> <li>・初期 He 加圧量を変更し、燃料棒の内圧上昇を抑制。</li> <li>・中間部グリッドをインコネルからジルカロイに変更し、被ばく低減及び使用済燃料発生量を抑制。 (上下部グリッドはインコネルのまま)</li> <li>・ジルカロイグリッド採用による圧損増加に対して上部ノズルを低圧損型とし、燃料集合体圧損の増加を抑制。</li> <li>・案内シンブルを改良シンブル(太径化)にして制御棒不完全挿入事象を抑制。</li> </ul>	
	<p>グリッド フレットイング (集合体振動により、グリッドと燃料被覆管間で摩擦が発生)</p> <p>1) 従来型グリッドにおける対策</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ベーン・タブフローホールの設置...バッフル板/グリッド間の流体力を抑制するため、グリッドの外ストラップのベーンとタブにフローホールを設置</li> <li>- グリッド拡管結合方式の変更...燃料集合体の構造減衰を増加させるため、グリッドと案内シンブルの拡管結合段数を変更</li> </ul> <p>2) I 型グリッドの採用...外ストラップ側にキーイン用窓の設置により、集合体振動特性を改善。</p> 	<p>・I 型グリッドの採用...ジルカロイグリッドにおいても I 型が採用し、良好な集合体振動特性を維持。</p> <p>・グリッドと案内シンブルの拡管結合段数は、48 燃料と同じ。</p> 		
	<p>外面水素化 (被覆管表面にニッケルが付着し、水素吸収が大きくなって被覆管が損傷)</p> <p>1) つかみ確認治具の採用...つかみ確認治具により引込治具の健全性確認</p> <p>2) 燃料棒引込治具がグリッドと干渉しないような引込方式に変更</p> <p>3) メカニカルマスクめっきの採用...燃料棒と接触する部分に Ni メッキを施さないグリッドのめっき方法に変更</p> <p>4) I 型グリッドばね...燃料棒引込時に拘束力が働かない状態として、燃料棒のスクラッチを防止</p>	<p>・I 型グリッドばね...ジルカロイグリッドにおいても I 型を採用し、燃料棒のスクラッチを防止。</p> 