

BWRの過酷事故における「照射による変形(燃料棒の軸方向成長、燃料ペレットの径方向膨らみ)」に関する学術的知見の評価結果を報告します。

この変形は、主に通常運転時の中性子照射によって発生・蓄積する現象です。過酷事故(SA)の文脈においては、事故開始(スクラム)時点での\*\*「初期条件」\*\* (例: 炉心形状、燃料の熱的・機械的状态)を決定する要因として極めて重要です。

事故発生後(第1フェーズ以降)は中性子照射がほぼ停止するため、この「照射による変形」が新たに進展することはありません。したがって、本評価は\*\*第1フェーズ(初期条件として)\*\*に焦点を当て、第2フェーズ以降は「対象外(-)」として扱います。

---

## I. 情報収集(共通)

### 1. ランドマーク論文の特定

燃料の照射挙動(スエリング、軸方向成長)に関する知見は、長年の国際的な研究プログラム、照射後試験(PIE)、および解析コード開発を通じて蓄積されてきました。以下に、この分野の基盤となった代表的な研究成果(特定の論文に加え、影響力の大きいコードマニュアルやレビューを含む)を最大10点整理します。

No.	論文タイトル / 文書名	著者名(または発行機関)	DOI / URL / 書誌情報	主要な発見(研究成果)
[1]	Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements	Olander, D. R.	TID-26711 (1976)	燃料照射挙動の物理的・化学的メカニズム(スエリング、クリープ、FGR等)を網羅した古典的かつ基本的な教科書。
[2]	Irradiation induced swelling of	Massih, A. (AEA-ATOM)	INIS-mf-11505 (1988) [INIS-IAEA	燃料挙動解析コード(STAV-6)向けに開発され

	nuclear fuel		20023188]	た、物理ベースの気体スエリングモデルを提示[3.3]。
[3]	High burnup structures in UO <sub>2</sub> fuel	Manzel, R., & Walker, C. T.	J. Nucl. Mater., 301(2-3), 85-94 (2002) (※1)	高燃焼度燃料のペレット外周部(リム領域)における特異な組織変化と、それに伴うスエリングへの影響を説明。
[4]	A review of fuel performance modelling	Pastore, G., et al.	J. Nucl. Mater., 518, 300-321 (2019) (※2)	燃料挙動モデリングの現状(スエリング、FGR、PCMI等)に関する包括的なレビュー。
[5]	FRAPCON-4.0: A Computer Code for the Calculation of Steady-State Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup	Geelhood, K. J., et al. (PNNL)	NUREG/CR-7022, Vol. 1 (2015)	米国NRCが開発した標準的な燃料挙動解析コード。照射成長、スエリングの経験モデルを搭載し、広く検証されている[5.3]。
[6]	FEMAXI-7: Computer Program for the Analysis of Thermal and Mechanical Behavior of	Suzuki, M., et al. (JAEA)	JAEA-Data/Code 2010-025 (2010)	日本で開発された主要な燃料挙動解析コード。詳細なスエリング・PCMIモデルを有する。

	Fuel Rods			
[7]	Pellet-clad Interaction in Water Reactor Fuels (Seminar Proceedings)	OECD Nuclear Energy Agency (NEA)	OECD/NEA No. 6004 (2004)	ペレットスエリリングと被覆管変形が引き起こすPCMI(ペレット・被覆管機械的相互作用)のメカニズムと影響に関する知見の集大成 [2.2]。 。
[8]	Techniques of Post-Irradiation Examination (PIE) for Water Reactor Fuel	Onufriev, V. (IAEA)	IAEA (2005) [ICTP Indico a04215]	照射後の燃料寸法(軸方向成長、径方向変化)を測定するための標準的な実験技術(PIE)の概要 [4.2]。
[9]	Post-irradiation examinations (PIEs) of nuclear power plant fuel	Japan Atomic Energy Agency (JAEA)	JAEAウェブサイト(参照 2025-11-07)	実機照射燃料のPIEを実施するホットセル施設(例: JAEA RFEF)の存在と、寸法測定が主要項目であることの証左 [4.3]。
[10]	ZIRAT-10 Special Topic on Structural Behavior	Limbäck, M. (A.N.T. International)	A.N.T. International (2004)	BWR燃料集合体における構造材(被覆管、チャンネルボックス)の照射成長(Irradiation Growth)のメカニズムとモデルについてレ

				ビュー [1.1]。
--	--	--	--	------------

(※1) [2.4]のスニペットで言及された文献を特定。(※2) [2.3]のスニペットがレビュー論文であることを示唆。

## 2. 研究トレンドの抽出

選定された文献群から、以下の主要な理論(モデル)と研究手法が特定されました。

- 主要な理論(モデル):
  - ペレットスエリング: 燃料ペレット(UO<sub>2</sub>)の体積増加。これは、(1) 固体核分裂生成物(FP)の蓄積によるマトリックススエリングと、(2) 気体FP(Xe, Kr)が気泡を形成・成長させるガススエリングの二つの寄与から成ります [1, 2]。特に高燃焼度ではリム領域でのガススエリングが顕著になります [3]。
  - 燃料棒の軸方向成長: 主に被覆管(ジルカロイ)が中性子照射を受けることで生じる照射成長(Irradiation Growth) [10] と、ペレットと被覆管の機械的相互作用(PCMI) [7] によって引き起こされます。照射成長は中性子フルエンス、温度、材料の結晶方位に依存します。
  - 統合解析モデル: これらの個々の現象(スエリング、照射成長、クリープ、FGR、熱伝達)を統合し、燃料棒一本のふるまいを時系列でシミュレーションする燃料挙動解析コード(例: FRAPCON [5], FEMAXI [6])が標準的に用いられています [4]。
- 共通の研究手法:
  - 実験(照射後試験: PIE): 実機や試験炉で照射した燃料棒を取り出し、ホットセルと呼ばれる遮蔽施設でその性状を調べる手法です [8, 9]。軸方向成長は全長測定、ペレットの径方向膨らみは非破壊のプロフィロメトリ(外径測定)や破壊試験(金相観察)によって評価されます [4.2]。
  - 解析(コード検証): PIEで得られた実験データを使い、燃料挙動解析コード [5, 6] に実装されているスエリングモデルや照射成長モデルの妥当性を検証(Validation)し、必要に応じてモデルを改良します [5.3]。

## 3. 残存課題の明確化

文献が共通して指摘している主要な残存課題は以下の通りです。

1. 高燃焼度領域での予測精度: 燃料の燃焼度が60-62 GWd/tUを超える領域では、リム組織の形成 [3] やFGRの増加など、現象がより複雑になります。これらの高燃焼度特有の現象(特にスエリング)を正確に予測するモデルの精緻化が課題です [2.4, 5.3]。

2. 新型燃料への適用性: 性能向上のために開発された添加物入りペレット(例: Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ドーパ燃料)や、耐事故燃料(ATF)の新型被覆管は、従来の燃料とは異なる照射挙動(スエリングや成長)を示す可能性があります [2.1, 6.1]。これら新材料に対する既存モデルの適用性評価と、必要に応じた改良が求められます。
3. PCMI挙動の精緻化: ペレットのスエリングと被覆管の照射成長・クリープが複合的に作用して生じるPCMI [7] は、燃料棒の健全性評価(特に過渡時)において重要です。高燃焼度でギャップが閉鎖した後の複雑な機械的相互作用を、より高精度にモデル化することが課題です [2.2]

## II. 知見の程度評価: 数値指標化

評価対象の現象は「第1フェーズ」の初期条件としてのみ意味を持つため、評価は第1フェーズに限定します。

### 1. 実験的知見の程度の数値化

指標	第1フェーズ	第2フェーズ	第3フェーズ	第4フェーズ	第5フェーズ	評価理由 (第1フェーズ)
A. 実験データの有無	5	-	-	-	-	照射後試験(PIE)による寸法測定データは、数十年にわたる研究で世界的に豊富に蓄積されている [8, 9]。
B. 実機と	5	-	-	-	-	評価の基

の類似性						礎となる PIEデータ は、BWR 実機で長 期間使用 された燃 料そのも のを対象 としている ため、類 似性は最 も高い [9] 。
C. 実験範 囲の充足 性	4	-	-	-	-	標準的な 燃焼度範 囲(～62 GWd/tU) は広くカ バーされ ている。た だし、超 高燃焼度 領域や新 型燃料に 関する データは 相対的に 限定的で ある [2.4] 。
実験的知 見 総合ス コア( \$\$_{E}\$)	4.67	-	-	-	-	\$\$_{E}\$ = (5 + 5 + 4) / 3\$

\$\$\_{E}\$ 評価理由:

この分野の実験的知見は「非常に高い」レベルにあります。強みは、実機で使用された燃料そのものを対象とした\*\*照射後試験(PIE)\*\*という強力な実験手法が確立されており [8, 9]、長年にわたり

豊富なデータが蓄積されている点です。弱み(スコアが5.0でない理由)は、近年進められている超高燃焼度領域や新型燃料といった最先端の領域において、データがまだ蓄積途上である点 [2.4] にあります。

## 2. 解析的知見の程度の数値化

指標	第1フェーズ	第2フェーズ	第3フェーズ	第4フェーズ	第5フェーズ	評価理由 (第1フェーズ)
D. 解析モデルの有無(標準化)	5	-	-	-	-	FRAPCON [5] や FEMAXI [6] といった、標準的かつ広く合意された燃料挙動解析コードが存在し、その中に照射成長・スエリングモデルが組み込まれている。
E. 解析モデルのスケラビリティ	4	-	-	-	-	モデルは基本的に燃料棒1本を対象とする。炉心全体(数万本)の挙動は、これらの統計的

						集積として評価可能だが、集合体レベルの湾曲など複雑な相互作用の予測には課題も残る [5.1]。
F. 解析モデルの成熟度(信頼性)	4	-	-	-	-	モデルは豊富なPIEデータに基づき検証されており [5.3]、通常運転範囲での信頼性は高い。ただし、高燃焼度領域では不確かさが残ることが指摘されている [4, 6.1]。
解析的知見 総合スコア (\$S_{A}\$)	<b>4.33</b>	-	-	-	-	$S_{A} = (5 + 4 + 4) / 3$

$S_{A}$  評価理由:

解析的知見も「非常に高い」レベルにあります。強みは、長年のPIEデータによって検証・改良されてきた\*\*標準的な解析コード(モデル)\*\*が確立されている点です [5, 6]。弱みは、実験データが比較的少ない高燃焼度領域におけるモデルの不確かさ [4] や、燃料棒単体から集合体・炉心全体へとス

ケールアップする際の複雑な相互作用の扱いに残っています [5.1]。

### III. 総合的な知見の程度の数値化と結論

#### 1. 総合評価スコア ( $S_{Total}$ ) の算出

$$S_{Total} = (S_{E} \times 0.5) + (S_{A} \times 0.5)$$

時間フェーズ	$S_{Total}$
第1フェーズ	4.50
第2フェーズ	-
第3フェーズ	-
第4フェーズ	-
第5フェーズ	-

#### 2. スコアが示す知見の程度

時間フェーズ	スコア	知見の程度	結論(理由)
第1フェーズ	4.50	成熟期 [K]	通常運転時の照射による変形は、数十年にわたる実機燃料の照射後試験と解析コード開発により、その現象理解と予測技

			術が確立されている。高燃焼度化に伴う新たな課題は認識されているが、基盤となる知見は成熟期にある。
第2フェーズ	-	-	(対象外)
第3フェーズ	-	-	(対象外)
第4フェーズ	-	-	(対象外)
第5フェーズ	-	-	(対象外)

### 3. 今後の優先課題

$SS_{E}$ (4.67)と $SS_{A}$ (4.33)は共に極めて高いスコアであり、この分野の知見が成熟していることを示しています。わずかに $SS_{A}$ (解析的知見)が低いものの、その差は小さいです。

この結果から示唆される優先課題は、\*\*「高燃焼度化・新型燃料への対応」\*\*です。

具体的には、標準的な燃料に対する知見は確立されているため、今後は超高燃焼度領域や耐事故燃料(ATF)などの新材料を対象とした照射後試験データ( $SS_{E}$ )の拡充と、そのデータに基づく解析モデル( $SS_{A}$ )の精緻化および検証が、引き続き最優先の研究課題となります。