4.2 LOCA 試験

4.2.1 LOCA 模擬試験

本年度は、スペイン・バンデロス炉において照射された PWR・ウラン燃料から採取した燃料棒(MMDA3)を用いた LOCA 模擬試験^(1,2)(令和 2 年度に実施)における燃料棒内自 由体積の効果を確認するために、MMDA3 と同じ燃料棒から採取した MMDA4 を用いての LOCA 模擬試験を実施した。また、MMDA3 の LOCA 模擬試験後の金相観察データ及びス イス・ライプシュタット炉で照射された BWR 燃料から採取した燃料棒(LZRT5)を用い た LOCA 模擬試験⁽³⁾(令和 4 年度に実施)に関して LOCA 模擬試験前の金相観察データ (レファレンス)、LOCA 模擬試験後の X 線撮影写真を取得した。

(1) 試験燃料棒の作製

(a) 試験燃料棒 (MMDA4) について

本年度の試験に供した燃料棒の被覆材である M-MDA は、PWR ステップ 2 燃料被覆管 として使用実績のある MDA をベースに、MDA と同等の機械特性を維持しつつ耐食性を 高めるとともに、水素吸収量率を低減させる目的で Zr に Nb 及び Sn をそれぞれ 0.5 wt% 程度、Fe 及び Cr をそれぞれ 0.3-0.4 wt%程度添加した Zr-Sn-Fe-Cr-Nb 系合金である⁽⁴⁾。 試験燃料棒作製に用いた燃料は長さ約 180 mm であり、スペイン・バンデロス炉で照射さ れた PWR ウラン燃料セグメント AP2-1 から採取した。AP2-1 セグメントからの MMDA3 及び MMDA4 採取位置を図 4.2.1-1 に示す。

試験燃料棒の採取位置における燃焼度は 73 GWd/t と評価されている。試験燃料棒の採取 位置に近接する位置から採取した試料に対する断面金相観察から、通常運転中に被覆管外 表面に形成された腐食酸化膜厚さは 23 μm と評価した。また、試験燃料棒の両端部から採 取した試料に対する水素分析により、同じく通常運転中に燃料被覆管に吸収された水素量 は 155 ppm と評価した。試験燃料棒の諸元を表 4.2.1-1 に示す。

(b) 試験燃料棒(MMDA4)への加工

実機で想定される LOCA 時には、原子炉圧力の低下と温度上昇に伴う燃料被覆管強度の 低下により燃料棒が破裂する可能性がある。これを模擬するために、本試験では、燃料ペレ ットを除去しない状態の試験燃料棒に室温にて 5 MPa のアルゴンガスを封入し、加熱によ る内圧上昇と燃料被覆管強度の低下により、試験燃料棒が試験中に破裂するようにした。

試験装置にセットするため、試験燃料棒の上下端栓にはステンレス鋼製のコネクション ロッドを接続し、最終的な試験体形状とした(図 4.2.1-2)。試験燃料棒の上下端栓部分の自 由体積は、MMAD3の約1ccに対して、MMDA4では約5ccとし、自由体積を確保するた めに燃料棒の上部側約35mmに対してペレットを脱ミートした。 (c) 試験燃料棒 (MMDA4) への熱電対溶接

試験中の燃料被覆管表面温度の制御及び測定のために、4本の R タイプ熱電対をスポッ ト溶接した。溶接位置は、加熱領域の中間(熱電対番号 No. 2)、その上下 40 mm の位置 (No. 1 及び No. 3)、及び No. 1 と No. 2 熱電対の中間高さにあり円周方向に 90°回転し た位置(No. 4)である。なお、熱電対溶接のために、通常運転中に燃料被覆管外表面に形 成された腐食酸化膜をリューターにより局所的に除去した。

(2) LOCA 模擬試験前(MMDA4)の分析・評価

(a) MMDA4 の外観写真

LOCA 模擬試験前の燃料棒の外観写真を図 4.2.1-3 に示す。撮影は、90°毎に 4 方向に対して実施した。局所的に金属光沢を示す領域が観察されるが、これは熱電対溶接のために酸化膜を局所的に除去した領域である。外観上、特異的な箇所は観察されなかった。

(b) MMDA4 の X 線透過写真

LOCA 模擬試験前の燃料棒の X 線透過写真を図 4.2.1-4 に示す。撮影は、0°と 90°の 2 方向に対して実施した。脱ミートした燃料棒上部領域においてやや黒くなっている様子が 観察された。

(c) MMDA4 $\mathcal{O}\gamma \mathcal{A} \neq \gamma \mathcal{V}$

LOCA 模擬試験前の軸方向 γ 線強度分布を図 4.2.1-5 に示す。脱ミートした燃料棒上部領域においてガンマ線カウントが低下していることが分かる。

(d) MMDA4 の外径

LOCA 模擬試験前の軸方向外径測定結果を図 4.2.1-6 に示す。測定は 90°毎に 2 方向に 対して実施した。熱電対溶接のために酸化膜を局所的に除去した領域で外径の落ち込みが 観察されたが、全体として特に有意な勾配等は観察されなかった。

(3) LOCA 模擬試験前(LZRT5)の分析・評価

(a) 金相観察

比較データとするための LOCA 模擬試験前のレファレンス金相観察を実施した。金相写 真を図 4.2.1-7(1)から図 4.2.1-7(18)に示す。一部のペレット最外周領域において高燃焼度組 織、ペレット被覆管ギャップの閉塞が認められた(図 4.2.1-7(2)、図 4.2.1-7(5)、図 4.2.1-7(9)、図 4.2.1-7(12))。エッチング後のマクロ観察(図 4.2.1-7(4)、図 4.2.1-7(11))ではダー クリングが観察され、ダークリングの内側ではペレット結晶粒内に微小な気泡が高密度に 集積されている様子が観察された(図 4.2.1-7(7)、図 4.2.1-7(13))。被覆管金相観察(図 4.2.1-7(15)の Photo 1-1-1、Photo 1-2-1)より評価した酸化膜厚さは、約 30μmとなり、渦電流 測定法により非破壊試験結果(表 4.2.1-1、約 37 µ m)とほぼ同等であった。

(4) LOCA 模擬試験

図 4.2.1-8 に示す LOCA 模擬試験装置の中央部に試験燃料棒を装荷し、LOCA 時に想定 される燃料棒の温度履歴を与えた。LOCA 時には、燃料棒の内圧上昇と燃料被覆管強度の 低下によって燃料棒が膨れ破裂し、場合によっては膨れに伴い細片化した燃料ペレットの 燃料棒内軸方向再配置や破裂開口部を通した燃料棒外への燃料ペレット放出 (FFRD) が生 じる可能性がある。FFRD の内、燃料ペレットの細片化の発生条件や燃料棒破裂時の燃料 ペレットの燃料棒内軸方向再配置及び燃料棒外放出の各挙動を評価するため、試験燃料棒 が破裂するまで昇温させた。

昇温速度については、典型的な LOCA 時の被覆管の昇温速度^(5,6)を模擬できること、及び 過去に原子力機構において高燃焼度燃料被覆管を対象に実施した LOCA 模擬試験^(7,8)との 比較ができることを考慮し、3 K/s とした。水蒸気流速は、水蒸気欠乏を避け、試験燃料棒 全体を酸化させるのに十分な流速⁽⁸⁾を与えることを目的に、13 mg/(cm² s)とした。

(a) MMDA4 に対する LOCA 模擬試験

MMDA4 に対する試験で得られた温度履歴を図 4.2.1-9 に示す。本試験は、上記の MMDA3 と同様の条件にて実施した。昇温中、セル内に設置したマイクロフォンから燃料 棒破裂に伴う衝撃音(目視において熱電対 No2 の温度は約 1043 K)が確認され、その時点 でヒータを切断した。試験後のデータ解析において、熱電対 No.2 の指示値が 1046 K に達 した時点(図 4.2.1-9 中の矢印)で熱電対指示値の変動が確認されたことから、燃料被覆管 の破裂はこの温度で生じたと考えられる。また、試験後に装置下部フランジを確認したとこ ろ、図 4.2.1-10(1)に示すように粉状のペレット片が観察された。LOCA 模擬試験後に回収 したペレットの外観写真を図 4.2.1-10(2)に示す。回収したペレットの重量は、約 0.2g であ った。他機関により実施された LOCA 模擬試験の知見^(9,10)も踏まえれば、ペレット放出量 はばらつきが大きい事象であるものの、破裂時の燃料棒内のガス量が重要な因子であるこ とを裏付ける結果と考えられる。

(5) LOCA 模擬試験後の分析・評価

(a) MMDA4 に対する分析・評価

MMDA4 に対する LOCA 模擬試験後の外観写真、外径測定結果を図 4.2.1-11(1)-(2)、図 4.2.1-12 に示す。

外観より、熱電対 No.1~3 を溶接した方向から約 180°回転した方向に破裂開口が生じて いる。外観から計測された破裂開口の長さは約 10 mm、幅は約 2 mm で、破裂開口の面積 は約 15 mm² であった。図 4.2.1-11(2)の破裂開口部の拡大写真より、開口部付近に細片化 ペレットが集積している様子が観察された。 外径測定は、燃料被覆管の破裂開口位置を基準点(0°位置)とし、基準点及び基準点から反時計回りに 30°間隔の 6 方向(0°、30°、60°、90°、120°及び 150°の計 6 方向)について実施した。熱電対 No.2 位置近傍において最も大きく膨れたことが分かる。破裂開口した膨れ部を楕円形と仮定して試験後の円周長を求めた。試験後の円周長の増加量である膨れ率は約 41%であった。

令和2年度^(1,2)に実施した MMDA3(自由体積 1cc)の LOCA 模擬試験では、破裂開口部の形態はピンホール状で、開口部面積は約0.03mm²であった。これに対して今回の MMDA4

(自由体積 5cc)では約 15 mm²となり、開口部の面積は明瞭に増加しており、自由体積の 影響を裏付けている。

(b) MMDA3 に対する分析・評価

MMDA3 に対する LOCA 模擬試験後の金相観察を実施した。観察対象として、図 4.2.1-13 に示すように破裂部近傍より横断面試料を採取し、破裂位置の下部側より縦断面試料を 採取した。破裂部近傍の横断面観察結果を図 4.2.1-14(1)-(11)、縦断面金相観察結果を図 4.2.1-15(1)-(13)から図 4.2.1-16(1)-(17)に示す。主な特徴を下記に記す。

(横断面観察)

- ・ 破裂開口部付近の横断面金相観察(図 4.2.1-14(1),(2),(6),(7))より、被覆管が膨らんでいる様子が観察された。ペレット中心寄りの領域は概ね形状を維持しているものの、外周部(図 4.2.1-14(3),(8))において最外周領域の高燃焼度組織の脱落が観察された。また、マクロ観察(図 4.2.1-14(1))より、ペレットと被覆管のギャップにペレット片は観察されなかった。
- 被覆管内面(図 4.2.1-14(2),(7))においてペレットと被覆管の反応層(ボンディング
 層)及び破裂時にペレットから剥離した高燃焼度組織領域が部分的に観察された。
- ・ ペレット最外周部で高燃焼度組織が部分的に残存する領域(図 4.2.1-14(11))が存在 し、その領域では多数のクラックが確認された。
- エッチング後のマクロ観察(図 4.2.1-14(6))よりダークゾーンが明瞭に観察され、ダ ークゾーンの境界付近の観察(図 4.2.1-14(9))より、ダークゾーンより外側ではペレ ット結晶粒が観察されたが、ダークゾーンの内側では微小な気泡が結晶粒内に高密 度に集積している様子が観察され、境界に沿ってクラックが進展している様子が観 察された。
- ・ ペレット中心部(図 4.2.1-14(10))においても微小な気泡が結晶粒内に高密度に集積 している様子が観察された。

(縦断面観察)

・ 破裂開口部より下部側の縦断面金相観察(図 4.2.1-15(1)-(9)、図 4.2.1-16(1)-(8))に

おいてペレットと被覆管のギャップにペレット小片が集積している様子が観察された。ガンマスキャンの結果^(1,2)を踏まえると、破裂開口部の上部側における細片化ペレットが下部側に移行したものと考えられた。

- マクロ観察(図 4.2.1-15(6)、図 4.2.1-16(12))より、横断面観察結果と同様にダーク ゾーンが観察され、ダークゾーンの境界(図 4.2.1-16(13))においてダークゾーンよ り外側ではペレット結晶粒が観察され、ダークゾーンより内側では微小な気泡が結 晶粒内に高密度に集積している様子が観察された。ダークゾーンの境界付近(図 4.2.1-15(11))においてクラックの進展が観察された。
- ・ 被覆管内面 (図 4.2.1-15(5)、図 4.2.1-15(13)) においてペレットと被覆管の反応層 (ボ ンディング層) 及び破裂時にペレットから剥離した高燃焼度組織領域が部分的に観 察された。

(c) LZRT5 に対する分析・評価

LZRT5 に対する LOCA 模擬試験後の X 線撮影写真を図 4.2.1-17 に示す。撮影は、0-180°、90-270°の2方向で実施した。写真より破裂開口部付近で被覆管が膨らみ、ペレットと被覆管のギャップが観察された。局所的にペレット片が脱離しているように見えたが、細片化している様子は観察されなかった。

(6) まとめ

燃料棒内体積をパラメータとした燃料棒(MMDA4)を用いた LOCA 模擬試験の結果、 燃料棒内体積の増加に伴い、燃料棒外へのペレット放出が増加することが観察された。金相 観察より、主に高燃焼度組織を有するペレット領域が細片化、軸方向への移動が確認され、 LOCA 模擬試験時において放出されたペレットは高燃焼度組織を有するペレット外周領域 と推定された。他機関実施の試験研究からの知見も踏まえれば、ペレット放出量はばらつき が大きい事象であるものの、破裂時の燃料棒内のガス量が重要な因子であることが明らか である。

試験 燃料棒 番号	採取 セグメン ト 番号	燃料 型式	セグメン ト平均燃 焼度 (GWd/t)	最終 サイクル の平均線 出力 (kW/m)	被覆管 材質	腐食 酸化膜 厚さ (µm)	初期 水素 濃度*** (ppm)	LOCA 模擬 試験の 実施年度
LZRT5	FBA004- a5-F	$\begin{array}{c} \text{BWR} \\ 10 \times 10 \\ \text{UO}_2 \end{array}$	47	24	Zry-2 with liner	37**	61	令和4年度
MMDA3 MMDA4	AP2-1	PWR 17×17 UO_2	73	10	M-MDA (SR*)	23	155	令和2年度 令和5年度

表 4.2.1-1 LOCA 模擬試験に供した試験燃料棒

*応力除去焼鈍

**非破壊試験より評価

***ベース照射後における被覆管の水素濃度



図 4.2.1-1 LOCA 模擬試験に用いる試験燃料棒の採取位置(AP2-1 セグメント)



図 4.2.1-2 LOCA 模擬試験用の試験体形状



図 4.2.1-3 MMDA4 の外観写真(LOCA 模擬試験前)



(90°方向)

図 4.2.1-4 MMDA4 の X 線透過写真(LOCA 模擬試験前)



図 4.2.1-5 MMDA4 の γ スキャン測定(LOCA 模擬試験前)



図 4.2.1-6 MMDA4 の外径測定(LOCA 模擬試験前)



図 4.2.1-7(1) LZRT5 の LOCA 模擬試験前金相観察 (ペレット金相、1 回目研磨後、マクロ写真)











図 4.2.1-7(4) LZRT5 の LOCA 模擬試験前金相観察 (ペレット金相、1回目エッチング後)















図 4.2.1-7(8) LZRT5 の LOCA 模擬試験前金相観察 (ペレット金相、2回目研磨後)











2mm

図 4.2.1-7(11) LZRT5 の LOCA 模擬試験前金相観察 (ペレット金相、2回目エッチング後)











2mm

図 4.2.1-7(14) LZRT5 の LOCA 模擬試験前金相観察 (被覆管金相、研磨後)







図 4.2.1-7(16) LZRT5 の LOCA 模擬試験前金相観察 (被覆管金相、研磨後)



2mm

図 4.2.1-7(17) LZRT5 の LOCA 模擬試験前金相観察 (被覆管金相、エッチング後)



図 4.2.1-7(18) LZRT5 の LOCA 模擬試験前金相観察 (被覆管金相、エッチング後)



図 4.2.1-8 LOCA 模擬試験装置



図 4.2.1-9 MMDA4 に対する LOCA 模擬試験での温度履歴



図 4.2.1-10(1) LOCA 模擬試験装置の下部側にあるフランジ部の外観写真



図 4.2.1-10(2) LOCA 模擬試験後に回収したペレットの外観写真

TOP	Bottom
0 110 120 130 140 150 160 170 180 190 200 210 220 230 240 250 260 270 280 290 300 310 320 330 340 350 360	370 380 390 400 410 420 430 44

 $(0^{\circ}$)



 $(90^\circ$)



 $(180^{\circ}$)



 $(270^\circ$)

図 4.2.1-11(1) MMDA4 の LOCA 模擬試験後外観写真



図 4.2.1-11(2) 破裂開口部の拡大写真



図 4.2.1-12 MMDA4 の LOCA 模擬試験後外径測定結果


図 4.2.1-13 MMDA3 の金相観察位置について



図 4.2.1-14(1) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察

(横断面ペレット金相、研磨後、マクロ写真)





(横断面ペレット金相、研磨後)



図 4.2.1-14(3) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (横断面ペレット金相、研磨後)



図 4.2.1-14(4) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (横断面ペレット金相、研磨後)



図 4.2.1-14(5) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (横断面ペレット金相、研磨後)



図 4.2.1-14(6) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (横断面ペレット金相、エッチング後)



図 4.2.1-14(7) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (横断面ペレット金相、エッチング後)



図 4.2.1-14(8) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (横断面ペレット金相、エッチング後)



図 4.2.1-14(9) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (横断面ペレット金相、エッチング後)



図 4.2.1-14(10) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (横断面ペレット金相、エッチング後)



図 4.2.1-14(11) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (横断面ペレット金相、エッチング後)



図 4.2.1-15(1) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、研磨後)



図 4.2.1-15(2) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、研磨後)



図 4.2.1-15(3) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、研磨後)



図 4.2.1-15(4) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、研磨後)



図 4.2.1-15(5) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、研磨後)



図 4.2.1-15(6) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、エッチング後)

4章



図 4.2.1-15(7) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、エッチング後)



(縦断面ペレット金相、エッチング後)



(縦断面ペレット金相、エッチング後)



図 4.2.1-15(10) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、エッチング後)



図 4.2.1-15(11) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、エッチング後)



(縦断面ペレット金相、エッチング後)



図 4.2.1-15(13) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、エッチング後)



図 4.2.1-16(1) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、研磨後)



図 4.2.1-16(2) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、研磨後)



図 4.2.1-16(3) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、研磨後)



図 4.2.1-16(4) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、研磨後)



図 4.2.1-16(5) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、研磨後)



図 4.2.1-16(6) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、研磨後)



図 4.2.1-16(7) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、研磨後)



図 4.2.1-16(8) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、研磨後)



図 4.2.1-16(9) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、研磨後)

4章



図 4.2.1-16(10) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、研磨後)



図 4.2.1-16(11) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、研磨後)


図 4.2.1-16(12) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、エッチング後)



(縦断面ペレット金相、エッチング後)



図 4.2.1-16(14) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、エッチング後)



図 4.2.1-16(15) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、エッチング後)



図 4.2.1-16(16) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、エッチング後)



図 4.2.1-16(17) MMDA3 の LOCA 模擬試験後金相観察 (縦断面ペレット金相、エッチング後)

Тор	試料名:LZRT5(LOCA試験後) 撮影日:令和6年3月1日 撮影方向:0°方向		Bottom
		and the second	

10 20 30 40 50 60 70 80 90 00110 120 130 140 150 160 170 180 190 200 210 220 230 240 250 260 270 280 Notes 56 40 50 60 70 80 90 00110 120 130 140 150 160 170 180 190 200 210 220 230 240 250 260 270 280

	(and a second	

図 4.2.1-17 LZRT5 の X 線透過写真(LOCA 模擬試験後)

4.2.2 LOCA 時の温度履歴を経験した燃料被覆管の四点曲げ試験

本年度は水素を含ませた PWR 用 17×17 型非照射ジルカロイー4 被覆管を対象に地震時 を想定した繰り返し荷重を負荷する四点曲げ試験を実施し、繰り返し負荷が LOCA 後の燃 料被覆管の曲げ強度に及ぼす影響を評価した。

(1) LOCA 模擬急冷試験

繰り返し荷重負荷四点曲げ試験の供試材作製のため、水素を添加した PWR 用 17×17型 非照射ジルカロイー4 被覆管(水素添加ジルカロイー4 被覆管)を対象に LOCA 模擬急冷 試験を実施した。水素添加量は 200 wppm 及び 600 wppm の 2 種類とした。

試験方法は R2 年度から本年度までと同様である(図 4.2.2-1)^(1,2,3)。図 4.2.2-1 に装置の 概要、図 4.2.2-2 に試験時の燃料被覆管温度・荷重・内圧履歴の一例を示す。主要試験パラ メータは以下の通りである。

•	Baker-Just ECR 目標值 ⁽¹¹⁾ :	10%- $20%$				
		(破裂開口近傍、膨れによる薄肉化考慮)				
•	等温酸化温度:	1473 K				
•	破裂に至るまでの昇温速度:	3 K/s				
•	破裂後 1473 K に至るまでの昇温速度:	10 K/s				
•	冷却方式:					
	• 1473 K から 973 K まで :	空冷(水蒸気)				
	 973 Kから室温まで: 	下部から灌水による急冷				
•	被覆管内圧(室温充填時):	5 MPa				
•	充填したアルミナペレットの数:	17 個				
•	充填したアルミナペレットの寸法:					
	• 外径:	8 mm				
	 ● 高さ: 	10 mm				
•	R-type 熱電対の溶接箇所:					
	• TC1 :	TC2 から 40 mm 上				
	• TC2 :	被覆管中央				
		(赤外線イメージ炉の制御用)				
	• TC3 :	TC2 から 40 mm 下				

(2) 繰り返し荷重負荷四点曲げ試験

LOCA 模擬急冷試験後、試料は治具寸法に合わせ、破裂部を中央として長さ140 mm に 切り出した。切り出し後試料に対し、繰り返し荷重負荷四点曲げ試験を実施した。図 4.2.2-3 に、試験装置に装荷した試験燃料棒の試験前外観を示す。

図 4.2.2-4 に試料セット時繰り返し荷重を負荷する四点曲げ試験装置の試験部外観を示

す。装置の荷重点間距離は 72 mm、支持点間距離は 130 mm とし、LOCA 模擬急冷試験後 の試験燃料棒の破裂開口部が荷重点間の中心に位置し、かつ破裂開口部が垂直方向におい て下向きになるように設置した。四点曲げ試験は、負荷点の間にある試料部分に対し均一な 曲げモーメントが加わることで、この部分の試料の最弱部で破断する特性があるため、破断 箇所の設定に関する恣意性を排除できる⁽¹²⁾。図 4.2.2-5 に四点曲げ試験後の試料外観の一例 を示す。いずれの試料も破裂開口中央位置において破損した。

原子力機構が非照射のジルカロイー4及びジルカロイー2被覆管を対象として過去に実施 した四点曲げ試験⁽¹³⁾は、LOCA時の再冠水過程における冷却材の飽和温度⁽¹⁴⁾を模擬して約 410 K の温度条件で実施されたが、LOCA後炉心の長期冷却期間中においては冷却材温度 がさらに低下することも考えられることから、本事業においては保守的に室温下で四点曲 げ試験を実施することとしている。

R3年度水素添加材試験との整合性を考慮し⁽²⁾、また 5.8 Nm、1000回までの繰り返し負荷を施した R2、R4 年度受入材試験では、破断に至る最大曲げモーメントに有意な変化が認められなかったことを踏まえ^(1,3)、本年度の試験では(R3年度と同様)1.84 Nm の1回繰り返し後四点曲げ破断試験のみを実施した。

表 4.2.2-1 に R3 年度及び本年度実施分水素添加ジルカロイー4 被覆管試料のリストを示 す。予定水素量は目標値であり、試料納入時の両端水素量が予定値の±10%以内の物のみ採 用している。試験後水素量は、四点曲げ試験後破断した試料の破断面付近を測定した結果で ある。試験後水素量は予定水素量より約数十から 200 wppm 程度高いことから、破損点付 近において、LOCA 模擬急冷試験による水素吸収量は小さいと考えられる。

最大曲げモーメントは次式により計算した。

$M = P \times a \qquad (\vec{\mathbf{x}} \ 4.2.2 \cdot 1)$

ここで、M (Nm)は最大曲げモーメント、P (N)は片側負荷点の荷重の最大値、a (m)は荷 重点 - 支持点間距離を表す。

金相に基づく酸化量パラメータである M-ECR は R4 年度報告書⁽³⁾に記載した方法に沿っ て次式により計算した。

$M-ECR = (1 - S_{\alpha+\theta}/S_0) \times 100\% \qquad (\exists 4.2.2.2)$

ここで、 $S_{\alpha+\beta}$ は α 相と prior - β 相の合計面積、 S_0 は被覆管受け入れ時の断面積を表す。 最大曲げ応力 σ_{max} は、R4 年度報告書⁽³⁾に記載した方法で計算しており、最大曲げモーメントに到達した時点で破断面開口部付近の試料部分における Z 方向引張応力を表す。

図 4.2.2-6(a)に 1.84 Nm、1 回繰り返し負荷後四点曲げ試験を実施した受入材及び水素添加材の BJ-ECR と最大曲げモーメントの関係、図 4.2.2-6(b)に M-ECR と最大曲げ応力の関係を示す。水素添加材は受入材に比べ最大曲げモーメントや最大曲げ応力の低下が有意であった。しかし、水素量と最大曲げモーメント・最大曲げ応力の低下度合いとの間には系統的な依存性は見られておらず、このような傾向が表れる原因・メカニズムの特定には至っていない。

番号	実施 年度	BJ-ECR	予定水	試験後	繰り返し	曲げ	5.4	M-ECR	σ _{max}
			素量	水素量	モーメント	╮/回数	IVI _{max}		
		%	wppm	wppm	Nm	日	Nm	%	MPa
1	R3	10.0	400	449	1.84	1	7.1	4.8	192.4
2	R3	10.4	400	448	1.84	1	4.1	8.9	129.4
3	R3	15.4	400	457	1.84	1	3.5	11.0	116.8
4	R3	14.9	400	452	1.84	1	4.8	8.3	157.8
5	R3	19.9	400	424	1.84	1	2.8	13.7	101.8
6	R3	10.5	800	931	1.84	1	3.8	9.2	133.0
7	R3	10.3	800	1013	1.84	1	4.7	7.0	141.5
8	R3	14.6	800	955	1.84	1	5.1	10.4	176.5
9	R3	14.6	800	1026	1.84	1	3.7	10.3	121.9
10	R5	10.9	200	274	1.84	1	5.3	6.2	174.4
11	R5	9.9	200	287	1.84	1	4.1	6.5	121.3
12	R5	15.9	200	255	1.84	1	3.6	9.5	112.9
13	R5	14.8	200	220	1.84	1	5.9	7.4	166.8
14	R5	10.3	600	624	1.84	1	3.6	6.2	114.6
15	R5	15.4	600	633	1.84	1	4.3	8.1	158.2
16	R5	20.7	600	660	1.84	1	2.8	10.9	97.1
17	R5	20.2	600	678	1.84	1	3.3	12.2	95.1

表 4.2.2-1 試料リスト







図 4.2.2-2 LOCA 模擬急冷破断試験時の燃料被覆管温度・荷重・内圧履歴の例



図 4.2.2-3 LOCA 模擬急冷破断試験後の試料外観の例



図 4.2.2・4 試料セット時繰り返し荷重を負荷する四点曲げ試験装置の試験部外観



図 4.2.2-5 四点曲げ試験後の試料外観一例



図 4.2.2-6 最大曲げモーメントと BJ-ECR との関係、(b) 最大曲げ応力と M-ECR との関係

4.2.3 PWR 炉心の LOCA 解析: FFRD の炉心冷却性影響評価

(1) 背景

FFRDによる細片化燃料の放出は、炉心下部への堆積によるドライアウトリスク等を介 して炉心冷却性に影響を及ぼし得る現象であることから、その放出量を見積もり、想定さ れる影響の程度を検証することが重要である。ここで着目すべきは炉心全体での燃料放出 総量と個々の燃料棒の放出割合となる。

本事業においては、令和2年度に燃料被覆管の確率論的破裂判定モデルを作成した後⁽¹⁾、 令和3年度には、同モデルを組み込んだ燃料挙動解析コード FEMAXI/RANNS と熱水力 安全解析コード RELAP による LOCA 過渡解析を組み合わせることで、炉心全体での破裂 数とその確率モデルを推定する炉心スケール解析を実施した⁽²⁾。続く令和4年度の取り組 みとして、被覆管破裂時燃料放出量の確率論的予測モデルを開発し⁽³⁾、併せて炉心解析コ ード CASMO5/SIMULATE-3を用いた PWR 平衡炉心解析を実施し、これによって燃料 集合体(193体)ごとの出力分布や燃焼度履歴が得られた⁽³⁾。令和5年度は、以上の成果 を集約することで、より詳細な炉心スケール解析とそれによる炉心全体での放出総量評価、 燃料棒ごとの放出割合評価を行うことが可能になった。

(2) 解析条件および手法① RELAP

令和3年度に実施した炉心スケール解析では、RELAP計算に用いる入力モデルにおけ る炉内の燃料集合体は3体の熱構造体(Heat Structure)によって代表されていた(三領 域モデル)⁽²⁾。本年度の解析ではこれを193体に増やし、熱構造体が1対1で燃料集合体 を表すようにした。各集合体の出力分布にはPWR平衡炉心解析の結果を適用し、一点近 似計算による炉出力がその割合に従って配分されるようにした。それに伴い各集合体の初 期温度をFEMAXI計算(後述)結果の終了時における各部温度から取ることとしたが、 その際、集合体内の平均的な出力(FEMAXI計算及び崩壊熱計算に使用)よりも棒単位で は高出力のものが含まれる点、及び、FEMAXIによる温度評価は燃料挙動・モデルに付随 する様々な不確かさを伴う点、を保守的に包絡するため、参照するペレット表面および中 心温度(FEMAXI解析結果)を1.3倍して適用している(モデルA)。別のアプローチと して、初期温度を三領域モデルのものから援用し、LOCA開始時の蓄熱の合計値が三領域 モデルと一致するように各温度領域の集合体数を調整する計算も併せて行った(モデルB)。 後者はより保守的である。今年度の解析では、RELAP計算に用いる物理パラメータに対 して確率論的な扱いはしておらず、したがって RELAP計算そのものはモデルA、Bそれ ぞれについて1ケースのみ行っていることになる。

② FEMAXI ベース照射計算

RELAP 入力モデルにおいて 193 体の燃料集合体を別々の熱構造体として計算するよう にしたのに合わせて、FEMAXI ベース照射計算も全ての燃料集合体に対して逐一行った。 出力履歴と燃焼度履歴は PWR 平衡炉心解析の結果から作成したもので、それぞれ 1~4 サ イクルの照射を経験している。その際、集合体内での出力・燃焼度分布について、軸方向 にはピーキングを考慮し、炉平均軸方向出力割合を全集合体に適用したが、水平方向には 燃料棒ごとのピーキングを考慮せず、単一の集合体平均値のみを用いた。前述の RELAP 計算と同様、物理パラメータ等の確率的な扱いは採用しておらず、そのため各集合体に対 して計算は1ケースずつ行っている。

③ RANNS 過渡解析

193 通り行った FEMAXI ベース照射計算それぞれの結果を初期条件として読み取り、 RANNS により LOCA 時燃料棒挙動を解析した。解析中行われる燃料被覆管の破裂判定、 及び、破裂した場合の燃料放出量評価に用いられるベイズ確率モデルには、毎回異なる乱 数列を生成、適用し、解析結果(放出量)が確率的に変動するようにした。解析は各集合 体に対して 700 ケースずつ、RELAP の二通り(A、B)それぞれに対して行った。②に記 載のとおり、集合体水平方向については燃焼度のピーキングを考慮していないため、放出 量評価モデルに与える燃焼度を実際の値より 1.13 倍する設定を加えることで、ピーキン グを保守的に包含するようにした。

FEMAXI/RANNS のモデルセット 00036QtmvmQ をベースとし、ここからの差分として、以下の namelist を変更して適用している。

$ETHC_{option} = 2$,	※熱伝達データを外部ファイルから読み込み
IFUB = 1 ,	※LOCA 計算オプションを指定
$TIM_REFL = 10000000.0$,	※LOCA 開始時からの再冠水開始時までの経過時間
(sec)、実際の被覆管表面熱伝達	は外部ファイルから与えられるので便宜上の設定
NRCOX2 = 1,	※被覆管内面酸化膜メッシュ数
TLIM = 180000.0,	※CPU 計算時間(sec)上限
ICHK = 10*0 ,	※異常値が検出されても計算を続行するオプション
NL_Mlv0TS_RwETHC_s = 1.0e-1	, ※ETHC における RANNS Lv-0 計算最小タ
イムステップ幅(sec)	
EFCOEF = 0.2, ※クリー	-プの安定化解析のためのタイムステップ幅制御因子
IFRST = 11,	※破裂判定オプション
$NL_UQ_mode = 3,$	※外部ファイルから乱数列を取得
I_LOCA_model = 38,	※IST=1 を使用するため 38 に設定
$NL_iFFRD(2) = 3,$	※放出量評価を有効化
IST = 1,	※軸方向に完全に均一に混合したギャップガス
$NL_FFRD(2) = 1.13,$	※集合体内水平方向のピーキングを包含する意図から
放出量評価で燃焼度を 1.13 倍とし	て計算
$NL_f_scl_FGR = 0.5,$	※核分裂ガス放出係数

以上の計算により得られた 700 ケース×2 組の炉心スケール解析結果に対して順序統計 の Wilk の方法(¹⁵)による統計的評価を行い、炉心全体での燃料の放出総量と、各ケースに おける燃料棒中の燃料放出割合の最大値に対してそれぞれ 95 パーセンタイルの 95%信頼 水準を求めた。

(3) 解析結果

PWR 平衡炉心解析の結果より、集合体燃焼度は 10.5-54.4GWd/MTU の範囲に分布し、 全体に燃焼度が高いほど出力は低くなる傾向にある(図 4.2.3-1)¹。FEMAXI 計算による 燃料棒各部温度は出力分布に応じて変化し、ペレット中心温度の軸平均値は図 4.2.3-2 の ようになった。RELAP 計算でも出力分布によって各集合体の PCT は異なる値を取り、ピ ーク値でモデル A では約 1178K、モデル B では約 1305K に達した(図 4.2.3-3、図 4.2.3-4)。これらの集合体に対して 700 通りの FEMAXI/RANNS 計算を行った結果、ベイズ統 計破裂予測モデルにより中央値にしてモデル A は 14 体、モデル B は 74 体で被覆管破裂 が予測された(図 4.2.3-5、図 4.2.3-6)。破裂に伴う燃料の放出状況は図 4.2.3-7~図 4.2.3-10 のようになった。統計評価による炉心全体の燃料放出総量と燃料棒ごとの燃料放出割 合最大値の 95 パーセンタイルの 95%信頼水準はモデル A でそれぞれ 32.0kg、4.20%、モ デル B でそれぞれ 326kg、14.1%となった。



図 4.2.3-1 PWR 平衡炉心解析による集合体燃焼度と出力計算結果(炉心の 1/8 対称性の ためユニークな出力値は全 31 点)

¹ 平衡炉心計算では Gd 入り燃料棒を燃料要素として含めており、特に照射初期の集合体 出力はこの影響(出力抑制)を強く受けている点に留意が必要である。



図 4.2.3-2 集合体燃焼度に対する FEMAXI 計算結果



図 4.2.3-3 RELAP による燃料被覆管 PCT 計算結果 (モデル A)



図 4.2.3-4 RELAP による燃料被覆管 PCT 計算結果 (モデル B)



図 4.2.3-5 炉心スケール解析で破裂が検出された集合体数(モデル A)



図 4.2.3-6 炉心スケール解析で破裂が検出された集合体数(モデル B)



図 4.2.3-7 炉心全体の燃料放出総量(kg)のヒストグラム(モデルA)



図 4.2.3-8 炉心全体の燃料放出総量(kg)のヒストグラム(モデル B)



図 4.2.3-9 炉内における燃料棒の燃料放出割合(%)の最大値のヒストグラム(モデル A)



図 4.2.3-10 炉内における燃料棒の燃料放出割合(%)の最大値のヒストグラム (モデル B)