830. 軽水炉燃料のペレット-被覆相互作用, (Ⅱ)

BWR 型 燃料 棒

柳 澤 和 章*, Harald DEVOLD**

(1985年 11月 1日 受 理)

Pellet-Cladding Interaction on Light Water Reactor Fuel, (Ⅱ)

BWR Type Fuel Rod

By Kazuaki YANAGISAWA and Harald DEVOLD

The influence of burn-up and fuel design parameter on the pellet-cladding interaction (PCI) of 8×8 BWR fuel was studied. Obtained results are as follows:

(1) It is revealed that the PCI was enhanced with increase of burn-up and with decrease of diametral gap.

(2) At burn-up of 15 MWd/kg U, a rod was subjected power cycling to 826 times with range of 30~45 kW/m with cycling period 20~25 min. No failure occurred in the course of experiment. The PCI was elastic and caused repeatedly at every cycle. The magnitude of the PCI decreased with increasing cycles. It was revealed from PIE that there was little rod pressure difference between cycled and non-cycled rod. The FP gas release rate between the rods was diffusion and dependent on square root of holding time at power.

(3) The PCI failure was dependent on fuel burn-up. The failure threshold of this experiment was equal to or less than that of the rods ramped under HBWR condition. The rod failed by PCI showed little relaxation and accompanied significant reduction of axial elongation at the failure.

KEYWORDS: *burn-up, BWR type reactors, fission product release, fuel-cladding interactions, fuel rods, light water reactors, power cycle, power ramping*

Ⅰ. 序 論

軽水炉燃料のペレット-被覆相互作用(Pellet-Cladding Interaction: 以下 PCI)の研究のため, 日本原子力研究所(原研)はノルウェー・ハルデン炉(HBWR)内に軽水ループを設置して出力急昇実験を行なった。この実験遂行に関する背景や目的等については, 著者らの前報⁽¹⁾で詳述した。

本報は, 原研の行なった上記出力急昇実験のうち, BWR型燃料棒に関するものである。実験では, ①燃焼度, ②燃料設計因子(直径ギャップ等)が出力急昇中のPCIに及ぼす影響を, 炉内計装機器類から得られた

データの評価・解析により研究した。PCI評価のために用いた具体的な計装機器として, 燃料直径測定ゲージ, 燃料被覆軸方向伸び計, 冷却材の温度計と圧力計, 中性子検出器等多数ある。これら計装類の詳細についても前報で報告した。

BWR型燃料棒に関し, 出力急昇下のPCIふるまいに及ぼす燃焼度(最高 21 MWd/kg U)および燃料設計因子の影響を, 多重計装を用いた炉内実験で評価したのはこれまでにあまり例がないので報告する。

* 日本原子力研究所 (Japan At. Energy Res. Inst.)

** ハルデン原子炉プロジェクト (OECD Halden Reactor Project)

II. 燃料棒の特性と照射リグ

1. 燃料棒の特性

これまでに国内を初め諸外国で行われた出力急昇実験⁽⁵⁾や炉外応力腐食割れ実験^{(6)~(14)}の結果によれば、燃料棒のPCI破損は燃焼度の増加とともに顕著となる傾向がある。このため、本実験では出力急昇に先立って燃料棒の燃焼度を増加させるため、あらかじめ一定の線出力で照射を行なった。この定出力下での予備照射を本報では“ベース照射”と呼ぶ。ベース照射中の燃料棒の平均線出力として、BWR型燃料棒が商用炉で照射されるとき平均出力に近い30 kW/mを用いた。

ベース照射では、直径56 mmの同一円上に外径

12.28 mmの燃料棒4本を等間隔に並べたもの、いわゆるクラスタを縦に2体準備し、合計8本の燃料棒を同時に照射できるような集合体構造にした。種々の燃焼度下でのPCI評価を行うため、下部側クラスタに装荷した4本の燃料棒は、照射途中でも別の燃料棒と取換え可能にした。

Table 1は、燃料棒番号とその設計因子およびベース照射による蓄積燃焼度等をまとめたものである。表からわかるように、本報では「標準」と呼ぶ燃料棒を含め3種類のものを用意した。PCIに及ぼす設計因子の影響については、同一燃焼度下で設計因子の異なる2本の燃料棒の相互比較により評価を行うこととした。このため、表中タイプIIの加圧燃料棒のPCIに関しては、比較対象用の燃料棒が得られなかった。

Table 1 Design parameters and accumulated burn-up of power ramped fuel rods

	Design parameters		Accumulated burn-up (MWd/kg U)			
	Gap (mm)	Fill gas (MPa)	Unirradiated 0	Low 6	Medium 15	High 20
Standard	0.230	0.1	—	—	BWR 10, BWR 4 BWR 5, BWR 6†	—
Type I	0.100	0.1	BWR 12	BWR 2, BWR 8	BWR 9	BWR 11
Type II	0.230	0.3	—	BWR 14	—	—

† Power cycled up to 826 times

Table 2には、比較研究のうえで基礎となった標準燃料棒の主要な寸法仕様を示す。

Table 2 Characteristics of BWR standard fuel

1. Fuel	
Form	Sintered and ground UO ₂
Density	94.8% T.D.
Outer diameter	10.3 mm
Enrichment	13.0%
Pellet end form	Double chamfered
Center hole diameter	1.8 mmφ for thermo-couple only
Pellet length	10.1 mm
2. Cladding	
Fabricating state	Fully annealed and autoclaved
Outer diameter	12.278 mm
Inner diameter	10.537 mm
Wall thickness	0.871 mm
3. Assembly	
Enriched length	445.0 mm
Enriched weight	0.388 kg
Diametral gap	0.230 mm
Fill gas pressure	0.1 MPa with pure He
Plenum volume	5.3 ml

設計因子である直径ギャップと初期加圧値を除けば、Table 2の寸法は実験で用いたすべての燃料棒にほぼ共通である。

2. 照射リグ

実験では、燃料棒を格納する圧力容器(以下、照射リグ)を2基用いた。1基はベース照射用リグであり、他の1基は出力急昇用リグである。前者の構造およびそこに内蔵された計装機器類については、冷却条件に関するものを除けば、前報で報告したものと同一である。すなわち、BWR型ベース照射リグでの冷却軽水の圧力は運転下で約7 MPaであった。循環軽水ループからベース照射リグ内に流入した冷却材は、ダウンカマを下った後、リグ底部で反転してから燃料棒を冷却した。ベース照射中の典型的な冷却材温度は、下部クラスタ、上下クラスタの中間部および上部クラスタ付近で、それぞれ257, 270および280°Cであった。冷却材圧力や温度変化に関する経時的な詳細データは別途報告した⁽⁷⁾。

ベース照射中の燃料集合体(上下クラスタ)の長手方向(以下、軸方向)相対出力分布は余弦曲線状であった。すなわち、上下クラスタの中間付近でピークが生じた。

ピーキング係数は照射中はほぼ一定で約1.2であった。

出力急昇リグは、前報で述べたPWR型燃料棒の出力急昇リグを併用した。リグの構造やリグに内蔵した炉内測定用の計装機器類は、前報の通りである。

Ⅲ. 実験方法

燃料棒の製造、測定機器の計装・組立は、ノルウェーエネルギー技術研究所で行なった。炉内使用前の検査として、外観検査、Heリーク試験、直径プロフィール測定等を行なったが、いずれの検査においても燃料棒になんらの異状もなかった。焼結燃料ペレットの焼きしまりに対する安定性を調べるため、米国NRCの勧告する方法⁽¹³⁾に従って炉外再焼結実験を行なった。温度1,700°C、保持時間24hの条件で再焼結した燃料棒の密度増加は約0.7% T.D.であった。この結果から、本実験に用いた燃料ペレットは焼きしまりに対して安定⁽¹⁴⁾と考えられた。

組立ての終了した燃料棒をエネルギー技術研究所からハルデン炉に輸送した後、BWR軽水ループ中のベース照射リグに装荷した。続いて、燃料体平均線出力30kW/mでベース照射を開始した。

出力急昇実験は、ベース照射済燃料棒9本に未照射燃料棒1本を加えて行なった。未照射燃料棒1本と8本の照射済燃料棒は、平均線出力30kW/mで1日出力保持した後、5kW/mごとのステップ状に出力を急昇し、目標線出力(例50kW/m)に到達後そこで出力保持(例1日)する出力履歴とした。このステップ状の出力急昇とは、例えば30~35kW/m(5kW/m幅)に2.5kW/m・hの速度で出力急昇したのち、その線出力値で1h保持するような出力急昇方法である。

1本の照射済燃料棒のみ、Fig. 1に示すような出力履歴にて急昇実験を行なった。すなわち、30kW/mで1日間出力保持を行なった後、ステップ状に出力急昇

Fig. 1 Ramp scheme of BWR standard fuel rod in which total of 826 power cyclings was executed

し、平均線出力45と30kW/mの間を周期約20~25minで826回往復する実験方法であった。

出力急昇リグに計装した中性子検出器から得たデータを用いて、燃料棒平均線出力(軸伸びや燃料棒内圧の評価に使用)、直径測定時の局所線出力(径方向PCIの評価に使用)、燃焼度の算出方法は前報の通りである。また、得られた燃料棒の直径、軸伸び、内圧データの評価についても、前報と同じ方法を用いた。

Ⅳ. 実験結果および考察

1. 出力急昇中のPCI

(1) 燃焼度の影響

直径ギャップ100 μ m(製造時)の燃料棒のPCIが、燃焼度によってどのように影響を受けるかを評価した。その結果をFig. 2に示す。ここでは、21MWd/kg Uまで照射した燃料棒と未照射燃料棒のPCI変形を比較した。図から次のことがわかる。

(1) 直径方向のPCI

出力急昇による未照射燃料棒の直径増加量は、Fig. 2(a)左からわかるように、最大で20 μ m(0.16%直径歪)であった。一方、照射済燃料棒の直径増加量は、Fig. 2(b)左からわかるように、最大で60 μ m(0.48%直径歪)であった。すなわち、21MWd/kg Uの照射により径方向PCIは最大で3倍になった。

(2) 軸方向のPCI

出力急昇による未照射燃料棒の軸伸び増加量は、Fig. 2(a)右からわかるように、最大で0.5mm(0.11%軸歪)であった。一方、照射済燃料棒の軸伸び増加量は、Fig. 2(b)右からわかるように、最大で1.3mm(0.29%軸歪)であった。すなわち、21MWd/kg Uの照射により軸方向PCIも最大ではほぼ3倍になった。

これから、燃料棒のPCIは燃焼度の増加とともに大きくなる傾向にあることがわかる。この原因としては、照射中の燃料スエリングとリロケーション⁽¹⁵⁾による直径ギャップの減少が考えられる。実験で用いた照射済燃料棒の冷却材による被覆のつぶれ(クリープダウン)は2 μ m程度であり、そのPCIへの影響はあまり大きくなかったと考えられる。

(2) 燃料設計因子の影響

(1) 直径ギャップ

燃焼度14MWd/kg Uで出力急昇した、直径ギャップ100および230 μ m(共に製造時)の2本の燃料棒の軸方向変形を評価した。その結果をFig. 3に示す。図から次のことがわかる。

直径ギャップが230 μ mであった燃料棒(以下、大

Fig. 2(a), (b) Rod outer diameter and cladding elongation as a function of linear power in (a) unirradiated and (b) pre-irradiated condition

チップ棒)は、Fig. 3左からわかるように、最大で0.3 mm (0.07%軸歪)伸びた。一方、直径ギャップが100 μm であった燃料棒(以下、小チップ棒)は、Fig. 3右からわかるように、最大で0.6 mm (0.14%軸歪)伸びた。すなわち、燃焼度14 MWd/kg Uにおいて、軸方向PCIは小チップ棒が大チップ棒に対して最大2倍となった。

これから、燃料棒のPCIは直径ギャップの大きさに依存することがわかる。すなわち、直径ギャップを小さくするとPCIは加速される。

(2) 初期加圧量

純Heによる充填ガス圧力(以下、初期加圧量)を0.1~0.3 MPaに増加した直径ギャップ230 μm の燃料棒を、燃焼度8 MWd/kg Uで出力急昇した。平均線出力は最大50 kW/mまで増加したが、直径変形量は約10

μm (0.08%直径歪)、軸変形量は約0.17 mm (0.04%軸歪)であった。これと比較すべき初期加圧量0.1 MPa、直径ギャップ230 μm の燃料棒は、ベース照射中に破損⁽¹⁷⁾してしまい燃焼度8 MWd/kg Uで出力急昇できなかった。このため、初期加圧によるPCIへの影響は明らかにならなかった。

2. 出力サイクル中のPCI

燃焼度15 MWd/kg Uに達した2本の標準燃料棒(Table 1のBWR 6, BWR 5)を用い、出力急昇後の出力サイクルがPCIに及ぼす影響を比較した。

実験では、まず燃料棒BWR 6(以下、サイクル棒)に、Fig. 1に示したような出力履歴で826回のサイクルリングを行い、燃料棒直径と軸変形に関するデータを得た。この出力サイクルを含んだ実験においては、炉内燃料破損は生じなかった。

Fig. 3 Axial deformation of cladding vs. rod averaged power at burn-up of 14 MWd/kg U; (left) large gap rod and (right) small gap rod

続いて、燃料棒 BWR5(以下、レファレンス 棒)でサイクル棒と同じ出力急昇を行い、最高線出力 45 kW/m に到達後、サイクリングに入らずそのまま線出力

を保持した。この保持中に燃料棒は PCI 破損した。

サイクル棒およびレファレンス棒につき、出力急昇中の直径および軸方向変形に着目して評価を行なった

Fig. 4 Diametral and axial elongation of (top) power cycled rod and (bottom) non-cycled rod during ramping, as a function of local power

結果をFig. 4に示す。図から出力急昇中の両燃料棒に関するPCIについて、次のことがわかる。

(1) 直径方向のPCI

両燃料棒とも、平均線出力30 kW/mのベース照射中に生じたと思われる径方向の残留変形(5 μ m程度のリッジング)があった。Fig. 4左側の両図からわかるように、局所線出力27 kW/m(平均線出力30 kW/mに相当)まで、ほとんどPCIによる変形が生じないの

は、そのベース照射中のならしによる影響と考えられる。しかしそれ以上の線出力では、両燃料棒のPCIは大きくなった。

Fig. 5は、局所線出力3および37 kW/mにおける両燃料棒の直径形状である。図から、低線出力時比較的平坦であった直径形状に、線出力の増加により生じたPCIのため、多くの凹凸が生じていることがわかる。局所線出力37 kW/mでの両燃料棒の平均リッジ

Fig. 5 Diameter traces of (top) power cycled and (bottom) non-cycled rod at local power of 3 and 37 kW/m

高さは15 μ m程度であった。

ステップ状の出力急昇が終了する直前の最高局所線出力42 kW/mでは、サイクル棒の直径増加量は20 μ m(0.17%直径歪)となり、レファレンス棒の直径増加量は15 μ m(0.13%直径歪)となった。

(2) 軸方向のPCI

両燃料棒の直径変形に関しては、局所線出力27 kW/m付近までは、ベース照射中のならし変形のためほとんどPCIが生じなかった。しかし軸変形に関しては、Fig. 4右側の両図からわかるように、平均線出力10 kW/m付近から両燃料棒にPCI変形が生じた。平均線出力の増加とともに軸変形量は増加し、最高平均線出力45 kW/mでは、サイクル棒の軸伸び増加量は1.1 mm(0.25%軸歪)となり、レファレンス棒の軸伸び増加量は0.8 mm(0.18%軸歪)となった。

サイクル棒は30 kW/mにおける出力保持中(コンディショニング中)に原子炉スクラムにより、実験を一時中断したほかはレファレンス棒と同一の出力急昇

履歴であった。Fig. 4からわかるように、線出力の増加に対する両燃料棒のPCIふるまいは良く似ていた。ただし最高線出力付近のPCIは、サイクル棒の方が直径および軸変形量ともに幾分大き目であった。

Fig. 6は、出力急昇中のPCIによって生じた両燃料棒の直径および軸変形量が、出力サイクル中(Fig. 6上)または定出力保持中(Fig. 6下)に緩和によってどのように変化していったかを評価した結果である。図からサイクル中のPCIについて、次のことがわかる。

(3) 直径方向のPCI: Fig. 6(左)

サイクル棒の直径値は時間および線出力に依存して減少した。826サイクル後の直径値の総緩和量は約20 μ m(0.17%直径歪)で、ほぼ出力急昇による変形増加量と同等になった。サイクル実験中、①第1サイクル時に低出力制限値30 kW/m以下の20 kW/mまで出力を下げる運転の誤り、②第580サイクル時に原子炉スクラムによるサイクル運転の中断、が生じた。

一方、レファレンス棒の直径値も時間に依存して緩

Fig. 6 Variations of diametral and axial deformation of (top) power cycled and (bottom) non-cycled rod as a function of holding time

和したが、定出力保時開始後 3 h、すなわち直径緩和が $10\ \mu\text{m}$ (0.09% 直径歪) に達した時点で PCI 破損した。

(4) 軸方向の PCI: Fig. 6(右)

サイクル棒の軸伸び量は時間および線出力に依存して減少した。826 サイクル後の軸伸び量の総緩和量は約 $0.6\ \text{mm}$ (0.13% 軸歪) であった。一方、レファレンス棒の軸伸び量も時間に依存して緩和したが、 $0.16\ \text{mm}$ (0.03% 軸歪) 緩和の時点で PCI 破損した。

サイクル棒には 826 回の出力サイクル中、燃料棒直径測定時や原子炉スクラム後の起動時に、平均線出力 $45\ \text{kW/m}$ を 5% ほど越える出力変動が生じた。PCI 変形もそれに対応して直前サイクルの PCI 変形量を平均 7% 越えるふるまいを生じた。

826 回の出力サイクル中、サイクル棒には常に PCI

による繰返し変形が直径および軸方向に生じた。サイクル数の増加とともに、この変形量は徐々に小さくなる傾向にあった。レファレンス棒は平均線出力 $45\ \text{kW/m}$ で保時中、3 h 後に PCI 破損した。

実験終了後、サイクル棒の直径値や軸長は、出力急昇前の値にはほぼ復帰した。これから、サイクル棒の炉内変形は弾性的であったことがわかる。

3. FP ガスの放出率

本節では、前章に述べたサイクル棒とレファレンス棒に関連した FP ガス放出率 (以下、FGR) について主として記述するが、他の出力急昇燃料棒のものについても併せて記述する。

(1) サイクル棒の FGR 評価

サイクル棒に計装していた燃料棒内圧測定装置は放

障のため実験中作動しなかった。しかしPIEからFGRに関するデータは得られた。一方、レファレンス棒はPCI破損のため、炉内データのみならずPIEからもFGRに関するデータは得られなかった。幸いに実験では非破損の燃料棒で、サイクル棒に対してFGR研究上レファレンスとなりうる燃料棒があった。この燃料棒 BWR 10(PCI 比較研究用に用いたレファレンス棒 BWR 5 と異なるので、以下、第2レファレンス棒)は、その燃焼度14.0 MWd/kg U がレファレンス棒の燃焼度 15.0 MWd/kg U に近く、出力履歴もほとんど同じであった。ただし、最高平均線出力がサイクル棒およびレファレンス棒ではともに 45 kW/m であった

が、第2レファレンス棒では50 kW/m と幾分高目であった。

第2レファレンス棒に関しては、出力急昇実験中およびPIEからFGRに関するデータを得た。出力急昇中の燃料棒内圧は前報で述べたように相対的内圧である。Fig. 7は、第2レファレンス棒の出力急昇実験における内圧および冷却材温度の変化を時間で評価した結果である。冷却材温度を同時に示したのは、内圧がその温度変化に強く依存するためである。この図から燃料棒の内圧は30 kW/mでのコンディショニング(図中①)、出力急昇時(図中②)、50 kW/m 定出力保持(図中③)の各段階において変化したことがわかる。

Fig. 7 Relative internal pressure and coolant outlet temperature of second reference rod as a function of ramping time

Fig. 7では、出力急昇前の冷却材温度206°Cにおける燃料棒内圧値 1.2 MPa が、出力急昇後の冷却材温度 206°Cにおける燃料棒内圧値2.3 MPaに増加していた。この圧力増加 1.1 MPa は、出力急昇中に生じた燃料棒からの FGR による結果と考えられる。冷却材温度 206°C 下の燃料棒圧力値 1.1 MPa は、標準状態に換算すれば0.7 MPaとなる。

Table 3は、サイクル棒と第2レファレンス棒のFGRに関する炉内およびPIEの測定結果をまとめたものである。この表で、(1)は上述の炉内ガス圧力測定の結果であり、(2)はPIEから求めた燃料棒の最終内圧値を(1)と同じ標準状態で示したものである。これより、炉内測定した内圧値は比較的PIE値に合っている(炉内値は10%の過大評価)ことがわかる。

一方、(2)で第2レファレンス棒の最終内圧値とサイクル棒のそれを比較すると、サイクル棒の方が約0.3 MPa 高い。この差はサイクル棒の燃焼度が約1 MWd/kg U 高いこと、高線出力 45 kW/m の実質保持時間が約7日(レファレンス棒は50 kW/m で1日)と長かったこと、等によると考えられる。

(3)はPIEのFPガス解析から得たサイクル棒と第2レファレンス棒のFGR値であり、前者は21%、後者は19%となっていた。すなわち、両燃料棒のFGR値にはあまり差がなかった。

比較的長期にわたる出力サイクルにもかかわらず、出力サイクル棒のFGR値が第2レファレンス棒のそれとあまり差異がなかったことから、出力サイクル中のFGR加速はなかったか、あっても小さかったと推

Table 3 Results of in-core pressure measurement and post-irradiation examination of power ramped rods

Result of in-core pressure measurement		
Fuel rod	BWR 6	BWR 10
Burn-up (MWd/kg U)	14.8	14.0
Condition	Power cycled	Non-cycled
Linear power at holding (kW/m)	45 & 30	50
Time at power (d)	16	1
(1) Increased rod pressure [†] during ramp (MPa)	Not obtained	0.7
Result of PIE puncturing		
Total gas amount (ml)	42.2	38.1
Free volume (ml)	4.6	5.9
(2) Punctured pressure (MPa)	0.92	0.65
(3) Fission gas release (%)	21.0	19.0

Note: Initial pressure of the both rods was 0.1 MPa.

[†] Measured with in-core pressure transducers

定される。

燃料からの FGR は燃料温度に影響を受け、高温ほど FGR が高くなる傾向にあること⁽¹⁰⁾、および第 2 レファレンス棒の炉内ガス圧力データが比較的精度が良いことから、Fig. 7 中の③(一定線出力 50 kW/m: 高温期間)を再評価して Fig. 8 に示す。図の内圧値は、最高線出力到達直後の内圧値を基準にして、そこから増加量を評価した。これからわかるように、50 kW/m 出力保持中の第 2 レファレンス棒の内圧増加は放物線状である。Fig. 8 を両対数プロットしてその勾配 m

(MPa/h)を求めたところ、 m は近似的に $\frac{1}{2}$ となった。すなわち、第 2 レファレンス棒の内圧増加量 Δp (MPa) は、平均線出力 50 kW/m における保持時間 Δt (h) に対して、実験事実から

$$\Delta p \propto \sqrt{\Delta t} \quad (1)$$

と書ける。前報で述べたように、燃料棒の FP ガス放出率 f (%) は

$$f \propto \Delta p \quad (2)$$

と書けるから、第 2 レファレンス棒の出力保持中の FGR に関しては、(1)、(2) 式から次の通りとなる。

Fig. 8 Relative internal pressure of second reference rod at constant power of 50 kW/m as a function of holding time, where pressure was normalized at beginning of holding

$$f \propto \sqrt{\Delta t} \quad (3)$$

これから、第2レファレンス棒の線出力 50 kW/m 保持中の FGR は、Booth の拡散理論⁽²⁰⁾によって導かれる高温での FGR の時間依存型とはほぼ同型になった。

サイクル棒と第2レファレンス棒の FGR に関するふるまいは、Table 3 から推測できるように、互いにあまり差がないことから判断して、出力サイクル中の FGR も第2レファレンス棒と同様に拡散律速によるものであらうと考えられる。

(2) 非破損燃料棒の FGR 評価

出力急昇実験において非破損だった4本の燃料棒につき、PIEの結果からFGRの評価を行なった。4本の燃料棒のうち2本は、燃焼度 6 MWd/kg U で出力急昇した小ギャップ 100 μm 燃料棒であり、残り2本は第3(1)項で記述したサイクル棒およびレファレンス棒よりなる大ギャップ 230 μm 燃料棒である。それらの FGR を燃焼度について評価した結果を Fig. 9 に示す。

図から、燃料棒の FGR は燃焼度に依存して大きくなる傾向にあることがわかる。燃焼度 15 MWd/kg U で平均線出力 45 kW/m に達する出力急昇の例では、FGR は 20% になった。

4. 出力急昇による PCI 破損

(1) PCI 破損のしきい値

実験で出力急昇した10本の燃料棒全部を、燃焼度と

Fig. 9 FP gas release of intact BWR rods as a function of attained averaged burn-up

最高線出力で評価し、それに PCI 破損・非破損を加味した結果を Fig. 10 に示す。実験はループを用いての BWR 模擬実験(冷却材圧力 7.0 MPa, 温度 280~300°C)であったが、従来ハルデン炉においても HBWR 条件下(冷却材圧力 3.4 MPa, 温度 240°C)で PCI 破損しきいを評価する研究⁽⁶⁾が 50 本以上の燃料棒について行われている。Fig. 10 には、その HBWR 条件における出力急昇実験の結果も併せて示した。

Fig. 10 Terminal power of ramped BWR rod as a function of accumulated burn-up, where more than 50 rods ramped in HBWR are included for comparison

図中の実線は、HBWR 条件下の出力急昇実験で PCI 破損した燃料棒のデータ点を包絡した PCI 破損しきい曲線である。図から、本実験で出力急昇した BWR 燃

料棒について次のことがわかる。

- (1) 最高平均線出力約 50 kW/m で未照射の燃料棒から次々に燃焼度を増加して出力急昇したが、

PCI 破損は 15 MWd/kg U 付近から生じた。それ以後の燃焼度では合計 4 本の BWR 燃料棒が PCI 破損した。すなわち、PCI 破損には燃焼度依存性があった。

- (2) BWR 燃料棒の破損しきい値は、いずれも HBWR 燃料棒による PCI 破損しきい曲線上かそれより下にあった。

(2) PCI 破損燃料棒の炉内ふるまい

直径ギャップ 100 μm で燃焼度 21 MWd/kg U まで照射した小ギャップ棒 BWR 11 と、直径ギャップ 230 μm で燃焼度 15 MWd/kg U まで照射した大ギャップ棒 BWR 4 は、ともに出力急昇時に PCI 破損した。この 2 本の燃料棒の出力急昇中の PCI による直径変化および出力保持中の緩和ふるまいについて評価した。

Fig. 11 は、両燃料棒の直径変化を局所線出力で評価したものである。図から、PCI 破損に至るまでに、小ギ

The rods were failed during a peak power holding.

Fig. 11 Rod outer diameter vs. local power of (top) small gap rod ramped at burn-up of 21 MWd/kg U, and (bottom) that of large gap rod ramped at burn-up of 15 MWd/kg U

ャップ棒の直径は 60 μm (0.5% 直径歪) の増加、大ギャップ棒の直径は 25 μm (0.2% 直径歪) の増加、をそれぞれ起したことがわかる。小ギャップ棒では、特に局所線出力 30 kW/m 以上での変形量増加が著しかった。

両燃料棒は平均線出力 43.7 ± 0.6 kW/m で出力保持されている間に PCI 破損したが、その間の緩和ふるまいを評価した結果を Fig. 12 に示す。

Fig. 12 Relaxation of (top) cladding elongation and (bottom) rod outer diameter, in which data from two failed rods are included for comparison

この図から次のことがわかる。

- (1) 小ギャップ棒と大ギャップ棒の PCI 破損は、出力保持後 2 および 10 h であった。出力急昇時に大きな PCI を生じた小ギャップ棒が早く破損した。
- (2) 出力保持中、小ギャップ棒と大ギャップ棒の直径にはほとんど緩和が観られなかった。両燃料棒の軸伸び量も出力保持 2 h 以内で 0.3 mm (0.07% 軸歪) の緩和が観られた程度で、それ以後ほとんど緩和が観られなかった。
- (3) 大ギャップ棒の直径値 (Fig. 12 上) は軸伸び (Fig. 12 下) の緩和中にもかかわらず増加した。出力保持中 10 h 目、大ギャップ燃料棒は PCI 破損した。

このとき、軸伸びには急激な変化が生じた。すなわち、出力急昇前 0.7 mm の相対伸びから出発して、最高線出力で 1.7 mm、PCI 破損直前で 1.5 mm になっていた軸伸び量が 0.5 mm まで急激に収縮した。実験後この伸び量は再び実験前の値 0.7 mm に戻った。PCI 破損による軸伸びの大きな収縮は HBWR 条件下での燃料棒⁹⁾に見られているが、本実験のような急激な収縮は今までに例がない。

V. 結 言

8×8 BWR 型燃料棒のペレット-被覆相互作用(PCI)に及ぼす燃焼度および燃料設計因子(直径ギャップと He 加圧量)の効果を研究するため、ハルデン炉による軽水模擬ループ実験を実施し、燃料棒直径、軸方向伸び、燃料棒内圧等の変化を線出力と時間によって解析・評価した。

実験から得られた結果は以下の通りである。

- (1) BWR 燃料棒の PCI は燃焼度の増加とともに大きくなる傾向にあった。燃焼度 21 MWd/kg U における燃料棒の PCI は、未照射燃料棒のはぼ 3 倍となった。すなわち直径ギャップを小さくすると PCI は加速される。燃焼度 14 MWd/kg U における小ギャップ棒の PCI は大ギャップ棒のはぼ 2 倍であった。
- (2) 826 回の出力サイクル中の PCI 変形は弾性的であった。サイクル中、燃料棒には PCI による変形が繰り返し生じたが、その大きさはサイクル数の増加とともに小さくなった。出力サイクル棒は実験中健全であったが、レファレンス棒は最高出力保持中に PCI 破損した。また PIE の結果、サイクル棒とレファレンス棒間の燃料棒内圧および FP ガス放出率(FGR)に大きな差はないことがわかった。FGR は拡散律速による $\sqrt{t}$ (t : 時間)依存型であった。さらに非破損燃料棒を用いて PIE から FGR を求めた結果、それは燃焼度とともに大きくなるのがわかった。
- (3) 実験で用いた燃料棒の PCI 破損には、燃焼度依存性が見られた。その破損しきい値は、HBWR 条件下で PCI 破損した燃料棒のしきい値と等しいか、またはそれ以下であった。また、PCI 破損した燃料棒の破損時間は出力急昇中に生じた PCI の

大きさに依存した。さらに PCI 破損燃料棒の出力保持中の緩和は小さく、破損時に軸伸び量が大きく減少するのが見られた。

本実験の遂行に当たり、終始有益な助言と討論を日本原子力研究所燃料安全工学次長 市川達生氏から賜りました。炉内実験の遂行に関しては、ハルデン原子炉プロジェクト副理事長 A. ハネビックおよび K.D. クヌッドセン両氏のほか、原研派遣員の高橋秀武、中島鉄雄、中村仁一、林 君夫、天野俊英の各氏に、並々ならぬご協力を頂きました。照射後試験では、ノルウェーのエネルギー技術研究所 シェラーホットラボ課長 P. アルネセン氏に適切な助言と協力を賜りました。ここに記して、感謝する次第です。

— 参 考 文 献 —

- (1) 柳澤和章, 近藤吉明, E. KOLSTAD: 原子力誌, 28(7), 641 (1986).
- (2) 菊地 章, 市川達生: 同上, 23(7), 507 (1981).
- (3) HOLLOWELL, T.E., KNUDSEN, P., MOGARD, H.: *Proc. ANS Topical Mtg. on LWR Extended Burnup, Williamsburg, Virginia, USA*, (1982).
- (4) MOGARD, H., HECKERMAN, H.: *Proc. ANS Topical Mtg. on LWR Fuel Performance, Orlando, Florida, USA*, (1985).
- (5) VILPPONEN, K.O., FØRDESTRØMMEN, N., SVANHOLM, K., MINAGAWA, Y.: *Proc. IAEA Specialists' Mtg. on PCI in Water Reactors, Risø, Denmark*, (1980).
- (6) JONES, R.L., CUBICCIOTTI, D., SYRETT, B.C.: *J. Nucl. Mater.*, 91, 277 (1980).
- (7) UNE, K.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, 16(8), 577 (1979).
- (8) PEEHS, M., STEHLE, H., STEINBERG, E.: *ASTM-STP* 681, 224 (1979).
- (9) BATY, D.L.: *Proc. IAEA Specialists' Mtg., Erlangen, Germany*, (1979).
- (10) ADAMSON, R.B.: *J. Nucl. Mater.*, 92, 363 (1980).
- (11) SYRETT, B.C., CUBICCIOTTI, D., JONES, R.L.: *Nucl. Technol.*, 55, 628 (1981).
- (12) CUBICCIOTTI, D., et al.: *J. Nucl. Mater.*, 78, 2 (1978).
- (13) LUNDE, L., et al.: Ref.(5).
- (14) WOOD, J.C., HARDY, D.D.: *Proc. ANS Topical Mtg., St. Charles, USA*, (1977).
- (15) MEYER, R.O.: *NUREG-0085*, (1976).
- (16) YANAGISAWA, K., HAYASHI, K.: *J. Nucl. Mater.*, 127, 116 (1985).
- (17) YANAGISAWA, K.: *JAERI-M* 83-234, (1983).
- (18) OECD Halden Project: *Annu. Rep.*, (1984).
- (19) WHITE, R.J., TUCKER, M.O.: *J. Nucl. Mater.*, 118, 1 (1983).
- (20) BOOTH, A.H.: *AECL-496*, (1975).