

# 沸騰水型原子炉(BWR)燃料に対する信頼性向上の研究現状

## Current Status of Studies on Reliability Improvement of BWR Fuel

日立製作所は、昭和32年に沸騰水型原子炉(BWR)用燃料の研究開発を開始した。以降、研究開発の内容は当初の生産技術開発から、BWR燃料の特性研究及び信頼性向上の研究へと移行してきた。本稿では、信頼性向上の研究現状を主体に紹介する。

信頼性向上の研究目標は、独自の研究開発成果を実製品に反映して、燃料漏洩の完全防止を達成することであり、この成果を適用した中国電力株式会社島根原子力発電所では、運転開始後約4年を経過した現在も、無漏洩運転を継続しており、研究開発の成果を実証することができた。無漏洩運転の基盤となった技術を要約すると、次に述べるとおりである。(1)燃料棒内の乾燥を徹底し、局部水素化を完全に防止したこと。(2)燃料に急激な出力変化を与えない運転法が徹底して遵守されたことの2点で、今後の課題は、任意の負荷変動に耐える改良燃料を開発し、より高い顧客のニーズにこたえることである。

藤江秀夫\* *Fujie Hideo*  
小熊正臣\* *Oguma Masaomi*  
新保勝利\* *Shinbo Katsutoshi*  
牧 英夫\*\* *Maki Hideo*  
河原 暲\*\*\* *Kawahara Akira*

### 1 緒 言

沸騰水型原子炉(以下、BWRと略す)には、二酸化ウラン(以下、 $\text{UO}_2$ と記す)焼結ペレットを外径12.5mm、長さ4,000mmのジルカロイ-2被覆管に密封した燃料棒が用いられている。電気出力1,100MWeのBWRの場合、原子炉の心臓部とも言うべき炉心は、約5万本の燃料棒から構成される。被覆管は、ウランの核分裂によって生ずる放射性生成物を燃料棒内に封じ込める役割を果たし、高い線出力密度に耐えるように設計されている。

日立製作所では、昭和32年にBWR燃料の研究開発に着手した。当初は、 $\text{UO}_2$ ペレットの成型・燃結、ジルカロイ-2被覆管の溶接、品質管理などの生産技術開発に主力を注ぎ、昭和43年には、商用BWR燃料の生産工場である日本ニュークリア・フューエル株式会社(略称JNF、日立製作所と他BWRメーカーとの合併会社)を設立した。昭和42年には、豊富な使用実績を誇る米国GE社の技術を導入し、更に製造技術や使用条件と関連付けた独自の燃料信頼性向上研究の成果を積み上げ、研究開発、設計及び製造に至る一貫したBWR燃料供給体制を確立した。

それらの技術を結集して、昭和47年には中国電力株式会社島根原子力発電所(電気出力460MWe)用初装荷燃料404体を完成した。同発電所は昭和49年3月には商用運転を開始し、以来、取替燃料をも含めて、燃料無漏洩運転を継続している。

本稿では、BWR燃料の設計改良の経緯、燃料の健全性を飛躍的に向上させた局部水素化防止技術、原子炉出力変動と関連付けた燃料棒の変形破損防止の最近の技術的な進歩について紹介する。

### 2 設計改良の経緯

#### 2.1 燃料集合体の構造

BWR燃料集合体は、 $\text{UO}_2$ 焼結研摩ペレットをジルカロイ

-2被覆管に装填して密封した燃料棒を、 $7 \times 7$ 又は $8 \times 8$ の正方格子状に配列し、それを上部及び下部タイプレート及びスペーサによって支持した燃料バンドルと、ジルカロイ-4製のチャンネルボックスとから構成されている。 $8 \times 8$ 型燃料集合体の構造を図1に示す。

ステンレス鋼 casting品である上部及び下部のタイプレートは、集合体の最外列に配置されている8本のタイロッドで結合されており、他の標準燃料棒は上下のタイプレートに保持されている。燃料棒の配列は、長さ方向の7箇所に配したスペーサによって水平方向に弾性支持されている。スペーサによる燃料棒の保持力は小さいので、燃料棒は温度変化に伴って自由に伸縮し、その長さの変化を自由に吸収できるようばねを介して上部タイプレートに装着されている。

チャンネルボックスは、組み立てられた集合体に上部より装脱着できるよう設計されており、冷却水の流路を形成するとともに、制御棒の案内面を構成し、更には集合体に剛性をもたせる役目を果たす。

#### 2.2 設計改良の経緯

BWR燃料は、過去20年を超える世界的な規模の研究開発と、約15年間の豊富な実炉使用実績に基づく経験に支えられ、より信頼性の高い燃料へと改良が積み重ねられている。商用BWR燃料の仕様は、 $7 \times 7$ 型、 $7 \times 7$ 改良型、 $8 \times 8$ 型へと変遷したが、その仕様を表1に示す。

集合体内の数本の燃料棒には、炉心反応度を適切に制御するために数パーセントのガドリニア( $\text{Gd}_2\text{O}_3$ )が添加されている。被覆管は十分な肉厚をもっており、冷却水外圧によって座屈しないように設計されている。

$7 \times 7$ 型の場合も、燃料棒内の残留水分を少なくし、極端に大きな出力変化を与えなければ十分な健全性を示す。しかし、その信頼性を更に向上させるために、 $7 \times 7$ 改良型では、棒内に「水分ゲッタ」を配した。また更に、ペレットと被覆

\* 日立製作所日立研究所    \*\* 日立製作所日立工場 工学博士    \*\*\* 日立製作所日立工場



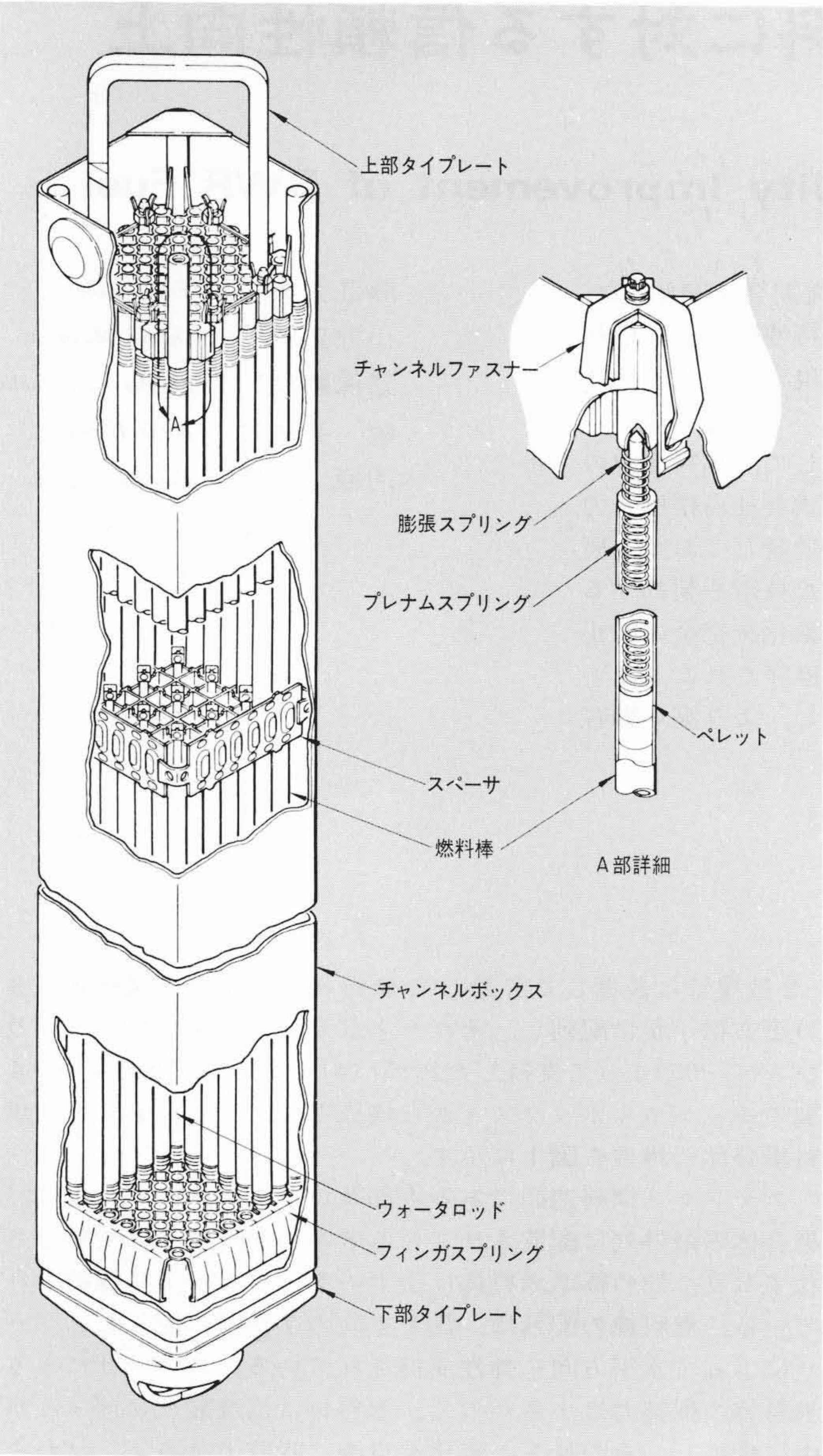


図1 BWR 8×8型燃料集合体の構造 燃料集合体は、63本の燃料棒と1本のウォータロッドから構成される燃料ハンドルと、それを囲むチャンネルボックスから成る。

管との相互作用(Pellet-Clad Interaction：以下、PCIと略す)に対する健全性向上のために、「チャンファ付短尺ペレット」と、延性の大きい「再結晶化焼鈍被覆管」を採用した。その後、単位体積当たりの熱出力(出力密度)を同一としながら、単位長さ当たりの熱出力(線出力密度)を低くして、耐PCI特性を大幅に改善させた8×8型へと設計改善された。

3 局部水素化による漏洩防止対策

ジルカロイ被覆のUO<sub>2</sub>型燃料棒が、商用BWR、PWR(加圧水型原子炉)などで多数使用され始めた1960年代末期から1970年代初期にかけて、同一原因と考えられる燃料漏洩が方々の原子炉で発見された。その発生割合は小さいものであったため、多量の燃料棒の使用実績が蓄積されるに至って、初めて系統的に発生することが判明した。この漏洩は、ジルカロイ被覆管が燃料棒内部に存在する微量水分によって局部的に水素化される結果、その部位が脆化するとともに、水素化物(ZrH<sub>2</sub>)形成による体積増加をきたし、被覆管内面より貫通ピ

表1 燃料仕様比較表 中国電力株式会社島根原子力発電所には、初装荷燃料として7×7型、第1回、第2回取替燃料として7×7改良型、第3回取替燃料として8×8型燃料が装荷されている。

| 項目                 | 燃料の型式・単位           | 7×7型               | 7×7改良型                                                                 | 8×8型                                                                   |
|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| ペレット               |                    |                    |                                                                        |                                                                        |
| 材料                 | —                  | UO <sub>2</sub>    | UO <sub>2</sub> 及び<br>Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 添加UO <sub>2</sub> | UO <sub>2</sub> 及び<br>Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 添加UO <sub>2</sub> |
| 直径                 | mm                 | 12.4               | 12.1                                                                   | 10.6                                                                   |
| 長さ                 | mm                 | 22                 | 12                                                                     | 11                                                                     |
| 密度<br>(対理論密度比)     | %                  | 94                 | 95                                                                     | 95                                                                     |
| 被覆管                |                    |                    |                                                                        |                                                                        |
| 材料                 | —                  | ジルカロイ-2応<br>力除去焼鈍材 | ジルカロイ-2再<br>結晶化焼鈍材                                                     | ジルカロイ-2再<br>結晶化焼鈍材                                                     |
| 外径                 | mm                 | 14.5               | 14.3                                                                   | 12.5                                                                   |
| 厚さ                 | mm                 | 0.90               | 0.94                                                                   | 0.86                                                                   |
| 燃料集合体全長            | m                  | 4.35               | 4.35                                                                   | 4.35                                                                   |
| 燃料有効高さ             | m                  | 3.66               | 3.66                                                                   | 3.66                                                                   |
| 燃料集合体当たりの燃<br>料棒本数 | —                  | 49                 | 49                                                                     | 63                                                                     |
| 水分ゲッタの有無           | —                  | なし                 | あり                                                                     | あり                                                                     |
| ウォータロッドの有無         | —                  | なし                 | なし                                                                     | あり                                                                     |
| 使用条件               |                    |                    |                                                                        |                                                                        |
| 最大線出力密度            | kW/ft              | 17.5               | 17.5*                                                                  | 13.4                                                                   |
| 炉心圧力               | kg/cm <sup>2</sup> | 71.7               | 71.7                                                                   | 71.7                                                                   |

注：\*BWR-4以降は18.5kW/ft

ンホールが発生する現象であることが分かった<sup>1)~3)</sup>。この漏洩は、燃料の使用初期に発生するのが一つの特徴である。

日立製作所での局部水素化の研究は、中国電力株式会社島根原子力発電所用初装荷燃料の漏洩防止を目的として、1971年(昭和46年)から開始された。当時、局部水素化による漏洩の防止方法は不明で、解決すべき最重要課題として、世界各国でその原因の究明と対策研究が行なわれていた。日立製作所では、そこで幾つかの試行錯誤を繰り返しながら発生条件を解明するとともに、その対策として燃料棒をよく乾燥して、統計的な発生条件に対して十分安全側となる低い値に水分を管理するため、JNFでの燃料製造工程、及び品質管理基準の整備を実施した。

現在では、燃料棒の乾燥を行なうだけでなく、水分を吸収するゲッタを併用しており、局部水素化による燃料漏洩は完全に解決された。

4 PCIによる漏洩防止対策

4.1 PCIによる漏洩

1971年ドレスデン1号炉の使用済み燃料棒の中に、被覆管に微小な縦割れのあるものが発見された<sup>4)</sup>。これがPCIによる燃料漏洩として商用炉燃料棒で確認された最初のものである。それ以来、PCIによって燃料が漏洩に至る機構の解明と対策が、燃料研究の重要な分野となった。燃料棒の出力を上げてゆくと、UO<sub>2</sub>ペレットは半径方向の温度こう配によって、図2に示すように割れを伴ってそり返るように変形し、被覆管との熱膨張差によって製造時に存在していた被覆管内面との間隙は小さくなる。出力が高くと、被覆管はペレットの端部によって内側から押されて、図3に示すようなリッジ(隆起)が形成される。このリッジ部には、ペレット端部の熱変形ばかりでなく、ペレットの半径方向クラックによっても局所的な応力、(又は「ひずみ」)集中が発生する。PCIによる漏洩は、このような局所的な応力(又は、「ひずみ」)が、あ



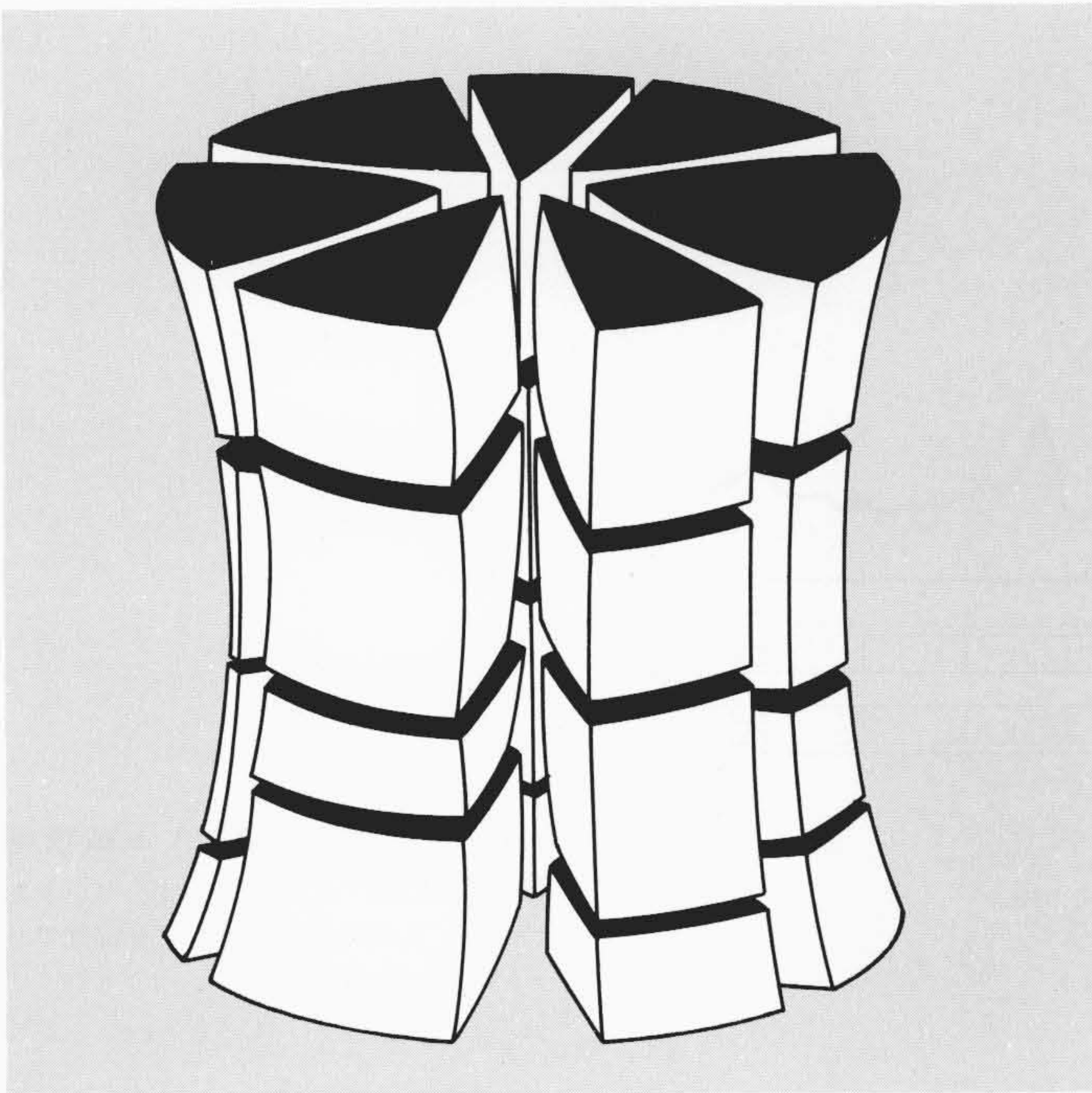


図2 UO<sub>2</sub>ペレットの熱変形 燃料棒の出力を上げてゆくと、UO<sub>2</sub>は、割れを伴いながら変形する。

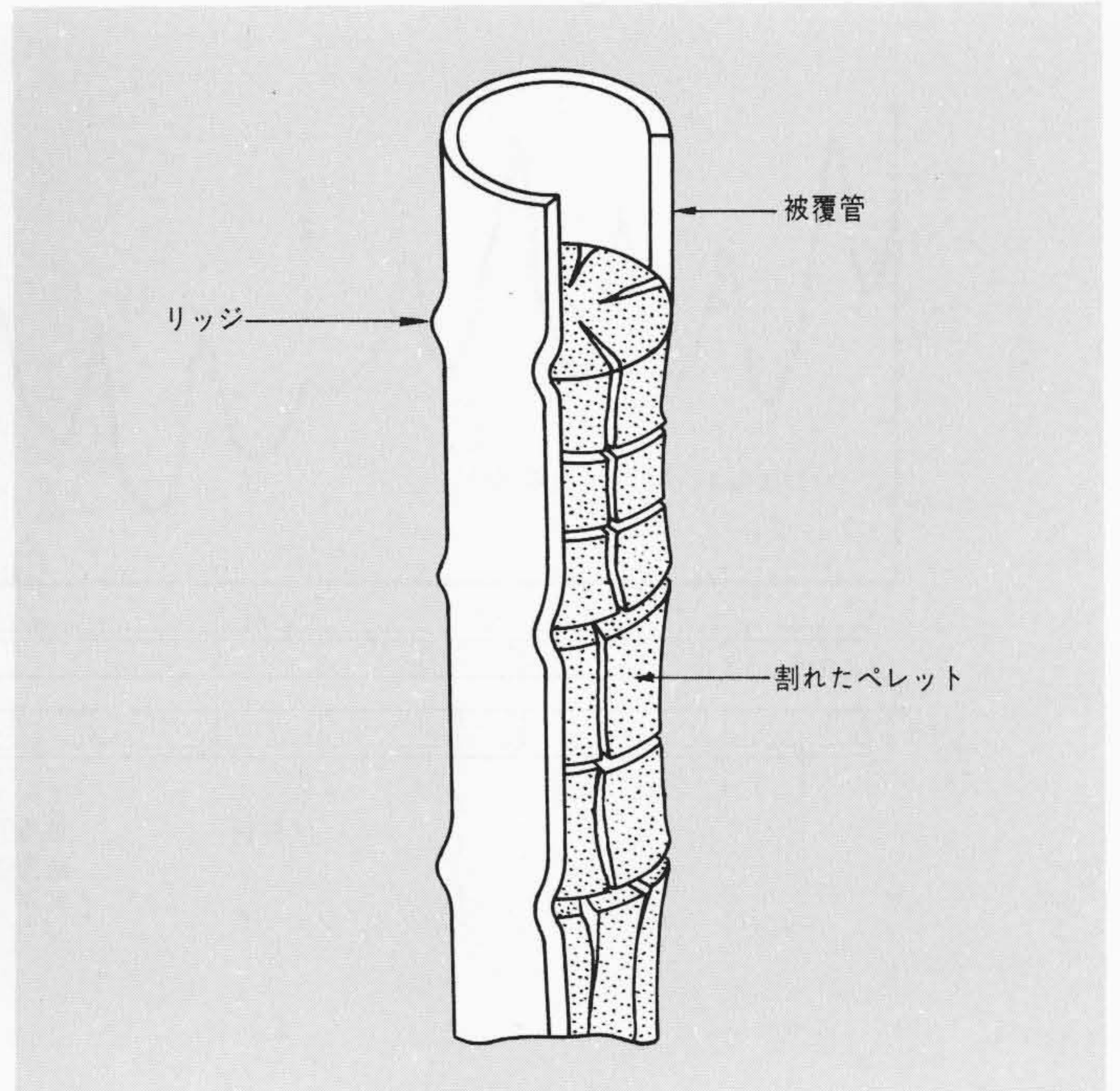


図3 PCIによる被覆管の変形 ペレットの熱変形によって、被覆管にリッジが生ずる。

るしきい値を超え、かつヨウ素などの腐食性核分裂生成物が作用して起こる一種の応力腐食割れ(以下、SCCと略す)現象によるものと考えられている。このため、変形破損を防止するためには、出力変動に伴うペレットの割れ、被覆管のリッジ変形、応力やひずみの集中などのPCI機構を解明し、更に被覆管の破断限界を明らかにして、原子炉の運転法や燃料棒の設計仕様の最適化を行なう努力が続けられている。

#### 4.2 PCI挙動の解明

##### (1) ハルデン炉を用いた照射試験

中国電力株式会社島根原子力発電所用初装荷燃料棒と同仕様であるが、長さ1,700mmの短尺燃料棒を製作して、ノルウェーに輸送し、ハルデン炉で平均燃焼度約17,000 MWD/T

まで照射し、照射中の燃料棒の伸びを測定した。図4にその一例を示す。出力を急速に上げると燃料棒の伸びは定格出力到達時に最大となり、その後しだいに小さくなる。この伸びの緩和現象は、高温になっているペレット中央部でのクリープによるものと考えられる。この結果から、出力上昇速度を同図の点線のように遅くすると、燃料棒の伸びを $\Delta l$ の分だけ<sup>5)</sup>低減できると予測された。また、燃料棒の伸び挙動を解析すると、ペレットが被覆管内面に接触する出力が分かる。図5は、PCIを開始する線出力密度を示したものである。ほぼ8 kW/ft以下では、PCIが発生しないことが分かる。この結果は、ほぼ8 kW/ftまでは制御棒引抜きなどによる速い出力上昇運転を許容できることを示唆していると言える。

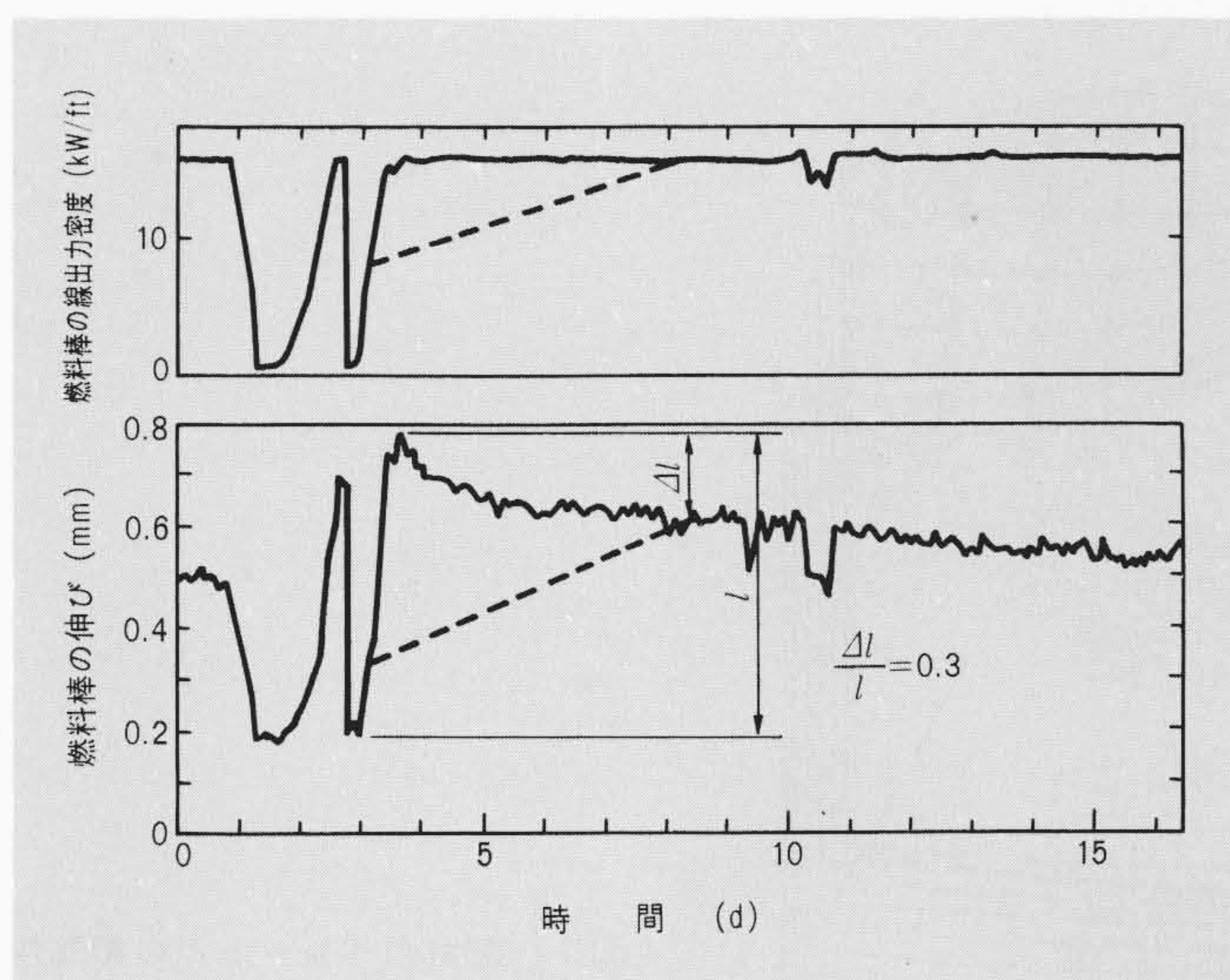


図4 燃料棒の伸び緩和現象 ノルウェー国ハルデン炉での燃料棒の照射試験結果の一例を示す。

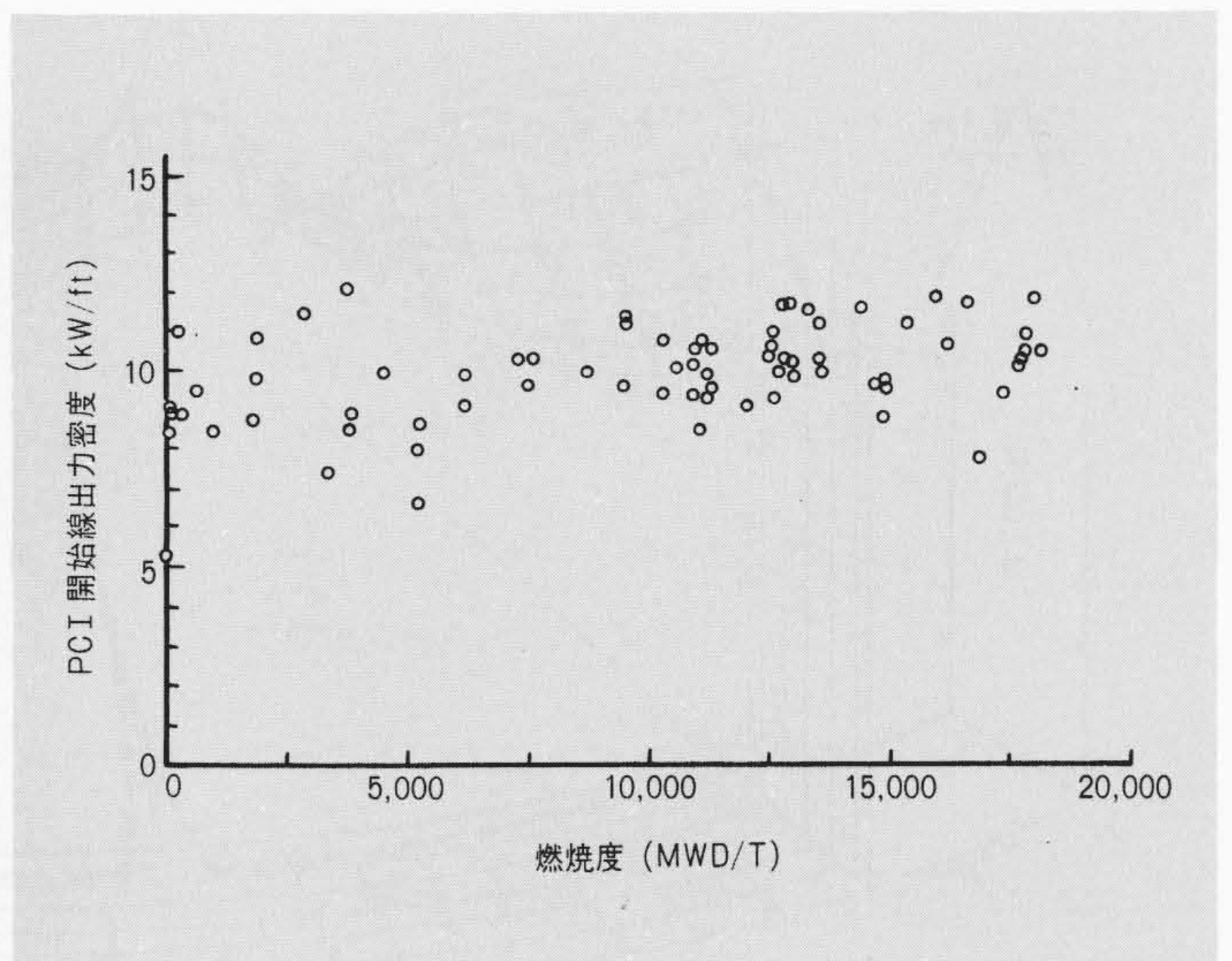


図5 PCI開始線出力密度の燃焼度依存 PCI開始線出力密度は、ほぼ8 kW/ft以上にある。中国電力株式会社島根原子力発電所燃料と同一仕様燃料棒のハルデン照射試験による。



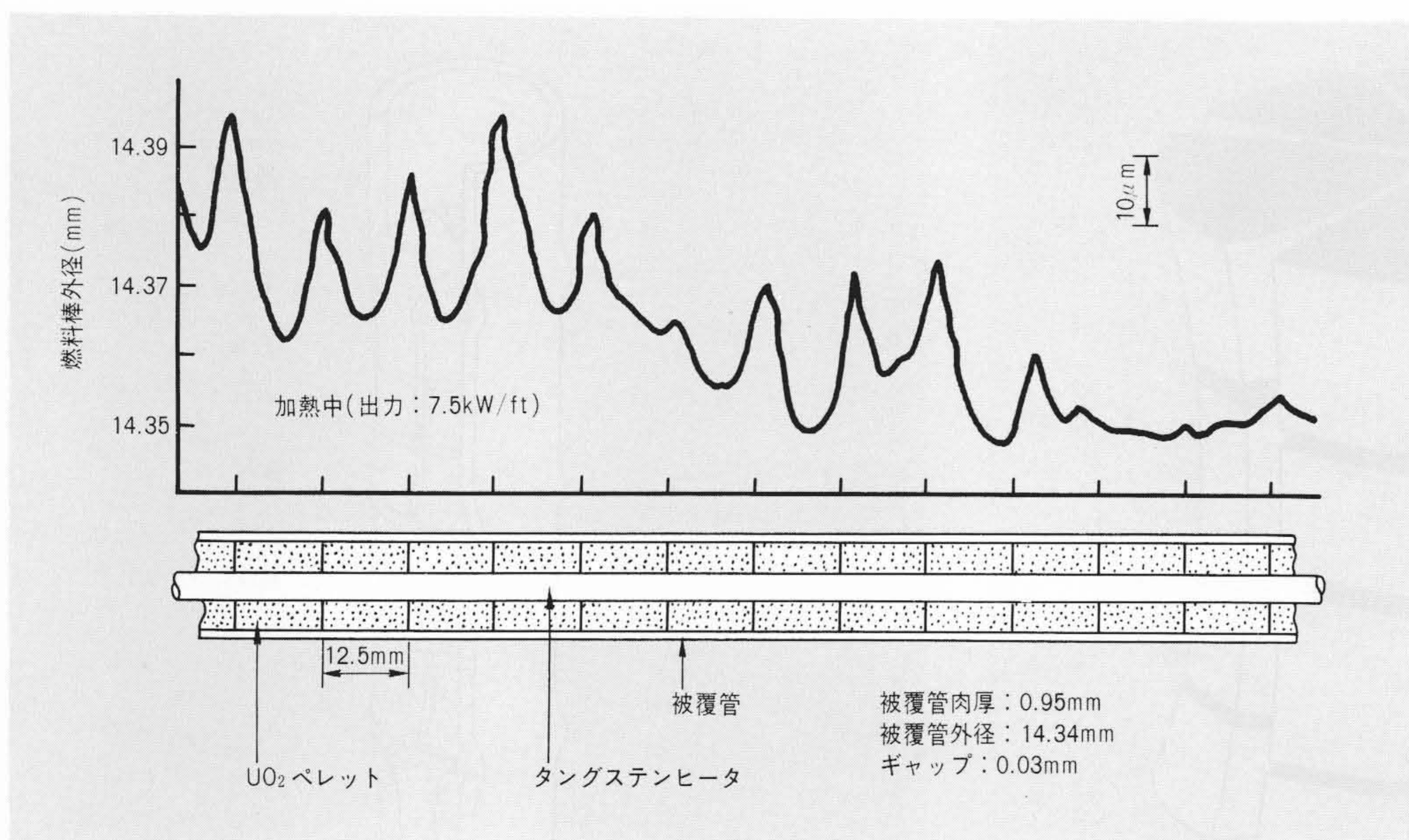


図6 PCI模擬実験による被覆管  
外径の変化 被覆管には、ペレット  
とペレットの隣接部に対応する位置でリ  
ッジ隆起が生ずる。

## (2) 炉外でPCIを模擬する実験

被覆管に複数個の中空ペレットを充填し、ペレットの中心部に挿入したタングステンヒータを通電加熱することによって、炉外でPCIを模擬する実験を行なった。PCIによる被覆管の変形は、差動トランス式直径測定リグで測定した。図6に加熱中の長さ方向に沿った被覆管の外径変化を示す。ペレット端面に対応した位置に、明確なリッジが認められる。出力上昇によって被覆管の外径も増加するが、その増加率は、 $\text{UO}_2$ ペレットを剛体と仮定したときの熱膨張変化率よりも小さく、被覆管の熱膨張率よりも大きいという、割れたペレットのふるまいと密接に関連した現象が明らかになってきた。

また、金属の中子を入れた $\text{UO}_2$ ペレットを圧縮するという中子拡管法により、ペレットの半径方向割れによって被覆管が受けるひずみ集中効果を定量化し、その結果、この現象がペレットの割れ数と、被覆管とペレットとの実効摩擦係数に

密接な関係があることが明らかになった<sup>6)</sup>。

## (3) ジルカロイ被覆管の外圧クリープ現象

被覆管の外圧によるクリープ現象は、ペレットと被覆管との間隙を減少させPCIを増進させる。炉外で、リッジ付模擬ペレットを挿入した被覆管を用いて外圧クリープ試験を実施した。外圧クリープの変形挙動はPCIが起こる前は膜応力で、PCI発生以降は膜応力と軸方向曲げ応力で説明できることが判明するなど、クリープ変形に関する知見が集積されつつある<sup>7)</sup>。

## (4) 変形予測コードによる解析

リッジ部の局所的な応力及びひずみを解析する、燃料変形予測コード“FEAST”を開発した<sup>8)</sup>。“FEAST”コードは、上述した照射試験、あるいは炉外実験から得られたペレットや燃料棒のふるまいをモデル化し、これを2次元有限要素法を用いた構造解析プログラムに取りまとめたものである。図

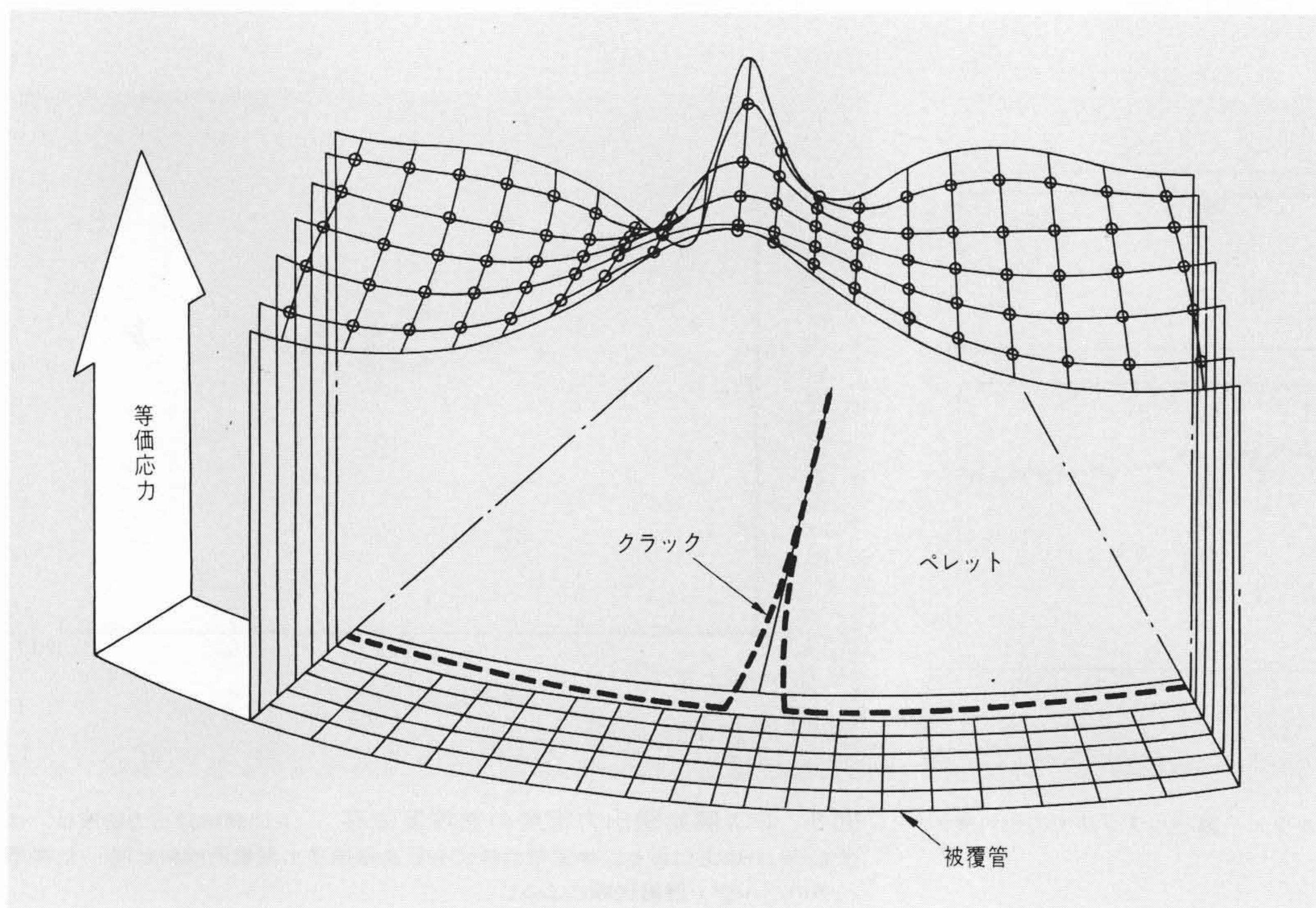


図7 割れたペレットとの相互作用による被覆管の応力分布 被覆管を5層に分割して解析した例を示す。被覆管のペレットクラックに対応した位置では、応力の集中が起こる。



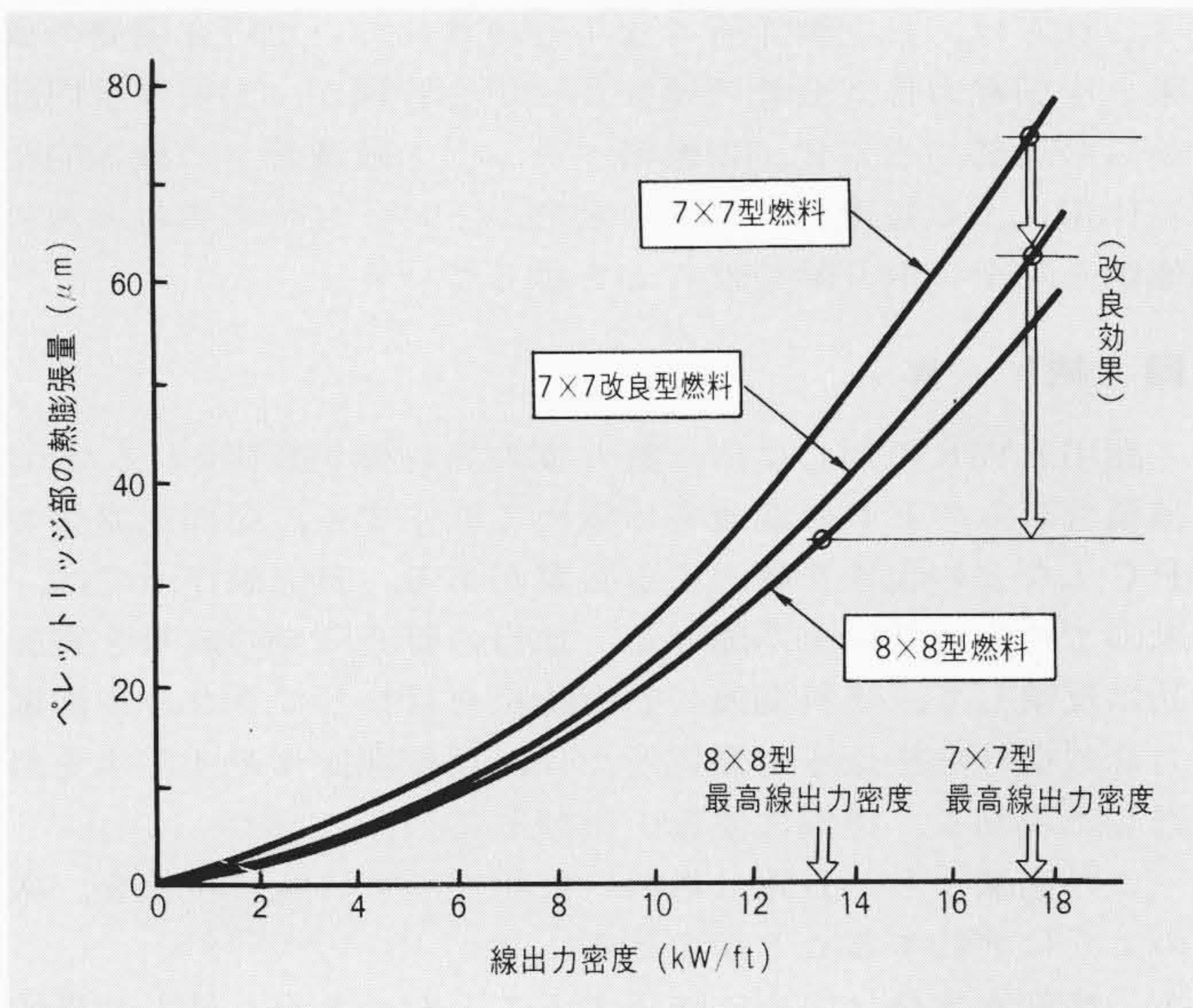


図8 ペレット形状改良によるPCI低減効果 ペレット形状に関する一連の設計改良は、燃料棒の変形を低減した。

7は、ペレットの半径方向割れに面した被覆管の応力分布を解析した一例を示すものである。ペレットの割れ先端部で、大きな応力集中が発生するのが分かる。

BWR燃料の設計改良の経緯は、2.で述べたとおりであるが、PCIによる漏洩防止対策の観点から、ペレット形状を改良した効果を図8に示す。フラット長尺ペレットからチャンファ付き短尺ペレットへの変更は、リッジ高さを約20%低減した。更に、8×8型の導入により、ペレット径の細径化及び線出力密度の減少は、初装荷燃料に対し約50%のPCI低減効果が得られたことになる。図9に燃料棒リッジ部の外径変化に及ぼす出力上昇速度の影響を解析した結果を示す。出力上昇速度を、燃料棒1本当たり0.06kW/ft/hにすると、60kW/ft/hの場合に比べ、燃料棒外径変化率が約40%低減することが分かる。

### 4.3 被覆管の破断限界の解明

#### (1) 被覆管の破断延性

ジルカロイは、中性子照射により一般的に引張強さは増加し、伸び(延性)は減少する性質をもっている。被覆管の破断限界を明らかにするため、応力除去焼鈍材及び再結晶化焼鈍材のジルカロイ-2管を実機使用温度(350~400℃)で中性子照射(照射量約 $5 \times 10^{20}$  nvt,  $E \geq 1$  MeV)し、ホットラボで高温(300~500℃)引張試験を実施した。応力除去焼鈍材の円周方向の一樣伸びは、照射により大きく減少するが、再結晶化焼鈍材のそれは、高温の試験温度ではほぼ照射前の値に回復することが分かった。被覆管の延性は、PCI破損率を低減する上で重要な性質である。

#### (2) ジルカロイ-2の炉外SCC実験

ヨウ素などの腐食性核分裂生成物が作用して起こるジルカロイ被覆管のSCCが、PCIによる核分裂生成物(FPと略す)の漏洩の主因であると考えられている。その主な理由は、電子顕微鏡で観察した破面の特徴が、炉外SCC実験で得られた破面の特徴と酷似していること、破断ひずみが小さく、単純な機械的破損とは考えにくいこと、破断出力到達時点からFP漏洩発生までに時間遅れがあること、などである。SCCは、応力(又はひずみ)腐食環境、被覆管の金属状態などの諸要因の組合せのもとで発生する<sup>9)</sup>。これらの要因の関係を調べる

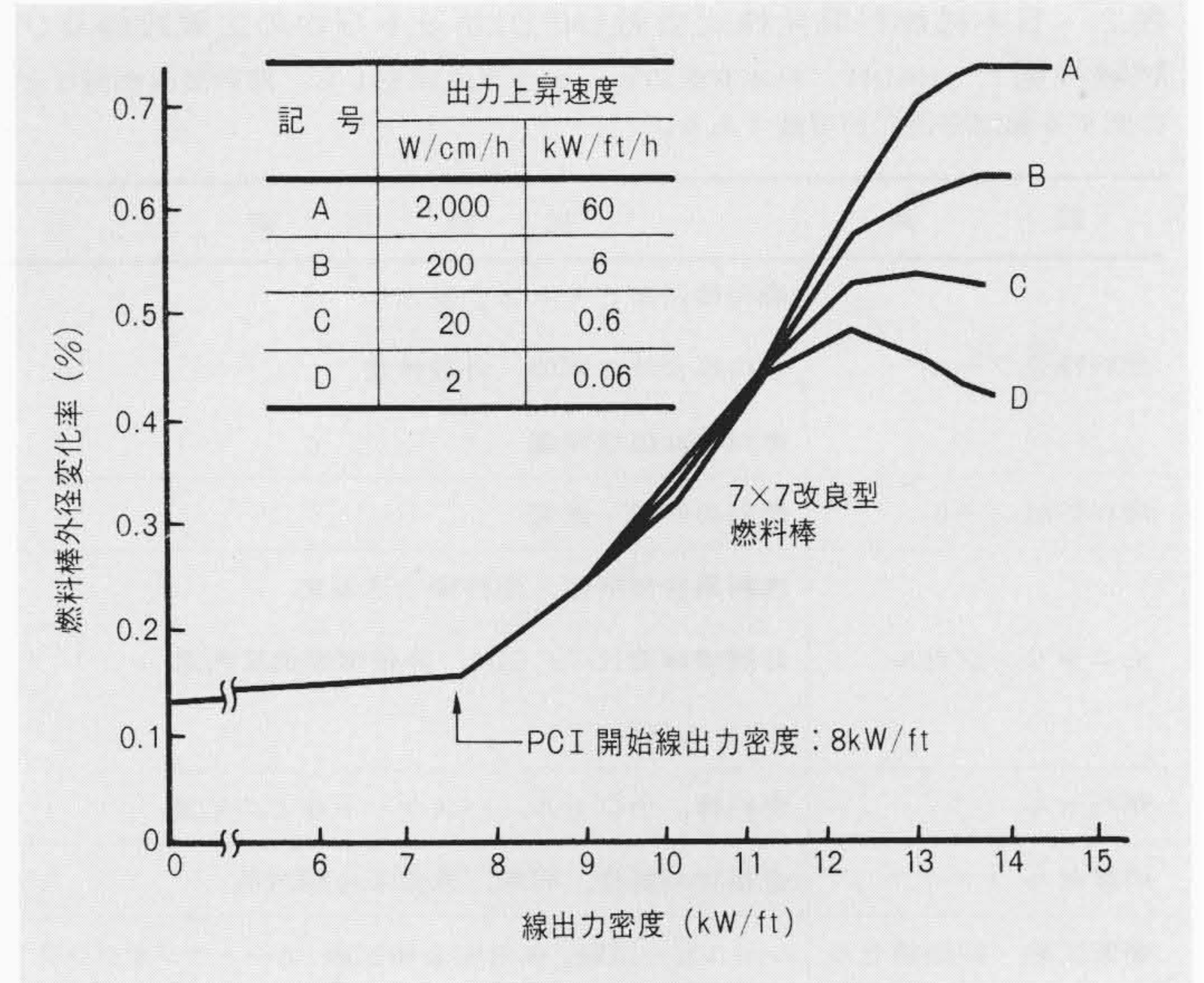


図9 PCIに及ぼす出力上昇速度の影響 出力上昇速度を0.06kW/ft/hにすると、燃料棒外径変形は大幅に減少する。

ため、内圧クリープ法、あるいはマンドレル法により炉外でSCC実験を行なった。

未照射材を用いたSCC実験によって、SCCが発生する臨界ヨウ素濃度や応力、及びひずみのしきい値などが解明されてきた。しかし、実用的には照射された材料で実験を行なう必要があり、次章で紹介するホットラボを用いた本格的な研究を計画中である。

### 5 BWR燃料の照射後試験技術

燃料の信頼性向上、改良型燃料の開発のためには、実験炉あるいは商用炉で使用された照射済み燃料の照射後試験を含めた多角的な研究開発が不可欠である。日立製作所は、他メーカーと共同で日本核燃料開発株式会社(略称NFD)を設立し、照射後試験を含めた多角的なBWR燃料の信頼性向上研究の体制を整えた。図10にNFDホットラボの外観を示す。

従来、日立製作所の燃料研究開発は、照射後試験設備及びその技術をもっていなかったため、これらを海外を含めた外部研究機関に頼らざるを得なかった。今後は、これらNFDを基盤とした各種炉外・炉内実験、照射材料特性評価実験と



図10 NFDホットラボの外観 ホットラボ正面右よりの鳥観図を示す。照射材は、キャスクとともに建屋の右部から搬入される。



表 2 日本核燃料開発株式会社(NFD)ホットラボの主要設備及び試験技術 NFDは、日本有数のホットラボ施設をもち、照射済み燃料などに関する核燃料研究が可能である。

| 設 備        | 試 験 技 術                     |
|------------|-----------------------------|
| 燃料検査プール    | 燃料輸送などキャスク受入れ               |
|            | 燃料集合体の解体、外観検査               |
|            | 燃料棒非破壊検査                    |
| 燃料貯蔵プール    | 燃料の貯蔵・保管                    |
| モニタリングセル   | 燃料集合体解体、燃料棒寸法測定             |
|            | 非破壊検査(UT, EC), 非破壊燃焼度測定     |
|            | FPガス測定                      |
| 切断セル       | 燃料棒, カプセル, バスケットなどの切断       |
| 研摩セル       | 金相材料製作, 研摩, 低倍率金相試験         |
| 衝撃試験・顕微鏡セル | シャルピー試験, 高倍率金相試験, オートラジオグラフ |
| 化学セル       | 高放射能試料の採取, 溶解及び分析           |
| 試料セル       | 引張試験, 破断片寸法検査               |
| 鉄・鉛セル      | 照射材の引張試験, 内圧破裂試験, 微小硬度試験    |
|            | その他特殊試験                     |
| その他        | 走査型電子顕微鏡ほか                  |

注：UT＝超音波深傷試験，EC＝渦電流深傷試験，FPガス＝核分裂生成ガス

燃料棒の照射後試験とを一体化した研究開発を進めることが可能となり、燃料の信頼性向上及び改良型燃料の開発の速度を大幅に加速することができる。

表 2 に、NFD ホットラボの主要設備及び試験技術を示す。NFD は、これらホットラボ施設のほか、ウランラボ、材料ラボを建設する計画であり、近い将来総合的な核燃料開発体制を確立する。

6 日立製作所納入燃料の使用実績

日立製作所が、中国電力株式会社の島根原子力発電所に納入した燃料の使用実績を表 3 に示す。当発電所では、現在まで燃料漏洩は皆無であり、7×7 型燃料でも十分な健全性をもっていることが実証された。また、昭和52年春には第 3 回取替燃料として 8×8 型燃料が装荷され、良好な実績を積み上げつつある。

表 3 中国電力株式会社島根原子力発電所燃料集合体使用実績 (1978年 2 月現在) 中国電力株式会社島根原子力発電所は、現在順調な運転を継続し、燃料は漏洩していない。

| 項目 \ 種類           | 初装荷燃料    | 第 1 回取替燃料 | 第 2 回取替燃料 | 第 3 回取替燃料 |
|-------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 燃 料 型 式           | 7×7 型    | 7×7 改良型   | 7×7 改良型   | 8×8 型     |
| 装 荷 時 期           | 1974年3月* | 1975年 4 月 | 1976年 4 月 | 1977年 6 月 |
| 装 荷 体 数           | 400**    | 56        | 76        | 64        |
| 集合体最高燃焼度 (MW D/T) | 約20,000  | 約16,000   | 約10,000   | 約5,000    |

注：\* 商用運転開始時期  
\*\*初装荷燃料は404体製造されたが、うち4体は第2回取替燃料と同時に装荷された。

これらは、日立製作所で永年継続されていた研究開発の成果と中国電力株式会社の運転及び炉心管理が、(1)被覆管内面からの局部的水素化、(2)燃料ペレットと被覆管との機械的相互作用による被覆管の過度の変形、という二つの燃料漏洩の原因を完全に取り除いたことを示している。

7 結 言

商用 BWR の炉心には、数万本の燃料棒が装荷されるため、被覆管からの FP の漏洩率は極めて低くても、局部水素化や PCI などの現象を解決する必要がある。日立製作所では、米国での先行技術を基礎とし、独自の研究開発の成果を実製品に反映して、燃料漏洩の完全防止を目指してきた。中国電力株式会社島根原子力発電所では、運転開始後約 4 年半を経過した現在も、無漏洩運転を継続している。

この実績から、BWR 燃料の信頼性向上研究の現状を、次のように要約することができる。

- (1) 局部水素化は完全に防止することができた。最も効果的であったのは燃料棒内の乾燥の徹底であった。水分ゲッタの採用は、バックアップとして信頼性向上の役割を果たす。
- (2) PCI による漏洩防止には、次の諸点が重要である。
  - (a) 燃料に急激な出力変化を与えない運転法(PCIOMR)を採用すれば、PCI による漏洩は防止できる。
  - (b) BWR 燃料は、PCI 対策を主目的として、7×7 型から 8×8 型へと種々の設計改良が施されたが、これら燃料仕様の改良により、信頼性の向上が達成された。

今後の開発目標としては、PCIOMR の撤廃が掲げられる。PCIOMR は顧客に多大な負担を与え、原子力発電の割合が増加する将来においては自由な負荷追従運転の要望が必然的に生ずると予想されるため、任意の負荷変動に耐える改良燃料の開発が必要である。末尾で紹介したホットラボをも駆使して、総力をあげてその研究開発を進め、より高い信頼性向上のニーズにこたえたいと考える。

本稿を終わるに当たり、燃料健全性確保のために御指導をいただいている中国電力株式会社殿に対し深くお礼を申しあげる。

参考文献

1) T.Bozzoni et al：CIRENE Fuel Performance Evaluation：IFA-128, IFA-137, IFA-139, Enlarged Halden Program Group Meeting Ustaoset, March 1 st-5th (1971)  
2) L.Lunde：Localized or Uniform Hydriding of Zircaloy, Some Observations on the Effect of Surface Conditions, J. of Nucl Mat. 44, 241～245 (1972)  
3) K.Joon：Probability of Fuel Failure Caused by Moisture, Halden Reactor Project, Ustaoset Lecture (1970)  
4) H.H.Klepfer, et al.：Fuel Performance in the BWR. Proc. American Power Conf, 34, 169 (1972)  
5) 牧：軽水炉燃料の変形挙動，日本原子力学誌，Vol. 18, No. 8 (1976)  
6) J.H.Gittus：Theoretical Analysis of Some Forces, Stresses and Strains Produced in Nuclear Fuel Element Cladding by Thermal Expansion of Cracked Fuel Deformation TGR Report 1547(S)(1967)  
7) 久保：ジルカロイ-2 被覆管の外圧クリープ，日本原子力学会昭52年分科会予稿集(Ⅱ)，H 8，(1977)  
8) 伊東ほか：有限要素法による燃料棒の局所変形解析(Ⅱ) 日本原子力学会昭52年度分科会予稿集(Ⅱ)，G42，(1977)  
9) K.Viedem, et al.：Fuel Element Failures Caused by Iodine Stress Corrosion, Trans. ANS, 20, 231-232 (1975)