

### 4.3 LOCA 試験

本年度は LOCA 模擬試験用試験燃料棒の作製を進めるとともに、令和 2 年度に LOCA 模擬試験に供した M-MDA 被覆 PWR・ウラン燃料<sup>(1)</sup> に対し試験後の分析を実施し、燃料ペレットの細片化、燃料棒内軸方向移動及び燃料棒外放出に関するデータを取得した。

また、令和 2 年度に加熱試験に供した PWR・ウラン燃料<sup>(1)</sup> に対し、加熱試験後の分析を実施し、加熱時の燃料ペレットの細片化及び核分裂生成ガス（FP ガス）放出挙動に関するデータを取得した。

LOCA 後の炉心冷却性の評価に関して、LOCA 時の温度履歴を経験した水素添加ジルカロイ-4 被覆管に対し、地震時に燃料棒に加わる荷重を適切に模擬した繰り返し荷重を負荷する四点曲げ試験を実施し、燃料被覆管の LOCA 後の曲げ強度に関するデータを取得した。

#### 4.3.1 LOCA 模擬試験

##### (1) 試験燃料棒の作製

##### (a) 試験燃料棒の採取

本年度は LOCA 模擬試験対象燃料のうち、Zircaloy-2 被覆ライブシュタット燃料について試料採取を行った。試験燃料棒作製に用いた燃料は長さ約 190 mm であり、スイス・ライブシュタット炉で照射された BWR ウラン燃料セグメント FBA004-a5-F から採取した（以後、LZRT5 という）。当該燃料は平成 22 年度燃料等安全高度化対策事業において JMTR 試験向けに欧州より輸送を実施したが、JMTR 廃炉に伴い当初使用目的下での供試の見通しは無くなった。しかし、当該燃料は本事業での LOCA 模擬試験用燃料として好適であることから、LOCA 模擬試験に供することとした。

試験燃料棒は FBA004-a5-F セグメントの上端から 10–202 mm の位置から採取した。被覆材の Zircaloy-2 には厚さ 95  $\mu\text{m}$  のライナーが内張りされている。試験燃料棒の採取位置における燃焼度は 47 GWd/tU と評価されている。最終サイクル線出力は約 27 kW/m であった。試験燃料棒の諸元を表 4.3.1-1 に示す。

本事業では先行研究において報告されている燃料ペレットの顕著な細片化（数  $\mu\text{m}$ ～100  $\mu\text{m}$  オーダーの粒子サイズへの細片化）を生じる燃焼度しきい値（セグメント平均燃焼度約 60–75 GWd/tU）<sup>(2)</sup> より燃焼度が高い燃料と低い燃料の双方を対象に試験を実施することで、顕著な細片化の発生しきい燃焼度を評価するとともに、本事業で実施する LOCA 模擬試験結果を先行研究と比較することで当該試験の妥当性検証を行う。LZRT5 の燃焼度は先行研究において報告されている LOCA 時の燃料ペレットの細片化発生しきい燃焼度 60–75 GWd/tU<sup>(3)</sup> に比べ十分に低く、この目的に合致している。

## (2) LOCA 模擬試験後の分析・評価

### (a) MMDA3 に対する分析・評価

令和 2 年度に LOCA 模擬試験に供した燃料棒はスペイン・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（以後、MMDA3 という）。試験燃料棒作製に用いた燃料は長さ約 190 mm である。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、機械特性及び耐食性を高めるとともに、水素吸収量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<sup>(3)</sup>。試験燃料棒の諸元を表 4.3.1-1 に示す。

本年度は MMDA3 に対して軸方向外径プロファイル測定を実施した。

MMDA3 は試験中に破裂し、熱電対 No. 2 の上約 4.5 mm の高さ、熱電対 No. 1~3 を溶接した方向から約 180° 回転した方向に微小なピンホール状の破裂開口を生じた。破裂開口は熱電対溶接位置から離れており、膨れ及び破裂に関し熱電対溶接の影響はないと考えられる。試験後の外観写真より計測された破裂開口の長さは約 0.3 mm、幅は約 0.2 mm であった。また、破裂開口の正射影の面積は約 0.03 mm<sup>2</sup> であった<sup>(4)</sup>。

図 4.3.1-1 に軸方向外径プロファイルの測定結果を示す。同図には比較のため、LOCA 模擬試験前（試験燃料棒内部をアルゴンガスにて加圧する前の状態）に測定した軸方向外径プロファイルを併せて示す。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。図から、TC2 溶接位置から上側に 4-5 mm の破裂開口位置近傍において最も大きく膨れたことが分かる。

## 4.3.2 燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験

### (1) 加熱試験

加熱試験にはアウトガス分析装置（OGA）<sup>(4,5)</sup>を用いた。OGA は燃料ペレットを真空中で加熱しながら、四重極質量分析計を用いて燃料ペレットからの放出ガスをリアルタイムに連続的に分析する装置であり、燃料ペレットから FP ガスが放出される温度を特定することが可能である。

試験条件を表 4.3.2-1 に示す。試験の概要は次の通りである。タングステン製のるつぼに入れた燃料ペレット片を真空中、LOCA 時の燃料棒の昇温速度<sup>(6,7)</sup>に近い約 5 K/s の速さで加熱した。

昨年度事業までに実施した AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片に対する加熱試験において、1173–1273 K の温度範囲に顕著な細片化を生じる温度しきい値（細片化発生しきい温度）があると推測された。本年度はこの細片化発生しきい温度を含む到達温度条件において加熱試験を実施した。

いずれの試験も各到達温度に到達した時点で直ぐに加熱を停止し、室温まで炉冷した後

に燃料ペレット片の外観を観察した。試験は到達温度が低い条件から順番に実施し、到達温度と細片化発生との関係性を評価した。各到達温度に達した後、燃料ペレット片の内、細片化した部分を回収し、重量を測定した。細片化していない部分のみを次の到達温度の試験に供した。

## (2) 加熱試験後の分析

### (a) AP2-1 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 2 に対する分析

AP2-1 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 2 に対し、令和 2 年度に加熱試験を実施した<sup>(1)</sup>。燃料ペレット片 No. 2 の情報を表 4.3.2-2 に、同ペレット片の加熱試験条件を表 4.3.2-1 にそれぞれ示す。燃料ペレット片 No. 2 は 973、1073、1173、及び 1273 K の各到達温度にて計 4 回の加熱試験を実施したが、試験中に細片化しなかった。この燃料ペレット片 No. 2 について光学顕微鏡を用いたマイクロ組織観察を実施した。

図 4.3.2-1 及び 4.3.2-2 に光学顕微鏡で撮影した燃料ペレット片 No. 2 の断面画像（エッチング前及びエッチング後）を示す。燃料ペレット片には製造時の結晶粒径（約 10  $\mu\text{m}$ ）と同等サイズの結晶粒からなり、ペレット外周部の組織に類似したもの（図 4.3.2-2(2)Photo 2-1 左側）と、ダークゾーンないし高燃焼度組織の特徴<sup>(8,9)</sup>である多数の気泡や細粒化した結晶粒からなるもの（例えば、図 4.3.2-2(2)Photo 1-1、及び Photo 2-1 右側、並びに図 4.3.2-2(3)Photo 4-1 及び Photo 5-1）の 2 種類が観察される。本報告書「4.2 レファレンス試験」に掲載した AP2-1 セグメント燃料の加熱試験前のペレット断面画像と比較すると、高燃焼度組織と考えられる組織において（例えば、図 4.3.2-2(2)Photo 1 左側、及び図 4.3.2-2(3)Photo 4 左側）多くのき裂の形成が確認された。

### (b) AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 3 に対する分析

AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 3 に対し、令和 2 年度に加熱試験を実施した<sup>(1)</sup>。燃料ペレット片 No. 3 の情報を表 4.3.2-3 に、同ペレット片の加熱試験条件を表 4.3.2-1 にそれぞれ示す。燃料ペレット片 No. 3 は加熱試験中に顕著に細片化しなかった。この燃料ペレット片 No. 3 を対象に光学顕微鏡を用いたマイクロ組織観察を実施した。

図 4.3.2-3 及び 4.3.2-4 に光学顕微鏡で撮影した燃料ペレット片 No. 3 の断面画像（エッチング前及びエッチング後）を示す。燃料ペレット片には製造時の結晶粒径（約 10  $\mu\text{m}$ ）と同等サイズの結晶粒からなるもの（図 4.3.2-4(2)Photo 1-1 右側）と、ダークゾーンないし高燃焼度組織の特徴<sup>(8,9)</sup>である多数の気泡や細粒化した結晶粒からなるもの（例えば、図 4.3.2-4(2)Photo 1-1 左側、図 4.3.2-4(2)Photo 3-1 及び Photo 3-2、並びに図 4.3.2-4(3)Photo 4-1）の 2 種類が観察された。また、図 4.3.2-4(2)Photo 3-1 及び Photo 3-2 に示すように、燃料ペレット粒子に存在しているき裂は結晶粒界に沿って形成されているように見える。

## (c) AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 11 に対する分析

AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 11 に対し、令和 2 年度に加熱試験を実施した<sup>(1)</sup>。燃料ペレット片 No. 11 の情報を表 4.3.2-3 に、同ペレット片の加熱試験条件を表 4.3.2-1 にそれぞれ示す。燃料ペレット片 No. 11 は加熱試験中に顕著に細片化した。燃料ペレット粒子の内、サイズが比較的大きく ( $> 1 \text{ mm}$ )、樹脂による埋め込みが可能なものを回収し、光学顕微鏡を用いたマイクロ組織観察を実施した。燃料ペレット片 No. 11 のその他の燃料ペレット粒子については SEM を用いたマイクロ組織観察を実施した。

図 4.3.2-5 及び 4.3.2-6 に光学顕微鏡で撮影した加熱試験で顕著に細片化した燃料ペレット片 No. 11 の断面画像（エッチング前及びエッチング後）を示す。観察対象となった燃料ペレット粒子はサイズが約  $1 \text{ mm}$  以上あり、燃料ペレット片 No. 11 の中でも細片化が比較的顕著でなかった組織と考えられる。燃料ペレット片には製造時の結晶粒径（約  $10 \mu\text{m}$ ）と同等サイズの結晶粒からなるもの（図 4.3.2-6(2)Photo 1-1 及び図 4.3.2-6(3)Photo 4-1 左）と、ダークゾーンないし高燃焼度組織の特徴<sup>(8,9)</sup>である多数の気泡や細粒化した結晶粒からなるもの（例えば、図 4.3.2-6(2)Photo 2-1 及び Photo 2-2、並びに図 4.3.2-6(3)Photo 3-1 及び Photo 4-1 右）の 2 種類が観察される。また、図 4.3.2-6(2)Photo 1-1 及び図 4.3.2-6(3)Photo 4-1 に示すように、燃料ペレット粒子に存在しているき裂は結晶粒界に沿って形成されているように見える。

図 4.3.2-7–4.3.2-9 に到達温度  $1073$ 、 $1173$ 、及び  $1273 \text{ K}$  の各加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像を示す。燃料ペレット粒子には製造時の結晶粒径（約  $10 \mu\text{m}$ ）と同等サイズの結晶粒からなるもの（例えば、図 4.3.2-8(8)Photo 7-4 及び図 4.3.2-9(6)Photo 5-4）と、ダークゾーンないし高燃焼度組織の特徴<sup>(8,9)</sup>である多数の気泡や細粒化した結晶粒からなるもの（例えば、図 4.3.2-7(2)Photo 1-4、図 4.3.2-7(3)Photo 2-4、図 4.3.2-7(4)Photo 3-4、図 4.3.2-8(4)Photo 3-4、図 4.3.2-8(7)Photo 6-4、及び図 4.3.2-9(5)Photo 4-4）の 2 種類が観察される。燃料ペレット粒子の割れ方も様々であった。図 4.3.2-8(5)Photo 4-4 及び図 4.3.2-9(6)Photo 6-4 には、結晶粒界が比較的明瞭であり、粒界割れにより形成したと考えられる破面が観察される。図 4.3.2-8(8)Photo 7-4、及び図 4.3.2-9(2)Photo 1-4 には比較的シャープな粒界や平滑な面が見られ、粒内割れにより形成したと考えられる破面が観察される。

図 4.3.2-10–4.3.2-12 に到達温度  $1073$ 、 $1173$ 、及び  $1273 \text{ K}$  の各加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の粒径分布を示す。この粒径分布は図 4.3.2-7(1)、図 4.3.2-8(1)及び図 4.3.2-9(1)の各マクロ画像に対する画像解析により評価したものである。粒径の定義には Heywood 径<sup>(10)</sup>を採用した。すなわち、画像解析により燃料ペレット粒子の投影面積を測定し、この投影面積と同一の面積をもつ円の直径を粒径と定義した。粒子の輪郭線上の任意の 2 点間の距離の最大が約  $25 \mu\text{m}$  以下の燃料ペレット粒子についてはこれらの微小な粒が体積分率に与える影響は軽微と考えられたこと、及び画像解析による投影面積の測定が困難であったことから、粒径分布評価の対象から外した。図 4.3.2-10(b)、4.3.2-11(b)

及び 4.3.2-12(b)の縦軸第二軸の累積体積分率は燃料ペレット粒子の体積分率を累積したものである。ここで、燃料ペレット粒子の体積は、Heywood 径として定義される粒径と同一の直径の球を仮定して算出した。図 4.3.2-5(1)及び 4.3.2-6(1)に示す光学顕微鏡観察を実施した比較的大きな燃料ペレット粒子は評価対象外とした。図から、加熱試験の到達温度が 1073 及び 1173 K の試験で粒径が 100  $\mu\text{m}$  以下の微細な燃料ペレット粒子が多く観察され、到達温度が 1273 K の試験では粒径が 100  $\mu\text{m}$  以下の微細な燃料ペレット粒子は比較的少なく、粒径が 100  $\mu\text{m}$  を超える比較的大きな燃料ペレット粒子が観察された。

図 4.3.2-13 に加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の組織別粒径分布を示す。この図は粒径 50  $\mu\text{m}$  以上の燃料ペレット粒子に対し SEM による組織観察を実施し、燃料ペレット粒子を製造時の結晶粒径(約 10  $\mu\text{m}$ )と同等サイズの結晶粒のみからなるものと、ダークゾーンないし高燃焼度組織の特徴<sup>(8,9)</sup>である多数の気泡や細粒化した結晶粒を含むものとに分類し、それぞれについて粒径分布を示したものである。同図に示すように、到達温度 1073 及び 1173 K の試験では全ての粒子にダークゾーンないし高燃焼度組織の特徴<sup>(8,9)</sup>である多数の気泡や細粒化した結晶粒からなる組織が観察された。サイズが比較的小さい粒子 (< 500–750  $\mu\text{m}$ ) にダークゾーンないし高燃焼度組織の特徴<sup>(8,9)</sup>である多数の気泡や細粒化した結晶粒からなる組織がより多く観察される傾向であった。

これまでの AP2-1 セグメント燃料及び AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片に対する加熱試験及びその試験後分析の結果から、燃料ペレットの LOCA 時の細片化挙動に関して以下の知見を得た。

- 燃焼度しきい値

高燃焼度  $\text{UO}_2$  燃料ペレット単体を真空中、5 K/s の昇温速度で 1273 K まで加熱した場合に重量割合にして 1%を超える顕著な細片化を生じるしきい燃焼度はセグメント平均燃焼度で 73–81  $\text{GWd/tU}$  の間にあると考えられた。この燃焼度は先行研究で報告されている顕著な細片化を生じる燃焼度しきい値 60–75  $\text{GWd/tU}$ <sup>(3)</sup>よりも若干高い。本事業で実施した加熱試験は燃料ペレット単体を対象に真空中で実施したことから、燃料被覆管の膨れ破裂に伴う燃料被覆管拘束力の解放や燃料棒内の急激な圧力減少などが無いことが細片化発生しきい燃焼度に影響した可能性がある。この点については、今後、LOCA 模擬試験を実施し評価する必要がある。

- 温度しきい値

セグメント平均燃焼度 81  $\text{GWd/tU}$  の燃料ペレット単体に対する加熱試験結果から、重量割合にして 1%を超える顕著な細片化を生じる温度しきい値は 1173–1273 K、重量割合にして 1%未満の僅かな細片化を生じる温度しきい値は 973–1073 K にあると考えられた。先行研究においては燃料被覆管にスリットを入れた状態の燃料棒片を加熱し、1023 K で

試料端部において僅かな細片化が、1123 K でより顕著な細片化が確認されており<sup>(11)</sup>、本事業で得られた結果はこれらの報告と概ね整合する。

- 微細組織と細片化挙動との関係

加熱試験後の高燃焼度  $\text{UO}_2$  燃料に対するマイクロ組織観察において、比較的小さな燃料ペレット粒子（粒子サイズ： $\leq$  約 500–750  $\mu\text{m}$ ）にダークゾーンないし高燃焼度組織の特徴である多数の気泡や細粒化した結晶粒からなる組織が主に観察された。この結果から、高燃焼度  $\text{UO}_2$  燃料ペレットの LOCA 時の顕著な細片化は主としてダークゾーンないし高燃焼度組織に高密度に集積した FP ガス気泡による燃料ペレットマトリクスの破壊に起因すると考えられた。

1073–1173 K の比較的低い温度で観察された高燃焼度  $\text{UO}_2$  燃料の細片化はいずれもこのようなダークゾーンないし高燃焼度組織における細片化であり、FP ガス気泡が高密度に集積したダークゾーンないし高燃焼度組織ではより低い温度で細片化を生じると考えられた。

以上の分析は燃料ペレット粒子のある断面ないしある一方向の破面のみを観察に基づいているため、分析結果には不確かさが存在する。したがって、これらの分析の不確かさに留意しつつ、燃料ペレットの細片化発生と燃焼の進展に伴う微細組織変化との関係に係るデータ及び知見を拡充する必要があると考えられる。

また、先に考察したように燃料ペレットの顕著な細片化が FP ガス気泡による燃料ペレットマトリクスの破壊に起因していることを裏付けるためには、細片化した燃料ペレットの組織観察だけでなく、FP ガスの放出温度と細片化温度との関係や、FP ガス放出量と細片化との関係を評価する必要があると考えられる。

FP ガスの放出温度と細片化温度との関係に関して、ピーク温度を過ぎた降温過程で FP ガス放出を開始したケース（例えば AP2-3 セグメント燃料のペレット片番号 No. 11）があることから、燃料ペレット細片化の駆動力としての熱応力（固体熱膨張起因による熱応力と FP ガス気泡熱膨張起因による熱応力の双方）の影響も考え得る。一般に、燃料ペレットに生じる熱応力は LOCA 条件下よりも通常運転中における出力の上昇時ないし下降時に大きくなると考えられる。一方で、本事業で実施した加熱試験では燃料ペレット小片をるつぼ内で加熱しているため温度差は付きにくく、熱応力の効果は小さいと考えられる。固体熱膨張起因による熱応力は温度に対しほぼ線形に働くと考えられるが、本事業で実施した加熱試験の結果から、FP ガス放出開始温度と細片化の関係は非線形であり、細片化には他の要因が主に寄与していると考えられる。FP ガス気泡の熱膨張起因による熱応力は、同一燃料ペレット内でも FP ガス気泡のサイズや圧力が異なることを考えれば、温度に対して非線形に働くと考えられ、本事業における加熱試験の結果と整合する。

FP ガス放出量と細片化との関係に関して、FP ガス放出量が多いにもかかわらず、細片

化を生じなかったケース（例えば AP2-1 セグメント燃料のペレット片番号 No. 1）が観察された。このことから、燃料ペレットの細片化には至らないが、FP ガス放出を生じるペレット結晶粒界のマイクロクラッキングのような燃料ペレットマトリクスのみクロな破壊と、燃料ペレットの細片化というマクロな破壊があることが示唆される。

#### 4.3.3 LOCA 時の温度履歴を経験した水素添加燃料被覆管の四点曲げ試験

本年度は高燃焼度燃料被覆管を模擬し水素を添加した PWR 用 17×17 型非照射ジルカロイ-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、燃焼の進展に伴う水素吸収量の増大が 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 模擬急冷破断試験

繰り返し荷重負荷四点曲げ試験の供試材作製のため、高燃焼度燃料を模擬し水素を添加した PWR 用 17×17 型非照射ジルカロイ-4 被覆管（水素添加ジルカロイ-4 被覆管）を対象に LOCA 模擬急冷破断試験を実施した。水素添加量は 400 wppm 及び 800 wppm の 2 種類とした。

図 4.3.3-1 に LOCA 模擬試験装置の概要を示す。LOCA 模擬試験装置は赤外線イメージ炉、荷重制御装置、及び石英反応管水蒸気発生装置で構成されている。

試験燃料棒は以下の通り作製した。まず、水素添加ジルカロイ-4 被覆管を長さ 190 mm に短尺化し、内部に実機の LOCA 時の熱的な条件（主に燃料棒の冷却挙動に影響を及ぼすと考えられる熱容量）を実際の燃料棒に近づけるとともに、燃料棒内の自由体積を調整するためのアルミナペレットを装填した。

次に、試験燃料棒を試験装置に固定するため、被覆管の両端にステンレス鋼製の上下端栓を接続した。

実機の LOCA 時には、原子炉圧力の低下と温度上昇に伴う被覆管強度の低下により燃料棒が破裂し、被覆管は外面だけでなく内面も酸化する可能性がある。これを模擬するために、本試験では上部端栓のガス供給ラインから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。

最後に、試験中の被覆管表面温度の制御及び測定のために、3 対の R タイプ熱電対をスポット溶接した。熱電対の溶接位置は被覆管高さ中間（TC2）、及びその上下 40 mm の位置（TC1 及び TC3）である。

試験燃料棒は LOCA 模擬試験装置の石英反応管の中に装荷し、赤外線イメージ炉を用いて水蒸気雰囲気中で加熱した。LOCA 模擬急冷破断試験時の燃料被覆管温度・荷重履歴の例を図 4.3.3-2 に示す。試験燃料棒は室温から 3 K/s の速さで加熱した。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<sup>(12)</sup>を与えることを目的に、約

( $5 \pm 1$ ) mg/(cm<sup>2</sup>s)とした。昇温中、1027–1082 K の温度で燃料被覆管は破裂した。破裂温度は水素を添加していない非照射ジルカロイ-4 被覆管より低い値を示した。これは、水素を添加したことで燃料被覆管強度が低下したこと及びジルコニウムの  $\alpha$  相から ( $\alpha + \beta$ ) 相への変態温度が低下したことが原因<sup>(13)</sup>と考えられる。破裂時の被覆管膨れ量は水素を添加していない非照射ジルカロイ-4 被覆管の 40%–73%に対し、20%–36%に抑制された。

破裂直後に一旦赤外線イメージ炉を停止し、燃料被覆管の破裂開口の形成と位置を確認した後、破裂開口位置での温度並びに破裂開口近傍で目標とした酸化量 (10%–20% ECR) を得るために必要な等温酸化時間を評価した。その後、再び赤外線イメージ炉を起動して 10 K/s で加熱し、試験燃料棒高さ中間位置の熱電対 TC2 の指示値が約 1473 K に達した後、目標酸化量が得られるまで温度を保持した。

等温酸化温度及び目標酸化量の設定根拠は以下の通りである。「軽水型動力炉の非常用炉心冷却系の性能評価指針」(ECCS 性能評価指針)<sup>(14)</sup>において規定される被覆管最高温度が 1473 K であること、従来研究<sup>(15)</sup>により 1273 K 以上で酸化後の被覆管の脆化がより顕著であることと、1220–1530 K の温度範囲で被覆管脆化に温度依存性が見られない<sup>(16)</sup>ことから、急冷破断試験における等温酸化温度は 1473 K を目標とした。また、ECCS 性能評価指針における酸化量の基準値が 15%ECR であることから、15%ECR を含む 10%–20%ECR の酸化量を与えた。ここで、酸化量 (ECR) の計算には、ECCS 性能評価指針において評価式として示されている Baker–Just 酸化速度式<sup>(15)</sup>を用いた。また、酸化量は燃料被覆管の膨れ破裂による減肉を考慮した金属層厚さに対し評価した。

等温酸化後、熱電対 TC2 の指示値で 973 K まで徐冷したのち、試験燃料棒の下端部から急冷水を注水し、試験燃料棒を急冷した。急冷前に徐冷するのは、酸化温度から直接急冷する場合と当該温度区間を徐冷した場合とでは燃料被覆管のマイクロ組織が異なり、徐冷を経た燃料被覆管の方が脆化しやすいためである<sup>(17)</sup>。なお、徐冷中の冷却速度は等温酸化温度から 1173 K までは 30–50 K/s、1173 から 973 K までは 5–9 K/s である。また、急冷水の水面上昇速度は約 30 mm/s であった。

集合体には燃料棒に加えスペーサや支持格子、制御棒案内管があるため、これらによって急冷時に起こる燃料棒の収縮が拘束され、燃料棒に軸方向の荷重が負荷される可能性がある。このような急冷時の燃料棒に負荷される拘束荷重は事故シナリオや集合体設計等に依存するため、これを定量的に評価することは非常に困難である。PWR 燃料棒についてはいくつかの評価例があり<sup>(18,19)</sup>、最大 490 N という拘束荷重が報告されている。そこで、本試験では、冷却開始時に試験燃料棒を固定し、被覆管収縮が拘束されることに伴い引張荷重を発生させ、集合体内で発生する拘束を模擬した。本試験での拘束荷重については、従来の知見を保守的に考慮して約 540 N が上限となるよう設定した。試験時には急冷開始とともに燃料被覆管にかかる軸方向荷重は増大し、最終的に設定値に近い約 530 N に達した。急冷完了後、数分間拘束を維持した。

図 4.3.3-3 に LOCA 模擬急冷破断試験後の試料の外観画像を示す。破裂開口は試料の軸



方向中間付近に形成されていた。

## (2) 繰り返し荷重負荷四点曲げ試験

LOCA 模擬急冷破断試験後、上下端栓を切断除去し、アルミナペレットを除去した水素添加ジルカロイ-4 被覆管試料に対し、繰り返し荷重負荷四点曲げ試験を実施した。図 4.3.3-4 に繰り返し荷重負荷四点曲げ試験装置の概要を、図 4.3.3-5 に試験前に試験装置に装荷した試験燃料棒の外観を示す。

装置の荷重点間距離は 72 mm、支持点間距離は 130 mm とし、急冷破断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。このような試験治具及び試料配置の設定は、四点曲げ試験時に急冷破断試験後の試験燃料棒の破裂開口部に均一な曲げモーメントが加わることを目的に、有限要素法 (FEM) 解析により決定したものである<sup>(20)</sup>。

試験温度は保守的に室温とした。原子力機構が過去に実施した非照射のジルカロイ-4 及びジルカロイ-2 被覆管を対象とした四点曲げ試験<sup>(20)</sup>は LOCA 時の再冠水過程における冷却材の飽和温度<sup>(7)</sup>を模擬した約 410 K の温度条件で実施されたが、LOCA 後の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において四点曲げ試験を実施することとした。

荷重点は最初に鉛直方向上向きに荷重が 127 N に達するまで変位させ、その後、鉛直方向下向きに変位させた。鉛直方向上向きの最大荷重 127 N は、地震時に想定される十分に保守的な荷重条件として、模擬燃料集合体に対する振動試験<sup>(21)</sup>で得られた旧基準地震動 S<sub>2</sub> の 3.3 倍の地震条件で想定される最大曲げモーメント 1.84 Nm 相当の荷重として設定した。変位速度は 1 mm/min とし、試料が破損するまで変位させた。この変位速度より速い場合、試験機のオーバーシュートにより、鉛直方向上向きの最大荷重を 127 N までに制御することが難しいためである。

図 4.3.3-6 に荷重変位曲線の一例を示す。荷重点を鉛直方向上向きに変位させた際の変位及び荷重を負に、荷重点を鉛直方向下向きに変位させた際の変位及び荷重を正とした。いずれの試料も荷重点を鉛直方向下向きに変位させた際に破損した。荷重点を鉛直方向上向きに変位させた際の最大荷重は (-126±1) N だった。鉛直方向下向きに変位させた際の最大荷重は 194–489 N であった。試料の破損直前の荷重点の変位速度は 1.0 mm/min だった。

図 4.3.3-7 に繰り返し荷重負荷四点曲げ試験後の試料外観画像を示す。いずれの試料も破裂開口中央位置において破損した。いずれの試料も、試料に生じた亀裂は 180° 方向の一部を除きほぼ全周に渡っており、ほぼ破断に近い破損形態であった。

図 4.3.3-8 に最大曲げモーメントと酸化量の関係を示す。同図には比較のため、令和 2 年度に本事業において取得した非照射ジルカロイ-4 被覆管に対する繰り返し荷重負荷四点曲げ試験結果<sup>(1)</sup>、原子力機構で過去に取得した非照射ジルカロイ-4 被覆管 (水素添加

材を含む) に対する鉛直方向下向きにのみ荷重を負荷する四点曲げ試験 (通常四点曲げ試験) 結果<sup>(20)</sup>、模擬燃料集合体に対する振動試験<sup>(21)</sup>で得られた旧基準地震動  $S_2$  の 3.3 倍の地震条件で想定される最大曲げモーメント 1.84 Nm を併せて示す。最大曲げモーメントは次式により計算した。

$$M = \frac{P}{2} a \quad (\text{x})$$

ここで、 $M$  は最大曲げモーメント、 $P$  は荷重の最大値、 $a$  は荷重点 - 支持点間距離を表す。酸化量 (ECR) の計算は、LOCA 模擬急冷破断試験時の膨れによる燃料被覆管の肉厚減少を考慮した金属層厚さに対し、等温酸化中の破裂開口位置における燃料被覆管表面の平均温度と等温酸化時間から、燃料被覆管の内外面両面酸化を仮定し、Baker-Just 酸化速度式<sup>(3)</sup>を用いて計算したものである。最大曲げモーメントのバラツキが大きいことは従来の四点曲げ及び繰り返し荷重負荷四点曲げ試験の特徴である。原因として LOCA 急冷時の熱衝撃により、破裂開口部周辺でランダムにき裂が生成した可能性が考えられる。図 4.3.3-9 に示すように、試料の中には急冷時に大きなき裂が生成した試料があることが上記可能性が考えられる根拠となる。図 4.3.3-8(1) から、最大曲げモーメントの下限を比較した場合、水素添加ジルカロイ-4 被覆管は水素を添加しない非照射ジルカロイ-4 被覆管より低い傾向を示した。これは水素脆化の影響と考えられる。水素吸収量 400 wppm と 800 wppm のそれぞれの試料の最大曲げモーメントを比較すると、両者はほぼ同等であった。図 4.3.3-8(2) から、水素添加材について繰り返し荷重負荷四点曲げ試験結果と通常四点曲げ試験結果とを比較すると、10% ECR 近傍の比較的低い酸化量において、繰り返し荷重を負荷した場合に最大曲げモーメントの下限値が低下する傾向が見られた。水素添加ジルカロイ-4 被覆管の最大曲げモーメントは、繰り返し荷重を負荷した場合にも、模擬燃料集合体に対する振動試験<sup>(21)</sup>で得られた旧基準地震動  $S_2$  の 3.3 倍の地震条件で想定される最大曲げモーメント 1.84 Nm よりも大きかった。

今後は試験データを拡充し、繰り返し荷重負荷及び水素吸収量の増大が最大曲げモーメントに及ぼす影響をデータのばらつきを含めてより精緻に評価する予定である。

表 4.3.1-1 LOCA 模擬試験に供した試験燃料棒

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/tU)	最終 サイクル 線出力 (kW/m)	被覆管 材質	腐食 酸化膜 厚さ ( $\mu\text{m}$ )	初期 水素 濃度** (wtppm)
LZRT5	FBA004- a5-F	BWR 10×10 UO <sub>2</sub>	47	~27	Zry-2 with liner (95 $\mu\text{m}$ )	TBD	TBD
MMDA3	AP2-1	PWR 17×17 UO <sub>2</sub>	73	~10	M-MDA (SR*)	23	155

\*応力除去焼鈍

\*\*通常運転中に燃料被覆管に吸収された水素の濃度

表 4.3.2-1 燃料ペレット片の加熱試験条件

採取 セグメント 番号	燃料 ペレット片 番号		昇温 速度 (K/s)	到達 温度 (K)	雰囲気
AP2-1	No. 2	昇温 1 回目	5	973	真空 (測定開始時真空度： $3 \times 10^{-4} - 6 \times 10^{-4}$ Pa)
		昇温 2 回目		1073	
		昇温 3 回目		1173	
		昇温 4 回目		1273	
	No. 3	昇温 1 回目	1273		
	No. 4	昇温 1 回目	1273		
	No. 5	昇温 1 回目	15	1273	
AP2-3	No. 3	昇温 1 回目	5	1073	真空 (測定開始時真空度： $3 \times 10^{-4} - 7 \times 10^{-4}$ Pa)
		昇温 2 回目		1173	
		昇温 3 回目		1273	
	No. 11	昇温 1 回目		1073	
		昇温 2 回目		1173	
		昇温 3 回目		1273	

表 4.3.2-2 AP2-1 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片<sup>(1)</sup>

燃料ペレット片 番号	採取 セグメント 番号	照射炉	燃料 タイプ	セグメント 平均燃焼度 (GWd/tU)	被覆管材質
No. 1-10	AP2-1	Vandellos- 2	PWR 17×17 UO <sub>2</sub>	73	M-MDA (SR*)

\*応力除去焼鈍

表 4.3.2-3 AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片<sup>(1)</sup>

燃料ペレット片 番号	採取 セグメント 番号	照射炉	燃料 タイプ	セグメント 平均燃焼度 (GWd/t)	被覆管材質
No. 1-11	AP2-3	Vandellos- 2	PWR 17×17 UO <sub>2</sub>	81	M-MDA (SR*)

\*応力除去焼鈍

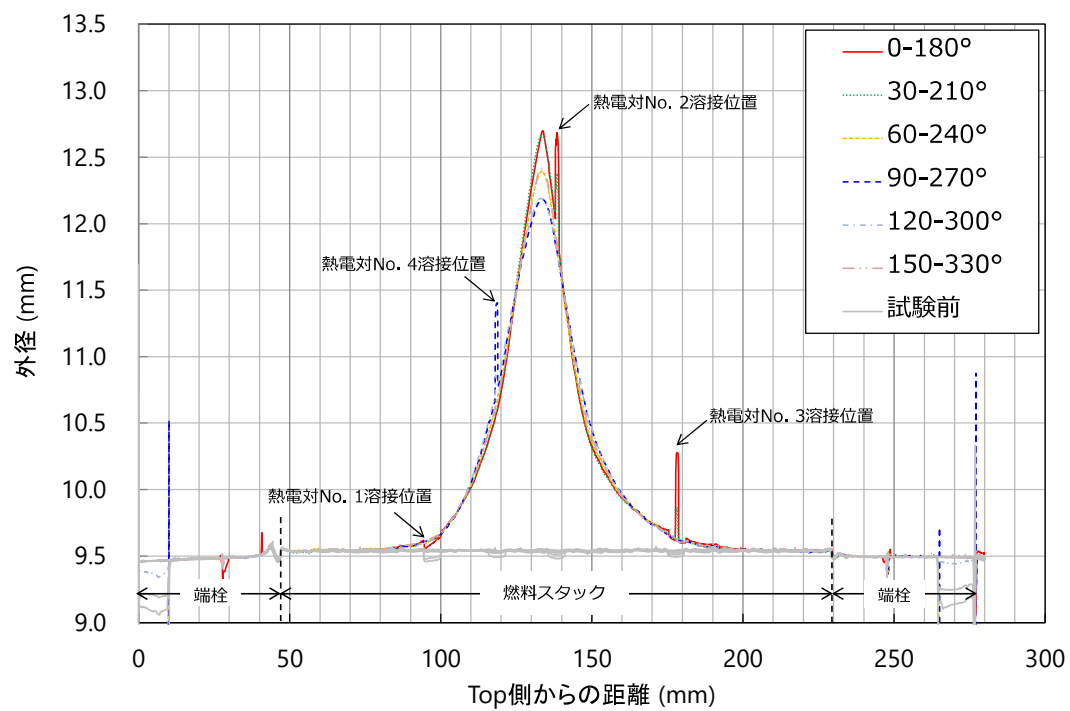


図 4.3.1-1 LOCA 模擬試験前後の MMDA3 の外径プロフィール

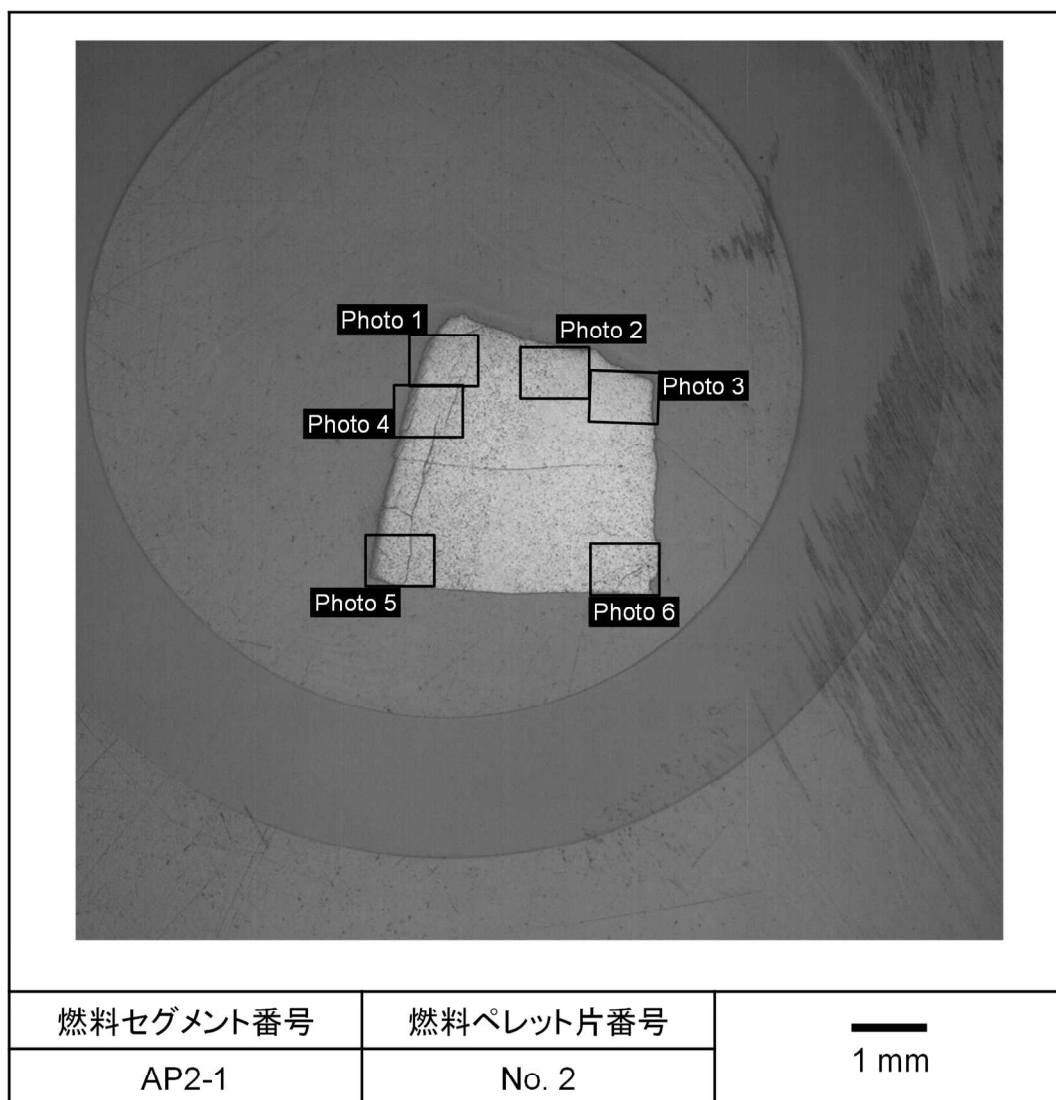


図 4.3.2-1(1) 加熱試験で細片化しなかった燃料ペレット片 No. 2 の断面画像  
(エッチング前、AP2-1 セグメント燃料)

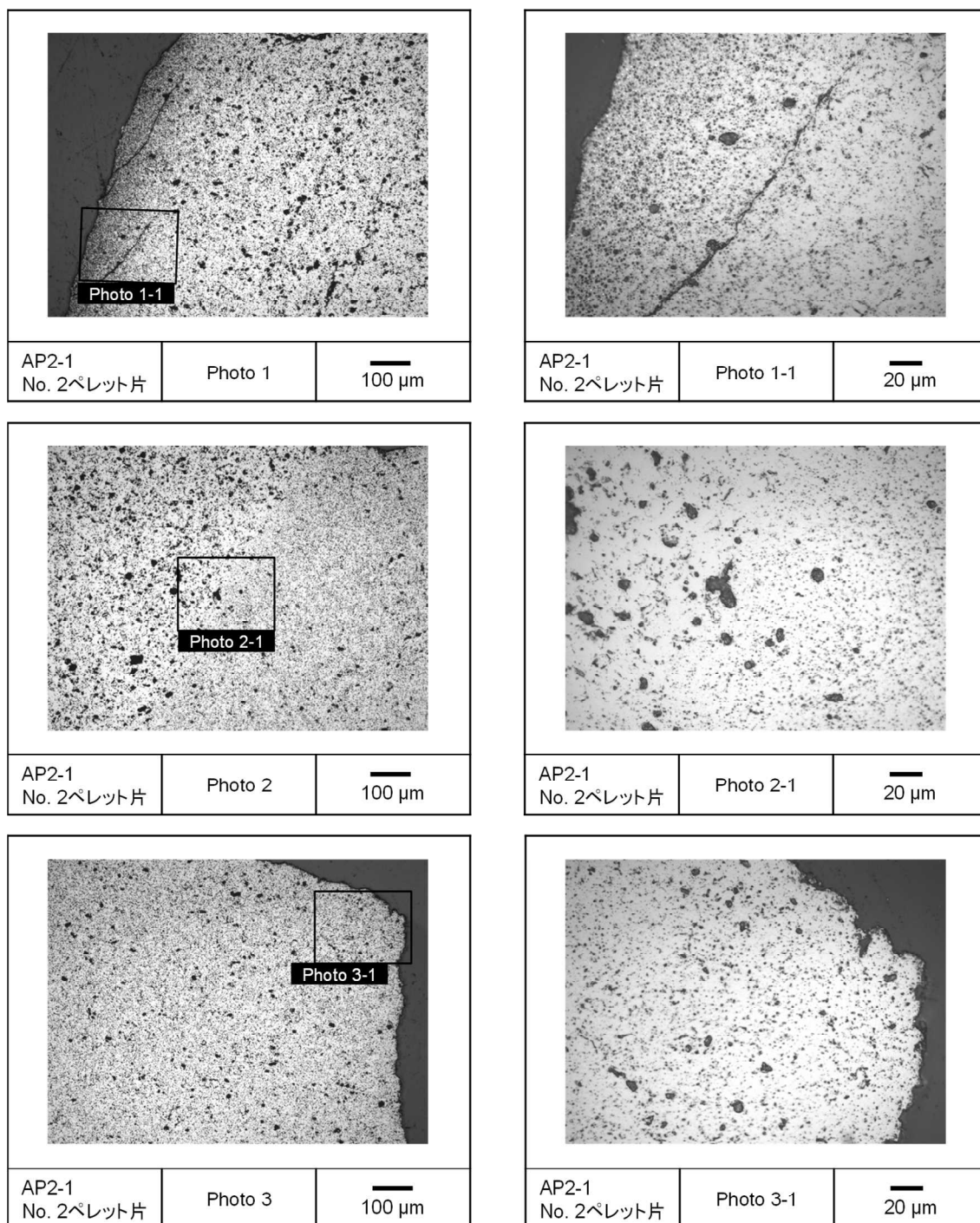


図 4.3.2-1(2) 加熱試験で細片化しなかった燃料ペレット片 No. 2 の断面画像  
(エッチング前、AP2-1 セグメント燃料)



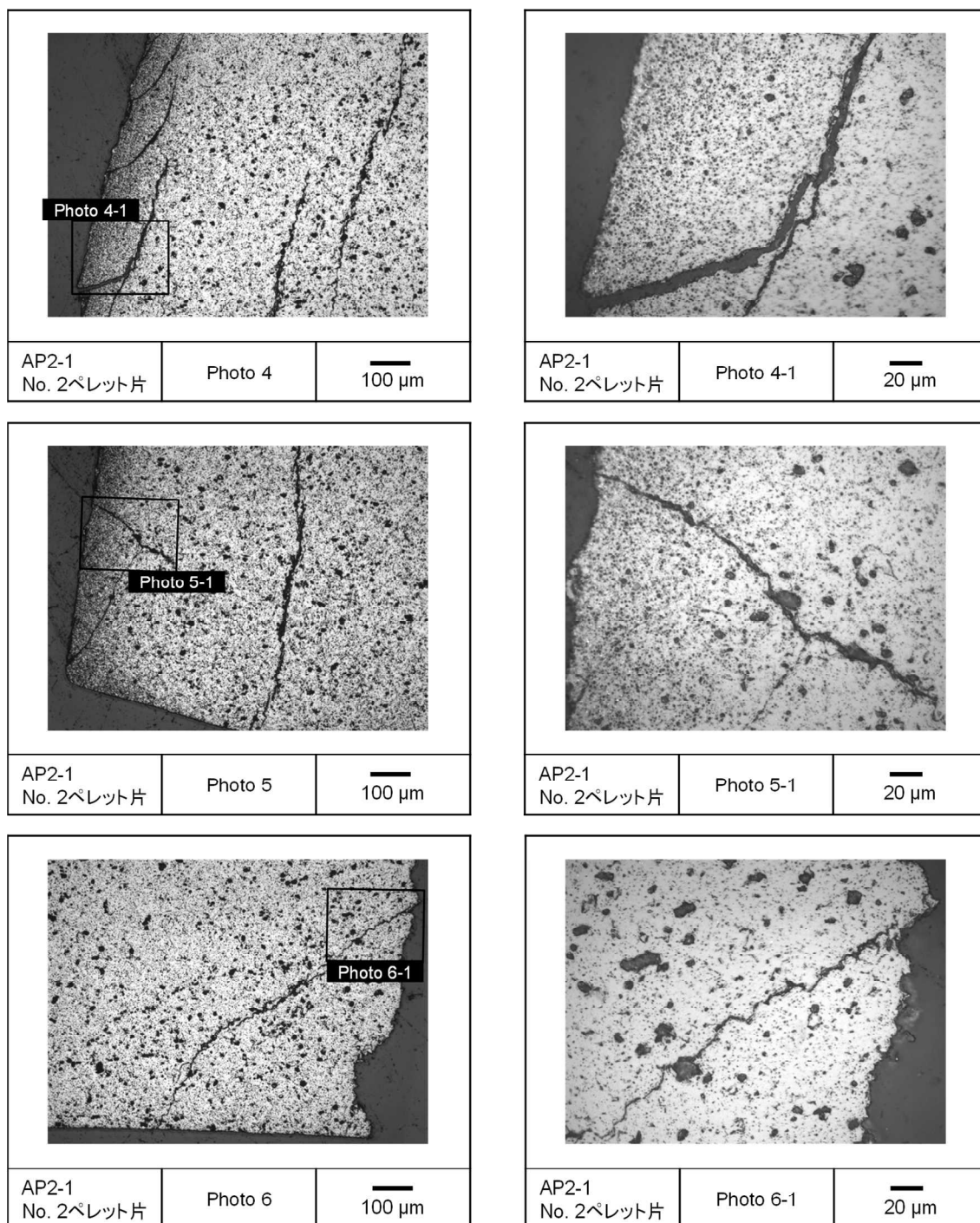


図 4.3.2-1(3) 加熱試験で細片化しなかった燃料ペレット片 No. 2 の断面画像  
(エッチング前、AP2-1 セグメント燃料)

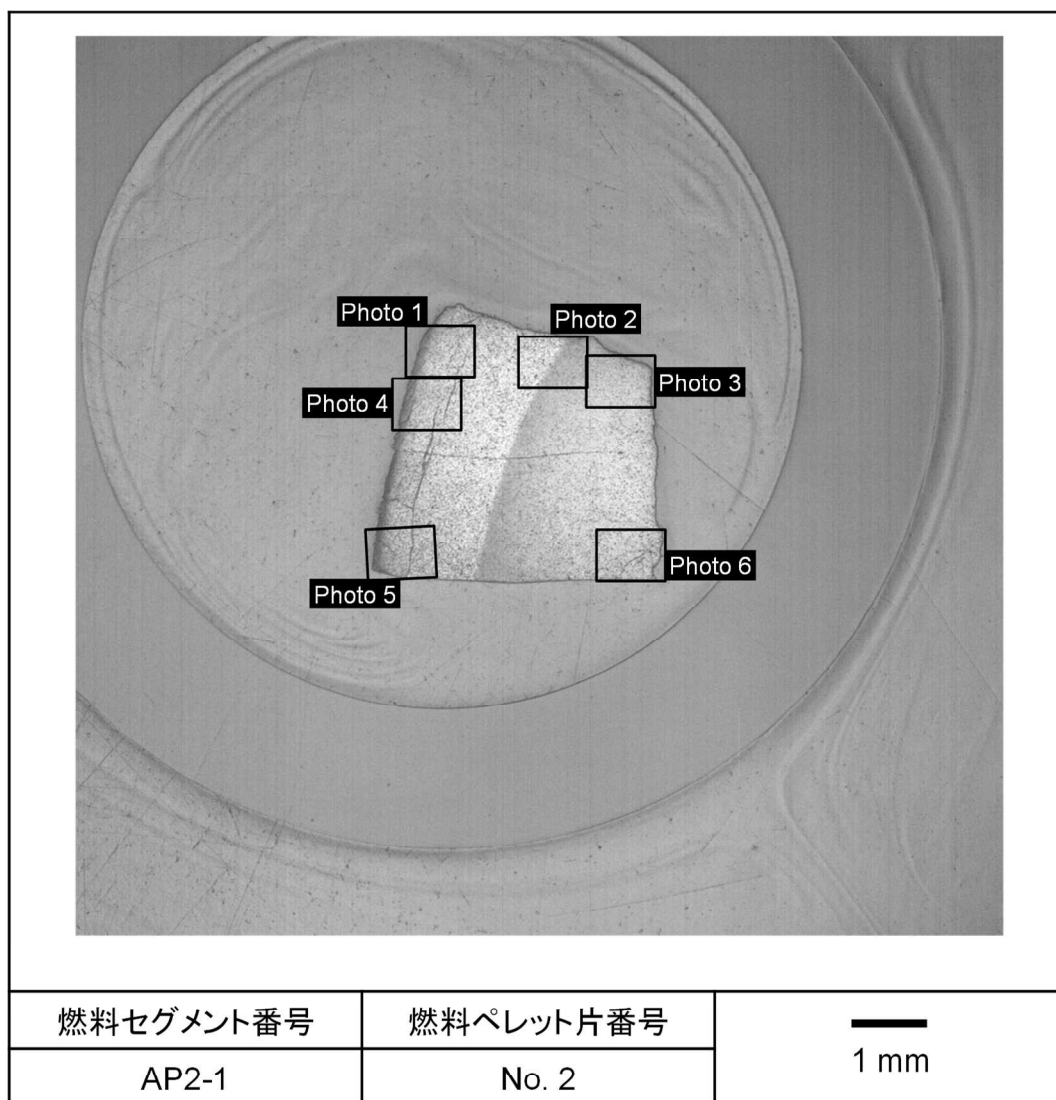


図 4.3.2-2(1) 加熱試験で細片化しなかった燃料ペレット片 No. 2 の断面画像  
(エッチング後、AP2-1 セグメント燃料)

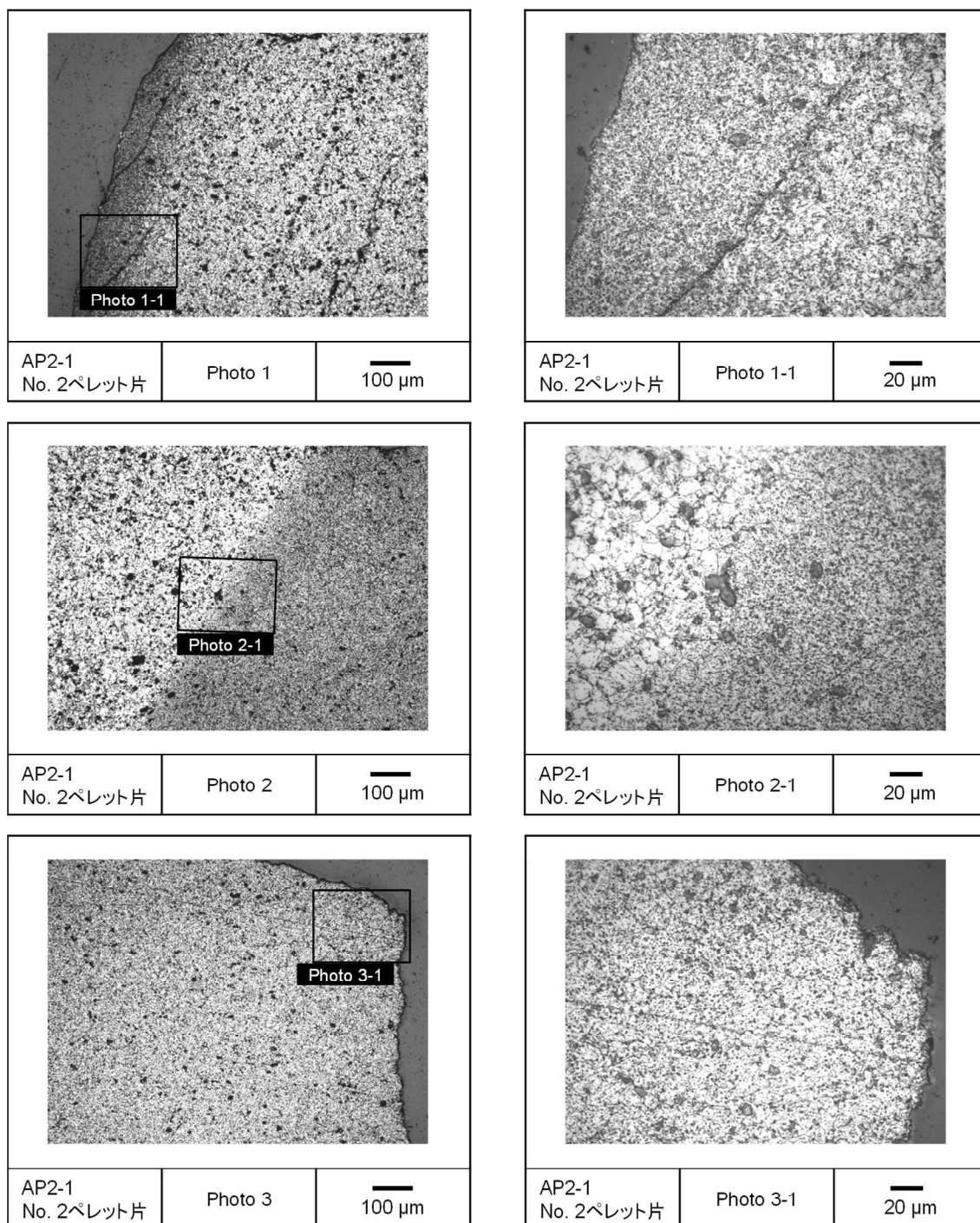


図 4.3.2-2(2) 加熱試験で細片化しなかった燃料ペレット片 No. 2 の断面画像  
(エッチング後、AP2-1 セグメント燃料)

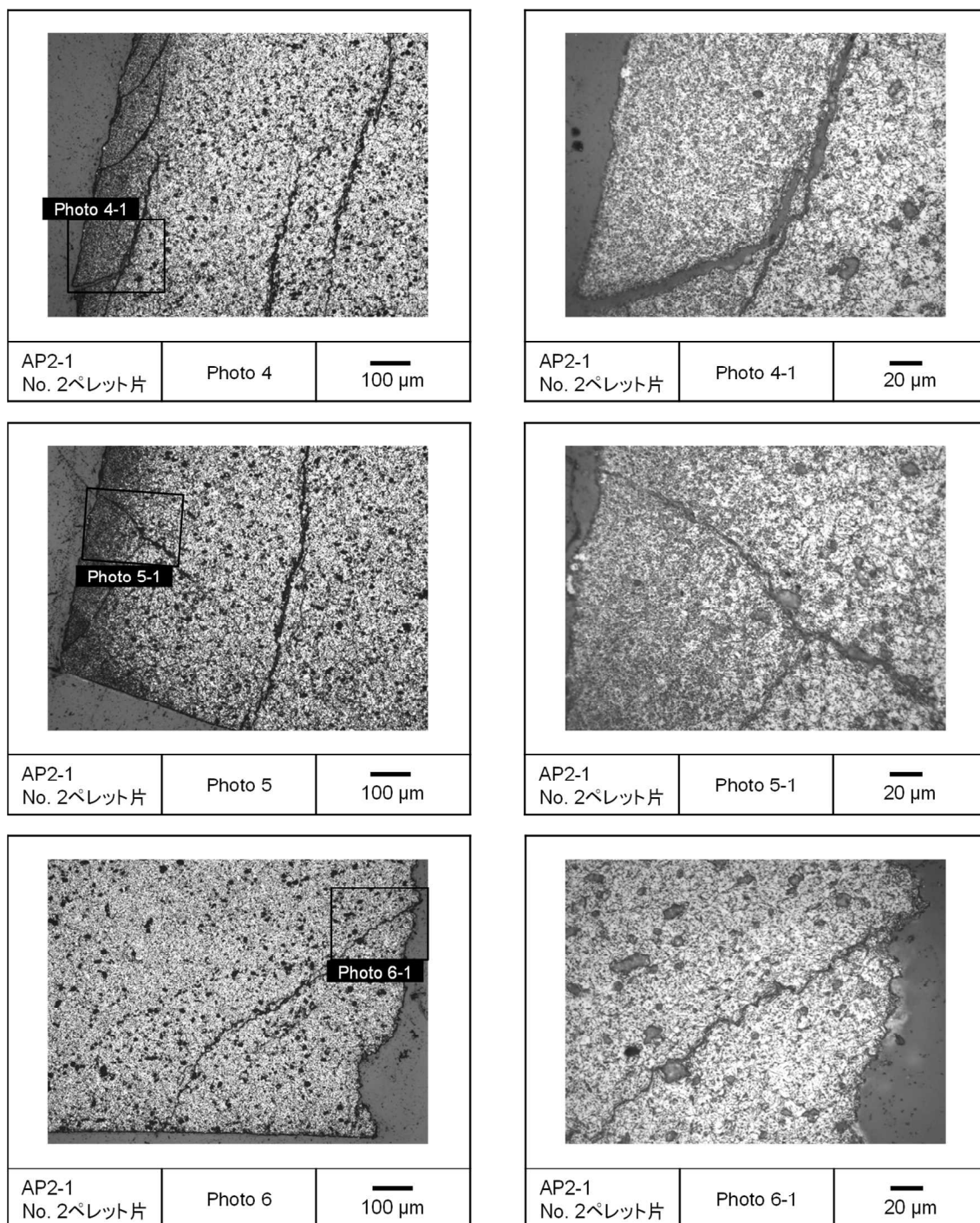


図 4.3.2-2(3) 加熱試験で細片化しなかった燃料ペレット片 No. 2 の断面画像  
(エッチング後、AP2-1 セグメント燃料)

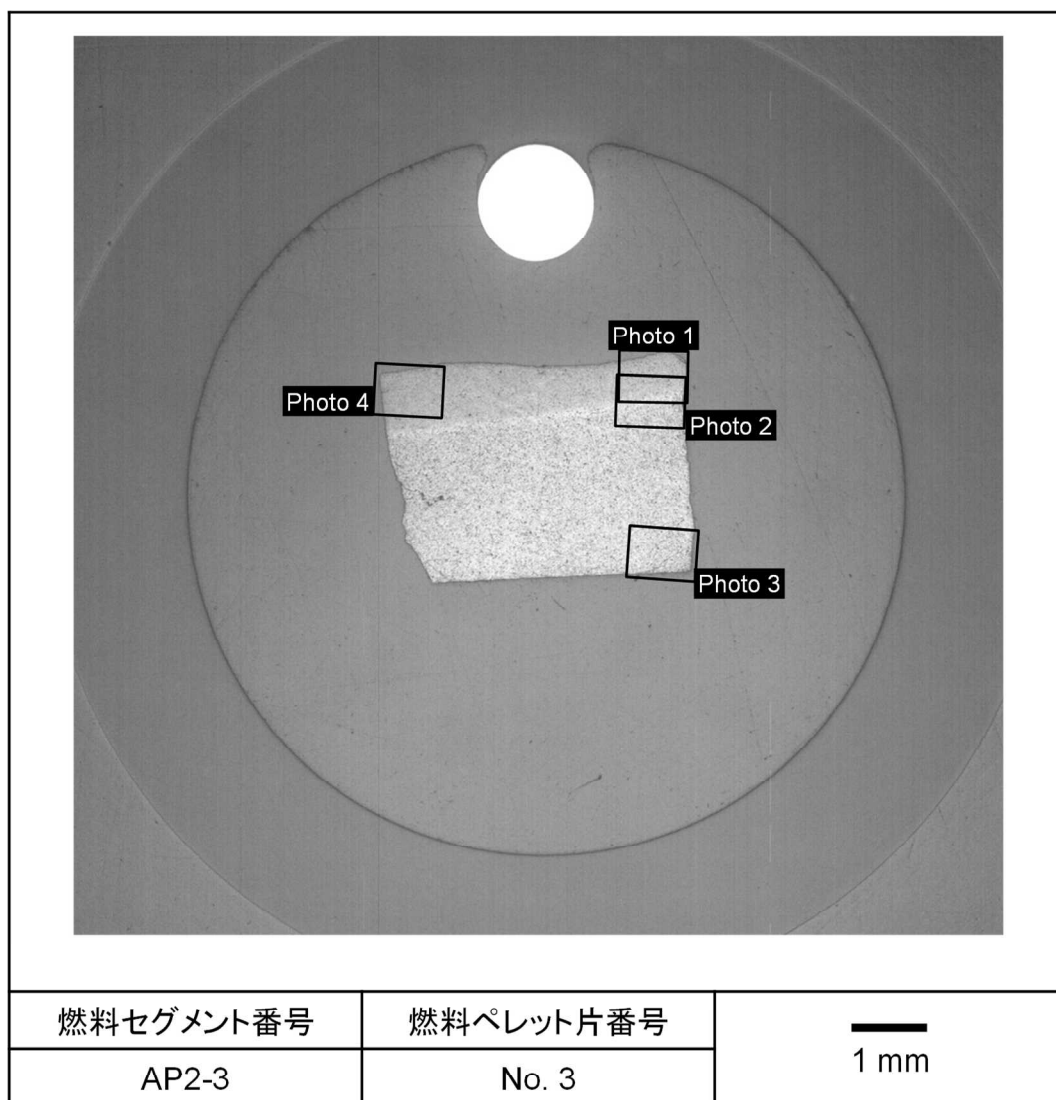


図 4.3.2-3(1) 加熱試験で顕著に細片化しなかった燃料ペレット片 No. 3 の断面画像  
(エッチング前、AP2-3 セグメント燃料)

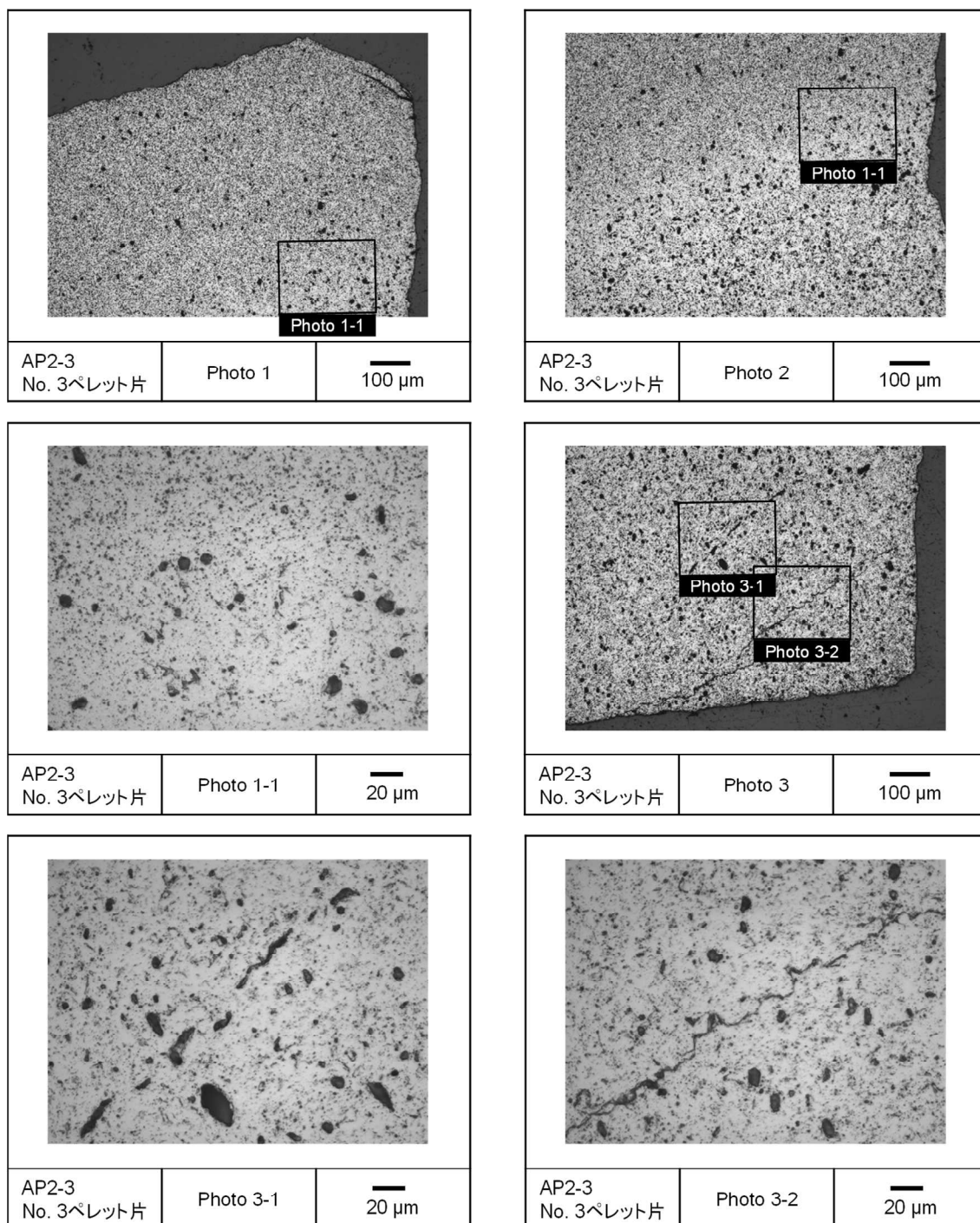


図 4.3.2-3(2) 加熱試験で顕著に細片化しなかった燃料ペレット片 No. 3 の断面画像  
(エッチング前、AP2-3 セグメント燃料)

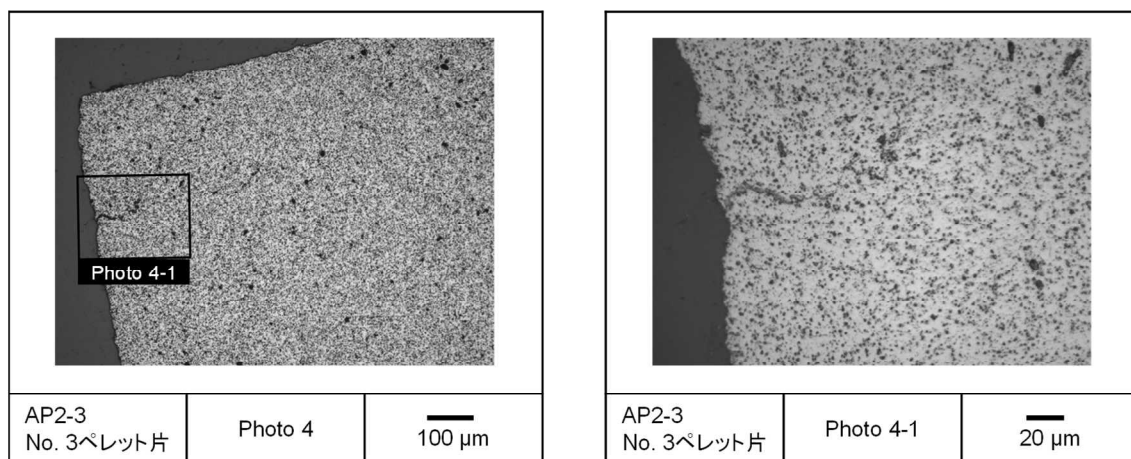


図 4.3.2-3(3) 加熱試験で顕著に細片化しなかった燃料ペレット片 No. 3 の断面画像  
(エッチング前、AP2-3 セグメント燃料)

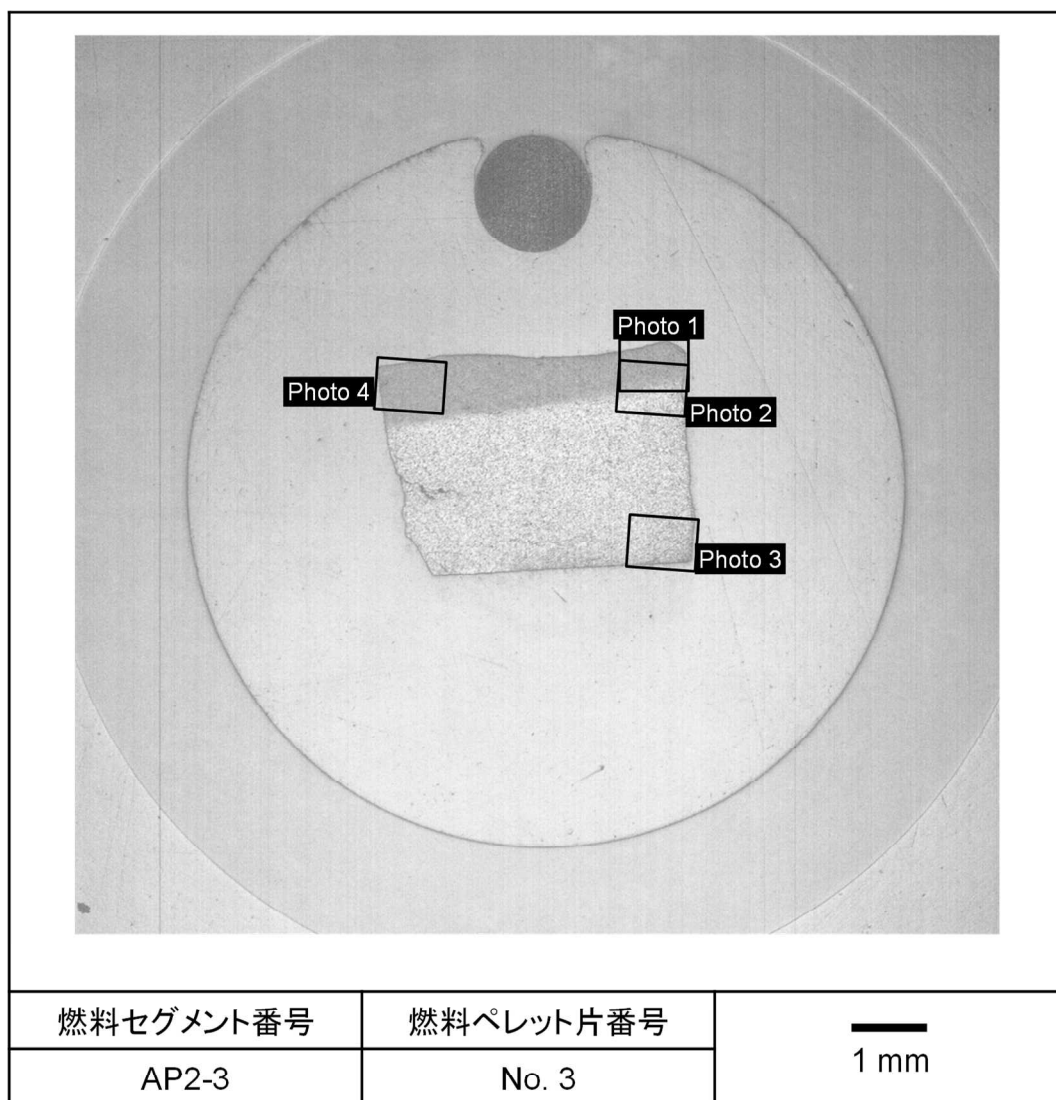


図 4.3.2-4(1) 加熱試験で顕著に細片化しなかった燃料ペレット片 No. 3 の断面画像  
(エッチング後、AP2-3 セグメント燃料)



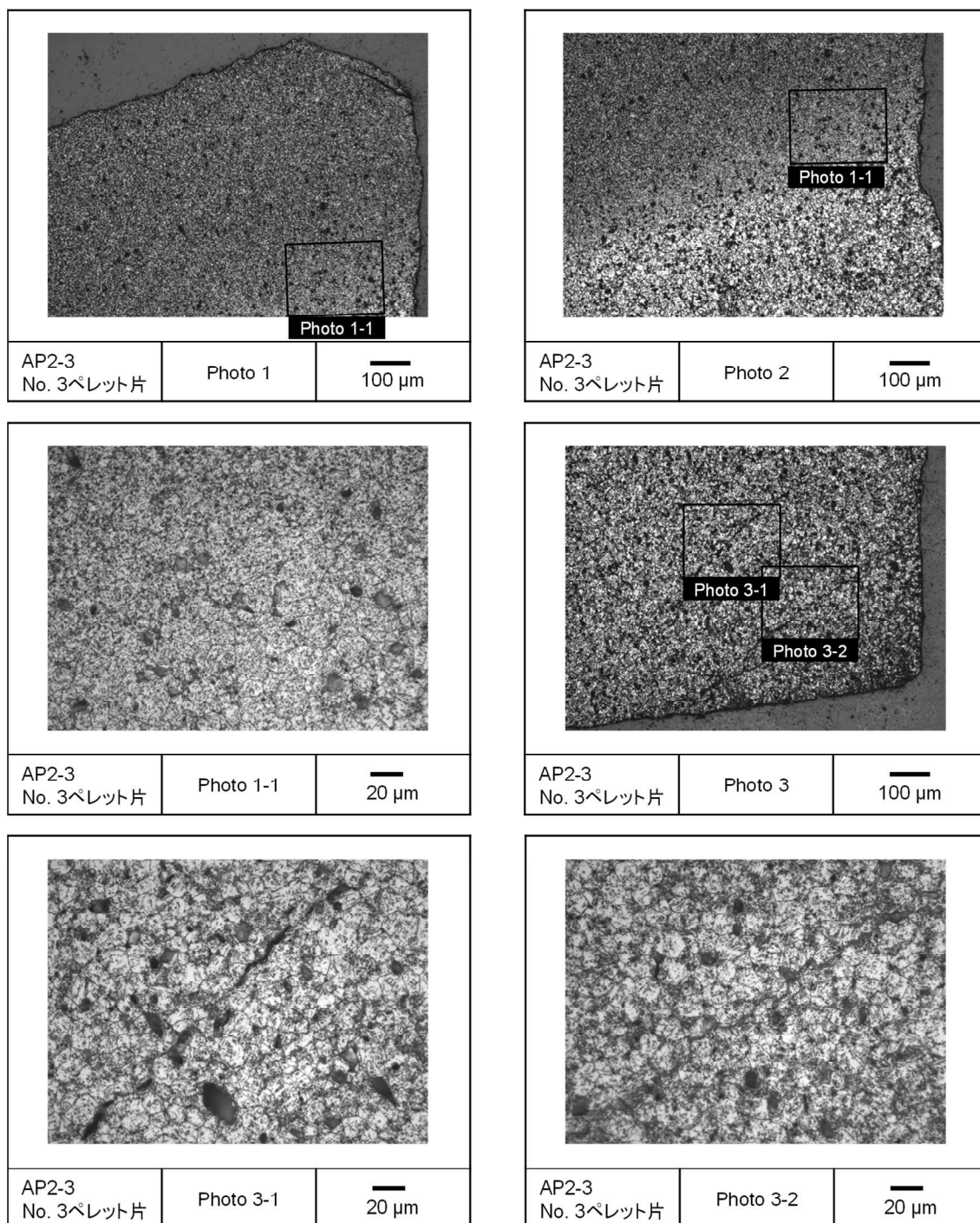


図 4.3.2-4(2) 加熱試験で顕著に細片化しなかった燃料ペレット片 No. 3 の断面画像  
(エッチング後、AP2-3 セグメント燃料)

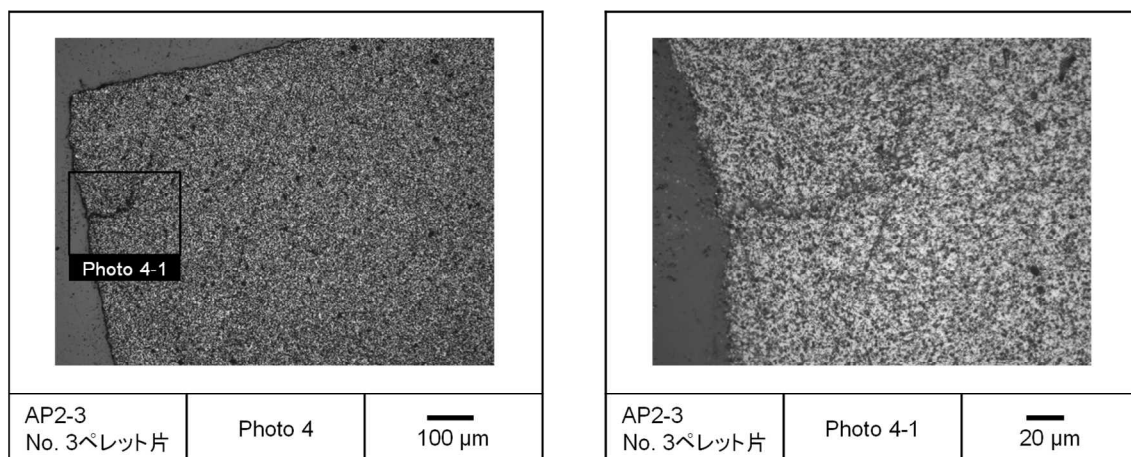


図 4.3.2-4(3) 加熱試験で顕著に細片化しなかった燃料ペレット片 No. 3 の断面画像  
(エッチング後、AP2-3 セグメント燃料)

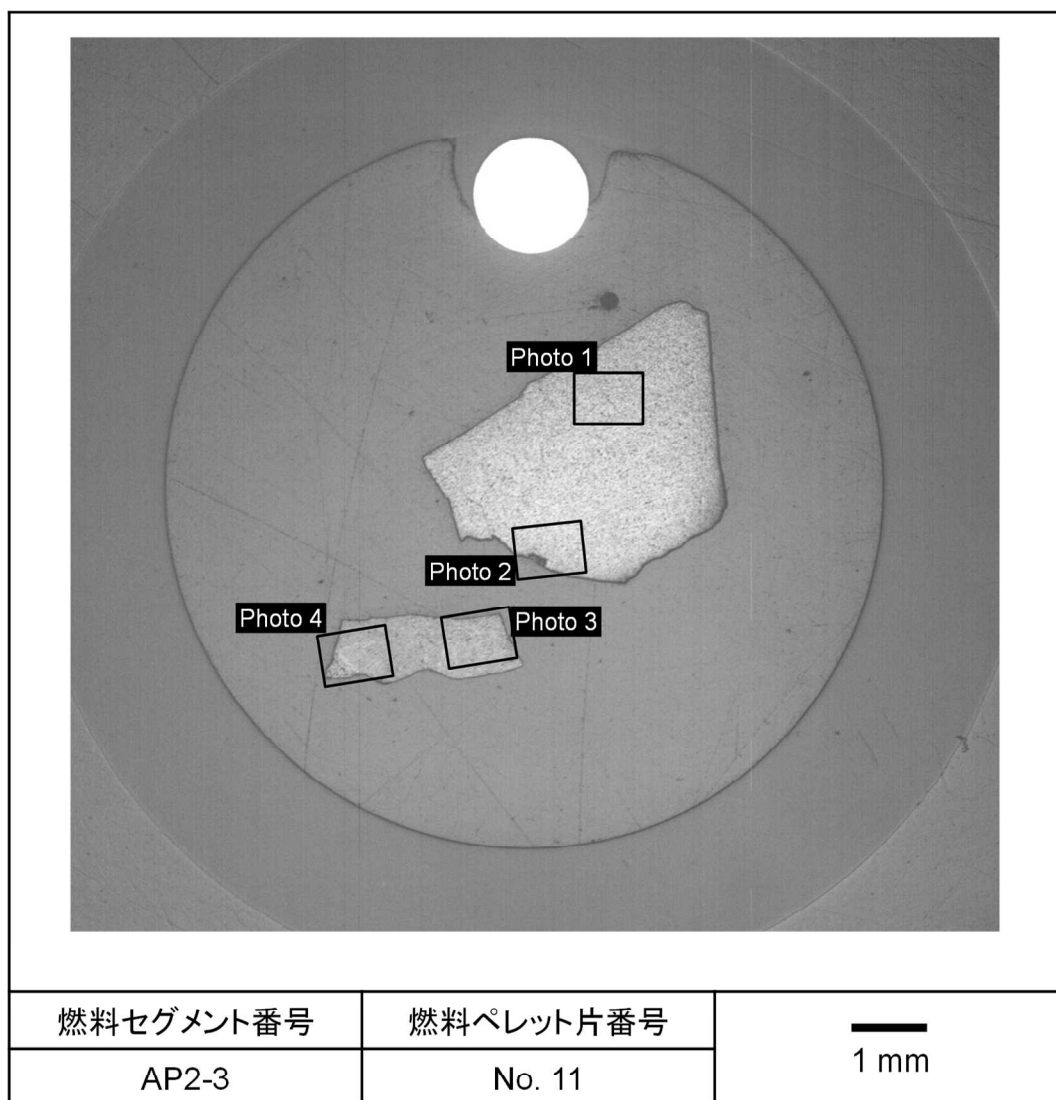


図 4.3.2-5(1) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の断面画像  
(エッチング前、AP2-3 セグメント燃料)

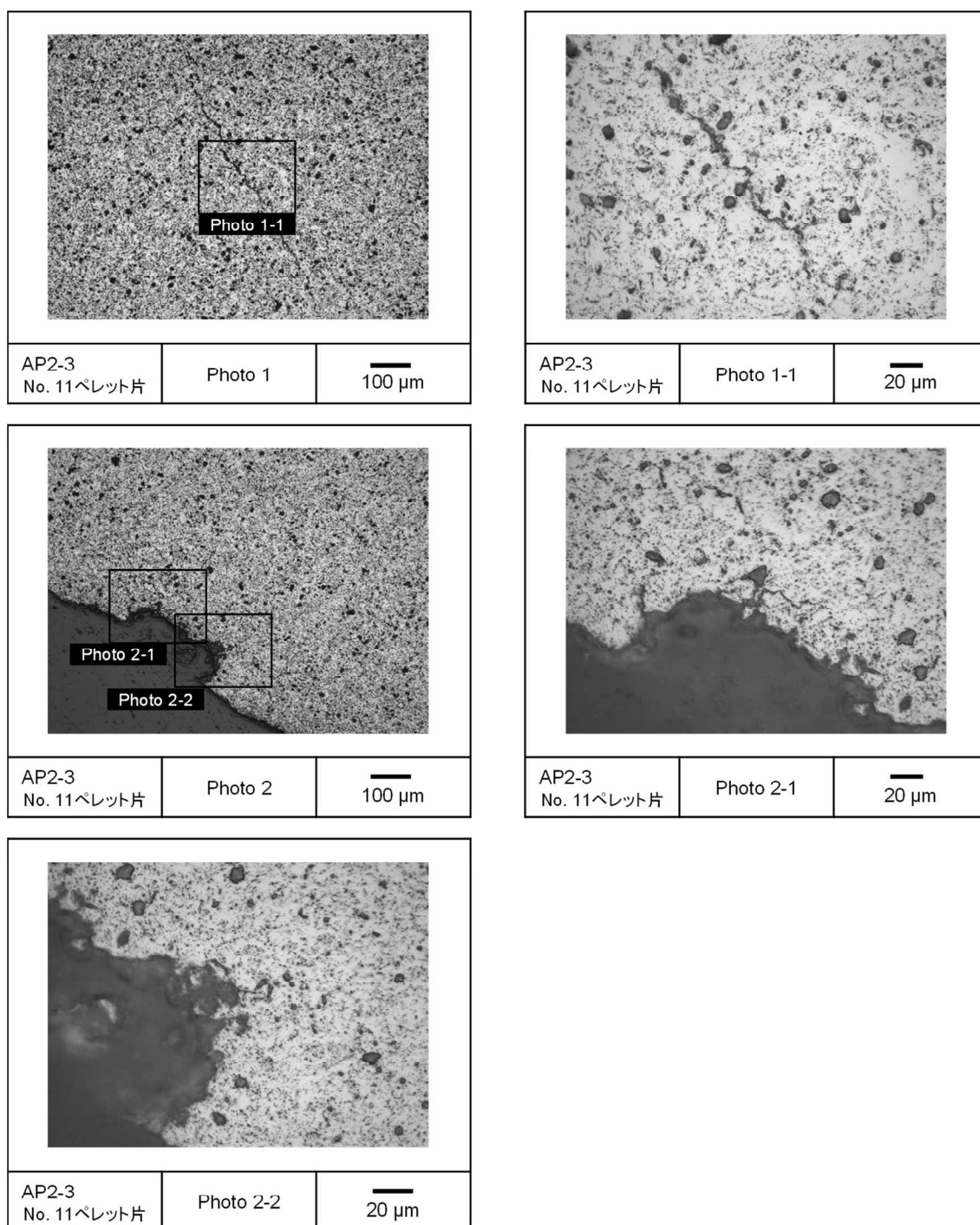


図 4.3.2-5(2) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の断面画像  
(エッチング前、AP2-3 セグメント燃料)

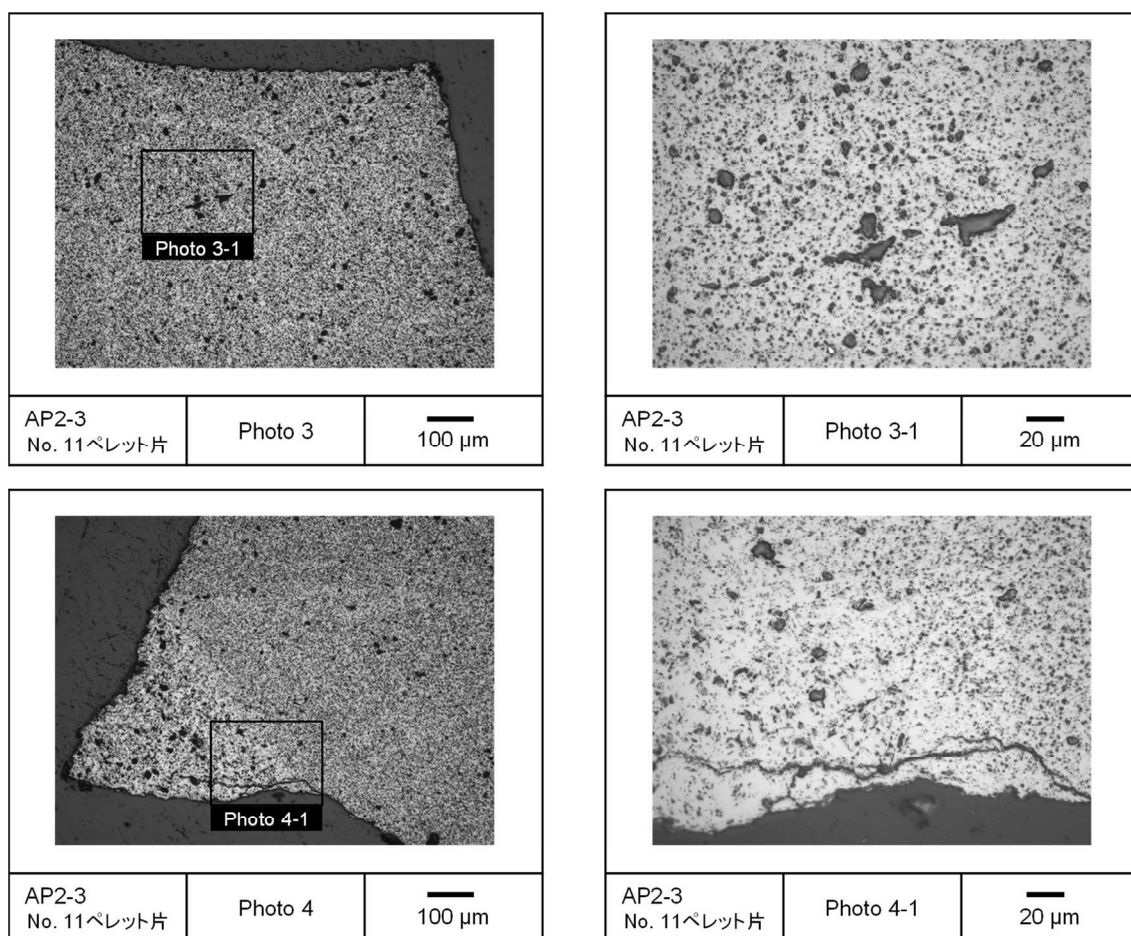


図 4.3.2-5(3) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の断面画像  
(エッチング前、AP2-3 セグメント燃料)

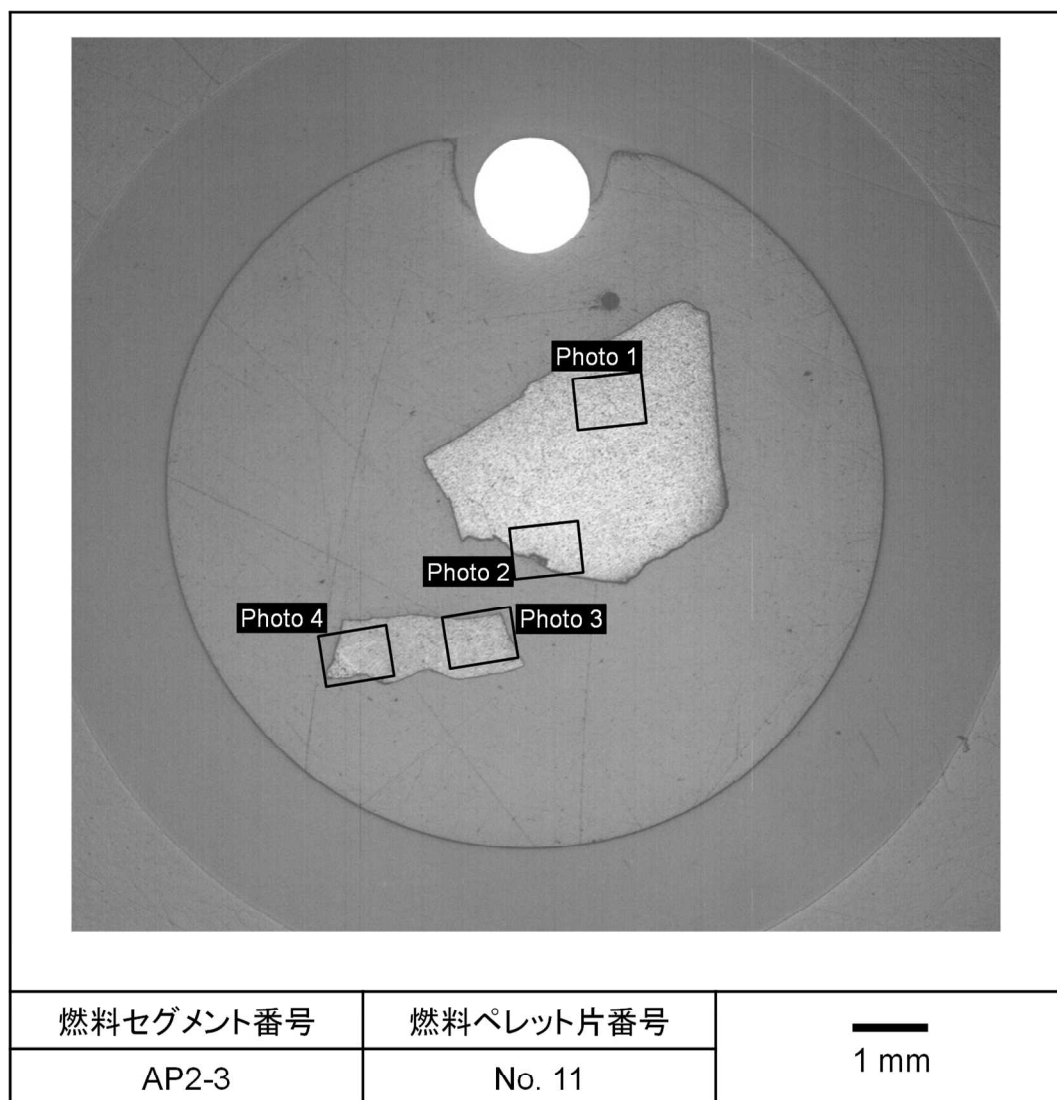


図 4.3.2-6(1) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の断面画像  
(エッチング後、AP2-3 セグメント燃料)

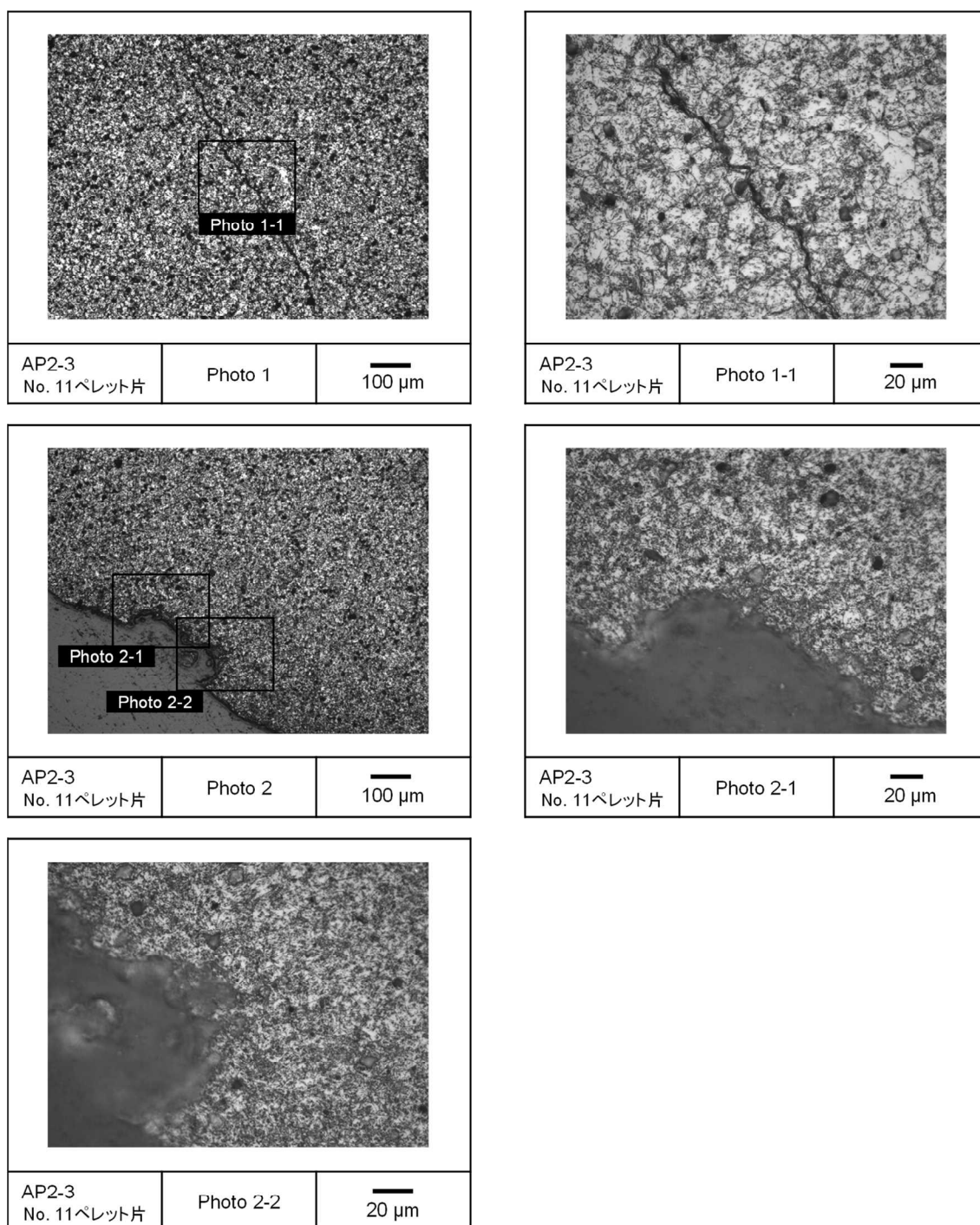


図 4.3.2-6(2) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の断面画像  
(エッチング後、AP2-3 セグメント燃料)

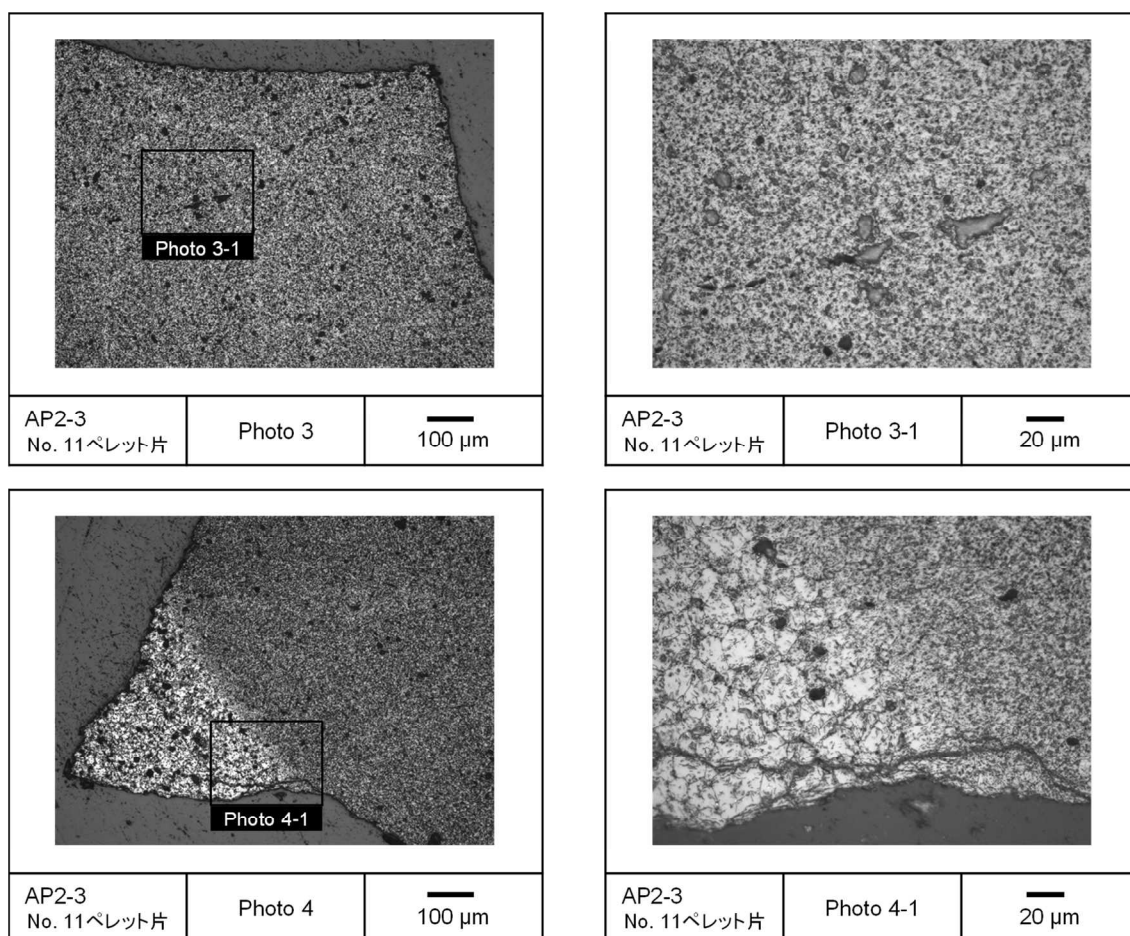


図 4.3.2-6(3) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の断面画像  
(エッチング後、AP2-3 セグメント燃料)



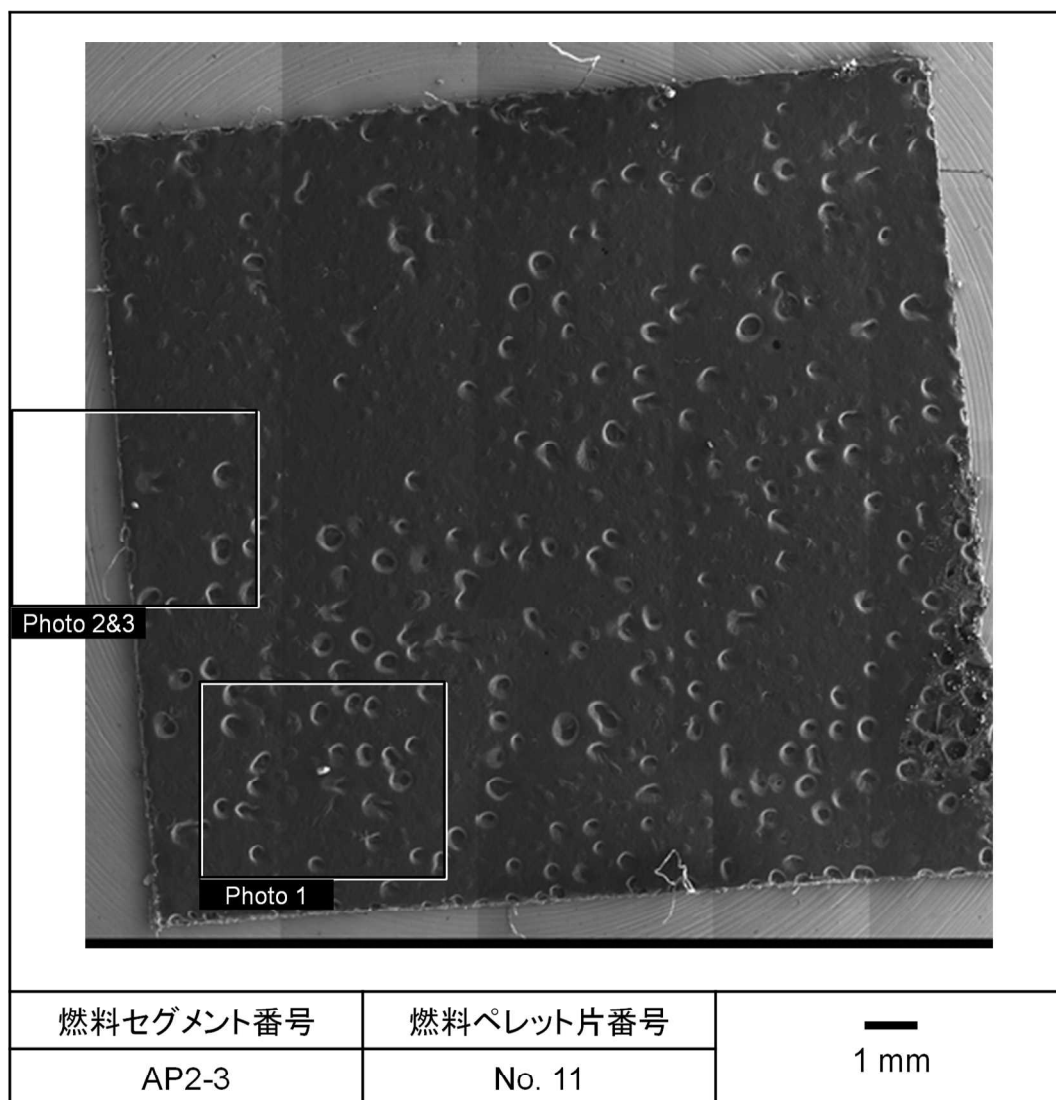


図 4.3.2-7(1) 到達温度 1073 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像 (マクロ画像、AP2-3 セグメント燃料)

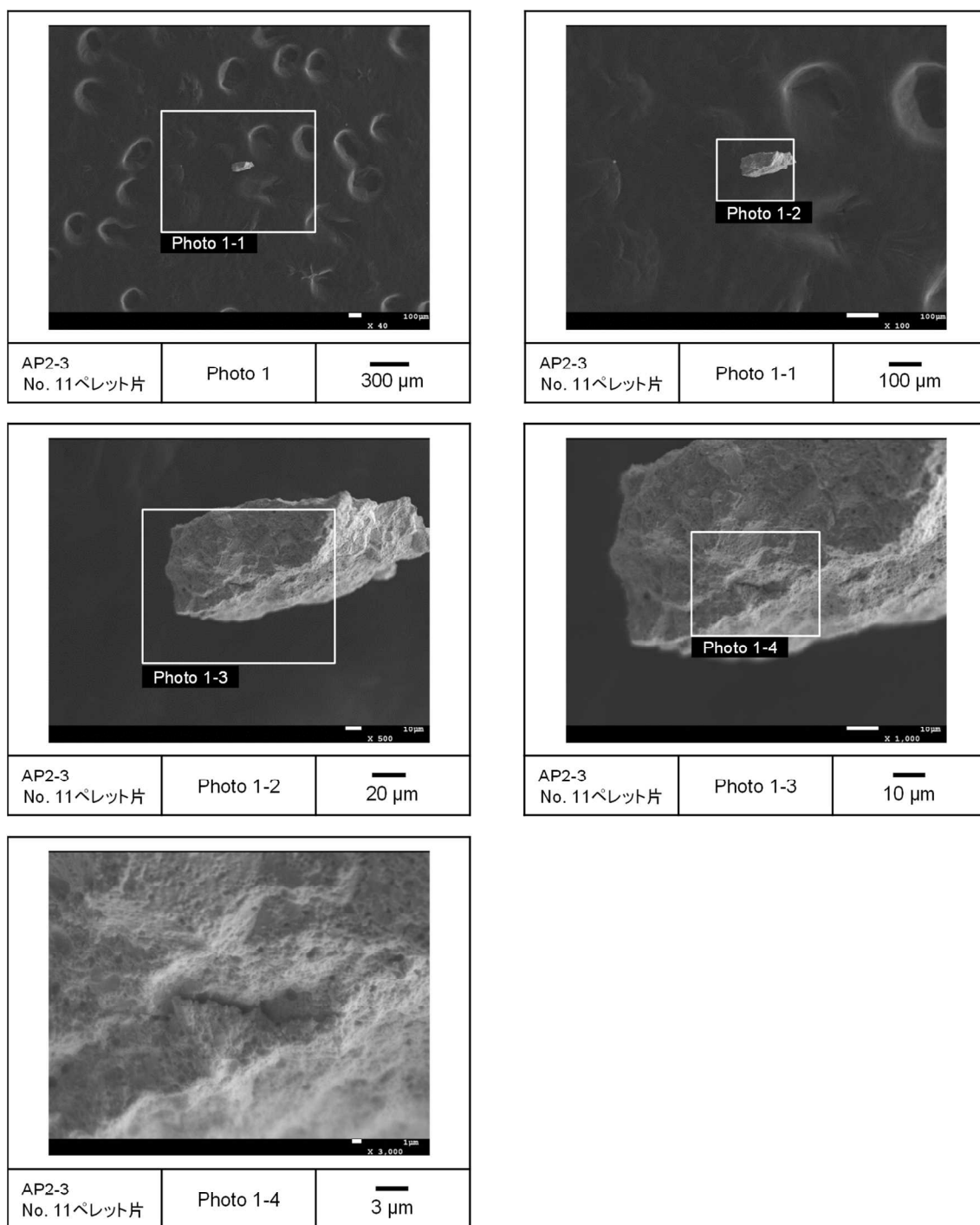


図 4.3.2-7(2) 到達温度 1073 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像 (AP2-3 セグメント燃料)

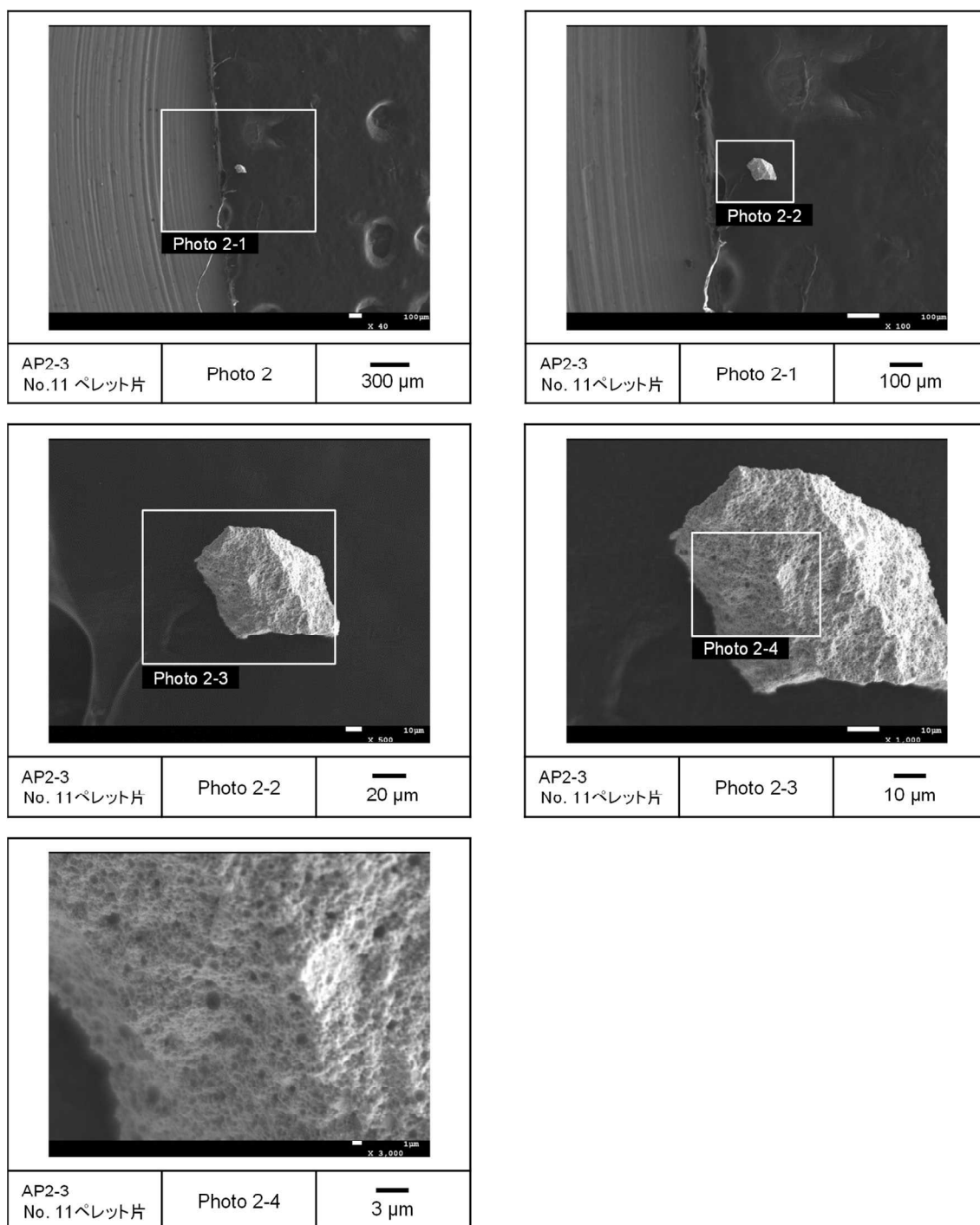


図 4.3.2-7(3) 到達温度 1073 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像 (AP2-3 セグメント燃料)

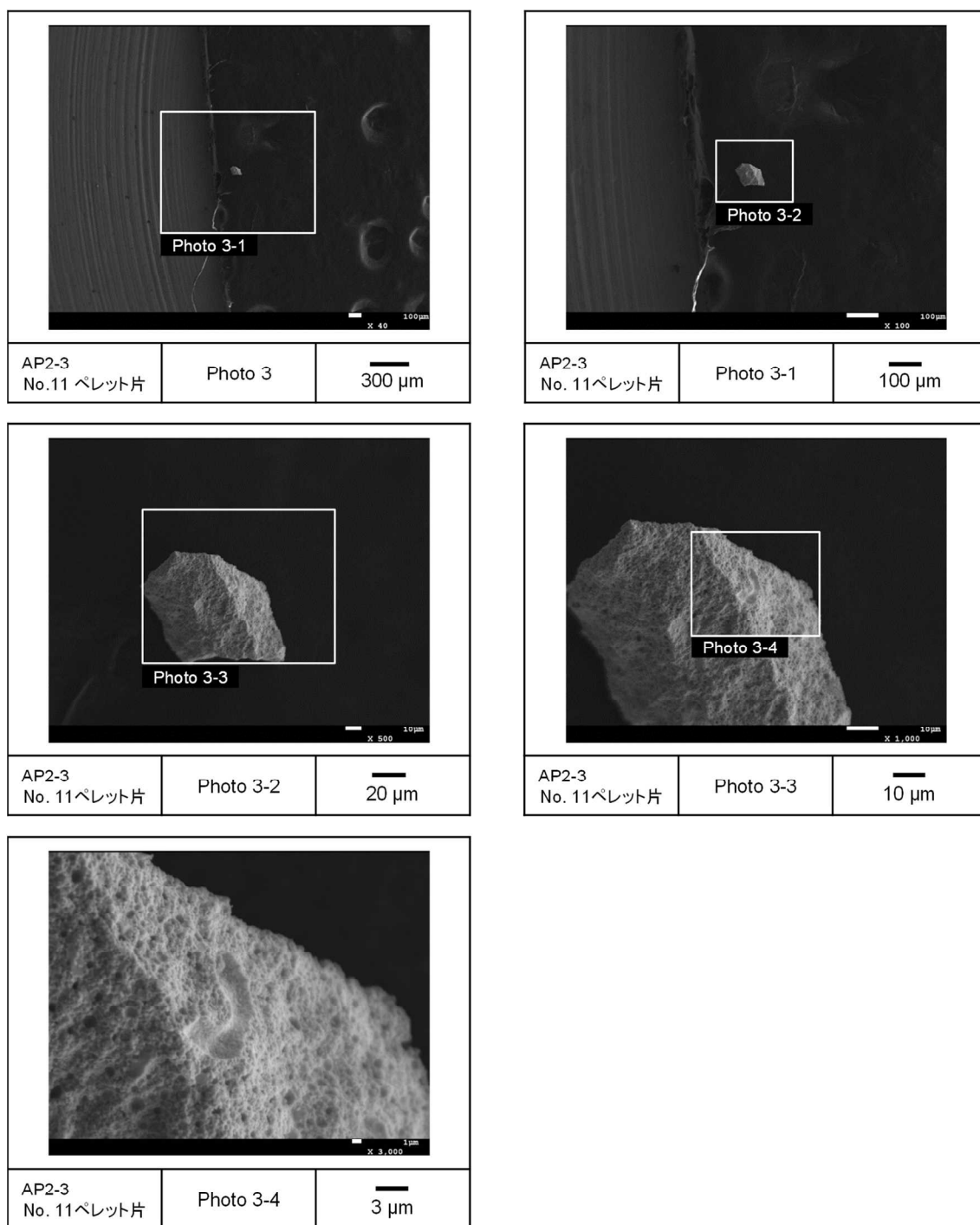


図 4.3.2-7(4) 到達温度 1073 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像 (AP2-3 セグメント燃料)

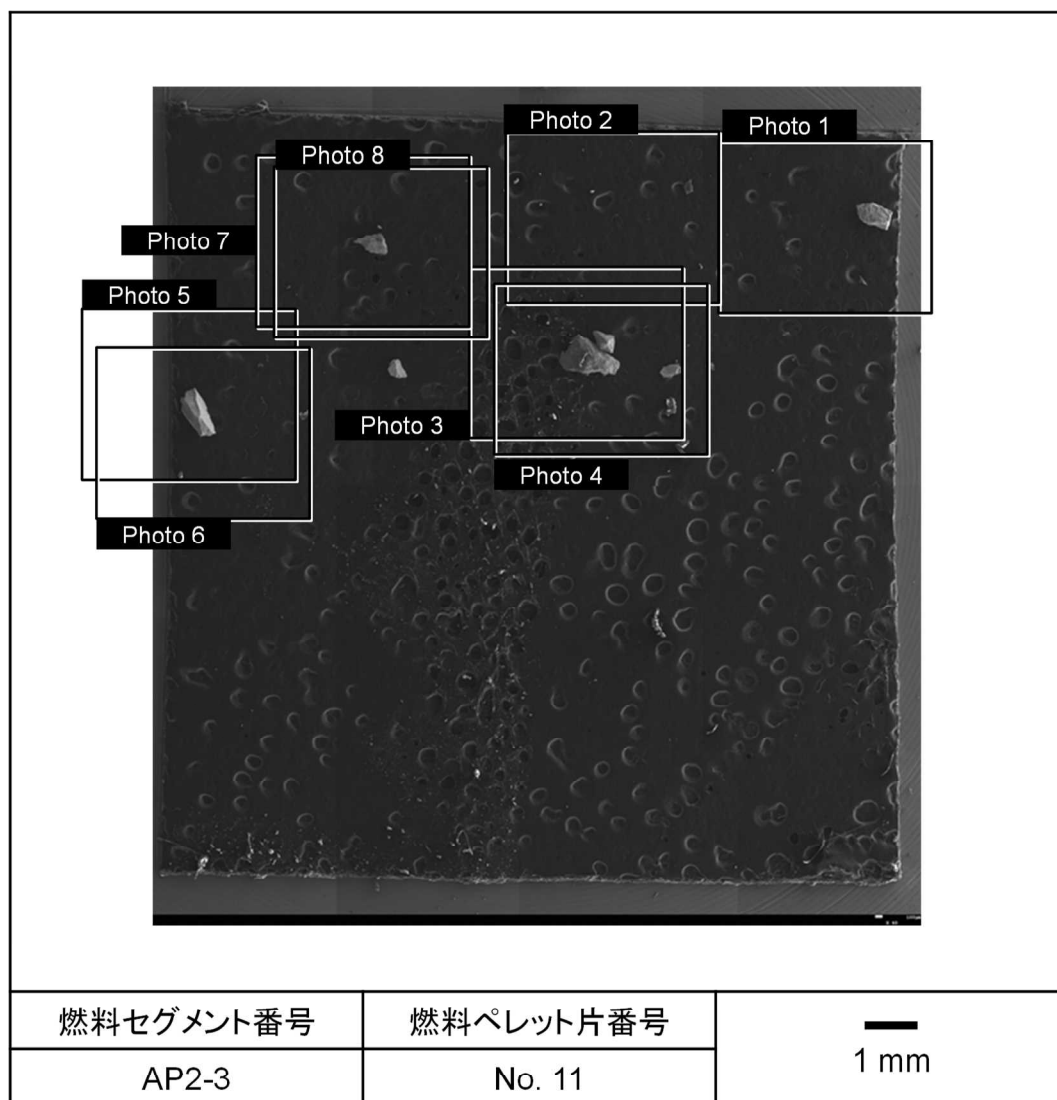


図 4.3.2-8(1) 到達温度 1173 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像 (マクロ画像、AP2-3 セグメント燃料)

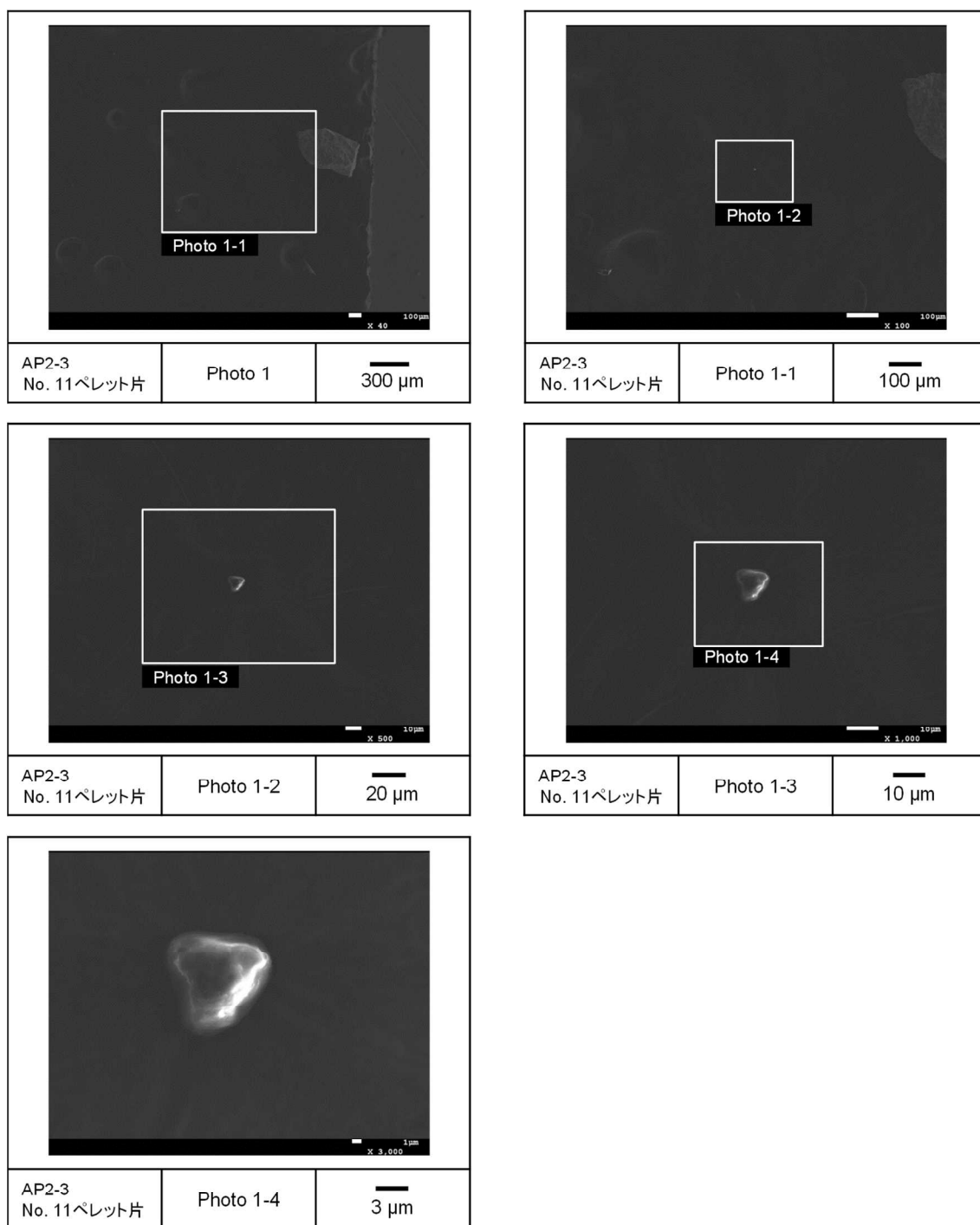


図 4.3.2-8(2) 到達温度 1173 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像 (AP2-3 セグメント燃料)

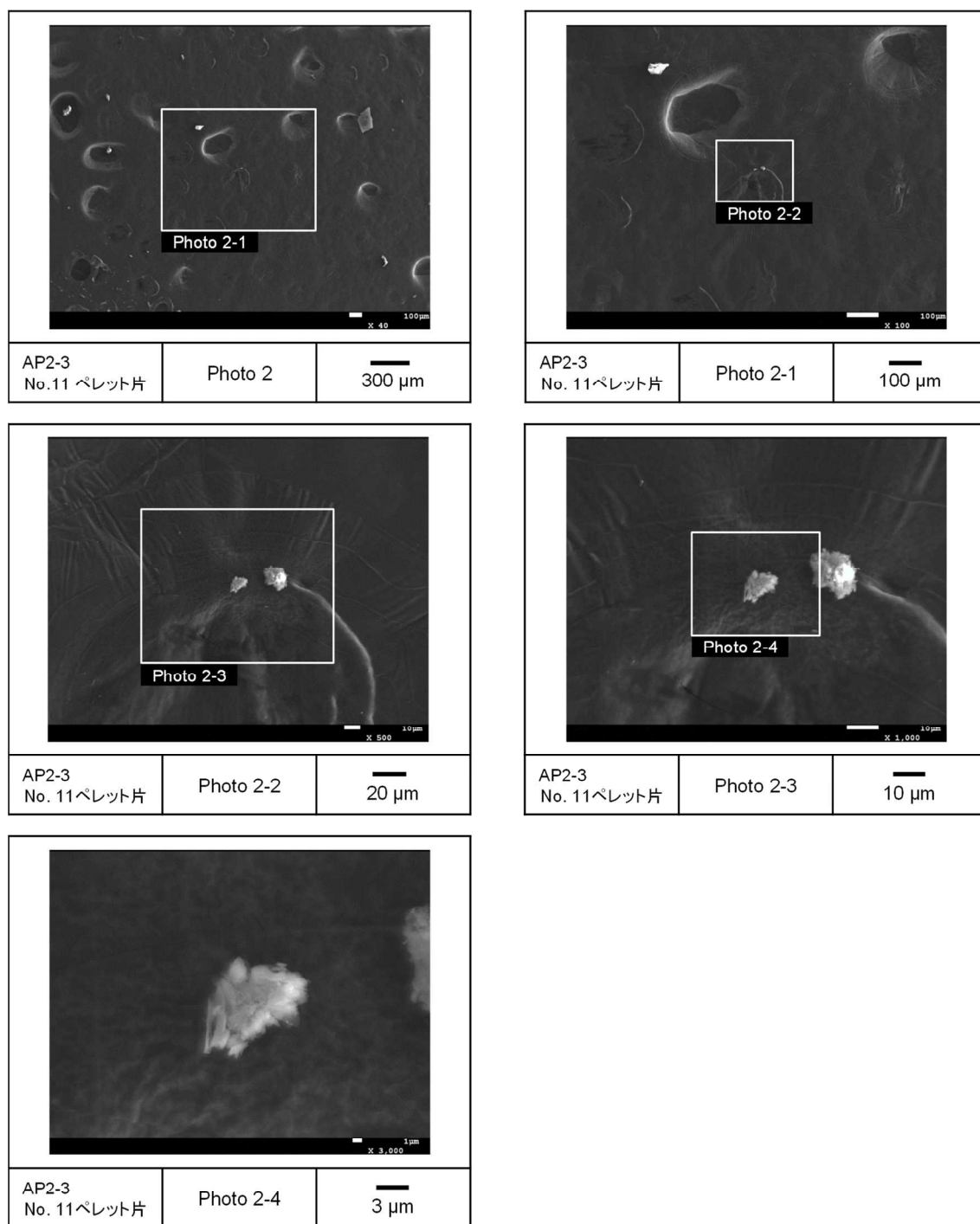


図 4.3.2-8(3) 到達温度 1173 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像 (AP2-3 セグメント燃料)

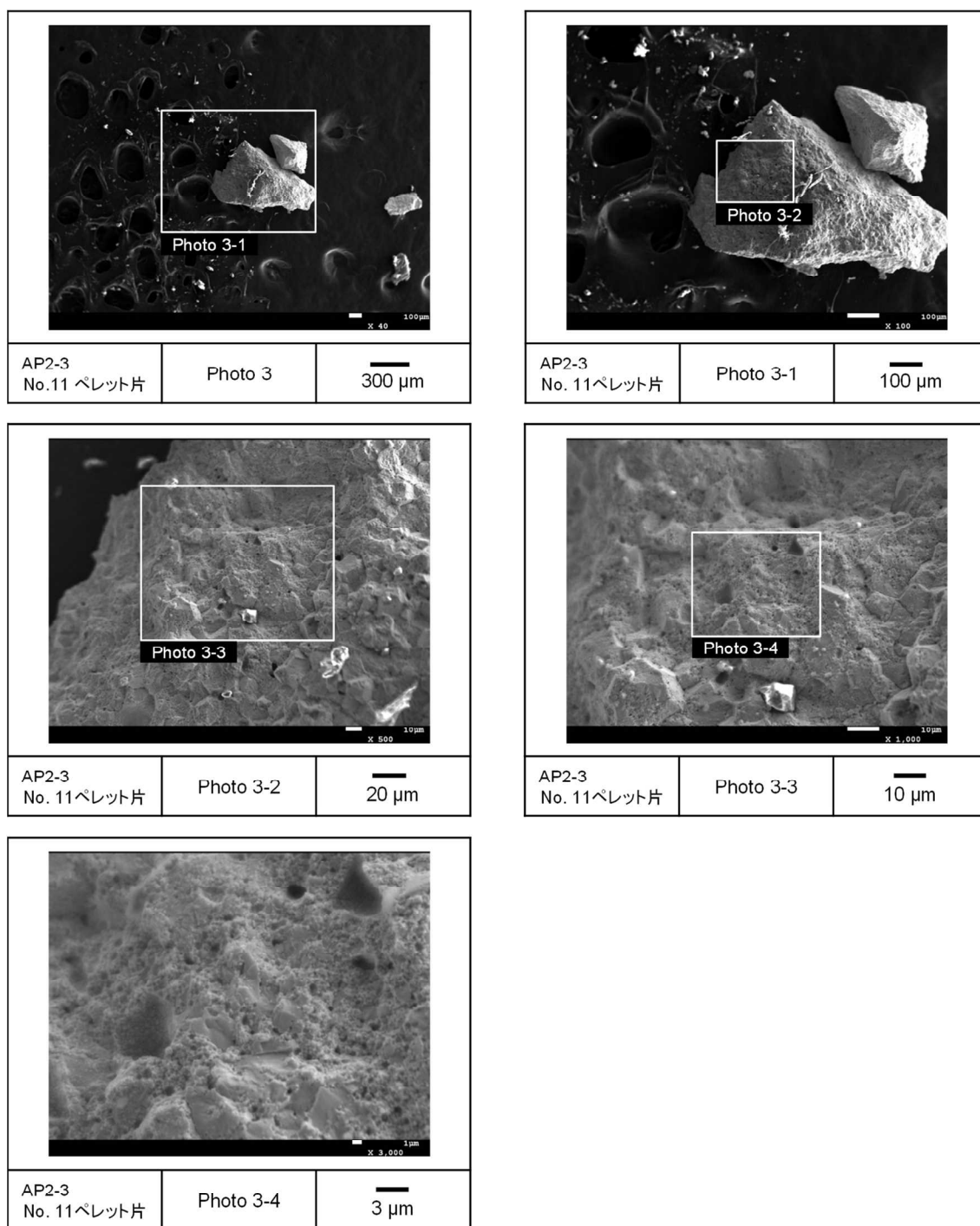


図 4.3.2-8(4) 到達温度 1173 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像 (AP2-3 セグメント燃料)



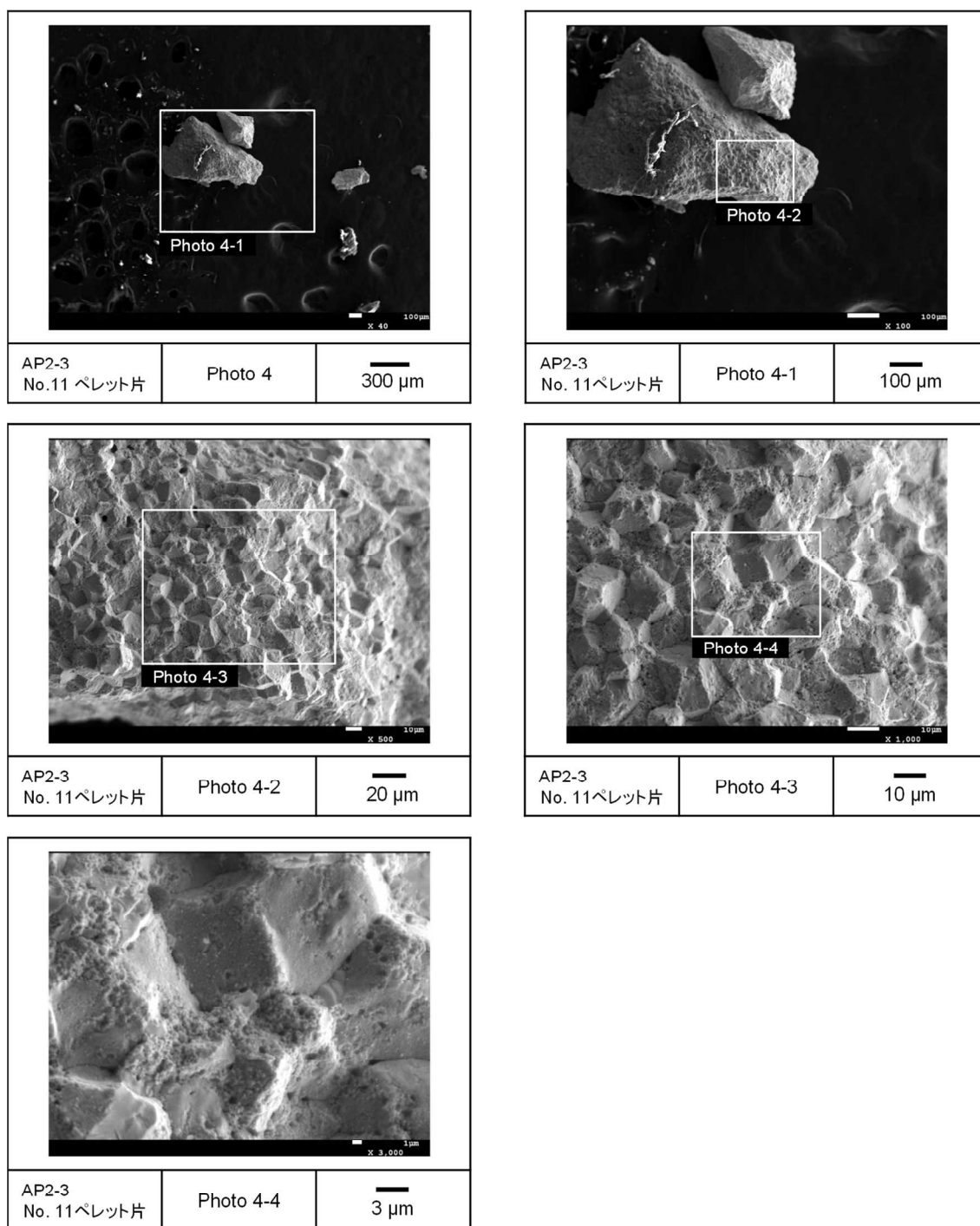


図 4.3.2-8(5) 到達温度 1173 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像 (AP2-3 セグメント燃料)

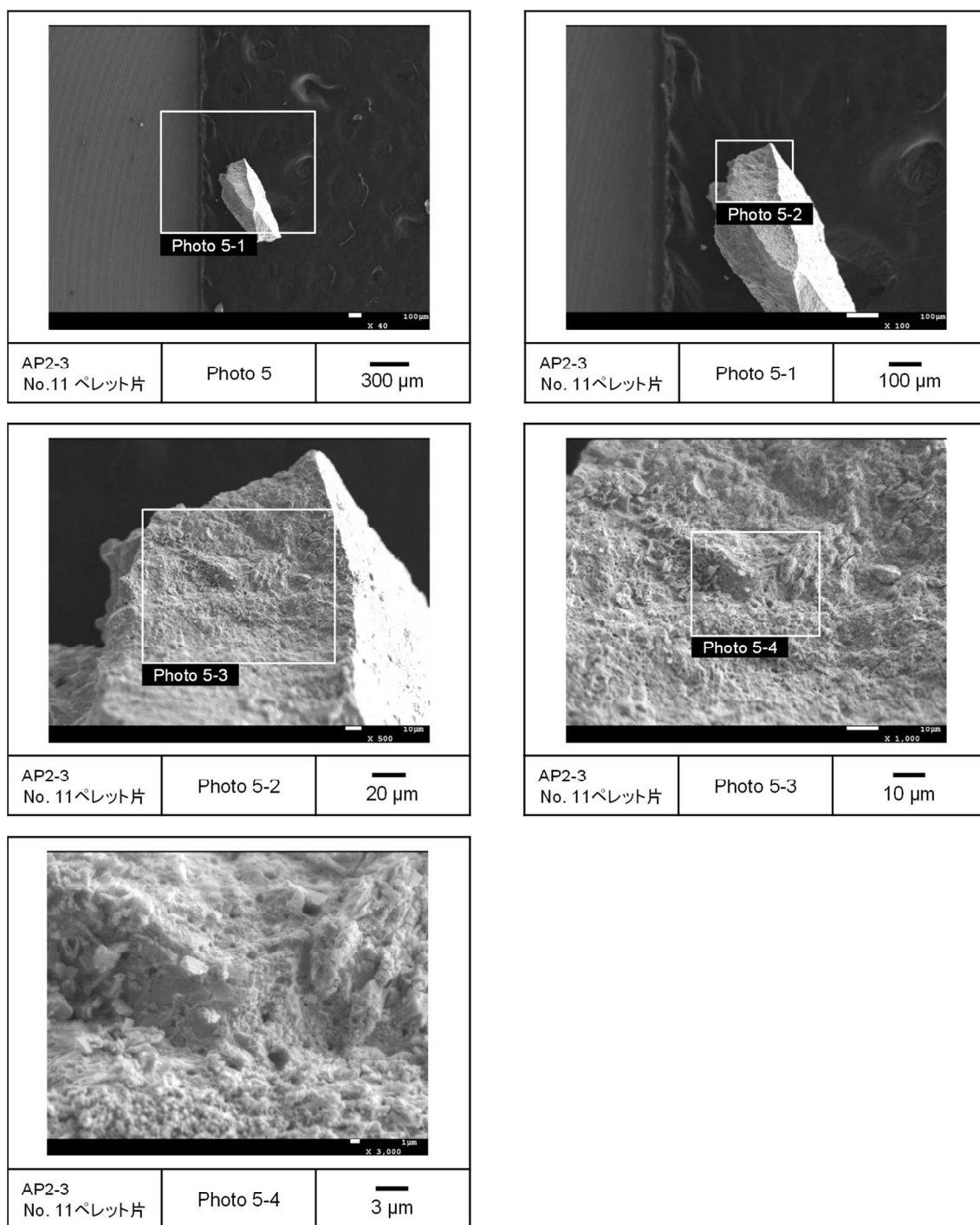


図 4.3.2-8(6) 到達温度 1173 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像 (AP2-3 セグメント燃料)

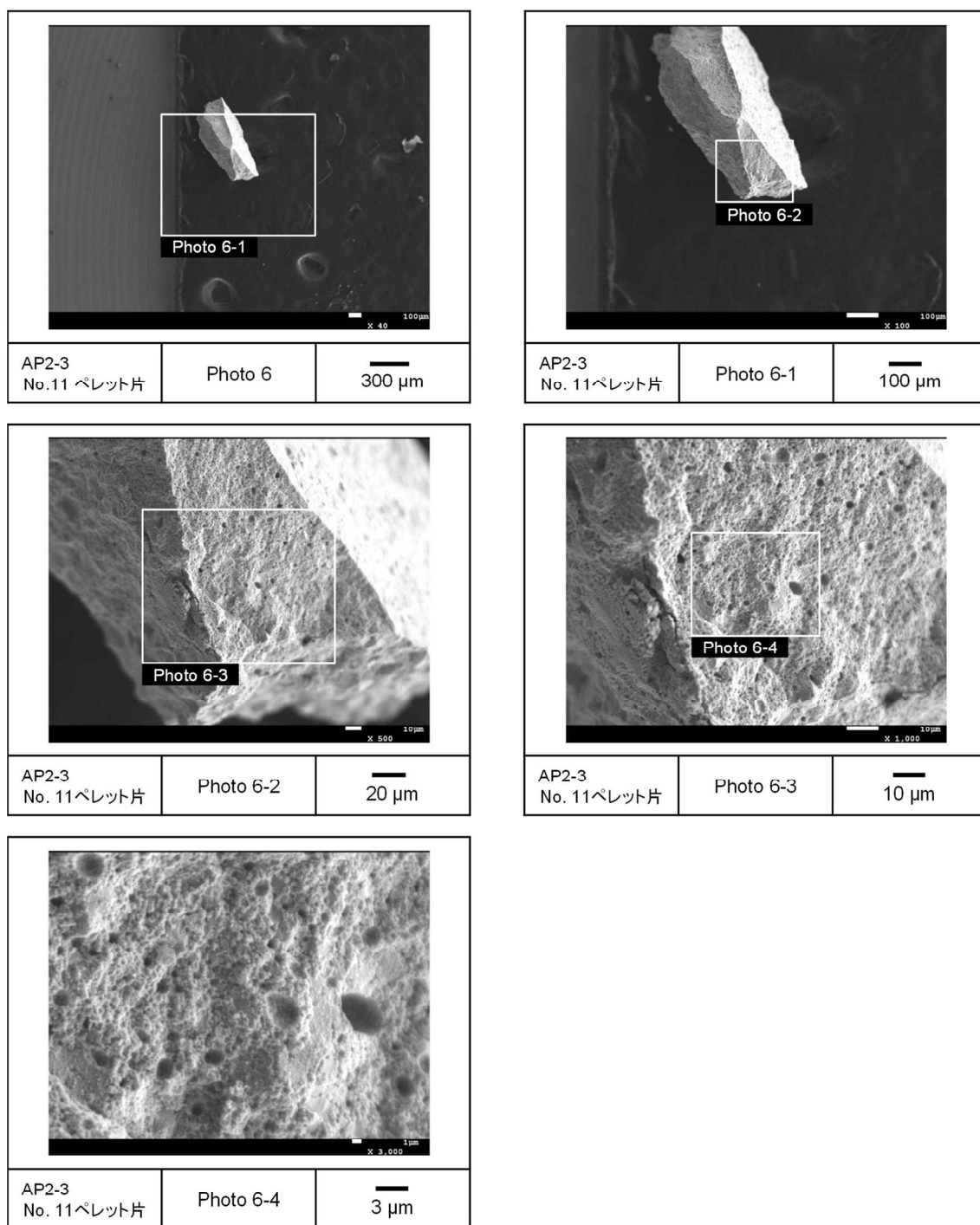


図 4.3.2-8(7) 到達温度 1173 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像 (AP2-3 セグメント燃料)

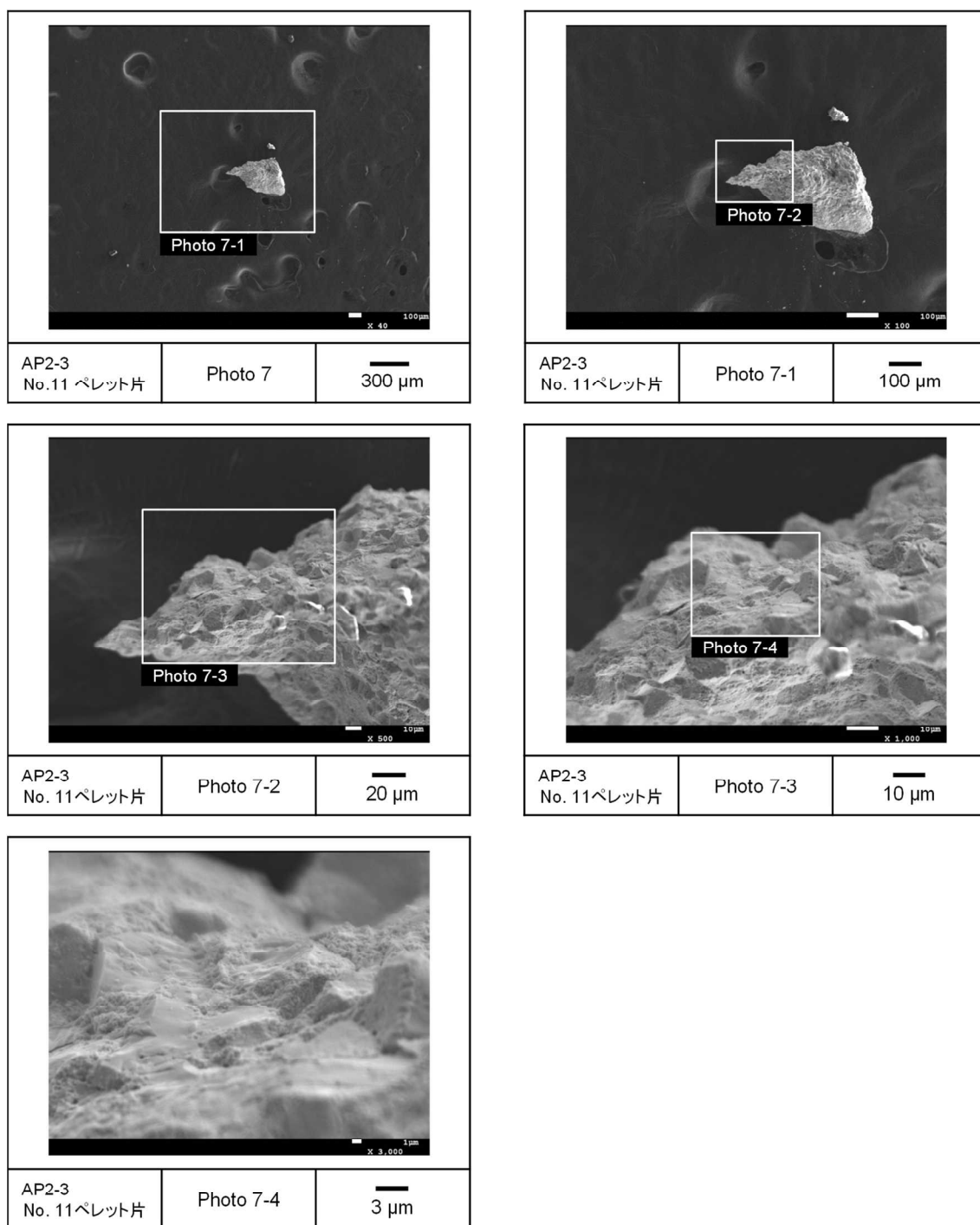


図 4.3.2-8(8) 到達温度 1173 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像 (AP2-3 セグメント燃料)

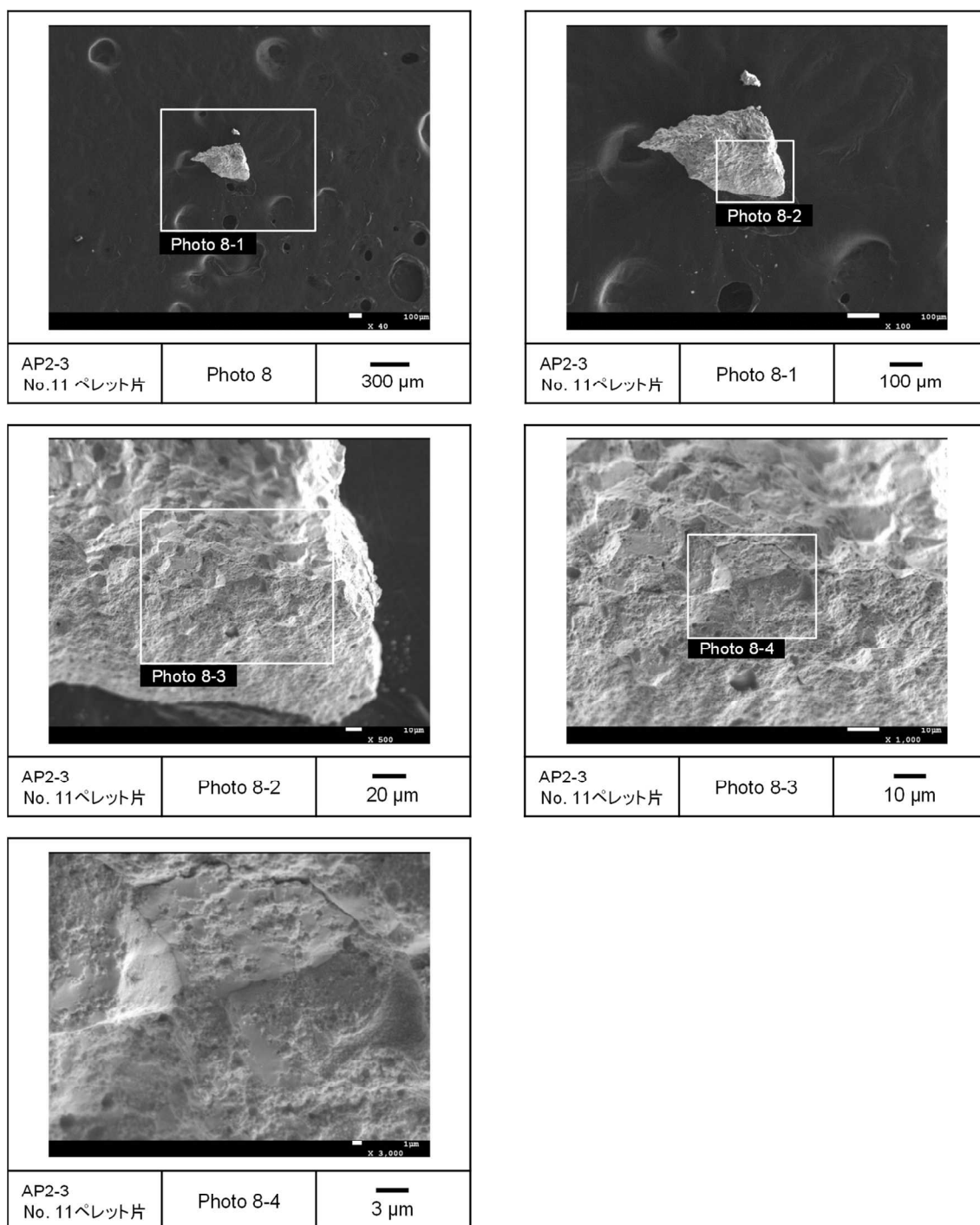


図 4.3.2-8(9) 到達温度 1173 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像 (AP2-3 セグメント燃料)

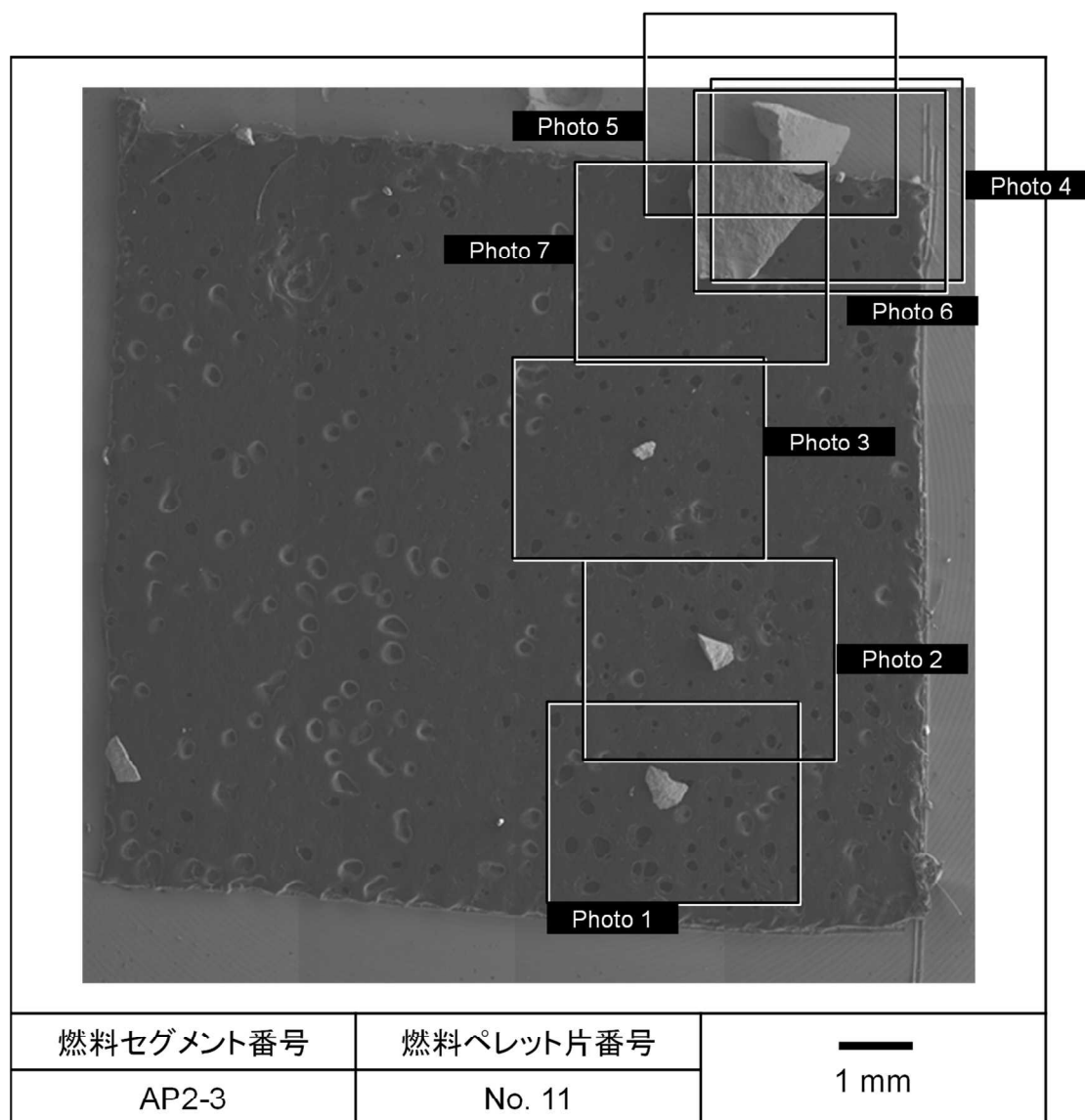


図 4.3.2-9(1) 到達温度 1273 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像 (マクロ画像、AP2-3 セグメント燃料)

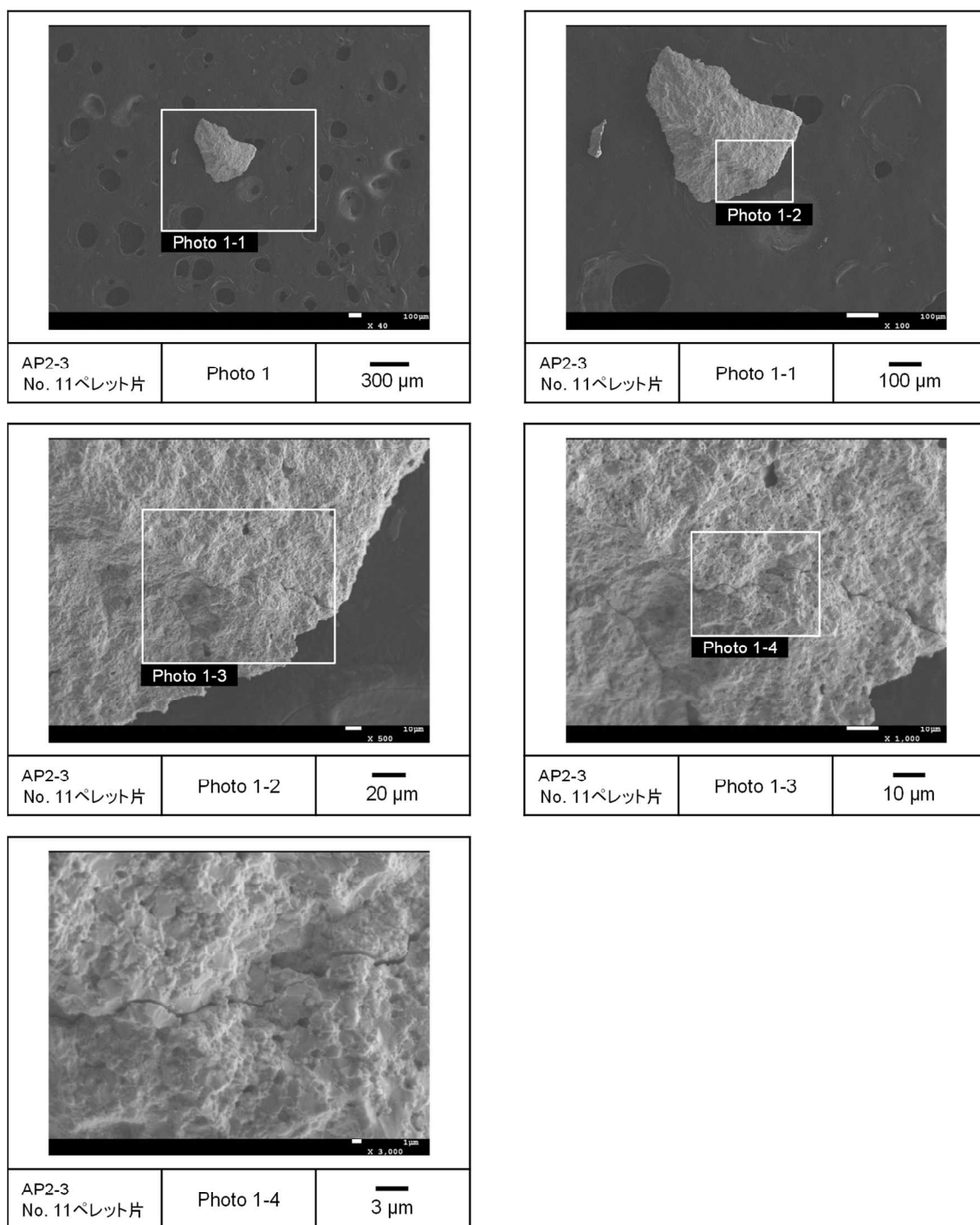


図 4.3.2-9(2) 到達温度 1273 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像 (AP2-3 セグメント燃料)

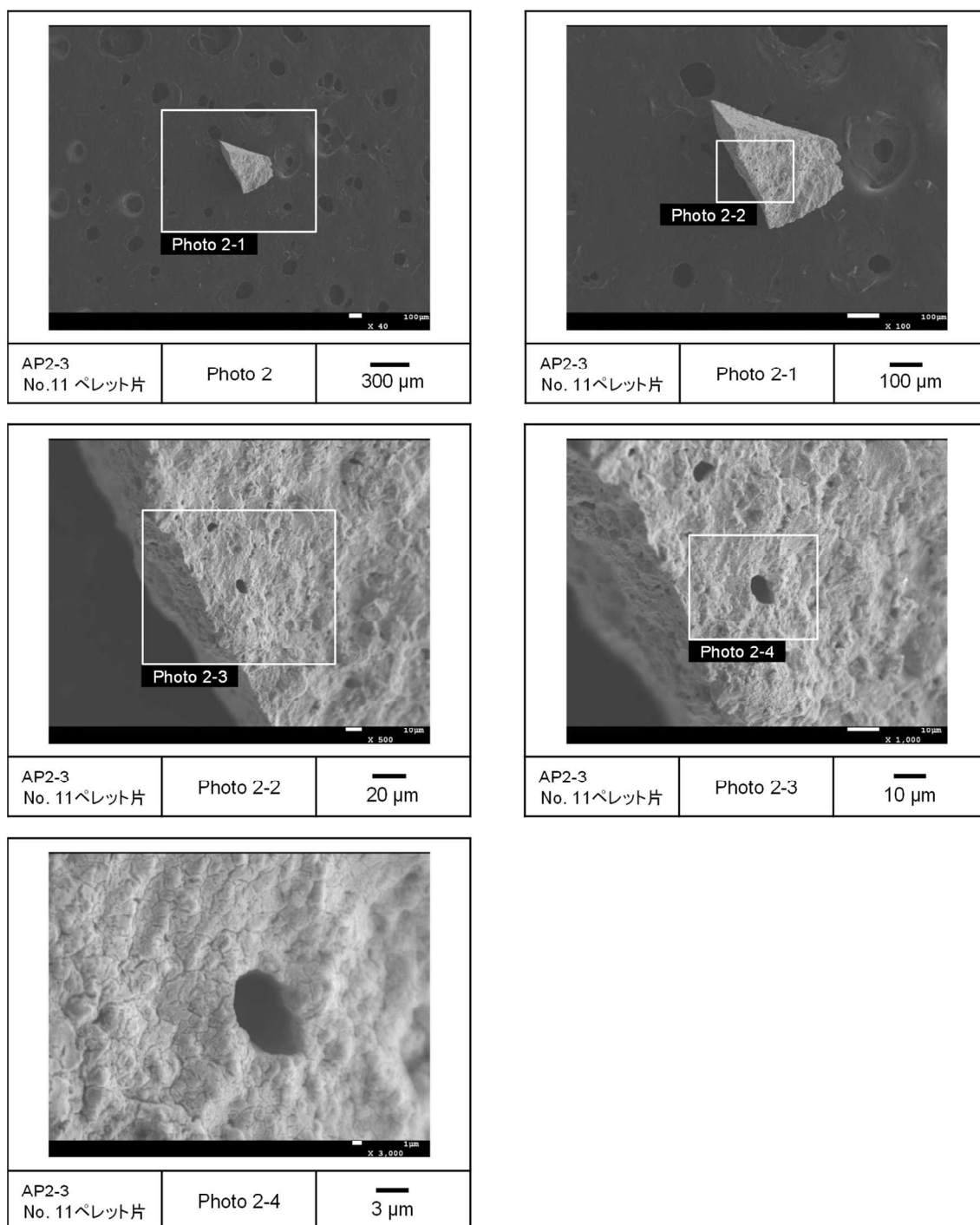


図 4.3.2-9(3) 到達温度 1273 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像 (AP2-3 セグメント燃料)



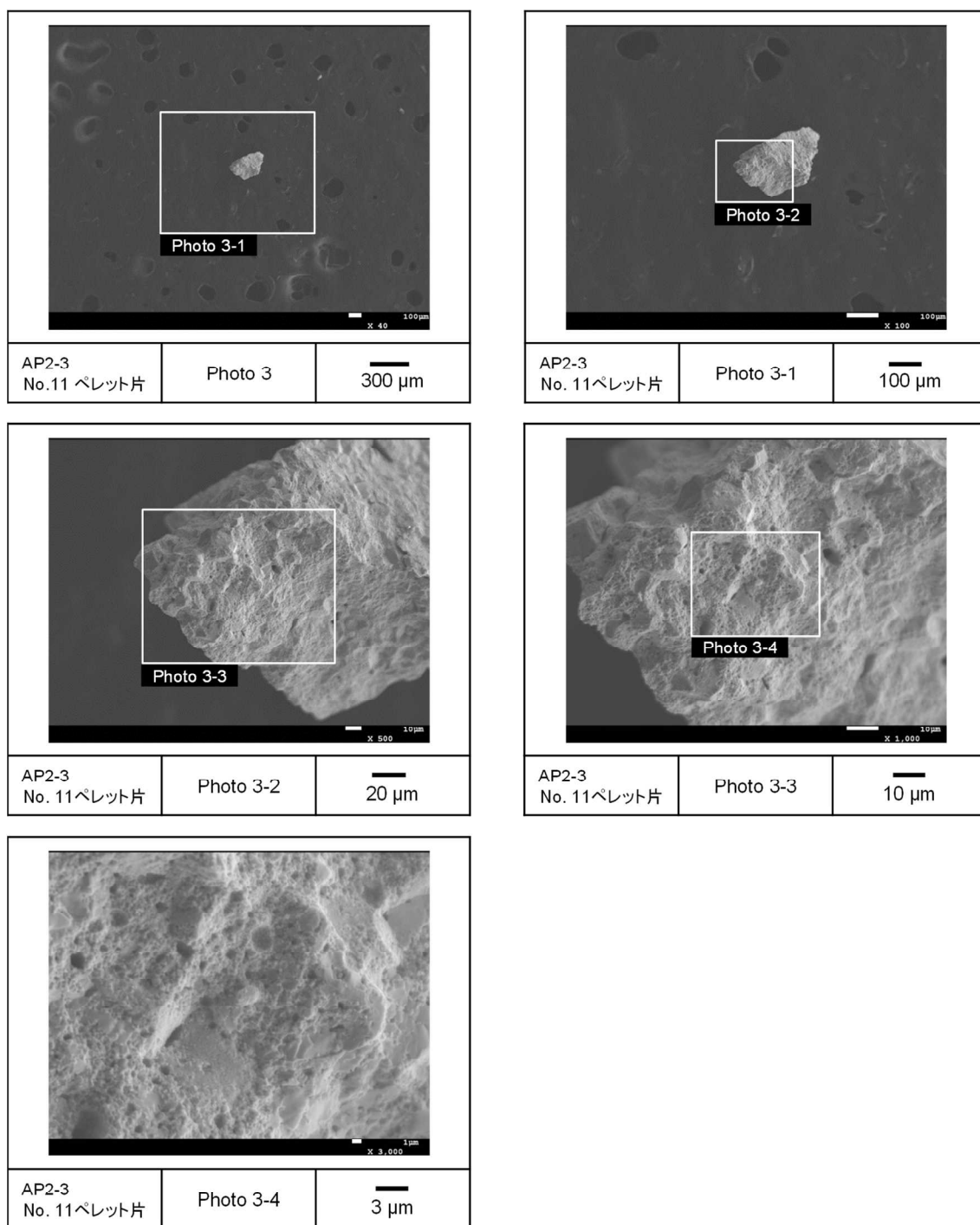


図 4.3.2-9(4) 到達温度 1273 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像 (AP2-3 セグメント燃料)

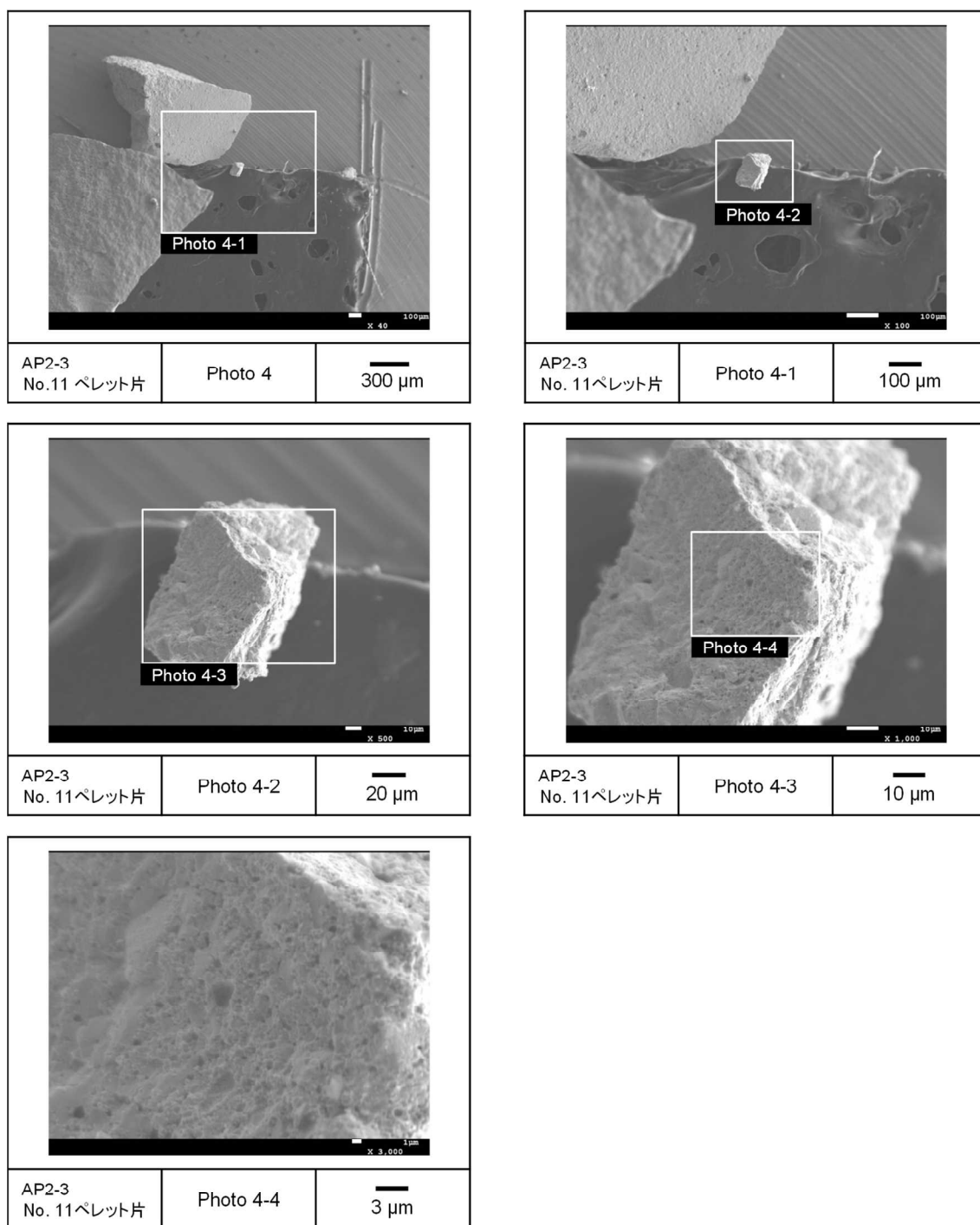


図 4.3.2-9(5) 到達温度 1273 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像 (AP2-3 セグメント燃料)

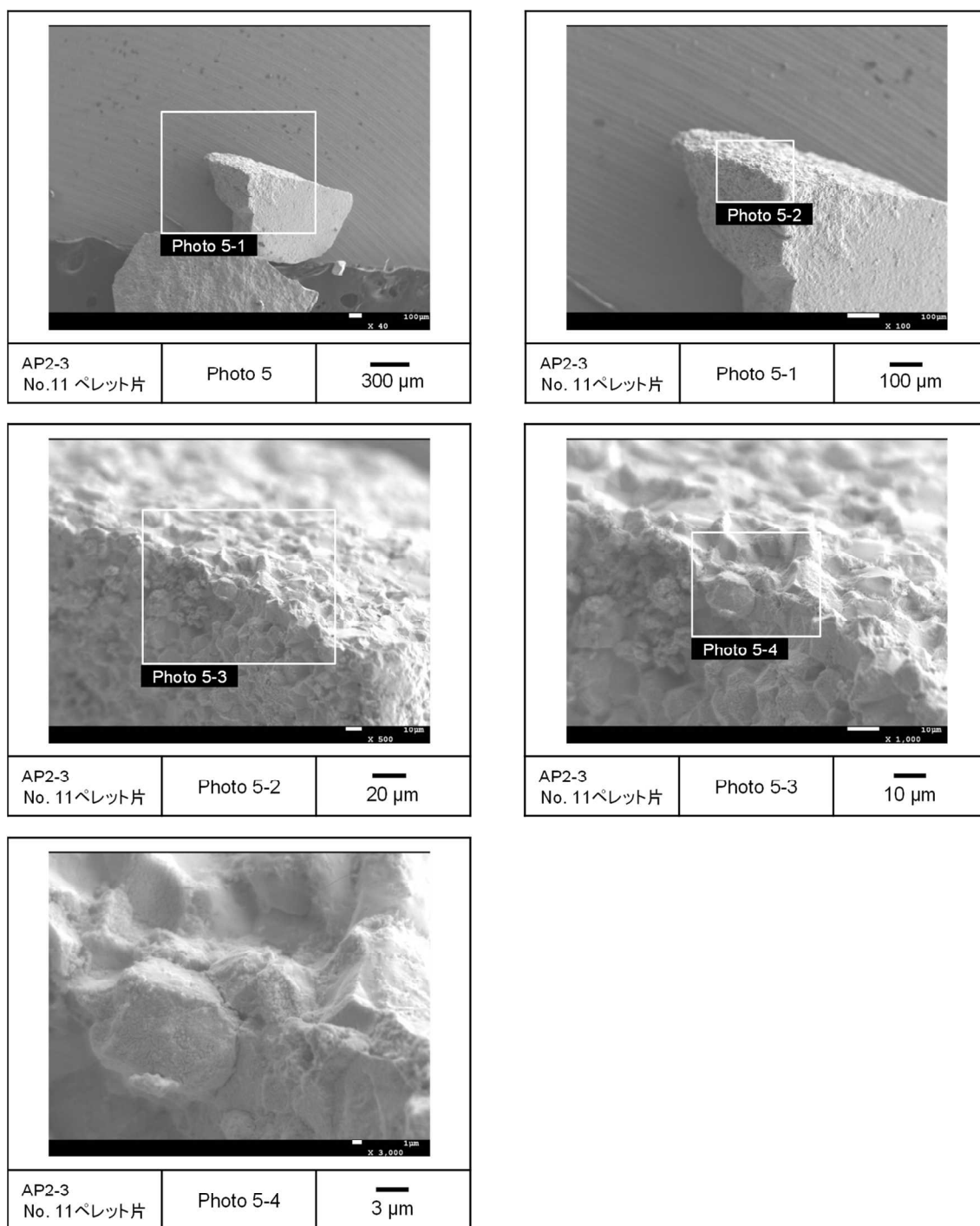


図 4.3.2-9(6) 到達温度 1273 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像 (AP2-3 セグメント燃料)

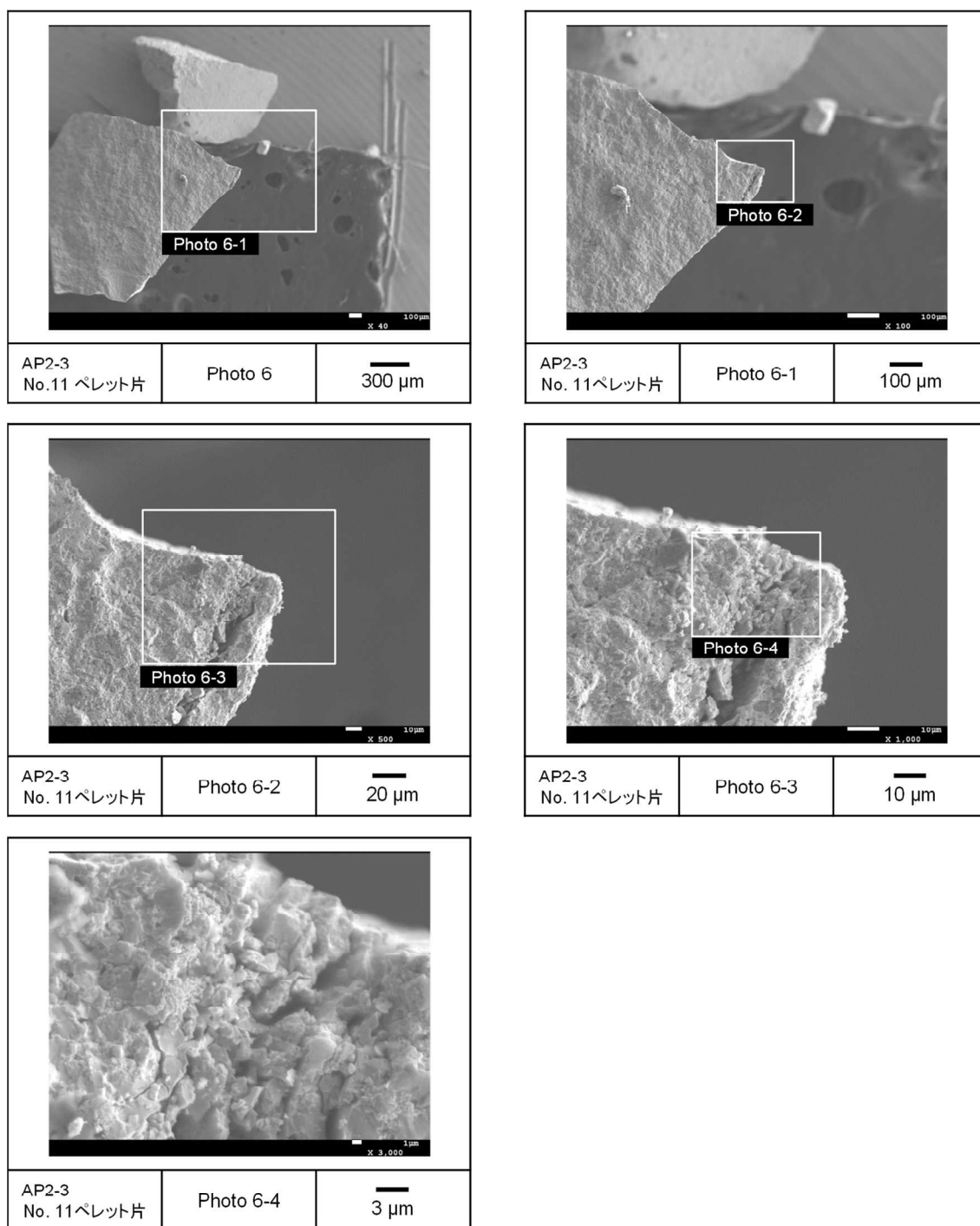


図 4.3.2-9(7) 到達温度 1273 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像 (AP2-3 セグメント燃料)

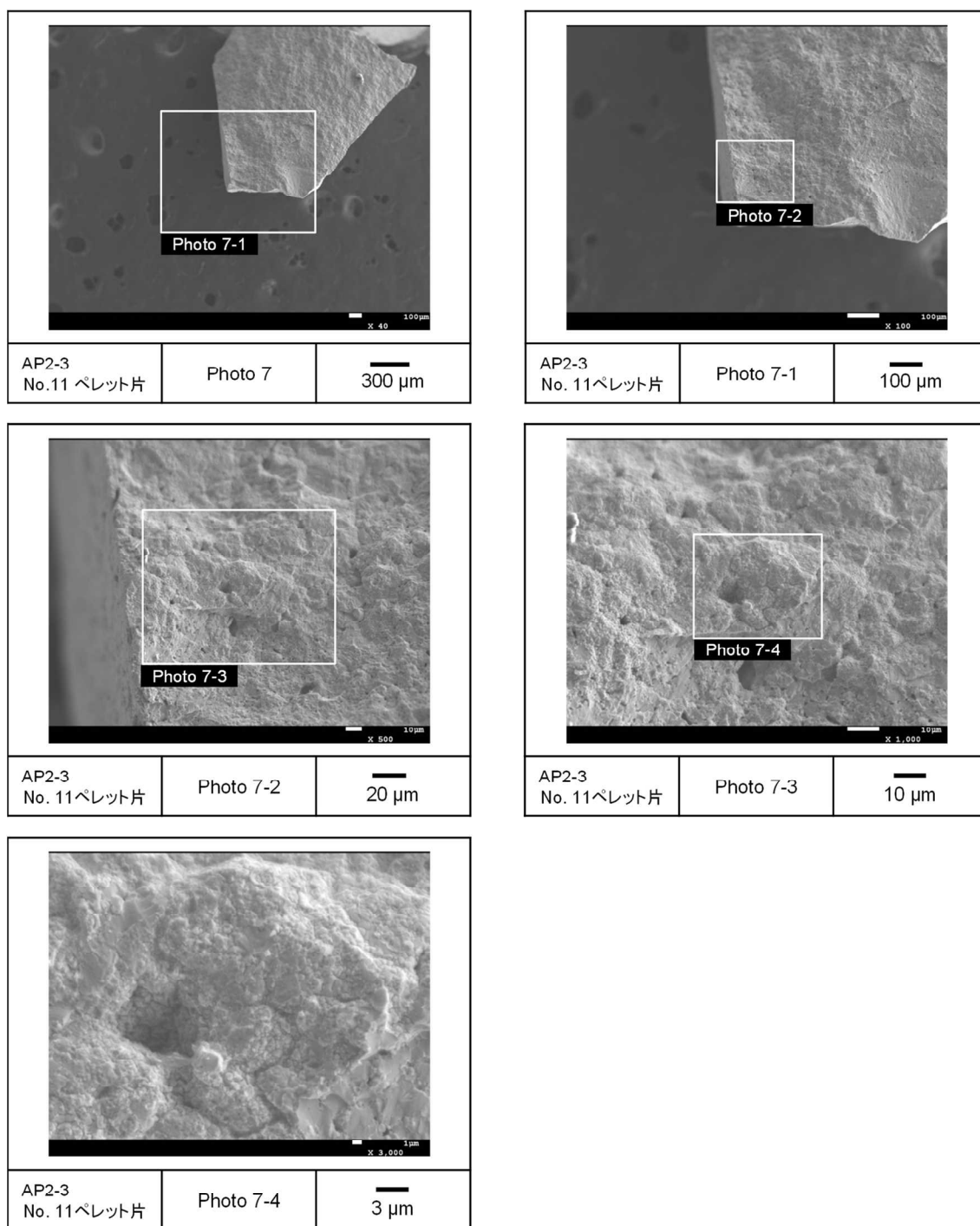
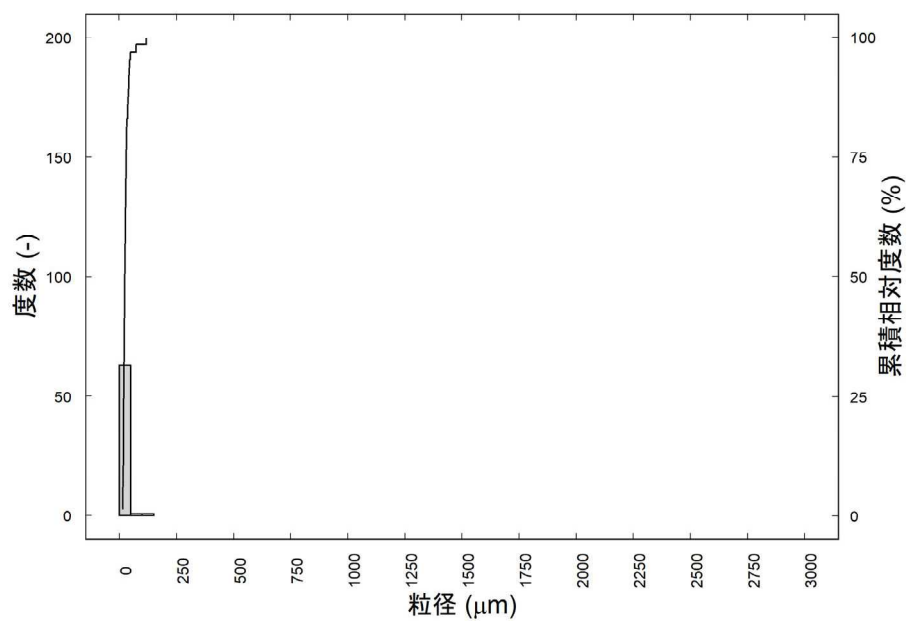
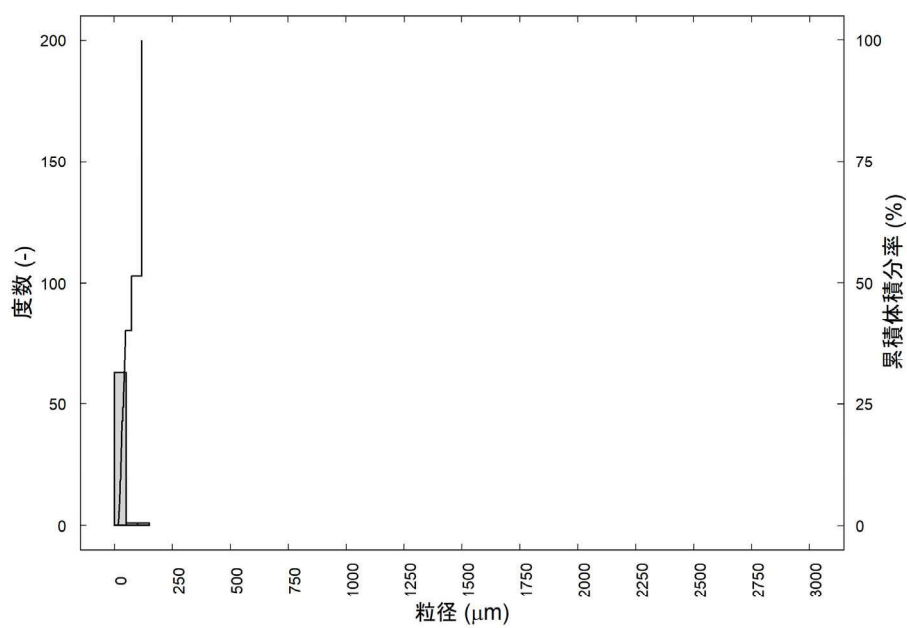


図 4.3.2-9(8) 到達温度 1273 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像 (AP2-3 セグメント燃料)

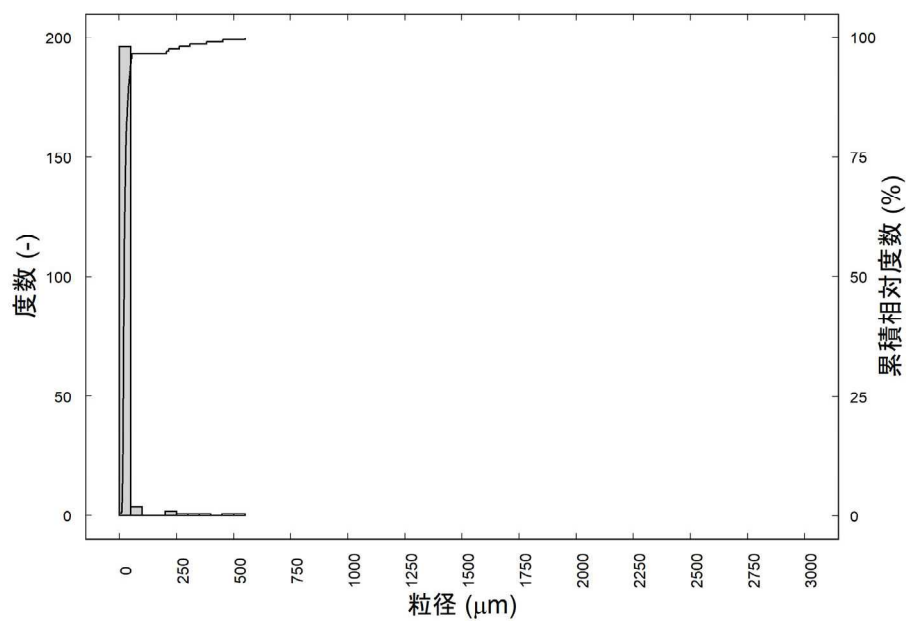


(a) 粒径分布と累積相対度数

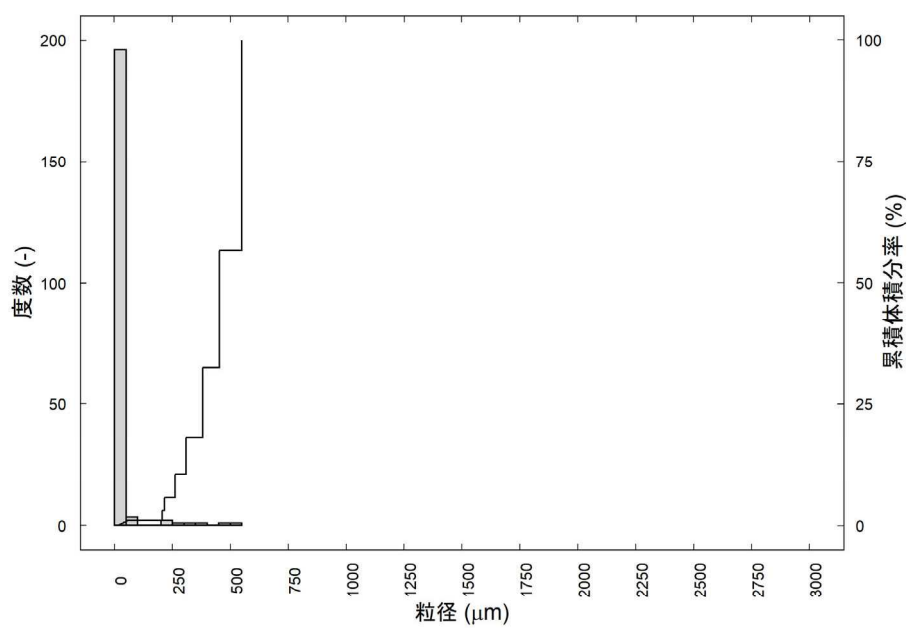


(b) 粒径分布と累積体積分率

図 4.3.2-10 到達温度 1073 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の粒径分布  
(AP2-3 セグメント燃料)

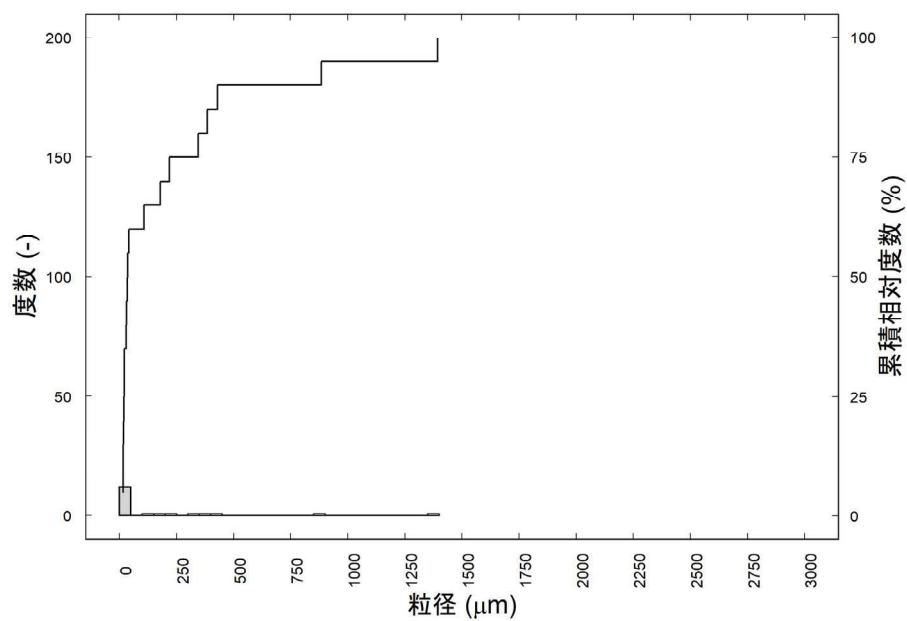


(a) 粒径分布と累積相対度数

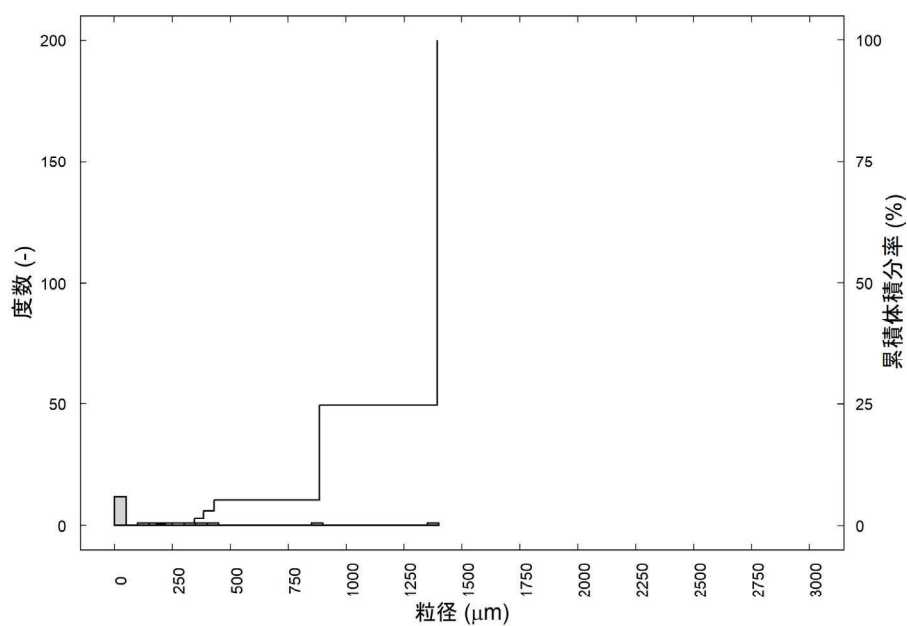


(b) 粒径分布と累積体積分率

図 4.3.2-11 到達温度 1173 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の粒径分布 (AP2-3 セグメント燃料)



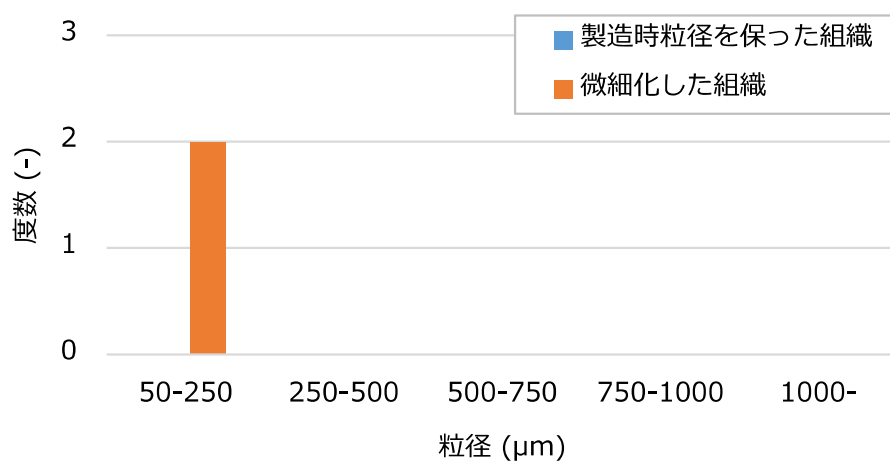
(a) 粒径分布と累積相対度数



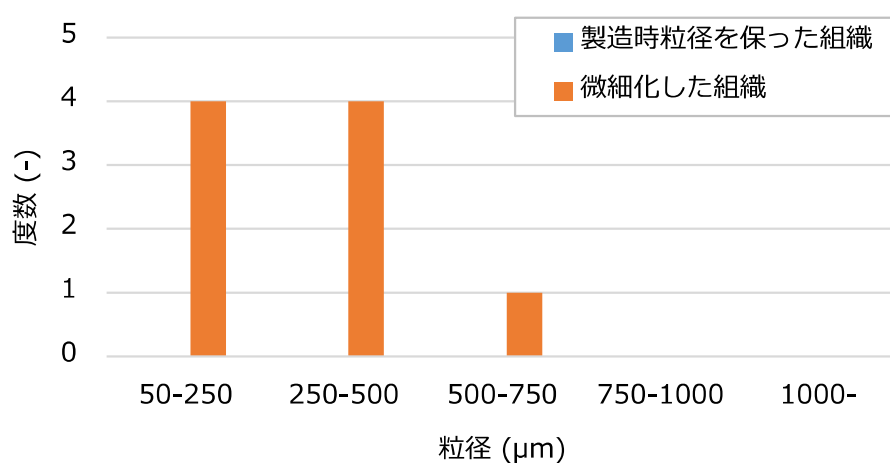
(b) 粒径分布と累積体積分率

図 4.3.2-12 到達温度 1273 K の加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の粒径分布 (AP2-3 セグメント燃料)

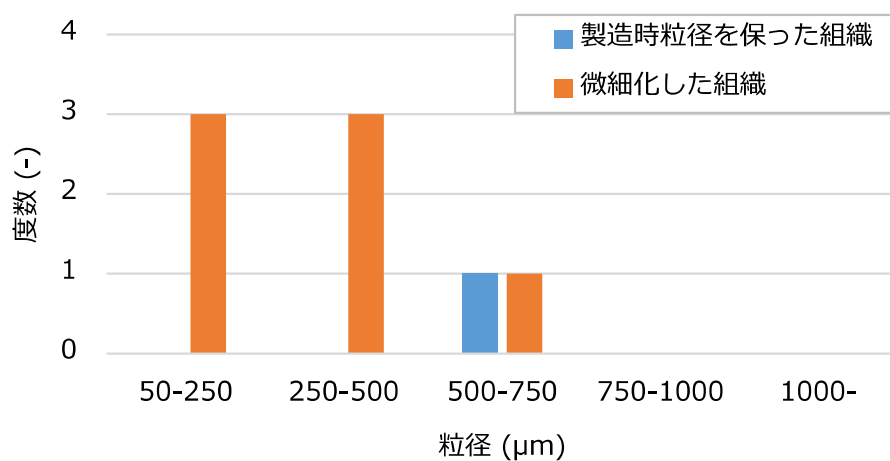




(a) 到達温度 1073 K の試験



(b) 到達温度 1173 K の試験



(c) 到達温度 1273 K の試験

図 4.3.2-13 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 11 の組織別粒径分布  
(AP2-3 セグメント燃料)

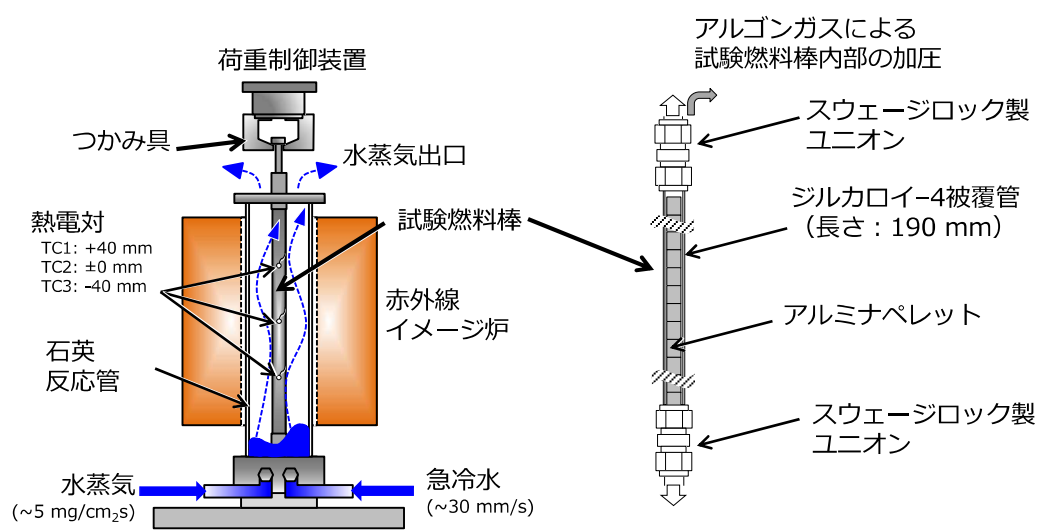


図 4.3.3-1 LOCA 模擬試験装置の概要

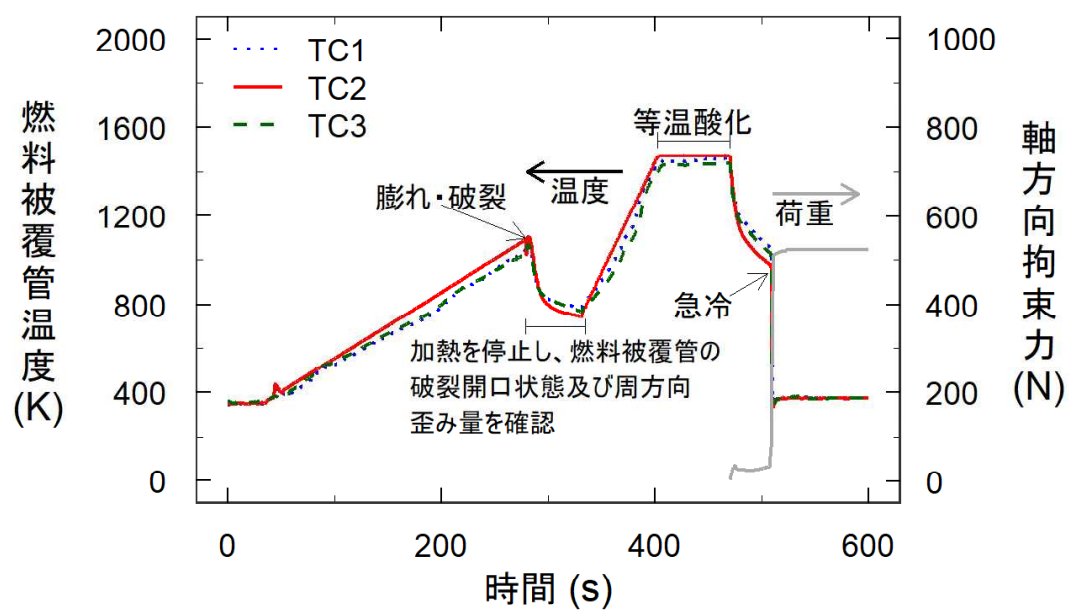
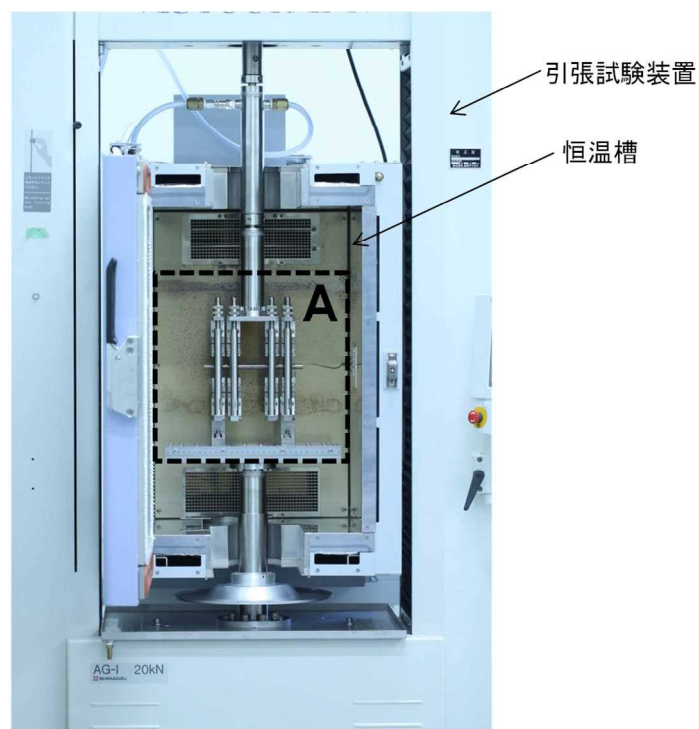


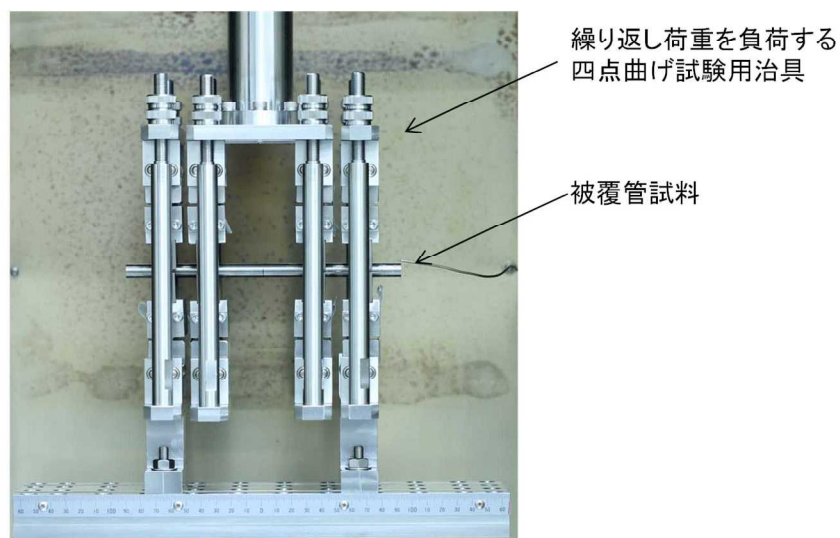
図 4.3.3-2 LOCA 模擬急冷破断試験時の燃料被覆管温度・荷重履歴の例



図 4.3.3-3 LOCA 模擬急冷破断試験後の試料外観の例



(a) 装置全体



(b) A 部拡大

図 4.3.3-4 繰り返し荷重を負荷する四点曲げ試験装置の外観



図 4.3.3-5 繰り返し荷重を負荷する四点曲げ試験装置に装荷した試料の外観

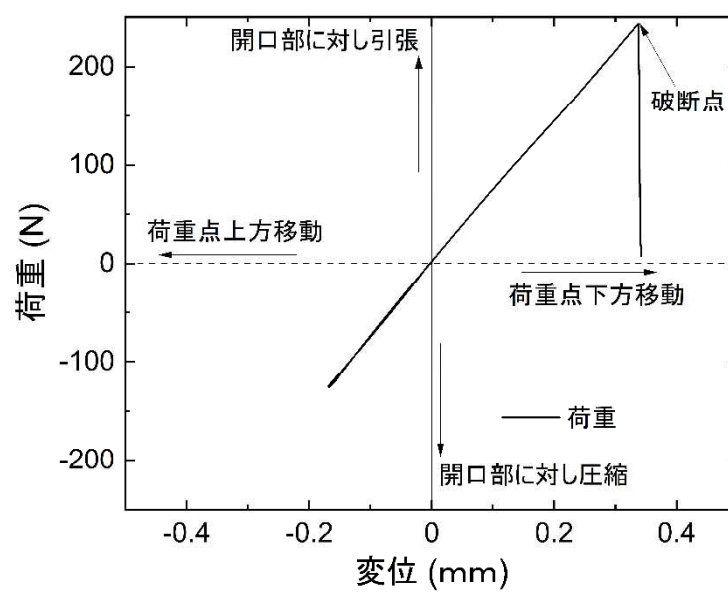


図 4.3.3-6 荷重-変位曲線の例

(荷重点を鉛直方向上向きに変位させた際の変位及び荷重を負に、荷重点を鉛直方向下向きの変位させた際の変位及び荷重を正とした。)



図 4.3.3-7 繰り返し荷重を荷重する四点曲げ試験後の試料外観



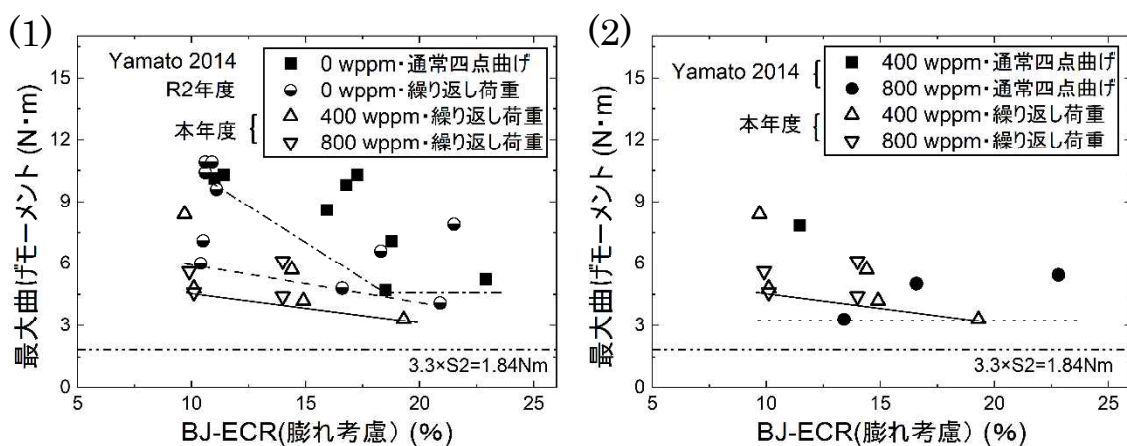


図 4.3.3-8 最大曲げモーメントと酸化量の関係（等温酸化温度：～1473 K）

((1) 水素添加しない非照射ジルカロイ-4 被覆管との比較。(2) 水素添加ジルカロイ-4 被覆管との比較。各条件で得られた最大曲げモーメントの下限値のトレンドを以下の通り線で表現する。実線：水素添加材・繰り返し荷重負荷四点曲げ試験；点線：水素添加材・通常四点曲げ試験<sup>(5)</sup>；破線：水素添加なし・繰り返し荷重負荷四点曲げ試験；一点鎖線：水素添加なし・通常四点曲げ試験。)

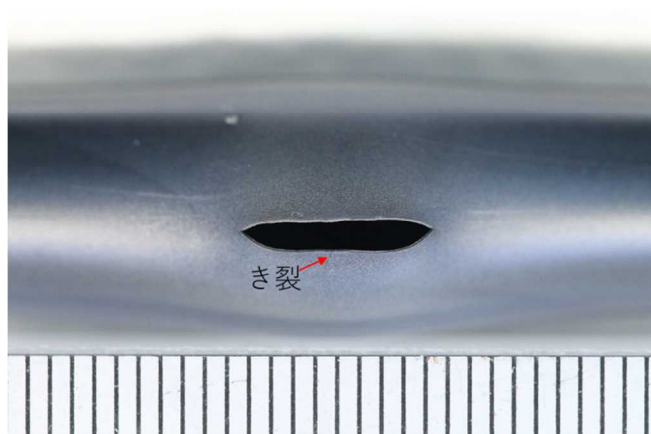


図 4.3.3-9 ECR 目標値を 20%に設定し急冷時にき裂が形成された試料の開口部拡大写真 (例)。

#### 4.4 RIA 試験

RIA 時の燃料挙動、破損限界及び破損形態についてデータを取得するため、非照射燃料を対象とした 2 回の RIA 模擬試験 (358-7 実験及び 224-2 実験) を NSRR において実施した。また、CN-1 実験及び LS-5 実験に関して、パルス照射後の試験燃料棒を対象とした照射後試験を実施した。

さらに、RIA 時に被覆管に作用する荷重の多軸性が高燃焼度燃料の破損挙動に及ぼす影響を明らかにするため、周方向と軸方向の応力を独立に与えることができる多軸応力負荷試験装置を用いた被覆管機械特性試験を実施した。

##### 4.4.1 358-7 実験

非照射の水素化物再配向被覆燃料を対象とした室温実験 358-7 を令和 3 年 10 月 17 日に実施した。燃料エンタルピ増分のピーク値 755 J/g (180 cal/g、暫定値) の実験条件に対し、燃料が破損した。

###### (1) 試験燃料棒

試験燃料は、水素化物を径方向へ配向させた被覆管及び濃縮度 4.8% のペレットで構成される。図 4.4.1-1 に上下端栓取付け後の燃料棒概略を示す。端栓はフェルルールを用いた継手により接続した。試験燃料棒内には室温で約 0.3 MPa の He を封入した。パルス照射前の試験燃料棒に対して実施した外観観察の結果を図 4.4.1-2 に示す。スタック長はペレット 5 個分で、約 56 mm である。外観写真ではパルス照射実験において問題となり得る傷、欠陥、特異部などは見られなかった。被覆管水素吸収量については、供試被覆管の分析結果に基づき約 200 wtppm と評価した。図 4.4.1-3 に試験燃料試料近傍の被覆管断面金相を示す。応力除去焼鈍被覆管に通常は周方向に水素化物が析出するが、内圧をかけた状態で熱処理し、水素化物を径方向に配向させたことより、周だけでなく径方向に配向した水素化物が観察される。寸法測定によると外径は約 9.58 mm であり、水素化物の径方向配向によりやや膨れたことを示している。

###### (2) 実験条件および計装

パルス照射実験の条件を以下に示す。反応度は、PCMI 破損を発生させるのに十分な歪みを発生させる条件で、かつ被覆管表面への厚い酸化膜の形成されない条件としてピーク燃料エンタルピが 750 J/g 程度になるように決定した。この条件は RANNS 解析によると被覆管周全ひずみを 1-1.3% 程度発生させる条件である。また、被覆管表面に貼り付けた歪みゲージで測定した被覆管の歪みの妥当性検証のためには被覆管の歪みを断面金相から評価すること、またその際には被覆管表面への厚い酸化膜の形成は回避することが望ましい。そこで、ピーク燃料エンタルピ設定においては、沸騰遷移が予想されるものの、高温酸化

に起因する厚い酸化膜が被覆管表面に形成されるには至らない条件とした。

実験カプセル：	I-S 型（未照射燃料用）
パルス照射時冷却水条件：	19°C、0.1 MPa の静止水
投入反応度：	\$3.32
燃料エンタルピー増分ピーク値（暫定値）：	755 J/g（180 cal/g）

計装項目を以下に示す。また、図 4.4.1-4 に計装取付けの概要を示す。

カプセル内圧計（液相）  
 燃料棒内圧計  
 AE センサ 2 個（燃料破損検出用）  
 クラッド歪みゲージ（スタック中央部: #1（周方向）, #2（軸方向）スタック部: #3（周方向）, #4（軸方向））  
 冷却水温度測定用シース熱電対  
 被覆管伸び計

### (3) 過渡計測記録の概要

2 台の中性子検出器で測定した NSRR の炉出力履歴を図 4.4.1-5(1)及び(2)、積分出力履歴を図 4.4.1-5(3)及び(4)に、前節で示した計測項目に関する過渡記録を図 4.4.1-5(5)から(14)に、時刻 0 から 10 秒まで、0 から 1 秒まで及び 0.25 から 0.35 秒までの 3 区間についてそれぞれ示す。

過去に実施した NSRR 実験より、歪みゲージを使用したセンサ（圧力計等）や熱電対の出力には NSRR 出力の履歴によく似た波形のノイズや、パルス照射以後も継続するドリフトが発生し得ることが判明している。このノイズ及びドリフトの要因は、出力にほぼ比例した強度で発生するガンマ線が歪みゲージ素子や熱電対素子の電気的特性に与える影響、ガンマ発熱による素子自身の温度上昇による特性変化などと理解されるが、精度良く補正することは困難であるため本報告においては得られた過渡計測結果をそのまま示す。

### (a) NSRR 出力・積分出力

図 4.4.1-5 (1), (2)及び(3), (4)に NSRR 出力履歴及び積分出力履歴をそれぞれ示す。NSRR 出力は時刻 0.2790 秒においてピーク値約 8.6 GW に達し、半値幅は約 6.4 ms であった。なお、NSRR の計測システムは積分演算を 1 秒までしか行わないため、時刻 1 秒以降の積分出力は一定値として記録される。炉物理計算による評価によれば、本実験における積分出力は時刻無限大で 76.9 MJ に達した。NSRR の出力ピーク値及び時刻無限大における積分出力は、#1 と #2 の平均値を用いて算出した。

**(b) カプセル内圧**

図 4.4.1-5 (5)に、カプセルの液相部で計測した圧力の履歴を示す。時刻 0.27 秒過ぎから圧力の増加が見られるが、これは NSRR 出力パルスに同期したノイズである。燃料破損時にはスパイク状の圧力波が観測されるが、本データには明確な信号の変化は検出されなかった。

**(c) 燃料棒内圧**

図 4.4.1-5 (6)に燃料棒内圧の履歴を示す。初期圧力は 0.3 MPa であるが、実験直前の調整においてゼロ調整を実施し、0MPa を示している。時刻 0.267 秒以降に圧力下降及び上昇が見られるが、これは NSRR パルス出力に同期したノイズと考えられる。時刻 0.28 秒付近で急激に圧力が減少し、0.3MPa 程度低下した。このような信号が見られるのは、カプセル内圧の項で記載したように燃料棒の破損が生じ、内部の圧力が減少したためと解釈される。また、被覆管に水素化物リムのある燃料棒を対象にした実験で燃料破損が生じた結果と比較して圧力は急激に減少しており、圧力の放出は比較的早かった可能性がある。

**(d) AE センサ出力**

図 4.4.1-5 (7)及び(8)に AE センサ#1 及び#2 の出力信号を示す。このセンサはカプセル構造材を伝わる音響波を計測するものであり、燃料破損の検出を目的として設置した。同種の型式のセンサを用い、いずれにおいても時刻 0.281 秒付近で振幅の増大が観測されており、燃料破損による音響波と解釈される。破損時刻をより高い時間分解能で読み取り、さらに、音響波の発生位置が燃料棒のペレットスタック中心と仮定して圧力センサ位置までの圧力波伝播時間を考慮し、破損時刻を 0.2807 秒と評価した。また、この時刻における燃料エンタルピー増分 527 J/g (126 cal/g、暫定値)を破損時燃料エンタルピー増分とした。

**(e) クラッド歪みゲージ**

図 4.4.1-5 (9)から(12)にスタック部中心部の被覆管表面 (軸方向 : #1、周方向 : #2) 及びスタック部中心から上部側へ 11mm 離れた位置の被覆管表面 (軸方向 : #3、周方向 : #4) に貼り付けたクラッド歪みゲージの履歴をそれぞれ示す。時刻 0.27 秒から信号の低下がみられるが、これは NSRR パルス出力に同期したノイズと考えられる。0.275 秒から信号の上昇がみられるが、これはペレットの熱膨張の被覆管への PCMI 荷重による被覆管に発生した歪みを検出していると考えられる。その後 0.281 秒付近で信号の急激な低下が確認された。これは、燃料の破損に伴いペレットから被覆管への PCMI 荷重が低下し、被覆管に生じた応力の低下により歪みが緩和したためと考えられ、上述した燃料破損との解釈と整合している。パルスノイズについては、その感受性における歪みゲージ毎の個体差、その感受性のカプセル内位置依存性が考えられるため、今後パルス照射に伴うノイズの除去方法

を確立し、データを評価する予定である。

(f) 冷却水温度

図 4.4.1-5 (13)に燃料スタック中心高さで測定した冷却水温度の履歴を示す。燃料棒からの距離は約 10 mm である。0.27 秒付近から急激に増加しているが、これはパルス照射によるノイズである。

(g) 被覆管伸び計

図 4.4.1-5 (14)に被覆管伸び計の出力信号を示す。時刻 0.28 秒付近から継続して増加している。これは、ペレットの熱膨張に伴う PCMI 荷重により被覆管が軸方向に伸びたことを示している。

(4) パルス照射後試験

実験後の燃料棒に対して以下の試験を実施した。

(a) 燃料棒外観観察

(a) 燃料棒外観観察

図 4.4.1-6 に、パルス照射後の燃料棒の外観写真を示す。燃料棒被覆管に縦割れが生じ、殆ど開口していないことが確認された。また、カプセル内にペレットは確認できなかったことから、ペレットの放出がほとんどなかったと考えられる。表面に付着物が付いているが、これはクラッド歪みゲージを接着する際に使用した接着剤である。

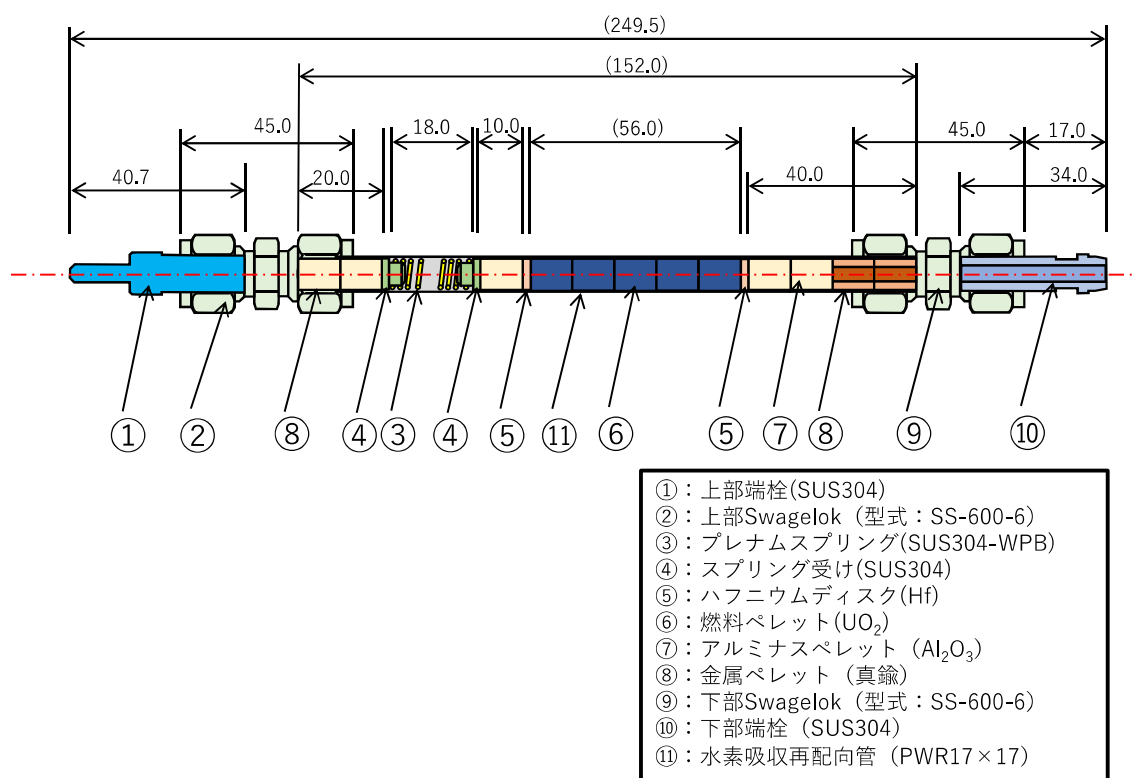


図 4.4.1-1 358-7 試験燃料棒の構造概略



図 4.4.1-2 358-7 試験燃料棒のパルス照射前外観写真

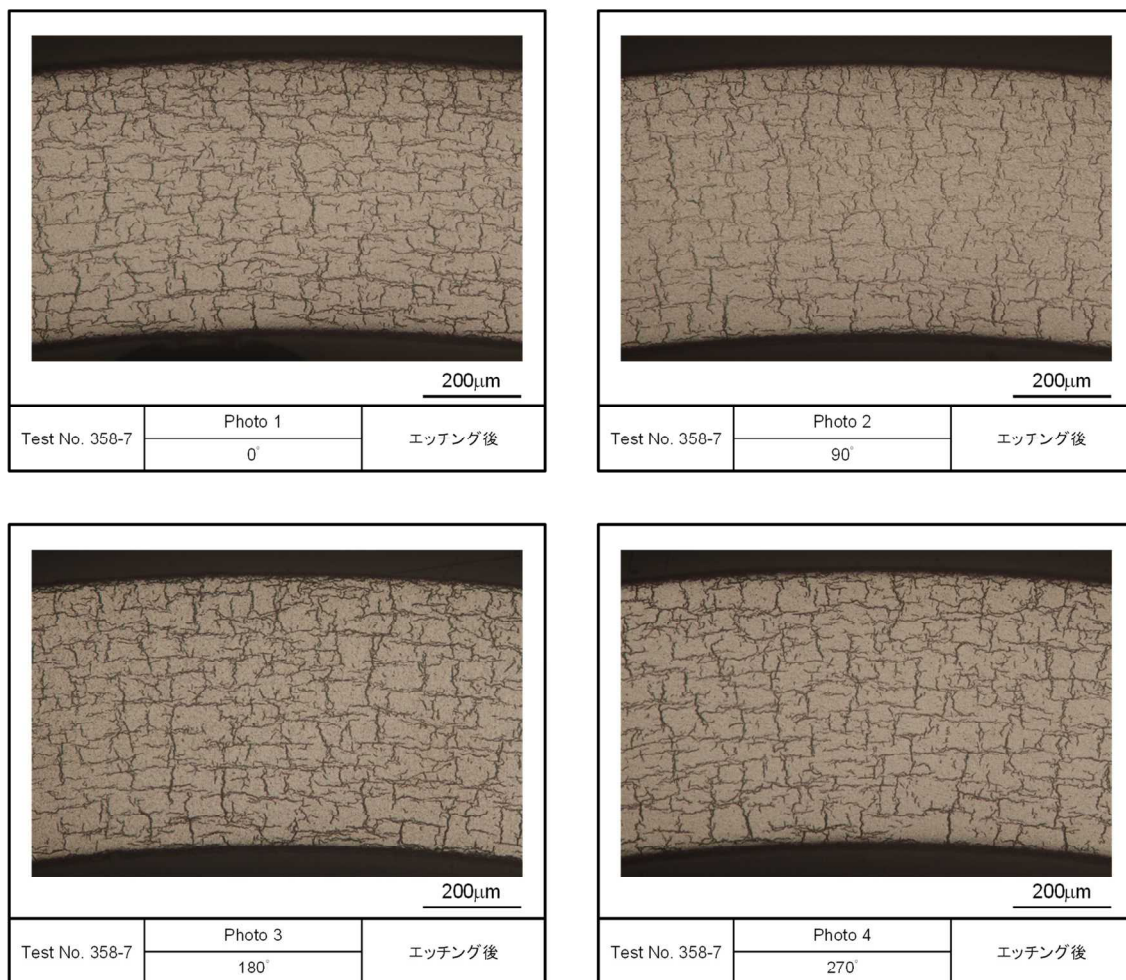


図 4.4.1-3 試験燃料被覆管試料近傍の被覆管断面金相



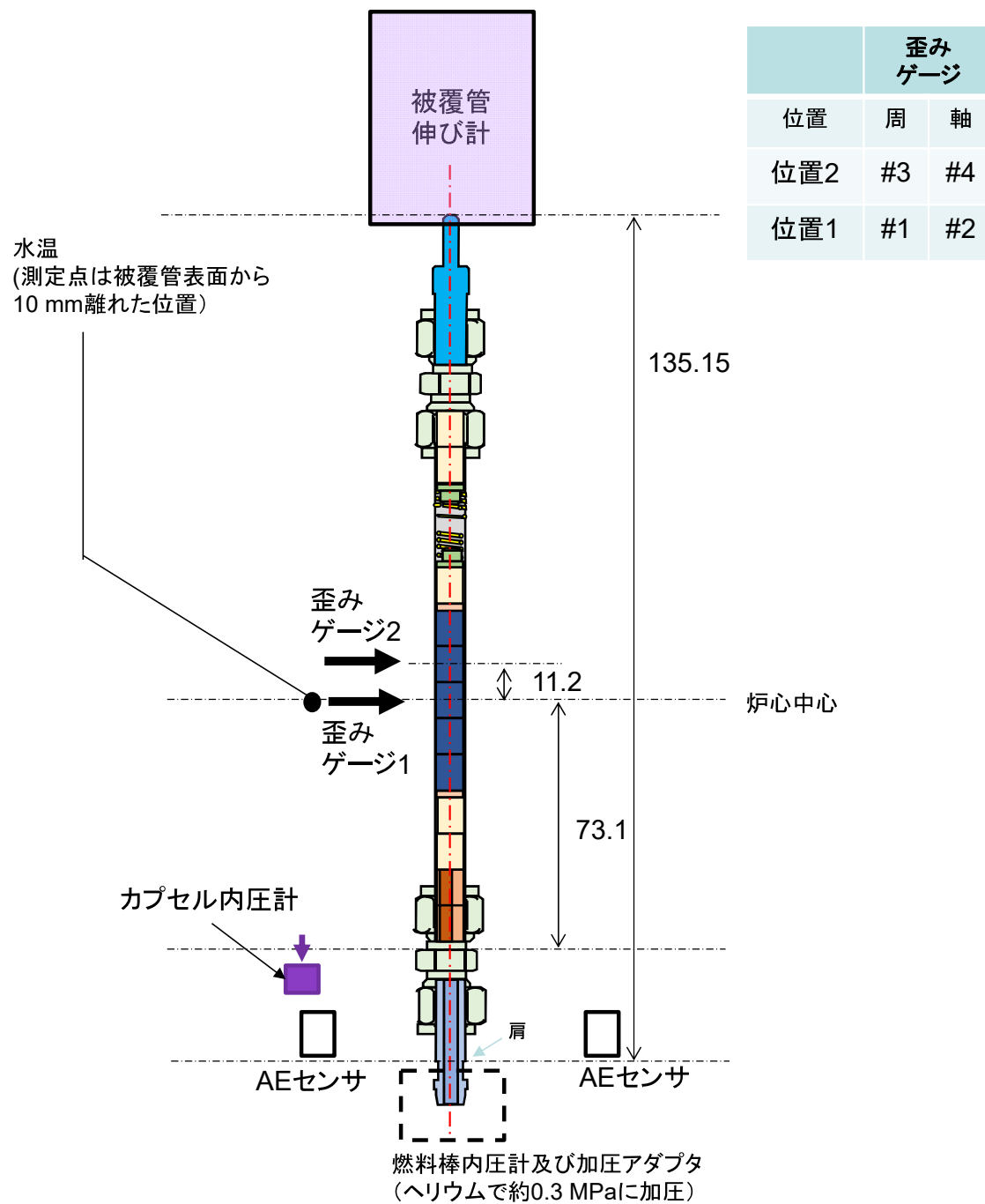


図 4.4.1-4 358-7 実験における計装取付けの概要

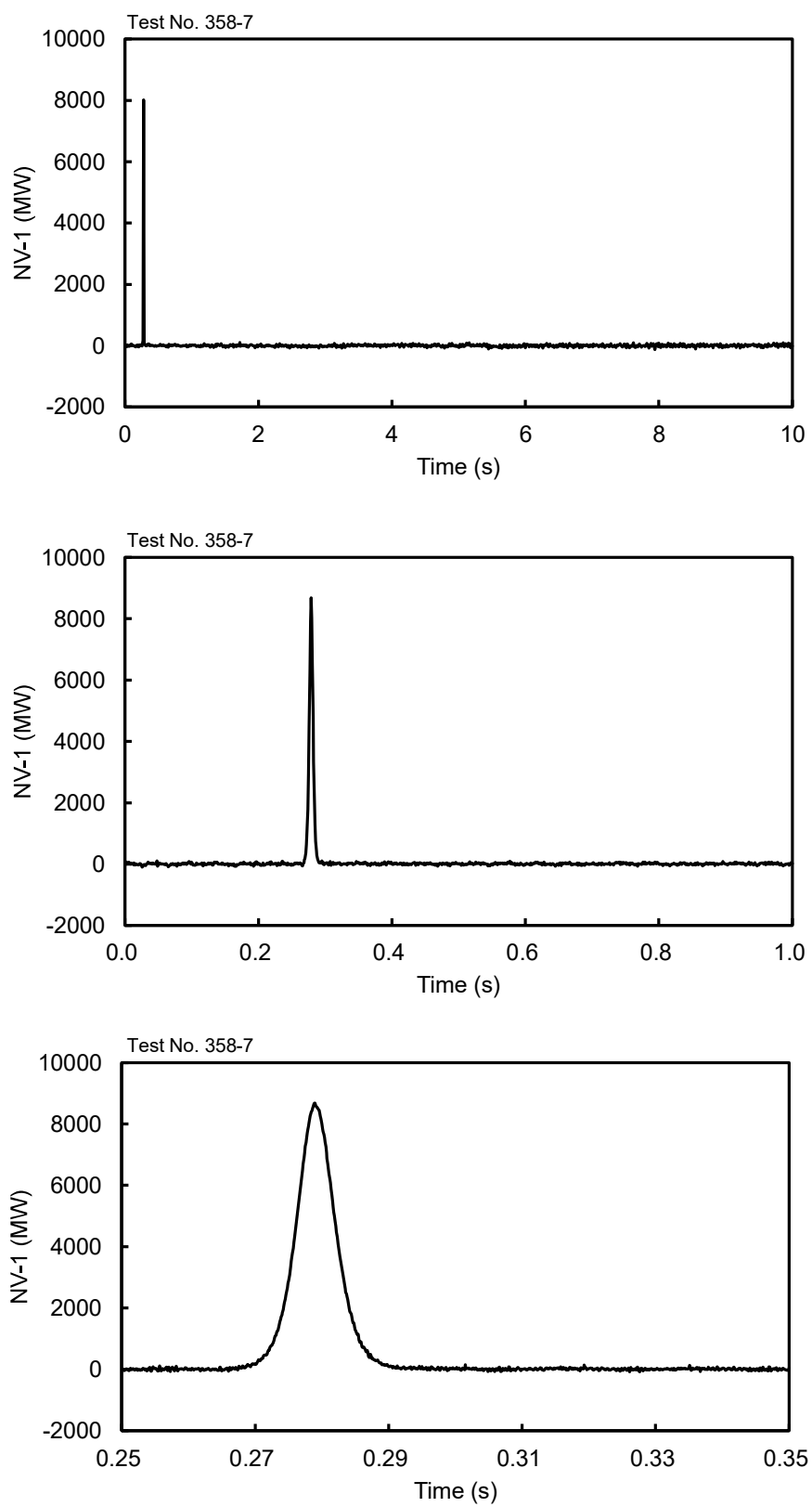


図 4.4.1-5 (1) 358-7 実験における原子炉出力履歴 (#1)

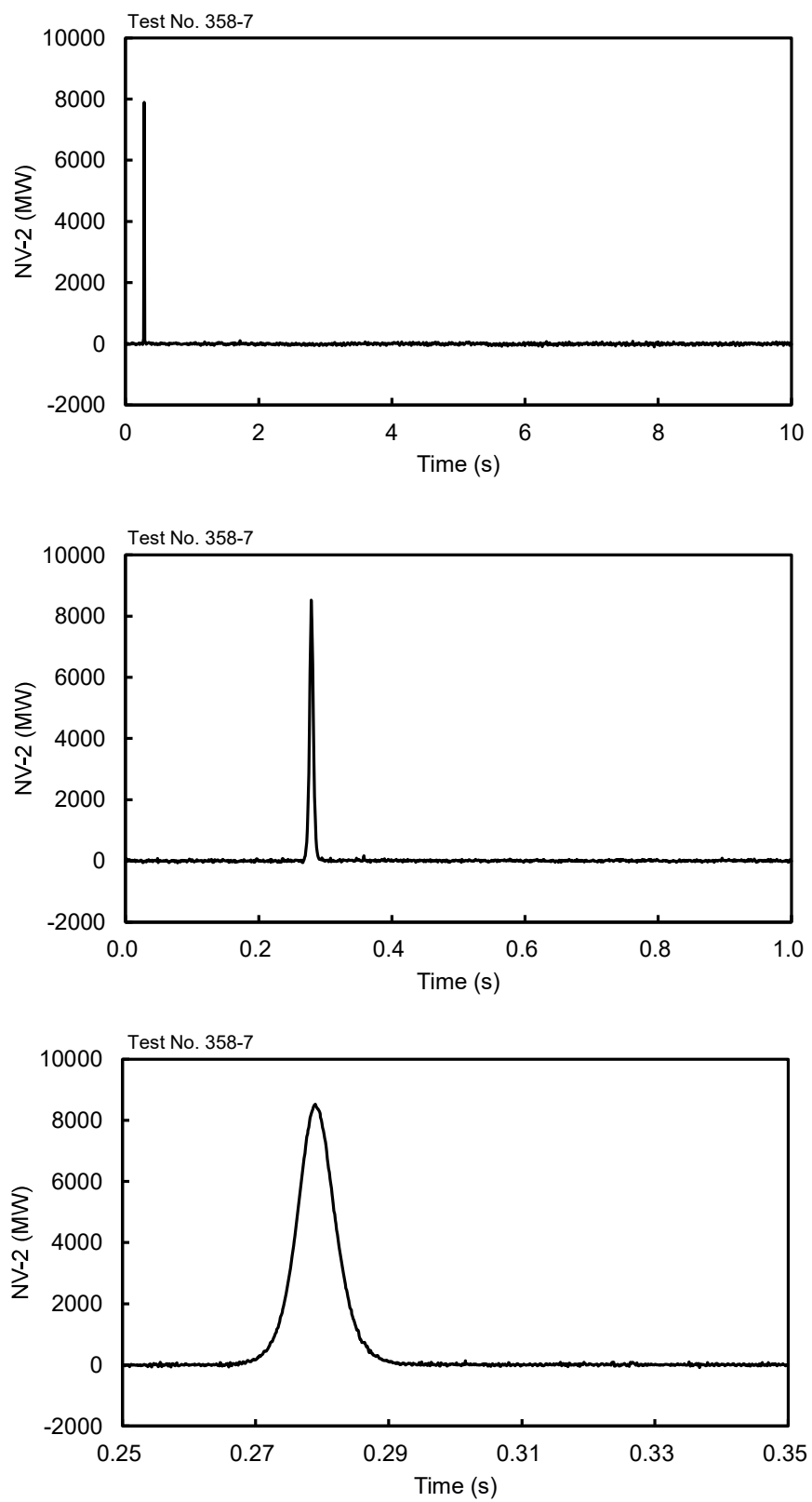


図 4.4.1-5 (2) 358-7 実験における原子炉出力履歴 (#2)

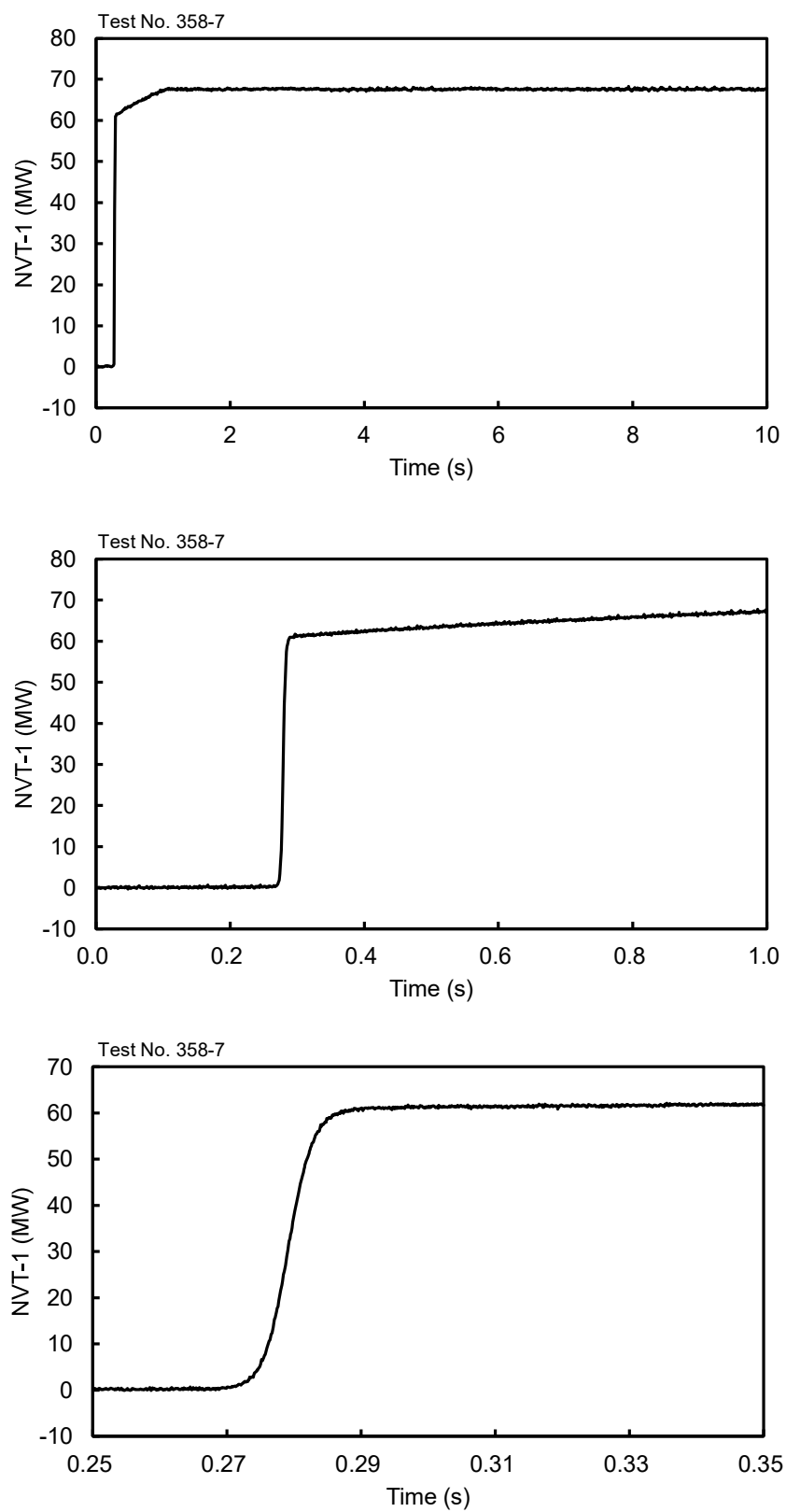


図 4.4.1-5 (3) 358-7 実験における原子炉積分出力 (#1)

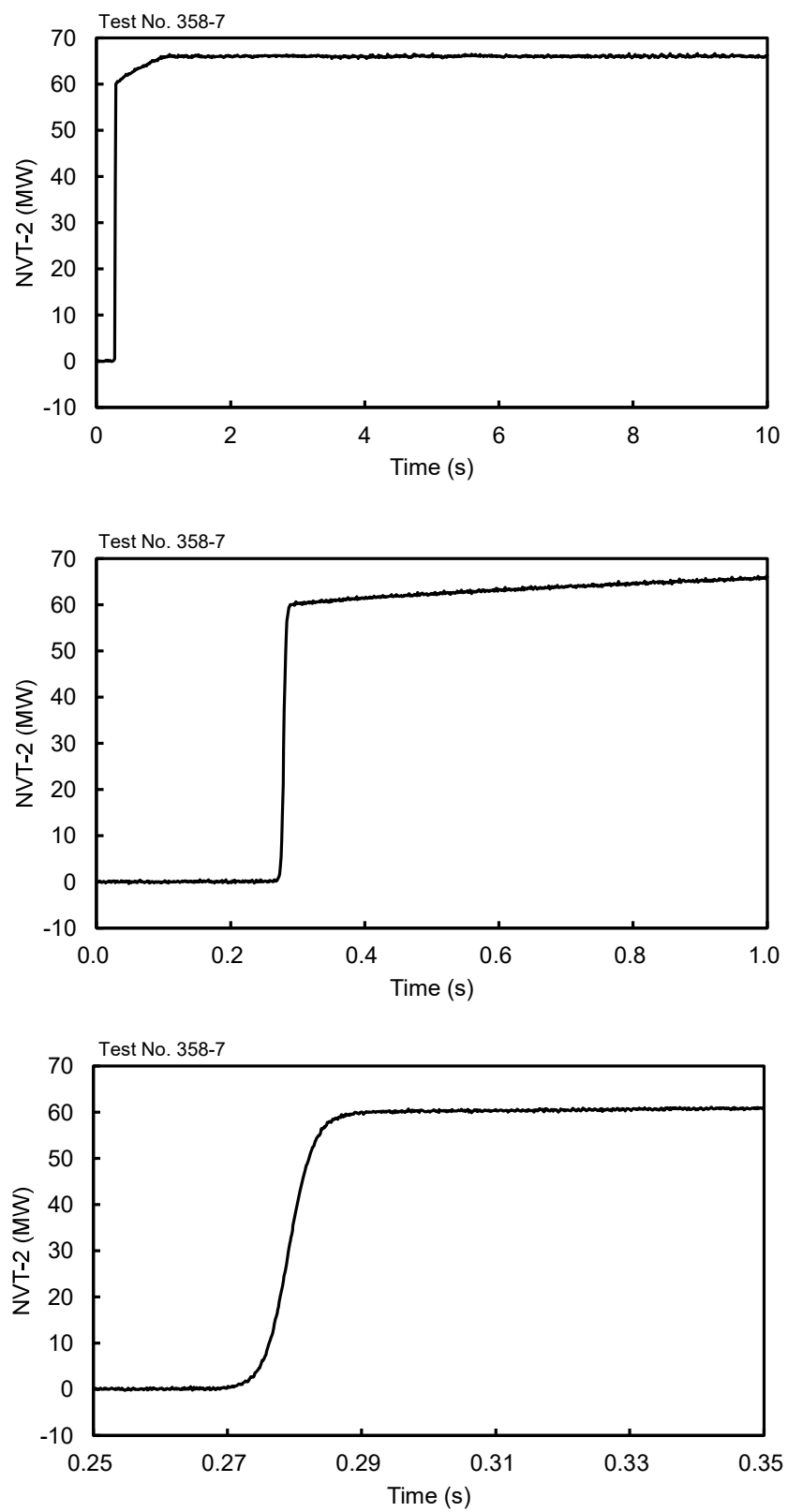


図 4.4.1-5 (4) 358-7 実験における原子炉積分出力 (#2)

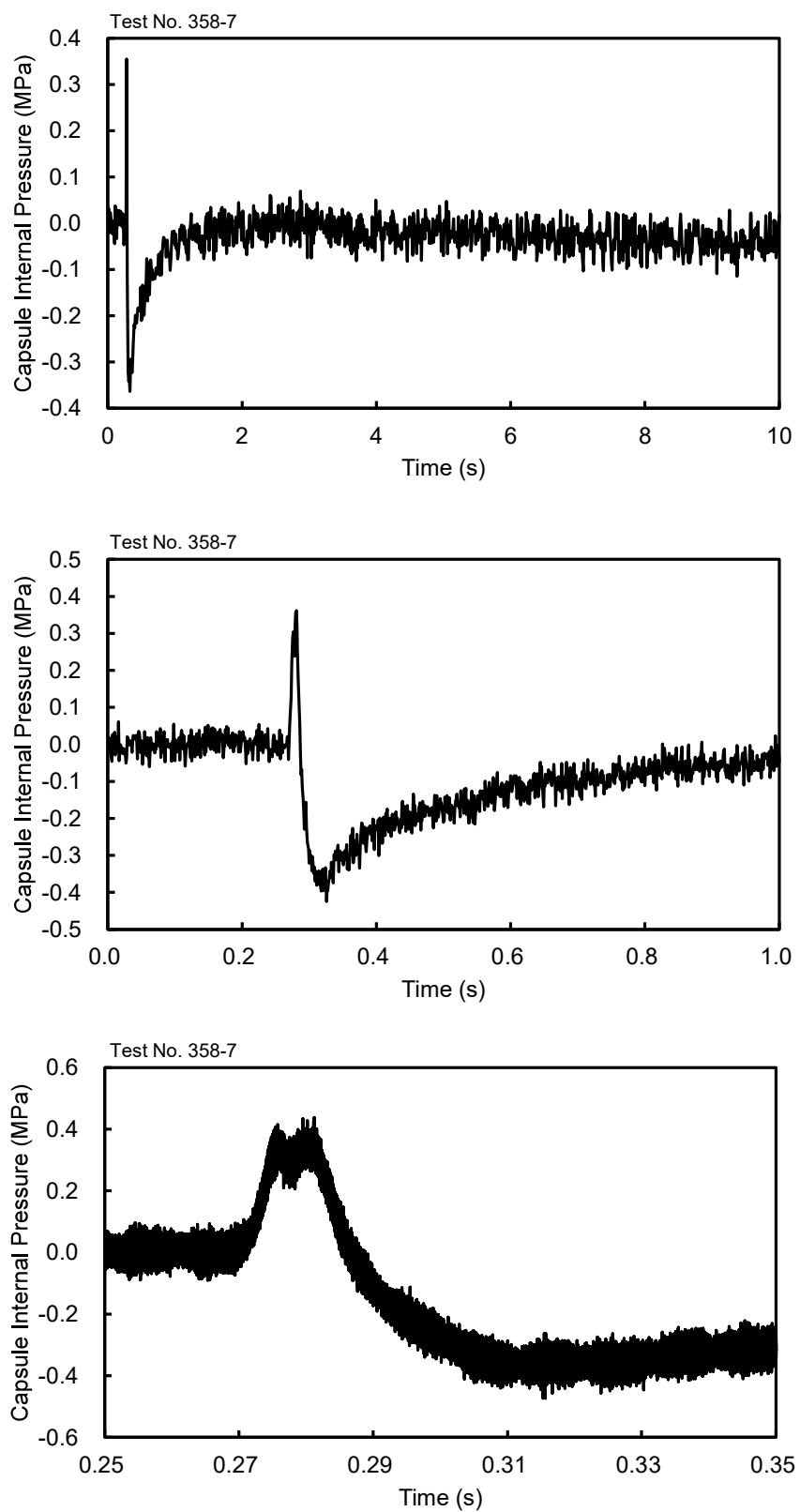


図 4.4.1-5 (5) 358-7 実験におけるカプセル内液相圧力履歴

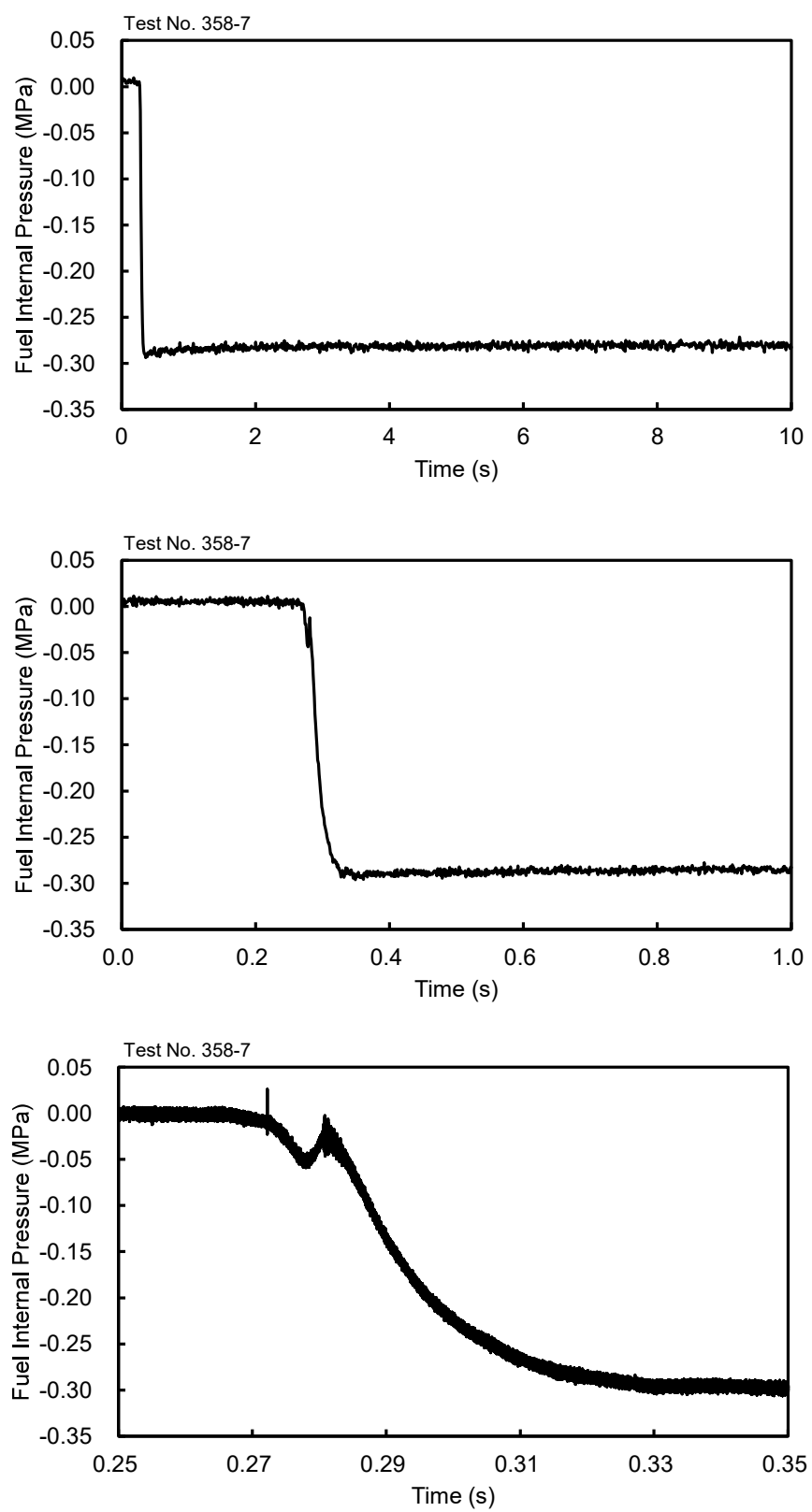


図 4.4.1-5 (6) 358-7 実験における燃料棒内圧履歴

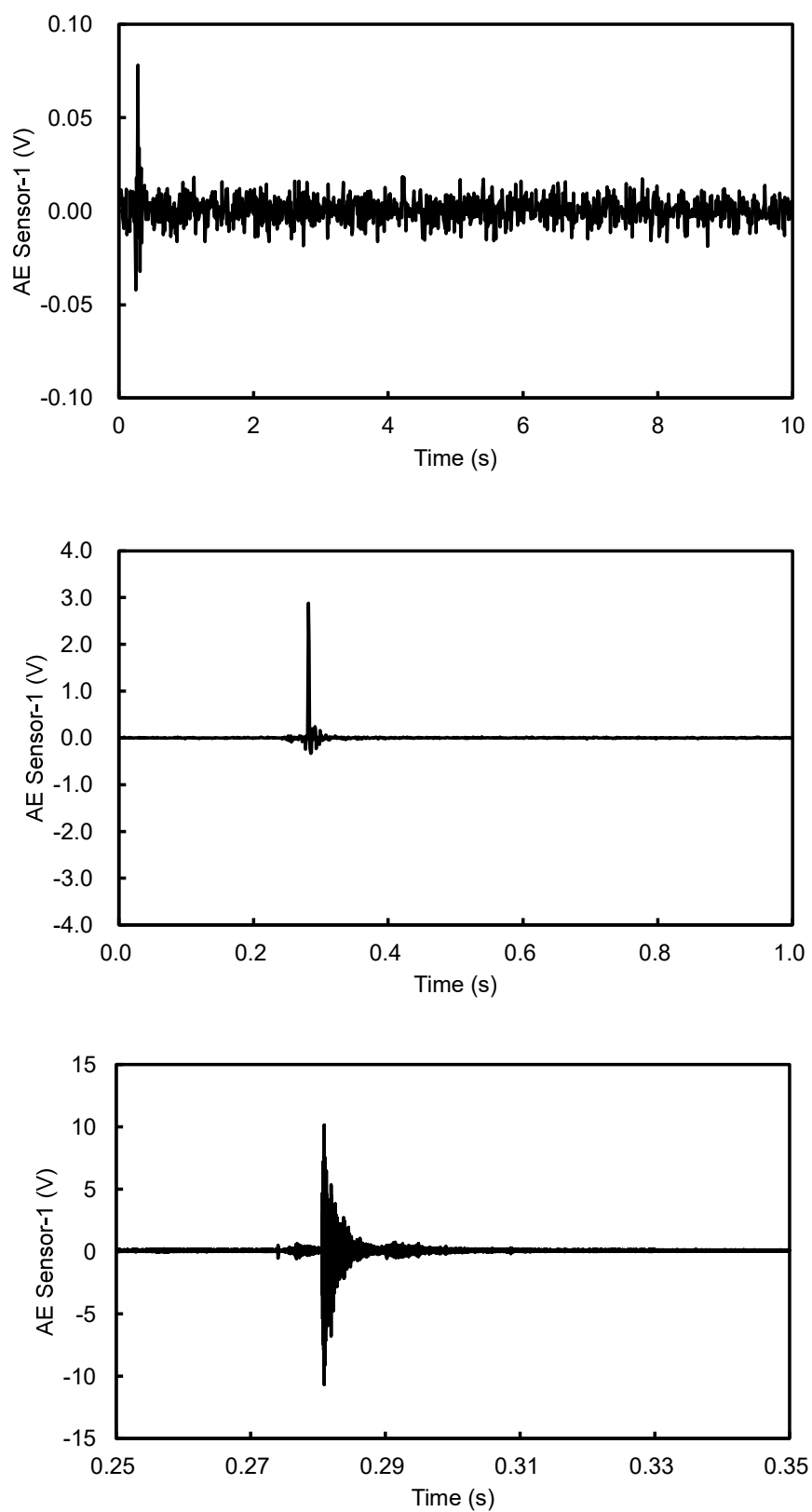


図 4.4.1-5 (7) 358-7 実験における AE センサ出力履歴 (#1)



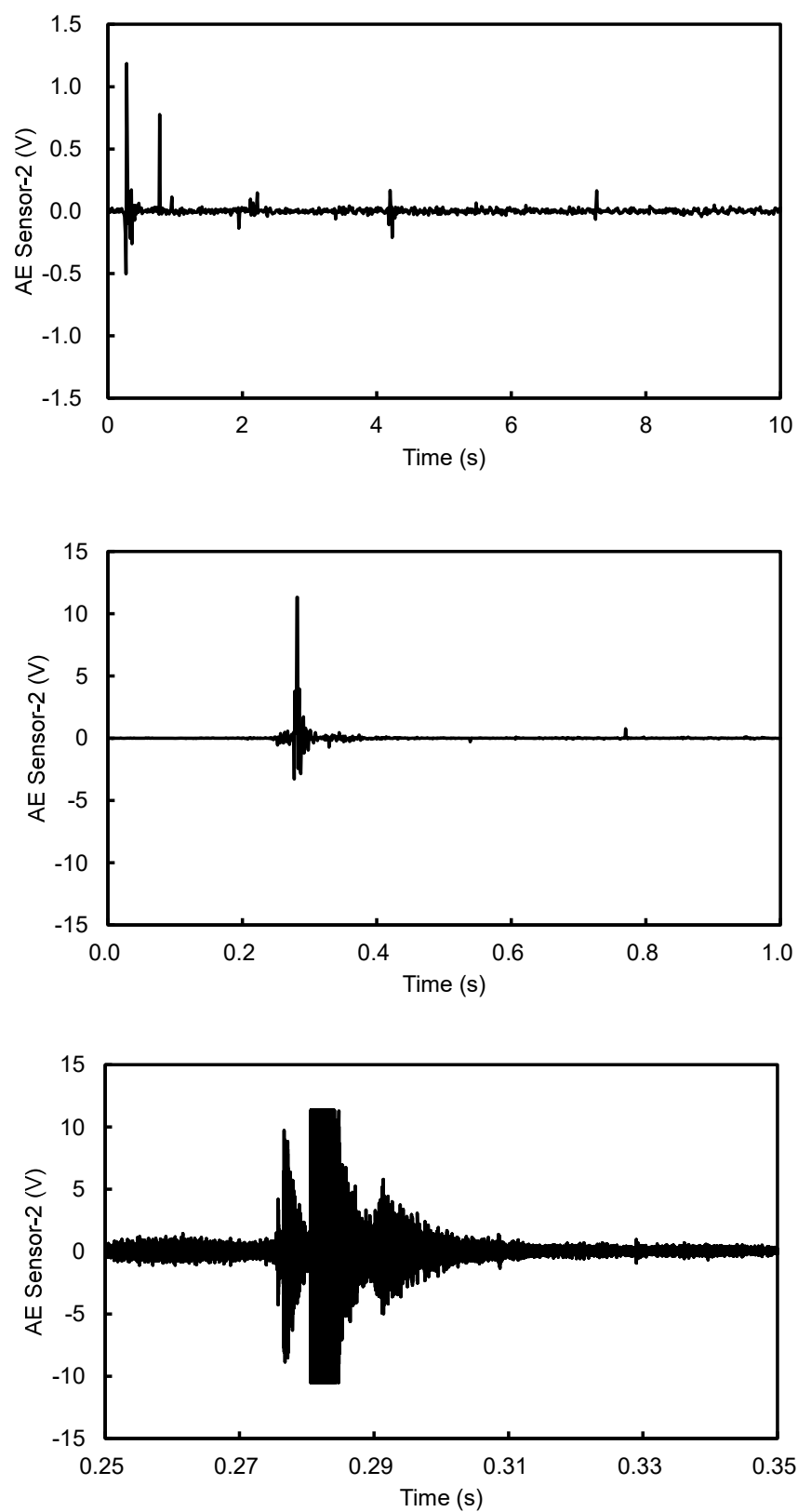


図 4.4.1-5 (8) 358-7 実験における AE センサ出力履歴 (#2)

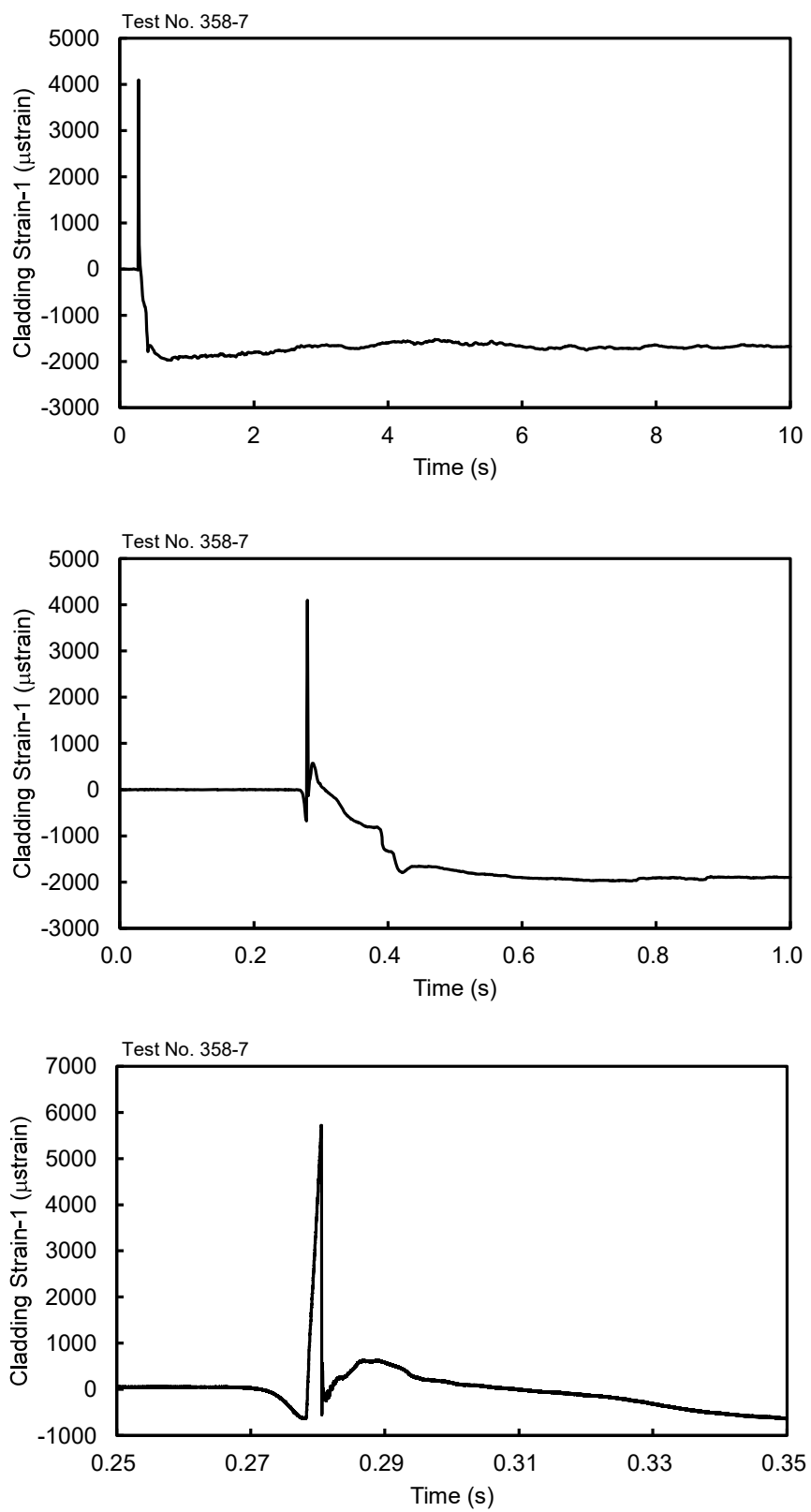


図 4.4.1-5 (9) 358-7 実験における軸方向クラッド歪みゲージ (#1)

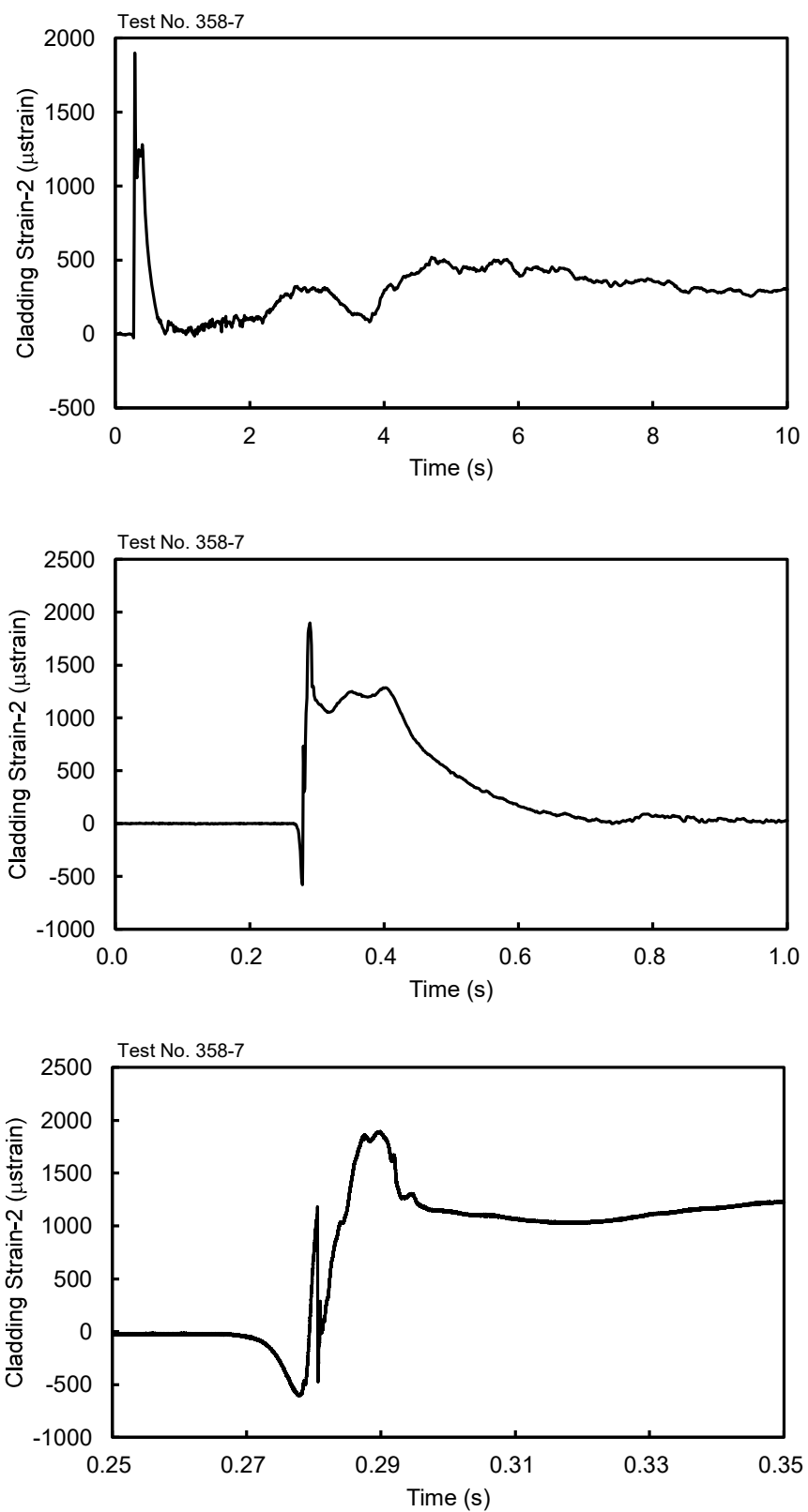


図 4.4.1-5 (10) 358-7 実験における軸方向クラッド歪みゲージ (#2)

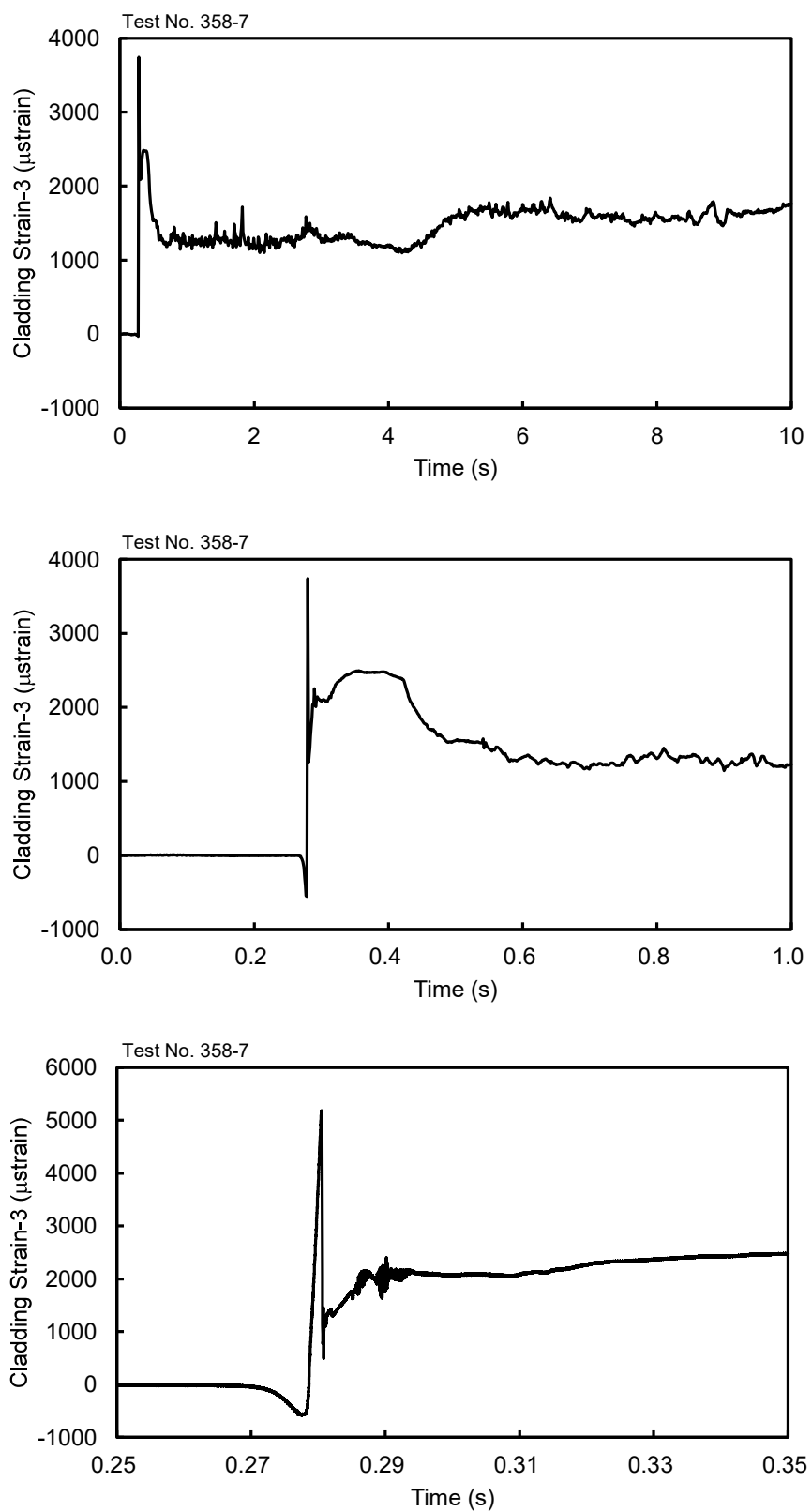


図 4.4.1-5 (11) 358-7 実験における周方向クラッド歪みゲージ (#3)

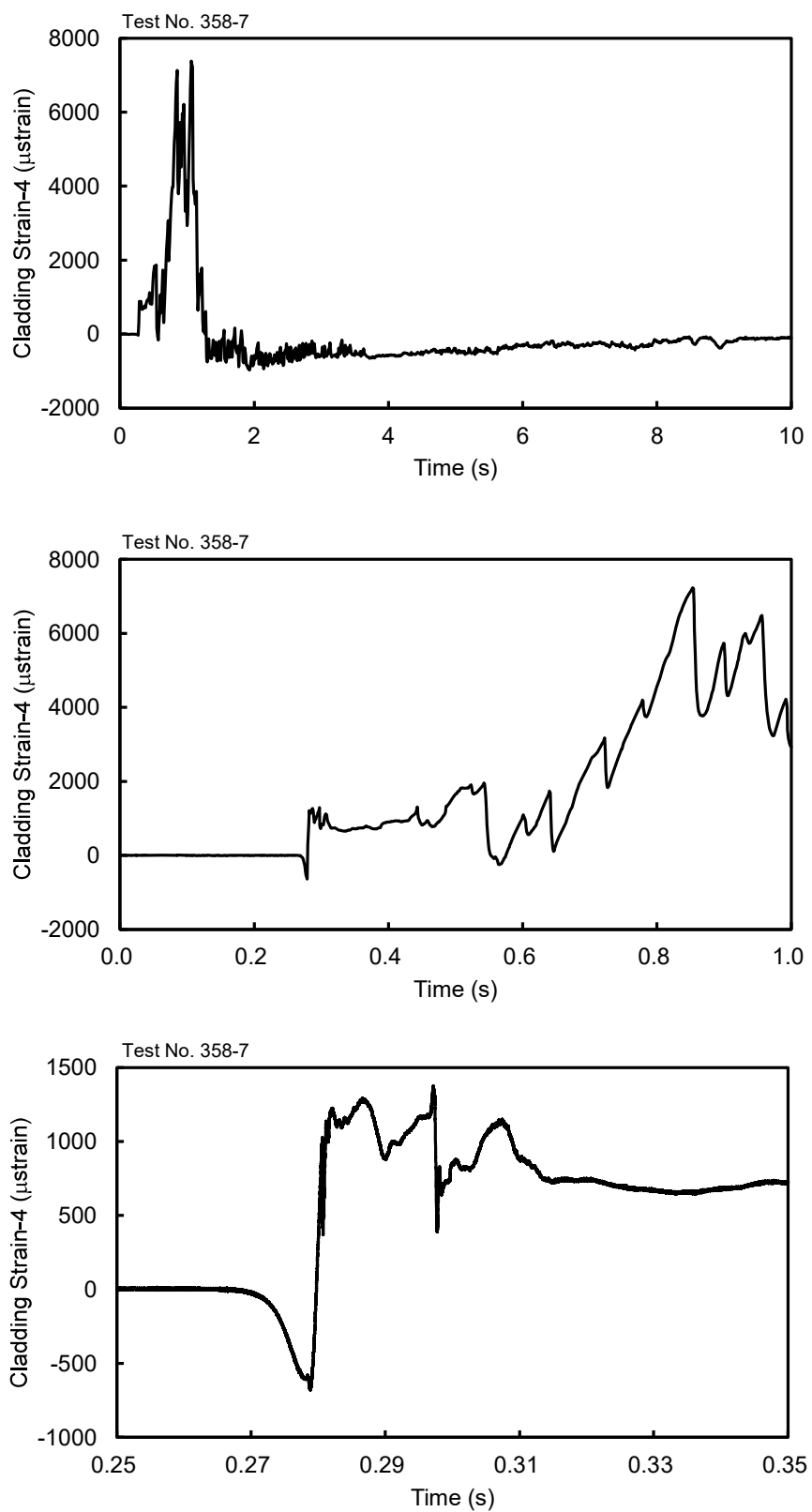


図 4.4.1-5 (12) 358-7 実験における周方向クラッド歪みゲージ (#4)

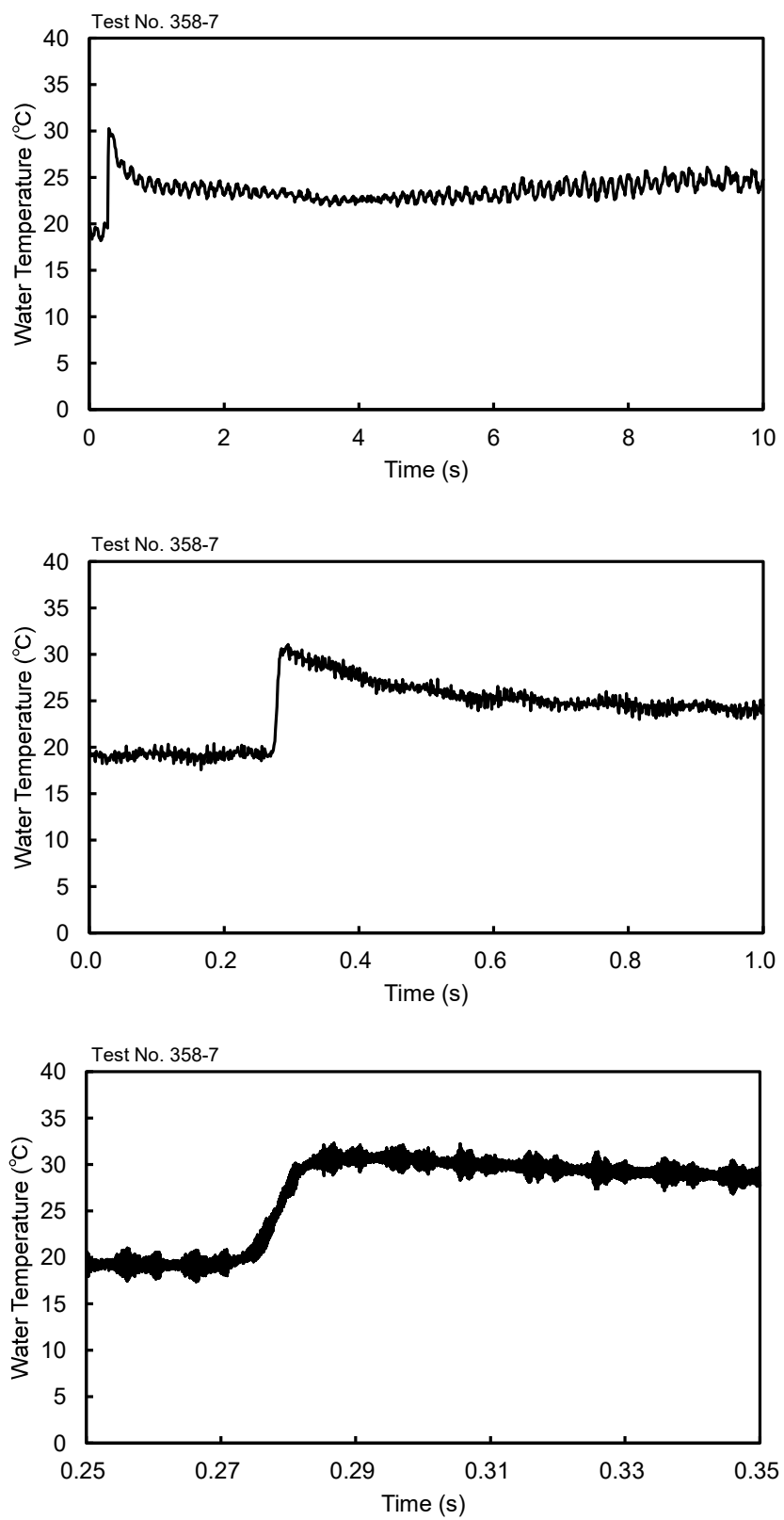


図 4.4.1-5 (13) 358-7 実験における冷却水温履歴

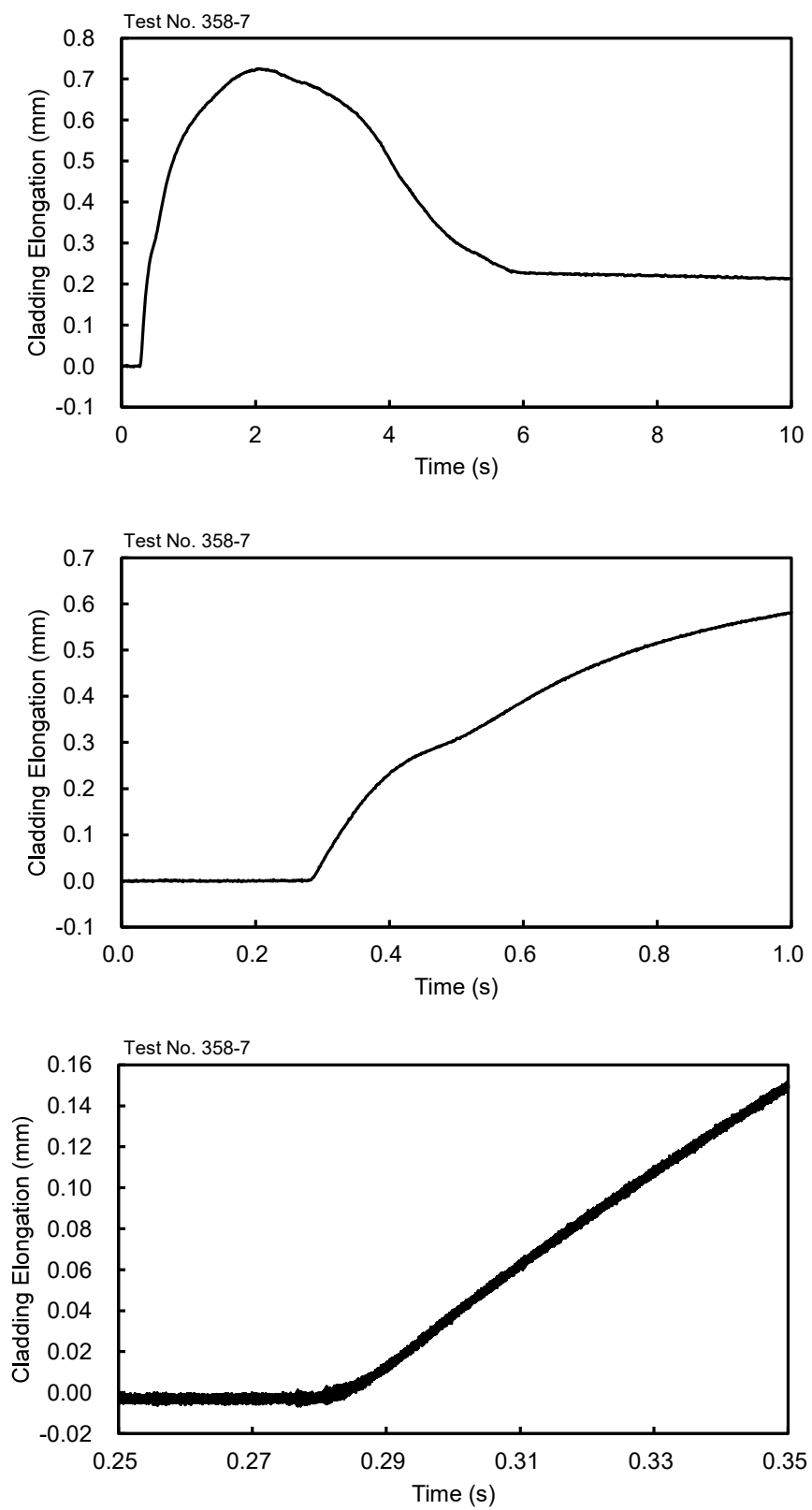


図 4.4.1-5 (14) 358-7 実験における被覆管伸び計

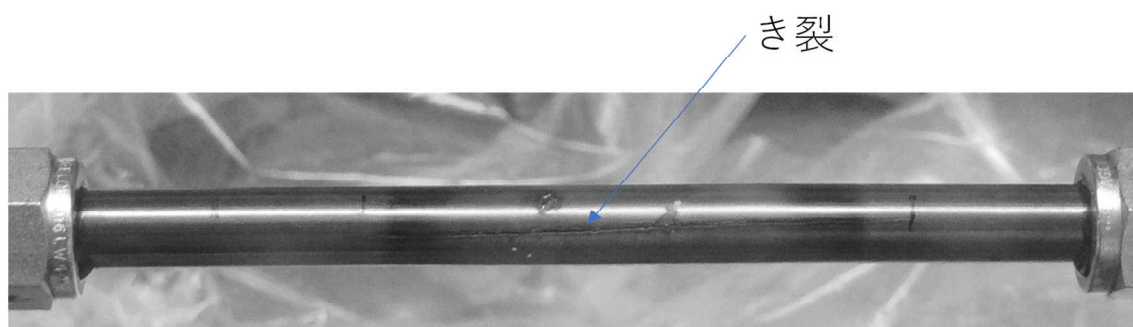


図 4.4.1-6 358-7 実験後の試験燃料棒外観



#### 4.4.2 224-2 実験

濃縮度 1.51%及び天然  $\text{UO}_2$  の未照射燃料を対象とした室温大気圧条件下での反応度事故模擬実験 224-2 実験を令和 3 年 9 月 17 日に実施した。本実験は、低濃縮度  $\text{UO}_2$  燃料(濃縮度 2%未満)を対象として、NSRR パルス照射時の実験燃料の発熱量評価に資する知見の取得を目的とした。現在の発熱量評価には解析コードを用いており、主に濃縮度 5%以上の未照射  $\text{UO}_2$  燃料を用いたパルス照射実験及びその照射後実験で得られた発熱量評価データにより検証されている。一方で、多くの高燃焼度燃料の濃縮度/fissile (全 U-Pu に対する U-235、Pu-239、Pu-241 の存在割合) に相当する 2%未満の領域については、未照射燃料での検証データは取得されておらず<sup>(1)</sup>、解析コードによる発熱量評価の信頼性向上のためには、より広範囲かつ多くの濃縮度 2%未満のデータ取得が必要となる。

なお、高燃焼度燃料を対象としたパルス照射後試験により、高燃焼度燃料の発熱量評価データは取得されている<sup>(2)</sup>が、これらデータは、未照射燃料のケースとは大きく異なり、燃料試料取扱施設での取扱方法の制限、ベース照射時に生じた FP を分離除去する工程の追加等に起因して系統的な測定誤差<sup>(3)</sup>が生じている可能性が指摘されている。

##### (1) 試験燃料棒

図 4.4.2-1 に試験燃料棒の構造概略を示す。試験燃料は、発熱量を評価する過程で燃料溶解を行う計画であったため、この作業を効率的に実施できるよう、また取扱い許容量等も考慮し、一部燃料ペレットについては PWR/BWR 燃料高さより低い設計とした。また、測定の主対象である濃縮度 1.51%の  $\text{UO}_2$  ペレットに加えて、より濃縮度の低い天然  $\text{UO}_2$  ペレットも用いた。

##### (2) 実験条件および計装

パルス照射実験の条件を以下に示す。

実験カプセル：	I-S 型 (室温大気圧・未照射燃料用)
パルス照射時冷却水条件：	室温大気圧の静止水
投入反応度：	\$3.55
燃料発熱量：	(4) パルス照射後試験に示す。

計装項目を以下に、計装取付けの概要を図 4.4.2-2 に示す。

- ① カプセル内圧計 1 箇所 (液相#1)  
燃料棒の破損の有無を確認するために取付けた。
- ② カプセル内熱電対 4 箇所 (#1：シース外径  $\Phi 1.0$  非接地型、#2：シース外径  $\Phi 1.0$  接地型【室温大気圧条件下照射済燃料実験用】、#3：シース外径  $\Phi 1.6$  非接地【高温高圧実験用】、#4：シース外径  $\Phi 1.0$  接地【室温大気圧条件未照射燃料実験用】。全て零接点付の K 熱電対。)

高温高圧実験及び室温大気圧実験で観測されたカプセル内温度の傾向に違いが生じ

ており<sup>(2)</sup>、この傾向が、熱電対線径の違いによる $\gamma$ 発熱の違いに起因するものか確認するため、各実験で用いた熱電対と同様のもの（線径の異なる熱電対）を取付けた。その他、熱電対の接地型、非接地型の違いによっても傾向が変わるか確認するため、これら型の異なる熱電対も加えて取付けた。

### ③ 被覆管ひずみゲージ（5箇所）

パルス照射時に生じる被覆管表面のひずみや同信号に生じるノイズについてデータを取得するため、取付位置や取付け方法の異なる複数のひずみゲージを配置した。

## (3) 過渡計測記録の概要

2 台の中性子検出器で測定した NSRR の炉出力履歴を図 4.4.2-3(1)及び(2)、積分出力履歴を図 4.4.2-3(3)及び(4)に示す。時刻 0 から 10 秒まで、0 から 1 秒まで及び 0.264 から 0.284 秒までの 3 区間に対応する。また、前節で示した計測項目に関する過渡記録を図 4.4.2-3(5)から(14)に示す。同様に、時刻 0 から 10 秒まで、0 から 1 秒まで及び 0.264 から 0.284 秒までの 3 区間に対応する。さらに、図 4.4.2-3(15)にカプセル内温度履歴の比較図を、図 4.4.2-3(16)、(17)、(18)に高速サンプリングした被覆管ひずみゲージ履歴の比較図を示す。

過去に実施した NSRR 実験より、歪みゲージを使用したセンサ（圧力計等）や熱電対の出力には NSRR 出力の履歴によく似た波形のノイズや、パルス照射以後も継続するドリフトが発生し得ることが判明している。このノイズ及びドリフトの要因は、出力にほぼ比例した強度で発生するガンマ線が歪みゲージ素子や熱電対素子の電気的特性に与える影響、ガンマ発熱による素子自身の温度上昇による特性変化などと理解されるが、精度良く補正することは困難であるため本報告においては得られた過渡計測結果をそのまま示す。

### (a) NSRR 出力・積分出力

図 4.4.2-3(1)及び(2)及び(3)、(4)に NSRR 出力履歴及び積分出力履歴をそれぞれ示す。いずれについても、#1 と #2 の平均値で評価を行った。NSRR 出力は時刻 0.2738 秒においてピーク値約 10.2 GW に達し、半値幅は約 5.8 ms であった。なお、NSRR の計測システムは積分演算を 1 秒までしか行わないため、時刻 1 秒以降の積分出力は一定値として記録される。炉物理計算による評価によれば、本実験における積分出力は時刻無限大で 83.5 MJ に達した。

### (b) カプセル内圧

図 4.4.2-3(5)にカプセルの液相部で計測した圧力の履歴を示す。液相部では時刻 0.26 秒過ぎから圧力の低下が見られるが、これは NSRR 出力パルスに同期したノイズである。

### (c) カプセル内温度

図 4.4.2-3(6)及び(9)に燃料棒上端付近（#1・#4）で測定した冷却水温度の履歴を示す。い

ずれの熱電対も燃料棒からの距離は約 10mm である。

熱電対#1、#4 (非接地型) の温度履歴において短時間だけ温度が低下しているのは NSRR パルス出力に同期したノイズと解釈される。また、パルス照射開始時刻 (約 0.26 秒) 付近で温度が急上昇しているのはガンマ発熱による熱電対自身の温度上昇によるものである。このノイズが接地型には見られず非接地型のみ見られた要因としては、接地型の方がガンマ発熱に対する応答が早く、また、シース (SUS) 材に生じるガンマ発熱の影響も受ける可能性があるため、結果として、パルスノイズによる見かけ上の温度低下とガンマ発熱による温度上昇のバランス上、ガンマ発熱による温度上昇の影響が勝った可能性が考えられるが、はっきりとした要因はわからない。図 4.4.2-3(15)に示すとおり、熱電対#1 から#4 の温度傾向や上昇温度幅は、前述の接地/非接地の違いによる傾向の違いを除けば、ほぼ同等であることがわかった。このことから、高温高压実験及び室温大気圧実験で観測されたカプセル内温度履歴の傾向差については、各実験で使用している熱電対シース線径  $\Phi 1.0$  mm (素線径約  $\Phi 0.15$  mm) と  $\Phi 1.6$  mm (素線径約  $\Phi 0.27$  mm) の差によるガンマ発熱の違いが主要因ではないことがわかった。

#### (d) 被覆管ひずみ

図 4.4.2-3(10)及び(14)に被覆管周方向ひずみ#1、#2、#3、#4、#5 の出力信号を示す。ひずみを測定するために用いるひずみゲージはそのケーブル長さが長いほどパルス照射時のノイズが大きくなる傾向にある可能性が考えられており、ノイズをより正確に除去するためには、ひずみ測定箇所である燃料発熱部と同じ軸方向位置に取付けることが望ましい。燃料被覆管変形の影響を受けないようノイズのみを測定するためには、被覆管表面への直接貼り付けを避けつつ、ひずみゲージを燃料近傍に固定する必要がある。そこで、図 4.4.2-2 (図 A) に示すとおり、燃料被覆管表面にシリコンを塗布しその上にひずみゲージを取付けた (#2、#4、#5)。

図 4.4.2-3(16)に示すとおり、燃料発熱部より上部位置に取付けたひずみゲージ (#1、#2) の履歴を比較すると、概ねノイズの波形は同じであった。パルスノイズピークとパルスノイズ後の到達値にはそれぞれ、約 100  $\mu$ s (0.01%)、約 150  $\mu$ s (0.015%) 程度の差が生じたが、PCMI 破損に至るひずみ量 (数%) のオーダーと比較すると許容範囲内の差である。図 4.4.2-3(17)に示すとおり、燃料発熱部 (上端のペレット腹部位置) に取付けたひずみゲージ (#3、#4) の履歴を比較すると、#1、#2 同様、パルスノイズピークとノイズ直後の到達値に差はあるが許容範囲内の差である。図 4.4.2-3(18)に示すとおり、シリコン上に取付けたひずみゲージ (#2、#4、#5) の履歴を比較すると、パルスノイズピーク値については、軸方向取付位置が下部にあるつまりケーブル長さが長い程大きくなることが確認されたが、パルスノイズ後の到達値についてはほぼ同等であることがわかった。これらの結果から、ノイズ除去用ひずみゲージの取付方法として有用である可能性が高いことがわかった。

#### (4) パルス照射後試験

実験後の燃料棒に対して以下の試験を実施した。

##### (a) 実験後燃料棒外観観察

図 4.4.2-4 及び図 4.4.2-5 に実験後燃料棒の外観及び燃料棒内から取出した燃料ペレットの外観を示す。当該燃料棒の外観観察を行ったところ、非破損であり、発熱量評価に影響を及ぼす可能性のある浸水がないことを確認した。さらに、取出した燃料ペレットに欠け等がないことを確認し、照射後試験実施上、問題ないことを確認した。

##### (b) パルス照射時の燃料発熱量の評価

パルス照射後の濃縮度 1.51%燃料ペレット（試料番号 1～4）及びその溶解液を一部フィルタに分取したもの（試料番号 5～7）に対し、Ge 検出器による  $\gamma$  線計測を行い、パルス照射時に生じた FP の放射能を評価し、それを基に燃料発熱量を評価した。

燃料ペレット溶解については、まず、2.27 mm、4.12 mm 高さの燃料ペレットにそれぞれ 8M 硝酸約 50ml を加えて 3 日間程度放置し、概ね溶解したことを目視にて確認した。その後、2.27 mm 高さの燃料ペレット溶解液をフィルタに一部分取した試料（試料番号 5）と、さらに約 1 日放置した溶液を同様にフィルタ分取した試料（試料番号 6）を作製し、 $\gamma$  線計測値を比較することで、十分溶解したことを確認した。4.12 mm 高さの燃料ペレット溶解液については、目視にて溶解確認後さらに数日間放置し、フィルタに一部分取した試料（試料番号 7）を作製した。

測定試料の詳細情報、 $\gamma$  線計測・発熱量評価の結果、試料重量及びガンマ線計測に係る測定誤差評価結果についてそれぞれ表 4.4.2-1、表 4.4.2-2、表 4.4.2-3 に示す。燃料ペレット及び燃料溶解液浸透フィルタの  $\gamma$  線計測の様子をそれぞれ図 4.4.2-5、図 4.4.2-6 に示す。試料の  $\gamma$  線計測にあたっては、Ge 検出器の不感時間が数%程度内に収まるように Ge 検出器から距離を離れた（燃料ペレット-Ge 検出器表面間距離：約 170 mm、燃料溶解液浸透フィルタ-Ge 検出器表面間距離：約 19 mm）。Ge 検出器における Ba-133、Ba-140 の検出効率については、標準線源（Ba-133、Eu-152、Cs-137、Co-60。試料厚さ 0.8 mm）を用い、302keV から 1408 keV（計 11 点、放出率が 10%以上のガンマ線に着目）のガンマ線エネルギー領域におけるエネルギーと  $\gamma$  線強度の関係式を fitting して求めたのち、Ba-140 の  $\gamma$  線エネルギー 537.27 keV における検出効率を算出して用いた。なお、検出効率のエラーは fitting 関数と標準線源により得られた計 11 点のデータのバラつきを考慮し算出したが、試料のジオメトリの違いについては考慮していない。

ガンマ線計測による燃料ペレットの発熱量評価の結果、高さ 2.27 mm、3.28 mm、4.12 mm、10.15 mm の各燃料ペレットでそれぞれ  $112 \pm 1$  cal/g、 $105 \pm 1$  cal/g、 $98 \pm 1$  cal/g、 $70 \pm 1$  cal/g となり、ペレットの高さが大きくなるにつれ、発熱量の値が小さく評価された。これは、評価上、自己吸収の効果を考慮していないためである。自己吸収については、試料の媒体（元素組成、密度）、試料形状など幾何学的条件だけでなく、Ge 結晶の形状や大きさ

など多くの要因が関係する複雑さから、正確な補正は難しいことが知られている<sup>(3)</sup>。表 4.4.2-4 に示すとおり、ガンマ線計測ソフトの機能を用いて簡易的に評価した燃料ペレットの自己吸収補正係数を考慮すると、発熱量はそれぞれ、133 cal/g、133 cal/g、131 cal/g、125 cal/g となり、異なる高さのペレットにおいても同等の値が得られた。なお、本発熱量評価パラメータの一つである Ba-140 の核分裂収率については、熱中性子による U-235 の核分裂のみを仮定した評価値<sup>(4)(5)</sup>を考慮し、6.20%とした。

燃料ペレット溶解液浸透フィルタ試料（試料番号 5、6、7。フィルタ厚さは 0.22 mm）の発熱量評価の結果はそれぞれ  $120 \pm 6$  cal/g、 $127 \pm 5$  cal/g、 $125 \pm 6$  cal/g となった。燃料ペレット形状の発熱量評価において自己吸収補正の有無を不確かさとみなせば、フィルタ試料の評価値は、この不確かさ範囲内に入り、両者は矛盾していない。なお、溶解液浸透フィルタ試料については、母材が非常に薄い紙であること、浸透させた溶液が硝酸ベースで自己吸収が無視しうることから、評価上、自己吸収はないものとした。

以上の検討から、フィルタ形状試料の評価値は、ペレット形状試料の評価値より信頼性が高いと考えられ、また、中性子輸送計算コード TWODANT<sup>(6)</sup>を用いて評価された値（解析評価値）126 cal/g（換算係数 1.510 cal/g/MJ）と比較すると、解析評価に関して従来評価されていた不確かさの範囲内である。これにより、5%未満の低濃縮度（fissile 比）条件範囲における解析評価値の信頼性を確認することができた。

表 4.4.2-1(1) 燃料ペレット試料情報

試料番号	1	2	3	4
試料名	燃料ペレット 4.12 mm	燃料ペレット 2.27 mm	燃料ペレット 3.28 mm	燃料ペレット 10.15 mm
試料形状	ディスクペレット			
種類	濃縮度 1.51% UO <sub>2</sub>			
ディッシュ/チャンファー	なし			
外径(mm)	8.19	8.19	8.19	8.18
試料高さ(mm)	4.12	2.27	3.28	10.15
パルス照射前試料重量(gUO <sub>2</sub> )	2.166	1.192	1.724	5.186
パルス照射後試料重量(gUO <sub>2</sub> )	2.1664	1.1921	1.7246	5.1863

表 4.4.2-1(2) 燃料溶解液浸透ろ紙試料情報

試料番号		5	6	7	
燃料ペレット溶解液	試料名	燃料ペレット 2.27 mm 溶解液浸透ろ紙 (1回目)	燃料ペレット 2.27 mm 溶解液浸透ろ紙 (2回目)	燃料ペレット 4.12mm 溶解液浸透ろ紙	
	溶解した燃料ペレット		燃料ペレット 2.27 mm		燃料ペレット 4.12mm
	試料形状		セルロース繊維ろ紙		
	仕様			No.5C	
		外径(mm)	φ25		
		厚さ(mm)	0.22		
	溶解液試料分取重量(g)		$6.430 \times 10^{-2}$	$1.253 \times 10^{-1}$	$1.302 \times 10^{-1}$
	溶解液全量(g)		$6.254 \times 10^1$		$6.501 \times 10^1$
	溶解液分取率 (分取量/溶解液全量)		0.001	0.002	0.002

表 4.4.2-2(1) 燃料ペレットのガンマ線計測及び発熱量評価結果

試料番号		1	2	3	4
測定機器		Ge検出器			
パルス照射日		2021/9/17 14:30			
測定開始日		2021/11/29 15:22	2021/11/30 16:04	2021/12/1 15:58	2021/12/22 17:03
測定終了日		2021/11/30 11:54	2021/12/1 12:25	2021/12/2 12:23	2021/12/23 13:52
核種	測定核種	Ba-140			
	E $\gamma$ (keV)	537.26 <sup>※1</sup>			
	放出率(%)	24.4 <sup>※1</sup>			
測定時間	Live Time(s)	72000	72000	72000	72000
	Real Time(s)	73892	73252	73540	74948
測定結果	ネット面積(Counts)	225027	135448	172086	107907
	計数率(cps)	3.125	1.881	2.390	1.499
	検出効率 <sup>※2</sup>	$5.984 \times 10^{-4}$	$6.030 \times 10^{-4}$	$6.005 \times 10^{-4}$	$5.842 \times 10^{-4}$
	半減期(d)	12.752 <sup>※1</sup>			
	崩壊定数(1/s)	$6.290 \times 10^{-7}$			
	測定試料放射エネルギー(Bq)	$1.160 \times 10^6$	$7.324 \times 10^5$	$9.864 \times 10^5$	$1.996 \times 10^6$
	燃料重量あたりのBa-140生成数(個/g-fuel)	$8.510 \times 10^{11}$	$9.767 \times 10^{11}$	$9.093 \times 10^{11}$	$6.120 \times 10^{11}$
	核分裂収率(%)	6.20% <sup>※3</sup>			
	燃料重量あたりの核分裂数(fission/g-fuel)	$1.373 \times 10^{13}$	$1.575 \times 10^{13}$	$1.467 \times 10^{13}$	$9.871 \times 10^{12}$
	燃料発熱量(cal/g)	98	112	105	70
<p>※1 Table of Isotopesより参照          ※2 537.26 keVにおける検出効率を算出          ※3 JENDL-4.0 Fission Yield Sublibrary及びJAERI-Research-98-052を参考に熱中性子によるU-235の核分裂のみを仮定した評価値</p>					

表 4.4.2-2(2) 燃料溶解液浸透フィルタ試料のガンマ線計測及び発熱量評価結果

燃料ペレット溶解液測定結果	試料番号	5	6	7	
	測定機器	Ge検出器			
	パルス照射日	2021/9/17 14:30			
	核種	測定核種	Ba-140		
		E $\gamma$ (keV)	537.26 <sup>※1</sup>		
		放出率(%)	24.4 <sup>※1</sup>		
	測定開始日	2021/12/6 15:49	2021/12/7 15:26	2021/12/8 11:09	
	測定終了日	2021/12/7 5:51	2021/12/8 5:28	2021/12/8 16:40	
	測定時間	Live Time(s)	50400	50400	19800
		Real Time(s)	50516	50527	19854
		ネット面積(Counts)	1542	3003	2039
		計数率(cps)	3.060 $\times 10^{-2}$	5.959 $\times 10^{-2}$	1.030 $\times 10^{-1}$
		検出効率※2	1.225 $\times 10^{-2}$		
		半減期(d)	12.752 <sup>※1</sup>		
		崩壊定数(1/s)	6.290 $\times 10^{-7}$		
		測定試料放射エネルギー(Bq)	8.061 $\times 10^2$	1.656 $\times 10^3$	2.965 $\times 10^3$
		溶解UO <sub>2</sub> 重量あたりの放射エネルギー(Bq/溶解試料重量g)	7.841 $\times 10^5$	8.267 $\times 10^5$	1.481 $\times 10^6$
		燃料重量あたりのBa-140生成数(個/g-fuel)	1.046 $\times 10^{12}$	1.103 $\times 10^{12}$	1.087 $\times 10^{12}$
		核分裂収率(%)	6.20% <sup>※3</sup>		
		燃料重量あたりの核分裂数(fission/g-fuel)	1.687 $\times 10^{13}$	1.778 $\times 10^{13}$	1.752 $\times 10^{13}$
燃料発熱量(cal/g)		120	127	125	
※1 Table of Isotopesより参照					
※2 537.26 keVにおける検出効率を算出					
※3 JENDL-4.0 Fission Yield Sublibrary及びJAERI-Research-98-052を参考に熱中性子によるU-235の核分裂のみを仮定した評価値					



表 4.4.2-3 試料重量及びガンマ線計測に係る測定誤差評価結果

試料番号		1	2	3	4	5	6	7
試料名		燃料ペレット 4.12 mm	燃料ペレット 2.27 mm	燃料ペレット 3.28 mm	燃料ペレット 10.15 mm	燃料ペレット 2.27 mm 溶解液浸透 ろ紙 (1回目)	燃料ペレット 2.27 mm 溶解液浸透 ろ紙 (2回目)	燃料ペレット 4.12mm 溶解液浸透 ろ紙
重量 (g)	試料重量(g)	2.1664	1.1921	1.7246	5.1863	0.0643 <sup>※2</sup>	0.1253 <sup>※2</sup>	0.1302 <sup>※2</sup>
	溶解液全量(g)	—	—	—	—	62.5408	62.5408	65.0146
	分取率	—	—	—	—	$1.03 \times 10^{-3}$	$2.00 \times 10^{-3}$	$2.00 \times 10^{-3}$
	重量・分取率誤差 <sup>※3</sup>	$\pm 2 \times 10^{-4}$	$\pm 4 \times 10^{-5}$	$\pm 2 \times 10^{-4}$	$\pm 2 \times 10^{-4}$	$\pm 1 \times 10^{-6}$	$\pm 4 \times 10^{-7}$	$\pm 8 \times 10^{-7}$
	相対誤差	0.01%	0.003%	0.01%	0.003%	0.10%	0.02%	0.04%
ガンマ線計測カウント	ネットカウント	225027	135448	172086	107907	1542	3003	2039
	誤差カウント	$\pm 835$	$\pm 637$	$\pm 741$	$\pm 937$	$\pm 73$	$\pm 101$	$\pm 84$
	相対誤差	0.37%	0.47%	0.43%	0.86%	4.4%	3.3%	4.0%
検出効率	検出効率	$5.984 \times 10^{-4}$	$6.030 \times 10^{-4}$	$6.005 \times 10^{-4}$	$5.842 \times 10^{-4}$	$1.225 \times 10^{-2}$	$1.225 \times 10^{-2}$	$1.225 \times 10^{-2}$
	相対誤差 <sup>※1</sup>	0.46%	0.46%	0.46%	0.46%	1.5%	1.5%	1.5%
<p>※1 標準線源により得たデータ点とそれに基づき導出したフィッティング関数とのバラつきから評価          ※2 試料番号5から7の試料重量(g)は溶解液分取量の重量(g)          ※3 試料番号1から4は試料重量の誤差。試料番号5から7は溶解液分取率の誤差。</p>								

表 4.4.2-4 燃料ペレットの自己吸収補正係数

試料番号		1	2	3	4	
試料名		燃料ペレット 4.12 mm	燃料ペレット 2.27 mm	燃料ペレット 3.28 mm	燃料ペレット 10.15 mm	
自己吸収 パラメータ	高さ (mm)	4.12	2.27	3.28	10.15	
	燃料ペ レット 密度	理論 密度	91.0%	90.8%	91.1%	90.7%
		UO <sub>2</sub> 密度 (g/cm <sup>3</sup> )	10.97			
		自己吸収計 算 に用いた密 度	9.98	9.96	9.99	9.95
試料の組成式		UO <sub>2</sub>				
自己吸収補正係数※		0.733	0.838	0.778	0.502	
※Ba-140 (537.26 keV) の自己吸収補正係数						

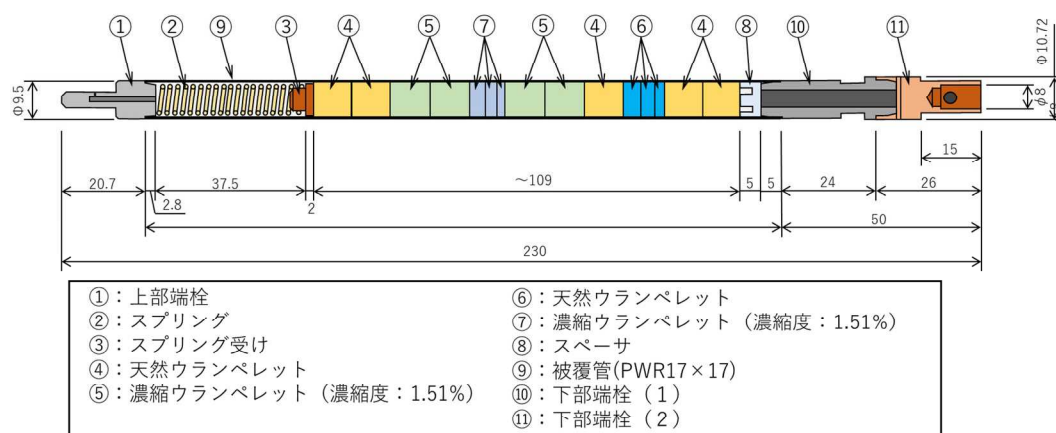
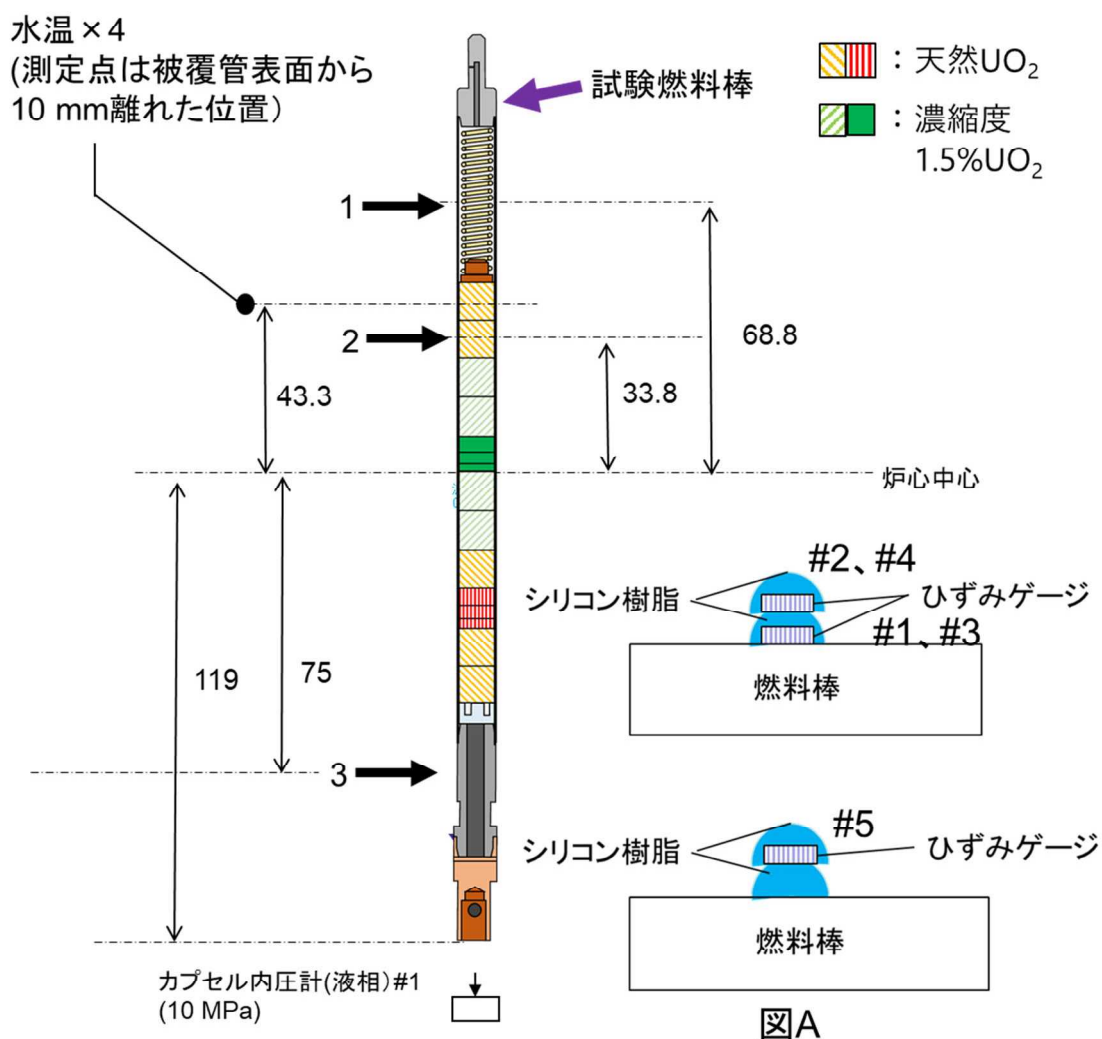


図 4.4.2-1 224-2 試験燃料棒の構造概略



被覆管ひずみ 測定箇所	方向及び個数	備考
1	周、2本(#1,#2)	ミネベア製、1本は燃料棒に貼付(#1、#3)。もう1本(#2、#4)は直接燃料棒に貼付せず図Aとおりにシリコン樹脂上に貼付。
2	周、2本(#3,#4)	
3	周、1本(#5)	ミネベア製、図Aのとおりシリコン樹脂上に貼付。直接燃料棒に貼付せず。

図 4.4.2-2 224-2 実験における計装取付けの概要

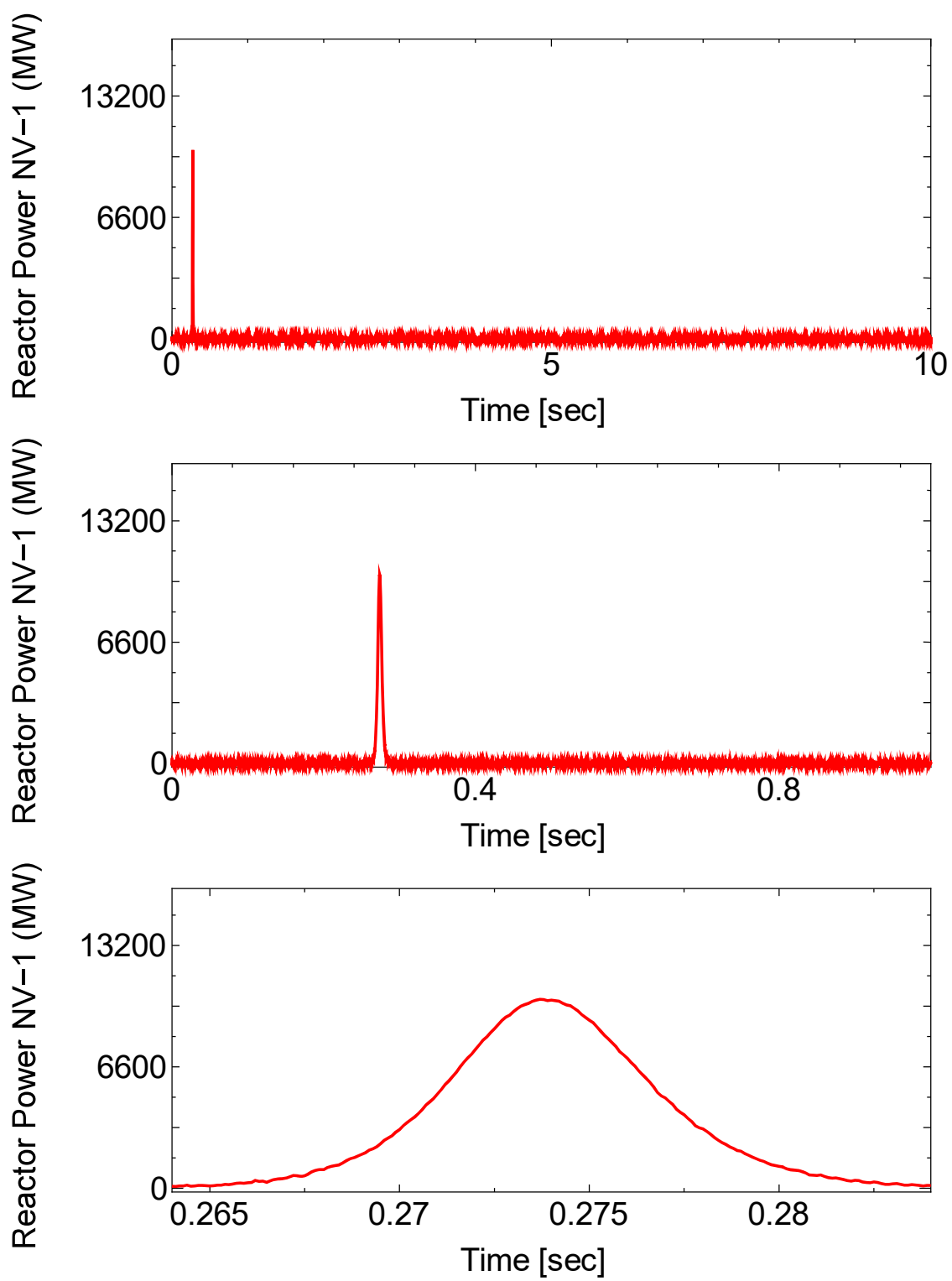


図 4.4.2-3 (1) 224-2 実験における原子炉出力履歴 (#1)

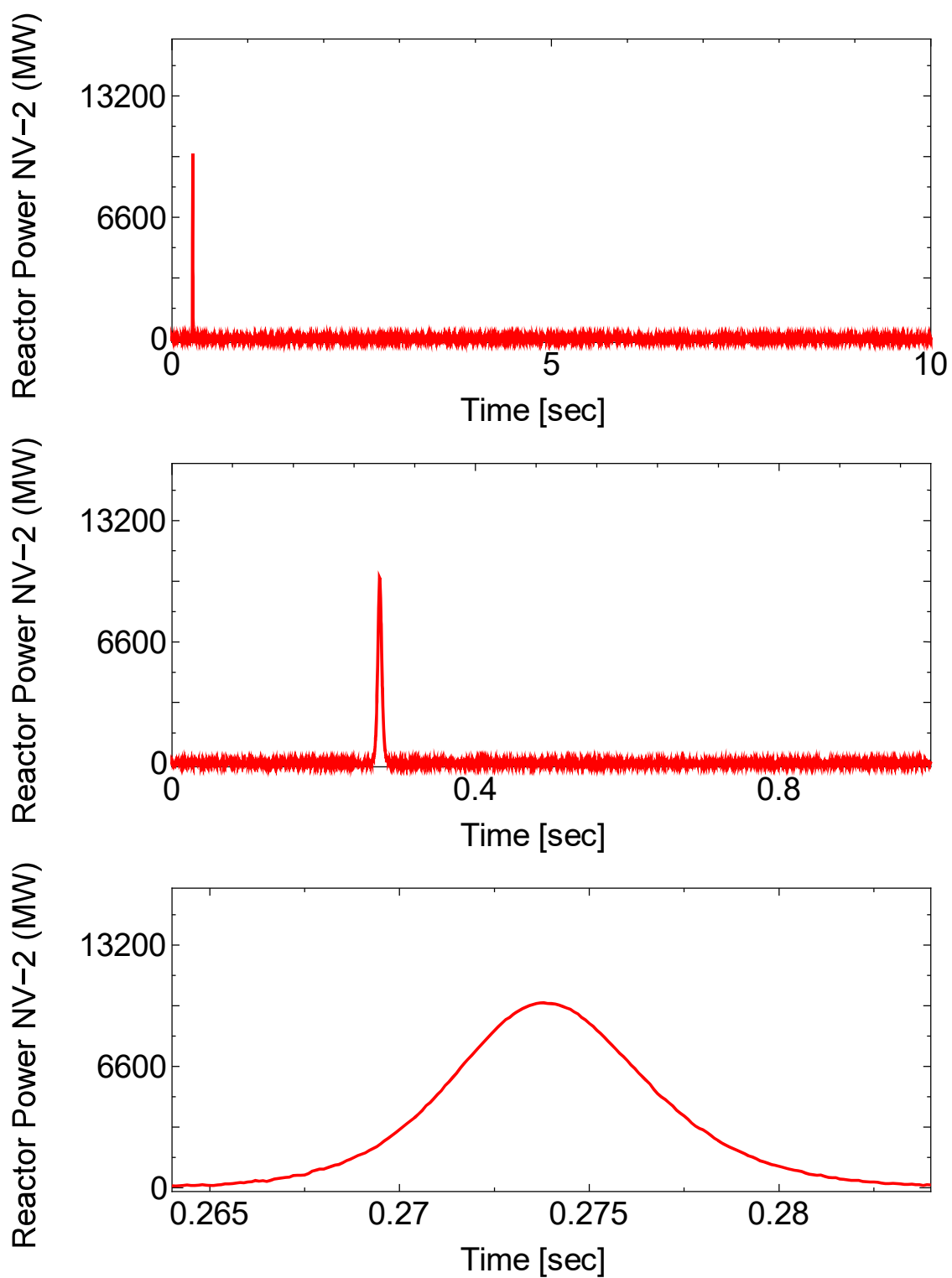


図 4.4.2-3 (2) 224-2 実験における原子炉出力履歴 (#2)

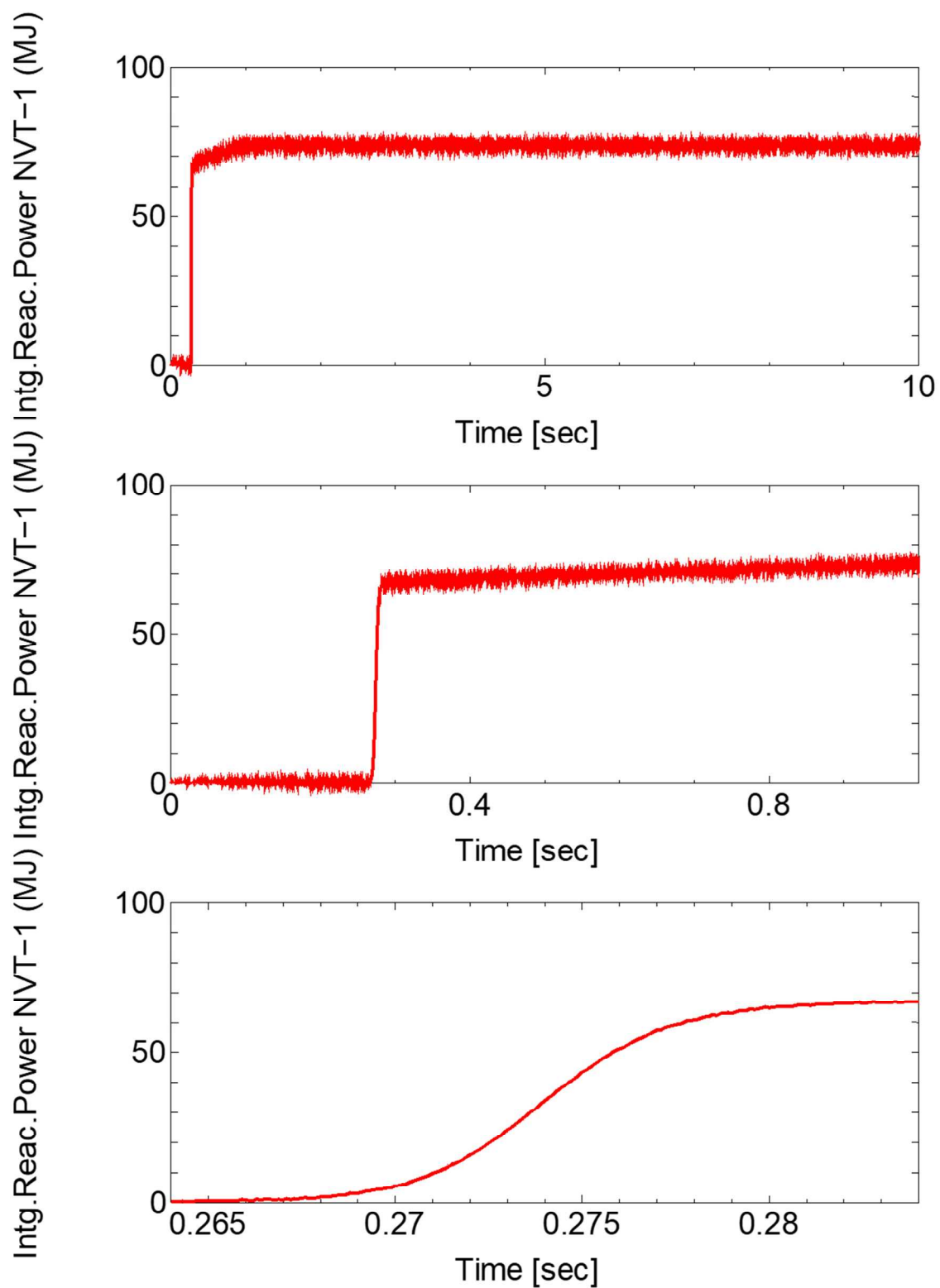


図 4.4.2-3 (3) 224-2 実験における原子炉積分出力 (#1)

Intg.Reac.Power NVT-2 (MJ) Intg.Reac.Power NVT-2 (MJ) Intg.Reac.Power NVT-2 (MJ)

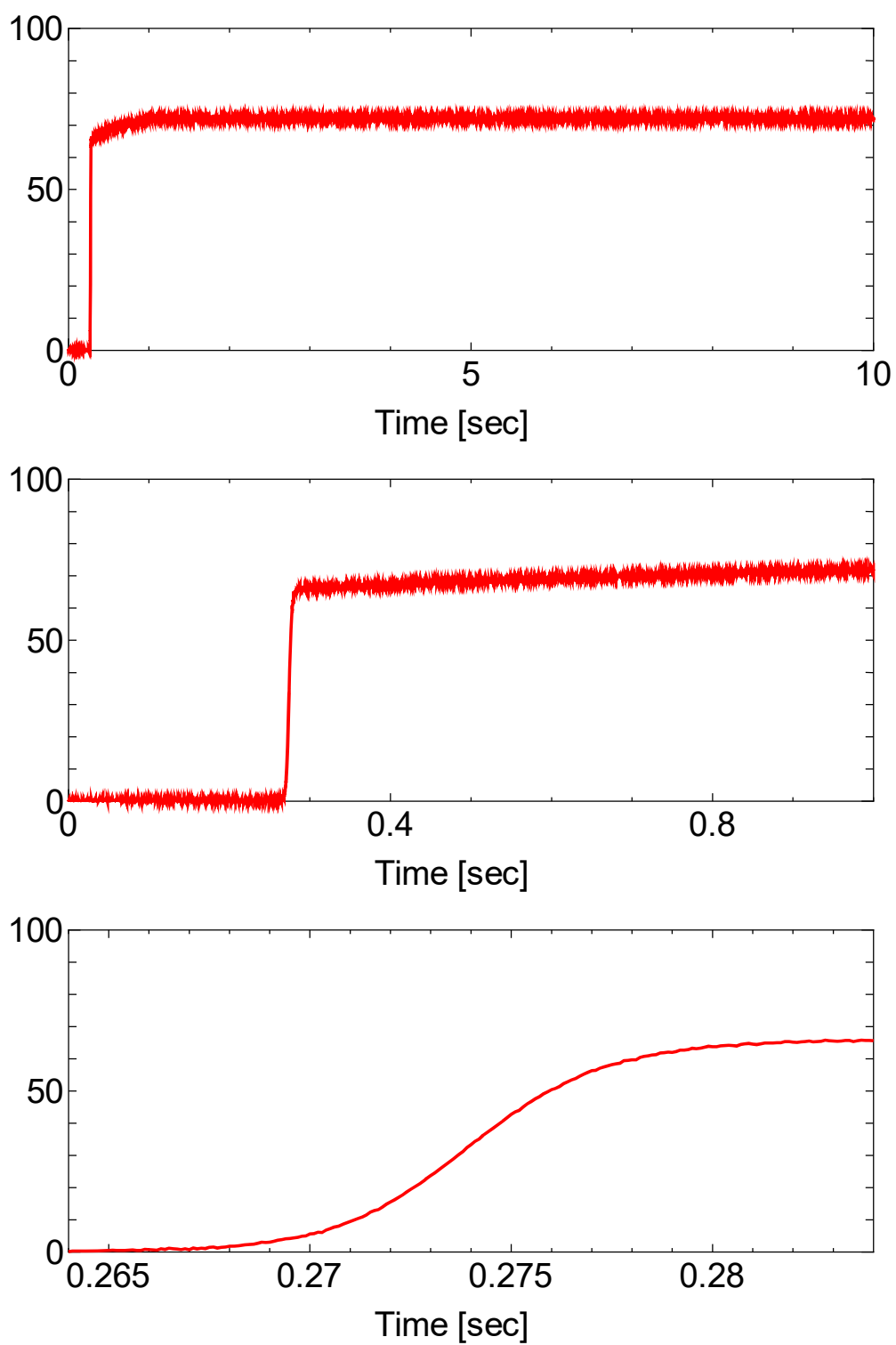
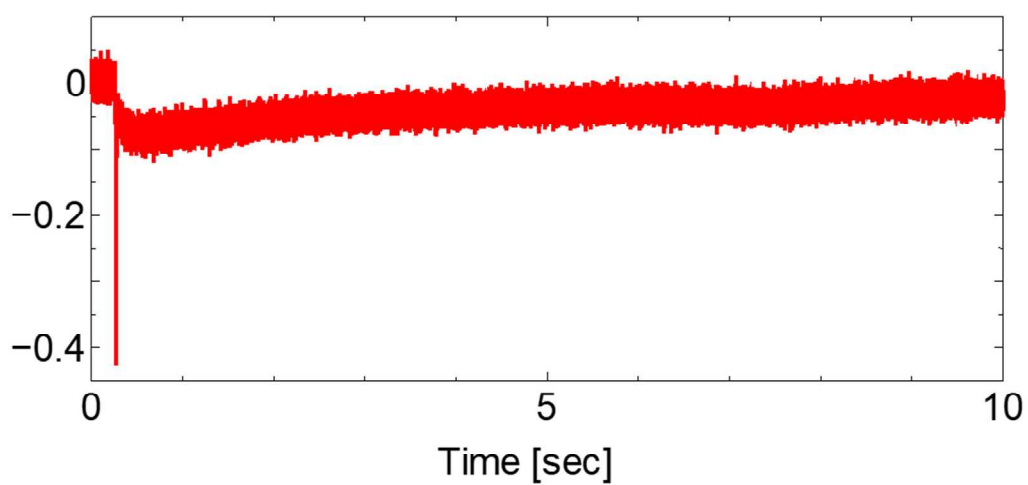
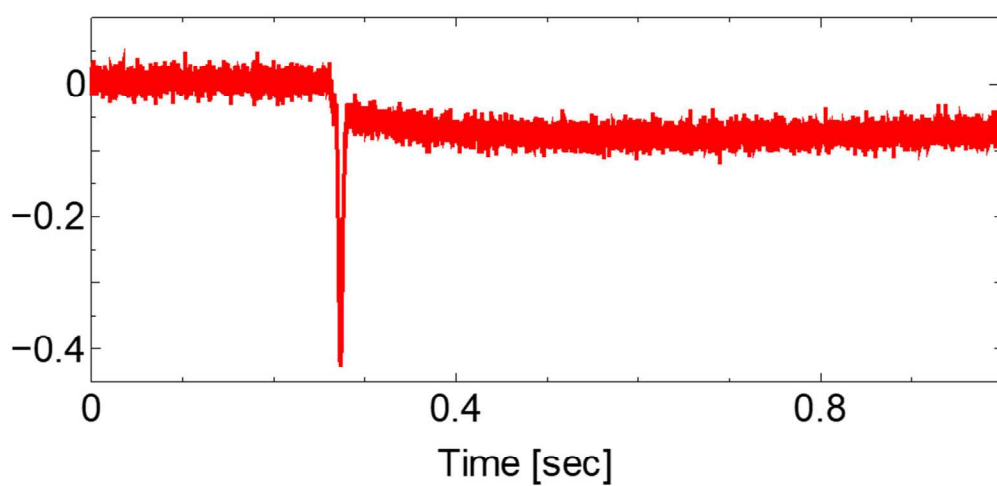


図 4.4.2-3 (4) 224-2 実験における原子炉積分出力 (#2)

Capsule Pressure #1 (MPa)



Capsule Pressure #1 (MPa)



Capsule Pressure #1 (MPa)

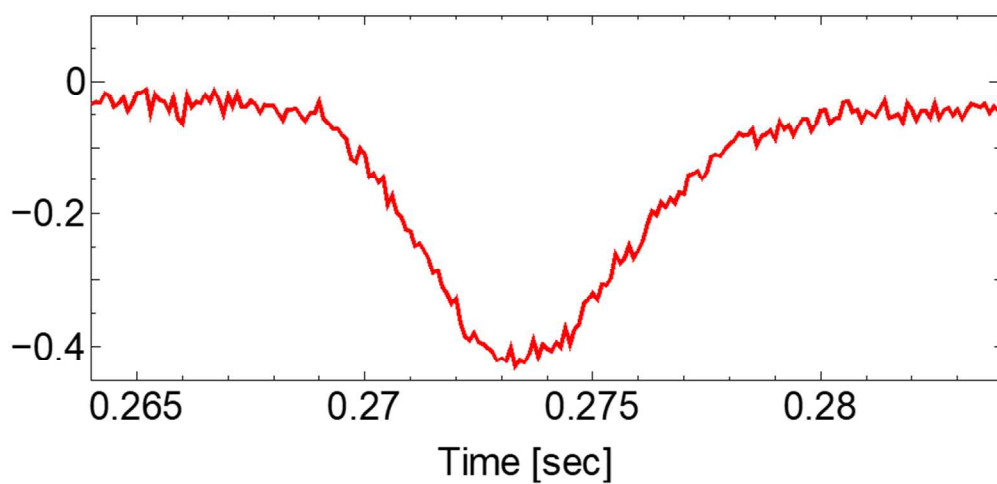


図 4.4.2-3 (5) 224-2 実験におけるカプセル内液相圧力履歴(#1)



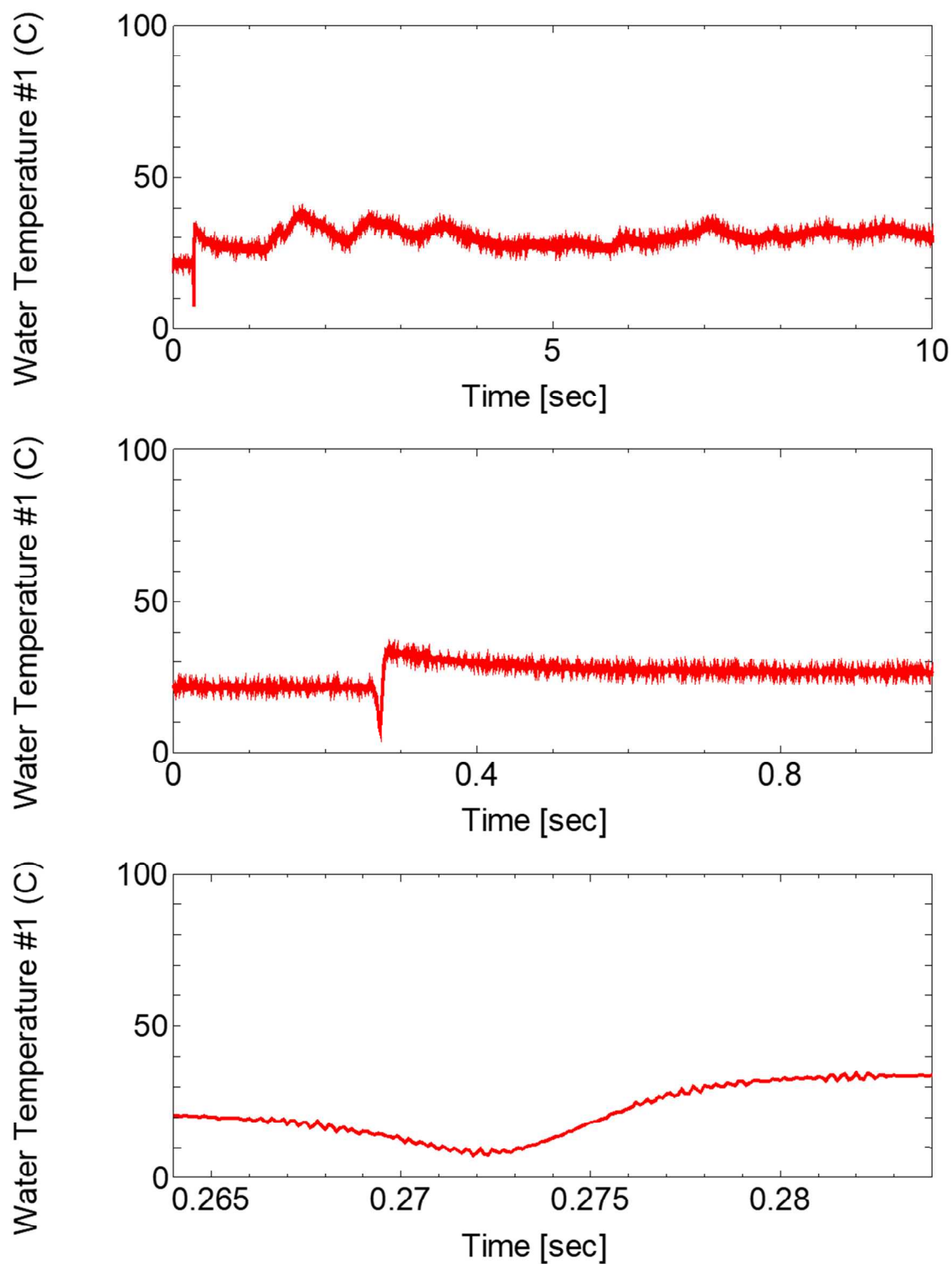


図 4.4.2-3 (6) 224-2 実験におけるカプセル内温度履歴(#1)

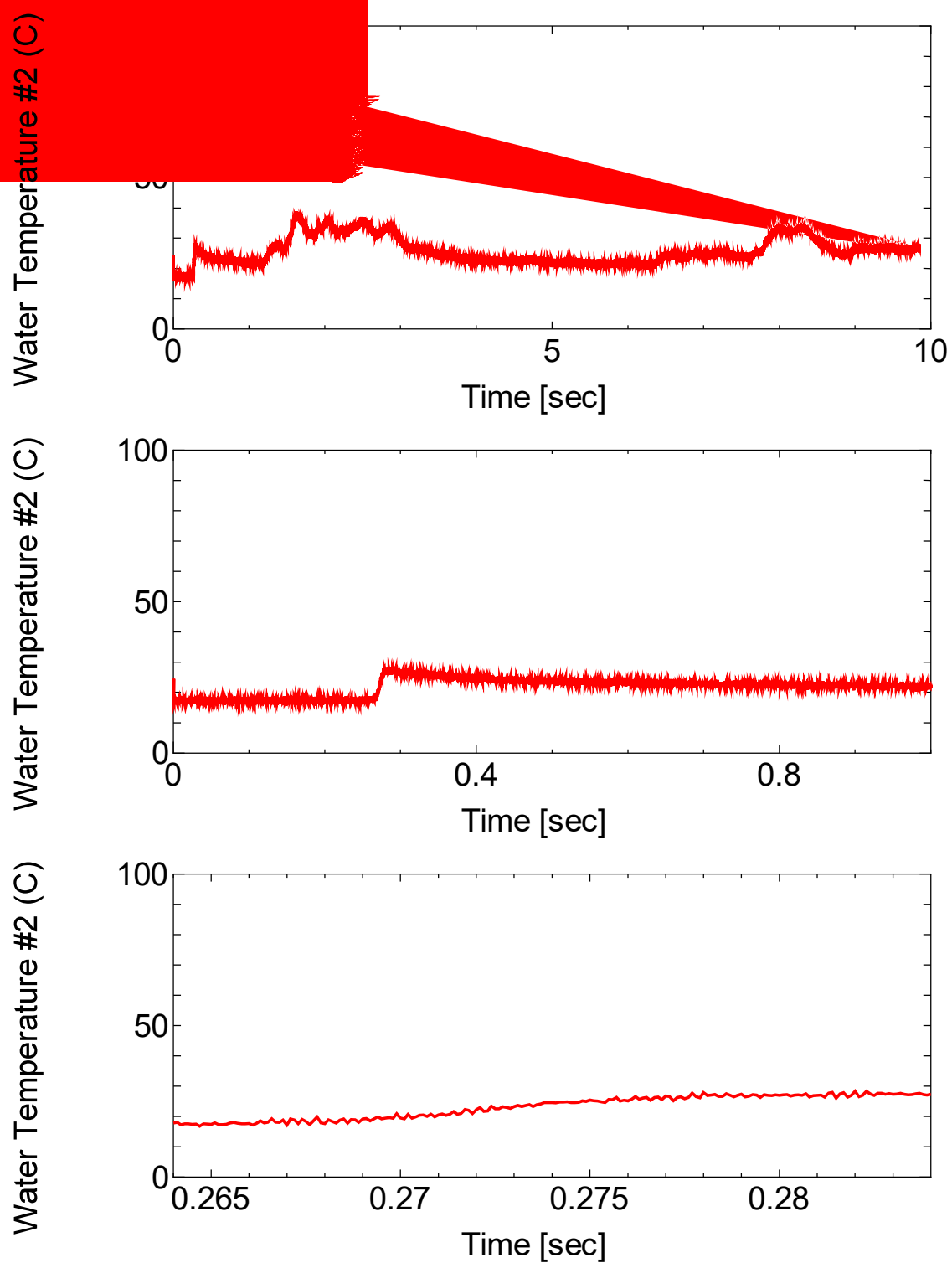


図 4.4.2-3 (7) 224-2 実験におけるカプセル内温度履歴(#2)

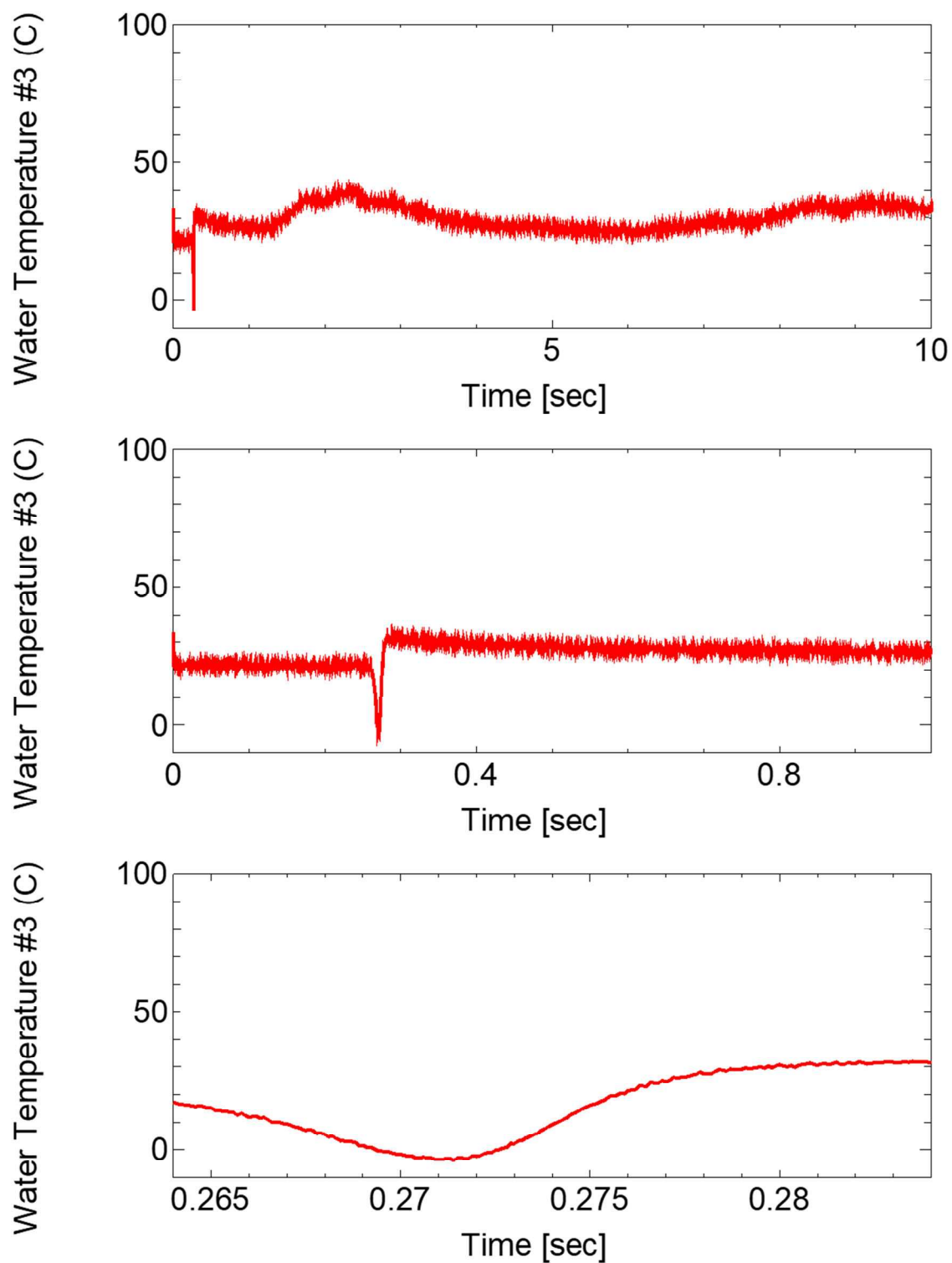


図 4.4.2-3 (8) 224-2 実験におけるカプセル内温度履歴(#3)

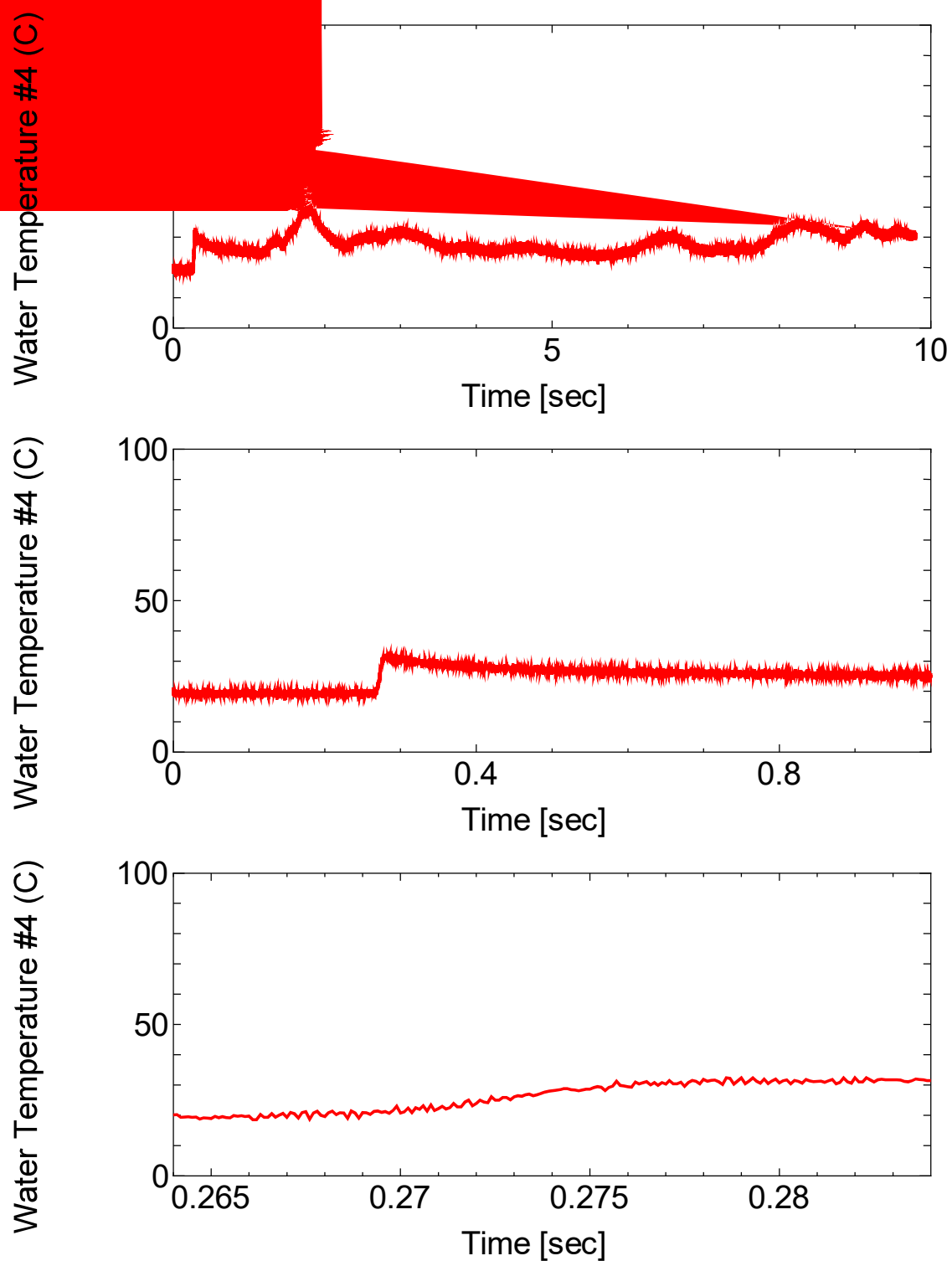


図 4.4.2-3 (9) 224-2 実験におけるカプセル内温度履歴(#4)

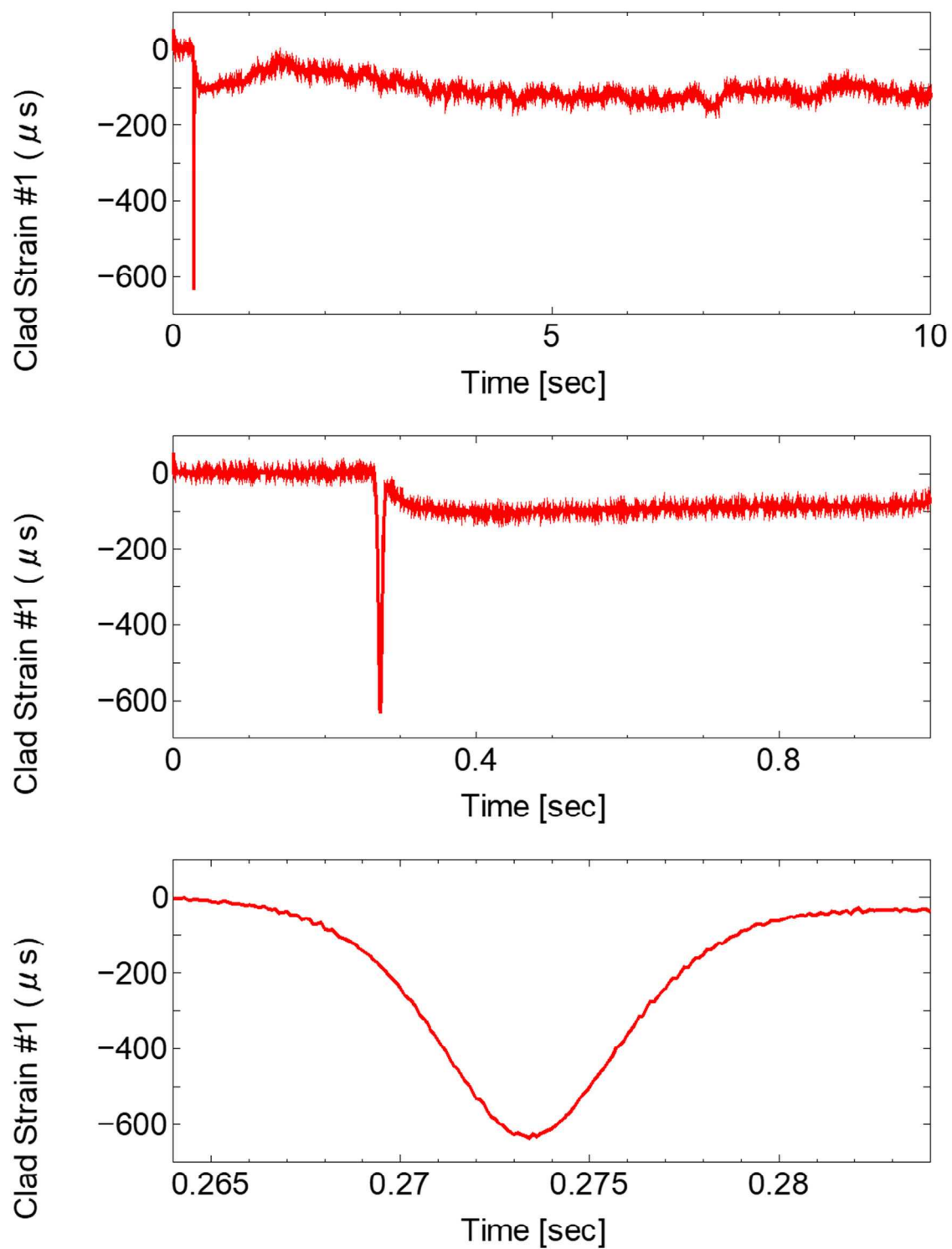


図 4.4.2-3 (10) 224-2 実験における被覆管周方向ひずみ(#1)

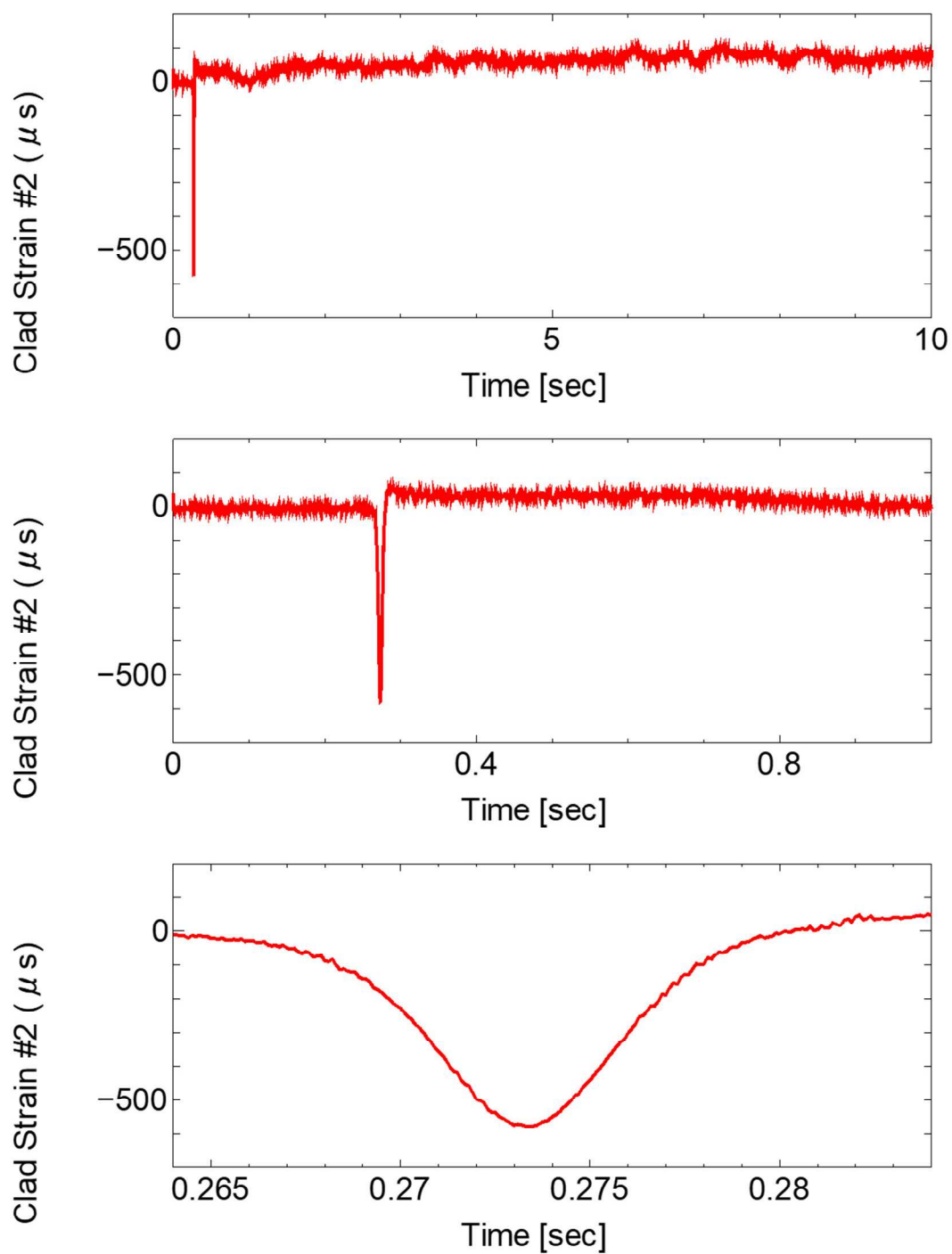


図 4.4.2-3 (11) 224-2 実験における被覆管周方向ひずみ履歴(#4)

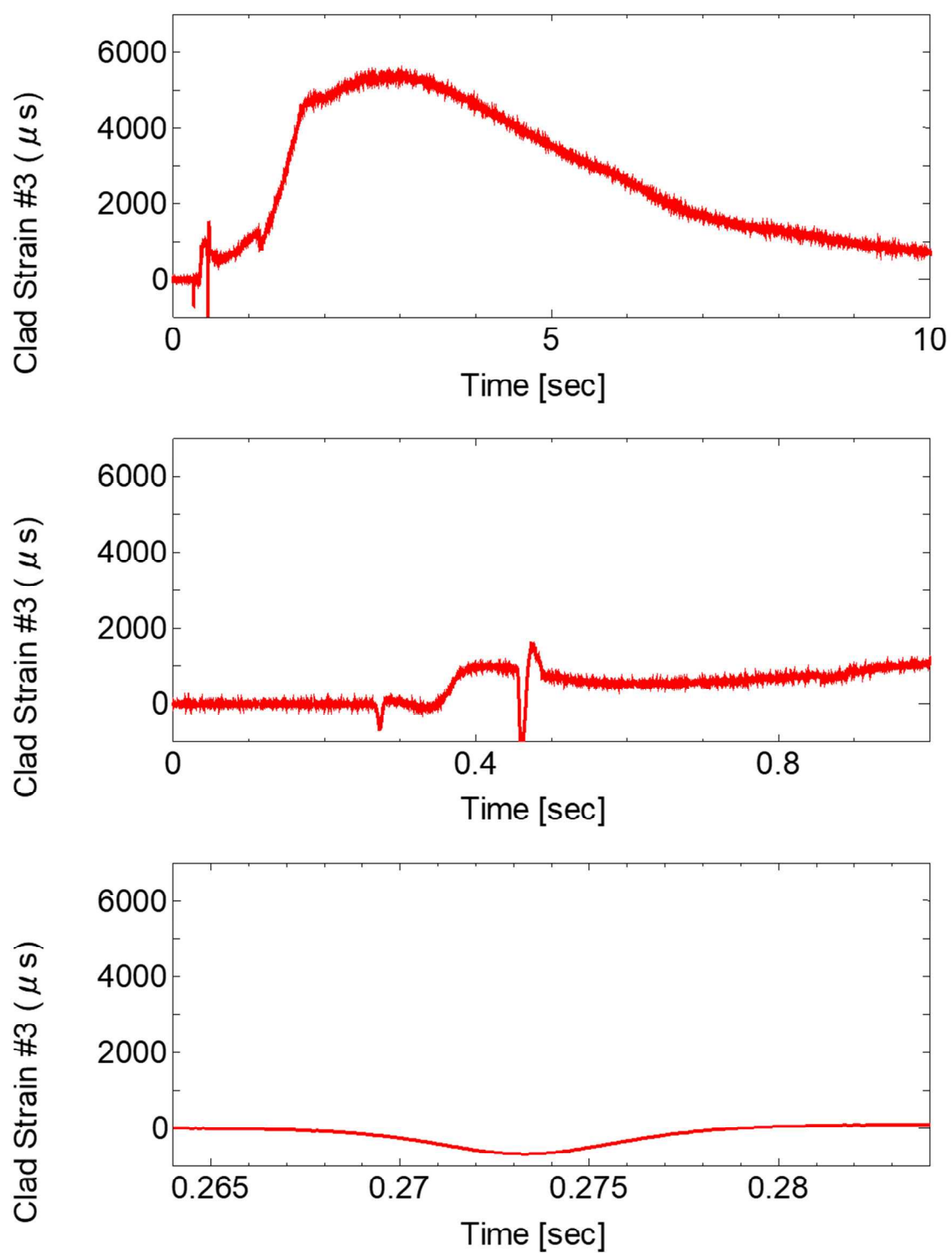


図 4.4.2-3 (12) 224-2 実験における被覆管周方向ひずみ履歴

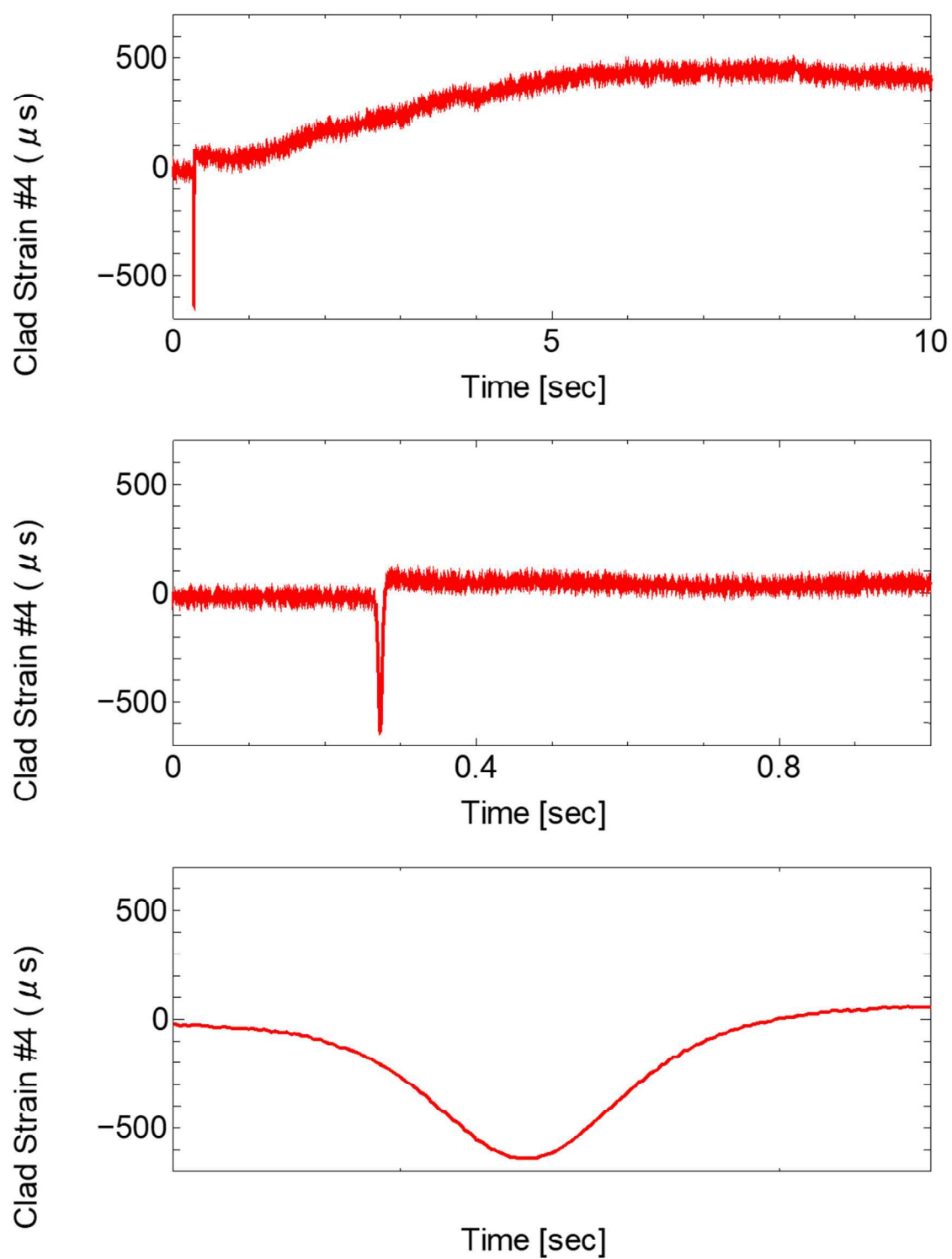


図 4.4.2-3 (13) 224-2 実験における被覆管周方向ひずみ履歴



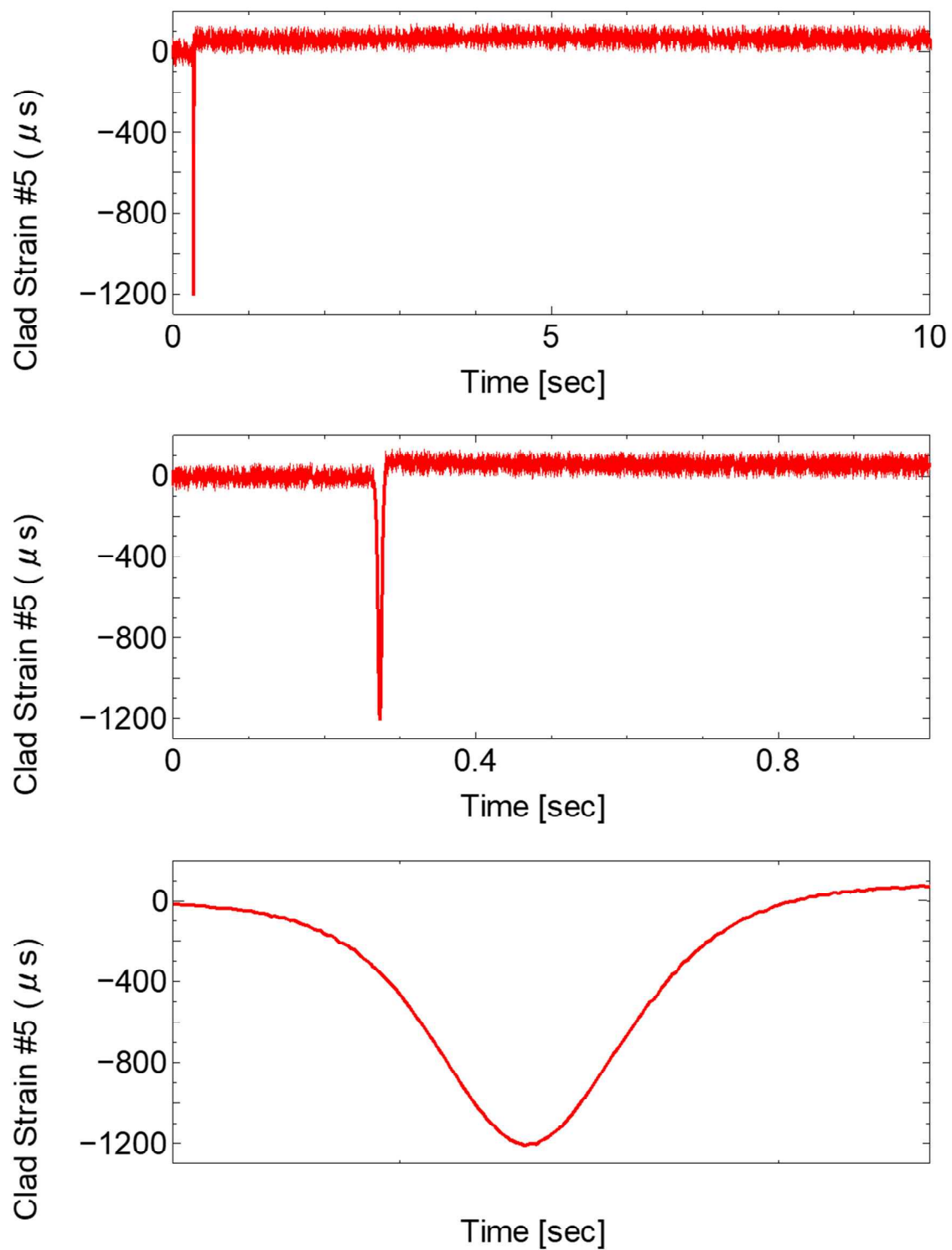


図 4.4.2-3(14) 224-2 実験における被覆管周方向ひずみ履歴

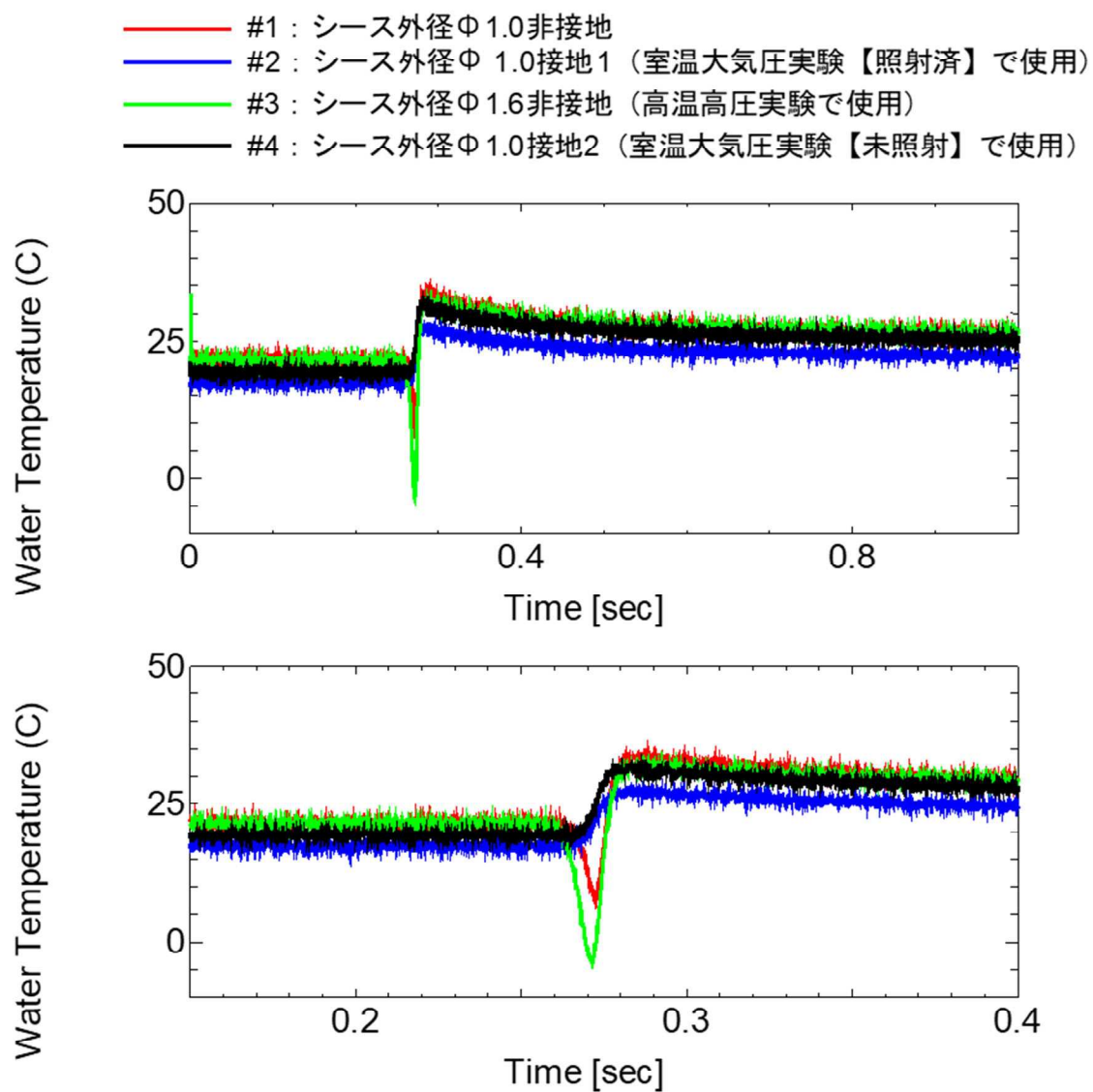


図 4.4.2- 3(15) 224-2 実験におけるにおけるカプセル内温度履歴まとめ(#1~#4)

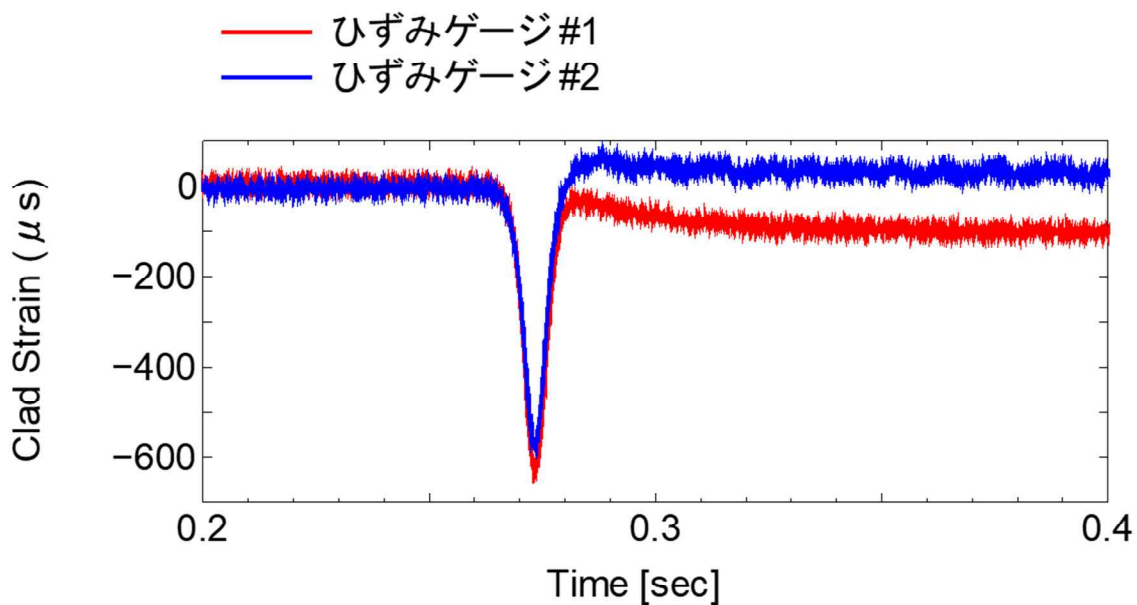


図 4.4.2-3(16) 224-2 実験における被覆管周方向ひずみ履歴(#1、#2)

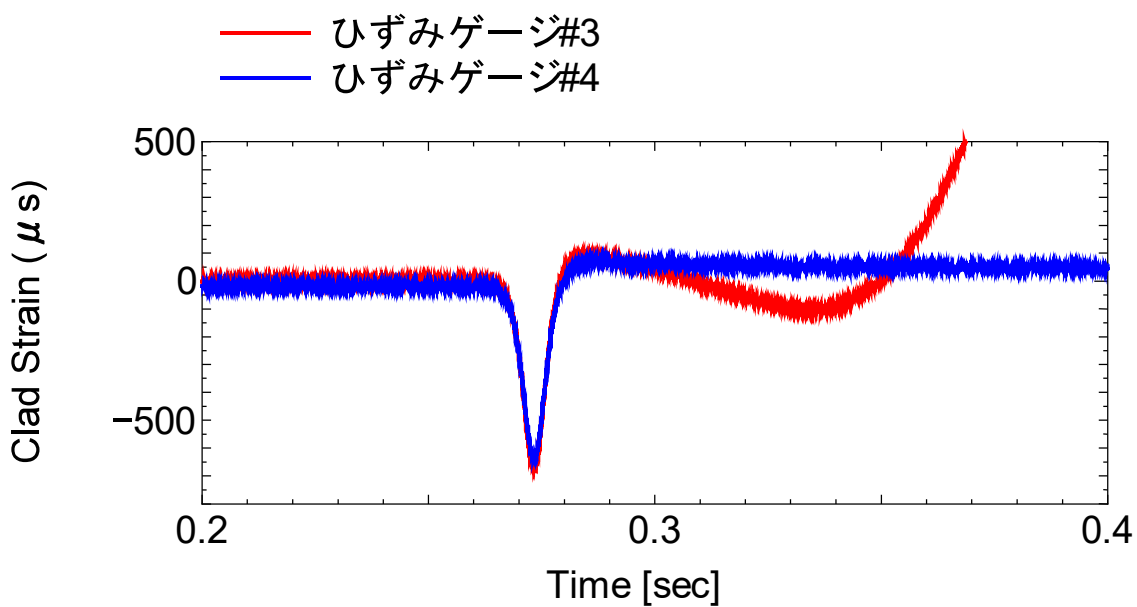


図 4.4.2-3(17) 224-2 実験における被覆管周方向ひずみ履歴まとめ(#3、#4)

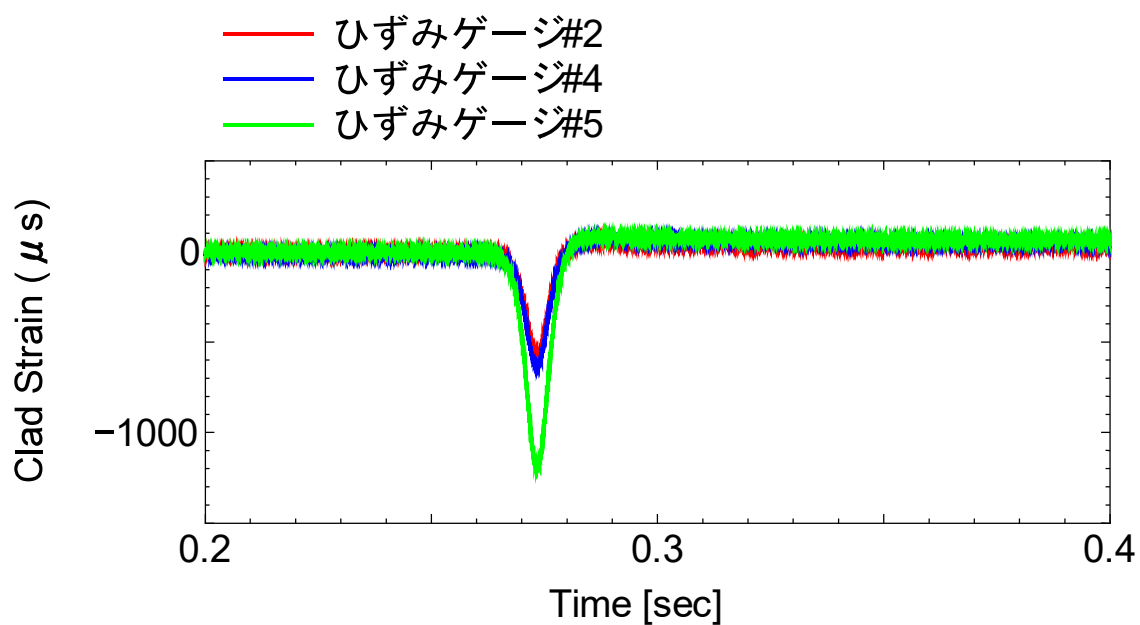


図 4.4.2-3(18) 224-2 実験における被覆管周方向ひずみ履歴まとめ(#2、#4、#5)

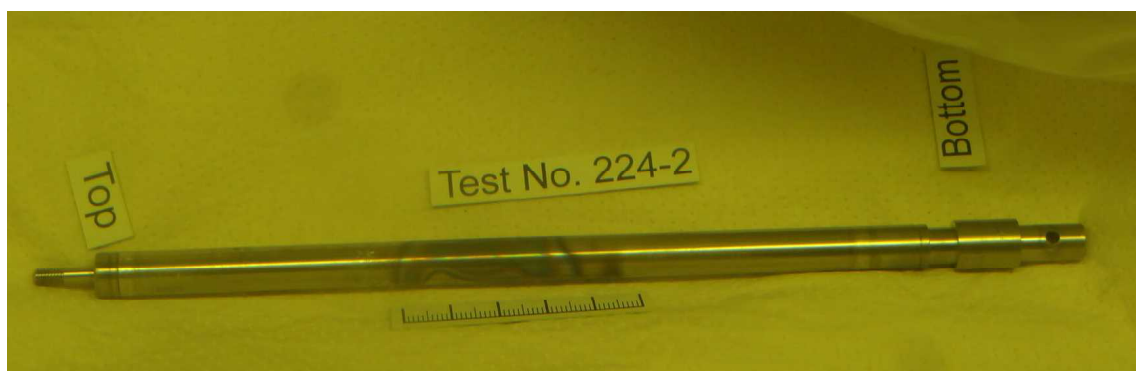


図 4.4.2-4 224-2 実験後燃料棒外観

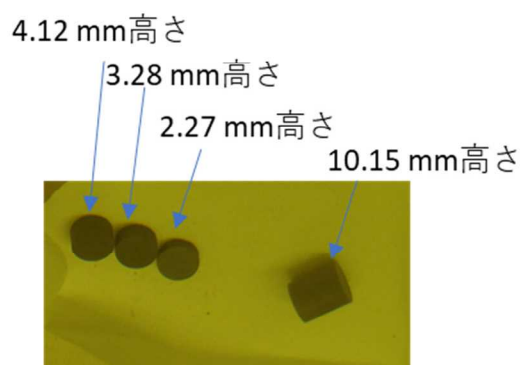


図 4.4.2-5 224-2 実験後燃料ペレット(濃縮度 1.51%)外観

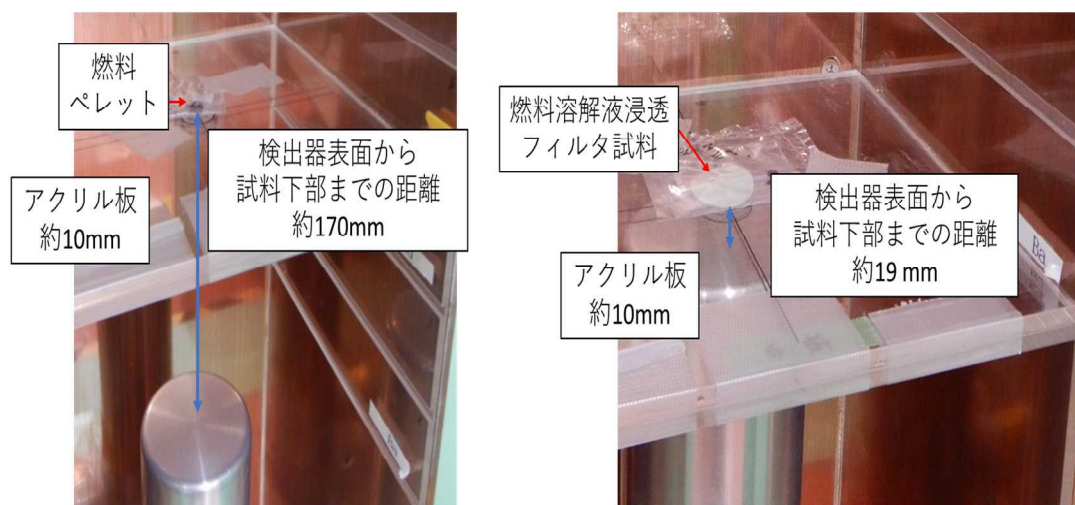


図 4.4.2-6 224-2 実験後燃料ペレット及び燃料溶解液浸透フィルタ試料の $\gamma$ 線計測時、試料セット状況