

4.3 LOCA 試験

燃料ペレットを除去しない状態の高燃焼度試験燃料棒を対象とする LOCA 模擬試験装置をホットセルに設置した。また、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 (AP2-3) から平成 28 年度に採取した燃料ペレット片⁽¹⁾ に対し、LOCA 時の温度変化を模擬した高燃焼度燃料ペレット単体の加熱試験及び同試験後分析を実施し、加熱時の燃料ペレット片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燃料被覆管に対し、地震時に燃料棒に加わる荷重を適切に模擬し、繰り返し荷重負荷可能な曲げ試験装置を整備した。

4.3.1 LOCA 模擬試験

(1) LOCA 模擬試験装置のホットセル内設置

燃料ペレットを除去しない状態の高燃焼度燃料を対象とした LOCA 模擬試験を実施できるよう、昨年度までに LOCA 模擬試験装置の整備を進めてきた⁽¹⁻⁴⁾。本年度は当該装置を原子力機構燃料試験施設ホットセル内に設置した。

図 4.3.1-1 にホットセル内に設置した LOCA 模擬試験装置の外観を示す。同装置は引張試験機 (荷重一定保持装置、加熱炉 (赤外線イメージ炉)、酸化雰囲気容器、等が内装された構造)、蒸気発生装置、局所排気装置、冷却水循環装置、熱電対溶接装置、制御盤、等により構成されている。

装置設置後には性能試験を実施し、同装置が所定の性能を満足し、LOCA 時に燃料が経験すると考えられる温度履歴、雰囲気及び荷重を適切に模擬出来ることを確認した。

4.3.2 燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験

(1) 試料採取

(a) AP2-1 セグメント燃料からの試料採取

アウトガス分析装置 (OGA)⁽²⁾ を用いた加熱試験の供試材として、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 から燃料ペレット片を採取した。採取した燃料ペレット片の情報を表 4.3.2-1 に示す。

燃料ペレット片を採取した AP2-1 燃料セグメントの平均燃焼度は 73 GWd/t であり、先行研究において推定されている燃料ペレットの顕著な細片化 (μm ~100 μm オーダーの粒子サイズの細片化) 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/t)⁽⁵⁾ に近く、燃焼の進展に伴う微細組織変化が生じ始めるとされる燃焼度 (局所燃焼度で約 70 GWd/t)⁽⁶⁾ にも到達していることから、同燃料は燃料の燃焼の進展に伴う微細組織変化と LOCA 時の細片化現象との関係性を評価することを目的とした本試験に適しているといえる。

燃料ペレット片の採取方法は次の通りである。まず、AP2-1 燃料セグメントの上端から

約 204 - 229 mm の位置よりペレット約 2 個分の試料を切出し、次に、切出した試料についてさらに被覆管を背割りし、燃料ペレット片を採取した。燃料ペレット片の採取位置を図 4.3.2-1 に示す。同図には、AP2-1 セグメント燃料被覆管の酸化膜厚さの文献値⁽⁴⁾を示している。

採取した燃料ペレット片の内、比較的大きなペレット片 10 個について、外観観察を実施した。図 4.3.2-2 及び図 4.3.2-3(1) - (10)に採取した燃料ペレット片の外観画像を示す。各ペレット片の識別番号は図 4.3.2-2 に示す通り、No. 1 - No. 10 とした。ペレット片 No. 3、5 及び 7 は外周部に滑らかな曲率を有していることから、ペレット最外周部近傍を含む位置から採取されたと推定される。この他のペレット片については、外観画像からはそのペレット径方向における採取位置を判断することは困難であった。しかしながら、選定した 10 個のペレット片のサイズはいずれも約 5 mm 程度であり、ペレットの中心部から外周部を横断する位置から採取されたものと推測される。

(b) AP2-3 セグメント燃料からの試料採取

平成 28 年度に AP2-3 セグメント燃料から OGA を用いた加熱試験の供試材として燃料ペレット片を採取した⁽¹⁾。平成 28 年度に採取した燃料ペレット片の情報を表 4.3.2-2 に示す。燃料ペレット片を採取した AP2-3 セグメント燃料の平均燃焼度は 81 GWd/t であり、先行研究において推定されている燃料ペレットの顕著な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/t）⁽⁵⁾を超えるとともに、燃焼の進展に伴う微細組織変化が生じ始めるとされる燃焼度（局所燃焼度で約 70 GWd/t）⁽⁶⁾にも到達していることから、同燃料は燃料の燃焼の進展に伴う微細組織変化と LOCA 時の細片化現象との関係性を評価することを目的とした本試験に適しているといえる。

図 4.3.2-4 に、この燃料ペレット片の採取位置近傍から採取した試料に対し過去に実施した断面マイクロ組織観察結果を示す⁽⁷⁾。図から、ペレット径方向中心近傍にダークゾーンが、ペレット最外周においては高燃焼度組織（リム組織）が確認でき、これらの組織においては、結晶粒内に製造時と異なる微小な気泡が高密度に形成されている様子が観察される。LOCA 時の急速なペレット温度上昇に伴いこれらの気泡の内圧が急速に上昇することで気泡周囲に割れが発生し、この割れがペレット細片化の駆動力となる可能性があることから、照射に伴うペレットの微細組織の変化とペレット細片化との関係を把握しておくことは、LOCA 時のペレット細片化の機構を知る上で重要と考えられる。

これらの燃料ペレット片のうち、本年度は燃料ペレット片 No. 1、2 及び 4 を加熱試験に供した。採取した燃料ペレット片の外観画像並びに重量及び密度測定結果を表 4.3.2-3 並びに図 4.3.2-5 及び 4.3.2-6 にそれぞれ示す。外観観察の結果、採取した燃料ペレット片のサイズはいずれも約 5 mm 程度であることから、この中にはペレット細片化の原因及びメカニズムを解明する上で重要なダークゾーンが含まれていると推測される⁽¹⁾。図 4.3.2-6 中のマーカーの面積の大小は、各燃料ペレット片の重量の大小を表している。また、同図

には MATPRO⁽⁸⁾の固体スウェリング率 (10 GWd/t 当たり 0.62% $\Delta V/V_0$) を併せて示している。図から、今回密度測定を実施した大部分の燃料ペレット片の体積変化率は、固体スウェリング率の傾きより大きいことが分かる。この結果より、採取した燃料ペレット片の体積膨張には、固体スウェリングの影響に加えガス気泡スウェリングの影響が表れている可能性がある。

図 4.3.2-7-4.3.2-12 に加熱試験前の燃料ペレット片 No. 1、2 及び 4 の外観及び走査型電子顕微鏡 (SEM) 画像を示す。図 4.3.2-8(1)の Photo 1-4、図 4.3.2-10(3)の Photo 3-4、及び図 4.3.2-12(3)の Photo 3-4 において、ダークゾーンないし高燃焼度組織の特徴^(6,9)である多数の気泡や細粒化した結晶粒が観察される。一方、図 4.3.2-8(4)の Photo 4-4、図 4.3.2-10(1)の Photo 1-4、及び図 4.3.2-12(4) Photo 4-4 などにおいて、ペレットの外周部、すなわちダークゾーンの径方向外側の組織に特徴的な製造時の結晶粒径約 10 μm と同等のサイズの結晶粒や焼きしまりにより気孔が消失した様子⁽⁹⁾が観察される。以上の観察から、加熱試験に供する燃料ペレット片 No. 1、2 及び 4 はいずれもダークゾーンないし高燃焼度組織とペレット外周部の組織とを横断する位置から採取したものと考えられる。

(2) 加熱試験

本年度は昨年度に引き続き、燃料ペレット片の顕著な細片化が発生するしきい値となる温度を評価するための加熱試験を実施した。供試材は AP2-3 燃料セグメントから採取した燃料ペレット片 No. 1、2 及び 4 の計 3 試料である。試験条件を表 4.3.2-4 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^(10,11)に近い約 5 K/s の速さで加熱した。

AP2-3 燃料セグメントから採取した燃料ペレット片 No. 5 及び 6 に対して実施した加熱試験において、到達温度が 1273 K 以上の試験で燃料ペレット片の顕著な細片化が観察されたことから⁽⁴⁾、1073–1273 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) があると推測される。この細片化発生しきい温度を精緻化することを目的として、燃料ペレット片 No. 4 に対する加熱試験の到達温度を 1073、1173 及び 1273 の 3 条件とし、到達温度ごとに 1 回、計 3 回の試験を実施した。燃料ペレット片 No. 2 及び No. 1 に対する加熱試験の到達温度は、No. 4 に対する試験結果を踏まえ、それぞれ 1273 K 及び 1173 K とした。

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燃料ペレット片の外観を観察した。なお、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。燃料ペレット片 No. 4 に対する試験では、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、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。

(a) 燃料ペレット片 No. 4 に対する試験

図 4.3.2-13 に加熱試験後の燃料ペレット片の外観を示す。到達温度 1073 及び 1173 K の試験において局所的な細片化が、到達温度 1273 K の試験において比較的顕著な細片化が観察された。細片化後の個々の燃料ペレットの粒子（以下「燃料ペレット粒子」という。）のサイズは粉末状の非常に小さいものから数ミリ程度のもので様々であった。約 1 mm 以下のサイズに細片化した燃料ペレット粒子の試験前の燃料ペレット片に占める重量割合は到達温度 1073、1173、及び 1273 K の各試験においてそれぞれ 1%未満、1%未満、及び 2%であった。このように、1273 K 未満の到達温度の試験で局所的な細片化が、1273 K 以上の到達温度の試験で顕著な細片化が生じる傾向は、昨年度に AP2-3 燃料セグメントから採取した燃料ペレット片 No. 5 及び 6 に対して実施した加熱試験の結果と同等であった。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⁽³⁾、本試験で得られた結果はこれらの報告と概ね整合する。

図 4.3.2-14(a)に加熱試験時のるつぼ温度及び燃料ペレット片から放出されたキセノン (Xe) 及びクリプトン (Kr) の単位重量当たりの分圧の時刻歴を示す。いずれの試験においても、ほぼ計画通りの温度履歴であった。また、いずれの試験においても Xe 及び Kr 双方のバックグラウンドを超える有意な放出が確認された。

図 4.3.2-14(b)に加熱試験時のるつぼ温度及び燃料ペレット片から放出された Xe 及び Kr の累積放出率の時刻歴を示す。ここで、FP ガスの累積放出率は燃料ペレット片 No. 4 の到達温度 1273 K の試験（昇温 3 回目の試験）において放出された FP ガスの総量で規格化した。図から、到達温度が 1173 K の試験（昇温 2 回目の試験）で FP ガスの放出量が最も小さくなったことが分かる。燃料ペレット片 No. 4 に対する試験では、各到達温度に達した後、細片化した部分を回収し、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ている。細片化に伴い、燃料ペレット内に析出した FP ガス気泡が放出されると予想されることから、今回の結果は 1073 K までの温度で細片化する組織（細片化しやすい組織）と 1273 K 程度まで細片化しない組織（細片化しにくい組織）の存在を示唆している可能性がある。昨年度に実施した加熱試験において、加熱時の到達温度が高くなるほど燃料ペレットの細片化が著しくなる傾向が見られたことから、加熱に伴う燃料ペレット内の FP ガス気泡の圧力上昇と、それに伴うペレットマトリクスへの応力負荷が、燃料ペレットの細片化の主な原因であると考えられた。そして、先行研究において LOCA 模擬試験中に著しい燃料ペレットの細片化が見られた燃料の燃焼度は燃料ペレット内におけるダークゾーンや高燃焼度組織の形成が著しくなる燃焼度に近いことから、これらの微細組織中に特徴的に見られる粗大化気泡の形成が燃料ペレット細片化の発生及びその程度と関連していることが示唆された。これらを踏まえ、今回加熱試験に供した燃料ペレット片については、今後、SEM を用いたマイクロ組織観察等を実施し、1073 K までの温度で細片化する組織（細片化しやすい組織）と 1273 K 程度まで細片化しない組織（細片化しにくい組織）との差を調べることで、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

関係を調査する予定である。

なお、図 4.3.2-14 から FP ガス放出時のるつぼ温度を評価するには燃料ペレット片から FP ガスが放出される時刻と、放出された FP ガスが四重極質量分析計において検出される時刻との間の時間差を考慮する必要がある。今後、この時間差を評価し、FP ガス放出時のるつぼ温度を評価する必要がある。

(b) 燃料ペレット片 No. 2 に対する試験

図 4.3.2-15 に加熱試験後の燃料ペレット片の外観を示す。図から、燃料ペレット片は顕著に細片化した様子が確認された。燃料ペレット粒子のサイズは粉末状の非常に小さいものから数ミリ程度のもので様々なサイズのものが確認され、燃料ペレット片の組織ごとに細片化の程度が異なること、すなわち、顕著な細片化を生じる組織と細片化が顕著でない組織とが存在することが示唆される。約 1 mm 以下のサイズに細片化した燃料ペレット粒子の試験前の燃料ペレット片に占める重量割合は約 3%であった。この燃料ペレット片についても SEM を用いたマイクロ組織観察等を実施し、顕著な細片化を生じた組織と生じなかった組織との差を調べることで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を確認できると考えられる。

図 4.3.2-16(a)に加熱試験時のるつぼ温度及び燃料ペレット片から放出された Xe 及び Kr の単位重量当たりの分圧の時刻歴を、図 4.3.2-16(b)に加熱試験時のるつぼ温度及び燃料ペレット片から放出された Xe 及び Kr の累積放出率の時刻歴をそれぞれ示す。図から、ほぼ計画通りの温度履歴が得られたことが確認された。図 4.3.2-16(a)から、燃料ペレット片から単位重量当たりに放出された FP ガス分圧は、燃料ペレット片 No. 4 の試験に比べて 1 桁程度高いことが分かる。また、FP ガス放出のピークは 90 秒近傍と 120 秒近傍にそれぞれ存在するように見える。

なお、図 4.3.2-16 から FP ガス放出時のるつぼ温度を評価するには燃料ペレット片から FP ガスが放出される時刻と、放出された FP ガスが四重極質量分析計において検出される時刻との間の時間差を考慮する必要がある。今後、この時間差を評価し、FP ガス放出時のるつぼ温度を評価する必要がある。

(c) 燃料ペレット片 No. 1 に対する試験

図 4.3.2-17 に加熱試験後の燃料ペレット片の外観を示す。図から、燃料ペレット片は顕著に細片化した様子が確認された。燃料ペレット粒子のサイズは粉末状の非常に小さいものから数ミリ程度のもので様々なサイズのものが確認され、燃料ペレット片の組織ごとに細片化の程度が異なること、すなわち、顕著な細片化を生じる組織と細片化が顕著でない組織とが存在することが示唆される。約 1 mm 以下のサイズに細片化した燃料ペレット粒子の試験前の燃料ペレット片に占める重量割合は約 3%であった。この燃料ペレット片についても SEM を用いたマイクロ組織観察等を実施し、顕著な細片化を生じた組織と生じなかった組織との差を調べることで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を確認できると考えられる。

図 4.3.2-18(a)に加熱試験時のるつぼ温度及び燃料ペレット片から放出された Xe 及び Kr の単位重量当たりの分圧の時刻歴を、図 4.3.2-18(b)に加熱試験時のるつぼ温度及び燃料ペレット片から放出された Xe 及び Kr の累積放出率の時刻歴をそれぞれ示す。図から、ほぼ計画通りの温度履歴が得られたことが確認された。図 4.3.2-18(a)から、燃料ペレット片か

ら単位重量当たり放出された FP ガス分圧は、燃料ペレット片 No. 2 の試験に比べ若干高く、燃料ペレット片 No. 4 の試験に比べて 1 桁程度高いことが分かる。また、FP ガス放出のピークは 95 秒近傍と 120 秒近傍にそれぞれ確認できる。これらの FP ガス放出ピークは燃料ペレット片 No. 2 の試験においてもほぼ同時刻で観察されている。加えて、FP ガス放出開始時刻も燃料ペレット片 No. 1 及び 2 の試験間でほぼ同等であることが分かる。両者の試験でるつば温度履歴は到達温度が異なるのみでほぼ同一であることを踏まえると、FP ガス放出開始温度及び FP ガス放出ピーク時温度は燃料ペレット片 No. 1 及び 2 の試験間でほぼ同等であったと考えられる。FP ガス放出ピークが燃料ペレット片の細片化に伴って観察されると仮定すれば、燃料ペレット片 No. 2 の細片化は 1173 K 以下の温度で生じたと推測される。

なお、図 4.3.2-18 から FP ガス放出時のるつば温度を評価するには燃料ペレット片から FP ガスが放出される時刻と、放出された FP ガスが四重極質量分析計において検出される時刻との間の時間差を考慮する必要がある。今後、この時間差を評価し、FP ガス放出時のるつば温度を評価する必要がある。

(3) 加熱試験後の分析

(a) 燃料ペレット片 No. 5 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. 5 に対し、平成 30 年度に加熱試験を実施した⁽⁴⁾。燃料ペレット片 No. 5 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 4.3.2-5 にそれぞれ示す。燃料ペレット片 No. 5 は加熱試験中に細片化した。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一部回収し、光学顕微鏡を用いたマイクロ組織観察を実施した。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 4.3.2-19 及び 4.3.2-20 に光学顕微鏡で撮影した加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 5 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いずれもサイズが約 1 mm 以上あり、細片化が比較的顕著でなかった組織と考えられる。図 4.3.2-20(2)Photo 2-1、4.3.2-20(3)Photo 4-2、図 4.3.2-20(4)Photo 5-1 及び Photo 6-1 等から、燃料ペレット粒子には製造時の結晶粒径（約 10 μm ）と同等サイズの結晶粒が観察される。また、図 4.3.2-20(3)Photo 3-1 及び 4.3.2-20(4)Photo 6-1 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ことから、これらの細片化が比較的顕著でなかった燃料ペレット粒子は、製造時の結晶粒径を保った領域において、加熱試験時に粒界割れが起こり分離した可能性が高いと考えられる。

図 4.3.2-21 及び 4.3.2-22 に加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 5 の SEM 画像を示す。図 4.3.2-22(1)Photo 1-4 及び 4.3.2-22(3)Photo 3-4 に示すように、サイズが比較的大きく ($> 500 \mu\text{m}$)、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粒子に

は製造時の結晶粒径（約 10 μm ）と同等サイズの結晶粒が観察される傾向である。結晶粒界も比較的明瞭に観察される。一方、図 4.3.2-22(5)Photo 5-4 及び 4.3.2-22(6)Photo 6-4 に示すように、サイズが比較的小さく（100–200 μm ）、細片化が比較的顕著であった組織と考えられる燃料ペレット粒子には、ダークゾーンないし高燃焼度組織の特徴^(6,9)である多数の気泡や細粒化した結晶粒が観察される。図 4.3.2-22(7)Photo 7-3 には、製造時の結晶粒径（約 10 μm ）をほぼ保った結晶粒 1 個分が観察された。

図 4.3.2-23 に加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 5 の粒径分布を示す。この粒径分布は図 4.3.2-19(1)及び 4.3.2-21 の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⁽¹²⁾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 μm 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 4.3.2-23(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算出した。図 4.3.2-23 から、体積割合にして 10%程度の燃料ペレット粒子が 1 mm 以下の粒径に細片化したことが分かる。

(b) 燃料ペレット片 No. 6 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. 6 に対し、平成 30 年度に加熱試験を実施した⁽⁴⁾。燃料ペレット片 No. 6 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 4.3.2-5 にそれぞれ示す。燃料ペレット片 No. 6 は加熱試験中に細片化した。燃料ペレット粒子の内、比較的大きく（> 1 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。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 4.3.2-24 及び 4.3.2-25 に光学顕微鏡で撮影した加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 6 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粒径が約 3 mm であり、細片化が比較的顕著でなかった組織と考えられる。図 4.3.2-25(2)Photo 3-1、並びに図 4.3.2-25(3)Photo 4-1 及び Photo 5-1 等から、燃料ペレット粒子には、製造時の結晶粒径（約 10 μm ）と同等サイズの結晶粒が観察される。図 4.3.2-25(2)Photo 3-1 及び図 4.3.2-25(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ことから、この細片化が比較的顕著でなかった燃料ペレット粒子は加熱試験時の粒界割れで分離した可能性が高いと考えられる。

図 4.3.2-26 及び 4.3.2-27 に加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 6 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 μm ）と同等サイズの結晶粒からな

るもの（例えば、図 4.3.2-27(1)Photo 1-2-2 及び図 4.3.2-27(6)Photo 5-4）と、ダークゾーンないし高燃焼度組織の特徴^(6,9)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 4.3.2-27(3)Photo 2-4 及び図 4.3.2-27(5)Photo 4-4）の 2 種類が観察される。これらの組織は様々なサイズの燃料ペレット粒子において観察され、燃料ペレット片の組織と細片化後のサイズの間には明確な関係は認められなかった。

燃料ペレット粒子の割れ方も様々であった。図 4.3.2-27(1)Photo 1-2-2 及び 4.3.2-27(10)Photo 9-4 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 4.3.2-27(6)Photo 5-4 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。また、同図には脱粒した様子も観察される。

図 4.3.2-28 に加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 6 の粒径分布を示す。この粒径分布は図 4.3.2-24(1)及び 4.3.2-26 の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。粒径の定義及び評価方法は燃料ペレット片 No. 5 の場合と同一とした。図 4.3.2-28(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 4.3.2-28 から、体積割合にして 12%程度の燃料ペレット片が 1 mm 以下の粒径に細片化したことが分かる。燃料ペレット片 No. 5 の粒径分布と比較すると、No. 6 の場合は 1 mm 以上の粒径に細片化した燃料ペレット粒子の個数が若干少ないものの、1 mm 以下の粒径に細片化した燃料ペレット粒子の粒径分布はほぼ同等であった。

以上の燃料ペレット片 No. 5 及び 6 の加熱試験後の分析結果から、細片化した燃料ペレット粒子のサイズと燃料ペレットの微細組織との間の関係に概ね以下の傾向が示唆された。

- 比較的大きな燃料ペレット粒子（粒子サイズ 500 μm 以上）には製造時の結晶粒径（約 10 μm ）と同等サイズの結晶粒が観察される傾向であった。この結晶粒は、加熱試験前のレファレンス試料（加熱試験に供した燃料ペレット片と同じセグメント燃料棒から採取した燃料ペレット試料）に対する光学顕微鏡観察において観察されたダークゾーンの外側からリム組織の内側に位置する組織のそれとよく似ている⁽¹⁾。また、これらの燃料ペレット粒子に存在するき裂は結晶粒界に沿って形成しているように見えることから、比較的大きな燃料ペレット粒子はダークゾーンの外側からリム組織の内側に位置する組織が加熱試験時に粒界割れしたことによって形成された可能性が高いと考えられる。
- 比較的小きな燃料ペレット粒子（粒子サイズ 500 μm 未満）には製造時の結晶粒径（約 10 μm ）と同等サイズの結晶粒からなるものと、ダークゾーンないし高燃焼度組織の特徴^(6,9)である多数の気泡や細粒化した結晶粒からなるものの 2 種類が観察された。これらの組織は様々なサイズの燃料ペレット粒子において観察され、燃料ペレット片の組織と細片化後のサイズとの間に明確な関係は認められなかった。また、燃料ペレ

ト片の破面からは粒界割れや脱粒、粒内割れとみられる様子が観察され、割れの様子も様々であった。

- 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の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。

4.3.3 LOCA 時の温度履歴を経験した燃料被覆管の四点曲げ試験

(1) 本事業で整備する四点曲げ試験装置の概要

原子力機構は LOCA 模擬急冷破断試験において膨れ、破裂、高温水蒸気中酸化、水素化、及び急冷を経験した軽水炉燃料被覆管試料を対象とした四点曲げ試験装置（概略を図 4.3.3-1 に示す）を既に有している^(13,14)。しかし、現在の試験装置は燃料被覆管試料の破裂開口部に対し圧縮ないし引張のいずれかの静的荷重のみを負荷する設計となっており、地震時に燃料被覆管に負荷されると想定される圧縮と引張の繰り返し荷重負荷条件を模擬できない。そこで、本年度は LOCA 模擬急冷破断試験を経験した軽水炉燃料被覆管試料に対し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の実施に必要な治具を製作した。また、当該試験に供する燃料被覆管試料として、PWR 用 17×17 型非照射ジルカロイ-4 被覆管を調達し、190 mm の長さに短尺加工した。

(2) 繰り返し荷重を負荷する四点曲げ試験用治具の製作

製作した治具は破裂開口部が荷重点間の中心に位置し、かつ垂直方向において下向きになるように設置した LOCA 模擬急冷破断試験後の軽水炉燃料被覆管試料の破裂開口部に、圧縮と引張の荷重を交互に繰り返し負荷できる構造とした。製作品は原子力機構に設置された既設のオートグラフ（島津製作所製、AG-I 20 kN）に取り付けて使用できるものとし、試験時の荷重に十分耐える剛性を有する構造とした。

製作品の主な仕様、構造図及び外観画像を表 4.3.3-1、図 4.3.3-2 及び図 4.3.3-3 にそれぞれ示す。

燃料被覆管試料の支持部の構造は次のとおりである。荷重点間及び支持点間距離は既存の四点曲げ試験装置^(13,14)との比較ができるよう、それぞれ 72 mm 及び 130 mm とした。ピン・ローラー機構を採用し、荷重負荷時の燃料被覆管試料の変位ないし変形に伴う鉛直方向及び水平方向への移動に対し、追従性を有する構造とした。

本年度は製作した治具の性能試験として、PWR 用 17×17 型非照射ジルカロイ-4 被覆管（受取管）を対象とした繰り返し荷重を負荷する四点曲げ試験を実施した。図 4.3.3-4 に同試験で取得した荷重・変位曲線を示す。図に示す通り、燃料被覆管試料に対して圧縮と引張りの荷重を交互に繰り返し負荷できることを確認した。

表 4.3.2-1 AP2-1 燃料セグメントから採取した燃料ペレット片

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)	被覆管材料
No. 1-10	AP2-1	Vandellos- 2	PWR 17×17 UO ₂	73	M-MDA (SR*)

*応力除去焼鈍

表 4.3.2-2 AP2-3 燃料セグメントから採取した燃料ペレット片⁽¹⁾

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)	被覆管材料
No. 1-10	AP2-3	Vandellos- 2	PWR 17×17 UO ₂	81	M-MDA (SR*)

*応力除去焼鈍

表 4.3.2-3 燃料ペレット片の密度測定結果 (AP2-3 燃料セグメント)⁽¹⁾

燃料ペレット片 番号	製造時データ ⁽⁵⁾	照射後測定結果		
	理論密度比 (%TD)	試料密度 (g/cm ³)	理論密度比 (%TD)	体積変化率* (%)
No. 1	96.0	9.79	89.3	7.5
No. 2		9.72	88.7	8.3
No. 4		9.91	90.4	6.2

*体積変化率(%) = (製造時密度 - 照射後密度) / 照射後密度 × 100

表 4.3.2-4 燃料ペレット片の加熱試験条件 (No. 1, 2 及び 4)

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)	保持時間 (s)	雰囲気
AP2-3	No. 4	昇温 1 回目	5	1073	0	真空 (測定開始時真空度 : $3 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-4}$ Pa)
		昇温 2 回目		1173		
		昇温 3 回目		1273		
	No. 2	昇温 1 回目		1273		
	No. 1	昇温 1 回目		1173		

表 4.3.2-5 燃料ペレット片の加熱試験条件 (No. 5 及び 6)

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)	保持時間 (s)	雰囲気
AP2-3	No. 5	昇温 1 回目	5	973	0	真空 (測定開始時真空度 : $5.4 \times 10^{-4} - 7.3 \times 10^{-4}$ Pa)
		昇温 2 回目		1073		
		昇温 3 回目		1273		
		昇温 4 回目		1473		
	No. 6	昇温 1 回目		973		
		昇温 2 回目		1073		
		昇温 3 回目		1273		
		昇温 4 回目		1473		

表 4.3.3-1 繰り返し荷重を負荷する四点曲げ試験装置の主な仕様

条件項目	仕様
対象試料	非照射ジルカロイ被覆管 (1) PWR17×17 型 (2) BWR10×10 型
試料長	190 mm
試験温度	室温-410 K
雰囲気	大気圧
最大荷重	2 kN
ストローク	最大変位：±2 mm 速度： 3.3×10^{-2} – 1.0×10^1 mm/s
支持点間距離	130 mm
荷重点間距離	72 mm

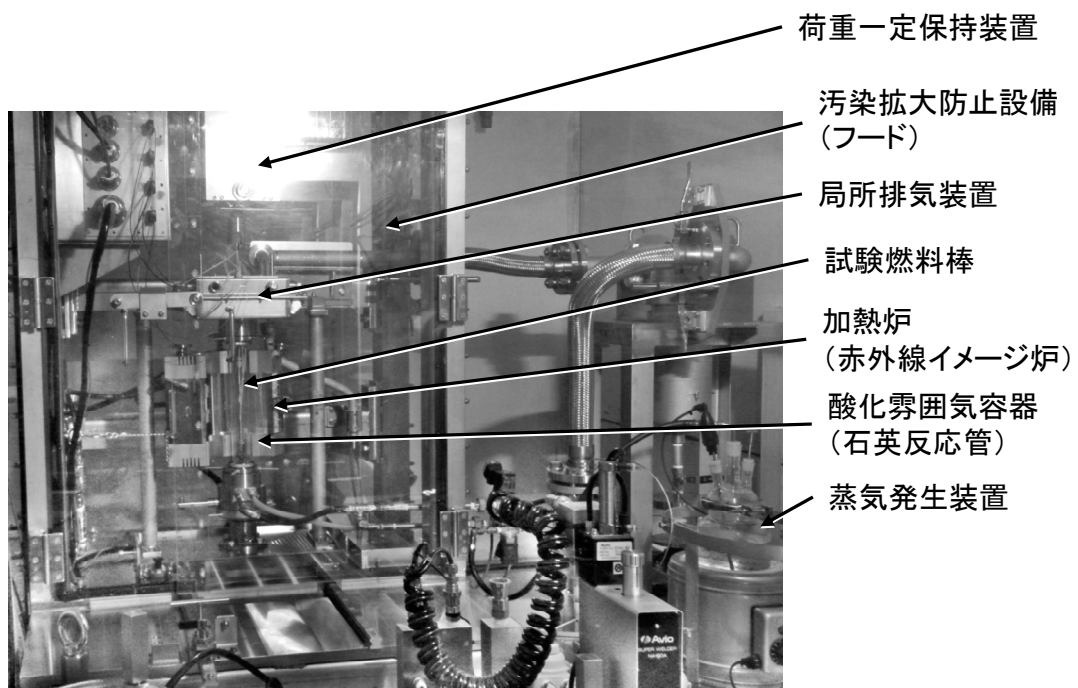


図 4.3.1-1 LOCA 模擬試験装置の外観

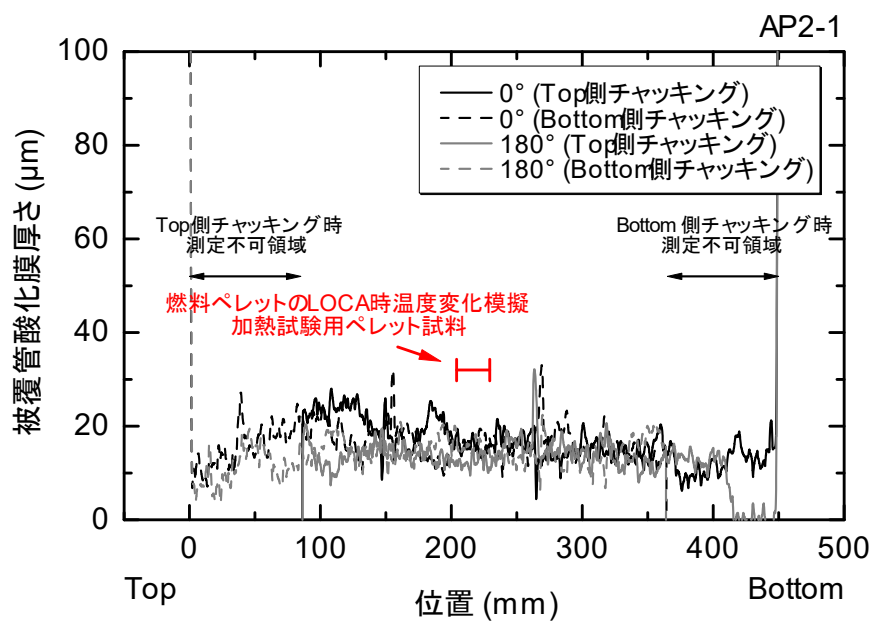


図 4.3.2-1 燃料ペレット片の採取位置

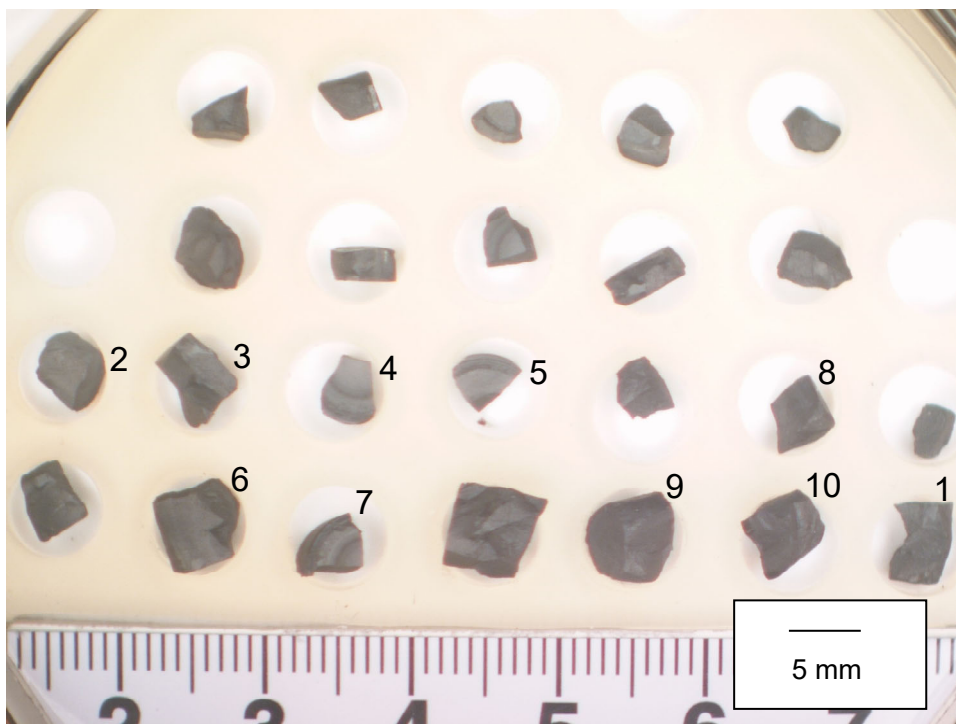


図 4.3.2-2 AP2-1 燃料セグメントから採取した燃料ペレット片の外観
(図中数値はペレット片番号)

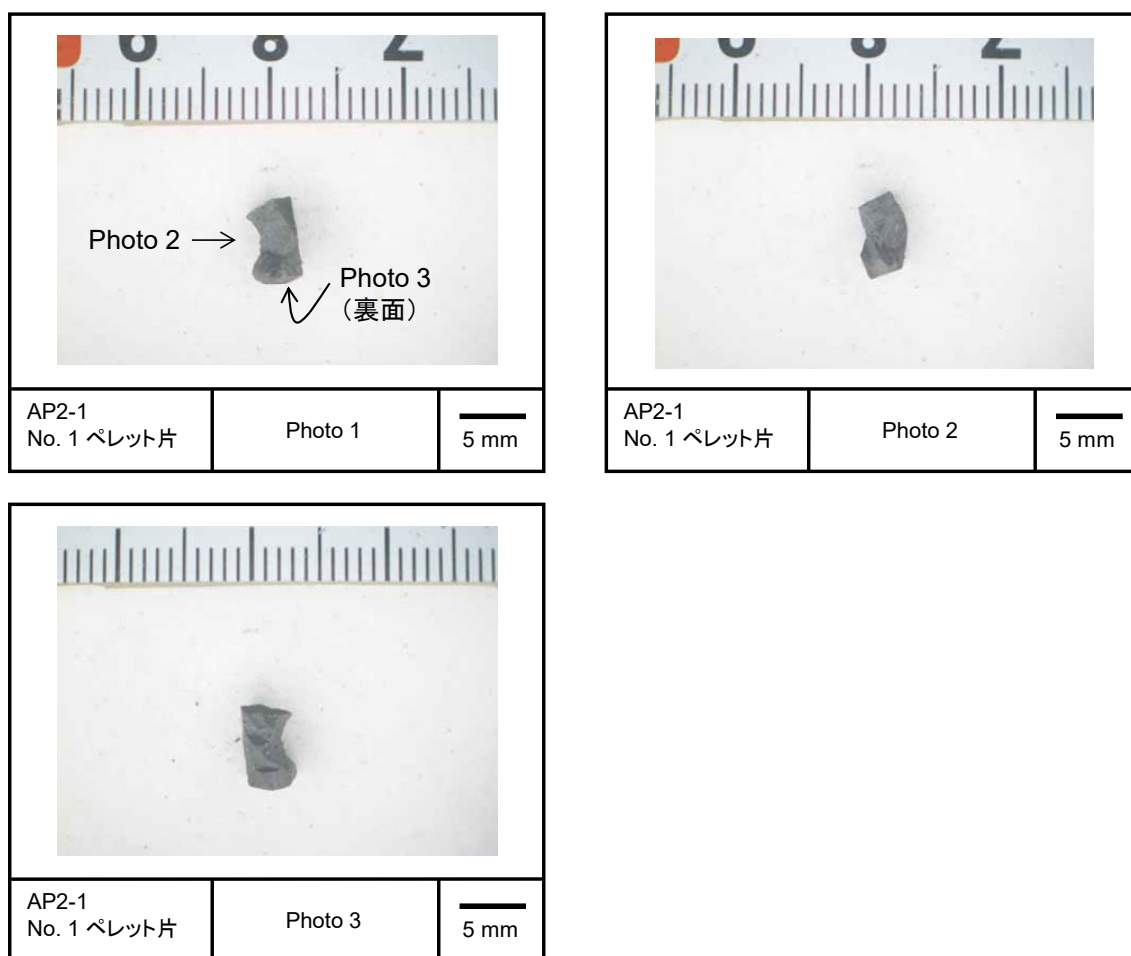


図 4.3.2-3(1) AP2-1 燃料セグメントから採取した燃料ペレット片の外観
(ペレット片 No. 1)

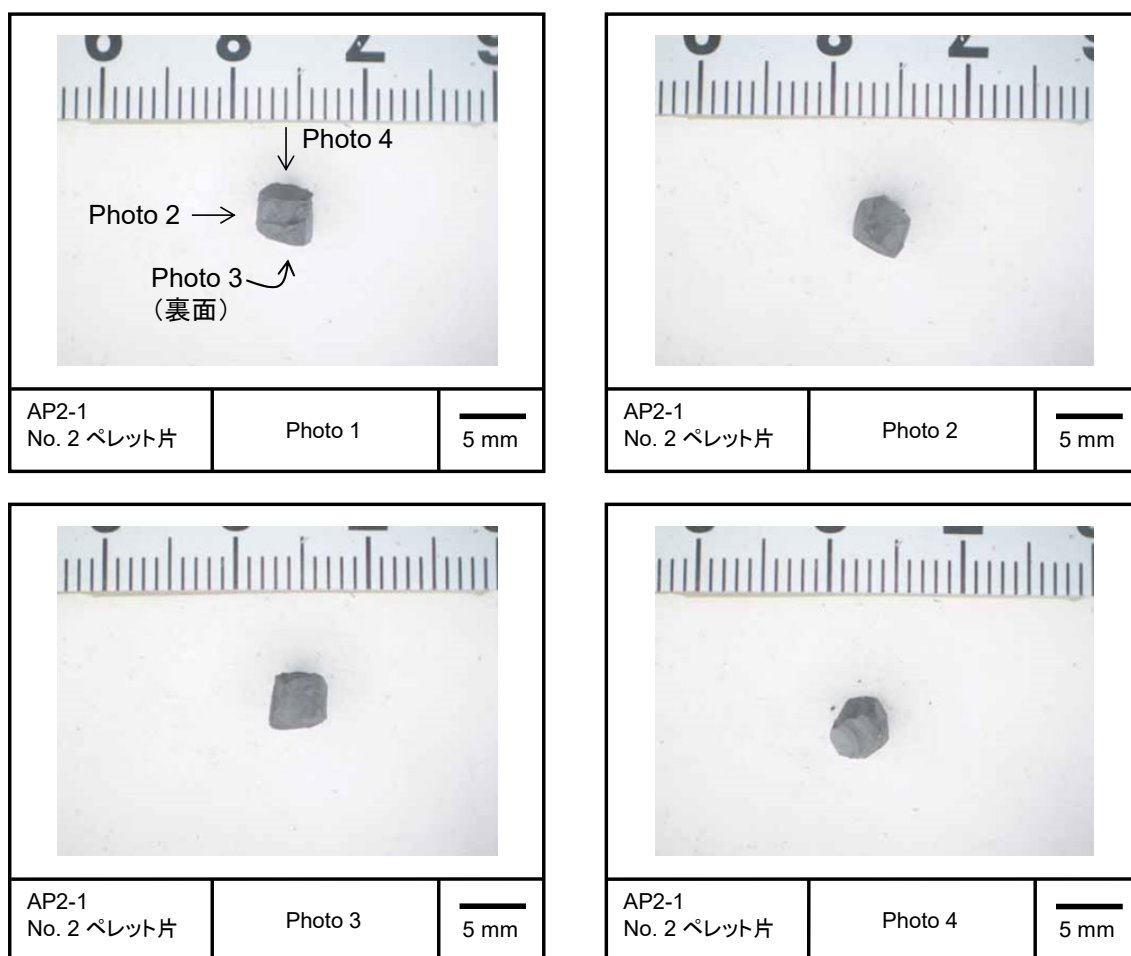


図 4.3.2-3(2) AP2-1 燃料セグメントから採取した燃料ペレット片の外観
(ペレット片 No. 2)

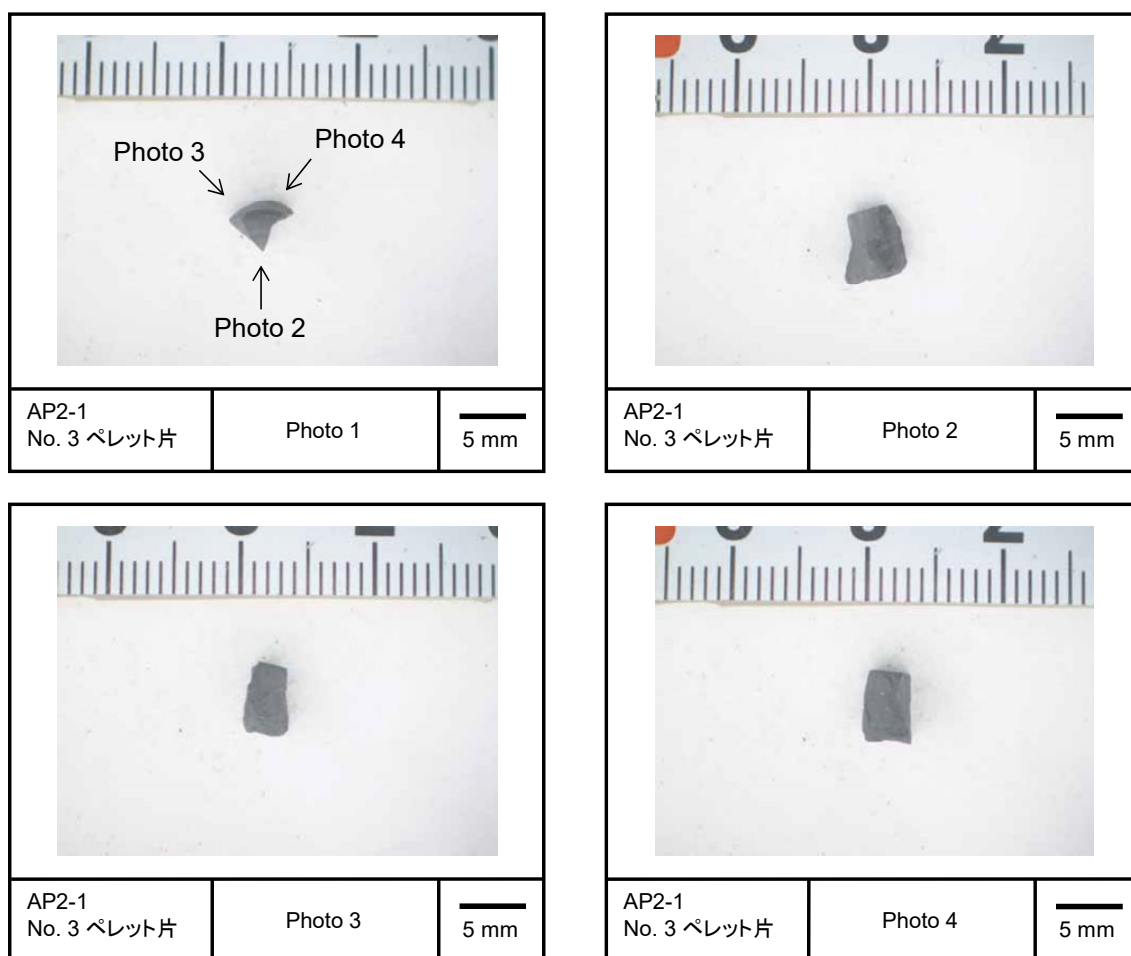


図 4.3.2-3(3) AP2-1 燃料セグメントから採取した燃料ペレット片の外観
(ペレット片 No.3)

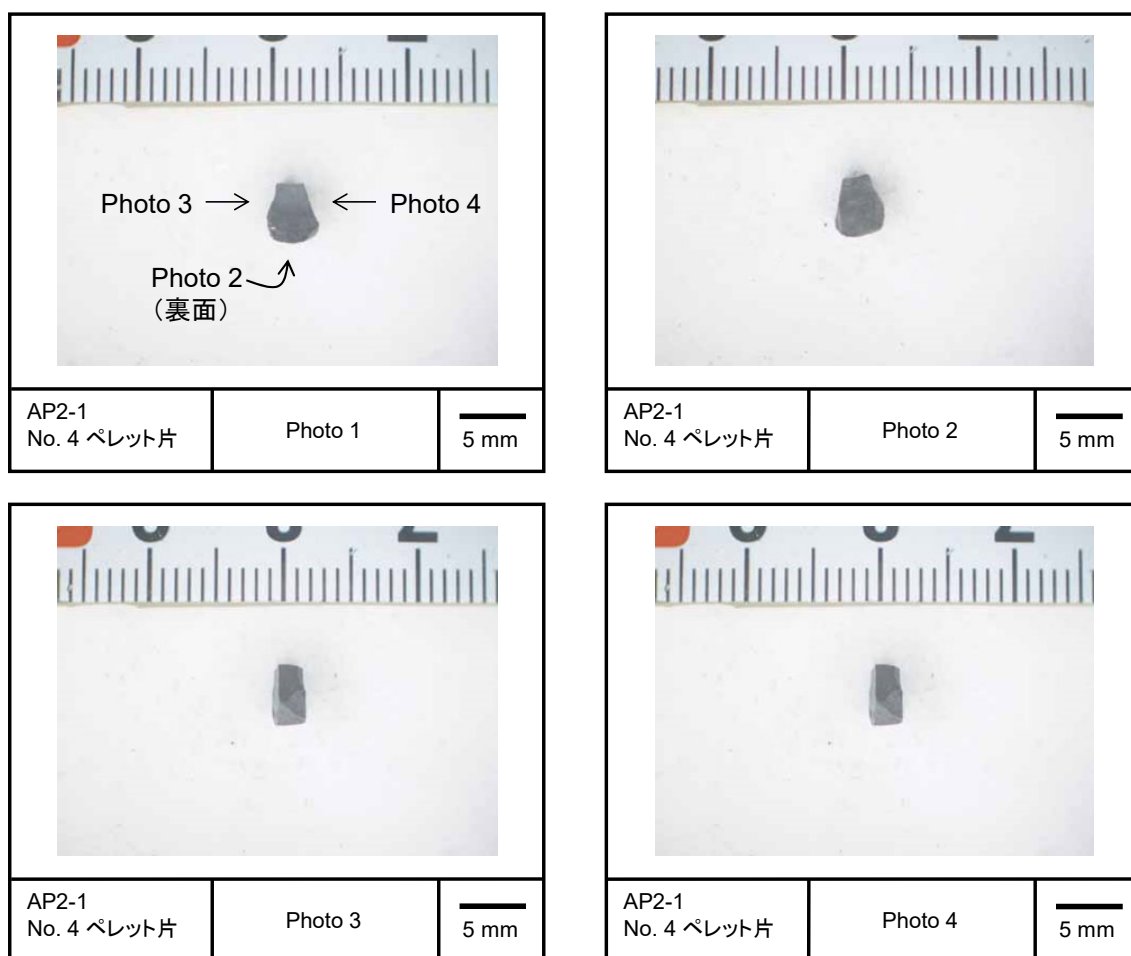


図 4.3.2-3(4) AP2-1 燃料セグメントから採取した燃料ペレット片の外観
(ペレット片 No. 4)

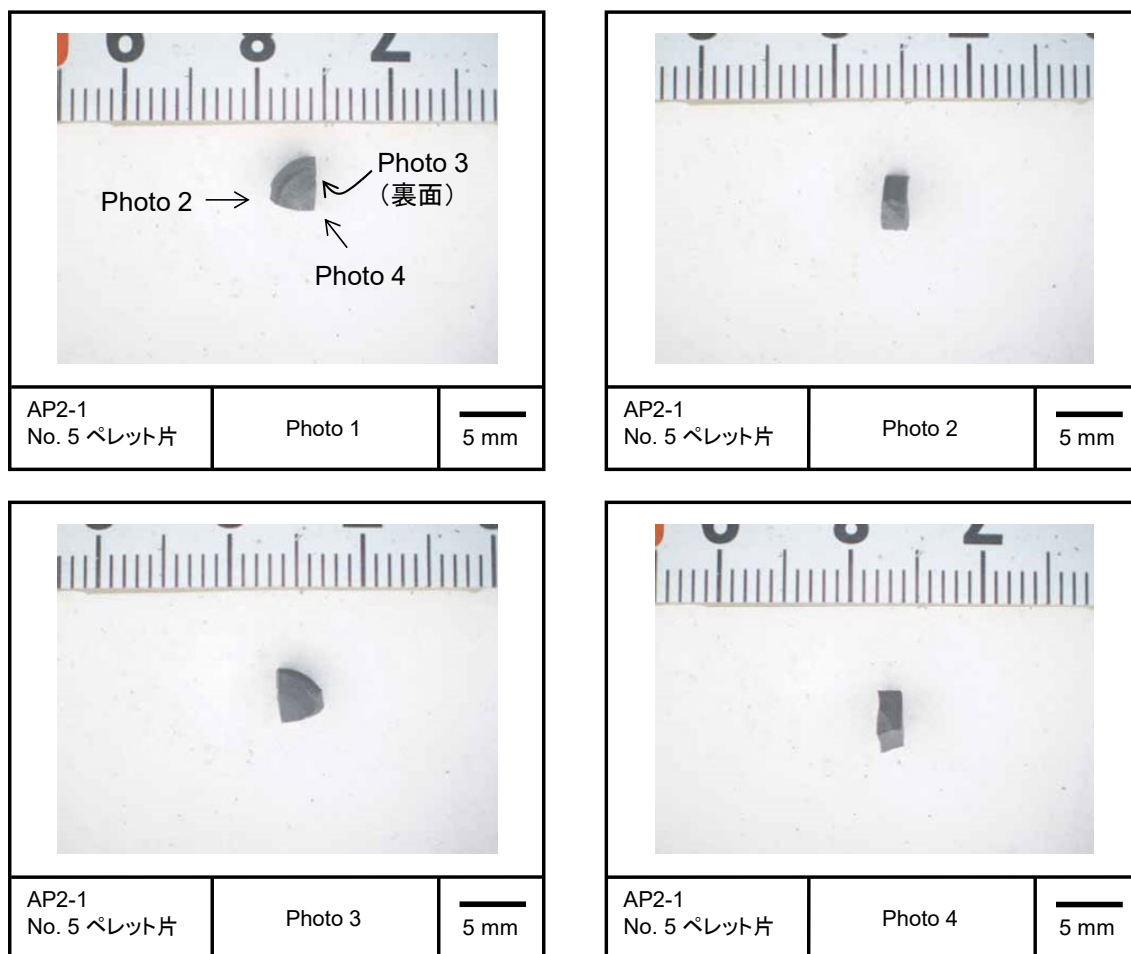


図 4.3.2-3(5) AP2-1 燃料セグメントから採取した燃料ペレット片の外観
(ペレット片 No. 5)

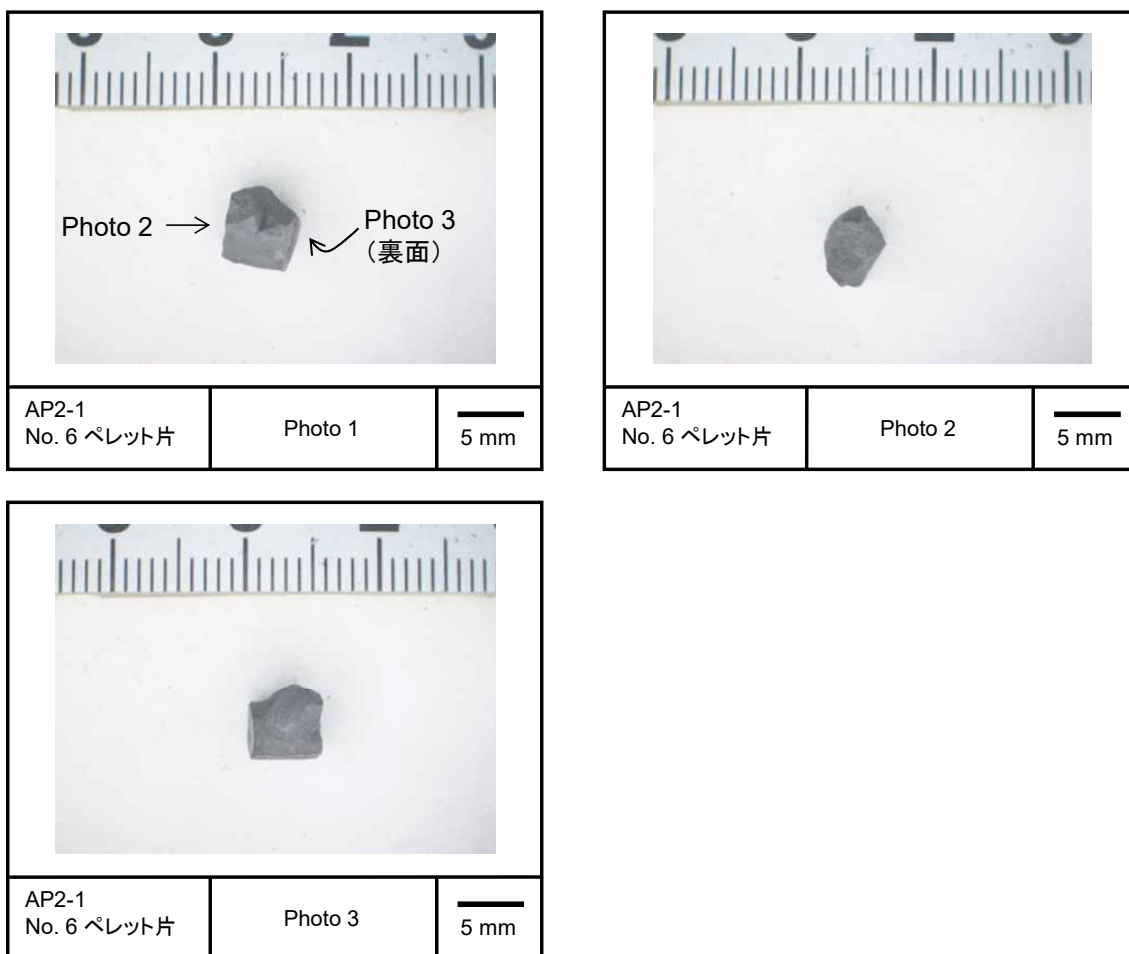


図 4.3.2-3(6) AP2-1 燃料セグメントから採取した燃料ペレット片の外観
(ペレット片 No. 6)

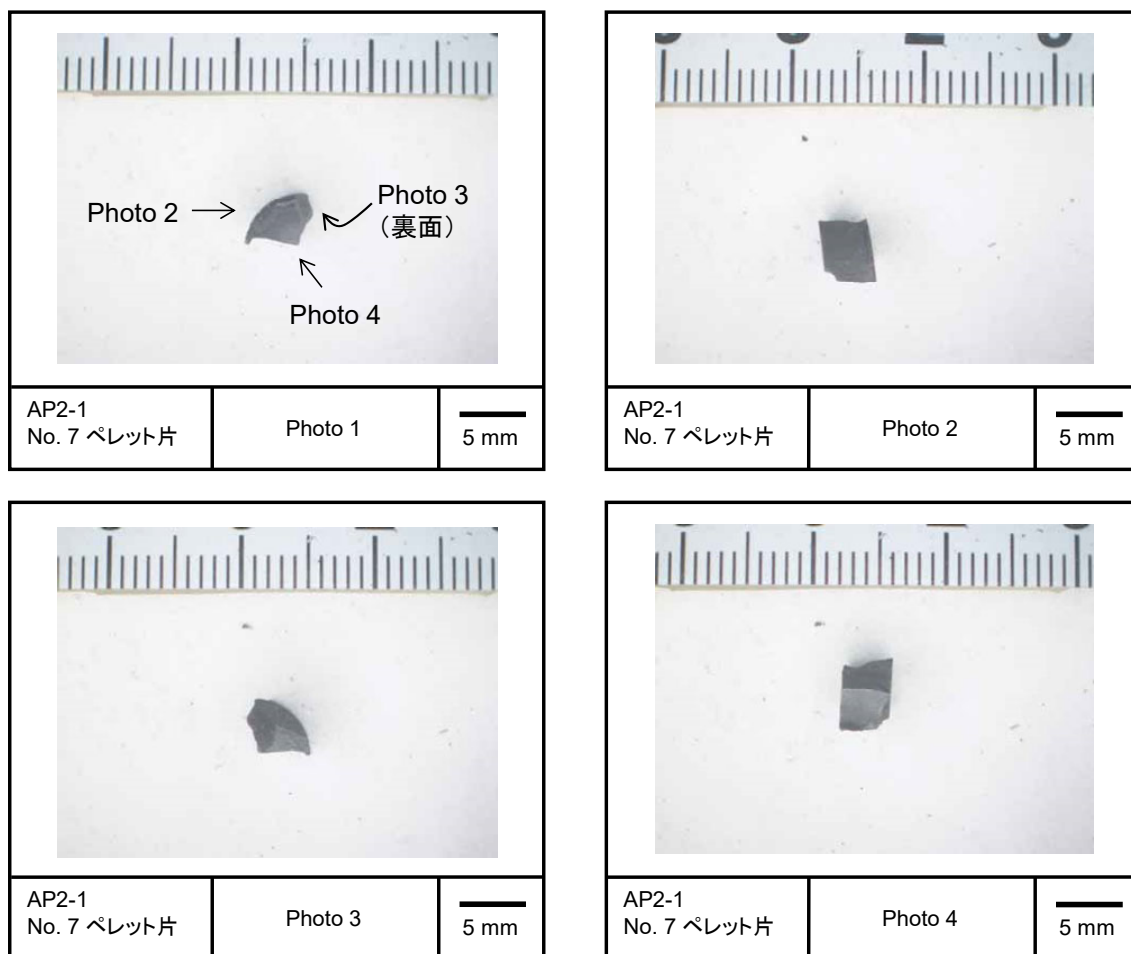


図 4.3.2-3(7) AP2-1 燃料セグメントから採取した燃料ペレット片の外観
(ペレット片 No. 7)

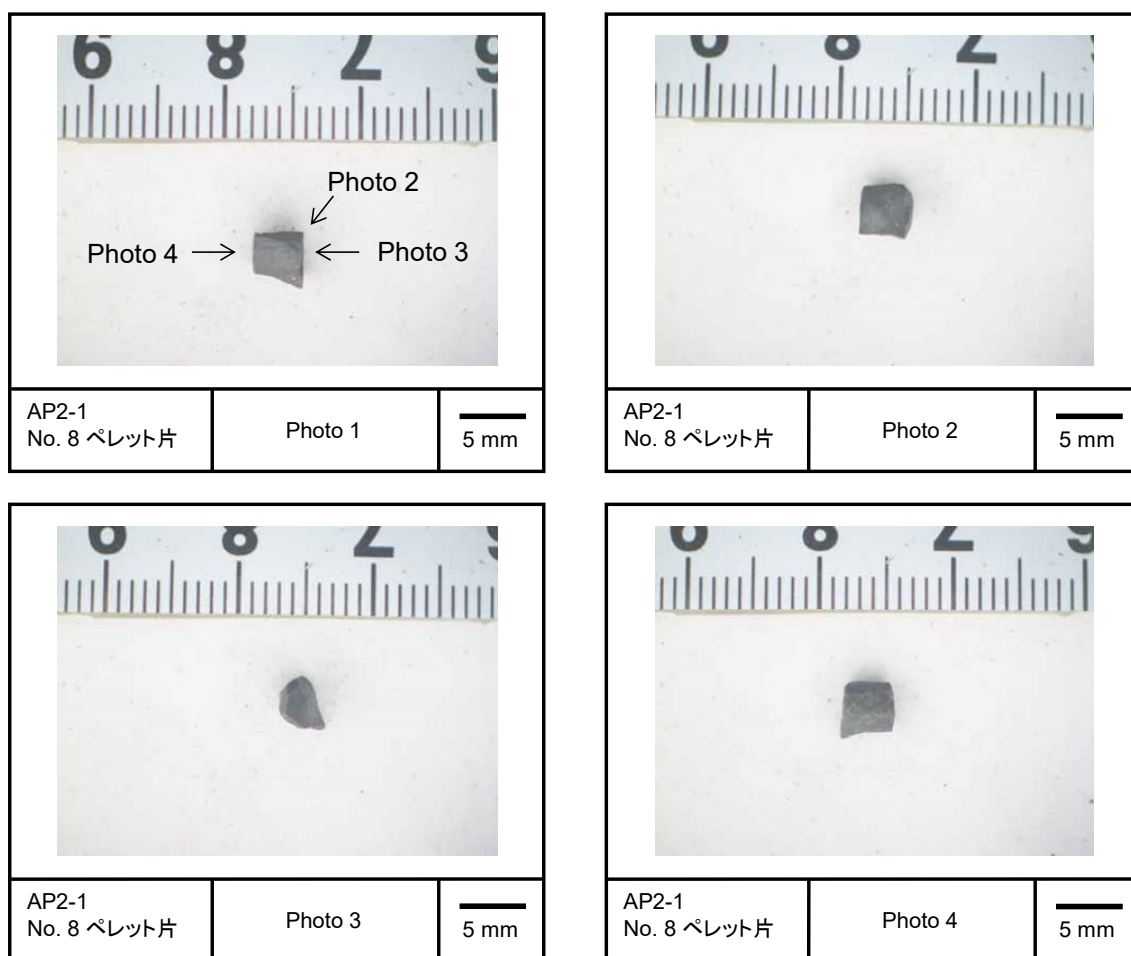


図 4.3.2-3(8) AP2-1 燃料セグメントから採取した燃料ペレット片の外観
(ペレット片 No. 8)

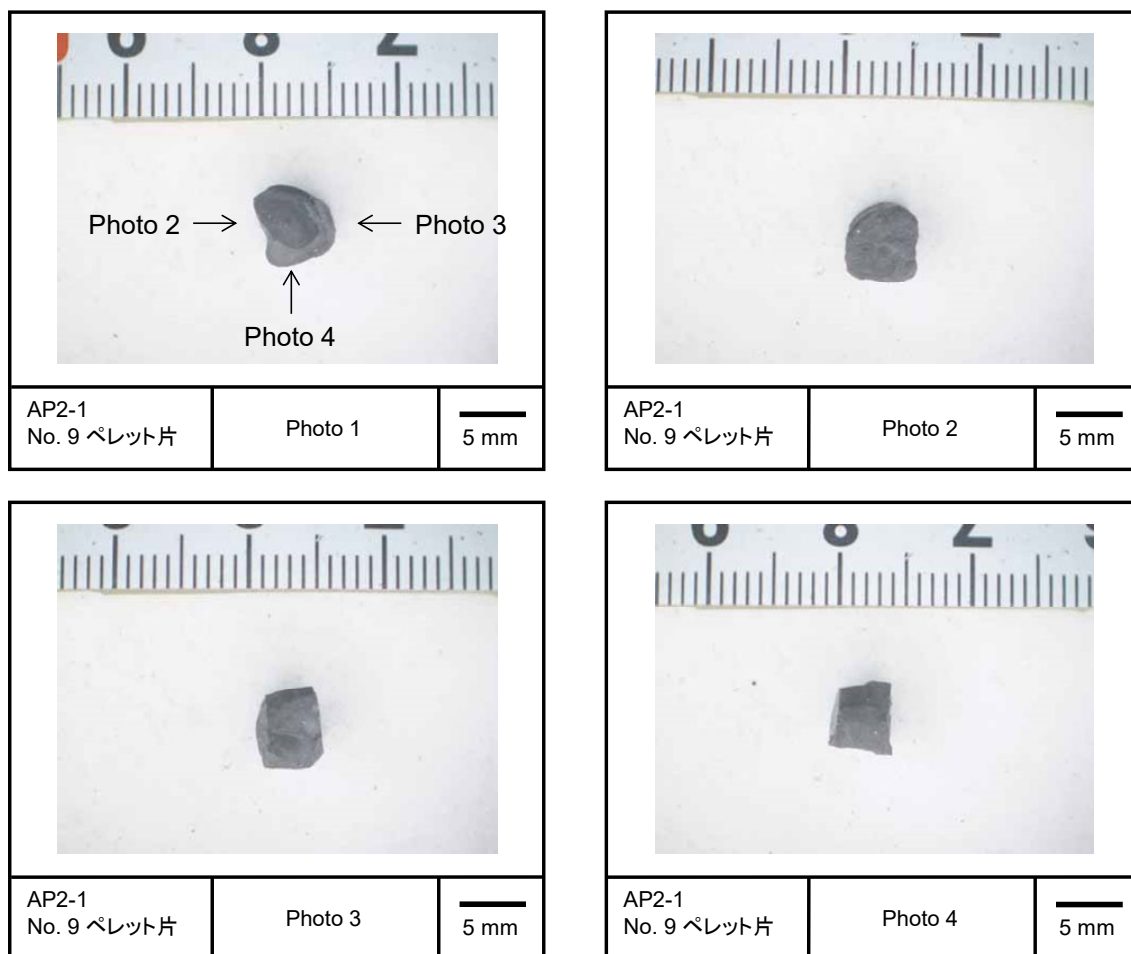


図 4.3.2-3(9) AP2-1 燃料セグメントから採取した燃料ペレット片の外観
(ペレット片 No. 9)

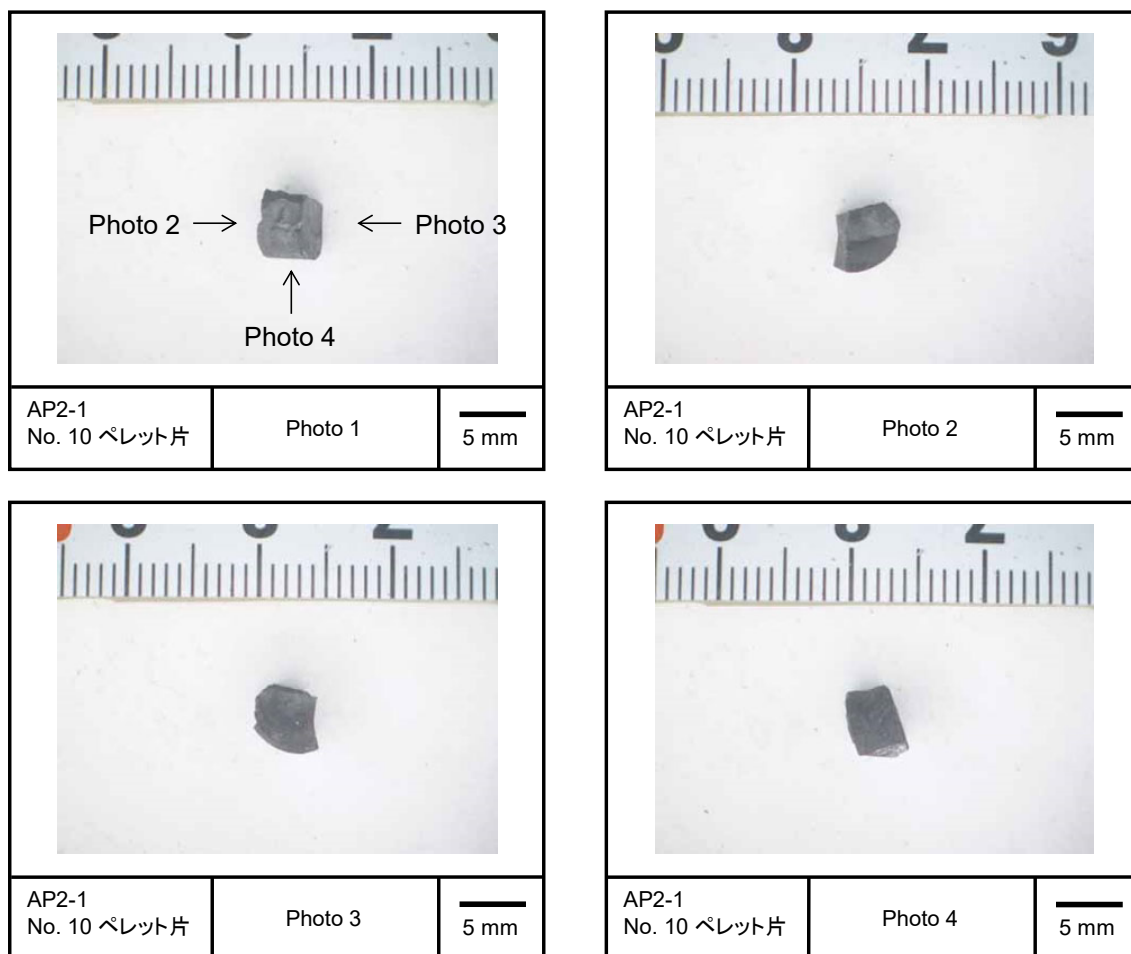


図 4.3.2-3(10) AP2-1 燃料セグメントから採取した燃料ペレット片の外観
(ペレット片 No. 10)

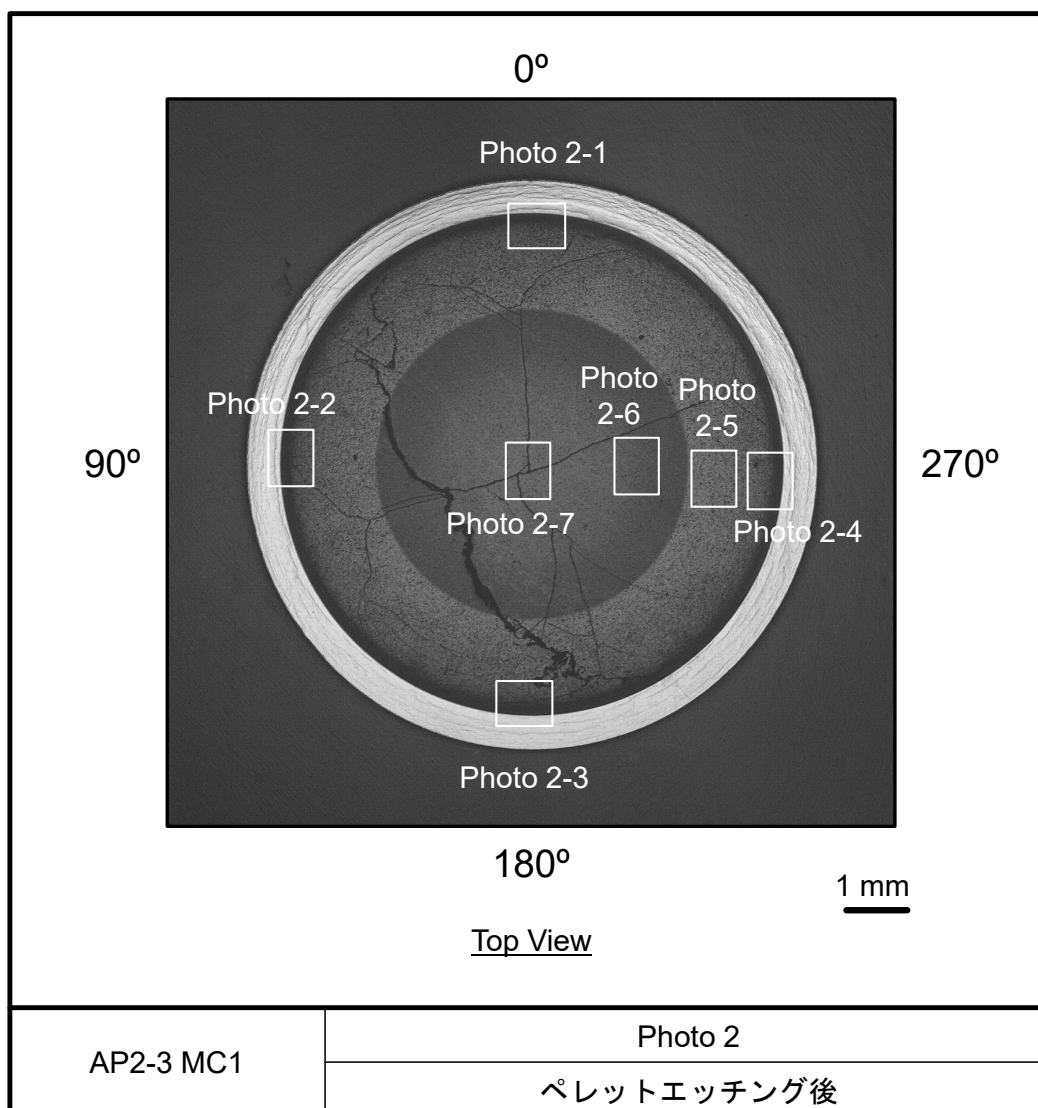


図 4.3.2-4(1) AP2-3 燃料セグメントから採取した燃料ペレットの
断面画像 (ペレットエッチング後) (7)

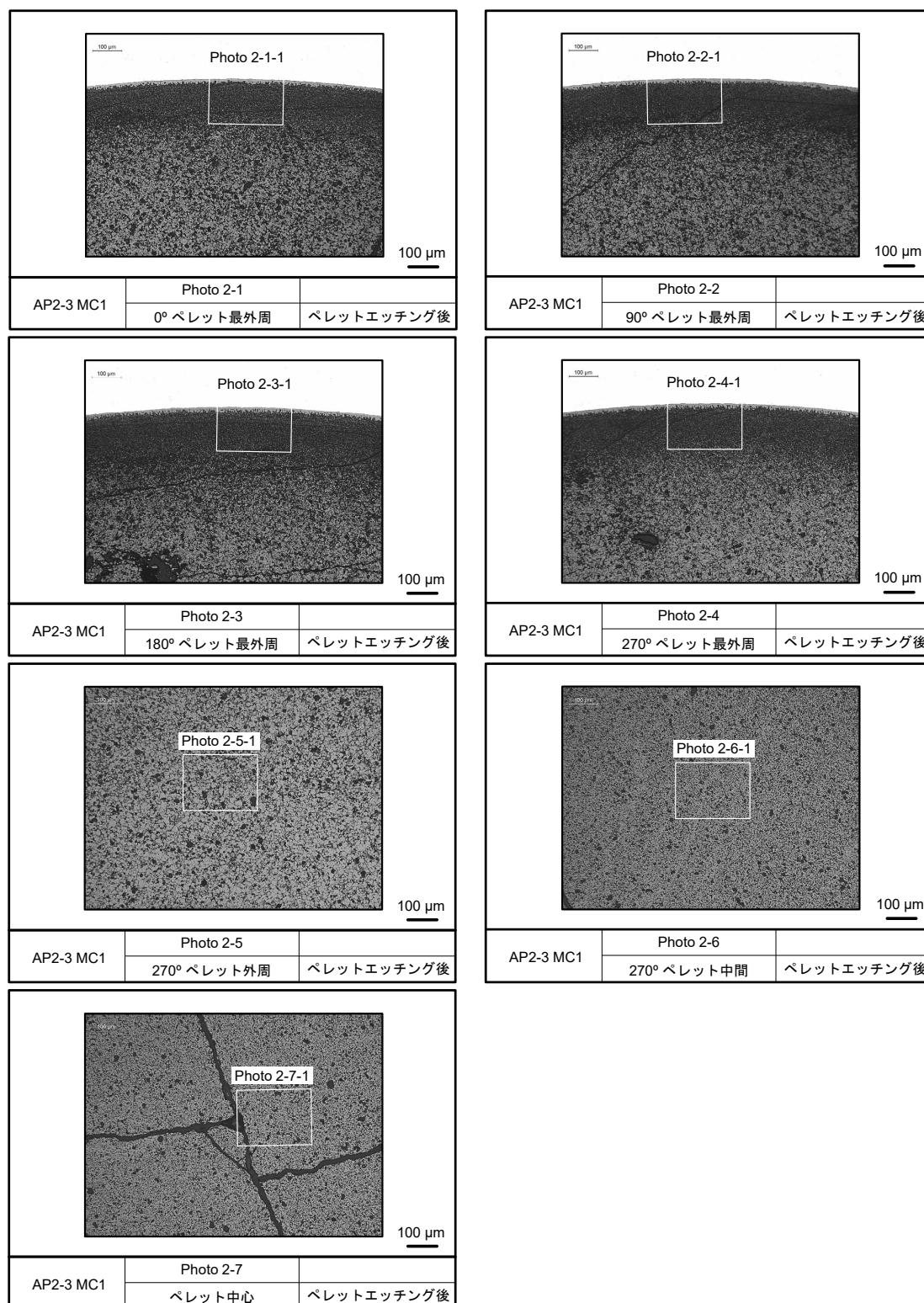


図 4.3.2-4(2) AP2-3 燃料セグメントから採取した燃料ペレットの断面画像（ペレットエッチング後）(7)

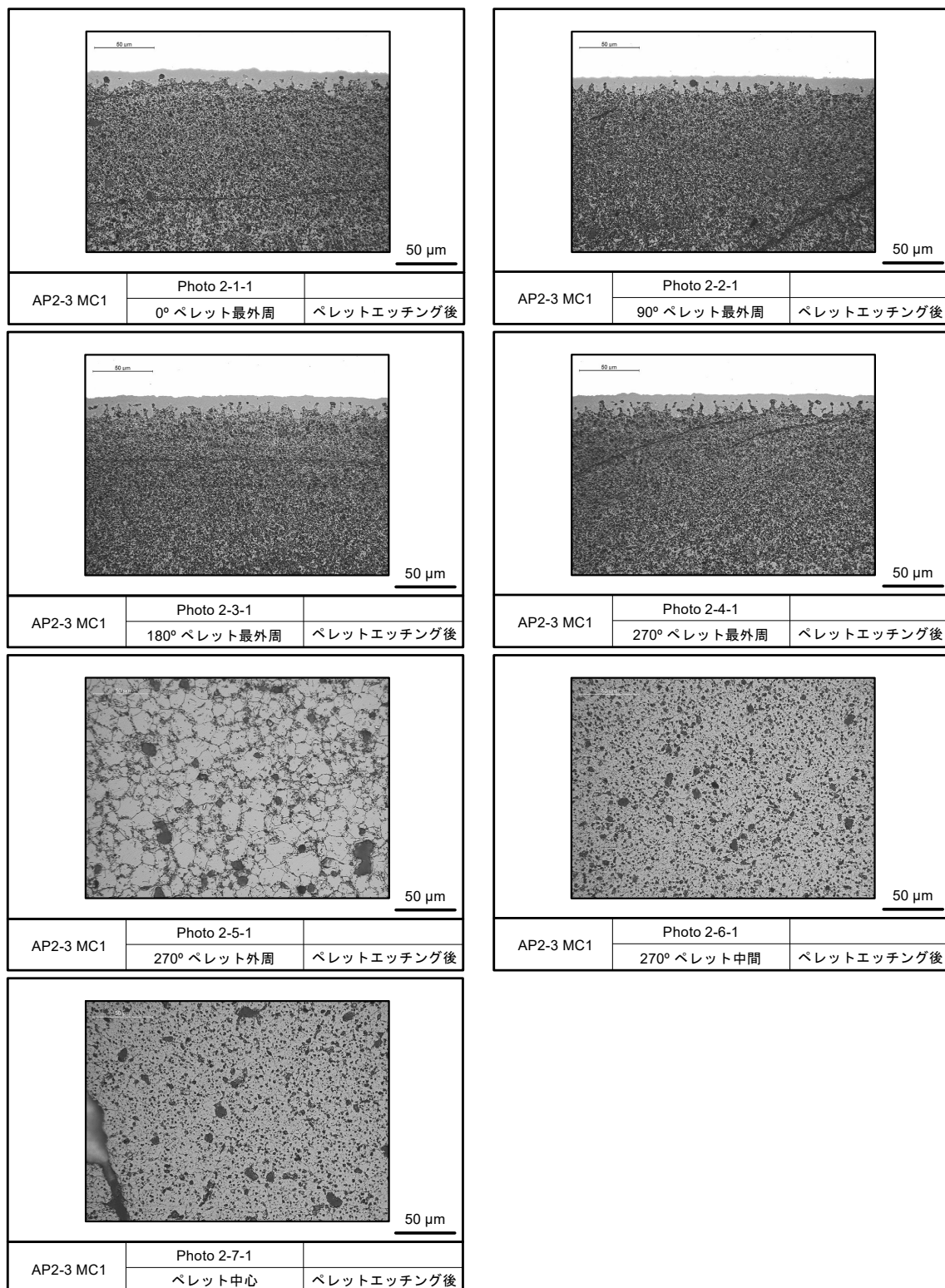


図 4.3.2-4(3) AP2-3 燃料セグメントから採取した燃料ペレットの断面画像（ペレットエッチング後）(7)

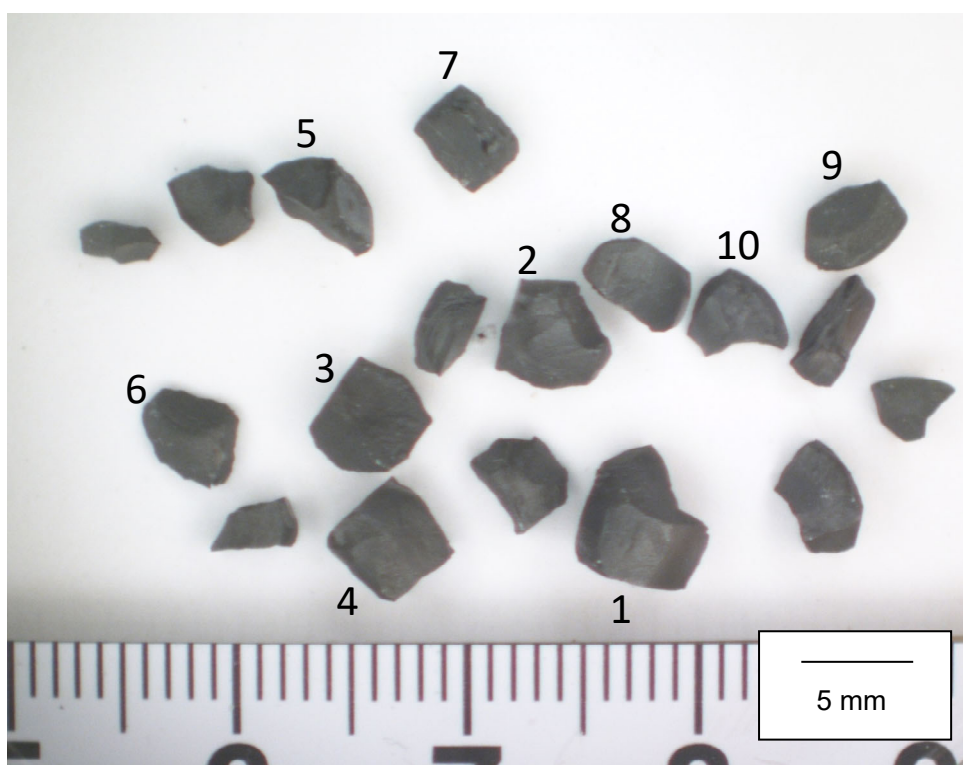


図 4.3.2-5 AP2-3 燃料セグメントから採取した燃料ペレット片の外観⁽¹⁾
(図中数値はペレット片番号)

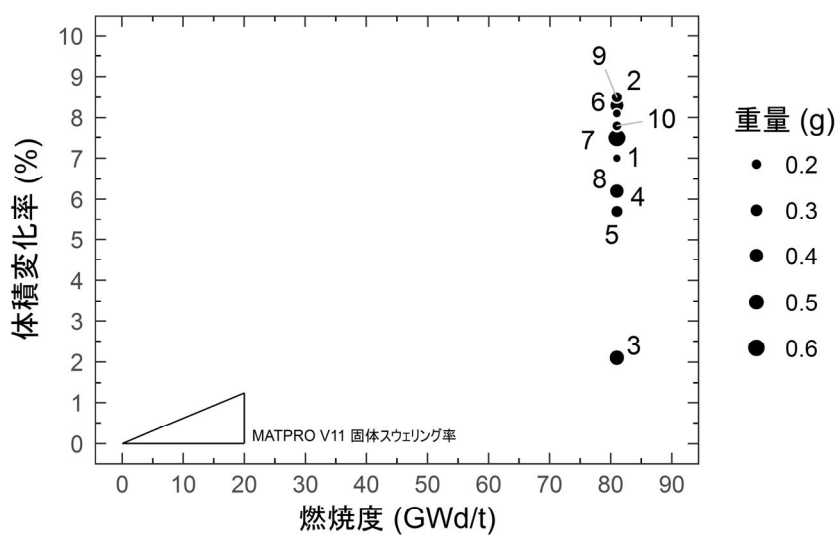


図 4.3.2-6 AP2-3 燃料セグメントから採取したペレット片の
体積変化率の燃焼度依存性⁽¹⁾
(図中数値はペレット片番号)

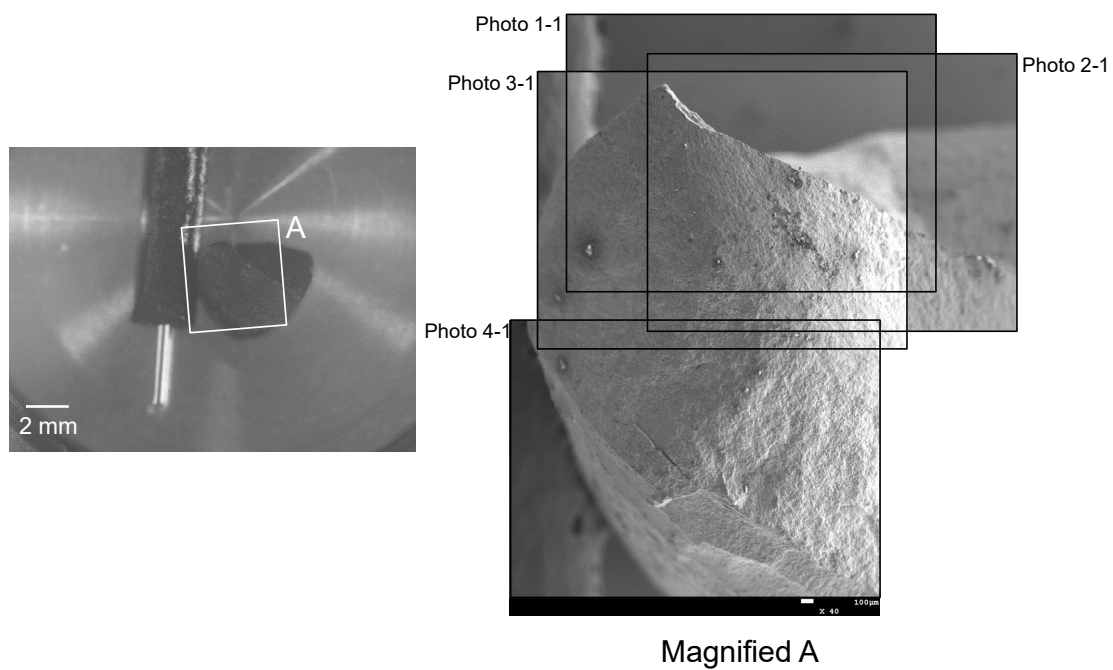


図 4.3.2-7 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 1 の外観
(AP2-3 燃料セグメント)

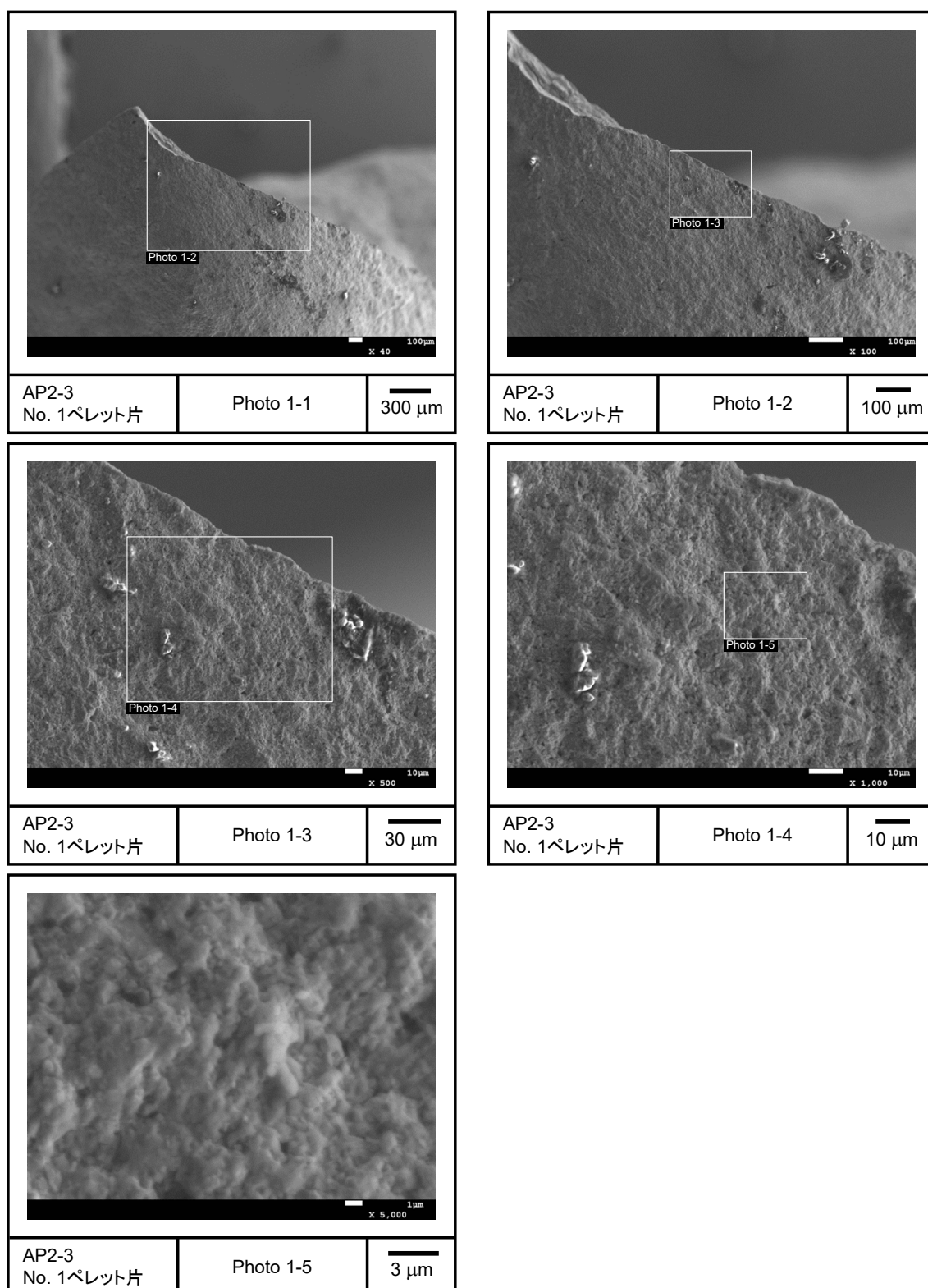


図 4.3.2-8(1) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 1 の SEM 画像
(AP2-3 燃料セグメント)

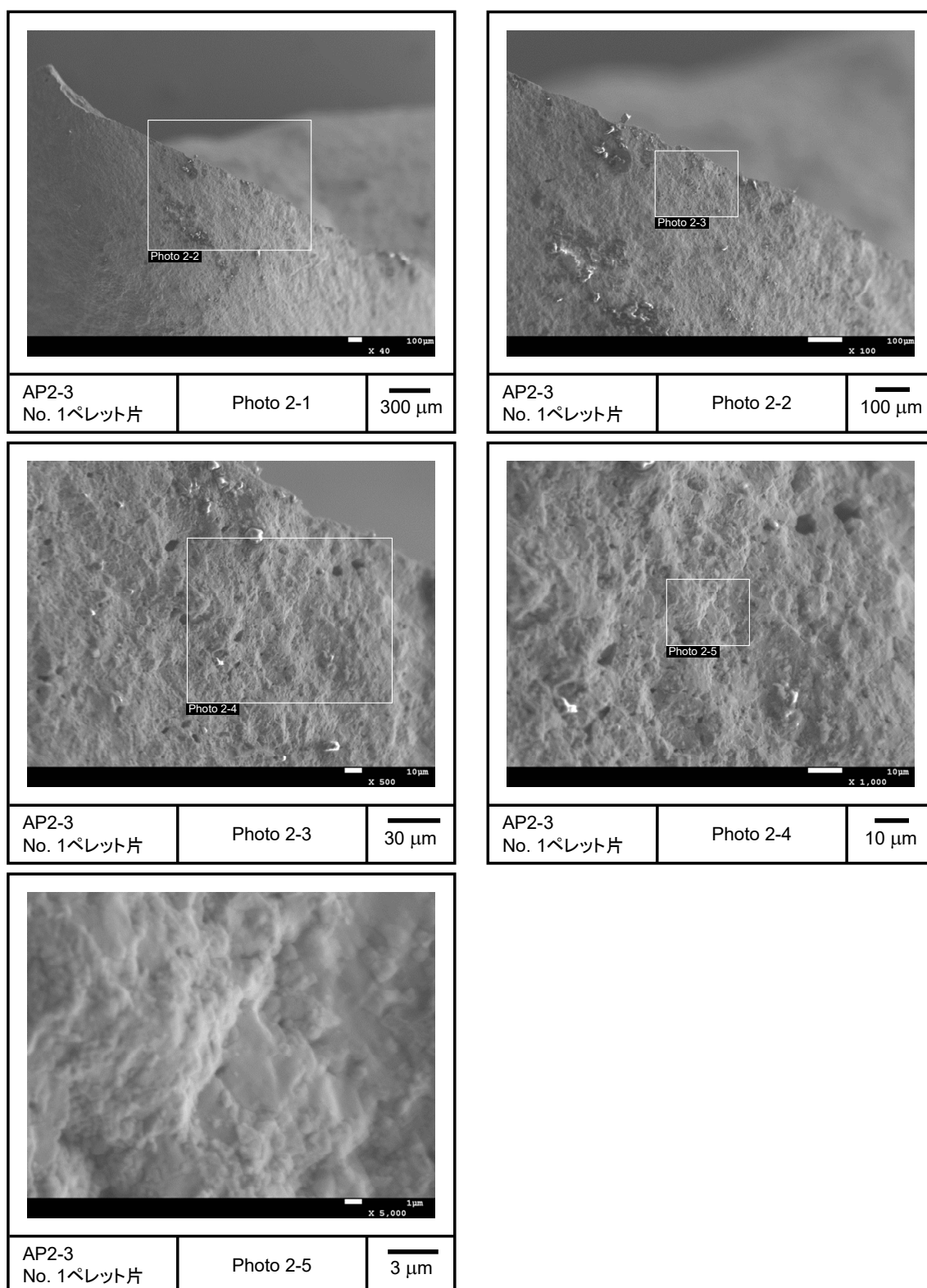


図 4.3.2-8(2) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 1 の SEM 画像
(AP2-3 燃料セグメント)

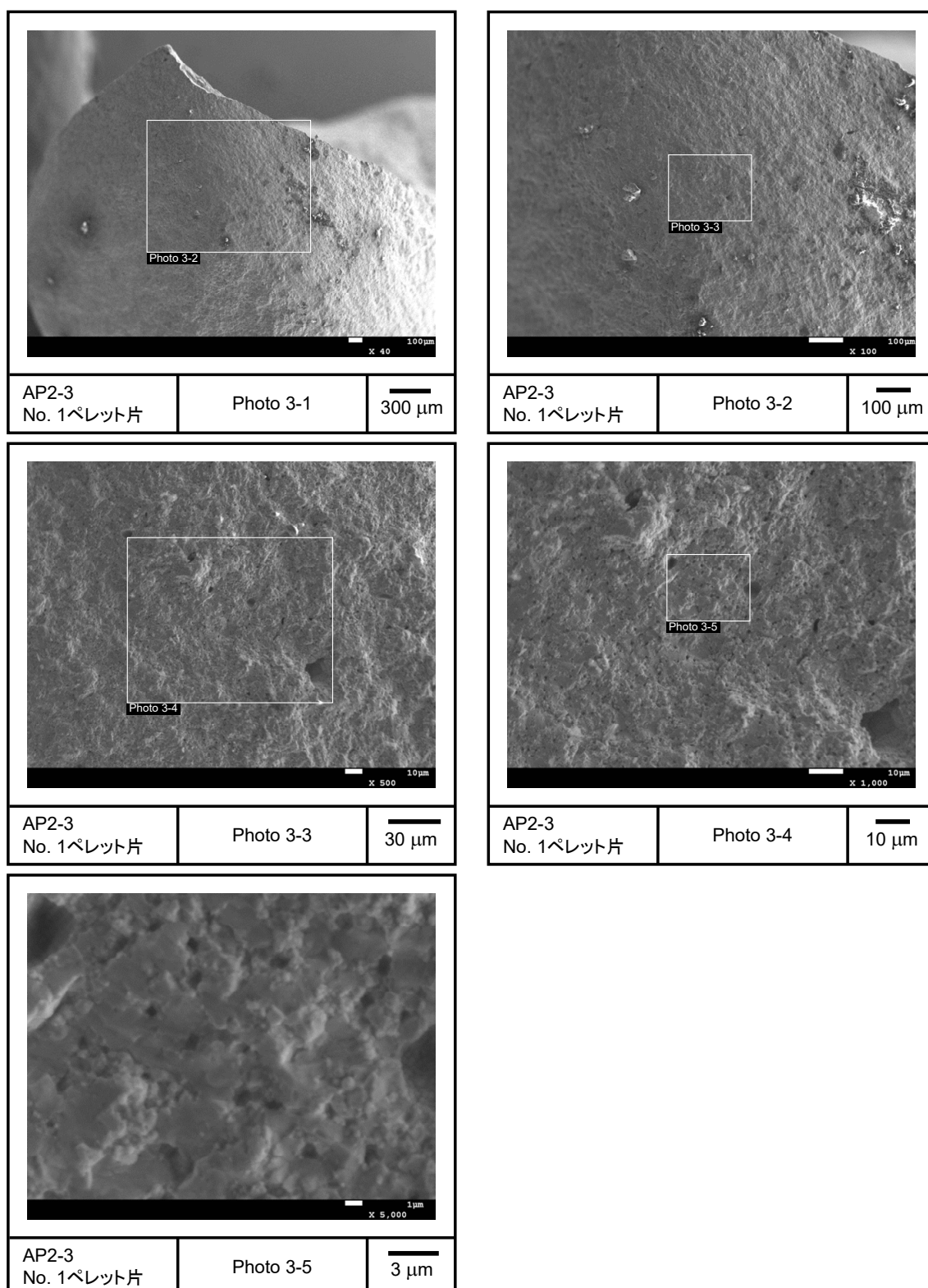


図 4.3.2-8(3) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 1 の SEM 画像
(AP2-3 燃料セグメント)

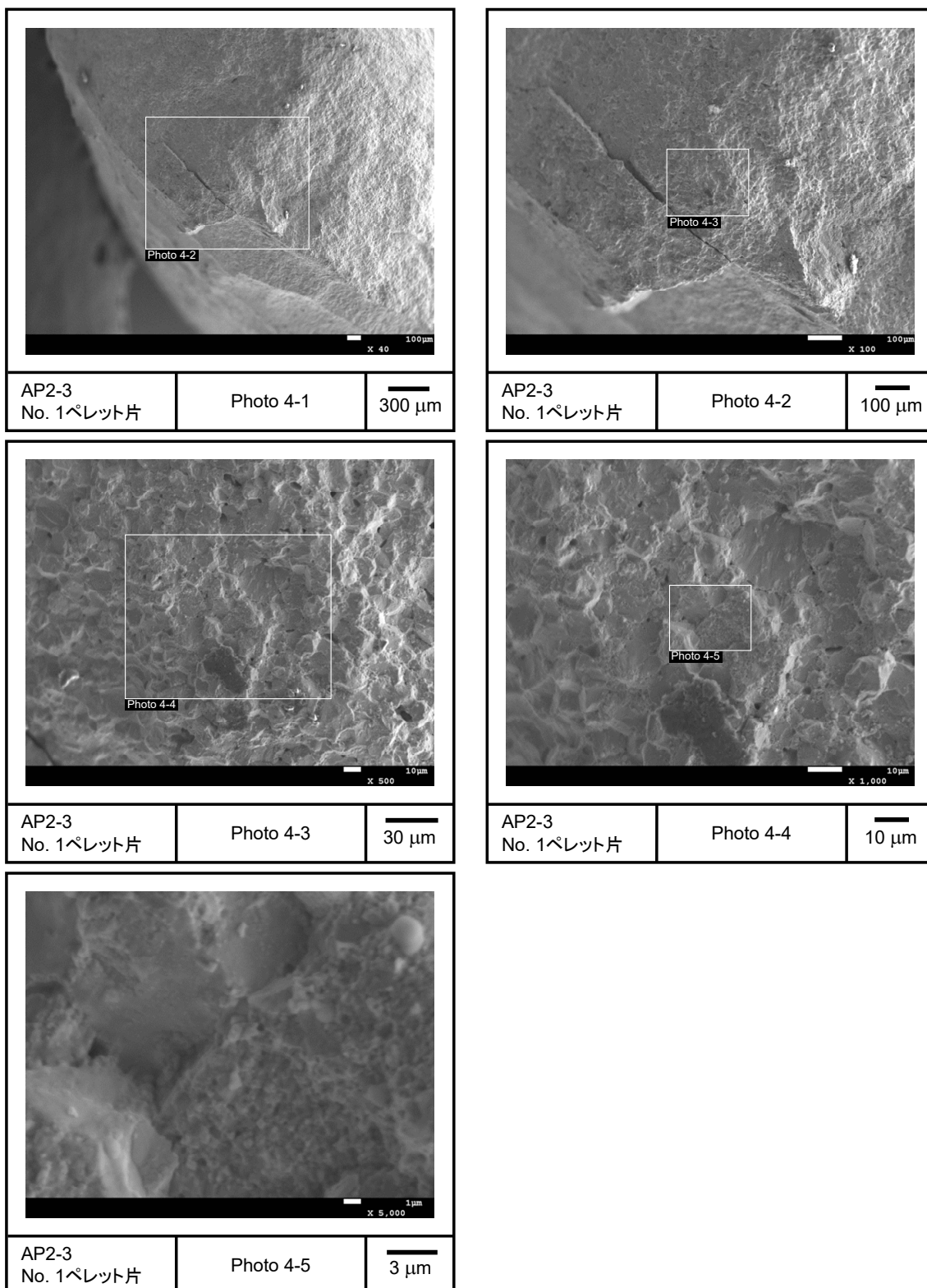


図 4.3.2-8(4) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 1 の SEM 画像
(AP2-3 燃料セグメント)

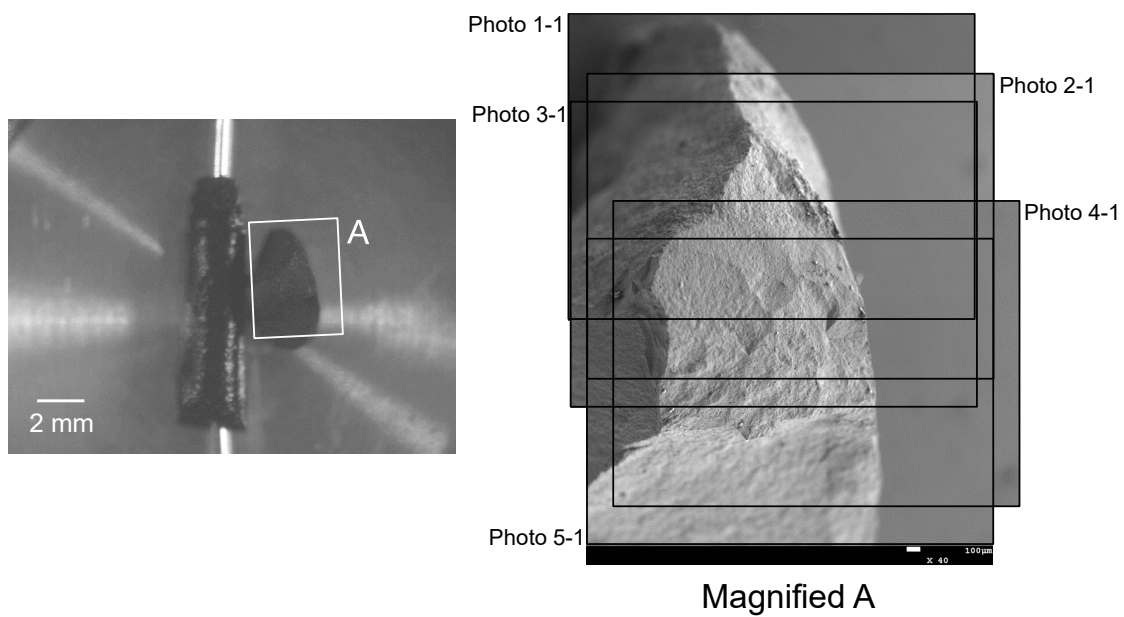


図 4.3.2-9 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 2 の外観
(AP2-3 燃料セグメント)

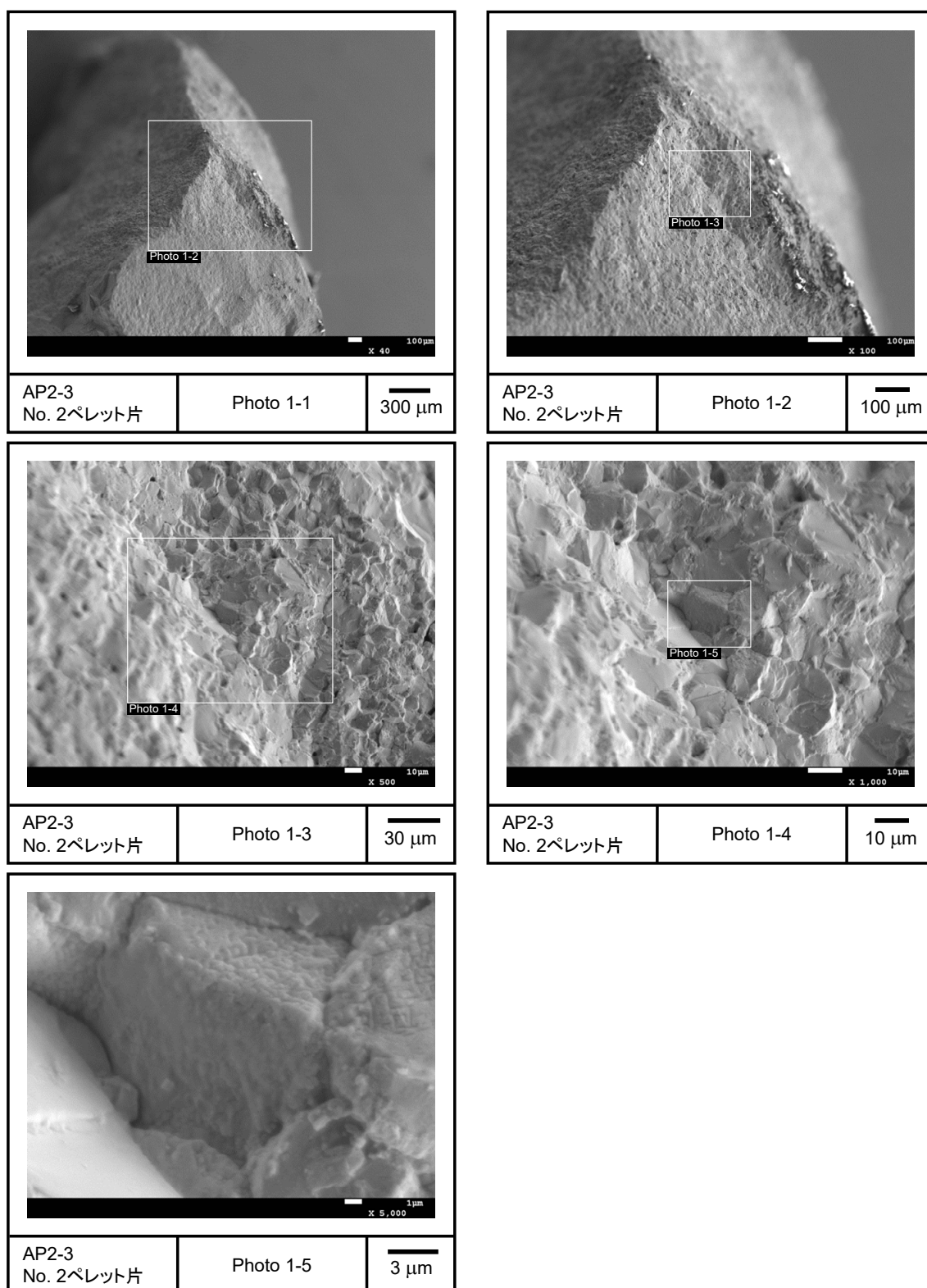


図 4.3.2-10(1) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-3 燃料セグメント)

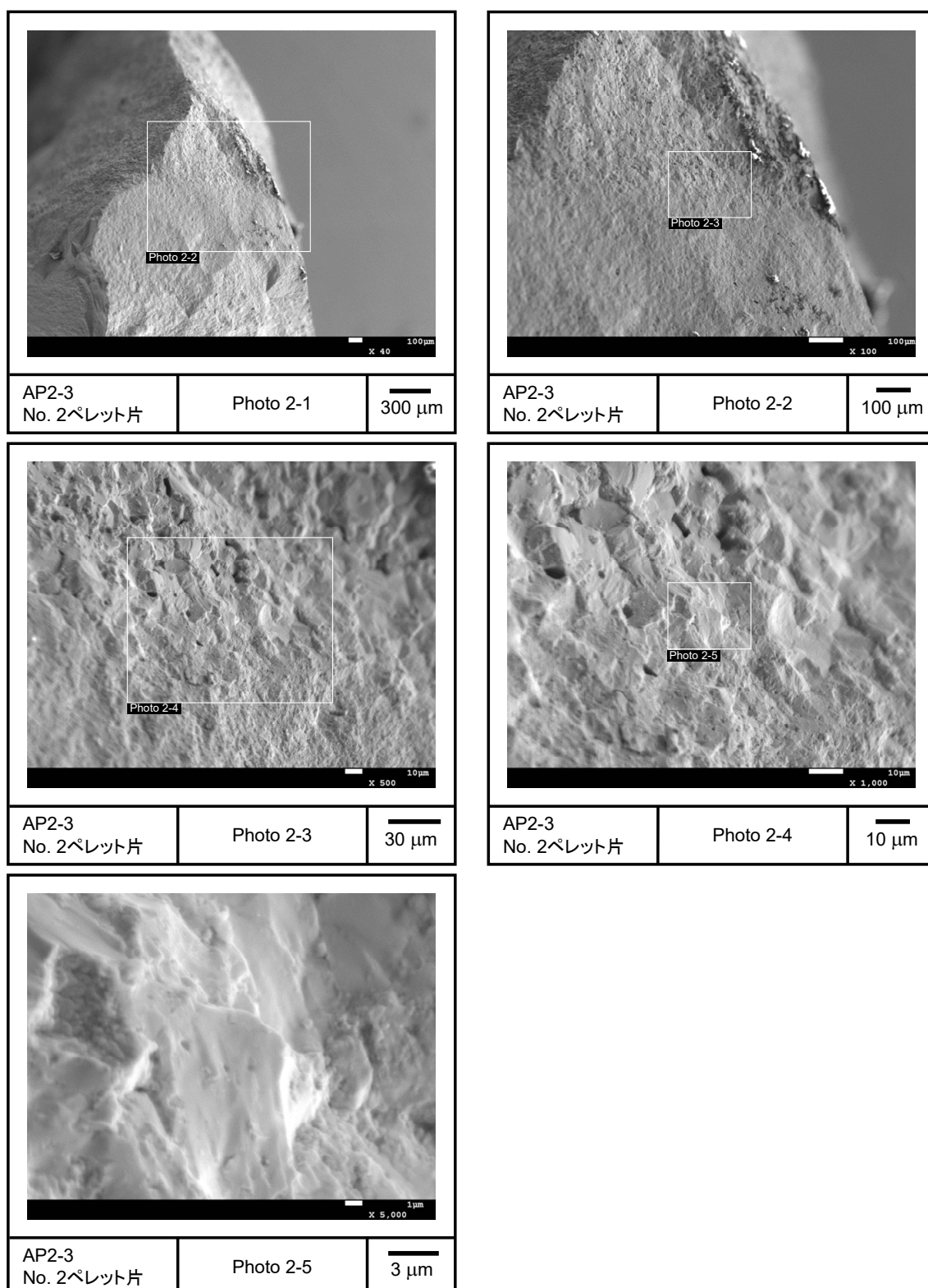


図 4.3.2-10(2) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-3 燃料セグメント)

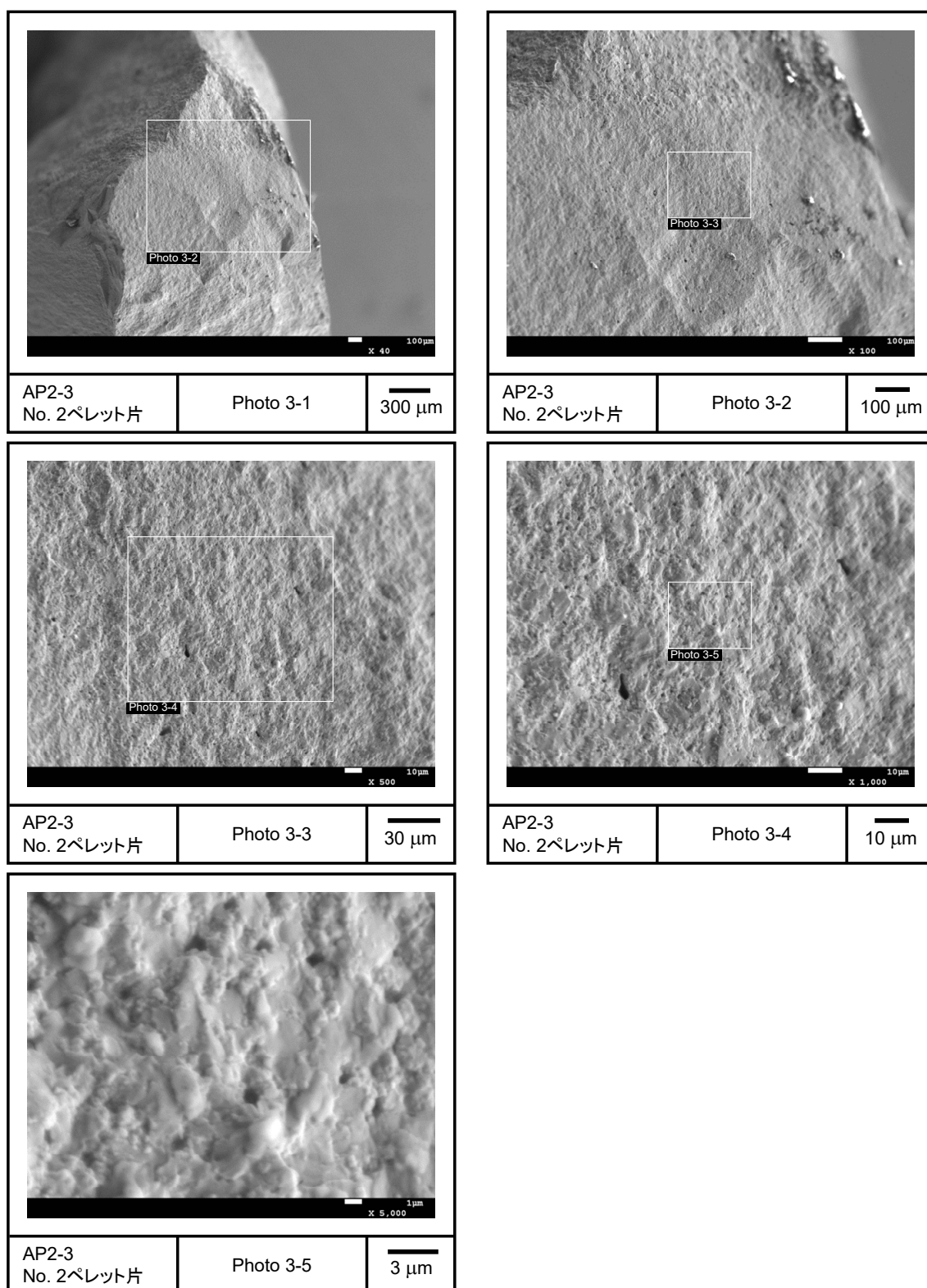


図 4.3.2-10(3) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-3 燃料セグメント)

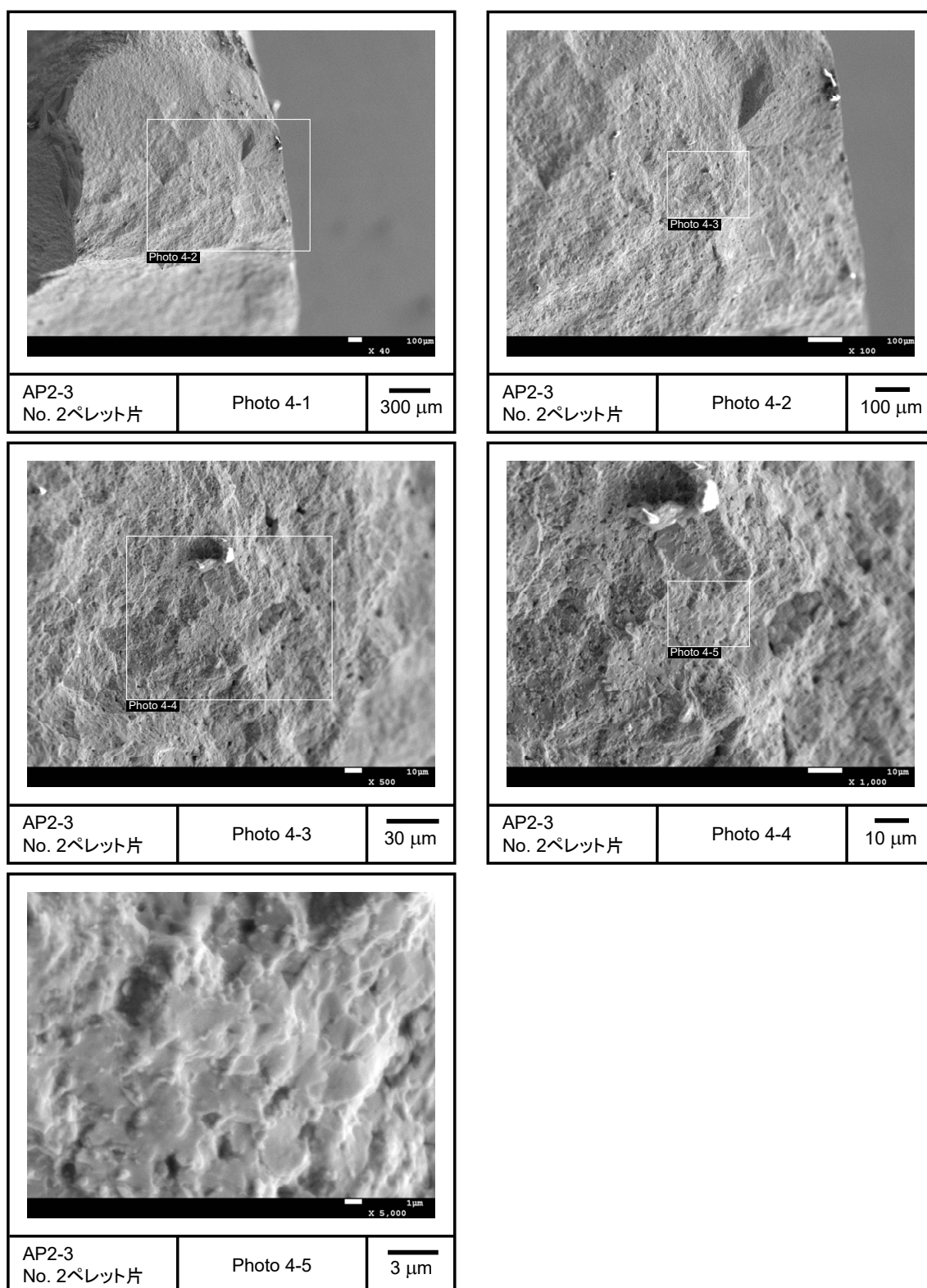


図 4.3.2-10(4) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-3 燃料セグメント)

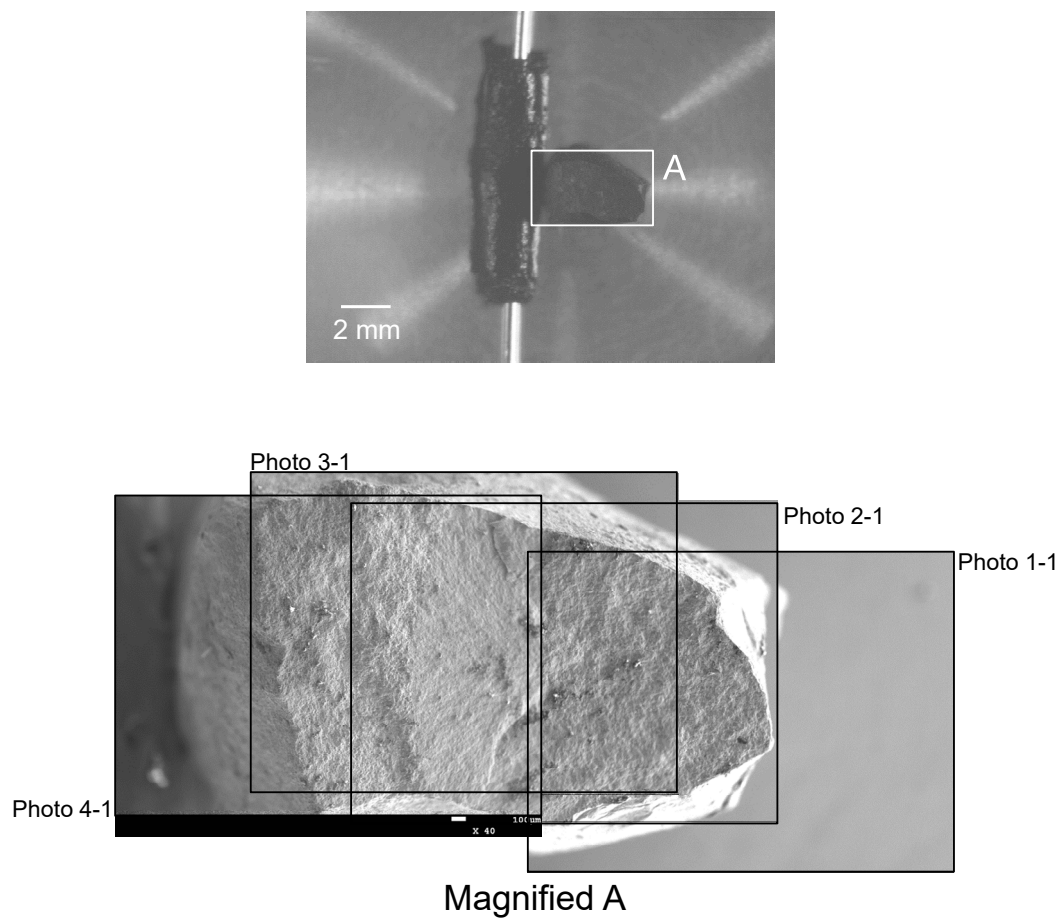


図 4.3.2-11 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 4 の外観
(AP2-3 燃料セグメント)

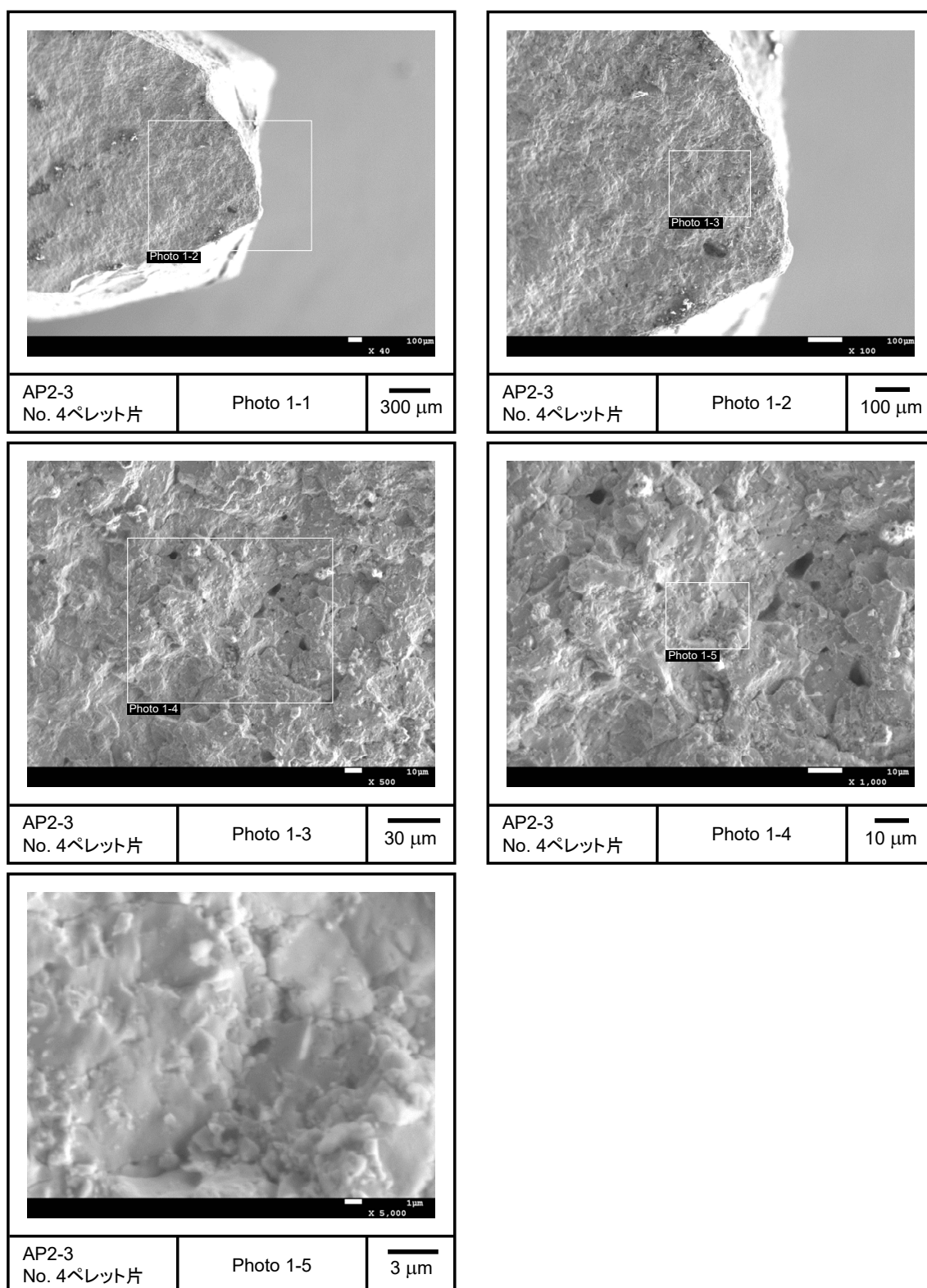


図 4.3.2-12(1) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 4 の SEM 画像
(AP2-3 燃料セグメント)

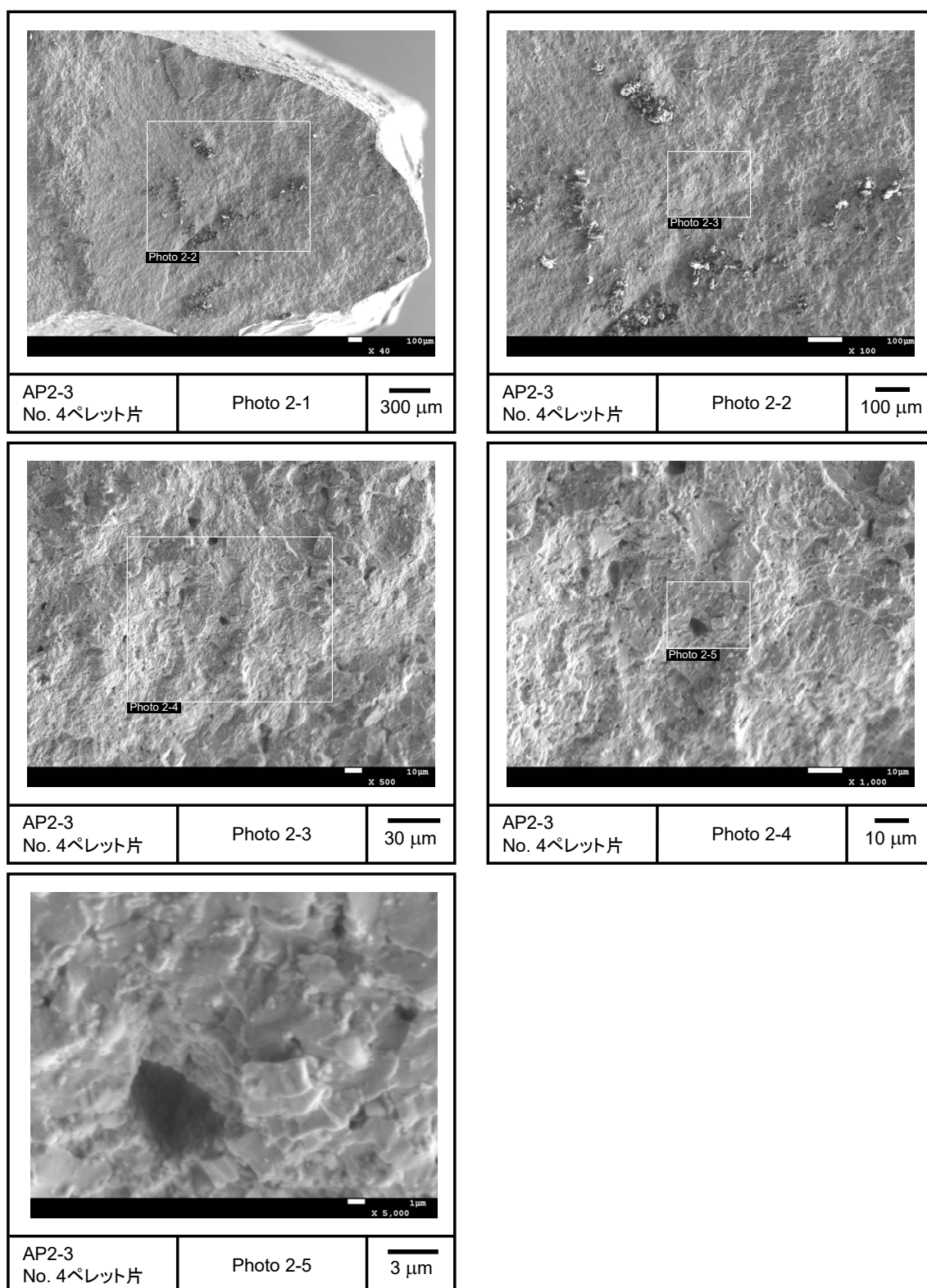


図 4.3.2-12(2) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 4 の SEM 画像
(AP2-3 燃料セグメント)

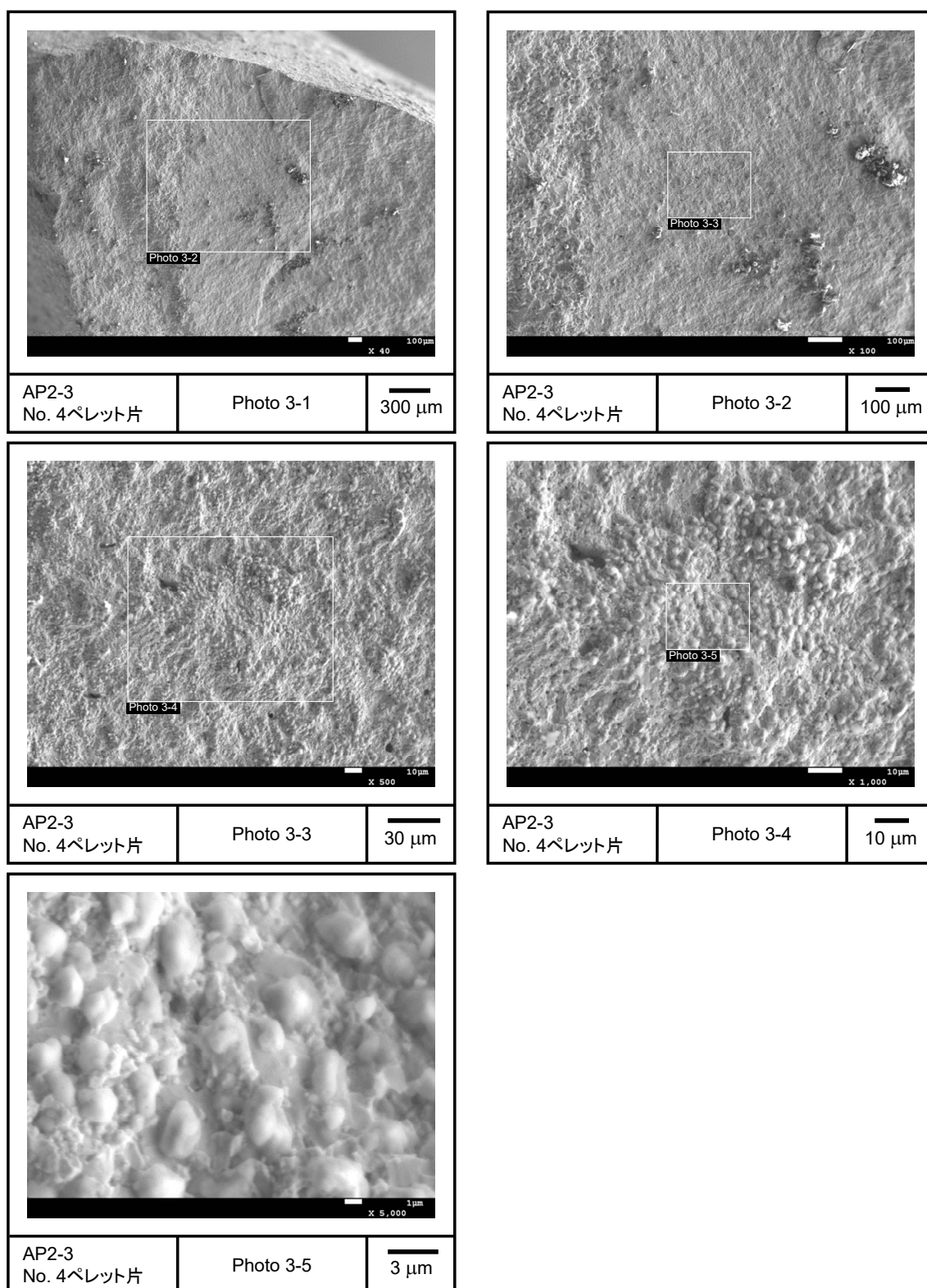


図 4.3.2-12(3) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 4 の SEM 画像
(AP2-3 燃料セグメント)

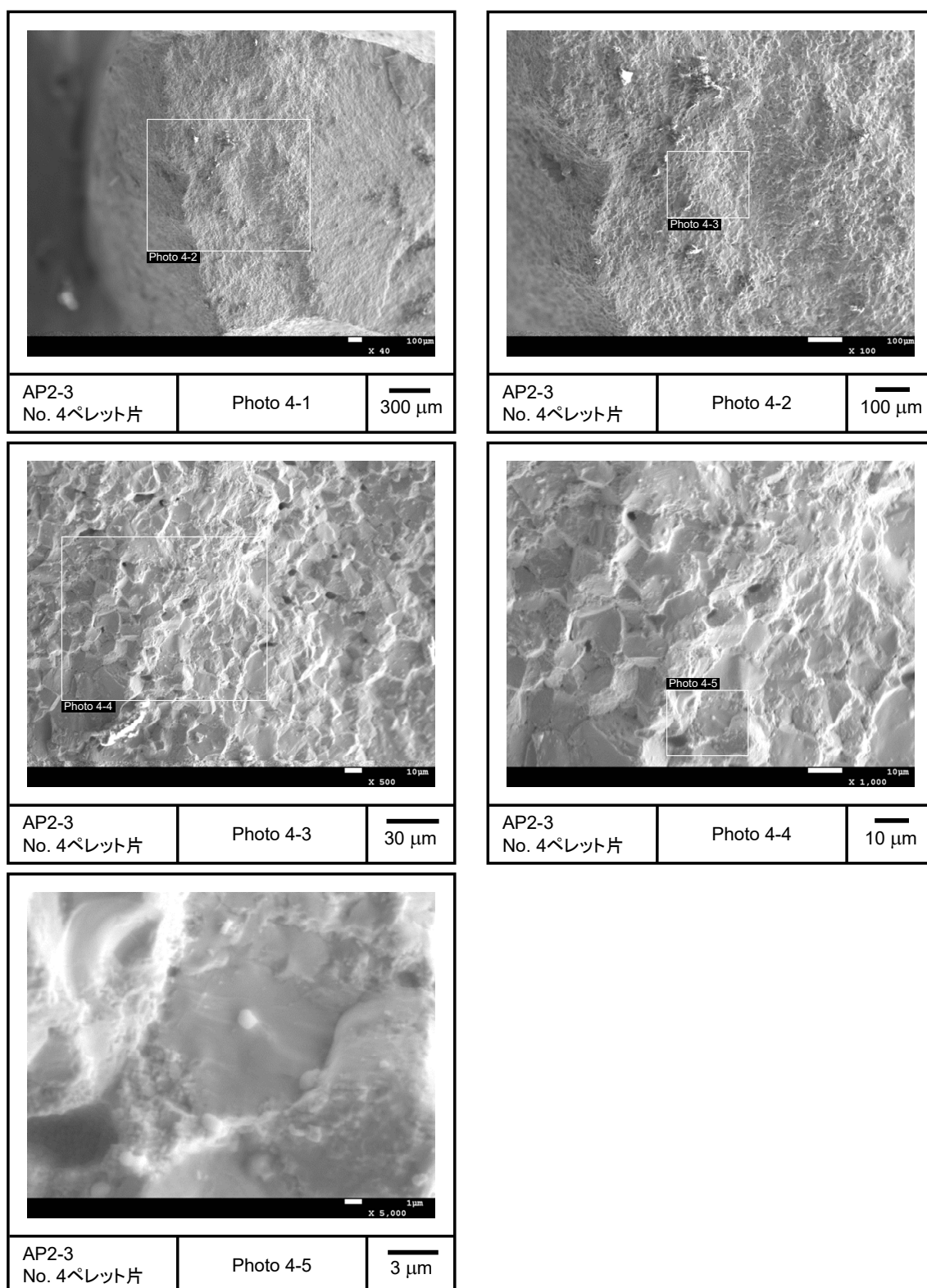


図 4.3.2-12(4) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 4 の SEM 画像
(AP2-3 燃料セグメント)

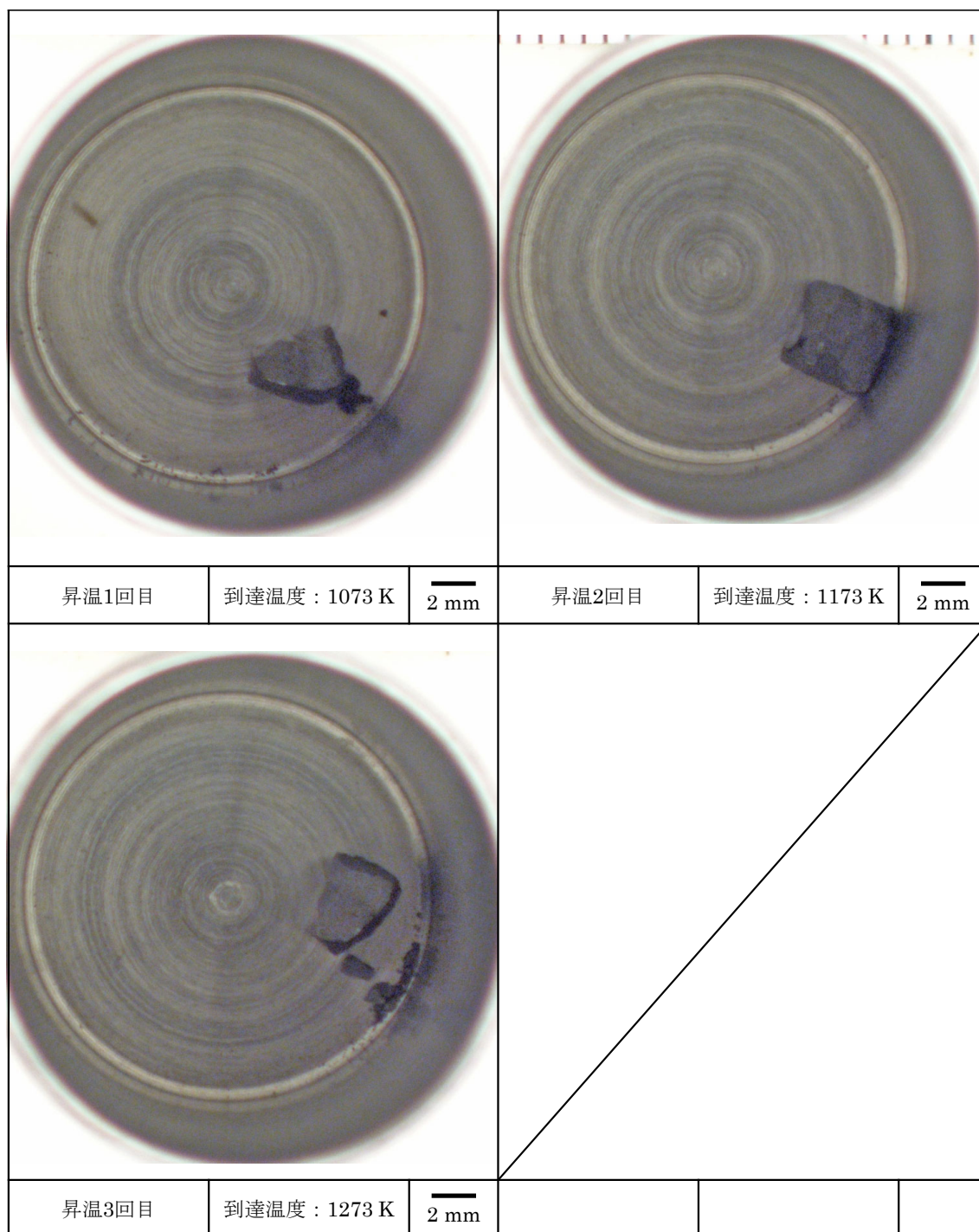


図 4.3.2-13 加熱試験後の燃料ペレット片 No. 4 の外観
(AP2-3 燃料セグメント)

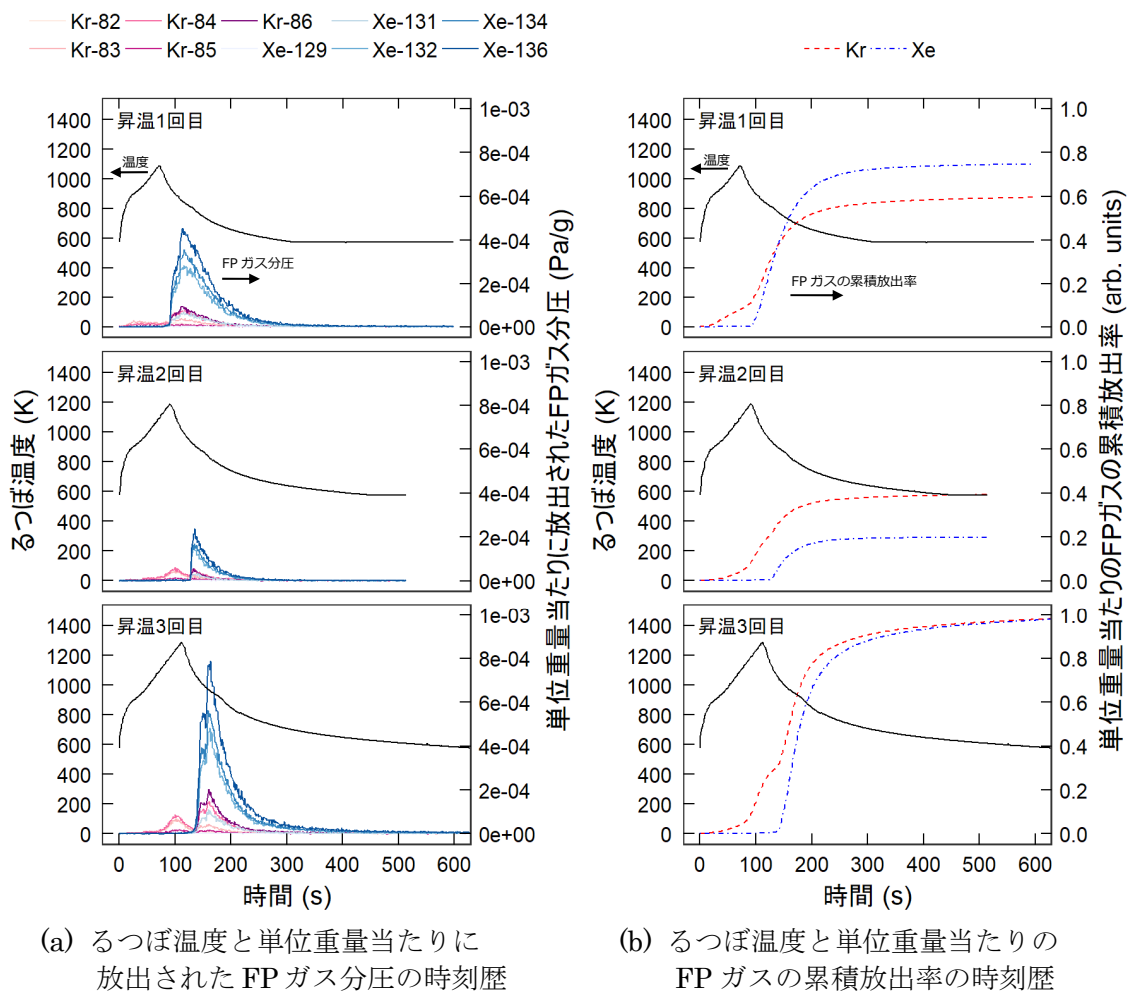


図 4.3.2-14 燃料ペレット片 No. 4 に対する加熱試験時のるつぼ温度
及び FP ガスの放出履歴

(AP2-3 燃料セグメント、単位重量当たりの FP ガスの累積放出率は燃料ペレット片 No.4
の昇温 3 回目の総放出量で規格化した。)

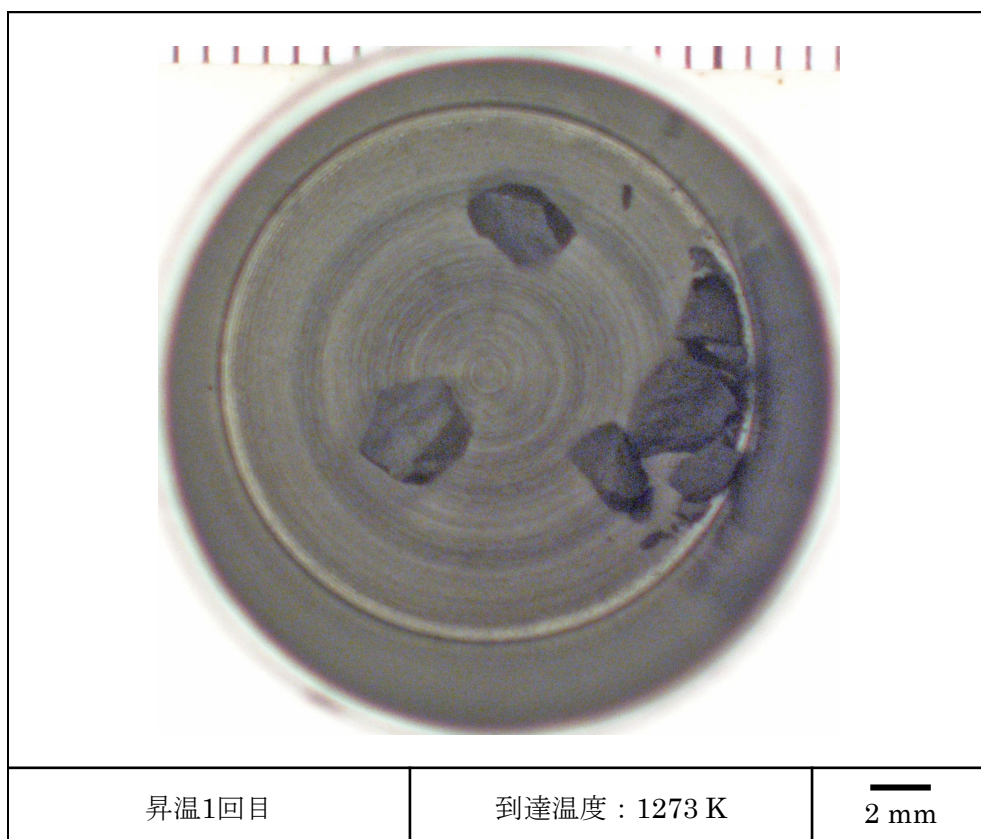
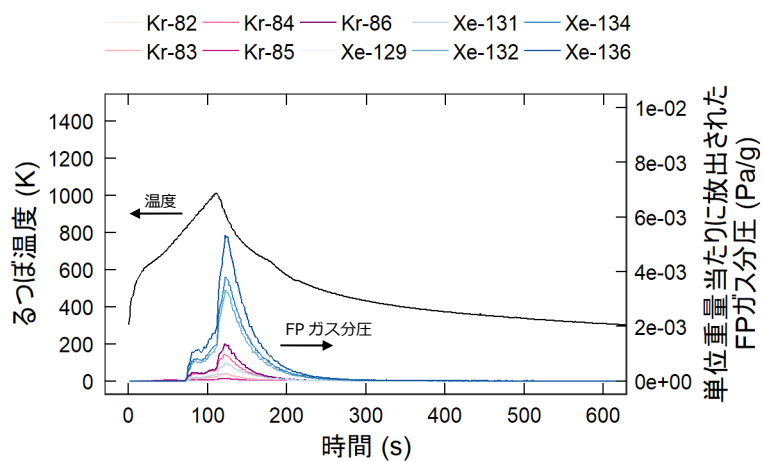
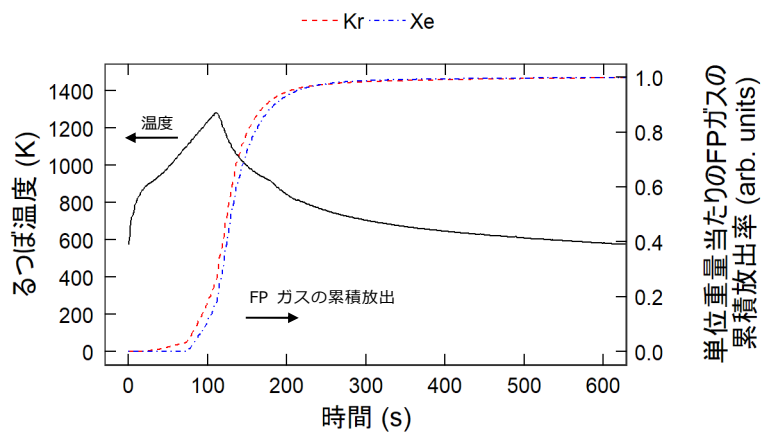


図 4.3.2-15 加熱試験後の燃料ペレット片 No. 2 の外観
(AP2-3 燃料セグメント)



(a) るつぼ温度と単位重量当りに放出された FP ガス分圧の時刻歴



(b) るつぼ温度と単位重量当たりの FP ガスの累積放出率の時刻歴

図 4.3.2-16 燃料ペレット片 No. 2 に対する加熱試験時のるつぼ温度及び FP ガスの放出履歴 (AP2-3 燃料セグメント)

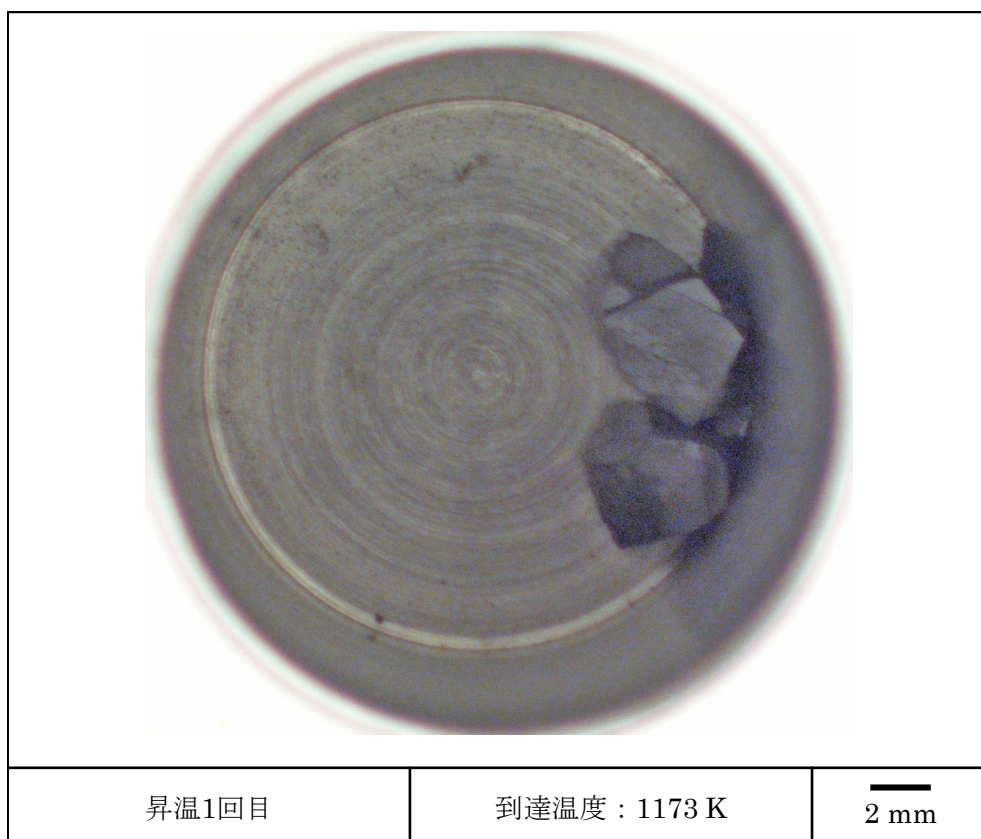
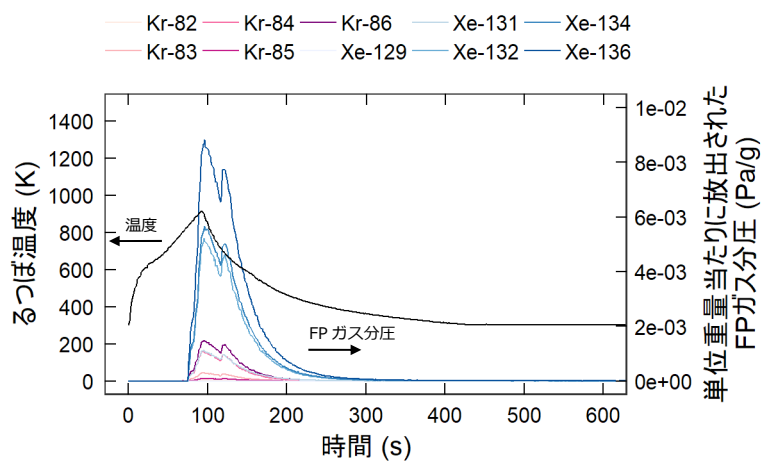
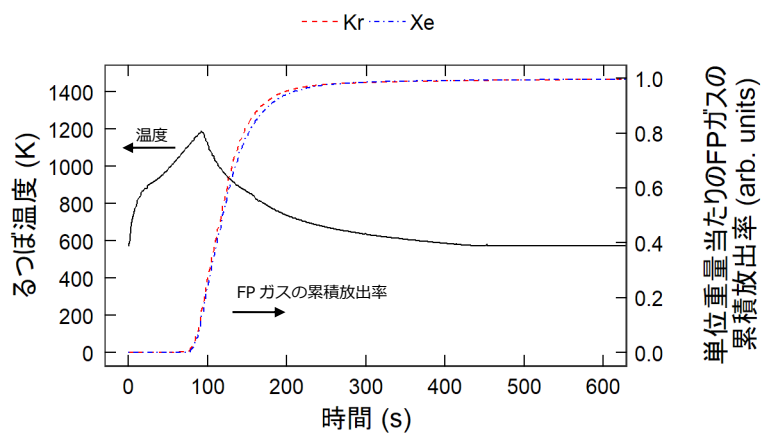


図 4.3.2-17 加熱試験後の燃料ペレット片 No. 1 の外観
(AP2-3 燃料セグメント)



(a) るつぼ温度と単位重量当りに放出された
FP ガス分圧の時刻歴



(b) るつぼ温度と単位重量当たりの
FP ガスの累積放出率の時刻歴

図 4.3.2-18 燃料ペレット片 No. 1 に対する加熱試験時のるつぼ温度
及び FP ガスの放出履歴
(AP2-3 燃料セグメント)