

図 4.3.2-11(1) AP2-3 セグメント燃料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）⁽⁵⁾

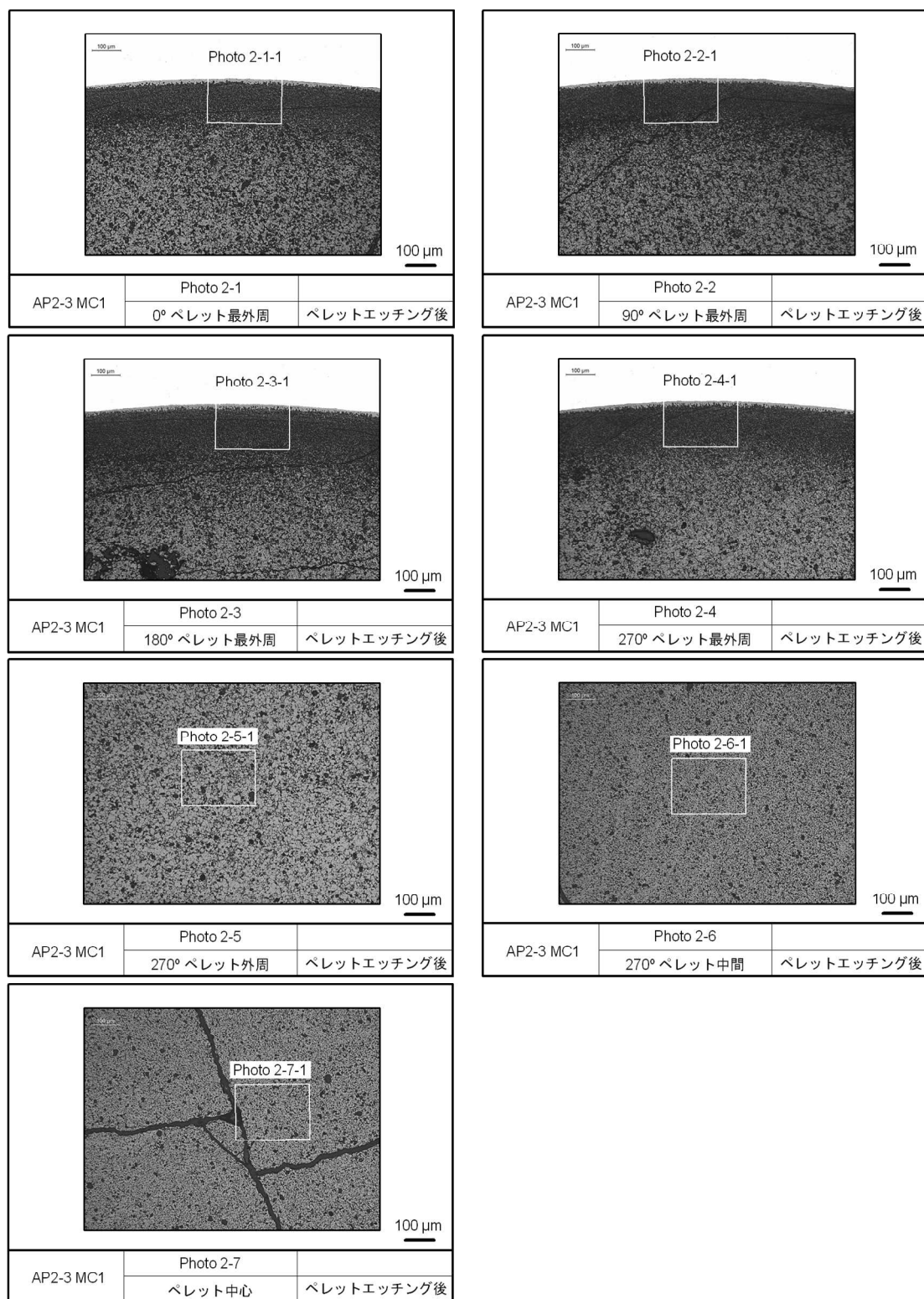


図 4.3.2-11(2) AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレットの断面画像（ペレットエッチング後）⁽⁵⁾

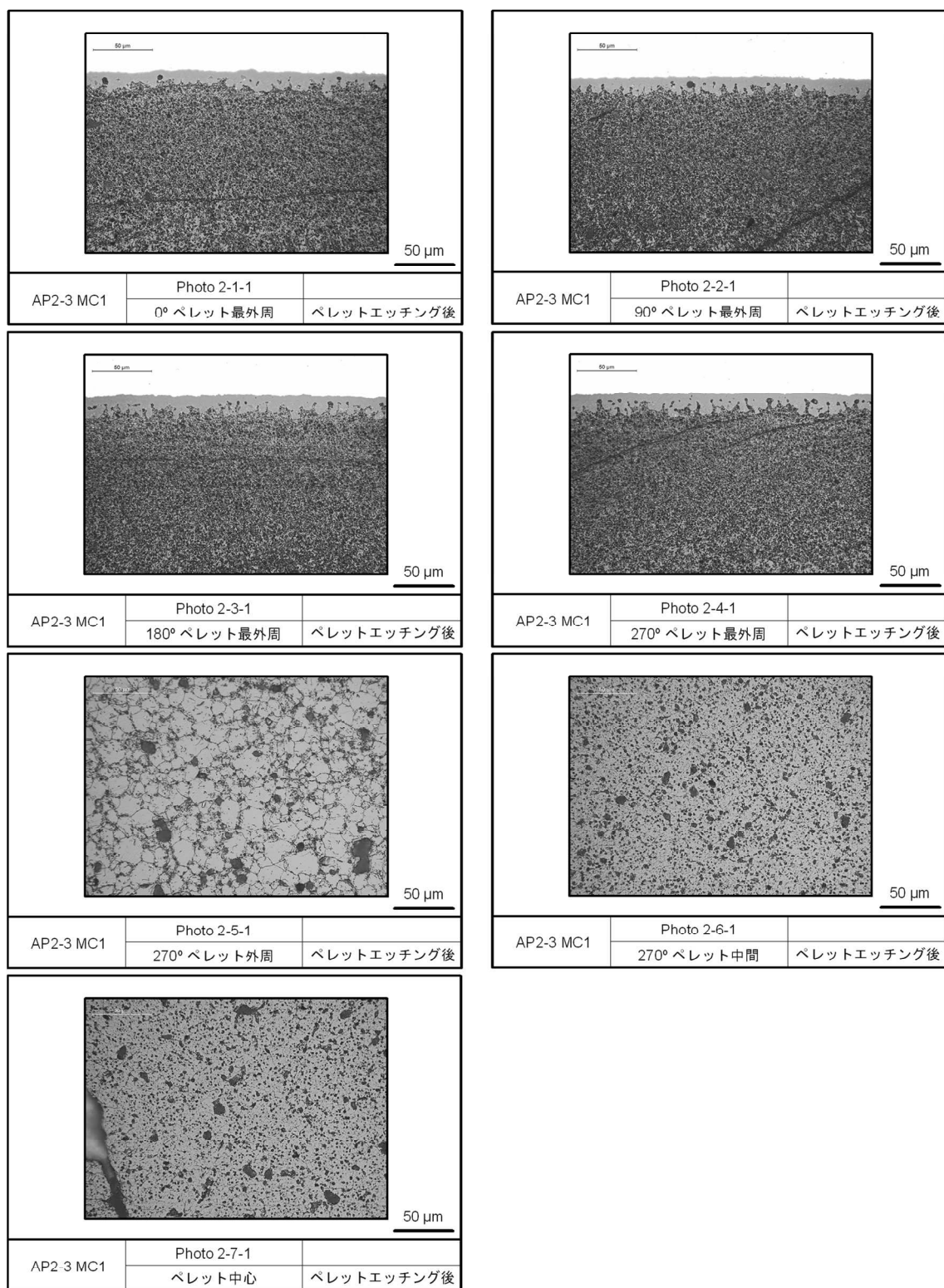


図 4.3.2-11(3) AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレットの断面画像（ペレットエッチング後）⁽⁵⁾



図 4.3.2-12 AP2-3 セグメント燃料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)

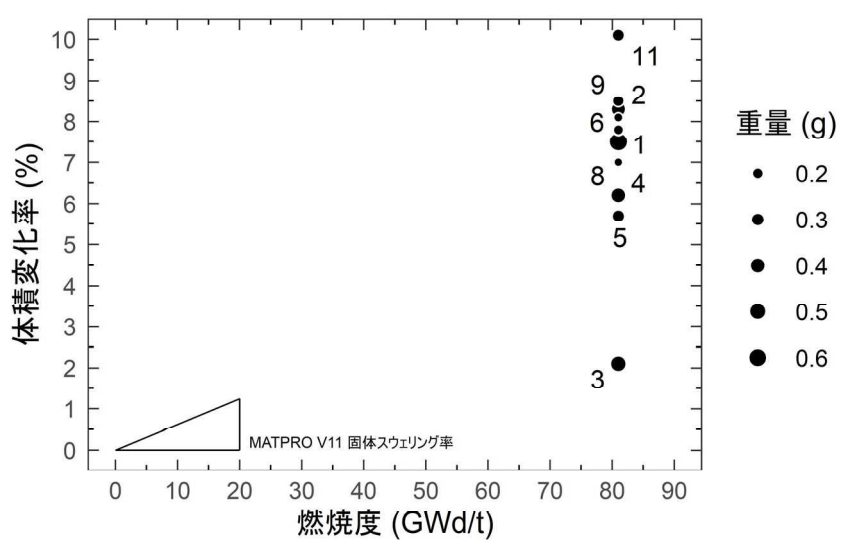


図 4.3.2-13 AP2-3 セグメント燃料から採取したペレット片の
体積変化率の燃焼度依存性
(図中数値はペレット片番号)

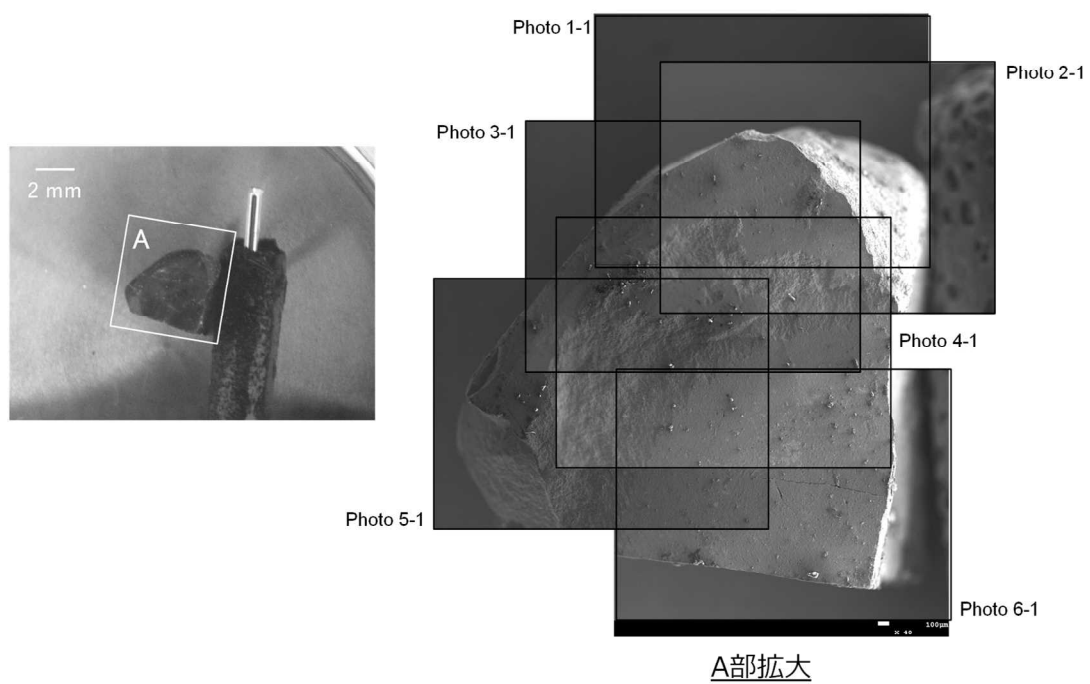


図 4.3.2-14 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 3 の外観
(AP2-3 セグメント燃料)

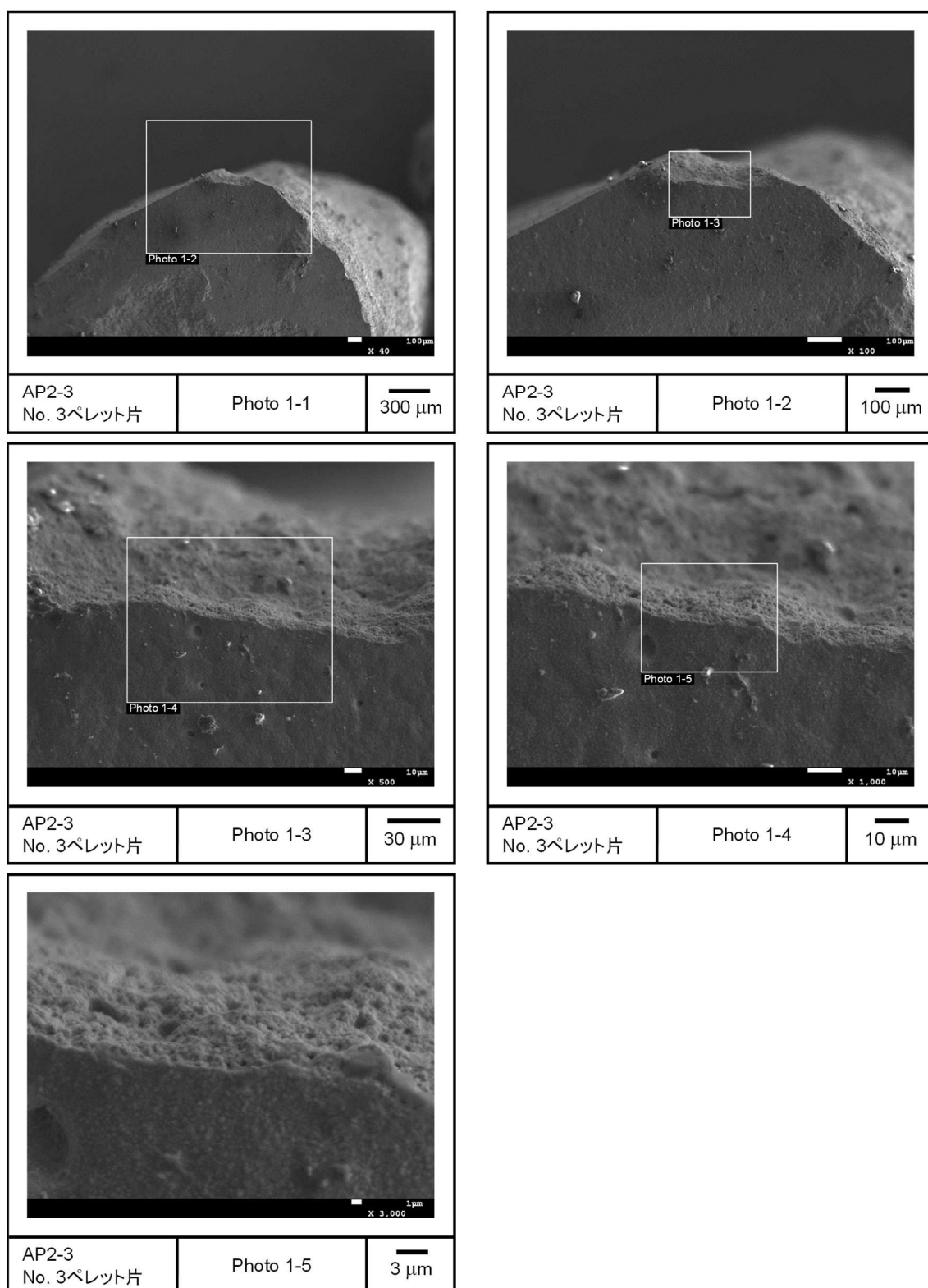


図 4.3.2-15(1) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 3 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

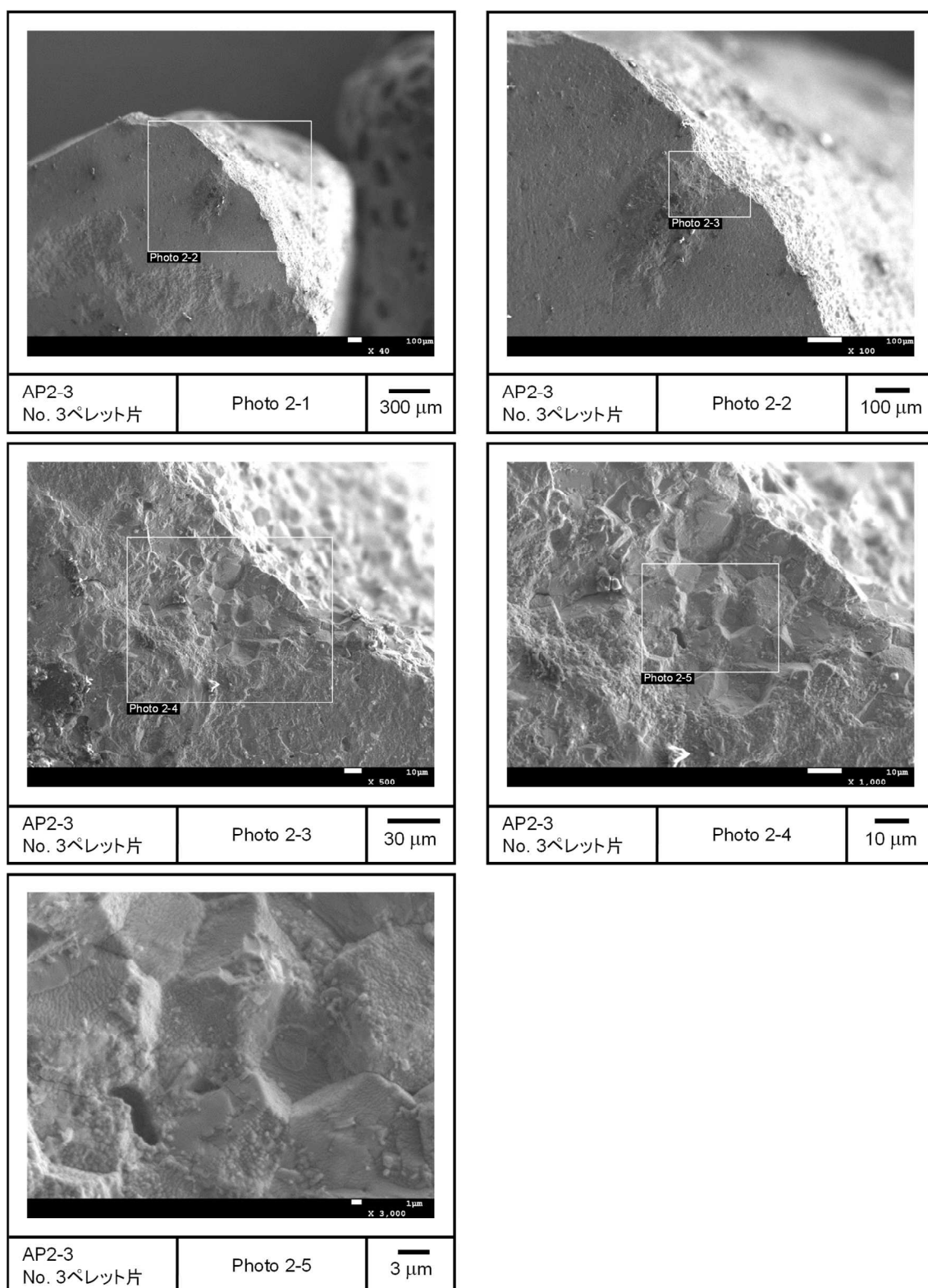


図 4.3.2-15(2) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 3 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

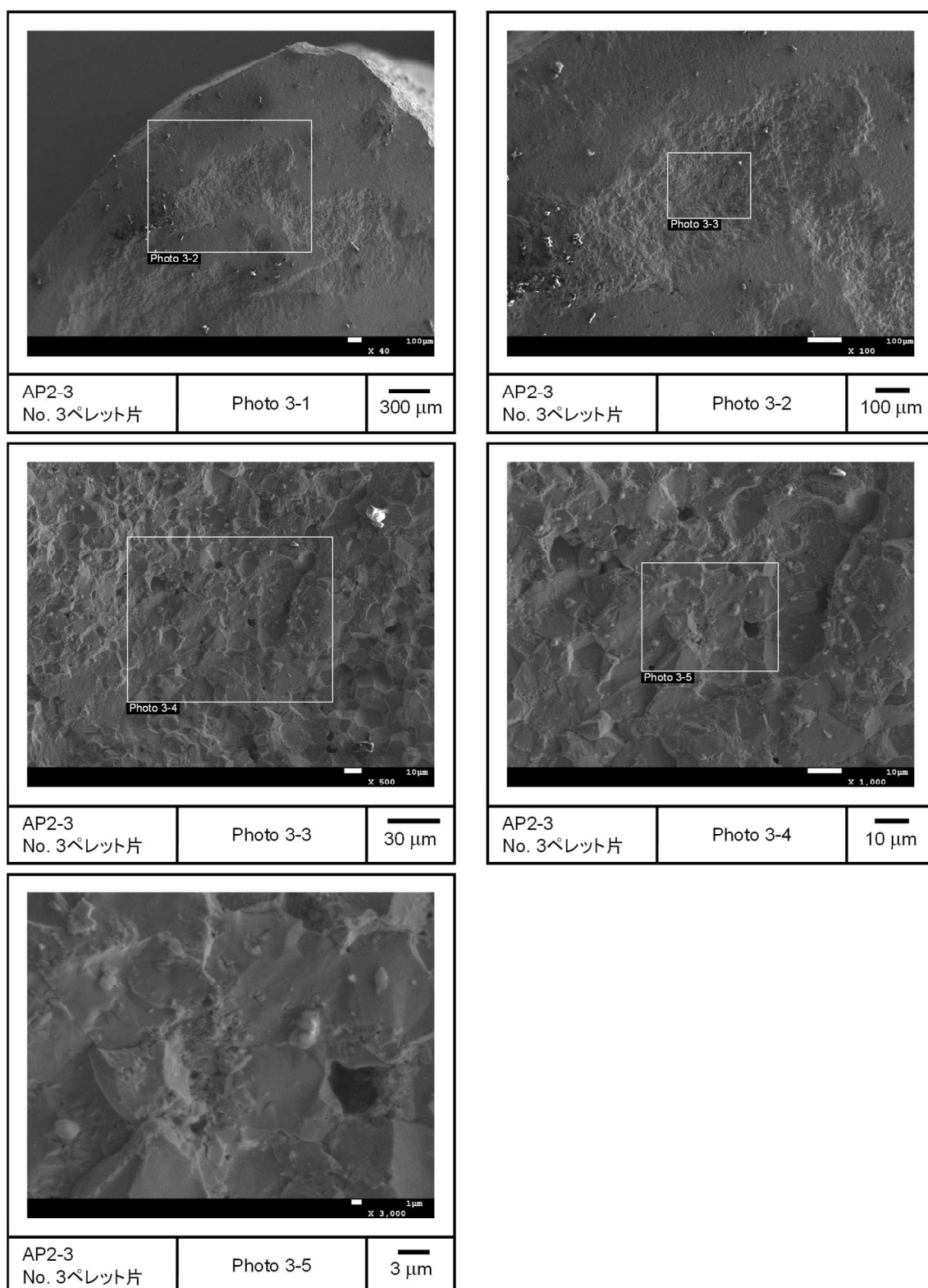


図 4.3.2-15(3) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 3 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

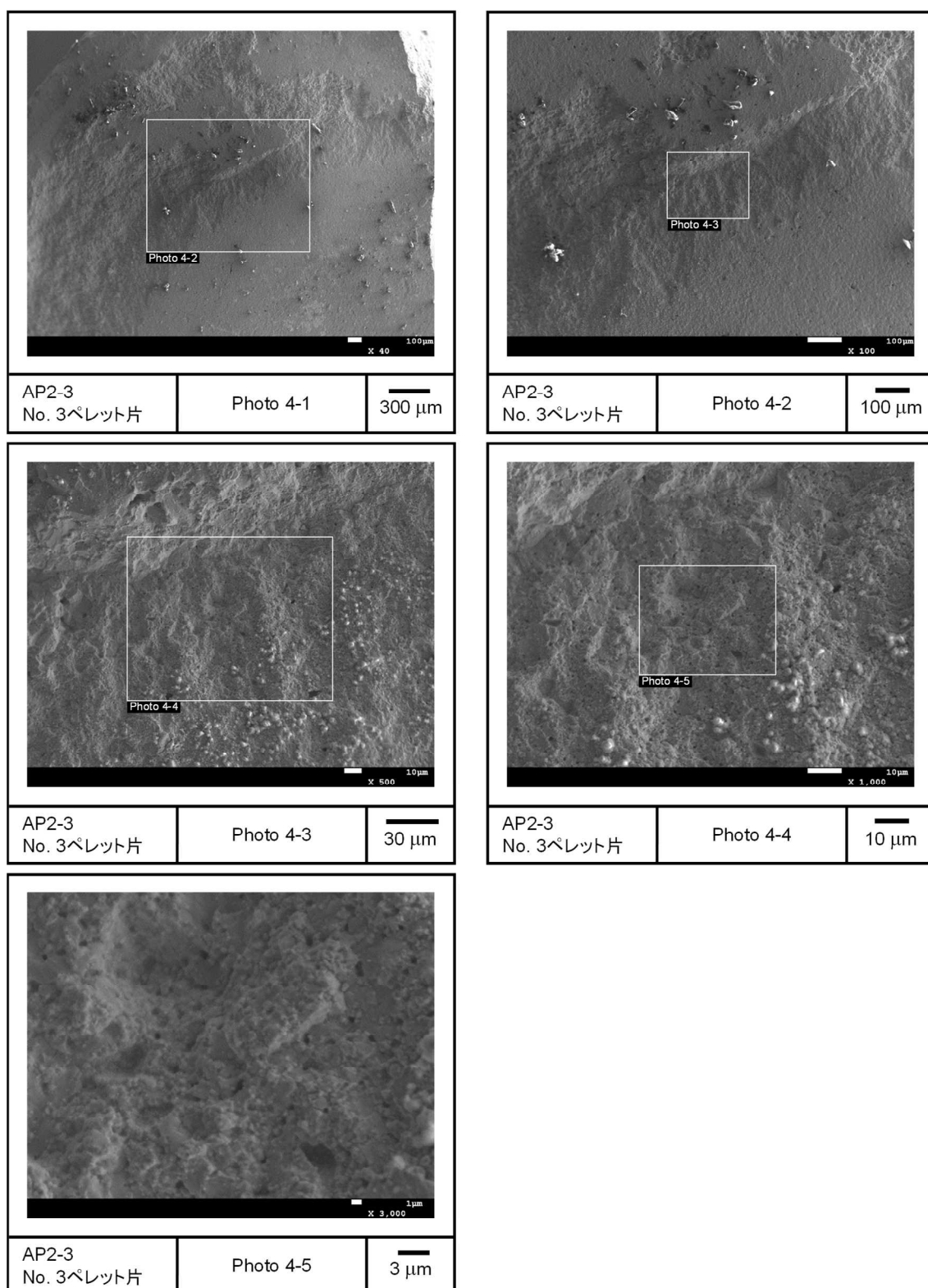


図 4.3.2-15(4) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 3 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

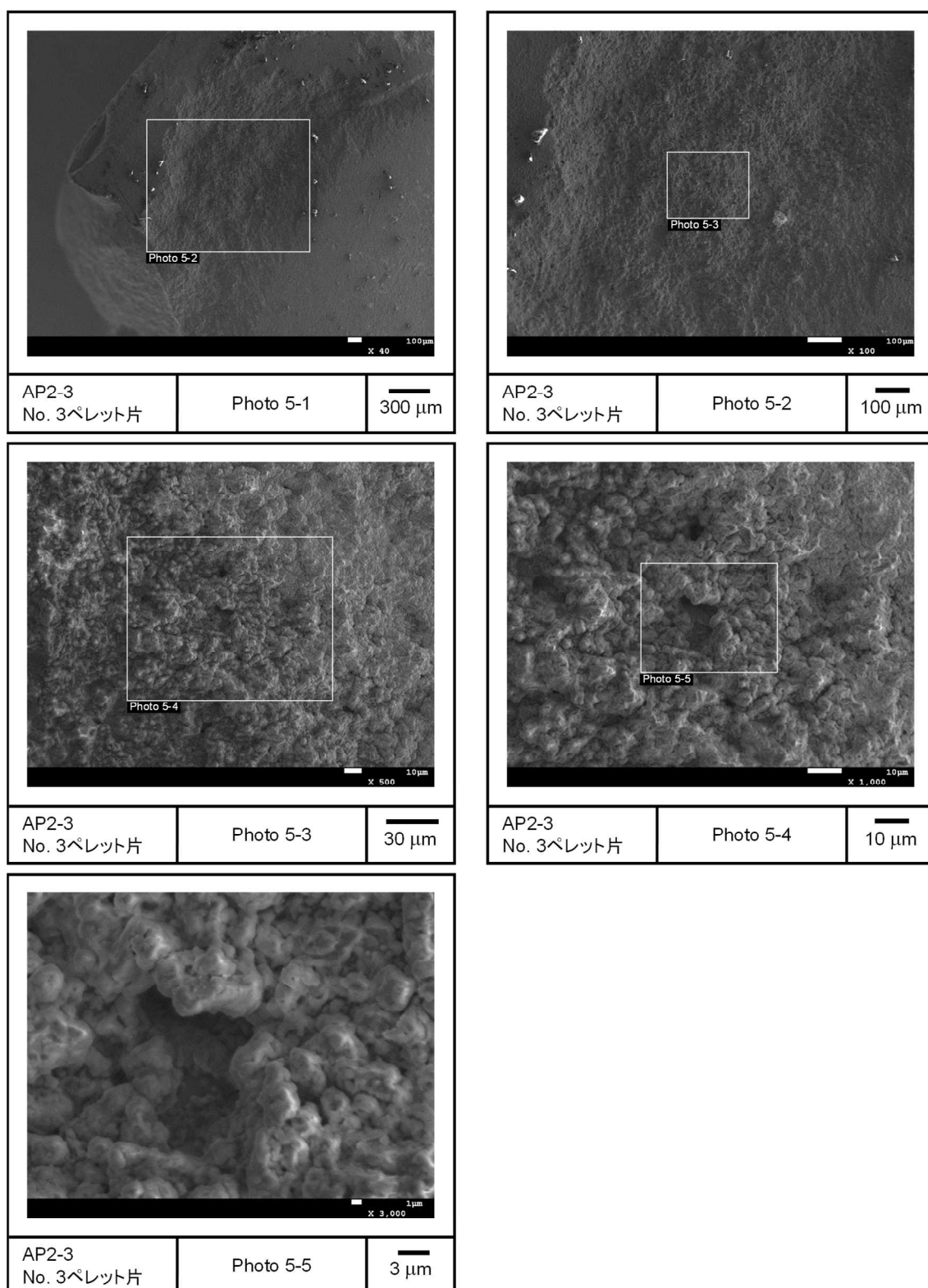


図 4.3.2-15(5) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 3 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

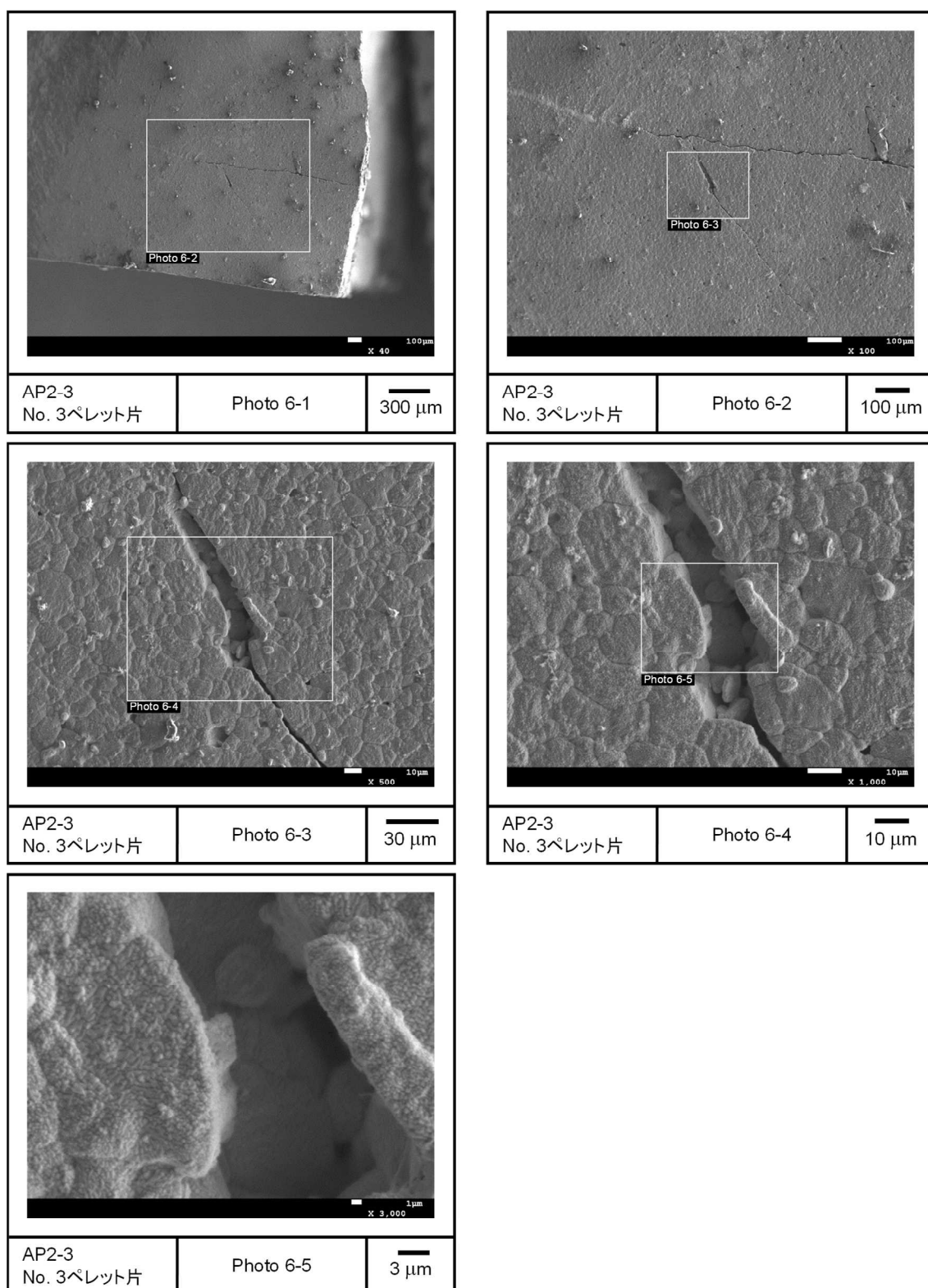


図 4.3.2-15(6) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 3 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

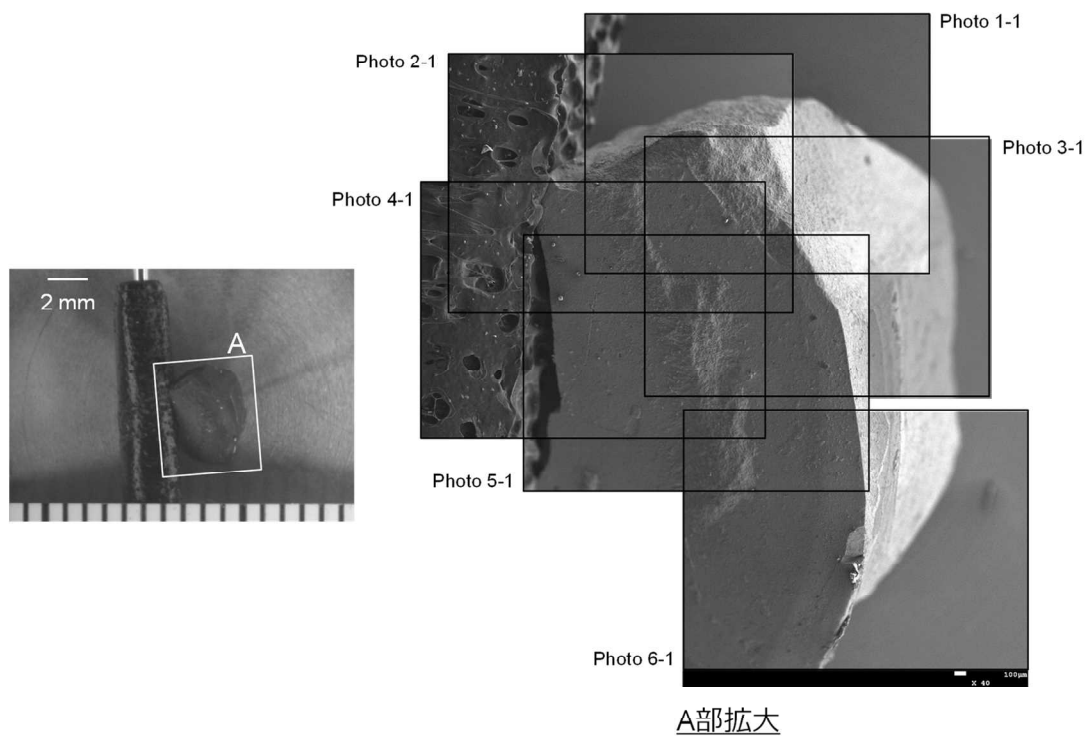


図 4.3.2-16 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 11 の外観
(AP2-3 セグメント燃料)

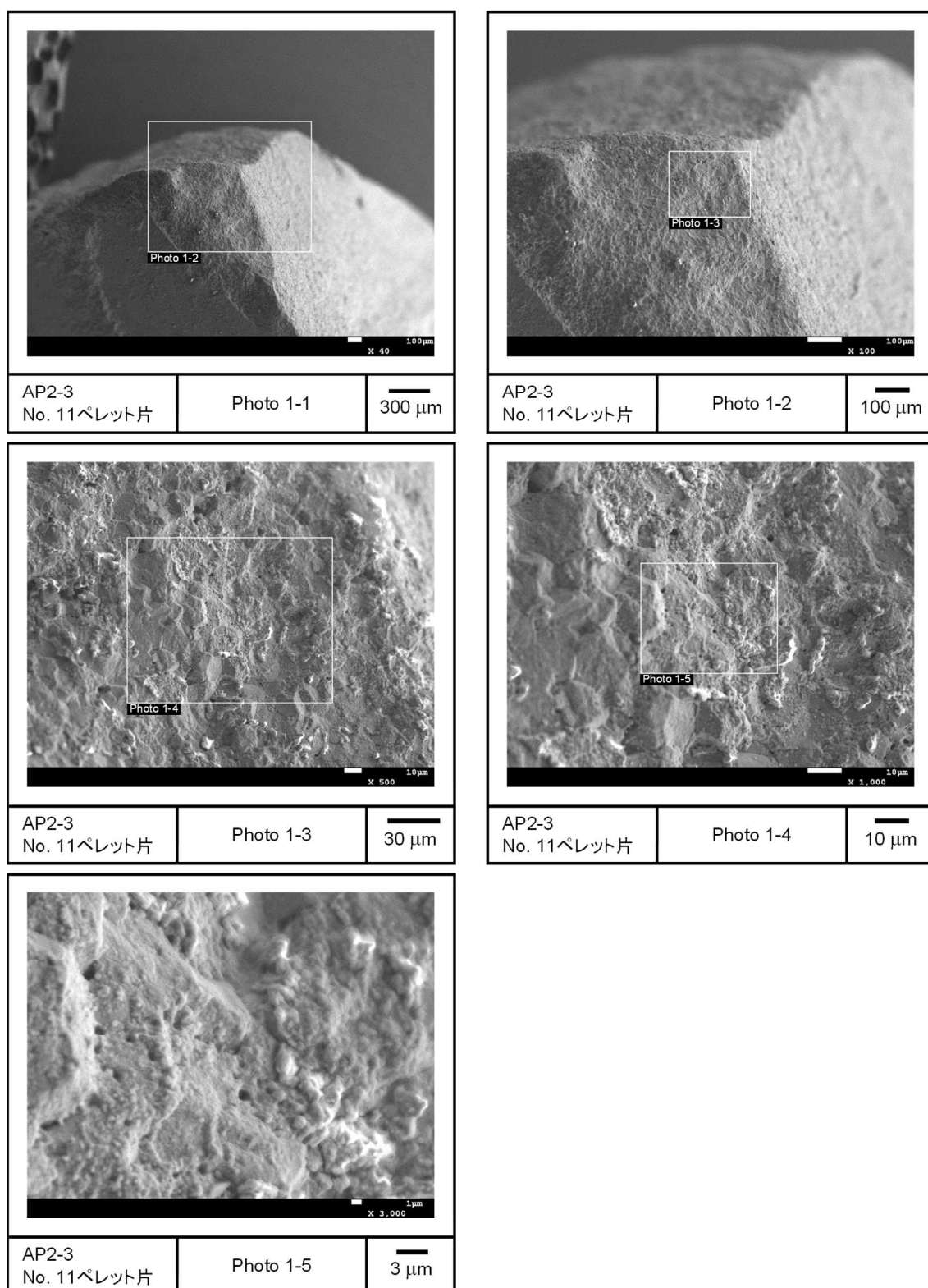


図 4.3.2-17(1) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

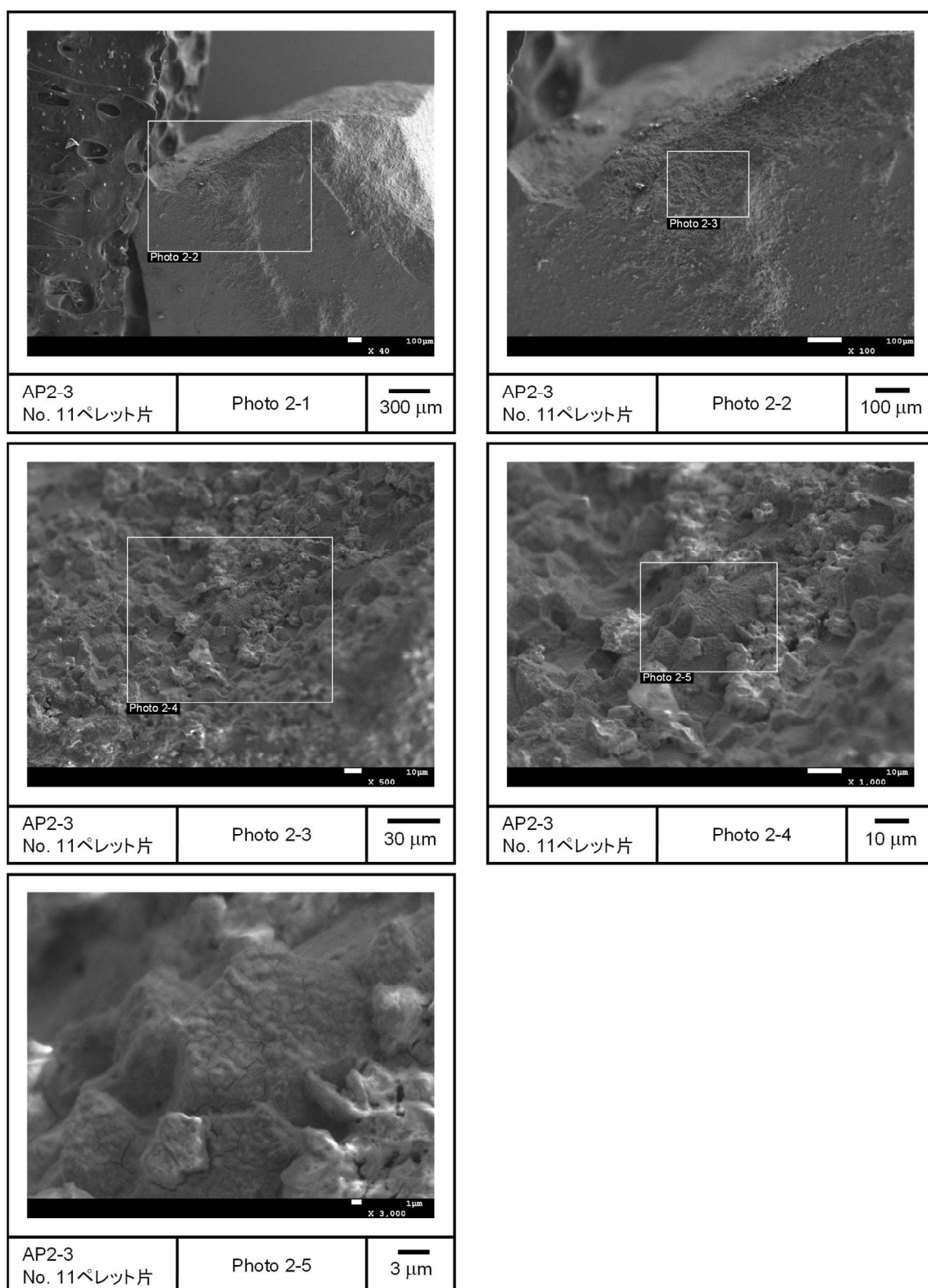


図 4.3.2-17(2) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

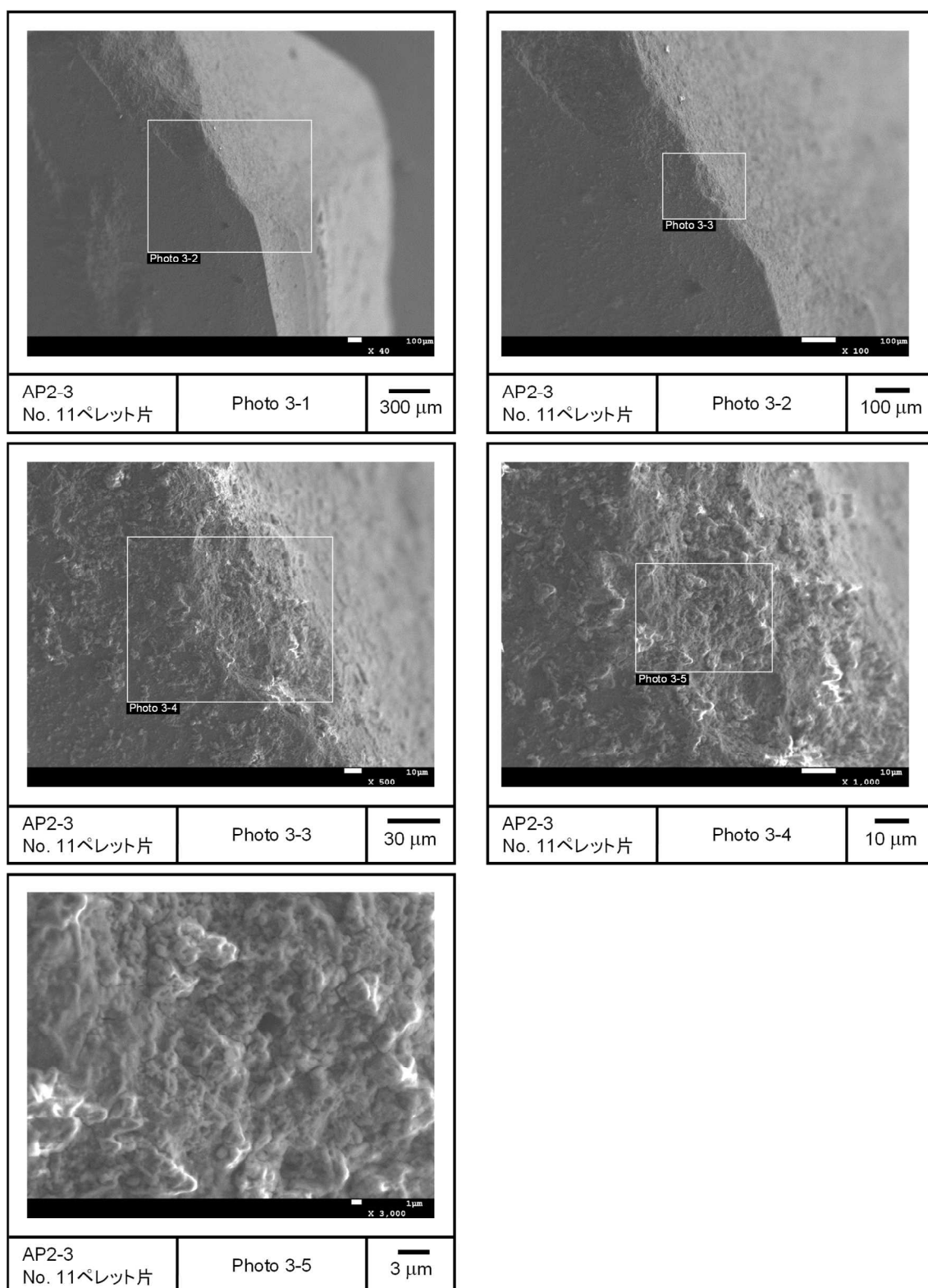


図 4.3.2-17(3) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

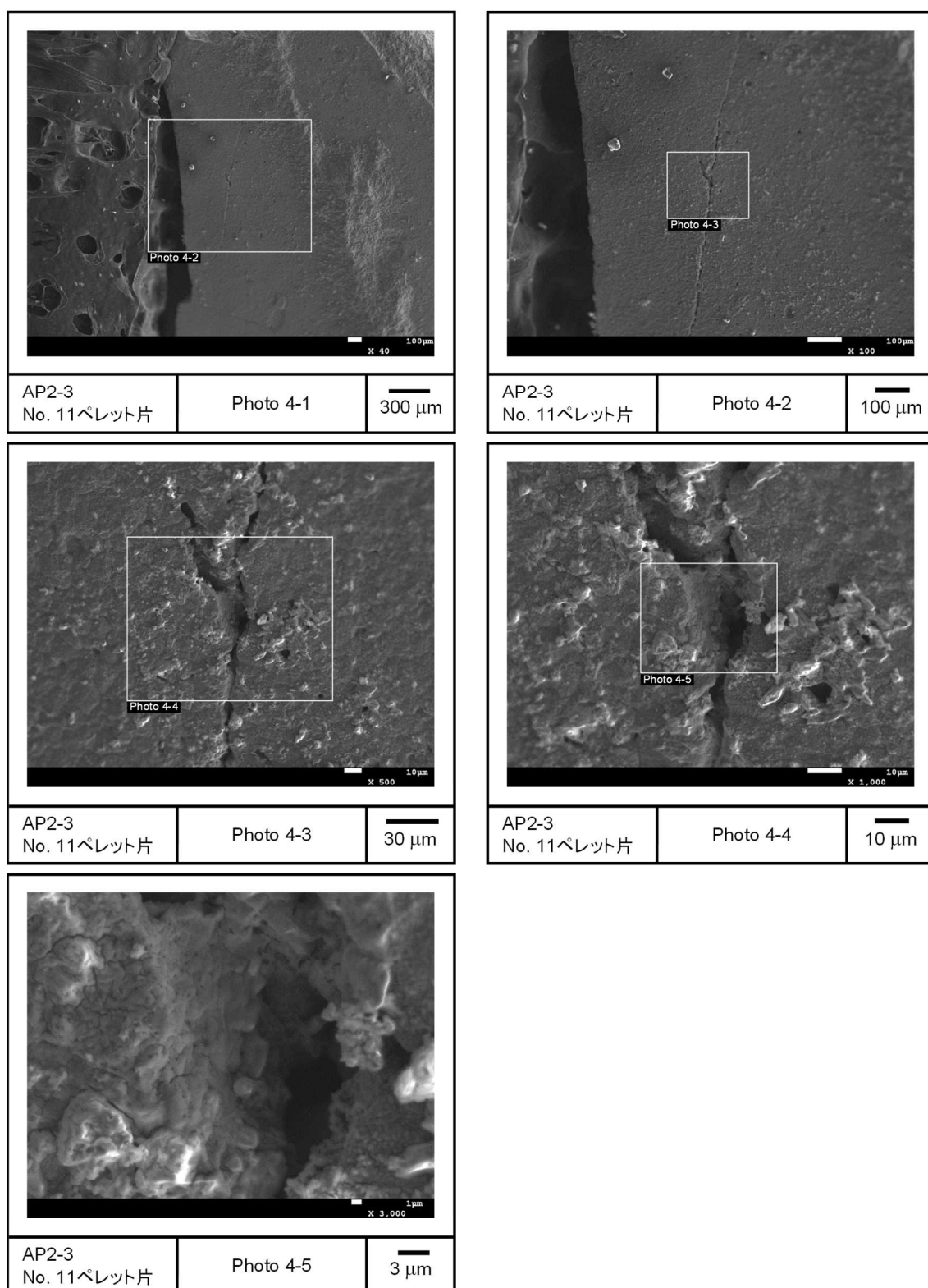


図 4.3.2-17(4) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

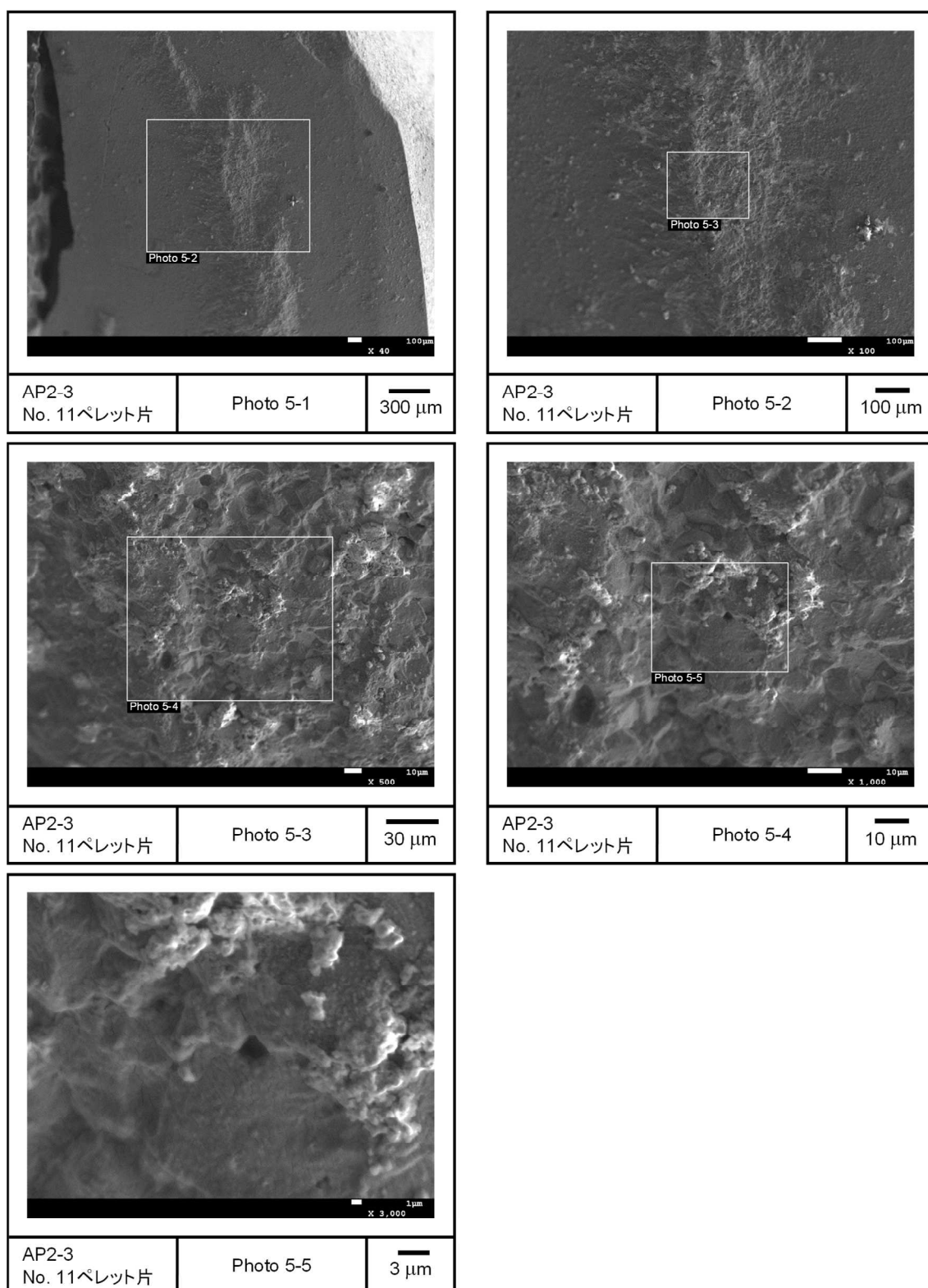


図 4.3.2-17(5) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

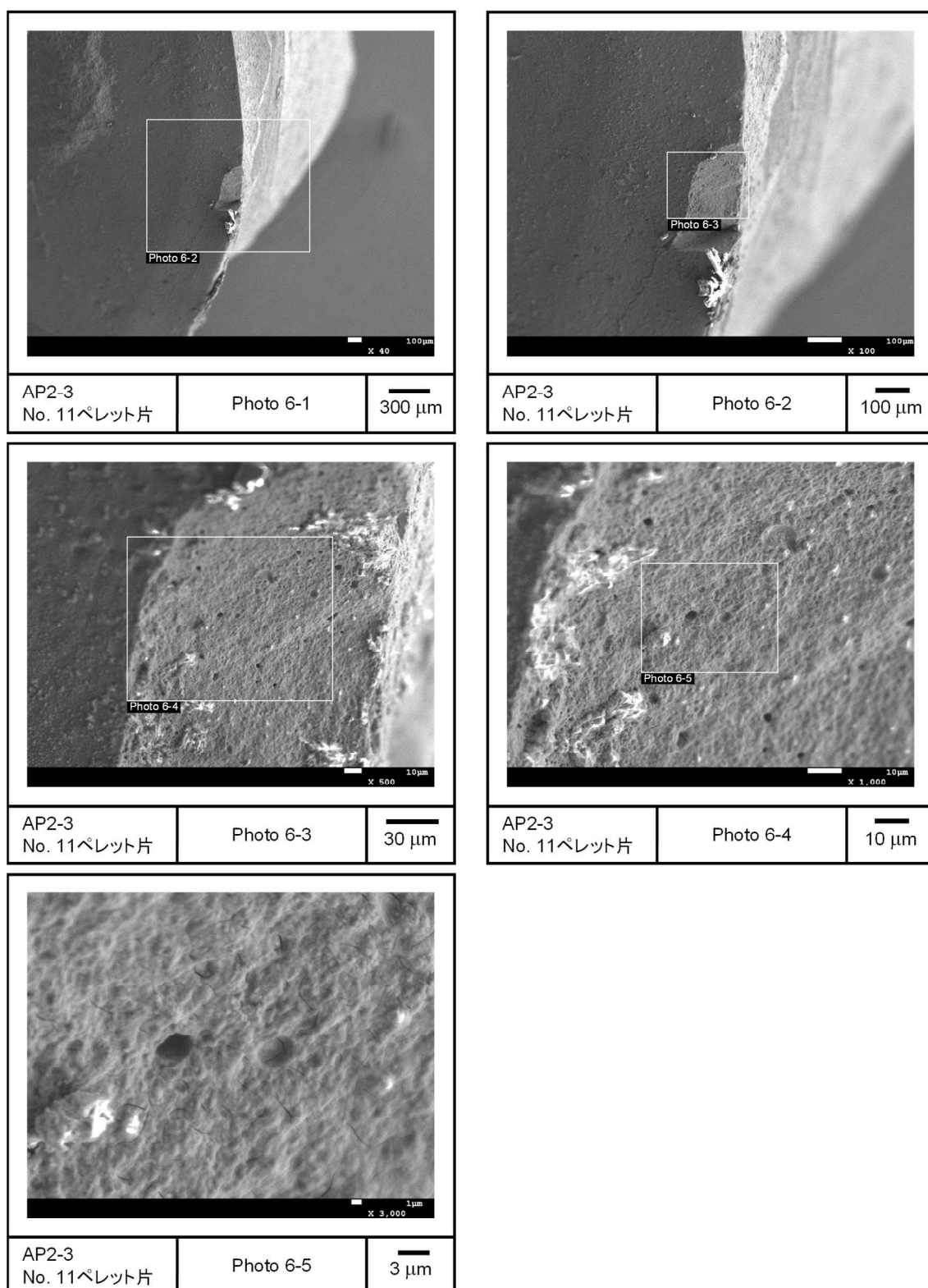


図 4.3.2-17(6) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 11 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

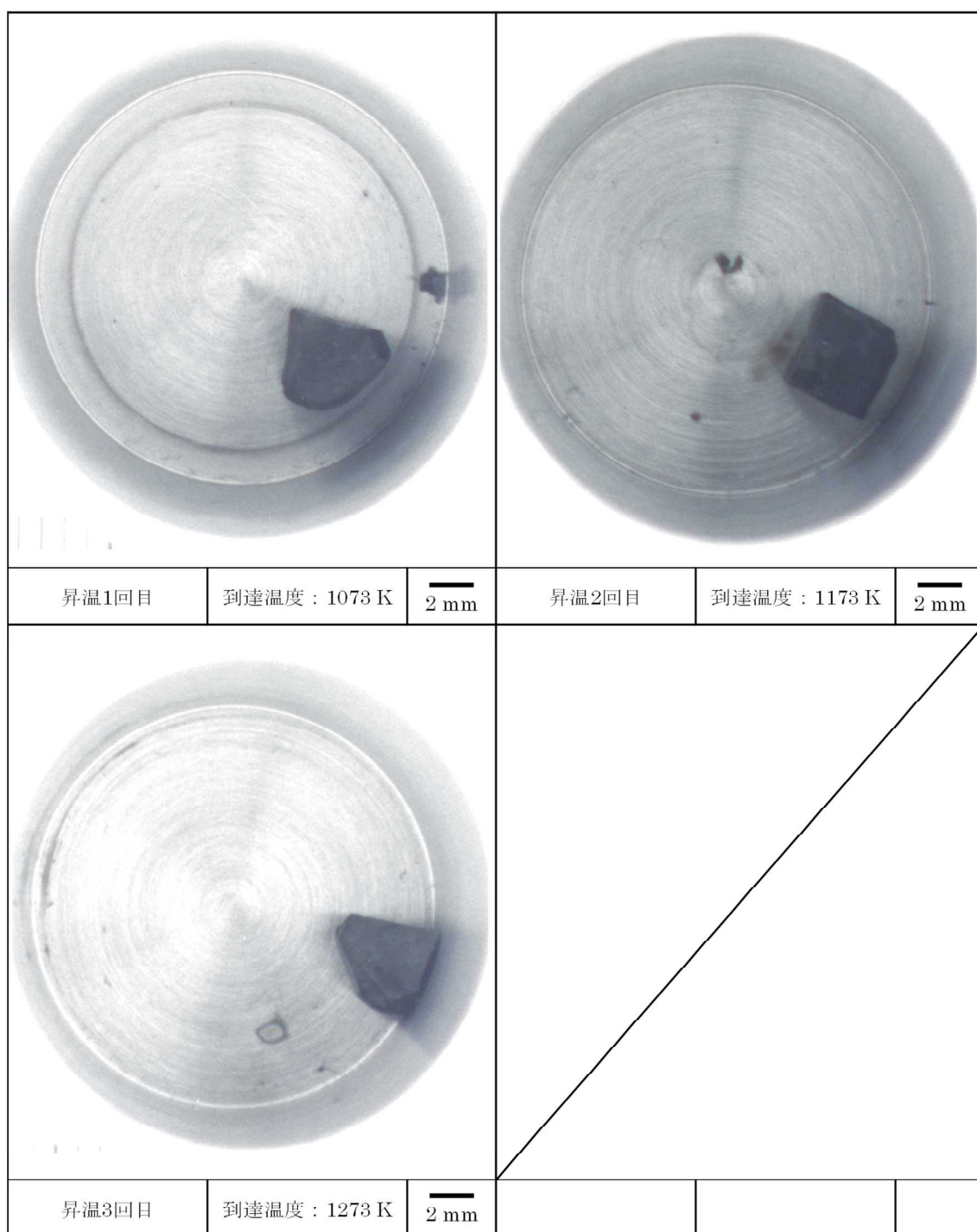


図 4.3.2-18 加熱試験後の燃料ペレット片 No. 3 の外観
(AP2-3 セグメント燃料)

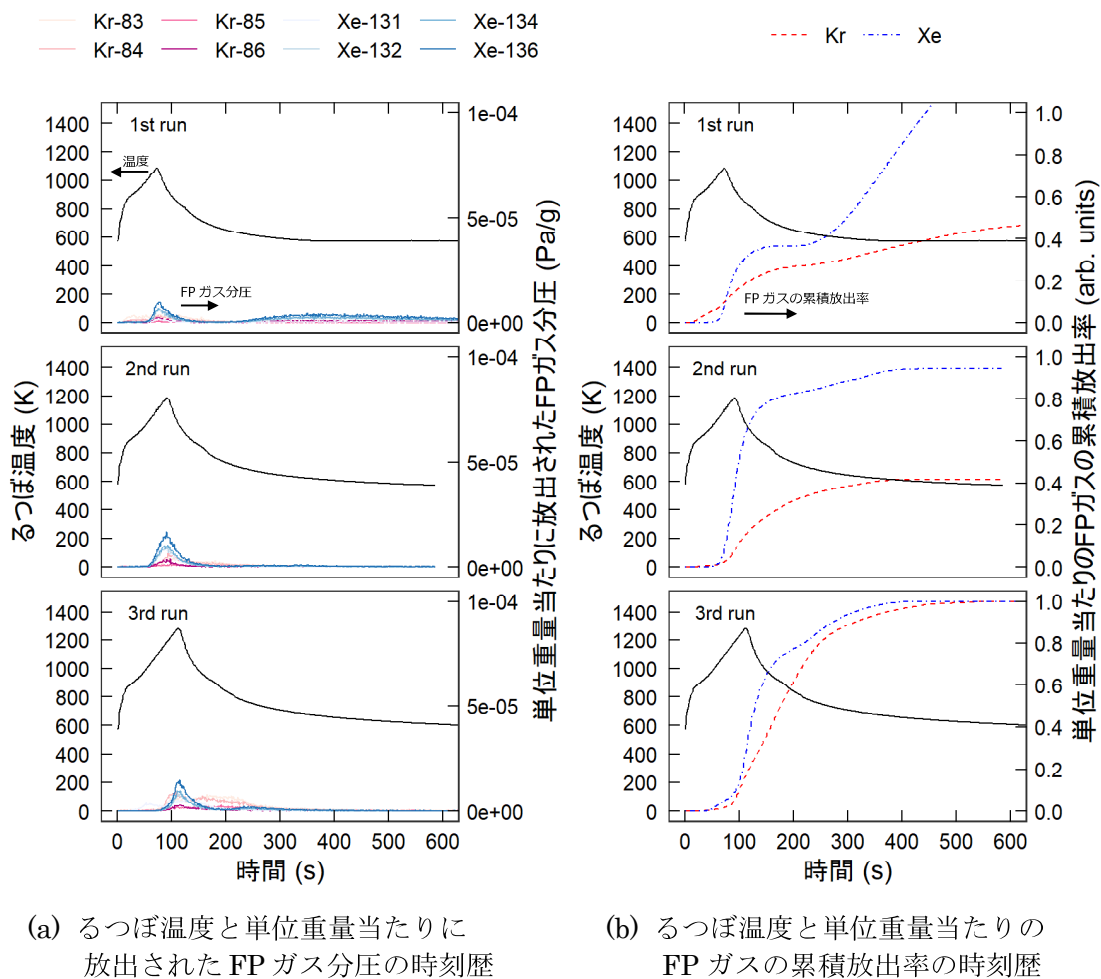


図 4.3.2-19 燃料ペレット片 No. 3 に対する加熱試験時のるつぼ温度及び FP ガスの放出履歴
 (AP2-3 セグメント燃料、単位重量当たりの FP ガスの累積放出率は燃料ペレット片 No.3 の昇温 3 回目の総放出量で規格化した。)

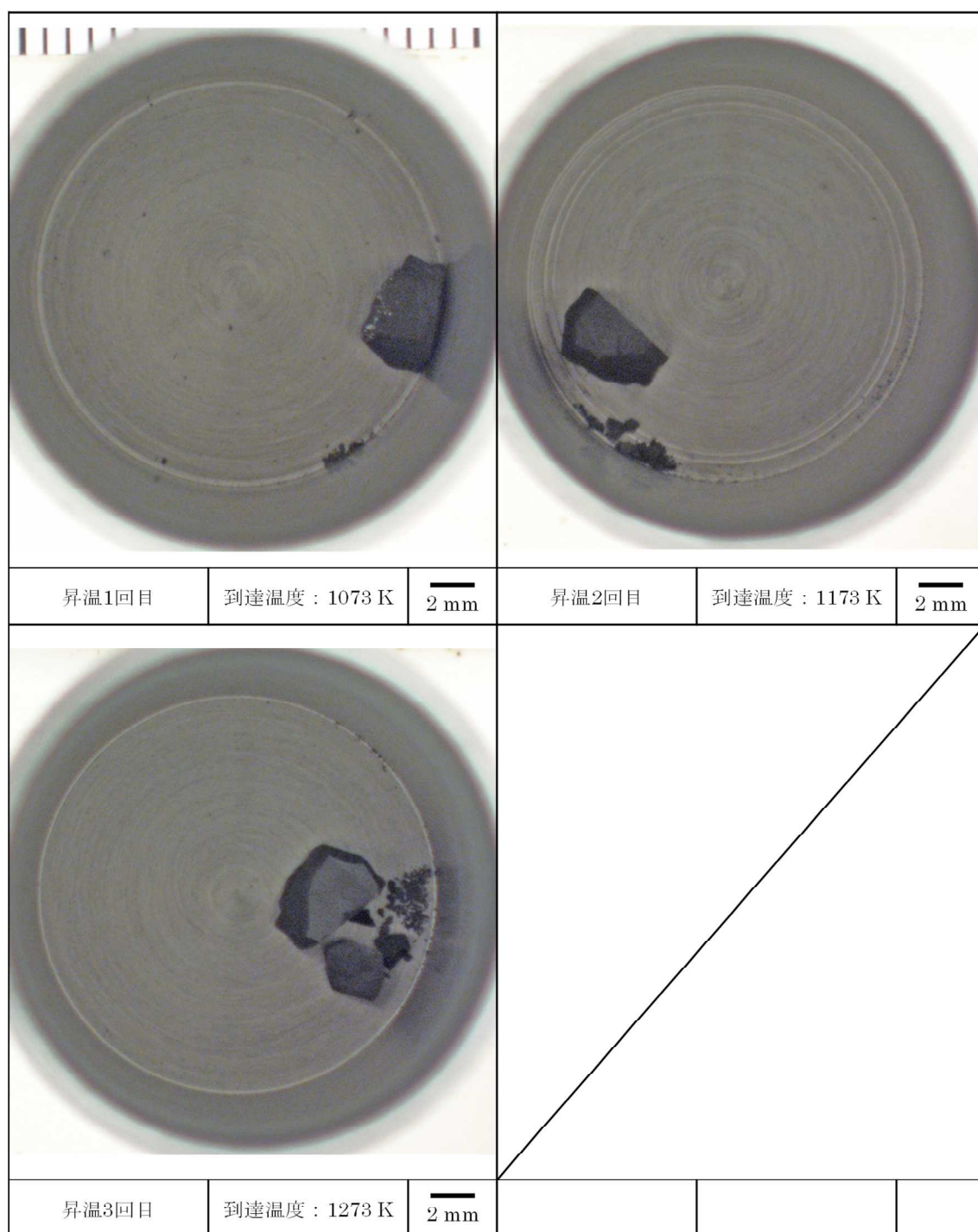
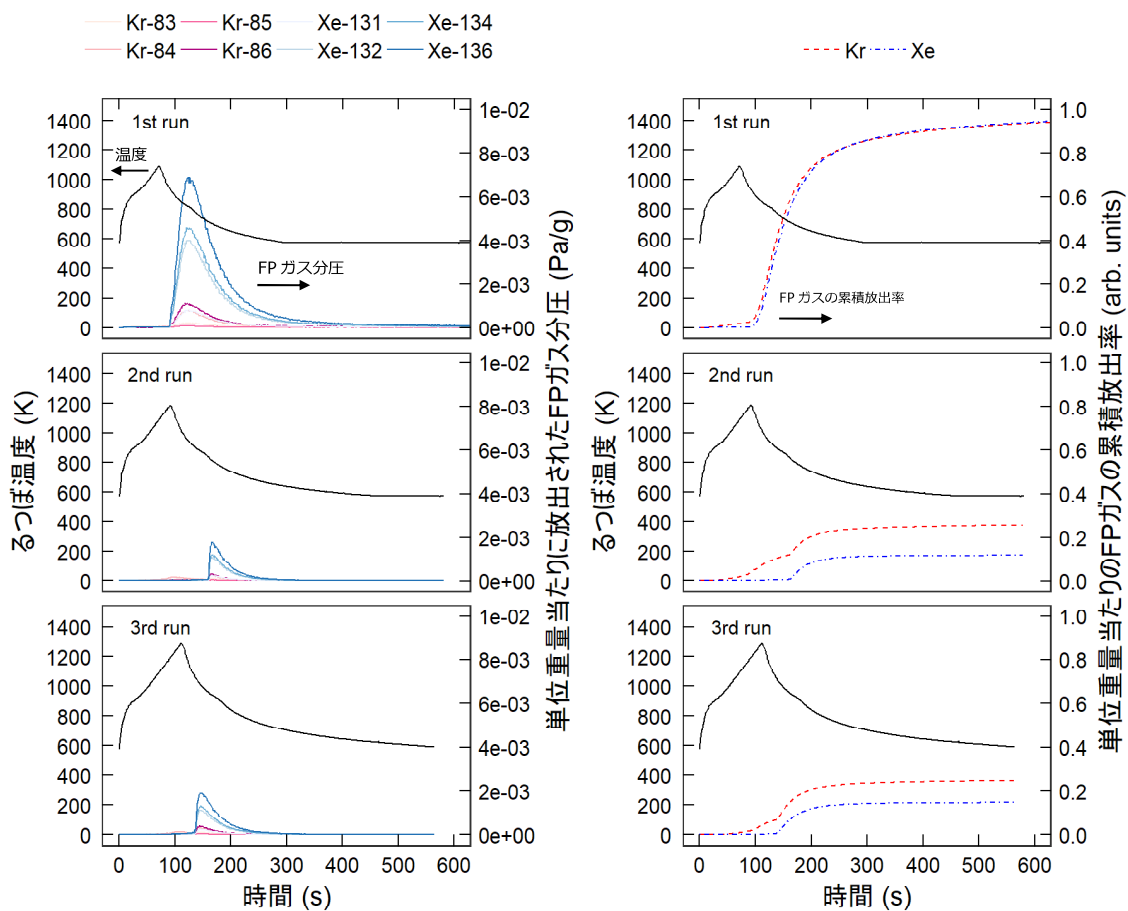


図 4.3.2-20 加熱試験後の燃料ペレット片 No. 11 の外観
(AP2-3 セグメント燃料)



(a) るつぼ温度と単位重量当たり
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 4.3.2-21 燃料ペレット片 No. 11 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 セグメント燃料、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.11 の昇温 1 回目の総放出量で規格化した。)

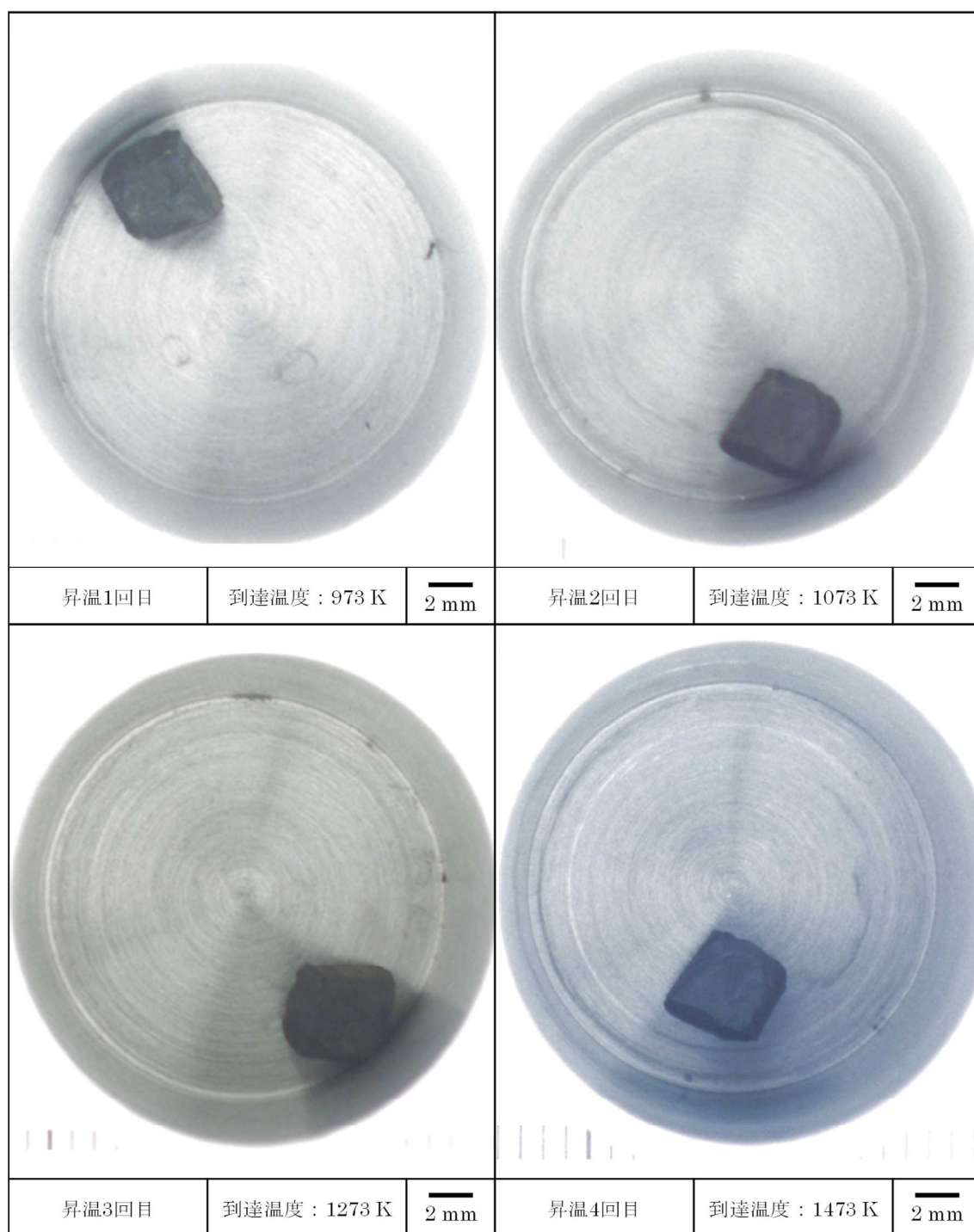
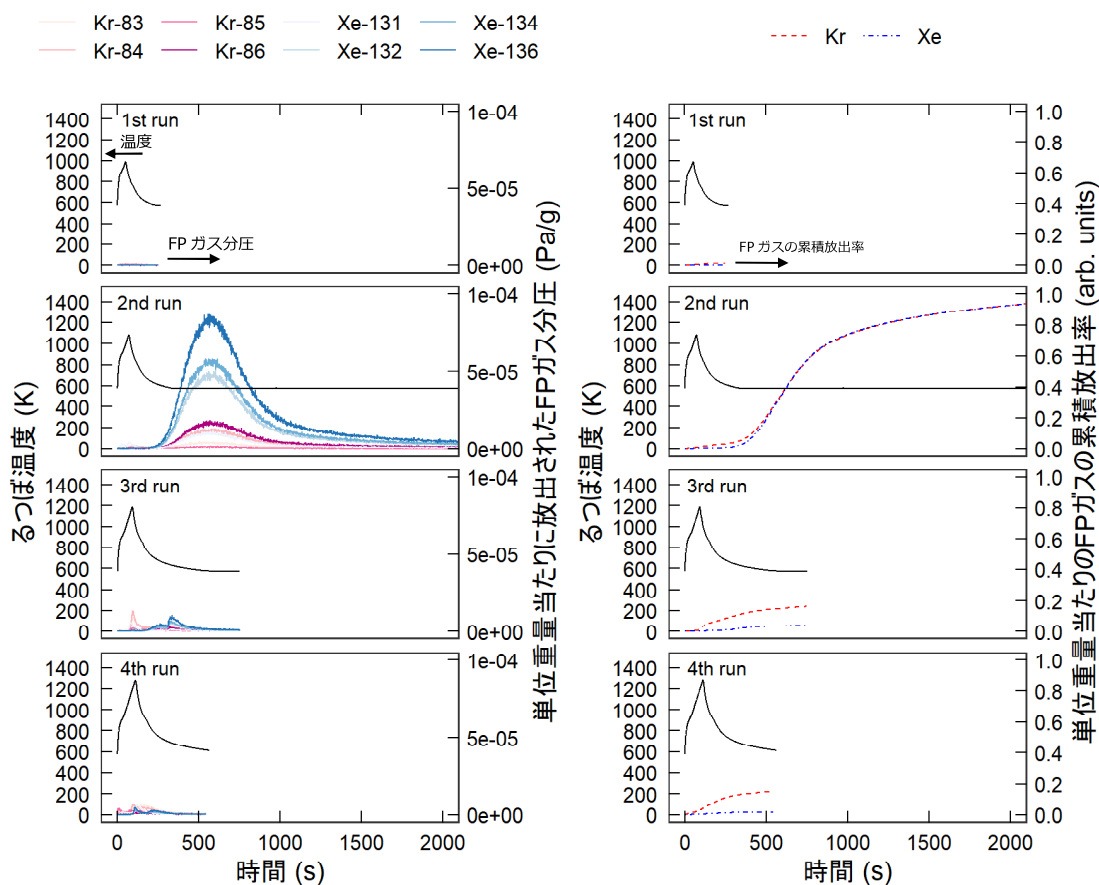


図 4.3.2-22 加熱試験後の燃料ペレット片 No. 2 の外観
(AP2-1 セグメント燃料)



(a) るつぼ温度と単位重量当たりに放出された 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 4.3.2-23 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

(AP2-1 セグメント燃料、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.2 の昇温 2 回目の総放出量で規格化した。)

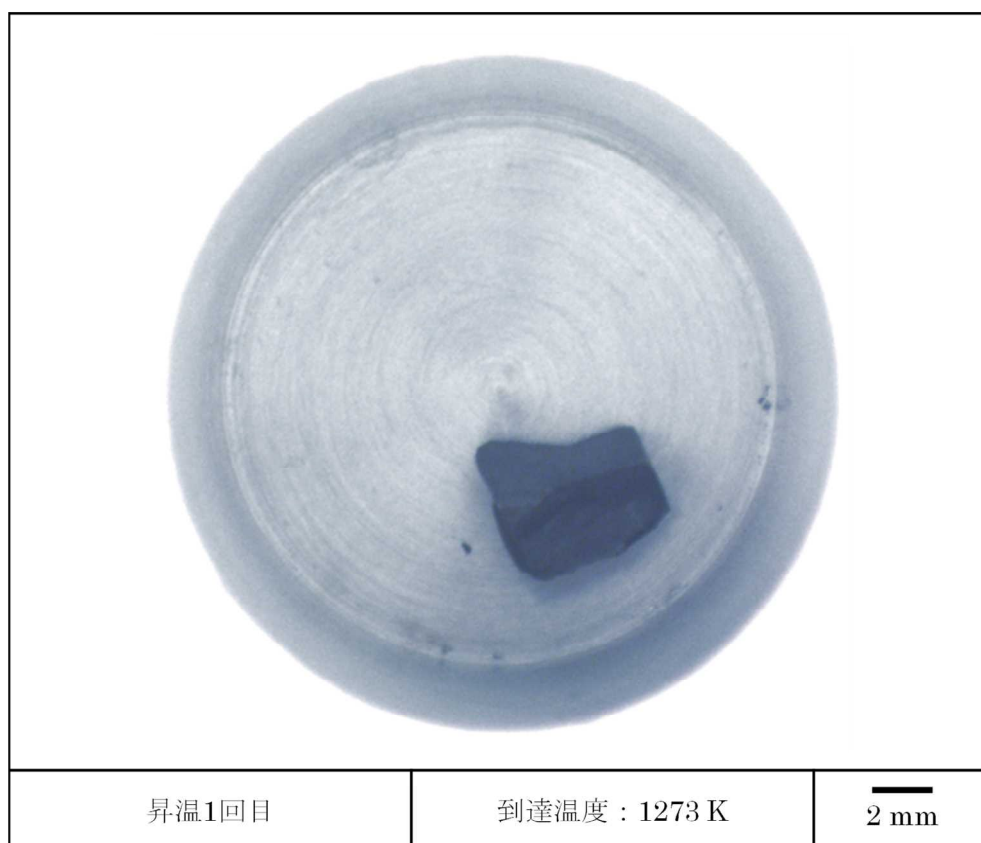
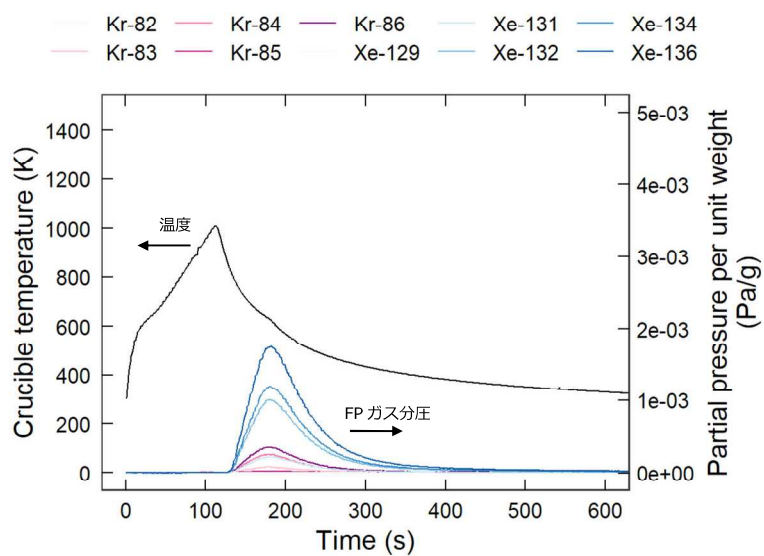
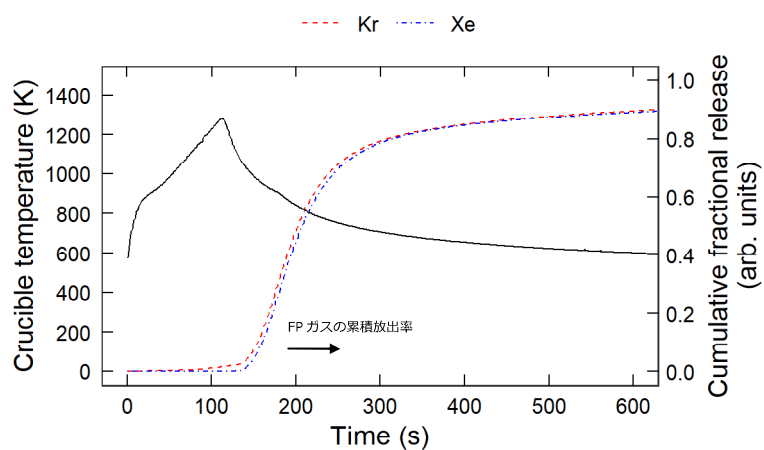


図 4.3.2-24 加熱試験後の燃料ペレット片 No. 3 の外観
(AP2-1 セグメント燃料)



(a) るつぼ温度と単位重量当たり放出された 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 4.3.2-25 燃料ペレット片 No. 3 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 (AP2-1 セグメント燃料)

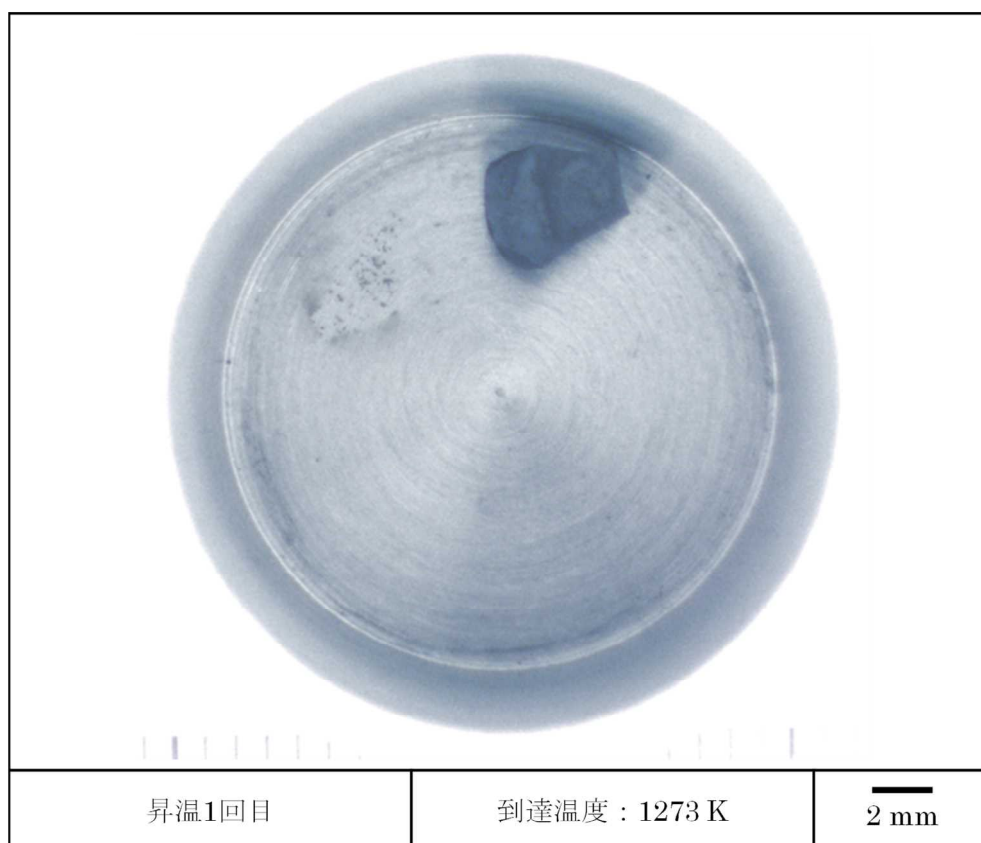
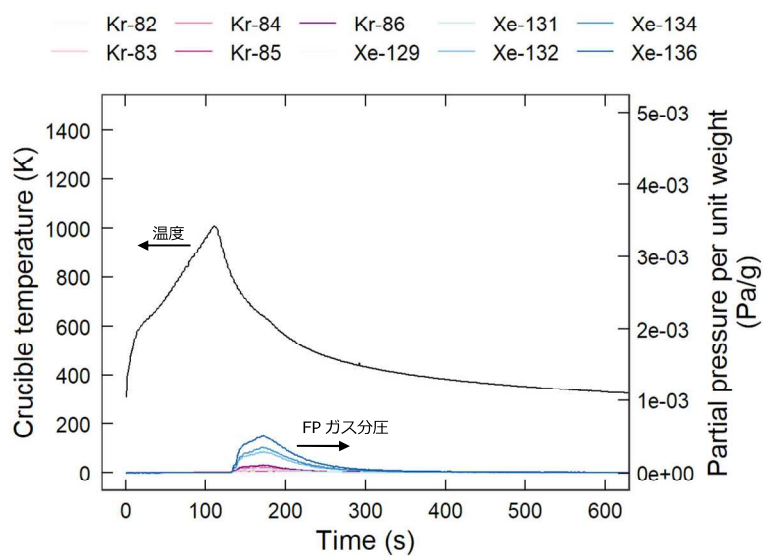
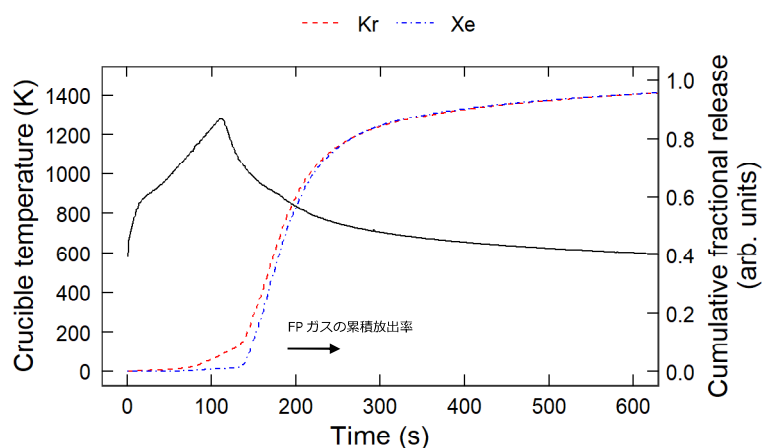


図 4.3.2-26 加熱試験後の燃料ペレット片 No. 4 の外観
(AP2-1 セグメント燃料)



(a) るつぼ温度と単位重量あたりに放出された
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 4.3.2-27 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
(AP2-1 セグメント燃料)

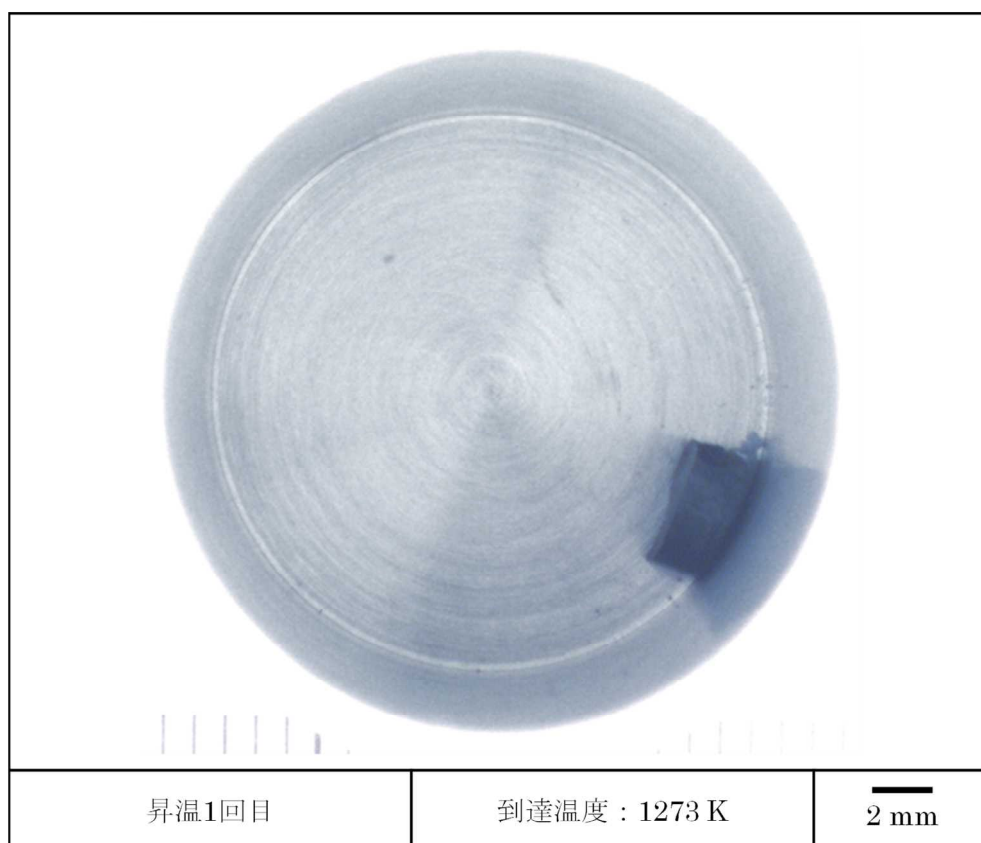
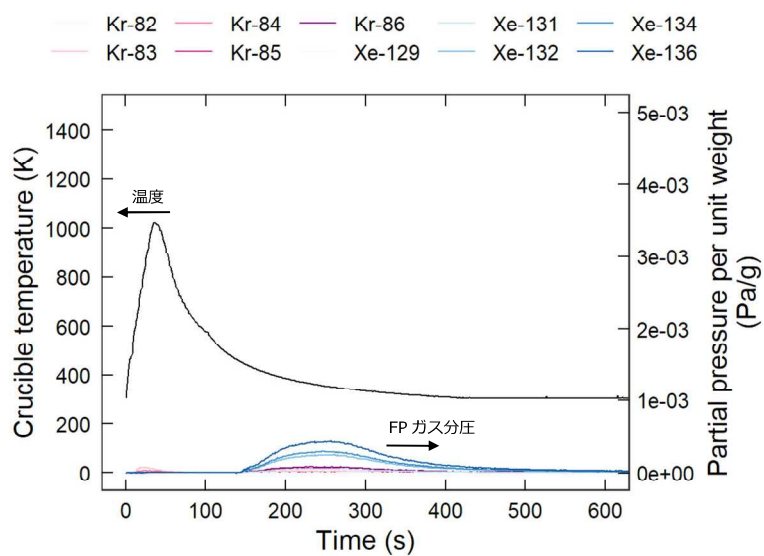
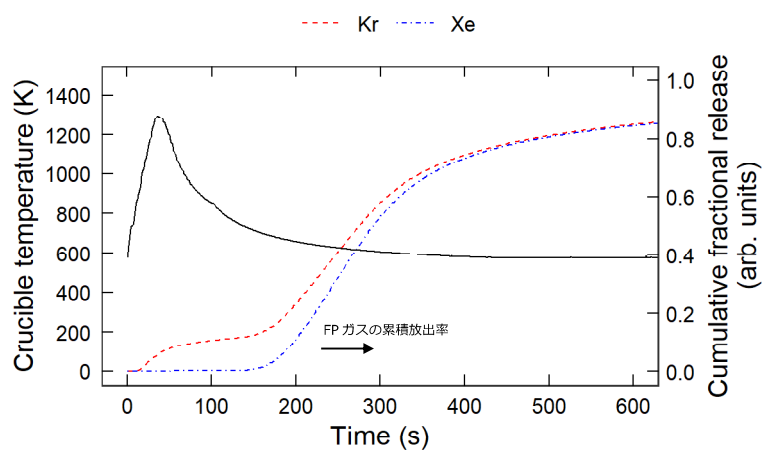


図 4.3.2-28 加熱試験後の燃料ペレット片 No. 5 の外観
(AP2-1 セグメント燃料)



(a) るつぼ温度と単位重量あたりに放出された
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 4.3.2-29 燃料ペレット片 No. 5 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
(AP2-1 セグメント燃料)

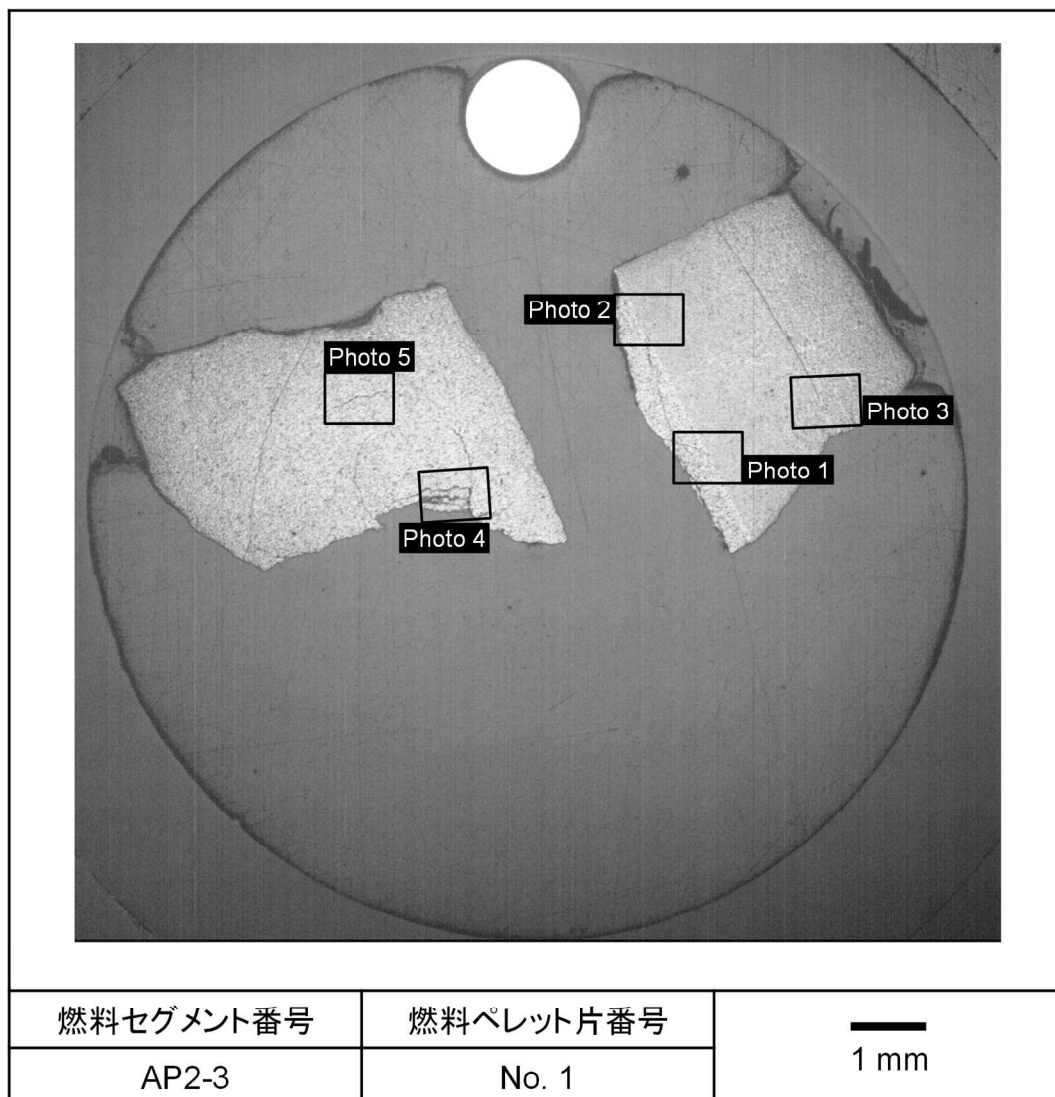


図 4.3.2-30(1) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 1 の断面画像
(エッチング前、AP2-3 セグメント燃料)

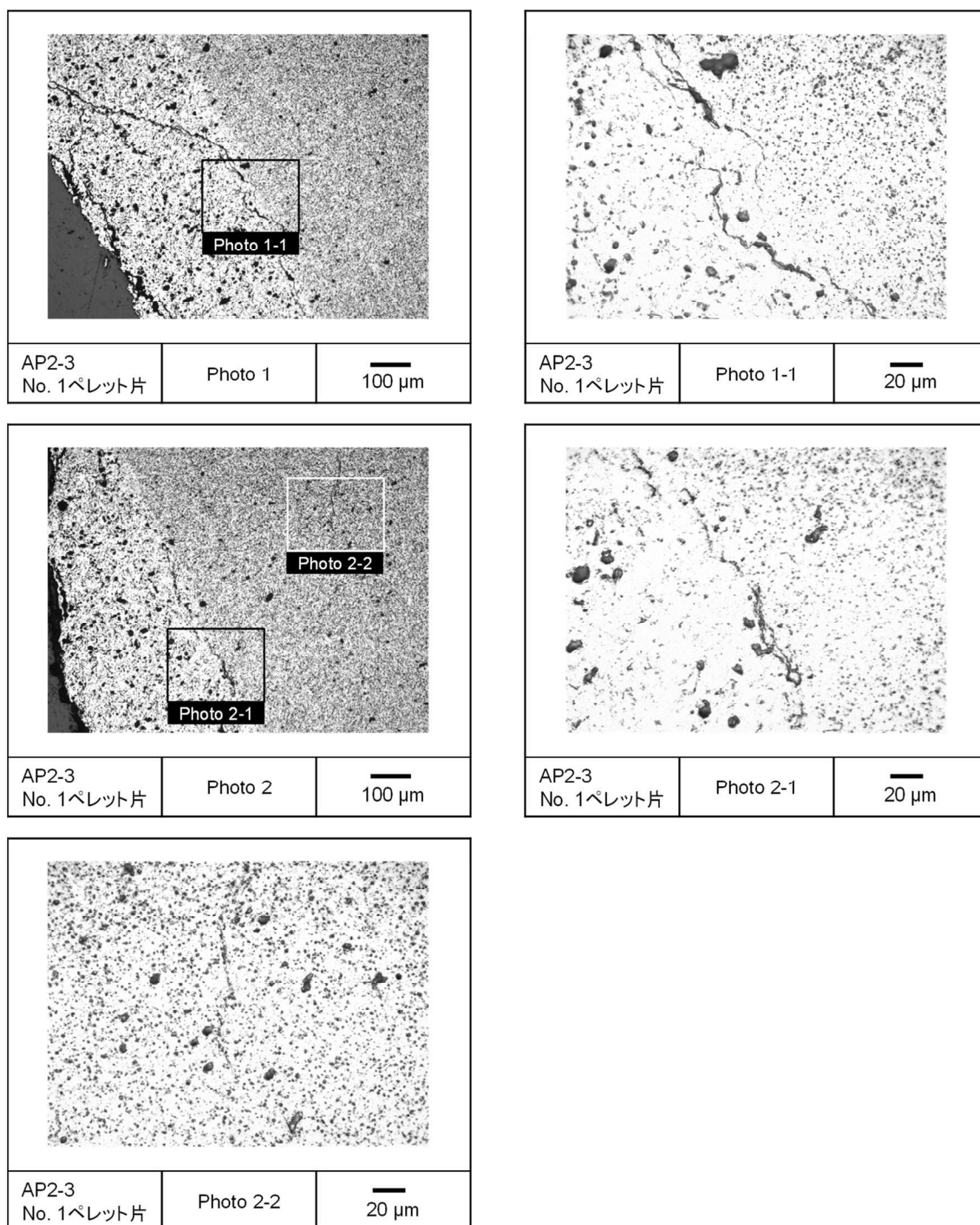


図 4.3.2-30(2) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 1 の断面画像
(エッチング前、AP2-3 セグメント燃料)

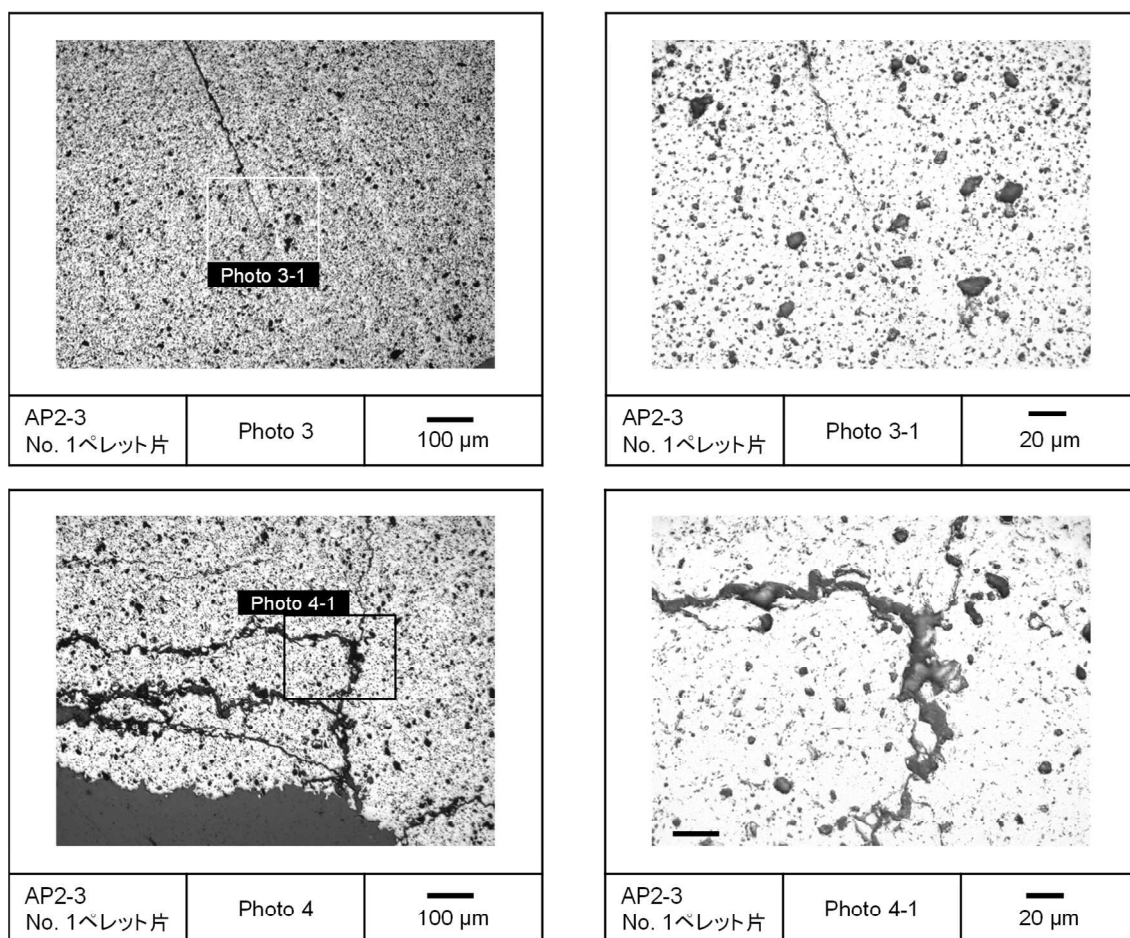


図 4.3.2-30 (3) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 1 の断面画像
(エッチング前、AP2-3 セグメント燃料)

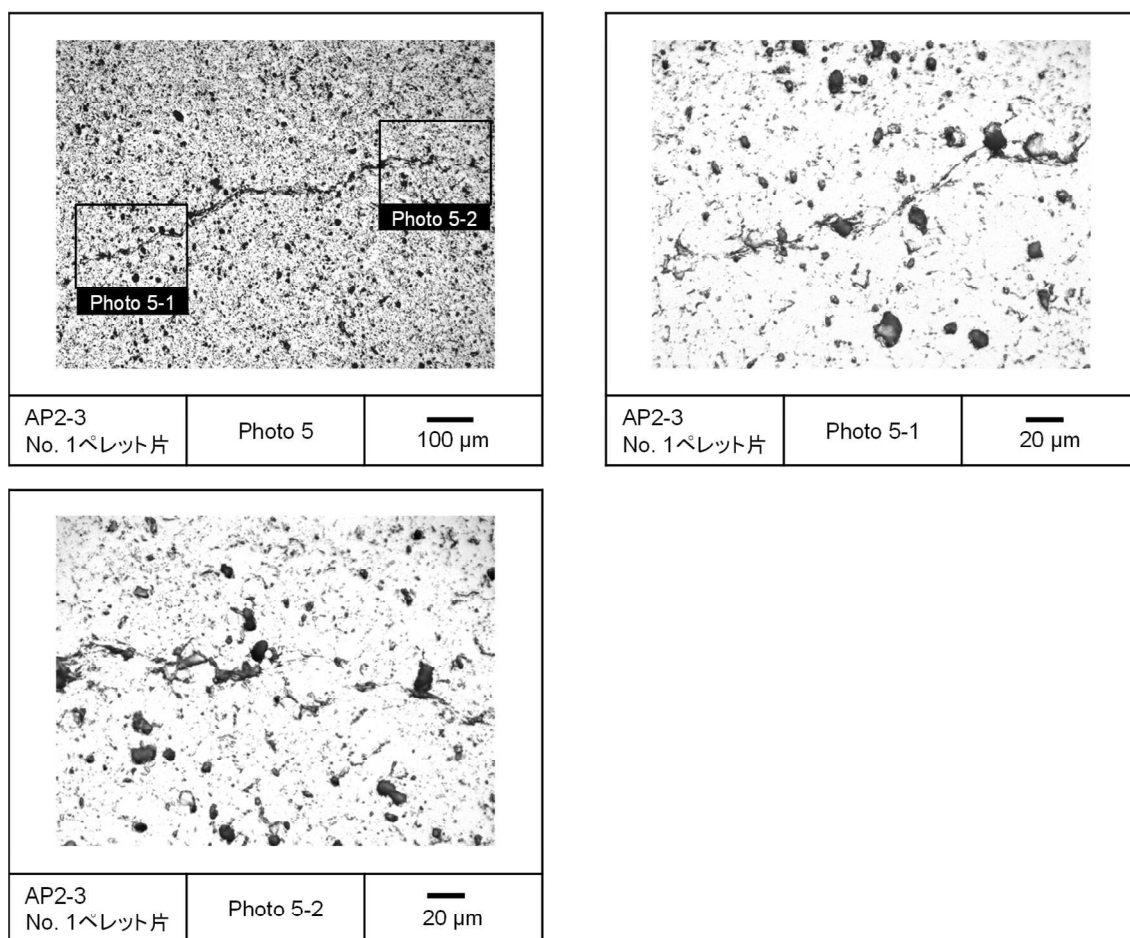


図 4.3.2-30(4) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 1 の断面画像
(エッチング前、AP2-3 セグメント燃料)

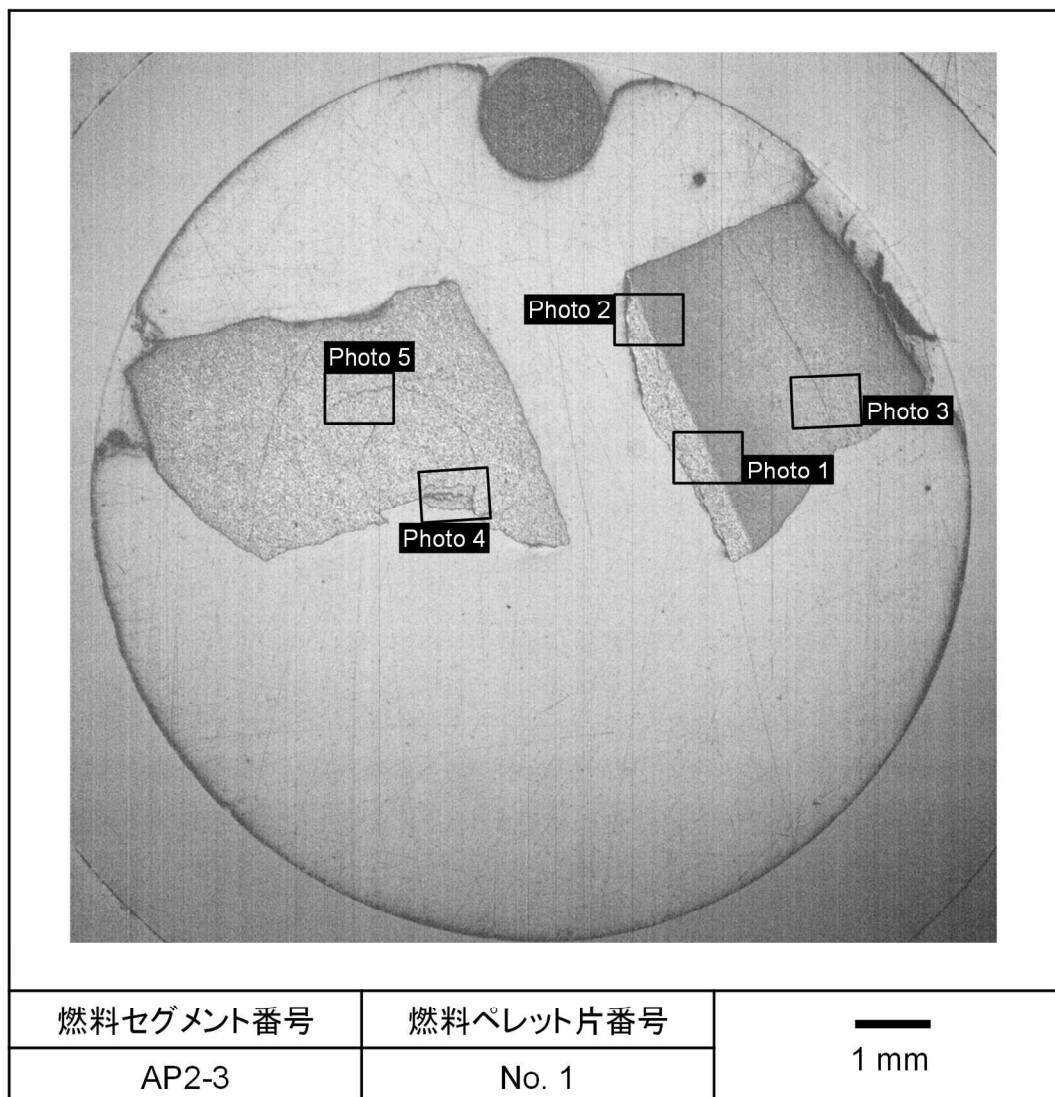


図 4.3.2-31(1) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 1 の断面画像
(エッチング後、AP2-3 セグメント燃料)

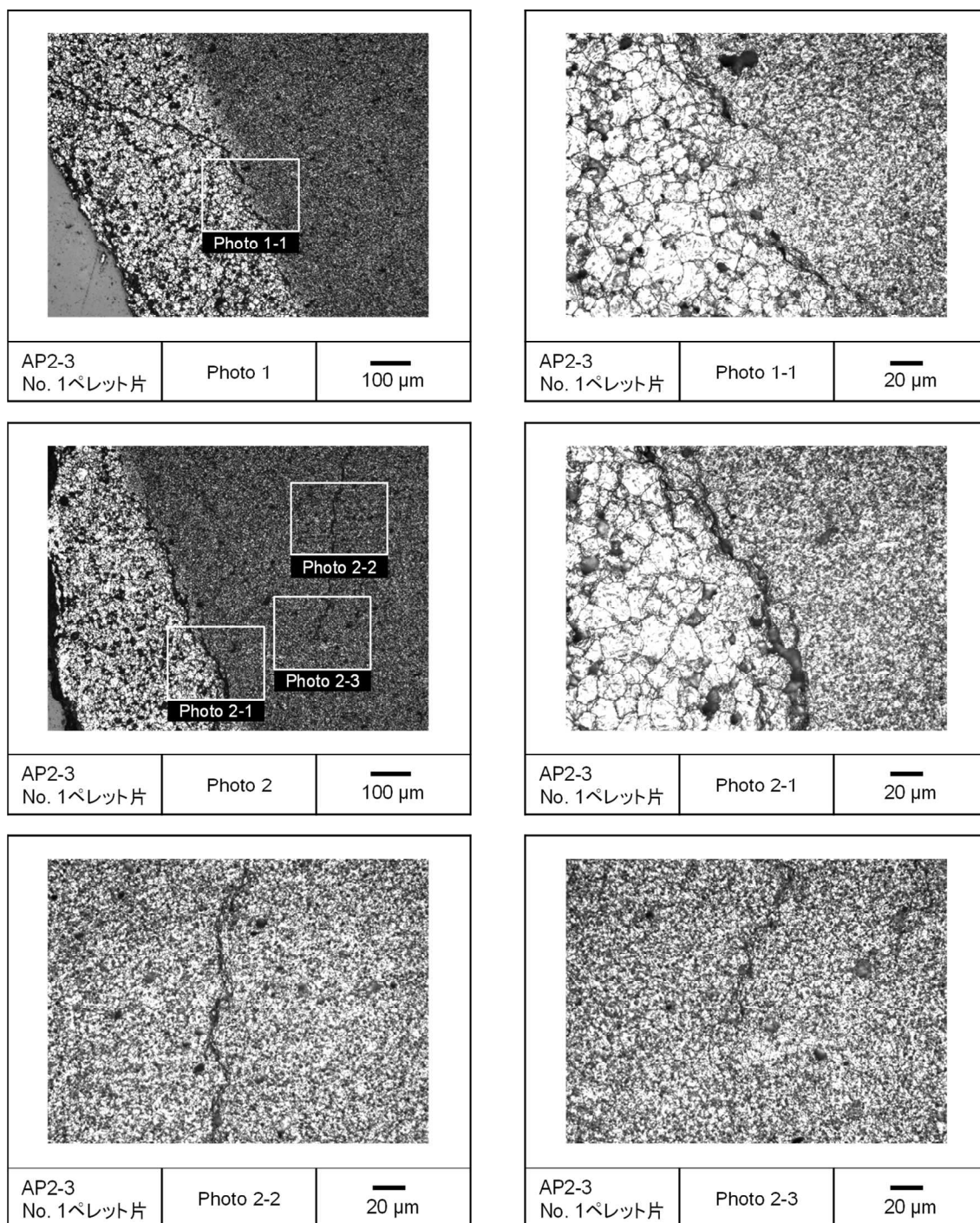


図 4.3.2-31(2) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 1 の断面画像
(エッチング後、AP2-3 セグメント燃料)

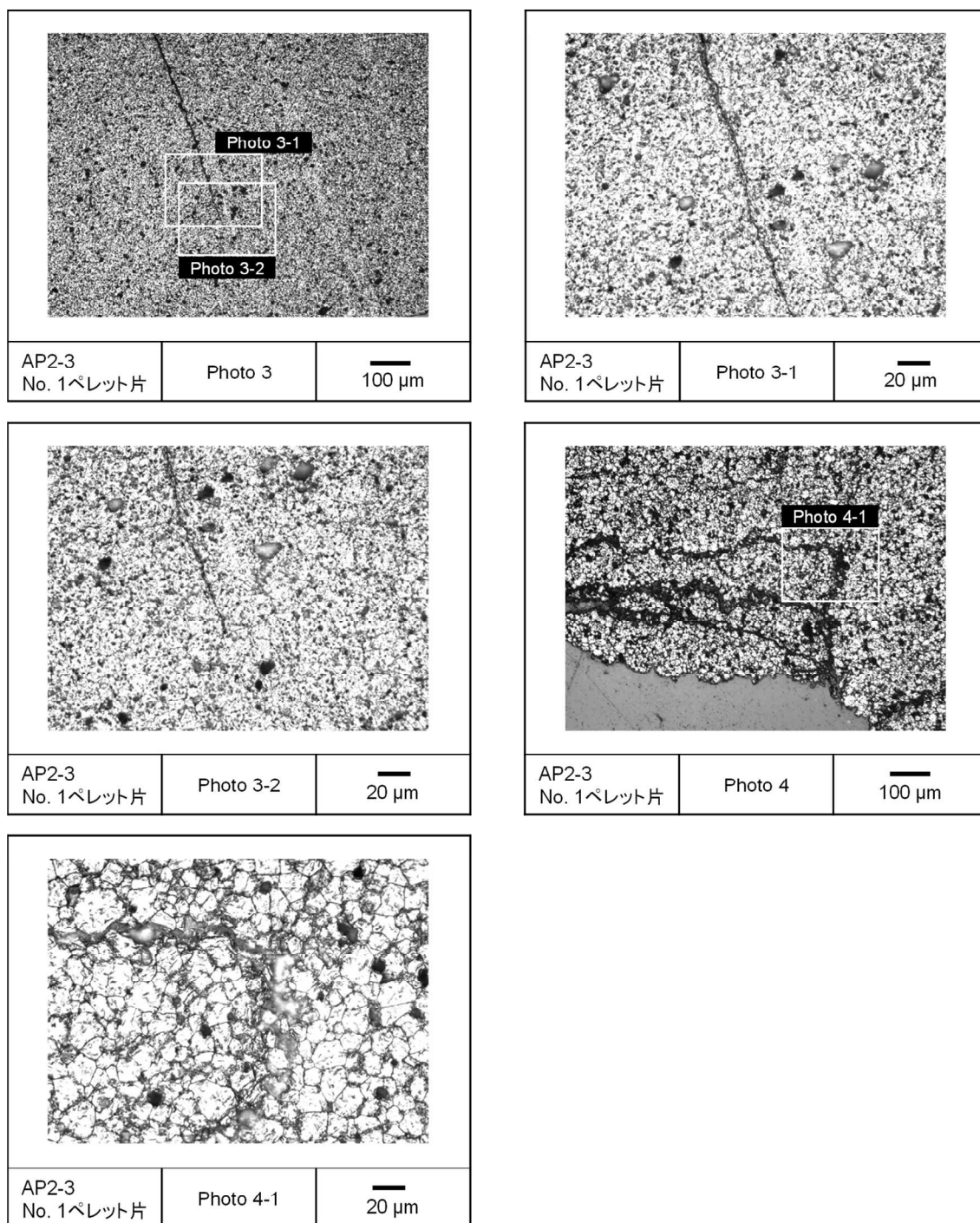


図 4.3.2-31(3) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 1 の断面画像
(エッチング後、AP2-3 セグメント燃料)

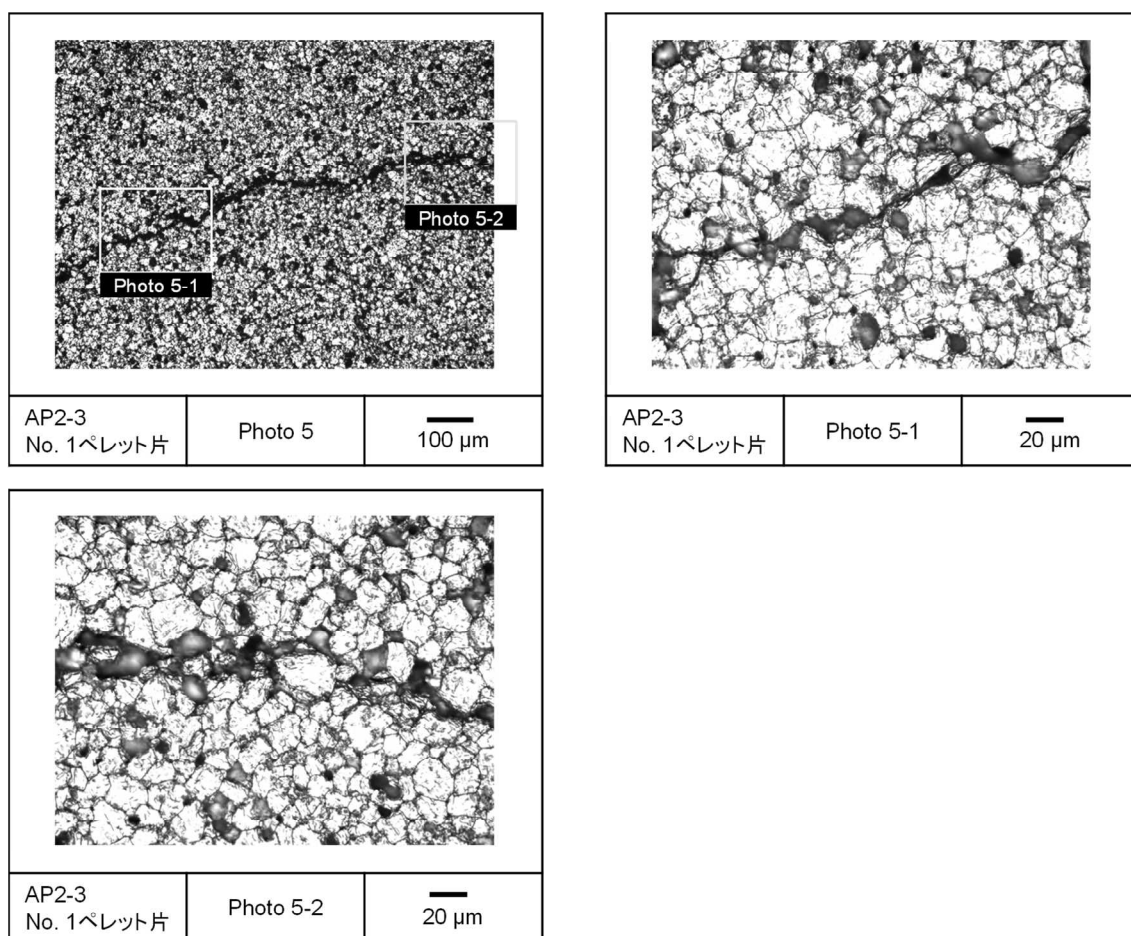


図 4.3.2-31 (4) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 1 の断面画像
(エッチング後、AP2-3 セグメント燃料)

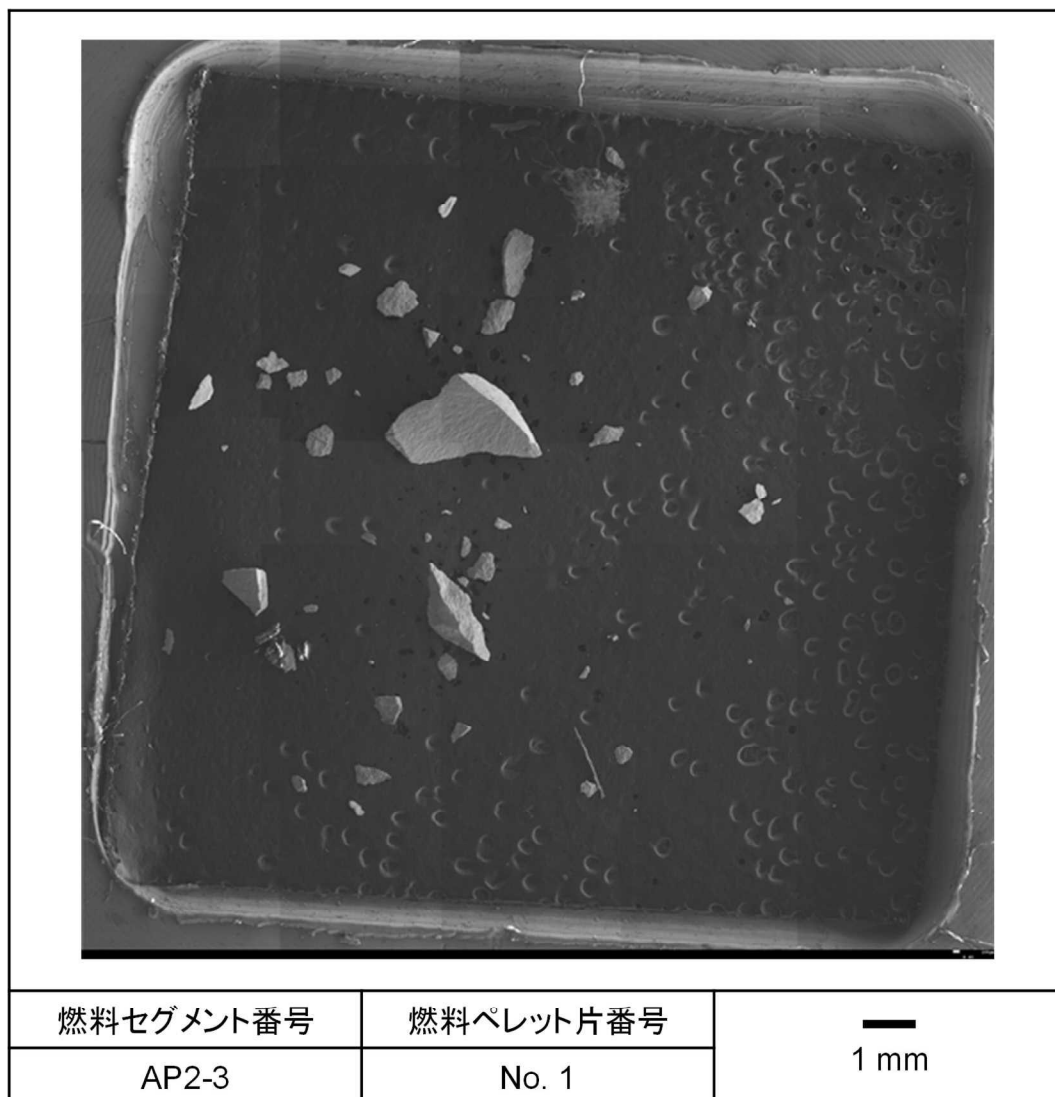


図 4.3.2-32(1) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 1 の SEM 画像
(マクロ画像、AP2-3 セグメント燃料)

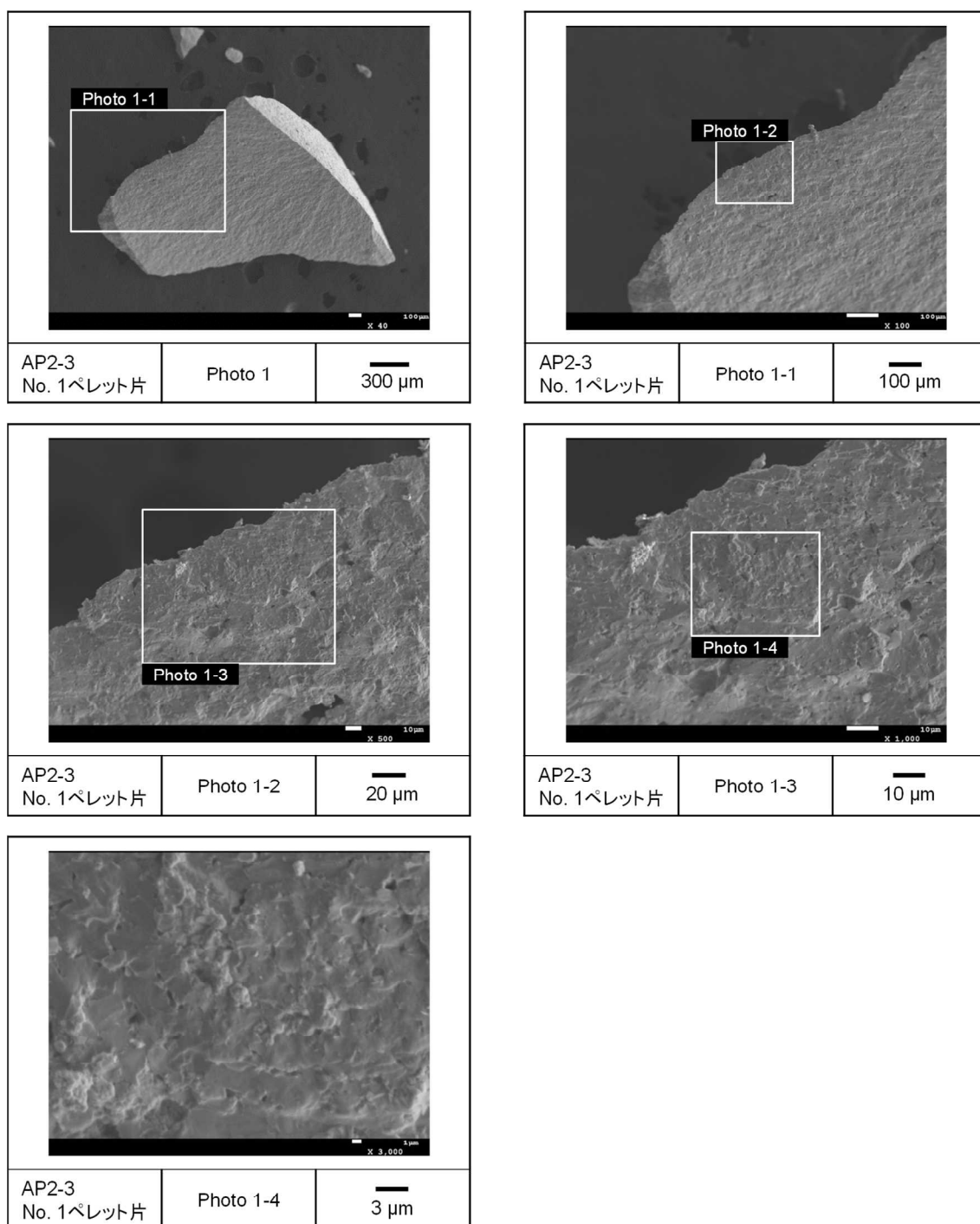


図 4.3.2-32(2) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 1 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

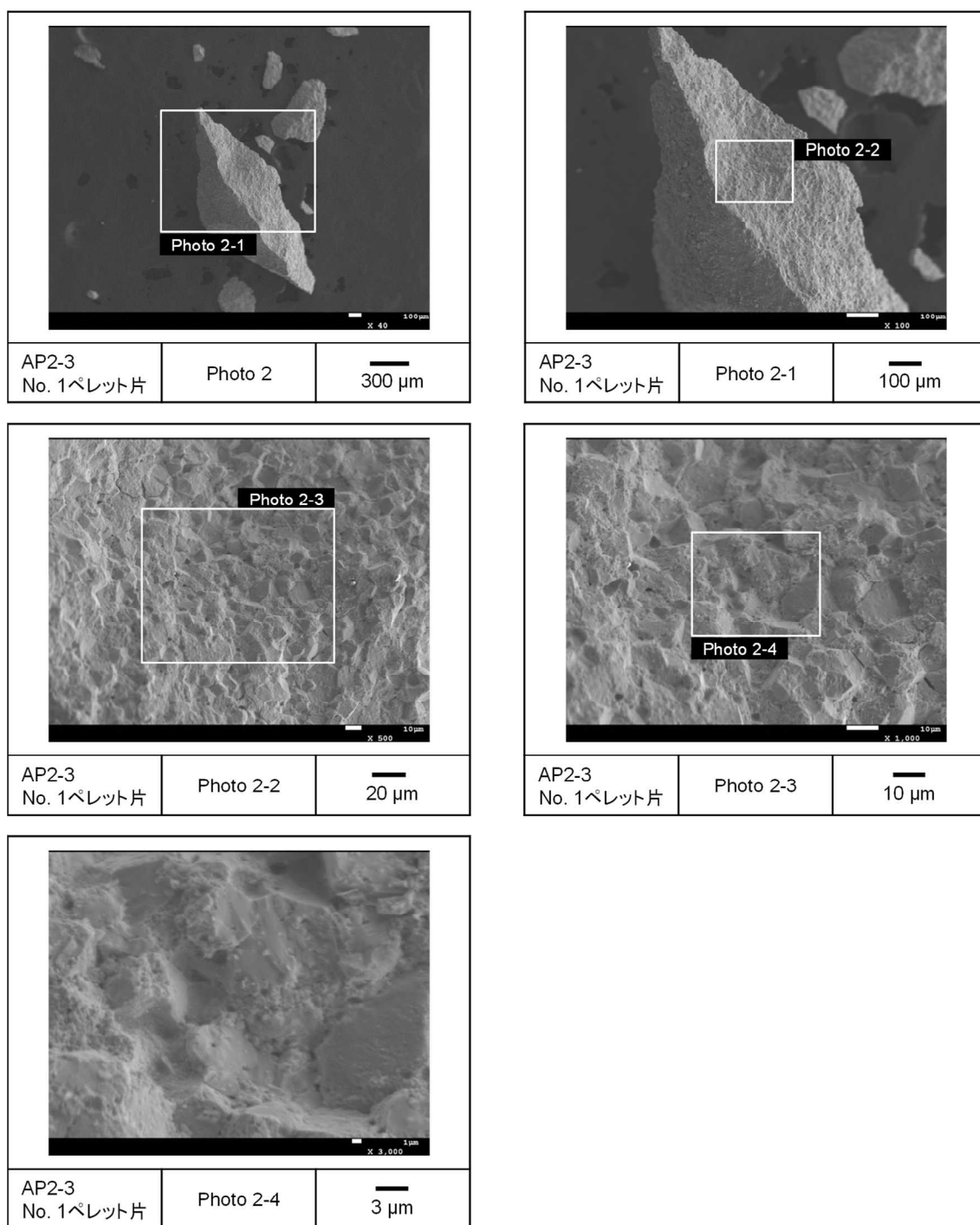


図 4.3.2-32(3) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 1 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

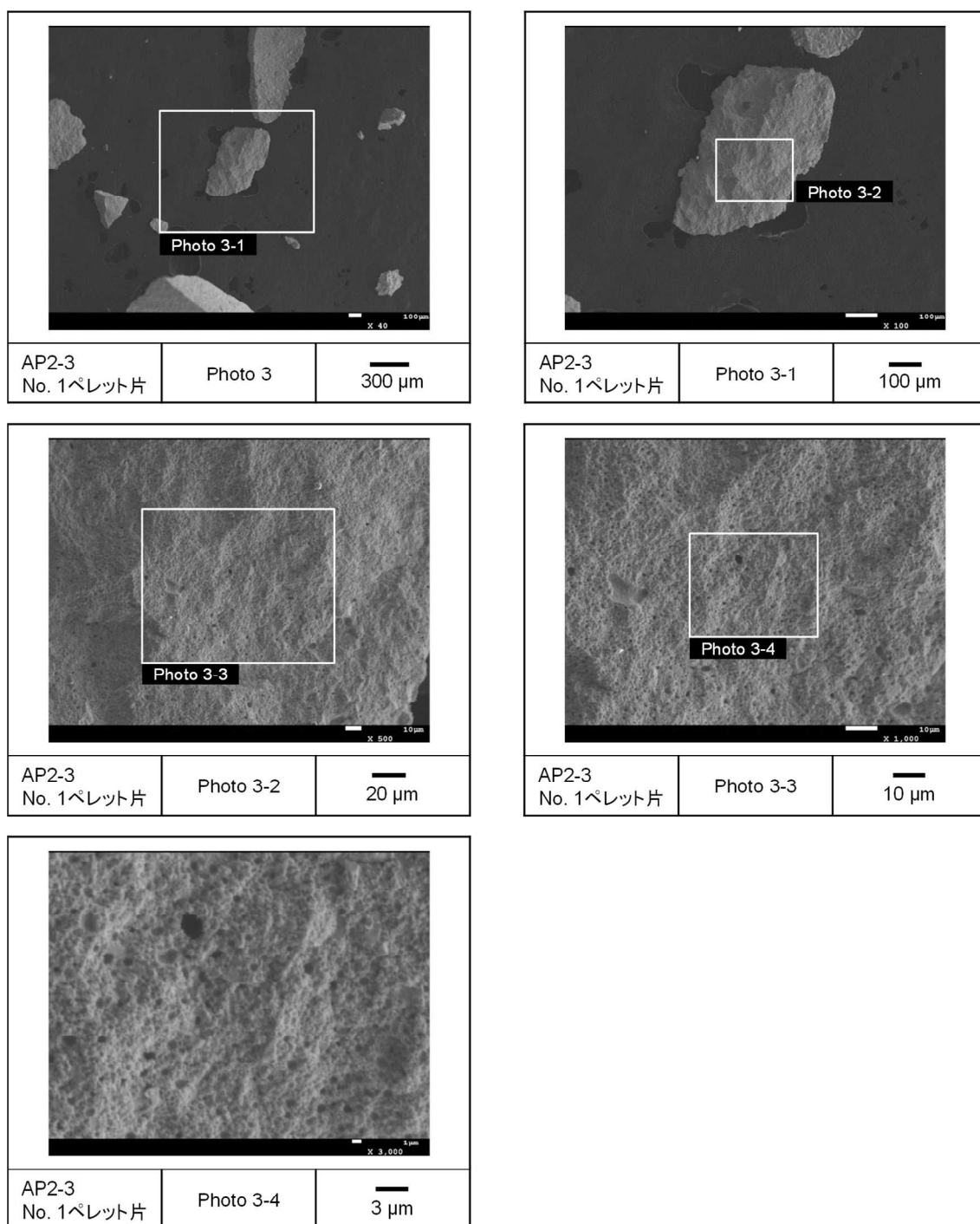


図 4.3.2-32(4) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 1 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

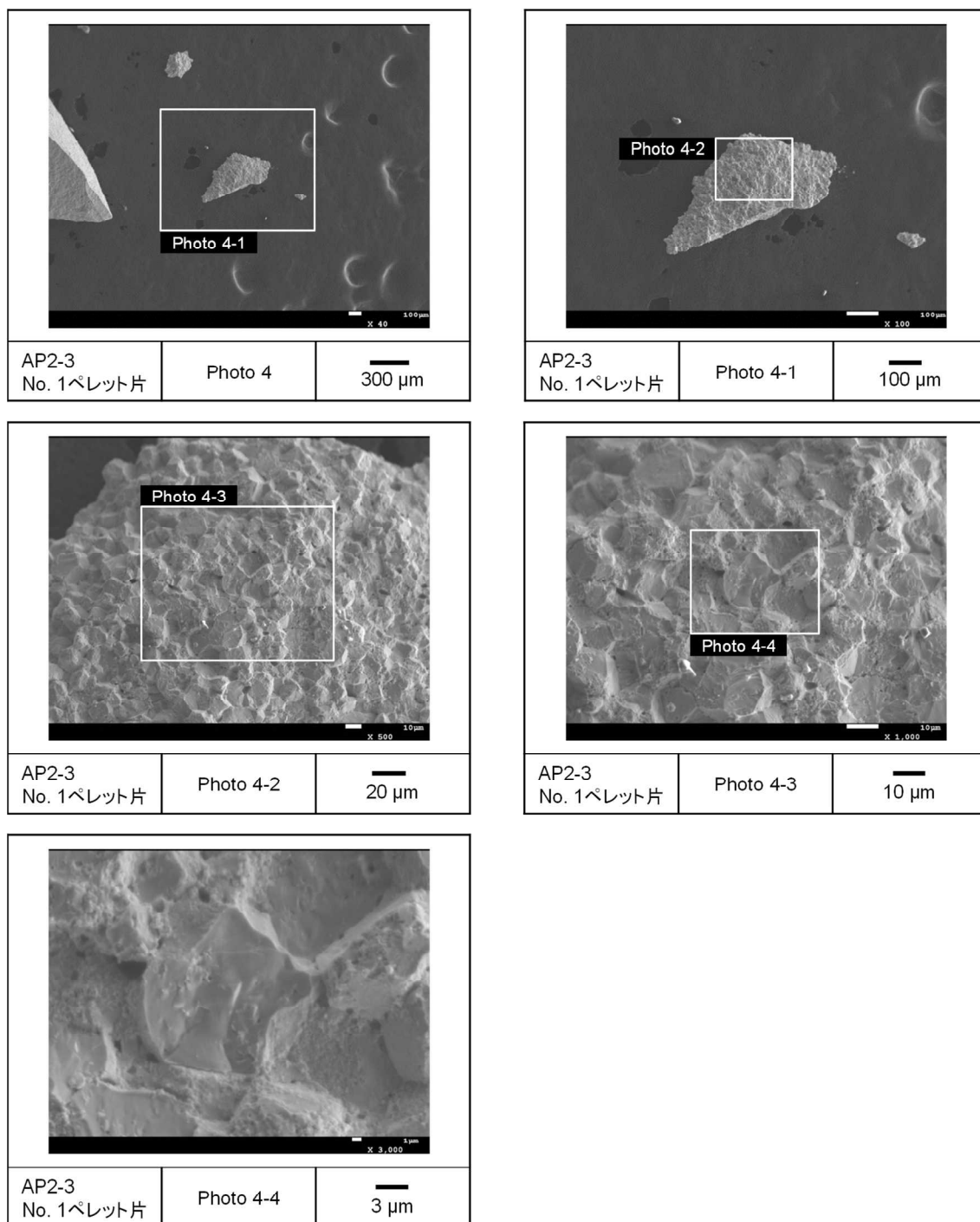


図 4.3.2-32(5) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 1 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

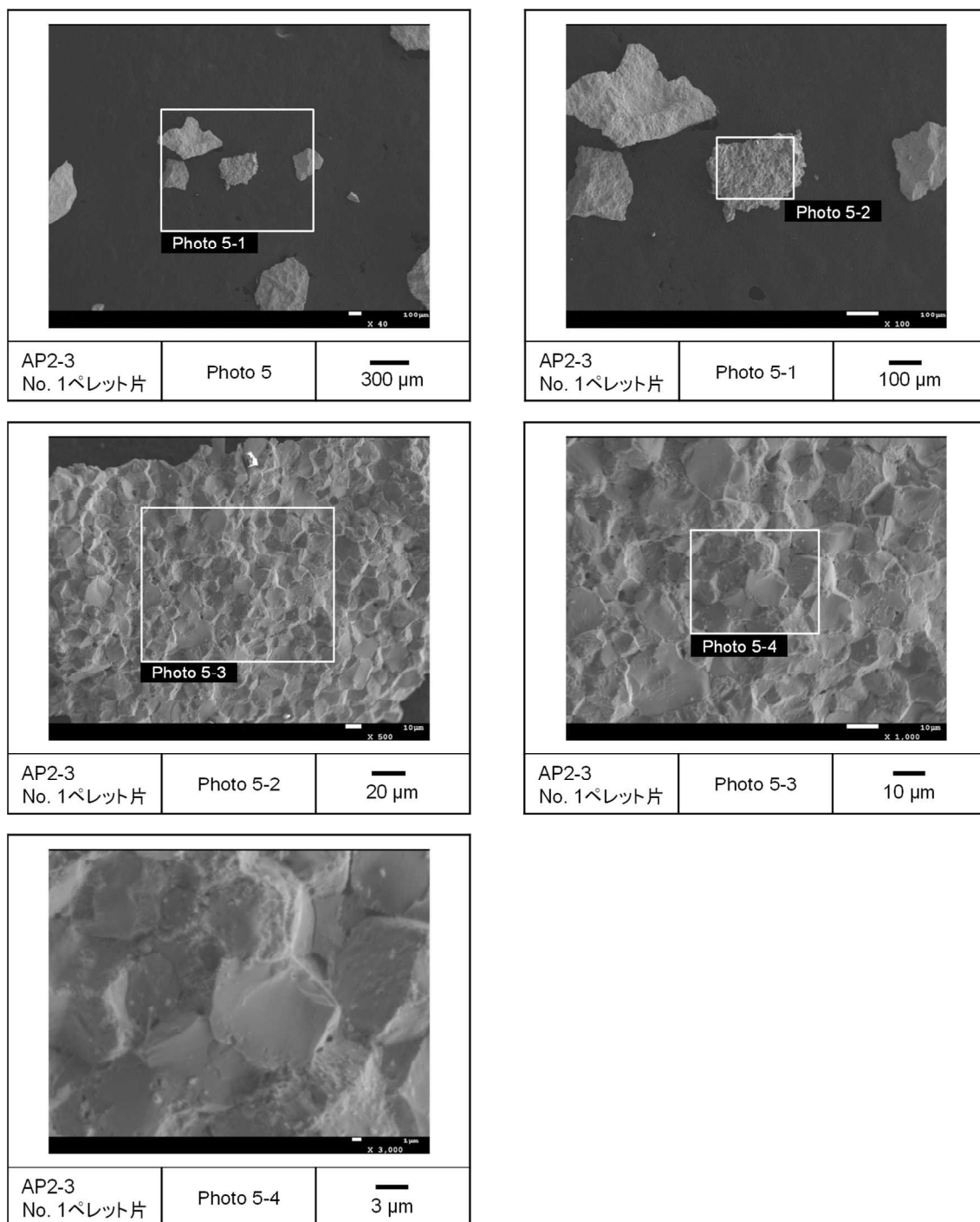


図 4.3.2-32(6) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 1 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

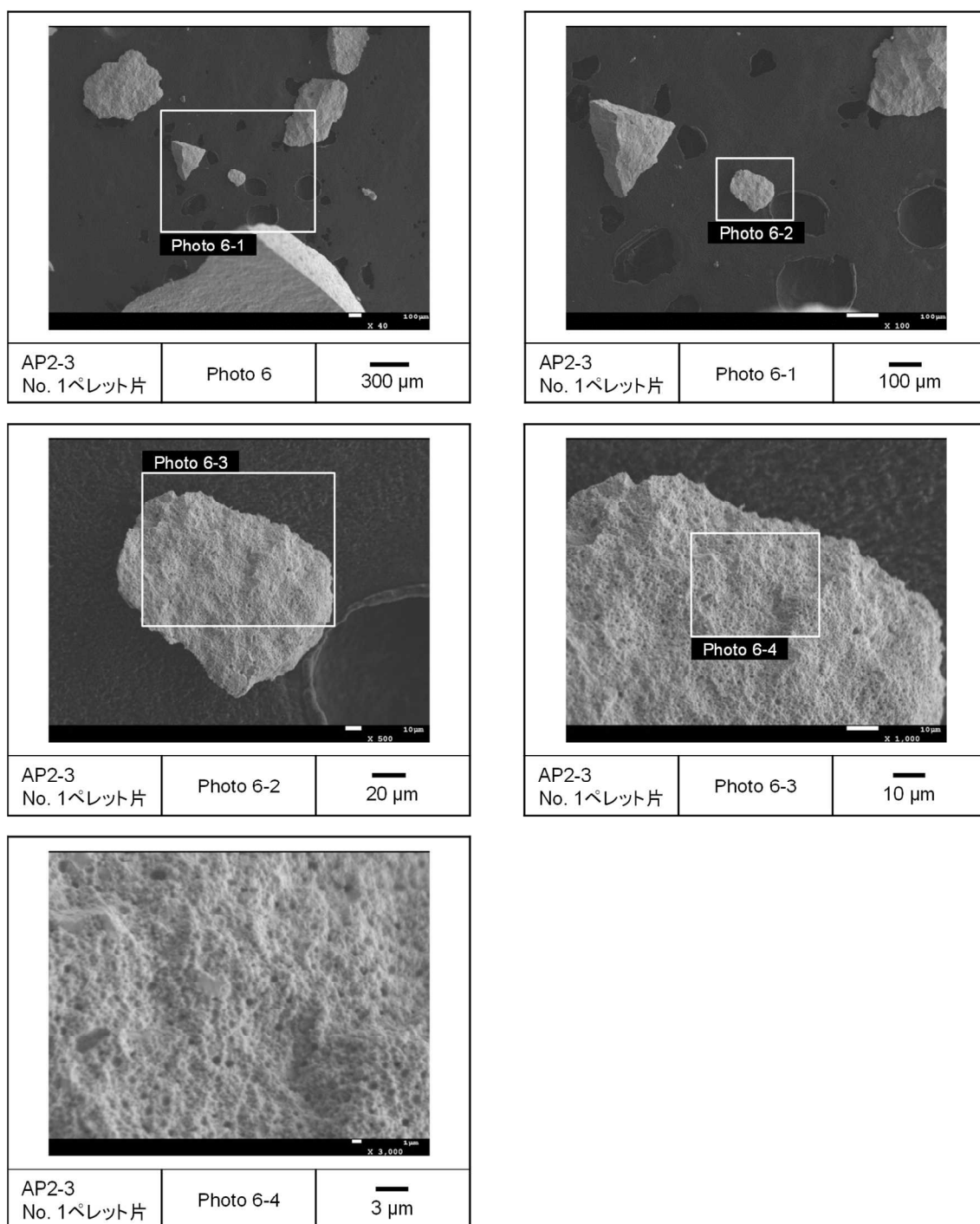


図 4.3.2-32(7) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 1 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

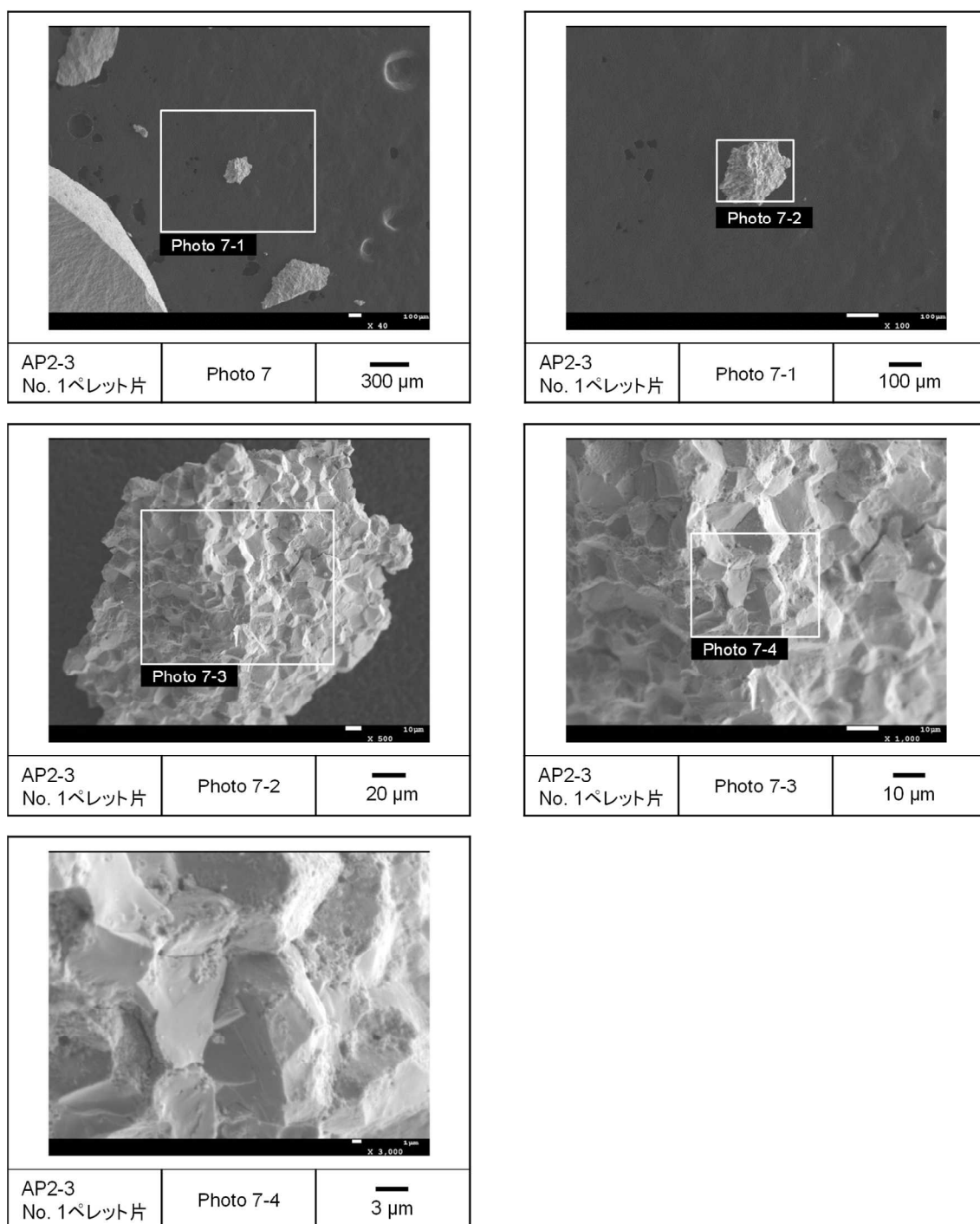


図 4.3.2-32(8) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 1 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

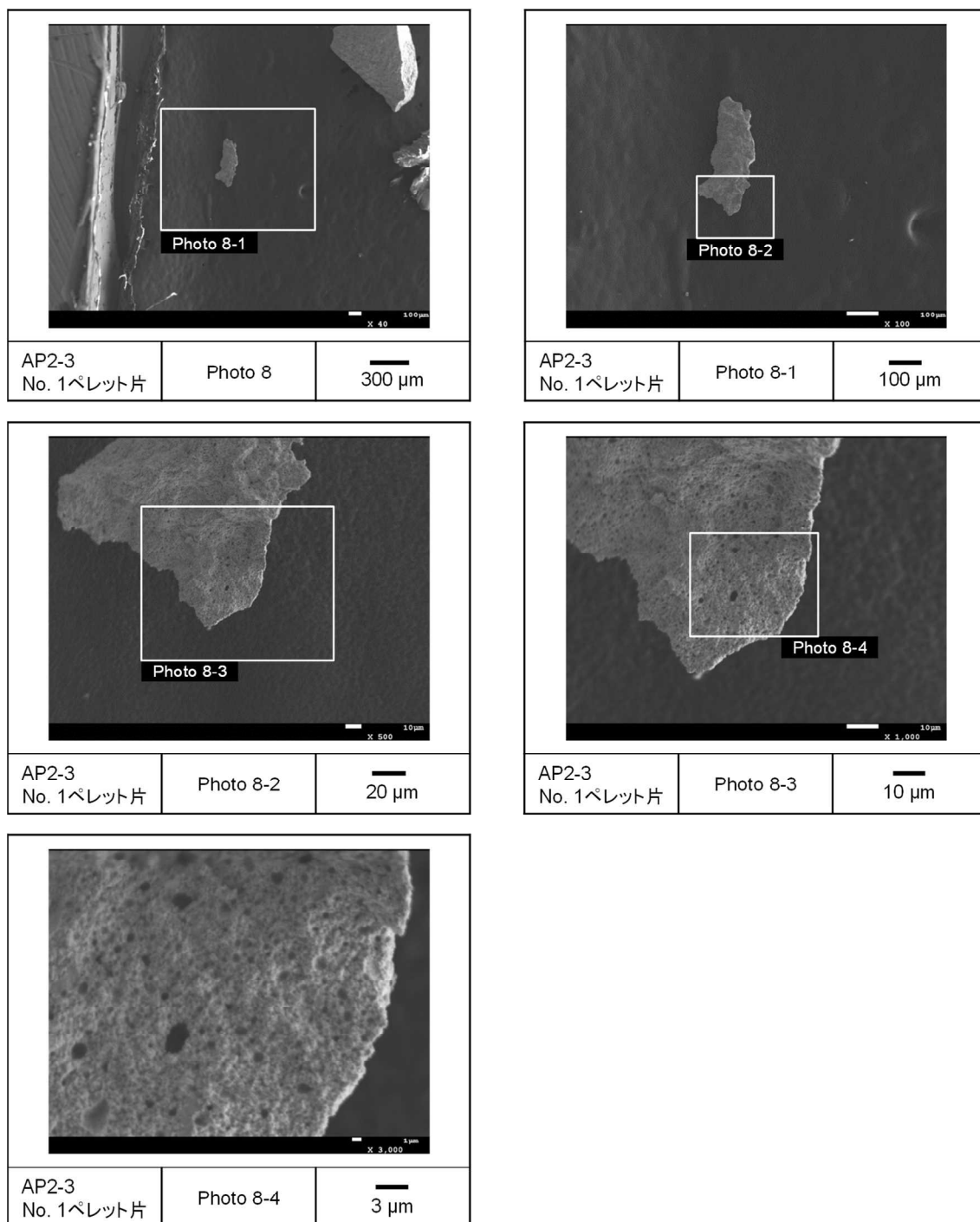
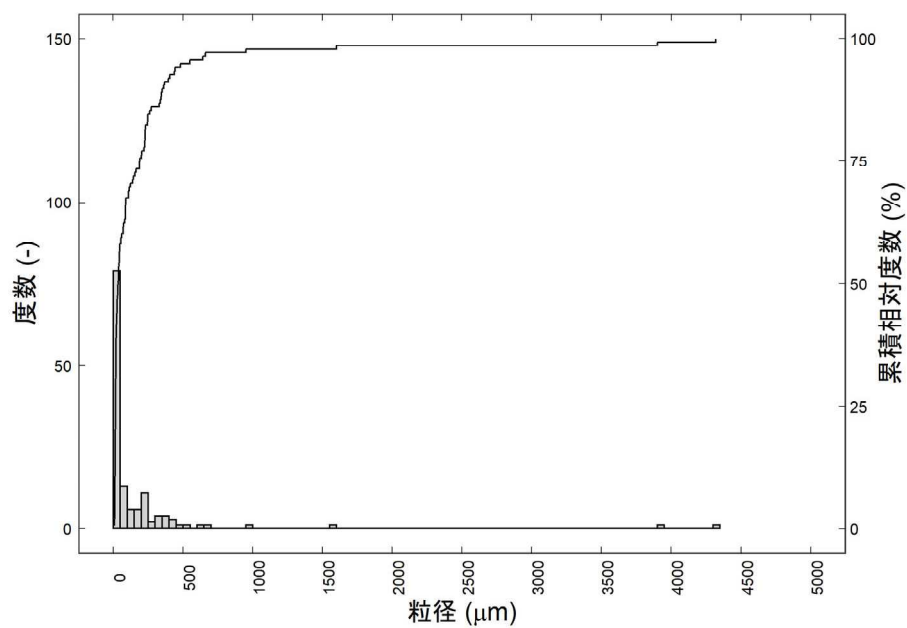
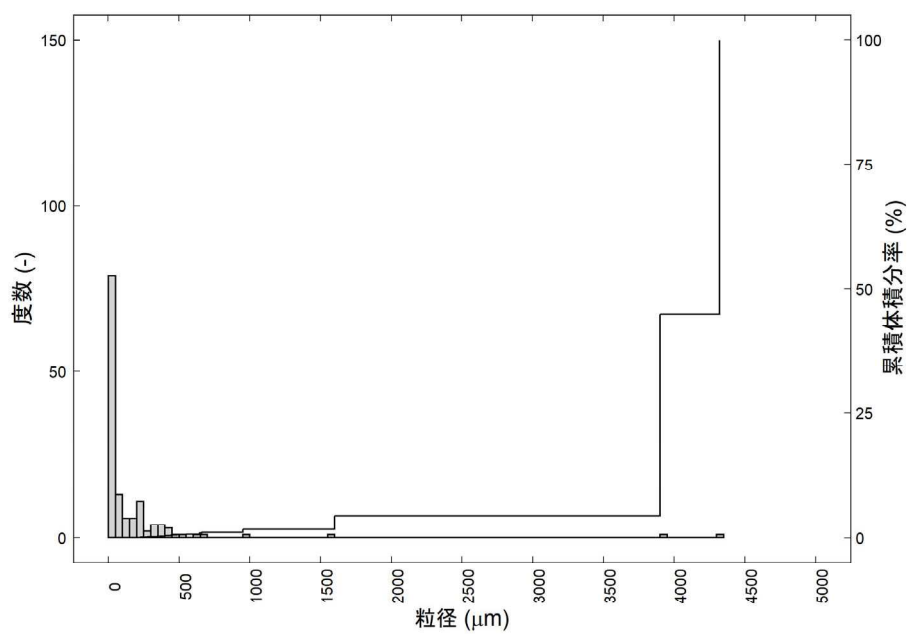


図 4.3.2-32(9) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 1 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)



(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 4.3.2-33 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 1 の粒径分布
(AP2-3 セグメント燃料)

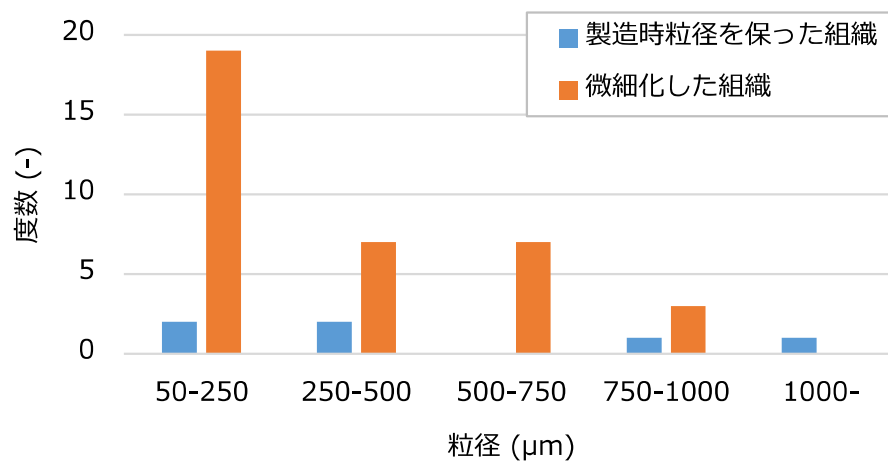


図 4.3.2-34 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 1 の組織別粒径分布
(AP2-3 セグメント燃料)

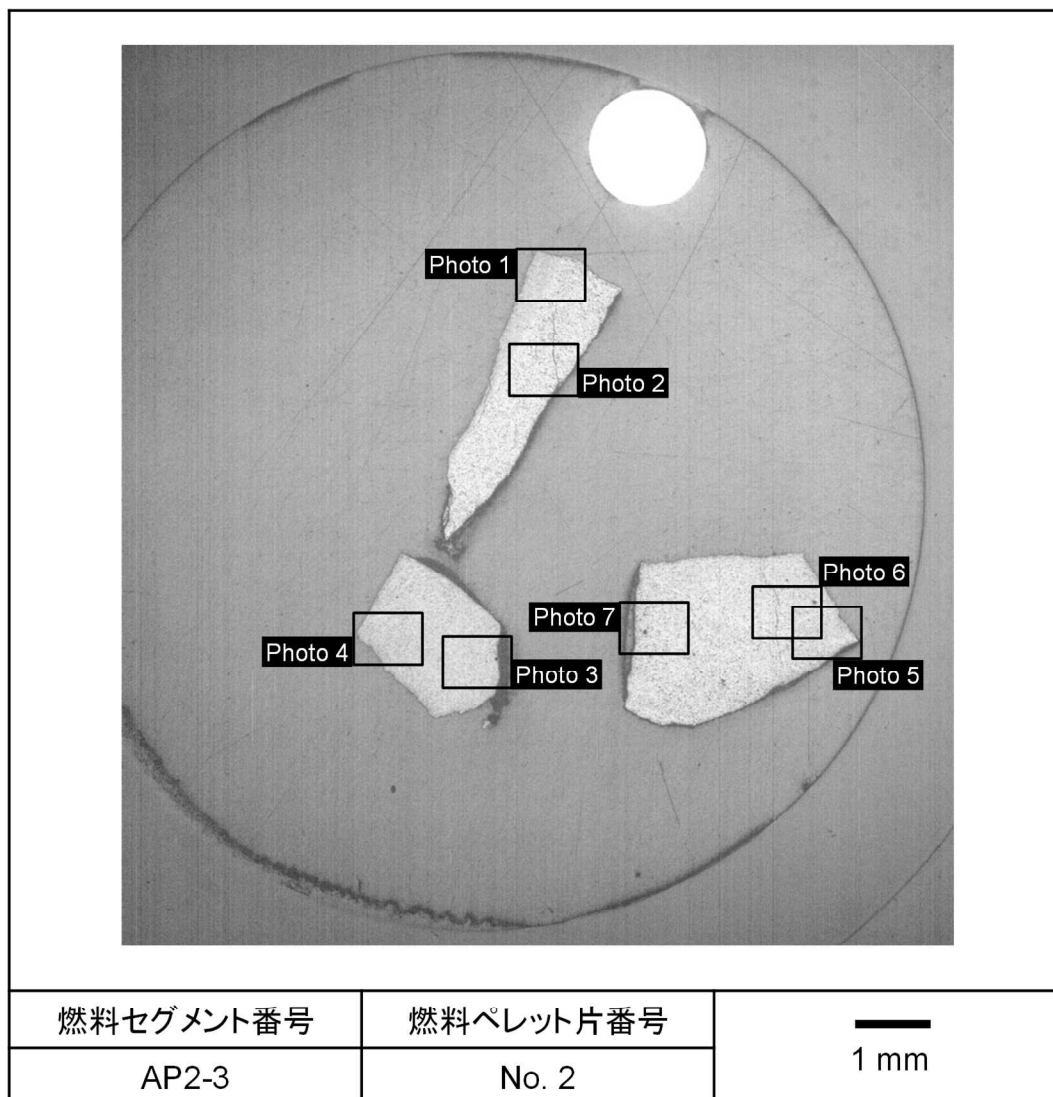


図 4.3.2-35(1) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の断面画像
(エッチング前、AP2-3 セグメント燃料)

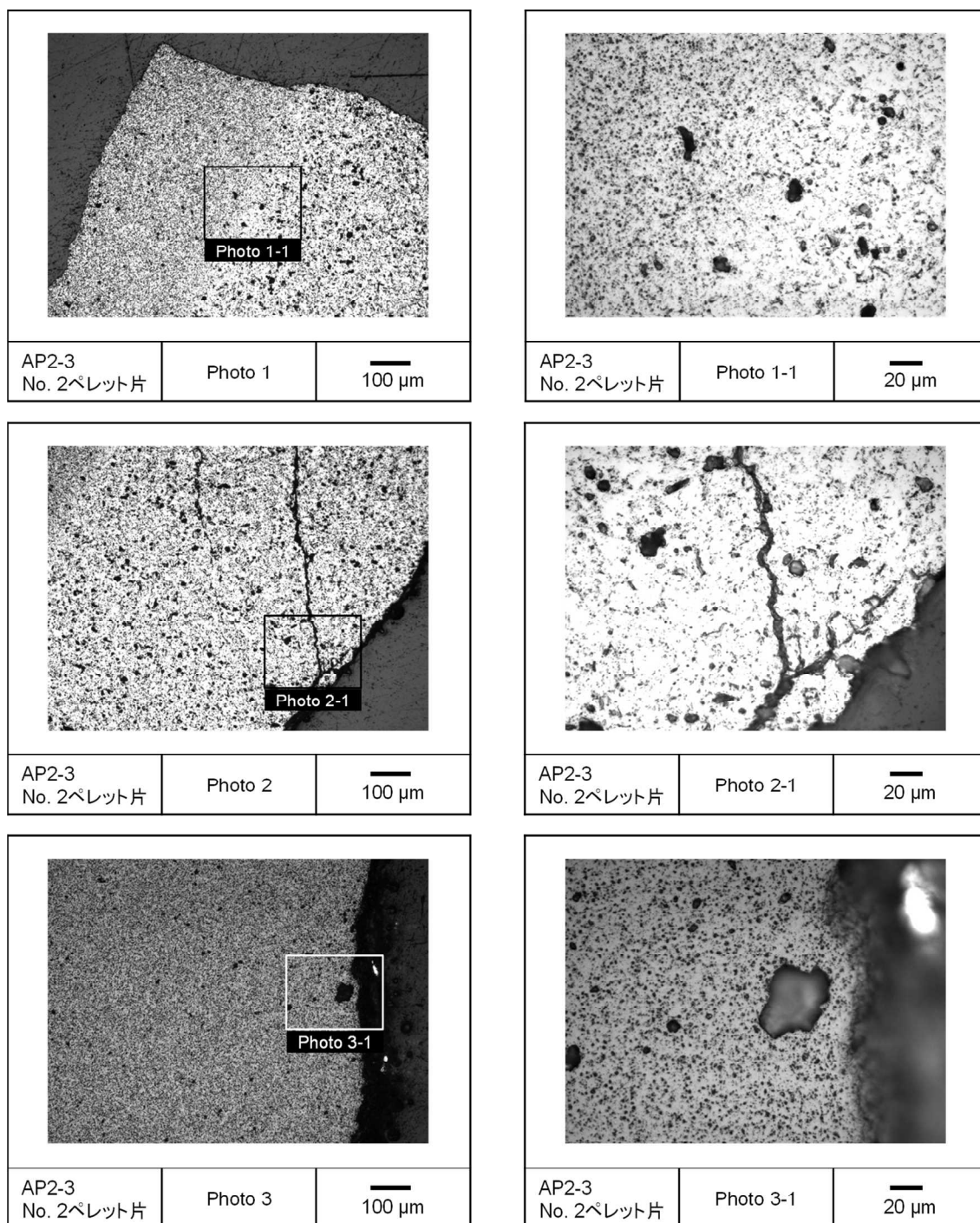


図 4.3.2-35(2) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の断面画像
(エッチング前、AP2-3 セグメント燃料)

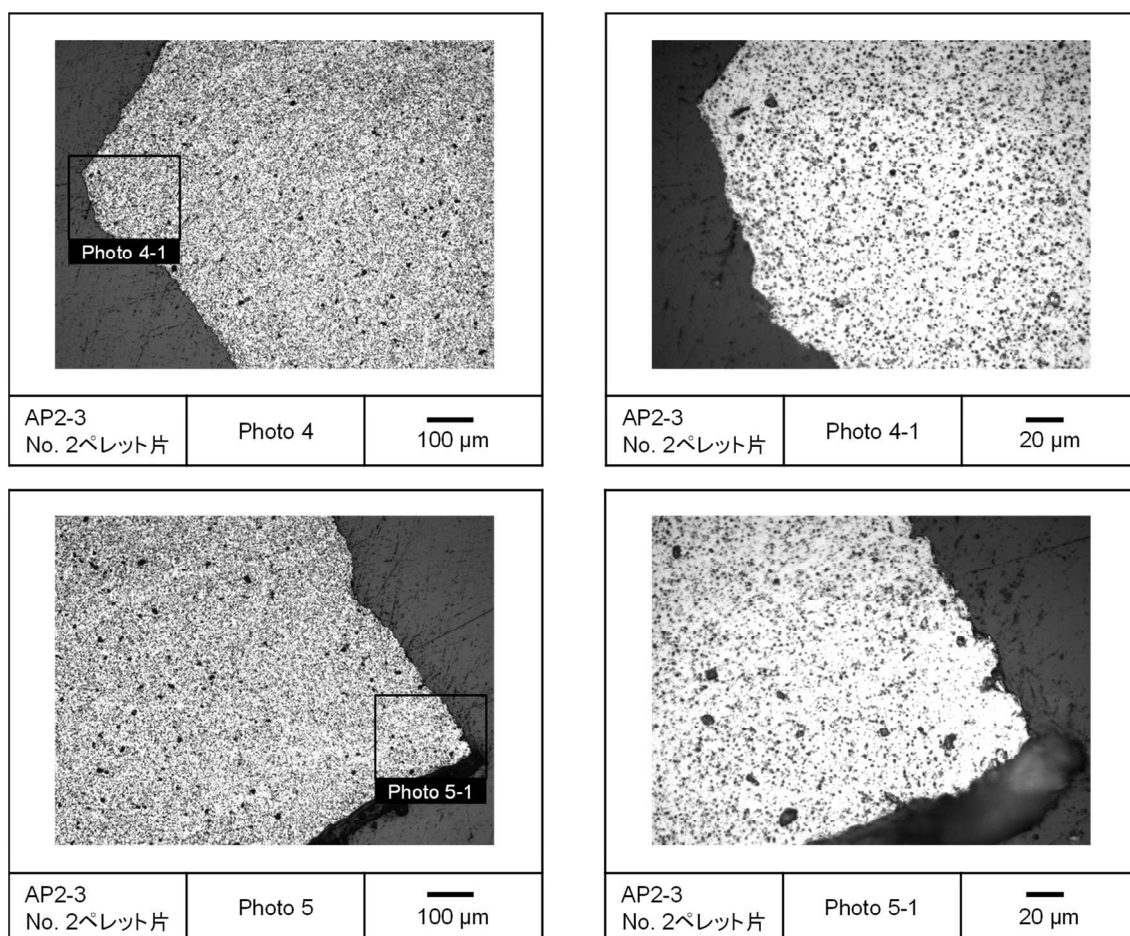


図 4.3.2-35(3) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の断面画像
(エッチング前、AP2-3 セグメント燃料)

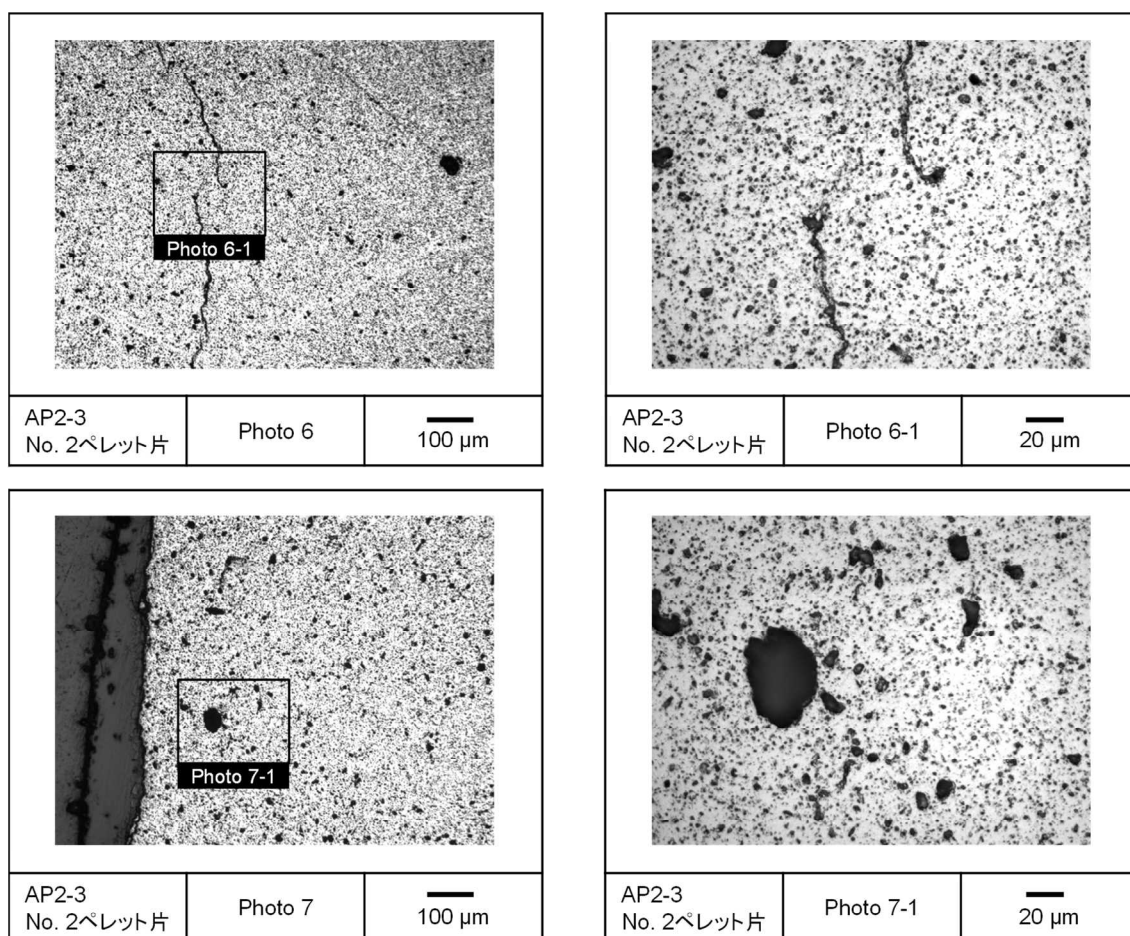


図 4.3.2-35(4) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の断面画像
(エッチング前、AP2-3 セグメント燃料)

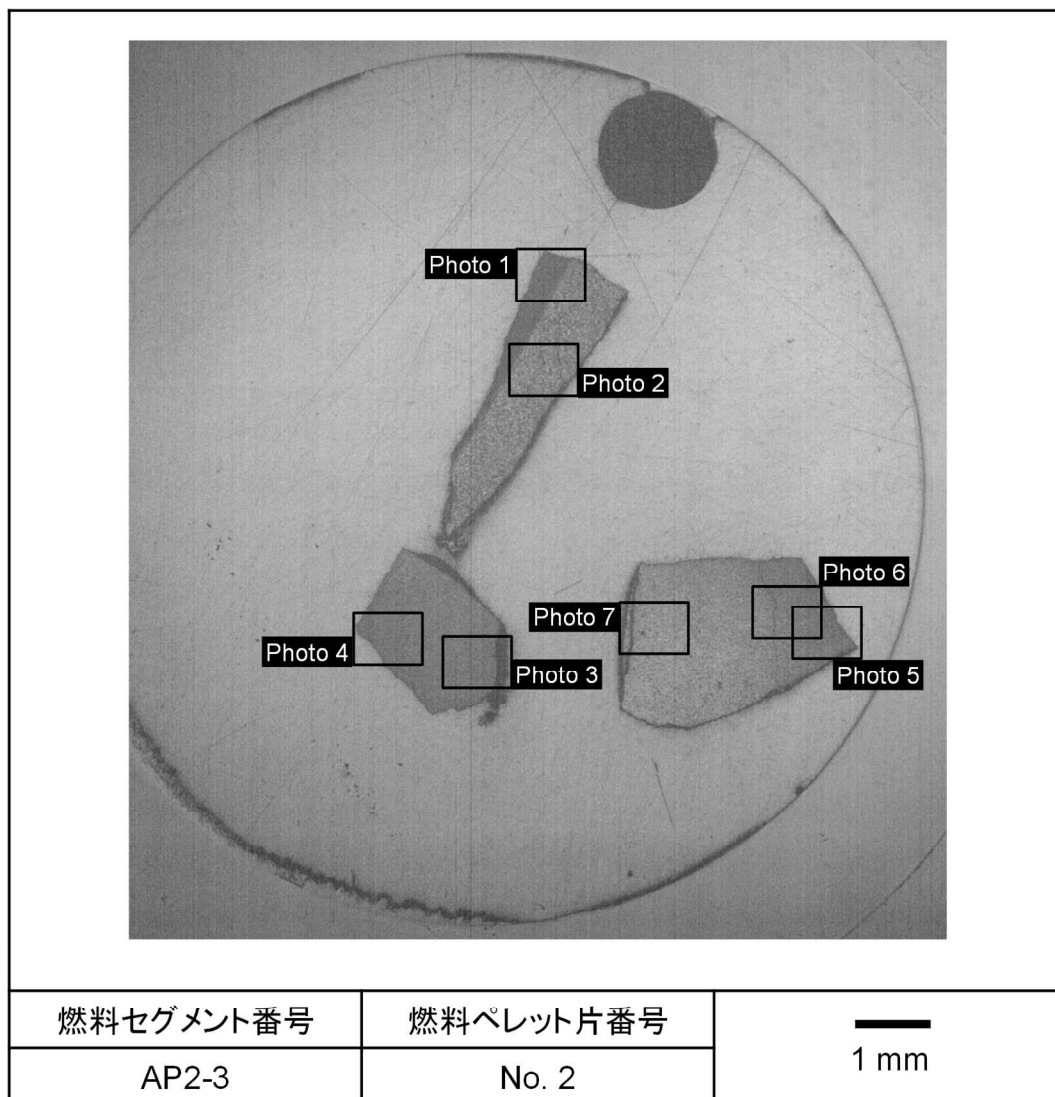


図 4.3.2-36(1) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の断面画像
(エッチング後、AP2-3 セグメント燃料)

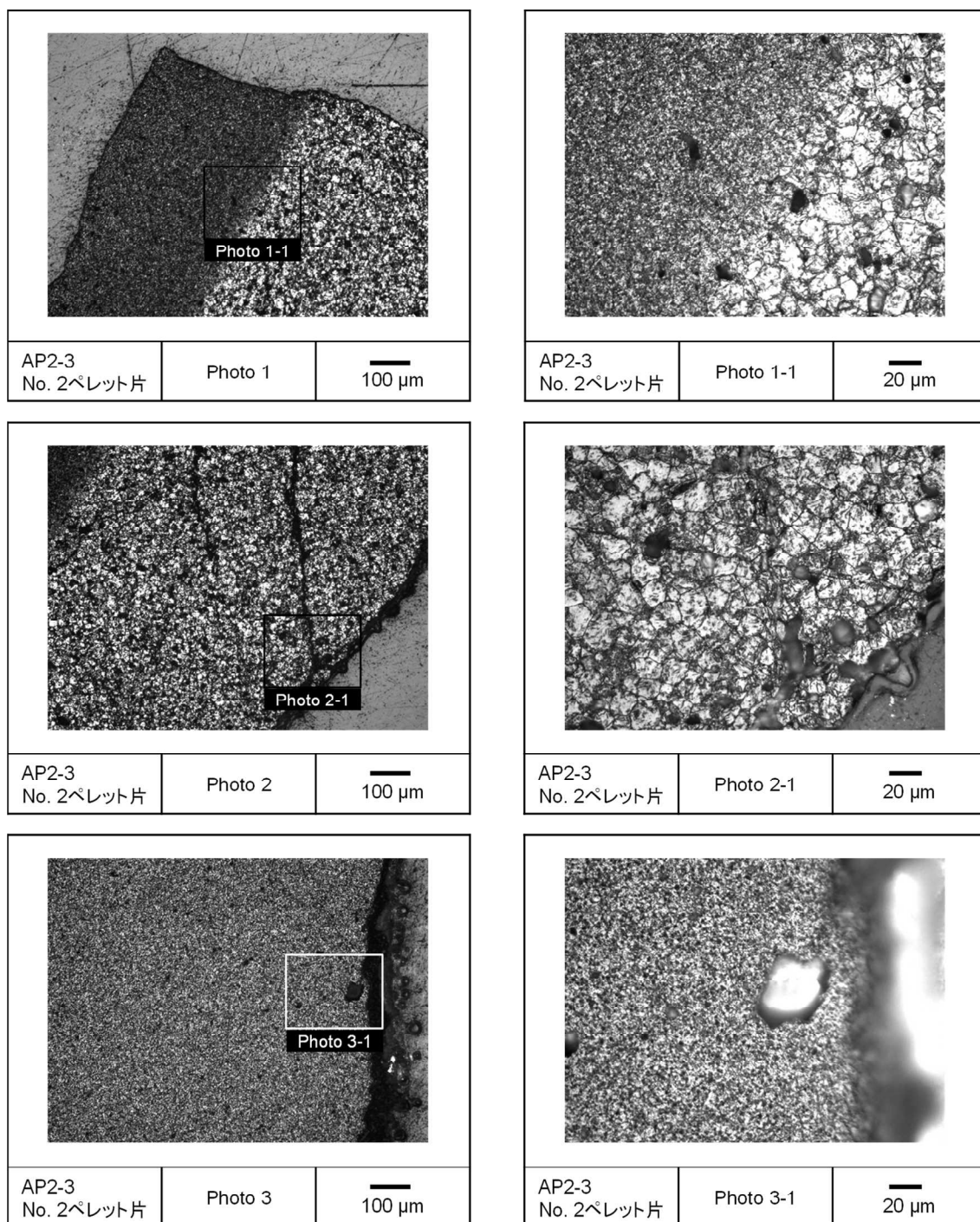


図 4.3.2-36(2) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の断面画像
(エッチング後、AP2-3 セグメント燃料)

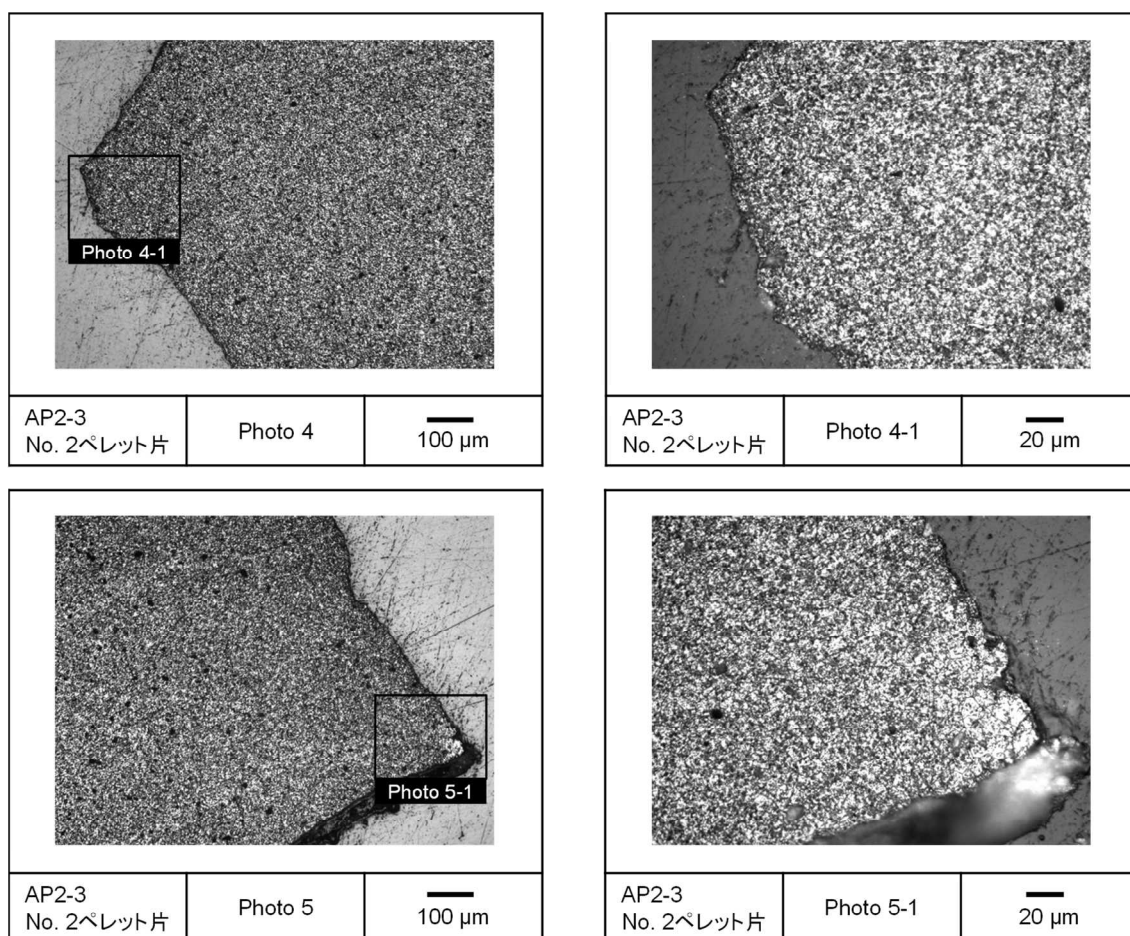


図 4.3.2-36(3) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の断面画像
(エッチング後、AP2-3 セグメント燃料)

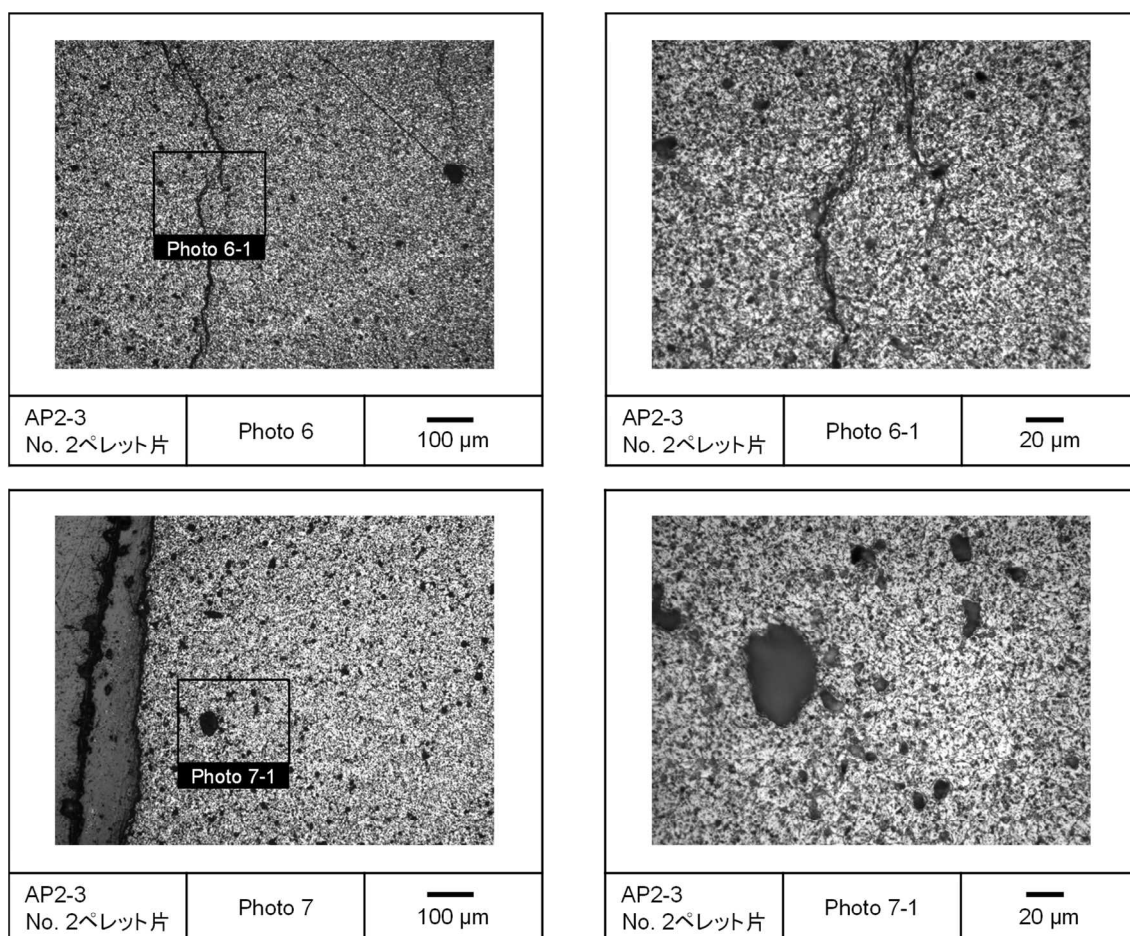


図 4.3.2-36(4) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の断面画像
(エッチング後、AP2-3 セグメント燃料)

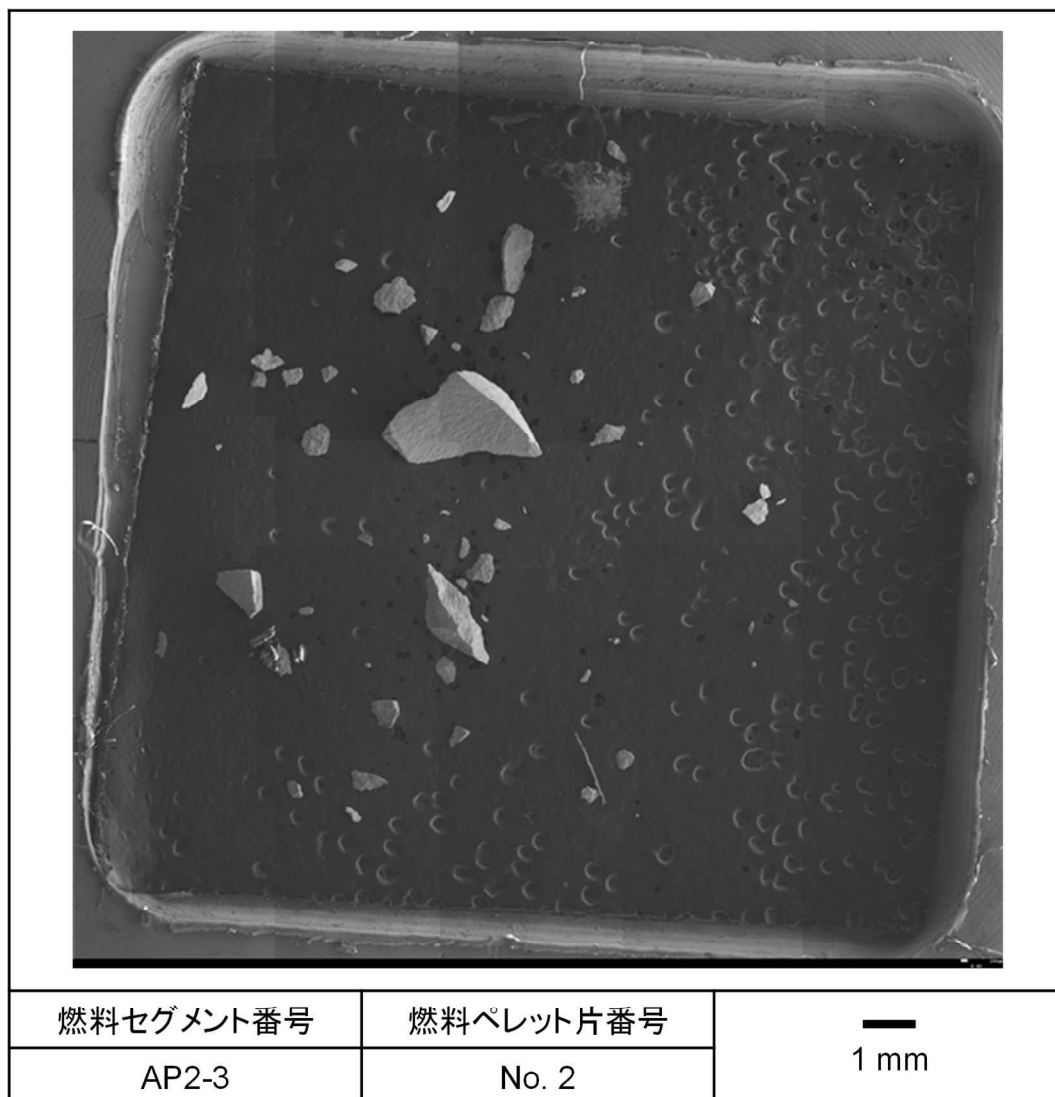


図 4.3.2-37(1) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(マクロ画像、AP2-3 セグメント燃料)

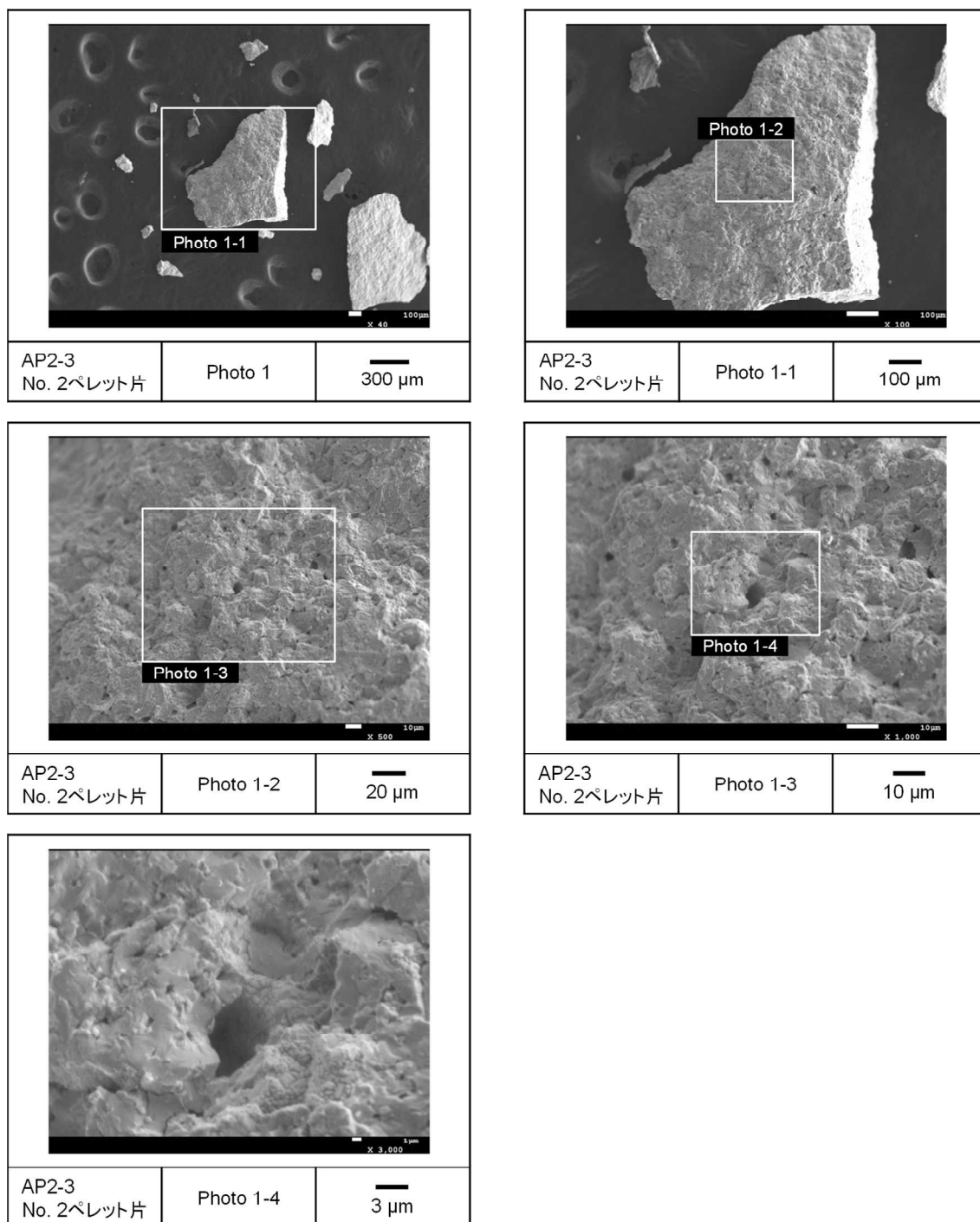


図 4.3.2-37(2) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

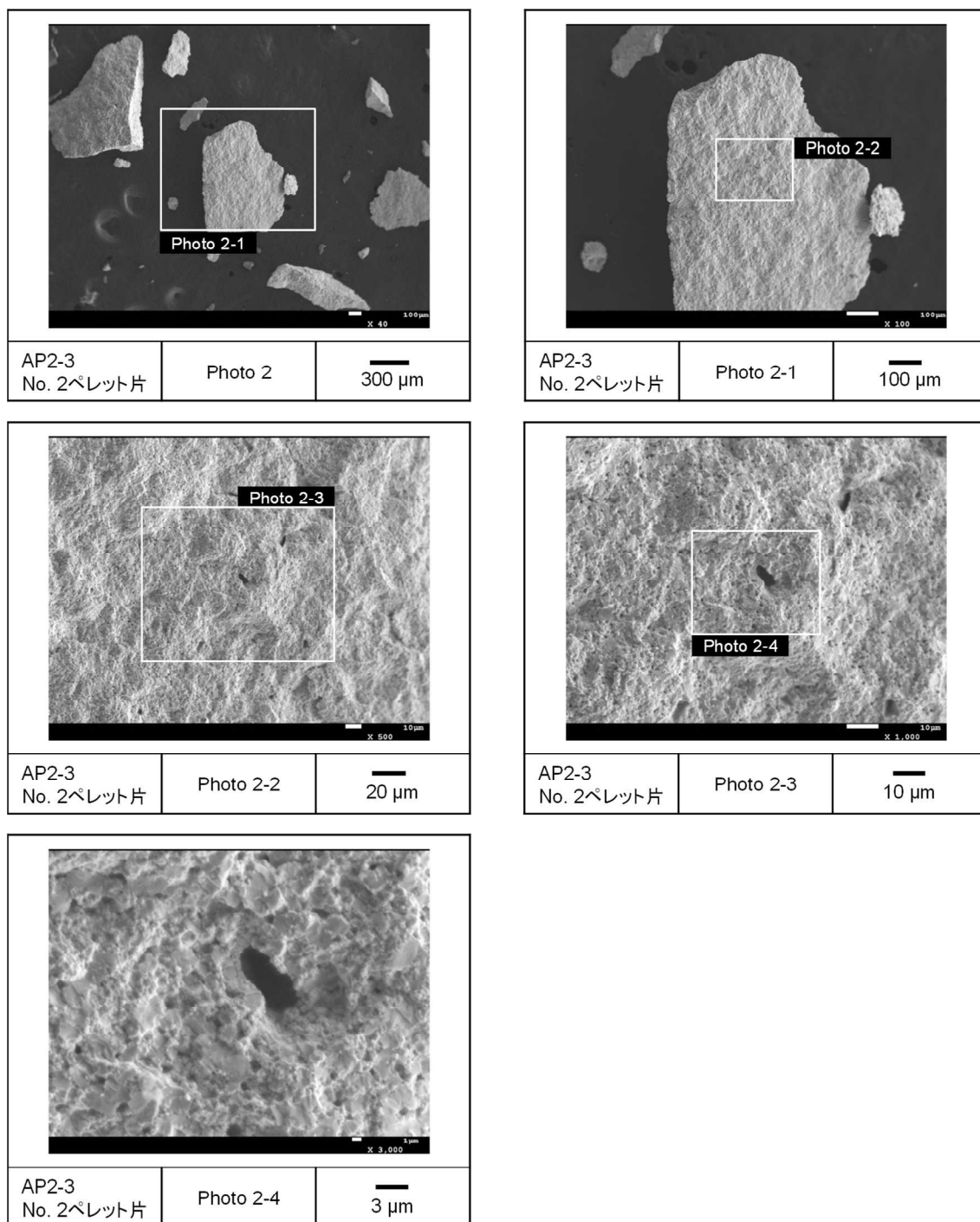


図 4.3.2-37(3) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

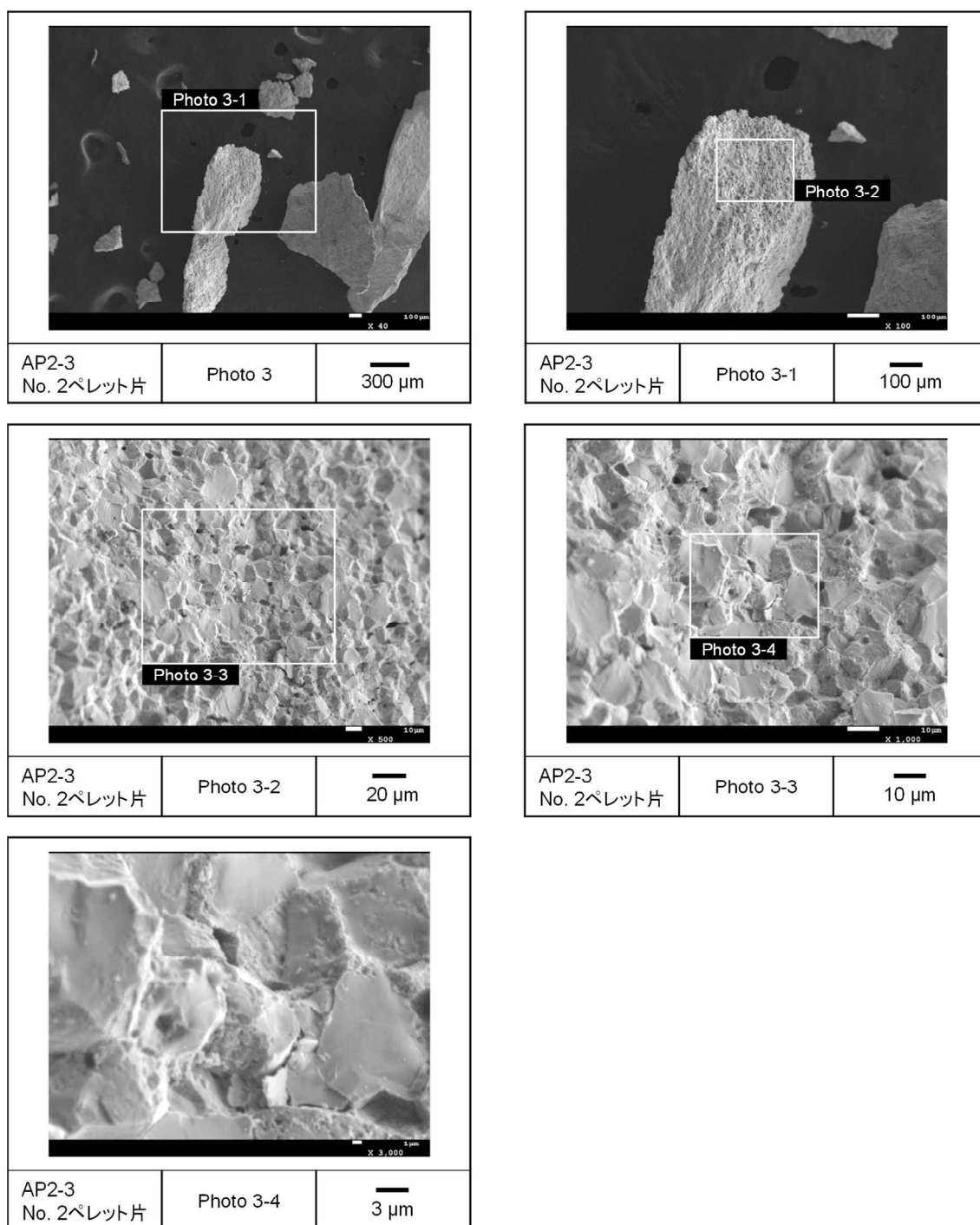


図 4.3.2-37(4) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

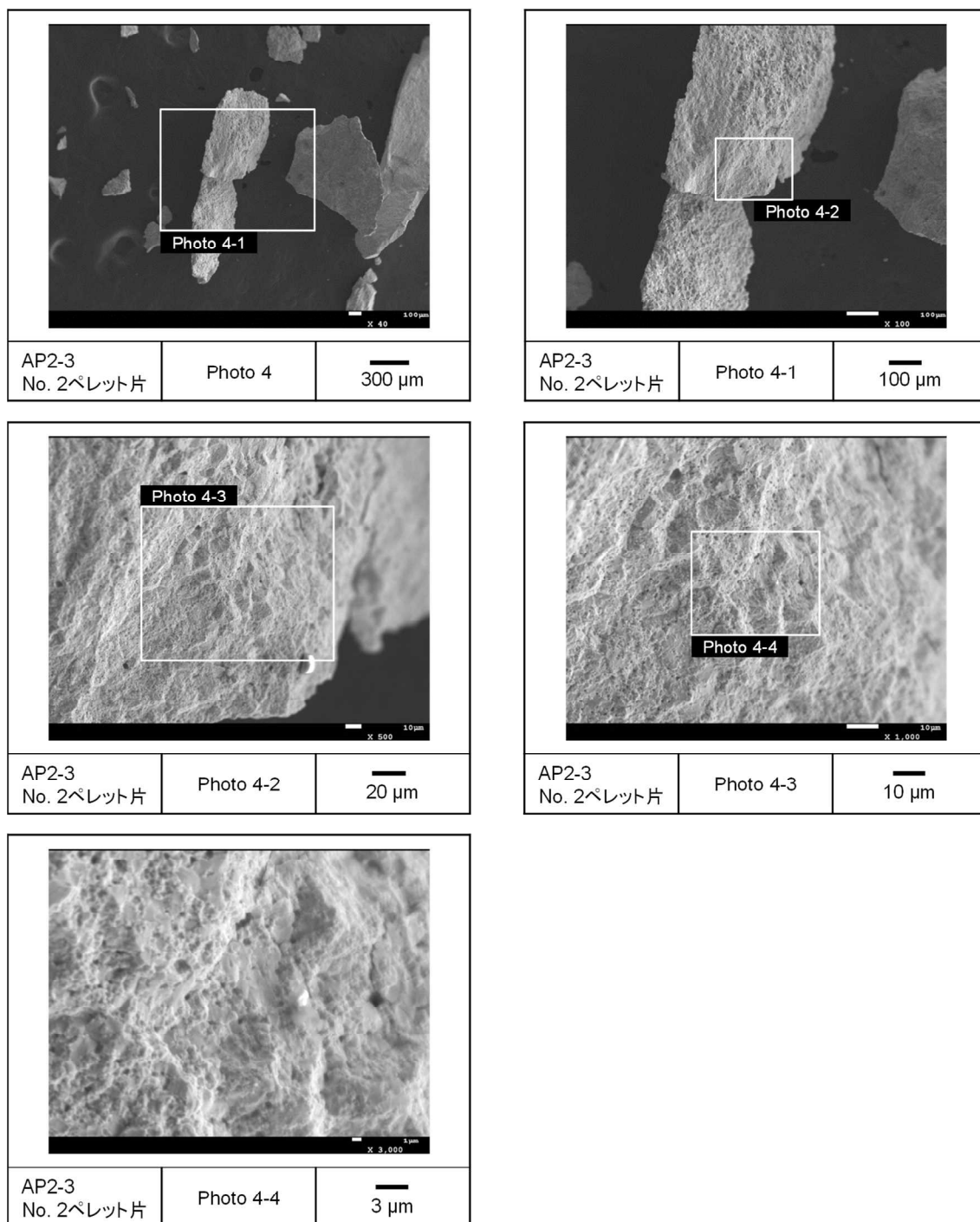


図 4.3.2-37(5) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

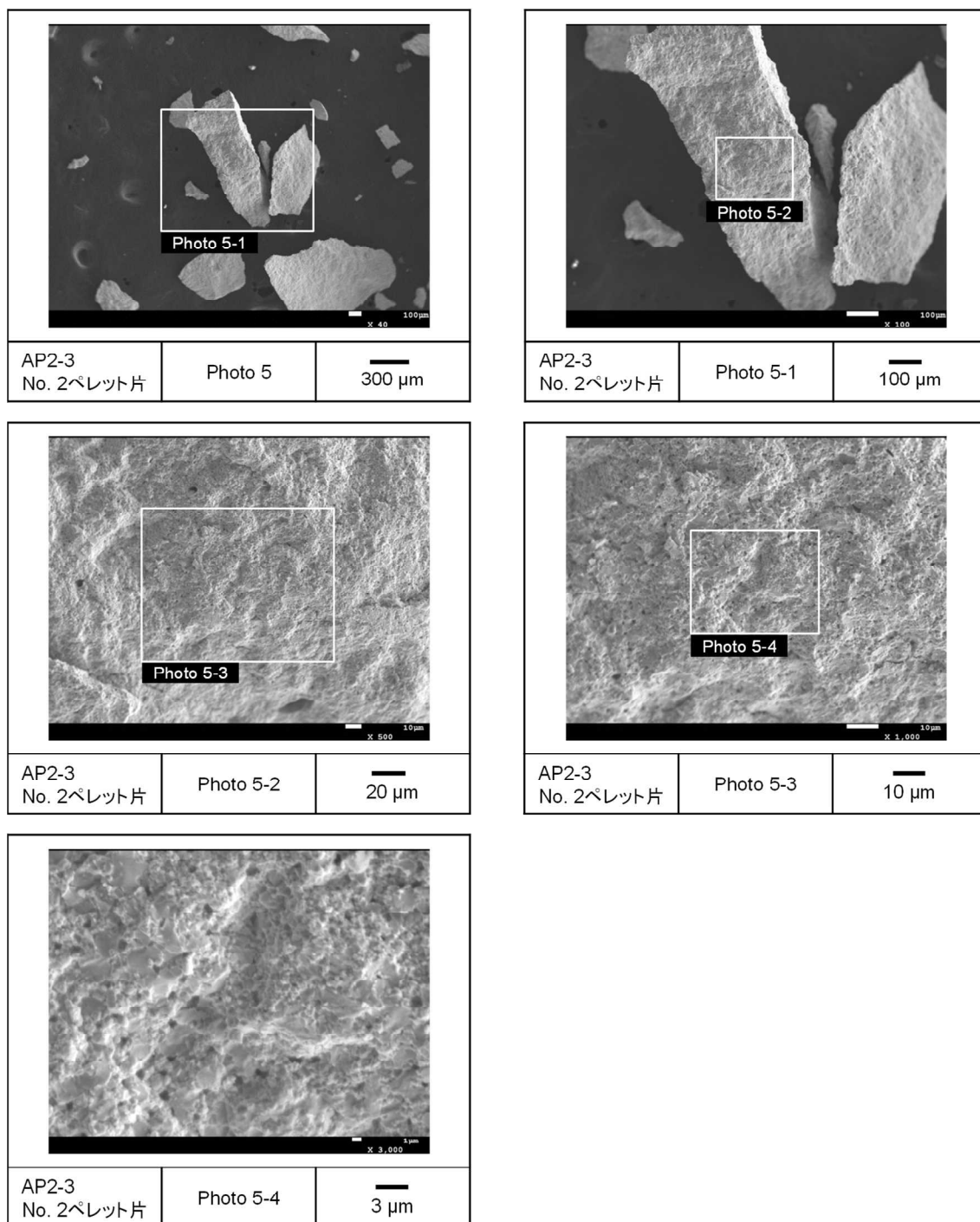


図 4.3.2-37(6) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

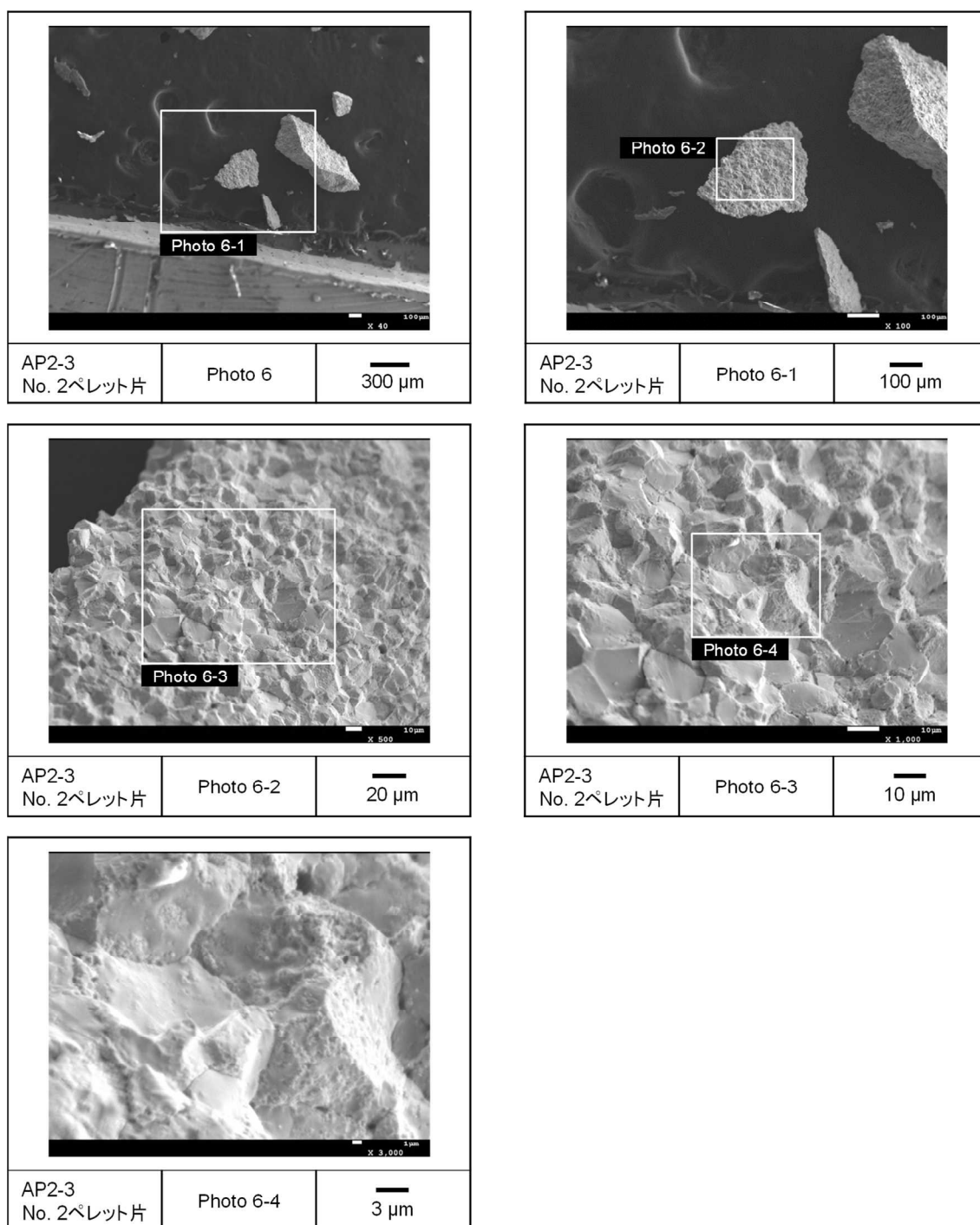


図 4.3.2-37(7) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

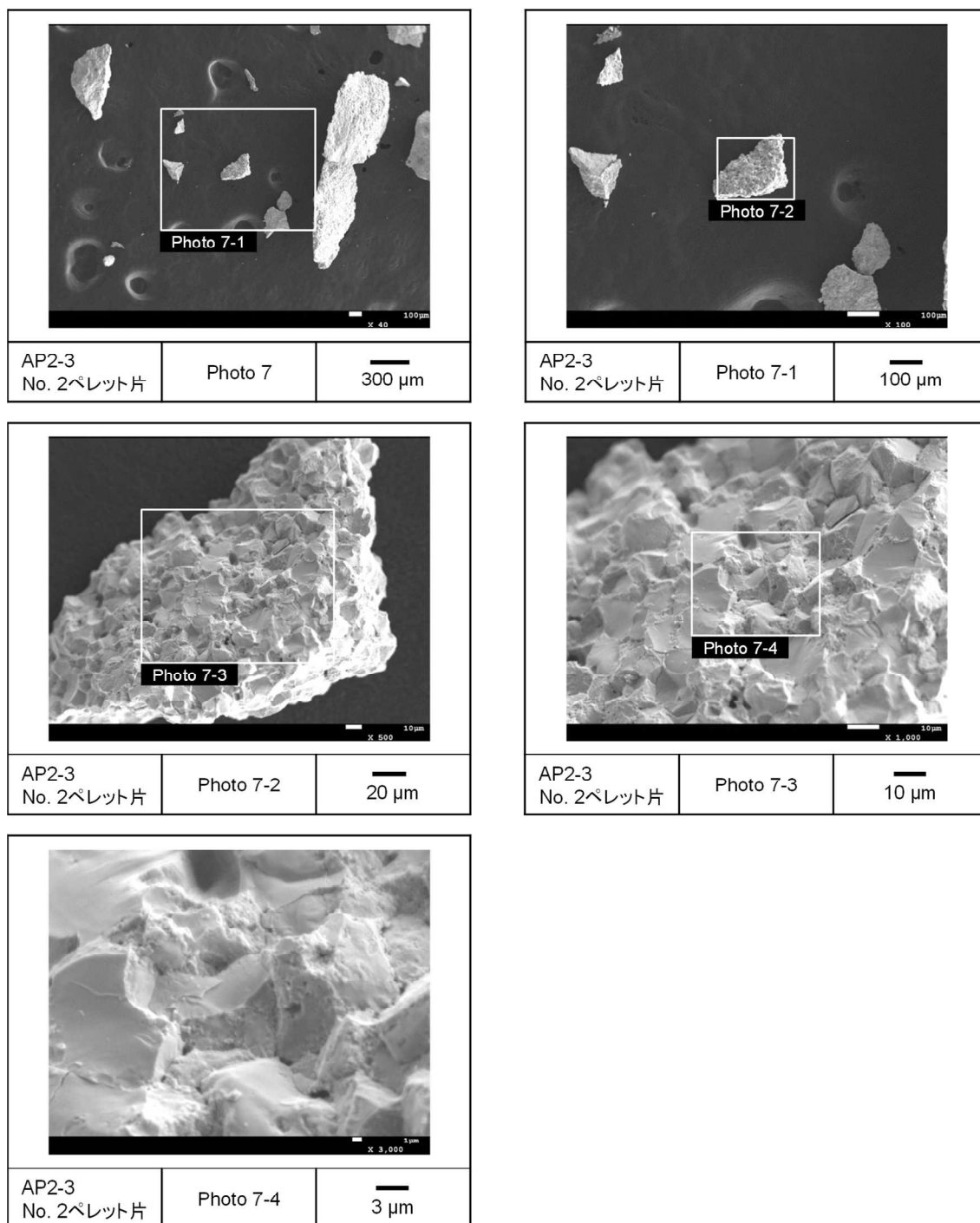


図 4.3.2-37(8) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

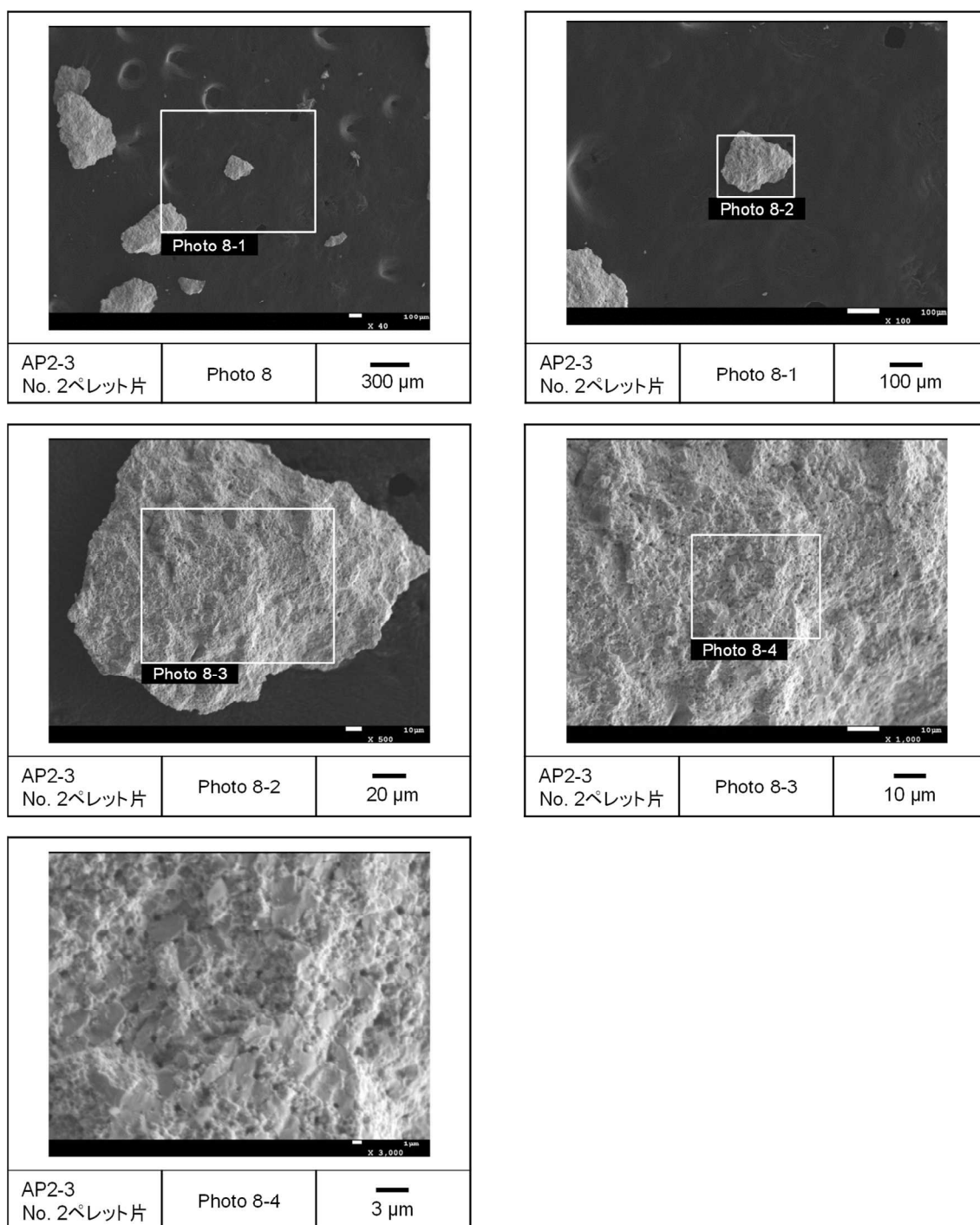


図 4.3.2-37(9) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

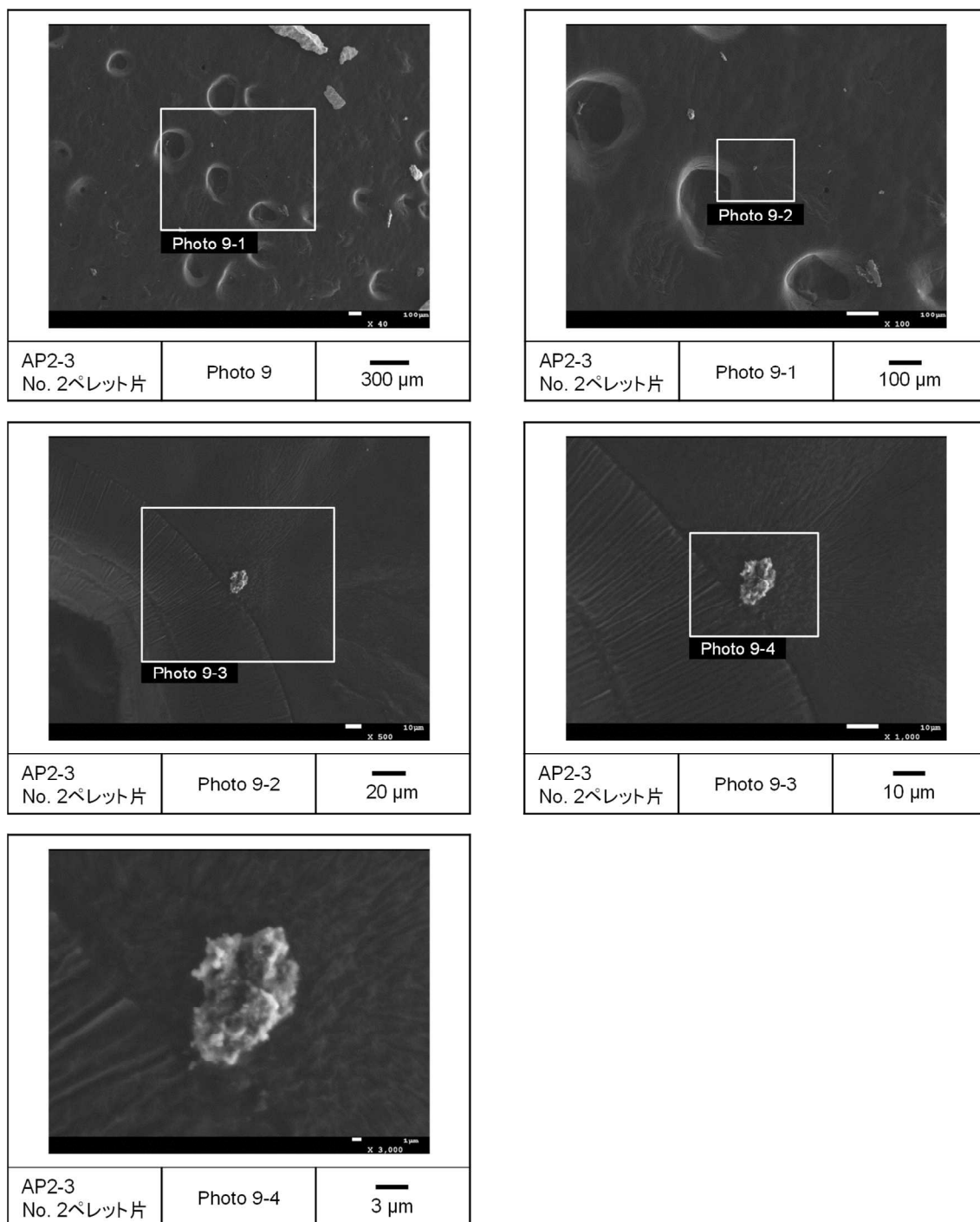


図 4.3.2-37(10) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

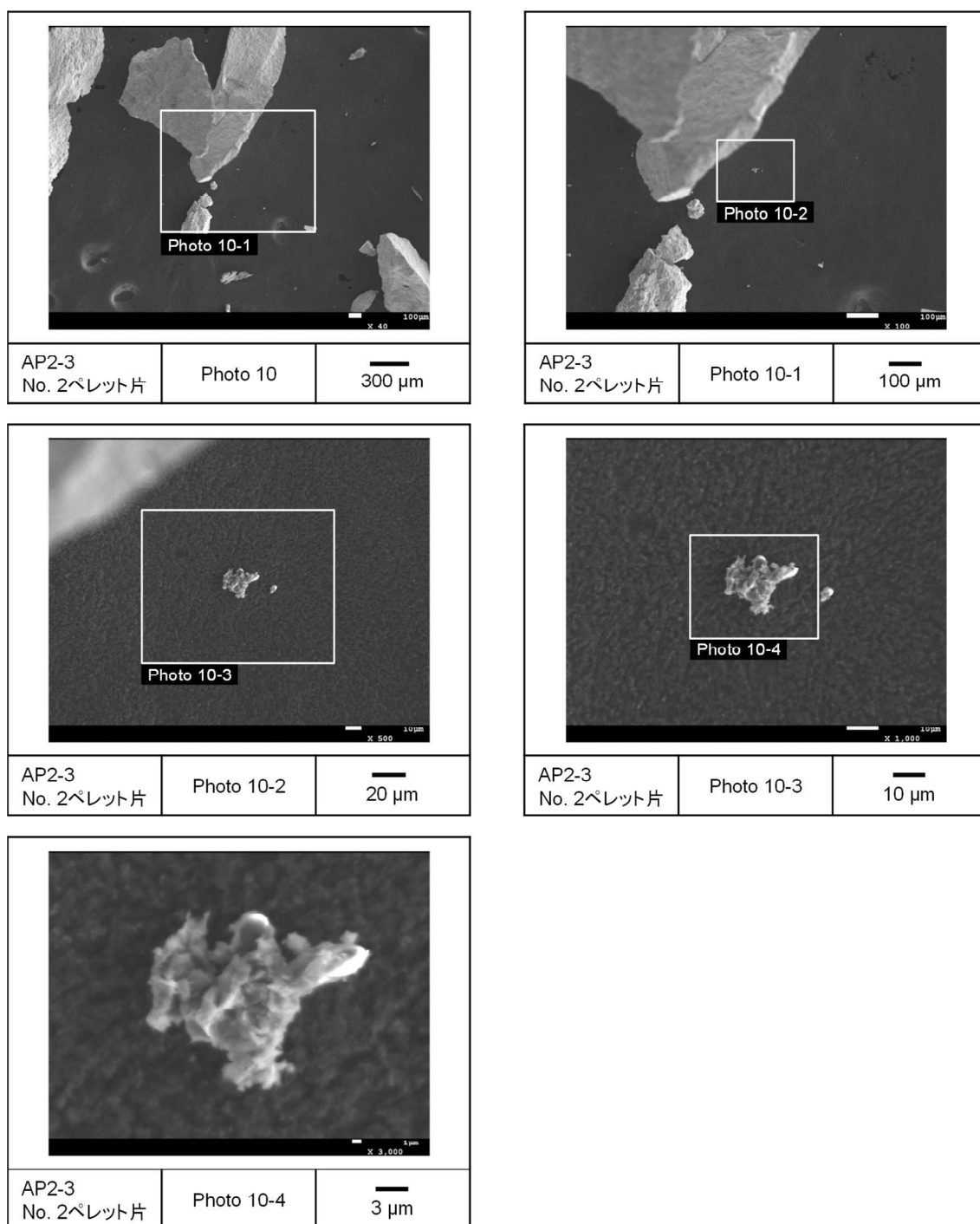


図 4.3.2-37(11) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

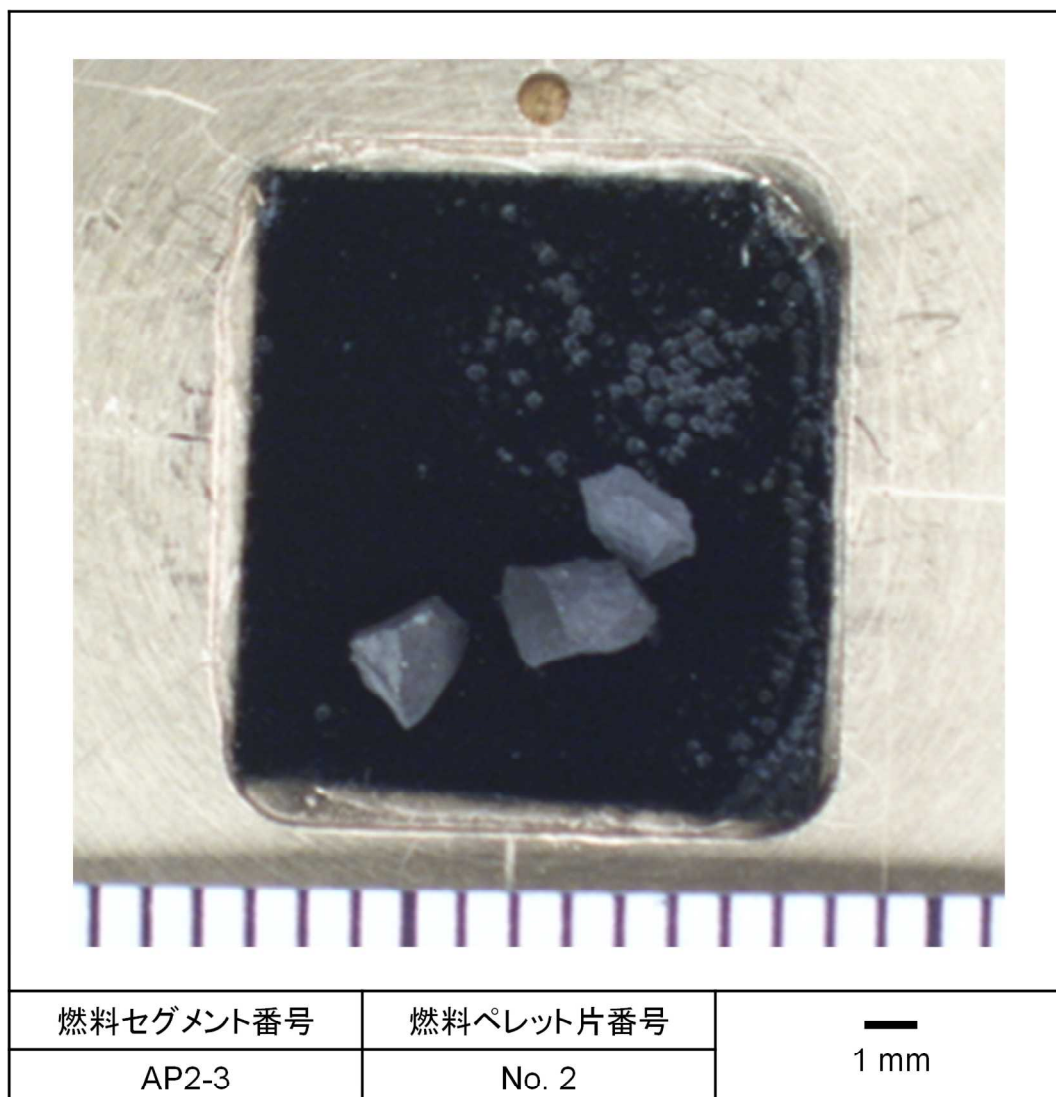


図 4.3.2-38(1) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(マクロ画像、AP2-3 セグメント燃料)

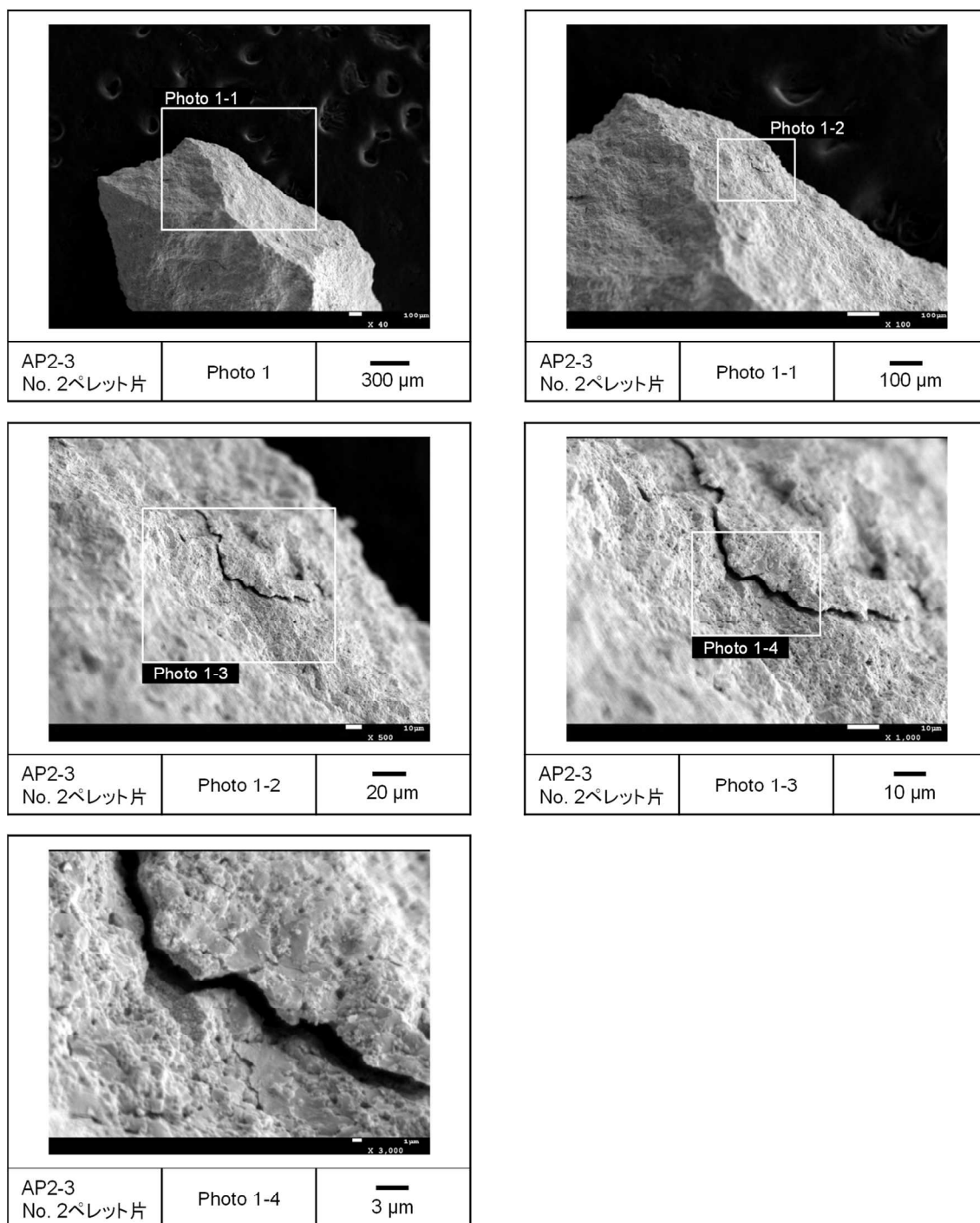


図 4.3.2-38(2) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

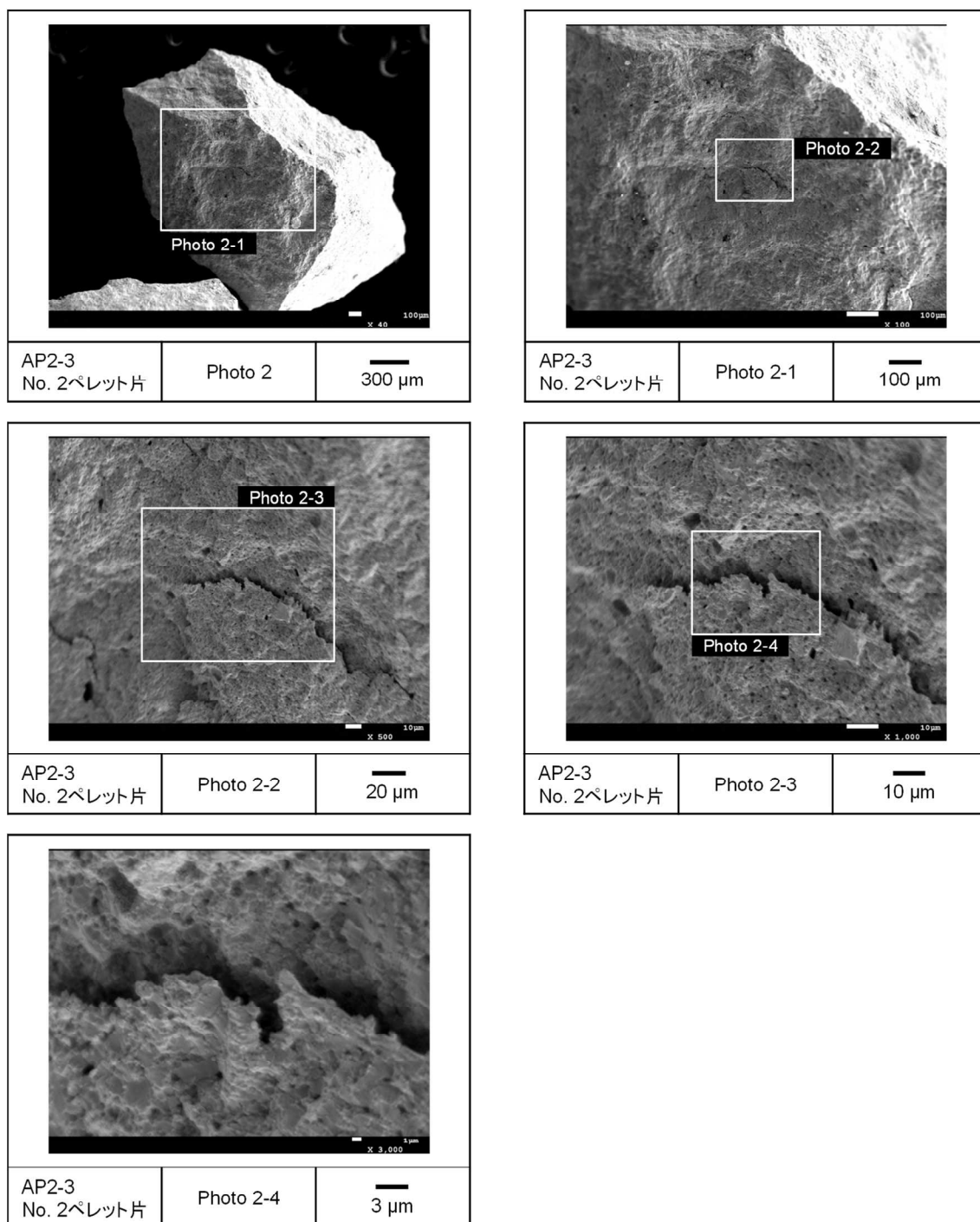


図 4.3.2-38(3) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

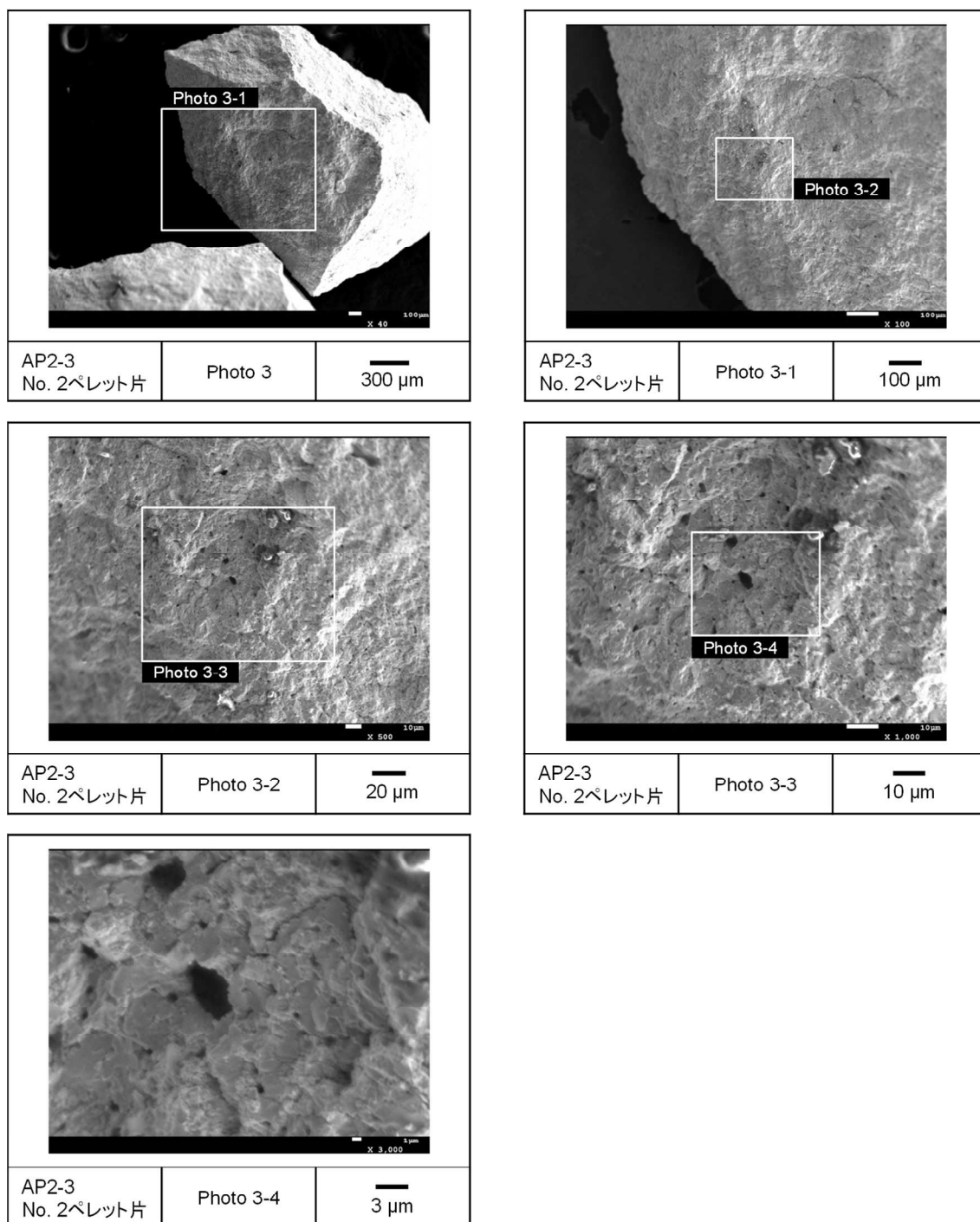


図 4.3.2-38(4) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

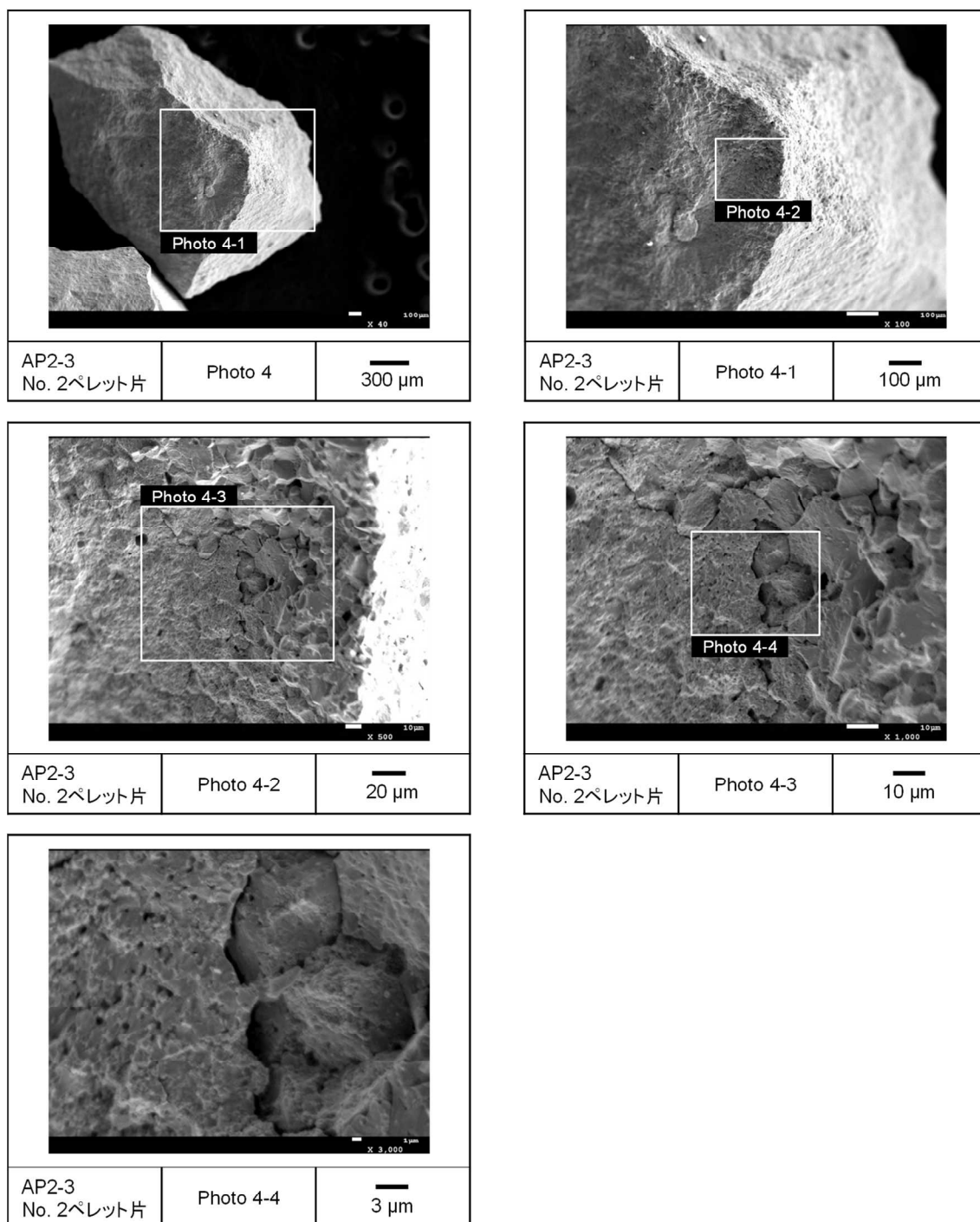


図 4.3.2-38(5) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

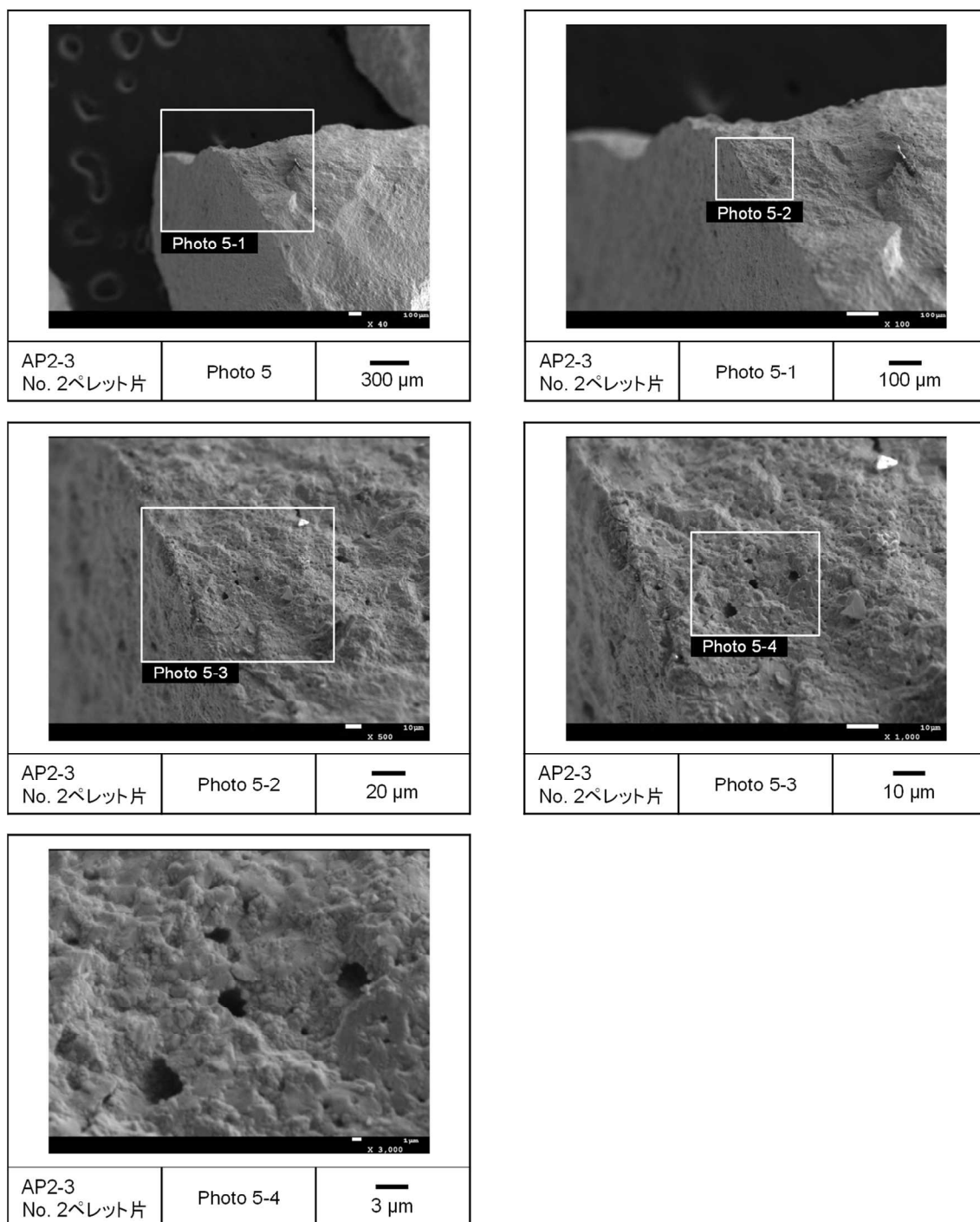


図 4.3.2-38(6) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

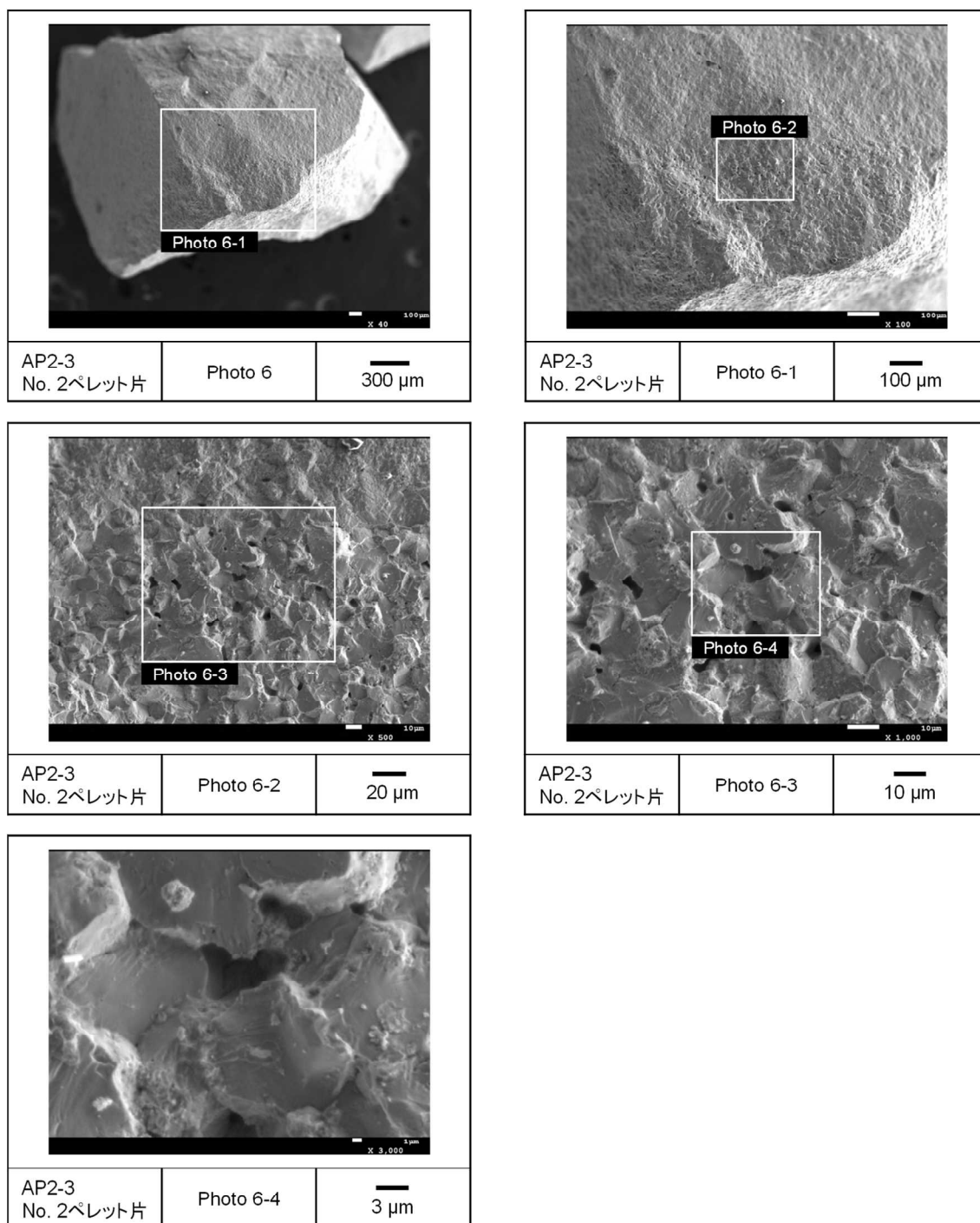


図 4.3.2-38(7) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

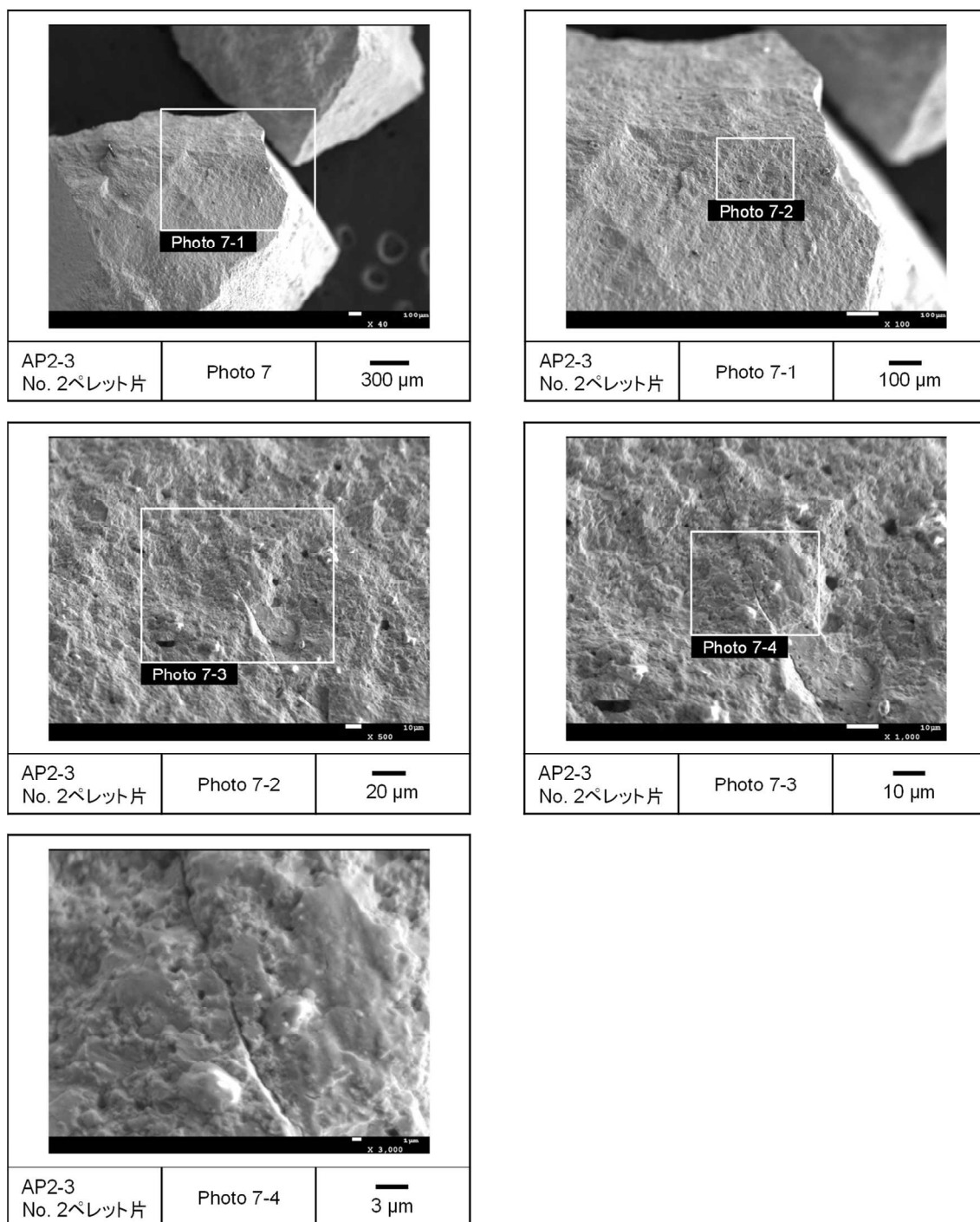


図 4.3.2-38(8) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

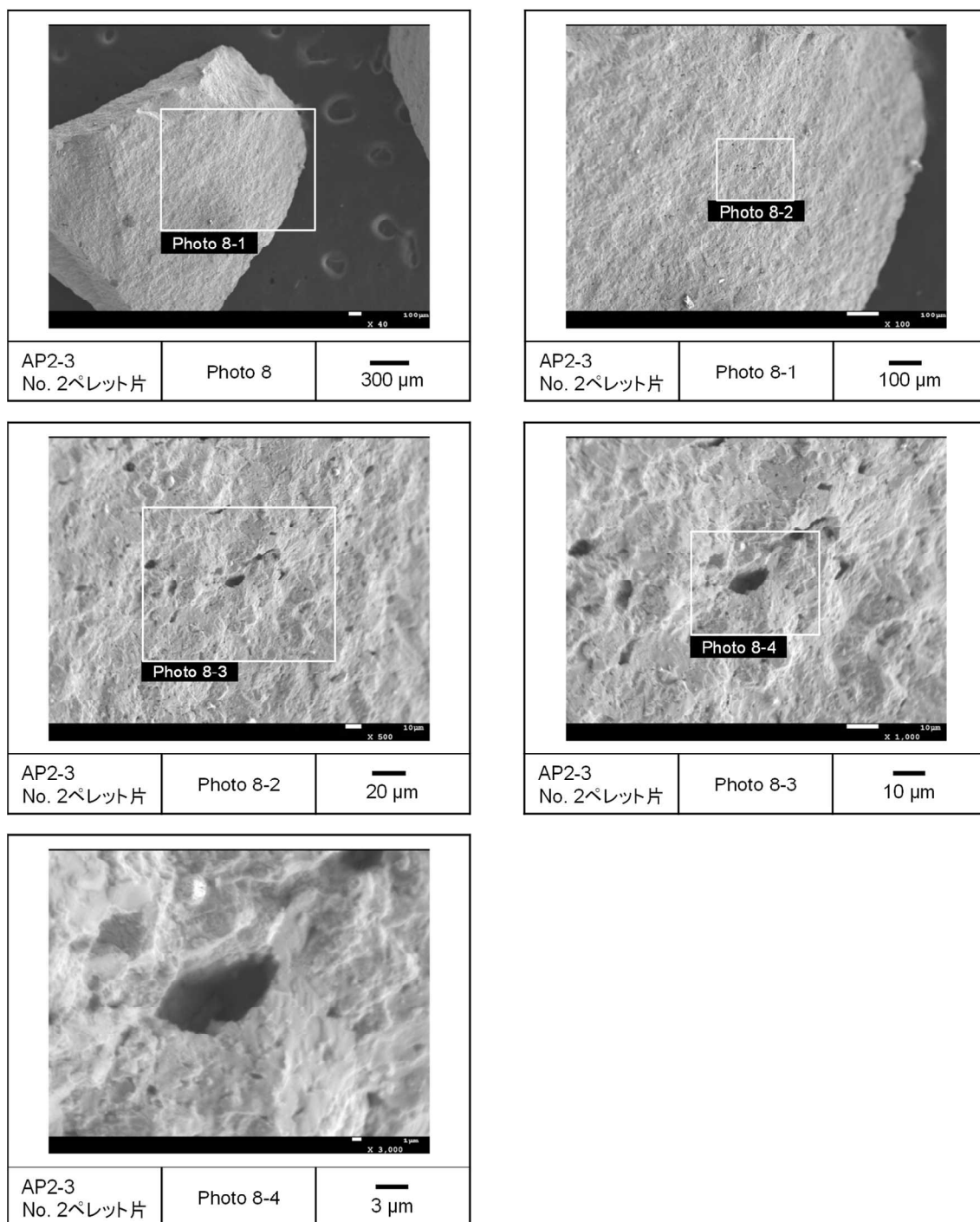


図 4.3.2-38(9) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)

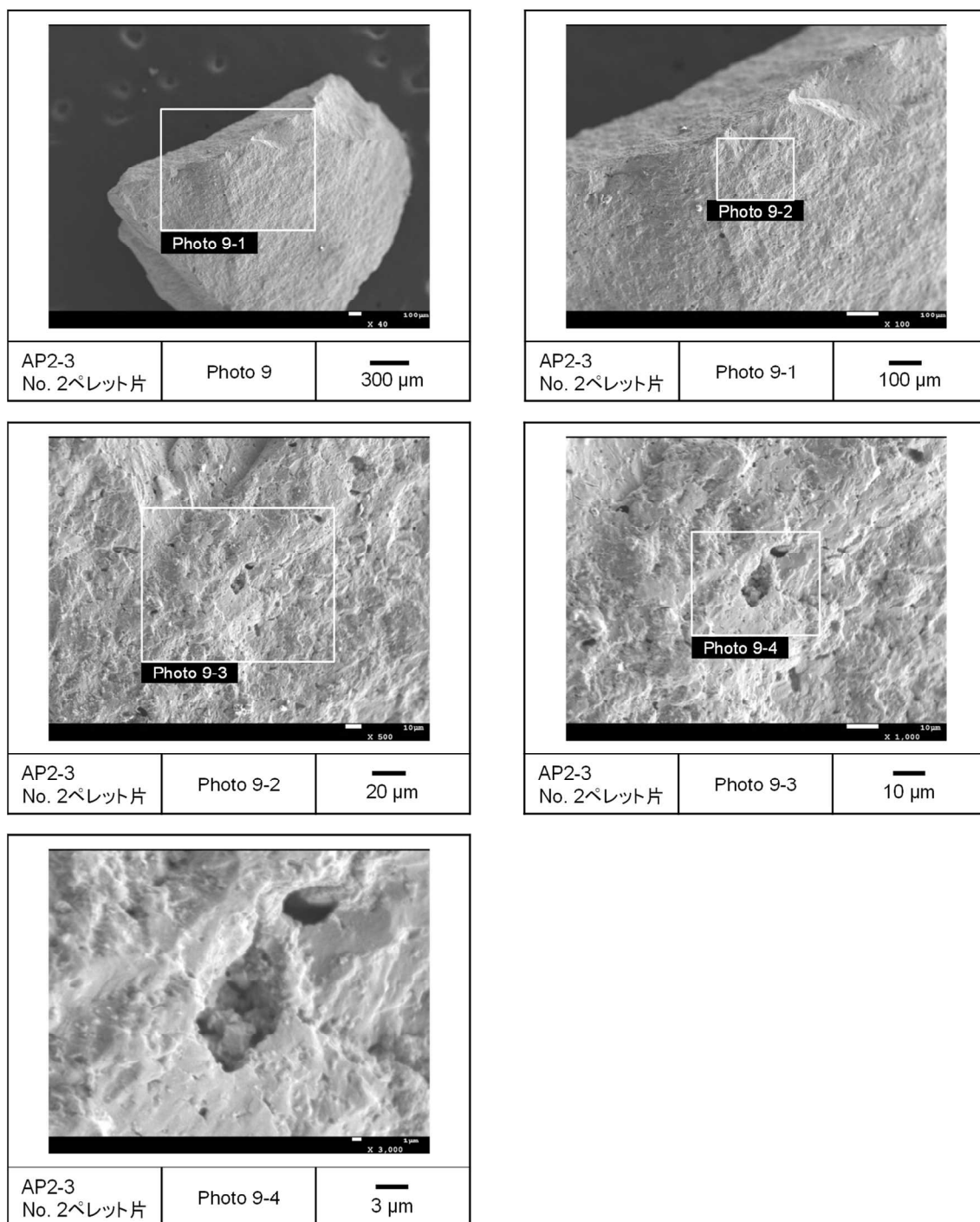
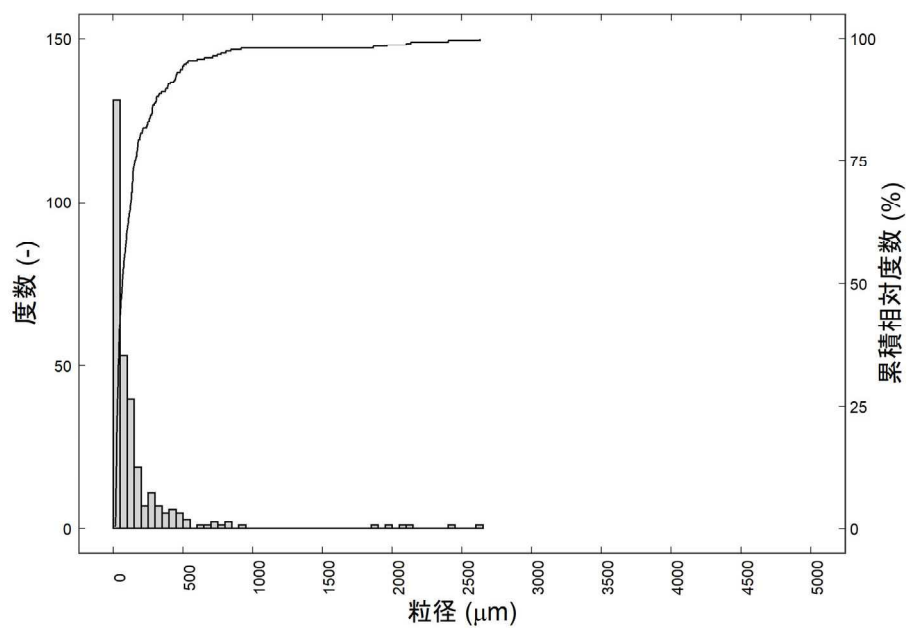
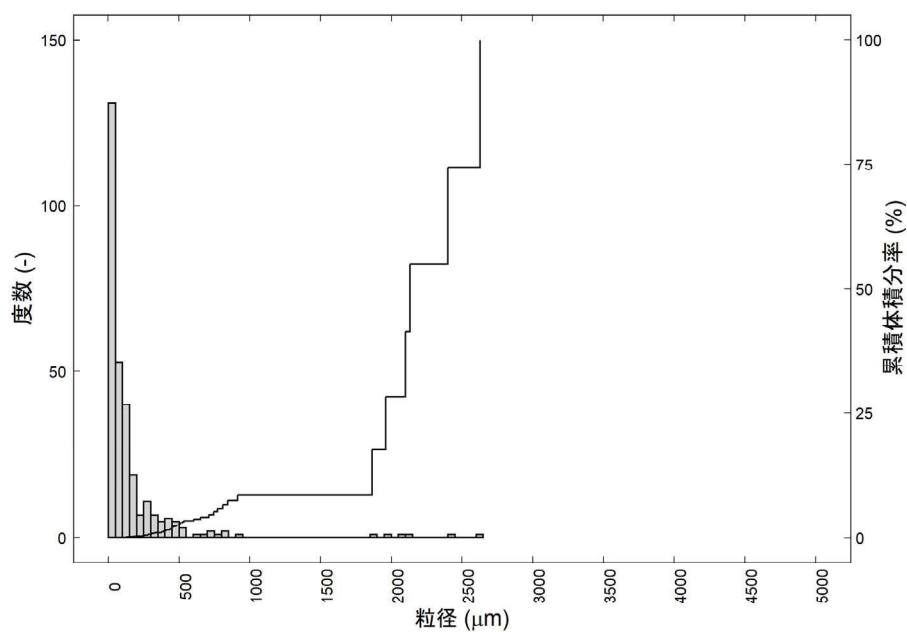


図 4.3.2-38(10) 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-3 セグメント燃料)



(a) 粒径分布と粒子数で評価した累積相対度数



(b) 粒径分布と累積体積分率

図 4.3.2-39 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の粒径分布
(AP2-3 セグメント燃料)

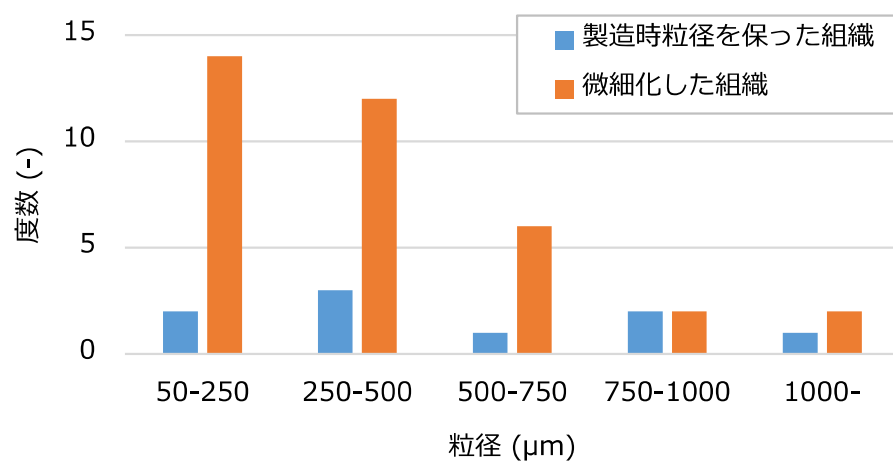


図 4.3.2-40 加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の組織別粒径分布
(AP2-3 セグメント燃料)

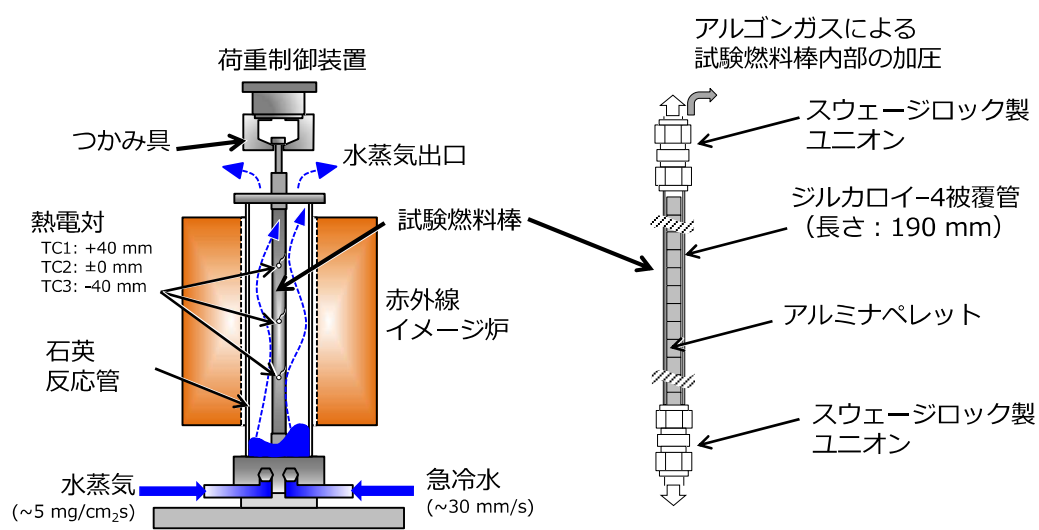


図 4.3.3-1 LOCA 模擬試験装置の概要

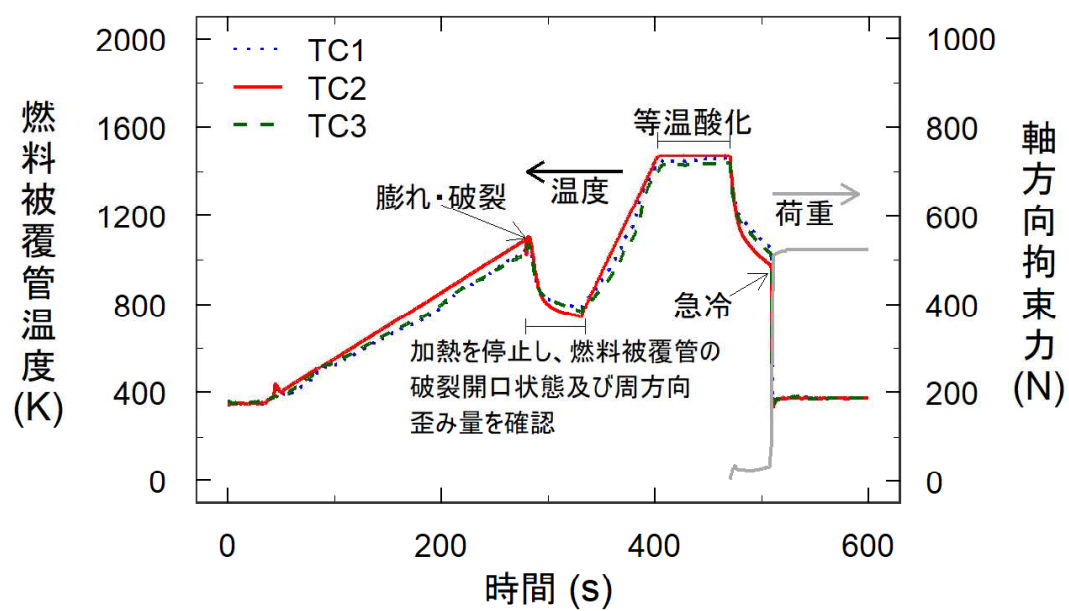
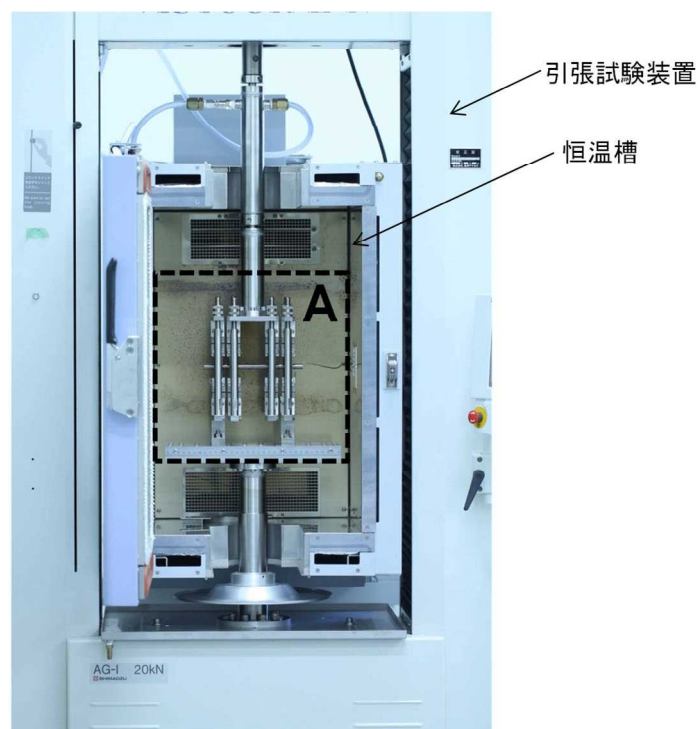


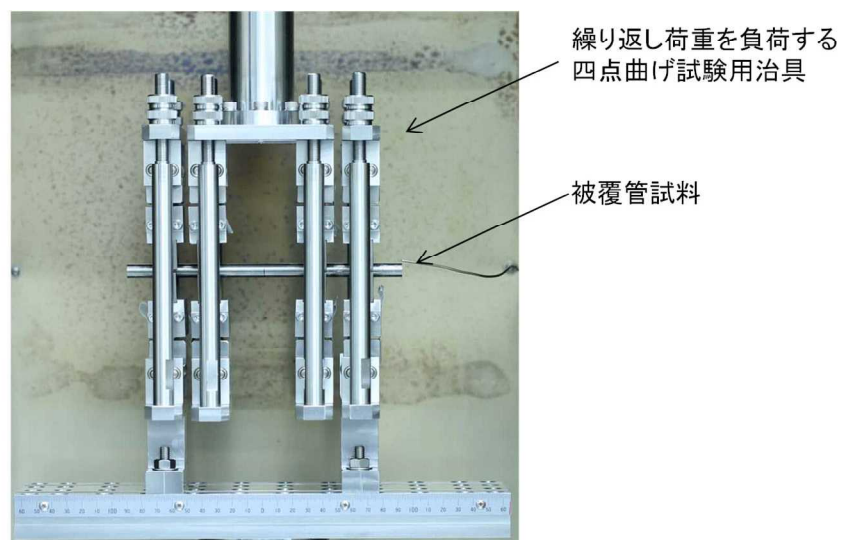
図 4.3.3-2 LOCA 模擬急冷破断試験時の燃料被覆管温度・荷重履歴の例



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

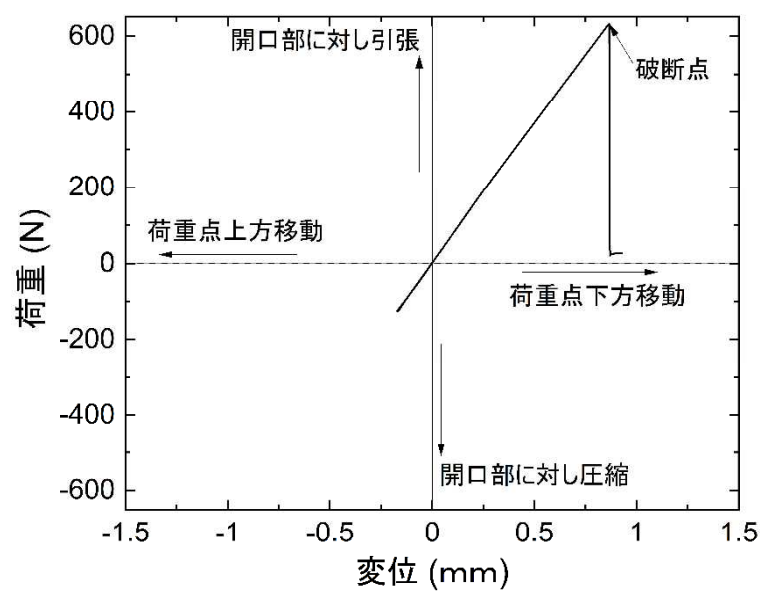


図 4.3.3-6 荷重-変位曲線の例

(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。)

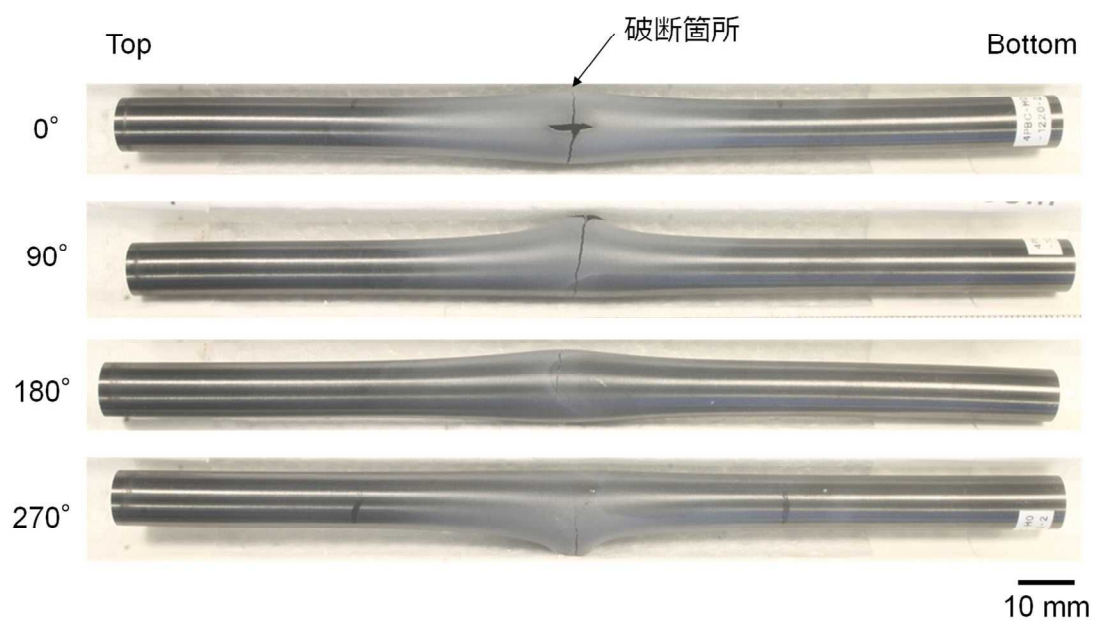


図 4.3.3-7 繰り返し荷重を負荷する四点曲げ試験後の試料外観

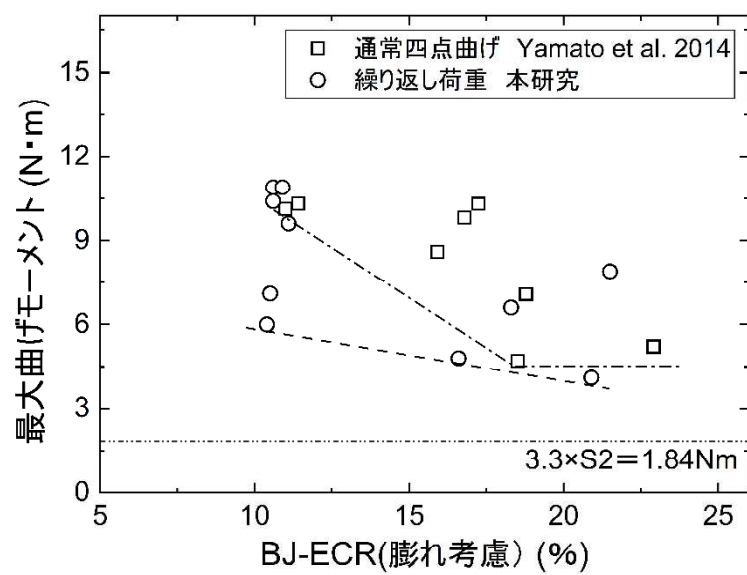


図 4.3.3-8 最大曲げモーメントと酸化量の関係 (等温酸化温度: ~1473 K)

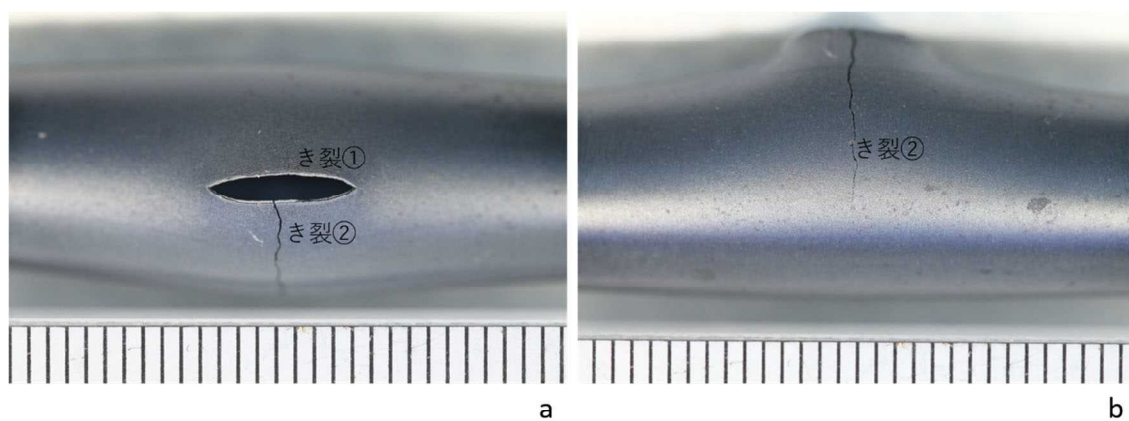


図 4.3.3-9 急冷時にき裂が形成した試料の開口部拡大写真の例。(a) 開口部正面、(b)開口部側面

4.4 RIA 試験

RIA 時の燃料挙動及び破損限界についてデータを取得するため、室温条件下における RIA 模擬試験を 1 回 (LS-5 実験)、高温高圧条件下における RIA 模擬試験を 1 回 (CN-2 実験) NSRR において実施した。また、CN-1 実験に関して、パルス照射後試験燃料棒の寸法測定を実施した。

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 LS-5 実験

高燃焼度 BWR-UO₂ 燃料を対象とした室温実験 LS-5 を令和 3 年 1 月 19 日に実施した。燃料エンタルピー増分のピーク値 314 J/g (75 cal/g、暫定値) の実験条件に対し、過渡計装記録によると燃料が破損したと思われる。

(1) 試験燃料棒

試験燃料は、表 4.1-1 に示す AP2-19 燃料セグメント (スイス・ライブシュタット BWR 照射 Zry-2 (LK-3) 被覆燃料) から採取した。図 4.4.1-1 に燃料セグメントからの採取位置及び上下端栓取付け後の燃料棒概略を示す。スタック長はペレット 12 個分で、X 線写真撮影に基づく測定によれば約 107 mm であった。セグメント燃料棒のガンマ線強度分布には軸方向の大きな変化はなく、試験燃料の平均燃焼度はセグメント燃焼度と同じ約 91 GWd/t と評価した。試料採取範囲における被覆管外面酸化膜厚さは約 69 μm と評価した。被覆管水素吸収量については、燃料セグメント AP2-19 に関する分析結果に基づき約 718 wtpm と評価した。燃料棒加工時に被覆管内には室温で 0.1 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、X 線写真撮影、寸法測定の結果をそれぞれ図 4.4.1-2 から図 4.4.1-4 に示す。外観写真では、下部側から 7cm 程度の下部端栓表面に異物が確認されるが、これはジルカロイ片である。He ガスを封入する際のシール溶接時に封入孔が封止されなかったため、スポット溶接により再度溶封処理を施した際に付着した。その他、パルス照射実験において問題となり得る傷、欠陥、扁平化、曲がりなどは見られなかった。寸法測定では、パルス照射実験において問題となり得る傷、欠陥などは見られなかった。

(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：	XII-I 型 (室温・大気圧用)
パルス照射時冷却水条件：	16°C、0.1 MPa の静止水
投入反応度：	\$4.53

燃料エンタルピー増分ピーク値（暫定値）： 314 J/g (75 cal/g)

計装項目を以下に示す。また、図 4.4.1-5 に計装取付けの概要を示す。

カプセル内圧計（液相#1）

燃料棒内圧計（スタック下部）

AE センサ 2 個（燃料破損検出用）

水塊速度計

カプセル外面歪みゲージ

クラッド歪みゲージ（スタック部以外:#1, スタック部（軸方向）:#2, #5, スタック部（周方向）:#3, #4）

冷却水温度測定用シース熱電対 2 箇所

(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 4.4.1-6(1)及び(2)、積分出力履歴を図 4.4.1-6(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 4.4.1-6(5)から(17)に、時刻 0 から 10 秒まで、0 から 1 秒まで及び 0.248 から 0.258 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 4.4.1-6 (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 0.2536 秒においてピーク値約 20.4 GW に達し、半値幅は約 4.4 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（破線部）。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 122.1 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 4.4.1-6 (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 0.251 秒過ぎか

ら僅かな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。時刻 0.2527 秒付近でスパイク状の圧力波が観測されており、従来のデータとの比較から、燃料破損による圧力上昇と解釈される。破損時刻をより高い時間分解能で読み取り、さらに、圧力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 0.25262 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 93 J/g (22 cal/g、暫定値) を破損時燃料エンタルピー増分とした。

(c) 燃料棒内圧

図 4.4.1-6 (6) に燃料棒内圧の履歴を示す。時刻 0.252 秒以降に圧力上昇が見られるが、燃料棒内ガスの熱膨張やペレットからの FP ガス放出により実際に圧力が上昇した可能性がある一方で、NSRR パルス出力に同期したノイズの可能性もある。時刻 0.2527 秒付近で急激に減少した。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たためと解釈される。

(d) AE センサ出力

図 4.4.1-6 (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、いずれにおいても同じ時刻に振幅の増大が見られた。燃料棒スタック中心から AE センサまでの距離を音響波が伝播する時間を考慮して破損時刻を評価したところ、カプセル内圧 (液相) による評価結果とほぼ一致する結果を得た。

(e) 水塊速度計信号

図 4.4.1-6 (9) に水塊速度計の出力信号を示す。時刻 0.253 秒付近から記録されている激しい振動は、冷却水の水面が上向きに移動したことを示す。時刻 0.3 秒以後の信号はフロート (及び冷却水塊) の落下に対応する。

(f) カプセル外面歪み

図 4.4.1-6 (10) に内カプセルの蓋外表面に設置した歪みゲージの信号を示す。この歪みゲージは炉中心軸から 30mm 程度離れた位置にあり、実験時のカプセルへの負荷を確認するために設置したものである。カプセルへの過度の負荷を示す信号は見られなかった。圧力計の出力と同様に、NSRR パルス出力に同期したノイズが記録された。

(g) クラッド歪みゲージ

図 4.4.1-6 (11) 及び(15) にクラッド歪みゲージ#1 から 5 の信号を示す。図 4.4.1-4 に示すように、スタック部ではない被覆管表面 (軸方向 : #1) 及びスタック部の被覆管表面 (軸方向 : #2, #5、周方向 : #3, #4) に貼り付けた。非スタック部の歪みゲージは、スタック

部の歪みゲージで測定されるパルス照射によるノイズを除去することを目的として貼り付けた。パルスノイズ感受性における歪ゲージ毎の個体差、パルスノイズ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。

(h) 冷却水温度

図 4.4.1-6 (16)及び(17)に燃料スタック中心高さ (#1) 及び燃料棒上端付近 (#2) 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 10 mm である。

熱電対#1 による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。熱電対#2 による温度履歴ではパルス照射の時刻に温度の低下が示されているが、これは熱電対の設置方法に起因する。熱電対#2 の冷接点（温度基準点）はカプセル蓋付近に設けられていたため、パルス照射時のガンマ発熱により冷接点の温度が上昇し、かつ、気相中であるため短時間では温度が低下しなかったと推測される。そのため、温度計測点において見かけ上の温度低下が記録されたと解釈される。

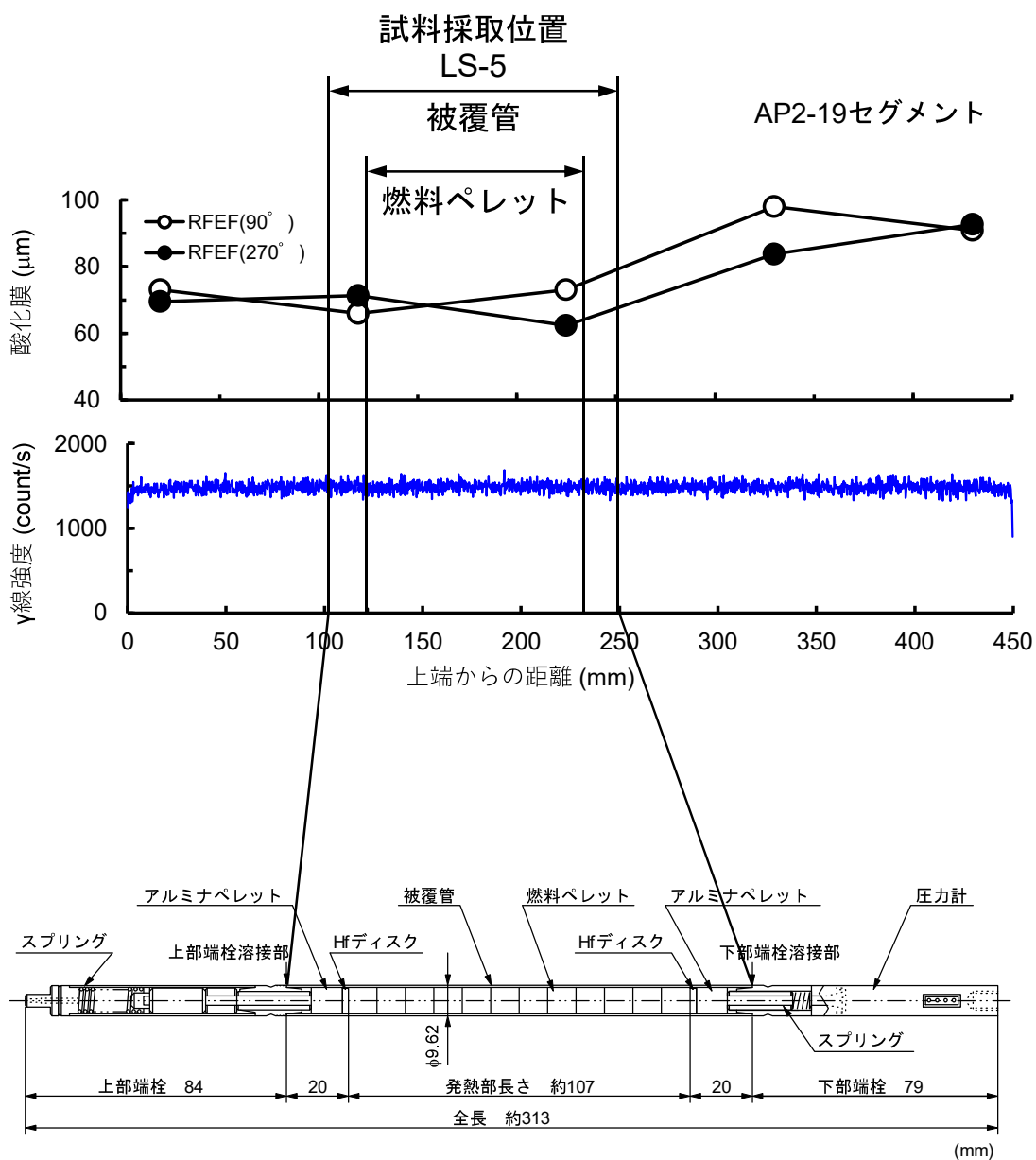


図 4.4.1-1 LS-5 試験燃料棒の構造概略

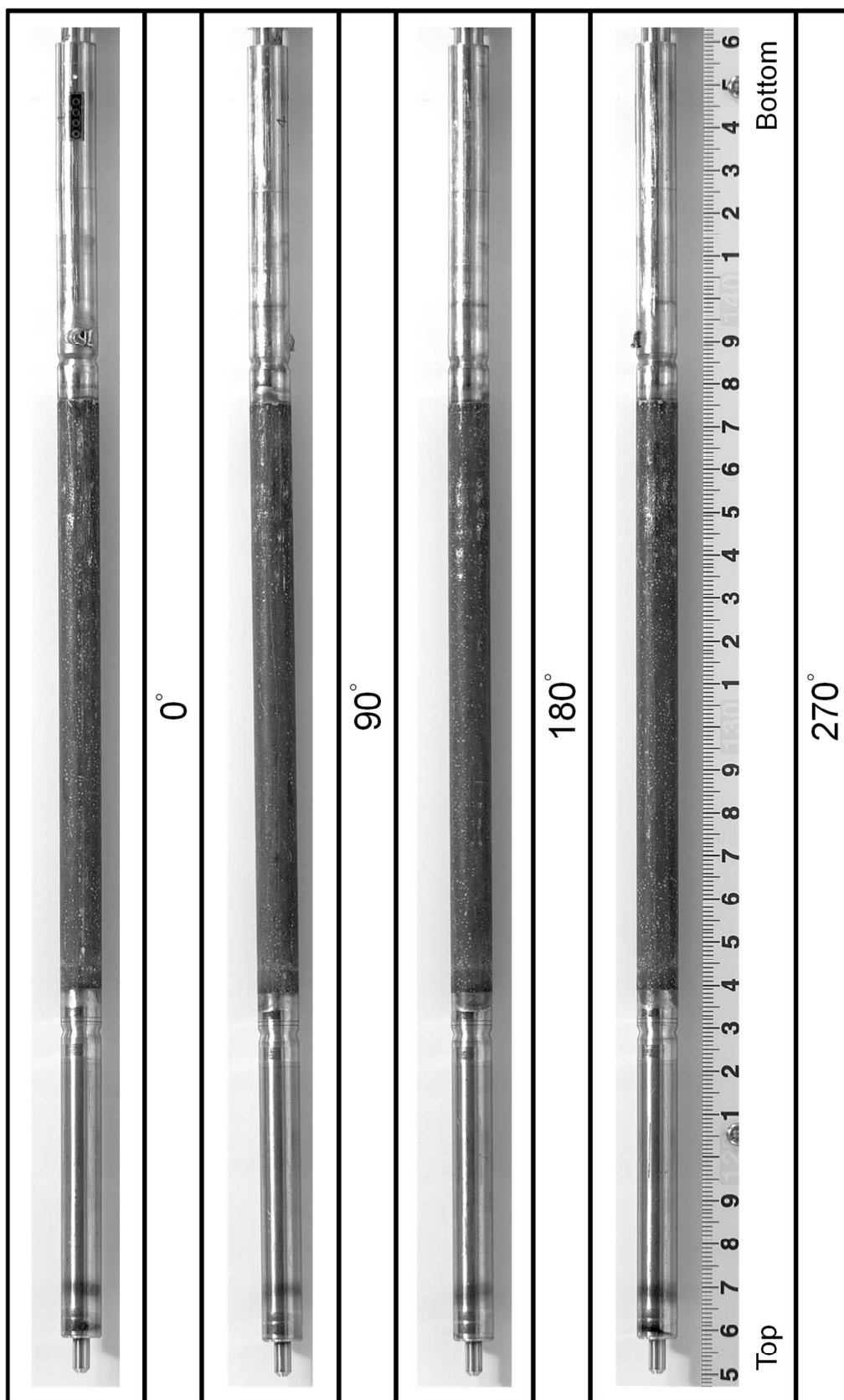


図 4.4.1-2 LS-5 試験燃料棒のパルス照射前外観写真

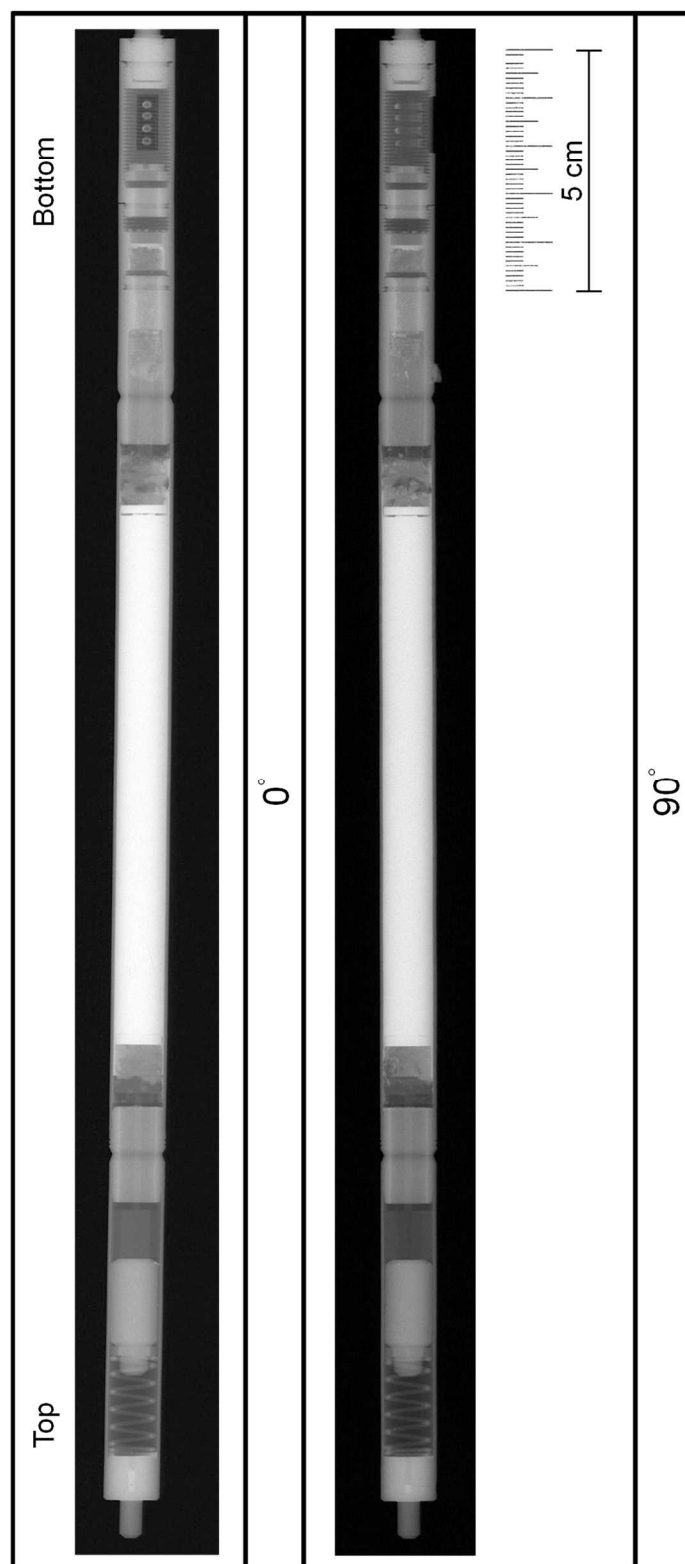


図 4.4.1-3 LS-5 試験燃料棒のパルス照射前 X 線写真

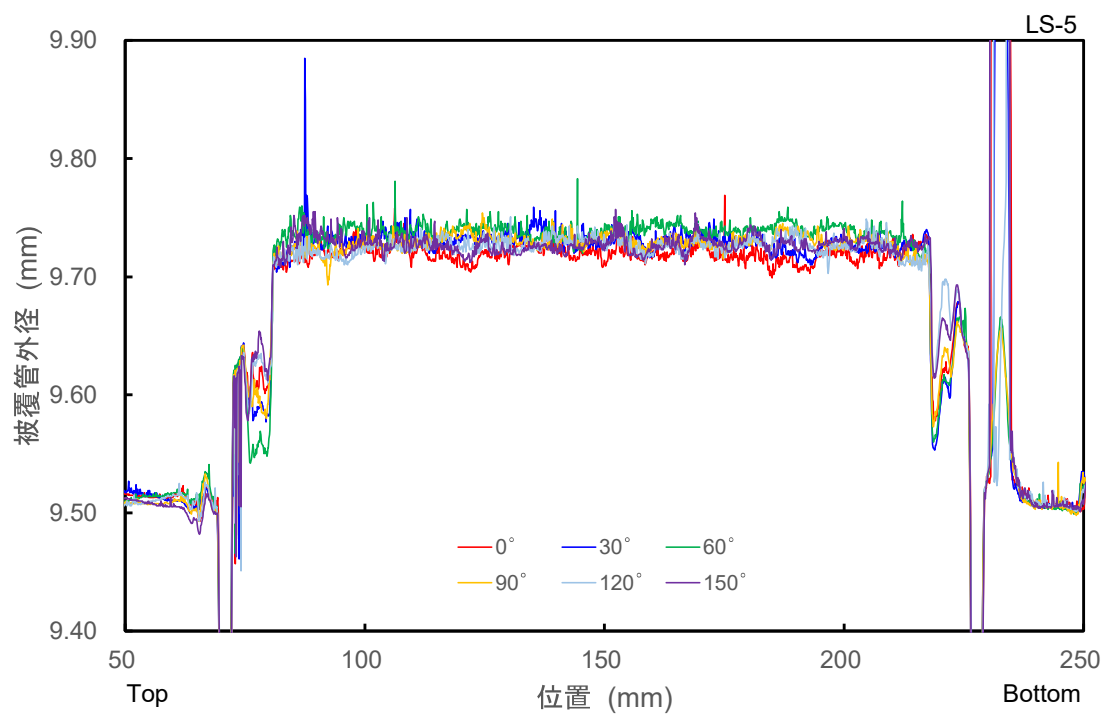


図 4.4.1-4 LS-5 試験燃料棒のパルス照射前寸法測定結果

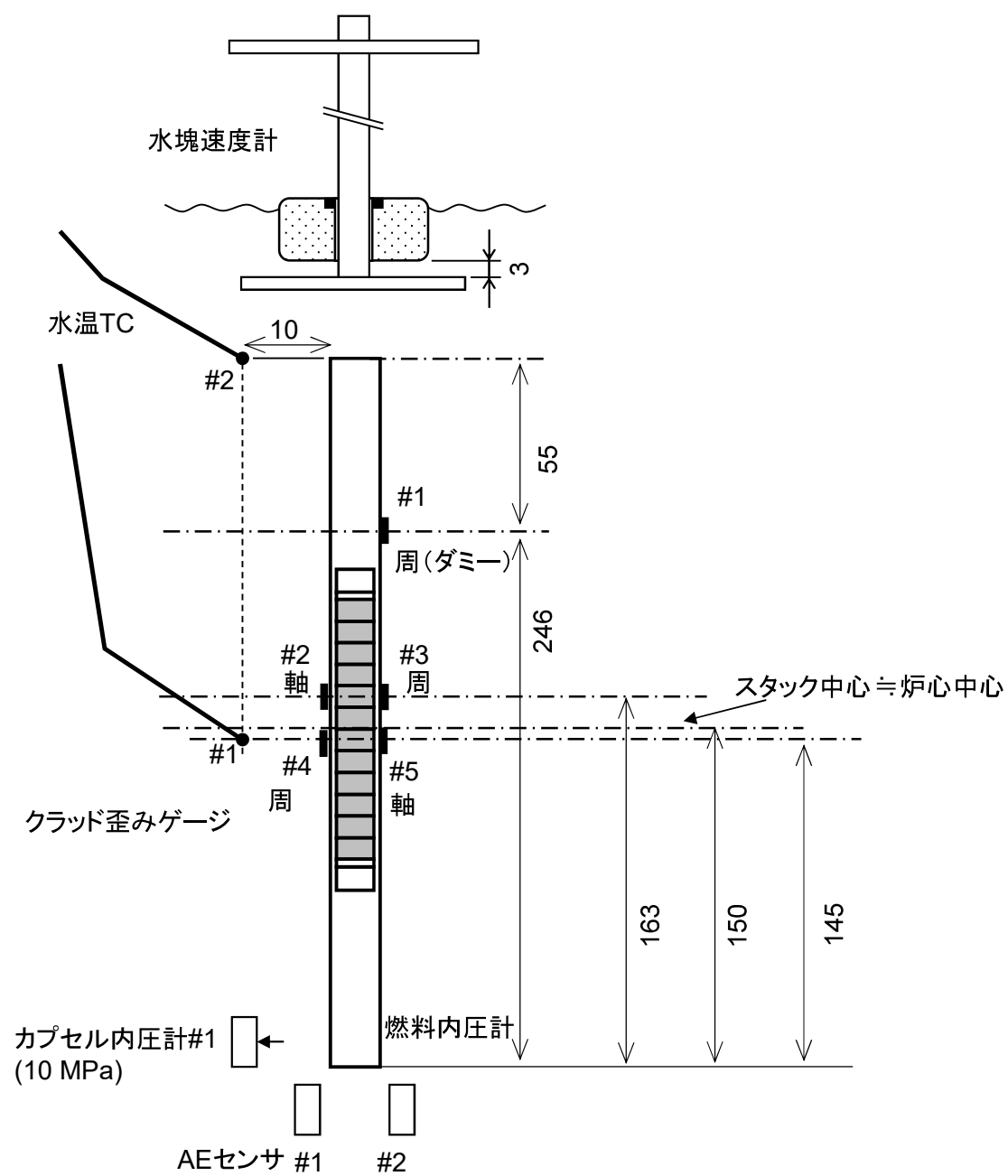


図 4.4.1-5 LS-5 実験における計装取付けの概要

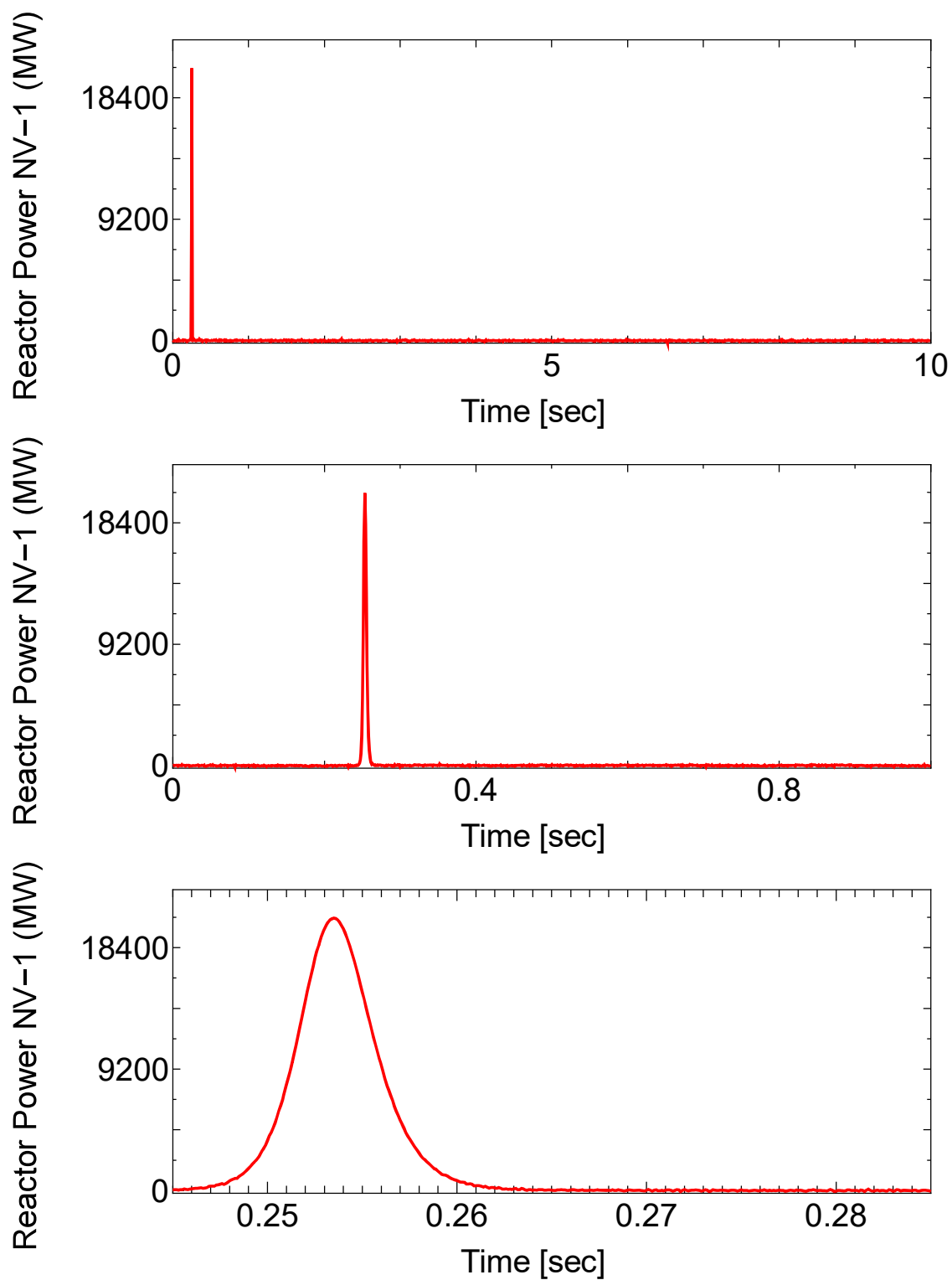


図 4.4.1-6 (1) LS-5 実験における原子炉出力履歴 (#1)

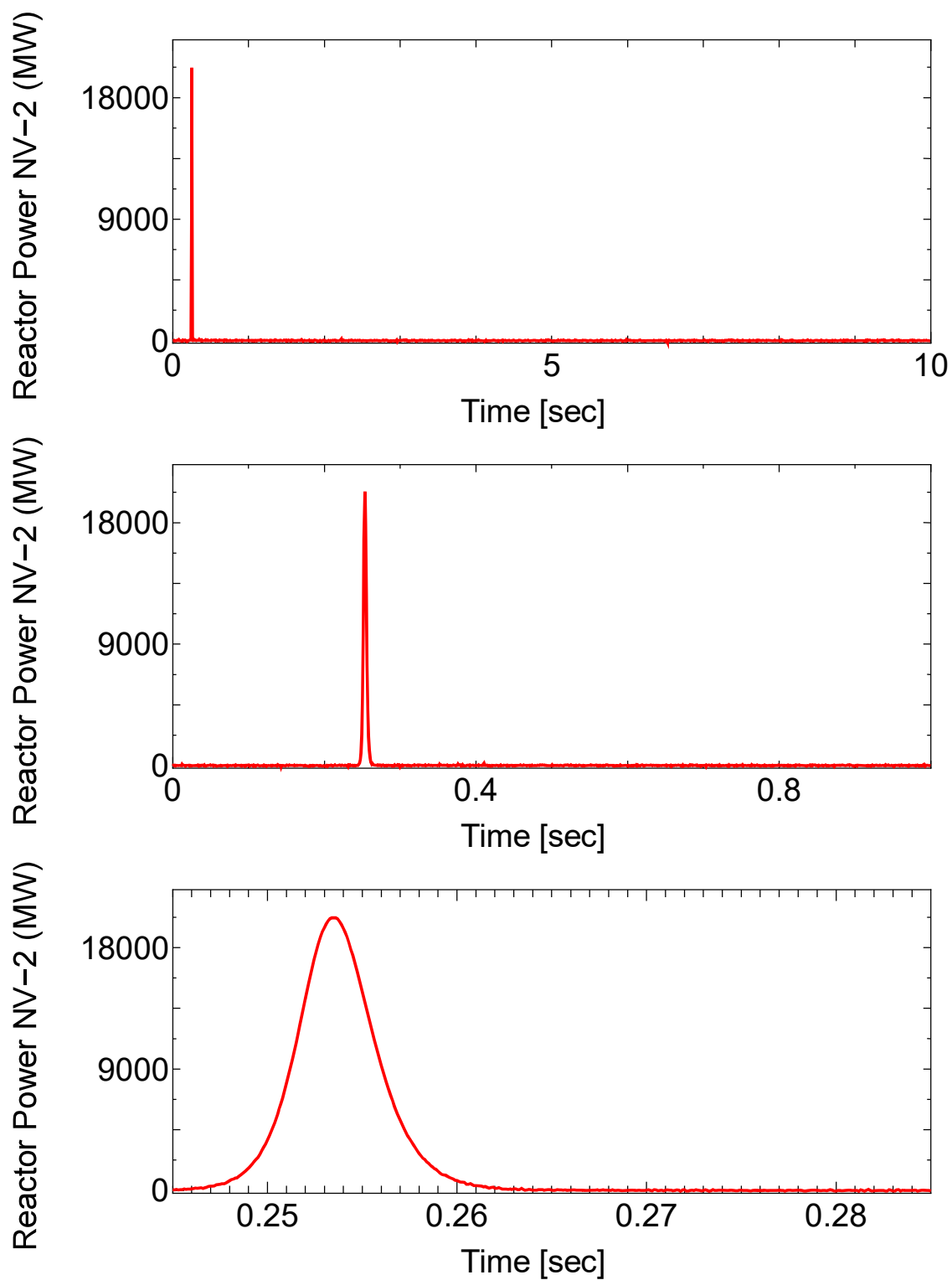


図 4.4.1-6 (2) LS-5 実験における原子炉出力履歴 (#2)

Intg.Reac.Power NVT-1 (MJ) Intg.Reac.Power NVT-1 (MJ) Intg.Reac.Power NVT-1 (MJ)

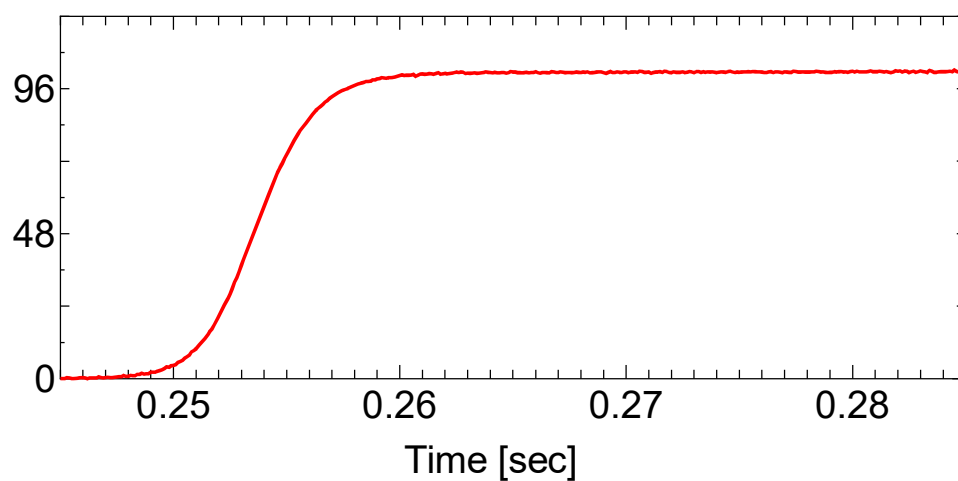
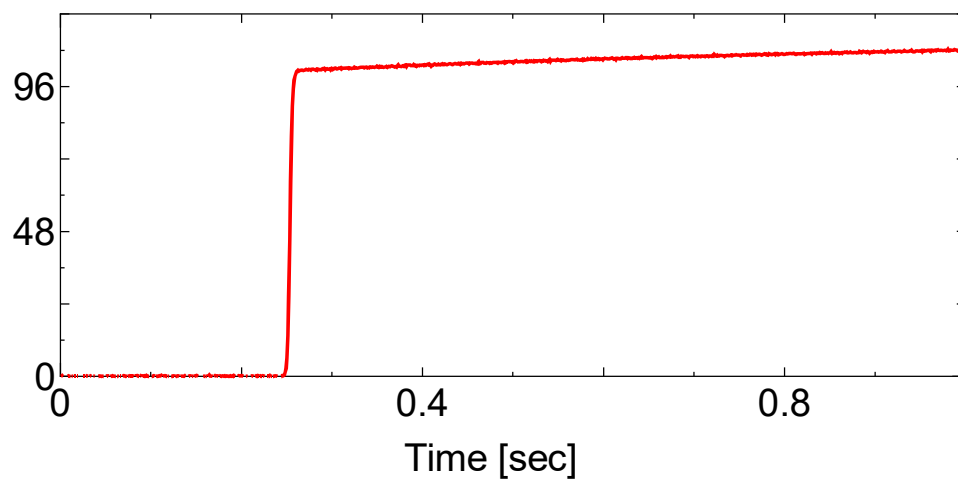
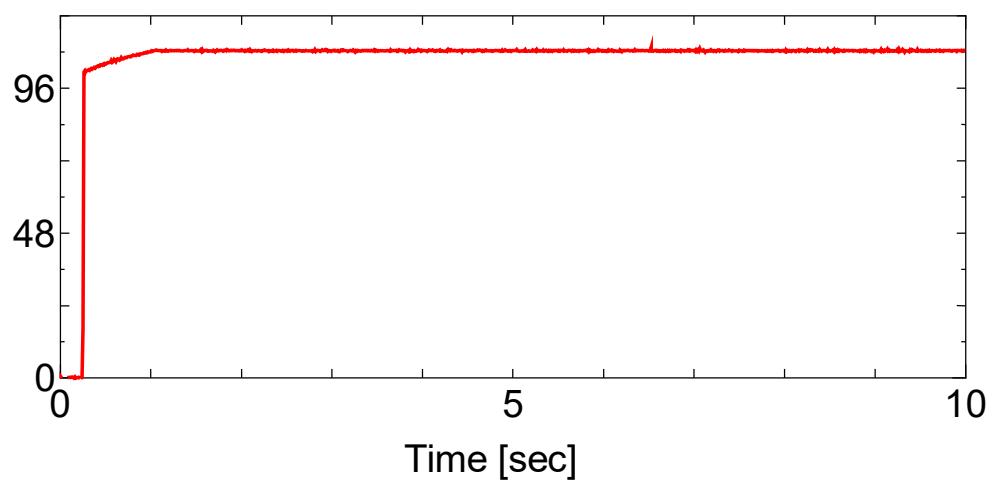


図 4.4.1-6 (3) LS-5 実験における原子炉積分出力 (#1)

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

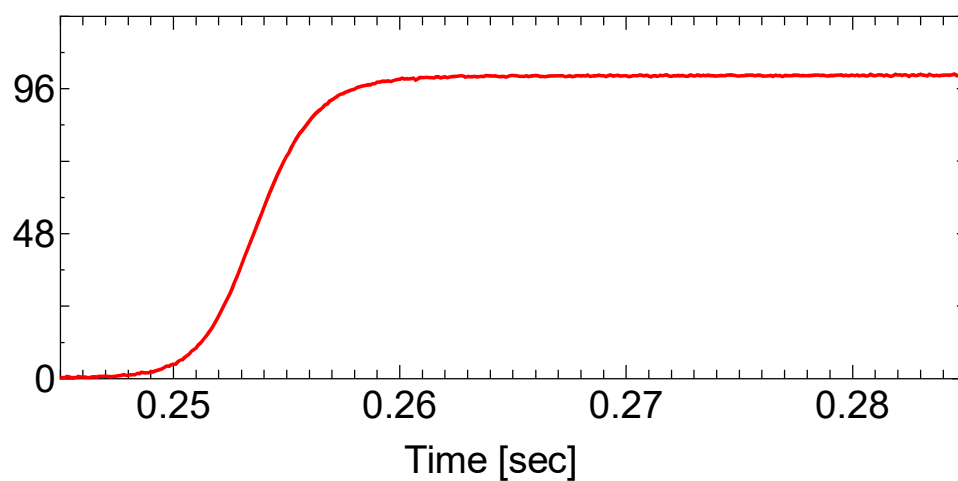
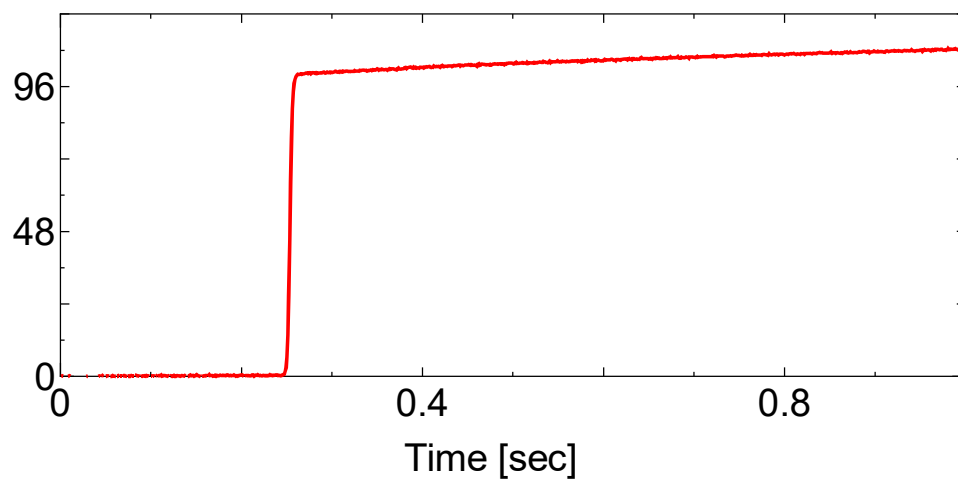
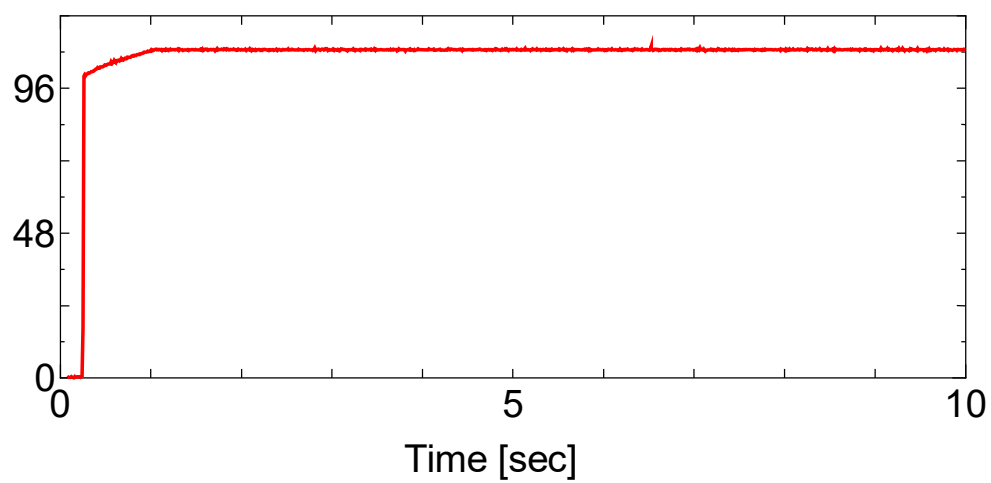
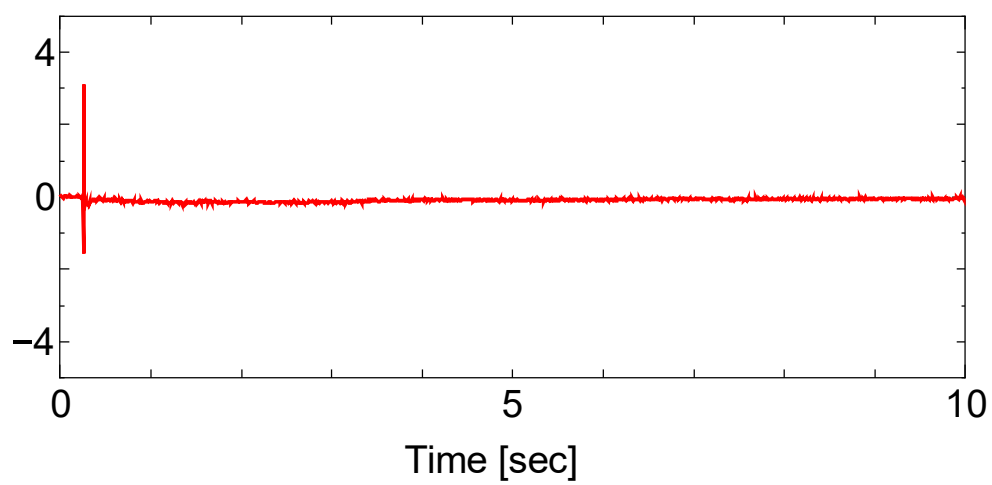
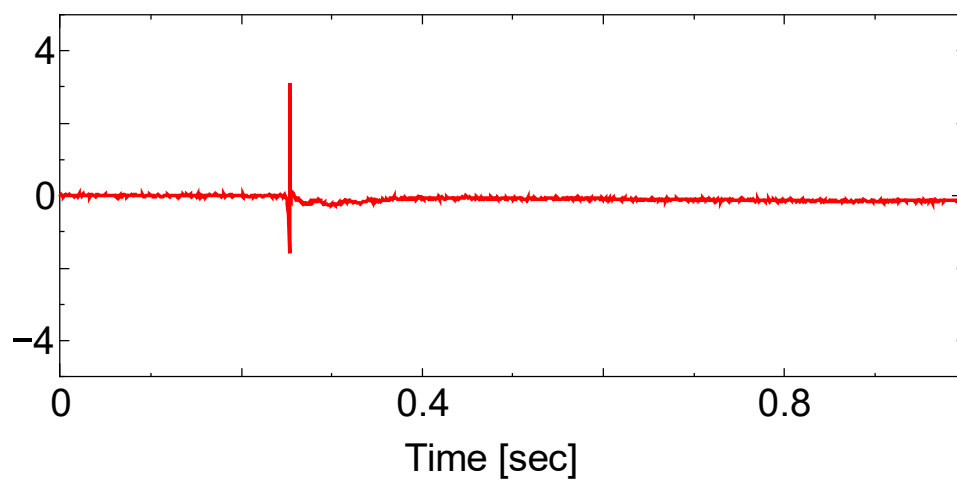


図 4.4.1-6 (4) LS-5 実験における原子炉積分出力 (#2)

Capsule Pressure #1 (MPa)



Capsule Pressure #1 (MPa)



Capsule Pressure #1 (MPa)

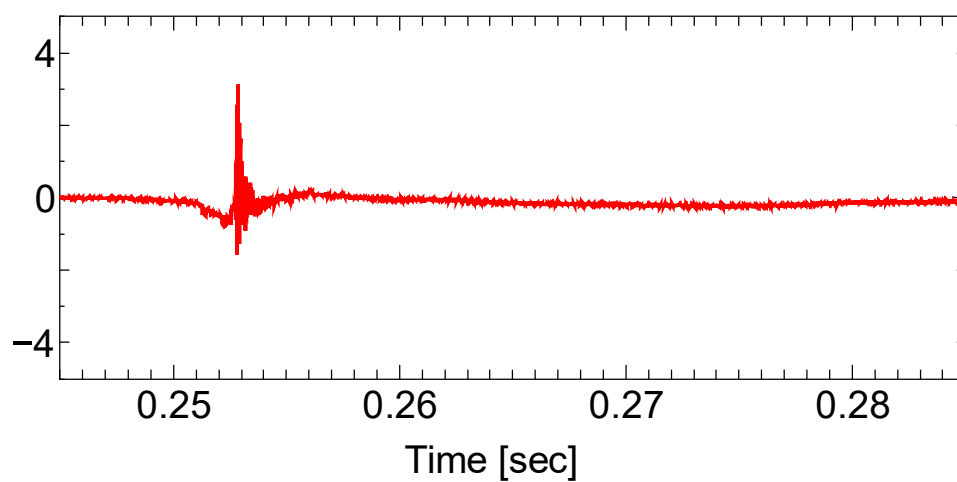


図 4.4.1-6 (5) LS-5 実験におけるカプセル内液相圧力履歴

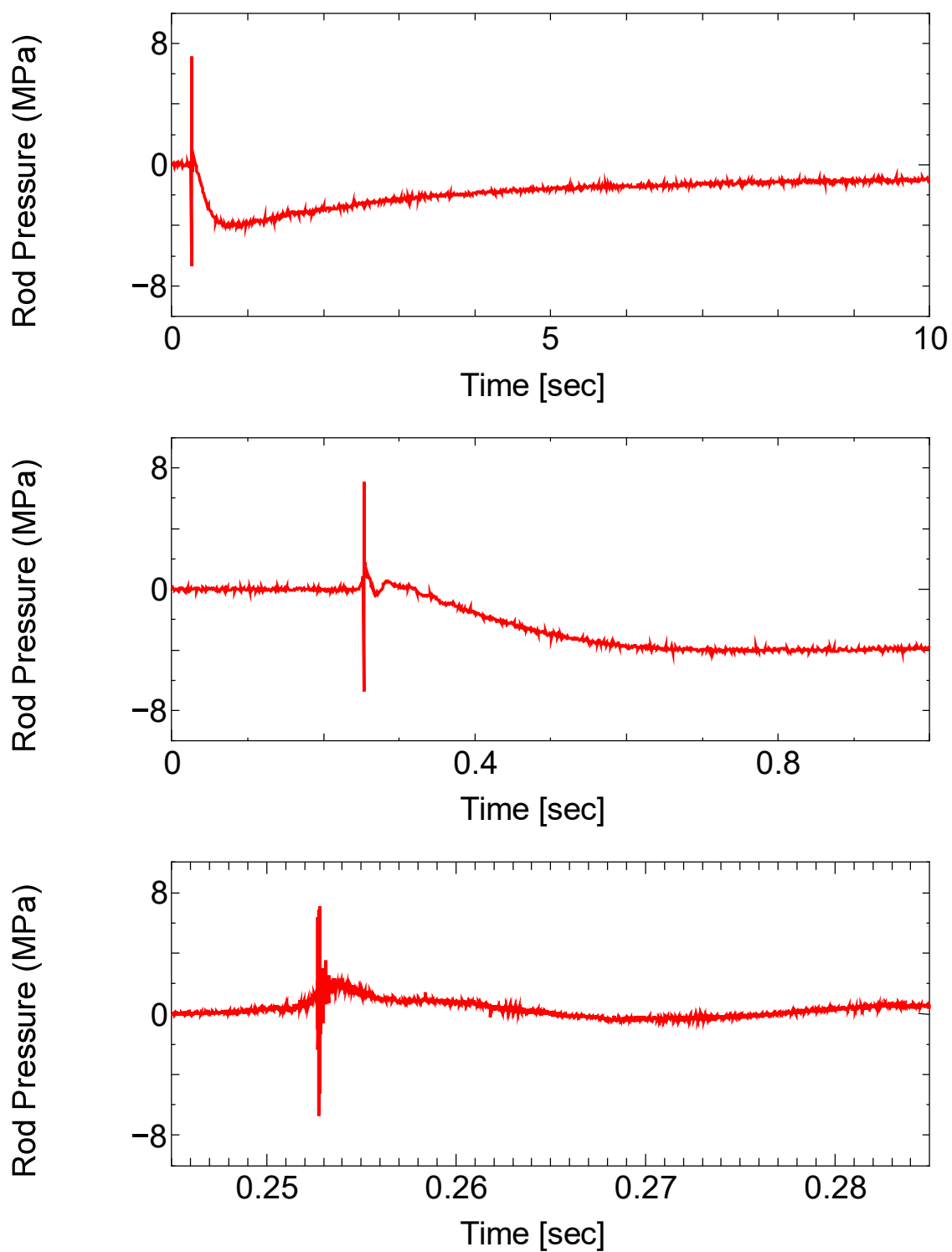


図 4.4.1-6 (6) LS-5 実験における燃料棒内圧履歴

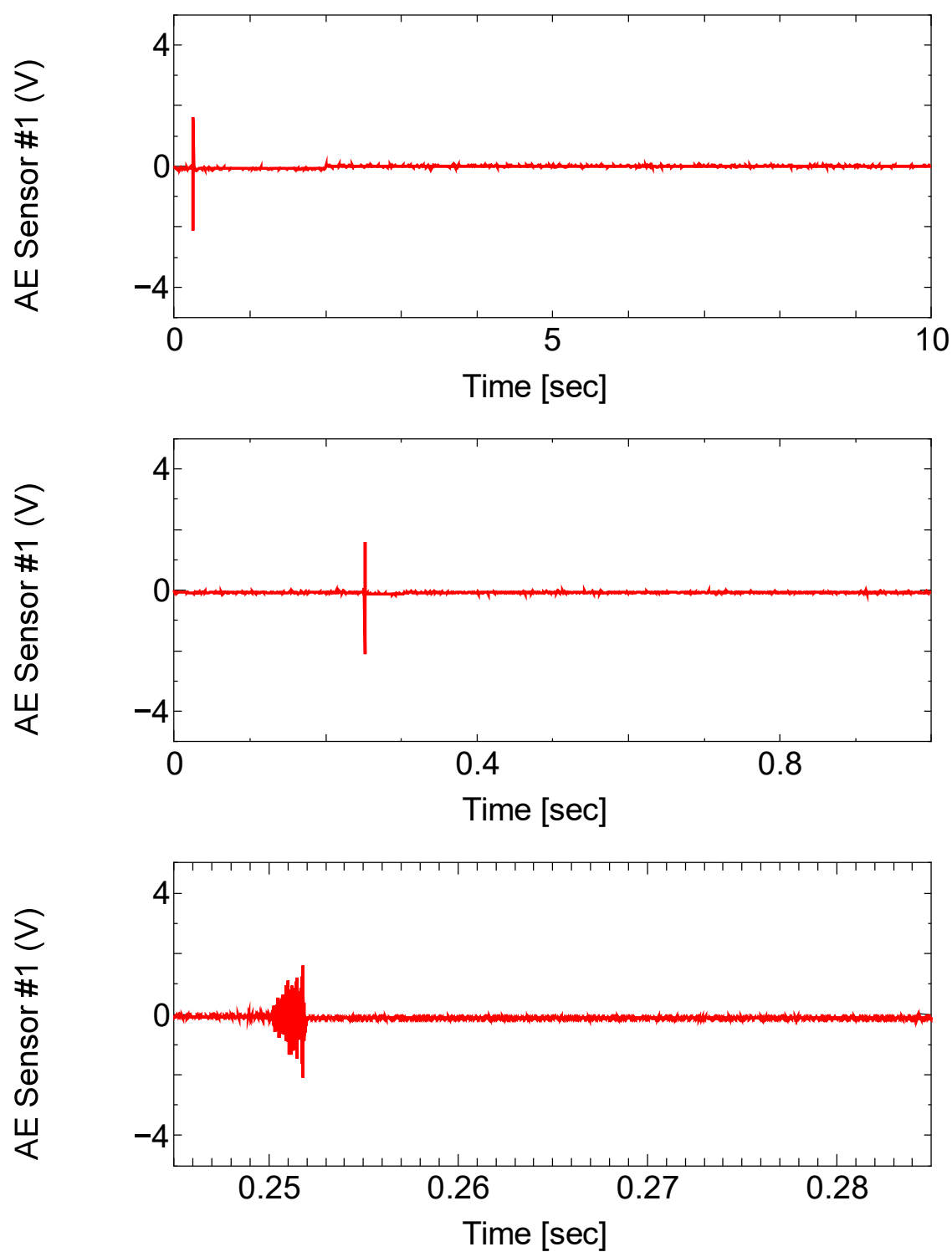


図 4.4.1-6 (7) LS-5 実験における AE センサ出力履歴 (#1)

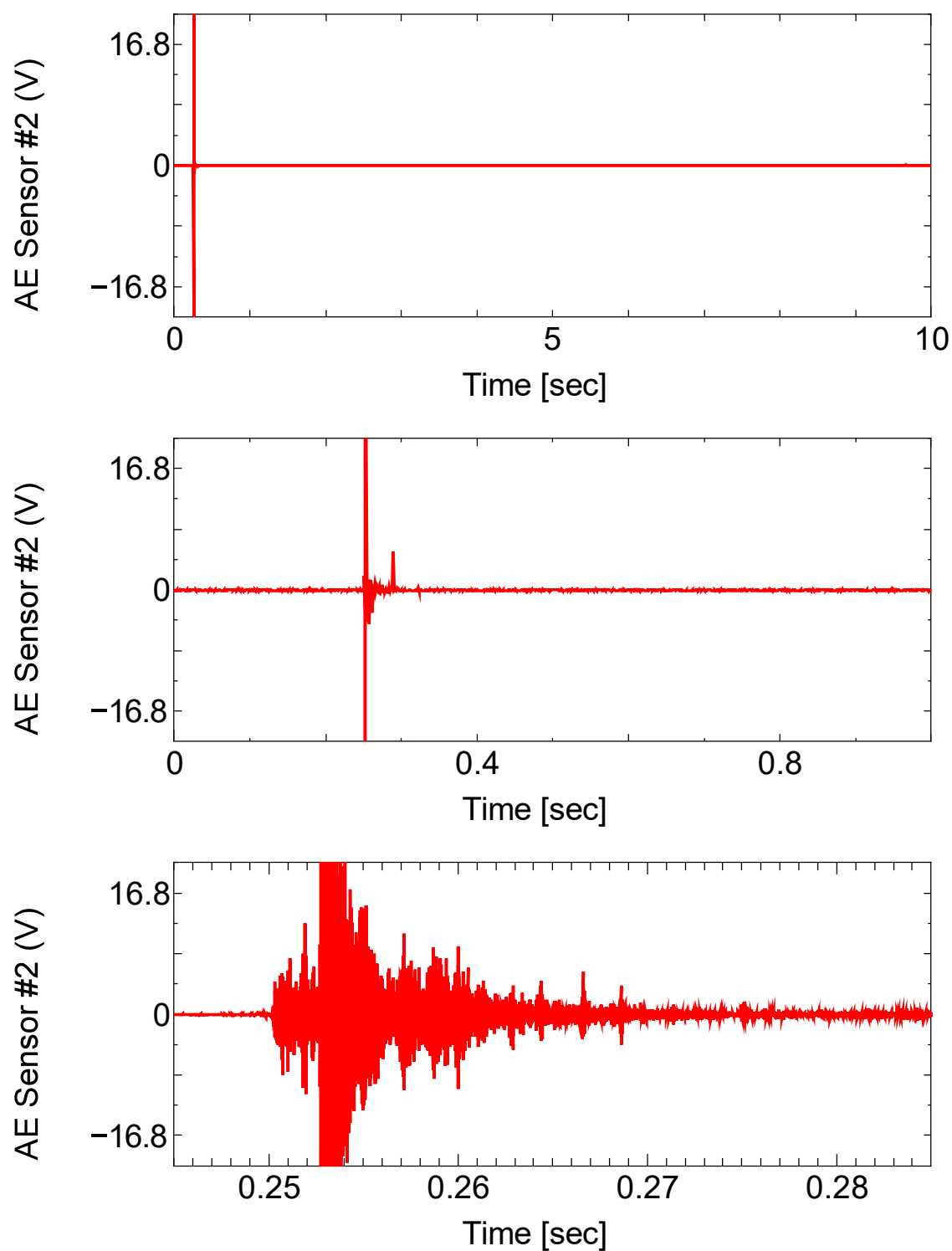


図 4.4.1-6 (8) LS-5 実験における AE センサ出力履歴 (#2)

Water Column Velocimeter (V) Water Column Velocimeter (V) Water Column Velocimeter (V)

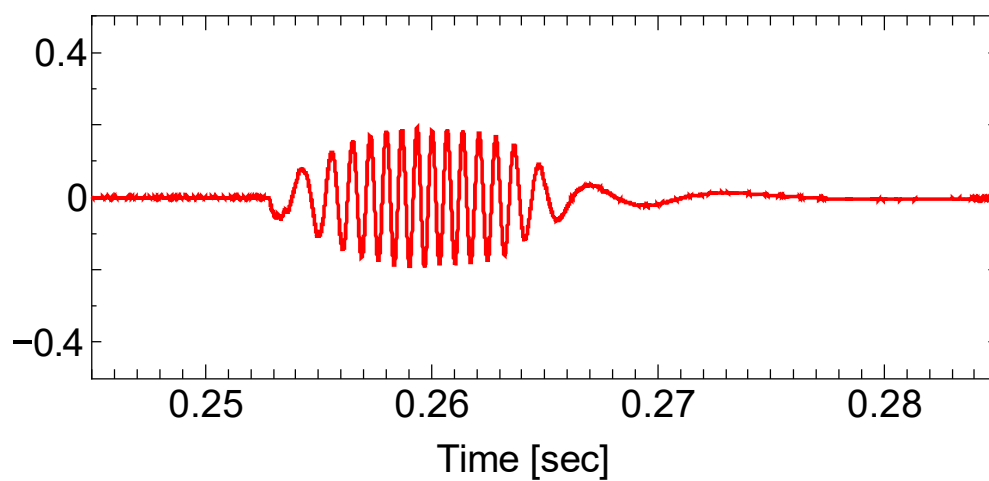
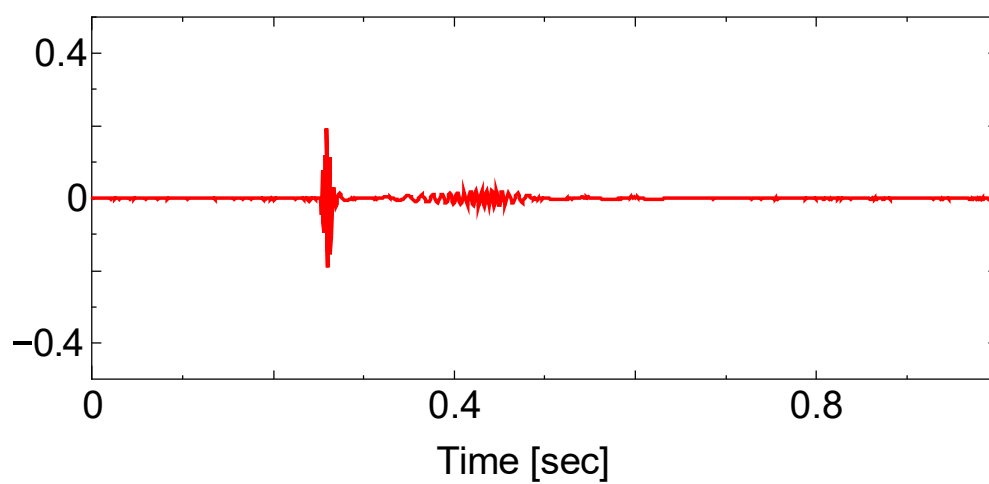
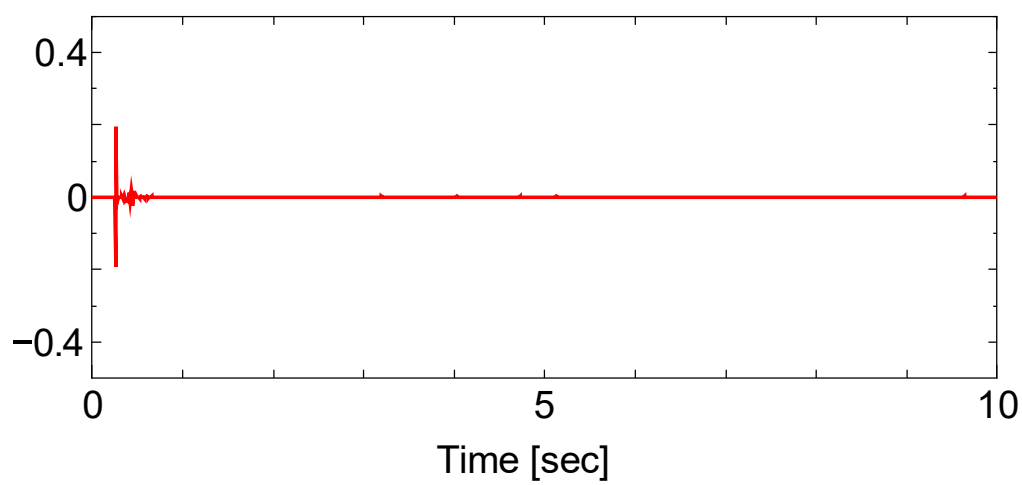


図 4.4.1-6 (9) LS-5 実験における水塊速度計出力履歴

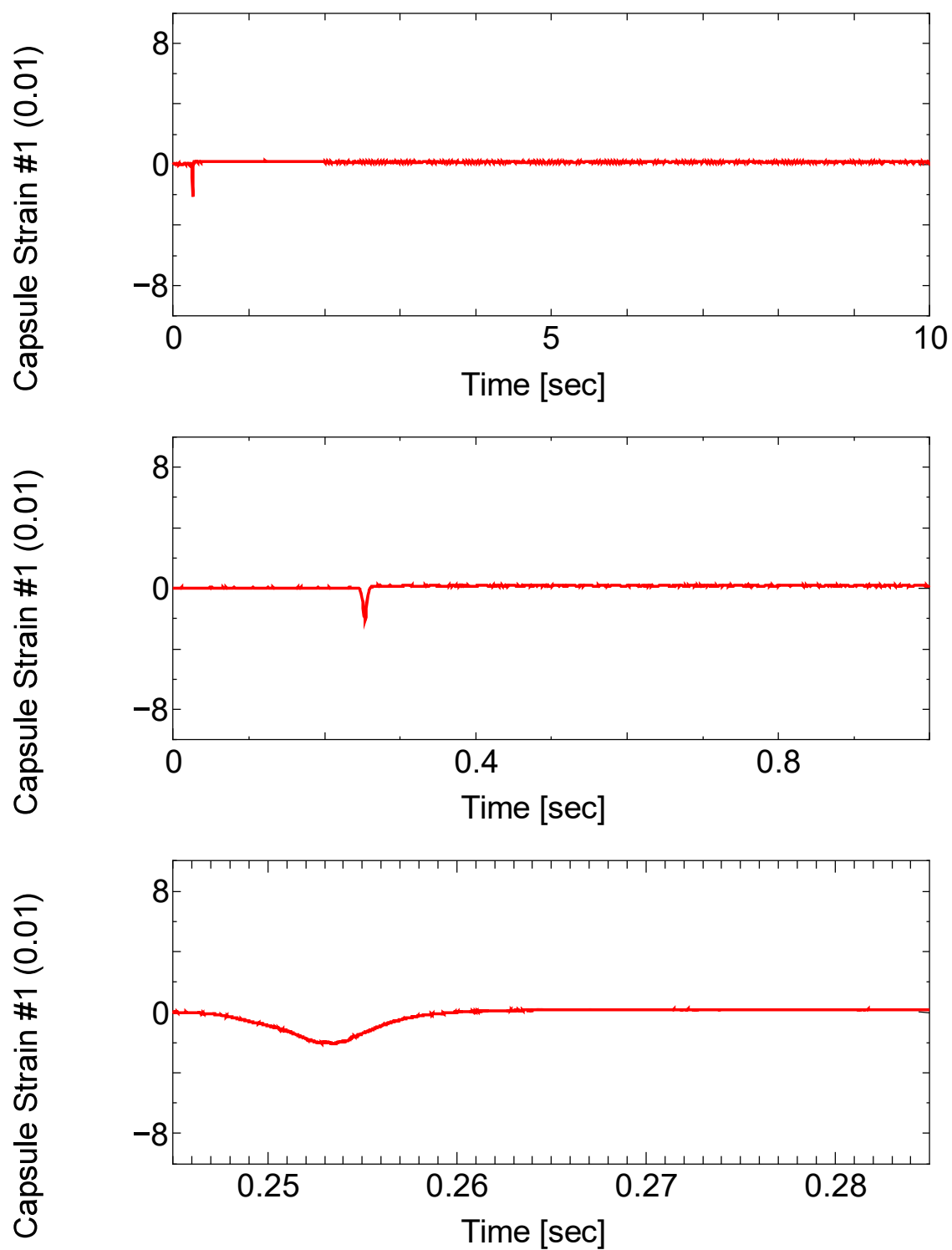


図 4.4.1-6 (10) LS-5 実験におけるカプセル外面歪み履歴

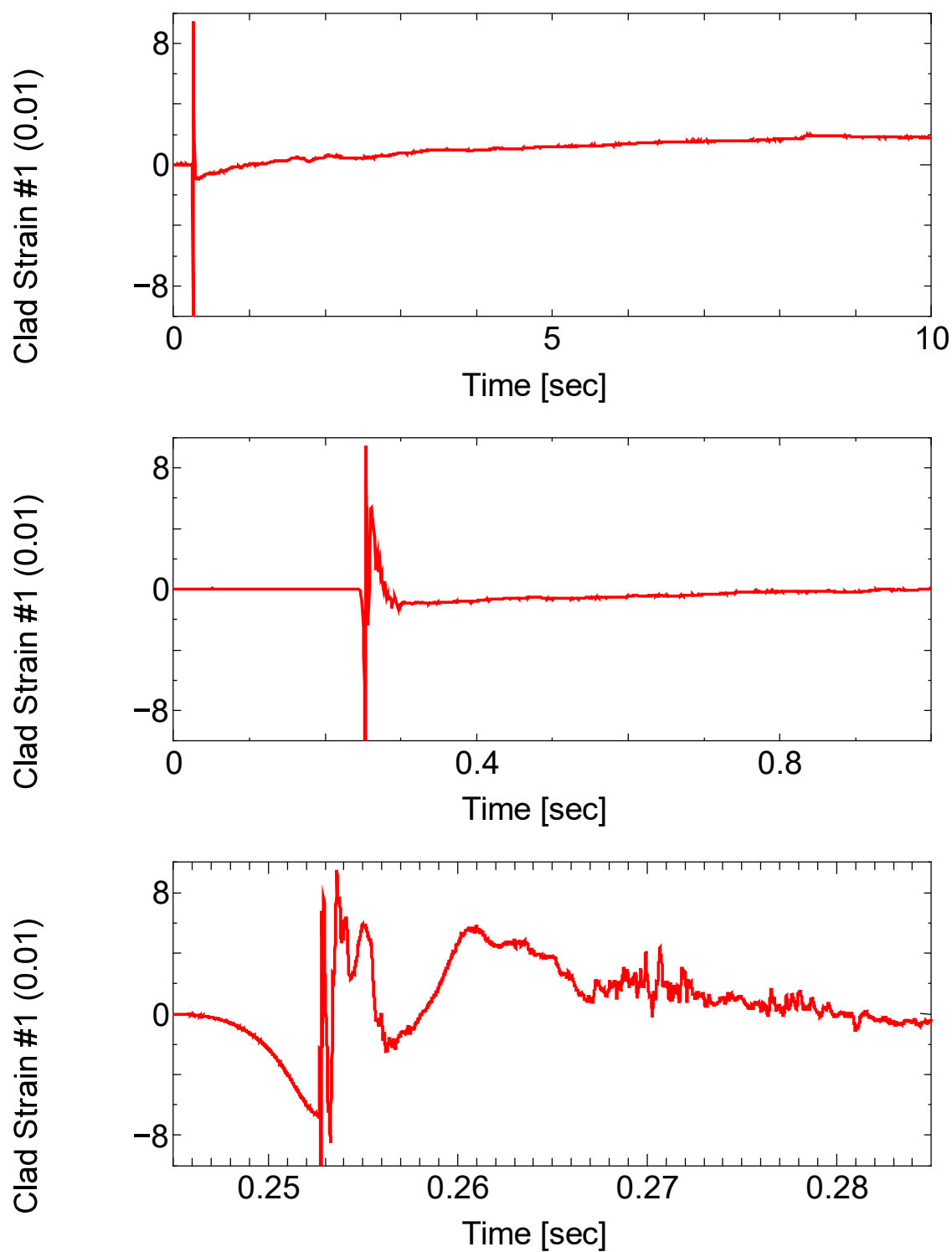


図 4.4.1-6 (11) LS-5 実験における軸方向クラッド歪みゲージ (#1)

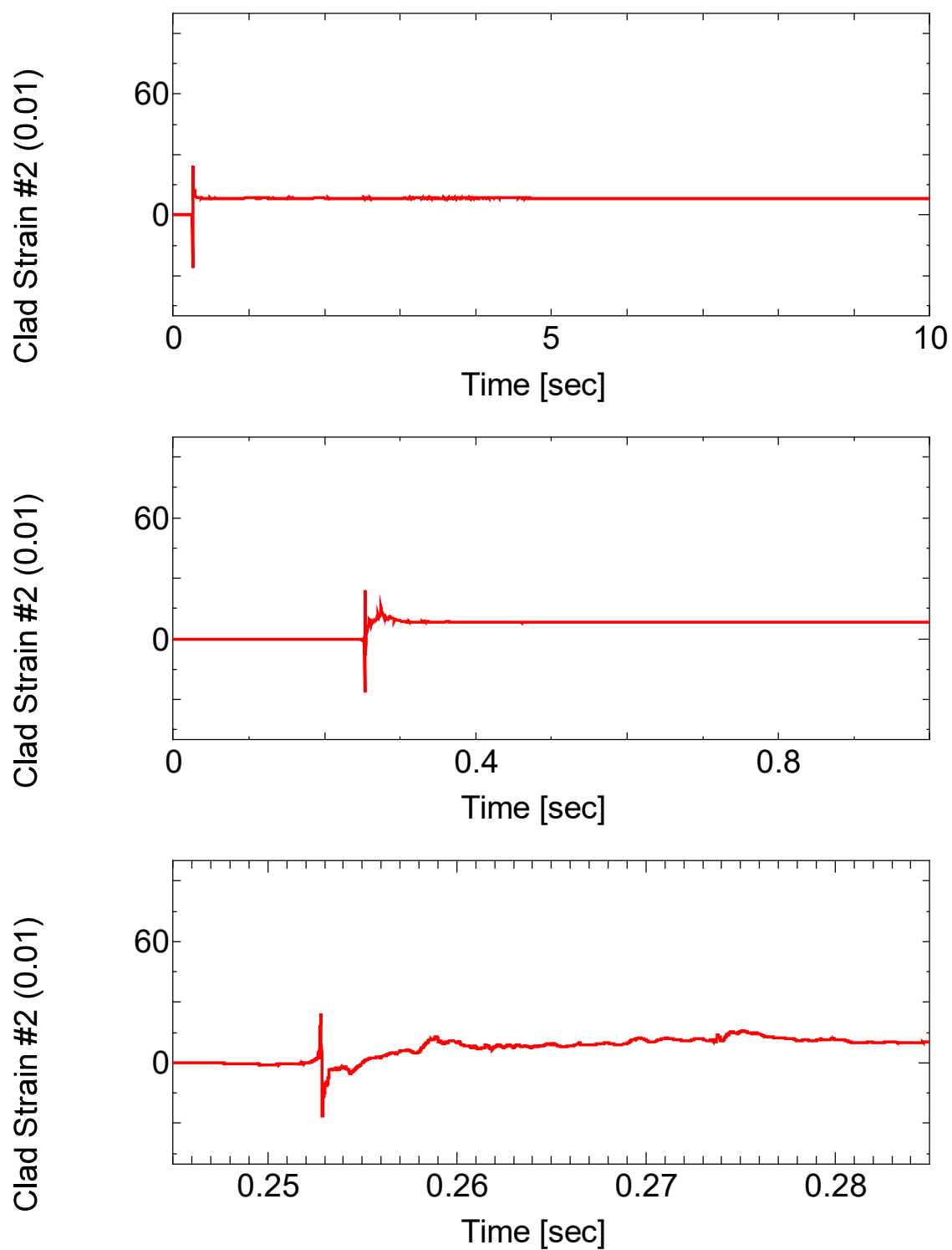


図 4.4.1-6 (12) LS-5 実験における軸方向クラッド歪みゲージ (#2)

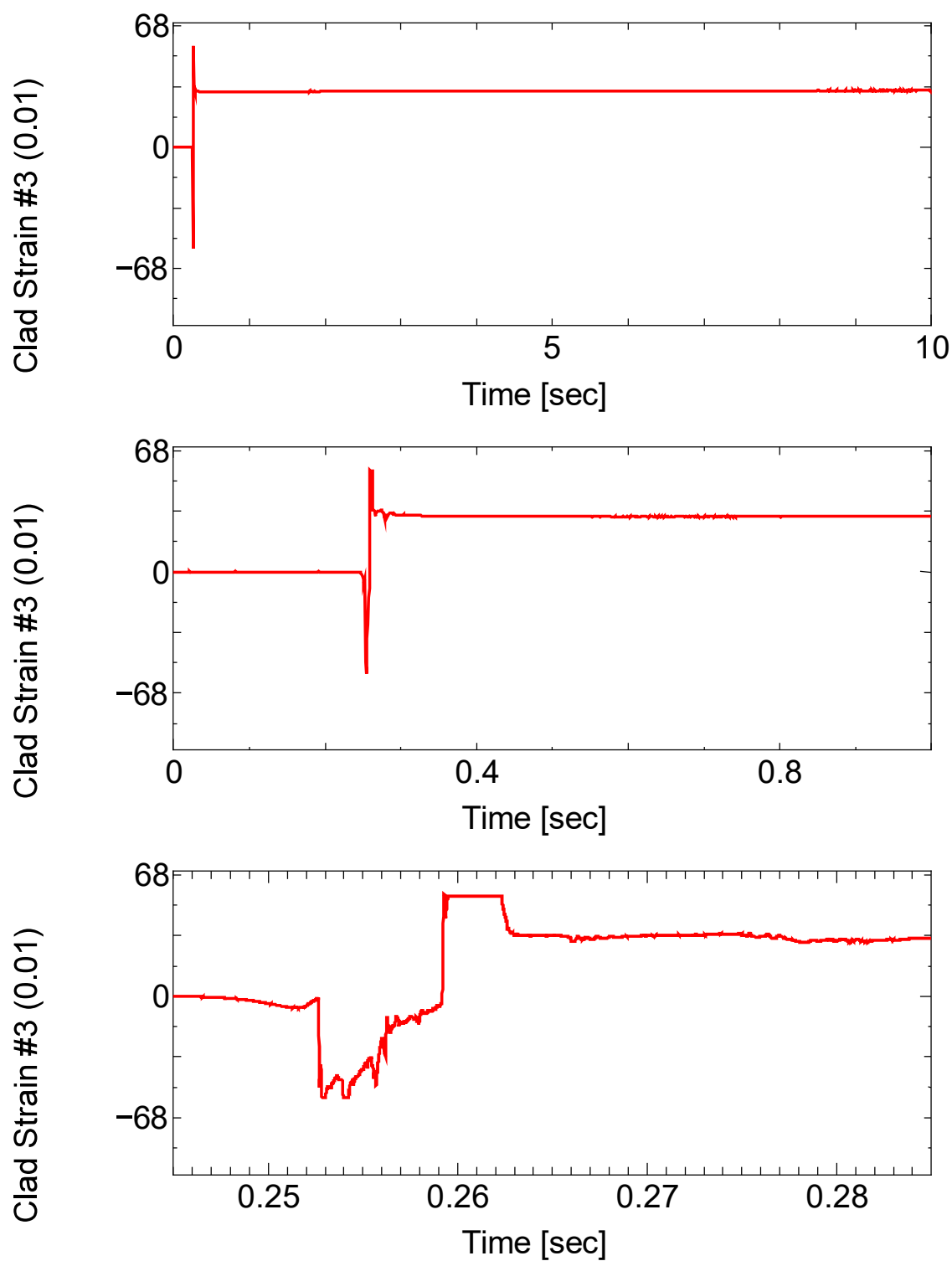


図 4.4.1-6 (13) LS-5 実験における周方向クラッド歪みゲージ (#3)

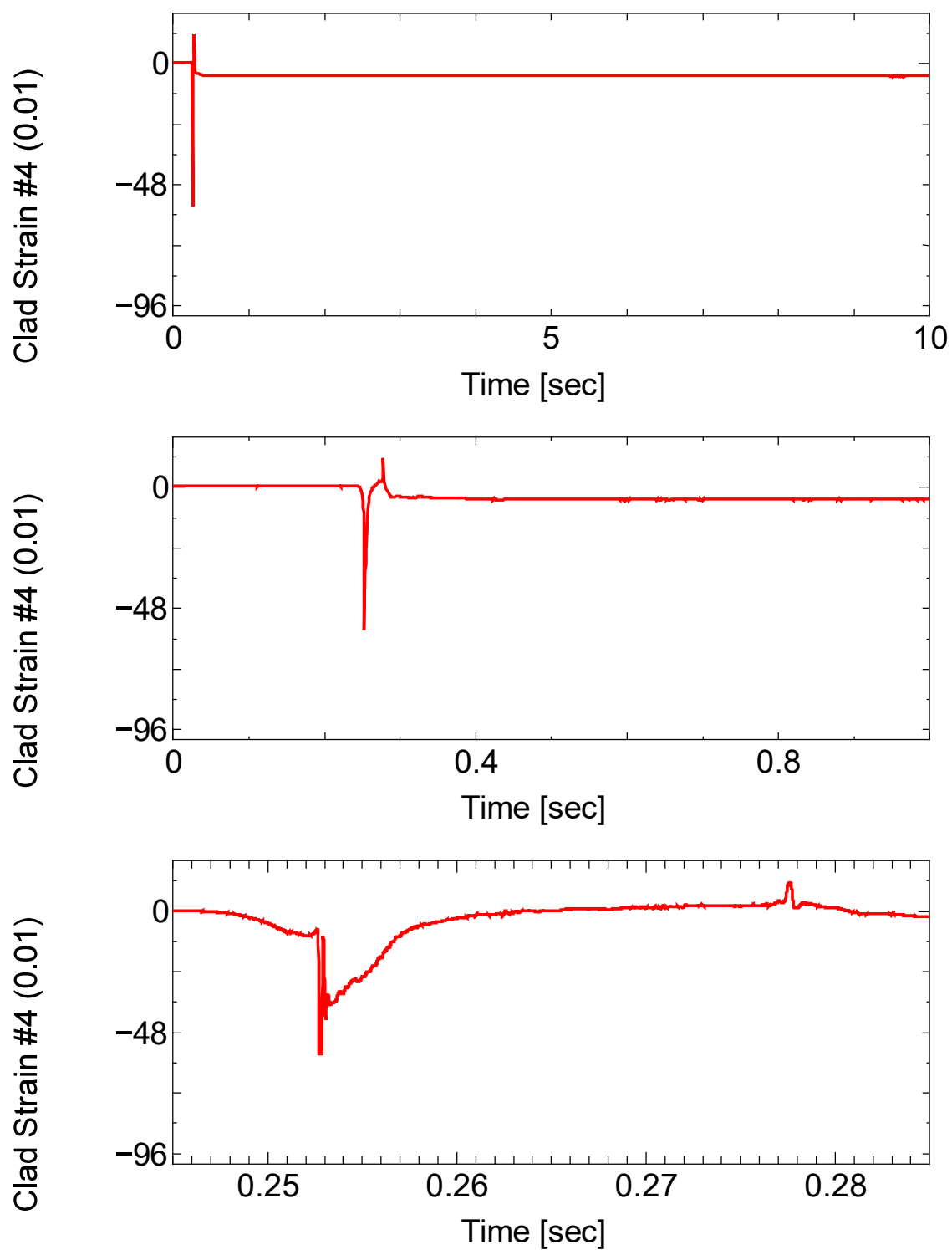


図 4.4.1-6 (14) LS-5 実験における周方向クラッド歪みゲージ (#4)

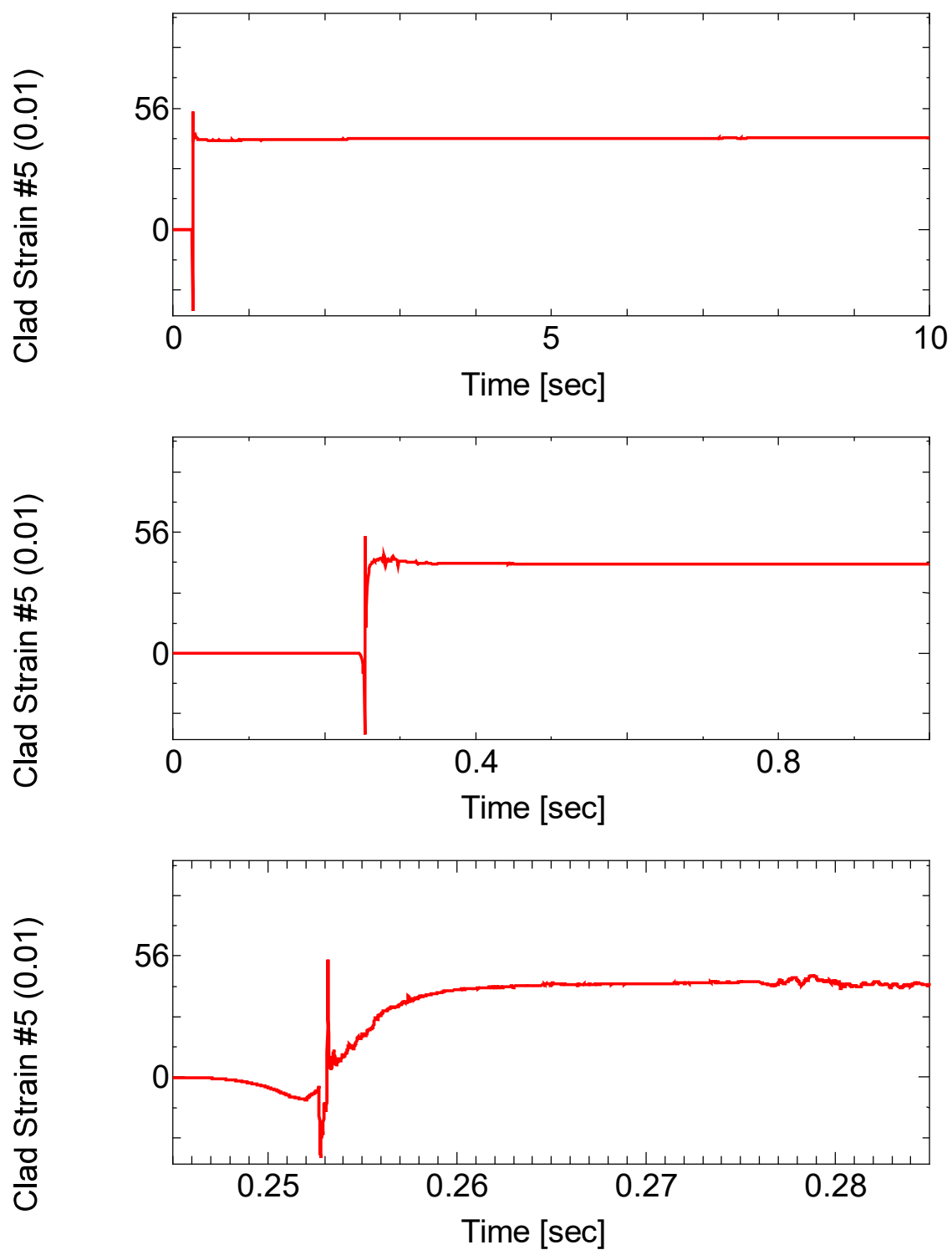
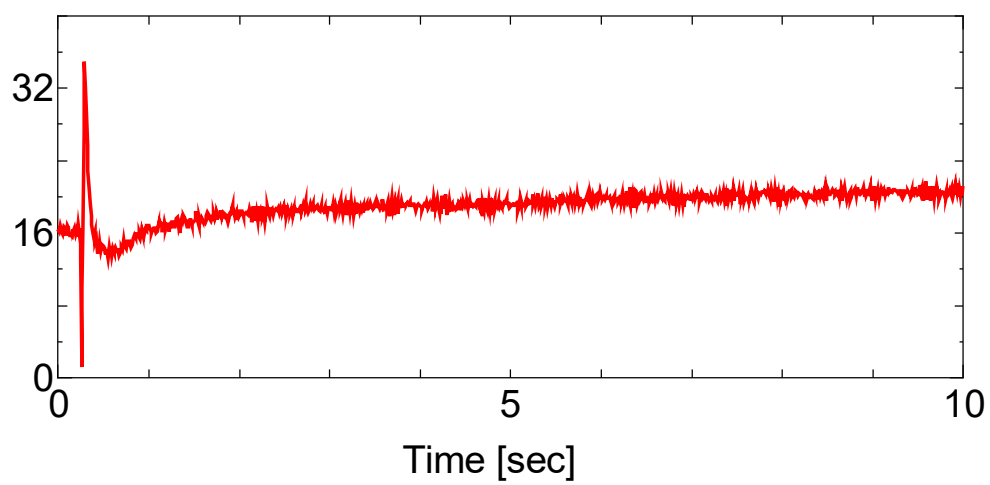
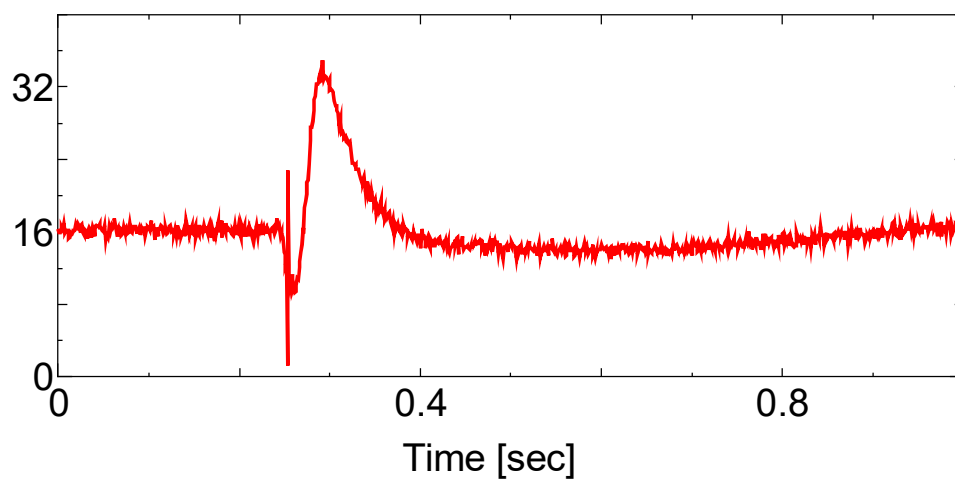


図 4.4.1-6 (15) LS-5 実験における軸方向クラッド歪みゲージ (#5)

Water Temperature #1 (C)



Water Temperature #1 (C)



Water Temperature #1 (C)

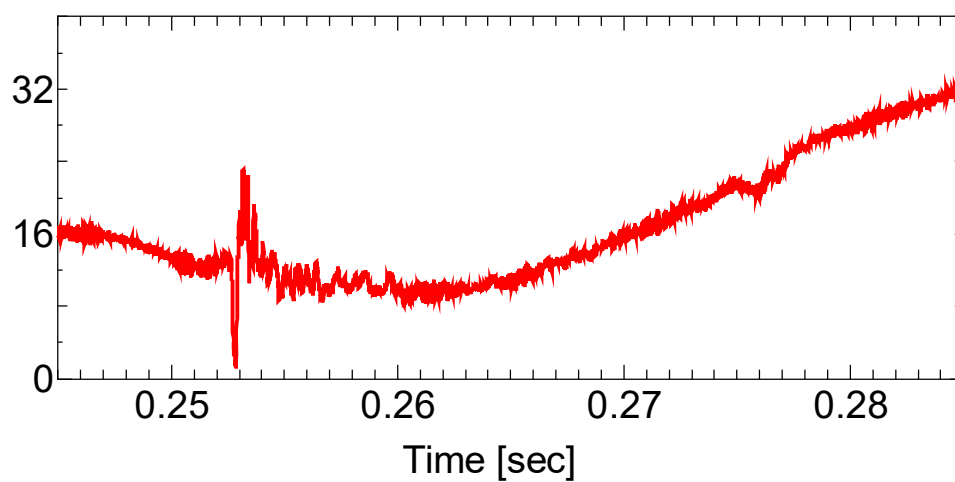
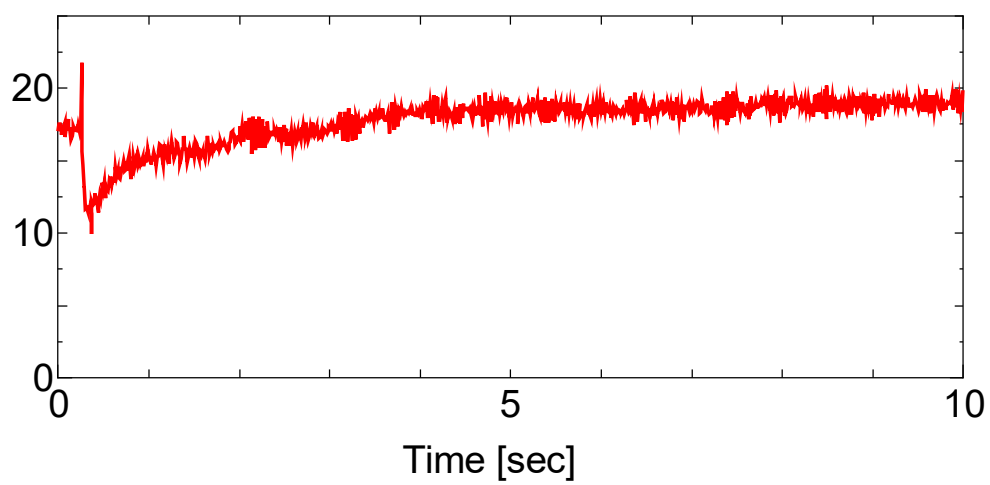
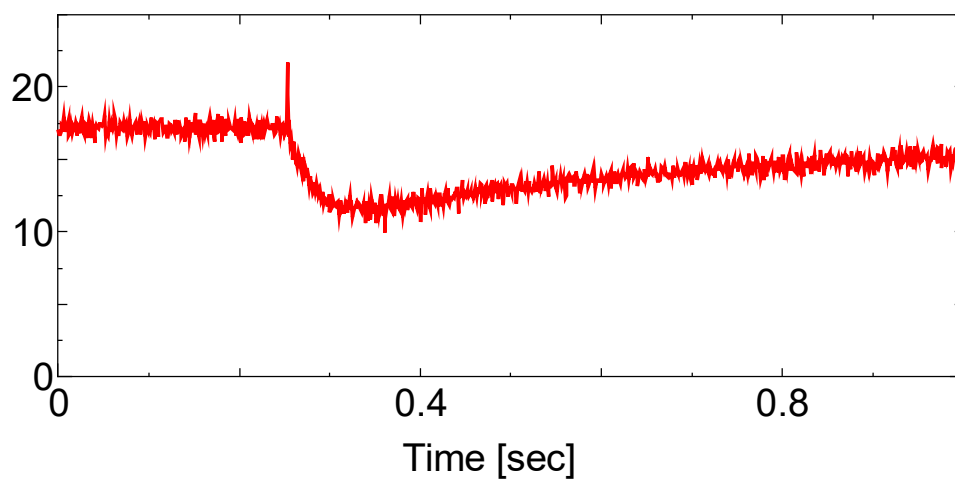


図 4.4.1-6 (16) LS-5 実験における冷却水温履歴 (#1)

Water Temperature #2 (C)



Water Temperature #2 (C)



Water Temperature #2 (C)

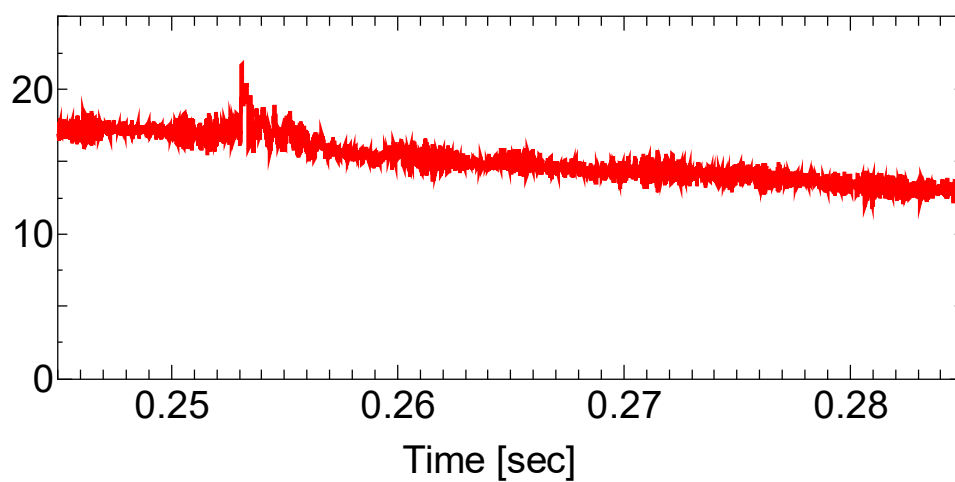


図 4.4.1-6 (17) LS-5 実験における冷却水温履歴 (#2)

4.4.2 CN-2 実験

高燃焼度 PWR-MOX 燃料を対象とした高温・高圧条件下での反応度事故模擬実験 CN-2 実験を令和 2 年 12 月 17 日に実施した。燃料エンタルピー増分のピーク値 560 J/g (134 cal/g) の実験条件に対し、実験時過渡データから燃料破損の発生を示す信号が計測され、照射後の外観観察から燃料の破損が確認された。

(1) 試験燃料棒

試験燃料は、表 4.1-1 に示す AP2-15 燃料セグメント (フランス・シノン B3 PWR 照射、M5 被覆 MOX 燃料) から採取した。

図 4.4.2-1 に燃料セグメントからの採取位置、加圧封入用上下部端栓及び当該端栓取付後の燃料棒の構造を示す。実験時に燃料ペレットから放出する FP ガスのプレナム移行を減らすため、可能な限りプレナム部の空間体積が小さくなるよう燃料棒を設計した (プレナム部の空間体積約 0.8 cc)。試験燃料棒加工時に、燃料被覆管内に室温で約 5 MPa の Ar-He 混合ガス (Ar97%、He3%) を封入した。モックアップ試験として模擬燃料棒に対し加圧封入後ガスパンクチャを実施した結果、設定圧力値 5 MPa よりも約 0.2 MPa 小さい圧力値となった。この圧力値低下の要因の一つとしては、加圧封入工程の一部である上部端栓の封入孔溶接の際に、溶接孔周辺のガスの温度が上昇することによってガス圧が上昇し、燃料棒内のガス量が減少することが考えられる。従って、CN-2 燃料棒の加圧封入後の内圧は、室温において 5 MPa より幾分か小さくなっている可能性が高い。スタック長はペレット 4 個分で、X 線写真撮影に基づく測定によれば約 47 mm であった。ガンマ線強度分布がほぼフラットであることから、試験燃料の平均燃焼度はセグメント燃焼度と同じ約 64 GWd/t と評価した。試験採取範囲における被覆管外面酸化膜厚さの平均値は約 10 μm と評価した。

パルス照射前の試験燃料棒に対して実施した外観観察、X 線写真撮影、寸法測定の結果をそれぞれ図 4.4.2-2 から図 4.4.2-4 に示す。いずれの結果においても、パルス照射実験において問題となり得る傷、欠陥、扁平化、曲がりなどは見られなかった。

(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 :	B-I 型 (高温・高圧用)
パルス照射時冷却水条件 :	262~282 °C、6.8 MPa の静止水
試験燃料棒内予加圧値 (室温) :	約 5 MPa (Ar97%、He3%混合ガス)
投入反応度 :	\$3.99
燃料エンタルピー初期値 (基準温度 20°C) :	71 J/g (17 cal/g)
燃料エンタルピー増分ピーク値 :	560 J/g (134 cal/g)

計装項目を以下に示す。また、図 4.4.2-5 に計装取付けの概要を示す。

カプセル内圧計 2 箇所（気相: #1, 液相: #2）

カプセル内熱電対 4 箇所（気相: #1, 液相: #1, #2, #3）

被覆管表面熱電対 1 箇所

AE センサ（燃料破損検出用）

(3) 冷却水昇温条件

パルス照射に先立ち、カプセル内の冷却水を電気ヒータにより昇温した。図 4.4.2-6 (1) 及び(2)に昇温中の温度及び圧力の履歴をそれぞれ示す。電気ヒータの通電はパルス照射時刻の約 3.6 時間前に開始し、通電開始から約 2.5 時間後に冷却水温度は目標温度に到達した。その後、電気ヒータ出力を制御して目標温度を約 1.2 時間維持した。

(a) カプセル内温度の履歴

昇温過程におけるカプセル内温度は位置及び液相／気相間で若干異なり、気相部は液相よりも温度が低い傾向、液相部ではカプセル下部（カプセル内液相温度#3）で温度が低い傾向が見られた。また、液相部では、カプセル内液相温度#2 が#3 に比べ僅かに高い状態で推移した。

なお、昇温開始時の水位はカプセル内液相部熱電対#1 位置よりも下だが、冷却水の熱膨張により、最終的な水位は、図 4.4.2-5 に示すようにカプセル内気相部熱電対#1 位置と液相部熱電対#1 位置の間となる。

(b) カプセル内圧力の履歴

カプセル内の気相部と液相部において圧力を計測した。液相部圧力#1 は概ね気相部圧力#1 よりも高い値となったが、冷却水温度に対応する飽和圧力との比較から、気相部圧力#1 が正確と判断した。

(c) パルス照射直前の冷却水状態

図 4.4.2-7 (1)に、カプセル内の気相部圧力#1 及び気相部温度#1 に対応する飽和圧力の履歴をパルス照射直前の約 50 秒間について示す。気相部圧力#1 と、気相部温度#1 に対応する飽和圧力との間には約 0.4 MPa の差があるが、カプセルに冷却水とともに封入された空気の分圧を考慮し、空気の分圧と飽和圧力の和と比較すると、気相部圧力#1 よりも約 0.1 MPa 低い関係となった。両者の値はほぼ一致していることから、気相部圧力#1 の値を正とし、カプセル内圧力は約 6.8 MPa と評価した。同様に、図 4.4.2-7 (2)では、カプセル内の液相部温度#1、#2 及び#3 のそれぞれに対応する飽和圧力を気相部圧力#1 と比較した。ただし、液相部温度#2 についてはパルス約 18 分前に 220℃程度まで急激に低下した

こと及び上部液相温度#1 及び下部液相温度#3 と比較してもより低い温度域を推移していることから何らかの要因によって当該箇所の測定に用いた熱電対等に不具合が生じたものと考えられる。液相部#1 に対する飽和圧力が気相部圧力#1 より 0.1 MPa 程度低い。液相部#1 位置はほぼ飽和状態にあると解釈される。一方、燃料棒下端部の液相部#3 の位置については、約 20℃程度サブクールされた状態であると解釈される。

(4) パルス照射時の過渡計測記録

2 台の中性子検出器で測定した NSRR の炉出力履歴を図 4.4.2-8 (1)及び(2)に、積分出力履歴を図 4.4.2-8 (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 4.4.2-8 (5)から(12)に示す。これらの出力履歴及び過渡記録については時刻 0 から 10 秒まで、0 から 1 秒まで及び 0.254 から 0.271 秒までの 3 区間を示す。加えて、カプセル内圧計及び AE センサについては、破損の発生を示す信号を含む区間 (0.6 から 0.7 秒までの区間) における高速サンプリングの過渡記録を図 4.4.2-8(13)に示す。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 4.4.2-8 (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。いずれについても、中性子検出器#1 と#2 の平均値で評価を行った。NSRR 出力は時刻 0.2615 秒においてピーク値約 14.6 GW に達し、半値幅は約 4.9 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 86.7 MJ に達した。

(b) カプセル内圧

図 4.4.2-8 (5)及び(6)に、それぞれカプセルの気相部及び液相部で計測した圧力の履歴を示す。気相部圧力 (#1) では時刻 0.26 秒付近から圧力上昇が見られるが、これは燃料棒表面での沸騰により蒸気が発生したためと解釈され、高温条件下で行われた従来の NSRR 実験でも同様の傾向が得られている。液相部では時刻 0.259 から 0.268 秒に掛けて急激な圧力の上昇が見られるが、波形から、NSRR 出力パルスに同期したノイズと考えられる。図 4.4.2-8(13)に示す高速サンプリングで取得した過渡記録 (時刻 0.6 秒～0.7 秒) では、時刻 0.6305 秒において僅かに液相圧力の変動が見られ、さらにカプセル気相部においては時刻

0.6312 秒に圧力の上昇がみられ、破損の発生に対応した信号の同期が生じたものと考えられた。

(c) AE センサ出力

図 4.4.2-8 (7)及び(13)に AE センサの出力信号を示す。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。信号の振幅は 0.261 秒以降増大し、0.262 秒にピークを示したが、これは燃料ペレットと被覆管の摩擦等の機械的な振動が検出されたものと推測される。高温条件下で行われた過去の NSRR 実験のうち、燃料が破損した VA-3 実験と比べて、信号の振幅(V)のピーク値が小さかったこと、高温条件下で非破損のケースである VA-7、VA-9 実験と同様の波形を示していることから、この時刻において燃料棒は破損しなかったと考えられる。一方で、時刻 0.6305 秒以降において信号の振幅の増大、及び、時刻 0.6318 秒において信号のピークが見られ、且つ、0.63 秒付近においてカプセル内圧計にも変化が見られており、この時刻において燃料棒の破損が生じたと考えられる。

(d) カプセル内温度

図 4.4.2-8 (8)～(11)に、それぞれ、カプセル内温度気相#1、液相#1～#3 の履歴を示す。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、冷却水への熱の散逸により温度指示値は一旦低下し、燃料の発熱に伴う冷却水温度上昇に伴い再び上昇を示していると考えられる。高温高圧実験及び室温大気圧実験(LS-5 実験等)で観測されたカプセル内温度の傾向を比べると、前者では、パルス直後に 10℃程度上昇し、なだらかに温度指示値が低下する(その後前述のとおり再び上昇する)傾向がある一方、後者では、パルス直後に急速に温度指示値が低下する(その後同様に再び上昇する)傾向がある。この傾向の違いは、冷却水温度の違いにより、冷却水への熱の散逸量が変化したことによると考えられる。

カプセル内液相温度#3 の履歴においては、0.254 から 0.261 秒にかけて、短時間だけ僅かに温度が低下している。波形の比較から、他の計装と同様に NSRR パルス出力に同期したノイズである可能性が考えられる。またパルス照射時のガンマ発熱による冷接点部分の温度上昇によっても、見かけ上の温度低下が生じ得ることから、これらノイズと冷接点の温度上昇の影響が複合して計測値のゆらぎをもたらしたものと解釈される。

(e) 被覆管表面温度

本計装はパルス照射開始時刻の約 10 分前に計測可能範囲を超えた状態になった。計装線の断線等により測定不能となったと考えられ、有効な情報は取得することができなかった。参考情報として図 4.4.2-8(12)に被覆管表面温度履歴を示すが、明らかにパルス照射直後の被覆管温度上昇を正しく捉えたものではないことが本履歴からわかる。

(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（治具付）

図 4.4.2-9 に、パルス照射後の燃料棒の外観写真を示す。燃料棒被覆管の概ね軸方向中心位置（上から 3 番目の燃料ペレット位置）に軸方向長さ約 10 mm 程度の開口部が見られた。開口部（正面）の様子は、H30 年度に NSRR を用いて実施された CN-1 試験燃料棒の破損開口部やロシアの BIGR 炉において高燃焼度 VVER 燃料を対象に実施された RIA 模擬実験（RT-9 実験⁽¹⁾）で観察された被覆管の破損形態（内圧破裂型）に類似している。また、開口部の膨れ方（開口部側面から見た様子）は、LOCA 模擬実験で観測されるバースト破損に類似している。したがって、本実験でも内圧破裂型の破損が生じた可能性が大きい。パルス照射前に測定不可能となった被覆管表面熱電対については、燃料棒表面から外れていることが確認された。パルス前（図 4.4.2-2）と比較すると、破損開口部だけでなく、ペレットスタック部全体に膨れが生じていることがわかる。

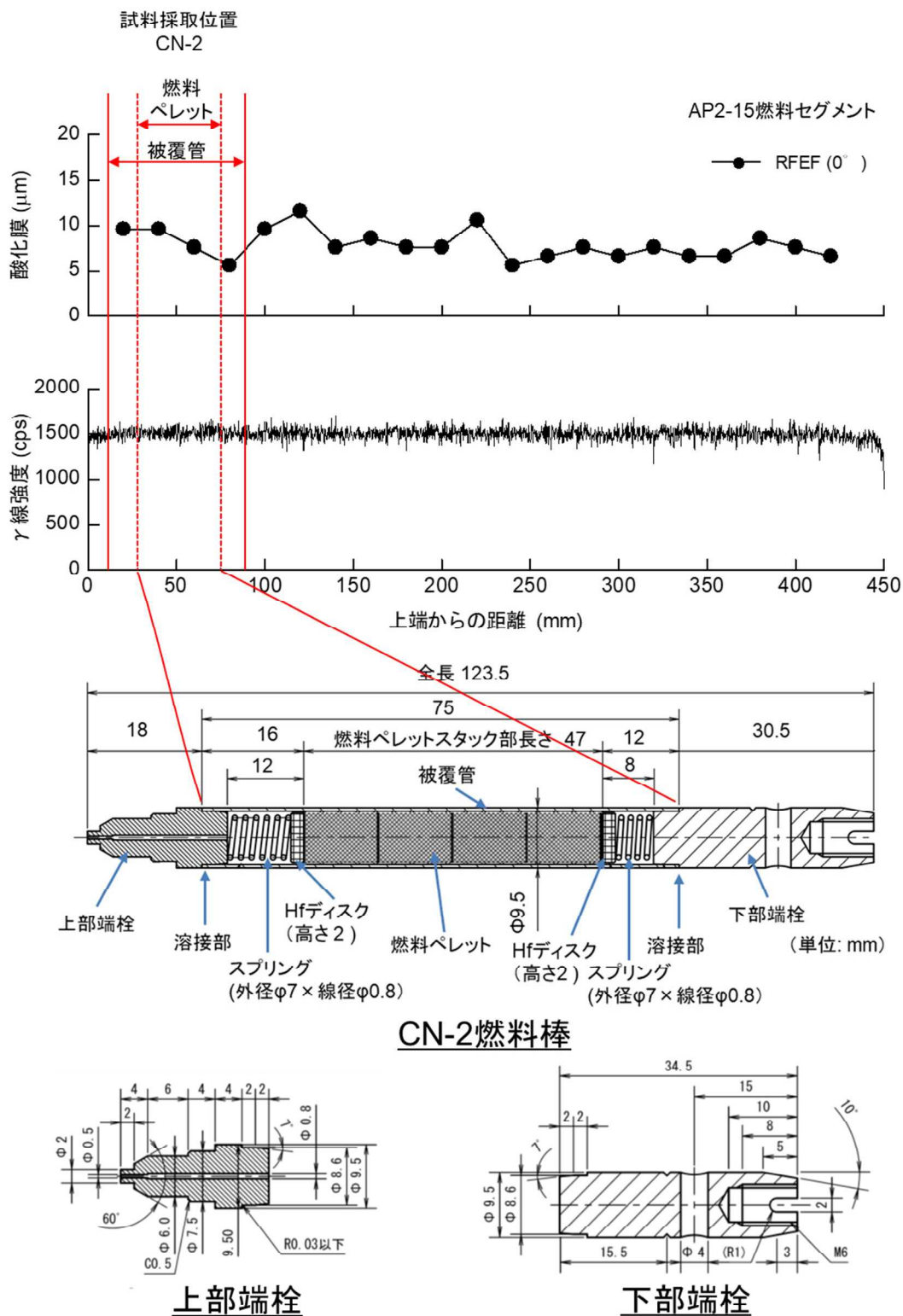


図 4.4.2-1 CN-2 試験燃料棒の構造概略

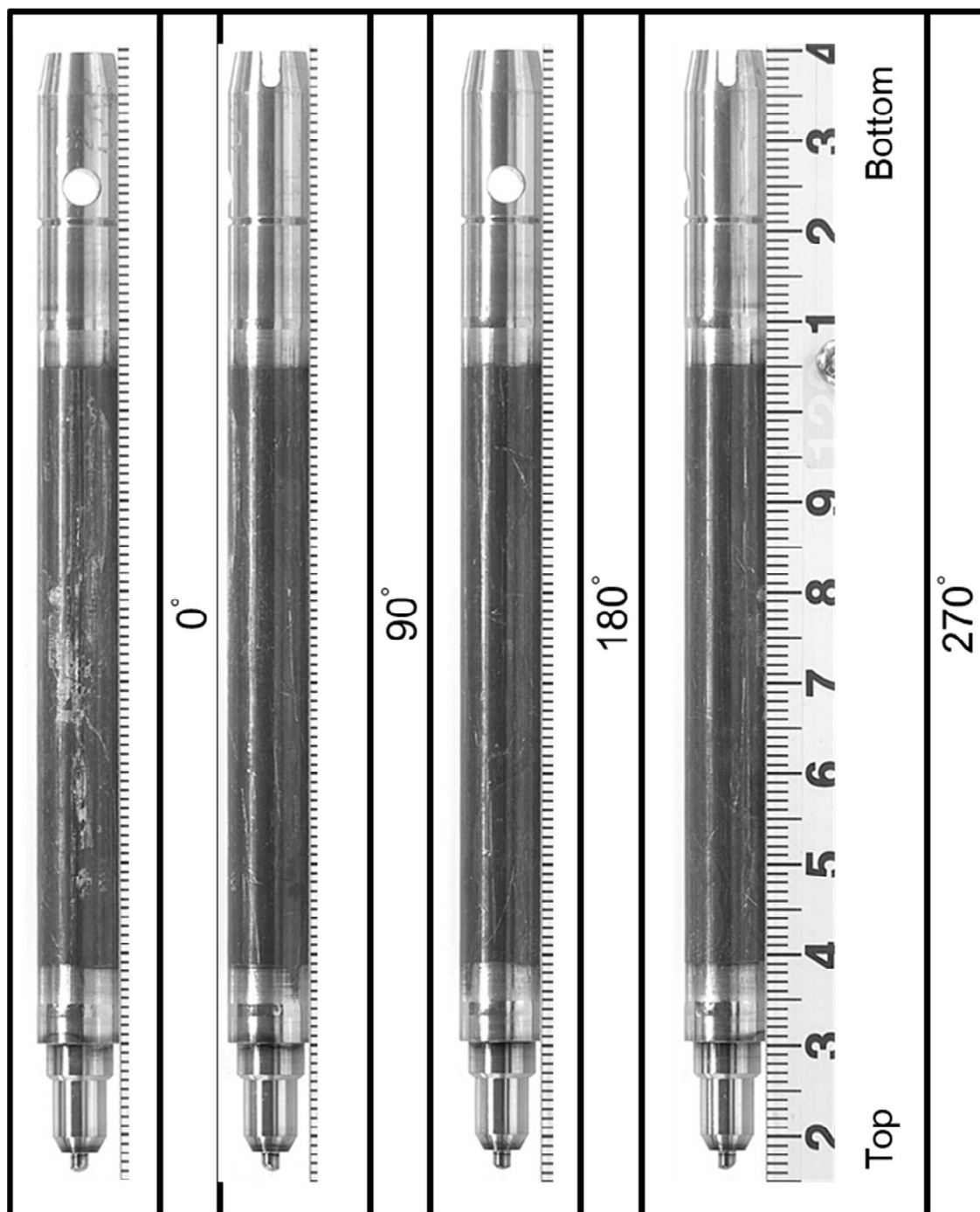


図 4.4.2-2 CN-2 試験燃料棒のパルス照射前外観写真

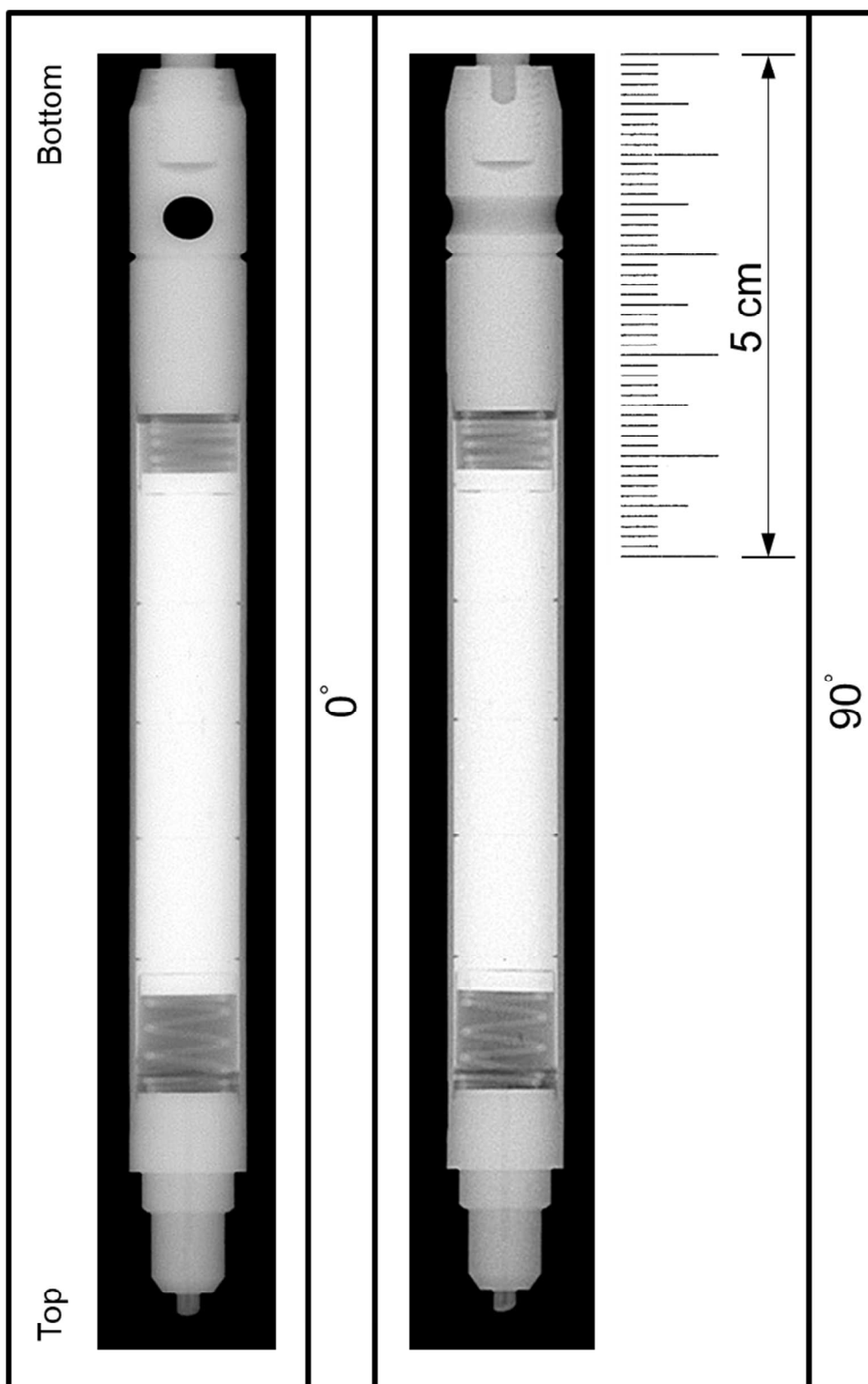


図 4.4.2-3 CN-2 試験燃料棒のパルス照射前 X 線写真

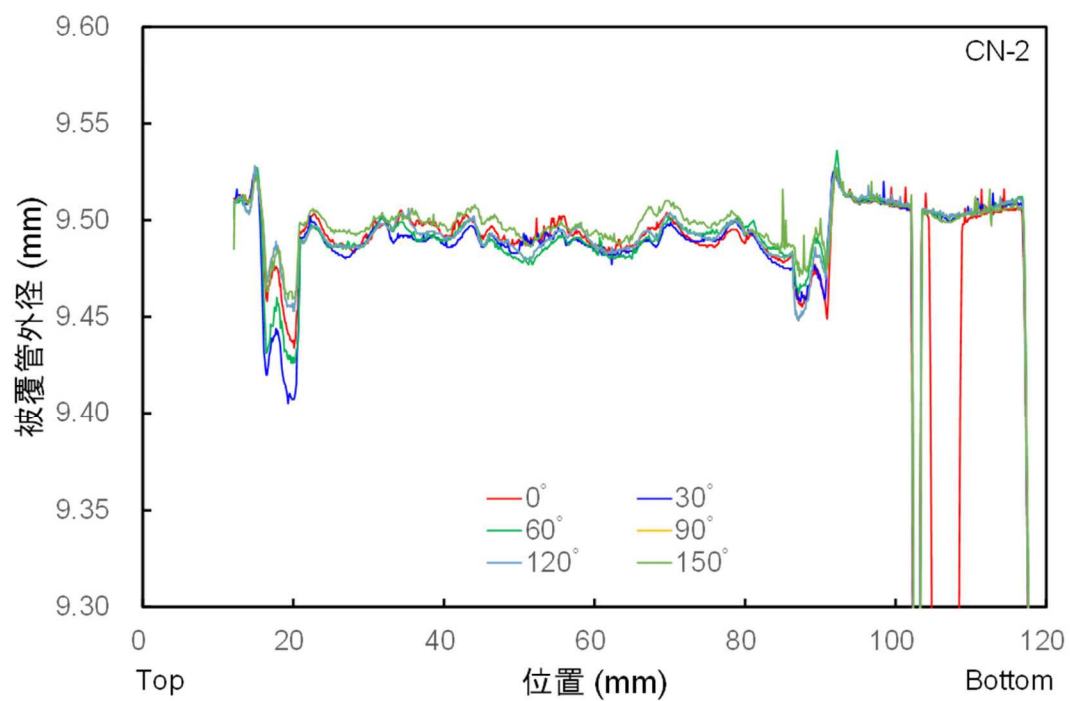


図 4.4.2-4 CN-2 試験燃料棒のパルス照射前寸法

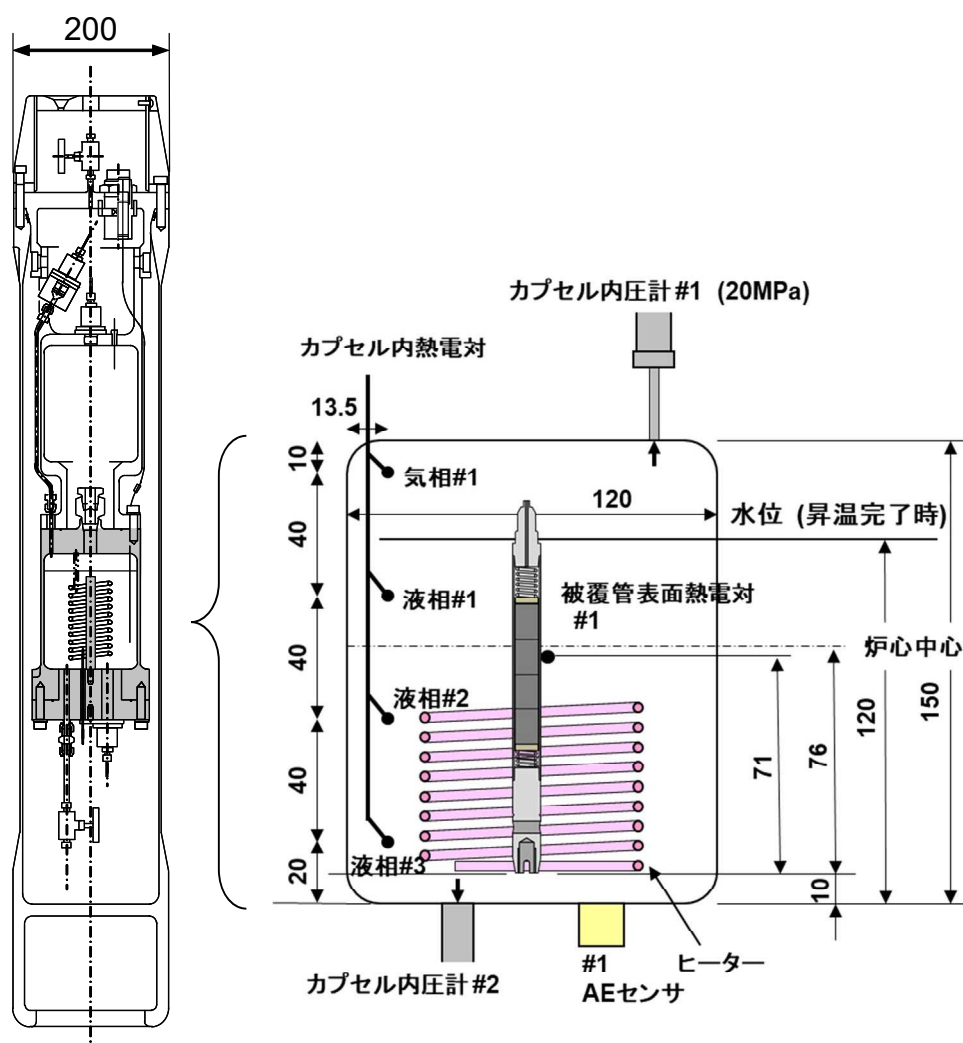


図 4.4.2-5 CN-2 実験における計装取付けの概要

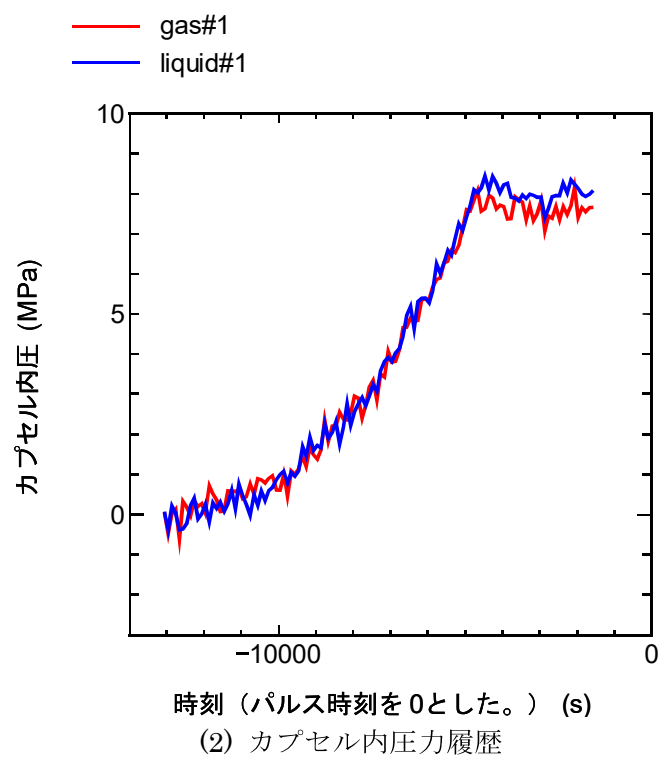
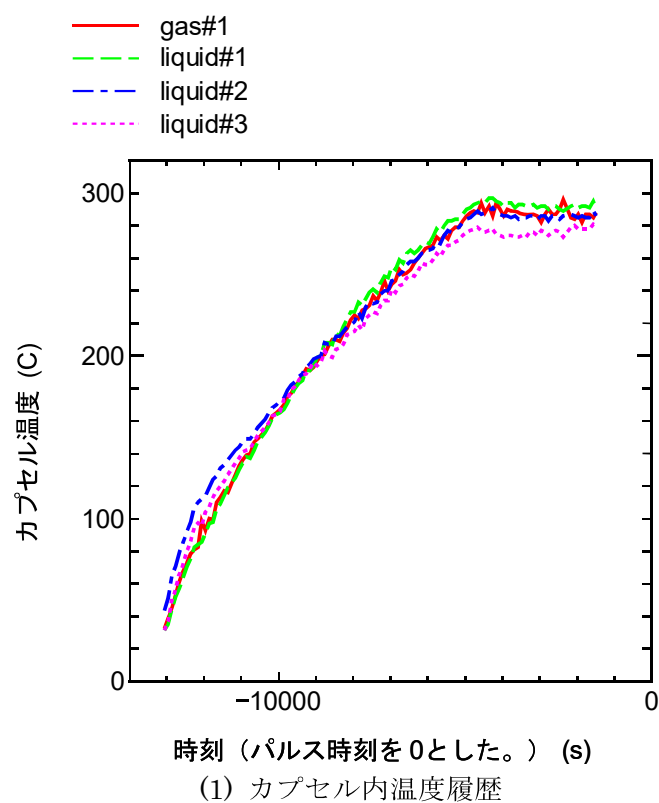
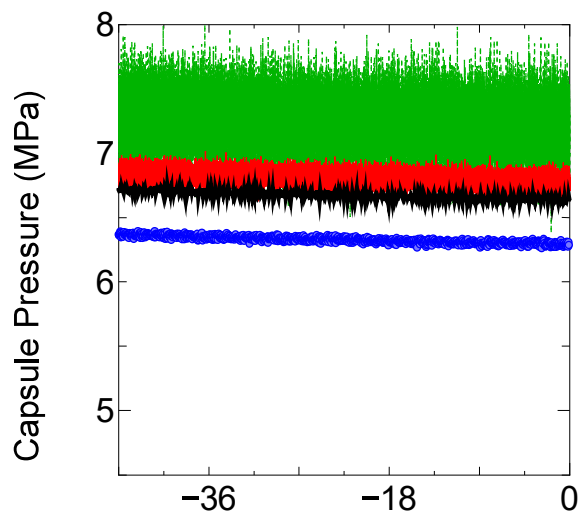


図 4.4.2-6 CN-2 昇温過程におけるカプセル内温度及び圧力の履歴

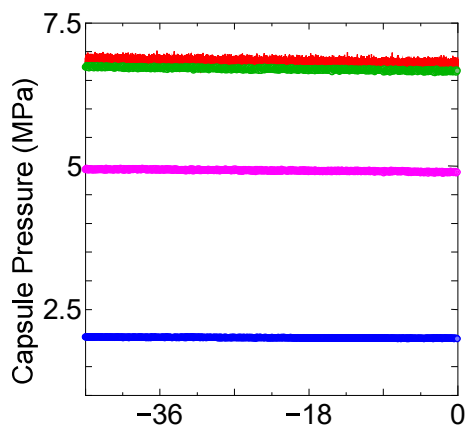
- D: C + partial press. of air
- C: Saturation press. for gas phase temp. G#1
- B: Liquid phase press. #1
- A: Gas phase press. #1



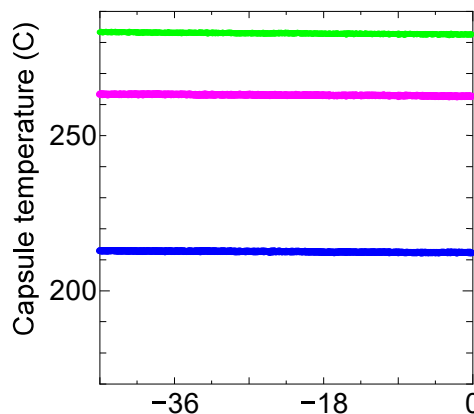
Time (パルス時刻を0とした。) (s)

(1) 気相部温度#1 との比較

- D: Saturation press. for liquid phase temp. W#3
- C: Saturation press. for liquid phase temp. W#2
- B: Saturation press. for liquid phase temp. W#1
- A: Gas phase pressure #1
- Liquid phase temp. W#3
- Liquid phase temp. W#2
- Liquid phase temp. W#1



Time (パルス時刻を0とした。) (s)



Time (パルス時刻を0とした。) (s)

(2) 液相部温度#1, #2 及び#3 との比較

図 4.4.2-7 CN-2 パルス照射実験前のカプセル内温度と圧力の関係

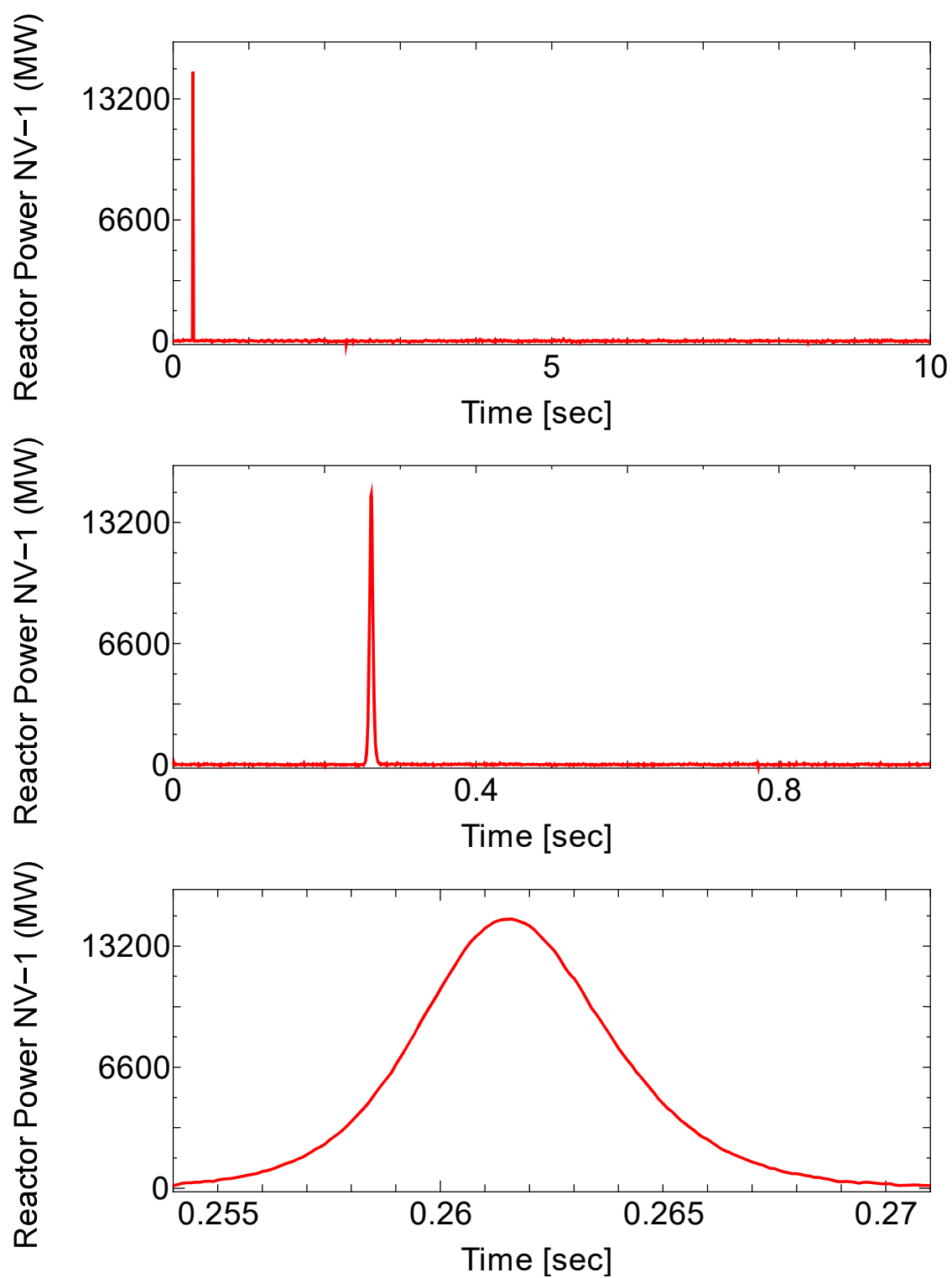


図 4.4.2-8 (1) CN-2 実験における原子炉出力履歴 (#1)

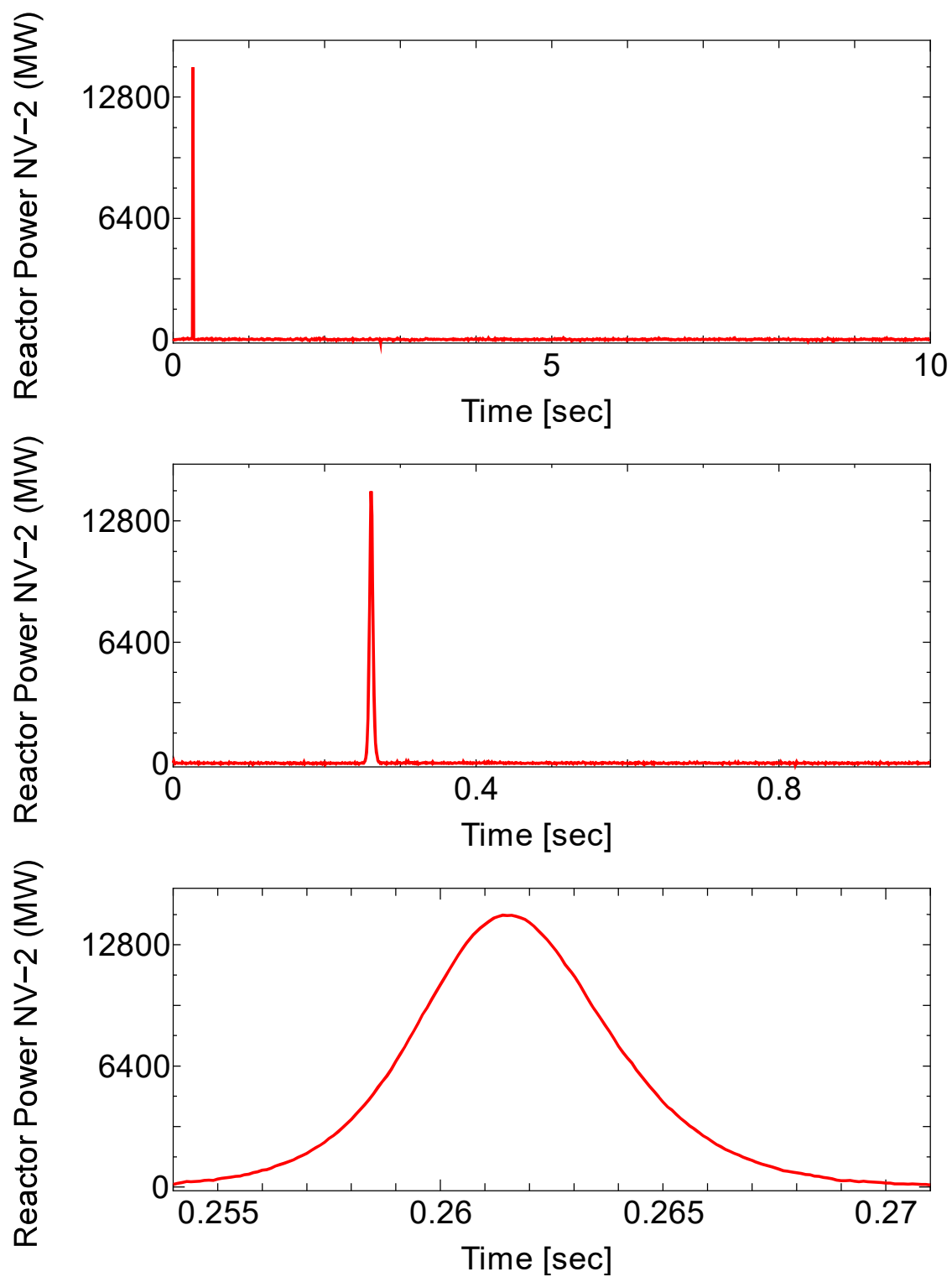


図 4.4.2-8 (2) CN-2 実験における原子炉出力履歴 (#2)

Intg.Reac.Power NVT-1 (MJ) Intg.Reac.Power NVT-1 (MJ) Intg.Reac.Power NVT-1 (MJ)

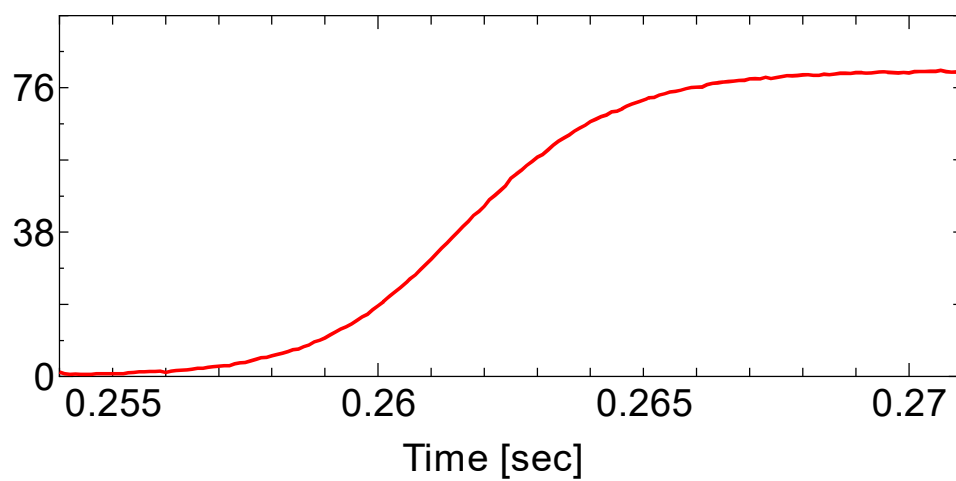
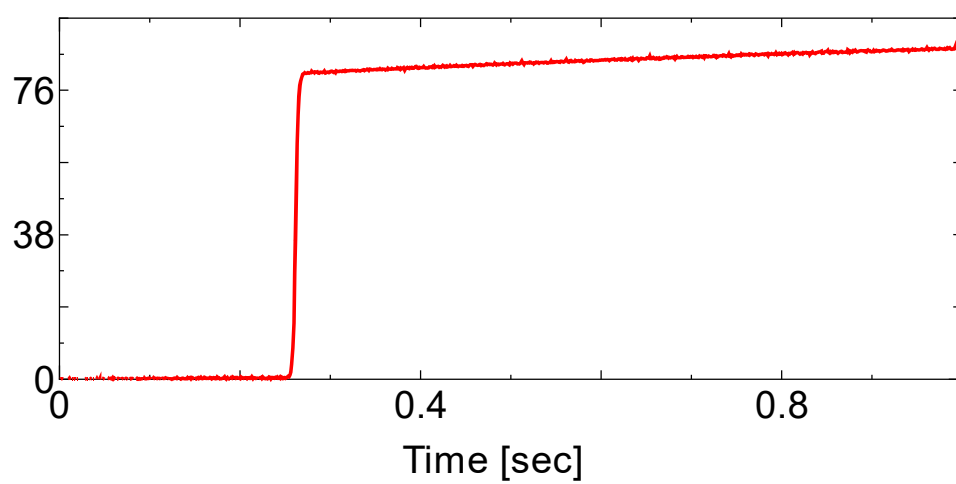
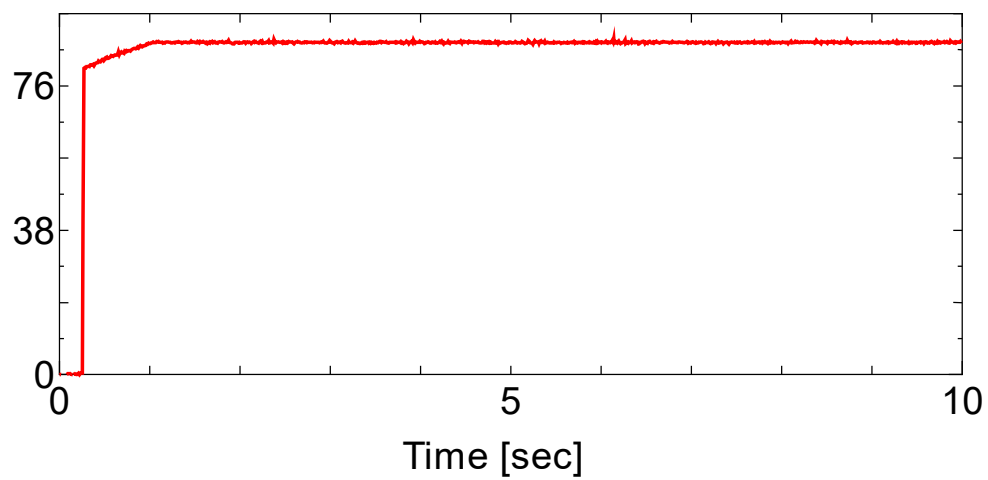


図 4.4.2-8 (3) CN-2 実験における原子炉積分出力 (#1)

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

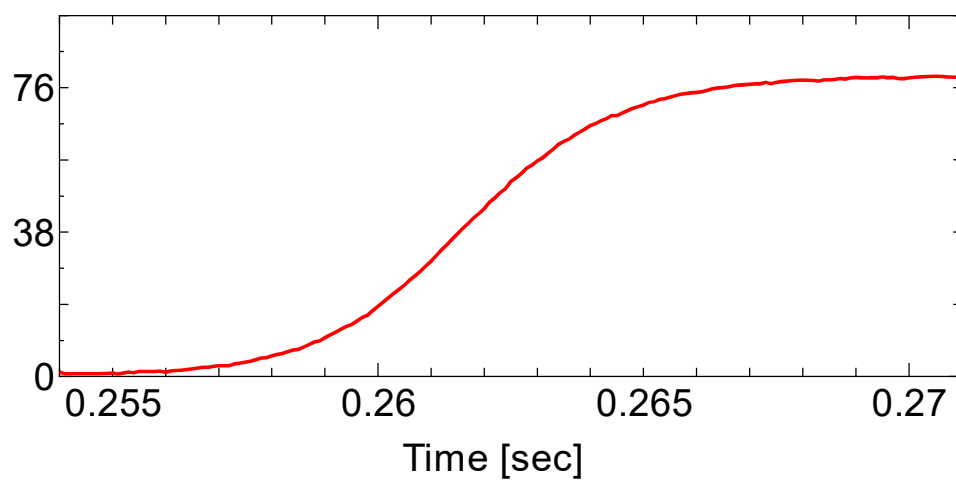
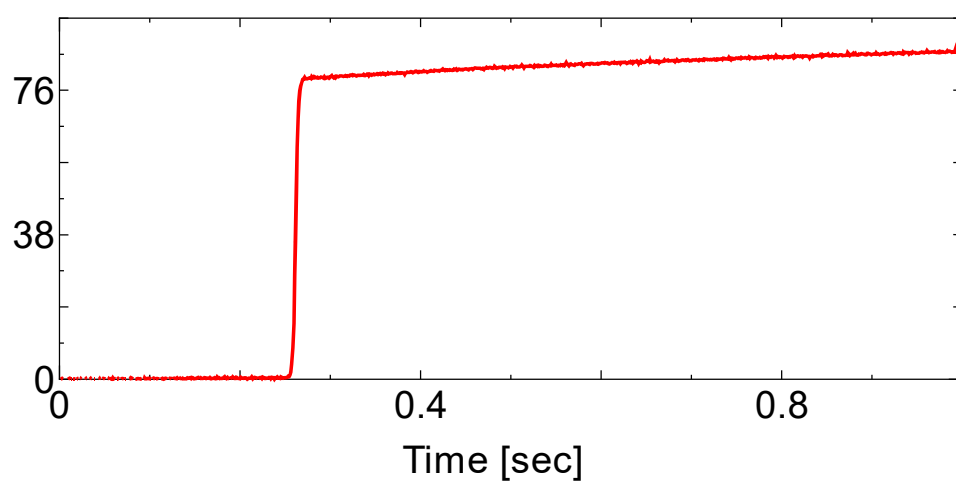
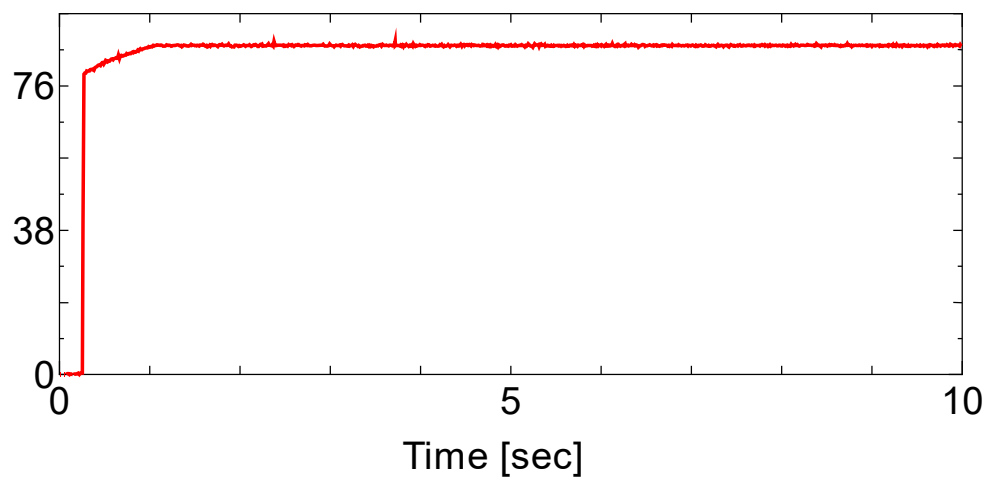
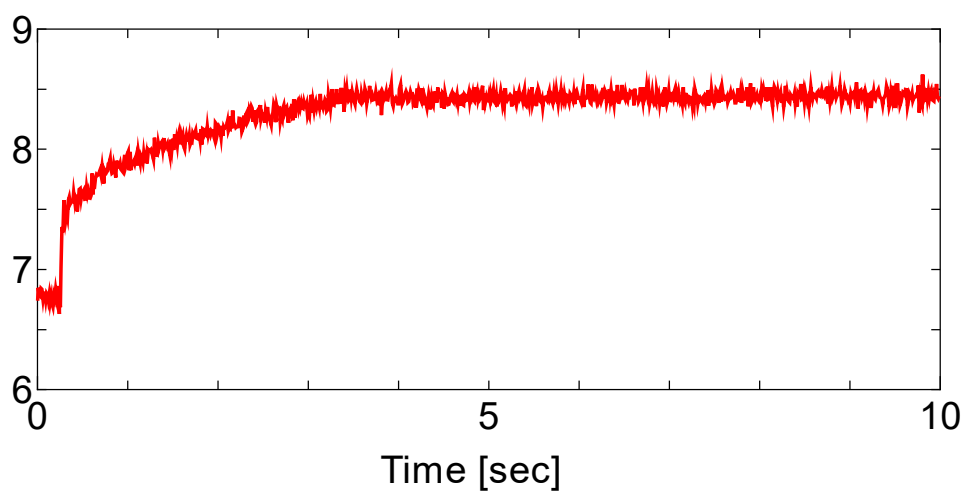
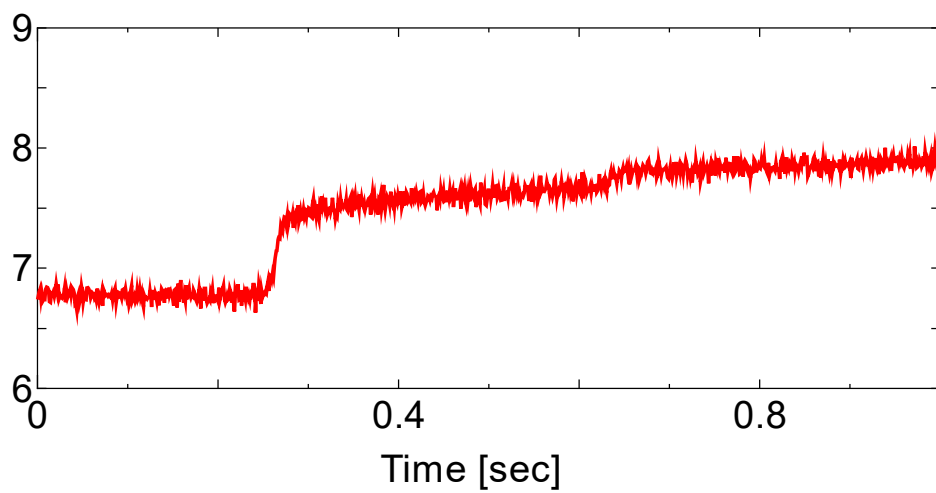


図 4.4.2-8 (4) CN-2 実験における原子炉積分出力 (#2)

Capsule Pressure #1 (MPa)



Capsule Pressure #1 (MPa)



Capsule Pressure #1 (MPa)

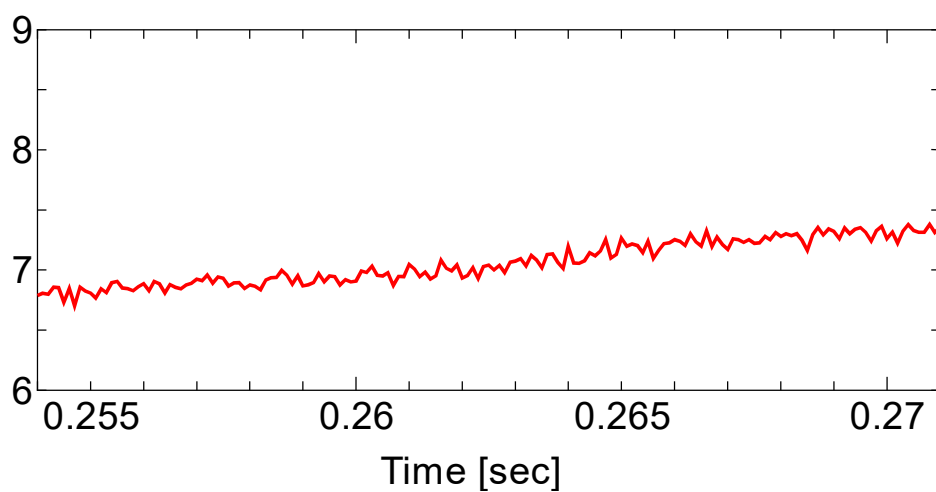
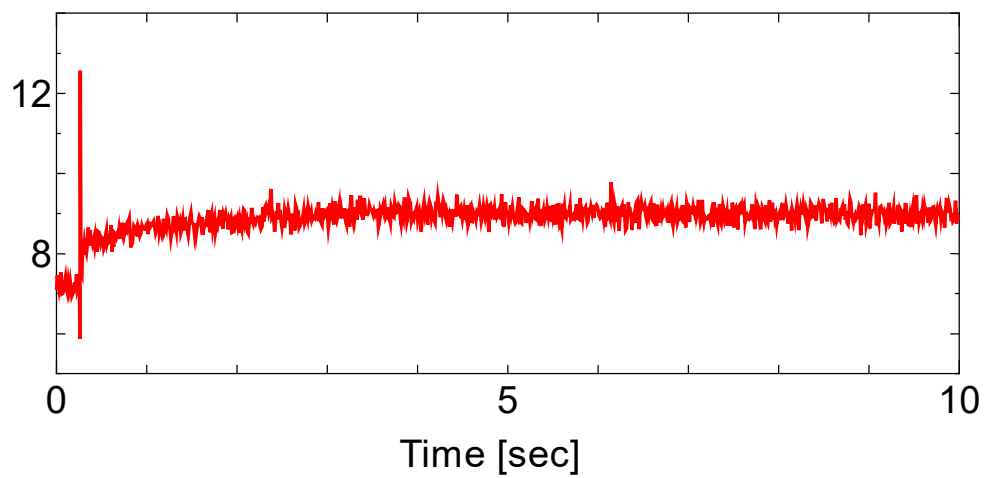
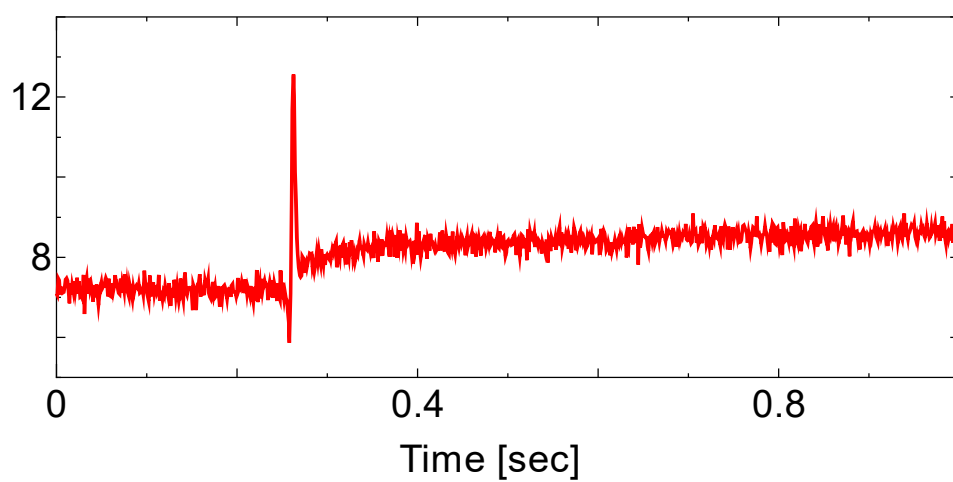


図 4.4.2-8 (5) CN-2 実験におけるカプセル内気相圧力履歴

Capsule Pressure #2 (MPa)



Capsule Pressure #2 (MPa)



Capsule Pressure #2 (MPa)

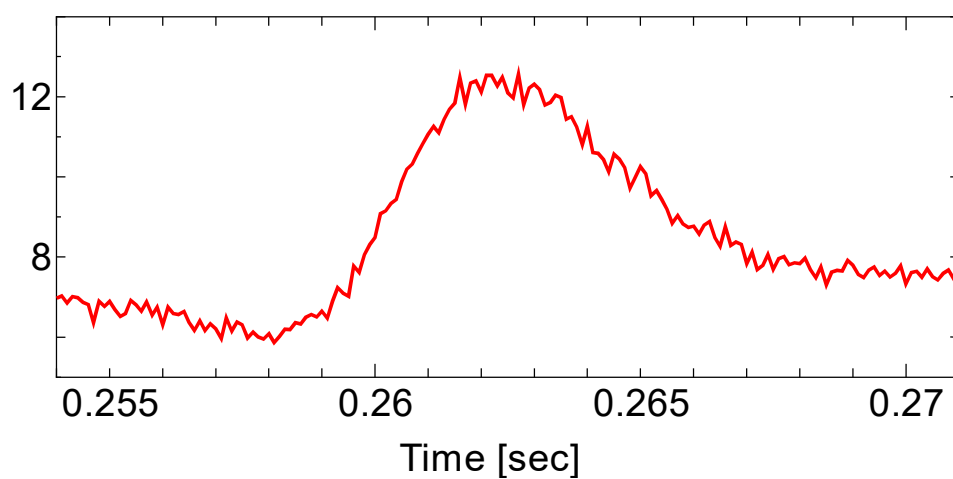


図 4.4.2-8 (6) CN-2 実験におけるカプセル内液相圧力履歴

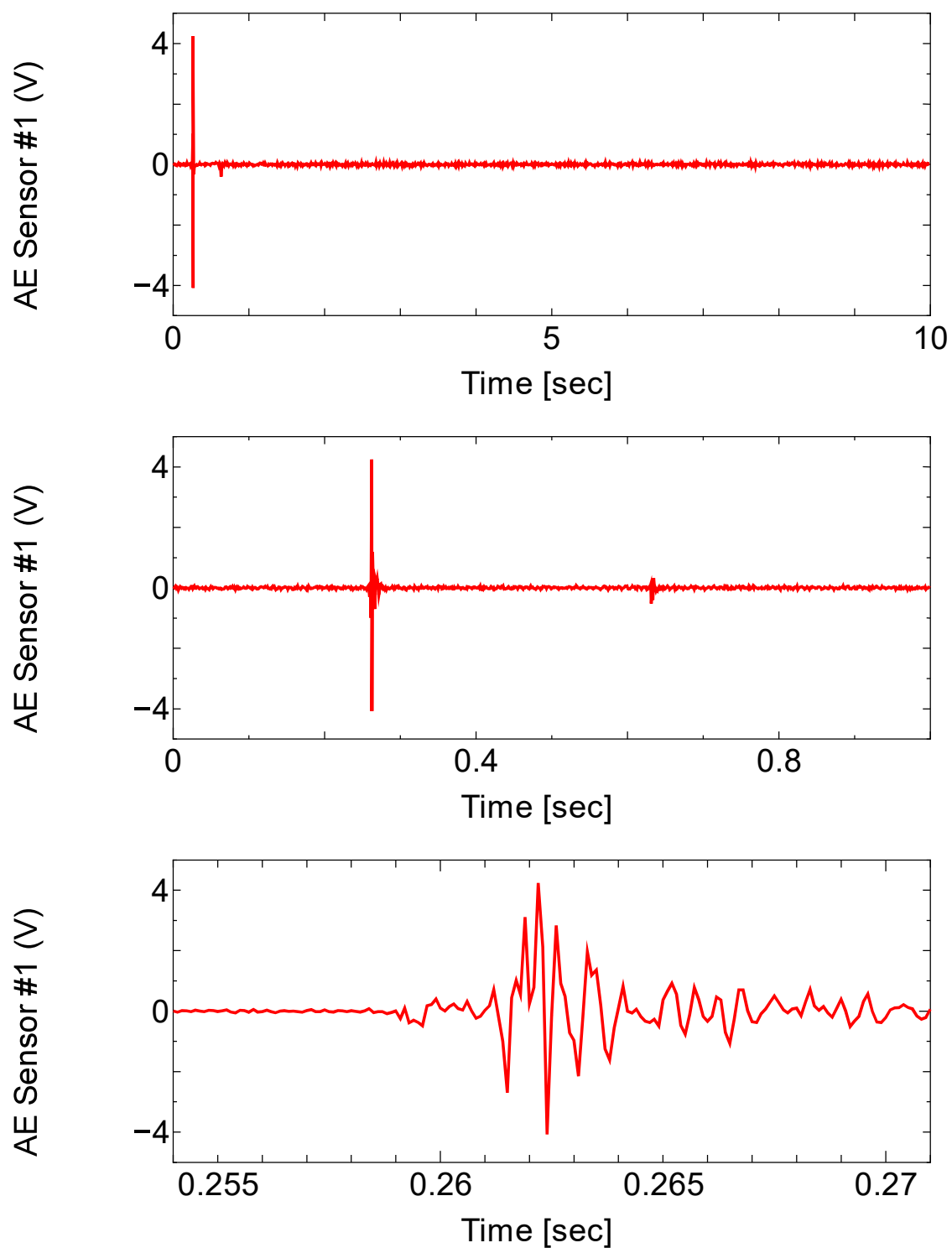


図 4.4.2-8 (7) CN-2 実験における AE センサ出力履歴

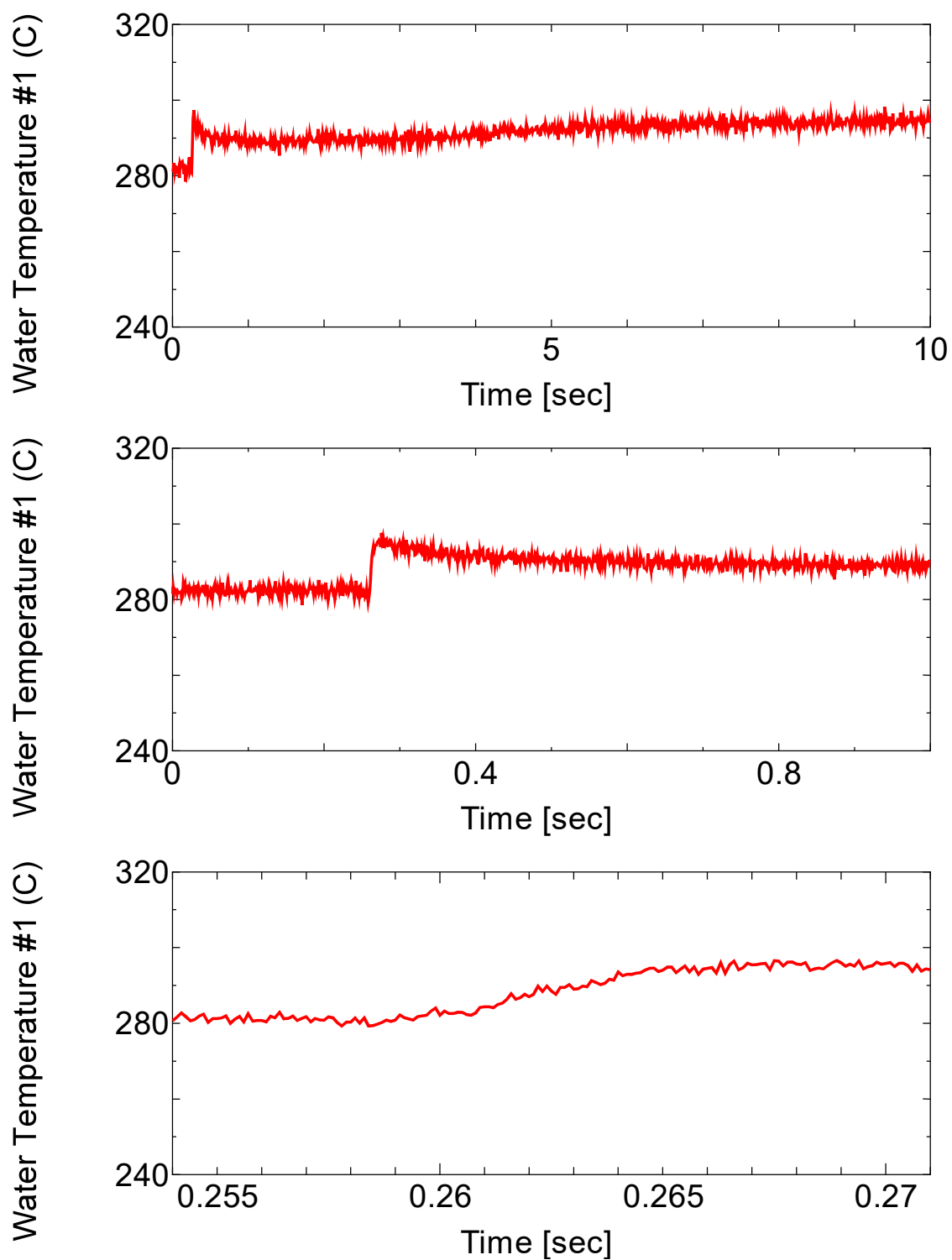


図 4.4.2-8 (8) CN-2 実験におけるカプセル内温度履歴(#1)

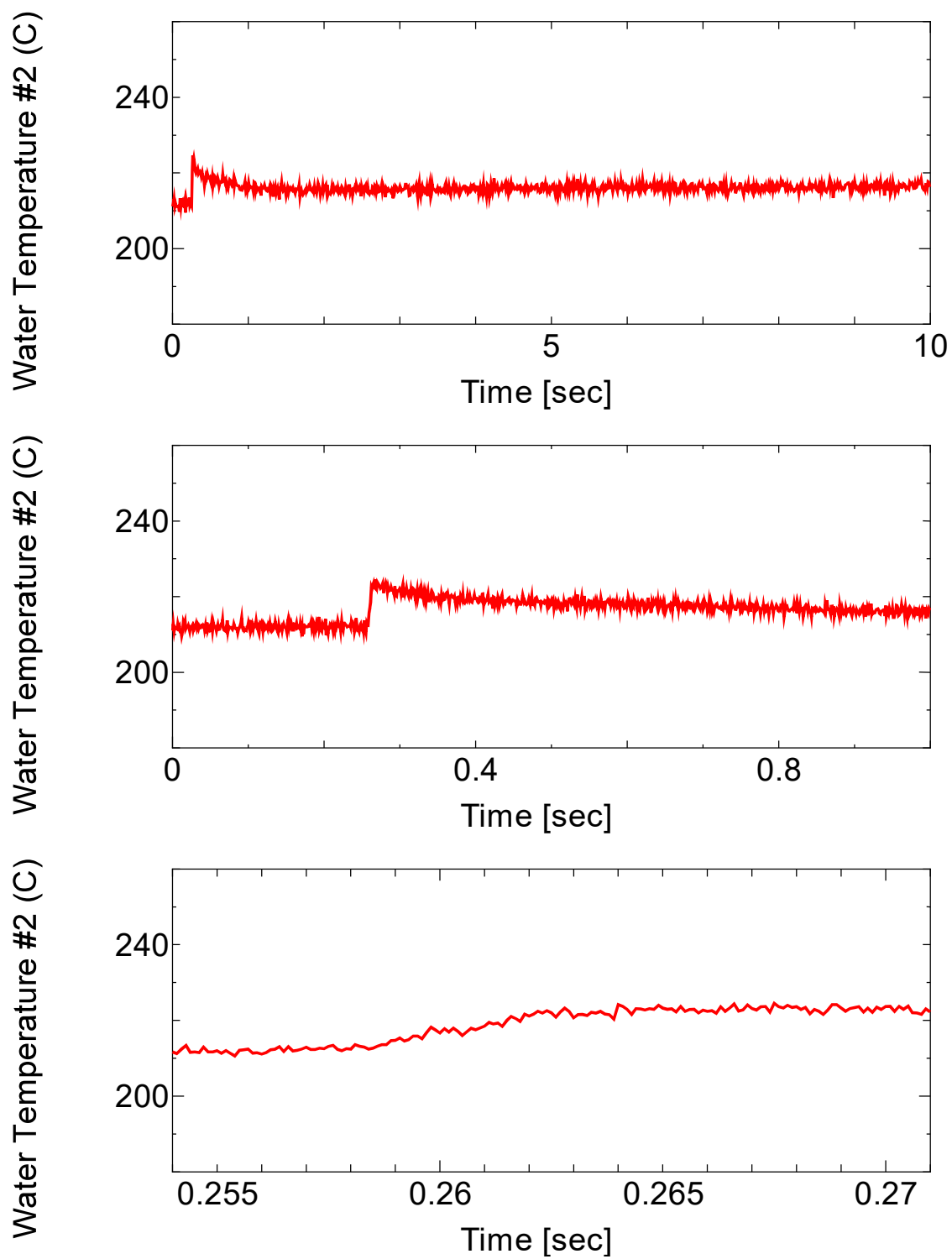


図 4.4.2-8 (9) CN-2 実験におけるカプセル内温度履歴(#2)

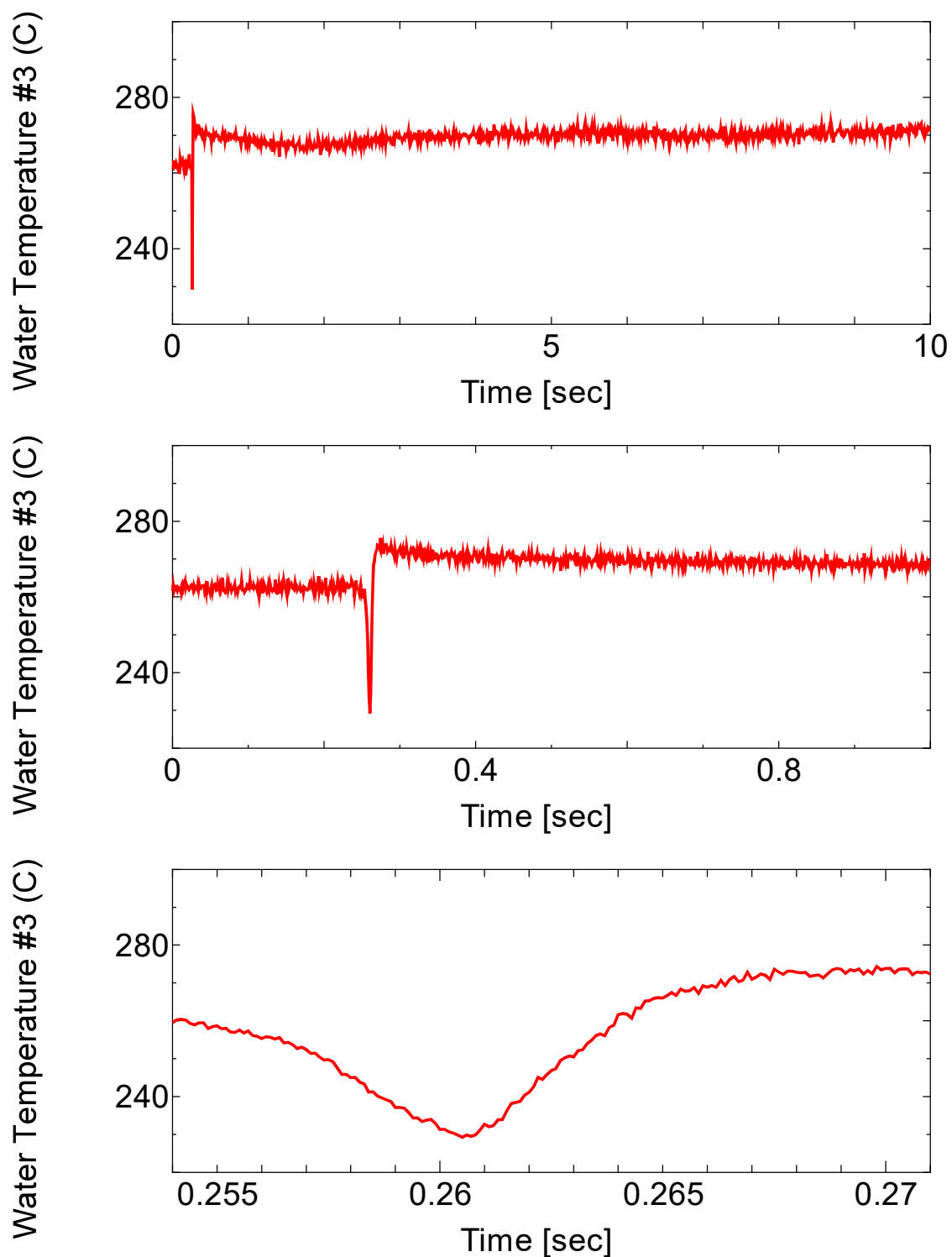


図 4.4.2-8 (10) CN-2 実験におけるカプセル内温度履歴(#3)

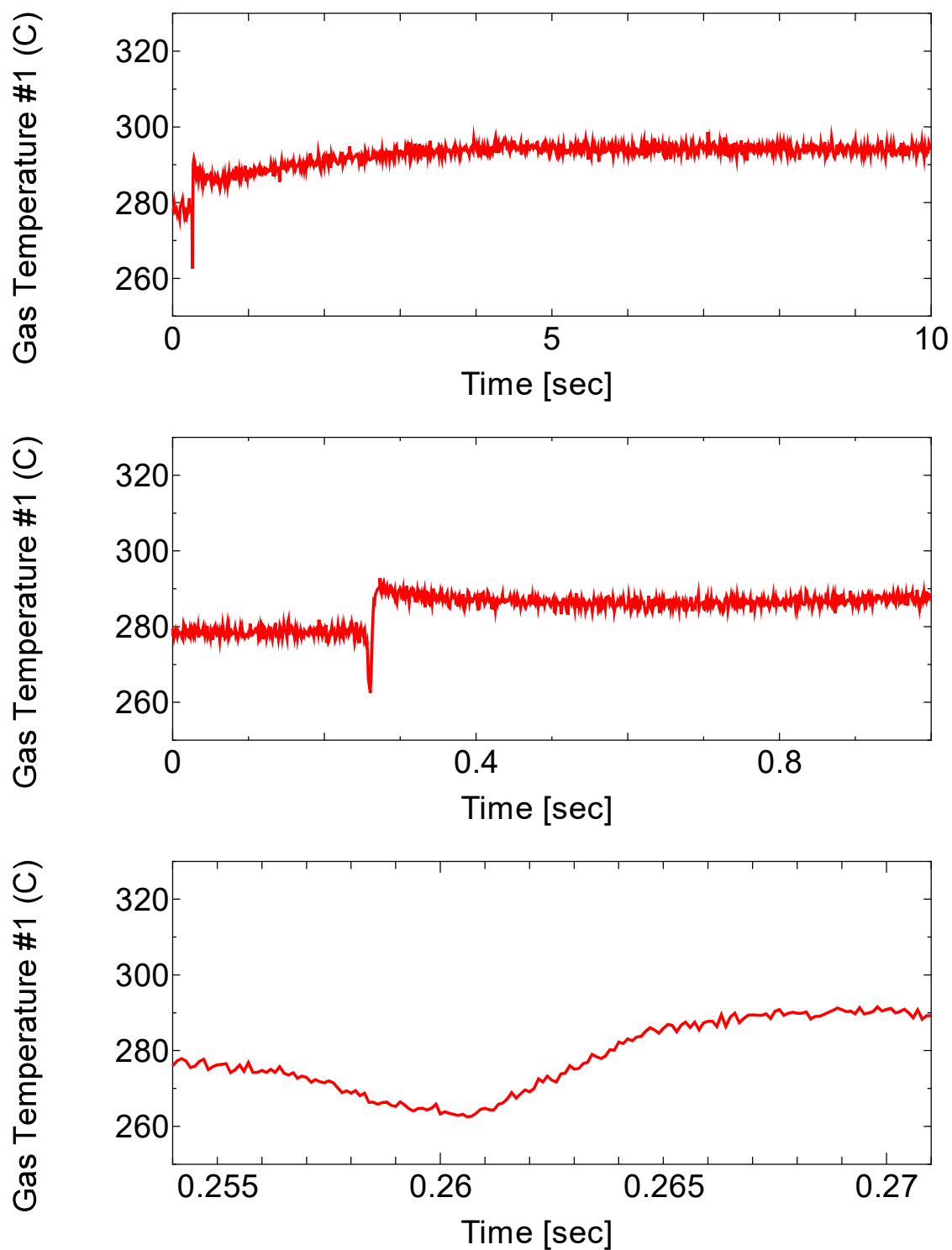


図 4.4.2-8 (11) CN-2 実験におけるカプセル内温度履歴(#4)

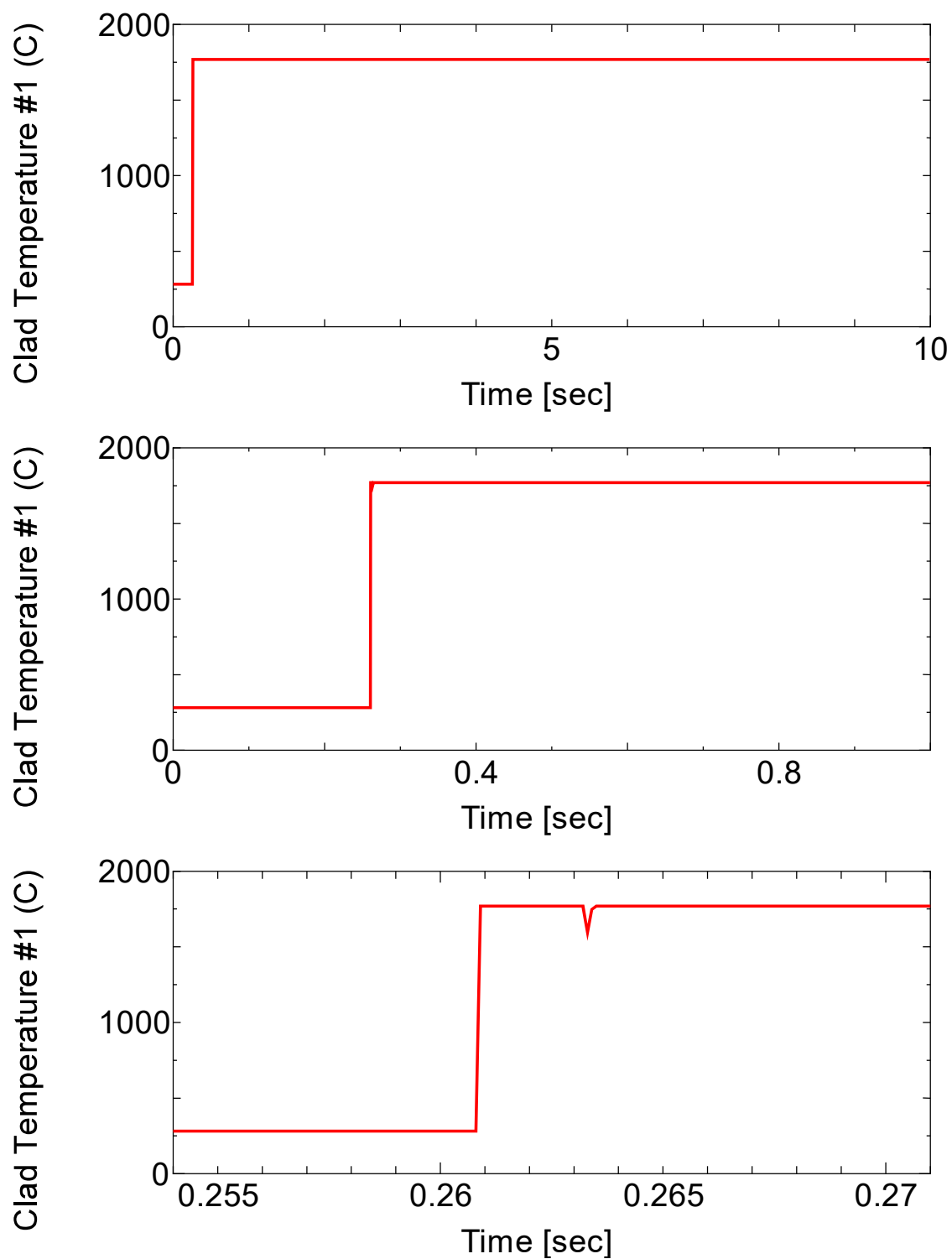


図 4.4.2-8 (12) CN-2 実験における被覆管表面温度履歴

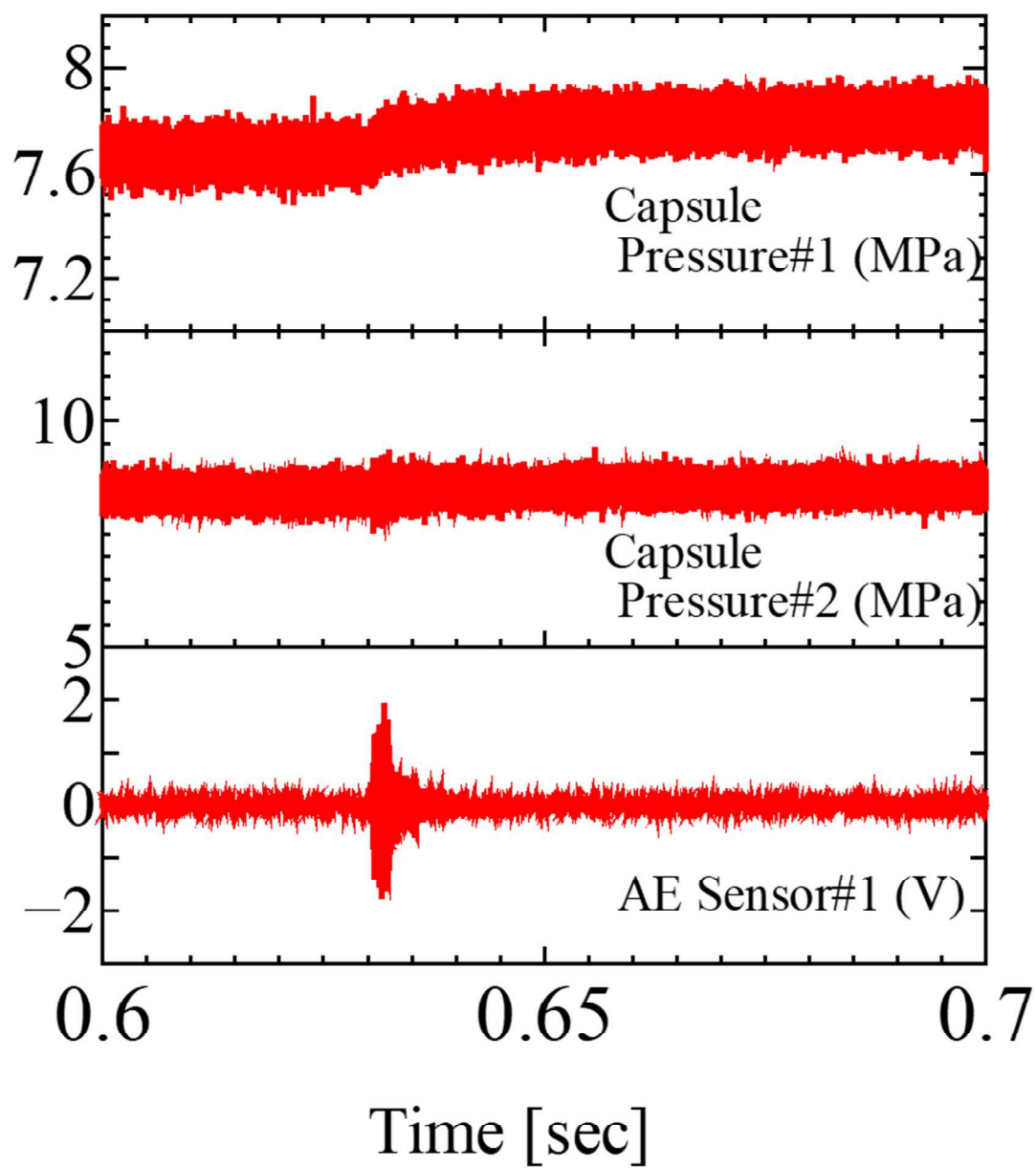


図 4.4.2-8 (13) CN-2 実験におけるカプセル内気相・液相圧力及び AE センサ出力履歴

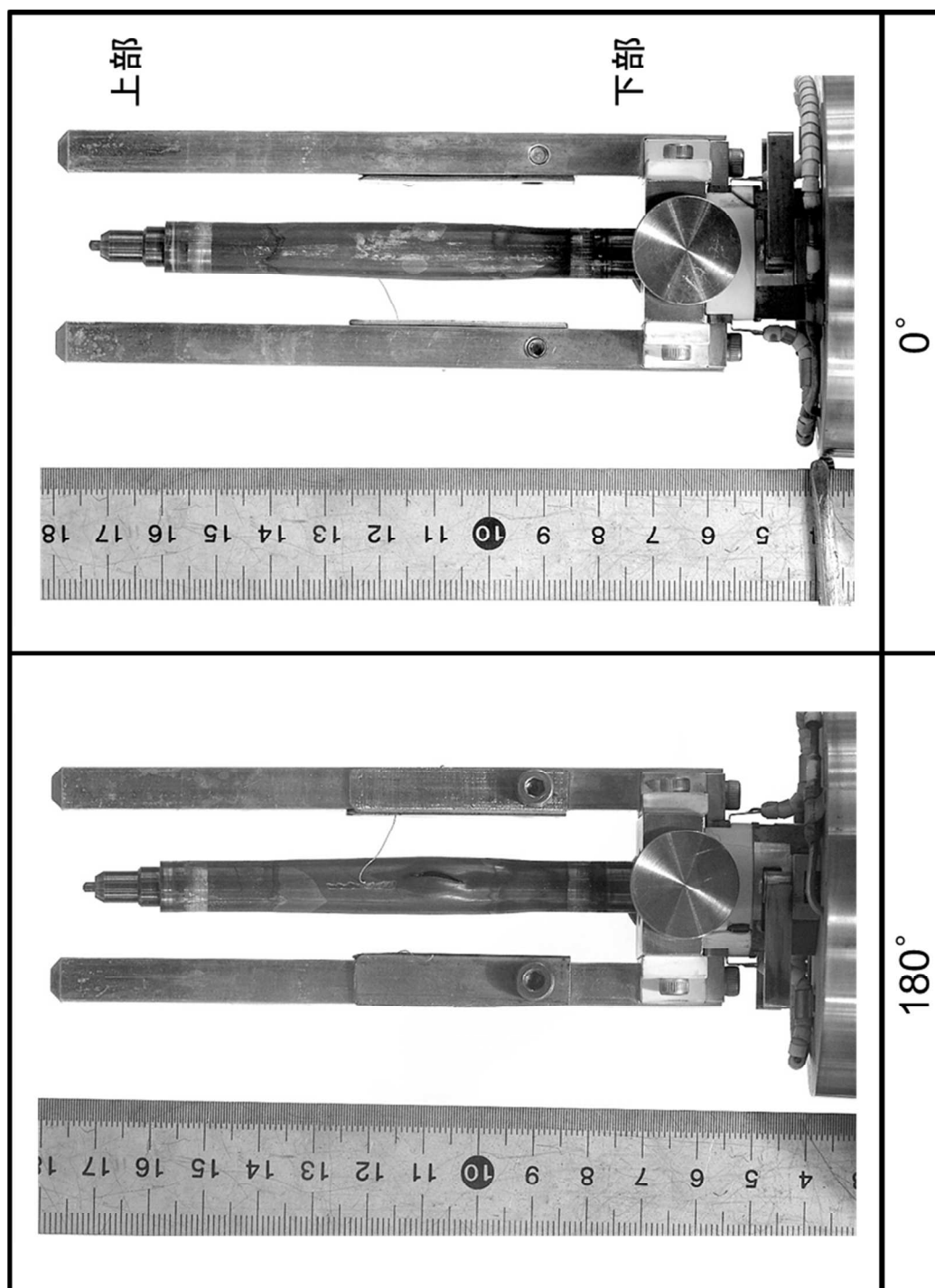


図 4.4.2-9(1) CN-2 試験燃料棒パルス後外観

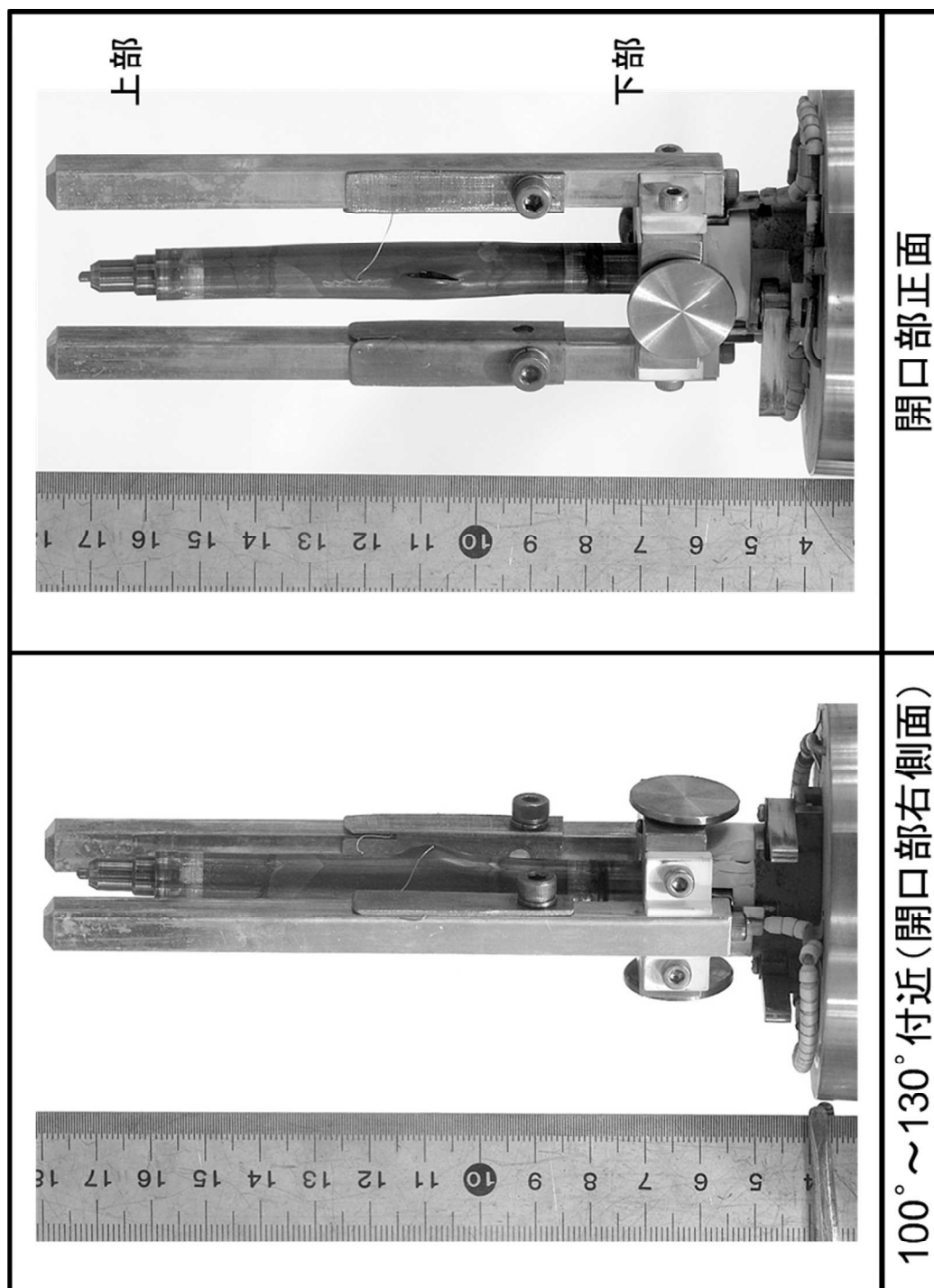


図 4.4.2-9(2) CN-2 試験燃料棒パルス後外観

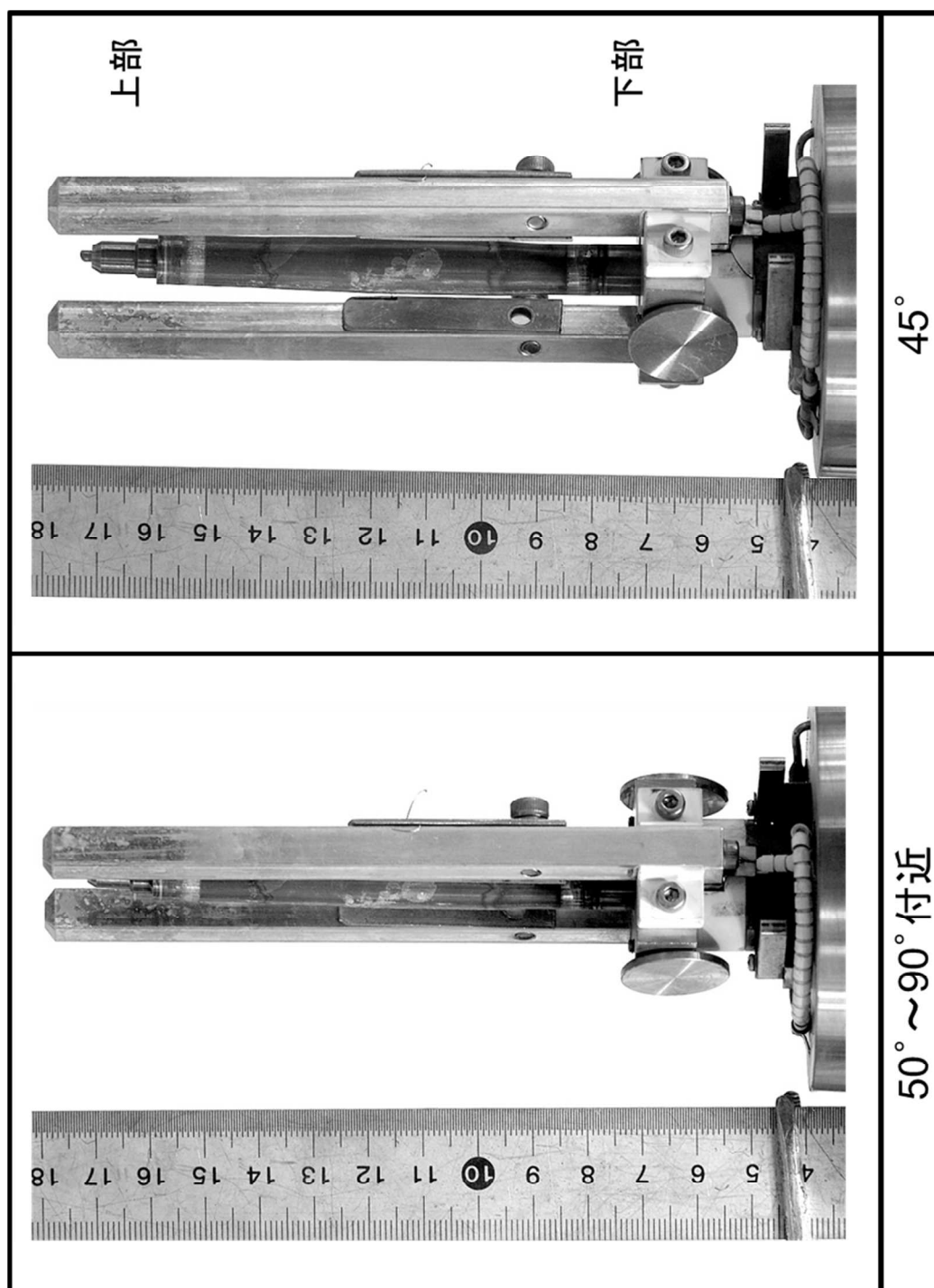


図 4.4.2-9(3) CN-2 試験燃料棒パルス後外観

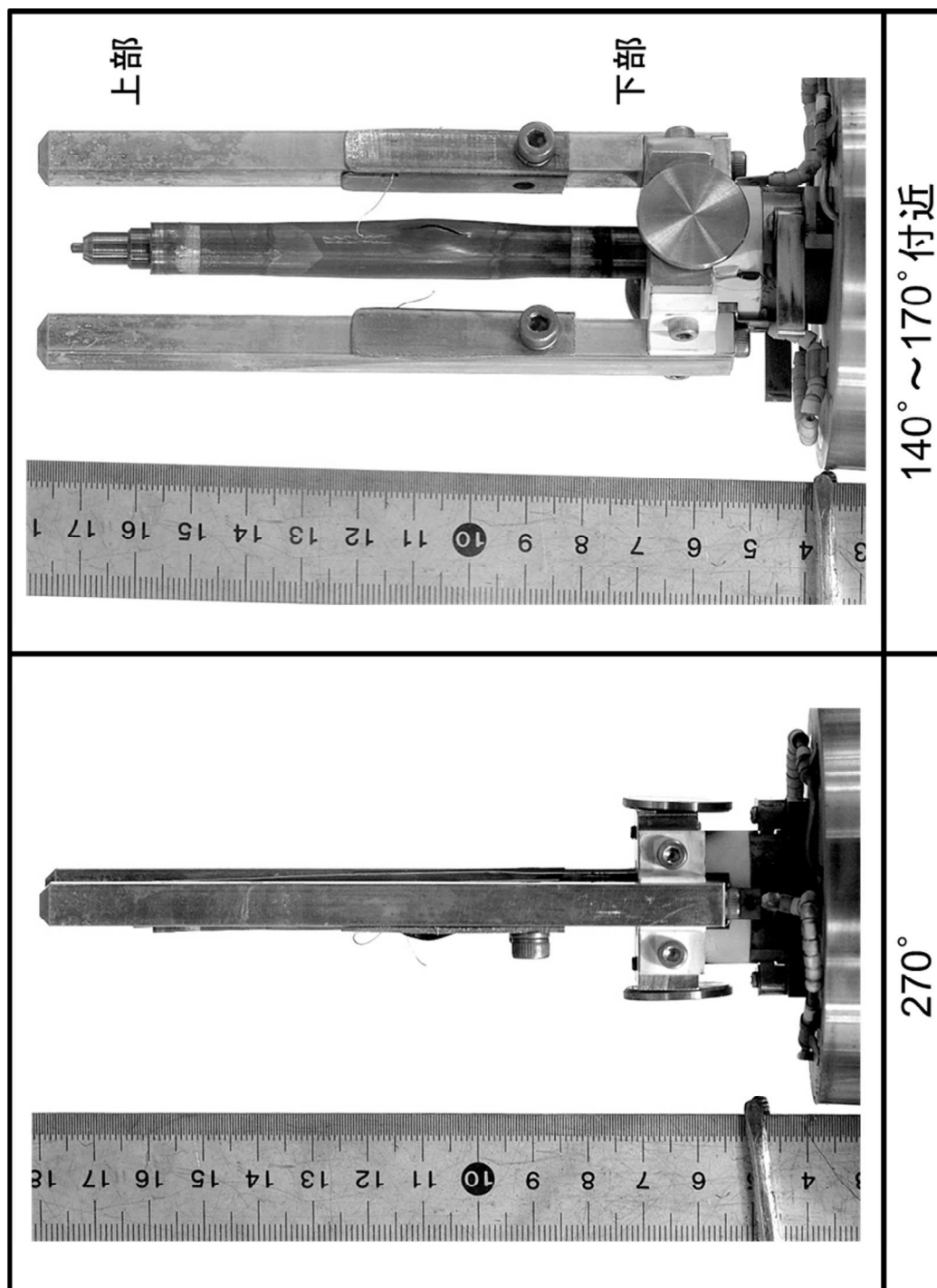


図 4.4.2-9(4) CN-2 試験燃料棒パルス後外観

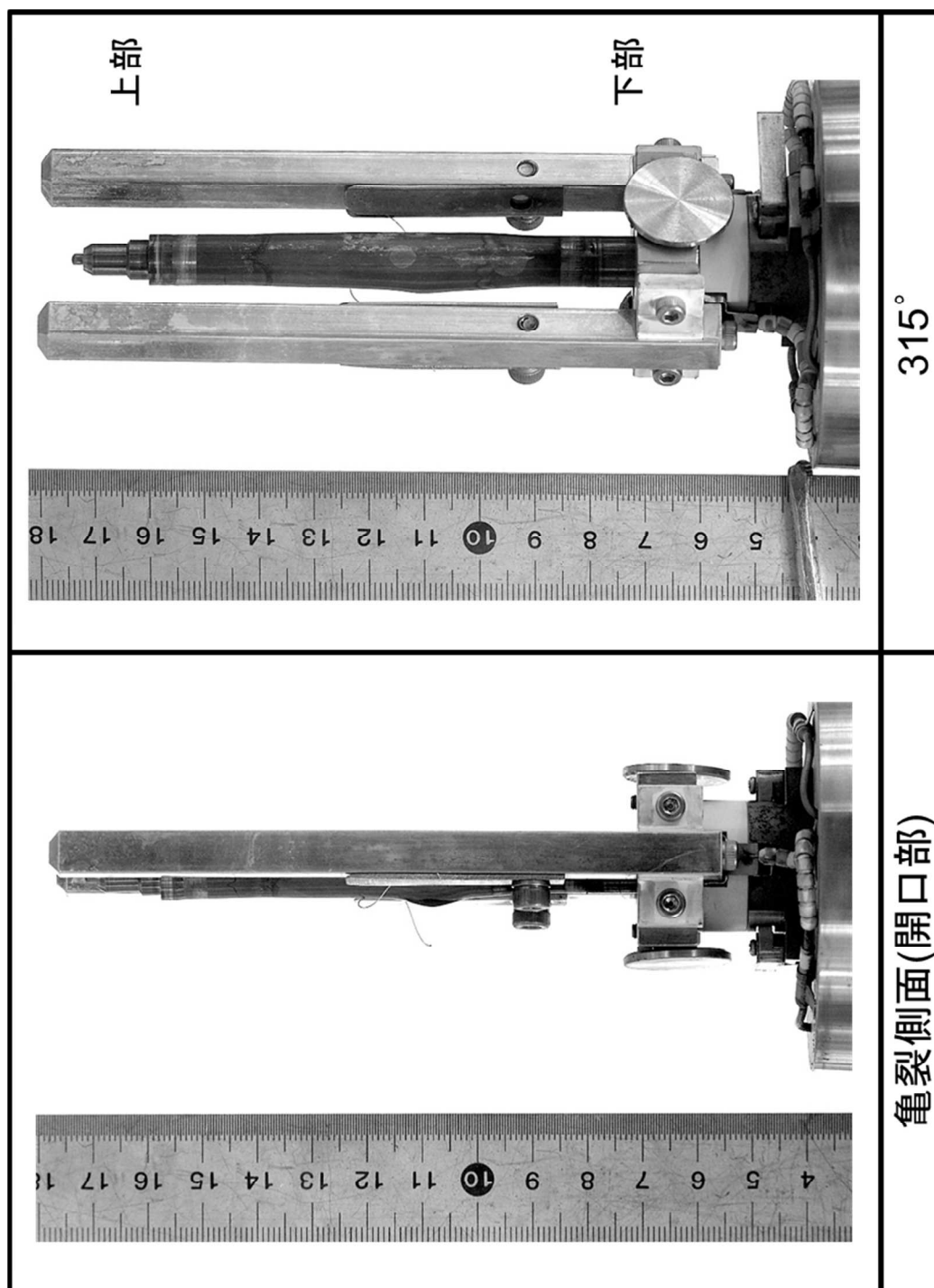


図 4.4.2-9(5) CN-2 試験燃料棒パルス後外観

4.4.3 CN-1 実験に関するパルス照射後試験

平成 30 年 9 月 7 日に、高燃焼度 PWR-MOX 燃料を対象とした室温大気圧実験 CN-1 実験を実施し、パルス照射中の過渡記録及び照射後試験（外観、X線）については既に報告した^(2,3)。本報告では、新たに取得したパルス照射後燃料棒寸法測定の結果を示す。

(1) 燃料棒寸法測定

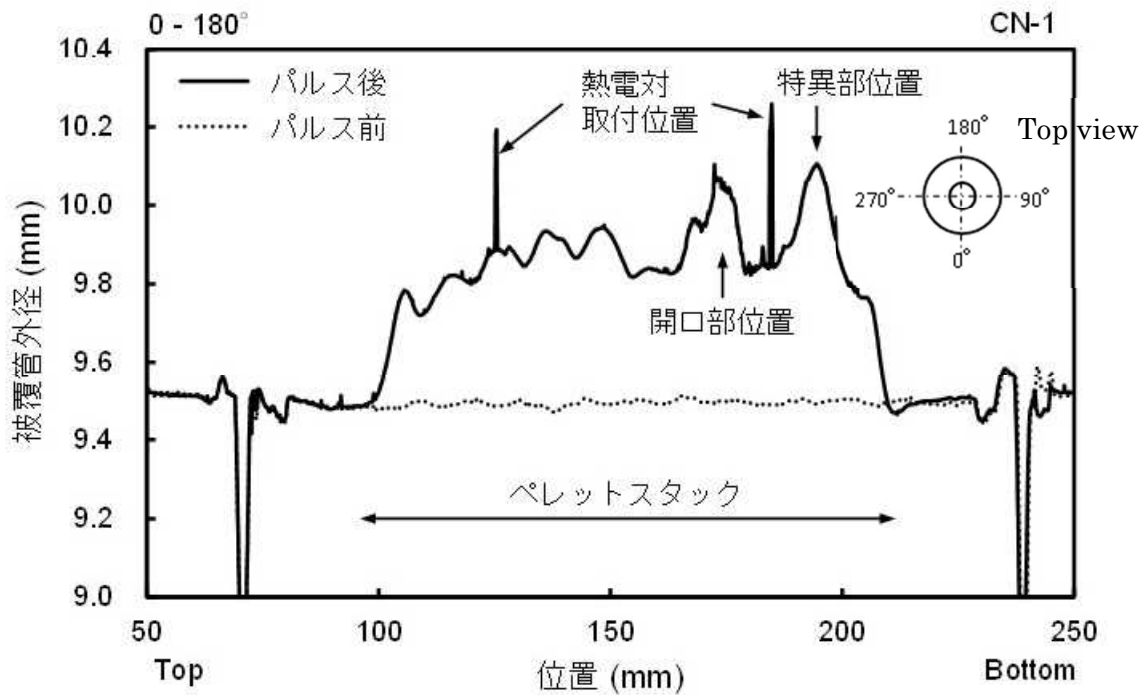
パルス照射後に燃料棒の寸法測定を行った。図 4.4.3-1、図 4.4.3-2、図 4.4.3-3 及び図 4.4.3-4 にそれぞれパルス照射後の燃料棒軸方向外径プロファイル測定結果、燃料棒の曲がり【被覆管上下端栓 V 溝部の外径中心点を結んだ直線（:b）及び試料外径中心点（:a）の偏差（: $\sigma = a - b$ ）の軸方向分布】測定結果、破損（開口）部・特異（膨れ；燃料棒外径最大）部の周方向外径プロファイルの測定位置及びその測定結果を示す。燃料棒軸方向外径プロファイルの結果については、パルス照射前の結果も併せて示す。ただし、パルス照射前に軸方向外径プロファイルを取得していない周方向角度においては、パルス前に取得した各周方向角度における軸方向外径プロファイルの平均値を示す。燃料棒の曲がりについては、測定方向及び曲がり方向（曲がりの符号）を表 4.4.3-1 に示す。燃料棒周方向外径プロファイルの結果（図 4.4.3-4）については、横軸を周方向角度として 0-180°～180-0°の外径測定値を示し、合わせて破損部領域及び特異部領域の凡その周方向角度も示す。

図 4.4.3-1 に示す 0-180°、13.2-193.2°、164.2-344.2°、171.8-351.8°及び 175.7-355.7°方向（0-180°周方向近傍角度）の外径測定結果では、Top から約 125 mm 及び 約 185 mm の位置においてスパイク状の外径増大が観察されるが、これはそれぞれ熱電対#2（～200 °C）及び熱電対#1（～800 °C）^②の取付位置に対応したものである。図 4.4.3-1 から破損部位置（Top から約 175 mm 位置）及び特異部位置（Top から約 195 mm 位置）においてピークが観察され、各位置における最大ひずみは、それぞれ約 6.8%及び約 8.1%であった（被覆管外径はそれぞれ約 10.15 mm 及び 10.27 mm）。

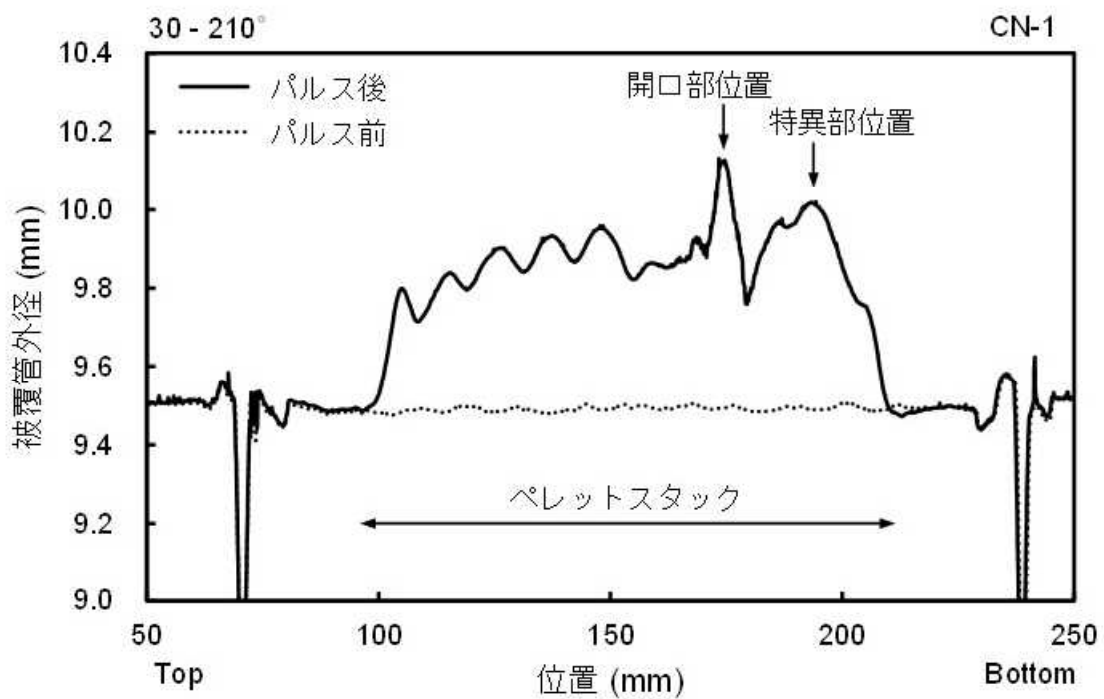
図 4.4.3-2 によると、曲がりパルス照射により増大しており、実験中最大で約 800 °Cを指示した熱電対#1 の周辺に位置する破損部及び特異部周辺では特に大きい（最大約 0.6 mm）ことがわかる。前述の外径測定結果（図 4.4.3-1）同様に、Top から約 125 mm 及び 約 185 mm の位置において観察されるスパイク状の曲がり変位は、熱電対の取付位置に対応したものである。

図 4.4.3-4(1)(2)によると、破損部及び特異部における外径変形の大きい周方向角度は、それぞれ、15°/30°付近及び 155°付近であり、破損部及び特異部における外径の最大値は、それぞれ 10.15 mm、10.29 mm 程度であるとわかる。15°/30°付近はそれぞれ破損部（中央：周方向角度～20.4°）の周方向右側及び周方向左側境界を正面に向けた角度であり、155° 付近は特異部（中央：周方向角度～171.8°）で観測される円状の白い付着物の円外左側を正面に向けた角度である。

軸方向及び周方向外径プロファイルの両結果から得た破損部及び特異部における外径最大値を用いて、破損部及び特異部における最大塑性ひずみをそれぞれ約 6.8%及び約 8.3%と評価した。

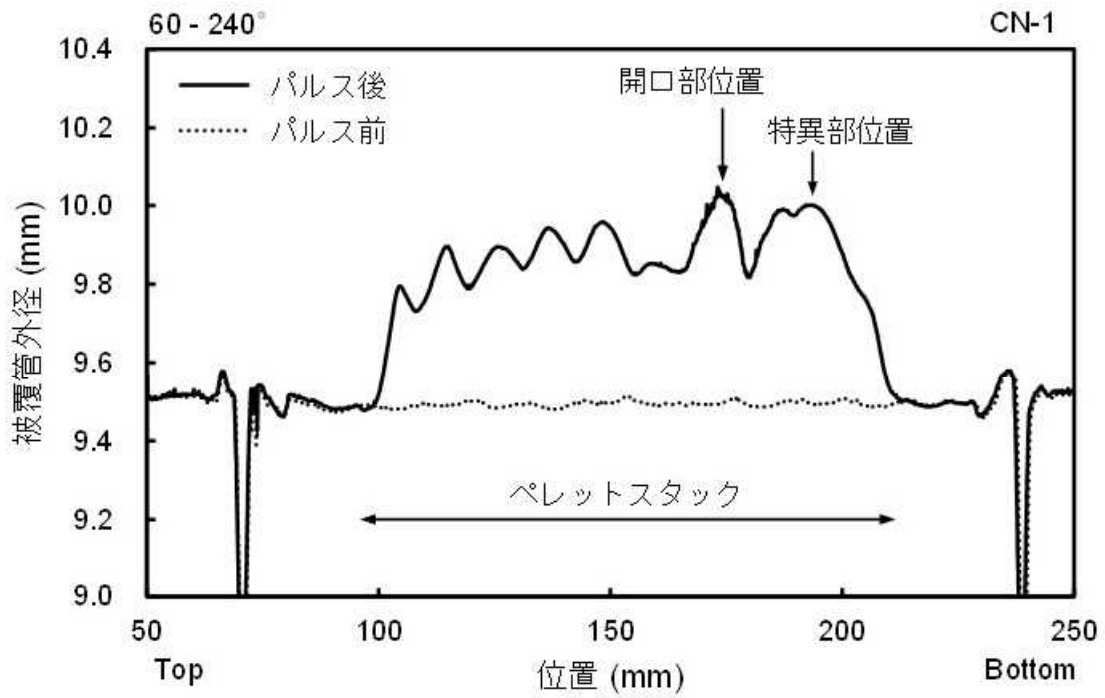


(1) 0 - 180° 方向

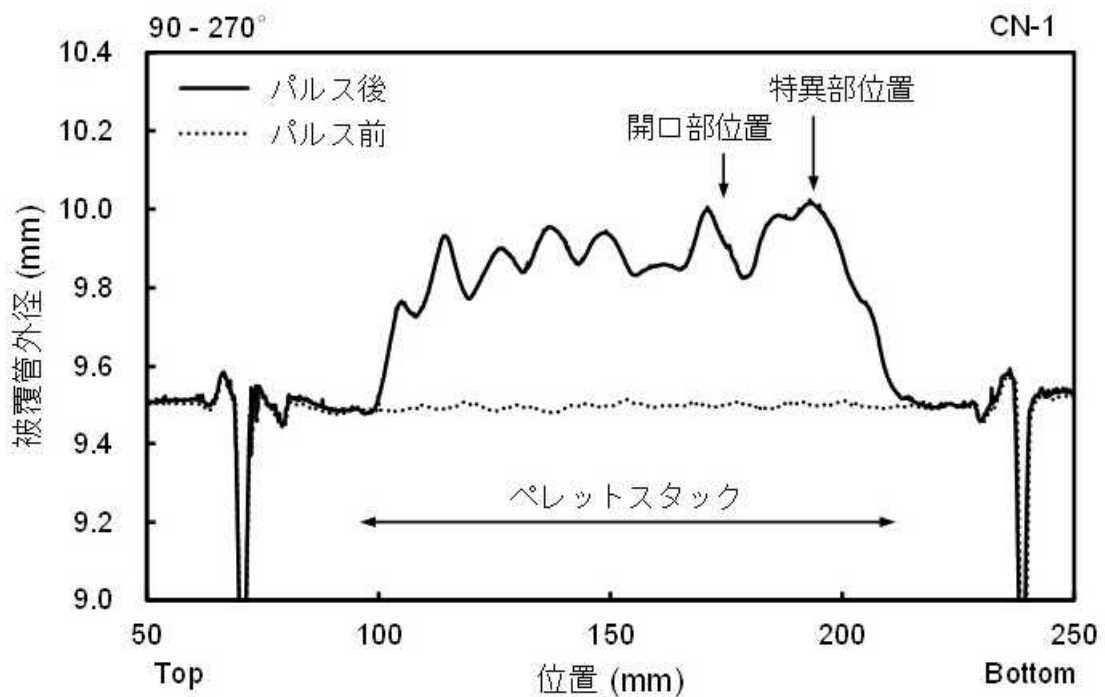


(2) 30 - 210° 方向

図 4.4.3-1 CN-1 実験前後の燃料棒外径 (1/7)

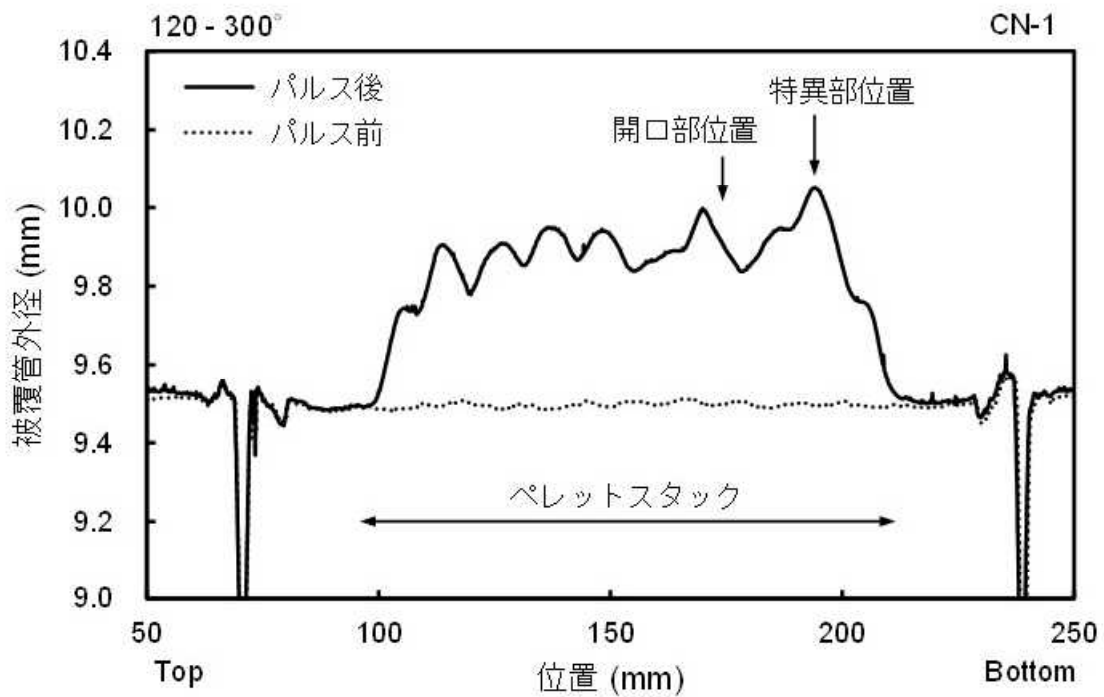


(3) 60 - 240° 方向

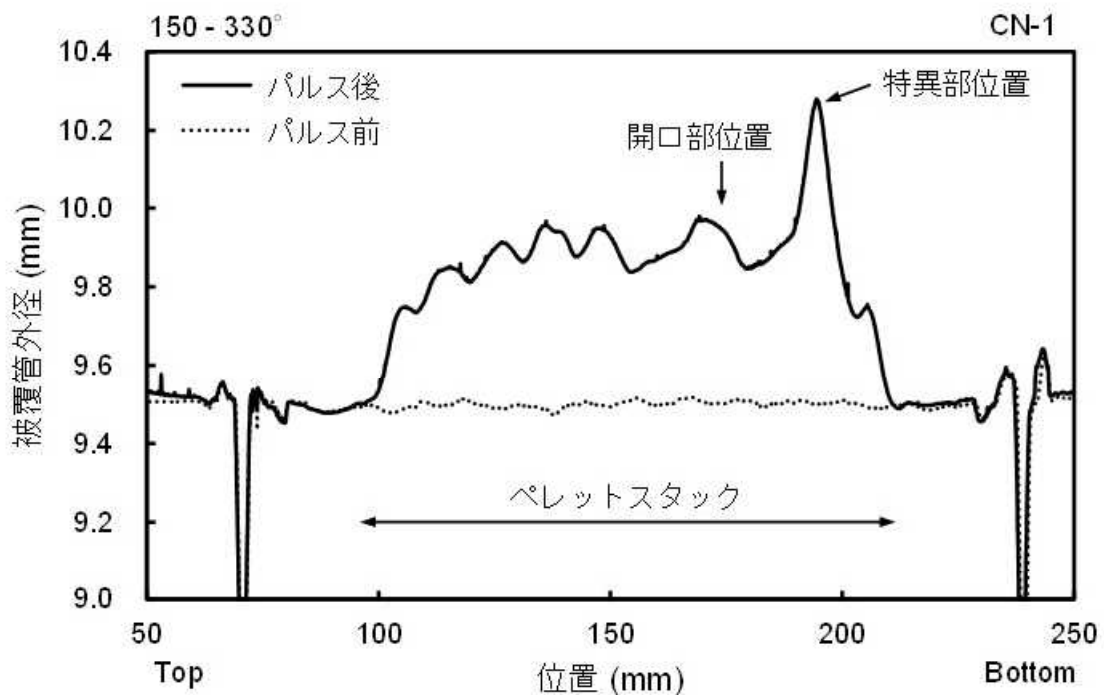


(4) 90 - 270° 方向

図 4.4.3-1 CN-1 実験前後の燃料棒外径 (2/7)

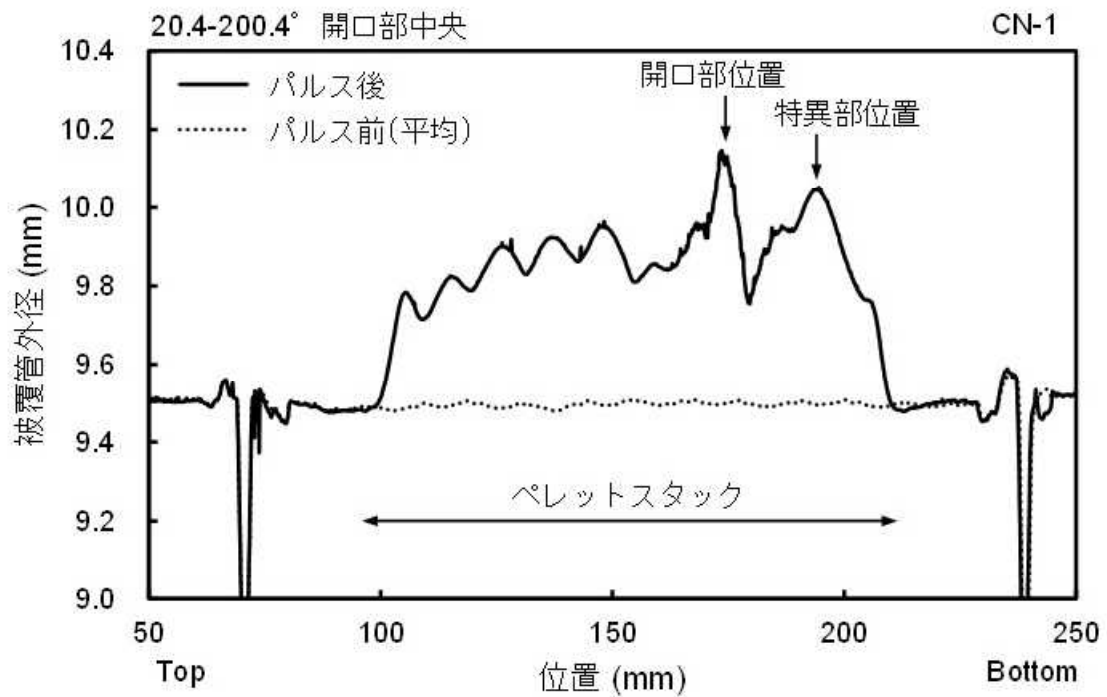


(5) 120 - 300° 方向

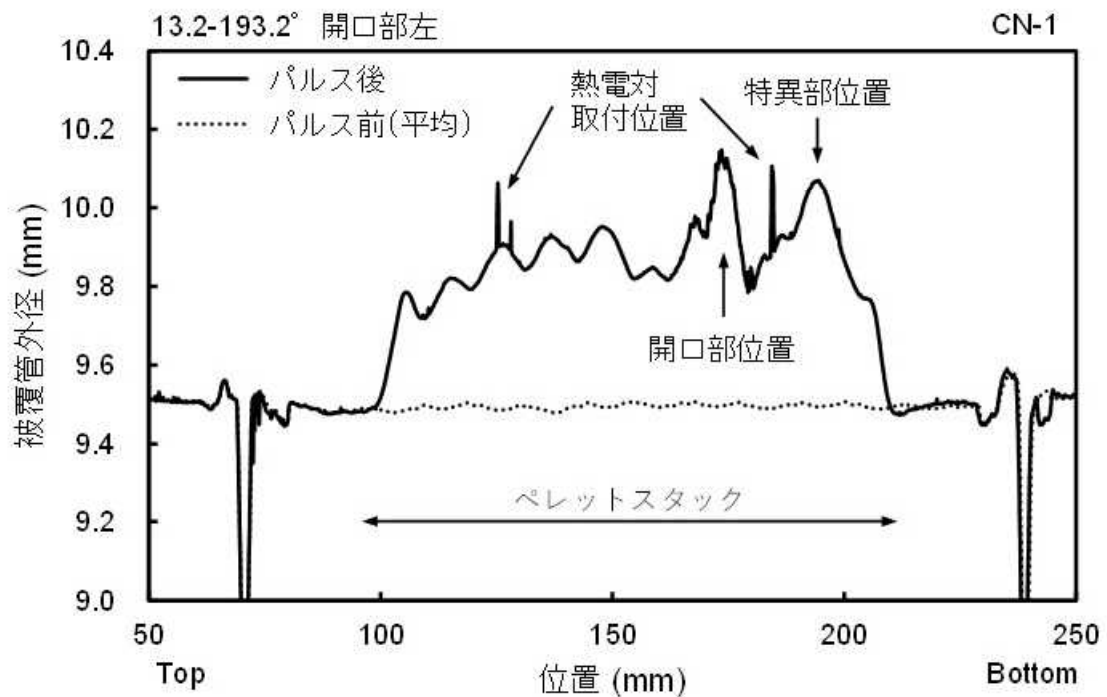


(6) 150 - 330° 方向

図 4.4.3-1 CN-1 実験前後の燃料棒外径 (3/7)

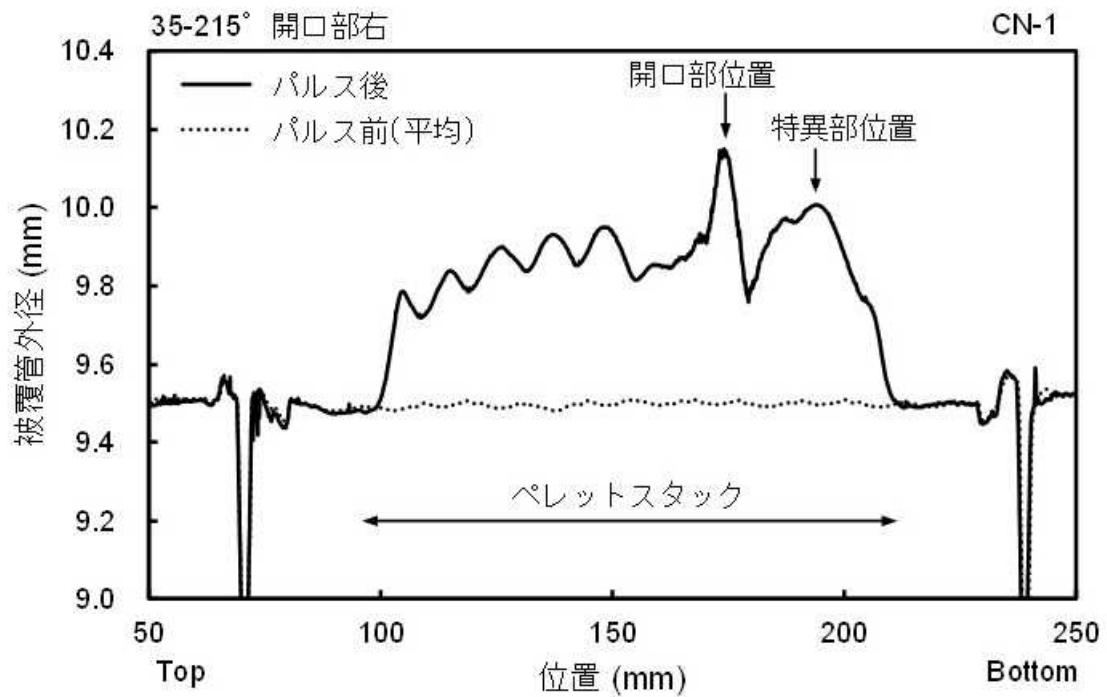


(7) 20.4 - 200.4° 方向 (開口部中央の周方向角度)

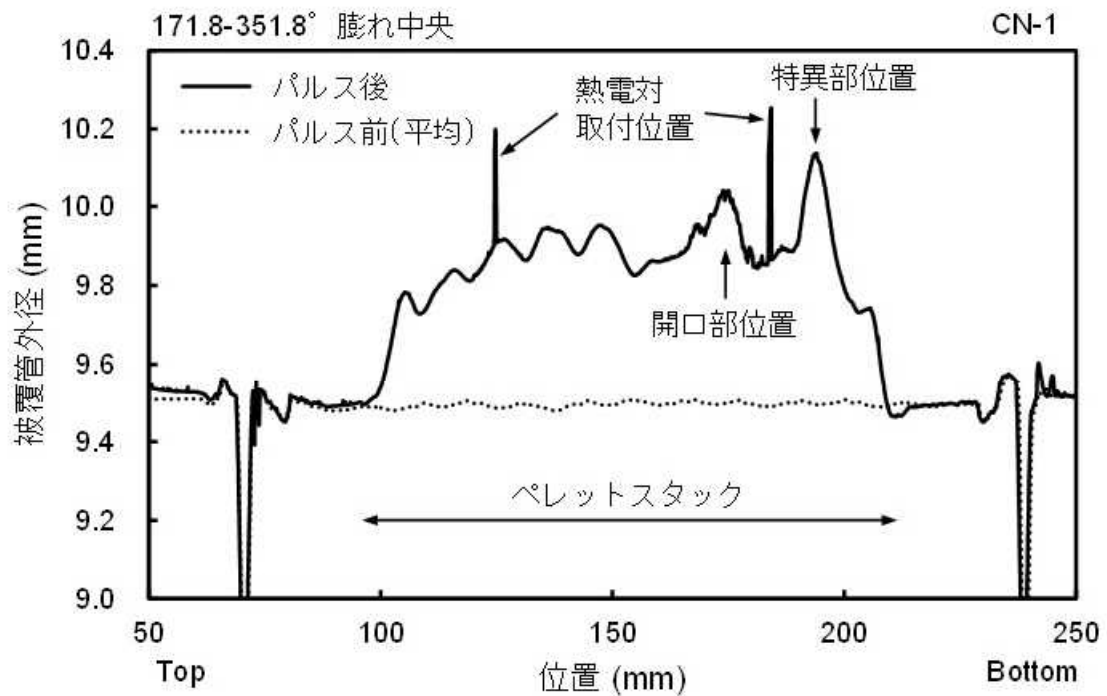


(8) 13.2 - 193.2° 方向 (開口部左側の周方向角度)

図 4.4.3-1 CN-1 実験前後の燃料棒外径 (4/7)

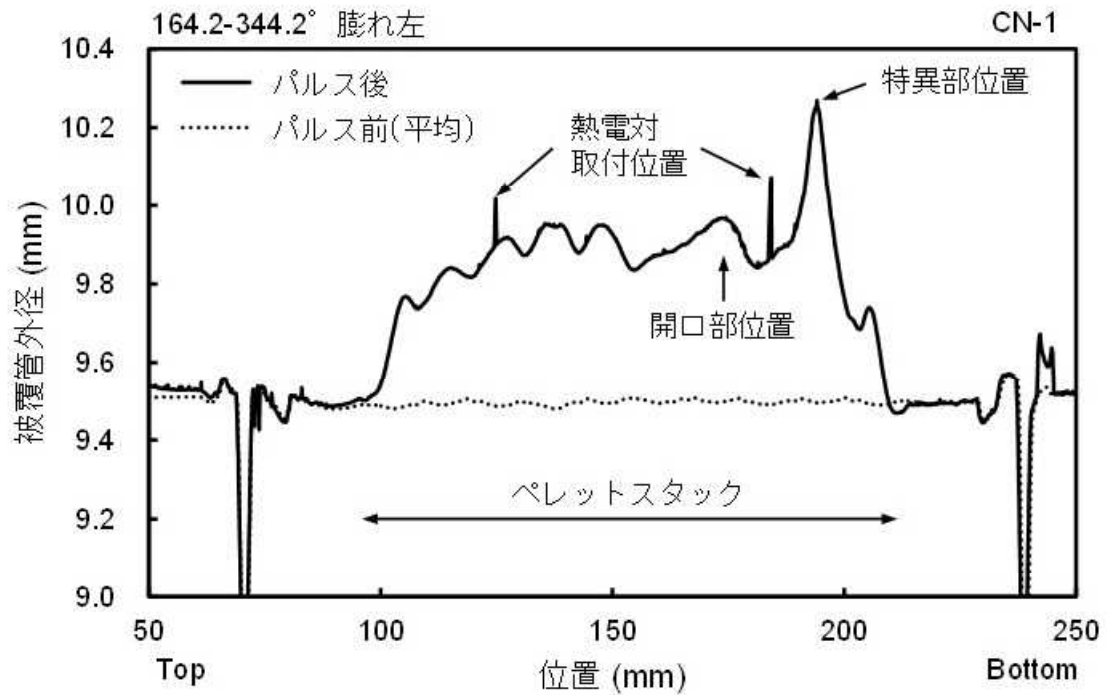


(9) 35 - 215° 方向 (開口部右側の周方向角度)

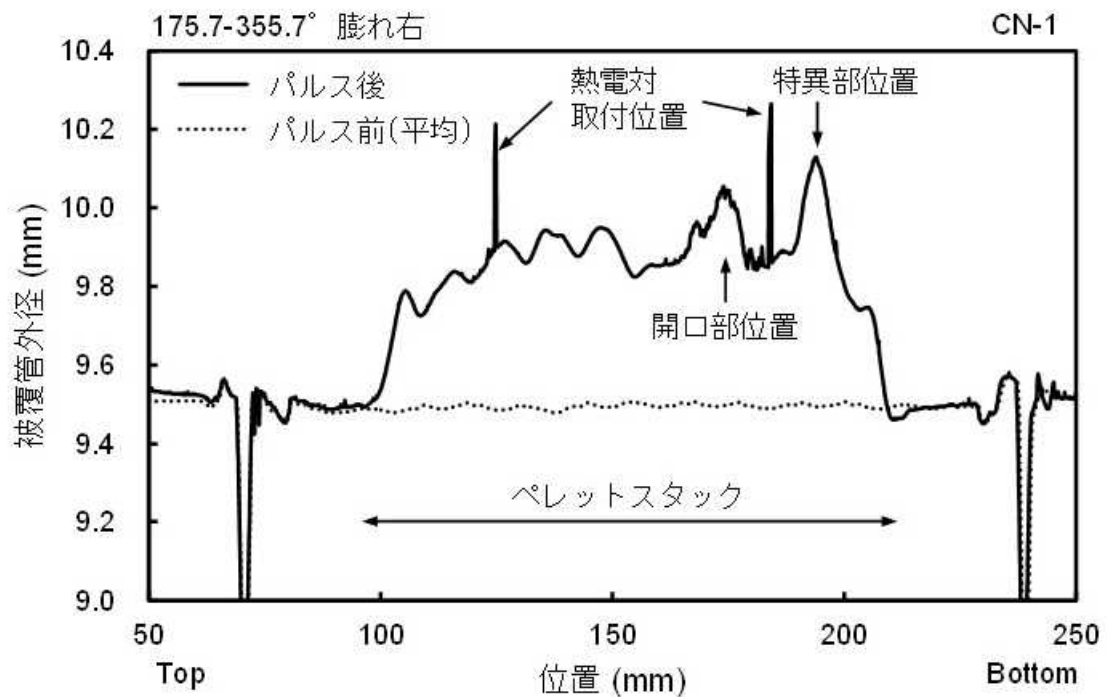


(10) 171.8 - 351.8° 方向 (膨れ部中央の周方向角度)

図 4.4.3-1 CN-1 実験前後の燃料棒外径 (5/7)



(11) 164.2 - 344.2° 方向 (膨れ部左側の周方向角度)



(12) 175.7 - 355.7° 方向 (膨れ部右側の周方向角度)

図 4.4.3-1 CN-1 実験前後の燃料棒外径 (6/7)

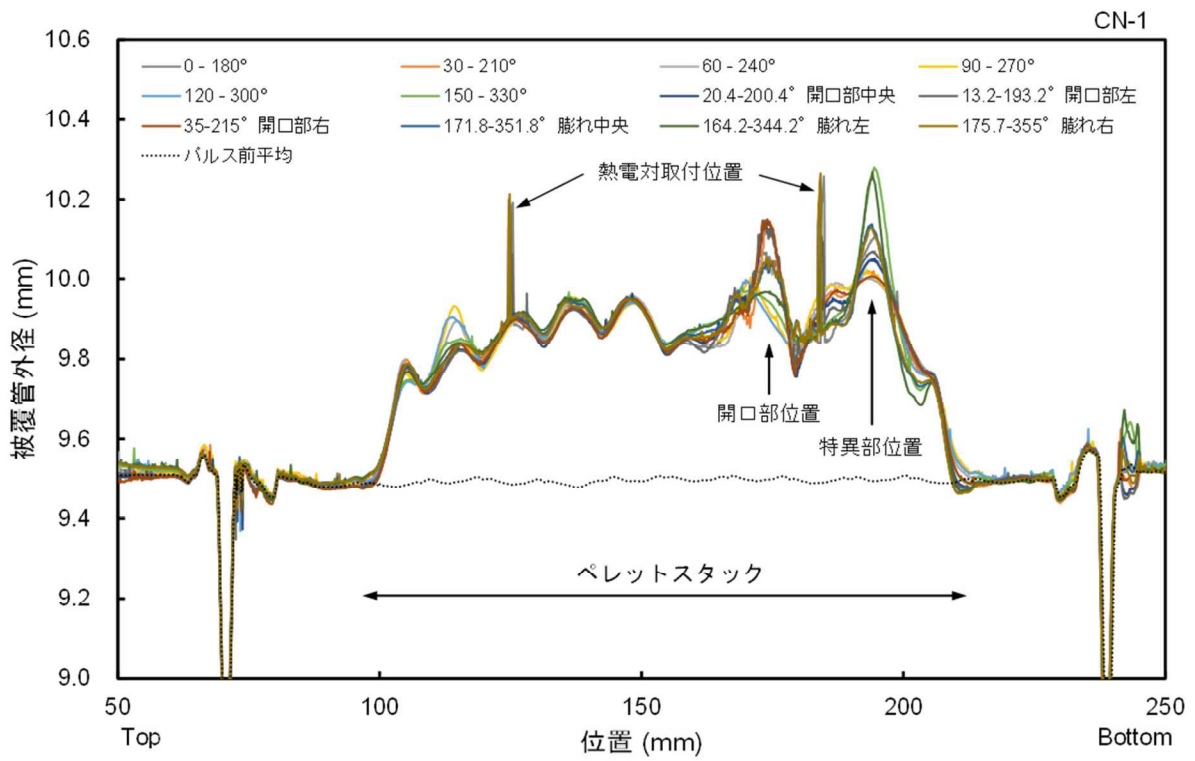
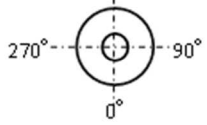


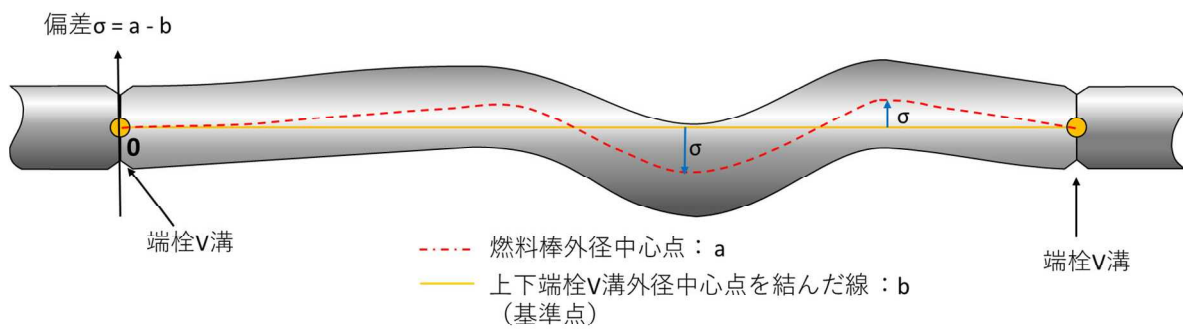
表 4.4.3-1 : 測定方向と曲がりの方向

測定方向	(+)方向	(-)方向
0° (0 - 180°)	0°	180°
30° (30 - 210°)	30°	210°
60° (60 - 240°)	60°	240°
90° (90 - 270°)	90°	270°
120° (120 - 300°)	120°	300°
150° (150 - 330°)	150°	330°
20.4° (20.4 - 200.4°)	20.4°	200.4°
13.2° (13.2 - 193.2°)	13.2°	193.2°
35.0° (35.0 - 215.0°)	35.0°	215.0°
171.8° (171.8 - 351.8°)	171.8°	351.8°
164.2° (164.2 - 344.2°)	164.2°	344.2°
175.7° (175.7 - 355.7°)	175.7°	355.7°

180° Top view

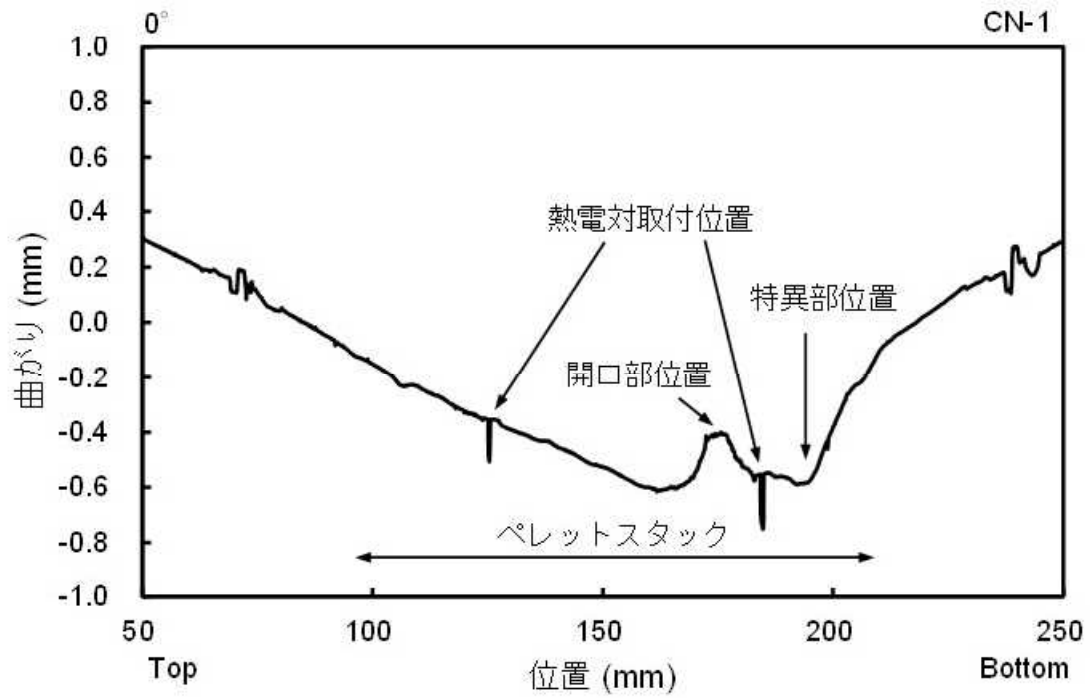


270° 90° 0°

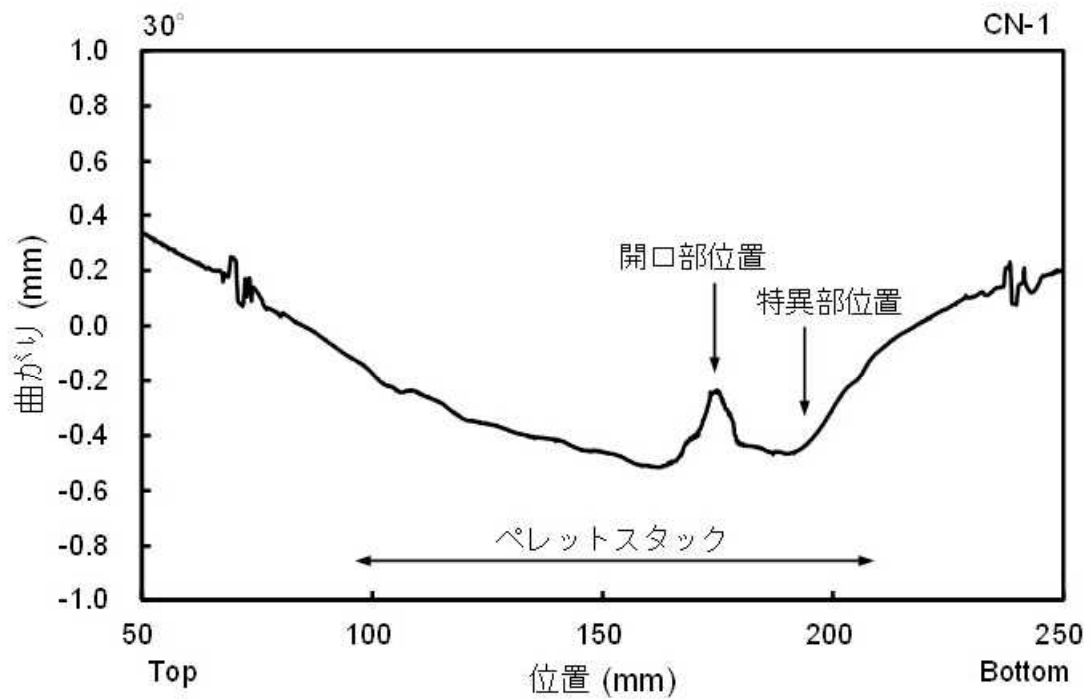


(1) 曲がりの定義

図 4.4.3-2 CN-1 実験後の燃料棒の曲がり (1/8)

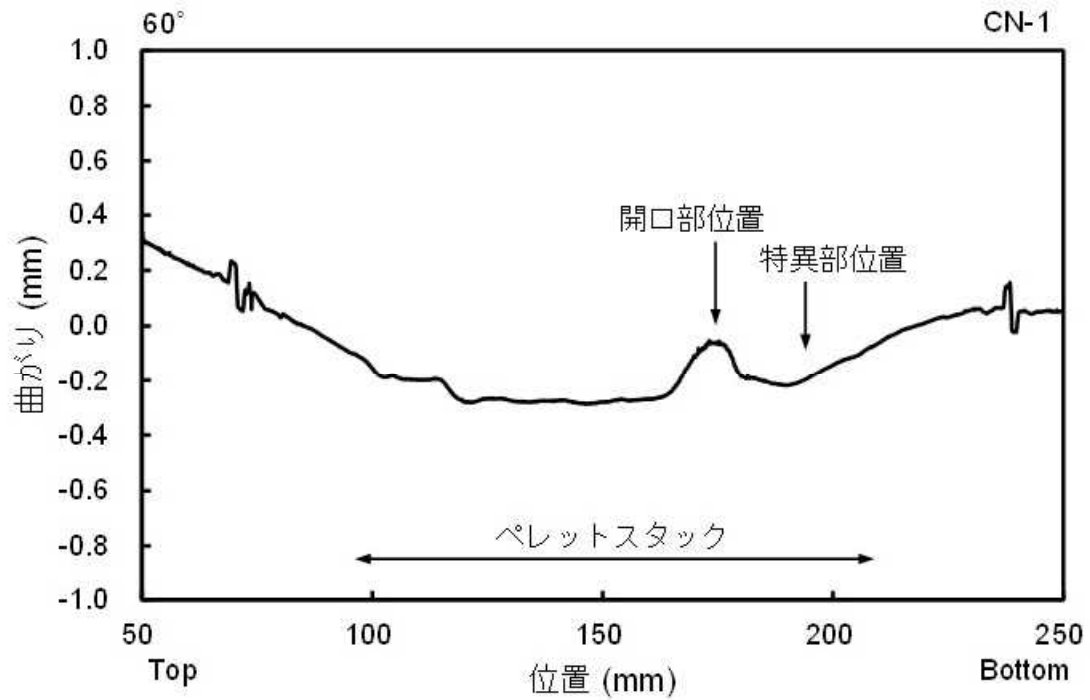


(2) 0° 方向

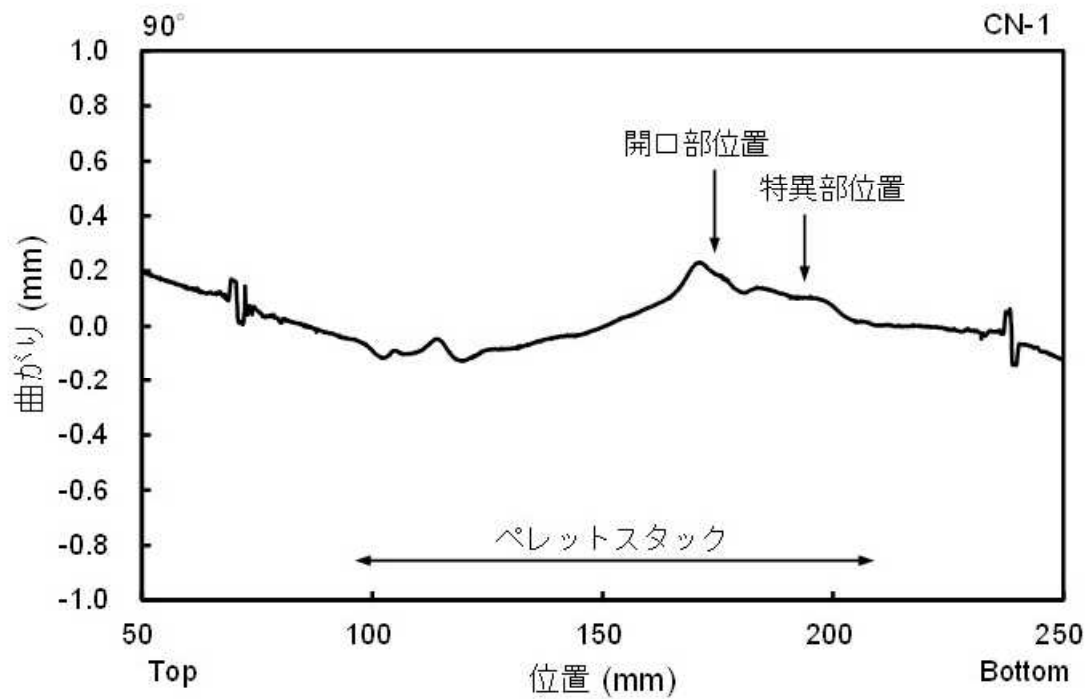


(3) 30° 方向

図 4.4.3-2 CN-1 実験後の燃料棒の曲がり (2/8)

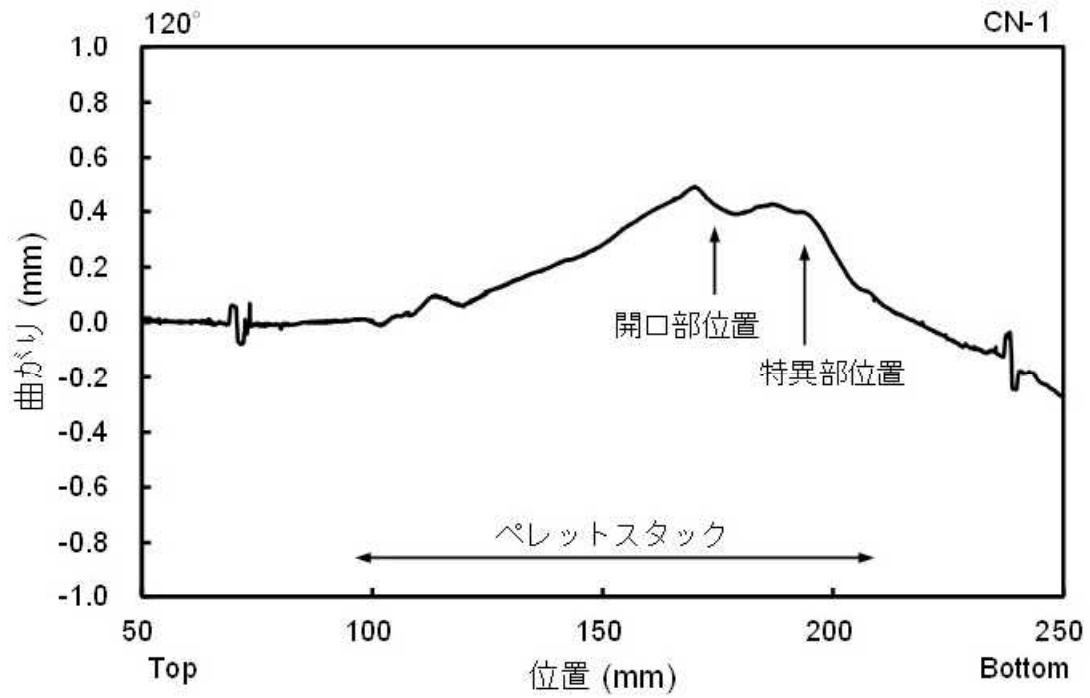


(4) 60° 方向

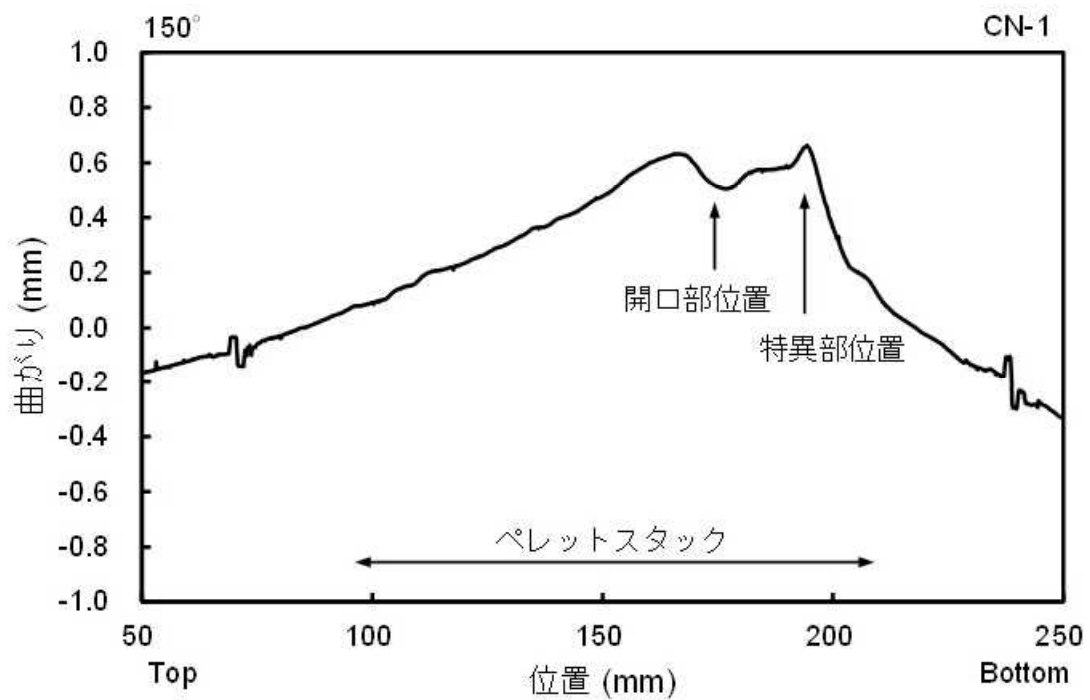


(5) 90° 方向

図 4.4.3-2 CN-1 実験後の燃料棒の曲がり (3/8)

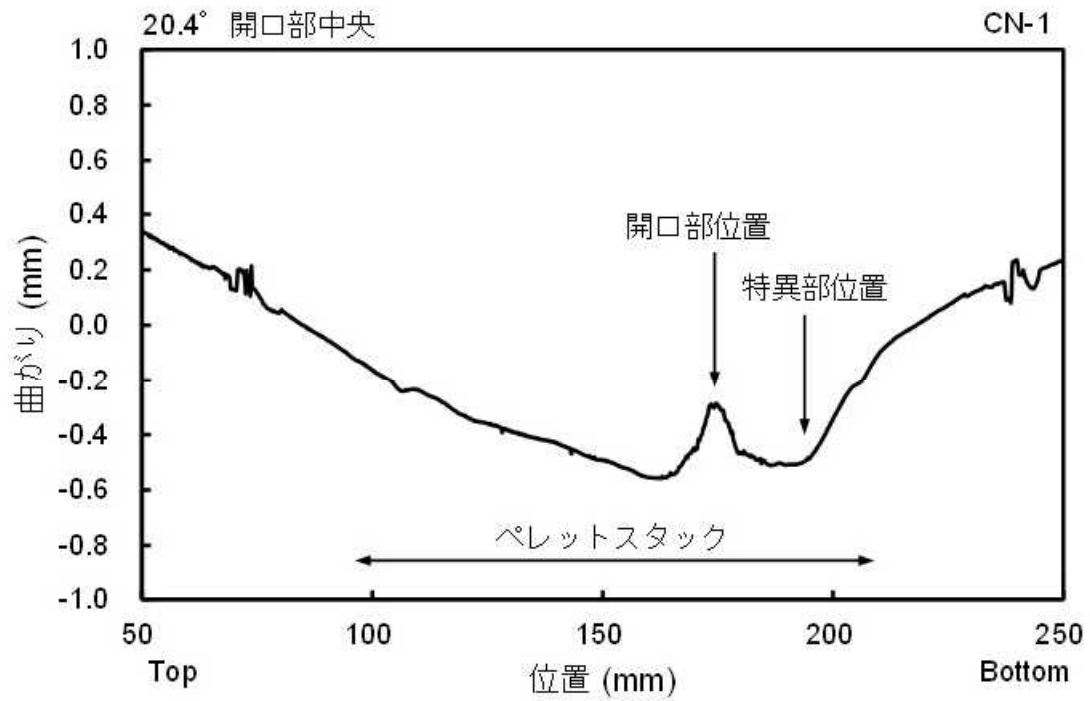


(6) 120° 方向

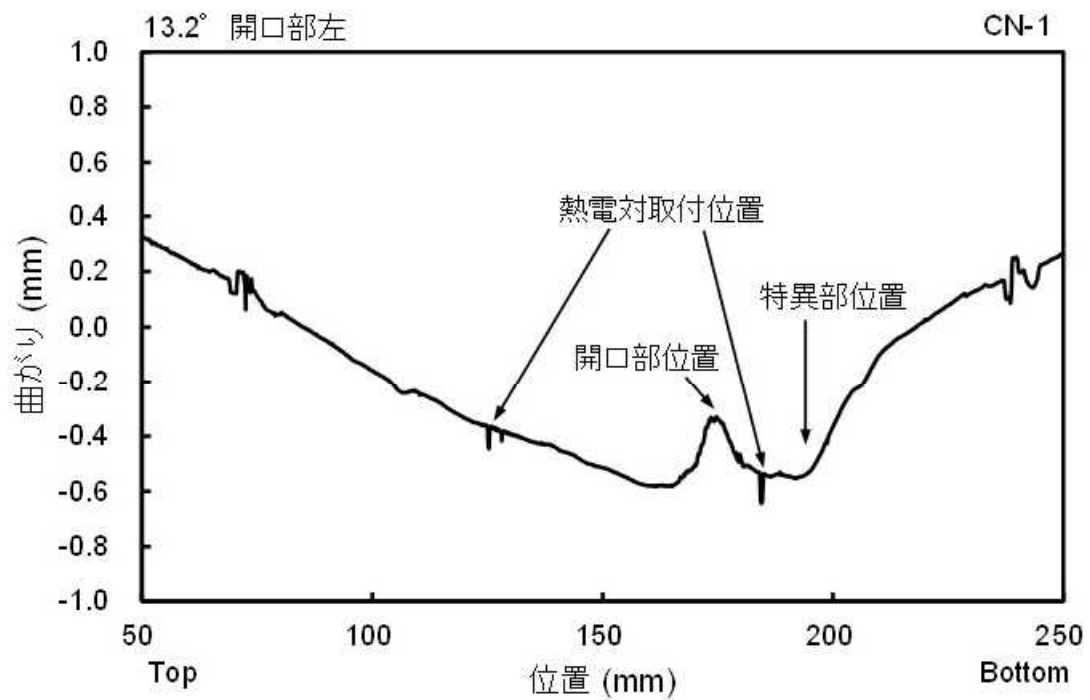


(7) 150° 方向

図 4.4.3-2 CN-1 実験後の燃料棒の曲がり (4/8)

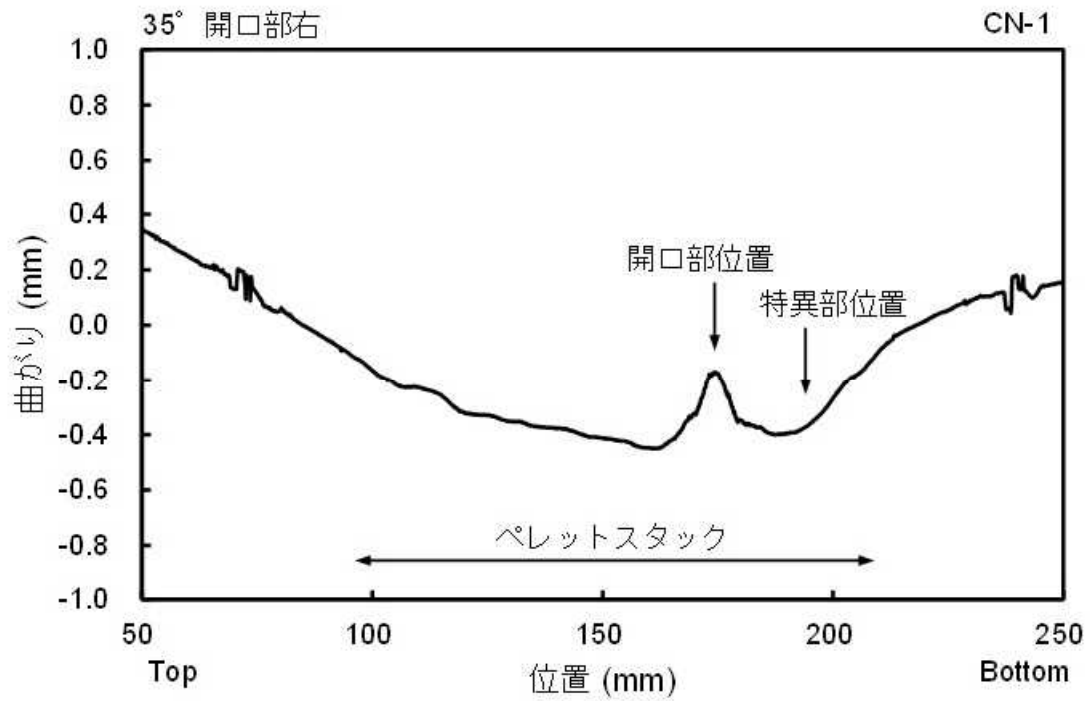


(8) 20.4° 方向 (開口部中央の周方向角度)

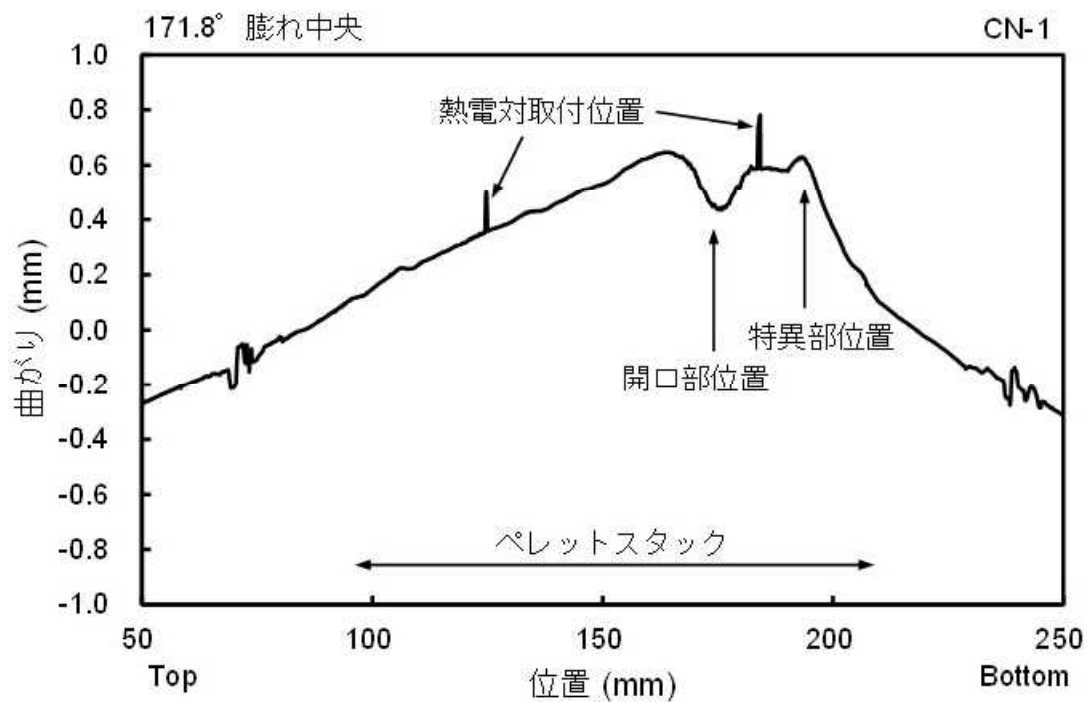


(9) 13.2° 方向 (開口部左側の周方向角度)

図 4.4.3-2 CN-1 実験後の燃料棒の曲がり (5/8)

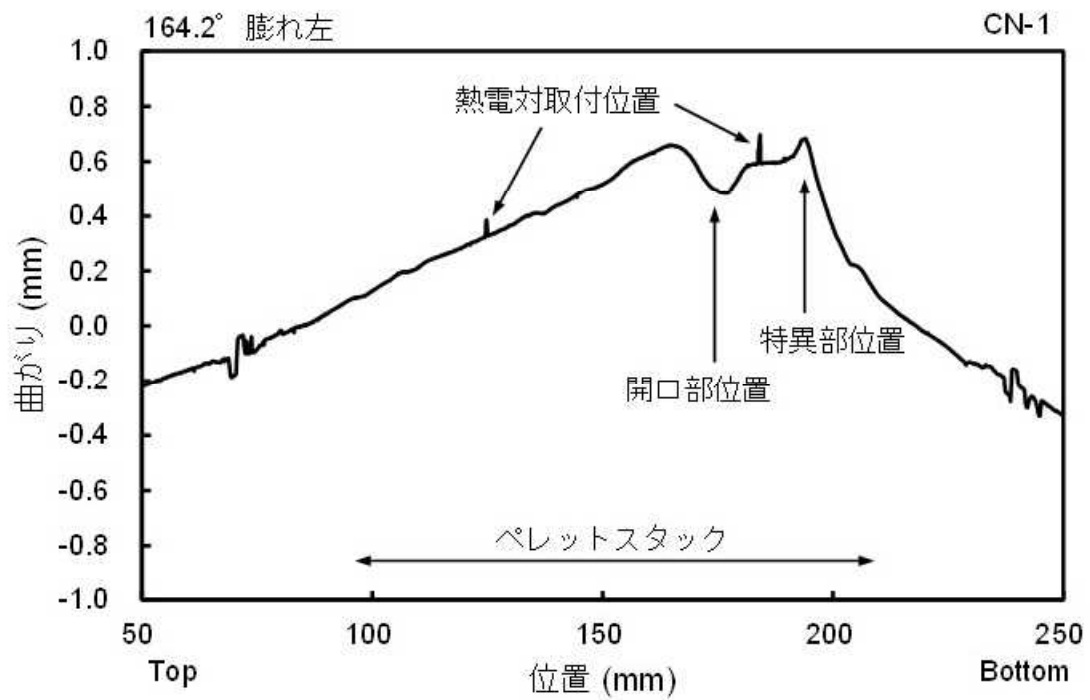


(10) 35° 方向 (開口部右側の周方向角度)

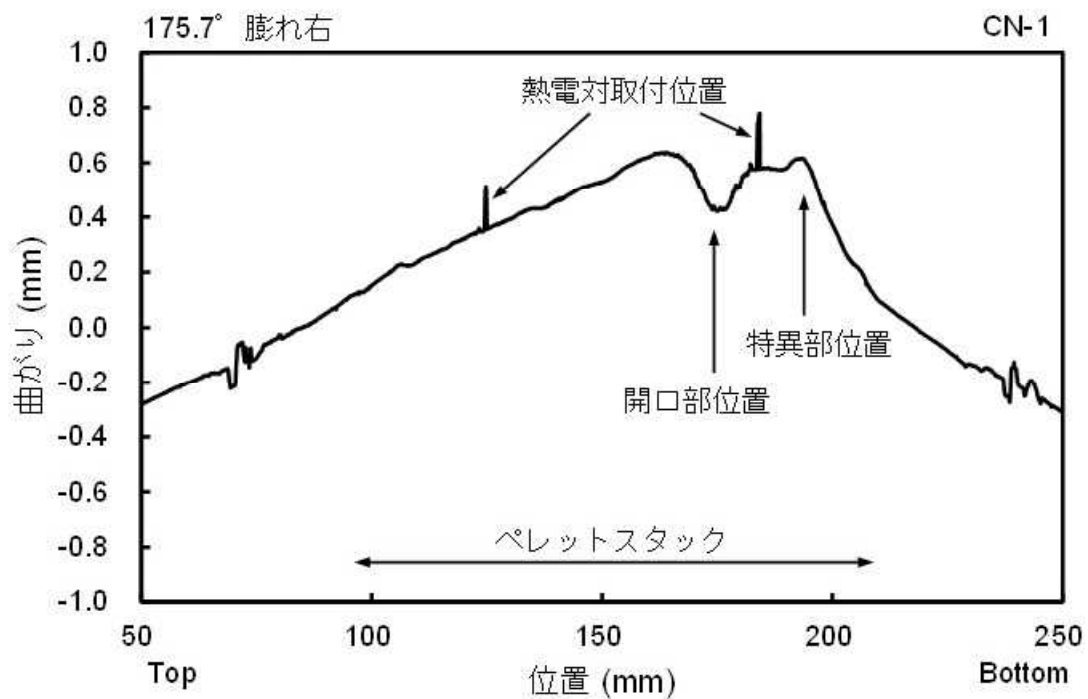


(11) 171.8° 方向 (膨れ部中央の周方向角度)

図 4.4.3-2 CN-1 実験後の燃料棒の曲がり (6/8)

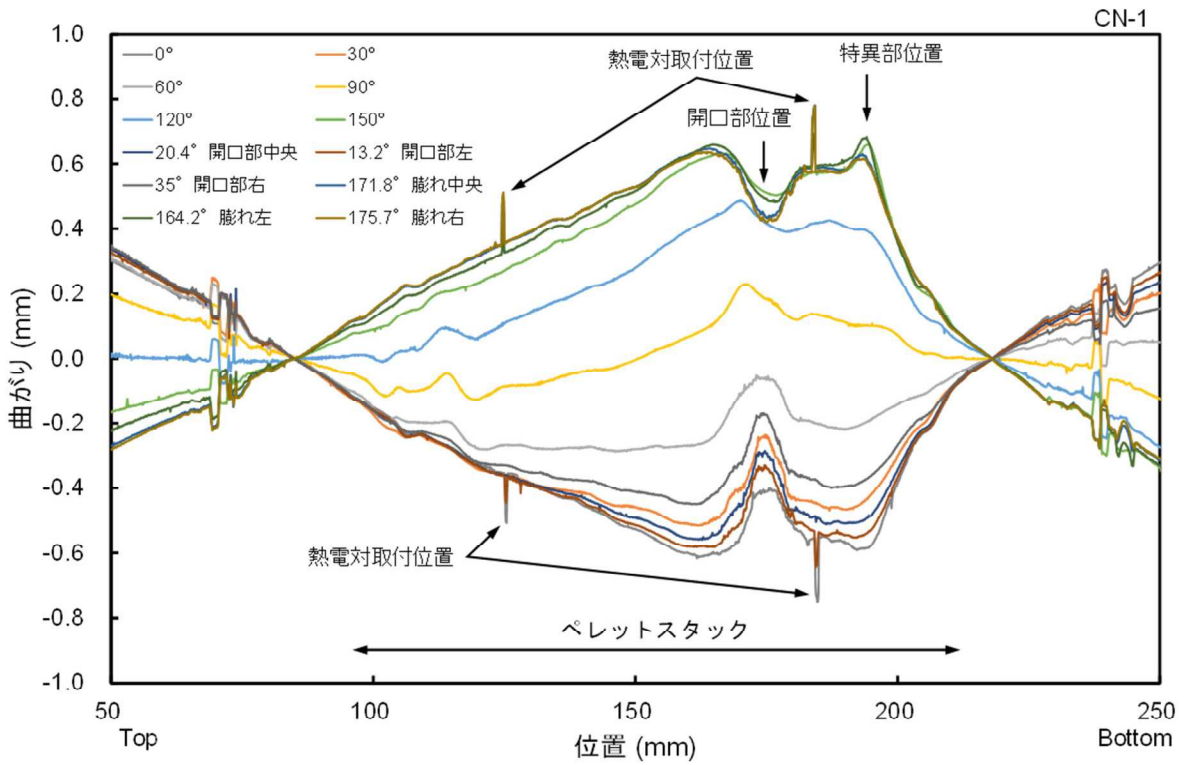


(12) 164.2° 方向 (膨れ部左側の周方向角度)



(13) 175.7° 方向 (膨れ部右側の周方向角度)

図 4.4.3-2 CN-1 実験後の燃料棒の曲がり (7/8)



(14) 燃料棒曲がり全角度方向まとめ

図 4.4.3-2 CN-1 実験後の燃料棒の曲がり (8/8)

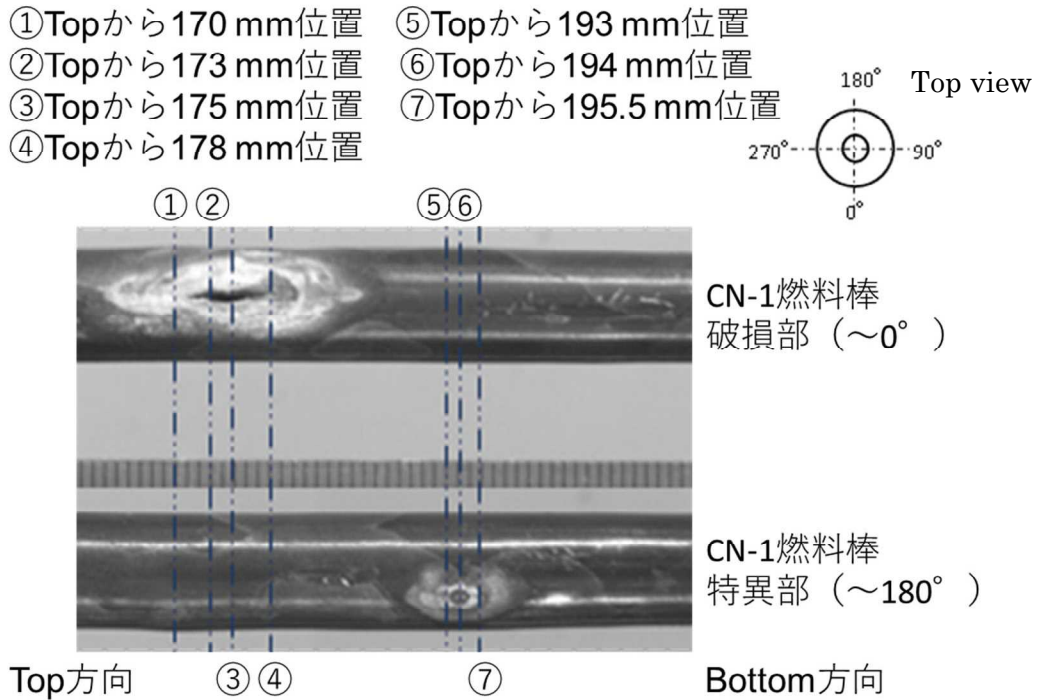
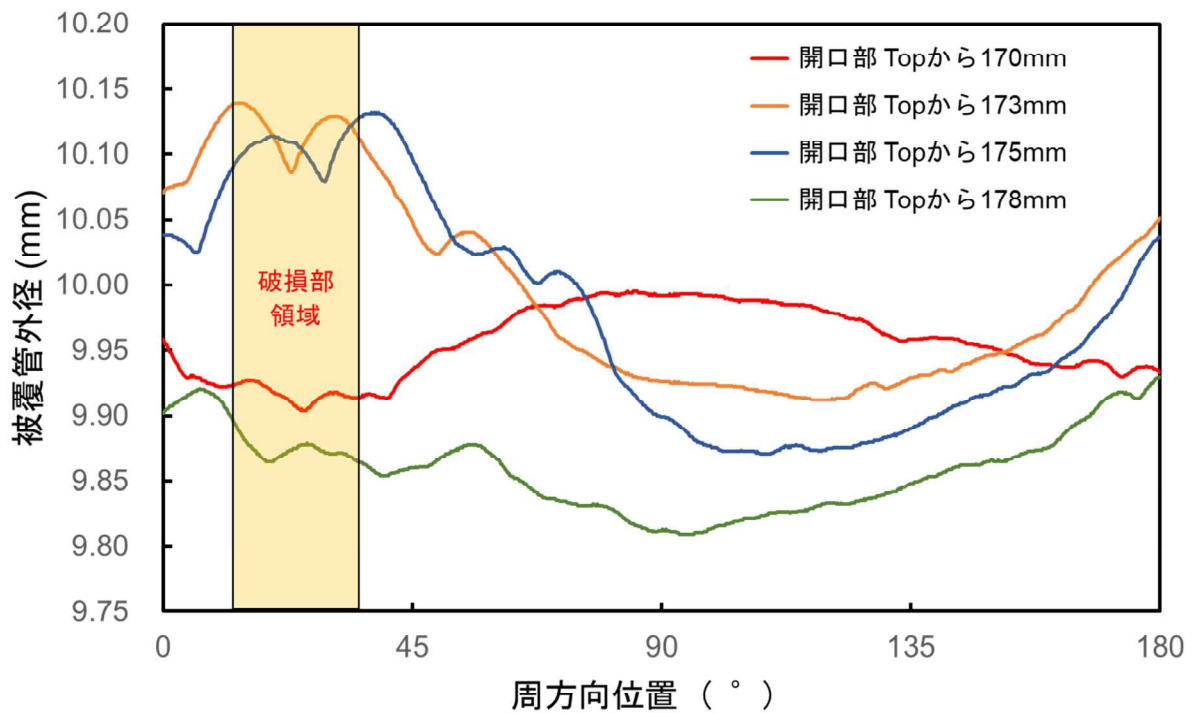
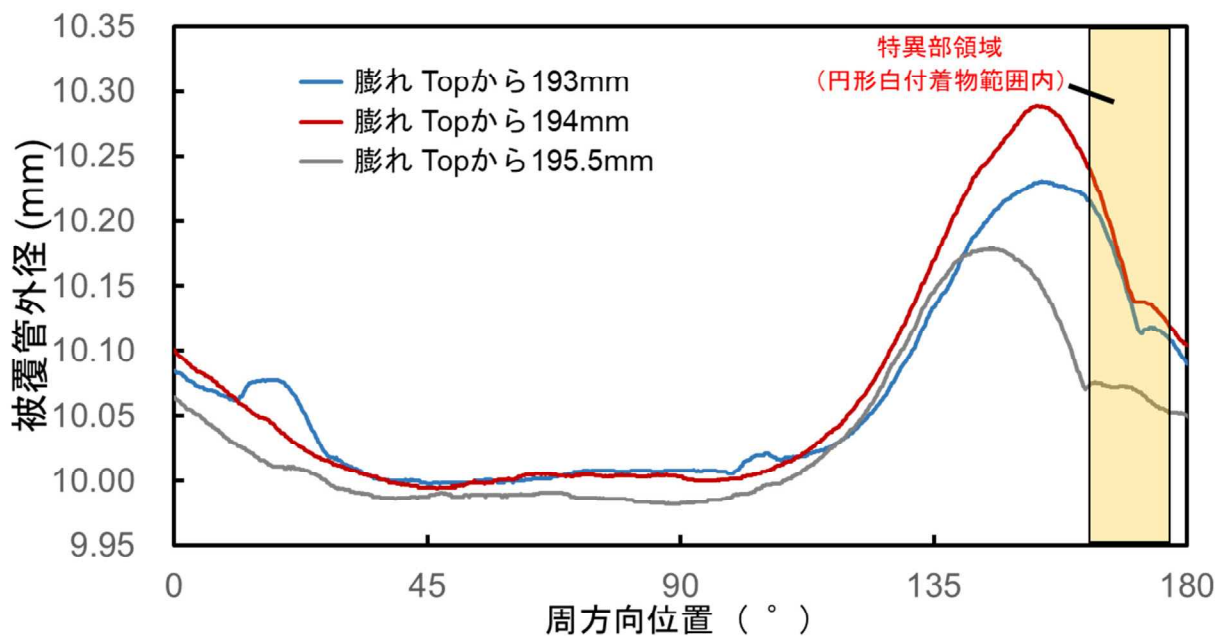


図 4.4.3-3 CN-1 実験後の燃料棒周方向外径プロフィール測定位置



(1) 破損部 (開口部) 位置

図 4.4.3-4 CN-1 実験後の燃料棒周方向外径プロフィール (1/2)



(2) 特異部 (膨れ部) 位置

図 4.4.3-4 CN-1 実験後の燃料棒周方向外径プロフィール (2/2)