

令和2年度原子力規制庁委託成果報告書

原子力施設等防災対策等委託費
(燃料破損に関する規制高度化研究) 事業
(令和2年度分)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
安全研究センター
令和4年3月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

目 次

| | |
|---|--------|
| 1 章 緒言 | 1-1 |
| 2 章 全体計画 | 2-1 |
| 2.1 目的 | 2-1 |
| 2.2 実施内容 | 2-1 |
| 2.2.1 LOCA 試験 | 2-2 |
| 2.2.2 RIA 試験 | 2-7 |
| 2.2.3 高温試験 | 2-10 |
| 2.2.4 改良型燃料被覆管の照射成長試験 | 2-10 |
| 3 章 令和 2 年度燃料破損に関する規制高度化研究事業の概要 | 3-1 |
| 3.1 LOCA 試験 | 3-1 |
| 3.2 RIA 試験解析 | 3-1 |
| 3.3 高温試験 | 3-1 |
| 3.4 改良型燃料被覆管の照射成長試験 | 3-1 |
| 4 章 令和 2 年度燃料破損に関する規制高度化研究事業の実施内容 | 4.1-1 |
| 4.1 燃料検査 | 4.1-1 |
| 4.1.1 燃料セグメントに対する非破壊試験 | 4.1-1 |
| 4.2 レファレンス試験 | 4.2-1 |
| 4.3 LOCA 試験 | 4.3-1 |
| 4.3.1 LOCA 模擬試験 | 4.3-1 |
| 4.3.2 燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験 | 4.3-3 |
| 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 | 4.3-14 |
| 4.4 RIA 試験 | 4.4-1 |
| 4.4.1 LS-5 実験 | 4.4-1 |
| 4.4.2 CN-2 実験 | 4.4-27 |
| 4.4.3 CN-1 実験に関するパルス照射後試験 | 4.4-57 |
| 4.4.4 被覆管機械特性試験 | 4.4-74 |
| 4.5 高温試験 | 4.5-1 |
| 4.5.1 高温条件下の燃料挙動に関する調査 | 4.5-1 |
| 4.5.2 炉心損傷判断基準の妥当性について | 4.5-1 |
| 4.5.3 高温試験条件の検討 | 4.5-4 |
| 4.6 解析評価 | 4.6-1 |
| 4.6.1 概要 | 4.6-1 |
| 4.6.2 OS-1 実験下で生じた PCMI における FP ガス寄与の検討 | 4.6-1 |

| | | |
|-------|---|--------|
| 4.6.3 | RIA 実験解析の入力生成に用いたベース照射解析結果の照射後試験結果 による検証 | 4.6-22 |
| 4.6.4 | 熱水力コードによるハルデン LOCA 試験 IFA-650.9 の実験解析 | 4.6-24 |
| 4.6.5 | LOCA 時の燃料被覆管膨れ破裂挙動の不確かさ評価 | 4.6-42 |
| 4.6.6 | LOCA 時の燃料挙動が炉心冷却性に及ぼす影響に関する検討 | 4.6-58 |
| 4.7 | 改良型燃料被覆管の照射成長試験 | 4.7-1 |
| 4.7.1 | 改良型燃料被覆管の照射成長試験の概要 | 4.7-1 |
| 4.7.2 | 照射条件 | 4.7-1 |
| 4.7.3 | 試験結果 | 4.7-4 |
| 4.7.4 | 照射成長に及ぼす合金元素・腐食・水素吸収の影響 | 4.7-6 |
| 4.7.5 | 改良型燃料被覆管の照射成長試験のまとめ | 4.7-6 |
| 4.8 | 廃棄物処分 | 4.8-1 |
| 4.9 | 専門部会の開催 | 4.9-1 |
| 4.10 | 事業の進捗管理 | 4.10-1 |
| 5 章 | 結言 | 5-1 |
| | (参考文献) | 6-1 |
| | (用語の解説) | 7-1 |

1 章 緒言

原子力規制庁は、改良型燃料が国内に導入される際の適合性審査の判断根拠となる技術的知見の取得及び高燃焼度で顕在化する事故時燃料挙動の有無の確認のため、海外商業炉において高燃焼度まで照射された改良型燃料¹を対象に、平成 30 年度まで「燃料等安全高度化対策事業」等の試験研究⁽¹⁻¹¹⁾を実施してきた。これらの研究で実施した反応度事故（Reactivity Initiated Accident : RIA）模擬試験において、「被覆管が幾つかの小片に分かれ試験前の燃料棒の形状を喪失する」、「燃料ペレットからの FP ガス放出に伴い燃料棒内圧が上昇し、被覆管が局所的に膨れて破損する」など、従来とは異なる燃料破損挙動が観察されている。また、海外で国際共同プロジェクトとして実施された冷却材喪失事故（Loss of Coolant Accident : LOCA）模擬試験において、燃料棒内で細片化した燃料ペレットの被覆管膨れ部への集積、被覆管破裂開口部からの放出など、従来の想定とは異なる LOCA 時燃料破損挙動が報告されている。これらの燃料挙動は事故時及び事故後の炉心冷却性に影響を及ぼす可能性があり、その把握は原子炉施設の安全規制上の重要な課題の一つとなっている。一方、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成二十五年原子力規制委員会規則第五号）」（以下、規則という。）の「解釈」において引用され、現在の適合性審査に用いられている燃料に関する判断基準を示した指針類は、旧原子力安全委員会が策定当時の知見に基づいて決定または了承したものである。原子力規制庁が実施してきた試験研究において、一部の改良型燃料の RIA 時破損限界が、現在の規制基準の一つである「ペレット被覆管機械的相互作用（PCMI）破損」のしきい値を下回った例が報告⁽¹¹⁾されており、この破損限界低下をもたらした原因について早急な説明が求められている。今後の適合性審査に最新知見を反映させる観点及び規制基準見直し要否の検討の観点から、上記の試験研究等で新たに観察された事故時の燃料破損挙動について破損発生の条件及びメカニズムを把握する必要がある。

上記の他、設計基準事故を超えるような条件に原子炉施設が至るような場合、規制側としては現在設計基準 LOCA 時の炉心冷却性維持を目的とした基準に基づき炉心の著しい損傷の開始と拡大防止策の有効性を判断しているが、このような判断基準の妥当性については検討の余地がある。検討に当たっては、実際に炉心の著しい損傷が起こる条件の評価が必要であり、これに向け、上記の基準を超えるような高温条件での燃料損傷挙動について知見を整理、拡充する必要がある。

¹ 民間事業者が、資源の有効利用や二酸化炭素の放出削減などの社会的要請に一層応える目的で開発を進めている燃料であり、従来の規格を大幅に超えて合金成分を変更した新合金被覆管や結晶組織を変更したペレットを採用することで、現行型の燃料に比べて発電用軽水炉で使用中の燃料被覆管の腐食や照射損傷等による劣化の抑制を図っている。このような改良型燃料の発電用軽水炉への導入は、改良型燃料の有する特長から原子力発電の安全性をより高めるものと考えられている。

上記の目的のため、平成 31 年度から「燃料破損に関する規制高度化研究」を開始した⁽¹²⁾。
本報告書は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構安全研究センターが原子力規制委員会原子力規制庁の委託を受け実施した、令和 2 年度原子力施設等防災対策等委託費（燃料破損に関する規制高度化研究）事業で得た成果をとりまとめたものである。

2 章 全体計画

2.1 目的

改良型燃料が国内に導入される際の適合性審査の判断根拠となる技術的知見の取得及び高燃焼度で顕在化する事故時燃料挙動の有無の確認を目的として、海外商業炉において高燃焼度まで照射された改良型燃料を用いた試験研究を平成 30 年度まで実施してきた。そこで実施した RIA 模擬試験、及び国際共同プロジェクトとして海外の試験機関で実施された LOCA 模擬試験において、従前と異なる燃料破損挙動が観察された。一方、現在「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成二十五年原子力規制委員会規則第五号）」（以下、規則という。）の「解釈」において引用され、適合性審査に用いられている燃料に関する判断基準を示した指針類は、旧原子力安全委員会が策定当時の知見に基づき、決定あるいは了承したものであり、指針類策定時には観察されていなかった燃料破損挙動については反映されていない。現在まで十分な知見が得られていない燃料の損傷及び破損挙動に関しては、その発生条件やメカニズムを調べ、審査等の際の判断に必要な知見として整備するとともに、現行指針類の見直しの要否の検討に反映する必要がある。また、LOCA 時の炉心の著しい損傷開始と事故拡大防止策の有効性を判断する基準として、現在は設計基準事故としての LOCA に関する基準（LOCA 基準）が用いられているが、この基準適用の妥当性については明確になっていない。本事業では、設計基準事故時及びその後の炉心の冷却性や未臨界性等の安全性維持に関して、現行指針類策定時には観察されていなかった燃料破損挙動等の新しい知見を取り込んだより確かな規制のため、事故時の燃料ペレットの細片化挙動、被覆管破損挙動、被覆管破損に伴う燃料ペレット片の燃料棒外放出挙動、LOCA 基準を超える高温条件での燃料損傷挙動等に係る知見を取得する。

取得する知見、データは、

- ・ LOCA 燃料挙動に関し、被覆管の酸化速度、急冷時破断限界、膨れ及び破裂挙動
- ・ RIA 時の燃料挙動に関し、燃料破損限界、破損挙動及び破損影響（被覆管破損形態、核分裂ガス放出、燃料微粒子化など）
- ・ 高温条件下の燃料挙動に関し、燃料の破損形態、燃料/被覆管の反応速度など

といった安全審査に反映できるものであり、事故時の燃料破損本数評価、被ばく評価、炉心冷却性や圧力バウンダリ健全性の評価に必要なものである。また、計算コード等を用いた燃料挙動の解析を行い、高燃焼度燃料の事故条件下の挙動を把握する。

2.2 実施内容

本事業では、上記の知見を取得するため、以下の 4 点に着目した研究を実施する。また、事業の全体スケジュールを表 2.2-1 に示す。

- (1) LOCA 時燃料破損が炉心冷却性に与える影響
- (2) RIA 時燃料破損が炉心安全性に与える影響
- (3) 事故時の燃料損傷状態変化
- (4) 燃料材料用改良合金の照射成長挙動に及ぼす合金組成の影響

(1)については、LOCA 時に発生する細片化に伴う燃料ペレットの燃料棒内再配置及び燃料棒外放出に関するデータを取得するために、商用炉で使用された燃料棒の LOCA 模擬試験等を、日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）の RFEF (Reactor Fuel Examination Facility：燃料試験施設) にて実施する。また、LOCA 後の燃料の耐震性に係る評価を行うため、LOCA 時の温度履歴を経験した燃料被覆管及び燃料集合体部材を対象とした機械試験を実施する。

(2)については、燃料破損形態の変化及び破損限界低下への寄与が推測される因子（製造仕様、ベース照射条件、混合酸化物（MOX）燃料中の Pu スポットや製造時の添加物添加によるペレットの FP ガス挙動の変化、燃焼度、試験時温度）について、それぞれの影響の有無を個別に確認するための試験を原子力機構 NSRR (Nuclear Safety Research Reactor：原子炉安全性研究炉) において行い、破損挙動に生じた変化の原因解明及び各因子の影響評価を行う。また、RIA 時の燃料変形を模擬した被覆管の多軸引張試験を実施し、応力条件に依存した破損形態の変化等に関する知見を得て、NSRR 実験での応力条件の把握や燃料特性に依存した破損挙動の評価を行う。さらに、NSRR での RIA 試験時の燃料挙動と商用炉で想定される RIA 時の燃料挙動とを比較し、NSRR で取得された試験結果の商用炉への適用性について評価する。

(3)については、事故時に想定される高温での燃料ペレットや被覆管の状態（燃料棒の損傷状態等）に関する知見の調査・整理を行い、更に評価に必要な知見については、試験炉を用いた実験等によりこれを拡充する。また、燃料挙動解析コード等を利用して上記データを解析し、事故時に燃料棒がその形状を喪失する温度等の条件を評価する。

(4)については、平成 29 年度までノルウェー・ハルデン炉にて実施された燃料材料用改良合金の照射成長試験後試料について、平成 31 年度に同炉施設から RFEF への試験片輸送を実施し、この試験片を対象に RFEF にて照射後試験を実施し、合金組成が照射成長挙動に及ぼす影響についての知見を得る。

2.2.1 LOCA 試験

(1) 背景と目的

LOCA は、原子炉設計時に想定する設計基準事象のひとつであり、1 次系配管の破断等により炉心の冷却材が喪失する事故である。LOCA が起こると原子炉は停止するが、崩壊熱により燃料棒の温度は上昇する。非常用炉心冷却系（Emergency Core Cooling System：ECCS）が作動し数分程度で燃料棒は冷却されるが、高温に曝されている間に被覆管は水蒸

気によって酸化され、酸化が著しい場合には燃料被覆管が脆化し、再冠水時の熱衝撃により破断する可能性がある。LOCA 時に炉心の冷却性を確保するためには、燃料棒の崩落につながる燃料被覆管の著しい脆化を防止すればよい、という考えに基づき、LOCA 時における燃料被覆管温度と酸化割合の上限（1200℃、15%ECR：Equivalent Cladding Reacted）が「軽水型動力炉の非常用炉心冷却系の性能評価指針」（昭和 56 年 7 月）（ECCS 性能評価指針）において定められた。

この ECCS 性能評価指針の制定以降、燃料の炉内滞在時間の延伸（燃焼度の延伸）に伴い、照射材の LOCA 時挙動について多数の研究が行われ、上記指針制定時には想定されていなかった LOCA 時の新たな燃料破損挙動が観察されている。

欧州の試験施設において、非常に高い燃焼度まで照射された軽水炉燃料を対象とした LOCA 模擬実験が実施され、LOCA 条件下の昇温過程において燃料ペレットが細片化し、細片化した燃料ペレットが燃料棒内軸方向に再配置し、燃料被覆管の破裂開口から燃料棒外に放出される現象（Fuel Fragmentation, Relocation and Dispersal：FFRD）が観察された^(1,2)。LOCA 時に膨れ破裂した燃料被覆管の膨れ部に細片化した燃料ペレットが高密度に集積した場合には、燃料棒の出力が局所的に上昇し、燃料被覆管最高温度（PCT）を上昇させる恐れがある。また、細片化した燃料ペレットが燃料棒外に放出された場合、その放出量によっては、LOCA 時の炉心の冷却性を阻害する恐れがある。

照射した燃料ペレットが LOCA 模擬試験時に割れ、燃料被覆管の膨れ部に移動し、集積する現象は上記指針制定当時の照射した燃料を対象とした LOCA 模擬実験においても観察されていた⁽¹⁻⁵⁾。細片化した燃料ペレット片が燃料被覆管膨れ部に集積することによる PCT の上昇の可能性は当時も認識されていたが、解析の保守性により相殺されるとして、LOCA に関する安全評価において考慮されていなかった⁽⁶⁾。しかし、燃料の炉内滞在時間の延伸（燃焼度の延伸）に伴い LOCA 条件下で観察される燃料ペレット片の細片化はより著しくなる傾向であり⁽⁴⁾、非常に細かく細片化した燃料ペレット片の燃料被覆管膨れ部における高密度な集積や、燃料被覆管の破裂開口部から燃料棒外への放出は、上記指針制定当時の解析において考慮されておらず、従来の解析に基づく判断をそのまま踏襲することはできないと考えられる。

FFRD 現象が LOCA 時の炉心冷却性に及ぼす影響に関しては海外の研究機関等において評価が進められている。仏国電力会社（EDF）は燃料ペレットの細片化が生じる非常に高い燃焼度まで照射された燃料棒は炉心周辺部に配置されることから、当該燃料棒の PCT は被覆管の破裂温度を下回ると評価している⁽⁷⁾。米国原子力規制委員会（NRC）は燃料挙動解析コード（FRAPCON 及び FRAPTRAN）とシステム解析コード（TRACE）をカップリングさせ、FFRD 発生時のペレット片の放出量を評価している⁽⁸⁾。高燃焼度燃料が低燃焼度燃料に比べ低い出力で使用されるという仮定に依存するものの、この評価結果は放出される燃料片の量が多くないことを示した。NRC はこの評価結果等を基に、現行の燃料設計及び燃料運用の範囲内では FFRD 現象は至急の対応を要するものではないと結論付けている。こ

のように、現行燃料に関して多量の細片化した燃料ペレットの移動や放出は予想されないとの知見があるものの、これらは現行の燃料設計及び燃料運用を前提としており、かつ、簡易的なモデルを用いた評価に基づいている。

従って、従来十分な知見が得られていない LOCA 時の燃料ペレットの細片化の発生条件とその程度、細片化した燃料ペレットの燃料被覆管膨れ部における充填率及び燃料棒外放出量、等のデータ及び知見を取得し、FFRD 現象が LOCA 時の炉心冷却性に及ぼす影響の評価精度の向上を図りつつ、当該影響を評価する必要がある。

ECCS 性能評価指針では燃料被覆管温度と酸化割合の上限の他に、燃料の形状の変化を考慮しても、崩壊熱の除去が長期間にわたって行われることを求めている。

LOCA が収束した後、炉心から燃料が取り出されるまでの期間については具体的に示されたものはなく、ある程度の長期にわたって燃料が炉心にとどまることが予想される。この LOCA 後の炉心の長期冷却期間中においては水力振動や地震、燃料取り扱い、輸送に伴い燃料棒に外力が作用すると考えられ⁽⁵⁾、これらの外力作用時にも炉心の冷却可能形状が維持されることを評価する必要がある。特に、東京電力福島第一原子力発電所事故後に多くの余震が発生したことを考慮すれば⁽⁹⁾、LOCA 後の炉心冷却性を考える上で地震による外力発生を考慮することは極めて重要である。

このような背景のもと、LOCA 後の炉心冷却性を評価するために、LOCA 条件下の温度・荷重履歴を経験した軽水炉燃料被覆管を対象とした機械強度試験が国内外で実施されてきた⁽¹⁰⁻¹⁴⁾。しかし、いずれの試験も圧縮の静的荷重を負荷する試験であり、圧縮と引張りの繰り返し荷重負荷や荷重振幅の変化等、地震時に燃料棒に負荷されると考えられる荷重条件を適切に模擬できていない。

以上より、本事業では、高燃焼度の軽水炉燃料を対象とした LOCA 模擬試験を実施し、LOCA 時の燃料ペレットの細片化の発生条件とその程度、細片化した燃料ペレットの燃料被覆管膨れ部における充填率及び燃料棒外放出量、等に係るデータを取得し、FFRD 現象が LOCA 時の炉心冷却性に及ぼす影響を評価する。また、LOCA 時の温度履歴を経験した軽水炉燃料被覆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、LOCA 後の燃料被覆管の曲げ強度に係るデータを取得し、LOCA 後の長期冷却期間中における炉心冷却性を評価する。

(2) 試験の概要

本事業における LOCA 試験では、FFRD 現象が LOCA 時の炉心冷却性に及ぼす影響を評価するための LOCA 模擬試験及び燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験、並びに LOCA 後の長期冷却期間中における炉心冷却性を評価するための繰り返し荷重を負荷する四点曲げ試験を実施する。

原子力機構は非照射水素添加被覆管や照射済燃料被覆管（44-84 GWd/t 燃料被覆管）を対象に、高燃焼度燃料の LOCA 時挙動に関する試験を実施してきた⁽¹⁴⁻²⁰⁾。これらの試験

で用いた照射後試験施設等の既存施設と技術的経験を本事業においても活用する。

(a) LOCA 模擬試験

実機の LOCA 時においては、崩壊熱により燃料棒温度が上昇する。燃料棒温度が上昇して、燃料棒内圧が原子炉内圧に比べ高くなり、かつ燃料被覆管の機械強度が低下すると、燃料被覆管は膨れて破裂する可能性がある。このような LOCA 時の昇温過程において、燃料ペレットが細片化し、細片化した燃料ペレット片が燃料被覆管の膨れ部に集積し、一部が燃料被覆管の破裂開口から燃料棒外に放出される現象が FFRD である。燃料被覆管が膨れて破裂すると、これによって形成した燃料被覆管の破裂開口から水蒸気が燃料棒内部に侵入し、燃料被覆管の内面は酸化する。この内面酸化、すなわち、ジルカロイ-水反応で発生した水素の一部は燃料被覆管に吸収される。燃料集合体では、支持格子により多くの燃料棒と制御棒案内管が束ねられており、これらの相互作用により燃料棒の軸方向の収縮が拘束され、炉心の再冠水に伴う燃料棒の急冷時には熱衝撃だけでなく機械荷重が燃料棒に作用する可能性がある。この再冠水過程の急冷時において、燃料被覆管の LOCA 時の酸化及び水素化による脆化が著しい場合に燃料棒は破断する恐れがある。

このように、LOCA 時に予想される燃料棒が曝される環境及び燃料挙動は複雑であることから、出来るだけ LOCA を模擬した条件で試験を実施し、FFRD 現象が LOCA 時の炉心冷却性に及ぼす影響を評価することが望ましい。従って、被覆管の膨れと破裂、高温水蒸気中での酸化、及び軸方向拘束の一連の LOCA 時燃料挙動を模擬可能な総合的な LOCA 模擬試験を行う。

LOCA 模擬試験には、燃料ペレットを除去しない状態の短尺の照射済燃料棒に不活性ガスを加圧封入し、その被覆管表面に試験中の温度制御及び測定を行うための熱電対を数箇所スポット溶接した試験燃料棒を使用する。不活性ガスを封入するのは、実機の LOCA 時に想定される燃料棒の破裂を模擬するためである。図 2.2.1-1 に LOCA 模擬試験用燃料棒の構造を示す。この試験燃料棒を図 2.2.1-2 に示す実燃料入り LOCA 模擬試験装置の中央部に装荷し、LOCA 時に想定される燃料棒の温度履歴を与える。試験時の昇温過程においては、燃料棒の内圧上昇と被覆管強度の低下によって試験燃料棒が膨れ破裂し、場合によっては膨れに伴うペレットの燃料棒内軸方向再配置や破裂開口部を通じた試験燃料棒外へのペレット放出が生じる可能性がある。

本試験においては、図 2.2.1-3(a)及び(b)に示す 2 種類の温度履歴にて試験燃料棒を加熱昇温することとする。細片化したペレットの燃料棒内軸方向再配置挙動や被覆管破裂時の細片化ペレットの燃料棒外移行挙動を評価する場合には燃料棒が破裂するまで昇温させる図 2.2.1-3 (a)の温度履歴を、細片化した燃料ペレットが LOCA 急冷時の燃料棒破断限界に及ぼす影響や、燃料棒破断時の細片化ペレットの放出量を評価する場合には図 2.2.1-3 (b)の温度履歴を用いて試験を実施する計画である。上記 2 種類の温度履歴の試験をそれぞれ破裂試験及び急冷破断試験と呼ぶこととする。

急冷破断試験では破裂の後、試験燃料棒の破裂開口位置及び膨れ破裂による被覆管周長の増加率、すなわち膨れ率に基づき所定の被覆管酸化量に達する条件（等温酸化温度及び時間）を算出し、この等温酸化温度及び時間にて被覆管を高温水蒸気中において酸化させた後、急冷水を下部から注入して試験燃料棒を冠水させ急冷する。この急冷の際に試験燃料棒には熱衝撃が加わるため、被覆管が著しく脆化している場合には燃料棒が破断し、これに伴って内部のペレットが放出される可能性もある。

被覆管の膨れ破裂に伴うペレットの細片化、軸方向移動及び試験燃料棒外放出の各挙動に関するデータ及び知見は試験後分析により取得する。また、急冷時の燃料被覆管の破断の有無から急冷時に破断に至る被覆管酸化量のしきい値に係る情報を得るとともに、破断が生じた場合には、試験後分析により破断時のペレット放出挙動に関するデータ及び知見を取得する。

(b) 燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験

FFRD の諸現象の内、燃料ペレットの細片化の発生しきい燃焼度はセグメント平均燃焼度で 60–75 GWd/t 程度に存在すると報告されている⁽²⁾。この燃焼度は、ペレット外周部における高燃焼度組織及び中間部におけるダークゾーンの形成しきい値に近く^(21,22)、それらの組織中に形成される微小な FP ガス気泡が細片化に影響を及ぼしている可能性がある。従って、燃焼の進展に伴う燃料ペレットの微細組織の変化と燃料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。

このような観点から、燃料ペレット径方向の様々な領域から採取した燃料ペレット片を対象とした LOCA 時温度変化模擬加熱試験を実施する

燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験では、照射済み燃料ペレット片を LOCA 時の燃料棒の温度変化を模擬した条件で、高周波誘導加熱方式により真空中で加熱する。加熱試験中は四重極質量分析計を用いて燃料ペレットの細片化に伴いペレットの結晶粒内ないし粒界から放出されると予想される FP ガスをリアルタイムに連続的に分析する。加熱試験後には燃料ペレット片に対し外観観察、マイクロ組織観察、等を実施する。以上より、LOCA 時の燃料ペレット細片化の発生条件の評価や発生メカニズムの解明に不可欠な知見を取得する。

(c) 四点曲げ試験

LOCA 後の炉心の冷却を長期に渡って維持するためには、長期冷却期間中に発生し得る地震等の外力に耐えられるように燃料被覆管の機械強度を維持することが重要である。上述のように、LOCA 時において燃料被覆管は膨れ破裂、高温水蒸気中での酸化等を経験することから、軸方向に異なる形状及び材料特性の分布を有する。このような LOCA 後の燃料被覆管の機械強度を評価する手法として四点曲げ試験がある。四点曲げ試験では、燃料被覆管試料の支点間に均一な曲げモーメントを加えることで、燃料被覆管試料の軸方向で

最も延性が低下した箇所における機械強度を求めることができる。

以上を踏まえ、LOCA 模擬試験後の燃料被覆管に対する四点曲げ試験を実施する。

四点曲げ試験では、地震時に燃料棒に負荷されると考えられる荷重条件を適切に模擬した繰り返し荷重負荷可能な四点曲げ試験装置を整備し、LOCA 時の膨れ及び破裂、内外面の両面酸化、並びに二次水素化の一連の事象を経た燃料被覆管を対象とした四点曲げ試験を実施する。これにより、LOCA 後の燃料被覆管の機械強度に係るデータを取得し、LOCA 後の長期冷却期間中における炉心冷却性の評価に必要な知見を取得する。

2.2.2 RIA 試験

(1) 背景と目的

RIA は、原子炉設計時に想定する設計基準事象のひとつであり、制御棒の飛び出しまたは落下により原子炉出力が局所的に急上昇し、燃料エンタルピが急激に増大する事故である。燃料エンタルピの増大によって燃料は破損に至る可能性があり、更には、燃料破損に伴い発生する水撃力及び衝撃圧力により炉内構造物や圧力容器が損傷を受ける恐れがあることから、「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象に関する評価指針」（昭和 59 年 1 月）において、RIA 時における燃料破損しきい値や、燃料エンタルピの最大値が制限されている。原子力機構の実験炉 NSRR では、RIA 時の出力急上昇を模擬したパルス照射実験により、燃料の破損限界や、燃料破損に伴い発生する水撃力・衝撃圧力の大きさに関するデータが取得され、安全評価指針策定のためのデータベースを提供して来た。

高燃焼度ウラン燃料の RIA については、原子力機構 NSRR 及び仏 CABRI 炉におけるパルス照射試験等の結果を基に、旧原子力安全委員会原子炉安全基準部会報告書「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象における燃焼の進んだ燃料の取り扱いについて」（平成 10 年 4 月）がまとめられた。同報告書では、PWR 燃料についてはナトリウム冷却条件 (CABRI 炉) で実施された燃料セグメント燃焼度 64GWd/t の実験、水冷却条件 (NSRR) では 50GWd/t の実験、BWR 燃料については水冷却条件 (NSRR) の 45GWd/t の実験における結果などにに基づき破損しきい値が決定された。

平成 10 年の破損しきい値決定において、燃料セグメント燃焼度 65GWd/t を超える領域については工学的判断に基づき暫定的な破損しきい値が設定され、この暫定しきい値については、今後の試験の進捗や燃料設計の改良等に応じて見直していくこととされた。また、軽水炉における MOX 燃料利用については、旧原子力安全委員会原子炉安全基準部会報告書「発電用軽水型原子炉施設に用いられる混合酸化物燃料について」（平成 7 年 6 月）により炉心装荷率 1/3 程度までの MOX 燃料では燃料集合体最高燃焼度 45GWd/t まで、また、同「改良型沸騰水型原子炉における混合酸化物燃料の全炉心装荷について」（平成 11 年 6 月）により改良型沸騰水型原子炉 (ABWR : Advanced BWR) での全炉心装荷では燃料集合体最高燃焼度 40GWd/t までの範囲で安全評価における指標が検討されたが、これらの報

告書の検討範囲を上回る燃焼度範囲については知見の拡大が求められていた。さらに、民間事業者によって開発が進められ、海外ではその一部が既に実用化されている、改良型燃料では、既存の発電炉のさらなる有効利用及び安全性向上の観点で、合金成分や製造条件を変更して耐食性を向上させた被覆管や、結晶組織を変化させることで FP ガス放出量を低減させた燃料ペレットが採用されている。今後国内においても導入が見込まれるこれら改良型燃料に関しても、現行の燃料に対して加えられた改良が通常運転時の健全性或原子炉の事故時安全性に及ぼす影響など、導入に際しての規制判断を行う上で必要とされるデータの取得及び拡充が求められていた。

これらの状況を受け、平成 18 年から平成 30 年にかけて、欧州で高燃焼度まで照射された改良型ウラン及び MOX 燃料を対象としたパルス照射実験 (NSRR) が行われ、破損限界等に係るデータ及び知見が大幅に拡充された。同試験に供された改良型ウラン及び MOX 燃料の大半については、高い燃焼度にあっても現行 PCMI 破損しきい値を上回る破損限界を示すことが確認された。一方、一部の燃料において、従来知見とは異なる破損挙動が確認されている。第一に、添加物入り BWR 燃料 (ADOPT) ペレットのデータを新たに取得した OS-1 実験で、PCMI 破損が観察され、その破損限界が現行しきい値を下回った。同燃料の被覆管微細組織観察結果より、被覆管金属層中に占める径方向水素化物 (被覆管の径方向に配向・成長したジルコニウム水素化物) の割合が従来取得データに対応する燃料に比して大きく、このような試験前の燃料状態が、低い破損限界の原因の一つになった可能性が指摘された。但し、同燃料のペレットは従来データ取得例の無い ADOPT であり、通常の UO_2 燃料と組成や微細組織が異なる MOX 燃料では過渡時のスウェリング挙動に有意な差が生じるケースがあることは従前から報告・指摘されていることを踏まえれば、被覆管の脆化度合だけでなく、PCMI の駆動力としての燃料ペレット側のスウェリングにおいても ADOPT に特有の挙動が生じ、これが破損限界に影響を及ぼした可能性も排除できない。また上述の径方向水素化物の状態についても、照射条件そのものの影響であるのか、あるいは ADOPT に特有の (ベース照射条件下での) 挙動の影響であるのか、明らかとなっていない。現行の PCMI 破損しきい値の安全裕度に関する議論へ OS-1 実験の結果が適切に反映されていく為には、現時点ではデータ・知見が十分でなく、同燃料に関する照射後試験や追試験の実施により、破損限界低下の原因特定を進める必要がある。第二に、M5 被覆高燃焼度 MOX 燃料のデータが初めて取得された CN-1 実験では、PCMI 破損こそ生じなかったものの、試験後の照射後試験で内圧破裂型と目される貫通欠陥の形成が確認された。これは高燃焼度 PWR/BWR 燃料では初めて観測されるタイプの破損形態であったことから、今後の安全評価において PCMI 破損とは別途適切に考慮されるべき要素であり、当該燃料が MOX 燃料であったことの影響、M5 被覆燃料であったことの影響等、破損メカニズムや支配パラメータの解明に向けデータ・知見の取得が必要である。

以上より、本事業で行う RIA 試験では、高燃焼度の添加物燃料及び MOX 燃料を主たる対象として、燃料棒の破損が生じる燃料エンタルピ (破損しきい値)、パルス照射による FP

ガス放出、燃料棒破損が生じた場合の燃料微粒子化や機械的エネルギー発生量など、事故時の影響評価に必要な、且つ、上記の従来知見とは異なる燃料破損挙動の原因特定に資するデータ及び知見を取得する。

(2) 試験の概要

高燃焼度まで照射されたウラン及び MOX 燃料を対象に、RIA 時に燃料が経験する急激な核加熱を模擬するための試験を NSRR において実施する。入手した燃料を原子力機構燃料試験施設のホットセルで短尺の試験燃料棒に加工し、NSRR パルス照射試験前の状態を調べるためのパルス前試験を実施した後、NSRR 施設に輸送する。試験燃料棒の構造を図 2.2.2-1 に示す。室温大気圧試験用燃料棒は全長約 300mm、燃料スタック長約 110mm で、高温高圧試験用燃料棒は全長約 120mm、燃料スタック長約 50mm の寸法である。両燃料棒ともエンドピークを抑える目的で燃料スタックの両端にハフニウム (Hf) ディスクを配置し、新品の端栓を装着した構造となっている。

NSRR 施設に輸送した試験燃料棒を実験カプセルに封入してパルス照射試験を実施する。実験カプセルの構造を図 2.2.2-2 に示す。本事業では、室温大気圧用及び高温高圧用の二種類のカプセルを用いる。両カプセル共、内容器と外容器から構成される二重カプセル型の構造であるが、高温高圧用カプセルには、内容器の安全性確保のため制限内圧を超えた場合の圧力逃がし用として圧力抑制用タンクが設けられている。

試験燃料棒を封入した実験カプセルを NSRR の炉心中央部の実験孔に装荷してパルス照射する。パルス照射試験では、RIA 時の出力暴走を模擬した条件での燃料の過渡挙動を被覆管外面温度、被覆管変形量、燃料棒内圧等の測定により把握する。図 2.2.2-3 に、実験燃料棒内に生じる発熱と燃料エンタルピの関係を示す。NSRR でのパルス照射により、実験燃料棒内では急激に核分裂反応が進み、発熱量 (発生エネルギー量) は増加する。時間の経過とともに、発熱の一部は冷却材に伝わり除熱されるが、パルス照射直後は冷却材に伝わる時間がないため、発熱量はすべて実験燃料棒内の燃料ペレットに蓄積される。この蓄積される発熱量を燃料エンタルピと呼んでいる。実験燃料棒の破損タイミングは上記のとおり燃料棒内圧履歴などから知ることができ、その時の燃料エンタルピを破損時エンタルピと呼んでいる。時間の経過により発熱量の一部は冷却材に伝わるため、燃料ペレットに蓄積される発熱量は最大値をとる。これをピークエンタルピと呼んでおり、破損が生じなかった場合には、ピークエンタルピにより試験結果を整理している。また、パルス照射試験後の燃料棒に対して、燃料試験施設にて照射後試験を実施する。この試験によって、燃料棒の破損が生じる燃料エンタルピ (破損しきい値)、パルス照射による FP ガス放出量、燃料棒破損が生じた場合の燃料微粒子化挙動や機械的エネルギー発生量など、事故の影響評価に必要なデータを取得する。NSRR 施設で行う作業の流れを図 2.2.2-4 に示す。

NSRR において実施する試験に加えて、RIA 時に被覆管に作用する応力状態を忠実に模擬し、被覆管の変形及び破損挙動に関するデータを取得するための機械特性試験を実施す

る。RIA の早期に被覆管に作用する力は主としてペレットの熱膨張によるが、被覆管に発生する周方向と軸方向の応力比はペレットと被覆管の固着状態に依存して変化する。また、燃料棒の内圧を駆動力とする場合には、ペレットの熱膨張による場合と周方向と軸方向の応力比が異なる。これらの条件を模擬するため、被覆管に周方向応力と軸方向応力を独立に与えることができる多軸応力負荷試験機を用いて機械特性試験を実施する。なお、本試験では非照射材料を対象とする。

2.2.3 高温試験

(1) 背景と目的、検討の概要

設計基準事故を超えるような条件に原子炉施設が至るような場合、規制側としては現在設計基準 LOCA 時の炉心冷却性維持を目的とした基準に基づき炉心の著しい損傷の開始と拡大防止策の有効性を判断しているが、このような判断基準の妥当性については検討の余地がある。検討に当たっては、実際に炉心の著しい損傷が起こる条件の評価が必要であり、これに向け、上記の基準を超えるような高温条件での燃料損傷挙動について知見を取得、拡充する必要がある。

LOCA 基準として定められている 1200°C を超える、いわゆるシビアアクシデントの領域における燃料挙動に関して、これまでに分離効果試験や集合体を用いた熔融試験等がなされているが、それら研究の多くは燃料熔融後の事象やソースターム評価に着目したものであり、 1200°C から熔融開始までの温度領域における燃料損傷挙動に関する研究は相対的に少なく、またその多くは燃料挙動の評価技術へ取り込まれていない。 1200°C を超えて被覆管の融点に至る温度領域における燃料棒の損傷挙動評価手法を高度化することは事故時の炉心損傷状態の把握にも繋がり、それらの知見はアクシデントマネジメントの有効性評価に反映できる他、例えば炉心損傷のモニタリングにおける核分裂生成ガス測定データのより有効な活用に結びつく可能性もある。そこで、本研究では、燃料の損傷程度の観点からこれまでの知見を整理して、高温条件模擬試験による知見拡充を念頭に、試験条件について検討する。

2.2.4 改良型燃料被覆管の照射成長試験

(1) 背景と目的

軽水炉燃料の安全性をより高めるために被覆管の外表面腐食量や水素吸収量を抑える目的で、従来と異なる組成を有する改良型燃料被覆管合金の開発が進められてきている。

燃料被覆管の主成分であるジルコニウムは高速中性子の照射を受けることによって変形を生じる。この変形は、ジルコニウムの結晶格子(六方晶)の a 軸方向に伸び、 c 軸方向に縮むものであり、実際に使用されている燃料被覆管は通常 c 軸が肉厚方向を向く金属組織を有することから、高速中性子の照射によって燃料被覆管には軸方向の伸びが発生する。この現象を照射成長と呼ぶ。高燃焼度まで照射された燃料棒で $0.1\sim 1\%$ の照射成長が観測されていることから、高燃焼度まで燃料を使用する際には無視できない伸び量となる。但し、燃料集合

体の設計においては通常この伸びが集合体の健全性に影響を及ぼさないよう考慮されている。

燃料被覆管の照射成長は、被覆管の金属組織や製造条件、照射条件、合金成分等の影響を受けることが知られている⁽⁸⁾。今後導入が見込まれる改良型燃料被覆管合金は従来の燃料被覆管材料と組成や製造条件が異なることから、これらの改良合金のみで構成された燃料集合体またはこれらの改良合金と従来合金が混在して構成されるような燃料集合体においては、その使用中の照射成長に伴う変形挙動が従来合金のみを用いたものと異なる可能性がある。従って、このような改良合金を使用した燃料集合体に係る事業者からの申請に備え、試験炉を用いた照射試験により改良合金の照射成長に関するデータを取得することとする。

具体的には、改良合金を含む種々の PWR 燃料被覆管合金を長期間にわたって PWR 冷却水条件下で照射し、軸方向の伸びを直接比較することによって、高速中性子の照射による影響だけでなく、合金成分や高燃焼度で顕著となる腐食や水素吸収等が照射成長に及ぼす影響を把握する。

(2) 試験の概要

高燃焼度化に伴う軽水炉燃料被覆管の外表面腐食量や水素吸収量を抑えるために開発された改良型被覆管合金の中で、近い将来国内の発電炉に導入される可能性の高いものについて入手し、試験に供した。また、PWR と異なる型式の発電炉で使用実績があり上記の改良合金と成分が似ている合金、ならびに製造条件の異なる被覆管についても試験に供し、上記の改良合金の結果と比較することにより、合金成分や被覆管の加工及び熱処理条件等が照射成長挙動に及ぼす影響を把握する。さらに、高燃焼度領域では燃料被覆管の水素吸収量が増加することから、この水素吸収が照射成長に及ぼす影響を評価するため、一部の材料について水素を吸収させたものを作製し試験に供した。

改良型燃料被覆管の照射成長試験は、ノルウェー・エネルギー技術研究所 (IFE) が所有するハルデン炉を利用して実施した。ハルデン炉での照射は、試験片を装荷した専用の照射試験容器 (照射リグ) を炉内に配置して実施した。照射容器は、水質を調整した PWR の冷却水条件を模擬するための高温高圧水ループに接続され、照射中の試験片の温度等は、高温高圧水ループの運転条件や試験片の配置位置等により調整した。

所定の照射期間毎に試験片を炉から取出し中間検査として、外観観察、試験片伸び量測定及び重量測定を実施した。また、所定の照射期間満了後には、照射後試験施設にて試験片の非破壊試験及び破壊試験を実施する計画であり、これまでに試験片外観観察、伸び量測定、重量測定及び一部の試験片について断面金相観察等を実施した。

試験の概要を図 2.2.4-1 に示す。

表 2.2-1 燃料破損に関する規制高度化研究の全体スケジュール

| 令和年度 項目 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|----------------|-----------|---------|---|------|
| LOCA 時燃料破 損が炉心冷却性 に与える影響 | LOCA 試験装置セル内設置 | | LOCA 試験 | | 総合評価 |
| | | ペレット加熱試験 | | | |
| | | 被覆管曲げ疲労試験 | | | |
| | | | 解析評価 | | |
| RIA 時燃料破損 が炉心安全性に 与える影響 | | RIA 試験実施 | | | 総合評価 |
| | | 被覆管機械特性試験 | | | |
| | | 解析評価 | | | |
| | | | | | |
| 事故時の燃料損 傷状態変化 | 文献調査、試験条件検討 | | 解析評価 | | 総合評価 |
| | | | | | |
| | | | | | |
| 燃料材料用改良 合金の照射成長 挙動に及ぼす合 金組成の影響 | 試験片輸送 ▼ | 照射後試験 | | | 総合評価 |
| | | 総合評価 | | | |
| | | | | | |

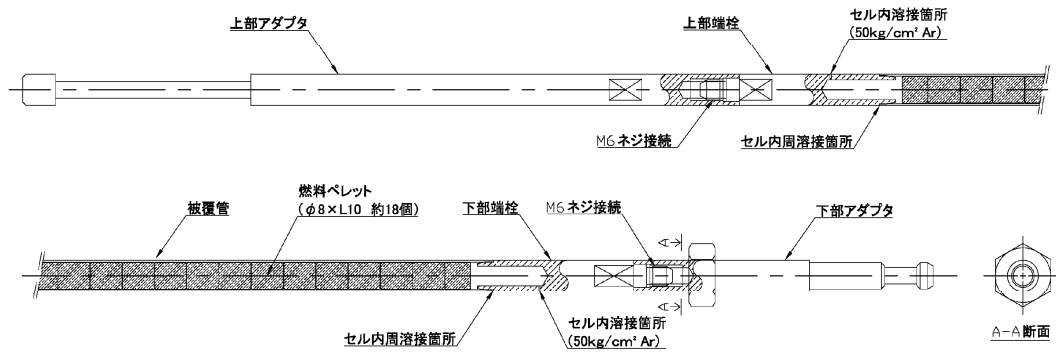


図 2.2.1-1 LOCA 模擬試験用燃料棒の構造図

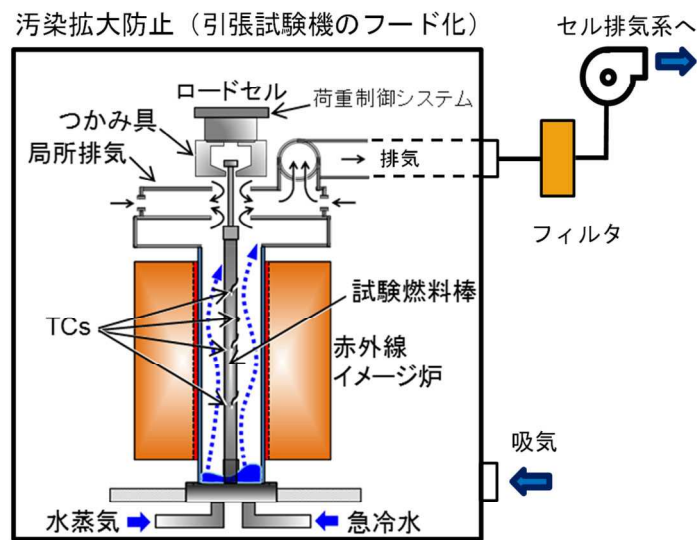
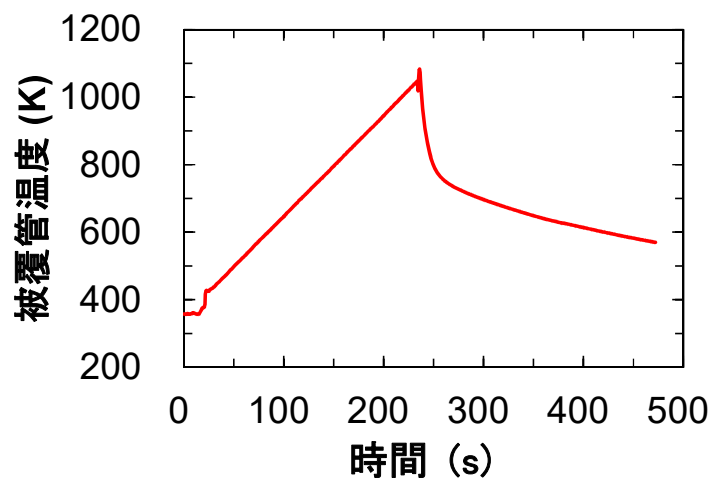
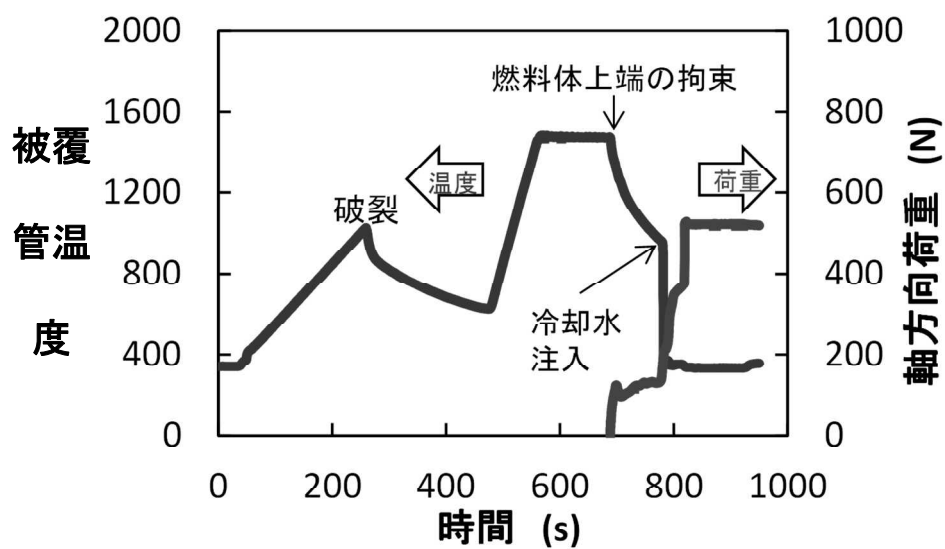


図 2.2.1-2 LOCA 模擬試験装置の概略図

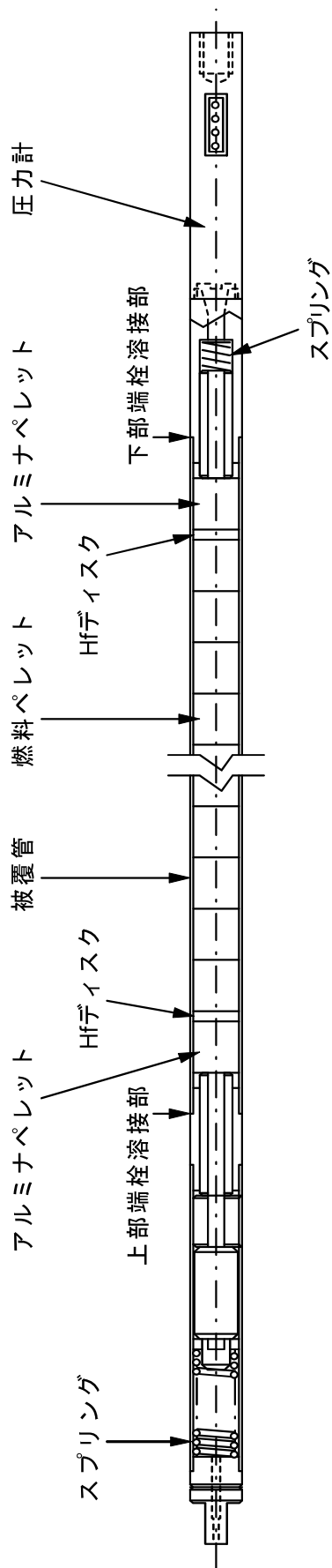


(a) 破裂試験

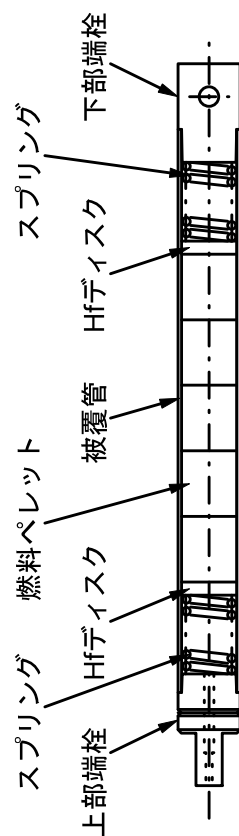


(b) 急冷破断試験

図 2.2.1-3 LOCA 模擬試験時の燃料被覆管温度と荷重履歴の例

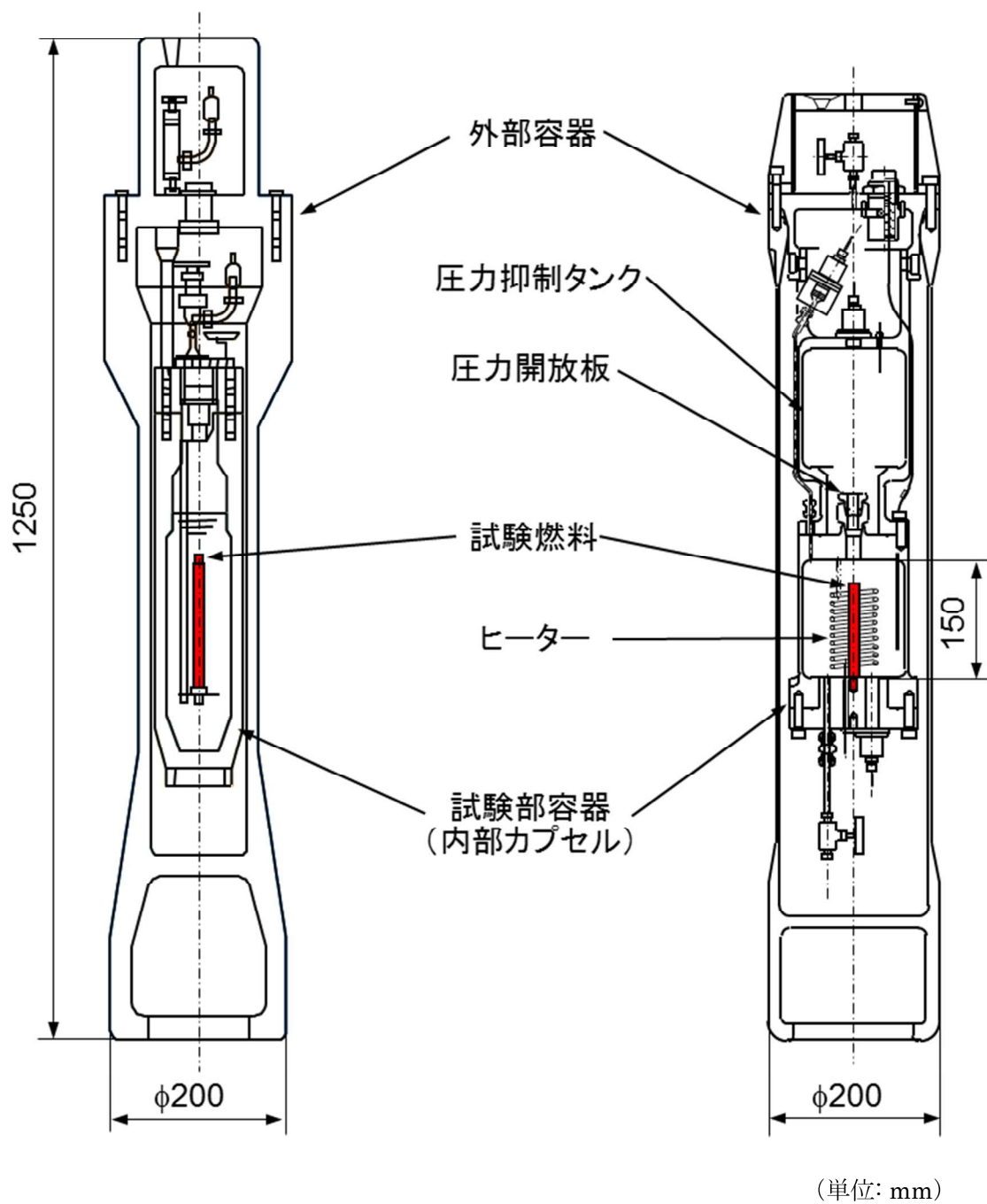


(1) 室温大気圧試験用燃料棒



(2) 高温高圧試験用燃料棒

図 2.2.2-1 NSRR 試験用燃料棒の概略構造



(1) 室温大気圧カプセル

(2) 高温高圧カプセル

図 2.2.2-2 RIA 試験用の実験カプセルの概要

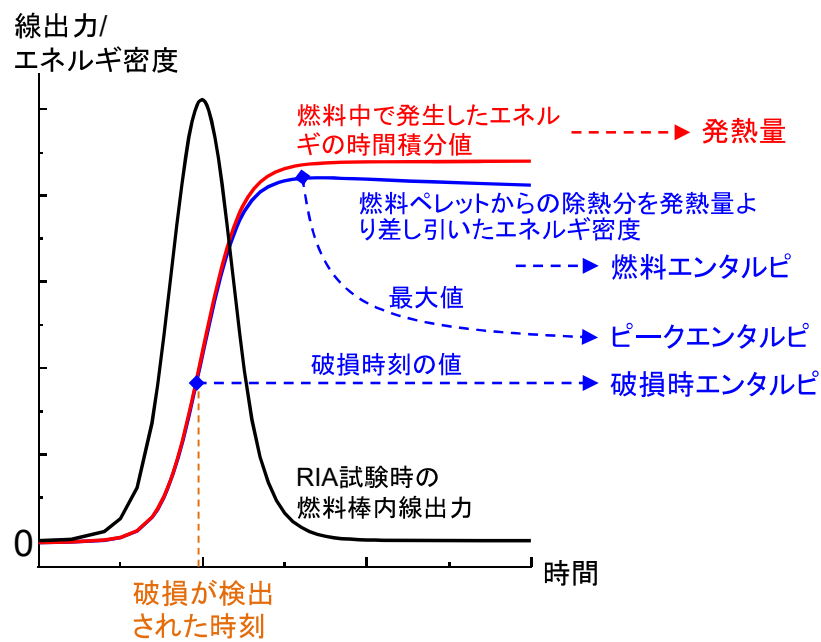


図 2.2.2-3 RIA 模擬試験時の線出力とエンタルピーの関係

- ① 燃料試験施設より試験燃料棒の搬入
- ② セミホットケーブルにて輸送容器から試験燃料棒の取出し
- ③ セミホットセルにて試験燃料棒への計装取付
- ④ セミホットケーブルにて試験燃料棒のカプセルへの装荷
- ⑤ カプセル装荷装置へのカプセル収納
- ⑥ カプセル装荷装置によりカプセルをNSRR炉心内へ移動・装荷
- ⑦
- ⑧ パルス照射
- ⑨ カプセル装荷装置によりカプセルをNSRR炉心内より取出し、セミホットケーブルへ移動
- ⑩ セミホットケーブルにて内部カプセルの取出し
- ⑪
- ⑫ 燃料試験施設へ内部カプセルの搬出

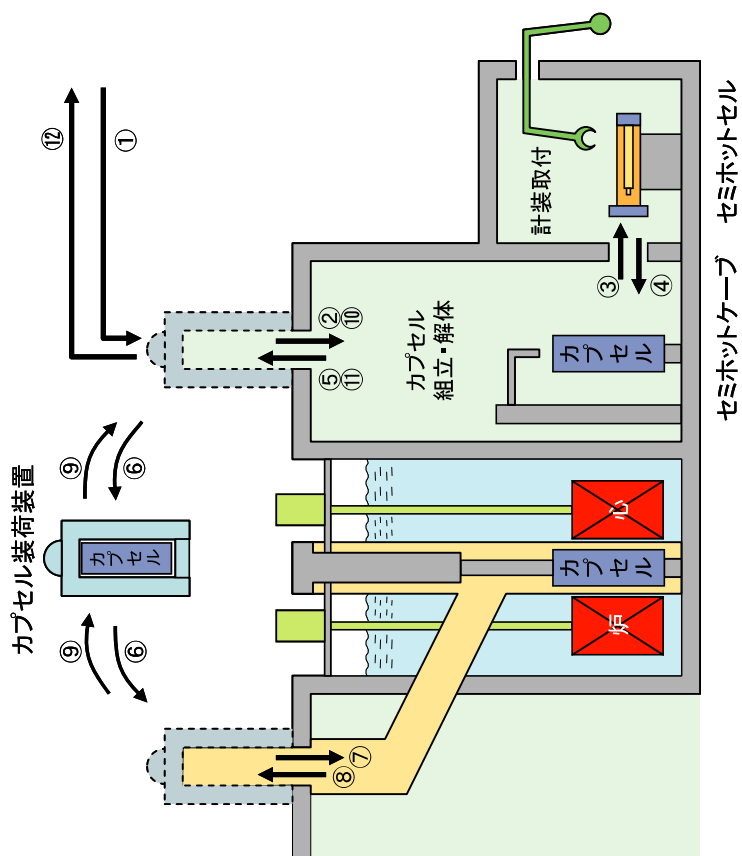


図 2.2.2-4 RIA 試験における NSRR 施設での試験燃料棒と実験カプセル取扱いの流れ

➤ 供試材

- 改良型燃料被覆管合金及び比較用合金
- 試験片長さ: 50、100mmの2種類

➤ 照射条件

- 照射温度: 240、300、320°C (目標)
- 照射環境: 高温高压水中 (PWR模擬)

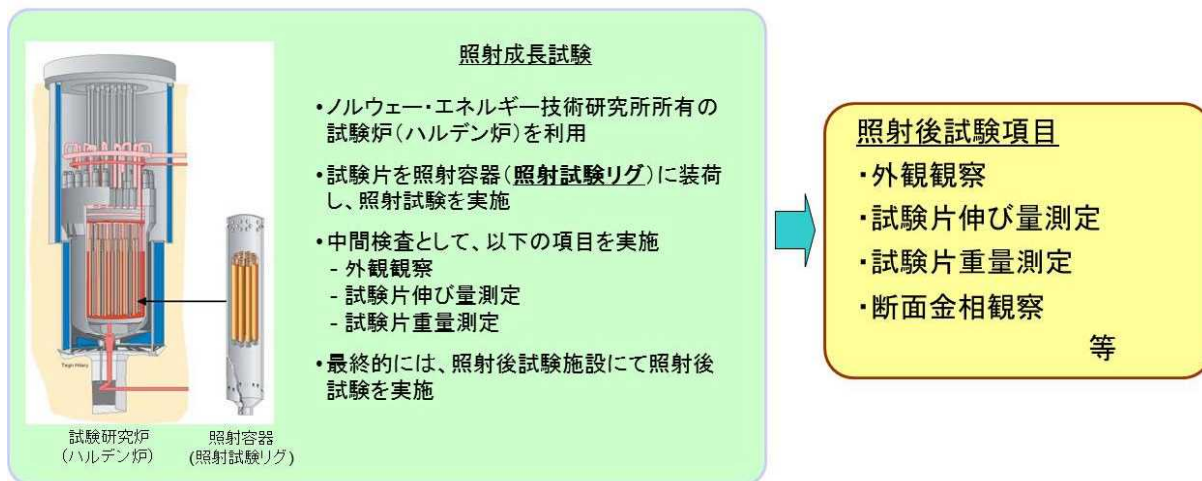


図 2.2.4-1 改良合金被覆管の照射成長試験の概要

3 章 令和 2 年度燃料破損に関する規制高度化研究事業の概要

3.1 LOCA 試験

燃料ペレットを除去しない状態の高燃焼度燃料を対象に LOCA 模擬試験を実施し、LOCA 時の燃料ペレットの細片化、燃料棒内軸方向再配置、及び燃料棒外放出 (FFRD) に係るデータを取得した。また、高燃焼度燃料ペレットを LOCA 時に想定される燃料温度まで加熱する試験等を実施し、LOCA 時のペレット性状変化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た繰り返し荷重負荷曲げ試験を実施した。

3.2 RIA 試験

- (1) 前事業で実施した OS-1 実験 (ADOPT 燃料、Zry-2 被覆) との対照試験として、通常燃料 (UO₂) を用いた高燃焼度燃料 (Zry-2 被覆) を対象に、原子力機構が保有する NSRR を使用して LS-5 実験を実施した。さらに、同様に前事業で実施した CN-1 実験 (MOX 燃料、M5 被覆) との対照試験として、同一セグメント燃料から切り出した試験燃料棒を対象とした高温高圧条件での RIA 試験 CN-2 を実施した。
- (2) 前事業で RIA 試験を実施した燃料に対して、原子力機構の燃料試験施設等を利用した試験及び分析を継続して行い、RIA 試験前後の燃料の状態に関するデータを取得した。CN-1 燃料について実施した試験後試験により、RIA 試験時の被覆管変形・破損状態等に関するデータを得た。また、RIA 実験 LS-5 の採取元の燃料セグメントについて、燃料検査を実施し、受入時の状態に関するデータを得た。
- (3) RIA 時に膨張したペレットから被覆管が受ける応力状態を適切に模擬できる多軸応力負荷試験装置を用いて非照射被覆管を対象とした機械特性試験を実施し、応力の多軸性、水素吸収等条件が被覆管の破損挙動に及ぼす影響に関するデータを取得した。

3.3 高温試験

炉心の著しい損傷の開始と事故拡大防止策の有効性判断における現行 LOCA 基準適用の妥当性検討に向け、LOCA 基準を超える高温条件での燃料損傷挙動などに係る知見を整理した。

3.4 改良型燃料被覆管の照射成長試験

改良型原子燃料に用いられる被覆管合金から調製した試験片を対象とした照射に伴う伸びデータ等を得ることを目的にノルウェー・エネルギー技術研究所が保有する試験研究炉 (ハルデン炉) を用いた照射試験を実施してきた。平成 22 年度に、試験準備、照射容器 (照射リグ) の設計および製作、照射容器を接続する高温高圧水ループの改造を実施、平成 23 年度から照射試験を開始し、試験炉の定期シャットダウン時期に合わせて試験片の中

間検査を実施した。平成 30 年 6 月末のハルデン炉廃炉決定に伴い照射試験は第 12 照射サイクル（平成 30 年 2 月まで）で終了した。

従来使用されていた Zry-4 (SR、応力除去材)と比較して改良合金被覆管の照射成長量は小さく、照射温度 300 °C、320 °Cにおいて合金成分及び熱処理条件によらず 0.2 %以内の範囲にあり、Nb 添加が照射欠陥の蓄積に影響していると考えられた。水素処理材の照射成長量は燃焼末期で増加傾向にあり、照射時の水素吸収が照射成長に影響している可能性が考えられた。

本研究で得られた照射成長挙動に関する知見、データは、今後、燃料挙動評価コード類のモデル更新に反映されるものと見込まれる。

4 章 令和 2 年度燃料破損に関する規制高度化研究事業の実施内容

4.1 燃料検査

平成 22 年度に輸送した燃料の仕様、燃焼度等の概要を表 4.1-1 に示す。なお、燃料はセグメント毎に AP2-1 から AP2-24 と呼ぶ。

4.1.1 燃料セグメントに対する非破壊試験

本年度は、スイス・ライプシュタット (BWR) で照射された UO_2 燃料セグメント AP2-19 について検査を実施した。また、本セグメントを対象に実施した金相試験（詳細については 4.2 レファレンス試験に記載）により得られた酸化膜厚さを用いて、被覆管外面酸化膜厚さ分布の補正を実施した。

(1) 燃料セグメントの寸法測定

燃料セグメント AP2-19 の寸法測定結果を図 4.1.1-1 に示す。このセグメント燃料では、すでに化学分析用の試料を採取しており、2 つの部分に分かれている。本結果は、RIA 試験用の燃料部分を含む試料を対象に測定したものである。実験において問題となり得る有害な欠陥等は見られなかった。

(2) 燃料セグメントの酸化膜厚さ測定

燃料セグメント AP2-19 について、2 方位 (90° 及び 270°) の軸方向位置 5 点における渦電流測定結果を平成 27 年度報告書に掲載した。今年度レファレンス試験である金相試験から得た酸化膜厚さで補正を行ったためその結果を図 4.1.1-2 に示す。

表 4.1-1 試験対象燃料一覧 (平成 22 年度輸送分)

| 燃料 セグメント 番号 | 燃焼度*1 (GWd/t) | 燃料名 | 燃料 タイプ | 照射炉 | 燃料棒 番号 | 試験採取位置 (下から .mm) | 被覆管 | | | | | | | ペレット | | | | 試験項目 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|------------------|-------------------------|---------------------------------|--------------|---------------------|--------------------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-------------------|--------------------|-----------------------|--------|-------------------|--------------------------------|--------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--------|-----|-------|------------|---------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|----|
| | | | | | | | 材質 (-) | 外径 (mm) | 内径 (mm) | 肉厚 (mm) | 高さ (mm) | 外径 (mm) | デイツ シュ | チャン ファ | 理論 密度 (%TD) | U235 濃縮度 (%) | Pu/Pu 富化度 (HM%) | | 添加物 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2-1 | 73 | バンデロス 燃料 | PWR 17x17 UO ₂ | Vandellos-2 | EH48-A08 | S2 (691 - 1141) | 9.5 | 8.36 | 0.57 | 9.83 | 8.19 | 有 | | | | | | 子備 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2-2 | 81 | | | | EH48-Q12 | S4 (1807 - 2257) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | LOCA試験 | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2-3 | 81 | | | | | S5 (2257 - 2707) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 有 | 子備 | | | | | | | | | | | | | |
| AP2-4 | 77 | | | | | S4 (1807 - 2258) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 4.9 | - | | | | | | | | | | | |
| AP2-5 | 78 | | | | S5 (2258 - 2709) | MMDA (RX) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | RIA試験 | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2-6 | 78 | | | | S4 (1810 - 2259) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | MDA | | | | | | | | | | | | | | 子備 |
| AP2-7 | 78 | | | | S5 (2259 - 2709) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2-8 | 80 | S3 (1249-1699) | ZIRLO (low-Su) | | | | | | | | | | | | | | | LOCA試験 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2-9 | 80 | S5 (2293-2743) | | | | | | | | | | | | | | | | | M5 | | | | | | | | | | | | | | | RIA試験 | | | | | | | | | | | | | |
| AP2-10 | 84 | S3 (1230 - 1680) | FXOGA1-A16 | | | | | | | | | | | | | | | LOCA試験 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2-11 | 84 | S6 (2769.7 - 3219.7) | | | | | | | | | | | | | | | | | M5 | | | | | | | | | | | | | | | RIA試験 | | | | | | | | | | | | | |
| AP2-12 | 87 | S3 (1279 - 1579) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | FXOGA1-M14 | FGD試験*2 | | | | | | | | | | | |
| AP2-13 | 68 | リングハルス 燃料 | PWR 15x15 UO ₂ | Ringhals-2 | AD23-D5 | 3-2 (2100-2550) | 10.72 | 9.48 | 0.62 | 11.15 | 9.29 | 有 | | | | | | 子備 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2-14 | 68 | | | | 3-3 (2550-3000) | M5 | | | | | | | | | | | | | RIA試験 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2-15 | 64 | シン燃料 | PWR 17x17 MOX | Chinnon B3 | FXP2LA-D09 | S4 (1749 - 2200) | 9.5 | 8.36 | 0.57 | 11.63 | 8.19 | 有 | | | | | | RIA試験 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2-16 | 63 | | | | S3 (1218 - 1592) | M5 | | | | | | | | | | | | | FGD試験*2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2-17 | 47 | | | | FBA004-a5 | EA (699-900) | 10.28 | 9.04 | 0.56 | 10.5 | 8.87 | 有 | 無 | | | | | 子備 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2-18 | 49 | | | | FBA004-a6 | F | | | | | | | | | | | | | CryO ₃ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2-19 | 91 | ライプシユ タット燃料 | BWR 10x10 UO ₂ | Leibstadt | AGB108-C6 | D (1309-1729) | 9.62 | 8.36 | 0.63 | 8.7 | 8.19 | 有 | | | | | | RIA試験 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2-20 | 85 | | | | J/A (2372-2822) | Zry-2 with liner (95 μm) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2-21 | 73 | | | | I/A (3051-3501) | | | | | | | | | | | | | | | Zry-2 with liner (70 μm) | LOCA試験 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2-22 | 63 | オスカーシャム 燃料 | | Oskarshamn-3 | 24565-C1 | 1 (439 - 889) | 9.62 | 8.36 | 0.63 | 10 | 8.19 | 有 | | | | | | RIA試験 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2-23 | 64 | | | | 2 | Zry-2 with liner (70 μm) | | | | | | | | | | | | | FGD試験*2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2-24 | 61 | | | | 1 (440 - 890) | | | | | | | | | | | | | | 子備 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

*1: セグメント平均燃焼度

*2: RIA条件下でのFPガス動的放出挙動試験

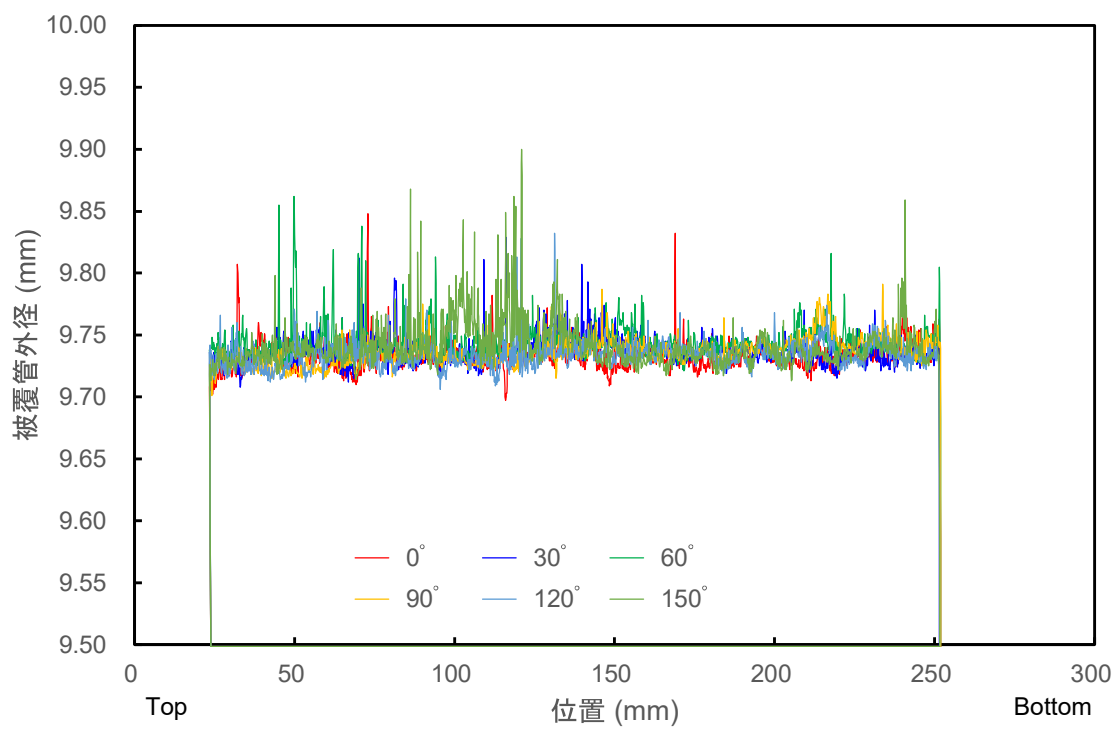


図 4.1.1-1 AP2-19 燃料セグメントの寸法測定結果

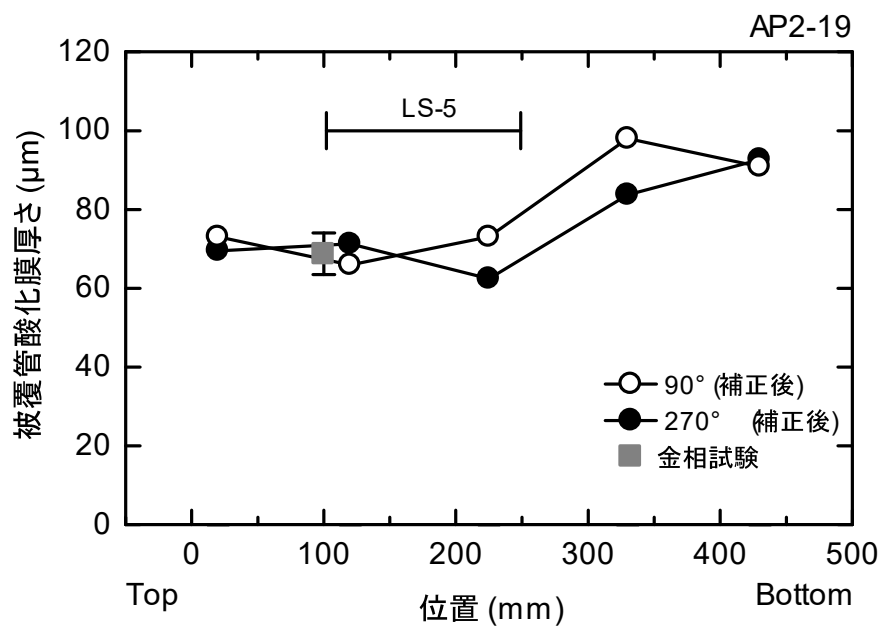


図 4.1.1-2 AP2-19 燃料セグメントの被覆管外面酸化膜厚さ分布

4.2 レファレンス試験

RIA 及び LOCA 試験に供する燃料の試験前の状態を把握するため、各燃料セグメントから採取したレファレンス試料に対する試験を実施した。燃料セグメント AP2-15 及び AP2-19 に関する試料採取計画を図 4.2-1 に示す。

(1) 被覆管水素分析

燃料セグメント AP2-19 に対して、図 4.2-1 に示した位置で軸方向に約 1 mm の被覆管試料を 2 か所 (HA1 及び HA2) で採取し水素濃度を測定した。これら試料はペレットの腹部位置で採取した。試料を 4 分割に切断後、各々の試料の水素濃度を測定した結果を表 4.2-1 に示す。平均濃度は HA1、HA2 でそれぞれ 709、727 wtppm であった。HA1 では周方向に対する水素濃度の違いが小さいのに対し、HA2 では 200 wtppm 程度の違いがあった。

(2) 金相試験

燃料セグメント AP2-15 及び AP2-19 から図 4.2-1 に示した MC の位置で採取した輪切り金相試料に対して断面観察を実施した。ペレット及び被覆管についてエッチング前後の観察を行った。それぞれの結果に対する図番は以下の通りである。

図 4.2.2-1 (1)(2)(3)(4): AP2-15 MC ペレットエッチング前

図 4.2.2-2 (1)(2)(3)(4): AP2-15 MC ペレットエッチング後

図 4.2.2-3 (1)(2)(3)(4)(5): AP2-15 MC 燃料被覆管エッチング前

図 4.2.2-4 (1)(2)(3)(4)(5): AP2-15 MC 燃料被覆管エッチング後

図 4.2.3-1 (1)(2)(3)(4): AP2-19 MC ペレットエッチング前

図 4.2.3-2 (1)(2)(3)(4): AP2-19 MC ペレットエッチング後

図 4.2.3-3 (1)(2)(3)(4): AP2-19 MC 燃料被覆管エッチング前

図 4.2.3-4 (1)(2)(3)(4): AP2-19 MC 燃料被覆管エッチング後

図 4.2.2-1、図 4.2.2-2 に示すペレットの断面写真から、FP ガスがガス気泡として集積した箇所が多数観察された。図 4.2.2-2 の Photo2-4-2 から、ヘイウッド径換算で約 1-21 μm の結晶粒径が観察された。製造時の結晶粒径は 6.9 μm である。なお、BZ-2、BZ-3、BZ-4 実験に供した燃料 (AP-2-15 燃料と類似の MIMAS-MOX 燃料) の製造時の結晶粒径は 8 μm である。

図 4.2.2-3 の Photo 3-1、3-2、3-3、3-4 に示すエッチング前の断面写真から、各々の視野角における平均酸化膜厚さを評価した結果、それぞれ約 11.4 μm (Photo3-1: 0°)、約 8.7 μm (Photo3-2: 90°)、約 9.4 μm (Photo3-3: 180°)、約 7.9 μm (Photo3-4: 270°) となった (これらの平均値は約 9.4 μm)。

図 4.2.2-4 の被覆管エッチング後の断面では、各方位において周方向に析出した水素化物が疎らに分布しており、比較的少ない量の水素化物が観察された。これは M5 被覆管の高い耐腐食性によると考えられる。一方、Photo4-1、4-4 において被覆管内面側に、Photo4-7 において被覆管外面側に、径方向に配向した水素化物も観察された。

図 4.2.3-3 の Photo 3-5-1、3-6-1、3-3-1、3-4-1 に示すエッチング前の断面写真から、AP2-19 の MC 位置の周方向平均酸化膜厚さを約 68.6 (63.1-73.8) μm と評価した。

AP2-19 の燃料被覆管においては、周方向に配向した水素化物だけではなく、軸方向に配向した水素化物が観察された。OS-1 のレファレンス燃料 AP2-22 と比べると、同じ再結晶焼鈍材であるが、燃焼度や水素吸収量が高いため、これを反映して径方向水素化物の割合が増大しているものと考えられる。この他、図 4.2.2-4 の Photo 4-5 及び 4-6 にみられるように、外面側に水素化物が密集した領域が観察された。これら領域は脆性的であると考えられ、PCMI 破損が発生した場合には、破損へ及ぼす影響を確認する必要がある。

表 4.2-1 被覆管水素分析結果 (AP2-19 燃料セグメント)

| AP2-19 項 目 | HA1-1 | HA1-2 | HA1-3 | HA1-4 | HA1 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 試料重量(mg) | 24.9 | 27.2 | 24.0 | 27.8 | 131.4 |
| 水素濃度(wtppm) | 704.1 | 684.9 | 749.2 | 701.9 | 709 |

| AP2-19 項 目 | HA2-1 | HA2-3 | HA2-3 | HA2-4 | HA2 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|------|
| 試料重量(mg) | 12.1 | 23.0 | 22.4 | 22.6 | 91.1 |
| 水素濃度(wtppm) | 762.2 | 508.6 | 716.2 | 921.8 | 727 |

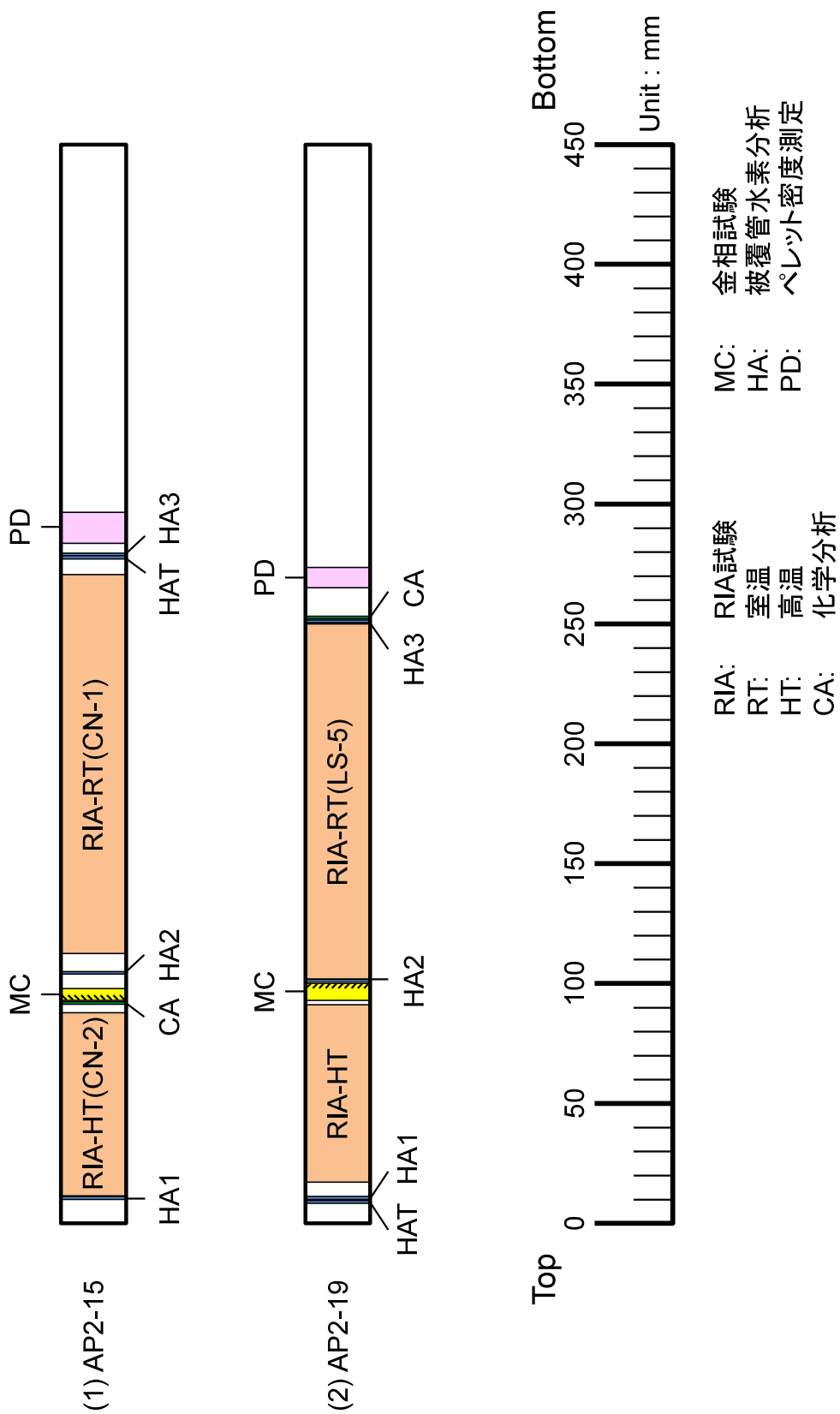


図 4-2-1 燃料セグメント(1) AP2-15 及び(2) AP2-19 に関する試料採取計画

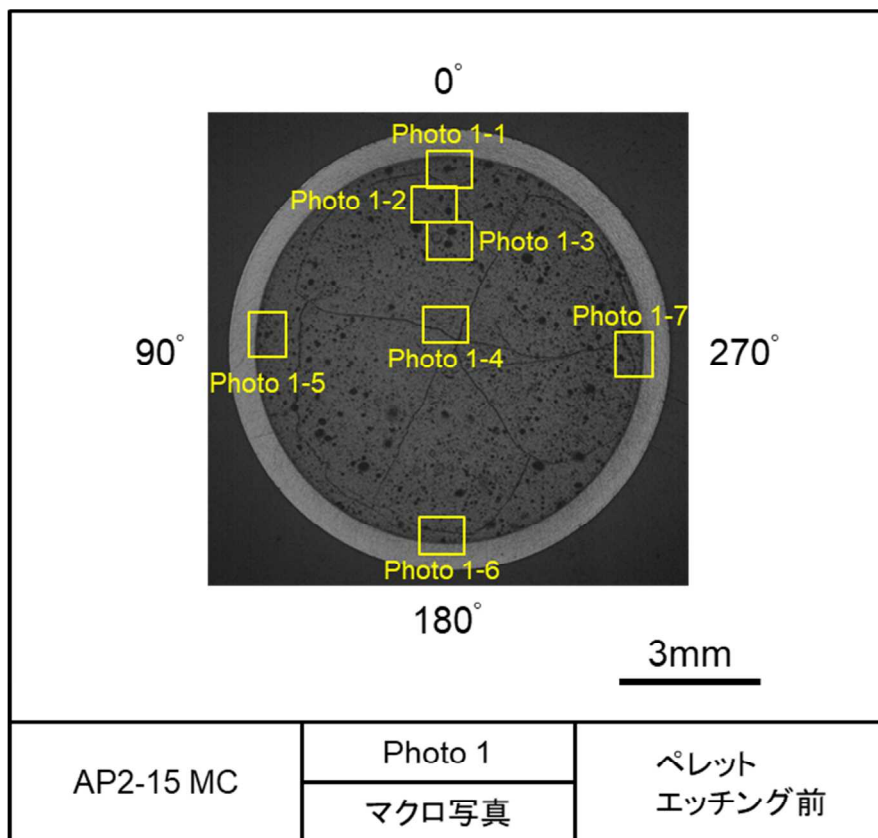


図 4.2.2-1(1) リファレンス試料の金相写真（ペレットエッチング前，AP2-15 MC）

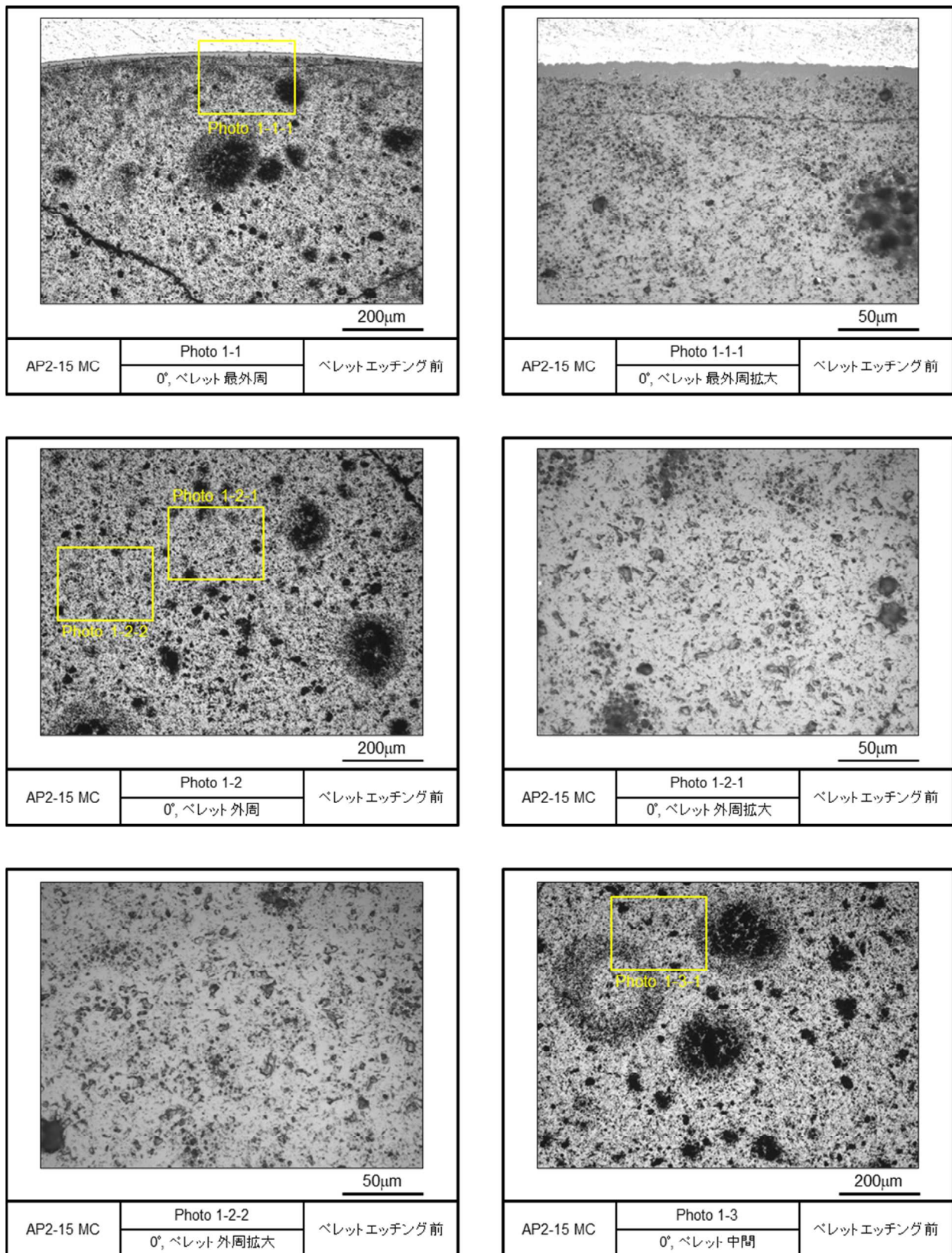


図 4.2.2-1(2) リファレンス試料の金相写真 (ペレットエッチング前, AP2-15 MC)

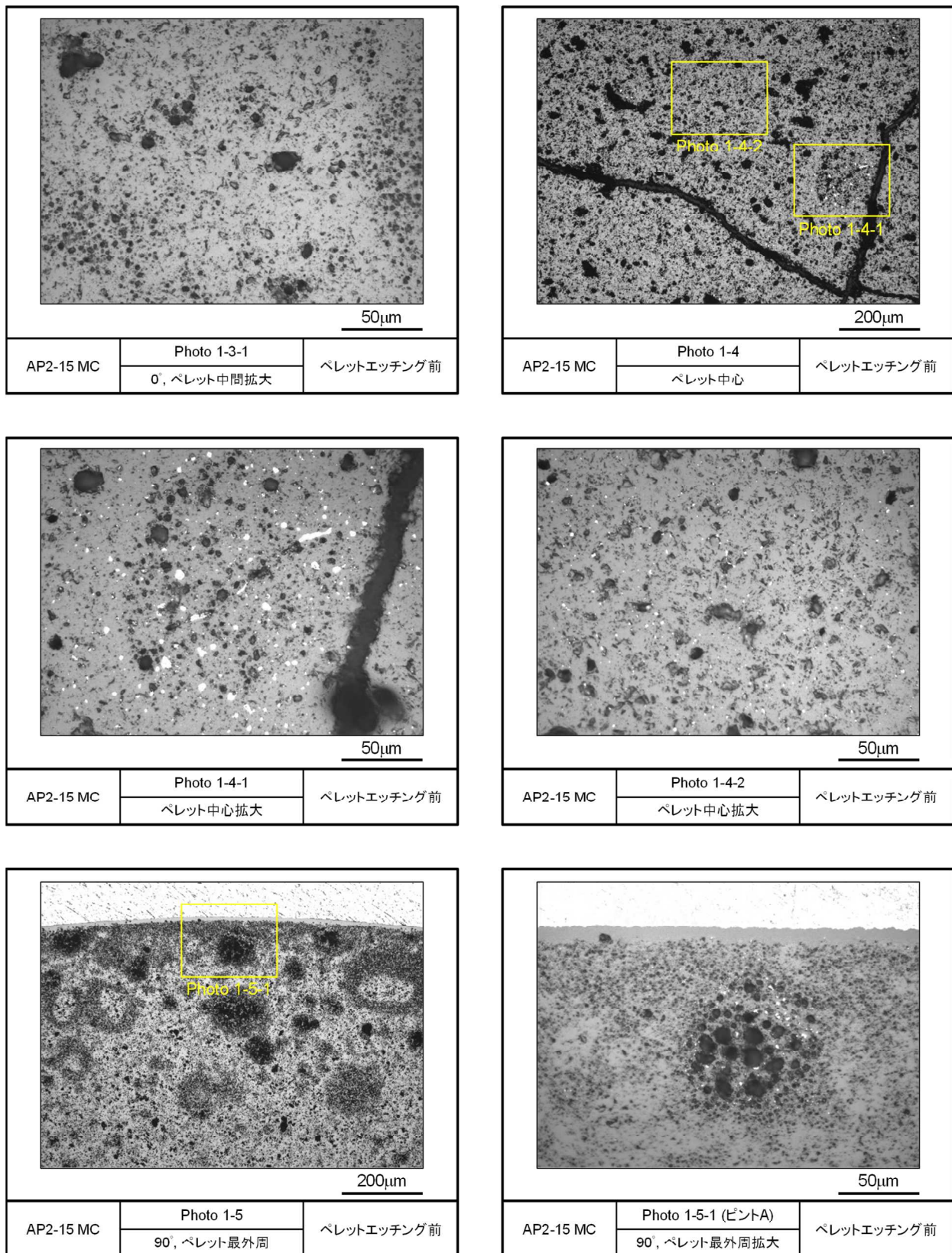


図 4.2.2-1(3) リファレンス試料の金相写真 (ペレットエッチング前, AP2-15 MC)

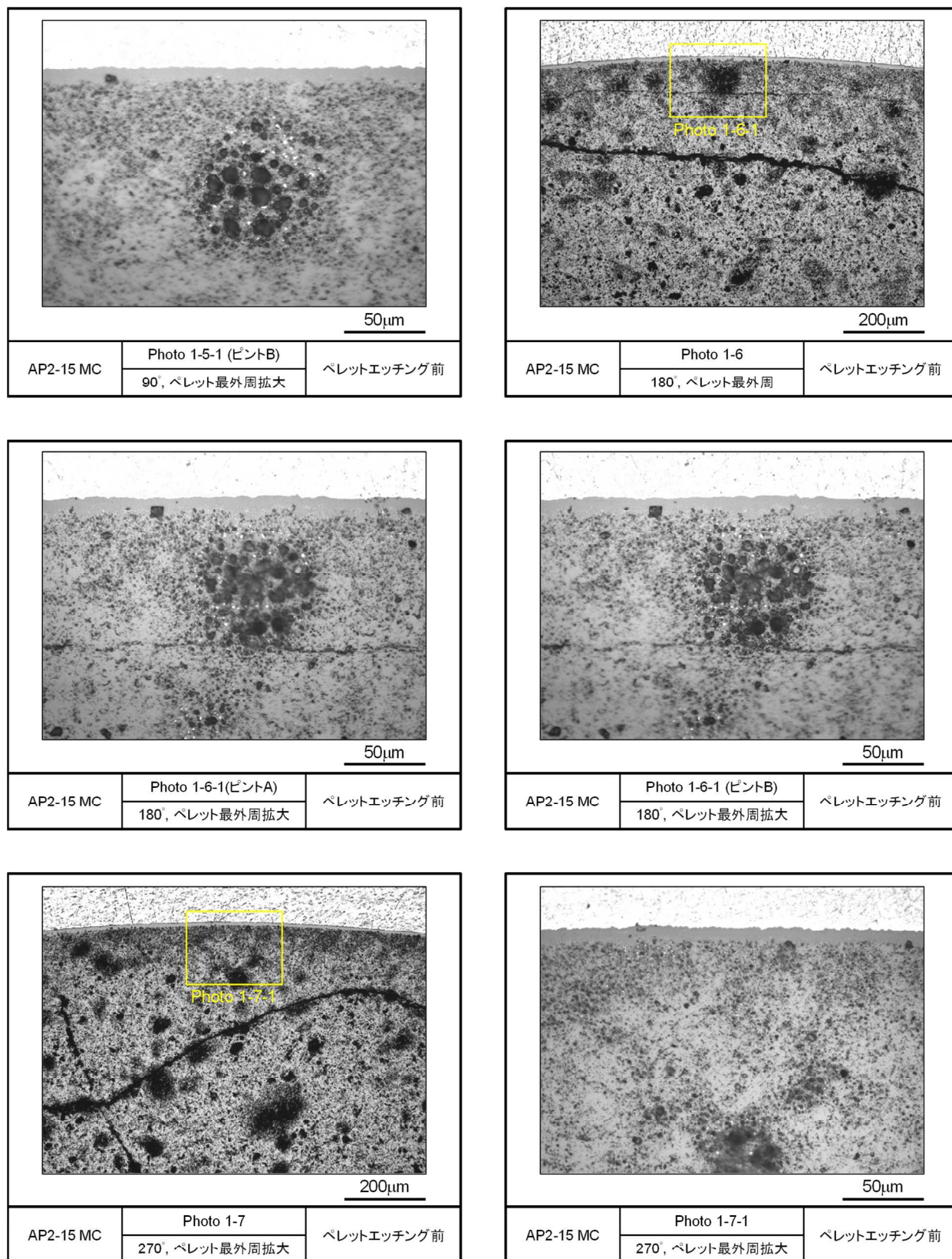


図 4.2.2-1(4) リファレンス試料の金相写真 (ペレットエッチング前, AP2-15 MC)

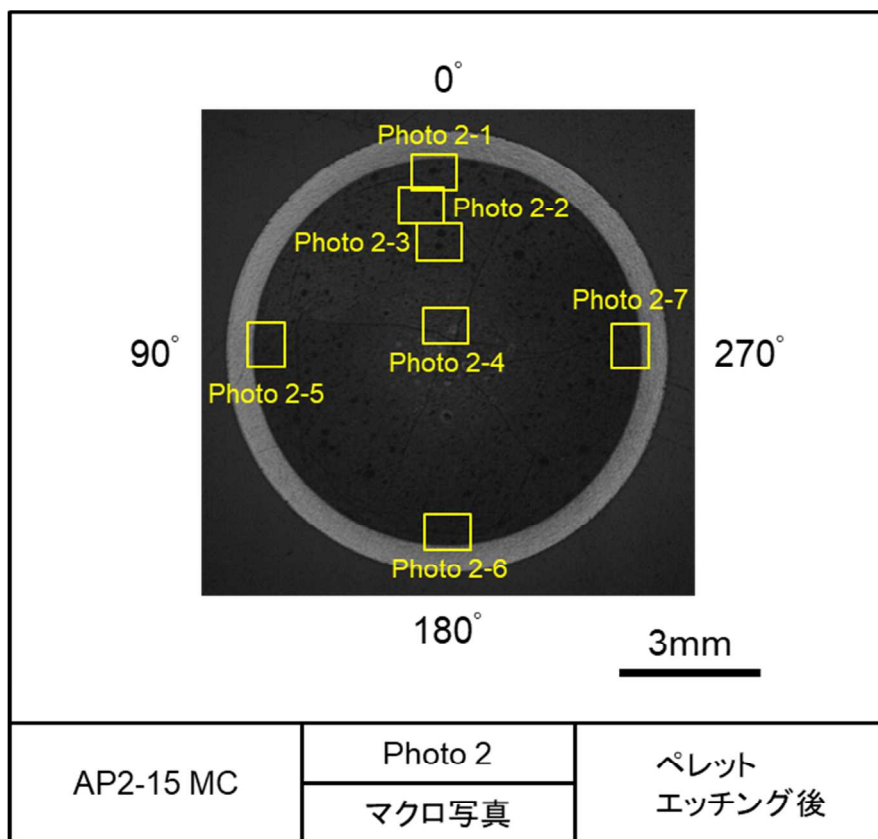


図 4.2.2-2(1) リファレンス試料の金相写真（ペレットエッチング後，AP2-15 MC）

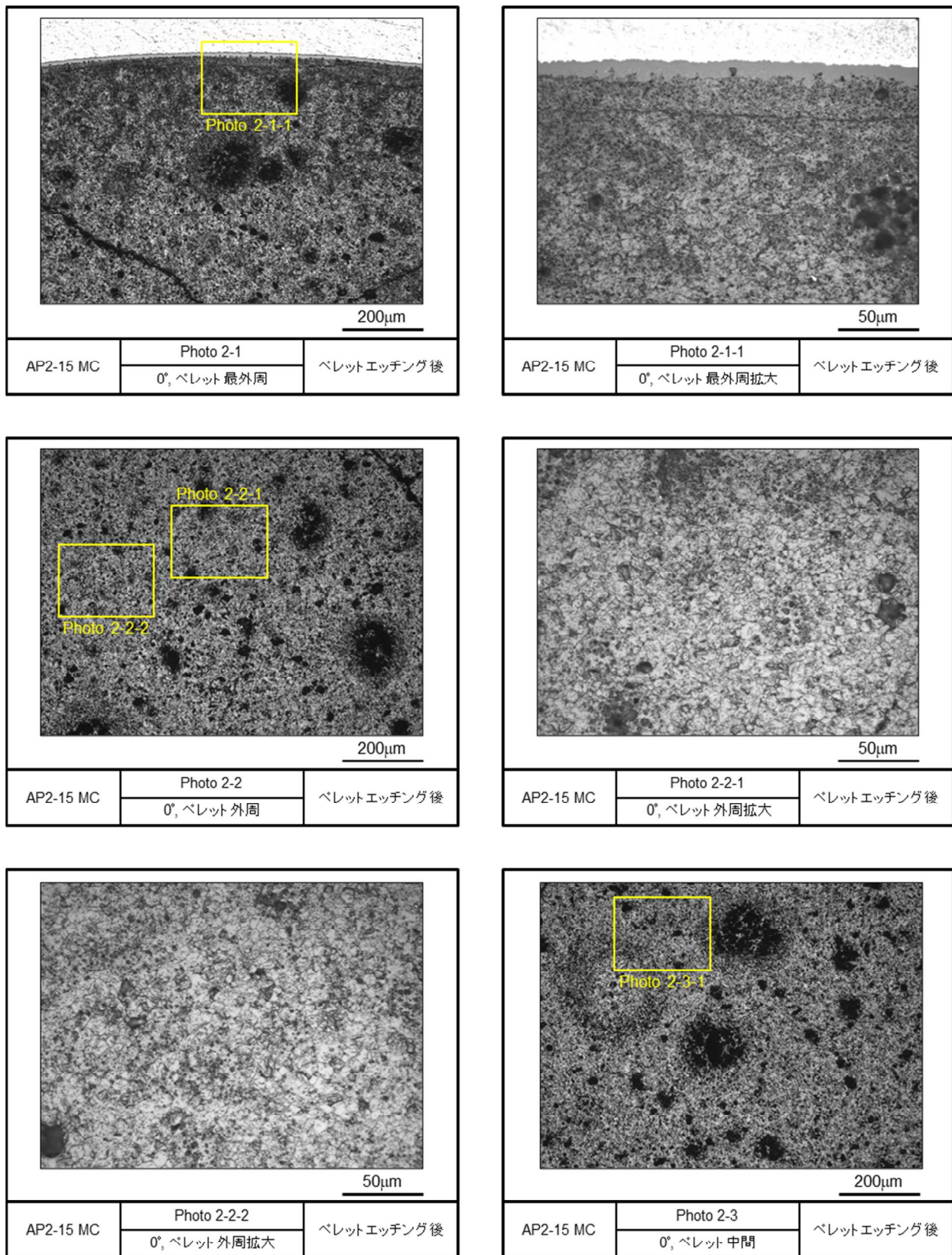


図 4.2.2-2(2) リファレンス試料の金相写真（ペレットエッチング後，AP2-15 MC）

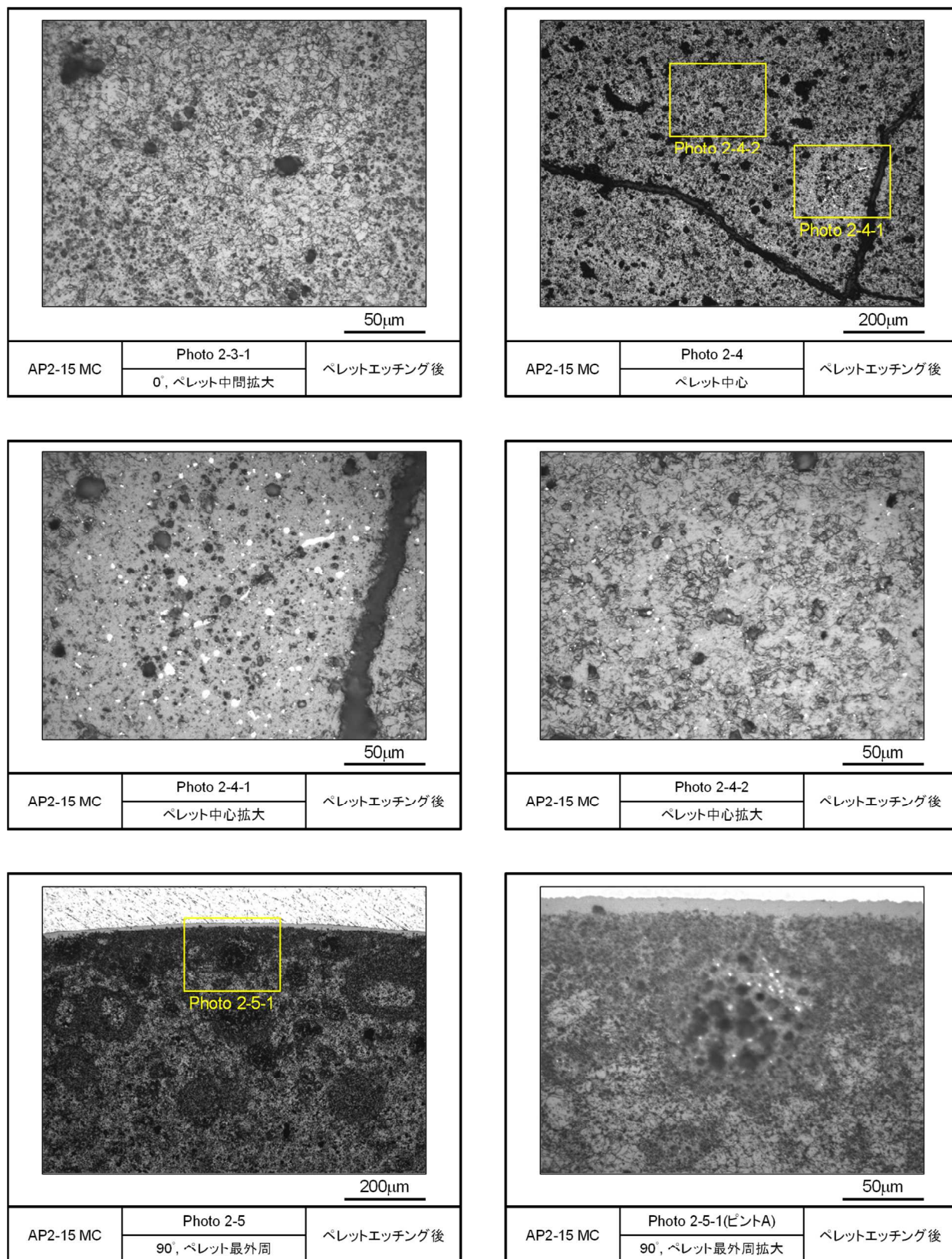


図 4.2.2-2(3) リファレンス試料の金相写真 (ペレットエッチング後, AP2-15 MC)

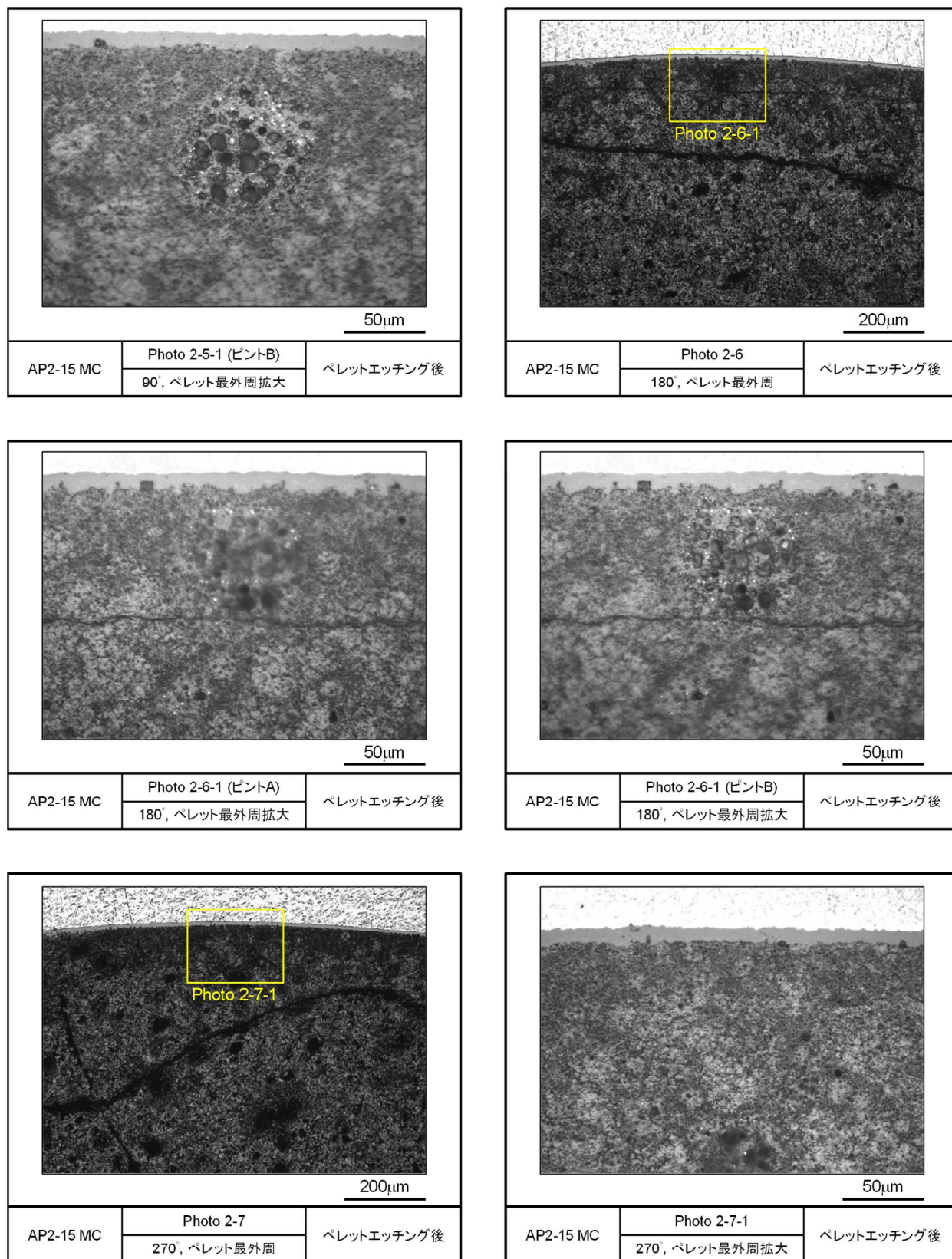


図 4.2.2-2(4) リファレンス試料の金相写真 (ペレットエッチング後, AP2-15 MC)

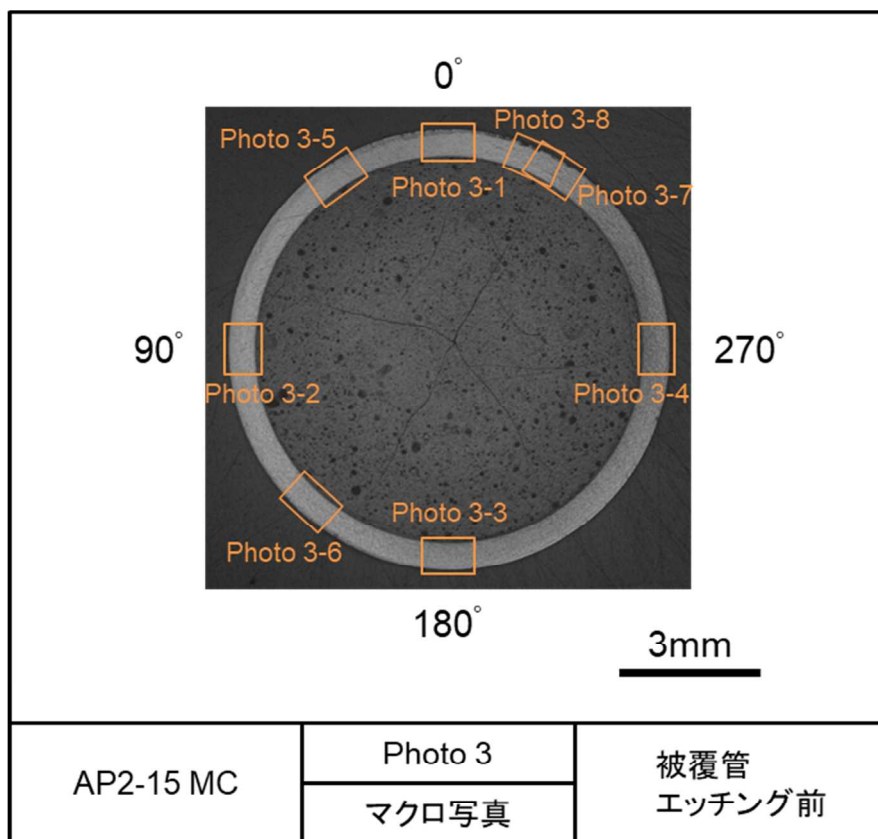


図 4.2.2-3(1) リファレンス試料の金相写真（被覆管エッチング前, AP2-15 MC）

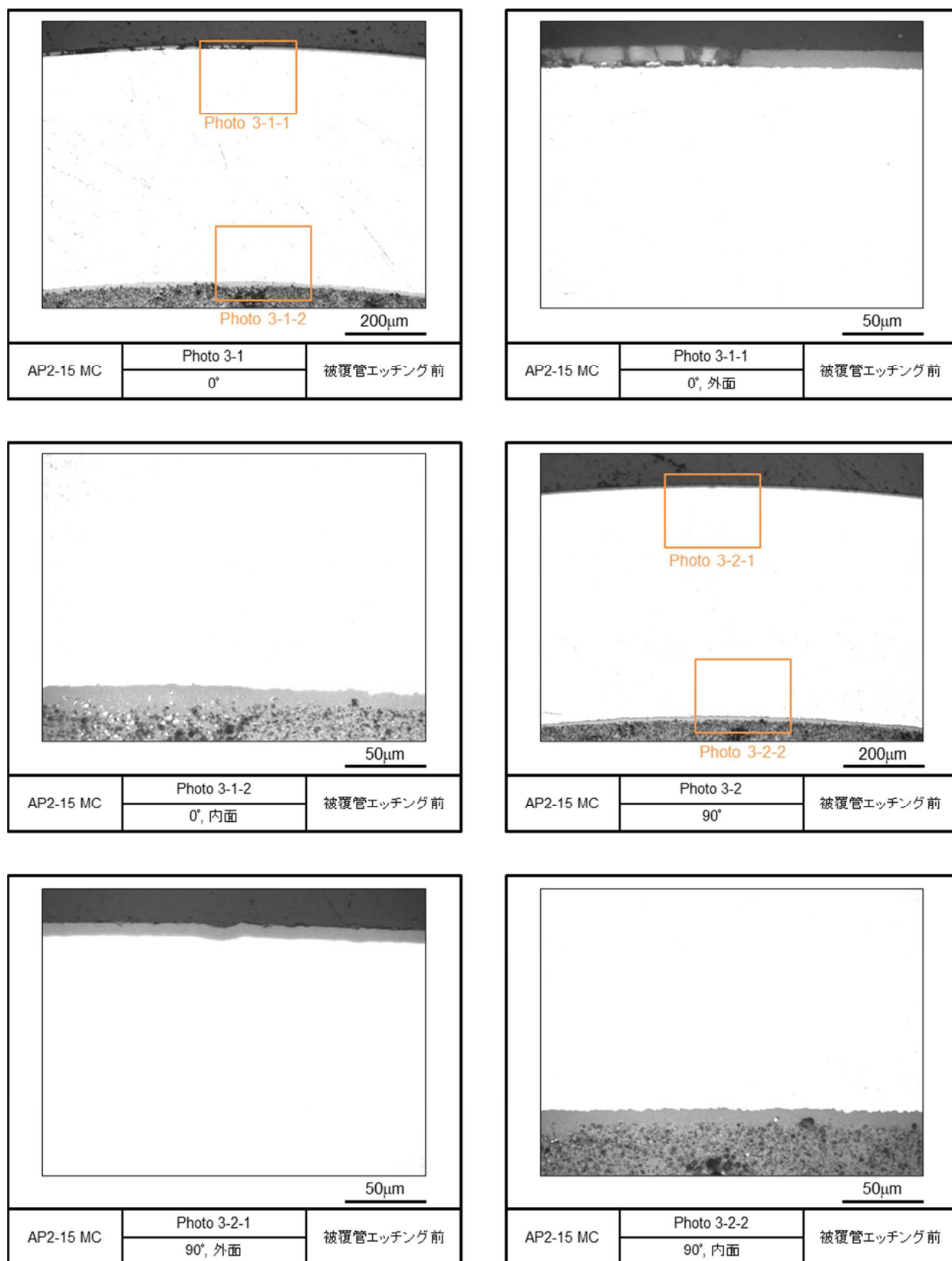


図 4.2.2-3(2) リファレンス試料の金相写真 (被覆管エッチング前, AP2-15 MC)

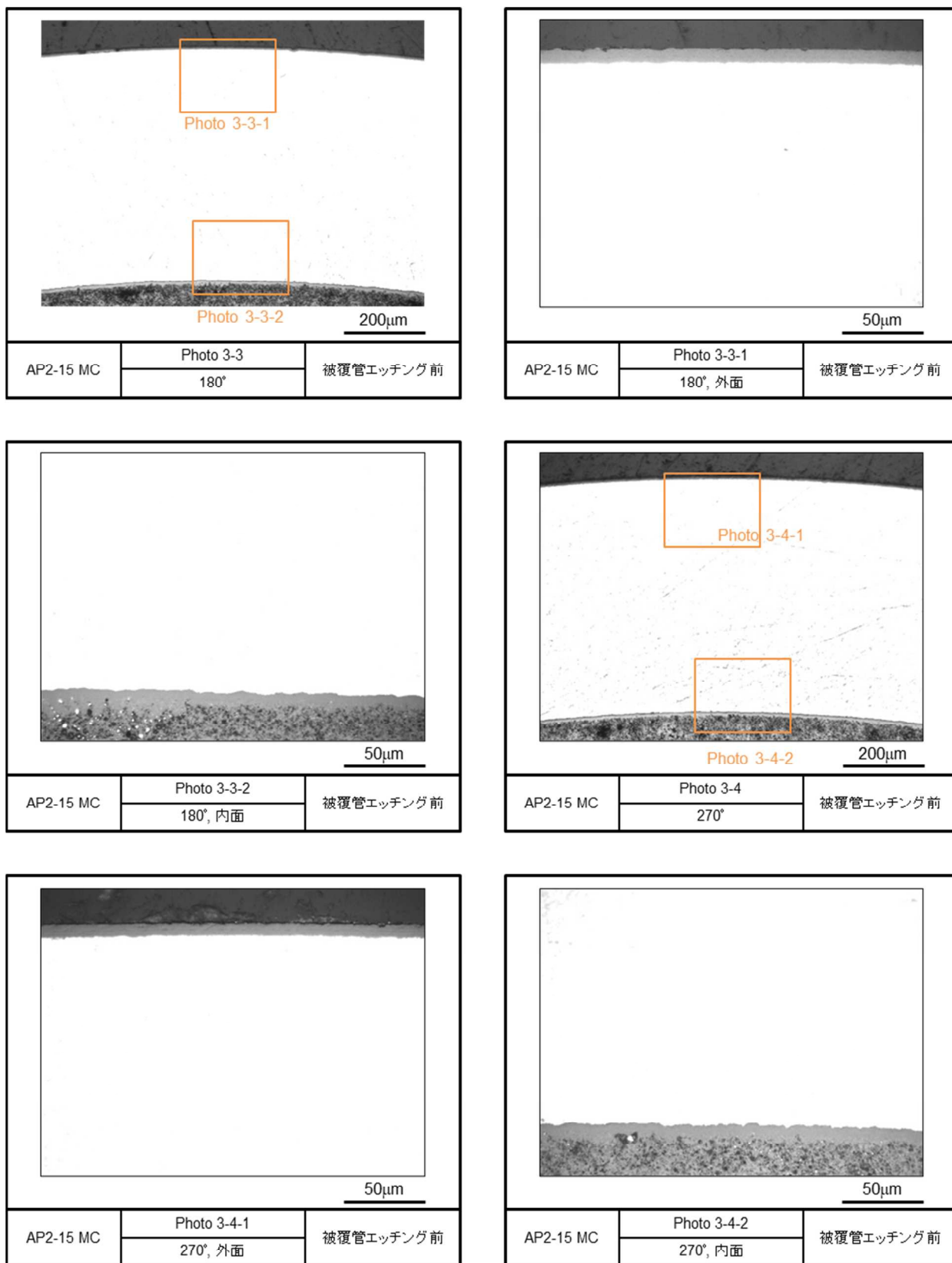


図 4.2.2-3(3) リファレンス試料の金相写真 (被覆管エッチング前, AP2-15 MC)

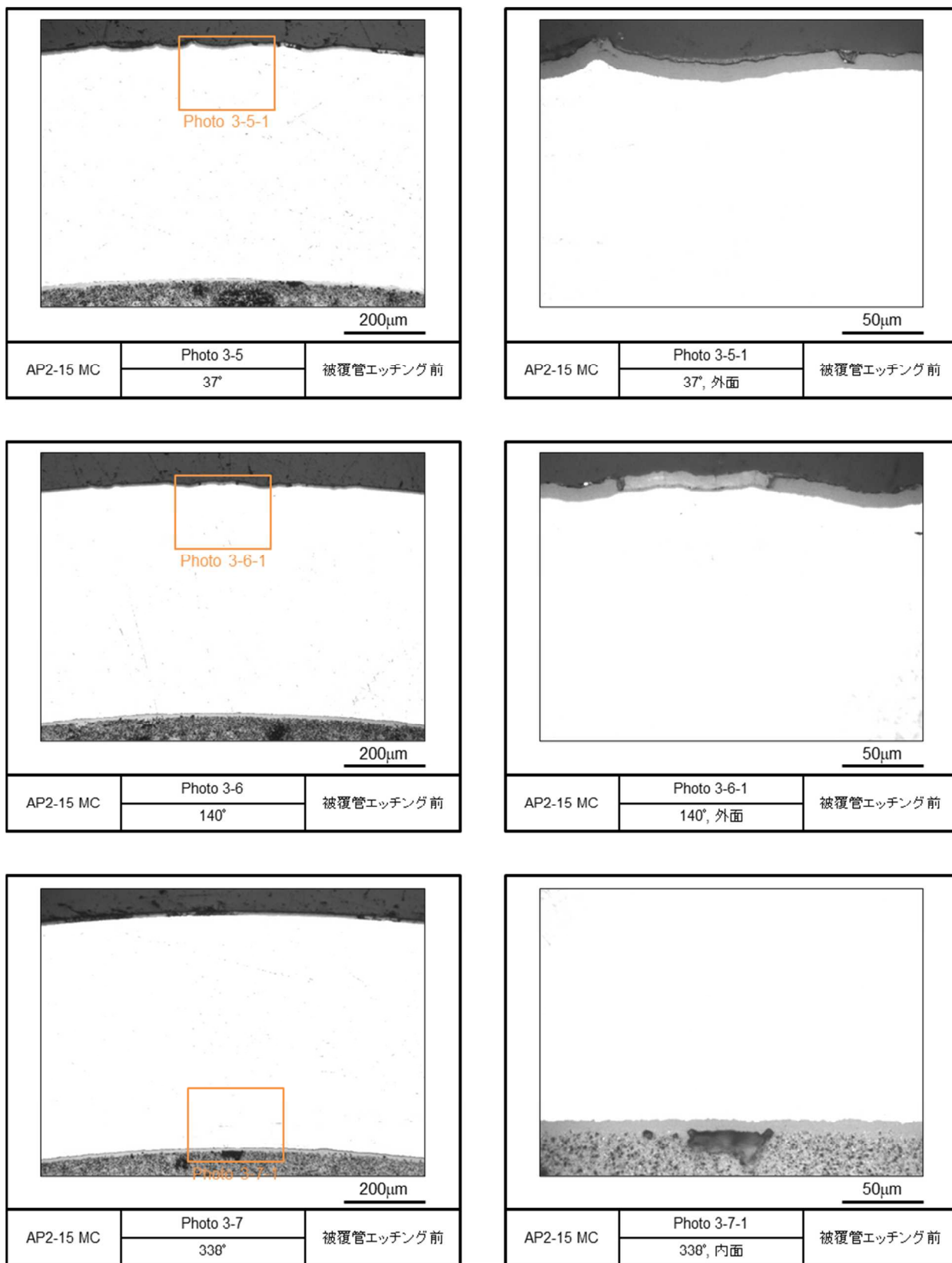


図 4.2.2-3(4) リファレンス試料の金相写真 (被覆管エッチング前, AP2-15 MC)

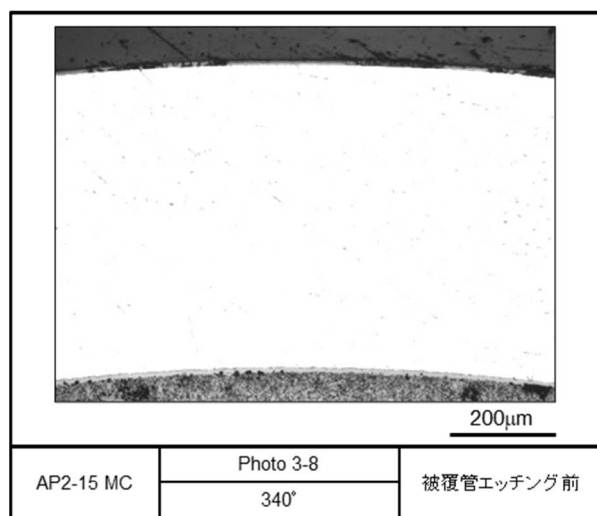


図 4.2.2-3(5) リファレンス試料の金相写真（被覆管エッチング前, AP2-15 MC）

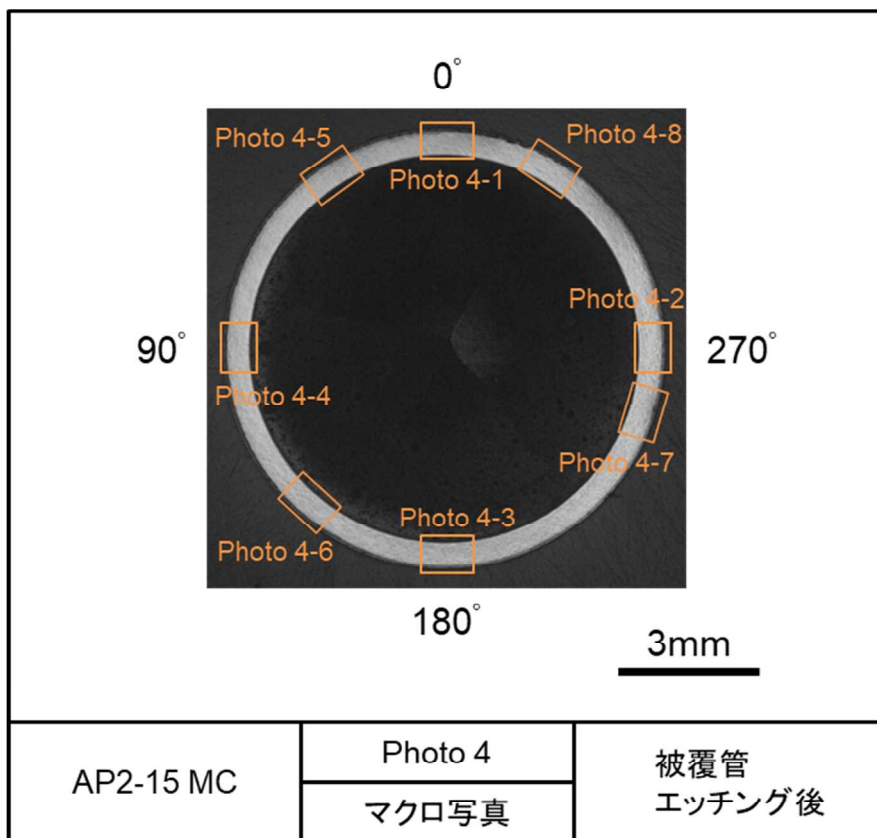


図 4.2.2-4(1) リファレンス試料の金相写真（被覆管エッチング後，AP2-15 MC）

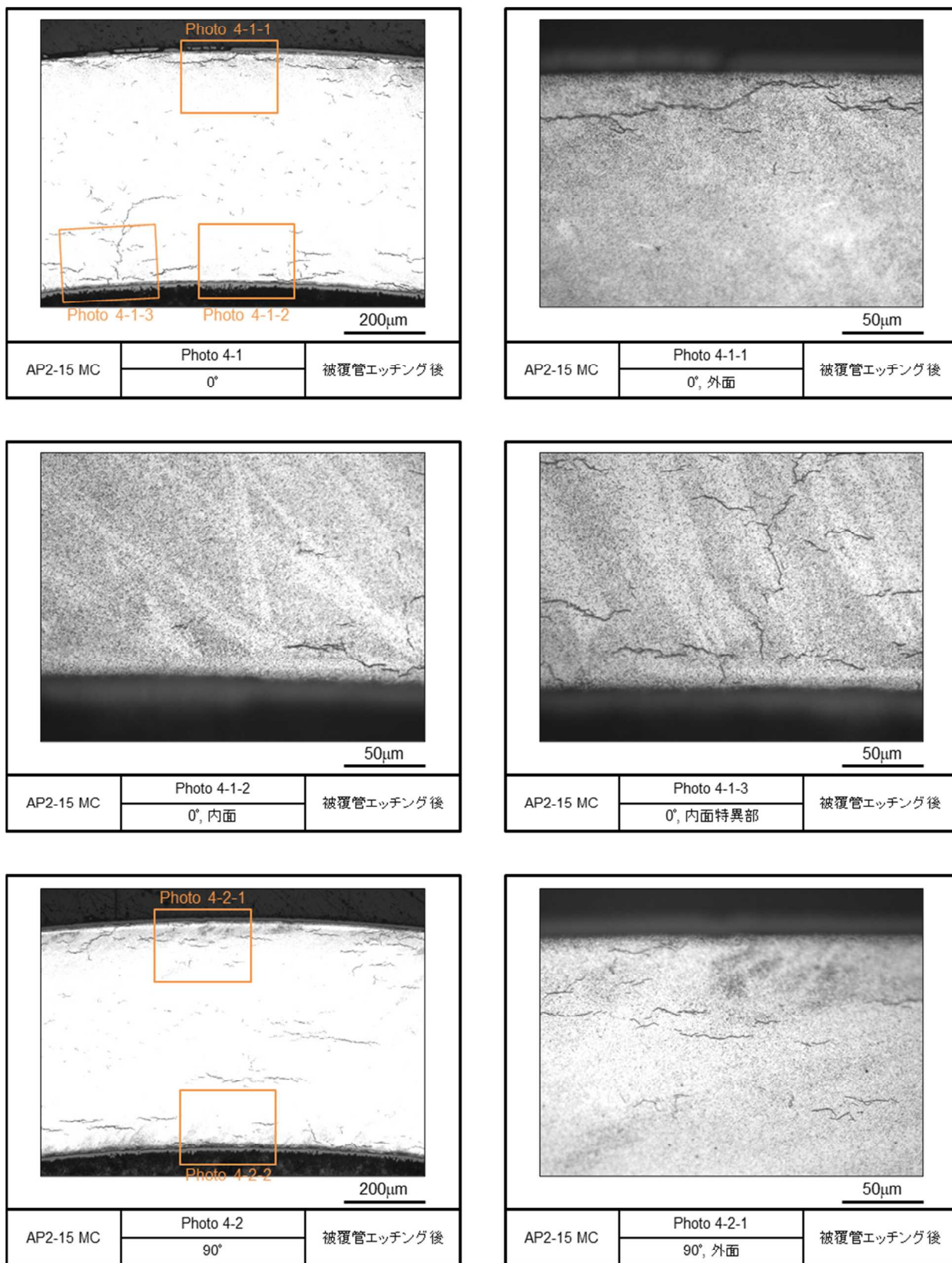


図 4.2.2-4(2) リファレンス試料の金相写真 (被覆管エッチング後, AP2-15 MC)

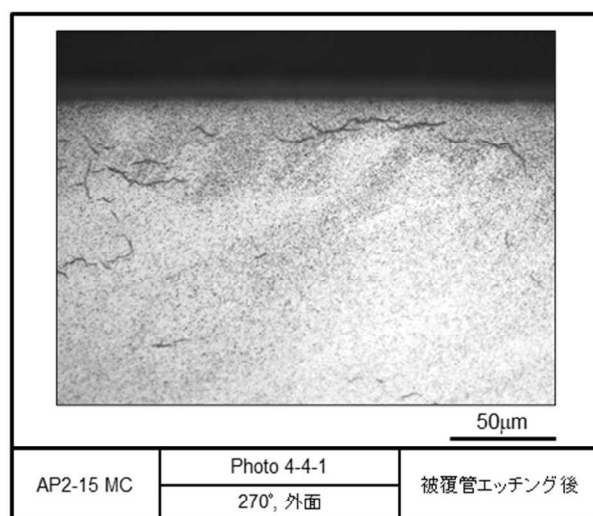
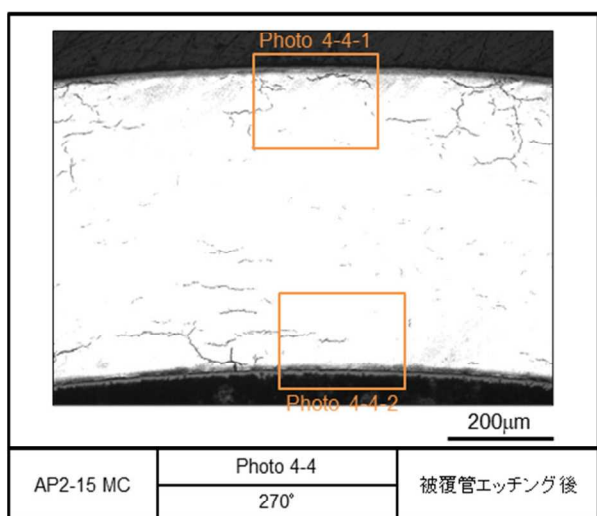
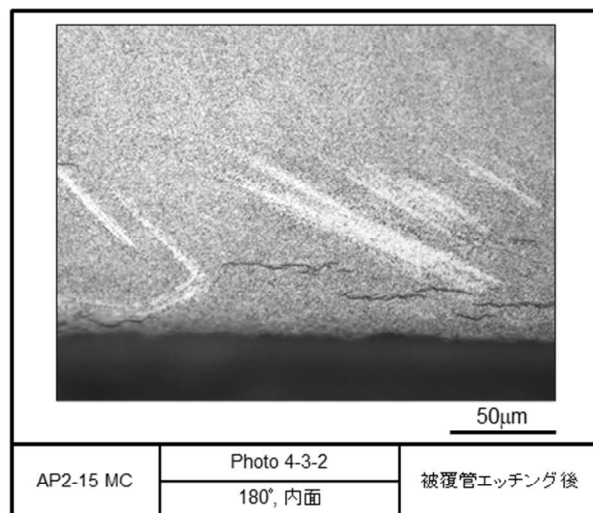
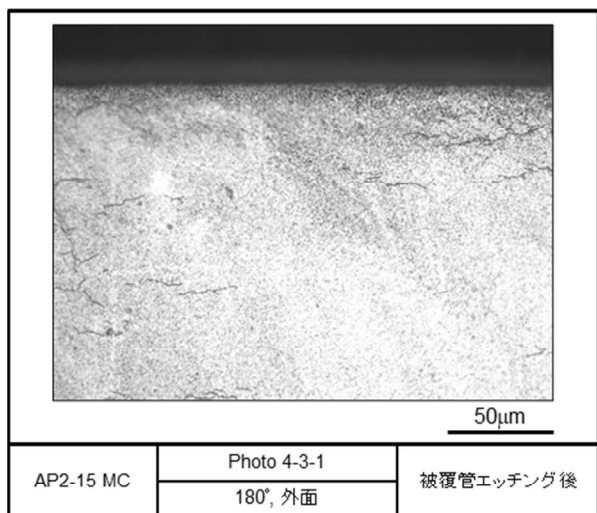
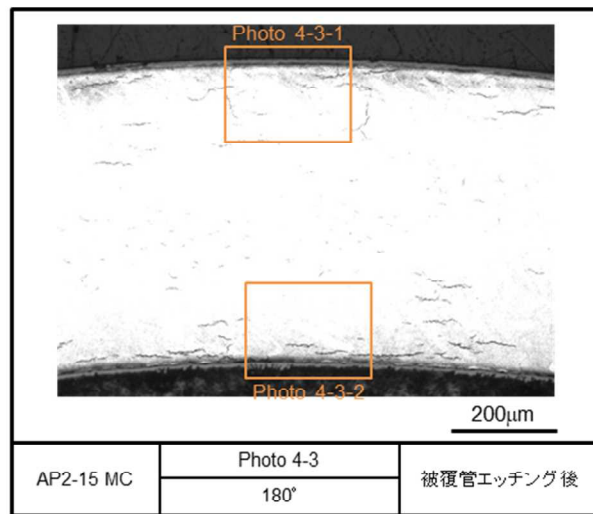
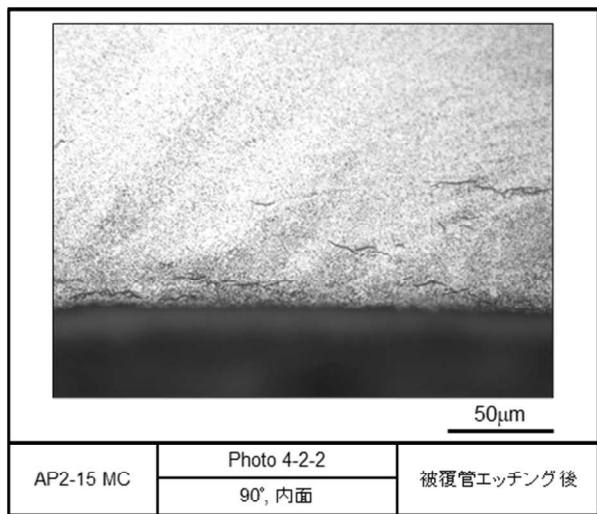


図 4.2.2-4(3) リファレンス試料の金相写真 (被覆管エッチング後, AP2-15 MC)

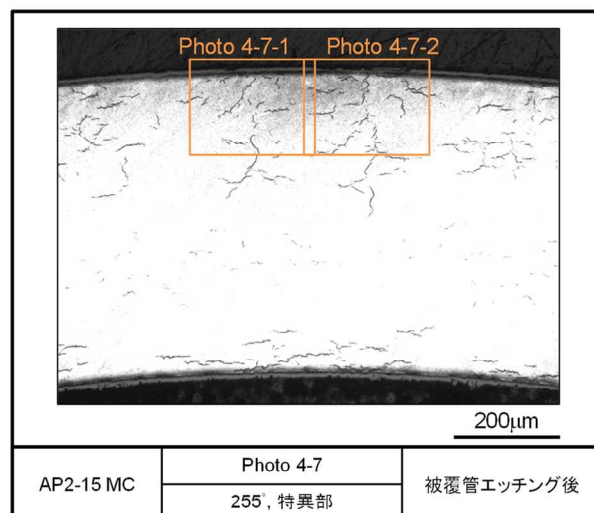
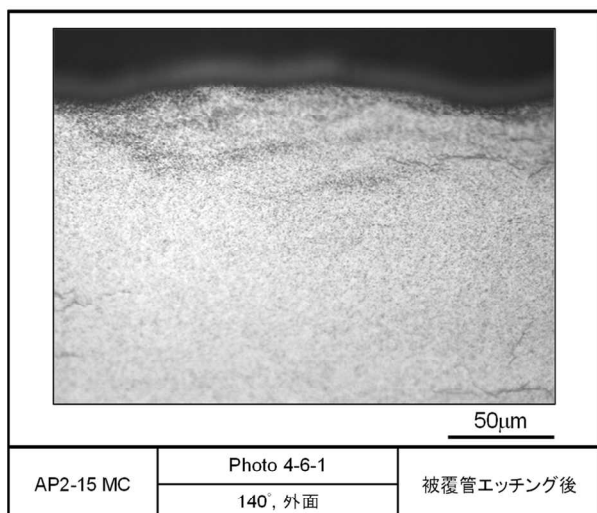
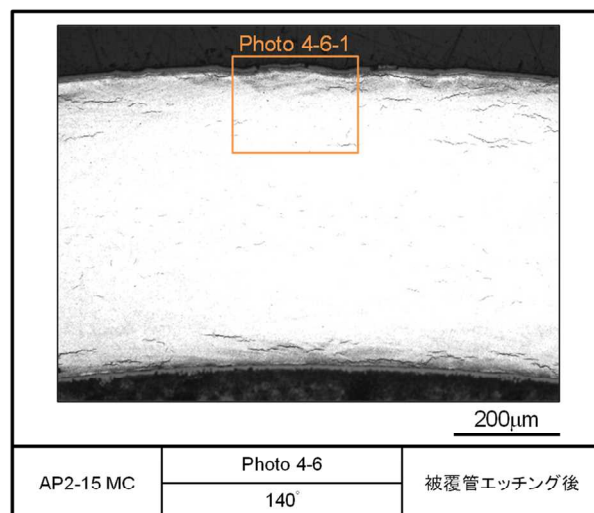
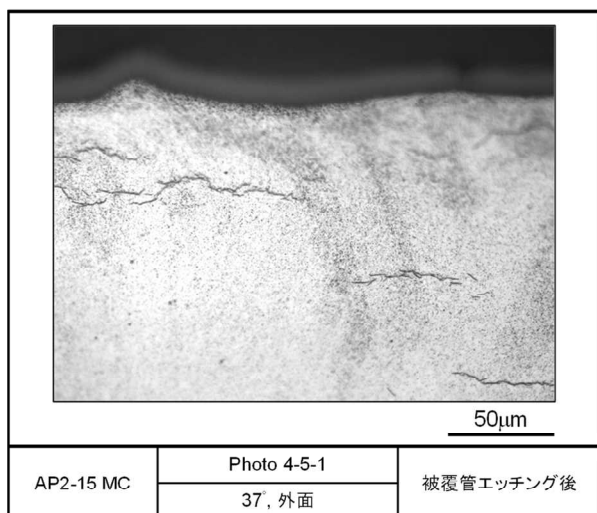
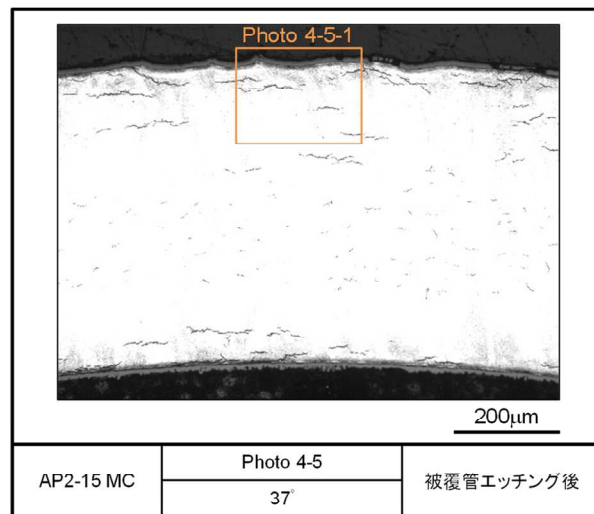
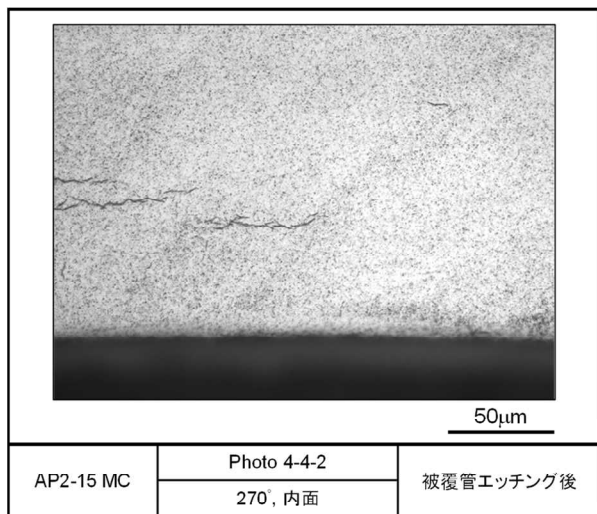


図 4.2.2-4(4) リファレンス試料の金相写真 (被覆管エッチング後, AP2-15 MC)

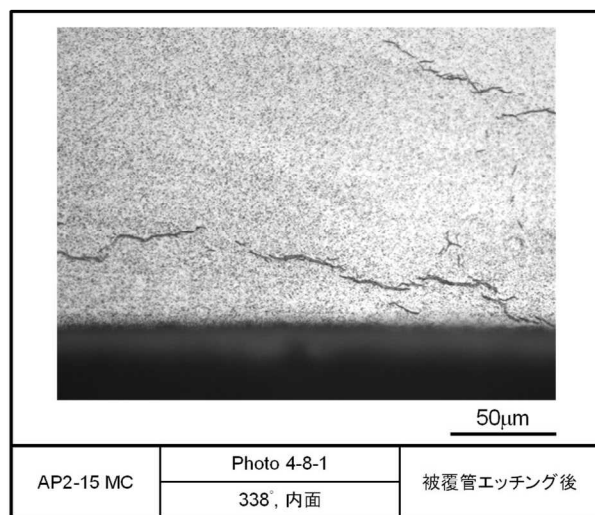
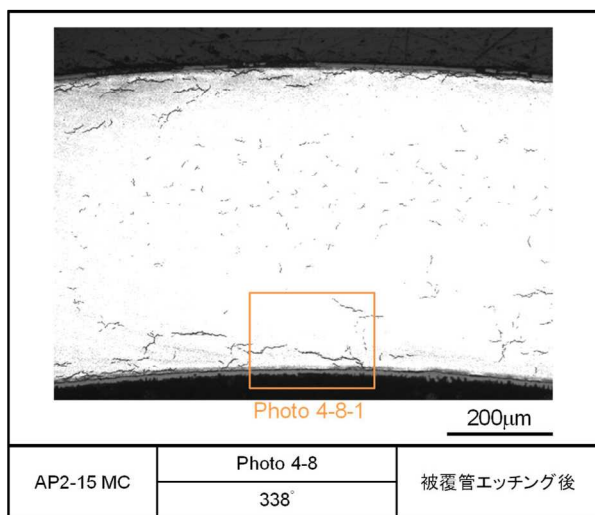
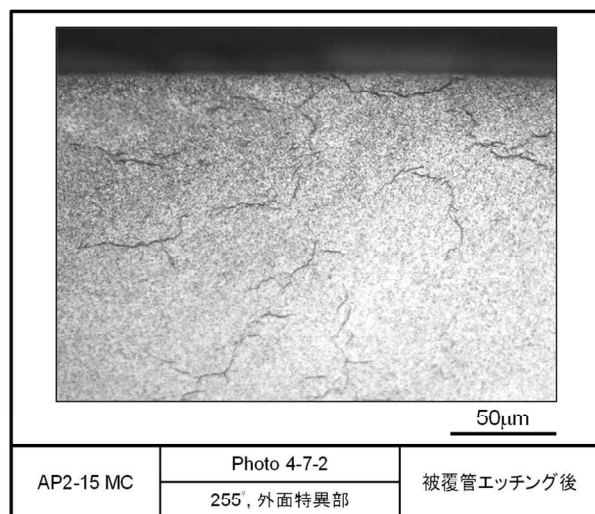
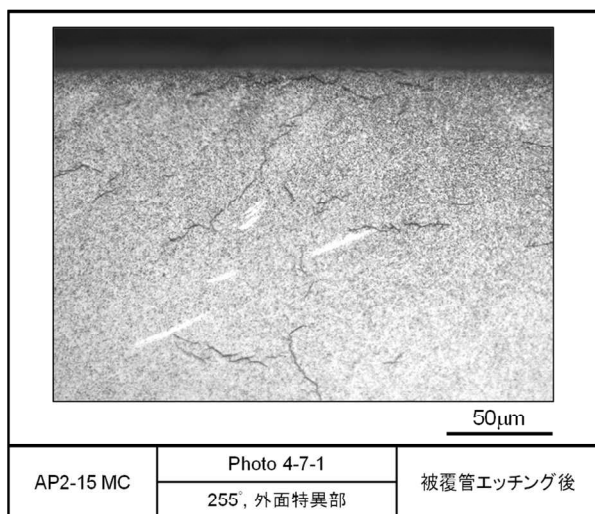


図 4.2.2-4(5) リファレンス試料の金相写真 (被覆管エッチング後, AP2-15 MC)

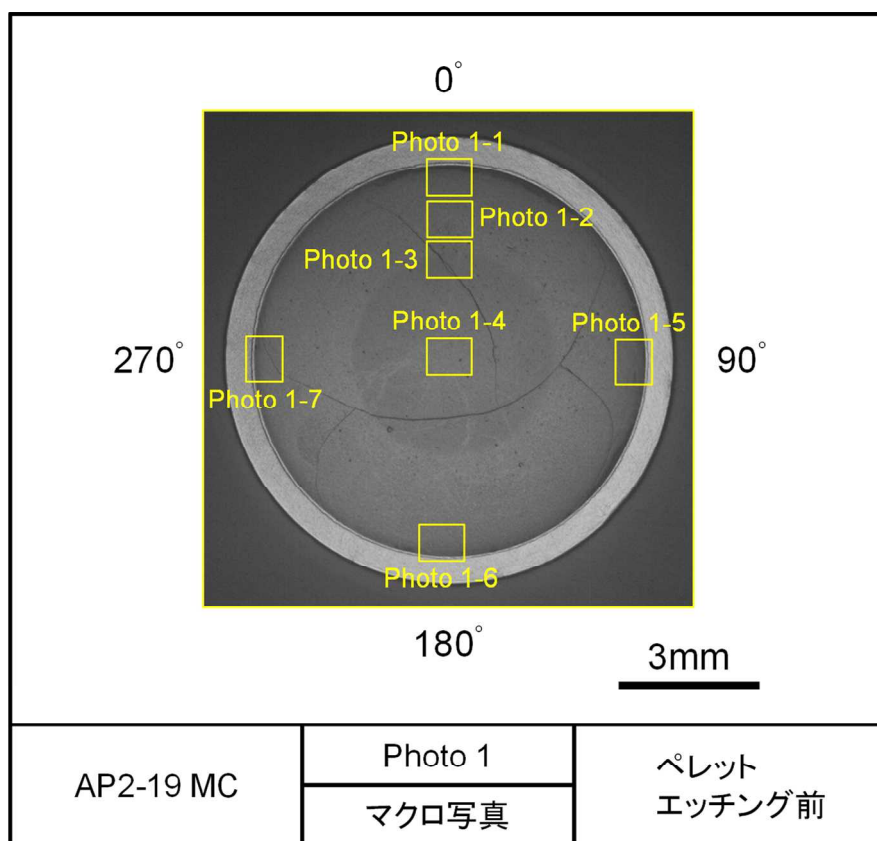


図 4.2.3-1(1) レファレンス試料の金相写真（ペレットエッチング前，AP2-19 MC）

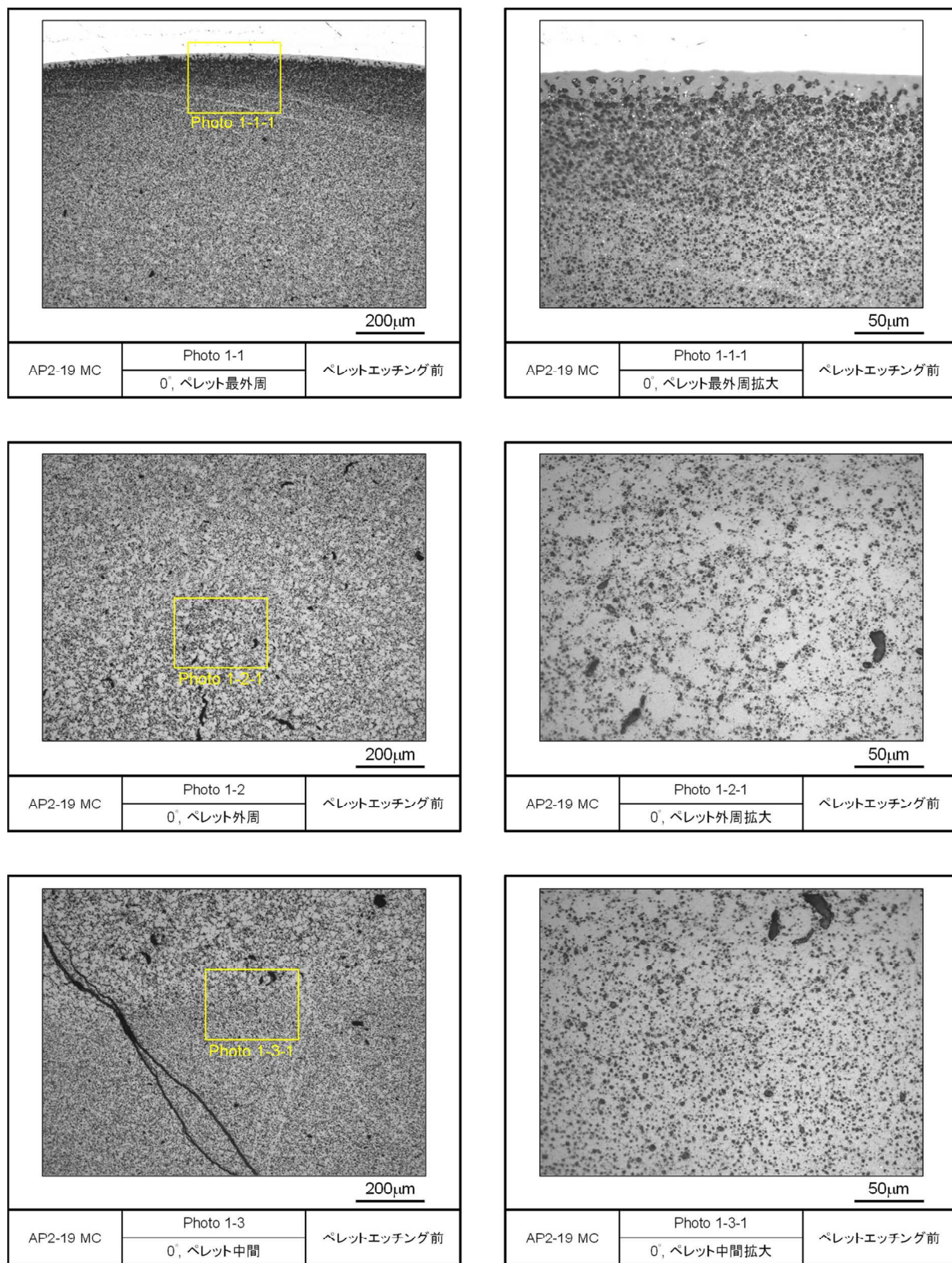


図 4.2.3-1(2) レファレンス試料の金相写真（ペレットエッチング前，AP2-19 MC）

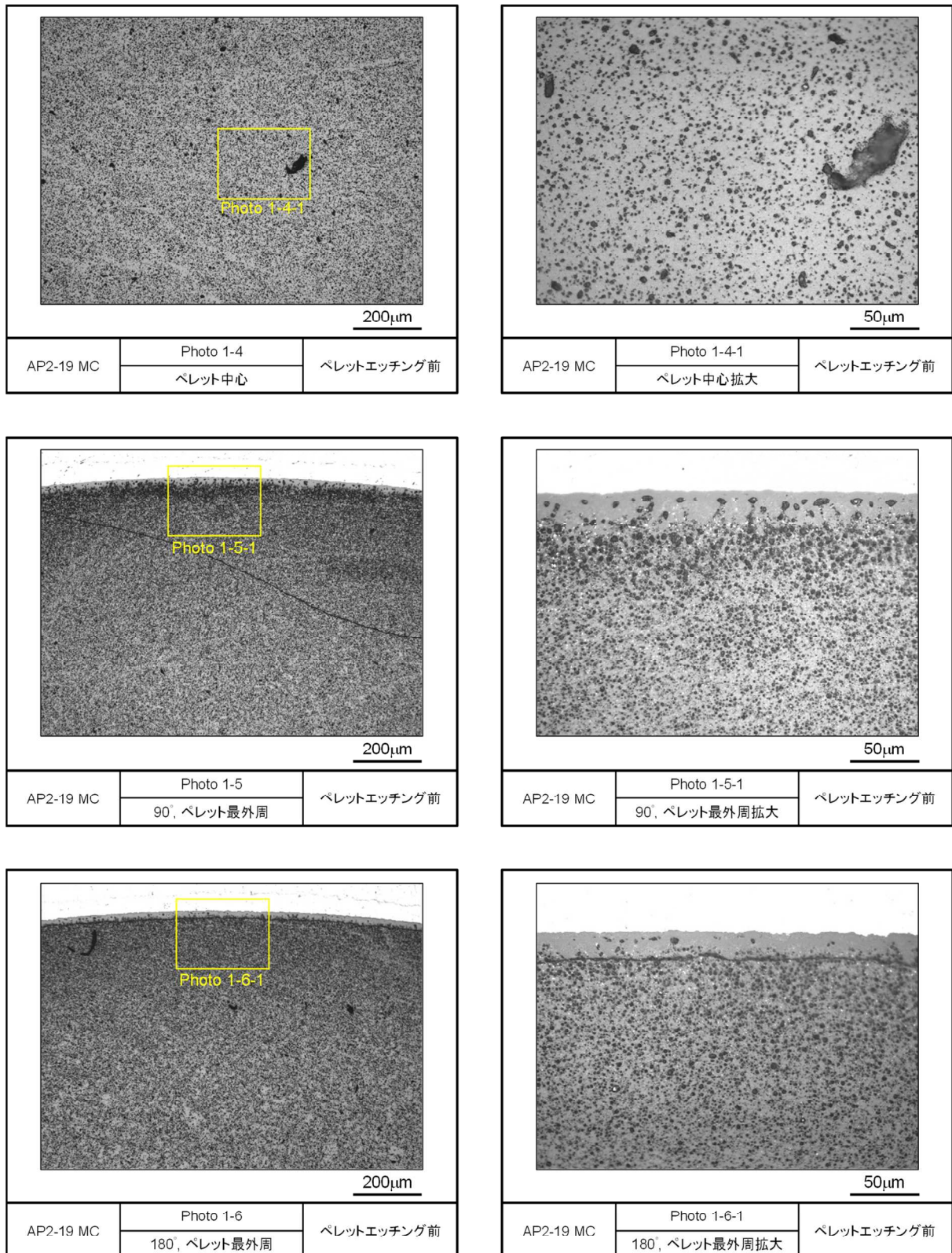


図 4.2.3-1(3) レファレンス試料の金相写真（ペレットエッチング前，AP2-19 MC）

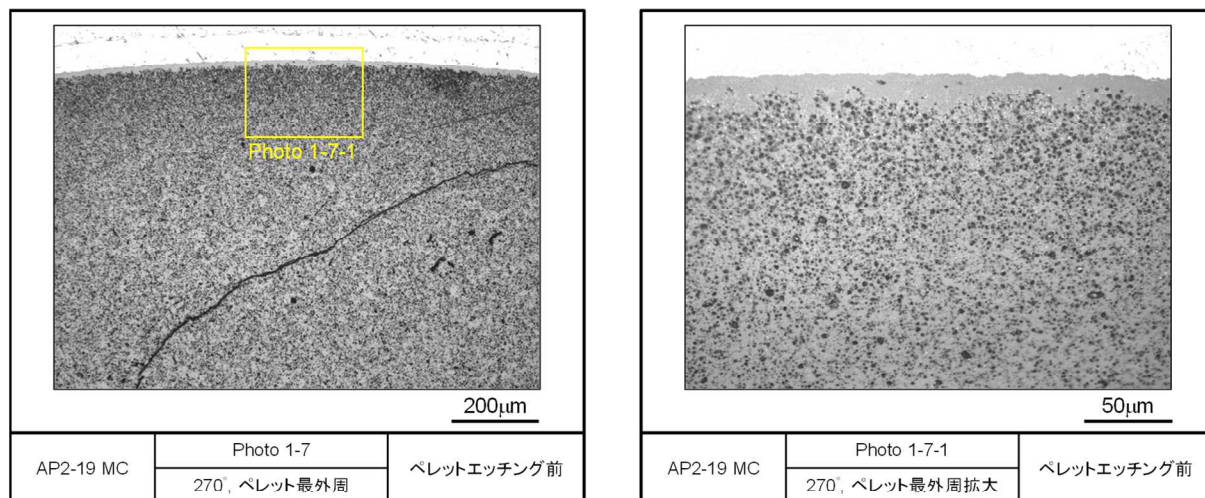


図 4.2.3-1(4) レファレンス試料の金相写真（ペレットエッチング前，AP2-19 MC）

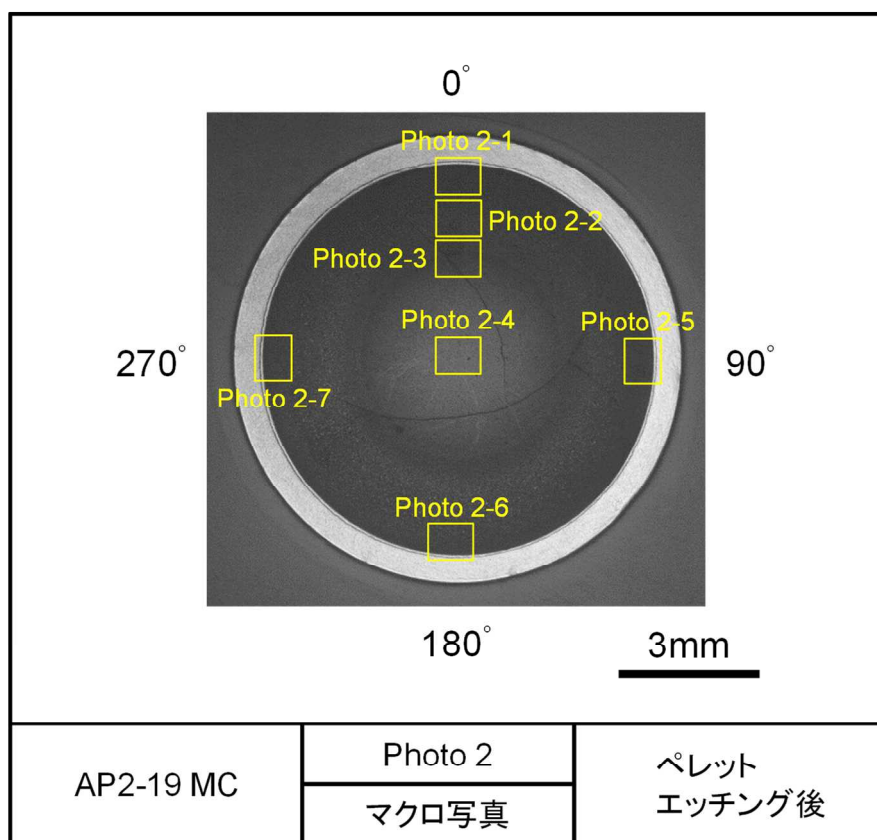


図 4.2.3-2(1) レファレンス試料の金相写真（ペレットエッチング後，AP2-19 MC）

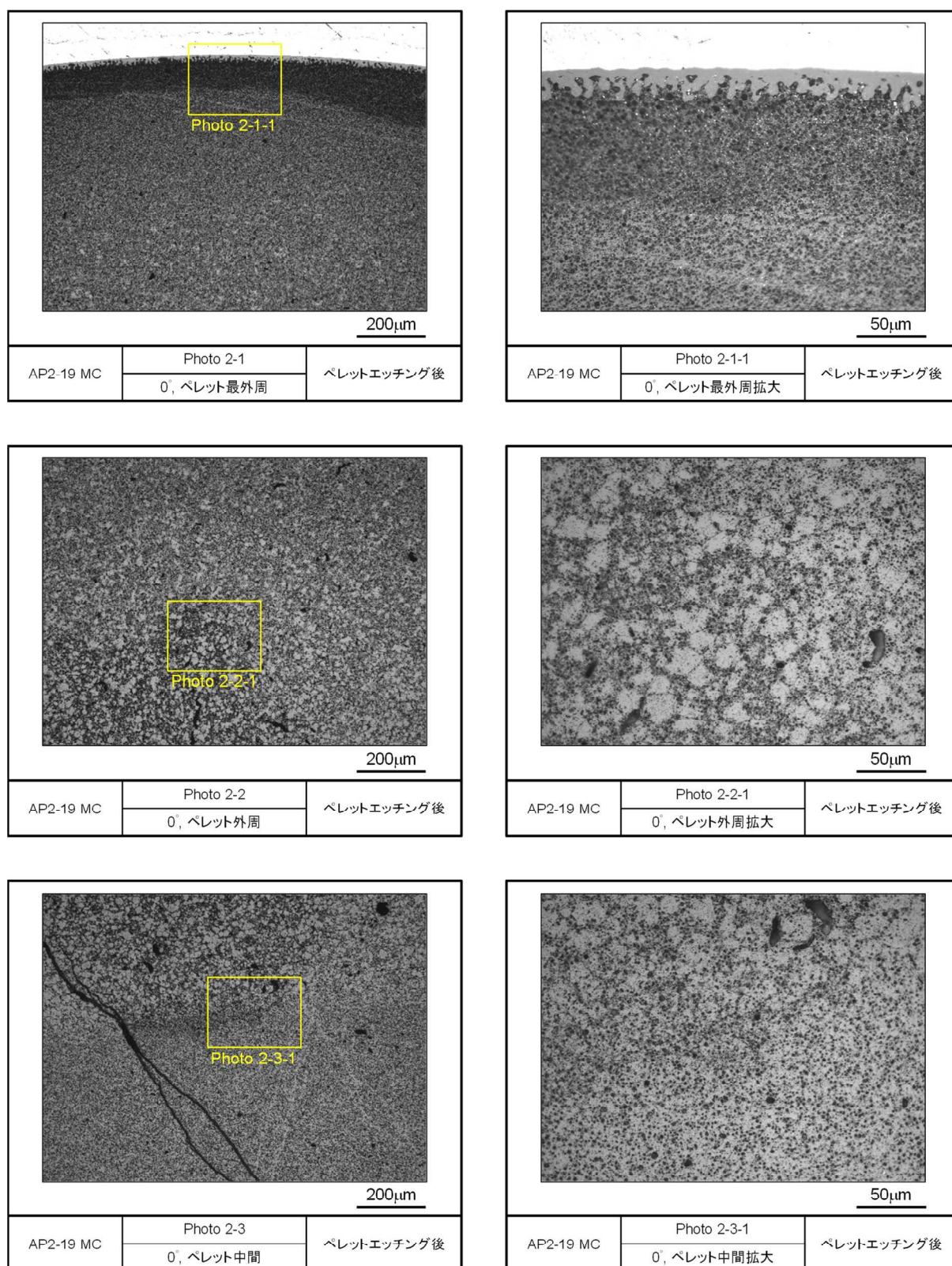


図 4.2.3-2(2) レファレンス試料の金相写真（ペレットエッチング後，AP2-19 MC）

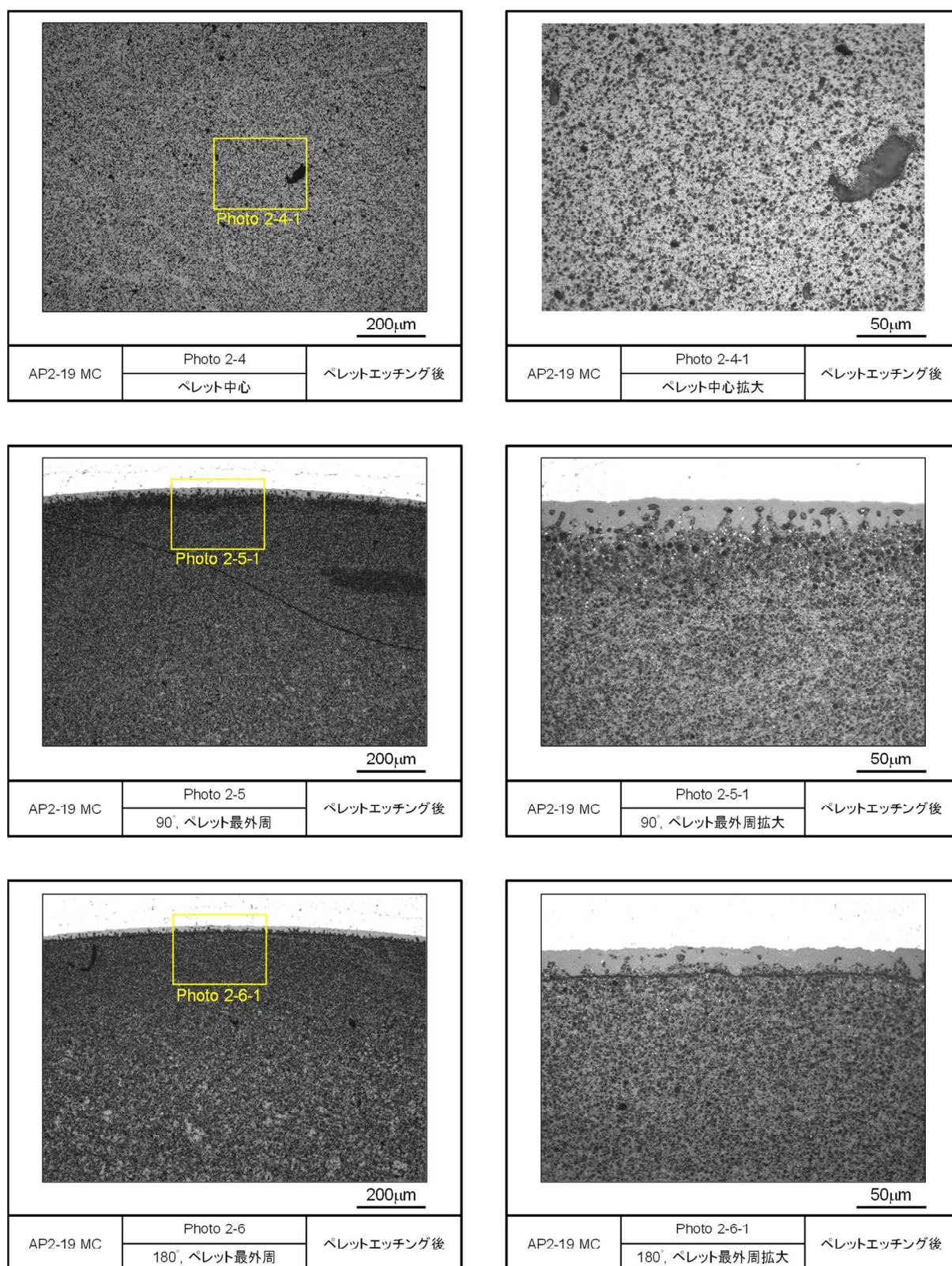


図 4.2.3-2(3) レファレンス試料の金相写真（ペレットエッチング後，AP2-19 MC）

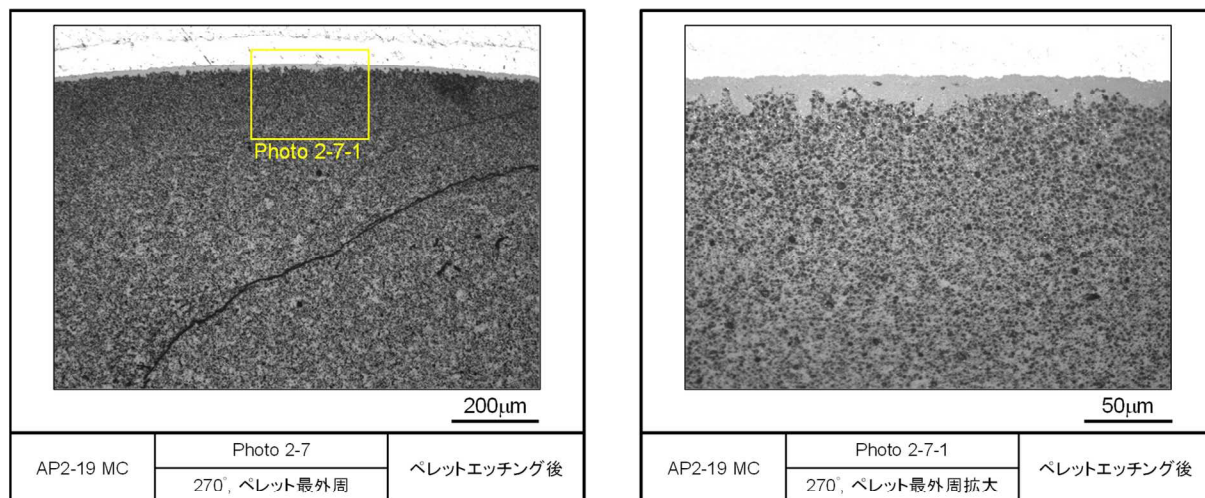


図 4.2.3-2(4) レファレンス試料の金相写真（ペレットエッチング後，AP2-19 MC）

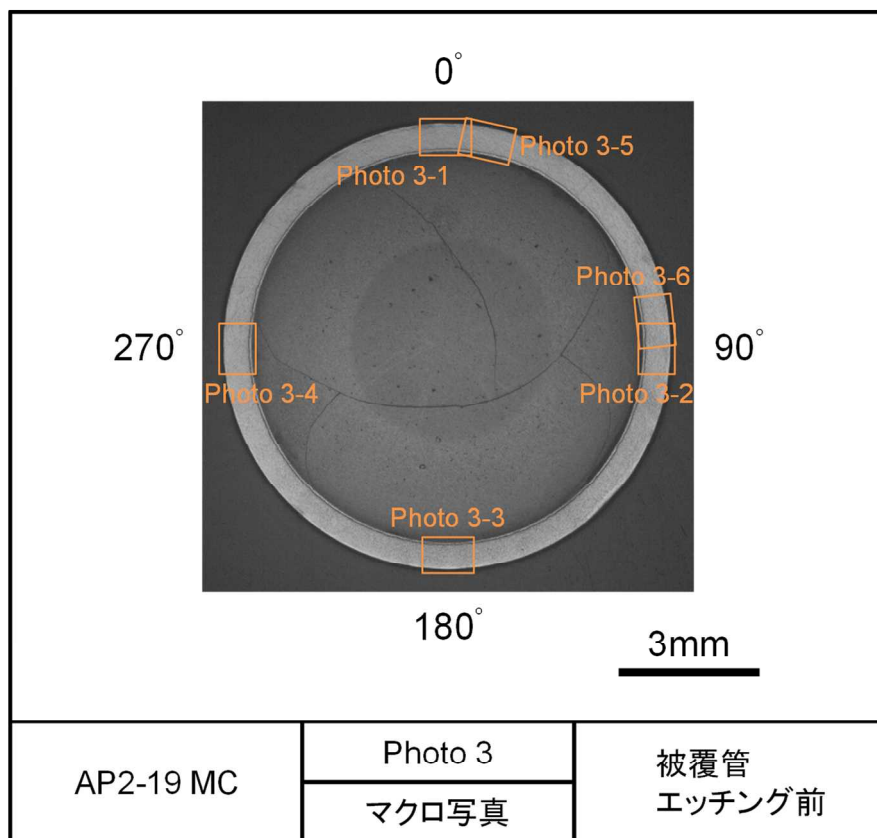


図 4.2.3-3(1) レファレンス試料の金相写真（被覆管エッチング前, AP2-19 MC）

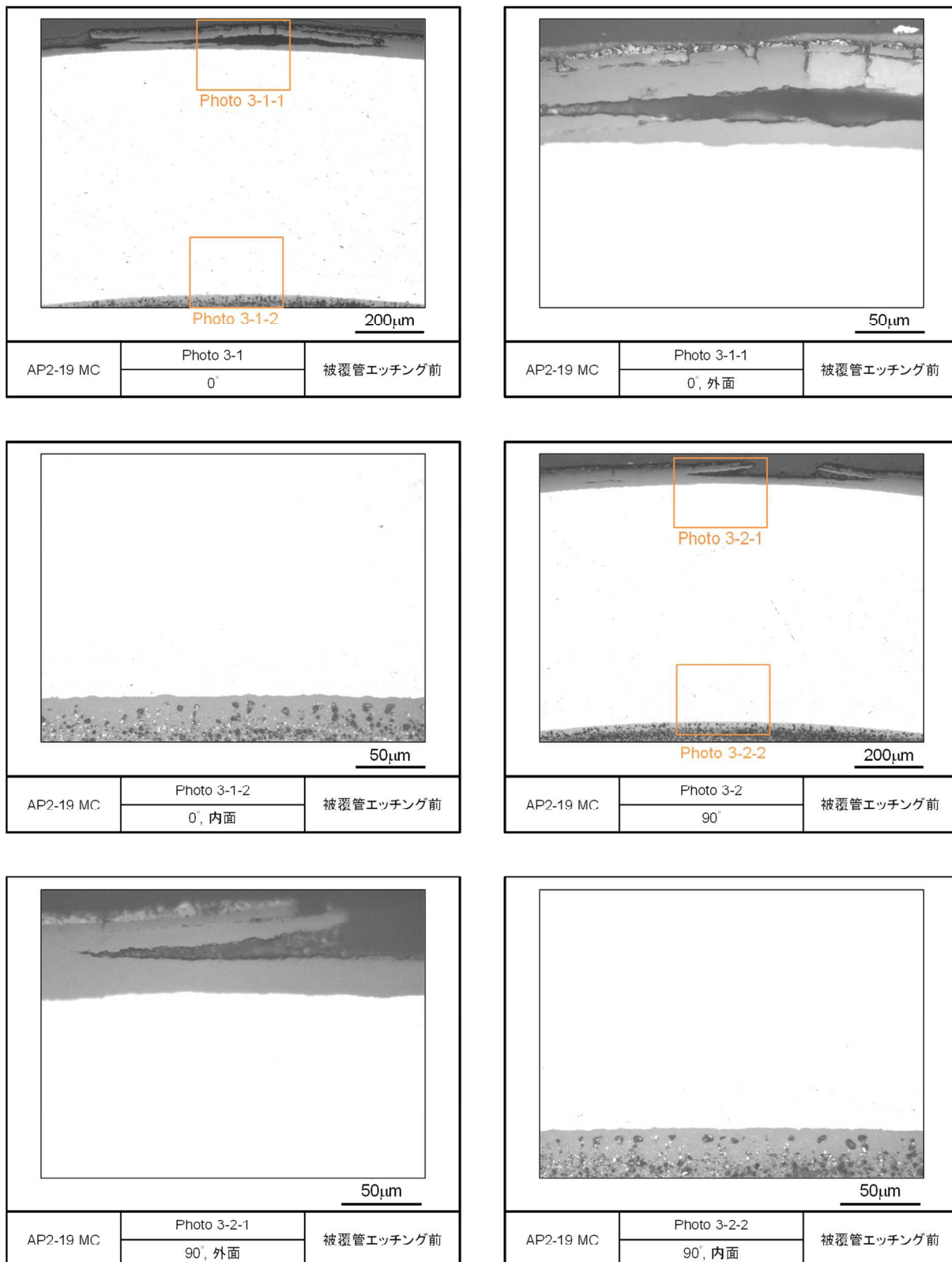


図 4.2.3-3(2) レファレンス試料の金相写真 (被覆管エッチング前, AP2-19 MC)

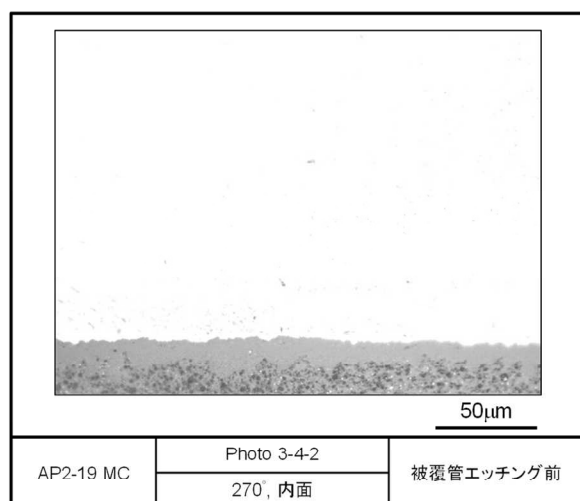
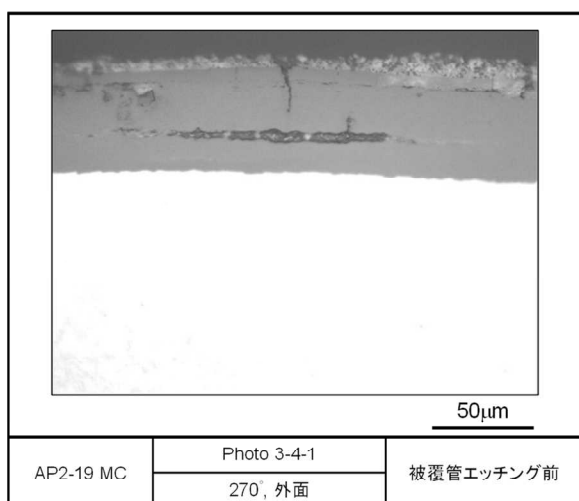
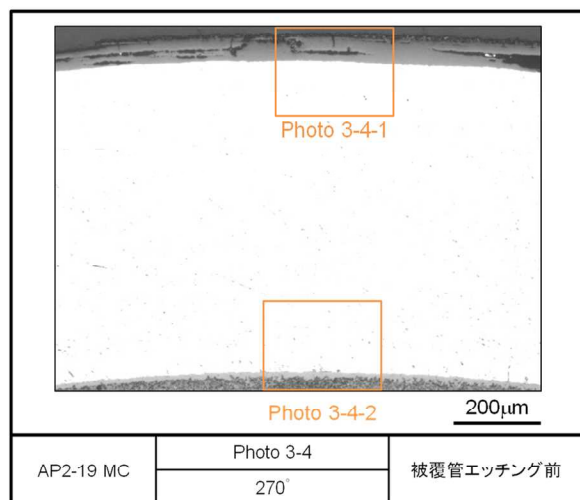
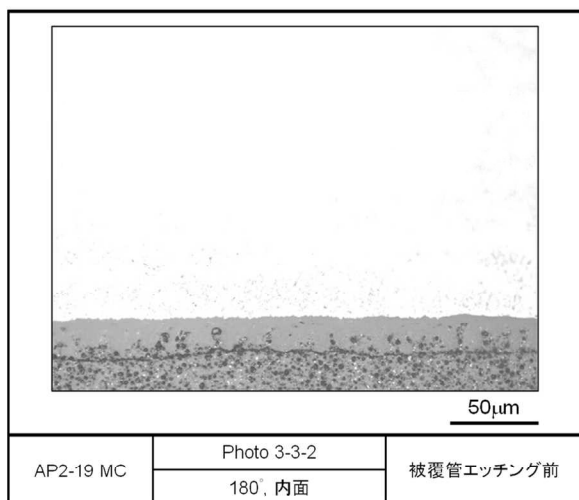
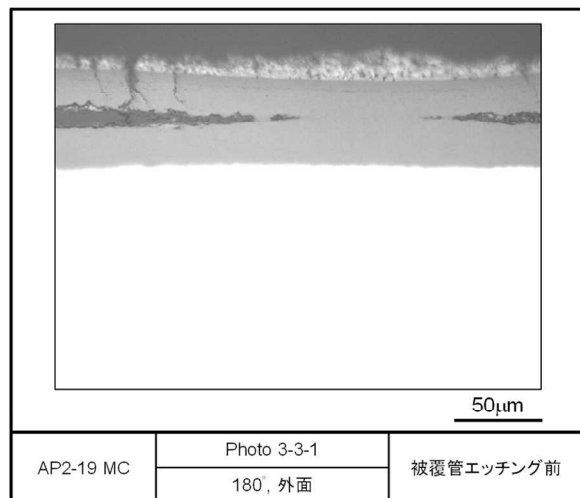
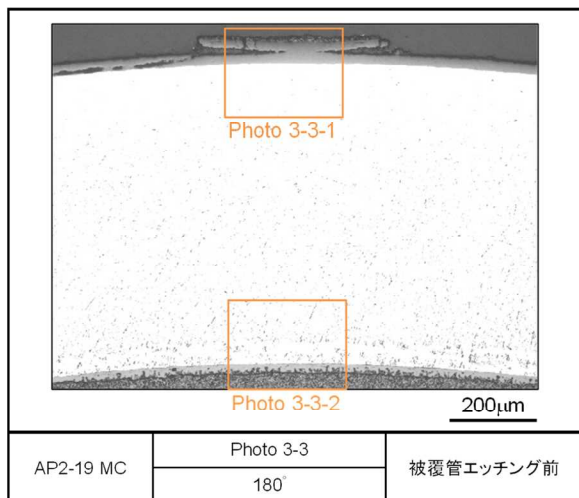


図 4.2.3-3(3) レファレンス試料の金相写真 (被覆管エッチング前, AP2-19 MC)

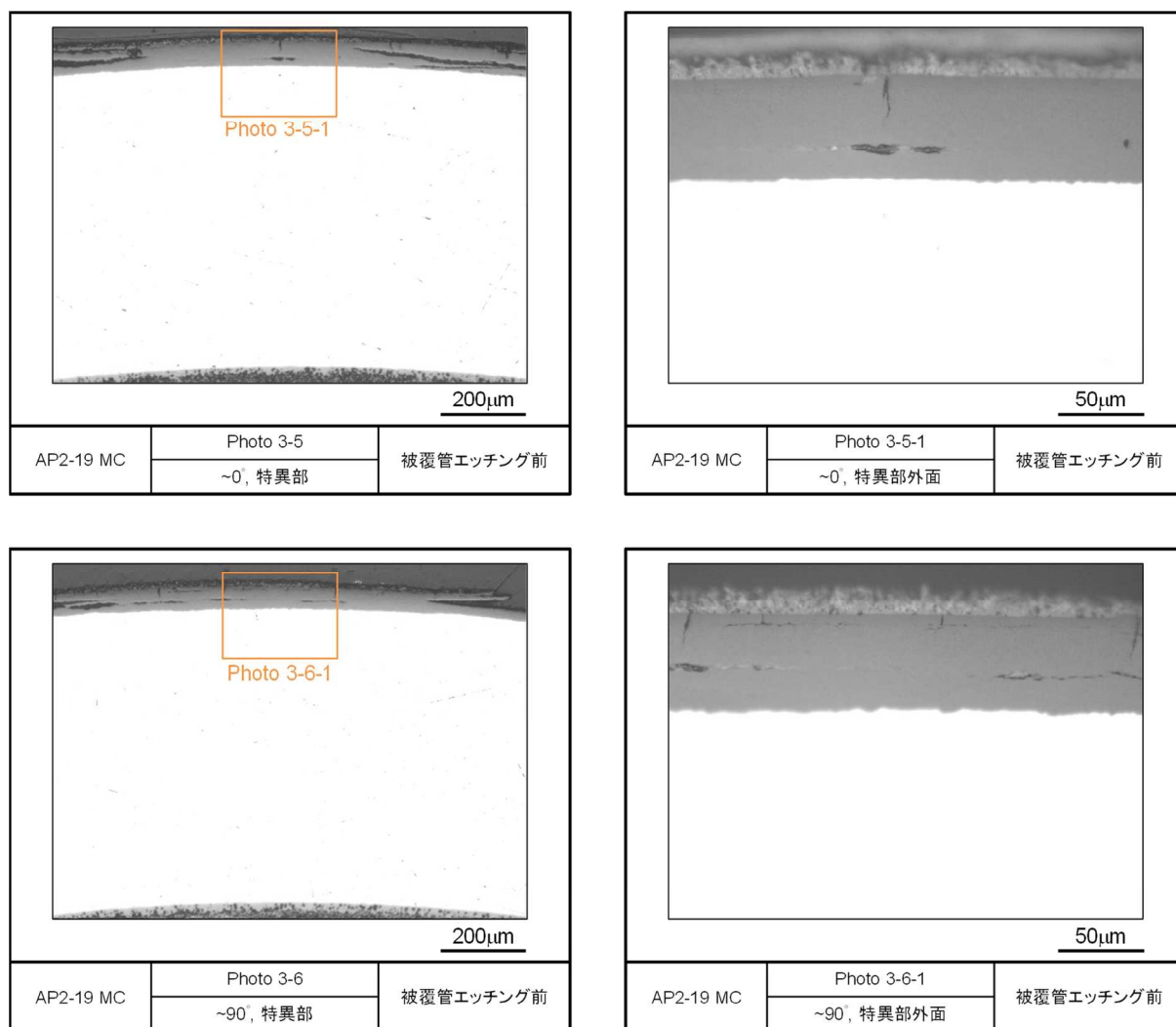


図 4.2.3-3(4) レファレンス試料の金相写真 (被覆管エッチング前, AP2-19 MC)

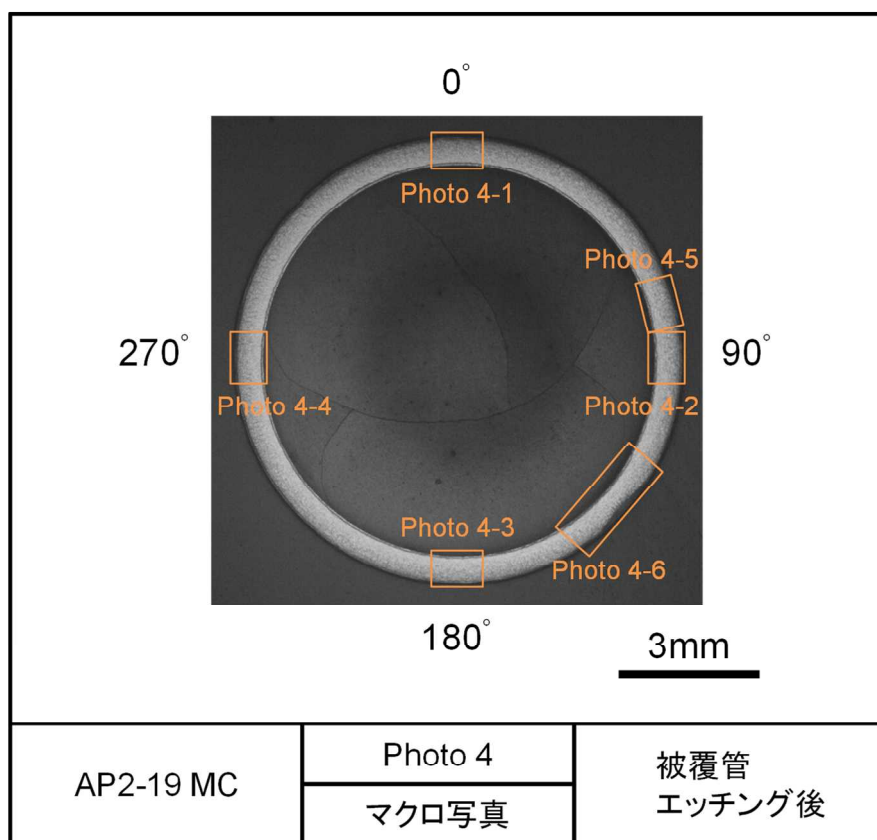


図 4.2.3-4(1) レファレンス試料の金相写真（被覆管エッチング後，AP2-19 MC）

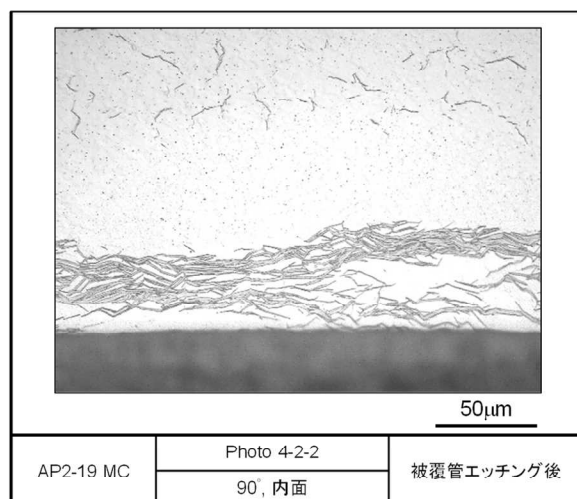
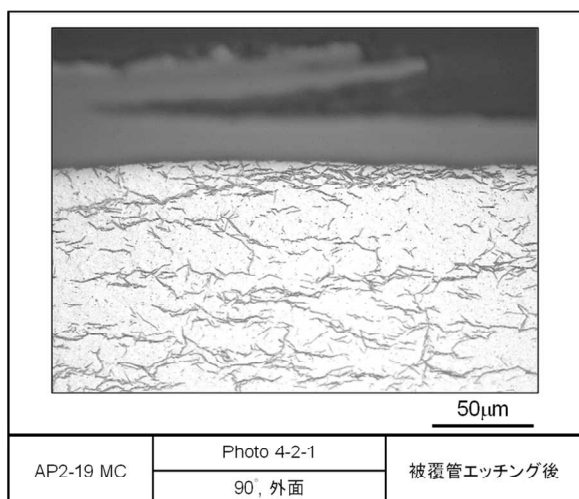
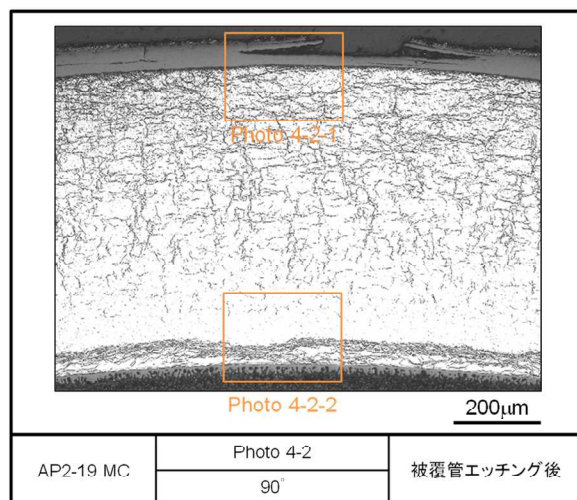
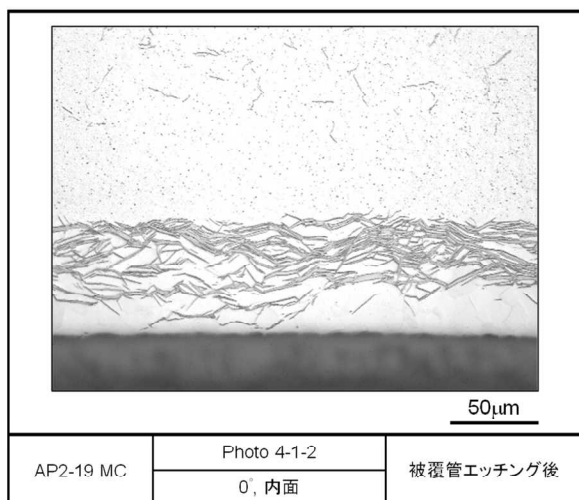
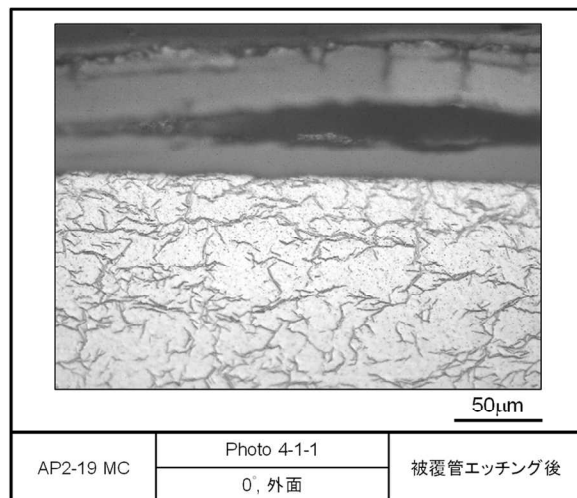
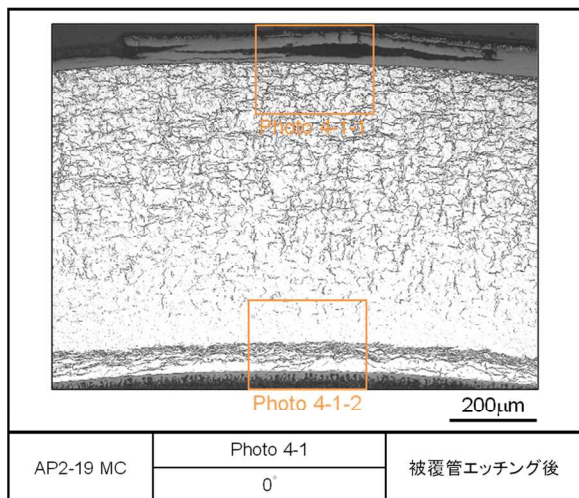


図 4.2.3-4(2) レファレンス試料の金相写真 (被覆管エッチング後, AP2-19 MC)

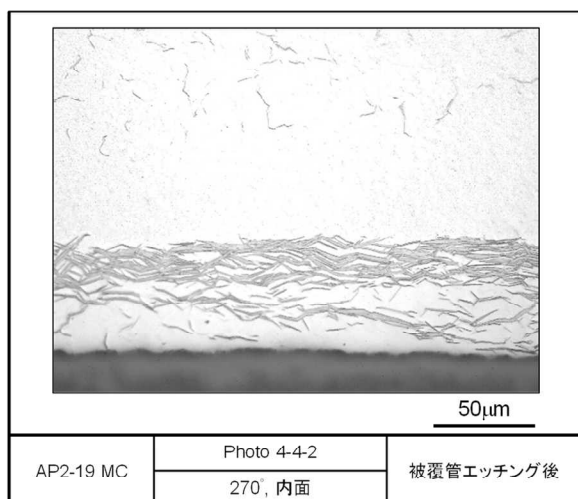
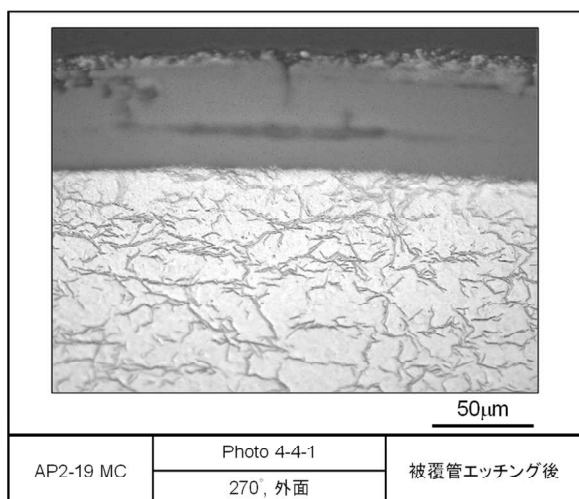
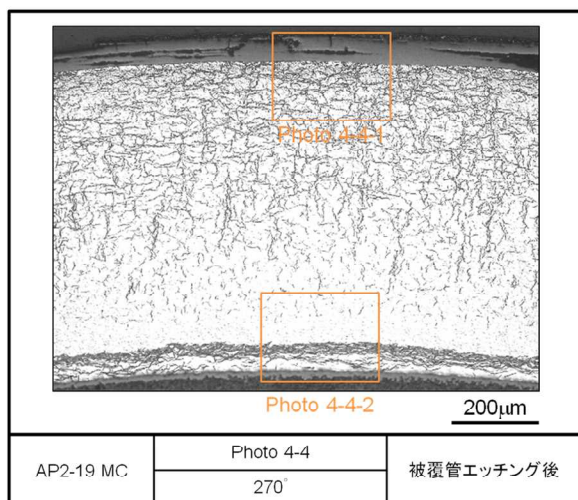
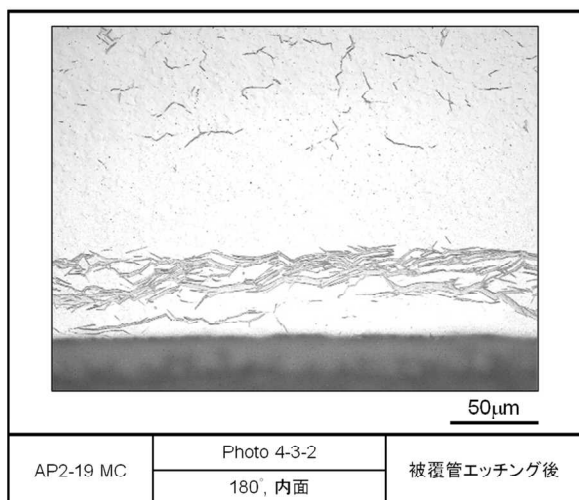
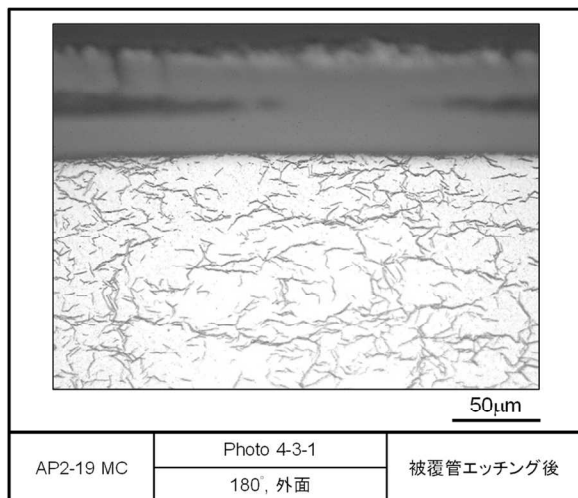
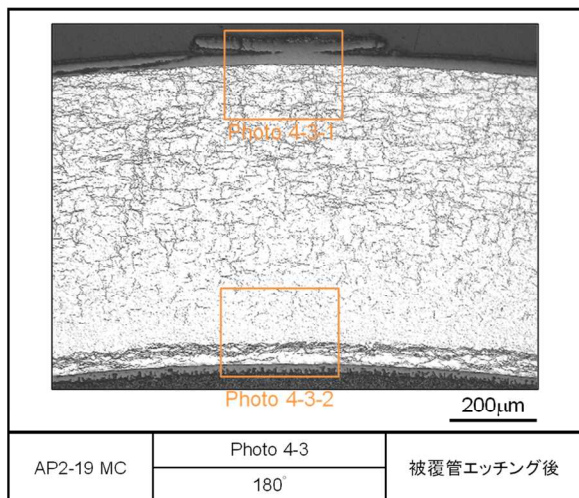


図 4.2.3-4(3) レファレンス試料の金相写真 (被覆管エッチング後, AP2-19 MC)

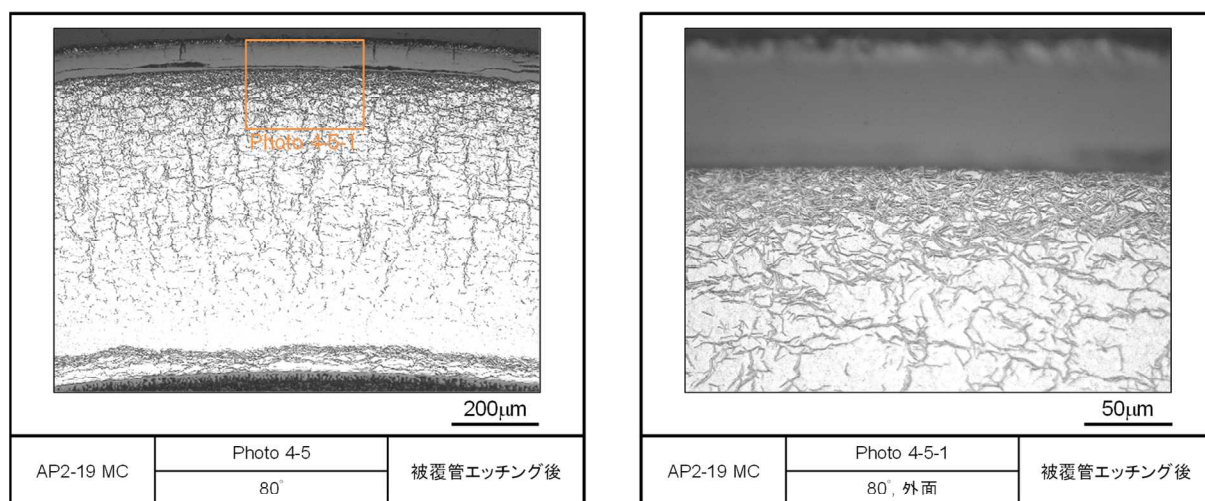


図 4.2.3-4(4) レファレンス試料の金相写真（被覆管エッチング後，AP2-19 MC）

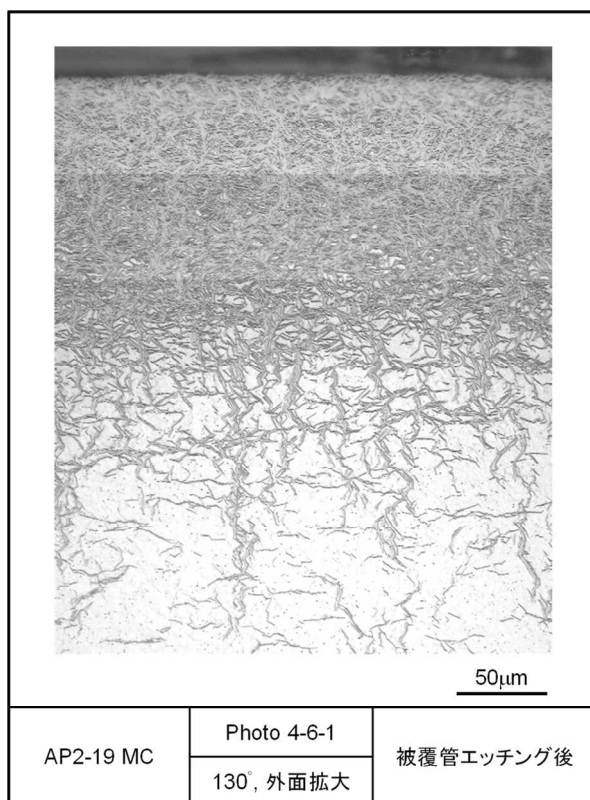
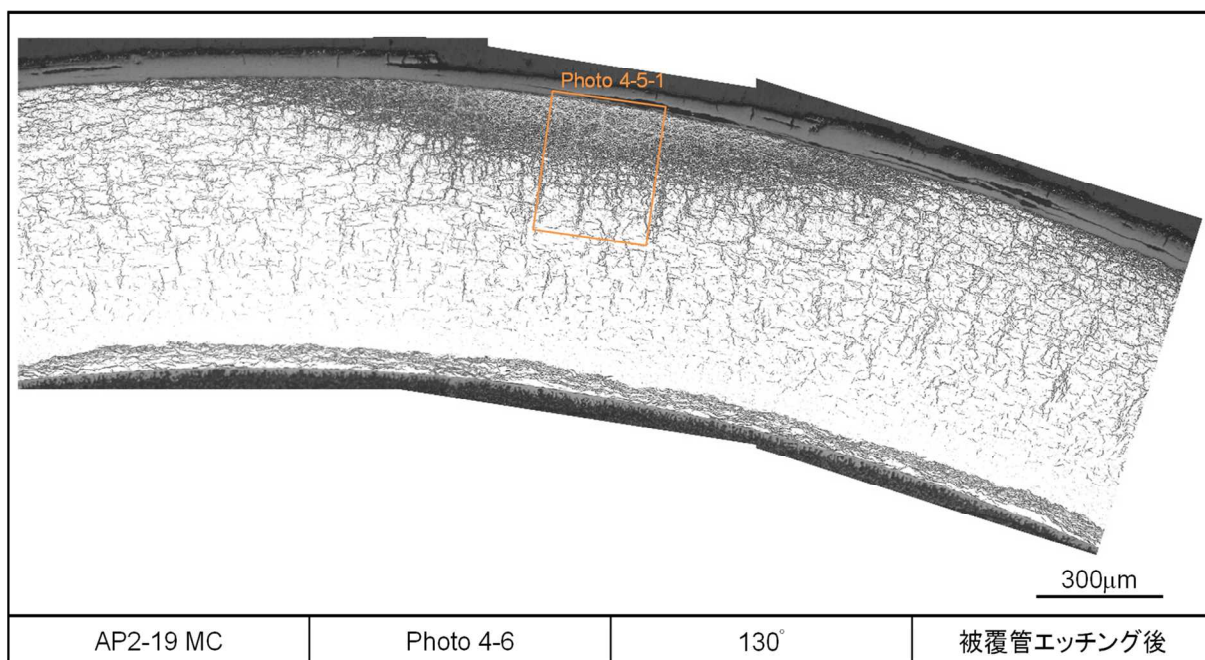


図 4.2.3-4(5) レファレンス試料の金相写真（被覆管エッチング後，AP2-19 MC）

4.3 LOCA 試験

スペイン・バンデロス炉において照射された PWR・ウラン燃料から採取した燃料棒⁽¹⁾に対し、LOCA 模擬試験を実施し、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の各挙動に関するデータを取得した。

また、スペイン・バンデロス炉において照射された PWR・ウラン燃料から採取した燃料ペレット片^(2,3)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非照射のジルカロイ-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するとともに、同試験の供試材として、高燃焼度燃料被覆管を模擬した水素添加ジルカロイ-4 被覆管を作製した。

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

本年度の試験に供した燃料棒の被覆材である 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⁽⁴⁾。試験燃料棒作製に用いた燃料は長さ約 190 mm であり、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)。AP2-1 セグメントにおける試験燃料棒採取位置を図 4.3.1-1 に示す。

試験燃料棒の採取位置における燃焼度は 73 GWd/t と評価されている。通常運転中に被覆管外表面に形成された腐食酸化膜厚さは試験燃料棒の採取位置に近接する位置から採取した試料に対する断面金相観察から 23 μm と評価した。また、同じく通常運転中に燃料被覆管に吸収された水素量は試験燃料棒の両端部から採取した試料に対する水素分析により 155 wtpm と評価した。試験燃料棒の諸元を表 4.3.1-1 に示す。

(b) 試験燃料棒への加工

実機の LOCA 時には、原子炉圧力の低下と温度上昇に伴う燃料被覆管強度の低下により燃料棒が破裂する可能性がある。これを模擬するために、本試験では、燃料ペレットを除去しない状態の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燃料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。

試験装置にセットするため試験燃料棒の上下端栓にステンレス鋼製のコネクションロッドを接続し、最終的な試験体形状とした (図 4.3.1-2)。試験燃料棒内部の自由体積は約 1160

mm²である。

(c) 熱電対の溶接

試験中の燃料被覆管表面温度の制御及び測定のために、4本のRタイプ熱電対をスポット溶接した。溶接位置は燃料被覆管高さ中間（熱電対番号No. 2）、その上下40 mmの位置（No. 1及びNo. 3）、及びNo. 1とNo. 2熱電対の中間高さにあり円周方向に90°回転した位置（No. 4）である。なお、熱電対溶接のために通常運転中に燃料被覆管外表面に形成された腐食酸化膜をリユーターにより局所的に除去した。

(2) LOCA 模擬試験の実施

試験燃料棒を図4.3.1-3に示すLOCA模擬試験装置の中央部に装荷し、LOCA時に想定される燃料棒の温度履歴を与えた。実機のLOCA時には、燃料棒の内圧上昇と燃料被覆管強度の低下によって燃料棒が膨れ破裂し、場合によっては膨れに伴い細片化した燃料ペレットの燃料棒内軸方向再配置や破裂開口部を通した燃料棒外への燃料ペレット放出（FFRD）が生じる可能性がある。FFRDの内、燃料ペレットの細片化の発生条件や燃料棒破裂時の燃料ペレットの燃料棒内軸方向再配置及び燃料棒外放出の各挙動を評価するため、試験燃料棒が破裂するまで昇温させた。

昇温速度については、典型的なLOCA時の被覆管の昇温速度^(5,6)を模擬できること、及び過去に原子力機構において高燃焼度燃料被覆管を対象に実施したLOCA模擬試験^(7,8)との比較ができることを考慮し、3 K/sとした。

(a) MMDA3 に対する試験

MMDA3に対する試験で得られた温度及び試験燃料棒内圧履歴を図4.3.1-4に示す。本試験では、まず試験燃料棒を水蒸気流中に置き、温度制御用熱電対としてNo. 2を使用し、昇温速度3 K/s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⁽⁸⁾を与えることを目的に、13 mg/(cm² s)とした。

昇温中、セル内に設置したマイクロフォンから燃料棒破裂に伴う衝撃音が明瞭に確認されなかったため、熱電対No. 2の指示値が約1173 Kに達するまで昇温を続けた。試験後のデータ解析において、熱電対No. 2の指示値が1044 Kに達した時点（図4.3.1-4中の矢印）で熱電対指示値の変動が確認されたことから、燃料被覆管の破裂はこの温度で生じたと考えられる。なお、燃料被覆管の破裂に伴う燃料ペレットの燃料棒外への放出は目視では確認されなかった。

(3) LOCA 模擬試験後の分析・評価

(a) MMDA3 に対する分析・評価

MMDA3の試験後の外観写真を図4.3.1-5に示す。この図から分かるように、熱電対No. 2

から上 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が生じている。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。図 4.3.1-5 の外観画像から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 mm² であった。熱電対 No.1、2 および 3 の指示値から二次関数補間を用いて推定される燃料被覆管の破裂開口位置での破裂温度は 1043 K であった。

外観画像より試験後試料の外径を計測し、破裂開口した膨れ部を楕円形と仮定して試験後の円周長を求めた。試験後の円周長の増加量である膨れ率は 30% であった。なお、膨れ率を確定させるためには、試験燃料棒を半径方向に切断して膨れ率を測定する必要がある。

LOCA 模擬試験前後の試験燃料棒の重量から評価した試験中に試験燃料棒外に放出された燃料ペレットの重量は 0.08 g であり、放出量は僅かであった。

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

平成 31 年度に AP2-1 セグメント燃料から加熱試験の供試材として燃料ペレット片を採取した⁽⁹⁾。平成 31 年度に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 セグメント燃料の平均燃焼度は 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(数 μm～100 μm 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 65–70 GWd/t)⁽⁹⁾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)⁽¹⁰⁾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の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。

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. 2–5 を加熱試験に供した。燃料ペレット片の外観画像を図 4.3.2-1 に示す。燃料ペレット片 No. 2–5 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。燃料ペレット片の密度測定結果を表 4.3.2-2 に示す。密度測定法は液浸法であり、置換液にはメタキシレンを使用した。採取したペレット片の密度は、UO₂ の理論密度(10.96 g/cm³ が 100%TD) に対し 89.6%–91.6% の範囲であった。バンドロス炉で照射された燃料ペレットの製造時密度は 96.0%T.D.⁽¹¹⁾ であることから、採取したペレット片は燃焼により 4.8%–7.1% の体積膨張を生じたと考えられる。図 4.3.2-2 に燃料ペレット片の体積変化率の燃焼度依存性を示す。図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⁽¹²⁾ の固体スウェリング率(10 GWd/t 当たり 0.62%ΔV/V₀) 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。従って、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考えられる。

図 4.3.2-3-4.3.2-10 に加熱試験前の燃料ペレット片 No. 2-5 の外観及び走査型電子顕微鏡 (SEM) 画像を示す。図 4.3.2-4(1)の Photo 1-4、図 4.3.2-8(1)の Photo 1-5、図 4.3.2-8(3)の Photo 3-5、及び図 4.3.2-10(1)の Photo 1-5 等において、ダークゾーンないし高燃焼度組織の特徴^(13,14)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 4.3.2-4(3)の Photo 3-4、図 4.3.2-6(1)の Photo 1-4、図 4.3.2-8(3)の Photo 4-4、及び図 4.3.2-10(2)の Photo 2-4 等において、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⁽¹⁴⁾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. 2、4-5 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。なお、燃料ペレット片 No. 3 については、ダークゾーンないし高燃焼度組織とみられる組織は観察されなかった。

なお、AP2-1 セグメント燃料に対するレファレンス断面金相観察は次年度以降に実施を計画している。

(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加熱試験の供試材として燃料ペレット片を採取した⁽²⁾。平成 28 年度に採取した燃料ペレット片の情報を表 4.3.2-3 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 65-70 GWd/t) ⁽⁹⁾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) ⁽¹⁰⁾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 4.3.2-11 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⁽¹¹⁾。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。

AP2-3 セグメント燃料から採取したの燃料ペレット片のうち、本年度は燃料ペレット片 No. 3 及び 11 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を図 4.3.2-12 に示す。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⁽²⁾。燃料ペレット片の密度測定結果を表 4.3.2-4 に示す。密度測定法は液浸法であり、置換液にはメタキシレンを使用した。燃料ペレット片 No. 3 及び 11 の密度は、 UO_2 の理論密度 (10.96 g/cm^3 が 100%TD) に対しそれぞれ 94.0%及び 87.2%であった。バンデロス炉で照射された燃料ペレットの製造時密度は 96.0%T.D.⁽¹¹⁾ であることから、燃料ペレット片 No. 3 及び 11 は燃焼によりそれぞれ 2.1%及び 10.1%の体積膨張を生じたと考えられる。図 4.3.2-13 に燃料ペレット片の体積変化率の燃焼度依存性を示す。図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⁽¹²⁾ 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、燃料ペレット片 No. 11 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。従って、燃料ペレット片 No. 11 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考えられる。一方、燃料ペレット片 No. 3 の体積変化率は固体スウェリング率の傾きより小さく、ガス気泡スウェリングの影響は小さい可能性がある。

図 4.3.2-14-4.3.2-17 に加熱試験前の燃料ペレット片 No. 3 及び 11 の外観及び走査型電子顕微鏡 (SEM) 画像を示す。図 4.3.2-15(1)の Photo 1-5、図 4.3.2-15(4)の Photo 4-5、及び図 4.3.2-17(6)の Photo 6-4 において、ダークゾーンないし高燃焼度組織の特徴^(13,14) 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 4.3.2-15(2)の Photo 2-4、及び図 4.3.2-17(2)の Photo 2-4 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 $10 \mu\text{m}$ 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⁽¹⁴⁾ 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. 3 及び 11 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

これまでの事業において、AP2-3 セグメント燃料から採取したの燃料ペレット片を対象とした加熱試験を実施し、燃料ペレット片の顕著な細片化を生じる温度を凡そ特定するとともに、加熱試験時の到達温度が高くなるにつれ細片化が著しくなる傾向から、燃料ペレット内 FP ガス気泡の内圧上昇が細片化の駆動力と推測された。

本年度は引き続き燃料ペレットの細片化発生メカニズムの解明を目的に、主として温度以外のパラメータ (燃焼度、昇温速度、及び通常運転中の体積膨張) が燃料ペレット片の顕著な細片化の発生に及ぼす影響を評価するための加熱試験を実施した。

供試材は AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 3 及び 11、並びに AP2-1 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 2-5 の計 6 試料である。

加熱試験にはアウトガス分析装置 (OGA) ^(2,15) 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 4.3.2-5 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^(5,6)に近い約 5 K/s の速さで加熱した。AP2-1 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 5 については、昇温速度が燃料ペレット片の顕著な細片化の発生に及ぼす影響を評価する目的で、約 15 K/s の昇温速度で試験を実施した。

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。AP2-1 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 3–5 に対する加熱試験の到達温度は、同燃料ペレット片 No. 2 に対する試験結果を踏まえ、1273 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。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。

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

図 4.3.2-18 に加熱試験後の燃料ペレット片の外観を示す。いずれの試験においても、粉末上の極微小な燃料ペレットの粒子（以下「燃料ペレット粒子」という。）が僅かに観察されるものの、顕著な細片化は観察されなかった。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 1%未満であった。

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 の温度範囲で顕著な細片化が観察された⁽³⁾。また、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 で試験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いる⁽¹⁶⁾。今回の燃料ペレット片 No. 3 に対する加熱試験は、これらと異なる結果となった。図 4.3.2-13 に示すように、この試料の通常運転中の体積変化率は低く、ガスバブルスウェリングの寄与が小さいと考えられる。従って、加熱に伴う燃料ペレット内 FP ガス気泡の内圧上昇の寄与が比較的小さかったと考えられ、1273 K までの温度で顕著な細片化を生じなかった今回の結果は、燃料ペレット内 FP ガス気泡の内圧上昇が細片化の駆動力であるとする仮説を裏付けるものと考えられる。

図 4.3.2-19(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 4.3.2-19(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. 3 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、加熱中の FP ガス放出量は到達温度が高くなるにつれて多くなる傾向が観察された。一方で、到達温度 1173 K の試験で完全に温度が下がってきた状況で若干の FP ガス放出が観察された。照射済み UO₂ 燃料棒を対象とした出力急昇試験において、出力降下時に顕著な FP ガス放出が観察されており、この原因の一つとして、出力降下時の急冷により結晶粒界にマイクロクラックが発生することで FP ガスが放出されやすくなることが挙げられている⁽¹⁷⁾。今回の加熱試験で観察された温度が下がった状態での FP ガス放出については、今後、試験後の燃料ペレットについて微細組織観察を行い、結晶粒界におけるマイクロクラック発生の有無を含めてその原因を調査する予定である。

なお、図 4.3.2-19 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) AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 11 に対する試験

図 4.3.2-20 に加熱試験後の燃料ペレット片の外観を示す。図から、到達温度 1273 K の試験で、燃料ペレット片は顕著に細片化した様子が確認された。到達温度が 1173 K 以下の試験においても、粉末状の燃料ペレット粒子が観察され、細片化が生じたと考えられる。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ま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、約 1%、約 4%であった。

図 4.3.2-13 に示すように、この試料の通常運転中の体積変化率は高く、ガスバブルスウェリングの寄与が大きいと考えられる。従って、加熱に伴う燃料ペレット内 FP ガス気泡の内圧上昇の寄与が比較的大きかったと考えられ、顕著な細片化を生じた今回の結果は、燃料ペレット内 FP ガス気泡の内圧上昇が細片化の駆動力であるとする仮説を裏付けるものと考えられる。

図 4.3.2-21(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 4.3.2-21(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。ここで、FP

ガスの累積放出率は燃料ペレット片 No. 11 の到達温度 1073 K の試験(昇温 1 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、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 4.3.2-21(a)から、燃料ペレット片 No. 11 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. 3 (AP2-3 セグメント燃料) の試験に比べて 2 桁程度高いことが分かる。FP ガスの放出量は到達温度 1073 K の試験で最も多かった。図 4.3.2-20 に示した通り、燃料ペレット片 No. 11 の顕著な細片化は到達温度 1273 K の試験で生じたことから、加熱試験中の FP ガスの放出量と細片化の程度との間に明確な相関は確認されなかった。

なお、図 4.3.2-21 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) AP2-1 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 2 に対する試験

図 4.3.2-22 に加熱試験後の燃料ペレット片の外観を示す。図から、粉末上の極微小な燃料ペレット粒子が僅かに観察されるものの、顕著な細片化は観察されなかった。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いずれの試験においても 1%未満であった。

図 4.3.2-13 に示す通り、燃料ペレット片 No. 2 の通常運転中の体積変化率は個体スウェリング率から予想される値より高く、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と考えられる。上述の AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 3 及び 11 に対する加熱試験結果の比較から、通常運転中の体積変化率が高い場合に顕著な細片化を生じる傾向が観察された。しかしながら、今回の加熱試験の結果、1273 K まで加熱した場合にも顕著な細片化を生じなかったことから、燃料ペレットの細片化は通常運転中の体積変化率のみでは説明できず、燃料ペレット片の燃焼度も関係していると考えられる。

図 4.3.2-23(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 4.3.2-23(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。ここで、FP ガスの累積放出率は燃料ペレット片 No. 2 の到達温度 1073 K の試験(昇温 2 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、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 4.3.2-23(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、AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 11 に対する試験に比べて 1 桁程度低いことが分かる。FP ガスの有意な放出は到達温度が 1073 K 以上の試験で観察され、放出量は到達温度 1073 K の試験で最も多かった。到達温度 1073 K 及び 1173 K の試験で、降温後しばらく経った後 (~300 s) に FP ガスの顕著な放出が観

察された。この原因については、上述した AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 3 と同様、今後、試験後の燃料ペレットについて微細組織観察を行い、結晶境界におけるマイクロクラック発生の有無を含めてその原因を調査する予定である。

なお、図 4.3.2-23 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。

(d) AP2-1 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 3 に対する試験

図 4.3.2-24 に加熱試験後の燃料ペレット片の外観を示す。図から、粉末上の極微小な燃料ペレット粒子が僅かに観察されるものの、顕著な細片化は観察されなかった。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 1%未満であった。

図 4.3.2-13 に示す通り、燃料ペレット片 No. 3 の通常運転中の体積変化率は個体スウェリング率から予想される値より高く、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と考えられる。上述の AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 3 及び 11 に対する加熱試験結果の比較から、通常運転中の体積変化率が高い場合に顕著な細片化を生じる傾向が観察された。しかしながら、今回の加熱試験の結果、1273 K まで加熱した場合にも顕著な細片化を生じなかったことから、燃料ペレットの細片化は通常運転中の体積変化率のみでは説明できず、燃料ペレット片の燃焼度も関係していると考えられる。

図 4.3.2-25(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 4.3.2-25(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 4.3.2-25(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、AP2-1 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 2 の試験に比べて 1~2 桁程度高いことが分かる。FP ガスの顕著な放出はピーク温度に到達した直後から降温する過程 (150–200 s) で観察された。

なお、図 4.3.2-25 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。

(e) AP2-1 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 4 に対する試験

図 4.3.2-26 に加熱試験後の燃料ペレット片の外観を示す。図から、粉末上の極微小な燃料ペレット粒子が僅かに観察されるものの、顕著な細片化は観察されなかった。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1%未満であった。

図 4.3.2-13 に示す通り、燃料ペレット片 No. 4 の通常運転中の体積変化率は個体スウェリング率から予想される値より高く、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と考えられる。上述の AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 3 及び 11 に対する加熱試験結果の比較から、通常運転中の体積変化率が高い場合に顕著な細片化を生じる傾向が観察された。しかしながら、今回の加熱試験の結果、1273 K まで加熱した場合にも顕著な細片化を生じなかったことから、燃料ペレットの細片化は通常運転中の体積変化率のみでは説明できず、燃料ペレット片の燃焼度も関係していると考えられる。

図 4.3.2-27(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 4.3.2-27(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 4.3.2-27(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、AP2-1 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 2 の試験に比べて 1 桁程度高いことが分かる。FP ガスの顕著な放出は AP2-1 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 3 の試験と同様、ピーク温度に到達した直後から降温する過程 (150–200 s) で観察された。

なお、図 4.3.2-27 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。

(f) AP2-1 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 5 に対する試験

図 4.3.2-28 に加熱試験後の燃料ペレット片の外観を示す。図から、粉末上の極微小な燃料ペレット粒子が僅かに観察されるものの、顕著な細片化は観察されなかった。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1%未満であった。

燃料ペレット片 No. 5 の昇温速度は 15 K/s であり、これまでの試験よりも 3 倍速い。昇温速度が速い場合、燃料ペレットに生じるマイクロクラックの程度や細片化の程度が著しくなるとの報告がある^(18,19)ものの、今回の試験については 1273 K まで昇温しても昇温速度 5 K/s の試験と比べて燃料ペレットの細片化が顕著になる傾向は観察されなかった。

図 4.3.2-13 に示す通り、燃料ペレット片 No. 5 の通常運転中の体積変化率は個体スウェリング率から予想される値より高く、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と考えられる。上述の AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 3 及び 11 に対する加熱試験結果の比較から、通常運転中の体積変化率が高い場

合に顕著な細片化を生じる傾向が観察された。しかしながら、今回の加熱試験の結果、1273 K まで加熱した場合にも顕著な細片化を生じなかったことから、燃料ペレットの細片化は通常運転中の体積変化率のみでは説明できず、燃料ペレット片の燃焼度も関係していると考えられる。

図 4.3.2-29(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 4.3.2-29(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 4.3.2-29(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、同一条件で実施した AP2-1 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 3 及び 4 の試験と同程度であった。FP ガスの顕著な放出は降温する過程 (150–200 s) で観察された。

なお、図 4.3.2-29 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。

(3) 加熱試験後の分析

(a) AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 1 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. 1 に対し、平成 31 年度に加熱試験を実施した⁽³⁾。燃料ペレット片 No. 1 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 4.3.2-6 にそれぞれ示す。燃料ペレット片 No. 1 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 4.3.2-30 及び 4.3.2-31 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. 1 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。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 4.3.2-31(2)Photo 1-1 の左側及び Photo 2-1 の左側、図 4.3.2-31(3)Photo 4-1、図 4.3.2-31(4)Photo 5-1 及び Photo 5-2) と、ダークゾーンないし高燃焼度組織の特徴^(13,14)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 4.3.2-31(2)Photo 1-1 の右側、Photo 2-1 の右側、及び Photo 2-3、並びに図 4.3.2-31(3)Photo 3-1) の 2 種類が観察される。また、図 4.3.2-31(2)Photo 2-1、図 4.3.2-31(3)Photo 4-1、図 4.3.2-31(4)Photo 5-1 及び Photo 5-2 等に示すように、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 4.3.2-32 に加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 1 の SEM 画像を示す。図

4.3.2-32(3)Photo 2-3 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 $10 \mu\text{m}$) と同等サイズの結晶粒が観察される傾向である。一方、サイズが比較的小さく ($100\text{--}200 \mu\text{m}$)、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、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 4.3.2-32(8)Photo 7-3) と、ダークゾーンないし高燃焼度組織の特徴^(13,14)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 4.3.2-32(9)Photo 8-4) 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 4.3.2-32(3)Photo 2-4 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 4.3.2-32(6)Photo 5-4 及び 4.3.2-32(8)Photo 7-4 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 4.3.2-33 に加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 1 の粒径分布を示す。この粒径分布は図 4.3.2-30(1)及び 4.3.2-32(1)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⁽²⁰⁾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 4.3.2-33(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 4.3.2-33 から、体積割合にして約 2%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。

図 4.3.2-34 に加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 1 の組織別粒径分布を示す。この粒径分布は図 4.3.2-32(1)に示すマクロ画像からランダムに選択した燃料ペレット粒子に対する組織観察により評価したものであり、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^(13,14)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、サイズが比較的小さい粒子 ($< 500\text{--}750 \mu\text{m}$) にダークゾーンないし高燃焼度組織の特徴^(13,14)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る。

(b) 燃料ペレット片 No. 2 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. 2 に対し、平成 31 年度に加熱試験を実施した⁽³⁾。燃料ペレット片 No. 2 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 4.3.2-6 にそれぞれ示す。燃料ペレット片 No. 2 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 ($> 1 \text{ mm}$)、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。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 4.3.2-35 及び 4.3.2-36 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. 2 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 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。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 4.3.2-36(2)Photo 1-1 及び Photo 2-1）と、ダークゾーンないし高燃焼度組織の特徴^(13,14)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 4.3.2-36(2)Photo 1-1 及び Photo 3-1、図 4.3.2-36(3)Photo 4-1 及び Photo 5-1、並びに図 4.3.2-36(4)Photo 6-1 及び Photo 7-1）の 2 種類が観察される。

図 4.3.2-37 及び 4.3.2-38 に加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 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 4.3.2-37(4)Photo 3-3、図 4.3.2-37(7)Photo 6-3、図 4.3.2-37(8)Photo 7-3、及び図 4.3.2-38(7)Photo 6-3）と、ダークゾーンないし高燃焼度組織の特徴^(13,14)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 4.3.2-37(3)Photo 2-4、図 4.3.2-37(5)Photo 4-4、図 4.3.2-37(6)Photo 5-4、図 4.3.2-37(9)Photo 8-4、図 4.3.2-38(2)Photo 1-4、及び図 4.3.2-38(3)Photo 2-4）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 4.3.2-37(7)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 4.3.2-37(4)Photo 3-4 及び図 4.3.2-38(7)Photo 6-4 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 4.3.2-39 に加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の粒径分布を示す。この粒径分布は図 4.3.2-35(1)、図 4.3.2-37(1)及び図 4.3.2-38(1)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. 1 の場合と同一とした。図 4.3.2-39(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 4.3.2-39 から、体積割合にして約 9%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. 1 の粒径分布と比較すると、No. 2 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割合が若干高い。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両者の間でほぼ同等であった。

図 4.3.2-40 に加熱試験で細片化した燃料ペレット片 No. 2 の組織別粒径分布を示す。この粒径分布は図 4.3.2-37(1)に示すマクロ画像からランダムに選択した燃料ペレット粒子に対する組織観察により評価したものであり、燃料ペレット粒子を製造時の結晶粒径（約 10 μm ）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^(13,14)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、サイズが比較的小さい粒子 (< 500–750 μm) にダークゾーンないし高燃焼度組織の特徴^(13,14)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る。

以上の AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 1 及び 2 の加熱試験後の分析結果、及び平成 31 年度に実施した AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 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 > 約 500–750 μm) には製造時の結晶粒径 (約 10 μm) と同等サイズの結晶粒が主に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⁽¹¹⁾とよく似ている。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主として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 : \leq 約 500–750 μm) にはダークゾーンないし高燃焼度組織の特徴^(13,14)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る傾向であった。このことは、燃料ペレット内 FP ガス気泡の内圧上昇が細片化の駆動力であるとする仮説を裏付けるものと考えられる。燃料ペレッ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

本年度は 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 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、PWR 用 17×17 型非照射ジルカロイ-4 被覆管を対象に LOCA 模擬急冷破断試験を実施した。

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、非照射ジルカロイ-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⁽²¹⁾を与えることを目的に、約 $(5 \pm 1) \text{ mg}/(\text{cm}^2\text{s})$ とした。昇温中、1093–1118 K の温度で燃料被覆管は破裂した。

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）⁽²²⁾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⁽²³⁾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⁽²⁴⁾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⁽²³⁾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⁽²⁵⁾。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^(26,27)、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非照射ジルカロイ-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⁽²⁸⁾。

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⁽²⁸⁾は LOCA 時の再冠水過程における冷却材の飽和温度⁽⁶⁾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⁽²⁹⁾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 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 237-633 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、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結果⁽²⁸⁾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⁽³⁾を用いて計算したものである。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 に示す通り、試料の中には急冷時に破断した試料や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 から、繰り返し荷重を負荷した場合に、ばらつきが大きいものの、比較的低い酸化量 (~17% ECR 以下) の一部の試料で最大曲げモーメントが低下する傾向が確認された。繰り返し荷重を負荷した場合、燃料被覆管の破裂開口部には最初に圧縮応力が発生し、その後、引張応力が発生する。圧縮応力発生時に試料中にき裂が形成ないし拡大し、破壊靱性が低下した可能性が考えられる。

今後は試験データを拡充し、データのばらつきを考慮しても繰り返し荷重を負荷した場合に最大曲げモーメントが低下する傾向があるのかを調査するとともに、照射材を模擬し水素を添加した非照射ジルカロイ-4 被覆管を対象とした繰り返し荷重負荷四点曲げ試験を実施する予定である。

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/t) | 最終 サイクル 線出力 (kW/m) | 被覆管 材質 | 腐食 酸化膜 厚さ (μm) | 初期 水素 濃度** (wtppm) |
|-----------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| MMDA3 | AP2-1 | PWR 17×17 UO ₂ | 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 AP2-1 セグメント燃料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 燃料ペレット片の密度測定結果 (AP2-1 セグメント燃料)

| 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* (%) |
| 2 | 96.0 | 9.85 | 89.9 | 6.8 |
| 3 | | 9.94 | 90.7 | 5.8 |
| 4 | | 9.85 | 89.9 | 6.8 |
| 5 | | 9.82 | 89.6 | 7.1 |
| 6 | | 10.0 | 91.6 | 4.8 |

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

表 4.3.2-3 AP2-3 セグメント燃料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. 1-11 | AP2-3 | Vandellos- 2 | PWR 17×17 UO ₂ | 81 | M-MDA (SR*) |

*応力除去焼鈍

表 4.3.2-4 燃料ペレット片の密度測定結果 (AP2-3 セグメント燃料)

| 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. 3 | 96.0 | 10.31 | 94.0 | 2.1 |
| No. 11 | | 9.56 | 87.2 | 10.1 |

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

表 4.3.2-5 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 |
|-------------------|---------------|---------|-------------------|-----------------|---|
| AP2-3 | 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 | |
| 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 | |

表 4.3.2-6 燃料ペレット片の加熱試験条件

(AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片 No. 1 及び 2)

| 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. 1 | 昇温 1 回目 | 5 | 1173 | 0 | 真空 (測定開始時真空度： $3.2 \times 10^{-3} - 4.2 \times 10^{-3}$ Pa) |
| | No. 2 | 昇温 1 回目 | | 1273 | | |

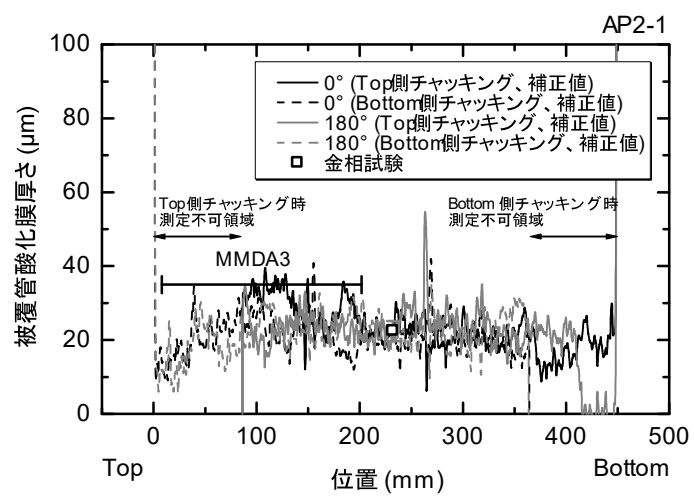


図 4.3.1-1 LOCA 模擬試験に用いる試験燃料棒の採取位置 (AP2-1 セグメント)

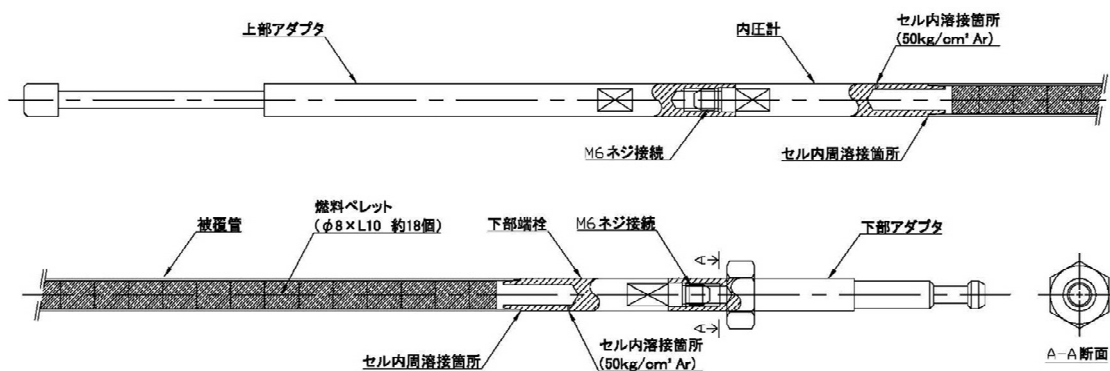


図 4.3.1-2 試験装置にセットするために両端にジョイントを接続した試験燃料棒の形状

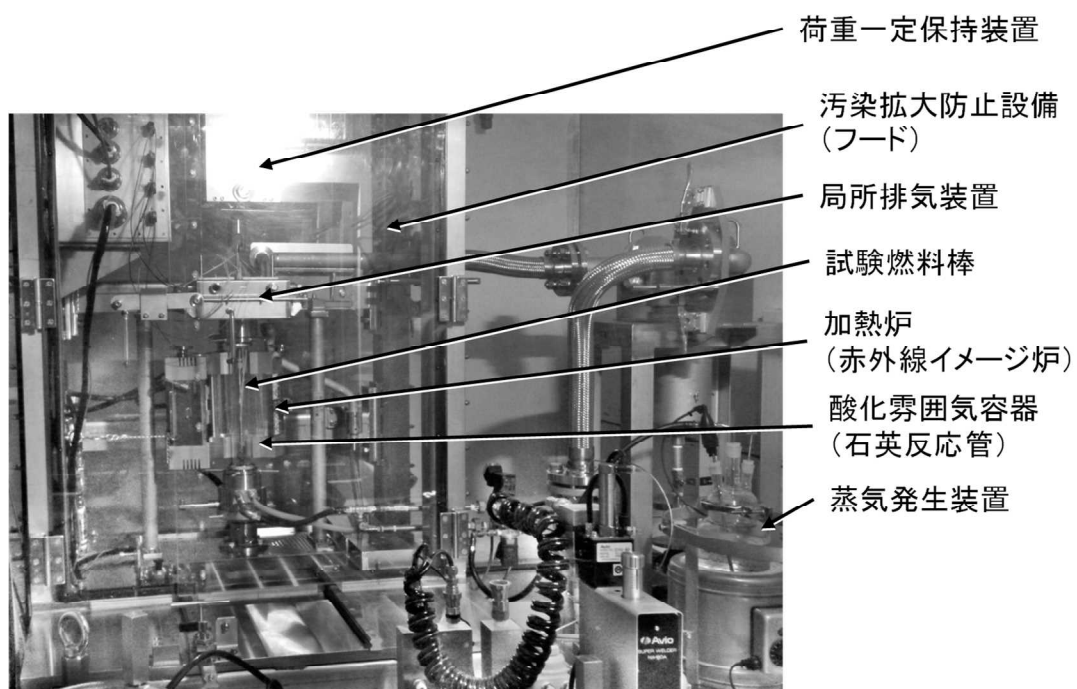


図 4.3.1-3 LOCA 模擬試験装置の外観

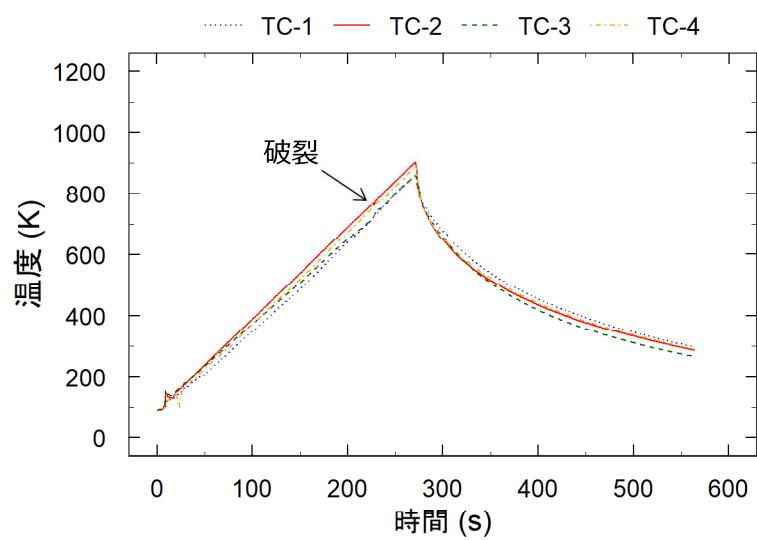


図 4.3.1-4 MMDA3 に対する試験での温度履歴

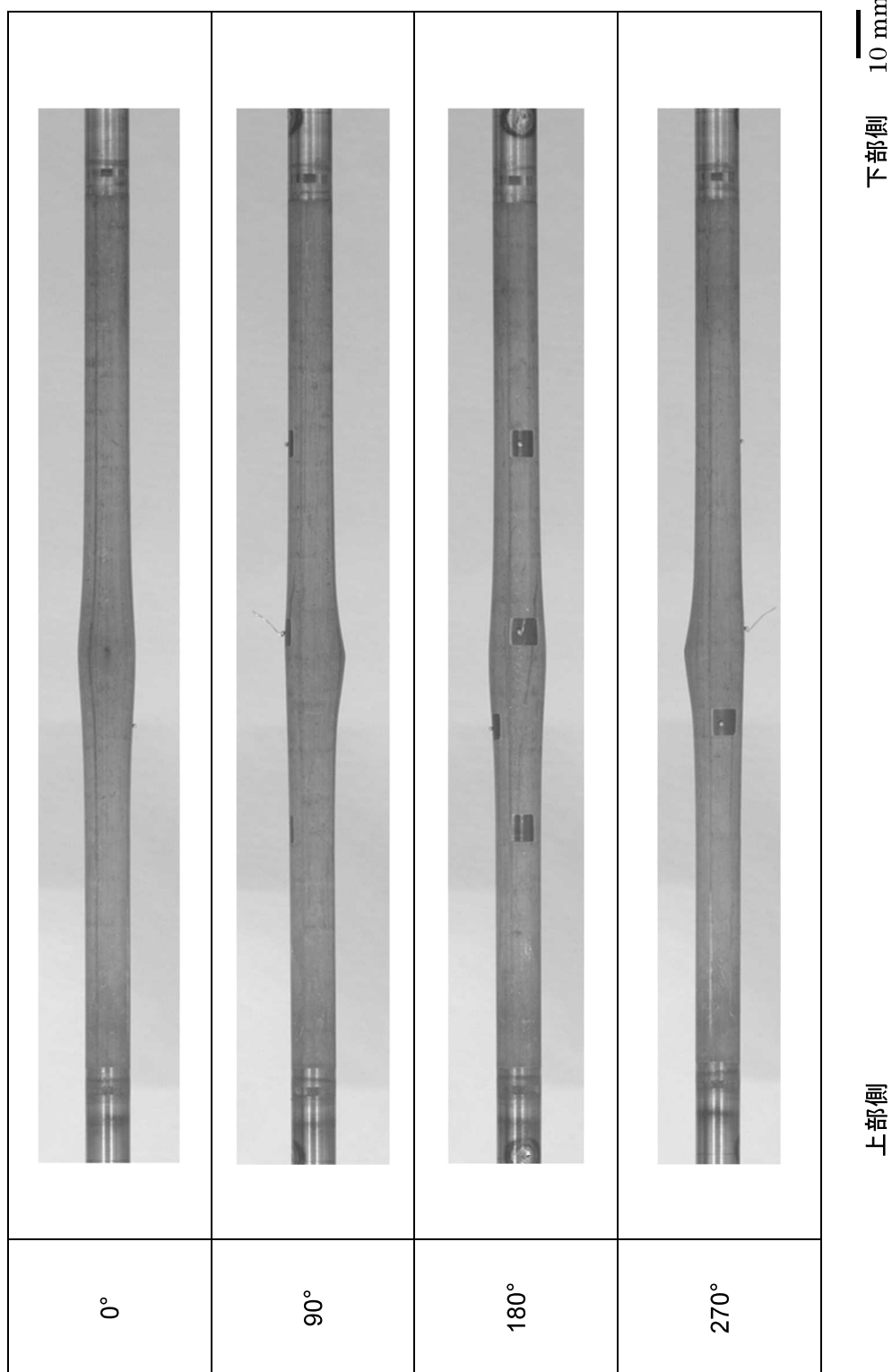


図 4.3.1-5 MMDA3 の試験後外観写真

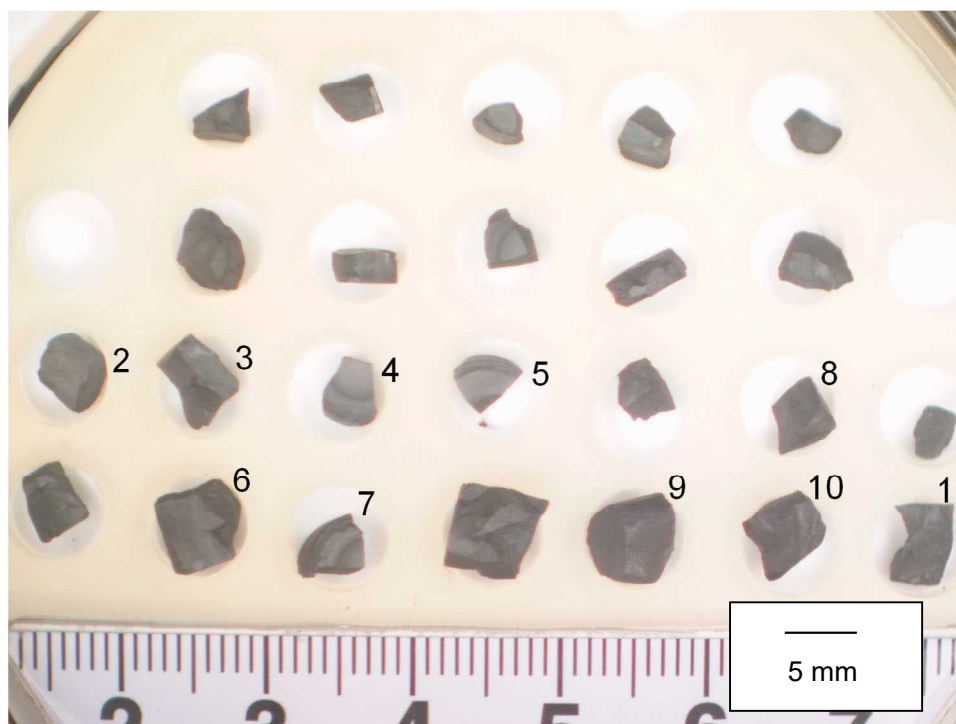


図 4.3.2-1 AP2-1 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片の外観⁽²⁾
(図中数値はペレット片番号)

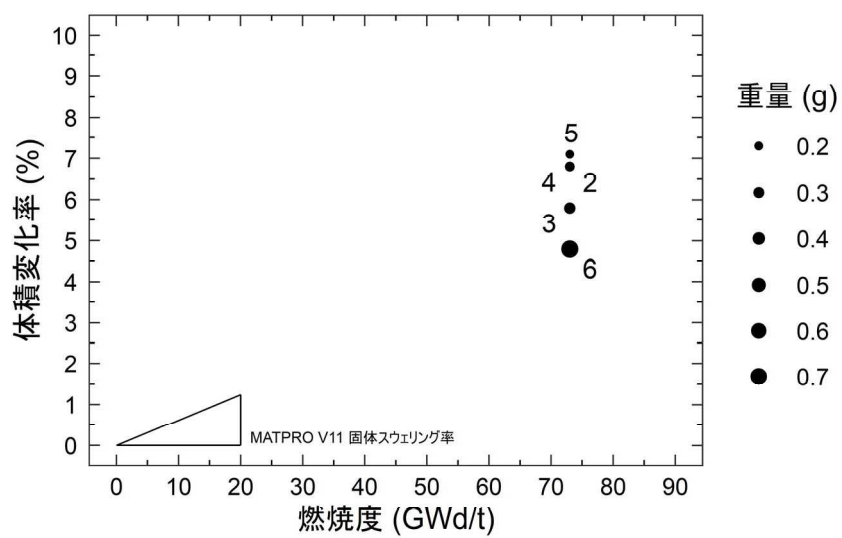


図 4.3.2-2 AP2-1 セグメント燃料から採取したペレット片の
体積変化率の燃焼度依存性
(図中数値はペレット片番号)

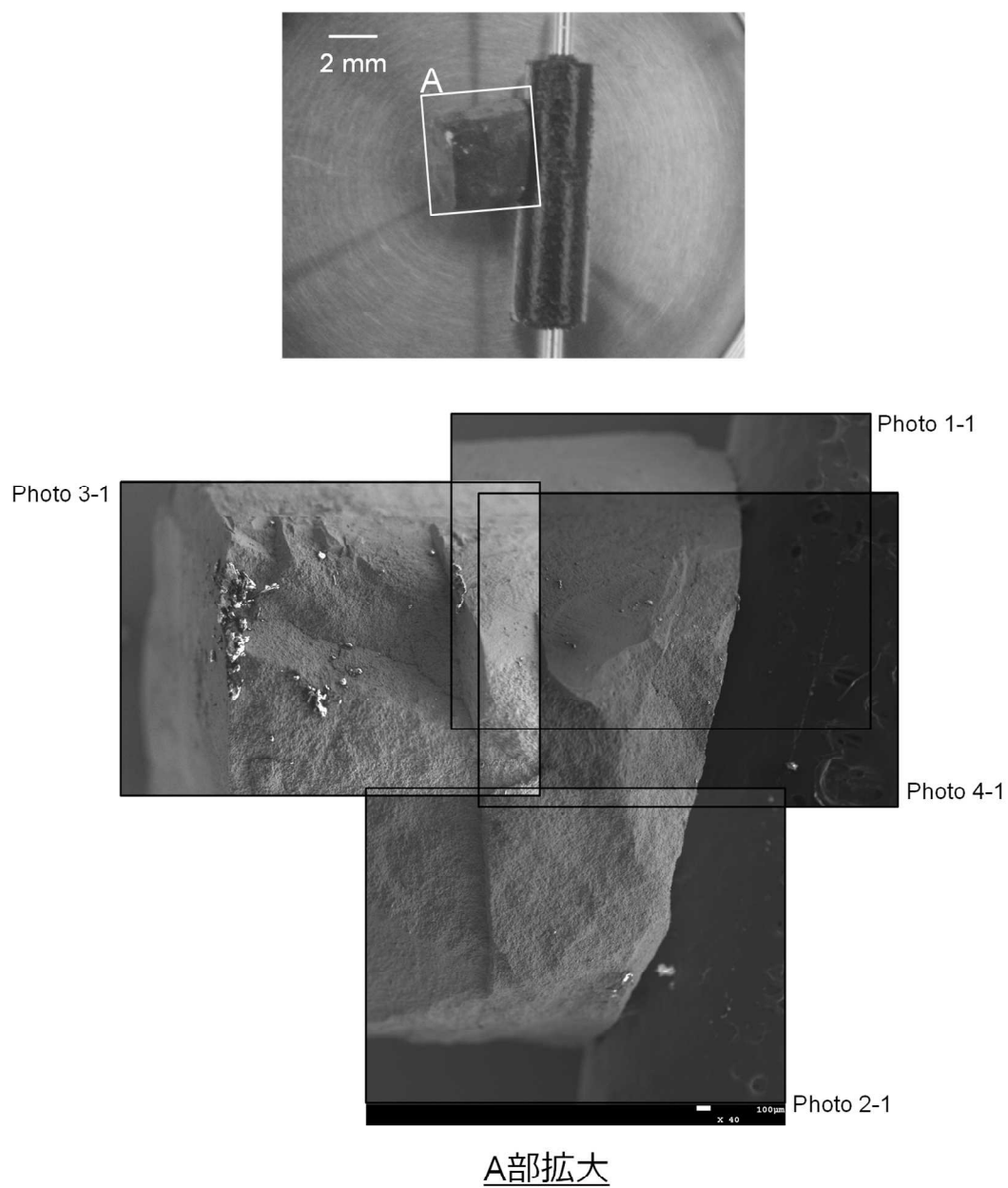


図 4.3.2-3 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 2 の外観
(AP2-1 セグメント燃料)

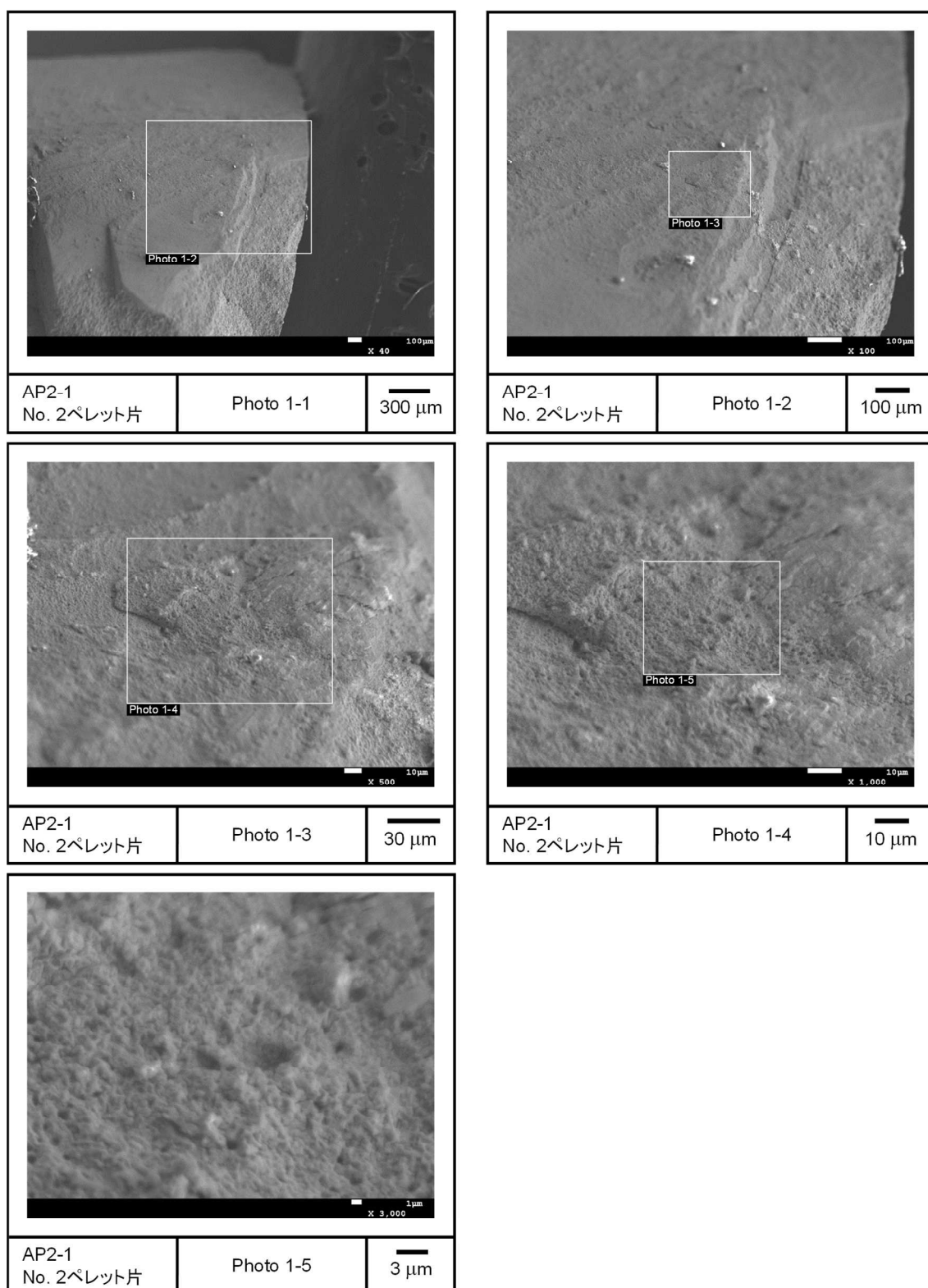


図 4.3.2-4(1) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-1 セグメント燃料)

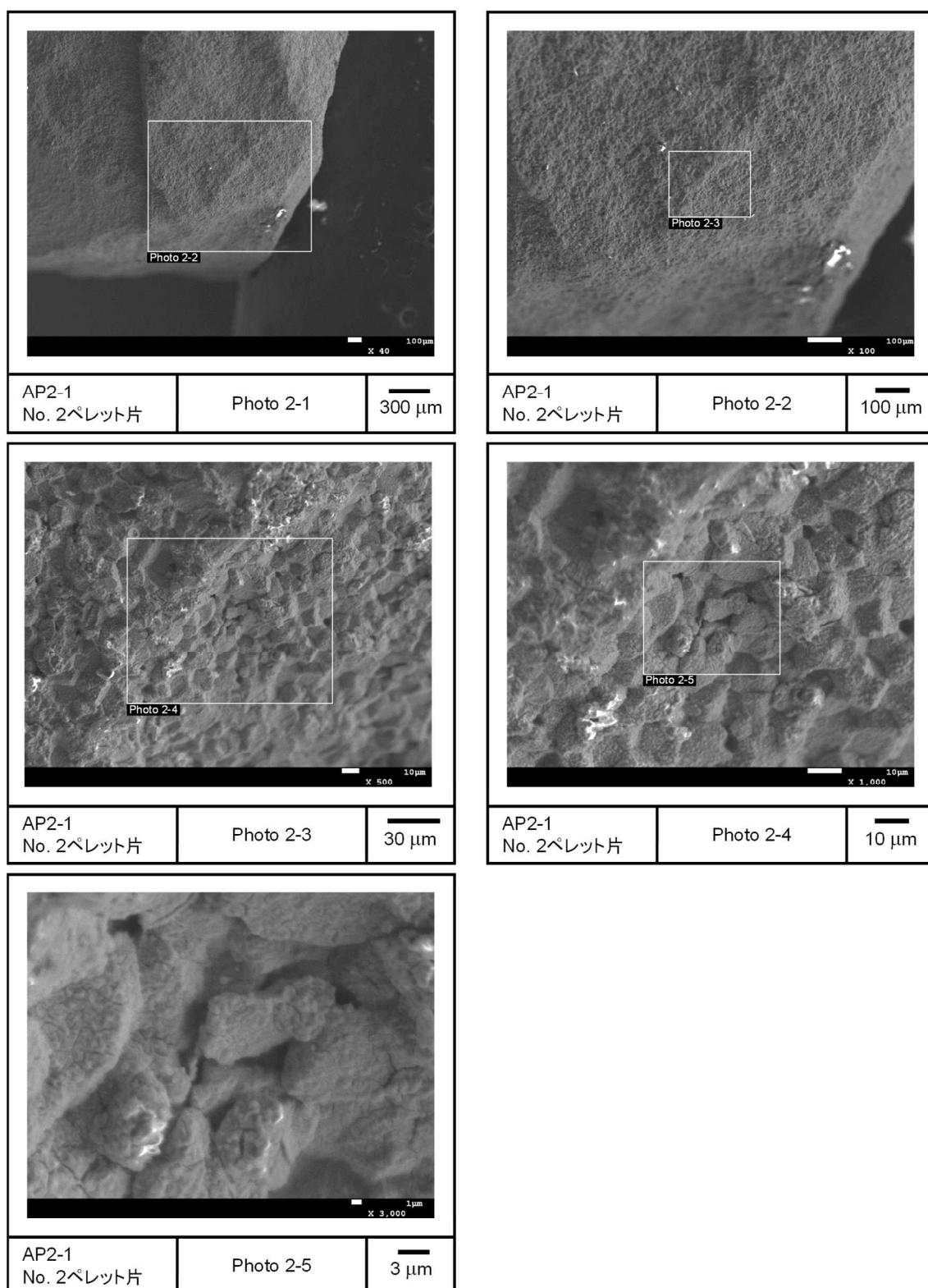


図 4.3.2-4(2) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-1 セグメント燃料)

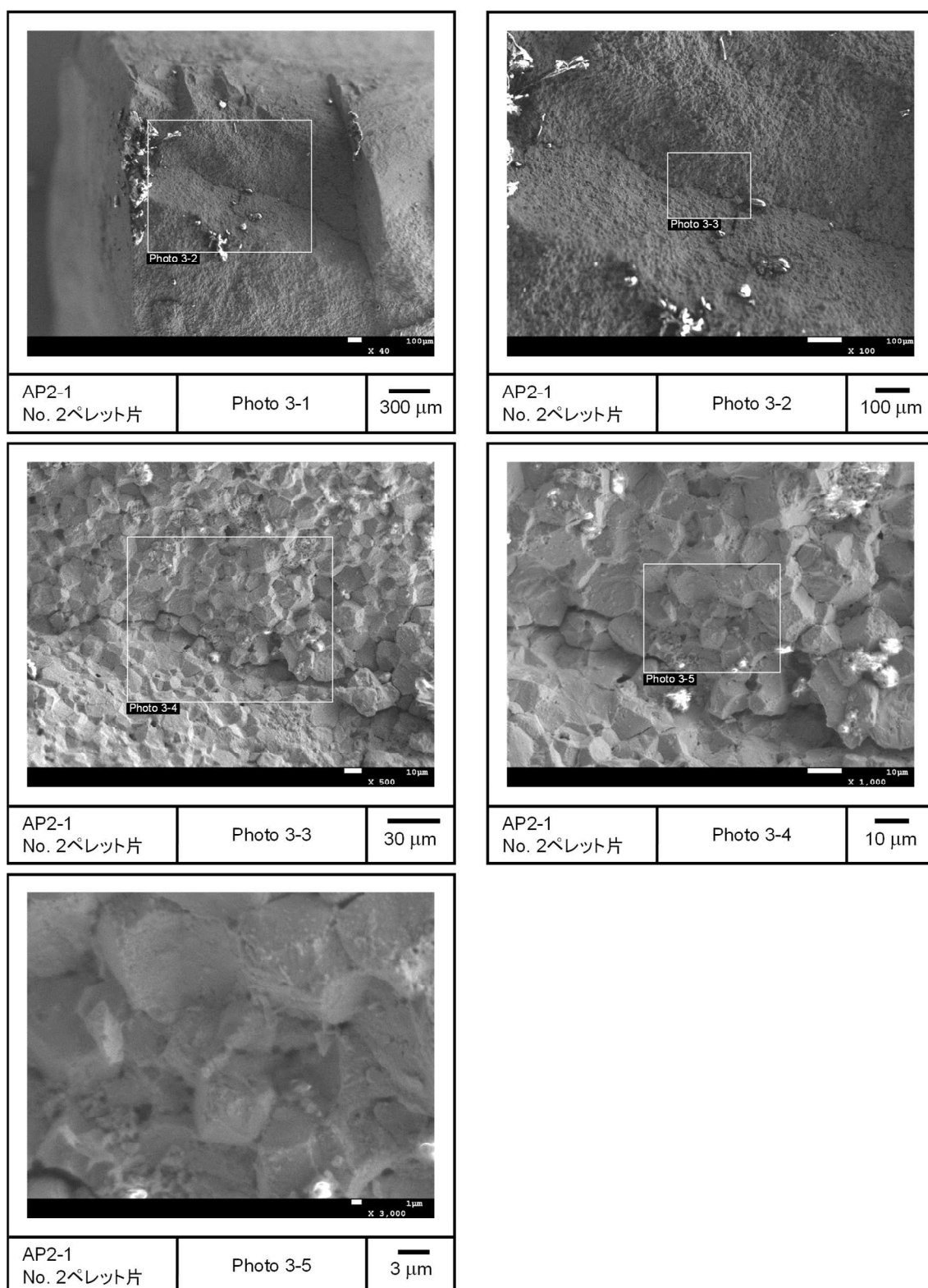


図 4.3.2-4(3) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-1 セグメント燃料)

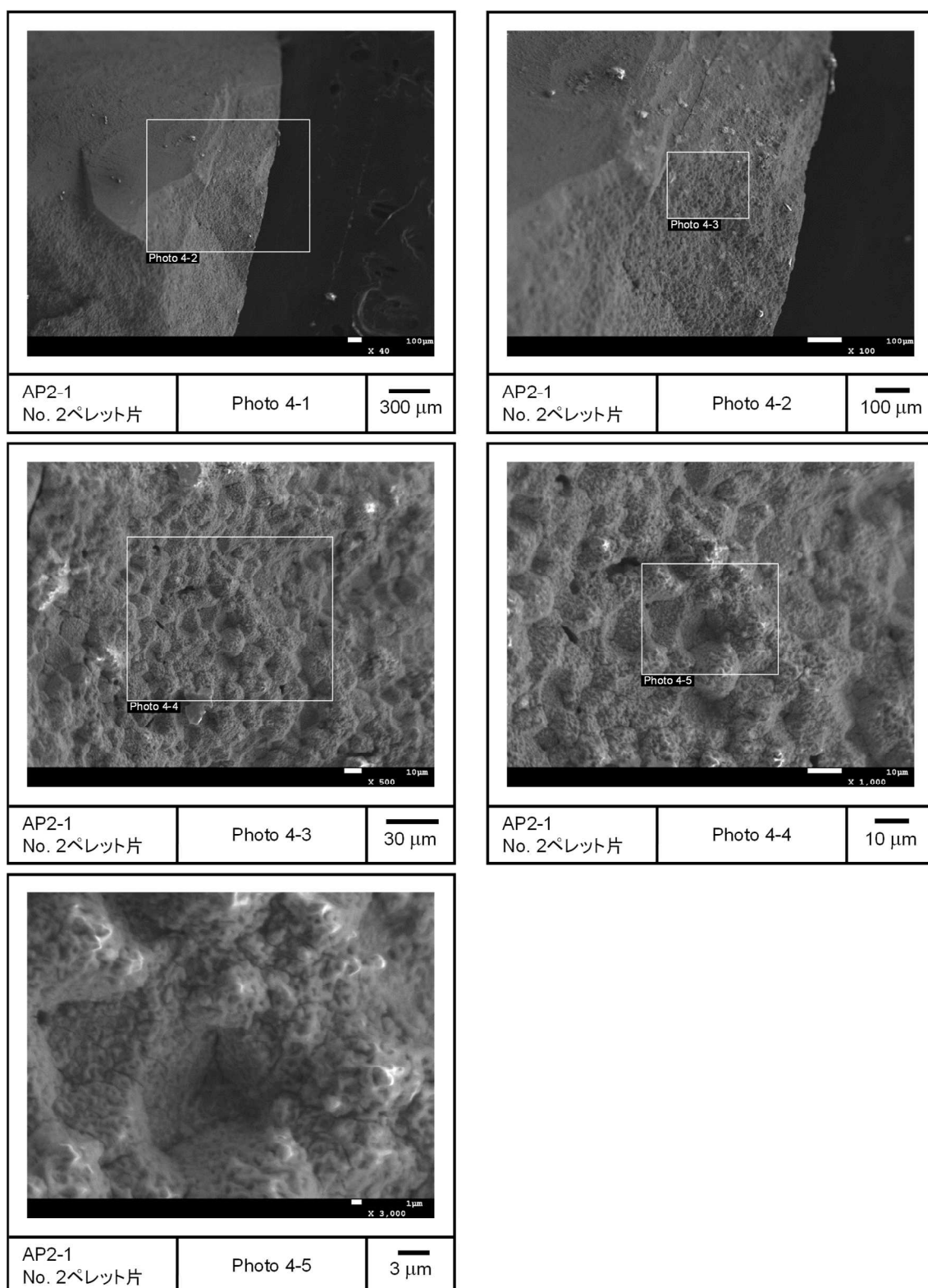


図 4.3.2-4(4) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 2 の SEM 画像
(AP2-1 セグメント燃料)

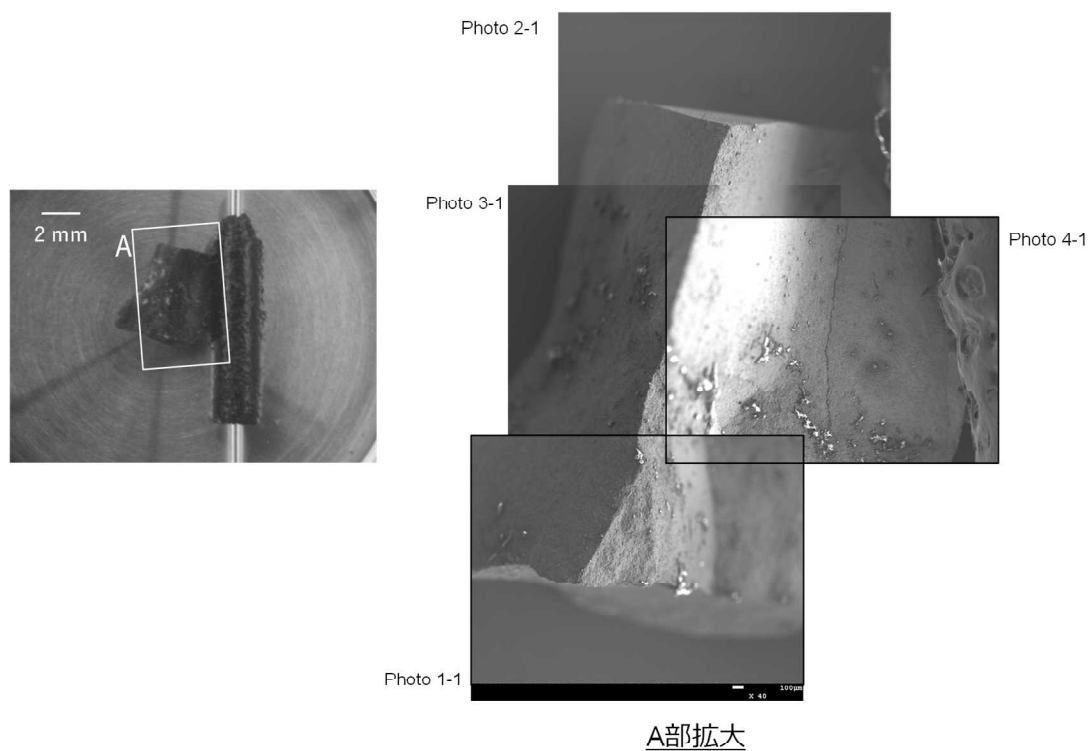


図 4.3.2-5 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 3 の外観
(AP2-1 セグメント燃料)

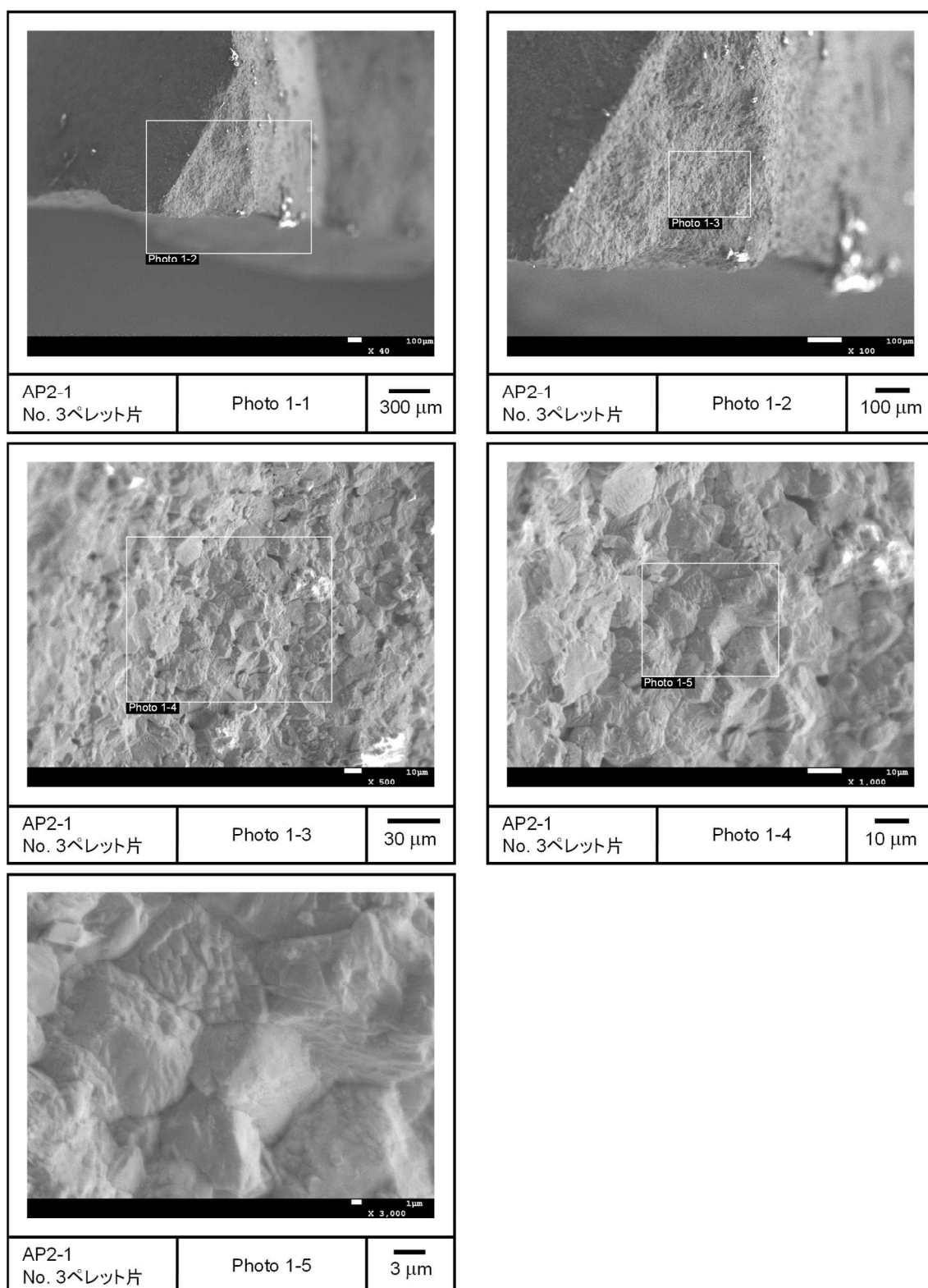


図 4.3.2-6(1) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 3 の SEM 画像
(AP2-1 セグメント燃料)

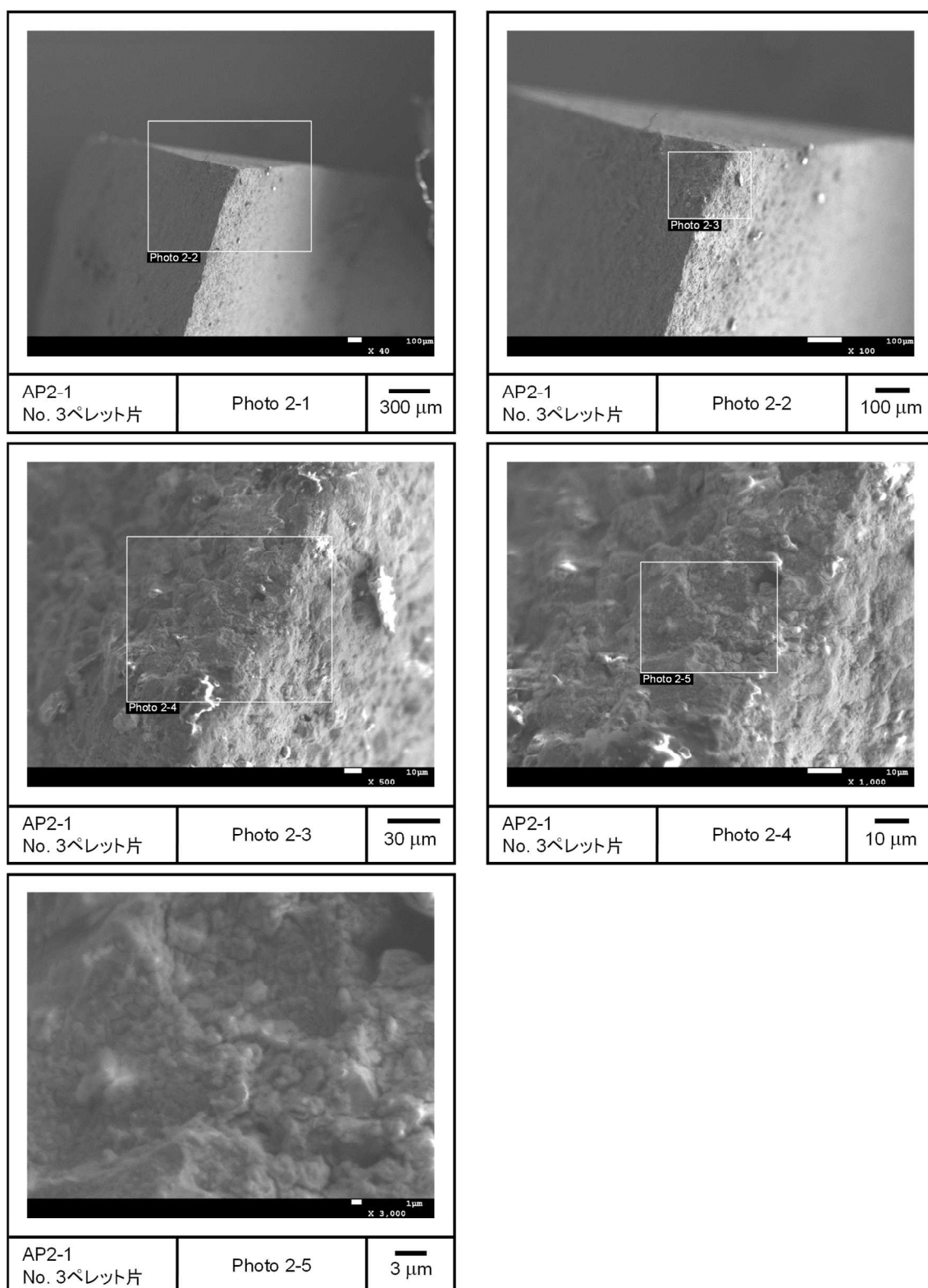


図 4.3.2-6(2) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 3 の SEM 画像
(AP2-1 セグメント燃料)

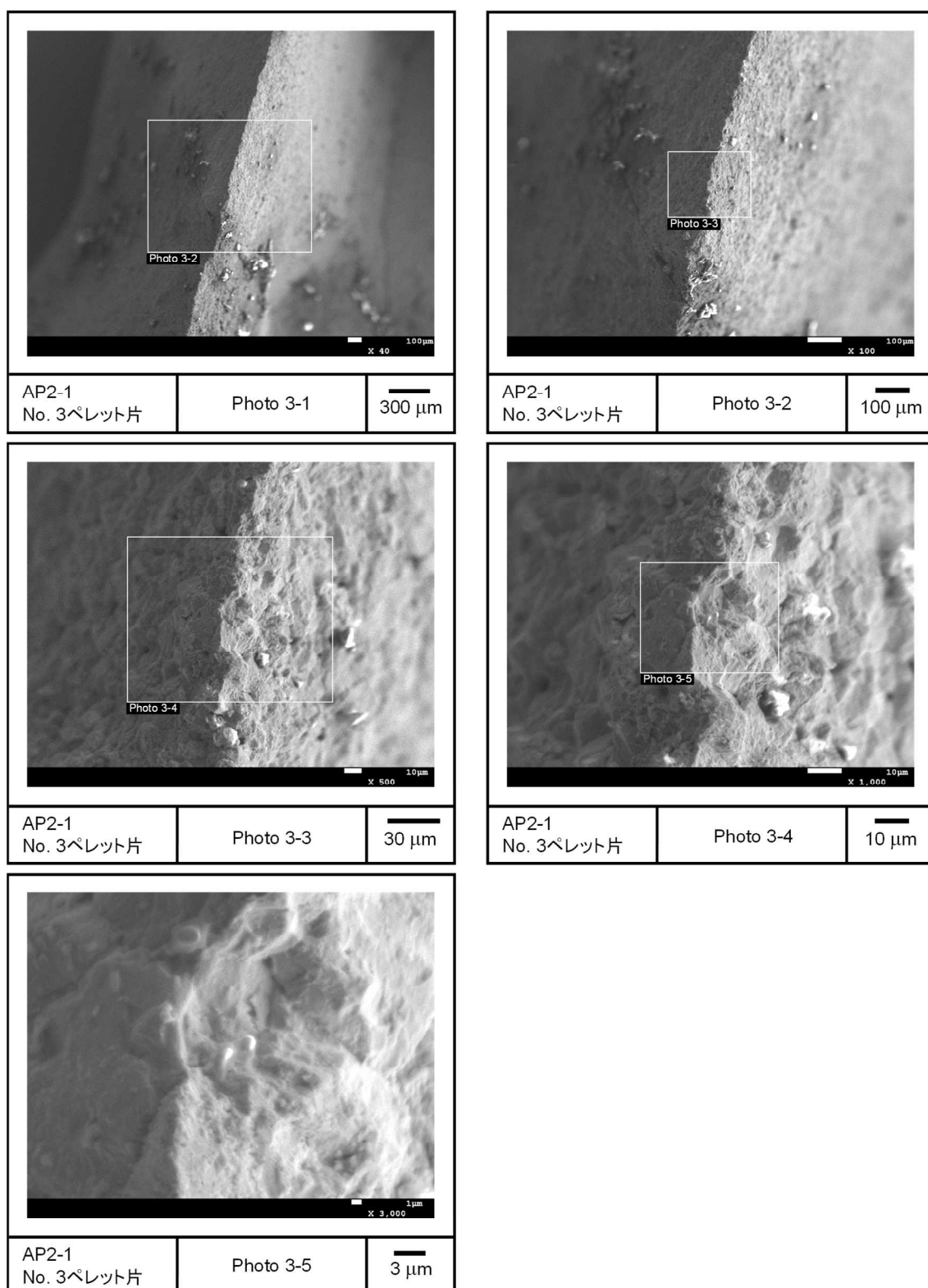


図 4.3.2-6(3) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 3 の SEM 画像
(AP2-1 セグメント燃料)

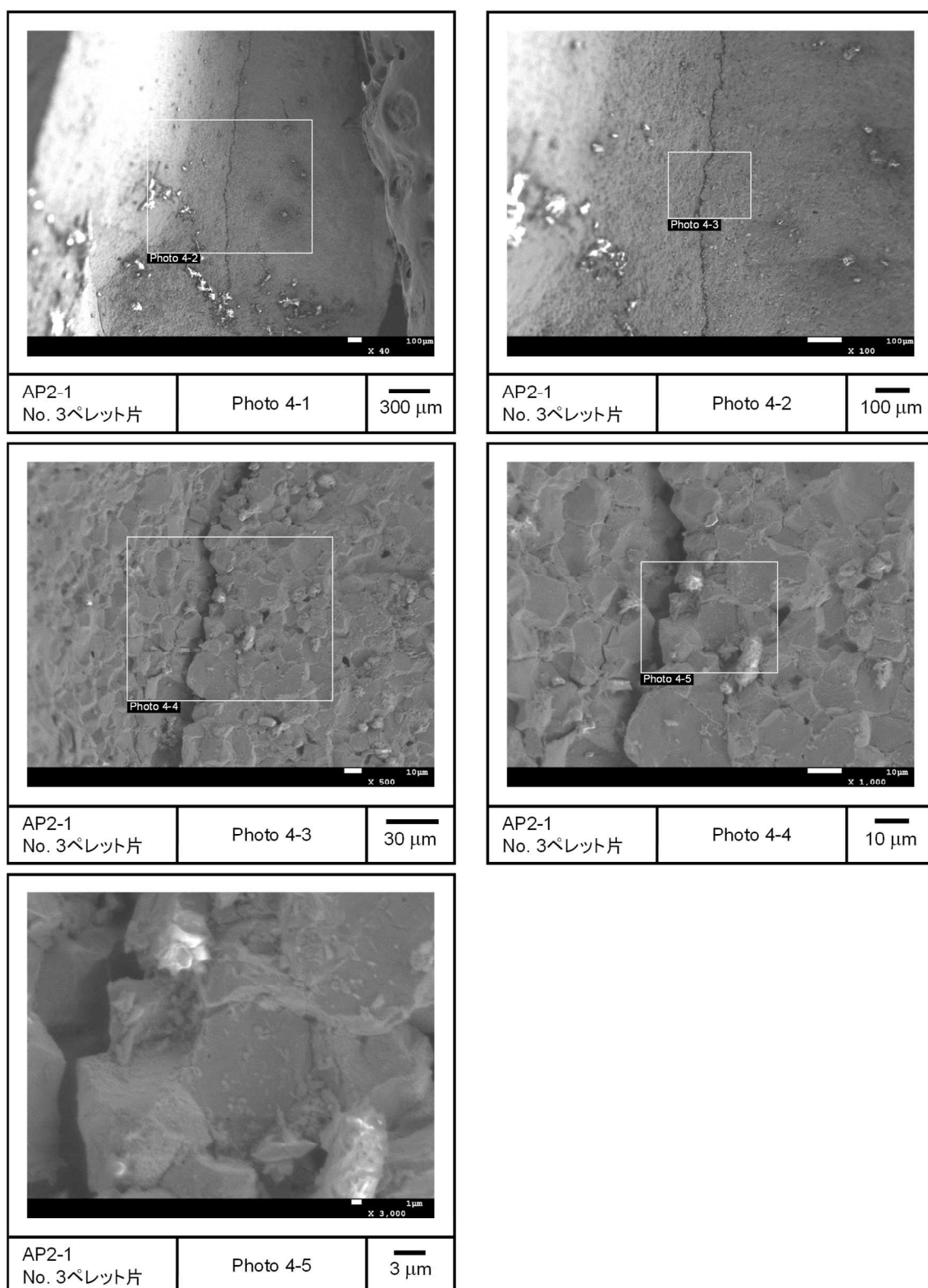


図 4.3.2-6(4) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 3 の SEM 画像
(AP2-1 セグメント燃料)

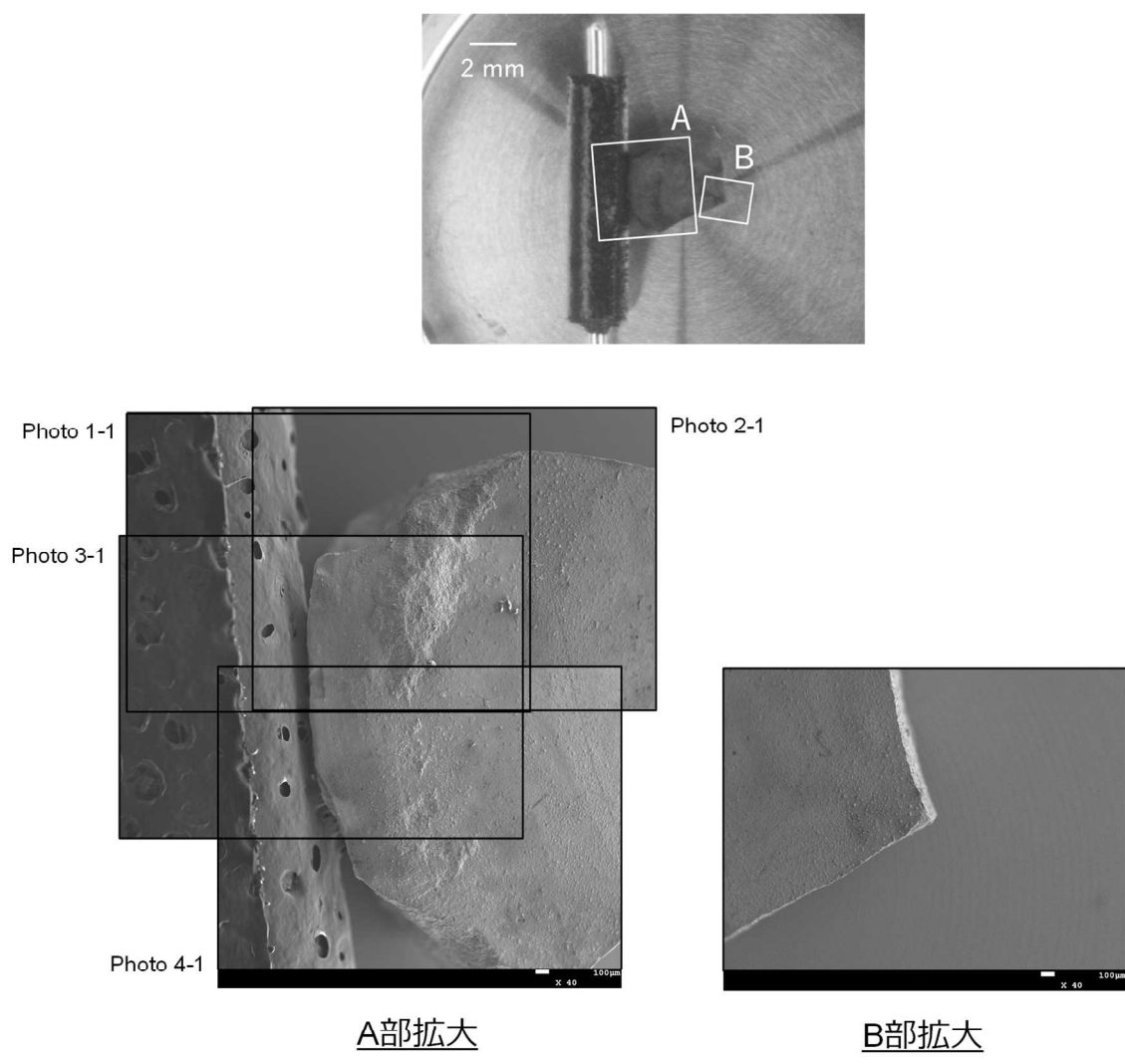


図 4.3.2-7 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 4 の外観
(AP2-1 セグメント燃料)

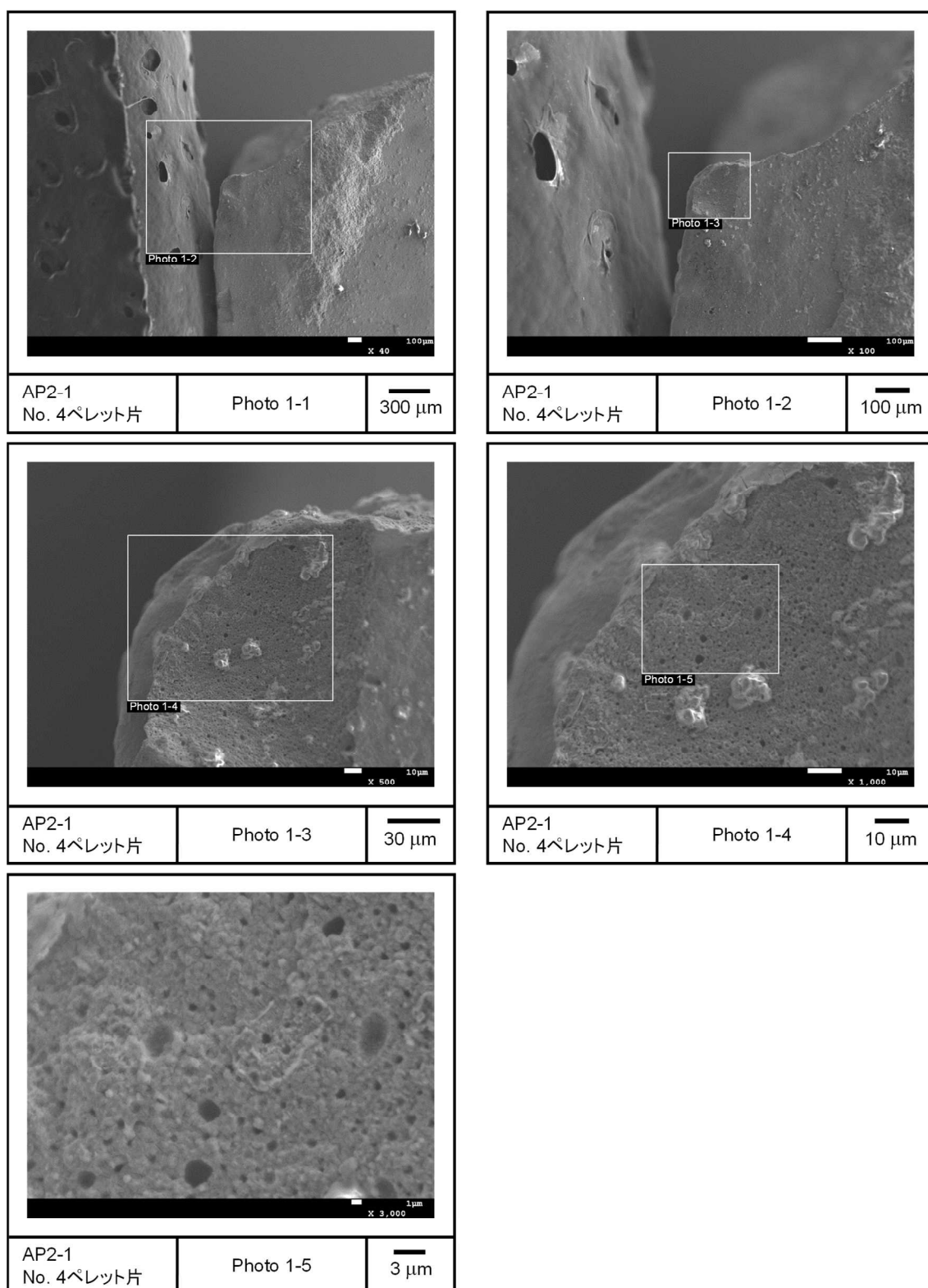


図 4.3.2-8(1) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 4 の SEM 画像
(AP2-1 セグメント燃料)

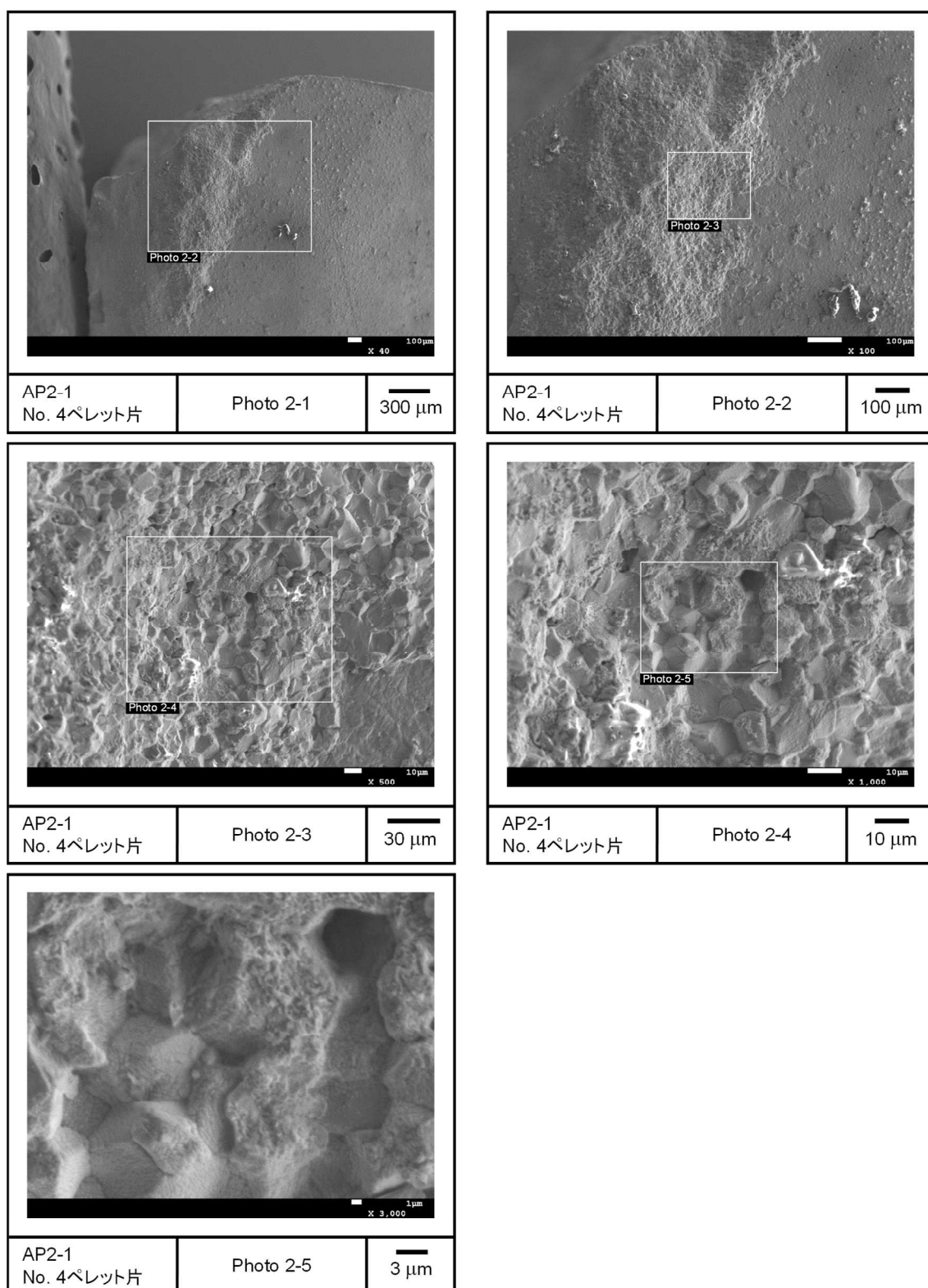


図 4.3.2-8(2) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 4 の SEM 画像
(AP2-1 セグメント燃料)

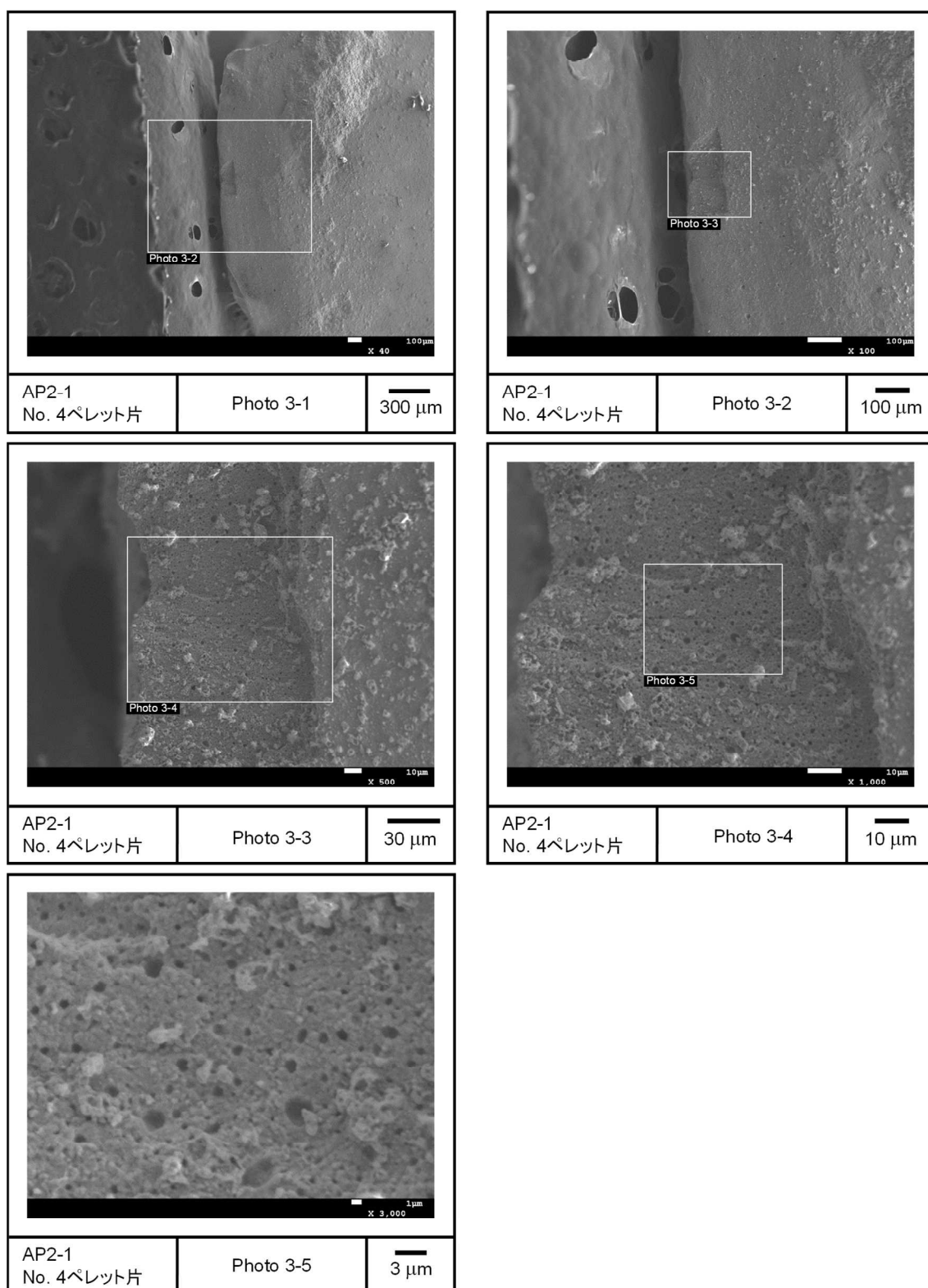


図 4.3.2-8(3) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 4 の SEM 画像
(AP2-1 セグメント燃料)

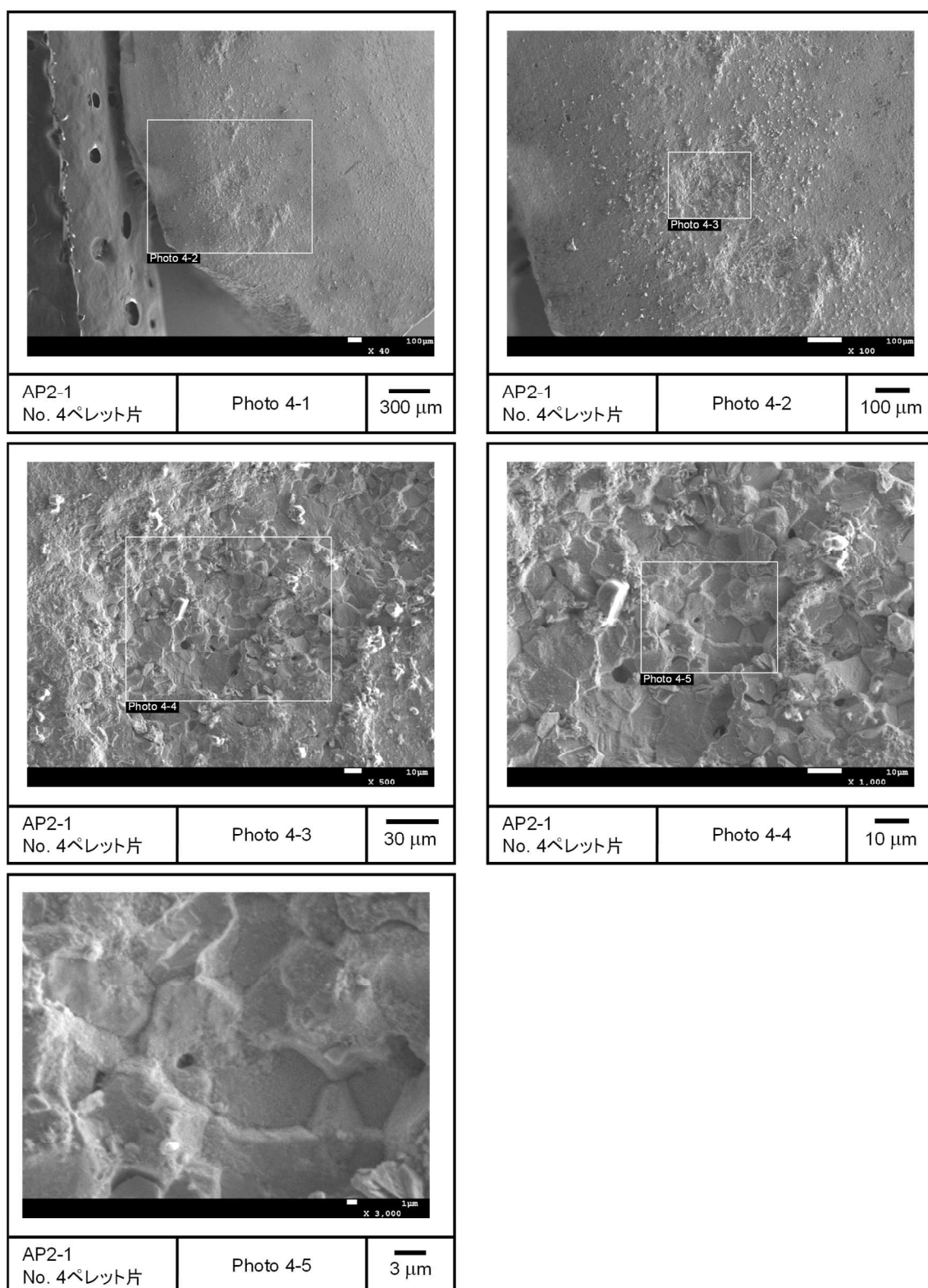


図 4.3.2-8(4) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 4 の SEM 画像
(AP2-1 セグメント燃料)

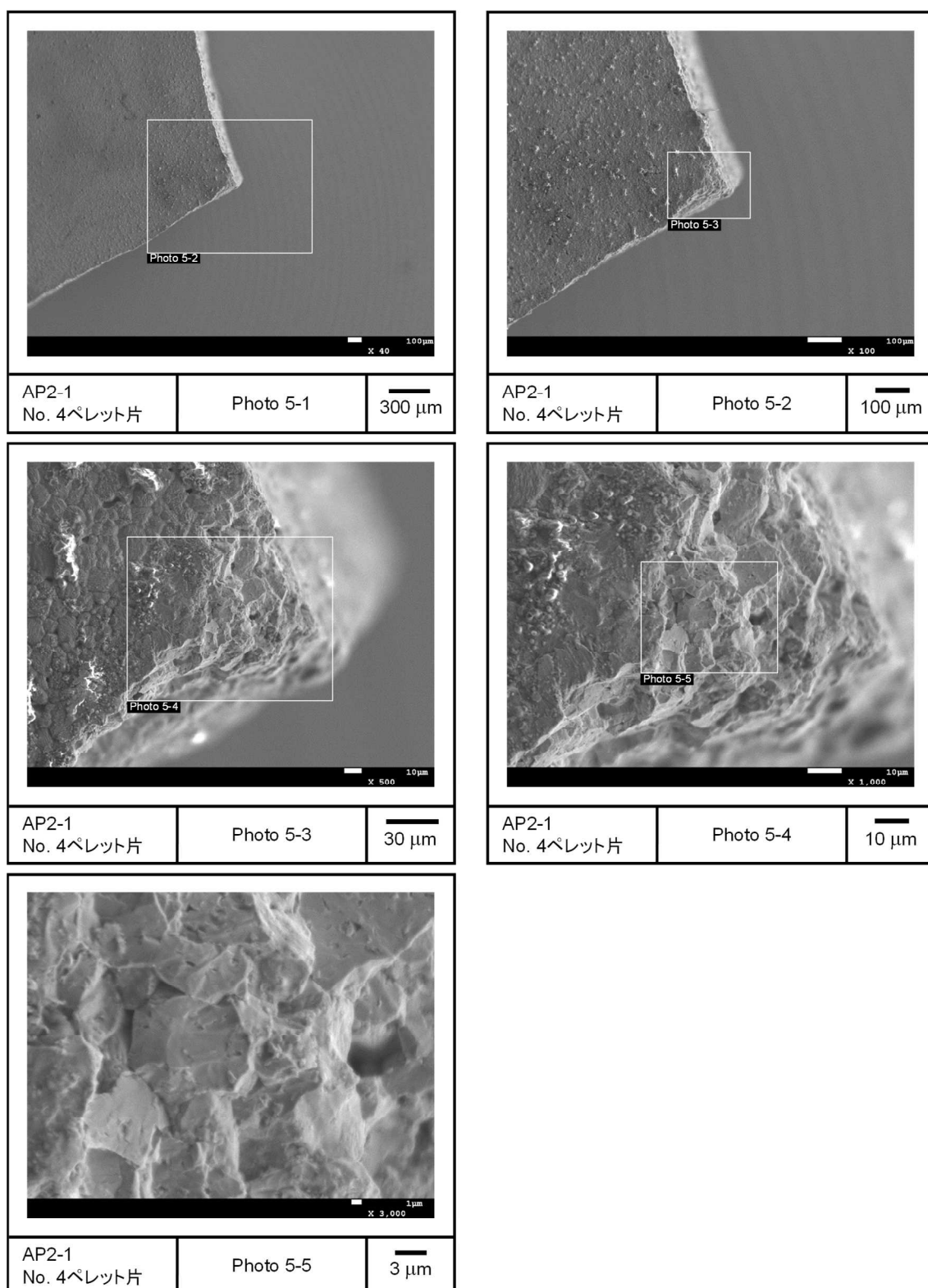


図 4.3.2-8(5) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 4 の SEM 画像
(AP2-1 セグメント燃料)

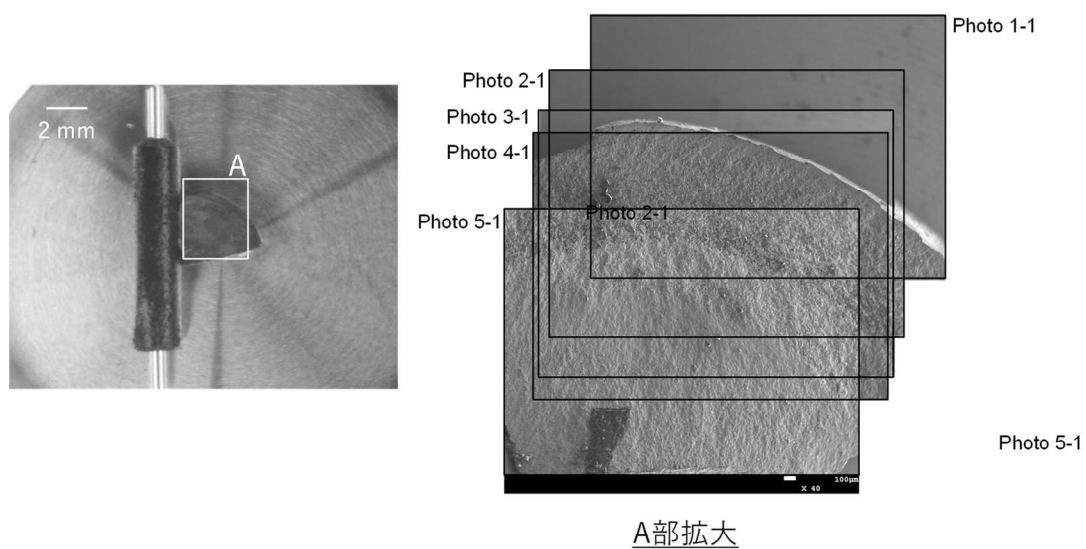


図 4.3.2-9 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 5 の外観
(AP2-1 セグメント燃料)

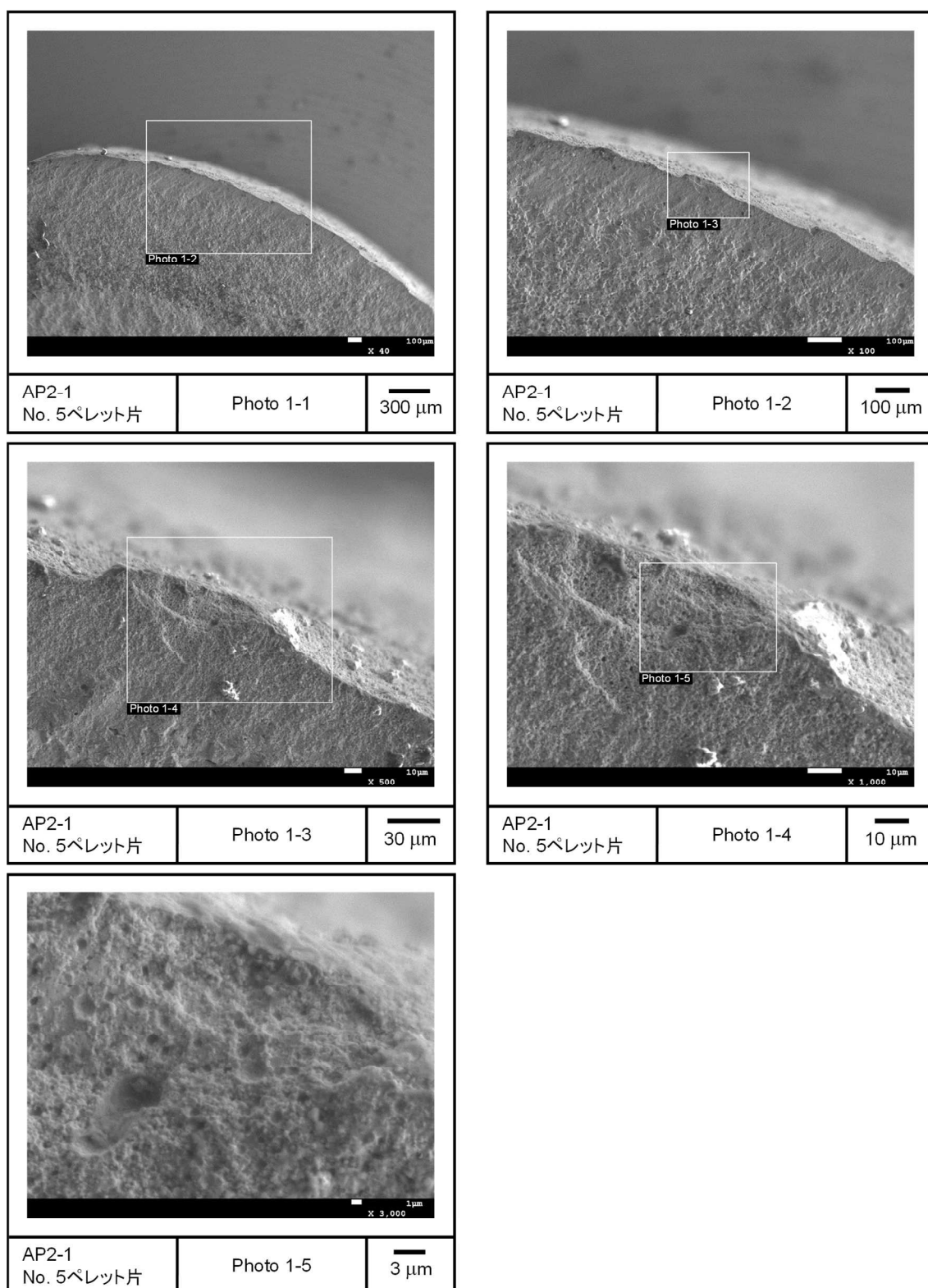


図 4.3.2-10(1) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 5 の SEM 画像
(AP2-1 セグメント燃料)

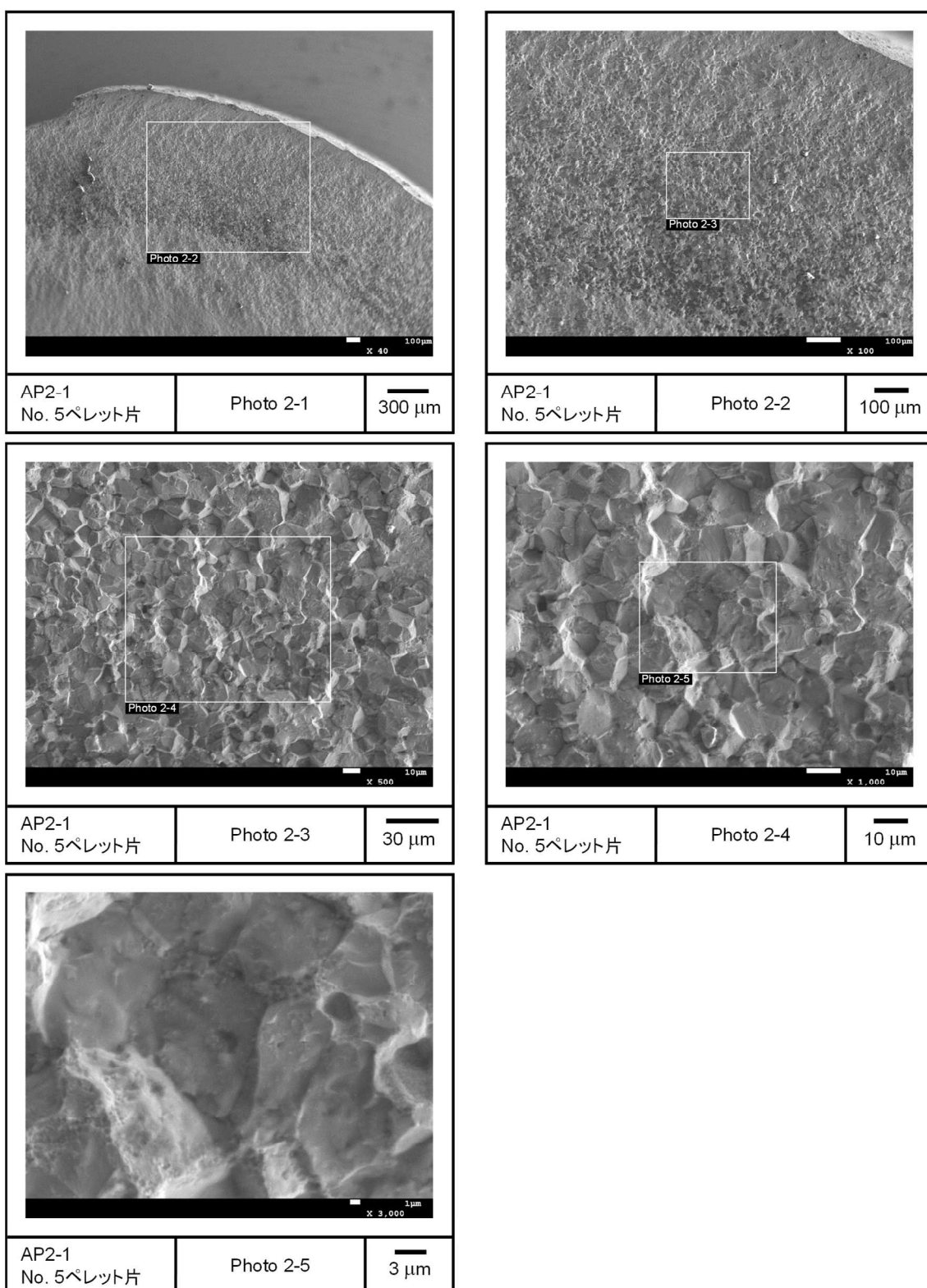


図 4.3.2-10(2) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 5 の SEM 画像
(AP2-1 セグメント燃料)

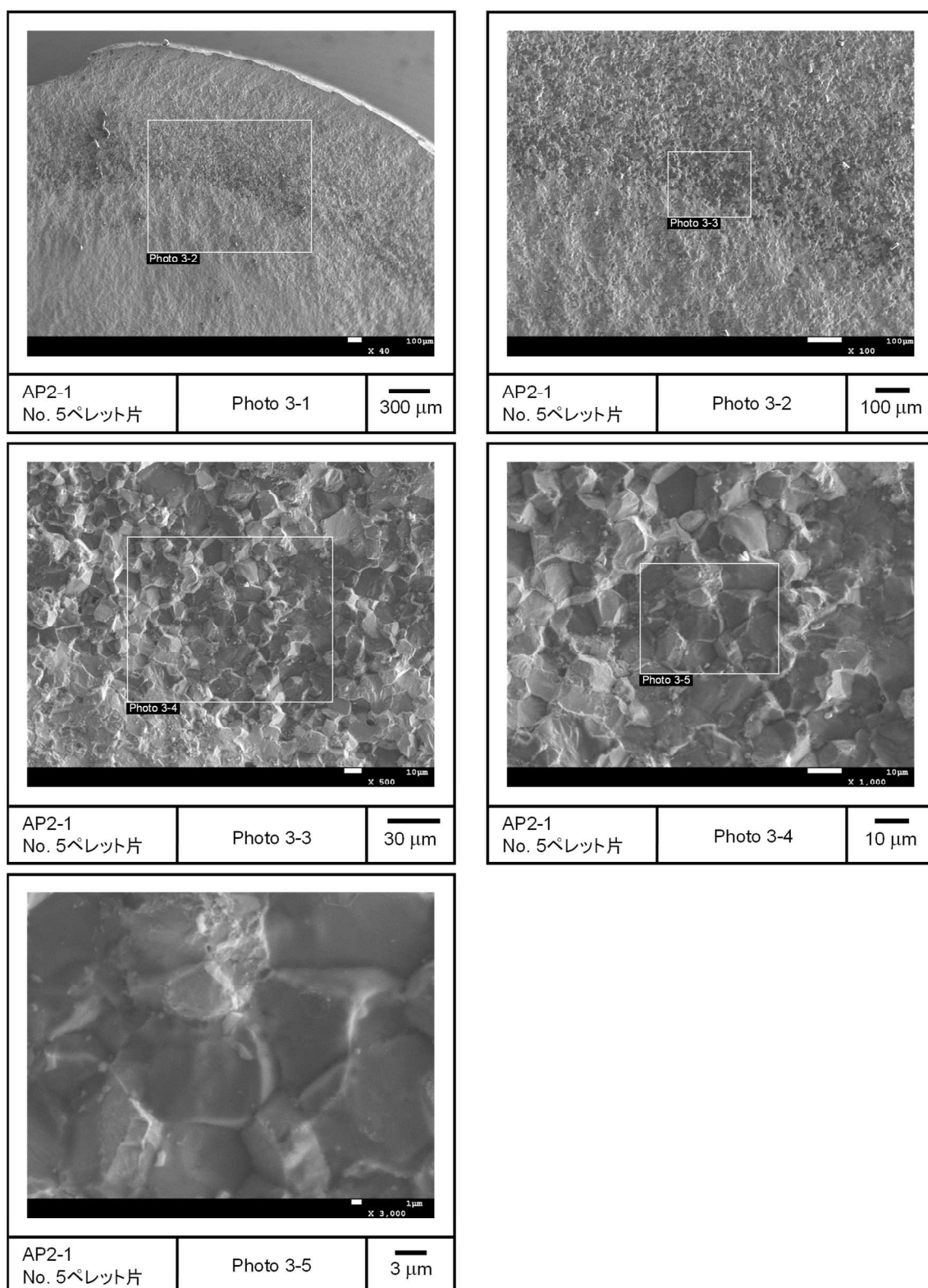


図 4.3.2-10(3) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 5 の SEM 画像
(AP2-1 セグメント燃料)

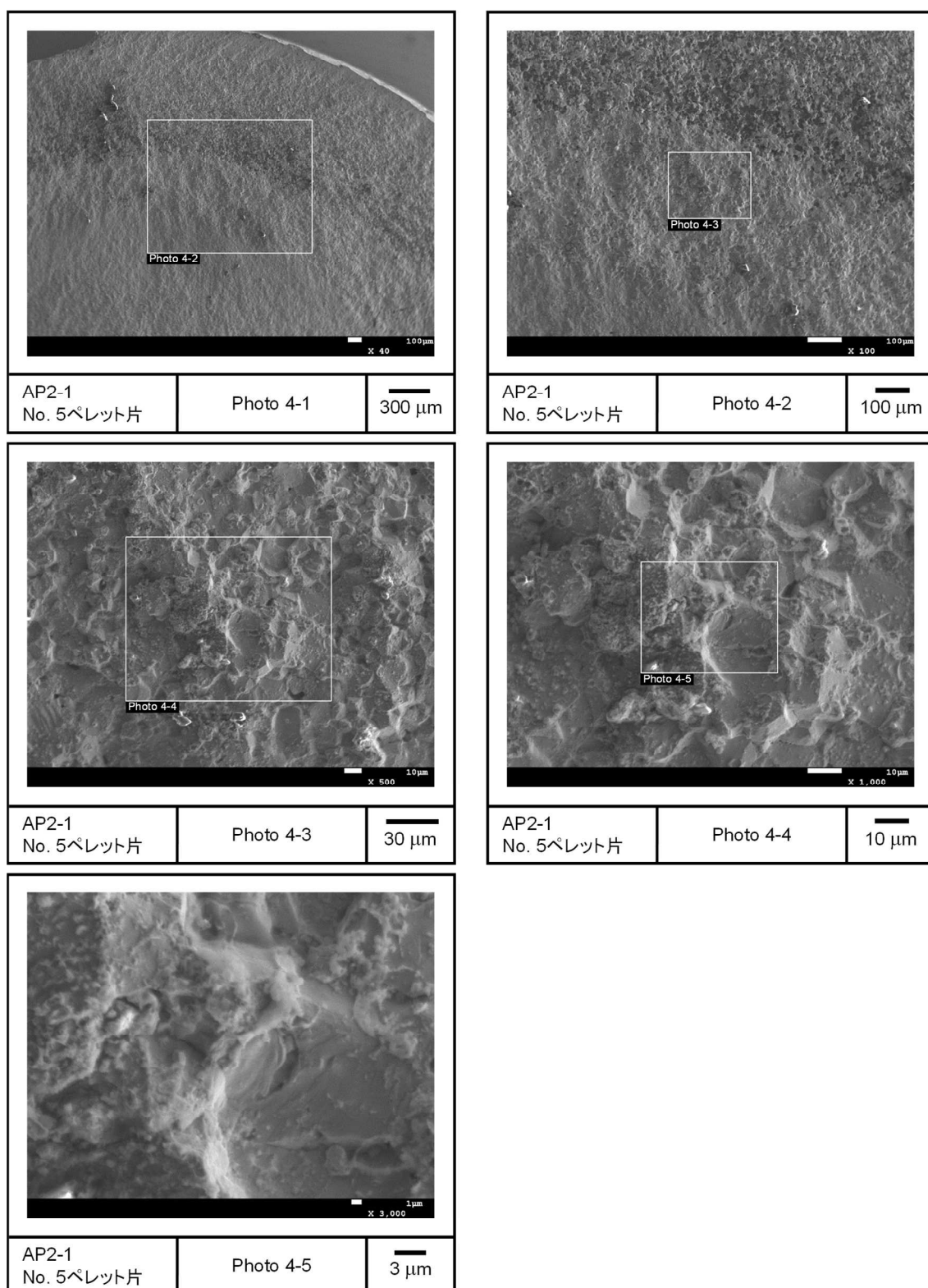


図 4.3.2-10(4) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 5 の SEM 画像
(AP2-1 セグメント燃料)

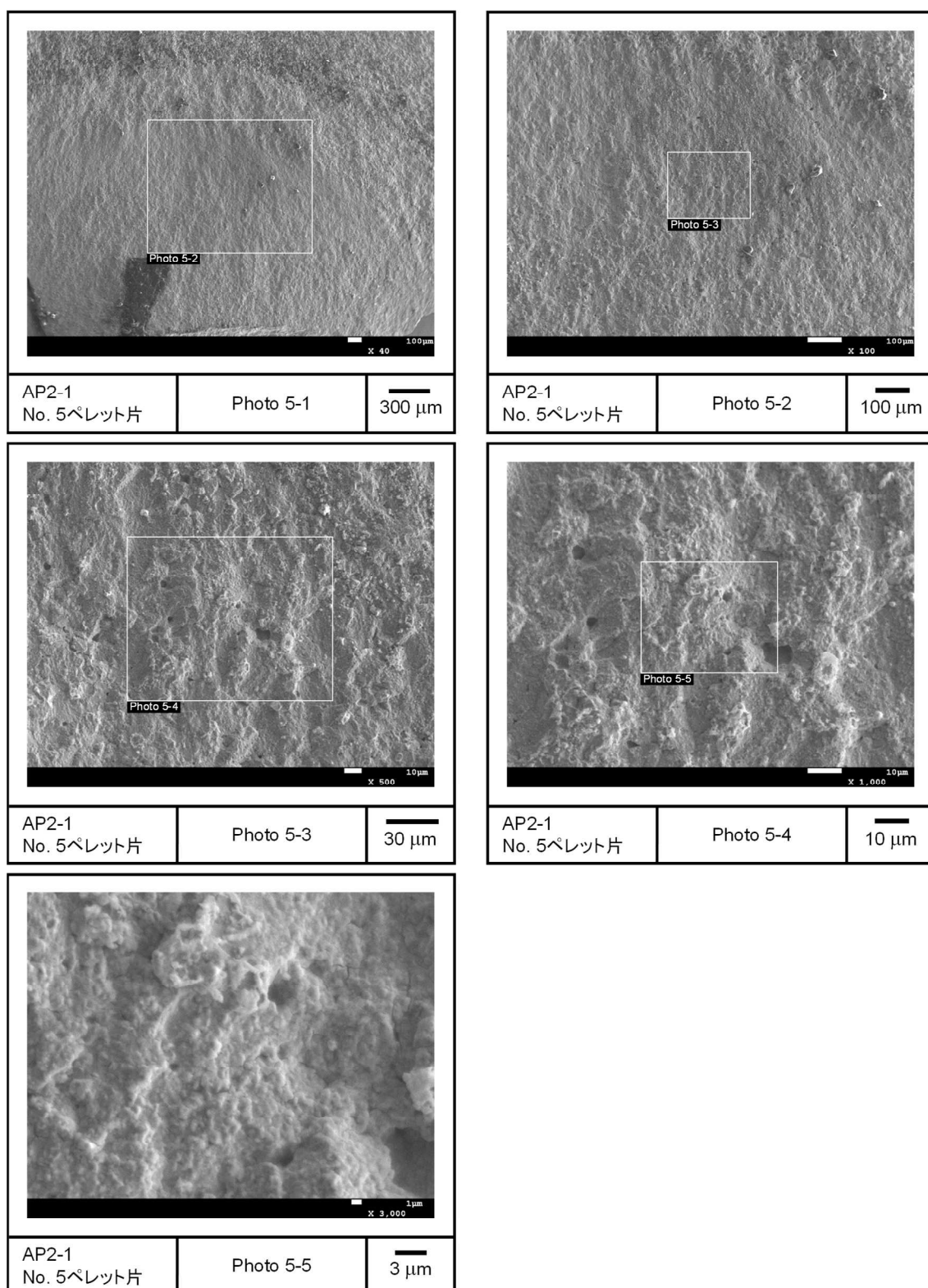


図 4.3.2-10(5) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 5 の SEM 画像
(AP2-1 セグメント燃料)