

平成 30 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
(燃料設計審査分野の規制研究) 事業
(平成 30 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
平成 31 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 RIA 試験	2-2
2.2.2 LOCA 試験	2-4
2.2.3 改良型燃料被覆管の照射成長試験	2-5
3 章 平成 30 年度燃料等安全高度化対策事業の概要	3-1
3.1 RIA 試験	3-1
3.2 RIA 試験解析	3-2
3.3 LOCA 試験	3-2
3.4 改良型燃料被覆管の照射成長試験	3-2
3.5 事故時燃料冷却性評価に関する研究	3-2
4 章 平成 30 年度燃料等安全高度化対策事業の実施内容	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 RIA 試験	4.3-1
4.3.1 VA-9 実験	4.3-1
4.3.2 CN-1 実験	4.3-24
4.3.3 OS-1 実験に関するパルス照射後試験	4.3-50
4.3.4 LS-4 実験に関するパルス照射後試験	4.3-81
4.3.5 燃料エンタルピの評価	4.3-99
4.3.6 被覆管機械特性試験	4.3-105
4.3.7 RIA 時の燃料挙動に関する総合評価	4.3-110
4.4 RIA 試験解析	4.4-1
4.4.1 解析の概要	4.4-1
4.4.2 FEMAXI-8/RANNS 解析の方法	4.4-1
4.4.3 ベース照射解析結果	4.4-2
4.4.4 RIA 試験解析結果	4.4-4
4.4.5 燃老被覆管中のき裂解析	4.4-9
4.4.6 RIA 試験解析のまとめ	4.4-13
4.5 LOCA 試験	4.5-1

4.5.1	酸化速度評価試験	4.5-1
4.5.2	LOCA 時の燃料挙動に関する総合評価	4.5-2
4.6	改良型燃料被覆管の照射成長試験	4.6-1
4.6.1	改良型燃料被覆管の照射成長試験の概要	4.6-1
4.6.2	照射成長試験に供する材料の選定、照射条件及び試験片の配置	4.6-1
4.6.3	試験片のハルデン炉照射及び冷却材ループ運転状況	4.6-3
4.6.4	試験片に係るハルデン炉施設での最終検査	4.6-5
4.6.5	試験片に係る照射後試験	4.6-6
4.6.6	改良型燃料被覆管の照射成長試験のまとめ	4.6-7
4.7	実燃料入り LOCA 模擬試験装置の設置準備作業	4.7-1
4.7.1	実燃料入り LOCA 模擬試験の概要	4.7-1
4.7.2	実燃料入り LOCA 模擬試験用燃料棒の作製	4.7-4
4.7.3	実燃料入り LOCA 模擬試験装置の設置作業	4.7-5
4.7.4	実燃料入り LOCA 模擬試験装置の設置準備作業のまとめ	4.7-5
4.8	燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験	4.8-1
4.8.1	加熱試験	4.8-1
4.8.2	加熱試験のまとめ	4.8-4
4.9	廃棄物処分	4.9-1
4.10	専門部会の開催	4.10-1
4.11	事業の進捗管理	4.11-1
5 章	結言	5-1
	(参考文献)	6-1
	(用語の解説)	7-1

4.5 LOCA 試験

スイス・ライプシュタット炉において照射され、平成 28 年度に酸化速度評価試験に供した Zircaloy-2 (Zry-2, LK3) 被覆管に対して、酸化速度評価試験後の分析を実施した。さらに、平成 23–30 年度に実施した LOCA 試験の結果を基に、LOCA 時の燃料挙動に関する総合評価を実施した。

4.5.1 酸化速度評価試験

(1) 酸化速度評価試験後の分析

(a) OZRT2-1–15 に対する分析

平成 28 年度に酸化速度評価試験に供した燃料被覆管の材料である Zry-2 は Fe、Cr、及び Ni の添加量を Zry-2 の規格の範囲内ではあるが高い側で制御したものであり、LK3 と呼ばれる。この Zry-2 被覆管の内側には厚さ 70 μm のジルコニウムが内張りされており、ジルコニウムライナ管である。なお、酸化速度評価試験においては被覆管の内側を研磨し、ジルコニウムの内張りを完全に除去した状態で試験を実施した⁽¹⁾。

平成 28 年度に酸化速度評価試験に供した試験片⁽¹⁾である OZRT2-1–15 の情報を表 4.5-1 に、同酸化速度評価試験の試験条件を表 4.5-2 に示す。本年度は OZRT2-1–15 に対して断面ミクロ組織観察を行った。

図 4.5-1(1)–(6)には酸化速度評価試験後の試験片の断面金相写真（腐食（エッチング）前及び腐食後）を示す。図中の腐食酸化膜は通常運転中に形成された酸化膜を、高温酸化層は酸化速度評価試験中に形成された酸化膜を示している。すべての試料において、被覆管外面には通常運転中に形成された腐食酸化膜が残存し、多数のクラックが観察される。低温かつ短時間側の酸化条件においては、腐食酸化膜は被覆管の酸化を抑制する保護膜効果を有する^(1, 3-9)。今回の断面金相写真も、酸化温度 1373 K、酸化時間 120 s のように低温かつ短時間側の酸化条件では被覆管外面の高温酸化が抑制されたことを示している。また、例えば酸化温度 1473 K、酸化時間 900 s の条件で酸化した試料において観察されるように、腐食酸化膜のクラック形成箇所で局所的に酸化が進行していることが分かる。なお、酸化速度評価試験に供する試験片は被覆管内表面に金属部が現れるまで燃料ペレットを除去した。このため、被覆管内面においては全ての酸化条件で高温酸化層が形成されていた。

ジルコニウム基合金被覆管を 1273 K 程度の温度において長時間水蒸気中で酸化させた場合、急激に酸化速度が増加するブレイクアウェイ酸化が起こることがある。過去の報告例によると、未照射の Zircaloy-4 (Zry-4) 被覆管では 1 時間を超える酸化時間で起こるといわれている⁽¹⁰⁾。ブレイクアウェイ酸化が起こると酸化膜の成長が著しいだけでなく、多量の水素吸収が起こるため、この現象は被覆管の脆化の観点から重要である。高燃焼度 Zry-2 被覆管についても、酸化温度 1273 K で 3600 s 酸化した試料において、被覆管の内外面の高温酸化層に多孔質な酸化膜、及び周方向のクラックの形成、並びに被覆管内外面の高温酸化層と金属相との境界が波を打ち、多数のクラックが形成されていること等、ブ

ブレイクアウェイ酸化の発生と考えられる兆候^(11,12)が確認された。この試料については酸化速度の急激な加速と 933 wtpm の顕著な水素吸収が確認されている^(1,7)。これらを考慮すれば、当該試料についてはブレイクアウェイ酸化が発生したものと考えられる。上述した通り、酸化温度 1273 K におけるブレイクアウェイ酸化開始時間は未照射の Zry-4 について約 3600 s と報告されており⁽¹⁰⁾、今回の結果から、燃焼の進展や合金組成の変更がブレイクアウェイ酸化開始時間に及ぼす影響は認められない。

周方向 4 箇所測定した被覆管内外面の高温酸化層の平均厚さを酸化時間に対してプロットした結果を図 4.5-2 に示す。比較のため、未照射 Zry-4 被覆管に対する酸化速度評価試験結果の文献値⁽¹³⁾を併せて示す。この図において、測定された高温酸化層厚さの最大値及び最小値をエラーバーとして示したが、未照射材では被覆管内面と外面で高温酸化層厚さにほとんど違いが見られなかったため、両者の平均値のみをプロットしている。この図から分かるように、高燃焼度 Zry-2 被覆管の外面の高温酸化層厚さは未照射材に比べ薄かった。照射材の外面酸化膜が未照射材のそれと比べ薄くなる傾向は過去に本事業で実施した照射材の酸化速度評価試験においても確認されており^(1,3-7)、通常運転中に被覆管外面に形成された腐食酸化膜が有する、高温水蒸気中での酸化抑制効果によるものと考えられる。一方、高燃焼度 Zry-2 被覆管の内面の酸化膜厚さの平均は未照射の酸化膜厚さの平均よりも厚い傾向が確認された。この傾向は過去に本事業で実施した照射材の酸化速度評価試験においても確認されており^(1,3-7)、両者の差の原因としては、試験片製作時の燃料ペレット除去処理の際に被覆管内表面が研磨されたことに伴う表面粗さの変化が考え得る。

4.5.2 LOCA 時の燃料挙動に関する総合評価

本事業でこれまでに取得した高燃焼度改良型燃料被覆管に対する急冷破断試験及び酸化速度評価試験の結果を基に、LOCA 時の燃料挙動に関する総合評価を実施した。急冷破断試験及び酸化速度評価試験に供した被覆管の情報を表 4.5-3 及び表 4.5-4 に示す。

(1) 高燃焼度改良型燃料被覆管の LOCA 時酸化挙動

(a) 酸化速度

LOCA 時にジルコニウム基合金が高温で水ないし水蒸気と反応すると、表面で乖離した酸素が内部に拡散し、濃度勾配に従って外表面から酸化膜 (ZrO_2) 及び酸素安定化 α 相 (α -Zr(O)) が形成され、内部の金属層中では酸素濃度が増大する。酸化膜と酸素安定化 α 相は非常に脆く、金属層の延性及び強度も酸素濃度の増大に伴い低下する。従って、LOCA 時における燃料の健全性の観点では、被覆管の厚みに占める残存金属層の厚さとその残存金属層における酸素濃度が重要であり、信頼性の高い安全評価を行うためには高燃焼度改良型燃料被覆管についても精度の高い酸化速度データを取得しておく必要がある。また、被覆管の酸化速度データは被覆管の酸化に伴う発熱や水素発生の評価にも用いられるため、これらの評価精度向上の観点からも精度の高い酸化速度データを取得することが重要であ

る。

高燃焼度化に伴い燃料被覆管では中性子照射量（照射欠陥）の増大とともに腐食量と水素吸収量が増大する。従って、これらの高燃焼度化の影響が LOCA 時の被覆管の酸化挙動に及ぼす影響を評価することが重要である。また、照射中の耐食性を改善するために、様々な改良合金が開発されている。僅かな合金組成の変更や不純物量の違いにより LOCA 時の酸化速度や延性低下の度合いが大きく変化した事例も報告されており⁽¹⁴⁾、新しい被覆管合金を使用する際には事故時の性能についても十分に確認する必要がある。以下に、本事業において実施した酸化速度評価試験から得た高燃焼度改良型燃料被覆管の高温酸化速度に関する知見をまとめる。

本事業においては平成 24–28 年度にかけて、80–85 GWd/t まで照射された高燃焼度改良型燃料被覆管である M-MDA、M5、低スズ ZIRLO、及び Zry-2 (LK3) に対して酸化速度評価試験を実施した。同試験では、燃料ペレットを除去した高燃焼度改良型燃料被覆管を約 8.5 mm の長さに切断し試験片とした。この試験片を高温水蒸気中において 1173–1473 K の温度にて 120–4000 s の時間範囲で等温酸化させた。酸化速度評価試験の条件を表 4.5-5 に示す。

表 4.5-6 に高燃焼度 M-MDA、M5、低スズ ZIRLO、及び Zry-2 (LK3) 被覆管について求めた酸化速度定数を、図 4.5-3 に同酸化速度定数の温度依存性を示す。酸化速度定数とは、酸化の進行が(1)式に示す二乗則に従うものと仮定したときの定数 (K_w) である。

$$\Delta W^2 = K_w t, \quad (1)$$

ここで、 ΔW は単位面積当たりの重量増加、 t は酸化時間を表す。M-MDA、M5、及び低スズ ZIRLO 被覆管の場合、酸化温度が 1173 及び 1273 K のケースの単位面積当たりの重量増加は酸化時間が約 900 s 以下では二乗則に従うと見なせるが、これよりも長い酸化時間のデータを含めると三乗則に従う傾向を示した。高燃焼度 Zry-2 (LK3) 被覆管の場合、酸化温度が 1273 及び 1373 K のケースの単位面積当たりの重量増加は酸化時間が約 900 s 以下では二乗則に従うと見なせるが、これよりも長い酸化時間では単位面積当たりの重量増加が顕著に増大し、二乗則から外れる傾向を示した。このため、表 4.5-6 及び図 4.5-3 に示すデータのうち、1173 及び 1273 K の酸化速度定数は酸化時間が約 900 s 以下のデータについて求めたものである。また、高燃焼度 Zry-2 (LK3) 被覆管の 1373 K における酸化速度定数は酸化時間が約 900 s 以下のデータについて求めたものである。高燃焼度低スズ ZIRLO 被覆管の 1373 K における酸化速度定数は、試料の重量増加が確認されなかった酸化時間が 120 s のデータを除いて求めた値である。同図には、平成 18–22 年度にかけて本事業において取得した未照射の被覆管である M5、Zry-4、M-MDA、及び低スズ ZIRLO に対する酸化速度評価試験結果^(3,4,15,16)を併せて示す。この図から、本事業で調べた改良型燃料被覆管の酸化速度は従来材である未照射 Zry-4 被覆管と比較して同等以下であること

が分かる。また、図中に示す Baker–Just 酸化速度式⁽²⁾との比較において、本事業で調べた改良型燃料被覆管の酸化速度は十分に低いことが分かる。

図 4.5-3 において照射材と未照射材の酸化速度を比較すると、本事業で調べた高燃焼度改良型燃料被覆管の酸化速度は未照射材と比較して 1473 K で同等であり、1373 K 以下の温度範囲で低いことが分かる。比較的低い酸化温度で短い時間酸化した場合に照射材の酸化が未照射材に比べて抑制される傾向は、本事業で実施した酸化速度評価試験後の断面金相観察や先行研究においても確認されている^(1, 3-9)。これらの照射材における酸化抑制は、通常運転中に被覆管外面に形成された腐食酸化膜の保護膜効果によるものと考えられる。但し、LOCA 時の被覆管の膨れ、破裂を考慮する必要がある。LOCA 時には燃料棒内圧が外圧を超え温度上昇に伴い被覆管の強度が低下するため、被覆管は膨れて破裂する可能性がある。この場合、周方向の変形により腐食酸化膜には細かなクラックが発生する。本事業における酸化速度評価試験で見られたように、腐食酸化膜にクラックが生じた位置では保護膜効果が低下し、高温酸化が進行する⁽⁴⁻⁷⁾。また、急冷破断試験において確認されたように、膨れ、破裂した後に酸化させた被覆管試料に関しては、腐食酸化膜の保護性はほとんど見られなかった^(1, 3-7, 17, 18)。従って、高燃焼度被覆管の安全評価に際しては、通常運転中に形成される腐食酸化膜による酸化抑制効果を考慮せずに保守的に評価するべきと考えられる。本事業で調べた未照射の改良型燃料被覆管の酸化速度や腐食酸化膜による酸化抑制効果が観察されなかった 1473 K における高燃焼度改良型燃料被覆管の酸化速度を見る限り、腐食酸化膜による酸化抑制効果を考慮しない場合においても改良型燃料被覆管の酸化速度は従来材である未照射 Zry-4 被覆管と比較して同等以下であると考えられる。先行研究において、高温酸化以前に吸収した水素 (< 800 wtpm) が被覆管の酸化による重量増加に及ぼす影響は 5%以下であると報告されている⁽¹⁹⁾。本事業では上述の腐食酸化膜による保護膜効果が顕著に観察された一方で、高温酸化以前に吸収した水素が酸化重量増加を増大する傾向は確認されなかった。

以上から、燃料被覆管の高温酸化速度は 85 GWd/t までの燃焼の進展や合金組成の変更により著しく増大しないと考えられる。

(b) ブレークアウェイ酸化

773–1073 K 及び約 1273 K で長時間酸化させた際に起こる「ブレークアウェイ酸化」⁽¹⁰⁾は酸化速度及び水素吸収の急激な増大を伴うことから、LOCA 時の燃料健全性評価において重要な現象である。先行研究においては 200 wtpm を超える水素吸収を伴う酸化をブレークアウェイ酸化と定義している^(11, 20)。本事業においては、1273 K の温度で 3600 s 酸化させた高燃焼度低スズ ZIRLO 及び Zry-2 (LK3) の双方の被覆管試料で重量増加が増大する傾向と 200 wtpm を超える水素吸収量の顕著な増大が観察された。また、これらの試料に対する酸化速度評価試験後の断面金相観察の結果、被覆管の内外面の高温酸化層に単斜晶に似た ZrO_2 及び周方向のクラックの形成、並びに被覆管内外面の高温酸化層と金

属相との境界が波を打ち、多数のクラックが形成されていること等、ブレイクアウェイ酸化の発生と考えられる兆候^(11,12)が確認された。従って、これらの被覆管試料についてはブレイクアウェイ酸化が発生したものと考えられる。

ブレイクアウェイ酸化を生じた被覆管は顕著に脆化することから、安全評価の観点ではブレイクアウェイ酸化が発生する酸化条件を評価することが重要である。1243–1273 K の温度で等温酸化させた場合、未照射 Zry-4 被覆管では 3600 s、未照射 M5 被覆管では 5000 s、未照射 ZIRLO 被覆管では (3100 ± 300) s の酸化時間でブレイクアウェイ酸化が生じたと報告されている^(10,11,20,21)。本事業においては、これらの酸化時間より短い酸化時間において高燃焼度改良型燃料被覆管のブレイクアウェイ酸化は観察されなかった。このことから、高温水蒸気中における燃料被覆管のブレイクアウェイ酸化発生条件は 85 GWd/t までの燃焼の進展や合金組成の変更によって著しく変化しないと考えられる。

(c) 表面粗さの影響

図 4.5-2 において高燃焼度 Zry-2 被覆管の内面の酸化膜厚さの平均は未照射の酸化膜厚さの平均よりも厚い傾向が確認され、燃料ペレット除去処理の際に被覆管内表面が研磨されたことに伴う表面粗さの変化が考えられた。この影響を確認するために、表面処理をパラメータとした未照射試料を用いた高温酸化試験を実施し、高温酸化に対する表面粗さの影響を検討した。表面処理条件は、コロイダルシリカ、耐水研磨紙 (#120、#400)、金属状ヤスリを用いて研磨した。表面処理後の外観を図 4.5-4 に示す。高温酸化試験は、赤外線炉で、試験温度 1273 K、Ar+水蒸気雰囲気とし、ただし昇温時雰囲気は、Ar ガスもしくは Ar+水蒸気雰囲気とした。試験前後に重量測定を行い、単位表面積あたりの重量増加を評価した。重量変化の酸化時間依存性を図 4.5-5 に示す。7200 s における Ar+水蒸気雰囲気条件では表面処理の影響は観察されなかったが、3600 s における Ar 雰囲気条件では、受入れ材と比較して研磨材において重量変化が大きい傾向を示し、ブレイクアウェイへの影響可能性が示唆された。今回の試験では表面処理より昇温時雰囲気の影響が大きかったが、酸化条件によっては表面粗さが影響すると考えられた。

(2) 高燃焼度改良型燃料被覆管の LOCA 時膨れ破裂挙動

LOCA 時の昇温過程において、被覆管の内圧上昇と機械強度の低下が相俟って、被覆管は膨れ、破裂する可能性がある。この膨れ及び破裂は被覆管の肉厚を減少させるため急冷時の被覆管破断限界に密接に関連するだけでなく、冷却材流路閉塞や核分裂ガス放出挙動（放出のタイミング）の観点においても重要である。本事業において実施した急冷破断試験から得た高燃焼度改良型燃料被覆管の膨れ破裂挙動に関する知見を以下にまとめる。

図 4.5-6 に高燃焼度改良型燃料被覆管の膨れ率と破裂温度の関係を示す。ここで、膨れ率は試験前後の被覆管の円周長の増加量を表す。同図には平成 18 及び 19 年度にかけて本事業において取得した高燃焼度燃料被覆管のデータ^(3,4)及び未照射 Zry-4 被覆管の文献値

(22) を併せて示す。また、同図には、Zry-4 (酸素濃度 1200 wtppm) の結晶相状態⁽²³⁾ 及びジルコニウム (酸素濃度 1200 wtppm、水素濃度 600 wtppm) の結晶相状態⁽²⁴⁾ を併せて示す。同図から、高燃焼度改良型燃料被覆管の膨れ率は未照射 Zry-4 被覆管と比較して同等以下であることが分かる。図 4.5-7 に高燃焼度改良型燃料被覆管の破裂温度と初期水素濃度の関係を示す。同図には平成 18 及び 19 年度にかけて本事業において取得した高燃焼度燃料被覆管のデータ^(3,4) を併せて示す。高燃焼度改良型燃料被覆管の破裂温度は初期水素濃度の増大に伴い低下する傾向が観察された。ジルコニウムの相変態温度は水素濃度により変化することが知られている⁽²⁴⁾。ジルカロイ被覆管中の水素濃度が増大した場合、 $\alpha/\alpha+\beta$ 相境界及び $\alpha+\beta/\beta$ 相境界は低温側へ移動する。ジルカロイ被覆管の破裂はこれらの結晶相境界で生じやすく、水素吸収量の増大に伴い LOCA 時の被覆管の破裂温度が低下することが報告されている⁽²⁵⁾。従って、本事業において観察された高燃焼度改良型燃料被覆管の破裂温度の低下は、実験体系に加え、燃焼の進展に伴う水素吸収の増大によるものと推測される。以上から、高燃焼度改良型燃料被覆管の破裂温度は水素吸収に伴う相変態温度変化の影響を受け若干低下すると考えられるものの、最高 85 GWd/t までの燃焼の進展や合金組成の変更によって膨れ率が未照射 Zry-4 被覆管と比べて著しく増大することはないと考えられる。

(3) 高燃焼度改良型燃料被覆管の LOCA 時水素吸収 (二次水素化) 挙動

LOCA 時には、その昇温過程において被覆管が膨れ、破裂した場合、被覆管の破裂開口部から水蒸気が流入し、被覆管は外面だけでなく内面も水蒸気雰囲気において酸化する。この被覆管内面の水蒸気中酸化により生じた水素は燃料棒内に滞留するため、燃料棒内部における水素分圧が高まる。このため、被覆管はその内面から水素を吸収 (二次水素化) しやすくなる。但し、破裂開口部にごく近い位置では、破裂開口部からの水蒸気の流入により水素分圧が高くないこと及び被覆管内面において酸化が進行し、比較的厚い酸化膜が形成することによる保護膜効果により水素吸収が妨げられる。その結果、水素分圧が高く内面での酸化の程度が少ない破裂開口から少し離れた軸方向位置 (20–50 mm) で顕著な水素吸収が起こる⁽²⁶⁻²⁸⁾。本事業において実施した急冷破断試験から得た高燃焼度改良型燃料被覆管の LOCA 時の水素吸収挙動に関する知見を以下にまとめる。

図 4.5-8 に急冷破断試験中に高燃焼度改良型燃料被覆管に吸収された水素量 (試験後水素濃度と初期水素濃度との差) の軸方向分布を示す。同図には平成 18 及び 19 年度に本事業において取得した高燃焼度燃料被覆管に対する急冷破断試験の結果を併せて示す^(3,4)。本事業で調べた高燃焼度改良型燃料被覆管の水素吸収量は最大で約 2000 wtppm であり、未照射 Zry-4 被覆管の文献値^(25, 29) と比べて同等以下であった。高燃焼度 Zry-2 (LK3) 被覆管を除き、本事業で調べた高燃焼度改良型燃料被覆管の LOCA 時の水素吸収量の軸方向プロファイルは未照射 Zry-4 被覆管について報告されているプロファイル⁽²⁵⁻²⁹⁾ と同等であり、破裂開口から 20–50 mm 離れた位置において最大となった。高燃焼度 Zry-2 (LK3) 被覆

管については、LZRT3 及び LZRT4 のそれぞれについて、破裂開口位置において LOCA 時の水素吸収量が最大ないし極大となる傾向を示した。破裂開口位置において LOCA 時の被覆管の水素吸収量が増大する傾向は、平成 18 年度に本事業において取得した高燃焼度 MDA 被覆管^(3, 30)、並びに先行研究において報告されている 39–44 GWd/t まで照射された Zry-4 被覆管⁽³¹⁾及び未照射 Zry-4 被覆管⁽²⁶⁾の一部についても確認されている。先行研究においては、LOCA 模擬試験時の水蒸気流量を小さくした場合に、破裂開口位置における LOCA 時の被覆管水素吸収量が増大することが報告されている⁽²⁶⁾。また、破裂開口が小さく、燃料棒内部への水蒸気流量が小さいと考えられた高燃焼度 MDA 被覆管で破裂開口位置において水素吸収量が大きくなる傾向を示した^(3, 30)。本事業で試験した高燃焼度 Zry-2 (LK3) 被覆管は破裂開口面積が約 0.4–0.5 mm²と微小であり、被覆管の内面酸化が限定的であったことから、燃料棒内部に流入する水蒸気流量が小さかったと考えられる。このような場合には、破裂開口近傍において水素分圧が比較的高く、かつ被覆管内面は酸化膜の形成が限定的であり、水素吸収を妨げない状態にあると考えられ、破裂開口位置において観察された LOCA 時の被覆管の水素吸収量が大きくなる傾向を合理的に説明できる。従って、本事業において高燃焼度 Zry-2 (LK3) 被覆管で観察された破裂開口位置における LOCA 時の被覆管水素吸収量の増大の原因は、微小な破裂開口に起因する燃料棒内へ流入する水蒸気流量の低下にあると考えられる。破裂開口位置における LOCA 時の被覆管水素吸収の増大は、酸化による脆化と水素化による脆化の重畳を意味するため、LOCA 時の被覆管の安全評価において考慮すべき重要な事象であると考えられるが、その発生メカニズムから、ECR が非常に高い場合を除いて破裂開口位置における水素吸収量は限定的であると考えられる。高燃焼度燃料被覆管に対する急冷破断試験において破裂開口位置における水素吸収の増大が観察された試験のうち、急冷時に破断したのは酸化量 38% ECR、破裂開口位置における水素吸収量約 730 wtpm の高燃焼度 MDA 被覆管のみである。酸化量 38% ECR における破断は非照射 Zry-4 被覆管の急冷破断限界⁽³⁰⁾と整合するものであり、この結果をもって、破裂開口位置における水素吸収の増大が起因となって LOCA 時の燃料被覆管の急冷破断限界が低下するとは言えない。このようにこれまでに得られたデータからは微小な破裂開口に起因すると考えられる破裂開口位置における水素吸収量の増大が LOCA 時の燃料被覆管の急冷破断限界を低下させる可能性は低いと考えられるものの、非照射 Zry-4 被覆管の急冷破断限界を下回る酸化量における燃料被覆管の破断/非破断に関するデータを蓄積し、知見を拡充することが重要である。

以上から、LOCA 時の燃料被覆管の水素吸収挙動に関して、水素吸収の軸方向プロファイルは被覆管の破裂開口サイズの影響を受けると考えられるものの、水素吸収量は最高 85 GWd/t までの燃焼の進展や合金組成の変更によって著しく増大することはないと考えられる。

(4) 高燃焼度改良型燃料被覆管の LOCA 時急冷破断条件

LOCA 時の炉心の冷却可能形状を維持することを目的に、ECCS 性能評価指針において燃料被覆管温度と酸化割合の上限（1200°C、15%ECR（等価被覆酸化量））が基準として定められている。これらの基準は主として未照射の従来型ジルカロイ被覆管に対する急冷破断試験に依拠して定められたものであるため、燃焼の進展に伴うジルコニウム合金被覆管の腐食量及び水素吸収量の増大や、被覆管の合金組成の変更が急冷破断限界に及ぼす影響を評価することが重要である。以下に、本事業において実施した急冷破断試験から得た高燃焼度改良型燃料被覆管の LOCA 時急冷破断限界に関する知見をまとめる。

本事業では、平成 23–27 年度にかけて、73–85 GWd/t まで照射された高燃焼度改良型燃料被覆管である M-MDA、M5、低スズ ZIRLO、及び Zry-2 (LK3) に対して急冷破断試験を実施し、これら被覆管の急冷破断限界を評価した。急冷破断試験には、燃料ペレットを取り除いた 190 mm の長さの被覆管にアルミナペレットを装填した後、室温にて 5 MPa のアルゴンガスを封入した試験燃料棒を用いた。この試験燃料棒を水蒸気中において赤外線イメージ炉を用いて加熱し、1473 K で所定の時間、等温酸化させた後に徐冷し、被覆管温度が 973 K に達した時点で下端から冠水させ急冷した。急冷開始温度と急冷開始温度までの冷却速度の双方が水素添加 Zry-4 被覆管の脆化に影響するとの知見がある^(32, 33)。本研究では 1473 K から 973 K までの間の冷却速度は 6–9 K/s であり、被覆管の脆化の観点で保守側の条件となっている。急冷水の水面上昇速度は約 30 mm/s であり、急冷速度は 80–240 K/s であったことから、973 K に達した時点で試験燃料棒は瞬時に冷却されたと言える。目標とした Baker–Just 酸化速度式⁽²⁾から求められる酸化量は約 20–30% である。実機の燃料集合体では燃料棒の軸方向収縮が拘束されると想定されるため、急冷時には試験燃料棒の熱収縮を拘束し、540 N を上限とした軸方向拘束力が試験燃料棒に荷重される条件とした。

表 4.5-7 並びに図 4.5-9 及び 4.5-10 に高燃焼度改良型燃料被覆管の急冷破断試験結果を示す。同図には平成 18 及び 19 年度に本事業において取得した高燃焼度燃料被覆管に対する急冷破断試験結果を併せて示す^(3,4)。図 4.5-10 の縦軸は LOCA 模擬条件での ECR であり、横軸は等温酸化温度である。図 4.5-10 の縦軸は同じく LOCA 模擬条件での ECR であり、横軸は初期水素濃度である。ここで、初期水素濃度とは急冷破断試験前の被覆管の水素濃度であり、高燃焼度燃料被覆管の場合には通常運転中に被覆管に吸収された水素濃度を表す。図 4.5-9 及び 4.5-10 に記載の ECR は通常運転中に被覆管外表面に形成された腐食酸化膜及び急冷破断試験時の膨れによる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被覆管表面の平均温度と等温酸化時間から、被覆管内外面の両面酸化を仮定し Baker–Just 酸化速度式⁽²⁾を用いて算出した。LZRT3 及び LZRT4 は破裂開口近傍以外の被覆管内面に酸化膜が形成されていなかったことから、これらの被覆管の酸化量として、被覆管の内外面の両面酸化を仮定して算出した ECR と被覆管外面のみの片面酸化を仮定し算出した ECR の双方の値を表示している。両図から分かるよう

に、高燃焼度改良型燃料被覆管は規制基準値（15%ECR）を超える酸化量を含む約 10–30%ECR の酸化量を与えても、約 520–530 N の拘束力条件下で破断することはなかった。

図 4.5-10 には未照射 Zry-4 被覆管の急冷破断限界の文献値⁽³⁰⁾を併せて示している。この急冷破断限界の文献値は、本事業で実施した急冷破断試験と同等の条件で実施した急冷破断試験により取得されたものである。同図から、未照射 Zry-4 の急冷破断限界に近い酸化条件においても本事業で試験した高燃焼度改良型燃料被覆管は破断しないことが分かる。

以上から、LOCA 時の燃料被覆管の急冷破断限界は、通常運転中に被覆管に吸収される水素の濃度の増大に伴い若干低下する傾向があるものの、最高 85 GWd/t 程度までの燃焼の進展や合金成分の変更によって著しく低下することはないと考えられる。

(5) 高燃焼度改良型燃料被覆管の LOCA 後の機械強度

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。これまで、LOCA 時及び LOCA 後の燃料被覆管の延性及び強度を評価するために様々な機械試験が実施されてきた。しかしながら、これらの機械試験の大部分は破裂していない被覆管試料に対する試験であり、これらの試験結果のみから、LOCA 時に発生し得る膨れ及び破裂開口、この破裂開口から燃料棒内に侵入した水蒸気による内面酸化及び二次水素化、等を有する燃料被覆管について地震等の外力作用時の機械強度を評価することは困難である。このような軸方向に異なる形状及び材料特性の分布を有する燃料被覆管の機械強度を評価する手法として 4 点曲げ試験がある。4 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。この特長に着目して、原子力機構では 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未照射の Zry-4 及び Zry-2 被覆管を対象とした 4 点曲げ試験を実施し、それらの機械強度に係るデータを取得してきた⁽³⁴⁾。しかしながら、LOCA 後の燃料被覆管の機械強度について、燃焼の進展や合金組成の変更が及ぼす影響に関する十分な知見が得られていない。以下に、本事業において実施した 4 点曲げ試験から得た高燃焼度改良型燃料被覆管の LOCA 後の機械強度に関する知見をまとめる。

本事業では、平成 27 及び 28 年度にかけて、急冷破断試験に供した高燃焼度改良型燃料被覆管である M5、低スズ ZIRLO、及び Zry-2 (LK3) に対して室温大気雰囲気条件での 4 点曲げ試験を実施した。

図 4.5-11 に最大曲げモーメントと ECR の関係を示す。同図には比較のため、約 410 K の温度条件で実施した未照射の Zry-4 及び Zry-2 被覆管に対する 4 点曲げ試験の文献値⁽³⁴⁾を併せて示す。ここで、最大曲げモーメント (M) は(2)式により定義される。

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

ここで、 P は荷重の最大値、 a は荷重点-支持点間距離を表す。ECRは通常運転中に被覆管外表面に形成された腐食酸化膜及び急冷破断試験時の膨れによる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被覆管表面の平均温度と等温酸化時間から、被覆管内外面の両面酸化を仮定し Baker-Just 酸化速度式^②を用いて算出した。LMFI3と未照射 Zry-4 被覆管、及び LZRT4と未照射 Zry-2 被覆管の内外径がそれぞれ異なることから、同図において LMFI3 及び LZRT4 の最大曲げモーメントには、それぞれ未照射 Zry-4 被覆管及び未照射 Zry-2 被覆管に対する断面係数の比で除した補正值を採用した。同図から、高燃焼度改良型燃料被覆管の最大曲げモーメントは未照射 Zry-4 被覆管（受入材）及び未照射の Zry-2 被覆管（受入材）と比較してほぼ同等であることが分かる。以上から、LOCA 後の燃料被覆管の機械強度は通常運転中に被覆管に吸収される水素の濃度増大に伴い若干低下する傾向があるものの、最高 85 GWd/t 程度までの燃焼の進展や合金成分の変更によって著しく低下することはないと考えられる。

表 4.5-1 酸化速度評価試験に供した試験片

試験片番号	採取 セグメント 番号	試料燃焼度 (GWd/t)	被覆管材料	腐食酸化膜 厚さ(μm)	初期 水素濃度 (wtppm)
OZRT2-1-15	AP2-20	85	Zry-2 (LK3) with liner (70 μm)	38.9	488

表 4.5-2 Zry-2 (LK3) 被覆管試料 (OZRT2-1-15) に対する酸化速度評価試験条件

試験片番号	試料燃焼度 (GWd/t)	被覆管 材料	等温酸化条件		酸化量 ECR (%)*
			温度 (K)	時間 (s)	
OZRT2-1-5	85	Zry-2 (LK3) with liner (70 μm)	1473	120-900	13-36
OZRT2-6-10			1373	120-1800	8-29
OZRT2-11-15			1273	120-3600	4-22

*通常運転中に被覆管外表面に形成された腐食酸化膜を除く金属層厚さに対し、Baker-Just 酸化速度式⁽²⁾を用いて等温酸化温度と時間から、被覆管の内外面両面酸化を仮定し算出。

表 4.5-3 急冷破断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	試料燃焼度 (GWd/t)	被覆管 材料	腐食酸化膜 厚さ (μm)	初期 水素濃度 (wtppm)
MMDA1	AP2-2	81	M-MDA (SR*)	27.0	249
MMDA2					227
LMFI3	AP2-10	84	M5	10.3	64
LMFI4					63
LZIR4	AP2-8	80	低スズ ZIRLO	17.9	144
LZIR5					123
LZRT3	AP2-20	85	Zry-2 (LK3) with liner (70 μm)	38.9	492
LZRT4	AP2-21	73		34.6	395

*応力除去焼鈍

表 4.5-4 酸化速度評価試験に供した試験片

試験片番号	採取 セグメント 番号	試料燃焼度 (GWd/t)	被覆管材料	腐食酸化膜 厚さ (μm)	初期 水素濃度 (wtppm)
OMMDA-1-4	AP2-2	81	M-MDA (SR*)	27.0	253
OMMDA-6-13	AP2-3			27.6	292
OMFI2-1-4	AP2-10	84	M5	10.3	65
OMFI2-6-15	AP2-11			NA	94
OZIR2-1, -3-5	AP2-8	80	低スズ ZIRLO	17.9	99
OZIR2-6-15	AP2-9			27.5	260
OZRT2-1-15	AP2-20	85	Zry-2 (LK3) with liner (70 μm)	38.9	488

*応力除去焼鈍

表 4.5-5 酸化速度評価試験条件

試験片番号	等温酸化条件	
	温度 (K)	時間 (s)
OMMDA-1-4	1473	120-900
OMMDA-6-9	1323	120-1800
OMMDA-10-13	1173	120-4000
OMFI2-1-4	1473	120-900
OMFI2-6-10	1373	120-1800
OMFI2-11-15	1273	120-3600
OZIR2-1, -3-5	1473	120-900
OZIR2-6-8, -14	1373	300-1800
OZIR2-10-13, -15	1273	120-3600
OZRT2-1-4	1473	120-900
OZRT2-6-10	1373	120-1800
OZRT2-11-15	1273	120-3600

表 4.5-6 高燃焼度改良型燃料被覆管の酸化速度定数のまとめ

試験片番号	採取セグメント 番号	セグメント 平均燃焼度 (GWd/t)	被覆管材料	腐食酸化膜 厚さ (μm)	初期水素 濃度 (wtppm)	酸化速度定数 ($\text{g m}^{-4} \text{s}^{-1}$)						
						1173 K	1273 K	1323 K	1373 K	1473 K		
OMMDA1-4	AP2-2	81	M-MDA (SR) ^{*1}	27.0	253	-	-	-	-	33.564		
OMMDA6-9	AP2-3			27.6	292	-	-	5.239	-	-		
OMMDA10-13						0.397 ^{*2}	-	-	-	-	-	
OMFI2-1-4	AP2-10	84	M5	10.3	65	-	-	-	-	37.271		
OMFI2-6-10	AP2-11			NA	94	-	-	-	10.198	-		
OMFI2-11-15						-	-	1.350 ^{*2}	-	-	-	
OZIR2-1, -3-5	AP2-8	80	低スズZIRLO	17.9	99	-	-	-	-	38.546		
OZIR2-6-8, -14	AP2-9			27.5	260	-	-	-	11.795	-		
OZIR2-10-13, -15						-	-	2.479 ^{*2}	-	-	-	
OZRT2-1-4	AP2-20	85	Zry-2 (LK3) with liner (70 μm)	38.9	488	-	-	-	-	34.661		
OZRT2-6-10						-	-	-	-	7.305 ^{*2}	-	-
OZRT2-11-15						-	-	1.429 ^{*2}	-	-	-	-

*1 応力除去焼鈍

*2 二乗則に従うとみなせ900 s以下の時間範囲について求めた値。

表 4.5-7 高燃焼度改良型燃料被覆管に対する急冷破断試験結果のまとめ

試験実施年度	H23		H24	H25		H26		H27	
	MMDA1	MMDA2	LMFI3	LMFI4	LZIR4	LZIR5	LZRT3	LZRT4	
試験燃料棒番号 被覆管材料	M-MDA (SR ^{*2})		M5		低スズZIRLO		Zircaloy-2 (LK3)		
セグメント平均燃焼度 (GWd/t)	81		84		80		73		
腐食酸化膜厚さ (μm)	27.0		10.3		17.9		34.6		
初期水素濃度 (wtppm)	249	227	64	63	144	123	492	395	
破裂温度 (K)	1041	1025	1047	1042	987	987	987	1015	
膨れ率 (%)	26.0	34.4	27.2	23.0	39.7	42.7	13.8	12.1	
等温酸化温度 (K)	1505	1475	1474	1473	1474	1475	1472	1474	
酸化時間 (s)	112	125	187	384	119	111	202	203	
酸化量 (ECR, %) ^{*1}	21.6	20.8	21.5	29.6	21.0	20.8	20.0	19.8	
急冷時軸方向荷重 (N)	80	528	521	519	529	526	525	521	
破断F / 非破断NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	

*1 通常運転中に被覆管外表面に形成された腐食酸化膜及び急冷破断試験時の膨れによる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被覆管表面の平均温度と等温酸化時間から、被覆管内外面の両面酸化を仮定し Baker-Just 酸化速度式^②を用いて算出した酸化量

*2 応力除去焼鈍

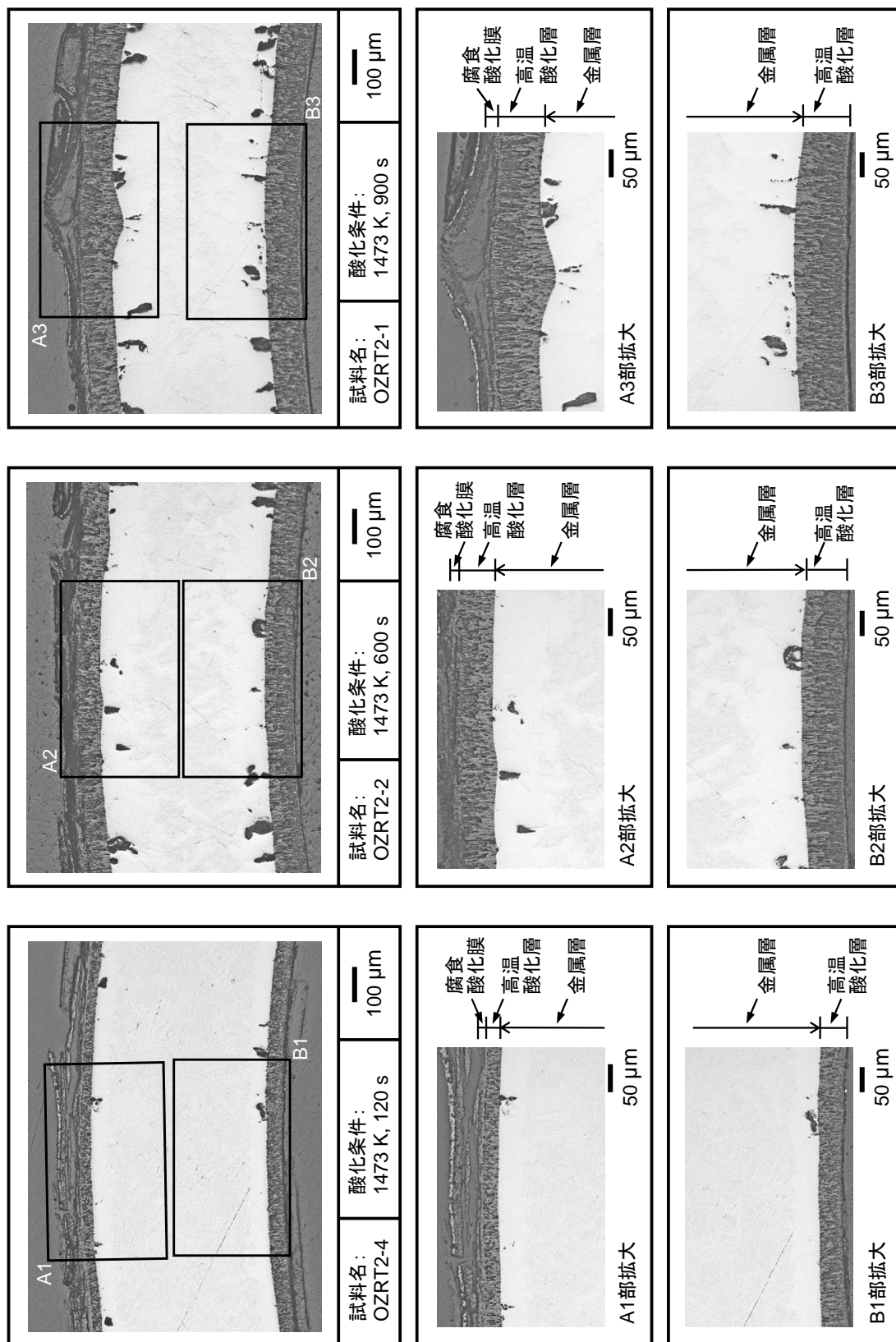


図 4.5-1 (1) 高燃焼度 Zry-2 被覆管の酸化速度評価試験後の試料断面（酸化温度：1473 K、腐食前）

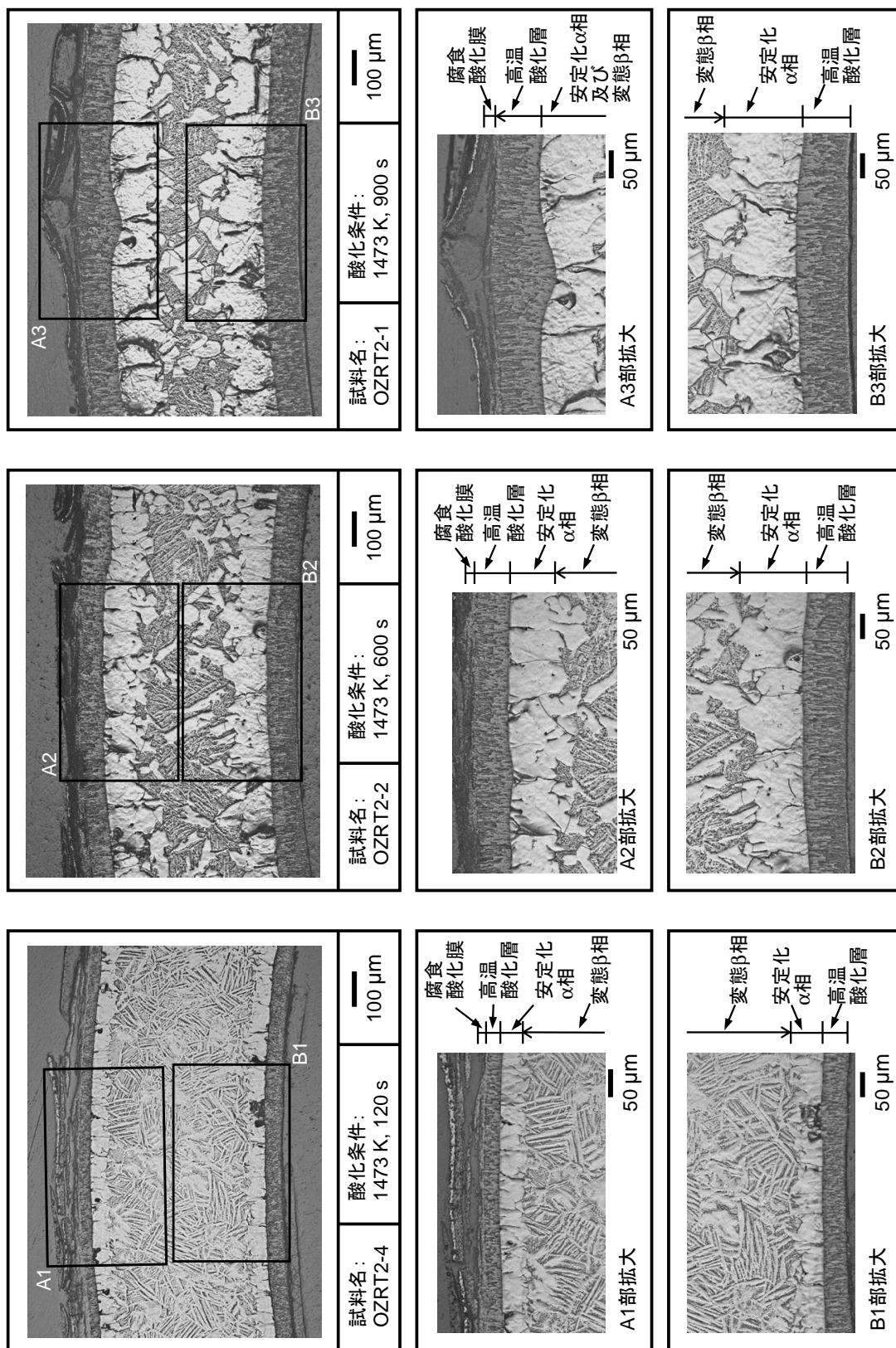


図 4.5-1 (2) 高燃焼度 Zry-2 被覆管の酸化速度評価試験後の試料断面 (酸化温度: 1473 K、腐食後)

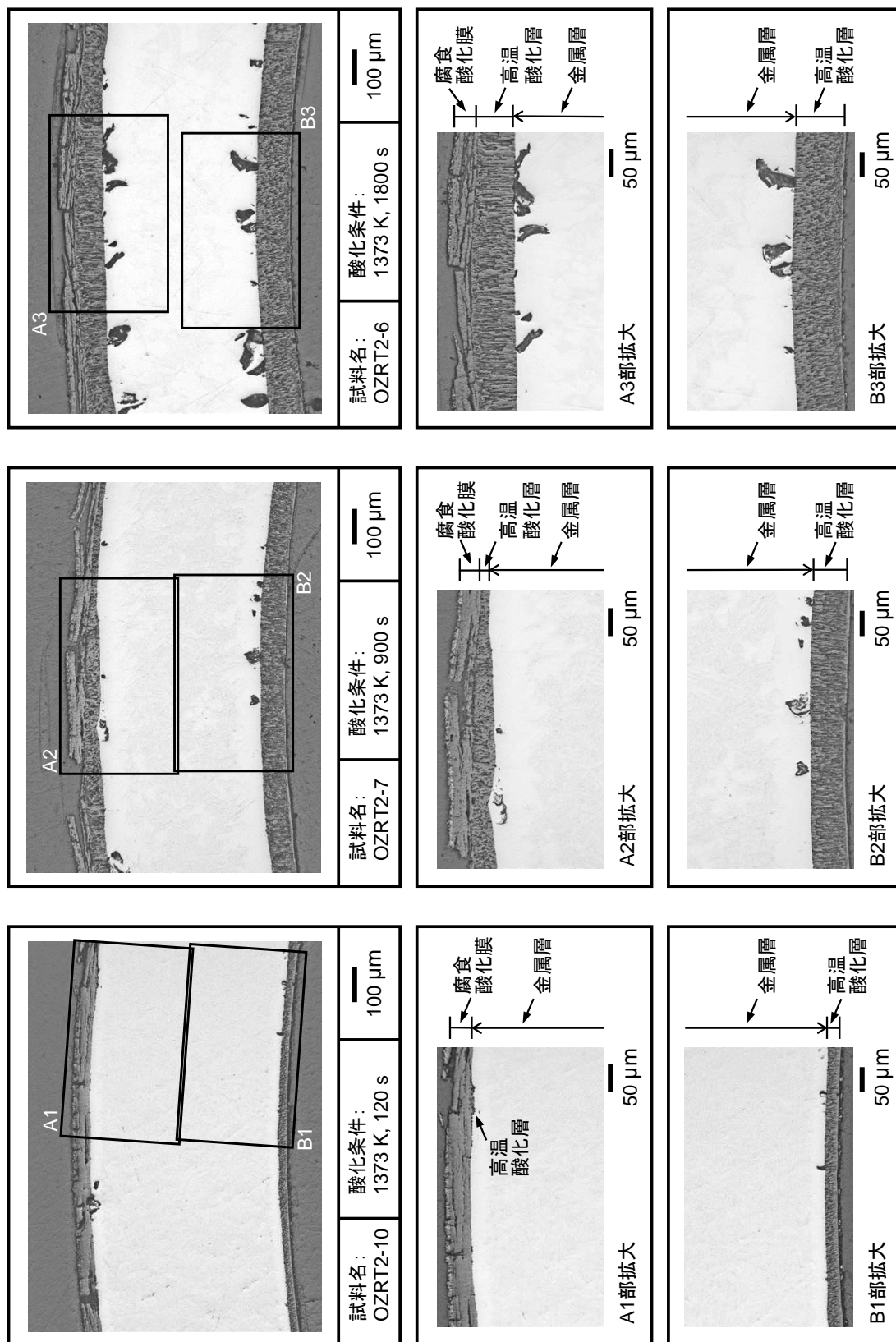


図 4.5-1 (3) 高燃焼度 Zry-2 被覆管の酸化速度評価試験後の試料断面 (酸化温度: 1373 K、腐食前)

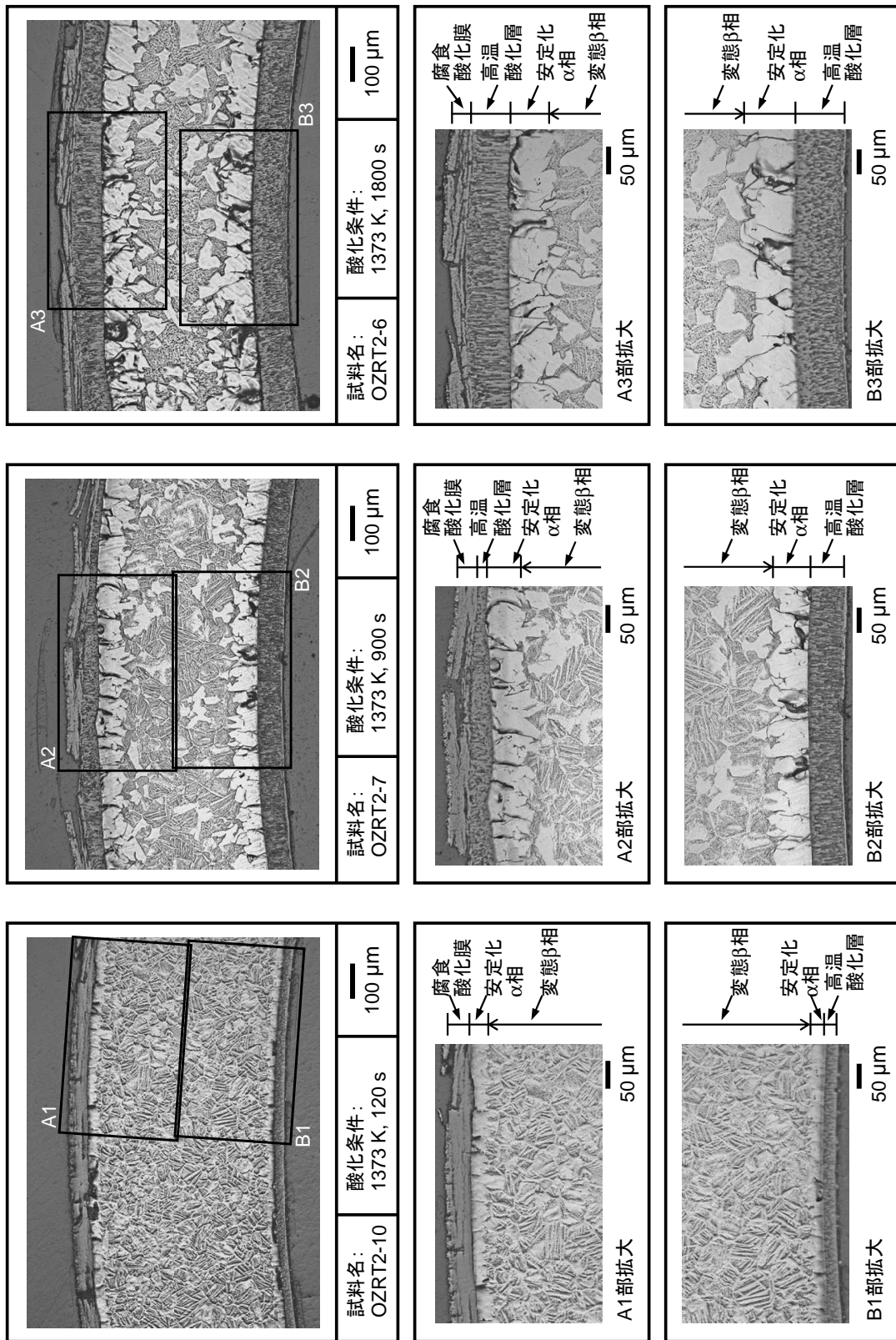


図 4.5-1 (4) 高燃焼度 Zry-2 被覆管の酸化速度評価試験後の試料断面 (酸化温度: 1373 K、腐食後)

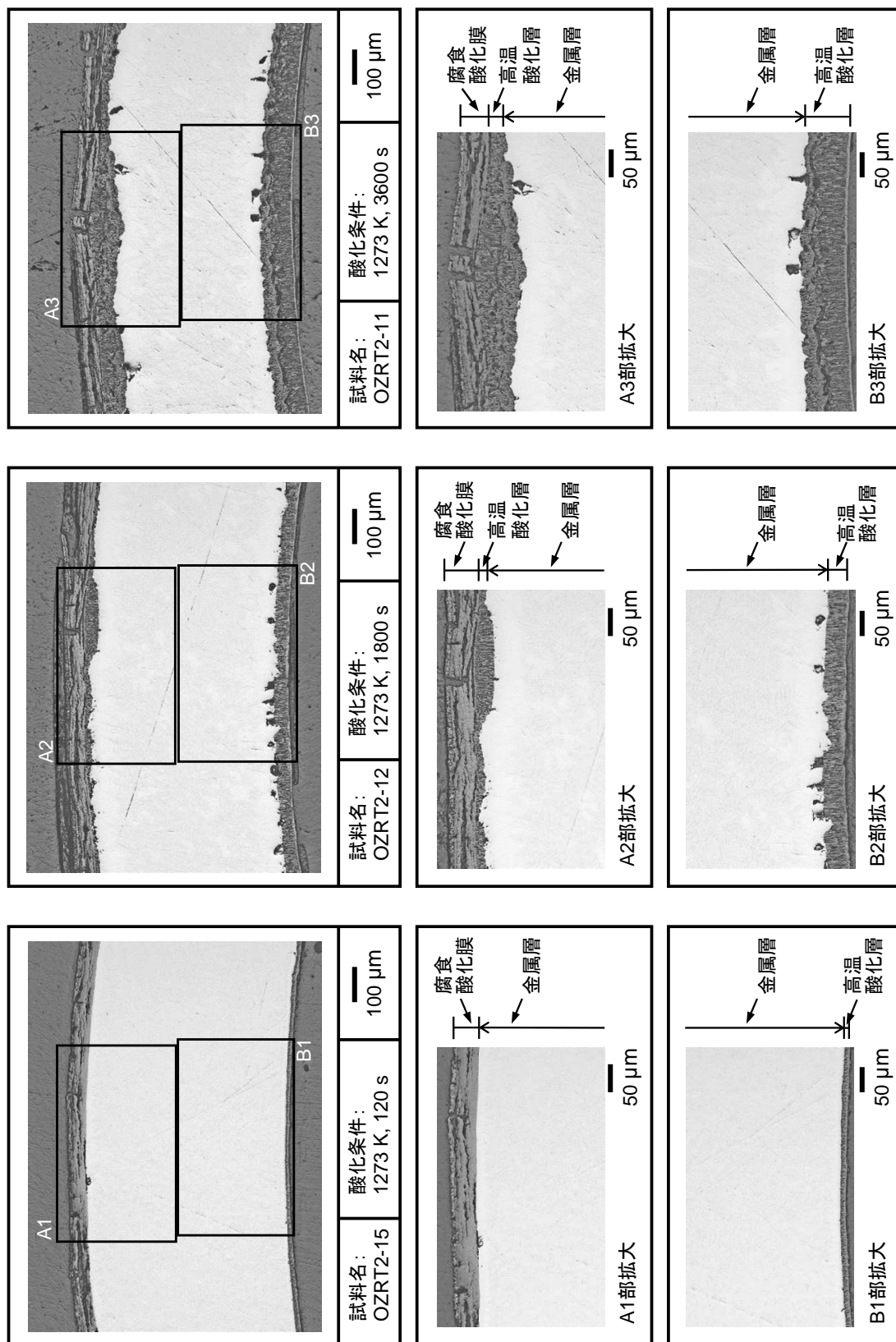


図 4.5-1 (5) 高燃焼度 Zry-2 被覆管の酸化速度評価試験後の試料断面 (酸化温度：1273 K、腐食前)

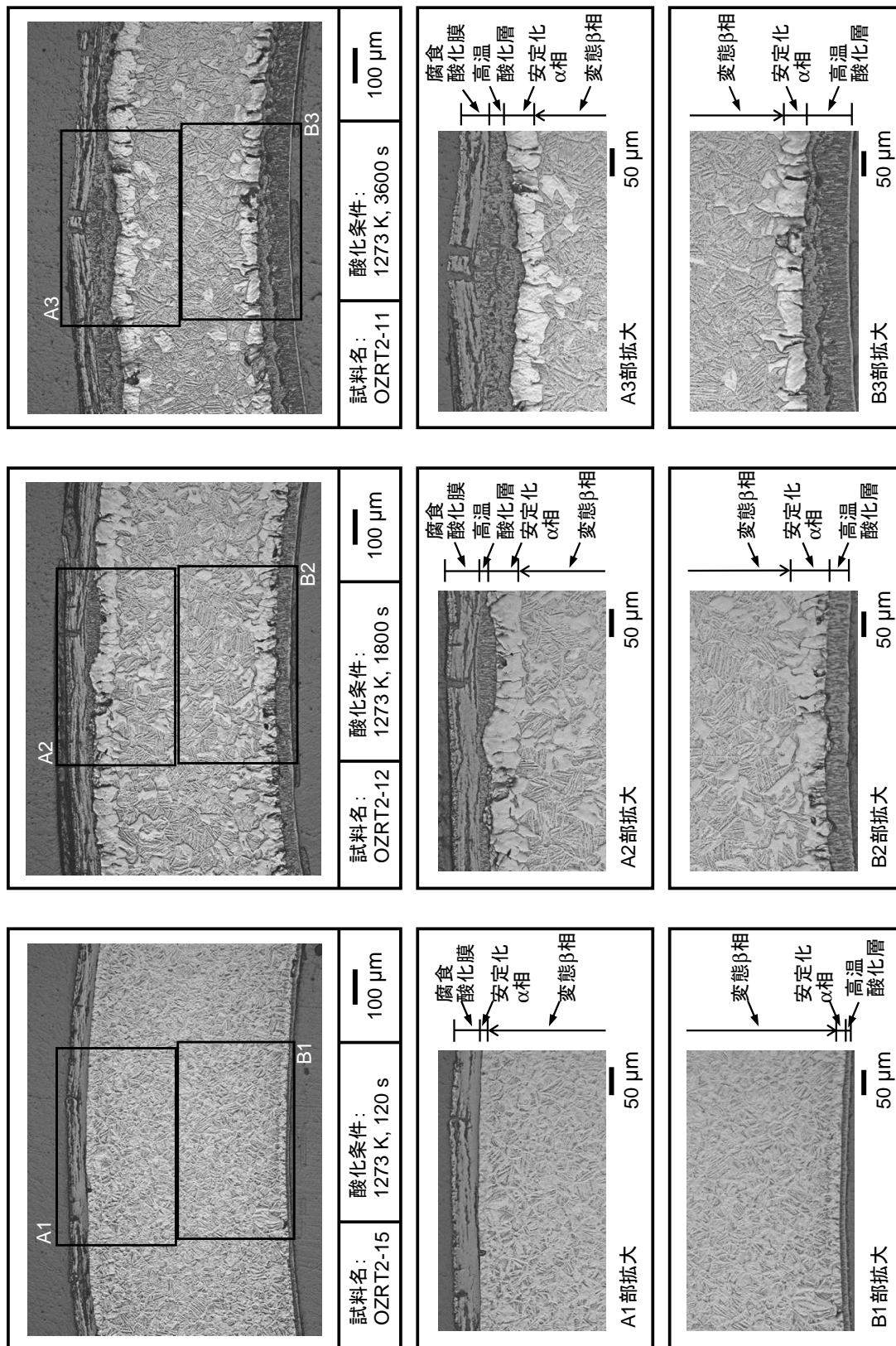


図 4.5-1 (6) 高燃焼度 Zry-2 被覆管の酸化速度評価試験後の試料断面 (酸化温度: 1273 K、腐食後)

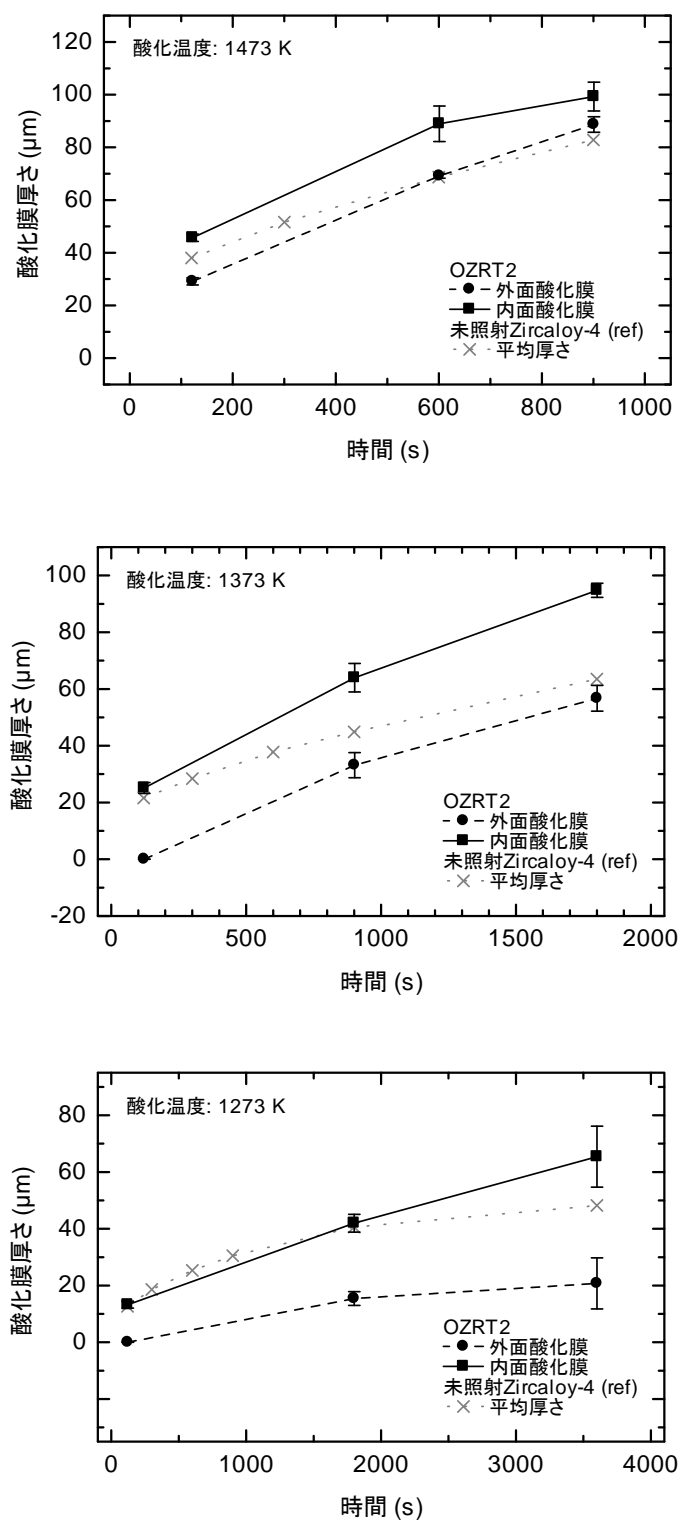


図 4.5-2 高燃焼度 Zry-2 の高温酸化層厚さと酸化時間の関係

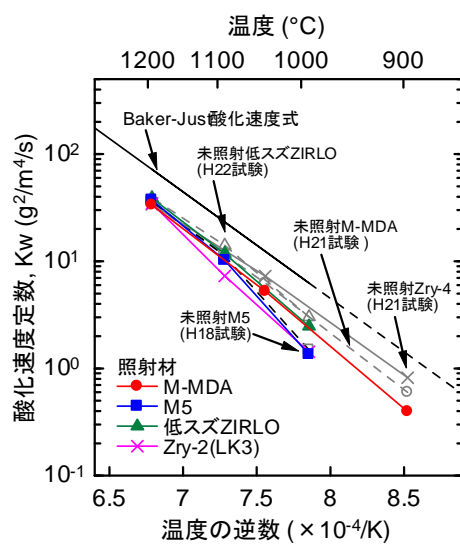


図 4.5-3 未照射及び高燃焼度改良型燃料被覆管について取得した酸化速度定数の温度依存性

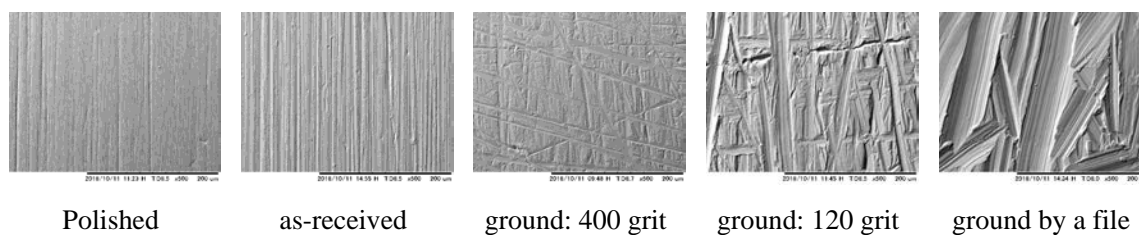


図 4.5-4 表面処理後の外表面 SEM 観察結果

Fig. 4.5-4. SEM images of specimen outer surfaces after polishing and grinding. The scales show 200 μm .

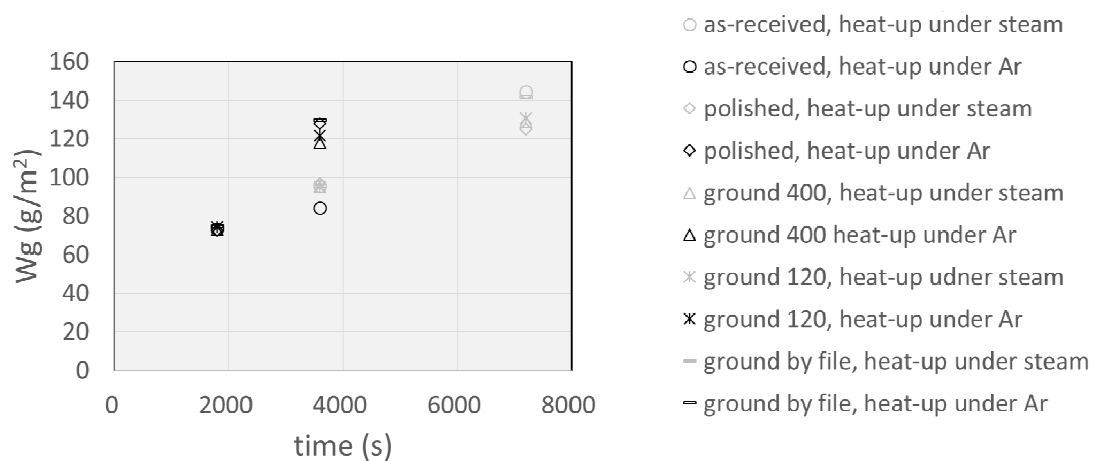


図 4.5-5 試料長さ 15mm を用いた赤外線炉の結果。重量増加と酸化時間の関係

Fig. 4.5-5 Results of the infrared furnace (15 mm long segments): weight gain plotted against the exposure time.

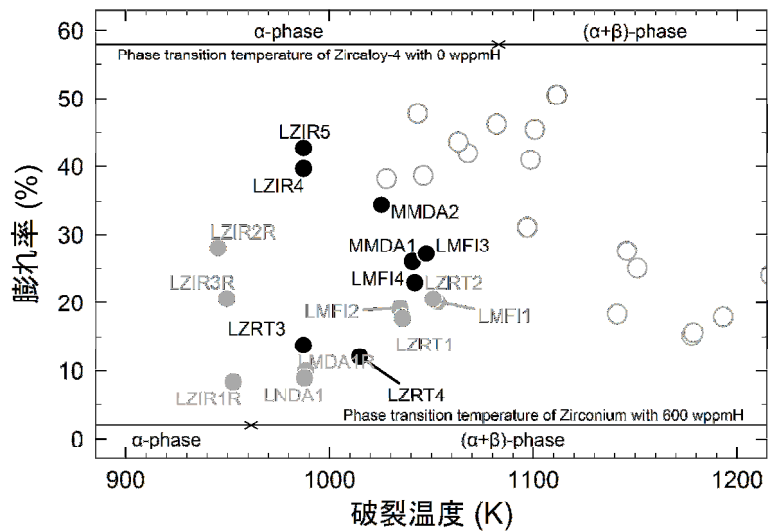


図 4.5-6 高燃焼度改良型燃料被覆管について取得した
膨れ率と破裂温度の関係

(● : 高燃焼度改良型燃料被覆管、● : 高燃焼度燃料被覆管^(3,4)、
○ : 未照射 Zry-4 被覆管の文献値⁽²²⁾)

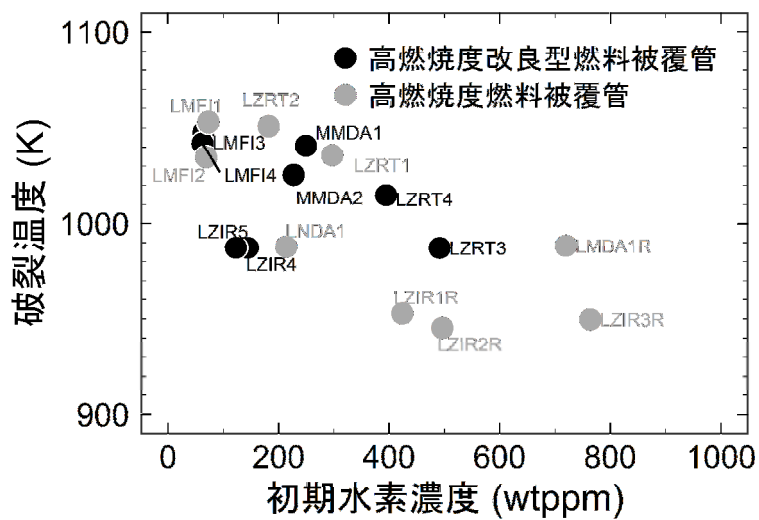


図 4.5-7 高燃焼度改良型燃料被覆管について取得した
破裂温度と初期水素濃度の関係

(● : 高燃焼度改良型燃料被覆管、● : 高燃焼度燃料被覆管^(3,4))

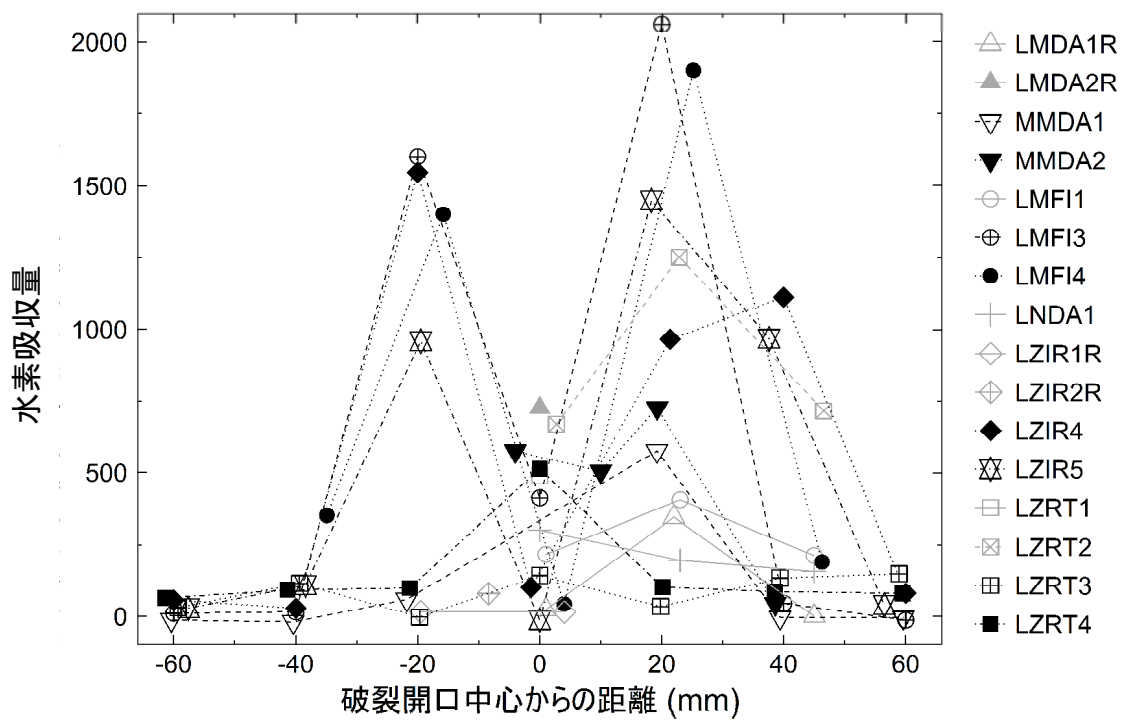
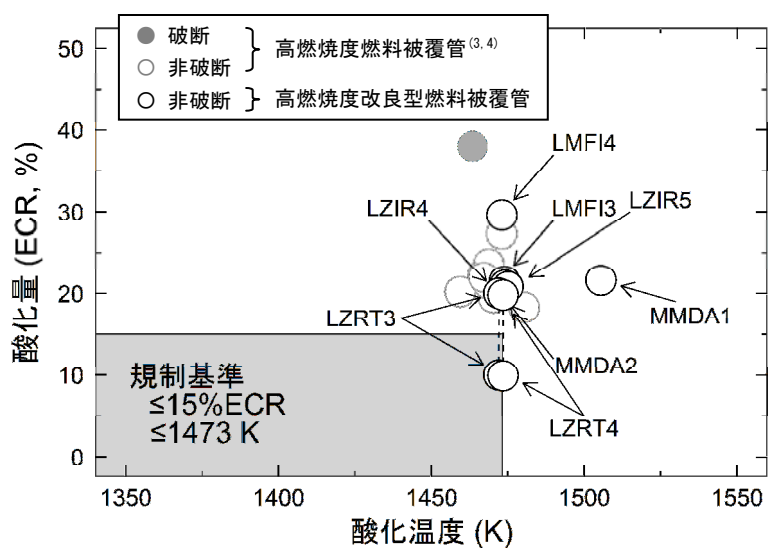
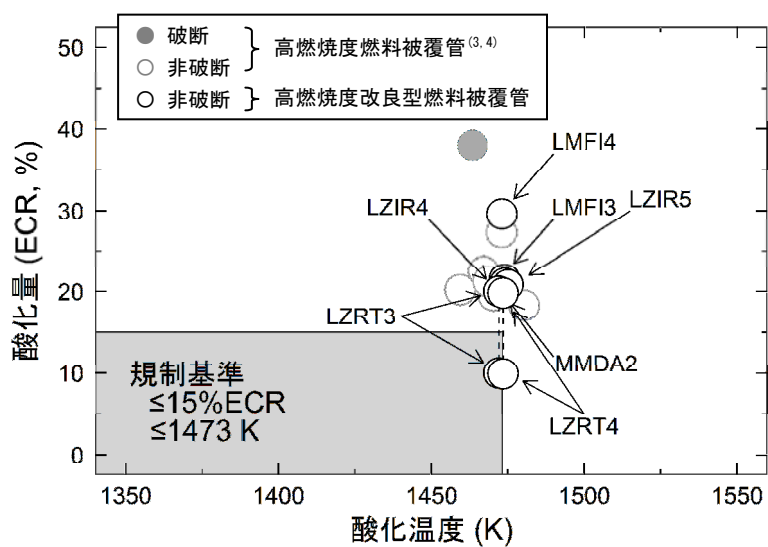


図 4.5-8 急冷破断試験中に試料に吸収された水素濃度の軸方向分布
 (黒のプロットは本事業で取得した高燃焼度改良型燃料被覆管、
 グレーのプロットは高燃焼度燃料被覆管^(3,4)。)



(a) 非拘束試験結果を含むプロット



(b) 拘束試験のみのプロット

図 4.5-9 LOCA 模擬条件での酸化量（膨れによる肉厚減少を考慮）と酸化温度に関する破断マップ

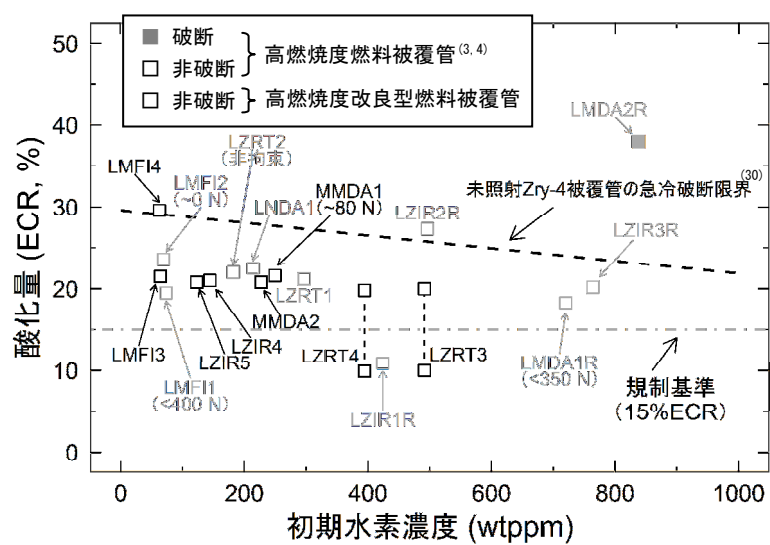
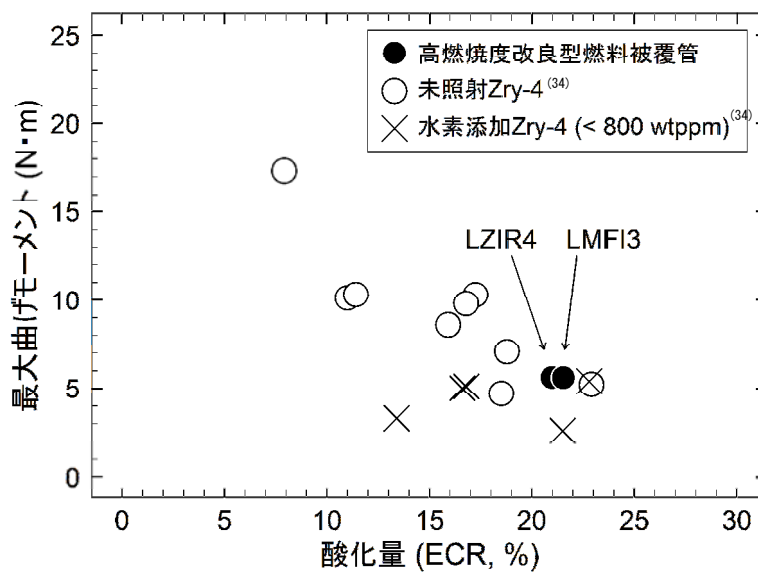
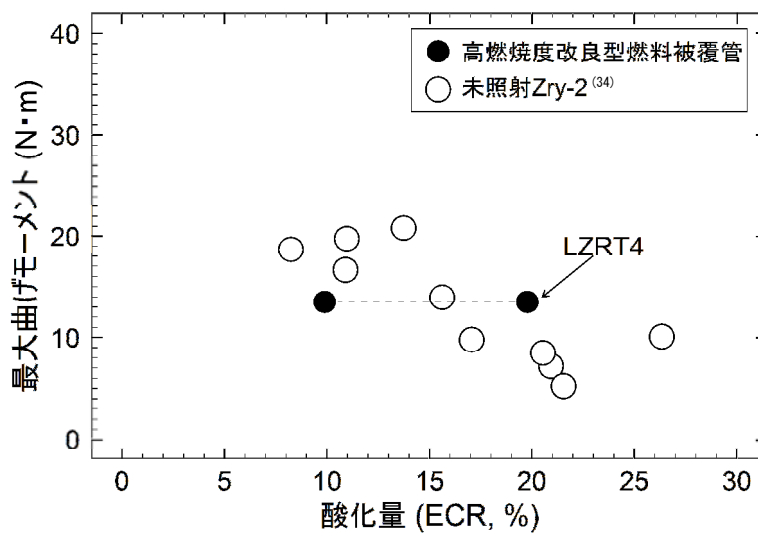


図 4.5-10 LOCA 模擬条件での酸化量（膨れによる肉厚減少を考慮）と初期水素濃度に関する破断マップ

（図中数値は軸方向拘束力の上限值。数値の記載がないものは 520–530 N。）



(a) PWR 被覆管



(b) BWR 被覆管

図 4.5-11 高燃焼度改良型燃料被覆管の最大曲げモーメントと酸化量の関係
(等温酸化温度: ~1473 K)

4.6 改良型燃料被覆管の照射成長試験

4.6.1 改良型燃料被覆管の照射成長試験の概要

民間事業者は、既存の発電用軽水炉のさらなる有効活用と安全性向上等のため、軽水炉燃料被覆管の組成を従来の材料から変更することで外表面腐食量や水素吸収量の抑制を図った改良型燃料被覆管合金の開発を進めてきている。この改良合金を使用した燃料集合体が特に国内の PWR において近い将来導入されることが見込まれるが、改良型燃料の被覆管等の材料として今後導入が見込まれる改良合金は、従来使用されてきた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。そこで、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、ノルウェー・エネルギー技術研究所 (IFE) が保有する試験炉を用いた照射試験によってこれら改良合金の照射成長に関するデータを取得する。

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、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。

4.6.2 照射成長試験に供する材料の選定、照射条件及び試験片の配置

(1) 供試材の選定

(a) 材料

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、種々の改良型被覆管合金が開発されている。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、試験に供する。

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入手して試験に供し、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、試験に供する。

供試材の合金組成を表 4.6.2-1 にまとめる。

(b) 試験片の数、寸法等

得られる結果の再現性、寸法依存性を確認するため、同じ材料について複数の試験片を準

備し、本照射成長試験に供する。

従来の被覆管材料を用いた燃料棒の場合に燃焼度 60GWd/t 相当の高速中性子照射量における照射成長が 1%程度⁽¹⁾であること、ならびに試験炉施設での長さ測定精度が 1 μ m 程度であることから、照射成長量を有効数字 3 桁程度で測定するためには、100mm 程度の試験片長さが必要と考えられる。また、長さの異なる試験片を同じ条件で照射して、試験片の寸法が測定結果に及ぼす影響について把握する必要がある。加えて、本照射成長試験を実施するハルデン炉において、炉心軸方向中性子束分布がほぼフラットとなる領域の幅が 150mm 程度であることを考慮すると、50 および 100mm の 2 種類の長さを有する試験片を準備し、試験に用いるのが妥当と考えられる。

また、得られる結果の再現性を確認するため、一部の材料については同一条件で複数の試験片を照射することにする。

(2) 照射条件

PWR 冷却水条件を模擬した条件で本照射成長試験を実施する。冷却材温度は、PWR の冷却材平均温度及び出口温度に近い 300 及び 320 °C(573 及び 593K)、冷却材圧力は 155 bar (15.5MPa)を目標とする。さらに、ハルデン炉の冷却材温度 240 °C(513K)においても照射し、照射成長挙動と照射中の温度との関係を調べるとともに、被覆管の酸化が照射成長挙動に及ぼす影響についても把握する。なお、ハルデン炉の冷却材温度における被覆管材料の酸化はほぼ無視できる。

水化学条件については、ホウ素濃度、リチウム濃度、溶存酸素濃度及び溶存水素濃度に関して典型的な PWR 冷却水条件を模擬するようにし、照射成長試験中にはこれらの濃度が妥当な値に保持されていることを定期的にチェックする。

(3) 試験片の配置と製作

以上の検討に基づき、平成 22 年度に 2 種類の照射試験リグ(IFA-735 及び IFA-736)を設計製作した⁽²⁾。これらの照射試験リグには試験片装荷用のホルダが設けられており、ホルダ 1 箇所あたり内側と外側の 2 個の試験片を装荷できるようになっている。

IFA-735 は、炉心軸方向の 2 領域（上部及び下部）に長さ 50mm および 100mm の試験片をそれぞれ 14 個ずつ、計 28 個を装荷することができる。IFA-736 は、炉心軸方向の 3 領域（上部、中間及び下部）に長さ 50mm の試験片をそれぞれ 14 個ずつ、計 42 個を装荷することができる。また、PWR を模擬した冷却材温度および圧力下で試験片の照射を行うため、圧力フラスコ内にこれらの照射試験リグを装荷する。照射試験リグ IFA-735 および IFA-736 を装荷する圧力フラスコは、それぞれ FFA-030-S および FFA-031-S である。IFA-735 を装荷する FFA-030-S の外側には、ハルデン炉冷却材条件で試験片の照射を行うためのホルダが設けられており、長さ 100mm の試験片を 12 個装荷することができる。

試験片の形状と試験片装荷部の構造の例を図 4.6.2-1 に示す。また、各照射試験リグ内での

試験片の配置を表 4.6.2-2 に示す。

試験片の製作は平成 23 年度に実施した⁽³⁾。

4.6.3 試験片のハルデン炉照射及び冷却材ループ運転状況

(1) ハルデン炉運転中の計装データ等の取得及び管理

照射試験リグ IFA-735 及び IFA-736 の両方について、ハルデン炉運転中の計装データ等は、各照射サイクルの期間にわたって、5 秒間隔のオンライン測定及び 15 分間隔のオフライン測定で取得された。

リグ内を流れる冷却材の水化学条件については、ハルデン炉運転期間中、定期的(1～3 日おき)に測定した。分析元素はホウ素及びリチウムであり、冷却材の pH も測定した。

(2) 照射履歴

照射試験リグ IFA-735 及び IFA-736 とも、ハルデン炉の PWR 条件を模擬できる冷却材ループ(Loop 6)に接続され照射された。照射成長試験に関する試験条件の目標値は以下の通りであった。

照射試験リグ	冷却材入口目標温度	冷却材ループ圧力	冷却材流量
IFA-735	307±2 (°C) (580±2 (K))	162±2 (bar) (16.2±0.2 (MPa))	300±50 (l/min)
IFA-736	330±2 (°C) (603±2 (K))		

照射試験は平成 23 年度に開始され同年度中に第 1 照射サイクルを、平成 24 年度に第 2 及び第 3 照射サイクルを、平成 25 年度に第 4 及び第 5 照射サイクルを、平成 26 年度に第 6 及び第 7 照射サイクルを、平成 27 年度に第 8 及び第 9 照射サイクルを、平成 28 年度に第 10 照射サイクルを、平成 29 年度に第 11 及び第 12 照射サイクルを終了した⁽⁴⁾。なお、平成 30 年 6 月末に IFE がハルデン炉の閉鎖を正式に決定し以降の照射試験が実施できなくなったことから、本照射試験は第 12 照射サイクルが最後となった。

照射開始から第 12 照射サイクル終了までの原子炉運転状況及び Loop 6 の熱水力条件を図 4.6.3-1 及び 2 に示す。

両照射試験リグ内を流れる冷却材中ホウ素及びリチウム濃度並びに冷却材 pH に関し、照射期間中の平均値を以下に示す。溶存水素濃度については図 4.6.3-3 に示す。

- ・ホウ素濃度：約 1000 (ppm)
- ・リチウム濃度：約 4.6 (ppm)
- ・pH：約 7.3

(3) 計装の状態

照射試験リグ IFA-735 及び IFA-736 に係る計装は、第 12 照射サイクル終了までの期間中、全て健全に動作しており、照射初期に不安定な挙動を示している中性子検出器を除いて特に異常な様子は認められなかった。現時点では、周囲の照射孔に装荷された他の照射試験リグの中性子検出器出力を利用することで IFA-735 及び IFA-736 の中性子束の評価を行っている。

IFA-735 及び IFA-736 に設置された中性子検出器は熱中性子束測定用のバナジウム型であるため、本照射成長試験で重要なパラメータである高速中性子束の直接測定には適していない。高速中性子束については、バナジウム中性子検出器とこれらのリグ内に装荷されたフルエンスモニタ(コバルト-アルミニウム、ニッケル、鉄のワイヤの放射化分析を利用)から別途評価する予定である。

ハルデン炉の典型的な炉心軸方向中性子束分布に基づき、試験片装荷領域における中性子束分布を評価した。その結果を図 4.6.3-4 に示す。現時点で、試験片領域間の中性子束の差は、照射試験リグによらず 1%以内と評価された。

(4) 試験片装荷領域の温度並びに高速中性子束及び高速中性子フラックスの評価

(a) 試験片装荷領域の温度評価

照射試験リグ IFA-735 及び IFA-736 の試験片装荷領域における温度の評価値(TS)を求めするため、冷却材の照射試験リグ入口(TIA)及び出口(TOA)における平均温度、照射試験リグ内を下降上昇する冷却材間の熱伝達、照射試験リグ内冷却材と原子炉減速材間の熱伝達及び炉内ガンマ発熱を考慮したモデルを構築し、収束計算を行った。その計算結果を定式化することで次式を得た。

$$TS = (2 \times TIA + TOA) / 3 + 1.3 \quad (1)$$

この式により評価された試験片装荷領域における温度は、第 11 及び第 12 照射サイクルにおいて、IFA-735 の場合 298～301℃、IFA-736 の場合 317～320℃であった。なお、モデル計算の結果によれば、 TS が高くなるほど試験片装荷領域での温度分布が大きくなる傾向が見られたが、その最高と最低の差は、 TS が 320℃付近の場合でも 1℃以下と評価されている。照射開始から第 12 照射サイクル終了までの評価温度(TS)の履歴を図 4.6.3-5 に示す。

IFA-735 の装荷された圧力フラスコ(FFA-030-S)の外表面に装荷された試験片については、ハルデン炉内を流れる冷却材(重水)に接していることからその照射中の温度はハルデン炉内の冷却材温度と同等と考えられる。これらの試験片の温度履歴を図 4.6.3-5 に合わせて示す。

(b) 高速中性子束及び高速中性子フルエンス

照射試験リグ IFA-735 及び IFA-736 の高速中性子束及び高速中性子フルエンスについては、各照射試験リグ内に装荷された中性子検出器の出力に基づき評価した。これらの中性子検出器はバナジウム型であり、その検出特性から高速中性子束を直接測定することができない。そこで、ハルデン炉で使用されている核計算コード(HELIOS)を利用し、以下のようなバナジウム型中性子検出器の出力と高速中性子束との関係式を求め、これを利用して照射試験リグ内の高速中性子束を評価した。

$$\Phi = FRND \cdot ND \quad (2)$$

ここで、*FRND* はブースター燃料の燃焼度に依存する係数である。ハルデン炉における過去の実績によれば、この方法による評価値には 10～20% の不確かさがあると考えられる。

照射開始から第 12 照射サイクル終了までの照射試験リグ IFA-735 及び IFA-736 の高速中性子束履歴を図 4.6.3-6 に、また高速中性子フルエンス履歴を図 4.6.3-7 に示す。これらの図から分かるように、両照射試験リグとも、第 12 照射サイクル終了時に達した高速中性子フルエンスは約 7.8×10^{21} (n/cm²) と評価される。但し、これは暫定値であり、今後フルエンスモニタを用いてこの評価値の妥当性を確認する予定である。

4.6.4 試験片に係るハルデン炉施設での最終検査

ハルデン炉には年 2 回の定期停止期間があり、この期間に照射試験リグを炉心から取出し、ハルデン炉施設にて試験片の中間検査を実施してきた。平成 30 年度は、IFA-735 に装荷された試験片を対象に最終検査を実施した。

最終検査項目は、試験片の外観観察、試験片長さ及び重量の測定であった。照射試験リグから取り出した試験片は、超音波洗浄後 100℃ で 1 時間乾燥させ、各検査に供した。

なお、外観観察と試験片重量測定は試験片に異常な腐食等が生じていないことを確認するため、また試験片長さ測定は照射成長量を評価するために実施した。

(1) 外観観察結果

図 4.6.4-1 に示す。いずれの試験片についても異常な腐食等は生じていなかった。

(2) 試験片長さ測定結果

表 4.6.4-1 に示す。ここで、試験片長さ測定の誤差(1 σ)は、測定機器の精度及び再現性から 2.8×10^{-3} (mm) と評価され、この値に基づくと、初期長さに対する試験片伸び量の比の評価誤差(1 σ)は、50 及び 100mm の試験片でそれぞれ 5.7×10^{-5} 及び 2.8×10^{-5} である。

第 12 照射サイクル終了時点での相対伸び量と高速中性子フルエンスとの関係を図 4.6.4-2 及び 3 に示す。

(3) 試験片重量測定結果

表 4.6.4-2 に示す。ここで、試験片重量測定の誤差(1σ)は、測定機器の精度及び再現性から $2.8 \times 10^{-2}(\text{mg})$ と評価された。

第 12 照射サイクル終了時点での試験片単位面積当たりの増量(mg/dm^2)と高速中性子フルエンスとの関係を図 4.6.4-4 及び-5 に示す。ここで、試験片の表面積は製作仕様値に基づいて評価した。また、試験片重量測定の誤差に基づき評価した、試験片の単位面積当たりの増量の評価誤差(1σ)は、50 及び 100mm の試験片でそれぞれ 0.54 及び 0.27(mg/dm^2)である。

理論密度の ZrO_2 が試験片表面に形成されると仮定した場合、照射温度 300°C の場合、ZIRLO(RX)及び M-MDA(RX)を除き、第 12 照射サイクル終了時点での酸化膜厚さは $4\mu\text{m}$ 程度と評価される。照射温度 300°C の ZIRLO(RX)及び M-MDA(RX)については、第 12 照射サイクル終了時点での酸化膜厚さは $8\sim 10\mu\text{m}$ と評価される。また、一部の水素吸収処理試験片については、水素を吸収させていない場合よりも酸化に伴う重量増加が小さい傾向が認められる。アーカイブ材の断面金相観察の結果、水素吸収処理試験片には照射試験開始前から既に薄い酸化膜が存在していたことから、この酸化膜の存在によって照射試験中の試験片の酸化が抑制されたと考えられる。

4.6.5 試験片に係る照射後試験

照射リグ IFA-735 及び-736 に装荷された一部の試験片をノルウェー・エネルギー技術研究所のホットラボ施設に輸送し、破壊試験に供した。破壊試験の項目として、試験片の金相観察、機械特性試験、等を実施した。

破壊試験に供した試験片の一覧を表 4.6.5-1 に示す。ホットラボ施設に輸送された試験片を各試験に適した形状に切断し試料とし、必要に応じて試料を樹脂に包埋し試験に供した。さらに、必要に応じて、照射試験用試験片のアーカイブ材（以下アーカイブ試料）についても同様の試験を実施した。

(1) 断面金相観察

樹脂に包埋した試料を研磨し、照射試験後試験片の内外表面及び端部の金相観察を行った。光学顕微鏡で撮影された写真から各面の酸化膜厚さを測定するとともに、必要なエッチング処理を行った後、光学顕微鏡及び走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて試験片金属部に析出した水素化物の様子を調べた。

照射試験後及びアーカイブ材の試験片金相観察結果の一例を図 4.6.5-1 に示す。また、酸化膜厚さ測定結果を表 4.6.5-2 に示す。照射試験後試験片については、酸化膜厚さの測定値と腐食量及び ZrO_2 の理論密度から評価した値との間に良い一致が見られた。また、アーカイブ材の試験片のうち、試験片番号 6、10、12 及び 13 の表面には酸化膜の形成が

見られた。これらの試験片はいずれも照射試験前に予め水素を吸収させた被覆管から調製したものであり、金相観察で見られた表面酸化膜は水素吸収処理を行った際に形成されたものと考えられる。

(2) 水素濃度分析

不活性ガス中加熱放出・熱伝導度法を用いて、照射試験後試験片及びアーカイブ試料中の水素濃度を測定した。

分析結果を表 4.6.5-3 に示す。照射試験後試験片の水素濃度はアーカイブ材のそれに比べ上昇している。これは、照射試験中に生じた腐食に伴い発生した水素が試験片の金属部に吸収されたためと考えられる。また、従来材の Zry-4 に比べ、改良合金の水素濃度は低い傾向が認められる。

(3) ビッカース硬度測定

照射試験後試験片及びアーカイブ試料を対象として、その軸方向断面及び横断面の中心線に沿ってビッカース硬度測定を実施した。測定時の負荷荷重は 500 g であり、四角錐型圧子を用いた。

試料の軸方向及び水平方向断面について、各方向 3 回ずつ測定を実施した。測定精度は約±3% (1 σ)であった。

測定結果を表 4.6.5-4 に示す。照射試験後の試験片のビッカース硬度は、いずれも高速中性子照射によって上昇する傾向にあることが分かる。

(4) 引張試験

照射試験後試験片及びアーカイブ試料を対象として、引張試験を実施した。引張試験用試料は、長さ 100mm の試験片を対象として実施し、試験片から所定の長さ(約 32 mm)に切り出した後、NC 加工にて作製した。また、引張試験後には、1 試験片当たり 1 回の破面観察を SEM にて実施した。

測定結果を表 4.6.5-5 に示す。また、引張試験前後の試験片の外観及び破面観察結果を図 4.6.5-2 及び-3 に示す。引張試験で破断した試験片の強度については、高速中性子照射の影響で照射試験後に増加している。試験片の破断形態については、外観や破断面の様子から照射試験後試験片及びアーカイブ材ともに延性破断的であったが、破断までに生じる試験片のくびれは、アーカイブ材に比べ照射試験後の試験片の方が小さい傾向が認められた。また、一部の引張試験後試験片の破断面には、金属の延性を示すディンプルとともに、線状の凹凸が認められる。この線状の凹凸は、金属部に析出した水素化物に対応するものと考えられる。

4.6.6 改良型燃料被覆管の照射成長試験のまとめ

民間事業者は、既存の発電用軽水炉のさらなる有効活用と安全性向上等のため、軽水炉燃料被覆管の組成を従来の材料から変更することで外表面腐食量や水素吸収量の抑制を図った改良型燃料被覆管合金の開発を進めてきている。この改良合金を対象として、ノルウェー・エネルギー技術研究所が保有する試験用原子炉(ハルデン炉)を用いた照射成長試験を平成 23 年度より実施している。2つの照射試験リグ(IFA-735 及び-736)を用いて試験片を照射し、試験片に照射された高速中性子フルエンスは最終的に約 8×10^{21} (n/cm²)に到達した。

平成 30 年度には、照射リグ IFA-735 に装荷された試験片の最終検査をハルデン炉施設にて実施した。最終検査項目として外観観察、試験片の長さ測定及び重量測定を行った結果、長さの変化量(伸び量)及び重量増量は試験片の種類(被覆管の製造方法、合金組成、水素添加の有無、等)及び照射温度によって異なる傾向が確認された。また、一部の試験片をノルウェー・エネルギー技術研究所のホットラボ施設に輸送し、破壊試験に供した。破壊試験の項目として、被覆管金相観察、水素濃度分析、等を実施した。

表 4.6.2-1 改良型燃料被覆管の照射成長試験に供する材料の合金組成

合金名	組成 (wt%)						備考
	Nb	Sn	Fe	Cr	O	Zr	
M5	1.0	—	0.04	—	0.14	Bal.	
M-MDA	0.5	0.5	0.3	0.4	—		
Q12	1.0	0.5	0.1	—	0.14		
J-Alloy_J2	1.6	—	—	0.1	0.1		
J-Alloy_J3	2.5	—	—	—	0.1		
Opt-ZIRLO	1	0.67	0.1	—	—		
Zircaloy-4	—	1.20–1.70	0.18–0.24	0.07–0.13	0.09–0.13	Bal.	比較対照 材料
ZIRLO	0.9–1.13	0.90–1.2	0.1	—	0.09–0.15		
E110opt	1.0	—	0.04	—	—		
E635M	0.8	0.8	0.35	—	—		

表 4.6.2-2 照射試験リグ内での試験片の配置

(a) IFA-735

- ・目標温度 240°C(513K) : 圧力フラスコ FFA-030-S 上。ホルダ 1 箇所当たり試験片 1 個を装荷。

ホルダ位置	材質 ^a (長さ 10cm)	ホルダ位置	材質 ^a (長さ 10cm)
1	M5	7	M5
2	Zry-4(RX)	8	Zry-4(RX)
3	Zry-4(SR)	9	Zry-4(RX)+H*
4	M-MDA(SR)	10	M-MDA(RX)
5	J-Alloy_J2	11	Opt-ZIRLO(P-RX)
6	J-Alloy_J3	12	ZIRLO(RX)

- ・目標温度 300°C(573K)

ホルダ位置	材質 ^a			
	軸方向位置 1 (リグ下部、長さ 10cm)		軸方向位置 2 (リグ上部、長さ 5cm)	
	ホルダ内側	ホルダ外側	ホルダ内側	ホルダ外側
1	M5	M5	M - MDA(RX)	M5
2	Zry-4(RX)	Zry - 4(RX)	M - MDA(RX)+H*	M5+H*
3	J-Alloy_J3	Zry - 4(SR)	J - Alloy_J2	Zry - 4(RX)
4	ZIRLO(RX)	M - MDA(SR)	J - Alloy_J2(RX)+H*	Zry - 4(RX)+H*
5	Opt-ZIRLO(P-RX)	M - MDA(RX)	Zry-4(SR, High-Q)	Zry - 4(SR)
6	ZIRLO(SR)	J - Alloy_J2	Zry-4(RX, High-Q)	M - MDA(SR)
7	Zry-4(CW, High-Q)	Zry-4(CW)	Zry-4(RX, High-Q)+H*	M - MDA(SR)+H*

^a CW:冷間加工材、SR:応力除去焼鈍材、RX:再結晶焼鈍材、P-RX:部分的再結晶焼鈍材、H*:約 200ppm 水素吸収処理材、High-Q:高 Q 値^{*}材(Q=4)。

※ Q 値は、次式で定義される(t_0 : 管への加工前の肉厚、 t : 管への加工後の肉厚、 d_0 : 管への加工前の直径、 d : 管への加工後の直径)。

$$Q = \{(t_0 - t)/t_0\} / \{(d_0 - d)/d_0\}$$

(b) IFA-736

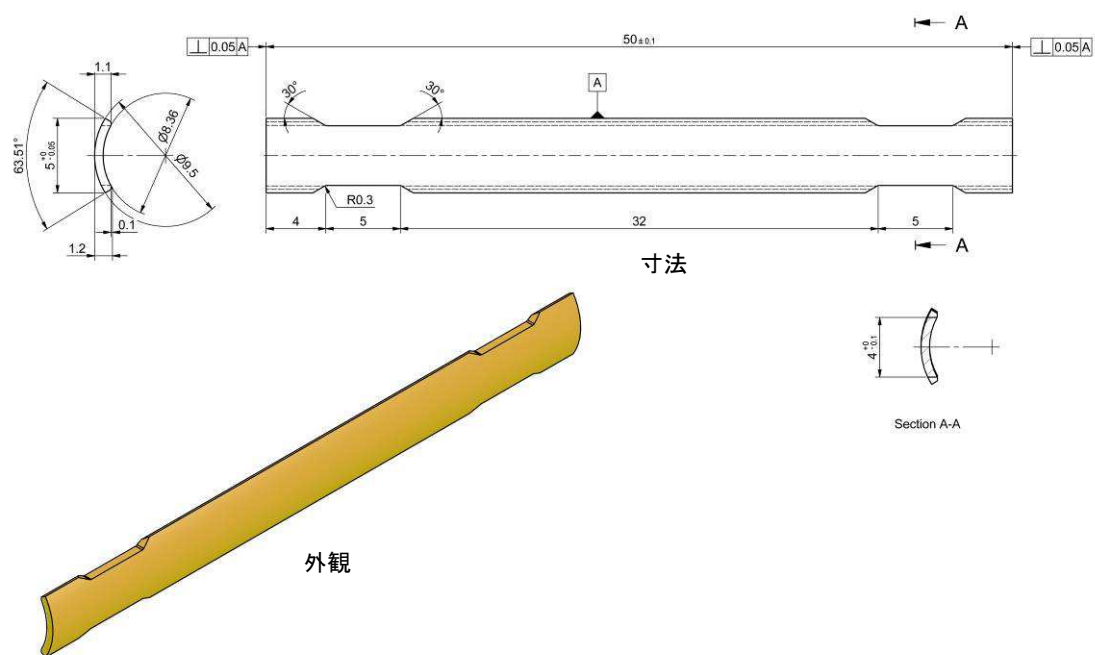
・目標温度 320°C(593K)

ホルダ 位置	軸方向位置 1(リグ下部、長さ 5cm)		軸方向位置 2(リグ中央部、長さ 5cm)		軸方向位置 3(リグ上部、長さ 5cm)	
	ホルダ内側	ホルダ外側	ホルダ内側	ホルダ外側	ホルダ内側	ホルダ外側
1	J-Alloy_J3	M5	Opt-ZIRLO(P-RX)	M5	M - MDA(RX)	M5
2	ZIRLO(RX)	M5	ZIRLO(SR)	M5	M-MDA(RX)+H*	M5+H*
3	E110-Opt	Zry-4(RX)	J-Alloy_J3	Zry-4(RX)	J - Alloy_J2	Zry - 4(RX)
4	Zry-4(CW)	Zry-4(SR)	ZIRLO(RX)	Zry-4(SR)	J - Alloy_J2+H*	Zry-4(RX)+H*
5	Zry-4(CW, High-Q)	J-Alloy_J2	E110-Opt	M-MDA(SR)	Q12	Zry - 4(RX)+H**
6	Zry-4(RX, High-Q)	Opt-ZIRLO(P-RX)	Q12	M-MDA(RX)	Q12+H*	M - MDA(SR)
7	Zry-4(RX, High-Q)+H**	ZIRLO(SR)	E635M	J - Alloy_J2	Q12+H**	M-MDA(SR)+H*

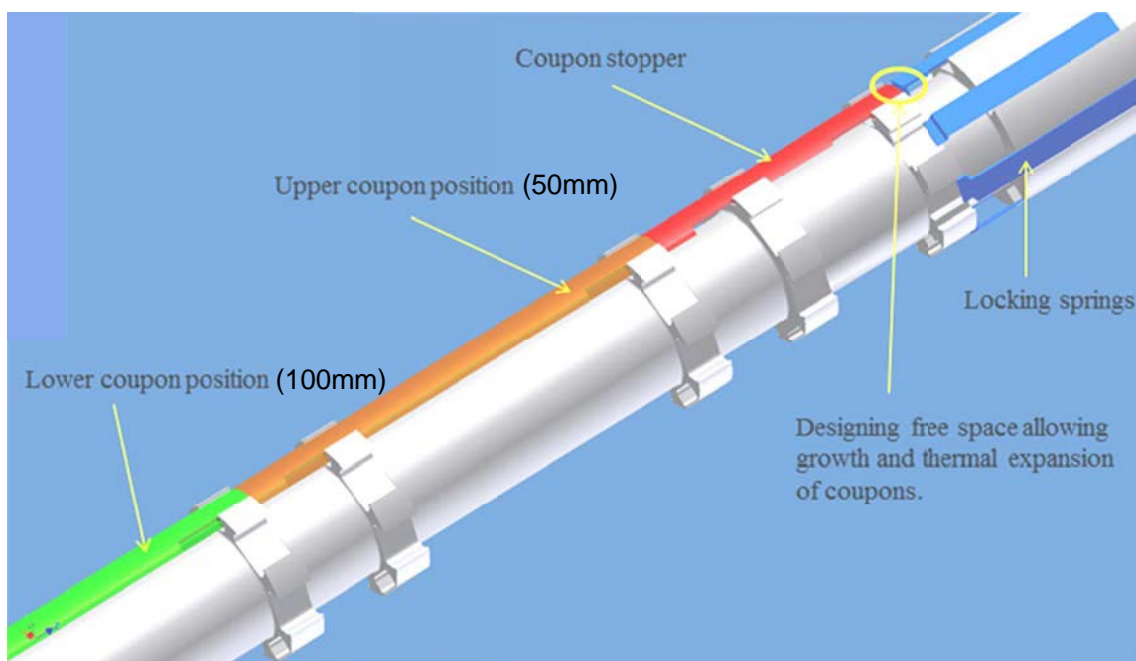
^a CW:冷間加工材、SR:応力除去焼鈍材、RX:再結晶焼鈍材、P-RX:部分的再結晶焼鈍材、H*:約 200ppm 水素吸収処理材、H**:約 400ppm 水素吸収処理材、High-Q:高 Q 値*材(Q=4)

※ Q 値は、次式で定義される(t_0 :管への加工前の肉厚、 t :管への加工後の肉厚、 d_0 :管への加工前の直径、 d :管への加工後の直径)。

$$Q = \{(t_0 - t)/t_0\} / \{(d_0 - d)/d_0\}$$



(a) 試験片の形状(長さ 50mm の場合)



(b) 試験片装荷部の構造(IFA-735 の場合)

図 4.6.2-1 試験片の形状と試験片装荷部の構造(拡大図)

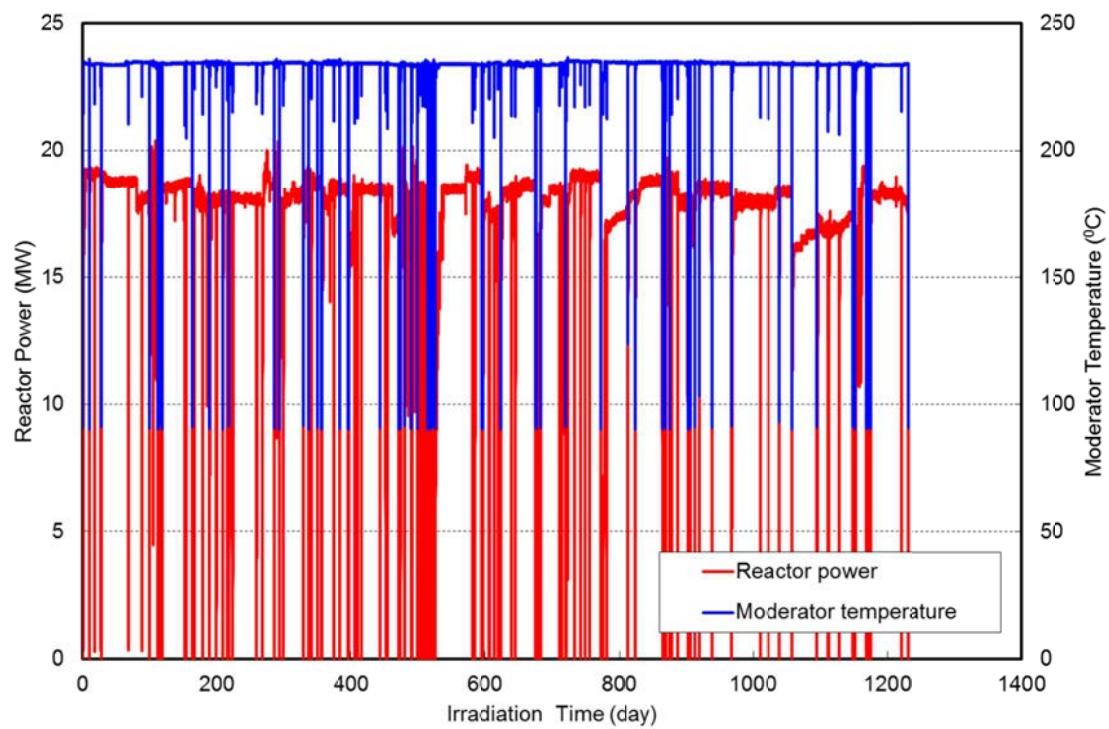
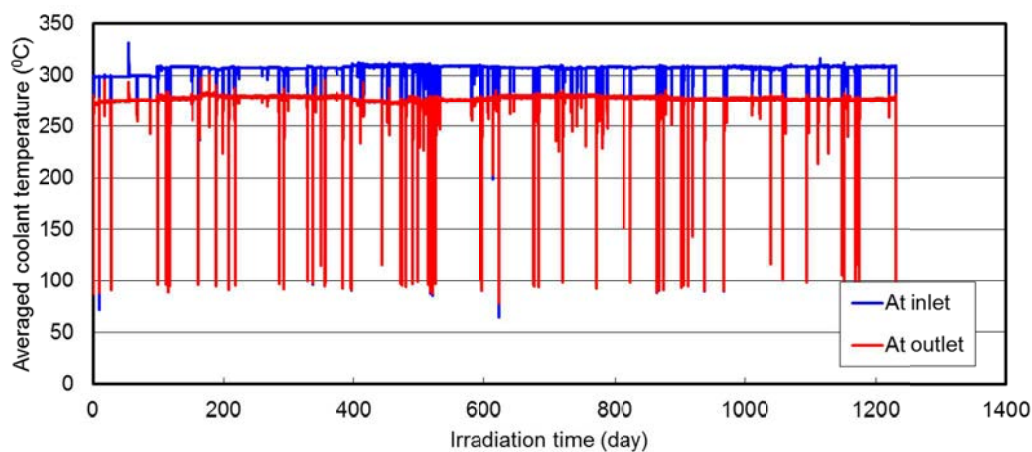
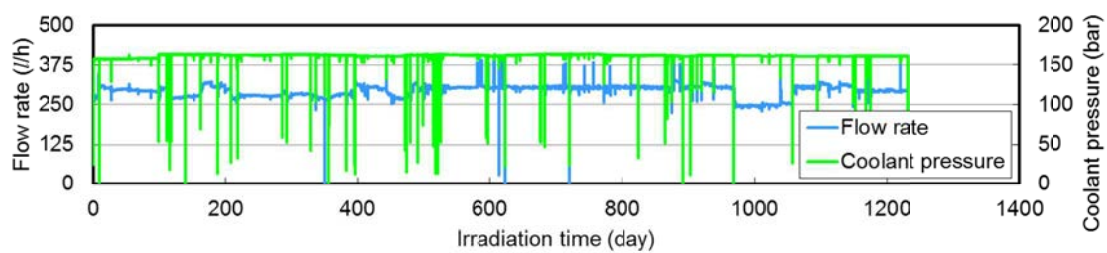
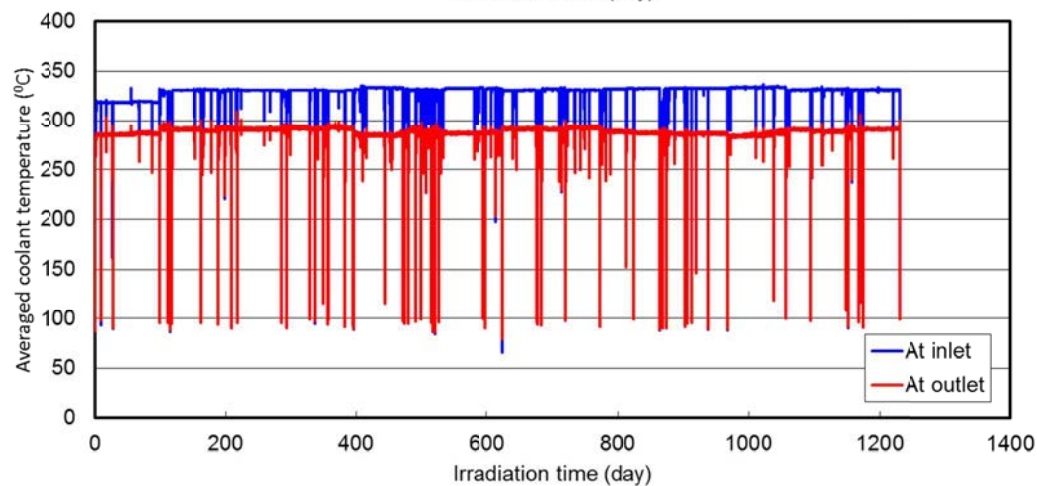
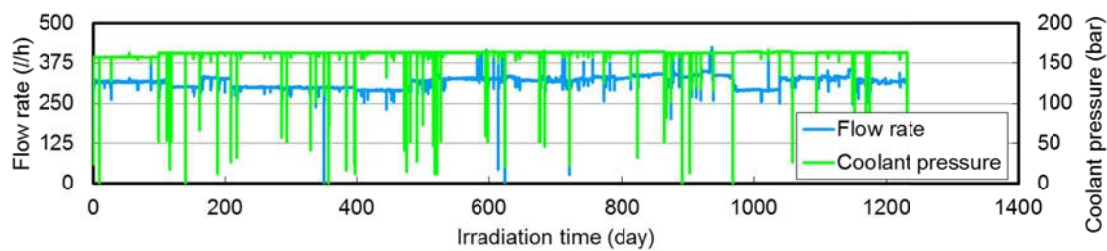


図 4.6.3-1 照射開始から第 12 照射サイクル終了までのハルデン炉熱出力及び減速材温度履歴



(a) IFA-735



(b) IFA-736

図 4.6.3-2 照射開始から第 12 照射サイクル終了までの照射試験リグ内の熱水力条件の履歴

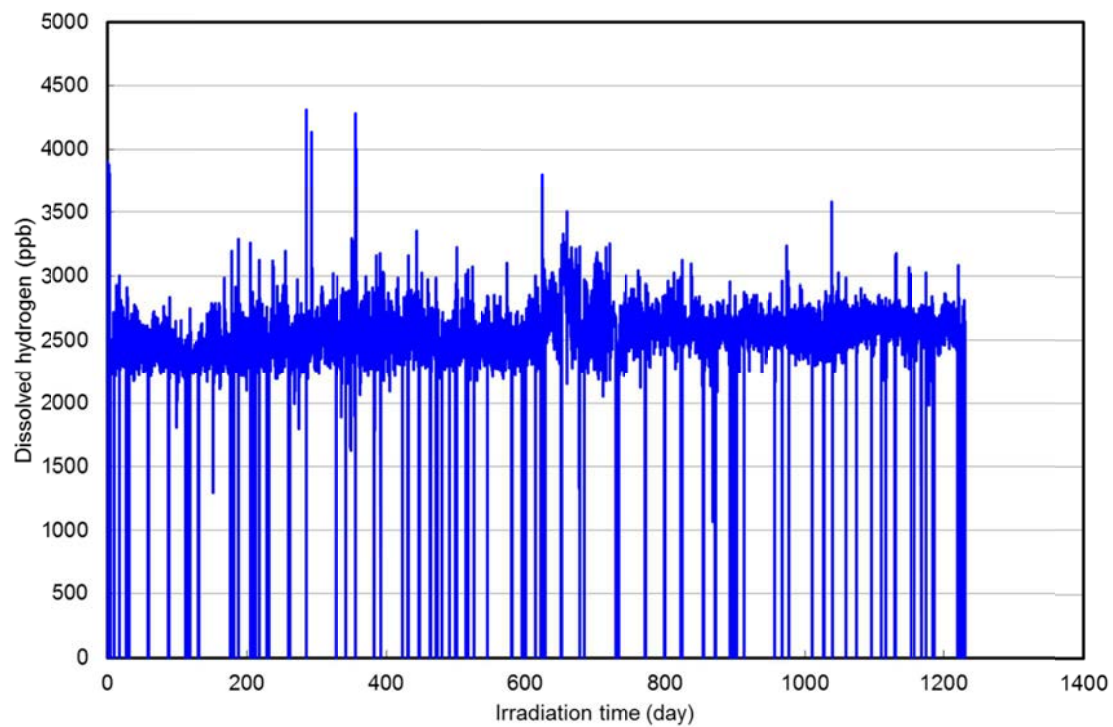


図 4.6.3-3 照射試験リグ内を流れる冷却材中溶存水素濃度の履歴

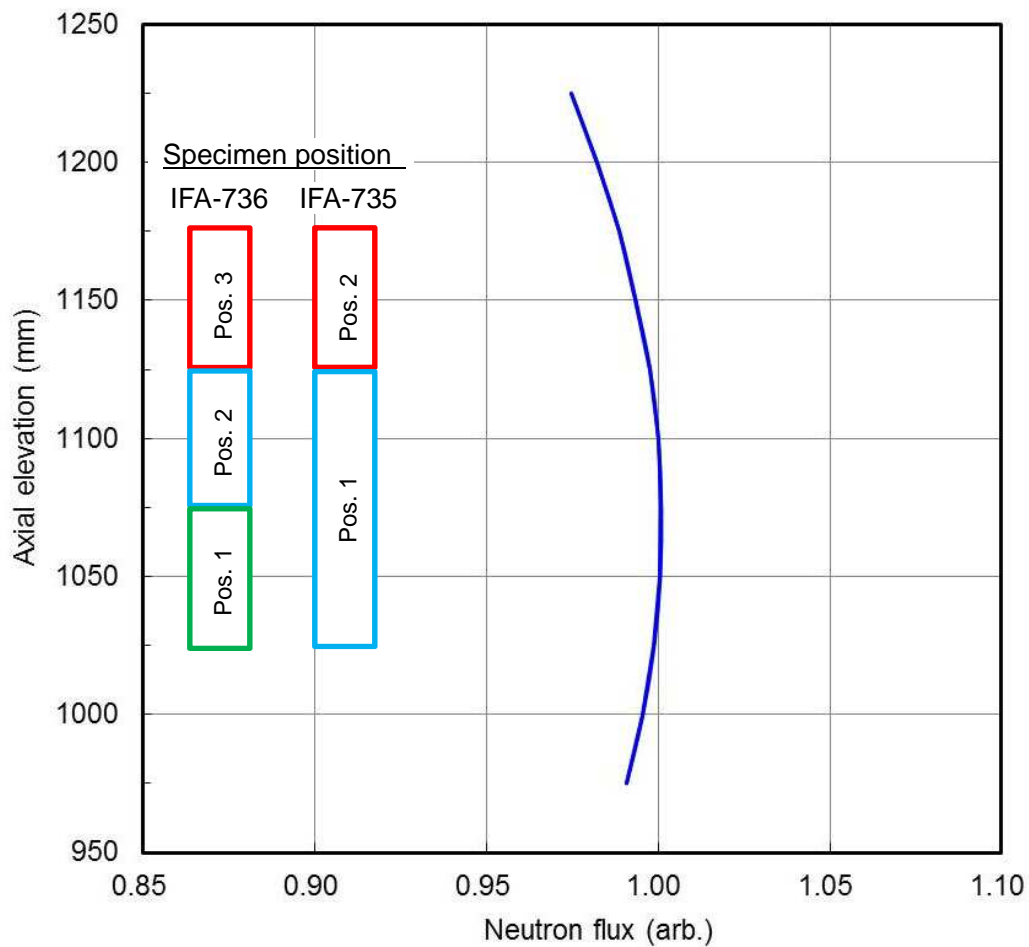
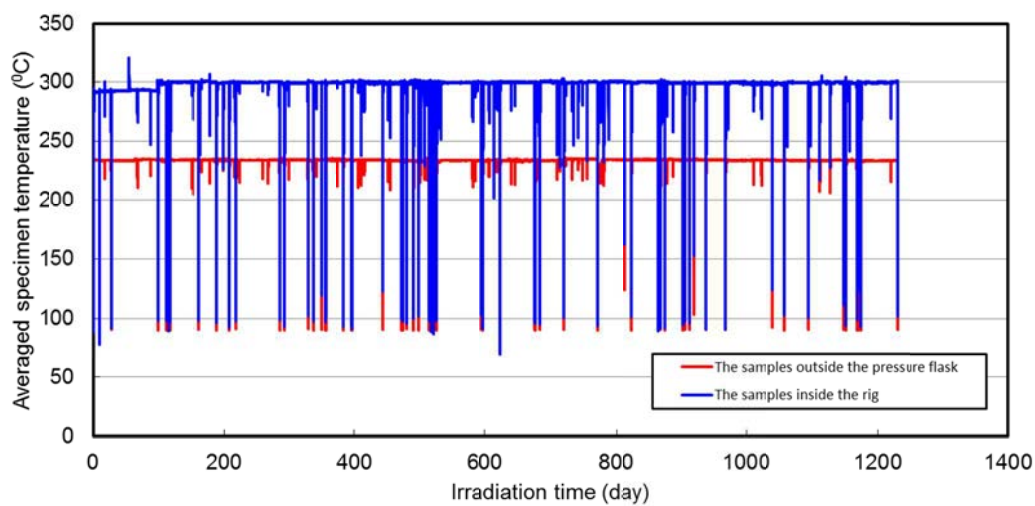
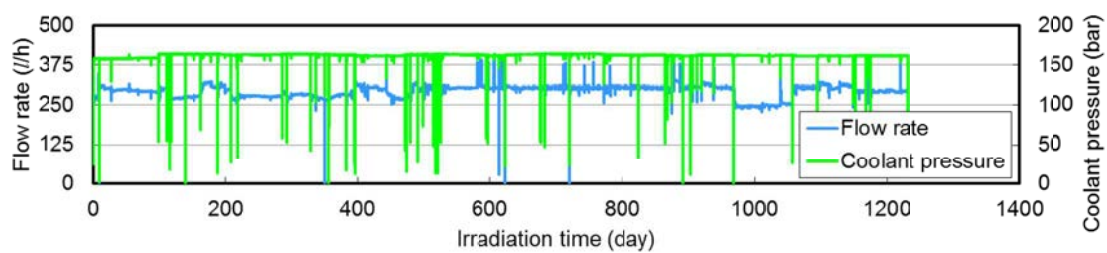
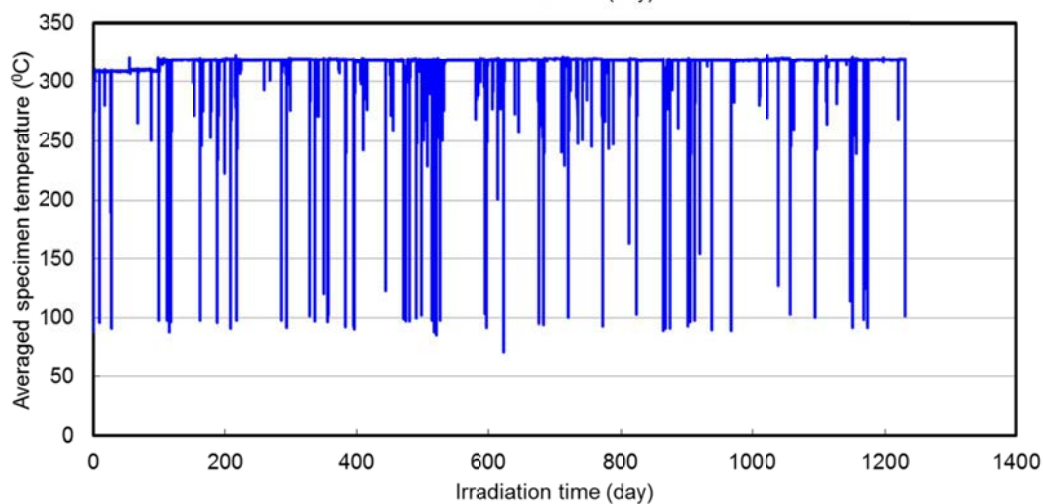
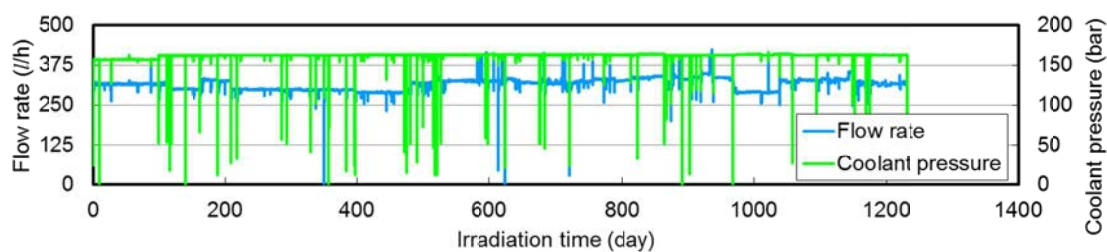


図 4.6.3-4 試験片近傍の炉心軸方向中性子束分布（ハルデン炉における典型例）

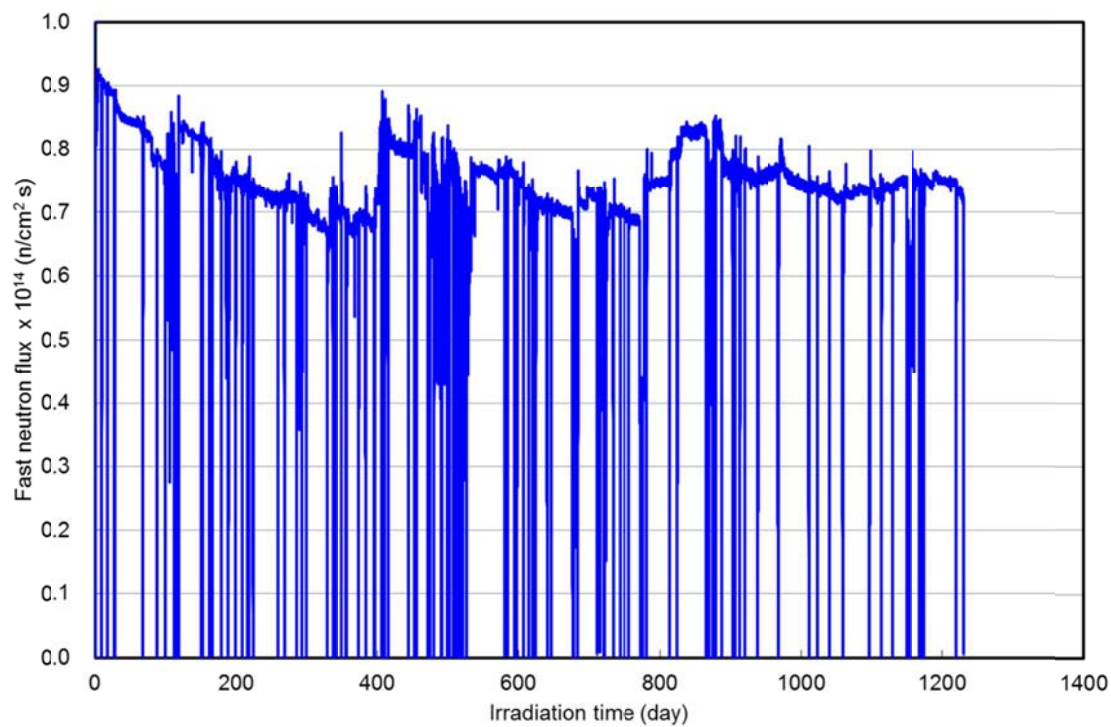


(a) IFA-735

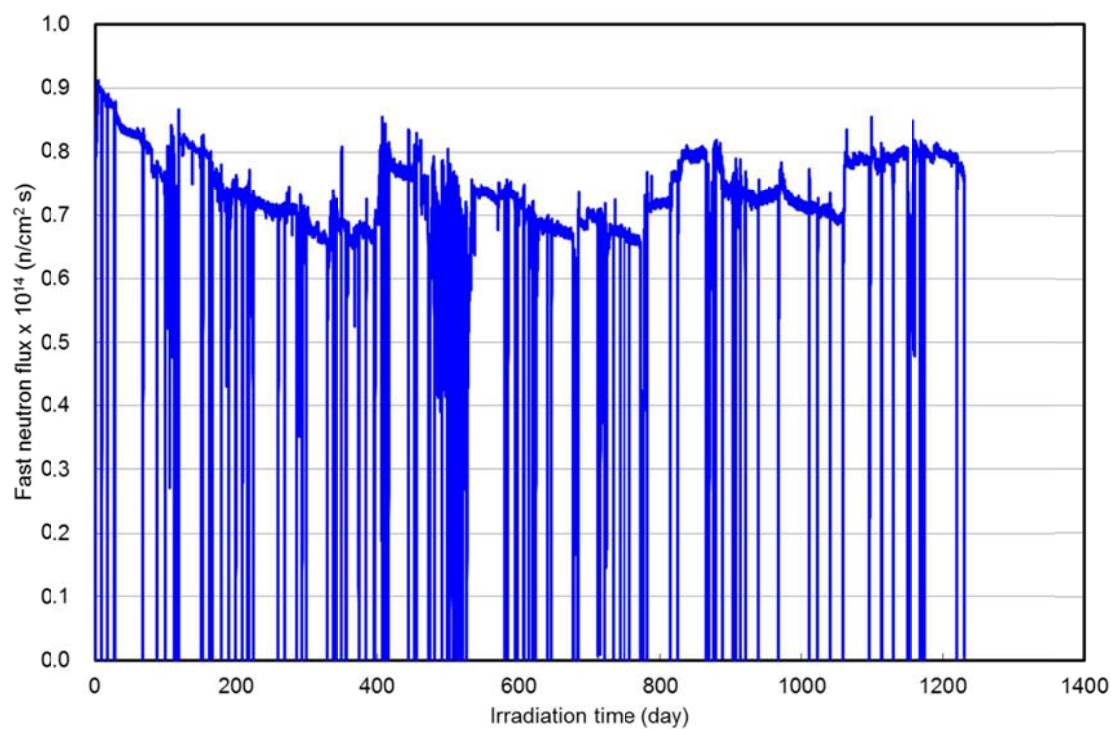


(b) IFA-736

図 4.6.3-5 照射開始から第 12 照射サイクル終了までの試験片の温度履歴

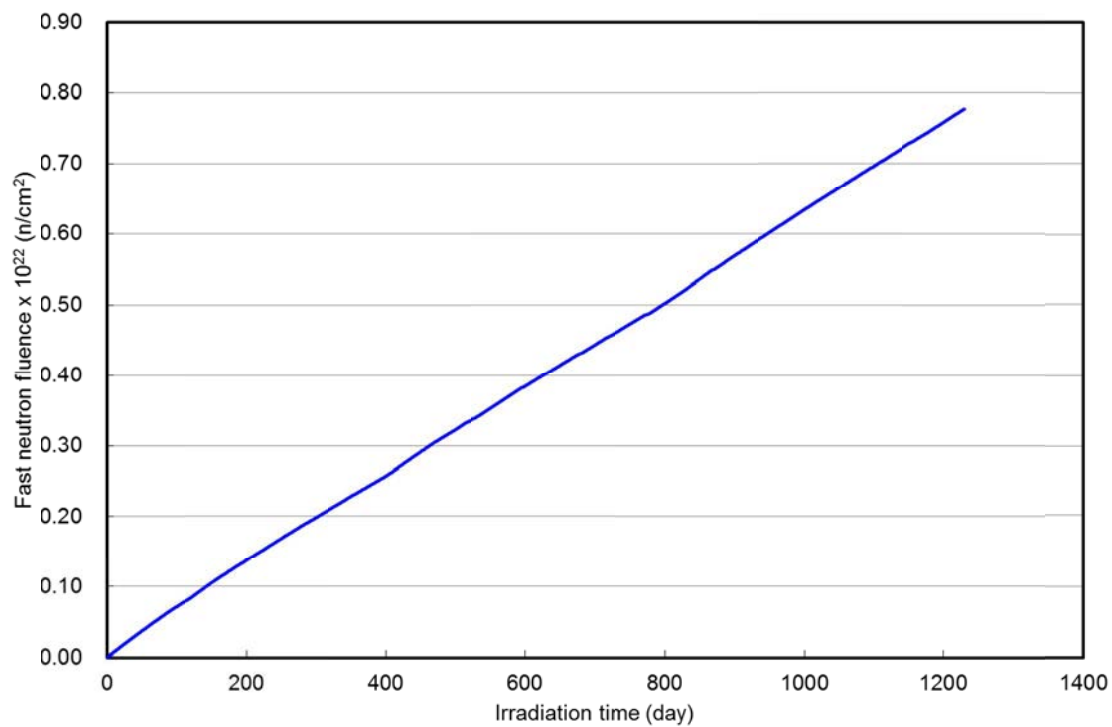


(a) IFA-735

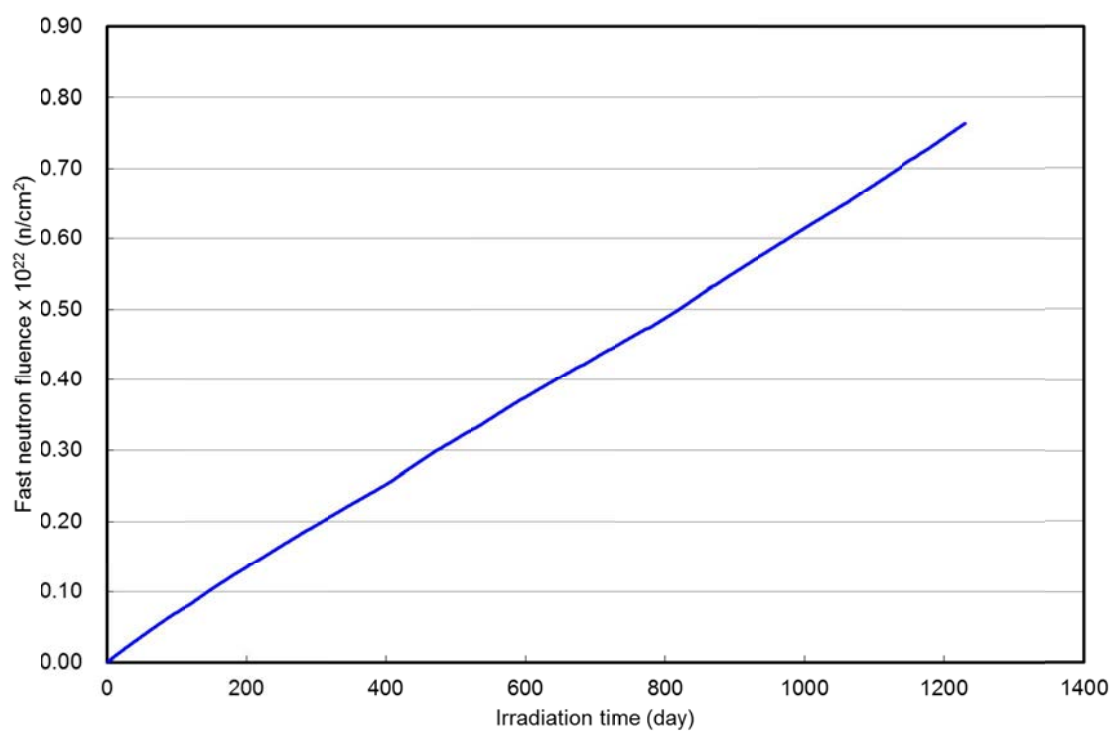


(b) IFA-736

図 4.6.3-6 照射開始から第 12 照射サイクル終了までの試験片領域での高速中性子束履歴



(a) IFA-735



(b) IFA-736

図 4.6.3-7 照射開始から第 12 照射サイクル終了までの試験片領域での
高速中性子フルエンス履歴





























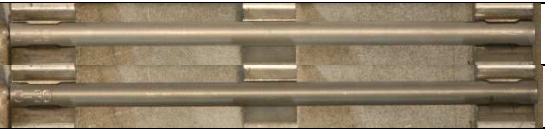

試験片 番号	第 12 照射サイクル後	
5-1		
5-2		
5-3		
5-4		
5-5		
5-6		
5-7		
5-8		
5-9		
5-10		
5-11		
5-12		
5-13		
5-14		
5-15		
5-16		
5-17		
5-18		
5-19		
5-20		
5-21		
5-22		
5-23		
5-24		
5-25		
5-26		
5-27		
5-28		

図 4.6.4-1(a) 試験片外観写真(IFA-735 に装荷されたもの。被覆管外表面側)

試験片 番号	第 12 照射サイクル後
5-29	
5-30	
5-31	
5-32	
5-33	
5-34	
5-35	
5-36	
5-37	
5-38	
5-39	
5-40	

+ 第 11 照射サイクル後に試験片の伸び量が試験片装荷部に設けたクリアランスを超えたため、第 12 照射サイクル以降、照射試験中にホルダから外れる可能性を考慮して試験片を装荷せず。

図 4.6.4-1(b) 試験片外観写真(IFA-735(圧力フラスコ外)に装荷されたもの。被覆管外表面側)

表 4.6.4-1(a) 試験片長さ測定結果(IFA-735 に装荷されたもの)

試験片 番号	材 質	試験片 作製後 (mm)	第 12 照射サイクル後 (mm)
5-1	M5	99.965	100.022
5-2	Zry-4(RX)	99.982	100.079
5-3	J-Alloy_J3	99.993	100.042
5-4	ZIRLO(RX)	99.960	100.090
5-5	Opt-ZIRLO(P-RX)	100.014	100.161
5-6	ZIRLO(SR)	99.994	100.198
5-7	Zry-4(CW, High-Q)	99.937	100.292
5-8	M5	99.959	100.012
5-9	Zry-4(RX)	99.981	100.074
5-10	Zry-4(SR)	99.989	100.349
5-11	M-MDA(SR)	99.969	100.049
5-12	M-MDA(RX)	99.990	100.127
5-13	J-Alloy_J2	100.001	100.032
5-14	Zry-4(CW)	99.946	100.302
5-15	M-MDA(RX)	49.955	50.021
5-16	M-MDA(RX)+H*	49.974	50.040
5-17	J-Alloy_J2	49.967	49.976
5-18	J-Alloy_J2+H*	49.999	50.041
5-19	Zry-4(SR, High-Q)	49.924	50.095
5-20	Zry-4(RX, High-Q)	49.985	50.024
5-21	Zry-4(RX, High-Q)+H*	49.967	50.006
5-22	M5	49.950	49.974
5-23	M5+H*	49.968	50.009
5-24	Zry-4(RX)	49.974	50.015
5-25	Zry-4(RX)+H*	49.992	50.038
5-26	Zry-4(SR)	49.975	50.151
5-27	M-MDA(SR)	49.934	49.967
5-28	M-MDA(SR)+H*	49.971	50.009

表 4.6.4-1(b) 試験片長さ測定結果(IFA-735(圧力フラスコ外)に装荷されたもの)

試験片 番号	材 質	試験片 作製後 (mm)	第 12 照射サイクル後 (mm)
5-29	M5	99.961	100.068
5-30	Zry-4(RX)	100.005	100.124
5-31	Zry-4(SR)	99.988	—+
5-32	M-MDA(SR)	99.977	100.382
5-33	J-Alloy_J2	100.003	100.092
5-34	J-Alloy_J3	100.004	100.090
5-35	M5	99.930	100.032
5-36	Zry-4(RX)	100.002	100.124
5-37	Zry-4(RX)+H*	100.008	100.150
5-38	M-MDA(RX)	99.988	100.152
5-39	Opt-ZIRLO(P-RX)	99.973	100.318
5-40	ZIRLO(RX)	99.975	100.085

+ 第 11 照射サイクル後に試験片の伸び量が試験片装荷部に設けたクリアランスを超えたため、第 12 照射サイクル以降、照射試験中にホルダから外れる可能性を考慮して試験片を装荷せず。

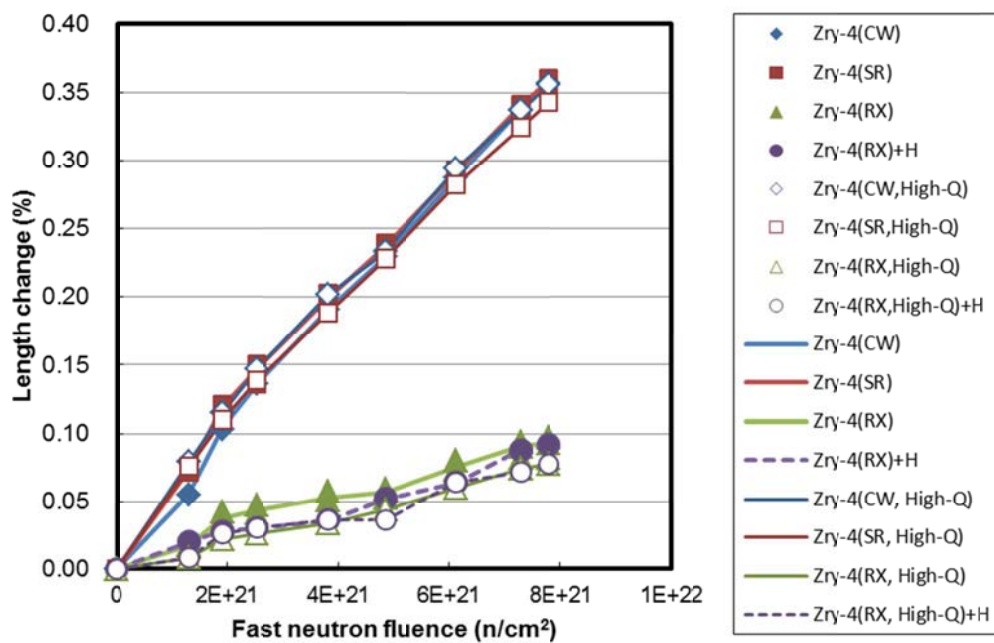
表 4.6.4-2(a) 試験片重量測定結果(IFA-735 に装荷されたもの)

試験片 番号	材 質	試験片 作製後 (mg)	第 12 照射サイクル後 (mg)
5-1	M5	1535.80	1540.83
5-2	Zry-4(RX)	1909.59	1915.89
5-3	J-Alloy_J3	1681.23	1685.83
5-4	ZIRLO(RX)	1690.42	1707.12
5-5	Opt-ZIRLO(P-RX)	1641.87	1647.57
5-6	ZIRLO(SR)	1645.78	1651.85
5-7	Zry-4(CW, High-Q)	1959.28	1964.94
5-8	M5	1533.67	1538.95
5-9	Zry-4(RX)	1962.64	1969.09
5-10	Zry-4(SR)	1904.58	1911.09
5-11	M-MDA(SR)	1707.46	1713.50
5-12	M-MDA(RX)	1702.92	1714.98
5-13	J-Alloy_J2	1687.89	1692.64
5-14	Zry-4(CW)	1927.98	1934.04
5-15	M-MDA(RX)	856.99	863.03
5-16	M-MDA(RX)+H*	858.13	861.95
5-17	J-Alloy_J2	854.63	857.24
5-18	J-Alloy_J2+H*	857.72	860.24
5-19	Zry-4(SR, High-Q)	944.88	947.91
5-20	Zry-4(RX, High-Q)	927.93	931.11
5-21	Zry-4(RX, High-Q)+H*	938.28	939.55
5-22	M5	755.79	758.45
5-23	M5+H*	678.71	681.35
5-24	Zry-4(RX)	938.74	942.02
5-25	Zry-4(RX)+H*	954.34	955.71
5-26	Zry-4(SR)	923.54	926.82
5-27	M-MDA(SR)	850.08	853.00
5-28	M-MDA(SR)+H*	856.46	859.12

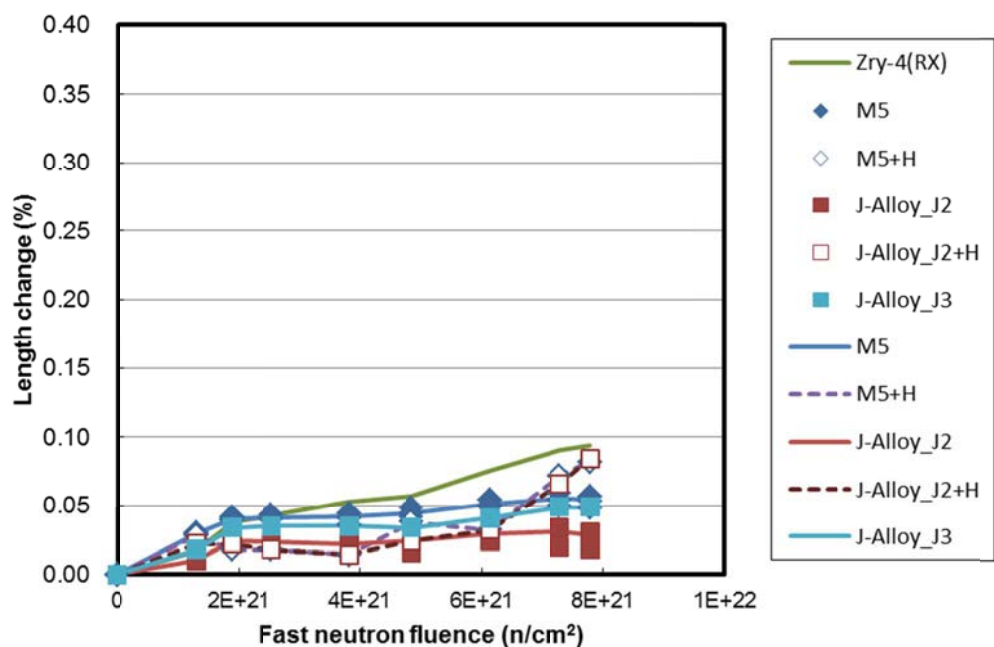
表 4.6.4-2(b) 試験片重量測定結果(IFA-735(圧力フラスコ外)に装荷されたもの)

試験片 番号	材 質	試験片 作製後 (mg)	第 12 照射サイクル後 (mg)
5-29	M5	1536.57	1552.56
5-30	Zry-4(RX)	1991.55	2005.11
5-31	Zry-4(SR)	1874.44	—+
5-32	M-MDA(SR)	1701.47	1717.01
5-33	J-Alloy_J2	1691.98	1704.50
5-34	J-Alloy_J3	1663.31	1672.05
5-35	M5	1537.56	1553.45
5-36	Zry-4(RX)	1937.21	1950.66
5-37	Zry-4(RX)+H*	1939.83	1950.48
5-38	M-MDA(RX)	1697.47	1711.71
5-39	Opt-ZIRLO(P-RX)	1679.83	1694.45
5-40	ZIRLO(RX)	1728.02	1740.20

+ 第 11 照射サイクル後に試験片の伸び量が試験片装荷部に設けたクリアランスを超えたため、第 12 照射サイクル以降、照射試験中にホルダから外れる可能性を考慮して試験片を装荷せず。

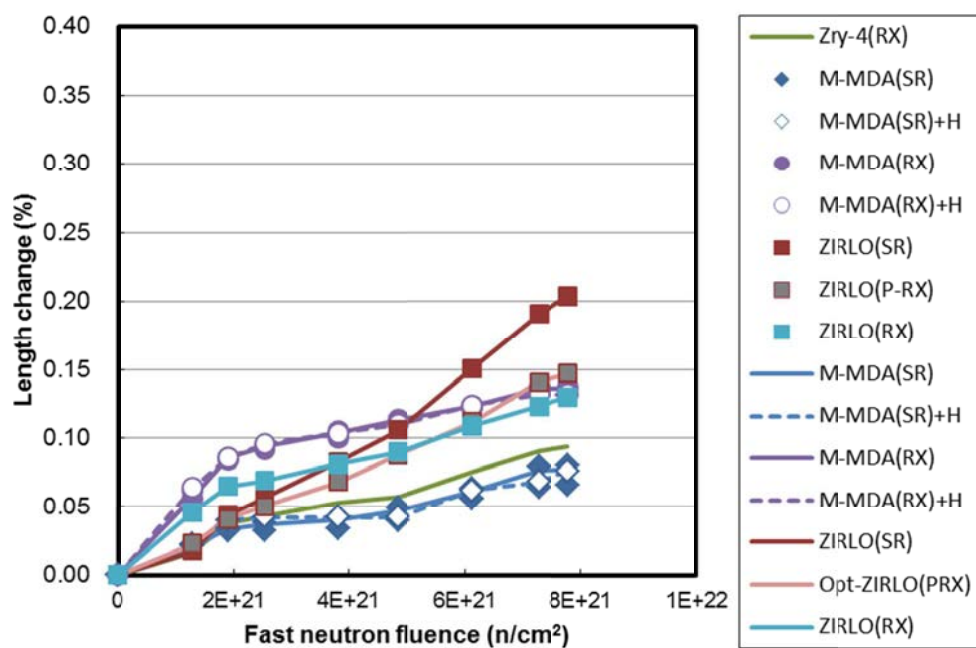


(a) Zry-4



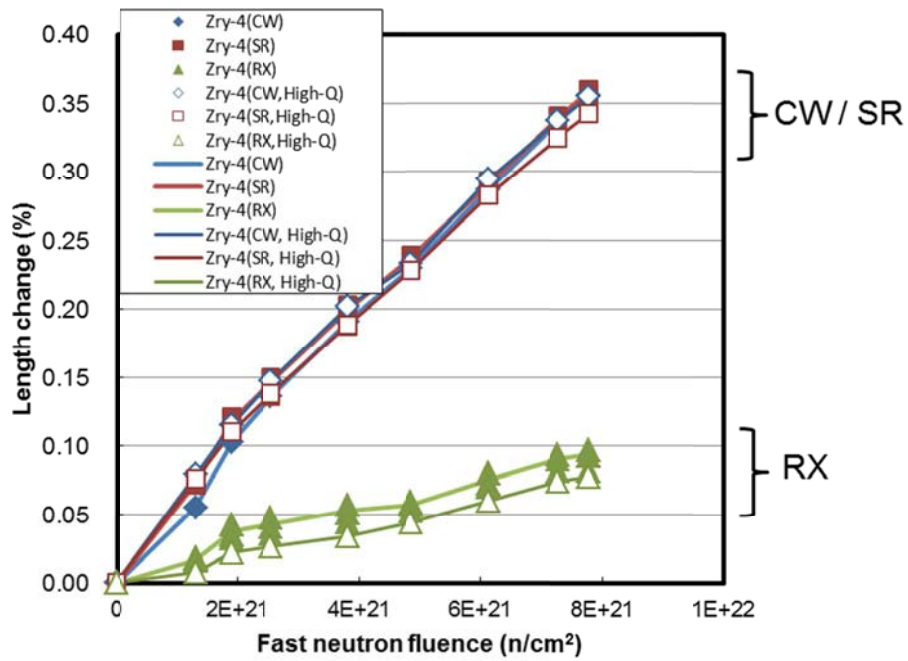
(b) Zr-Nb(-Fe or Cr)系合金

図 4.6.4-2 照射成長量と高速中性子フルエンスとの関係(IFA-735。照射温度 300°C)

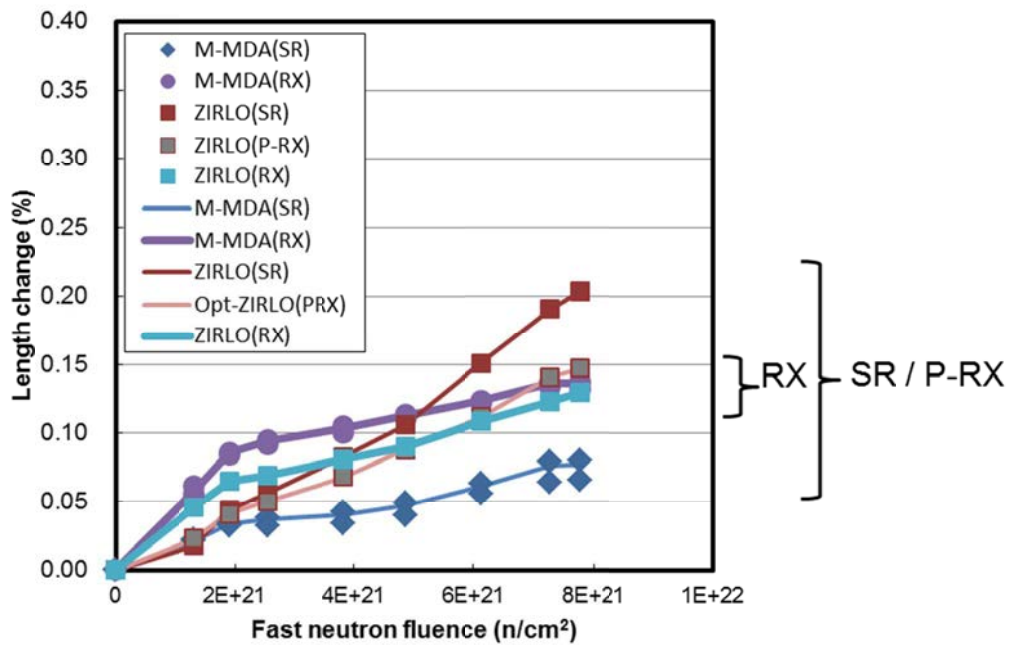


(c) Zr-Nb-Sn(-Fe or Cr)系合金

図 4.6.4-2(続き) 照射成長量と高速中性子フルエンスとの関係(IFA-735。照射温度 300°C)

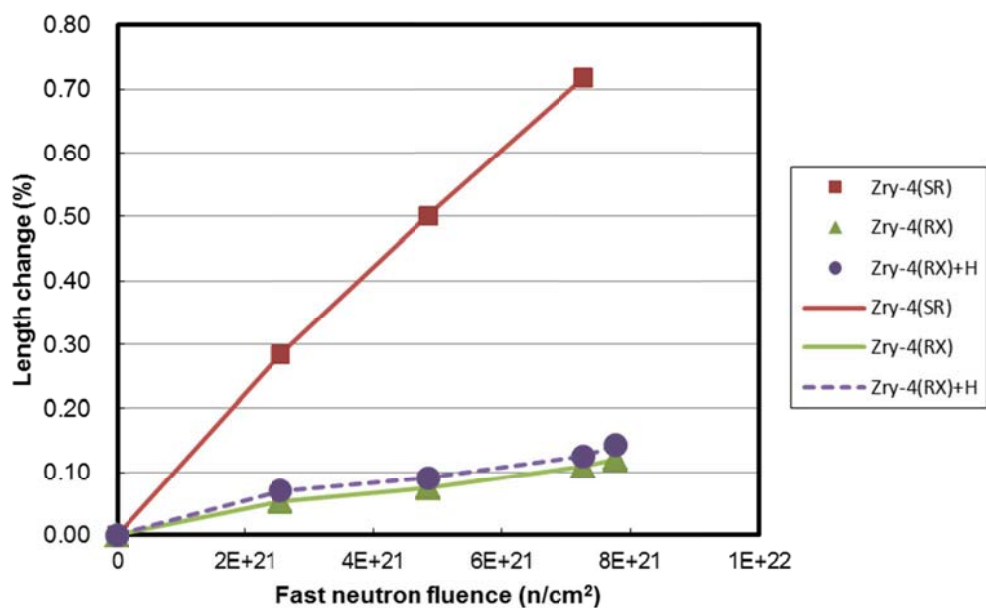


(d) Zry-4

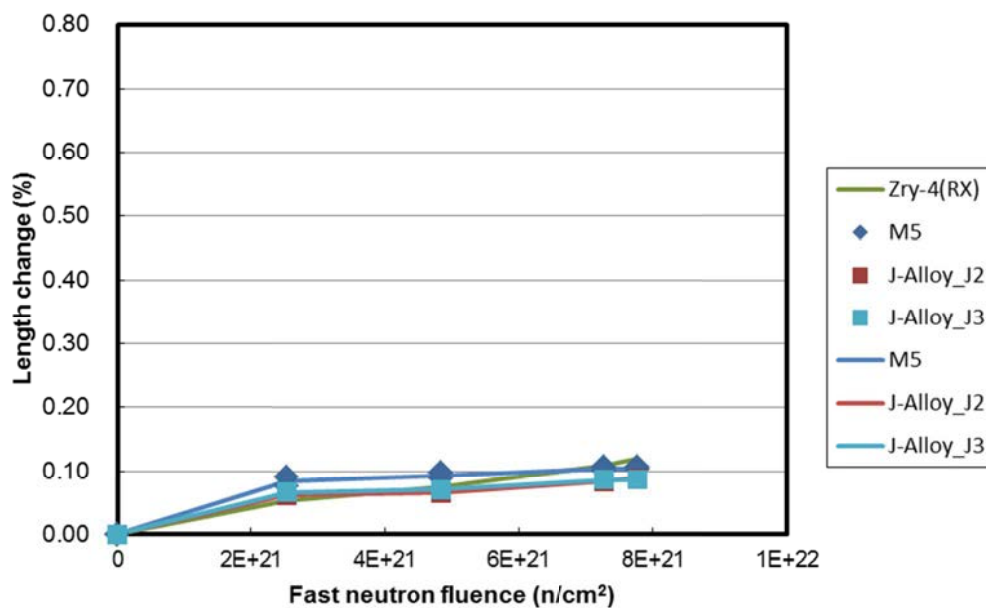


(e) Zr-Nb-Sn(-Fe or Cr)系合金

図 4.6.4-2(続き) 照射成長量と高速中性子フルエンスとの関係(IFA-735。照射温度 300°C)

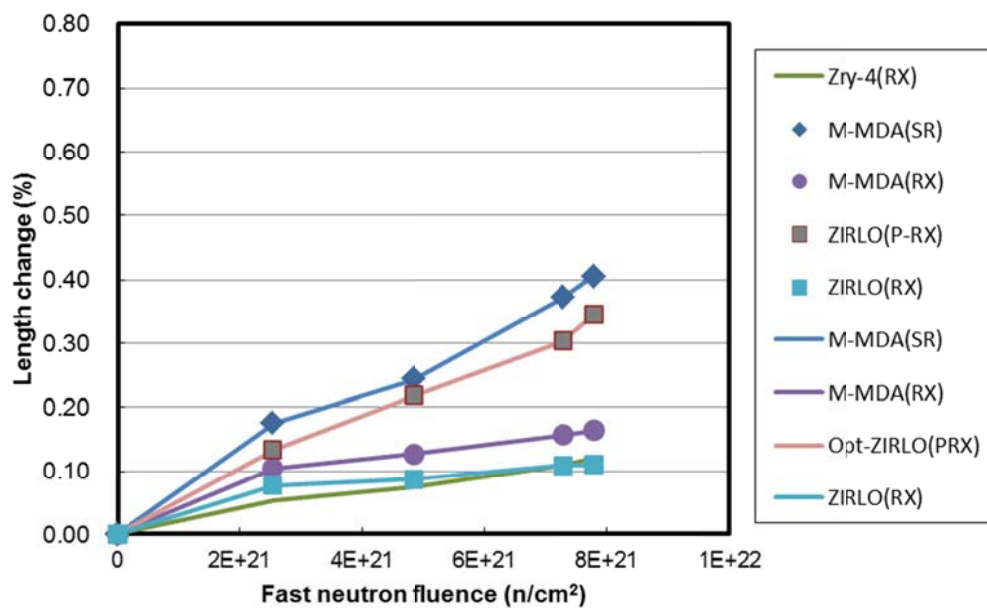


(a) Zry-4



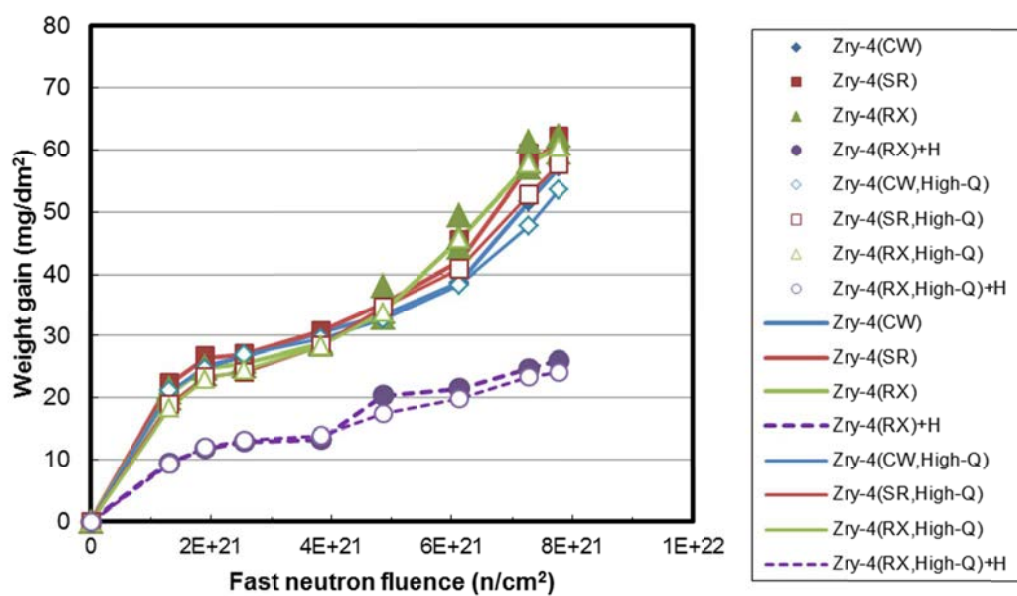
(b) Zr-Nb(-Fe or Cr)系合金

図 4.6.4-3 照射成長量と高速中性子フルエンスとの関係(IFA-735, 240°C)

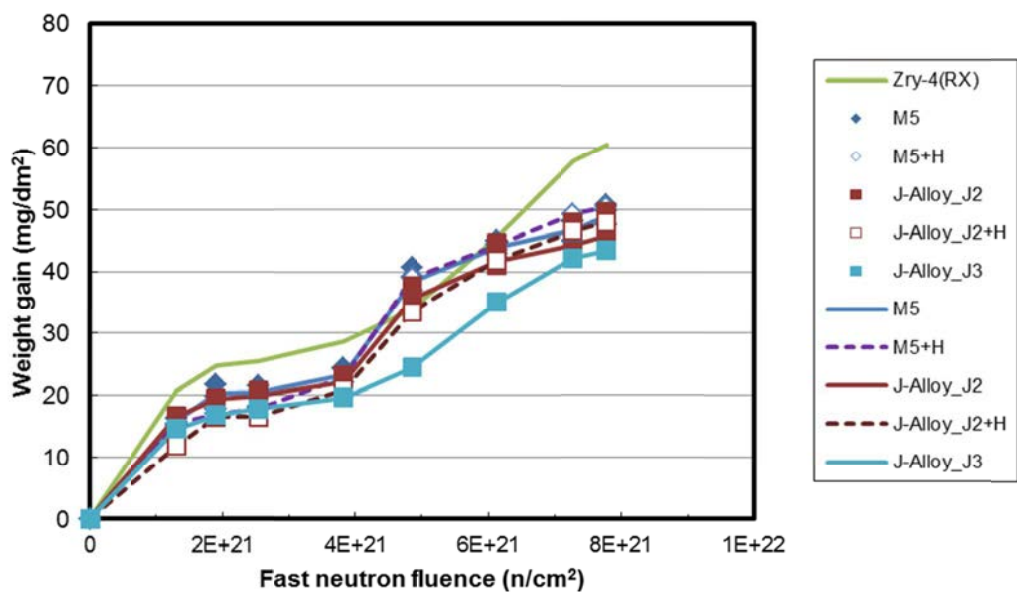


(c) Zr-Nb-Sn(-Fe or Cr)系合金

図 4.6.4-3(続き) 照射成長量と高速中性子フルエンスとの関係(IFA-735。240°C)

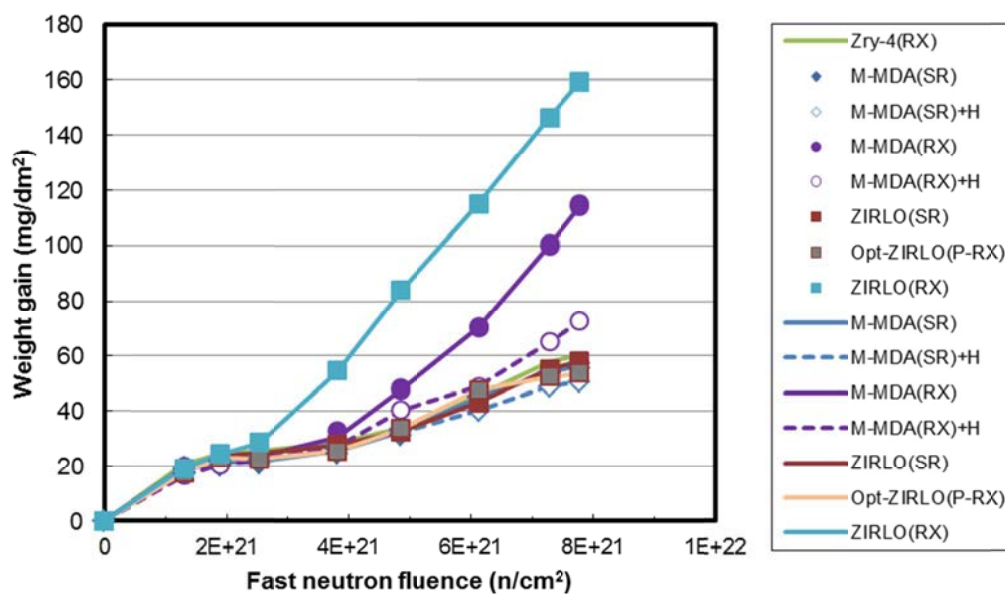


(a) Zry-4



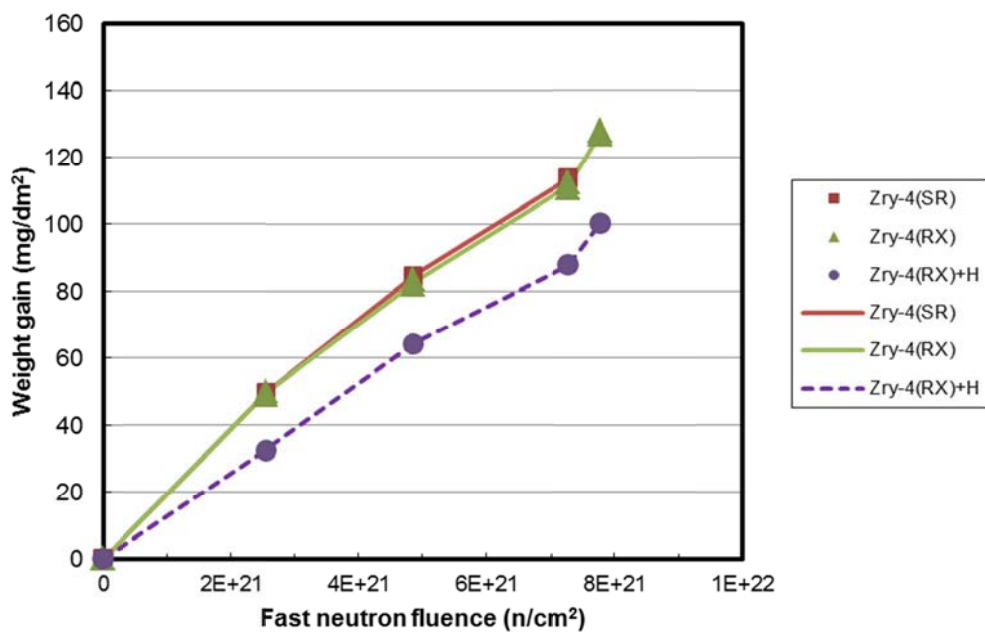
(b) Zr-Nb(-Fe or Cr)系合金

図 4.6.4-4 単位面積当たりの増量(mg/dm^2)と高速中性子フルエンスとの関係
(IFA-735。照射温度 300°C)

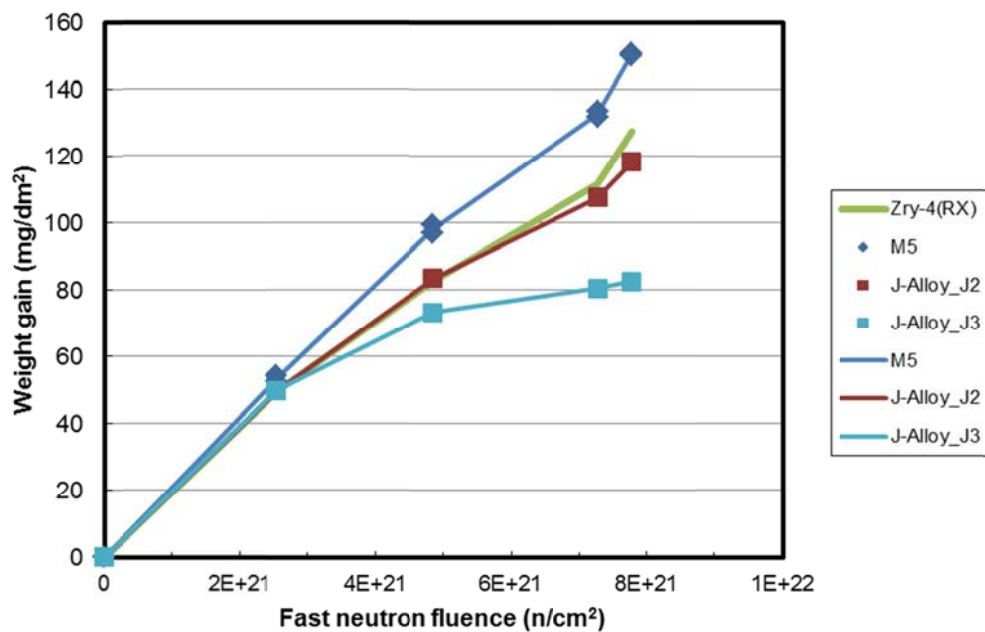


(c) Zr-Nb-Sn(-Fe or Cr)系合金

図 4.6.4-4(続き) 単位面積当たりの増量(mg/dm²)と高速中性子フルエンスとの関係
(IFA-735。照射温度 300°C)

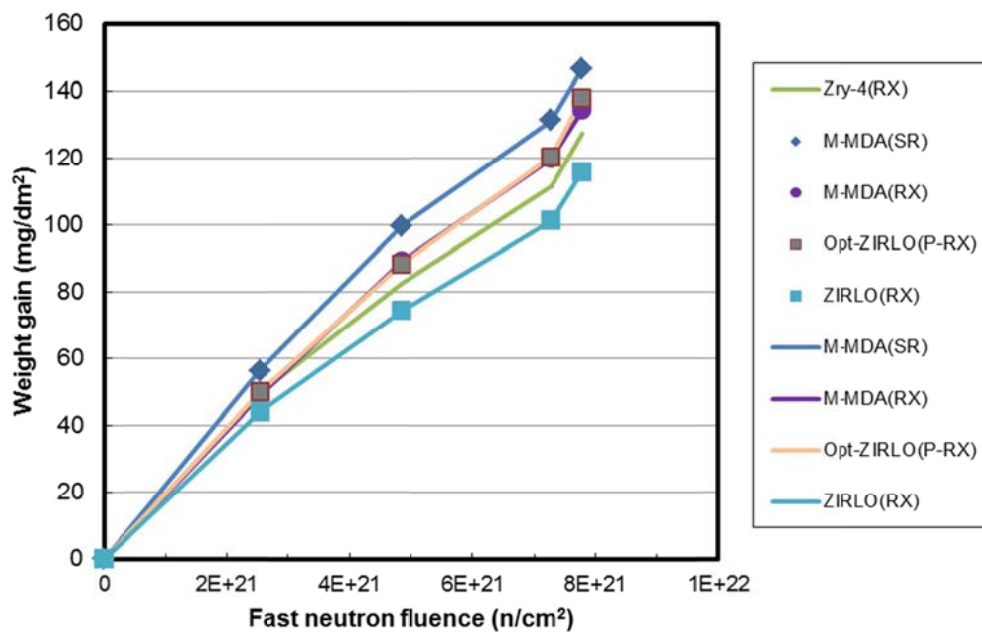


(a) Zry-4



(b) Zr-Nb(-Fe or Cr)系合金

図 4.6.4-5 単位面積当たりの増量(mg/dm²)と高速中性子フルエンスとの関係
(IFA-735, 240°C)



(c) Zr-Nb-Sn(-Fe or Cr)系合金

図 4.6.4-5(続き) 単位面積当たりの増量(mg/dm²)と高速中性子フルエンスとの関係
(IFA-735。240℃)

表 4.6.5-1 今年度破壊試験に供した試験片の一覧

・ IFA-735 装荷

試験片番号	材 質	試験片番号	材 質
5-3	J-Alloy_J3	5-34	J-Alloy_J3
5-10	Zry-4(SR)	5-35	M5
5-15	M-MDA(RX)	5-36	Zry-4(RX)
5-21	Zry-4(RX, High-Q)+H*	5-37	Zry-4(RX)+H*
5-22	M5	5-38	M-MDA(RX)
5-28	M-MDA(SR)+H*	5-39	Opt-ZIRLO(P-RX)
5-31	Zry-4(SR)	5-40	ZIRLO(RX)

・ IFA-736 装荷

試験片番号	材 質	試験片番号	材 質
6-7	Zry-4(RX, High-Q)+H**	6-29	M-MDA(RX)
6-14	ZIRLO(SR)	6-31	J-Alloy_J2
6-18	ZIRLO(RX)	6-36	M5
6-25	Zry-4(SR)	6-38	Zry-4(RX)

・ アークイブ材

試験片番号	材 質	試験片番号	材 質
1	J-Alloy_J3	8	Zry-4(SR)
2	M5	9	J-Alloy_J2
3	M-MDA(RX)	10	M-MDA(SR)+H*
4	Opt-ZIRLO(P-RX)	11	ZIRLO(SR)
5	ZIRLO(RX)	12	Zry-4(RX, High-Q)+H*
6	Zry-4(RX)+H*	13	Zry-4(RX, High-Q)+H**
7	Zry-4(RX)		

表 4.6.5-2 酸化膜厚さ測定結果 (6点測定平均値)

・ IFA-735 装荷

試験片 番号	材 質	酸化膜厚さ(μm)				試験片 番号	材 質	酸化膜厚さ(μm)			
		端部縦断面		軸方向中央横断面				端部縦断面		軸方向中央横断面	
		下部	上部	外面側	内面側			下部	上部	外面側	内面側
5-3	J-Alloy_J3	3.1	2.9	3.0	2.9	5-34	J-Alloy_J3	8.5	9.7	7.7	9.8
5-10	Zry-4(SR)	4.4	6.0	4.2	4.1	5-35	M5	10.8	12.3	12.6	12.4
5-15	M-MDA(RX)	6.6	3.9	7.7	9.8	5-36	Zry-4(RX)	9.8	10.0	10.5	10.0
5-21	Zry-4(RX, High-Q)+H*	4.1	4.5	5.2	4.1	5-37	Zry-4(RX)+H*	10.0	10.4	14.2	13.9
5-22	M5	4.4	4.3	3.0	2.9	5-38	M-MDA(RX)	11.2	8.6	11.6	12.0
5-28	M-MDA(SR)+H*	5.4	5.1	3.7	2.7	5-39	Opt-ZIRLO(P-RX)	10.4	11.2	12.2	11.7
5-31	Zry-4(SR)	9.1	9.4	9.8	8.9	5-40	ZIRLO(RX)	7.8	6.5	10.4	10.5

・ IFA-736 装荷

試験片 番号	材 質	酸化膜厚さ(μm)				試験片 番号	材 質	酸化膜厚さ(μm)			
		端部縦断面		軸方向中央横断面				端部縦断面		軸方向中央横断面	
		下部	上部	外面側	内面側			下部	上部	外面側	内面側
6-7	Zry-4(RX, High-Q)+H**	9.6	9.2	14.4	17.3	6-29	M-MDA(RX)	13.6	15.1	13.7	13.8
6-14	ZIRLO(SR)	13.4	13.6	9.6	8.8	6-31	J-Alloy_J2	5.9	6.1	5.4	5.4
6-18	ZIRLO(RX)	14.9	16.4	24.8	20.2	6-36	M5	5.7	5.5	5.8	5.6
6-25	Zry-4(SR)	8.8	10.4	6.8	7.2	6-38	Zry-4(RX)	8.6	10.5	8.3	7.8

表 4.6.5-2 酸化膜厚さ測定結果（6点測定平均値）（続き）

・アーカイブ材

試験片 番号	材 質	酸化膜厚さ(μm)			
		端部縦断面		軸方向中央横断面	
		外面側	内面側	外面側	内面側
6	Zry-4(RX)+H*	4.6	4.2	3.6	3.4
10	M-MDA(SR)+H*	0	4.4	0	4.9
12	Zry-4(RX, High-Q)+H*	4.6	5.0	4.8	4.6
13	Zry-4(RX, High-Q)+H**	8.3	7.8	8.0	7.8

(上記以外の試験片番号の試験片については酸化膜が薄く、光学顕微鏡による金相観察で測定できず)

表 4.6.5-3 水素濃度分析結果

・ IFA-735 装荷

試験片 番号	材 質	水素濃度 (ppm)	試験片 番号	材 質	水素濃度 (ppm)
5-3(1)	J-Alloy_J3	28	5-36(1)	Zry-4(RX)	243
5-3(2)		28	5-36(2)		239
5-3(3)		29	5-38(1)	M-MDA(RX)	176
5-15(1)	M-MDA(RX)	76	5-38(2)		163
5-15(2)		66	5-40(1)	ZIRLO(RX)	99
5-35(1)	M5	114	5-40(2)		142
5-35(2)		110			

・ IFA-736 装荷

試験片 番号	材 質	水素濃度 (ppm)	試験片 番号	材 質	水素濃度 (ppm)
6-29(1)	M-MDA(RX)	145	6-31(1)	J-Alloy_J2	48
6-29(2)		160	6-31(2)		32

・ アークタイプ材

試験片 番号	材 質	水素濃度 (ppm)	試験片 番号	材 質	水素濃度 (ppm)
1	J-Alloy_J3	15	8	Zry-4(SR)	22
2	M5	14	9	J-Alloy_J2	15
3	M-MDA(RX)	16	10	M-MDA(SR)+H*	131
4	Opt-ZIRLO(P-RX)	18	11	ZIRLO(SR)	14
5	ZIRLO(RX)	19	12	Zry-4(RX, High-Q)+H*	227
6	Zry-4(RX)+H*	283	13	Zry-4(RX, High-Q)+H**	413
7	Zry-4(RX)	19			

(アークタイプ材の水素濃度の測定誤差は±15%)

表 4.6.5-4 ビッカース硬度測定結果 (3回測定平均値)

・ IFA-735 装荷

試験片 番号	材 質	HV0.5		試験片 番号	材 質	HV0.5	
		縦	水平			縦	水平
5-3	J-Alloy_J3	223	226	5-34	J-Alloy_J3	241	234
5-10	Zry-4(SR)	286	267	5-35	M5	251	243
5-15	M-MDA(RX)	292	285	5-36	Zry-4(RX)	247	239
5-21	Zry-4(RX, High-Q)+H*	274	255	5-37	Zry-4(RX)+H*	256	237
5-22	M5	236	233	5-38	M-MDA(RX)	291	278
5-28	M-MDA(SR)+H*	314	291	5-39	Opt-ZIRLO(P-RX)	273	269
5-31	Zry-4(SR)	286	262	5-40	ZIRLO(RX)	273	260

・ IFA-736 装荷

試験片 番号	材 質	HV0.5		試験片 番号	材 質	HV0.5	
		縦	水平			縦	水平
6-7	Zry-4(RX, High-Q)+H**	272	264	6-29	M-MDA(RX)	293	280
6-14	ZIRLO(SR)	287	269	6-31	J-Alloy_J2	231	221
6-18	ZIRLO(RX)	274	263	6-36	M5	224	223
6-25	Zry-4(SR)	285	263	6-38	Zry-4(RX)	270	258

・ アークイブ材

試験片 番号	材 質	HV0.5		試験片 番号	材 質	HV0.5	
		縦	水平			縦	水平
1	J-Alloy_J3	162	151	8	Zry-4(SR)	223	206
2	M5	169	161	9	J-Alloy_J2	165	151
3	M-MDA(RX)	179	171	10	M-MDA(SR)+H*	244	227
4	Opt-ZIRLO(P-RX)	208	195	11	ZIRLO(SR)	238	221
5	ZIRLO(RX)	169	168	12	Zry-4(RX, High-Q)+H*	177	172
6	Zry-4(RX)+H*	176	169	13	Zry-4(RX, High-Q)+H**	176	168
7	Zry-4(RX)	176	167				

(縦：端面部縦断面、水平：軸方向中央部水平断面)

表 4.6.5-5 引張試験結果

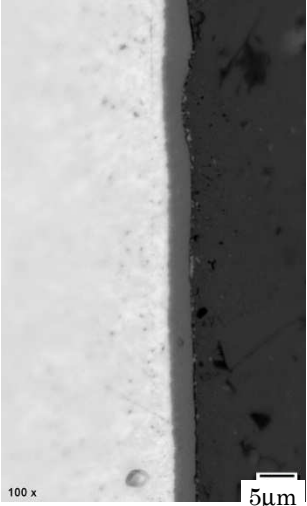
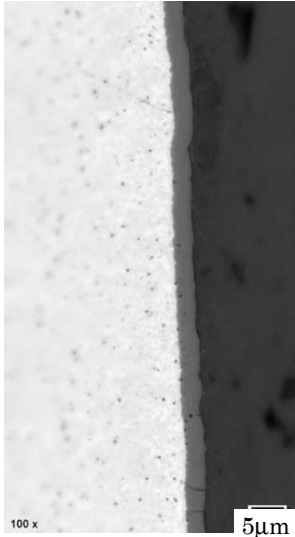
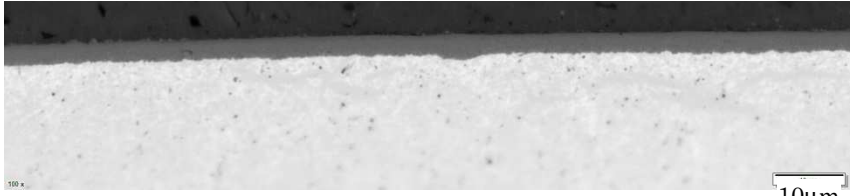
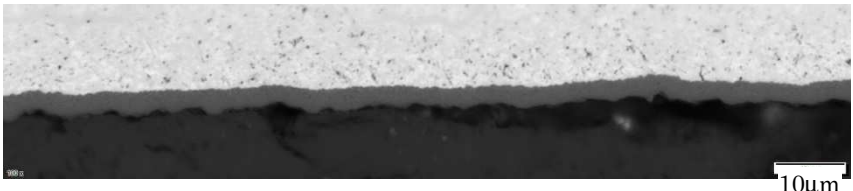
・ IFA-735 装荷

試験片 番号	材 質	極限引張 強さ (MPa)	破断応力 (MPa)	最大荷重 (N)	最大荷重点に おける均一伸 び(%)	破断伸び (%)
5-3	J-Alloy_J3	770.43	594.57	1044.3	11.14	16.79
5-10	Zry-4(SR)	1131.40	929.60	1544.9	11.18	16.97
5-31	Zry-4(SR)	1094.30	916.15	1494.2	9.70	12.80
5-34	J-Alloy_J3	804.83	620.80	1091.0	8.26	12.58
5-35	M5	818.17	708.26	967.7	10.80	12.21
5-36	Zry-4(RX)	949.34	812.56	1296.3	9.12	10.69
5-37	Zry-4(RX)+H*	976.82	851.32	1333.8	8.10	9.64
5-38	M-MDA(RX)	996.25	821.31	1350.4	8.06	11.13
5-39	Opt-ZIRLO(P-RX)	982.19	982.19	1331.4	8.93	11.35
5-40	ZIRLO(RX)	909.69	728.35	1234.5	7.80	10.00

・ アークイブ材

試験片 番号	材 質	極限引張 強さ (MPa)	破断応力 (MPa)	最大荷重 (N)	最大荷重点に おける均一伸 び(%)	破断伸び (%)
1	J-Alloy_J3	509.78	374.85	691.01	21.52	40.78
2	M5	499.92	361.01	591.26	24.39	41.73
3	M-MDA(RX)	564.23	419.92	764.81	21.39	42.08
4	Opt-ZIRLO(P-RX)	679.15	524.14	920.59	17.09	31.49
5	ZIRLO(RX)	540.81	399.48	733.87	20.04	41.37
6	Zry-4(RX)+H*	605.58	643.37	826.92	20.67	40.13
7	Zry-4(RX)	600.62	447.46	820.15	21.06	37.15
8	Zry-4(SR)	879.42	698.51	1200.90	13.99	25.47
9	J-Alloy_J2	498.27	359.98	675.41	22.85	38.04
9-2	J-Alloy_J2	507.93	363.43	688.50	20.31	40.79
10	M-MDA(SR)+H*	820.46	680.74	1112.10	13.96	23.32
11	ZIRLO(SR)	814.69	643.34	1105.50	14.45	23.24
12	Zry-4(RX, High-Q)+H*	594.19	461.81	811.37	18.73	33.16
13	Zry-4(RX, High-Q)+H**	619.95	484.45	846.54	19.03	31.32

試験片番号： 5-3

観察位置		
端面部		 <p>100 x 5μm</p>
		 <p>100 x 5μm</p>
		下部 上部
軸方向中央水平断面	外面側	 <p>100 x 10μm</p>
	内面側	 <p>100 x 10μm</p>

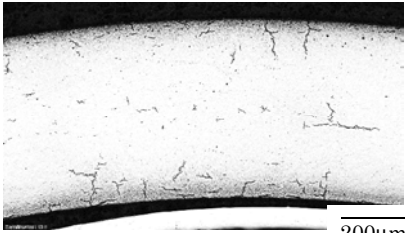
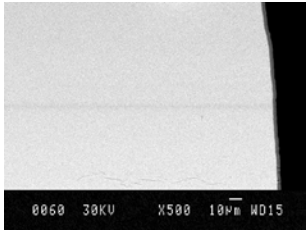
水素化物エッチング面	
 <p>光学顕微鏡像 200μm</p>	 <p>SEM 像 (上部端面縦断面)</p>

図 4.6.5-1 断面金相観察結果

試験片番号： 5-10

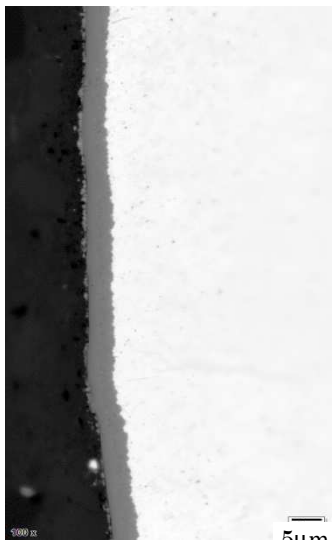
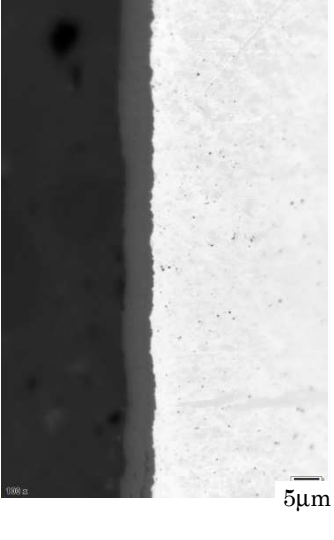
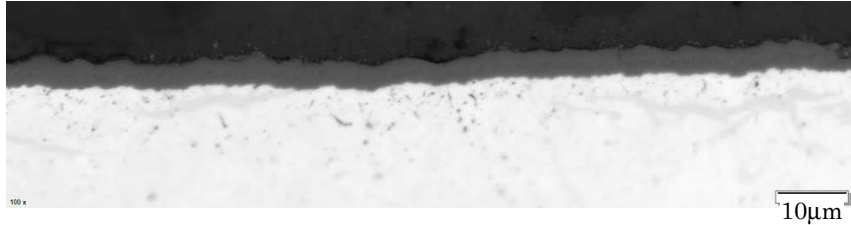
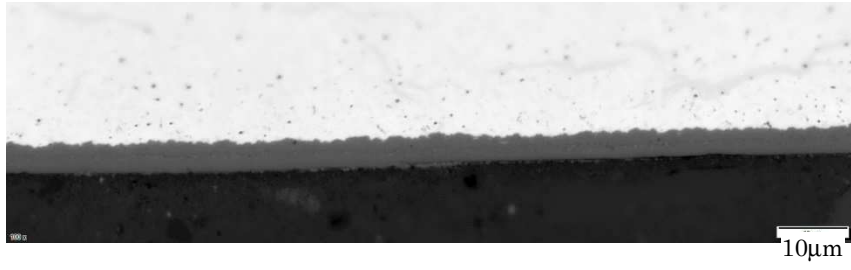
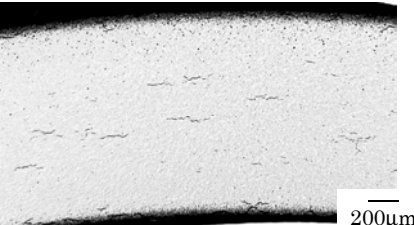
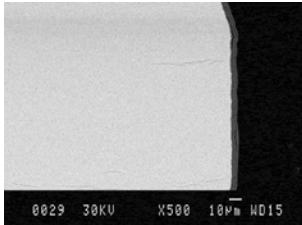
観察位置			
端面部			
		下部	上部
軸 方 向 中 央 水 平 断 面	外面側		
	内面側		
水素化物エッチング面			
			
	光学顕微鏡像	SEM 像 (上部端面縦断面)	

図 4.6.5-1 断面金相観察結果 (続き)

試験片番号： 5-15

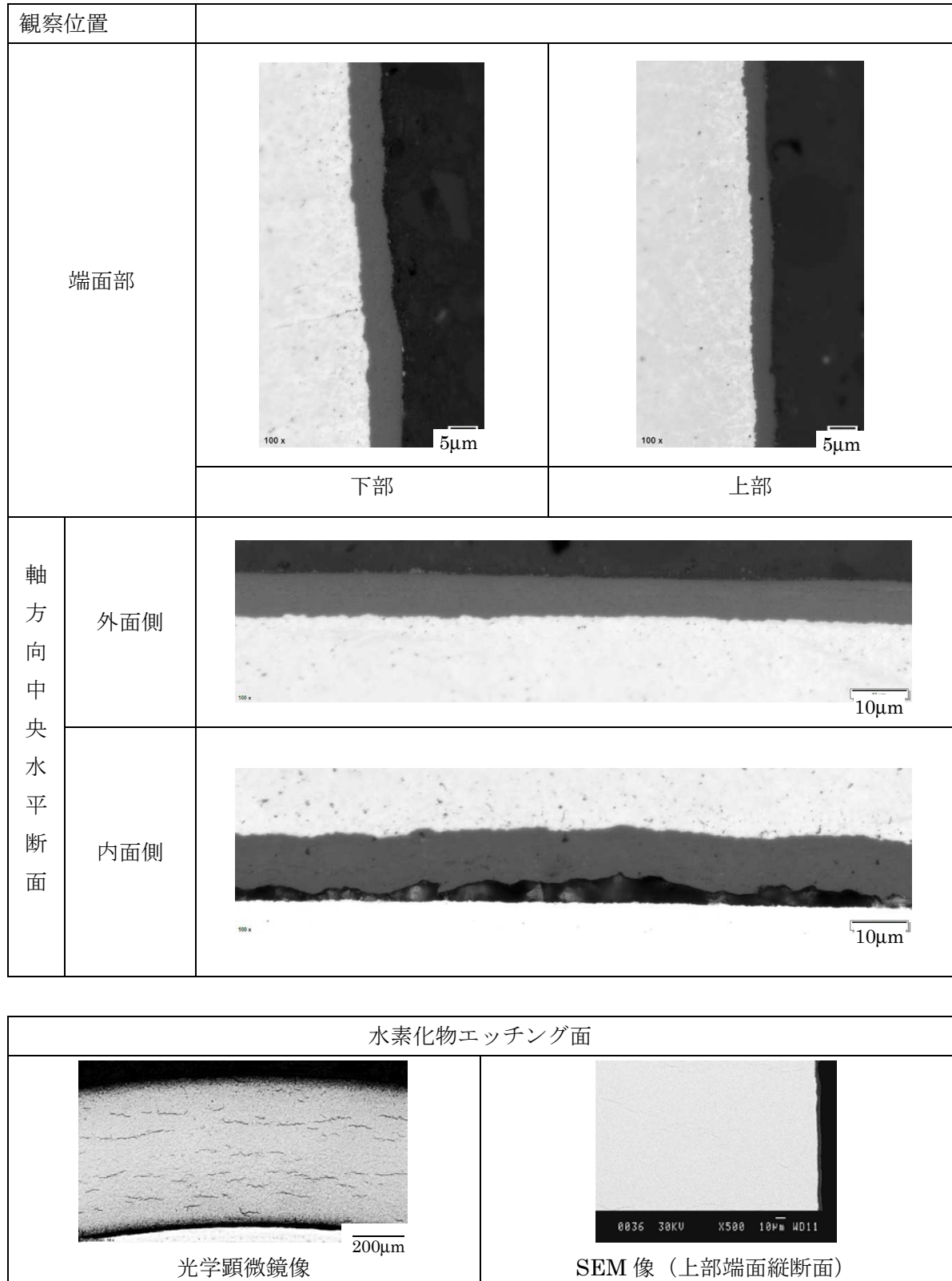

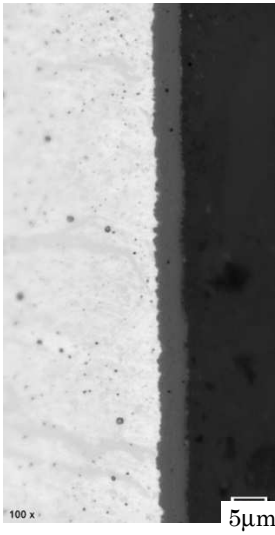
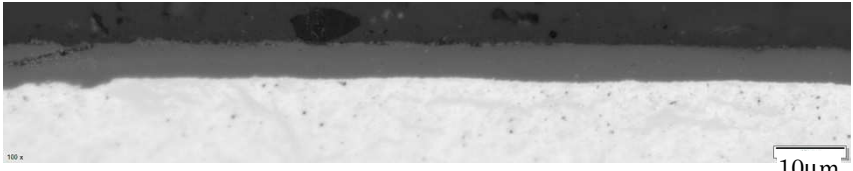
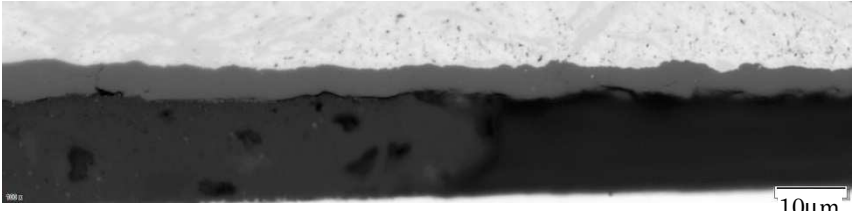


図 4.6.5-1 断面金相観察結果（続き）

試験片番号： 5-21

観察位置			
端面部			
		下部	上部
軸 方 向 中 央 水 平 断 面	外面側		
	内面側		

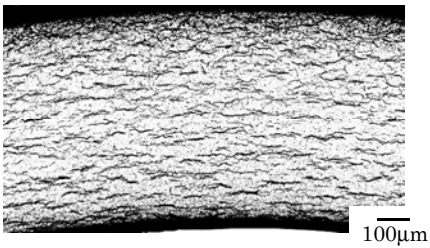
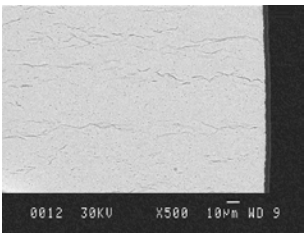
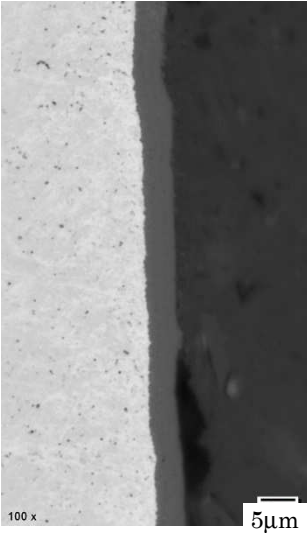
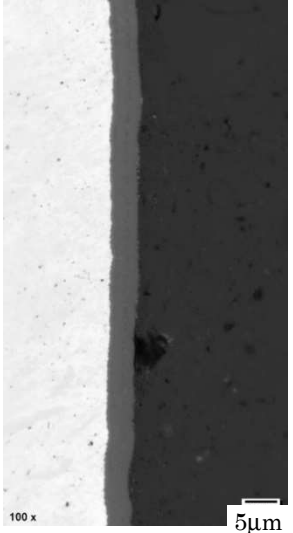
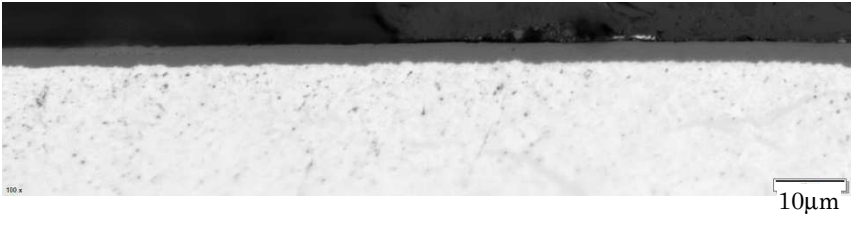
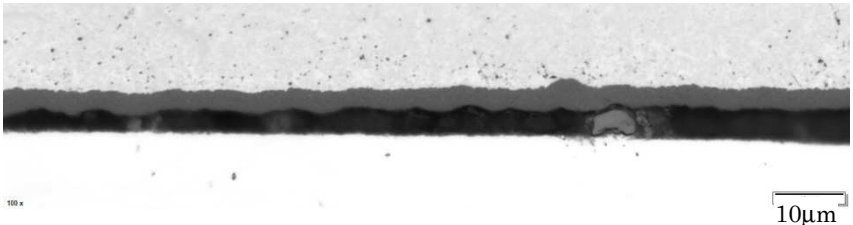
水素化物エッチング面	
	
光学顕微鏡像 (横断面)	SEM 像 (上部端面縦断面)

図 4.6.5-1 断面金相観察結果 (続き)

試験片番号： 5-22

観察位置		
端面部		
		
		<p style="text-align: center;">下部</p> <p style="text-align: center;">上部</p>
軸 方 向 中 央 水 平 断 面	外面側	
	内面側	

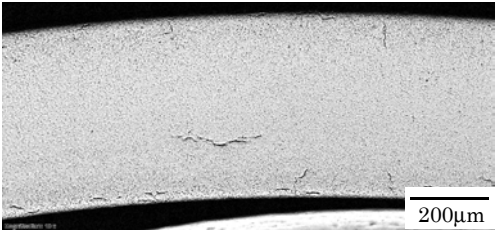
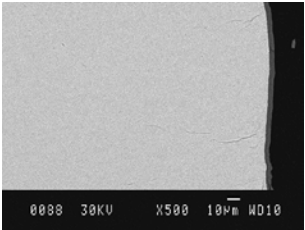
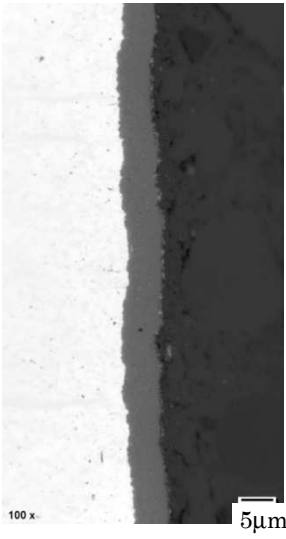
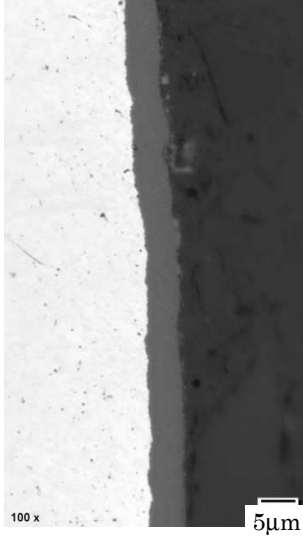
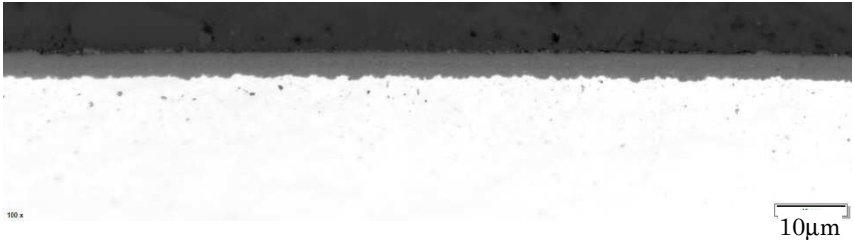
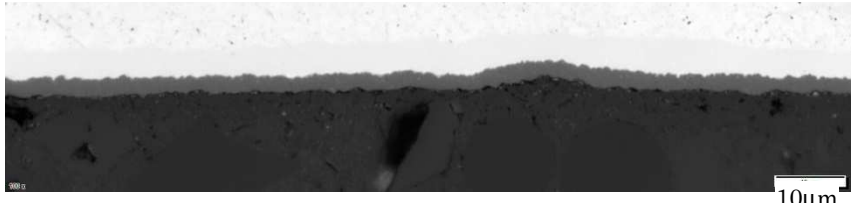
水素化物エッチング面	
	
光学顕微鏡像（横断面）	SEM 像（上部端面縦断面）

図 4.6.5-1 断面金相観察結果（続き）

試験片番号： 5-28

観察位置		
端面部		 <p>100 x 5μm</p>
		 <p>100 x 5μm</p>
		下部 上部
軸方向中央水平断面	外面側	 <p>100 x 10μm</p>
	内面側	 <p>100 x 10μm</p>

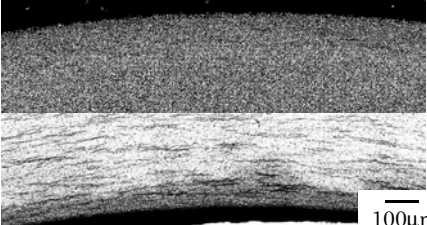
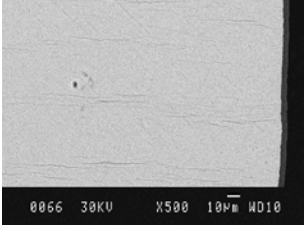
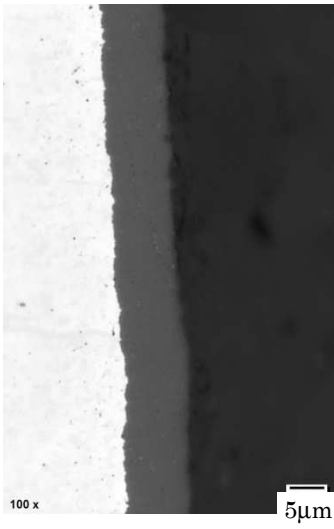
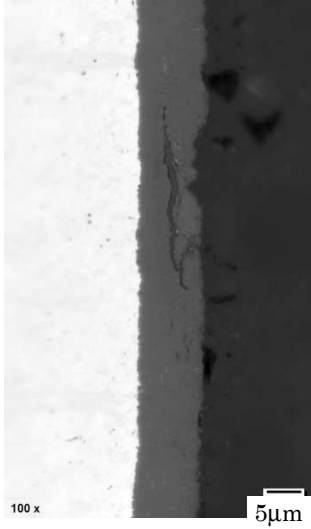
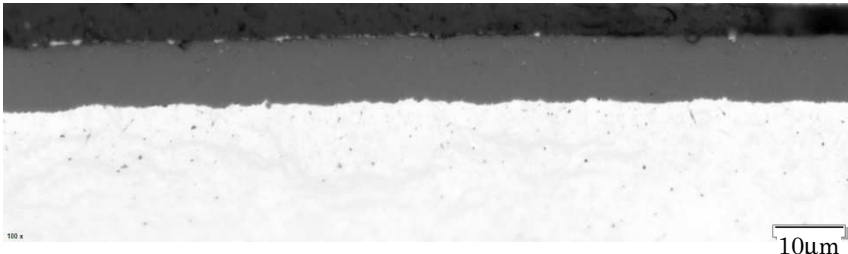
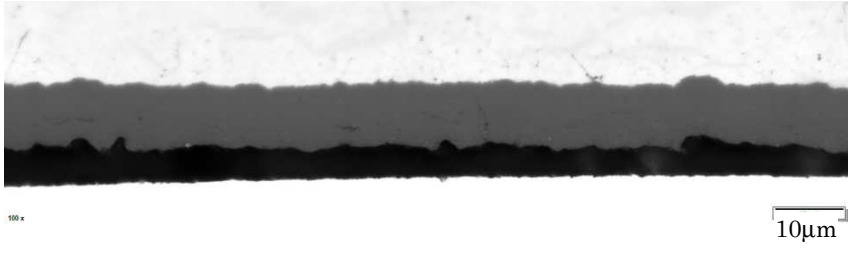
水素化物エッチング面	
 <p>100μm</p> <p>光学顕微鏡像 (横断面)</p>	 <p>0066 30KV X500 10μm WD10</p> <p>SEM 像 (上部端面縦断面)</p>

図 4.6.5-1 断面金相観察結果 (続き)

試験片番号： 5-31

観察位置			
端面部			
		下部	上部
軸方向中央水平断面	外面側		
	内面側		

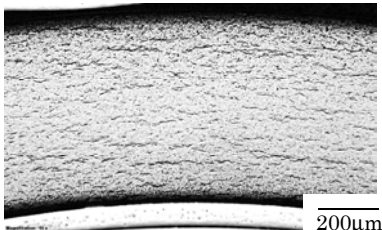
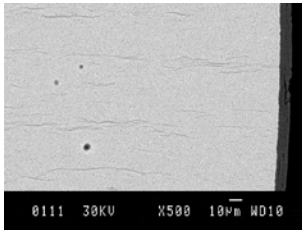
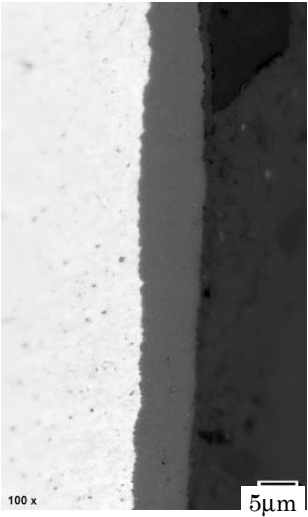
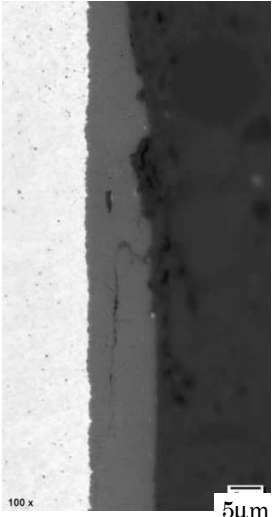
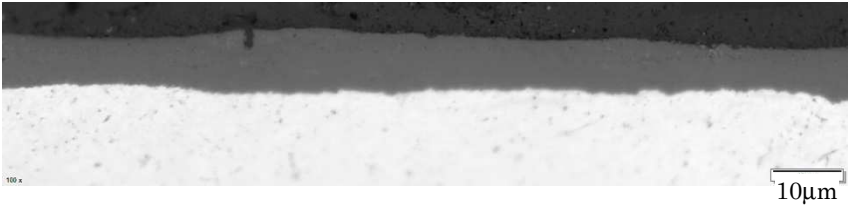
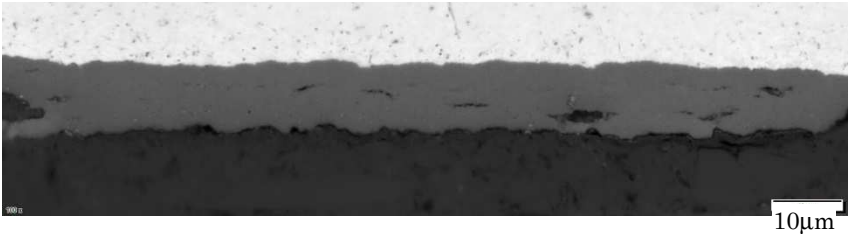
水素化物エッチング面	
	
光学顕微鏡像 (横断面)	SEM 像 (上部端面縦断面)

図 4.6.5-1 断面金相観察結果 (続き)

試験片番号： 5-34

観察位置		
端面部		 <p>100 x 5μm</p>
		 <p>100 x 5μm</p>
		下部 上部
軸方向中央水平断面	外面側	 <p>100 x 10μm</p>
	内面側	 <p>100 x 10μm</p>


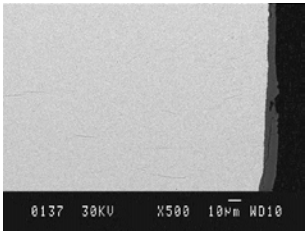
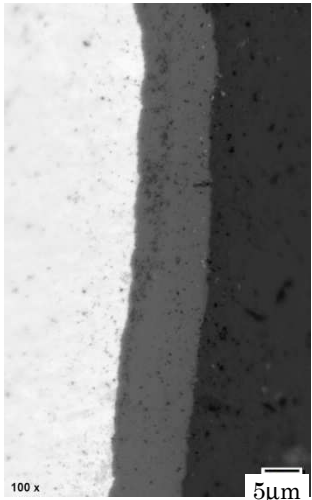
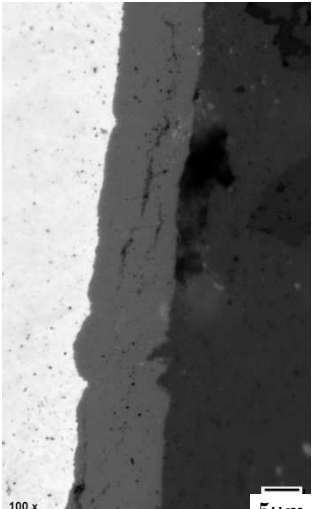
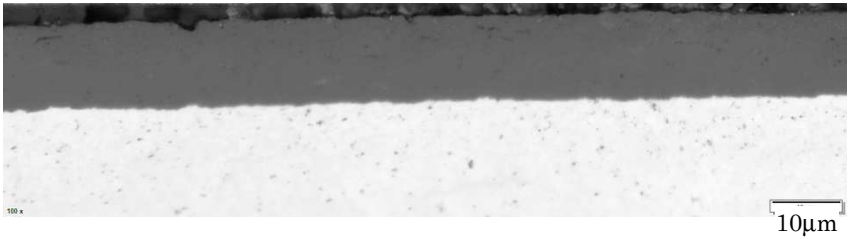
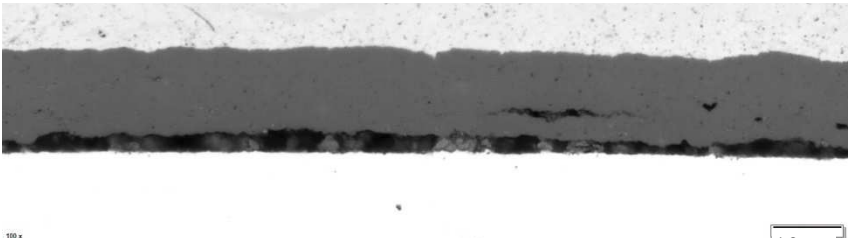
水素化物エッチング面	
 <p>100μm</p>	 <p>0137 30KV X500 10μm WD10</p>
光学顕微鏡像 (横断面)	SEM 像 (上部端面縦断面)

図 4.6.5-1 断面金相観察結果 (続き)

試験片番号： 5-35

観察位置			
端面部			
		下部	上部
軸方向中央水平断面	外面側		
	内面側		

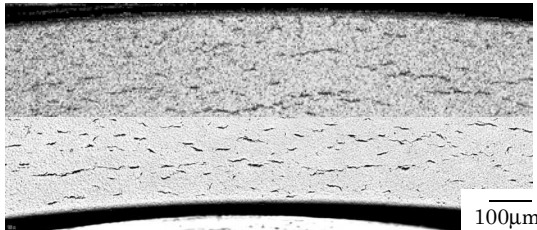
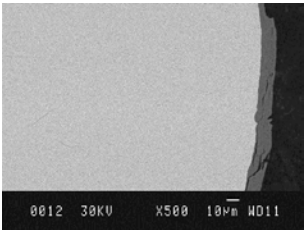
水素化物エッチング面	
	
光学顕微鏡像 (横断面)	SEM 像 (上部端面縦断面)

図 4.6.5-1 断面金相観察結果 (続き)

試験片番号： 5-36

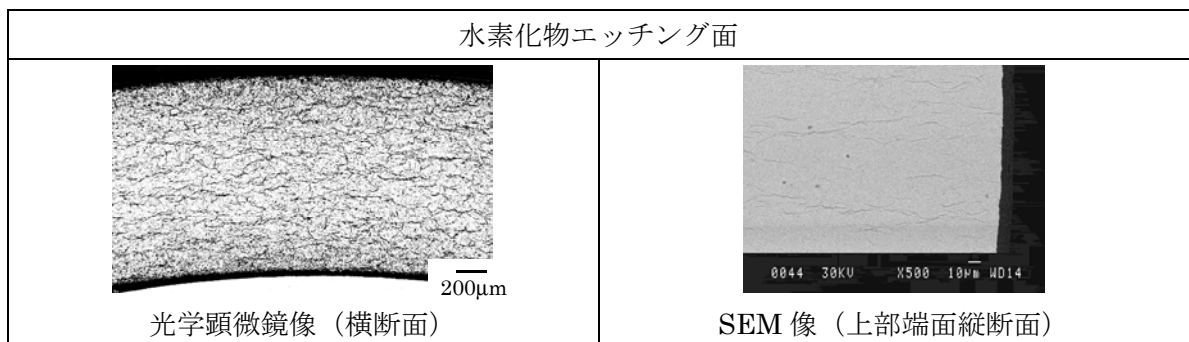
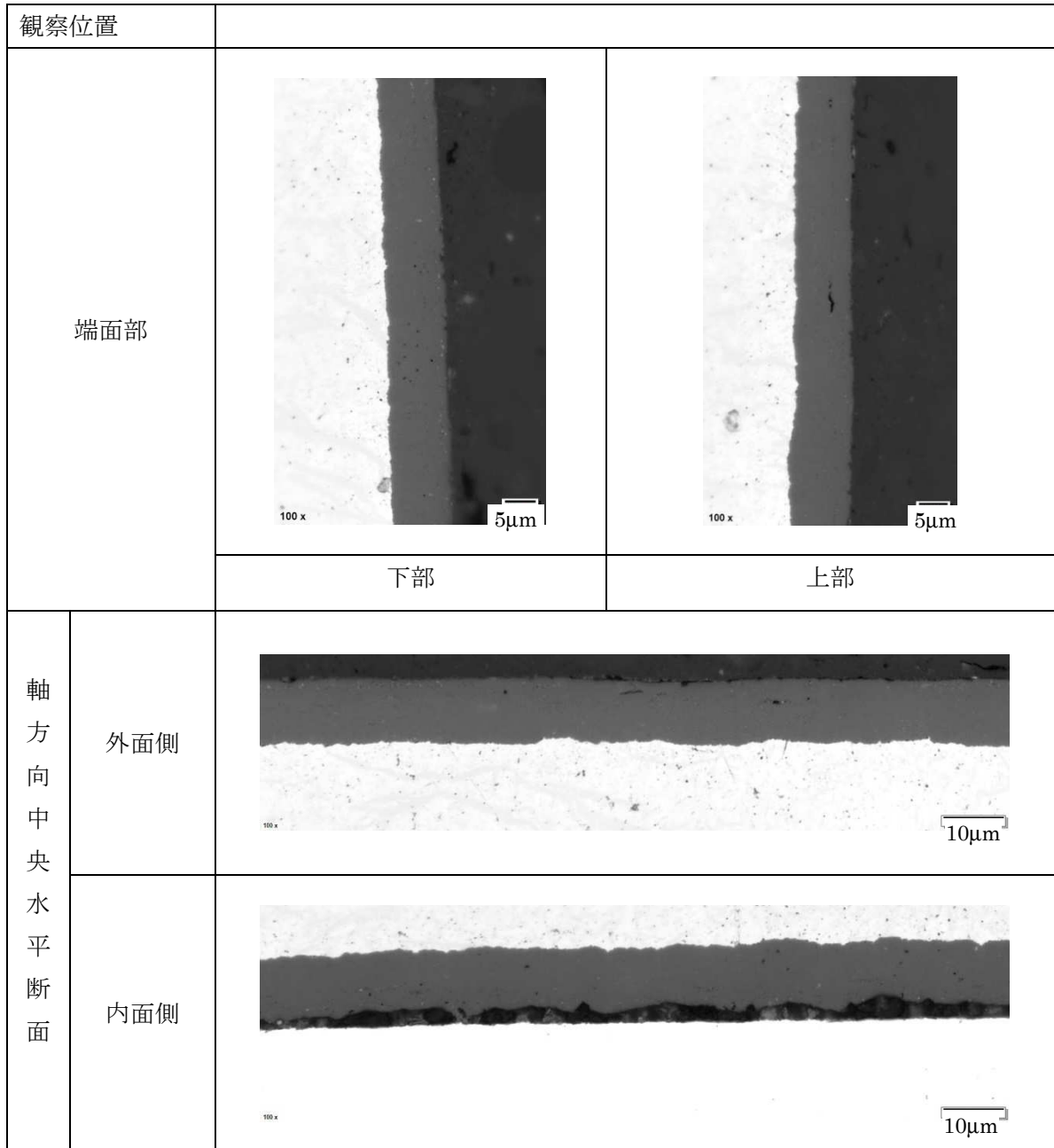


図 4.6.5-1 断面金相観察結果（続き）

試験片番号： 5-37

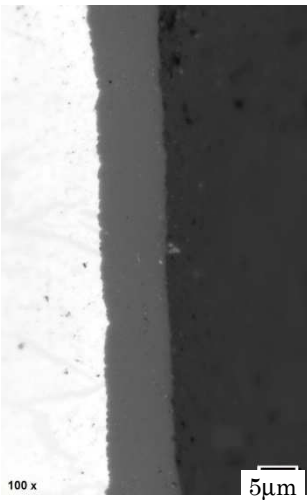
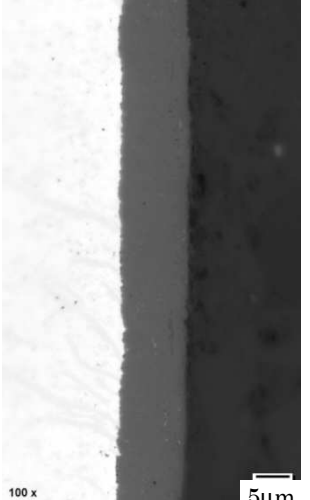
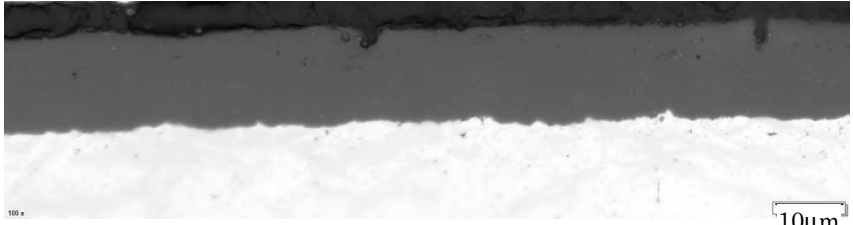
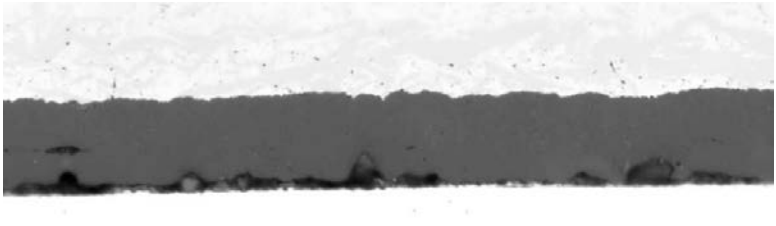
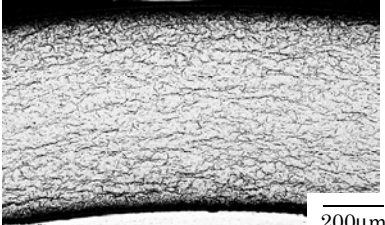
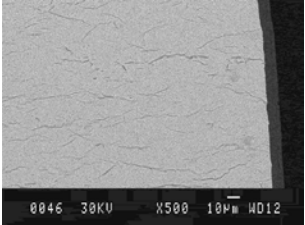
観察位置			
端面部			
		下部	上部
軸方向中央水平断面	外面側		
	内面側		
水素化物エッチング面			
			
光学顕微鏡像 (横断面)		SEM 像 (上部端面縦断面)	

図 4.6.5-1 断面金相観察結果 (続き)

試験片番号： 5-38


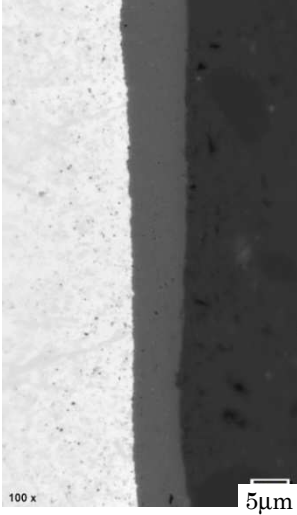
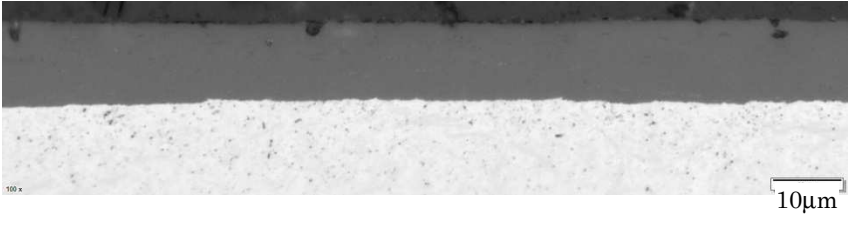
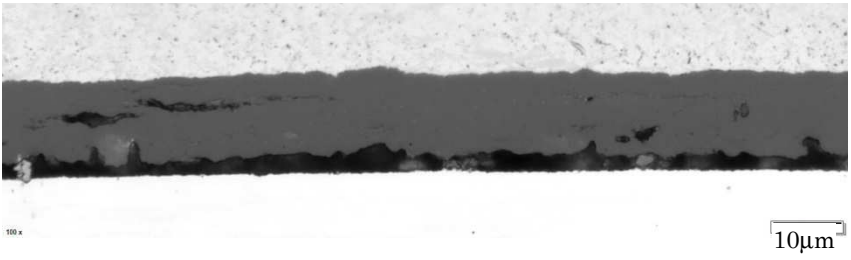
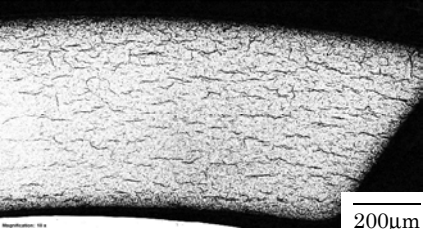
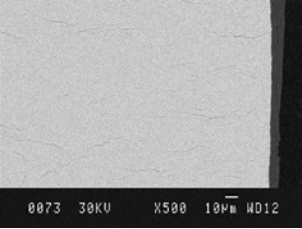
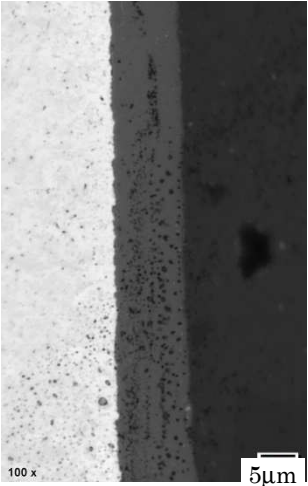
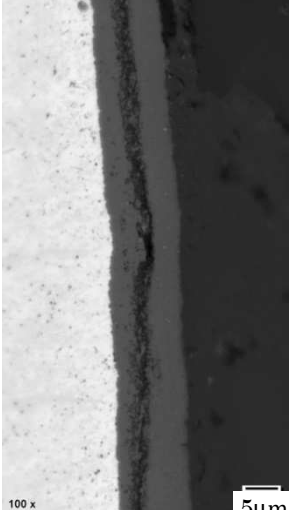
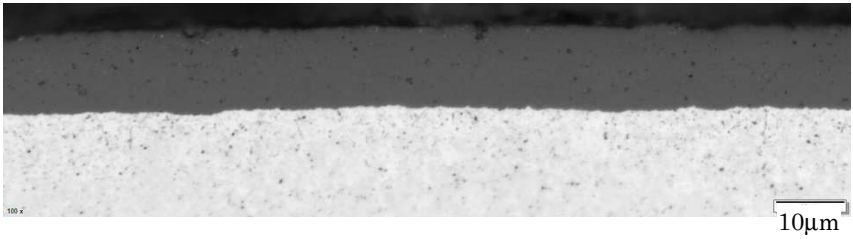
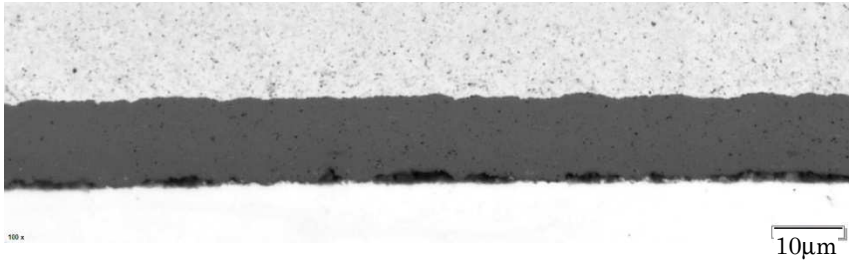
観察位置			
端面部			
		下部	上部
軸方向中央水平断面	外面側		
	内面側		
水素化物エッチング面			
			
光学顕微鏡像 (横断面)		SEM 像 (上部端面縦断面)	

図 4.6.5-1 断面金相観察結果 (続き)

試験片番号： 5-39

観察位置			
端面部			
		下部	上部
軸方向中央水平断面	外面側		
	内面側		


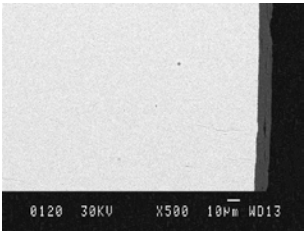

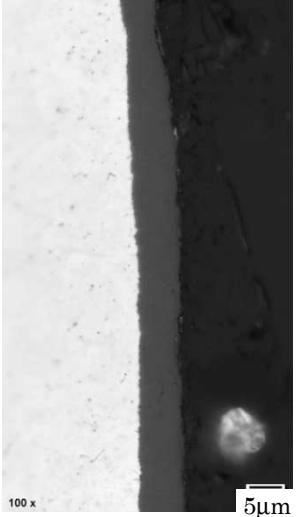
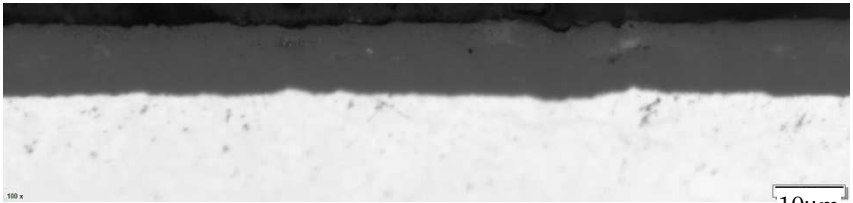
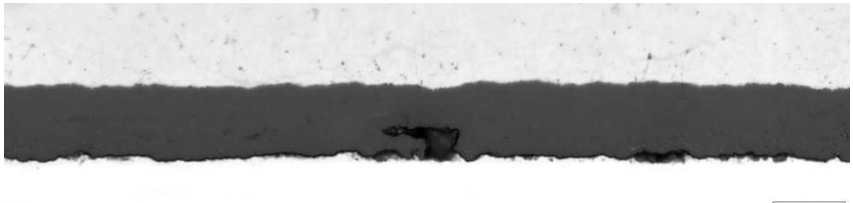
水素化物エッチング面	
	
光学顕微鏡像 (横断面)	SEM 像 (上部端面縦断面)

図 4.6.5-1 断面金相観察結果 (続き)

試験片番号： 5-40

観察位置			
端面部			
		下部	上部
軸方向中央水平断面	外面側		
	内面側		

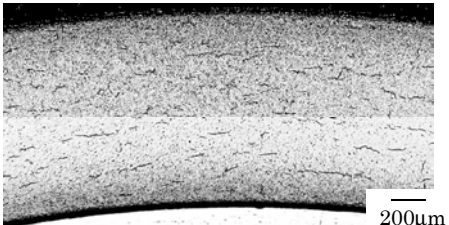
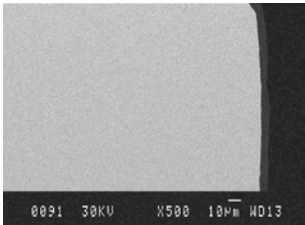
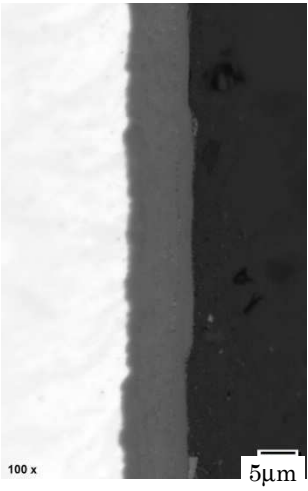

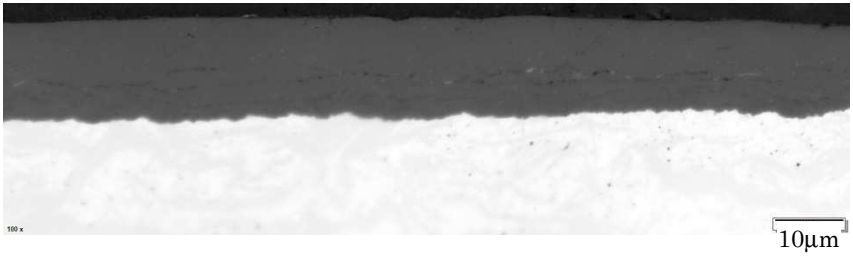
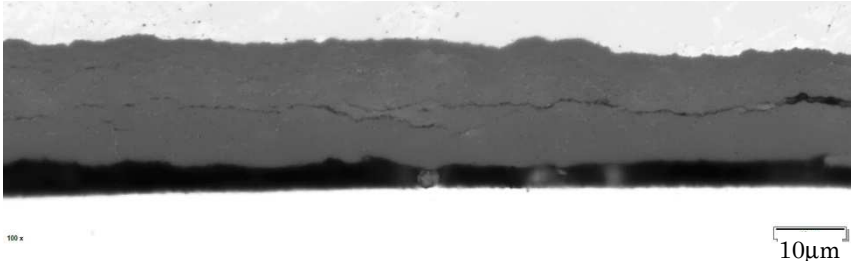
水素化物エッチング面	
	
光学顕微鏡像 (横断面)	SEM 像 (上部端面縦断面)

図 4.6.5-1 断面金相観察結果 (続き)

試験片番号： 6-7

観察位置			
端面部			
		下部	上部
軸方向中央水平断面	外面側		
	内面側		

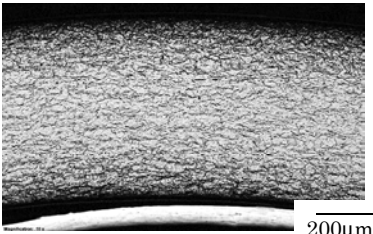
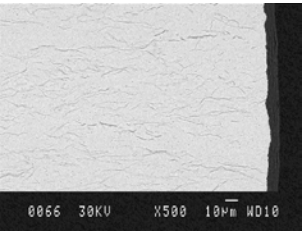
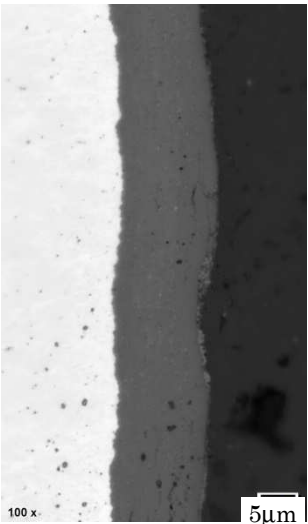
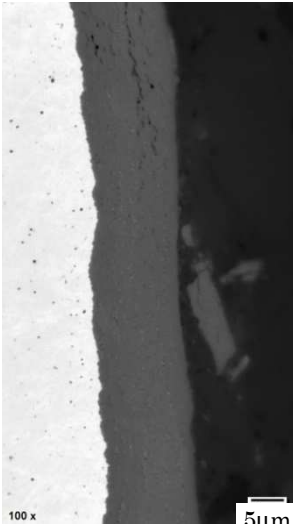
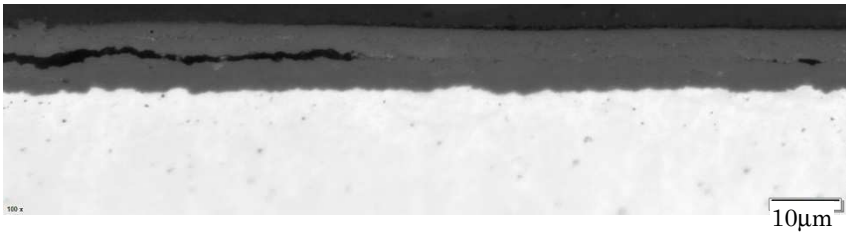
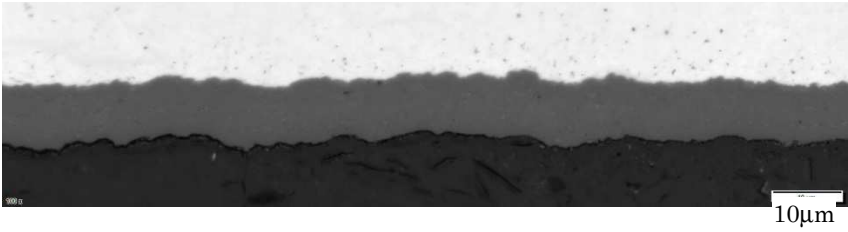
水素化物エッチング面	
	
光学顕微鏡像 (横断面)	SEM 像 (上部端面縦断面)

図 4.6.5-1 断面金相観察結果 (続き)

試験片番号： 6-14

観察位置			
端面部			
		下部	上部
軸方向中央水平断面	外面側		
	内面側		

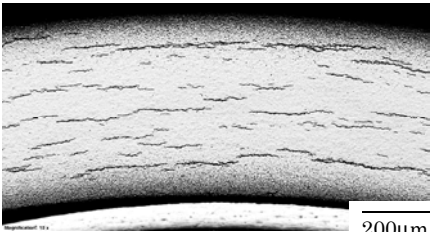
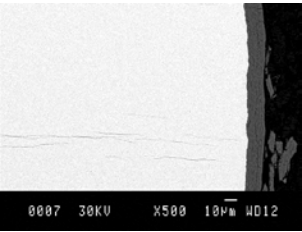
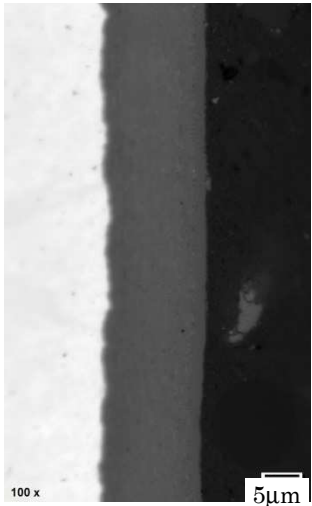
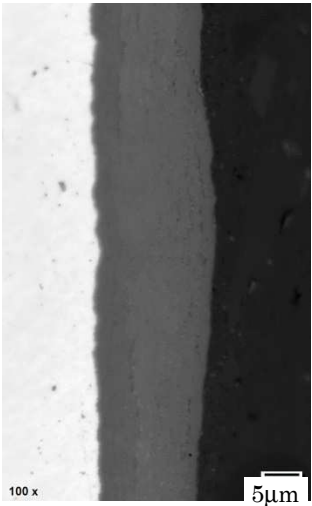
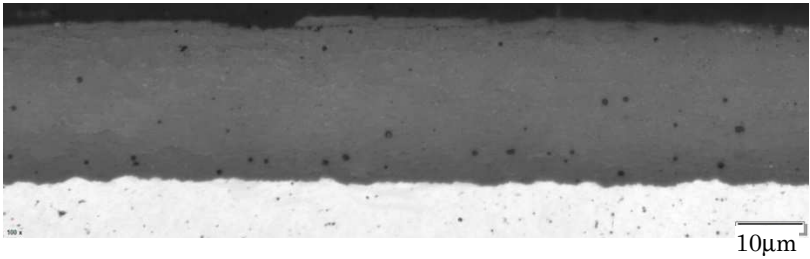
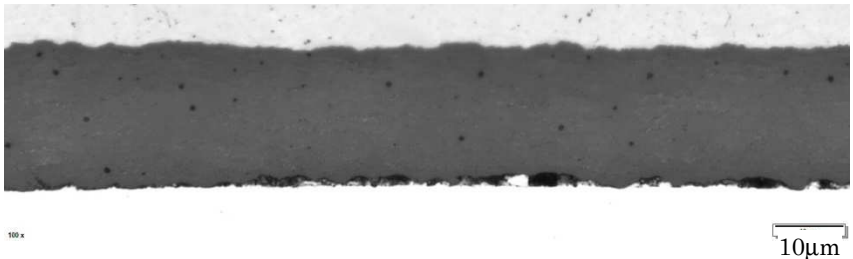
水素化物エッチング面	
	
光学顕微鏡像 (横断面)	SEM 像 (上部端面縦断面)

図 4.6.5-1 断面金相観察結果 (続き)

試験片番号： 6-18

観察位置			
端面部			
		下部	上部
軸方向中央水平断面	外面側		
	内面側		

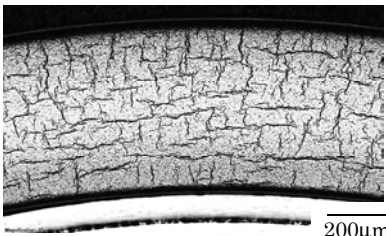
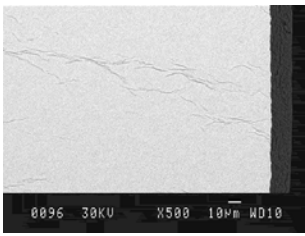
水素化物エッチング面	
	
光学顕微鏡像 (横断面)	SEM 像 (上部端面縦断面)

図 4.6.5-1 断面金相観察結果 (続き)

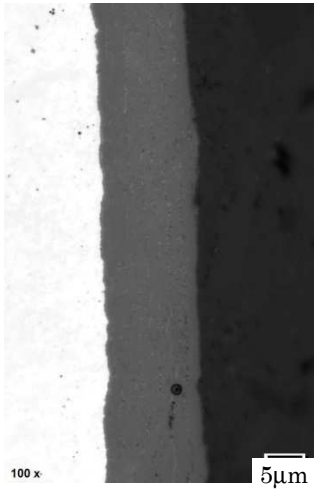
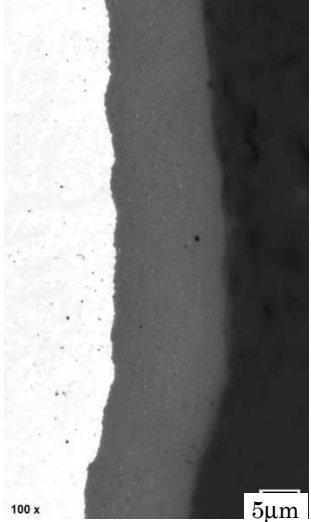
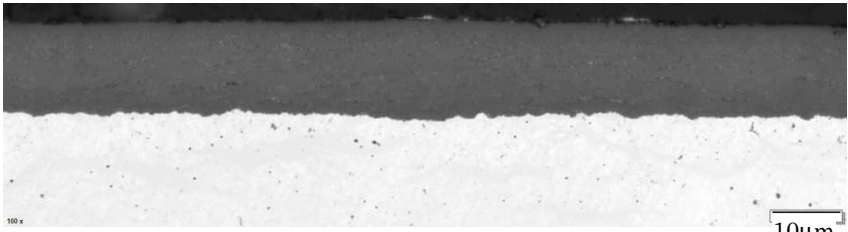
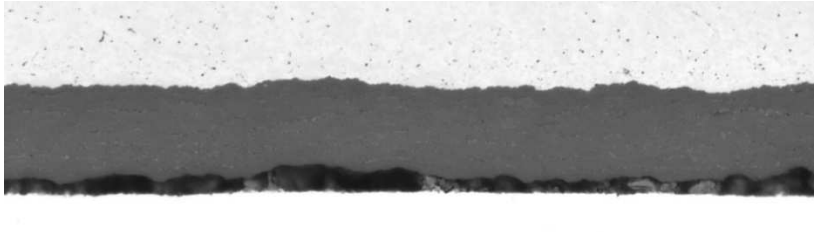
試験片番号： 6-25

観察位置	
端面部	<p style="text-align: center;">下部</p>
	<p style="text-align: center;">上部</p>
軸 方 向 中 央 水 平 断 面	<p style="text-align: center;">外面側</p>
	<p style="text-align: center;">内面側</p>

水素化物エッチング面	
<p style="text-align: center;">光学顕微鏡像 (横断面)</p>	<p style="text-align: center;">SEM 像 (上部端面縦断面)</p>

図 4.6.5-1 断面金相観察結果 (続き)

試験片番号： 6-29

観察位置		
端面部	 <p>100 x 5μm</p> <p>下部</p>	 <p>100 x 5μm</p> <p>上部</p>
軸方向中央水平断面	外面側	 <p>100 x 10μm</p>
	内面側	 <p>100 x 10μm</p>

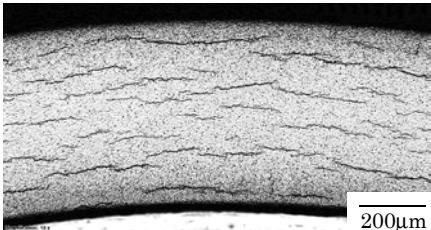
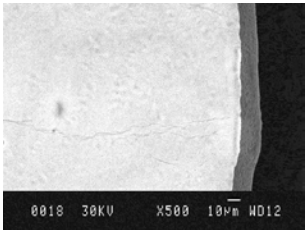
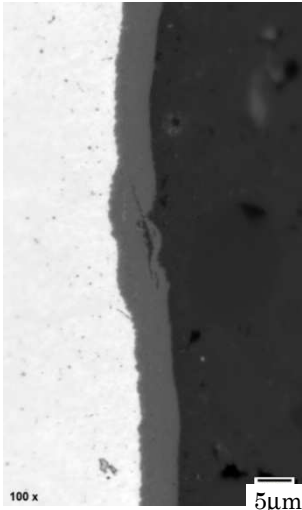

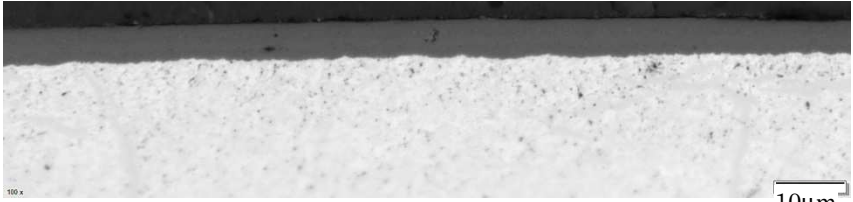
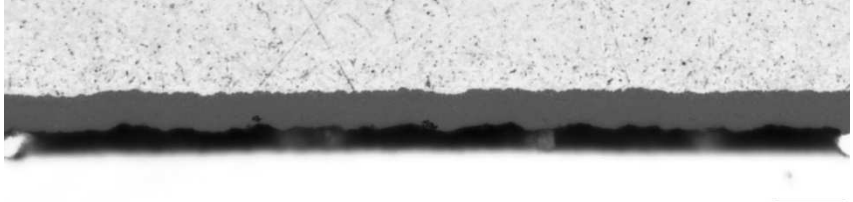
水素化物エッチング面	
 <p>200μm</p> <p>光学顕微鏡像（横断面）</p>	 <p>0018 30KV X500 10μm WD12</p> <p>SEM 像（上部端面縦断面）</p>

図 4.6.5-1 断面金相観察結果（続き）

試験片番号： 6-31

観察位置		
端面部		 <p>100 x 5μm</p>
		 <p>100 x 5μm</p>
	下部	上部
軸 方 向 中 央 水 平 断 面	外面側	 <p>100 x 10μm</p>
	内面側	 <p>100 x 10μm</p>

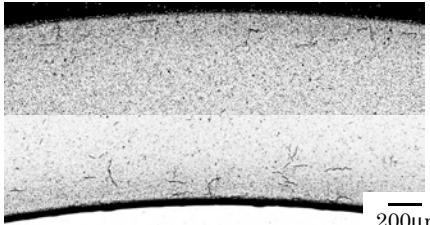
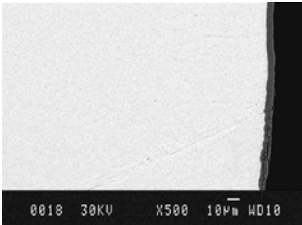
水素化物エッチング面	
 <p>200μm</p> <p>光学顕微鏡像 (横断面)</p>	 <p>SEM 像 (上部端面縦断面)</p>

図 4.6.5-1 断面金相観察結果 (続き)

試験片番号： 6-36



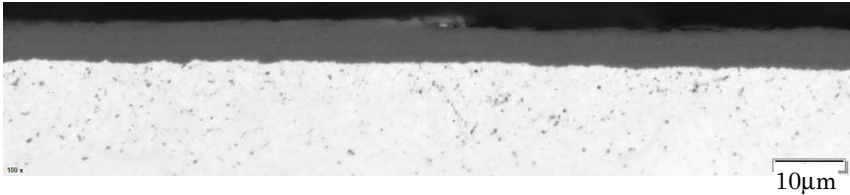
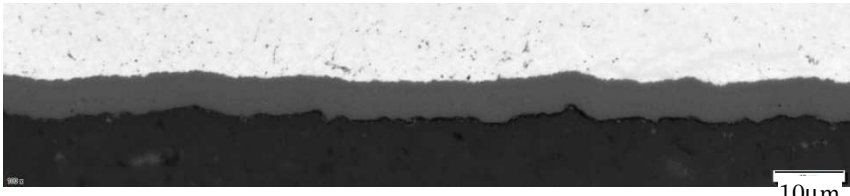
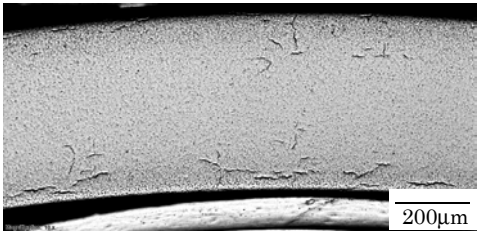
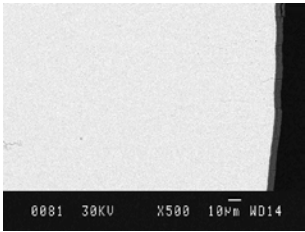
観察位置			
端面部			
		下部	上部
軸方向中央水平断面	外面側		
	内面側		
水素化物エッチング面			
			
光学顕微鏡像（横断面）		SEM 像（上部端面縦断面）	

図 4.6.5-1 断面金相観察結果（続き）

試験片番号： 6-38

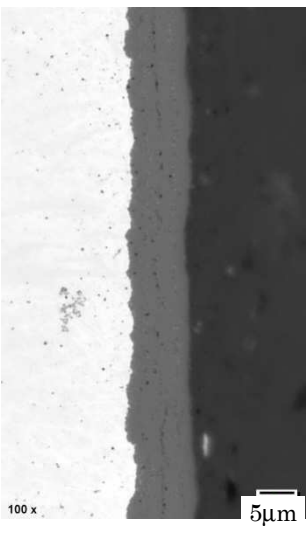
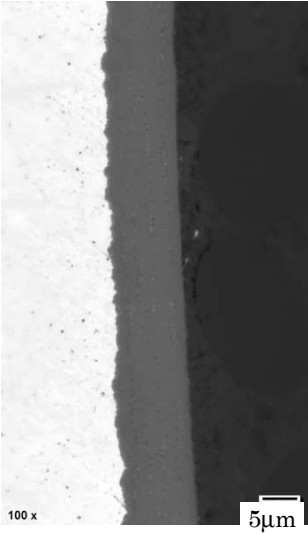
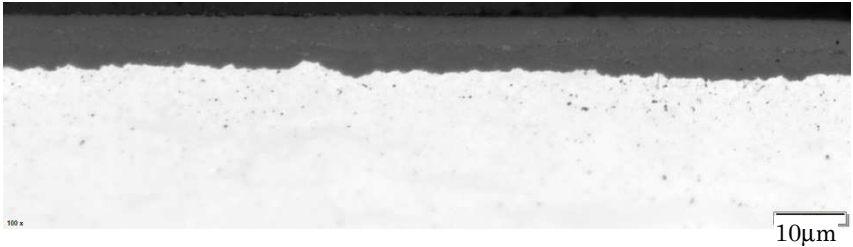
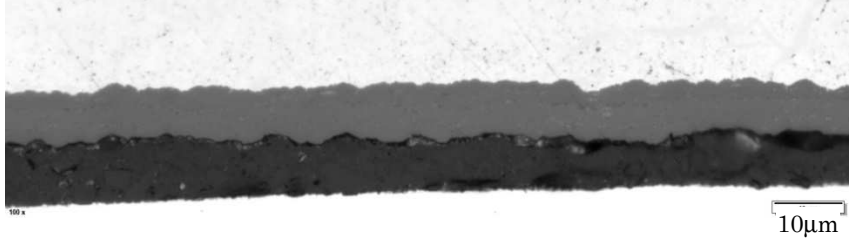
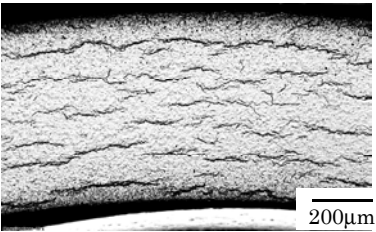
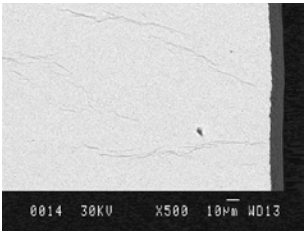
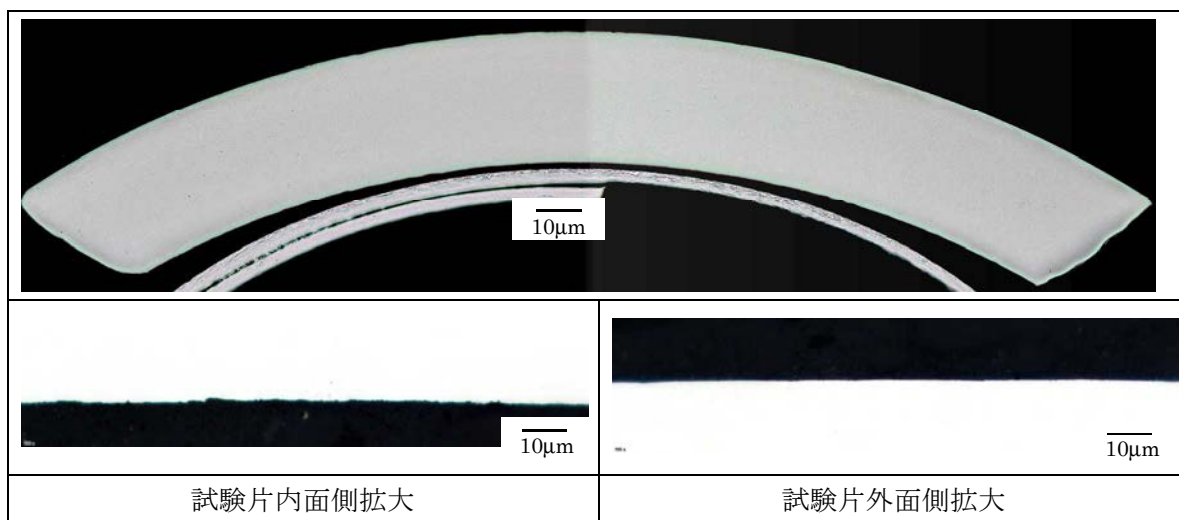
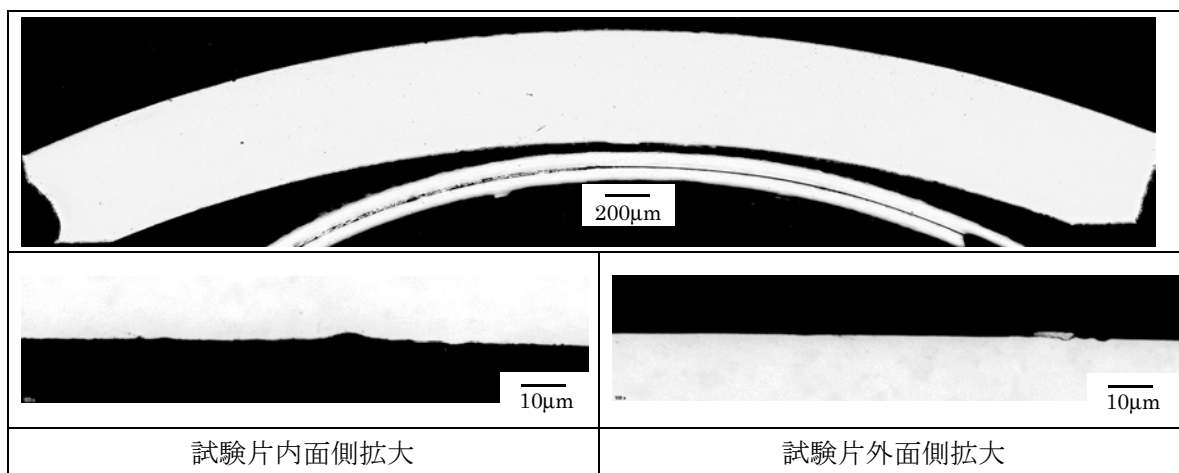
観察位置			
端面部			
		下部	上部
軸方向中央水平断面	外面側		
	内面側		
水素化物エッチング面			
			
	光学顕微鏡像 (横断面)		SEM 像 (上部端面縦断面)

図 4.6.5-1 断面金相観察結果 (続き)

試験片番号 : 1



試験片番号 : 2



試験片番号 : 3

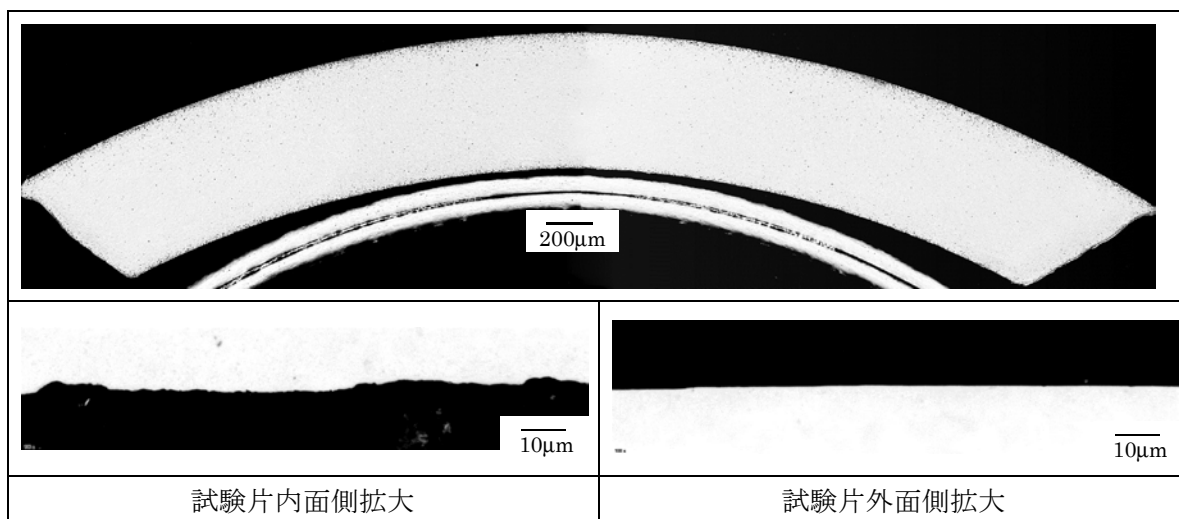
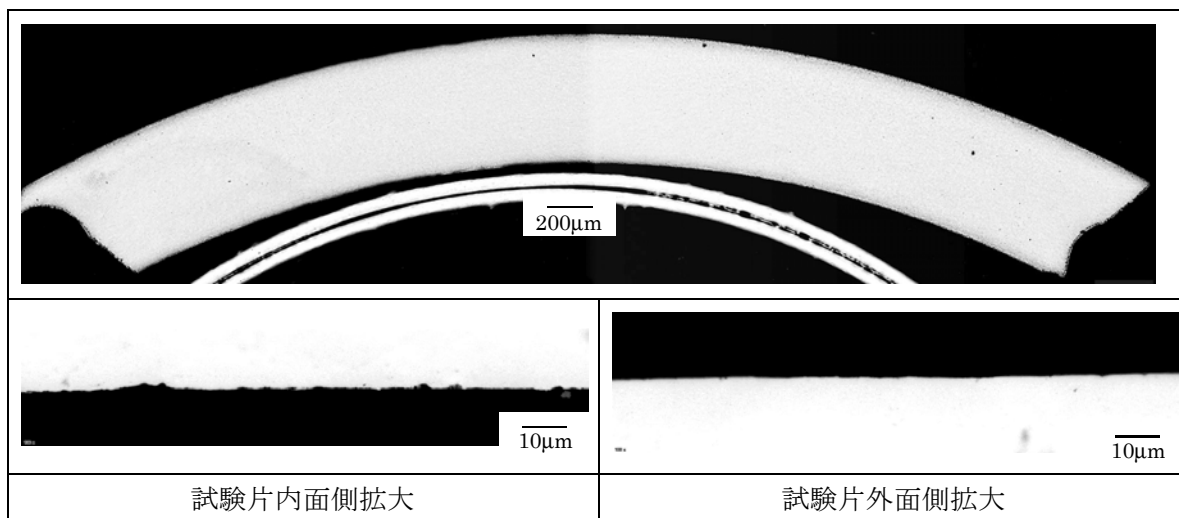


図 4.6.5-1 断面金相観察結果 (続き)

試験片番号：4



試験片番号：5

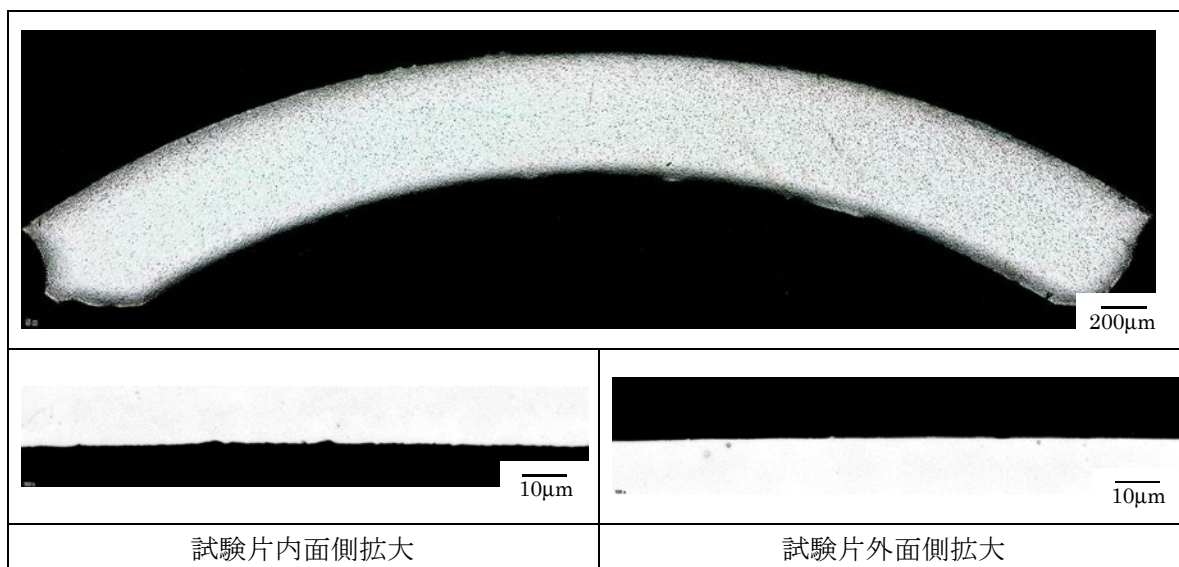
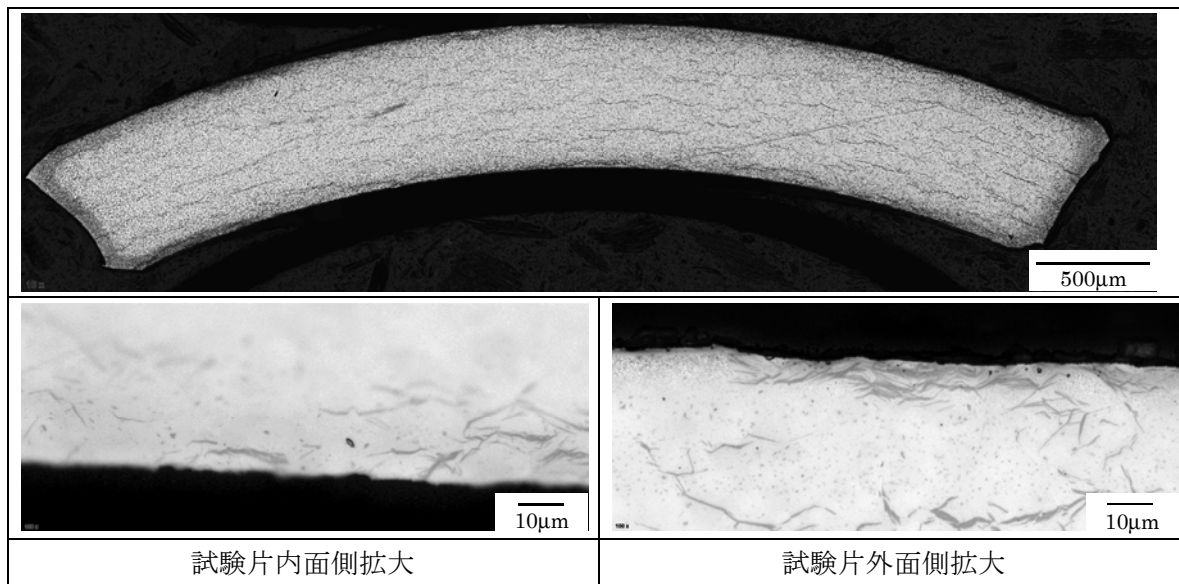


図 4.6.5-1 断面金相観察結果 (続き)

試験片番号：6



試験片番号：7

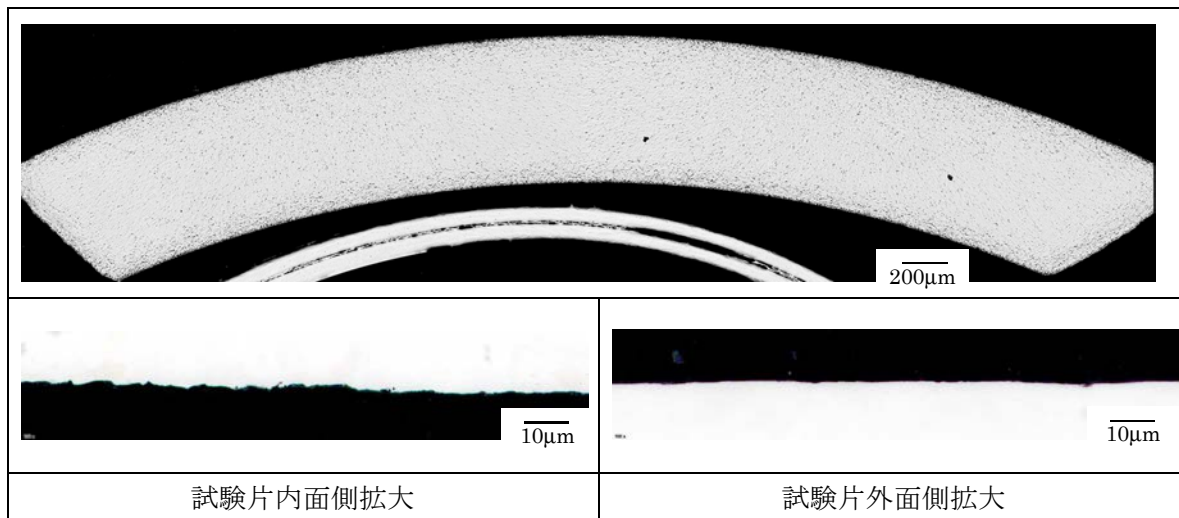
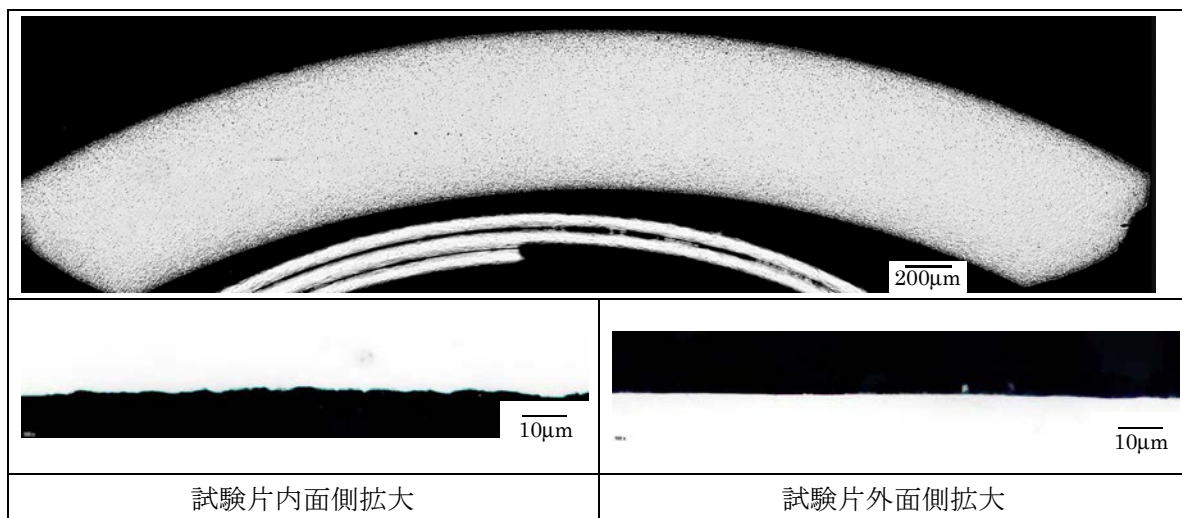


図 4.6.5-1 断面金相観察結果（続き）

試験片番号：8



試験片番号：9

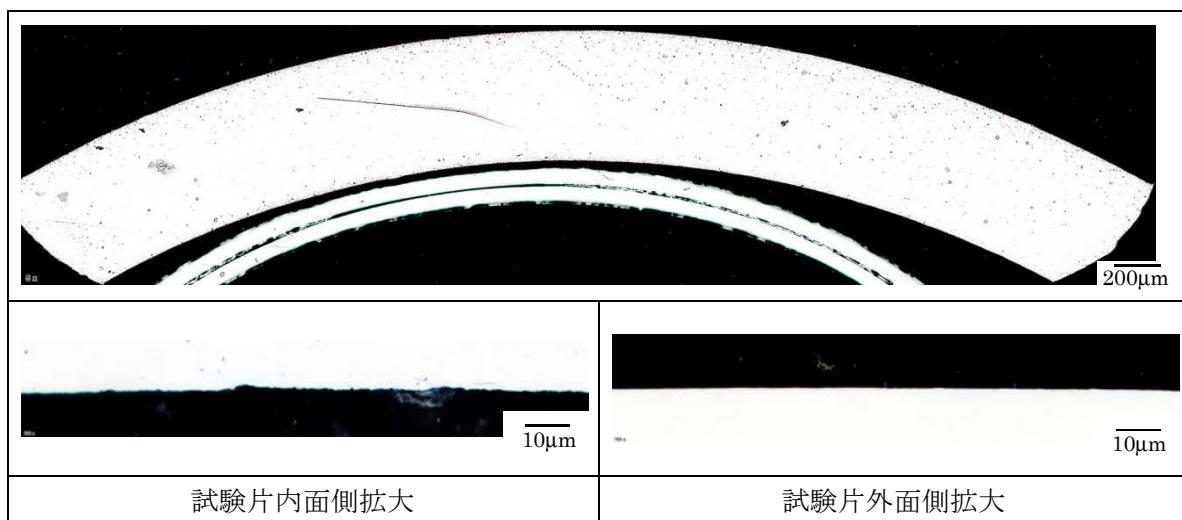
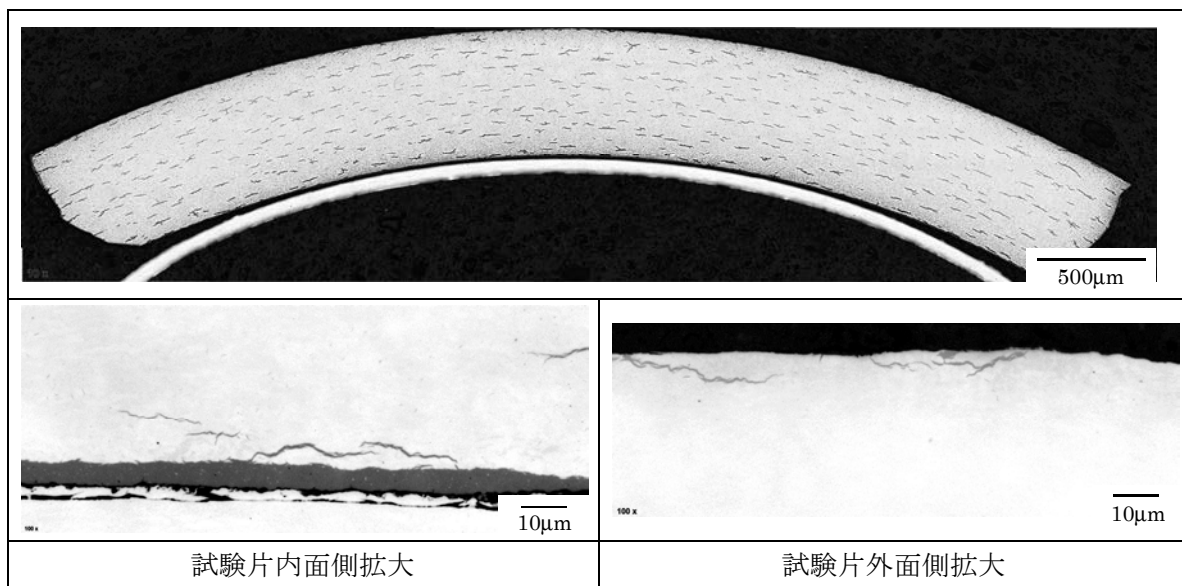


図 4.6.5-1 断面金相観察結果（続き）

試験片番号：10



試験片番号：11

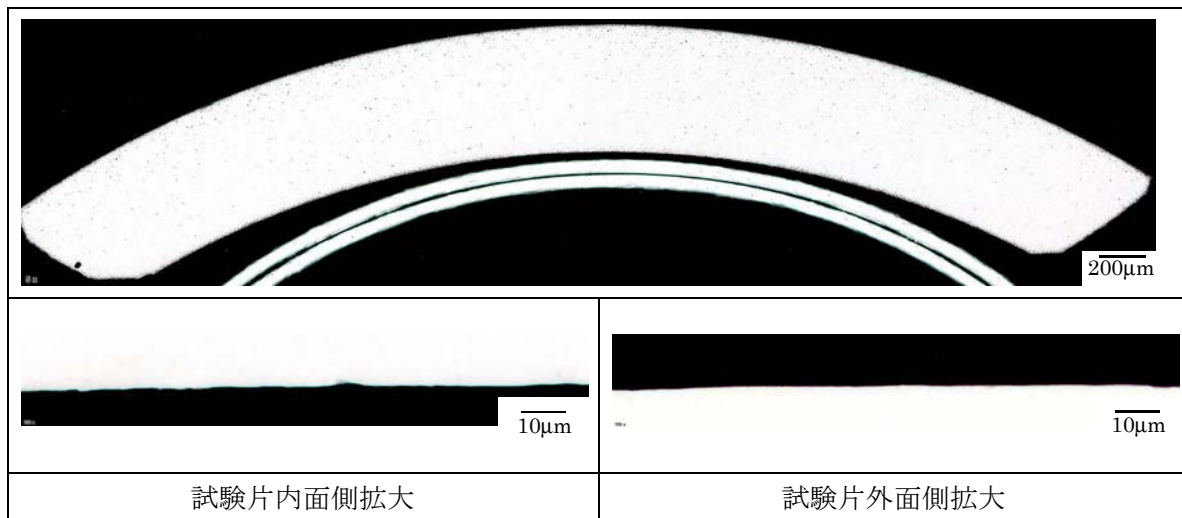
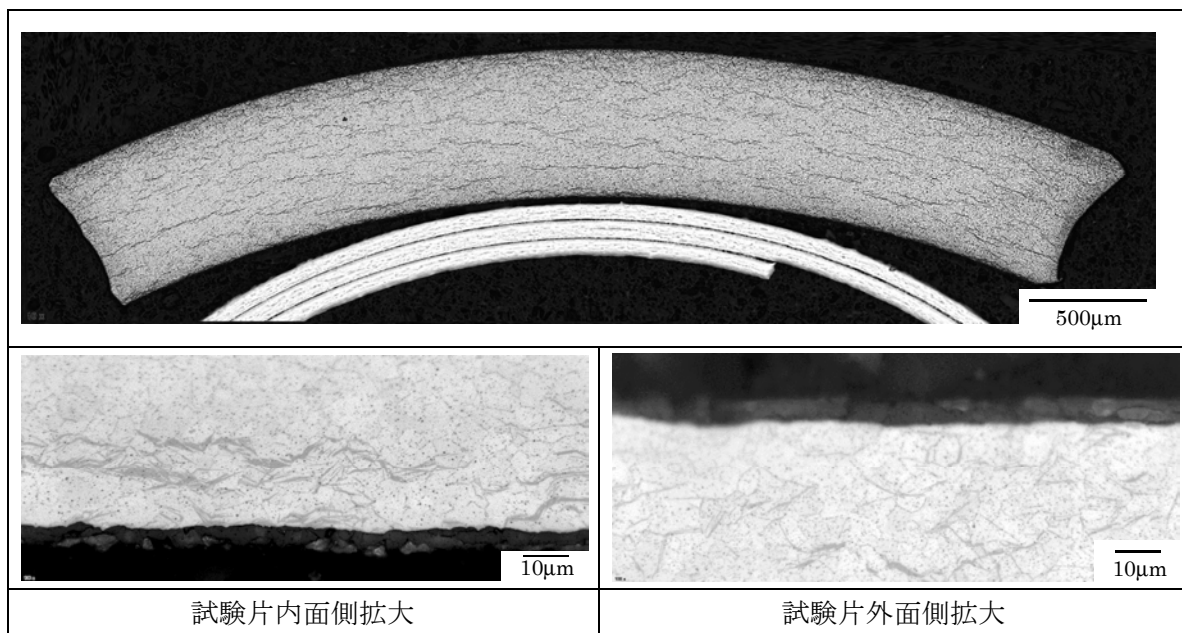


図 4.6.5-1 断面金相観察結果（続き）

試験片番号 : 12



試験片番号 : 13

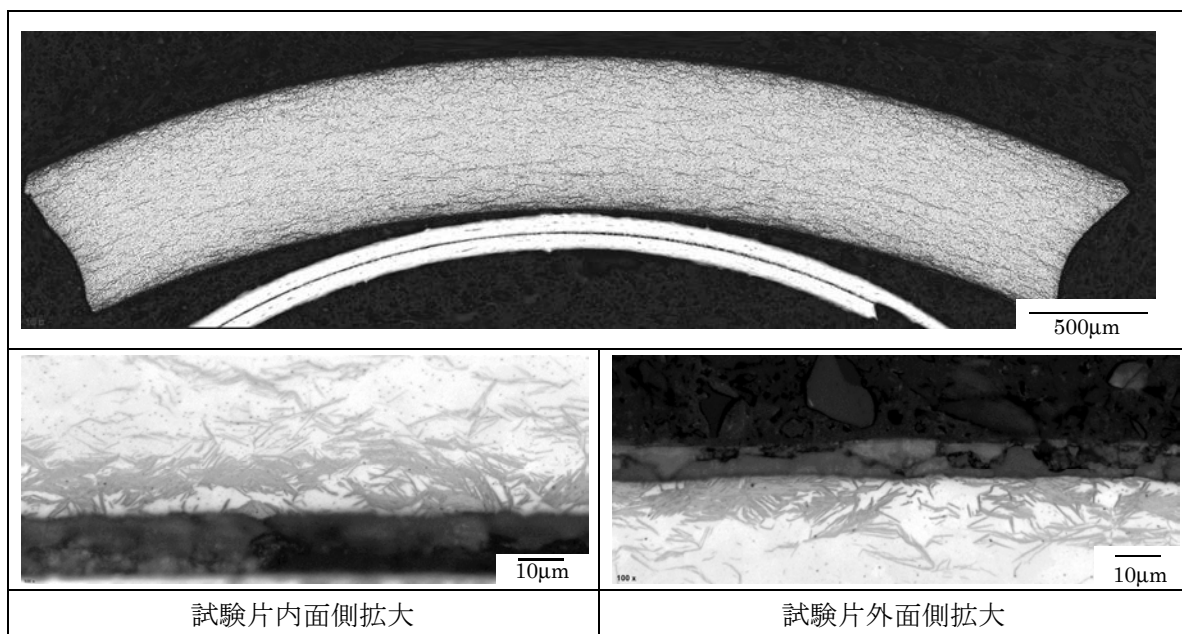


図 4.6.5-1 断面金相観察結果 (続き)





















試験片 番号	引張試験前 (外面)	引張試験後 (外面)
5-3		
5-10		
5-31		
5-34		
5-35		
5-36		
5-37		
5-38		
5-39		
5-40		

図 4.6.5-2(a) 引張試験片の外観 (IFA-735 装荷)








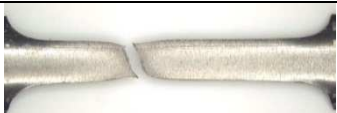














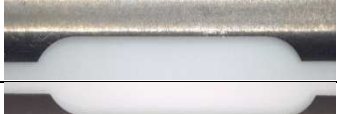



試験片 番号	引張試験前 (外面)	引張試験後 (外面)
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		

図 4.6.5-2(b) 引張試験片の外観 (アーカイブ材)

試験片 番号	引張試験後破面	破面拡大
5-3		
5-10		
5-31		
5-34		
5-35		
5-36		
5-37		
5-38		
5-39		
5-40		

図 4.6.5-3(a) 引張試験片の破面観察結果 (IFA-735 装荷)

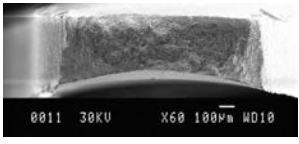
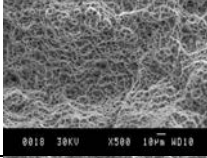
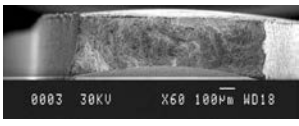
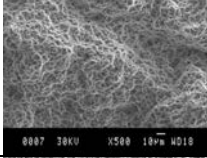
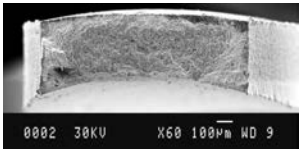
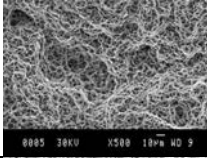
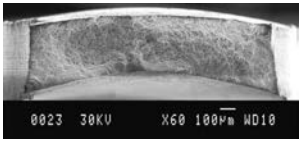
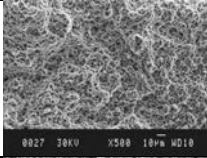
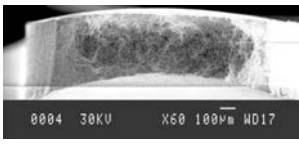
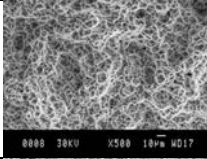
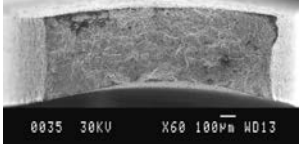
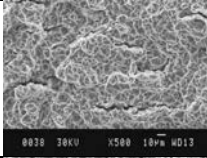
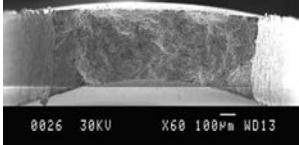
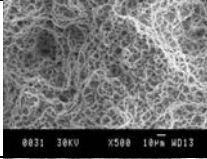
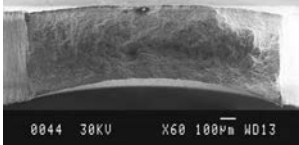
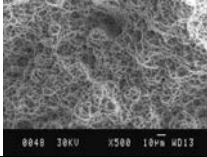
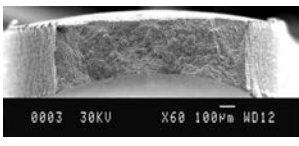
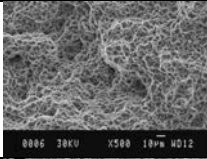
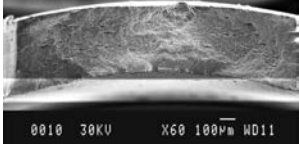
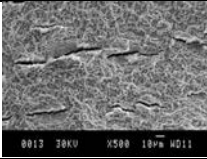
試験片 番号	引張試験後破面	破面拡大
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

図 4.6.5-3(b) 引張試験片の破面観察結果 (アーカイブ材)

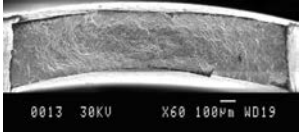
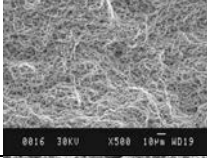
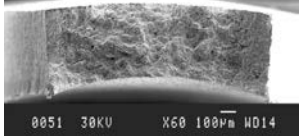
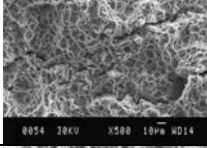
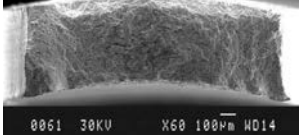
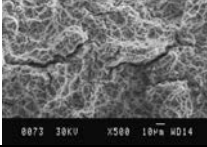
試験片 番号	引張試験後破面	破面拡大
11		
12		
13		

図 4.6.5-3(b) (続き) 引張試験片の破面観察結果 (アーカイブ材)

4.7 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の設置準備作業

燃料ペレットを除去しない状態の高燃焼度軽水炉燃料棒を対象とした LOCA 模擬試験（以下、実燃料入り LOCA 模擬試験）の実施に向け、試験条件案を検討するとともに、試験に供する試験燃料棒の作製に着手した。また、実燃料入り LOCA 模擬試験装置をホットセル内に設置するための準備作業を実施した。

4.7.1 実燃料入り LOCA 模擬試験の概要

(1) 背景と目的

欧州の試験施設で近年実施された、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 模擬実験において、その昇温過程で燃料被覆管が破裂した際に、細片化した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）が確認されている。軽水炉の LOCA 時及び LOCA 後の燃料及び炉心冷却性に関してこの FFRD 現象の影響を評価しておくことが必要であり、このために着目すべき重要な現象として、LOCA 時の燃料棒内で生じるペレットの細片化、軸方向の移動及び燃料棒外への放出が挙げられる。

(a) ペレットの細片化

ペレットの細片化に伴って、ペレット内部に閉じ込められていた FP ガス等が放出される、ないしペレットの比表面積が増大することにより、燃料ペレットから放出される FP の量が増大する可能性がある。従って、LOCA 時に燃料ペレットが細片化する条件を評価することが重要である。

(b) ペレットの燃料棒内軸方向再配置

細片化したペレットが被覆管の膨れ部に集積することで、局所的に被覆管温度が上昇し、酸化が進むことなどによって被覆管の脆化が進行する可能性がある。また、細片化したペレットが被覆管の膨れ部、すなわち、破裂開口部近傍に集積した場合には、燃料棒内部に流入する水蒸気の流れを阻害し、LOCA 時の被覆管の水素吸収（二次水素化）挙動に影響を及ぼす可能性がある。このため、細片化したペレットの燃料棒内軸方向再配置が被覆管温度上昇や二次水素化挙動に及ぼす影響を評価することが重要である。

(c) 破裂開口からのペレット細片の放出

燃料棒から放出されたペレット片による冷却材流路閉塞により、炉心の冷却可能形状が失われる可能性がある。また、放出されたペレット片が ECCS に流入することで、その稼働状態に影響を及ぼすことも考えられる。従って、細片化したペレットの燃料棒外への移行挙動を評価することが重要である。

本事業では燃料ペレットを除去しない状態の短尺の軽水炉燃料棒に対する LOCA 模擬試験を実施することにより、上記の FFRD 現象のような LOCA 時の燃料挙動に関連するデータ及び知見を整備することを目的とする。

(2) 試験の概要

本試験の具体的な内容は次の通りである。本試験に供する試験燃料棒として、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ものを想定する。図 4.7-1 に実燃料入り LOCA 模擬試験用燃料棒の構造を示す。この試験燃料棒を図 4.7-2 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 4.7-3(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 4.7-3 (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 4.7-3 (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。

表 4.7-1 に上記の試験の種類と取得予定のデータ及び知見を示す。

(3) 試験条件の検討

(a) 試験対象燃料の案

実燃料入り LOCA 模擬試験に供する候補燃料を表 4.7-2 に示す。表 4.7-2 に記載の試験対象燃料は欧州の PWR 及び BWR で照射された高燃焼度燃料の中(1, 2)から選定した。選定に

あたり、先行研究において報告されている LOCA 時の燃料ペレットの細片化発生しきい値である燃焼度 60–75 GWd/t⁽³⁾を入力情報とし、このしきい燃焼度より燃焼度が高い燃料と低い燃料の双方を対象とした。表 4.7-2 に記載の PWR 燃料の燃焼度はいずれも上記しきい燃焼度に比べて同等以上であることから、より低い燃焼度の PWR 燃料が利用可能となった際には試験条件を見直すこととする。

(b) 試験条件案

破裂試験及び急冷破断試験の両試験の燃料被覆管の長さは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⁽⁴⁻⁸⁾と比較ができることを考慮し 190 mm とした。

破裂試験及び急冷破断試験の両試験の試験燃料棒の初期内圧については、LOCA 時の被覆管の膨れ及び破裂開口がより大きくなること、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⁽⁴⁻⁸⁾との比較ができることを考慮し約 5 MPa に設定した。ジルカロイ被覆管の膨れ率と破裂開口の大きさは破裂時の被覆管の結晶相状態の影響を受けることが報告されている^(9, 10)。過去に原子力機構で実施した試験では、被覆管の初期内圧が 5 MPa の場合、破裂時被覆管温度は約 950–1050 K となり被覆管の膨れ率及び破裂開口面積が最も大きくなる温度で破裂する傾向を示した⁽⁴⁻⁸⁾。被覆管の膨れ率が大きい程、被覆管はより顕著に薄肉化する。また、破裂開口サイズが大きいほど、燃料棒外に放出される燃料ペレット片の割合が大きくなると推測される。さらに、LOCA 時の燃料ペレットの細片化には被覆管の拘束力が影響し、被覆管の膨れ率が大きい場合に細片化しやすいことが報告されている^(3, 11)。以上から、5 MPa の初期内圧は被覆管の機械強度、細片化発生、及び燃料棒外への燃料ペレット片の放出量の観点から保守的な条件であると考えられる。

破裂試験及び急冷破断試験の両試験の昇温速度については、典型的な LOCA 時の被覆管の昇温速度^(12, 13)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⁽⁴⁻⁸⁾との比較ができることを考慮し、3 K/s とする。昇温速度は LOCA 時の被覆管の膨れ率に影響を及ぼし、昇温速度が速い場合には膨れ率が小さくなり、遅い場合に膨れ率が大きくなることが報告されている⁽¹⁰⁾。この 3 K/s の昇温速度は、LOCA 時の被覆管の膨れ率がより大きくなる条件として設定したものである。LOCA 時の燃料ペレットの細片化には被覆管の拘束力が影響することが報告されており^(3, 11)、被覆管の膨れが大きくなる 3 K/s の昇温速度は FFRD 現象を評価する上で保守的な条件であると考えられる。

「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)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^(14, 15)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、1273–1473 K の温度範囲で被覆管脆化に温度依存性が見られないことが明らかになっていることから、急冷破断試験における等温酸化温

度は 1473 K を超えないがそれに近い温度、すなわち 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、試験燃料棒に対し 15%ECR を超える酸化量を与え安全性を確認することとした。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⁽¹⁶⁾を用いる。

急冷破断試験時の急冷開始温度について、873–973 K 程度まで徐冷した後に急冷するとジルカロイの変態 β 相の結晶粒界近傍で酸素安定化 α 相が析出し、脆化が促進される可能性があることが報告されている⁽¹⁷⁾。本試験では、これを踏まえ、急冷開始温度を 973 K に設定した。

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^(18, 19)、最大 431 N (44 kgf) 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⁽¹⁸⁾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することとする。なお、試験燃料棒の昇温及び等温酸化中は試験燃料棒上端を引張試験機のクロスヘッド (昇降機構) により保持し被覆管にかかる負荷がゼロになるよう、すなわち温度上昇と酸化に伴う被覆管の軸方向への伸長が妨げられないように調整する。

以上の実燃料入り LOCA 模擬試験条件案と設定根拠を表 4.7-3 に、燃料棒毎の実燃料入り LOCA 模擬試験条件案を表 4.7-4 にそれぞれ示す。

4.7.2 実燃料入り LOCA 模擬試験用燃料棒の作製

表 4.7-2 に記載した試験対象燃料のうち、M-MDA 被覆バンデロス燃料について切断、上下端栓部嵌め合い加工、及び構成部材 (端栓、アダプタ) の作製を実施した。本年度の試験燃料棒作製に用いた燃料被覆管の材料である 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、MDA と同等の機械特性を維持しつつ耐食性を高めるとともに、水素吸収率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。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 及び MMDA4 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 4.7-4 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及び燃料被覆管に吸収された水素量は次年度以降に測定する予定である。

なお、この燃料に対する非破壊検査の結果は 4.1 節に示した。

4.7.3 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の設置準備

実燃料入り LOCA 模擬試験装置をホットセル内に設置するにあたり、既設 LOCA 試験装置を撤去する必要がある。この既設 LOCA 試験装置は燃料ペレットを除去した状態の高燃焼度燃料被覆管を対象とした LOCA 模擬試験を実施する装置として、平成 17 年度に原子力機構燃料試験施設のホットセル内に設置⁽²⁰⁾されて以来、継続して使用されてきたものである。同装置は引張試験機（荷重一定保持装置、加熱炉、酸化雰囲気容器、等が内装された構造）、蒸気発生装置、局所排気装置、冷却水循環装置、熱電対溶接装置、制御盤、等により構成されている。本装置が設置されたホットセルは同装置を含めて汚染されていることから、作業者の被ばく低減を図るために撤去作業に先立ちホットセル内等を除染する必要がある。そこで、本年度は実燃料入り LOCA 模擬試験装置のホットセル内への設置に向けた準備作業として、ホットセル内及び既設 LOCA 試験装置の除染、並びに装置類の撤去を実施した。

4.7.4 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の設置準備作業のまとめ

実燃料入り LOCA 模擬試験の実施に向け、試験条件案を検討するとともに、試験に供する M-MDA 被覆バンデロス燃料について切断、上下端栓部嵌め合い加工、及び構成部材（端栓、アダプタ）の作製等の試験燃料棒の作製を実施した。また、実燃料入り LOCA 模擬試験装置を原子力機構燃料試験施設のホットセル内に設置するための準備作業として、ホットセル内及び既設 LOCA 試験装置の除染、並びに装置類の撤去を実施した。

表 4.7-1 実燃料入り LOCA 模擬試験の種類と取得予定のデータ及び知見

試験の種類	取得予定のデータ及び知見
破裂試験	<ul style="list-style-type: none"> • 燃料ペレットの細片化発生しきい値（被覆管拘束力） • 細片化した燃料ペレットの燃料棒膨れ部における充填率 • 被覆管破裂時の細片化燃料ペレットの燃料棒外放出量
急冷破断試験	<ul style="list-style-type: none"> • 被覆管破断時の細片化燃料ペレットの燃料棒外放出量 • 燃料ペレットの有無が被覆管の急冷破断限界に及ぼす影響（細片化した燃料ペレットの燃料棒内軸方向再配置が LOCA 時の被覆管水素吸収（二次水素化）挙動に及ぼす影響を含む）

表 4.7-2 実燃料入り LOCA 模擬試験対象燃料

採取 セグメント 番号	燃料タイプ	被覆管 材料	照射炉	試料燃焼度 (GWd/t)	最終 サイクル 線出力 (kW/m)
AP2-1	PWR 17×17	M-MDA (SR*)	Vandellos-2	73	~10
ALP6	UO ₂	MDA		76	17
ALP15	BWR 10×10 UO ₂ (SVEA96+)	Zircaloy-2 (LK3)	Leibstadt	41	7
AP2-21	BWR 10×10			73	~13
AP2-24	UO ₂		Oskarshamn-3	61	~10

*応力除去焼鈍

表 4.7-3 実燃料入り LOCA 模擬試験条件案と設定根拠

条件項目	設定条件		設定根拠
	破裂試験	急冷破断試験	
被覆管長さ (mm)	190		過去に原子力機構で実施した LOCA 模擬試験と同等の条件として設定
被覆管初期内圧 (MPa)	5		典型的な LOCA 時の燃料被覆管の熱過渡条件を模擬し、かつ被覆管の膨れが大きくなる条件として設定
昇温速度 (K/s)	3		
等温酸化温度 (K)	1473		規制基準値 1200°C に相当する条件として設定
酸化量 (%)	20		<ul style="list-style-type: none"> 規制基準値 15% ECR と同等以上の条件として設定 酸化速度の評価には Baker-Just 酸化速度式を使用 膨れ破裂及び通常運転中の腐食による被覆管の薄肉化を考慮
急冷開始温度 (K)	973		被覆管脆化の観点から保守的な条件として設定
軸方向拘束力の 上限値 (N)	540		炉外実験により評価された被覆管と支持格子の間の摩擦力を基に保守的に設定

表 4.7-4 実燃料入り LOCA 模擬試験条件案

採取 セグメント 番号	試料 燃焼度 (GWd/t)	試験の 種類	目標 酸化量*1 (ECR, %)	等温酸化条件		関連する 試験
				温度 (K)	時間*2 (s)	
AP2-1	73	破裂試験				MMDA1, MMDA2
		急冷破断試験	20	1473	~270	
ALP6	76	破裂試験				LMDA1R, LMDA2R
ALP15	41	破裂試験				LZRT1, LZRT2
AP2-21	73	急冷破断試験	20	1473	~290	LZRT3, LZRT4
AP2-24	61	破裂試験				—

*1Baker-Just 酸化速度式を用いて、等温酸化温度と時間から算出

*2製造時の金属肉厚に対し、1473 K で目標酸化量を得るための酸化時間

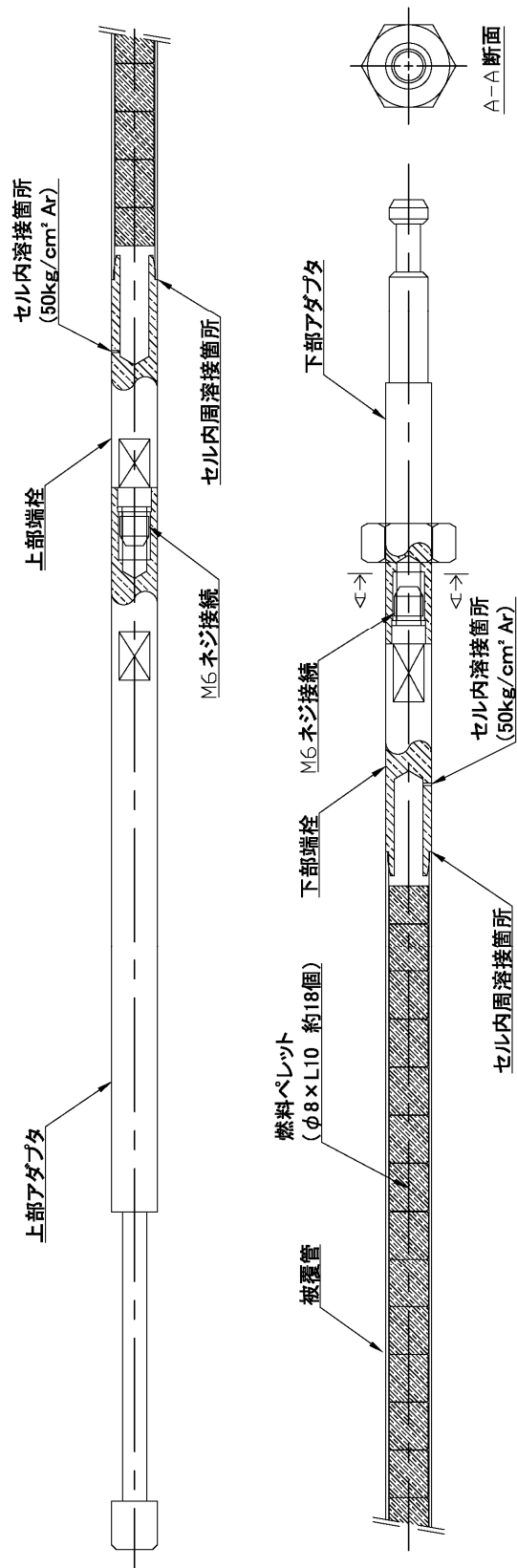


図 4.7-1 実燃料入り LOCA 模擬試験用燃料棒の構造図

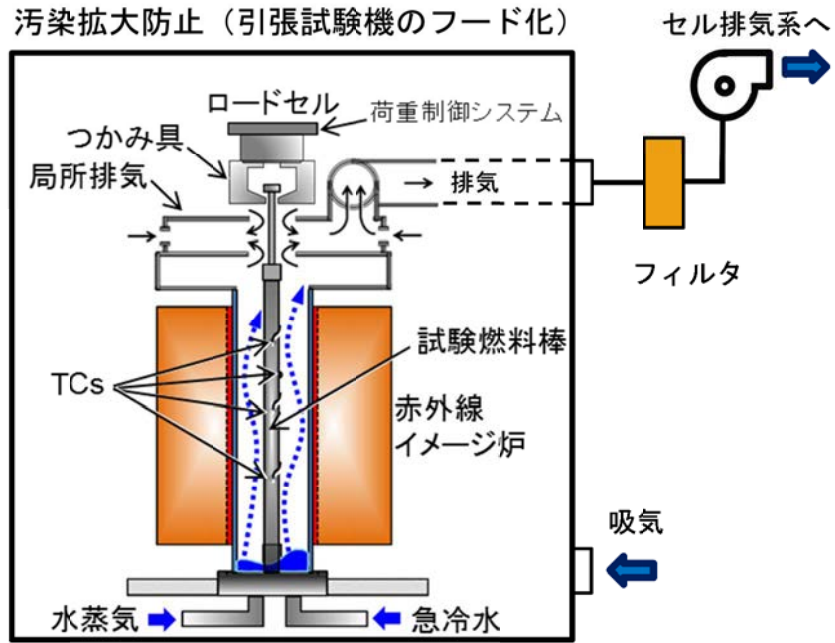
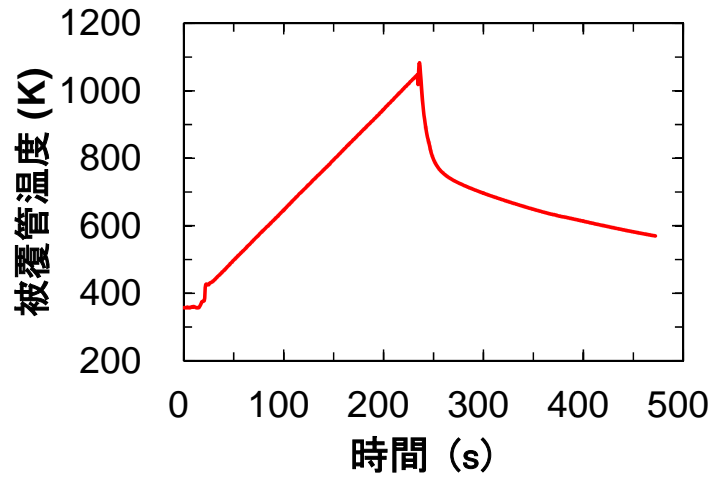
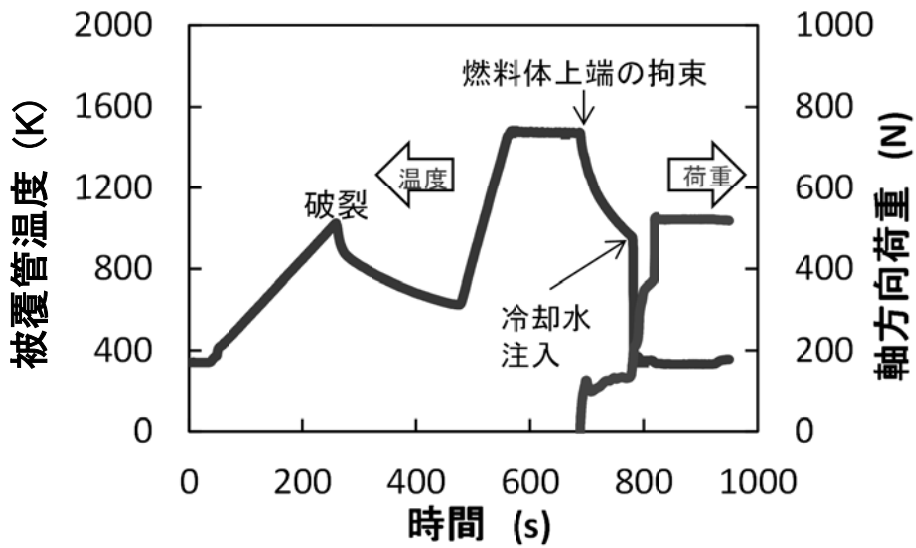


図 4.7-2 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の概略図



(a) 破裂試験



(b) 急冷破断試験

図 4.7-3 試験時の被覆管温度と荷重履歴の例

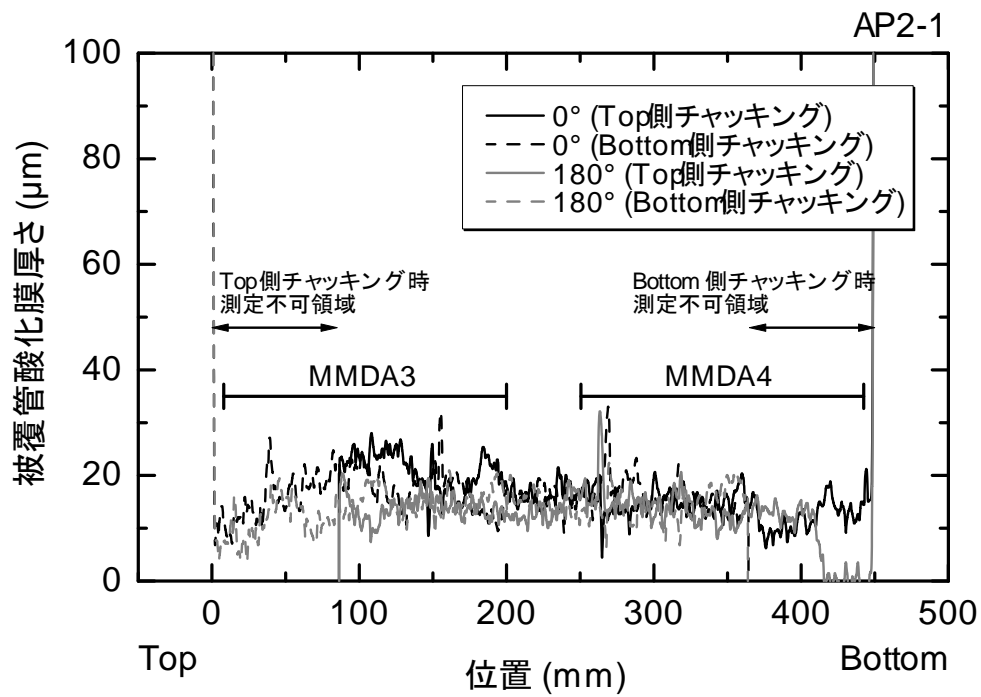


図 4.7-4 実燃料入り LOCA 模擬試験に用いる試験燃料棒の採取位置 (AP2-1 セグメント)

4.8 燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験

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 (AP2-3) から平成 28 年度に採取した燃料ペレット片⁽¹⁾ に対し、LOCA 時の温度変化を模擬した高燃焼度ペレット単体の加熱試験を実施し、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。

4.8.1 加熱試験

(1) 試料採取

平成 28 年度に AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片に対してアウトガス分析装置 (OGA)⁽²⁾ を用いた加熱試験を実施した。平成 28 年度に採取した燃料ペレット片の情報を表 4.8-1 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細片化の燃焼度しきい値 (約 70–75 GWd/t)⁽³⁾ を超るとともに、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 (約 70 GWd/t)⁽⁴⁾ 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。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. 5、6 及び 8 を加熱試験に供した。採取した燃料ペレット片の外観画像並びに重量及び密度測定結果を表 4.8-2 並びに図 4.8-1 及び 4.8-2 にそれぞれ示す。外観観察の結果、採取した燃料ペレット片の直径はいずれも約 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¹」が含まれていると推測される⁽¹⁾。図 4.8-2 中のマーカの面積の大小は、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⁽⁶⁾ 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。この結果より、採取した燃料ペレット片の体積膨張には、固体スウェリングの影響に加えガス気泡スウェリングの影響が表れている可能性がある。図 4.8-3–4.8-8 に加熱試験前の燃料ペレット片 No. 5、6 及び 8 の外観及び走査型電子顕微鏡 (SEM) 画像を示す。図 4.8-4(2) の Photo 2-5、図 4.8-6(1) の Photo 1-5、及び図 4.8-8(1) の Photo 1-5 などにおいて、ダークゾーンないし高燃焼度組織の特徴^(7, 8) である多数の気泡や細粒化した結晶粒が観察される。図 4.8-4(1) においては被覆管の背割りに使用したドリルの接触痕と見られる同心円状の模様が確認されたため、燃料ペレット片 No. 5 は高燃焼度組織を含んでいる可能性がある。図 4.8-4(3) の Photo 3-4、図 4.8-6(4) の

¹ ダークゾーンにおいては、製造時と異なる微小な気泡が結晶粒内に高密度に形成されている様子が観察されている⁽¹⁾。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に繋がる可能性があることから、燃焼の進展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。

Photo 4-4、及び図 4.8-8(4) Photo 4-4 などにおいて、ペレットの外周部、すなわちダークゾーンの径方向外側の組織に特徴的な製造時の結晶粒径約 10 μm と同等のサイズの結晶粒や焼きしまりにより気孔が消失した様子⁽⁸⁾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. 5、6 及び 8 はいずれもダークゾーンないし高燃焼度組織とペレット外周部の組織とを横断する位置から採取したものと考えられる。

(2) 加熱試験

本年度は燃料ペレット片の細片化が発生するしきい値となる温度を評価するための加熱試験を燃料ペレット片 No. 5、6 及び 8 それぞれに対し実施した。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^(9,10)に近い約 5 K/s の速さで加熱した。到達温度は先行研究において報告されている燃料ペレットの細片化発生しきい温度である 1023 K⁽³⁾より低い温度及び高い温度を含む、973、1073、1273、及び 1473 K の 4 条件とし、各燃料ペレット片について到達温度ごとに 1 回、計 4 回の試験を実施した。各到達温度に到達した時点で直ぐに加熱を停止し、室温まで炉冷した後に燃料ペレット片の外観を観察した。なお、試験は到達温度が低い条件から順番に実施し、到達温度と細片化発生との関係性を評価した。

(a) 燃料ペレット片 No. 5 に対する試験

図 4.8-9 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。到達温度 1273 K 以上の試験において、Xe 及び Kr 双方の顕著な放出が確認された。図 4.8-10 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. 5 の到達温度 1473 K の試験 (昇温 4 回目の試験) において放出された FP ガスの総量で規格化した。図から、到達温度が 1073 K 以下の試験においても僅かであるが FP ガスが放出されたことが分かる。なお、図 4.8-9 及び 4.8-10 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。

図 4.8-11 に加熱試験後の燃料ペレット片の外観を示す。到達温度 1273 及び 1473 K の試験後に燃料ペレット片の顕著な細片化が確認された。先行研究においては燃料被覆管にスリットを入れた状態の燃料棒片を加熱し、1023 K で試料端部において僅かな細片化が、1123 K でより顕著な細片化が確認されており⁽³⁾、本試験で得られた結果はこれらの報告と概ね整合する。到達温度 1273 及び 1473 K の試験後の燃料ペレット片の外観を比較すると、到達温度がより高い 1473 K でより著しい燃料ペレットの細片化が生じたことが確認された。このように、加熱時の到達温度が高くなるほど燃料ペレットの細片化が著しくなる傾

向が見られることから、温度上昇とともに燃料ペレットへの機械的負荷を増加させる何らかの因子が燃料ペレットの細片化の原因となっていると考えるのが妥当である。このような因子として、燃料ペレット内に析出した FP ガス気泡が第一に考えられる。すなわち、析出した FP ガス気泡内の圧力はペレット温度の上昇とともに増加し、その表面で生じる応力が燃料ペレットの破壊応力を超えればその時点で細片化が生じることになる。実際に、顕著な細片化が観察された到達温度 1273 及び 1473 K の試験においては、図 4.8-9 及び 4.8-10 に示す通り、顕著な FP ガスの放出が観察されている。そして、先行研究において LOCA 模擬試験中に著しい燃料ペレットの細片化が見られた燃料の燃焼度は燃料ペレット内におけるダークゾーンや高燃焼度組織の形成が著しくなる燃焼度に近いことから、これらの微細組織中に特徴的に見られる粗大化気泡の形成が燃料ペレット細片化の発生及びその程度と関連していることが示唆される。燃料ペレットの細片化発生と燃焼度進展に伴う微細組織変化との関係については、加熱試験後の燃料ペレット片に対して SEM を用いたマイクロ組織観察等を実施し、細片化を生じた組織と生じなかった組織との差を調べることで確認できると考えられる。

(b) 燃料ペレット片 No. 6 に対する試験

図 4.8-12 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。到達温度 1273 K 以上の試験において、Xe 及び Kr 双方の顕著な放出が確認された。図 4.8-13 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. 5 の到達温度 1473 K の試験（昇温 4 回目の試験）において放出された FP ガスの総量で規格化した。図から、到達温度が 1073 K 以下の試験においても僅かであるが FP ガスが放出されたことが分かる。到達温度 1473 K の試験（昇温 4 回目の試験）において放出された FP ガスの総量を燃料ペレット片 No. 5 と 6 とで比較すると、燃料ペレット片 No. 6 の FP ガス放出量は 30–40%程小さかった。なお、図 4.8-12 及び 4.8-13 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。

図 4.8-14 に加熱試験後の燃料ペレット片の外観を示す。到達温度 1473 K の試験後の燃料ペレット片において顕著な細片化が確認された。1273 K 以下の試験では、燃料ペレット片の細片化は一部においてのみ生じており、大部分は試験前の形状を維持していた。この燃料ペレット片についても SEM を用いたマイクロ組織観察等を実施し、細片化を生じた組織と生じなかった組織との差を調べることで燃料ペレットの細片化発生と燃焼の進展に伴う微細組織変化との関係を確認できると考えられる。

(c) 燃料ペレット片 No. 8 に対する試験

図 4.8-15 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 の分圧の時刻歴を示す。到達温度 1073 K の条件の試験後に加熱炉からるつぼに入った燃料ペレット片を取り出す際、燃料ペレット片がるつぼごと加熱炉のサセプタ内に落下した。この落下により、燃料ペレット片の一部が回収困難になったこと、及び落下が原因で燃料ペレット片が破損した可能性が否定できないことから、燃料ペレット片 No. 8 に対する試験はこの時点で中止した。図 4.8-15 から、到達温度 1073 K の試験において、Xe 及び Kr 双方の顕著な放出が確認された。図 4.8-16 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. 5 の到達温度 1473 K の試験（昇温 4 回目の試験）において放出された FP ガスの総量で規格化した。図から、到達温度が 973 K の試験においても僅かであるが FP ガスが放出されたことが分かる。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 ガスの総量は燃料ペレット片 No. 5 及び 6 の同試験において放出された FP ガスの総量と比較して顕著に大きかった。なお、図 4.8-15 及び 4.8-16 から FP ガス放出時のるつぼ温度を評価するには燃料ペレット片から FP ガスが放出される時刻と、放出された FP ガスが四重極質量分析計において検出される時刻との間の時間差を考慮する必要がある。今後、この時間差を評価し、FP ガス放出時のるつぼ温度を評価する必要がある。

図 4.8-17 に到達温度 973 K の加熱試験後の燃料ペレット片の外観を示す。燃料ペレット片は試験前の形状を維持していることが観察される。

4.8.2 加熱試験のまとめ

燃料ペレット単体を用いた LOCA 時温度変化模擬加熱試験を実施した。加熱試験後の燃料ペレット片の外観観察の結果、高燃焼度燃料ペレットで顕著な細片化が生じ得る温度は 1073–1273 K の温度範囲にあると考えられた。この温度は先行研究で評価されている高燃焼度燃料の LOCA 模擬試験時の燃料ペレット細片化発生温度と概ね整合するものであった。また、燃料ペレット細片化の程度と加熱時の到達温度との傾向から、燃料ペレット細片化の発生原因として、高燃焼度領域で燃料ペレットに生じる微細組織の変化が示唆された。燃料ペレット細片化発生に及ぼす微細組織状態の影響については、加熱試験後の燃料ペレット片に対して SEM を用いたマイクロ組織観察等を実施し、細片化を生じた組織と生じなかった組織との差を調べることで評価が可能と考えられる。また、同マイクロ組織観察を実施することで燃料ペレット片の粒度分布や細片化割合等の LOCA 時の燃料ペレットの細片化挙動についてより定量的な情報を得られると考えられる。

LOCA 時の炉心の冷却性の観点からは、燃料ペレットの細片化そのものが安全上の脅威とはならないものの、細片化した燃料ペレットが多量に被覆管膨れ部に堆積する場合や燃料棒外に放出される場合には炉心の冷却を阻害する恐れがある。仏国では燃料ペレット片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、当該燃料棒の被覆管最高温度は被覆管の破裂温度を下回ると評価している⁽¹¹⁾。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⁽¹²⁾。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、現行燃料に関して現在の使用条件で多くのペレット片の移動や放出は予想されないと知見があるものの、FFRD は被覆管最高温度や炉心冷却性に影響を及ぼす恐れがあることから、FFRD が生じる条件やその影響に関する知見が十分に得られた際には、ECCS 性能評価指針への反映について検討すべきである。

表 4.8-1 AP2-3 セグメント燃料から採取した燃料ペレット片⁽¹⁾

試験片番号	採取 セグメント 番号	照射炉	燃料 タイプ	試料燃焼度 (GWd/t)	被覆管材料
No. 1-10	AP2-3	Vandellos- 2	PWR 17×17 UO ₂	81	M-MDA (SR*)

*応力除去焼鈍

表 4.8-2 燃料ペレット片の密度測定結果⁽¹⁾

燃料ペレット片 番号	製造時データ ⁽⁵⁾	照射後測定結果		
	理論密度比 (%TD)	試料密度 (g/cm ³)	理論密度比 (%TD)	体積変化率* (%)
No. 5	96.0	9.95	90.8	5.7
No. 6		9.74	88.8	8.1
No. 8		9.70	88.5	8.5

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

表 4.8-3 燃料ペレット片の加熱試験条件

	昇温速度 (K/s)	到達温度 (K)	保持時間 (s)	雰囲気
昇温 1 回目	5	973	0	真空 (測定開始時真空度： 5.4×10 ⁻⁴ - 7.3×10 ⁻⁴ Pa)
昇温 2 回目		1073		
昇温 3 回目		1273		
昇温 4 回目		1473		



図 4.8-1 採取した燃料ペレット片の外観 ⁽¹⁾
 (図中数値はペレット片番号)

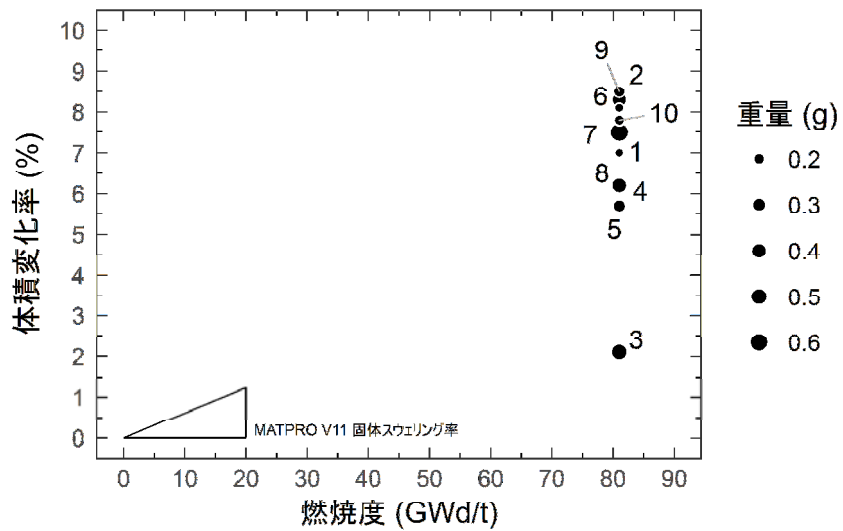


図 4.8-2 燃料ペレット片の体積変化率の燃焼度依存性 ⁽¹⁾
 (図中数値はペレット片番号)

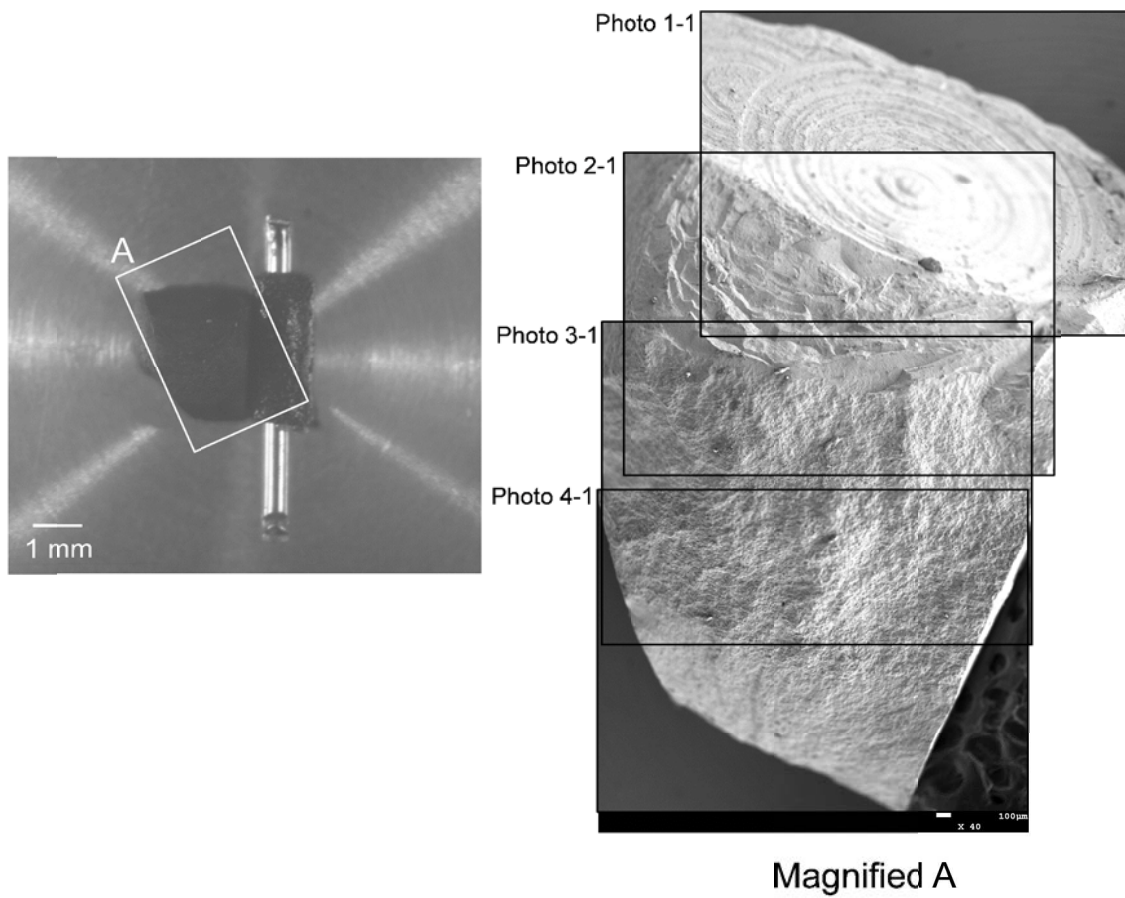
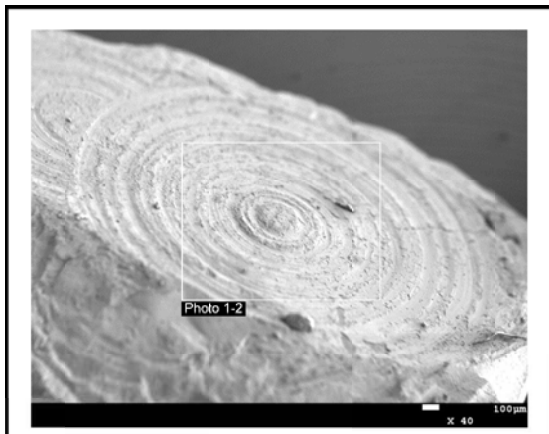


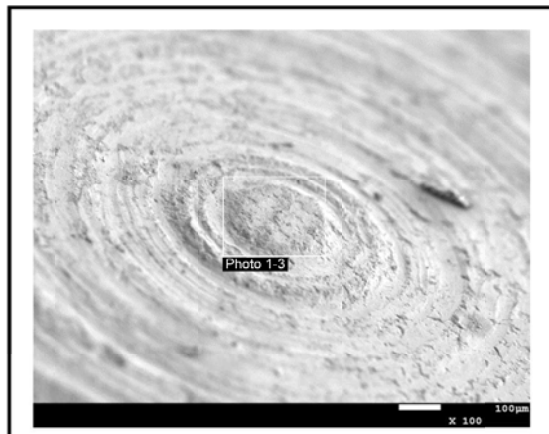
図 4.8-3 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 5 の外観



AP2-3
No. 5ペレット片

Photo 1-1

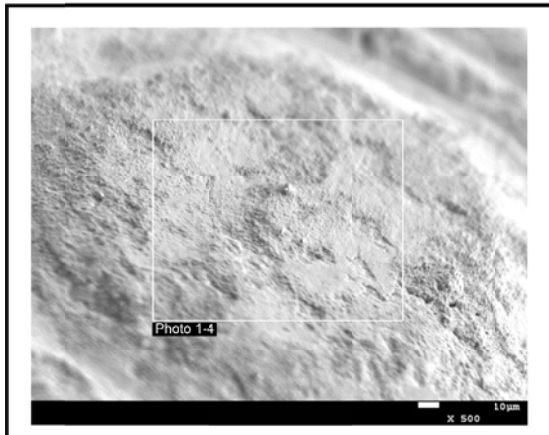
300 μm



AP2-3
No. 5ペレット片

Photo 1-2

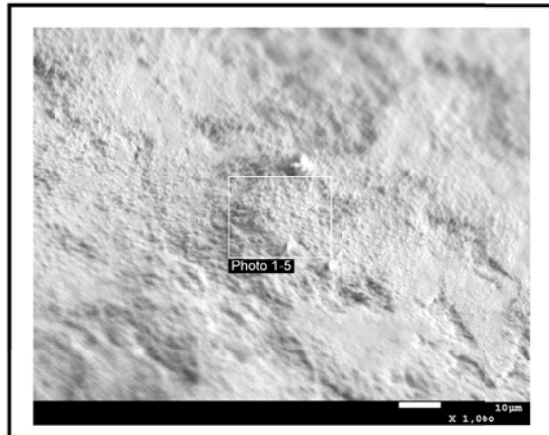
100 μm



AP2-3
No. 5ペレット片

Photo 1-3

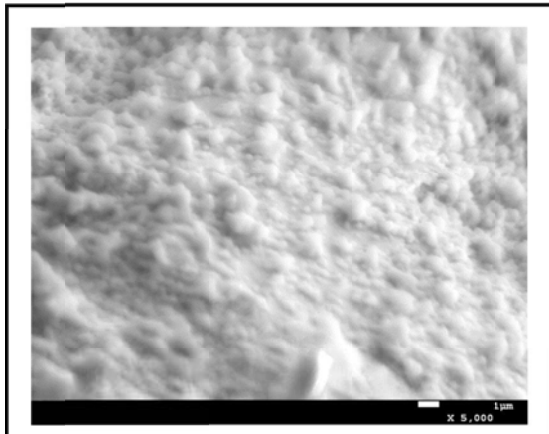
30 μm



AP2-3
No. 5ペレット片

Photo 1-4

10 μm

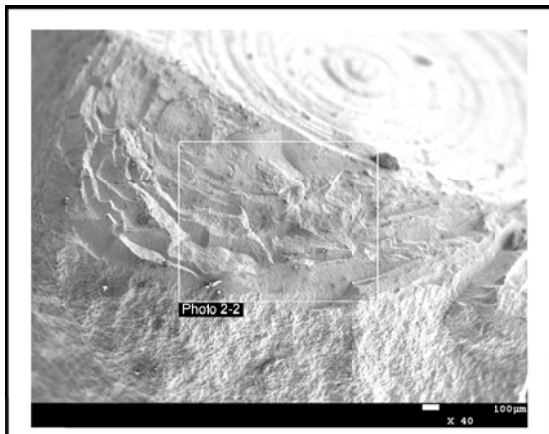


AP2-3
No. 5ペレット片

Photo 1-5

3 μm

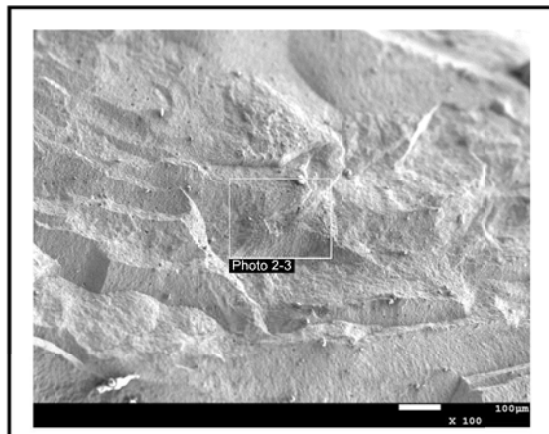
図 4.8-4(1) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 5 の SEM 画像



AP2-3
No. 5ペレット片

Photo 2-1

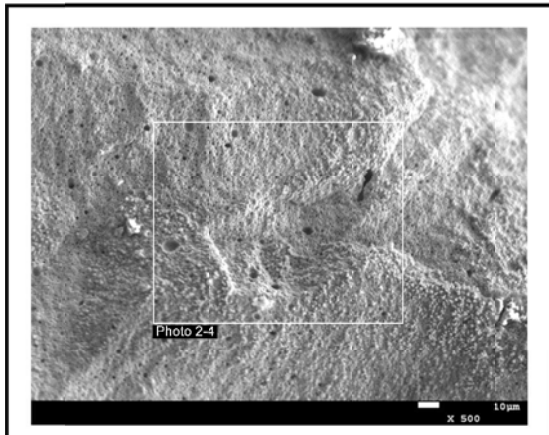
300 μm



AP2-3
No. 5ペレット片

Photo 2-2

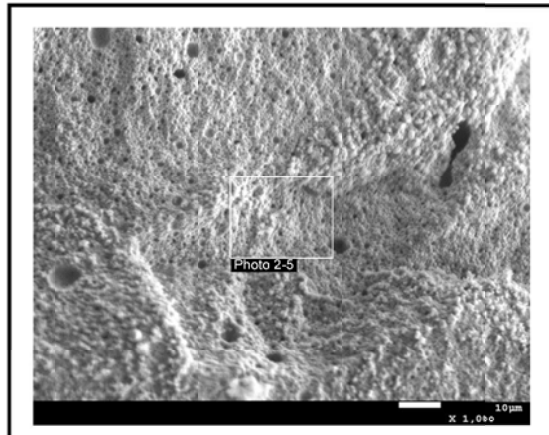
100 μm



AP2-3
No. 5ペレット片

Photo 2-3

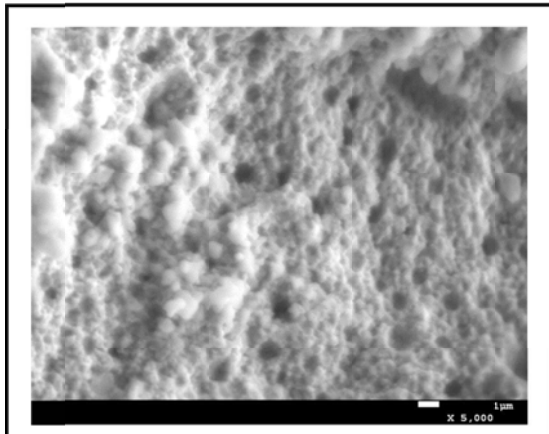
30 μm



AP2-3
No. 5ペレット片

Photo 2-4

10 μm

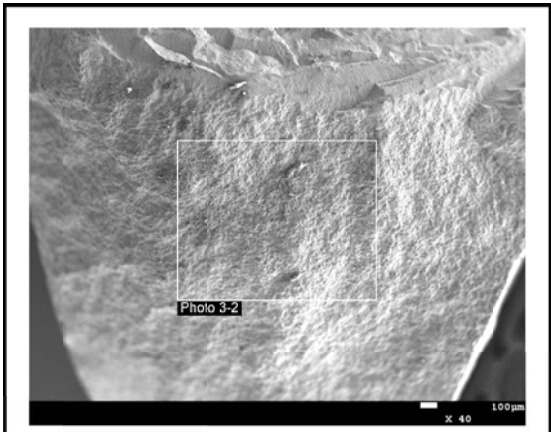


AP2-3
No. 5ペレット片

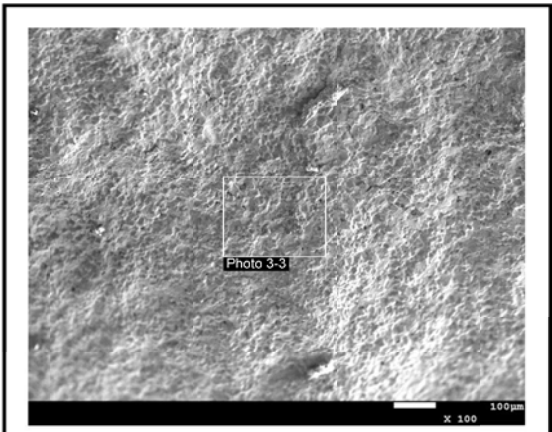
Photo 2-5

3 μm

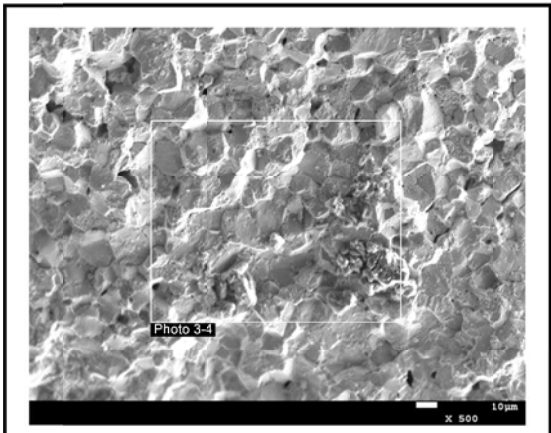
図 4.8-4(2) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 5 の SEM 画像



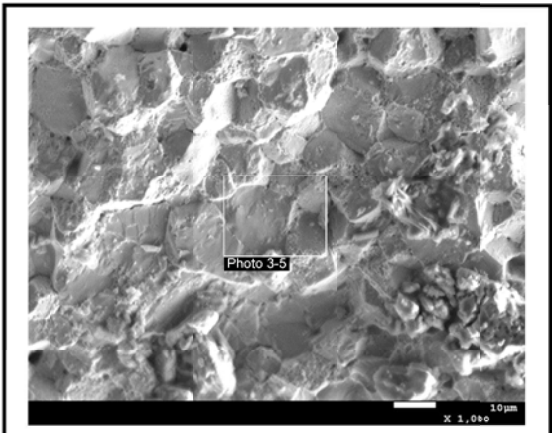
AP2-3 No. 5ペレット片	Photo 3-1	300 μm
---------------------	-----------	--------



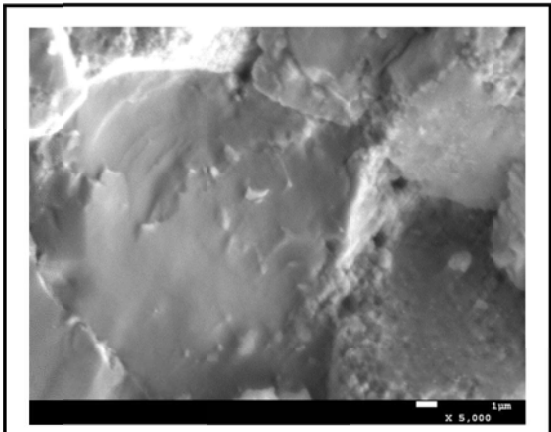
AP2-3 No. 5ペレット片	Photo 3-2	100 μm
---------------------	-----------	--------



AP2-3 No. 5ペレット片	Photo 3-3	30 μm
---------------------	-----------	-------

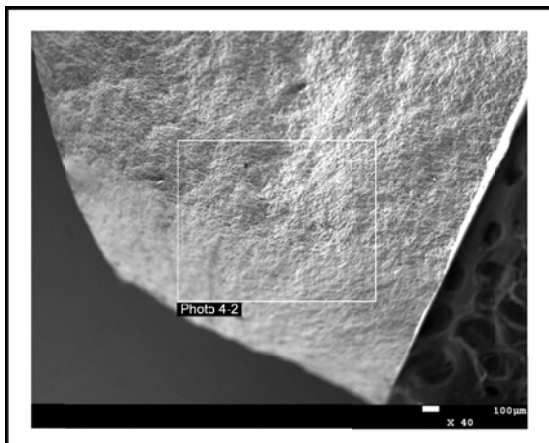


AP2-3 No. 5ペレット片	Photo 3-4	10 μm
---------------------	-----------	-------

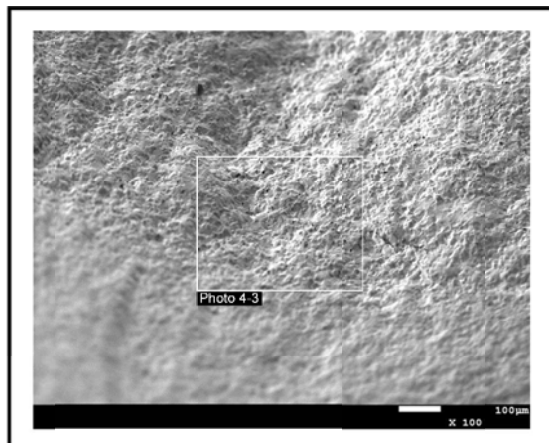


AP2-3 No. 5ペレット片	Photo 3-5	3 μm
---------------------	-----------	------

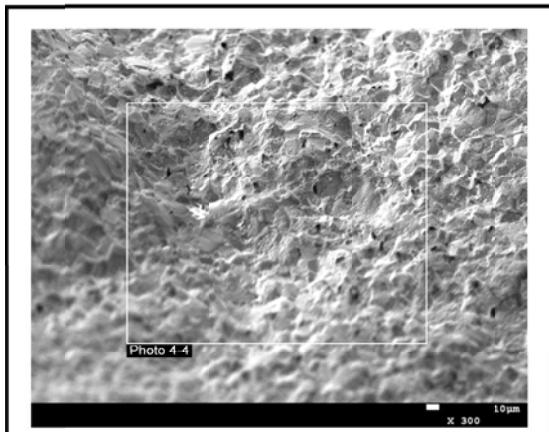
図 4.8-4(3) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 5 の SEM 画像



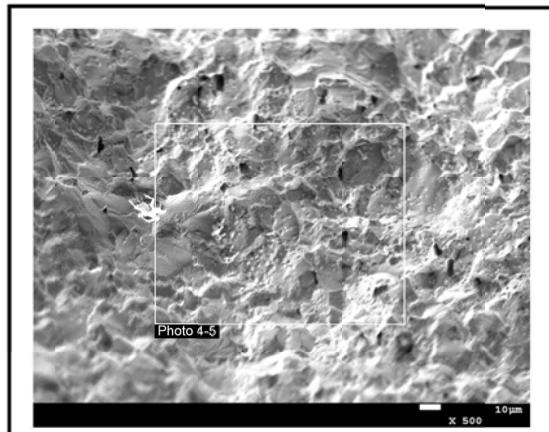
AP2-3 No. 5ペレット片	Photo 4-1	300 μm
---------------------	-----------	--------



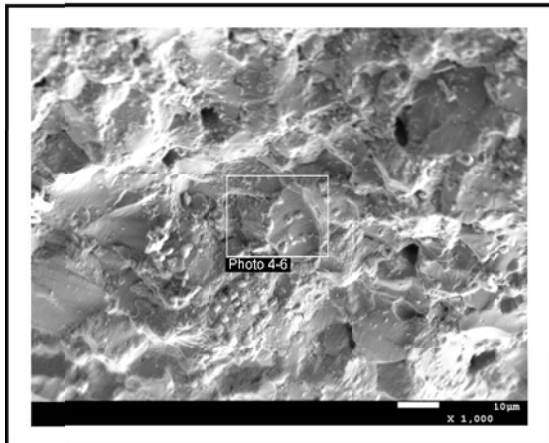
AP2-3 No. 5ペレット片	Photo 4-2	100 μm
---------------------	-----------	--------



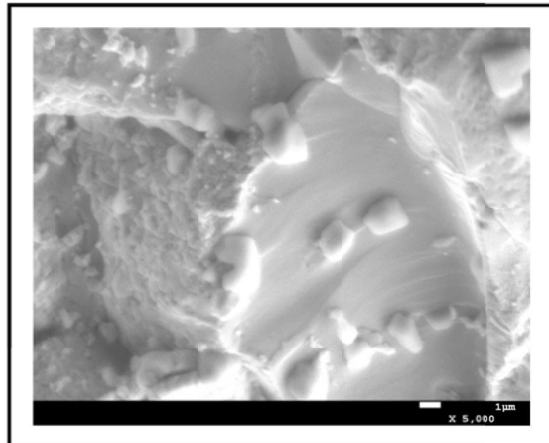
AP2-3 No. 5ペレット片	Photo 4-3	30 μm
---------------------	-----------	-------



AP2-3 No. 5ペレット片	Photo 4-4	20 μm
---------------------	-----------	-------



AP2-3 No. 5ペレット片	Photo 4-5	10 μm
---------------------	-----------	-------



AP2-3 No. 5ペレット片	Photo 4-6	3 μm
---------------------	-----------	------

図 4.8-4(4) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 5 の SEM 画像

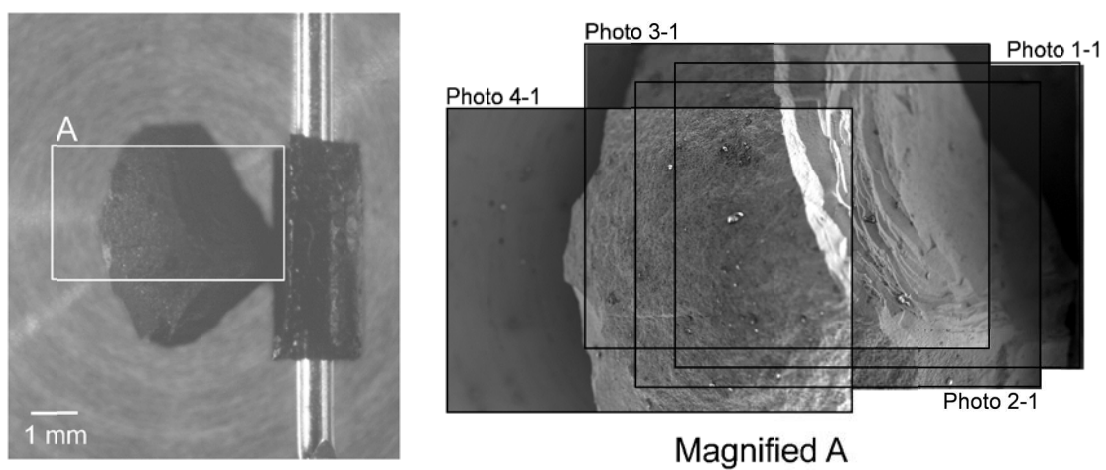
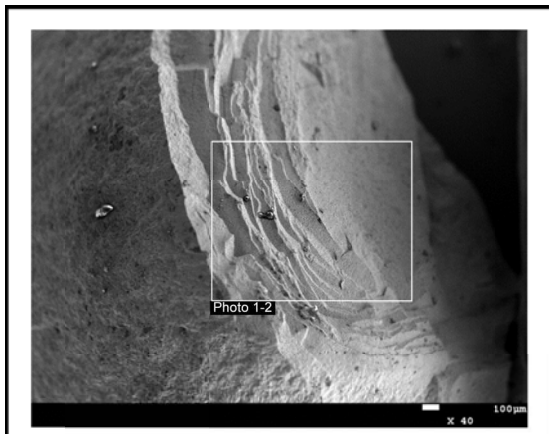


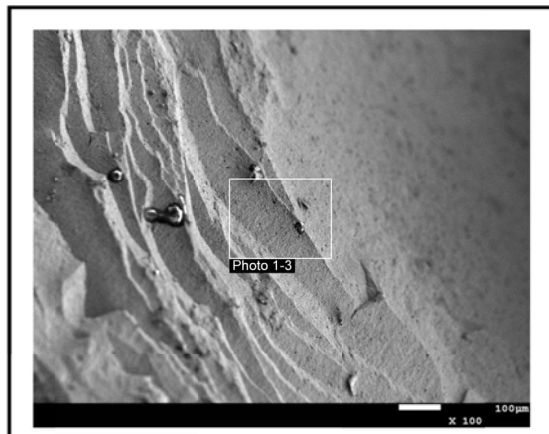
図 4.8-5 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 6 の外観



AP2-3
No. 6ペレット片

Photo 1-1

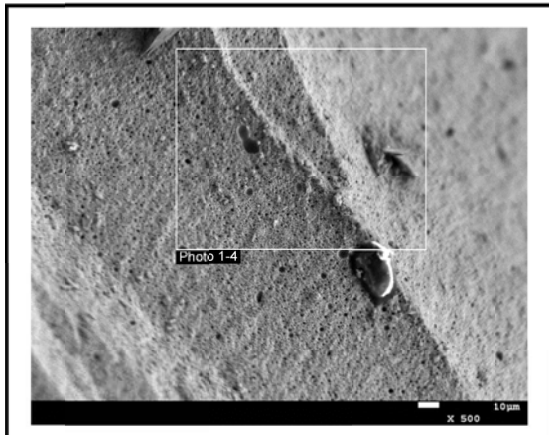
300 μm



AP2-3
No. 6ペレット片

Photo 1-2

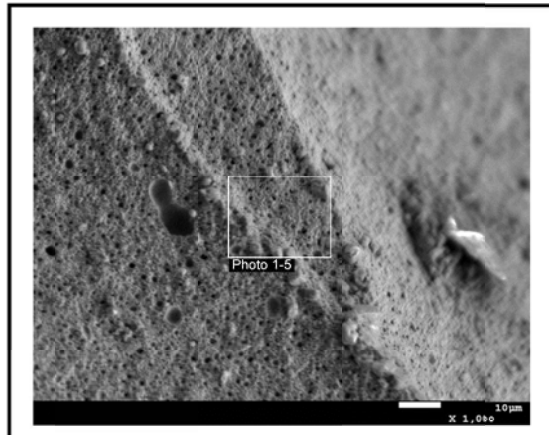
100 μm



AP2-3
No. 6ペレット片

Photo 1-3

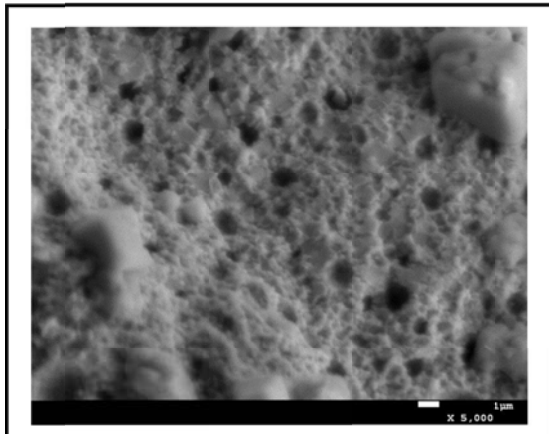
30 μm



AP2-3
No. 6ペレット片

Photo 1-4

10 μm

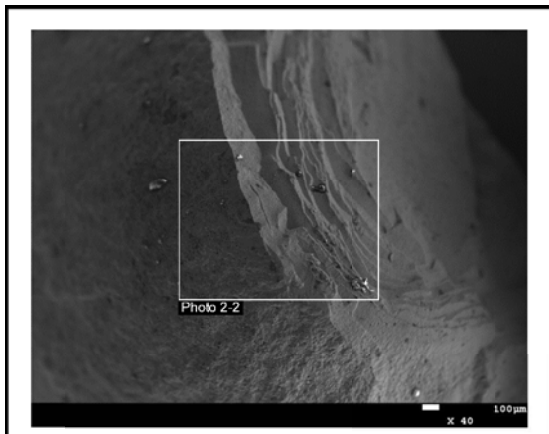


AP2-3
No. 6ペレット片

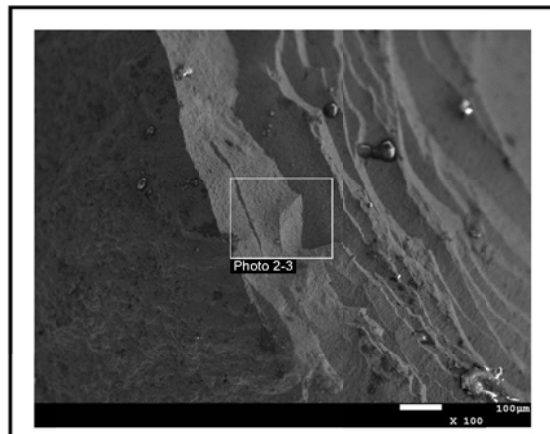
Photo 1-5

3 μm

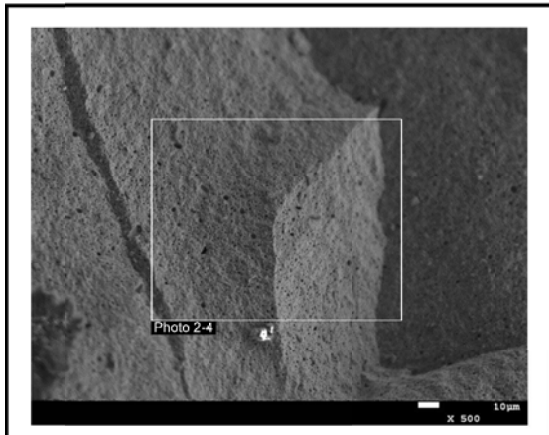
図 4.8-6(1) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 6 の SEM 画像



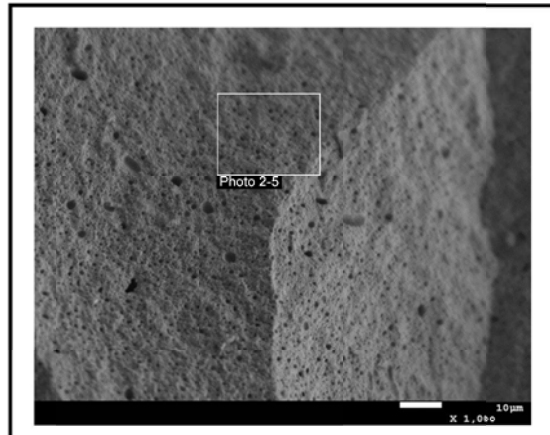
AP2-3 No. 6ペレット片	Photo 2-1	300 μm
---------------------	-----------	--------



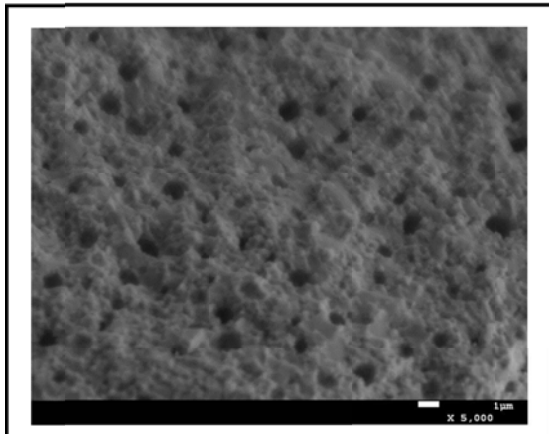
AP2-3 No. 6ペレット片	Photo 2-2	100 μm
---------------------	-----------	--------



AP2-3 No. 6ペレット片	Photo 2-3	30 μm
---------------------	-----------	-------

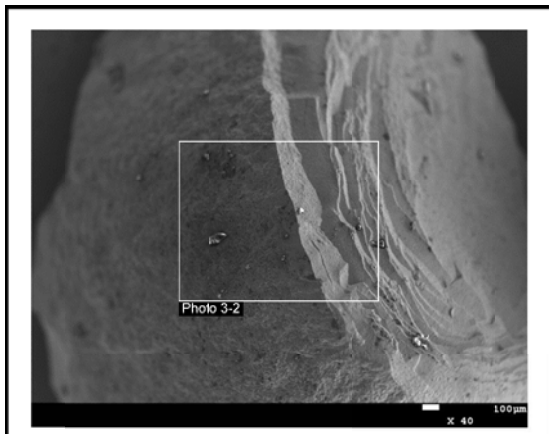


AP2-3 No. 6ペレット片	Photo 2-4	10 μm
---------------------	-----------	-------

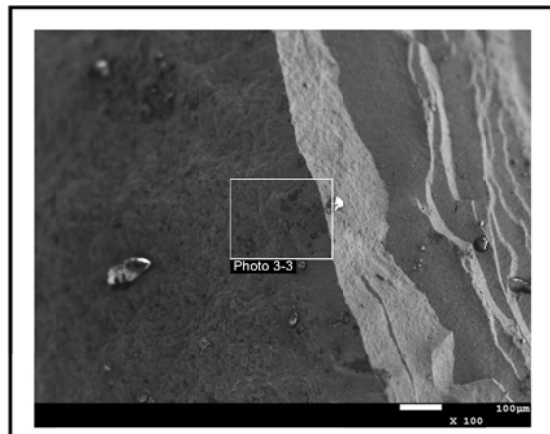


AP2-3 No. 6ペレット片	Photo 2-5	3 μm
---------------------	-----------	------

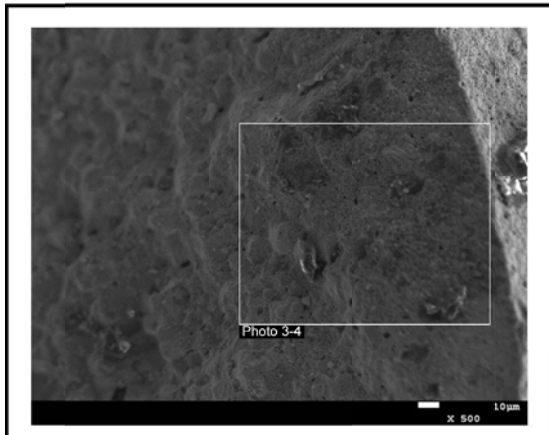
図 4.8-6(2) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 6 の SEM 画像



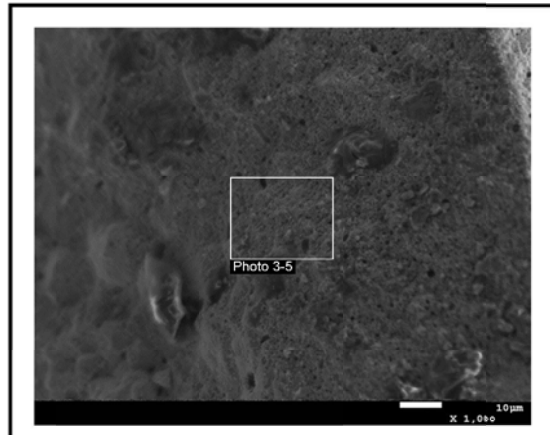
AP2-3 No. 6ペレット片	Photo 3-1	300 μm
---------------------	-----------	--------



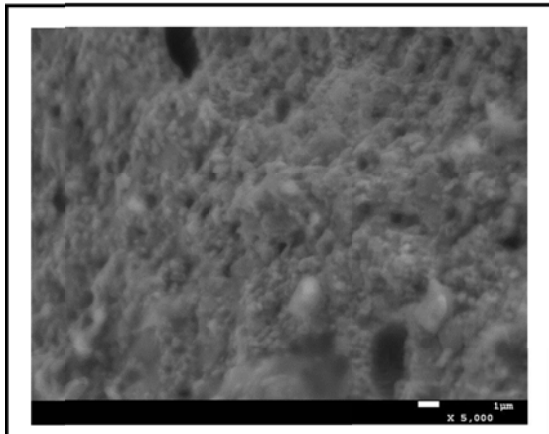
AP2-3 No. 6ペレット片	Photo 3-2	100 μm
---------------------	-----------	--------



AP2-3 No. 6ペレット片	Photo 3-3	30 μm
---------------------	-----------	-------

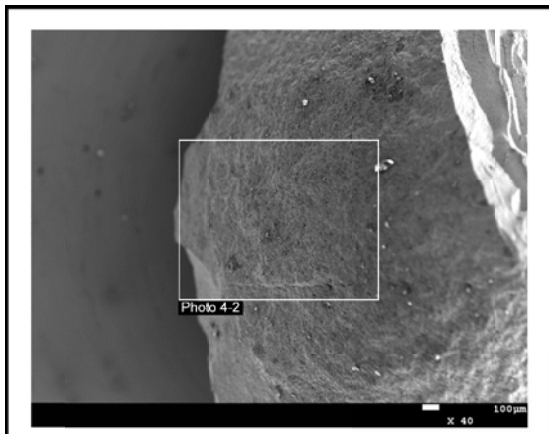


AP2-3 No. 6ペレット片	Photo 3-4	10 μm
---------------------	-----------	-------

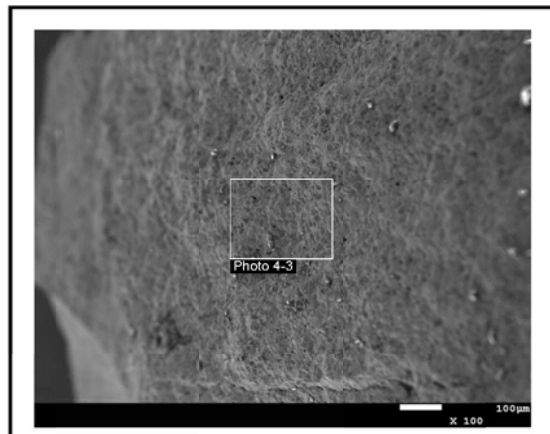


AP2-3 No. 6ペレット片	Photo 3-5	3 μm
---------------------	-----------	------

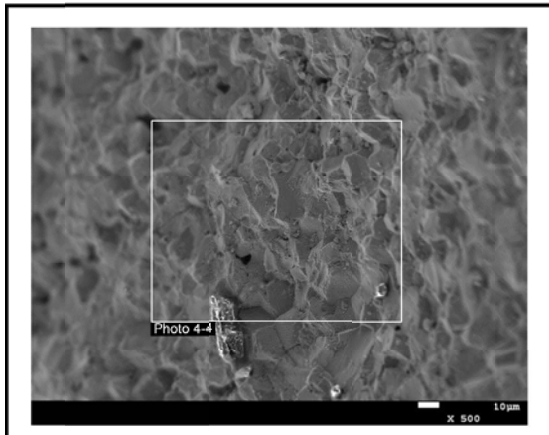
図 4.8-6(3) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 6 の SEM 画像



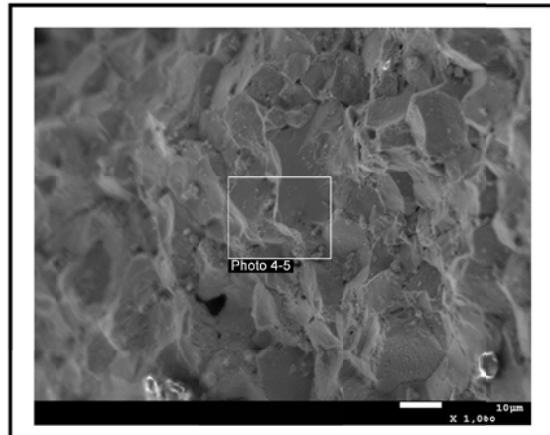
AP2-3 No. 6ペレット片	Photo 4-1	300 μm
---------------------	-----------	--------



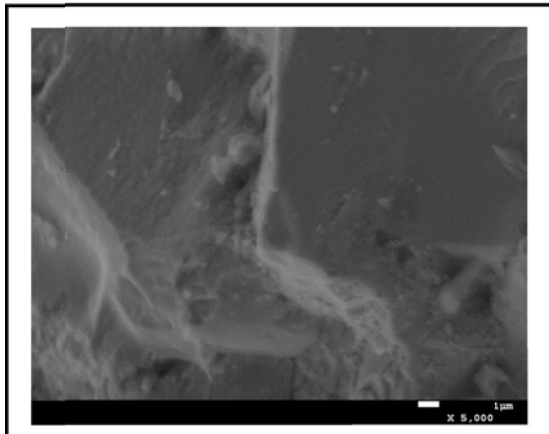
AP2-3 No. 6ペレット片	Photo 4-2	100 μm
---------------------	-----------	--------



AP2-3 No. 6ペレット片	Photo 4-3	30 μm
---------------------	-----------	-------



AP2-3 No. 6ペレット片	Photo 4-4	10 μm
---------------------	-----------	-------



AP2-3 No. 6ペレット片	Photo 4-5	3 μm
---------------------	-----------	------

図 4.8-6(4) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 6 の SEM 画像

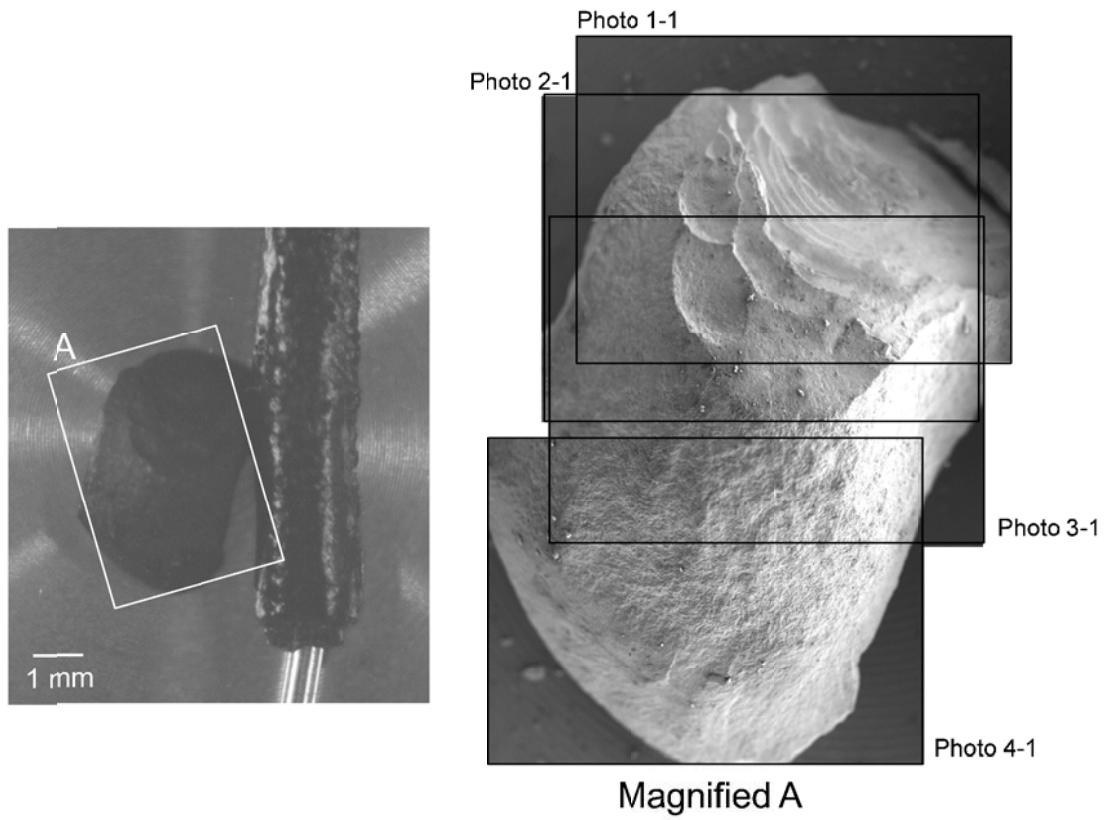
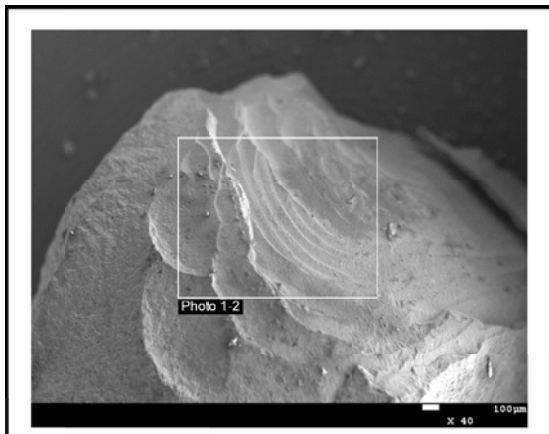


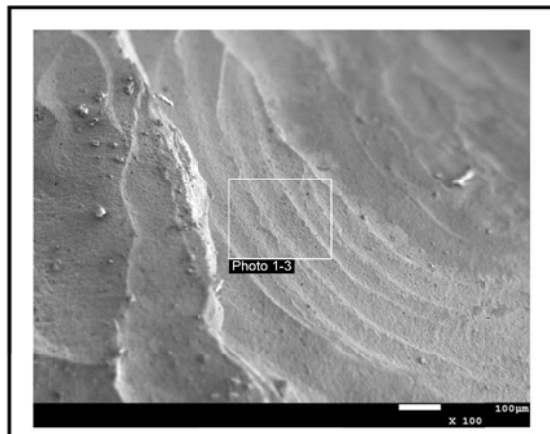
図 4.8-7 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 8 の外観



AP2-3
No. 8ペレット片

Photo 1-1

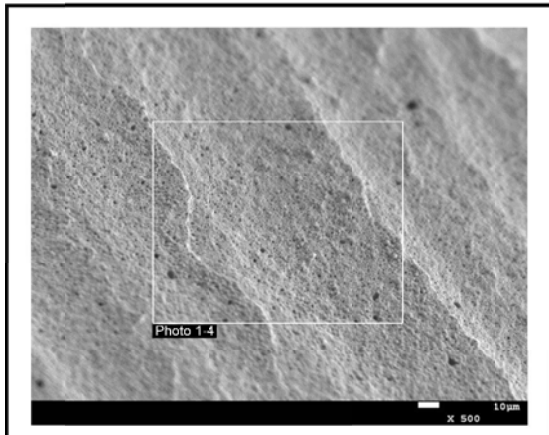
300 μm



AP2-3
No. 8ペレット片

Photo 1-2

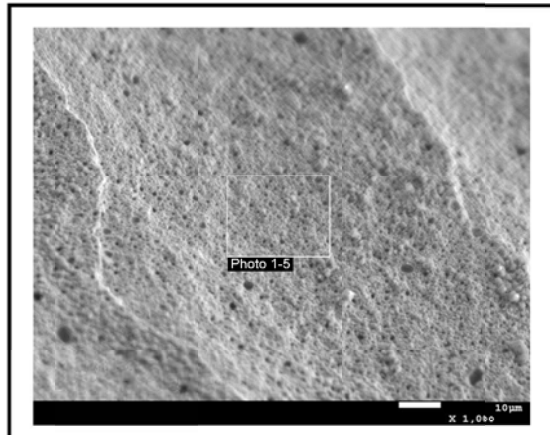
100 μm



AP2-3
No. 8ペレット片

Photo 1-3

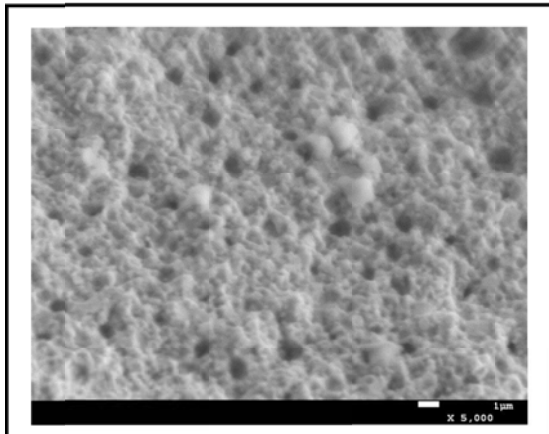
30 μm



AP2-3
No. 8ペレット片

Photo 1-4

10 μm

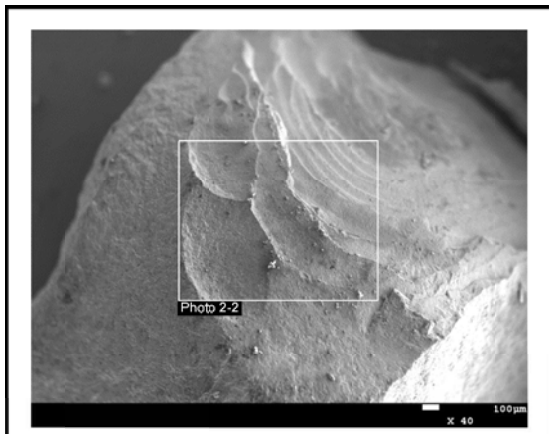


AP2-3
No. 8ペレット片

Photo 1-5

3 μm

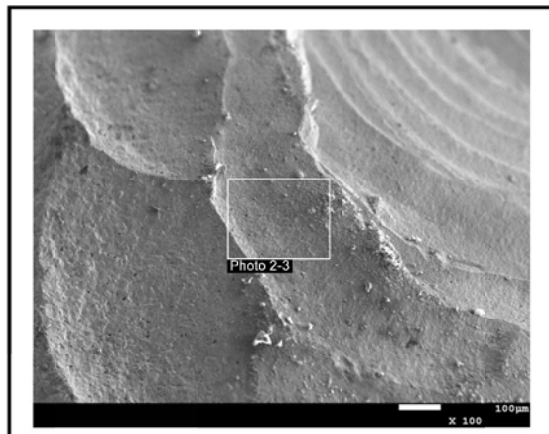
図 4.8-8(1) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 8 の SEM 画像



AP2-3
No. 8ペレット片

Photo 2-1

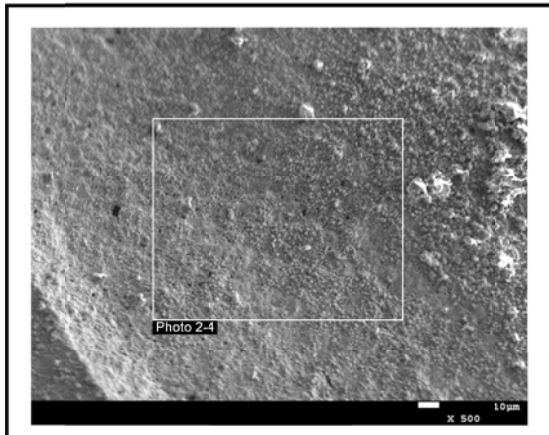
300 μm



AP2-3
No. 8ペレット片

Photo 2-2

100 μm



AP2-3
No. 8ペレット片

Photo 2-3

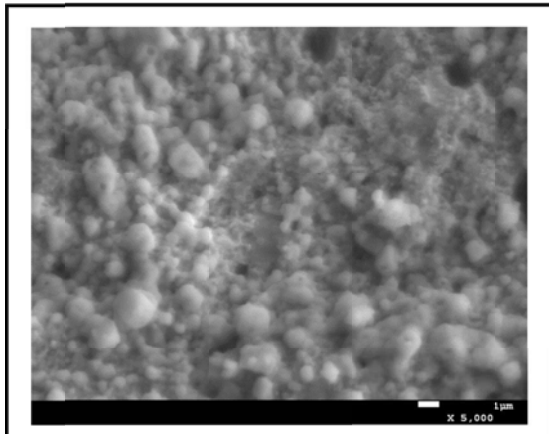
30 μm



AP2-3
No. 8ペレット片

Photo 2-4

10 μm

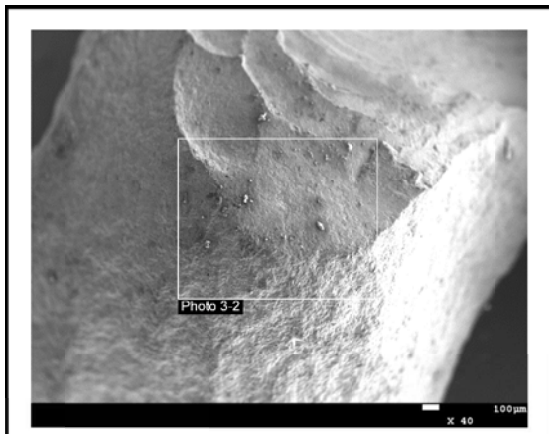


AP2-3
No. 8ペレット片

Photo 2-5

3 μm

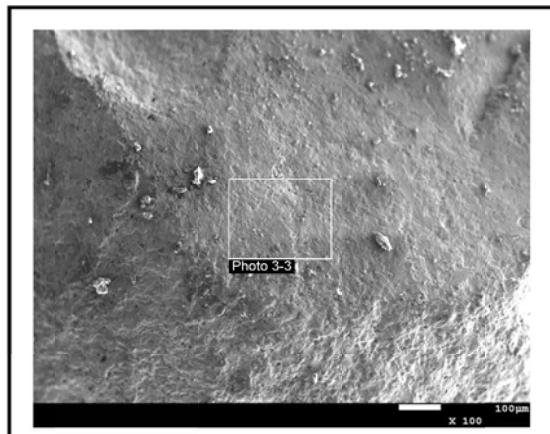
図 4.8-8(2) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 8 の SEM 画像



AP2-3
No. 8ペレット片

Photo 3-1

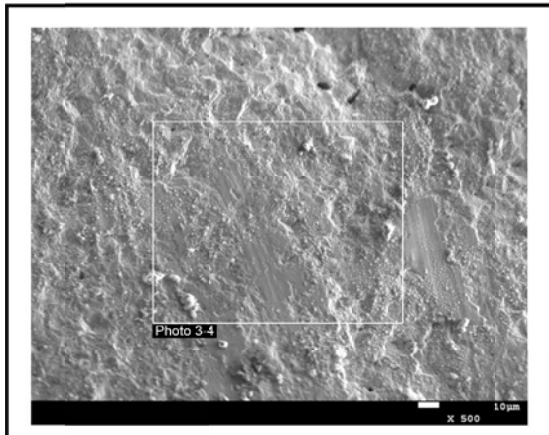
300 μm



AP2-3
No. 8ペレット片

Photo 3-2

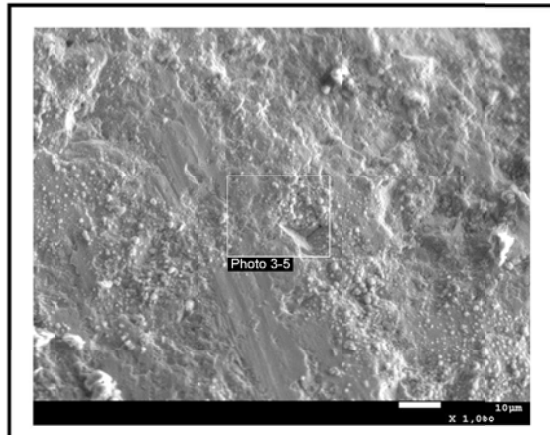
100 μm



AP2-3
No. 8ペレット片

Photo 3-3

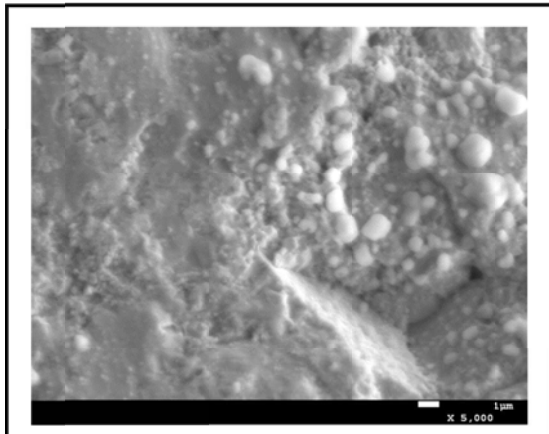
30 μm



AP2-3
No. 8ペレット片

Photo 3-4

10 μm

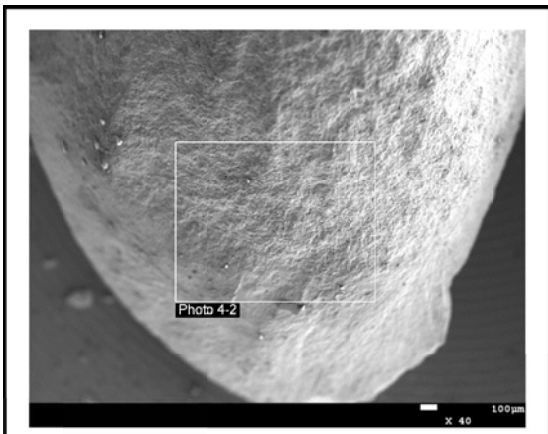


AP2-3
No. 8ペレット片

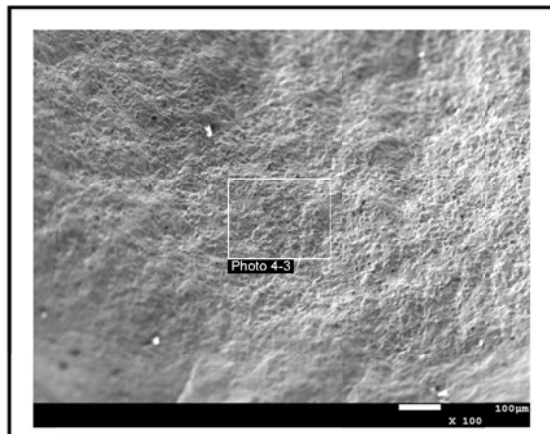
Photo 3-5

3 μm

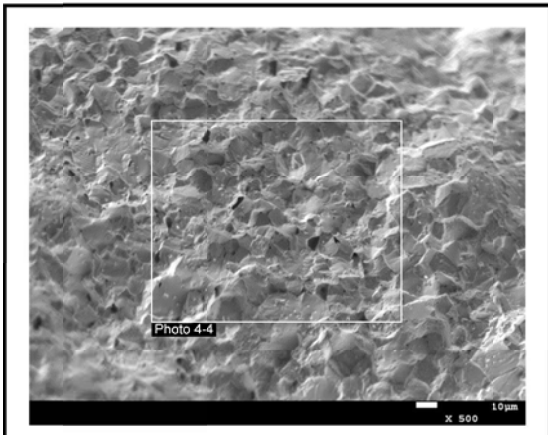
図 4.8-8(3) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 8 の SEM 画像



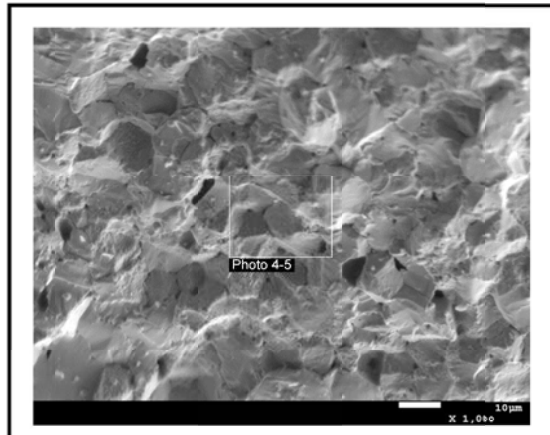
AP2-3 No. 8ペレット片	Photo 4-1	300 μm
---------------------	-----------	--------



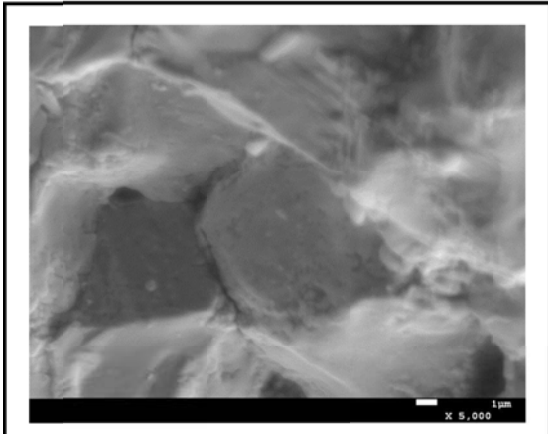
AP2-3 No. 8ペレット片	Photo 4-2	100 μm
---------------------	-----------	--------



AP2-3 No. 8ペレット片	Photo 4-3	30 μm
---------------------	-----------	-------



AP2-3 No. 8ペレット片	Photo 4-4	10 μm
---------------------	-----------	-------



AP2-3 No. 8ペレット片	Photo 4-5	3 μm
---------------------	-----------	------

図 4.8-8(4) 加熱試験前の燃料ペレット片 No. 8 の SEM 画像

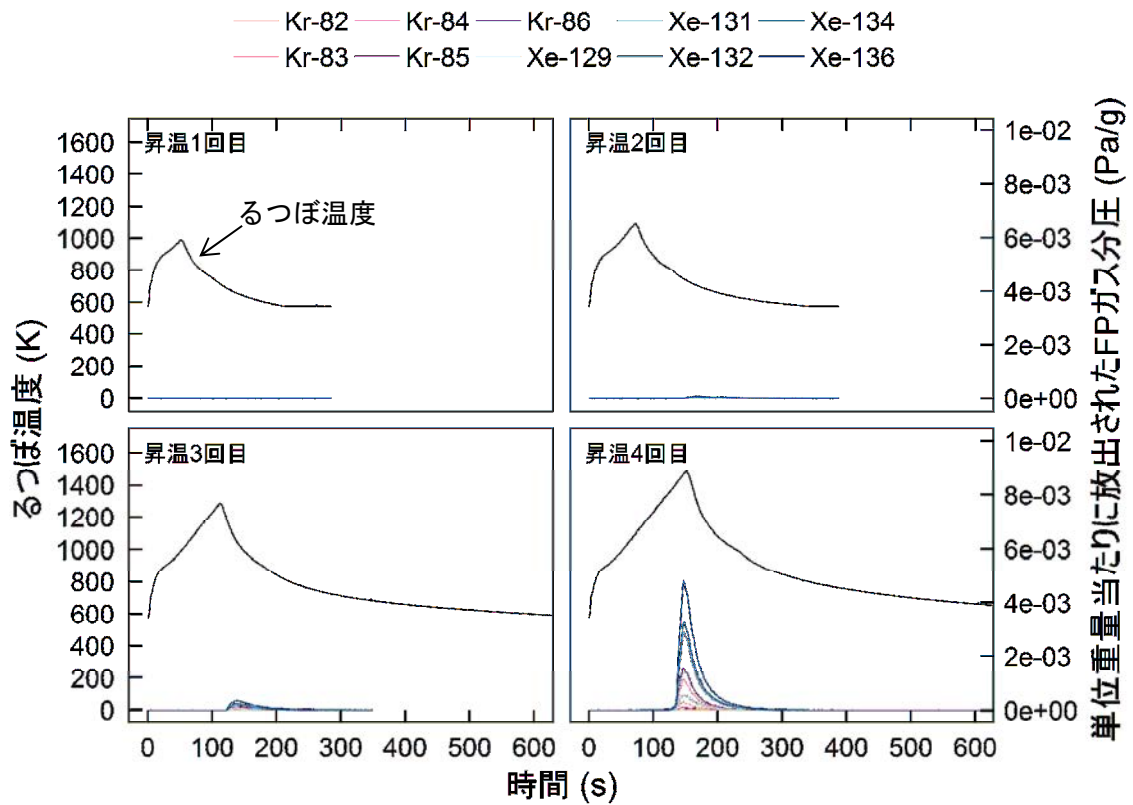


図 4.8-9 燃料ペレット片 No. 5 に対する加熱試験時のりつぼ温度及び同燃料ペレット片から放出されたキセノン (Xe) 及びクリプトン (Kr) の分圧の時刻歴

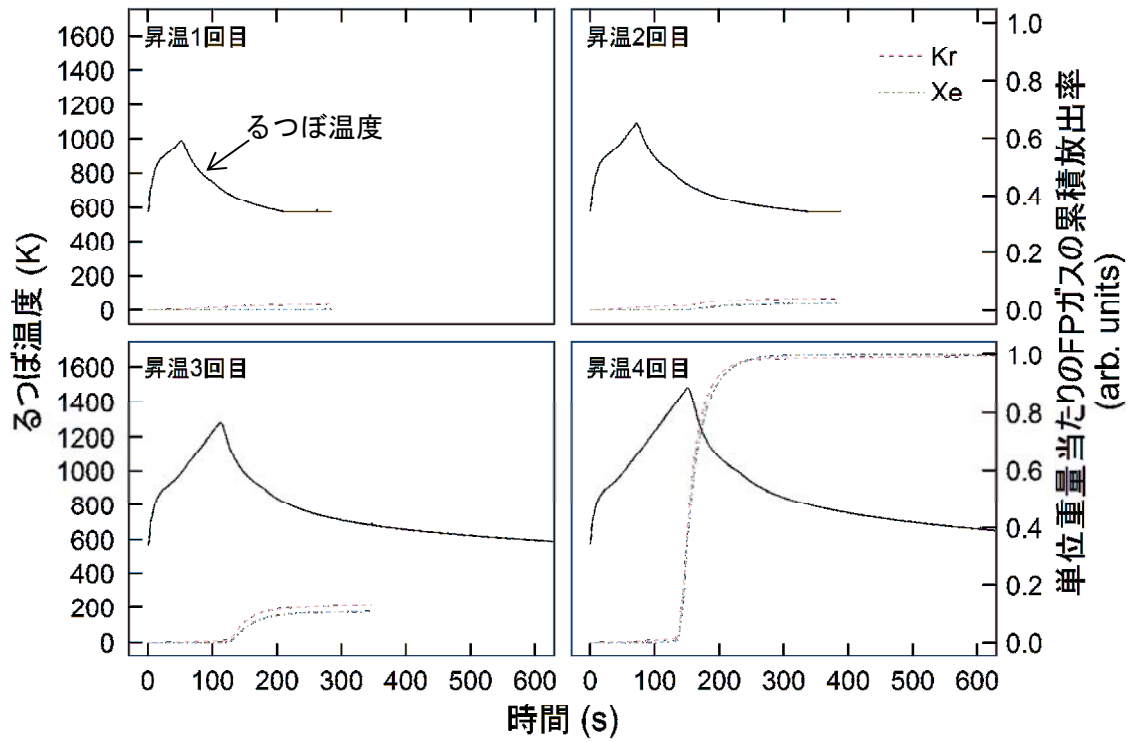


図 4.8-10 燃料ペレット片 No. 5 に対する加熱試験時のるつぼ温度及び同燃料ペレット片から放出されたキセノン (Xe) 及びクリプトン (Kr) の累積放出率の時刻歴 (単位重量当たりの FP ガスの累積放出率は燃料ペレット片 No. 5 の昇温 4 回目の総放出量で規格化した。)

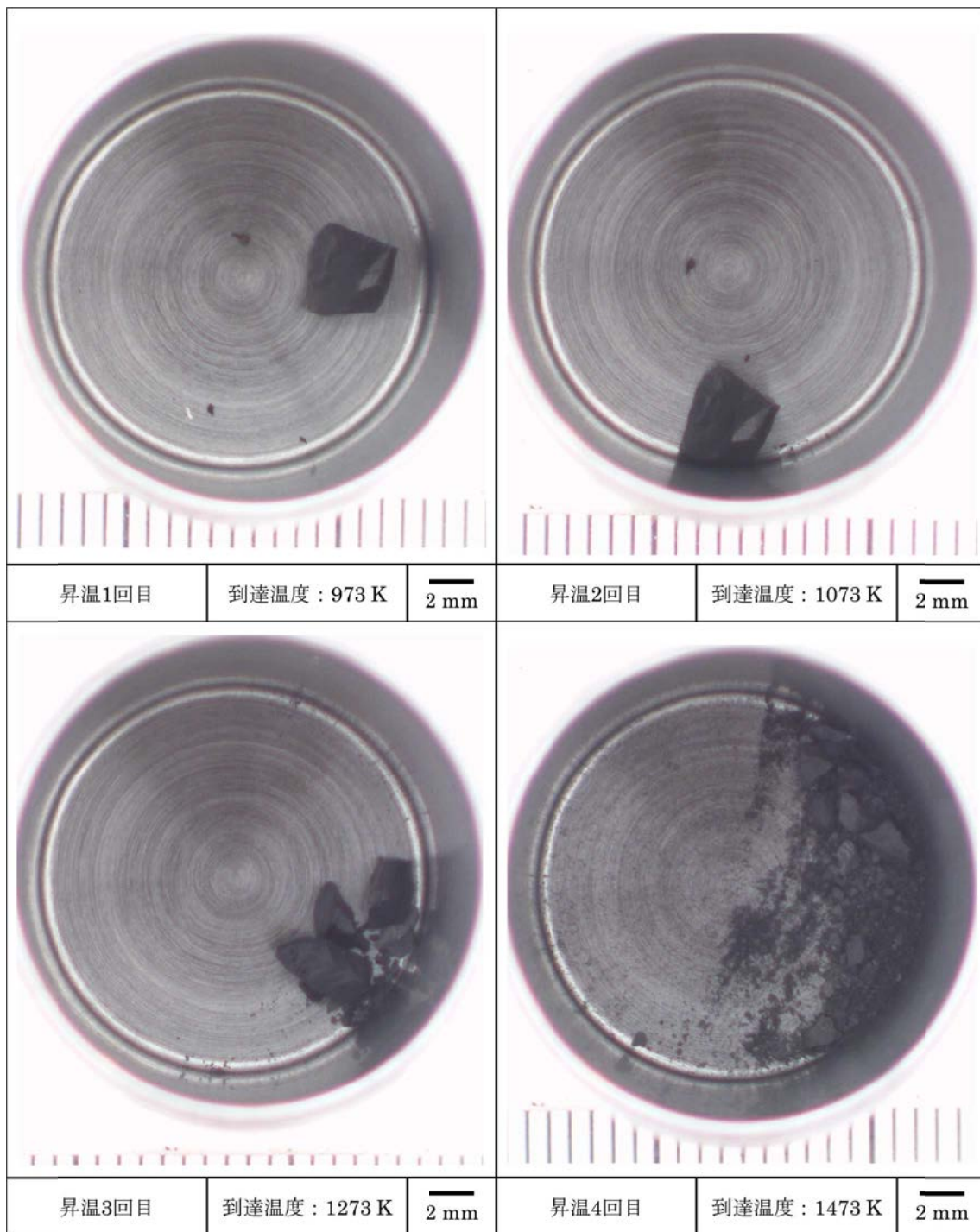


図 4.8-11 加熱試験後の燃料ペレット片 No. 5 の外観

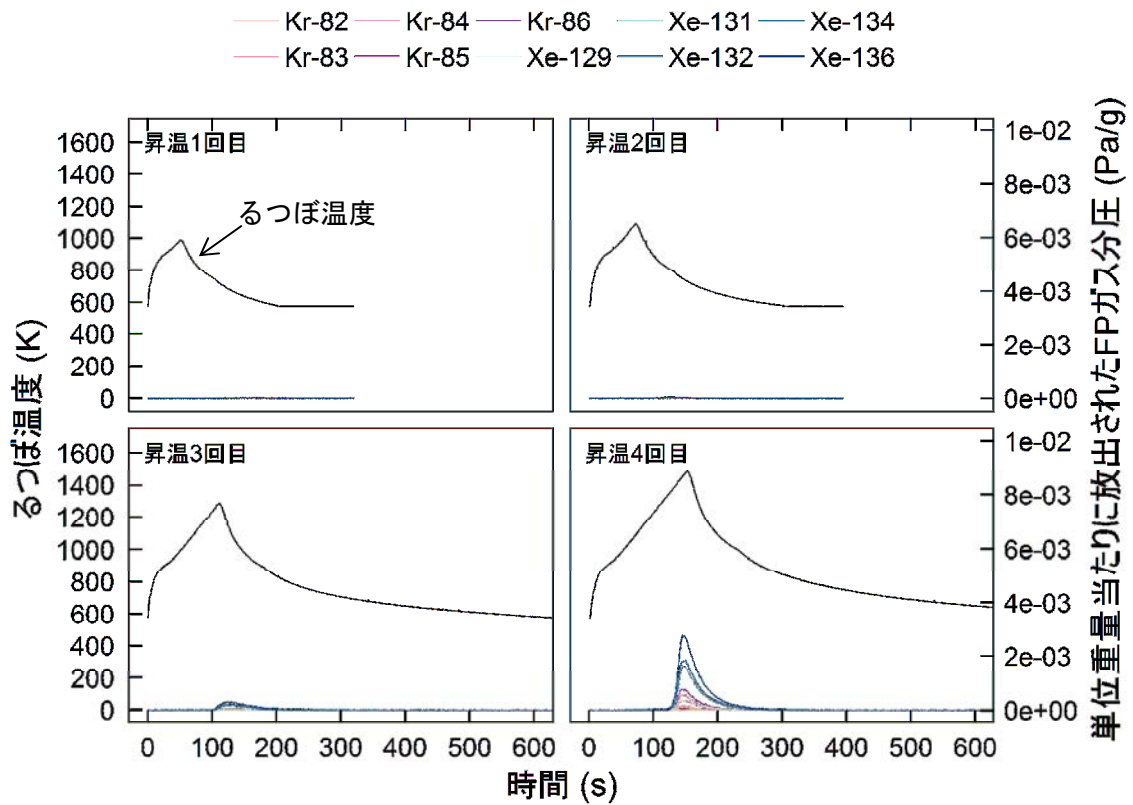


図 4.8-12 燃料ペレット片 No. 6 に対する加熱試験時のるつぼ温度及び同燃料ペレット片から放出されたキセノン (Xe) 及びクリプトン (Kr) の分圧の時刻歴

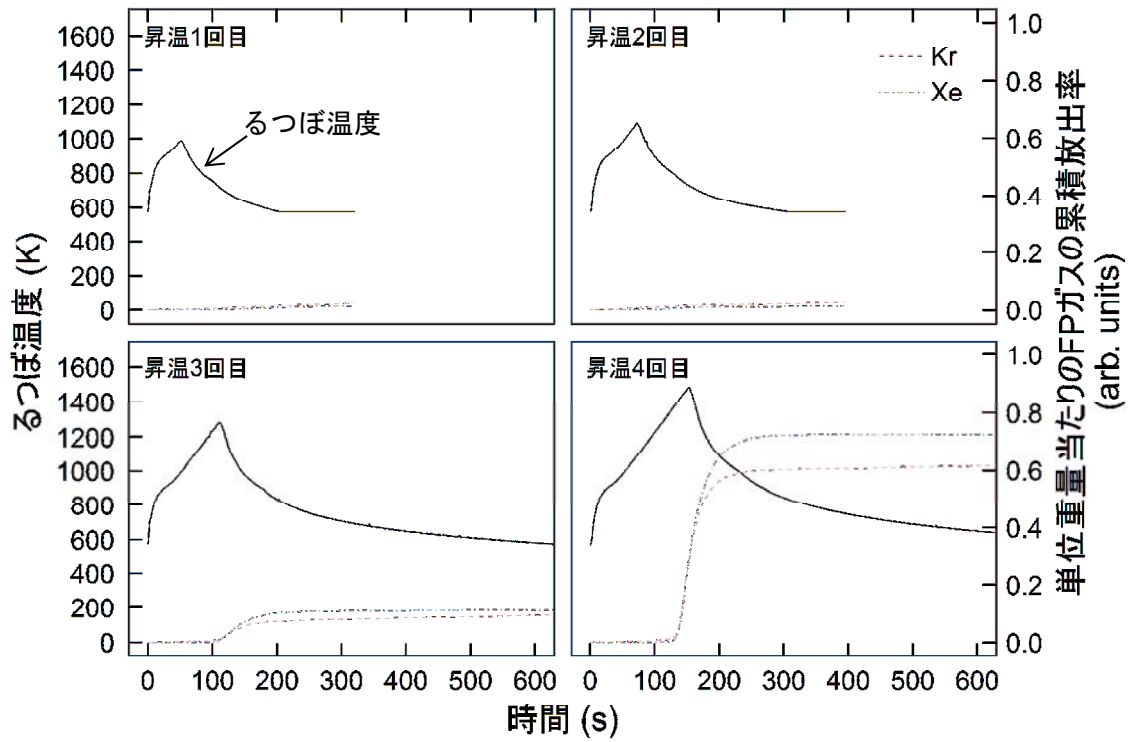


図 4.8-13 燃料ペレット片 No. 6 に対する加熱試験時のるつぼ温度及び同燃料ペレット片から放出されたキセノン (Xe) 及びクリプトン (Kr) の累積放出率の時刻歴 (単位重量当たりの FP ガスの累積放出率は燃料ペレット片 No. 5 の昇温 4 回目の総放出量で規格化した。)

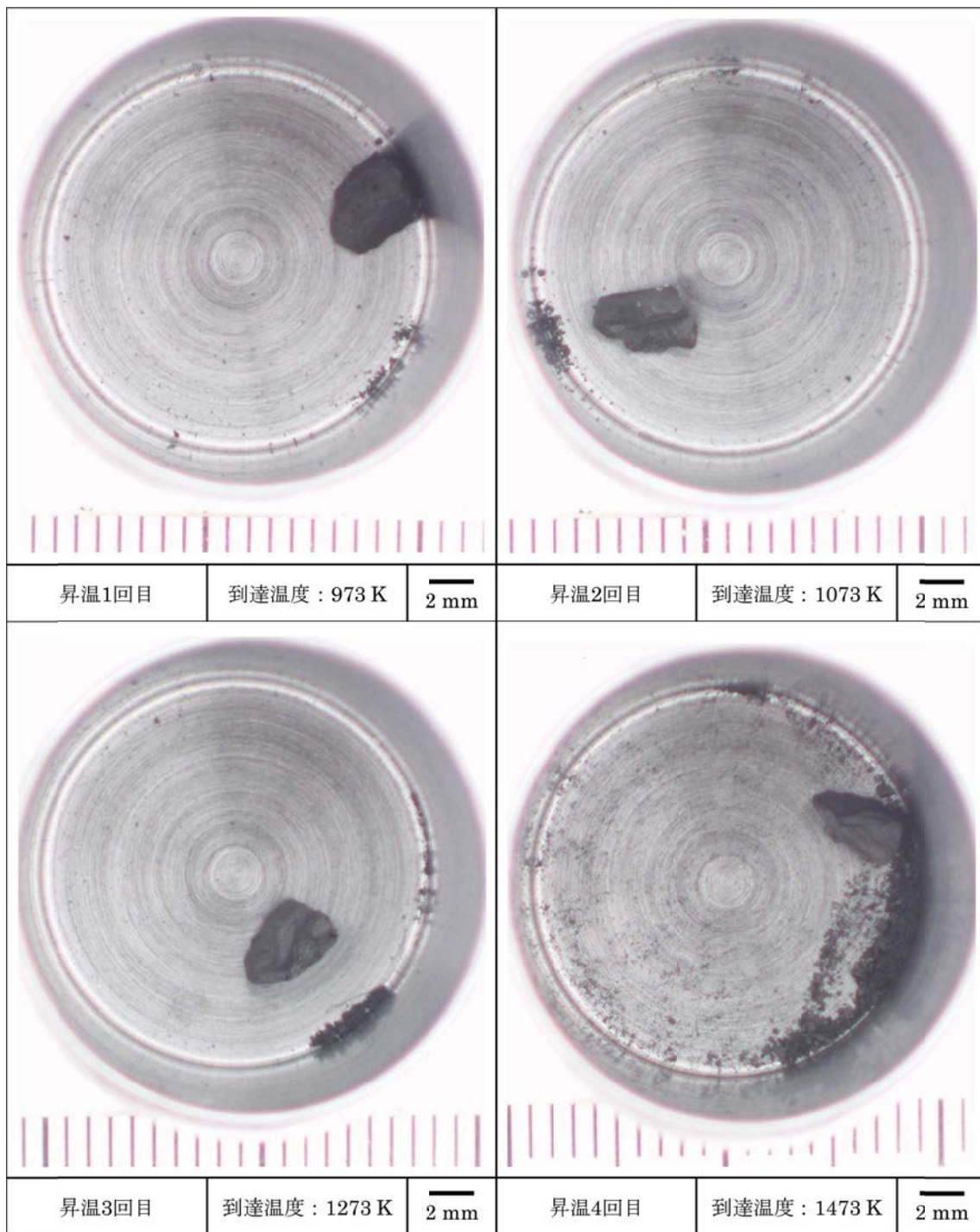


図 4.8-14 加熱試験後の燃料ペレット片 No. 6 の外観

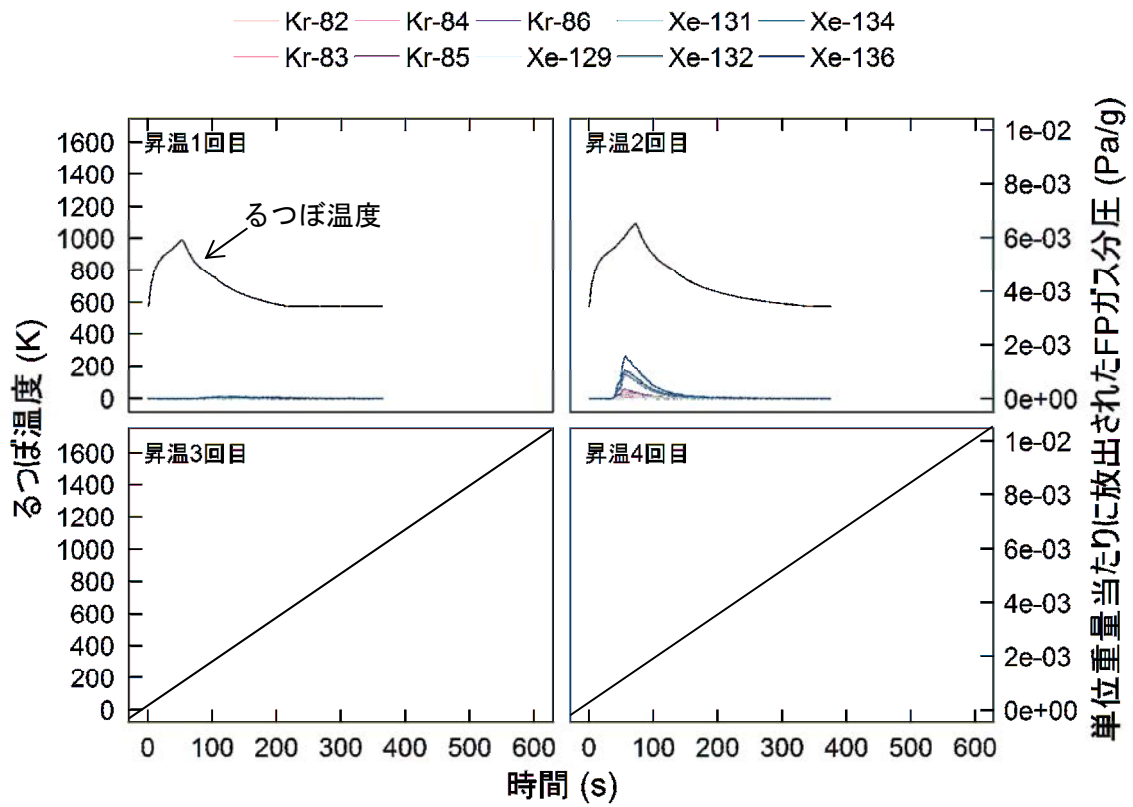


図 4.8-15 燃料ペレット片 No. 8 に対する加熱試験時のるつぼ温度及び同燃料ペレット片から放出されたキセノン (Xe) 及びクリプトン (Kr) の分圧の時刻歴

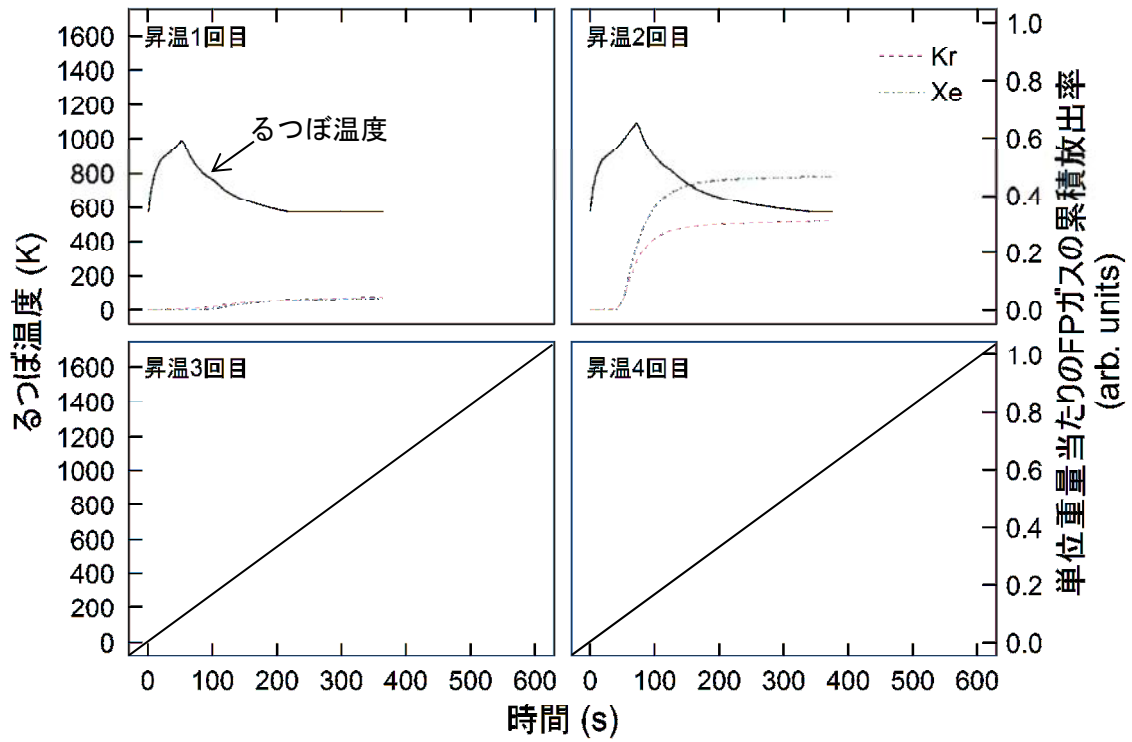


図 4.8-16 燃料ペレット片 No. 8 に対する加熱試験時のるつぼ温度及び同燃料ペレット片から放出されたキセノン (Xe) 及びクリプトン (Kr) の累積放出率の時刻歴 (単位重量当たりの FP ガスの累積放出率は燃料ペレット片 No. 5 の昇温 4 回目の総放出量で規格化した。)

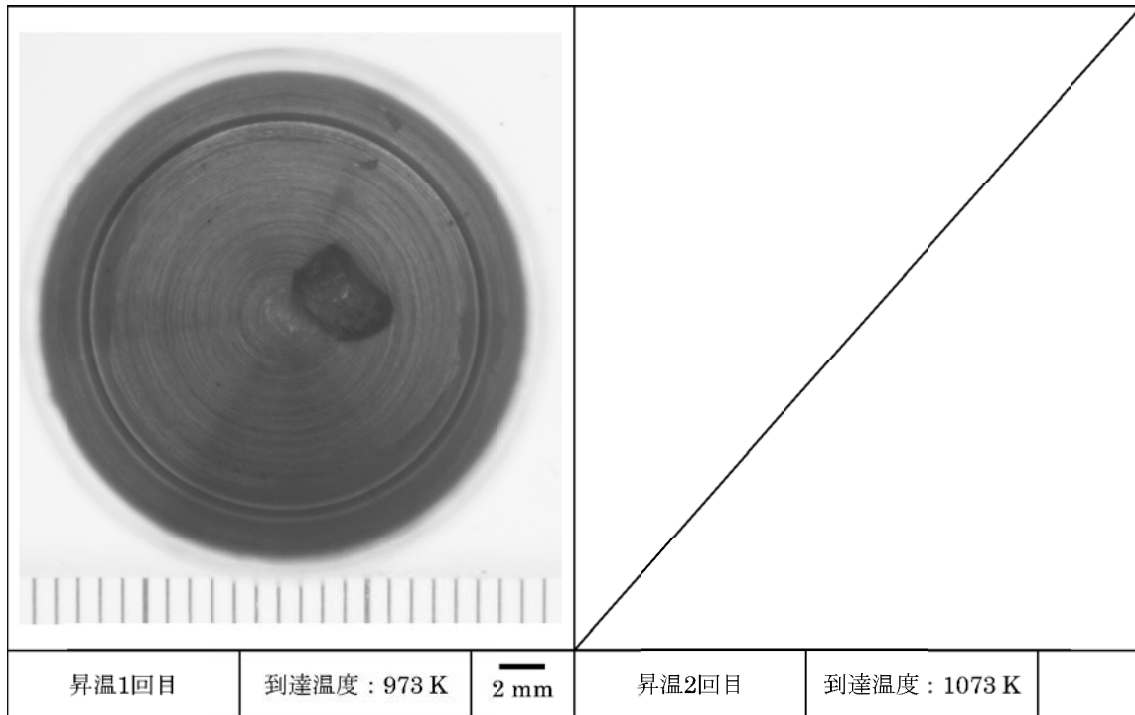


図 4.8-17 加熱試験後の燃料ペレット片 No. 8 の外観

4.9 廃棄物処分

本事業における照射後試験の実施に伴い発生した放射性廃棄物は、性状（固体廃棄物及び液体廃棄物）及び表面線量率により区分し、機構内の放射性廃棄物処理場へ引き渡し、処理又は保管廃棄を行った。発生した放射性廃棄物の量については、RIA 試験に付随する照射後試験では固体廃棄物約 7.2m³ 及び液体廃棄物約 7.9m³、また LOCA 試験関連では固体廃棄物約 3.1m³ 及び液体廃棄物約 3.4m³ であった。実入り LOCA 装置等準備では、固体廃棄物約 1m³ であった。

4.10 専門部会の開催

事業で得られた成果の内容を精緻化するための専門部会を、平成 31 年 3 月 11 日（水）に開催した。

本専門部会では、事業の全体概要、RIA 試験、RIA 試験解析、LOCA 試験、改良型燃料被覆管の照射成長試験について、平成 30 年度に得られた成果が原子力機構担当者からそれぞれ報告され、出席した専門部会委員との質疑応答により、成果の明確化及び精緻化を行った。

4.11 事業の進捗管理

事業計画内容を漏れの無いように遂行するための原子力規制庁担当官との打合せを平成30年8月1日、12月13日に実施した。

各打合せにおいては、その時点での事業の進捗状況等を報告した。

5章 結言

民間事業者は、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ため、原子力発電炉の安全性を確保しつつ更なる高燃焼度化をはじめとする高度利用を目指した燃料、いわゆる「改良型燃料」の研究開発を現在まで進めてきた。

改良型燃料は、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たものであり、このような改良型燃料の発電用軽水炉への導入は、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。

本事業においては、今後導入が見込まれる改良型燃料の照射試験で得られた燃料試料を対象に反応度事故模擬実験（RIA 試験）、冷却材喪失事故模擬実験（LOCA 試験）を実施し、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）、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、といった安全審査に反映できるデータを取得した。また、試験で得られた結果の評価を行うために、燃料挙動解析コード等を用いた解析的評価を行った。さらに、改良型燃料への採用が考えられている Zr-Nb 二元系合金被覆管を含む改良合金被覆管を試験炉で照射し照射に伴う伸び（照射成長）に関するデータを取得してきた。

平成 30 年度は、入手した高燃焼度改良型燃料に対する RIA 試験、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試験機を用いた機械特性試験、RIA 試験に係る計算コードを用いた解析、LOCA 試験並びにハルデン炉において Zr-Nb 二元系合金を含む改良型燃料被覆管の照射成長試験を実施した。また、平成 20～29 年度に実施した燃料等安全高度化対策事業、平成 30 年度の燃料設計審査分野の規制研究事業で得た成果を基に、安全審査に必要な高度化軽水炉燃料の RIA 及び LOCA 時燃料挙動に関する知見をとりまとめた。

得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 反応度事故（RIA）に対する安全評価においては、原子炉出力の急上昇によって破損に至る燃料棒の本数を評価し、破損本数に応じて、破損に伴い圧力容器内で発生する機械的エネルギーや冷却材中に放出される放射性物質量の評価を行う。したがって、燃料が破損に至ると判断するための基準（破損しきい値）が適切に定められていることが重要である。燃焼が進んだ燃料の破損については、その主な原因がペレット被覆管機械的相互作用（PCMI）であること、また、燃焼度の増大とともに破損が起りやすくなることが明らかになったことを受けて、平成 10 年に PCMI 破損しきい値が燃焼度 75 GWd/t までの範囲について定められた。しかし、既存の発電炉のさらなる安全性向上に向け改良型燃料の導入も見込まれる現在、RIA 時の安全を確保するためには、75 GWd/t を超える燃焼度域で燃料が破損に至る条件の定量化及び現行 PCMI 破損しきい値が改良型燃料に対して有する安全余裕の把握が必要である。

平成 30 年度は、VA-9 及び CN-1 の 2 回の RIA 模擬実験を実施した。高温高圧条件で

実施した VA-9 実験（燃焼度 80 GWd/t の ZIRLO(low-Sn)被覆 PWR-UO₂燃料）では、燃料エンタルピー増分が 481 J/g (115 cal/g)に達したが、過渡計測において燃料破損を示唆する信号は検出されなかった。室温条件で実施した CN-1 実験燃料（燃焼度 64 GWd/t の M5 被覆 PWR-MOX 燃料）では、燃料エンタルピー増分が 670 J/g (160 cal/g)に達したが、過渡計測において燃料破損を示唆する信号は検出されなかった。一方試験後の燃料棒の外観検査によると燃料棒被覆管の中心部に内圧破裂型と思われる軸方向の小さな開口部が見られ、高燃焼度 PWR/BWR 燃料では初めて観測される内圧破裂型の破損と判断された。また、昨年度実施した Zry-2 被覆 BWR-UO₂燃料実験である LS-4（クロミア添加物入り燃料ペレット）及び OS-1（ADOPT 燃料：クロミア及びアルミナ添加物入り燃料ペレット）の照射後試験、並びに炉外多軸応力負荷試験を進め、以下の主要な知見を得た。

- ・ 破損した OS-1 燃料の試験後被覆管金相観察結果によると、径方向に配向した水素化物を經由しながらき裂が進展し、最終的に貫通欠陥の形成に至ったと考えられる。このようなき裂進展は従来観察されてきた BWR 燃料の PCMI 破損における典型的な破損形態である。
- ・ LS-4 燃料の燃料棒寸法測定結果と解析結果の比較より、燃料棒の試験前後の外径変化の最大値は UO₂ ペレット熱膨張の寄与をやや上回る程度であり、PCMI 挙動への添加物燃料ペレット固有の影響は見られない。
- ・ 一部の析出水素化物を径方向に配向させた Zry-4 被覆管（17×17 型、SR 材）を対象に、真応力制御による二軸応力負荷試験を室温条件で実施した。水素濃度約 100 ppm の水素化物再配向試料では、径方向配向度が高い条件で軸及び周方向の破損ひずみが減少する傾向が確認された。

本事業を通じ、以下のデータ及び知見を取得した。

PCMI 破損限界に関して、先進的な燃料材料（M-MDA(SR)、Low-Sn ZIRLO、添加物入り燃料）について新たにデータを取得すると共に、燃焼度域についても 84GWd/t までデータを拡充し、現行しきい値の適用性に関する検証範囲を拡大した。改良合金被覆管燃料である M-MDA(SR)被覆燃料、Low-Sn ZIRLO 被覆燃料、M5 被覆燃料に対し、現行しきい値が適切な安全余裕を有することを明らかにした。また、被覆管水素吸収量、水素化物配向特性及び初期温度が PCMI 破損限界に強い相関を持つことが分かった。

FP ガス放出率に関して、全体として放出率がピークエンタルピーに対し正の相関を示すが、50GWd/tU 程度までのデータ点による従来の整理に比べると傾向は明瞭でない。本事業を通じて高燃焼度側のデータが充実し、追加放出率が燃焼度に対して正の相関を示すことが明瞭になった。

CN-1 実験は PCMI 型の破損が生じなかった一方、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破損形態であることから、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る。

OS-1 実験は現行しきい値を下回る破損限界であることが明らかになった。同燃料被覆管中に占める径方向水素化物の割合が比較的大きく、低い破損限界の原因となった可能

性が考えられる。しかし、従来データ取得例の無い ADOPT 燃料であるため、PCMI の駆動力としての燃料ペレット側のスエリングが破損限界に影響を及ぼした可能性は否定できない。

- (2) RIA 試験解析の目的は、燃料ペレット及び被覆管内部における温度や応力の分布といった直接計測できないデータを取得し、さらに、試験装置の制約を超えた条件下での燃料挙動を予測することで、RIA 試験から得られる知見を補完し、試験結果に対する理解を深めることである。このため、燃料のベース照射開始時から終了時までの燃料ふるまいを FEMAXI-8 コードにより解析し、これにより得られた燃料状態に関する情報を入力として、RANNS コードによる RIA 試験時燃料ふるまいの解析を行う。また、再結晶焼鈍被覆管 (RX 材) の水素化物の析出形態で想定される複数のき裂が被覆管の破損に及ぼす影響の解明に向け、燃料被覆管金属中に存在する複数のき裂の PCMI 条件下における力学的なふるまいを取り扱うための解析手法について検討・整備を行う。

平成 30 年度は、FEMAXI-8 コード及び RANS コードにより RIA 試験候補燃料を用いた LS-4 実験、OS-1 実験、VA-9 実験及び CN-1 実験の実験解析、並びに昨年度に引き続き ABAQUS コードによる複数き裂進展解析手法の検討及び同手法を実験に適用した解析を実施し、以下の知見を得た。

- LS-4 について、実験解析を実施した。FRAPTRAN 破損モデルによる予測は非破損であり、実験結果と一致した。PIE データに基づく暫定値との比較では解析値 1.9% は過小評価である可能性が大きい。比較値の小さい点において傾向は一致する。解析によれば追加放出率が小さいことの原因として大粒径化されたペレットの他にベース照射期間中の高い線出力履歴も考えられ、大粒径ペレットの効果の程度については PIE の進捗をふまえて更に検討する必要がある。被覆管の塑性ひずみは、実験値で最大 2.36% であり、熱膨張によるひずみ量の解析値約 1.8% よりやや大きい。追加 FGR が小さい点を考慮しても、本実験で添加物ペレット固有のふるまいが PCMI 挙動に影響した可能性は小さい。
- OS-1 について、実験解析を実施した。発熱量や水素濃度等入力情報の更新を反映した FRAPTRAN 破損モデルの判定は非破損であり、低エンタルピーで破損が生じた実験結果と大きく矛盾した。モデルのパラメータとなっている水素吸収量だけでなく、水素化物の配向特性等の他の要因が破損に寄与していると考えられる。また解析上、破損時刻において FP ガス追加放出は生じておらず、被覆管温度は内面で約 280℃、肉厚中央部で約 50℃、表面で 20℃ と低いレベルにあることから、内圧を駆動力とする変形が破損に関与したとは考え難い。
- VA-9 について、実験解析を実施した。J 積分モデル及び FRAPTRAN 破損モデル共に判定は非破損であった。解析によると被覆管ひずみ量は、4.61% となり、同様の燃焼度、入力、線出力履歴である VA-7 の PIE で得られたひずみ量の最大値 5.29% と比較すると近い値となった。

- CN-1 実験解析では、M5 合金の高耐食性により水素吸収量が低い水準で維持されており、FRAPTRAN 破損モデルによる判定は非破損であった。燃料ペレット温度の到達最大値は中心部で 1800°C 程度、外周部で 2400°C 程度と高く、RIA 時の FP ガス追加放出率が 57% と大きくなった。実験後の PIE では燃料の破損が確認されたが、燃料温度、被覆管温度共高いレベルで推移したこと、FP ガス放出量が極めて大きいこと、PCMI 破損は生じないと判定であったこと等の解析結果はいずれも、同燃料の破損が PCMI 破損ではなく内圧破裂型の破損であったとの解釈に整合する。
- 昨年度に整備した ABAQUS コードによる複数き裂進展解析手法を用いて、OS-1 及び LS-1 実験に対するき裂進展解析を実施し、OS-1 燃料の PCMI 破損における被覆管中径方向水素化物の分布・配向状態の差が破損限界の低下に寄与したとの解釈を裏付ける解析結果を得た。但し本解析で示唆された寄与だけでは両実験結果の違いを説明するには十分とは言えない。

(3) LOCA 時の安全性を確保するためには、炉心の冷却性すなわち冷却可能形状の維持が必要とされる (ECCS 性能評価指針)。同指針では、被覆管最高温度が 1200°C を超えないこと、化学量論的酸化量が被覆管肉厚の 15% を超えないことが規定されているが、これは被覆管の著しい脆化を防ぎ脆化による広範な燃料棒の破損を防ぐことにより炉心の冷却可能形状を維持することを目的としている。最高温度及び酸化量に関する基準値はジルカロイ被覆管に関するデータを基に決められたものであり、改良型被覆管についてはジルカロイ被覆管と比較した LOCA 時性能の確認が基本的に必要である。確認すべき性能は以下の通りである。

- 脆化に関する基準は酸化量を指標としていることから、酸化量を評価する酸化速度を精度良く求めておく必要がある。また、酸化速度がジルカロイと比べて著しく大きくないことが必要である。
- 被覆管の酸化挙動を調べ酸化量と脆化の関係に影響する不均一な酸化膜の成長や、特定の条件における酸化速度の増大や過度の水素吸収 (ブレイクアウェイ酸化) が起こらないことを確認する必要がある。
- 脆化や LOCA 時に被覆管の破断が起こりやすくなる酸化量 (しきい酸化量) について調べ、しきい酸化量が基準値 (15%) 以下にならないことを確認する必要がある。

平成 30 年度は平成 28 年度に酸化速度評価試験に供した高燃焼度改良型 BWR 燃料 (燃焼度 85 GWd/t) から採取した Zircaloy-2 (Zry-2、LK3) 被覆管を対象に試験後の分析を実施し、以下の知見を得た。

- 高燃焼度 Zry-2 被覆管のブレイクアウェイ酸化発生条件は非照射の従来材である Zircaloy-4 被覆管の文献値と比較して同等であったことから、Zry-2 燃料被覆管に関して、85 GWd/t までの燃焼の進展や合金組成の変更によってブレイクアウェイ酸化発生条件が著しく変化することは無いと考えられる。

本年度はさらに平成 23-30 年度に実施した LOCA 試験の結果を基に、LOCA 時の燃料挙動に関する総合評価を実施し、以下の知見を得た。

- ・ LOCA 時の燃料挙動のうち、高温酸化挙動に関しては、85 GWd/t までの燃焼の進展や合金組成の変更による燃料被覆管高温酸化速度の著しい増大は生じないこと、ブレードアウェイ酸化発生条件の著しい変化も生じないこと、従って、本事業にて調べた高燃焼度改良型燃料被覆管（燃焼度 80-85 GWd/t）の安全評価において Baker-Just 酸化速度式を利用することは妥当であることを示す結果を得た。
- ・ 昇温時の膨れ破裂、破裂後の等温酸化、酸化後の急冷等の挙動に関しては、同じく最大 85 GWd/t 程度までの燃焼の進展や合金組成の変更により、膨れ破裂時の被覆管膨れ率は著しく増大することはないと考えられること、被覆管の破裂開口サイズの影響を受けると考えられるものの、水素吸収量は著しく増大することはないと考えられること、通常運転中に被覆管に吸収される水素の濃度の増大に伴い若干低下する傾向があるものの、急冷破断限界は著しく低下することはないこと等がわかった。

(4) 民間事業者は、既存の発電用軽水炉のさらなる有効活用と安全性向上等のため、軽水炉燃料被覆管の組成を従来の材料から変更することで外表面腐食量や水素吸収量の抑制を図った改良型燃料被覆管合金の開発を進めてきている。この改良合金を対象として、ノルウェー・エネルギー技術研究所が保有する試験用原子炉(ハルデン炉)を用いた照射成長試験を平成 23 年度より実施している。2つの照射試験リグ(IFA-735 及び-736)を用いて試験片を照射し、試験片に照射された高速中性子フルエンスは最終的に約 8×10^{21} (n/cm²)に到達した。

平成 30 年度には、照射リグ IFA-735 に装荷された試験片の最終検査をハルデン炉施設にて実施した。最終検査項目として外観観察、試験片の長さ測定及び重量測定を行った結果、長さの変化量(伸び量)及び重量増量は試験片の種類(被覆管の製造方法、合金組成、水素添加の有無、等)及び照射温度によって異なる傾向が確認された。また、一部の試験片をノルウェー・エネルギー技術研究所のホットラボ施設に輸送し、破壊試験に供した。破壊試験の項目として、被覆管金相観察、水素濃度分析、等を実施した。

(5) 欧州の試験施設で近年実施された、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 模擬実験において、その昇温過程で燃料被覆管が破裂した際に、細片化した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)が確認されている。軽水炉の LOCA 時及び LOCA 後の燃料及び炉心冷却性に関して燃料ペレット挙動が関わるこの FFRD 現象の影響を評価しておくことが必要であり、このために着目すべき重要な現象として、LOCA 時の燃料棒内で生じるペレットの細片化、軸方向の移動及び燃料棒外への放出が挙げられる。

- ・ ペレットの細片化に伴って、ペレット内部に閉じ込められていた FP ガス等が放出される、ないしペレットの比表面積が増大することにより、燃料ペレットから放出される FP の量が増大する可能性がある。従って、LOCA 時に燃料ペレットが細片化する条件を評価することが重要である。

- ・ 細片化したペレットが被覆管の膨れ部に集積することで、局所的に被覆管温度が上昇し、酸化が進むことなどによって被覆管の脆化が進行する可能性がある。また、細片化したペレットが被覆管の膨れ部、すなわち、破裂開口部近傍に集積した場合には、燃料棒内部に流入する水蒸気の流れを阻害し、LOCA 時の被覆管の水素吸収（二次水素化）挙動に影響を及ぼす可能性がある。このため、細片化したペレットの燃料棒内軸方向再配置が被覆管温度上昇や二次水素化挙動に及ぼす影響を評価することが重要である。
- ・ 燃料棒から放出されたペレット片による冷却材流路閉塞により、炉心の冷却可能形状が失われる可能性がある。また、放出されたペレット片が ECCS に流入することで、その稼働状態に影響を及ぼすことも考えられる。従って、細片化したペレットの燃料棒外への移行挙動を評価することが重要である。

平成 30 年度は実燃料入り燃料ペレットを除去しない状態の高燃焼度軽水炉燃料棒を対象とした LOCA 模擬試験（実燃料入り LOCA 模擬試験）の実施に向け、試験条件案を検討するとともに、試験に供する M-MDA 被覆バンドロス燃料について切断、上下端栓部嵌め合い加工、及び構成部材（端栓、アダプタ）の作製等の試験燃料棒の作製を実施した。また、実燃料入り LOCA 模擬試験装置を原子力機構燃料試験施設のホットセル内に設置するための準備作業として、ホットセル内及び既設 LOCA 試験装置の除染、並びに同装置類の撤去を実施した。

本年度はさらに燃料ペレット単体を用いた LOCA 時温度変化模擬加熱試験を実施し、高燃焼度燃料ペレットで顕著な細片化が生じ得る温度を概略明らかにした。この温度は先行研究で評価されている高燃焼度燃料の LOCA 模擬試験時の燃料ペレット細片化発生温度と整合するものであった。また、燃料ペレット細片化の程度と加熱時の到達温度との傾向から、燃料ペレット細片化の発生原因として、高燃焼度領域で燃料ペレットに生じる微細組織の変化が示唆された。燃料ペレット細片化発生に及ぼす微細組織状態の影響については、加熱試験後の燃料ペレット片に対して SEM を用いたマイクロ組織観察等を実施し、細片化を生じた組織と生じなかった組織との差を調べることで評価が可能と考えられる。

現行燃料に関して現在の使用条件で多くのペレット片の移動や放出は予想されないと
の知見があるものの、FFRD は被覆管最高温度や炉心冷却性に影響を及ぼす恐れがある
ことから、FFRD が生じる条件やその影響に関する知見が十分に得られた際には、ECCS 性
能評価指針への反映について検討すべきである。

(参考文献)

1 章

- (1) T. Fuketa, H. Sasajima and T. Sugiyama, “Behavior of High Burnup PWR Fuels with Low-Tin Zircaloy-4 Cladding Under Reactivity-Initiated-Accident Conditions”, Nuclear Technology, Vol. 133, No.1, pp.50-62, (2001).
- (2) T. Nakamura, K. Kusagaya, T. Fuketa and H. Uetsuka, “High-burnup BWR Fuel Behavior under Simulated Reactivity-Initiated-Accident Conditions”, Nuclear Technology, Vol.138, pp.246-259, (2002).
- (3) F. Nagase and H. Uetsuka, “Study of High Burn up Fuel Behavior under LOCA Conditions at JAERI: Hydrogen effects on the failure bearing capability of cladding tubes”, Nuclear Safety Research Conference, Washington, U.S.A., October 22-24, 2001(NUREG/CP-0176, May 2002).
- (4) “Cladding Embrittlement during Postulated Loss-of-Coolant Accidents”, NUREG/CR-6967, ANL-07/04, (2008).
- (5) 平成 14 年度高度化軽水炉燃料安全技術調査に関する報告書、日本原子力研究所、平成 15 年 3 月.
- (6) 平成 15 年度高度化軽水炉燃料安全技術調査に関する報告書、日本原子力研究所、平成 16 年 3 月.
- (7) 平成 16 年度高度化軽水炉燃料安全技術調査に関する報告書、日本原子力研究所、平成 17 年 3 月.
- (8) 平成 17 年度高度化軽水炉燃料安全技術調査に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 18 年 3 月.
- (9) 平成 18 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 19 年 3 月.
- (10) 平成 19 年度燃料等安全高度化対策事業 (高度化軽水炉燃料安全技術調査) に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 20 年 3 月.
- (11) 平成 20 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 21 年 11 月.
- (12) 平成 21 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 22 年 3 月.
- (13) 平成 22 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 23 年 9 月.
- (14) 平成 23 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 25 年 3 月.
- (15) 平成 24 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構

構 安全研究センター、平成 26 年 3 月。

- (16) 平成 25 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 26 年 3 月。
- (17) 平成 26 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 27 年 3 月。
- (18) 平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費 (燃料等安全高度化対策) 事業に関する報告書、(国研) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 28 年 3 月。
- (19) 平成 28 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 (燃料等安全高度化対策) 事業 (平成 28 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、平成 30 年 1 月。
- (20) 平成 29 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 (燃料等安全高度化対策) 事業 (平成 29 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、平成 31 年 3 月。

2 章

- (1) “Cladding Embrittlement during Postulated Loss-of-Coolant Accidents”, NUREG/CR-6967, ANL-07/04, (2008).
- (2) F. Nagase, T. Otomo and H. Uetsuka, “Oxidation Kinetics of Low-Sn Zircaloy-4 at the Temperature Range from 773 to 1,573K”, J. Nucl. Sci. Technol., Vol.40, No.4, pp.213-219 (2003).
- (3) M. Billone, Y. Yan, T. Burtseva and R. Daum, “Cladding Embrittlement During Postulated Loss-of-Coolant Accidents”, NUREG/CR-6967 (2008).
- (4) F. Nagase and T. Fuketa, ” Recent results from LOCA study at JAERI”, Nuclear Safety Research Conference, Washington D. C. , U.S.A., Oct. 20-21 (2003).
- (5) F. Nagase and T. Fuketa, “Behavior of pre-hydrided Zircaloy-4 cladding under simulated LOCA conditions”, J. Nucl. Sci. Technol., Vol.42, No.2, pp.209-218 (2005).
- (6) 平成 19 年度燃料等安全高度化対策事業 (高度化軽水炉燃料安全技術調査) に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 20 年 3 月。
- (7) 「軽水炉燃料のふるまい」、(財)原子力安全研究協会、平成 10 年 7 月。
- (8) V. Fidleris, “The irradiation creep and growth phenomena”, J. Nucl. Mater., Vol. 159, pp.22-42 (1988).

4 章

4.3 RIA 試験

- (1) 平成 17 年度高度化軽水炉燃料安全技術調査に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 18 年 3 月。

- (2) L. Yegorova, O. Nechaeva et al., “Experimental Study of Narrow Pulse Effects on the Behavior of High Burnup Fuel Rods with Zr-1%Nb Cladding and UO₂ Fuel (VVER Type) under Reactivity-Initiated Accident Conditions”, NUREG/IA-0213, Vol.2, 2006.
- (3) 平成 29 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（燃料等安全高度化対策）事業（平成 29 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、平成 31 年 3 月。
- (4) 中村武彦、笹島栄夫、更田豊志、鈴木敏夫、高橋正人、細山田龍二、石島清見、“N S R R 照射済燃料実験での発熱量評価（J M T R 照射燃料）”, JAERI-Research 98-052 (1998)
- (5) 須山賢也、清住武秀、望月弘樹、“統合化燃焼計算コードシステム SWAT 改訂版”, JAERI-Data/Code 2000-027 (2000).
- (6) R.E. Alcouffe, F.W. Brinkley, D.R. Marr, R.D. O’Dell, “User’s Guide for TWODANT: A Code Package for Two-Dimensional, Diffusion-Accelerated, Neutral-Particle Transport”, LA-10049-M (1984).
- (7) 平成 22 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 23 年 9 月。
- (8) 平成 23 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 25 年 3 月。
- (9) 平成 24 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 26 年 3 月。
- (10) 平成 25 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 26 年 3 月。
- (11) 平成 26 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 27 年 3 月。
- (12) 平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費（燃料等安全高度化対策）事業に関する報告書、(国研) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 28 年 3 月。
- (13) 平成 28 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（燃料等安全高度化対策）事業（平成 28 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、平成 30 年 1 月。

4.4 RIA 試験解析

- (1) 宇田川豊、鈴木元衛、天谷政樹，“軽水炉燃料の事故時挙動解析コード RANNS の反応度事故解析モデル開発”, JAEA-Data/Code 2014-025 (2015).
- (2) 平成 29 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（燃料等安全高度化対策）事業（平成 29 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、平成 31 年 3 月。

- (3) 平成 26 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 27 年 3 月。
- (4) 平成 23 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 25 年 3 月。
- (5) 宇田川豊、山内紹裕、北野剛司、天谷政樹，“燃料挙動解析コード FEMAXI-8 の開発—軽水炉燃料挙動モデルの改良と総合性能の検証—”，JAEA-Data/Code 2018-016 (2019)。
- (6) Y. Udagawa, T. Sugiyama, M. Suzuki, F. Nagase, “PCMI FAILURE LIMIT ASSESSED BY FRACTURE MECHANICS APPROACH BASED ON NSRR HIGH-BURNUP PWR FUEL TESTS”, Proc. IAEA Technical Meeting on Fuel Behavior Under Transient and LOCA, Mito, Oct. 19-22, 2011.
- (7) M. Ishikawa, S. Shiozawa, “A study of fuel behavior under reactivity initiated accident conditions — review”, J. Nucl. Mater., Vol. 95, pp.1-30 (1980).
- (8) K.J. Geelhood, W.G. Luscher, C.E. Beyer, J.M. Cuta, “FRAPTRAN 1.4: A computer code for the transient analysis of oxide fuel rods”, NUREG/CR-7023 (2011).
- (9) Y. Udagawa, T. Mihara, T. Sugiyama, M. Suzuki, M. Amaya, “Simulation of the fracture behavior of Zircaloy-4 cladding under reactivity-initiated accident conditions with a damage mechanics model combined with fuel performance codes FEMAXI-7 and RANNS”, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 51, No. 2, pp.208-219, (2014).

4.5 LOCA 試験

- (1) 平成 28 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（燃料等安全高度化対策）事業（平成 28 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、平成 30 年 1 月。
- (2) L. Baker and L. C. Just, “Studies of Metal-Water Reaction at High Temperatures; III. Experimental and Theoretical Studies of the Zirconium-Water Reaction,” ANL-6548, Argonne National Laboratory (1962).
- (3) 平成 18 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 19 年 3 月。
- (4) 平成 19 年度燃料等安全高度化対策事業(高度化軽水炉燃料安全技術調査)に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 20 年 3 月。
- (5) 平成 26 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 27 年 3 月。
- (6) 平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費（燃料等安全高度化対策）事業に関する報告書、(国研) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 28 年 3 月。

- (7) 平成 29 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（燃料等安全高度化対策）事業（平成 29 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、平成 31 年 3 月。
- (8) M. Ozawa, T. Takahashi, T. Homma, and K. Goto, “Behavior of irradiated Zircaloy-4 fuel cladding under simulated LOCA conditions,” *Zirconium in the Nuclear Industry: Twelfth International Symposium*, ASTM STP 1354, pp. 279-299 (2000).
- (9) T. Chuto, F. Nagase, and T. Fuketa, “High temperature oxidation of Nb-containing Zr alloy cladding in LOCA conditions,” *Nucl. Eng. Technol.*, Vol. 41, No. 2, pp. 163-170 (2009).
- (10) F. Nagase, T. Otomo, and H. Uetsuka, “Oxidation kinetics of low-Sn Zircaloy-4 at the temperature range from 773 to 1,573 K,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, Vol. 40, No. 4, pp. 213-219 (2003).
- (11) MC. Billone, Y. Yan, TA. Burtseva, and RO. Meyer. “Cladding Behavior during Postulated Loss-of-Coolant Accidents,” The U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-7219, ANL-16/09 (2016).
- (12) M. Yamato, F. Nagase, and M. Amaya, “Reduction in the onset time of breakaway oxidation on Zircaloy cladding ruptured under simulated LOCA conditions,” *J. Nucle. Mater.*, Vol. 445, pp. 78-83 (2014).
- (13) T. Chuto, “Oxidation of high burnup fuel cladding in LOCA conditions,” presented at FSRM2010: 2010 May 19-20; Mito (Japan).
- (14) M. Billone, Y. Yan, and T. Burtseva, “Post-quench ductility of advanced alloy cladding,” *Proc. The Nuclear Fuels Sessions of the 2004 Nuclear Safety Research Conference*, Washington, DC, October 25-27, 2004, NUREG/CP-0192.
- (15) 平成 21 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 22 年 3 月。
- (16) 平成 22 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 23 年 9 月。
- (17) 平成 24 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 26 年 3 月。
- (18) 平成 20 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 21 年 11 月。
- (19) F. Nagase, T. Otomo, and H. Uetsuka, “Experiments on high burnup fuel behavior under LOCA conditions at JAERI,” *Proc. 2000 International Topical Meeting on Light Water Reactor Fuel Performance*; 2000 Apr 10-13; Park City, Utah (USA).
- (20) M. Billone, Y. Yan, T. Burtseva, and R. Daum, “Cladding Embrittlement During Postulated Loss-of-Coolant Accidents,” Washington (DC): The U.S. Nuclear

- Regulatory Commission, NUREG/CR-6967 (2008).
- (21) L. Portier, T. Bredel, J. Brachet, V. Maillot, J. Mardon, and A. Lesbros, "Influence of Long Service Exposures on the Thermal-Mechanical Behavior of Zy-4 and M5 Alloys in LOCA Conditions," *J. ASTM Intl.* Vol. 2, pp. 1-24 (2005).
- (22) T. Narukawa and M. Amaya, "The effect of azimuthal temperature distribution on the ballooning and rupture behavior of Zircaloy-4 cladding tube under transient-heating conditions," *J. Nucl. Sci. Technol.*, Vol. 53, No. 11, pp. 1758-1765 (2016).
- (23) H.M. Chung and T.F. Kassner, "Pseudobinary zircaloy-oxygen phase diagram," *J. Nucle. Mater.*, Vol. 84, pp. 327-339 (1979).
- (24) 瀬戸山 大吾, 山中 伸介, "1161. ジルコニウム-酸素-水素 3 元系計算状態図," *日本原子力学会和文論文誌*, Vol. 2, No. 4, pp. 452-459 (2003).
- (25) F. Nagase and T. Fuketa, "Effect of Pre-Hydridding on Thermal Shock Resistance of Zircaloy-4 Cladding under Simulated Loss-of-Coolant Accident Conditions," *J. Nucl. Sci. Technol.*, Vol. 41, No. 7, pp. 723-730 (2004).
- (26) H. Uetsuka, T. Furuta, and S. Kawasaki, "Zircaloy-4 Cladding Embrittlement due to Inner Surface Oxidation under Simulated Loss-of-Coolant Condition," *J. Nucl. Sci. Technol.*, Vol. 18, No. 9, pp. 705-717 (1981).
- (27) T. Furuta, H. Uetsuka, and S. Kawasaki, "Ductility Loss of Zircaloy Cladding by Inner-Surface Oxidation during High Temperature Transient," *J. Nucl. Sci. Technol.*, Vol. 18, No. 10, pp. 802-810 (1981).
- (28) T. Furuta and S. Kawasaki, "Reaction behavior of zircaloy-4 in steam-hydrogen mixtures at high temperature," *J. Nucl. Mater.*, Vol. 105, No. 2, pp. 119-131 (1982).
- (29) F. Nagase and T. Fuketa, "Behavior of Pre-hydrided Zircaloy-4 Cladding under Simulated LOCA Conditions," *J. Nucl. Sci. Technol.*, Vol. 42, No. 2, pp. 209-218 (2005).
- (30) F. Nagase, T. Chuto, and T. Fuketa, "Behavior of High Burn-up Fuel Cladding under LOCA Conditions," *J. Nucl. Sci. Technol.*, Vol. 46, No. 7, pp. 763-769 (2009).
- (31) F. Nagase and T. Fuketa, "Fracture Behavior of Irradiated Zircaloy-4 Cladding under Simulated LOCA Conditions," *J. Nucl. Sci. Technol.*, Vol. 43, No. 9, pp. 1114-1119 (2006).
- (32) Vandenberghe V., Brachet J.C., Le Saux M., Gilbon D., Billone M., Hamon D., Mardon J. P., and Hafidi B., "Influence of the Cooling Scenario on the Post-Quench Mechanical Properties of Pre-Hydrided Zircaloy-4 Fuel Claddings after high Temperature Steam Oxidation (LOCA Conditions)," *Proc. 2010 LWR Fuel Performance/TopFuel/WRFPM*, Orlando, Florida, USA, September 26-29, 2010,

paper 096 (2010).

- (33) Brachet, J.C., Hamon, D., Bechade, J.L., Forget, P., Toffolon-Masclat, C., Raepsaet, C., Mardon, J.P., and Sebbari, B.. Quantification of the Chemical Elements Partitioning within Pre-Hydrated Zircaloy-4 after High Temperature Steam Oxidation as a Function of the Final Cooling Scenario (LOCA Conditions) and Consequences on the (Local) Materials Hardening (IAEA-TECDOC-CD--1709). International Atomic Energy Agency (IAEA) (2013).
- (34) M. Yamato, F. Nagase, and M. Amaya, "Evaluation of fracture resistance of ruptured, oxidized, and quenched Zircaloy cladding by four-point-bend tests," J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 51, No. 9, pp. 1125–1132 (2014).

4.6 改良型燃料被覆管の照射成長試験

- (1) 「軽水炉燃料のふるまい」、(財)原子力安全研究協会、平成 10 年 7 月。
- (2) 平成 22 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 23 年 9 月。
- (3) 平成 23 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 25 年 3 月。
- (4) 平成 29 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(燃料等安全高度化対策)事業(平成 29 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、平成 31 年 3 月。

4.7 実燃料入り LOCA 模擬試験装置の設置準備作業

- (1) 平成 19 年度燃料等安全高度化対策事業(高度化軽水炉燃料安全技術調査)に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 20 年 3 月。
- (2) 平成 29 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(燃料等安全高度化対策)事業(平成 29 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、平成 31 年 3 月。
- (3) "Report on fuel fragmentation, relocation, dispersal," NEA/CSNI/R(2016)16, OECD/NEA (2016).
- (4) F. Nagase, T. Chuto, and T. Fuketa, "Behavior of High Burn-up Fuel Cladding under LOCA Conditions," J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 46, No. 7, pp. 763–769 (2009).
- (5) 平成 23 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 25 年 3 月。
- (6) 平成 25 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 26 年 3 月。
- (7) 平成 26 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構

- 安全研究センター、平成 27 年 3 月。
- (8) 平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費（燃料等安全高度化対策）事業に関する報告書、(国研) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 28 年 3 月。
- (9) F. J. Erbacher, H. J. Neitzel, and K. Wiehr. “Cladding deformation and emergency core cooling of a pressurized water reactor in a LOCA,” Karlsruhe: Institut für Reaktorbauelemente Projekt Nukleare Sicherheitsforschung; 1990. (Report no. KfK 4781).
- (10) T. Narukawa and M. Amaya, “The effect of oxidation and crystal phase condition on the ballooning and rupture behavior of Zircaloy-4 cladding tube-under transient-heating conditions,” J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 53, No. 1, pp. 112-122 (2016).
- (11) P. Raynaud, “Fuel Fragmentation, Relocation, and Dispersal During the Loss-of-Coolant Accident,” Washington (DC): The U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG-2121 (2012).
- (12) ME. Nissley, C. Frepoli, and K. Ohkawa, “Realistic assessment of fuel rod behavior under large-break LOCA conditions,” Proc. of the Nuclear Fuels Sessions of the 2004 Nuclear Safety Research Conference (NUREG/CP-0192). Proceedings; 2004 Oct 22–27; Washington (DC): Marriott Hotel at Metro Center; 2005.
- (13) HM. Chung, “Fuel behavior under loss-of-coolant accident situations,” Nucl. Eng. Technol., Vol. 37, pp. 327–362 (2005).
- (14) H. Uetsuka, T. Furuta, and S. Kawasaki, “Zircaloy-4 cladding embrittlement due to inner surface oxidation under simulated loss-of-coolant condition,” J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 18, No.9, pp. 705–717 (1981).
- (15) H. Uetsuka, T. Furuta, and S. Kawasaki, “Failure-bearing capability of oxidized Zircaloy-4 cladding under simulated loss-of-coolant condition,” J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 20, No. 11, pp. 941–950 (1984).
- (16) L. Baker and L. C. Just, “Studies of Metal-Water Reaction at High Temperatures; III. Experimental and Theoretical Studies of the Zirconium-Water Reaction,” ANL-6548, Argonne National Laboratory (1962).
- (17) Y. Udagawa, F. Nagase, and T. Fuketa, “Effect of Cooling History on Cladding Ductility under LOCA Conditions,” J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 43, No. 8, pp. 844–850 (2006).
- (18) K. Honma, S. Doi, M. Ozawa, S. Urata, and T. Sato, “Thermal-Shock Behavior of PWR High-Burnup Fuel Cladding Under Simulated LOCA Conditions,” Proc. ANS Annual Meeting, Milwaukee, Wisconsin (2001).
- (19) T. Murata, Y. Taniguchi, S. Urata, and T. Sato, “LOCA simulation test of the

cladding for high-burnup fuel,” Proc. ANS Annual Meeting, Milwaukee, Wisconsin (2001).

- (20) 平成 17 年度高度化軽水炉燃料安全技術調査に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、平成 18 年 3 月。

4.8 燃料ペレットの LOCA 時温度変化模擬加熱試験

- (1) 平成 28 年度原子力施設等防災対策等委託費 (事故時燃料冷却性評価に関する研究) 事業に関する報告書、(国研) 日本原子力研究開発機構安全研究センター、平成 29 年 3 月。
- (2) 平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費 (事故時燃料冷却性評価に関する研究) 事業に関する報告書、(国研) 日本原子力研究開発機構安全研究センター、平成 28 年 3 月。
- (3) K. H. Yueh, N. Snis, D. Mitchell, and C. Munoz-Reja, “Fuel Fragmentation Data Review and Separate Effects Testing”, Proc. of WRFPM 2014, Sendai, Japan, September 14-17, 2014, paper no. 100117 (2014).
- (4) M. Kinoshita, et al., “High Burn-up Rim Project: (III) Properties of Rim-Structure Fuel”, Proc. 2004 International Meeting on LWR Fuel Performance, 19-22 September, Orlando, Florida (2004).
- (5) 平成 24 年度燃料等安全高度化対策事業に関する報告書、(独) 日本原子力研究開発機構安全研究センター、平成 26 年 3 月。
- (6) D. L. Hagrman and G. A. Reymann (eds.), “MATPRO-Version 11 A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior”, NUREG/CR-0497, TREE-1280, February (1979).
- (7) V. V. Rondinella and T. Wiss, “The high burn-up structure in nuclear fuel”, Materials Today, Vol. 13, No. 12, pp. 24–32 (2010).
- (8) D. Baron and J. Spino, “Does Rim Microstructure Formation Degrade the Fuel Rod Performance?”, Proc. of IAEA Technical Committee Meeting on Technical and Economic Limits to Fuel Burnup Extension, San Carlos de Bariloche, Argentina, 15–19 November 1999 (1999).
- (9) M. E. Nissley, C. Frepoli, and K. Ohkawa, “Realistic assessment of fuel rod behavior under large-break LOCA conditions,” Proc. of the Nuclear Fuels Sessions of the 2004 Nuclear Safety Research Conference (NUREG/CP-0192). Proceedings; 2004 Oct 22–27; Washington (DC): Marriott Hotel at Metro Center; 2005 (2005).
- (10) H. M. Chung, “Fuel behavior under loss-of-coolant accident situations,” Nucl. Eng. Technol., Vol. 37, pp. 327–362 (2005).
- (11) A. Cabrera and N. Waeckel., “A strength based approach to define LOCA limits,” Proc. of TopFuel 2015, Zurich, Switzerland, September 13-17, 2015 (2015).
- (12) Policy Issue (Information). Evaluation of fuel fragmentation, relocation and

dispersal under loss-of-coolant accident (LOCA) conditions relative to the draft final rule on emergency core cooling system performance during a LOCA (50.46c).
SECY-15-0148, No. 30, Nuclear Regulatory Commission; 2015 (ADAMS Accession No. ML15238B193).

(用語の解説)

(ア行)

ECCS : **Emergency Core Cooling System**, 非常用炉心冷却系

原子炉冷却系の配管破断が起きるなどして冷却材が炉心から喪失した場合に、直ちに冷却材を炉心に注入して炉心を冷却する安全システム。

異常過渡 :

原子炉運転時の異常な過渡変化。原子炉施設の寿命期間中に予想される機器の単一故障、運転員の単一の誤操作等によって生じる異常な状態をいう。

一次元円筒体系 :

燃料棒の数値解析モデルにおいて、燃料棒を中心軸に対称な円筒形状で近似し、温度及び変形を、軸方向に一様で半径方向に分布を持つと近似して計算する体系。

E110、**E635** :

VVER 型原子炉用燃料被覆管に使用されている材料。**E110** が **Zr-Nb2** 元系合金であるのに対し、**E635** は **Zr-Sn-Nb-Fe** の 4 元系合金である。

NSRR : **Nuclear Safety Research Reactor**, 原子炉安全性研究炉

燃料の安全性研究を目的として、1975年に日本原子力研究所(現:(国研)日本原子力研究開発機構)に建設された研究炉。原子炉出力の上昇に対して強い負のフィードバックを有するため、意図的な制御棒引抜きにより過大な反応度を投入しても、出力暴走には至らず、短時間のうちに自動的に出力が収束するという特長を備える。この特長を利用したパルス出力運転により、反応度事故(**RIA**)時の原子炉出力履歴を安全に模擬することが可能である。

FP : **Fission Product**, 核分裂生成物

核分裂により生成される核種。**FP**の多くが核的に不安定(放射性)であり、環境に放出された場合には公衆の被ばく要因となる。原子炉においては、燃料ペレット、燃料被覆管、原子炉圧力容器、原子炉格納容器、原子炉建家といった障壁により、環境への**FP**放出を防止している。

FGR : **Fission Gas Release**, **FP** ガス放出率

燃料内で生成された**Xe**や**Kr**といった気体状核分裂生成物(**FP**ガス)は、その多くが燃料

の結晶粒内に蓄積されるが、一部は拡散により結晶粒の表面に到達し、結晶粒界気泡を形成する。結晶粒界気泡がペレット外部に連結していた場合、FPガスはペレットの外部に放出される。FPガスの生成量に対して放出量が占める割合をFPガス放出率と呼ぶ。特に指定しない限り、ペレットから燃料棒内の自由空間への放出率を示すものであり、被覆管の外部への放出を意味するものではない。

なお、RIA時に燃料温度が急上昇する場合には、ペレットの熱応力や結晶粒界蓄積ガスの熱膨張により、結晶粒界気泡と外部との連結が増大するため、FPガス放出率も増大する。

M5 :

AREVA社（旧フラマトム社）が開発した高耐食性燃料被覆管合金。ジルコニウムとニオブの2元系合金。仏では多くの使用実績があり、国内でも今後、実用化が見込まれる。

M5をさらに改良した材料（Q12等）の開発も進められている。

M-MDA :

三菱原子燃料株式会社が開発している高耐食性燃料被覆管合金で、Zry-4の組成に近く、ニオブが添加されたもの。MDA（PWRステップ2燃料（55000 MWd/t）の被覆管として使用されている）の耐食性および水素吸収率をさらに改善した材料である。

（カ行）

機械的エネルギー :

原子炉の炉心あるいは燃料棒の破損によって発生する機械的な破壊力。発生する原因としては、高温の溶融した燃料や炉心構造材が冷却材と接触して生ずる蒸気爆発等が考えられている。

金相試験 :

金属等の断面のマイクロ組織観察を行う試験のこと。

高温待機時 :

温態停止状態ともいう。緊急停止などの一時的な計画外停止での待機状態で、一次冷却材ポンプからの入熱などで、一次冷却材の温度が一定（約 286℃）に維持される状態をいう。

降伏 (Yielding) :

ペレットや被覆管のような固体結晶に応力を加えると初めは弾性的なふるまいを示すが、応力がある一定レベルを超えると塑性変形（永久変形）が生じる。この、弾性変形の限

界を降伏という。

(サ行)

再冠水：

冷却材喪失事故 (LOCA) が発生して原子炉压力容器内の水位が低下し、炉心部燃料が露出する状態になった後、非常用炉心冷却系 (ECCS) の作動により炉心に水が注入され、再び炉心燃料が水に浸かり (冠水)、炉心が冷却される過程をいう。この過程を経ることにより燃料棒温度は低下し、長期にわたる炉心崩壊熱除去が可能となる。

ZIRLO™：

米国ウェスティングハウス社が開発した高耐食性燃料被覆管合金。Zry-4の組成に近く、鉄及びニオブを添加したもの。また、ZIRLO™をさらに改良したOpt-ZIRLO™の開発が現在進められている。

J 合金：J-Alloy

PWR 用燃料被覆管の更なる耐食性向上および水素吸収率低減を目的として、PWR 5 電力、燃料メーカーおよび材料メーカーが共同で開発した材料。Zr-1.8%Nb、Zr-1.6%Nb-0.1%Cr、Zr-2.5%Nb の 3 種類が開発され、それぞれ J1、J2、J3 合金と呼ばれている。

Zry：Zircaloy ジルカロイ

商用発電炉において黎明期から使用されてきた被覆管合金。ジルコニウムとスズを主成分とする。添加物の違うZircaloy (Zry)-1～-4が開発され、使用条件での性能を考慮して、PWRにおいてはZry-4が、BWRにおいてはZry-2が使用されている。近年の高燃焼度化に伴い耐食性の高い合金に置き換えられつつある。

照射成長：

ジルコニウム合金燃料被覆管は、一般に高速中性子の照射によって燃料棒長手 (軸) 方向に伸びる傾向がある。この現象を照射成長という。これは、六方晶の結晶構造を有するジルコニウムにおいて高速中性子照射により生成する結晶格子欠陥のうち、空孔が底面に、格子間原子が柱面に集積しやすいことと関係していると言われている。

照射試験リグ：

ノルウェー・エネルギー技術研究所が所有するハルデン炉 (別項参照) において燃料試料や材料試料を照射するための計装付き照射容器。試験片、温度測定用熱電対等の計装類およびこれらを支える構造材等からなる。計装付き燃料体 (Instrumented Fuel

Assembly: IFA) と呼ばれる。

水撃力：

水塊や水柱が壁面に衝突あるいは管内を流れる流体が塞き止められた時に生ずる衝撃力。原子炉の安全評価においては、水蒸気爆発等によって吹き上げられた冷却材が炉内構造物や圧力容器の上面に衝突することが想定される。

スペーサーグリッド（スペーサ）：

燃料棒相互の間隔を正確に保持する目的で、燃料集合体の軸方向に数箇所分布して用いられる支持格子のこと。BWR 燃料における支持格子は、ジルカロイ製の円筒状部材とインコネル製のスプリングを組み合わせる燃料棒を支持する構造となっている。PWR 燃料においては、インコネル製あるいはジルカロイ製の薄板を格子状に組み上げ、板ばねと対面する突起により燃料棒を水平方向に支持する。

制御棒案内管：

PWR 燃料集合体において、制御棒の円滑な出し入れ案内を目的として設置される内部構造物。グリッドスペーサーを所定の位置に固定する役目も果たしており、案内管／グリッドスペーサー／上下部ノズルが一体となって燃料集合体骨格を形成し、構造強度の担い手となっている。

脆化：

材料の変形において、抗力が大きく変形能が小さくなり、さらに伸びや断面収縮率が低下することを脆化といい、その性質を脆性またはもろさという。軽水炉燃料においては、中性子照射による照射損傷の蓄積、水側腐食層の成長および腐食に伴う水素吸収と水素化物の析出などにより被覆管の延性が低下する。

設計基準事象：

原子炉施設の安全設計とその評価に当たって考慮される事象。事象の分類として、安全保護回路、工学的安全施設などの設計の妥当性を確認する観点で選定された「運転時の異常な過渡変化」及び放射性物質の放出の可能性がある事象における工学的安全施設などの妥当性を確認する観点で選定された「設計基準事故」がある。

(夕行)

多軸応力条件：

使用中の燃料の被覆管が受ける力学的負荷は、通常は周方向応力が主（一軸応力状態）

であるが、ペレットと被覆管が強い接触状態にあるなど、条件によっては周方向以外の方向にも応力が作用する場合がある。このとき、被覆管は多軸応力条件下にあるという。

DNB : Departure from Nucleate Boiling (核沸騰膜沸騰遷移)

燃料被覆管表面から冷却水への伝熱において、熱流束の増加とともに核沸騰状態から膜沸騰状態へ伝熱モードが急速に遷移すること。

低温時 :

冷態停止状態ともいう。定期検査時、燃料取替作業時及び長期間におよぶ保守作業を伴うような場合に維持される状態で、一次冷却材の温度が約 90℃以下の状態をいう。

等体積円筒リング要素 :

燃料棒を一次元円筒体系で解析する場合、ペレットスタックを半径方向に複数の、かつ等体積の (=軸方向長さは等しいが厚みが異なる) リング要素に分割し、要素内では温度は一定として、応力歪みは連続的に変化するとして、数値計算を行う。

(ナ行)

二次元解析 :

一次元解析は、軸方向が一様で半径方向のみの (温度、変形) 分布を計算するが、二次元解析では、軸方向及び半径方向の分布を計算する。

燃料スタック :

燃料棒に装填された燃料ペレット全体のこと。

燃料セグメント :

発電炉で使用されている長尺 (約 4 m) の燃料棒に対し、実験用に短くした燃料棒のこと。

(ハ行)

パルス照射試験 :

NSRRのパルス出力運転を利用したRIA模擬試験。試験においては、高い耐圧性及び気密性を備えたステンレス鋼製のカプセルに試験対象となる燃料を封入してNSRR炉心にて照射する。このため、試験燃料が破損した場合でも影響が及ぶ範囲はカプセル内に限られ、事故模擬試験を安全に行うことが可能である。また、カプセルごと試験燃料を交換するため、比較的短期間に複数回の試験を実施することが可能である。

ハルデン炉：

ノルウェー南部のハルデン市に設置された、ノルウェー・エネルギー技術研究所(Institutt for energiteknikk: IFE) が所有する重水沸騰型試験炉 (HBWR)。重水を冷却水として使用しているため炉心が大きく計装の設置等が容易であるという特徴を有する。冷却材温度および圧力は 240℃、3.3MPa である。

PCMI : Pellet-Clad Mechanical Interaction (ペレット被覆管機械的相互作用)

照射とともに燃料ペレットはFPガスバブルの成長などによって体積膨張し、一方被覆管は冷却水圧力によってクリープダウンし、ギャップ空間は減少する。この状況で、出力上昇によりペレットがさらに熱膨張して被覆管と接触し、被覆管を押し広げようとする。このときペレットは被覆管から反力を受ける。こうしてペレットと被覆管は変形する。このような、ペレットと被覆管の間の力学的な相互作用をPCMIと呼ぶ。ボンディング層が生じている場合は、ペレットの変形が直接被覆管に作用するので、PCMIは強くなる。また高燃焼度燃料の反応度事故においては、ペレットの急速な熱膨張により発生するPCMIが燃料破損の主要因となる。

プルサーマル：

プルトニウムを熱 (サーマル) 中性子炉で利用することを意味する和製英語。MOX 燃料を軽水炉において使用することを指す。

Baker-Just 式：

ジルコニウムと水の反応速度について、米国・オークリッジ国立研究所で 1960 年代に求められた式。その後に行われたジルカロイ被覆管を用いた酸化速度式と比較して、大きな酸化速度を与えることが知られているが、酸化量に関して安全側の評価を行うために現在も安全評価において使用されている。

(マ行)

MIMAS 法 : Micronized MASTer 法

MOX燃料製造法の一つ。燃料ペレット中のPuO₂とUO₂の混合状態をより均一化させるために開発された製造手法。まずPuO₂粉末とUO₂粉末を粉碎混合してマスターブレンド粉末を得、このマスターブレンド粉末にUO₂粉末を加える2段階混合によって所定の富化度に調整する。ベルゴニュークリア社などが採用している。

MOX 燃料 : Mixed OXide fuel, 混合酸化物燃料

使用済燃料の再処理により得られたプルトニウムをウランと混合して製造した燃料。高

速増殖炉及び新型転換炉用の燃料としてだけでなく、軽水炉において利用される場合もある（プルサーマル）。

(ラ行)

RIA : Reactivity Initiated Accident, 反応度事故

原子炉設計時に想定する設計基準事象の一つであり、制御棒の落下（BWRの場合）や飛び出し（PWRの場合）などにより原子炉の出力が急速に上昇する事故である。出力暴走事故とも呼ばれる。

LOCA : Loss Of Coolant Accident, 冷却材喪失事故

原子炉設計時に想定する設計基準事象の一つであり、炉心で発生した熱を除去し熱交換器あるいは蒸気タービンへ熱を伝達する役目をもつ原子炉冷却材が、1次系配管の破断等によって流れ出し炉心の冷却機能が損なわれる事故。