

4.5. 文献調査

本節では、今後の実験装置の整備や実験内容に反映させることを狙いとして実施した文献調査についてまとめる。4.5.1 ではスケーリング装置の一環として実施する PWR ホットレグにおける気液対向流制限に関する研究、4.5.2 では、欧州で現在行われている水素リスクに関する HYMERS 計画、4.5.3 では、熱水力安全研究グループで数年前に実施したリウエット速度に関する研究、4.5.4 では、二相流ジェットの不安定性解析に関する既往研究、4.5.5 では、温度成層、熱伝達、物質伝達、熱伝達のアナロジー等に関する既往研究についてまとめる。

4.5.1 PWR ホットレグにおける気液対向流制限 (CCFL) に関する研究

4.5.1.1. 概論

PWR において、ホットレグにおける気液対向流制限を評価することは、2.2.3 章で述べた重要性に加えて、リフラックス冷却に係る重要性もある。例えば、定期点検中のミッドループ運転時における予熱除去系 (RHR) の喪失時や、小破断 LOCA 時に ECCS が作動しない場合、炉心で発生した蒸気を蒸気発生器で凝縮させ、凝縮水を炉心に還流させることによって炉心を冷却する、リフラックス冷却を行うことが考えられている。リフラックス冷却時には、ホットレグ内で炉心から蒸気発生器に向かう蒸気と、蒸気発生器から炉心に流れる冷却水が対向流を形成し、液相の流量が低減する気液対向流制限 (CCFL; Counter-Current Flow Limitation) が生じる可能性がある。この水平管と斜め管を組み合わせた配管内に生じる現象は、リフラックス冷却時の冷却水の分布に大きく影響を与えるため、現象のメカニズムを理解し、適切なモデルを作ることが必要である。RELAP や TRAC などの 1 次元システムコードにおいては、垂直管内気液二相流の慣性力と重力の釣り合いから導出された無次元断面平均体積流束を用いた Wallis の式[1]を主とする単純な相関式が使用されているが、精度については検討の余地がある。これらの理由により、斜め管内 CCFL を対象とした多くの研究がなされている。以下では、まず Al Issa らによる既往の比較結果 [2]を基に、CCFL 現象への幾何形状、物性等の影響を概説し、その後実機 PWR における現象を理解するために不可欠と考えられる、比較的大口径の配管を使用した研究について記述する。

4.5.1.2. CCFL 現象への各種パラメータの影響

これまでに実施されてきた斜め管内 CCFL に関する研究のほとんどにおいて、上述の無次元断面平均体積流束

$$J_k^* = J_k \left\{ \frac{\rho_k}{gD(\rho_L - \rho_G)} \right\}^{1/2}, \quad (k = G, L; G: Gas\ phase, L: Liquid\ phase) \quad (4.5.1-1)$$

を用いて CCFL の開始条件についての実験データが整理されている。Al Issa らは、表

4.5.1-1 に示す実験に対して、種々の形状及び物性をパラメータとした比較を、この J^* を用いた整理を通じて実施した。

管径の影響 管径は二相流の界面積及び流体と壁との接触面積に影響を与えるため、CCFL現象への影響が大きいと考えられる。しかし、CCFLの開始条件に管径が影響するとする研究と、影響しないとする研究がある。例えば、Navarroら[3]やKangら[4]による研究では、図4.5.1-1、及び4.5.1-2に示すとおり、管径が大きいとCCFLが開始する $JG^*0.5$ が増加する。これは、管径が大きいと液相への抗力が相対的に小さいため、CCFLの開始にはより速い気相流速が必要になると説明している。一方、Choiら[5]の結果(図4.5.1-3)は、CCFL開始条件に管径は影響しないことを示している。

水平部長さ L と直径との比 L/D の影響 図4.5.1-4に、Ohnukiら[6]、Wongwisesら[7]、Kangら[4]およびNavarroら[3]による実験より得られた L/D の影響を示す。全ての研究において、 L/D が大きいほど $JG^*0.5$ が減少し、より低い気相流速でCCFLが発生することが分かる。また、CCFLだけでなく、流下流量が0になる限界である、Zero liquid limitも同様に減少する。ただ、研究同士を相互に比較すると、 $JG^*0.5$ の絶対値は大きく異なっており、他のパラメータの影響も大きいことが分かる。

斜め管傾斜角の影響 図4.5.1-5に、Wongwisesら[7]、Navarroら[3]による傾斜角の影響を示す。特に液相流速が高い領域で、傾斜角が大きいと $JG^*0.5$ が小さくなり、CCFLが発生しやすくなることが分かる。これについて、傾斜角が大きい場合、曲がり部から水平部にかけての液相の流動方向変化が大きくなり、流動の乱れが大きくなることが原因としている。

斜め管長さの影響 図4.5.1-6に、Navarroら[3]、Ohnukiら[6]による斜め管長さの影響を示す。Ohnukiらの実験では傾斜管が長くなると $JG^*0.5$ が増加する。これは、傾斜管が短い場合には曲がり部でCCFLが発生するが、長くなるに従い傾斜管出口での発生に移行することが関係しているとしている。一方、Navarroらの実験では、傾斜管が長いと $JG^*0.5$ が小さくなるという、Ohnukiらの結果とは矛盾する結果が得られている。この理由として、Navarroらの実験は管径が大きいため、傾斜管内ではなく水平管内でCCFLが発生しており、この場合傾斜管が長いと曲がり部での乱れが大きくなり、低気相流速でもCCFLが発生するためとしている。

曲がり部及び傾斜管出口形状の影響 Ohnukiら[6]は、傾斜管の出口形状を円と楕円とした実験を行い、円形の場合に $JG^*0.5$ が大きくなり、CCFLが発生しにくくなることを示した。また同じ実験において、曲がり部の形状の違いは無視できることを明らかにした。一方、

Ghiaasiaan ら[8]、Lopez de Bertodano ら[9]、Kang ら[4]は、傾斜管の出口端がエッジ状の場合、液流の乱れを助長するため CCFL が早く発生しやすいことを示しており、実験においては出口端部形状を明確にしておく必要があることを示唆している。

圧力の影響 後述する、実機ホットレグサイズで実験可能な唯一の装置である UPTF における結果[10]、および Deendarlianto ら[11]による結果を図 4.5.1-7 に示す。両結果とも、圧力の違いが CCFL 発生に与える明確な影響は見られない。しかし、Kawaji ら[11]による水平管における実験においては、高圧条件ではスラグが発生しないとの報告があり、これは斜め管においても同様の現象が見られる可能性があり、この場合 CCFL の発生にも影響を与える可能性は否定できない。

水-空気系と水-蒸気系の違い Al Issa らのレビューでは言及されていないが、水-空気系と水-蒸気系での CCFL 発生条件に関する研究も行われている。Ohnuki ら[6]は、小径（φ 25mm）の円管の実験において、両系における違いはほとんど見られないとした。一方、Vallee ら[12]は、高さ 250mm の矩形断面管を用いた実験において、図 4.5.1-8 に示すとおり、Wallis パラメータで結果を整理すると、両系で大きな違いが生じ、水-蒸気系においてより高い $JG^*0.5$ において CCFL が発生することを明らかにした。さらに流体の粘度を考慮した新たなパラメータ

$$\begin{aligned} X_L^* &= J_L^* \cdot \left(\frac{\mu_L}{\mu_G} \right)^n = j_L \cdot \sqrt{\frac{1}{g \cdot H} \cdot \frac{\rho_L}{\rho_L - \rho_G}} \cdot \left(\frac{\mu_L}{\mu_G} \right)^n \\ X_G^* &= J_G^* \cdot \left(\frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^n = j_i \cdot \sqrt{\frac{1}{g \cdot H} \cdot \frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G}} \cdot \left(\frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^n \end{aligned} \quad (4.5.1-2)$$

を用いて整理すると、図 4.5.1-9 のごとく両結果が良好に一致することから、流体粘性が CCFL に与える影響が示唆された。

4.5.1.3. 大口径管を用いた斜め管 CCFL 実験

上で述べたように、CCFL 発生条件への管径の影響は未だ不明確な部分があるため、実機 PWR ホットレグにおける現象を模擬するためには、比較的大口径の配管を用いた実験が有効であると考えられる。ここでは、これまでに実施されてきたいくつかの実験について概説する。

UPTF 実験[13] UPTF (Upper Plenum Test Facility、図 4.5.1-10) は、原子炉全体を実寸規模で模擬した実験装置であり、ホットレグの直径は 0.75m である (図 4.5.1-11)。この装置における斜め管 (ホットレグ) 内 CCFL 実験は、これまでで唯一の実寸の管を用いた実験である。図 4.5.1-12 に示す CCFL 発生開始点の実験結果から、高圧 (15bar) の場合

若干 CCFL 発生開始が高気相流速側となるものの、明確な圧力依存性は見られなかった。また、システム解析コード ATHLET を用いた解析結果は実験結果とよく一致しているが、使用されたモデル等が明示されておらず、詳細は不明である。本実験は、唯一の実機条件における CCFL 実験としての重要性はあるものの、CCFL 実験用の装置ではないことから、各相の流速、液面高さ等の計測結果が無く、また高圧実験のため可視化画像も得られていない。さらに、ホットレグ内に HUTZE と呼ばれる ECC 注入管が存在しており、現象にかなりの影響を与えている。従って、本実験結果から定量的な知見を得るのは難しいと考えられる。

HZDR における実験[12] 独国 HZDR (ヘルムホルツセンタードレズデンローゼンドルフ研究所)の実験装置は、独国 Konvoi 型 PWR を 1/3 スケール模擬しており、流路高さ 250mm、流路幅 50mm の矩形流路を持つ (図 4.5.1-13)。大きな特徴として、ガラス製の壁を持つ流路を、上部及び下部タンクとともに圧力容器の内部に設置することで、0.15~0.3MPa の水-空気系および 1.5~5MPa の水-蒸気系の実験が可能で、さらに高圧条件にもかかわらず流動の可視化が容易である (図 4.5.1-14)。この実験では既に述べたとおり、流体の粘度を考慮した新たなパラメータ(式 4.5.1-2)を用いることで、図 4.5.1-9 に示すとおり水-空気系、及び水-蒸気系における CCFL 発生条件を整理することができた。

INSS&神戸大における実験 INSS (原子力安全システム研究所) と神戸大学は、実機 PWR ホットレグの 1/15 スケールの円管流路 (ϕ 50mm、図 4.5.1-15) [14]、および 1/5 スケールの矩形流路 (高さ 150mm、流路幅 10mm、図 4.5.1-16) [15]の装置を用いた、大気圧条件における水-空気実験を行っている。特徴として、高速度カメラを用いた可視化により流動様式を取得し、CCFL 特性との関係に着目している。円管流路実験では、図 4.5.1-17 に示すとおり、現象のヒステリシスが顕著である。これは、特に気相流速の増加時に CCFL が発生する時には傾斜管出口付近で生じ、その後水平管内 CCFL に遷移し、気相流速が減少し CCFL が終了する時には水平管内 CCFL のまま終了するためである。また、管径が比較的小さいため、傾斜管出口部が完全に水没してしまい、ここを空気が貫通することで生じる波が CCFL 現象に大きな影響を与えている場合があり、本装置に特異な現象である。一方、矩形流路実験では、図 4.5.1-18 に示すとおり、ヒステリシスは観察されなかった。また、上述の HZDR 実験の結果と大きく値が異なっており、これは流路幅が 10mm と非常に小さく、流路壁の影響が顕著なことが原因である可能性がある。

COLLIDER 実験[16] 独国ミュンヘン工科大において近年開始された、実機ホットレグの 1/3.9 スケール (ϕ 0.19m) の円管流路を用いた、水-空気系、大気圧条件の実験である (図 4.5.1-19)。図 4.5.1-20 に示すように、水平管部分での射流に 3 次元的な波立ちを観察しており、CCFL 発生条件との関連の可能性を指摘している。また、比較的大口径の管である

にもかかわらず、上述の Minami ら[5]の実験で発生した、傾斜管出口部における CCFL が観察されており、これを原因とする CCFL 条件のヒステリシスも得られている(図 4.5.1-21)。

4.5.1.4. 既往研究の問題点と本事業への反映

ここまで述べたように、斜め管内 CCFL 現象について多くの研究がなされている。しかし、現象を総合的に把握し、モデル化を行うためには、以下の点で問題がある。

- 条件、形状の異なる実験結果の比較が多く、単一のパラメータの影響調査が不十分。
- 矩形管と円管で発生する現象の差異についての考察がなされていない。Wallis の式で整理するとグラフ形状が近くなることから、円管を矩形管で模擬しているに過ぎない。
- 議論に用いられる計測結果が、流速と可視化画像のみである。

また、現象の説明に関しても、

- CCFL 発生条件の、形状、物性依存性の説明が不十分
- CCFL 発生場所の予測ができない。
- 流動状態と CCFL の関係が不明確。

といった問題点がある。

これらを踏まえ、まず運営交付金により、大気圧条件の水-空気実験装置を製作中である。本装置では、既往研究を元に、特にベント付近、および傾斜管出口付近の幾何形状をパラメータとする実験を実施する。また、矩形管の流路幅をパラメータとするなどにより、矩形管と円管の定量的比較を行う。さらに、ワイヤメッシュセンサーや電気式水位計の稠密配置により、流動状態の定量化を行う予定である。この水-空気実験装置において知見を蓄えた後、高圧条件の水-蒸気実験装置を高圧熱流動ループに設置し、圧力や流体物性をパラメータとした実験を実施する予定である。

表 4.5.1-1 Al Issa らの比較に使用された研究一覧

Authors	Horizontal riser length H (m)	Inclined riser length l (m)	Inclination angle θ (°)	Diameter D (mm)	Correlation	Correlation parameters	Notes
Wallis (1961)	-	-	-	-	$mJ_L^{1/2} + J_C^{1/2} = C$	$m = 0.5 - 1.00 = 0.7 - 1.0$	Vertical flow
Wallis (1969)	-	-	-	-	$J_L^{1/2} + J_C^{1/2} = 1$	-	Analytical: Liquid film Model, Low liquid momentum
Pushkina and Sorokin (1969)	-	-	-	-	$mK_L^{1/2} + K_C^{1/2} = C$	Best fit to experiment	Vertical flow, thin film layer
Richter et al. (1978)	0.914	-	45	203.2	$J_L^{1/2} + J_C^{1/2} = 0.7$	-	
Krolewski (1980)	0.584	0.305	45.90	50.8	$0.78J_L^{1/2} + J_C^{1/2} = 0.53$	-	
Ohnuki (1986)	0.01-0.4	0.0380.6	40.45	265.176	$0.75J_L^{1/2} + J_C^{1/2} = C$	Circular exit to the upper tank $C = \ln(\frac{D}{l})^{-0.066} + 0.088$ Elliptical exit to the upper tank $C = \ln(\frac{D}{l})^{0.066} + 0.81$	
Siddiqui et al. (1986)	2.4D-95D	-	90	36.5-47	$J_C^{1/2} = 0.45$	$Fr_p^* = \frac{D}{l} \sqrt{\frac{gD}{Fr_p^*}}$	Flooding coincides with Slug formation
Ardrion and Banerjee (1986)	1.82-2.36	-	90	36-47	$J_C^{1/2} = 1.444 - 0.004\lambda$ $-\cosh(\lambda^{0.057} (Fr_p^*)^{-0.02} J_L^{1/2} \rho^{0.07})$	$\lambda = \frac{H(Re^*)^{0.3}}{D}$	
Ohnuki et al. (1988)	0.26	0.06	50	25.4	$0.75J_L^{1/2} + J_C^{1/2} = C$	$Re^* = \frac{D}{l} \sqrt{\frac{gD(l-D)}{Fr_p^*}}$	
Kawaji et al. (1989)	0.1-2.54	-	90	51	-	$C = \ln(\frac{D}{l})^{-0.066} + 0.88$	Real 1:1 scale PWR hot-leg geometry
UPTF (Weiss et al., 1992)	7.197	1.27	50	750	$J_L^{1/2} + J_C^{1/2} = 0.7$	-	Analytical/Empirical: Best fit to Model calculations
Lopez de Bertodano (1994)	0.4	-	50	26-76	$J_C - J_L > 0.487 \left(\frac{(l-D)\rho_0 / \rho_c \sin(\theta) \lambda_c}{8(\pi D / D)^{1/2} J_C^{1/2}} \right)$	-	
Choi and No (1995)	2.16	-	0-1	40,60,70	$0.798J_L^{1/2} + J_C^{1/2} = 0.619$	-	
MHYRESA (Geffraye et al., 1995)	2.645-2.473	1.06-1.194	50	75-352	$0.64J_L^{1/2} + J_C^{1/2} = 0.58$ $J_C^{1/2} = 0.52J_L^{1/2} = 0.61$	-	
Zapke and Kröger (1996)	2	-	60-90	30	$mJ_L^{1/2} + J_C^{1/2} = kZ_L^2$	$Z_L = \frac{\sqrt{D \lambda_c}}{Fr_p^*}$	Air, Argon, Helium, Hydrogen, Water, Methanol, Isopropanol and Aqueous Methanol solutions
Wongwises (1996)	0.557-2.816	1.26	50-75-90	64	-	-	
Chun et al.(1999)	0.7-3.388	0.623-0.648	35	40-80	$0.397J_L^{1/2} + J_C^{1/2} = C$	$C = 0.603 - 0.00234(L/D)$	
Kang et al. (1999)	0.7-3.39	0.623-0.648	35	40-80	$0.397J_L^{1/2} + J_C^{1/2} = C$	$C = 0.603 - 0.00234(L/D)$	Low inlet water Flow $J_L < 0.2$
Chun and Yu (1999)	2.2	-	0.25-0.5	83	$0.6J_L^{1/2} + J_C^{1/2} = 0.52$	-	
Yu et al.(2000)	-	-	-	-	$mJ_L^{1/2} + J_C^{1/2} = C$	$m = \alpha(0.38 + 4.14 \exp(-\frac{0.07}{\alpha}))C = 0.06\alpha^{0.6} - 0.00234(L/D)$	Analysis of 356 Data point for CCFL
Kim and No (2002)	-	-	-	-	$0.614J_L^{1/2} + J_C^{1/2} = C$	$C = 0.635 - 0.00234(L/D)$	Flooding in steam generator Tubes
Jeong (2002)	-	-	-	-	$J_L^{1/2} + J_C^{1/2} = 0.85$	-	
Navarro (2005)	0.1-0.8	0.1-0.5	30-90	36-54	$J_C^{1/2} = F_0 - F_1 J_L^{1/2} - F_2 J_C$ for $H = 0$ and UPTF dimensions $J_C^{1/2} = 0.5963 - 1.17J_C - 0.2452J_L^{1/2}$ $H =$ water head in upper tank	$0.4722\theta - 1.564910^{-4}(\frac{\theta}{D})^2 - 0.16539(\frac{H-D\sin(\theta)}{D})^{0.2} + 0.78375$ $F_1 = 0.507\theta^{0.2} - 0.26015(\frac{\theta}{D})^{0.46} - 0.00121(\frac{\theta}{D})^{1.2}$ $F_2 = -1.03549\theta - 0.5881(\frac{\theta}{D})^{0.3} + 0.20163(\frac{\theta}{D})^{0.7}$	
Minami et al. (2010)	0.43	0.06	50	58	Richter $J_L^{1/2} + J_C^{1/2} = 0.7$	-	

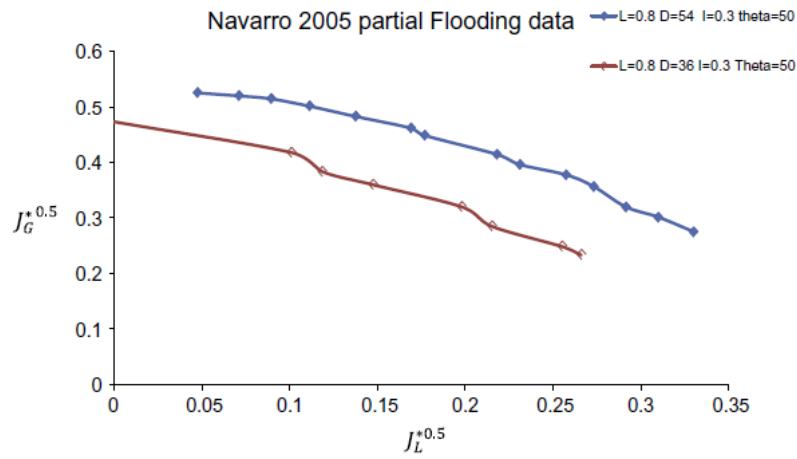


図 4.5.1-1 CCFL 発生条件への管径の影響(1)

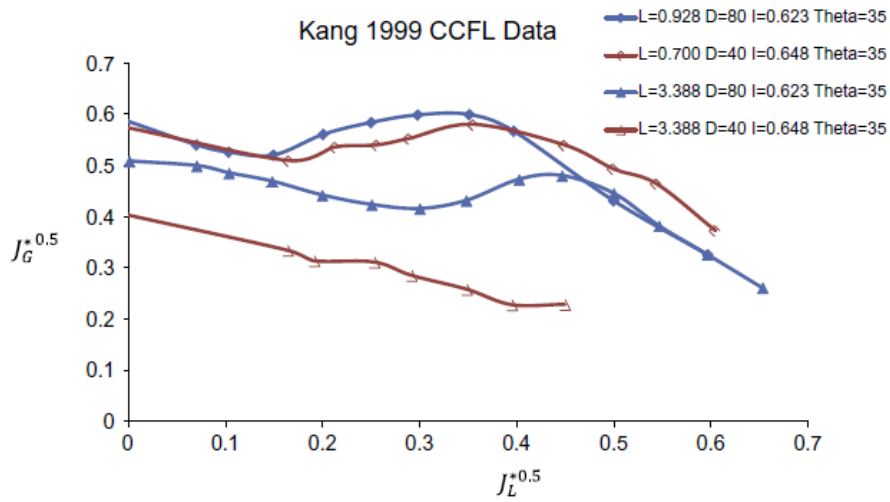


図 4.5.1-2 CCFL 発生条件への管径の影響(2)

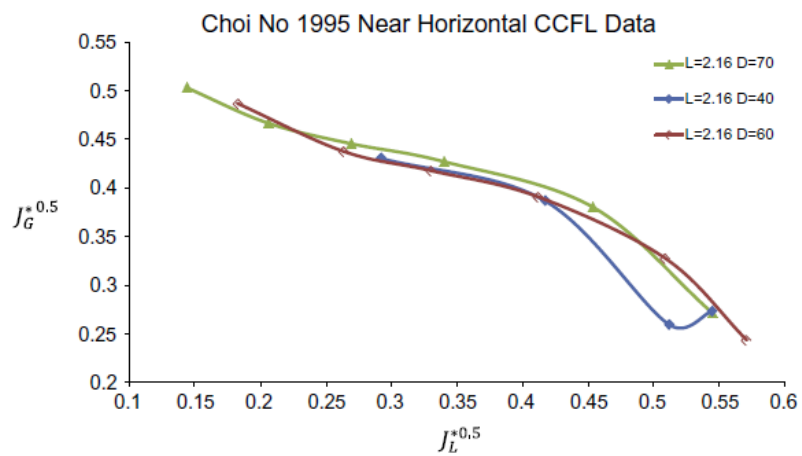


図 4.5.1-3 CCFL 発生条件への管径の影響(3)

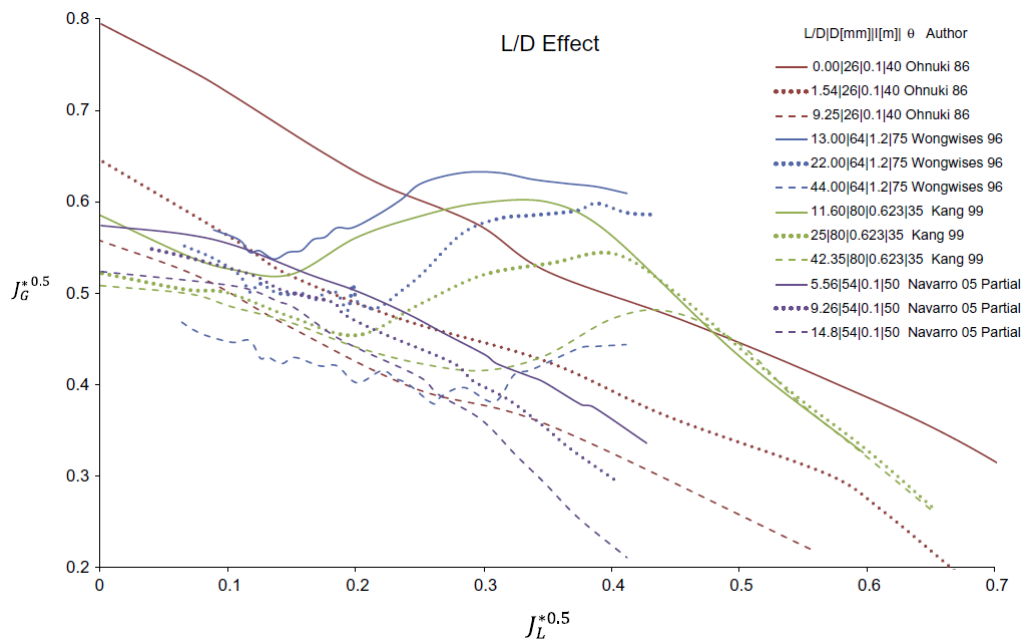


図 4.5.1-4 CCFL 発生条件への L/D の影響

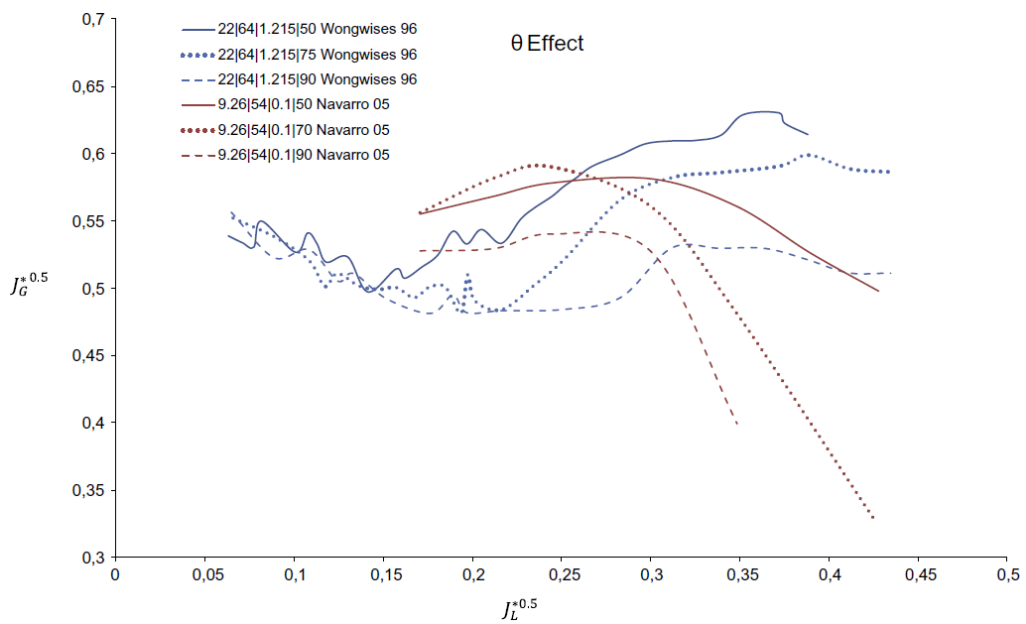


図 4.5.1-5 CCFL 発生条件への斜め管傾斜角の影響

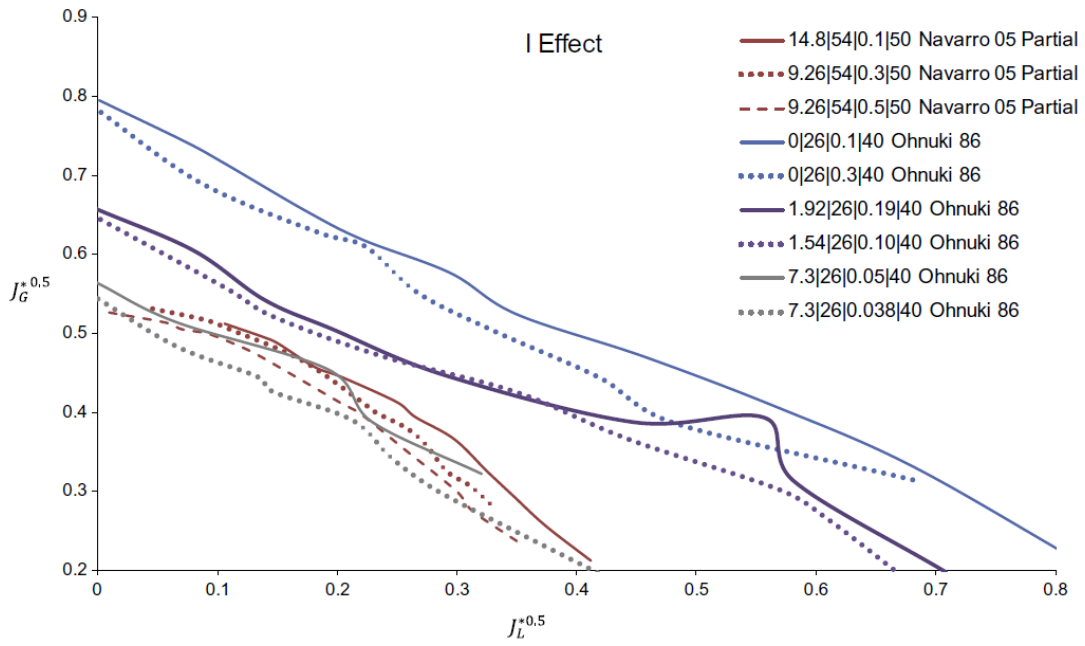


図 4.5.1-6 CCFL 発生条件への斜め管長さの影響

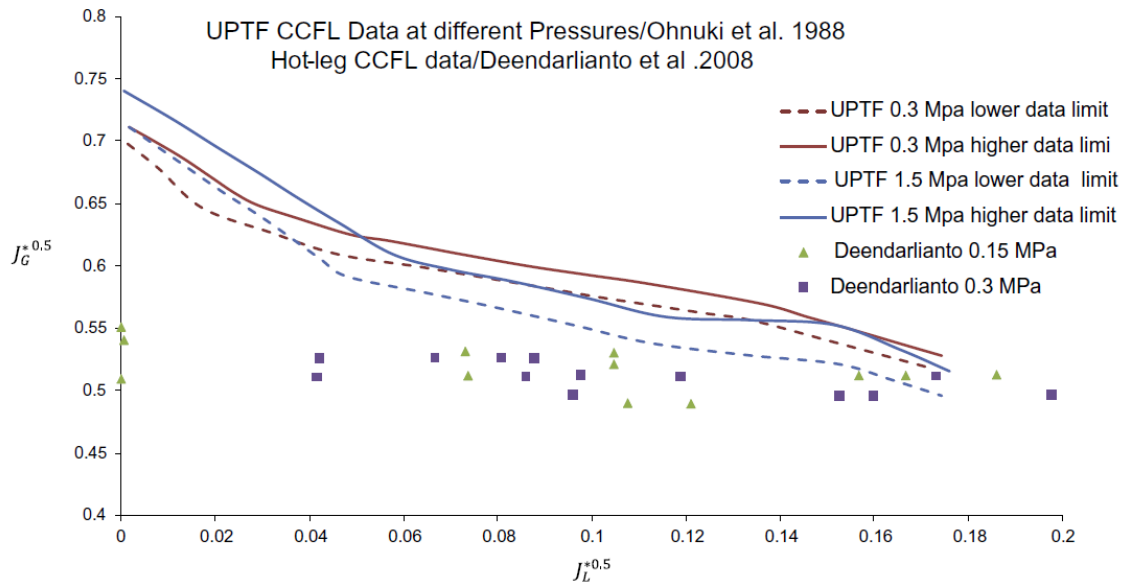


図 4.5.1-7 CCFL 発生条件への圧力の影響

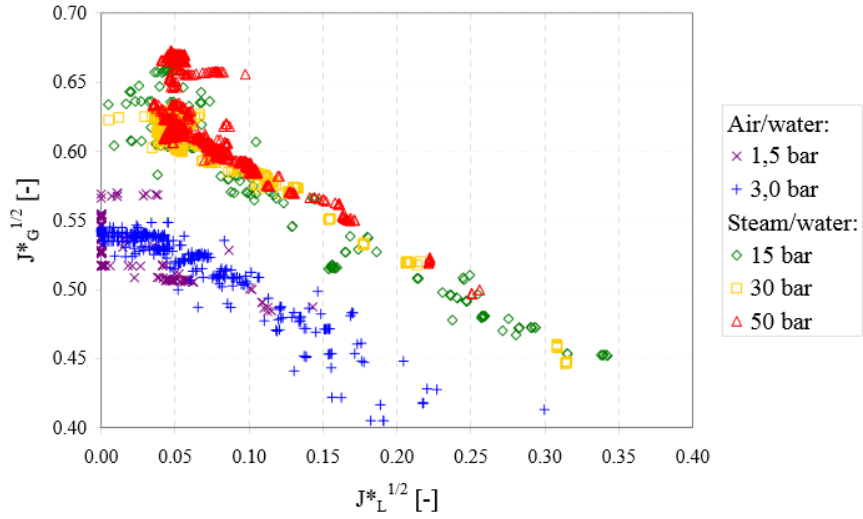


図 4.5.1-8 水-空気及び水-蒸気実験における CCFL 発生条件 (Wallis パラメータで整理)

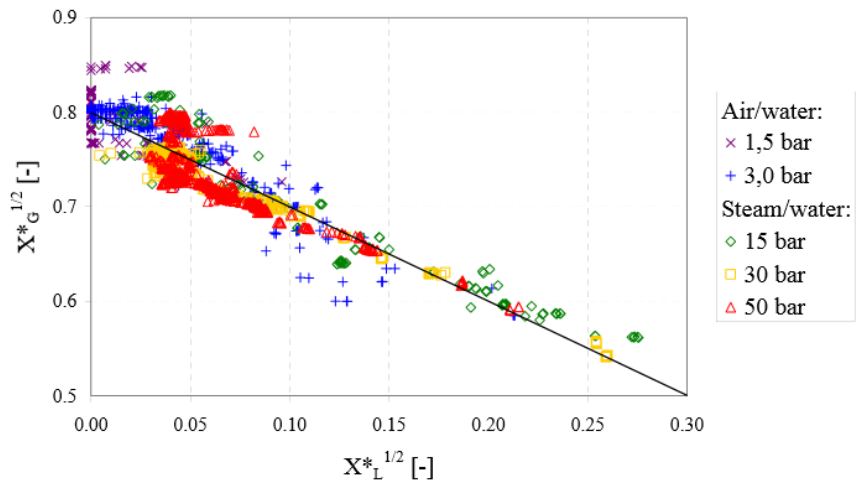


図 4.5.1-9 水-空気及び水-蒸気実験における CCFL 発生条件 (粘度を考慮したパラメータで整理)

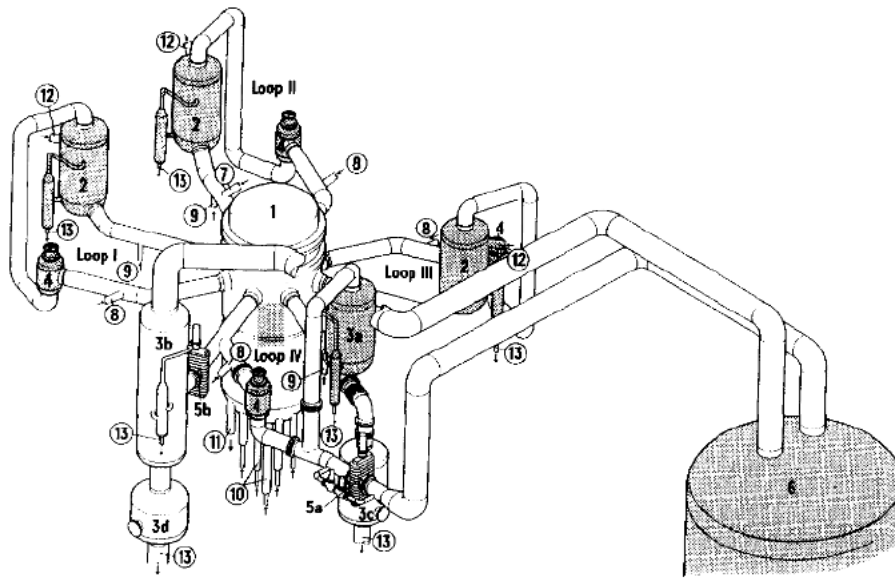


図 4.5.1-10 UPTF 実験装置

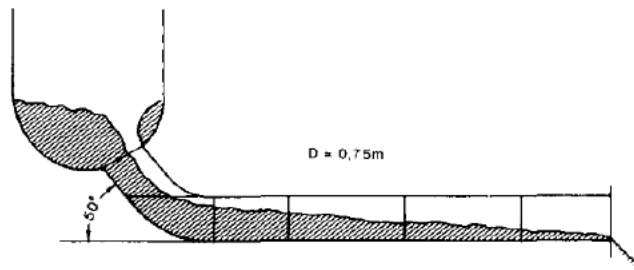


図 4.5.1-11 UPTF のホットレグ模擬配管

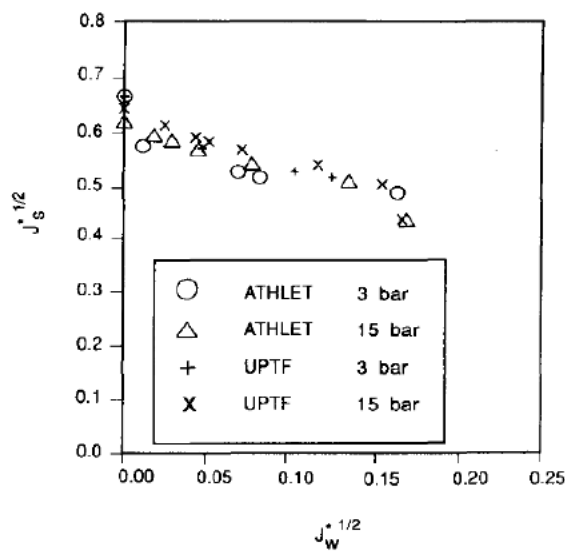


図 4.5.1-12 UPTF 実験における CCFL 発生開始点

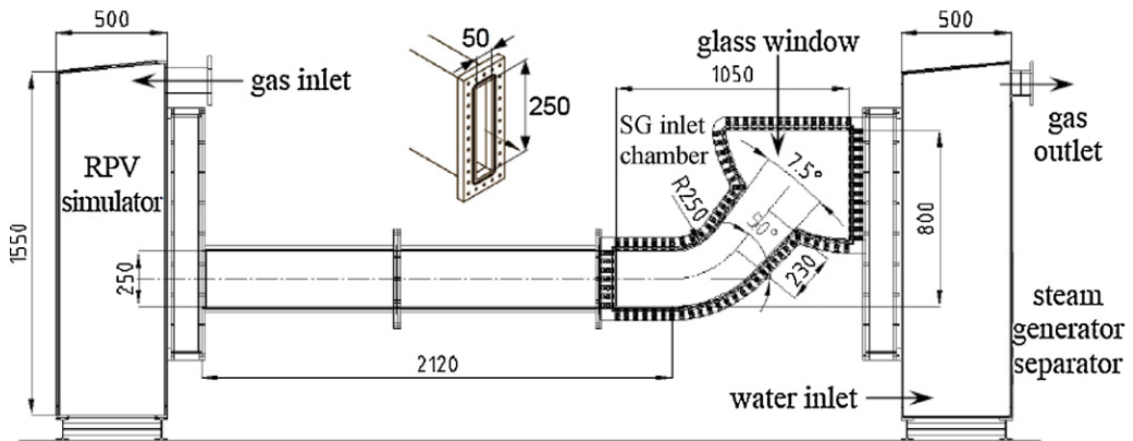


図 4.5.1-13 HZDR における CCFL 試験部

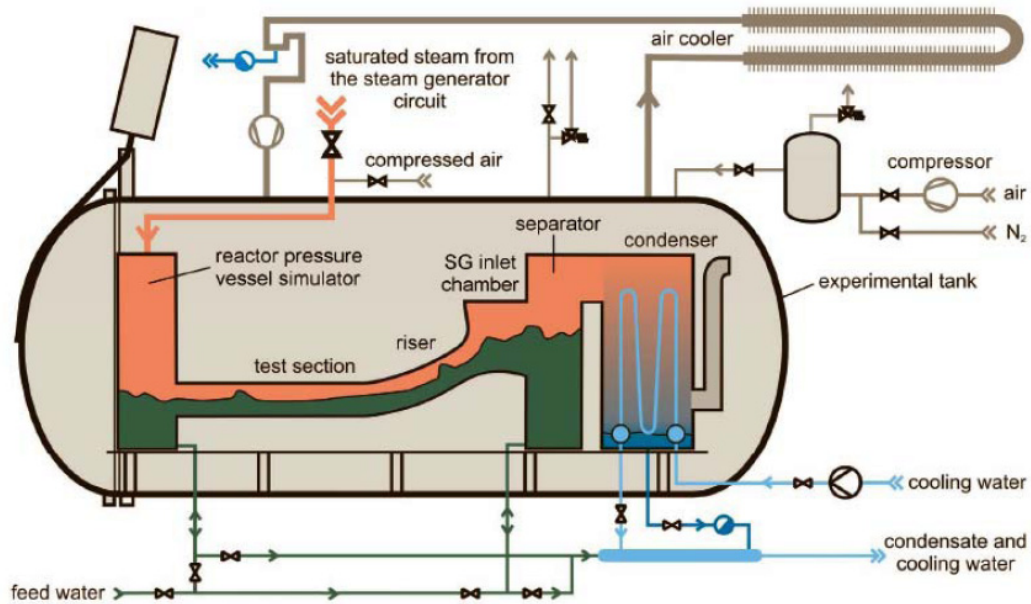


図 4.5.1-14 压力容器

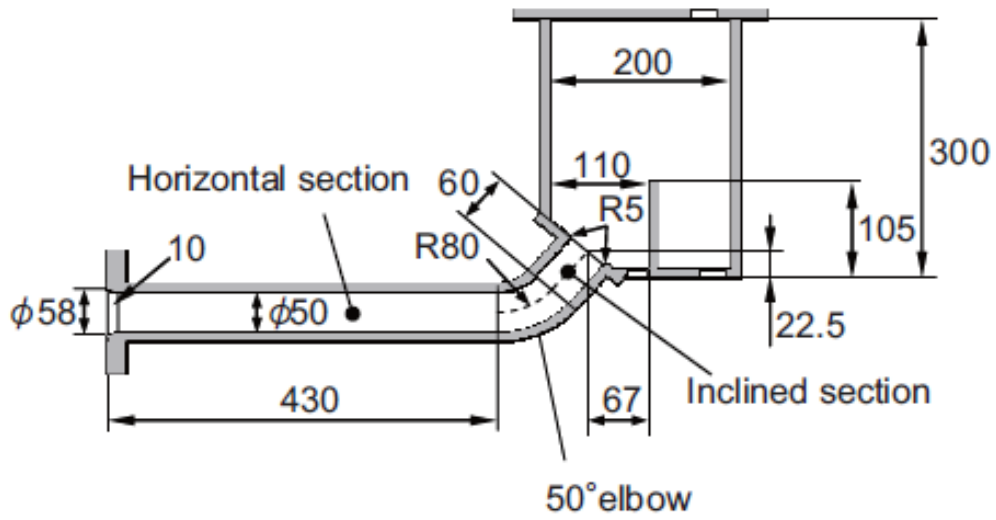


図 4.5.1-15 円管流路 1/15 スケール装置

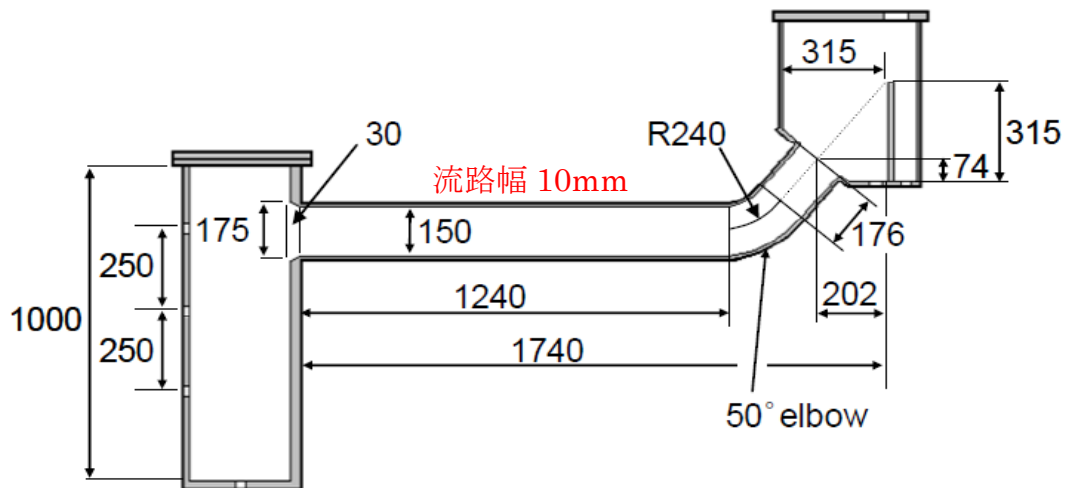


図 4.5.1-16 矩形流路 1/5 スケール装置

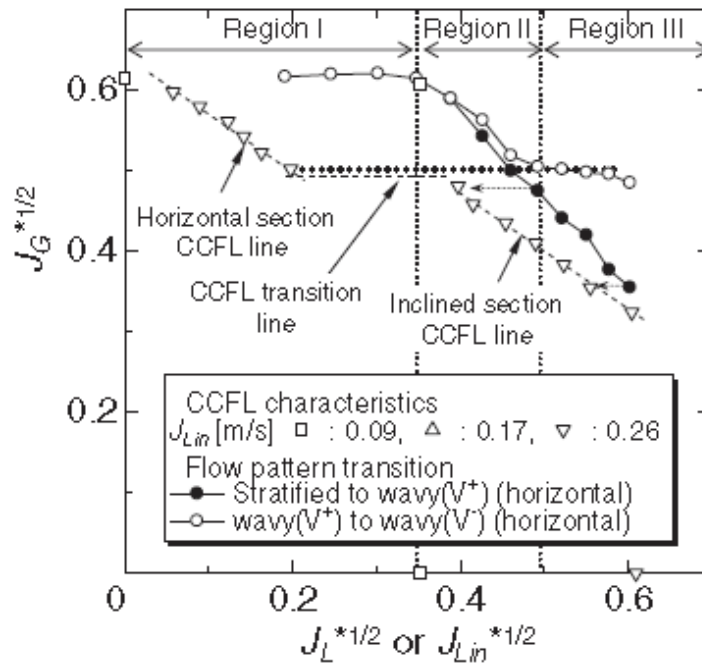


図 4.5.1-17 円管流路 1/15 スケール装置における CCFL 発生条件

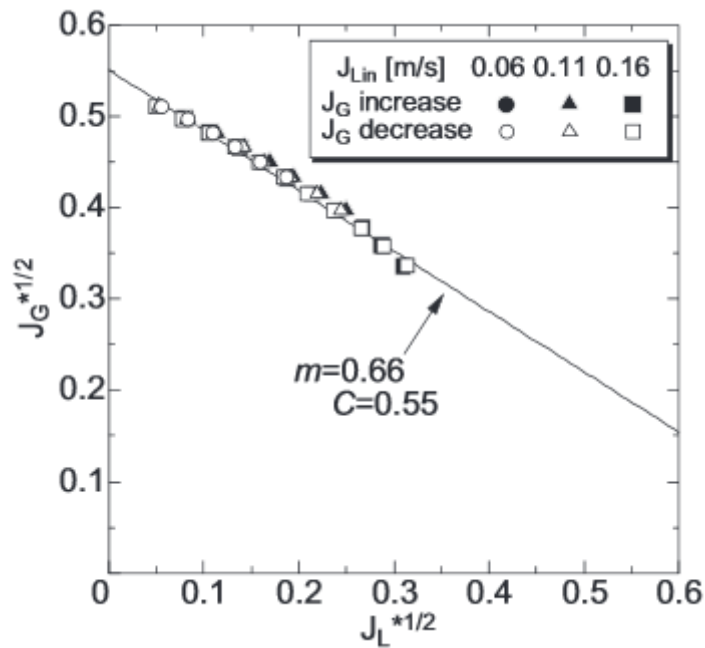


図 4.5.1-18 矩形流路 1/5 スケール装置における CCFL 発生条件

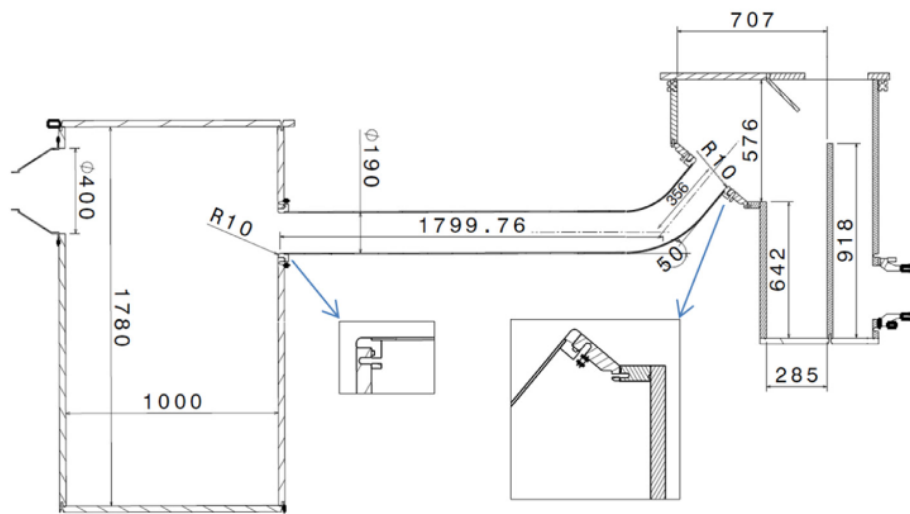
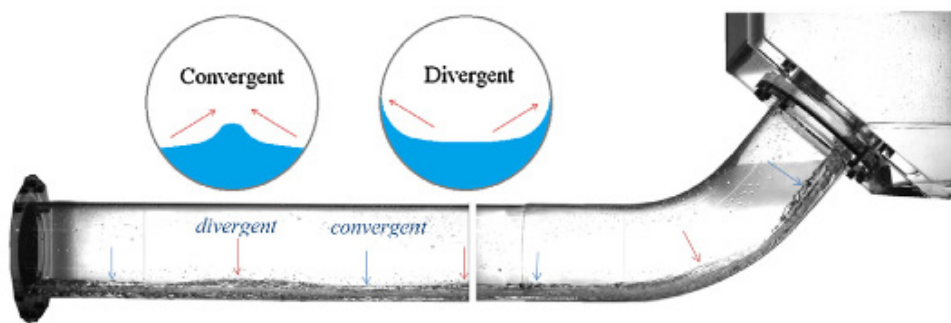
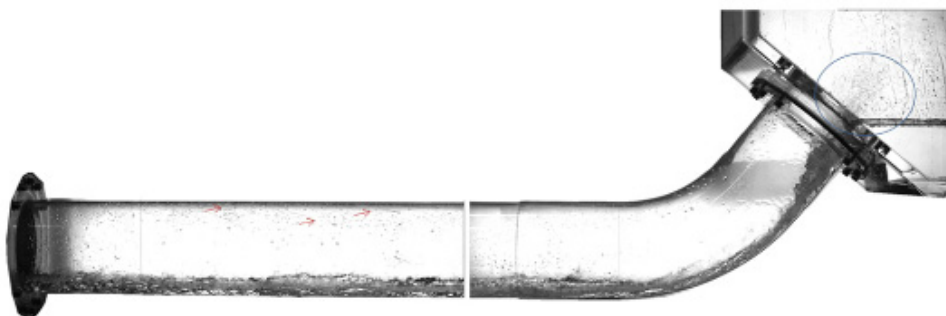


図 4.5.1-19 COLLIDER 実験装置



(a) 水平部における波立ち



(b) 傾斜管出口部における CCFL

図 4.5.1-20 COLLIDER 実験における可視化画像

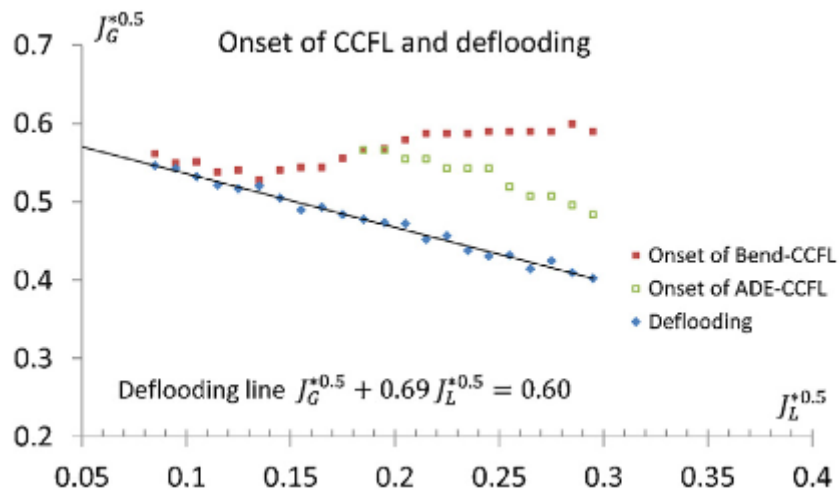


図 4.5.1-21 COLLIDER 実験における CCFL 発生条件

4.5.2 HYMERS 計画

4.5.2.1. 概要

HYMERS(Hydrogen Mitigation Experiments for Reactor Safety)計画は、水素リスクに関する OECD/NEA 主催の研究計画であり、世界各国の規制機関や研究機関が参加している。参加期間の総数は 2012 年の段階で 20 である。本計画を説明する資料[1]では、本計画を実施する理由として、格納容器内の水素挙動の予測手法の整備は従来よりなされているが、いまだ十分ではなく、なお、高い優先度と安全上の重要性を有する技術課題であるという認識が示されている。本計画では PSI の PANDA 装置及び CEA の MISTRA 装置を用いて実施する実験を、参加機関が解析し、解析コードの評価並びに改良を行うこととしている。研究期間は 2012 年から 2015 年が予定されている。

実験内容としては、基本的に OECD/SETH や OECD/SETH2 計画で対象としたように、格納容器内水素挙動に関する基本現象、安全機器の作動の影響、システム効果の 3 分野に着目した実験を実施するとしている。基本現象については、従来から検討されている格納容器への気相单相流放出に加え、二相流放出や、水平もしくは垂直の壁等の内部構造物の影響に関する実験を実施するとしている。安全機器に関する実験としては、二つの機器（例えば、スプレイ冷却とファンクーラ冷却）による相互干渉効果に着目する。システム効果については、PANDA 装置を用いてダンパーやラプチャーディスクの急速開放等に着目する。予定されている実験シリーズの内容を表 4.5.2-1 に示す。8 実験シリーズにおいて、PANDA 装置を用いて 24 実験、MISTRA 装置を用いて 9 実験を実施する計画である。

表 4.5.2-1 HYMERS プロジェクトで計画されている実験シリーズと検討内容

実験シリーズ名	検討内容
E1, E2	様々な放出流による密度成層の浸食挙動、垂直壁と床の影響等内部構造の影響
E3, E4	熱源によって引き起こされる自然循環の密度成層浸食挙動に対する影響、内壁での凝縮の影響。新型炉（EPR, APR1400, AP1000 等）への適用
E5	鉛直下向き二相噴流
E6	スプレー冷却とファンクーラー冷却の相互干渉
E7, E8	大空間での自然循環、コンパートメント間の流動、スプレー冷却

4.5.2.2. 本事業への反映

OECD/NEA において、これまで水素リスクに関連するいくつかのプロジェクトが実施されてきたが、依然、格納容器内の水素挙動は、優先度が高い重要課題であるとしていること、及び、多くの国際機関が参加していることは、本問題に関する技術の成熟度、並びに、安全上の重要性に関する国際的な認識を理解する上で重要である。すなわち、格納容器内の水素挙動に係る CFD コードや LP コードを用いた現状の評価手法にまだまだ改善すべきところが多く、評価手法の高度化のために実験を実施する必要性が高いことが国際的に認識されていると言える。

一般に、最先端の CFD コードを用いた単相流の解析においても、乱流や拡散挙動等の解析のためには、実験に基づきその妥当性が評価されるべき多くのモデルが必要とされ、特に、より複雑な現象を伴う二相流の問題では、さらに多くの実験で確認すべきモデルが必要となる。安全解析においては、計算結果の不確かさを把握することが必要であり、そのためには、実験に基づくモデルは、その手法を開発・評価した実験データベースの範囲で使用されることが基本であり、範囲外への外挿が必要な場合は、工学的に十分な検討を払う必要がある。したがって、実験においては事故時の広い条件を考慮したデータベースを構築することが重要である。

一方、過温破損に関する実験研究は、水素リスクに関する研究と比べ、従来ほとんど行われていないことにも注意を払う必要がある。水素リスクに係る研究において、水素分布の予測が重要な研究課題であることと同様に、過温破損に関する研究においても、温度分布の予測が重要であり、自然循環や温度成層等の流体挙動、高温流体と構造物との相互作用、安全系の作動の影響等を考慮可能な予測手法を整備することが極めて重要である。しかしながら、従来、格納容器模擬装置で行われた実験の温度、密度範囲は、例えば SETH2 計画において、最大圧力が、2.6 気圧、格納容器内雰囲気最高温度が 130°C、注入気体最高温度は 150°C 程度であり、格納容器シール部の過温破損が生じる温度として推定されている約 250°C や、過圧破損が生じる圧力と比べて相当に低いといえる。

これらを踏まえ、本事業で製作する大型格納容器試験装置 CIGMA では、高い温度、圧力条件で実験を実施できるようにすることとし、設計圧力は 1.5MPa、設計温度は、圧力境界において 200°C（圧力 1.5MPa の場合）から 300°C（大気圧から 0.53MPa までの場合）、ガス注入ノズルにおいて 700°C とする。この仕様により、従来装置での実験と比べて、特色のある実験を実施し新知見を得ることが期待できる。

4.5.3 リウエット速度に関する研究

4.5.3.1. 概要

原子力機構では、平成 17 年から 21 年にかけて、日本原子力学会の「BWR における過渡的な沸騰遷移後の燃料健全性評価基準：2003」(Post-BT 基準) [1]が推奨する被覆管温度挙動予測手法に関連し、当時の原子力安全・保安院からの受託事業として、沸騰遷移後(Post-BT)の熱伝達に関する研究を実施している(以下、Post-BT 研究と呼ぶ)。この研究では、BWR の運転時の異常な過渡変化時の定常及び非定常な炉心伝熱挙動に着目し、単管熱伝達装置と 2x2 のバンドル実験装置を用いた実験を実施している[2,3,4]。

検討した伝熱挙動のうち、一旦液膜がドライアウトし高温になった燃料棒が再度濡れる(リウエット)挙動に関する実験では、圧力、流量等をパラメータとし、炉心上部でドライアウトを発生させ定常状態を保った後、流量増大や電気入力低下等によるリウエット点の伝播挙動を観測している。また、リウエット伝播速度に関して、二次元の熱伝導理論解析に基づき、高温壁温度とリウエット伝播速度の関係を、1)リウエット温度、2)先行冷却領域の大きさ並びに熱伝達率、3)リウエット後の濡れ領域の熱伝達率等の関数として、解析関数で表す理論モデルを作成した。ここで、先行冷却領域はリウエット点近傍の乾き領域で大きな熱伝達を示す領域である。図 4.5.3-1 は、本モデルと実験を比較している。図中の無次元速度 V_n (Peclet 数) 及び無次元伝熱面温度 T_n は、下記式で定義される。

$$V_n = \frac{\rho_w c_w u \delta}{\lambda_w} \quad (4.5.3-1)$$

$$T_n = \frac{T_w - T_{sat}}{T_0 - T_{sat}} \quad (4.5.3-2)$$

ここで ρ_w は壁密度、 c_w は壁比熱、 λ_w は壁熱伝導度、 δ は壁厚み、 T_w は高温壁温度、 T_0

は濡れ(リウエット)温度で Lienhard の過熱限界モデル式で予測される値、 T_{sat} は飽和温度である。また、先行冷却は、リウエット点で最大熱流束となる指数関数で表され、このモデルでは熱流束の値が乾き領域側に 1.5cm 離れたところで最大熱流束の 37%に減衰する分布を使用している。図で示されるように、先行冷却を考慮するモデルは単管試験及びバンドル試験で得られた実験結果と大まかに一致する一方、先行冷却を考慮しない場合はリウエット速度を大きく過小評価している。

これらの検討により、主な結論として、1) 先行冷却領域の範囲はリウエット点から1~2cm程度で、この領域に、定常実験で得られたドライアウト後の熱伝達率と比べても非常に大きな熱伝達率を与えなければ、実験で得られた壁温度とリウエット速度の関係を再現できないこと、2) 壁内の熱伝導解析においては、実験と同様な先行冷却を考慮する場合は、半径方向(壁の厚さ方向)の熱伝導のみを考慮すれば良く軸方向熱伝導は無視し得ること等、先行冷却の重要性を明らかにした。ただし、先行冷却領域の大きさや、熱伝達率等の熱流動条件(圧力、流量、クオリティ、温度)依存性については、Post-BT研究では十分には検討していない

そこで、Post-BT研究の終了後、炉心伝熱に関する安全研究の一環として2x2バンドル実験の解析検討を実施している[5]。図4.5.3-2に、この検討で評価したバンドル実験におけるリウエット速度とリウエットの際に急激に温度低下する前の高温被覆管温度の関係を、質量流束をパラメータとして示す。両者の関係は全体に大きくばらついているが、ばらつきを包絡する最大温度は、リウエット速度の増大とともに減少する傾向が示されている。このようなばらつきを示す原因として、リウエット点の伝播を制限するメカニズムに最大除熱量による制限と液膜伝播による制限の二つがあることが考えられる。ここで、最大除熱量は濡れ温度や濡れ点での熱流束等に影響を受け、液膜伝播は環状噴霧流中の液滴伝達、エントレインメント、液膜蒸発等に影響を受ける。すなわち、環状液膜流がドライアウト領域をリウエット点が上方に伝播する際に、壁温度が十分低い場合は、液膜の到来とともに壁は濡れるものの壁温度が高い場合には濡れ温度等の制限による最大除熱量の制限によりリウエットの進展が制限されることが考えられる。

さらに、この検討では、リウエット点に固定した座標系での定常を仮定した模擬燃料棒の多次元熱伝導数値解析を行い、リウエット速度に対する影響因子を定量的に検討した。例えば、伝播速度が濡れ温度で制限された状態を解析するためには、濡れ点の壁温度がLienhardの最大過熱温度の式の値となるように、リウエット速度等の影響因子を繰り返し計算で調整した。定常の仮定から明白なように、リウエット速度は、ある時間あたりに被覆管から放出される熱量と除熱量のバランスから決まっており、先行冷却領域の大きさが大きいほど、また、その熱伝達率及び濡れ温度が大きいほど、早く進展することが推定できる。濡れ温度をパラメータとして得られたリウエット速度を、実験データと比較して図4.5.3-3に示す。図に示されるように、Lienhardの式で計算される過熱度を1.5倍にした値を濡れ温度とするケースでは、全体のばらつきを包絡する結果が得られている。ここで、図では濡れ過熱温度をパラメータにしているが、数値解析上は、濡れ点での熱伝達率や熱流束をパラメータにしても同様な結果が得られている。すなわち、ある被覆管温度における最大リウエット速度は、濡れ温度等で定まる最大除熱量で制限されていると考えられる。

4.5.3.2. 本事業への反映

BWR の運転時の異常な過渡変化や事故時の安全評価を行う上で、上述の研究で検討された環状噴霧流による定常及び非定常の伝熱流動は、最も基礎となる熱水力挙動である。本事業においても、従来研究を踏まえ新たな知見を構築するため、4x4 バンドル実験及びより基礎的な単管実験を実施する計画である。

上記研究では、濡れ温度等の制限による除熱量支配のリウエット挙動については、局所的な熱水力条件で決定できる可能性が示されたが、液膜流動支配の場合は、局所的な挙動の解析だけでは不十分であることは明確である。このような挙動を検討するためには、環状噴霧流中の液膜流、液滴流、蒸気流の三つの流動場を考慮した二流体三流動場モデルに基づく解析手法を用いるのが適切である。従来より二流体三流動場モデルに基づく解析手法はサブチャンネルコードとして国内外で開発が行われており、近年では我が国産業界においても実験を代替する手法として開発が行われてきている。しかし、現象の複雑さゆえに、技術的にはいまだ十分に成熟しておらず、安全審査においては適切な実験での確認が求められている。本事業では、従来研究を踏まえ、三流動場解析モデルを高度化するための詳細な実験を行う。特に、次年度以降実施する単管伝熱実験では、下記等の把握を狙った実験を行うことにする。

- 定常ドライアウト実験（ステップ状に条件を変化）
- 定常リウエット実験（ステップ状に条件を変化）
- 過渡ドライアウト実験（流量過渡、もしくは、電力過渡）
- 過渡リウエット実験（流量過渡、もしくは、電力過渡）
- 模擬スパーサの影響
- スプレイ作動等による上方からのリウエット挙動

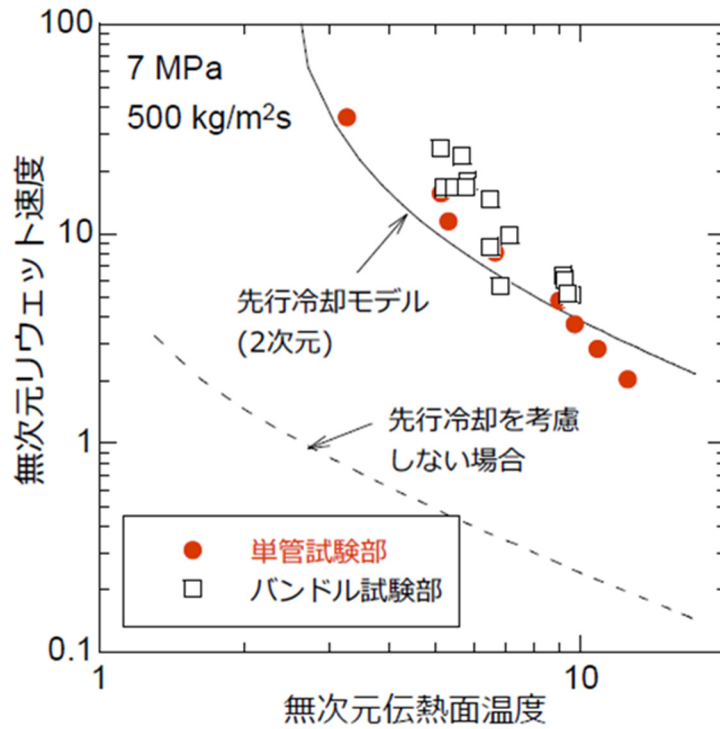


図 4.5.3-1 リウエット速度と伝熱面温度の関係に関するモデルと実験値の比較

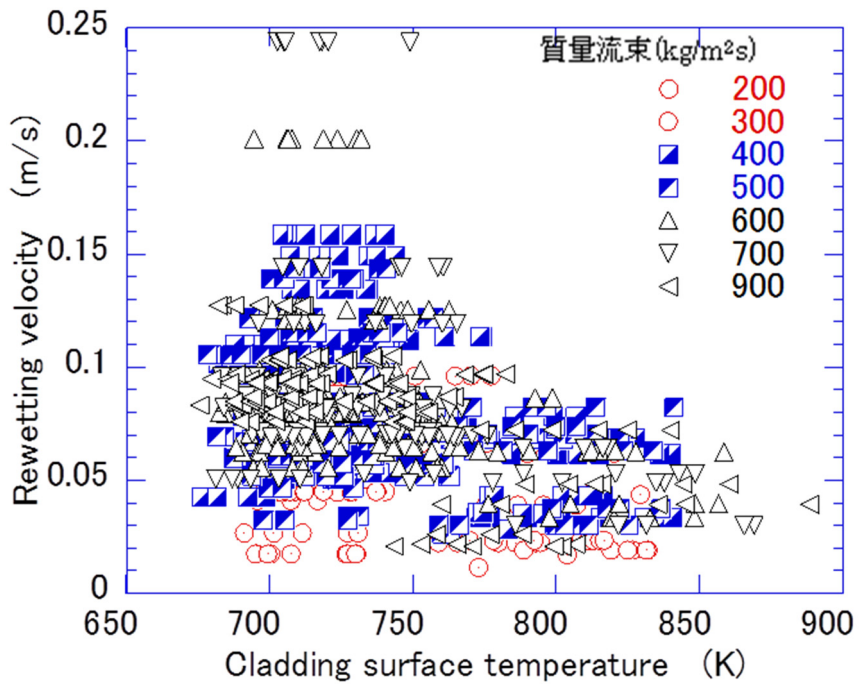


図 4.5.3-2 リウエット速度と伝熱面温度の関係を示す実験値

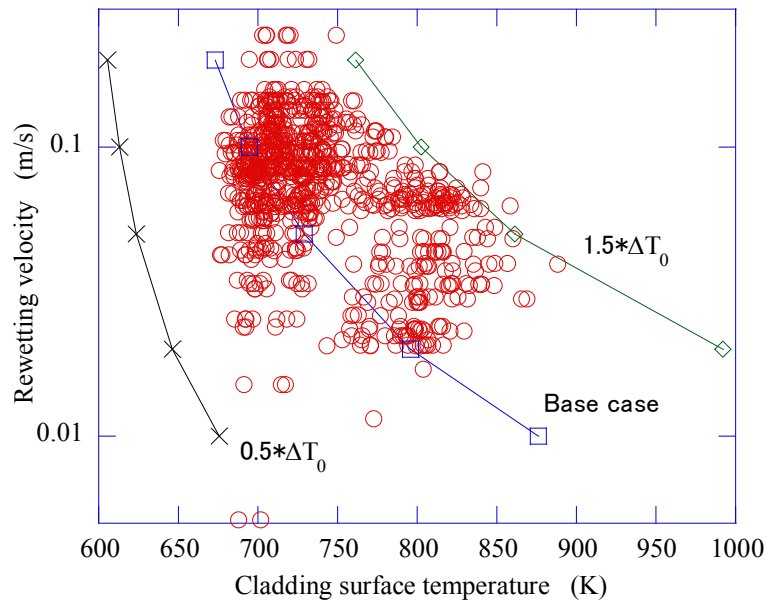


図 4.5.3-3 リウエット速度と被覆管初期温度の関係： ΔT_0 は Lienhard の式で予測される
 濡れ過熱度。

4.5.4 二相流ジェット的不安定性解析

本事業では、解析検討のツールとなる CFD コードを選定するために、平成 24 年度に複数のコードの比較検討を行い、OpenFOAM を用いることにした[1]。また、二相流解析モデルの検討では、BWR の格納容器ベント作動時に生じるプールスクラビング現象を主要な評価対象としている。本現象を再現するためには、平成 25 年度報告書の文献調査にまとめられたように、液相中への気相ジェット注入やジェット流から気泡（もしくはチャーン）流への遷移などの流動現象の評価が不可欠となる[2]。一般に二相流現象は複雑であり、現象を詳細に計測することは困難であるため、一つの検討方法として、数値解析手法を理論解析と比較し、その妥当性を検討することが行われている。この検討のため、気相ジェットが液相に注入される際の界面の不安定性理論に基づく解析モデルとの比較を今後行うことを計画している。本節では、関連する既往研究の調査結果について述べる。

4.5.4.1. 背景

ジェットの不安定性問題に関する議論は、Rayleigh らによる円柱状流体の毛細管力不安定性の解析[3]に端を発し、スプレイやアトマイザー[4]、液体カーテン[5]などを対象とした液滴擾乱の安定・不安定性解析は盛んに行われてきた。1990 年代より Li らによって気相中での平面液相シートの空間発展型の線形不安定性解析が始められ[6]、その後、平面気相シート(ジェット)の時間発展型の線形不安定性解析[7][8]や円柱ジェットの不安定性解析[9][10]の研究が行われるようになった。気相シートは一度不安定になると、界面擾乱は成長し、一連の気泡の中へのシート崩壊の原因となるが、これらの研究では、粘性液体媒体および表面張力、気体密度、液体粘性のような様々な物理パラメータの効果および圧縮気相シートの時間-空間型の絶対・対流不安定性などについて論じている。

近年では、Bolaños-Jiménez [11]ら、Gutiérrez-Montes ら[12]によって静止空気中へ放出される水-空気シートの平面周囲流 (co-flow) の実験と線形安定性解析、さらに OpenFOAM の VOF 法ソルバ interFoam を用いた二次元 CFD 解析も行われ、比較検討された。これらは、空気-水-空気シートにおける Weber 数や速度比に依存するジェット流と気泡流を定義し、気泡構造プロセス、気泡様式について明らかにしている。

4.5.4.2. Li らの不安定性解析

これまでにさまざまな流動条件に対し、不安定性解析がなされてきたが、ここでは、本事業で注目している対象と同様な静止液相中への気相シート注入の議論[7]、[8]にのみ着目する。

概要・条件

安定性には界面の表面張力 σ が重要な役割を果たしているため、気相 Weber 数、密度比、

Reynolds 数に特徴が現れることが考えられる。そこで、定常解と気液界面での微小波の時間発展型の線形不安定性を解析し、不安定性限界、各密度比、気相 Weber 数、Reynolds 数ごとの擾乱成長率、最大成長率と支配的波数の関係、波速度について明らかにした。

対象としている現象は、図 4.5.4-1 に示すように、無限静止液相面に対し、厚み $2a$ 、気相密度 ρ_g の圧縮性気体シートは速度 U_g で注入される（下付き文字 g は気相、 l は液相に関する量を示す）。なお、液相粘性（非粘性液相の場合は密度比 $\rho = 0.1$ と仮定）、表面張力は考慮し、気相粘性、重力は考慮しない。

支配方程式

基底流出は、気相では流体の方向に速度 U_g 、圧力 p_g と気相密度 ρ_g 、液相では静止しているため、全方向で速度 0 と圧力 p_l によって与えられる。線形化された質量、運動量輸送方程式は以下のように示される。

$$\delta_j \left(\frac{\partial}{\partial t} + U_g \frac{\partial}{\partial x} \right) \rho_j + \rho_j (\nabla \cdot \mathbf{u}_j) = 0 \quad (4.5.4-1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}_j}{\partial t} + \delta_j U_g \frac{\partial \mathbf{u}_j}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_j} \nabla p_j + (1 - \delta_j) \nu_l \nabla^2 \mathbf{u}_j \quad (4.5.4-2)$$

$$p_g = \left(\frac{\partial p_g}{\partial \rho_g} \right)_s \rho_g = c^2 \rho_g \quad (4.5.4-3)$$

ここで、 $\mathbf{u}_j = \mathbf{u}_j(x, y, t)$ は擾乱速度、下付き文字 j は気相 ($j = g$) および液相 ($j = l$) に関する量を示す。 δ_j は $j = g$ のとき $\delta_j = 1$ 、 $j = l$ のとき $\delta_j = 0$ となり、 ν_l は液体の動粘性係数、下付き文字 s は等エントロピ過程を意味し、 c は気相における音速である。以下のように液相-気相界面に適用すると、

$$v_j = \frac{\partial \xi_{\pm}}{\partial t} + \delta_j U_g \frac{\partial \xi_{\pm}}{\partial x} \quad (y \approx \pm a) \quad (4.5.4-4)$$

$$(\tau_{yy})_g - (\tau_{yy})_l = P_l - 2\mu_l \frac{\partial v_l}{\partial y} - P_g = \pm \sigma \frac{d^2 \xi_{\pm}}{dx^2} \quad (y \approx \pm a) \quad (4.5.4-5)$$

$$(\tau_{xy})_l = \mu_l \left(\frac{\partial u_l}{\partial y} + \frac{\partial v_l}{\partial x} \right) = 0 \quad (y \approx \pm a) \quad (4.5.4-6)$$

ここで、 ξ_{\pm} は擾乱振幅（図 4.5.4-1 を参照）、 τ_{yy} 、 τ_{xy} は界面の垂直応力およびせん断応力であり、 μ_l は液相の粘性係数である。擾乱は以下のように仮定され、輸送方程式は流れ関数 φ_g 、 φ_l を導入した以下の基準振動解の項を解く。

$$[\varphi_g, \varphi_l, \xi_+, \xi_-] = [\psi_g(y), \psi_l(y), \xi_0, \xi_0 e^{i\theta}] e^{ikx + \omega t} \quad (4.5.4-7)$$

擾乱の気相液相界面は $y = \pm a + \xi_{\pm}$ と示され、 ξ_0 は初期擾乱振幅、 θ は伝播方向と主流のなす角（図 4.5.4-1 を参照）である。さらに、波数 k 、波周波数 ω は

$$k = 2\pi/\lambda \quad (4.5.4-8)$$

$$\varpi = \omega_r + i\omega_i \quad (4.5.4-9)$$

ここで、 λ は波長、 ω_r は擾乱の成長もしくは崩壊率、 ω_i は擾乱の角振動を示し、 $-\omega_i/k$ は伝播波速度となる。安定性モードは2種類あり[4]、[13]、 θ の値に応じて分類される。すなわち、 $\theta = 0$ における周期的に2つの界面が平行に変位する **sinuous** (対称) モードと、 $\theta = \pi$ における **varicose** (反対称) モードである。**sinuous** モードのとき、式(4.5.4-7)より、

$$(\Omega + im)^2 \tanh m + \frac{\Omega^2}{\rho} + \frac{4}{\rho Re} m^2 i\Omega - \frac{4}{\rho Re^2} m^3 (m - n) - \frac{m^3}{We_g} = 0 \quad (4.5.4-10)$$

$$(\theta = 0)$$

ここで、無次元波周波数 Ω 、波速度 m 、変数 n 、密度比 ρ 、Reynolds 数 Re 、気相 Weber 数 We_g は

$$\Omega = \varpi a / U_g \quad (4.5.4-11)$$

$$m = ka \quad (4.5.4-12)$$

$$n = \sqrt{m^2 - iRe\Omega} \quad (4.5.4-13)$$

$$\rho = \rho_g / \rho_l \quad (4.5.4-14)$$

$$Re = U_g a / \nu_l \quad (4.5.4-15)$$

$$We_g = \rho_g U_g^2 a / \sigma \quad (4.5.4-16)$$

Ω の実数部分である Ω_r は擾乱の成長率を示し、

$$\Omega_r = \frac{m}{\tanh m + \frac{1}{\rho}} \left[\frac{\tanh m}{\rho} - \frac{m \left(\tanh m + \frac{1}{\rho} \right)}{We_g} \right]^{1/2} \quad (\theta = 0) \quad (4.5.4-17)$$

varicose モードのとき、

$$(\Omega + im)^2 \coth m + \frac{\Omega^2}{\rho} + \frac{4}{\rho Re} m^2 i\Omega - \frac{4}{\rho Re^2} m^3 (m - n) - \frac{m^3}{We_g} = 0 \quad (4.5.4-18)$$

$$(\theta = \pi)$$

このとき Ω_r は

$$\Omega_r = \frac{m}{\coth m + \frac{1}{\rho}} \left[\frac{\coth m}{\rho} - \frac{m \left(\coth m + \frac{1}{\rho} \right)}{We_g} \right]^{1/2} \quad (\theta = \pi) \quad (4.5.4-19)$$

結果

Li ら[7]の論文から一部の結果(不安定性限界、各密度比、Reynolds 数ごとの擾乱成長率)を紹介する。

図 4.5.4-2 に **sinuous**、**varicose** モードそれぞれの粘性、非粘性における不安定性限界と気相 Weber 数の関係を示す。気相 Weber 数が増加する液体粘性は、粘性効果により **sinuous** および **varicose** 不安定性の不安定性限界を増大させるが、 $We_g = 4$ で不安定性モードに関

ならず一定の値に収束する。これは非粘性の場合も同様である。

図 4.5.4-3 に $We_g = 1.001$ 、 $\rho = 0.1$ の sinuous モードにおける Reynolds 数ごとの擾乱成長率と波数の関係を示す。液体粘性には空気力学的不安定性と粘性増大不安定性があり、Reynolds 数に応じて支配性が変化する。 $Re = 10$ のとき、粘性増大不安定性が支配的となるが、 $Re = 50$ では粘性増大不安定性から空気力学的不安定性へ遷移し、曲線も波数 $0.01 \sim 0.055$ の間に極大値を有するようになる。完全に 1 つの最大値となる $Re = 10^5$ では、空気力学的不安定性が支配的となる。これは、一般に Reynolds 数の減少は擾乱成長率の低下をもたらすとされているため、矛盾が生じているように思えるが、Li らは論文の中で、粘性効果は不安定性と安定性因子の相反する特徴を持つためであると述べている。

図 4.5.4-4、4.5.4-5 は、 $We_g = 4.0$ 、 $\rho = 0.1$ のときの sinuous および varicose モードにおけるレイノルズ数ごとの擾乱成長率と波数の関係を示す。共に Reynolds 数が増加するにつれて擾乱成長率は高まるが、波数 $3.54 \sim 4$ の間で擾乱成長率が 0 となる傾向が見られる。これは粘性増大不安定性が高まるためであるとしている。

4.5.4.3. 本事業への反映

一般に CFD 手法による二相流解析は、気液界面を平均して取り扱う二流体モデルを用いる方法およびより厳密に取り扱う VOF 法を用いる方法がある。いずれの場合も二相流 CFD は技術的に未成熟であり、今後の高度化が必要とされている。当面、液相中に気相を流入させる際の界面不安定性の理論解を用いて、VOF 手法の妥当性評価 (verification) を予備的に行う予定である。その結果、本事業で計画しているスケーリング効果やスクラビング挙動の把握に活用できる目途が立った段階で、本事業での検討を提案する。

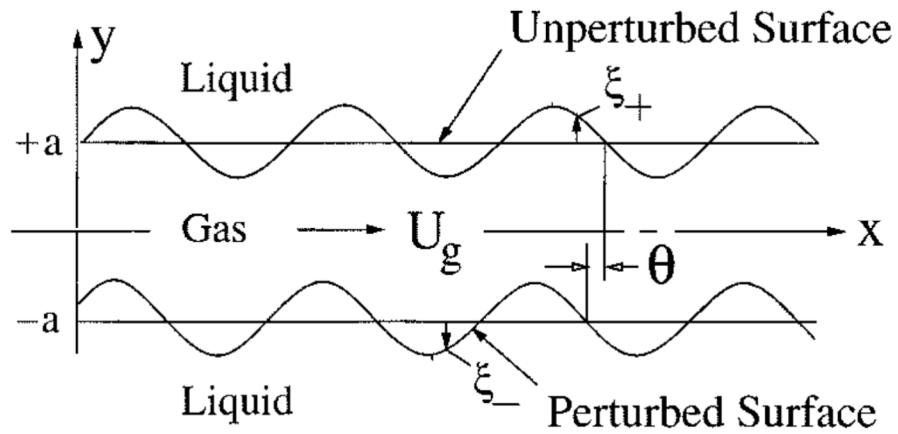


図 4.5.4-1 計算対象
(Li ら、1996 [7]からの再掲)

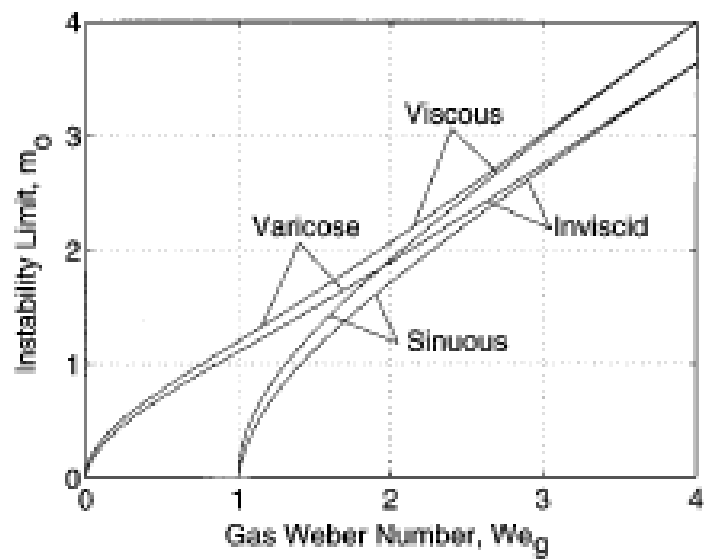


図 4.5.4-2 不安定性限界と気相 Weber 数 (非粘性 $\rho = 0.1$)
(Li ら、1996 [7]からの再掲)

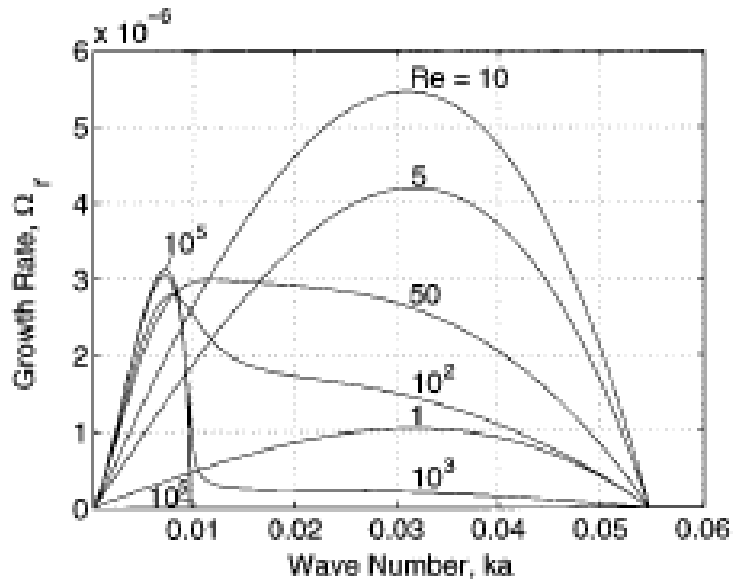


図 4.5.4-3 sinuous モードにおける Reynolds 数ごとの擾乱成長率と波数
 ($We_g = 1.001$ 、 $\rho = 0.1$)
 (Li ら、1996 [7]からの再掲)

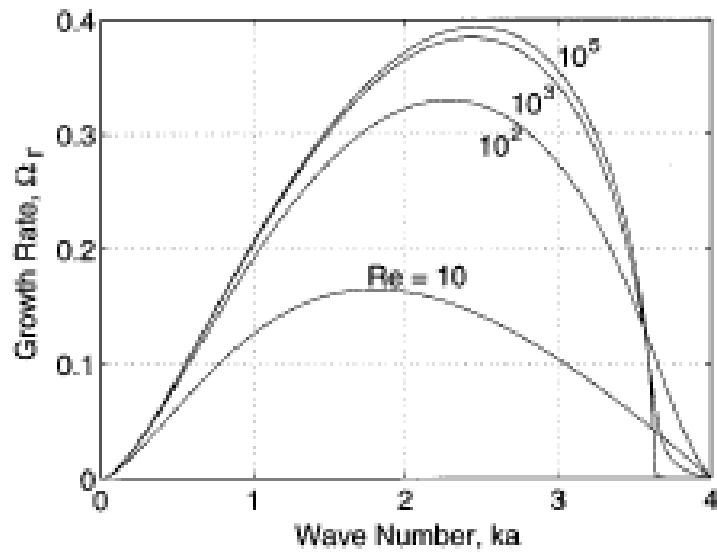


図 4.5.4-4 sinuous モードにおける Reynolds 数ごとの擾乱成長率と波数
 ($We_g = 4.0$ 、 $\rho = 0.1$)
 (Li ら、1996 [7]からの再掲)

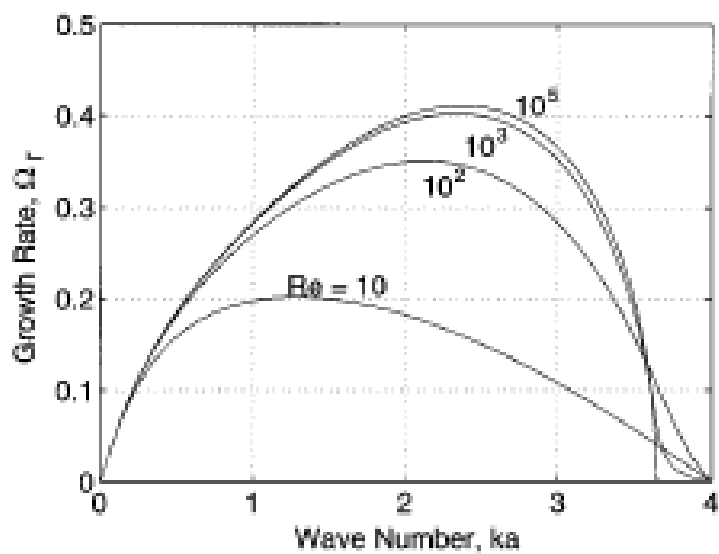


図 4.5.4-5 varicose モードにおける Reynolds 数ごとの擾乱成長率と波数
 ($We_g = 4.0$ 、非粘性 $\rho = 0.1$)
 (Li ら、1996 [7]からの再掲)

4.5.5 温度や多成分気体による成層現象、熱や物質伝達等に関する既往研究

シビアアクシデント時の熱水力挙動を把握する上で、原子炉格納容器内の熱や物質の混合やそれらによる成層化は、重要な現象である。既往研究では、様々なアプローチによりそれらの現象を解析・予測する手法が提案されてきた。以下では、原子炉格納容器内での熱や物質混合現象や成層現象に関連した既往研究の一部を紹介する。

4.5.5.1. 温度や多成分気体による密度成層に関する解析の現状

以下に解析手法の分類や、解析の具体例を示す。

(1) 0-D model、1-D model、2-D or 3-D model

Heihua らは、大空間内での熱混合や成層現象を解析するための解析手法として以下のようまとめている[1]。

現在の格納容器内熱水力挙動を解析のためのメインツールが、RELAP5 や MELCOR のような集中定数系のシステム解析コードである。これらのコードには、0-D モデルとも呼ばれ、大きな空間を一つのノードで再現するものである。この解析手法では、大空間内における熱混合や成層現象を予測するための汎用的なモデルは実装されておらず、解析で選択するモデルに解析結果は大きく依存する。例えば、Argonne National Laboratory が高速増殖炉のシステム解析のために開発した SASSYS コードでは、炉心が温められた流体が炉心上部の Hot-pool に入ることによって生じる熱混合の様子をジェット運動量や浮力に応じて、以下のような3つのケースに分類してモデル化を行っている。

- ① 完全混合状態
- ② 成層化+cold buoyant jet case
- ③ 成層化+hot buoyant jet case

しかし、このモデルは Hot-pool の形状などに大きく依存するために大きな不確かさを有する。

2-D model や 3-D model は、CFD 解析で用いられるモデルである。この手法は、詳細な成層の様子やジェットの流れの様子を得ることができるが、その他の手法に比べると計算コストが莫大となる。

その他に、1-D model というものがある[2]。このモデルでは、例えば、成層現象に関しては、1-D の integral model を用いて、流れによる熱が物質の移動を表現するものであり、大空間内で形成される密度成層の時間変化を捉えることができる。流れの形状により、熱や物質の移動は変化するので、典型的な流れのパターンとそれによる熱や物質の移動を表現するモデルが実装されている。この例として、カリフォルニア大学バークレー校が開発した BMIX++コードがある。

(2) 解析の具体例

Povilaitis らは、フランス CEA が所有する模擬格納容器 MISTRA により行われた実験を集中定数系コード COCOSYS により解析を行っている[3]。この報告では、集中定数系コードを用いているが、模擬格納容器内を複数のノードに分割し、流れによる熱や物質の移動をモデル化することでジェット流入による成層の時間変化を捉えている。また、そのノーディングが結果に与える影響に関しても述べており、ジェットの流入部付近では、比較的細かいノーディングにすることで解析精度が向上することを述べている。

さらに、注目すべき解析コードとして GOTHIC コードというものがある。これは、ベースとしては集中定数系のコードとして分類されるが、オプションとしてノーディングを通常の集中定数系コードよりも細かく分割することで CFD-like な解析を可能としている。Andreani は SETH-2 プロジェクトで行われたジェットによる成層崩壊実験に関する解析を GOTHIC コードで行っている[4]。また、Hultgren らも、GOTHIC コードを用いて PSI 所有の模擬格納容器 PANDA の実験に関する解析を行っている[5]。

4.5.5.2. スカラーの乱流輸送モデルについて

格納容器内熱水力現象において、乱流による熱や物質の輸送は大きな役割を担っている。CFD 解析により、スカラーの乱流輸送のモデリングについては、既往研究により多くの手法が開発されている。以下では、そのモデリング手法について述べる。

二成分気体による圧縮性流体でのスカラー量 θ (質量分率やエンタルピー)の輸送方程式は、次のように与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\theta) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \theta) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right) \quad (4.5.5-1)$$

ここで α は拡散係数である。CFD において、RANS (Reynolds-averaged Navier Stokes) 解析を行う場合、上式にレイノルズ平均($\bar{\quad}$)を基本操作としたファールブル重み付け平均($\widetilde{\quad}$)を適用した以下のような式が解析上の支配方程式となる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\widetilde{\theta}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}\widetilde{u}_i\widetilde{\theta}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \frac{\partial \widetilde{\theta}}{\partial x_i} - \bar{\rho}\widetilde{u}'_i\widetilde{\theta}' \right) \quad (4.5.5-2)$$

この式の左辺に見られる $\bar{\rho}\widetilde{u}'_i\widetilde{\theta}'$ は RANS 解析では直接解くことができない乱流スカラーフラックスであり、それはモデリングされる必要がある。

乱流スカラーフラックスのモデリングを行う際、もっともよく用いられている手法は SGDH (Simple gradient diffusion hypothesis) と呼ばれる、以下のようなモデリングである。

$$\bar{\rho}\widetilde{u}'_i\widetilde{\theta}' = -\alpha_t \frac{\partial \widetilde{\theta}}{\partial x_i} \quad (4.5.5-3)$$

ここで、 α_t は乱流拡散係数であり、渦粘性係数(μ_t)とエンタルピー輸送の方程式では乱流プラントル数(Pr_t)、質量分率の輸送では乱流シュミット数(Sc_t)を用いて以下のように導出される。

$$\alpha_t = \frac{\mu_t}{Pr_t} \quad (4.5.5-4)$$

$$\alpha_t = \frac{\mu_t}{Sc_t}$$

物性値であるプラントル数、シュミット数とは異なり、乱流プラントル数、乱流シュミット数は流れ場の状況に大きく依存する(後述)。

SGDH のようなシンプルな勾配拡散近似よりも発展した、Daly と Halow によって提案された代数型表現の GGDH (Generalized gradient-diffusion hypothesis)と呼ばれるものがある(4.5.5-5 式)[6]。

$$\overline{\rho u'_i \theta'} = -C_s \overline{\rho u'_j u'_k} \frac{k}{\varepsilon} \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x_i} \quad (4.5.5-5)$$

ここで、 C_s はモデル定数であり、既往研究では 0.3 が用いられている。このモデリングでは、式中にレイノルズ応力($\overline{\rho u'_j u'_k}$)を組み込んだことにより非等法的な乱流拡散を再現することが可能になっている。Kumar らは、浮力ブルームに関する RANS 解析において乱流モデルを k - ε モデルとして、乱流熱フラックスに GGDH を適用した解析を行っている[7]。その結果、SGDH を用いた解析結果よりも、GGDH を用いた解析結果は平均流速、平均温度分布ともにも実験結果と良い一致を示している。

近年では、SGDH、GGDH の更なる発展モデルとして、Abe と Suga によって high-ordered GGDH (HO-GGDH)が提案された(4.5.1-6 式)[8]。

$$\overline{\rho u'_i \theta'} = -\alpha_c \tau_c \overline{\rho} \frac{\overline{u'_j u'_k} \cdot \overline{u'_k u'_l}}{k} \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x_i} \quad (4.5.5-6)$$

α_c はモデル定数で 0.575 などが用いられ、 τ_c は乱流の時間スケールであり、通常 $\tau_c = k/\varepsilon$ で表現される。Rossi らは、様々な流れ場でのスカラーの輸送に関して、Direct Numerical Simulation (DNS)や実験結果と比較して、HO-GGDH の有用性を確認している[9, 10]。

さらに、高度な手法として、乱流スカラーフラックスの輸送方程式において生成項と圧力・スカラー勾配項はほぼバランスしていることから

$$\overline{\rho C_{h1} \frac{\varepsilon}{k} u'_i \theta'} = -\overline{\rho} \left\{ \overline{u'_i u'_j} - (1 - C_{h21}) \overline{u'_j \theta'} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + C_{h22} \overline{u'_j \theta'} \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right\} \quad (4.5.5-7)$$

となる[11]。ここで、括弧内の第一項に現れるレイノルズ応力を以下のような乱流粘性係数を用いた一般的なモデリングを適用する[12]。

$$\overline{\rho u'_i u'_j} = \frac{2}{3} \overline{\rho} k \delta_{ij} - \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_i} \right) \quad (4.5.5-8)$$

さらに、右辺括弧内の第二項に現れる乱流スカラーフラックスについては、(4.5.5-3)式で表現される SGDH を用いると、

$$\overline{\rho u'_i \theta'} = -\alpha_t \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x_i} + \alpha_t \frac{k}{\varepsilon} \left(C_{j\theta}^{(1)} \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} - C_{j\theta}^{(2)} \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x_j} \quad (4.5.4-9)$$

このような、繰り込み的な方法を用いて作られた高度な乱流スカラーモデリングは多数存在する。

4.5.5.3. Pr_t と Sc_t について

(1) 噴流

前節では、乱流によるスカラーの輸送に関するモデリングの概要について述べた。一般的には、最も簡便な表記法である SGDH がよく使われている。しかしながら、SGDH では流れ場の情報から導出された乱流粘性係数(μ_t)と乱流プラントル数(Pr_t)、乱流シュミット数(Sc_t)を用いて乱流拡散係数を決定している。しかし、それらの係数は流れ場の状況によって大きく変化することが知られている。流れ場と乱流シュミット数、乱流プラントル数の関係性に関する研究の歴史は長く、多くの研究で様々な式が提案されており、例えば A. J. Reynolds は 30 以上の乱流プラントル数、乱流シュミット数に関する提案式について、7 つのクラスで整理している [13]。以下では、数多くある関連する既往研究の中で、格納容器内熱水力挙動解析能力向上に参考となりうる研究成果を示す。また、以下では乱流プラントル数および乱流シュミット数に関して、特に区別する必要がない場合は σ_t と表記する。

従来の解析でもっともよく用いられている手法は、係数を一定として設定する方法で、

$$\sigma_t = 0.9 \text{ (壁乱流)} \quad \sigma_t = 0.6 \text{ (自由乱流)} \quad (4.5.5-10)$$

とするものである。

Yimer は、円形噴流における乱流シュミット数の半径方向のプロファイルを実験により導出した[14]。その結果、噴流中心では乱流シュミット数は 0.62 となり、中心部分から離れるにつれて単調に 1.1 の値まで増加すると報告している。また、A. J. Reynolds も同様に円形噴流における σ_t の半径方向のプロファイルを実験結果から導出し、中心部分から離れるにつれて単調に増加すると報告している [15]。さらに、 σ_t の変化は噴流の間欠率に変化が生じる位置より急峻になることから、両者には深い関係があることを示唆している。

(2) 安定成層

安定成層の強さによるシュミット数の変化に関しても、多くの研究がなされている [16]。代表例としては、以下に示す 4 つの研究がある。これらすべての提案式は、以下の式で表現される勾配リチャードソン数の関数として表現されている。

$$R_i = \frac{N^2}{S^2} \quad (4.5.5-11)$$

ここで、 $S = \partial U / \partial z$ で鉛直方向の速度勾配、 $N = \sqrt{(-g/\rho_0) \partial \bar{\rho} / \partial z}$ で Brunt-Vaisälä 振動数と呼ばれるものである。勾配リチャードソン数は安定度の強さを表す指標である。

I. Munk and Anderson の式[17]

$$\sigma_t = \sigma_{t0} \frac{(1 + \beta \cdot R_i)^\alpha}{(1 + \beta_\rho \cdot R_i)^{\alpha_\rho}}$$

$$\alpha = -\frac{1}{2}, \beta = 10 \quad (4.5.5-12)$$

$$\alpha_\rho = -\frac{3}{2}, \beta_\rho = \frac{10}{3}$$

ここで σ_{t0} は中立条件のときの値である。また、Morelらは、この提案式とこれに基づく修正式を実装し、 $k-\epsilon$ モデルにより熱的安定成層を有する境界層に関する解析を行い、乱流諸量を風洞実験結果と比較している[18]。その結果、乱流プラントル数を一定とした解析結果よりも、実験値と良い一致を示すと述べている。

II. Venayagamoorthy and Stretch の式[19]

$$\sigma_t = \sigma_{t0} \exp\left(-\frac{R_i}{\sigma_{t0} \Gamma_\infty}\right) + \frac{R_i}{R_{f_\infty} \sigma_{t0}}$$

$$\Gamma_\infty = \frac{1}{3} \quad (4.5.5-13)$$

$$R_{f_\infty} = \frac{1}{4}$$

この提案式は、理論的背景から導出され DNS により妥当性が確認されている。

III. Kim and Mahnt の式[20]

$$\sigma_t = \sigma_{t0} \frac{1 + 15R_i(1 + 5R_i)^{1/2}}{1 + 10R_i(1 + 5R_i)^{-1/2}} \quad (4.5.5-14)$$

このモデルは、大気境界層での適用を目指していたために、航空機を用いた観測結果を用いて妥当性評価を行っている。

IV. Strang and Fernando の式[21]

$$\sigma_t = \frac{56}{3} R_i^{1.4} \text{ for } R_i \leq 0.25 \quad (4.5.5-15)$$

$$\sigma_t = \frac{0.2 + 5(1 + 5R_i)^{-1.5}}{0.01 + 5(1 + 5R_i)^{-2.5}} \text{ for } R_i > 0.25 \quad (4.5.5-16)$$

他の4つとは異なりこの提案式だけは、単調増加にならずに、 $R_i \rightarrow \infty$ では $\sigma_t \approx 20$ となることが分かる。また、 $R_i = 0$ では $\sigma_t = 0$ となってしまう、これは乱流拡散係数が無限大になることを意味しているために、非物理的な振る舞いになることを示している。図4.5.5-1に、4つの提案式のグラフを示す。Kim and Mahntの提案式がもっとも急峻な変化を示し、Munk and Andersonの提案式がもっとも緩やかな変化を示している。また、 R_i が小さい値では、Strang and Fernandoの式が最も大きな値を示している。これら4つの提案式を比較すると安定成層の強さが強くなるにつれて、 σ_t の提案式間の差は大きくなり、それはどの式を用いるかで結果が大きく変化することを意味している。

以上のように、噴流での σ_t 、安定成層における σ_t に関する研究は、過去に多くなされてきた。しかし、上述のように現在の多くの解析では乱流プラントル数、乱流シュミット数はある一定の値で解析され、提案式を実装したような解析例は少数派である。安定成層内でのシュミット数に関しては、格納容器内密度成層に関する解析を高度化するために必要な情報ものとなるだろう。さらに、格納容器内密度成層の鉛直噴流による崩壊に関しては、噴流と成層間の相互作用が存在するので、モデリングに必要な乱流シュミット数や乱流プラントル数を詳細に検討することが解析の更なる向上につながると考えられる。

4.5.5.4. 浮力効果を考慮した乱流モデル

4.4節で述べた格納容器内密度成層挙動解析で用いた浮力効果を考慮した乱流モデルについて述べる。ISP-47では、密度成層内での浮力による乱流の減衰効果の考慮の必要性を述べている。また、そのためには一般的に広く用いられているk-ε型の2方程式乱流モデルからさらに発展した乱流モデルを適用することを提案している。発展モデルの例としては、吉澤らは密度変動の輸送方程式を加えた3方程式モデルを提案している[22, 23]。また、村上らは乱流減衰を表現するためにレイノルズ応力のモデリングにモデル関数を用いる手法を導入している[24]。

一方、香月らは大気安定・不安定な流れ場を解析するために、WETコンセプト(乱流の財産(W)=乱流の収入(E)×時間スケール(T))に基づく比較的シンプルな手法を導入した。以下にその概要を述べる[25]。

WETコンセプトに基づくと、レイノルズ応力は以下のように表現することができる。

$$\underbrace{\langle \rho \rangle [u'_i u'_j]}_{(W)} \cong T \cdot \underbrace{(P_{ij} + G_{ij})}_{(E)} + \frac{2}{3} \langle \rho \rangle k \quad (4.5.5-17)$$

ここで、 P_{ij} と G_{ij} は、それぞれ速度勾配と浮力によるレイノルズ応力の生成項を表現している。浮力効果を考慮しない場合、 k - ε モデルでは以下のようにレイノルズ応力は表現される。

$$\langle \rho \rangle [u'_i u'_j] \cong T \cdot P_{ij} + \frac{2}{3} \langle \rho \rangle k = -\mu_t \left(\frac{\partial [u_i]}{\partial x_j} + \frac{\partial [u_j]}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \langle \rho \rangle k \quad (4.5.5-18)$$

ここで、 μ_t は乱流粘性係数を表している。このモデリングをベースとして、浮力効果を考慮した場合、(4.5.5-19)式のようにレイノルズ応力は表現される。

$$\langle \rho \rangle [u'_i u'_j] \cong T \cdot (P_{ij} + G_{ij}) + \frac{2}{3} \langle \rho \rangle k = \left(1 + \frac{G_{ij}}{P_{ij}} \right) T \cdot P_{ij} + \frac{2}{3} \langle \rho \rangle k \quad (4.5.5-19)$$

さらに、 G_{ij}/P_{ij} の部分は k - ε モデルに適用するために、 $G_{ij}/P_{ij} = G_k/P_k$ と簡略化する。この G_k/P_k は勾配リチャードソン数 R_i に-1を乗じたものと同様であるため、香月モデルは以下のように乱流粘性係数の導出に以下のような形式で浮力効果を組み込んだものといえる。

$$\mu_t = \langle \rho \rangle C_\mu f_\mu \left(1 + \frac{G_k}{P_k} \right) \frac{k^2}{\varepsilon} = \langle \rho \rangle C_\mu f_\mu (1 - R_i) \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.5.5-20)$$

ここで、 f_μ は低 Re 型モデルで現れる減衰関数を表している。

以上のように、簡易的なモデリングであるが、様々な大気安定度を模擬した風洞実験の結果との比較では、従来モデルよりも良好な結果を示している。さらに、安部らがこのモデルを格納容器内での密度成層挙動解析を行うために二成分気体圧縮性気体に適用し、従来モデルと比較した結果、大きな改善を示している[26, 27]。

4.5.5.5. 本事業への反映

格納容器熱水力挙動を安全審査等で解析する際には、目的や特徴に応じて、CFDコードもしくはLPコードを使用する。本事業では、これを踏まえ、それぞれのコード用の解析モデルの検証・改良を行うことにしている。当面、CFD手法の検討に重点おいており、4.5.5.4章で述べたモデルを用いた手法を交付金予算に基づく研究で整備し、その結果を参考に、本年度の事業では4.4.3に示した水平ジェットの解析を行なった。このようなCFD解析の高度化のためには、本章で述べたように、スカラー量の乱流輸送、乱流プラントル数、乱流シュミット数等についての検討が必要であり、今後、既往研究を参考に検討を行う。また、LPコード用モデルに関しても、4.5.5.1章で述べた0-Dモデルや1-Dモデルを参考にし、モデルを整備することを予定している。

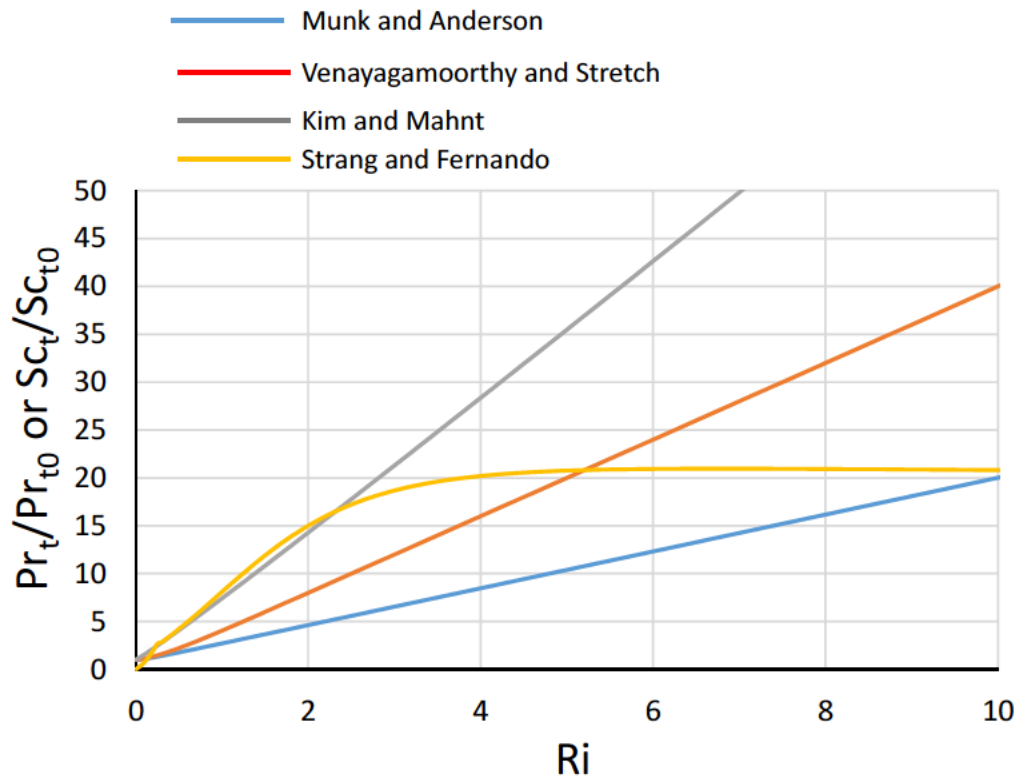


図 4.5.5-1 安定度の変化による乱流シュミット(プラントル)数の変化

4.6. 今後の計画

4.6.1 模擬炉心・スケール実験

模擬炉心実験では、今年度製作した単管炉心伝熱実験装置を用いて、特に BWR 条件におけるドライアウト後のリウエット挙動に関する実験を行う。4.5.2 節で述べたように、リウエット挙動を詳細に解析するためには、二流体三流動場モデルが必須と考えられ、これを高度化するために必要なデータを取得するための実験が必要である。このため、次年度以降、以下に示す内容を順次実施する予定である。

- 定常ドライアウト実験（ステップ状に条件を変化）
- 定常リウエット実験（ステップ状に条件を変化）
- 過渡ドライアウト実験（流量過渡、もしくは、熱出力過渡）
- 過渡リウエット実験（流量過渡、もしくは、熱出力過渡）
- 模擬スパーサの影響
- スプレイ作動等による上方からのリウエット挙動

また、高圧熱流動ループおよび BWR 模擬 4×4 バンドル試験体の製作を行う。製作の第一期として、H28 年度末までに高圧熱水ループに 4×4 バンドル試験体を設置した実験装置を完成する。その後蒸気発生器及び電源設備の増強により、高圧水蒸気二相流ループを完成するとともに、PWR 模擬 5×5 バンドル試験体、斜め管等のスケール実験装置を順次製作・設置する予定である。

スケール実験では、H26 年度までに購入したワイヤーメッシュセンサーを大口径垂直管に設置し、電気抵抗式 4 センサーボイドプローブと相補的に使用することで、垂直管内二相流のボイド率分布、界面速度、界面積濃度を計測し、界面積濃度輸送モデルの高度化に有効なデータの取得を目標とする。

4.6.2 大型格納容器試験

今年度整備した大型格納容器試験装置を用いて、平成 27 年度以降、順次実験を開始する予定である。本章では予定している実験の概要について概略図を用いて説明する。

4.5.2 節で述べたように、大型実験装置を用いた格納容器内熱水力挙動に関する実験は、現在でも欧州を中心とした研究プロジェクトとして展開されており、そこでは水素挙動やソースターム挙動を中心とした実験が実施されている。特に格納容器内の水素挙動に関しては、原子力安全に関連して依然として高い優先順位を持った課題として認識されており、単純体系の密度成層の浸食挙動でさえ良く予測されないという現状がある。本事業では水素リスク並びに格納容器の過温破損に関する熱水力挙動を検討課題とし、事故進展挙動や格納容器健全性を維持するための外部冷却等事故対策の効果を検討するための実験を計画している。

まず、図 4.6.2-1 に示すように、密度成層浸食実験、外部冷却実験、内部冷却実験の 3 種をベース実験として実施する。密度成層浸食実験では従来行われている単純体系での実験から始まり、従来検討が不十分なジェット温度（高い温度）の影響を検討する実験へと繋げる予定である。外部冷却実験では、冷却方法を様々に変え、例えば格納容器の頂部近傍のみ冷却した場合の全体的な冷却効果等、AM 策の有効性評価にも直結した実験を実施する。内部冷却では数種のスプレイノズルによる水流量範囲を大きく変えたパラメータ実験を実施し、スプレイノズルの設計範囲外での冷却効果等、広い範囲で AM の有効性を検討する実験を実施する。

これらの基本的な実験から図 4.6.2-2 に示したような応用的な実験への展開も検討している。成層浸食実験に対しては、特に予測が難しく検討が不十分なパラメータ（二相流や横向き等）の影響の検討や、冷却実験に対しては内部構造物による影響の検討を予定している。また、コンポーネント効果やシステム効果として、除熱源や発熱源を置いたときとの水素・温度分布への影響や、ベント時の水素排気挙動に関する実験も検討する。さらに、図 4.6.2-3 に示すように、長期的な復旧時の AM 策の検討として、窒素置換や蒸気漏洩が継続する中での長期冷却実験も実施する。

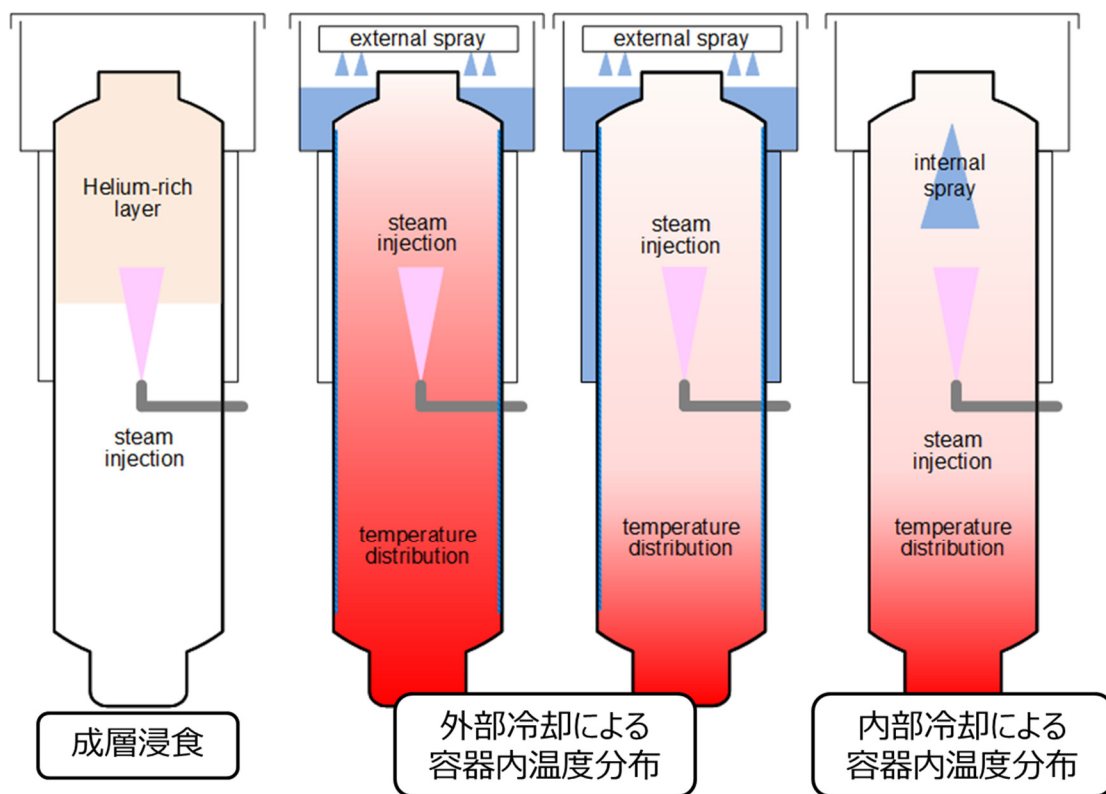


図 4.6.2-1 ベース実験

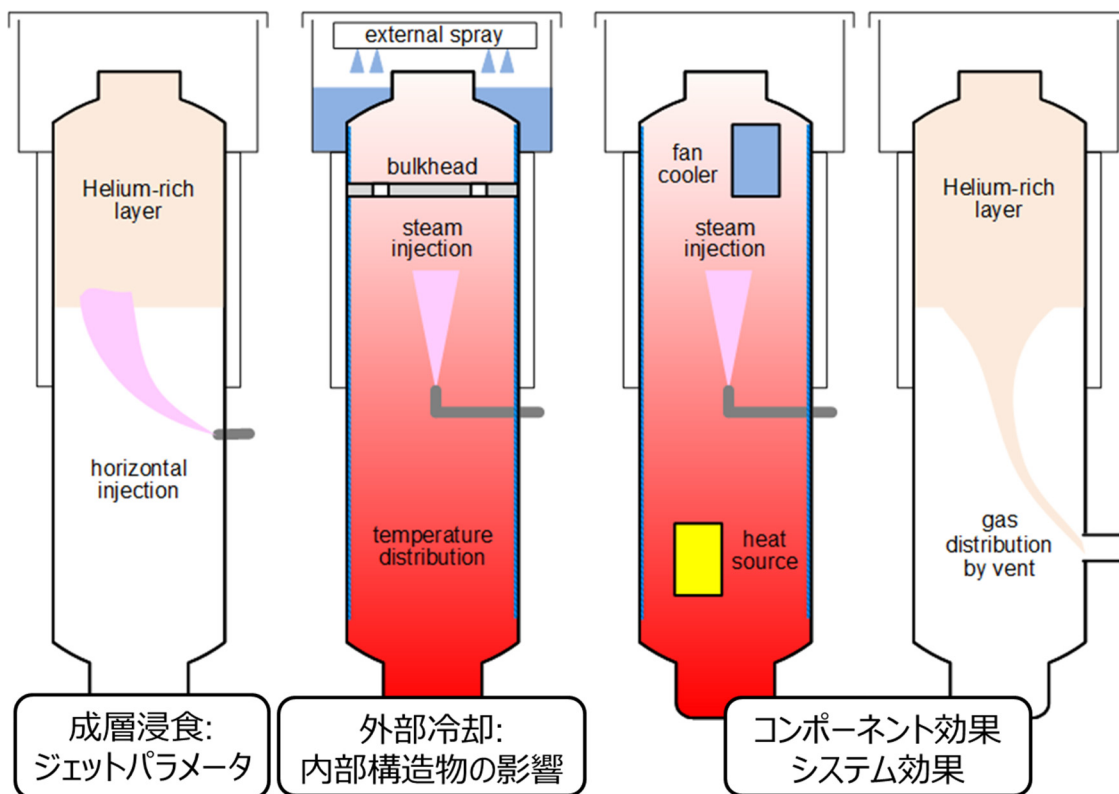


図 4.6.2-2 ベース実験からの展開（基礎実験，コンポーネント・システム効果）

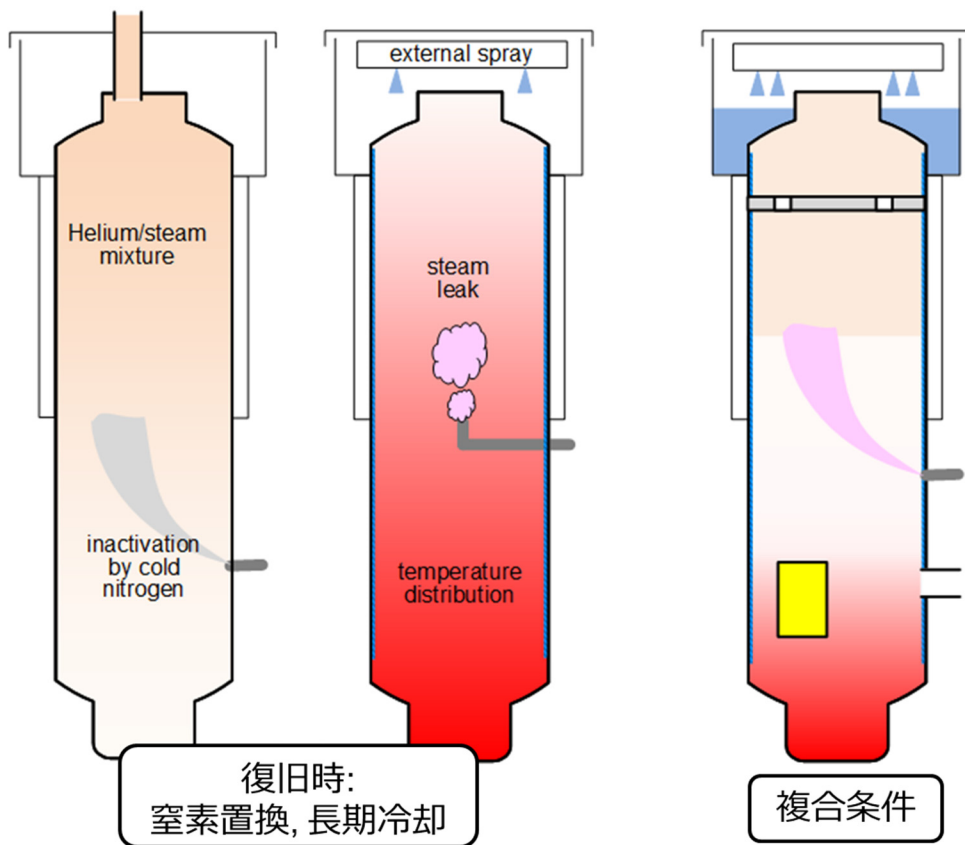


図 4.6.2-3 ベース実験からの展開（復旧時実験，複合条件実験）

5. 結言

本年度の事業では、以下の検討や実験装置等の整備を、計画通りに実施することができた。

1. 原子炉水質管理技術高度化対策事業では、ラジオリシス解析コードの改良及び ECP 解析コードの整備を行うとともに、コードの検証に必要な ECP 測定データをオートクレーブ及び非照射下試験ループを用いて取得した。改良・整備した解析コードの放射線照射環境下における ECP 評価への適用性を確認するため、ノルウェー ハルデン炉で取得された照射下 ECP 測定データを入手するとともに当該データが取得された試験装置をモデル化し、測定値と解析値の比較を行った。また、放射線照射下で生成した酸化皮膜の分析等により得られる情報から、改良・整備した解析コードによる放射線照射環境下における ECP 評価との相関を確認した。さらに、プラント高経年化に対する水化学管理の影響に関して既往知見の調査及び整理を行った。主な結論は以下の通りである。

整備した ECP 解析コードは、非照射下で取得した ECP 測定データ及び文献で報告されている ECP 測定データで検証し、その適用性を確認した。また、ラジオリシス解析コード及び ECP 解析コードを用いてノルウェー ハルデン炉で取得された照射下 ECP 測定データを評価した結果、BWR 模擬環境及び PWR 模擬環境の両方において解析は測定値に対して妥当な結果を与えることを確認した。

表面 SEM 観察及び断面 SEM 観察の結果、試験片表面には緻密な下地層と結晶性の高い表面層の酸化皮膜の形成が認められた。また、ラマン分光分析の結果、試験片の全てにおいて主として NiFe_2O_4 のスペクトルが観察された。照射リグ内の腐食環境を解析で評価した結果、試験片が照射された際の ECP は大凡 200mV-SHE であり、高温での Fe-Ni-Cr 合金の電位-pH 図より $\text{ECP}=200\text{mV-SHE}$ では NiFe_2O_4 が安定に存在することから、水のラジオリシス解析と ECP 解析コードにより評価した ECP は妥当であったと評価した。

PWR の高経年化に対する水質管理の影響について既往知見を調査した結果、Ni 基合金の PWSCC 進展速度に対して溶存水素濃度依存性が認められ、Ni/NiO の平衡水素濃度に起因した被膜安定状態が影響していることが推測された。一方、ステンレス鋼の SCC に対する溶存水素の影響は認められなかった。また、600 合金のき裂進展速度への Zn 注入の影響をき裂進展試験で評価した結果、若干のき裂進展速度の相違は見られたものの Zn 注入の影響は顕著で無かった。

2. 軽水炉の事故時熱流動の調査においては、原子力規制庁による国産事故解析コードの

開発や安全規制での判断等に役立つ最新知見や実験データベースを整備することを主要な目的とし、炉心伝熱、並びに、炉心冷却挙動に強く影響する原子炉システム内の流動挙動のスケーリング効果、さらには、重大事故時の格納容器での熱水力挙動に着目した実験を中心とする研究を実施する。

本年度は、前年度までに作成した事業計画に沿って実験装置の整備、計測手法に係る予備実験の実施、数値流体力学(CFD)手法の検討、文献調査等を実施した。

炉心損傷前の原子炉における熱水力挙動の研究に関しては、広い圧力範囲で基礎的な伝熱実験を実施するための単管炉心伝熱実験装置の主要部分を完成させるとともに、高圧熱流動ループの整備を継続した。また、二相流計測機器や界面面積濃度輸送モデルの整備に役立てるための大口径垂直配管実験を実施した。

炉心損傷後の格納容器における熱水力挙動に関する研究に関しては、大型格納容器実験装置 CIGMA の主要部分を完成させるとともに、ガス濃度計測のための予備実験を実施した。CIGMA 装置では、水素リスクに関する実験とともに、福島第一原発事故で生じたとされる格納容器の過温破損に関する高温実験を実施することが可能である。従来類似の目的を有する実験装置においては、これまで、過温破損に至るような高温での実験はなされておらず、本装置により過温破損に至る事象進展やそれを防止するための事故対応策の有効性、さらには、長期的な格納容器冷却等に関する新たな知見が得られることが期待できる。

また、既往研究の調査を行い、来年度以降の実験内容や装置整備内容に関する検討を実施した。単管炉心伝熱実験装置では、特に、従来原子力機構で実施した運転時の異常な過渡変化時の伝熱挙動に関する研究の成果と技術課題を踏まえ、リウエット時の最大除熱量や液膜挙動に着目した実験を実施する。また、異常過渡に限定せず事故時に想定される広い条件での実験を実施する。スケール実験に関しては、ホットレグの CCFL 挙動に着目し、装置形状等のパラメータ効果が既往研究間で不整合な状況があることを踏まえた実験を実施する。大型格納容器試験装置 CIGMA を用いた実験においては、まず、装置の特性や計測系の精度を把握するための装置特性実験を行い、次に、装置の性能確認も含め、欧州等で行われてきた実験と同様な実験を実施するところから実験研究を開始する。

解析研究に関しては、単管装置や CIGMA 装置の実験の開始に対応し、実験データ解析を開始し、解析モデルの検証・改良を行うとともに、実験条件の策定に活用する。

参考文献

1.1

- [1] 日本機械学会、発電用原子力設備規格 維持規格、JSME S NA-1 2008
- [2] 水化学ロードマップ検討特別専門委員会、水化学ロードマップ、日本原子力学会、(2007)

2.2.3

- [1] 日本原子力学会、BWR における過渡的な沸騰遷移後の燃料健全性評価基準：2003, AESJ-SC-P002:2003 (2003).

3.1.2

- [1] N. Ichikawa, Y. Hemmi and J. Takagi, Precise Evaluation of Corrosion Environments of Structural Materials under Complex Water Flow Condition, (I) Estimation of Corrosion Potentials in Reactor Pressure Vessel Bottom of BWRs, J. Nuclear Science and Technology, 40, 8, PP.583-590 (2003)
- [2] D. D. Macdnald, Viability of Hydrogen Water Chemistry for Protecting In-Vessel Components of Boiling Water Reactors, Corrosion, 48, 3, pp.194-205 (1992)
- [3] M. Hishida, J. Takabayashi, T. Kawakubo and Y. Yamashina, Polarization Curve Measurement in High Purity Water at Elevated Temperatures, Corrosion, 41, 10, pp.570-574 (1985)
- [4] Y. Wada, A. Watanabe, M. Tachibana, N. Uetake, S. Uchida and K. Ishigure, Effect of Hydrogen Peroxide on Intergranular Stress Corrosion Cracking of Stainless Steel in High Temperature Water, (III) Crack Growth Rates in Corrosive Environment Determined by Hydrogen Peroxide, J. Nuclear Science and Technology, 37, 10, pp.901-912 (2000)
- [5] S. Uchida, Y. Morishima, T. Hirose, T. Miyazawa, T. Satoh, Y. Satoh and Y. Wada, Effects of Hydrogen Peroxide on Corrosion of Stainless Steel (VI) – Effects of Hydrogen Peroxide and Oxygen on Anodic Polarization Properties of Stainless Steel in High Temperature Pure Water - , J. Nuclear Science and Technology, 44, 5, pp.758-766 (2007)

3.2.1

- [1] N. Ichikawa, et al., Water Chemistry of Nuclear Reactor System 7, 230 (1996).

3.2.2

- [1] P. Bennett, N. Hogberg, T. M. Karlsen, and Helge Thoresen, In-Core ECP Measurements under LWR Conditions in the Halden Reactor, Proc. 10th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems - Water Reactors-, Lake Tahoe, Nevada, Aug.5-9 (2001).
- [2] 例えば、S. Hettiarachchi, Advances in Electrochemical Corrosion Potential Monitoring in Boiling Water Reactor, Proc. 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems -Water Reactors-, TMS, 3 (2005)

3.3.1

- [1] Y. Wada et al., 2006 International Workshop on Coolant Water Radiolysis and Electrochemistry.
- [2] M. Tachibana et al., Journal of Nuclear Science and Technology, 46, 2, 132 (2009).
- [3] M. Hishida et al., Corrosion, 41, 10, 570 (1985).
- [4] Y. J. Kim et al., Proc. 10th Int. Conf. Env. Deg. Mat. In NPP, Aug. 5-9 2001 (2001).
- [5] C. C. Lin et al., Corrosion, 52, 8, 618 (1996).
- [6] S.Uchida, Y. Wada, N. Uetake and M. Fuse, Prediction of Corrosive Circumstances in BWR RPV Bottom to Evaluate Lifetime of Major Components, Proc. Seminar on Water Chemistry of Nuclear Reactor System '97, 41 (1997)
- [7] Y. Wada, K. Ishida, M. Tachibana, N. Ohta and M. Fuse, Current Status and Issues in ECP Measurement and Evaluation for SCC Mitigation in BWRs, Proc. Zairyo-to-Kankyo 2009, A-110 (2009)

3.3.3

- [1] Y. Wada, S. Yamamoto and H. Takiguchi, Current Status and Issues in ECP

Calculation: Moving toward Standardization, Proc. 6th Workshop on LWR Coolant Water Radiolysis and Electrochemistry, 27 Oct. Jeju, Korea (2006)

- [2] M. U. Macdonald, J. Pitt, D. D. Macdonald, The Impact of Radiolytic Yield on the Calculated ECP in PWR Primary Coolant Circuits, *J. Nuclear Materials*, 362, 1 (2007)

3.3.4

- [1] Y. Wada, A. Watanabe, M. Tachibana, K. Ishida, N. Uetake, S. Uchida, K. Akamine, M. Sambongi, S. Suzuki, K. Ishigure, "Effects of hydrogen peroxide on intergranular stress corrosion cracking of stainless steel in high temperature water, (IV) Effects of oxide film on electrochemical corrosion potential", *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 38, No. 3, 2001, pp. 183-192.
- [2] T. Miyazawa, T. Terachi, S. Uchida, T. Satoh, T. Tsukada, Y. Sato, Y. Wada, H. Hosokawa, "Effects of hydrogen peroxide on corrosion of stainless steel, (V) Characterization of oxide films with multilateral surface analyses", *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 43, No. 8, 2006, pp. 884 - 895.
- [3] Yonggang Lu, Kazuhiko Sakaguchi, Yosuke Tsujimoto, Nozomi Sakurai, Tetsuya Uchimoto, Makoto Takahashi, Yoshiyuki Takagi, Masaharu Kitamura, Tetsuo Shoji, "A system Safety Benchmark facility for SCC Pipe Tests with High and Low Flow Rate Condition and Some Preliminary Test Results in BWR Environment", *Proceedings of 11th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors*, (2003), 805-815, Paper No.60526, in CD-ROM.
- [4] Y. J. Kim, P. L. Andresen, "Data quality, issues, and guidelines for electrochemical corrosion potential measurement in high-temperature water", *Corrosion*, (2003) pp. 584-596.
- [5] T. M. Karlsen, M. Espeland, H. K. Jenssen, N. O. Solum, "Summary on the Investigation of the Effects of Flux / Fluence on the Oxidation Kinetics of 316L and Inconel 600 Materials in the Halden Boiling Water Reactor (IFA-727)", HR-54, March 2010
- [6] T. M. Karlsen, J. Balak, M. Espeland, H. K. Jenssen, N. O. Solum, "Summary Report on the Investigation of the Effects of Exposure Time on the Oxidation Kinetics of 316L and 316LN Stainless Steels in the Halden Boiling Water Reactor (IFA-727. 2), HR-62, June 2011

3.4.1

- [1] 独立行政法人 原子力安全基盤機構、”平成 17 年度 Ni 基合金応力腐食割れ(SCC)進展評価技術調査(定荷重試験)に関する報告書”平成 18 年 7 月
- [2] Journal of the Institute of Nuclear Safety System, Vol.13 2006, p179.
- [3] 小川ら、8th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Systems-Water Reactors
- [4] Peter Bennett, 10th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Systems-Water Reactors
- [5] 水熱科学ハンドブック(1997)
- [6] 山本ら、12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Systems-Water Reactors
- [7] A. Molander, B. Rosborg, J. Svensen, P. O. Andersson, Paper No.48, Water Chemistry for Nuclear Reactor Systems, BNES-4 (1986)
- [8] A. Kishida, H. Takamatsu, S. Isobe, M. Sato, K. Arioka, T. Tsuruta, Proc. 1987 Symp. On Chemistry in High Temperature Water, p.C3g-1, EPRI NP-6005 (1987)
- [9] B. BEVERSKOGT,” REVISED POURBAIX DIAGRAMS FOR ZINC AT 25-300°C”, Corrosion science, Vol 39, No1, pp107-114, 1997

3.4.2

- [1] R.Sunaryo and M.Domae, Numerical Simulation on Effect of Methanol Addition on Coolant Radiolysis in Pressurized Water Reactor, Journal of Nuclear Science and Technology, 45(12) (2008)1261
- [2] M.U.Macdonald et al., The impact of radiolytic yield on the calculated ECP in PWR primary coolant circuits, J. Nucl. Mat. 362(2007)1
- [3] A.J.Elliot and D.M.Bartels, The Reaction Set, Rate Constanta and g-Values for the Simulation of the Radiolysis of Light Water over the Range 20° to 350° Based on Information Available in 2008, AECL 153-127160-450-001 (2009)

4.2.1

- [1] 平成 19 年度燃料等安全高度化対策事業（高精度熱水力安全評価技術調査）に関する報告書、285-290、2008
- [2] Okawa, T., Kotani, A., Shimada, N. & Kataoka, I. Effects of a Flow Obstacle on the Deposition Rate of Droplets in Annular Two-Phase Flow. Journal of Nuclear Science

and Technology 41, 871–879 (2004).

- [3] Okawa, T., Murakami, T. & Takei, R. Rate of droplet deposition in steam–water annular flow and effect of a flow obstacle. Nuclear Engineering and Design 241, 4497–4503 (2011).

4.2.2

- [1] 平成 24 年度原子力発電施設等安全調査研究委託費（原子力発電施設等安全調査）に関する報告書、2014

4.2.3

- [1] Shen, X. & Nakamura, H. Local interfacial velocity measurement method using a four-sensor probe. International Journal of Heat and Mass Transfer 67, 843–852 (2013).
- [2] 佐藤聡 他、「4 センサープローブを用いた大口径垂直管内水-空気二相流の計測」、日本原子力学会 2014 年秋の大会 K20、京都、2014 年 9 月

4.4

- [1] S. Abe, M. Ishigaki, Y. Sibamoto and T. Yonomoto, A study on improvement of RANS analysis for erosion of density stratified layer of multicomponent gas by buoyant jet in a containment vessel, Journal of Energy and Power Engineering, submitted, (2015)
- [2] S. Abe, M. Ishigaki, Y. Sibamoto and T. Yonomoto, RANS analyses on erosion behavior of density stratification consisted of helium-air mixture gas by a low momentum vertical buoyant jet in the PANDA test facility, the third International Benchmark exercise (IBE-3), Nuclear Engineering and Design, submitted, (2015)
- [3] H. J. Allelein, K., Fischer, J., Vendel, J., Malet, E., Studer, S., Schwarz, M., Houkema, H. Paillère, A. Bentaib, International Standard Problem ISP-47 on Containment Thermal-hydraulics, NEA News. 25, 2, 2007
- [4] D. Paladino, G. Mignot, R. Kapulla, R. Zboray, M. Andreani, I. Tkatschenko, E. Studer, J. Brinster, OECD/SETH-2 project: PANDA and MISTRA experiments addressing key safety issues for Water Reactor Containment, The 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-hydraulics, May 12-15,

Pisa, 2013

- [5] D. Paladino, J. Dreier, PANDA: A Multipurpose Integral Test Facility for LWR Safety Investigations. Science and Technology of Nuclear installations. Article ID 239319 9pages, 2012
- [6] R. Kapulla, G. Mignot, S. Paranjape, D. Paladino, Large Scale Gas Stratification Erosion by a Vertical Helium-Air Jet, Science and Technology of Nuclear Installation, 2014, Article ID 197267, 16 pages, 2014
- [7] Michele Andreani, Arnaldo Badillo and Ralf Kapulla, Synthesis of the OECD/NEA-PSI CFD Benchmark Exercise, CFD4NRS-5, Sep. 9-11, Zurich, 2014
- [8] M. Kato, B. E. Launder, The modeling of Turbulent Flow around Stationary and Vibrating Square. 9th Symposium on turbulent shear flows, August, Kyoto, 1993
- [9] 香月 壮亮, 大岡 龍三, 高橋 岳生, 加藤信介, 様々な大気安定度での大気境界層発達に関する風洞実験と数値シミュレーション、日本建築学会環境系論文集、第 74 巻、No. 640、735-743、2009
- [10] M. Escudero Berzal et al., Nuclear science and technology, State-of-the-art review on fission products aerosol pool scrubbing under severe accident conditions, Final report, EUR 16241 EN (1995).
- [11] A. Dehbi, D. Suckow, S. Guentay, Aerosol retention in low-subcooling pools under realistic accident conditions, Nuclear Engineering and Design, 203, pp. 229-241 (2001).

4.5.1

- [1] Wallis, G.B., One-dimensional Two-phase Flow. McGraw-Hill., (1969).
- [2] Al Issa, S. & Macian, R. A review of CCFL phenomenon. Annals of Nuclear Energy 38, 1795–1819 (2011).
- [3] Navarro, M.A., Study of countercurrent flow limitation in a horizontal pipe connected to an inclined one. Nucl. Eng. Des. 235, 1139–1148, (2005).
- [4] Kang, S.-K., Chu, L.-C., NO, H.C., Chun, M.-H., 1999. Air–water countercurrent flow limitation in a horizontal pipe connected to an inclined riser. J. Kor. Nucl. Soc. 31 (6), 548–560.
- [5] Choi, K.Y., No, H .C., 1995. Experimental studies of flooding in nearly horizontal pipes. Int. J. Multiphase Flows 21 (3), 419.
- [6] Ohnuki, A., 1986. Experimental study of counter-current two-phase flow in horizontal tube connected to inclined riser. J. Nucl. Sci. Technol. 23, 219–232.

- [7] Wongwises, S., 1996. Two-phase countercurrent flow in a model of a pressurized water reactor hot leg. *Nucl. Eng. Des.* 166, 121–133.
- [8] Ghiaasiaan, S.M., Turk, R.E., Abdel-Khalik, S.I., 1994. Countercurrent flow limitation in inclined channels with bends. *Nucl. Eng. Des.* 152, 379–388.
- [9] De Bertodano, M.L., 1994. Counter current flow gas–liquid flow in a pressurized water reactor hot leg. *Nucl. Sci. Eng.* 117, 126–133.
- [10] Ohnuki, A., Adachi, H., Murao, Y., 1988. Scale effects on countercurrent gas-liquid flow in a horizontal tube connected to an inclined riser. *Nucl. Eng. Des.* 107, 283–294.
- [11] Deendarlianto, Vallée, C., Lucas, D., Beyer, M., Pietruske, H., Carl, H., 2008. Experimental study on the air/water counter-current flow limitation in a model of the hot leg of a pressurized water reactor. *Nucl. Eng. Des.* 238, 3389–3402.
- [12] Vallée, C., Seidel, T., Lucas, D., Beyer, M., Prasser, H.-M., Pietruske, H., Schütz, P., Carl, H., 2009. Counter-current flow limitation experiments in a model of the hot leg of a pressurised water reactor - comparison between high pressure steam/water experiments and low pressure air/water experiments. In proceedings of the 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH13), 27.09–2.10.2009, Kanazawa, Japan, Paper N13P1107.
- [13] Mayinger, F., Weiss, P. & Wolfert, K. Two-phase flow phenomena in full-scale reactor geometry. *Nuclear Engineering and Design* 145, 47–61 (1993).
- [14] Minami, N., Nishiwaki, D., Nariai, T., Tomiyama, A. & Murase, M. Countercurrent Gas-Liquid Flow in a PWR Hot Leg under Reflux Cooling (I) Air-Water Tests for 1/15-Scale Model of a PWR Hot Leg. *Journal of Nuclear Science and Technology* 47, 142–148 (2010).
- [15] 南 則敏、村瀬 道雄、富山 明男、リフラックス冷却時のホットレグにおける気液対向流挙動に関する研究、*INSS JOURNAL*, Vol.17(2010), pp331-343.
- [16] Al Issa, S. & Macian-Juan, R. Experimental investigation of countercurrent flow limitation (CCFL) in a large-diameter hot-leg geometry: A detailed description of CCFL mechanisms, flow patterns and high-quality HSC imaging of the interfacial structure in a 1/3.9 scale of PWR geometry. *Nuclear Engineering and Design* (2014).

4.5.2

- [1] Domenico Paladino and Isabelle Tkatschenko, HYMERS: Hydrogen Mitigation Experiments for Reactor Safety, Investigation of complex safety-related scenarios of high relevance for LWR containment thermal-hydraulics, 17 June 2011,

4.5.3

- [1] 日本原子力学会, BWR における過渡的な沸騰遷移後の燃料健全性評価基準 : 2003, AESJ-SC-P002:2003 (2003).
- [2] Sibamoto et al., Measurement and analysis for rewetting velocity under post-BT conditions during anticipated operational occurrence of BWR, J. Eng. Gas Turbines Power, 132, pp.102909-1-8 (2010).
- [3] Sibamoto et al., Rewetting Front Propagation under Anticipated Operational Occurrences for BWRs - Development of Two-dimensional Analytical Model -J. Nucl. Sci. Technol., 50(2), pp.148-159 (2013).
- [4] Sibamoto et al., J. Nucl. Sci. Technol., 48(3), Core heat transfer coefficients immediately downstream of the rewetting front during anticipated operational occurrences for BWRs, pp.440-453 (2011).
- [5] 与能本泰介ら、BWR 異常過渡における沸騰遷移後のリウエット速度 バンドル実験の数値解析、日本原子力学会 2015 年春の年会.

4.5.4

- [1] 平成 24 年度原子力発電施設等安全調査研究委託費 (原子力発電施設等安全調査) に関する報告書 (2014)
- [2] 平成 25 年度原子力発電施設等安全調査研究委託費 (原子力発電施設等安全調査) に関する報告書 (2014)
- [3] Rayleigh, L., On the instability of jets, Proceeding of the London mathematical society, 10 (1878), 4-13
- [4] Squire, H. B., Investigation of the instability of a moving liquid film, British Journal of Applied Physics, 4 (1953), 167-169
- [5] Lin, S. P., Stability of a viscous liquid curtain, Journal of Fluid Mechanics, 104 (1981), 111-118
- [6] Li, X., Spatial Instability of Plane Liquid Sheets, Chemical Engineering Science, 48, 16 (1993), 2973-2981
- [7] Li, X., and Bhunia, A., Temporal Instability of Plane Gas Sheets in a Viscous Liquid Medium, Physics of Fluids, 8, 103 (1996), 103-111
- [8] Li, X., and Bhunia, A., Instability of Plane Compressible Gas Sheets, Acta Mechanica, 123 (1997), 117-133

- [9] Shen, J., and Li, X., Instability of cylindrical compressible gas jets in viscous liquid streams, *Acta Mechanica*, 130 (1998), 95-110
- [10] Parthasarathy, R. N., and Chiang, K-M, Temporal instability of gas jets injected in viscous liquids to three-dimensional disturbances, *Physics of Fluids*, 10 (1998), 2105-2107
- [11] Bolaños-Jiménez, R., Sevilla, A., Gutiérrez-Montes, C., Sanmiguel-Rojas, E., and Martínez-Bazan, C., Bubbling and jetting in planar coflowing Air-Water Sheet, *J. Fluid Mech.*, 682 (2011), 519-542
- [12] Gutiérrez-Montes, C., Bolaños-Jiménez, R., Sevilla, A., and Martínez-Bazan, C. Experimental and Numerical Study of the Periodic Bubbling Regime in Planar Co-Flowing Air-Water Sheets, 50 (2013), 106-119
- [13] Crapper, G. D., Dombrowski, N., and Pyott, G. A. D., Kelvin-Helmholtz wave growth on cylindrical sheets, *Journal of Fluid Mechanics*, 68, 3 (1975), 497-502

4.5.5

- [1] Haihua Zhao and Per F. Peterson, An overview of Modeling Methods for Thermal Mixing and Stratification in Large Enclosures for Reactor Safety Analysis, The 8th International Topical Meeting and Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (Nuthos-8), Shanghai, China, October 10-14, (2010)
- [2] J. Christensen and P. F. Peterson, A One-Dimensional Lagrangian Model for Large-Volume Mxing, *Nuclear engineering and design*, Vol. 204, pp. 299-320 (2001)
- [3] M. Povilaitis, E. Urbonavicius and S. Rimkevicius, Modeling of atmosphere stratification in contianments of nuclear power plants using lumped-parameter code, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 241, pp. 3111-3120, (2011)
- [4] Michele Anderson, Ralf Kapulla, Robert Zboray, Gas stratification break-up by a vertical jet: Simulation using the GOTHIC code, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 249, pp. 71-81, (2012)
- [5] Ante Hultgren, Ignacio Gallego-Marcos, Walter Villanueva and Pavel Kudinov, Large Scale Erosion of a Helium Stratified Layer by a Vertical Jet Using the GOTHIC Code, The 10th International Topical Meeting and Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (Nuthos-10), Oknawa, Japan, December 14-18, (2014)
- [6] Bart J. Daly and Francis H. Harlow, Transport equation in turbulence, *The physics of Fluid*, 13, 11, 2634-2649 (1970)

- [7] Rajesh Kumar and Anupam Dewan, URNAS computation with buoyancy corrected turbulence models for turbulent thermal plume, *International journal of heat and mass transfer*, 72, 680-389, (2014)
- [8] K. Abe and K. Suga, Towards the development of a Reynolds-averaged algebraic turbulence scalar-flux, *International journal of heat and fluid flow*, 22, 19-29 (2001)
- [9] Riccardo Rossi, A numerical study of algebraic flux models for heat and mass transport simulation in complex flows, *international journal of heat and mass transfer*, 53, 4511-4524 (2010)
- [10] Riccardo Rossi and Gianluca Iaccarino, Numerical simulation of scalar dispersion downstream of a square obstacle using gradient-transport type model, *Atmospheric environment*, 43, 2518-2531, (2009)
- [11] 大宮司久明、三宅裕、吉澤徴 編、乱流の数値流体力学 ~モデルと計算法~, 東京大学出版会、1998
- [12] 若尾泰文、川村洋、平行平板間乱流における線形性原理に基づくスカラ輸送のモデリング、*日本機械学会論文集(B編)*、第 62 巻、3934-3942、1996
- [13] A. J. Reynolds, The prediction of turbulent prandtl and Schmidt numbers, *International Heat and Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 1055-1069, (1975)
- [14] Yimer, I., Campbell, I., Jiamg, L. Y., Estimation of the turbulent Schmidt number from experimental profile of axial velocity and concentration for High-Reynolds-Number Jet flows, *Canadian Aeronautics and Space Journal*, Vol. 48, pp. 195-200, (2002)
- [15] A. J. Reynolds, The Variation of Turbulent Prandtl and Schmidt numbers in Wakes and jets, *International Heat and Mass Transfer*, Vol. 19, pp. 757-764 (1976)
- [16] Zachary A. Elliott and Subhas K. Venayagamoorthy, Evaluation of turbulent Prandtl (Schmidt) number parameterizations for stably stratified environmental flows, *Dynamics of Atmosphere and Oceans*, 51, 137-150, (2011)
- [17] Munk, W. H. and Anderson, E. R., Notes on a theory of the thermocline, *Journal of Marine Research*, 7, 276-295, (1948)
- [18] R. Morel, A. Laassibi, E. Alcaraz, R. Zegdi, G. Brun and D. Jeandel, Validation of a $k-\epsilon$ model based on experimental results in a thermally stable stratified turbulent boundary layer, *international journal of heat and mass transfer*, 35, 2717-2724 (1992)
- [19] Venayagamoorthy, S. K., and Strerch, D. D., On the turbulent Prandtl number in homogeneous stably stratified turbulence, *Journal of Fluid Mechanics*, 644, 359-369, (2010)

- [20] Kim, J. and Mahrtr, L., Simple formulation of turbulent mixing in the stable free atmosphere and nocturnal boundary layer, *Tellus* 44A, 3811-394, (1992)
- [21] Strang, E. J., Fernando, H. J. S., Vertical mixing and transports through a stratified shear layer, *Journal of physics Oceanography*, 31, 2026-2048, (2001)
- [22] A. Yoshizawa, Statistical modeling of turbulent thermally buoyant flows. *Journal of Physics Society of Japan*, Vol. 55, pp. 3066-3072, (1986)
- [23] A. Yoshizawa, A. Statistical analysis of compressible turbulent shear flows with special emphasis on turbulent modeling. *Physical Review A*, Vol. 46, pp. 3292-3306, (1992)
- [24] S. Murakami, S. Kato, T. Shikamoto, D. Laurence and D. Blay, New low-Reynolds-number $k\text{-}\epsilon$ model including damping effect due to buoyancy in a stratified flow field. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 3483-3496, (1996)
- [25] 香月壮亮、大岡 龍三、高橋 岳生、加藤 信介、様々な大気安定度での大気境界層に関する風洞実験と数値シミュレーション、*日本建築学会環境系論文種*、第 74 巻、第 640 号、pp. 735-743, (2009)
- [26] S. Abe, M. Ishigaki, Y. Sibamoto and T. Yonomoto, A study on improvement of RANS analysis for erosion of density stratified layer of multicomponent gas by buoyant jet in a containment vessel, *Journal of Energy and Power Engineering*, submitted, (2015)
- [27] S. Abe, M. Ishigaki, Y. Sibamoto and T. Yonomoto, RANS analyses on erosion behavior of density stratification consisted of helium-air mixture gas by a low momentum vertical buoyant jet in the PANDA test facility, the third International Benchmark exercise (IBE-3), *Nuclear Engineering and Design*, submitted, (2015)

用語の解説

原子炉水質管理技術高度化対策事業

BWR	Boiling Water Reactor : 沸騰水型原子炉
PWR	Pressurized Water Reactor : 加圧水型原子炉
ECP	Electrochemical Corrosion Potential : 腐食電位。材料の腐食環境を表す指標。
ハルデン炉	ノルウェーエネルギー研究所が有する試験炉。燃料や材料の照射研究に使用され、既に 50 年以上の歴史を持つ。
照射リグ	ハルデン炉で照射試験を行うための、照射試料等を装荷するための機器。
ブースター燃料	ハルデン炉で実施する照射技術のひとつ。照射試験部位の照射環境を最適にするため、圧力フラスク内に燃料を配置する。試験の目的に合わせ、燃料の濃縮度も変えることができる。
照射試験ループ	ハルデン炉内で燃料や材料の照射試験を行う際に、試験部に高温高圧水を供給する装置
PWSCC	PWR 1 次冷却水中の環境下における応力腐食割れ : Primary Water Stress Corrosion Cracking
吸収線量率	単位時間あたり単位体積の物質が放射線の照射によって吸収するエネルギー
ブースター燃料	ハルデン炉で実施する照射技術のひとつ。照射試験部位の照射環境を最適にするため、圧力フラスク内に燃料を配置する。試験の目的に合わせ、燃料の濃縮度も変えることができる。
オートクレーブ	高温高圧水環境下で材料試験等を行うための装置
圧力フラスク	ハルデン炉で BWR、PWR の圧力環境を模擬する際の容器で、圧力フラスク内に照射リグが装荷される。
DH	Dissolved Hydrogen
ECP センサー	材料の腐食電位を測定するための計測器であり、標準水素電極電位として値を与える測定上の基準となる。
PDM	CT 試験片に直流交番電流を印加して電位差を測定し、き裂の進展に伴う試験片の残存面積をモニターする方法 Potential Drop Method、DC ポテンシャルとも。
AECL	カナダ原子力公社(Atomic Energy of Canada Limited)
ダウンカマー	加圧水型原子炉(PWR)や沸騰水型原子炉(BWR)で、炉容器内壁と炉心槽(炉心シュラウド)間の円環上の空間をいう。定常運転時に、ダウンカマーでの原子炉冷却水の流れは下向きである。

軽水炉の事故時熱流動の調査

ATHLET	Analysis of THERmal-hydraulics of LEaks and Transients : ドイツ GRS が開発した最適評価コード。
BT	Boiling Transition ; 沸騰遷移。液体が沸騰する過熱面が濡れている状態から乾いた状態に遷移すること。炉心冷却の状態と対応している。通常、BWR で用いる用語で、PWR では、核沸騰限界 DNB と呼ばれる。
CATHARE	フランス CEA が開発した最適評価コード
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives : フランスの原子力・代替エネルギー庁
CFD コード	Computational Fluid Dynamics : 数値流体力学コード。極めて小さな検査体積における保存則の計算に基づく詳細解析コード
CHF	Critical Heat Flux : 限界熱流束。沸騰曲線における熱流束の極大値。
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH : 原子力安全協会。ドイツの原子力専門機関。
IRSN	放射線防護原子力安全研究所。フランスの原子力安全・放射線防護総局 DGSNR の支援組織
ISP	International Standard Problem : 国際標準問題。ある組織や機関が原子力の安全上重要な現象に関する問題の設定と実験データの提供を行い、各国の研究者が異なるコンピュータプログラムで独自に問題を解決する国際協力プログラム。
JNES	原子力安全基盤機構。現在、原子力規制庁。
KAERI	Korea Atomic Energy Research Institute : 韓国原子力研究院。
KINS	Korea Institute of Nuclear Safety : 韓国原子力安全技術院。
LDV	Laser Doppler Velocimetry : レーザードップラー流速計。2本のレーザー光を交差させて干渉縞を作り、流体中の粒子が干渉縞を通過する際の散乱光を受光することで流体速度を計測する。
LES	Large Eddy Simulation : 計算格子より大きい渦をすべて計算し、格子以下の小さい渦をモデル化する乱流解析手法。
LP コード	Lumped parameter : 集中定数系コード。比較的大きな体積における保存則の計算に基づく解析コード。安全解析に使用する RELAP5 や MELCOR 等の最適評価コードが該当する。
MARS	Multi-dimensional Analysis of Reactor Safety. KAERI が開発した最適評価コード
MISTRA	フランス CEA が所有する格納容器実験装置。体積は 100m ³ 。

NRI	Nuclear Research Institute Rez plc : チェコの国立研究所.
OECD/NEA/WGAMA	経済協力開発機構/原子力機関/事故の解析と管理に関するワーキンググループ
PANDA	PSI が所有する格納容器実験装置。体積は 460m ³ 。
PAR	Passive Autocatalytic Recombiner : 静的触媒型再結合器。電源等を必要とせず、水素ガスを酸素と再結合させ無害な水に戻す装置。
PCT	Peak Cladding Temperature : 燃料棒被覆管表面最高温度。
PIV	Particle Image Velocimetry : 粒子画像流速計。流れに多数の粒子マーカーを注入し、粒子の運動が局所の流体運動と同一であることを仮定して流体速度を計測する手法。レーザーシート内で散乱体となる粒子が光を反射し、それをカメラで撮影して粒子の移動量を測定する。
Post-BT	Post- Boiling Transition : 沸騰遷移が生じた後の過熱面が乾いた状態。
PSI	Paul Scherrer Institute : スイスポールシェラー研究所。
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation : ナビエ=ストークス方程式にレイノルズ平均 (流れ場を表す物理量をアンサンブル平均値とそこからの変動分の和で表す処理) を適用して算出された方程式を数値的に解く手法。
RELAP5	NRC が開発した最適予測コード。
ThAI	ドイツの Becker Technologies GmbH が運転する格納容器実験装置。体積は 60m ³ 。
TRACE	NRC が開発した最適予測コード
UNIPI	イタリアのピサ大学
V&V	Verification and validation : 解析コードの妥当性評価のこと。通常、verification は、数値解析に係る数学的な妥当性を、validation は実験と比較し検討される妥当性をいう。その際、単に実験と解析の比較だけでなく、実験の実機模擬性 (スケール効果) も考慮して妥当性を検討する。
VOF 法	Volume of Fluid 法 : 界面捕獲法の一つであり、各計算格子の流体の体積占有率 (流体率) を移流させて気液界面の移動を表現する。
数値解析ソルバー	数値解析コードが有する一般的な機能のうち、保存則を連立して解く数値計算機能を実装するコード。
スケーリング(スケー	実機と実験装置の大きさ (スケール) 等の違いの影響を工学的に

ル) 実験
二流体モデル

検討するための実験.
流れ場を平均化し、巨視的に気液二相流を表現する二相流モデル
の一つ.

照射場で生成した酸化皮膜に関する研究
成果報告書

目 次

1. 緒言.....	1
2. 実施内容.....	1
2.1 試験片の選定.....	1
2.2 表面酸化皮膜分析.....	1
3. 実施方法.....	1
3.1 試験片の選定.....	1
3.2 表面酸化皮膜分析.....	1
3.2.1 表面 SEM	1
3.2.2 ラマン分光.....	1
3.2.3 断面 SEM	2
4. 実施結果.....	3
4.1 試験片の選定結果.....	3
4.2 表面酸化皮膜分析結果.....	3
4.2.1 表面 SEM	3
4.2.2 ラマン分光.....	4
4.2.3 断面 SEM	4
5. 考察.....	70
6. 結論.....	76
7. 参考文献.....	76

1. 緒言

本委託研究は、ノルウェー・ハルデン炉の照射リグを利用して放射線分解水質条件下で浸漬試験したステンレス鋼(316L鋼)の表面酸化皮膜の性状を詳細に分析し、水のラジオリシス評価結果の妥当性検証に資するための知見を得ることを目的とする。

2. 実施内容

2.1 試験片の選定

ハルデン炉照射リグにて浸漬試験したステンレス鋼等試験片の中から、試験に用いた照射リグ内の放射線フラックス分布、水質条件、試験片の装荷位置等を参考に、表面酸化皮膜分析を行う試験片を選定する。

2.2 表面酸化皮膜分析

水のラジオリシス評価結果の妥当性検証に資することを勘案して分析方法の検討を行う。その上で、ホットラボにおいて選定した試験片表面に形成した酸化皮膜の分析を行い、高温水中における酸化皮膜の安定性等との関連性を検討する。

3. 実施方法

3.1 試験片の選定

ハルデン炉照射リグにて浸漬試験したステンレス鋼等試験片の中から、試験に用いた照射リグ内の放射線フラックス分布、水質条件、試験片の装荷位置等を参考に、表面酸化皮膜分析を行う試験片を選定する。

3.2 表面酸化皮膜分析

照射下酸化皮膜観察は水化学との関連を検討するため、表面SEMによる表面酸化物変化の観察(高電位酸化物、ヘマタイト等の検出)、ラマン分光による表面酸化物の同定(高電位酸化物の同定)及び断面SEMによる金属/酸化物界面の酸化局在化の評価を行った。

3.2.1 表面 SEM(Surface SEM)

表面SEM観察は全ての平板試験片に対して実施した。実施内容は以下である。

- (1)目視観察用に両面(サイドA及びサイドB)を写真撮影した。
- (2)概観観察用に両面(サイドA及びサイドB)を低倍率SEM(倍率x12)で観察し写真撮影した。
- (3)微視観察用に両面(サイドA及びサイドB)の代表的な3か所について高倍率SEM(倍率x250, x1000, x2000 及び x4000)で観察し写真撮影した。

3.2.2 ラマン分光(Raman spectroscopy)

ラマン分光分析は平板試験片ID 3、5及び7の3つの試験片を除く全ての試験片に対して実施した。3つの試験片に対してラマン分光分析が出来なかったのはラマン装置の故障による。ラマン分光には100倍の対象個所が使用された。また以下のパラメーターが設定された。

- Integration time: 2000 ms
- Average number: 3
- Time multiply: 15

ラマン分光分析は各平板試験片の両面(サイドA及びサイドB)に実施された。それぞれのサイドで3つのスペクトルを取った。分析個所は表面SEM観察時に選定した代表的な3か所に隣接した個所とした。

3.2.3 断面SEM(Cross section SEM)

断面SEM観察は全ての平板試験片に対して実施した。実施内容は以下である。

- (1)倍率 x20-25 の 2-3 の画像から構成される 1 つの概観画像
- (2)12 個の詳細画像:低倍率及び高倍率における 3つの代表的領域からの SEI(二次電子像) and BEI(反射電子像)顕微鏡写真
- (3) 5 つの BEI(反射電子像)顕微鏡写真から構成される断面の全体像

図3.1は、試験片の樹脂埋めの方法を示す。試験片は 10° の角度を持たせた試験片ホルダーに試験片のサイドBが下向きになるようにセットする。試験片とホルダーをエポキシ樹脂に埋め込み、下側から研磨する。従って、サイドBの酸化皮膜の断面がSEMで観察される。酸化皮膜厚さは観察された厚さに $\sin 10$ を乗じて計算される。

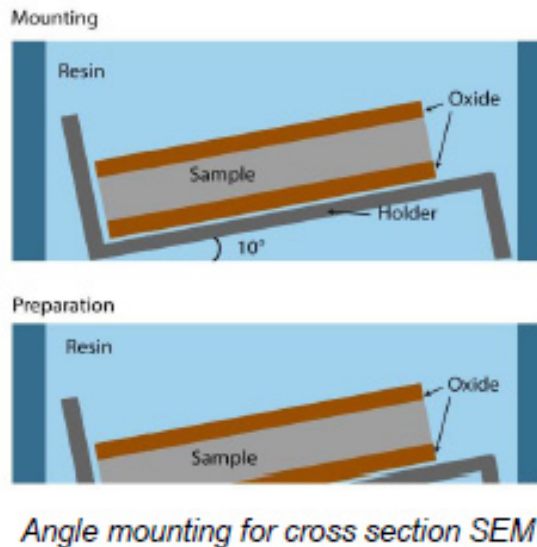


図 3.1 研磨する平板試験片の樹脂埋め方法

4. 実施結果

4.1 試験片の選定結果

ハルデン炉照射リグにて浸漬試験したステンレス鋼等試験片の中から試験に用いた照射リグ内の放射線フラックス分布、水質条件、試験片の装荷位置等を参考に表面酸化皮膜分析を行う試験片を選定した。

まず試験片材料には本事業がステンレス鋼を対象としているので316Lオーステナイトステンレス鋼を選定することにした。その上でハルデン炉における照射試験状況を調査した結果、試験リグ番号IFA-727.1及びIFA-727.2において2009年と2010年に代表的なBWR条件下(溶存酸素2 ppm、温度287℃)でかつ低、中及び高中性子束の領域で照射された316L鋼試験片がありかつハルデン炉シェラーホットラボに保管されていることが分かったのでそれらの中から本事業目的に合致する試験片を選定対象とすることにした。

図4.1(1)、(2)は、試験リグ番号IFA-727.1及びIFA-727.2における試験片の装荷位置並びに相対的ガンマフラックス分布を示す。相対的ガンマフラックスレベルで大略3条件となる図中に示した①、②及び③のフラックスレベルに対応する試験リグ内での位置に装荷された試験片ID番号1、3、5、-1、-3、-5及び-7の7つの316L試験片を選定した。

表4.1は、選定した316Lオーステナイトステンレス鋼の化学成分を示す。また、表4.2 に選定した316L試験片の中性子束、浸漬時間を示す。試験片ID番号1、3及び5は中性子束レベルの影響をみる目的で選定された試験片である。高レベルで $2.9 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV}$ 、中レベルで $5 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV}$ 、低レベルで $3 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV}$ であった。また、中性子束高レベル条件($2.5 \sim 3.2 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV}$)において生成酸化皮膜に及ぼす浸漬時間(照射時間)の影響を確認する目的でそれぞれ浸漬時間が528、864、1181及び2572時間の試験片ID番号-1、-3、-5及び-7を選定した。ラジオリシス・ECP解析は時々刻々の環境評価であり時間積分の概念は無い。高中性子束条件において生成酸化皮膜に経時変化のないことが確認されればラジオリシス・ECP解析結果の妥当性評価に寄与することが出来ると考えた。

4.2 表面酸化皮膜分析結果

表面SEM、ラマン分光分析及び断面SEMに関する結果を以下にまとめる。

4.2.1 表面SEM(Surface SEM)

表面SEM顕微鏡写真を図4.2(1)・4.2(70)に示す。全ての表面はつかみ治具によりある程度のひっかき痕があった。酸化皮膜層はそのような箇所(例えば Sample 3, side A position 1, 図4.2(13))において損傷していた。

平板試験片の表面は小さな($\approx 1\mu\text{m}$)結晶体が密集したかなり均質の形態であった。いくつかの箇所において試験片ID番号-3のサイドAの位置1に見られるように点在したより大きな結晶体($\approx 3\mu\text{m}$)が示された。(図4.2(43))。またいくつかの箇所、例えば試験片ID番号1のサイドAの位置1(図4.2(3))、試験片ID番号5サイドAの位置2(図4.2(24))及び試験片ID番号-7サイドAの位置1(図4.2(63))において密集した結晶体に覆われたあるいは埋もれた薄く脆い平板状の構造体があった。

4.2.2 ラマン分光(Raman spectroscopy)

図4.3(1)–4.3(12) はラマン分光スペクトルを示す。試験片ID番号1サイドAの位置2(図4.3(1))のスペクトルは低い強度を示した。この場合はおそらくレーザー光線が少なくとも酸化物が表面から剥がれた部分に当たったためと思われる。

形成された酸化物の同定には、図4.4に示した種々の酸化物の標準試薬粉末から得られたラマンスペクトルを用いた。各酸化物の主ピーク位置ならびに複数のピーク高さの比率から酸化物を同定した。分析した316L平板試験片(試験片ID番号1, -1, -3 及び -5)の全てのラマンスペクトルにおいて試験片ID-3サイドBの位置1 (図4.3(8))に示される Cr_2O_3 の一例を除いて NiFe_2O_4 が同定された。

なお、ラマン装置の故障により分光分析が出来なかった試験片ID番号3、5及び-7の3つの試験片についてはハルデン炉において同様な条件下で照射、浸漬された316L試験片に対するラマン分析結果を引用することにした。^{[1],[2]}

4.2.3 断面SEM(Cross section SEM)

低角度断面SEM画像を図4.5(1)–4.5(28) に示す。それぞれの図中には、各断面から推定された基材、酸化皮膜、試験片外表面ならびにエポキシの部位を併せて示す。

低角度断面SEM画像においてエポキシ樹脂層は試験片のサイドB上で極めて薄いのでエポキシのはく離がいくつかの個所で生じている。その結果、表面からいくつかの酸化結晶体が観察される。いくつかの場合、エポキシの大きな部分が分離して試験片準備中に表面酸化結晶体の部分が浸漬された可能性がある。このような個所においては研磨布の繊維が接触してこれらの表面酸化結晶体を研磨した可能性がある。その結果、酸化物の断面における長さは本当の長さよりも大きくなった可能性がある。

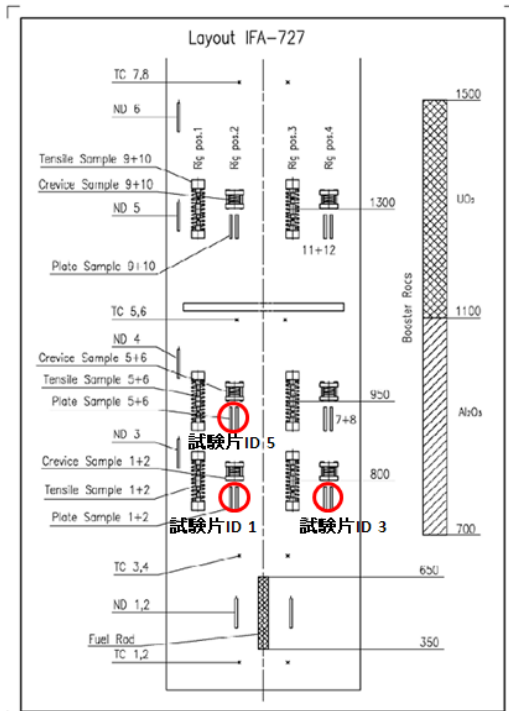
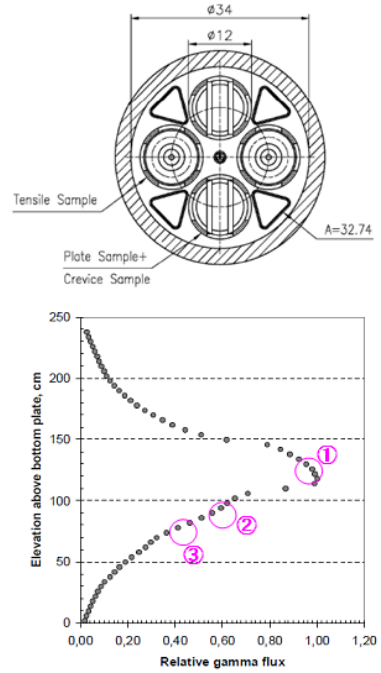


Figure 6 Schematic of specimen layout in IFA-727



平板試験片の位置とフラックスレベル

①：高レベル、②：中レベル、③：低レベル

図 4.1(1) 試験リグ番号 IFA-727.1 における平板試験片の装荷位置とフラックスレベル並びに選定した 316L 平板試験片

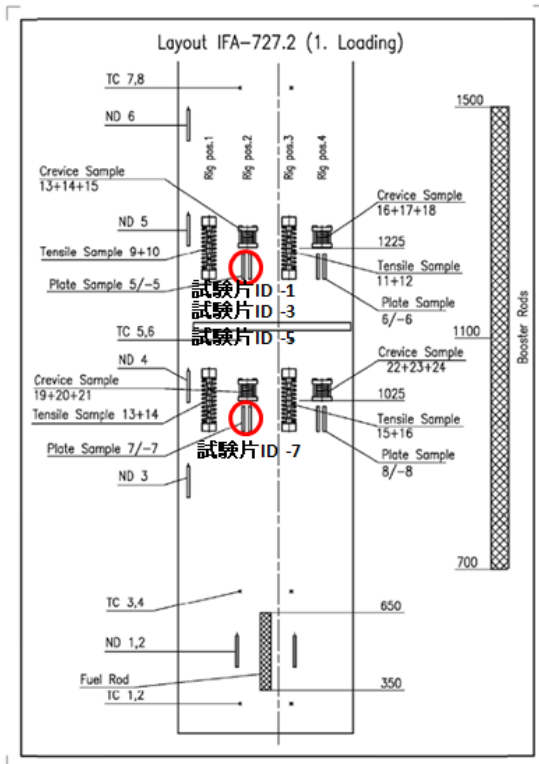


Figure 5 Schematic of specimen layout in IFA-727

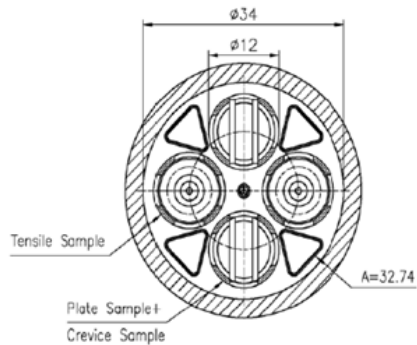


図 4.1(2) 試験リグ番号 IFA-727.2 における平板試験片の装荷位置とフラックスレベル並びに選定した 316L 平板試験片

表 4.1 選定した 316L 鋼の化学成分 (wt %)

	C	Si	Mn	P	Ni	Cr	Mo	N
316L	0.018	0.47	0.82	0.028	12.06	17.68	2.17	0.039

表 4.2 選定した 316L 試験片の中性子束、浸漬時間

	材料	中性子束 (n/cm ² /s>1 MeV)	浸漬時間(h)
1	316L	3×10^{12}	2233
3	316L	5×10^{12}	2233
5	316L	2.9×10^{13}	2233
-1	316L	2.5×10^{13}	864
-3	316L	2.8×10^{13}	528
-5	316L	2.8×10^{13}	1181
-7	316L	3.2×10^{13}	2572

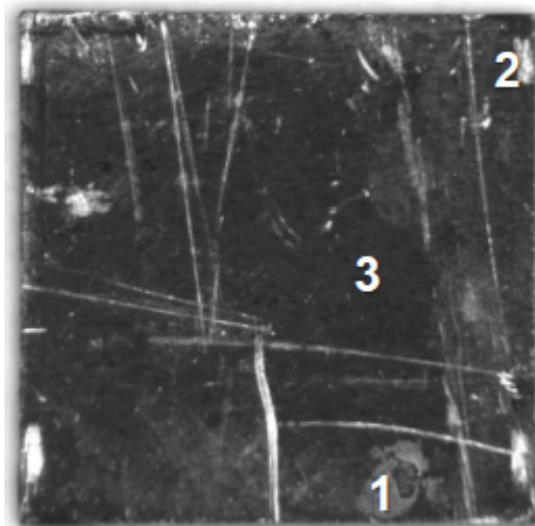


Figure 1 IFA-727.1: Macrograph of specimen Plate 1 side A 316L

図 4.2(1) 316L 平板試験片 ID 番号 1 サイド A の顕微鏡全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $3 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

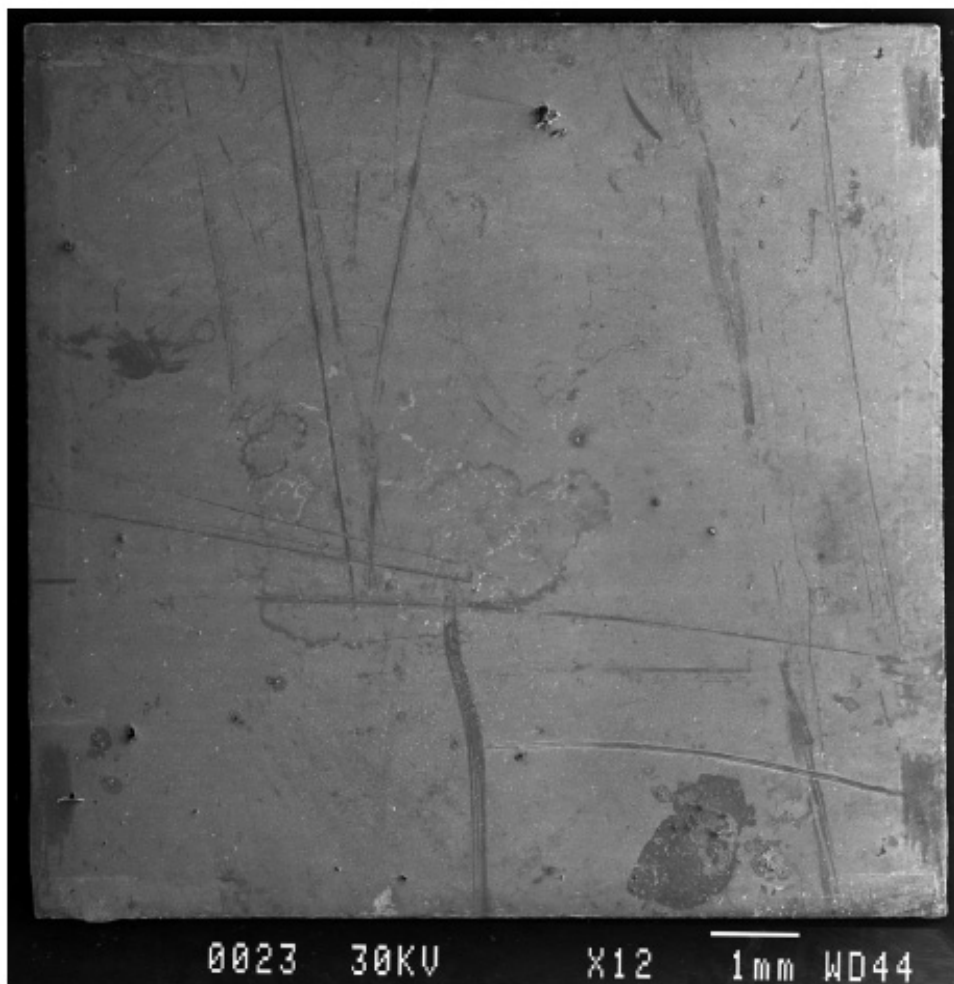


Figure 2 IFA-727.1: SEM overview of specimen Plate 1 side A 316L

図 4.2(2) 316L 平板試験片 ID 番号 1 サイド A の SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $3 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

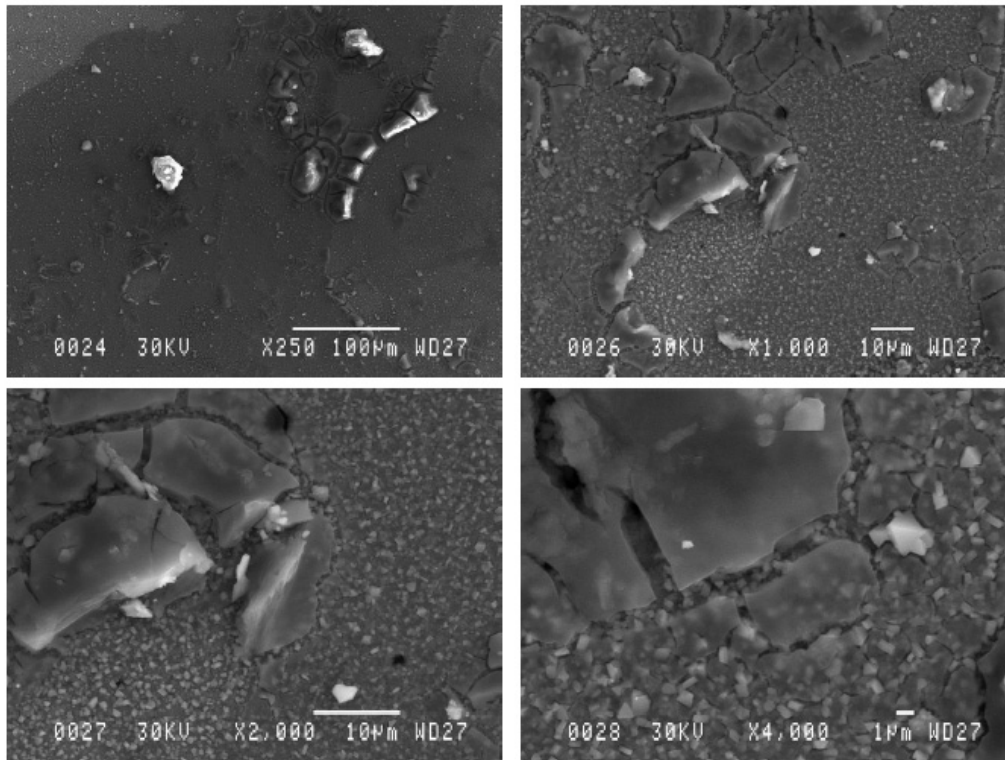


Figure 3 IFA-727.1: SEM details for specimen Plate 1 side A 316L - Position 1 in Fig. 1

図 4.2(3) 316L 平板試験片 ID 番号 1 サイド A 位置 1 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $3 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

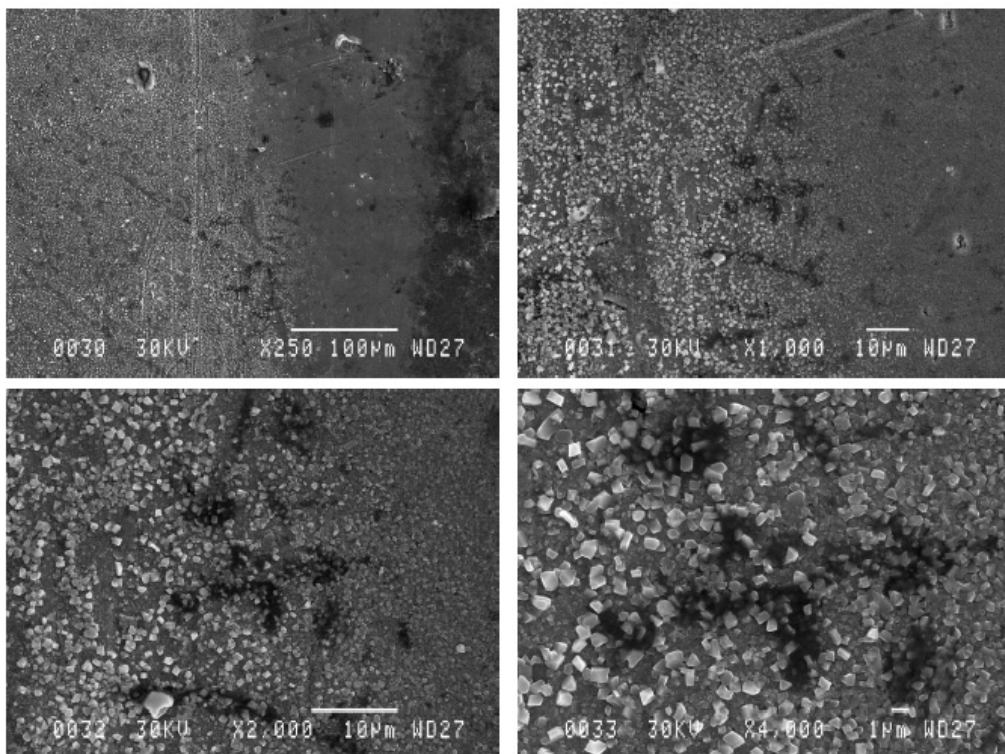


Figure 4 IFA-727.1: SEM details for specimen Plate 1 side A 316L - Position 2 in Fig. 1

図 4.2(4) 316L 平板試験片 ID 番号 1 サイド A 位置 2 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $3 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

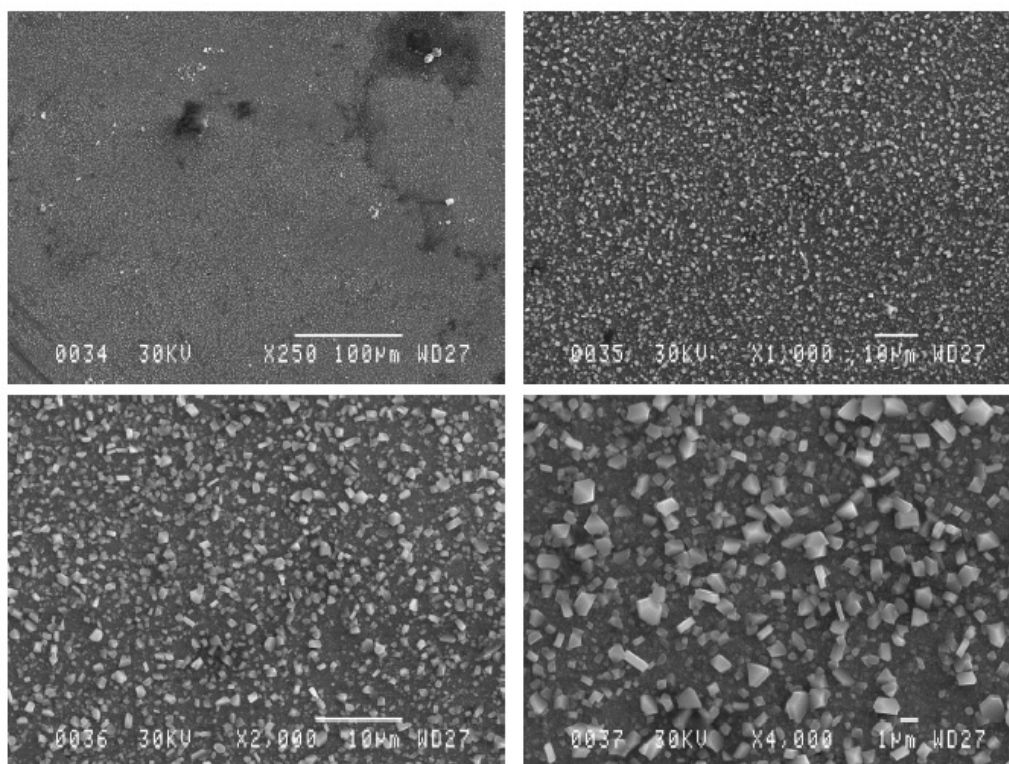


Figure 5 IFA-727.1: SEM details for specimen Plate 1 side A 316L - Position 3 in Fig. 1

図 4.2(5) 316L 平板試験片 ID 番号 1 サイド A 位置 3 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $3 \times 10^{12} (\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

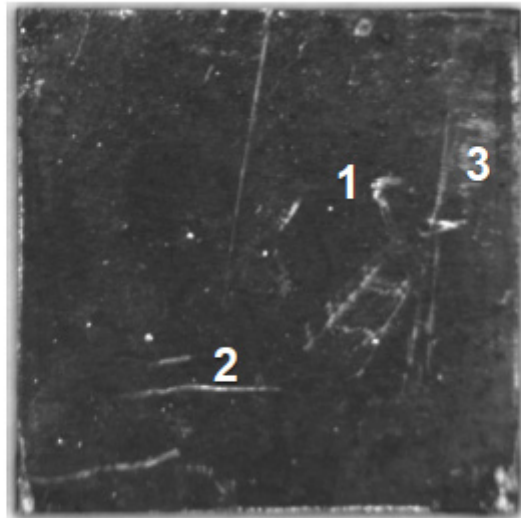


Figure 6 IFA-727.1: Macrograph of specimen Plate 1 side B 316L

図 4.2(6) 316L 平板試験片 ID 番号 1 サイド B の顕微鏡全体写真
- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $3 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

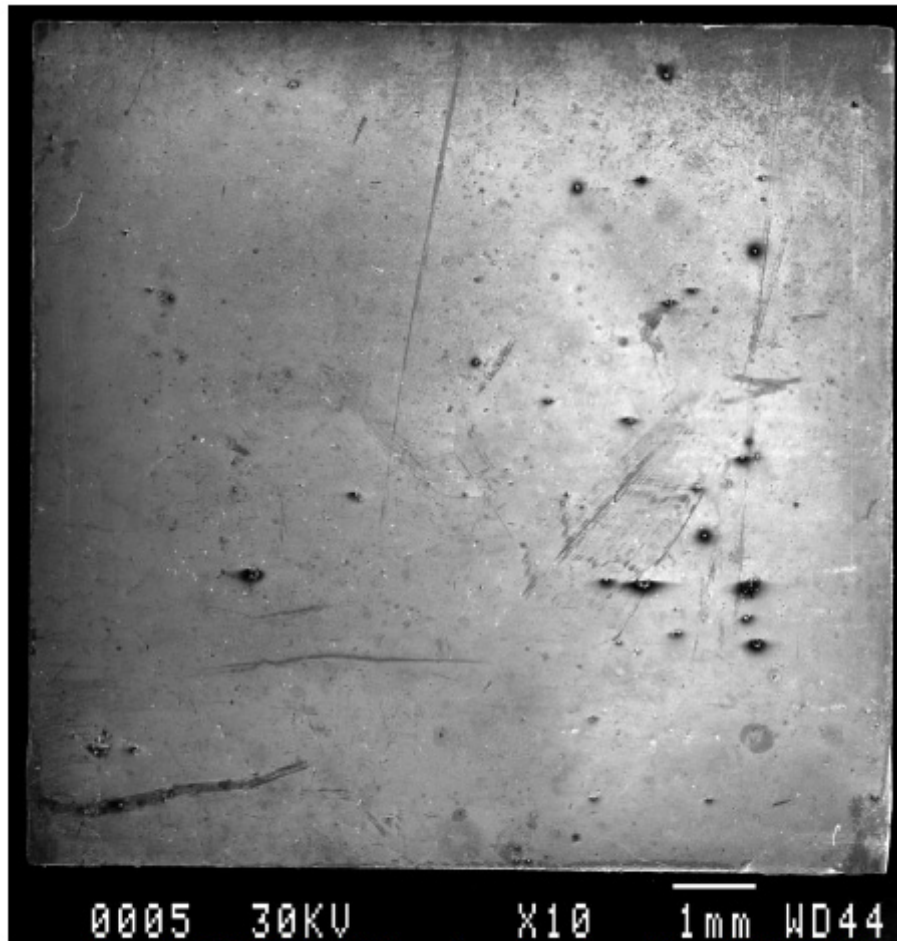


Figure 7 IFA-727.1: SEM overview of specimen Plate 1 side B 316L

図 4.2(7) 316L 平板試験片 ID 番号 1 サイド A の SEM 全体写真
- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $3 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

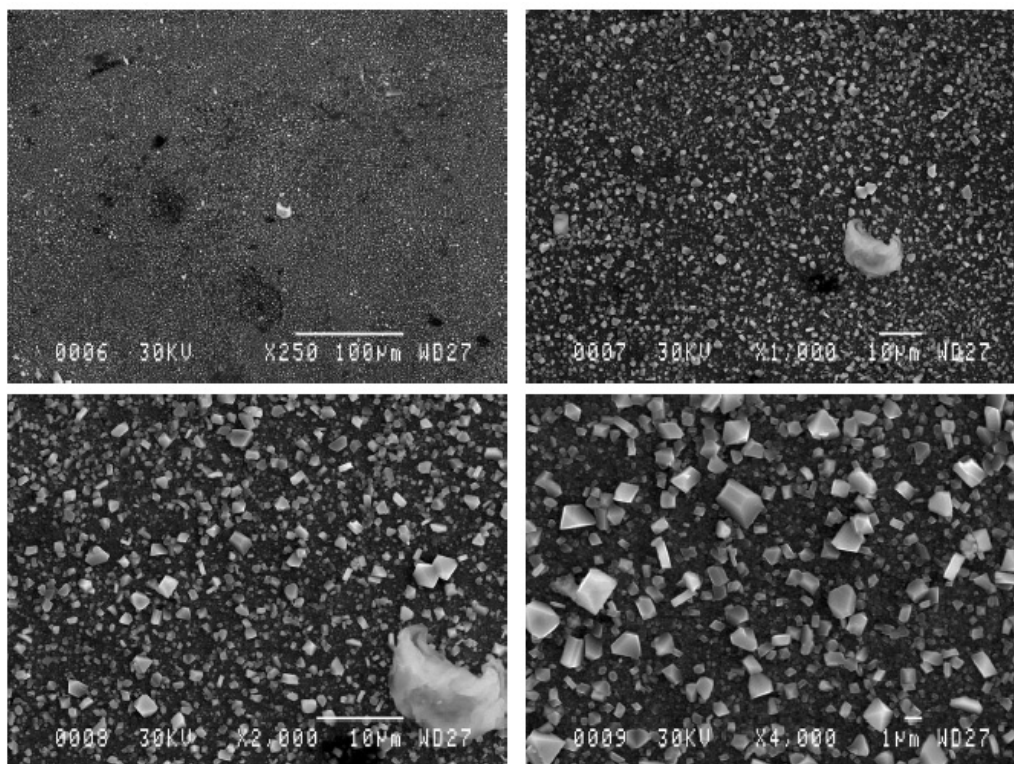


Figure 8 IFA-727.1: SEM details for specimen Plate 1 side B 316L - Position 1 in Fig. 6

図 4.2(8) 316L 平板試験片 ID 番号 1 サイド B 位置 1 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $3 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

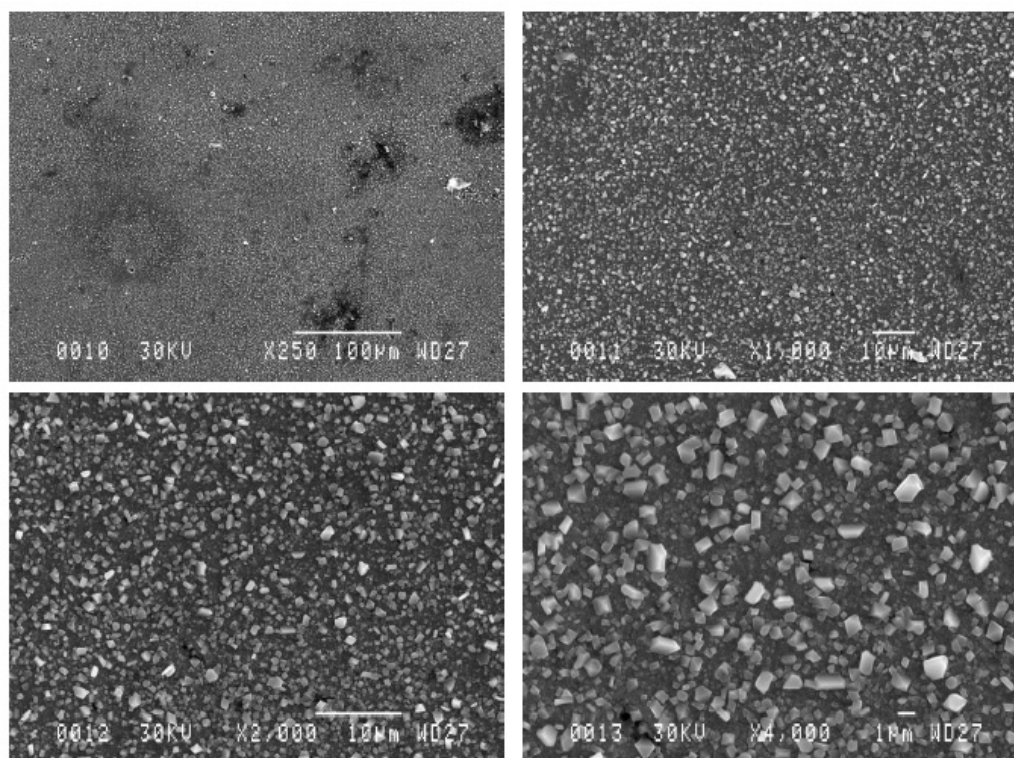


Figure 9 IFA-727.1: SEM details for specimen Plate 1 side B 316L - Position 2 in Fig. 6

図 4.2(9) 316L 平板試験片 ID 番号 1 サイド B 位置 2 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $3 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

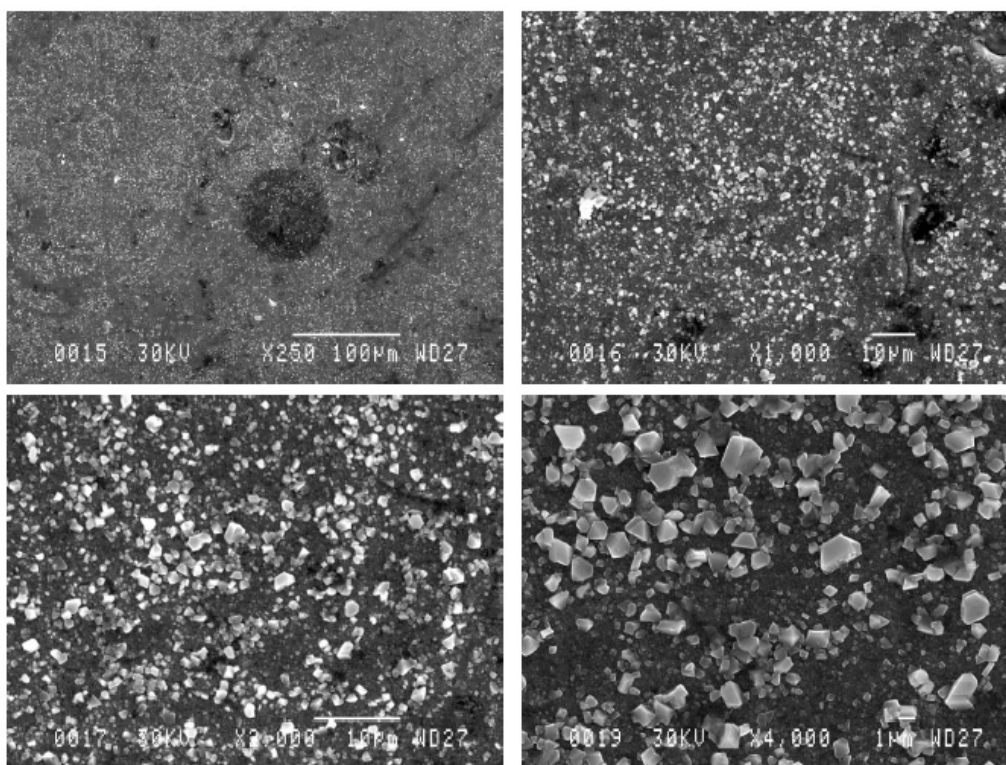


Figure 10 IFA-727.1: SEM details for specimen Plate 1 side B 316L - Position 3 in Fig. 6

図 4.2(10) 316L 平板試験片 ID 番号 1 サイド B 位置 3 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $3 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

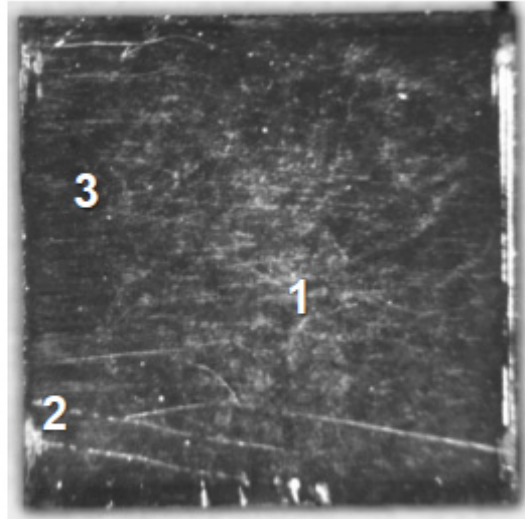


Figure 11 IFA-727.1: Macrograph of specimen Plate 3 side A 316L

図 4.2(11) 316L 平板試験片 ID 番号 3 サイド A の顕微鏡全体写真
- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $5 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

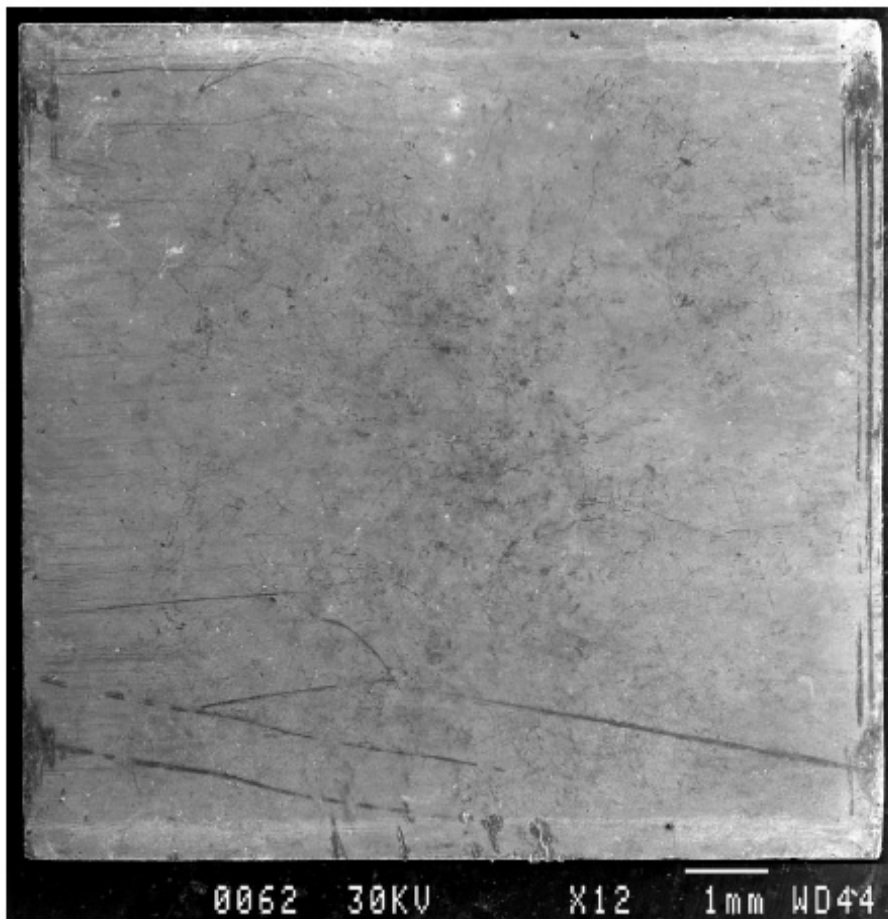


Figure 12 IFA-727.1: SEM overview of specimen Plate 3 side A 316L

図 4.2(12) 316L 平板試験片 ID 番号 3 サイド A の SEM 全体写真
- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $5 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

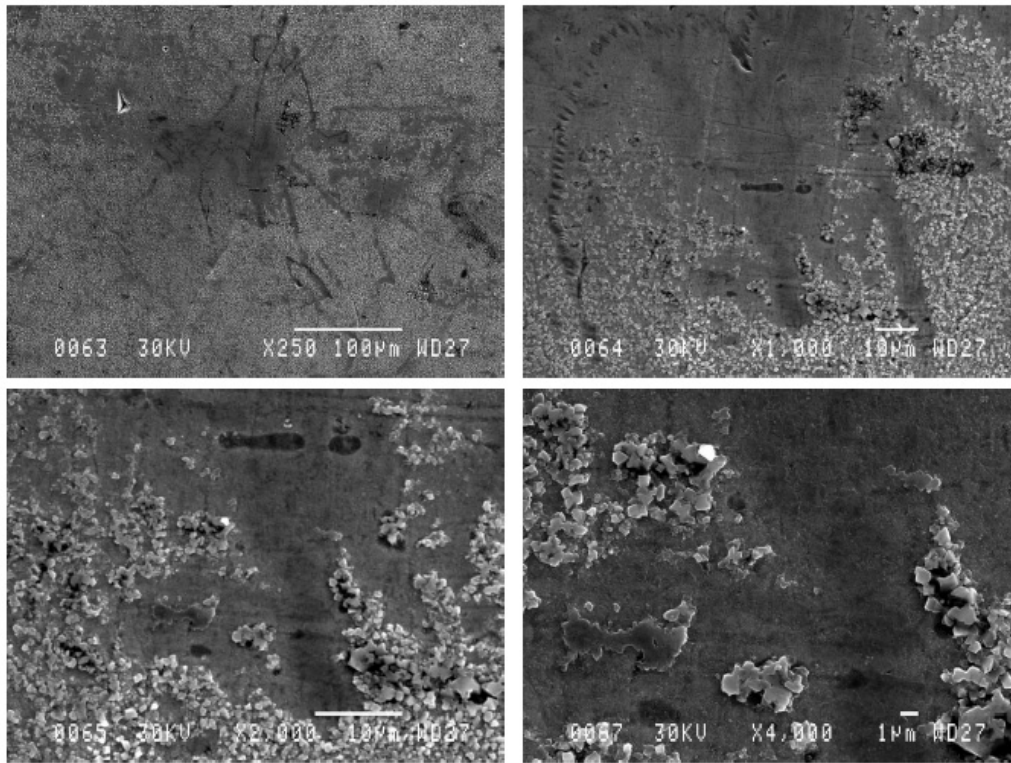


Figure 13 IFA-727.1: SEM details for specimen Plate 3 side A 316L - Position 1 in Fig. 11

図 4.2(13) 316L 平板試験片 ID 番号 3 サイド A 位置 1 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $5 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

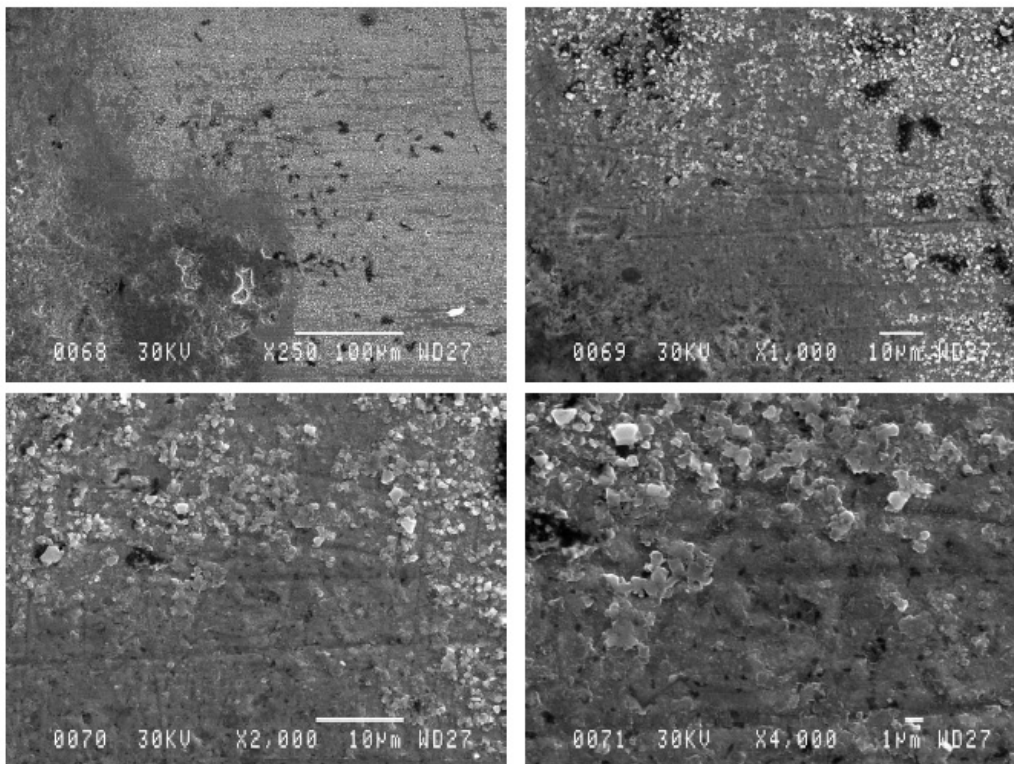


Figure 14 IFA-727.1: SEM details for specimen Plate 3 side A 316L - Position 2 in Fig. 11

図 4.2(14) 316L 平板試験片 ID 番号 3 サイド A 位置 2 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $5 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

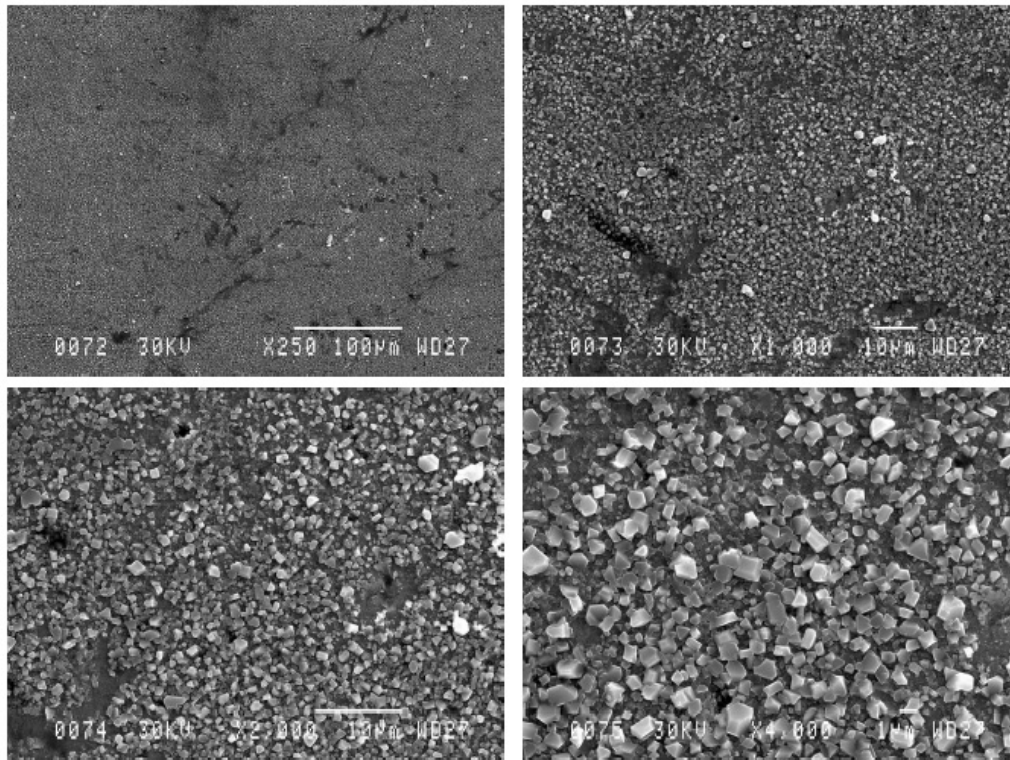


Figure 15 IFA-727.1: SEM details for specimen Plate 3 side A 316L - Position 3 in Fig. 11

図 4.2(15) 316L 平板試験片 ID 番号 3 サイド A 位置 3 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $5 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

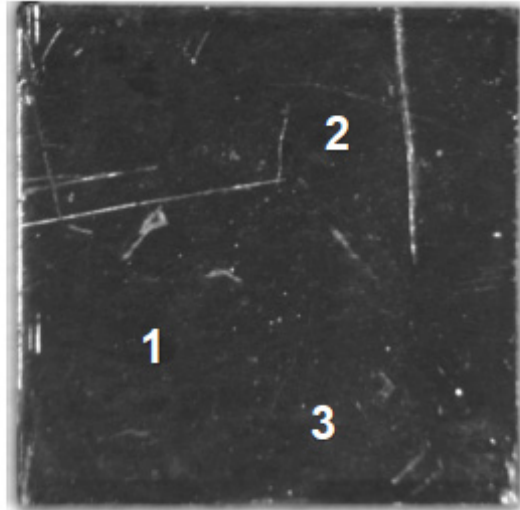


Figure 16 IFA-727.1: Macrograph of specimen Plate 3 side B 316L

図 4.2(16) 316L 平板試験片 ID 番号 3 サイド B の顕微鏡全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $5 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

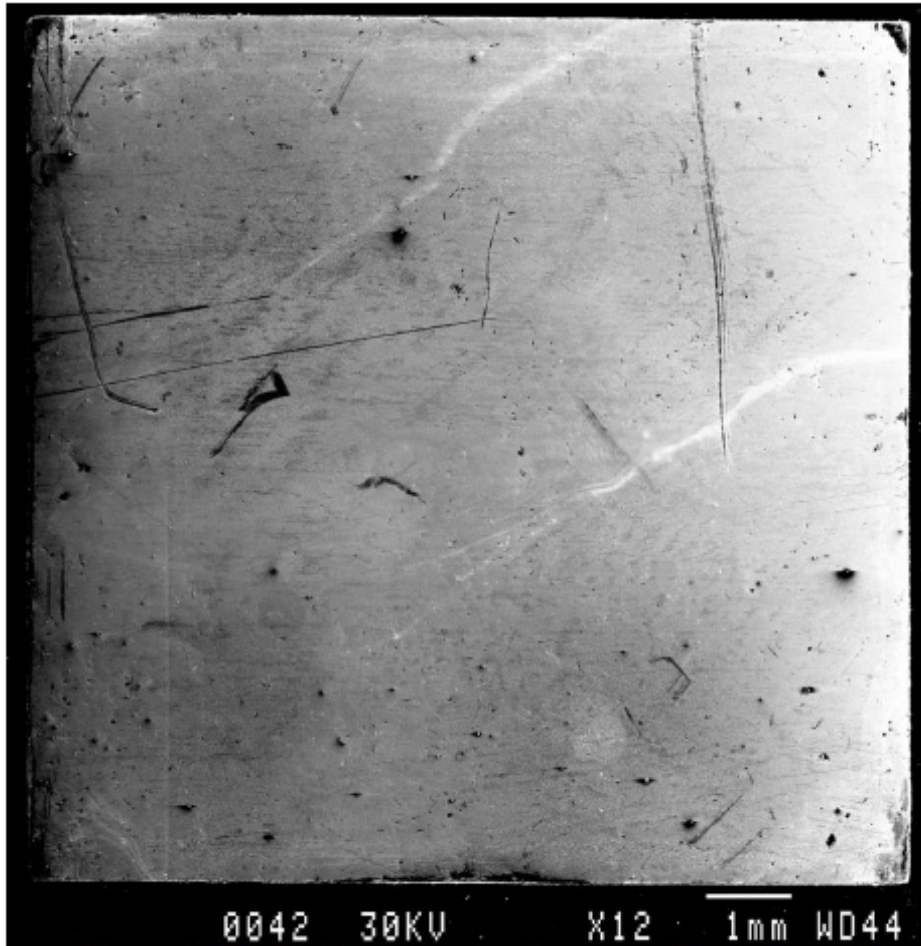


Figure 17 IFA-727.1: SEM overview of specimen Plate 3 side B 316L

図 4.2(17) 316L 平板試験片 ID 番号 3 サイド B の SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $5 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

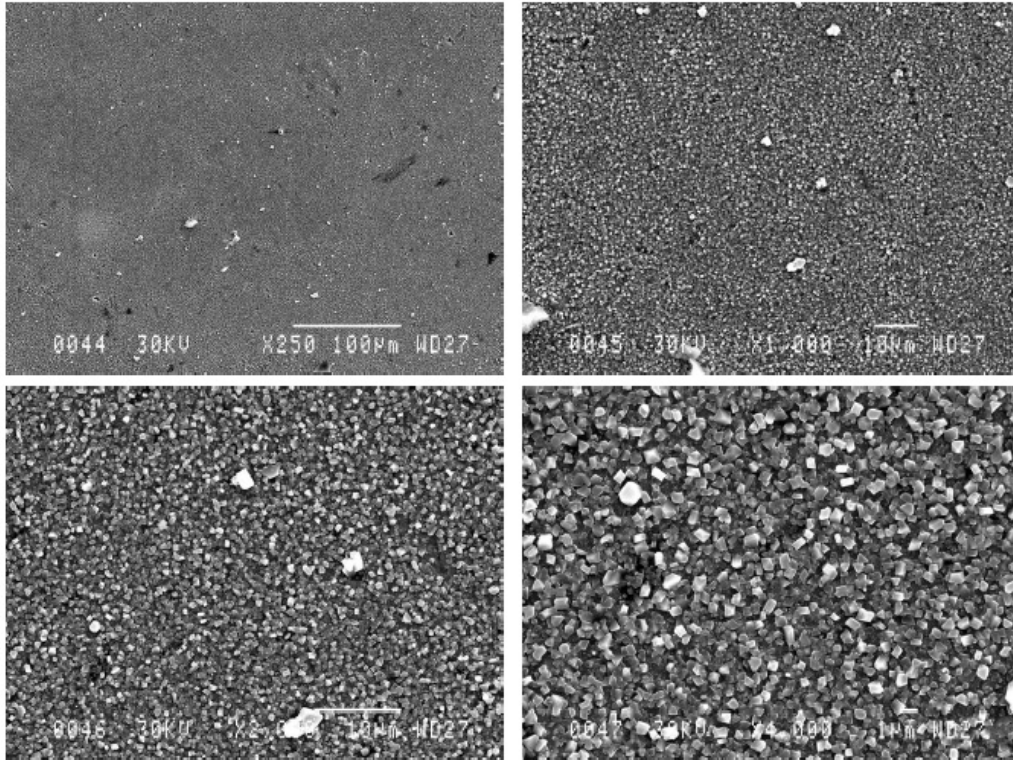


Figure 18 IFA-727.1: SEM details for specimen Plate 3 side B 316L - Position 1 in Fig. 16

図 4.2(18) 316L 平板試験片 ID 番号 3 サイド B 位置 1 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $5 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

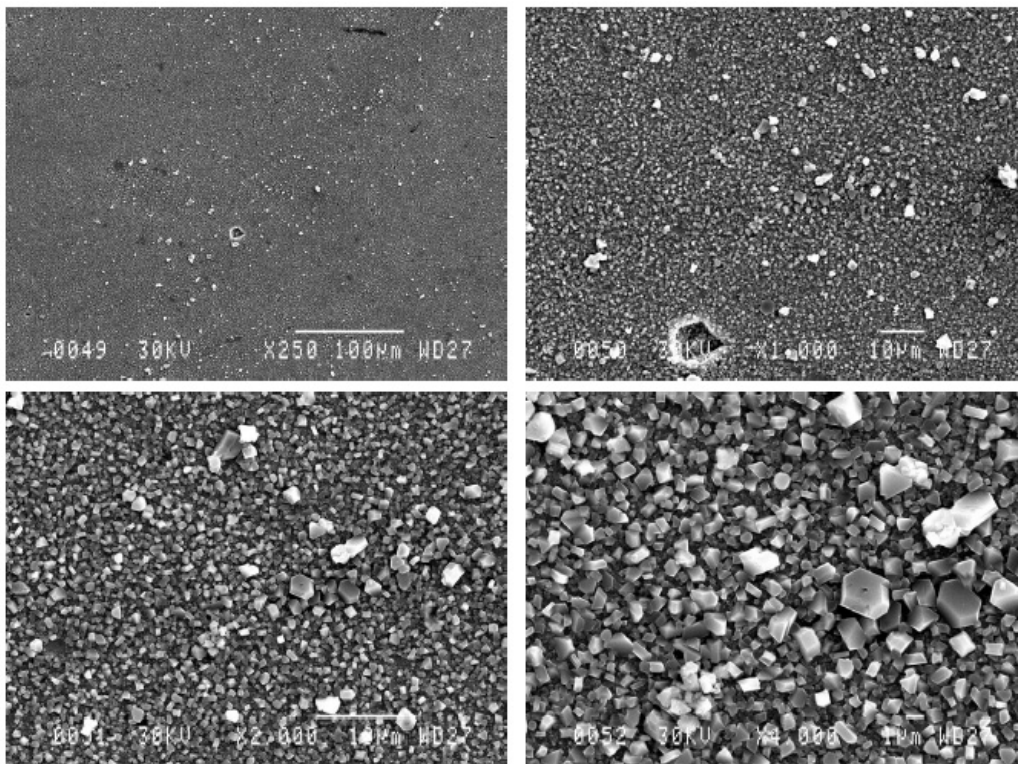


Figure 19 IFA-727.1: SEM details for specimen Plate 3 side B 316L - Position 2 in Fig. 16

図 4.2(19) 316L 平板試験片 ID 番号 3 サイド B 位置 2 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $5 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

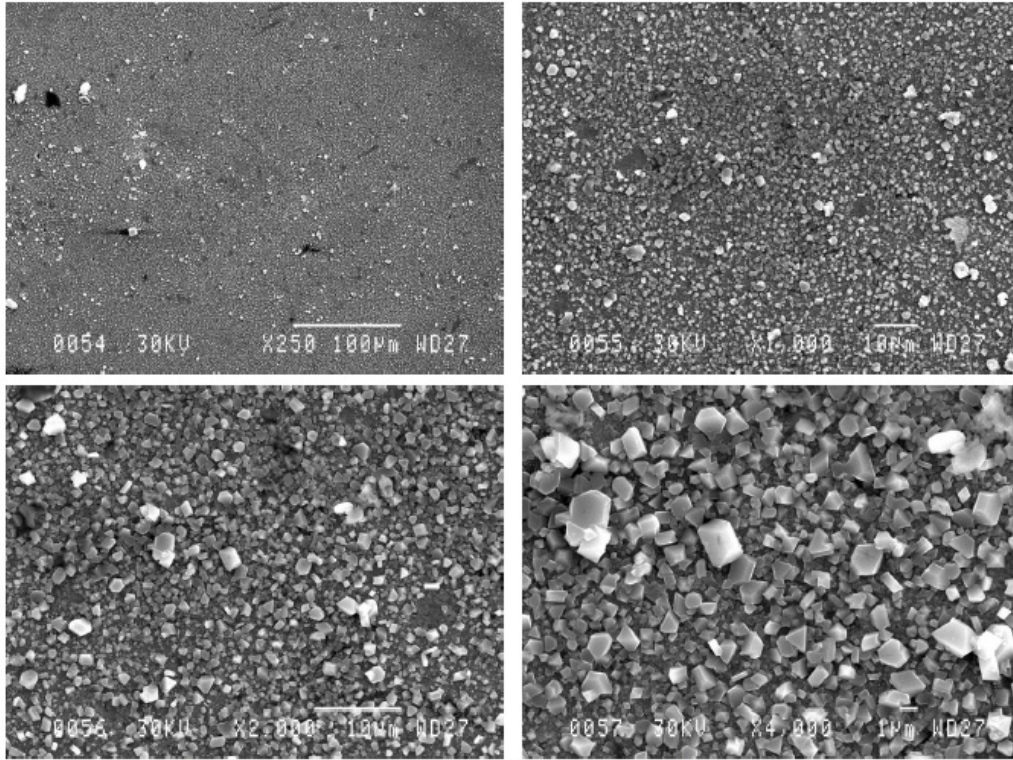


Figure 20 IFA-727.1: SEM details for specimen Plate 3 side B 316L - Position 3 in Fig. 16

図 4.2(20) 316L 平板試験片 ID 番号 3 サイド B 位置 3 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $5 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

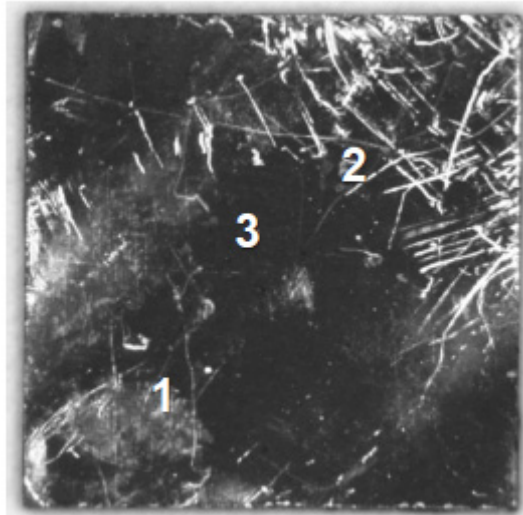


Figure 21 IFA-727.1: Macrograph of specimen Plate 5 side A 316L

図 4.2(21) 316L 平板試験片 ID 番号 5 サイド A の顕微鏡全体写真
- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $2.9 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

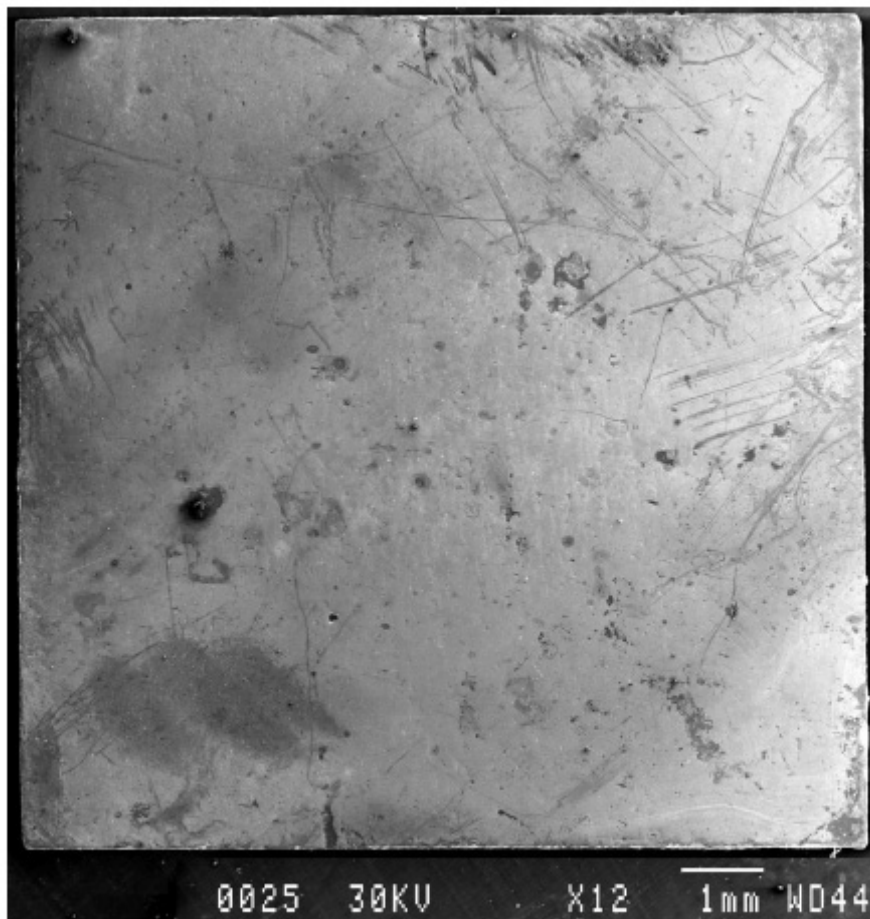


Figure 22 IFA-727.1: SEM overview of specimen Plate 5 side A 316L

図 4.2(22) 316L 平板試験片 ID 番号 5 サイド A の SEM 全体写真
- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $2.9 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

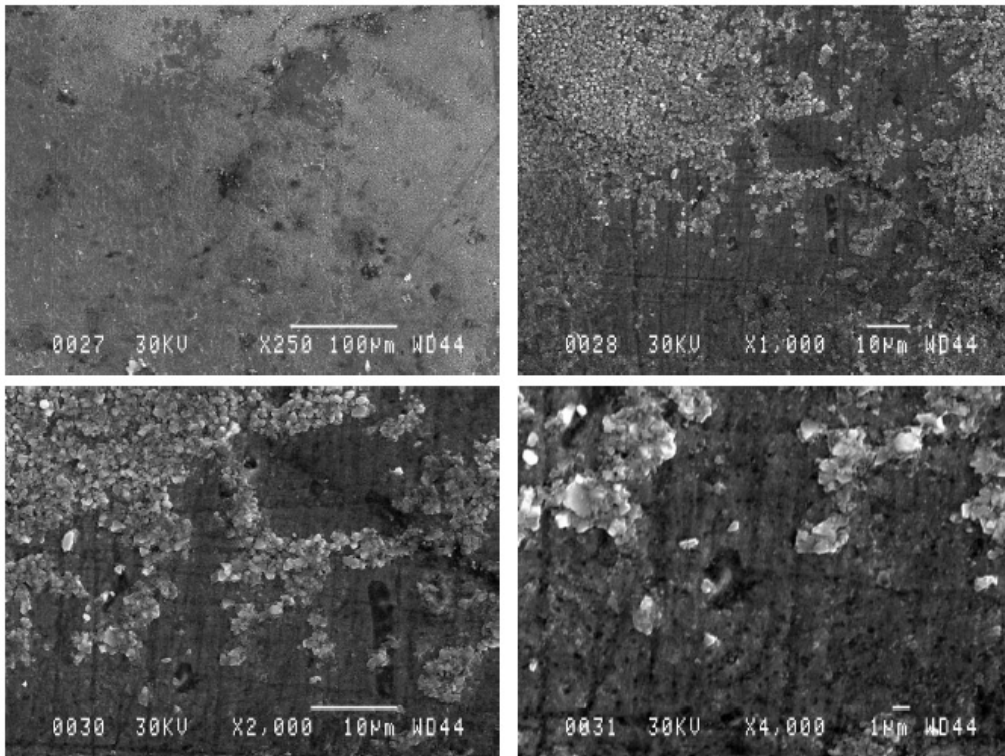


Figure 23 IFA-727.1: SEM details for specimen Plate 5 side A 316L - Position 1 in Fig. 21

図 4.2(23) 316L 平板試験片 ID 番号 5 サイド A 位置 1 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $2.9 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

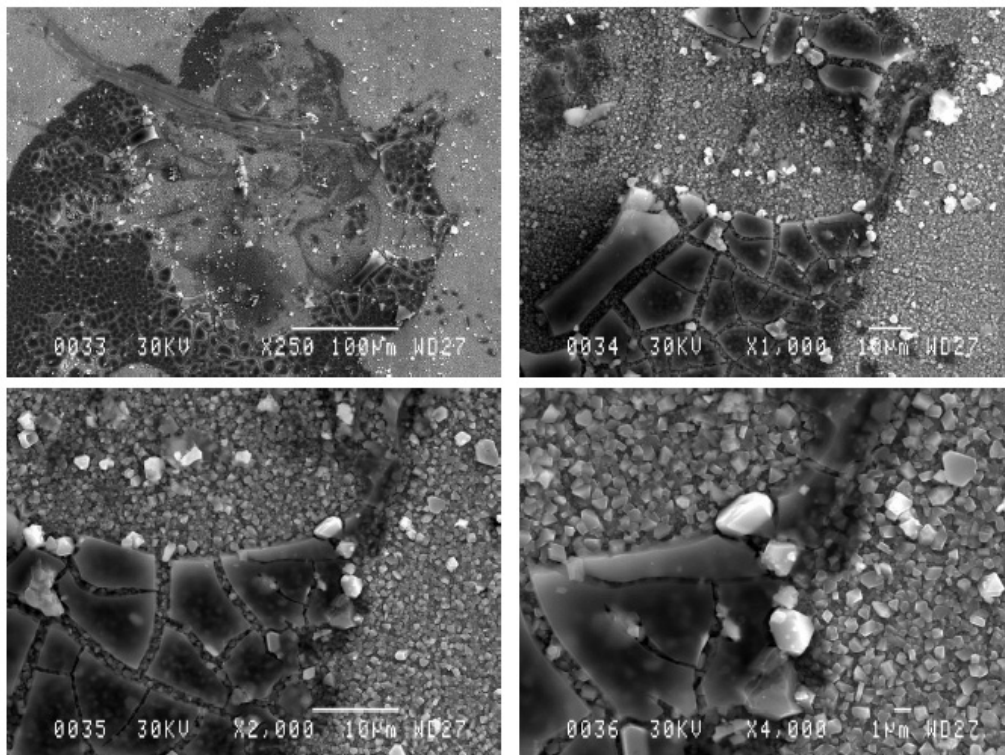


Figure 24 IFA-727.1: SEM details for specimen Plate 5 side A 316L - Position 2 in Fig. 21

図 4.2(24) 316L 平板試験片 ID 番号 5 サイド A 位置 2 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $2.9 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

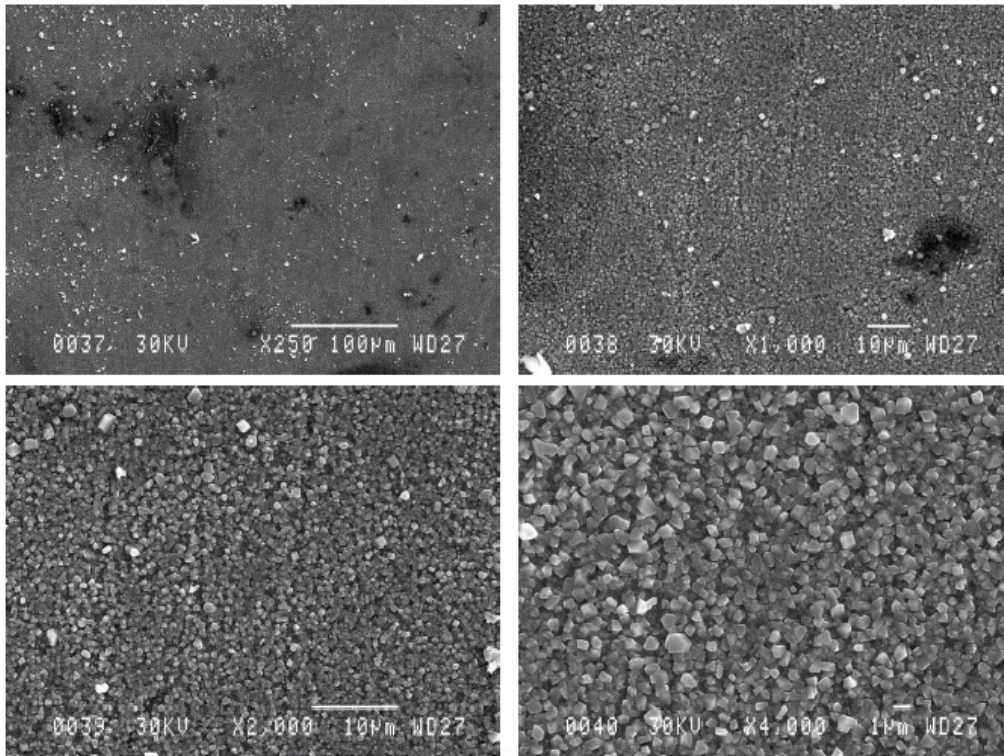


Figure 25 IFA-727.1: SEM details for specimen Plate 5 side A 316L - Position 3 in Fig. 21

図 4.2(25) 316L 平板試験片 ID 番号 5 サイド A 位置 3 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $2.9 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

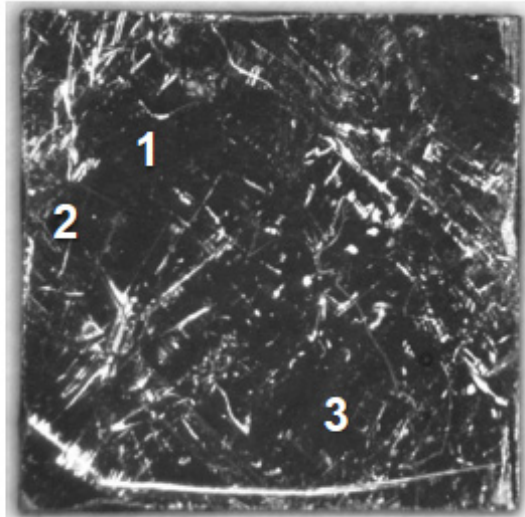


Figure 26 IFA-727.1: Macrograph of specimen Plate 5 side B 316L

図 4.2(26) 316L 平板試験片 ID 番号 5 サイド B の顕微鏡全体写真
- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $2.9 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

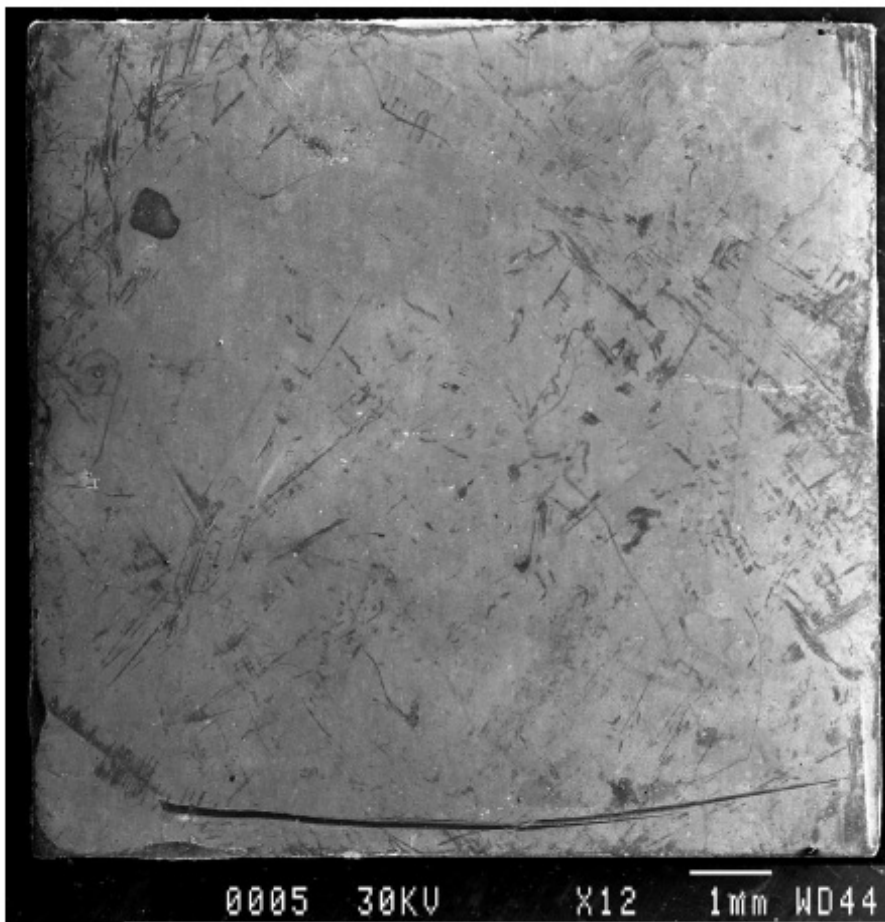


Figure 27 IFA-727.1: SEM overview of specimen Plate 5 side B 316L

図 4.2(27) 316L 平板試験片 ID 番号 5 サイド B の SEM 全体写真
- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $2.9 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

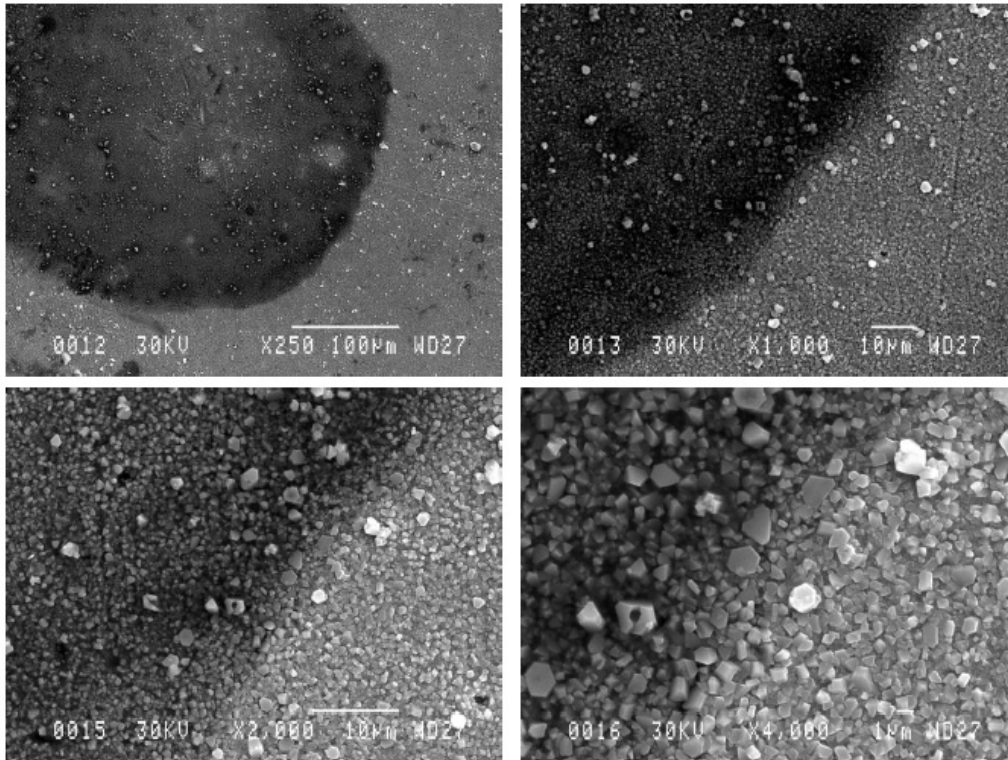


Figure 29 IFA-727.1: SEM details for specimen Plate 5 side B 316L - Position 2 in Fig. 26

図 4.2(28) 316L 平板試験片 ID 番号 5 サイド B 位置 1 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $2.9 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

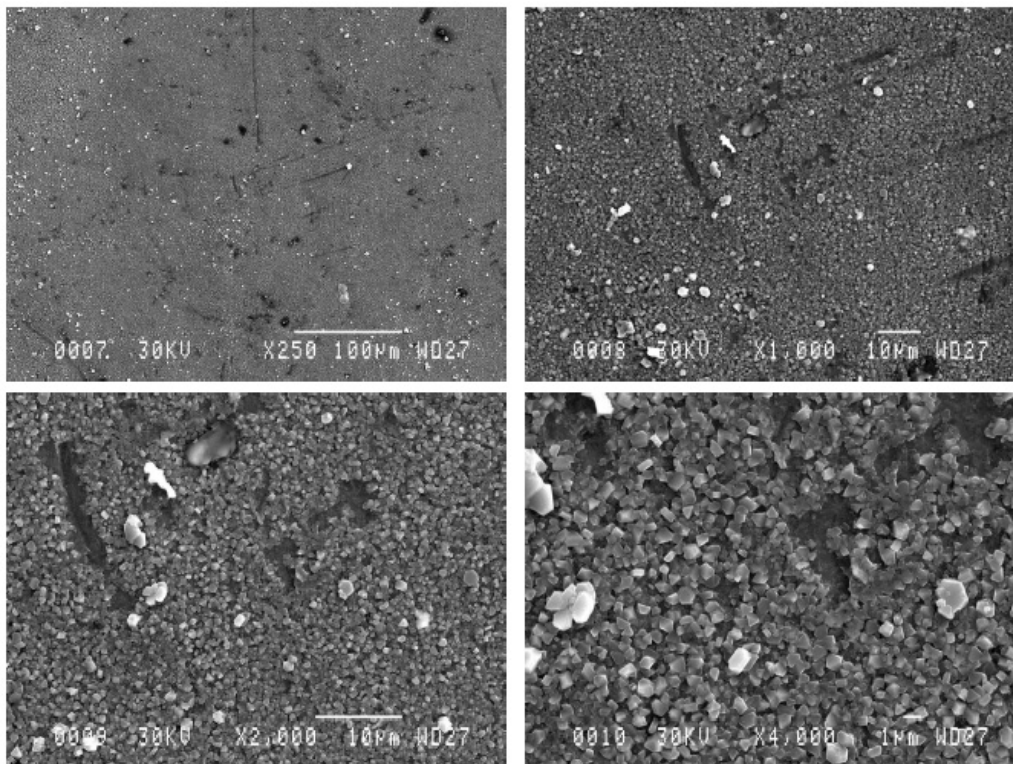


Figure 28 IFA-727.1: SEM details for specimen Plate 5 side B 316L - Position 1 in Fig. 26

図 4.2(29) 316L 平板試験片 ID 番号 5 サイド B 位置 2 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $2.9 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

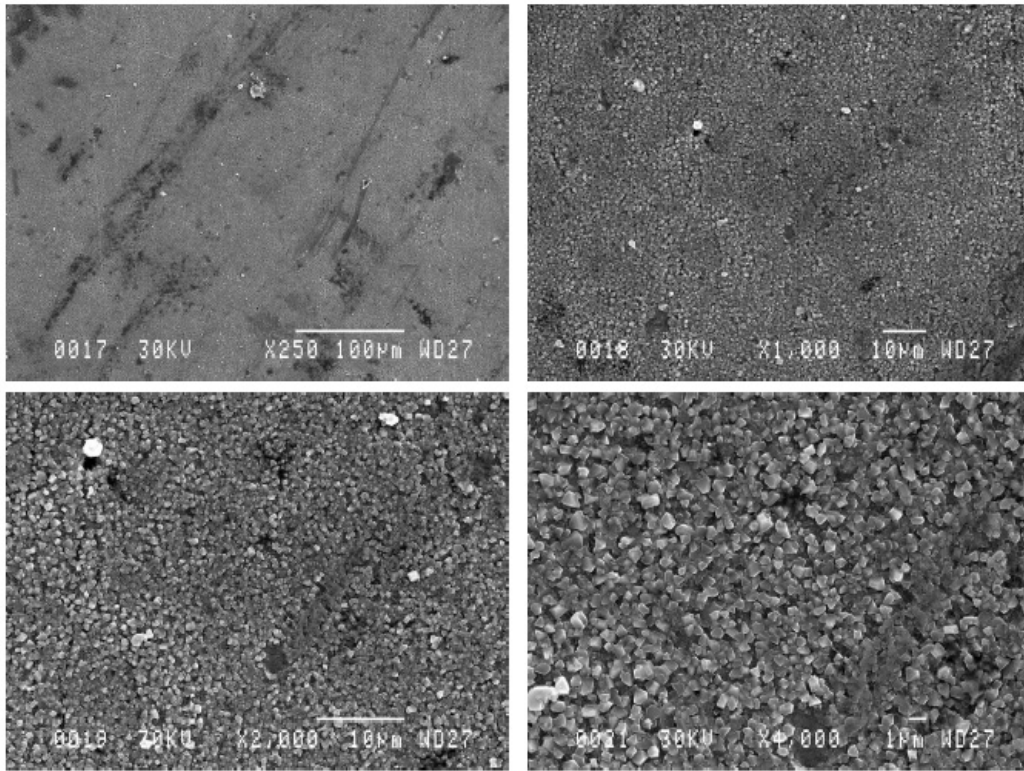


Figure 30 IFA-727.1: SEM details for specimen Plate 5 side B 316L - Position 3 in Fig. 26

図 4.2(30) 316L 平板試験片 ID 番号 5 サイド B 位置 3 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $2.9 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

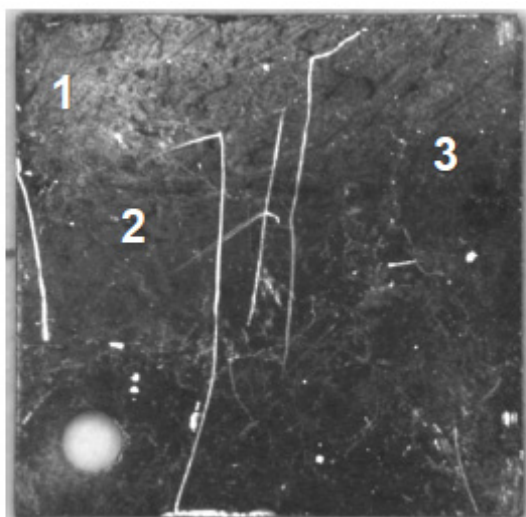


Figure 61 IFA-727.2: Macrograph of specimen Plate -1 side A 316L

図 4.2(31) 316L 平板試験片 ID 番号-1 サイド A の顕微鏡全体写真
- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 864 時間、中性子束 $2.5 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

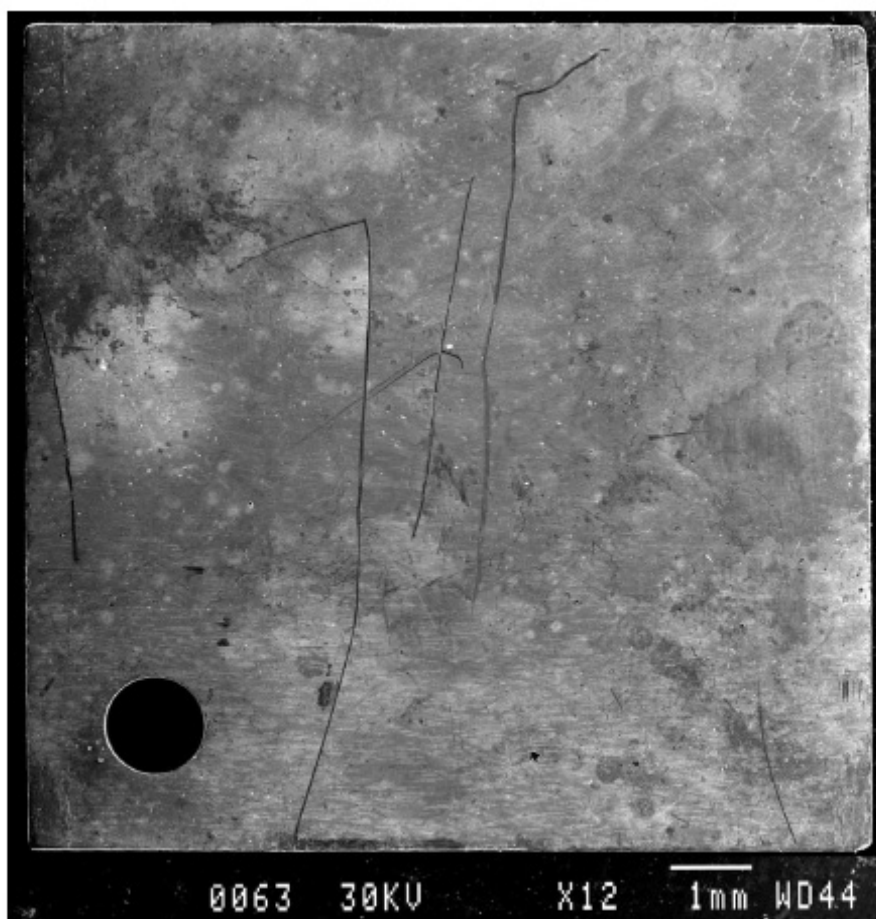


Figure 62 IFA-727.2: SEM overview of specimen Plate -1 side A 316L

図 4.2(32) 316L 平板試験片 ID 番号-1 サイド A の SEM 全体写真
- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 864 時間、中性子束 $2.5 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

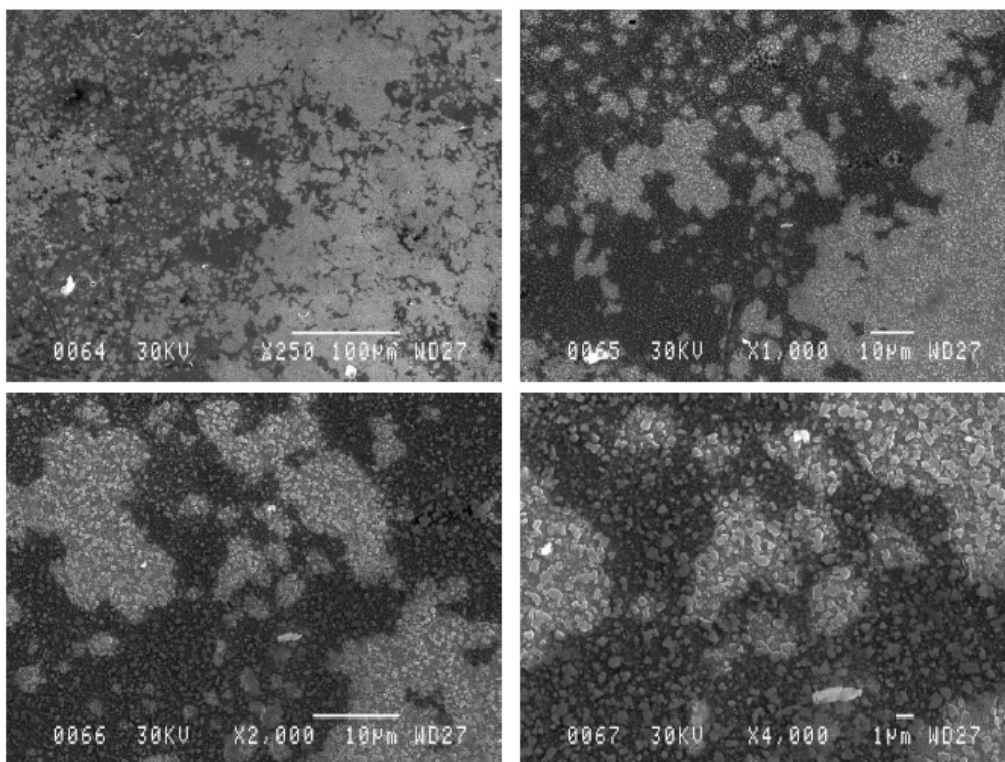


Figure 63 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate -1 side A 316L - Position 1 in Fig. 61

図 4.2(33) 316L 平板試験片 ID 番号-1 サイド A 位置 1 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 864 時間、中性子束 $2.5 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

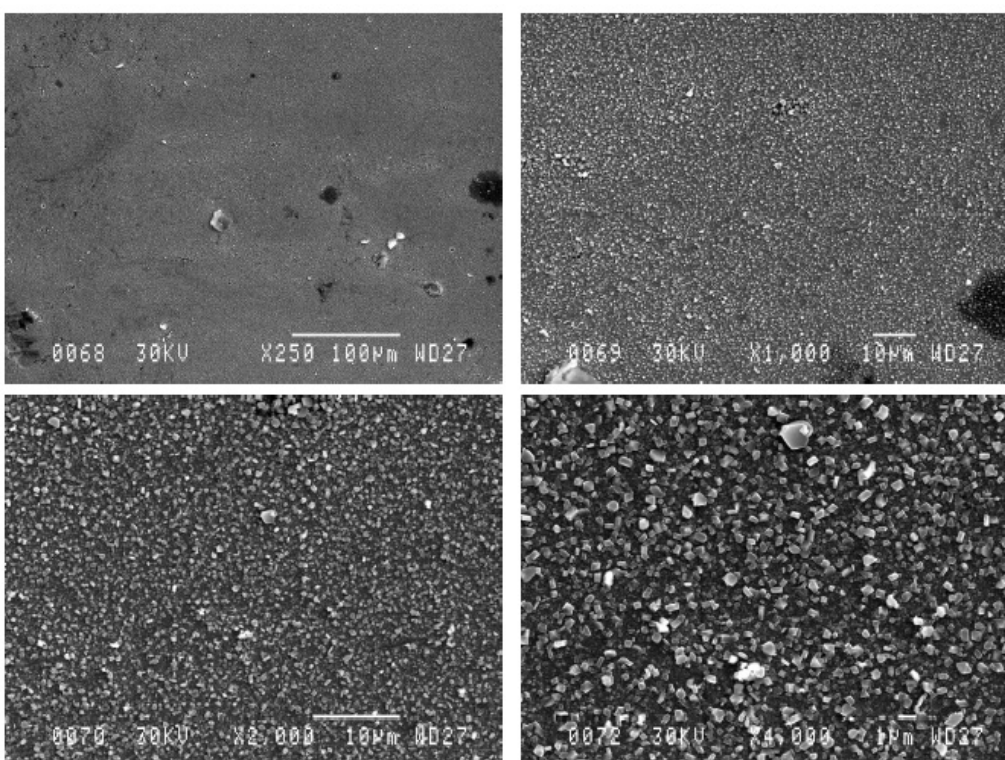


Figure 64 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate -1 side A 316L - Position 2 in Fig. 61

図 4.2(34) 316L 平板試験片 ID 番号-1 サイド A 位置 2 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 864 時間、中性子束 $2.5 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

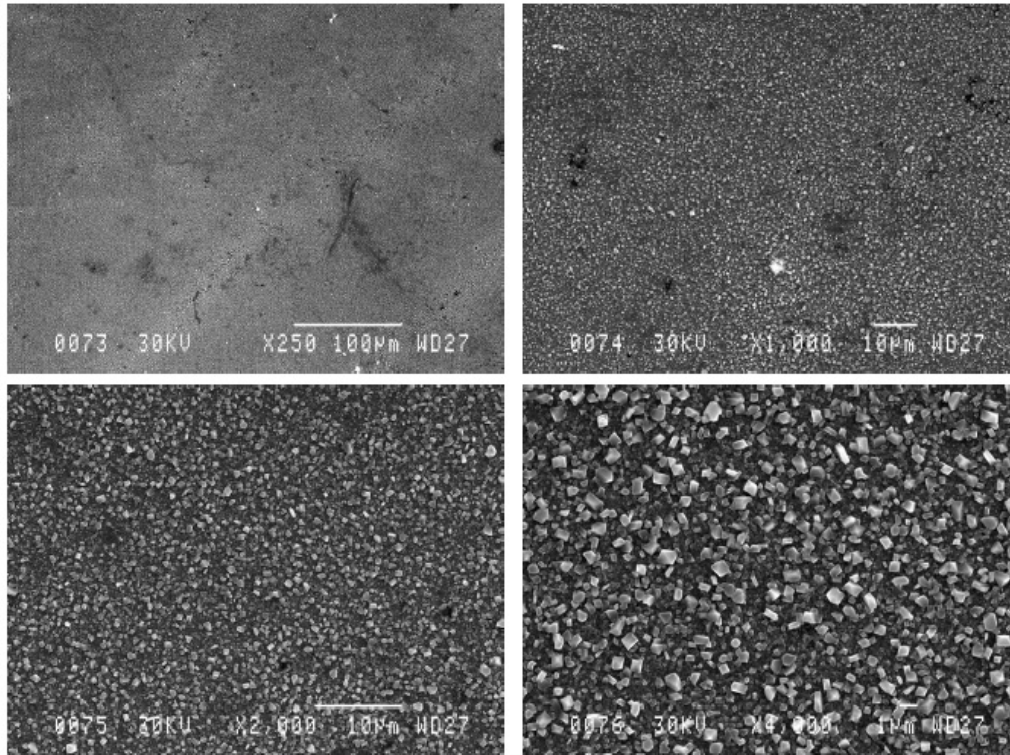


Figure 65 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate -1 side A 316L - Position 3 in Fig. 61

図 4.2(35) 316L 平板試験片 ID 番号-1 サイド A 位置 3 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 864 時間、中性子束 $2.5 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

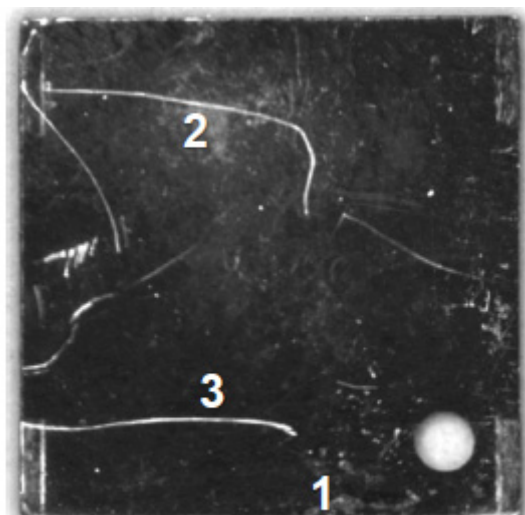


Figure 66 IFA-727.2: Macrograph of specimen Plate -1 side B 316L

図 4.2(36) 316L 平板試験片 ID 番号-1 サイド B の顕微鏡全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 864 時間、中性子束 $2.5 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

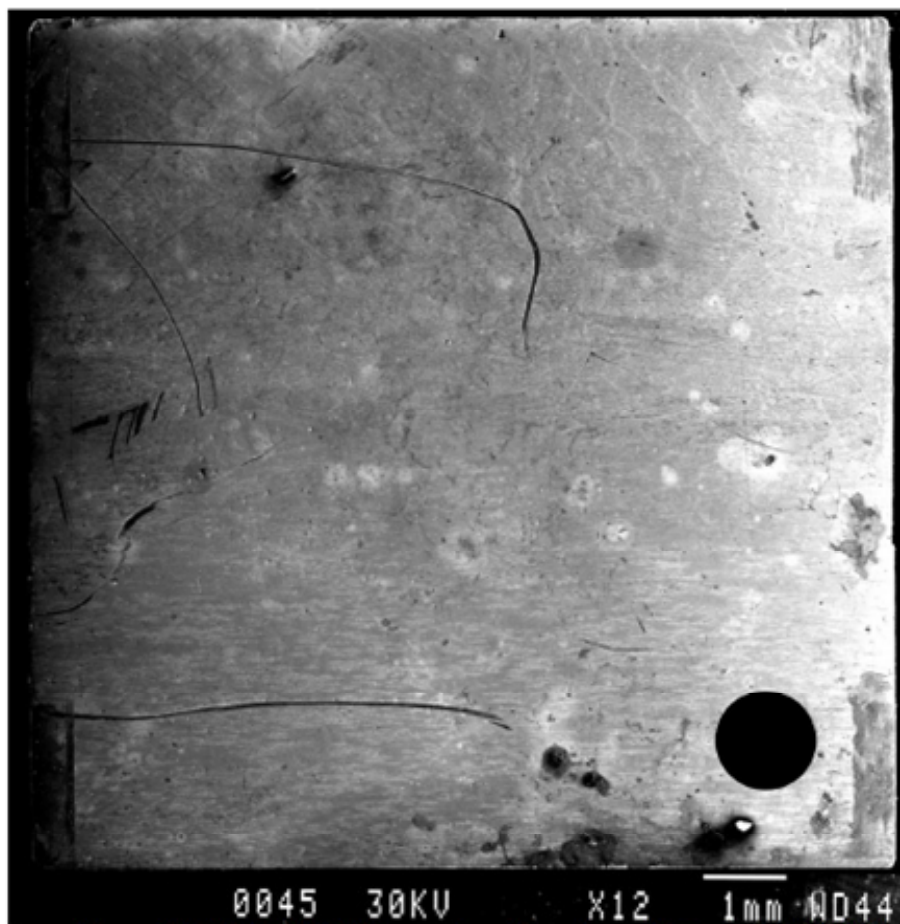


Figure 67 IFA-727.2: SEM overview of specimen Plate -1 side B 316L

図 4.2(37) 316L 平板試験片 ID 番号-1 サイド B の SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 864 時間、中性子束 $2.5 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

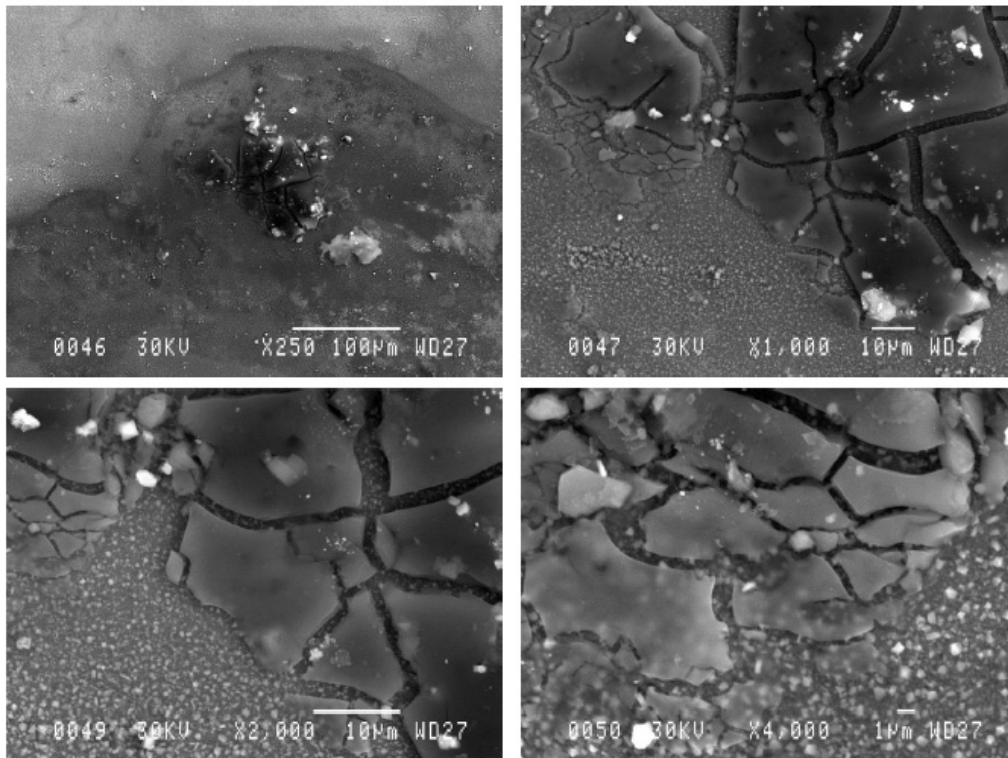


Figure 68 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate -1 side B 316L - Position 1 in Fig. 66

図 4.2(38) 316L 平板試験片 ID 番号-1 サイド B 位置 1 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 864 時間、中性子束 $2.5 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

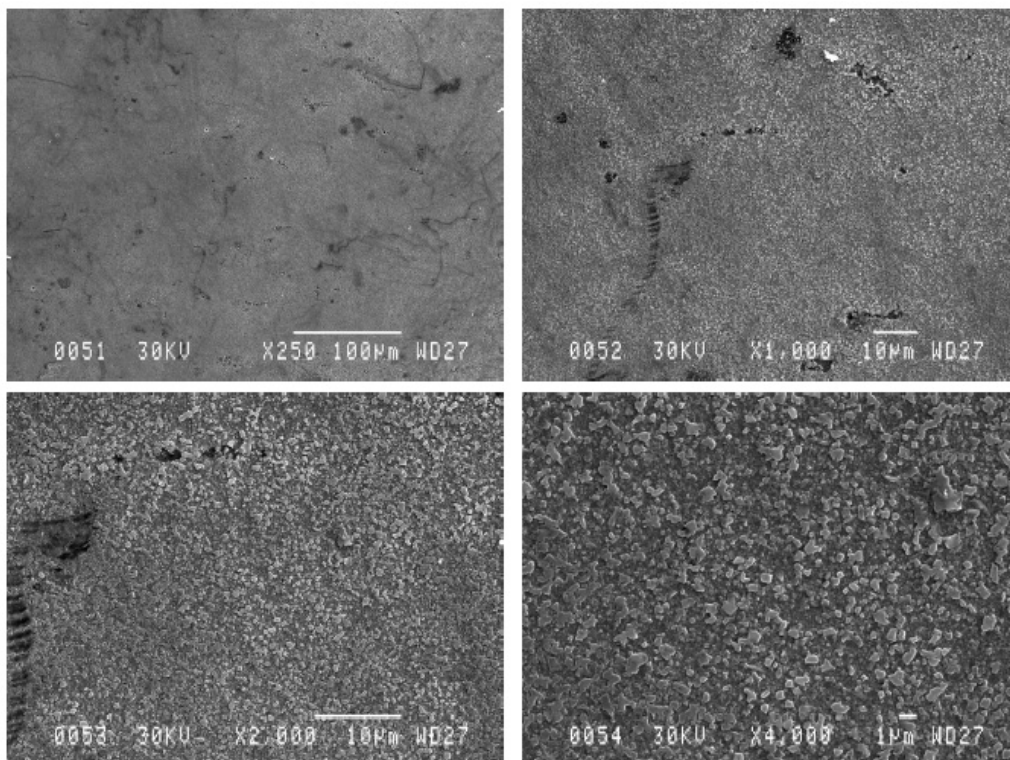


Figure 69 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate -1 side B 316L - Position 2 in Fig. 66

図 4.2(39) 316L 平板試験片 ID 番号-1 サイド B 位置 2 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 864 時間、中性子束 $2.5 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

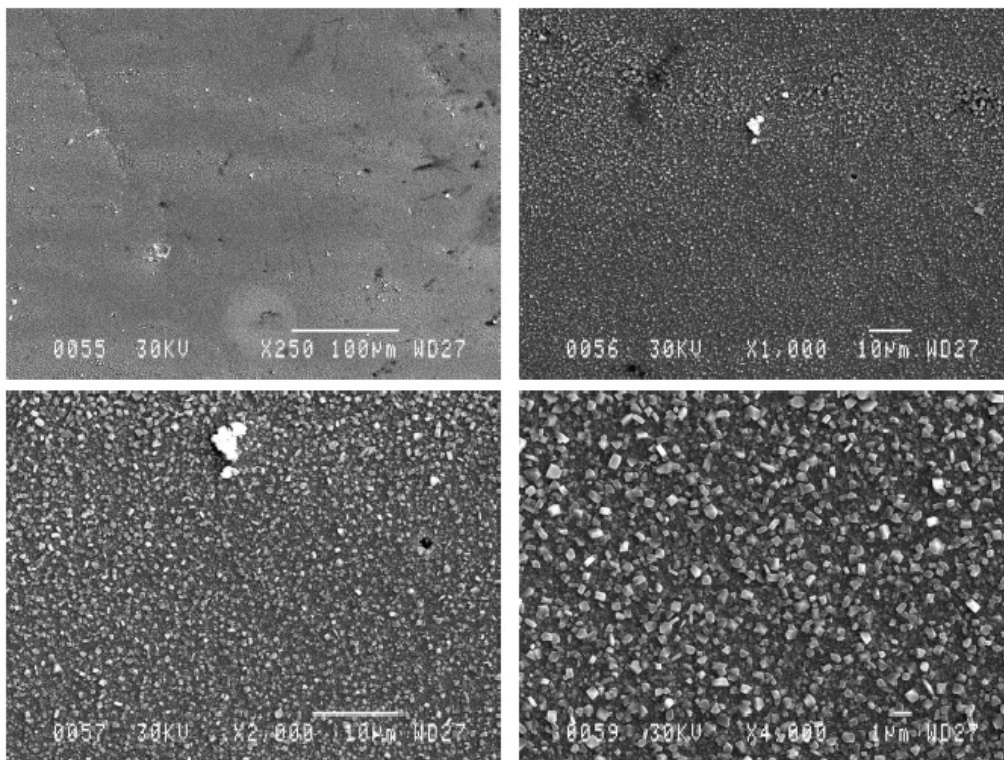


Figure 70 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate -1 side B 316L - Position 3 in Fig. 66

図 4.2(40) 316L 平板試験片 ID 番号-1 サイド B 位置 3 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 864 時間、中性子束 $2.5 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

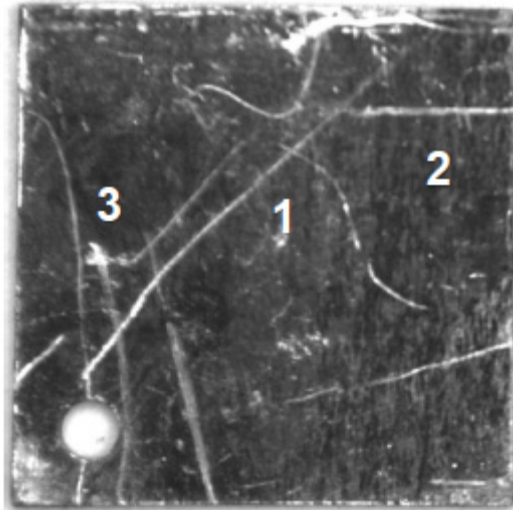


Figure 71 IFA-727.2: Macrograph of specimen Plate -3 side A 316L

図 4.2(41) 316L 平板試験片 ID 番号-3 サイド A の顕微鏡全体写真
- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 528 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -



Figure 72 IFA-727.2: SEM overview of specimen Plate -3 side A 316L

図 4.2(42) 316L 平板試験片 ID 番号-3 サイド A の SEM 全体写真
- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 528 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

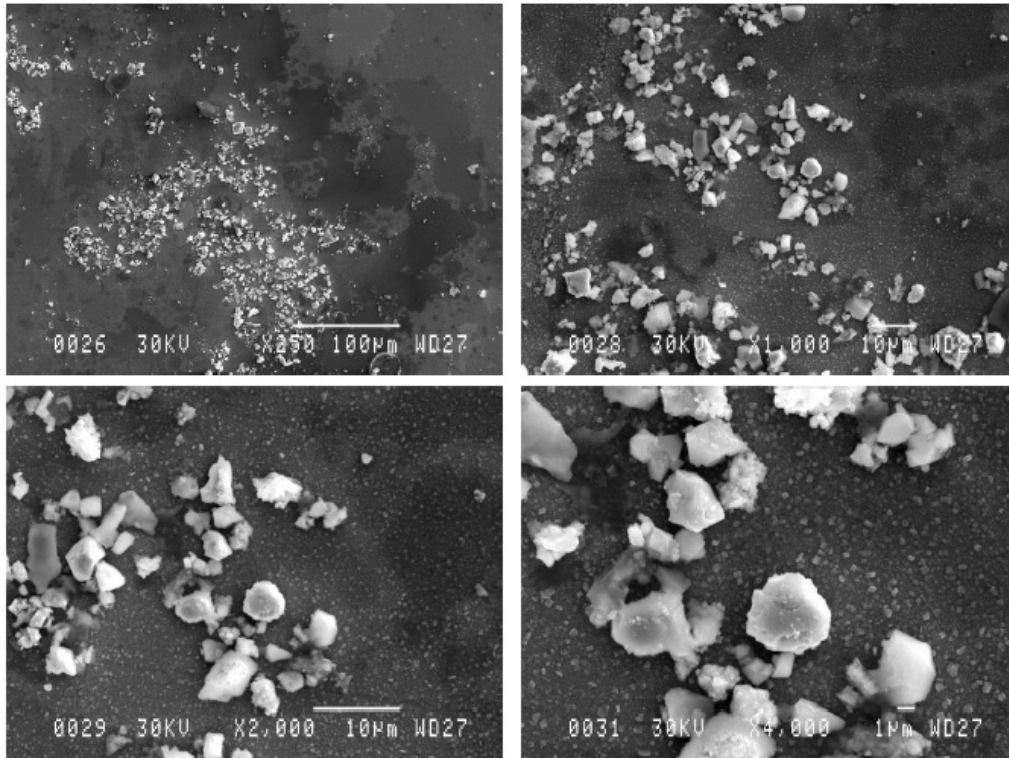


Figure 73 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate -3 side A 316L - Position 1 in Fig. 71

図 4.2(43) 316L 平板試験片 ID 番号-3 サイド A 位置 1 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 528 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

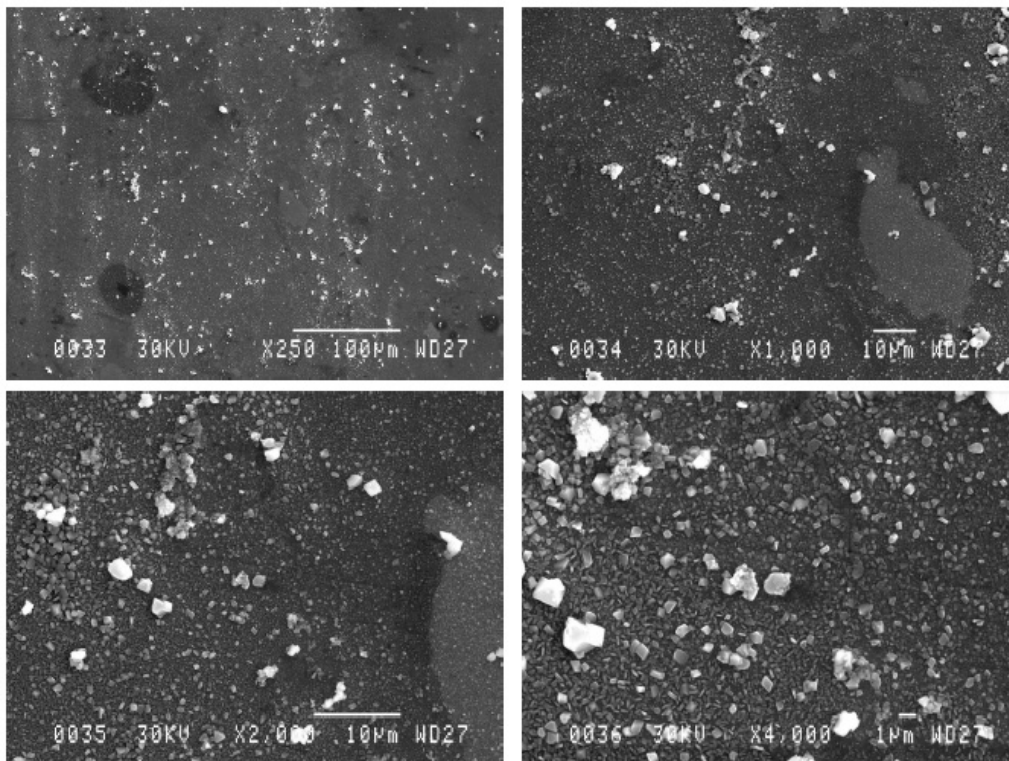


Figure 74 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate -3 side A 316L - Position 2 in Fig. 71

図 4.2(44) 316L 平板試験片 ID 番号-3 サイド A 位置 2 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 528 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

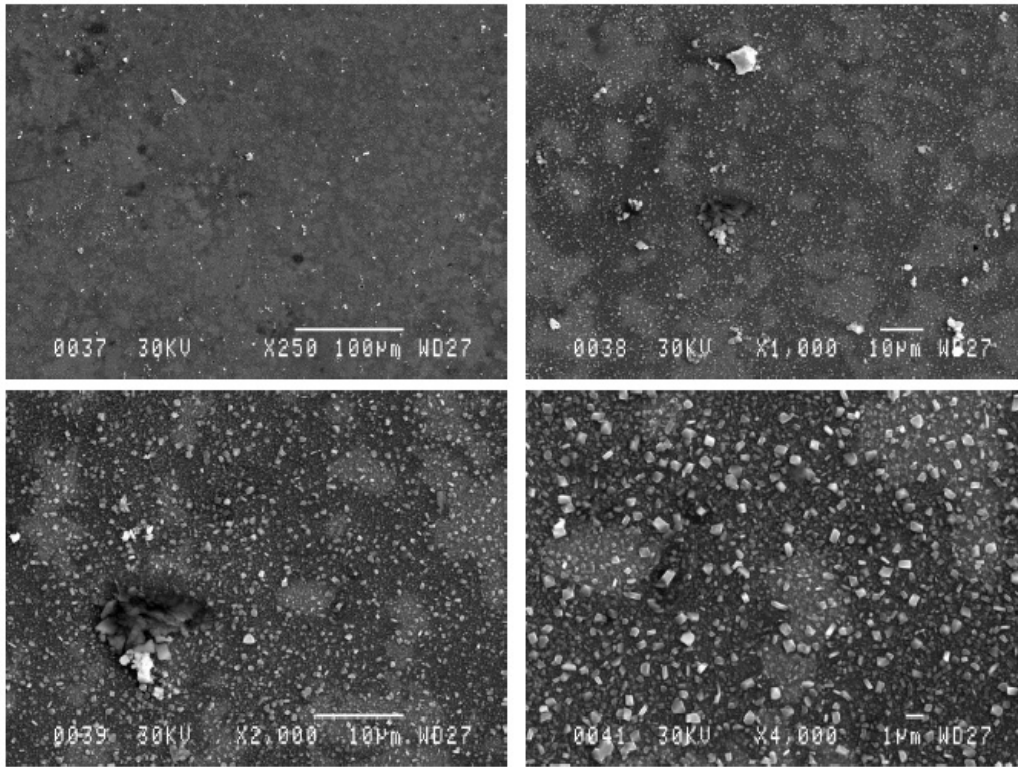


Figure 75 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate -3 side A 316L - Position 3 in Fig. 71

図 4.2(45) 316L 平板試験片 ID 番号-3 サイド A 位置 3 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 528 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

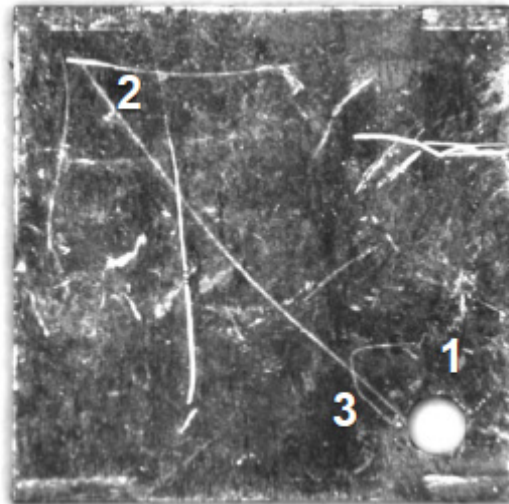


Figure 76 IFA-727.2: Macrograph of specimen Plate -3 side B 316L

図 4.2(46) 316L 平板試験片 ID 番号-3 サイド B の顕微鏡全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 528 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

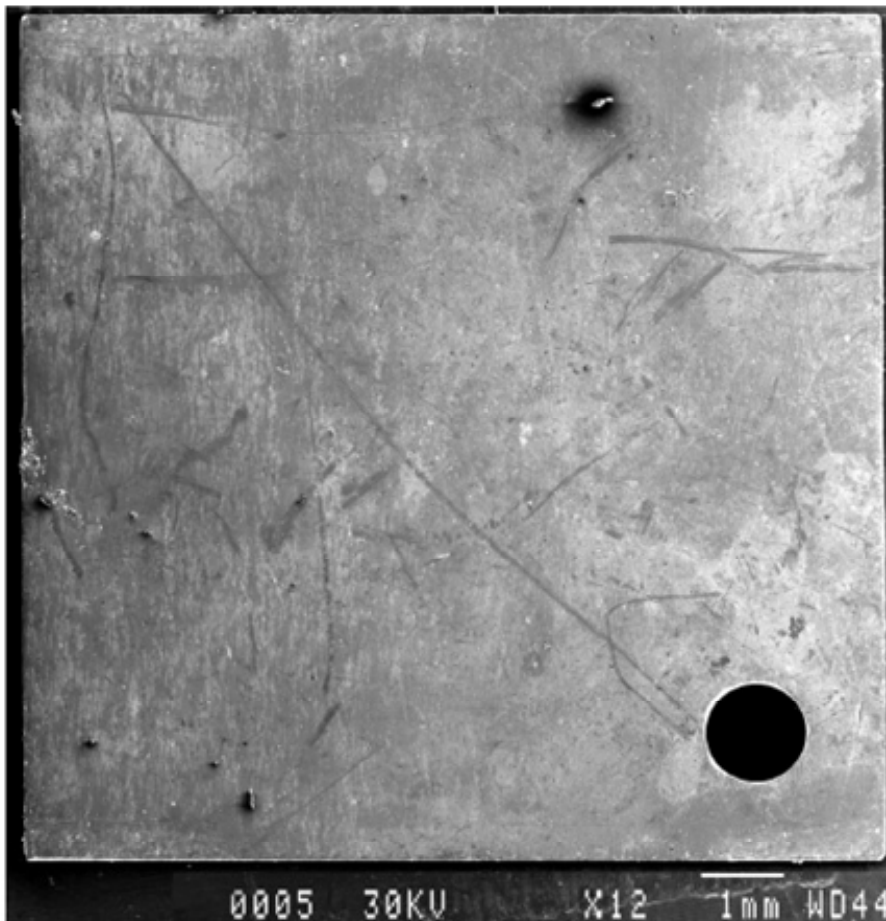


Figure 77 IFA-727.2: SEM overview of specimen Plate -3 side B 316L

図 4.2(47) 316L 平板試験片 ID 番号-3 サイド B の SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 528 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

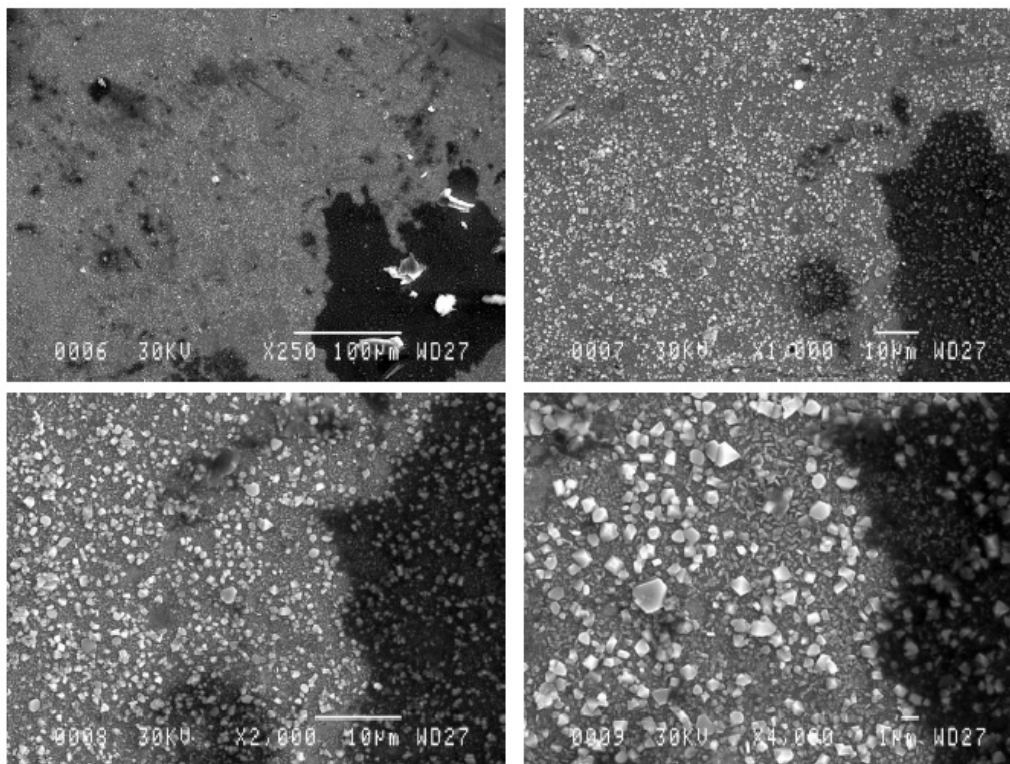


Figure 78 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate -3 side B 316L - Position 1 in Fig. 76

図 4.2(48) 316L 平板試験片 ID 番号-3 サイド B 位置 1 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 528 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

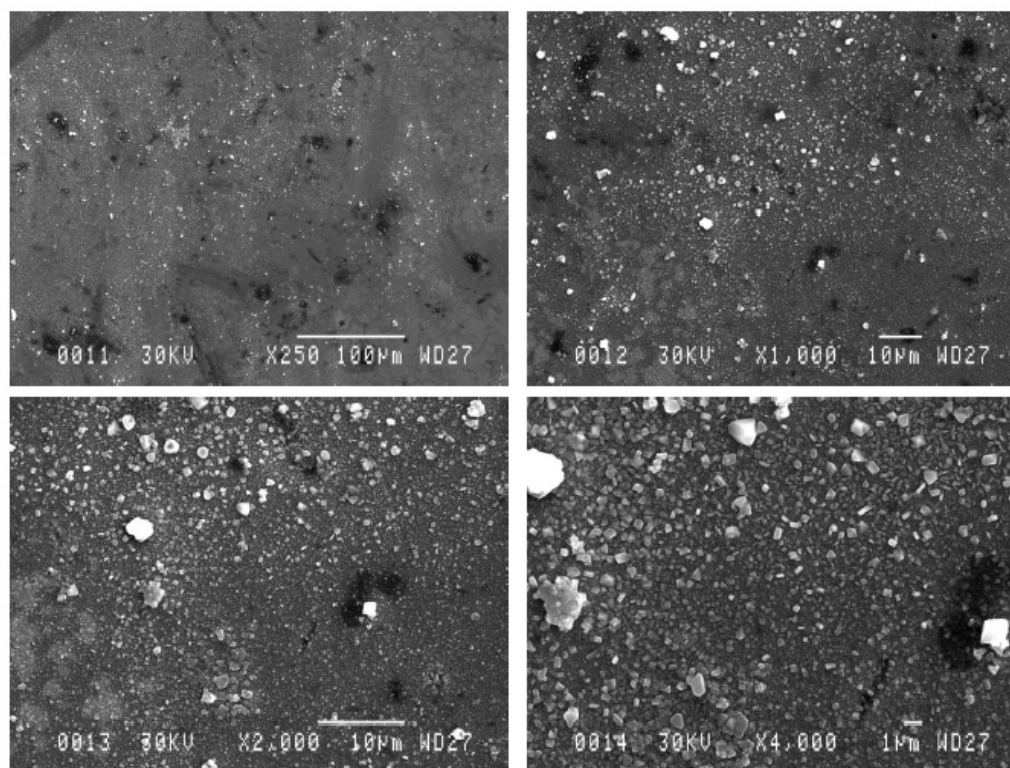


Figure 79 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate -3 side B 316L - Position 2 in Fig. 76

図 4.2(49) 316L 平板試験片 ID 番号-3 サイド B 位置 2 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 528 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

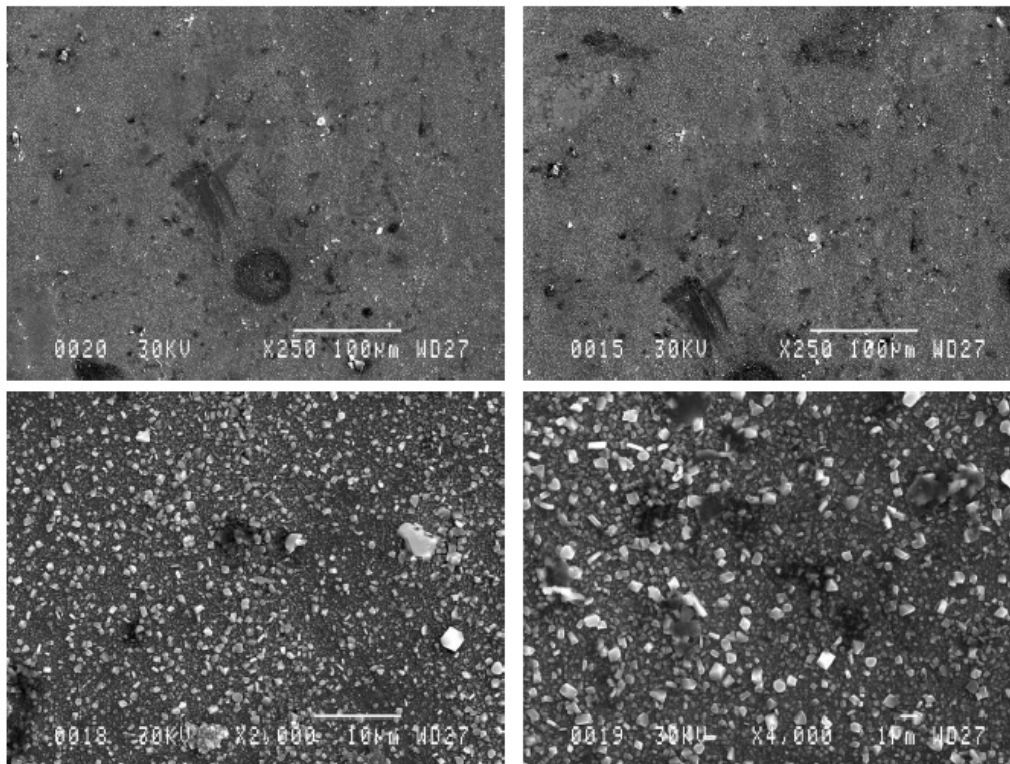


Figure 80 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate -3 side B 316L - Position 3 in Fig. 76

図 4.2(50) 316L 平板試験片 ID 番号-3 サイド B 位置 3 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 528 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

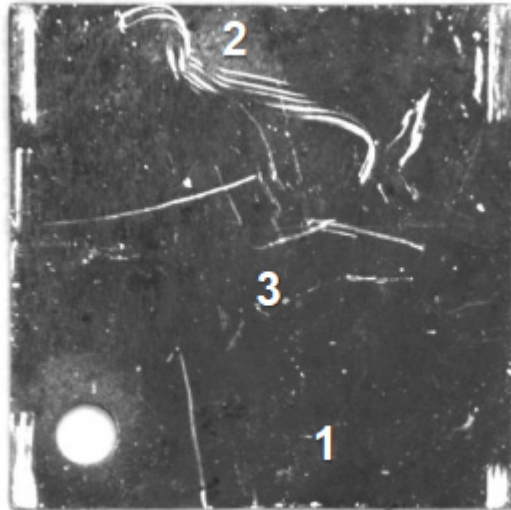


Figure 81 IFA-727.2: Macrograph of specimen Plate -5 side A 316L

図 4.2(51) 316L 平板試験片 ID 番号-5 サイド A の顕微鏡全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 1181 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -



Figure 82 IFA-727.2: SEM overview of specimen Plate -5 side A 316L

図 4.2(52) 316L 平板試験片 ID 番号-5 サイド A の SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 1181 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

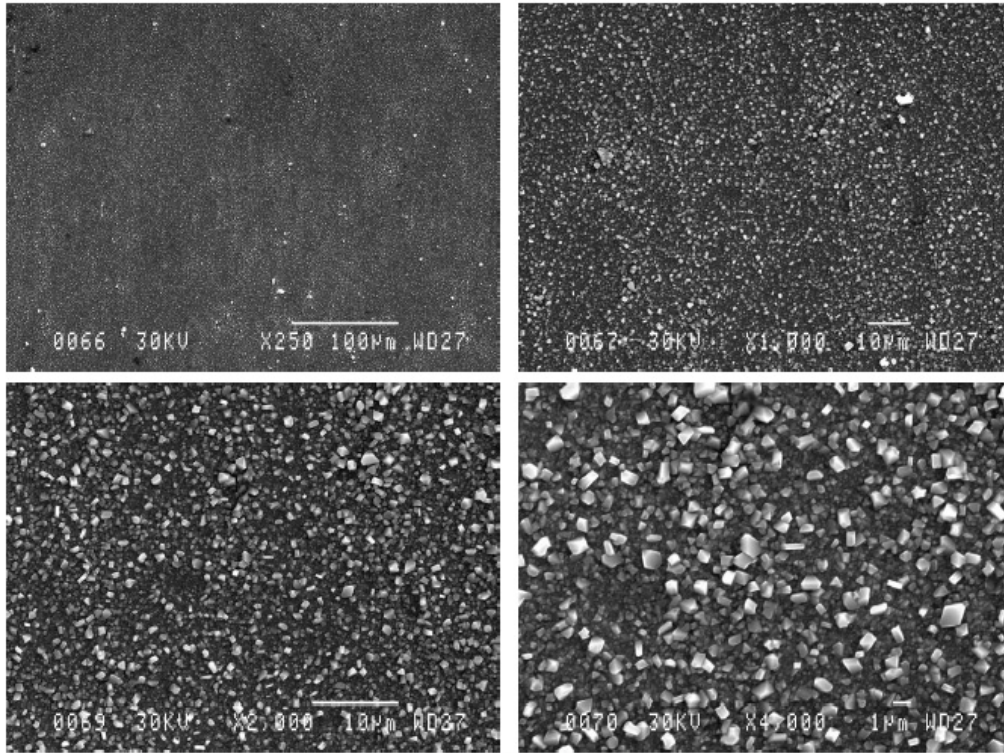


Figure 83 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate -5 side A 316L - Position 1 in Fig. 81

図 4.2(53) 316L 平板試験片 ID 番号-5 サイド A 位置 1 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 1181 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

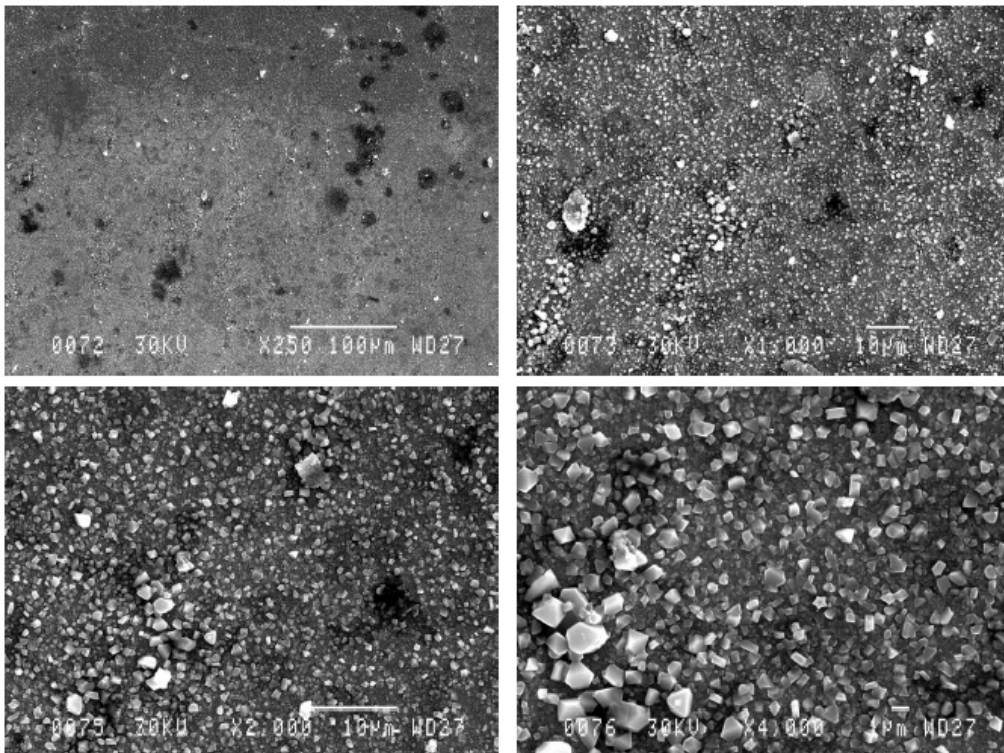


Figure 84 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate -5 side A 316L - Position 2 in Fig. 81

図 4.2(54) 316L 平板試験片 ID 番号-5 サイド A 位置 2 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 528 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

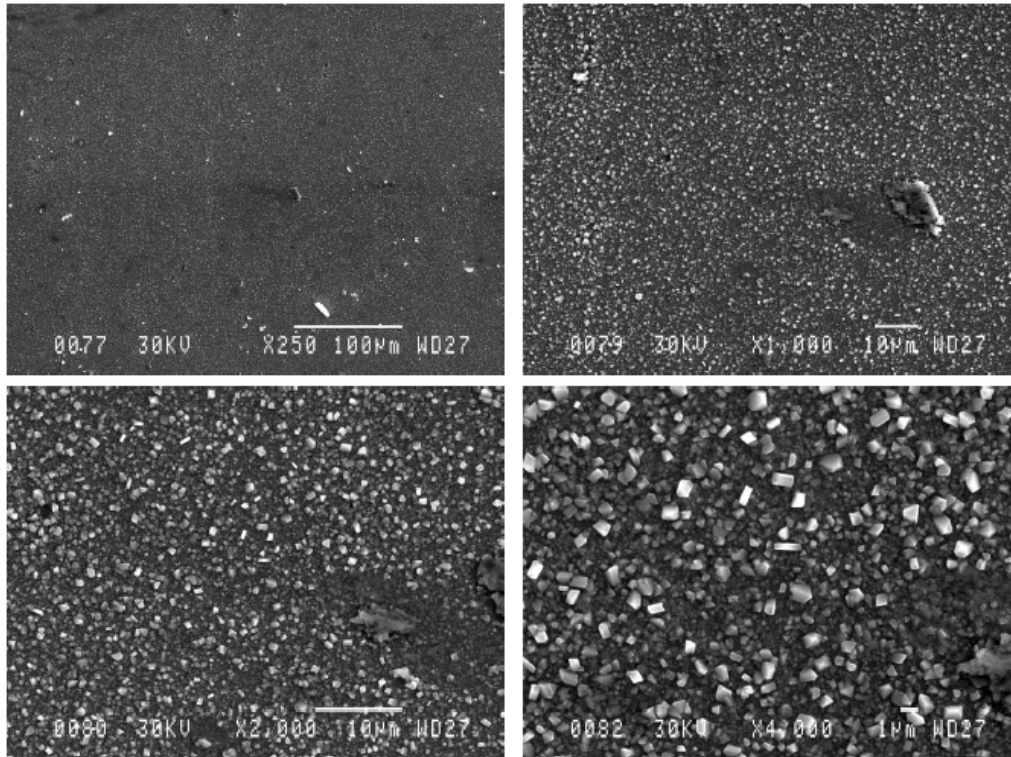


Figure 85 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate -5 side A 316L - Position 3 in Fig. 81

図 4.2(55) 316L 平板試験片 ID 番号-5 サイド A 位置 3 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 528 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

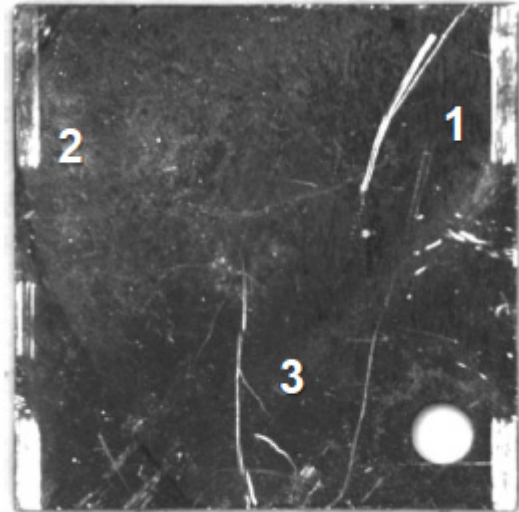


Figure 86 IFA-727.2: Macrograph of specimen Plate -5 side B 316L

図 4.2(56) 316L 平板試験片 ID 番号-5 サイド B の顕微鏡全体写真
- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 1181 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

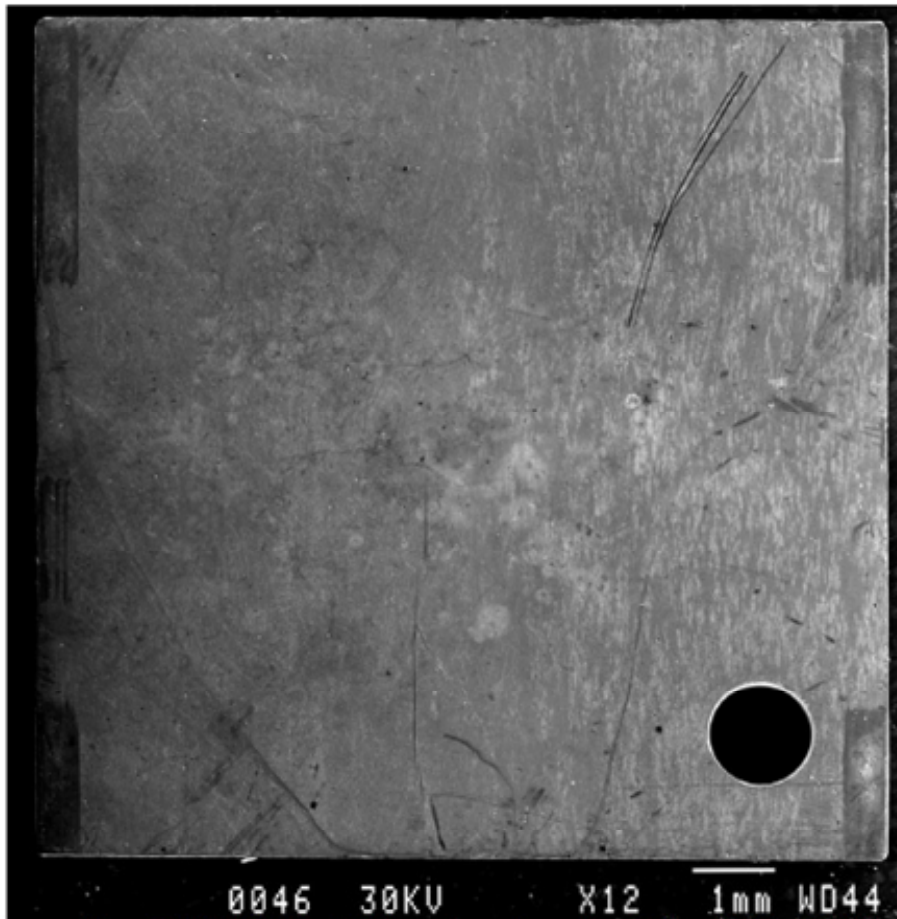


Figure 87 IFA-727.2: SEM overview of specimen Plate -5 side B 316L

図 4.2(57) 316L 平板試験片 ID 番号-5 サイド B の SEM 全体写真
- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 1181 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

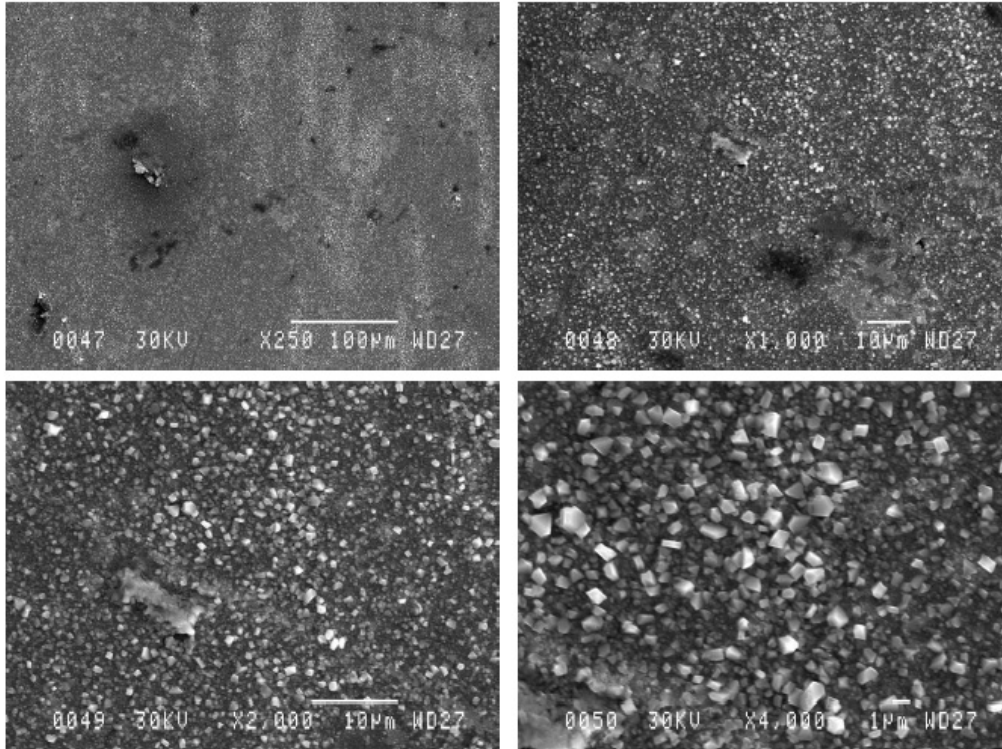


Figure 88 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate -5 side B 316L - Position 1 in Fig. 86

図 4.2(58) 316L 平板試験片 ID 番号-5 サイド B 位置 1 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 1181 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

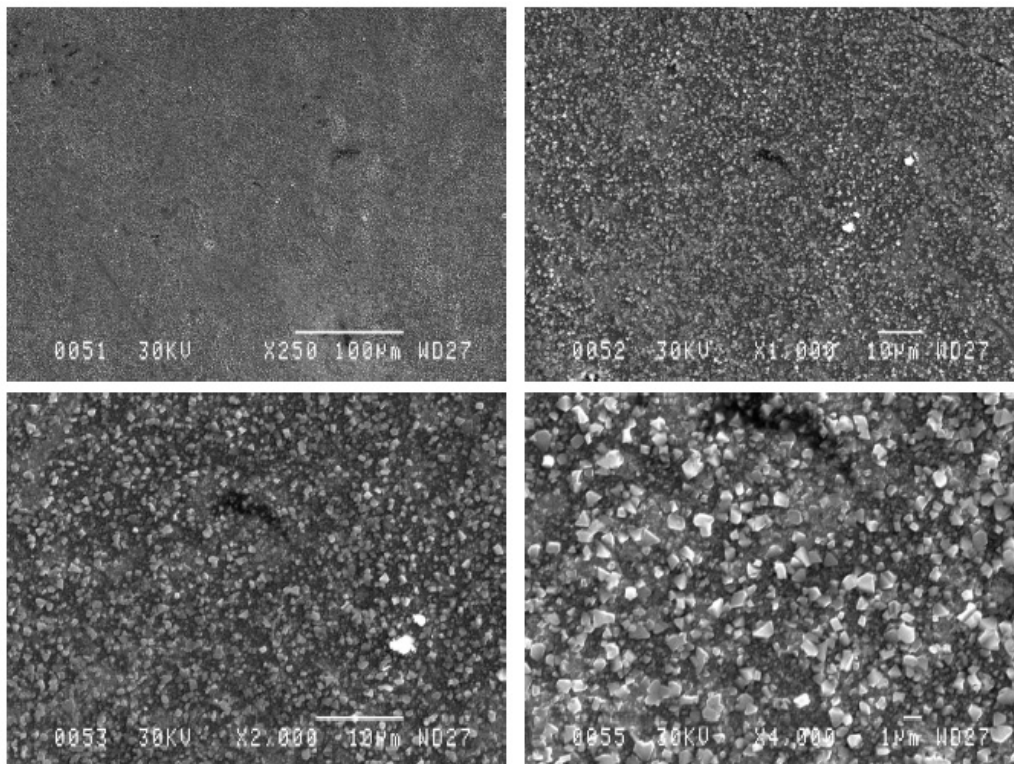


Figure 89 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate -5 side B 316L - Position 2 in Fig. 86

図 4.2(59) 316L 平板試験片 ID 番号-5 サイド B 位置 2 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 1181 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

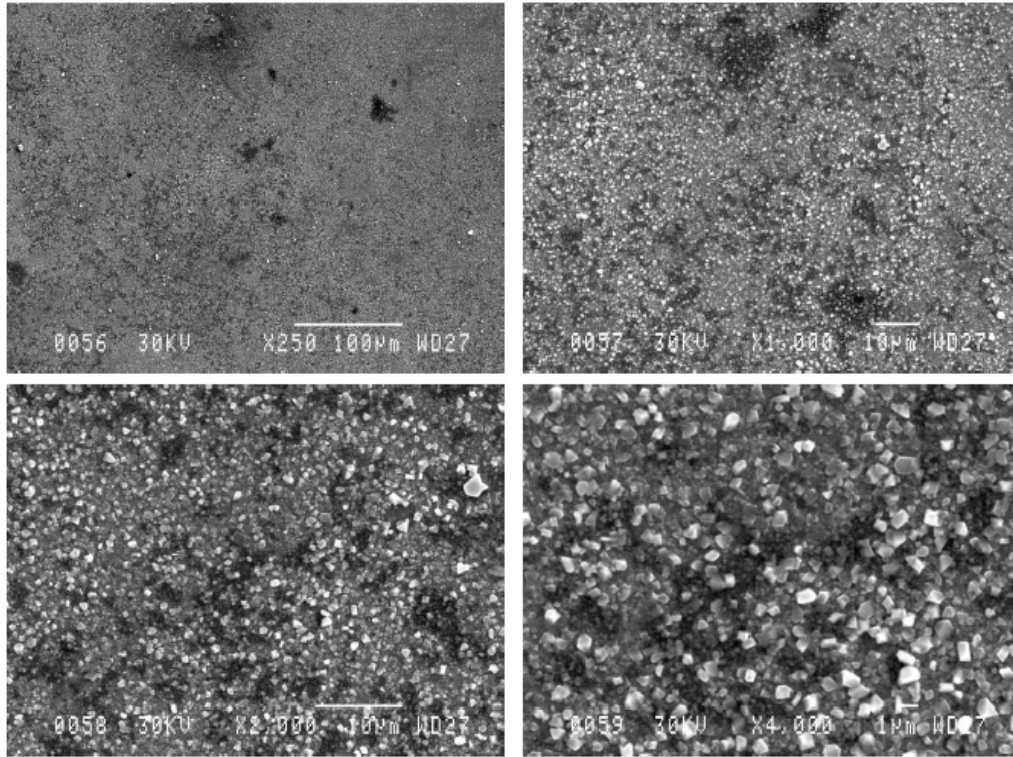


Figure 90 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate -5 side B 316L - Position 3 in Fig. 86

図 4.2(60) 316L 平板試験片 ID 番号-5 サイド B 位置 3 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 1181 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

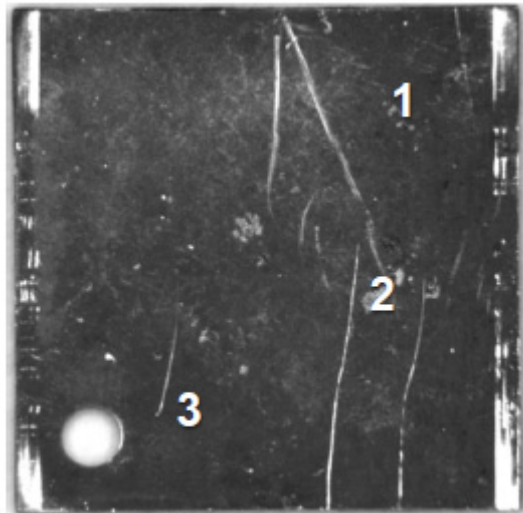


Figure 91 IFA-727.2: Macrograph of specimen Plate -7 side A 316L

図 4.2(61) 316L 平板試験片 ID 番号-7 サイド A の顕微鏡全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2572 時間、中性子束 $3.2 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

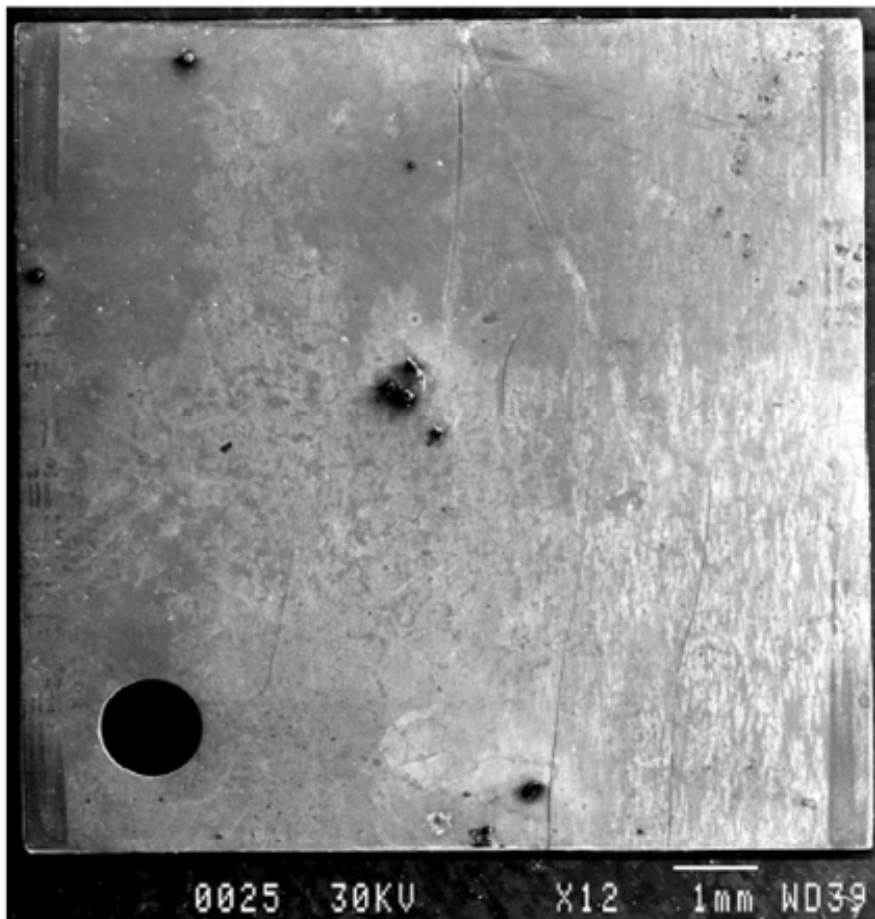


Figure 92 IFA-727.2: SEM overview of specimen Plate -7 side A 316L

図 4.2(62) 316L 平板試験片 ID 番号-7 サイド A の SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2572 時間、中性子束 $3.2 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

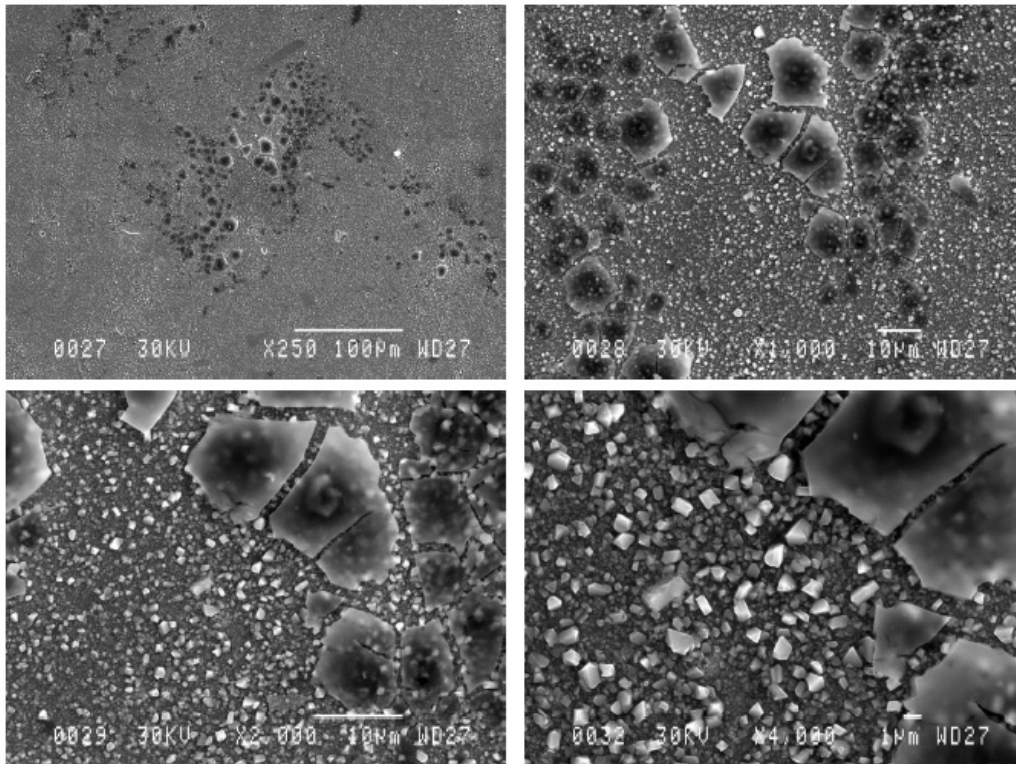


Figure 93 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate-7 side A 316L - Position 1 in Fig. 91

図 4.2(63) 316L 平板試験片 ID 番号-7 サイド A 位置 1 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2572 時間、中性子束 $3.2 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

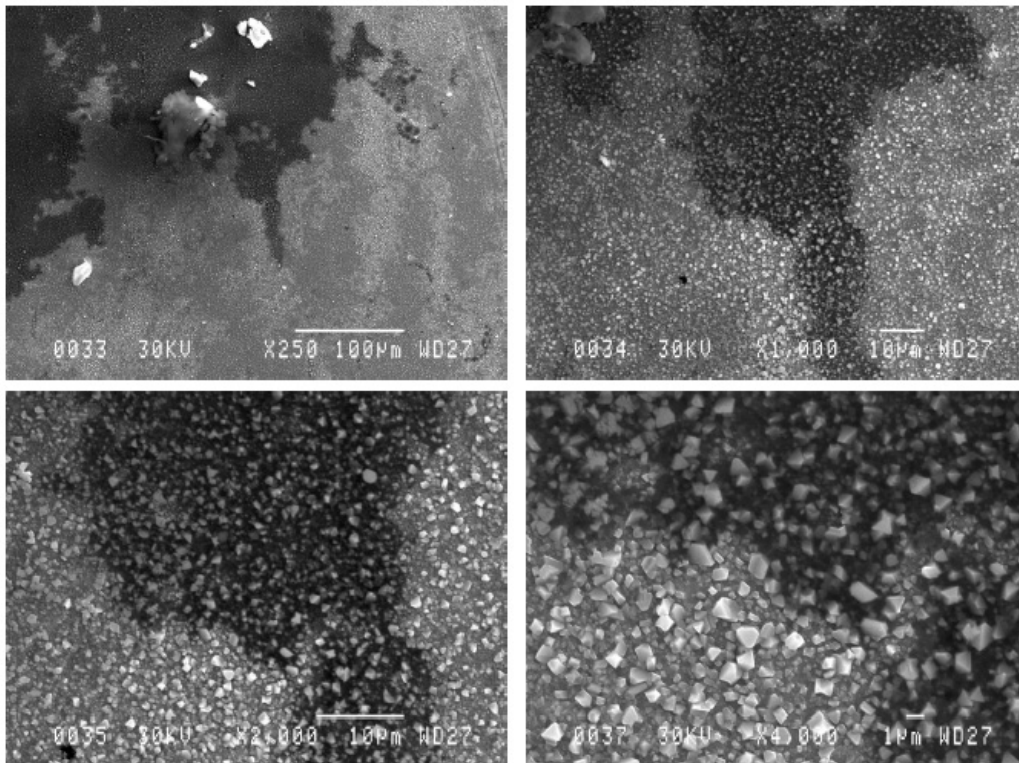


Figure 94 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate-7 side A 316L - Position 2 in Fig. 91

図 4.2(64) 316L 平板試験片 ID 番号-7 サイド A 位置 2 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2572 時間、中性子束 $3.2 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

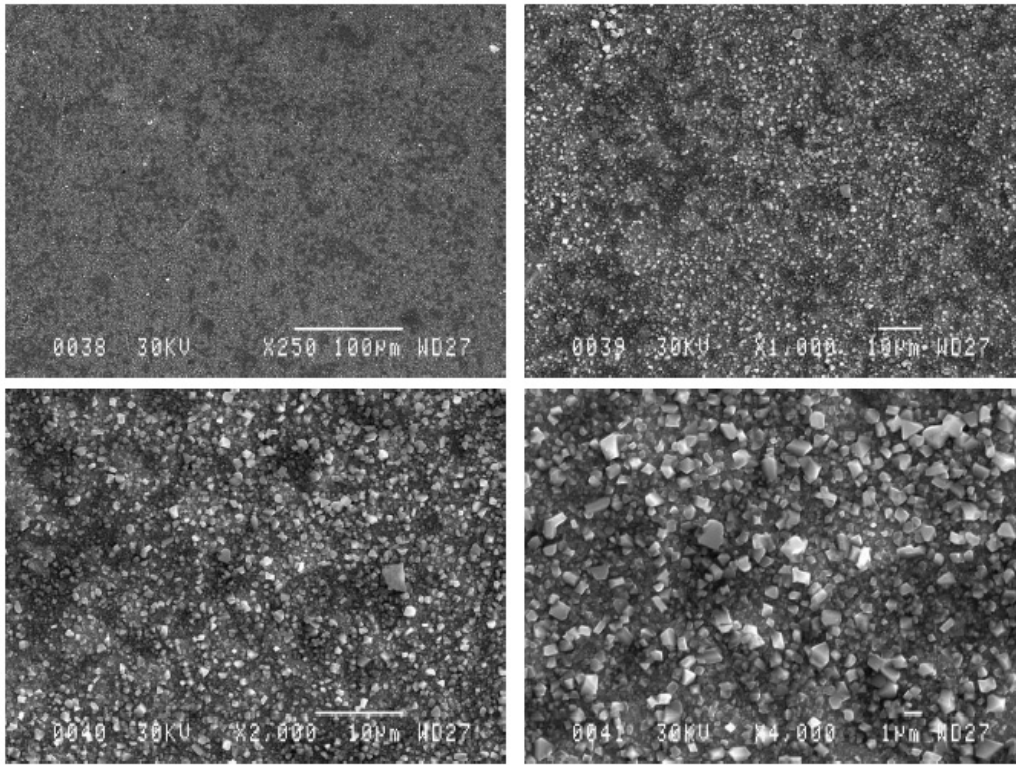


Figure 95 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate -7 side A 316L - Position 3 in Fig. 91

図 4.2(65) 316L 平板試験片 ID 番号-7 サイド A 位置 3 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2572 時間、中性子束 $3.2 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

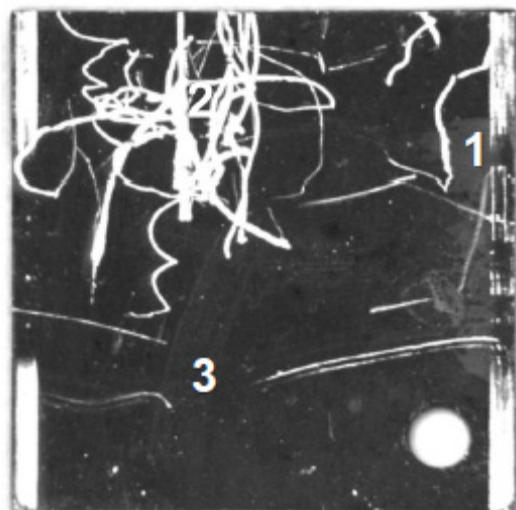


Figure 96 IFA-727.2: Macrograph of specimen Plate -7 side B 316L

図 4.2(66) 316L 平板試験片 ID 番号-7 サイド B の顕微鏡全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2572 時間、中性子束 $3.2 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

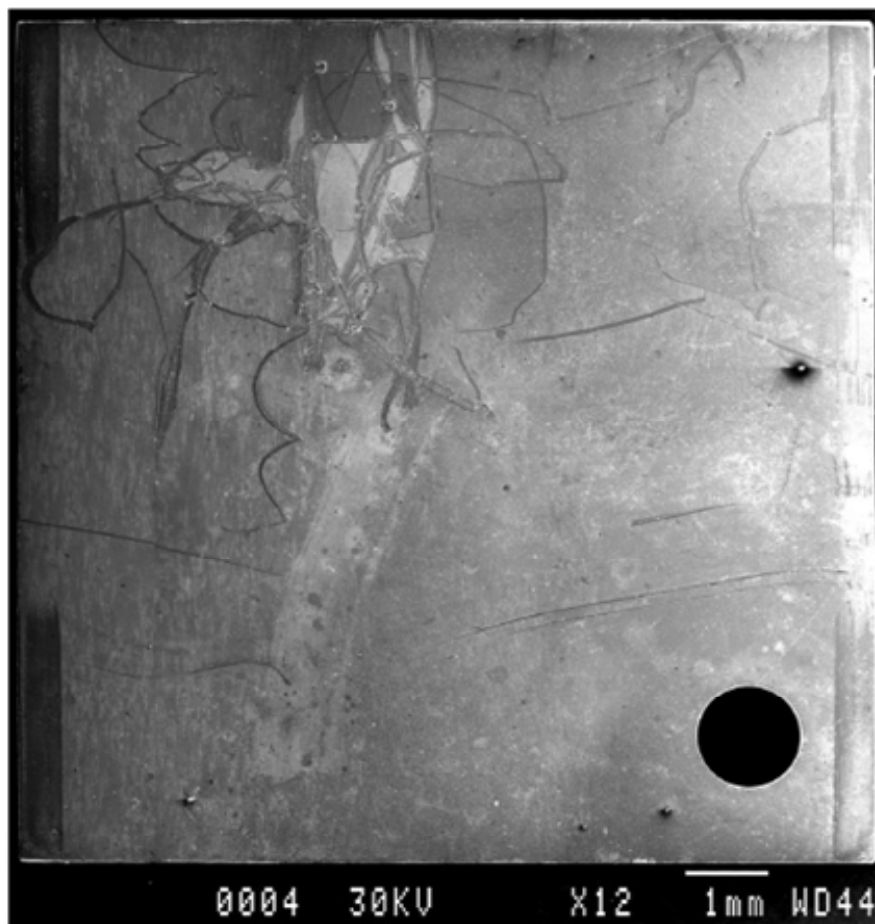


Figure 97 IFA-727.2: SEM overview of specimen Plate -7 side B 316L

図 4.2(67) 316L 平板試験片 ID 番号-7 サイド B の SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2572 時間、中性子束 $3.2 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

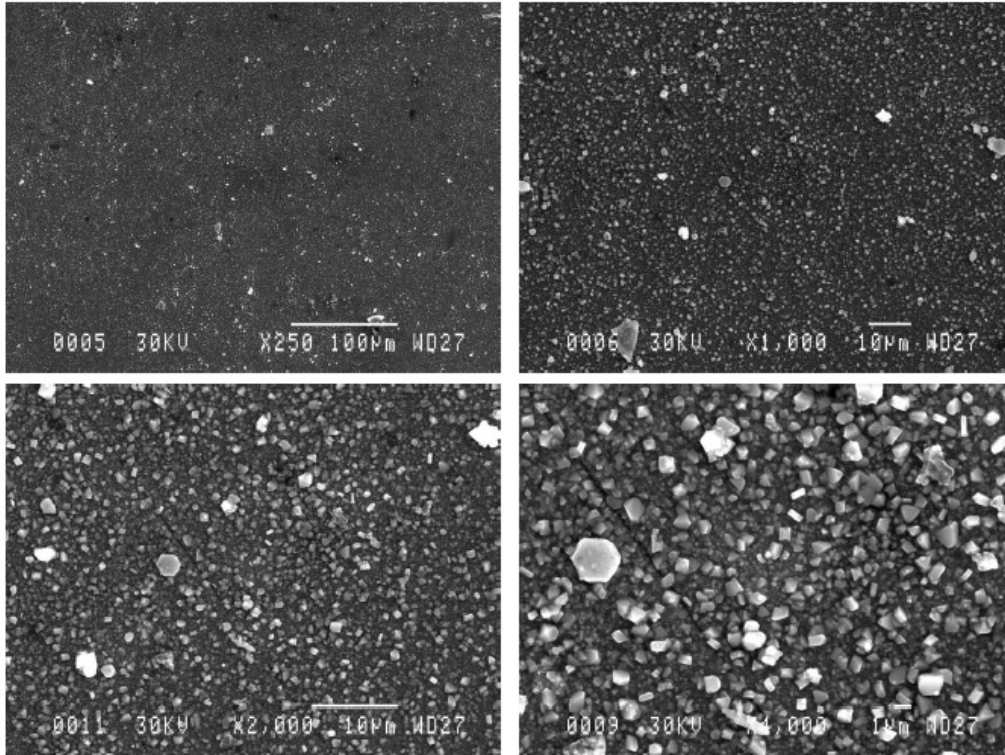


Figure 98 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate -7 side B 316L - Position 1 in Fig. 96

図 4.2(68) 316L 平板試験片 ID 番号-7 サイド B 位置 1 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2572 時間、中性子束 $3.2 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

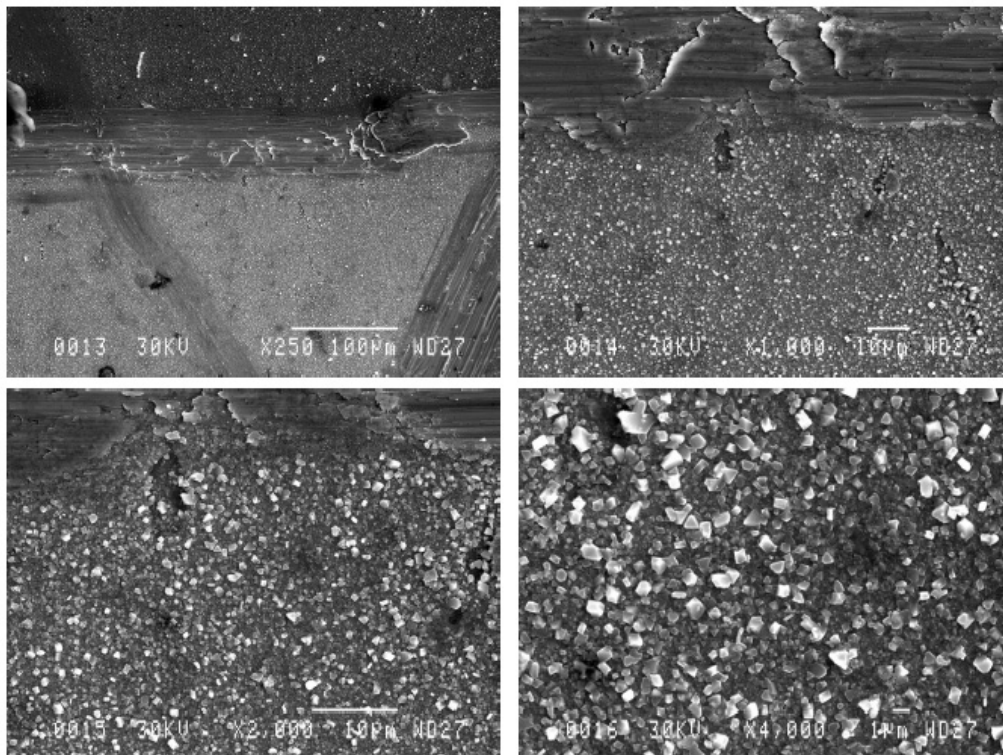


Figure 99 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate -7 side B 316L - Position 2 in Fig. 96

図 4.2(69) 316L 平板試験片 ID 番号-7 サイド B 位置 2 の SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2572 時間、中性子束 $3.2 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

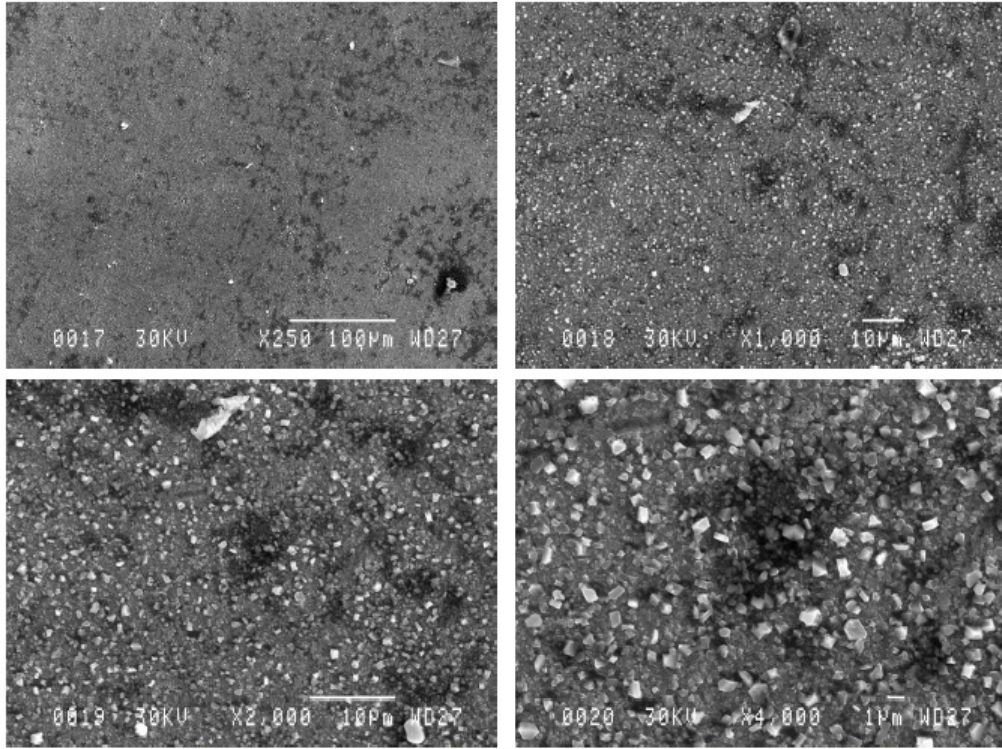


Figure 100 IFA-727.2: SEM details for specimen Plate -7 side B 316L - Position 3 in Fig. 96

図 4.2(70) 316L 平板試験片 ID 番号-7 サイド B 位置 3 の SEM 詳細写真
- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2572 時間、中性子束 $3.2 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

IFA-727.1 Plate 1 Side A (316L)

Corresponding SEM images

- Pos 1: Fig. 3
- Pos 2: Fig. 4
- Pos 3: Fig. 5

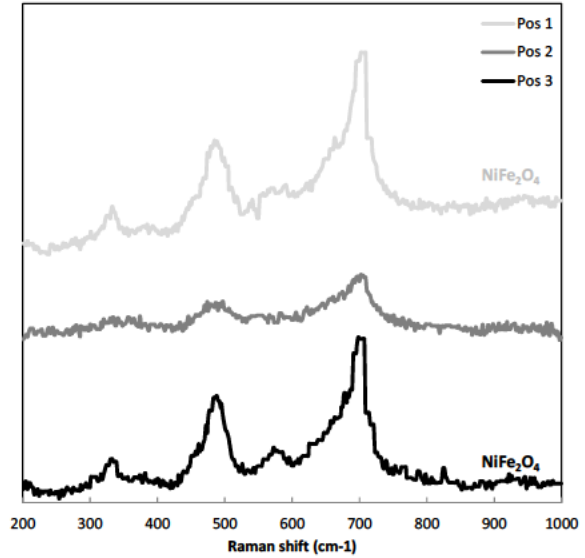
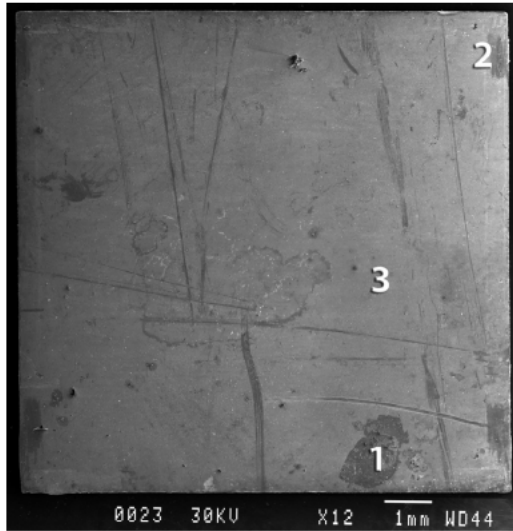


Figure 1 Raman from IFA-727.1 Plate 1 Side A (316L)

IFA-727.1 Plate 1 Side B (316L)

図 4.3(1) 316L 平板試験片 ID 番号 1 サイド A のラマンスペクトル

- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $3 \times 10^{12} (\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

IFA-727.1 Plate 1 Side B (316L)

Corresponding SEM images

- Pos 1: Fig. 8
- Pos 2: Fig. 9
- Pos 3: Fig. 10

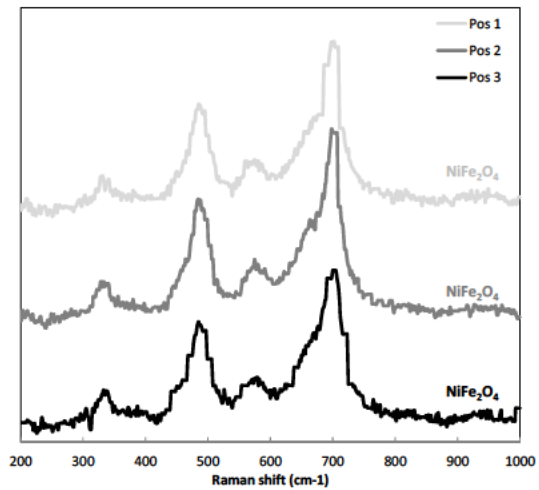
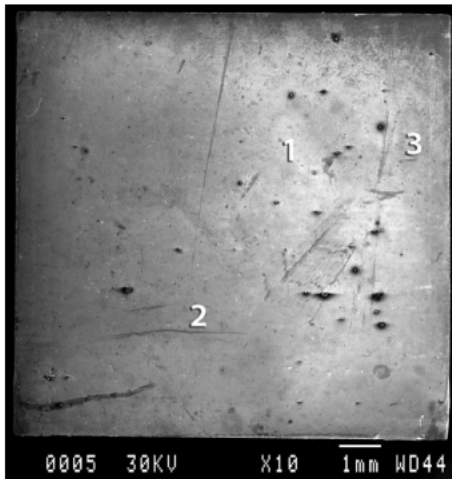


Figure 1 Raman from IFA-727.1 Plate 1 Side B (316L)

図 4.3(2) 316L 平板試験片 ID 番号 1 サイド B のラマンスペクトル

- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $3 \times 10^{12} (\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

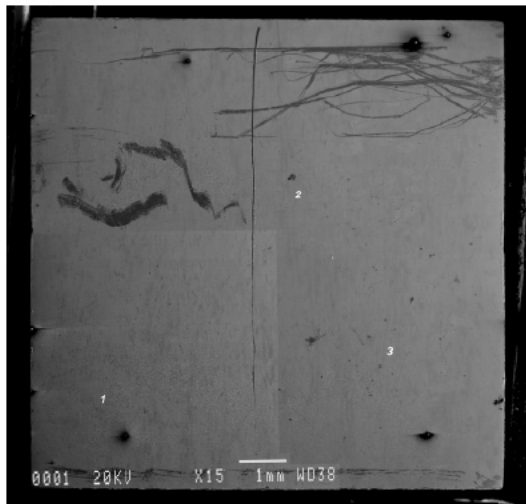


Figure 60 SEM overview of medium flux 316L plate sample 4, side B

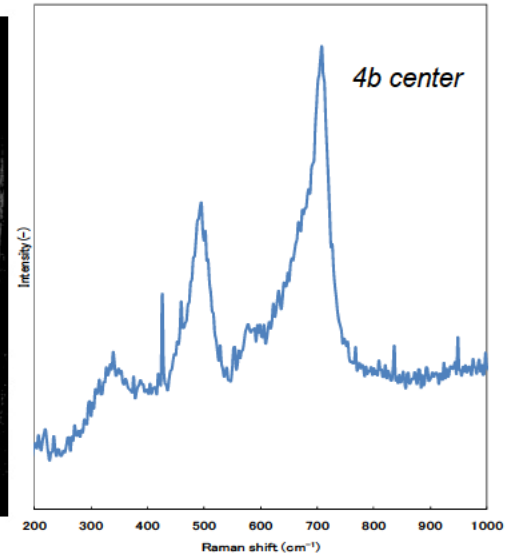


図 4.3(3) 316L 平板試験片 ID 番号 3 と同一条件で高温水中に浸漬、照射された
316L 平板試験片のラマンスペクトル^[1]

- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $5 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

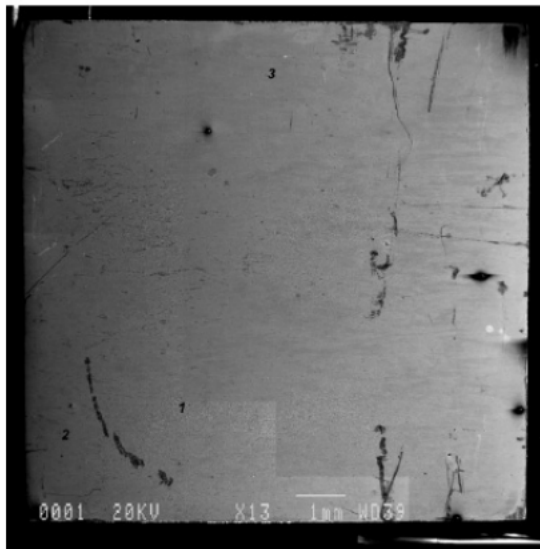


Figure 64 SEM overview of high flux 316L SS plate sample 6 side A

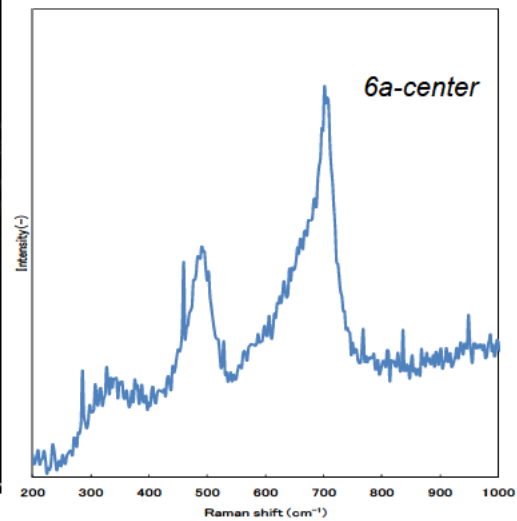


図 4.3(4) 316L 平板試験片 ID 番号 5 と同一条件で高温水中に浸漬、照射された
316L 平板試験片のラマンスペクトル^[1]

- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $2.9 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

IFA-727.2 Plate -1 Side A (316L)

Corresponding SEM images

Pos 1: Fig. 63

Pos 2: Fig. 64

Pos 3: Fig. 65

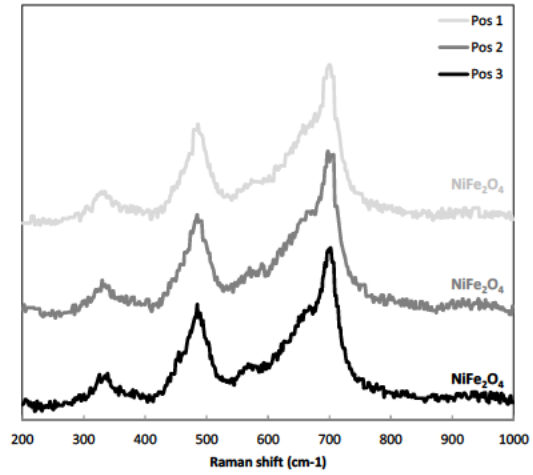
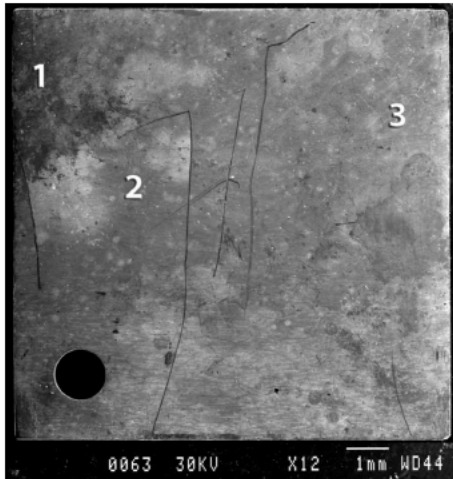


Figure 1 Raman from IFA-727.2 Plate -1 Side A (316L)

図 4.3(5) 316L 平板試験片 ID 番号-1 サイド A のラマンスペクトル

- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 864 時間、中性子束 $2.5 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

IFA-727.2 Plate -1 Side B (316L)

Corresponding SEM images

Pos 1: Fig. 68

Pos 2: Fig. 69

Pos 3: Fig. 70

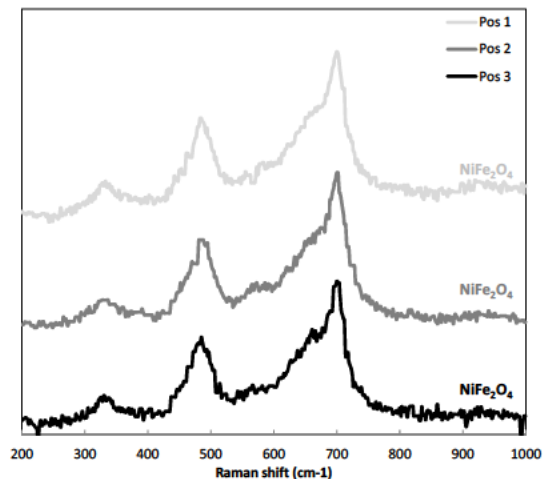
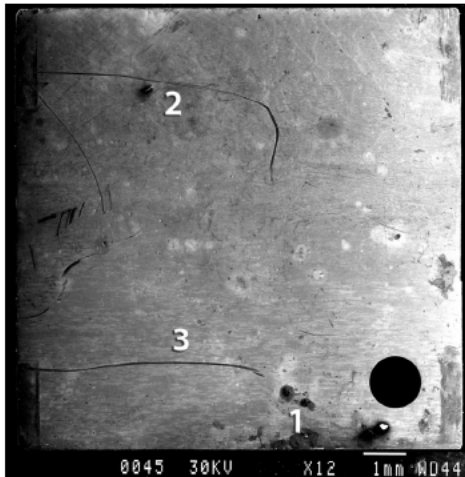


Figure 1 Raman from IFA-727.2 Plate -1 Side B (316L)

図 4.3(6) 316L 平板試験片 ID 番号-1 サイド B のラマンスペクトル

- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 864 時間、中性子束 $2.5 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

IFA-727.2 Plate -3 Side A (316L)

Corresponding SEM images

Pos 1: Fig. 73

Pos 2: Fig. 74

Pos 3: Fig. 75

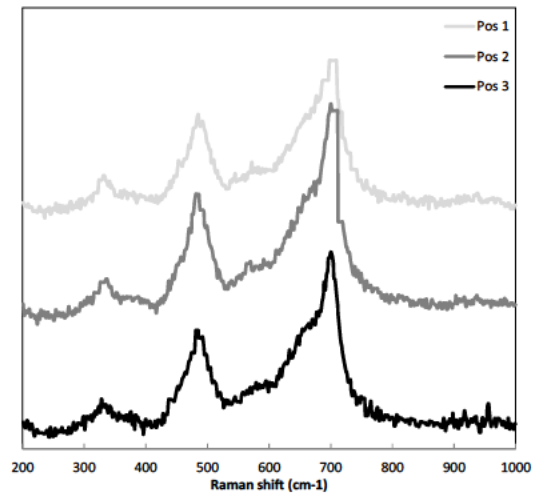
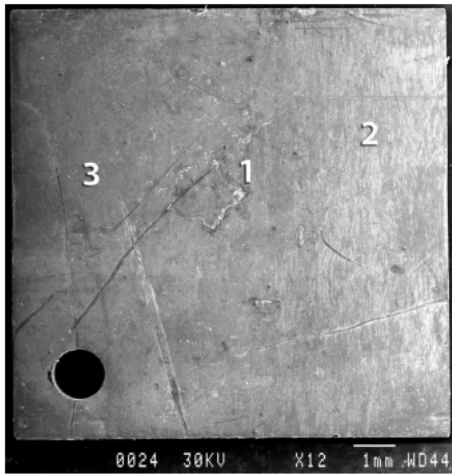


Figure 1 Raman from IFA-727.2 Plate -3 Side A (316L)

図 4.3(7) 316L 平板試験片 ID 番号-3 サイド A のラマンスペクトル

- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 528 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

IFA-727.2 Plate -3 Side B (316L)

Corresponding SEM images

Pos 1: Fig. 78

Pos 2: Fig. 79

Pos 3: Fig. 80

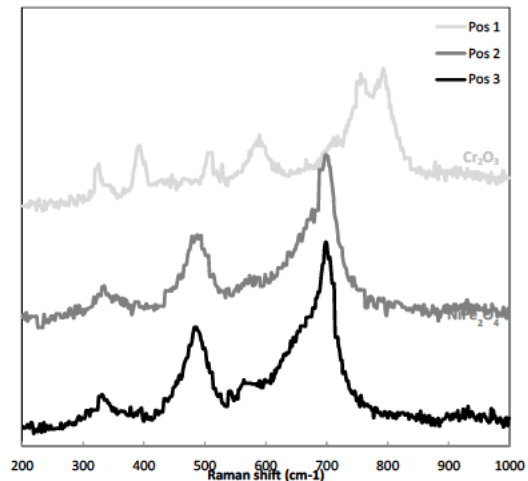
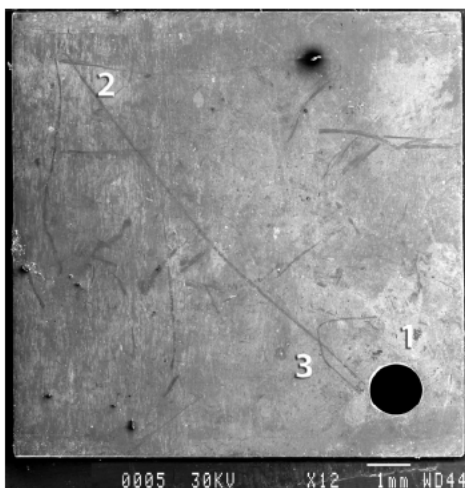


Figure 1 Raman from IFA-727.2 Plate -3 Side B (316L)

図 4.3(8) 316L 平板試験片 ID 番号-3 サイド B のラマンスペクトル

- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 528 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

IFA-727.2 Plate -5 Side A (316L)

Corresponding SEM images

Pos 1: Fig. 83

Pos 2: Fig. 84

Pos 3: Fig. 85

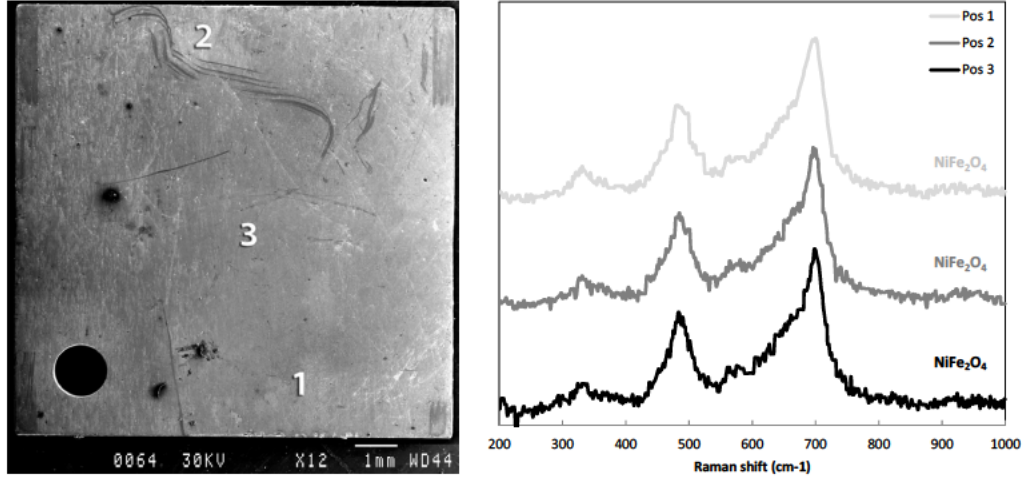


Figure 1 Raman from IFA-727.2 Plate -5 Side A (316L)

図 4.3(9) 316L 平板試験片 ID 番号-5 サイド A のラマンスペクトル

- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 1181 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

IFA-727.2 Plate -5 Side B (316L)

Corresponding SEM images

Pos 1: Fig. 88

Pos 2: Fig. 89

Pos 3: Fig. 90

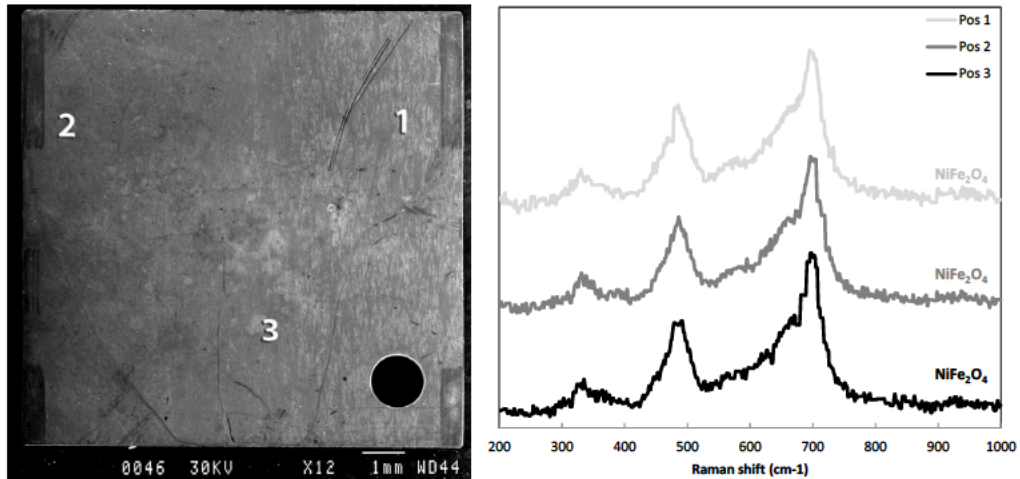


Figure 1 Raman from IFA-727.2 Plate -5 Side B (316L)

図 4.3(10) 316L 平板試験片 ID 番号-5 サイド B のラマンスペクトル

- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 1181 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

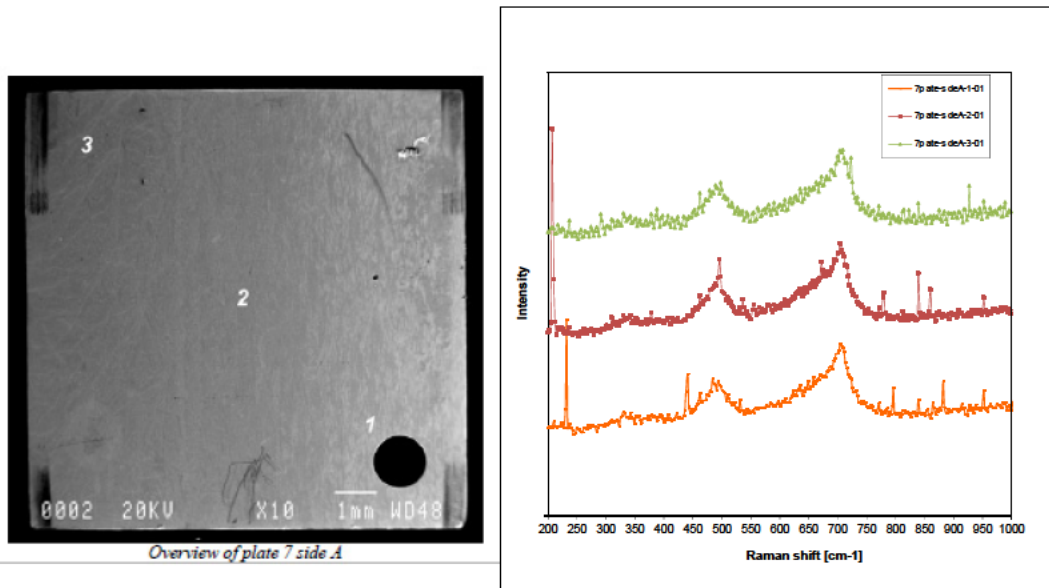


図 4.3(11) 316L 平板試験片 ID 番号-7 と同一条件で高温水中に浸漬、照射された
316L 平板試験片サイド A のラマンスペクトル^[2]

- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2572 時間、中性子束 $3.2 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s}) > 1 \text{ MeV}$ -

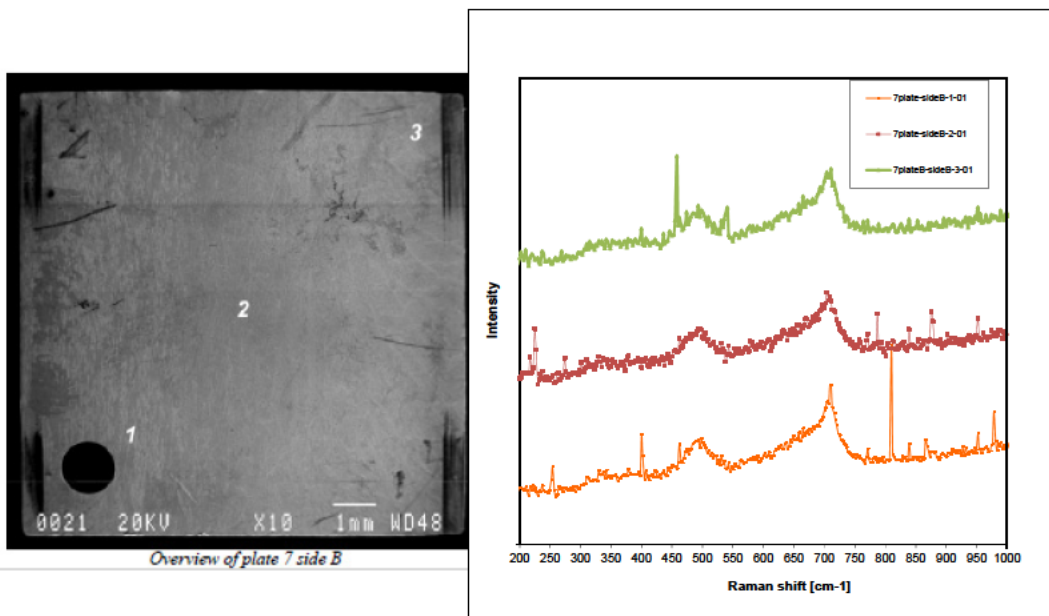


図 4.3(12) 316L 平板試験片 ID 番号-7 と同一条件で高温水中に浸漬、照射された
316L 平板試験片サイド B のラマンスペクトル^[2]

- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2572 時間、中性子束 $3.2 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s}) > 1 \text{ MeV}$ -

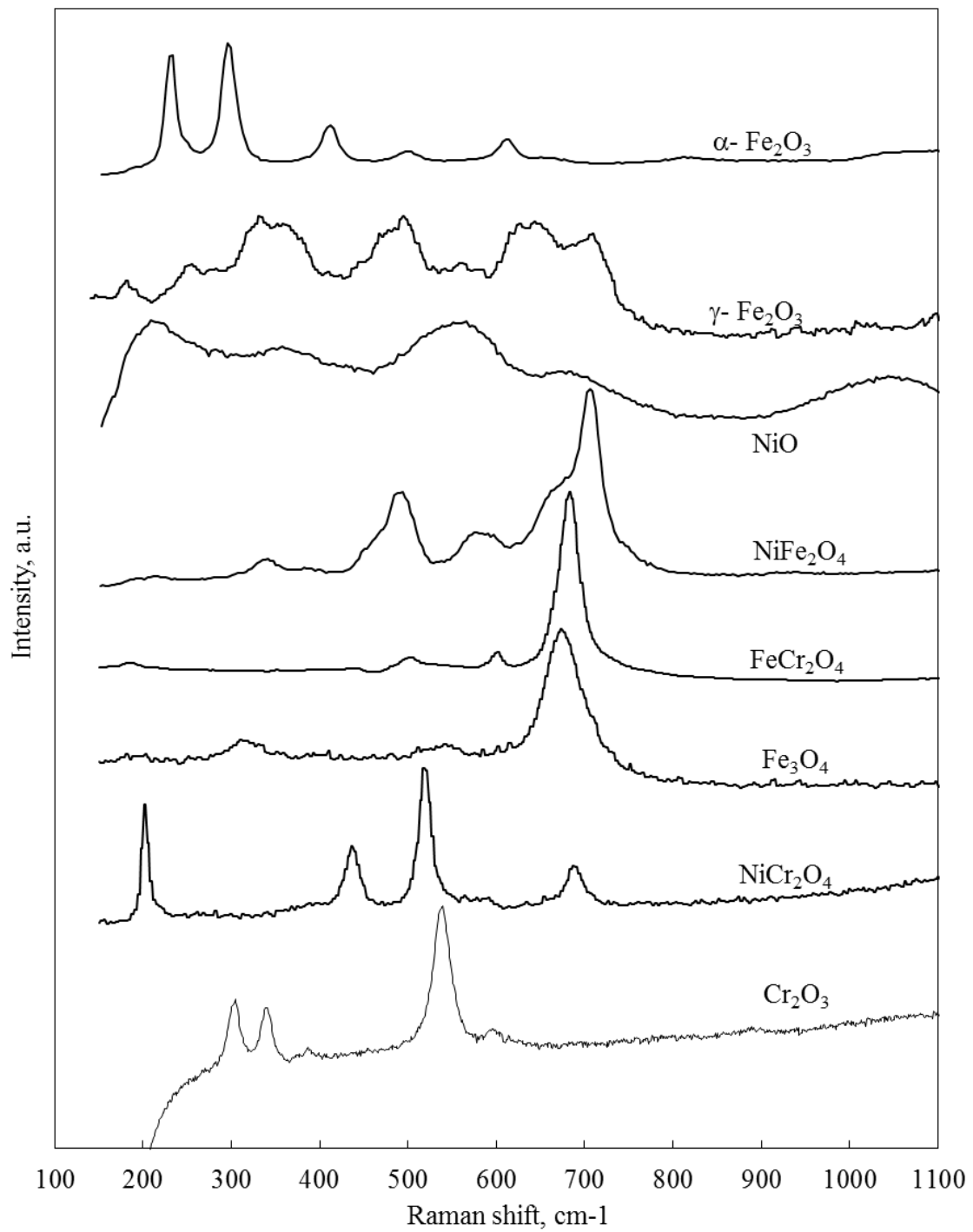


図 4.4 標準試薬粉末により得られるラマンスペクトル

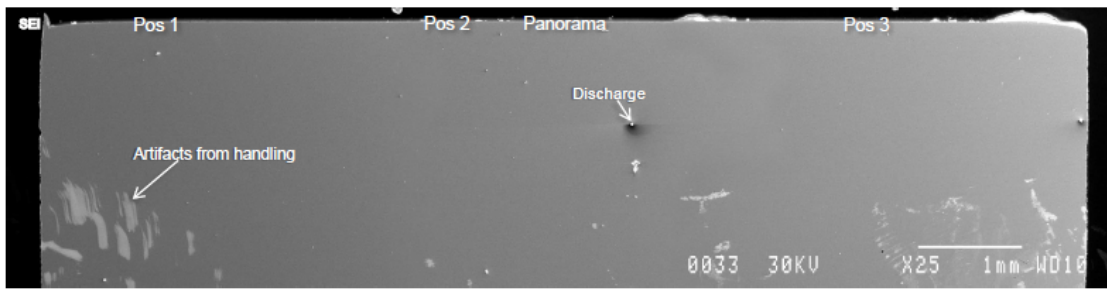


Figure 115 IFA-727.1 Plate 1 316L – 10° Cross section SEM – Overview

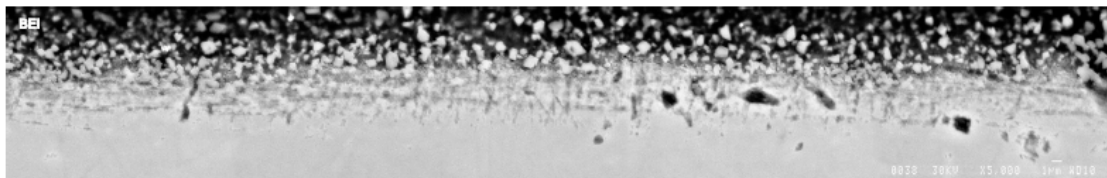


Figure 116 IFA-727.1 Plate 1 316L – 10° Cross section SEM – Panorama

図 4.5(1) 316L 平板試験片 ID 番号 1 サイド B の 10° 傾斜断面 SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $3 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

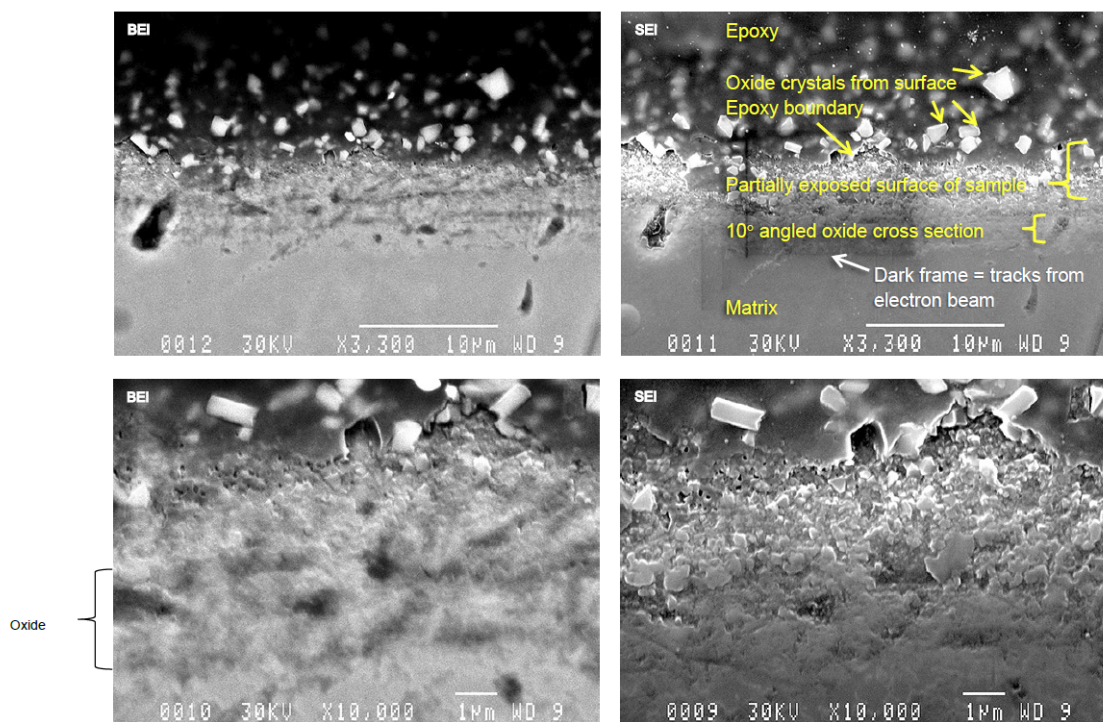


Figure 117 IFA-727.1 Plate 1 316L – 10° Cross section SEM – Details from Pos. 1

図 4.5(2) 316L 平板試験片 ID 番号 1 サイド B 位置 1(図 4.5(1))の 10° 傾斜断面 SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $3 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

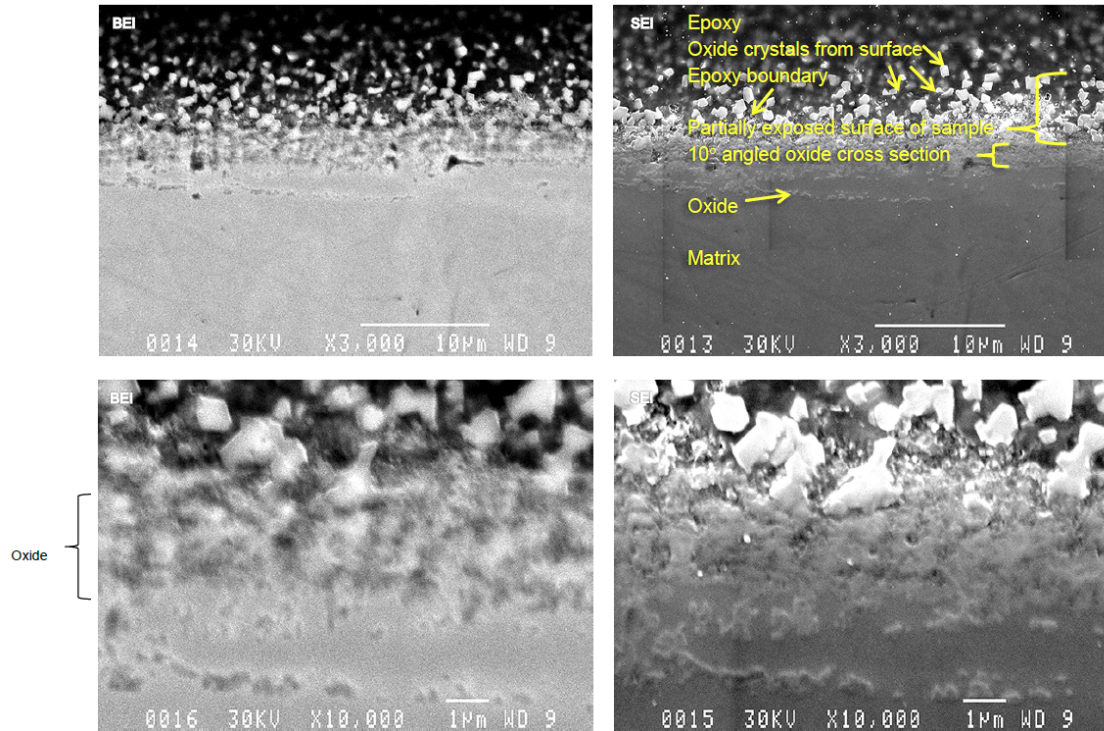


Figure 118 IFA-727.1 Plate 1 316L – 10° Cross section SEM – Details from Pos. 2

図 4.5(3) 316L 平板試験片 ID 番号 1 サイド B 位置 2(図 4.5(1))の 10° 傾斜断面 SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $3 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

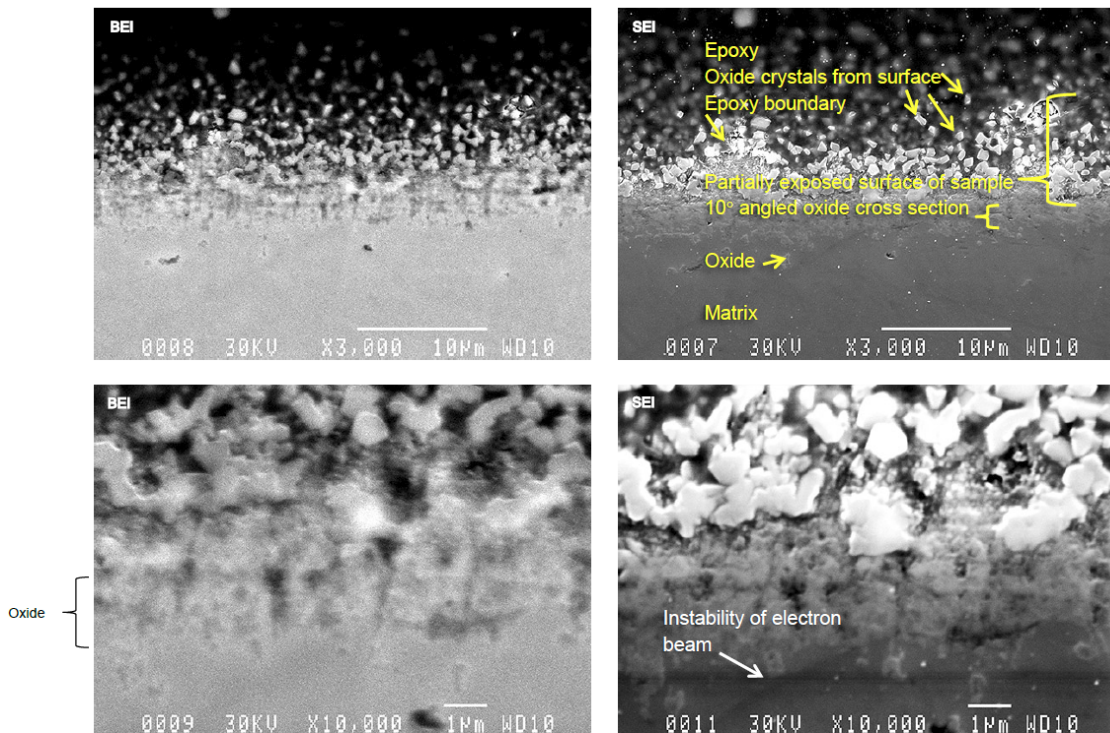


Figure 119 IFA-727.1 Plate1 316L – 10 degree cross section SEM – Details from Pos. 3

図 4.5(4) 316L 平板試験片 ID 番号 1 サイド B 位置 3(図 4.5(1))の 10° 傾斜断面 SEM 詳細写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $3 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

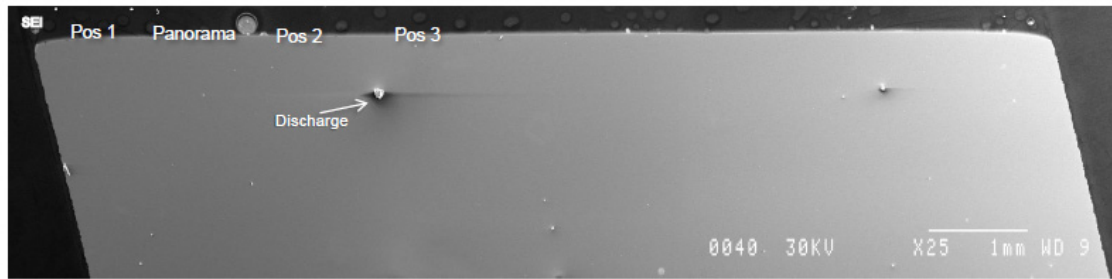


Figure 120 IFA-727.1 Plate3 316L – 10° Cross section SEM – Overview

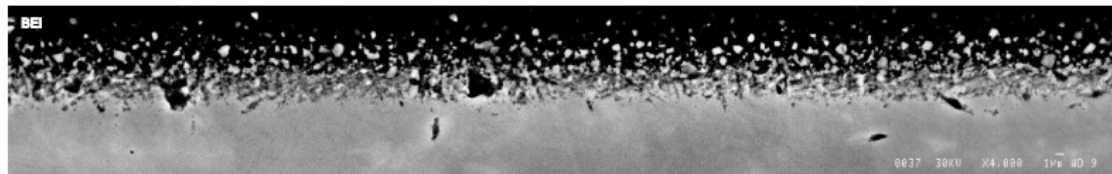


Figure 121 IFA-727.1 Plate3 316L – 10° Cross section SEM – Panorama

図 4.5(5) 316L 平板試験片 ID 番号 3 サイド B の 10° 傾斜断面 SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $5 \times 10^{12} (\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

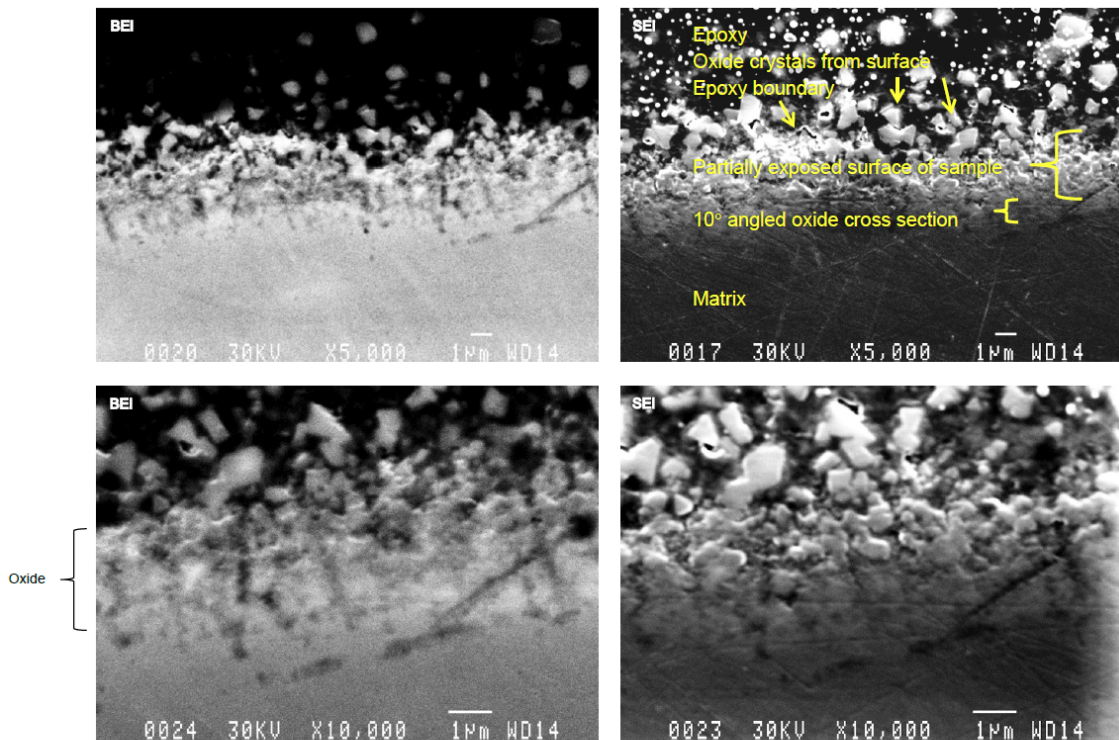


Figure 122 IFA-727.1 Plate3 316L – 10° Cross section SEM – Details from Pos. 1

図 4.5(6) 316L 平板試験片 ID 番号 3 サイド B 位置 1(図 4.5(5))の 10° 傾斜断面 SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $5 \times 10^{12} (\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

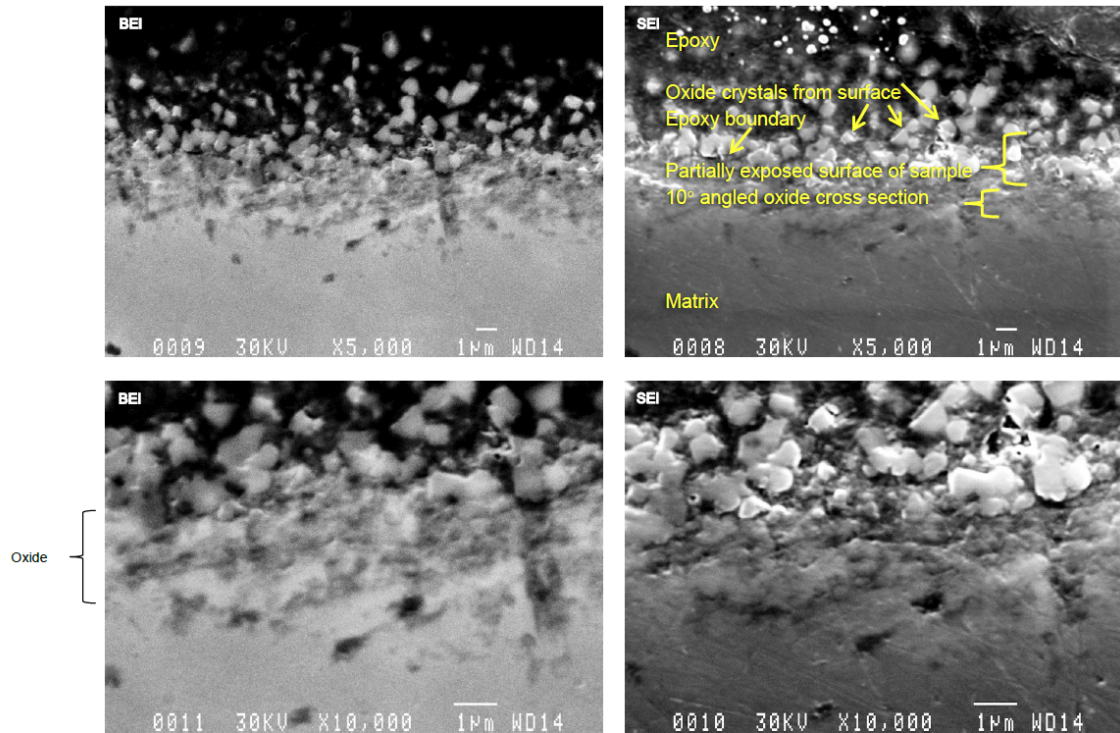


Figure 123 IFA-727.1 Plate3 316L – 10° Cross section SEM – Details from Pos. 2

図 4.5(7) 316L 平板試験片 ID 番号 3 サイド B 位置 2(図 4.5(5))の 10° 傾斜断面 SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $5 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

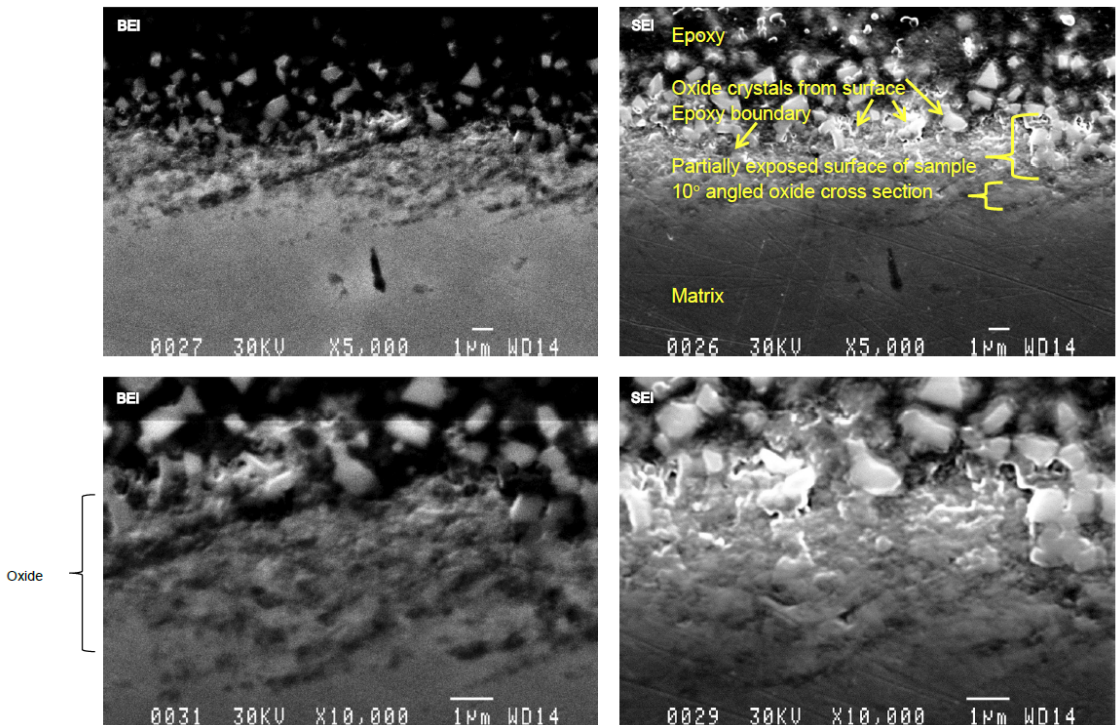


Figure 124 IFA-727.1 Plate3 316L – 10° Cross section SEM – Details from Pos. 3

図 4.5(8) 316L 平板試験片 ID 番号 3 サイド B 位置 3(図 4.5(5))の 10° 傾斜断面 SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $5 \times 10^{12}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

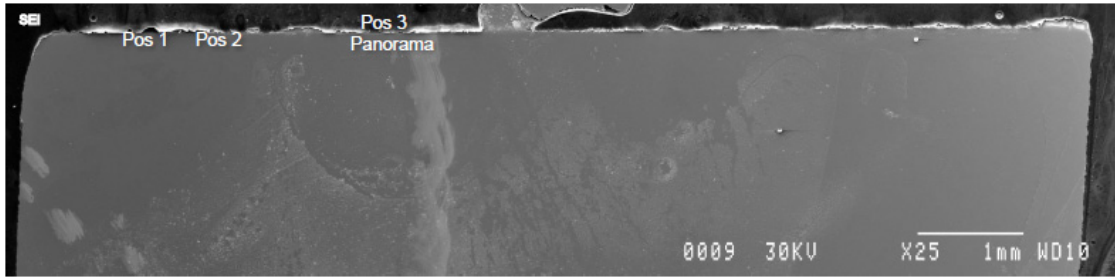


Figure 125 IFA-727.1 Plate5 316L – 10° Cross section SEM – Overview

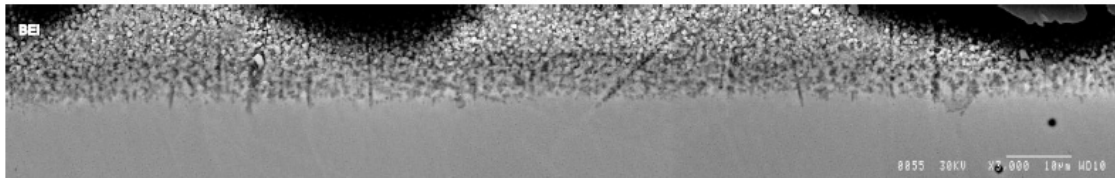


Figure 126 IFA-727.1 Plate5 316L – 10° Cross section SEM – Panorama

図 4.5(9) 316L 平板試験片 ID 番号 5 サイド B の 10° 傾斜断面 SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $2.9 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

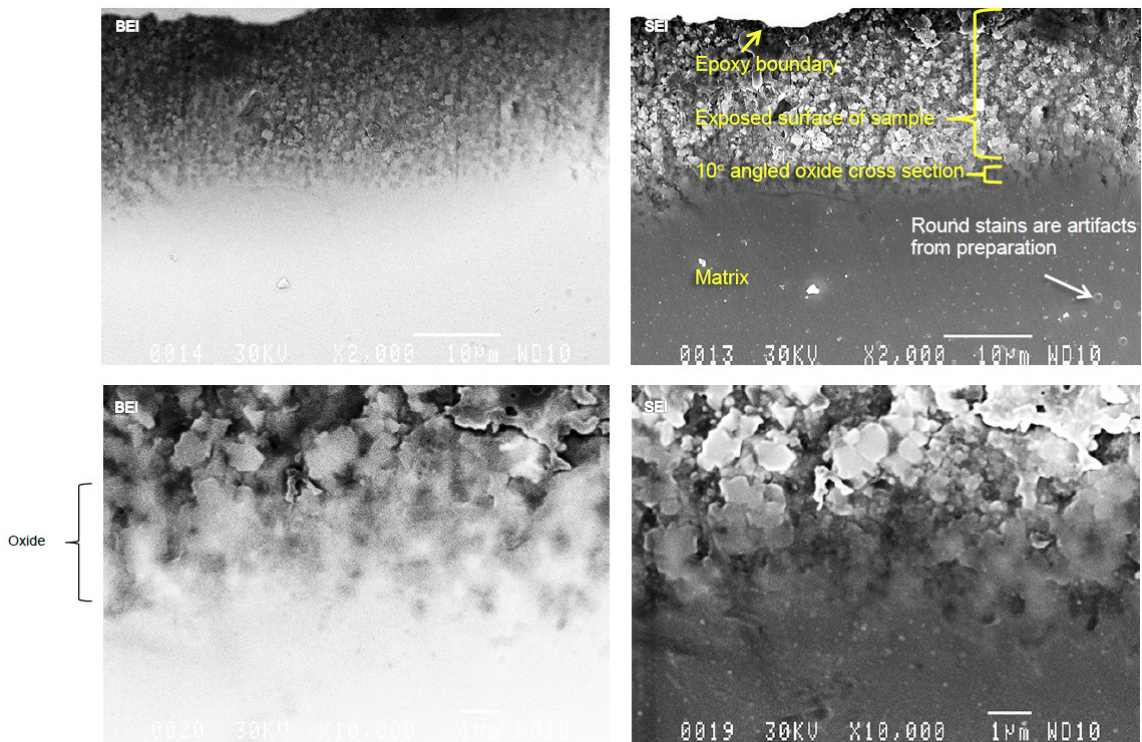


Figure 127 IFA-727.1 Plate5 316L – 10° Cross section SEM – Details from Pos. 1

図 4.5(10) 316L 平板試験片 ID 番号 5 サイド B 位置 1(図 4.5(9))の 10° 傾斜断面 SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $2.9 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

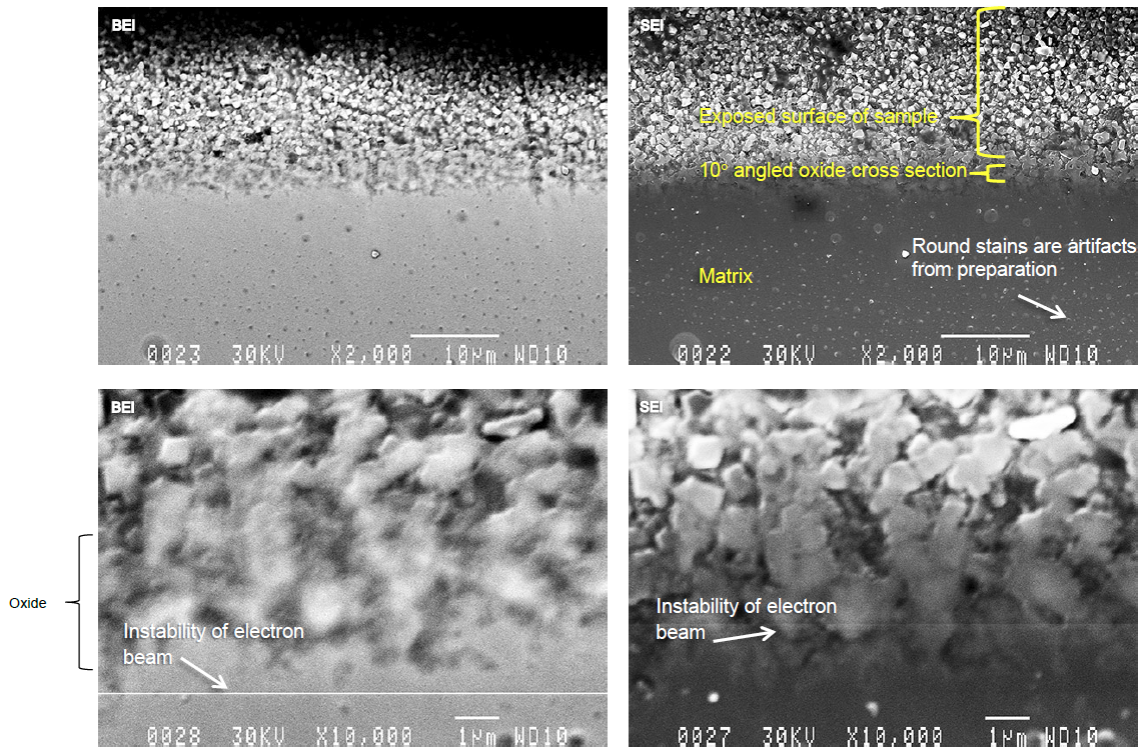


Figure 128 IFA-727.1 Plate5 316L – 10° Cross section SEM – Details from Pos. 2

図 4.5(11) 316L 平板試験片 ID 番号 5 サイド B 位置 2(図 4.5(9))の 10° 傾斜断面 SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $2.9 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

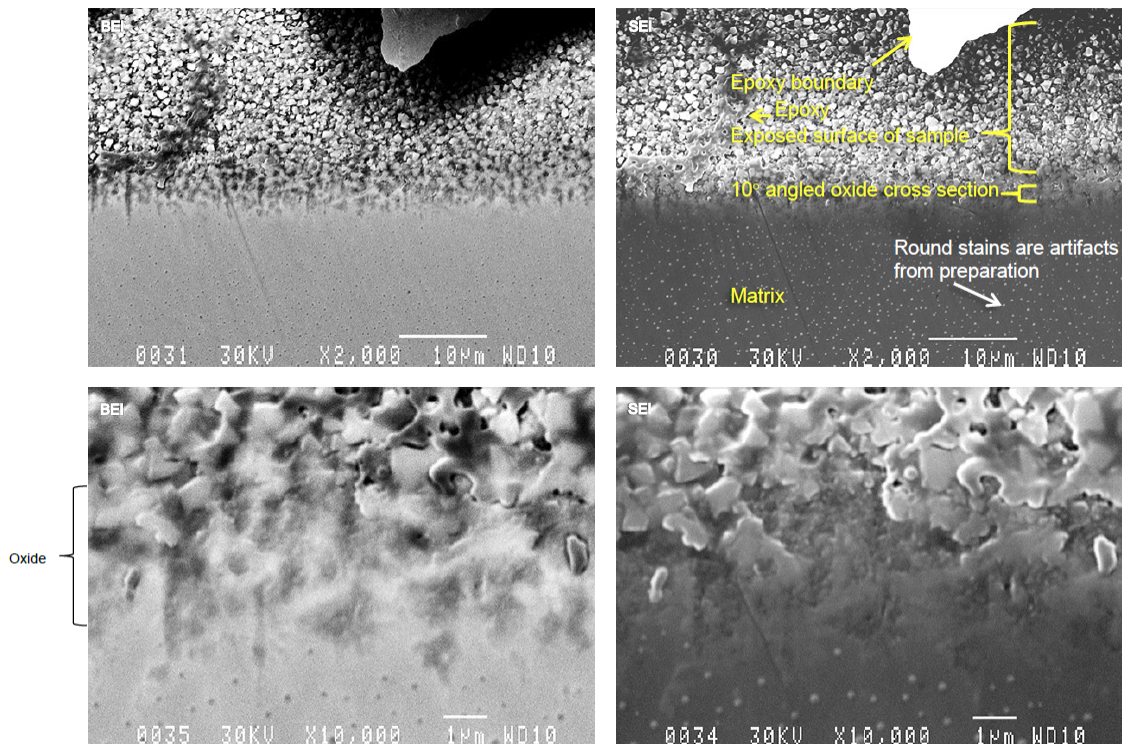


Figure 129 IFA-727.1 Plate5 316L – 10° Cross section SEM – Details from Pos. 3

図 4.5(12) 316L 平板試験片 ID 番号 5 サイド B 位置 3(図 4.5(9))の 10° 傾斜断面 SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2233 時間、中性子束 $2.9 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

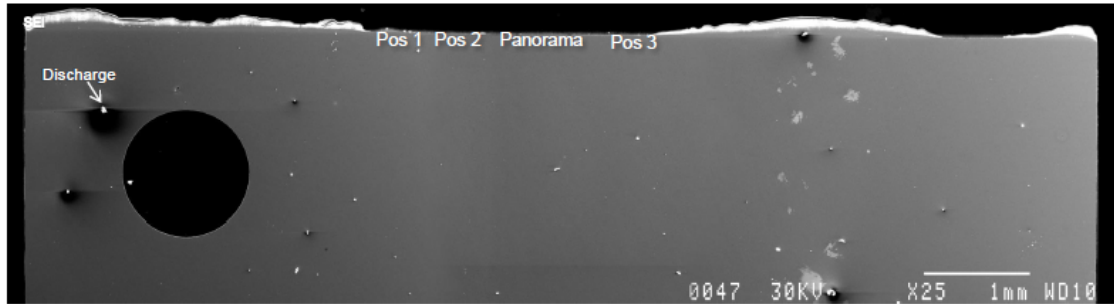


Figure 145 IFA-727.2 Plate-1 316L – 10° Cross section SEM – Overview

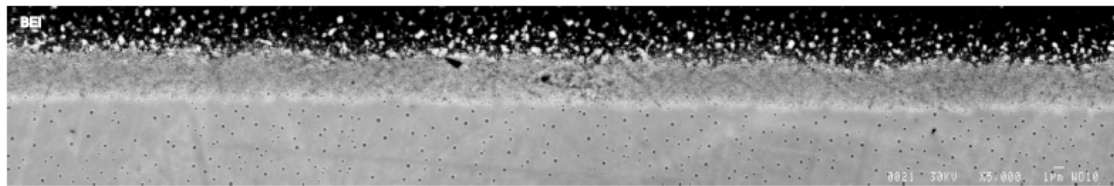


Figure 146 IFA-727.2 Plate-1 316L – 10° Cross section SEM – Panorama

図 4.5(13) 316L 平板試験片 ID 番号-1 サイド B の 10° 傾斜断面 SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 864 時間、中性子束 $2.5 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

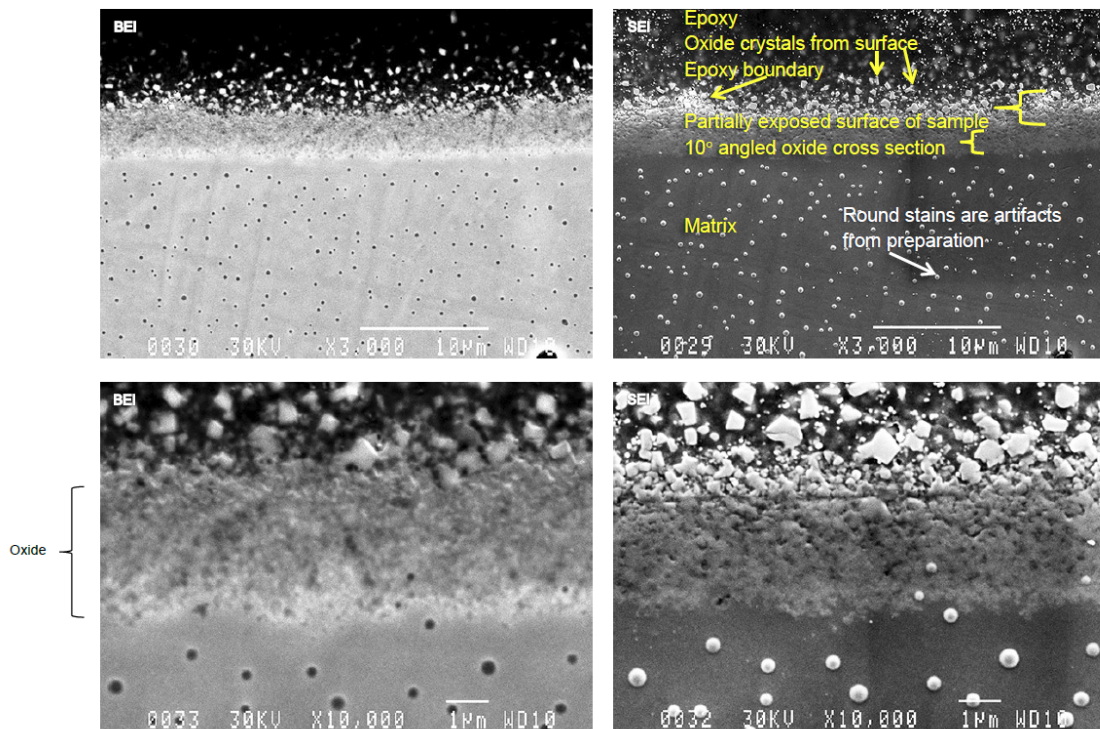


Figure 147 IFA-727.2 Plate-1 316L – 10° Cross section SEM – Details from Pos. 1

図 4.5(14) 316L 平板試験片 ID 番号-1 サイド B 位置 1(図 4.5(13))の 10° 傾斜断面 SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 864 時間、中性子束 $2.5 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

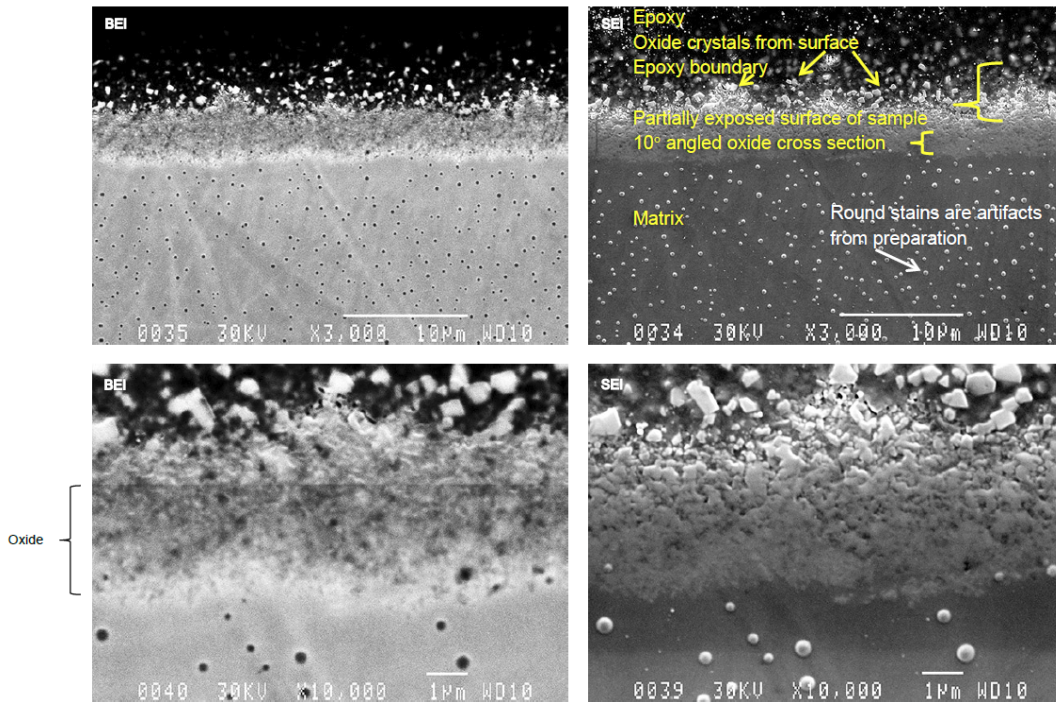


Figure 148 IFA-727.2 Plate-1 316L – 10° Cross section SEM – Details from Pos. 2

図 4.5(15) 316L 平板試験片 ID 番号-1 サイド B 位置 2(図 4.5(13))の 10° 傾斜断面 SEM 全体写真

- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 864 時間、中性子束 $2.5 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

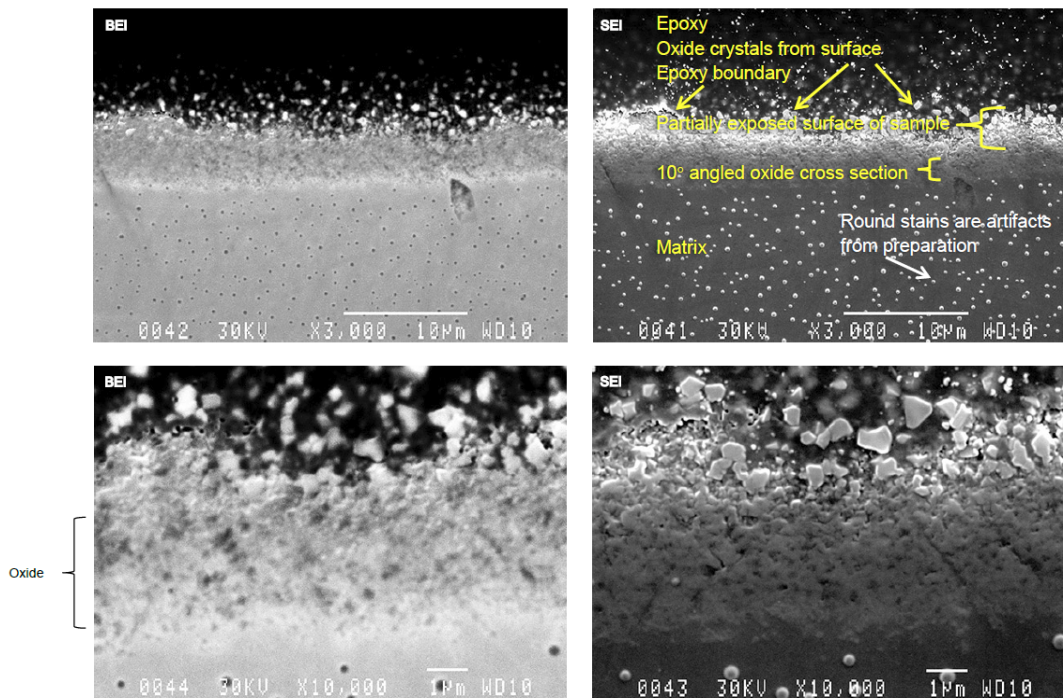


Figure 149 IFA-727.2 Plate-1 316L – 10° Cross section SEM – Details from Pos. 3

図 4.5(16) 316L 平板試験片 ID 番号-1 サイド B 位置 3(図 4.5(13))の 10° 傾斜断面 SEM 全体写真

- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 864 時間、中性子束 $2.5 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

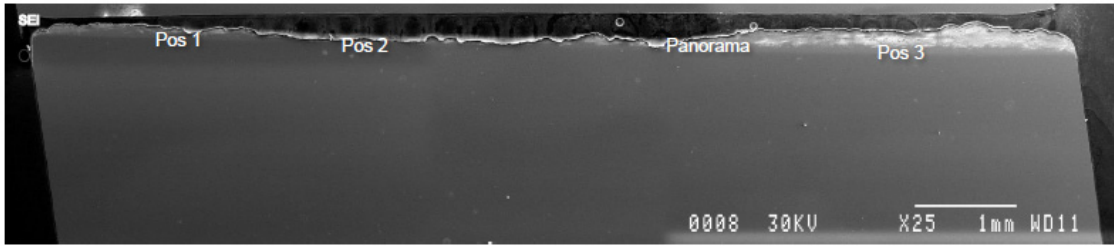


Figure 150 IFA-727.2 Plate-3 316L – 10° Cross section SEM – Overview

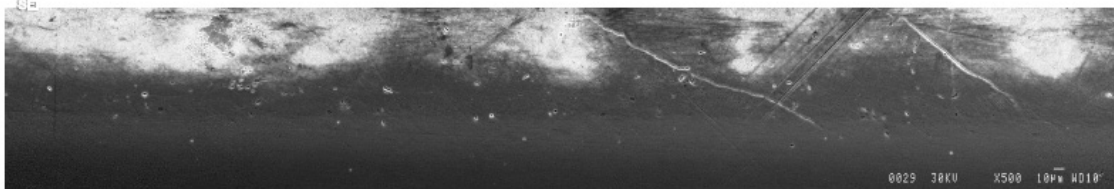


Figure 151 IFA-727.2 Plate-3 316L – 10° Cross section SEM – Panorama

図 4.5(17) 316L 平板試験片 ID 番号-3 サイド B の 10° 傾斜断面 SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 528 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

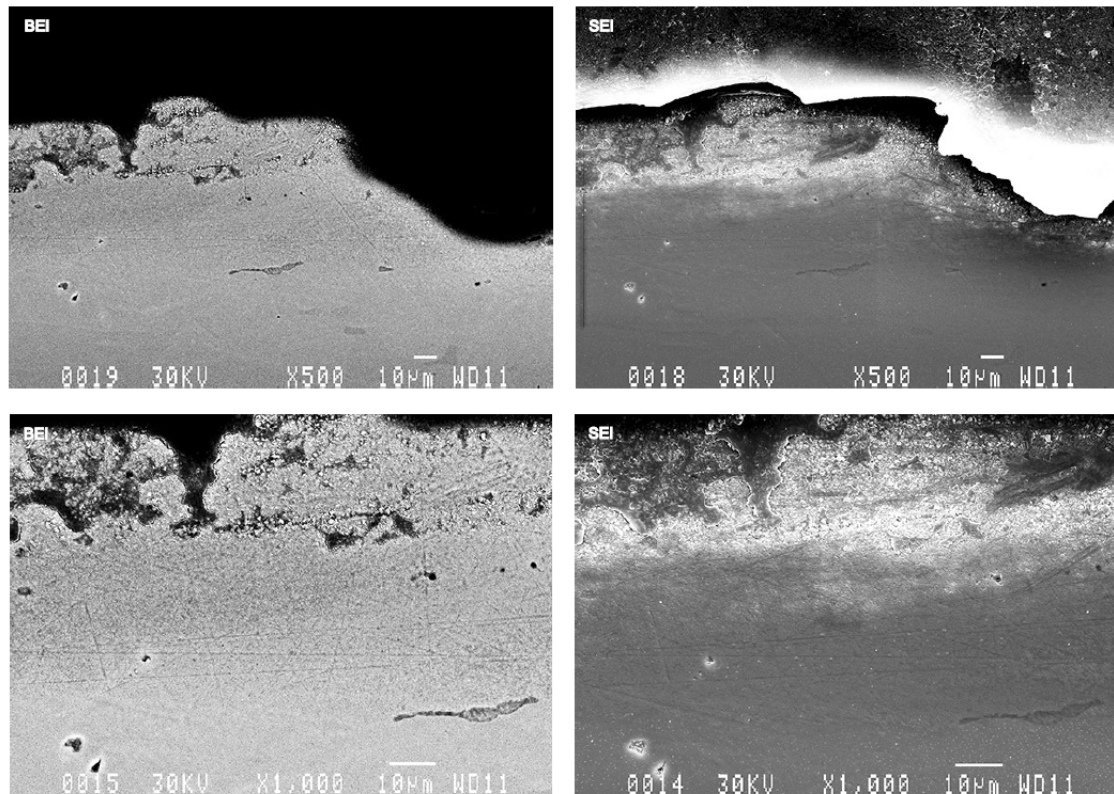


Figure 152 IFA-727.2 Plate-3 316L – 10° Cross section SEM – Details from Pos. 1

図 4.5(18) 316L 平板試験片 ID 番号-3 サイド B 位置 1(図 4.5(17))の 10° 傾斜
 断面 SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 528 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

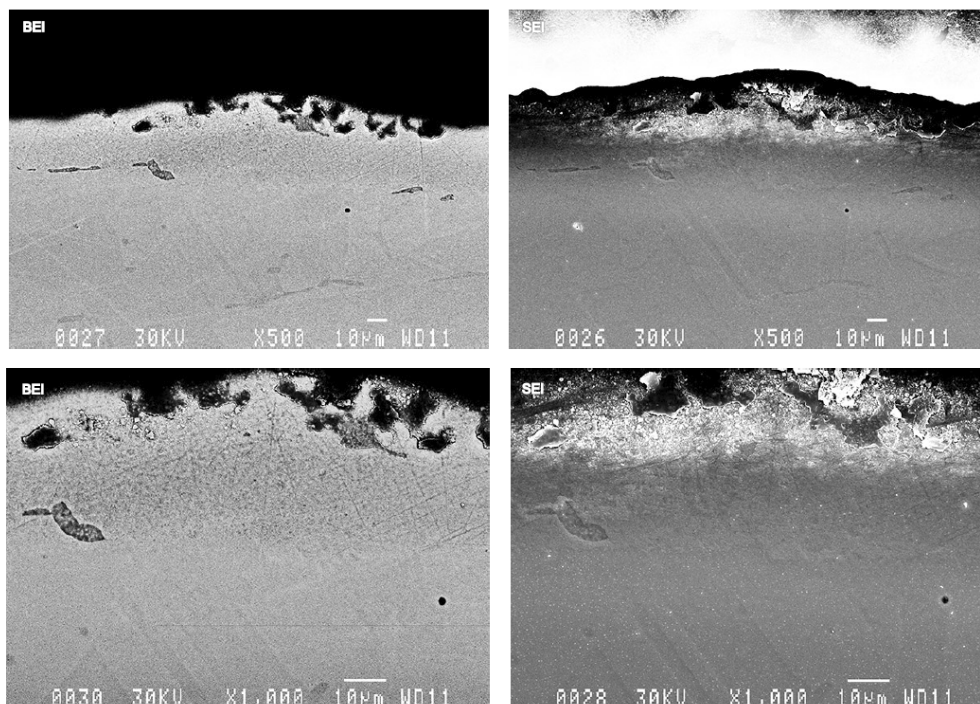


Figure 153 IFA-727.2 Plate-3 316L – 10° Cross section SEM – Details from Pos. 2

図 4.5(19) 316L 平板試験片 ID 番号-3 サイド B 位置 2(図 4.5(17))の 10° 傾斜断面 SEM 全体写真

- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 528 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

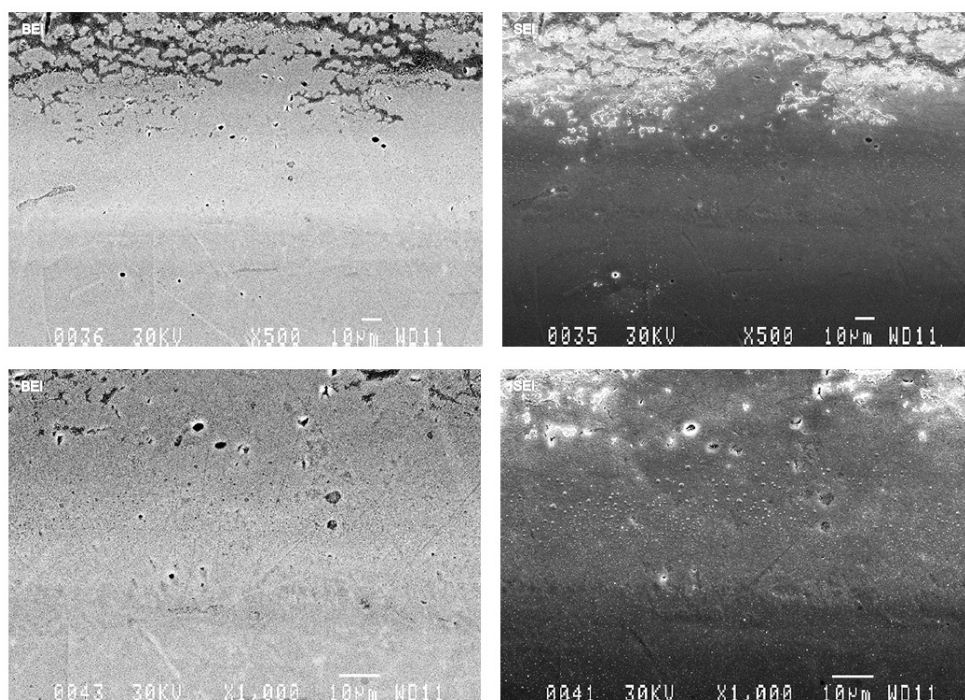


Figure 154 IFA-727.2 Plate-3 316L – 10° Cross section SEM – Details from Pos. 3

図 4.5(20) 316L 平板試験片 ID 番号-3 サイド B 位置 3(図 4.5(17))の 10° 傾斜断面 SEM 全体写真

- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 528 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

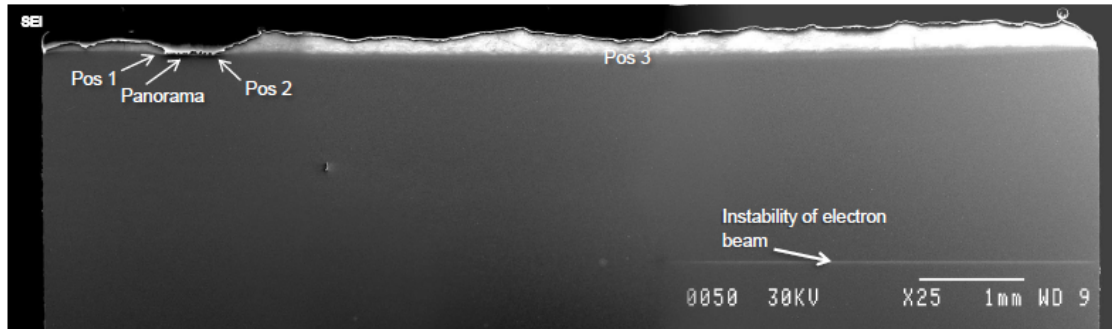


Figure 155 IFA-727.2 Plate-5 316L – 10° Cross section SEM – Overview



Figure 156 IFA-727.2 Plate- 5 316L – 10° Cross section SEM – Panorama

図 4.5(21) 316L 平板試験片 ID 番号-5 サイド B の 10° 傾斜断面 SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 1181 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

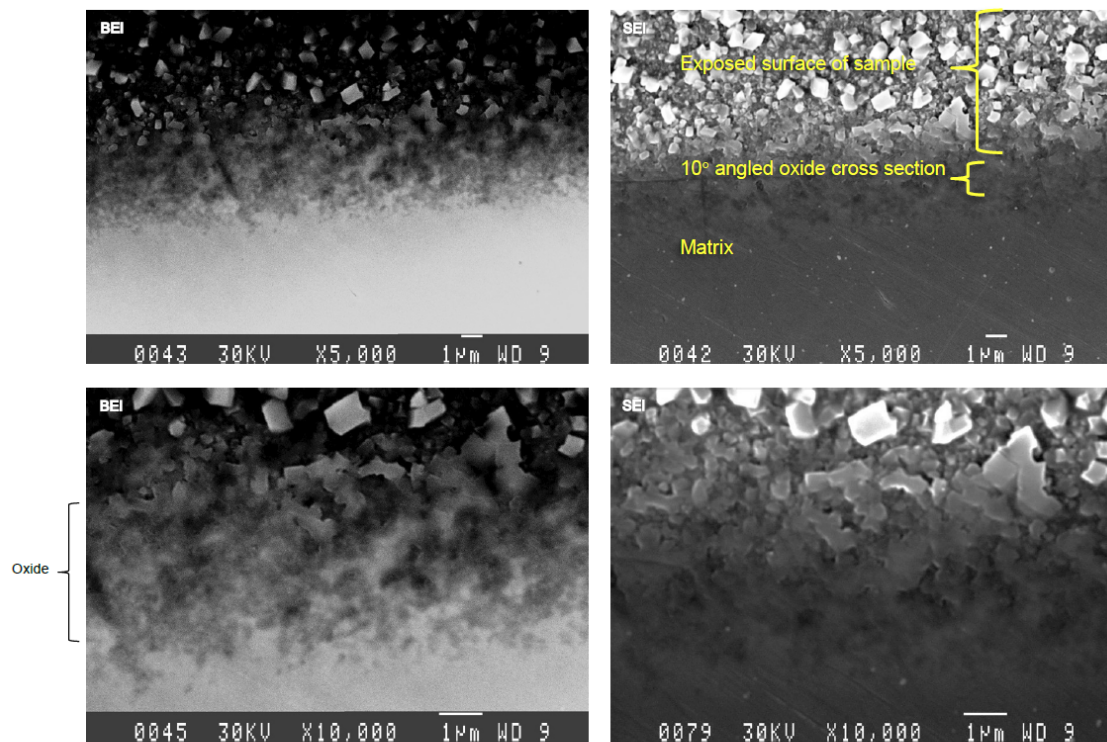


Figure 157 IFA-727.2 Plate-5 316L – 10° Cross section SEM – Details from Pos. 1

図 4.5(22) 316L 平板試験片 ID 番号-5 サイド B 位置 1(図 4.5(21))の 10° 傾斜
 断面 SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 1181 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

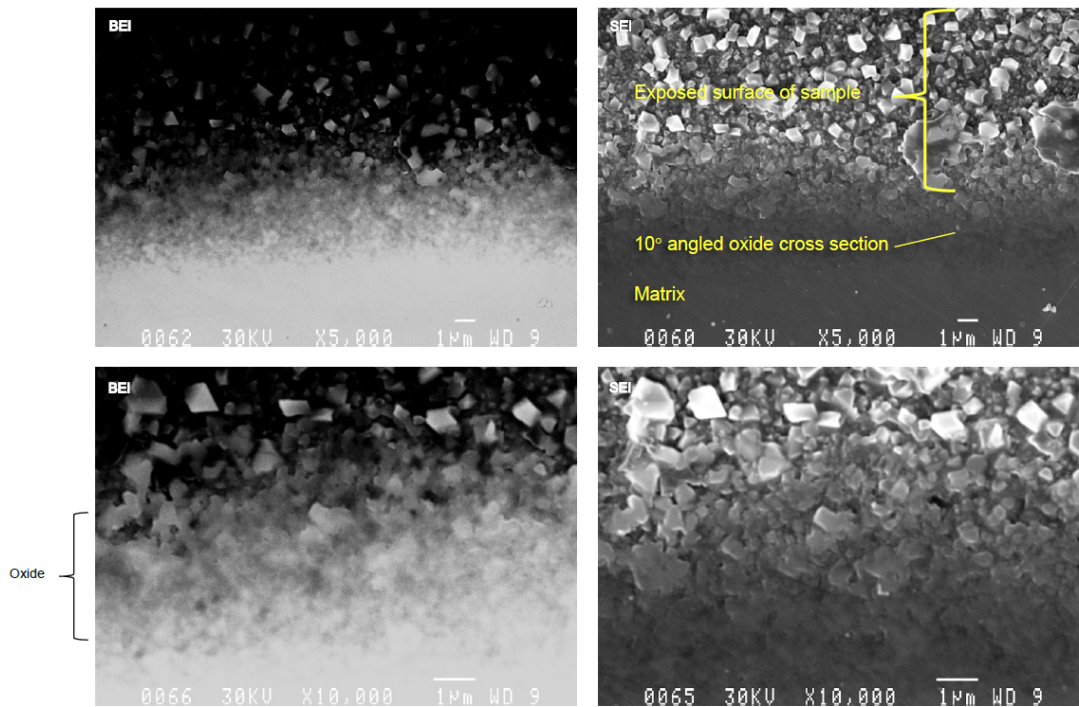


Figure 158 IFA-727.2 Plate-5 316L – 10° Cross section SEM – Details from Pos. 2

図 4.5(23) 316L 平板試験片 ID 番号-5 サイド B 位置 2(図 4.5(21))の 10° 傾斜断面 SEM 全体写真

- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 1181 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

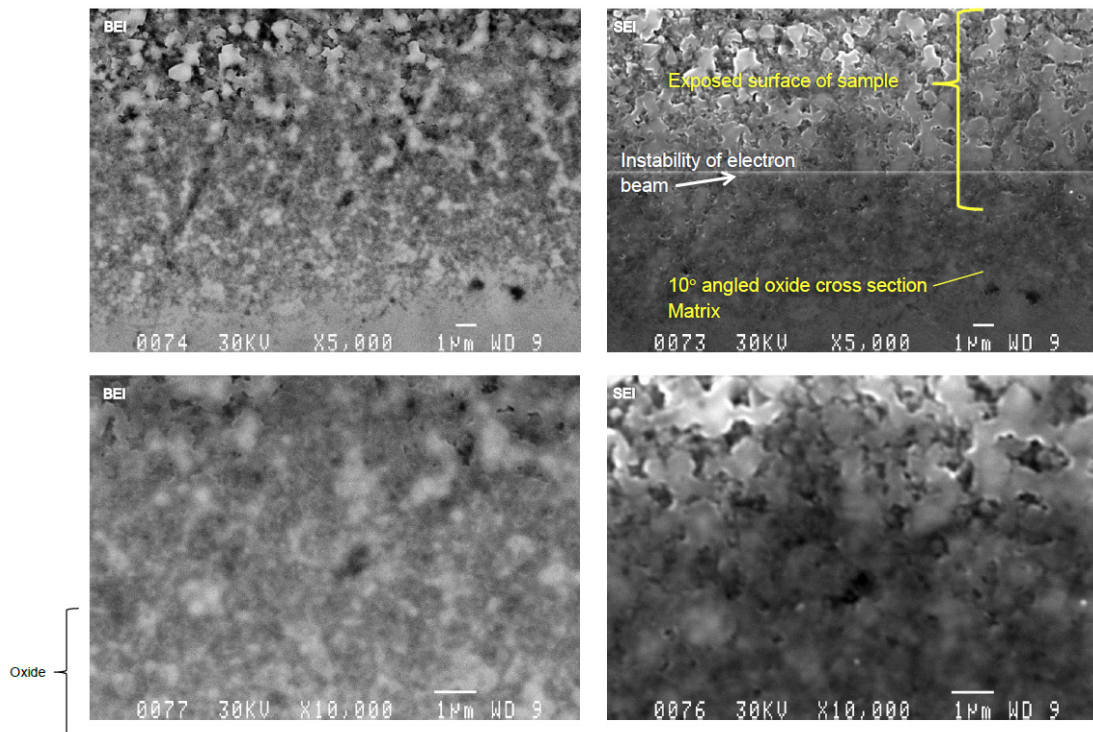


Figure 159 IFA-727.2 Plate-5 316L – 10° Cross section SEM – Details from Pos. 3

図 4.5(24) 316L 平板試験片 ID 番号-5 サイド B 位置 3(図 4.5(21))の 10° 傾斜断面 SEM 全体写真

- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 1181 時間、中性子束 $2.8 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

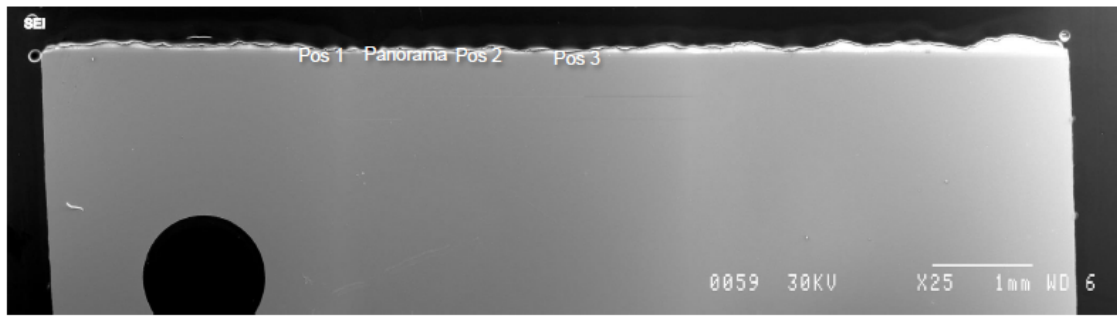


Figure 160 IFA-727.2 Plate-7 316L – 10° Cross section SEM – Overview

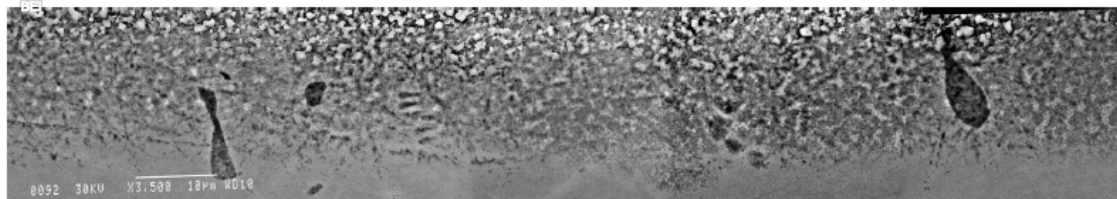


Figure 161 IFA-727.2 Plate-7 316L – 10° Cross section SEM – Panorama

図 4.5(25) 316L 平板試験片 ID 番号-7 サイド B の 10° 傾斜断面 SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2572 時間、中性子束 $3.2 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

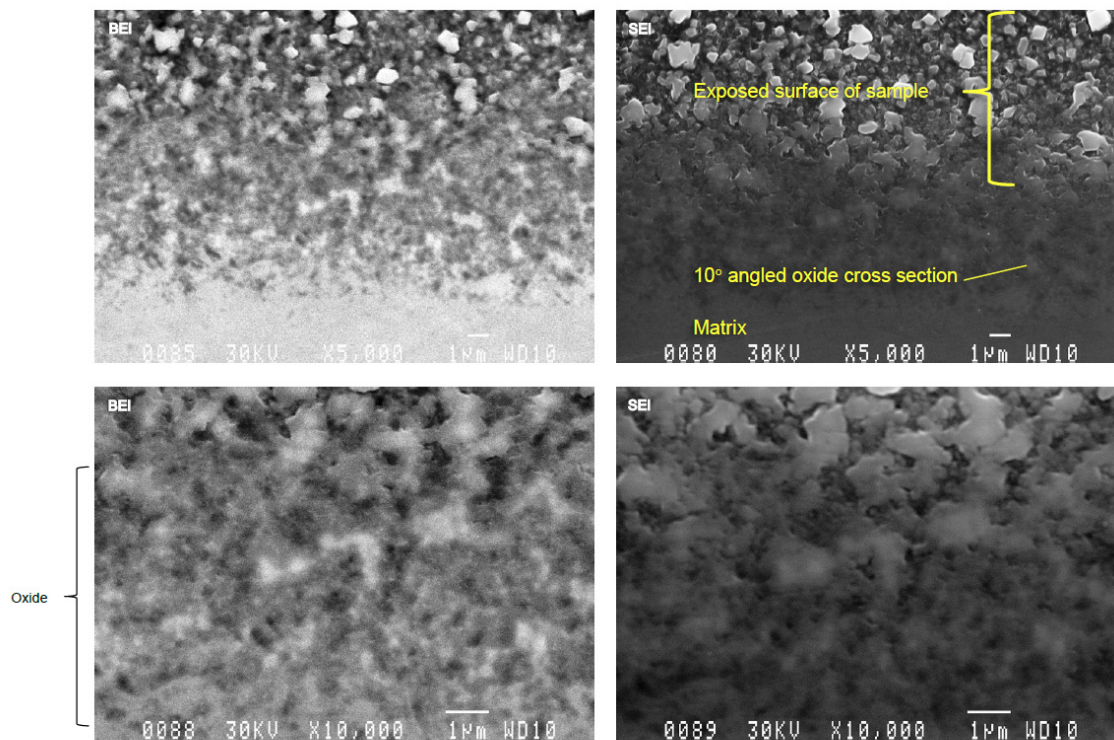


Figure 162 IFA-727.2 Plate-7 316L – 10° Cross section SEM – Details from Pos. 1

図 4.5(26) 316L 平板試験片 ID 番号-7 サイド B 位置 1(図 4.5(25))の 10° 傾斜
 断面 SEM 全体写真
 - 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2572 時間、中性子束 $3.2 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

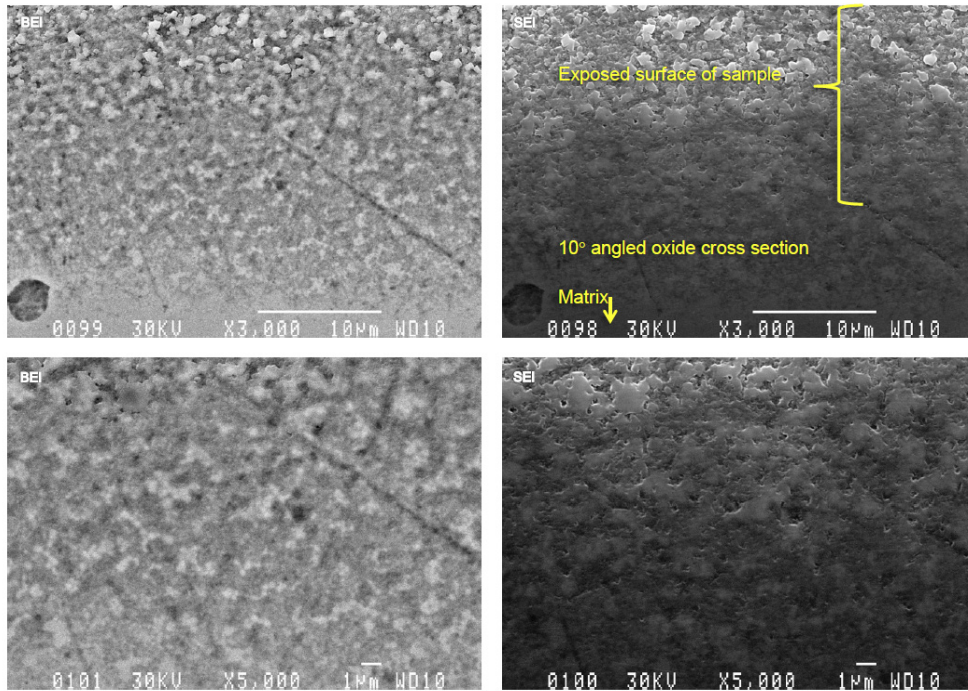


Figure 163 IFA-727.2 Plate-7 316L – 10° Cross section SEM – Details from Pos. 2

図 4.4(27) 316L 平板試験片 ID 番号-7 サイド B 位置 2(図 4.4(25))の 10° 傾斜断面 SEM 全体写真

- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2572 時間、中性子束 $3.2 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

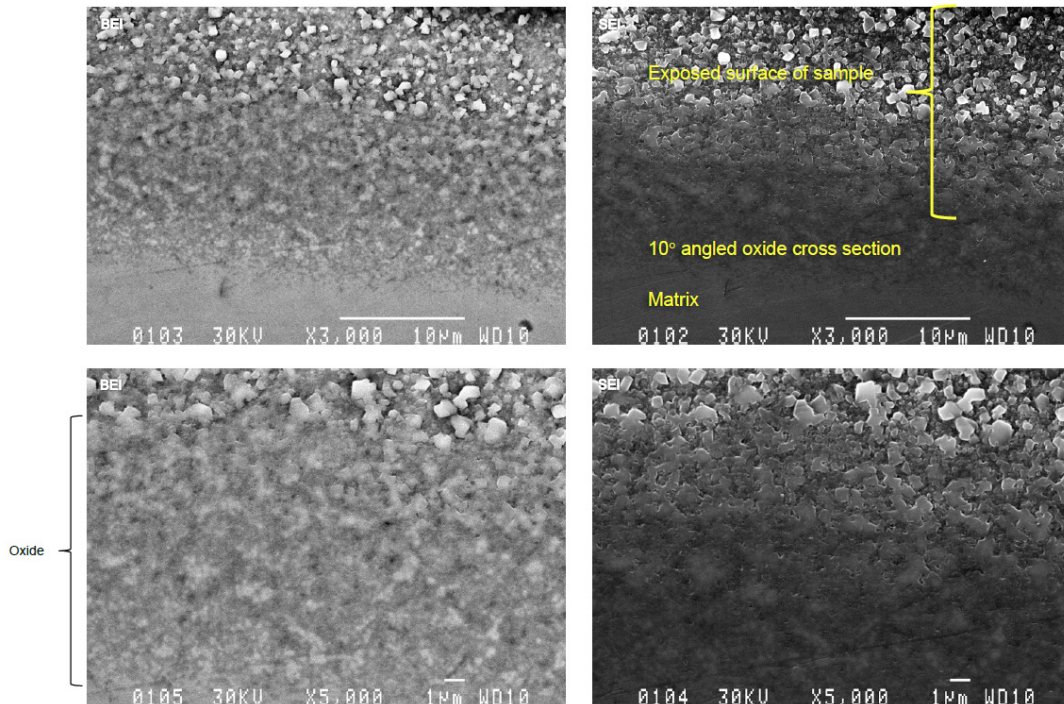


Figure 164 IFA-727.2 Plate-7 316L – 10° Cross section SEM – Details from Pos. 3

図 4.5(28) 316L 平板試験片 ID 番号-7 サイド B 位置 3(図 4.5(25))の 10° 傾斜断面 SEM 全体写真

- 287°C、2ppmDO 高温水中浸漬時間 2572 時間、中性子束 $3.2 \times 10^{13}(\text{n}/\text{cm}^2/\text{s} > 1 \text{ MeV})$ -

5. 考察

(1) ラマン分光分析結果の解釈

照射下高温水環境に浸漬したSUS316L平板試験片の表面に形成した酸化皮膜をラマン分光分析法で分析したところ、全ての試験片において主に NiFe_2O_4 からなるラマンスペクトルを観測した。また表面のSEM観察の結果では、いずれの試験片においても最表面の小さな結晶体とその下部に微細な形態の酸化皮膜が形成していることを確認した。ラマンスペクトルは表層から約10~20 nm程度の深さにある物質を同定していることから、今般の結果は表層の結晶体ならびに微細な形態の酸化物の双方からの信号であると考えられ、表面SEM観察で認められた小さな結晶体と下部に形成した酸化物のいずれも NiFe_2O_4 が中心に構成されているものと考えられる。

図5.1(1)-(3)は、Fe-Cr-Ni三元系の287°CにおけるFe種、Cr種及びNi種に対する電位-pH図を示す。電位-pH図の作成にはOUTOKUMPU社のHSC Chemistry 5.0ソフトを使用した。Fe-Cr-Ni三元系合金の287°CにおけるFe種及びNi種に対する電位-pH図に示すように、pH=5.6において NiFe_2O_4 が平衡状態にある電位領域は凡そ-0.2~0.5 (V)の範囲にあることが判る。

一方Wadaら^[4]及びMiyazawaら^[4]は、酸素が溶存した高温水と過酸化水素(H_2O_2)が溶存した高温水にSUS304ステンレス鋼を浸漬し、表面に形成された酸化皮膜のラマン分光分析を行った。その結果の一例を図5.2に示す。この図に示すように、溶存酸素が高い環境で形成する酸化皮膜は $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ならびに NiFe_2O_4 である一方、 H_2O_2 を含む環境では NiFe_2O_4 の形成がより明確であったことを報告している。また非照射条件での皮膜形成に及ぼす流速の影響についての検討結果では^[4]、SUS304ステンレス鋼の管状試験片を用いて、流速を0.055 m/sec(低流速)ならびに1.1 m/sec(高流速)の二条件下にて形成した酸化皮膜をラマン分光分析およびESCAで分析したところ、低流速条件下で形成した外層皮膜の主成分は $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ならびに NiFe_2O_4 であったのに対し、高流速条件下で形成した酸化皮膜は NiFe_2O_4 であったと報告している。以上の既往知見より、照射下での浸漬試験で得られた酸化皮膜分析の結果は、

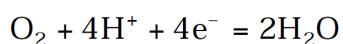
①水のラジオリシスで生成した H_2O_2 の存在

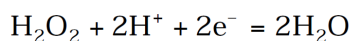
②比較的速い流速条件

の2つの原因が重畳し、 NiFe_2O_4 の形成がより促進され易い条件下にあったと考えられる。

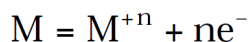
一方既往の文献で指摘されている $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 Fe_3O_4 、 FeCr_2O_4 等の酸化物については、形成していなかったか若しくは形成していても信号のバックグラウンドから分離できない程度に微弱であった可能性がある。加えて、今回用いた供試材はSUS316Lステンレス鋼で既往の知見において検討されているSUS304よりもNi含有量が高いことから NiFe_2O_4 の形成が顕著となる可能性も考えられる。いずれにせよ今回の浸漬条件は、主に NiFe_2O_4 が形成しやすい条件であったと思われる。

さてここでステンレス鋼の腐食電位に関わる酸化還元反応における溶存酸素と H_2O_2 の寄与について考える。溶存酸素と H_2O_2 の関与するカソード反応として、下記のそれぞれの反応が指摘されている^[4]。





一方金属の酸化に関わるアノード反応は一般に下記の式で表される。



ECPはこれらの反応に伴う電荷の授受が平衡状態となった点で決まるものであるが、実際には酸素と H_2O_2 の寄与をそれぞれ分離して評価することは困難である。それぞれの寄与を個々に検証するためには、溶存酸素と H_2O_2 の還元反応に必要な水素イオンのモル数が異なる点に着目し、例えば酸化皮膜中における水素イオン濃度をパラメトリックに設定して反応に伴う電子の生成を制御し、溶存酸素と H_2O_2 の寄与を分離して検討する等のアプローチが有効であると考えられる。いずれにせよ、このような条件下における酸化皮膜の形成機構を検討するに当たっては、水素(イオン)の役割の点からも考察可能な試験を計画立案していく必要があり、環境効果の明示につながるものと期待される。

(2)断面SEMによる皮膜厚さ測定結果の解釈

図5.3は、今回得られた皮膜厚さを実験室での非照射試験ならびにハルデン炉において同様な条件下で照射、浸漬された316L試験片において得られた結果[1]、[2]を凡例に*印を示して併せて示す。

図中緑色白抜き◇で示したHigh Flux条件での時間依存性に着目すると、Flux一定の条件下では酸化時間経過とともに皮膜厚さが増加する傾向が伺える。また■で示した非照射試験結果も右上がりの傾向を示しているが、比較して皮膜厚さが薄い。非照射酸化試験は水流速の遅いオートクレーブ内での酸化試験結果であり、上述の流速効果を考慮すれば、照射下では流速が速く薄い皮膜が形成される傾向があるものの、非照射と比較して厚く形成されていたことになる。これは、照射による直接の材料/環境界面反応への影響と、水のラジオリシスで発生した H_2O_2 による酸化皮膜形成への寄与が考えられる。

2233時間の試験結果においては、おおむねFluxの増加に伴い皮膜厚さが増加する傾向が得られた。一般に酸化皮膜の成長は、放物線則に従う。放物線則は一般に下式で表される。



ここで、 d は皮膜厚さ、 k は放物線速度定数、 t は時間である。この放物線則は、皮膜内におけるイオン拡散が律速過程の場合に観察され、緻密な内層皮膜に対してはおおむねこの整理が妥当である。一方、酸化物表面からの合金元素の溶出は一般に直線則として示され、高温水中では両者の和として形成される。

2233時間でのFlux依存性ならびに照射と非照射下での皮膜厚さ成長の時間依存性のそれぞれの相違については、この放物線則における速度定数の相違として整理可能であると考えられる。非照射に対して、Fluxの増加に伴い、この速度定数が大きくなり、結果として2000時間以上で飽和値として観察された皮膜厚さの増加につながったものと考えられる。今回の皮膜厚さは、皮膜の内層ならびに外層の総和として、全皮膜厚さを用いており、今後速度則を議論するにあたり、内層ならびに外層毎の皮膜厚さの整理も必要と思われる。

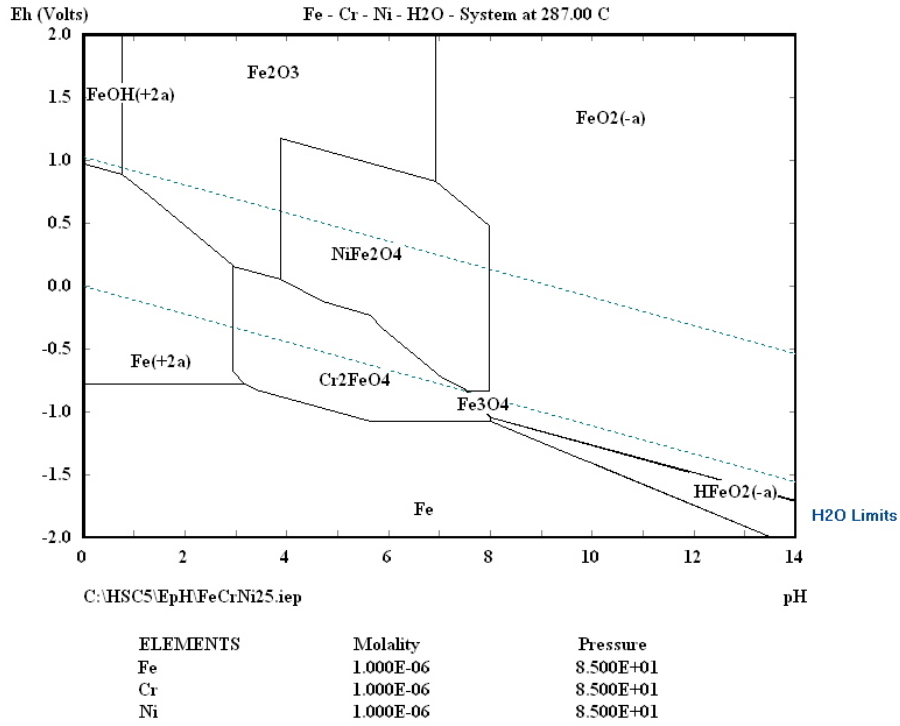


図 5.1(1) Fe-Cr-Ni 三元系における Fe 種に対する 287°Cにおける電位-pH 図
 $(\text{Fe}[\text{aq}])_{\text{tot}} = [\text{Cr}(\text{aq})]_{\text{tot}} = [\text{Ni}(\text{aq})]_{\text{tot}} = 10^{-6} \text{ molal.}$

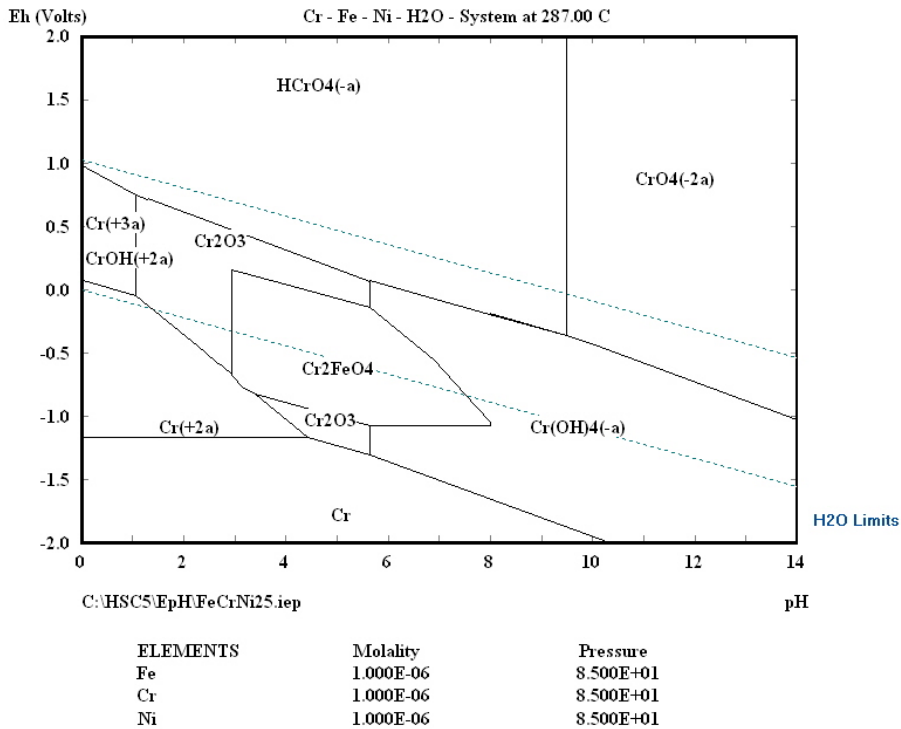


図 5.1(2) Fe-Cr-Ni 三元系における Cr 種に対する 287°Cにおける電位-pH 図
 $(\text{Fe}[\text{aq}])_{\text{tot}} = [\text{Cr}(\text{aq})]_{\text{tot}} = [\text{Ni}(\text{aq})]_{\text{tot}} = 10^{-6} \text{ molal.}$

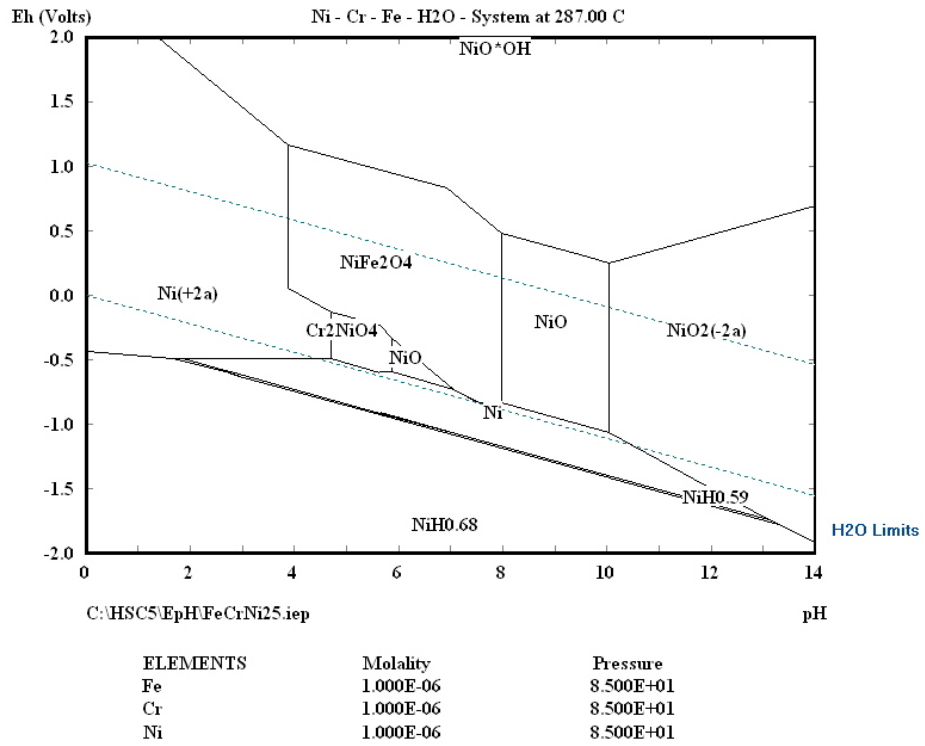
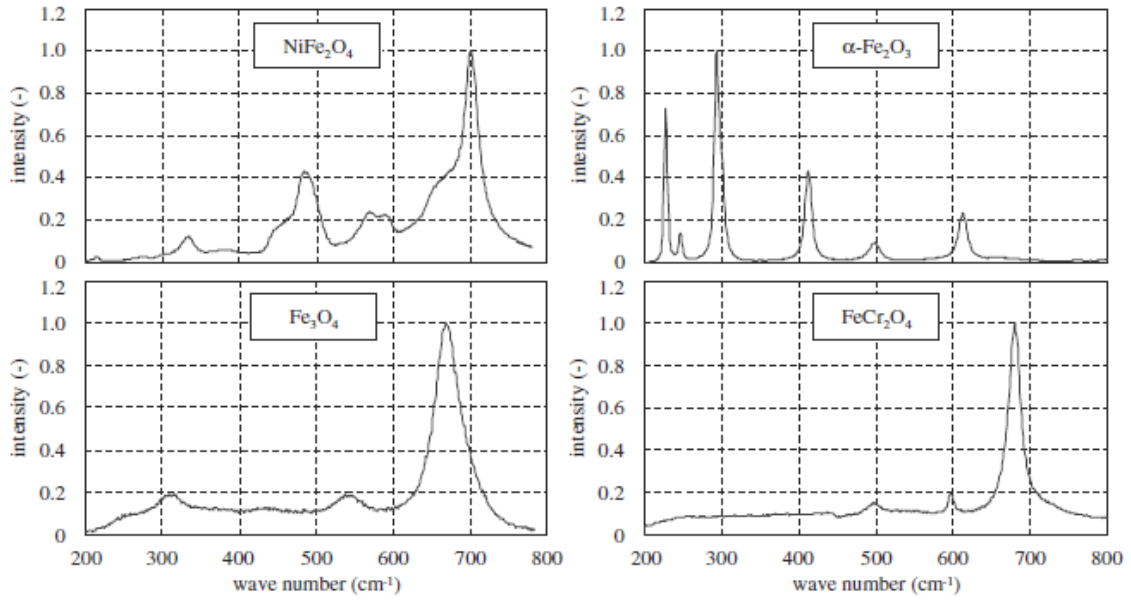
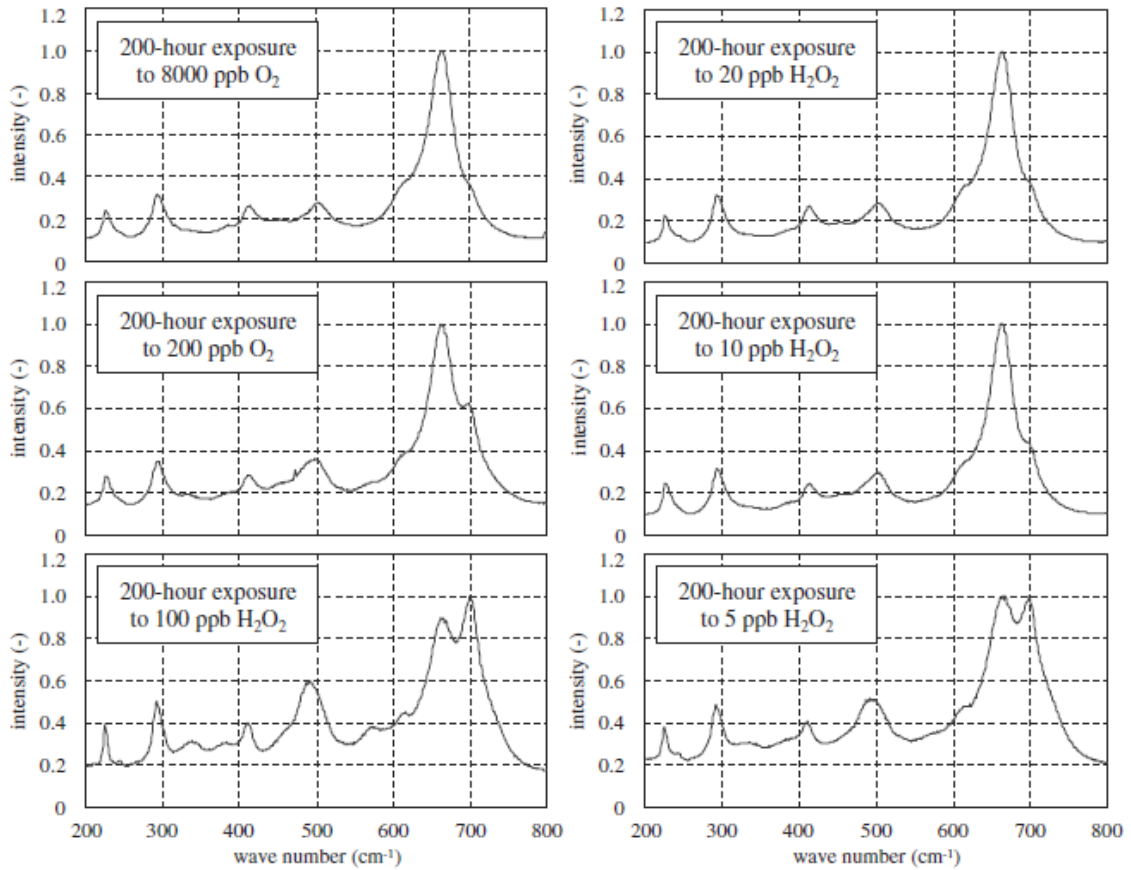


図 5.1(3) Fe-Cr-Ni 三元系における Ni 種に対する 287°Cにおける電位-pH 図
 $(\text{Fe}[\text{aq}])_{\text{tot}} = [\text{Cr}(\text{aq})]_{\text{tot}} = [\text{Ni}(\text{aq})]_{\text{tot}} = 10^{-6} \text{ molal.}$



(a)



(b)

Fig. 3 Laser Raman spectra: (a) Standard oxides and (b) oxides on the specimens exposed to H₂O₂ or O₂

図 5.2 高温水に浸漬した SUS304 から得られたレーザーラマンスペクトルの例^[2]

(a)スペクトルの検量線

(b)各濃度の酸素及び過酸化水素環境に浸漬した試験片の分析結果

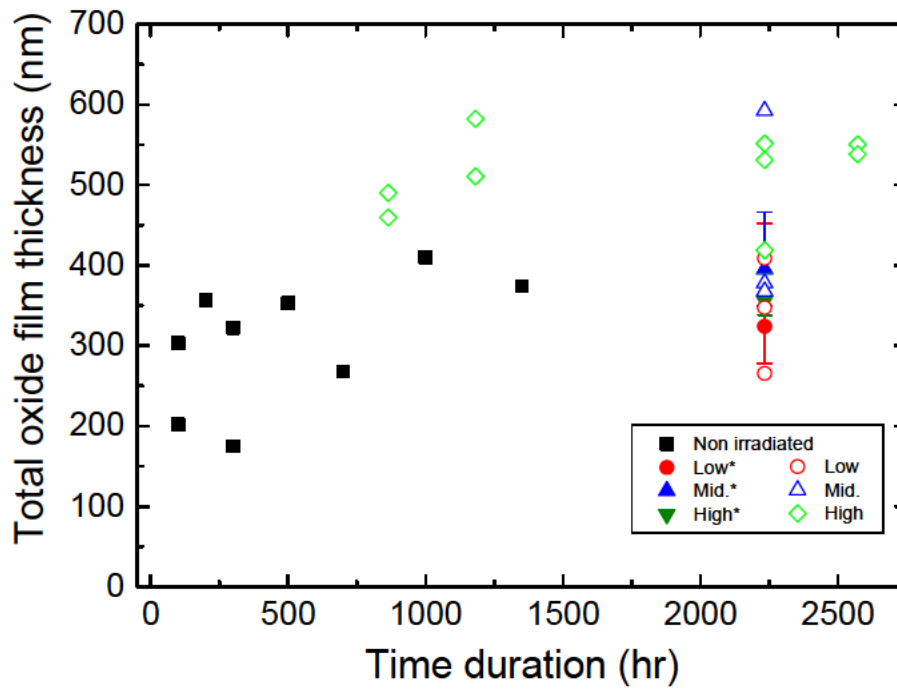


図 5.3 酸化時間ならびに皮膜厚さ
 (凡例の*は、文献[1], [2]により得られた皮膜厚さを示す)

6. 結論

ハルデン炉における照射試験状況を調査した結果、試験リグ番号IFA-727.1及びIFA-727.2において2009年と2010年に代表的なBWR条件下(溶存酸素2 ppm、温度287°C)でかつ低、中及び高中性子束の領域で照射された316L鋼試験片がありかつハルデン炉シェラーホットラボに保管されていることが分かったのでそれらの中から相対的ガンマフラックスレベルが大略3条件となる試験リグ内での位置に装荷された試験片ID 番号1、3、5、-1、-3、-5及び-7の7つの316L試験片を表面酸化皮膜分析用試験片として選定した。

選定した316L試験片について表面SEM観察、ラマン分光分析及び断面SEM観察を行った。表面SEM観察の結果、平板試験片の表面はかなり均質の形態であった。ラマン分光分析の結果、分析した316L平板試験片の全てのラマンスペクトルにおいて NiFe_2O_4 が特定されているようである。

断面SEM観察の結果、酸化皮膜厚さは酸化時間に伴い増加し、また照射量が増えるとともに増加する傾向が得られた。

7. 参考文献

- [1] T. M. Karlsen, M. Espeland, H. K. Jenssen, N. O. Solum, “Summary on the Investigation of the Effects of Flux / Fluence on the Oxidation Kinetics of 316L and Inconel 600 Materials in the Halden Boiling Water Reactor (IFA-727)”, HR-54, March 2010
- [2] T. M. Karlsen, J. Balak, M. Espeland, H. K. Jenssen, N. O. Solum, “Summary Report on the Investigation of the Effects of Exposure Time on the Oxidation Kinetics of 316L and 316LN Stainless Steels in the Halden Boiling Water Reactor (IFA-727. 2), HR-62, June 2011
- [3] Y. Wada, A. Watanabe, M. Tachibana, K. Ishida, N. Uetake, S. Uchida, K. Akamine, M. Sambongi, S. Suzuki, K. Ishigure, "Effects of hydrogen peroxide on intergranular stress corrosion cracking of stainless steel in high temperature water, (IV) Effects of oxide film on electrochemical corrosion potential", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 38, No. 3, 2001, pp. 183-192.
- [4] T. Miyazawa, T. Terachi, S. Uchida, T. Satoh, T. Tsukada, Y. Sato, Y. Wada, H. Hosokawa, “Effects of hydrogen peroxide on corrosion of stainless steel, (V) Characterization of oxide films with multilateral surface analyses”, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 43, No. 8, 2006, pp. 884 - 895.
- [5] Yonggang Lu, Kazuhiko Sakaguchi, Yosuke Tsujimoto, Nozomi Sakurai, Tetsuya Uchimoto, Makoto Takahashi, Yoshiyuki Takagi, Masaharu Kitamura, Tetsuo Shoji, “A system Safety Benchmark facility for SCC Pipe Tests with High and Low Flow Rate Condition and Some Preliminary Test Results in BWR Environment”, Proceedings of 11th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, (2003), 805-815, Paper No.60526, in CD-ROM.

- [6] Y. J. Kim, P. L. Andresen, "Data quality, issues, and guidelines for electrochemical corrosion potential measurement in high-temperature water", *Corrosion*, (2003) pp. 584-596.