

3.4 ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究

再循環ポンプ等に用いられているステンレス鋼は、長時間高温に曝されること（熱時効）により材料の組織が変化して靱性が低下する。高経年化技術評価等においては、ステンレス鋼の熱時効による靱性の低下挙動評価は（一財）発電設備技術検査協会において実施された「プラント長寿命化技術開発」研究より開発された靱性予測モデル（以下、「H3Tモデル」という）を用いて実施されている。H3Tモデルは、主に加速劣化試験等の結果に基づいて主にPWRプラントの環境を考慮して開発され、PWRプラント及びBWRプラントの評価に用いられている。本研究では、実機材料（対象機器：再循環ポンプ）を用いて組織観察、破壊靱性試験等を実施し、実機環境でのH3Tモデルによる熱時効による靱性の低下挙動評価手法の保守性を検証する。対象材料は、令和3年度にH-1再循環（PLR）ポンプ（B）より採取した試験体である。本試験体は、現在、日本核燃料開発株式会社（以下、「NFD」という）で核燃料汚染物として保管・管理されている。表3.4-1に全体試験マトリックスを、表3.4-2に令和4年度試験マトリックスを示す。令和4年度は、実施計画に基づき、試験片の製作と試験の実施として以下に示す項目を実施した。

- (1) 試験片の製作
- (2) 試験の実施
- (3) 事業計画案の見直し

また、成果報告として、対象機器・材料、試験後の試験体及び残材の管理・保管や、試験体の輸送についてもまとめた。

表 3.4-1 全体試験マトリックス

	破壊靱性試験	引張試験	シャルピー試験	観察用試験
形状	1T-C(T)	JIS 14A/B 試験片	フルサイズ	10x10x2mm
数量	8 (予備 2 含む)	6	24 (試験体毎に 4 本)	12
試験温度	288°C, RT	288°C, RT	RT 含む 7 温度	—
備考	L-C 方向	L 方向	L-C 方向	材料送付含

表 3.4-2 令和4年度試験マトリックス

	破壊靱性試験	引張試験	シャルピー試験	観察用試験
形状	1T-C(T)	JIS 14A/B 試験片	フルサイズ	10x10x2mm
数量	加工 6*/試験 4	加工 4/試験 4	0	加工 12/試験 6
試験温度	288℃	288℃	RT 含む 7 温度	—
備考	L-C 方向	L 方向	L-C 方向	試験片輸送含

* : 2 個は今年度加工のみ。来年度以降試験に供する。

3.4.1 試験片の製作

(1) 試験片の形状及び寸法

今年度製作した試験片を以下に示す。

- ・ 引張試験片（適用規格：JIS Z 2241(2015)14A 号）4 個
- ・ 1T-C(T)試験片（適用規格：ASTM E 1820-21）6 個
- ・ 組織観察用試験片（適用規格：なし。10mm×10mm×2mm の平板）12 個

試験片の形状及び寸法を図 3.4.1(1)-1～3 に示す。引張試験片は JIS Z 2241(2015)に準拠した 14A 号平板試験片、1T-C(T)試験片は ASTM E 1820-21 に準拠、組織観察用試験片に適用規格はなく 10mm×10mm×2mm の平板型の試験片とした。引張試験片と 1T-C(T)試験片は試験片形状と刻印位置で試験体との位置関係を特定できるが、組織観察用試験片は正方形であり刻印を付さないため試験片形状で試験体との位置関係を特定できない。そのため、図 3.4.1(1)-3 に示すように切り欠きを設けて試験体との位置関係を特定できるようにした。

試験片の製作手順を以下に示す。

① 試験体の粗切断

製作する試験片を含むように試験体をブロック状に切断する。

② 試験片の加工

ブロック状に切り分けた試験体から試験片を加工する。

③ 試験片の寸法測定

加工した試験片の寸法を測定し、各寸法が所定の交差内であることを確認する。

試験体の粗切断及び試験片の加工に際しては切断に先立って罫書きを施し、罫書き線に沿って切断することにより切断間違いがないようにした。

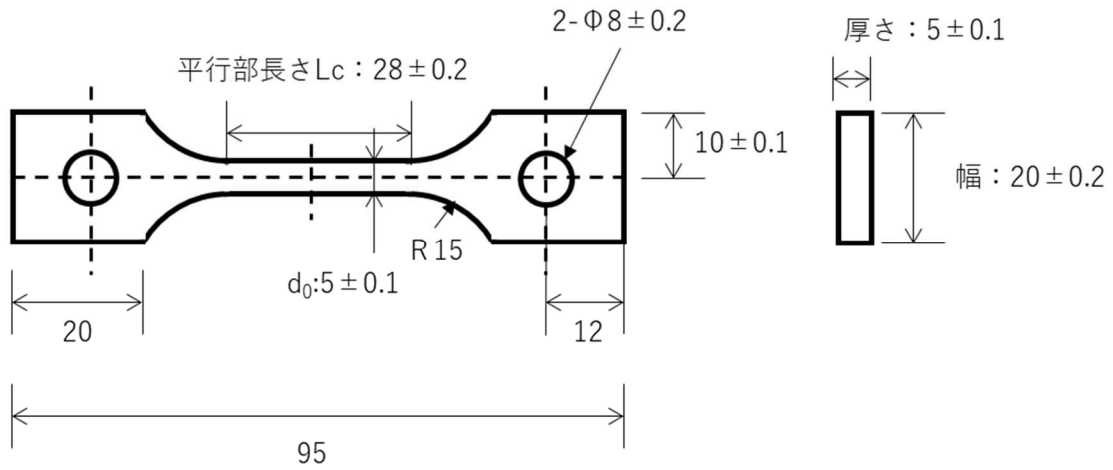


図 3.4.1(1)-1 引張試験片の形状及び寸法

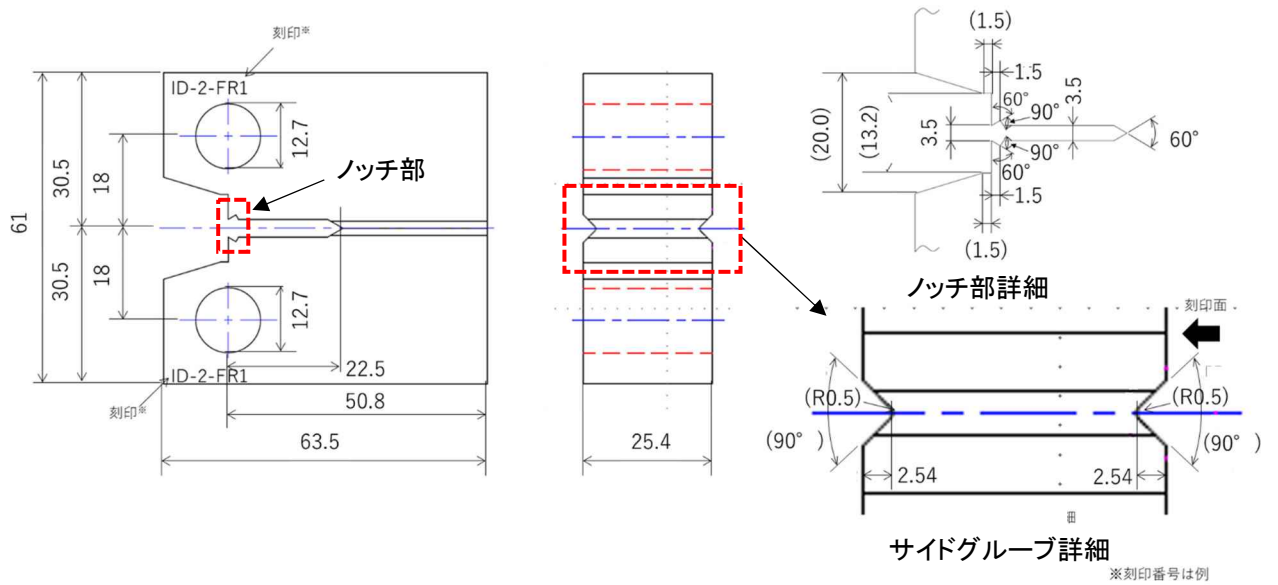


図 3.4.1(1)-2 1T-C(T)試験片の形状及び寸法

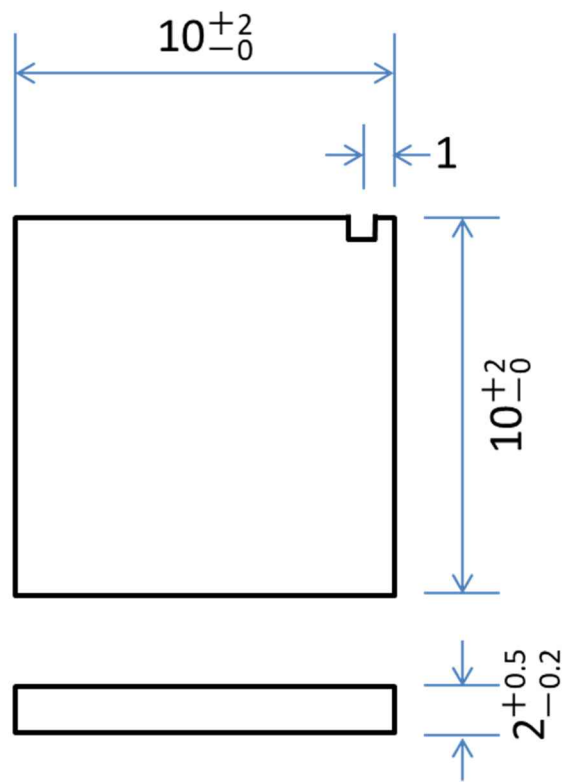


図 3.4.1(1)-3 組織観察用試験片の形状及び寸法

(2) 試験体の粗切断

1) 試験体板取図

試験体 6 体 (ID-1~6) の試験片板取図を図 3.4.1(2)-1~6 に示す。試験体毎に寸法や向きが異なるため、板取図は試験体毎に作成した。板取図には来年度以降製作するシャルピー衝撃試験片及び今後必要に応じて製作する予備試験片も含まれている。試験片加工のためのブロック状試験体を得るために粗切断する箇所を太い青線で示した。粗切断にはバンドソーを用いるが、組織観察用試験片には観察面における切断の影響を考慮して精密切断機を用いた。

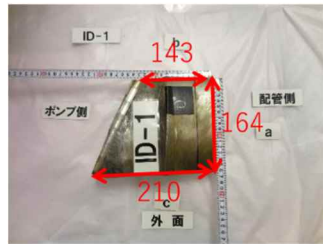
粗切断後に板取図の緑で示した面をエッチングし、試験片に有害な補修溶接や溶接欠陥がないことを確認する。エッチングにより補修溶接や溶接欠陥が確認された場合はこれらを避けるよう板取図を再検討する。

2) 罫書き

粗切断の準備作業として罫書きを行った。ID-1 を例として罫書きの手順を図 3.4.1(2)-7 に示す。試験体は円筒構造物から採取したため反りがある。また、サイトでの切断面は必ずしも直交していないため、まず配管側の端面から 47.5mm 離れた位置に、端面と並行に基準線を引いた。この基準線を元に位置決めして、罫書き線を(a)から(f)の順に付した。罫書きの例として ID-1 の罫書き後の外観を図 3.4.1(2)-8 に示す。

3) 粗切断

2)で付した罫書きに沿って粗切断を行った。粗切断後のブロック状試験体の外観を試験体 ID ごとに図 3.4.1(2)-9~14 に示す。粗切断は図中の番号順に行った。それぞれの試験体について、図中に A 面と示す面にエッチングを施し、外観を観察した。いずれの試験体も補修溶接や铸造欠陥等の試験に影響を及ぼすような材料の異常は確認されなかった。そのため、板取図通りに試験片の加工を行うこととした。



■ バンドソー切断線

- 引張試験片及びシャルピー衝撃試験片（点線で表示）は令和5年度採取の予定

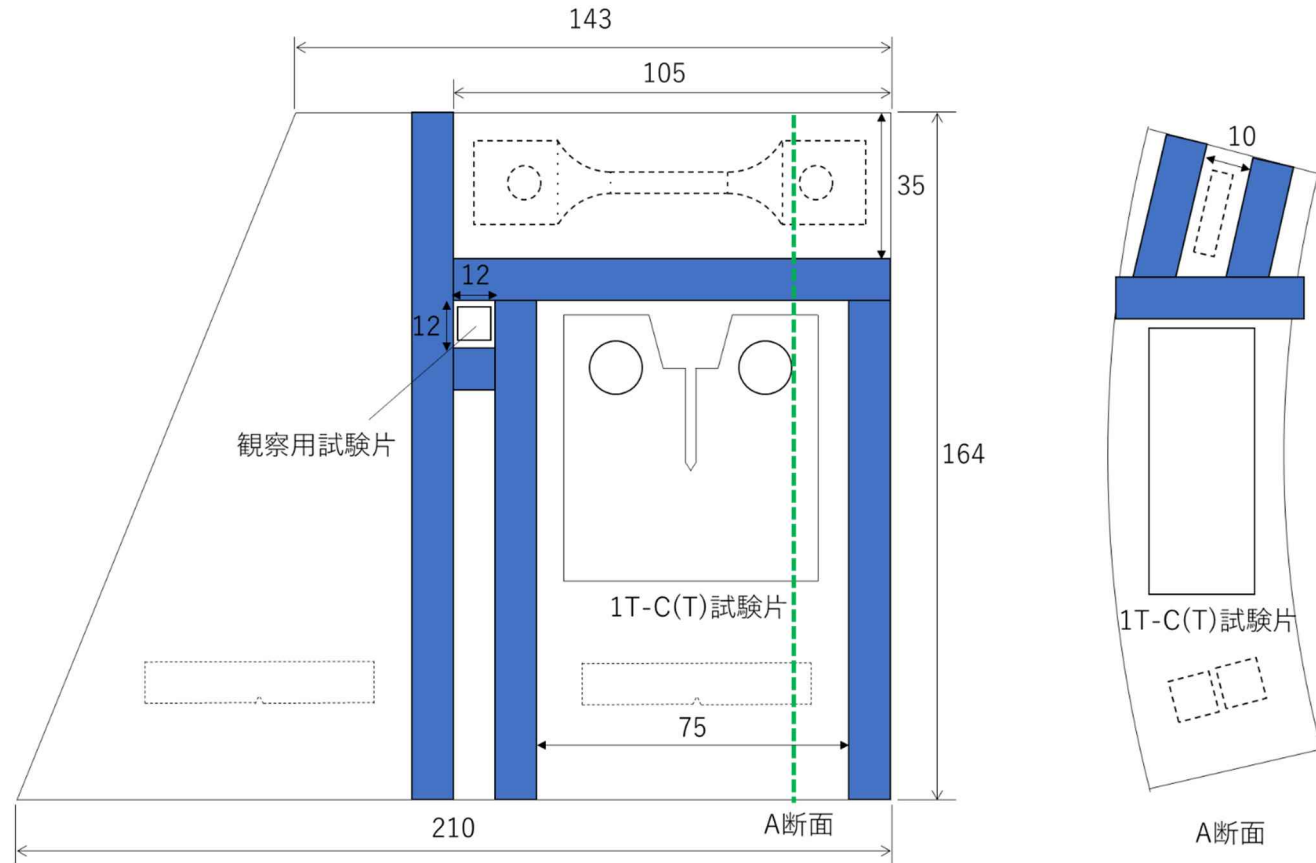
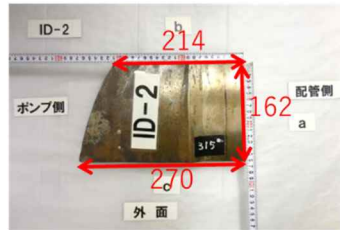


図 3.4.1(2)-1 試験体板取図 (ID-1) 単位 : mm



— バンドソー切断線

- シャルピー衝撃試験片及び予備試験片（点線で表示）は、必要に応じて令和5年度以降に採取の予定

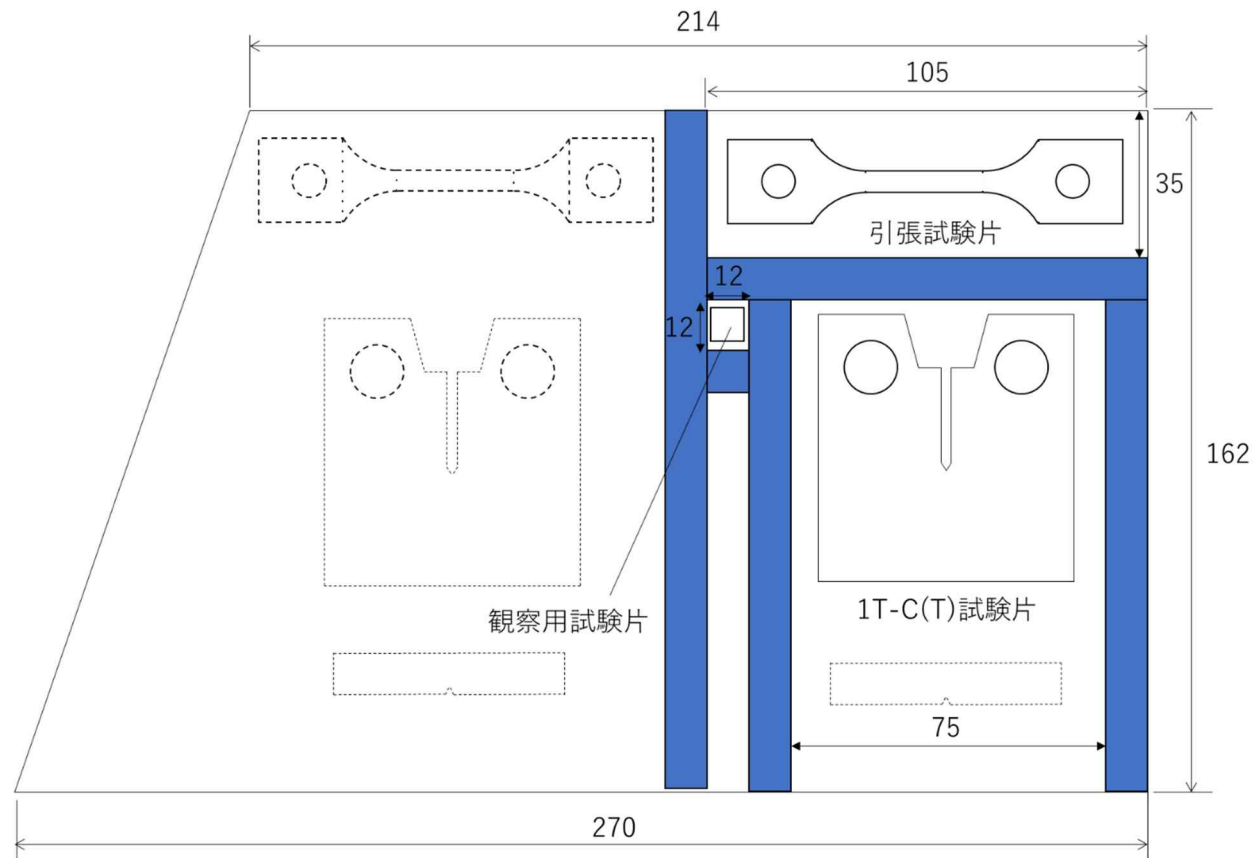
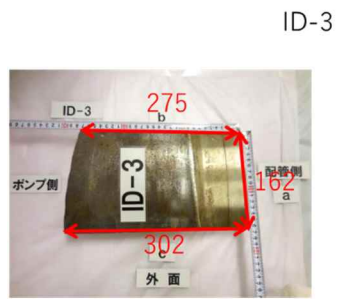


図 3.4.1(2)-2 試験体板取図 (ID-2) 単位 : mm



— バンドソー切断線

- シャルピー衝撃試験片及び予備試験片（点線で表示）は、必要に応じて令和5年度以降に採取の予定

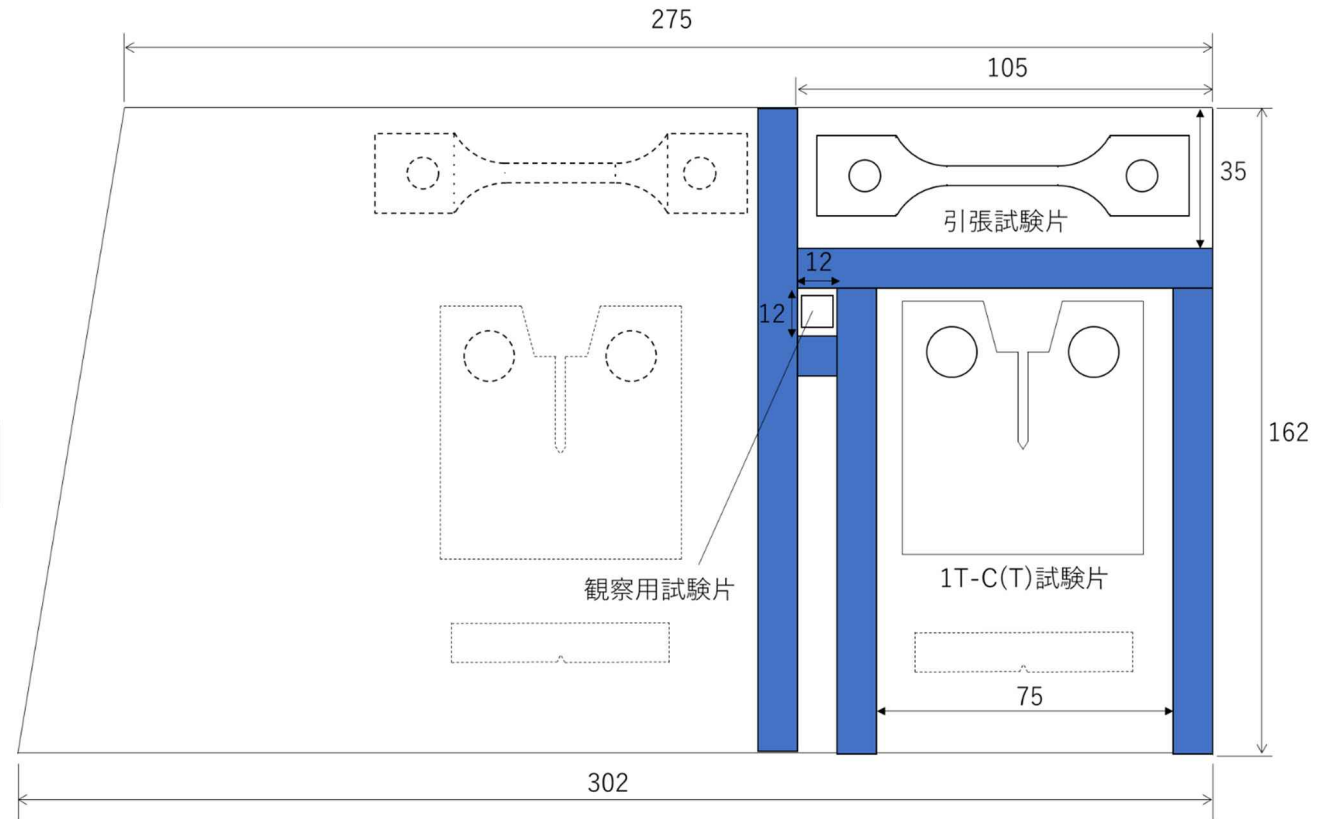


図 3.4.1(2)-3 試験体板取図 (ID-3) 単位 : mm



— バンドソー切断線

- シャルピー衝撃試験片及び予備試験片（点線で表示）は、必要に応じて令和5年度以降に採取の予定

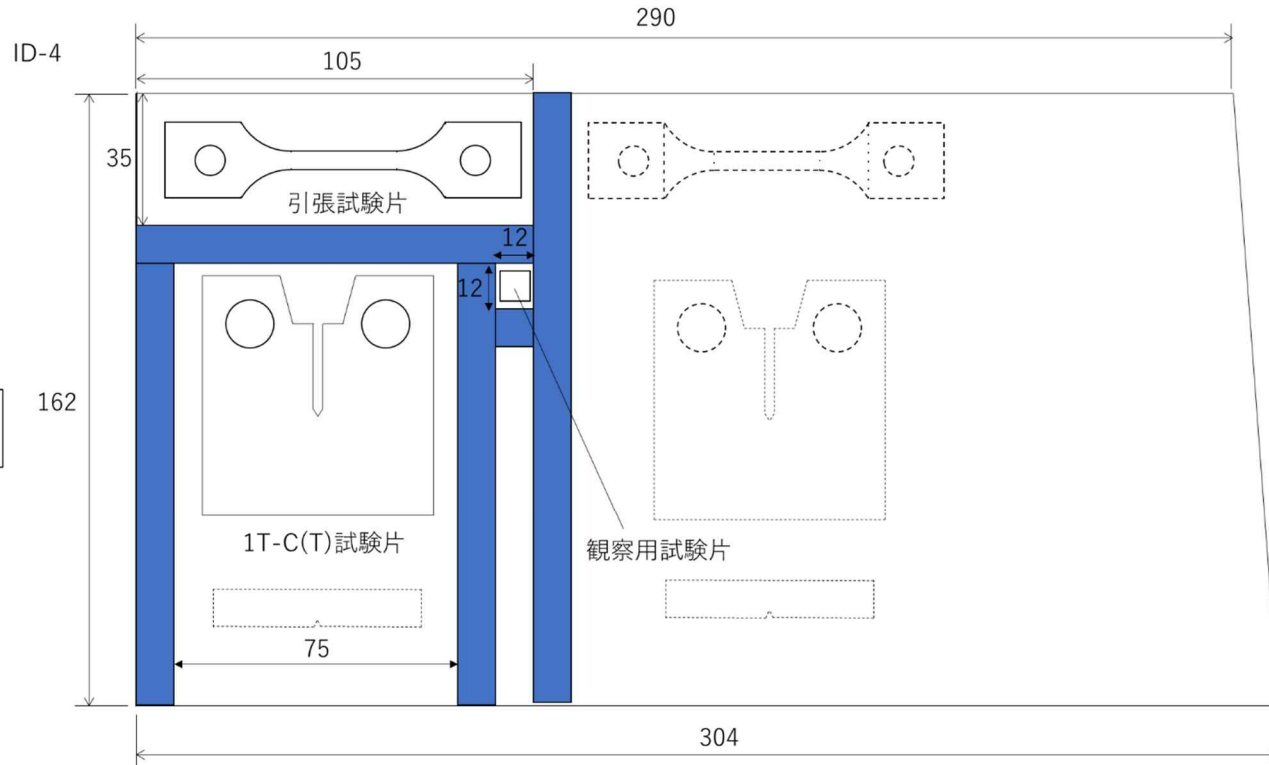


図 3.4.1(2)-4 試験体板取図 (ID-4) 単位 : mm



— バンドソー切断線

- シャルピー衝撃試験片及び予備試験片（点線で表示）は、必要に応じて令和5年度以降に採取の予定

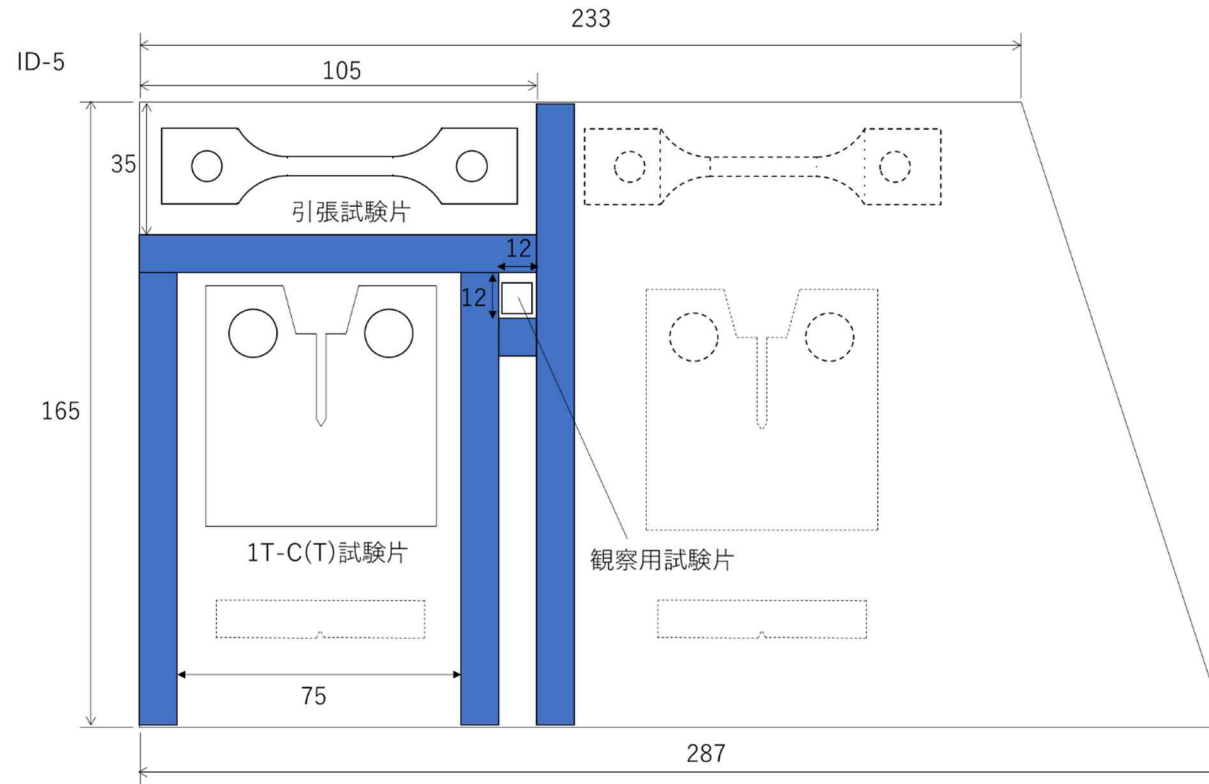
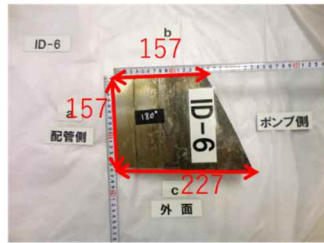


図 3.4.1(2)-5 試験体板取図 (ID-5) 単位 : mm



■ バンドソー切断線

- 引張試験片及びシャルピー衝撃試験片（点線で表示）は、令和5年度以降に採取の予定
- 断面の板取図はID-1と同様

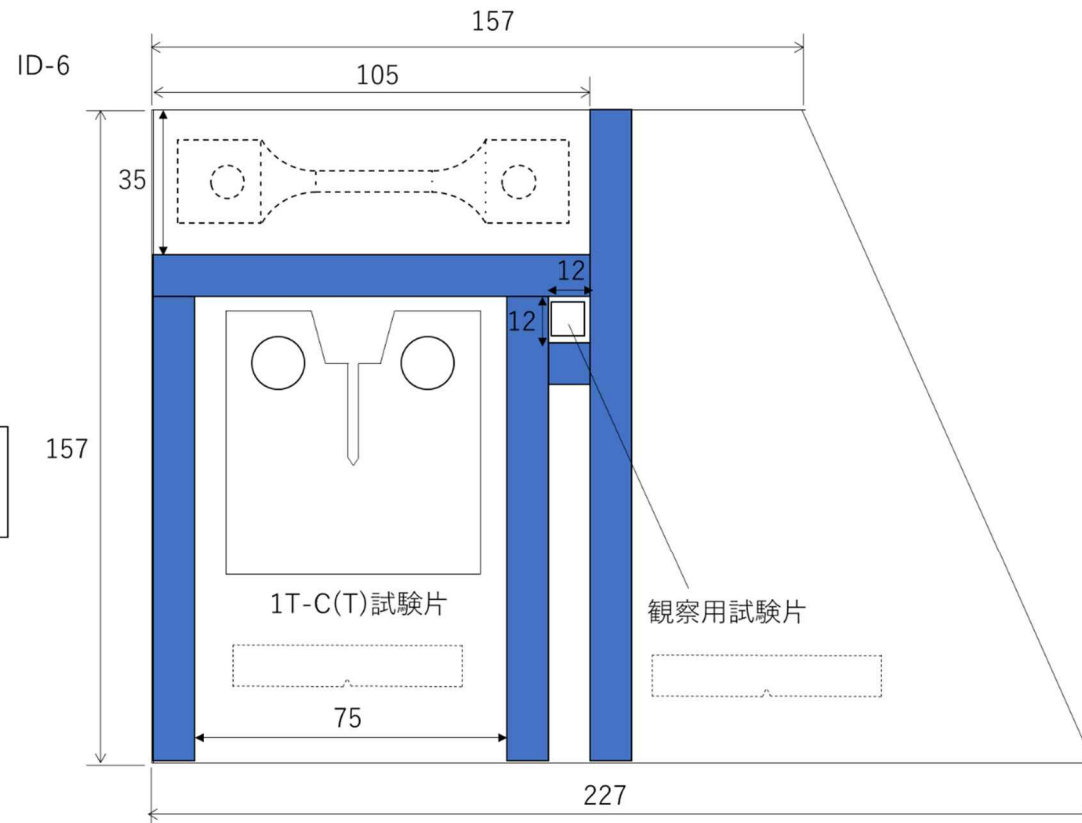
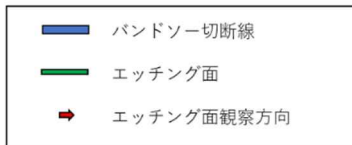
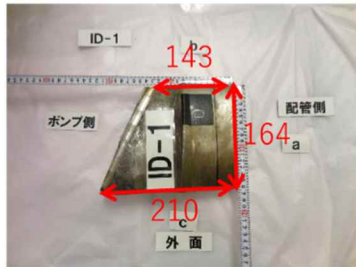
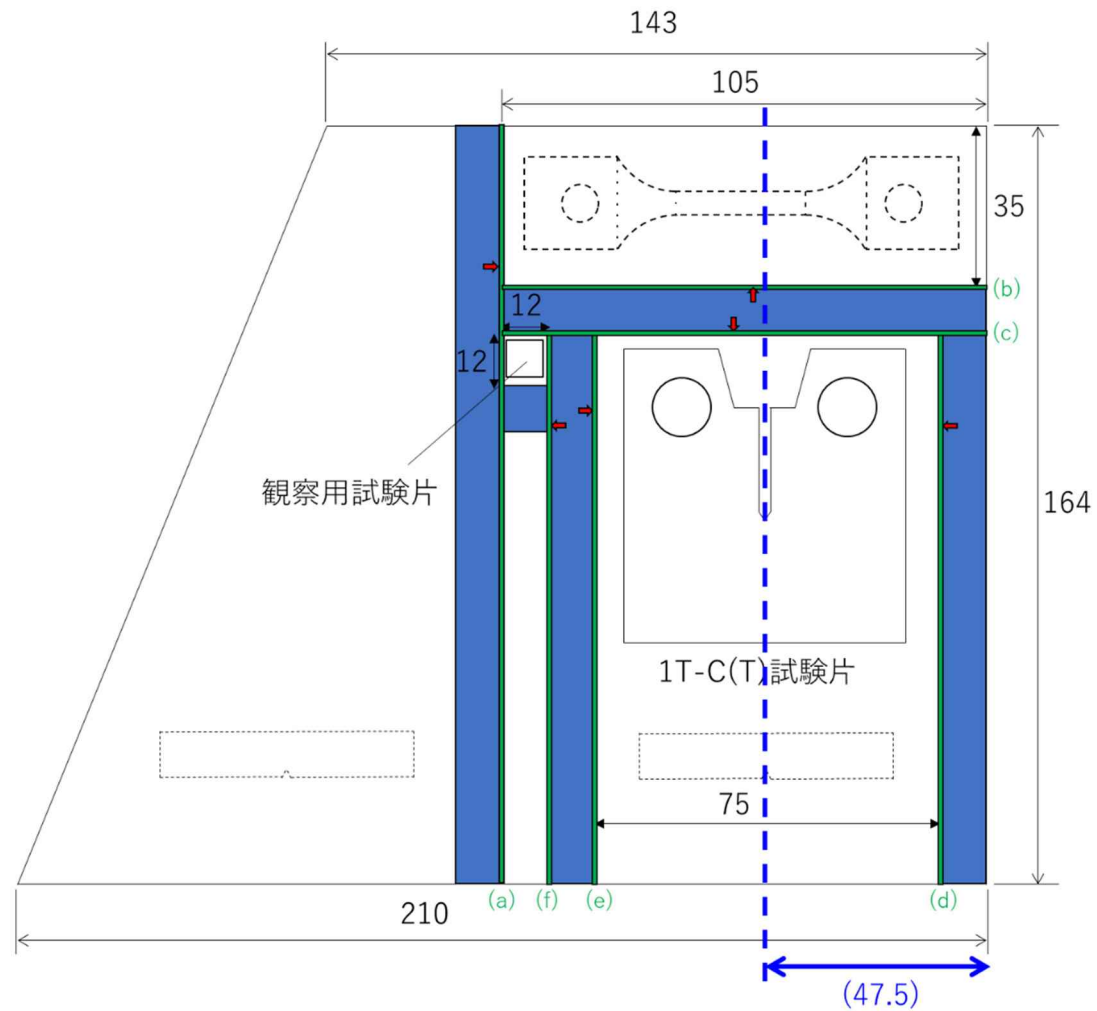


図 3.4.1(2)-6 試験体板取図 (ID-6) 単位 : mm



- 引張試験片及びシャルピー衝撃試験片 (点線で表示) は令和5年度採取の予定



体加工手順 (ID-1 の例) 単位 : mm

図 3.4.1(2)-7 試験

寸法は切断後に確保する寸法
()内はケガキ寸法



図 3.4.1(2)-8 罫書き付与後の試験体外観 (ID-1 の例) 単位 : mm



図 3.4.1(2)-9 粗切断後の試験体外観写真 (ID-1)

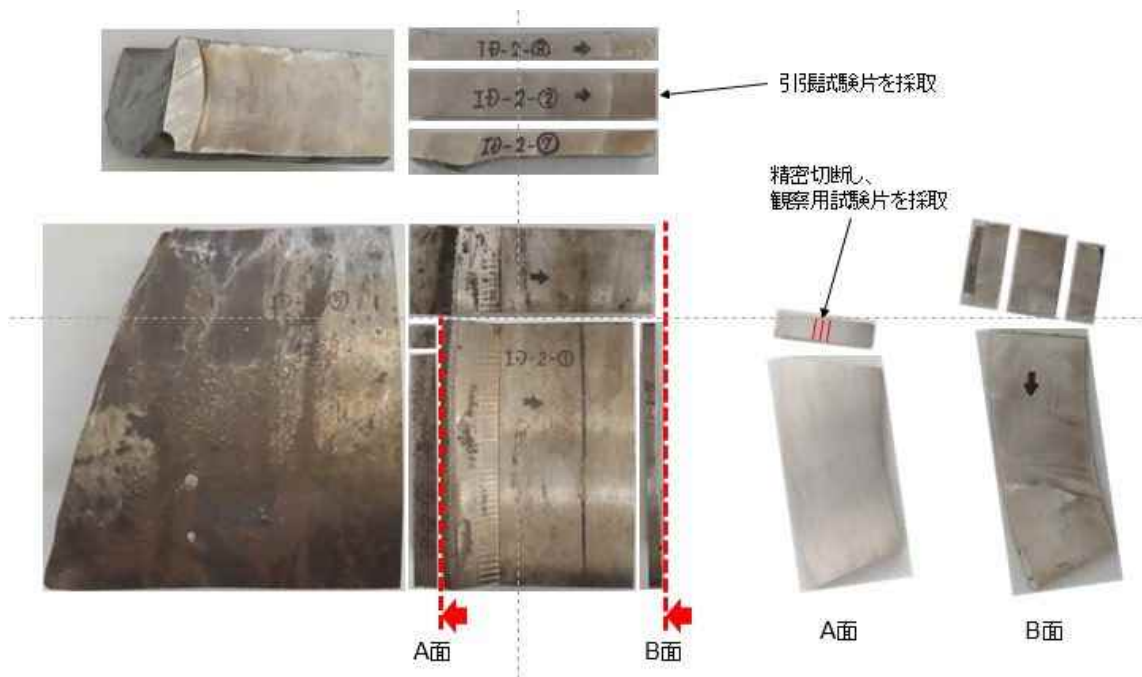


図 3.4.1(2)-10 粗切断後の試験体外観写真 (ID-2)

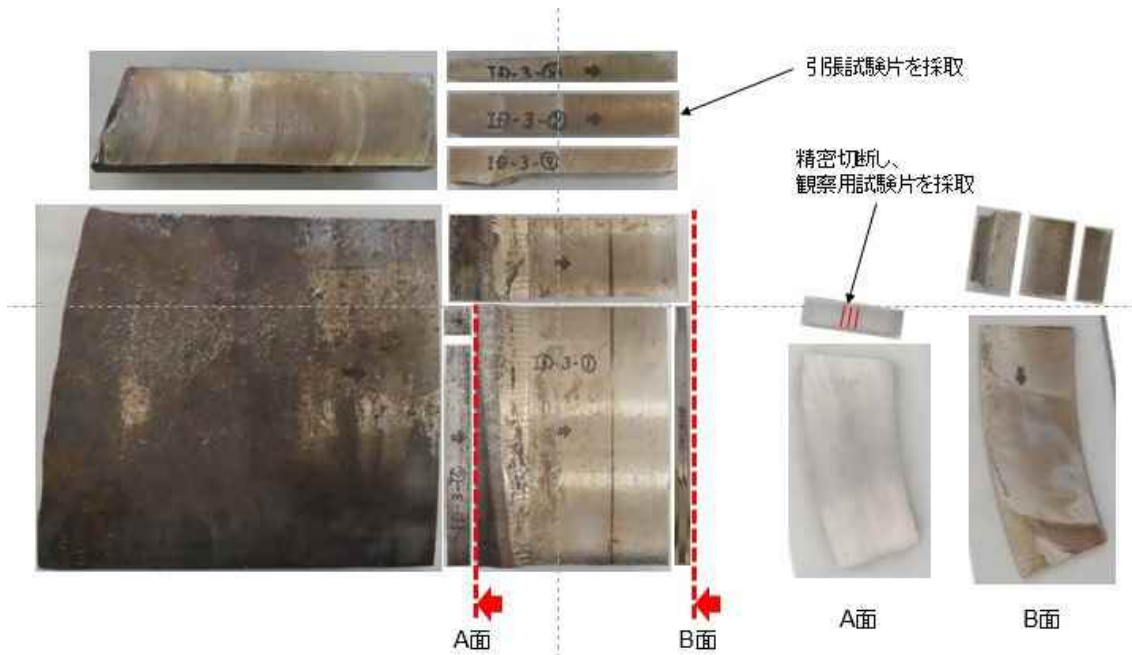


図 3.4.1(2)-11 粗切断後の試験体外観写真 (ID-3)

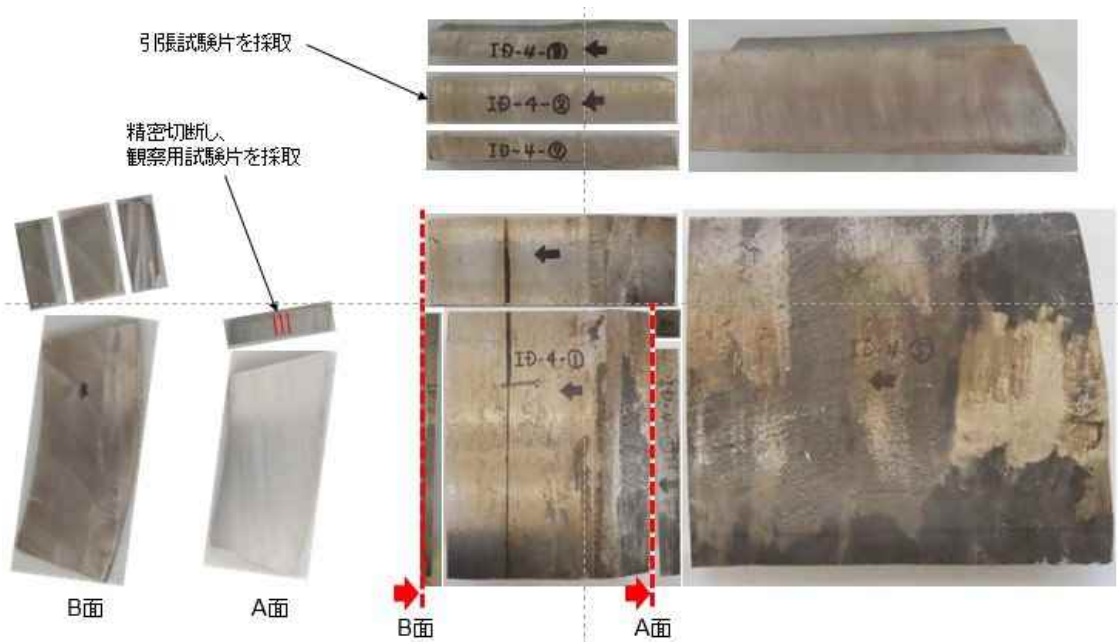


図 3.4.1(2)-12 粗切断後の試験体外観写真 (ID-4)

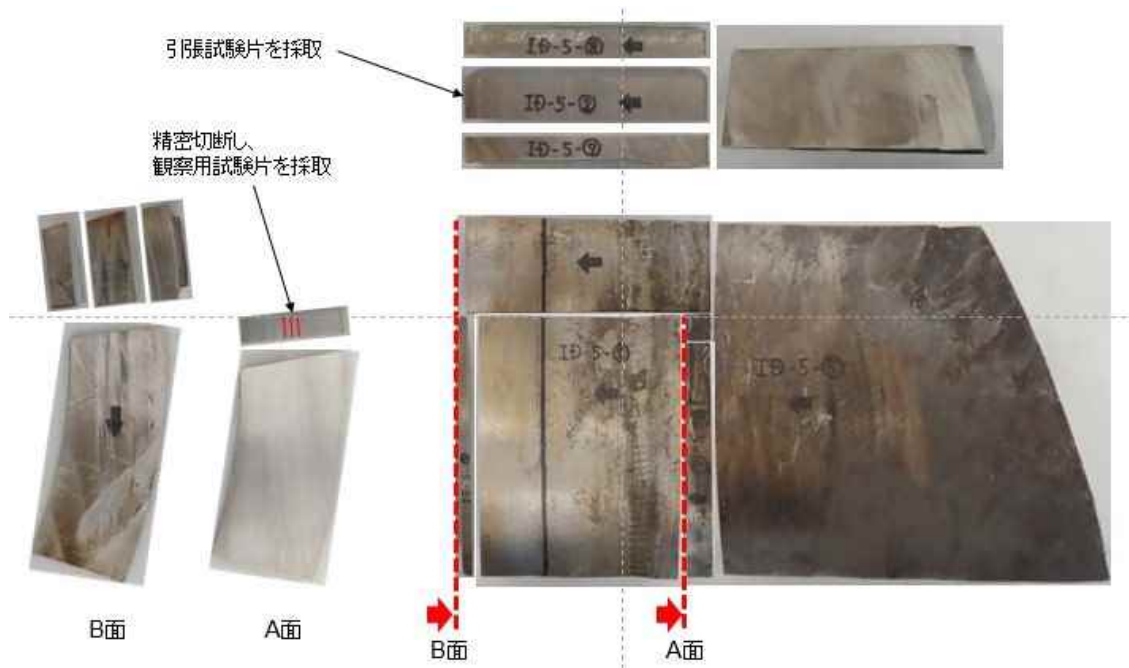


図 3.4.1(2)-13 粗切断後の試験体外観写真 (ID-5)



図 3.4.1(2)-14 粗切断後の試験体外観写真 (ID-6)

(3) 試験片の加工

1) 試験体方位の定義

試験体は円筒形の構造物のほぼ 2/3 周の範囲から ID-1 と 6、ID-2 と 5、ID-3 と 4 が対面側となるように 6 体採取した。従って、試験片の方向を元の構造物を基準に示すと、ID-1、2、3 と ID-4、5、6 はそれぞれ鏡像反転した位置関係となる。試験片の加工の際には元の構造物と試験片の方向の関係を明確にする必要がある。そのため、図 3.4.1(3)-1 に示すように各試験体の方位を定義した。以降、試験体の方位は図 3.4.1(3)-1 を基準に示す。

2) 引張試験片

試験体 ID2～5 よりそれぞれ 1 個ずつ引張試験片を加工した。試験体の ID と試験片番号の対応を表 3.4.1(3)-1 に示す。図 3.4.1(3)-2 に引張試験片を採取する粗切断後のブロック状試験体を示す。また、ID-2～5 の試験体より採取したブロック状試験体の引張試験片板取図及び罫書き位置を図 3.4.1(3)-3 に示す。

引張試験片の加工手順を図 3.4.1(3)-4 に示す。図中の順番に従って、エンドミルによりブロック状試験体の各面を罫書きまで削り込んだ ((1)～(4))。続けてドリルを用いてピン穴を加工した ((5))。その後フライスを使って所定の寸法になるように引張試験片を切削し ((6))、引張試験片を加工した ((7))。加工した引張試験片に試験片番号をマーキングした。マーキング要領を図 3.4.1(3)-5 に示す。試験片破断後も試験片番号により試験片を管理できるよう、両側のつかみ部に試験片番号をマーキングした。

加工後に引張試験片の寸法測定及び外観観察を行った。ゲージ部には原標点間距離を測定するための罫書を行った。寸法測定結果を表 3.4.1(3)-2 に示す。引張試験片の寸法は全て公差の範囲内であった。引張試験片の外観を図 3.4.1(3)-6 に示す。引張試験に影響を及ぼすような外観上の傷や欠陥等はなかった。

3) 1T-C(T)試験片

試験体 ID1～6 よりそれぞれ 1 個ずつ 1T-C(T)試験片を加工した。試験体の ID と試験片番号の対応を表 3.4.1(3)-3 に示す。図 3.4.1(3)-7 に 1T-C(T)試験片を採取する粗切断後のブロック状試験体を示す。また、ID-1～6 の試験体より採取したブロック状試験体の罫書き位置を図 3.4.1(3)-8 に

示す。罫書きにより、ワイヤ移動経路の確認を行った。

1T-C(T)試験体にはワイヤ放電加工機を用いた。図 3.4.1(3)-9 及び図 3.4.1(3)-10 にワイヤ移動経路を示す。図 3.4.1(3)-9 に示す A, B, D 面の加工を行った後、ブロック状試験体を持ち替えて図 3.4.1(3)-10 に示す C, E, F 面の加工を行った。C, E, F 面の加工に先立ち、罫書きによるワイヤ移動経路の確認を行った。

ワイヤ放電加工機による加工後の 1T-C(T)試験片に試験片番号をマーキングした。マーキング要領を図 3.4.1(3)-11 に示す。試験片破断後も試験片番号により試験片を管理できるように、試験片の上端及び下端の両方に同じ試験片番号をマーキングした。

マーキング後に 3.4.2 項に示す予亀裂導入を施したのちに、サイドグループ加工を行った。サイドグループはワイヤ放電加工機で加工した。サイドグループ加工のワイヤ移動経路を図 3.4.1(3)-12 に示す。

ワイヤ放電加工機による加工後に 1T-C(T)試験片の寸法測定及び外観観察を行った。寸法測定箇所を図 3.4.1(3)-13 に、寸法測定結果を表 3.4.1(3)-4 に示す。1T-C(T)試験片の寸法は全て公差の範囲内であった。1T-C(T)試験片の外観を図 3.4.1(3)-14 に示す。破壊靱性試験に影響を及ぼすような外観上の傷や欠陥等はなかった。

4) 組織観察用試験片

試験体 ID-1~6 よりそれぞれ 2 個ずつ組織観察用試験片を加工した。試験体の ID と試験片番号の対応を表 3.4.1(3)-5 に示す。図 3.4.1(3)-15 に組織観察用試験片の加工位置を示す。図 3.4.1(3)-16 に組織観察用試験片のブロック状試験体採取手順及び罫書き位置を示す。約 10mm×10mm×実厚の棒状のブロック状試験体を精密切断機で加工した。ID-1~6 より採取した棒状のブロック状試験体の罫書き位置を図 3.4.1(3)-16 に合わせて示す。拡大図に示す位置より棒状のブロック状試験体を罫書きで切断し、その後詳細図に示す ID-***M1** 及び **M2** (*は試験体 ID 番号の数値部) を試験体毎に切断した。採取した組織観察用試験片を所定の寸法となるように精密切断機で加工した。組織観察用試験体加工後に採取方向が分かるようにスリットを加工した。スリット加工位置を図 3.4.1(3)-17 に示す。

組織観察用試験片は表面研磨するため試験片番号をマーキングすること

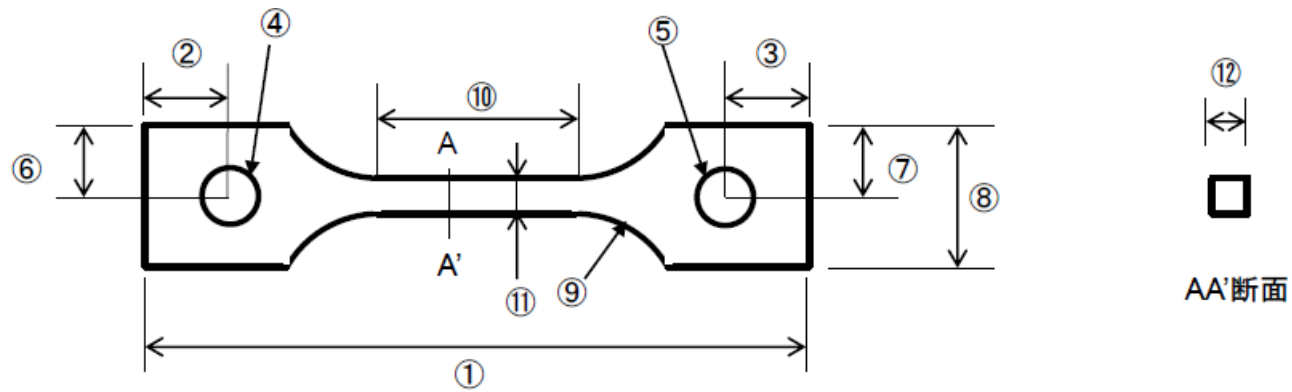
ができない。そのため、試験片の側面に本数の異なる罫書きを施すことで試験片を識別した。罫書き位置を図 3.4.1(3)-18 に示す。スリットがある側の側面には試験片番号 ID-x-My の y に対応する本数罫書きを施した。また、スリットがない側の側面には x に対応する本数罫書きを施した。図 3.4.1(3)-18 の例では、スリット側の側面に 2 本、スリットがない側の側面に 4 本の罫書きがあるので、試験片番号は ID-4-M2 となる。

組織観察用試験片の加工後にフェライトスコープによるフェライト測定を行った。フェライトスコープ測定位置を図 3.4.1(3)-19 に示す。また、フェライト測定と同じ位置で厚さを計測した。その後に組織観察用試験片の寸法測定及び外観観察を行った寸法測定結果をフェライト測定結果と合わせて表 3.4.1(3)-6 に示す。組織観察用試験片の寸法は全て公差の範囲内であった。フェライト測定結果は 3.4.2 項で論ずる。組織観察用試験片の外観を図 3.4.1(3)-20 に示す。引張試験に影響を及ぼすような外観上の傷や欠陥等はなかった。

表 3.4.1(3)-1 試験体と引張試験片番号の対応

試験体	試験片番号
ID-2	ID-2-TT1
ID-3	ID-3-TT1
ID-4	ID-4-TT1
ID-5	ID-5-TT1

表 3.4.1(3)-2 引張試験片寸法測定結果



単位:mm

測定箇所	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
寸法	95	12	12	8±0.2	8±0.2	10±0.1	10±0.1	20±0.2	R15	28±0.2	5±0.1	5±0.1
ID-2-TT1	94.9	12.0	12.0	8.0	8.0	10.0	10.0	20.0	15.0	28.0	5.0	5.1
ID-3-TT1	95.0	12.0	12.0	8.0	8.0	10.0	10.0	20.0	15.0	27.9	5.0	5.0
ID-4-TT1	95.0	12.0	12.0	8.0	8.0	9.9	10.0	20.0	14.9	28.0	5.0	5.0
ID-5-TT1	95.0	12.1	12.0	8.0	8.0	10.0	10.0	20.0	14.9	27.9	5.1	5.0

表 3.4.1(3)-3 試験体と 1T-C(T)試験片番号の対応

試験体	試験片番号
ID-1	ID-1-FR1
ID-2	ID-2-FR1
ID-3	ID-3-FR2
ID-4	ID-4-FR1
ID-5	ID-5-FR1
ID-6	ID-6-FR1

表 3.4.1(3)-4 1T-C(T)試験片寸法測定結果 (単位 : mm)

測定箇所	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	D1	D2	H1	H2	H3	H4
寸法	61±0.4	30.5±0.2	30.5±0.2	18±0.2	18±0.2	(20.0)	(13.2)	3.5+0.2-0.0	3.5+0.1-0.3	12.7+0.1-0.0	12.7+0.1-0.0	63.5±0.4	50.8±0.2	22.5±0.2	(1.5)
ID-1-FR1	61.0	30.5	30.5	18.0	18.0	20.1	13.2	3.6	3.5	12.8	12.8	63.5	50.9	22.4	1.4
ID-2-FR1	61.0	30.5	30.5	18.0	17.9	20.0	13.2	3.6	3.5	12.8	12.8	63.6	50.8	22.4	1.4
ID-3-FR1	61.0	30.5	30.5	18.0	18.0	40.1	13.2	3.6	3.5	12.8	12.8	63.6	50.9	22.4	1.5
ID-3-FR2	61.0	30.6	30.5	18.0	18.0	20.1	13.2	3.5	3.5	12.8	12.8	63.5	50.8	22.3	1.4
ID-4-FR1	61.0	30.5	30.5	18.0	18.0	20.1	13.2	3.6	3.5	12.7	12.7	63.5	50.8	22.3	1.4
ID-5-FR1	61.0	30.5	30.5	18.0	18.0	20.1	13.2	3.6	3.5	12.7	12.7	63.5	50.8	22.4	1.4
ID-6-FR1	61.0	30.5	30.5	18.0	18.0	20.1	13.2	3.5	3.5	12.8	12.8	63.5	50.8	22.4	1.4

測定箇所	H5	H6	H7	T1	T2※	T3※	R1	R2	R3	R4	R5	R6※	R7※	r1※	r2※
寸法	(1.5)	1.5±0.1	1.5±0.1	25.4+0.0-0.2	2.54±0.1	2.54±0.1	60° +0° -1°	60° +0° -1°	(90°)	(90°)	60° ±1°	(90°)	(90°)	(R0.5)	(R0.5)
ID-1-FR1	1.4	1.5	1.5	25.3	2.56	2.50	59°	60°	89°	89°	60°	90°	90°	R0.5	R0.5
ID-2-FR1	1.4	1.5	1.5	25.3	2.55	2.49	60°	59°	91°	91°	61°	90°	90°	R0.5	R0.5
ID-3-FR1	1.4	1.5	1.5	25.4	-	-	60°	59°	92°	91°	60°	-	-	-	-
ID-3-FR2	1.4	1.5	1.5	25.4	2.56	2.52	60°	59°	92°	92°	60°	89°	89°	R0.5	R0.5
ID-4-FR1	1.4	1.5	1.5	25.4	2.51	2.51	60°	59°	92°	90°	60°	90°	89°	R0.5	R0.5
ID-5-FR1	1.4	1.5	1.5	25.4	2.55	2.52	60°	60°	91°	91°	60°	89°	90°	R0.5	R0.5
ID-6-FR1	1.4	1.5	1.5	25.4	2.60	2.57	59°	60°	90°	92°	61°	90°	89°	R0.5	R0.5

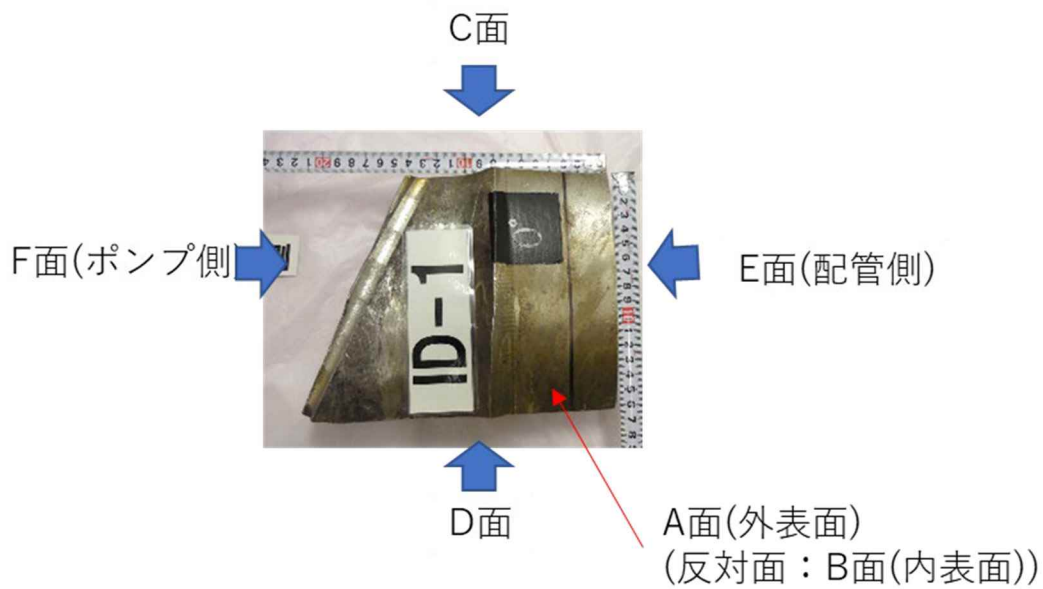
※サイドグループ加工後に測定

表 3.4.1(3)-5 試験片と組織観察用試験片番号の対応

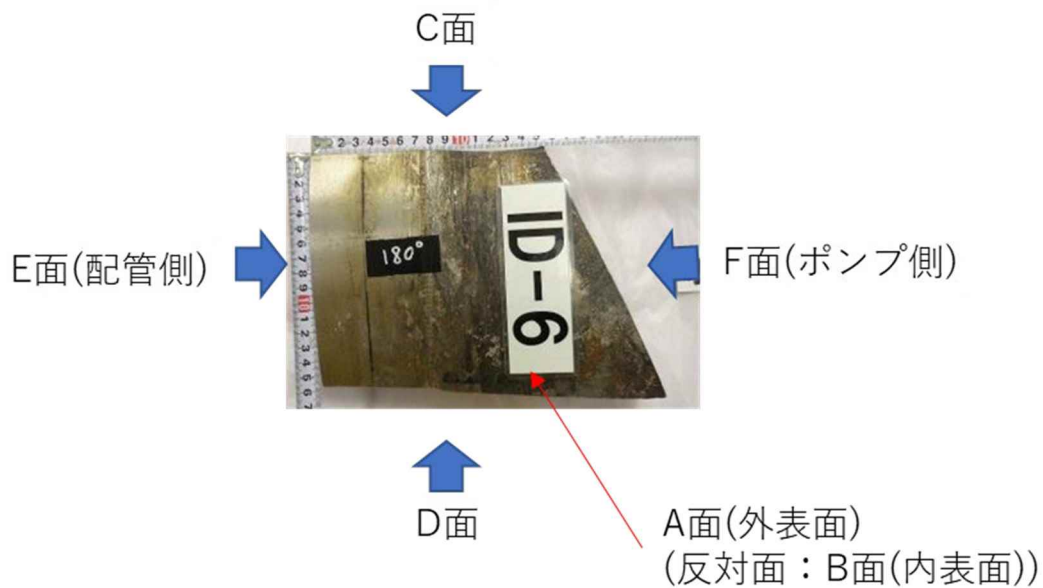
試験体	A 面(外表面)側から 加工した試験片	B 面(内表面)側から 加工した試験片
ID-1	ID-1-M1	ID-1-M2
ID-2	ID-2-M1	ID-2-M2
ID-3	ID-3-M1	ID-3-M2
ID-4	ID-4-M1	ID-4-M2
ID-5	ID-5-M1	ID-5-M2
ID-6	ID-6-M1	ID-6-M2

表 3.4.1(3)-6 観察用試験片の寸法、重量及びフェライト量測定結果

	寸法 (mm)		厚さt(mm)						フェライト量 (%)						重量(g)	合計重量(g)	
	C-D間	E-F間	①	②	③	④	⑤	tmax-tmin	①	②	③	④	⑤	平均値			
仕様	10+2/0	10+2/0	2+0.5/-0.2						≒0.17	—						—	28.51
ID-1- M1	11.74	11.36	2.46	2.47	2.44	2.46	2.48	0.04	25.6	23.0	23.9	25.1	22.6	24.0	2.48		
ID-1- M2	11.68	11.04	2.42	2.44	2.43	2.46	2.48	0.06	25.5	23.5	22.0	18.7	25.6	23.1	2.41		
ID-2- M1	11.37	11.36	2.41	2.42	2.43	2.43	2.46	0.05	17.9	16.6	18.6	19.8	19.3	18.4	2.40		
ID-2- M2	11.13	11.38	2.41	2.42	2.44	2.44	2.49	0.08	19.6	19.4	20.1	19.2	18.9	19.4	2.34		
ID-3- M1	11.06	11.19	2.39	2.43	2.37	2.42	2.47	0.10	19.2	20.7	18.3	20.4	17.6	19.2	2.26		
ID-3- M2	11.16	10.97	2.47	2.44	2.41	2.38	2.48	0.10	19.7	19.7	18.0	17.6	19.2	18.8	2.29		
ID-4- M1	11.75	11.49	2.38	2.40	2.42	2.43	2.44	0.06	20.2	19.0	20.8	19.6	18.7	19.7	2.51		
ID-4- M2	11.76	11.46	2.34	2.34	2.35	2.35	2.40	0.06	21.4	21.6	20.8	19.3	19.6	20.5	2.45		
ID-5- M1	11.28	11.40	2.36	2.36	2.36	2.34	2.43	0.09	18.7	17.7	18.3	20.9	19.4	19.0	2.36		
ID-5- M2	11.20	11.34	2.34	2.38	2.34	2.41	2.40	0.07	21.1	19.6	18.8	18.8	19.7	19.6	2.35		
ID-6- M1	11.60	11.19	2.32	2.33	2.32	2.33	2.40	0.08	19.8	18.5	19.8	21.1	22.9	20.4	2.34		
ID-6- M2	11.67	11.00	2.38	2.35	2.34	2.33	2.39	0.06	19.9	19.6	21.0	18.6	20.4	19.9	2.34		



(a) ID-1～ID-3 (ID-1 を例に示す)



(b) ID-4～ID-6 (ID-6 を例に示す)

図 3.4.1(3)-1 試験体の面の定義

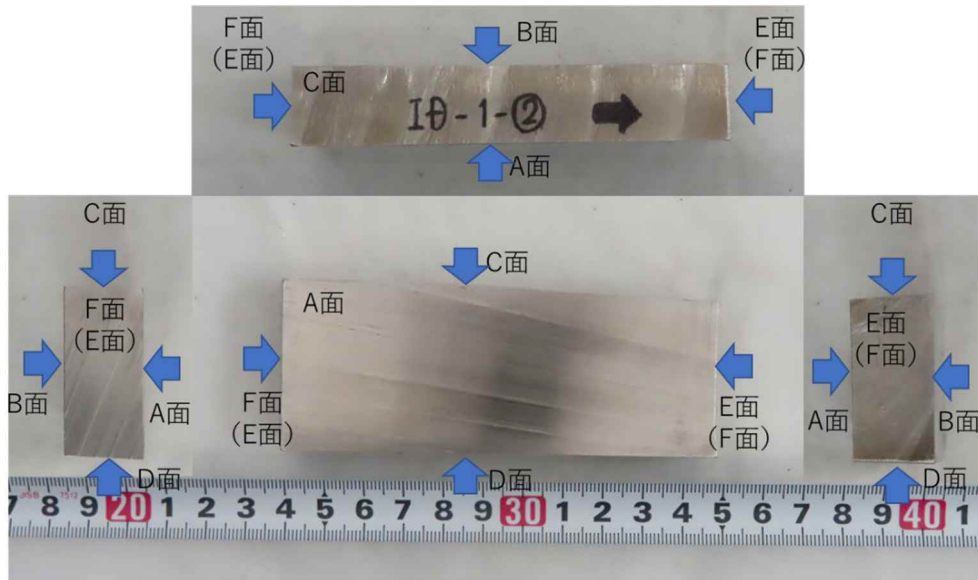
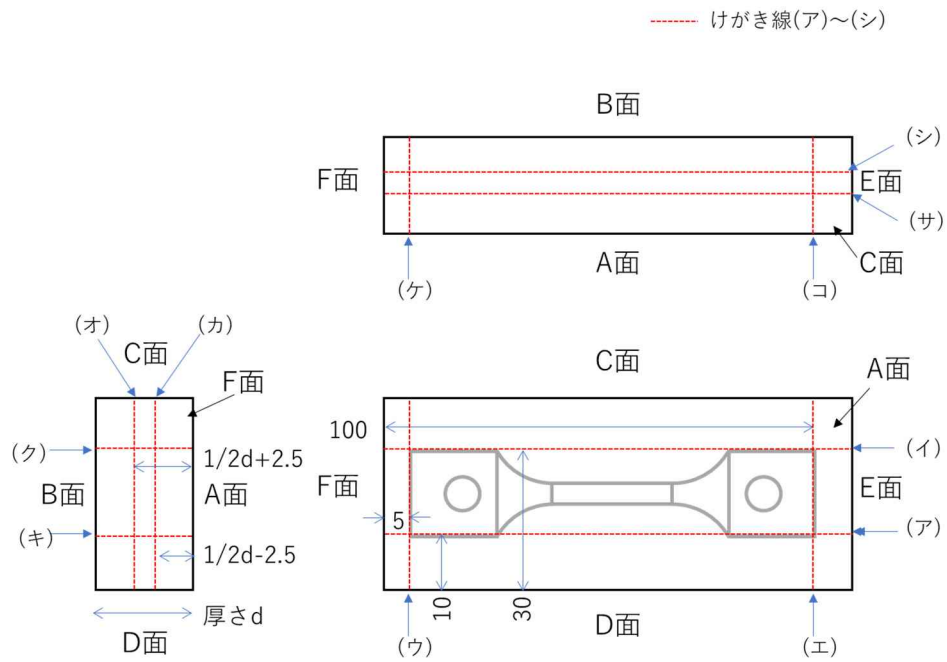
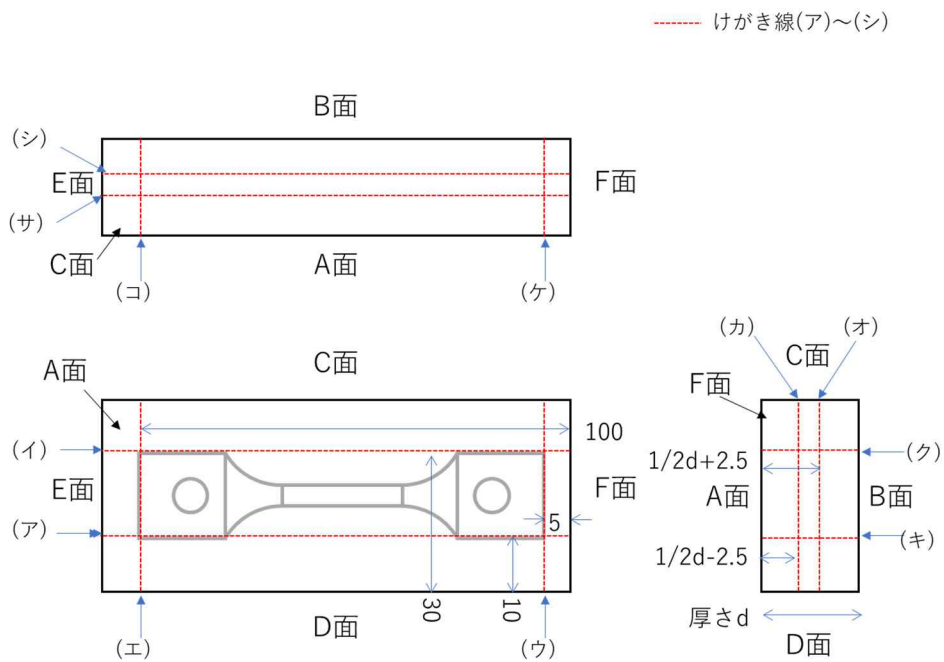


図 3.4.1(3)-2 ID-2～ID-3 における引張試験片を加工する
ブロック状試験体の方位（カッコ内の方位は ID-4～ID-5）

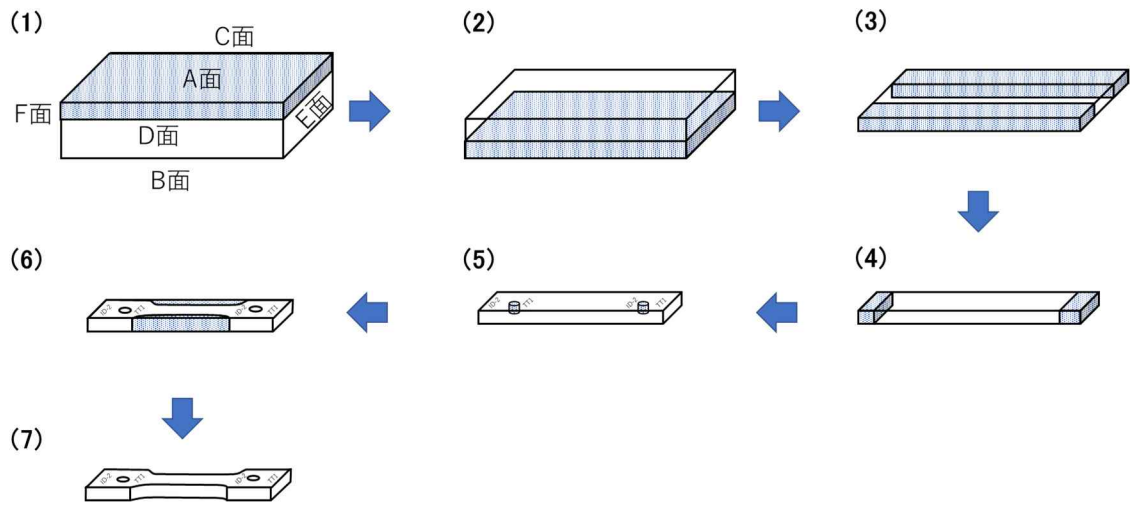


(a) ID-2~ID-3

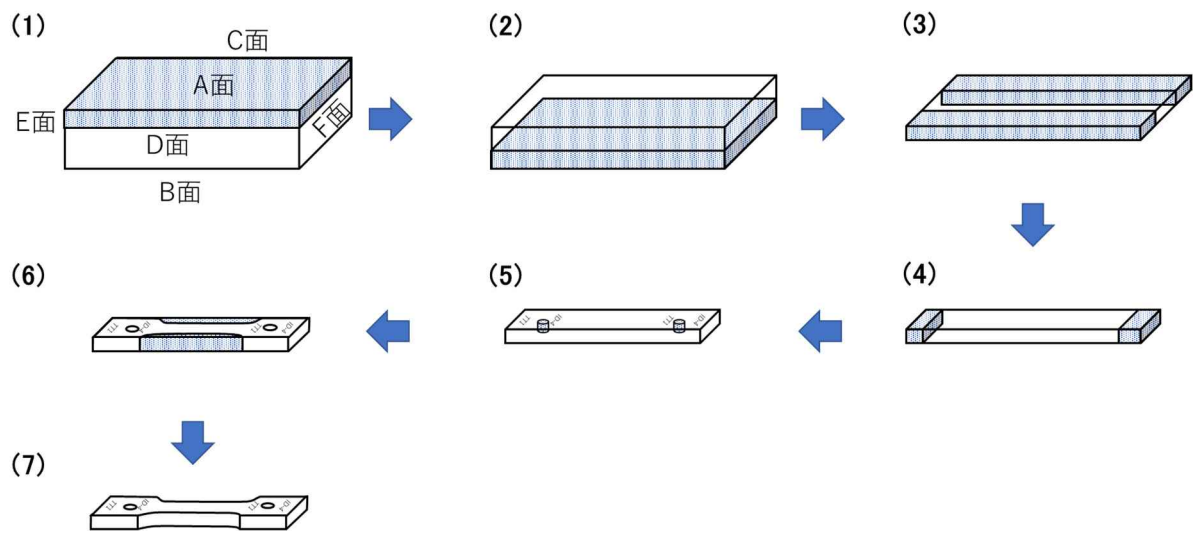


(b) ID-4~ID-5

図 3.4.1(3)-3 引張試験片の板取図と罫書き位置(赤破線) (単位: mm)

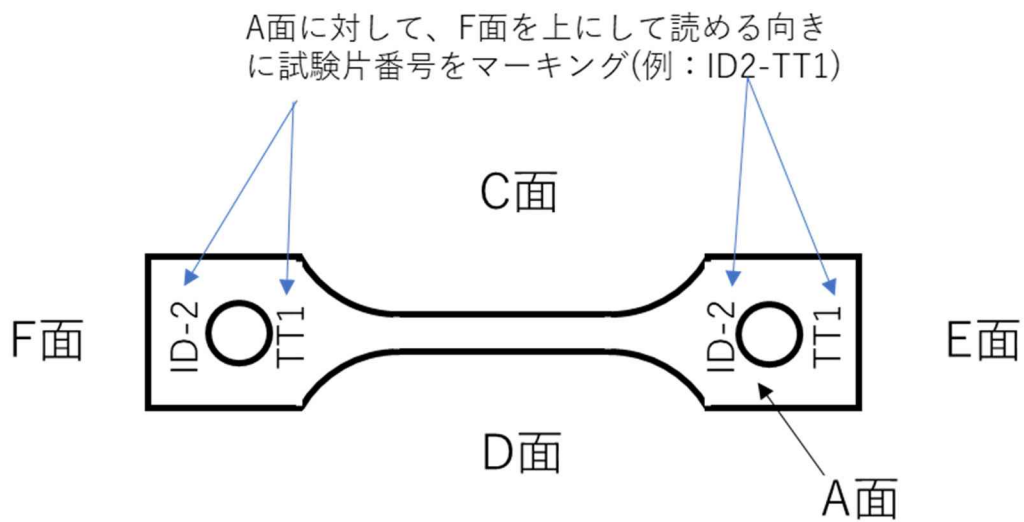


(a) ID-2~ID-3

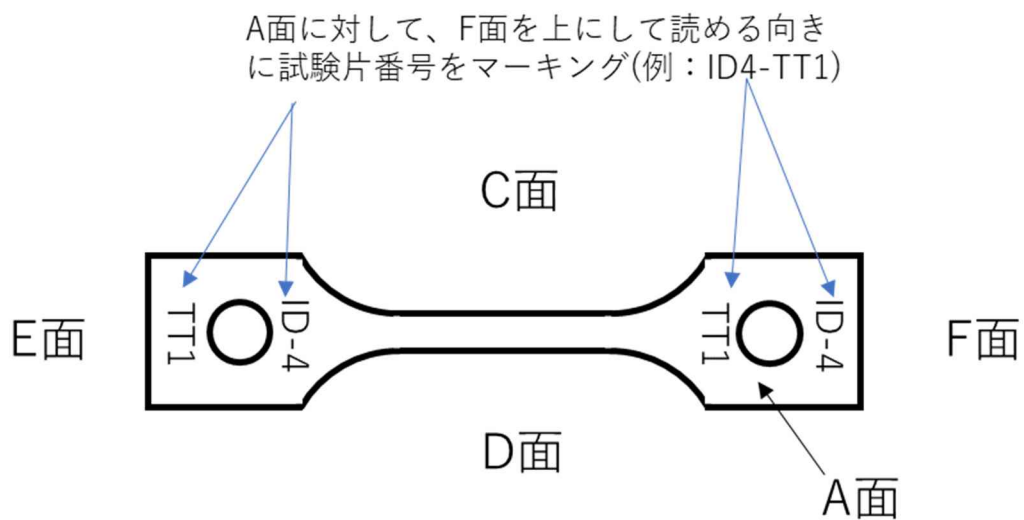


(b) ID-4~ID-5

図 3.4.1(3)-4 引張試験片加工手順

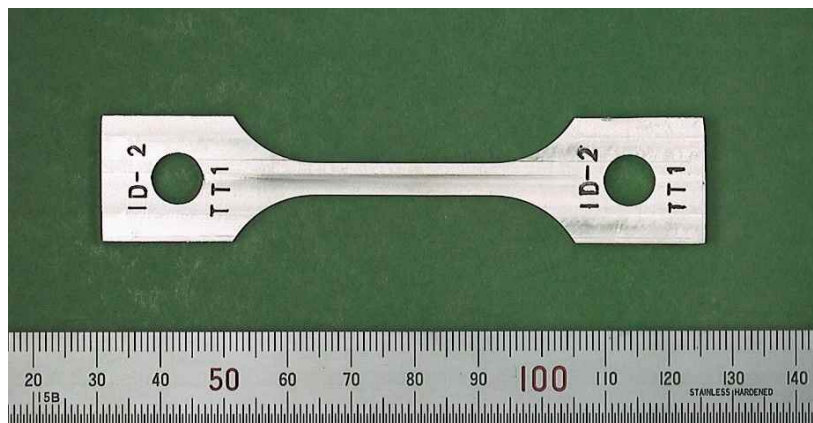


(a) ID-2~ID-3

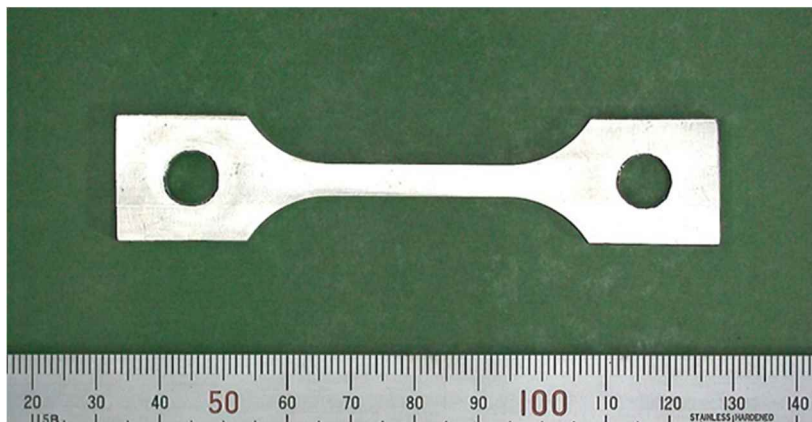


(b) ID-4~ID-5

図 3.4.1(3)-5 引張試験片マーキング要領

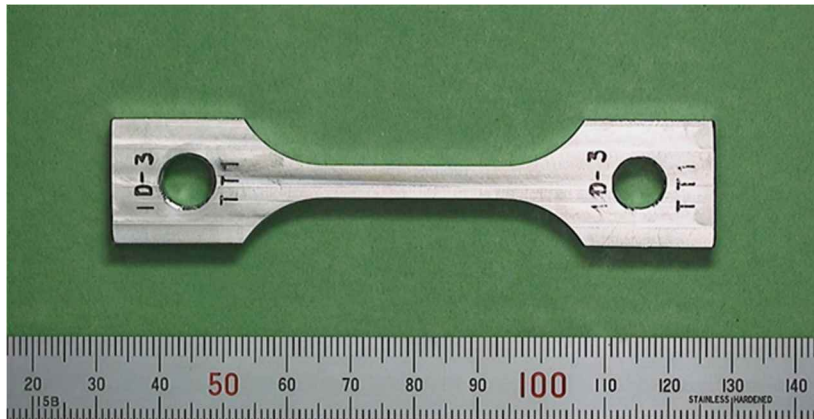


(a) ID-2-TT1 の A 面

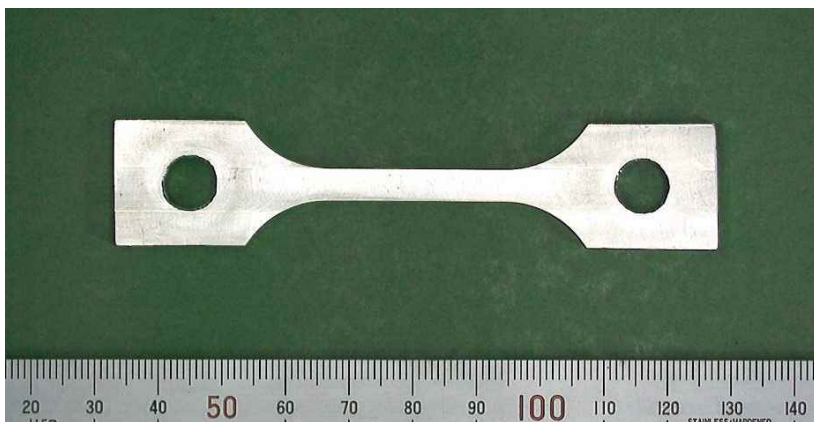


(b) ID-2-TT1 の B 面

図 3.4.1(3)-6 引張試験片の外観写真(1/4)

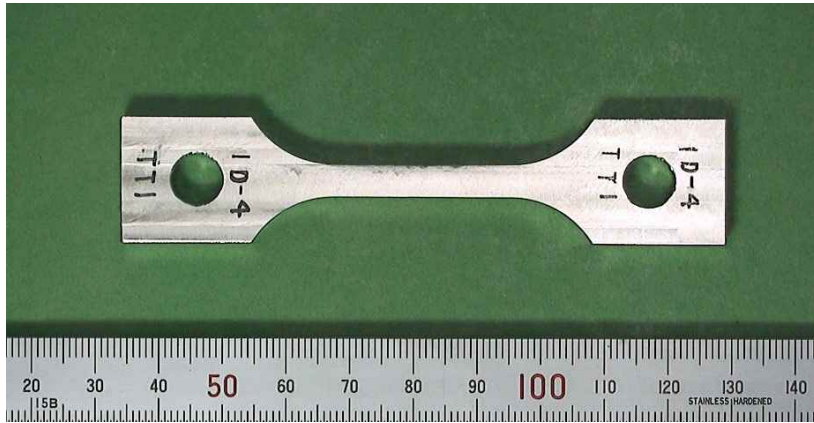


(a) ID-3-TT1 の A 面

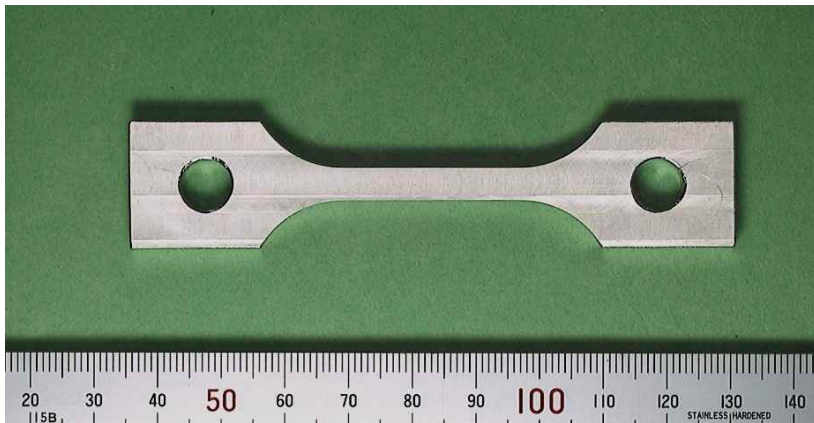


(b) ID-3-TT1 の B 面

図 3.4.1(3)-6 引張試験片の外観写真(2/4)

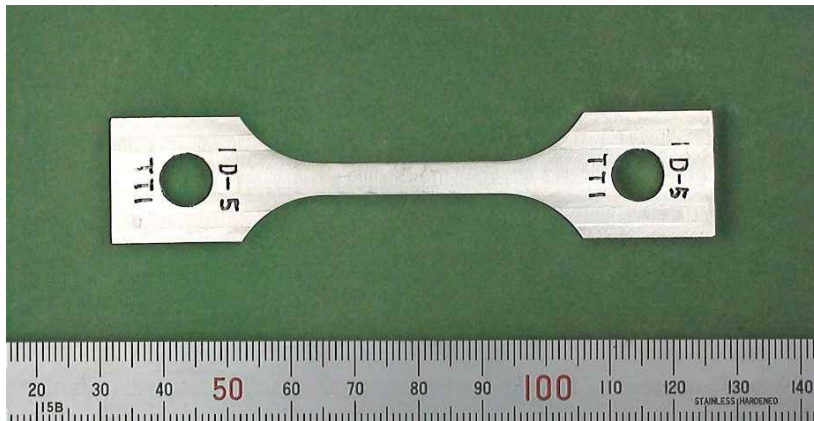


(a) ID-4-TT1 の A 面

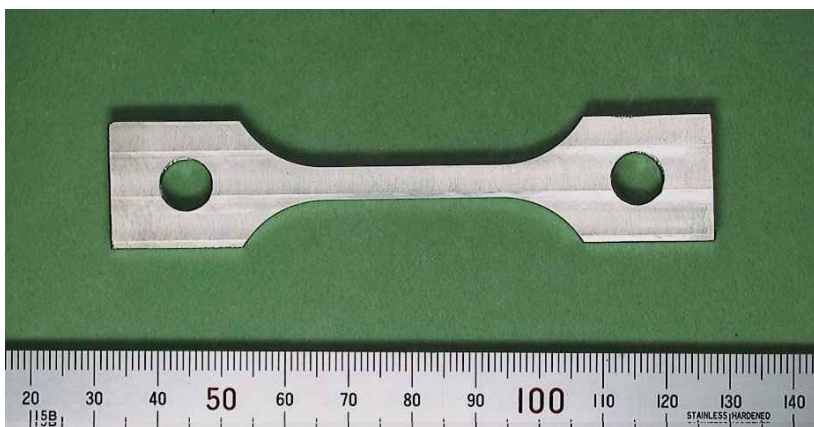


(b) ID-4-TT1 の B 面

図 3.4.1(3)-6 引張試験片の外観写真(3/4)



(a) ID-5-TT1 の A 面



(b) ID-5-TT1 の B 面

図 3.4.1(3)-6 引張試験片の外観写真(4/4)

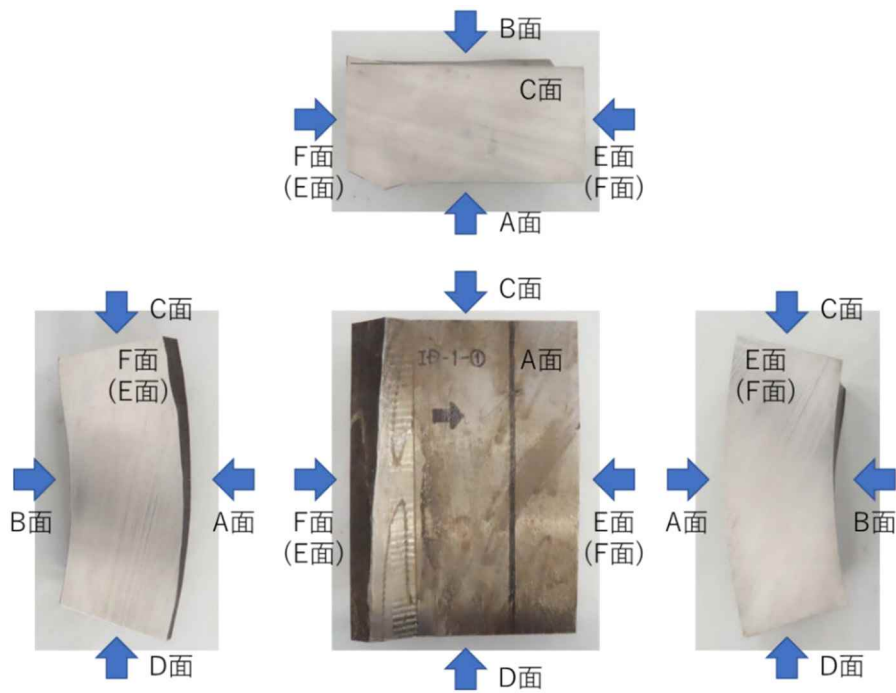
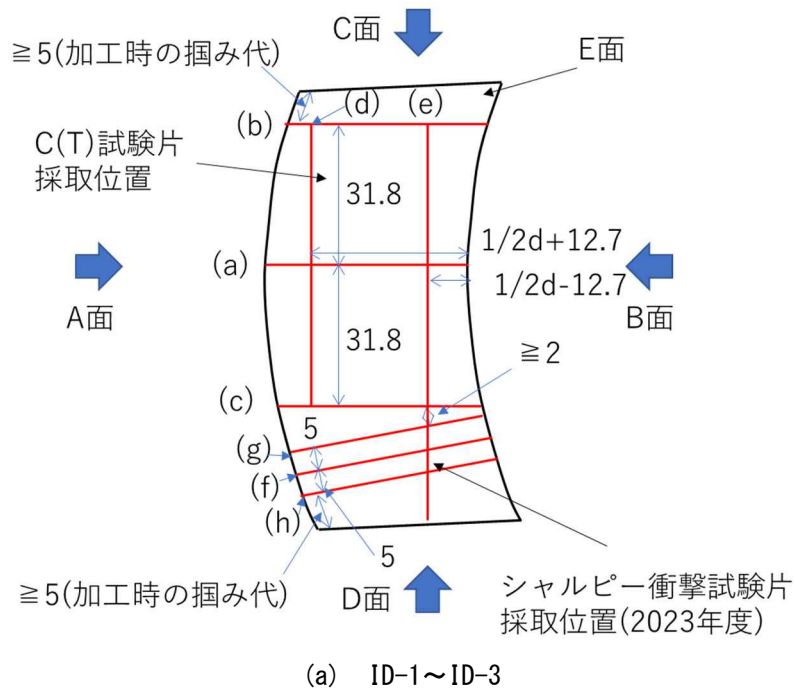


図 3.4.1(3)-7 ID-2~ID-3 における引張試験片を加工するブロック状試験体の方位 (カッコ内の方位は ID-4~ID-5)

— けがき線



— けがき線

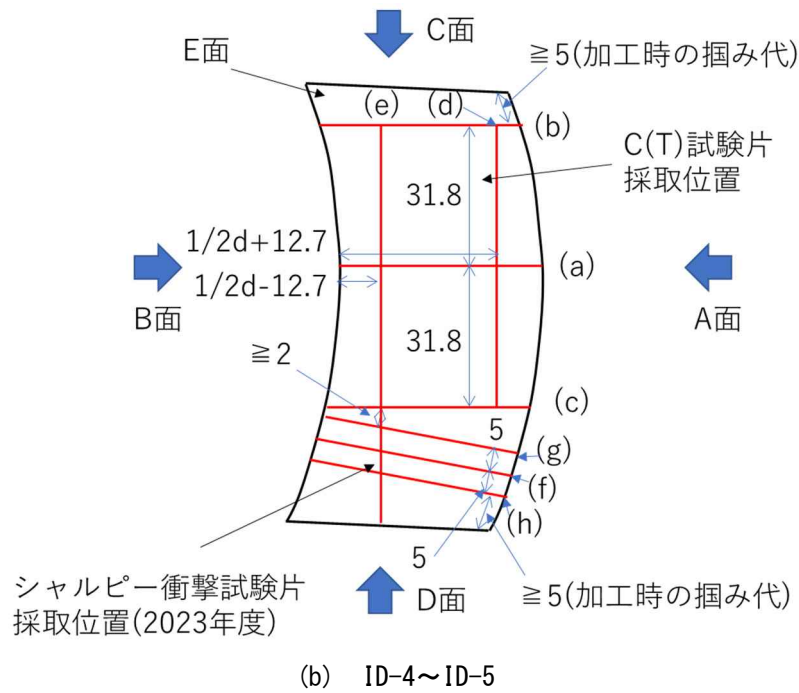
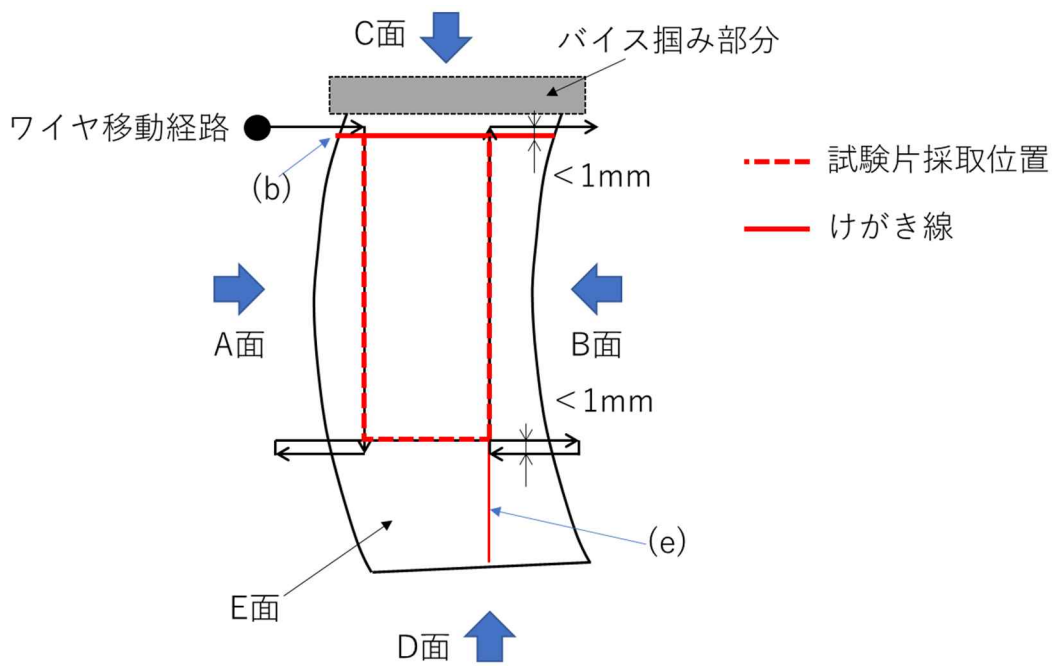
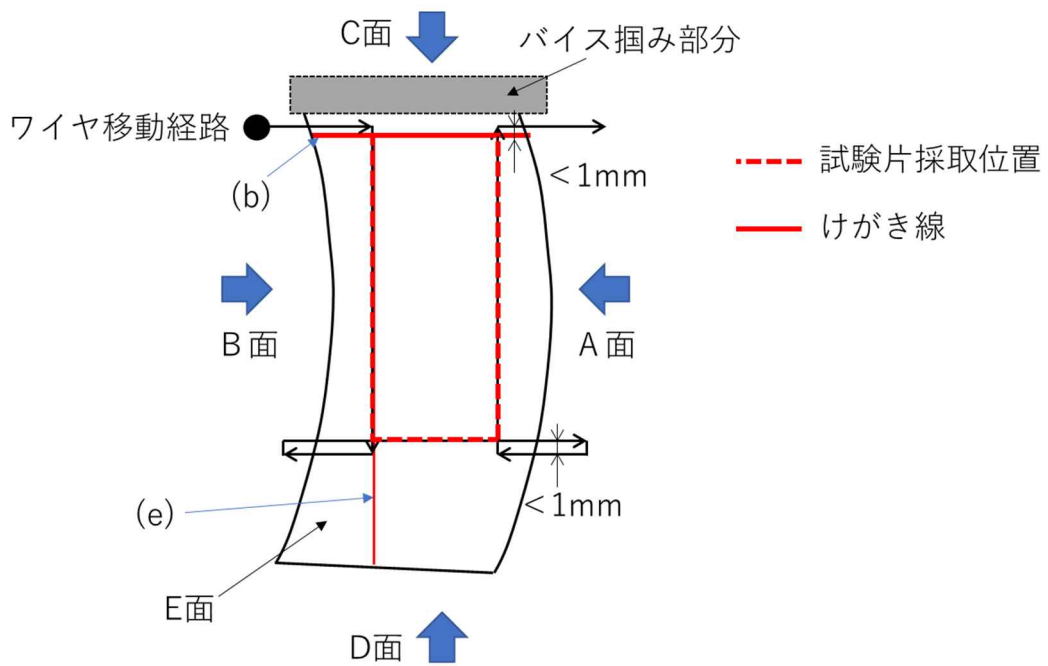


図 3.4.1(3)-8 試験体 E 面への罫書線 (赤実線) (単位 : mm)

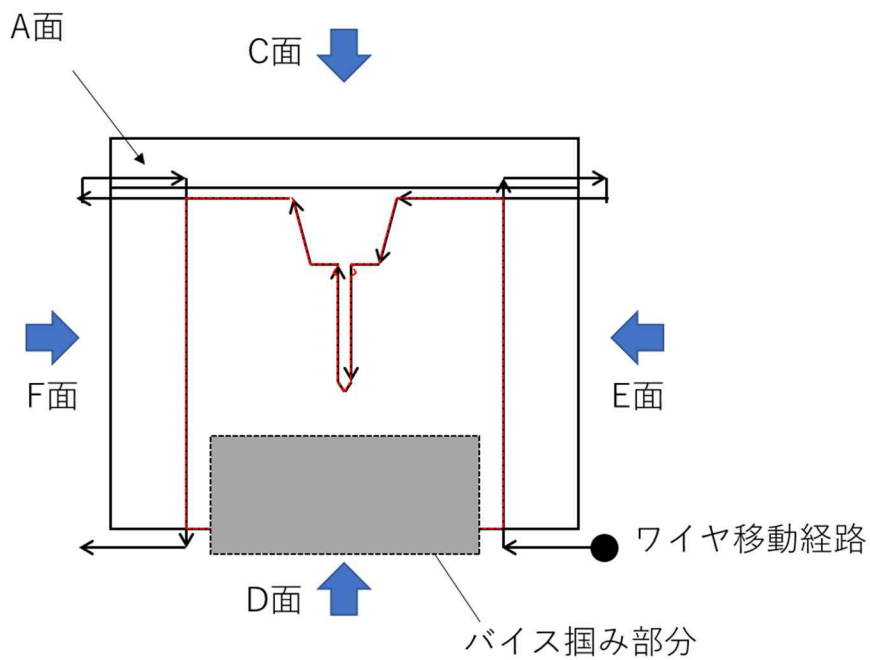


(a) ID-1~ID-3

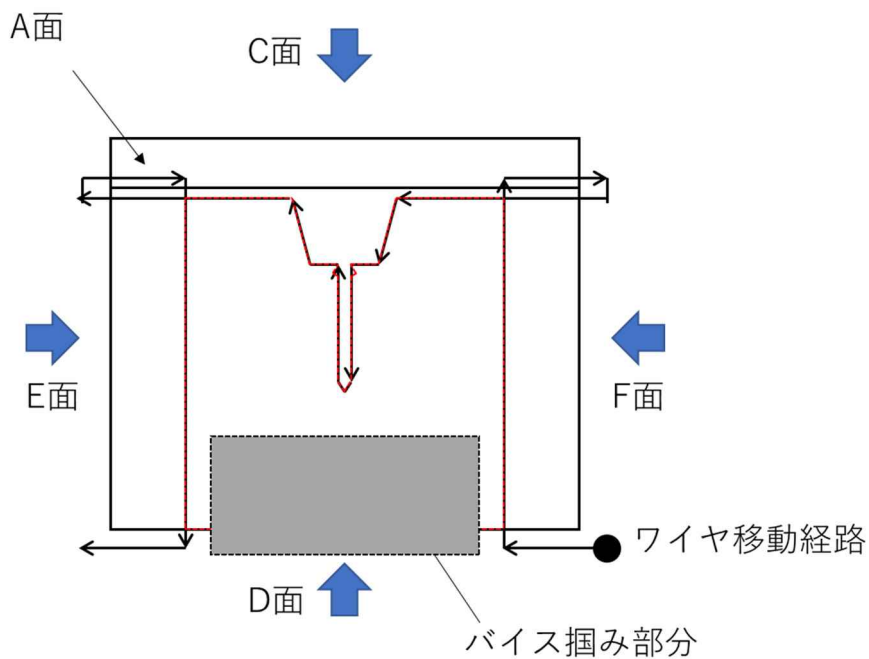


(b) ID-4~ID-6

図 3.4.1(3)-9 ワイヤ移動経路(A、B、D面)



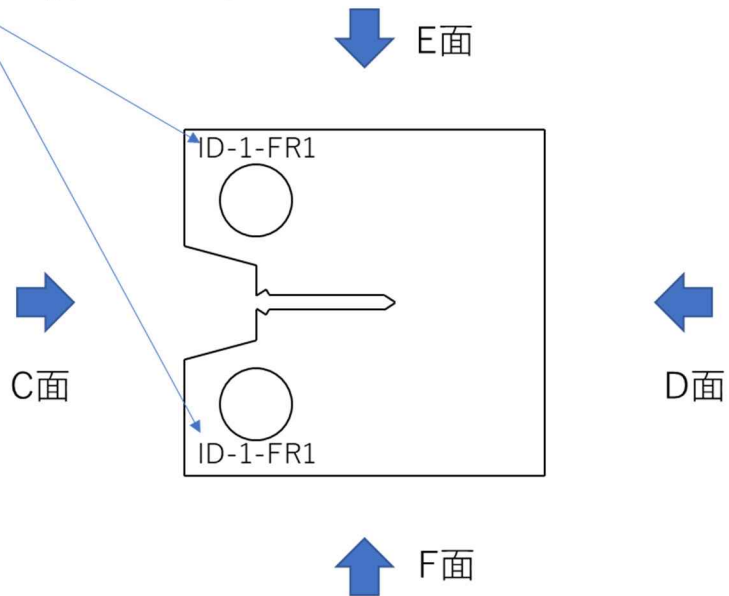
(a) ID-1~ID-3



(b) ID-4~ID-6

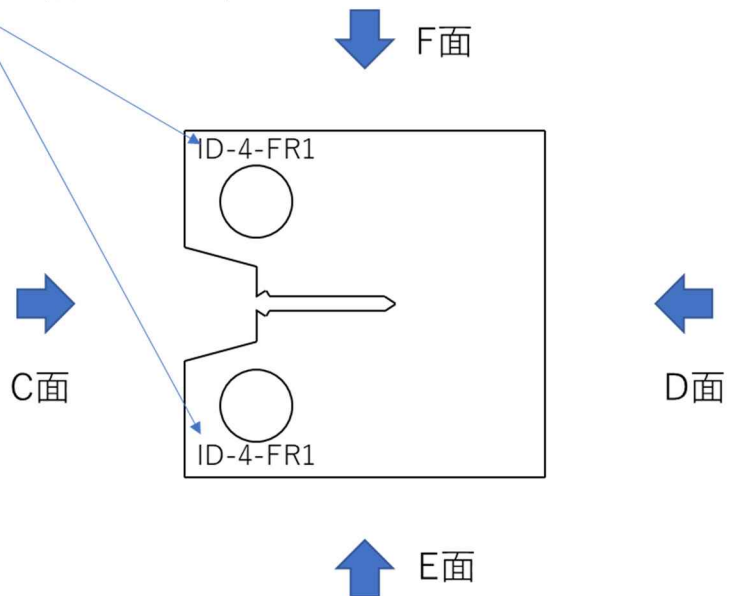
図 3.4.1(3)-10 ワイヤ移動経路(C、E、F面加工時)

A面に対して、D面を右にして読める向き
に試験片番号をマーキング(例：ID-1-FR1)



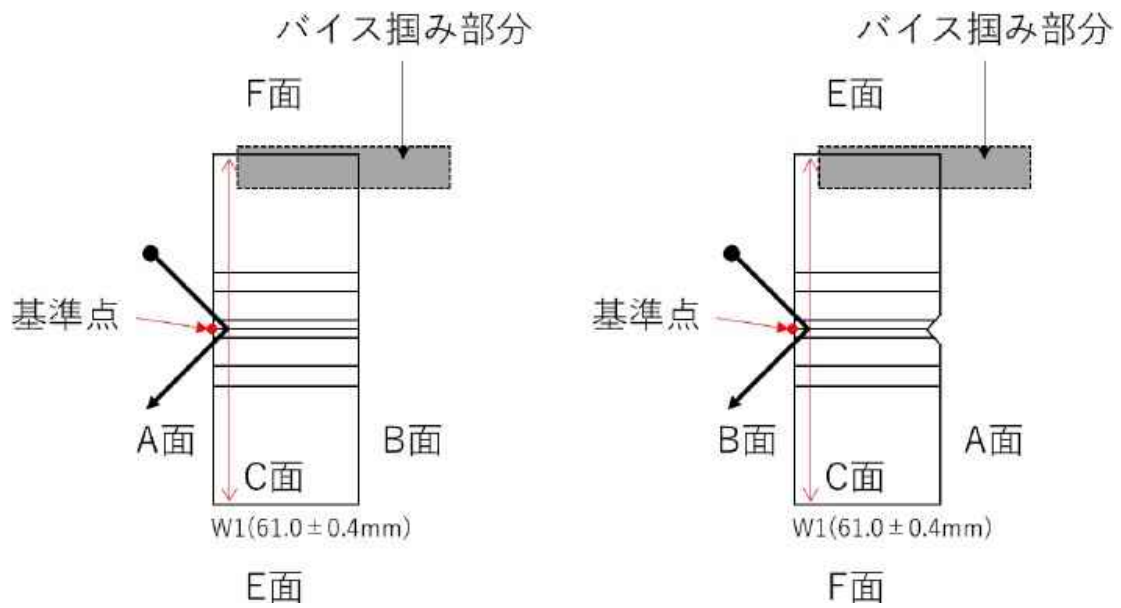
(a) ID-1~ID-3

A面に対して、D面を右にして読める向き
に試験片番号をマーキング(例：ID-4-FR1)



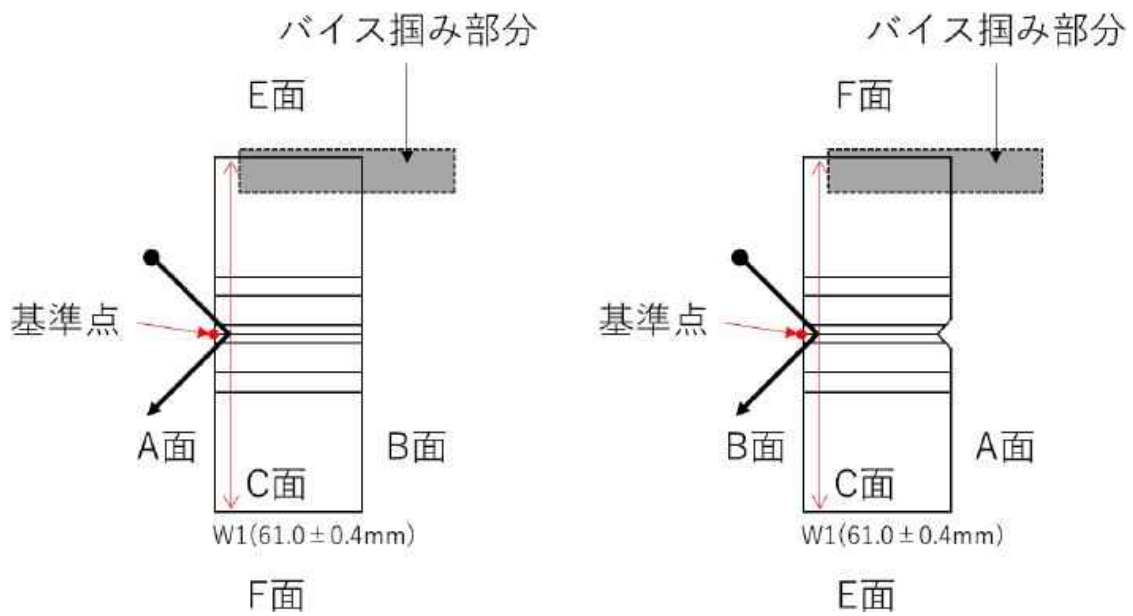
(b) ID-4~ID-6

図 3.4.1(3)-11 1T-C(T)試験片マーキング要領



(a) ID-1~ID-3 A面加工時

(b) ID-1~ID-3 B面加工時

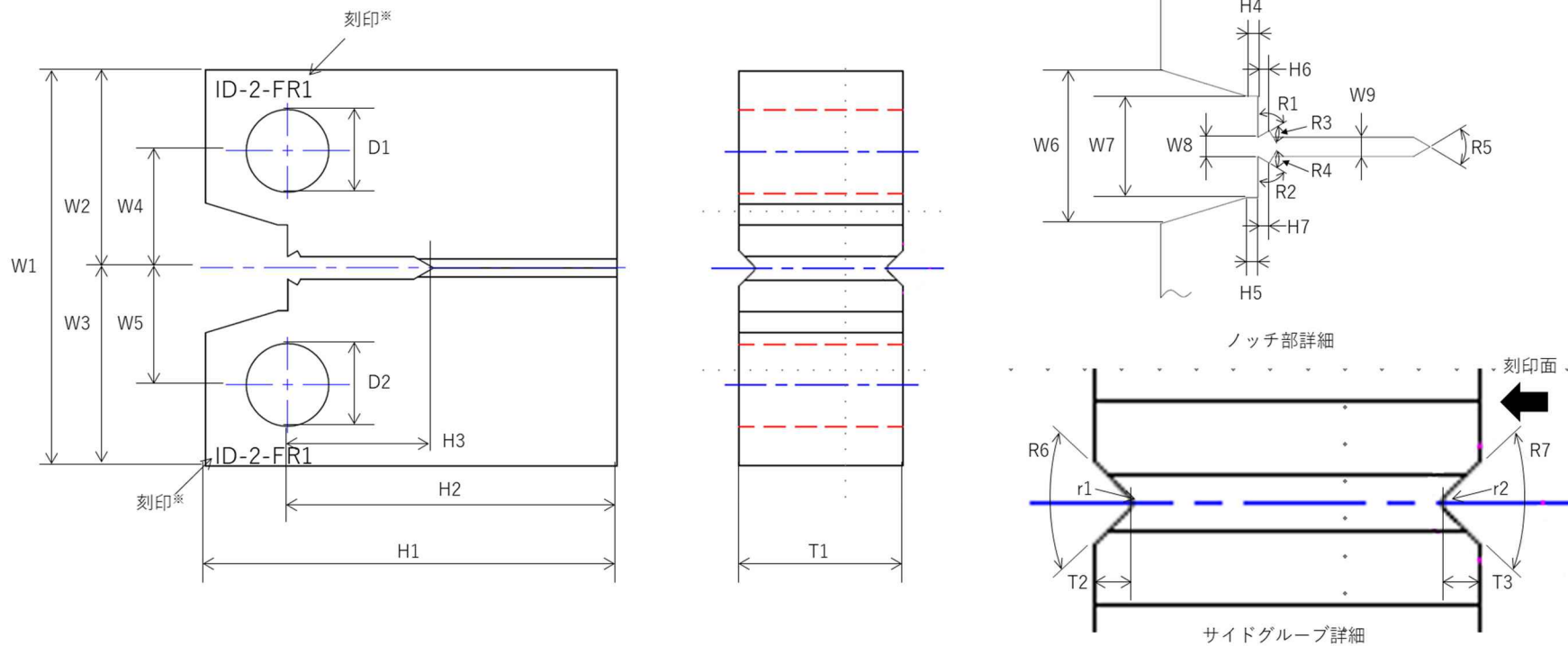


(c) ID-4~ID-6 A面加工時

(d) ID-4~ID-6 B面加工時

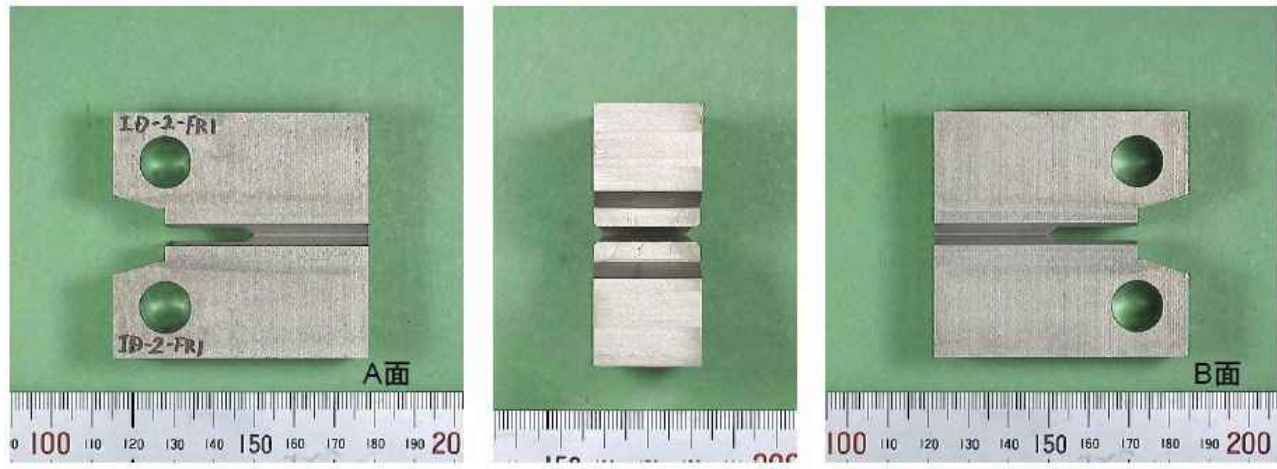
← ● ワイヤ移動経路

図 3.4.1(3)-12 ワイヤ移動経路(サイドグループ加工時)

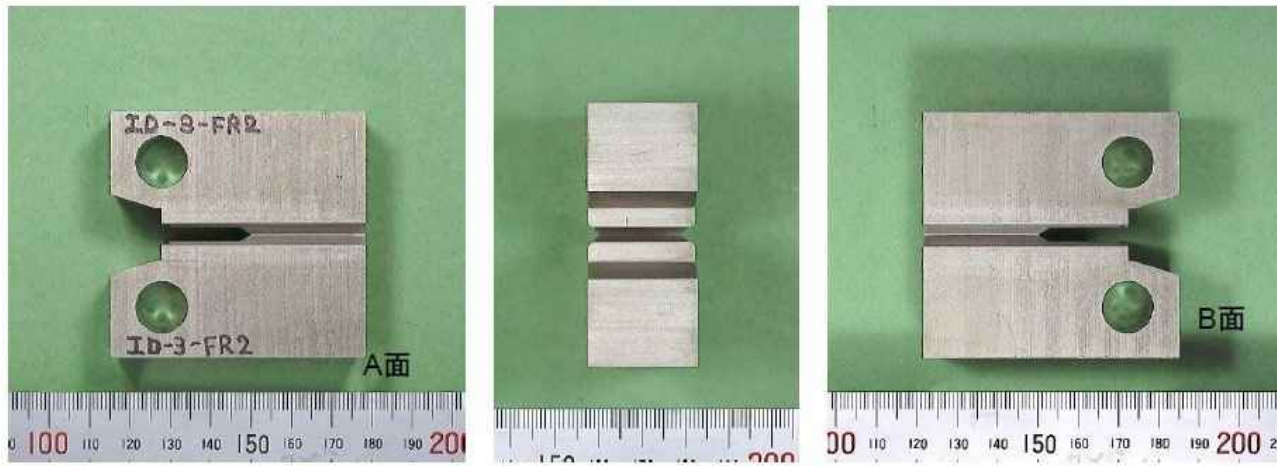


※刻印番号は例

図 3.4.1(3)-13 1T-C(T)試験片寸法測定箇所

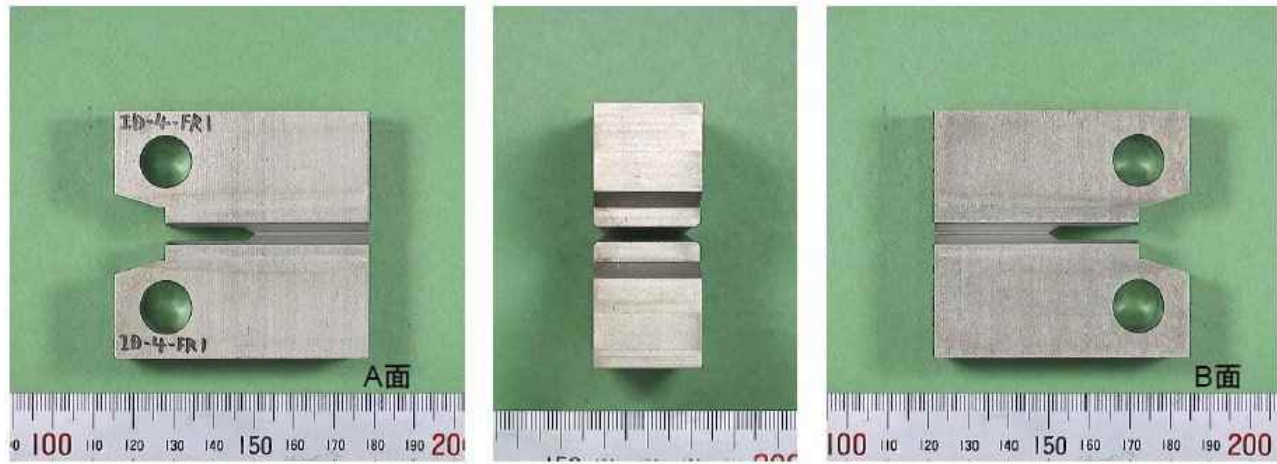


(a) ID-2-FR1

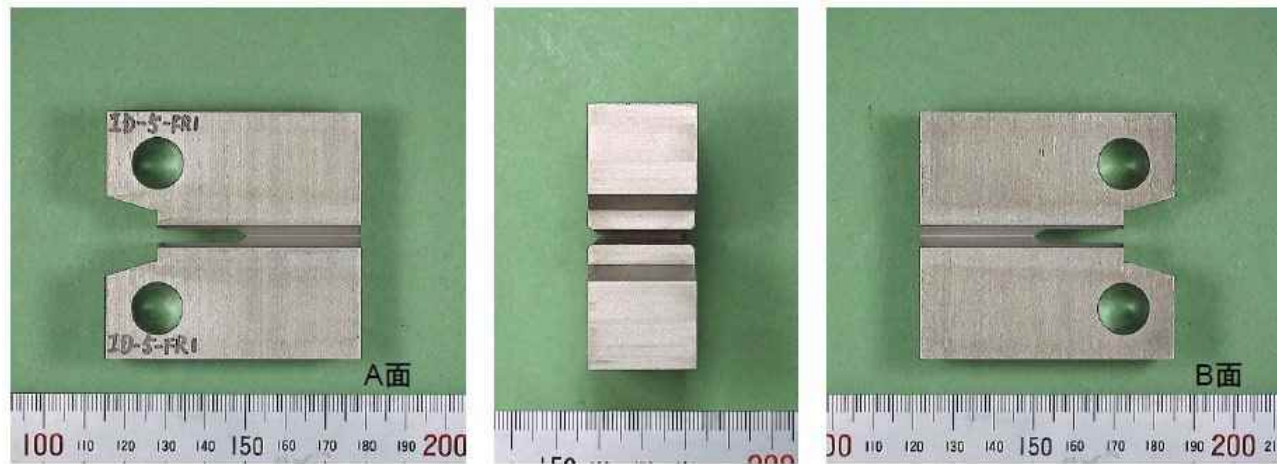


(b) ID-3-FR2

図 3.4.1(3)-14 サイドグループ加工後の 1T-C(T) 試験片の外観写真 (1/3)

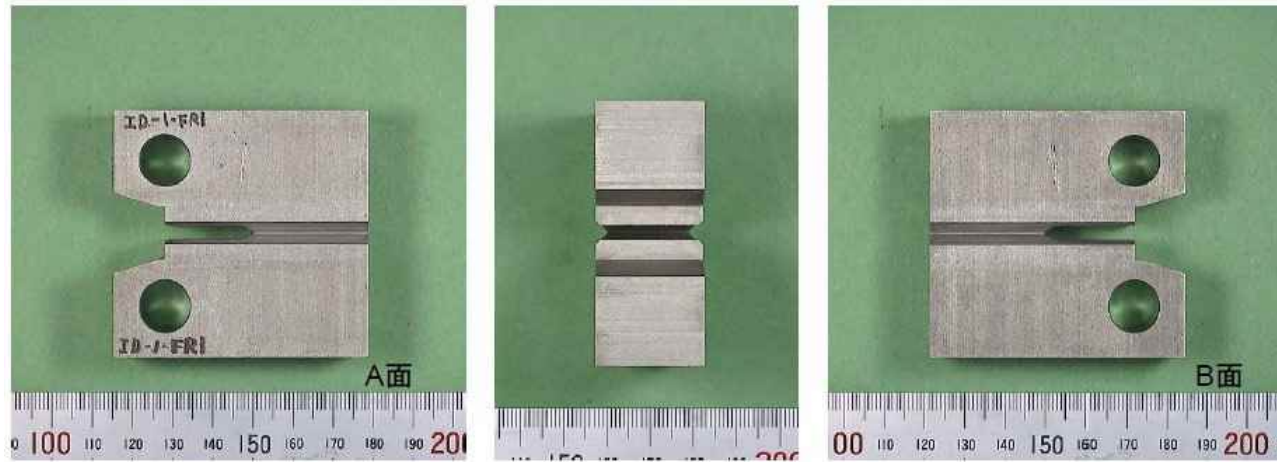


(c) ID-4-FR1



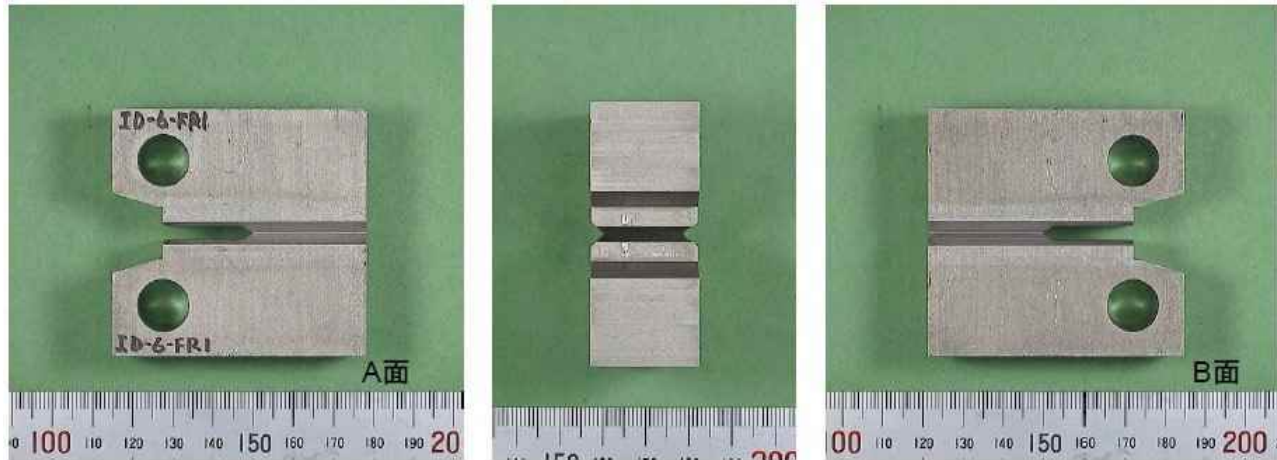
(d) ID-5-FR1

図 3.4.1(3)-14 サイドグループ加工後の 1T-C(T) 試験片の外観写真 (2/3)



(e) ID-1-FR1

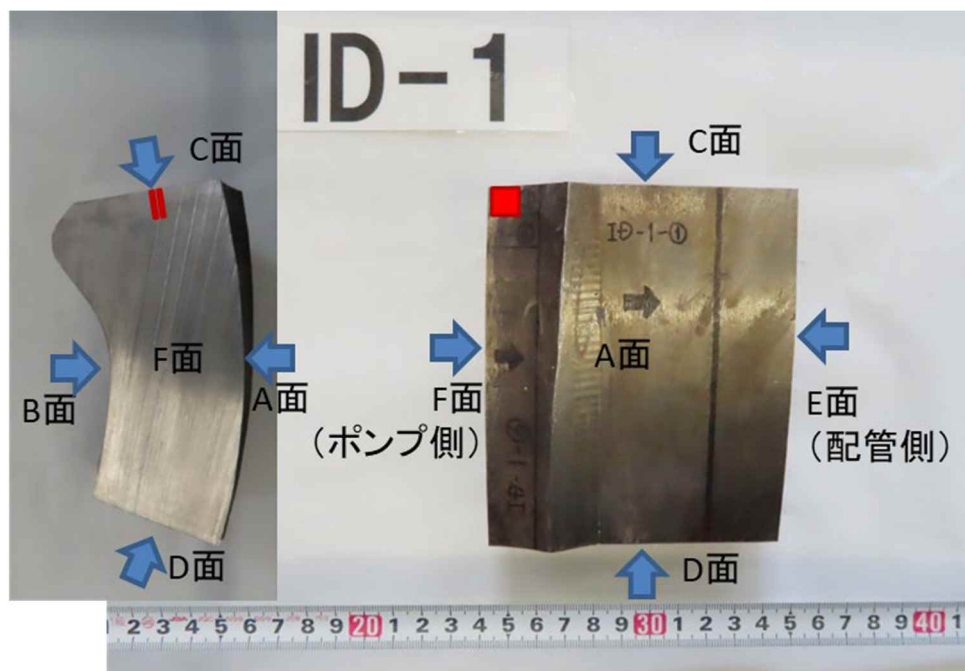
(令和 5 年度以降試験予定)



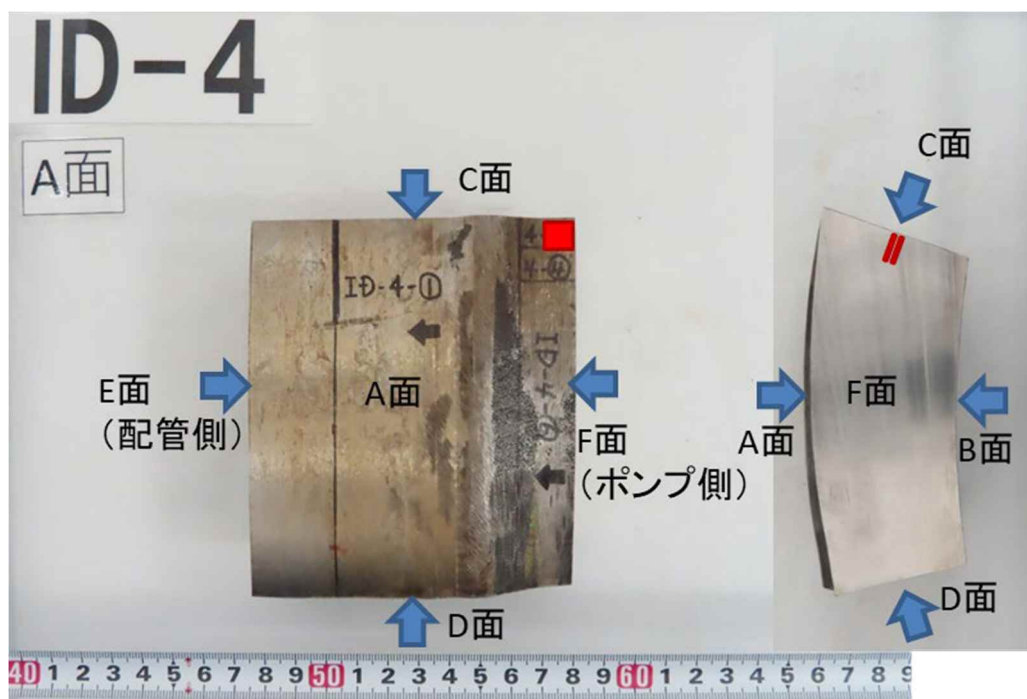
(f) ID-6-FR1

(令和 5 年度以降試験予定)

図 3.4.1(3)-14 サイドグループ加工後の 1T-C(T) 試験片の外観写真 (3/3)

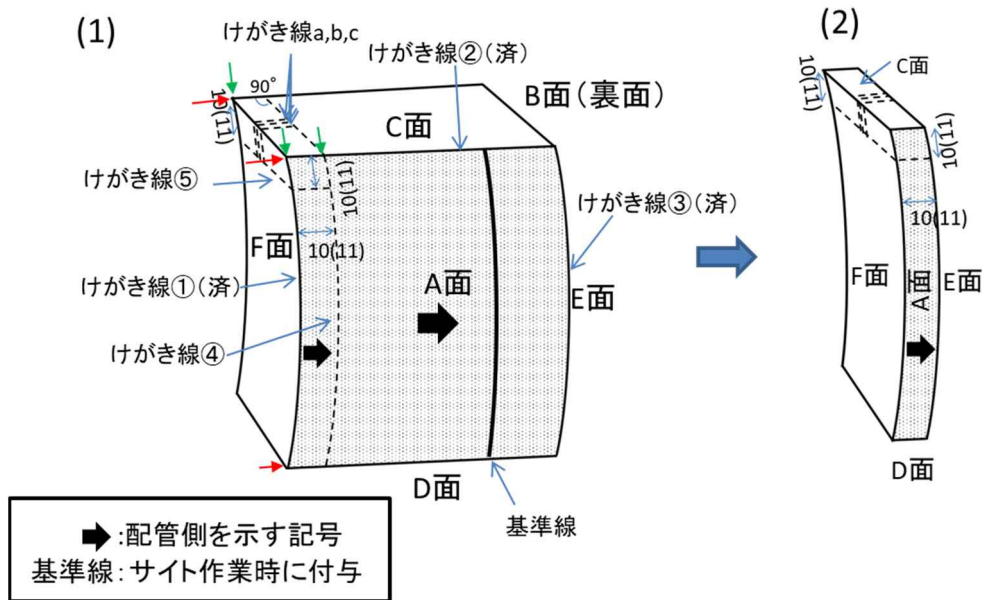


(a) ID-1の例 (ID-1~ID-3共通)

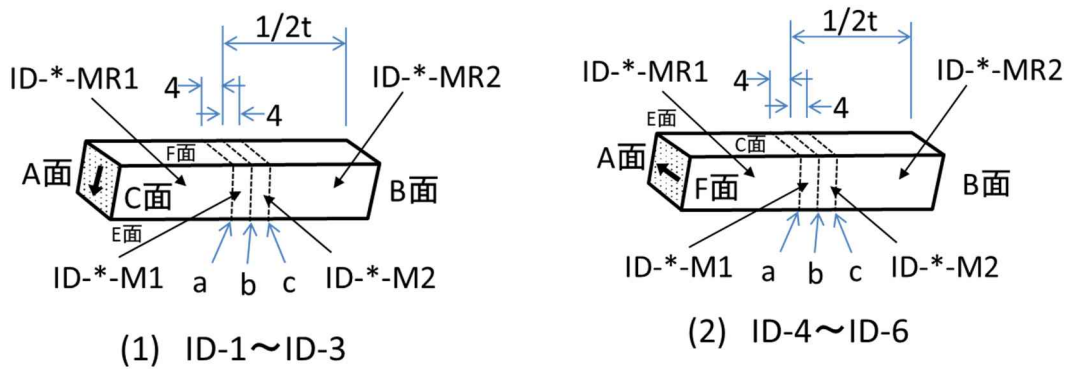


(b) ID-4の例 (ID-4~ID-6共通)

図 3. 4. 1 (3)-15 観察用試験片加工位置

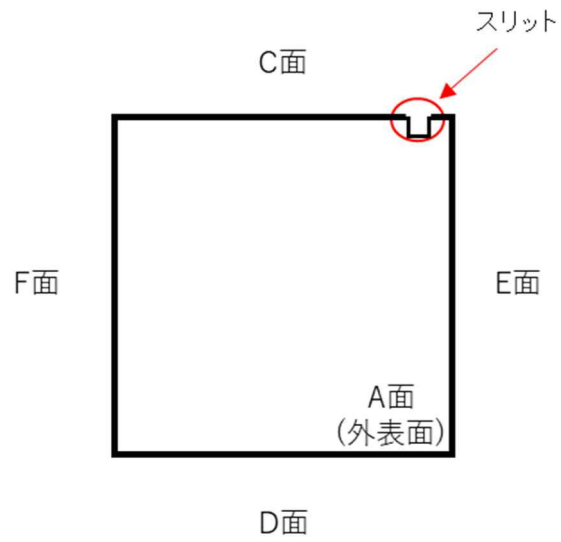


(a) 全体図 (ID-1~ID-3試験体の例)

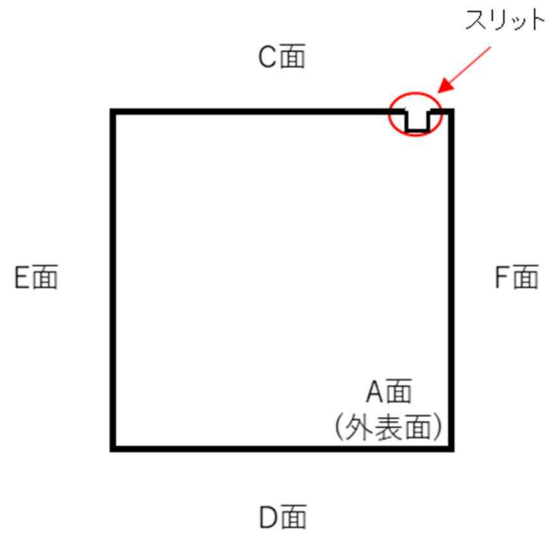


(b) 詳細図

図 3.4.1(3)-16 組織観察用試験片のブロック状試験体採取手順及び罫書き位置



(a) ID-1~ID-3



(a) ID-4~ID-6

図 3.4.1(3)-17 組織観察用試験片のスリット加工位置

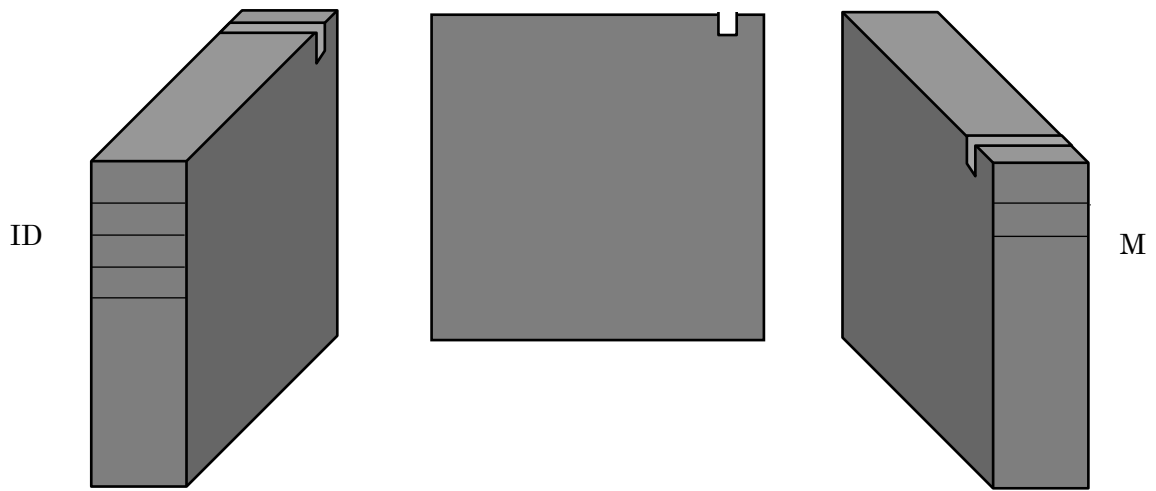


図 3.4.1(3)-18 組織観察用試験片識別用罫書き位置 (ID-4-M2 の例)

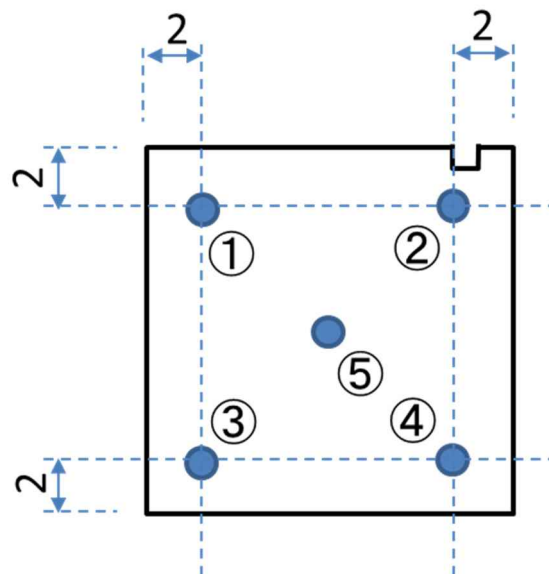
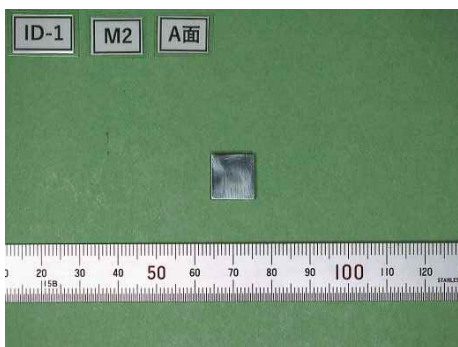


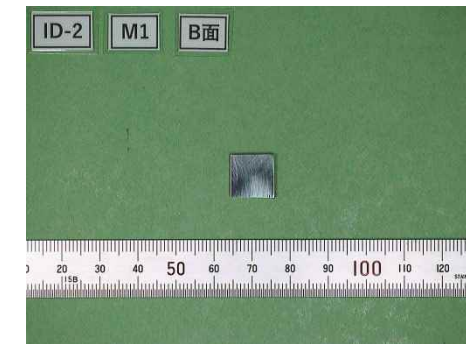
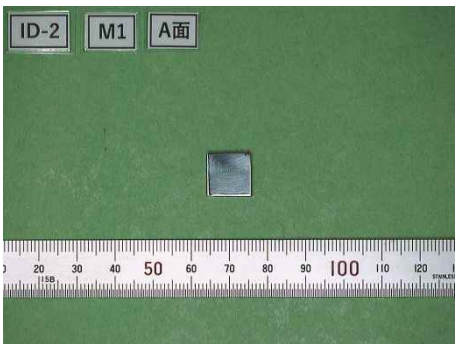
図 3.4.1(3)-19 組織観察用試験片のフェライト測定及び厚さ測定箇所 (単位 : mm)



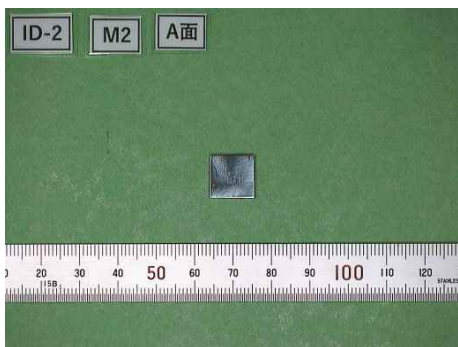
(a) ID-1-M1



(b) ID-1-M2

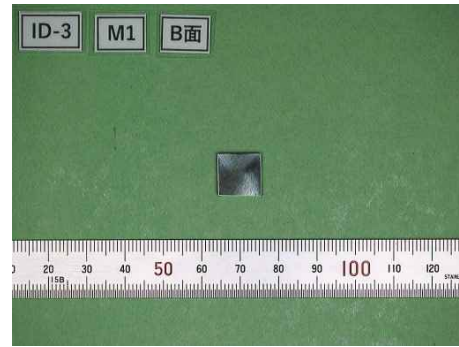
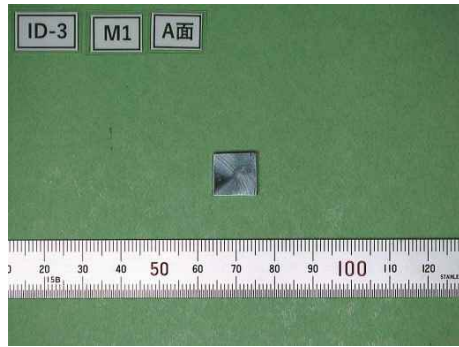


(c) ID-2-M1

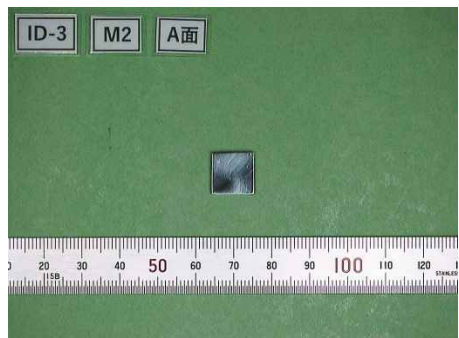


(d) ID-2-M2

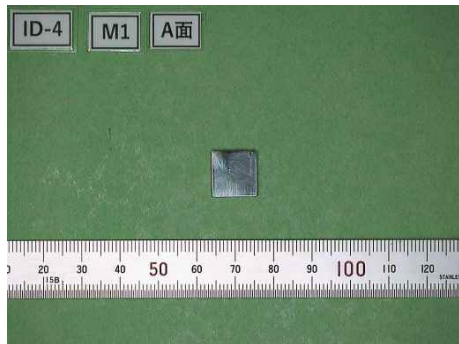
図 3.4.1(3)-20 観察用試験片の外観写真(1/3)



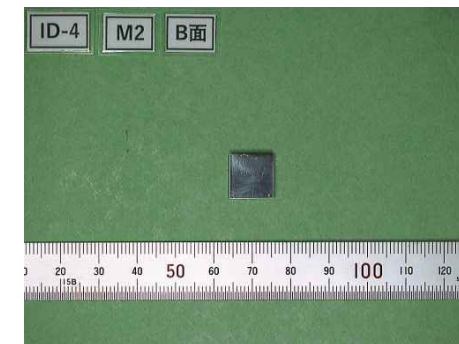
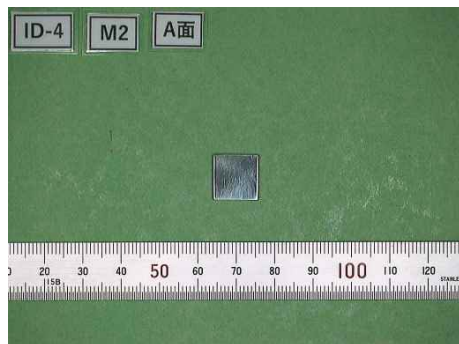
(e) ID-3-M1



(f) ID-3-M2

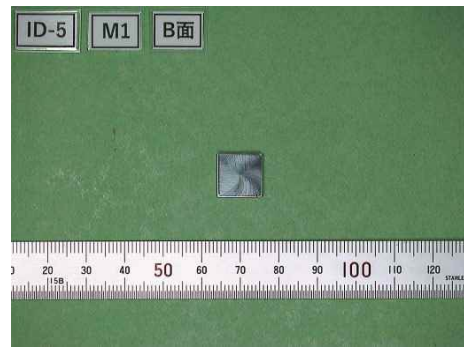
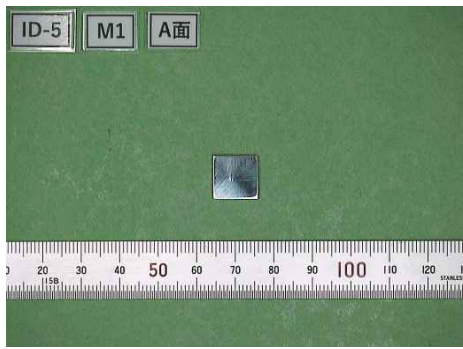


(g) ID-4-M1

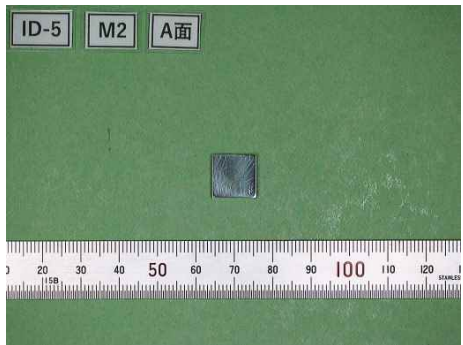


(h) ID-4-M2

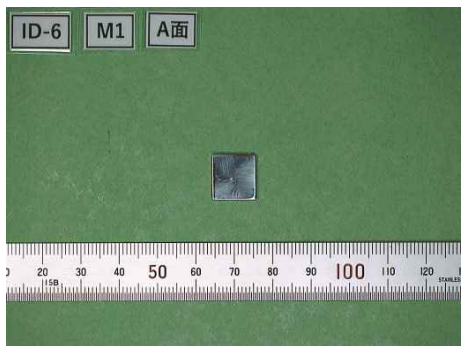
図 3.4.1(3)-20 観察用試験片の外観写真(2/3)



(i) ID-5-M1



(j) ID-5-M2



(k) ID-6-M1



(l) ID-6-M2

図 3.4.1(3)-20 観察用試験片の外観写真(3/3)

(4) 組織観察用試験片の輸送

1) 輸送計画

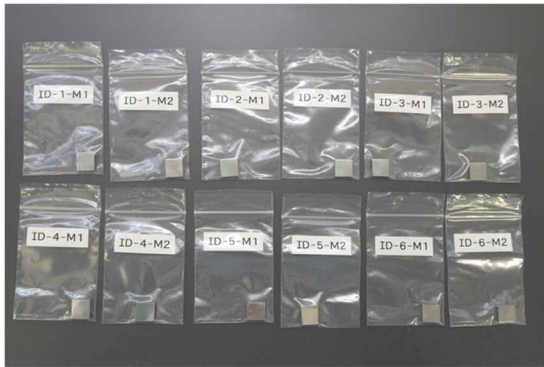
NFD から電中研への組織観察用試験片の輸送について計画した。組織観察用試験片 12 個を L 型輸送物としてステンレス鋼製の輸送容器を用いることとし、輸送車両にて電中研まで陸路で輸送することとした。

組織観察用試験片は 1 個ずつポリ袋に入れ、ポリ袋に試料名を記し、さらに ID 毎にスチロールケースに収納 (2 個一組) して、テープで密封した後、輸送容器に収納することとした。

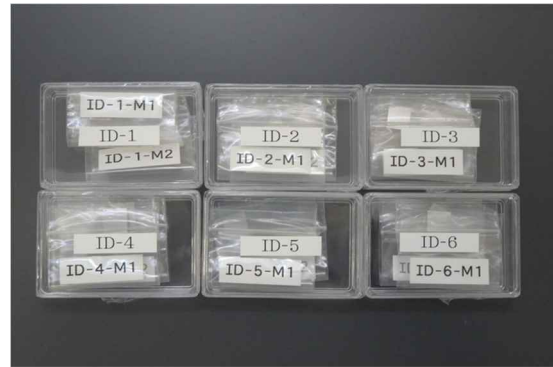
試験片の梱包状況を図 3.4.1(4)-1 に示す。輸送は 2022 年 9 月 30 日を実施日として計画した。

2) 輸送の実施

前項の梱包要領に従い、組織観察用試験片を梱包して輸送容器に収納し、L 型輸送物の表面線量当量率 ($5\mu\text{Sv/h}$ 以下) を満足することを確認した。前項の計画通り、加工した組織観察用試験片は NFD から電中研に陸路にて L 型輸送物として輸送し、容器搬出 (NFD) 並びに容器搬入 (電中研) は 2022 年 9 月 30 日の 1 営業日にて計画し、輸送車両はほぼ予定通りの時間に NFD を出発し、同日中に電中研に到着した。車両への積載及び積載後のサーベイの様子を図 3.4.1(4)-2 に示す。



(a) 輸送のために袋詰めした試験片



(b) IDごとに箱詰めした試験片



(c) 試験片の容器収納状況

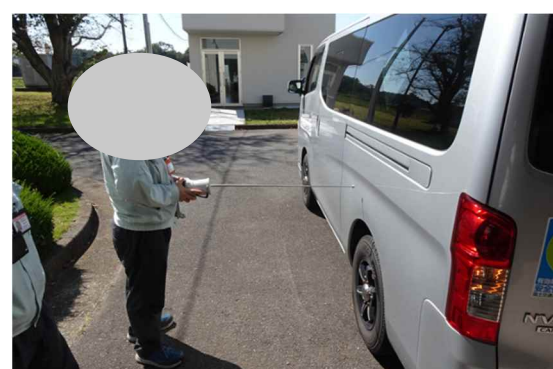


(d) 輸送用容器外観

図 3.4.1(4)-1 組織観察用試験片輸送準備の状況



(a) 車両内での積載b(固縛)状況



(b) 積載車のサーベイ状況

図 3.4.1(4)-2 輸送容器の積載及び積載車サーベイの様子

(5) 試験体及び残材の保管・管理

令和4年度時点で、本研究に使用する試験体及び残材はNFDの管理区域で保管している。供試体は、ID確認、寸法測定、外観撮影を行い管理している。また、本研究終了時には、中部電力株式会社より貸与された再循環ポンプから加工した実機材は、残材、試験後の試験片と、加工の際に発生する切粉も含めて返却する必要があることから、可能な限りNFDにて回収し、袋に入れて保管している。

引張試験片の外観を図3.4.1(3)-6に、1T-C(T)試験片の外観を図3.4.1(3)-14に示す。それぞれの試験片に試験片番号を付した。試験により分断した後も試験片が識別できるよう、試験片の両端に試験片番号を付した。なお、組織観察用試験片のように試験片番号を付すことが困難なものは罫書きによる識別をするとともに、図3.4.1(4)-1(a)にあるように保管用の袋による管理も併用した。なお、組織観察用試験片は現在電中研の管理区域にて同様の管理を行っている。

3.4.2 試験の実施

(1) 引張試験

1) 試験方法

JIS G 0567(2020)^[3.4.2(1)-1]に準拠して、最大荷重 100kN の島津製作所製 油圧サーボ式疲労試験機を用いて試験温度 288℃にて引張試験を行い、応力ひずみ曲線を取得する試験はクロスヘッドの変位制御とし、 $0.42\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ($=0.007\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$) の一定速度で試験片が破断するまで変位を負荷した。ひずみ速度は(1)式によって 0.00025s^{-1} と計算され、JIS G 0567 図 1a)方法 A に記載のひずみ速度範囲のうち範囲 2(推奨ひずみ速度範囲)に該当する。

$$\text{ひずみ速度}=\text{クロスヘッド変位速度}/\text{初期平行部長さ} \cdots \cdots (1)$$

また、高精度な応力ひずみ関係を取得することを目的として、デジタル画像相関(DIC)法によって試験片のひずみを測定した。本試験では、試験片 ID のマーキング面の反対面にスペックルパターンを付与し、マーキング面を A 面、スペックルパターンを付与した面を B 面とした。5M ピクセルの CCD カメラを 1 台用いて概ね 1fps のフレームレートで試験画像を記録した。画像から試験片平行部のひずみ分布を解析し、その解析結果から原標点間のひずみを評価して応力ひずみ関係を取得した。この結果と試験荷重により公称応力-公称ひずみ曲線を作成した。得られた結果を整理し、下記を報告した。

- ・ 試験片外観 (試験前、試験後)
- ・ スペックルパターン付与後の試験片外観 (試験前、試験後)
- ・ 応力ひずみ曲線
- ・ 降伏応力(0.2%耐力)
- ・ 引張強さ
- ・ 絞り
- ・ 一様伸び
- ・ 破断伸び

2) 試験結果

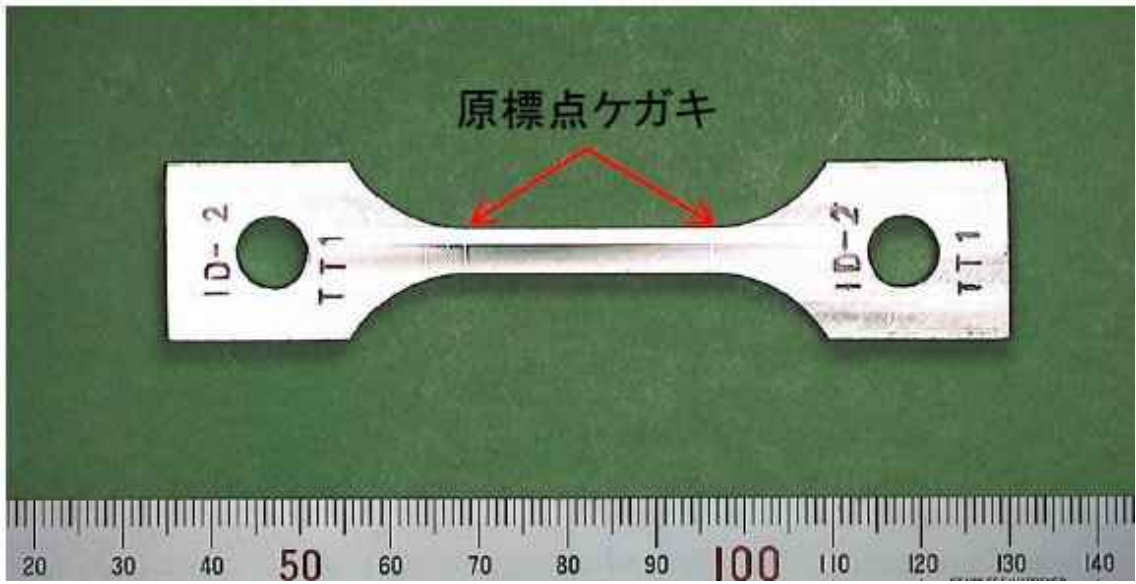
前項の試験方法に基づき、試験温度 288°Cにて引張試験を実施した。スペックルパターン付与後の試験片外観写真を図 3.4.2(1)-1 に、試験後の引張試験外観写真を図 3.4.2(1)-2 に、平行部のひずみ分布（解析前後）を図 3.4.2(1)-3 に、応力ひずみ曲線を図 3.4.2(1)-4 に、引張試験結果を表 3.4.2(1)-1 にそれぞれ示す。0.2%耐力及び引張強さは、後述する破壊靱性試験の評価において使用する σ_F ：流動応力の算出に適用した。

<参考文献>

- [3.4.2(1)-1] 鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法, JIS G 0567, 日本産業規格, 2020

表 3.4.2(1)-1 引張試験（試験温度 288°C）結果

	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	絞り (%)	一様伸び (%)	破断伸び (%)
ID-2-TT1	215	471	53	22	27
ID-3-TT1	228	488	57	28	35
ID-4-TT1	208	487	47	24	29
ID-5-TT1	190	466	57	22	28

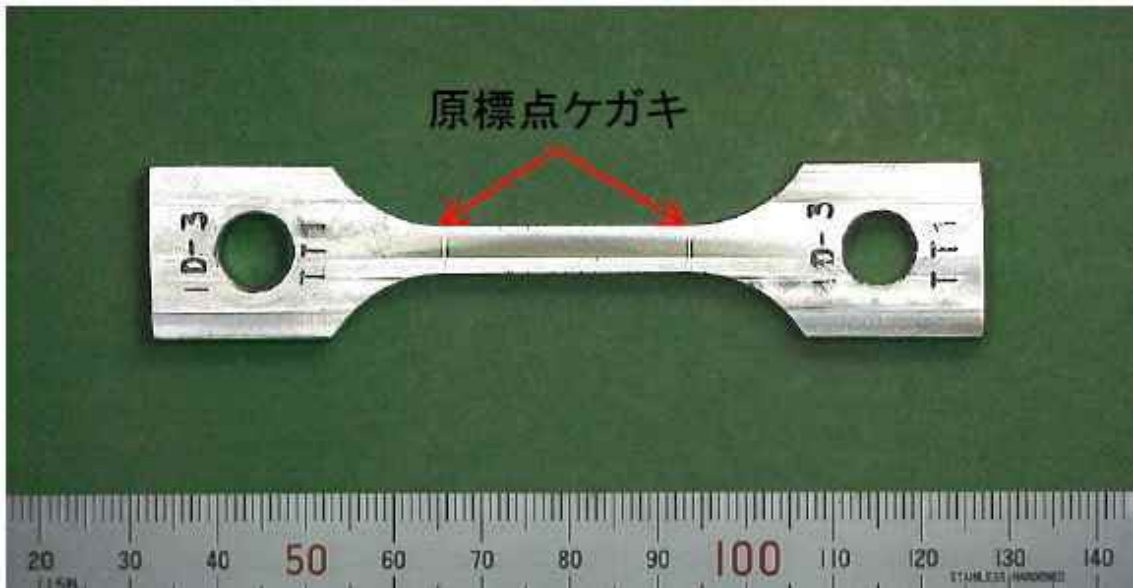


(a) ID-2-TT1 の A 面

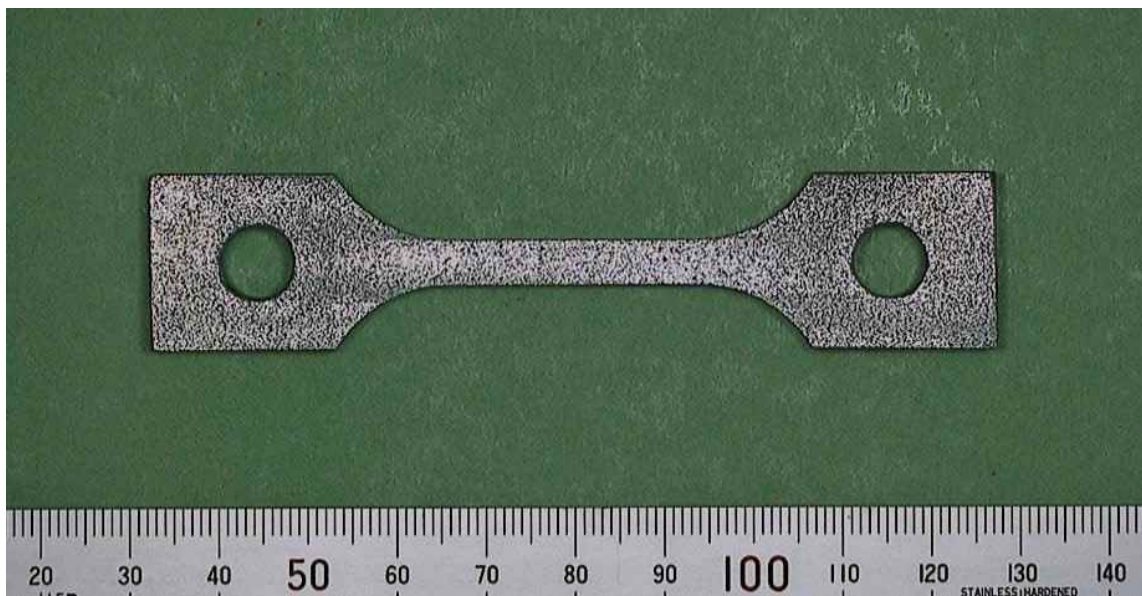


(b) ID-2-TT1 の B 面

図 3.4.2(1)-1 スペックルパターン付与後の外観写真(1/4)

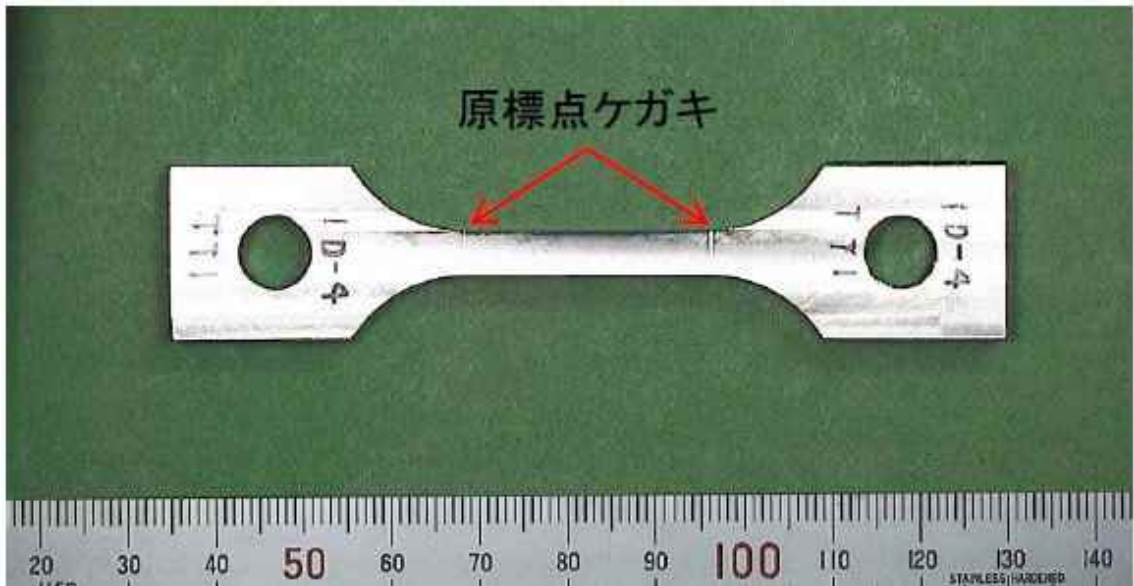


(c) ID-3-TT1 の A 面

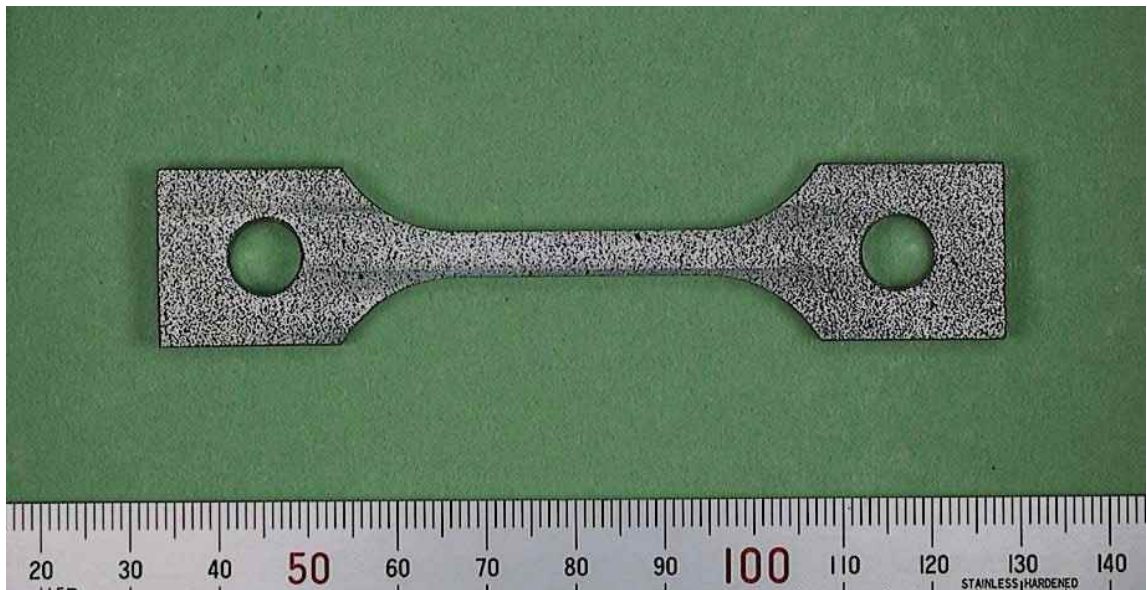


(d) ID-3-TT1 の B 面

図 3.4.2(1)-1 スペックルパターン付与後の外観写真(2/4)

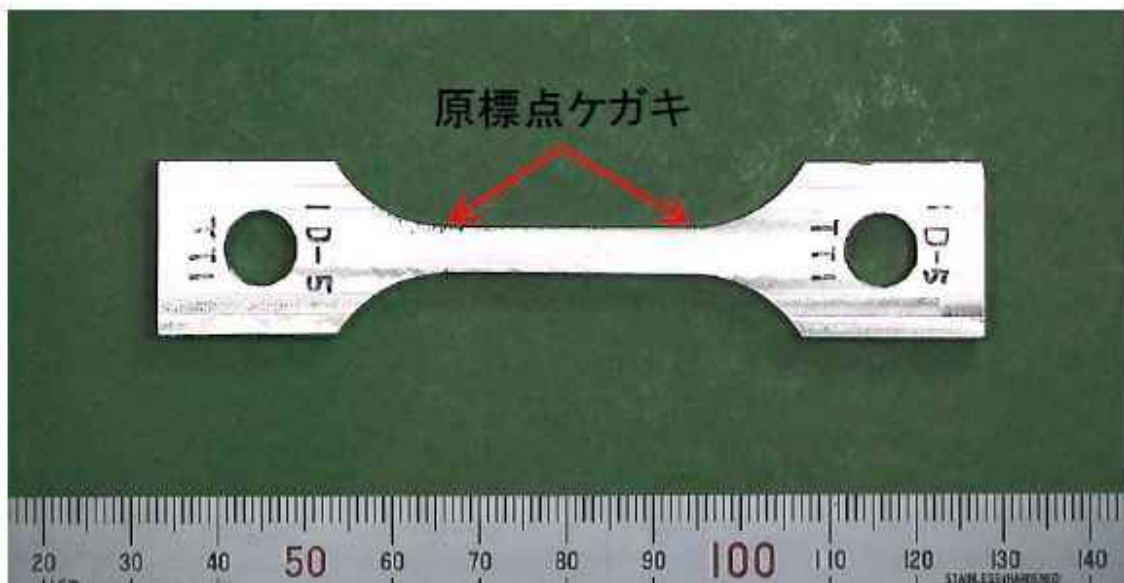


(e) ID-4-TT1 の A 面

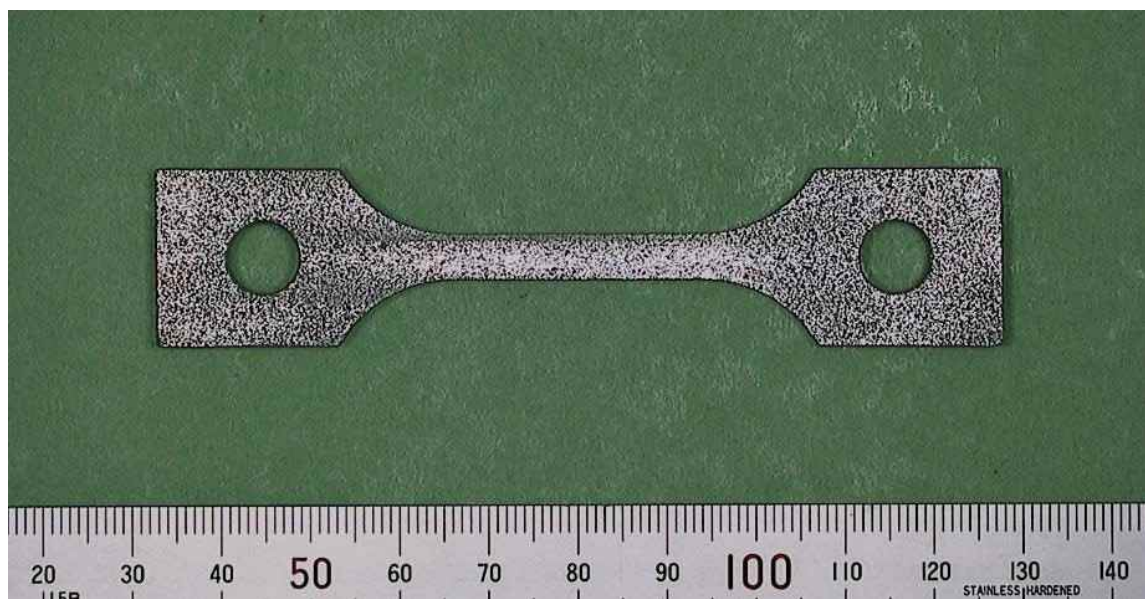


(f) ID-4-TT1 の B 面

図 3.4.2(1)-1 スペックルパターン付与後の外観写真(3/4)

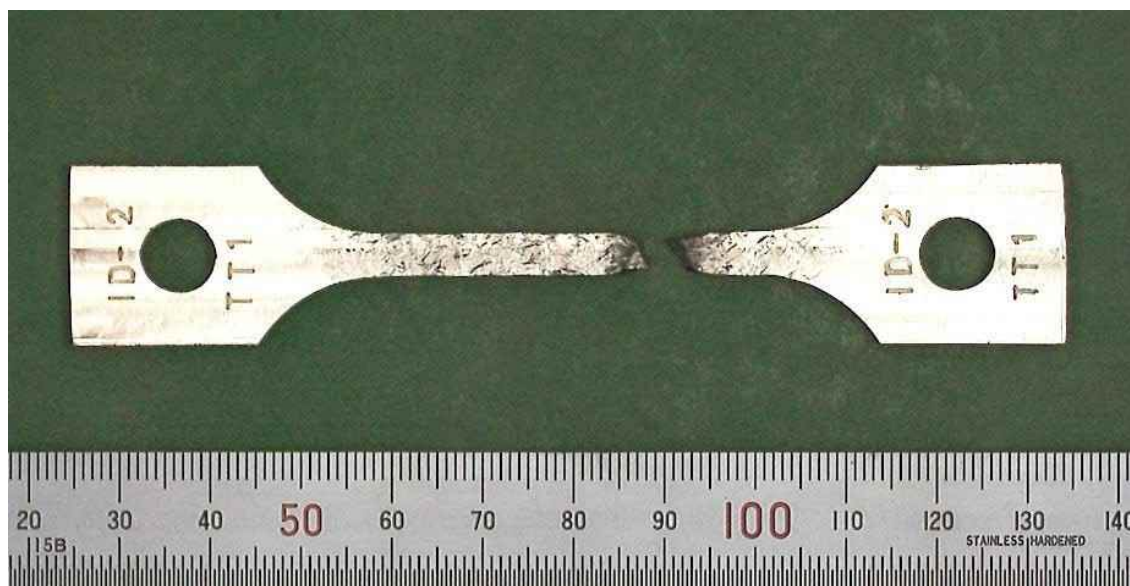


(g) ID-5-TT1 の A 面



(h) ID-5-TT1 の B 面

図 3.4.2(1)-1 スペックルパターン付与後の外観写真(4/4)



(a) ID-2-TT1 の A 面



(b) ID-2-TT1 の B 面

図 3.4.2(1)-2 試験後の外観写真(1/4)

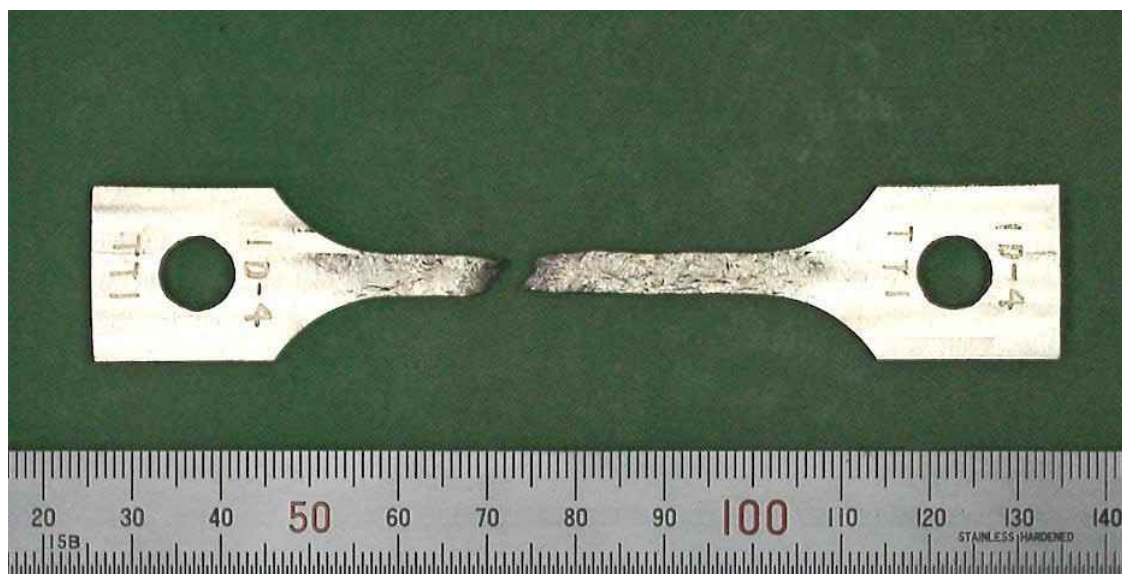


(c) ID-3-TT1 の A 面

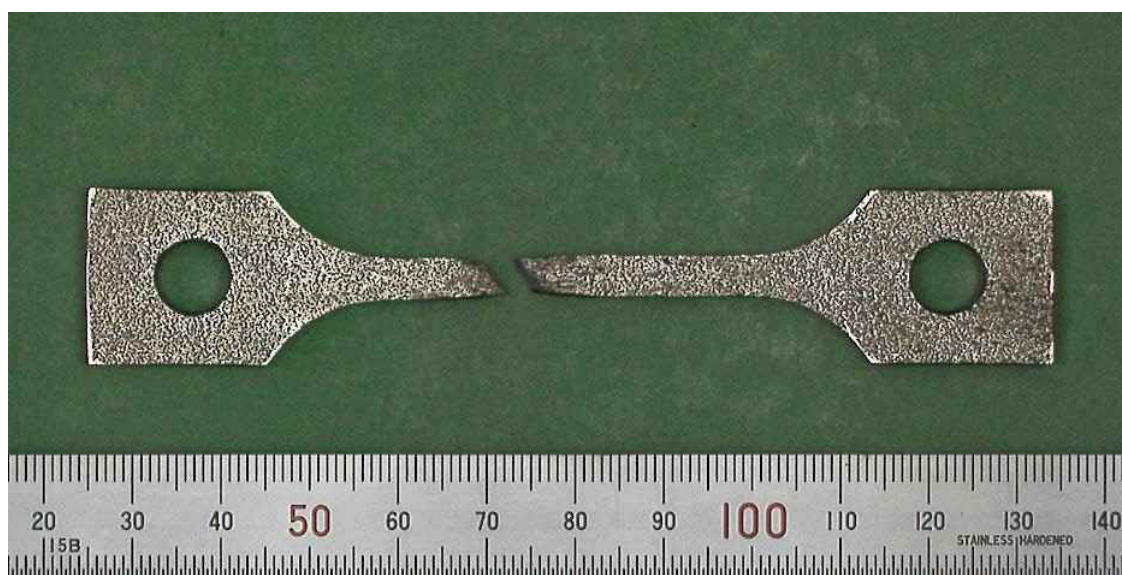


(d) ID-3-TT1 の B 面

図 3.4.2(1)-2 試験後の外観写真(2/4)

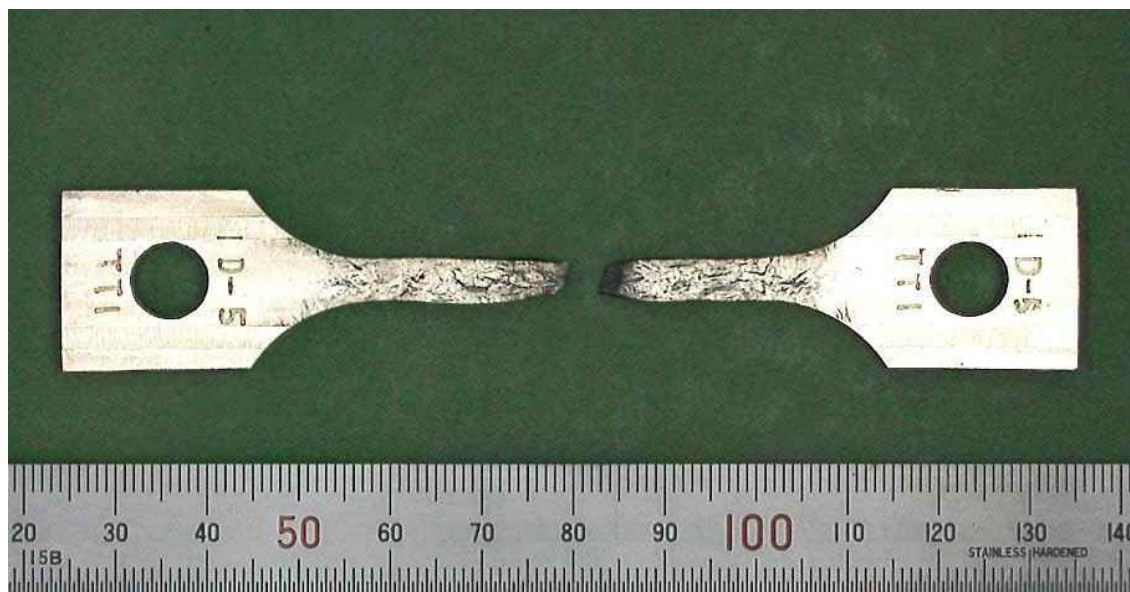


(e) ID-4-TT1 の A 面



(f) ID-4-TT1 の B 面

図 3.4.2(1)-2 試験後の外観写真(3/4)

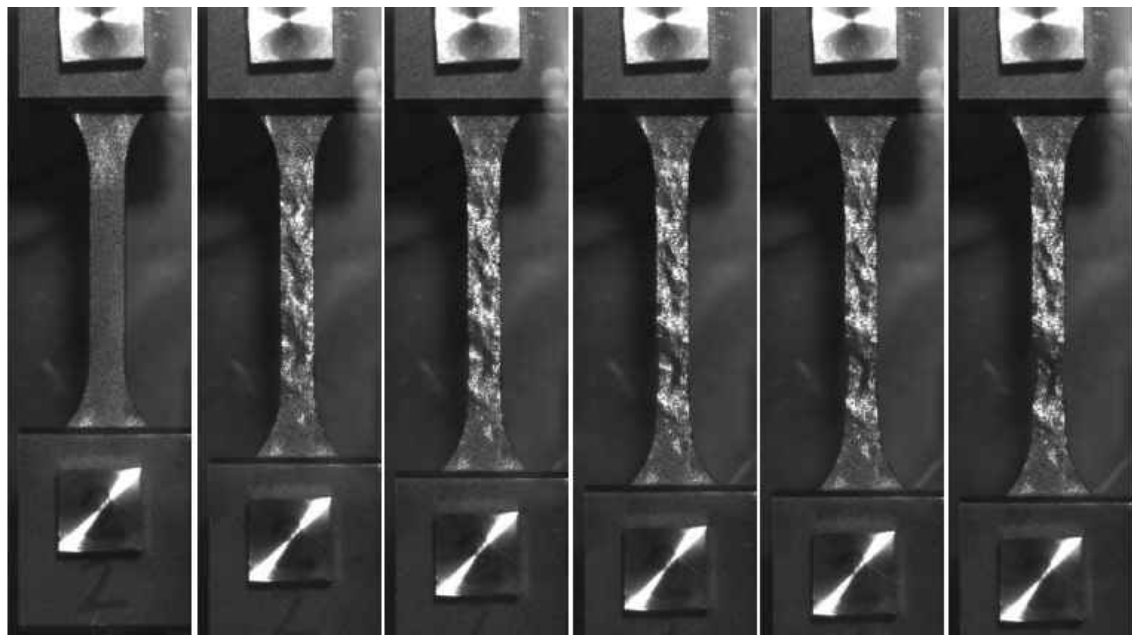


(g) ID-5-TT1 の A 面



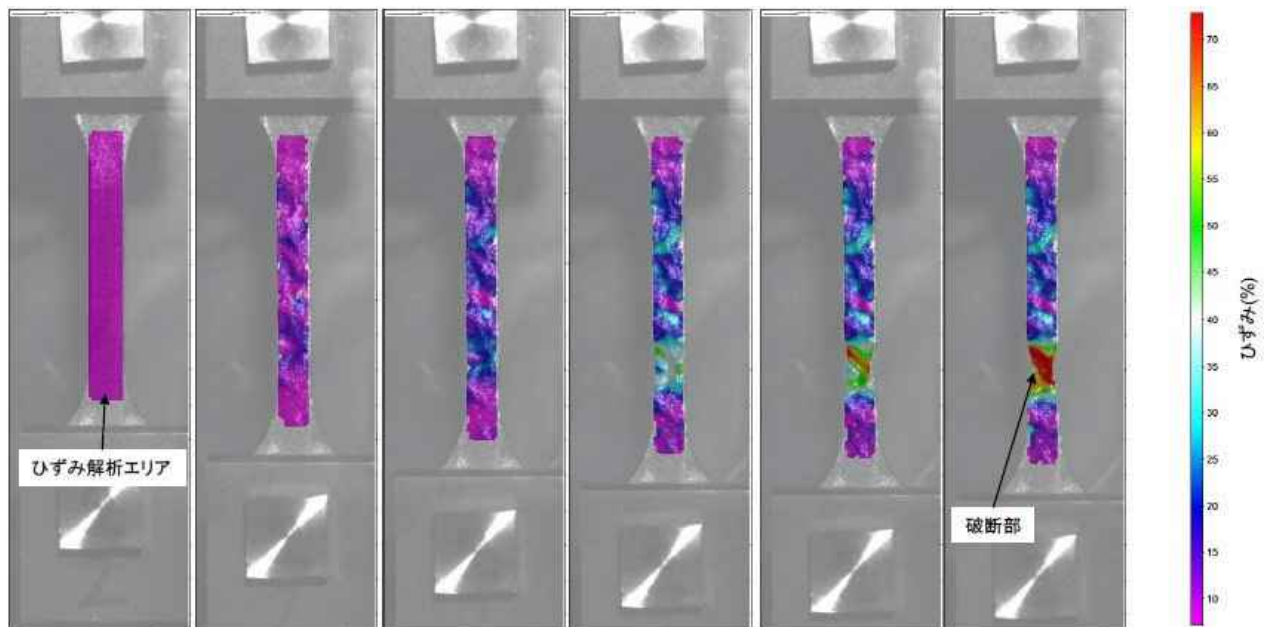
(h) ID-5-TT1 の B 面

図 3.4.2(1)-2 試験後の外観写真(4/4)



試験開始時 破断直前

(a) 解析前(ID-2-TT1)



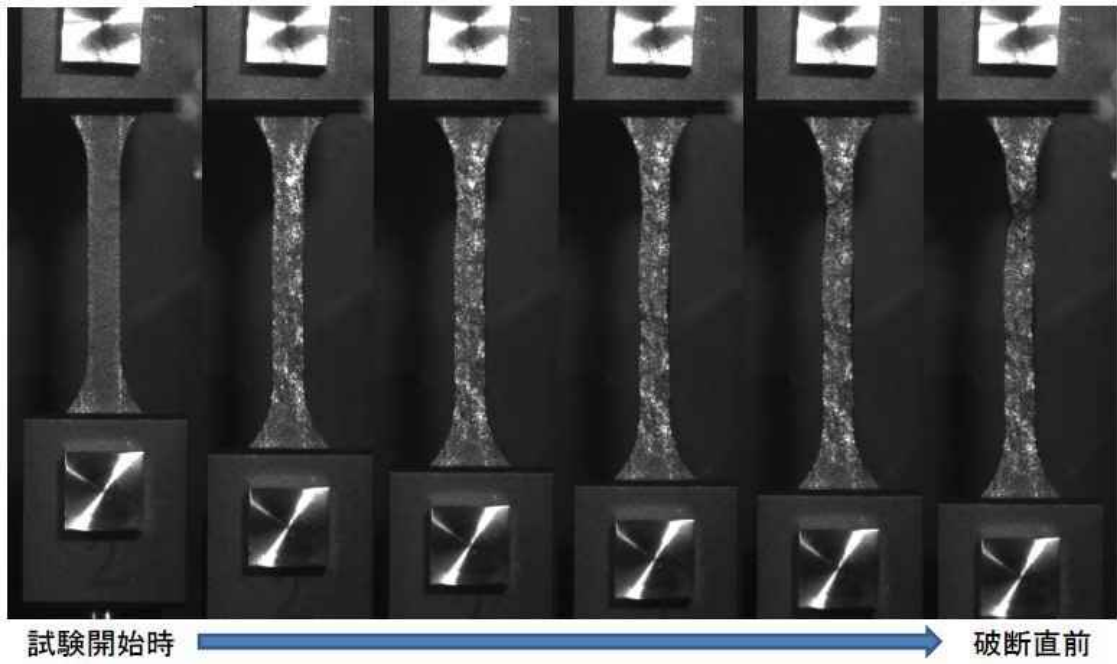
試験開始時 破断直前

DICによる平行部ひずみ値

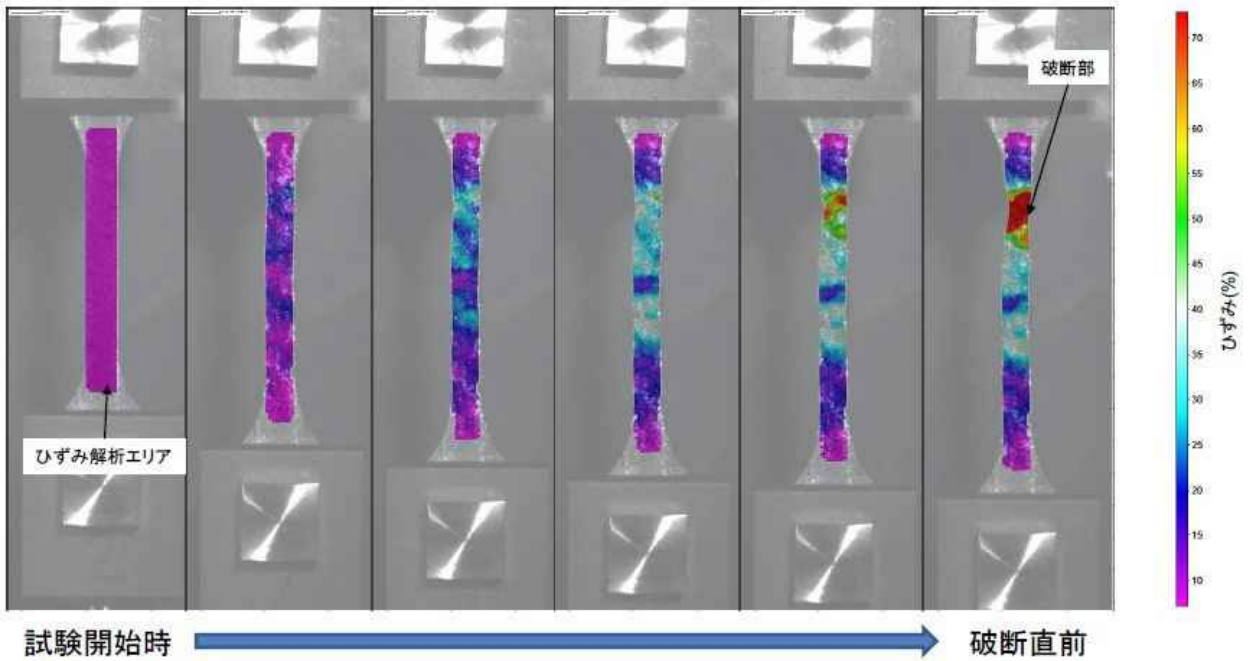
0%	10%	16%	22%	24%	27%
----	-----	-----	-----	-----	-----

(b) 解析後(ID-2-TT1)

図 3.4.2(1)-3 平行部ひずみ分布(1/4)



(c) 解析前(ID-3-TT1)

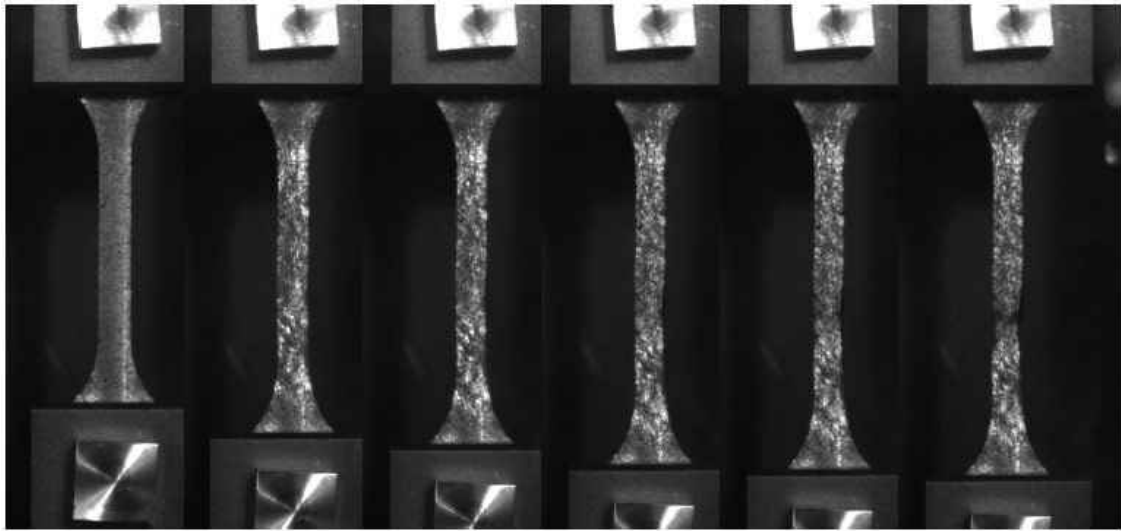


DICによる平行部ひずみ値

0%	12%	20%	26%	31%	35%
----	-----	-----	-----	-----	-----

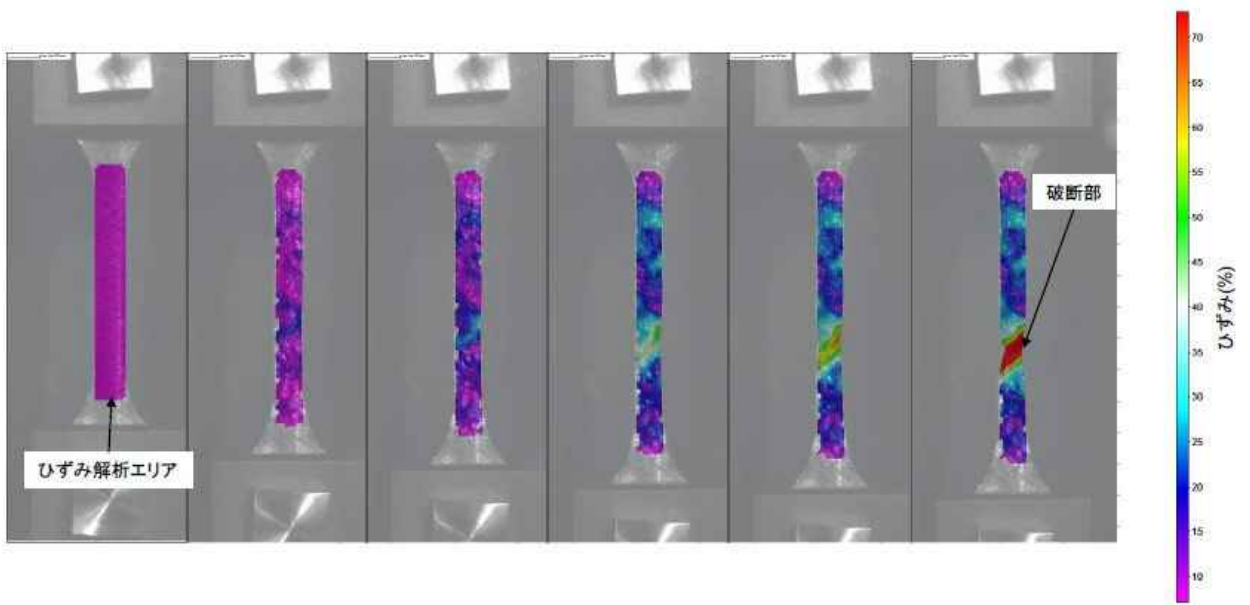
(d) 解析後(ID-3-TT1)

図 3.4.2(1)-3 平行部ひずみ分布 (2/4)



試験開始時 破断直前

(e) 解析前(ID-4-TT1)



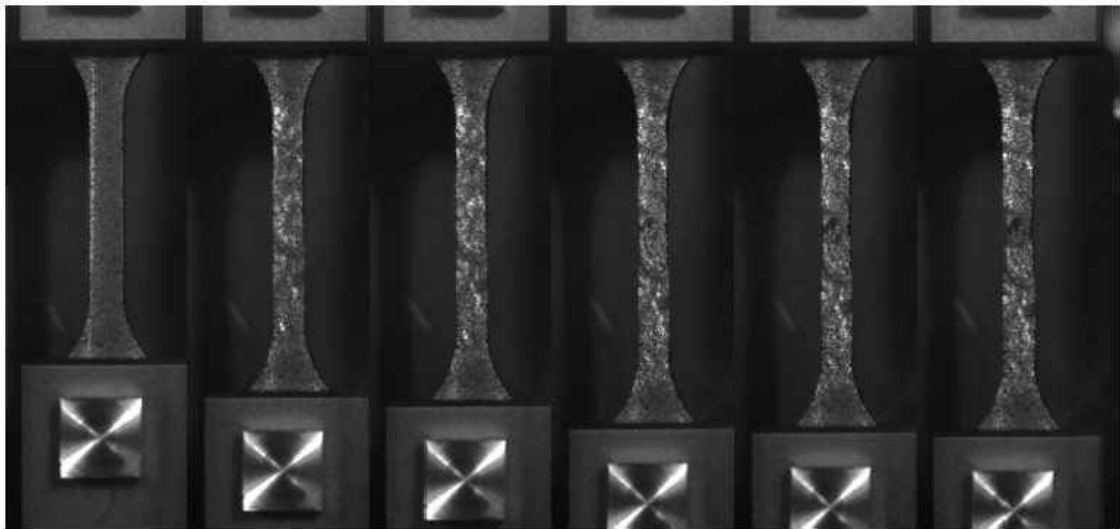
試験開始時 破断直前

DICによる平行部ひずみ値

0%	10%	15%	23%	26%	29%
----	-----	-----	-----	-----	-----

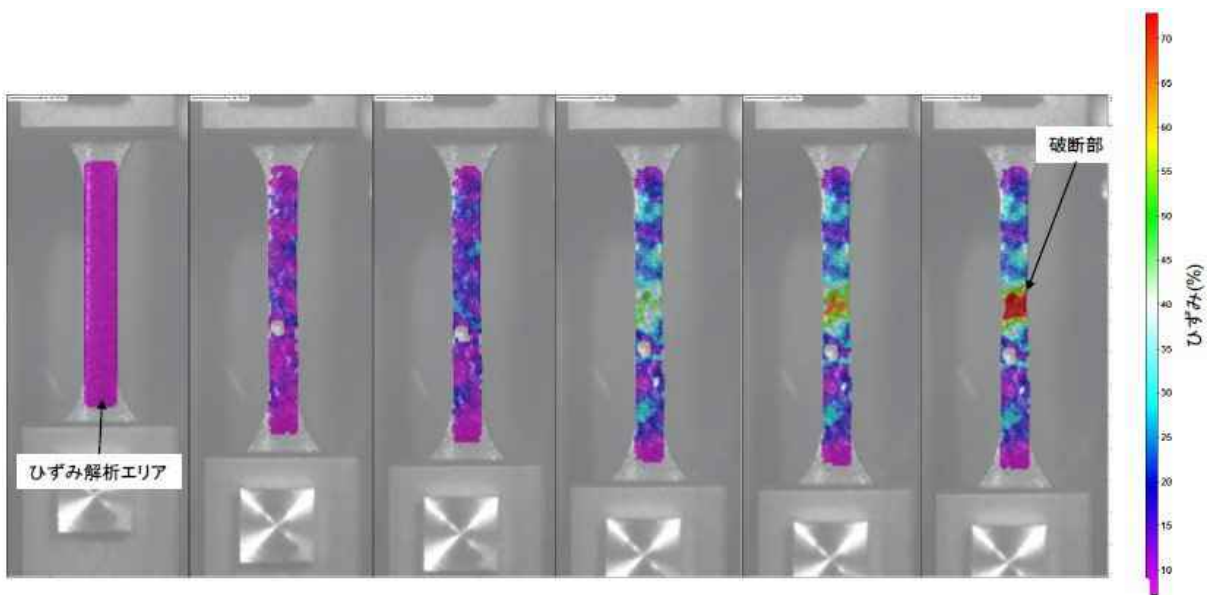
(f) 解析後(ID-4-TT1)

図 3.4.2(1)-3 平行部ひずみ分布 (3/4)



試験開始時  破断直前

(g) 解析前(ID-5-TT1)



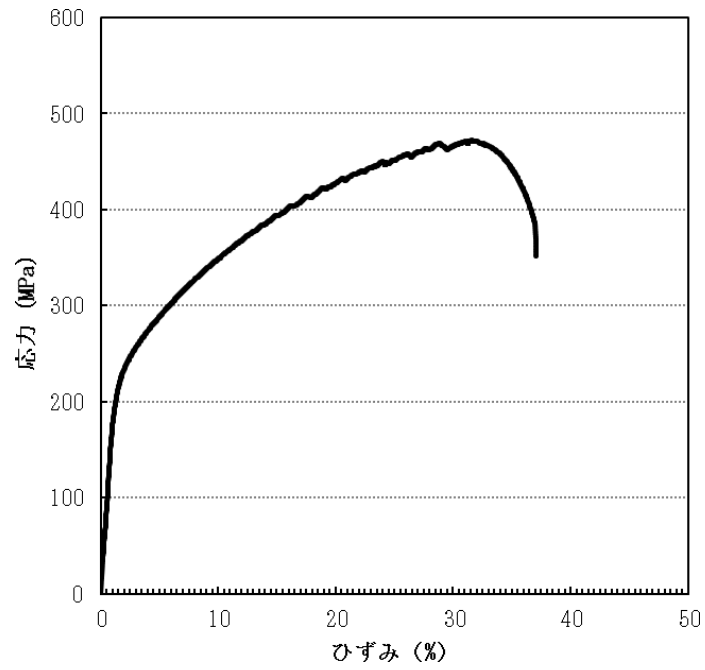
試験開始時  破断直前

DICによる平行部ひずみ値

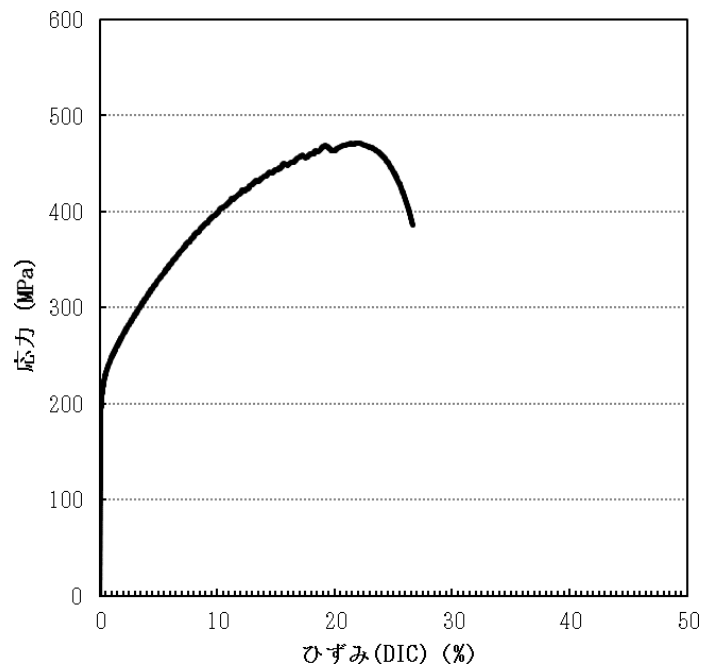
0%	11%	15%	24%	26%	28%
----	-----	-----	-----	-----	-----

(h) 解析後(ID-5-TT1)

図 3.4.2(1)-3 平行部ひずみ分布 (4/4)

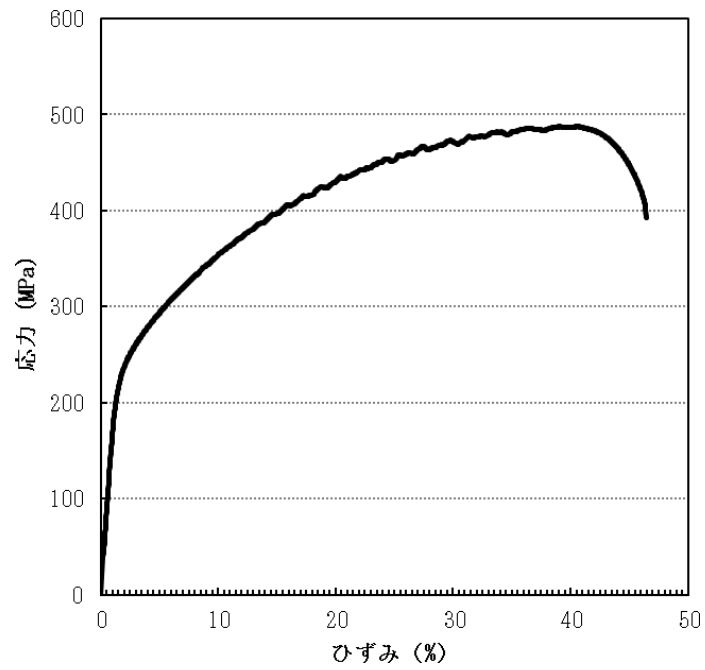


(a) ひずみを装置のクロスヘッド変位から評価(ID-2-TT1)

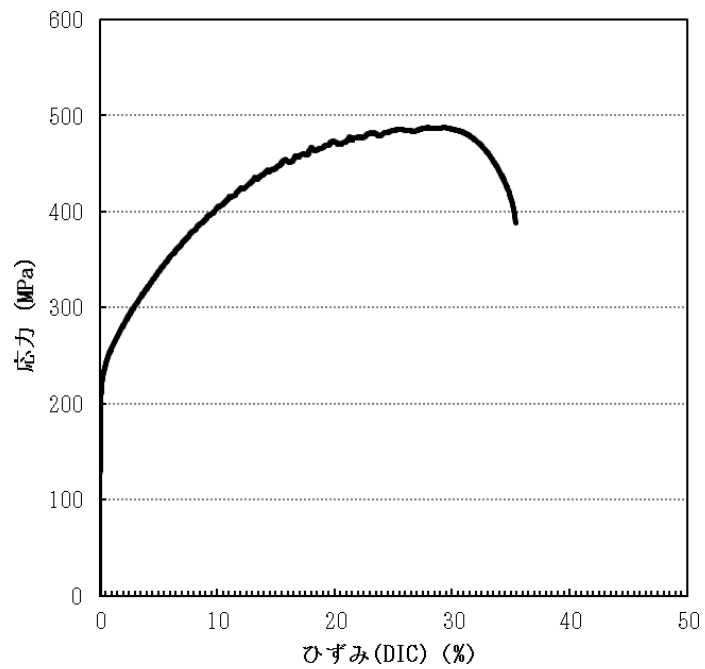


(b) ひずみを画像解析(DIC)法により評価(ID-2-TT1)

図 3.4.2(1)-4 応力-ひずみ曲線(1/4)

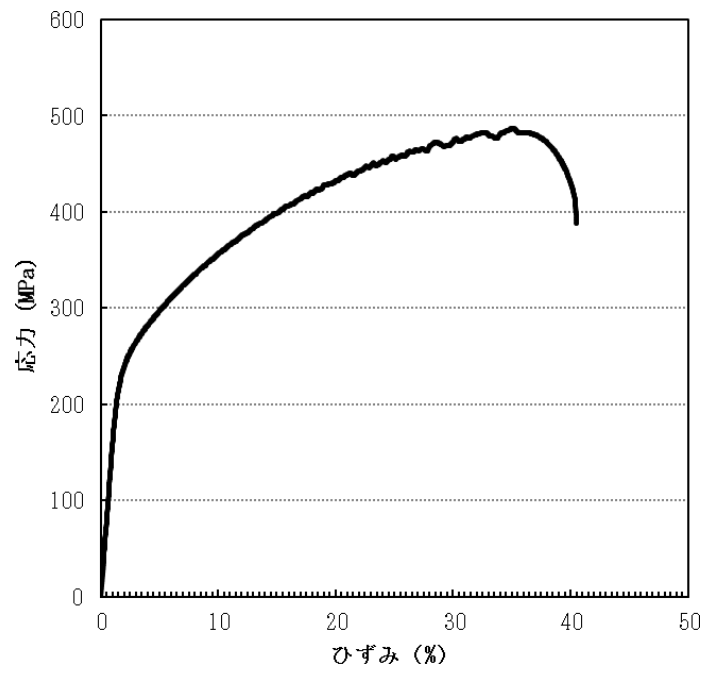


(c) ひずみを装置のクロスヘッド変位から評価(ID-3-TT1)

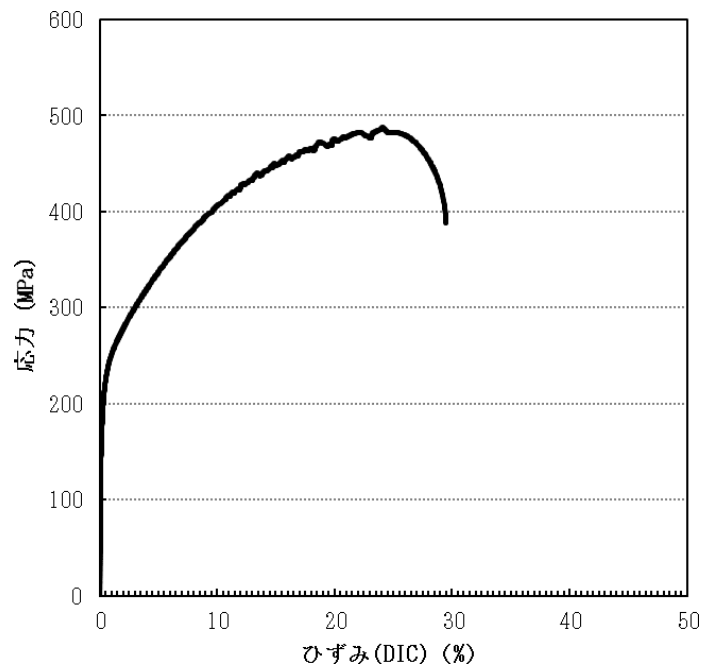


(d) ひずみを画像解析(DIC)法により評価(ID-3-TT1)

図 3.4.2(1)-4 応力-ひずみ曲線 (2/4)

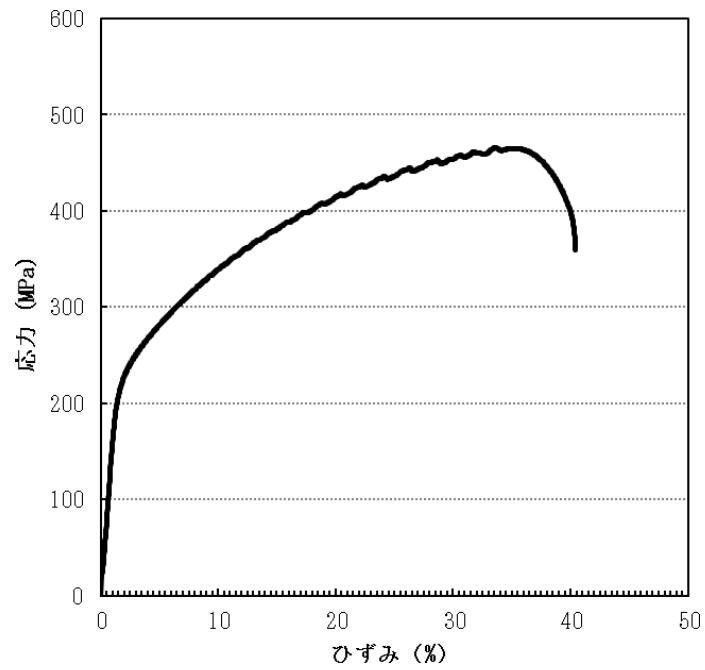


(e) ひずみを装置のクロスヘッド変位から評価(ID-4-TT1)

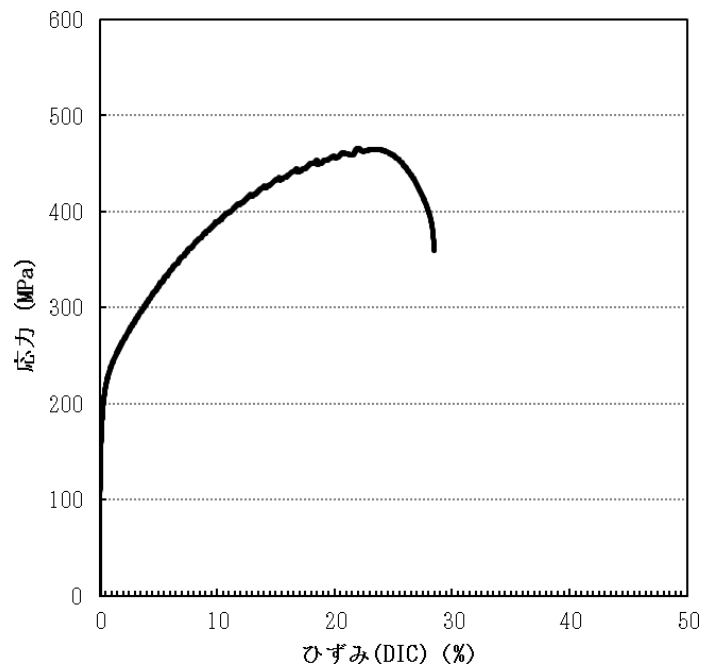


(f) ひずみを画像解析(DIC)法により評価(ID-4-TT1)

図 3.4.2(1)-4 応力-ひずみ曲線(3/4)



(g) ひずみを装置のクロスヘッド変位から評価(ID-5-TT1)



(h) ひずみを画像解析(DIC)法により評価(ID-5-TT1)

図 3.4.2(1)-4 応力-ひずみ曲線(4/4)

(2) 破壊靱性試験

1) 試験方法

破壊靱性試験に先立ち前に室温、大気中にて目標最終 K_{max} : 12 MPa \sqrt{m} の条件にて疲労予亀裂を導入した。応力比は 0.1、繰返し速度は 5Hz とした。なお、疲労予亀裂は試験片 4 体及び予備試験片 2 体に対して実施した。疲労予亀裂導入後、サイドグループ加工を実施した。

疲労予亀裂を導入し、サイドグループを加工した試験片を用い、ASTM E1820-21^[3.4.2(2)-1]に従って、除荷コンプライアンス法により弾塑性破壊靱性試験を実施した。環境条件は大気中、試験温度は 288°C とし、繰返し数は 4 とした。各除荷時の J 積分と Δa を算出して延性亀裂進展抵抗 (J-R) 曲線を求め、鈍化直線と平行な 0.2 mm オフセットラインとの交点から延性亀裂進展開始点の J 積分である J_Q を求めた。なお、下記に示す有効性(Validity)判定を行い、すべての条件を満足する場合、 J_Q は試験片寸法に依らない値である J_{Ic} と判定される。

- ① $B > 10 J_Q / \sigma_f$
- ② $b_0 > 10 J_Q / \sigma_f$
- ③ $|a_{i,ave} - a_i| > 0.05 B$
- ④ $|a_{f,ave} - a_f| > 0.05 B$

ここで、 B : 試験片厚さ、 σ_f : 流動応力(0.2%耐力と引張強さの平均値)、 b_0 : 初期リガメント長さ、 a_i : 個々の測定位置の初期亀裂長さ、 $a_{i,ave}$: a_i の平均値、 a_f : 個々の測定位置の最終亀裂長さ、 $a_{f,ave}$: a_f の平均値である。

試験後に試験片を強制破断し、デジタルマイクロスコープを用いて試験片外観観察及び破面観察を実施した。その後フェライトスコープを用いて破面上のフェライト量測定を実施した。図 3.4.2(2)-5(a)にフェライト量測定箇所を示す。得られた結果から以下について整理した。

- 試験片外観及び破面観察結果
- 破面上のフェライト量測定結果
- 荷重-荷重線変位関係
- J-R 曲線
- J_Q (J_{Ic})
- Validity 判定結果

2) 試験結果

① 除荷コンプライアンス法による J-R 曲線の評価

前項の試験方法に基づき、288℃大気中での弾塑性破壊靱性試験を実施した。弾塑性破壊靱性試験では、荷重－荷重線変位関係を取得した。各除荷線のコンプライアンスより延性亀裂進展量 Δa を算出し、荷重－荷重線変位関係から求まる J 積分との対応より J-R 曲線を求めた。各試験片の荷重－荷重線変位関係を図 3.4.2(2)-1 に、除荷コンプライアンス法による J-R 曲線を図 3.4.2(2)-2 に示す。鈍化直線の傾きは、同じ供試材から採取した引張試験片の試験で得られた流動応力の 2 倍とした。

ここで、それぞれの破壊靱性試験における各除荷線に対応する J 積分の変化及び Δa の変化を図 3.4.2(2)-3 及び図 3.4.2(2)-4 にそれぞれ示す。J 積分は概ね単調に増加していることが確認された一方で、 Δa は初期のバラツキが大きく、概ね 20 回目以降の除荷にて増加する傾向が見られた。20 回目以前の除荷過程では J 積分が比較的小さく、実際に延性亀裂進展が生じているとは考え難いことから、本研究では、 J_Q の決定に用いる、べき乗近似曲線のフィッティングには、20 回目より後の除荷時の J 積分及び Δa データを用いた。なお、亀裂進展量が負になることは現実には生じ得ないことから、本試験において認められた顕著なばらつきは、除荷コンプライアンス法により推定される亀裂長さの精度に起因するものであると判断される。

破面開放後の破面マクロ写真を図 3.4.2(2)-5 に、破面上での亀裂長さ測定結果を表 3.4.2(2)-1 に示す。弾塑性破壊靱性試験結果を表 3.4.2(2)-2 に、ASTM E1820-21 に基づいた Validity 判定結果を表 3.4.2(2)-3 にまとめる。弾塑性破壊靱性試験の予備負荷時の判定項目 7、及び最終亀裂長さの実測値の差に関する判定項目 11、12 はいずれの試験片も Invalid であった。判定項目 7 の Invalid 判定は、除荷コンプライアンス法の再現性に起因するものであり、判定項目 11 及び 12 の Invalid 判定は、実測亀裂長さに対しコンプライアンス法により求まる亀裂長さが過小評価となったことに起因する。その他の判定項目は Valid であった。なお、亀裂形状に関する判定は判定項目 13 及び 14 であり、いずれも Valid と判定された。ASTM E1820-21 の A9.10 に基づく J_Q の J_{Ic} とし

での判定は判定項目 2 及び 3 であり、いずれの試験片も Valid であった。

② Normalization Data Reduction Technique(NDR 法)による J-R 曲線の評価

前項では除荷コンプライアンス法による J-R 曲線の評価を実施したが、荷重－荷重線変位関係には試験片間で大きな差が見られないのに対し（図 3.4.2(2)-1 参照）、得られた J-R 曲線には試験片間で比較的大きな差が認められた（図 3.4.2(2)-2 参照）。また J_Q の値は 263～511 kJ/m² の範囲であった。試験片間で J-R 曲線及び J_Q の差が大きい要因として、図 3.4.2(2)-4 に示すように、除荷コンプライアンス法により推定された亀裂長さのバラツキが大きい点が挙げられる。また、前述のように、本研究では全ての試験片で亀裂長さを過小評価した。試験において亀裂長さを過小評価することは、J-R 曲線を過大評価することにつながるため、非安全側の評価結果を与える可能性がある。なお、実機材を評価した例^[3.4.2(2)-2]や、ラボ材の評価例^[3.4.2(2)-3]でも、ステンレス鋼を対象とした除荷コンプライアンス法により求めた J-R 曲線は、亀裂進展量を一貫して過小評価しており、これは材料の特性に起因するものと考えられる。

J-R 曲線における評価上の亀裂長さを実測長さに対応させる手法の一つに、ASTM E1820-21 の Annex15 に規定される Normalization Data Reduction Technique(以下、「NDR 法」という)がある。NDR 法は、荷重－荷重線変位関係と、初期亀裂長さ及び最終亀裂長さから試験中の延性亀裂進展量を試験後に推定して J-R 曲線を求める手法である。本法は、高負荷速度での試験や高温での試験、過酷環境中での試験など、除荷コンプライアンス法の適用が難しい場合に有用な J-R 曲線の評価法であると上記 ASTM 規格内に記載されている。本手法では、試験における総亀裂進展量に実測値を用いるため、J-R 曲線の評価上、総亀裂進展量には過小評価が生じない。ここでは、本事業で実施した 4 体の試験片の破壊靱性試験について、本来の延性亀裂進展抵抗を求めることを目的に NDR 法を適用した。NDR 法による J-R 曲線の評価手順は、ASTM E1820-21 の Annex 15 に準拠した。なお、NDR 法は延性亀裂進展量が大きくなる試験には適用できないとされており、規格には 4 mm 及び 0.15 b_0 の小さい方が延性亀裂進展量の上限とされている。本事業で実施

した破壊靱性試験は、いずれもこの延性亀裂進展量の上限を超えている点を付記する。

NDR 法による J-R 曲線を図 3.4.2(2)-6 に、NDR 法による弾塑性破壊靱性試験結果及び J_{Ic} としての判定結果を表 3.4.2(2)-4 に示す。なお、同表には TSS モデル^[3.4.2(2)-4]による流動応力の予測値、H3T モデル^[3.4.2(2)-4]による破壊靱性パラメータの予測値（実機評価に用いる下限特性）も併せて示す。モデルに入力する熱時効条件については、280°C×144569 h とした。TSS モデルによる予測値は実測値に対し若干高めの値を示す一方で、H3T モデルにより予測される破壊靱性パラメータについては実測値を大きく下回った。これは、破壊靱性評価においては、H3T モデルが保守的であることを示す結果である。

除荷コンプライアンス法及び NDR 法により求めた各試験片の J-R 曲線から、ASTM E1820-21 において J_Q を求める際に用いる、べき乗近似した J-R 曲線の比較結果を図 3.4.2(2)-7 に示す。除荷コンプライアンス法の場合、前述の通り延性亀裂進展量を過小評価しており、結果として J-R 曲線の傾きが大きくなることで、NDR 法よりも高い亀裂進展抵抗を示す形になっている。この結果からも、本事業の目的となる実機材の実力を評価する手法としては、NDR 法の方が適切であると考えられる。

③ フェライト量の測定結果

破面開放後の C(T)試験片を対象に、フェライトスコープを用いてフェライト量測定を実施した。フェライト量測定結果を表 3.4.2(2)-5 に示す。フェライト量（試験片側面①～④）の平均値は 19.1%～21.9%であり、令和 2 年度に報告した Schaeffler 線図による予測値より、フェライトスコープによる測定値の方が大きな値であった。また、同じ供試体から採取した観察用試験片を対象としたフェライトスコープによるフェライト量測定結果とほぼ同じ値であった。

<参考文献>

- [3.4.2(2)-1] Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM E1820-21, ASTM international, 2021
- [3.4.2(2)-2] O. K. Chopra, W. J. Shack. Mechanical Properties of Thermally Aged Cast Stainless Steels from Shippingport Reactor Components. NUREG/CR-6275, ANL-94/37, 1995.
- [3.4.2(2)-3] O. K. Chopra, A. Sather. Initial assessment of the mechanisms and Significance of low-temperature embrittlement of cast stainless steel in LWR system. NUREG/CR-5385, ANL-89/17, 1990.
- [3.4.2(2)-4] Seiichi Kawaguchi, Takeharu Nagasaki, Koji Koyama. Prediction method of tensile properties and fracture toughness of thermally aged cast duplex stainless steel piping. Proceedings of ASME PVP2005-71528, July 17-21, 2005, Denver, Colorado USA.

表 3.4.2(2)-1 破面上での亀裂長さ測定結果

試験片番号	初期亀裂長さ a_0 (mm)	最終亀裂長さ a_p (mm)	延性亀裂進展量 Δa (mm)
ID-2-FR1	26.95	32.83	5.88
ID-3-FR2	26.28	30.70	4.42
ID-4-FR1	26.04	32.36	6.32
ID-5-FR1	26.33	31.66	5.33

表 3.4.2(2)-2 弾塑性破壊靱性試験結果のまとめ

試験片番号	試験温度 (°C)	流動応力 σ_f (MPa)	J_Q (kJ/m ²)	$J = C(\Delta a)^m$	
				C	m
ID-2-FR1	288	342	263	381	0.69
ID-3-FR2	288	358	511	540	0.62
ID-4-FR1	288	348	424	495	0.74
ID-5-FR1	288	328	330	421	0.69

表 3.4.2(2)-3 Validity 判定結果のまとめ

判定項目		ID-2- FR1	ID-3- FR2	ID-4- FR1	ID-5- FR1
1	$2 \leq WB \leq 4$	Valid	Valid	Valid	Valid
2	$B > 10J_Q / \sigma_f$	Valid	Valid	Valid	Valid
3	$b_0 > 10J_Q / \sigma_f$	Valid	Valid	Valid	Valid
4	$P_{max} < P_m$	Valid	Valid	Valid	Valid
5	$K_{fmax} \leq K_{max}$	Valid	Valid	Valid	Valid
6	試験速度 $0.3 \text{ min} \leq P_m$ 到達時間 $\leq 3 \text{ min}$	Valid	Valid	Valid	Valid
7	予備負荷 $ a_{ave} - a_i \leq 0.002W$ ($i=1\sim 3$)	Invalid	Invalid	Invalid	Invalid
8	$0.45 \leq a_0/W \leq 0.70$	Valid	Valid	Valid	Valid
9	$\Delta a_0 \geq 1.3$	Valid	Valid	Valid	Valid
10	$\Delta a_0 \geq 0.05B$	Valid	Valid	Valid	Valid
11	$ \Delta a_p - \Delta a_{predicted} < 0.15\Delta a_p$ ($\Delta a_p < 0.02b_0$ の場合)	—	Invalid	—	—
12	$ \Delta a_p - \Delta a_{predicted} < 0.03b_0$ ($\Delta a_p \geq 0.02b_0$ の場合)	Invalid	—	Invalid	Invalid
13	$ a_{0i} - a_0 \leq 0.05B$ ($i=1\sim 9$)	Valid	Valid	Valid	Valid
14	$ a_{pi} - a_p \leq 0.05B$ ($i=1\sim 9$)	Valid	Valid	Valid	Valid
15	有効データ 5 点以上	Valid	Valid	Valid	Valid
16	最大試験力までにデータ 8 点以上	Valid	Valid	Valid	Valid
17	0.15 mm オフセット線と 0.5 mm オフセッ ト線の間には有効データ 1 点以上	Valid	Valid	Valid	Valid
18	0.5 mm オフセット線と 1.5 mm オフセッ ト線の間には有効データ 1 点以上	Valid	Valid	Valid	Valid
19	$0.4J_Q \sim J_Q$ の間にデータ 3 点以上	Valid	Valid	Valid	Valid

W : 試験片幅, B : 試験片厚さ, b_0 : 初期リガメント長さ, a_0 : 初期亀裂長さ(平均値),
 σ_f : 流動応力, P_{max} : 疲労予亀裂導入時の最終荷重, $P_m=0.4Bb_0^2\sigma_f/(2W+a_0)$, K_{fmax} : 疲
 労予亀裂導入時の最終 K 値, K_{max} : 判定基準 K 値,

a_{ave} : 予備負荷時の亀裂長さ(平均値), a_i : 予備負荷時の亀裂長さ($i=1\sim 3$),

Δa_0 : 疲労亀裂進展量, Δa_p : 延性亀裂進展量(実測値), $\Delta a_{predicted}$: 延性亀裂進展量(推定
 値),

a_{0i} : 初期亀裂長さ($i=1\sim 9$), a_{pi} : 最終亀裂長さ($i=1\sim 9$), a_p : 最終亀裂長さ(平均値)

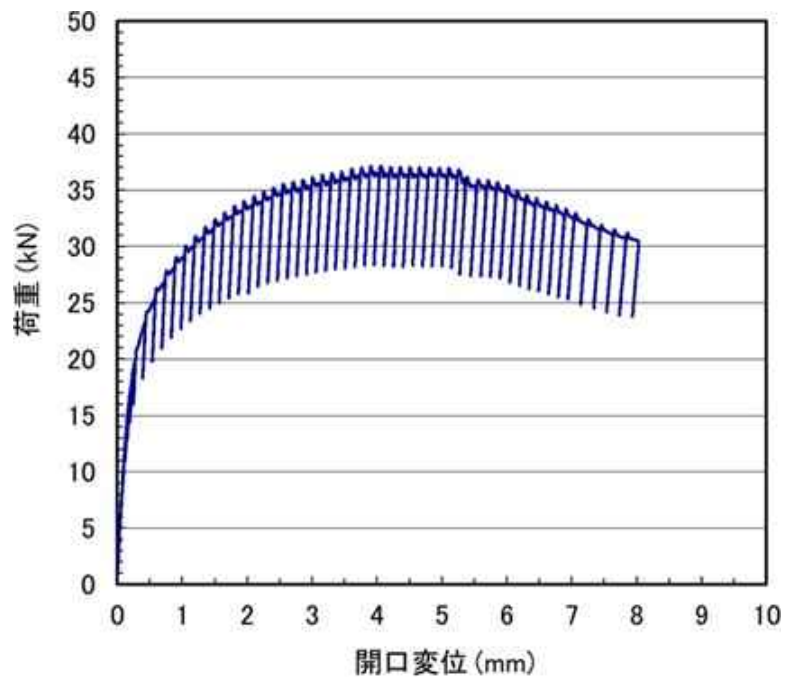
表 3.4.2(2)-4 弾塑性破壊靱性試験結果及び H3T/TSS モデル予測値のまとめ

試験片 番号	試験温度 (°C)	流動応力 σ_f (MPa)	J_Q (kJ/m ²)	$J = C(\Delta a)^m$		J_{Ic} としての Validity	
				C	m	$B > 10J_Q / \sigma_f$	$b_0 > 10J_Q / \sigma_f$
ID-2-FR1	288	342	330	416	0.60	Valid	Valid
ID-3-FR2	288	358	506	531	0.50	Valid	Valid
ID-4-FR1	288	348	354	433	0.57	Valid	Valid
ID-5-FR1	288	328	381	442	0.60	Valid	Valid
TSS/H3T モデル	325	360	144	213	0.43	-	-

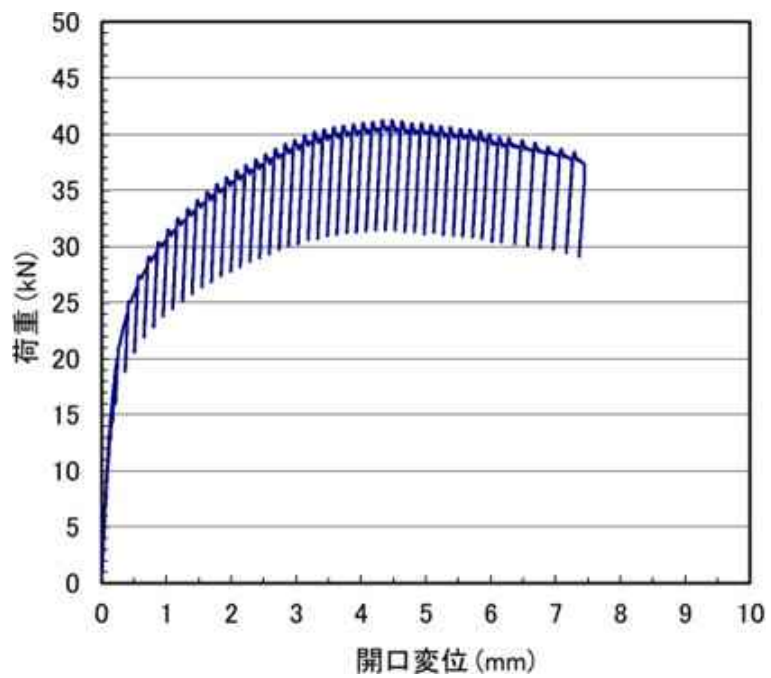
モデルに用いた熱時効条件は 280°C×144569 h であり、モデルにより求められる材料特性は 325°Cにおける特性である。

表 3.4.2(2)-5 フェライト量測定結果 (%)

試験片番号	試験片側面					比較 参照値*2
	①	②	③	④	平均値	
ID-2-FR1	20.0	19.3	18.8	18.3	19.1	18.9
ID-3-FR2	19.6	19.0	20.5	20.4	19.9	19.0
ID-4-FR1	20.6	18.5	23.4	21.2	20.9	20.1
ID-5-FR1	23.1	22.4	21.4	20.5	21.9	19.3
試験片番号	破面 (参考値)					
	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
ID-2-FR1	14.2	14.2	17.5	14.5	13.7	15.3
ID-3-FR2	16.3	13.2	15.2	12.9	13.4	15.8
ID-4-FR1	17.7	16.2	18.2	17.6	15.1	16.5
ID-5-FR1	16.7	14.9	16.0	18.1	15.8	21.1

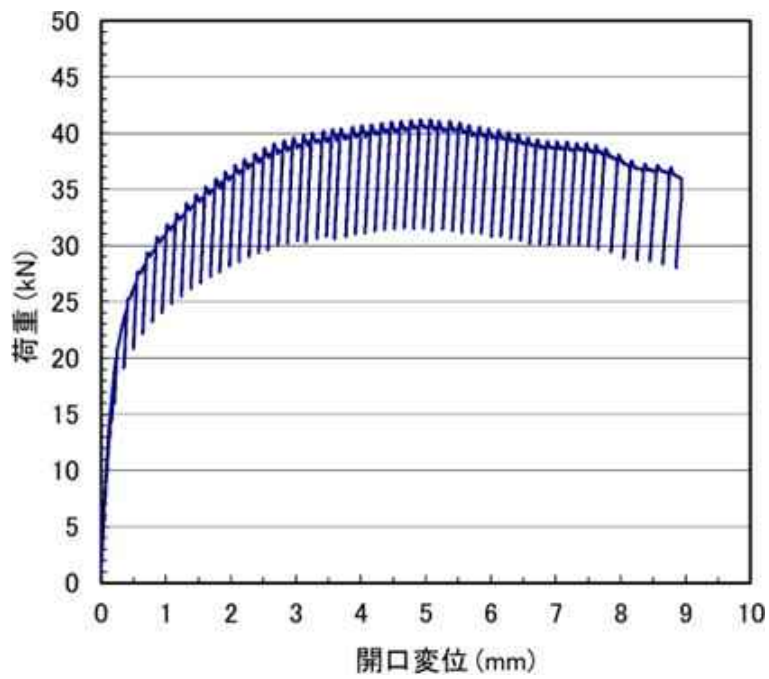


(a) ID-2-FR1

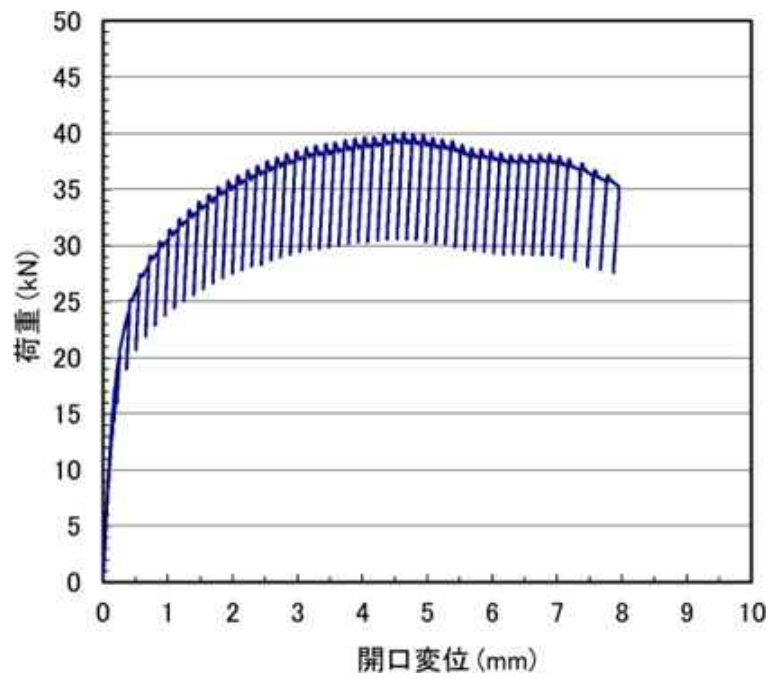


(b) ID-3-FR2

図 3.4.2(2)-1 弾塑性破壊靱性試験における荷重—荷重線変位関係(1/2)

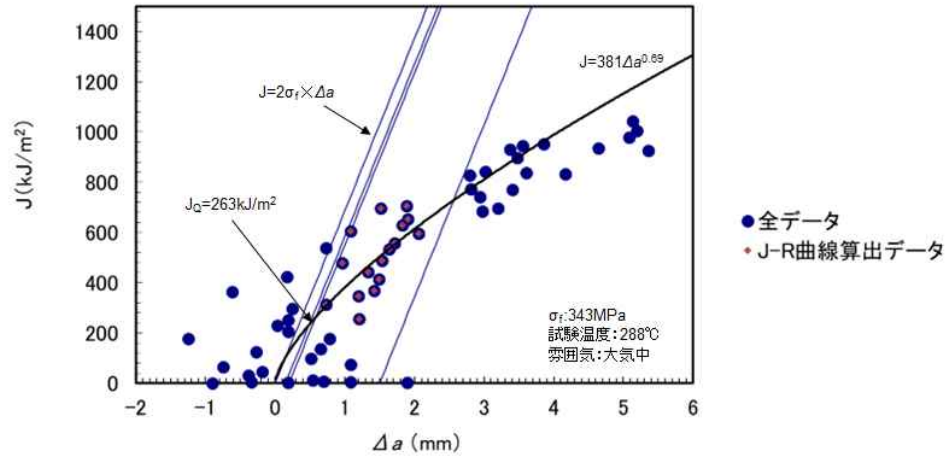


(c) ID-4-FR1

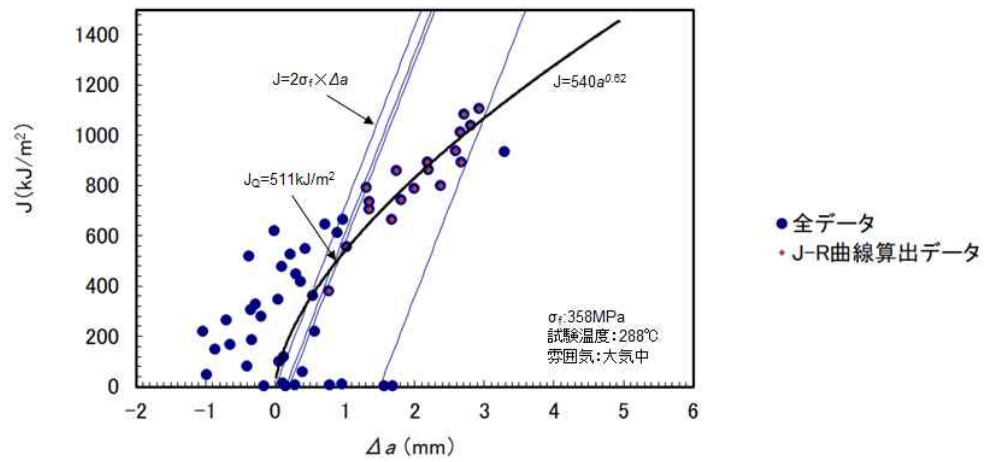


(d) ID-5-FR1

図 3.4.2(2)-1 弾塑性破壊靱性試験における荷重-荷重線変位関係 (2/2)

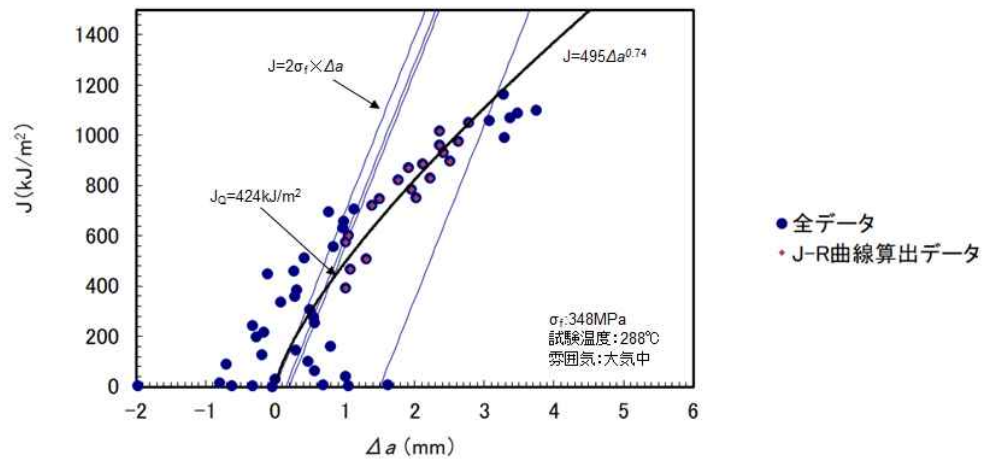


(a) ID-2-FR1

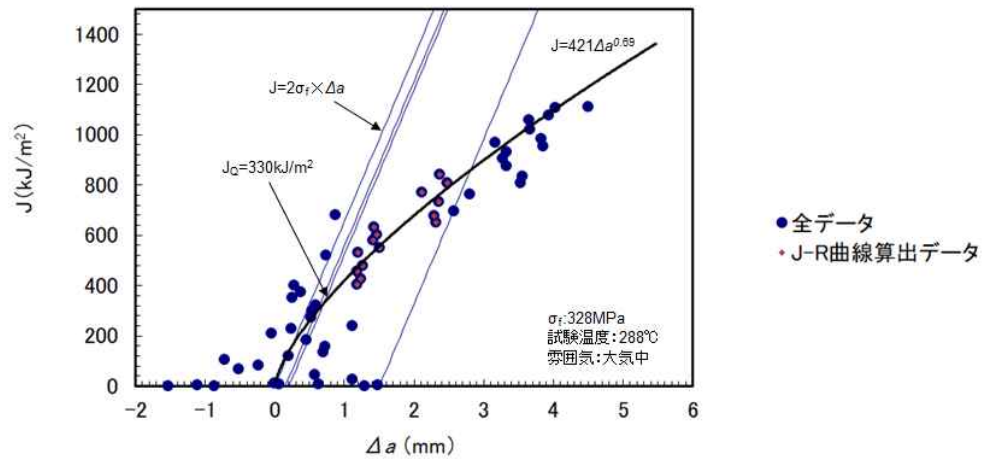


(b) ID-3-FR2

図 3.4.2(2)-2 除荷コンプライアンス法による J - R 曲線 (1/2)

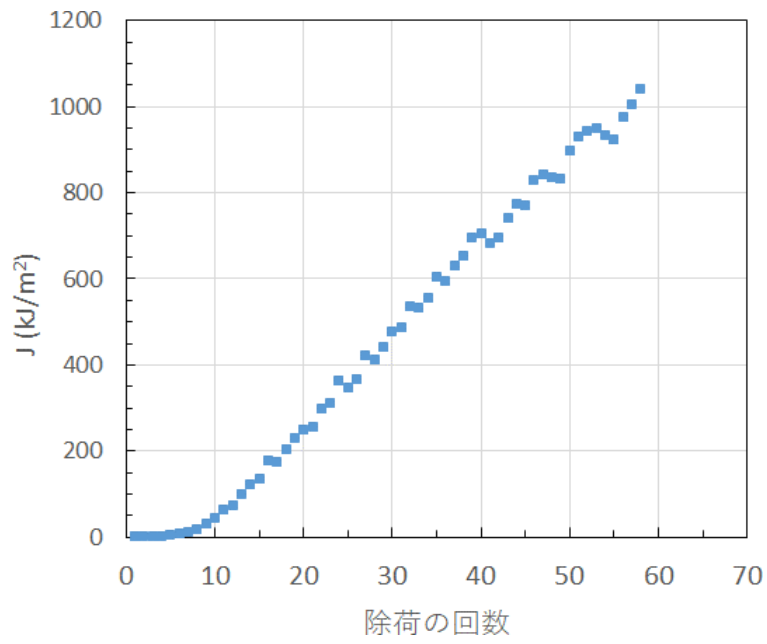


(c) ID-4-FR1

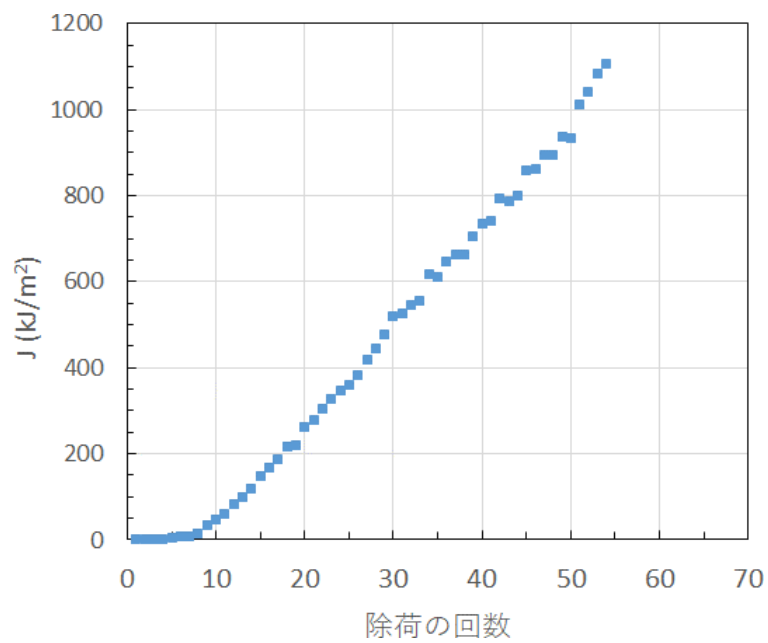


(d) ID-5-FR1

図 3.4.2(2)-2 除荷コンプライアンス法による J-R 曲線 (2/2)

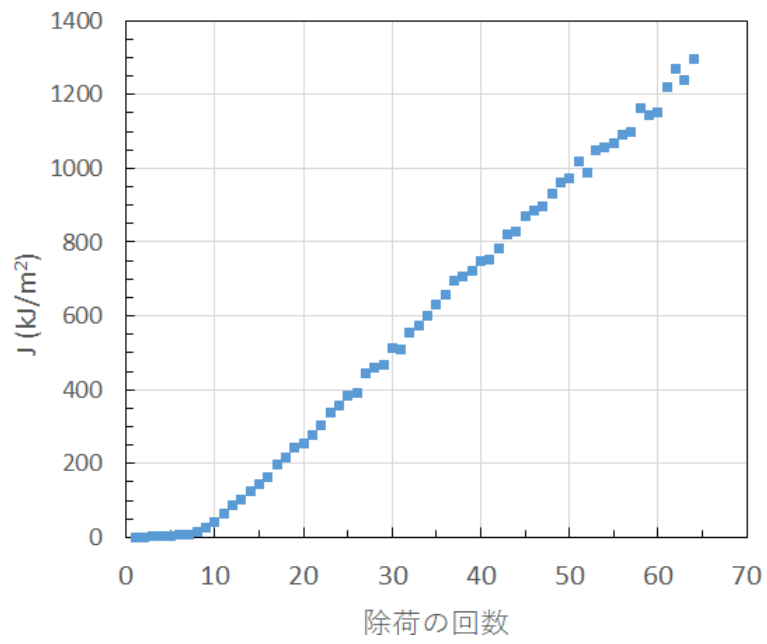


(a) ID-2-FR1

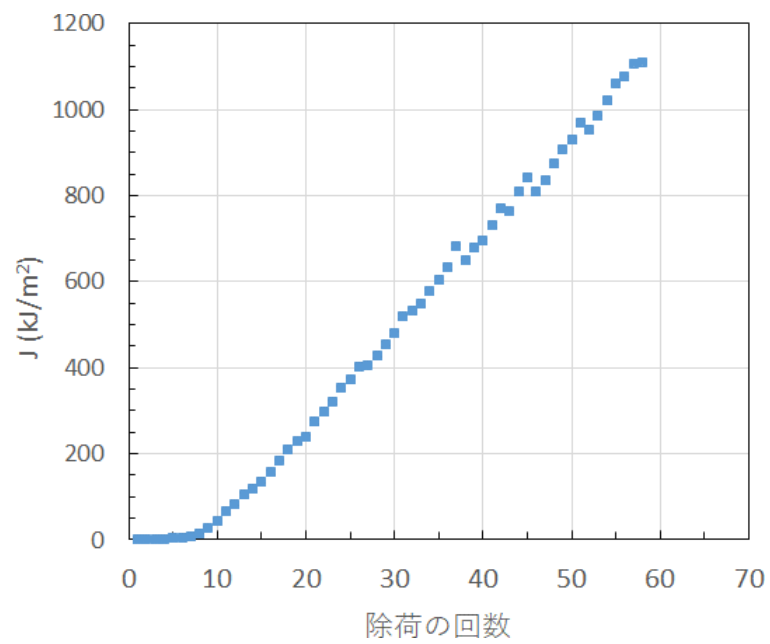


(b) ID-3-FR2

図 3.4.2(2)-3 各除荷線に対応する J 積分の変化(1/2)

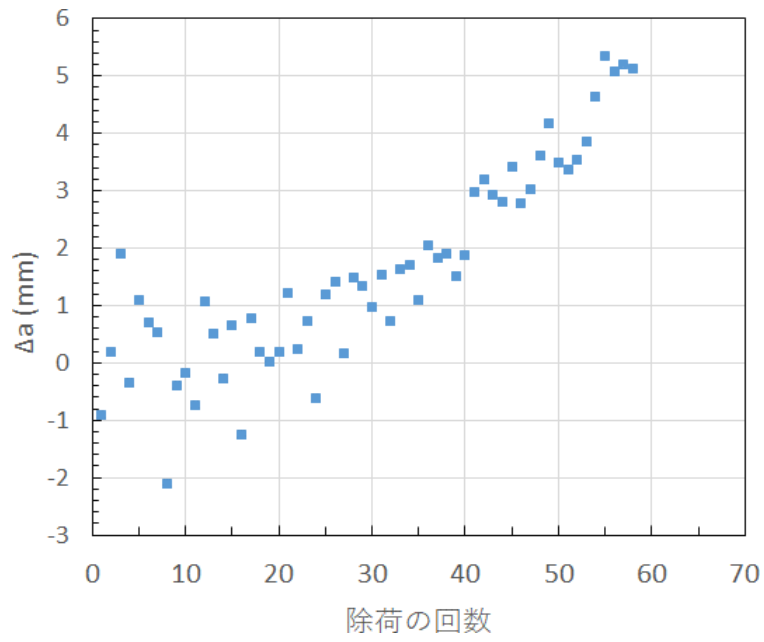


(c) ID-4-FR1

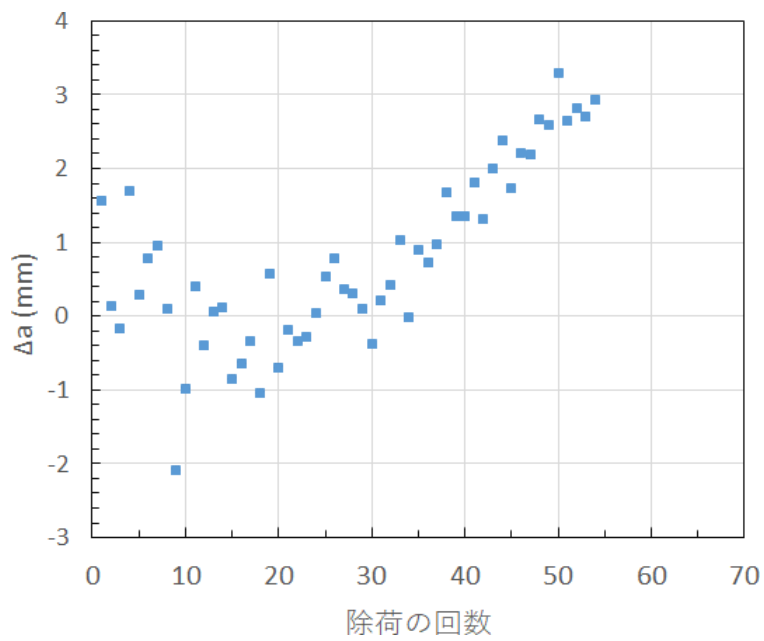


(d) ID-5-FR1

図 3.4.2(2)-3 各除荷線に対応する J 積分の変化(2/2)

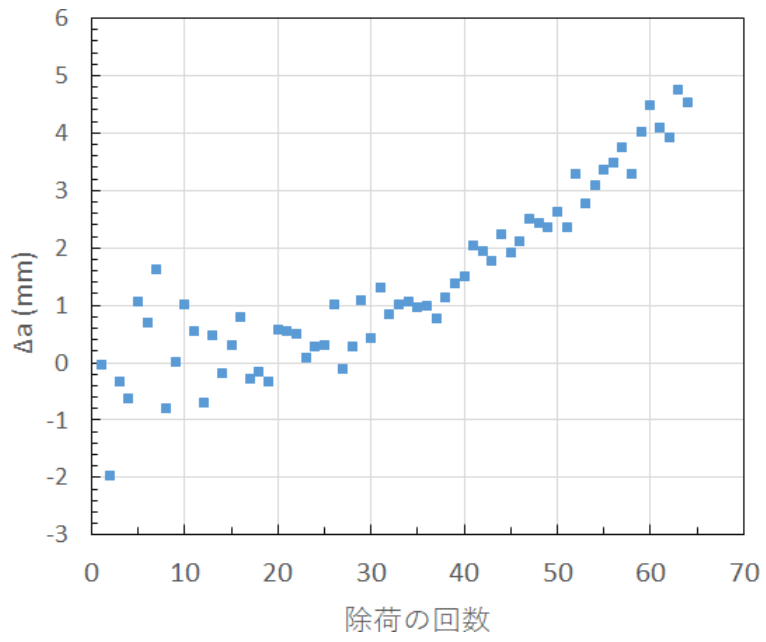


(a) ID-2-FR1

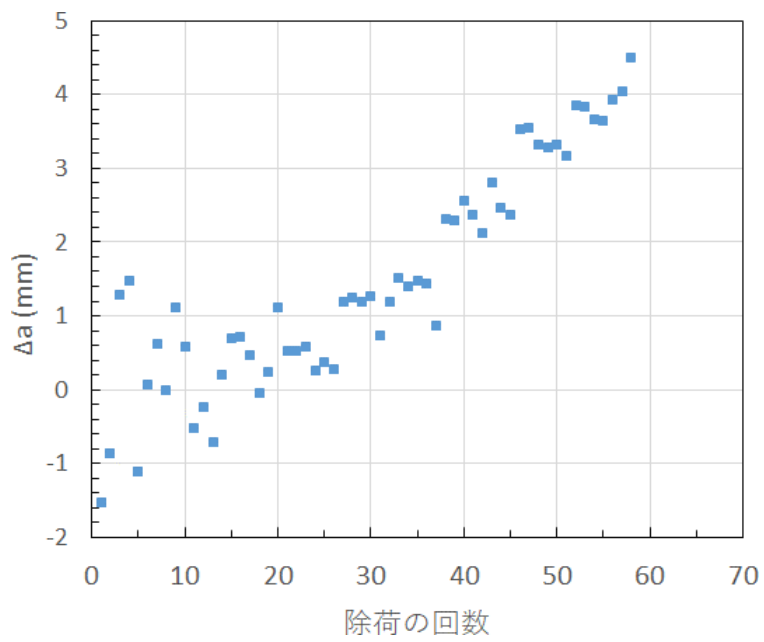


(b) ID-3-FR2

図 3.4.2(2)-4 各除荷線に対応する Δa の変化(1/2)

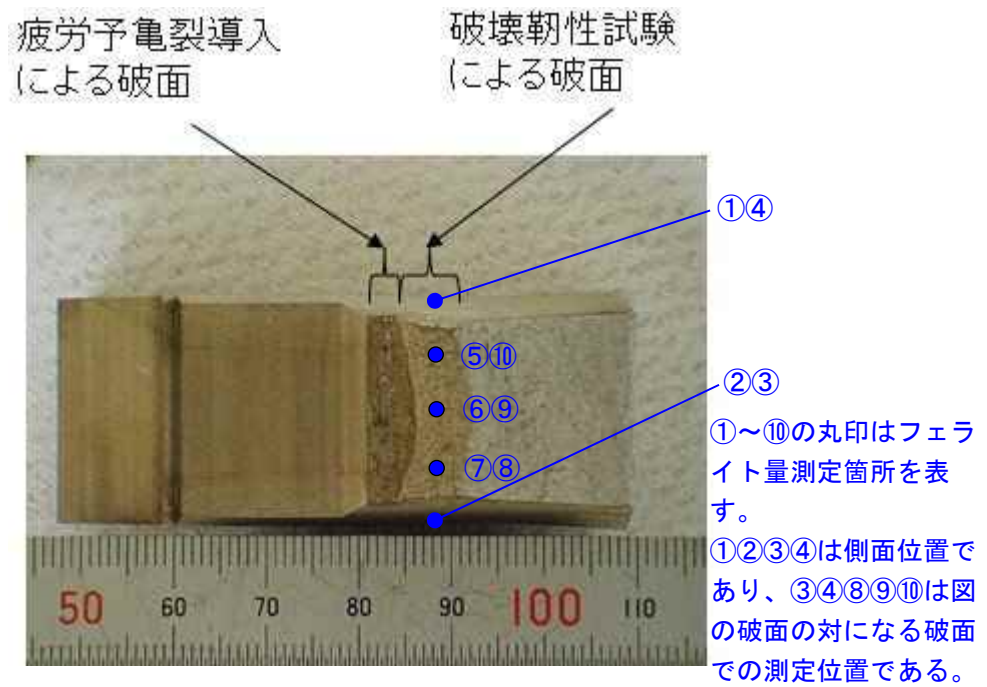


(c) ID-4-FR1

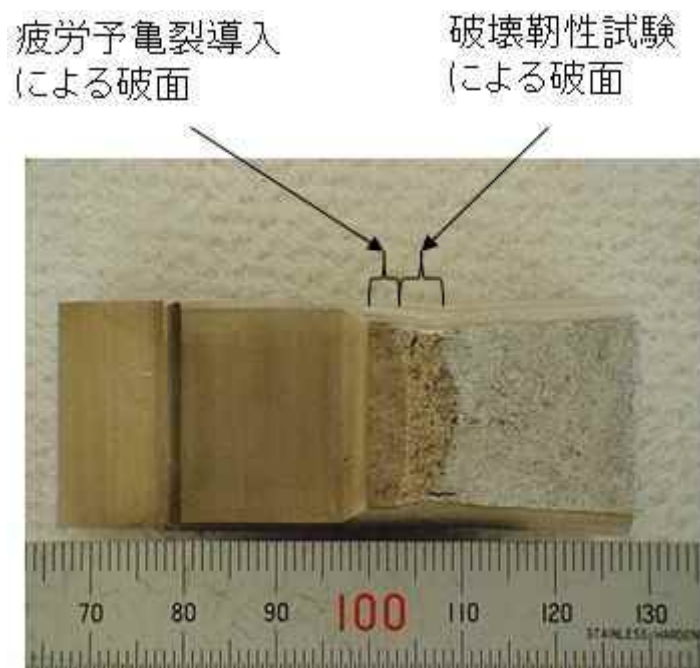


(d) ID-5-FR1

図 3.4.2(2)-4 各除荷線に対応する Δa の変化(2/2)

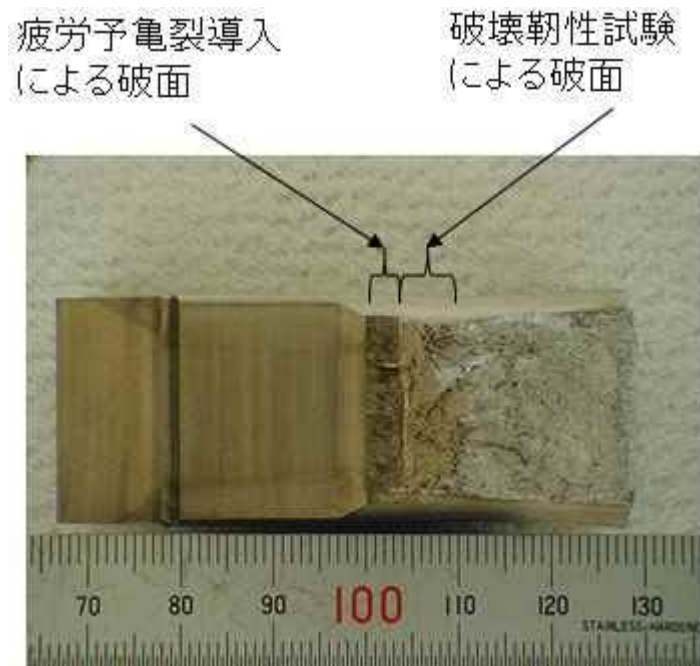


(a) ID-2-FR1

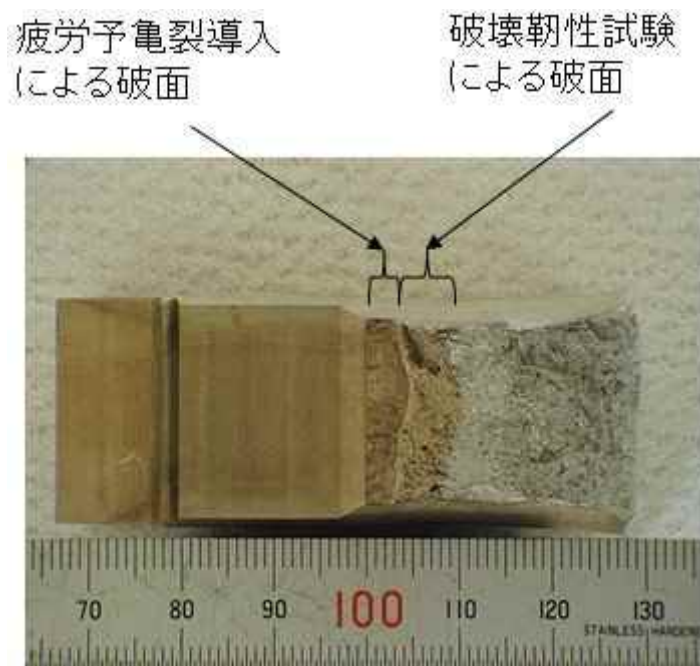


(b) ID-3-FR2

図 3.4.2(2)-5 弾塑性破壊靱性試験後の破面マクロ写真(1/2)

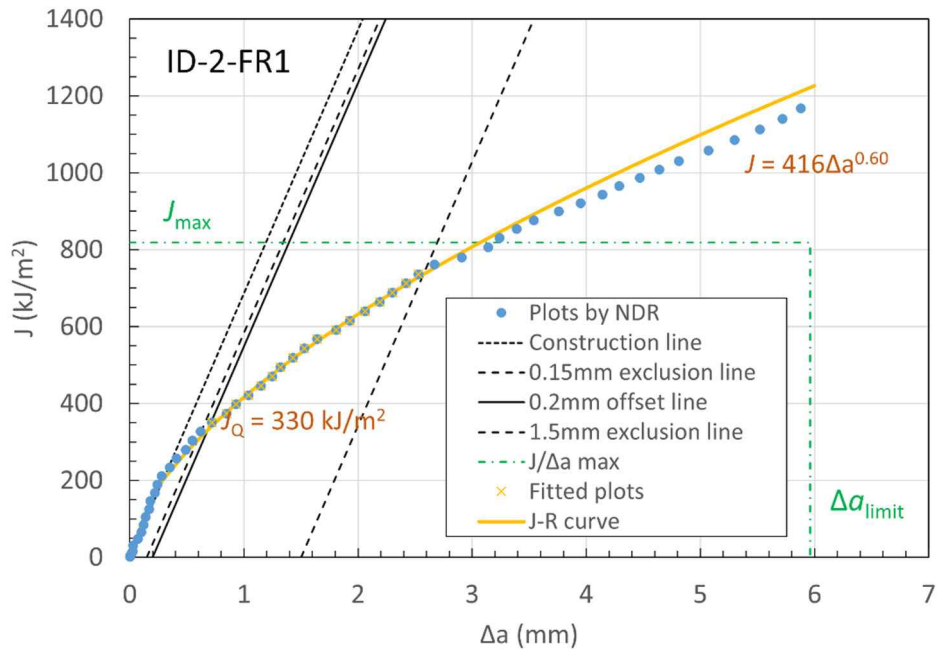


(c) ID-4-FR1

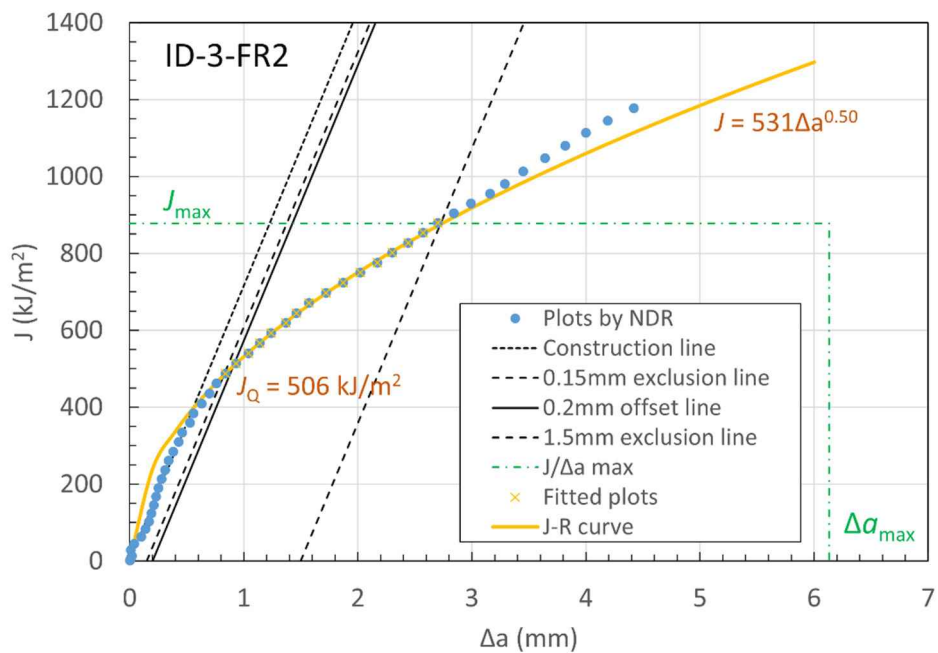


(d) ID-5-FR1

図 3.4.2(2)-5 弾塑性破壊靱性試験後の破面マクロ写真(2/2)

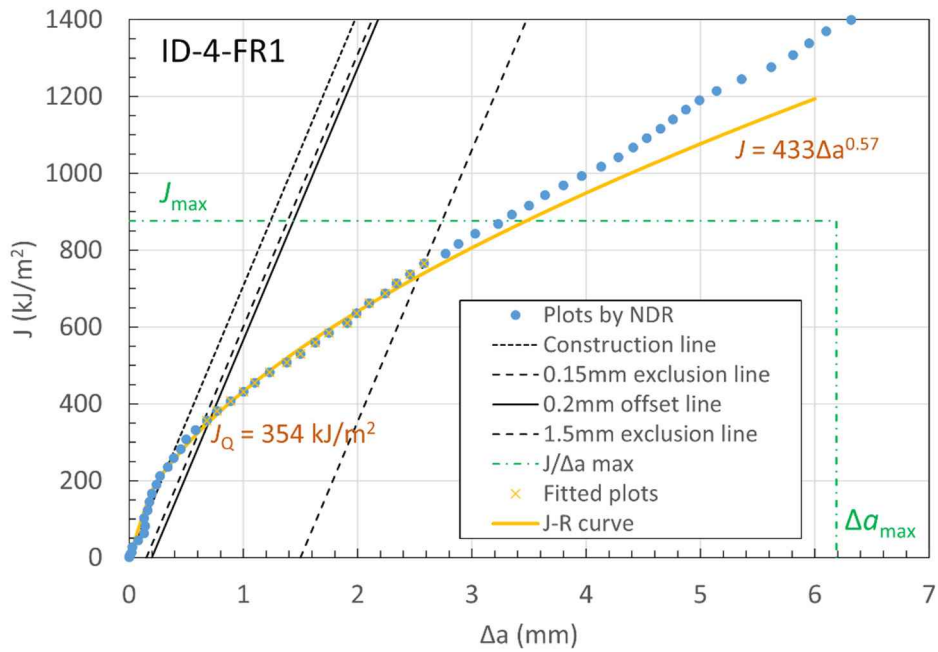


(a) ID-2-FR1

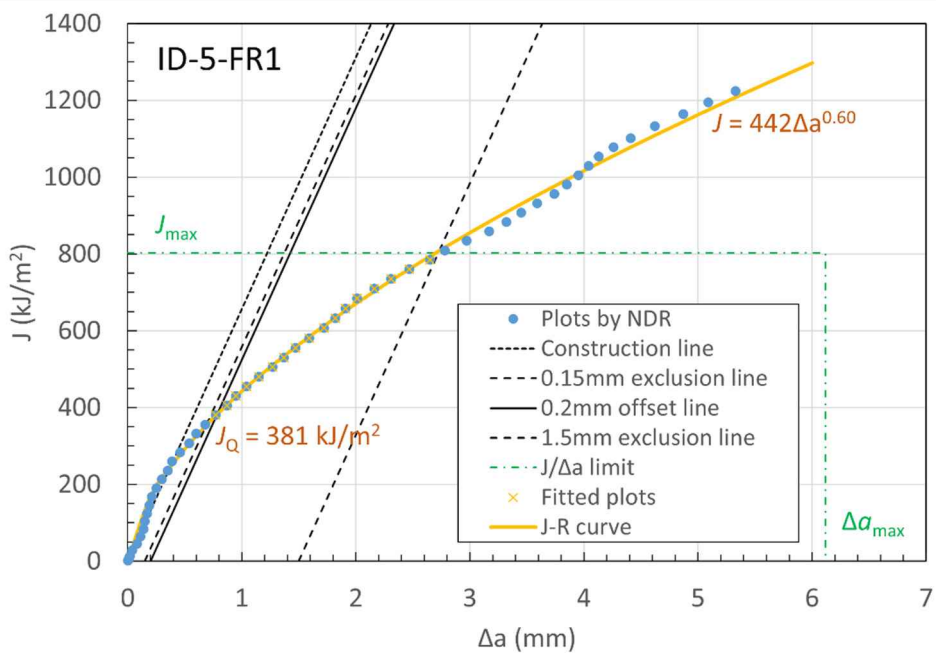


(b) ID-3-FR2

図 3.4.2(2)-6 NDR 法による J - R 曲線(1/2)

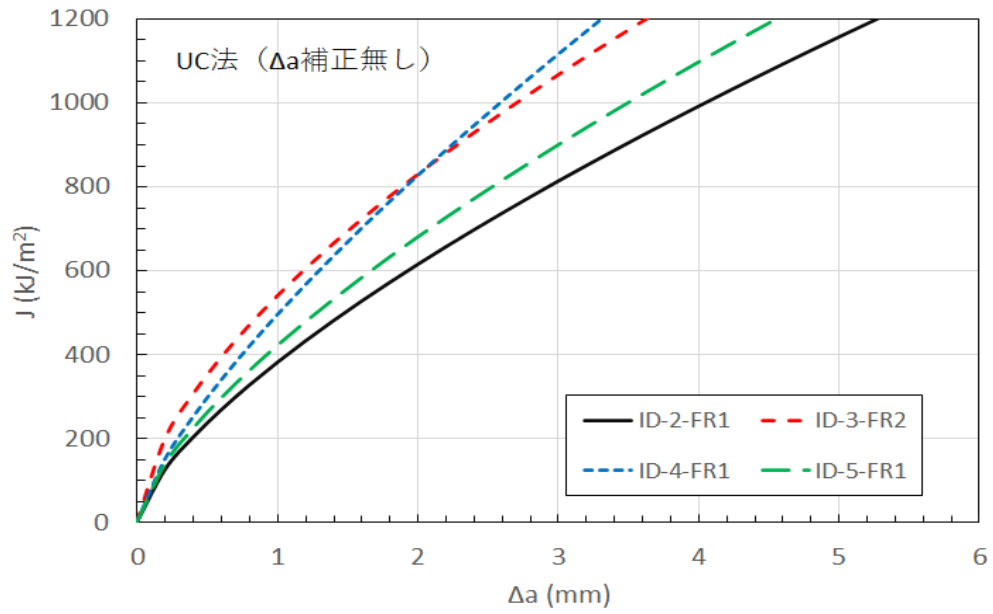


(c) ID-4-FR1

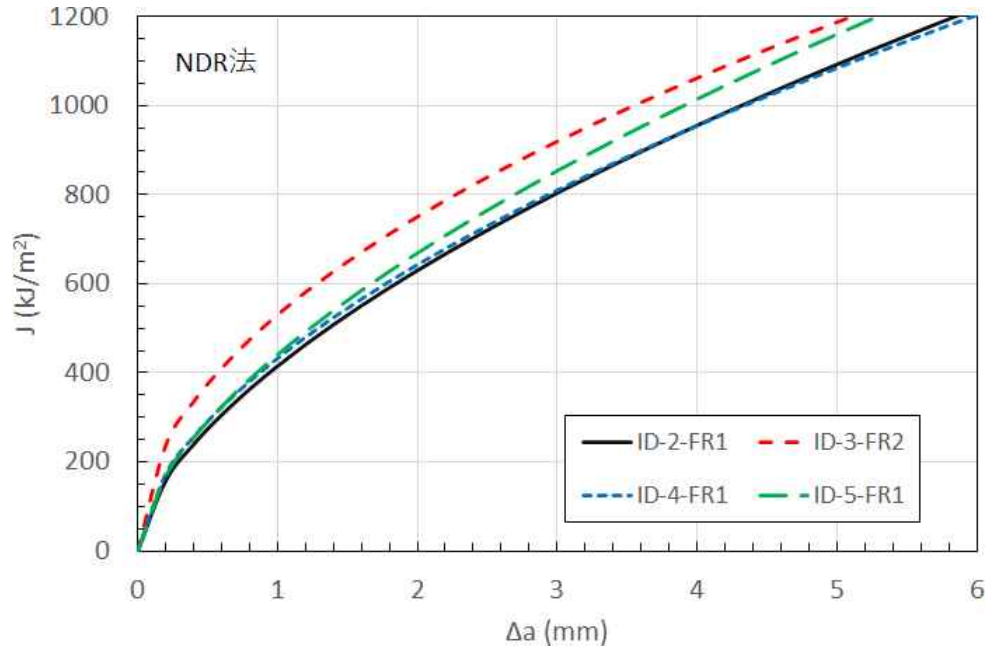


(d) ID-5-FR1

図 3.4.2(2)-6 NDR 法による J - R 曲線 (2/2)



(a) 除荷コンプライアンス法 (UC 法)



(b) NDR 法

図 3.4.2(2)-7 試験片間の J - R 曲線

(3) フェライト相割合の評価

ステンレス鋼鋳鋼の熱時効はフェライト相のマイクロ組織の変化によって生じることから、機器に含まれているフェライト相の割合によって熱時効による脆化の程度が変わることが知られている。このため、熱時効評価において機器に含まれるフェライト相の割合は重要なパラメータとなり、国内実機評価に用いられる H3T モデルにおいても、ASTM A800/A800M^[3.4.2(3)-1]を用いたフェライト相割合の予測法が整備されている。本研究では、観察用試験片の面積率からフェライト相の割合を求め、フェライトスコープによる測定値及び ASTM A800 / A800M の予測結果と比較する。

1) 試験方法

観察対象は前述した ID-1 から ID-6 の試験体から採取した 12 種の平面寸法約 10 mm×10 mm 観察用試験片である。各試験片をエメリー紙で研磨後、電解研磨によりフェライト相組織を表出させた。電解研磨後の観察用試験片の写真を図 3.4.2(3)-1 に示す。フェライト相割合の評価は以下の手順にて実施した。

- ① フェライトスコープ測定位置に近く、かつ 12 試験片において平行度が保たれ、撮影視野全域において鮮明にフェライト相、オーステナイト相が観察できる 5 視野（図 3.4.2(3)-2 に示す No. 5～No. 9）を選定する。
- ② 対象とした視野について、画像解析ソフト Image J を用いて二値化し、オーステナイト相とフェライト相・ボイドを判別する。
- ③ 形状情報からボイド部のみを抽出して区別する。
- ④ オーステナイト相のみを抽出（画像上の白色部分）する。
- ⑤ 自動処理ができていない部分について微修正を実施する。
- ⑥ ボイド部については減算し、残面積中において抽出されたフェライト相の割合を当該視野のフェライト相割合として算出する。

上記の②～⑥の手順の概要図を図 3.4.2(3)-3 に示す。これらの手順にて測定された各試験片の 5 視野の平均値をフェライト相割合として定義した。

2) 試験結果

本観察及び解析において得られたフェライト相割合を表 3.4.2(3)-1 に示

す。視野毎の値は 7.8 %～23.6 %となり、試験片毎の平均値は 12.5%～22.3%であった。画像解析値とフェライトスコープ測定値、さらには H3T モデルに採用されている ASTM A800/A800M による推定値の比較結果を図 3.4.2(3)-4 に示す。全体傾向として、画像解析により面積率から求めたフェライト割合は、フェライトスコープにより測定したフェライト相割合よりも小さな値を示した。フェライトスコープは磁気情報から求めた間接値であることから、観察面の数を十分に確保した場合は、画像解析結果の方が実際のフェライト相割合を代表するものと考えられる。なお、ASTM A800/A800M による推定値は 15.1 %であり、今回の測定法で比較した場合は、面積率から求めた値の方が近い結果となった。

<参考文献>

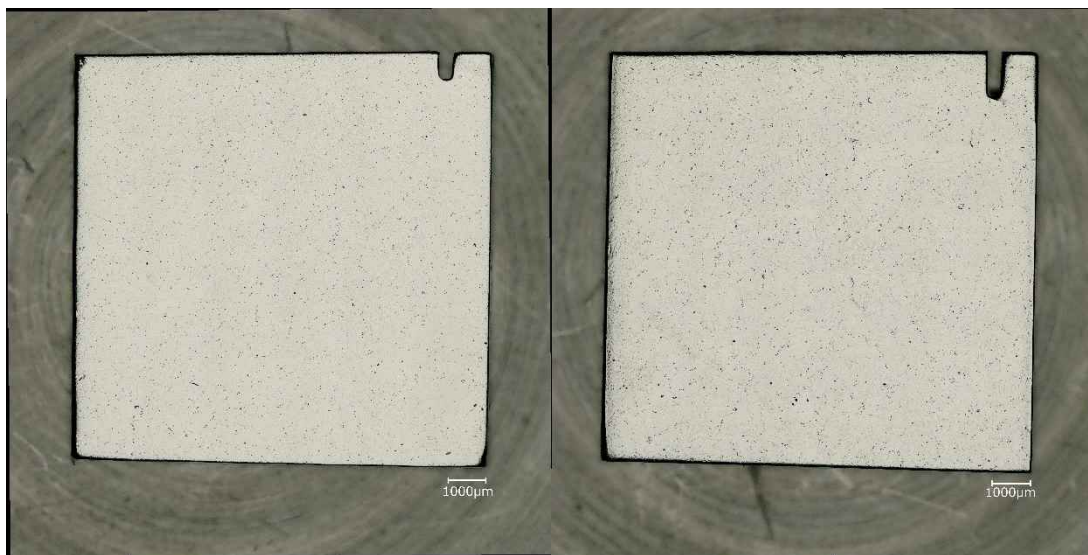
- [3.4.2(3)-1] ASTM International. Standard Practice for Steel Casting, Austenitic Alloy. Estimating Ferritic Content Thereof. ASTM A800 / A800M, 2006.

表 3.4.2(3)-1 フェライト相割合 (%)

	ID-1		ID-2		ID-3		ID-4		ID-5		ID-6	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2
平均	22.3	18.0	16.2	13.9	13.2	14.6	16.3	14.8	17.5	12.5	13.6	17.4
最大	23.6	19.9	18.7	15.6	16.1	16.9	19.7	18.1	21.4	15.5	15.9	22.4
最小	21.4	16.7	12.2	12.4	7.8	12.1	12.3	9.5	12.9	9.0	10.8	14.3



ID-1 (左 : M1 右 : M2)



ID-2 (左 : M1 右 : M2)

図 3.4.2(3)-1 電解研磨後の組織観察用試験片 (1/3)



ID-3 (左 : M1 右 : M2)

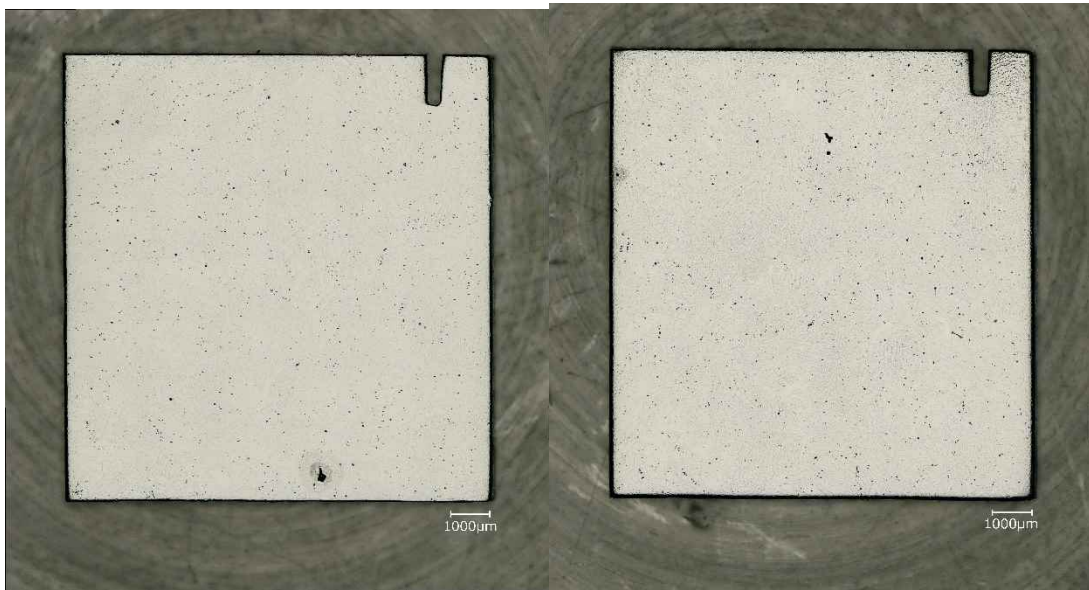


ID-4 (左 : M1 右 : M2)

図 3.4.2(3)-1 電解研磨後の組織観察用試験片 (2/3)



ID-5 (左 : M1 右 : M2)



ID-6 (左 : M1 右 : M2)

図 3.4.2(3)-1 電解研磨後の組織観察用試験片 (3/3)

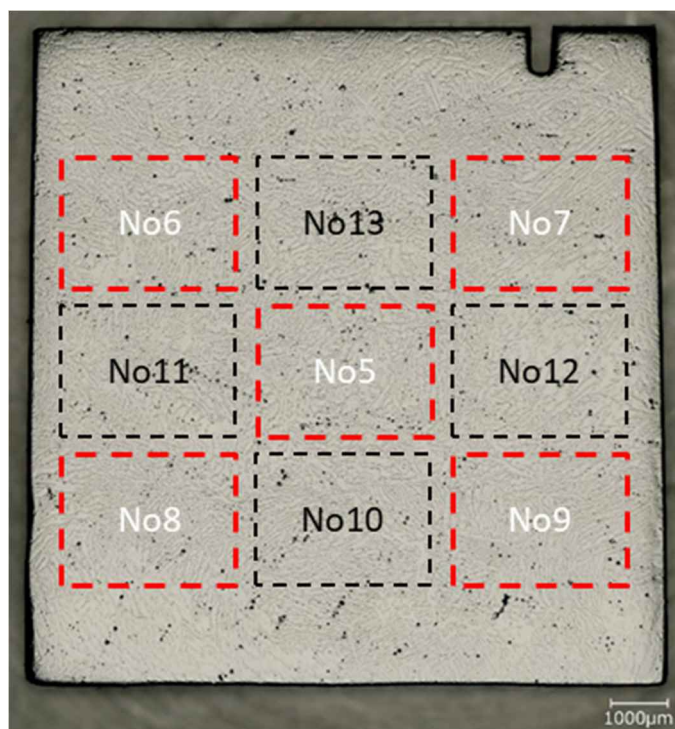


図 3. 4. 2 (3)-2 フェライト量評価の画像選定位置 (No. 5~No. 9)

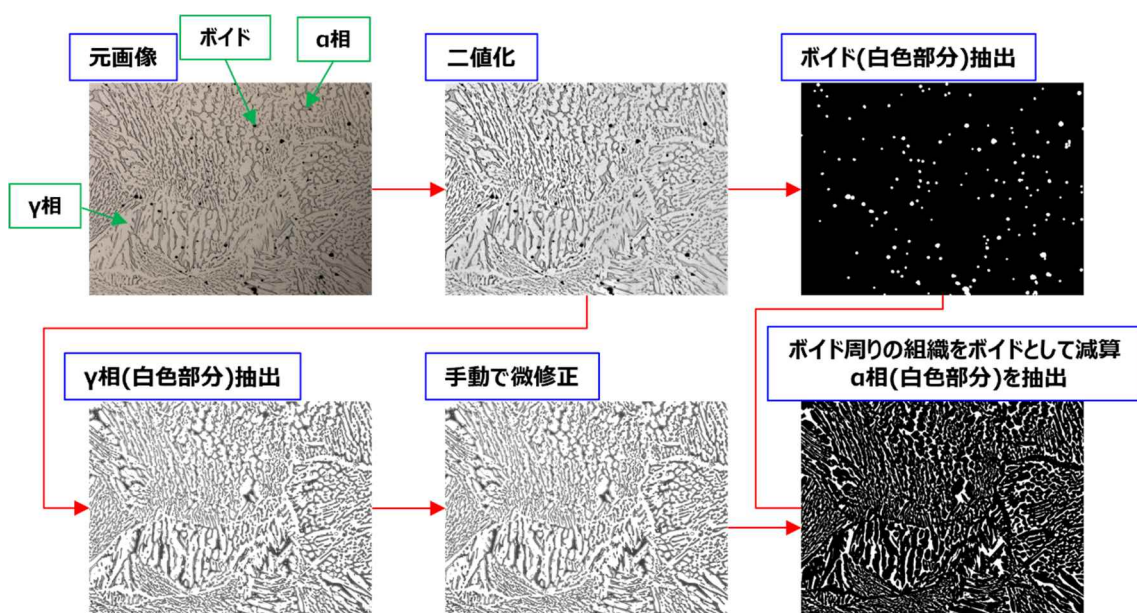


図 3. 4. 2 (3)-3 フェライト相割合評価手順

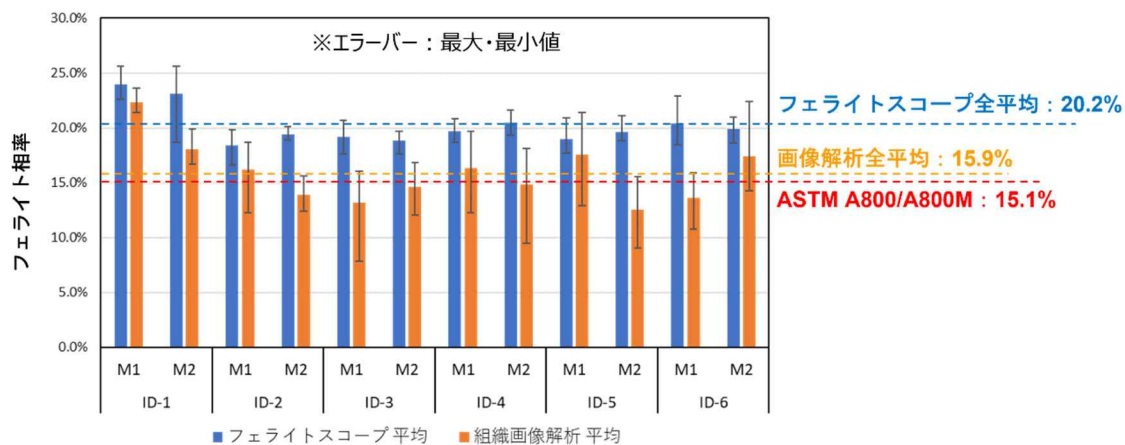


図 3.4.2(3)-4 各種法により求めたフェライト量の比較

(4) ナノインデントー硬さ試験

ステンレス鋼鋳鋼の熱時効による脆化には、フェライト相内のマイクロ組織変化に起因する硬化が関与するため、脆化の程度を把握し、かつマイクロ組織変化と鋳鋼全体の脆化を関係付けるために、フェライト相の硬さが有効なパラメータとなり得る。また、弾塑性破壊靱性評価はフェライト相単相ではなく、ステンレス鋼鋳鋼の大部分を占めるオーステナイト相を含む評価であるため、熱時効により機械特性の変化がないとされるオーステナイト相についてもフェライト相との差を把握しておくことが望ましいと考えられる。本研究では、フェライト相及びオーステナイト相単体の硬さデータを取得するために、ID-1～ID-6のM2の6試験片を対象として、室温にてナノインデントー硬さ試験を実施した。

1) 試験方法

試験はフェライト相割合観察用に仕上げた試験片表面を対象として実施した。試験には、ナノインデントーENT-NEXUS (Elionix 製) を用い、試験片ごとにフェライト相、オーステナイト相を区別せず 10 点×10 点の計 100 点の試験を、比較的フェライト相が多く分布する 7 箇所を実施し、合計 700 点の試験を実施した。圧子はバーコピッチ型 (三角錐) を用い、押し込み荷重を 1 gf (9.8 mN)、荷重負荷時間と荷重除去時間を各 10 秒、荷重保持時間を 1 秒として、押し込み荷重-変異曲線を得た。本研究では硬さの定義がビッカース硬さ (HV) に近い「インデンテーション硬さ (H_{IT})」を求めた。 H_{IT} の算出は ISO14577-1^[3.4.2(4)-1]に準拠し、圧子の先端形状の補正には田中の補正式^[3.4.2(4)-2]を適用した。フェライト及びオーステナイト相境界に近い位置で得られたデータは、相境界から十分離れた位置で取得されたデータと比較して高い値を示したことから、ここでは相境界から圧痕サイズの 2 倍以上の距離を有する点のみを有効データ点とした。さらに、ボイド付近で得られたデータや、押し込み荷重・変異曲線に異常があるデータを除いた点から平均値を求め、その値を本研究におけるフェライト相及びオーステナイト相単体の硬さとして定義した。また、得られたナノインデンテーション硬さ硬さ H_{IT} について、硬さ基準片 HN-W (山本科学工具研究社製) の測定結果を用いた HV への換算も実施した。

2) 試験結果

10×10 点の試験を行った後の試験片表面の一例を図 3.4.2(4)-1 に示す。圧痕サイズを比較すると、フェライト相での試験位置の方が小さく、フェライト相の硬さの方がオーステナイト相よりも明確に硬い値となっていることがわかる。前述のように、相境界から圧痕サイズ 2 つ以内の位置の結果については高めの値となり、单相の数値を代表していないと考えられることから評価点からは除いた。その結果、合計試験点数は表 3.4.2(4)-1 に示す点数となった。フェライト相は前述のように面積率が平均 16 %程度であることから、試験点数としてはオーステナイト相の方が多い結果となった。

試験により得られたフェライト相の結果を図 3.4.2(4)-2 に、ビッカース硬さに換算した結果を図 3.4.2(4)-3 にそれぞれ示す。図中のエラーバーは標準偏差を示している。ID-1-M2 に関しては標準偏差を考慮しても他の試験片よりも低い値となり、ビッカース換算値では約 350 HV となった。ID-2～ID-5 はビッカース硬さ換算値で約 400 HV、ID-6 で約 380 HV であった。

試験により得られたオーステナイト相の結果を図 3.4.2(4)-4 に、ビッカース硬さに換算した結果を図 3.4.2(4)-5 にそれぞれ示す。図中のエラーバーは標準偏差を示している。オーステナイト相に関しては標準偏差を考慮しても試験片間の差異は認められず、ビッカース硬さで 182～196 HV であった。

本試験により得られたフェライト相硬さが熱時効により硬化しているかどうかを検討するため、既存知見との比較を実施する。図 3.4.2(4)-6 に本試験と同条件で実施された CF3M の種々の加速熱時効材で取得されたデータ^[3.4.2(4)-3]と、本研究で取得した値を併せて示す。なお、本材の熱時効時間はプラントの運転時間に合わせ、144569h とした。本研究で試験したポンプケーシング材の初期硬さは不明ながら、既存知見の未時効材 4 種の硬さと比較した場合、若干ながら高い値を示している。これらの値は図中の CF3M-H 材の 350℃×500 h 条件、300℃×15000 h 条件、CF3M-D 材の 320℃×6000 h 条件と同程度の値である。以上の結果から、あくまで推定ではあるものの、本研究で評価した実機材には、熱時効による硬

化が生じているものと考えられる。ただし、得られた硬さは既存知見の加速熱時効材において、硬化が認められ始める熱時効条件と同程度であるため、硬化の程度に関しては比較的小さなものであると考えられる。

オーステナイト相の硬さについては、既存知見で報告されている 4 種の CF-3M 材の硬さの範囲が 2349~2624 MPa であり、本研究で取得された値と同等である。このことから、本ポンプケーシング材についても、オーステナイト相に関しては熱時効による硬化は生じていないと考えられる。

<参考文献>

- [3.4.2(4)-1] ISO14577-1, Metallic Materials –Instrumented Indentation Test for Hardness and Materials Parameters – Part 1: Test Method, 2002.
- [3.4.2(4)-2] T. Sawa and K. Tanaka. Simplified method for analyzing nanoindentation data and evaluation performance of nanoindentation instruments. Journal of Materials Research., Vol. 16, p. 3084-3096, 2002.
- [3.4.2(4)-3] Y. Miura, T. Sawabe, K. Betsuyaku, and T. Arai, Thermal Aging Behavior of Grade CF3M Cast Austenitic Stainless Steels, ASME PVP2017-65959, 2017.

表 3.4.2(4)-1 ナノインデント硬度試験の有効試験点数

ID	ID-1-M2	ID-2-M2	ID-3-M2	ID-4-M2	ID-5-M2	ID-6-M2
フェライト相	108	56	101	114	78	78
オーステナイト相	334	310	299	288	302	369

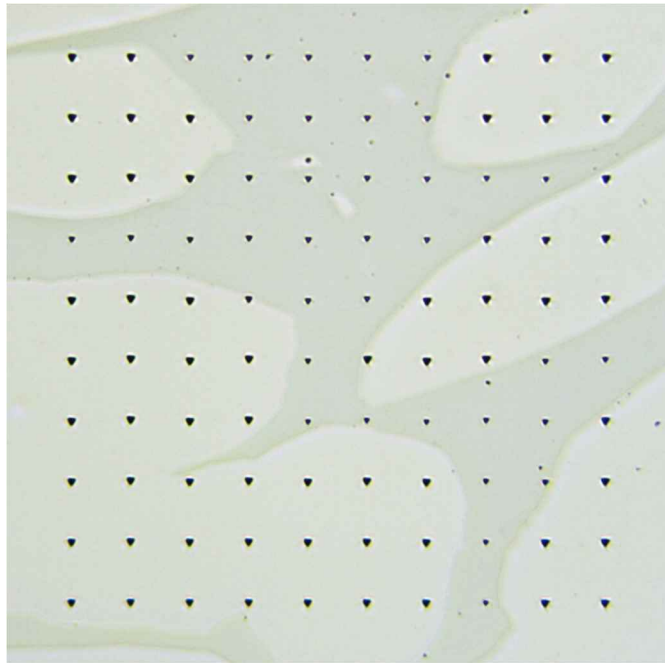


図 3.4.2(4)-1 ナノインデントー硬度試験後の試験面 (ID-1-M2)

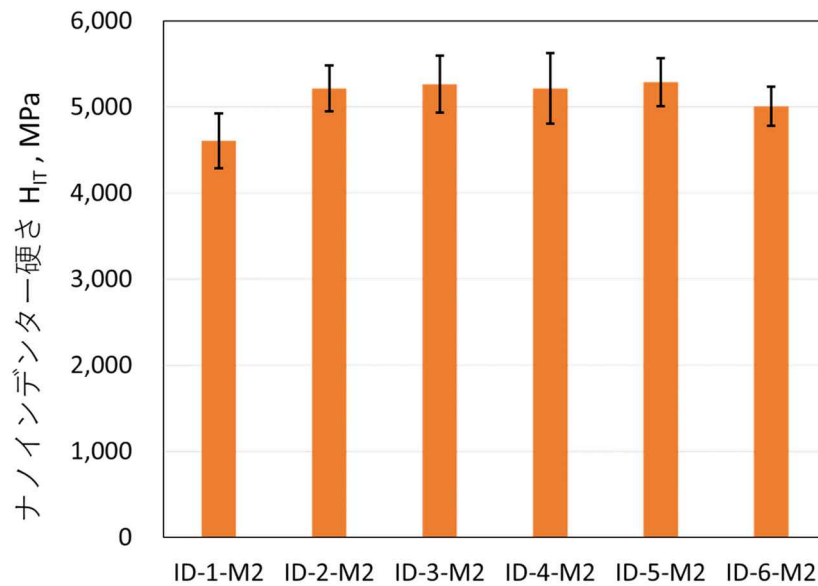


図 3.4.2(4)-2 フェライト相のナノインデントー硬度

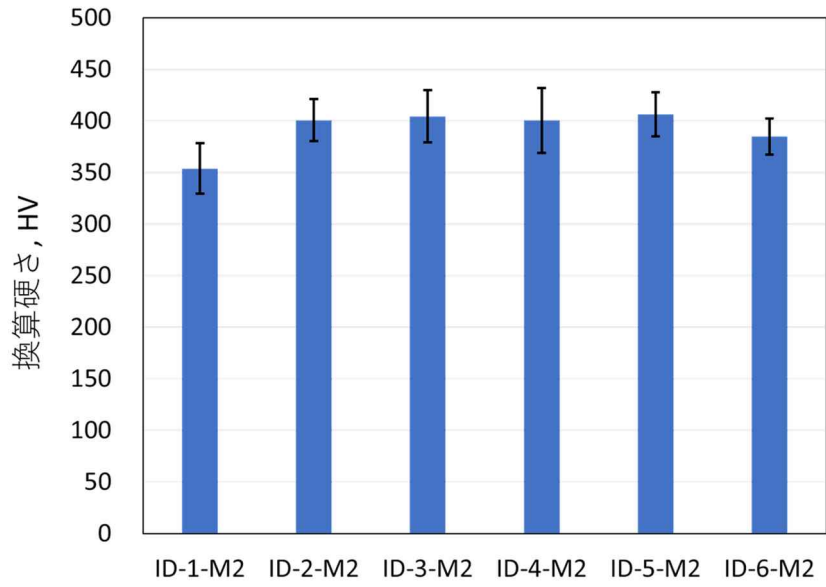


図 3. 4. 2 (4) -3 フェライト相のナノインデント硬度 (HV 換算値)

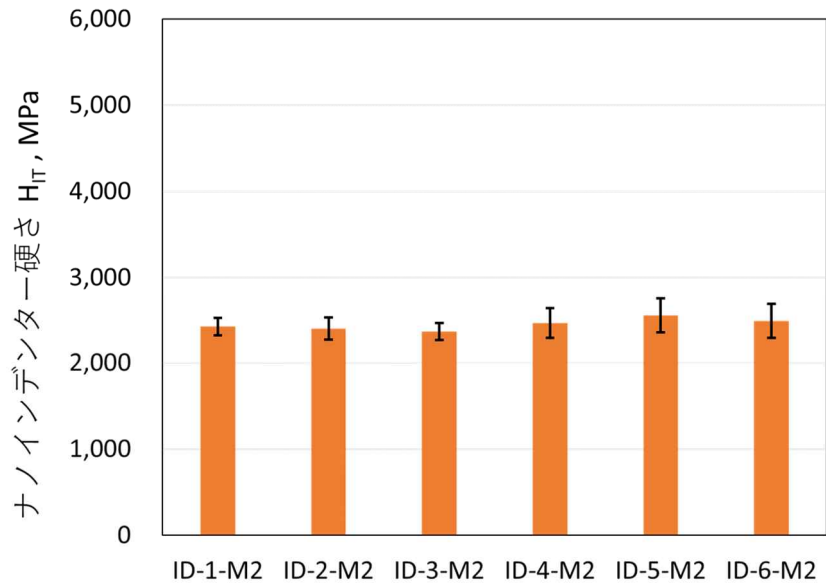


図 3. 4. 2 (4) -4 オーステナイト相のナノインデント硬度

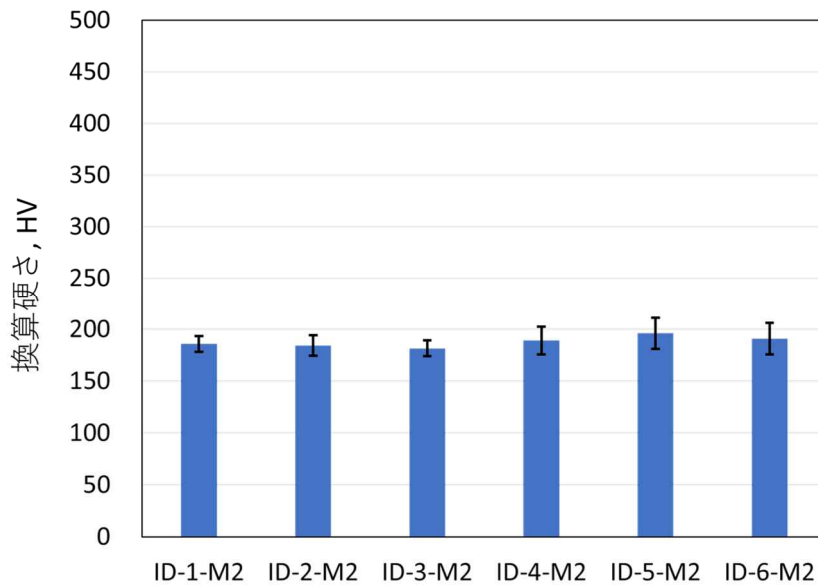


図 3.4.2(4)-5 オーステナイト相のナノインデンター硬さ (HV 換算値)

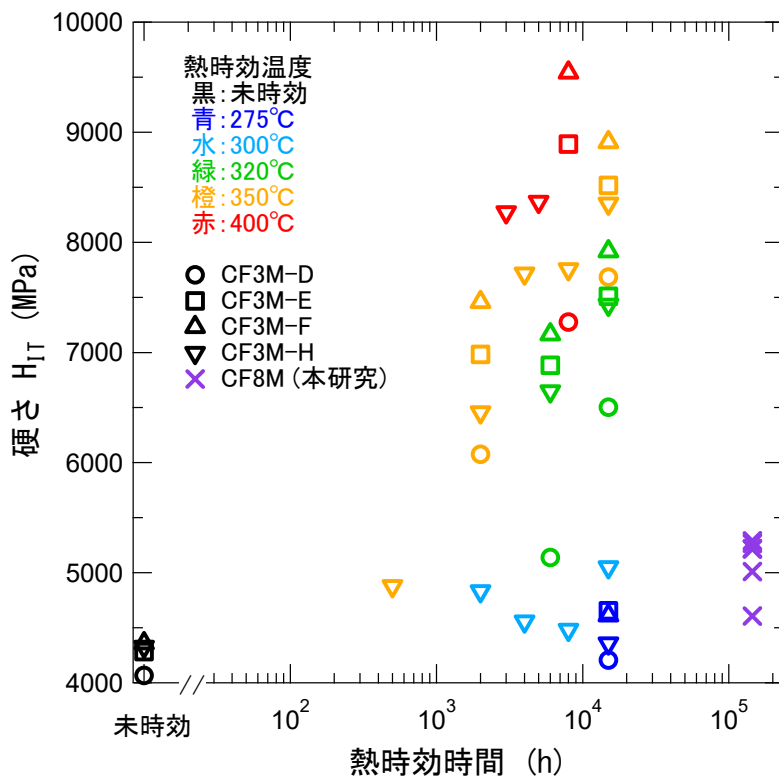


図 3.4.2(4)-6 既存知見^[3.4.2(4)-3]と本材におけるナノインデンター硬さの比較 (参考文献[3.4.2(4)-3]の図からデータを引用し作図)

(5) ビッカース硬さ試験

ステンレス鋼の熱時効による脆化は前述のようにフェライト相のミクロ組織の変化によるフェライト相の硬化によって生じるため、フェライト相割合が大きいほど影響を受ける。一方でオーステナイト相についてはナノインデント硬さ試験の結果として得られたように、熱時効による硬化はほとんど認められない。したがって、フェライト相が硬化した場合でも、その割合と熱時効の進行の程度次第では、材料全体としての特性が熱時効によって変化するかどうかは明確ではない。ここでは引張特性や弾塑性破壊靱性同様、本材のマクロ特性を把握するために、ビッカース硬さ試験を実施した。

1) 試験方法

ビッカース硬さ試験はナノインデント試験を実施した試験片（各 ID の M2）6 種を対象に実施した。ビッカース試験における試験荷重は 10 kgf とし、JIS Z2244 に準拠して実施した。ビッカース試験の試験荷重はナノインデント硬さ試験の 10000 倍であり、圧痕サイズを考慮すると、ナノインデント硬さ試験による硬さ試験結果への影響は無視できる程度と考えられることから、追加の研磨等は実施せず、ナノインデント硬さ試験実施後の表面状態のまま本試験を実施した。試験装置にはビッカース硬さ試験機 AAV-503（Mitutoyo 製）を用いた。各試験片への試験回数は 15 回とし、その平均値を対象試験片の硬さと定義した。試験は JIS Z2244^[3.4.2(5)-1]に規定される圧痕間隔を満足しつつ、上記でフェライト相割合の評価を実施した視野内で 1 点以上の試験を実施できるような位置において実施した。試験片における試験位置の目安を図 3.4.2(5)-1 に示す。本図中に赤い印で示す位置を目安にしつつ、当該位置にボイドや傷などが存在する場合はそれを避ける形で試験を実施した。

2) 試験結果

試験後の試験片の写真を図 3.4.2(5)-2 に示す。いずれの試験片についても、予定した位置からズレのある位置で試験を実施した。なお、試験片 ID-2-M2 については、1 箇所の試験位置において想定より圧痕サイズが大きくなり、JIS に定める圧痕間隔を満足しなかったため、当該点のデータは棄却し、測定点を 1 点追加して 15 点のデータを取得した。

表 3.4.2(5)-1 に試験結果の一覧を示す。平均硬さの範囲は 164~173 で

あった。ステンレス鋼データブック[3.4.2(5)-2]に示される未時効（铸造まま）状態での CF8M のブリネル硬さをビッカース硬さに変換した値は 164～179 であり、本試験で得られた数値はこれに近い値となっている。したがって、本材の初期の硬さは不明ながら、実機運転条件において、試験荷重 10kgf でのビッカース硬さ試験により判別できるような顕著な硬化が生じている可能性は低いと考えられる。なお、ID-1-M2 については 1 点において 108、ID-2-M2 については 123 という非常に小さな数値を示した点が存在した。これらの試験中の装置の挙動や、前後で実施した標準片の試験結果に異常がなかったことから、これらの試験は正常に実施できていると判断される。このような小さな硬さとなった理由としては、表層部を除く評価体積内に、比較的多くのポイドが含まれていたことなどが考えられる。

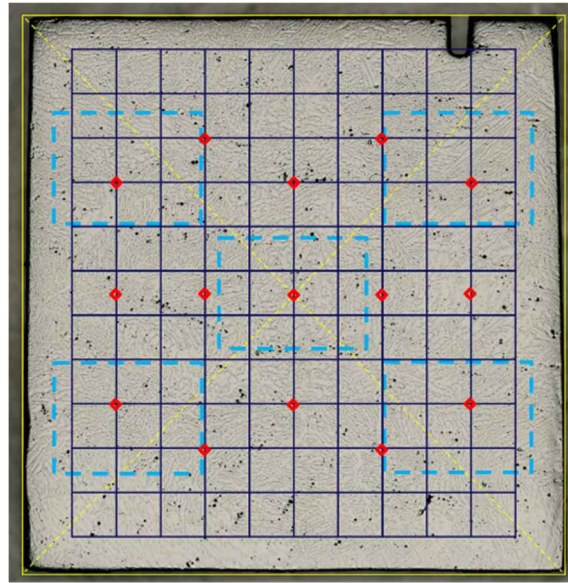
組織観察において、各 ID でフェライト相割合にはある程度の差異があったものの、本試験において明確なフェライト相割合と硬さの相関関係は認められなかった。本試験で得られた硬さはナノインデント硬さ試験におけるオーステナイト相単体の硬さよりも小さな値となったが、これは圧子形状及び試験荷重の影響によるものと考えられる。

<参考文献>

- [3.4.2(5)-1] ビッカース硬さ試験—第 1 部：試験方法, JIS Z 2244-1, 日本産業規格, 2020.
- [3.4.2(5)-2] ステンレス鋼データブック, ステンレス協会編, 2000.

表 3.4.2(5)-1 ビッカース硬さ一覧

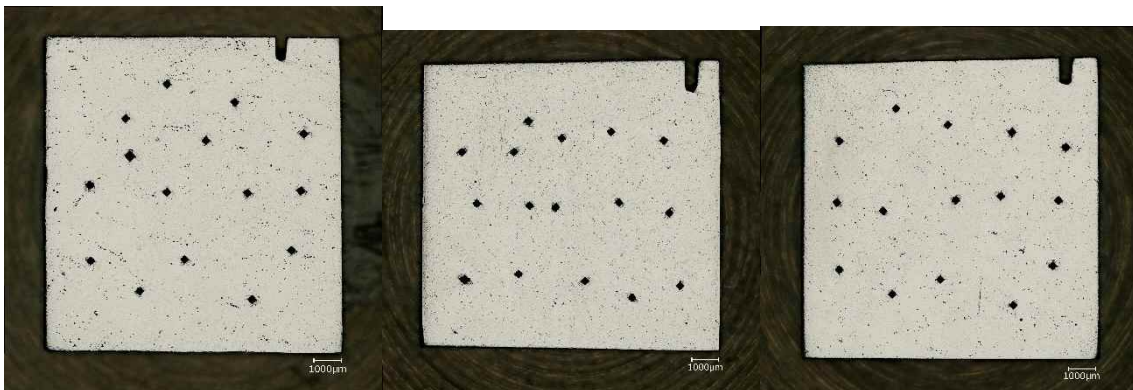
試験片ID	試験片硬さ [HV]															平均硬さ [HV]	標準偏差	最小値 [HV]	最大値 [HV]
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15				
ID-1-M2	179	171	172	175	170	167	163	164	156	178	108	170	158	170	163	164.3	16.9	108	179
ID-2-M2	123	169	173	174	174	170	175	165	164	178	170	166	175	178	178	168.8	13.5	123	178
ID-3-M2	167	172	173	174	172	173	173	170	157	175	174	182	178	180	165	172.3	6.1	157	182
ID-4-M2	178	166	179	171	179	172	174	162	174	172	176	174	176	173	175	173.4	4.6	162	179
ID-5-M2	163	171	171	170	171	176	169	175	172	173	163	175	176	174	168	171.1	4.1	163	176
ID-6-M2	166	162	165	164	166	160	169	165	161	172	174	174	174	171	171	167.6	4.9	160	174



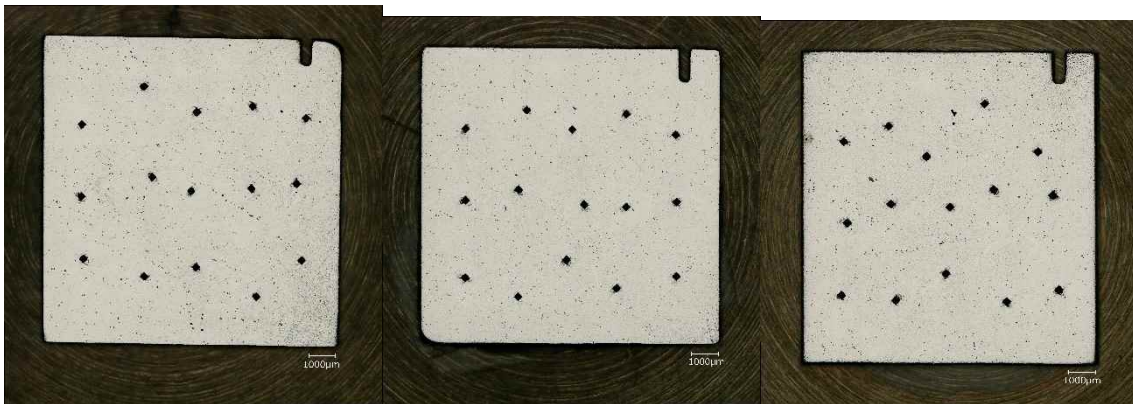
◆ 打痕位置目安

— フェライト面積率測定位置

図 3.4.2(5)-1 ビッカース硬さ試験実施の目安位置



(左: ID-1-M2 中: ID-2-M2 右: ID-3-M2)



(左: ID-4-M2 中: ID-5-M2 右: ID-6-M2)

図 3.4.2(5)-2 ビッカース硬さ試験後の試験片

(6) アトムプローブトモグラフィー (APT)

ステンレス鋼の熱時効による脆化はフェライト相内のマイクロ組織変化によるものとされており、相分離及び Ni、Si、Mn を主要元素とする G 相と呼ばれる析出物とその主要因とされている^[3.4.2(6)-1]。前述のナノインデント硬度試験において評価対象であるポンプケーシング材に若干の硬化傾向と見られる挙動が認められたことから、フェライト相のマイクロ組織には何らかの変化が生じている可能性がある。ここでは ID-1~6 の M1 の 6 試験片を対象として APT を実施し、フェライト相のマイクロ組織の把握を試みる。

1) 試験方法

集束イオンビーム (FIB) 装置 NX2000 (日立ハイテク製) を用い、上記の 6 試験片のフェライト相から APT 用試料を採取し加工した。APT には局所電極型アトムプローブ LEAP5000XR (CAMECA 製) を用いた。データ取得時の試料温度は 50 K とし、パルスフラクションが 15 % の電圧パルスで周波数 200 kHz で試料に印加した。熱時効によるフェライト相の相分離を定量的に評価するため、相分離の指標の一つである Variation^[3.4.2(6)-2]を用いた。フェライト相に Cr 原子がランダムに固溶する場合を仮定すると、局所 Cr 濃度の相対度数分布は二項分布に従う。一方、相分離により Cr 原子の濃化領域と希薄領域が生じると、高濃度と低濃度の相対度数が増加する。Variation は二項分布と実際の相対度数分布との差の絶対値の和として、次式で定義される値である。

$$\text{Variation} \equiv \sum_i |O(i) - B(i)|$$

ここで、 i は Cr 濃度、 $O(i)$ は時効後の Cr 濃度の相対度数分布、 $B(i)$ は二項分布である。本研究では、三次元アトムマップを 100 個ずつの原子を有するブロックに分割し、各ブロックの局所 Cr 濃度を計算して相対度数分布を求めた。

APT で検出された G 相の定義と解析は以下の手順にて実施した。なお、これらは Hamaoka ら^[3.4.2(6)-3]及び Miura ら^[3.4.2(6)-4]が採用した条件と同一である。

- ① 互いの距離が 0.55 nm 以下である Si 原子と Mn 原子を一つの集まりとし、その合計が 4 個以上の場合をクラスター構成要素とする。
- ② これらの Si 原子と Mn 原子から 0.55 nm 以下にあるすべての元素の

原子を含めてクラスター候補とする。

- ③ クラスター候補に含まれるランダムに分布した原子の集まりを除外するため、Si 原子と Mn 原子の合計が 25 個以上のものを熱時効により生じたクラスターと見なす (Si 原子と Mn 原子の合計が 25 個未満のものを除外する)。
- ④ クラスターにはフェライト相の相分離により生じた Cr 高濃度領域も抽出される可能性がある。Ni は G 相で濃化するが Cr 高濃度領域で希薄化するため、Ni 濃度が 15 at.%以上のクラスターを G 相析出物と見なす。

以上の手順により抽出した G 相析出物から、主にその数密度、大きさ (ギニエ直径) を求めた。APT は各試験片から採取した試料の測定が 3 回成功するまで実施し、かつ計 3 回の合計の解析イオン数が 4000 万個を超えることを条件として実施した。なお、局所的な Cr 濃度は試験片毎及び各測定で異なることから、Variation については 3 試料の各測定イオン数によって重みをつけた平均値で評価した。G 相の数密度については、3 試料中で識別された G 相の合計数を、3 試料の合計測定体積で除することによって求めた。

2) 試験結果

測定によって得られた ID-1-M1～ID-6-M1 のアトムマップを図 3.4.2(6)-1 から図 3.4.2(6)-6 にそれぞれ示す。ここでは主要元素として検出された Cr、Mn、Ni、Si、Fe、Mo に加え、C と P も併せて示す。P は、G 相のサイズが大きくなった場合に、G 相内で検出される元素であり、Mo も同様の傾向が見られる。なお、Fe、Cr、Ni は元素の存在比が大きいことから、ここではそれぞれ解析イオンの総数の 5%、5%、30%の原子を表示した。前述した Variation に関連する元素は Cr、G 相に関連する元素は主として Mn、Ni、Si であり、熱時効による変化が生じると、Cr については濃化領域と希薄領域に分離する挙動が観察され、Mn、Ni、Si は明確なクラスタリングが観察されるようになる^[3.4.2(6)-3]。これらの挙動が見やすい形となるように、図 3.4.2(6)-7 から図 3.4.2(6)-12 に、図 3.4.2(6)-1 から図 3.4.2(6)-6 に示した Cr、Mn、Ni、Si のアトムマップに関し、図の X 方向の中央 5 nm のみの領域を抽出し、グレースケールにて

表示した図をそれぞれ示す。ID-1-M1～ID-6-M1 から採取された全 18 試料のアトムマップからは、Cr が濃淡領域に分離するような様子や、Mn、Ni、Si が明確にクラスタリングするような様子は観察されず、目に見えるような明確な特徴は認められない。また、その他の元素についても、特筆すべき特徴は見られなかった。

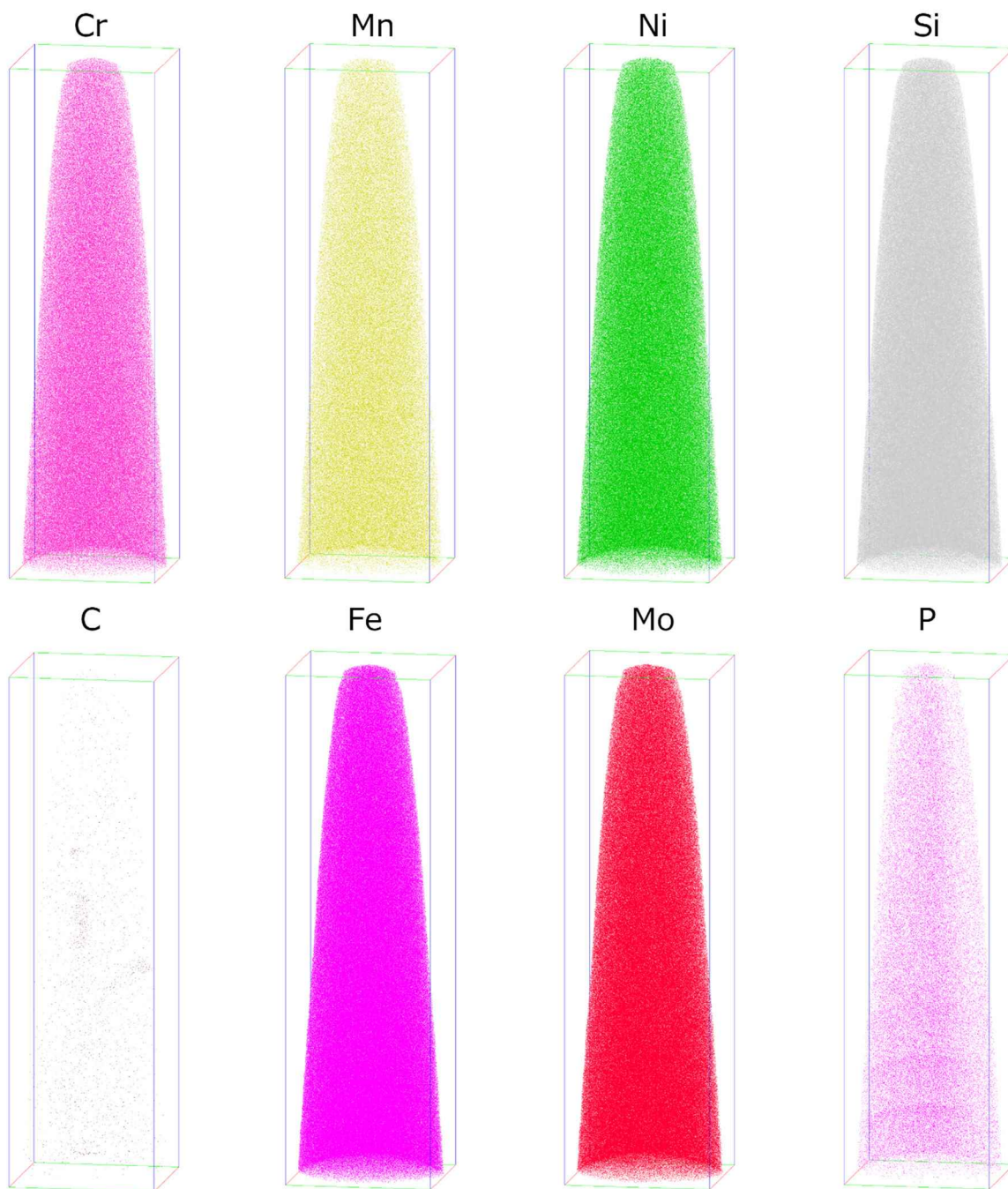
これらの Cr のマップデータから算出された Variation の値を、Miura ら^[3.4.2(6)-4]によって報告された 2 種類の CF3M の加速熱時効材から取得されたデータと併せて図 3.4.2(6)-13 に示す。6 試料から算出された Variation の値はいずれも 0.2 程度であり、これは図中の 2 種の CF3M における 350°C×500 h、及び 300°C×8000 h 条件に近い値である。図中の 2 種の CF3M は、未時効状態での Variation が 0.13 から 0.16 程度であり、仮に本研究で評価した CF8M ポンプケーシング材の初期値もこれらと同程度であると仮定すると、ごくわずかながら Variation の値が増加している状態である。従って、評価対象のポンプケーシング材は、若干ながら熱時効によって相分離が進行した状態となっている可能性がある。

前述の定義に従って求めた G 相の数密度を図 3.4.2(6)-14 に、ギニエ直径を図 3.4.2(6)-15 にそれぞれ示す。本研究で対象とした 6 試験片から採取したすべての試験片において、数は異なるものの、G 相が検出された。本研究で定義した G 相は、未時効材においては検出されていない^[3.4.2(6)-4]ことから、これらは実機運転中に生じたものであると推定される。本研究にて検出された G 相の数密度を CF3M の加速熱時効材と比較すると、G 相析出物が検出され始める熱時効条件（例えば、CF3M-H 材の 350°C×1000 h 条件など）と同程度であり、数密度自体は大きくないことが分かる。一方で、Ni 濃度が 15 at.%に迫るものの、本研究の定義からは除外された、G 相の前駆体と見なせるようなものが複数個確認された。これらはより長時間の熱時効により Ni 濃度が 15 at.%を上回ると予想される。また、G 相のギニエ直径についても、既存知見において 350°C以下の熱時効条件で検出され始めるサイズである 2 nm 程度であった。G 相のサイズと数密度がフェライト相の硬化やステンレス鋼鑄鋼の脆化に及ぼす影響については明らかになっていないものの、ポンプケーシング材でこれらが検出されたことから、BWR 運転温度においても、熱時効が進行

することが示唆される。

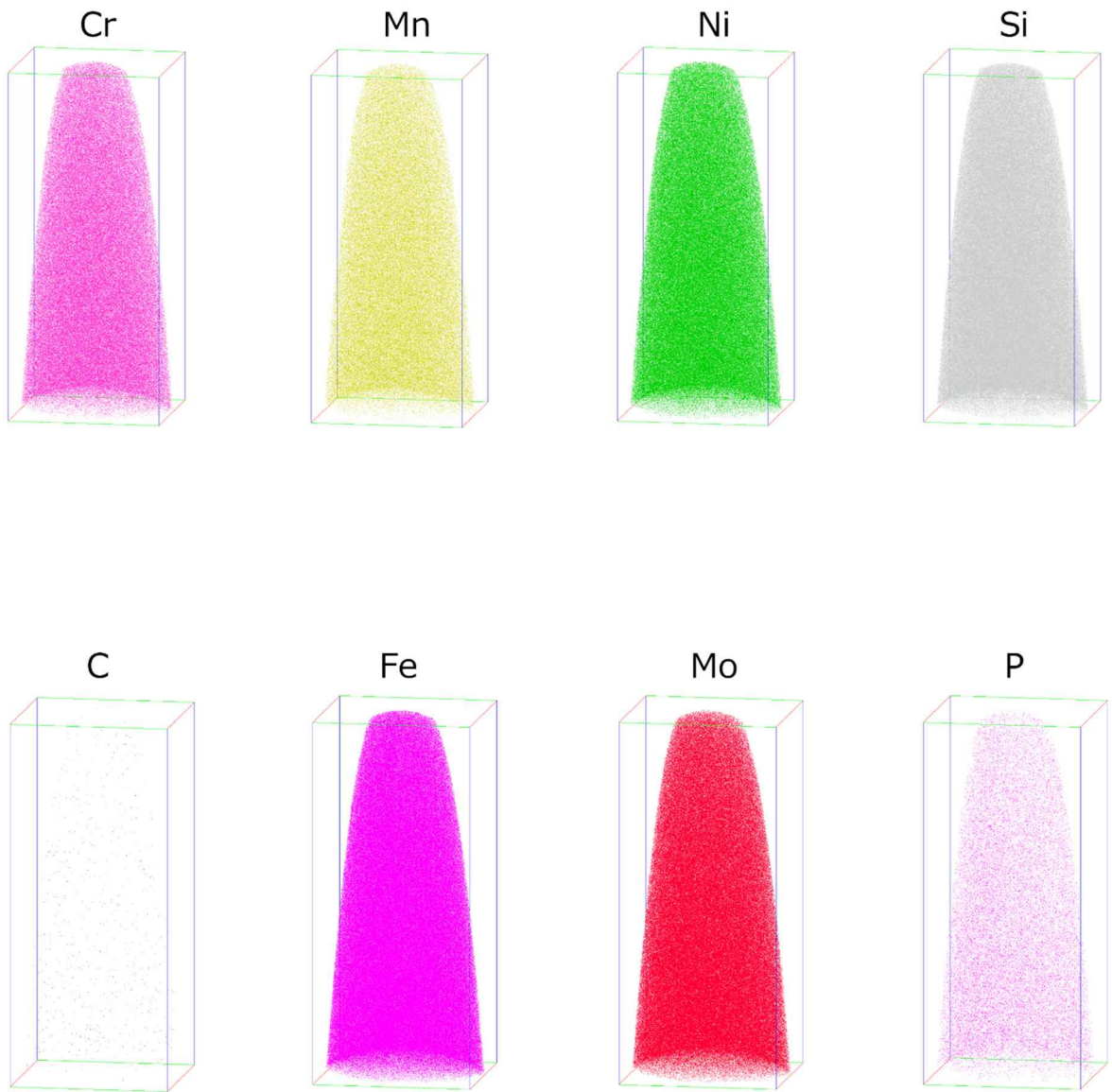
<参考文献>

- [3.4.2(6)-1] 桑野寿. 2相ステンレス鋼の時効脆化と寿命予測. まてりあ. vol. 35, 7, p. 747 - 752, 1996.
- [3.4.2(6)-2] F. Danoix and P. Auger, Atom Probe Studies of the Fe-Cr System and Stainless Steels Aged at Intermediate Temperature: A Review, Material Characterization, 2000, Vol. 44, Issues 1-2, p. 177-201.
- [3.4.2(6)-3] T. Hamaoka, A. Nomoto, K. Nishida, K. Dohi and N. Soneda, Effects of Aging Temperature on G-phase Precipitation and Ferrite-Phase Decomposition in Duplex Stainless Steel, Philosophical Magazine, 2012, Vol. 92, Issue 34, p. 4354-4375.
- [3.4.2(6)-4] Y. Miura, T. Sawabe, K. Betsuyaku, and T. Arai, Thermal Aging Behavior of Grade CF3M Cast Austenitic Stainless Steels, ASME PVP2017-65959, 2017.
- [3.4.2(6)-5] 三浦靖史, 新井拓, 低炭素ステンレス鋼溶接金属の熱時効に関する研究, 日本保全学会第 17 回学術講演会講演資料, 2021.



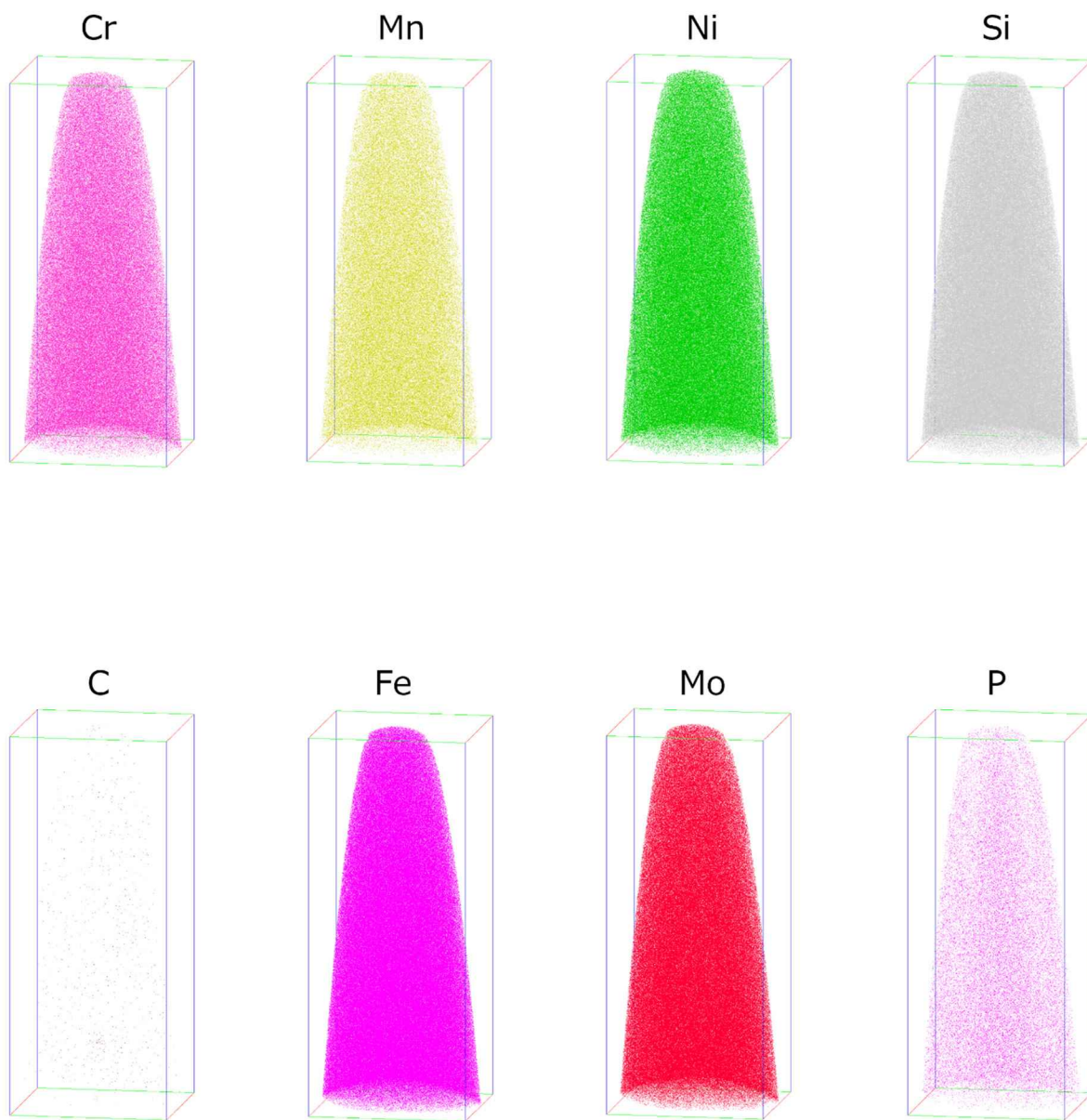
R5098_12124 ID-1-M1(84×86×300 nm³)

図 3.4.2(6)-1 ID-1-M1 のアトムマップ (1/3)



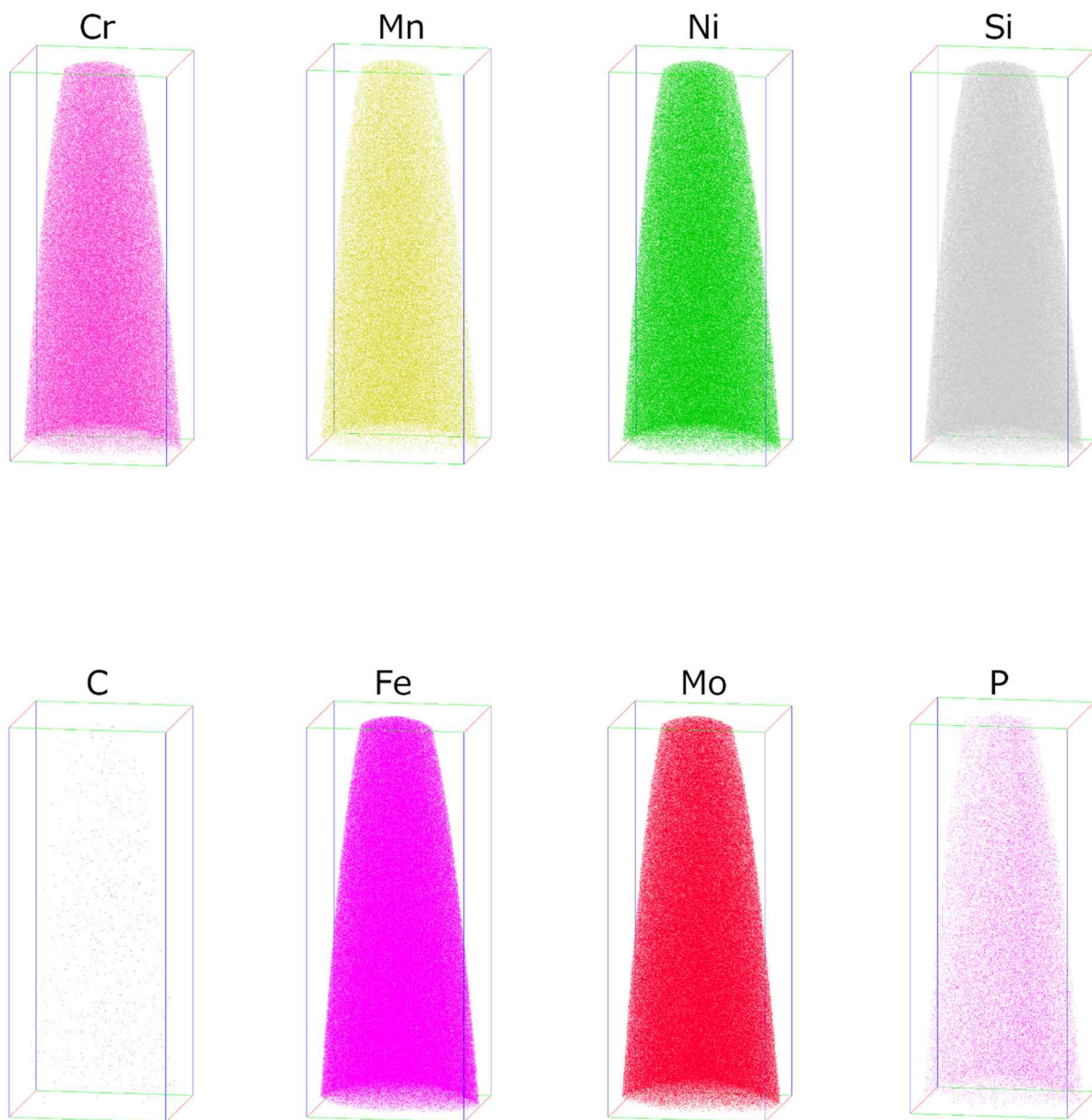
R5098_12134 ID-1-M1(80×81×190 nm³)

図 3.4.2(6)-1 ID-1-M1 のアトムマップ (2/3)



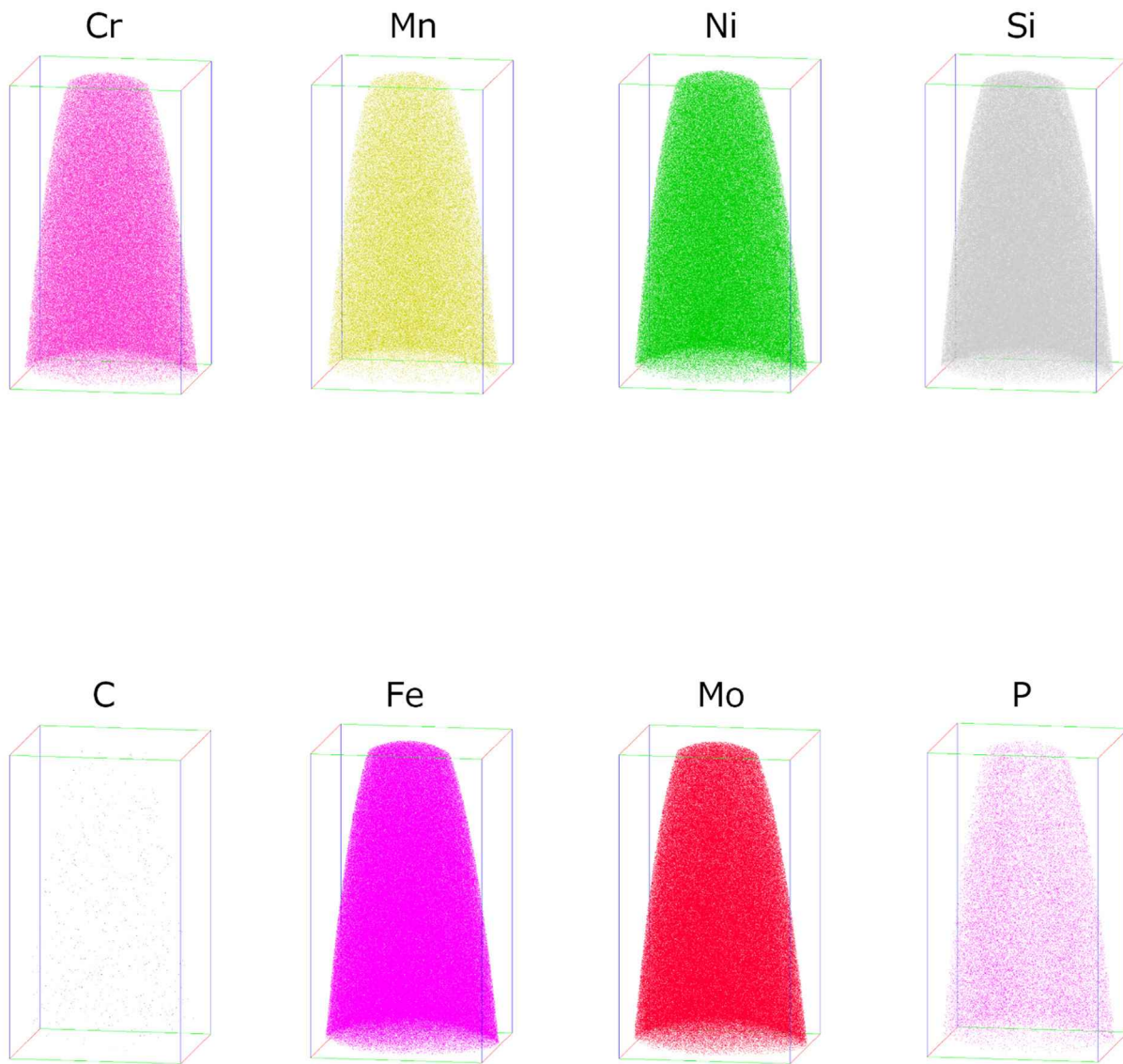
R5098_12136 ID-1-M1(83×83×200 nm³)

図 3.4.2(6)-1 ID-1-M1 のアトムマップ (3/3)



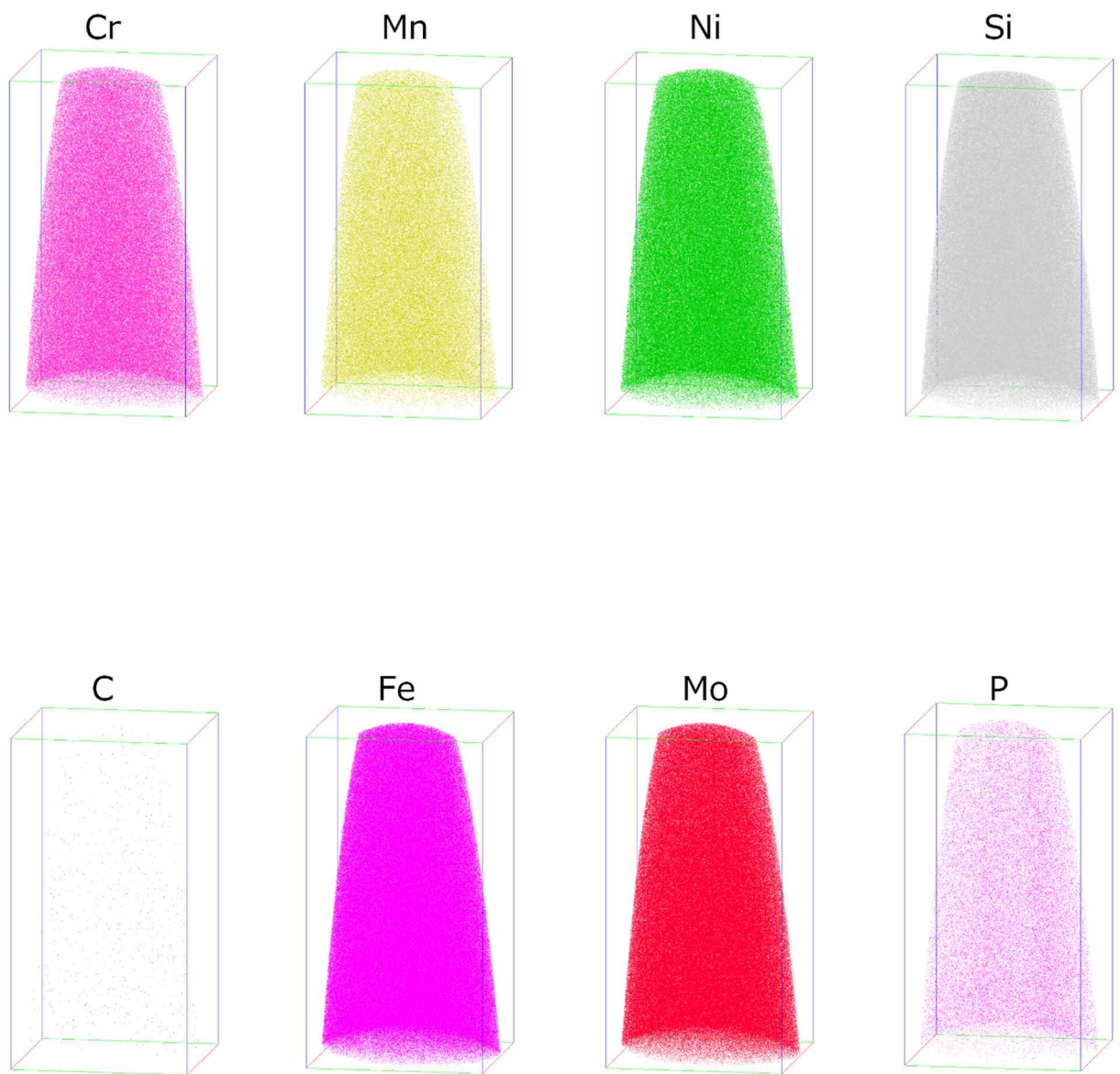
R5098_12164 ID-2-M1(80×82×200 nm³)

図 3.4.2(6)-2 ID-2-M1 のアトムマップ (1/3)



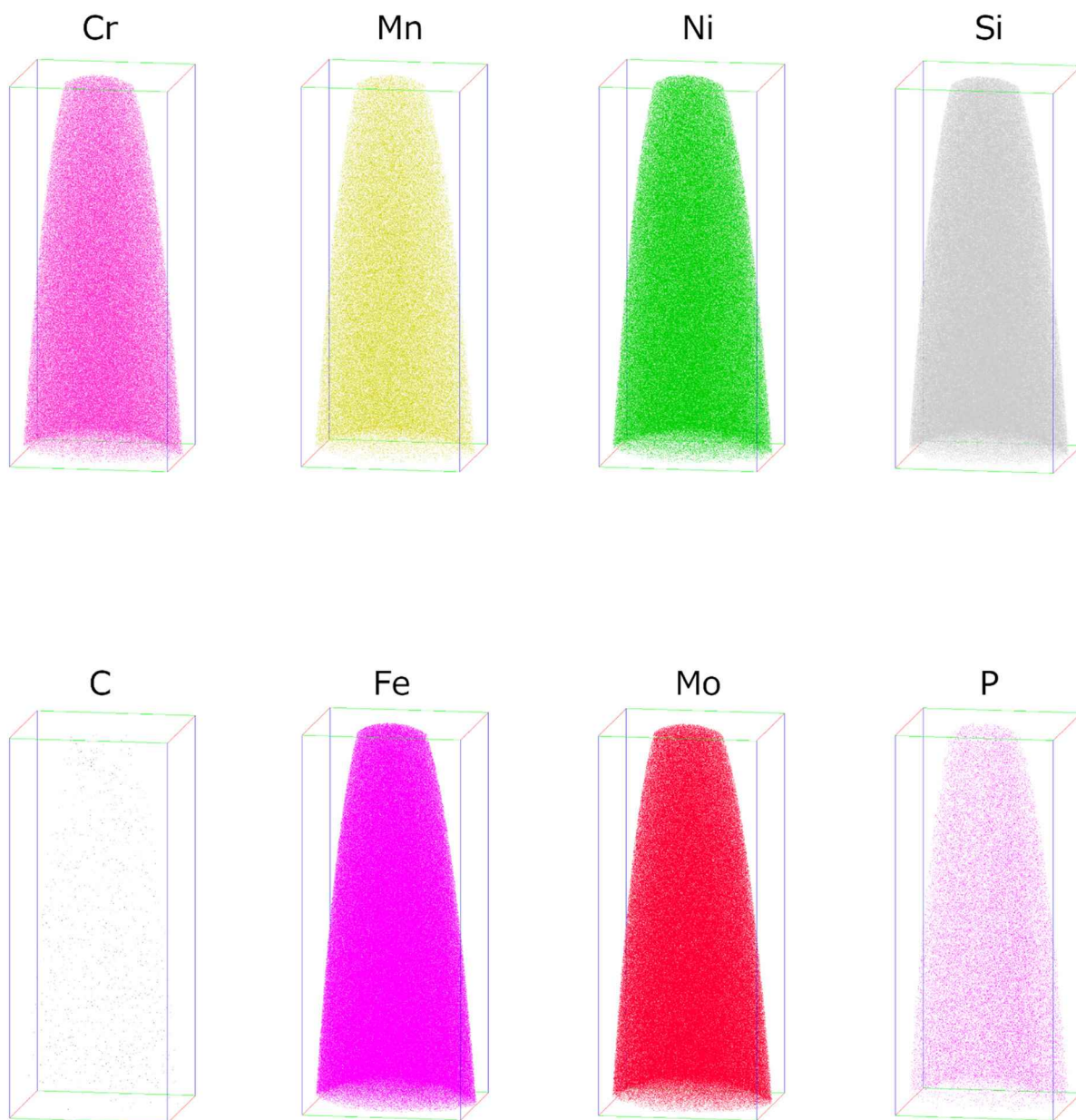
R5098_12165 ID-2-M1(89×88×160 nm³)

図 3.4.2(6)-2 ID-2-M1 のアトムマップ (2/3)



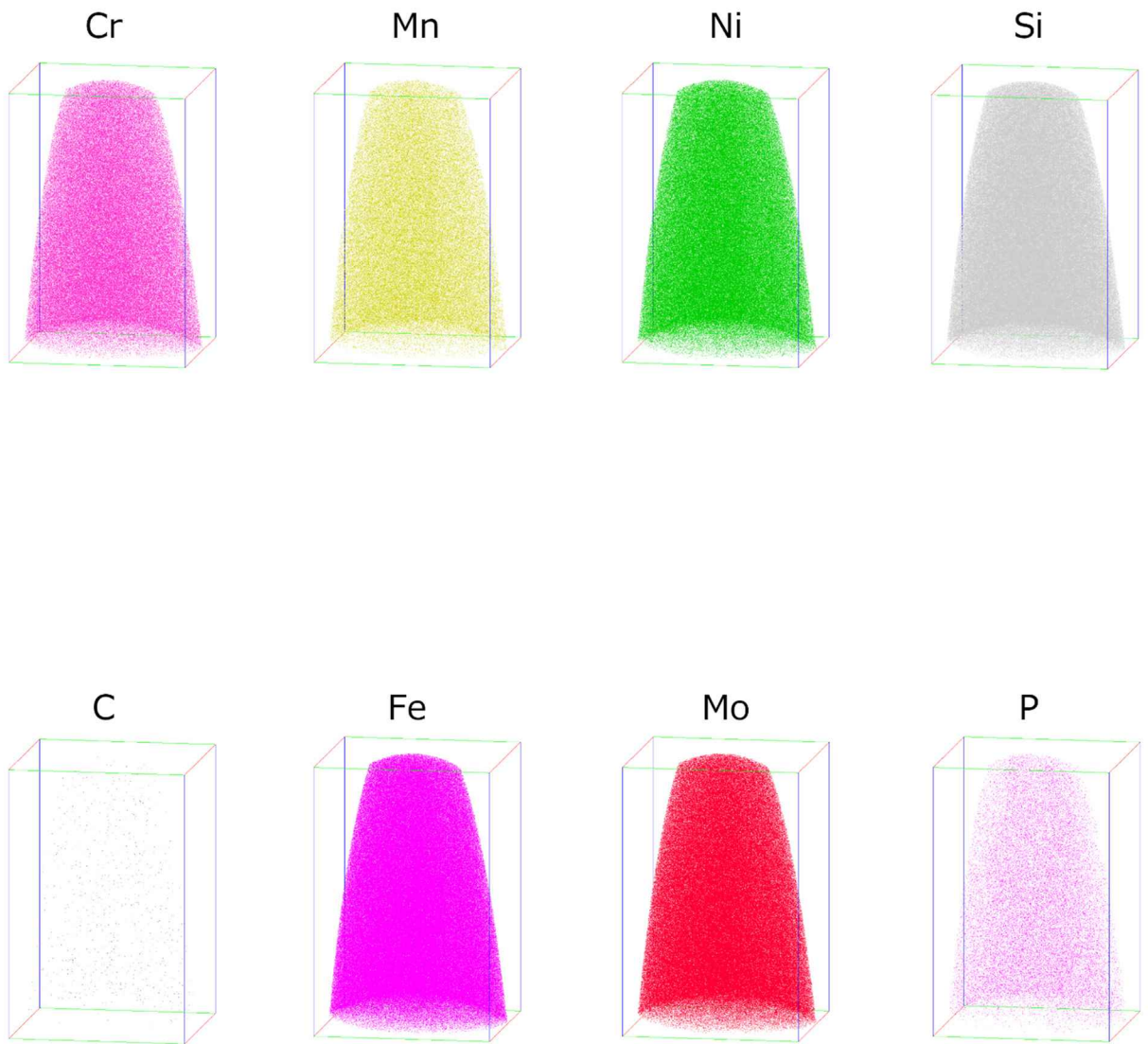
R5098_12169 ID-2-M1(94×93×170 nm³)

図 3.4.2(6)-2 ID-2-M1 のアトムマップ (3/3)



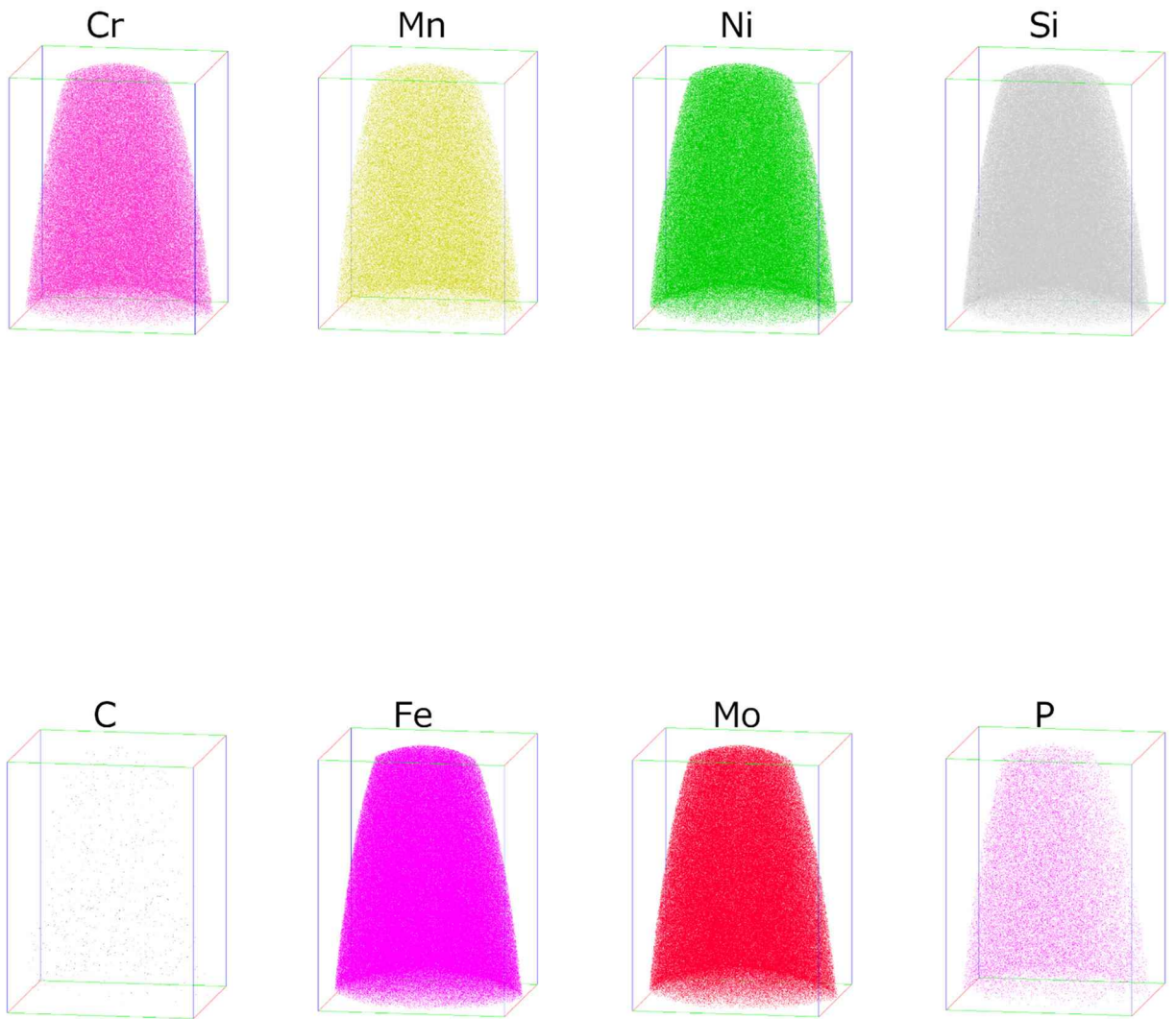
R5098_12166 ID-3-M1(84×84×200 nm³)

図 3.4.2(6)-3 ID-3-M1 のアトムマップ (1/3)



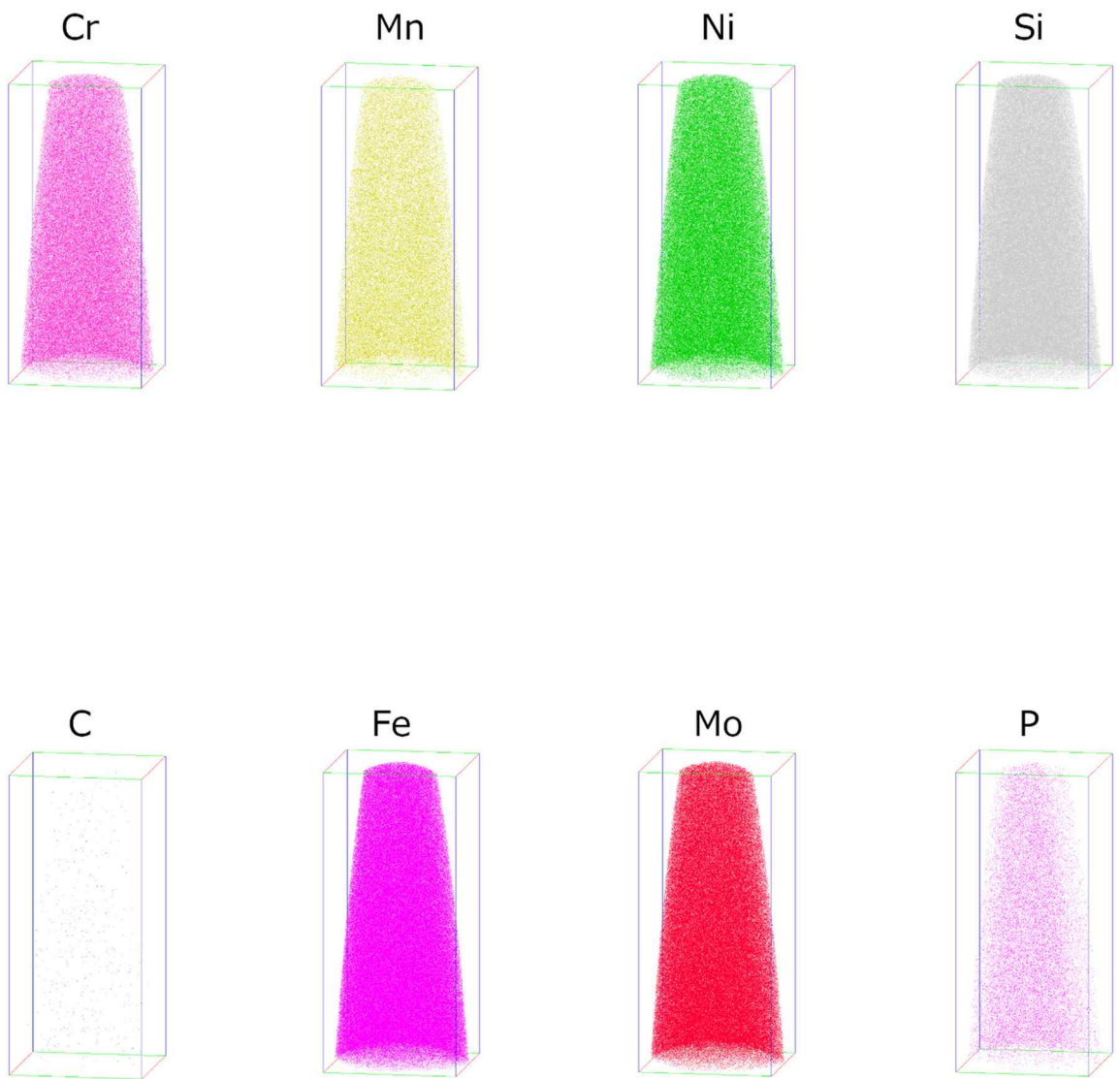
R5098_12167 ID-3-M1(90×90×140 nm³)

図 3.4.2(6)-3 ID-3-M1 のアトムマップ (2/3)



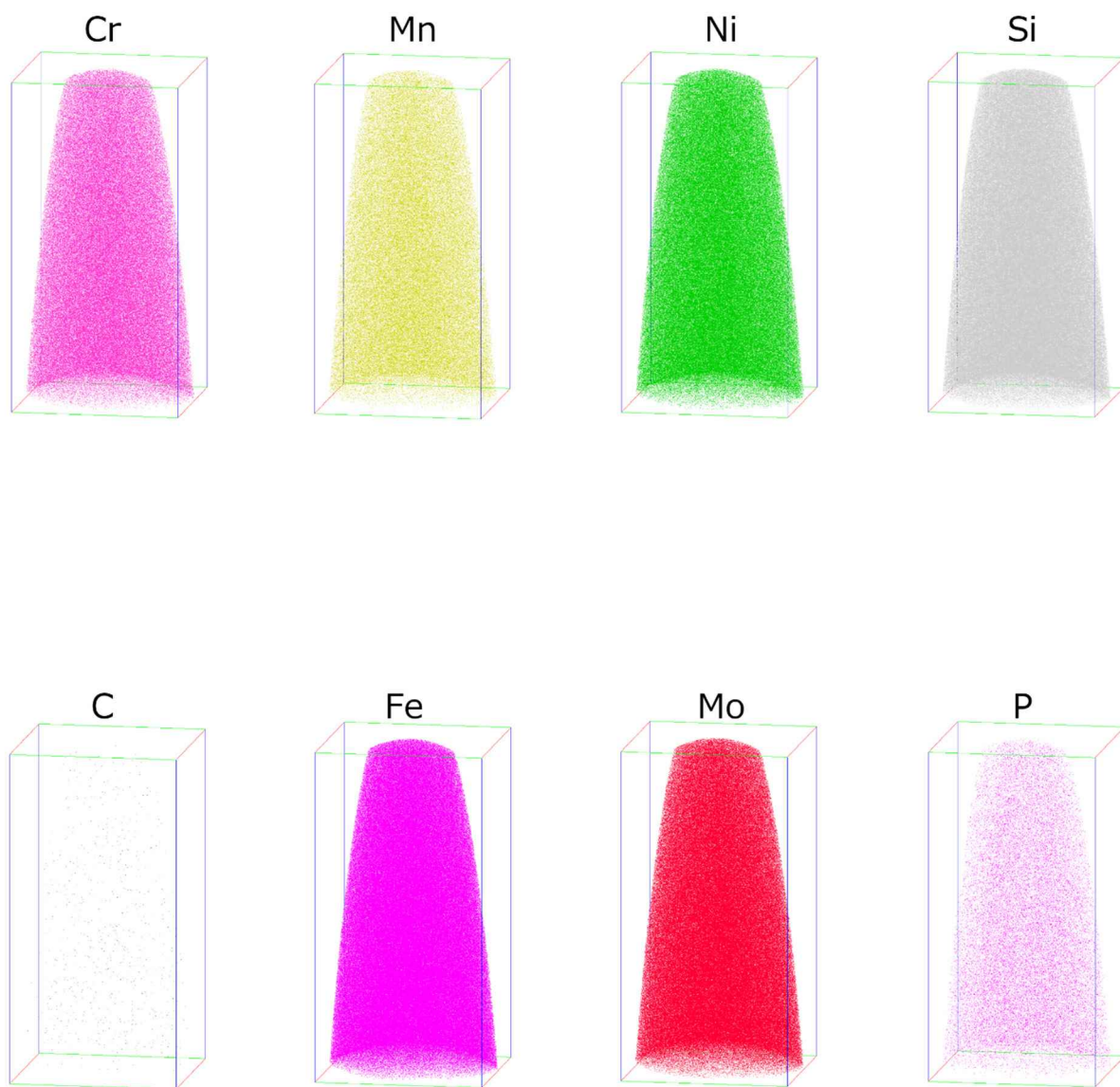
R5098_12168 ID-3-M1(94×94×130 nm³)

図 3.4.2(6)-3 ID-3-M1 のアトムマップ (3/3)



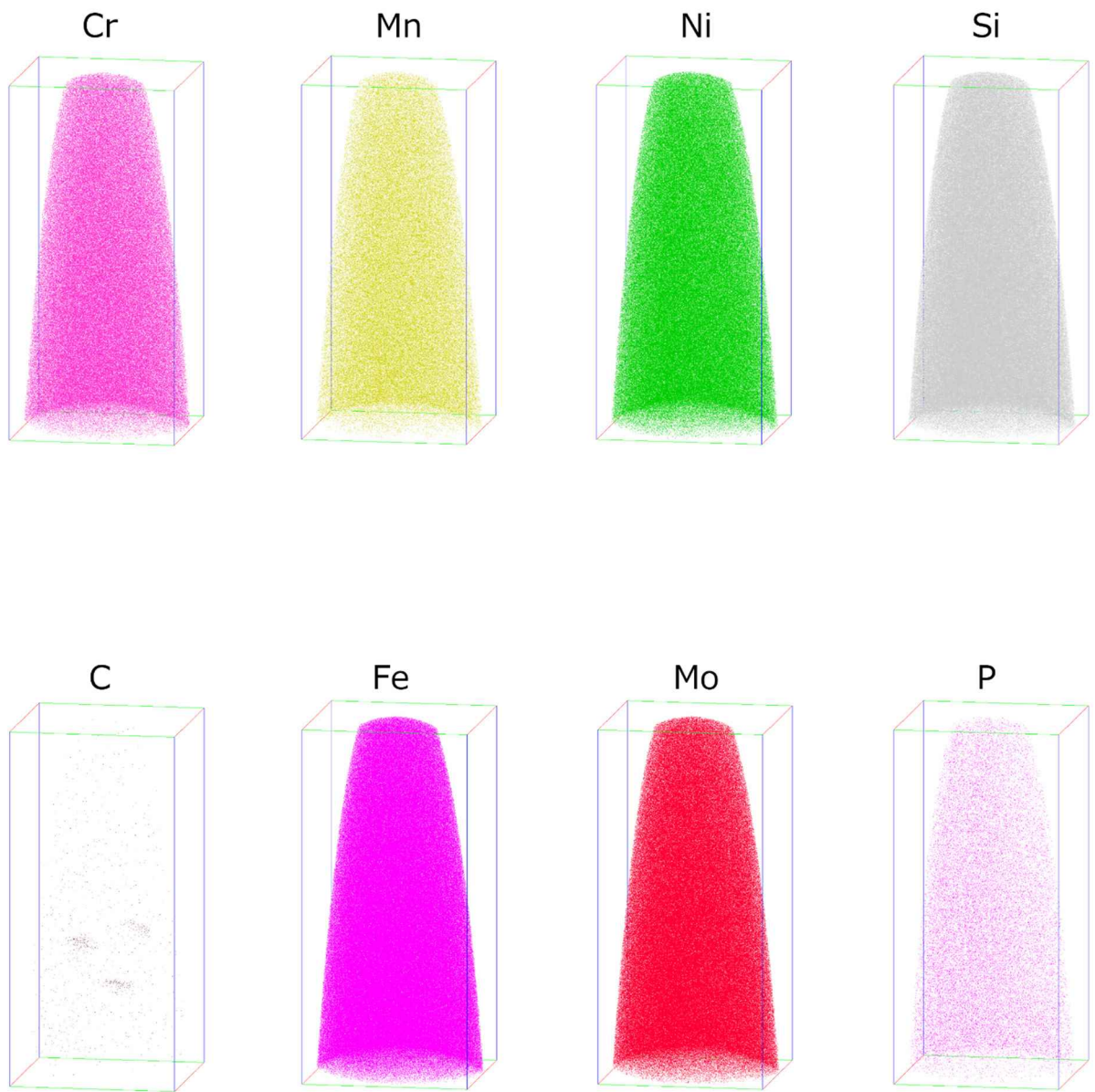
R5098_12170 ID-4-M1(67×64×150 nm³)

図 3.4.2(6)-4 ID-4-M1 のアトムマップ (1/3)



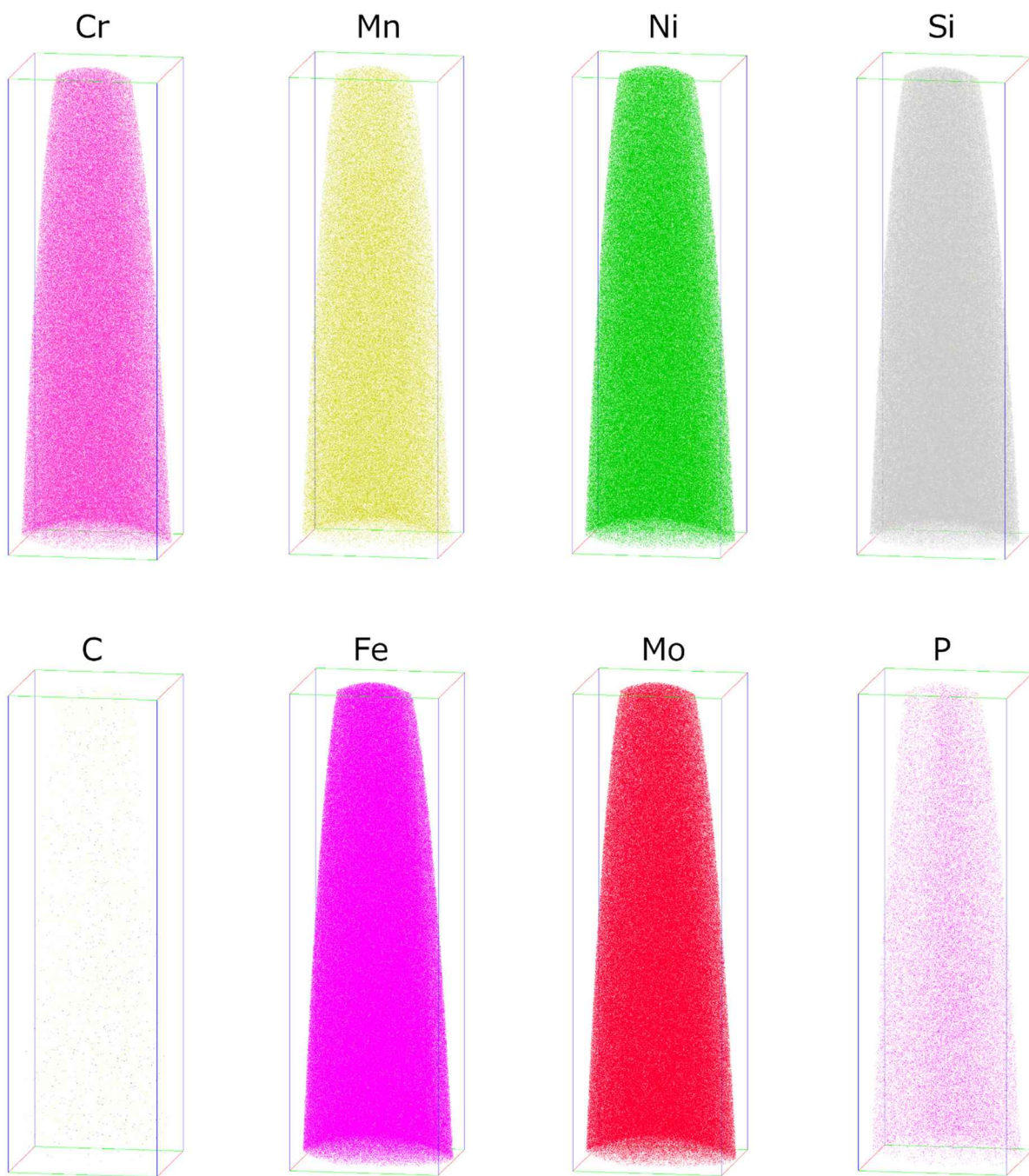
R5098_12172 ID-4-M1(86×86×170 nm³)

図 3.4.2(6)-4 ID-4-M1 のアトムマップ (2/3)



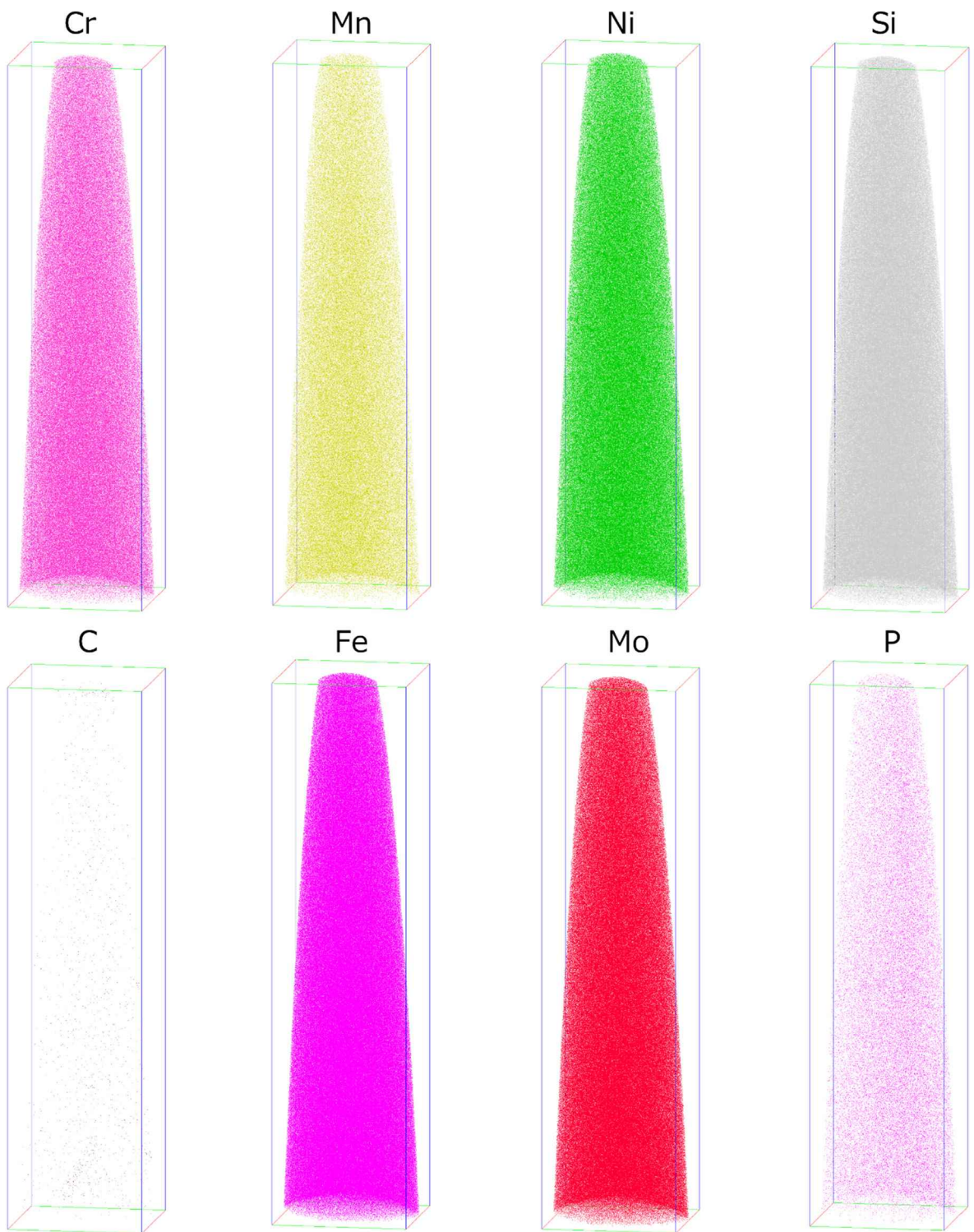
R5098_12174 ID-4-M1(90×88×190 nm³)

図 3.4.2(6)-4 ID-4-M1 のアトムマップ (3/3)



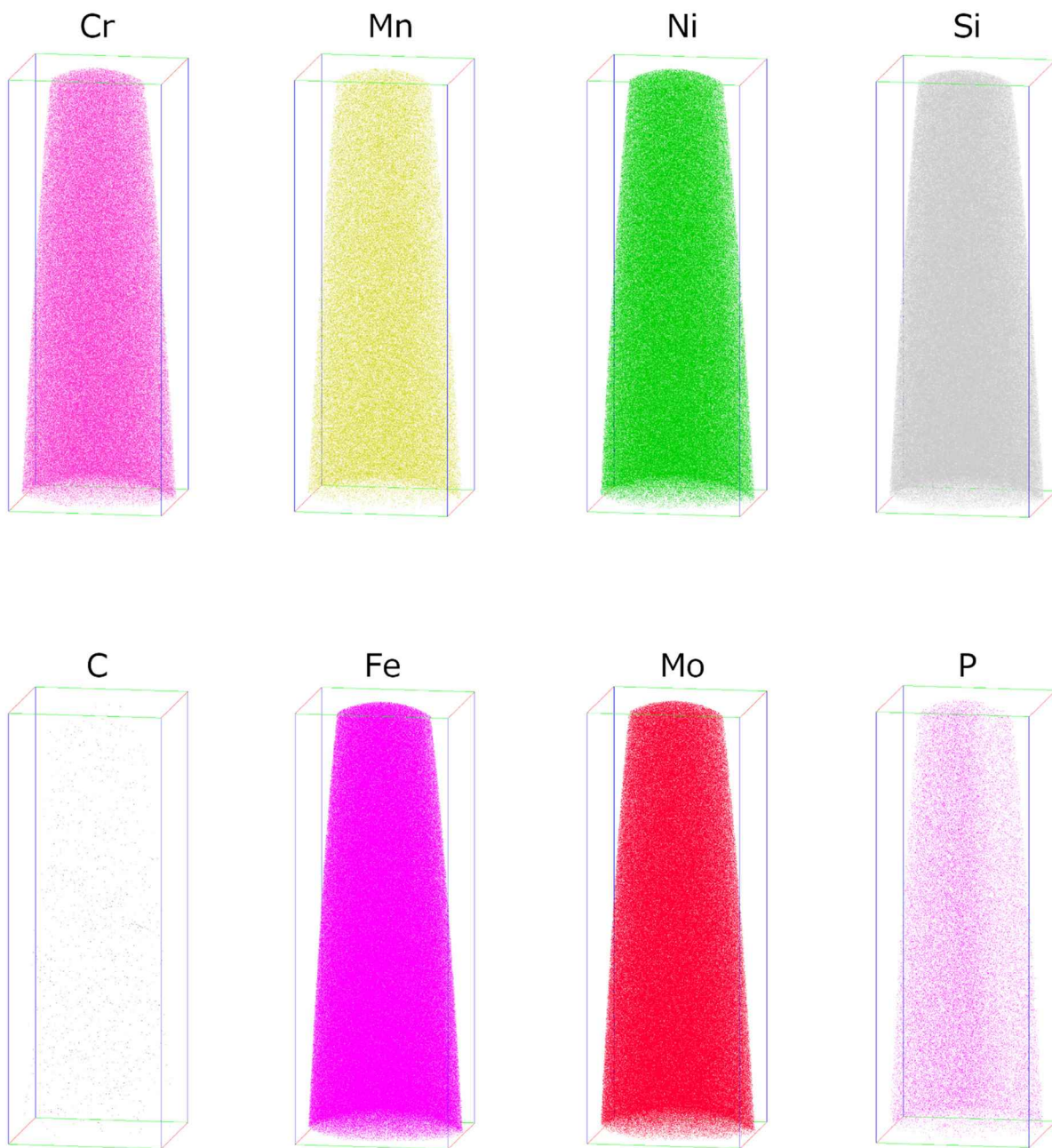
R5098_12151 ID-5-M1(83×83×270 nm³)

図 3.4.2(6)-5 ID-5-M1 のアトムマップ (1/3)



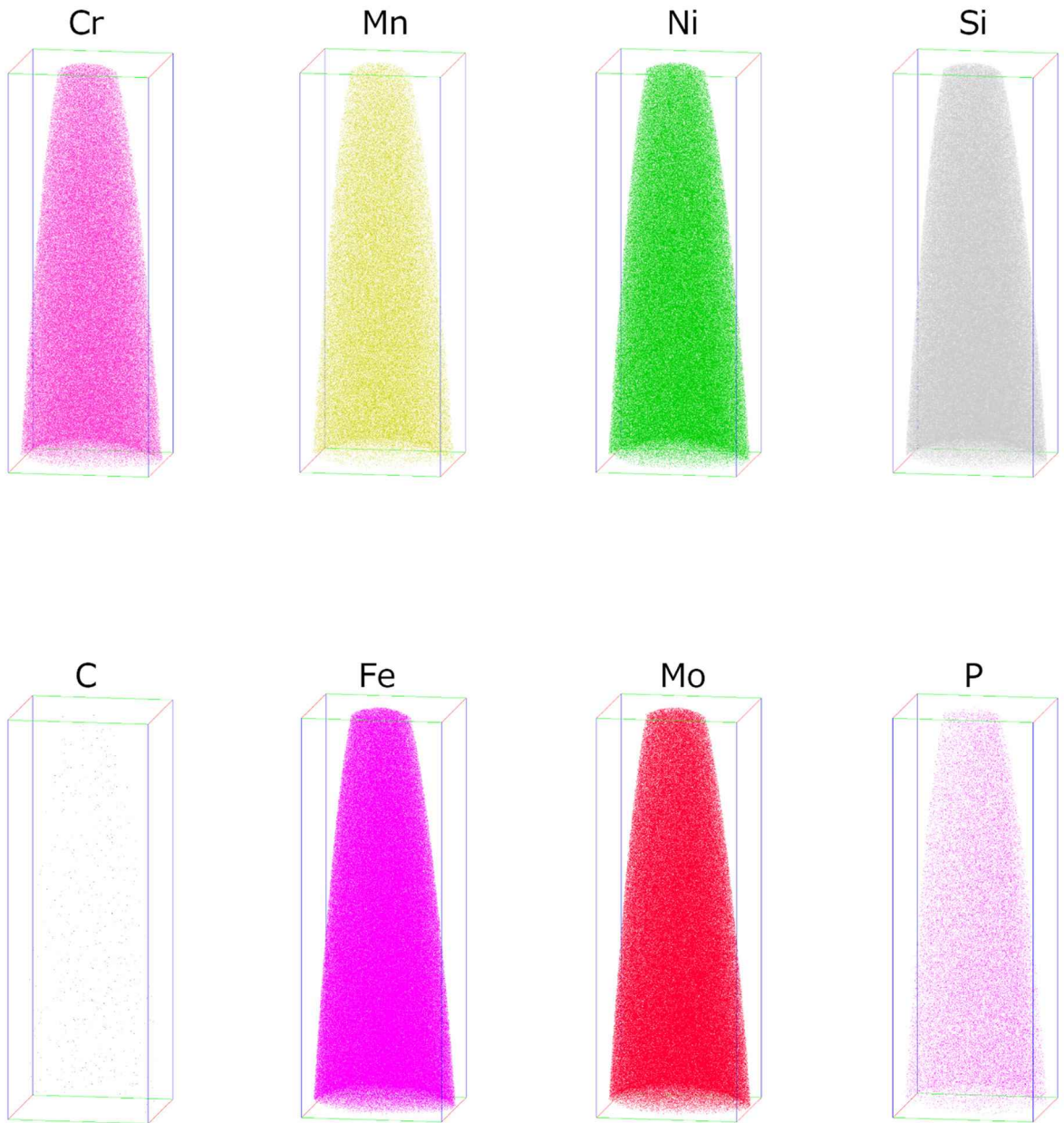
R5098_12152 ID-5-M1(80×72×320 nm³)

図 3.4.2(6)-5 ID-5-M1 のアトムマップ (2/3)



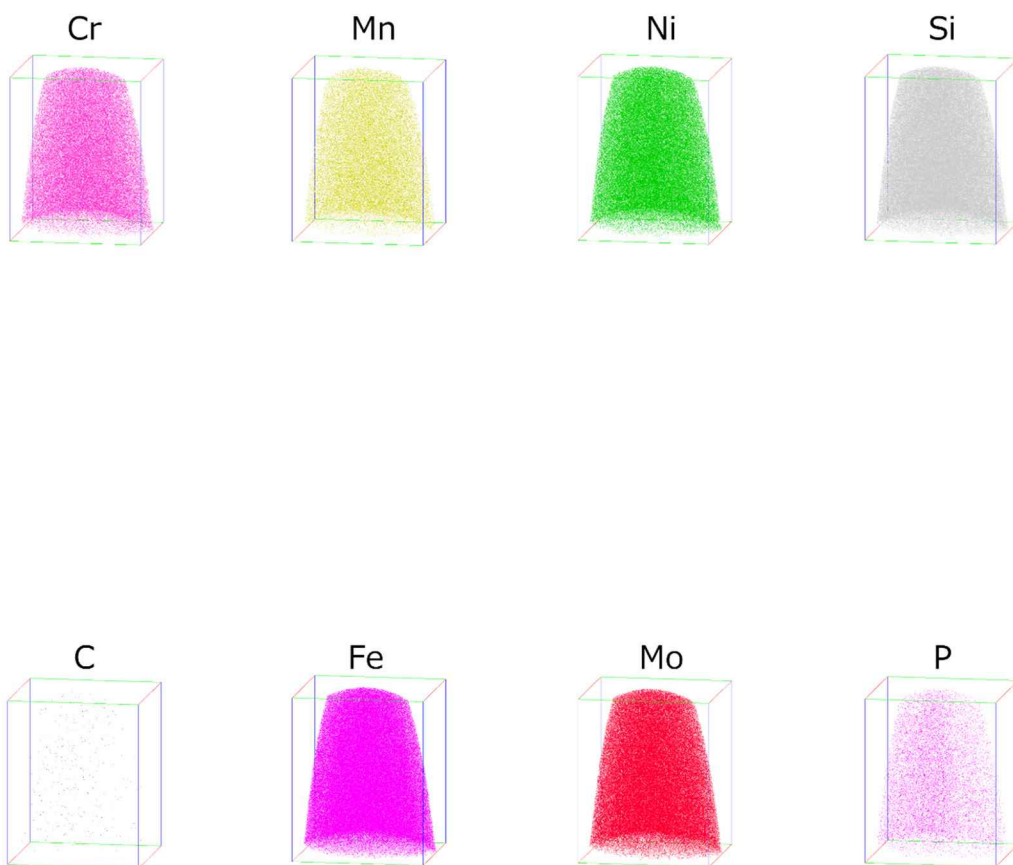
R5098_12171 ID-5-M1(83×83×230 nm³)

図 3.4.2(6)-5 ID-5-M1 のアトムマップ (3/3)



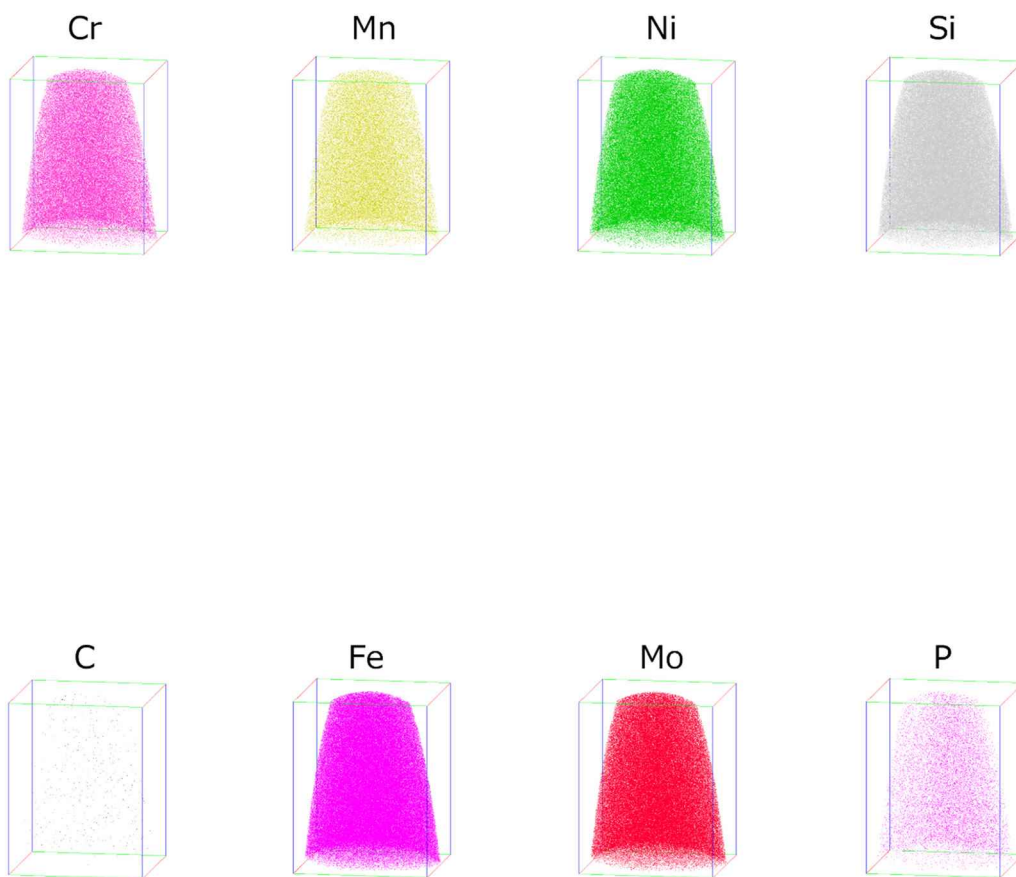
R5098_12154 ID-6-M1(75×75×210 nm³)

図 3.4.2(6)-6 ID-6-M1 のアトムマップ (1/3)



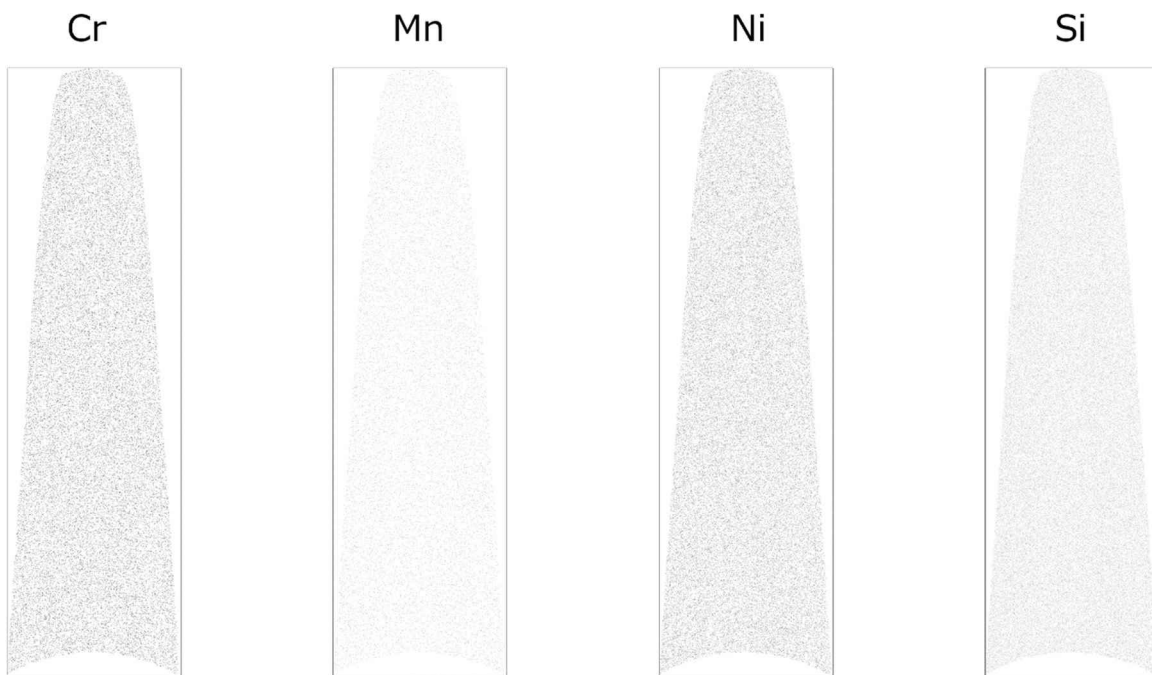
R5098_12156 ID-6-M1(71×72×90 nm³)

図 3.4.2(6)-6 ID-6-M1 のアトムマップ (2/3)



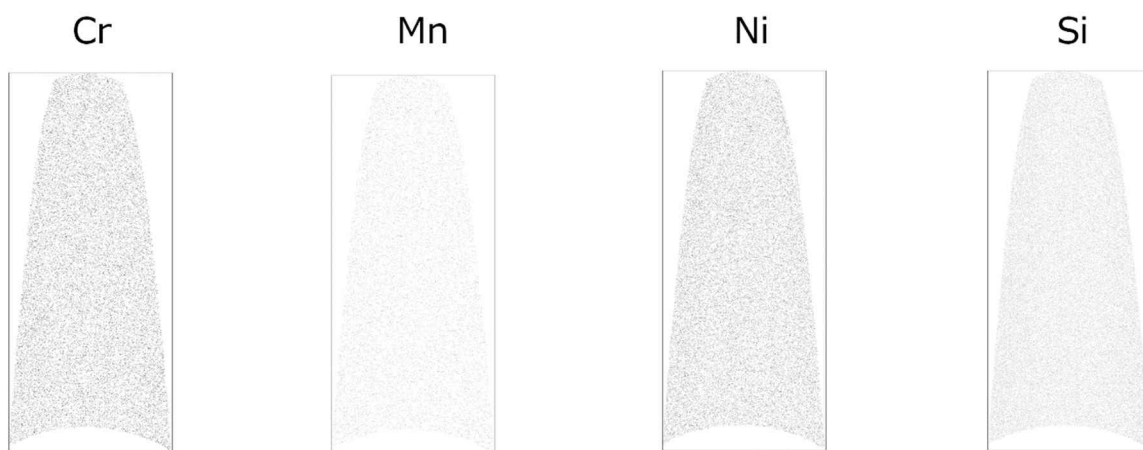
R5098_12157 ID-6-M1(74×74×94 nm³)

図 3.4.2(6)-6 ID-6-M1 のアトムマップ (3/3)



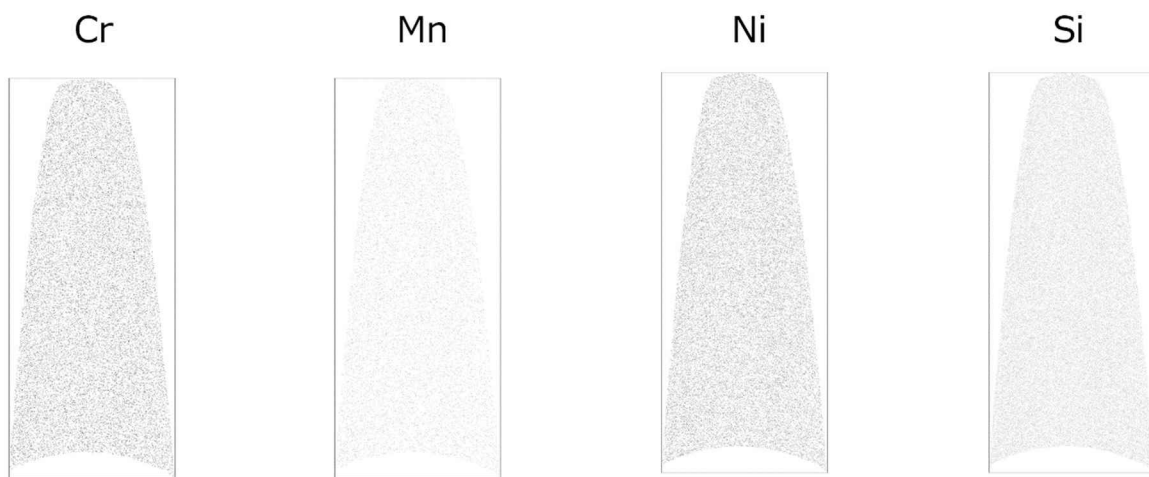
R5098_12124 ID-1-M1(5×86×300 nm³)

図 3.4.2(6)-7 ID-1-M1 のアトムマップ (スライス像) (1/3)



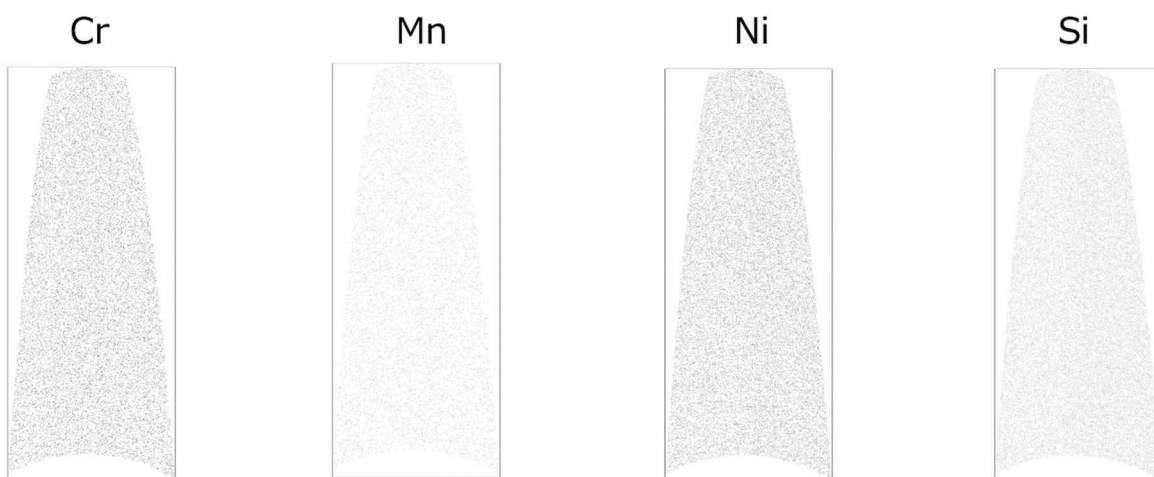
R5098_12134 ID-1-M1(5×81×190 nm³)

図 3.4.2(6)-7 ID-1-M1 のアトムマップ (スライス像) (2/3)



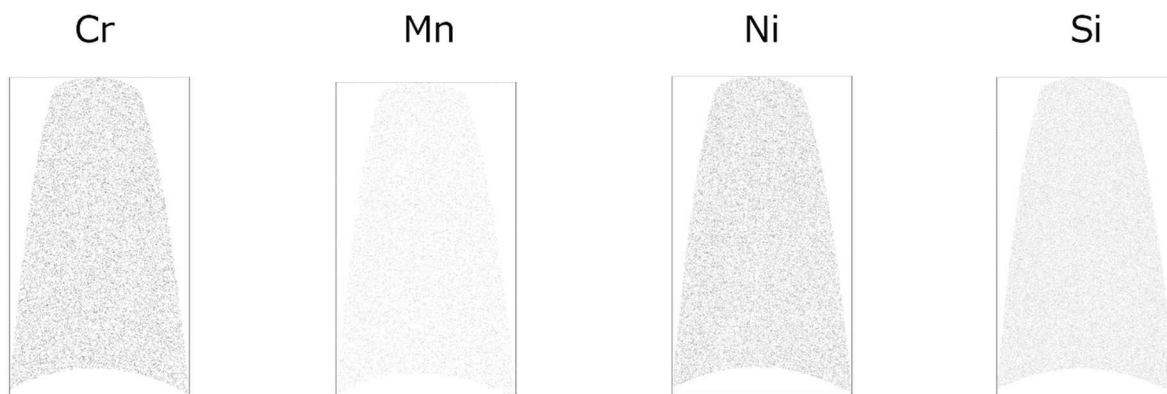
R5098_12136 ID-1-M1(5×83×200 nm³)

図 3. 4. 2(6)-7 ID-1-M1 のアトムマップ (スライス像) (3/3)



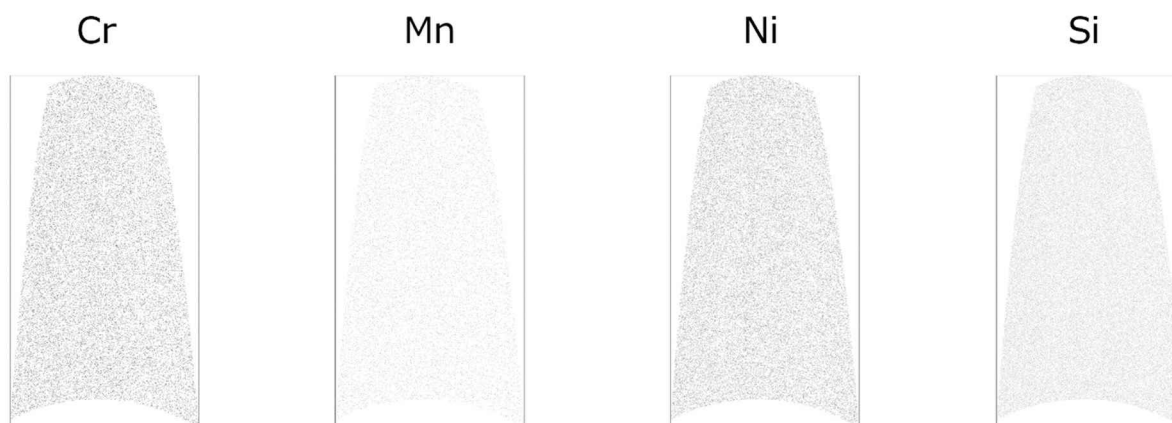
R5098_12164 ID-2-M1(5×82×200 nm³)

図 3. 4. 2(6)-8 ID-2-M1 のアトムマップ (スライス像) (1/3)



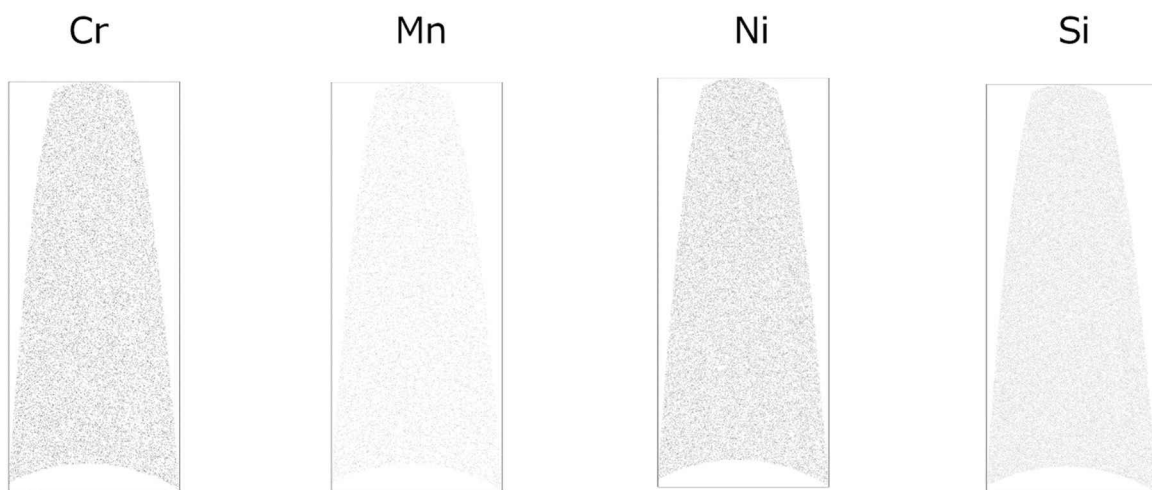
R5098_12165 ID-2-M1(5×88×160 nm³)

図 3.4.2(6)-8 ID-2-M1 のアトムマップ (スライス像) (2/3)



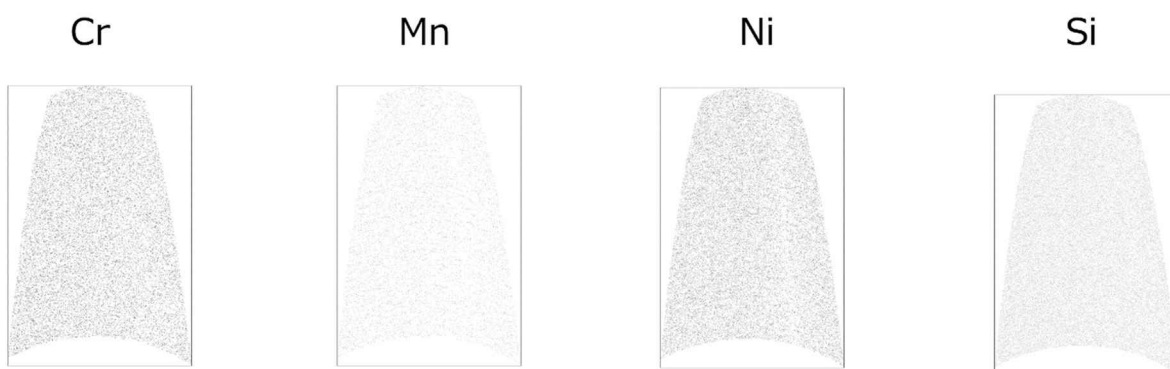
R5098_12169 ID-2-M1(5×93×170 nm³)

図 3.4.2(6)-8 ID-2-M1 のアトムマップ (スライス像) (3/3)



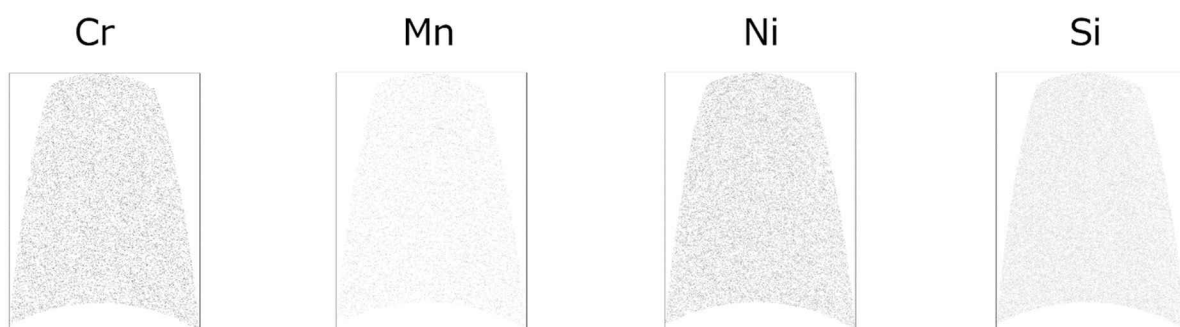
R5098_12166 ID-3-M1(5×84×200 nm³)

図 3.4.2(6)-9 ID-3-M1 のアトムマップ (スライス像) (1/3)



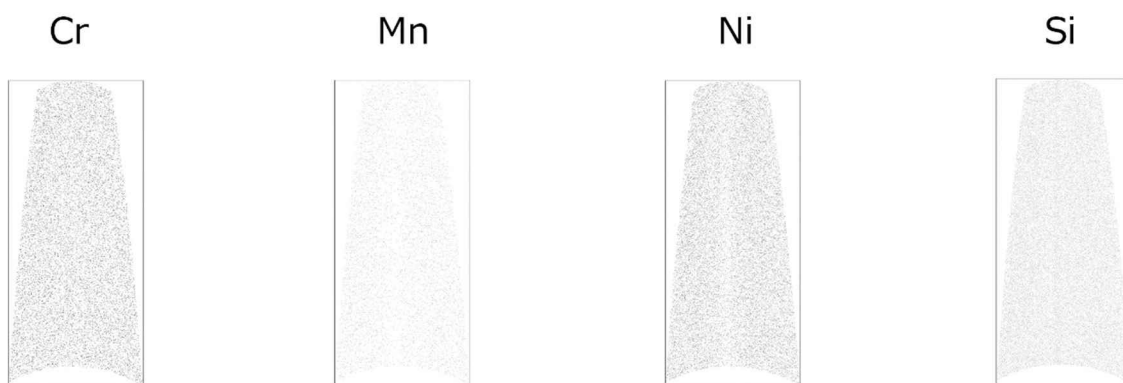
R5098_12167 ID-3-M1(5×90×140 nm³)

図 3.4.2(6)-9 ID-3-M1 のアトムマップ (スライス像) (2/3)



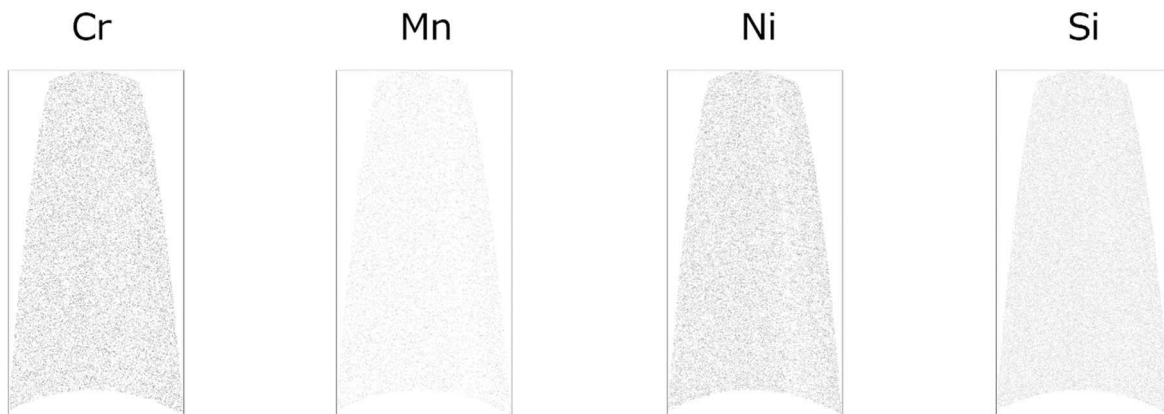
R5098_12168 ID-3-M1(5×94×130 nm³)

図 3.4.2(6)-9 ID-3-M1 のアトムマップ (スライス像) (3/3)



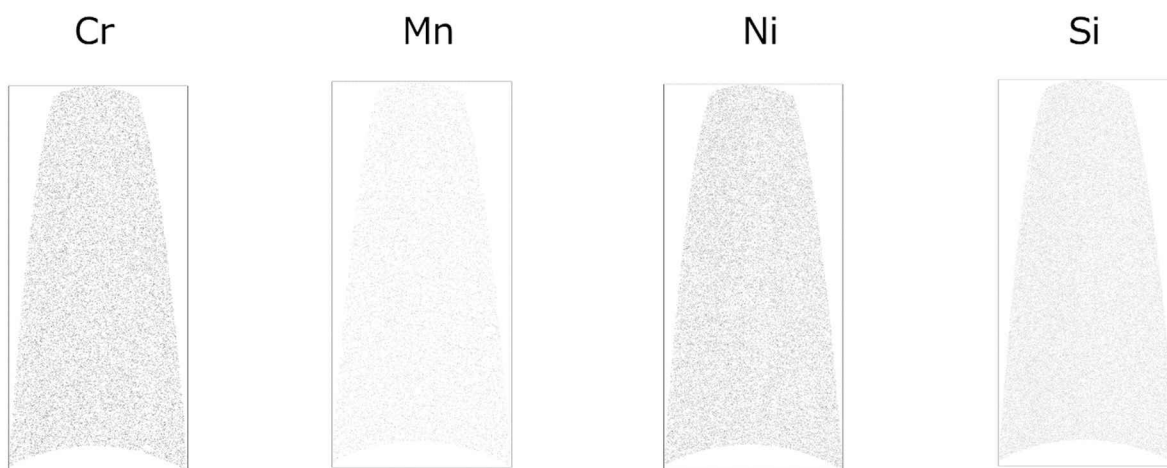
R5098_12170 ID-4-M1(5×64×150 nm³)

図 3.4.2(6)-10 ID-4-M1 のアトムマップ (スライス像) (1/3)



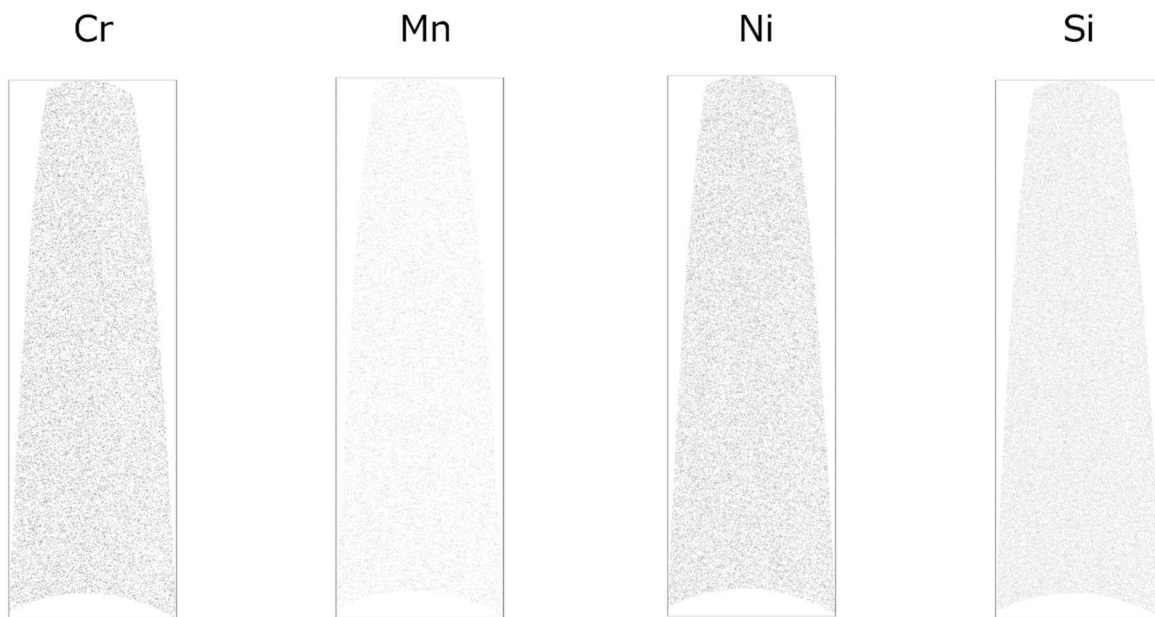
R5098_12172 ID-4-M1(5×86×170 nm³)

図 3.4.2(6)-10 ID-4-M1 のアトムマップ (スライス像) (2/3)



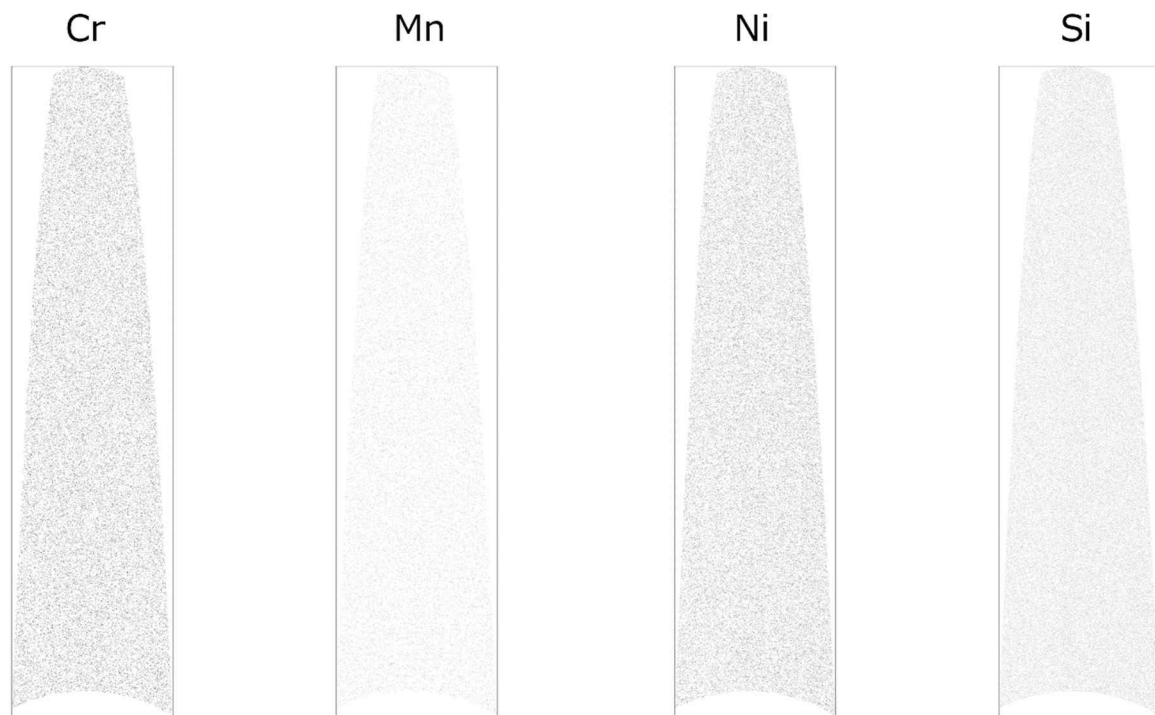
R5098_12174 ID-4-M1(5×88×190 nm³)

図 3.4.2(6)-10 ID-4-M1 のアトムマップ (スライス像) (3/3)



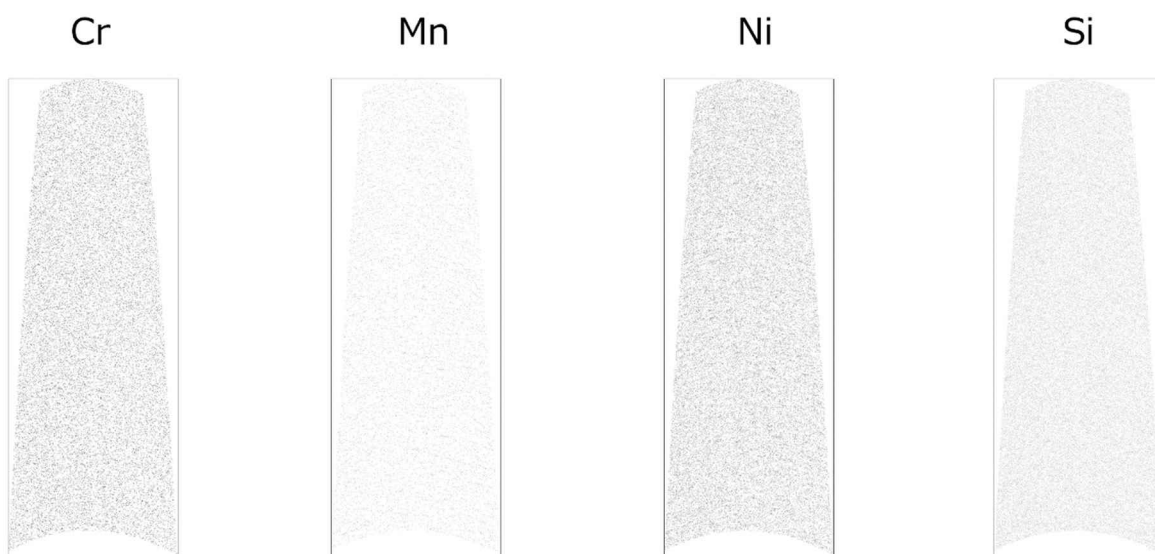
R5098_12151 ID-5-M1(5×83×270 nm³)

図 3.4.2(6)-11 ID-5-M1 のアトムマップ (スライス像) (1/3)



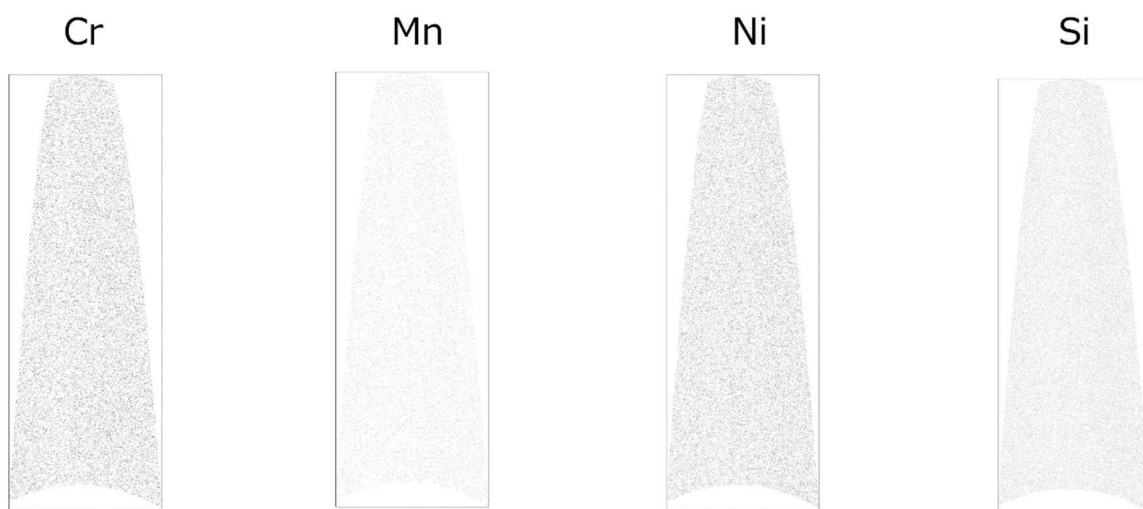
R5098_12152 ID-5-M1(5×72×320 nm³)

図 3.4.2(6)-11 ID-5-M1 のアトムマップ (スライス像) (2/3)



R5098_12171 ID-5-M1(5×83×230 nm³)

図 3.4.2(6)-11 ID-5-M1 のアトムマップ (スライス像) (3/3)



R5098_12154 ID-6-M1(5×75×210 nm³)

図 3.4.2(6)-12 ID-6-M1 のアトムマップ (スライス像) (1/3)



R5098_12156 ID-6-M1(5×72×90 nm³)

図 3.4.2(6)-12 ID-6-M1 のアトムマップ (スライス像) (2/3)



R5098_12157 ID-6-M1(5×74×94 nm³)

図 3.4.2(6)-12 ID-6-M1 のアトムマップ (スライス像) (3/3)

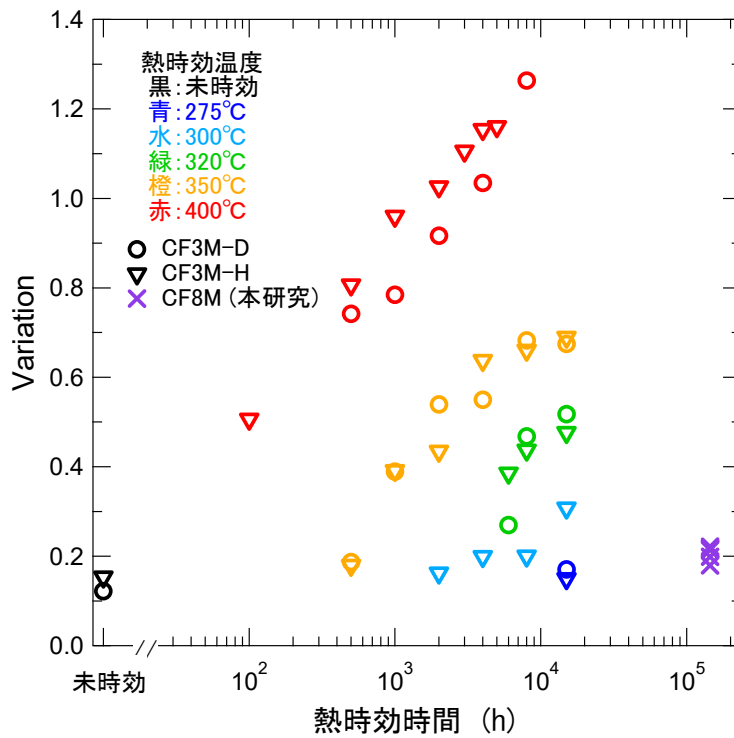


図 3.4.2(6)-13 文献値^[3.4.2(6)-4]とポンプケーシング材の Variation の比較
(参考文献[3.4.6(4)-4]の図からデータを引用し、図を作成)

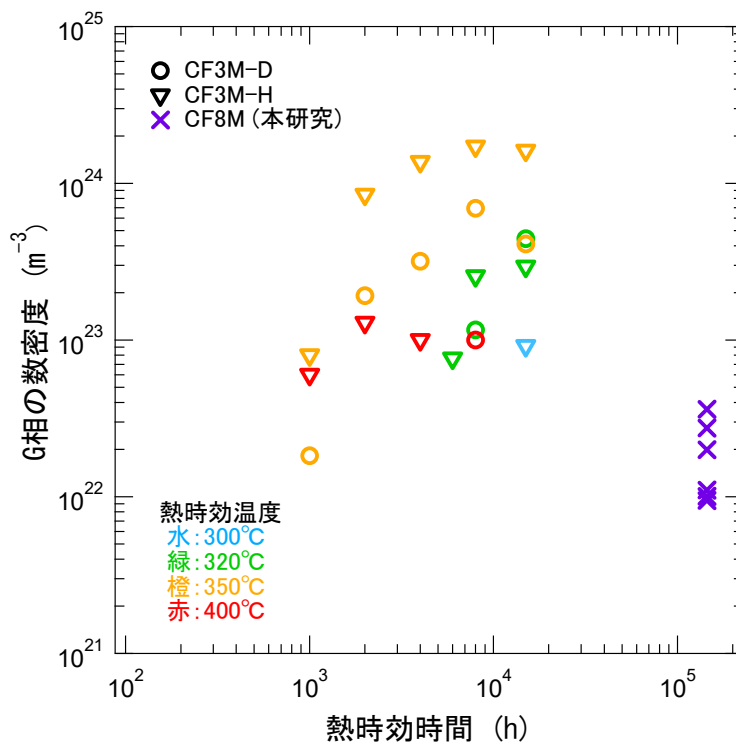


図 3.4.2(6)-14 文献値^[3.4.2(6)-4]とポンプケーシング材の G 相の数密度の比較
(参考文献[3.4.2(6)-4]の図からデータを引用し、図を作成)

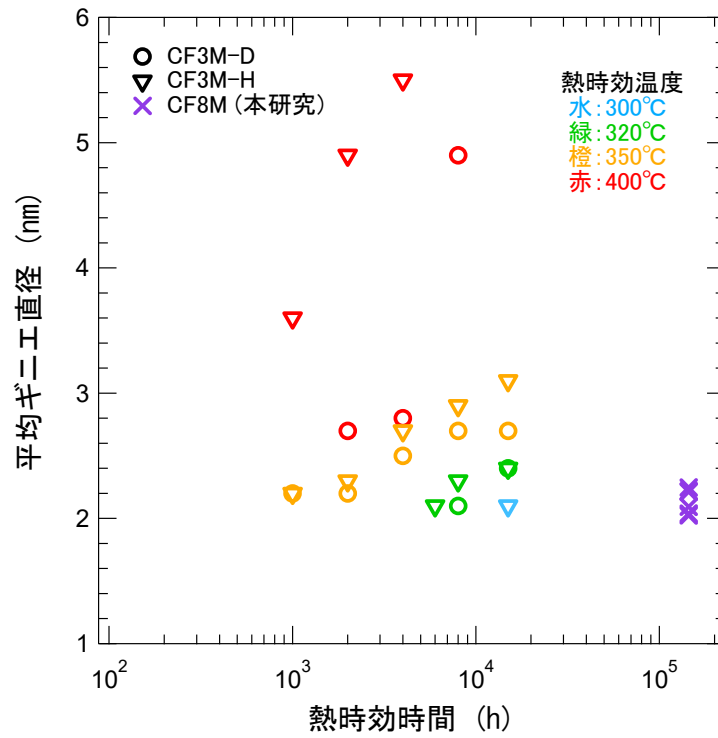


図 3.4.2(6)-15 文献値^[3.4.2(6)-5]とポンプケーシング材のG相のギニエ直径の比較
(参考文献[3.4.2(6)-5]の図からデータを引用し、図を作成)

3.4.3 事業計画案の見直し

令和4年度は計画通り進捗した。令和5年度以降は当初の計画に沿って試験を実施する。令和5年度以降の事業計画を図3.4.3-1に、試験マトリックスを表3.4.3-1に示す。事業計画案は特に見直しの必要はなく、令和5年度以降は計画案に沿って事業を進める。

令和5年度以降の試験では、破壊靱性試験について、試験片2個はデータの取得状況から試験温度(288°C or RT)を決定し(表3.4.3-1注記*)、フェライト測定は破壊靱性試験を実施した試験片ごとにフェライトスコープによる測定を実施予定である(表3.4.3-1注記**)。また、化学成分分析については、CF8MのASTM規格で化学成分が規定された元素に加えてNb及びNの分析を実施する(表3.4.3-1注記***).

表 3.4.3-1 令和5年度以降の試験マトリックス

	破壊靱性試験	引張試験	シャルピー試験	観察用試験	化学成分分析
形状	1T-C(T)	JIS 14A/B 試験片	フルサイズ	10x10x2mm	任意 (端材)
数量	加工 2/試験 4	加工 2/試験 2	加工 24/試験 24	加工 0/試験 6	加工 2/試験 2
試験温度	RT×2、 (288°C or RT) ×2*	RT	RT 含む 7 温度	—	—
備考	L-C 方向 試験片フェライト測定**	L 方向	L-C 方向	試験済み試験片送付含	規格元素 + Nb、N***

注記*: (288°C or RT)はデータの取得状況から試験温度を決定

** :破壊靱性試験を実施した試験片ごとにフェライトスコープによる測定を実施

*** :CF8M の ASTM 規格で化学成分が規定された元素に加えて Nb、N の分析を実施

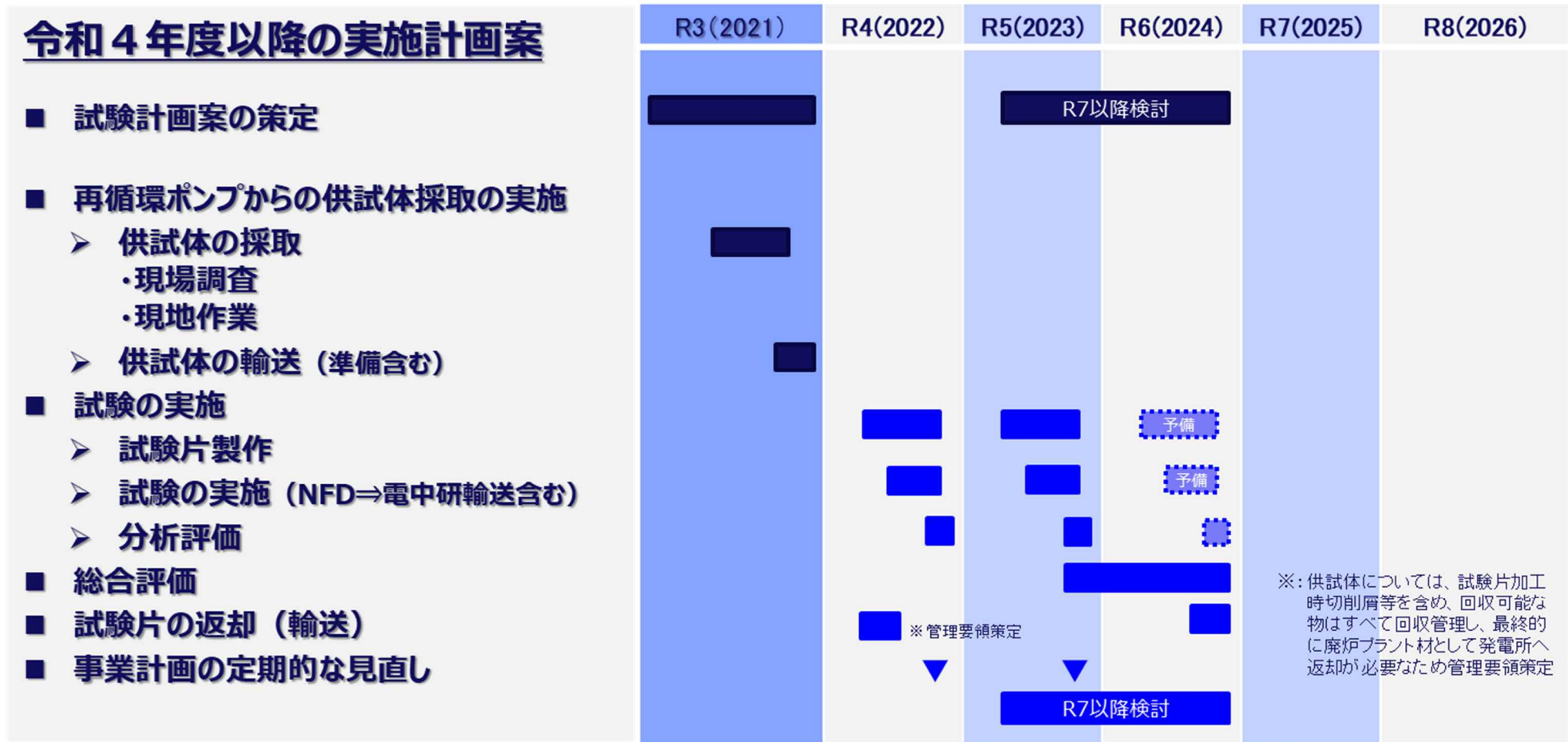


図 3.4.3-1 ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究 事業計画案

4. 実機材料を活用した安全研究検討委員会等の開催実績

本事業において収集した情報、研究計画（安全研究戦略マップ含む）、試験方法及び採取したデータの透明性及び客観性を高めるために、電中研及び電中研以外の専門家による「実機材料を活用した安全研究検討委員会」を設置・運営し、有識者からの意見を参考とするとともに技術的側面からのレビューを受けるとともに、NRA に対し定期的な進捗報告を実施した。本章では以下の実績をまとめた。

- 実機材料を活用した安全研究検討委員会
- 本事業に関する NRA に対する実績報告

4.1 実機材料を活用した安全研究検討委員会

4.1.1 検討委員会の設置

本事業の成果に対し電中研及び電中研以外の専門家による「実機材料を活用した安全研究検討委員会」を設置・運営した。

(1) 名称

令和4年5月25日(水)に開催した NRA と電中研との第一回打合せにて、本研究で設置する検討委員会名称を、昨年度と同様に「実機材料を活用した安全研究検討委員会」とする計画について NRA の了解を得た。

(2) 体制

令和4年5月25日(水)に開催した NRA と電中研との第一回打合せにて、本検討委員会の体制は、有識者・学識経験者については、令和3年度の検討委員会と同じとすることを提案し、NRA の了解を得た。委員構成を表 4.1.1-1 に示す。なお、オブザーバ参画機関についても、令和3年度の検討委員会と同様として、第一回委員会開催前に電中研事務局より参画機関に個別に打診し確定した。

(3) 運営

1) 事務局

令和4年5月25日(水)に開催した NRA と電中研との第一回打合せにて、本検討委員会の事務局は令和3年度と同様に電中研とすることで了解を得た。

2) 運営要項等

本事業について、有識者から技術的な側面からのレビューを受けることにより、収集した情報、研究計画（安全研究戦略マップ含む）、試験方法及び取得したデータの透明性及び客観性を高めるため、「実機材料を活用した安全研究検討委員会運営要項」を令和3年度から内容を引き継ぐ形で策定し、本年度は謝金の取り扱いについて明記した。運営要項を添付資料-1に示す。また、本検討委員会で得た情報の扱いに関し、秘密保持情報の使用及び開示、その他秘密情報に係る不正行為を防止するため、秘密情報の保持に関する必要事項を定めた「秘密保持誓約」についても令和3年度から内容を引き継ぐ形で策定するとともに、秘密保持誓約の署名について、Web形式が中心であることから議事録の出席者等で制約者を特定する運用を具体的に追記した。「秘密保持誓約」を添付資料-2に示す。これらの運営要領は、令和3年度 第一回実機材料を活用した安全研究検討委員会（令和3年7月19日）にて承認された。

表 4.1.1-1 実機材料を活用した安全研究検討委員会 委員の構成

	所属機関	所属部署
委員 (主査)	東京大学	大学院工学系研究科
委員 (副主査)	大阪大学	工学研究科
委員	福井大学	学術研究院工学系部門
委員	株式会社 原子力安全システム研究所	技術システム研究所
委員	原子力規制庁	技術基盤 G
委員	原子力規制庁	技術基盤 G
委員	(一財)電力中央研究所	

備考:

【事務局】 電力中央研究所

【オブザーバ】

東北大学(大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻)

電気事業者

- ・電気事業連合会／原子力エネルギー協議会(ATENA)
- ・北海道電力株式会社 ・東北電力株式会社 ・東京電力ホールディングス株式会社
- ・中部電力株式会社 ・中部電力株式会社 ・北陸電力株式会社
- ・関西電力株式会社 ・中国電力株式会社 ・四国電力株式会社
- ・九州電力株式会社 ・日本原子力発電株式会社
- ・電源開発株式会社

原子力プラントメーカー

- ・東芝エネルギーシステムズ株式会社
- ・日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社
- ・三菱重工業株式会社

国内研究機関等

- ・日本核燃料開発株式会社
- ・株式会社 原子力安全システム研究所

原子力規制庁

日本原子力研究開発機構(安全研究センター)

電力中央研究所

4.1.2 開催実績

実機材料を活用した安全研究検討委員会は3回実施した。
実績を以下に示す。

(1) 令和4年度 第一回 廃炉材を活用した安全研究検討委員会

日 時：2022年7月19日（火） 13:30-16:00

場 所：Web EXによる会議

出席者：(出席委員 ○)

	所属機関	出欠
委員(主査)	東京大学	○
委員(副主査)	大阪大学	—
委員	福井大学	—
委員	(株)原子力安全システム研究所	○
委員	原子力規制庁	○
委員	原子力規制庁	○
委員	(一財)電力中央研究所	○

議事概要：

第一回検討委員会の実施にあたり、運営、役員の選出、本年度研究の概要に関する説明があった。

- 事務局より、運営規約、守秘義務誓約について説明し、運営規約・守秘義務誓約に従い進めることが了承された。
- 運営規約・種に義務誓約に基づき、議事録に出席者及び欠席者を記載することで守秘義務誓約とする運用が了承された。
- 運営規約に基づき、東京大学委員を主査に選出し、主査より大阪大学委員を副主査に選任した。
- 電中研より、本年度の研究計画概要について説明した。

なお、欠席委員に対しては、別途個別説明を実施した。

- 福井大学委員：2022年7月26日（火）10:00-12:00 Web 会議
- 大阪大学委員：2022年7月26日（火）13:30-15:45 Web 会議

(2) 令和4年度 第二回 廃炉材を活用した安全研究検討委員会

日 時：2022年11月2日（水） 13:15-16:30

場 所：Web EXによる会議

出席者：（出席委員 ○）

	所属機関	
委員(主査)	東京大学	○
委員(副主査)	大阪大学	○
委員	福井大学	○
委員	㈱原子力安全システム研究所	—
委員	原子力規制庁	○
委員	原子力規制庁	○
委員	(一財)電力中央研究所	○

議事概要：

中間報告として、研究の進捗状況を中心に報告した。

- 実機材料を用いた安全研究マップの見直し
- 靱性低下に係る研究
- 予防保全対策技術の保守性に係る研究
- ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究

なお、欠席委員に対しては、別途個別説明を実施した。

- 原子力安全システム研究所委員：

2022年12月5日（月）14:00-17:00 ラゾーナ川崎東芝ビル会議室

(3) 令和4年度 第三回 廃炉材を活用した安全研究検討委員会

日 時：2023年2月15日（水） 13:15-16:30

場 所：Web EX による会議

出席者：（出席委員 ○）

	所属機関	出欠
委員(主査)	東京大学	○
委員(副主査)	大阪大学	○
委員	福井大学	○
委員	㈱原子力安全システム研究所	○
委員	原子力規制庁	○
委員	原子力規制庁	○
委員	(一財)電力中央研究所	○

議事概要：

成果報告として、令和3年度の成果報告を実施した。

- 実機材料を用いた安全研究マップの見直し
- 靱性低下に係る研究
- 予防保全対策技術の保守性に係る研究
- ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究

4.2 原子力規制庁への進捗報告

NRA に対する定期的な進捗報告の実績を以下に示す。

(1) 電中研－規制庁 第一回打合せ

日 時：令和4年5月25日（水）15:30～17:30

場 所：規制庁会議室及び WebEx 会議

参加者：原子力規制庁 技術基盤 G 対面 2 名／Web 出席 4 名

電力中央研究所 対面 5 名

議事概要

令和4年度 実機材料を活用した健全性評価に係る研究について、令和4年度事業仕様書に基づく個別研究の実施基本計画案、並びに研究マスタースケジュールについて説明し、本年度実施計画について了解頂いた。また、本年度の研究の実施にあたり必要となる、過年度の研究成果の引継ぎを受け、その活用に了解頂いた。

(2) 電中研－規制庁 第二回打合せ

日 時：令和4年7月11日（月）10:10～12:00

場 所：WebEx 会議

参加者：原子力規制庁 技術基盤 G Web 出席 6 名

電力中央研究所 Web 出席 5 名

議事概要

第一回安全研究検討委員会の議事次第、並びに本年度実施計画詳細について事前説明し、大幅な変更を伴うコメントはなく了解頂いた。また、令和4年度実施計画書と委託成果報告書目次案の対比表に基づき受託報告書の目次構成について説明し、本案をベースとしてまとめる方向で了解頂いた。

(3) 電中研－規制庁 第三回打合せ

日 時：令和4年10月25日（火）15:00～17:00

場 所：WebEx 会議

参加者：原子力規制庁 技術基盤 G Web 出席 6 名

電力中央研究所 Web 出席 5 名

○議事概要

第二回安全研究検討委員会の議事次第、並びに報告内容について説明し、大幅な変更を伴うコメントはなく了解頂いた。なお、本研究において想定する実機材活用のため廃炉プラントからの採取を想定している機器や時期については、あくまでも想定ということではあるが、当該事業者に事前に資料を送付するなど、事前にアナウンスすることとした。

(4) 電中研－規制庁 第四回打合せ

日 時：令和5年2月8日（水）15:00～17:00

場 所：WebEx 会議

参加者：原子力規制庁 技術基盤 G Web 出席 5 名

電力中央研究所 Web 出席 5 名

議事概要

成果報告として実施の第三回安全研究検討委員会の議事次第、並びに報告内容について説明し、大幅な変更を伴うコメントはなく了解頂いた。なお、成果の説明範囲が各個別研究3件と多岐にわたることから、これまでの委員会の委員コメントや質疑応答を踏まえ、解析の実施や、結果の比較評価について、その詳細説明の前に、ポイントとなる前提条件や検討目的や、結果の概要を端的にまとめた資料頁を準備するなどアドバイスを頂いた。また、H-1を試験体採取対象の廃炉プラントとしていることから、中部電力株式会社にも事前に資料を送付し、成果報告内容をあらかじめ共有しておくこととした。

5. まとめ

令和4年度 原子力施設等防災対策等委託費（実機材料等を活用した経年劣化評価・検証（実機材料を活用した健全性評価に係る研究））事業について、本年度実施計画範囲について研究を完了した。概要を以下にまとめた。

5.1 実機材料を活用した安全研究マップの定期的な見直し

令和4年度は、安全研究マップの定期的な見直しとして、そのインプットとなる「実機材料を活用した研究課題整理表」について、実機材料を活用した材料健全性研究に関する国内外の計画や実施状況（令和3年度調査結果を踏まえ、2022年1月から本年度に調査可能な期間までの進捗状況等）を更新した。その結果に基づき「実機材料を活用した安全研究マップ」の反映の可否を検討した。

(1) 実機材料を活用した材料健全性研究に関する計画・実施状況の調査

原子力発電所の構造物と考慮すべき材料の経年劣化事象の関係に基づき、令和3年度に調査した国内外の実機材料を活用した材料健全性研究、学協会規格動向等の最新知見の調査結果に対し、令和3年度調査内容以降を含めて令和4年度（2022年1月から12月の期間）の研究動向や国際会議での発表を調査した。

■ 海外プロジェクト研究動向・文献調査

- ① スウェーデン SMILE プロジェクト(2021年～2025年)
- ② 米国 DOE LWRS プロジェクト(2011年～)
- ③ スペイン Zorita プロジェクト(2007年～2019年)
- ④ フランス EDF/MAI プロジェクト(2011年～)

■ 国際会議等の調査

- ⑤ ASME PVP 2022: (2022年7月17日～22日:米国)
- ⑥ International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems (2022年7月17日～7月22日:米国)
- ⑦ PLiM 2022 (2022年11月28日～12月2日:オーストリア)

(2) 実機材料を活用した材料健全性研究の実施に関わる研究課題整理表の更新

研究プロジェクトや国際会議での発表について、2022年1月から2022年12月までの期間で調査した。これらの進捗報告を含めた成果内容は、令和3年度成

果の「研究課題整理表」に既に集約されている研究分野や、関連する課題や技術情報であり、新たに「研究課題整理表」に反映すべき知見はなかった。

(3) 実機材料を活用した安全研究マップの見直し

上記 (2) に示すように、「実機材料を活用した安全研究マップ」への反映等について検討した。その結果、上記の通り研究課題整理表は現状の知見の集約・整理内容は関連最新動向と整合しており、令和 3 年度から安全研究マップに反映すべき新たな知見はなかった。

5.2 靱性低下に係る研究

本研究では、実機から採取した材料に対する破壊靱性試験を行うことにより、実機条件における破壊靱性の経年変化に関する知見を取得して評価式の保守性を確認することを目的とする。令和4年度は事業計画に基づき、以下を実施した。

(1) 試験体採取仕様詳細の検討

事業者にて実施する解体工事で生じる廃炉材から試験体を採取する方法を調査した。なお、解体作業そのものは事業者の工程管理の下で実施する作業であるため、本研究の管理外であることから、本研究で調整できない範囲については仮定の下で前提条件を整理して調査を実施し、調査プロセスを整理し、解体作業の条件を「対象機器の解体工事開始前」「対象機器の解体工事实施後」の2ケースについて整理し、廃炉材からの試験体採取工程、材料採取時の条件、採取工法、採取時の推奨工法の検討を整理した。

■ 試験体の取り扱い(試験体保管方法)

試験体の取り扱いにおける留意点として、試験体の一時保管先としてSFPやD/Sプールが考えられること、保管場所の確保や保管管理の具体化、さらに、試験体へ加工をした後に取り違えが起きないように刻印処置等が挙げられた。

■ 試験体の輸送

試験体の輸送に関し、輸送容器について整理し、輸送に必要な条件として輸送関連法規、輸送容器への試験体の収容、輸送容器及び試験体を取り扱う設備、照射後試験施設の受け入れについて整理した。また、2026年度に上部格子板を対象とすることを想定した輸送計画の推奨案を検討した。

■ 試験片の採取時切断

対象機器の輸送時期を、上部格子板は2026年度以降、炉心シュラウドは2028年度以降と想定し、それぞれの輸送物の放射エネルギーと適用可能な輸送容器、及びそれに収納可能な試験片の形状寸法を整理した。

■ 照射後試験施設での試験体管理仕様

照射後試験施設における保管方法と試験後のプラントへの返却方法について考え方を整理し、照射後試験施設における保管方法と、試験後のプラントへの返却方法についてまとめた。

■ 試験片の中性子照射量評価手法

炉内構造物の靱性低下を評価するために中性子照射量の把握が必要となるが、中性子照射量の直接的な計測は不可能であるため、従来の監視試験中性子照射量評価方法について整理し、この手法をベースとして廃炉材の放射エネルギーを直接測定することにより照射量を評価する手法を整理した。廃炉材（オーステナイト系ステンレス鋼製炉内構造物）に含まれる核種を用いて照射量評価を実施するための核反応を検討整理し、廃炉材の初期元素濃度及び放射能測定方法と、その結果に基づく中性子照射量評価手法として、対象核種に ^{93m}Nb 及び ^{60}Co を選定し、今年度は ^{93m}Nb について評価手法を立案した。なお、放射能測定から中性子照射量の一連の評価が実際に適用可能であることを検証する必要があるため、今後、実機の照射材料を用いた測定と試験解析による評価手法の妥当性確認も検討・計画することとした。

(2) 事業計画案の見直し

今後の事業計画では、対象機器である上部格子板、並びに炉心シュラウドからの試験体採取時期を 2026 年度以降と想定し事業計画を見直した。事業計画は採取時期の想定 2026 年度をキープランとして、設計・製作・試験プロセスも念頭に工事実施計画及び年度展開を具体化する必要がある。また、採取と輸送の課題である採取した試験体の「照射量の評価手法の検討」や、「解体工法の影響の検証（切断等）」も必要である。

更に、対象プラントの 2026 年度前後の廃炉工程の進捗によっては、令和 3 年度に検討を HOLD とした、原子炉内機器の廃棄前に原子炉内に据え付けられたままの状態での炉内より試験体を採取する「事前サンプリング工法」の検討を再開する必要も生じることから、この検討を再開することを事業計画に反映した。

5.3 予防保全対策技術の保守性に係る研究

本研究では応力改善工法施工部位に対する残留応力評価を行い、事業者が実施した予防保全対策技術施工箇所に対する亀裂の解釈の考え方の保守性を検証することを目的とし、令和4年度は、事業計画に基づき、以下の項目を実施した。

(1) 除染の影響確認試験の実施仕様詳細の検討

令和4年度は除染によるピーニング施工部の残留応力分布への影響確認試験について、除染実績などを踏まえて、①試験片形状及び試験条件、②試験装置などの仕様詳細を検討した。

1) 試験片準備及び試験条件に係る検討

実機の除染実績などを踏まえて、以下の項目について具体的な試験評価方法を検討した。

- 試験片形状
- 酸化被膜形成条件
- 除染処理条件(除染処理時間、温度、除染液濃度、比液量など)
- 除染試験マトリクス

2) 試験装置に係る検討

可能な限り実機を模擬したループ試験と実機模擬を合理化した実験室系のバッチ試験について試験装置構成及び試験工程案を検討した。検討の結果、試験準備や各種手配に要する時間はバッチ試験の方がループ試験と比べて比較的短期であることや、研究目的を鑑み除染影響による評価が十分可能であることから、除染試験としてバッチ試験を選択することとした。

(2) 複合的な応力状態を踏まえた影響確認の詳細実施要領の検討

令和4年度は解析的アプローチとして、個別の応力因子に対する切断影響及びこれらの応力因子が重畳した応力状態に対する切断影響について、実績のある解析モデルを用いて解析を実施した。さらに、解析の結果を踏まえて要素試験(平板溶接継手)への反映項目を検討し、要素試験体による試験・解析の詳細実施要領を検討した。

1) 解析的アプローチによる切断影響確認

① 個別の残留応力場に対する切断影響確認

解析的アプローチとして、溶接による残留応力解析の実績が豊富な炉

心シュラウド（500MWe 級 BWR）の中間胴 H4 溶接部を対象部位として、個別の残留応力場に対する切断影響を確認するために、以下に示す解析モデルにより応力場を模擬するとともに切断影響について解析を実施した。

■ 曲げ加工による残留応力場に対する切断影響

曲げ加工による残留応力の FEM 解析モデルによる模擬は、平板解析モデルに対し曲げモーメントを負荷することで行った。解析の結果、切断は曲げ加工による残留応力場に影響しなかった。よって、重畳した残留応力場に対する切断影響確認及び要素試験体において、曲げ加工による残留応力場の考慮は不要とした。

■ 溶接による残留応力場に対する切断影響

溶接による残留応力場の FEM 解析モデルによる模擬は、炉心シュラウド中間胴 H4 溶接部を対象に、国内許認可申請や高経年化技術評価で実績のある 3 次元弾塑性解析モデル・手法を用いて実施した。H4 溶接部の開先形状及び溶接条件は、国内 500MWe 級 BWR プラントの同溶接部の施工実績を基に設定し、溶接部全周の残留応力を解析により求めた。解析の結果、溶接による残留応力場は切断により応力分布が変化した。

■ ピーニングによる残留応力場に対する切断影響

SP による残留応力場に対する切断の影響評価を 2 ケース実施した。解析ケース A は、溶接による残留応力の解析と同一モデルによる解析で実施した。解析ケース A の解析モデルは溶接残留応力の算出に特化した解析モデルであり、溶接部近傍以外は構造物表面の解析メッシュ分割が粗く、SP による残留応力が模擬できない場合がある。そのため、解析ケース B として単純円筒モデルでの評価も実施した。その結果、両ケースとも SP による圧縮残留応力に対する切断の影響は軽微であった。SP による圧縮応力付与の原理は材料表面の塑性変形が周囲部材により拘束されることによる圧縮応力場の形成であり、幅や高さ方向に切断した場合でも板厚方向の部材が残存していることから影響が軽微であったと考えられる。

② 重畳した残留応力場に対する切断影響確認

個別の残留応力場を模擬した解析モデルによる切断影響の解析結果を踏まえて、溶接残留応力と SP による残留応力を重畳させた残留応力場を模擬した切断影響の解析を実施した。重畳した残留応力場を再現する方法として、溶接及び SP それぞれ個別に評価した残留応力を直接足し合わせる方法にて実施した。その結果、両因子を組み合わせた残留応力場は切断の影響を受ける可能性があることを確認した。なお、SP の応力場の解析による模擬方法は確立されていないことから、解析による模擬については今後も検討が必要である。そのため、事業計画で実施予定の要素試験体を用いた試験的アプローチでは、実際に溶接継手を製作し SP 施工して切断するとともに、その切断過程の残留応力を測定するなどして、取得したデータから解析モデルの境界条件の検討やチューニングを行う必要がある。

2) 試験的アプローチによる切断影響確認

要素試験体を用いた試験的アプローチにより解析手法の妥当性を確認するとともに、実機構造模擬解析に資する試験データの取得を目的とした試験要領詳細を立案した。

① 要素試験に用いる試験体の検討

要素試験に用いる試験体は、国内 500MWe 級 BWR プラントのシュラウド中間胴（H4 溶接部含む）を模擬し、板厚約 30mm のステンレス鋼板（平板）を突合せ溶接した構造とした。この要素試験体には、実機ピーニング施工条件を模擬した SP を施工する。なお、実機シュラウドにおける溶接及び SP は、大径の円筒構造物であるシュラウドの自己拘束条件下で施工されているため、本試験体の製作では、実機シュラウドの自己拘束を模擬するような拘束治具が必要となる。本拘束治具の形状及び寸法等の詳細については、本要素試験の模擬解析結果を用いた調査を計画する。

② 要素試験と模擬解析との比較検証方法

解析モデルによる重畳応力場の再現等（解析的アプローチ）の妥当性を確認するため、要素試験体より得られたデータ（試験的アプローチ）

と比較による検討が必要である。H4 溶接部を模擬して SP 施工した要素試験体の残留応力測定は切断前後で実施し、測定した残留応力場を再現するように解析モデルに反映する方針とし、要素試験体の表層部残留応力の測定方法には X 線回折法を適用するが、必要に応じて、ひずみゲージ切断解放法を組み合わせることとした。

(3) 現地気中環境における残留応力測定工法の成立性検討

蒸気発生器出入口管台セーフエンド溶接部表面近傍に各種ツールを案内するための装置として、超音波ショットピーニング設備と蒸気発生器出入口管台内面供用期間中検査装置を用いることを想定し、それぞれの設備に残留応力測定機材を搭載して現地気中環境における残留応力を測定する工法の成立性を検討した。その結果、蒸気発生器水室内への搬入については両設備とも実績もあり工法・作業性等への問題はないと判断した。また、設備の構成及び配置も類似しており、作業計画上也配置レイアウトの成立性等には問題はないことを確認した。超音波ショットピーニング設備と比べて、設備組み立てによる蒸気発生器水室内作業が少ない、供用期間検査装置を選定し、マニピュレータ先端の施工ヘッド部への残留応力測定機材の搭載構造を検討するとともに、測定時に測定部位と測定機材とが干渉せず測定可能であることを確認した。なお、以下に示す応力測定系の課題があることが分かった。

- 残留応力測定機材の電源ケーブル、並びに制御系 USB ケーブルが既製システムの構成では短く、延長した場合には、必要電圧の低下やノイズの影響などが想定され、延長可否の検討が必要であることが分かった。
- 放射線環境という観点では、実測データの文献値より蒸気発生器水室上部の蒸気発生器伝熱管の除染後の環境線量として約 0.4mSv/h との参考測定結果があり、搭載する残留応力測定機材は放射線環境場での使用を前提としていないことから、その影響確認が必要であることが分かった。

以上より、今後の課題として、①電源ケーブル、並びに制御系 USB ケーブルの延長検討と、②応力測定系への放射線環境の影響確認が必要と判断し、今後の検討確認が必要な事項とした。

(4) 事業計画案の見直し

(1)、(2)及び(3)の成果を総合的に検討し、令和5年度以降の予防保全対策技術の保守性に係る研究の事業計画案（実施不可も含む）を見直した。

1) 切断・加工仕様策定のための試験計画の検討

PWR超音波ショットピーニング気中環境施工部位に対する残留応力測定工法の課題として応力測定系のケーブル延長可否の確認（必要電圧確保、ノイズの影響）や放射線環境の影響確認等が挙げられ、後者の放射線の影響確認試験の詳細検討に着手することとした。また、PWR廃炉環境として特有な条件に除染があることから、「PWRプラントにおける除染の影響確認試験の立案」を計画に追加した。

2) 残留応力測定方法・設備等の課題解決方法の検討

市販の残留応力測定機材を搭載した残留応力測定工法の課題として、応力測定系のケーブル延長可否の確認や放射線環境の影響確認等の課題が挙げられた。後者の放射線の影響については文献値で0.4mSv/hとの情報があるが、実測値がなく、実現性の判断の観点から「放射線環境の影響確認」を優先して実施する事業計画に見直した。

5.4 ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究

再循環ポンプ等に用いられているステンレス鋼鑄鋼に対する高経年化技術評価等では、熱時効による靱性の低下挙動評価に H3T モデルを用いているが、このモデルは主に加速劣化試験等の結果に基づいて PWR プラント環境を考慮して開発された経緯がある。そのため、本研究では、実機材料（対象機器：再循環ポンプ）を用いて組織観察、破壊靱性試験等を実施し、実機環境での H3T モデルによる熱時効による靱性の低下挙動評価手法を温度の異なる BWR の評価に用いることの保守性検証を目的としており、令和 4 年度は、以下の項目について実施した。対象材料は、令和 3 年度に H-1 再循環（PLR）ポンプ（B）より採取した試験体である。本試験体は、現在、NFD で核燃料汚染物として保管・管理されている。

(1) 試験片の製作

試験体から破壊靱性試験片、引張試験片と観察用試験片（金相観察、硬さ測定、APT 用）の採取板取図を検討し、粗切断・エッチング等の手順を策定した。供試体の粗切断と合わせて断面エッチングにより補修溶接部や有害な欠陥等がないことを確認した。この供試体から、破壊靱性試験片、引張試験片、並びに観察用試験片の製作を製作した。

(2) 試験の実施

加工した試験片を用いて製作した試験片を用いて各種材料試験を行った。今年度の試験結果に対する評価は暫定的なものであり、来年度以降データがそろった段階で最終的な評価を行う。

1) 引張試験

板型試験片を用いて 288℃で 4 回引張試験を実施した。ひずみの測定には DIC 法を用い、0.2%耐力、引張強さ、破断伸び等の機械的性質に関するデータを得た。本データは H-1 実機材の基礎特性データの把握や破壊靱性試験結果の Validity 判定等に用いられる。

2) 破壊靱性試験

1T-C(T)試験片を用いて 288℃で 6 回破壊靱性試験を実施し、ASTM E1820-21 の Annex15 に規定される NDR 法を用いて J-R 曲線を求めるとともに、延性亀裂進展開始点の J 積分である J_q を得た。ASTM E1820-21 の判定基準により、 J_q については Valid と判定された。

3) フェライト相割合の評価

1T-C(T)試験片の近傍より採取した 12 個の組織観察試験片により金相観察を行い、画像データからフェライト相とオーステナイト相を分離して面積比を求め、フェライト量を評価した。試験片ごとのフェライト量は 12.5%～22.3%の範囲かつ平均値は 15.9%であり、試験片毎の変動はあるものの、化学成分より評価した 15.1%と近い値であった。

4) 硬さ測定

組織観察用試験片 6 体について、ナノインデント硬さ及びビッカース硬さを測定した。ナノインデント硬さを既往知見と比較し、僅かながら硬化の傾向があることを確認した。

5) アトムプローブトモグラフィー (APT)

組織観察用試験片 6 体のフェライト相から分析用試験片を採取し、APTを行った。相分離の指標となる Variation 値は約 0.2 で既往知見との比較により僅かながら熱時効による相分離が進行していると考察された。また、運転中に生じたと推察される G 相クラスターも検出された。

(3) 事業計画案の見直し

令和 3 年度に策定した令和 4 年度以降のステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究の事業計画案に対し試験の進捗状況を踏まえると、計画の見直しを要する項目はなかった。

5.5 実機材料を活用した安全研究検討委員会等の開催実績

本事業において収集した情報、研究計画（安全研究戦略マップ含む）、試験方法及び採取したデータの透明性及び客観性を高めるとともに、専門家の意見を広く評価に反映するために、電中研及び電中研以外の専門家による「実機材料を活用した安全研究検討委員会」を設置・運営し、有識者からの意見を参考とするとともに技術的側面からのレビューを受けた。また、原子力規制庁に対して定期的な進捗報告を実施した。実機材料を活用した安全研究検討委員会は、令和4年度事業開始時（令和4年7月）、中間成果報告（令和4年11月）、並びに成果報告（令和5年2月）の3回開催した。また、原子力規制庁に対する報告は進捗状況に応じて4回実施した。

5.6 まとめ

電中研は、原子力規制庁より、令和4年度原子力施設等防災対策等委託費（実機材料等を活用した経年劣化評価・検証（実機材料を活用した健全性評価に係る研究））事業を受託し、本年度実施計画範囲の研究を完了し、委託報告書としてまとめた。

添付資料

添付資料-1 実機材料を活用した安全研究検討委員会運営要項

添付資料-2 秘密保持誓約

令和4年7月19日制定

令和4年11月2日改定

実機材料を活用した安全研究検討委員会運営要項

1. 名 称

実機材料を活用した安全研究検討委員会

2. 目 的

原子力規制委員会原子力規制庁原子力施設等防災対策等委託費（実機材料等を活用した経年劣化評価・検証（実機材料を活用した健全性評価に係る研究）事業（以下、本事業）について、有識者から技術的な側面からのレビューを受けることにより、収集した情報、研究計画（安全研究戦略マップ含む）、試験方法及び取得したデータの透明性及び客観性を高める。

3. 主催

（一財）電力中央研究所 エネルギートランスフォーメーション研究本部
材料科学研究部門

4. 検討委員会の構成

- （1）本検討会の構成は以下に示す委員とオブザーバ、事務局より構成される。
 - ・ 委員：外部有識者、原子力規制庁、電力中央研究所
 - ・ オブザーバ：電気事業者、ATENA、プラントメーカー（東芝 ESS、日立 GE、三菱重工）、試験・研究機関、大学、JAEA、原子力規制庁等
 - ・ 事務局：電力中央研究所
- （2）主査は各委員の中から互選により選出する。主査は副主査を選任できる。
- （3）主査が検討会に出席できない場合には、副主査が代行する。

5. 検討委員会の活動

本検討委員会は、本事業の実施計画、実施内容、実施結果について、技術的な側面からのレビューを行う。

6. 開催時期・方法

年3回程度開催する。

開催方法は、対面形式の会議もしくは Web 会議とする。

7. 秘密保持

本検討委員会の参加者は、本検討委員会に参加した時点で別紙に定める秘密保持

誓約書の内容を理解し、署名したものとする。秘密保持対象となる配布資料先の特
定は議事録に記載されている「参加者」、「配布資料のみ」に記載されている氏名に
よって行うものとする。

8. その他

- (1) 本検討委員会について、事務局の事前の許可なく録音、録画することを禁止
する。
- (2) 委員への謝金については電中研の規定「所外者に対する交通費、謝礼等に関
する取扱基準」に則る。委員会を事情により欠席し、別途説明・レビューを
行う機会を設けた場合は、委員会に出席した場合と同様、謝金を支払うもの
とする。
- (3) 本要項に定めのない事項は、本検討会で別途協議する。

以 上

秘密保持誓約

本誓約は、「実機材料を活用した安全研究検討委員会」で得た情報の扱いに関するものである。

秘密情報の使用および開示、その他秘密情報に係る不正行為を防止するため、秘密情報の保持に関する必要事項を定めた下記の条項を遵守することを誓約する。

第1条（基本的留意事項）

個人情報保護法、不正競争防止法等の情報保護に関する諸法令（関連する官公庁のガイドラインを含む）の遵守に留意する。

第2条（秘密情報の範囲）

「秘密情報」（以下「本秘密情報」という）とは、「実機材料を活用した安全研究検討委員会」で得た情報をいい、口頭、文書、図面、電子データ、磁気データその他一切の形式によるものを含む。

2. 前項の規定にかかわらず以下の各号に該当する場合は、本秘密情報として取り扱わないものとする。

- (1) 相手方からの提供、貸与あるいは収集の時点ですでに公知のもの、または開示後情報を受領した当事者の責によらずして公知となったもの。
- (2) 相手方が提供、貸与した時点ですでに保有しているもの
- (3) 第三者から秘密保持義務を負うことなく正当に入手したもの。

第3条（秘密保持の義務）

本誓約において明示的に規定されている場合を除き、本秘密情報を第三者に開示、漏洩してはならない。

第4条（本秘密情報の管理）

本秘密情報を自己の役員および従業員（以下「関係者等」という。）に開示することができる。ただし、関係者等に対して本誓約において規定する秘密保持義務と同等の義務を課すものとする。また、本秘密情報を「実機材料を活用した安全研究検討委員会」以外のために使用してはならない。

第5条（事故等発生時の報告義務）

本秘密情報につき、漏洩等の不正行為が発生した場合、「実機材料を活用した安全研究検討委員会」事務局に報告するものとする。

第6条（協議解決）

本誓約に関して疑義を生じた場合、または本誓約に定めのない事項については、「実機材料を活用した安全研究検討委員会」にて解決する。

第7条（有効期間）

本誓約の有効期間は、各年度における第一回「実機材料を活用した安全研究検討委員会」開催日から当該年度の3月31日までとする。ただし、本誓約に規定する秘密保持義務は、有効期間終了後も本事業の終了まで有効に存続するものとする。

以上