

令和4年度原子力産業基盤強化事業委託  
(原子力機器へのAM材適用に向けた材料データベース構築)

事業報告書

2023年3月

三菱重工業株式会社

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

株式会社IHI

## 目次

<b>1</b>	<b>事業目的</b> .....	<b>1-1</b>
<b>2</b>	<b>事業計画</b> .....	<b>2-1</b>
2.1	事業内容.....	2-1
2.1.1	STEP1 検証プロセス方法の妥当性確認.....	2-1
2.1.2	STEP2 規格化に向けた材料データの取得.....	2-2
2.1.3	2022 年度以降実施試験の試験計画策定.....	2-2
2.2	事業体制.....	2-2
2.3	事業工程.....	2-3
<b>3</b>	<b>STEP1 検証プロセス方法の妥当性確認</b> .....	<b>3-1</b>
3.1	試験方案策定.....	3-1
3.1.1	試験基本仕様.....	3-1
3.1.2	試験片造形に関わる仕様.....	3-28
3.2	試験片の製作.....	3-31
3.2.1	試験片の造形、造形の記録.....	3-31
3.3	材料試験.....	3-103
3.3.1	硬さ試験.....	3-103
3.3.2	組織試験.....	3-106
3.3.3	化学分析.....	3-128
3.4	評価.....	3-133
3.4.1	材料試験結果の評価.....	3-133
3.4.2	国内規格としての対応案策定.....	3-143
<b>4</b>	<b>STEP2 規格化に向けた材料データの取得</b> .....	<b>4-1</b>
4.1	物性値取得向け試験片の製作.....	4-1
4.1.1	試験方案策定.....	4-1
4.1.2	試験片の製作.....	4-13
<b>5</b>	<b>2022 年度以降実施試験の試験計画策定</b> .....	<b>5-1</b>
5.1	STEP1 検証プロセス方法の妥当性確認.....	5-2
5.1.1	常温引張試験.....	5-2
5.2	STEP2 規格化に向けた材料データの取得.....	5-4
5.2.1	常温引張試験.....	5-5
5.2.2	高温引張試験.....	5-6
5.2.3	疲労試験.....	5-8
5.2.4	硬さ試験.....	5-10
5.2.5	腐食試験.....	5-11
5.2.6	SCC 試験.....	5-14

5.2.7	組織試験	5-19
5.2.8	化学分析	5-20
5.2.9	材料物性試験	5-21
5.2.10	破壊靱性特性の確認試験	5-23
5.2.11	非破壊検査	5-24
5.3	STEP3 モックアップ検証方法の妥当性確認	5-28
5.3.1	PBF 法	5-29
5.3.2	DED 法	5-29
5.4	試験工程	5-30
<b>6</b>	<b>まとめ</b>	<b>6-1</b>

### 略語、略称の一覧

AM :	Additive Manufacturing の略。(付加製造)
CT (X線 CT) :	Computed Tomography の略。(コンピュータ断層撮影 (法))
DED :	Directed Energy Deposition の略。(指向性エネルギー堆積 (法))
HIP :	Hot Isostatic Pressing の略。(熱間静水圧成形 (法)、熱間等方圧加圧 (法))
IHI :	株式会社 IHI
JIS :	Japan Industrial Standards の略。(日本産業規格)
JSME :	The Japan Society of Mechanical Engineers の略。(一般社団法人日本機械学会)
JSME 材料規格 :	日本機械学会 発電用原子力設備規格 材料規格 (JSME S NJ1)
JSME 設計・建設規格 :	日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1)
JSME 溶接規格 :	日本機械学会 発電用原子力設備規格 溶接規格 (JSME S NB1)
MHI :	Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.の略。(三菱重工業株式会社)
PBF :	Powder Bed Fusion の略。(粉末床溶融結合 (法))
PT :	Penetrant Testing の略。(浸透探傷試験)
RT :	Radiographic Testing の略。(放射線透過試験)
SA :	Solution Annealing の略。(固溶化熱処理)
SCC :	Stress Corrosion Cracking の略。(応力腐食割れ)
SR :	Stress Release の略。(応力除去 (熱処理))
東芝 ESS :	東芝エネルギーシステムズ株式会社
日立 GE :	日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社



## 1. 事業目的

### (1) 事業の背景

3Dプリンタによる付加製造技術（AM：Additive Manufacturing）は、従来工法（機械加工、溶接等）では高度な製作ノウハウと作業者の技量なくして製作困難である複雑な形状の部品を高品質でタイムリーに安定して供給できる可能性があり、設計自由度も拡大可能なため、性能向上に加え、より合理的な設計と効率的な製作が可能である。また一体化による部品点数の削減や製造リードタイムの短縮などによるコスト削減効果も大きくなると考えられる。この製造技術は一般産業界で普及しつつあり、原子力分野でも、原子力プラントの安全性・信頼性・効率性の一層の向上に寄与すると見込まれる。

また、2011年の東日本大震災以降、停止しているプラントの再稼働も少数に留まっており、原子力向け製品の製造機会が大幅に減少している。このため、技術継承や設備廃棄等の問題も生じており、高度な品質要求への対応能力を維持できず、原子力事業から撤退するサプライヤが増え続けている。原子力産業界へAM材の適用を図っていくことができれば、原子力関連製品市場への新規サプライヤの参入機会が生まれ、国内の原子力産業の維持・拡大に寄与すると見込まれる。

他方、AM材の適用を原子力製品に適用するためには、サプライヤによる品質のばらつきを排除する品質要求の統一化を図るため、AM材適用における規格を制定する必要がある。現在、日本機械学会において有識者を交えた規格化の議論が進められているが、規格化にはAMによる材料特性データベースの整備が必要となる。このためには、1社では不可能である多数の材料データを、複数の原子力製品メーカーで協業・分担して蓄積し、原子力産業で共通に利用するAM材規格の制定にフィードバックしていく取り組みが必要である。

### (2) AMの技術と種類

米国NEI(Nuclear Energy Institute)が2019年5月に提出したレポート<sup>[1-1]</sup>によると、米国産業界において、原子力産業への適用可能性があり、原子炉構造物の製造に最も関心のあるAM技術として以下の3種を選定している。表1-1にこれらの方式の模式図を示す。

- ・パウダーベッド方式（PBF：Powder Bed Fusion）
- ・デポジション方式（DED：Directed Energy Deposition）
- ・バインダージェット方式（BJT：Binder Jetting）

PBFは、原料粉末を1層ごとに敷き詰める工程と、造形したい部分にレーザーや電子ビームなど高エネルギービームを照射する工程を繰り返すことで造形物を得る方式である。DEDは、レーザーや電子ビームなどの高エネルギービームの照射位置に原料粉末やワイヤーなど造形材料を供給し、造形物を得る方式である。PBFは、高

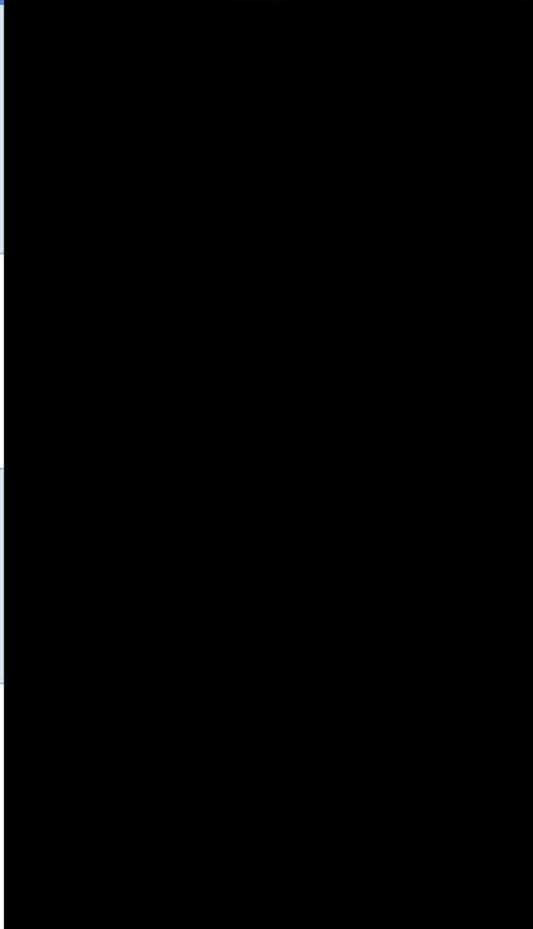
い形状精度が期待できるのに対し、DED は、一般的に形状精度は劣るものの高い造形速度が得られるという特徴がある。また一般的に、レーザー式は電子ビーム式より高精度、電子ビーム式はレーザー式より高速とされている。一方、BJT は、金属粉末などにバインダー(液体結合剤)を噴射して選択的に造形する方法である。金属粉末射出成形(MIM : Metal Injection Molding)法のように成形体を成形した後、バインダーを除去し、焼結して造形体を製作する。BJT は、PBF や DED に比べ、密度は低くなるが、微細形状の小型部品に向いている。

このように AM 技術はその方式により特徴が異なってくるため、対象製品の種類、形状や大きさ等により最適な AM 技術を選定し、それぞれの特徴を考慮したうえでの適用することになる。

(参考文献)

[1-1]NEI Report, “Roadmap for Regulatory Acceptance of Advanced Manufacturing Methods in the Nuclear Energy Industry,” Prepared by the Nuclear Energy Institute, May 13, 2019.

表 1-1. AM 各方式の模式図

方式	模式図
<p>パウダーベッド (PBF)</p>	
<p>デポジション (DED)</p>	
<p>パウダー ワイヤー</p>	
<p>バインダージェット (BJT)</p>	

### (3) 規格化動向

AM の一般的な規格化は、ASTM(American Society for Testing and Materials:米国試験材料協会)と ISO (International Organization for Standardization:国際標準化機構) が各技術専門委員会で約 10 年前から材料、3D データ、造形、検査方法等の国際標準化を推進中であり、日本では 2019 年度より ISO ベースで JIS 規格化策定に着手している。

また、原子力製品適用に向けた規格化として、ASME (American Society of Mechanical Engineers : 米国機械学会) 委員会では圧力容器への適用クライテリア策定に向けた議論が進行中であり、JSME (Japan Society of Mechanical Engineers:日本機械学会) では 2020 年度に AM 技術の原子力規格化を目指して原子力専門委員会の下でタスクグループを立ち上げ、2025 年度以降の規格制定を目指している。

## 2. 事業計画

### 2.1 事業内容

本委託事業は、AM 材を原子力製品へ適用するために規格化に必要な材料特性データベースを整備すると共に、今回得られる材料特性データベースを、規格検討にフィードバックし、これを原子力分野での AM 材の基準とすることを目的とし、以下を実施する。

- ① 日本機械学会での議論内容に基づき、規格化に必要な材料データの取得計画を策定する。(2021 年度)
- ② 複数のプロセスで製作した AM 材について、各種材料試験を実施し、規格化のための材料データベースを構築する。(2022～2024 年度)

2021 年度は国内外の他産業界を含む規格化動向の調査結果に基づき規格化に向けた材料データベース策定方針の検討を行い、材料データ取得計画の策定を行った。この成果を踏まえ、本委託事業は、AM 材を原子力製品へ適用するために規格化に必要な材料特性データベースを整備すると共に、今回得られる材料特性データベースを、規格検討にフィードバックし、これを原子力分野での AM 材の基準とする。材料データ取得は以下 3 段階(STEP)に分けて行う計画とする (2022～2024 年度)。対象材料は原子力機器で広く使用されているオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS316L) とする。

- ① STEP1：検証プロセス方法の妥当性確認
- ② STEP2：規格化に向けた材料データ取得
- ③ STEP3：モックアップ検証方法の妥当性確認

このうち、2022 年度の具体的な実施内容と実施方法は以下の通り。なお、検討結果は第三者レビューとして、JSME 原子力専門委員会 AM 技術規格検討タスクのレビューを受ける。

#### 2.1.1 STEP1 検証プロセス方法の妥当性確認

材料品質が確保された領域を認定するプロセスの検証方法の妥当性を確認するためのデータ取得、評価を行う。データ取得は 4 社が独立して実施し、得られた 4 バッチ分のデータによる評価を行う。2022 年度については粉末床溶融結合法 (PBF 法) に対して実施する。

##### (1) 試験方案策定

- ✓ 2021 年度の成果に基づき、試験マトリクス、試験片形状、試験方法など 4 社間で共通となる試験基本仕様を定義する。
- ✓ PBF 造形装置、使用粉末、造形条件、後処理方法など試験片造形に関わる仕様を検討し、各社毎に異なる項目の仕様を定義する。

## (2) 試験片の製作

- ✓ 各社は(1)項で定義した仕様に従い、試験片を造形する。
- ✓ 寸法外観検査、非破壊検査、熱処理チャートなど、仕様に従い品質記録を残す。

## (3) 材料試験

- ✓ 各社は、それぞれ造形した試験片に対し、(1)項で定義した仕様に従い材料試験を実施する。試験項目は常温引張試験、硬さ試験、組織試験、化学分析とする計画である。2022年度はこのうち常温引張試験以外の項目についてのデータ取得を行う。

## (4) 評価

- ✓ 材料試験で得られたデータからプロセス検証方法の妥当性を評価し、国内規格としての対応案を策定する。

### 2.1.2 STEP2 規格化に向けた材料データの取得

AM 材の規格化に向けては、材料特性が既存材料に対する要求を満足することを示すか、又は新規材料採用ガイドラインに基づく手続きをとる必要があるが、いずれの場合においてもそのバックグラウンドとなる材料データの取得が必要である。2022年度は物性値データ取得用の試験片製作までを実施範囲とする。

#### (1) 物性値取得向け試験片の製作

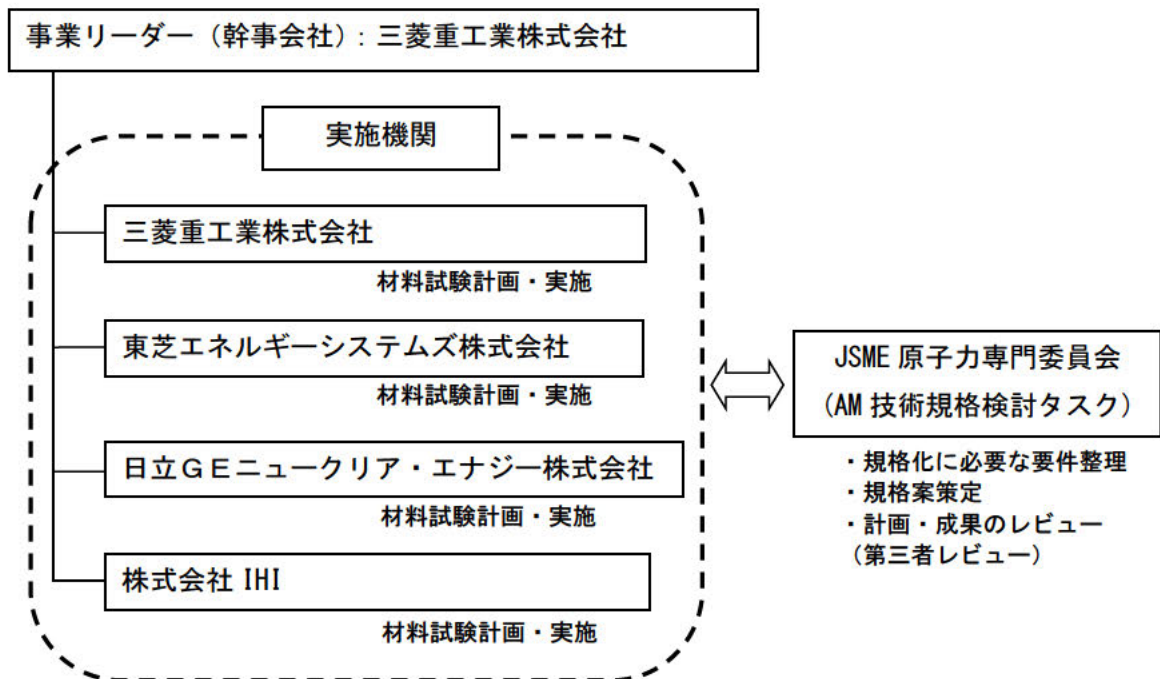
- ✓ 各社保有（又は委託先）の PBF 造形装置を用い、任意の位置で物性値取得用試験片を造形する。造形条件は STEP1 向けに定義したものと同一とする。
- ✓ 熱処理は従来規格で要求されている固溶化熱処理と、品質向上に有意である HIP（HIP+固溶化熱処理）を施した 2 パターンとする。
- ✓ DED については、1 社が試験片を造形する。
- ✓ DED の熱処理は、固溶化熱処理と、DED の特徴であるフランジなどの追加造形の可能性を考慮し、熱処理なしの 2 パターンとする。

### 2.1.3 2022 年度以降実施試験の試験計画策定

2022 年度以降、機械試験、疲労試験、SCC 試験等を実施する予定である。これら試験の試験計画を具体化する。

## 2.2 事業体制

実施体制を以下に示す。事業リーダー（幹事会社）は MHI とし、事業の進捗管理、全体取り纏めを実施する。実施機関は MHI、東芝 ESS、日立 GE、IHI の原子力機器製造メーカ 4 社とし、材料試験計画の策定、試験片造形、材料試験をそれぞれ分担して実施する。



### 2.3 事業工程

2022年度の実施スケジュールを以下に示す。

	2022年度						
	9	10	11	12	1	2	3
1. STEP1 検証プロセス方法の妥当性確認							
(1) 試験方案策定	■						
(2) 試験片の製作			■				
(3) 材料試験			■				
(4) 評価						■	
2. STEP2 規格化に向けた材料データの取得							
(1) 物性値取得向け試験片の製作					■		
3. 2022年度以降実施試験の試験計画策定							
(1) 2022年度以降試験計画策定	■						■ 最終報告
4. まとめ							▼

### 3. STEP1 検証プロセス方法の妥当性確認

#### 3.1 試験方案策定

##### 3.1.1 試験基本仕様

###### (1) 試験マトリクス

STEP1 における造形モデルの基本方針を図 3.1.1(1)-1 及び図 3.1.1(1)-2 に示す。造形モデルは、ASME PTB-13-2021 の 8 章「Additive Manufacturing Procedure Qualification」で規定された造形領域及び試験方法を参考に決定したものであり、主に以下の影響を評価することを目的とした配置となっている。

- ・ リコータの移動方向  
リコータの移動方向については、粉末を敷く始まりと終りの位置で層の性質に差が生じる可能性がある。
- ・ シールドガスの流れ方向  
熔融時に生じるヒュームの分布がガスの流れ方向によって差が生じる可能性がある。
- ・ 光源からの距離  
光源からの距離によって照射形状に差が生じる（光源から離れるほど熔融箇所レーザー形状は楕円となる）。
- ・ 複数光源による造形  
複数光源で造形した場合、その境界において材料特性に差が生じる可能性がある。
- ・ 造形方向（試験方向）  
造形方向により材料特性に異方性が生じる可能性がある。
- ・ 積層高さ方向  
造形物の高さの位置によって材料特性に差が生じる可能性がある。
- ・ 冷却速度の影響  
造形位置や造形手順によって、試験片ごとに造形中の冷却速度に差が生じる可能性がある。

STEP1 ではこれら因子の影響度合いを確認するために、PBF 装置のベースプレート上に網羅的に、かつ複数方向で試験片を造形し、材料試験に供する。材料試験によりベースプレート上での材料特性の分布を把握することで、ASME PTB-13-2021 の造形領域、試験方法の考え方の妥当性を確認する。造形の考え方は以下の通り。

- 1 バッチ分の試験片造形に 3 回の造形を行うが (図 3.1.1(1)-1 の造形①～③)、その 3 回の造形で使用する粉末や造形条件などは造形機関ごとに可能な限りすべて統一させることとし、これらを同一バッチとして扱う。
- 引張試験片は垂直方向 (Z 方向)、水平方向 (X 方向、Y 方向)、及び 45°方向を選定し、垂直方向引張試験片と水平方向引張試験片は高さ方向に 3 段 (上段、中段、下段)、45°方向引張試験片は高さ方向に 1 段 (下段) 造形する。
- 垂直方向引張試験片は、造形①の垂直方向に造形した角棒を上段、中段、下段に三分割して採取し、水平及び 45°方向の試験片は、適宜サポートを設置して 1 本ずつ造形する。
- 引張試験片は造形①～③で造形した角棒材から加工して採取する。試験片形状は JIS Z 2241:2011 「金属材料引張試験方法」に基づくものとする。
- 硬さ試験、組織試験及び化学分析用試験片は、垂直方向に造形した角棒から上段、中段、下段位置から採取する。なお、図 3.1.1(1)-1 では造形②にて垂直方向に造形した角棒から採取することとなっているが、造形①の角棒から採取しても良い。
- リコータ面に対し造形物が平行に位置する場合、粉末を敷く際にリコータへの反力が大きくなり、均一な粉末層を引くことが出来なくなるリスクがあることから、造形物はリコータ面に対し数度(°)程度傾けて配置する。
- 引張試験片は、材料試験に供する前に非破壊検査を実施する。試験結果に影響を与えるような欠陥がないことを確認するために、試験片加工前の全試験片に対して放射線透過試験 (Radiographic Testing : 以下、「RT」という) を、試験片加工後の全試験片に対して浸透探傷試験 (Penetrant Testing : 以下、「PT」という) を実施する。
- 造形位置による内部欠陥の分布傾向把握に資するデータ蓄積を目的に、代表数点に対して X 線断層撮影法 (X-ray Computed Tomography : 以下「X 線 CT」という) による欠陥評価を実施する。
- STEP1 の造形は MHI、東芝 ESS、日立 GE、IHI の 4 社でそれぞれ実施する。試験片は各社の条件 (装置、粉末、入熱条件など) でそれぞれ 1 バッチ造形する。4 社分の試験片を材料試験に供することで、4 社間の相違の確認・評価を行う。
- 試験片は造形後、固溶化熱処理を実施する。熱処理条件は従来材規格の範囲内で、任意の条件で実施する。



また、試験片 ID は以下の考え方に従い設定することとする。

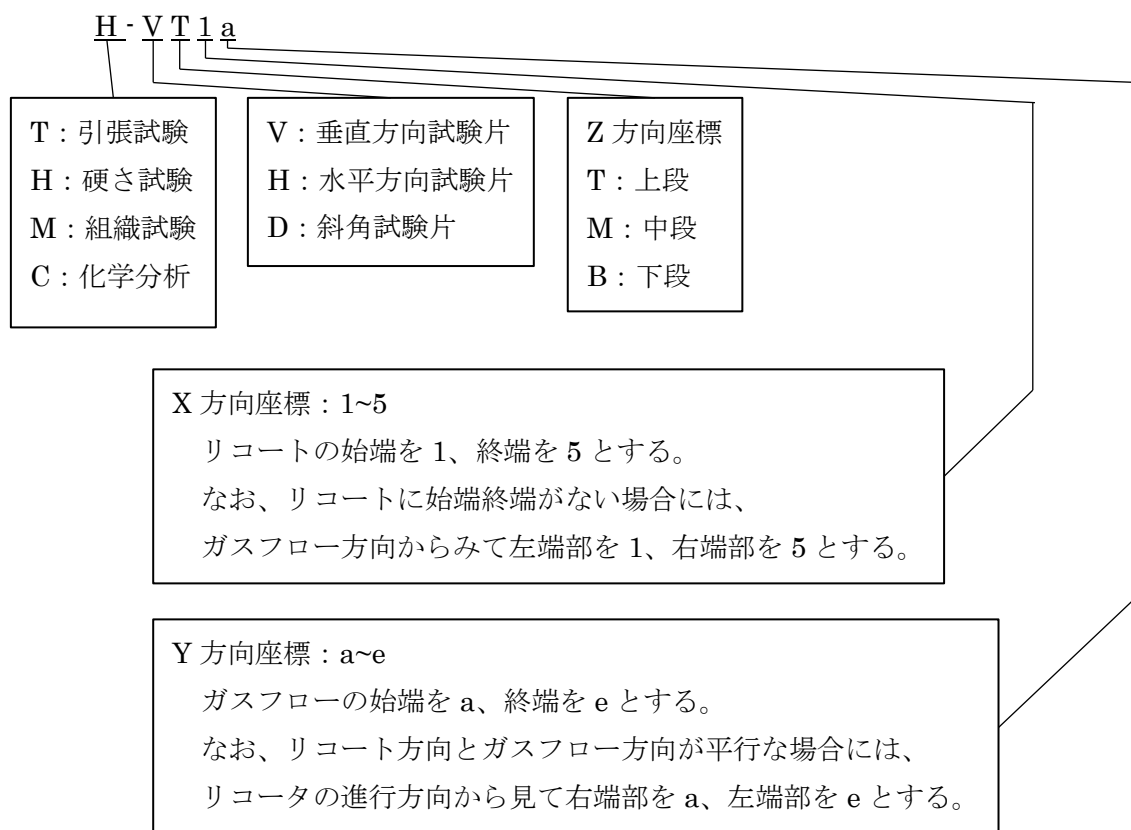


表 3.1.1(1)-1 に試験マトリクスを示す。また、硬さ試験、組織試験の試験位置を図 3.1.1(1)-3 に示す。造形の際のレーザ光源が一つの場合、座標 1a、3c、5d の上段、中段及び下段、又は座標 1a、1e、3c、5a、5d の上段、中段及び下段から試験片を採取し、試験に供する。光源が二つの場合、座標 1a、1e、3c、5a、5d の上段、中段及び下段から試験片を採取し、試験に供する。

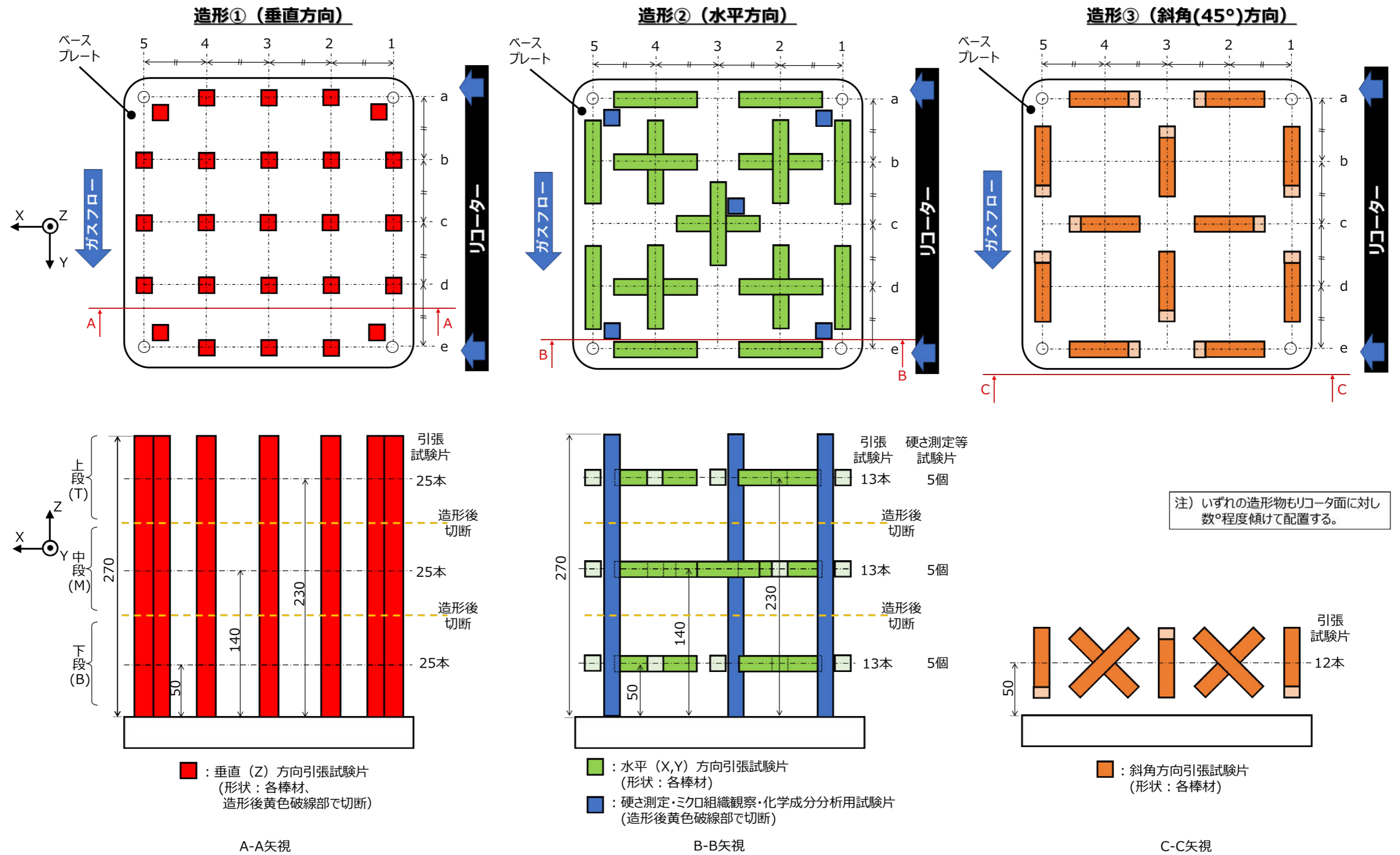
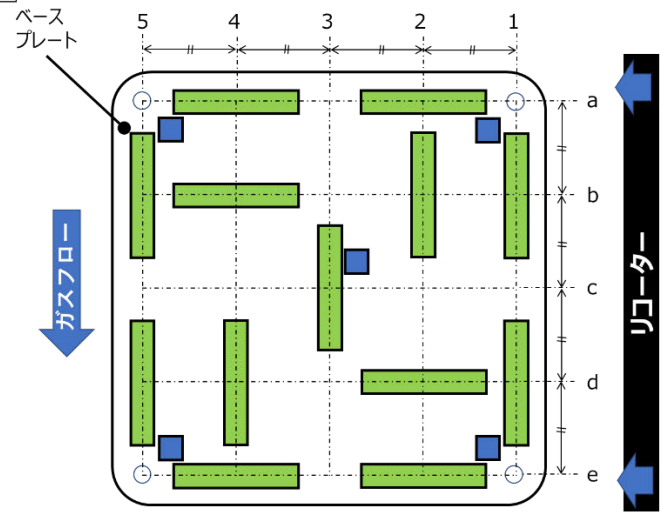
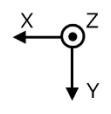


図 3.1.1(1)-1 STEP1 における造形モデルの基本方針(図は一例)

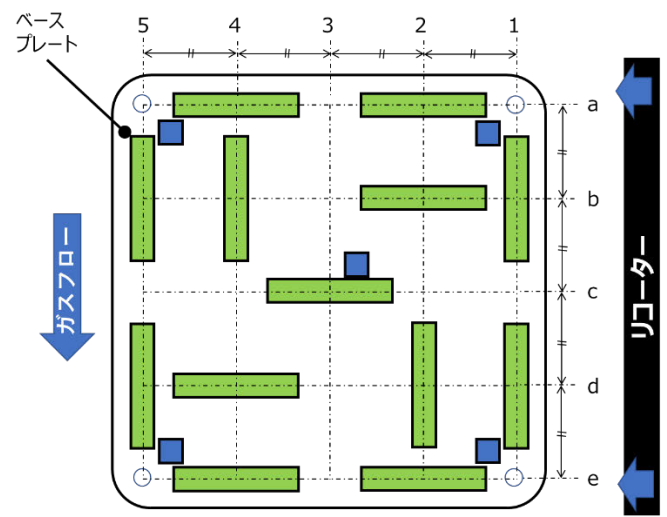
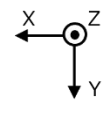
注) いずれの造形物もリコータ面に対し  
数°程度傾けて配置する。

**造形② (水平方向)**

**上段**  
(高さ230mm断面)



**中段**  
(高さ140mm断面)



**下段**  
(高さ50mm断面)

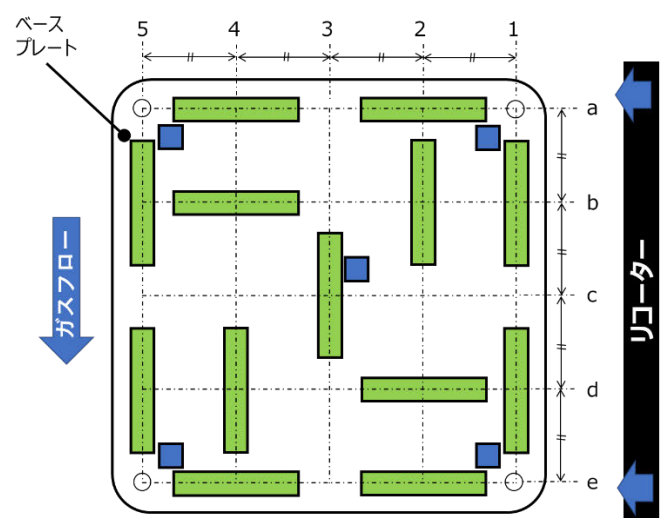
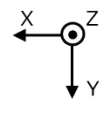


図 3.1.1(1)-2 STEP1 の造形方案のうち造形②の各高さの断面図(図は一例)

表 3.1.1(1)-1 STEP1 の試験マトリックス

試験項目	試験片採取方向	試験片個数			合計
		上段	中央	下段	
常温引張試験	垂直	25	25	25	75
	水平	13	13	13	39
	斜角(45°)	—	—	12	12
硬さ試験*		3 (5)	3 (5)	3 (5)	9 (15)
マイクロ試験*		3 (5)	3 (5)	3 (5)	9 (15)
化学分析		5	5	5	15

\*合計 9 か所の試験座標：1a、3c、5e の上段、中段、下段

合計 15 か所の試験座標：1a、1e、3c、5a、5e の上段、中段、下段

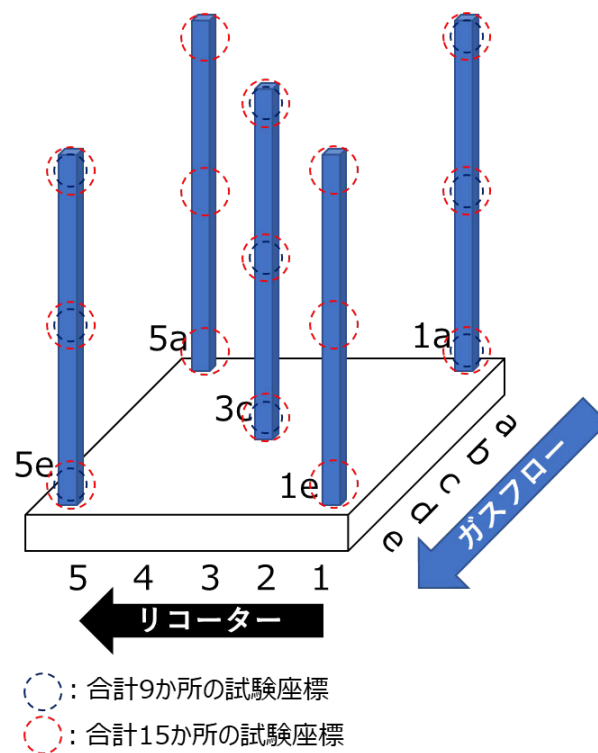


図 3.1.1(1)-3 硬さ試験、組織試験及び化学分析の試験位置(図は一例)

## (2) 試験方法

STEP 1 では、造形位置毎の材料特性のバラつき及び方位の影響を評価することにより ASME PTB 13 の検証プロセス方法の妥当性を確認することを目的として、①常温引張試験の試験片加工、②硬さ試験、③組織試験、④化学分析、及び非破壊検査（⑤放射線透過試験（RT）、⑥浸透探傷試験（PT）、⑦X-線 C-T 試験（CT））を実施する。また、各項目の基本仕様は以下の通りである（STEP1 試験マトリクスと各社分担表 3.1.1(2)-1 に示す）。

① 引張試験片加工 (常温引張試験)

AM 造形材を対象とした常温引張試験は、採取方向が引張強度に及ぼす影響を把握するため、垂直方向、水平方向、45°傾斜の3方位を対象に試験を実施する。図 3.1.1(2)①-1～図 3.1.1(2)①-3 にそれぞれ、垂直方向、水平方向、45°方向の引張試験用部材の配置例を示す。垂直方向の引張試験片は、AM 造形位置による引張強度への影響を把握する観点から、網羅的に 25 か所の造形材についてそれぞれ上部、中部、下部の3部位から合計 75 か所を対象に引張試験片を採取した。同様に、水平方向の引張試験片についても、AM 造形位置による引張強度への影響を把握する観点から、13 か所についてそれぞれ上部、中部、下部の3部位から合計 39 か所を対象に引張試験片を作製した。また、45°傾斜の引張試験片については、下部のみ 12 か所を対象に引張試験片を作製した。引張試験片形状では、JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」に従い、図 3.1.1(2)①-4 に示す 14A 号試験片 (φ4 又は φ6) とし、寸法は作製可能な AM 造形材寸法に従い各造形バッチで決定した。表 3.1.1(2)①-1 に常温引張試験片加工のマトリックスを示す。

表 3.1.1(2)①-1 引張試験片加工マトリックス

試験片位置				規格	備考
	上部	中部	下部	JIS Z 2241 14A 号試験片	試験片寸法は作製可能な AM 造形材寸法に従い各造形バッチで決定。
垂直方向	25	25	25		
水平方向	13	13	13		
45°傾斜	-	-	12		
				126 本	

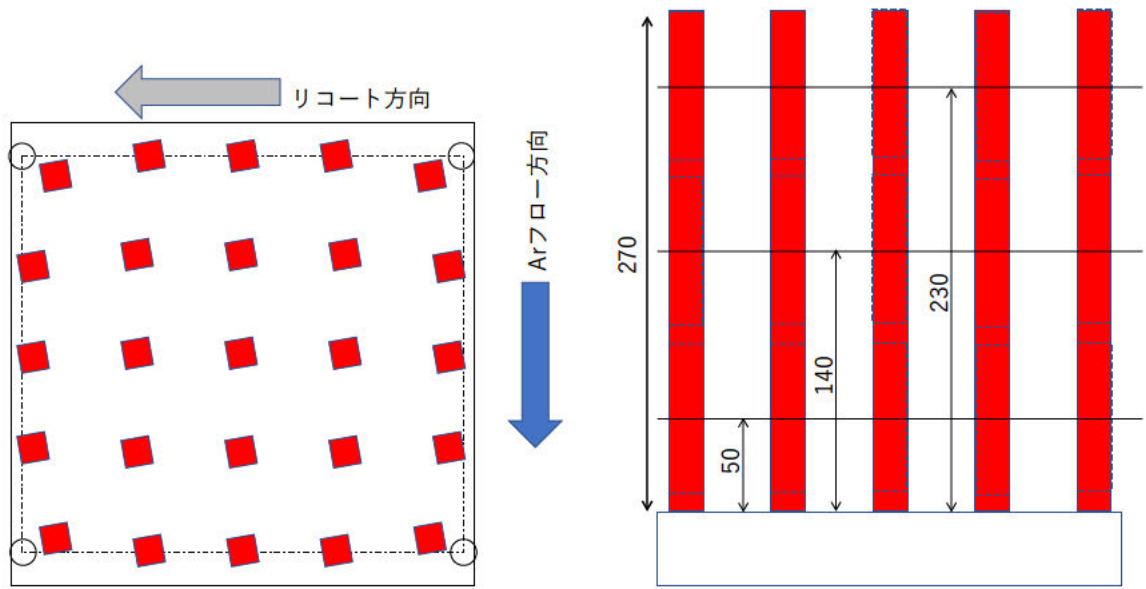


図 3.1.1(2)①-1 垂直方向引張試験用部材の配置例

(25 位置にて上部、中部、下部の 3 部位から合計 75 か所を対象に引張試験片を採取)

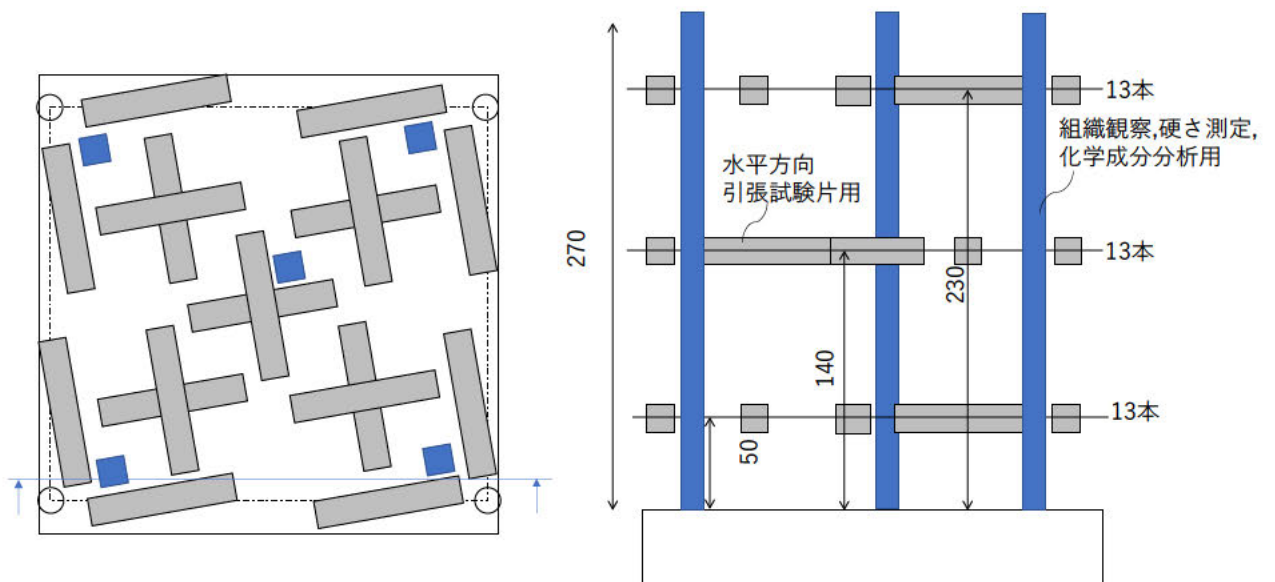


図 3.1.1(2)①-2 水平方向引張試験用部材の配置例

(13 位置にて上部、中部、下部の 3 部位から合計 39 か所を対象に引張試験片を採取)

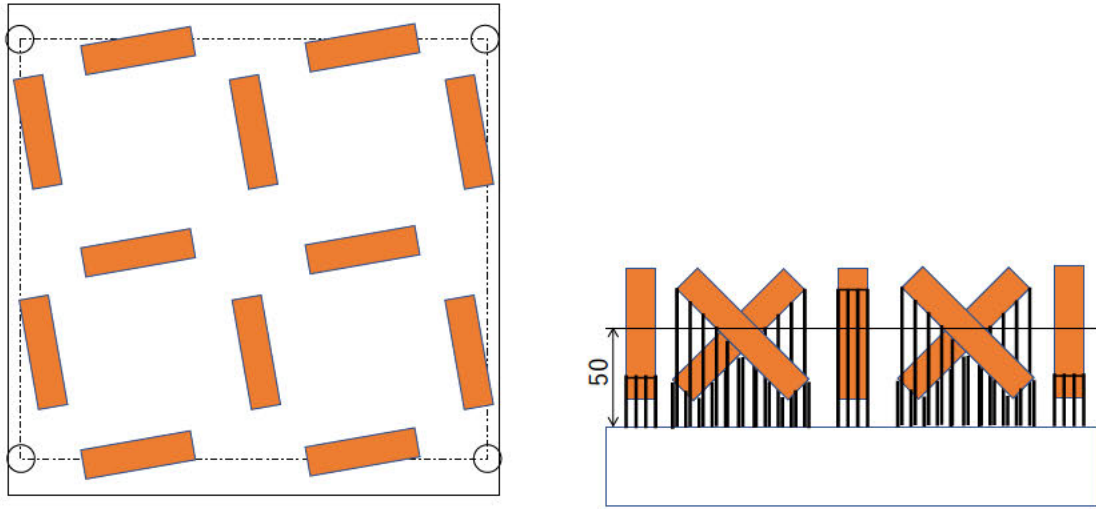


図 3.1.1(2)①-3 45°方向引張試験用部材の配置例  
(12 か所から引張試験片を採取)



図 3.1.1(2)①-4 引張試験片形状例 (JIS Z 2241 14A 号試験片)



② 硬さ試験

1 光源造形及び2 光源造形にあたり AM 造形位置（Ar ガスフロー上流下流、リコート方向及び造形高さ）による硬さへの影響を把握する観点から、硬さ測定用試験片の採取位置を検討した。

AM 造形位置（Ar ガスフロー上流下流及びリコート方向）による硬さへの影響確認について四隅及び中央部の5 か所について、それぞれ上部、中部、下部の3 部位から合計15 か所を対象に硬さ測定用試験片を作製した（1 光源造形はパターン1、2 光源造形がパターン3）。また、造形方向（積層方向に対して平行面及び直行面）による硬さへの影響確認について二隅及び中央部の3 か所について、それぞれ上部、中部、下部の3 部位から合計9 か所のXY 面及びYZ 面（x 方向：リコート方向、y 方向：Ar ガスフロー方向）に対し、硬さ測定用試験片を作製した（1 光源造形はパターン2、2 光源造形がパターン3）。

硬さ測定方法は、JIS Z 2244-1「ビッカース硬さ試験—第1部：試験方法」である。なお、測定点数は各5 点とする。硬さ測定マトリックスは表 3.1.1(2)②-1~表 3.1.1(2)②-3 に示す。また、硬さ測定用試験片の造形位置を図 3.1.1(2)②-1 に示す。

表 3.1.1(2)②-1 硬さ試験マトリックス

パターン1:AM 造形位置による影響確認（1 光源）

試験片位置					観察面	規格	備考
	上部	中部	下部	合計	YZ 面	JIS Z 2244	測定点数は各5 点とする。
四隅	1×4	1×4	1×4	15 か所			
中央部	1	1	1	(15 面)			

表 3.1.1(2)②-2 硬さ試験マトリックス

パターン2:造形方向の影響確認（1 光源）

試験片位置					観察面	規格	備考
	上部	中部	下部	合計	XY 面 及び YZ 面	JIS Z 2244	測定点数は各5 点とする。
二隅	1×2	1×2	1×2	9 か所			
中央部	1	1	1	(18 面)			

表 3.1.1(2)②-3 硬さ試験マトリックス

パターン 3 : AM 造形位置による影響確認 (2 光源) (2 バッチ)

試験片位置				観察面	規格	備考
	上部	中部	下部			
四隅	1×4	1×4	1×4	XY 面 及び YZ 面	JIS Z 2244	測定点数は各 5 点とする。
中央部	1	1	1			

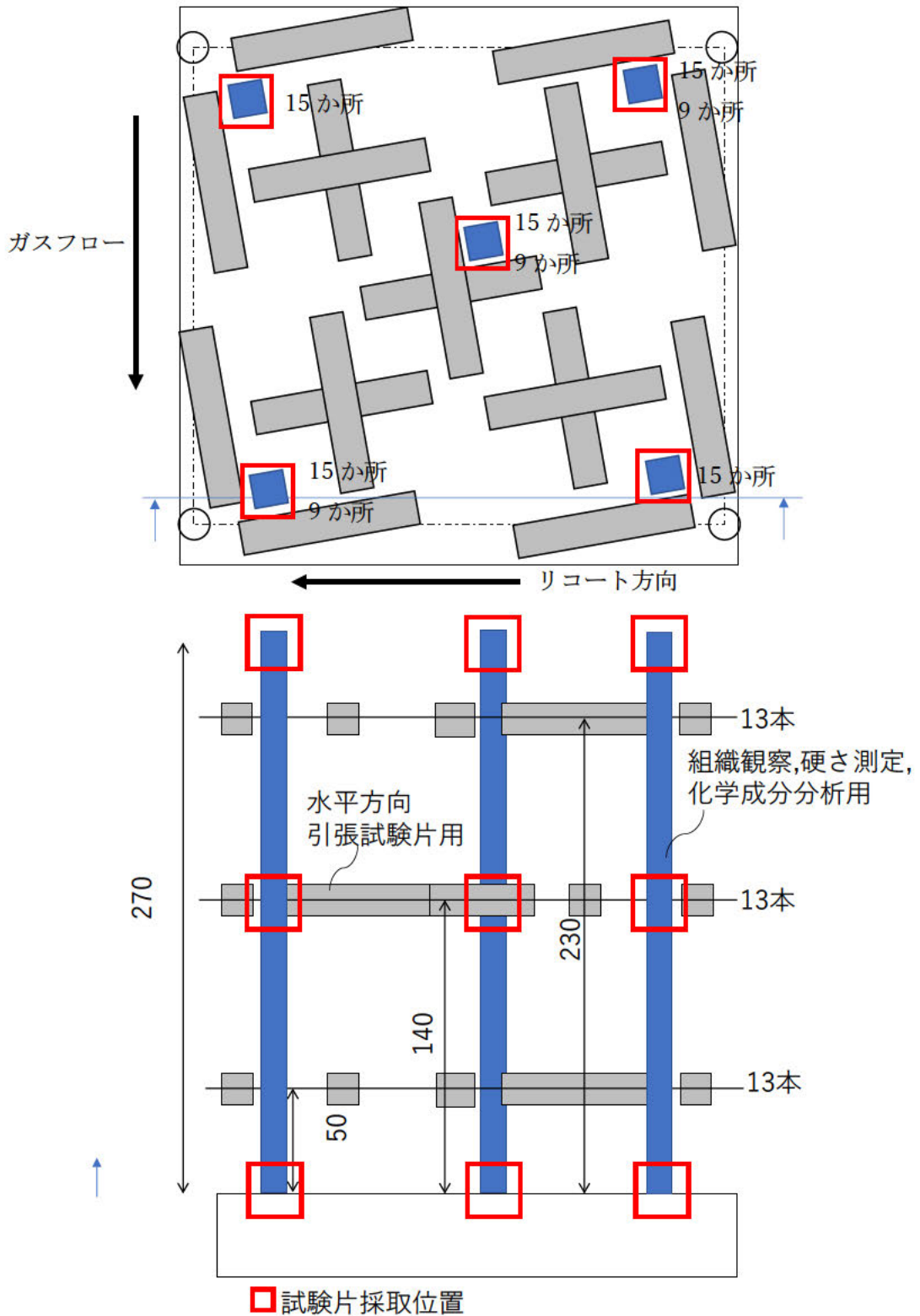


図 3.1.1(2)②-1(a) 硬さ測定用部材の配置例と試験片採取位置例 (1 光源)  
 (パターン1 及びパターン2)

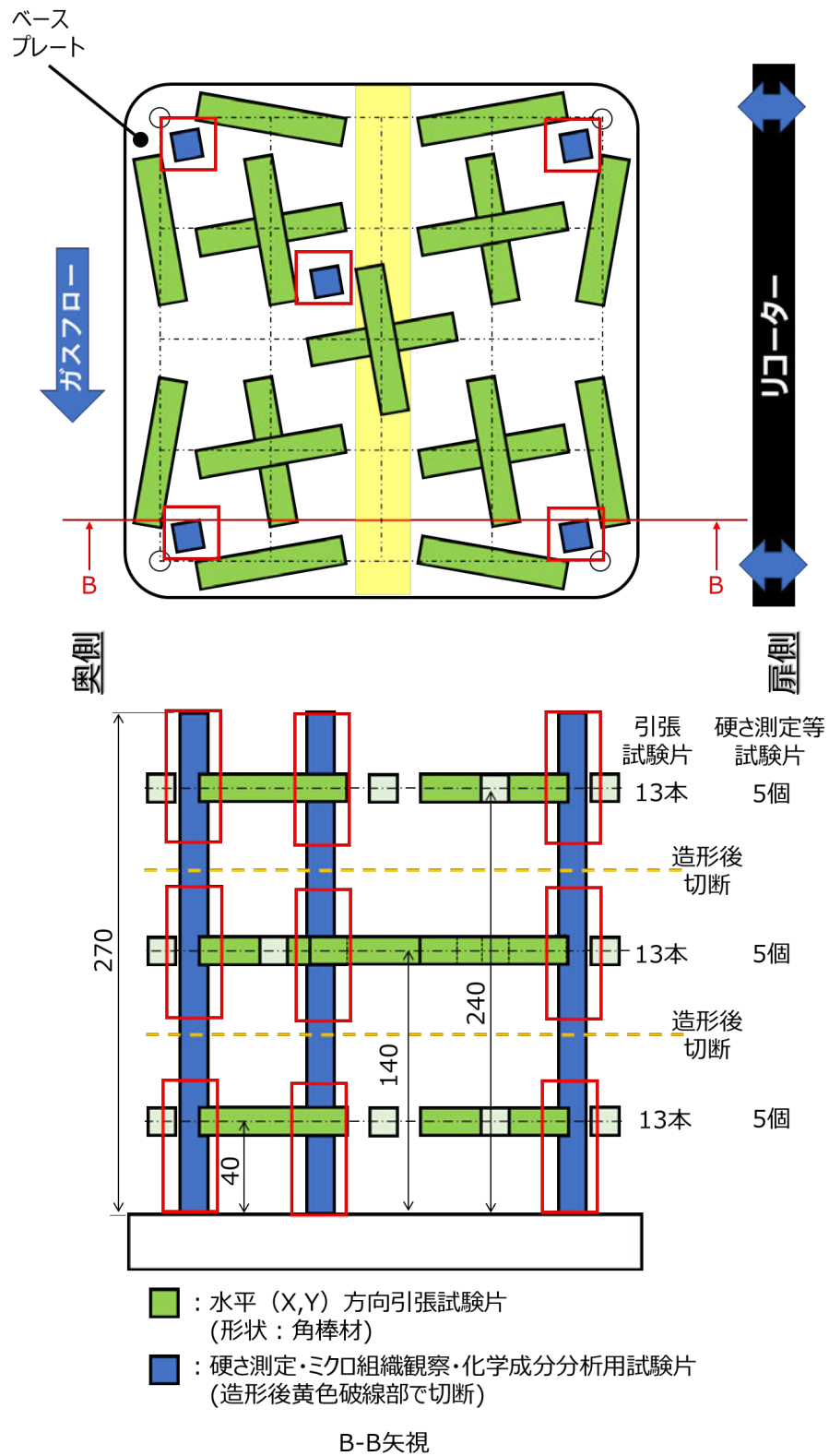
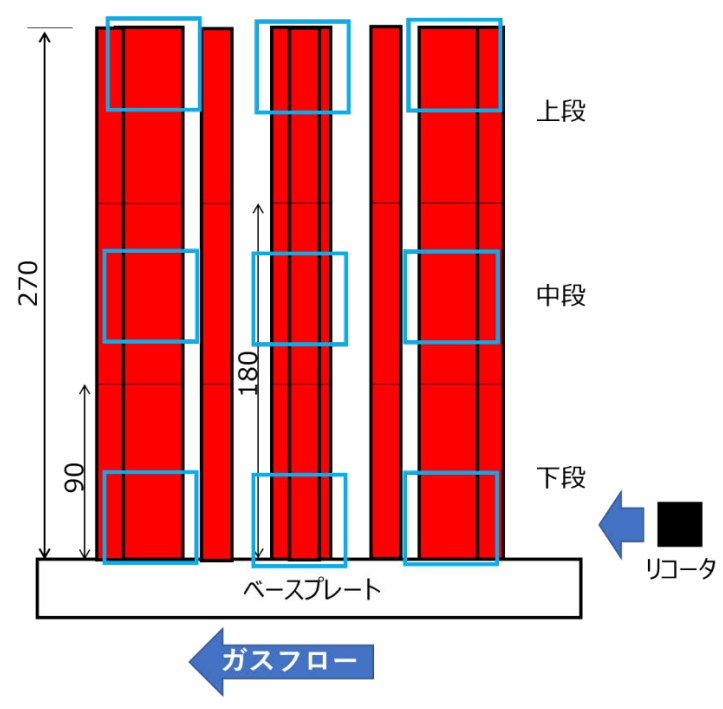
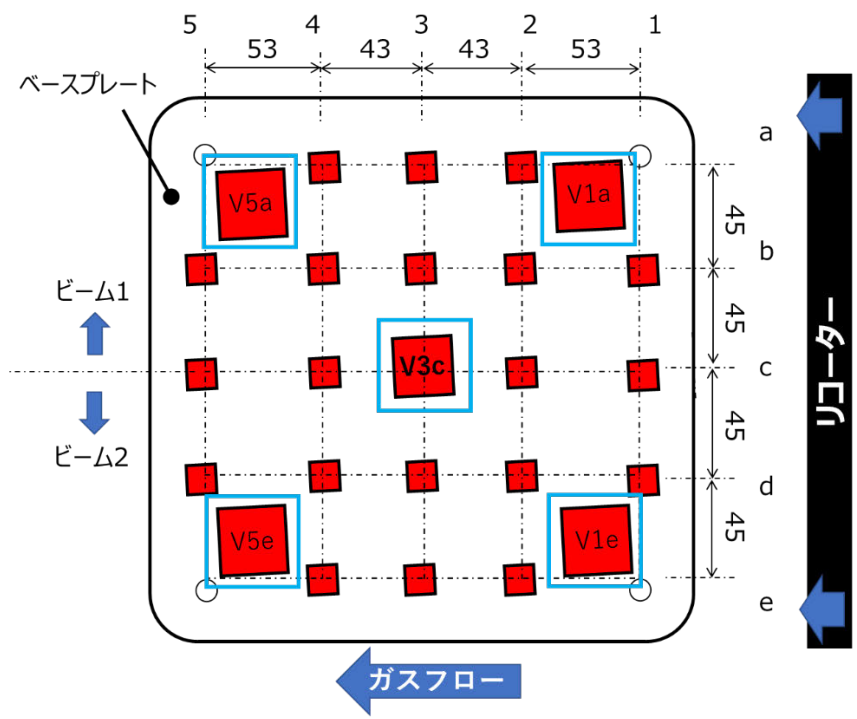


図 3.1.1(2)②-1 (b) 硬さ測定用部材の配置例と試験片採取位置例 (2光源)  
(パターン3) (1)



■ : 垂直 (Z) 方向引張試験片  
 (座標1a、1e、3c、5a、5eについては硬さ測定・ミクロ組織観察・化学成分分析用試験片にも供する)

図 3.1.1(2)②-1 (c) 硬さ測定用部材の配置例と試験片採取位置例 (2 光源)  
 (パターン 3) (2)

### ③ 組織試験

AM 造形位置 (Ar ガスフロー上流下流、リコート方向及び造形高さ、光源からの距離) に対する造形方向による金属組織への影響を把握する観点から、2 バッチの 1 光源造形 AM 造形材に対し、二隅及び中央部の 3 か所について、それぞれ上部、中部、下部の 3 部位合計 9 か所を対象に XY 面及び YZ 面 (リコート方向は Ar ガスフロー方向の垂直場合、X 方向: リコート方向、Y 方向: Ar ガスフロー方向) に対し、組織試験を実施した。また、2 光源造形 AM 造形材について各光源のスキューン範囲の影響を把握するために、四隅及び中央部の 3 か所について、それぞれ上部、中部、下部の 3 部位合計 15 か所を対象に XY 面及び YZ 面に対し、組織試験を実施した。

JIS G 0553 「鋼のマクロ組織試験方法」に従い、組織試験用試験片を採取し、必要に応じて、樹脂埋め、研磨、エッチングした上で、組織試験を実施した。各観察面に対し、マクロ観察 1 領域、ミクロ組織試験 3 領域の組織試験を行う。ミクロ組織試験は、1 領域を 2 つの倍率 (x100、x400 又は x500) で行った。

図 3.1.1(2)③-1 に組織試験用部材の配置例と試験片採取位置例を示す。組織試験マトリックスは表 3.1.1(2)③-1 及び表 3.1.1(2)③-2 に示す。

表 3.1.1(2)③-1 組織試験マトリックス  
(1 光源造形)

試験片位置					観察面	規格	備考
	上部	中部	下部	合計	XY 面 及び YZ 面	JIS G 0321	マクロ領域: 1 領域、ミクロ領 域: 3 領域
二隅	1×2	1×2	1×2	9 か所			
中央部	1	1	1				

表 3.1.1(2)③-2 組織試験マトリックス  
(2 光源造形)

試験片位置					観察面	規格	備考
	上部	中部	下部	合計	XY 面 及び YZ 面	JIS G 0321	マクロ領域: 1 領域、ミクロ領 域: 3 領域
四隅	1×4	1×4	1×4	15 か所			
中央部	1	1	1				

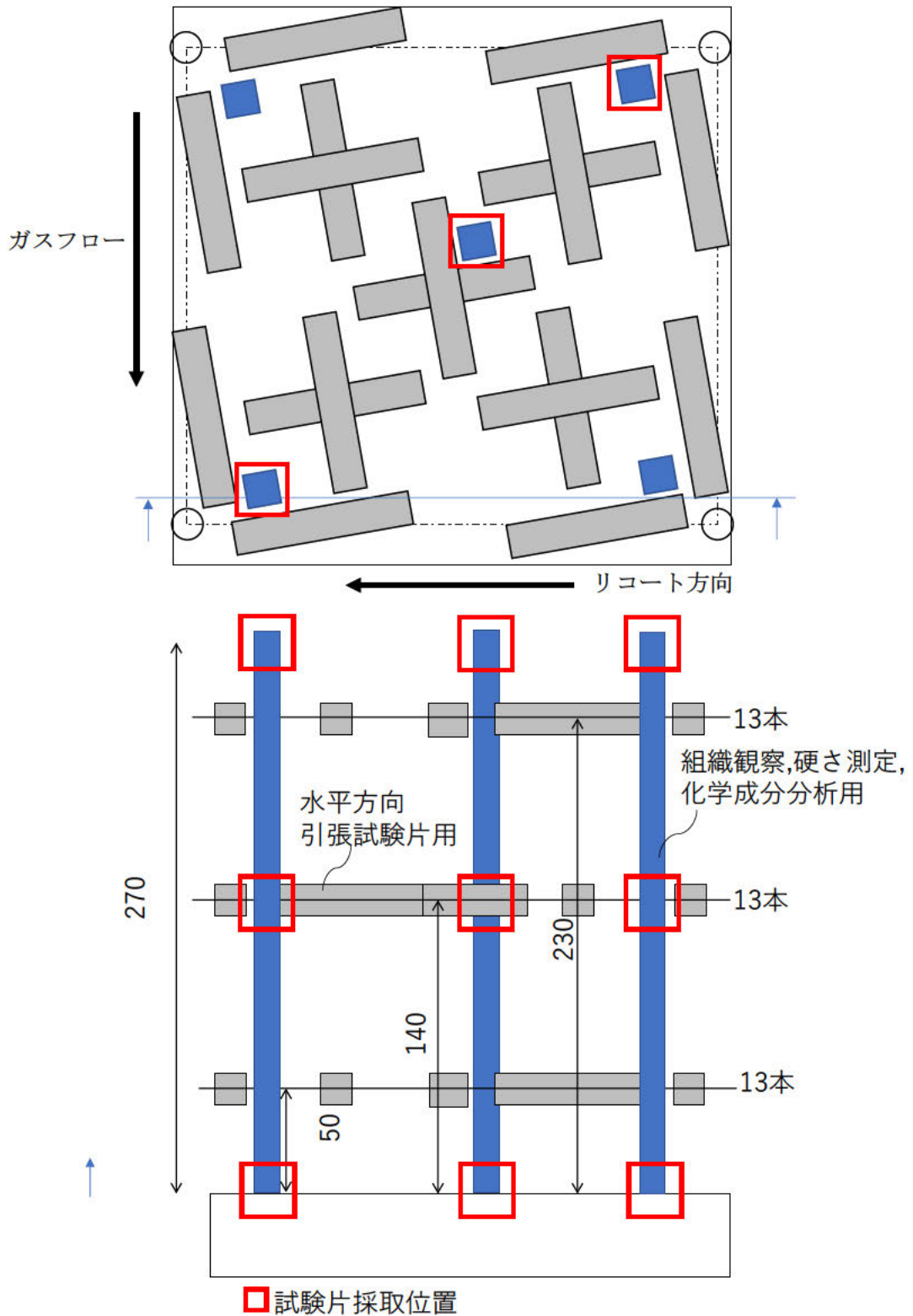


図 3.1.1(2)③-1(a) 組織試験用部材の配置例と試験片採取位置例  
(1 光源及び 2 光源 (1))

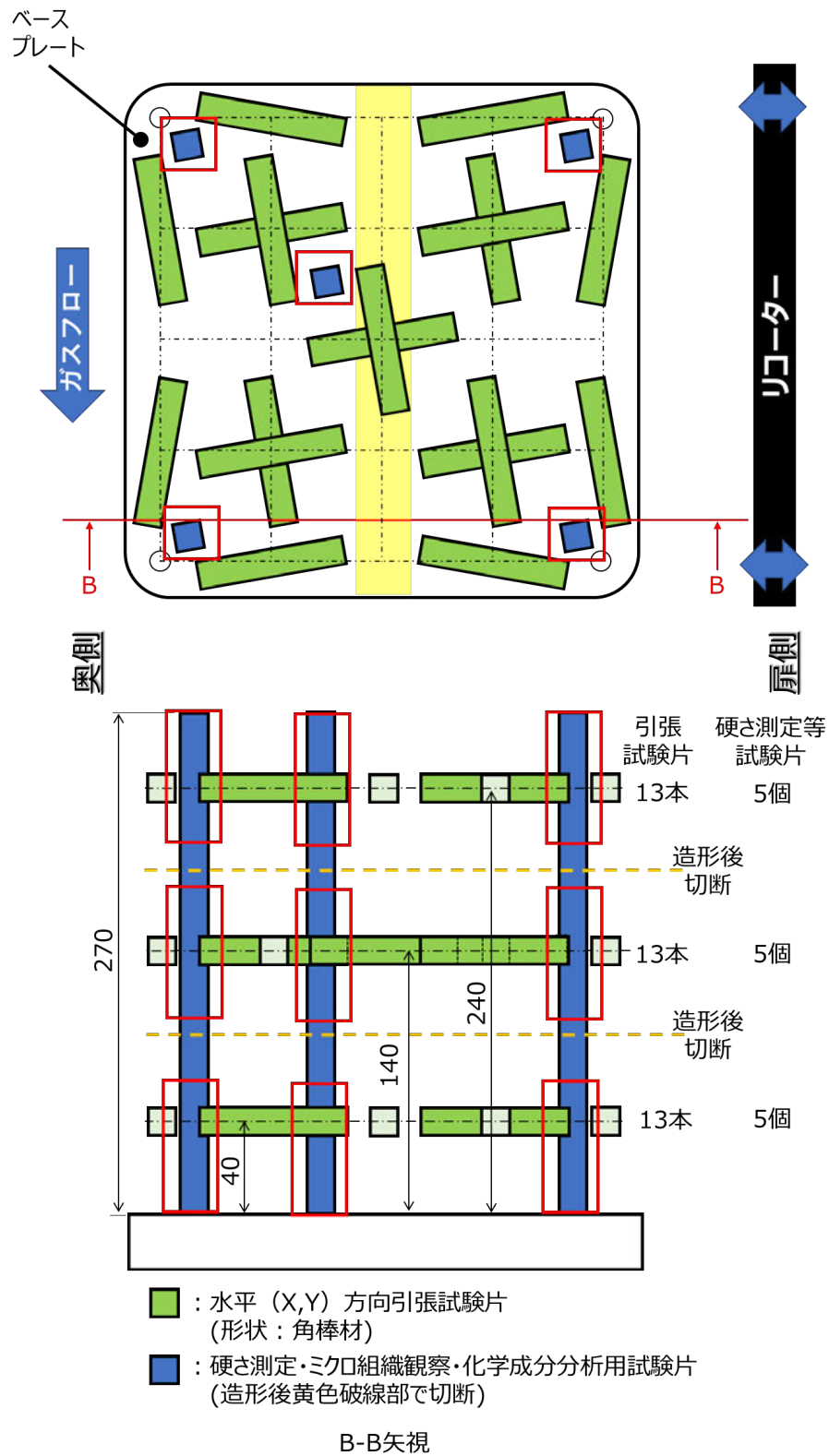
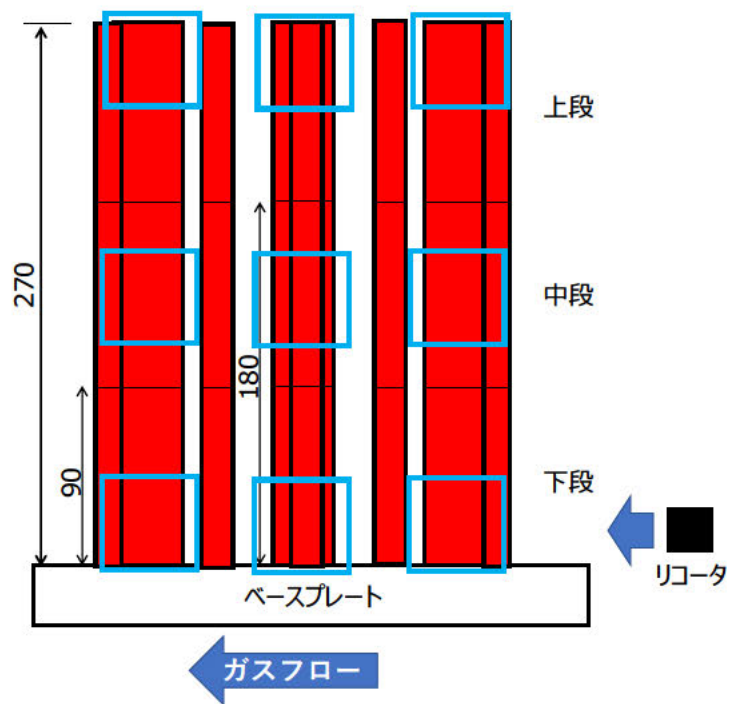
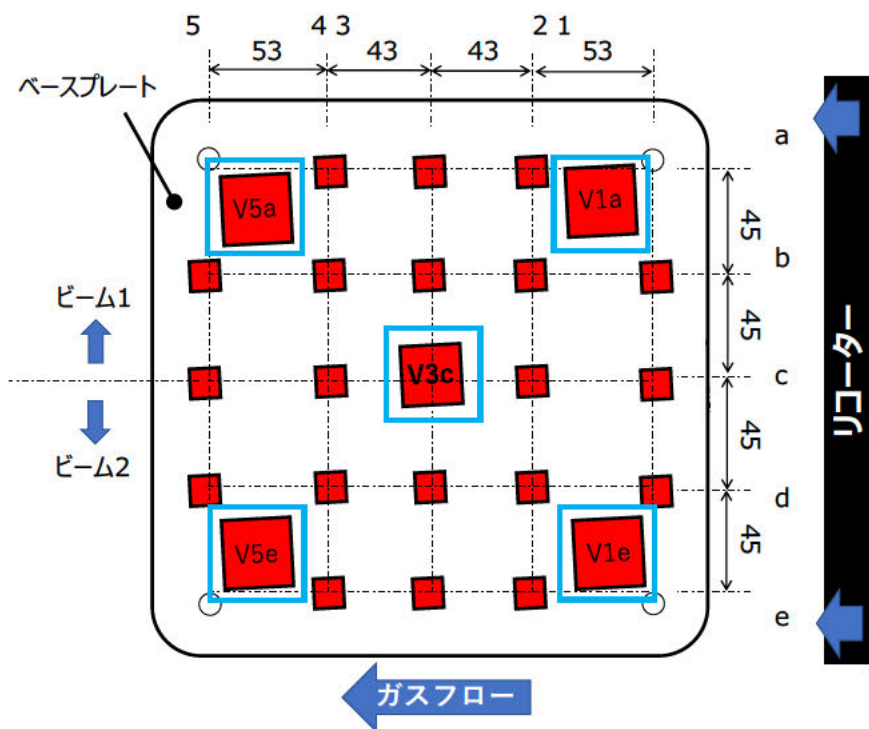


図 3.1.1(2)③-1(b) 組織試験用部材の配置例と試験片採取位置例 (2光源) (1)





■ : 垂直 (Z) 方向引張試験片  
 (座標 1a、1e、3c、5a、5e については硬さ測定・マイクロ組織観察・化学成分分析用試験片にも供する)

図 3.1.1(2)③-1(c) 組織試験用部材の配置例と試験片採取位置例 (2 光源) (2)

#### ④ 化学分析

化学分析には、3回の造形4バッチのAM造形材を対象にJIS G 0321「鋼材の製品分析方法及びその許容変動値」に従い、化学分析を実施する。

図 3.1.1(2)④-1 に化学分析用部材の配置例と試験片採取位置例を示す。化学分析位置は、造形位置による影響を把握する観点から、四隅及び中央部の5か所についてそれぞれ上部、中部、下部の3部位から、合計15か所を対象に分析する（分析用ブロック寸法は作製可能なAM造形材寸法に従い決定する）。化学分析マトリックス及び分析対象化学成分は表 3.1.1(2)④-1 及び表 3.1.1(2)④-2 に示す。分析対象化学成分はJIS規格で規定されるSUS316Lの化学成分及びO、Nである。各元素の分析方法は表 3.1.1(2)④-3 に示す。

表 3.1.1(2)④-1 化学分析マトリックス

対象材料	試験片位置					規格
		上部	中部	下部	合計	
PBF AM 造 形材 (316L)	四隅	1×4	1×4	1×4	15か所	JIS G 0321
	中央部	1	1	1		

表 3.1.1(2)④-2 JIS G 4303:2012「ステンレス鋼棒」で  
規定されるSUS316Lの化学成分 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.030 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	12.00 ~15.00	16.00 ~18.00	2.00 ~3.00

(\*)JIS規格の化学成分に加えて、O及びNを対象に分析を実施する。

表 3.1.1(2)④-3 各元素の分析方法

分析元素	分析方法 (JIS)
C,S	燃焼-赤外線吸収法 (C...G 1211-3 : 2018, S...G 1215-4 : 2018) 表面付着・吸着炭素除去-燃焼-赤外線吸収法 (C...G1211-4 : 2018) 二酸化ケイ素重量法 (Si...G1212 : 1997)
Si	モリブドけい酸青吸光光度法 (G 1212 : 1997) ICP 発光分光分析法 (G 1258-2 : 2014)
Mn,Mo	ICP 発光分光分析法 (G 1258-2 : 2014)
P	モリブドリん酸青吸光光度法 (G 1214 : 1998) ICP 発光分光分析法 (G 1258-2 : 2014)
Ni	沈殿分離 EDTA2Na・Zn 逆滴定法 (G 1216-2 : 2022) ICP 発光分光分析法 (G 1258-2 : 2014)
Cr	ペルオキシ二硫酸アンモニウム酸化 KMnO <sub>4</sub> 滴定法 (G 1217 : 2017) ICP 発光分光分析法 (G 1258-2 : 2014)
O	不活性ガス融解-赤外線吸収法 (G 1239 : 2014)
N	不活性ガス融解-熱伝導度法 (G 1228-3 : 2022)

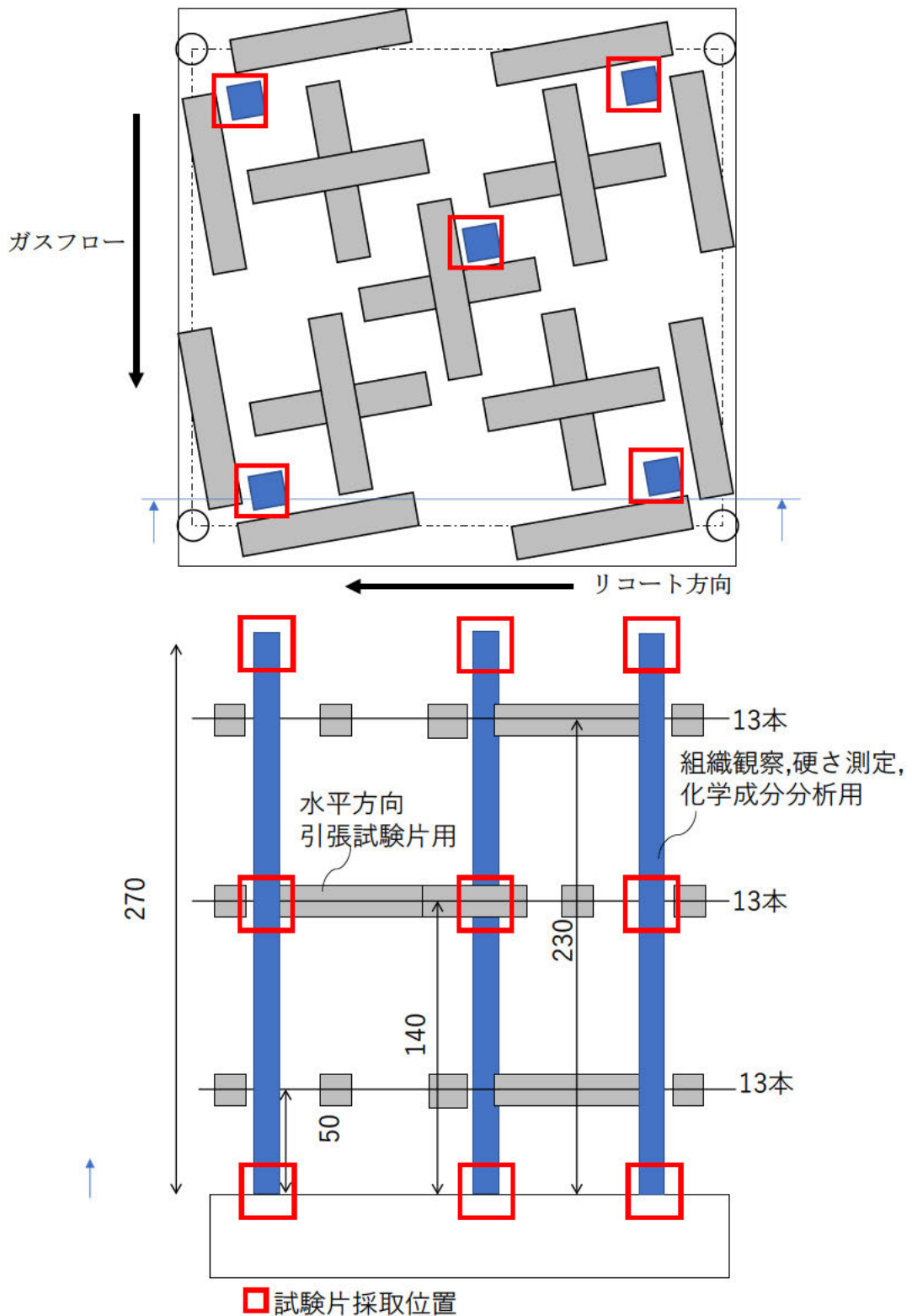
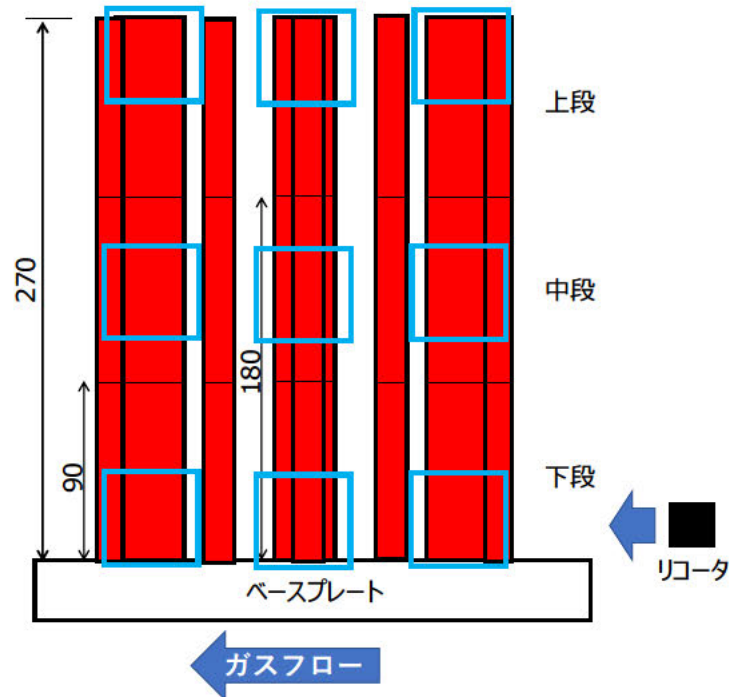
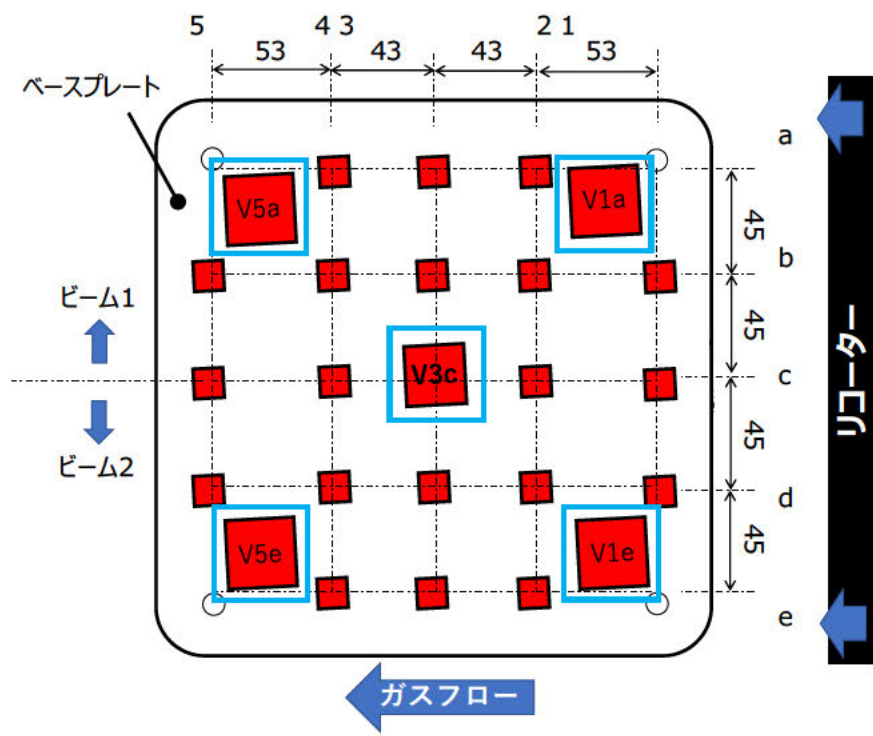


図 3.1.1(2)④-1 (a) 化学分析用部材の配置例と試験片採取位置例 (1 光源)



■ : 垂直 (Z) 方向引張試験片  
 (座標1a、1e、3c、5a、5eについては硬さ測定・マイクロ組織観察・化学成分分析用試験片にも供する)

図 3.1.1(2)④-1 (b) 化学分析用部材の配置例と試験片採取位置例 (2 光源)

表 3.1.1(2)-1 STEP1 試験マトリクスと各社分担

造形方法	造形装置	鋼種	熱処理		項目	実施内容	試験片 採取方向	試験片数			担当会社		
			HIP 処理	固溶化 熱処理				上段	中段	下段			
PBF 方式 (SLM)	SLM280 (SLM Solution)	Type316L	なし	あり	常温引張試験 片加工	JIS Z 2241 14A 号試験片に従い試験片加工を行う。	垂直	25	25	25	三菱重工業株式会社		
							水平	13	13	13			
							斜角 (45°)	0	0	12			
					硬さ測定	パターン 3 に従い、各試験片 5 点測定する。	-	5	5	5			
	組織試験	マクロ 1 枚+ミクロ 3 領域(×2 倍率)での観察を行う。	-	5	5	5							
	化学分析	切粉を採取して分析を行う。	-	5	5	5							
	M2 (Concept Laser)	Type316L	なし	あり	常温引張試験 片加工	JIS Z 2241 14A 号試験片に従い試験片加工を行う。	垂直	25	25	25		東芝エネルギーシステムズ株式会社	
							水平	13	13	13			
							斜角 (45°)	0	0	12			
					硬さ測定	パターン 3 に従い、各試験片 5 点測定する。	-	5	5	5			
	組織試験	マクロ 1 枚+ミクロ 3 領域(×2 倍率)での観察を行う。	-	5	5	5							
	化学分析	切粉を採取して分析を行う。	-	5	5	5							
	M290 (EOS)	Type316L	なし	あり	常温引張試験 片加工	JIS Z 2241 14A 号試験片に従い試験片加工を行う。	垂直	25	25	25			日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社
							水平	13	13	13			
							斜角 (45°)	0	0	12			
					硬さ測定	パターン 1 に従い、各試験片 5 点測定する。	-	5	5	5			
組織試験	マクロ 1 枚+ミクロ 3 領域(×2 倍率)での観察を行う。	-	3	3	3								
化学分析	切粉を採取して分析を行う。	-	5	5	5								
M290 (EOS)	Type316L	なし	あり	常温引張試験 片加工	JIS Z 2241 14A 号試験片に従い試験片加工を行う。	垂直	25	25	25	株式会社 IHI			
						水平	13	13	13				
						斜角 (45°)	0	0	12				
				硬さ測定	パターン 2 に従い、各試験片 5 点測定する。	-	3	3	3				
組織試験	マクロ 1 枚+ミクロ 3 領域(×2 倍率)での観察を行う。	-	3	3	3								
化学分析	切粉を採取して分析を行う。	-	5	5	5								

STEP 1 における非破壊検査の目的は、適切な AM 造形がなされているか、欠陥がなく機械的特性データを取得する試験片として適切かを確認することと、造形領域全体にわたって欠陥の発生状況を把握することである。この目的に鑑み、AM 造形物の内部欠陥有無を確認するため、すべての引張試験用部材（垂直方向 75 本、水平方向 39 本、45°方向 12 本）に対して放射線透過試験 (RT)を実施した。また、その部材から①で作製した引張試験片に対して表面欠陥有無を確認するため、浸透探傷試験 (PT)を実施した。また、造形位置による内部欠陥の傾向把握に資するデータ蓄積を目的として、一部の引張試験片において X 線 CT 試験 (CT)を実施する。非破壊検査の基本仕様は下記に述べる。

⑤放射線透過試験 (RT)

項目	内容
適用規格	判定基準：日本機械学会「発電用原子力設備規格 溶接規格」JSME S NB1-2012 (2013 年追補) 試験方法：日本産業規格「鋼溶接継手の放射線透過試験方法」JIS Z 3104: 1995 ASTM E192「Standard Reference Radiographs of Investment Steel Castings for Aerospace Applications」
試験者	JIS Z 2305 に基づく RT 有資格者（レベル 2 以上）
試験方法	工業用 X 線装置を放射線源とした単壁撮影

⑥浸透探傷試験 (PT)

項目	内容
適用規格	判定基準：日本機械学会「発電用原子力設備規格 溶接規格」JSME S NB1-2012 (2013 年追補) 試験方法：日本産業規格「非破壊試験—浸透探傷試験—第 1 部：一般通則：浸透探傷試験方法及び浸透指示模様のカテゴリ」JIS Z 2343-1: 2001 ASTM E165「Standard Practice for Liquid Penetrant Examination for General Industry」
試験者	JIS Z 2305 に基づく PT 有資格者（レベル 2 以上）
試験方法	溶剤除去性蛍光浸透探傷試験（速乾式現像法） 水洗性染色浸透探傷検査（速乾式現像法）

⑦ X線 CT 試験 (CT)

項目	内容
撮影範囲	引張試験片平行部を撮影することを基本とする。
目標撮像品質	50 $\mu$ m 程度のきずが確認できる品質とする。



以上、①~⑦を踏まえ、STEP 1 の試験フロー例を図 3.1.1(2)-1 に示す。

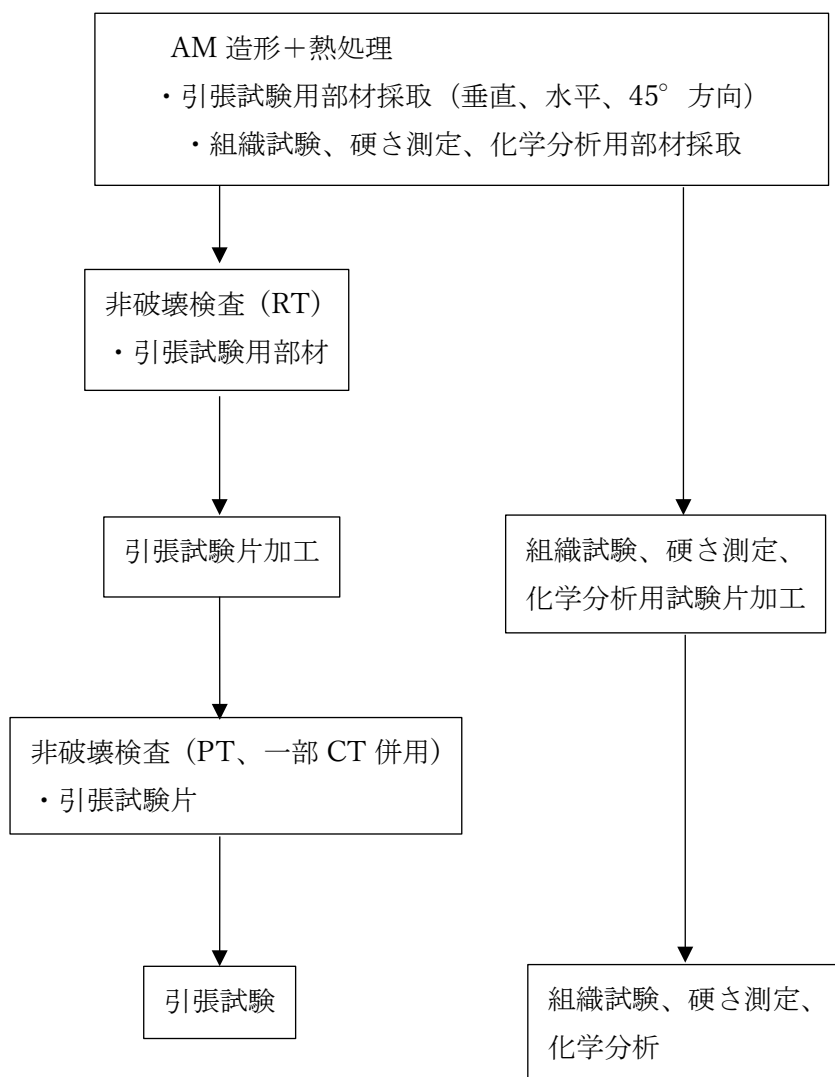


図 3.1.1(2)-1 STEP 1 の試験フロー

### 3.1.2 試験片造形に関わる仕様

#### (1)PBF 造形装置

本事業に参加する企業で試験片造形に用いる PBF 装置の一覧を表 3.1.2(1)-1 に示す。表 3.1.2(1)-1 に示す装置はいずれも代表的な PBF 装置メーカーのものであり、造形品質が比較的安定した中型の造形装置である。

表 3.1.2(1)-1 試験片造形に用いた PBF 装置一覧

担当会社		MHI	東芝 ESS	日立 GE	IHI
造形装置	メーカー	SLM Solution	Concept Laser	EOS	EOS
	型番	SLM280	M2	M290	M290
	外観				
	造形サイズ [mm]	280×280×350	250×250×325	250×250×325	250×250×325
	造形材料	ステンレス鋼 Ni 基合金 チタン合金	ステンレス鋼 Ni 基合金など	ステンレス鋼、鉄系 アルミ合金 Ni 基合金 チタン合金	ステンレス鋼、鉄系 アルミ合金 Ni 基合金 チタン合金

#### (2)使用粉末

本事業に参加する企業により、JIS 規格(JISG4304)を満たす SUS316L 粉末を選定し、試験片造形用として用いた。各担当会社で用いた粉末の成分一覧を表 3.1.2(2)-1 に示す。

表 3.1.2(2)-1 試験片造形に用いた SUS316L 粉末一覧

元素		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
(参考)JIS 規格 SUS316L[%]		0.030 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	12.00 ~15.00	16.00 ~18.00	2.00 ~3.00
担当会社 (粉末メーカー/型式)	MHI(aerlikon metco/MetcoAdd 316L- A(-45 +15μ)-10 l)	0.01	0.45	1.20	0.010	0.006	12.12	17.21	2.26
	東芝 ESS (非開示/非開示)	0.014	0.64	0.62	0.008	0.006	12.56	17.43	2.01
	日立 GE (EOS Stainless Steel 316L/9011- 0032/#S172203)	0.014	0.40	1.26	0.006	0.009	13.61	17.60	2.72
	IHI(aerlikon metco/MetcoAdd 316L- A(-45 +15μ)-10 l)	0.01	0.57	1.53	0.012	0.004	12.93	17.32	2.34

(3)造形条件

表 3.1.2(1)-1 の装置及び表 3.1.2(2)-1 の粉末を用い、図 3.1.1(1)-1 及び図 3.1.1(1)-2 のモデルの造形を実施した。各担当会社にて選定した造形条件を表 3.1.2(3)-1 に示す。

表 3.1.2(3)-1 造形条件

造形パラメータ		レーザ出力[W]	スキャン速度[mm/sec]
担当会社	MHI	275	900
	東芝 ESS	300	700
	日立 GE	205	975
	IHI	225	1085

#### (4)後処理方法

造形した図 3.1.1(1)-1 及び図 3.1.1(1)-2 のモデルの後処理方法について各担当会社で検討し、表 3.1.2(4)-1 に示す熱処理前作業を実施した上で、JIS 規格での SUS316L (棒材、板材) の要求仕様を参考に表 3.1.2(4)-2 に示す条件にて固溶化熱処理を実施した。

表 3.1.2(4)-1 固溶化熱処理(SA)前作業

担当会社	プレート・ サポート除去 タイミング	応力除去条件		
		目標温度 [°C]	保持時間 [h]	冷却方法
MHI	固溶化熱処理後	(実施なし)	(実施なし)	(実施なし)
東芝 ESS	応力除去後	895~905	2	ガス冷却
日立 GE	応力除去後	800 以上	2 以上	ガス冷却
IHI	固溶化熱処理後	(実施無し)	(実施無し)	(実施無し)

表 3.1.2(4)-2 固溶化熱処理(SA)条件

担当会社	固溶化熱処理条件		
	目標温度 [°C]	保持時間 [h]	冷却方法
MHI	1070~1090	2	ガス冷却
東芝 ESS	1140~1150	2	ガス冷却
日立 GE	1040~1100	1.0	水冷
IHI	1038~1093	0.5	水冷

### 3.2 試験片の製作

#### 3.2.1 試験片の造形、造形の記録

##### (1) MHI

##### ① 造形方案

図 3.2.1(1)①-1 に垂直方向の造形方案を示す。図 3.1.1(1)-1 に従い、引張試験用造形材計 25 本のうち四隅を除く 21 本は図の通り間隔で配置した。四隅の 4 本はベースプレート固定用ボルトとの干渉を避けるため、ベースプレート中よりにずらして配置した。引張試験用造形材（垂直方向造形）は各  $10\text{mm}\times 10\text{mm}\times 270\text{mm}$  とした。またリコータと造形物との接触負荷を下げるため、リコータ方向に対し  $10$  度傾けるものとした。なお、垂直方向の引張試験用造形材は上中下の 3 段を連続的に造形するが、各試験片の必要長さは  $80\text{mm}$  程度であることから、 $270\text{mm}$  の造形材より試験片中心がベースプレート面から  $40\text{mm}$ 、 $140\text{mm}$ 、 $240\text{mm}$  となるように別途切断して作成する。

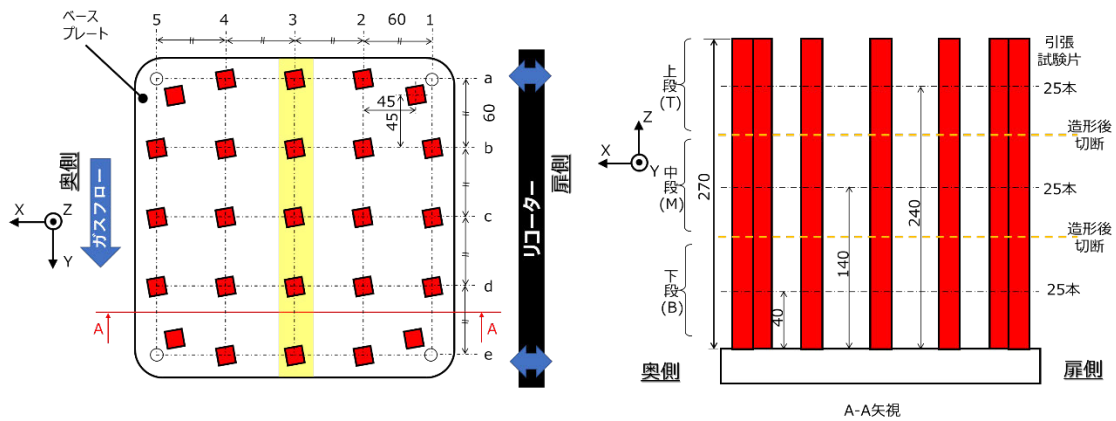


図 3.2.1(1)①-1 造形①垂直方向 (MHI)

図 3.2.1(1)①-2 に水平方向の造形方案を示す。図 3.1.1(1)-1 及び図 3.1.1(1)-2 に従い、引張試験用造形材は等間隔に配置し、硬さ試験・マイクロ試験・化学分析用造形材については極力四隅及び中央に配置するが、ベースプレート固定用ボルトや引張試験用造形材と干渉しないように配置した。引張試験用造形材（水平方向造形）は 10mm×10mm×80mm とし、硬さ試験・マイクロ試験・化学分析用造形材（垂直方向造形）のサイズは 10mm×10mm×270mm とした。また、リコータと造形材との接触負荷を下げるため、リコータ方向に対し 10 度傾けるものとした。引張試験用造形材はベースプレートから所定の距離を保つため、ベースプレートと造形材下面の間にサポートを造形している。

なお、硬さ試験・マイクロ試験・化学分析用造形材は上中下の 3 段を連続的に造形するが、各試験片の必要長さは 80mm 程度であることから、270mm の造形材より切り代 15mm として別途 3 当分に切断して作成する。

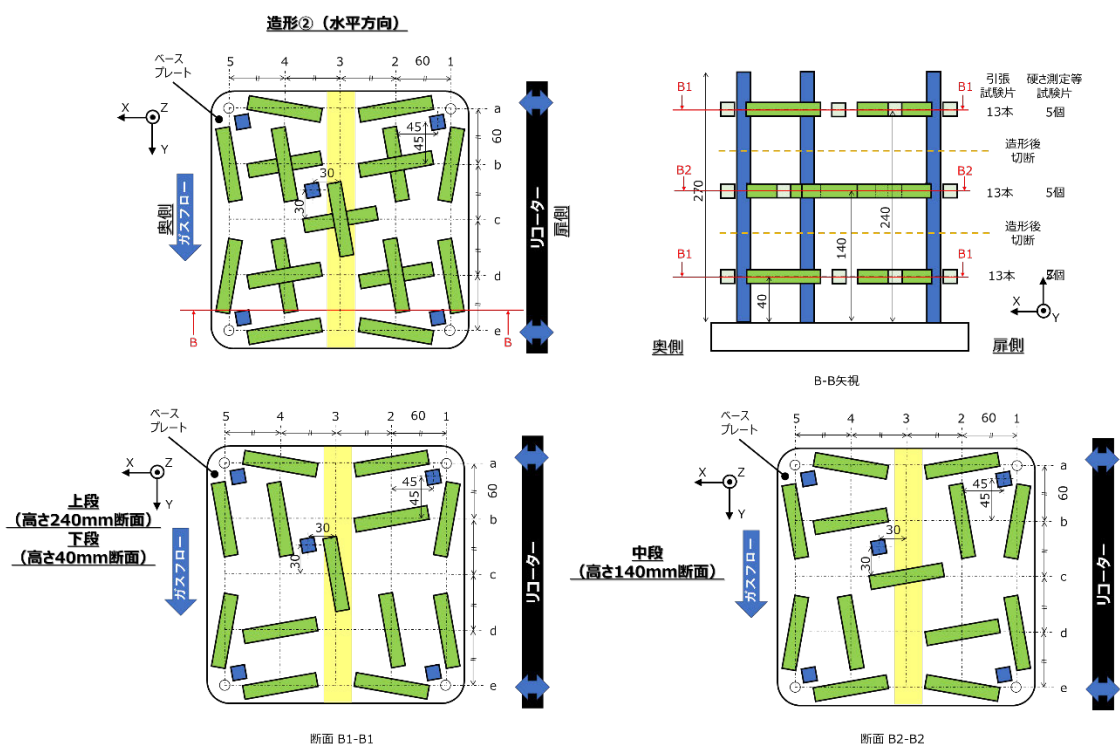


図 3.2.1(1)①-2 造形②水平方向 (MHI)

図 3.2.1(1)①-3 に 45 度方向の造形方案を示す。図 3.1.1(1)-1 に従い、引張試験用造形材は等間隔となるよう配置した。造形材のサイズは 10mm×10mm×80mm とした。また、リコータと造形材の接触負荷を下げるため、リコータ方向に対し 10 度傾けるものとした。引張試験用造形材はベースプレートから所定の距離を保つため、ベースプレートと造形材下面の間にサポートを造形している。

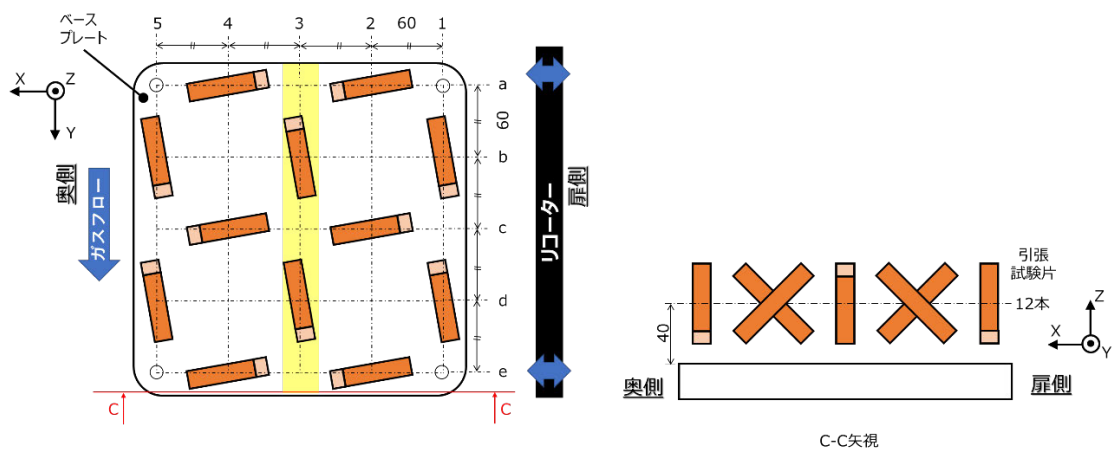


図 3.2.1(1)①-3 造形③45 度方向(MHI)

## ② 造形結果

表 3.1.2(3)-1 の条件を用いて造形した。造形後の外観を図 3.2.1(1)②-1 に示す。造形①垂直方向に関しては外観上の不良なく造形が完了したことを確認した。一方で、造形②水平方向と造形③45度方向に関しては、外観上の不良が発生しているが試験片の採取は可能であり、本事象の影響はないと判断される。 [REDACTED]

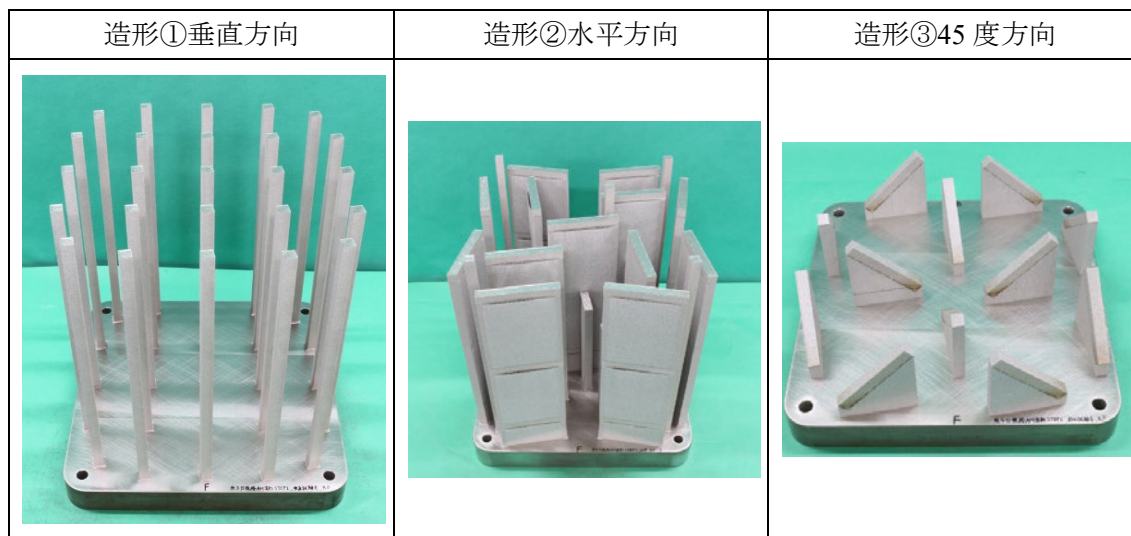


図 3.2.1(1)②-1 造形後外観(MHI)



③ 熱処理結果

図 3.2.1(1)②-1 に示した造形物に対して、ベースプレートから造形物を切り離さない状態で、表 3.1.2.(4)-2 にて示した条件にて計画通り固溶化熱処理を実施した。 [REDACTED]

#### ④ RT 結果

固溶化熱処理の完了した造形物に対し、3.1.1(2)項「⑤放射線透過試験 (RT)」の仕様に基づき、図 3.2.1(1)④-1 に示す X 線照射方向にて RT の撮影を実施した。

また GTN-4010 を参照し、溶接規格 N1100(1)a を基準として判定を実施した。判定結果を表 3.2.1(1)④-1 に示す。

RT を実施した垂直・水平・45 度方向の 3 つのバッチで造形した引張試験用造形材(□10 角材)の一部において、融合不良又はポロシティが複数検出されている。不合格判定となった造形材の代表的な造影結果を図 3.2.1(1)④-2 に示す。

また、品質に影響を及ぼす可能性があると考えている因子として、「ガスフロー方向」・「造形高さ」・「リコート方向」・「レーザのラップする領域」に着目して、造形アドレスの違いによる不合格品の発生確率を表 3.2.1(1)④-2 に整理した。整理の結果、ガスフローの上流、下流でのきずの発生確率に顕著な相違が確認された。一方で、そのほかの因子に関しては発生確率はおおむね一定となっており、影響は確認されなかった。

今回着目した各々の影響因子と不合格品の発生確率の関係について、下記に考察する。

##### ガスフロー方向

ガスフロー上流側の試験片に比べて、下流側の試験片では、不合格品の発生確率が高かった。その原因として、以下が考えられる。

- (1) 試験片の造形順序は、ガスフロー下流側から上流側の順である。そのため、上流側の造形時に飛散したスパッタやヒュームが下流側の造形面に付着し、次の層の造形時に融合不良が発生した
- (2) ガスフロー下流側に滞留したヒュームの影響により、レーザが減衰して入熱が不十分になり、融合不良欠陥が発生した

##### 造形高さ

造形高さに対して、造形材の不合格品の発生確率が変化する傾向は認められなかった。そのため、造形高さが融合不良やポロシティ等の欠陥数に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。積層高さに関わらず、一定量のヒュームがチャンバ内に滞留していると考えられ、滞留したヒュームの影響によりレーザが減衰して入熱が不十分になり、融合不良欠陥が発生したと考えられる。

##### リコート方向

リコート方向に対して、不合格品の発生確率が変化する傾向は見られなかった。本造形に使用した SLM 装置では、粉末敷設は下記 (a) と (b) を毎層交互に繰り返すため、リコート方向と欠陥発生との相関がみられなかったことも考えられる。

- (a) リコータがチャンバ手前から奥方向へ移動し、粉末敷設

(b) リコータがチャンバ奥から手前方向へ移動し、粉末敷設  
レーザのラップする領域

レーザのラップする領域とラップしない領域では、不合格品の発生確率は同等であった。2つのレーザの照射領域と出力等が正しくキャリブレーションされているため、ラップ有無の差による欠陥発生への影響はほぼ無かったと考えられる。

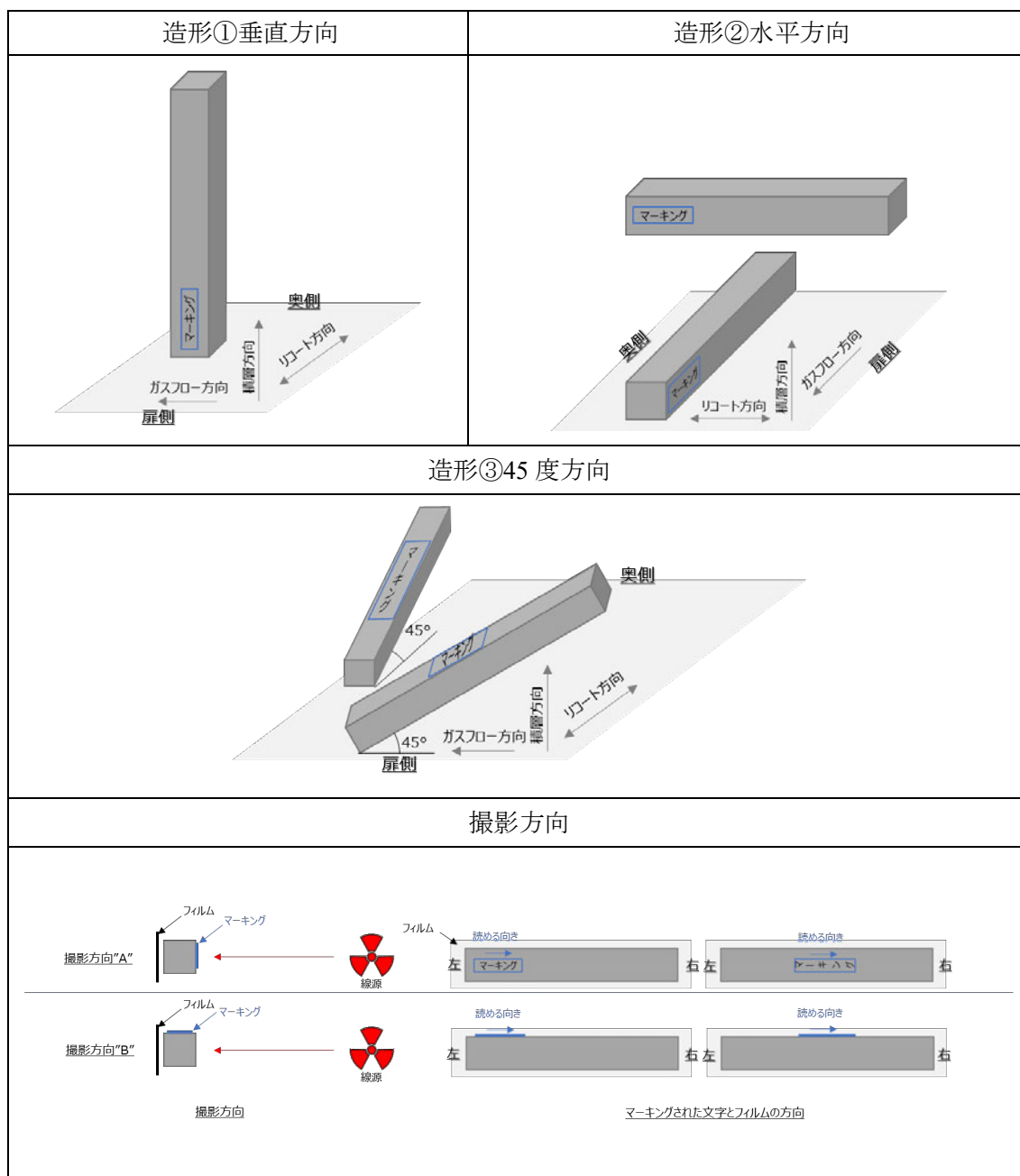
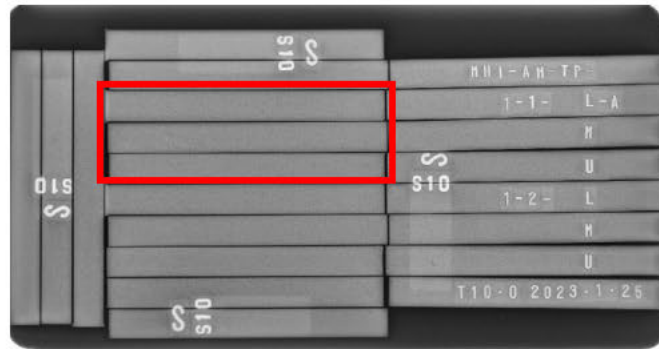
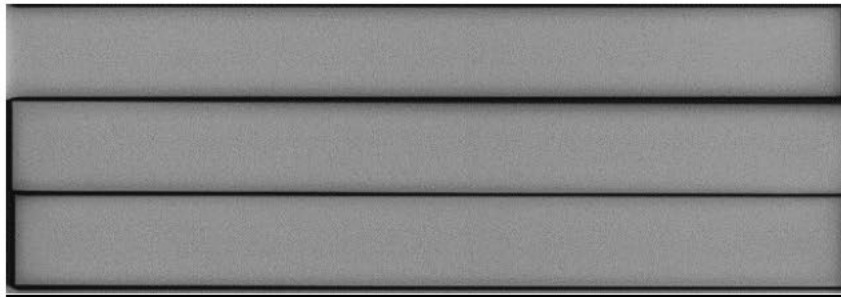


図 3.2.1(1)④-1 RT 撮影方向(MHI)

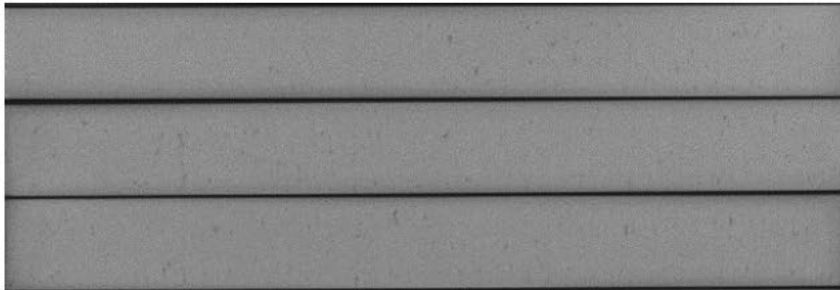


撮影全景

健全部の例)



不合格指示の例1) ※



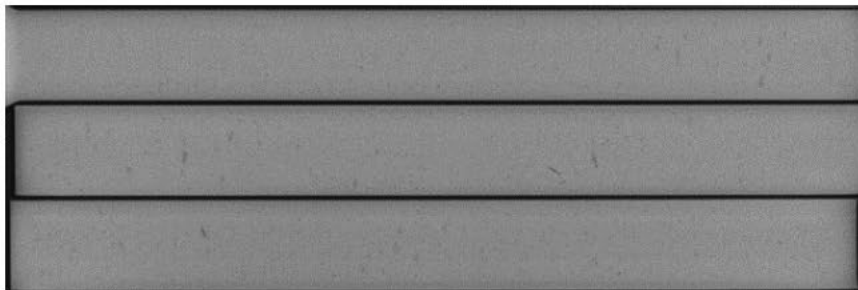
T-VB5e  
(MHI-AM-TP-1-L)

T-VM5e  
(MHI-AM-TP-1-M)

T-VT5e  
(MHI-AM-TP-1-U)

試験片全体に  $\phi 0.5 \sim 1.0\text{mm}$  のポロシティーおよび  $L1.0 \sim 1.5\text{mm}$  の融合不良を複数検出

不合格指示の例2) ※



T-VB4e  
(MHI-AM-TP-6-L)

T-VM4e  
(MHI-AM-TP-6-M)

T-VT4e  
(MHI-AM-TP-6-U)

試験片全体に  $\phi 0.5 \sim 1.0\text{mm}$  ポロシティーおよび  $L1.0 \sim 2.0\text{mm}$  の融合不良を複数検出

(※：画像処理を行い指示を識別しやすく加工)

図 3.2.1(1)④-2 RT 造影結果の代表例

表 3.2.1(1)④-1 造形①垂直方向 RT 結果 (MHI)

採取位置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
上段	T-VT1a (TP-1-25-U)	合格	T-VT1b (TP-1-24-U)	合格	T-VT1c (TP-1-23-U)	合格	T-VT1d (TP-1-22-U)	合格	T-VT1e (TP-1-21-U)	不合格
	T-VT2a (TP-1-20-U)	合格	T-VT2b (TP-1-19-U)	合格	T-VT2c (TP-1-18-U)	合格	T-VT2d (TP-1-17-U)	不合格	T-VT2e (TP-1-16-U)	不合格
	T-VT3a (TP-1-15-U)	合格	T-VT3b (TP-1-14-U)	合格	T-VT3c (TP-1-13-U)	合格	T-VT3d (TP-1-12-U)	合格 (指示有)	T-VT3e (TP-1-11-U)	不合格
	T-VT4a (TP-1-10-U)	合格	T-VT4b (TP-1-9-U)	合格	T-VT4c (TP-1-8-U)	合格	T-VT4d (TP-1-7-U)	合格	T-VT4e (TP-1-6-U)	不合格
	T-VT5a (TP-1-5-U)	合格	T-VT5b (TP-1-4-U)	合格	T-VT5c (TP-1-3-U)	合格	T-VT5d (TP-1-2-U)	合格	T-VT5e (TP-1-1-U)	不合格
中段	T-VM1a (TP-1-25-M)	合格	T-VM1b (TP-1-24-M)	合格	T-VM1c (TP-1-23-M)	合格	T-VM1d (TP-1-22-M)	合格 (指示有)	T-VM1e (TP-1-21-M)	不合格
	T-VM2a (TP-1-20-M)	合格	T-VM2b (TP-1-19-M)	合格	T-VM2c (TP-1-18-M)	合格	T-VM2d (TP-1-17-M)	不合格	T-VM2e (TP-1-16-M)	不合格
	T-VM3a (TP-1-15-M)	合格	T-VM3b (TP-1-14-M)	合格	T-VM3c (TP-1-13-M)	合格	T-VM3d (TP-1-12-M)	不合格	T-VM3e (TP-1-11-M)	不合格
	T-VM4a (TP-1-10-M)	合格	T-VM4b (TP-1-9-M)	合格	T-VM4c (TP-1-8-M)	合格	T-VM4d (TP-1-7-M)	合格	T-VM4e (TP-1-6-M)	不合格
	T-VM5a (TP-1-5-M)	合格	T-VM5b (TP-1-4-M)	合格	T-VM5c (TP-1-3-M)	合格	T-VM5d (TP-1-2-M)	合格	T-VM5e (TP-1-1-M)	不合格
下段	T-VB1a (TP-1-25-L)	合格	T-VB1b (TP-1-24-L)	合格	T-VB1c (TP-1-23-L)	合格	T-VB1d (TP-1-22-L)	合格	T-VB1e (TP-1-21-L)	不合格
	T-VB2a (TP-1-20-L)	合格	T-VB2b (TP-1-19-L)	合格	T-VB2c (TP-1-18-L)	合格	T-VB2d (TP-1-17-L)	不合格	T-VB2e (TP-1-16-L)	不合格
	T-VB3a (TP-1-15-L)	合格	T-VB3b (TP-1-14-L)	合格	T-VB3c (TP-1-13-L)	合格	T-VB3d (TP-1-12-L)	不合格	T-VB3e (TP-1-11-L)	不合格
	T-VB4a (TP-1-10-L)	合格	T-VB4b (TP-1-9-L)	合格	T-VB4c (TP-1-8-L)	合格	T-VB4d (TP-1-7-L)	合格	T-VB4e (TP-1-6-L)	不合格
	T-VB5a (TP-1-5-L)	合格	T-VB5b (TP-1-4-L)	合格	T-VB5c (TP-1-3-L)	合格	T-VB5d (TP-1-2-L)	合格	T-VB5e (TP-1-1-L)	不合格

表 3.2.1(1)④-1 造形②水平方向 RT 結果 (MHI)

採取位置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
上段	—	—	T-HT1b (TP-2-13-U)	合格	—	—	T-HT1d (TP-2-12-U)	合格	—	—
	T-HT2a (TP-2-11-U)	合格	T-HT2b (TP-2-10-U)	合格	—	—	T-HT2d (TP-2-9-U)	合格	T-HT2e (TP-2-8-U)	不合格
	—	—	—	—	T-HT3c (TP-2-7-U)	合格	—	—	—	—
	T-HT4a (TP-2-6-U)	合格	T-HT4b (TP-2-5-U)	合格	—	—	T-HT4d (TP-2-4-U)	合格	T-HT4e (TP-2-3-U)	不合格
	—	—	T-HT5b (TP-2-2-U)	合格	—	—	T-HT5d (TP-2-1-U)	不合格	—	—
中段	—	—	T-HM1b (TP-2-13-M)	合格	—	—	T-HM1d (TP-2-12-M)	合格	—	—
	T-HM2a (TP-2-11-M)	合格	T-HM2b (TP-2-10-M)	合格	—	—	T-HM2d (TP-2-9-M)	合格	T-HM2e (TP-2-8-M)	不合格
	—	—	—	—	T-HM3c (TP-2-7-M)	合格	—	—	—	—
	T-HM4a (TP-2-6-M)	合格	T-HM4b (TP-2-5-M)	合格	—	—	T-HM4d (TP-2-4-M)	合格	T-HM4e (TP-2-3-M)	不合格
	—	—	T-HM5b (TP-2-2-M)	合格	—	—	T-HM5d (TP-2-1-M)	不合格	—	—
下段	—	—	T-HB1b (TP-2-13-L)	合格	—	—	T-HB1d (TP-2-12-L)	合格	—	—
	T-HB2a (TP-2-11-L)	合格	T-HB2b (TP-2-10-L)	合格	—	—	T-HB2d (TP-2-9-L)	合格 (指示有)	T-HB2e (TP-2-8-L)	不合格
	—	—	—	—	T-HB3c (TP-2-7-L)	合格	—	—	—	—
	T-HB4a (TP-2-6-L)	合格	T-HB4b (TP-2-5-L)	合格	—	—	T-HB4d (TP-2-4-L)	合格	T-HB4e (TP-2-3-L)	不合格
	—	—	T-HB5b (TP-2-2-L)	合格	—	—	T-HB5d (TP-2-1-L)	合格	—	—

表 3.2.1(1)④-1 造形③45度方向 RT 結果 (MHI)

採取位置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
下段	—	—	T-DB1b (TP-3-12)	合格	—	—	T-DB1d (TP-3-11)	合格	—	—
	T-DB2a (TP-3-10)	合格	—	—	T-DB2c (TP-3-9)	合格	—	—	T-DB2e (TP-3-8)	合格 (指示有)
	—	—	T-DB3b (TP-3-7)	合格	—	—	T-DB3d (TP-3-6)	合格	—	—
	T-DB4a (TP-3-5)	合格	—	—	T-DB4c (TP-3-4)	合格	—	—	T-DB4e (TP-3-3)	不合格
	—	—	T-DB5b (TP-3-2)	合格	—	—	T-DB5d (TP-3-1)	合格	—	—

表 3.2.1(1)④-2 不合格品の発生確率

ガスフロー方向の影響					
アドレス	a (ガス上流)	b ←	c —	d →	e (ガス下流)
不合格数/試材数	0/23	0/30	0/20	7/30	22/23
不合格発生確率 (%)	0	0	0	23	96
造形高さの影響					
アドレス	T (上段)		M (中段)		B (下段)
不合格数/試材数	9/38		10/38		10/30
不合格発生確率 (%)	24		26		33
リコート方向の影響					
アドレス	1 ←	2 —	3 リコート方向	4 —	5 →
不合格数/試材数	3/23	9/30	5/20	7/30	5/23
不合格発生確率 (%)	13	30	25	23	22
レーザのラップする領域の影響					
アドレス	3 (レーザラップ領域)			1,2,4,5 (ラップしない領域)	
不合格数/試材数	5/20			24/106	
不合格発生確率 (%)	25			23	

造形エリアのアドレス

A-A矢視



### ⑤ 試験片加工

固溶化熱処理及び RT の完了した造形①～③に対し、JIS Z2241「金属材料引張試験方法」の 14A 号引張試験片（図 3.1.1(2)①-4 参照）に従い、引張試験片を加工した。切り出し位置及び数量については、図 3.1.1(2)①-1～3 及び表 3.1.1.(2)①-1 参照。引張試験片形状を図 3.2.1(1)⑤-1 に示す。

加工された試験片の外観例を図 3.2.1(1)⑤-2 に示す。加工後の目視確認ではきず等は認められず、すべての試験片はグリップ部も含めて適切な加工が実施された。

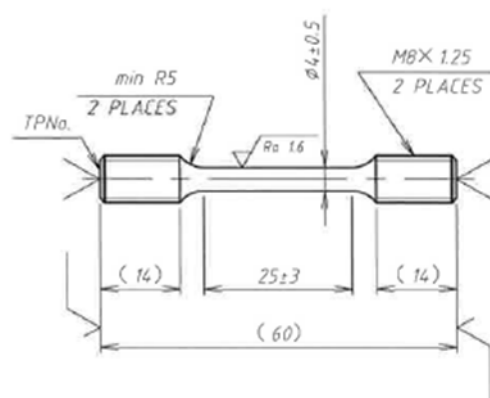


図 3.2.1(1)⑤-1 引張試験片形状(MHI)

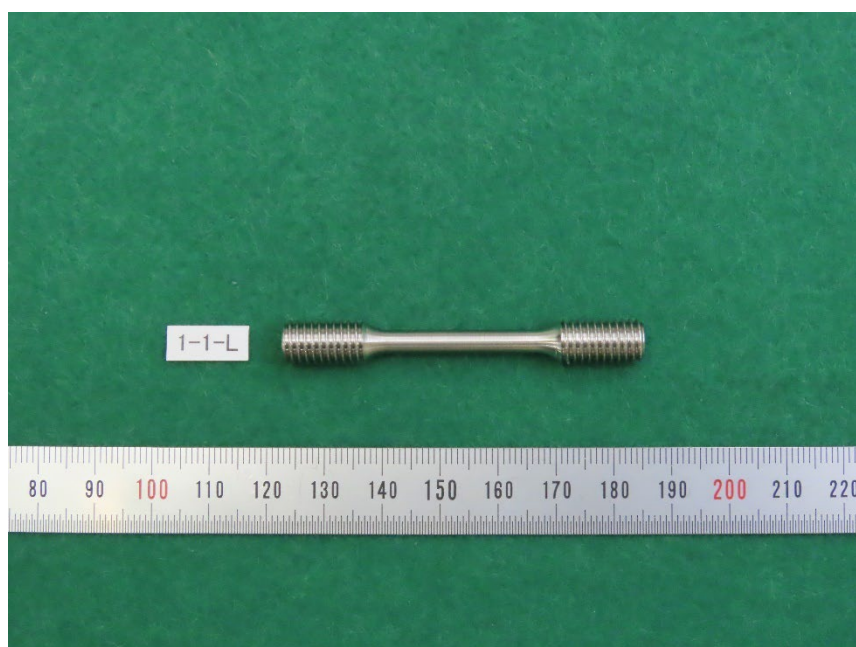


図 3.2.1(1)⑤-2 引張試験片外観例

## ⑥ PT 結果

引張試験片加工の完了した造形材に対し、3.1.1(2)項「⑥浸透探傷試験 (PT)」の仕様に基づき PT を実施した。また、JSME S NB1:2013「溶接規格」第 2 章 N-1100 非破壊試験 (4)浸透探傷試験を参照し、きずの判定を実施した。上記規格に準拠して、きずの判定基準は下記の 1～5 項すべてを満足する場合に合格とした。ただし、判定基準の 5 項目については、評価面積 (3750mm<sup>2</sup>) ではなく、本対象の評価面積 (Φ4mm×25mmL の表面積≒314mm<sup>2</sup>) 内においてきずの判定を実施した。判定結果を表 3.2.1(1)⑥-1 に示す。すべての試験片で合格と判定された。ただし、きずの判定基準としては合格の範囲内ではあるが、円形状浸透指示模様自体は多数確認された。平行部が Φ4mm×25mmL の比較的小型の引張試験片であり、PT で評価されたこれらの表面状態が引張特性に及ぼす影響は不明だが、次年度に得られる試験データと照合しながらこれらの影響を確認する。

### 判定基準

1. 割れ※による浸透指示模様がない。
2. 長さ 1mm を超える線状浸透指示模様がない。
3. 長さ 4mm を超える円形状浸透指示模様がない。
4. 4 個以上の円形状浸透指示模様が直線上に並んでいる場合は、隣接する浸透指示模様間の距離が 1.5mm を超えている。
5. 面積が 3750mm<sup>2</sup> の長方形 (短辺の長さは 25mm 以上とする。) 内に円形状浸透指示模様が 10 個以上含まれない。ただし、長さが 1.5mm 以下の浸透指示模様は算定しなくてもよい。

※長さ 1mm 以下のものは、きずの指示模様とはみなさない。



表 3.2.1(1)⑥-1 造形①垂直方向 PT 結果(MHI)

採取位置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
上段	T-VT1a	合格	T-VT1b	合格	T-VT1c	合格	T-VT1d	合格	T-VT1e	合格
	T-VT2a	合格	T-VT2b	合格	T-VT2c	合格	T-VT2d	合格	T-VT2e	合格
	T-VT3a	合格	T-VT3b	合格	T-VT3c	合格	T-VT3d	合格	T-VT3e	合格
	T-VT4a	合格	T-VT4b	合格	T-VT4c	合格	T-VT4d	合格	T-VT4e	合格
	T-VT5a	合格	T-VT5b	合格	T-VT5c	合格	T-VT5d	合格	T-VT5e	合格
中段	T-VM1a	合格	T-VM1b	合格	T-VM1c	合格	T-VM1d	合格	T-VM1e	合格
	T-VM2a	合格	T-VM2b	合格	T-VM2c	合格	T-VM2d	合格	T-VM2e	合格
	T-VM3a	合格	T-VM3b	合格	T-VM3c	合格	T-VM3d	合格	T-VM3e	合格
	T-VM4a	合格	T-VM4b	合格	T-VM4c	合格	T-VM4d	合格	T-VM4e	合格
	T-VM5a	合格	T-VM5b	合格	T-VM5c	合格	T-VM5d	合格	T-VM5e	合格
下段	T-VB1a	合格	T-VB1b	合格	T-VB1c	合格	T-VB1d	合格	T-VB1e	合格
	T-VB2a	合格	T-VB2b	合格	T-VB2c	合格	T-VB2d	合格	T-VB2e	合格
	T-VB3a	合格	T-VB3b	合格	T-VB3c	合格	T-VB3d	合格	T-VB3e	合格
	T-VB4a	合格	T-VB4b	合格	T-VB4c	合格	T-VB4d	合格	T-VB4e	合格
	T-VB5a	合格	T-VB5b	合格	T-VB5c	合格	T-VB5d	合格	T-VB5e	合格

表 3.2.1(1)⑥-1 造形②水平方向 PT 結果(MHI)

試験片 採取位置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
上段	—	—	T-HT1b	合格	—	—	T-HT1d	合格	—	—
	T-HT2a	合格	T-HT2b	合格	—	—	T-HT2d	合格	T-HT2e	合格
	—	—	—	—	T-HT3c	合格	—	—	—	—
	T-HT4a	合格	T-HT4b	合格	—	—	T-HT4d	合格	T-HT4e	合格
	—	—	T-HT5b	合格	—	—	T-HT5d	合格	—	—
中段	—	—	T-HM1b	合格	—	—	T-HM1d	合格	—	—
	T-HM2a	合格	T-HM2b	合格	—	—	T-HM2d	合格	T-HM2e	合格
	—	—	—	—	T-HM3c	合格	—	—	—	—
	T-HM4a	合格	T-HM4b	合格	—	—	T-HM4d	合格	T-HM4e	合格
	—	—	T-HM5b	合格	—	—	T-HM5d	合格	—	—
下段	—	—	T-HB1b	合格	—	—	T-HB1d	合格	—	—
	T-HB2a	合格	T-HB2b	合格	—	—	T-HB2d	合格	T-HB2e	合格
	—	—	—	—	T-HB3c	合格	—	—	—	—
	T-HB4a	合格	T-HB4b	合格	—	—	T-HB4d	合格	T-HB4e	合格
	—	—	T-HB5b	合格	—	—	T-HB5d	合格	—	—

表 3.2.1(1)⑥-1 造形③45 度方向 PT 結果(MHI)

採取 位置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
下段	—	—	T-DB1b	合格	—	—	T-DB1d	合格	—	—
	T-DB2a	合格	—	—	T-DB2c	合格	—	—	T-DB2e	合格
	—	—	T-DB3b	合格	—	—	T-DB3d	合格	—	—
	T-DB4a	合格	—	—	T-DB4c	合格	—	—	T-DB4e	合格
	—	—	T-DB5b	合格	—	—	T-DB5d	合格	—	—

## ⑦ CT 結果

造形位置による内部欠陥の発生傾向を把握するため、3.1.1(2)項「⑦X線CT試験(CT)」の仕様に基づき、図 3.2.1(1)⑦-1 に示す位置から採取した引張試験片のCTを実施した。撮影条件及び撮影方向を表 3.2.1(1)⑦-1 及び図 3.2.1(1)⑦-2 に示す。

CTを実施した試験片は6本で、1本は品質が比較的安定している位置、残りの5本は造形条件を考慮して品質が比較的安定していないと考えられる位置の試験片とし、図 3.2.1(1)⑦-1 に示す位置の試験片を選定した。

選定においては次の点が造形品質に影響を与えたと考えた。

- ・ガスフローの上流/下流の違い  
下流側はスパッタやヒュームが造形物上面に付着する等で融合不良等の欠陥が発生しやすくなると考えられる。
- ・造形高さの高/低の違い  
ガスフローで除去しきれなかったヒュームが造形が進むにつれてチャンバ内に滞留しレーザが減衰して所定の入熱が得られない可能性があるため、高い側では融合不良が発生しやすくなると考えられる。
- ・レーザラップ領域  
レーザラップ領域を跨ぐ、もしくはその領域内に造形物が収まる場合には、1つの造形物を2つのレーザで造形することになる。そのため、造形物に段差が生じ、造形物内部に欠陥が発生する可能性がある。また、2つのレーザの出力は規定値内ながらも微妙に異なるため、1つの造形物を2つのレーザで造形した場合は品質にばらつきが生じやすいと考えられる。
- ・レーザ位置  
レーザは光学系により向きを変えてチャンバ天井より造形領域全体に照射されるが、厳密には光学系の真下が最も品質が安定すると考えられる。
- ・(リコート方向)  
リコートは往復しながら粉敷を実施するが、経験上リコート方向が品質に与える影響は認められていない。

上記を考慮して、最も品質が安定していると考えられる位置として、レーザがラップしない領域、光学系の真下、下段の位置の試験片として T-VB4c を選定した。

次に、ガスフローの上流/下流の違い、造形高さの高/低の違いを確認するため、ガスフロー上流/下流側のものとして、T-HB4a(上流側)、T-HB4c(下流側)を選定、また、造形高さの高/低のものとして、T-HT4c(高側)、T-HB4c(低側)を選定し

た。最後にレーザラップ領域の影響を確認するものとして、試験片全域がラップ領域に入る T-HB3c(下段)、T-HT3c(上段)を選定した。

CT 結果を表 3.2.1(1)⑦-2 に示す。CT 観察領域を横から見た際のきずを赤色表示した図、観察領域上方から下方を見下ろした際のきずを赤色表示した図、観察領域内の代表的な水平断層図を示す。T-HT4e 及び T-HB4e では約数十  $\mu\text{m}$  大の微小なきずから 1mm を超える大きなきずまで多数のきずが確認された。T-VB4c、T-HT3c、T-HB3c、T-HB4a では数十  $\mu\text{m}$  大の球状のきず（一部不定形きずあり）が検出されたが、ごく微量であり造形位置に対する有意差は見られなかった。

試験片の位置関係と CT 結果について次の通り考察した。

#### 品質が安定していると考えられる試験片 (T-VB4c)

微小な欠陥が検出されたが、本試験と同一の造形装置、造形条件および同 Lot の材料粉末を使用して実施した造形品質確認試験\*の結果の一部を図 3.2.1(1)⑦-3 に示す。図 3.2.1(1)⑦-3 には、断面組織に大きな欠陥等は認められず、本造形条件における標準的な造形品質であると考えられる。したがって、図 3.2.1(1)⑦-3 と T-VB4e の欠陥数および欠陥サイズはほぼ同等であることから、T-VB4e は標準的な造形品質であると考えられる。

※造形品質の指標である充填率（造形物の断面における欠陥部/充填部の面積比率）を確認するため、 $\square 10\text{mm}$  のブロックを試造形し、ブロックの断面組織を観察する試験

#### ガスフローの上流/下流の違い (T-HB4a(上流側)、T-HB4e(下流側))

ガスフロー上流側の試験片に比べて、下流側の試験片は欠陥数が多く、欠陥サイズも大きかった。その原因として、以下が考えられる。

- (1) 試験片の造形順序は、ガスフロー下流側から上流側の順である。そのため、上流側の造形時に飛散したスパッタやヒュームが下流側の造形面に付着し、次の層の造形時に融合不良が発生したため
- (2) ガスフロー下流側に滞留したヒュームの影響により、レーザが減衰して入熱が不十分になり、融合不良欠陥が発生したため

#### 造形高さの高/低の違い (T-HT4e (高側)、T-HB4e (低側))

造形高さに対して欠陥数や欠陥サイズが変化する傾向は認められなかった。そのため、造形高さが欠陥数および欠陥サイズに及ぼす影響はほとんどないと考えられる。積層高さに関わらず、一定量のヒュームがチャンバ内に滞留していると考えられ、滞留したヒュームの影響によりレーザが減衰して入熱が不十分になり、融合不良欠陥が発生したと考えられる。一方で、造形高さに関わらず多数の欠陥が検出された理由は、いずれの試験片もガスフロー下流側に位置するためであると考えられる。

レーザラップ領域の影響 (T-HB3c(下段)、T-HT3c(上段))

欠陥有無に着目すると、レーザラップ部は標準的な造形品質と同等であると考えられる。また、レーザラップ部においても、造形高さ(240mm)が欠陥数及び欠陥サイズに及ぼす影響は小さい、もしくはほとんどないと考える。

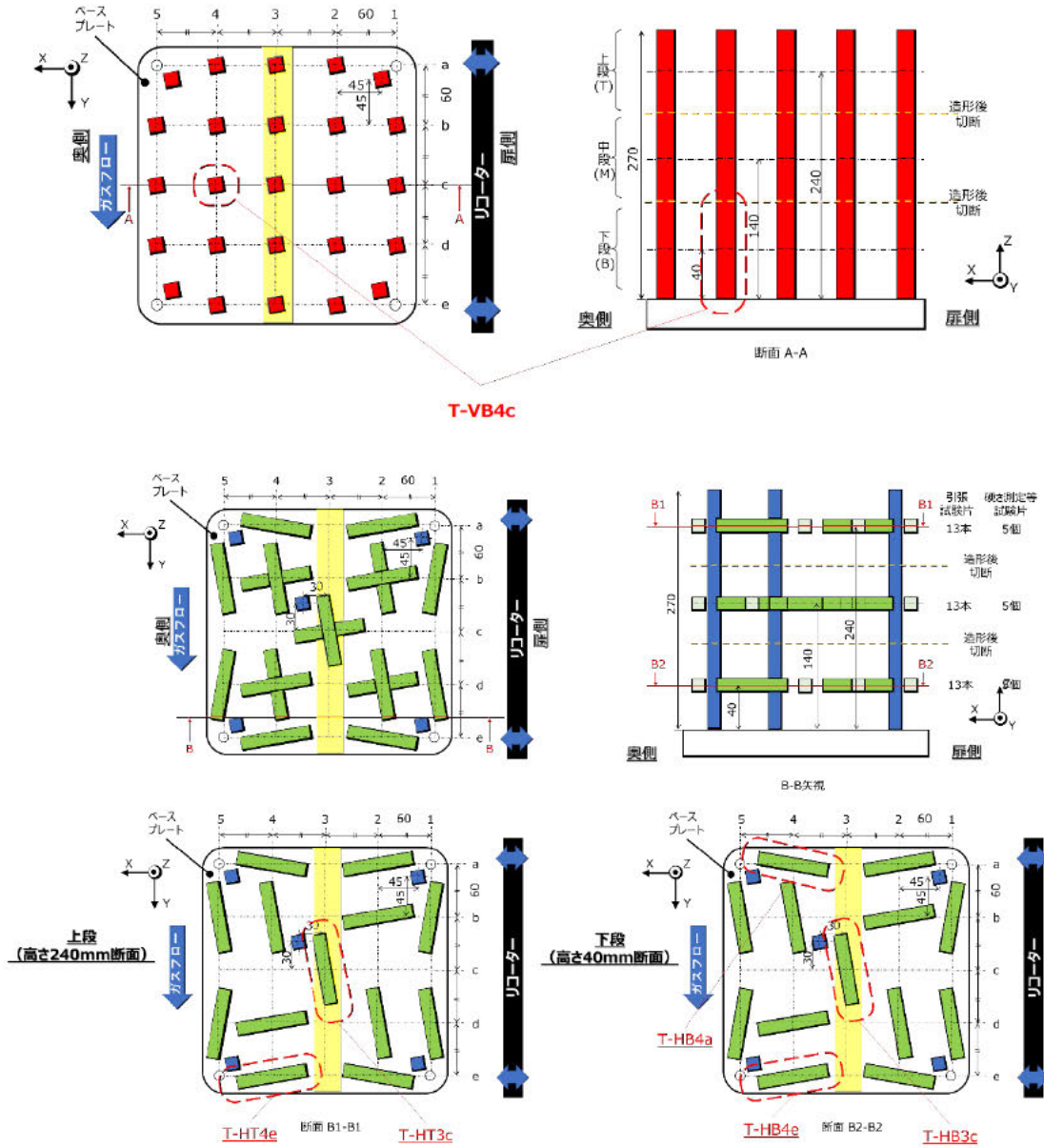


図 3.2.1(1)⑦-1 CT 対象引張試験片(MHI)  
(注：点線で囲った採取位置が CT 対象試験片)



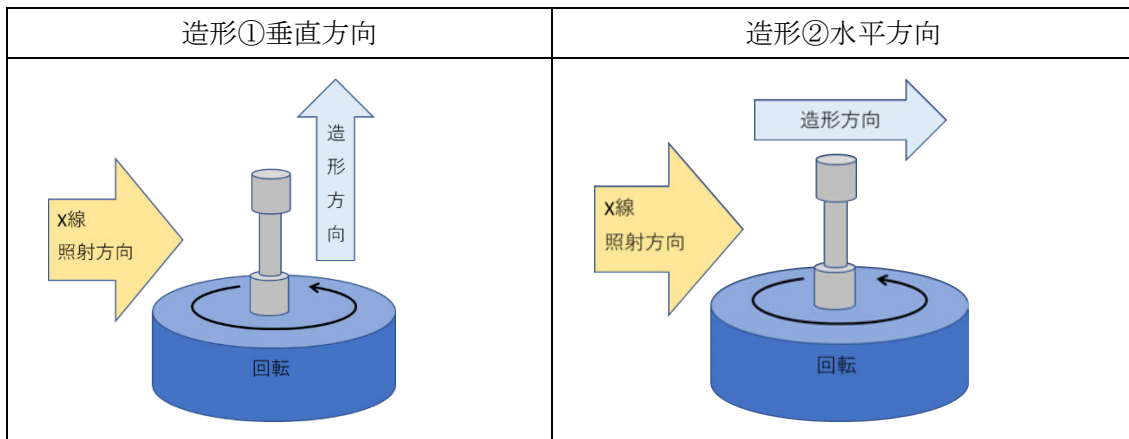
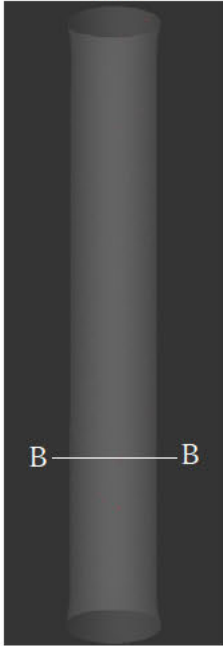
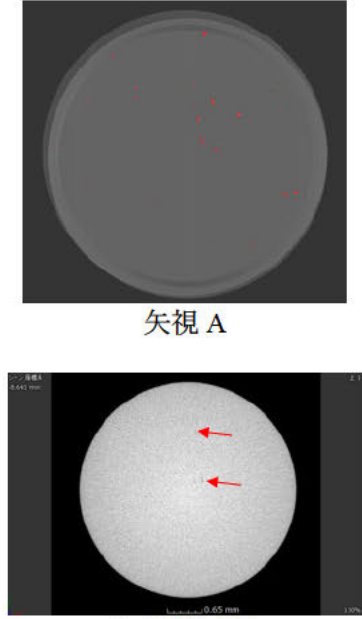
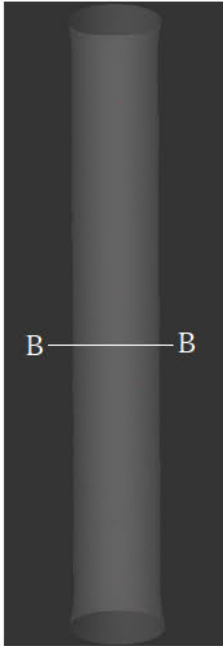
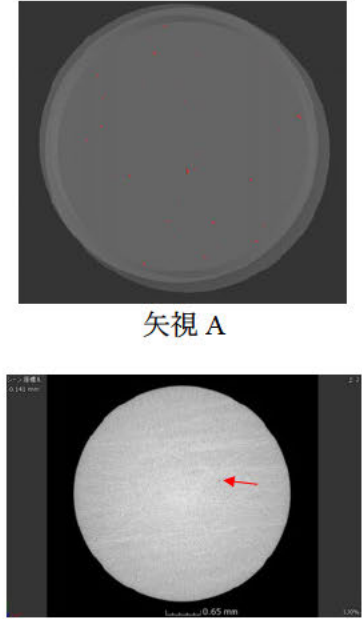


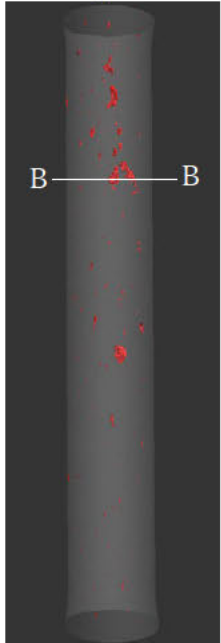
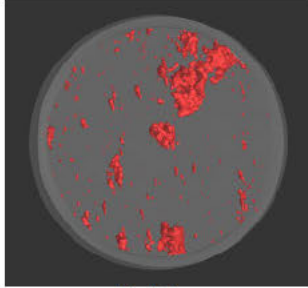
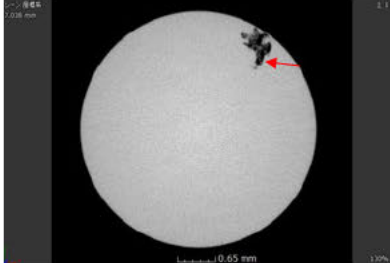
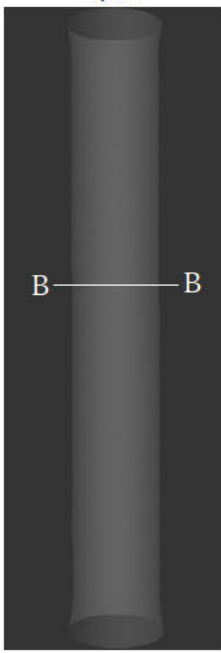


図 3.2.1(1)⑦-2 CT 撮影方向(MHI)

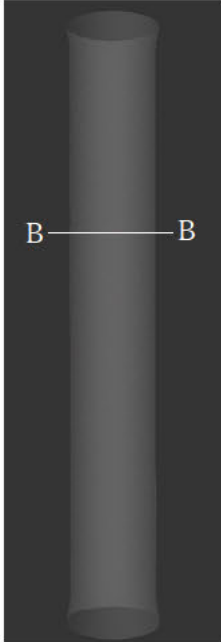


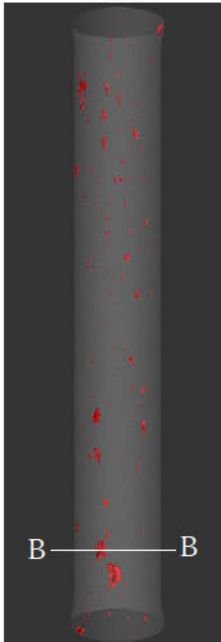
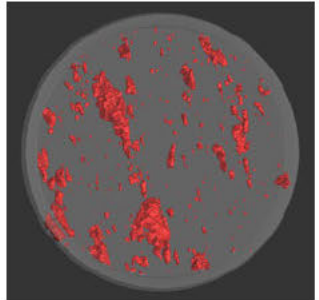
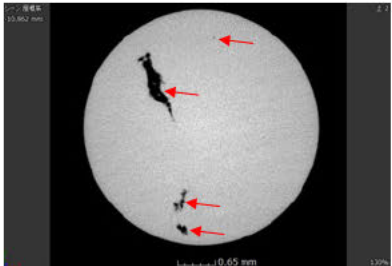
表 3.2.1(1)⑦-1 CT 撮影条件(MHI)

CT 装置	メーカー	島津製作所
	型式	inspeXio SMX-225CT FPD HR
撮影条件	電流[ $\mu$ A]	100
	電圧[kV]	190
	線源-回転ステージ間距離 [mm]	24
	線源-検出器間距離 [mm]	800
	プロジェクション数	1800
	重ね合わせ回数	2
	スライスピッチ [mm]	0.012
	プレフィルタ (材質, 厚さ [mm])	Cu 0.5
	線質硬化補正	metal-1
	ボクセルサイズ [mm/voxel]	0.012
	露光時間 [ms]	250
	画像サイズ	約 440×440×2400

表 3.2.1(1)⑦-2 CT 結果(MHI)

造形方向	試験片 採取位置	試験片 ID	撮影結果	
造形① 垂直方向	下段	T-VB4c		 <p data-bbox="1114 757 1203 786">矢視 A</p> <p data-bbox="1086 1070 1230 1099">B-B 断層図</p> <p data-bbox="715 1115 1337 1182">微小なきずの検出あり。約 50<math>\mu</math>m 以下の球状や不定形のきずが約 30 個確認された。</p>
造形② 水平方向	上段	T-HT3c		 <p data-bbox="1114 1563 1203 1592">矢視 A</p> <p data-bbox="1086 1877 1230 1906">B-B 断層図</p> <p data-bbox="715 1921 1337 1989">微小なきずの検出あり。50<math>\mu</math>m 以下の球状のきずが約 30 個確認された。</p>

造形方向	試験片 採取位置	試験片 ID	撮影結果	
		T-HT4e		 <p data-bbox="1114 667 1198 696">矢視 A</p>  <p data-bbox="1086 1025 1225 1055">B-B 断層図</p>
			<p data-bbox="715 1081 1331 1151">微小～大きなきずの検出あり。50<math>\mu</math>m以下の球状～約1.2mmの不定形の多数のきずが確認された。</p>	
	下段	T-HB3c		 <p data-bbox="1114 1503 1198 1532">矢視 A</p>  <p data-bbox="1086 1839 1225 1868">B-B 断層図</p>
			<p data-bbox="715 1888 1331 1957">微小なきずの検出あり。50<math>\mu</math>m以下の球状のきずが約13個確認された。</p>	

造形方向	試験片 採取位置	試験片 ID	撮影結果	
		T-HB4a		 <p data-bbox="1114 689 1203 719">矢視 A</p>  <p data-bbox="1086 1021 1230 1050">B-B 断層図</p>
<p data-bbox="715 1070 1331 1137">微小なきずの検出あり。50<math>\mu</math>m 以下の球状のきずが約 18 個確認された。</p>				
		T-HB4e		 <p data-bbox="1114 1489 1203 1518">矢視 A</p>  <p data-bbox="1086 1821 1230 1850">B-B 断層図</p>
<p data-bbox="715 1870 1331 1937">微小な～大きなきずの検出あり。50<math>\mu</math>m 以下の球状～約 1.3mm の不定形の多数のきずが確認された。</p>				

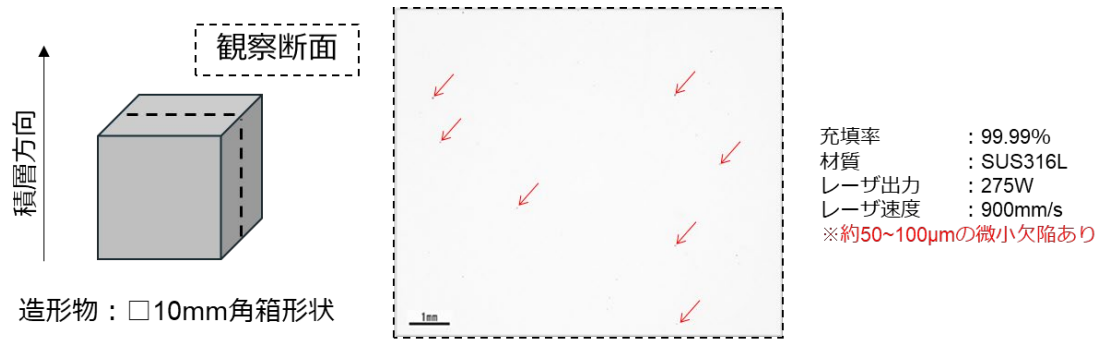


図 3.2.1(1)⑦-3 造形品質確認試験の結果 (材質 : SUS316L)

(2) 東芝 ESS

① 造形方案

図 3.2.1(2)①-1 に垂直方向の造形方案を示す。図 3.1.1(1)-1 に従い、引張試験用のモデルは 20 本とし、図示で示す間隔で配置した。また、硬さ試験・マイクロ試験・化学分析用のモデルは 5 本とし、ねじ穴と重ならないように配置した。垂直造形物のサイズは、引張試験用のモデルは 15mm×15mm×270mm、硬さ試験・マイクロ試験・化学分析用のモデルは 30mm×30mm×270mm とした。またリコータと造形物との接触負荷を下げるため、リコータ方向に対し 3°傾けるものとした。なお、本造形は 2 ビームで造形しており、図 3.2.1(2)①-1 の c-c'ラインが 2 ビームの重なり位置である。

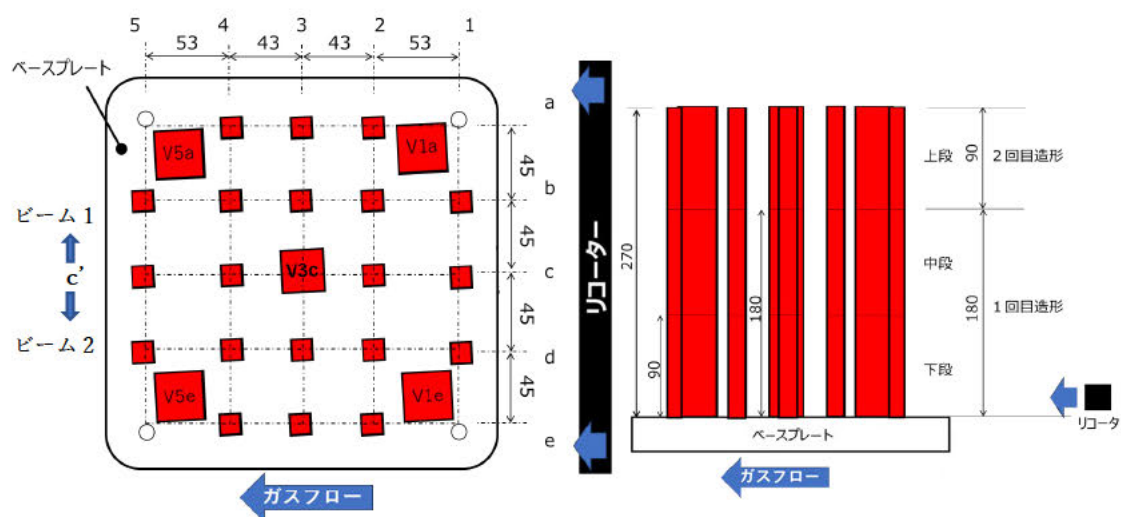


図 3.2.1(2)①-1 造形①垂直方向

図 3.2.1(2)①-2 に水平方向の造形方案を示す。図 3.1.1(1)-1 及び図 3.1.1(1)-2 に従い、引張試験用のモデルは 39 本とし、図示で示す間隔で配置した。水平造形物のサイズは 15mm×15mm×80mm とした。またリコータと造形物の接触負荷を下げるため、リコータ方向に対し 3°傾けるものとした。また、造形の際には適宜サポートを設けた。なお、本造形は 2 ビームで造形しており、図 3.2.1(2)①-2 の c-c'ラインが 2 ビームの重なり位置である。

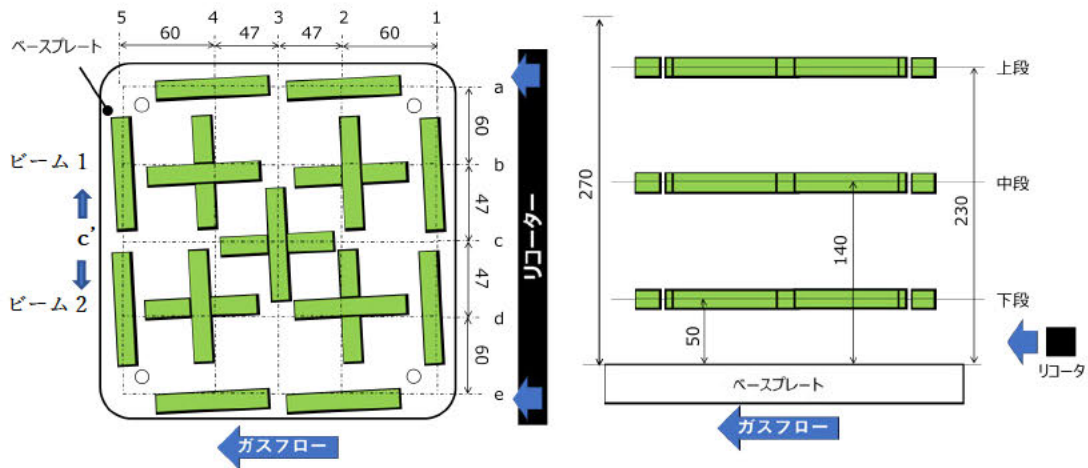


図 3.2.1(2)①-2 造形②水平方向

図 3.2.1(2)①-3 に 45°方向の造形方案を示す。図 3.1.1(1)-1 に従い、引張試験用のモデルは等間隔となるよう配置した。45°造形物のサイズは 15mm×15mm×80mm とした。またリコータと造形物の接触負荷を下げるため、リコータ方向に対し 3°傾けるものとした。また、造形の際には適宜サポートを設けた。なお、本造形は 2 ビームで造形しており、図 3.2.1(2)①-3 の c-c'ラインが 2 ビームの重なり位置である。

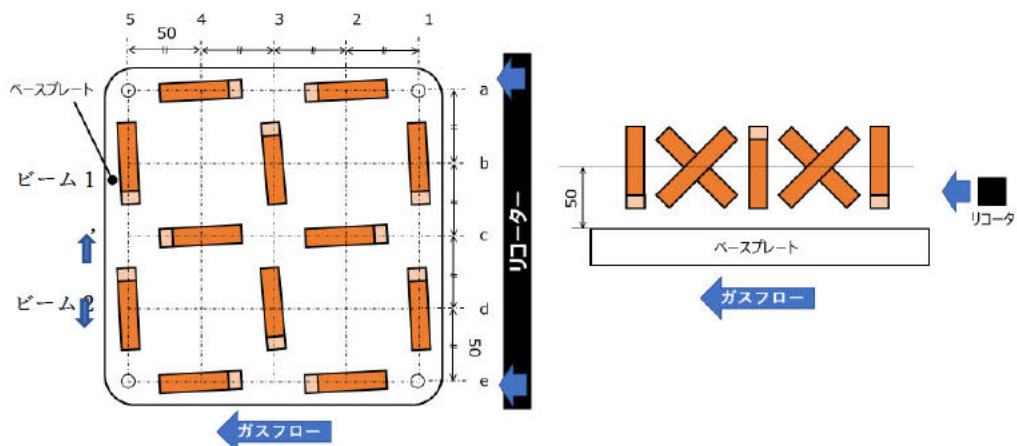


図 3.2.1(2)①-3 造形③45°方向







④ RT 結果

熱処理の完了した造形物に対し、3.1.1(2)項「⑤放射線透過試験 (RT)」の仕様に基づき、図 3.2.1(2)④-1 に示す X 線照射方向にて RT の撮影を実施した。

また GTN-4010 を参照し、溶接規格 N1100(1)a を基準として判定を実施した。判定結果を表 3.2.1(2)④-1～表 3.2.1(2)④-3 に示す。判定の結果、基準を超えるきずは検出されず、引張試験に十分供することができるものと考えられる。

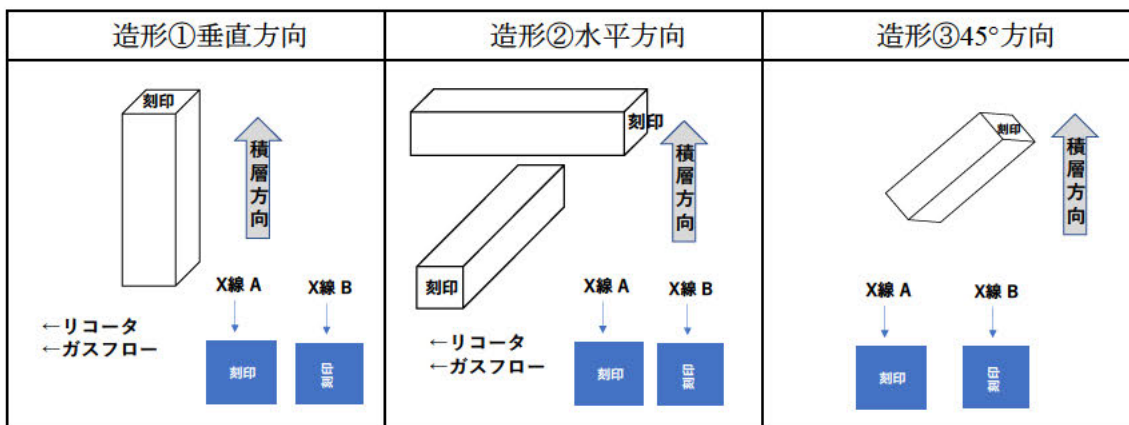


図 3.2.1(2)④-1 RT 撮影方向(東芝 ESS)

表 3.2.1(2)④-1 造形①垂直方向 RT 結果 (東芝 ESS)

採取位置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
上段	T-VT1a	合格	T-VT1b	合格	T-VT1c	合格	T-VT1d	合格	T-VT1e	合格
	T-VT2a	合格	T-VT2b	合格	T-VT2c	合格	T-VT2d	合格	T-VT2e	合格
	T-VT3a	合格	T-VT3b	合格	T-VT3c	合格	T-VT3d	合格	T-VT3e	合格
	T-VT4a	合格	T-VT4b	合格	T-VT4c	合格	T-VT4d	合格	T-VT4e	合格
	T-VT5a	合格	T-VT5b	合格	T-VT5c	合格	T-VT5d	合格	T-VT5e	合格
中段	T-VM1a	合格	T-VM1b	合格	T-VM1c	合格	T-VM1d	合格	T-VM1e	合格
	T-VM2a	合格	T-VM2b	合格	T-VM2c	合格	T-VM2d	合格	T-VM2e	合格
	T-VM3a	合格	T-VM3b	合格	T-VM3c	合格	T-VM3d	合格	T-VM3e	合格
	T-VM4a	合格	T-VM4b	合格	T-VM4c	合格	T-VM4d	合格	T-VM4e	合格
	T-VM5a	合格	T-VM5b	合格	T-VM5c	合格	T-VM5d	合格	T-VM5e	合格
下段	T-VB1a	合格	T-VB1b	合格	T-VB1c	合格	T-VB1d	合格	T-VB1e	合格
	T-VB2a	合格	T-VB2b	合格	T-VB2c	合格	T-VB2d	合格	T-VB2e	合格
	T-VB3a	合格	T-VB3b	合格	T-VB3c	合格	T-VB3d	合格	T-VB3e	合格
	T-VB4a	合格	T-VB4b	合格	T-VB4c	合格	T-VB4d	合格	T-VB4e	合格
	T-VB5a	合格	T-VB5b	合格	T-VB5c	合格	T-VB5d	合格	T-VB5e	合格

表 3.2.1(2)④-2 造形②水平方向 RT 結果 (東芝 ESS)

採取位置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
上段	—	—	T-HT1b	合格	—	—	T-HT1d	合格	—	—
	T-HT2a	合格	T-HT2b	合格	—	—	T-HT2d	合格	T-HT2e	合格
	—	—	—	—	T-HT3c	合格	—	—	—	—
	T-HT4a	合格	T-HT4b	合格	—	—	T-HT4d	合格	T-HT4e	合格
	—	—	T-HT5b	合格	—	—	T-HT5d	合格	—	—
中段	—	—	T-HM1b	合格	—	—	T-HM1d	合格	—	—
	T-HM2a	合格	T-HM2b	合格	—	—	T-HM2d	合格	T-HM2e	合格
	—	—	—	—	T-HM3c	合格	—	—	—	—
	T-HM4a	合格	T-HM4b	合格	—	—	T-HM4d	合格	T-HM4e	合格
	—	—	T-HM5b	合格	—	—	T-HM5d	合格	—	—
下段	—	—	T-HB1b	合格	—	—	T-HB1d	合格	—	—
	T-HB2a	合格	T-HB2b	合格	—	—	T-HB2d	合格	T-HB2e	合格
	—	—	—	—	T-HB3c	合格	—	—	—	—
	T-HB4a	合格	T-HB4b	合格	—	—	T-HB4d	合格	T-HB4e	合格
	—	—	T-HB5b	合格	—	—	T-HB5d	合格	—	—

表 3.2.1(2)④-3 造形③45°方向 RT 結果 (東芝 ESS)

採取位置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
下段	—	—	T-DB1b	合格	—	—	T-DB1d	合格	—	—
	T-DB2a	合格	—	—	T-DB2c	合格	—	—	T-DB2e	合格
	—	—	T-DB3b	合格	—	—	T-DB3d	合格	—	—
	T-DB4a	合格	—	—	T-DB4c	合格	—	—	T-DB4e	合格
	—	—	T-DB5b	合格	—	—	T-DB5d	合格	—	—

### ⑤ 試験片加工

固溶化熱処理及び RT の完了した造形①～③に対し、JIS Z2241「金属材料引張試験方法」の 14A 号引張試験片（図 3.1.1(2)①-4 参照）に従い、引張試験片を加工した。切り出し位置及び数量については、図 3.1.1(1)-1 及び表 3.1.1(1)-1 参照。引張試験片形状を図 3.2.1(2)⑤-1 に、引張試験片外観例を図 3.2.1(2)⑤-2 に示す。

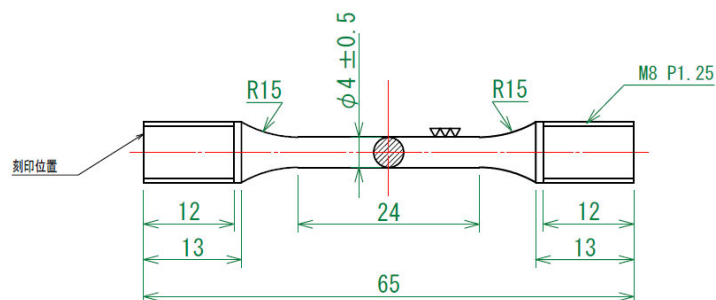


図 3.2.1(2)⑤-1 引張試験片形状(東芝 ESS)

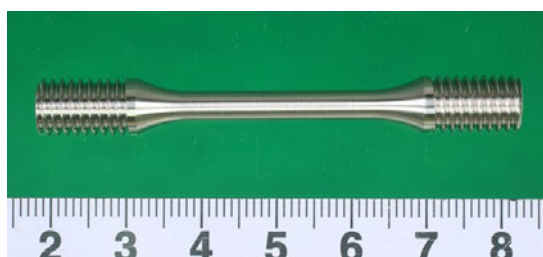


図 3.2.1(2)⑤-2 引張試験片外観例

⑥ PT 結果

引張試験片加工の完了した造形物に対し、3.1.1(2)項「⑥浸透探傷試験 (PT)」の仕様に基づき、PT を実施した。なお、PT 試験は、ASTME165 に準拠して実施した。

表 3.2.1(2)⑥-1～表 3.2.1(2)⑥-3 に PT 試験の判定結果を示す。いずれの試験片においても PT 指示は認められなかったため、引張試験に十分供することができるものと考えられる。

表 3.2.1(2)⑥-1 造形①垂直方向 PT 結果(東芝 ESS)

採取位置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
上段	T-VT1a	合格	T-VT1b	合格	T-VT1c	合格	T-VT1d	合格	T-VT1e	合格
	T-VT2a	合格	T-VT2b	合格	T-VT2c	合格	T-VT2d	合格	T-VT2e	合格
	T-VT3a	合格	T-VT3b	合格	T-VT3c	合格	T-VT3d	合格	T-VT3e	合格
	T-VT4a	合格	T-VT4b	合格	T-VT4c	合格	T-VT4d	合格	T-VT4e	合格
	T-VT5a	合格	T-VT5b	合格	T-VT5c	合格	T-VT5d	合格	T-VT5e	合格
中段	T-VM1a	合格	T-VM1b	合格	T-VM1c	合格	T-VM1d	合格	T-VM1e	合格
	T-VM2a	合格	T-VM2b	合格	T-VM2c	合格	T-VM2d	合格	T-VM2e	合格
	T-VM3a	合格	T-VM3b	合格	T-VM3c	合格	T-VM3d	合格	T-VM3e	合格
	T-VM4a	合格	T-VM4b	合格	T-VM4c	合格	T-VM4d	合格	T-VM4e	合格
	T-VM5a	合格	T-VM5b	合格	T-VM5c	合格	T-VM5d	合格	T-VM5e	合格
下段	T-VB1a	合格	T-VB1b	合格	T-VB1c	合格	T-VB1d	合格	T-VB1e	合格
	T-VB2a	合格	T-VB2b	合格	T-VB2c	合格	T-VB2d	合格	T-VB2e	合格
	T-VB3a	合格	T-VB3b	合格	T-VB3c	合格	T-VB3d	合格	T-VB3e	合格
	T-VB4a	合格	T-VB4b	合格	T-VB4c	合格	T-VB4d	合格	T-VB4e	合格
	T-VB5a	合格	T-VB5b	合格	T-VB5c	合格	T-VB5d	合格	T-VB5e	合格

表 3.2.1(2)⑥-2 造形②水平方向 PT 結果 (東芝 ESS)

採取位置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
上段	—	—	T-HT1b	合格	—	—	T-HT1d	合格	—	—
	T-HT2a	合格	T-HT2b	合格	—	—	T-HT2d	合格	T-HT2e	合格
	—	—	—	—	T-HT3c	合格	—	—	—	—
	T-HT4a	合格	T-HT4b	合格	—	—	T-HT4d	合格	T-HT4e	合格
	—	—	T-HT5b	合格	—	—	T-HT5d	合格	—	—
中段	—	—	T-HM1b	合格	—	—	T-HM1d	合格	—	—
	T-HM2a	合格	T-HM2b	合格	—	—	T-HM2d	合格	T-HM2e	合格
	—	—	—	—	T-HM3c	合格	—	—	—	—
	T-HM4a	合格	T-HM4b	合格	—	—	T-HM4d	合格	T-HM4e	合格
	—	—	T-HM5b	合格	—	—	T-HM5d	合格	—	—
下段	—	—	T-HB1b	合格	—	—	T-HB1d	合格	—	—
	T-HB2a	合格	T-HB2b	合格	—	—	T-HB2d	合格	T-HB2e	合格
	—	—	—	—	T-HB3c	合格	—	—	—	—
	T-HB4a	合格	T-HB4b	合格	—	—	T-HB4d	合格	T-HB4e	合格
	—	—	T-HB5b	合格	—	—	T-HB5d	合格	—	—

表 3.2.1(2)⑥-3 造形③45°方向 PT 結果 (東芝 ESS)

採取位置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
下段	—	—	T-DB1b	合格	—	—	T-DB1d	合格	—	—
	T-DB2a	合格	—	—	T-DB2c	合格	—	—	T-DB2e	合格
	—	—	T-DB3b	合格	—	—	T-DB3d	合格	—	—
	T-DB4a	合格	—	—	T-DB4c	合格	—	—	T-DB4e	合格
	—	—	T-DB5b	合格	—	—	T-DB5d	合格	—	—

## ⑦ CT 結果

造形位置による内部欠陥の発生傾向を把握するため、3.1.1(2)項「⑦X線CT試験(CT)」の仕様にに基づき、図 3.2.1(2)⑦-1 に示す位置から採取した引張試験片のCTを実施した。撮影条件及び撮影方向を表 3.2.1(2)⑦-1 及び図 3.2.1(2)⑦-2 に示す。CT試験は4本ずつ測定し、垂直方向試験片は2回(4本×2回=8本)、水平方向試験片は1回(4本×1回=4本)の測定を行った。

CT試験を実施した試験片は12本で、図 3.2.1(2)⑦-1 に示す位置の試験片を選定した理由は次の通りである。

造形領域全域における位置による差を確認するために、垂直方向試験片の4隅と中央部の5カ所(1a、1e、3c、5a、5e)を選定した。また、2ビームの重なり位置とリコータ、ガスフローの関係を確認するため、1c、5cを選定した。高さの位置は下段とするが、3cのみ上段の試験も実施した。水平方向試験片からは、中央部の上段3c、下段3c、リコータ、ガスフローの影響を確認するため、追加で始端側の下段1bと終点側の下段5bの4カ所の測定を実施した。

CT結果を表 3.2.1(2)⑦-2 に示す。VT3c(中央部、上段)に最大0.23mm、VB5c(リコータ終端の中央部、下段)に最大0.31mmのボイドが検出された。水平方向を含む、その他の試験片では、ボイドは検出されなかった。図 3.2.1(2)⑦-3 にボイドが検出された試験片のX線CT画像を示す。VT3cでは、19個のボイドが検出されており、最大径0.23mmのボイドはネジ部に認められた。VB5cでは、47個のボイドが検出されており、最大径0.31mmのボイドは試験片R部に認められた。ボイドが検出された試験片は、いずれも2ビームの重なり位置を含んでいた。ただし、両試験片ともにRTではキズが検出されていないことを確認している。

表 3.2.1(2)⑦-1 CT 撮影条件(東芝 ESS)

CT 装置	メーカー	ニコン
	型式	TXH320
撮影条件	電流[ $\mu$ A]	150 $\mu$ A
	電圧[kV]	220kV

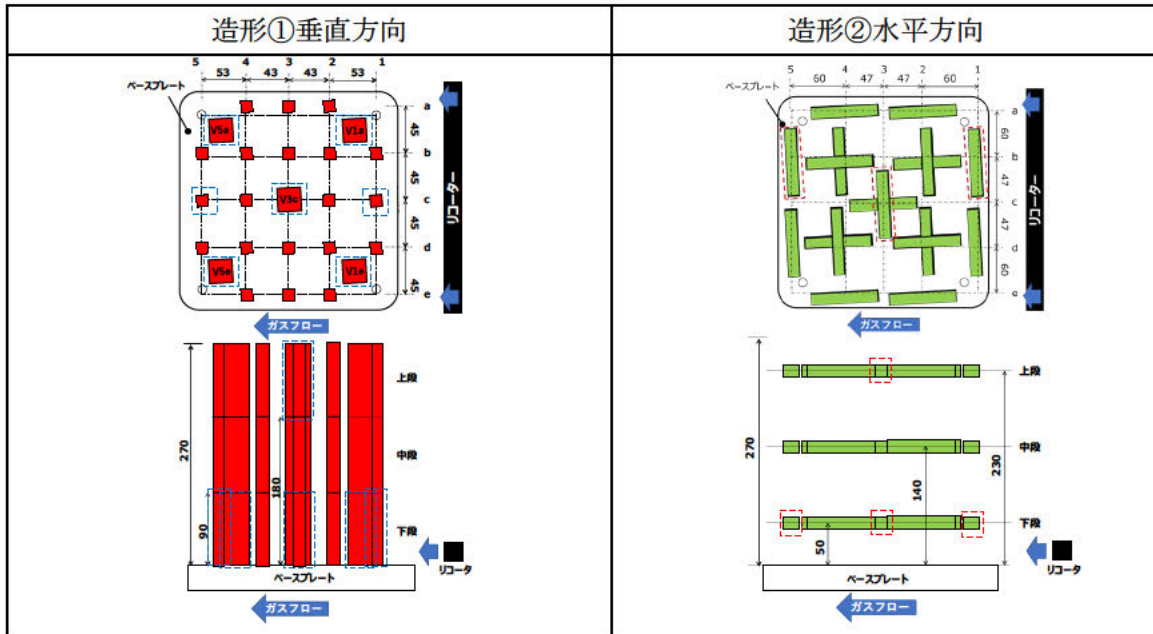


図 3.2.1(2)⑦-1 CT 対象引張試験片(東芝 ESS)  
(注：点線で囲った採取位置が CT 対象試験片)

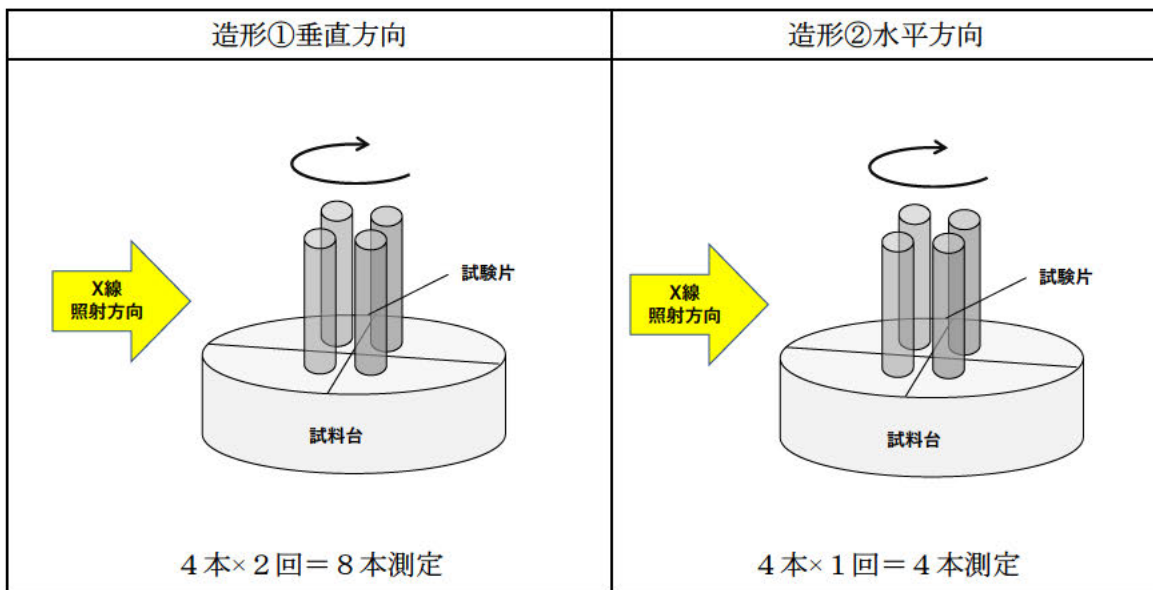
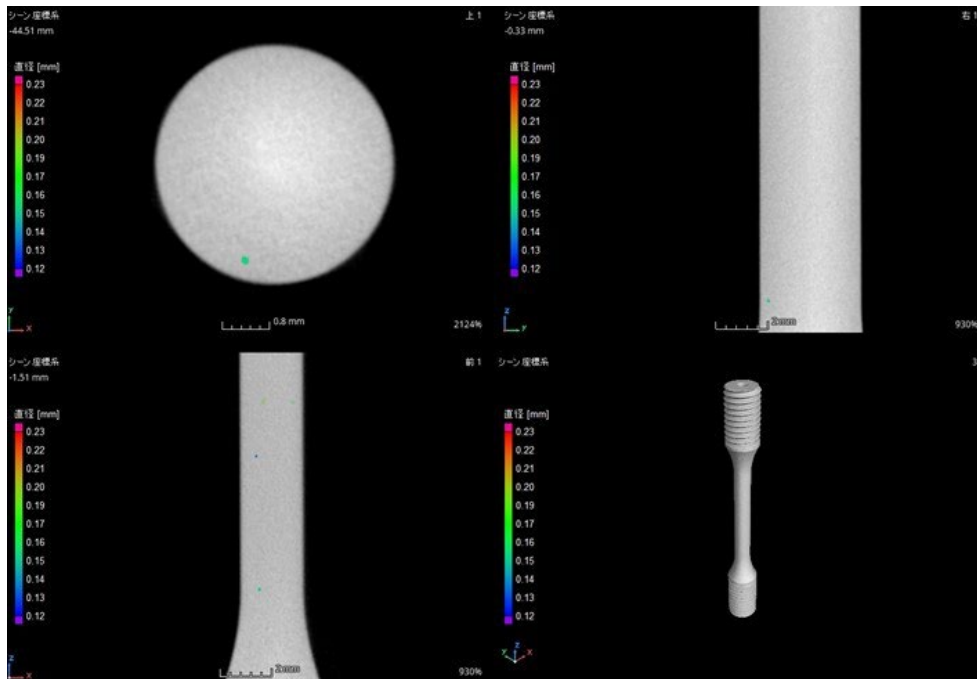


図 3.2.1(2)⑦-2 CT 撮影方向(東芝 ESS)

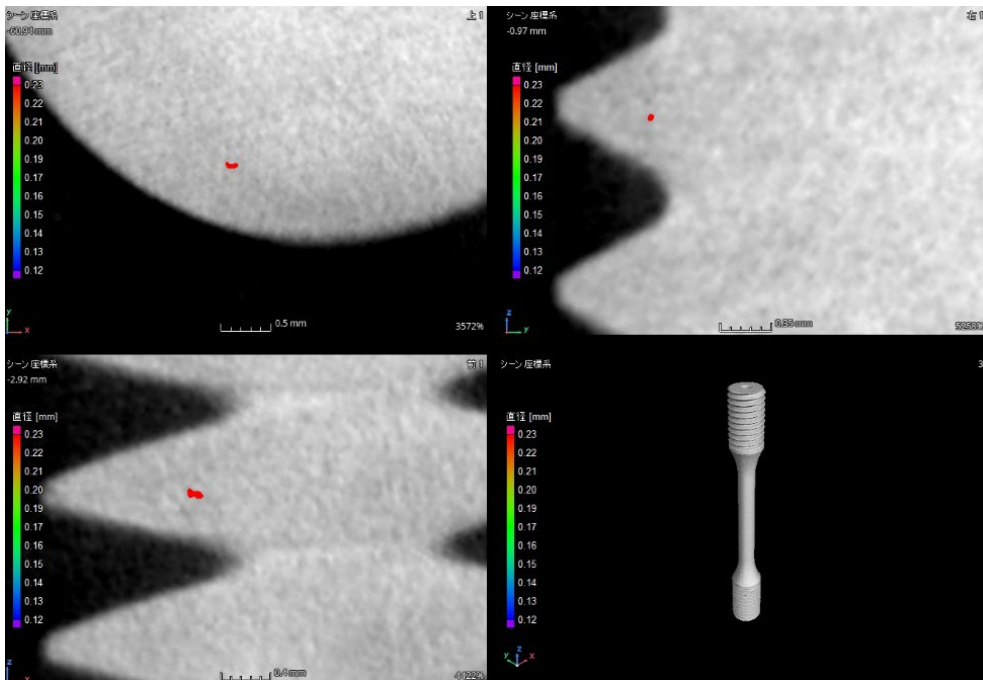


表 3.2.1(2)⑦-2 CT 結果

造形方向	試験片 採取位置	試験片 ID	撮影結果
造形① 垂直方向	上段	T-VT3c	最大 0.23mm のボイドが検出。
	下段	T-VB1a	欠陥の検出無し。
		T-VB1c	欠陥の検出無し。
		T-VB1e	欠陥の検出無し。
		T-VB3c	欠陥の検出無し。
		T-VB5a	欠陥の検出無し。
		T-HT5c	最大 0.31mm のボイドが検出。
T-HT5e	欠陥の検出無し。		
造形② 水平方向	上段	T-HT3c	欠陥の検出無し。
	下段	T-HB1b	欠陥の検出無し。
		T-HB3c	欠陥の検出無し。
		T-HB5b	欠陥の検出無し。

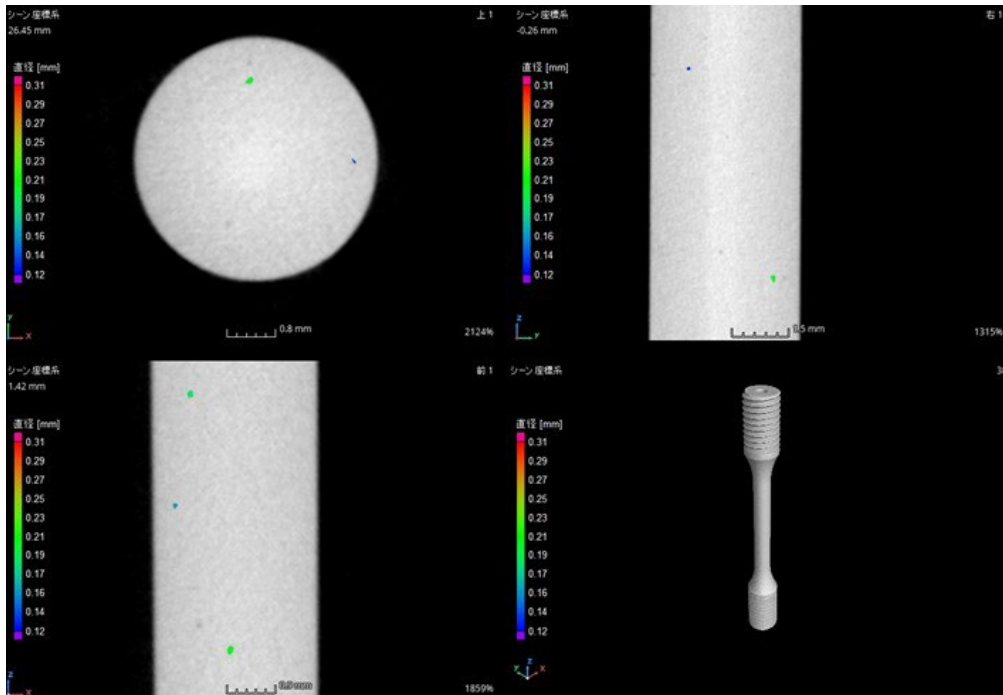


平行部の結果

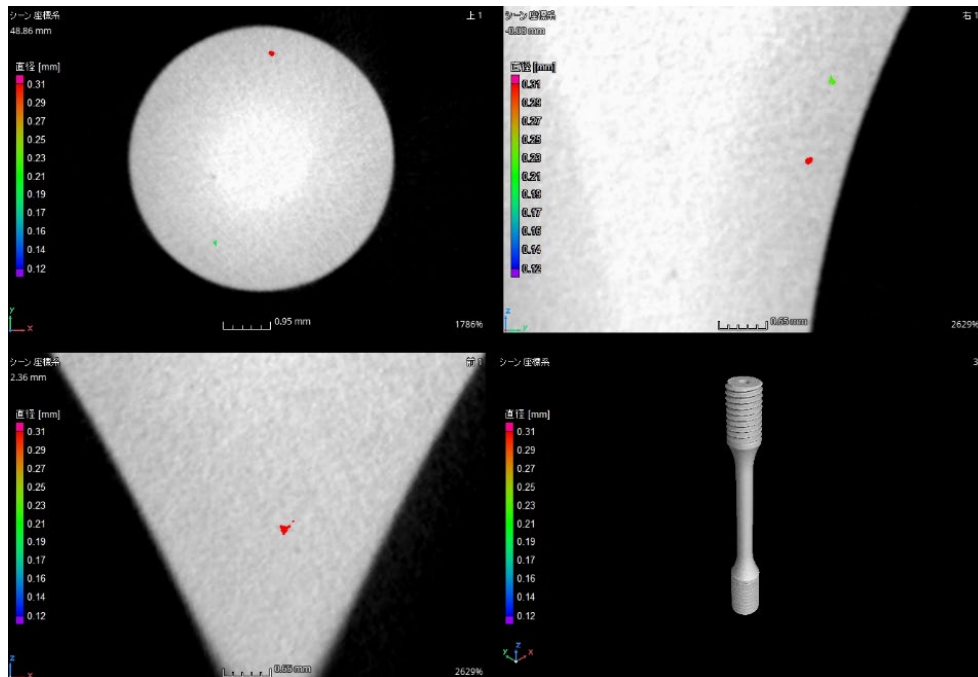


最大ボイドの位置

(a)T-VT3c



平行部の結果



最大ボイドの位置

(b) T-VB5c

図 3.2.1(2)⑦-3 CT 試験結果

### (3) 日立 GE

#### ① 造形方案

図 3.2.1(3)①-1 に垂直方向の造形方案を示す。図 3.1.1(1)-1 に従い、引張試験用のモデルを 4 隅の 4 本を除く 21 本については等間隔となるよう配置し、4 隅の 4 本は、 $x$ - $y$  平面の中心を格子点より中心方向に  $x=8\text{mm}, y=5\text{mm}$  位相を変えて配置した。垂直造形物のサイズは  $20\text{mm}\times 20\text{mm}\times 270\text{mm}$  とした。またリコータと造形物の接触負荷を下げるため、各造形物の中心を基準としてリコータ方向に対し  $10$  度傾けるものとした。

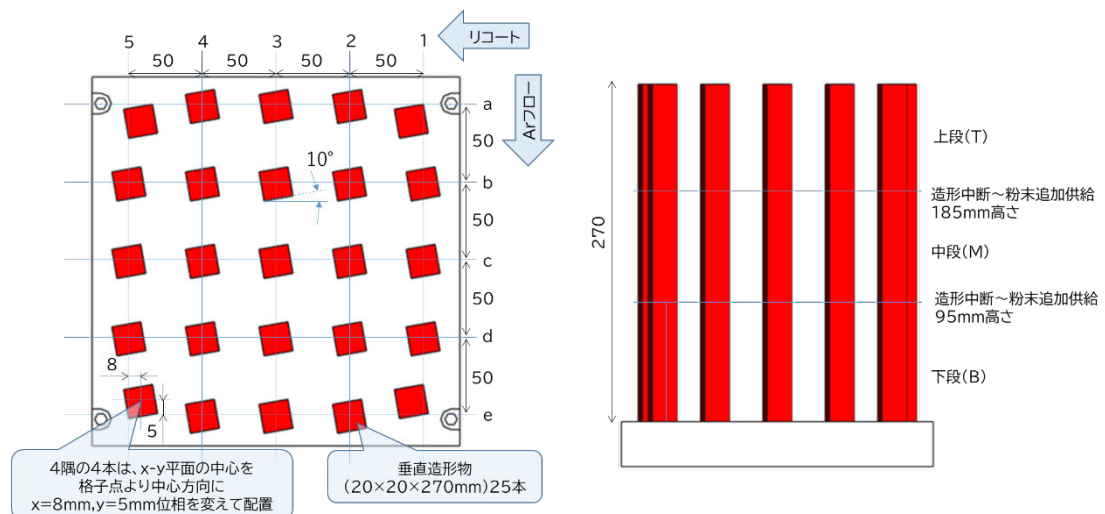


図 3.2.1(3)①-1 造形①垂直方向 (日立 GE)

図 3.2.1(3)①-2 に水平方向の造形方案を示す。図 3.1.1(1)-1 及び図 3.1.1(1)-2 に従い、引張試験用の水平方向の造形造形物は等間隔に、硬さ測定・マイクロ組織試験・化学分析試験用の垂直方向の造形物については4隅と中央の5本とし、水平方向の造形物を避けて配置した。各造形物の辺が X と Y 方向となるように造形物の中心を格子点に合わせて配置し、10 度傾けた状態で造形物同士が重ならないよう最外周を固定し、各造形物が 4.5mm 以上離れるよう外周側より配置調整を行った。水平造形物のサイズは 20mm×20mm×80mm とし、硬さ試験・マイクロ組織試験・化学分析用の垂直造形物のサイズは 20mm×20mm×270mm とした。またリコータと造形物の接触負荷を下げるため、各造形物の中心を基準としてリコータ方向に対し 10 度傾けるものとした。

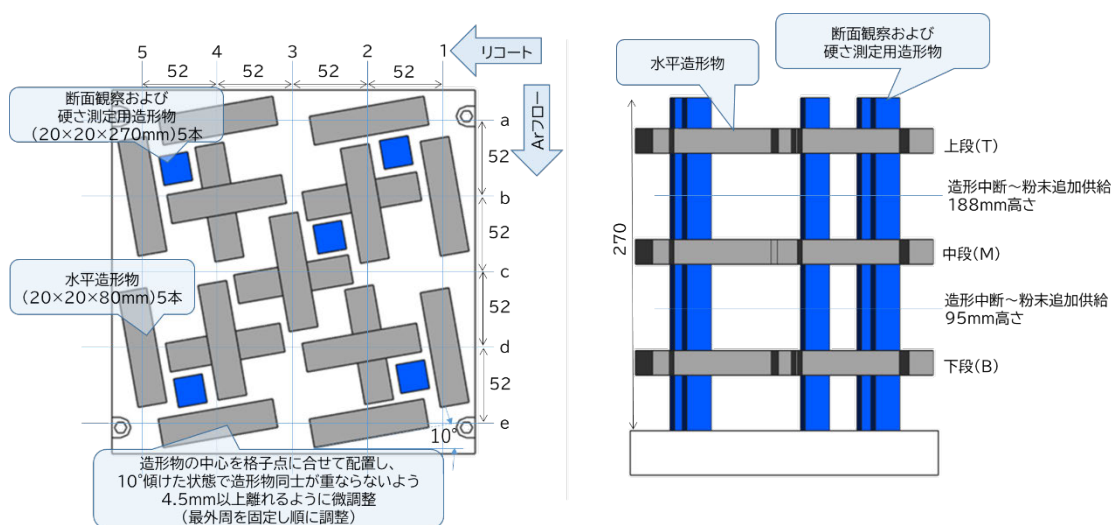


図 3.2.1(3)①-2 造形②水平方向 (日立 GE)

図 3.2.1(3)①-3 に 45 度方向の造形方案を示す。図 3.1.1(1)-1 に従い、各造形物が等間隔となるよう配置した。またリコータとの接触負荷を下げるため、各造形物の中心軸を基準としてリコータ方向に対し 10 度傾けるものとした。

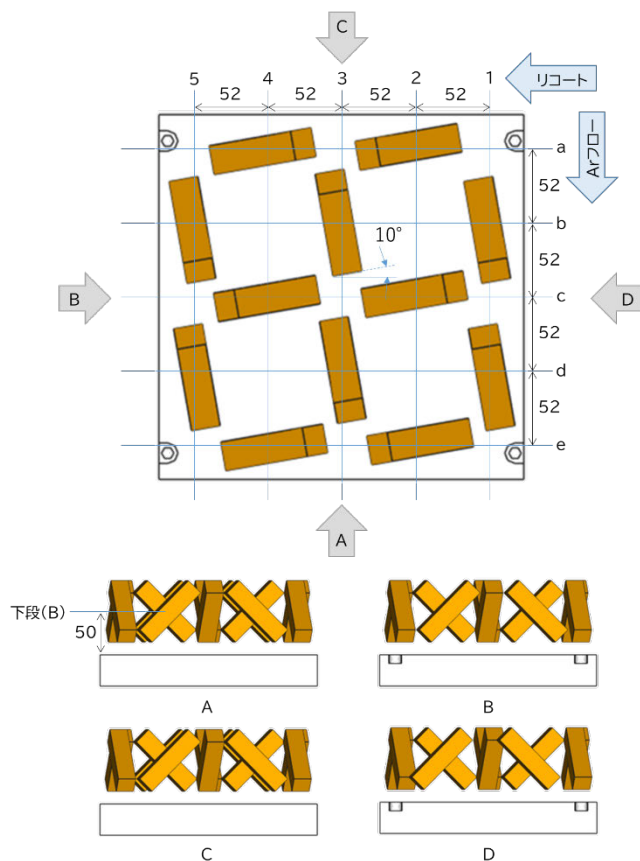


図 3.2.1(3)①-3 造形③45 度方向(日立 GE)

②造形結果

表 3.1.2(3)-1 の条件を用いて造形した、造形後の外観を図 3.2.1(3)②-1 に示す。  
外観上の不良なく造形が完了したことを確認した。



図 3.2.1(3)②-1 造形後外観(日立 GE)

③熱処理結果

図 3.2.1(3)②-1 に示した造形物について、造形後に表 3.1.2(4)-1 にて示した SR を実施した後、ベースプレート及びサポート材の除去を実施。その後、表 3.1.2(4)-2 にて示した条件にて固溶化熱処理を実施した。 [REDACTED]



#### ④RT 結果

熱処理の完了した造形物に対し、3.1.1(2)項「⑤放射線透過試験 (RT)」の仕様にに基づき、図 3.2.1(3)④-1 に示す X 線照射方向にて RT を実施した。

また GTN-4010 を参照し、溶接規格 N1100(1)a を基準として判定を実施した。判定結果を表 3.2.1(3)④-1~表 3.2.1(3)④-3 に示す。RT の結果、試験片 ID. T-HT2e、T-HT4e、T-HM2e、T-HM4e、T-HB2e、T-HB4e に集中ブローホール ( $\phi 0.5$  以下のきずが試験視野範囲に 10 個以上) が確認されたことから、JIS Z 3104 付属書 4 §6.1 により不合格と判定した。中ブローホールが確認された試験片の代表 RT フィルムは図 3.2.1(3)④-2 に示す)。これらの試験片はすべて Ar ガスフローの下流側に配置され、大物量造形パターン (造形②水平方向) にて Ar ガスフロー流れに対する位置によって差が生じるの影響が確認された。その他の TP には基準を超えるきずが検出されずに合格と判定した。

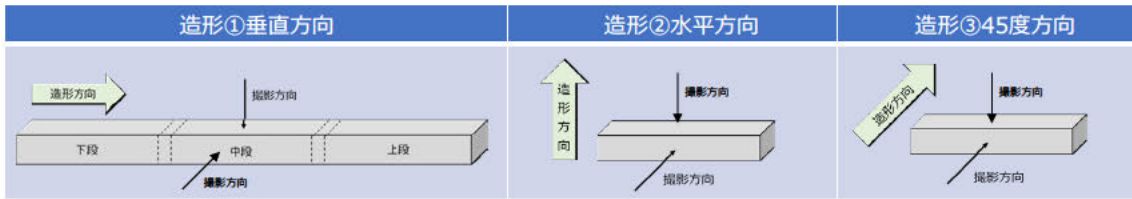
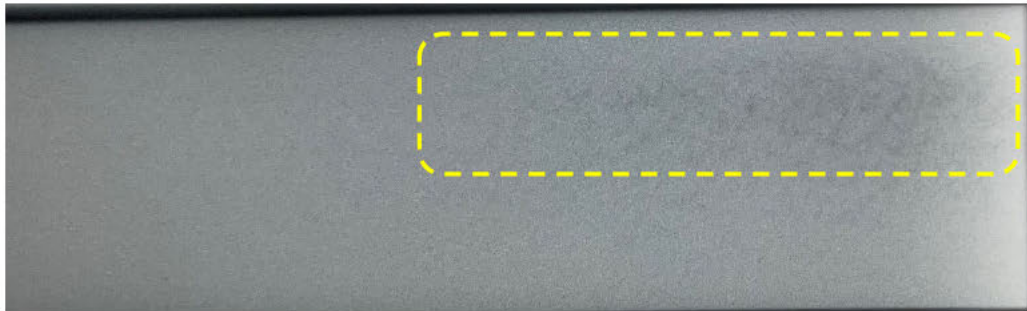


図 3.2.1(3)④-1 RT 撮影方向(日立 GE)



試験片 ID. T-HT2e



試験片 ID. T-HB4e

図 3.2.1(3)④-2 集中ブローホールが確認された TP の代表 RT フィルム。

表 3.2.1(3)④-1 造形①垂直方向 RT 結果 (日立 GE)

採取位置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
上段	T-VT1a	合格	T-VT1b	合格	T-VT1c	合格	T-VT1d	合格	T-VT1e	合格
	T-VT2a	合格	T-VT2b	合格	T-VT2c	合格	T-VT2d	合格	T-VT2e	合格
	T-VT3a	合格	T-VT3b	合格	T-VT3c	合格	T-VT3d	合格	T-VT3e	合格
	T-VT4a	合格	T-VT4b	合格	T-VT4c	合格	T-VT4d	合格	T-VT4e	合格
	T-VT5a	合格	T-VT5b	合格	T-VT5c	合格	T-VT5d	合格	T-VT5e	合格
中段	T-VM1a	合格	T-VM1b	合格	T-VM1c	合格	T-VM1d	合格	T-VM1e	合格
	T-VM2a	合格	T-VM2b	合格	T-VM2c	合格	T-VM2d	合格	T-VM2e	合格
	T-VM3a	合格	T-VM3b	合格	T-VM3c	合格	T-VM3d	合格	T-VM3e	合格
	T-VM4a	合格	T-VM4b	合格	T-VM4c	合格	T-VM4d	合格	T-VM4e	合格
	T-VM5a	合格	T-VM5b	合格	T-VM5c	合格	T-VM5d	合格	T-VM5e	合格
下段	T-VB1a	合格	T-VB1b	合格	T-VB1c	合格	T-VB1d	合格	T-VB1e	合格
	T-VB2a	合格	T-VB2b	合格	T-VB2c	合格	T-VB2d	合格	T-VB2e	合格
	T-VB3a	合格	T-VB3b	合格	T-VB3c	合格	T-VB3d	合格	T-VB3e	合格
	T-VB4a	合格	T-VB4b	合格	T-VB4c	合格	T-VB4d	合格	T-VB4e	合格
	T-VB5a	合格	T-VB5b	合格	T-VB5c	合格	T-VB5d	合格	T-VB5e	合格

表 3.2.1(3)④-2 造形②水平方向 RT 結果 (日立 GE)

採取位置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
上段	—	—	T-HT1b	合格	—	—	T-HT1d	合格	—	—
	T-HT2a	合格	T-HT2b	合格	—	—	T-HT2d	合格	T-HT2e	不合格
	—	—	—	—	T-HT3c	合格	—	—	—	—
	T-HT4a	合格	T-HT4b	合格	—	—	T-HT4d	合格	T-HT4e	不合格
	—	—	T-HT5b	合格	—	—	T-HT5d	合格	—	—
中段	—	—	T-HM1b	合格	—	—	T-HM1d	合格	—	—
	T-HM2a	合格	T-HM2b	合格	—	—	T-HM2d	合格	T-HM2e	不合格
	—	—	—	—	T-HM3c	合格	—	—	—	—
	T-HM4a	合格	T-HM4b	合格	—	—	T-HM4d	合格	T-HM4e	不合格
	—	—	T-HM5b	合格	—	—	T-HM5d	合格	—	—
下段	—	—	T-HB1b	合格	—	—	T-HB1d	合格	—	—
	T-HB2a	合格	T-HB2b	合格	—	—	T-HB2d	合格	T-HB2e	不合格
	—	—	—	—	T-HB3c	合格	—	—	—	—
	T-HB4a	合格	T-HB4b	合格	—	—	T-HB4d	合格	T-HB4e	不合格
	—	—	T-HB5b	合格	—	—	T-HB5d	合格	—	—

表 3.2.1(3)④-1 造形③45度方向 RT 結果 (日立 GE)

採取位置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
下段	—	—	T-DB1b	合格	—	—	T-DB1d	合格	—	—
	T-DB2a	合格	—	—	T-DB2c	合格	—	—	T-DB2e	合格
	—	—	T-DB3b	合格	—	—	T-DB3d	合格	—	—
	T-DB4a	合格	—	—	T-DB4c	合格	—	—	T-DB4e	合格
	—	—	T-DB5b	合格	—	—	T-DB5d	合格	—	—

### ⑤試験片加工

固溶化熱処理及び RT の完了した造形①～③に対し、JIS Z2241「金属材料引張試験方法」の 14A 号引張試験片（図 3.1.1(2)①-4 参照）に従い、引張試験片を加工した。切り出し位置及び数量については、図 3.1.1(2)①-1～3 及び表 3.1.1(2)①-1 参照。引張試験片形状を図 3.2.1(3)⑤-1 に示す。

加工した引張試験片は全数指定の寸法通り加工を完了した。

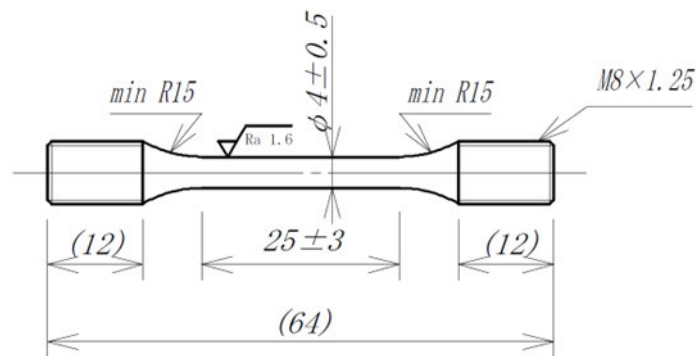


図 3.2.1(3)⑤-1 引張試験片形状(日立 GE)



図 3.2.1(3)⑤-1 引張試験片外観例

### ⑥PT 結果

引張試験片加工の完了した造形物に対し、3.1.1(2)項「⑥浸透探傷試験 (PT)」の仕様に基づき、PT を実施した。その結果、その結果を表 3.2.1(3)⑥-1~3 に示す。RT で不合格となった試験片 ID T-HT2e、T-HT4e、T-HM2e、T-HM4e、T-HB2e、T-HB4e の 6 体については、PT においても RT と同様に集中ブローホールが確認され、不合格となった (代表結果は図 3.2.1(3)⑥-1 に示す)。また、合格範囲内ではあるがピンホール指示が確認された試験片が 2 体あった (代表結果は図 3.2.1(3)⑥-2 に示す)。

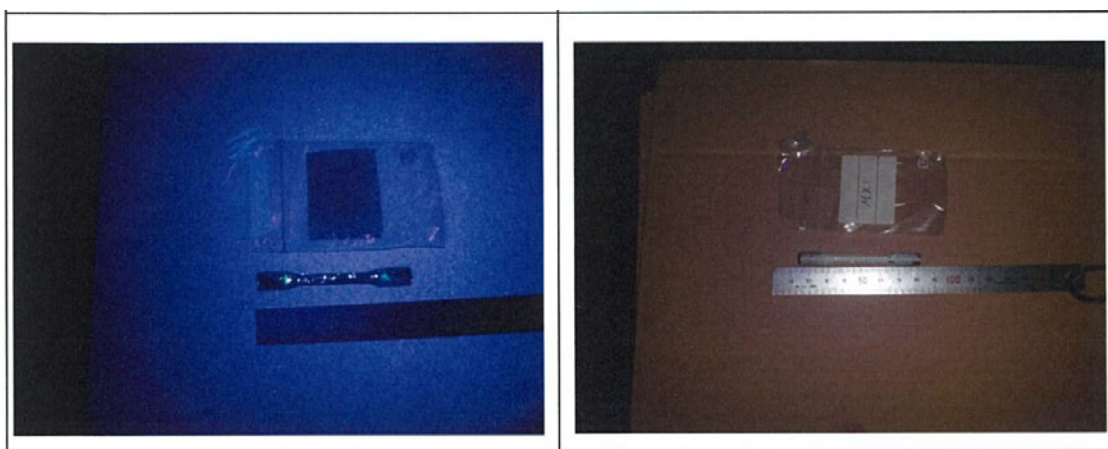


図 3.2.1(3)⑥-1 PT 結果の例 (集中ブローホールは確認された試験片 ID. T-HM2d)

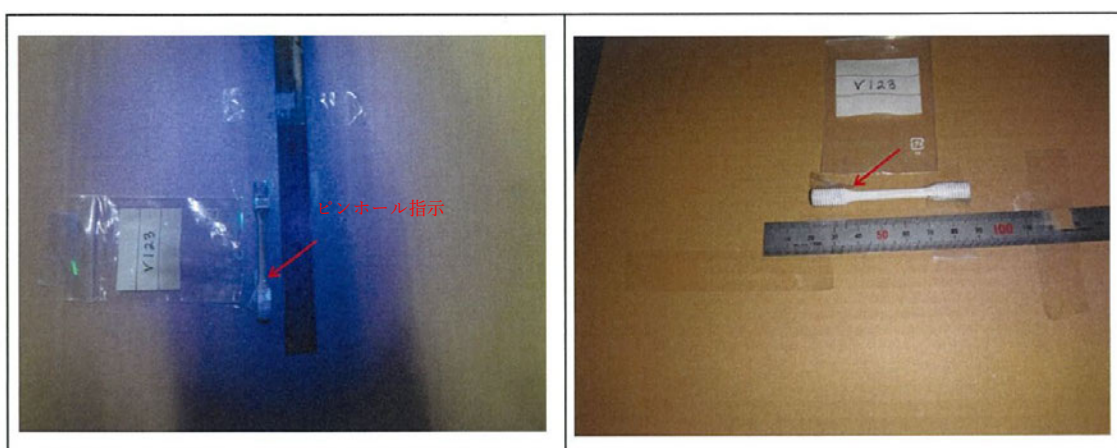


図 3.2.1(3)⑥-2 PT 結果の例 (ピンホール指示が確認された試験片 ID. T-VB4e)

表 3.2.1(3)⑥-1 造形①垂直方向 PT 結果(日立 GE)

採取位置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
上段	T-VT1a	合格	T-VT1b	合格	T-VT1c	合格	T-VT1d	合格	T-VT1e	合格
	T-VT2a	合格	T-VT2b	合格	T-VT2c	合格	T-VT2d	合格	T-VT2e	合格
	T-VT3a	合格	T-VT3b	合格	T-VT3c	合格	T-VT3d	合格	T-VT3e	合格
	T-VT4a	合格	T-VT4b	合格	T-VT4c	合格	T-VT4d	合格	T-VT4e	合格
	T-VT5a	合格	T-VT5b	合格	T-VT5c	合格	T-VT5d	合格	T-VT5e	合格
中段	T-VM1a	合格	T-VM1b	合格	T-VM1c	合格	T-VM1d	合格	T-VM1e	合格
	T-VM2a	合格	T-VM2b	合格	T-VM2c	合格	T-VM2d	合格	T-VM2e	合格
	T-VM3a	合格	T-VM3b	合格	T-VM3c	合格	T-VM3d	合格	T-VM3e	合格
	T-VM4a	合格	T-VM4b	合格	T-VM4c	合格	T-VM4d	合格	T-VM4e	合格
	T-VM5a	合格	T-VM5b	合格	T-VM5c	合格	T-VM5d	合格	T-VM5e	合格
下段	T-VB1a	合格	T-VB1b	合格	T-VB1c	合格	T-VB1d	合格	T-VB1e	合格
	T-VB2a	合格	T-VB2b	合格	T-VB2c	合格	T-VB2d	合格	T-VB2e	合格
	T-VB3a	合格	T-VB3b	合格	T-VB3c	合格	T-VB3d	合格	T-VB3e	合格
	T-VB4a	合格	T-VB4b	合格	T-VB4c	合格	T-VB4d	合格	T-VB4e	合格
	T-VB5a	合格	T-VB5b	合格	T-VB5c	合格	T-VB5d	合格	T-VB5e	合格

表 3.2.1(3)⑥-2 造形②水平方向 PT 結果(日立 GE)

試験片 採取位 置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
上段	—	—	T-HT1b	合格	—	—	T-HT1d	合格	—	—
	T-HT2a	合格	T-HT2b	合格	—	—	T-HT2d	合格	T-HT2e	不合格
	—	—	—	—	T-HT3c	合格	—	—	—	—
	T-HT4a	合格	T-HT4b	合格	—	—	T-HT4d	合格	T-HT4e	不合格
	—	—	T-HT5b	合格	—	—	T-HT5d	合格	—	—
中段	—	—	T-HM1b	合格	—	—	T-HM1d	合格	—	—
	T-HM2a	合格	T-HM2b	合格	—	—	T-HM2d	合格	T-HM2e	不合格
	—	—	—	—	T-HM3c	合格	—	—	—	—
	T-HM4a	合格	T-HM4b	合格	—	—	T-HM4d	合格	T-HM4e	不合格
	—	—	T-HM5b	合格	—	—	T-HM5d	合格	—	—
下段	—	—	T-HB1b	合格	—	—	T-HB1d	合格	—	—
	T-HB2a	合格	T-HB2b	合格	—	—	T-HB2d	合格	T-HB2e	不合格
	—	—	—	—	T-HB3c	合格	—	—	—	—
	T-HB4a	合格	T-HB4b	合格	—	—	T-HB4d	合格	T-HB4e	不合格
	—	—	T-HB5b	合格	—	—	T-HB5d	合格	—	—

表 3.2.1(3)⑥-3 造形③45度方向 PT 結果(日立 GE)

採取 位置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
下段	—	—	T-DB1b	合格	—	—	T-DB1d	合格	—	—
	T-DB2a	合格	—	—	T-DB2c	合格	—	—	T-DB2e	合格
	—	—	T-DB3b	合格	—	—	T-DB3d	合格	—	—
	T-DB4a	合格	—	—	T-DB4c	合格	—	—	T-DB4e	合格
	—	—	T-DB5b	合格	—	—	T-DB5d	合格	—	—



### ⑦CT 結果

造形位置による内部欠陥の発生傾向を把握するため、3.1.1(2)項「⑦X線 CT 試験(CT)」の仕様に基づき、図 3.2.1(3)⑦-1 に示す位置から採取した引張試験片の CT 試験を実施した。撮影条件及び撮影方向を表 3.2.1(3)⑦-1 及び図 3.2.1(3)⑦-2 に示す。

CT 試験を実施した試験片は 10 本で、図 3.2.1(3)⑦-1 に示す位置の試験片を選定した理由は次の通りである。1 層の造形（レーザ照射）面積の違いを確認するため、造形領域の中心より採取した。造形①垂直方向から下段(b),中段(M),上段(T)( T-VT3c, T-VM3c, T-VB3c)と造形②水平方向から下段(B),中段(M)( T-HM3c, T-HB3c)について採取した。また、造形中に発生する金属蒸気（ヒューム）やスパッタの影響を受ける可能性があるガスフロー下流域から下段(b),中段(M),上段(T)( T-HB4e, T-HM4e, T-HT4e) について採取した。ガスフロー上段を評価するため、造形②水平方向から上段(T)(T-HT2a)について採取した。また、造形②水平方向造形の長手方向の違いを比較するため、中段(M)(T-HM4b)について採取した。

CT 結果を表 3.2.1(3)⑦-2 に示す。RT 結果及び PT 結果と同様、試験片 ID. T-HT4e、T-HM4e、T-HB4e にて欠陥は検出された。これらの試験片はすべて Ar ガスフローの下流側に配置され、大物量造形パターン（造形②水平方向）にて Ar ガスフロー流れに対する位置によって差が生じるの影響が確認された。

表 3.2.1(3)⑦-1 CT 撮影条件(日立 GE)

CT 装置	メーカー	日立製作所
	型式	HiXCT-9/6M-SP
撮影条件	電流[ $\mu$ A]	—
	電圧[kV]	9 MV

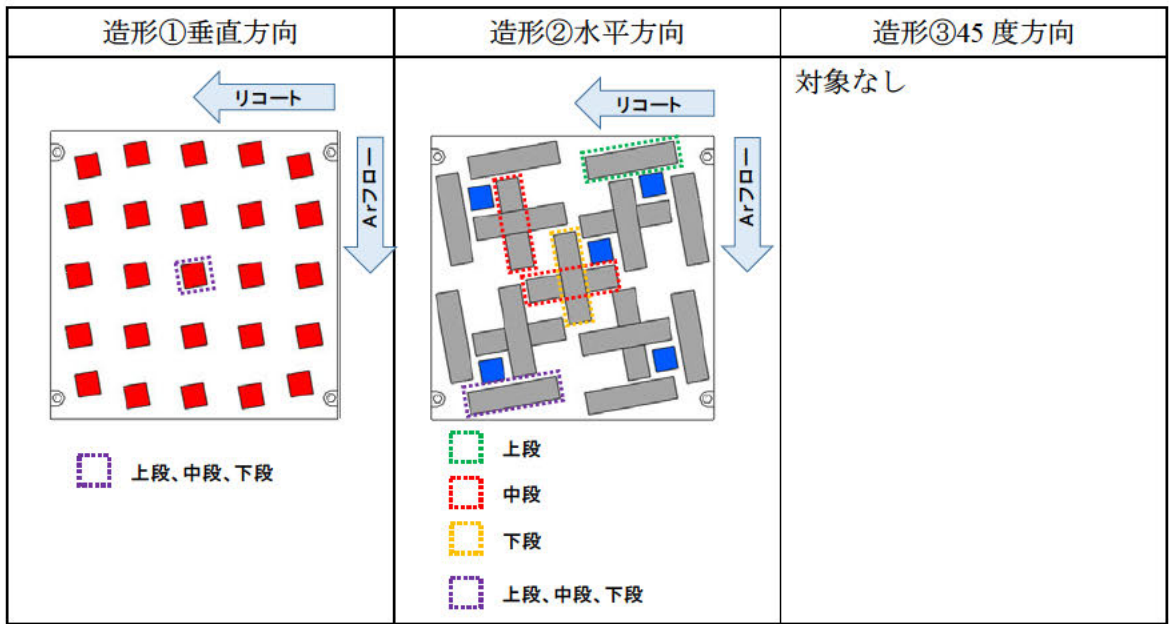


図 3.2.1(3)⑦-1 CT 対象引張試験片(日立 GE)  
(注：点線で囲った採取位置が CT 対象試験片)

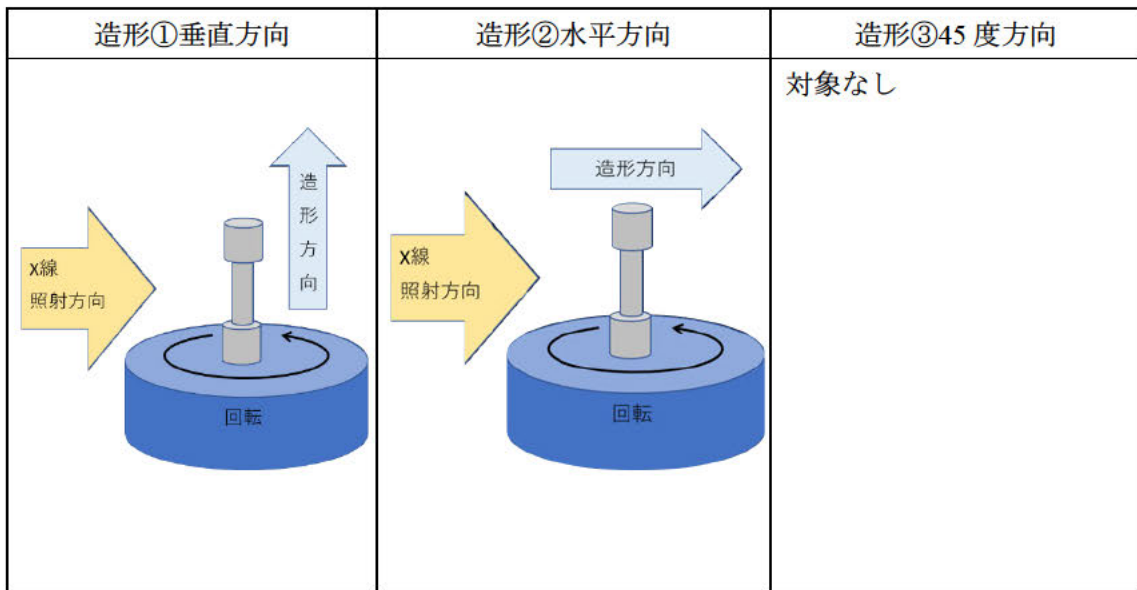
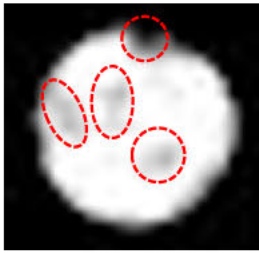
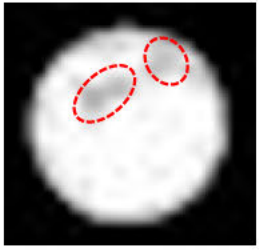
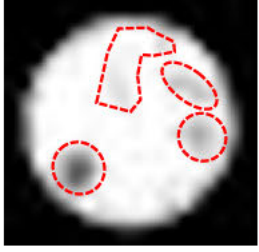


図 3.2.1(3)⑦-2 CT 撮影方向(日立 GE)

表 3.2.1(3)⑦-2 CT 撮像結果 (欠陥指示は確認された試験片)

水平方向	試験片 採取位置	試験片 ID	CT 撮像結果の例 (欠陥指示あり)	撮影結果
造形方向 造形②	上段	T-HT4e		複数撮影位置に $\phi 0.5\text{mm}$ 以上の欠陥は検出された。
	中段	T-HM4e		複数撮影位置に $\phi 0.5\text{mm}$ 以上の欠陥は検出された。
	下段	T-HB4e		複数撮影位置に $\phi 0.5\text{mm}$ 以上の欠陥は検出された。

(4)IHI

①造形方案

図 3.2.1(4)①-1 に垂直方向の造形方案を示す。垂直造形物のサイズは 20mm×20mm×270mm とした。造形物の配置については、図 3.1.1(1)-1 に従い 4 隅の 4 本を除く 21 本については等間隔とし、4 隅の 4 本については造形物の角が格子の線に当たるように配置した。造形物の角度については、リコータと造形物との接触負荷を下げるためリコータ方向に対し 10 度傾けるものとした。また造形開始時点の粉末充填の最大量では 270mm の造形高さに足りない見通しであったため、引張試験片採取位置の範囲外の造形高さにおいて、一時造形を中断し粉末供給を行った。

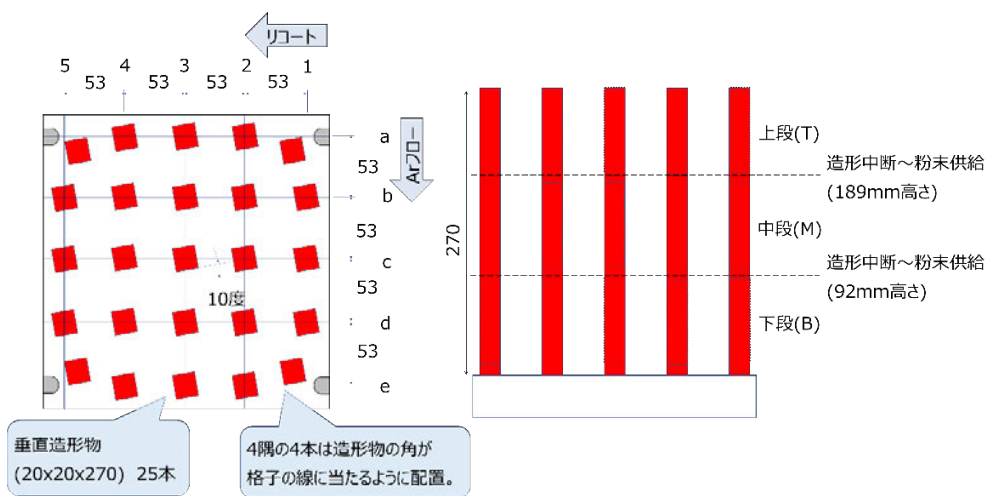


図 3.2.1(4)①-1 造形①垂直方向 (IHI)

図 3.2.1(4)①-2 に水平方向の造形方案を示す。水平造形物のサイズは 15mm×15mm×80mm、硬さ試験・組織試験・化学分析用の造形物のサイズは 20mm×20mm×270mm とした。造形物の配置については、図 3.1.1(1)-1 及び図 3.1.1(1)-2 に従い水平造形物は等間隔とし、硬さ試験・組織試験・化学分析用の造形物については図 3.2.1(4)①-2 に示す通り A と B の距離が同じとなるよう配置した。造形物の角度については、リコータと造形物との接触負荷を下げるためリコート方向に対し 10 度傾けるものとした。また造形開始時点の粉末充填の最大量では 270mm の造形高さに足りない見通しであったため、引張試験片採取及び硬さ試験・組織試験・化学分析評価の範囲外である造形高さにおいて、一時造形を中断し粉末供給を行った。

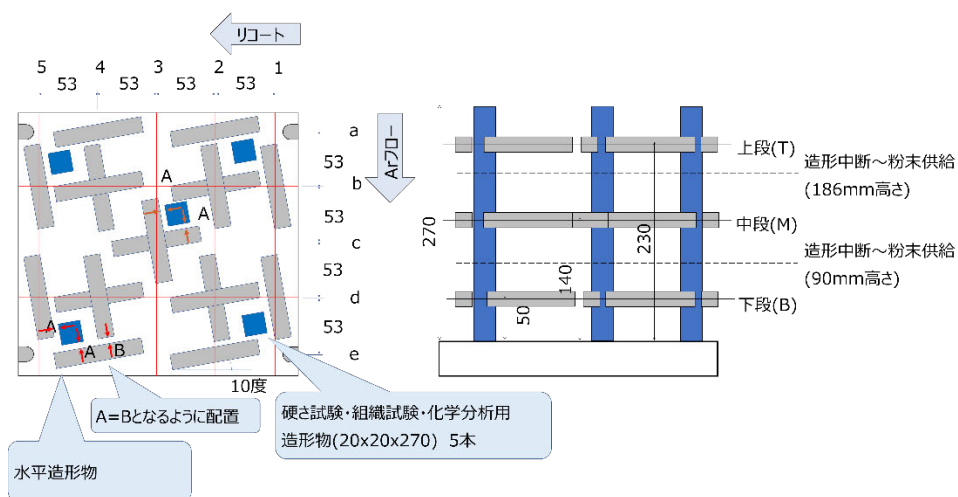


図 3.2.1(4)①-2 造形②水平方向 (IHI)

図 3.2.1(4)①-3 に 45 度方向の造形方案を示す。45 度造形物のサイズは 20mm×20mm×80mm とした。造形物の配置については、図 3.1.1(1)-1 に従い各造形物が等間隔となるよう配置した。またリコートと造形物の接触負荷を下げるため、リコート方向に対し 10 度傾けるものとした。

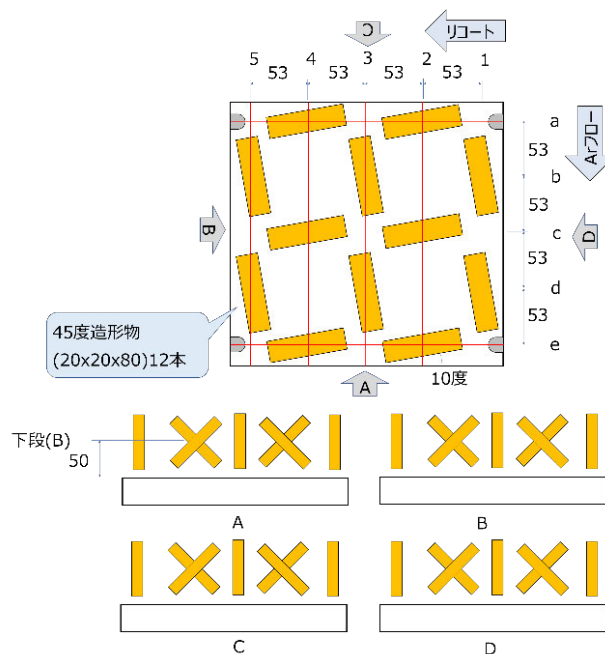


図 3.2.1(4)①-3 造形③45 度方向(IHI)

②造形結果

表 3.1.2(3)-1 の条件を用い、造形した造形物の外観を図 3.2.1(3)②-1 に示す。外観上の不良なく造形が完了したことを確認した。

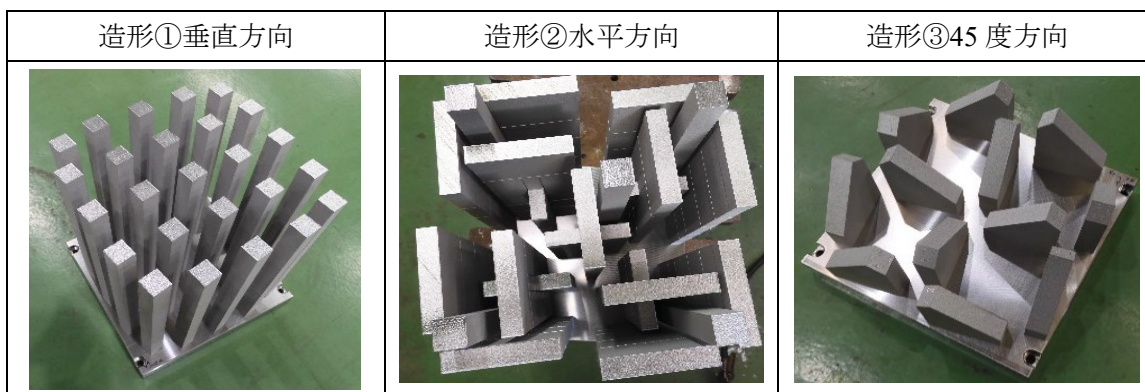


図 3.2.1(4)②-1 造形後外観(IHI)





#### ④RT 結果

熱処理の完了した造形物に対し、3.1.1(2)項「⑤放射線透過試験 (RT)」の仕様に基づき、図 3.2.1(4)④-1 に示す X 線照射方向にて RT の撮影を実施した。

判定基準については日本機械学会「発電用原子力設備規格 溶接規格」JSME S NB1-2012 (2013 年追補)を参照した。判定結果を表 3.2.1(4)④-1～表 3.2.1(4)④-3 に示す。判定の結果、造形②水平方向の造形物のうちの 2 本において基準を超えるきずが検出され、不合格であった。図 3.2.1(4)④-2 に示す通り、不合格となった 2 本はいずれも下段の高さで、最も Ar フロー下流側で造形したものであった。不合格となった試験片のきずの発生原因としては、上流側を造形した際に発生したスパッタの下流側造形面への堆積や、Ar フローで排除しきれなかったヒュームが下流側に残留しレーザが阻害されることにより熔融不足となった可能性が考えられる。

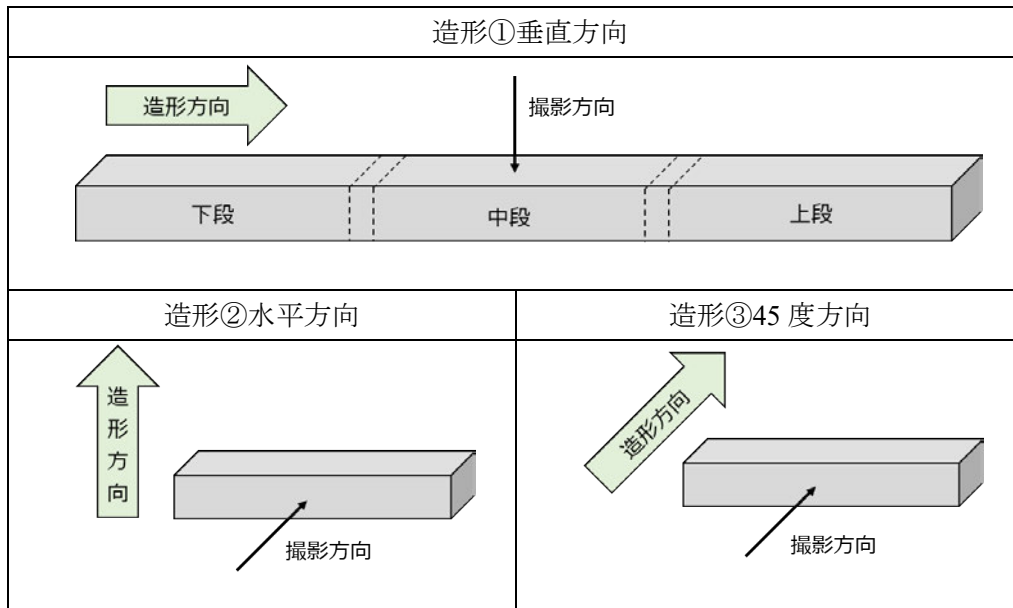


图 3.2.1(4)④-1 RT 摄影方向(IHI)

表 3.2.1(4)④-1 造形①垂直方向 RT 結果 (IHI)

採取位置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
上段	T-VT1a	合格	T-VT1b	合格	T-VT1c	合格	T-VT1d	合格	T-VT1e	合格
	T-VT2a	合格	T-VT2b	合格	T-VT2c	合格	T-VT2d	合格	T-VT2e	合格
	T-VT3a	合格	T-VT3b	合格	T-VT3c	合格	T-VT3d	合格	T-VT3e	合格
	T-VT4a	合格	T-VT4b	合格	T-VT4c	合格	T-VT4d	合格	T-VT4e	合格
	T-VT5a	合格	T-VT5b	合格	T-VT5c	合格	T-VT5d	合格	T-VT5e	合格
中段	T-VM1a	合格	T-VM1b	合格	T-VM1c	合格	T-VM1d	合格	T-VM1e	合格
	T-VM2a	合格	T-VM2b	合格	T-VM2c	合格	T-VM2d	合格	T-VM2e	合格
	T-VM3a	合格	T-VM3b	合格	T-VM3c	合格	T-VM3d	合格	T-VM3e	合格
	T-VM4a	合格	T-VM4b	合格	T-VM4c	合格	T-VM4d	合格	T-VM4e	合格
	T-VM5a	合格	T-VM5b	合格	T-VM5c	合格	T-VM5d	合格	T-VM5e	合格
下段	T-VB1a	合格	T-VB1b	合格	T-VB1c	合格	T-VB1d	合格	T-VB1e	合格
	T-VB2a	合格	T-VB2b	合格	T-VB2c	合格	T-VB2d	合格	T-VB2e	合格
	T-VB3a	合格	T-VB3b	合格	T-VB3c	合格	T-VB3d	合格	T-VB3e	合格
	T-VB4a	合格	T-VB4b	合格	T-VB4c	合格	T-VB4d	合格	T-VB4e	合格
	T-VB5a	合格	T-VB5b	合格	T-VB5c	合格	T-VB5d	合格	T-VB5e	合格

表 3.2.1(4)④-2 造形②水平方向 RT 結果 (IHI)

採取位置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
上段	—	—	T-HT1b	合格	—	—	T-HT1d	合格	—	—
	T-HT2a	合格	T-HT2b	合格	—	—	T-HT2d	合格	T-HT2e	合格
	—	—	—	—	T-HT3c	合格	—	—	—	—
	T-HT4a	合格	T-HT4b	合格	—	—	T-HT4d	合格	T-HT4e	合格
	—	—	T-HT5b	合格	—	—	T-HT5d	合格	—	—
中段	—	—	T-HM1b	合格	—	—	T-HM1d	合格	—	—
	T-HM2a	—	T-HM2b	合格	—	—	T-HM2d	合格	T-HM2e	合格
	—	—	—	—	T-HM3c	合格	—	—	—	—
	T-HM4a	合格	T-HM4b	合格	—	—	T-HM4d	合格	T-HM4e	合格
	—	—	T-HM5b	合格	—	—	T-HM5d	合格	—	—
下段	—	—	T-HB1b	合格	—	—	T-HB1d	合格	—	—
	T-HB2a	合格	T-HB2b	合格	—	—	T-HB2d	合格	T-HB2e	不合格
	—	—	—	—	T-HB3c	合格	—	—	—	—
	T-HB4a	合格	T-HB4b	合格	—	—	T-HB4d	合格	T-HB4e	不合格
	—	—	T-HB5b	合格	—	—	T-HB5d	合格	—	—

表 3.2.1(4)④-3 造形③45度方向 RT 結果 (IHI)

採取位置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
下段	—	—	T-DB1b	合格	—	—	T-DB1d	合格	—	—
	T-DB2a	合格	—	—	T-DB2c	合格	—	—	T-DB2e	合格
	—	—	T-DB3b	合格	—	—	T-DB3d	合格	—	—
	T-DB4a	合格	—	—	T-DB4c	合格	—	—	T-DB4e	合格
	—	—	T-DB5b	合格	—	—	T-DB5d	合格	—	—

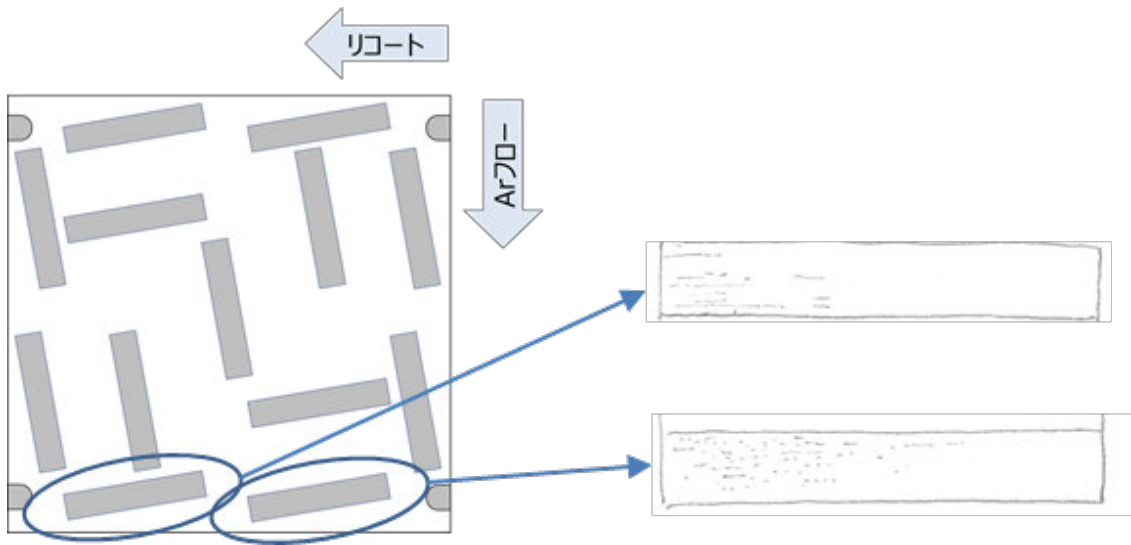


図 3.2.1(4)④-2 造形②水平方向(下段) RT 不合格発生位置及びトレース画像

### ⑤試験片加工

固溶化熱処理及び RT の完了した図 3.2.1(4)②-1 の造形物に対し、JIS Z2241「金属材料引張試験方法」の 14A 号引張試験片（図 3.1.1(2)①-4 参照）に従い、図 3.2.1(4)⑤-1 に示す形状にて引張試験片を加工した。加工の結果、表 3.1.1(2)①-1 のマトリクスにて示す引張試験片全数が指定の形状通りであることを確認した。切り出し位置については、図 3.1.1(2)①-1~3 参照。試験片加工後の外観例を図 3.2.1(4)⑤-2 に示す。

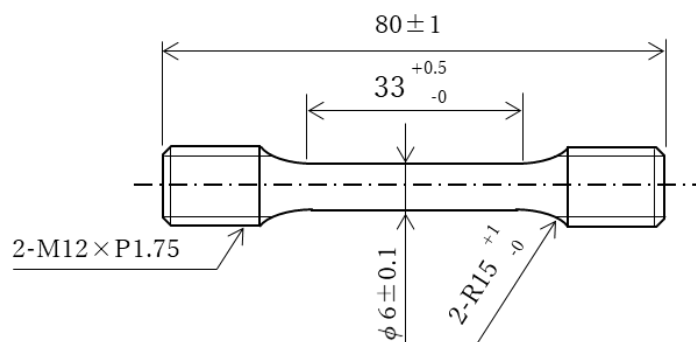


図 3.2.1(4)⑤-1 引張試験片形状(IHI)

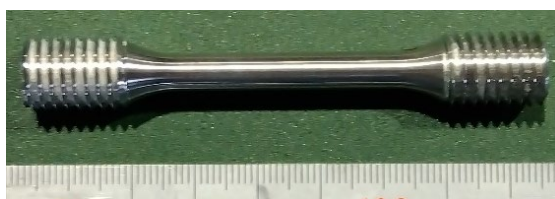


図 3.2.1(4)⑤-2 引張試験片外観例(IHI)

⑥PT 結果

前項⑤にて加工した引張試験片に対し、3.1.1(2)項「⑥浸透探傷試験 (PT)」の仕様に基づき PT を実施した。判定基準については JSME S NB1-2012 (2013 年追補)N1100(2)4)項の「溶接の場合」を参照した。判定結果を表 3.2.1(4)⑥-1～表 3.2.1(4)⑥-3 に示す。判定の結果、垂直方向及び水平方向の一部の試験片にて不合格となるきずが検出された。不合格となった引張試験片の造形位置は図 3.2.1(4)⑥-1 に示す通り Ar フローの下流側に集中しており、また垂直方向の下段の一部では Ar フロー上流のリコート下流側でも確認された。

表 3.2.1(4)⑥-1 造形①垂直方向 PT 結果(IHI)

採取位置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
上段	T-VT1a	合格	T-VT1b	合格	T-VT1c	合格	T-VT1d	合格	T-VT1e	合格
	T-VT2a	合格	T-VT2b	合格	T-VT2c	合格	T-VT2d	合格	T-VT2e	合格
	T-VT3a	合格	T-VT3b	合格	T-VT3c	合格	T-VT3d	合格	T-VT3e	合格
	T-VT4a	合格	T-VT4b	合格	T-VT4c	合格	T-VT4d	合格	T-VT4e	合格
	T-VT5a	合格	T-VT5b	合格	T-VT5c	合格	T-VT5d	合格	T-VT5e	合格
中段	T-VM1a	合格	T-VM1b	合格	T-VM1c	合格	T-VM1d	合格	T-VM1e	合格
	T-VM2a	合格	T-VM2b	合格	T-VM2c	合格	T-VM2d	合格	T-VM2e	合格
	T-VM3a	合格	T-VM3b	合格	T-VM3c	合格	T-VM3d	合格	T-VM3e	合格
	T-VM4a	合格	T-VM4b	合格	T-VM4c	合格	T-VM4d	合格	T-VM4e	合格
	T-VM5a	合格	T-VM5b	合格	T-VM5c	合格	T-VM5d	合格	T-VM5e	合格
下段	T-VB1a	合格	T-VB1b	合格	T-VB1c	合格	T-VB1d	合格	T-VB1e	合格
	T-VB2a	合格	T-VB2b	合格	T-VB2c	合格	T-VB2d	合格	T-VB2e	不合格
	T-VB3a	合格	T-VB3b	合格	T-VB3c	合格	T-VB3d	合格	T-VB3e	合格
	T-VB4a	合格	T-VB4b	合格	T-VB4c	合格	T-VB4d	不合格	T-VB4e	合格
	T-VB5a	不合格	T-VB5b	合格	T-VB5c	合格	T-VB5d	合格	T-VB5e	不合格

表 3.2.1(4)④-2 造形②水平方向 PT 結果(IHI)

試験片 採取位 置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
上段	—	—	T-HT1b	合格	—	—	T-HT1d	合格	—	—
	T-HT2a	合格	T-HT2b	合格	—	—	T-HT2d	合格	T-HT2e	合格
	—	—	—	—	T-HT3c	合格	—	—	—	—
	T-HT4a	合格	T-HT4b	合格	—	—	T-HT4d	合格	T-HT4e	不合格
	—	—	T-HT5b	合格	—	—	T-HT5d	合格	—	—
中段	—	—	T-HM1b	合格	—	—	T-HM1d	合格	—	—
	T-HM2a	—	T-HM2b	合格	—	—	T-HM2d	合格	T-HM2e	不合格
	—	—	—	—	T-HM3c	合格	—	—	—	—
	T-HM4a	合格	T-HM4b	合格	—	—	T-HM4d	合格	T-HM4e	不合格
	—	—	T-HM5b	合格	—	—	T-HM5d	合格	—	—
下段	—	—	T-HB1b	合格	—	—	T-HB1d	合格	—	—
	T-HB2a	合格	T-HB2b	合格	—	—	T-HB2d	合格	T-HB2e	不合格
	—	—	—	—	T-HB3c	合格	—	—	—	—
	T-HB4a	合格	T-HB4b	合格	—	—	T-HB4d	合格	T-HB4e	不合格
	—	—	T-HB5b	合格	—	—	T-HB5d	合格	—	—

表 3.2.1(4)⑥-3 造形③45度方向 PT 結果(IHI)

採取 位置	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定	試験片 ID	判定
下段	—	—	T-DB1b	合格	—	—	T-DB1d	合格	—	—
	T-DB2a	合格	—	—	T-DB2c	合格	—	—	T-DB2e	合格
	—	—	T-DB3b	合格	—	—	T-DB3d	合格	—	—
	T-DB4a	合格	—	—	T-DB4c	合格	—	—	T-DB4e	合格
	—	—	T-DB5b	合格	—	—	T-DB5d	合格	—	—



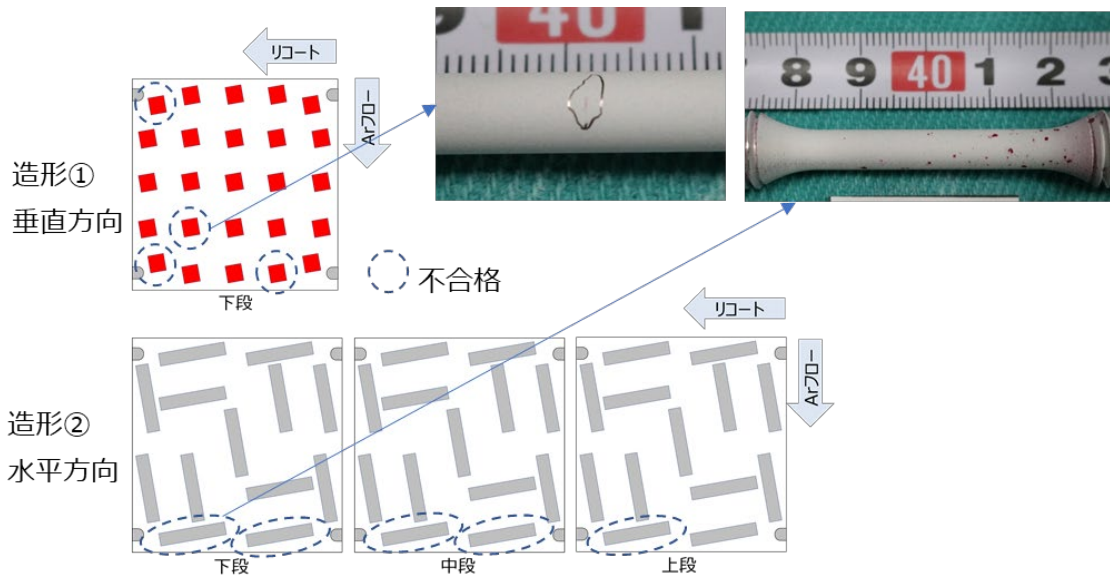


図 3.2.1(4)⑥-1 PT 不合格発生位置及び欠陥例

⑦CT 結果

造形位置による内部欠陥の発生傾向を把握するため、3.1.1(2)項「⑦X 線 CT 試験 (CT)」の仕様に基づき、図 3.2.1(4)⑦-1 に示す位置から採取した引張試験片の CT を実施した。撮影対象については、リコート方向・Ar フロー方向・高さの影響を評価できるように、垂直・水平・45 度の各造形方向から、計 14 本を選定した。撮影条件及び撮影方向を表 3.2.1(4)⑦-1 及び図 3.2.1(4)⑦-2 に示す。

CT 結果を表 3.2.1(4)⑦-2 に示す。概ねきずの検出無しもしくは 0.1mm ほどのきずが検出された程度であったが、水平方向下段の 1 本(T-HB2e)については 0.5mm オーバーのきずが多数検出されており、採取位置は Ar フローの最下流であった。図 3.2.1(4)⑦-3 に最もきずの多かった水平方向下段の T-HB2e 及び 0.1mm 大のきずの検出例として垂直方向下段の T-VB5e の撮影結果を示す。本撮影結果は、引張試験片平行部の径方向断面を 0.1mm ピッチで重ね、試験片平行部全体に対してきずの発生位置を把握しやすくしたものである。T-HB2e ではきずが連続して並んでおり、積層面間の融合不良が多数発生しているものと考えられる。

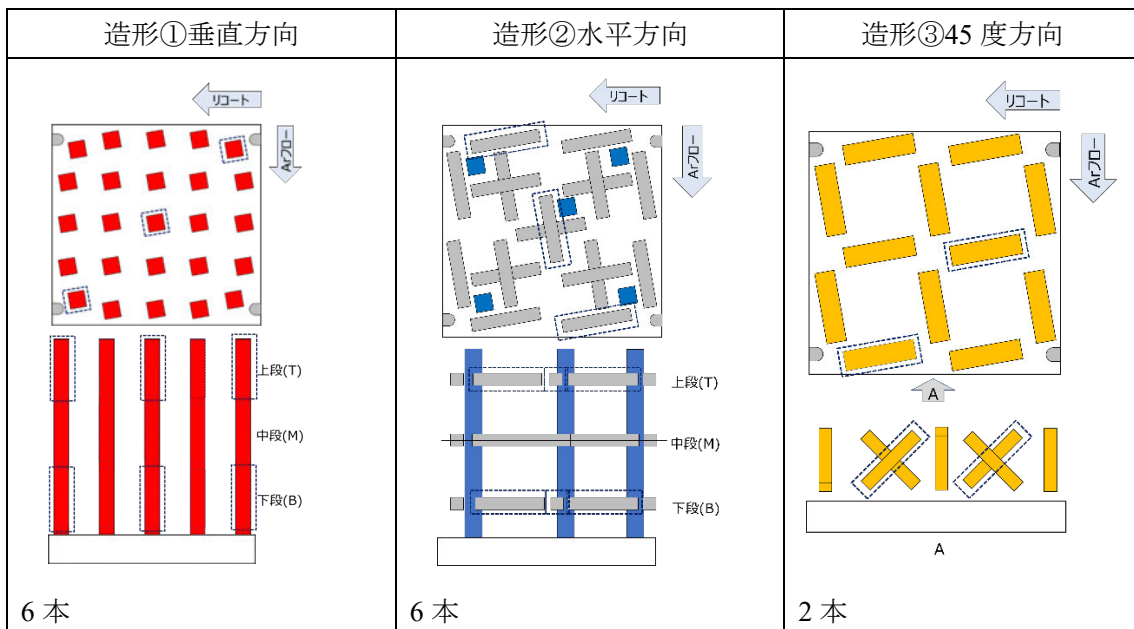


図 3.2.1(4)⑦-1 CT 対象引張試験片(IHI)

(注：点線で囲った採取位置が CT 対象試験片)

表 3.2.1(4)⑦-1 CT 撮影条件(IHI)

CT 装置	メーカー	ニコン
	型式	MCT225
撮影条件	電流[ $\mu$ A]	160
	電圧[kV]	220

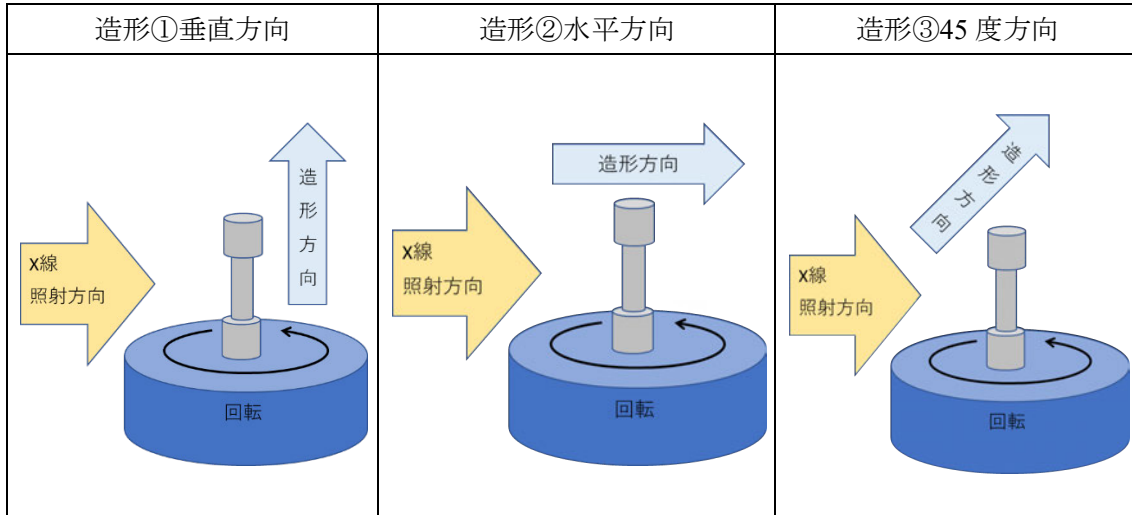


図 3.2.1(4)⑦-2 CT 撮影方向(IHI)

表 3.2.1(4)⑦-2 CT 結果

造形方向	試験片 採取位置	試験片 ID	撮影結果
造形① 垂直方向	上段	T-VT1a	きずの検出なし。
		T-VT3c	きずの検出なし。
		T-VT5e	きずの検出なし。
	下段	T-VB1a	きずの検出なし。
		T-VB3c	1 か所 0.1mm×0.5mm 長さ程のきずあり
		T-VB5e	0.1mm ほどのきずが点在。
造形② 水平方向	上段	T-HT4a	きずの検出なし。
		T-HT3c	きずの検出なし。
		T-HT2e	きずの検出なし。
	下段	T-HB4a	きずの検出なし。
		T-HB3c	0.1mm ほどの空孔が数個点在。
		T-HB2e	0.5mm オーバーのきず多数あり。
造形③ 45度方向	上段	T-DT2c	きずの検出なし。
		T-DT4e	0.1mm ほどのきずが点在。

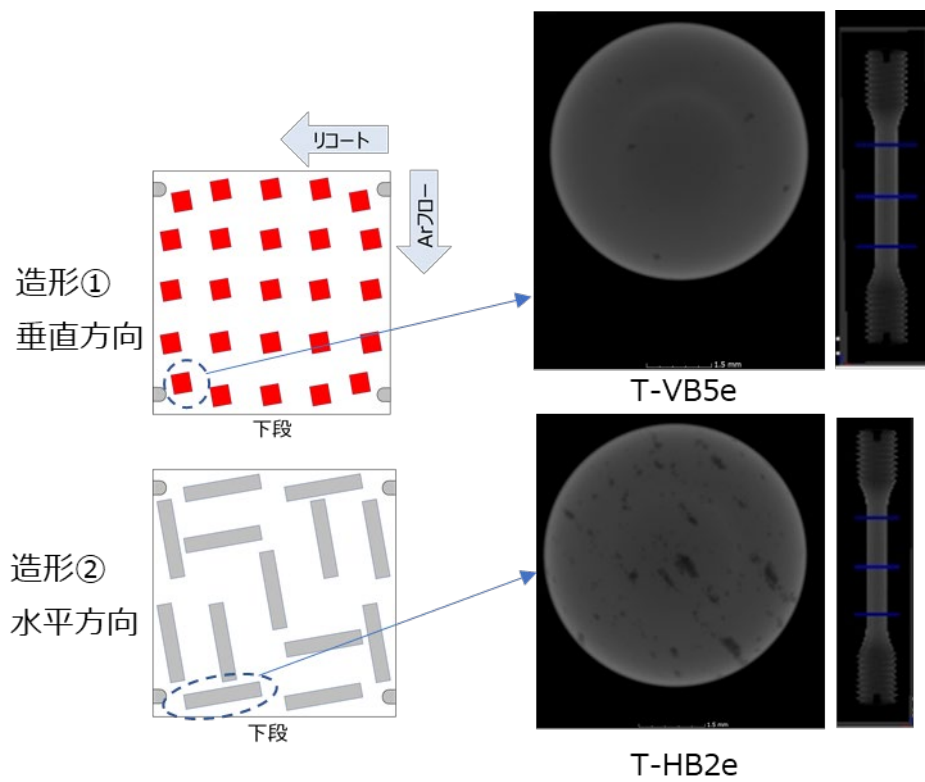


図 3.2.1(4)⑦-3 CT 撮影例(IHI)

### 3.3 材料試験

#### 3.3.1 硬さ試験

表 3.3.1-1 に MHI にて造形した試験片に対する硬さ試験結果を示す。硬さは造形座標、高さ座標、試験面によらず概ね HV170 であり、いずれも規格値である HV200 以下を満足した。

表 3.3.1-2 に東芝 ESS にて造形した試験片に対する硬さ試験結果を示す。硬さは造形座標、高さ座標、試験面によらず 5 点の平均値で HV134~153 であり、いずれも規格値である HV200 以下を満足した。

表 3.3.1-3 に日立 GE にて造形した試験片に対する硬さ試験結果を示す。硬さは造形座標、高さ座標、試験面によらず概ね HV180~200 程度を示したが、一部の試験片で HV200 を超える値が見られた。HV200 を超えた測定箇所の傾向に傾向や特異性は見られない。

表 3.3.1-4 に IHI にて造形した試験片に対する硬さ試験結果を示す。硬さは造形座標、高さ座標、試験面によらず概ね HV170~180 であり、いずれも規格値である HV200 以下を満足した。

表 3.3.1-1 ビッカース硬さ試験結果 (材料: Type316L、造形機関: MHI、HV1.0)

試験片 ID	XY 面						YZ 面					
	1	2	3	4	5	平均	1	2	3	4	5	平均
H-VT1a	169	168	164	174	168	169	174	171	170	177	175	173
H-VT1e	170	167	172	175	166	170	174	170	177	169	166	171
H-VT3c	167	162	163	167	170	166	160	161	160	167	165	163
H-VT5a	170	168	166	166	166	167	172	174	173	171	165	171
H-VT5e	170	172	168	167	175	170	177	176	168	177	169	173
H-VM1a	156	170	166	162	169	165	170	179	164	173	171	171
H-VM1e	162	169	172	169	171	169	166	164	166	173	174	169
H-VM3c	164	168	165	165	174	167	164	169	172	165	172	168
H-VM5a	167	167	160	171	169	167	174	173	173	166	170	171
H-VM5e	167	163	164	167	160	164	175	164	174	175	169	171
H-VB1a	170	164	164	167	165	166	171	172	176	177	174	174
H-VB1e	168	172	172	165	162	168	175	171	172	168	175	172
H-VB3c	172	168	170	166	175	170	174	170	169	177	173	173
H-VB5a	170	169	169	170	168	169	178	169	164	169	166	169
H-VB5e	165	172	167	167	171	168	175	164	172	177	173	172

表 3.3.1-2 ビッカース硬さ試験結果 (材料: Type316L、造形機関: 東芝 ESS、HV1.0)

試験片 ID	XY 面						YZ 面					
	1	2	3	4	5	平均	1	2	3	4	5	平均
H-VT1a	136	140	133	136	140	137	143	141	144	140	148	143
H-VT1e	143	142	141	148	138	143	154	156	153	152	151	153
H-VT3c	143	145	148	146	146	145	145	144	148	145	147	146
H-VT5a	148	148	142	143	140	144	135	135	138	134	140	136
H-VT5e	140	143	143	137	137	140	143	140	134	142	139	139
H-VM1a	135	142	139	141	136	139	139	133	131	132	135	134
H-VM1e	138	141	142	135	135	138	136	136	133	137	132	135
H-VM3c	141	148	143	140	143	143	145	145	146	148	153	148
H-VM5a	135	140	140	132	134	136	142	133	143	137	138	138
H-VM5e	142	143	140	139	138	140	148	154	148	146	154	150
H-VB1a	145	140	140	141	146	142	138	142	146	147	142	143
H-VB1e	135	138	138	140	138	138	144	145	142	142	143	143
H-VB3c	138	134	136	136	137	136	139	139	138	138	141	139
H-VB5a	140	136	138	145	146	141	137	138	134	140	137	137
H-VB5e	133	134	135	132	134	134	145	148	145	145	146	146

表 3.3.1-3 ビッカース硬さ試験結果（材料：Type316L、造形機関：日立 GE、HV1.0）

試験片 ID	XY 面						YZ 面					
	1	2	3	4	5	平均	1	2	3	4	5	平均
H-VT1a	—	—	—	—	—	—	206	207	195	196	199	201
H-VT1e	—	—	—	—	—	—	190	181	185	193	187	187
H-VT3c	—	—	—	—	—	—	209	194	190	200	207	200
H-VT5a	—	—	—	—	—	—	189	187	186	198	200	192
H-VT5e	—	—	—	—	—	—	197	188	193	192	196	193
H-VM1a	—	—	—	—	—	—	196	198	205	196	188	197
H-VM1e	—	—	—	—	—	—	193	187	176	184	188	186
H-VM3c	—	—	—	—	—	—	196	194	186	196	191	193
H-VM5a	—	—	—	—	—	—	200	185	193	191	193	192
H-VM5e	—	—	—	—	—	—	184	177	175	186	178	180
H-VB1a	—	—	—	—	—	—	200	200	190	201	198	198
H-VB1e	—	—	—	—	—	—	184	188	180	198	189	188
H-VB3c	—	—	—	—	—	—	201	199	193	201	209	201
H-VB5a	—	—	—	—	—	—	192	188	186	198	198	192
H-VB5e	—	—	—	—	—	—	195	190	188	200	199	194

表 3.3.1-4 ビッカース硬さ試験結果（材料：Type316L、造形機関：IHI、HV1.0）

試験片 ID	XY 面						YZ 面					
	1	2	3	4	5	平均	1	2	3	4	5	平均
H-VT1a	181	173	169	174	180	175	179	173	177	174	180	175
H-VT1e	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
H-VT3c	181	175	175	175	178	177	183	183	175	172	182	179
H-VT5a	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
H-VT5e	180	176	179	170	172	175	181	179	179	177	177	179
H-VM1a	183	181	180	181	180	181	183	180	185	175	183	181
H-VM1e	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
H-VM3c	181	173	172	172	181	176	181	178	176	171	178	177
H-VM5a	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
H-VM5e	178	180	175	176	178	177	172	171	175	170	169	171
H-VB1a	177	172	184	172	177	176	180	183	184	172	173	178
H-VB1e	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
H-VB3c	180	179	175	177	179	178	181	179	185	181	180	181
H-VB5a	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
H-VB5e	175	173	175	169	169	172	178	180	175	169	180	176

### 3.3.2 組織試験

表 3.3.2-1～表 3.3.2-6 に MHI にて造形した試験片に対する組織試験結果を示す。2 光源造形 AM 造形材について各光源のスキャン範囲の影響を把握するために、図 3.1.1(1)-3 に示す四隅および中央部の 5 か所（造形位置：1a、1e、3c、5a、5e）について、それぞれ上部、中部、下部の 3 部位、計 15 か所を対象に、XY 面および YZ 面の組織観察（計 30 断面）を実施した。

同一方向断面の造形位置による組織の有意差は認められなかった。YZ 面は、熔融凝固痕が鱗片状に重なって積層方向に伸長した柱状晶組織を示し、XY 面は、四角形のチェスパターンの結晶粒組織を示した。また、各観察視野において微細欠陥は確認されず、HIP と固溶化熱処理による顕著な再結晶組織も認められなかった。

表 3.3.2-7～表 3.3.2-12 に東芝 ESS にて造形した試験片に対する組織試験結果を示す。観察位置は、造形領域全域における位置による差を確認するために、垂直方向試験片の 4 隅と中央部の 5 か所（図 3.1.1(1)-3 の 1a、1e、3c、5a、5e）を選定した。リコートおよびガスフローの始端側（1a、1e）と終端側（5a、5e）および中央部について、それぞれ、上段、中段、下段の三水準の観察を実施した。

マクロ金属組織観察からは、いずれの試験片においても内部欠陥や偏析は認められず、造形位置による違いは認められなかった。ミクロ金属組織観察結果からは、いずれの観察位置においても、内部欠陥は認められず、混粒のない再結晶組織であることを確認した。また、金属組織において造形位置による差異は認められなかった。

表 3.3.2-13～表 3.3.2-16 に日立 GE にて造形した試験片に対する組織試験結果を示す。図 3.1.1(1)-3 に示す造形位置 1a、3c、5e について観察した。造形位置は、X-Y 座標面におけるリコート(X)方向とガスフロー(Y)方向に分布しており、1a(X 上流、Y 上流)、3c(X 中流、Y 中流)、5e(X 下流、Y 下流)に位置し、それぞれ積層方向に上段、中段、下段の三水準について観察した。

組織を比較した結果、同じ評価面において造形高さに因らず、造形位置による明確な差異や特異点は観察されなかった。XY 面と YZ 面の評価面について観察すると、YZ 面と比較して XY 面の方が結晶粒径が小さかった。これは、造形後の組織の異方性が影響していると考えられる。造形物の組織は、積層方向に一方向凝固的な組織形態となり（エピタキシャル成長によって）YZ 面は積層方向に長く、XY 面は等方的な粒成長となるため、熱処理後も造形による粒成長の影響が組織に現れていると推察される。

なお、各観察面の観察視野において 50 $\mu\text{m}$  を超えるような明確に粗大な欠陥は観察されなかった。



表 3.1.1(1)-1 の STEP1 試験マトリックス及び図 3.1.1(1)-3 の試験位置に従い、IHI にて組織試験を実施した結果を表 3.3.2 17～表 3.3.2 20 に示す。なお、IHI にて使用した装置はレーザ光源が一つのため、試験座標は図 3.1.1(1)-3 にて示す 1a/3c/5e×上段/中段/下段の合計 9 か所とし、観察面は XY 面と YZ 面の 2 面とした。

マクロ組織観察の結果、1mm 以下の空孔が点在していることを確認したが、造形位置や高さによる明確な有意差は見られなかった。

ミクロ組織観察では、YZ 面はレーザによる溶け込み痕と考えられるうろこ状の様が見られ、さらに積層方向への粒成長が見られた。XY 面では格子状に結晶粒が並んでおり、組織に異方性があることを確認した。観察面の方向による組織の異方性については、造形位置や高さによらず同様の傾向が見られた。

表 3.3.2-1 組織試験結果（マクロ組織観察、材料：Type316L、造形機関：MHI、エッチング液：王水）

800μm

		1a	1e	3c	5a	5e
上段	XY					
	YZ					
中段	XY					
	YZ					
下段	XY					
	YZ					

表 3.3.2-2 組織試験結果（マイクロ組織観察、材料：Type316L、造形機関：MHI、座標：1a、エッチング液：王水）

		×100			100μm			×500			20μm		
上段	XY												
	YZ												
中段	XY												
	YZ												
下段	XY												
	YZ												



表 3.3.2-3 組織試験結果（マイクロ組織観察、材料：Type316L、造形機関：MHI、座標：1e、エッチング液：王水）

		×100			100μm		×500		20μm	
上段	XY									
	YZ									
中段	XY									
	YZ									
下段	XY									
	YZ									

表 3.3.2-4 組織試験結果（マイクロ組織観察、材料：Type316L、造形機関：MHI、座標：3c、エッチング液：王水）

		×100			100μm			×500			20μm		
上段	XY												
	YZ												
中段	XY												
	YZ												
下段	XY												
	YZ												

表 3.3.2-5 組織試験結果（マイクロ組織観察、材料：Type316L、造形機関：MHI、座標：5a、エッチング液：王水）

		×100			100μm			×500			20μm		
上段	XY												
	YZ												
中段	XY												
	YZ												
下段	XY												
	YZ												



表 3.3.2-6 組織試験結果 (マイクロ組織観察、材料: Type316L、造形機関: MHI、座標: 5e、エッチング液: 王水)

		×100			100μm			×500			20μm		
上段	XY												
	YZ												
中段	XY												
	YZ												
下段	XY												
	YZ												

表 3.3.2-7 組織試験結果 (マクロ組織観察、材料: Type316L、造形機関: 東芝 ESS、エッチング液: 10%しゅう酸)


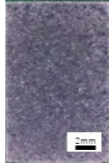
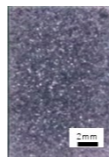




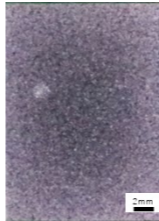

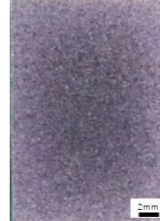
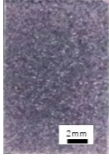

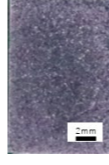
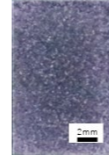
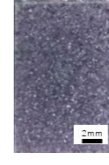



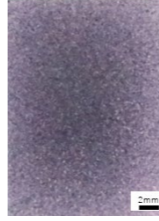
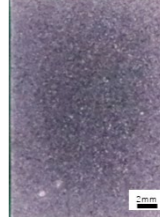


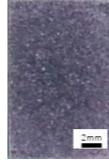
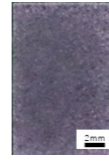


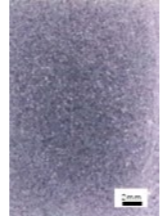


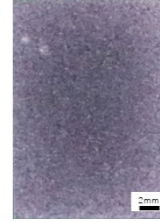
		1a	1e	3c	5a	5e
上段	XY					
	YZ					
中段	XY					
	YZ					
下段	XY					
	YZ					



表 3.3.2-8 組織試験結果 (マイクロ組織観察、材料: Type316L、造形機関: 東芝 ESS、座標: 1a、エッチング液: 10%しゅう酸)

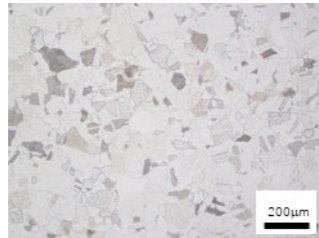
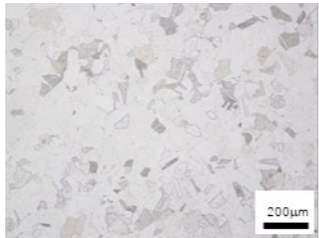
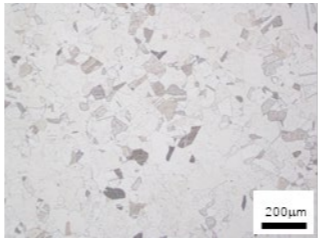
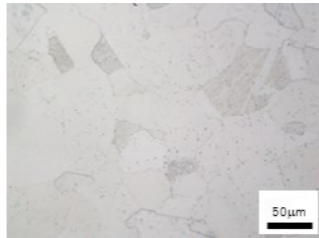

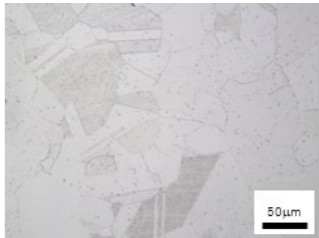
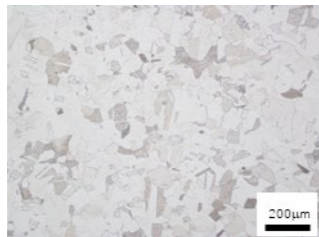
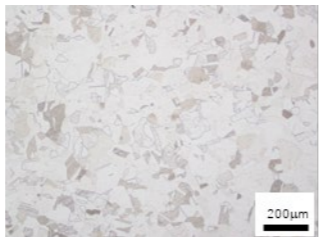
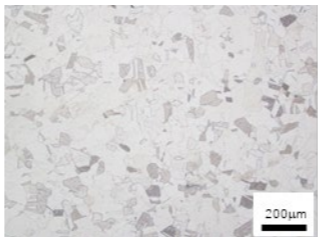
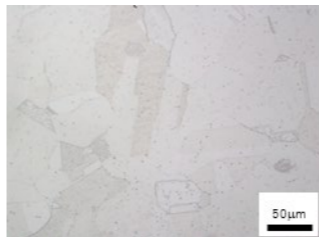
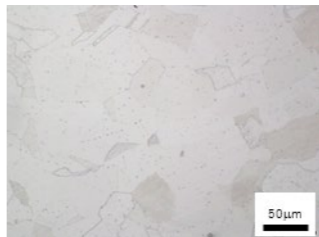

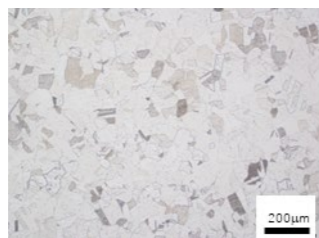
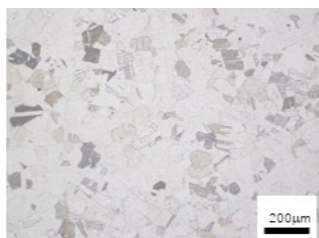
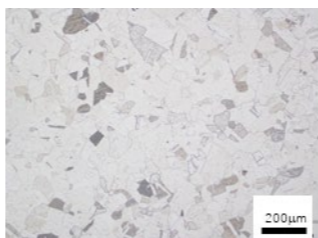
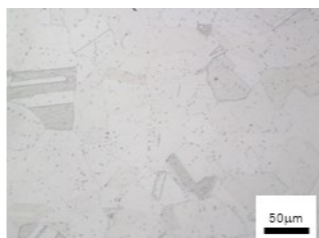
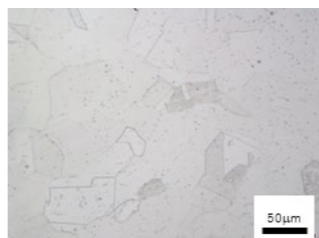
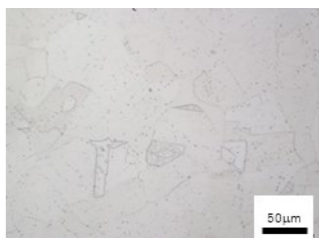
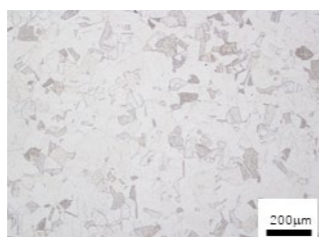
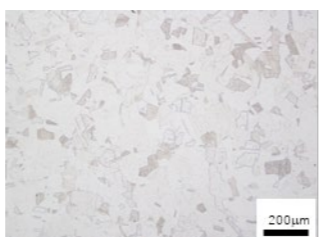
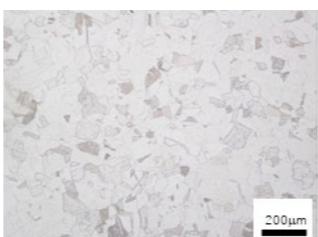
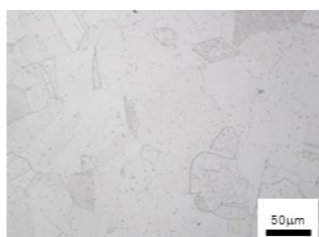
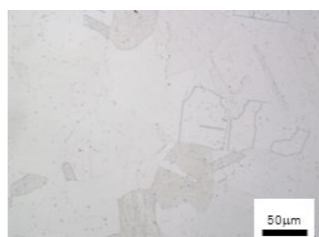
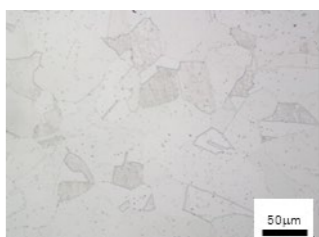
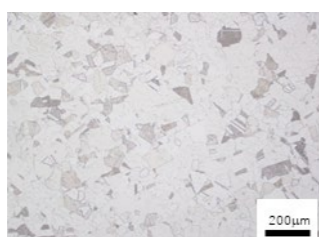
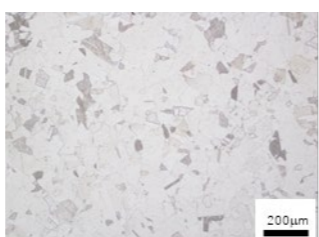
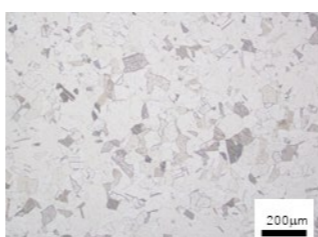
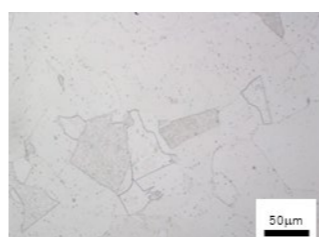
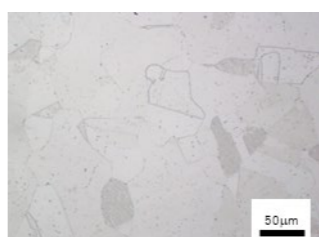
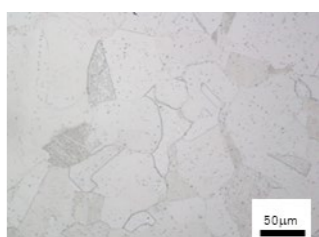


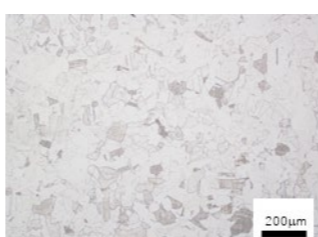


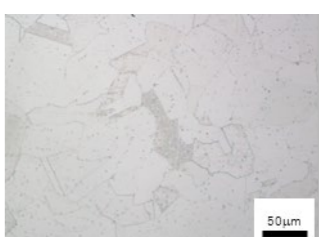
		×100			×400		
上段	XY						
	YZ						
中段	XY						
	YZ						
下段	XY						
	YZ						



表 3.3.2-9 組織試験結果（マイクロ組織観察、材料：Type316L、造形機関：東芝 ESS、座標：1e、エッチング液：10%しゅう酸）

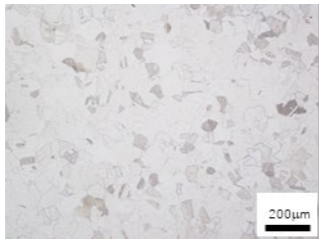

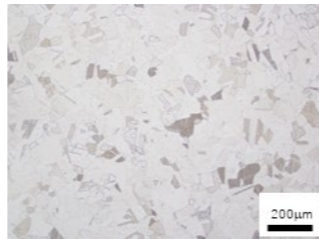
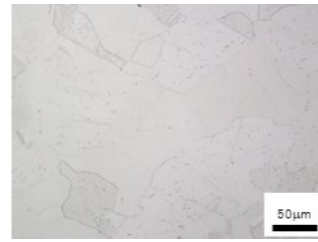
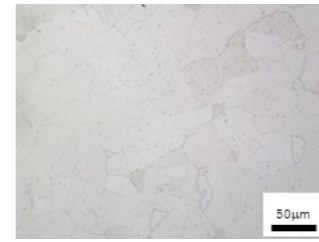
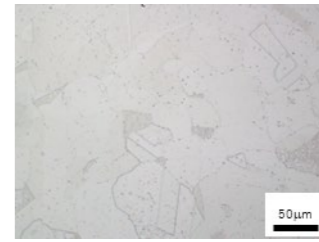
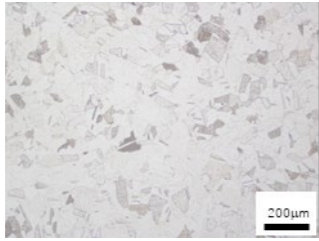
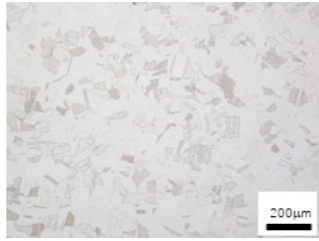
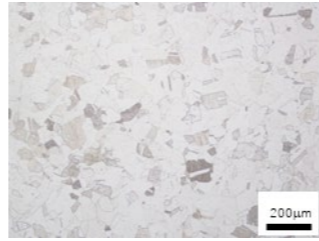

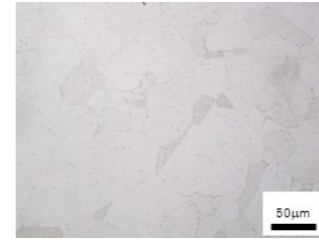
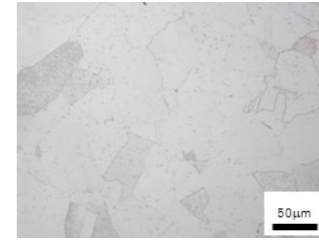
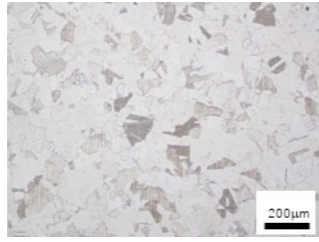
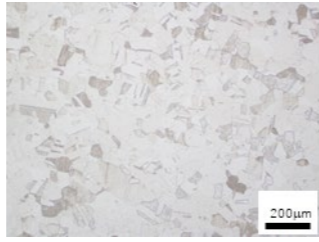
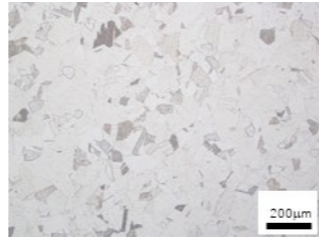
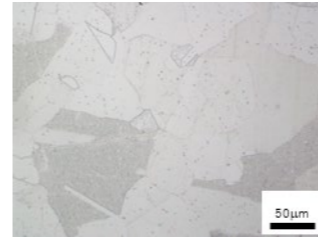
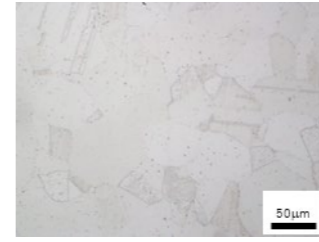
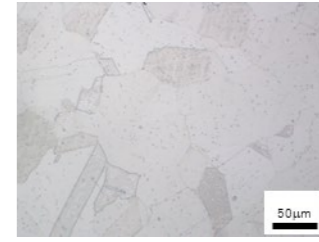
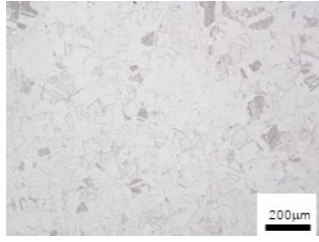


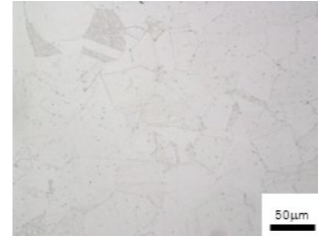
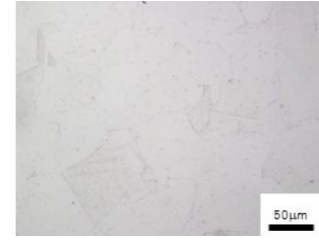
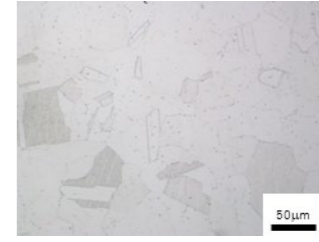
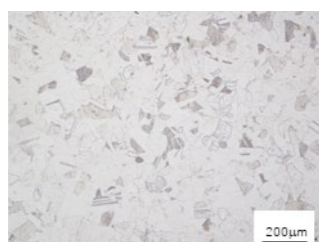
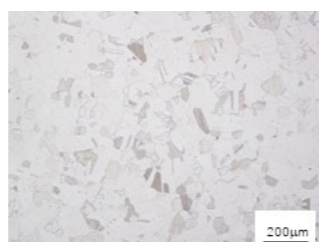
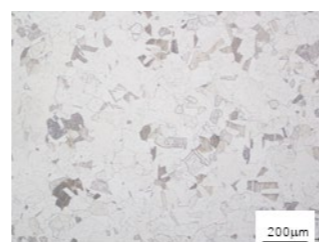
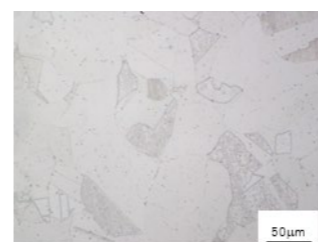
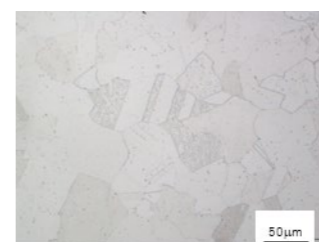
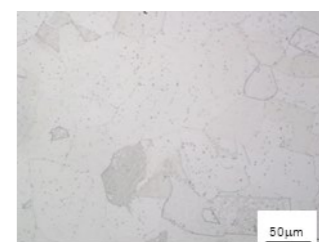



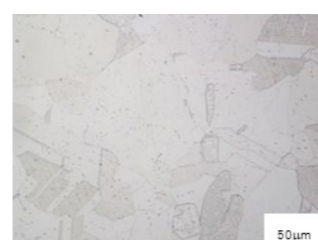
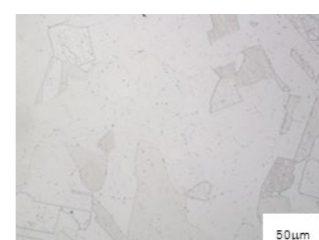
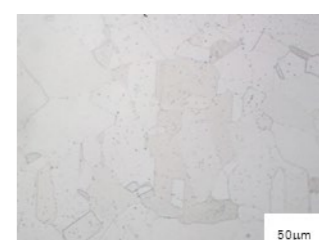
		×100			×400		
上段	XY						
	YZ						
中段	XY						
	YZ						
下段	XY						
	YZ						



表 3.3.2-10 組織試験結果 (マイクロ組織観察、材料: Type316L、造形機関: 東芝 ESS、座標: 3c、エッチング液: 10%しゅう酸)

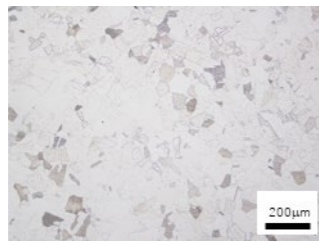
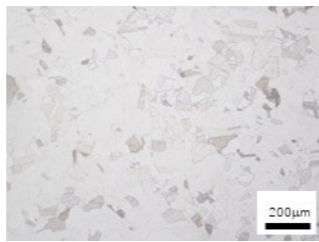
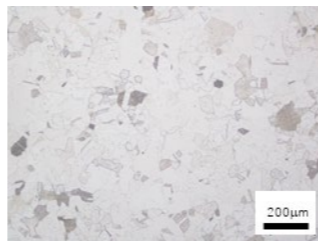
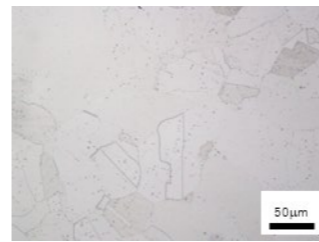
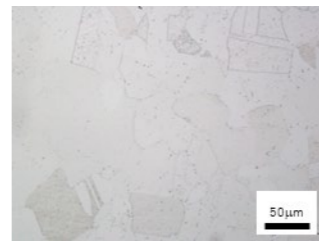
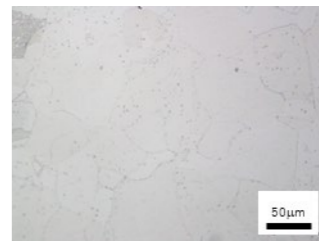
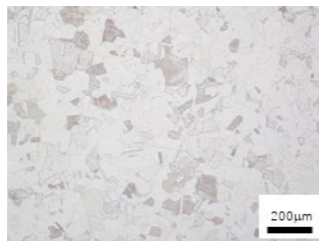
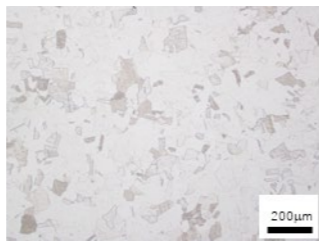
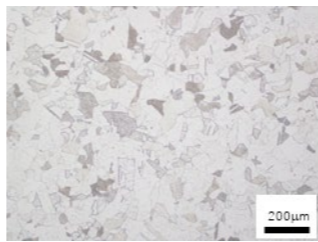
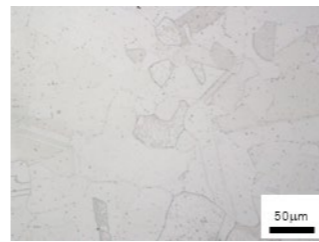
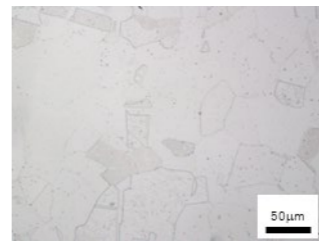
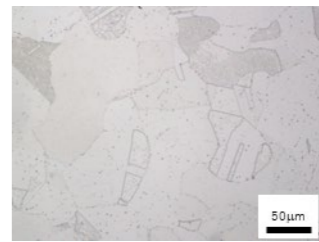
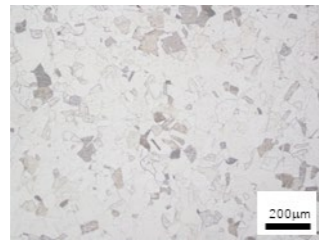
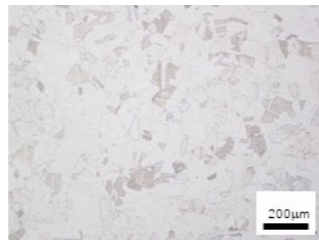
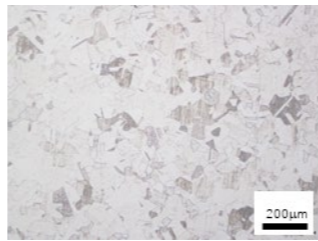
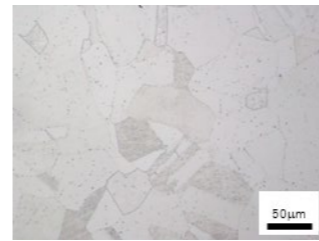
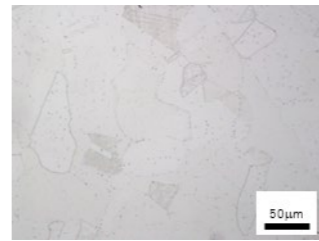
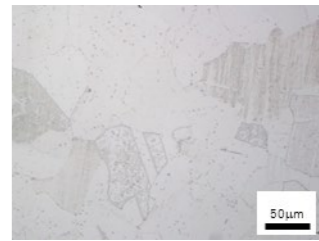
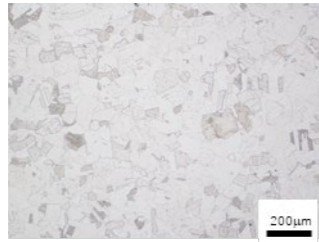
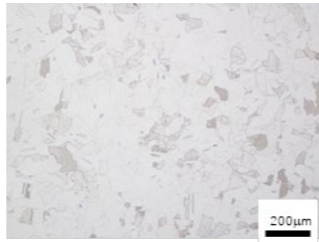
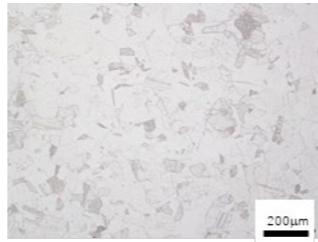
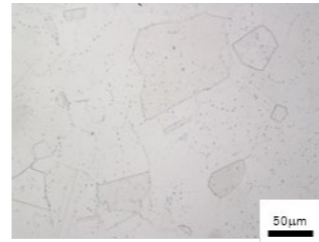
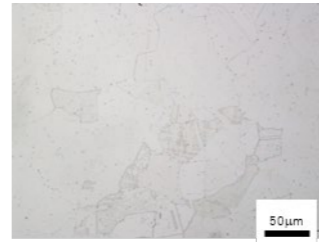
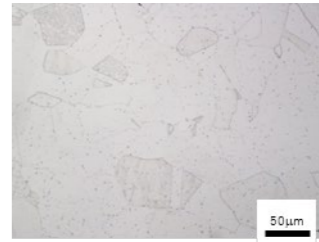
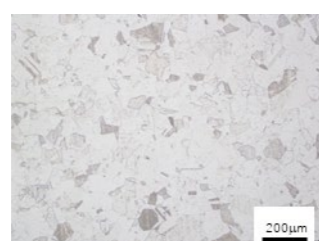
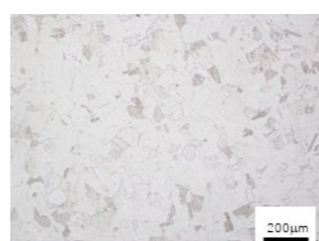
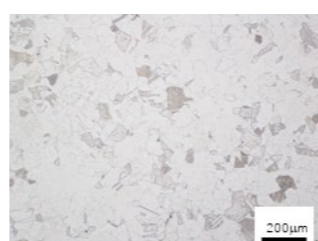
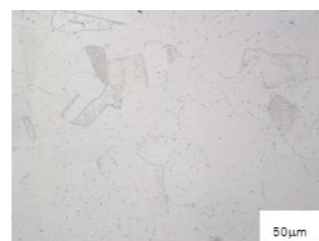
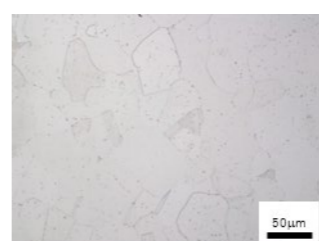
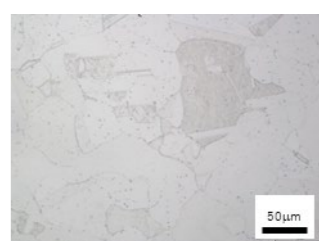
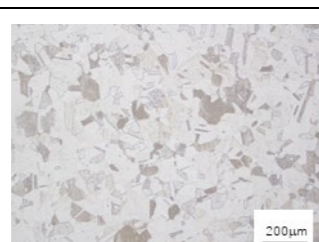
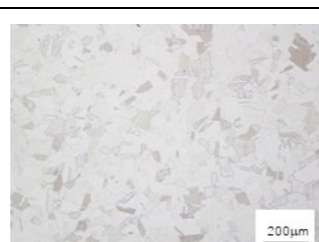
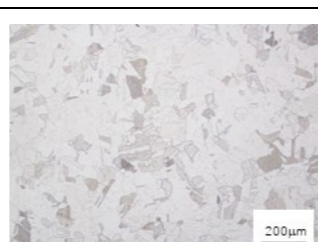


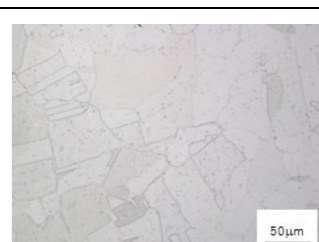
		×100			×400		
上段	XY						
	YZ						
中段	XY						
	YZ						
下段	XY						
	YZ						



表 3.3.2-11 組織試験結果 (マイクロ組織観察、材料: Type316L、造形機関: 東芝 ESS、座標: 5a、エッチング液: 10%しゅう酸)

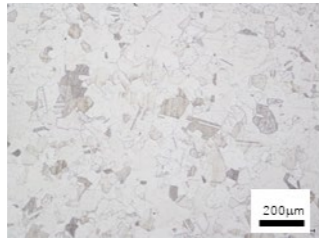
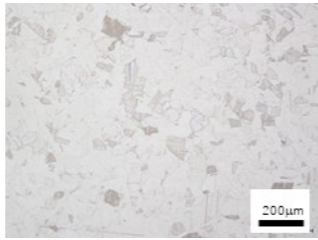
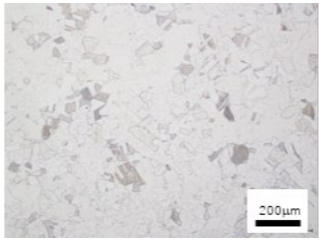
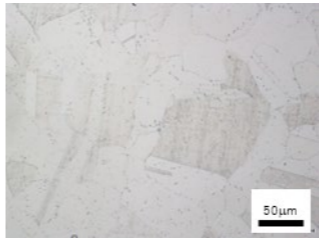
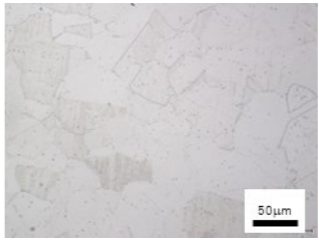
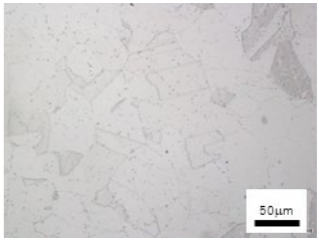
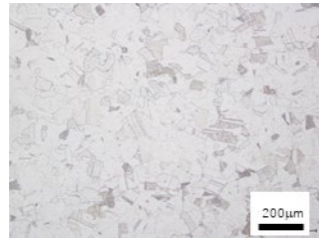
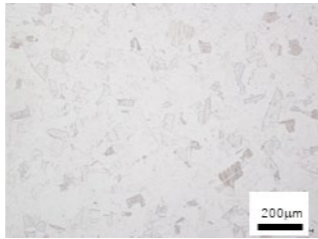
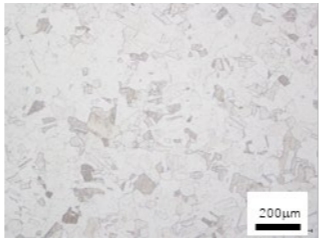
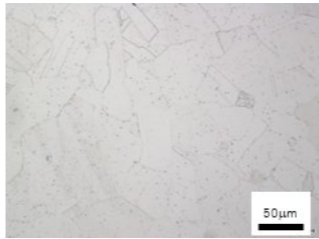
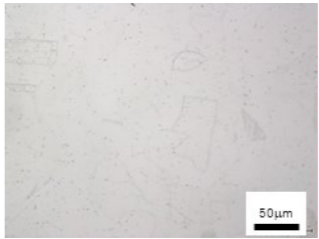
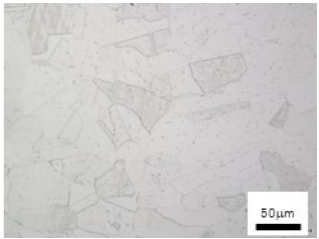
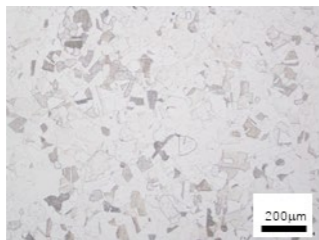
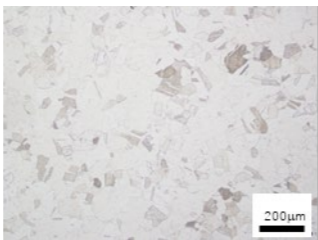
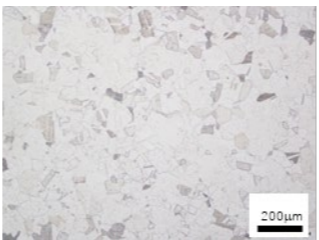
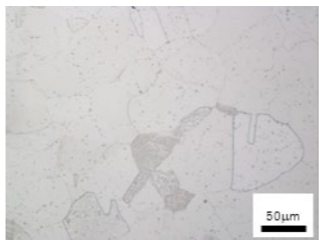
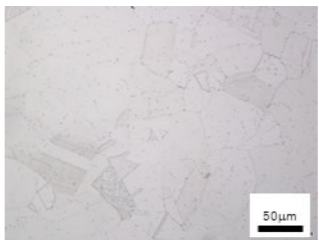
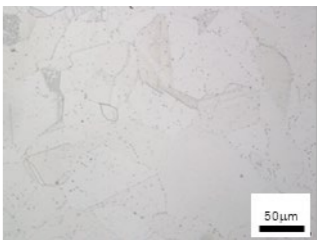
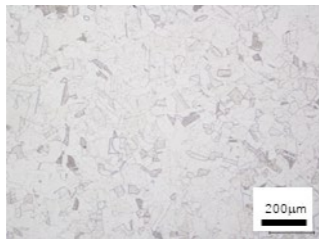
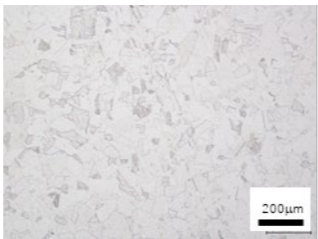
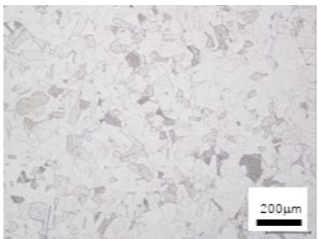
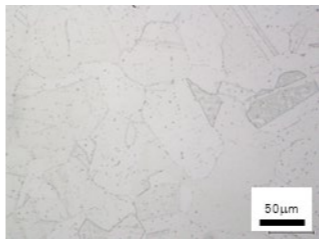
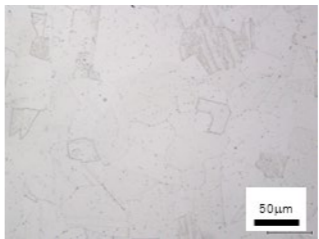
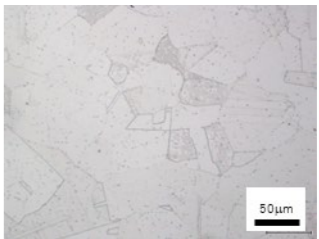


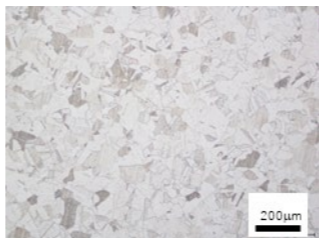
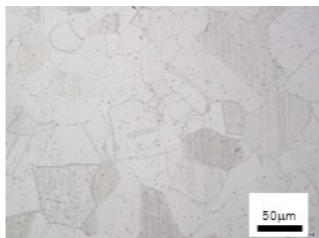
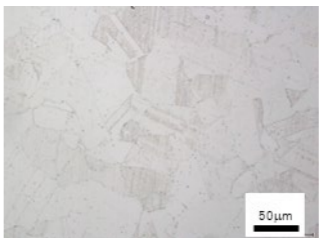
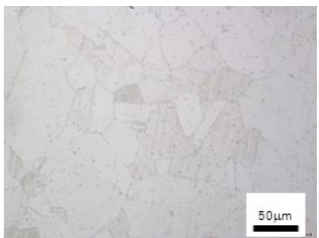
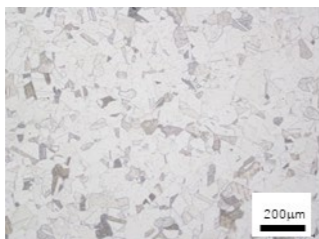
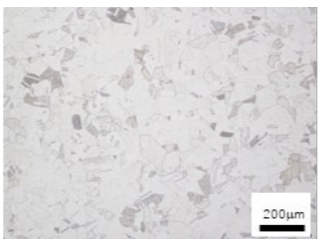
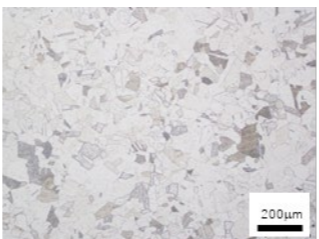
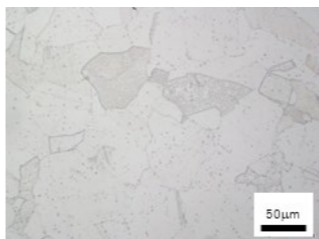
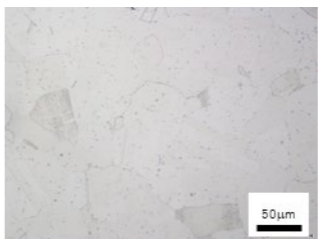
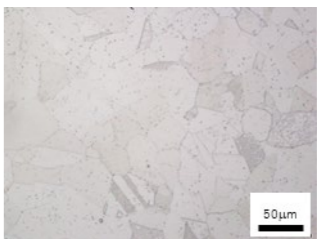
		×100			×400		
上段	XY						
	YZ						
中段	XY						
	YZ						
下段	XY						
	YZ						



表 3.3.2-12 組織試験結果 (マイクロ組織観察、材料: Type316L、造形機関: 東芝 ESS、座標: 5e、エッチング液: 10%しゅう酸)

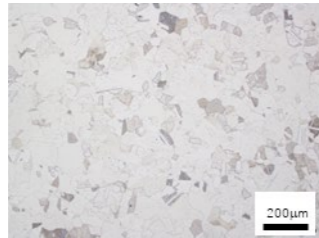

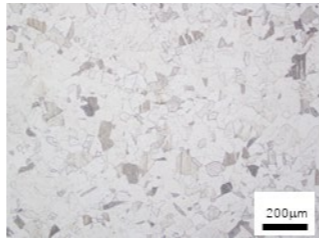
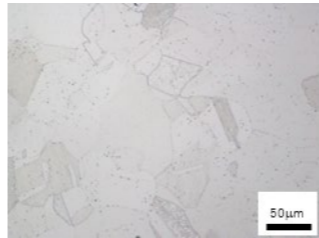
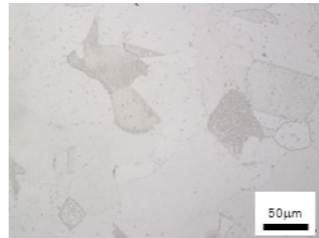

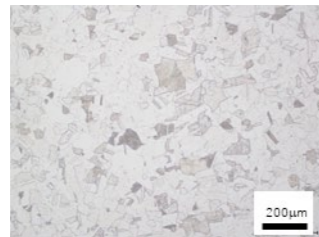
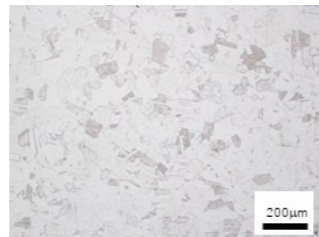
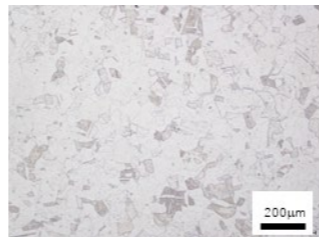
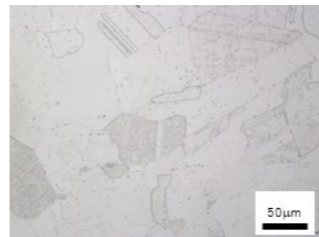
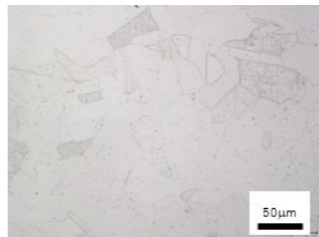
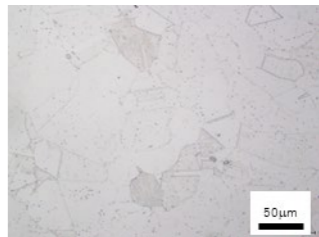
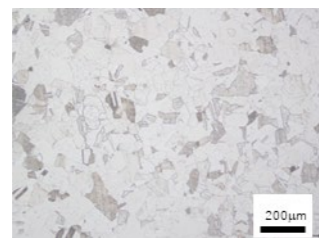
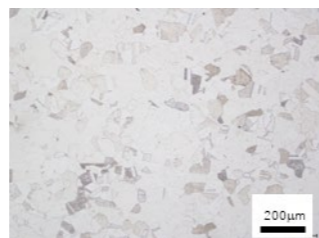
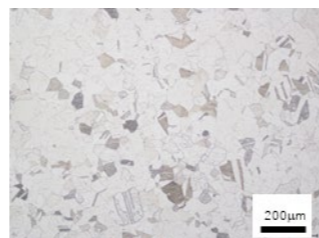
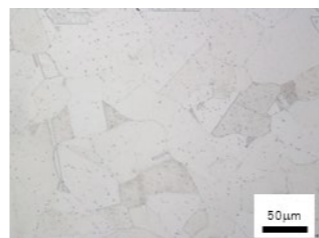

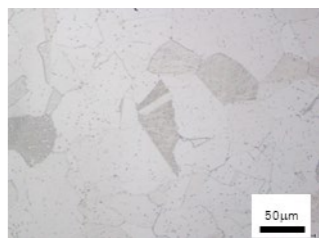
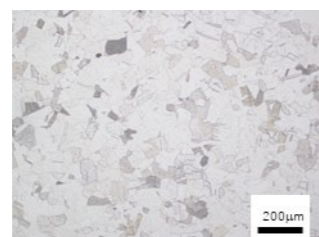
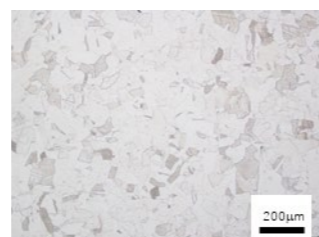
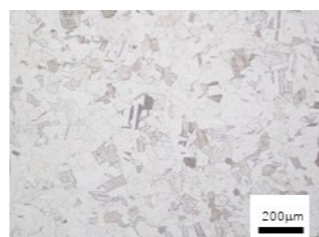
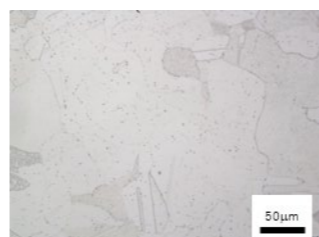
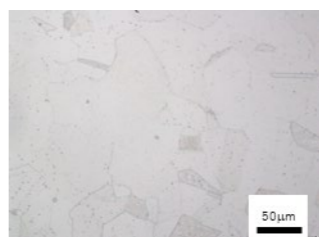
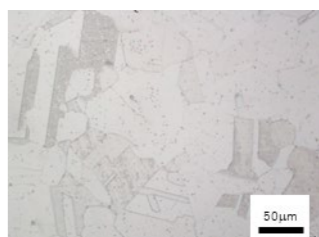
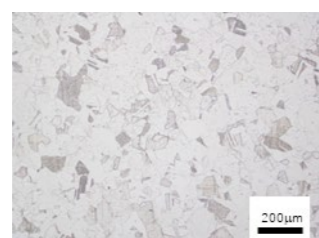
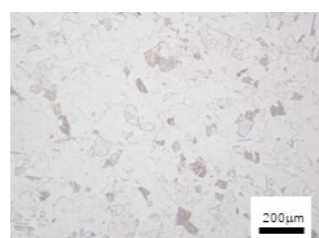
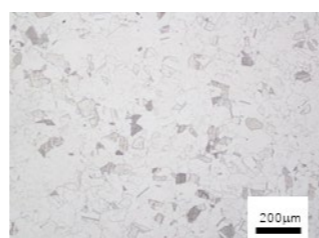
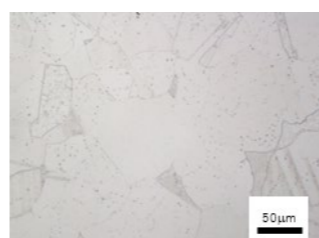
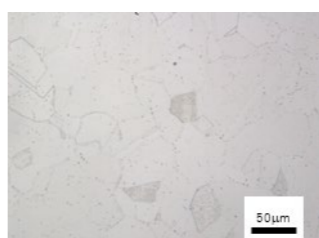
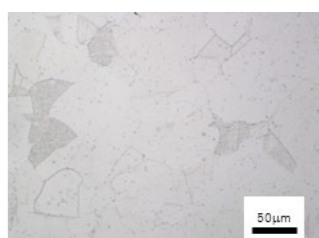
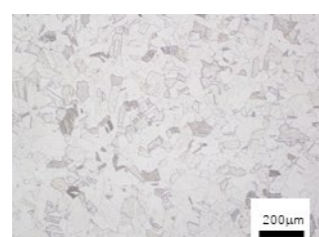
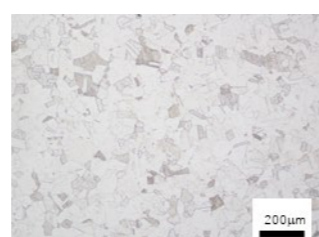
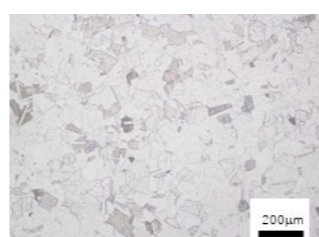
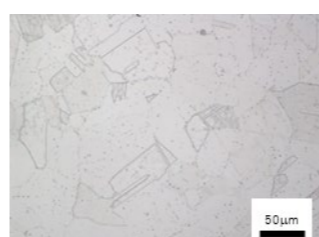
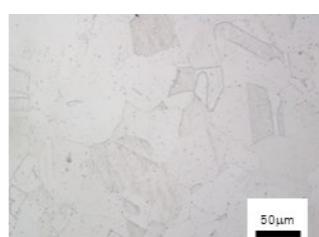
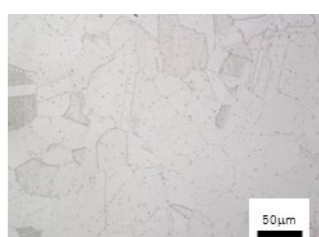
		×100			×400		
上段	XY						
	YZ						
中段	XY						
	YZ						
下段	XY						
	YZ						

表 3.3.2-13 組織試験結果 (マクロ組織観察、材料 : Type316L、造形機関 : 日立 GE、エッチング液 : 塩酸+過酸化水素+水)

		1a	3c	5e
上段	XY			
	YZ			
中段	XY			
	YZ			
下段	XY			
	YZ			



表 3.3.2-14 組織試験結果 (マイクロ組織観察、材料：Type316L、造形機関：日立 GE、座標：1a、エッチング液：硝酸+塩酸+グリセリン)

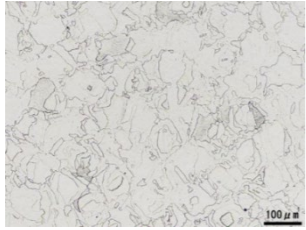
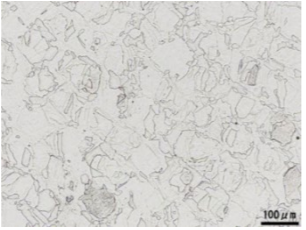
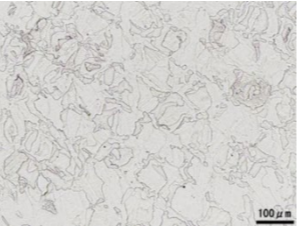
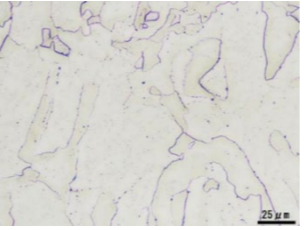
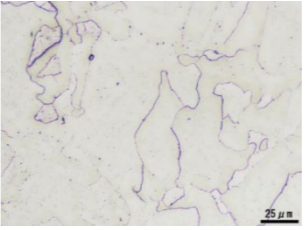
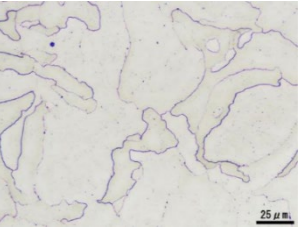
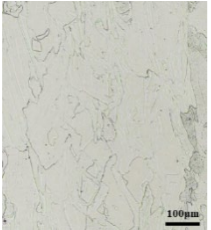
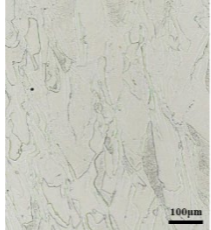
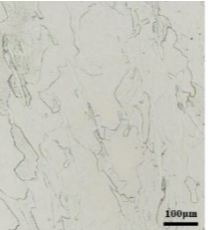
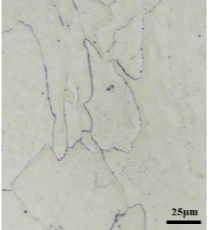

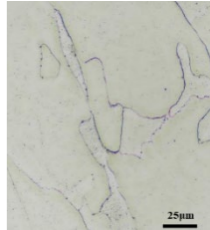
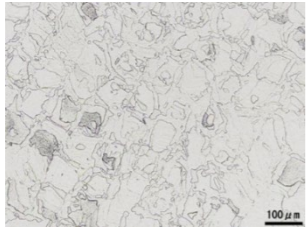
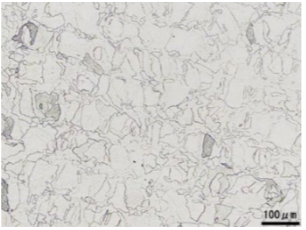
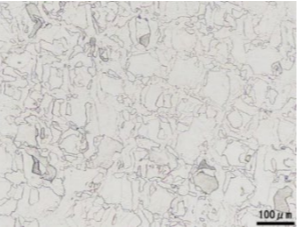
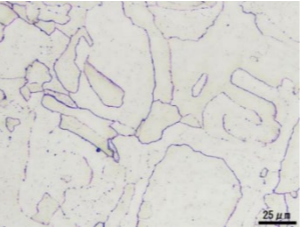
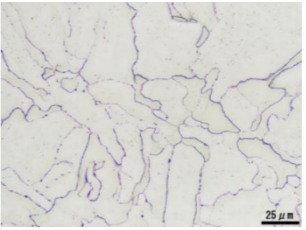
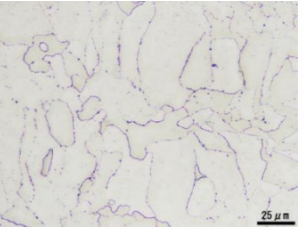

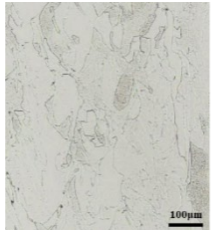
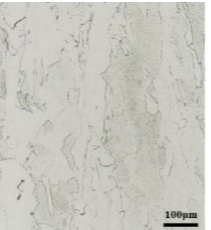
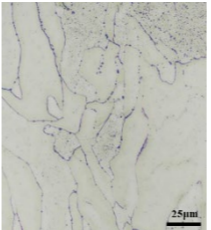
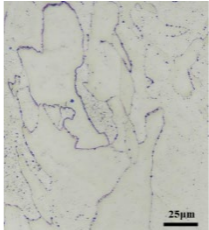
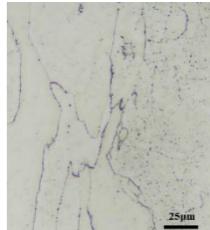
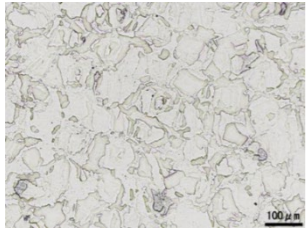
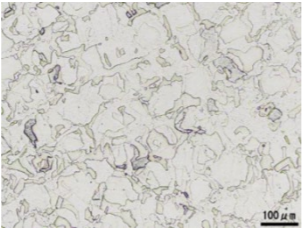
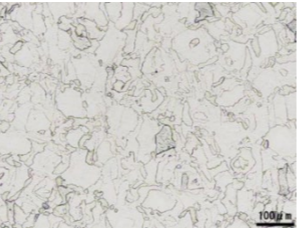
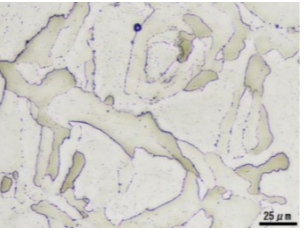
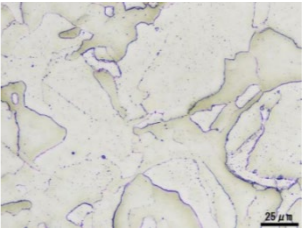
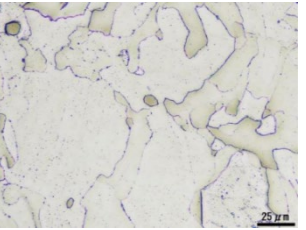

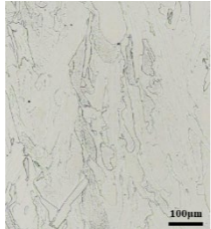
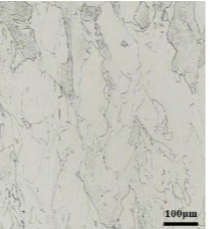
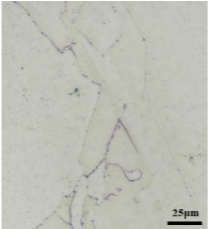
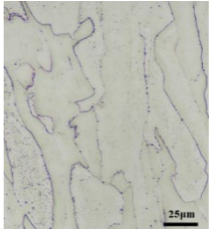
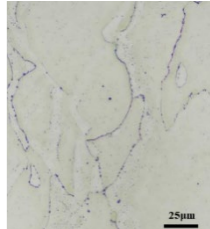
		×100			×400		
上段	XY						
	YZ						
中段	XY						
	YZ						
下段	XY						
	YZ						



表 3.3.2-15 組織試験結果（マイクロ組織観察、材料：Type316L、造形機関：日立 GE、座標：3c、エッチング液：硝酸+塩酸+グリセリン）

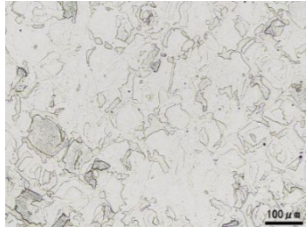
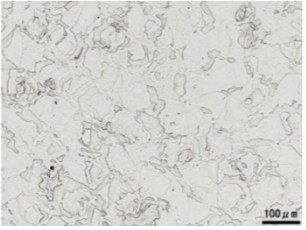
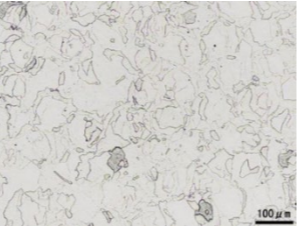
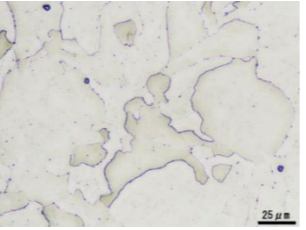
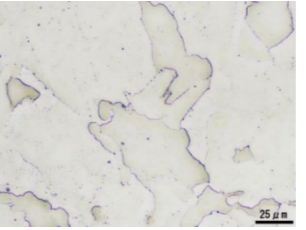
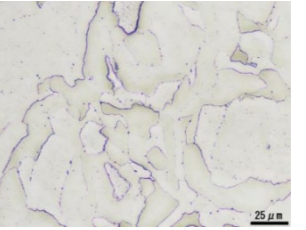
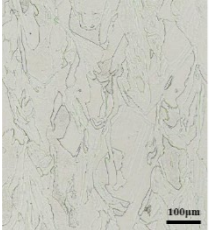
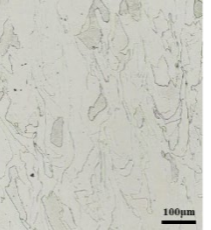
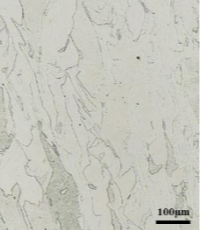


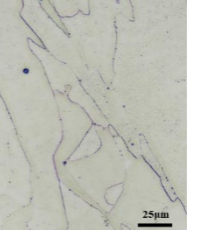
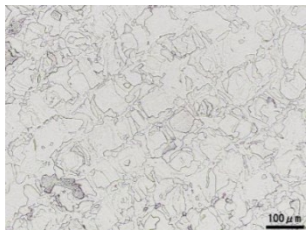
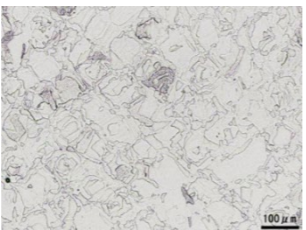
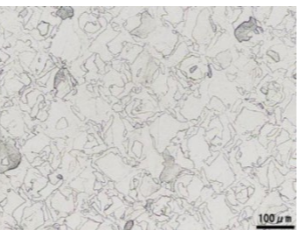
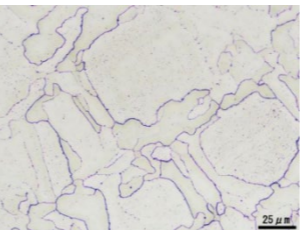
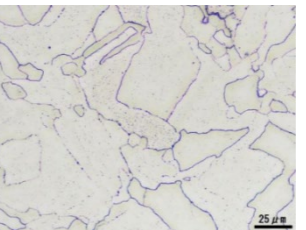
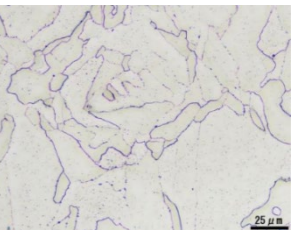
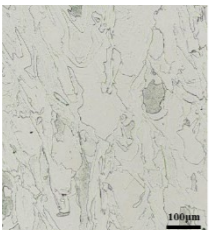
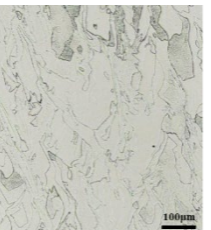
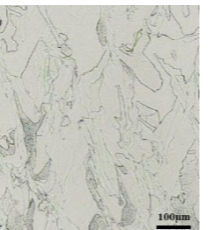
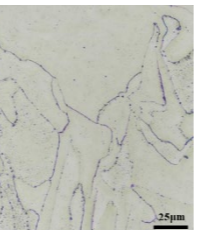
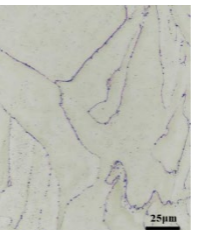
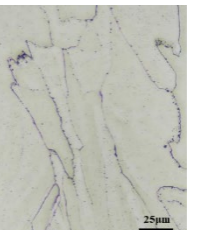
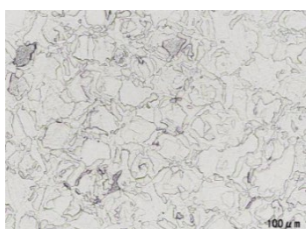
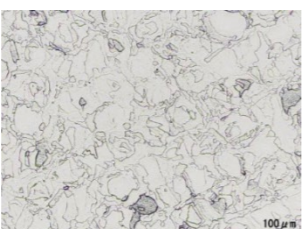
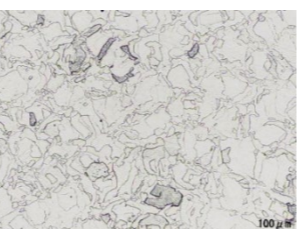
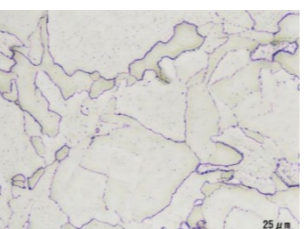
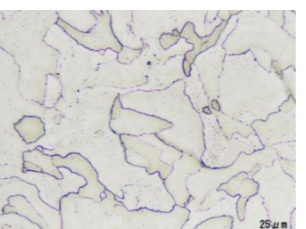
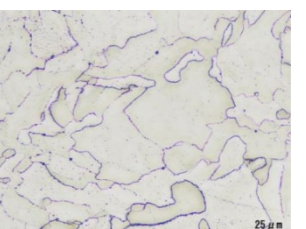



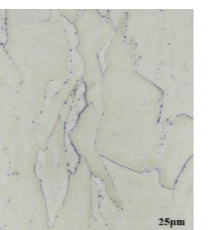
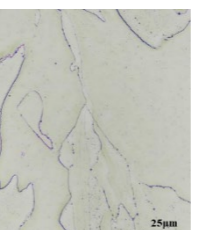
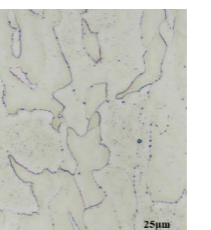
		×100			×400		
上段	XY						
	YZ						
中段	XY						
	YZ						
下段	XY						
	YZ						



表 3.3.2-16 組織試験結果（マイクロ組織観察、材料：Type316L、造形機関：日立 GE、座標：5e、エッチング液：硝酸+塩酸+グリセリン）

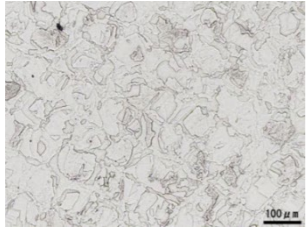
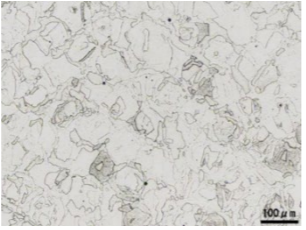
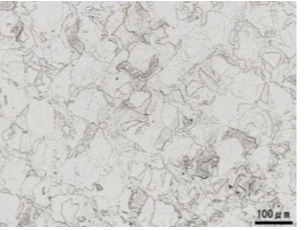
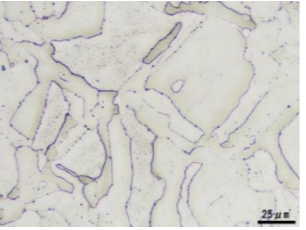
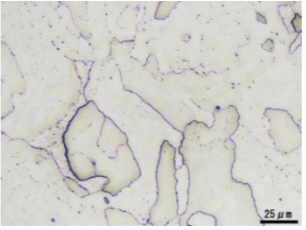
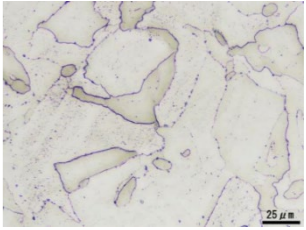
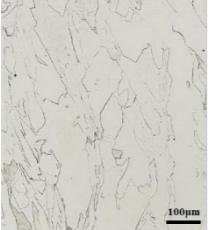
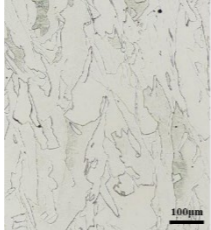
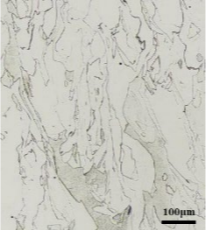
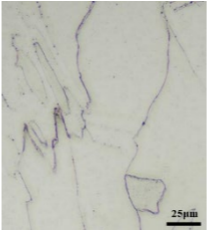
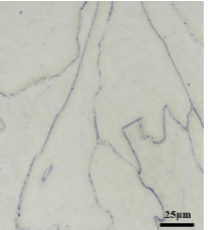
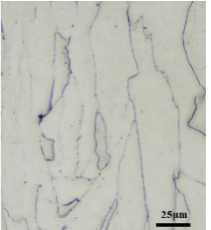


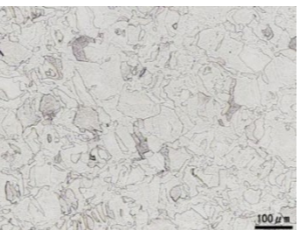
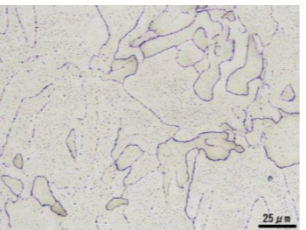
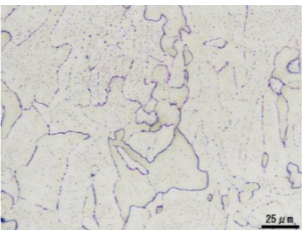
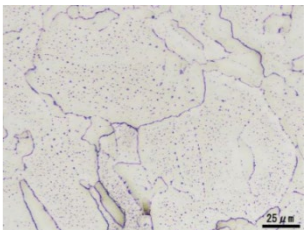
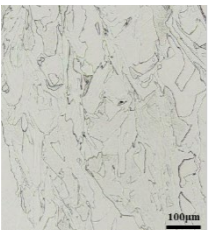
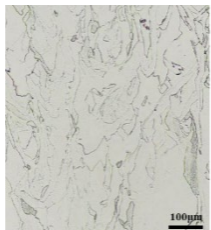
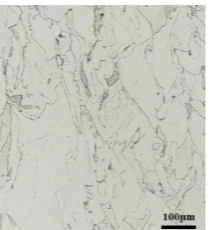
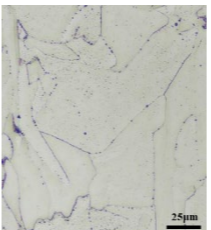
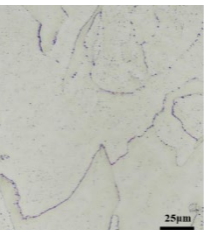
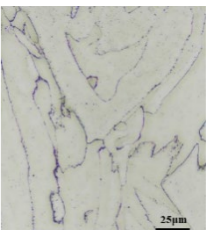
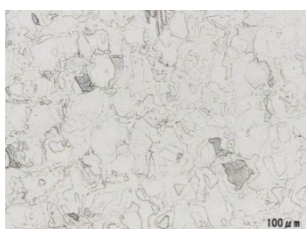
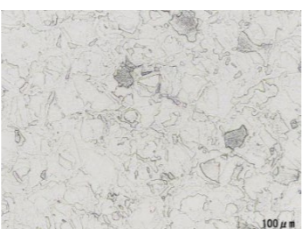
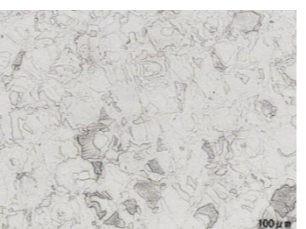
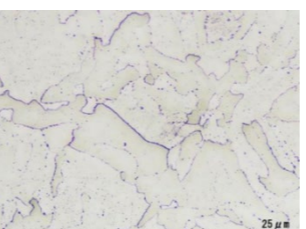
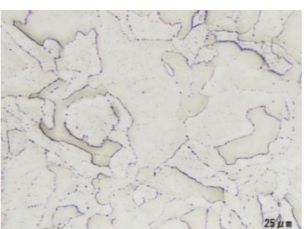
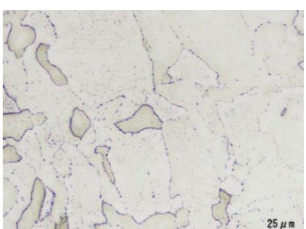
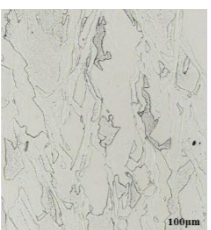

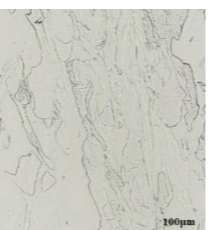
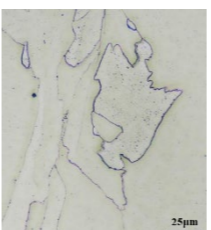
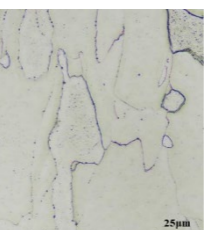

		×100			×400		
上段	XY						
	YZ						
中段	XY						
	YZ						
下段	XY						
	YZ						

表 3.3.2-17 組織試験結果（マクロ組織観察、材料：Type316L、造形機関：IHI、エッチング液：塩酸(約 70°C)）

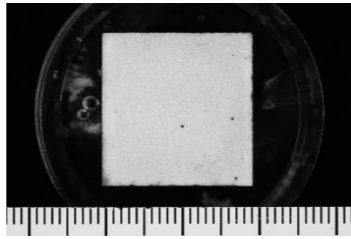
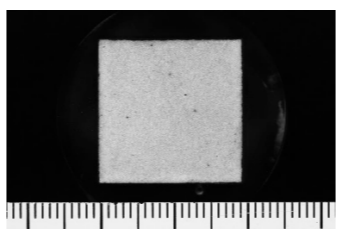
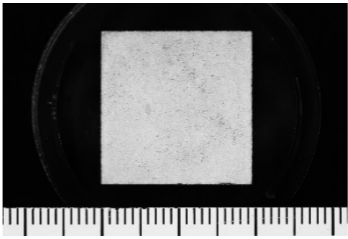
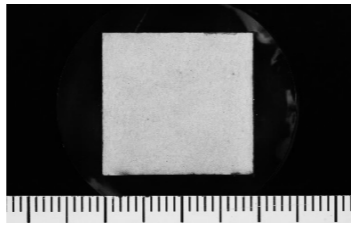
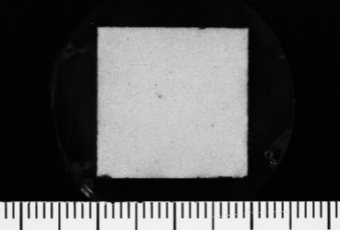
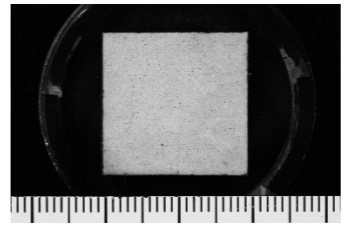
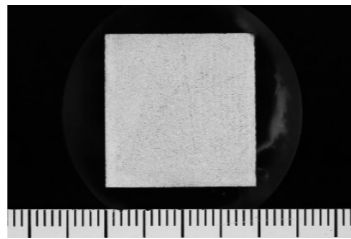
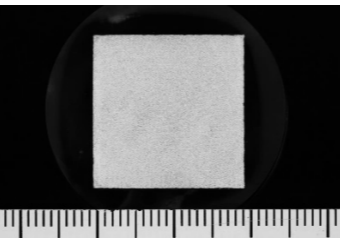
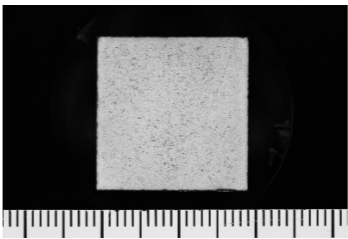
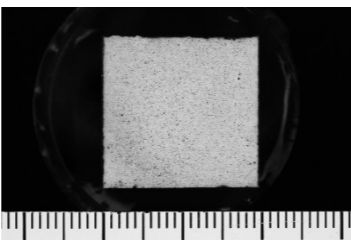
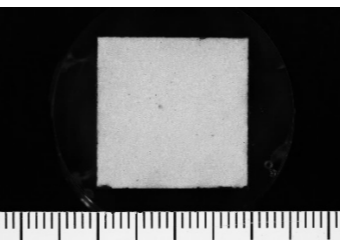
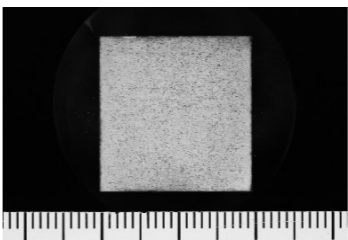
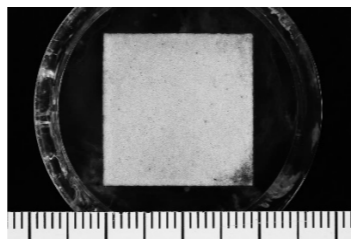
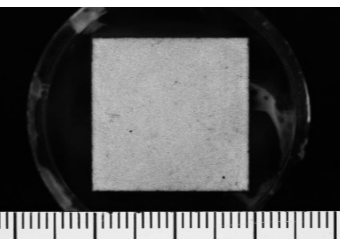
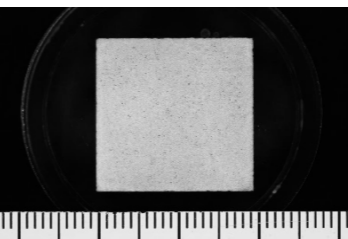
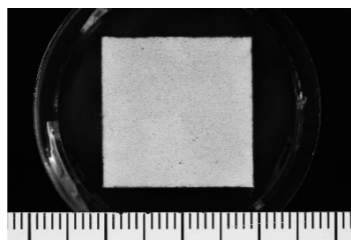
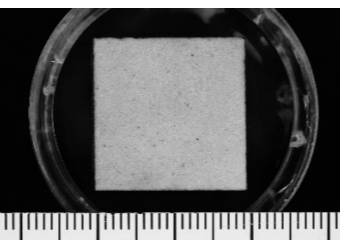
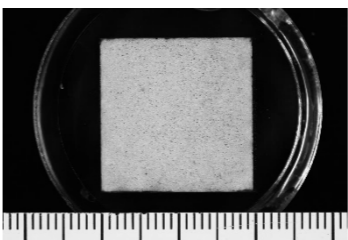
		1a	3c	5e
上段	XY			
	YZ			
中段	XY			
	YZ			
下段	XY			
	YZ			



表 3.3.2-18 組織試験結果（マイクロ組織観察、材料：Type316L、造形機関：IHI、座標：1a、エッチング液：10%シュウ酸(電解エッチング)）

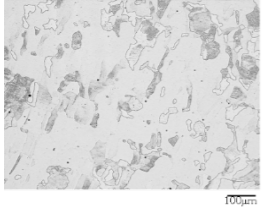
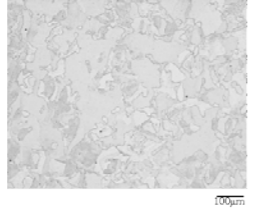
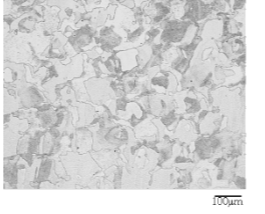
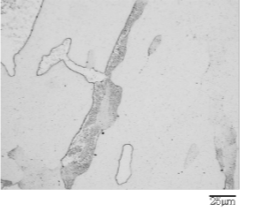
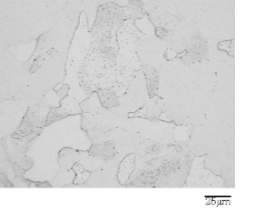
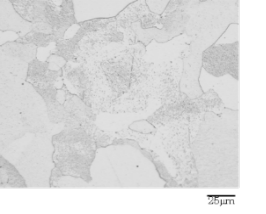
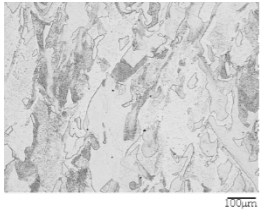
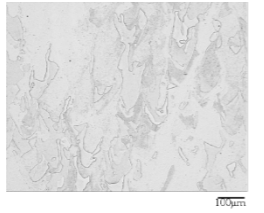
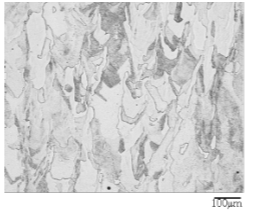
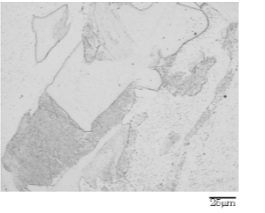
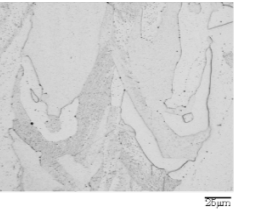
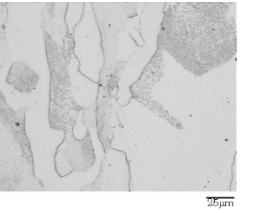
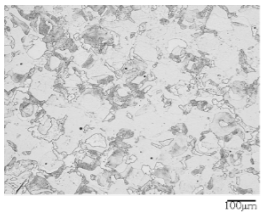
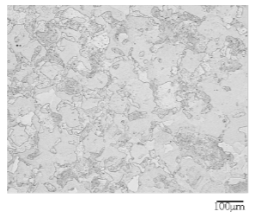
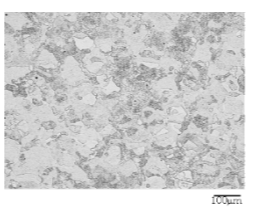
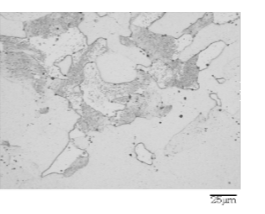
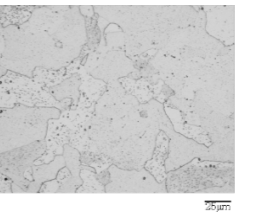
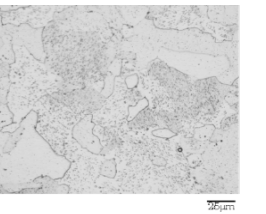
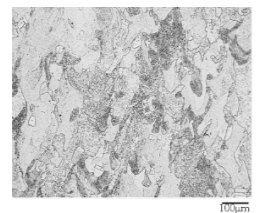
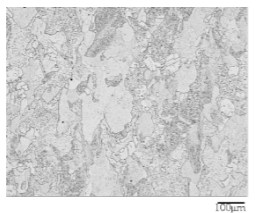
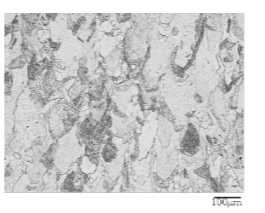
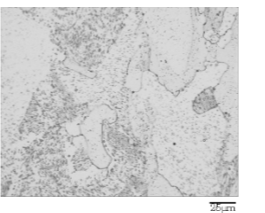
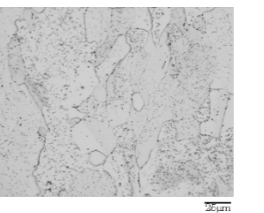
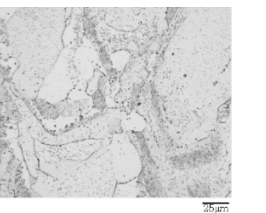
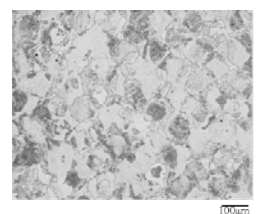
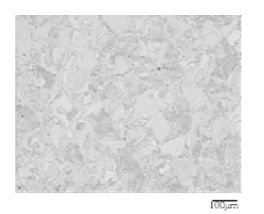
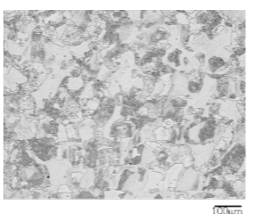
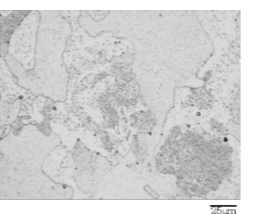
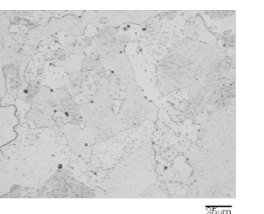
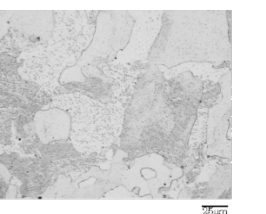
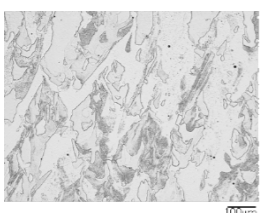
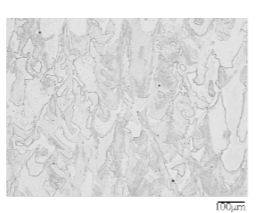
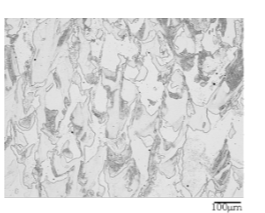
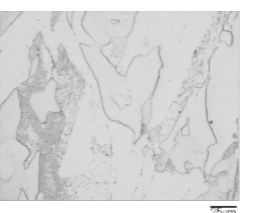
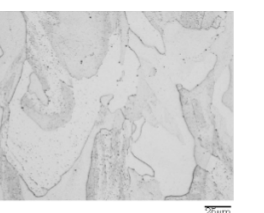
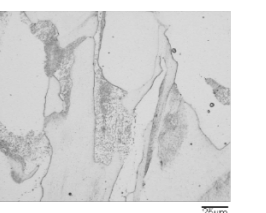
		×100			×400		
上段	XY						
	YZ						
中段	XY						
	YZ						
下段	XY						
	YZ						

表 3.3.2-19 組織試験結果（マイクロ組織観察、材料：Type316L、造形機関：IHI、座標：3c、エッチング液：10%シュウ酸(電解エッチング)）

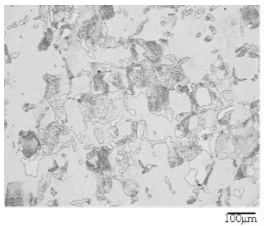
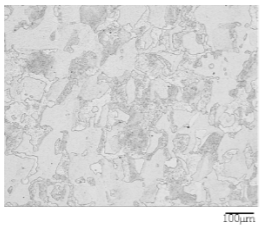
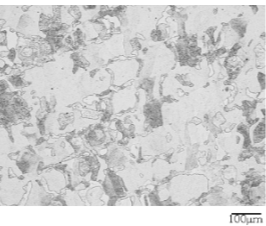
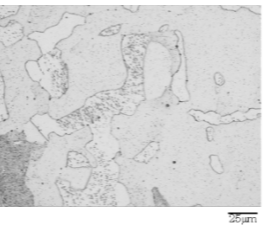
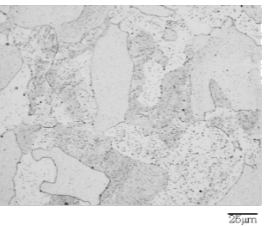
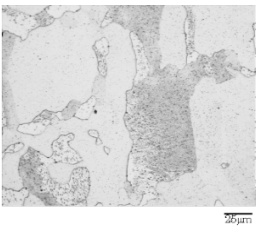
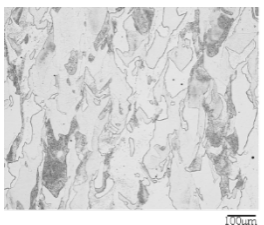
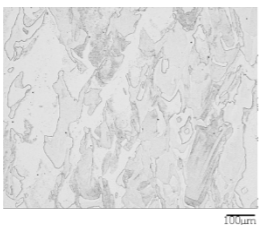
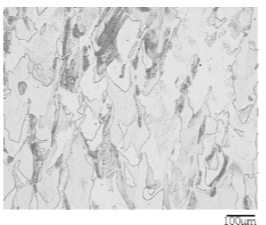
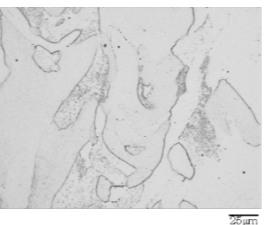
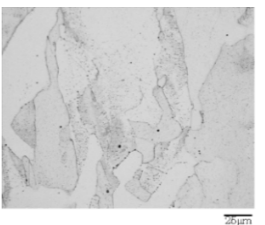
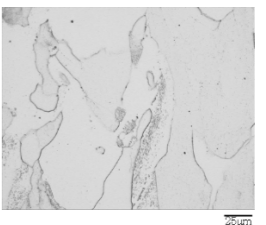
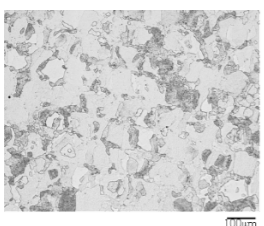
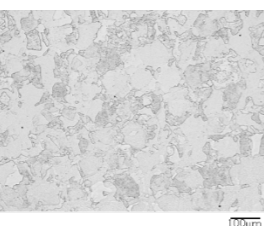
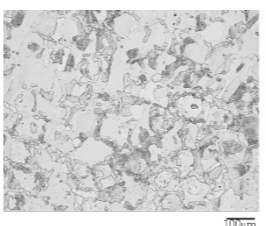
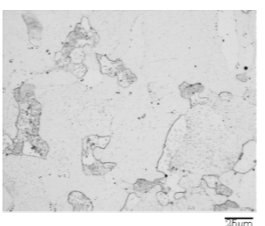
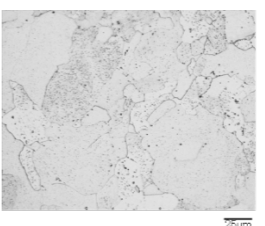
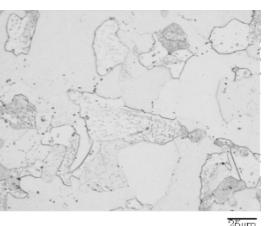
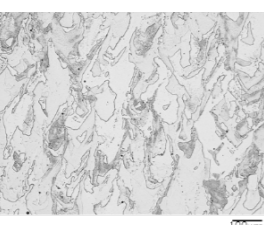
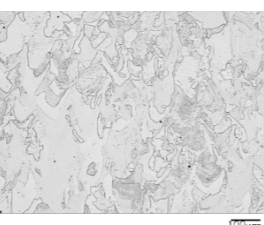
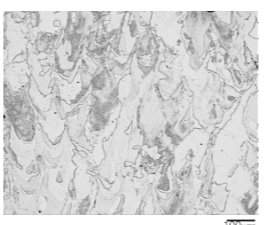
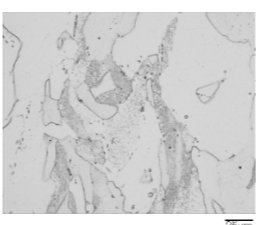
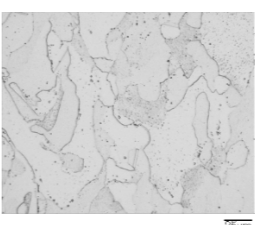
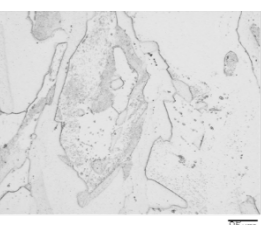
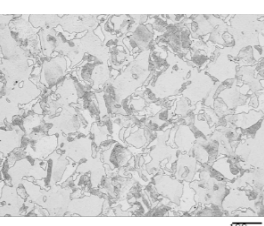
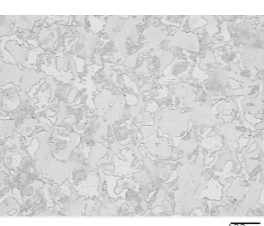
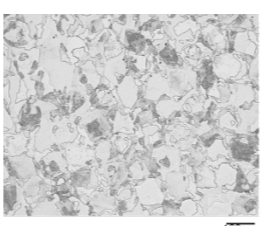
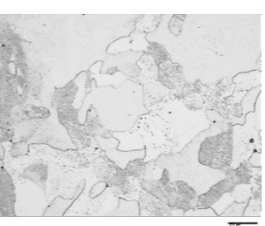
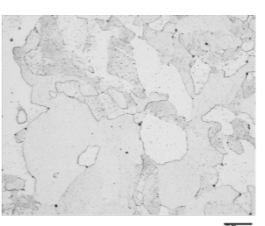
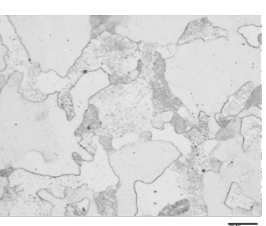

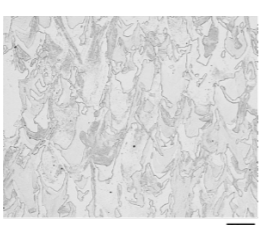

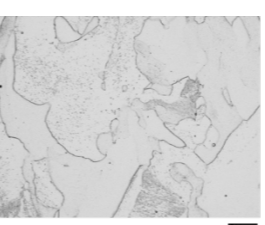
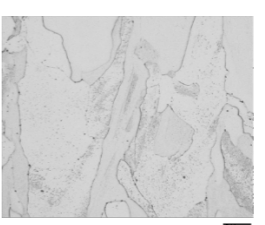
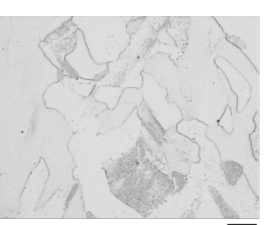
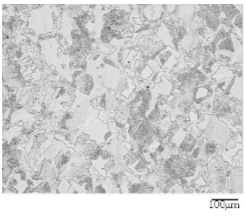
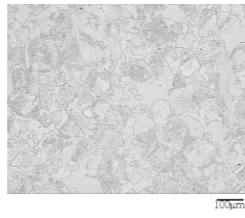
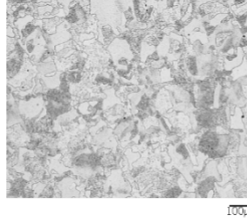
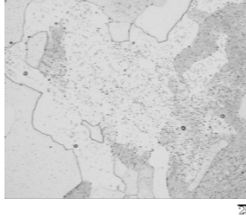
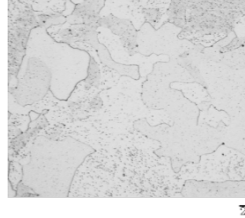
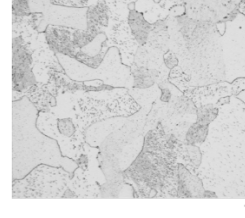

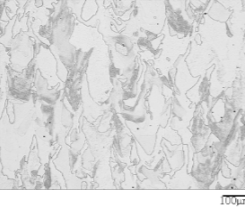
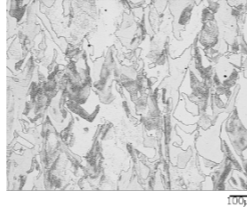
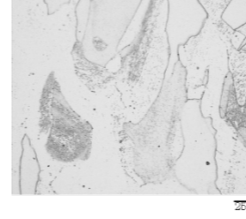

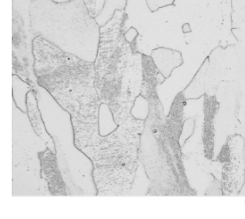
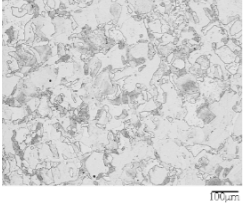
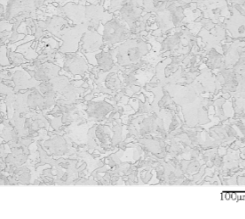
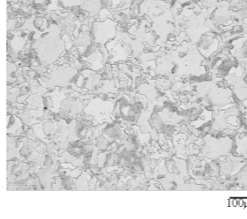
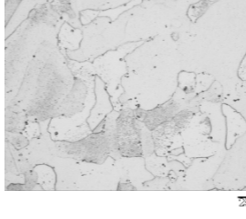
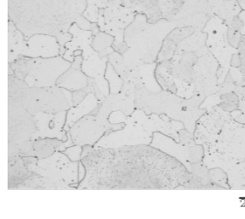
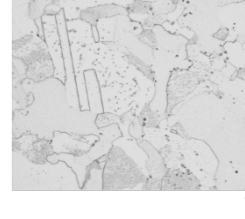
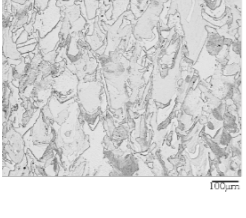
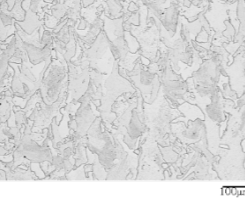
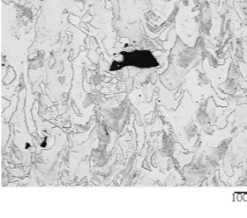
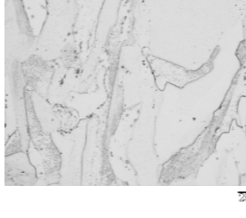
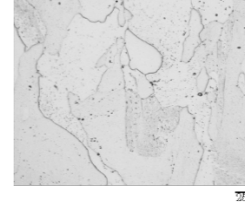
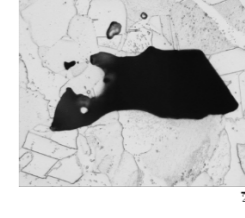
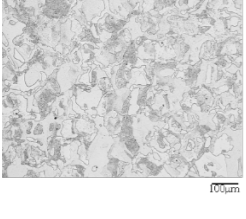

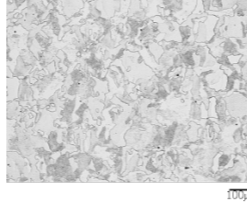
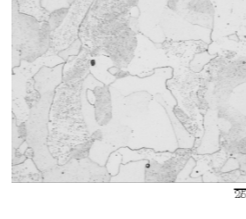
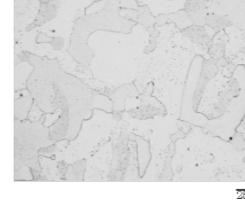
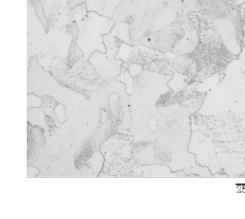



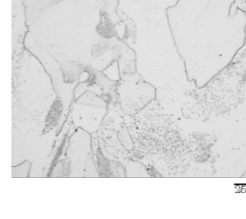
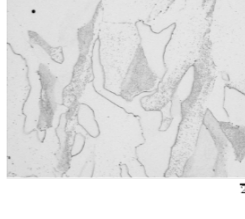
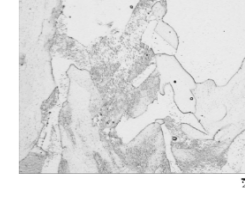
		×100			×400		
上段	XY						
	YZ						
中段	XY						
	YZ						
下段	XY						
	YZ						

表 3.3.2-20 組織試験結果（マイクロ組織観察、材料：Type316L、造形機関：IHI、座標：5e、エッチング液：10%シュウ酸(電解エッチング)）

		×100			×400		
上段	XY						
	YZ						
中段	XY						
	YZ						
下段	XY						
	YZ						

### 3.3.3 化学分析

表 3.3.3-1 に MHI にて造形した試験片に対する化学分析結果を示す。化学成分は造形座標によらず概ね一定であり、分析値は粉末と概ね同等となった。また、いずれの分析値も JIS 規格からの逸脱はなく、要求値を満足した。

表 3.3.3-2 に東芝 ESS にて造形した試験片に対する化学分析結果を示す。化学成分は、Cr が 17.07~17.58%と若干ばらつきが確認されたが、特に造形座標による傾向は認められなかった。また、O は、上段(T)で 0.030~0.031%、中央(M)で 0.027%、下段(B)で 0.035~0.036%と造形高さによる差が認められた。その他の元素は概ね一定であり、粉末の化学成分に近い値を示した。また、いずれの分析値も JIS 規格の要求値を満足した。

表 3.3.3-3 に日立 GE にて造形した試験片に対する化学分析結果を示す。化学成分は造形 x-y 座標によらず概ね一定であったが、造形高さ上段(T)とそれ以下の中央(M)、下段(B)で化学成分に違いを確認した。これは、上段(T)部を造形する前に供給粉末が不足するため、一度造形を停止して粉末を継ぎ足した際に、異なる lot の粉末と混ぜて使用したためであると考えられる。下段(B)および中央(M)は Charge A の粉末を使用し、上段(T)では Charge A と Charge B を重量比で 1:2 となる量を粉末供給層に投入し造形した。各造形高さで使用した造形粉末の化学成分と、当該部で造形した試験片の化学成分は、試験片の Ni、Cr、Mo が粉末の化学成分よりやや高めに検出されたが、その他の元素についてはほぼ同等の値を示した。また、いずれの分析値も JIS 規格の要求値を満足した。

表 3.3.3-4 に IHI にて造形した試験片に対する化学分析結果を示す。いずれの分析値も JIS 規格の要求値を満足しており、粉末の化学成分と概ね同等の値を示した。

表 3.3.3-1 化学分析結果 (材料：Type316L、造形機関：MHI、単位：wt.%)

元素	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	O
JIS 規格* SUS316L(参考)	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	12.00~ 15.00	16.00~ 18.00	2.00~ 3.00	—	—
ASTM 規格** UNS S31603(参考)	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	10.0~ 14.0	16.0~ 18.0	2.00~ 3.00	—	—
粉末(Charge A)	0.01	0.45	1.20	0.010	0.006	12.12	17.21	2.26	0.10	0.05
H-VT1a	0.008	0.48	1.34	0.013	0.004	12.5	17.6	2.41	0.087	0.0402
H-VT1e	0.009	0.49	1.33	0.012	0.004	12.5	17.5	2.41	0.087	0.0403
H-VT3c	0.008	0.49	1.32	0.013	0.004	12.5	17.5	2.41	0.087	0.0391
H-VT5a	0.009	0.49	1.35	0.013	0.005	12.5	17.4	2.41	0.087	0.0406
H-VT5e	0.008	0.48	1.35	0.013	0.004	12.5	17.6	2.41	0.087	0.0409
H-VM1a	0.008	0.49	1.35	0.012	0.004	12.6	17.6	2.40	0.087	0.0405
H-VM1e	0.008	0.47	1.33	0.012	0.004	12.5	17.5	2.41	0.088	0.0407
H-VM3c	0.008	0.49	1.33	0.012	0.004	12.5	17.5	2.40	0.087	0.0403
H-VM5a	0.008	0.48	1.36	0.013	0.004	12.5	17.4	2.40	0.086	0.0411
H-VM5e	0.008	0.49	1.35	0.012	0.005	12.5	17.6	2.41	0.087	0.0422
H-VB1a	0.008	0.48	1.36	0.013	0.004	12.6	17.6	2.41	0.088	0.0420
H-VB1e	0.009	0.49	1.34	0.012	0.004	12.5	17.5	2.42	0.087	0.0420
H-VB3c	0.008	0.50	1.33	0.012	0.004	12.5	17.5	2.40	0.086	0.0420
H-VB5a	0.008	0.49	1.36	0.012	0.004	12.5	17.5	2.40	0.087	0.0430
H-VB5e	0.009	0.49	1.35	0.013	0.004	12.5	17.6	2.41	0.087	0.0433

\*JIS G 4303:2012 「ステンレス鋼棒」

\*\*ASTM F3184-16 「Standard Specification for Additive Manufacturing Stainless Steel Alloy (UNS S31603) with Powder Bed Fusion」

表 3.3.3-2 化学分析結果 (材料 : Type316L、造形機関 : 東芝 ESS、単位 : wt.%)

元素	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	O
JIS 規格* SUS316L(参考)	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	12.00~ 15.00	16.00~ 18.00	2.00~ 3.00	—	—
ASTM 規格** UNS S31603(参考)	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	10.0~ 14.0	16.0~ 18.0	2.00~ 3.00	—	—
粉末(Charge A)	0.014	0.64	0.62	0.008	0.006	12.56	17.43	2.01	0.04	0.03
H-VT1a	0.011	0.61	0.57	0.010	0.006	12.47	17.21	2.04	0.044	0.031
H-VT1e	0.011	0.63	0.58	0.010	0.006	12.40	17.12	2.05	0.045	0.031
H-VT3c	0.011	0.59	0.57	0.010	0.006	12.57	17.44	2.03	0.045	0.030
H-VT5a	0.011	0.60	0.57	0.010	0.006	12.59	17.50	2.04	0.044	0.031
H-VT5e	0.012	0.60	0.59	0.010	0.006	12.69	17.35	2.06	0.044	0.031
H-VM1a	0.012	0.62	0.57	0.010	0.006	12.41	17.27	2.04	0.043	0.027
H-VM1e	0.011	0.62	0.57	0.010	0.006	12.50	17.33	2.05	0.044	0.027
H-VM3c	0.011	0.60	0.57	0.010	0.006	12.53	17.48	2.02	0.044	0.027
H-VM5a	0.012	0.60	0.57	0.010	0.006	12.65	17.52	2.01	0.044	0.027
H-VM5e	0.012	0.60	0.57	0.010	0.006	12.61	17.58	2.03	0.045	0.027
H-VB1a	0.012	0.61	0.57	0.010	0.006	12.42	17.07	2.05	0.042	0.035
H-VB1e	0.011	0.63	0.57	0.010	0.006	12.56	17.49	2.04	0.043	0.035
H-VB3c	0.011	0.60	0.57	0.010	0.006	12.65	17.52	2.03	0.044	0.035
H-VB5a	0.011	0.60	0.57	0.010	0.006	12.62	17.45	2.04	0.043	0.036
H-VB5e	0.012	0.60	0.57	0.010	0.006	12.61	17.44	2.04	0.044	0.035

\*JIS G 4303:2012 「ステンレス鋼棒」

\*\*ASTM F3184-16 「Standard Specification for Additive Manufacturing Stainless Steel Alloy (UNS S31603) with Powder Bed Fusion」



表 3.3.3-3 化学分析結果 (材料 : Type316L、造形機関 : 日立 GE、単位 : wt.%)

元素	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	O
JIS 規格* SUS316L(参考)	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	12.00~ 15.00	16.00~ 18.00	2.00~ 3.00	—	—
ASTM 規格** UNS S31603(参考)	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	10.0~ 14.0	16.0~ 18.0	2.00~ 3.00	—	—
粉末(Charge A)	0.014	0.40	1.26	0.006	90ppm	13.61	17.60	2.72	0.09	
粉末(Charge B)	0.019	0.35	1.43	0.014	63ppm	13.47	17.31	2.76	0.08	
H-VT1a	0.015	0.38	1.31	0.010	0.009	14.7	17.8	2.83	0.076	0.053
H-VT1e	0.014	0.38	1.30	0.011	0.009	14.4	17.7	2.83	0.076	0.050
H-VT3c	0.014	0.39	1.27	0.009	0.009	14.4	17.9	2.82	0.077	0.053
H-VT5a	0.013	0.39	1.28	0.010	0.008	14.4	17.8	2.86	0.077	0.053
H-VT5e	0.014	0.39	1.27	0.010	0.009	14.5	17.8	2.88	0.075	0.054
H-VM1a	0.013	0.42	1.24	0.006	0.010	14.7	17.9	2.84	0.074	0.023
H-VM1e	0.013	0.42	1.24	0.007	0.010	14.6	17.9	2.82	0.074	0.023
H-VM3c	0.013	0.42	1.24	0.007	0.010	14.4	17.9	2.83	0.075	0.024
H-VM5a	0.012	0.42	1.25	0.006	0.010	14.4	18.0	2.82	0.074	0.024
H-VM5e	0.013	0.42	1.24	0.007	0.010	14.4	18.0	2.82	0.074	0.024
H-VB1a	0.013	0.42	1.24	0.006	0.010	14.5	18.0	2.83	0.075	0.025
H-VB1e	0.013	0.42	1.22	0.007	0.010	14.7	18.0	2.80	0.074	0.024
H-VB3c	0.013	0.42	1.24	0.006	0.010	14.4	17.9	2.81	0.074	0.021
H-VB5a	0.013	0.42	1.24	0.007	0.010	14.4	18.0	2.82	0.075	0.023
H-VB5e	0.013	0.42	1.23	0.006	0.010	14.5	18.0	2.84	0.074	0.022

\*JIS G 4303:2012 「ステンレス鋼棒」

\*\*ASTM F3184-16 「Standard Specification for Additive Manufacturing Stainless Steel Alloy (UNS S31603) with Powder Bed Fusion」

表 3.3.3-4 化学分析結果 (材料：Type316L、造形機関：IHI、単位：wt.%)

元素	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	O
JIS 規格* SUS316L(参考)	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	12.00~ 15.00	16.00~ 18.00	2.00~ 3.00	—	—
ASTM 規格** UNS S31603(参考)	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	10.0~ 14.0	16.0~ 18.0	2.00~ 3.00	—	—
粉末(Charge A)	0.01	0.54	1.46	<0.008	0.004	12.72	17.58	2.39	0.07	0.04
H-VT1a	0.010	0.55	1.41	0.014	0.005	12.83	17.77	2.52	0.068	0.036
H-VT1e	0.010	0.56	1.38	0.015	0.005	12.95	17.72	2.51	0.068	0.037
H-VT3c	0.010	0.56	1.40	0.014	0.005	12.85	17.79	2.51	0.068	0.035
H-VT5a	0.011	0.55	1.38	0.014	0.005	12.82	17.72	2.51	0.068	0.036
H-VT5e	0.010	0.56	1.40	0.014	0.005	12.98	17.80	2.52	0.069	0.036
H-VM1a	0.007	0.51	1.35	0.015	0.004	12.79	17.81	2.51	0.067	0.042
H-VM1e	0.007	0.52	1.34	0.015	0.004	12.89	17.82	2.52	0.067	0.041
H-VM3c	0.007	0.51	1.35	0.015	0.004	12.78	17.82	2.52	0.066	0.040
H-VM5a	0.006	0.51	1.34	0.014	0.004	12.76	17.79	2.52	0.067	0.041
H-VM5e	0.007	0.52	1.34	0.015	0.004	12.89	17.80	2.52	0.067	0.040
H-VB1a	0.010	0.57	1.41	0.014	0.005	12.88	17.90	2.51	0.068	0.041
H-VB1e	0.010	0.57	1.40	0.015	0.005	12.96	17.69	2.51	0.068	0.040
H-VB3c	0.010	0.55	1.41	0.014	0.005	12.93	17.83	2.52	0.068	0.040
H-VB5a	0.010	0.55	1.40	0.014	0.005	12.83	17.81	2.51	0.069	0.039
H-VB5e	0.010	0.56	1.40	0.014	0.005	12.99	17.79	2.52	0.068	0.046

\*JIS G 4303:2012 「ステンレス鋼棒」

\*\*ASTM F3184-16 「Standard Specification for Additive Manufacturing Stainless Steel Alloy (UNS S31603) with Powder Bed Fusion」

### 3.4 評価

#### 3.4.1 材料試験結果の評価

##### (1) 硬さ試験

表 3.4.1(1)-1 に硬さ試験を実施した機関ごとの全点の測定値の範囲を示す。一部 JIS 規格値の HV200 を上回る測定値が認められたが、概ね規格値を満足することを確認した。

表 3.4.1(1)-1 各実施機関の硬さ測定値（全点の測定値範囲及び全点平均値）

実施機関	測定結果(全点、HV1.0)	
	範囲	平均値
MHI	156~179	169
東芝 ESS	131~156	141
日立 GE	175~209	193
IHI	169~185	177

また、各社取得した硬さ測定データを基に、以下の観点で評価を行った。

- ・造形高さの影響
- ・測定面の影響
- ・造形位置の影響

##### 【造形高さ及び測定面の影響】

表 3.4.1(1)-2 に XY 面、YZ 面における各造形高さ位置（上段、中段及び下段）の平均硬さを示す。表中の数値は、各段の硬さの平均値を示す。表より、硬さに及ぼす高さ方向の影響は認められなかった。また、XY 面と YZ 面で明瞭な硬さの差異も認められなかった。

表 3.4.1(1)-2 各段における XY 面、YZ 面の硬さ平均値

実施機関	XY 面			YZ 面		
	上段	中段	下段	上段	中段	下段
MHI	168	166	168	170	170	172
東芝 ESS	142	139	138	143	141	142
日立 GE	—	—	—	195	190	195
IHI	176	178	175	178	176	178

【造形位置の影響】

上段、中段、下段において、リコート方向及びガスフロー方向の始端部、中央部、終端部で硬さが最小値、最大値となる回数をカウントし、造形位置ごとの硬さの分布傾向を評価した。なお、MHI が使用した装置はリコート方向に始端、終端がないことから、リコート方向のカウントは除外した。表 3.4.1(1)-3 にリコート方向、ガスフロー方向で硬さが最大、最小となる割合を示す。表中の括弧内は全カウント数に対する各条件のカウント数を表す。表より、各方向の中央部において、硬さが最小値となる割合が低い傾向が認められた。硬さと関連のある引張試験結果(来年度取得)と併せて、最終的な評価を行う。

表 3.4.1(1)-3 各方向で硬さが最大、最小値となる割合

方向	始端		中央		終端	
	最大	最小	最大	最小	最大	最小
リコート	18.8% (6/32)	18.8% (6/32)	21.9% (7/32)	3.1% (1/32)	9.4% (3/32)	28.1% (9/32)
ガスフロー	18.8% (9/48)	12.5% (6/48)	18.8% (9/48)	8.5% (4/48)	16.7% (8/48)	25.0% (12/48)

## (2) 組織試験

### ① マクロ/マイクロ組織試験

AM 造形材について各光源のスキャン範囲の影響を把握するために、図 3.1.1(2) ③-1 に示す四隅と中央部の 5 か所 (2 光源造形、造形位置 : 1a、1e、3c、5a、5e)、又は二隅と中央部の 3 か所 (1 光源造形、造形位置 : 1a、3c、5e) について、それぞれ上部、中部、下部の 3 部位の XY 面及び YZ 面の組織試験を実施した。

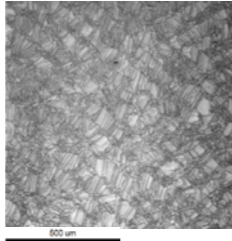
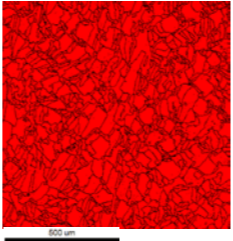
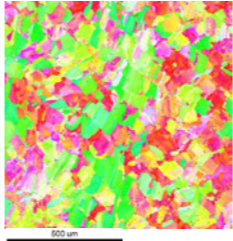
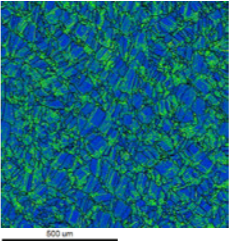

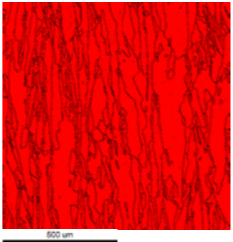

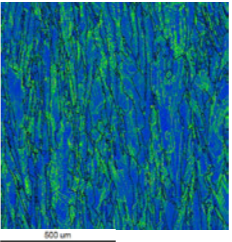
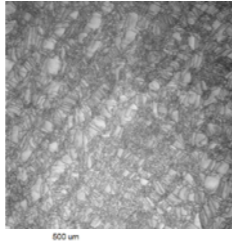
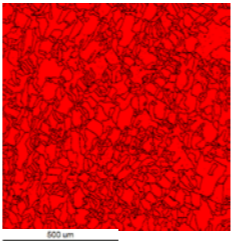
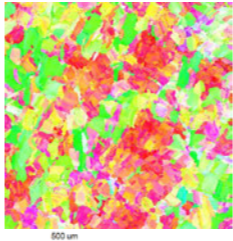
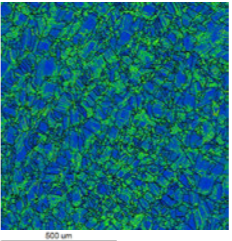
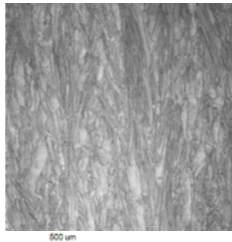
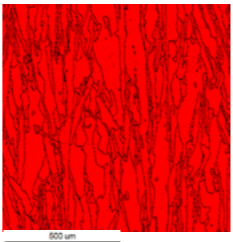

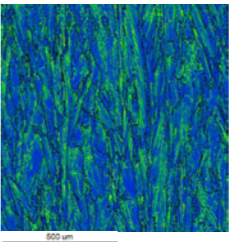
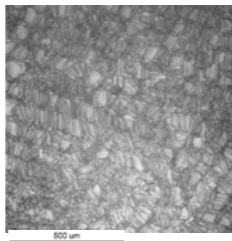
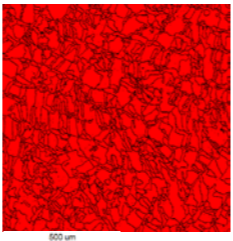

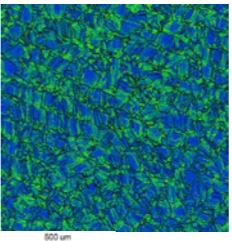
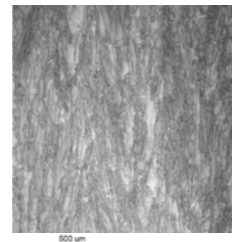
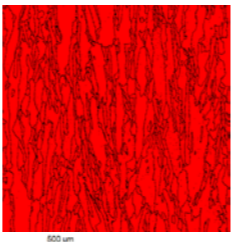
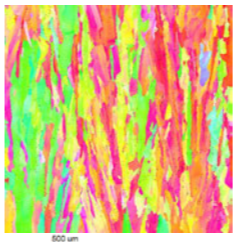
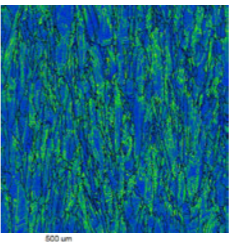
いずれの造形材でも、各観察視野において局所的な溶融不良を除き、微細欠陥は確認されず、同一方向断面の造形位置による組織の有意差は認められなかった。低温側の固溶化熱処理した造形試験片において、YZ 面は、溶融凝固痕が鱗片状に重なって積層方向に伸長した柱状晶組織を示し、XY 面は、四角形のチェスパターンの結晶粒組織を示した。一方、高温側の固溶化熱処理した造形材試験片において、XY 面と YZ 面共に混粒のない再結晶組織を確認した。造形材の微細セル組織が比較的な高温固溶化熱処理によって回復・消失し、再結晶が生じたと推定される。これは造形材の硬さ測定結果にも一致する (高温側の固溶化熱処理を行うとセル組織が消失し再結晶に伴い硬さが最も低下した)。

## ② 後方散乱電子回析(EBSD)

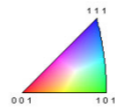
HIP や固溶化熱処理によって再結晶が生じて強度低下をもたらす可能性がある。そこで、EBSD（電子線後方散乱回折）による結晶方位解析を行い、固溶化熱処理した造形材組織を確認した。表 3.4.1(2)②-1 及び表 3.4.1(2)②-2 に代表サンプル（MHI 造形材、低温側の固溶化熱処理（ $1080 \pm 10^\circ\text{C} \times 2\text{h}$ ）、造形位置 2 ヶ所：隅（5e）及び中央（4c）のそれぞれ上部、中部、下部の 3 部位）の XY 面又は YZ 面の EBSD 解析結果を示す。光学顕微鏡組織と同様に、YZ 面は積層方向に伸長した柱状晶組織、XY 面は四角形のチェスパターンのような結晶粒組織が確認された（IQ マップ、IPF マップ参照）。相同定の結果（Phase マップ参照）、いずれの断面もオーステナイト単相組織を示しており、 $\delta$  フェライトは確認されなかった。セル境界近傍に造形時に急冷凝固で導入された高いひずみが固溶化熱処理後にも残ったことが確認された（KAM マップ参照）。

EBSD により等軸粒組織ではないことや高いひずみが残存していたことが明らかとなった。このことから、低温側の固溶化熱処理によって顕著な再結晶組織は生じていなかったと言える。

表 3.4.1(2)②-1 EBSD 解析結果 (材料: Type316L、造形位置: 4c、造形機関: MHI)

		IQ マップ	Phase マップ	IPF マップ	KAM マップ
上段	XY				
	YZ				
中段	XY				
	YZ				
下段	XY				
	YZ				

■ オーステナイト相  
■ フェライト相



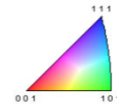
Min Max  
0 5



表 3.4.1(2)②-1 EBSD 解析結果 (材料 : Type316L、造形位置 : 5e、造形機関 : MHI)

		IQ マップ	Phase マップ	IPF マップ	KAM マップ
上段	XY				
	YZ				
中段	XY				
	YZ				
下段	XY				
	YZ				

■ オーステナイト相  
■ フェライト相





### (3) 化学分析

図 3.4.1(3)-1~3.4.1(3)-8 に 4 社で造形及び熱処理した造形物の分析値と JIS 規格要求値及び使用粉末の値を示す。造形物の化学分析の結果、4 バッチの造形すべてにおいて JIS 規格の要求値を満足する結果であった。また、Ar ガスフローの上流・中央・下流による明確な差異は確認されなかった。造形物の高さ方向で、若干分析値に違いを生じる場合もあるが、粉末の化学成分を逸脱する明確な変化は確認されなかった。造形物の化学分析値と粉末の化学組成の分析値のズレは、検査方法の違いによる影響が考えられる。

以上のことから、造形及び熱処理によって粉末材料に含まれる化学成分が大きく変化しないことが示唆された。

一方、JIS 規格要求外である窒素及び酸素について、図 3.4.1(3)-9~3.4.1(3)-10 に分析値と使用粉末の値(分析値があるもののみ記載)を示す。窒素及び酸素は、使用する粉末が同じである場合、場所による影響はほとんど受けないことが確認された。日立 GE の造形物の上段で、中段・下段より酸素が多く検出されたのは、使用する粉末 Lot が異なるためであると考えられる。

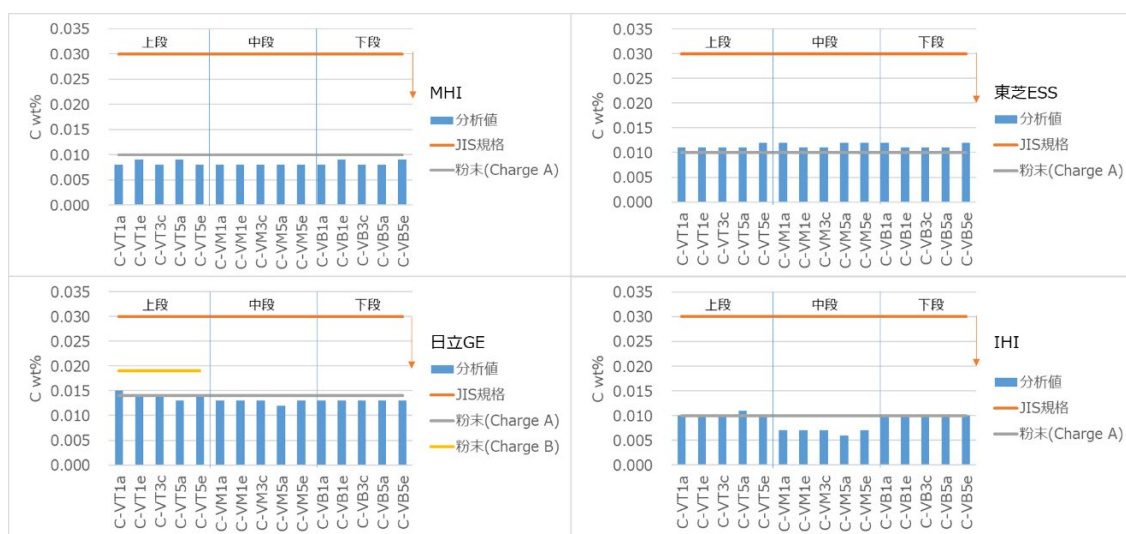


図 3.4.1(3)-1 造形物及び粉末の C 分析結果

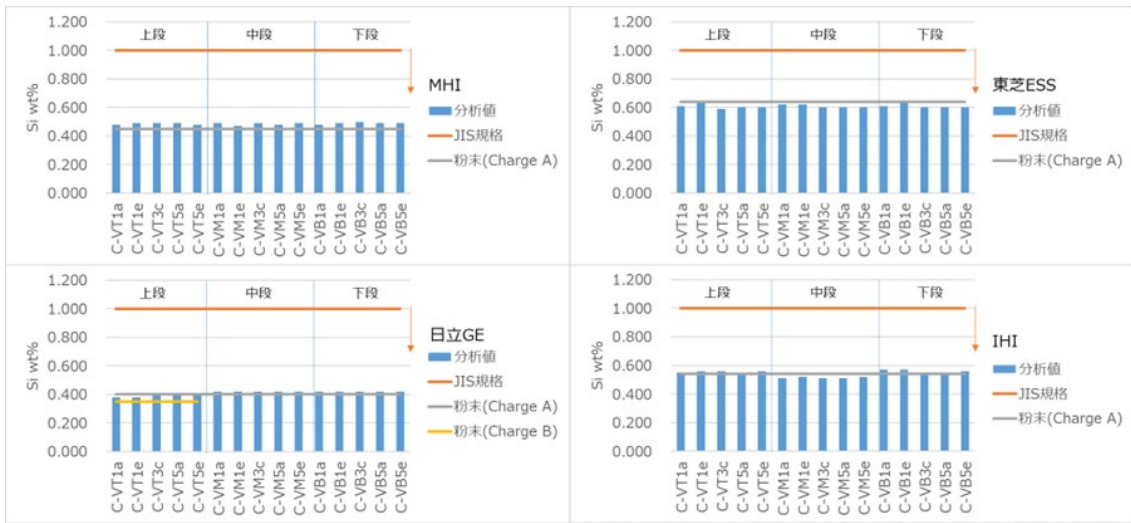


図 3.4.1(3)-2 造形物及び粉末の Si 分析結果

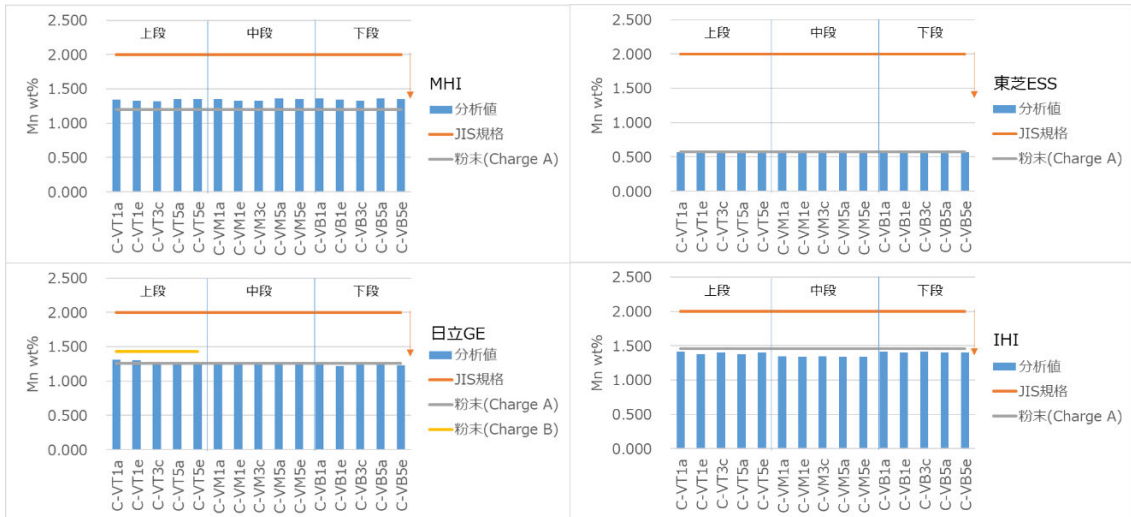


図 3.4.1(3)-3 造形物及び粉末の Mn 分析結果

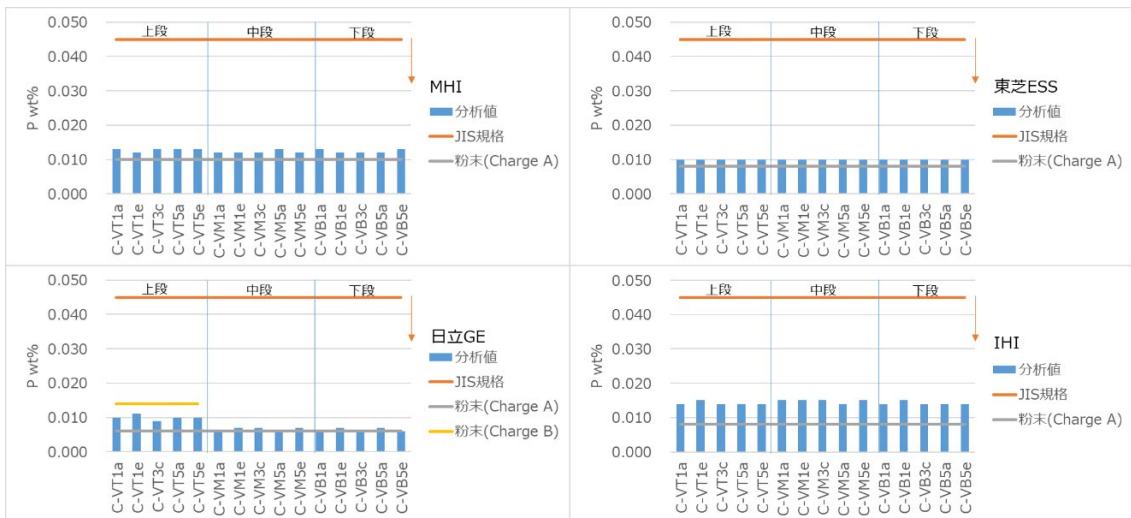


図 3.4.1(3)-4 造形物及び粉末の P 分析結果

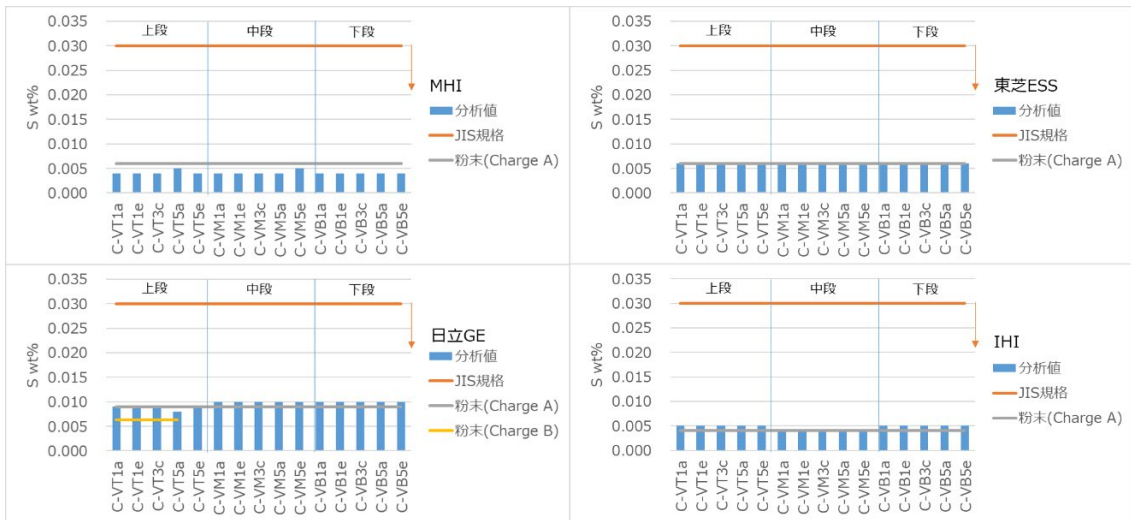


図 3.4.1(3)-5 造形物及び粉末の S 分析結果

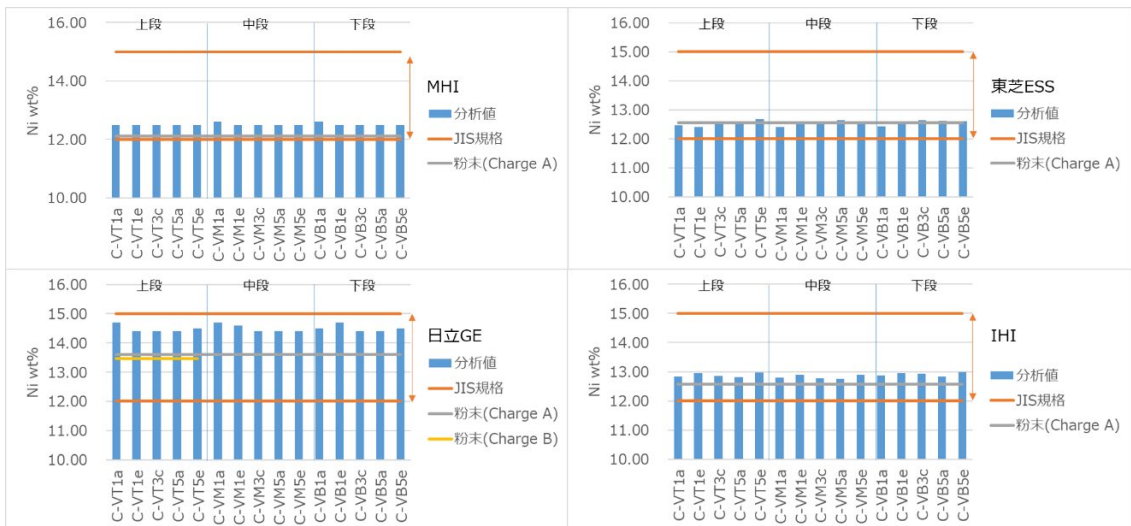


図 3.4.1(3)-6 造形物及び粉末の Ni 分析結果

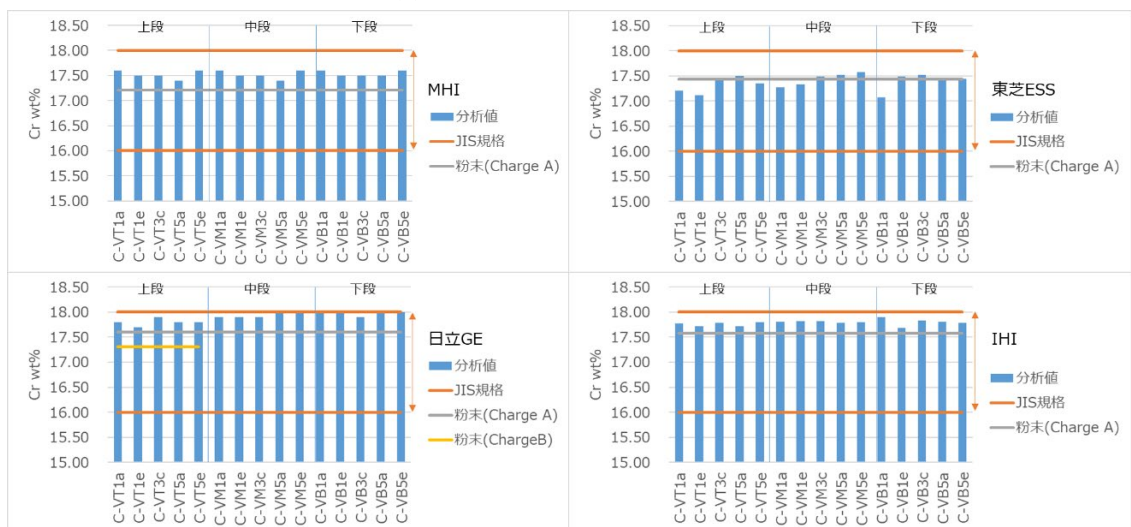


図 3.4.1(3)-7 造形物及び粉末の Cr 分析結果

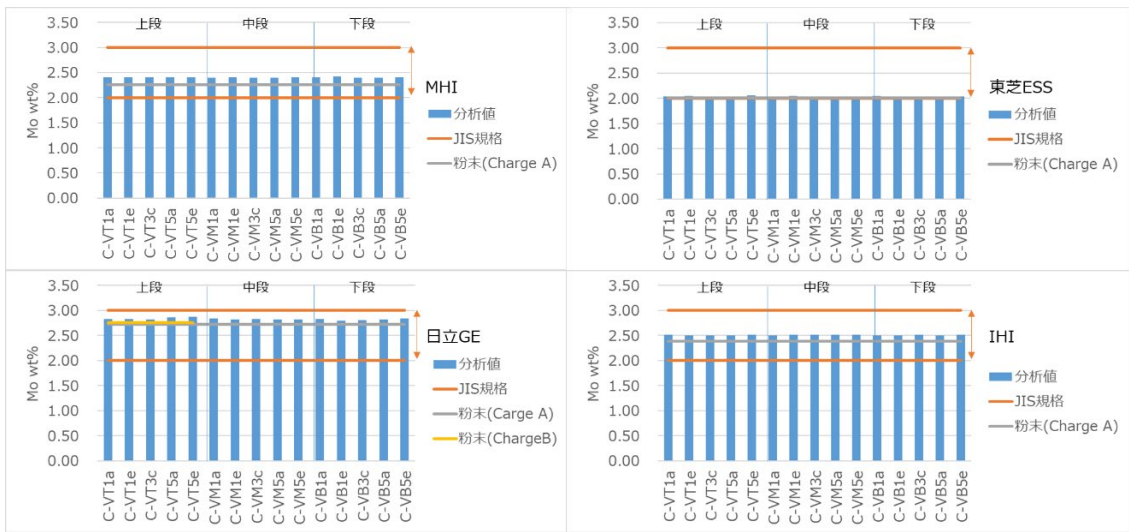


図 3.4.1(3)-8 造形物及び粉末の Mo 分析結果

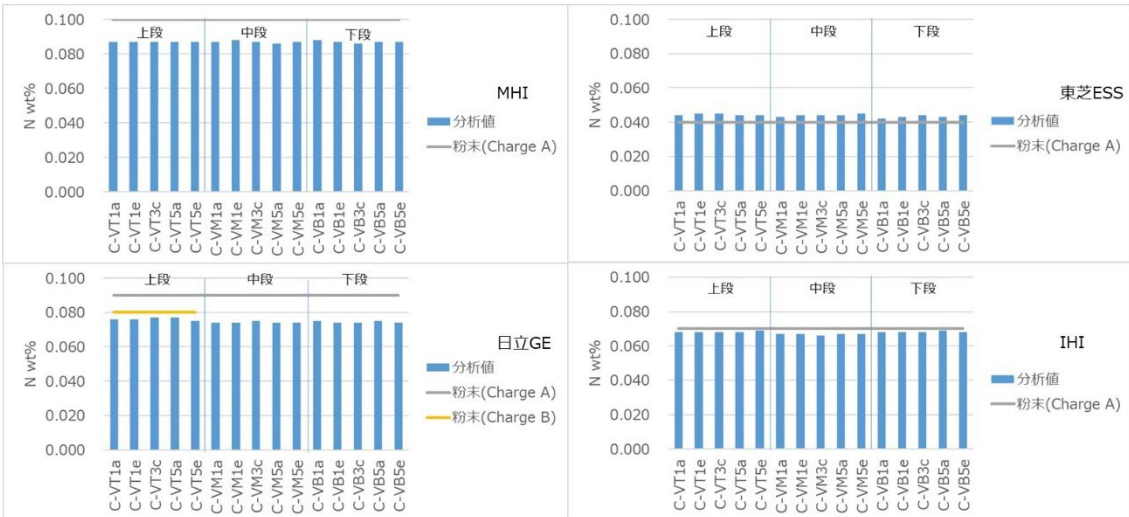


図 3.4.1(3)-9 造形物及び粉末の N 分析結果

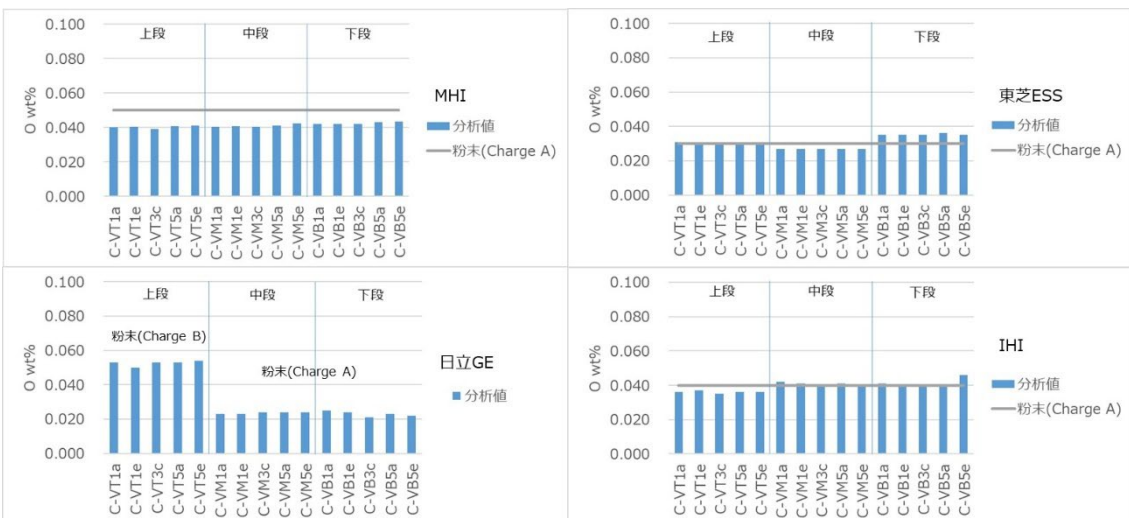


図 3.4.1(3)-10 造形物及び粉末の O 分析結果(日立 GE 粉末は O 分析値なし)

### 3.4.2 国内規格としての対応案策定

#### ①STEP1 検証プロセス方法の妥当性確認の結果

化学分析については各社いずれも規格内の結果であったが、硬さは概ね規格値を満足したものの一部の結果で規格値以上の値も確認された。金属組織については、造形条件や熱処理条件がそれぞれ異なる製作元によって柱状晶/等軸粒といった違いは見られたが、造形位置による組織の有意差は見られなかった。

また非破壊評価(RT,PT,CT)においては、東芝 ESS 以外の Ar フロー下流で造形された試験片において顕著に欠陥が発生しやすい傾向が見られた。

#### ②STEP2 規格化に向けたデータ取りへ進む際の懸念点

STEP2 物性値取得試験向け試験片の造形については、STEP1 の上記①の結果とともに、常温引張試験まで実施した結果から造形範囲を決定するものであったが、スケジュールの都合上引張試験の結果を待たずに造形している。

次年度予定している STEP2 の評価をするための試験片の採取位置については、上記①の結果と次年度実施予定の STEP1 常温引張試験の結果によって決めるものとする。



#### 4. STEP2 規格化に向けた材料データの取得

##### 4.1 物性値取得向け試験片の製作

###### 4.1.1 試験方案策定

###### (1)試験基本仕様

###### ①試験マトリクス

###### a. PBF 法

STEP2 の物性値取得用試験片は、STEP1 と同様に MHI、東芝 ESS、日立 GE、IHI の 4 社でそれぞれ 1 バッチずつ造形し、合計 4 バッチとした。採取方向が材料物性値に及ぼす影響を把握するため、造形方向は 3 方向（水平 2 方向、垂直 1 方向）とした。造形モデルの配置イメージを図 4.1.1(1)①a-1 に示す。試験片造形には後述の表 4.1.1(2)①a-1 に示す各社選定の造形装置を用い、各社任意の位置で造形するものとした。造形条件については後述の表 4.1.1(2)①c-1 にて示す。

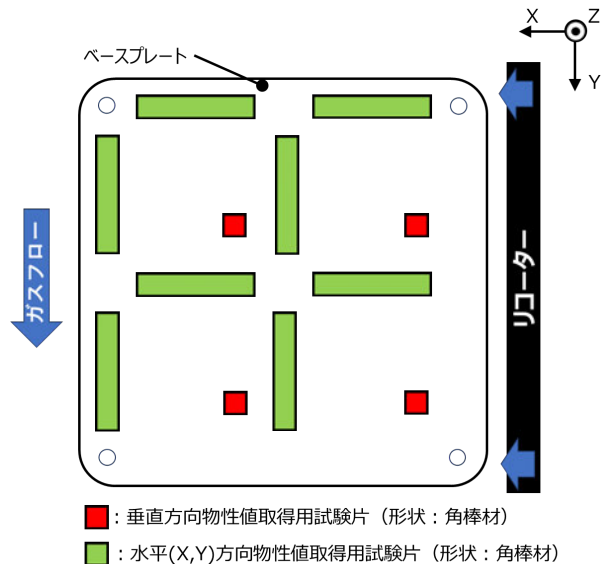


図 4.1.1(1)①a-1 STEP2 材料物性試験における造形モデルの基本方針

次に、試験マトリクスを表 4.1.1(1)①a-1 に示す。

線膨張係数の試験温度は、JSME S NJ1「材料規格」のオーステナイト系ステンレス鋼で規定されている 20°C（常温）、50°C、75°C、100°C、125°C、150°C、175°C、200°C、225°C、250°C、275°C、300°C、325°C、350°C、375°C、400°C、425°C の 17 条件とし、熱伝導率・温度伝導率については材料規格に規定はないが、温度依存性を把握する観点から線膨張係数と同様の 17 条件とした。縦弾性係数の試験温度は、材料規格において規定されている -75°C、25°C（常温）、100°C、150°C、200°C、250°C、300°C、350°C、400°C、450°C の 10 条件とし、ポアソン比についても同様に 10 条件とした。

材料物性試験の試験片採取数は、3通りの採取方向(垂直方向、水平(X,Y)方向)及び2通りの熱処理条件(固溶化熱処理(SA)、熱間等方圧加圧法(HIP)+SA)の組み合わせに対し n=1 にて採取するものとした。

表 4.1.1(1)①a-1 STEP2 材料物性試験の試験マトリックス

試験項目	温度条件	試験片 採取方向	試験片採取数	
			熱処理	
			固溶化熱処理	固溶化熱処理 + HIP処理
線膨張係数	20°C (常温)、50°C、75°C、100°C、 125°C、150°C、175°C、200°C、225°C、 250°C、275°C、300°C、325°C、350°C、 375°C、400°C、425°C (17条件)	垂直	1	1
		水平(X)	1	1
		水平(Y)	1	1
熱伝導率、 温度伝導率	20°C (常温)、50°C、75°C、100°C、 125°C、150°C、175°C、200°C、225°C、 250°C、275°C、300°C、325°C、350°C、 375°C、400°C、425°C (17条件)	垂直	1	1
		水平(X)	1	1
		水平(Y)	1	1
縦弾性係数、 ポアソン比	-75°C、25°C (常温)、100°C、150°C、 200°C、250°C、300°C、350°C、400°C、 450°C (10条件)	垂直	1	1
		水平(X)	1	1
		水平(Y)	1	1

## b. DED 法

STEP2 では DED 法を適用して製造した材料に対する材料データの取得も実施する。DED 法は PBF 法と異なり造形領域を規定する必要がないため、STEP1 は実施せず、STEP2 から実施する。

一般に DED 法は材料に関して、大きく金属粉末を材料とするパウダ DED 法と金属ワイヤを材料とするワイヤ DED 法の二種類、熱源に関して、レーザーや電子ビーム、プラズマアーク等を熱源とする DED 法があるが、本事業においては、参画する原子力プラントメーカーの志向するレーザーを光源とするワイヤ DED 法について検討を実施する。(本報告書では特に断りのない限りレーザーを光源とするワイヤ DED 法を DED 法と称する。)

DED 法では供給された線材が熔融凝固してビードを形成し、造形物を得る方法であるため、2022 年度に造形を実施する材料物性試験においては、積層方向、造形パス方向、造形パスに直交する方向の 3 方向を考慮して試験片を造形する必要がある。熱処理に関しては、PBF 法と同様に固溶化熱処理 (SA) を実施することが考えられるが、DED 法はその使用用途として、直接、既存の大型製品へ溶着することが考えられるため、固溶化熱処理を実施するケースと造形ままのケースの 2 種類の材料を準備する。

試験の内容に関しては PBF 法と同様であるため、4.1.1(1)①a.PBF 法を参照のこと。



(2) 試験片造形に関わる仕様

① PBF 法

a. PBF 造形装置

本事業に参加する企業で試験片造形に用いる PBF 装置の一覧を表 4.1.1(2)①a-1 に示す。表 4.1.1(2)①a-1 に示す装置はいずれも代表的な PBF 装置メーカーのものであり、造形品質が比較的安定した中型の造形装置である。

表 4.1.1(2)①a-1 試験片造形に用いた PBF 装置一覧

担当会社		MHI	東芝 ESS	日立 GE	IHI
造形装置	メーカー	SLM Solution	Concept Laser	EOS	EOS
	型番	SLM280	M2	M290	M290
	外観				
	造形サイズ [mm]	280×280×350	250×250×325	250×250×325	250×250×325
	造形材料	ステンレス鋼 Ni 基合金 チタン合金	ステンレス鋼 Ni 基合金など	ステンレス鋼、鉄系 アルミ合金 Ni 基合金 チタン合金	ステンレス鋼、鉄系 アルミ合金 Ni 基合金 チタン合金

b. 使用粉末

本事業に参加する企業により、JIS 規格(JISG4304)を満たす SUS316L 粉末を選定し、試験片造形用として用いた。各担当会社で用いた粉末の成分一覧を表 4.1.1(2)①b-1 に示す。

また、PBF の粉末はレーザーの未照射部等の未固化部分は再利用されることが一般的であり、未使用粉末と同等の要求を満たすものを再利用して使用する場合もある。なお、この場合においても、元素粉末や他組成の粉末を混合して利用することはしていない。

表 4.1.1(2)①b-1 試験片造形に用いた SUS316L 粉末一覧(2022 年度造形分)

元素		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
(参考)JIS 規格 SUS316L[%]		0.030 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	12.00 ~15.00	16.00 ~18.00	2.00 ~3.00
担当会社 (粉末メーカー/ 型式)	MHI (aerlikon metco/MetcoAdd 316L- A(-45 +15μ)-10 I)	0.01	0.45	1.20	0.010	0.006	12.12	17.21	2.26
	東芝 ESS (-/-)	0.014	0.64	0.62	0.008	0.006	12.56	17.43	2.01
	日立 GE (EOS Stainless Steel 316L/9011- 0032/#S172203)	0.014	0.40	1.26	0.006	0.009	13.61	17.60	2.72
	IHI (aerlikon metco/MetcoAdd 316L- A(-45 +15μ)-10 I)	0.01	0.57	1.53	0.012	0.004	12.93	17.32	2.34

c. 造形条件

表 4.1.1(2)①a-1 の装置及び表 4.1.1(2)①b-1 の粉末を用い、図 4.1.1(1)①a-1 のモデルの造形を実施した。各担当会社にて選定した造形条件を表 4.1.1(2)①c-1 に示す。

表 4.1.1(2)①c-1 造形条件

造形パラメータ		レーザ出力[W]	スキャン速度[mm/sec]
担当会社	MHI	275	900
	東芝 ESS	300	700
	日立 GE	205	975
	IHI	225	1085

d. 後処理方法

造形した図 4.1.1.(1)①a-1 のモデルの後処理方法について各担当会社で検討した。

PBF においては、材料中の欠陥を減少し緻密化することで材料特性が改善することが考えられる。そこで、STEP2 では、造形後の材料に対して、中間熱処理として熱間等方圧加圧法 (HIP) 処理の実施有無の違いのある 2 種類の材料を準備する。

表 4.1.1(2)①d-1 に示す熱処理前作業を実施した上で、一部の材料に対しては ASME/ASTM 規格の HIP 条件を参考に表 4.1.1(2)①d-2 に示す条件にて中間熱処理として HIP 処理を実施し、最終的にすべての材料に対して JIS 規格での SUS316L (棒材、板材) の要求仕様を参考に表 4.1.1(2)①d-3 に示す条件にて固溶化熱処理を実施した。なお、東芝 ESS は引張強さ確保のため STEP1 と SR 及び SA の条件を変更している。STEP2 では各社次年度以降も原則同じ条件とする。

表 4.1.1(2)①d-1 固溶化熱処理前作業(2022 年度造形分)

担当会社	プレート・サポート除去 タイミング	応力除去条件		
		目標温度 [°C]	保持時間 [h]	冷却方法
MHI	HIP 処理前又は SA 前	(実施しない)	(実施しない)	(実施しない)
東芝 ESS	応力除去後	645~655	2	ガス冷却
日立 GE	応力除去後	800 以上	2 以上	ガス冷却
IHI	HIP 処理前又は SA 前	(実施しない)	(実施しない)	(実施しない)

表 4.1.1(2)①d-2 熱間等方圧加圧法(HIP)条件(2022 年度造形分)

担当会社	熱間等方圧加圧法(HIP)条件			
	保持圧力 [MPa]	目標温度 [°C]	保持時間 [h]	冷却方法
MHI	98	1070~1090	3	ガス冷
東芝 ESS	100	1145~1155	2	ガス冷
日立 GE	100	1085~1095	2	ガス冷
IHI	100~110	1100~1130	2(1hr50min~2hr10min)	ガス冷

表 4.1.1(2)①d-3 固溶化熱処理(SA)条件(2022 年度造形分)


担当会社	固溶化熱処理条件		
	目標温度 [°C]	保持時間 [h]	冷却方法
MHI	1070~1090	2	ガス冷
東芝 ESS	1075~1085	2	ガス冷
日立 GE	1040~1100	1.0	水冷
IHI	1038~1093	0.5	水冷

② DED 法

a. DED 造形装置

本事業に参加する企業で試験片造形に用いる DED 装置を表 4.1.1(2)②a-1 に示す。

表 4.1.1(2)②a-1 試験片造形に用いた DED 装置

担当会社		MHI
造形装置	メーカー	前田工業株式会社自社開発
	外観	
装置概要		<ul style="list-style-type: none"> <li>造形委託先（前田工業株式会社）の Wire-DED 装置</li> <li>レーザー発振器：IPG 社製イッテルビウムファイバーレーザー（公称出力 30kW）</li> <li>HOT 電源、ワイヤ送給装置、多軸ロボット</li> </ul>

b. 使用線材

本事業に参加する企業により、JIS 規格(JISZ3321)を満たす YS316L 線材を選定し、試験片造形用として用いた。用いた線材の成分一覧を表 4.1.1(2)②b-1 に示す。

表 4.1.1(2)②b-1 試験片造形に用いた SUS316L 線材一覧(2022 年度造形分)

元素	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb	N
JIS Z3321:2021 YS316L	0.03 以下	0.30- 0.65	1.0- 2.5	0.03 以下	0.03 以下	11.0- 14.0	18.0- 20.0	2.0- 3.0	0.75 以下	-	
Filler Metal (ミルシート 記載値)	0.014	0.46	1.70	0.027	0.001	12.18	19.34	2.20	0.30	0.01	0.014



c. 造形条件

表 4.1.1(2)②a-1 の装置及び表 4.1.1(2)②b-1 の線材を用い、試験に必要な造形材の造形を実施した。選定した造形条件を表 4.1.1(2)②c-1 に示す。

表 4.1.1(2)②c-1 造形条件

レーザ出力[kW]	HOT 電流[A]
5.0	100

d. 後処理方法

後処理に関しては、PBF 法と同様に固溶化熱処理（SA）を実施することが考えられるが、DED 法はその使用用途として、直接、既存の大型製品へ溶着することが考えられるため、固溶化熱処理を実施するケースと造形ままのケースの2種類の材料を準備する。固溶化熱処理の条件は JIS 規格（JIS G 4304：2021「熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯」表 JA.1—オーステナイト系の熱処理条件の例、SUS316L：1010～1150℃急冷）等を参考に表 4.1.1(2)②d-1 に示す条件にて固溶化熱処理を実施した。

表 4.1.1(2)②d-1 固溶化熱処理(SA)条件(2022 年度造形分)

固溶化熱処理条件		
目標温度 [°C]	保持時間 [h]	冷却方法
1060	1	水冷

#### 4.1.2 試験片の製作

##### (1) 試験片の造形、造形の記録

###### ① PBF 法

###### a. MHI

###### (a) 造形方案

図 4.1.2(1)①a(a)-1 に物性値取得向け造形材の造形方案を示す。試験は積層方向、ガスフロー方向と平行する方向、直行する方向それぞれに沿う方向で実施されるため、必要量を考慮して、各 $\square 25 \times L80$ の角材を4本、計12本造形する。またリコータと造形材との接触負荷を下げるため、リコート方向に対し10度傾けるものとした。水平方向造形材はベースプレートから所定の距離を保つため、ベースプレートと造形材下面の間にサポートを造形している。

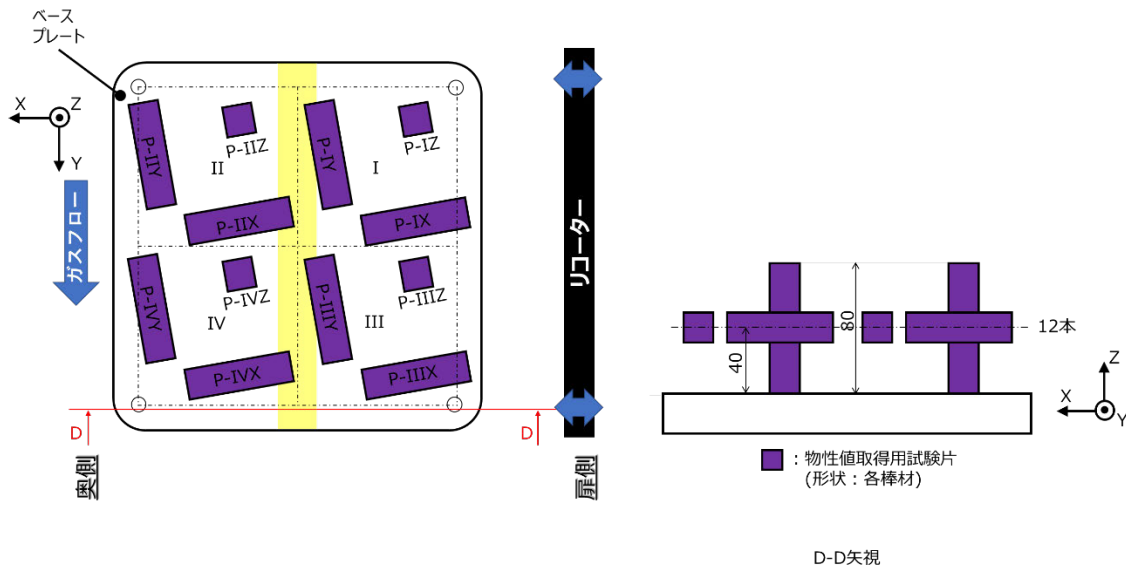


図 4.1.2(1)①a(a)-1 物性値取得向け造形材 (MHI)

(b) 造形結果

表 4.1.1(2)①c-1 の条件を用いて造形した。造形後の外観を図 4.1.2(1)①a(b)-1 に示す。外観上の不良が発生しているが物性値測定用試験片の採取は可能であり、本事象の影響はないと判断される

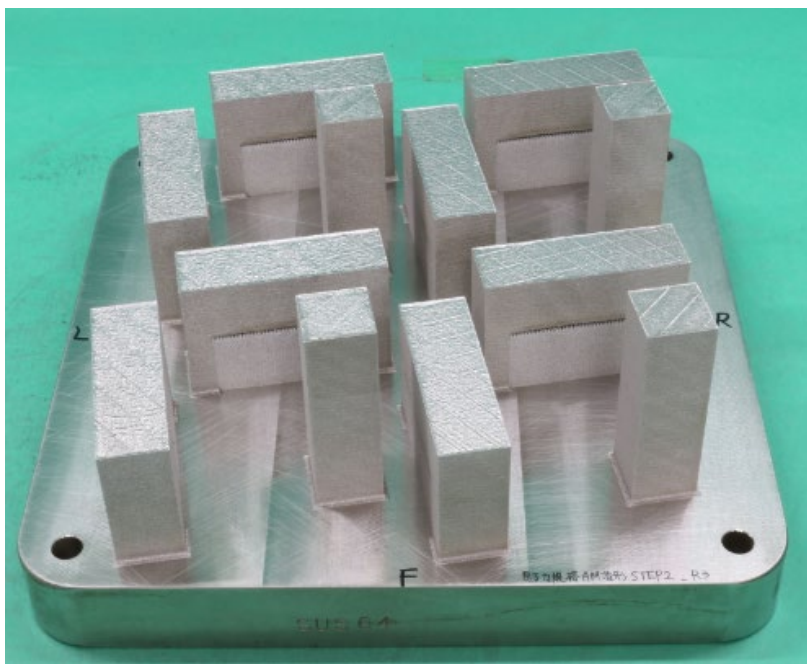


図 4.1.2(1)①a(b)-1 造形後外観(MHI)

(c) 熱処理結果

図 4.1.2(1)①a(a)-1 に示した造形物について、造形後にプレート及びサポート材の除去を実施。その後、表 4.1.2(1)①a-1 にて示した試験片に対して、表 4.1.1(2)①d-2 及び表 4.1.1(2) d-3 にて示した条件にて HIP 処理及び固溶化熱処理を実施した。

表 4.1.2(1)①a(c)-1 HIP 処理の実施有無

試験片番号	HIP 実施有無
P-IX	有 (HIP+SA)
P-IY	
P-IZ	
P-III <sub>X</sub>	
P-III <sub>Y</sub>	
P-III <sub>Z</sub>	
P-II <sub>X</sub>	有 (SAのみ)
P-II <sub>Y</sub>	
P-II <sub>Z</sub>	
P-IV <sub>X</sub>	
P-IV <sub>Y</sub>	
P-IV <sub>Z</sub>	

b. 東芝 ESS

(a) 造形方案

図 4.1.2(1)①b(a)-1 に物性値取得向け試験片の造形方案を示す。X、Y、Z 方向試験片のモデルを各 4 個等間隔となるように配置し、X1/Y1/Z1 と X3/Y3/Z3、X2/Y2/Z2 と X4/Y4/Z4 に分けて 2 レーザで造形した。造形物のサイズは X/Y/Z 試験片ともに 25mm×25mm×70mm とした。またリコータと造形物との接触負荷を下げるため、リコータ方向に対し 3 度傾けるものとした。また、造形の際には適宜サポートを設けた。

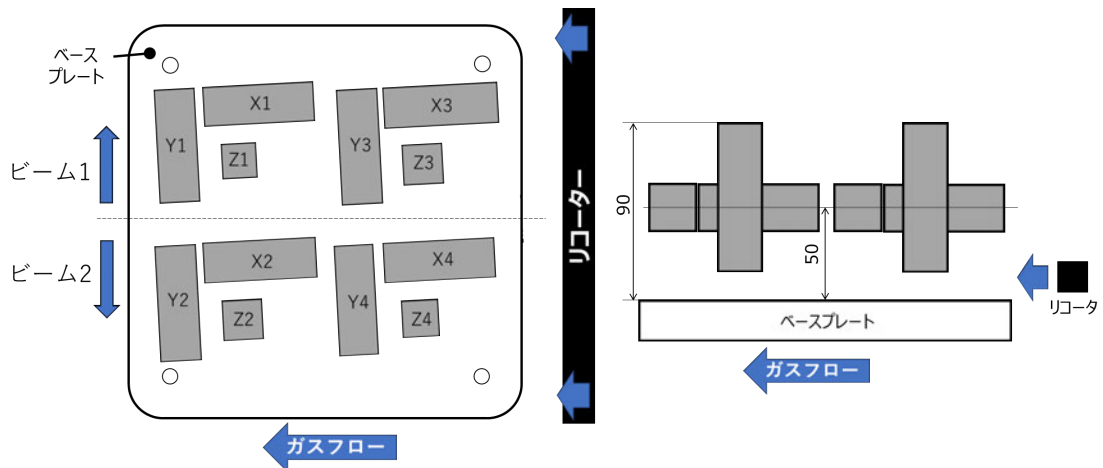


図 4.1.2(1)①b(a)-1 造形方案

(b) 造形結果

表 4.1.1(2)①c-1 の条件を用い、試験片を造形した。造形後の外観を図 4.1.2(1)①b(b)-1 に示す。外観上の不良なく造形が完了したことを確認した。

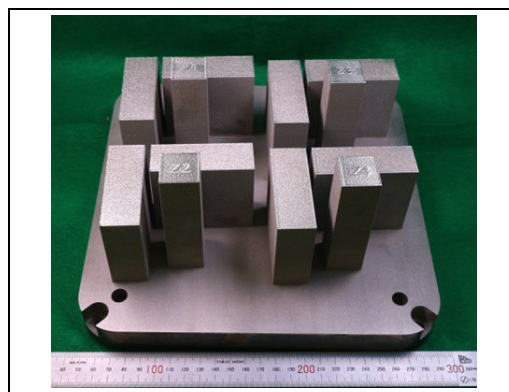


図 4.1.2(1)①b(b)-1 造形後外観(東芝 ESS)





c 日立 GE

(a) 造形方案

図 4.1.2(1)①c(a)-1 に材料物性取得のための造形方案を示す。造形方向による材料物性値への影響を把握するため、3方向（水平2方向、垂直1方向）について造形し試験片を採取する。造形した試験片から線膨張係数、熱伝導率、温度伝導率、縦弾性係数、ポアソン比を評価する。試験片の配置は長手方向が x 及び y の水平方向の造形モデルを配置し、その交点と対角の位置に長手方向が z の垂直方向の造形モデルを配置した。水平方向2本と垂直方向1本を1セットとして4分割で配置した。ガスフロー下流の造形領域にスパッタが堆積する現象は、造形物の物量に影響を受けるため、造形物の物量が少ない本造形法案では影響がない可能性があるが、念のためガスフロー下流を避けるため、Y方向の座標 e より内側になるよう配置した。造形物のサイズは 20mm×20mm×80mm とした。またリコータと造形物の接触負荷を下げるため、各造形物の中心を基準としてリコータ方向に対し 10度傾けるものとした。

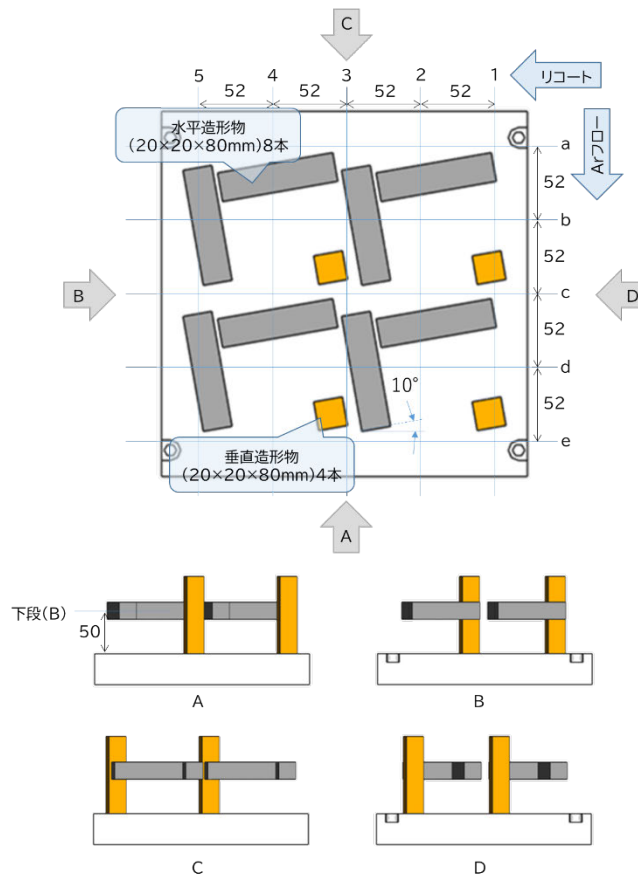


図 4.1.2(1)①c(a)-1 STEP 2 物性値取得用試験片造形（日立 GE）

(b) 造形結果

表 4.1.1(2)①c-1 の条件を用いて造形した、造形後の外観を図 4.1.2(1)①c(b)-1 に示す。外観上の不良なく造形が完了したことを確認した。

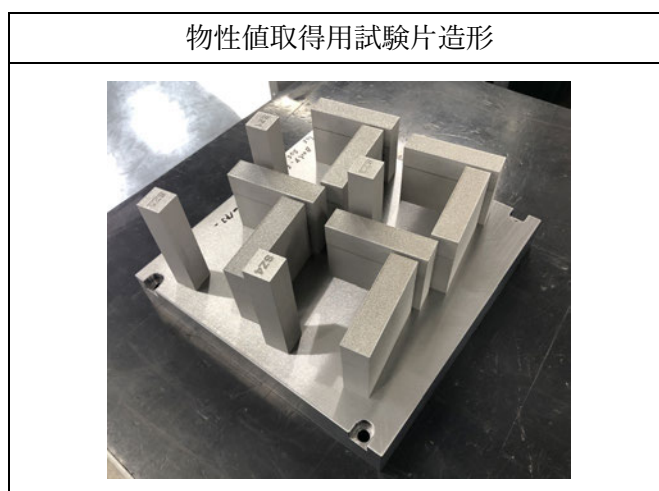
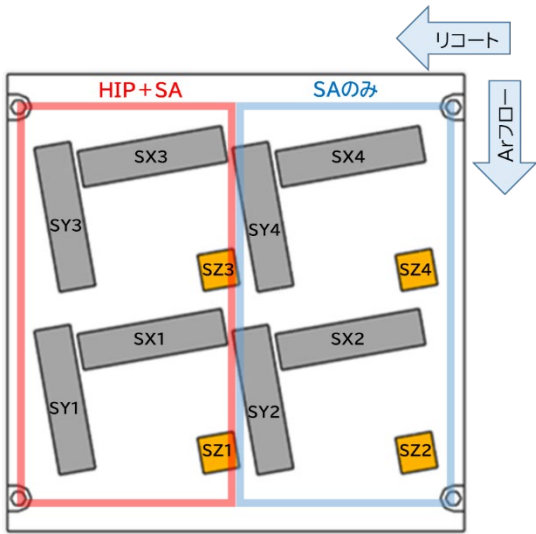


図 4.1.2(1)①c(b)-1 造形後外観(日立 GE)

(c) 熱処理結果

図 4.1.2(1)①c(a)-2 に示した造形物について、造形後に表 4.1.1(2)①d-1 にて示した SR を実施した後、ベースプレート及びサポート材の除去を実施。その後、表 4.1.1(2)①d-3 にて示した条件にて固溶化熱処理を実施した。[REDACTED] た、図 4.1.2(1)①c(a)-1 に示した造形法案の x 座標(3-5)、y 座標(a-e)の水平方向造形 4 本及び垂直方向造形 2 本の試験片について、表 4.1.1(2)①d-2 に示した HIP 処理を実施した。また、表 4.1.2(1)①c(c)-1 に各試験片の HIP 処理の実施有無を示す。

表 4.1.2(1)①c(c)-1 HIP 処理の実施有無

	試験片番号	HIP 実施有無
	SX1 SX3 SY1 SY3 SZ1 SZ3	有 (HIP+SA)
	SX2 SX4 SY2 SY4 SZ2 SZ4	無 (SAのみ)

d. IHI

(a)造形方案

図 4.1.2(1)①d(a)-1 に物性値取得向け試験片の造形方案を示す。造形方向を水平 2 方向及び垂直 1 方向の計 3 方向とし、各造形方向に対して 4 本の試験片を造形するものとした。造形物のサイズは、水平 2 方向の計 8 本については 15mm×15mm×80mm とし、垂直方向の 4 本については 20mm×20mm×90mm とした。造形位置については、各試験片の中心間の距離を 53mm で等間隔とし、リコータと造形物との接触負荷を下げるためリコータ方向に対し 10 度傾けるものとした。また水平方向の造形の際には適宜サポートを設けた。

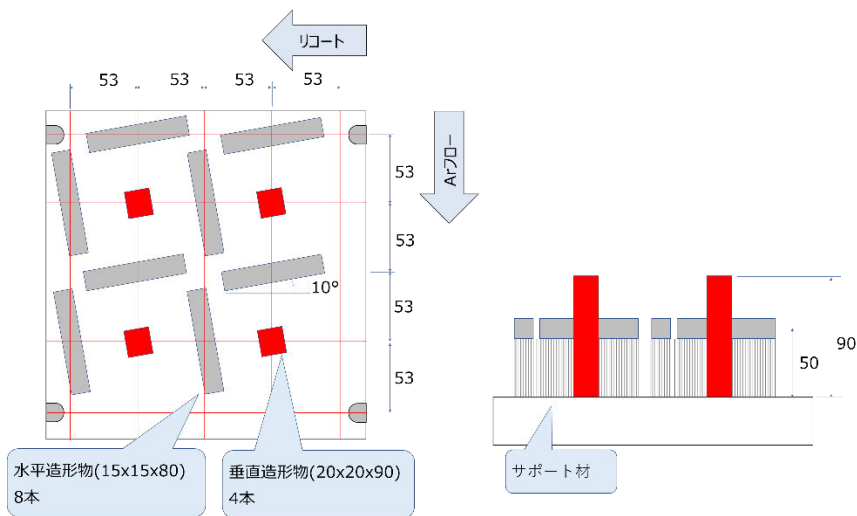


図 4.1.2(1)①d(a)-1 造形方案

(b)造形結果

表 4.1.1(2)①c-1 の条件を用いて造形した、造形後の外観を図 4.1.2(1)①d(b)-1 に示す。外観上の不良なく造形が完了したことを確認した。

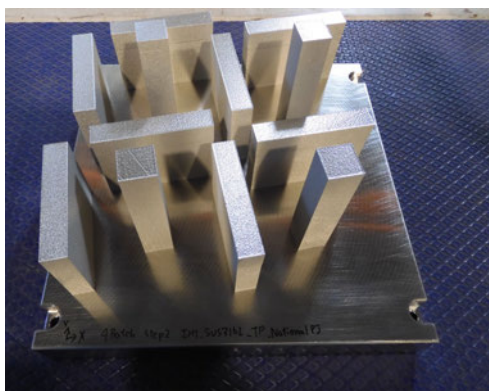


図 4.1.2(1)①d(b)-1 造形後外観(IHI)

(c)熱処理結果

図 4.1.2(1)①d(a)-1 に示した造形物に対し、図 4.1.2(1)①d(c)-1 に示す通り、点線位置を境に半数の 6 本を HIP+固溶化熱処理の対象とし、もう半数の 6 本を固溶化熱処理の対象とした。熱処理の手順として、まず図 4.1.2(1)①d(c)-1 の点線位置で切断後、リコート下流側の 6 本をプレートに付いたまま表 4.1.1(2)①d-2 の条件にて HIP を実施した。次に HIP を完了したリコート下流側の 6 本と、リコート上流側の 6 本に対し、プレートに付いたまま表 4.1.1(2)①d-3 の条件にて 1 バッチで固溶化熱処理を実施した。

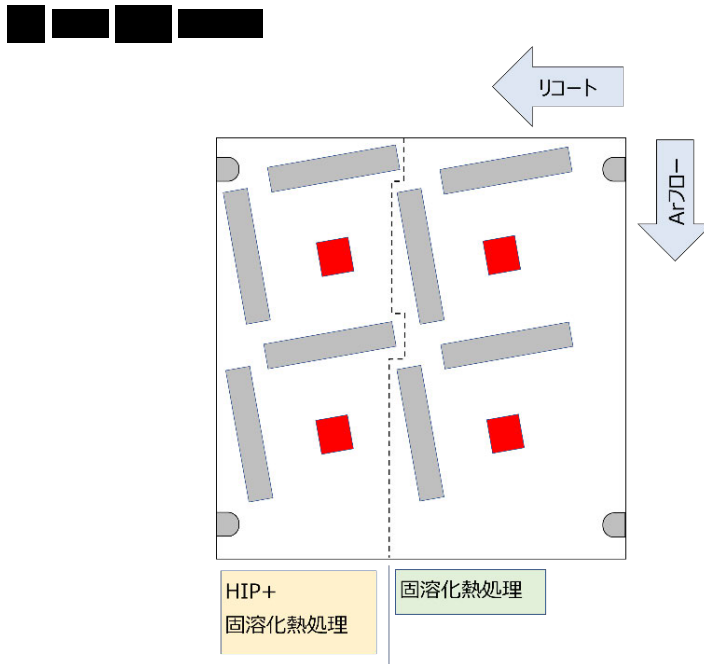


図 4.1.2(1)①d(c)-1 造形物 HIP 及び固溶化熱処理対象(IHI)

② DED 法

a. MHI

(a) 造形方案

図 4.1.2(1)②a(a)-1 に物性値取得向け造形材の造形方案を示す。試験は積層方向、造形パス方向、造形パスに直交する方向の3方向に対して実施されるため、必要量を考慮して、3つのブロック状の造形材をベースプレート上に配置した。試験片は造形した各ブロックより切り出して作成するが、半分は固溶化熱処理に供された試験片を準備する必要があるため、各造形材を2等分して、半分は造形まま、半分は固溶化熱処理に供する試材とした。

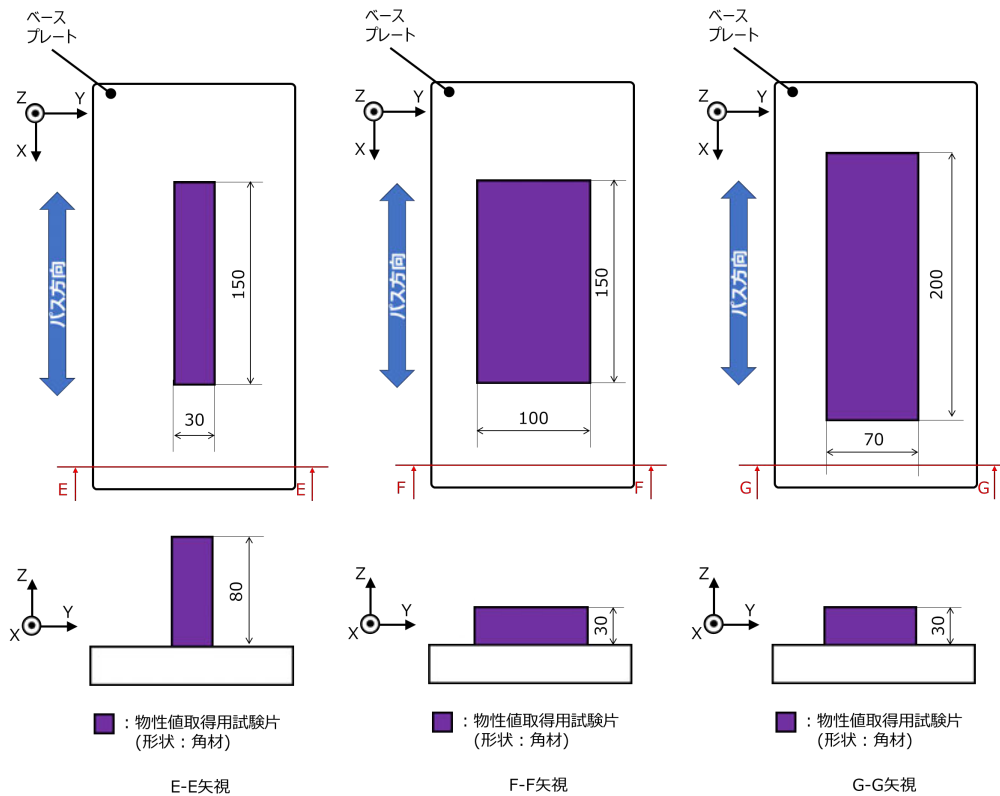


図 4.1.2(1)②a(a)-1 造形方案 (MHI)



(b) 造形結果

表 4.1.1(2)②c-1 の条件を用い、造形後の外観を図 4.1.2(1)②a(b)-1 に示す。  
外観上の不良なく造形が完了したことを確認した。



図 4.1.2(1)②a(b)-1 造形後外観(MHI)

(c) 熱処理結果

図 4.1.2(1)②a(a)-1 に示した造形物について、造形後に各造形材を 2 等分して、半分は造形まま、半分は固溶化熱処理に供した。固溶化熱処理用試材は、熱処理時の寸法制約からベースプレートを切離した。分割位置は図 4.1.2(1)②a(c)-1 の通りである。二等分した外観写真を図 4.1.2(1)②a(c)-2 に示す。

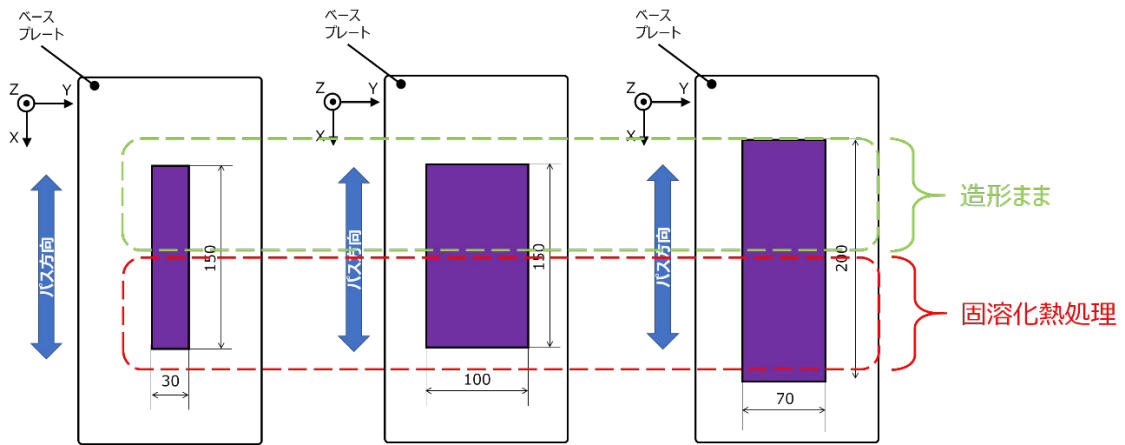
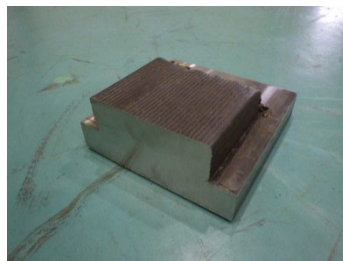


図 4.1.2(1)②a(c)-1 固溶化熱処理の実施有無



熱処理なし(造形まま)



熱処理なし(造形まま)



熱処理なし(造形まま)



熱処理あり



熱処理あり



熱処理あり

図 4.1.2(1)②a(c)-2 2 等分した試材の外観写真

## 5. 2022 年度以降実施試験の試験計画策定

2021 年度は国内外の他産業界を含む規格化動向の調査結果に基づき、規格化に向けた材料データベース策定方針の検討を行い、材料データ取得計画を策定した。本項では、抽出した各試験項目および 2022 年度の成果を踏まえて、2023 年度以降に実施する試験項目の具体的な試験計画を策定した。2023 年度以降に実施する試験項目は以下のとおりである。

### STEP 1：検証プロセス方法の妥当性確認

- (1) 常温引張試験

### STEP 2：規格化に向けた材料データの取得

- (1) 常温引張試験
- (2) 高温引張試験
- (3) 疲労試験
- (4) 硬さ試験
- (5) 腐食試験
- (6) SCC 試験
- (7) 組織試験
- (8) 化学分析
- (9) 材料物性試験（線膨張係数、熱伝導率、温度伝導率、縦弾性係数、ポアソン比）
- (10) 非破壊検査

### STEP 3：モックアップ検証方法の妥当性確認

- (1) PBF 法
- (2) DED 法

## 5.1 STEP 1：検証プロセス方法の妥当性確認

### 5.1.1. 常温引張試験

STEP1 の常温（10～35℃）での引張試験は、PBF AM 材から採取した引張試験片を対象に、試験を実施する（4 バッチ、垂直方向 75 本、水平方向 39 本、45°方向 12 本、試験片製作結果は 3.2.1 章に記述した）。常温引張試験は JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」に従い実施する。

引張試験速度について、ISO 6892-1 “Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature (MOD)”では、ひずみ速度制御法による方法を方法 A、応力増加速度制御による方法を方法 B として規定している。これを基にした JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」では、方法 A を附属書 JB、方法 B を本編で規定している。引張試験では、降伏点までとそれ以降とで試験速度を変更するのが一般的である。JIS Z 2241 附属書 JB (方法 A)では、降伏点までは  $2.5 \times 10^{-4} \pm 0.5 \times 10^{-4} / \text{s}$  ( $=2.0 \sim 3.0 \times 10^{-4} / \text{s}$ )、引張強さまでは  $6.7 \times 10^{-3} \pm 1.33 \times 10^{-3} / \text{s}$  ( $=5.37 \sim 8.03 \times 10^{-3} / \text{s}$ ) が推奨されている。また、JIS Z 2241 本編 (方法 B)では、降伏点までは  $3 \sim 30 \text{MPa} / \text{s}$ 、引張強さまでは  $3 \sim 8 \times 10^{-3} / \text{s}$  と規定している。本試験では、方法 A に基づくひずみ速度制御の引張試験方法を候補とする。この場合、降伏点までは、 $2.0 \sim 3.0 \times 10^{-4} / \text{s}$ 、引張強さまでは  $5.37 \sim 8 \times 10^{-3} / \text{s}$  を推奨条件とする。

なお、常温引張試験の評価項目は、引張強さ、耐力、伸び、絞り、応力ひずみ線図とする。STEP1 の常温引張試験概要（案）を下記に示す。

AM 造形：PBF

熱処理：SA

試験片位置：垂直方向 75 か所（25 か所×3 部位（上部、中部、下部））

水平方向 39 か所（13 か所×3 部位（上部、中部、下部））

45°方向 12 か所（12 か所×1 部位（下部））

適用規格：JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」

試験片形状：14A 号試験片（φ4 又は φ6）

試験速度： $2.0 \sim 3.0 \times 10^{-4} / \text{s}$  (降伏点まで)

$5.37 \sim 8 \times 10^{-3} / \text{s}$  (降伏点から引張強さまで)

評価項目：引張強さ、耐力、伸び、絞り、応力ひずみ線図

繰り返し数：1

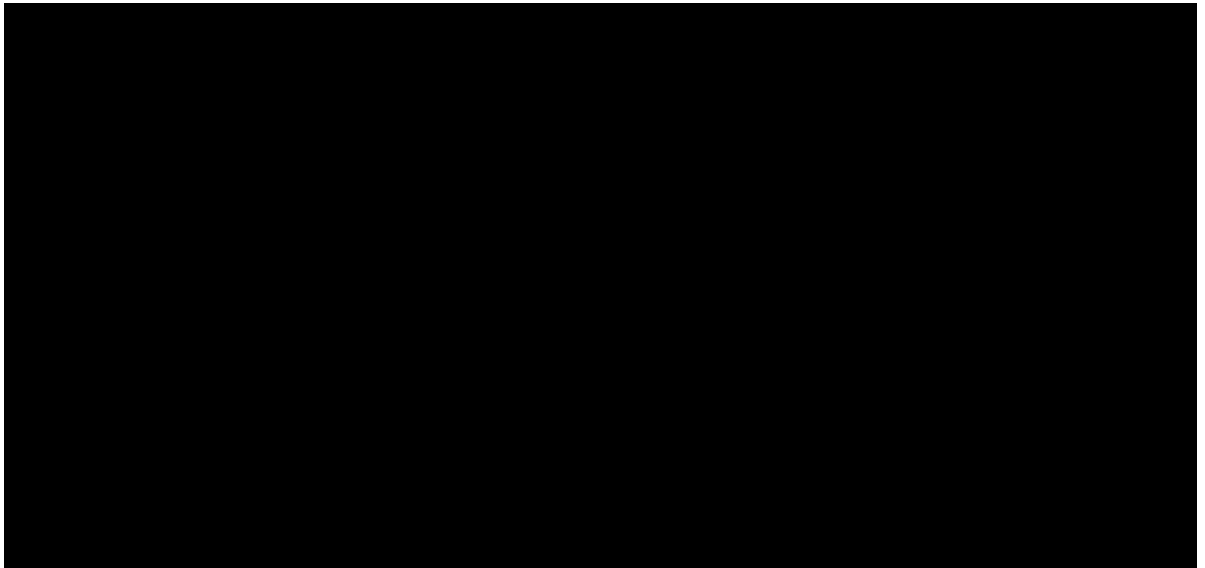


図 5.1.1-1 引張試験片形状例 (JIS Z 2241 14A 号試験片)

## 5.2. STEP 2：規格化に向けた材料データの取得

STEP 2 では、STEP 1 で妥当性を確認した造形プロセスに基づき取得した材料特性データと既存規格データを比較し、AM 材の規格化を検討することを目的として、(1) 常温引張試験、(2) 高温引張試験、(3) 疲労試験、(4) 硬さ試験、(5) 腐食試験、(6) SCC 試験、(7) 組織試験、(8) 化学分析、(9) 材料物性試験（線膨張係数、熱伝導率、温度伝導率、縦弾性係数、ポアソン比）、(10) 破壊靱性特性確認試験、(11) 非破壊検査を実施する。なお、STEP 2 で造形する AM 材の熱処理は、PBF は固溶化熱処理 (Solution annealing: SA)、熱間等方圧加圧法 (Hot Isostatic Pressing: HIP)+SA の 2 条件、DED は熱処理なし (As-build)、SA の 2 条件とする。以下に試験方法、試験条件の案を記載する。

### 5.2.1. 常温引張試験

STEP 1 では、造形位置、採取方向が引張強度に及ぼす影響を把握するため、複数箇所、複数方向を対象に試験を実施する計画とした。STEP 1 でこれらの影響は把握できるものと考えられることから、STEP 2 ではこれらの影響を考慮し、試験片採取位置を決定する。

STEP 2 の常温（10～35℃）での引張試験は、STEP 1 同様、JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」に従い、降伏点までは  $2.0\sim 3.0\times 10^{-4}$  /s、引張強さまでは  $5.37\sim 8\times 10^{-3}$  /s とする。また、引張試験片形状は、JIS Z 2241 で規定され、14A 号試験片とし、寸法は作製可能な AM 造形材寸法に従い決定する。評価項目は、引張強さ、耐力、伸び、絞り、応力ひずみ線図とする。

なお、PBF AM 材について STEP 2 では SA 材及び HIP+SA 材のデータを取得する。また、DED 造形材については、As-build 材（熱処理無し）、SA 材のデータを取得する。STEP 2 の常温引張試験概要（案）を下記に示す。

AM 造形：PBF、DED

熱処理：PBF 造形材：HIP+SA、SA

DED 造形材：As-build、SA

試験片位置：STEP 1 の評価結果を踏まえて決定

適用規格：JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」

試験片形状：14A 号試験片（常温試験）

試験速度： $2.0\sim 3.0\times 10^{-4}$  /s (降伏点まで)

$5.37\sim 8\times 10^{-3}$  /s (降伏点から引張強さまで)

評価項目：引張強さ、耐力、伸び、絞り、応力ひずみ線図

繰り返し数：2



### 5.2.2. 高温引張試験

JSME S NJ1「材料規格 添付 1 新規材料採用ガイドライン」では、常温から最高使用温度より 50°C高い温度までの 50°Cごとのデータを取得することが規定されている。JSME S NJ1「材料規格」で規定される各引張強度の温度条件を加味し、高温試験は、65°C、100°C、150°C、200°C、250°C、350°C、400°C、450°Cの 8 条件とする。また高温引張試験は、JIS G 0567「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」に従い、実施する。JIS G 0567では、ひずみ速度制御による試験方法（方法 A）およびひずみ速度範囲を拡大した試験方法（方法 B）を規定している。ここで、方法 B について JIS G 0567では、金属のひずみ速度感受性は、常温よりも高温の方がより高い可能性があり、試験速度が規定範囲内であっても、測定する特性の値に影響を与える場合がある、としている。また、一方、方法 A は、ISO 6892-2 “Metallic materials — Tensile testing — Part 2: Method of test at elevated temperature”の大幅改訂に伴い、ISO 6892-2 を基に新たに追加された方法であることから、方法 A を採用するのが望ましいと考えられる。なお、方法 A において、特に規定のない限り推奨する試験速度として、降伏点までは  $7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \pm 20\%$  ( $=5.6 \sim 8.4 \times 10^{-5} \text{ /s}$ )、引張強さまでは  $1.4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \pm 20\%$  ( $=1.12 \sim 1.68 \times 10^{-3} \text{ /s}$ ) としている。試験片形状は、変位を正確に測るため、JIS G 0567 で規定するつば付き試験片とする。図 5.2.2-1 に試験片形状例を示す。寸法は作製可能な AM 造形材により決定する。また、引張試験片を採取可能な造形部材の寸法として、 $20 \times 20 \times 80 \text{ mm}$ 、 $15 \times 15 \times 80 \text{ mm}$  又は  $10 \times 10 \times 80 \text{ mm}$  を候補とする。評価項目は、引張強さ、耐力、伸び、絞り、応力ひずみ線図とし、繰り返し数はいずれも 2 とする。

高温引張試験についての検討結果を下記に示す。

AM 造形：PBF、DED

熱処理：PBF 造形材：HIP+SA、SA

DED 造形材：As-build、SA

試験片位置：STEP 1 の評価結果を踏まえて決定

適用規格：JIS G 0567「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」

試験片形状：JIS G 0567 つば付き試験片

試験温度：65°C、100°C、150°C、200°C、250°C、350°C、400°C、450°C

試験速度： $5.6 \sim 8.4 \times 10^{-5} \text{ /s}$ （降伏点まで）

$1.12 \sim 1.68 \times 10^{-3} \text{ /s}$ （降伏点から引張強さまで）

評価項目：引張強さ、耐力、伸び、絞り、応力ひずみ線図

繰り返し数：2



図 5.2.2-1 試験片形状例 (JIS G 0567 つば付き試験片)

### 5.2.3. 疲労試験

JSME S NC1「設計・建設規格」<sup>[5-2-1]</sup>ではオーステナイト系ステンレス鋼の設計疲労線図が定められており、AM材の疲労特性を把握するため、本事業で取得するAM材の疲労試験データをこの設計疲労線図と比較する。図 5.2.3-1 に設計建設規格で定めるSUS316の設計疲労曲線の例を示す。繰り返しピーク応力強さは許容繰り返し回数の増加に伴い減少するが、繰り返し回数が $1 \times 10^7$ 程度からほぼ横ばいとなっている。そのため、疲労試験の許容繰り返し回数の上限値は $1 \times 10^7$ を目標とし、設計疲労線図との傾向比較のため、他の繰り返し回数は $5 \times 10^2$ 、 $1 \times 10^3$ 、 $3 \times 10^3$ 、 $1 \times 10^4$ 、 $1 \times 10^5$ 、 $1 \times 10^6$ を目標とする。また、バラつきを考慮し、各繰り返し数の条件に対し、試験員数は2とする。引張圧縮疲労試験について、高サイクル疲労試験のJIS規格は廃止となっている。また、低サイクル疲労試験については、JIS Z 2279「金属材料の高温低サイクル疲労試験方法」があるが、高温環境での試験を対象とした規格である。そのため、高サイクル疲労試験についてはASTM E 466 “Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axis Fatigue Tests of Metallic Materials”又はASTM E 606 “Standard Test Method for Strain – Controlled Fatigue Testing”、低サイクル疲労試験についてはASTM E 606 “Standard Test Method for Strain – Controlled Fatigue Testing”が候補と考える。試験片採取位置STEP1の引張特性評価結果を踏まえて決定し、試験片寸法は作製可能なAM造形材寸法に従い決定する。

なお、既存知見<sup>[5-2-2]</sup>にて、欠陥サイズ（面積）、試験片の表面粗さ、等と疲労特性の相関性は報告されたため、本事業で取得する疲労試験結果（破面観察結果を含めて）を用いて組織試験結果（5.2.7項）、非破壊検査結果（5.2.11項）との相関性を評価する。疲労試験の概要（案）を下記に示す。

AM造形：PBF、DED

熱処理：PBF造形材：HIP+SA、SA

DED造形材：As-build、SA

試験片位置：STEP1の評価結果を踏まえて決定

採取方向：1方向

適用規格：高サイクル疲労試験: ASTM E 466 又は ASTM E 606

目標繰り返し回数： $1 \times 10^5$ 、 $1 \times 10^6$ 、 $1 \times 10^7$

低サイクル疲労試験: ASTM E 606

目標繰り返し回数： $5 \times 10^2$ 、 $1 \times 10^3$ 、 $3 \times 10^3$ 、 $1 \times 10^4$

試験員数：2

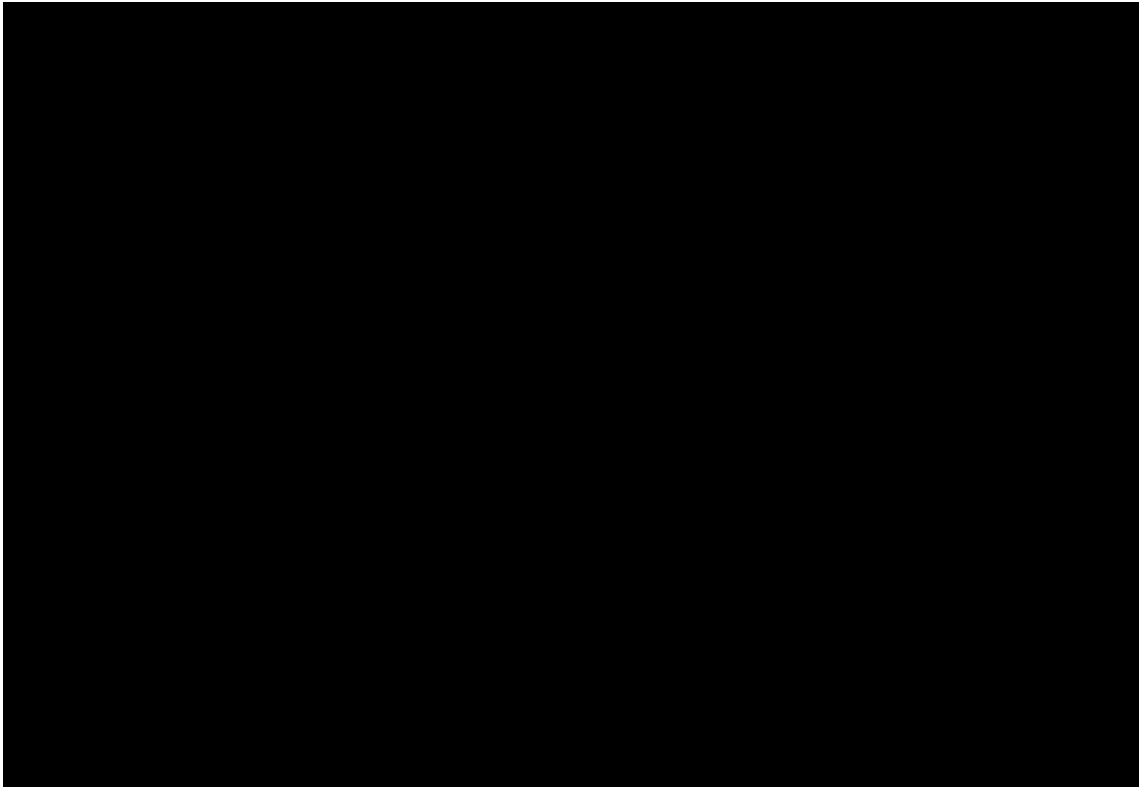


図 5.2.3-1 SUS316 の設計疲労曲線の例(JSME) <sup>[5-2-1]</sup>

#### 5.2.4. 硬さ試験

STEP 1 では、造形位置の金属組織に及ぼす影響を把握するため、複数箇所を対象に硬さ試験を実施する計画とした。STEP 1 で造形位置の影響は把握できるものと考えられるため、STEP 2 の造形位置は、STEP 1 の評価結果を踏まえて決定する。一方、造形方向の影響を把握しておくため、STEP 2 では、造形方向 3（水平 2 方向、垂直 1 方向）の AM 造形材から試験片を採取し、硬さ試験を実施することが考えられる。作製した試験片に対し、STEP 1 同様、JIS Z 2244-1「ビッカース硬さ試験—第 1 部：試験方法」に従い、硬さ測定を行う。測定点数は各 5 点とする。なお、PBF については SA 材及び HIP+SA 材のデータを取得する。DED については、As-build 材、SA 材のデータを取得する。

硬さ試験の概要（案）を下記に示す。

AM 造形：PBF、DED

熱処理：PBF 造形材：HIP+SA、SA

DED 造形材：As-build、SA

試験片位置：STEP 1 の評価結果を踏まえて決定

適用規格：JIS Z 2244-1「ビッカース硬さ試験—第 1 部：試験方法」

測定点数：各試験片に対し、5 点

測定面：X-Y 面、Y-Z 面

#### 5.2.5. 腐食試験

JIS G 4303「ステンレス鋼棒」、JIS G 4304「熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯」では、要求がある場合、腐食試験を実施することが規定されており、JIS G 0571「ステンレス鋼のしゅう酸エッチング試験方法」、JIS G 0572「ステンレス鋼の硫酸・硫酸第二鉄腐食試験方法」、JIS G 0573「ステンレス鋼の65%硝酸腐食試験方法」、JIS G 0575「ステンレス鋼の硫酸・硫酸銅腐食試験方法」のいずれの方法で実施しても良いとされている。一方、JIS G 5121「ステンレス鋼鋳鋼品」では、要求がある場合実施する腐食試験は、硫酸・硫酸銅腐食試験とすることが規定されている。そのため、腐食試験としては、いずれの規格でも共通して提示されているJIS G 0575「ステンレス鋼の硫酸・硫酸銅腐食試験方法」を候補とする。本試験法は、採取した試験片を沸騰硫酸・硫酸銅溶液中に入れて試験したのち、曲げ試験による割れの観察を行って、粒界腐食の有無・程度を評価するものである。

試験片造形位置については、STEP 1の評価結果を踏まえて決定することとし、造形方向が耐食性に及ぼす影響を把握するため、3方向（水平2方向、垂直1方向）のAM造形材から試験片を採取することが考えられる。なお、JIS G 0575では試験片員数に関する規定はないが、JIS G 4303およびJIS G 4304では、同一溶綱、同一熱処理条件ごとに1個としているため、繰り返し数は3とする。

腐食試験の概要（案）を下記に示す。

AM造形：PBF、DED

熱処理：PBF 造形材：HIP+SA、SA

DED 造形材：As-build、SA

試験片位置：STEP 1の評価結果を踏まえて決定

造形方向：3方向（水平2方向、垂直1方向）

適用規格：JIS G 0575「ステンレス鋼の硫酸・硫酸銅腐食試験方法」

繰り返し数：3

試験装置、試験溶液、試験片切断方法および切断後の処理は、JIS G 0575に準拠した要領とする。JIS G 0575では評価対象の鋼材の形状によって試験片寸法が規定されているが、本検討対象のAM材は”棒材”に相当するため、造形部材を規定に従って厚さ5mm以下、幅25mm以下、長さ30mm以下に加工する。また、AM材では製造時の表面粗さが材料の耐食性や試験結果に影響する可能性がある。その影響有無を評価するため、試験片は、造形部材の中央部および表面側のそれぞれ1体を採取して試験に供することとする。本検討対象のSUS 316L材は、鋭敏化熱処理条件の対象となる極低炭素鋼種（炭素0.030%以下）に該当するため、鋭敏化熱処理を実施する。鋭敏化熱処理の条件はJIS G 0575に従う。試験片採取要領・寸法を図5.2.5-1に示す。

試験条件（案）を下表 5.2.5-1 に示す。試験片の曲げ条件については、JIS G 0575 で製作プロセスにより分類されているうちの「鋳鋼品」の規定に沿うこととし、曲げ半径を試験片厚さの 2 倍以内、曲げ角度を $\geq 90^\circ$  とした。

結果の評価は、JIS G 0575 では試験後の曲げ面の外側の頂を拡大鏡（5～15 倍）、もしくは頂の面を顕微鏡（100～200 倍）で観察し、粒界腐食の有無を調べることとしている。一方で腐食有無のみでの判定は定量性に欠けるため、いずれの試験片も粒界腐食が発生した場合、製法や熱処理による優劣を判断できない可能性がある。したがって、粒界腐食が見られた場合は断面観察による腐食深さの計測を実施し、耐食性の定量比較を実施する。

以上より、結果の報告に際しては、下表 5.2.5-2 に示す項目を報告することとする。

表 5.2.5-1 試験条件（案）

項目	条件
液成分	沸騰 15.7%硫酸+5.5%硫酸銅
液量	試験片の表面積 1cm <sup>2</sup> 当たり 8ml 以上とする
試験時間	16 時間
曲げ半径	試験片厚さの 2 倍以内
曲げ角度	$\geq 90^\circ$
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 試験片は、試験中に常に銅片と接触させる</li> <li>・ 一つの試験溶液中で試験する試験片の数は、液量の制限範囲内であれば何個でもよい</li> <li>・ 表面粗さ評価用試験片の場合は、製造時の表面が曲げの外側となるようにする</li> </ul>

表 5.2.5-2 試験結果の報告事項

項目	備考
腐食試験後の外観観察結果	試験片の曲げ頂部外側全体の外観状況を記録
腐食試験後の断面観察結果	試験片の曲げ頂部外側全体の断面像を記録
粒界腐食深さ	粒界腐食が見られる場合、断面観察において腐食深さを計測して記録

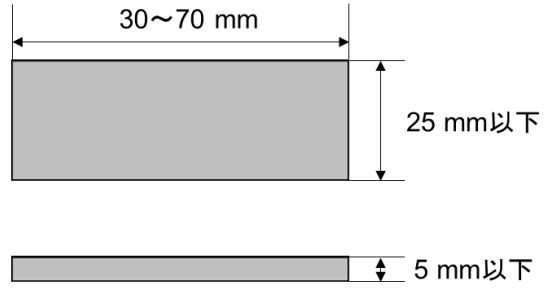


図 5.2.5-1 腐食試験片寸法



### 5.2.6. SCC 試験

耐 SCC 性を確認するためには、SCC 発生試験と SCC 進展試験が考えられる。AM 材と従来材を比較することを想定すると、SCC 発生試験ではいずれも SCC が発生しない場合、両者の比較が難しい可能性がある。一方、SCC 進展試験では SCC を進展させて評価をするため、両者の耐 SCC 性を定量的に評価できると考えられる。そのため、まずは SCC 進展試験により耐 SCC 性を確認することとする。

#### (1) BWR 環境の SCC 進展試験

AM 材による BWR 環境の SCC 進展試験結果例<sup>[5 2-2]</sup>を図 5.2.6-1 に示す。SCC 進展速度は試験片採取方向により異なり、X-Z 方向（SCC 進展方向は積層方向）と Z-X 方向（SCC 進展方向は積層方向と垂直）では X-Z 方向の試験片の方が SCC 進展速度が速くなっている。SCC 進展方向が AM 造形方向である Z 方向（積層方向）となるようにする方が進展速度が速く、保守的なデータとなると考えられることから、X-Z 方向に試験片を採取する。また、同研究<sup>[5 2-3]</sup>により、PBF AM 材 SCC 進展速度は熱処理条件により異なり、SA 処理のみの造形材の SCC 進展速度は HIP+SA 材より速くなっているため、保守的なデータ取得の観点から、PBF AM 材の熱処理条件は、SA のみとする。DED AM 材は熱処理なし及び SA 処理材とのこととする。AM 材の SCC 進展試験の知見<sup>[5 2-2]</sup>では、ASTM E 647 に従い、試験片寸法として 0.5TCT 試験片（厚さ 12.7mm、幅 25.4mm）を採用しており、本事業でも同様に 0.5TCT 試験片を採用する。また、応力拡大係数  $K$  値も知見と同様に  $25-30\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  とする。試験温度は BWR 環境（288℃）を考慮し設定する。BWR 環境の SCC 進展試験の水質条件は通常炉内水質環境（Normal Water Chemistry, 以降 NWC と称す。）を設定する。なお、試験片員数は、PBF 造形材は 1 本×4 造形バッチ、DED 造形材は 2 本（熱処理なし 1 本、SA 材 1 本）×1 造形バッチとする。SCC 進展試験の評価項目は試験中の水質条件（腐食電位、pH、溶存酸素濃度等）、試験後の破面観察及び SCC 進展速度とする。

本試験で取得するデータを用いて、JSME S NA1-2016, 「維持規格」<sup>[5 2-4]</sup>ではオーステナイト系ステンレス鋼（鋭敏化 SUS304 鋼及び低炭素系ステンレス鋼）の SCC 進展線図（図 5.2.6-3）が定められており、本事業で取得する AM 材の SCC 試験データをこの SCC 進展線図及び既存知見と比較評価する。

BWR 環境での SCC 試験の概要（案）を以下に示す。

AM 造形 : PBF、DED

試験形状 : SCC 進展試験

試験片形状: ASTM E 647 の 0.5TCT 試験片

熱処理 : PBF 造形材 : SA

DED 造形材 : As-built、SA

試験片位置 : STEP 1 の評価結果を踏まえて決定 (PBF AM 材)

採取方向 : X-Z 方向

試験温度 : 288°C (BWR)

水質条件 : NWC (BWR)

試験員数 : PBF 造形材 : SA (1 本 × 4 バッチ)

DED 造形材 : As-build (1 本)、SA (1 本)

繰り返し数 : 1

## (2) PWR 環境の SCC 進展試験

AM 造形の熱処理並びに試験片採取方向及び試験片寸法は上記(1)と同様とする。水質条件は PWR1 次系を模擬した環境を想定し、温度は 325°C とする。なお、オーステナイト系ステンレス鋼の 1 次系環境における SCC 進展速度は、この温度付近で最大となるとされる。荷重負荷条件は EPRI ガイドライン<sup>[5 2-5]</sup>に準拠し、定期的除負荷した後定荷重に遷移する条件とする。この定期的除負荷の目的は、疲労亀裂先端部をデンドライト境界に到達させることであり、1000hr を目安に実施するが、亀裂進展状況に応じて短縮又は延長する。得られた SCC 進展速度データは MRP-458 等の公開文献で報告されている SCC 進展速度データと比較評価を行う。そのため、最大 K 値は MRP-458<sup>[5 2-6]</sup>を参考としてデータ数が最も多い 30 MPa√m とする。また、既存知見<sup>[5 2-6]</sup>で報告されているように、硬さと SCC 進展速度には相関があることから、得られた SCC 進展速度データは硬さ値を考慮した比較評価を行う。供試材について、PBF は各社製造の造形体を 1 体ずつの計 4 体を測定する。DED は MHI で製造した造形体を対象とし、造形まま材および固溶化熱処理材の計 2 体とする。PWR 環境での SCC 試験の概要（案）を以下に示す。

### < 供試体 >

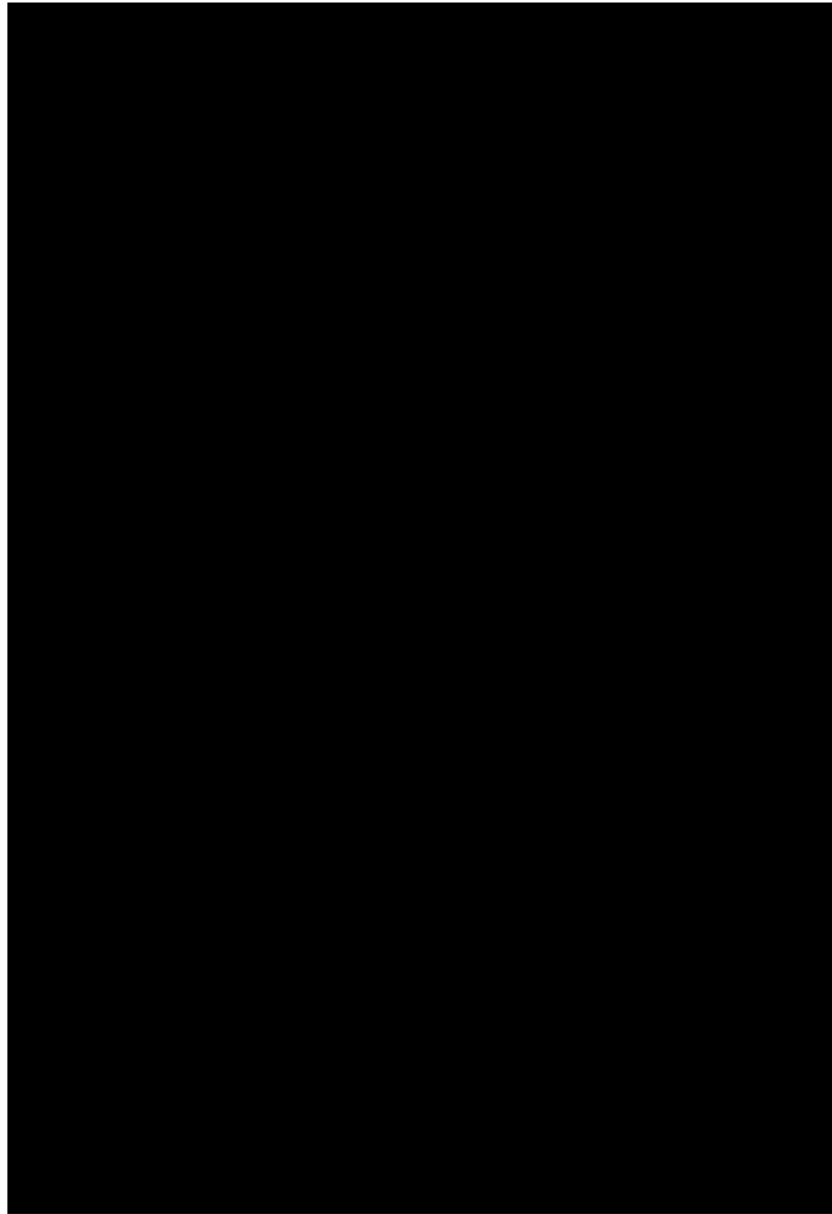
AM 造形	: PBF、DED
試験片形状	: ASTM E 647 の 0.5TCT 試験片
熱処理	: PBF : SA の 1 条件 DED : As built、SA の 2 条件
採取方向	: X-Z 方向
試験片数	: PBF : 4 (各社で製造した造形体 1 体ずつの計 4 体) DED : 2 (製造は MHI、As built と SA の計 2 体)

### < 試験条件 >

温度	: 325°C
K 値	: 30 MPa√m
試験時間(目安)	: 定期的除負荷 1000hr、定荷重 1500hr
水質条件	: PWR1 次系模擬水
モニタリング方法	: DCPD 法



(a) 試驗片採取方向



(b) 試驗結果

圖 5.2.6-1 SCC 進展試驗結果例<sup>[5.2-2]</sup>



図 5.2.6-2 オーステナイト系ステンレス鋼（鋭敏化 SUS304 鋼、低炭素系ステンレス鋼）  
の BWR 通常炉内水質環境中の SCC 亀裂進展速度線図<sup>[5-2-3]</sup>

### 5.2.7. 組織試験

STEP 1 では、造形位置の金属組織に及ぼす影響を把握するため、複数箇所を対象に組織試験を実施する計画とした。STEP 1 で造形位置の影響は把握できるものと考えられることから、STEP 2 の造形位置は、STEP 1 の評価結果を踏まえて決定する。STEP 2 では、造形方向の影響を把握するため、3 方向（水平 2 方向、垂直 1 方向）に作製した AM 造形物から試験片を採取し、組織試験を実施する。採取した試験片に対し、JIS G 0553「鋼のマクロ組織試験方法」に従い、樹脂埋め、研磨、エッチングした上で、組織試験を行う。また、各試験片に対し、マクロ観察 1 領域、ミクロ組織試験 3 領域の組織試験を行う。ミクロ組織試験は 1 領域を 2 つの倍率（x100、x400 等）で行う。なお、PBF については STEP 1 で SA 材、HIP+SA 材のデータのみを取得する。

組織試験の概要（案）を下記に示す。

AM 造形：PBF、DED

熱処理：PBF 造形材：HIP+SA、SA

DED 造形材：As-build、SA

試験片位置：STEP 1 の評価結果を踏まえて決定

造形方向：3 方向（水平 2 方向、垂直 1 方向）

適用規格：JIS G 0553「鋼のマクロ組織試験方法」

観察領域：4 領域（マクロ領域：1 領域、ミクロ領域：3 領域）

観察倍率：マクロ観察 1 倍率、ミクロ観察 2 倍率（x100、x400 等）

#### 5.2.8. 化学分析

分析する元素としては、STEP 1 と同様、SUS316L の JIS 規格で規定のある C、Si、Mn、P、S、Ni、Cr、Mo およびガス成分である O、N を対象とする。また STEP1 同様、JIS G 0321 「鋼材の製品分析方法及びその許容変動値」に従い、化学分析をする。

STEP 1 では、造形位置の化学成分に及ぼす影響を把握するため、複数個所を対象に化学分析を実施する計画とした。STEP 1 で造形位置の影響は把握できるものと考えられることから、STEP 2 では、造形方式および各熱処理毎に代表造形物から 1 ヶ所ずつ試験片を採取し化学分析を実施することとする。なお、PBF について SA 材、HIP+SA 材のデータのみを取得する。DED については As-build 材、SA 材のデータを取得する。化学分析の概要（案）を下記に示す。

AM 造形：PBF、DED

熱処理：PBF 造形材：HIP+SA、SA

DED 造形材：As-build、SA

試験片位置：造形方式および各熱処理毎に代表造形物から 1 ヶ所ずつ

適用規格：JIS G 0321 「鋼材の製品分析方法及びその許容変動値」

分析対象：C、Si、Mn、P、S、Ni、Cr、Mo、O、N

### 5.2.9. 材料物性試験（線膨張係数、熱伝導率、温度伝導率、縦弾性係数、ポアソン比）

試験片採取位置については、STEP 1 の評価結果を踏まえて決定することとし、造形方向が材料物性値に及ぼす影響を把握するため、3 方向（水平 2 方向、垂直 1 方向）の AM 造形材から試験片を採取する。

#### (a) 線膨張係数

JSME S NJ1 「材料規格」では、オーステナイト系ステンレス鋼の線膨張係数は、20°C（常温）、50°C、75°C、100°C、125°C、150°C、175°C、200°C、225°C、250°C、275°C、300°C、325°C、350°C、375°C、400°C、425°C の 17 条件の値が規定されている。これらのデータと比較することを勘案すると、同様に 17 条件の線膨張係数のデータを取得する。

#### (b) 熱伝導率、温度伝導率

熱伝導率、温度伝導率については、材料規格に規定はないが、温度依存性を把握する観点から、線膨張係数と同様に 17 条件でデータを取得する。

#### (c) 縦弾性係数、ポアソン比

オーステナイト系ステンレス鋼の縦弾性係数は、材料規格において、-75°C、25°C（常温）、100°C、150°C、200°C、250°C、300°C、350°C、400°C、450°C の 10 条件の値が規定されており、これらのデータと比較することを勘案すると、同様に 10 条件の縦弾性係数のデータを取得する。また、ポアソン比についても同様に 10 条件とする。なお、線膨張係数については JIS Z 2285 「金属材料の線膨張係数の測定方法」、熱伝導率、温度伝導率については JIS R 1611 「ファインセラミックスのフラッシュ法による熱拡散率・比熱容量・熱伝導率の測定方法」、縦弾性係数、ポアソン比については JIS Z 2280 「金属材料の高温ヤング率試験方法」に従う。繰り返し数はいずれも 1 とする。

材料物性試験の概要（案）を下記に示す。



AM 造形 : PBF、DED

熱処理 : SA、HIP+SA (PBF)

熱処理なし、SA (DED)

試験片位置 : STEP 1 の評価結果を踏まえて決定

造形方向 : 3 方向 (水平 2 方向、垂直 1 方向)

適用規格 : JIS Z 2285 「金属材料の線膨張係数の測定方法」

JIS R 1611 「ファインセラミックスのフラッシュ法による熱拡散率・比熱容量・熱伝導率の測定方法」

JIS Z 2280 「金属材料の高温ヤング率試験方法」

温度条件 : 線膨張係数、熱伝導率、温度伝導率

20°C (常温)、50°C、75°C、100°C、125°C、150°C、175°C、200°C、  
225°C、250°C、275°C、300°C、325°C、350°C、375°C、400°C、425°C

縦弾性係数、ポアソン比

-75°C、25°C (常温)、100°C、150°C、200°C、250°C、300°C、350°C、  
400°C、450°C

繰り返し数 : 1

#### 5.2.10. 破壊靱性特性の確認試験

STEP 2 の破壊靱性特性の確認試験の試験片採取位置は STEP 1 の試験結果を踏まえて、決定する。AM 材の破壊靱性特性確認に関して、シャルピー衝撃試験及び破壊靱性試験は考えられる。シャルピー衝撃試験は、JIS Z 2242「金属材料のシャルピー衝撃試験方法」に従い、試験温度の案は過去研究<sup>[5-2-7]</sup>を参考に-200°C、-150°C、-100°C、0°C、RT、100°C、200°C、288°C、325°Cを考えられるが、試験結果をふまえて、必要に応じて調整する。シャルピー衝撃試験片形状は、JIS Z 2241 で規定され、標準試験片（V ノッチ、幅 10mm）とする。評価項目は、吸収エネルギー、延性破面率、横膨出量とする。

また、破壊靱性試験は ASTM E 1820「Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness」に従い、室温及び高温条件で実施する。破壊靱性試験片形状及び寸法は、ASTM E 1820 で規定され、0.5 TCT とする。評価項目は予亀裂導入結果、J-R 曲線、破壊靱性  $J_{Ic}$  及び試験後の破面とする。取得するシャルピー衝撃試験結果及び破壊靱性試験結果は既存知見との比較評価を実施する。

なお、PBF AM 材について STEP 2 では SA 材及び HIP+SA 材のデータを取得する。また、DED 造形材については、As-build 材（熱処理無し）、SA 材のデータを取得する。STEP2 のシャルピー衝撃試験及び破壊靱性試験概要（案）を下記に示す。

##### シャルピー衝撃試験

AM 造形：PBF、DED

熱処理：PBF 造形材：HIP+SA、SA

DED 造形材：As-build、SA

試験片位置：STEP 1 の評価結果を踏まえて決定

適用規格：JIS Z 2242「金属材料のシャルピー衝撃試験方法」

試験片形状：標準試験片（V ノッチ、幅 10mm）

試験温度：-200°C、-150°C、-100°C、0°C、RT、100°C、200°C、288°C、325°C

評価項目：吸収エネルギー、延性破面率、横膨出量

繰り返し数：3

##### 破壊靱性試験

AM 造形：PBF、DED

熱処理：PBF 造形材：HIP+SA、SA

DED 造形材：As-build、SA

試験片位置：STEP 1 の評価結果を踏まえて決定

適用規格：ASTM E 1820「Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness」

試験片形状：0.5TCT 試験片

試験温度：室温、高温（既存知見を踏まえて決定）

繰り返し数：2

### 5.2.11. 非破壊検査

STEP 1 で造形位置等が機械的特性に及ぼす影響は把握できているものと考えられ、STEP 2 では、材料品質が確保された領域内で造形するものと考えられる。STEP 2 では AM 材の規格化に向けたデータ取得が目的であることから、疲労試験片、SCC 試験片、及び引張試験片の加工前の AM 造形材に対し内部欠陥有無を確認するため、放射線透過試験 (RT)を実施する。また、加工後の疲労試験片及び引張試験片に対し、浸透探傷試験 (PT)を実施する。RT 及び PT は、STEP 1 と同様に下記の仕様で実施する。

表 5.2.11-1 RT の仕様

項目	内容
適用規格	判定基準：日本機械学会「発電用原子力設備規格 溶接規格」 JSME S NB1-2012 (2013 年追補) 試験方法：日本産業規格「鋼溶接継手の放射線透過試験方法」 JIS Z 3104: 1995 ASTM E192 「Standard Reference Radiographs of Investment Steel Castings for Aerospace Applications」
試験者	JIS Z 2305 に基づく RT 有資格者（レベル 2 以上）
試験方法	工業用 X 線装置を放射線源とした単壁撮影

表 5.2.11-2 PT の仕様

項目	内容
適用規格	判定基準：日本機械学会「発電用原子力設備規格 溶接規格」 JSME S NB1-2012 (2013 年追補) 試験方法：日本産業規格「非破壊試験—浸透探傷試験—第 1 部：一般通則：浸透探傷試験方法及び浸透指示模様分類」 JIS Z 2343-1: 2001 ASTM E165 「Standard Practice for Liquid Penetrant Examination for General Industry」
試験者	JIS Z 2305 に基づく PT 有資格者（レベル 2 以上）
試験方法	溶剤除去性蛍光浸透探傷試験（速乾式現像法） 水洗性染色浸透探傷検査（速乾式現像法）

非破壊検査の概要（案）を下記に示す。

AM 造形：PBF、DED

熱処理：SA、HIP+SA（PBF）

熱処理無し、SA（DED）

試験片位置：STEP 1 の評価結果を踏まえて決定

検査時期：

- ・引張、SCC、シャルピー衝撃試験、破壊靱性試験及び疲労試験片加工前（RT）
- ・引張及び疲労試験片加工後（PT）

以上、5.2.1~5.2.11 を踏まえ、STEP 2 の試験フロー例を図 5.2-1 に示す。

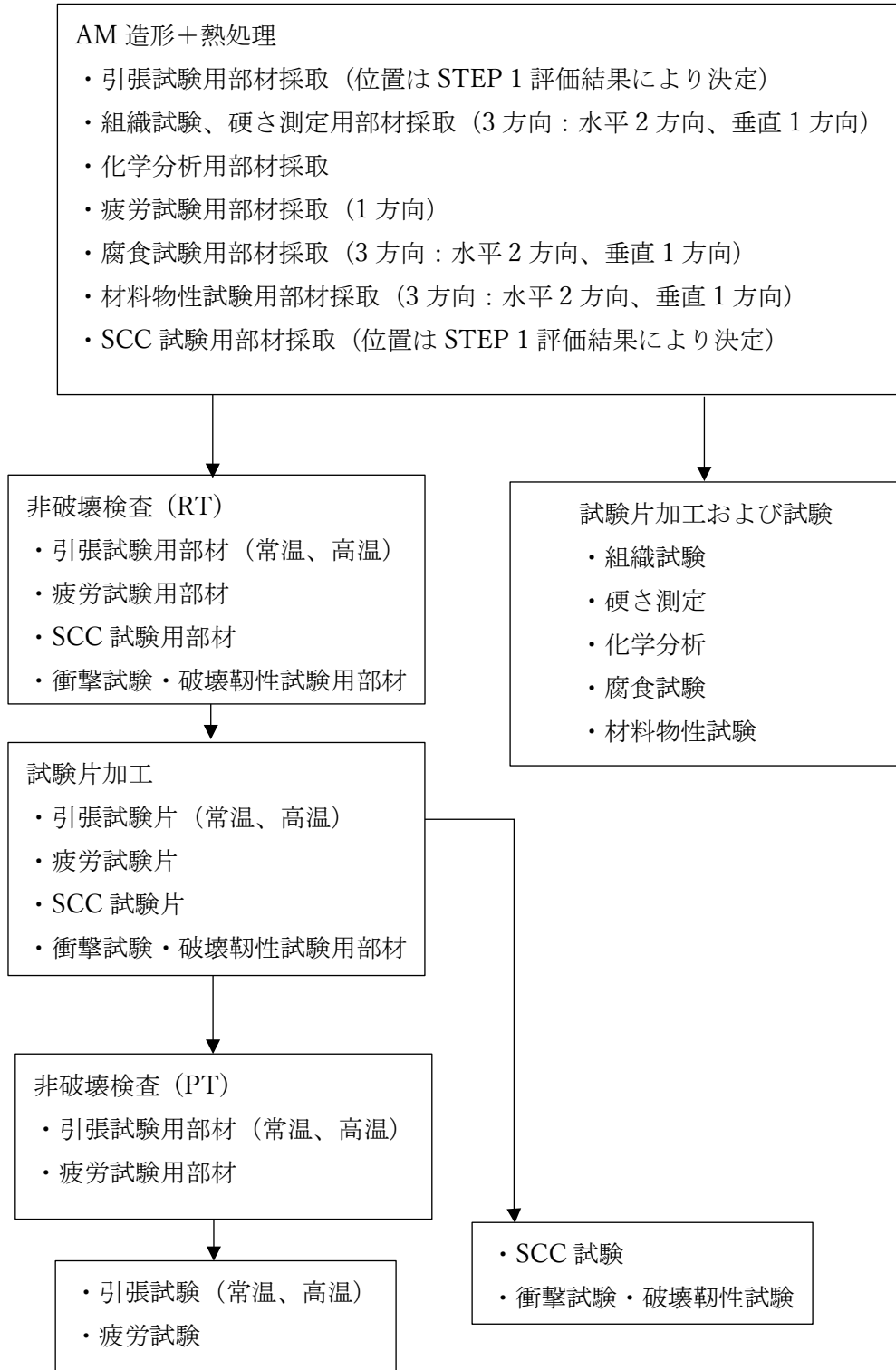


図 5.2-1 STEP 2 の試験フロー

## 参考文献

- [5.2-1] JSME S NF1, “発電用原子力設備規格 環境疲労評価手法”
- [5.2-2] Fatigue of additively manufactured 316L stainless steel: The influence of porosity and surface roughness、Klas Solberg, Shuai Guan, Seyed Mohammad Javad Razavi, Torgeir Welo, Kang Cheung Chan, Filippo Berto. FFEMS, Volume42, Issue9, Special Issue: Advances in Fatigue and Fracture - Celebrating the 40th Anniversary of FFEMS.
- [5.2-3] GE Global Research, “Environmental Cracking and Irradiation Resistant Stainless Steels by Additive Manufacturing”, DE-NE0008428
- [5.2-4] JSME, JSME S NA1-2016, “発電用原子力設備規格 維持規格”, (2016)
- [5.2-5] EPRI Technical report, “Stress Corrosion Cracking Testing Guidelines with Emphasis on High Temperature Water”, Final report, Aug. 2020.
- [5.2-6] MRP-458, “Stress Corrosion Crack Growth Rates in Stainless Steels in PWR Environments (MRP-458)”, Final Report, Aug. 2022.
- [5.2-7] 財団法人 発電設備技術検査協会、「プラント長寿命化技術開発 低合金鋼・ステンレス鋼等腐食環境材料試験」平成6年3月.

### 5.3 STEP3：モックアップ検証方法の妥当性確認

プロトタイプ機器（モックアップ）を製造し、製造したプロトタイプ機器を解体して造形した機器全体の材料特性を把握する試験を計画する。

AM 材の製造は「プロセス検証（製造要領認定）」、「プロトタイプ検証(モックアップ試験)」、「製品試験での検証（製品合否試験）」にて担保されるが、AM では自由な形状を造形することが想定されるため、製品のそばで同時に造形する製品合否試験だけでは、形状や造形条件に起因する機器の最弱部の特性を把握することは難しい場合があると考える。そこで、プロトタイプ機器（モックアップ）を製造し、製造したプロトタイプ機器を解体して特徴的な部位において、試験を実施することにより、形状や造形条件に起因する機器の特性を把握する。

特徴となる要素は、以下に例示するものが想定されるが、これらを考慮することで十分かどうかを確認するための試験を計画する。

- ・製品の厚さ（最厚部・最薄部・遷移部）
- ・傾斜壁部
- ・造形位置・方向による違い

試験としては、解体試験にて取り出した代表部位の試験片に対し、機械特性試験（引張試験、硬さ試験）、化学分析等を行い、相当材の要求値を満足すること、また組織試験や非破壊検査により、合理的に均一であり亀裂や融合欠陥がないことの確認することを計画する。

なお、造形するプロトタイプ機器の詳細や実施する試験の内容については 2023 年度に STEP2 の結果を踏まえて計画する。

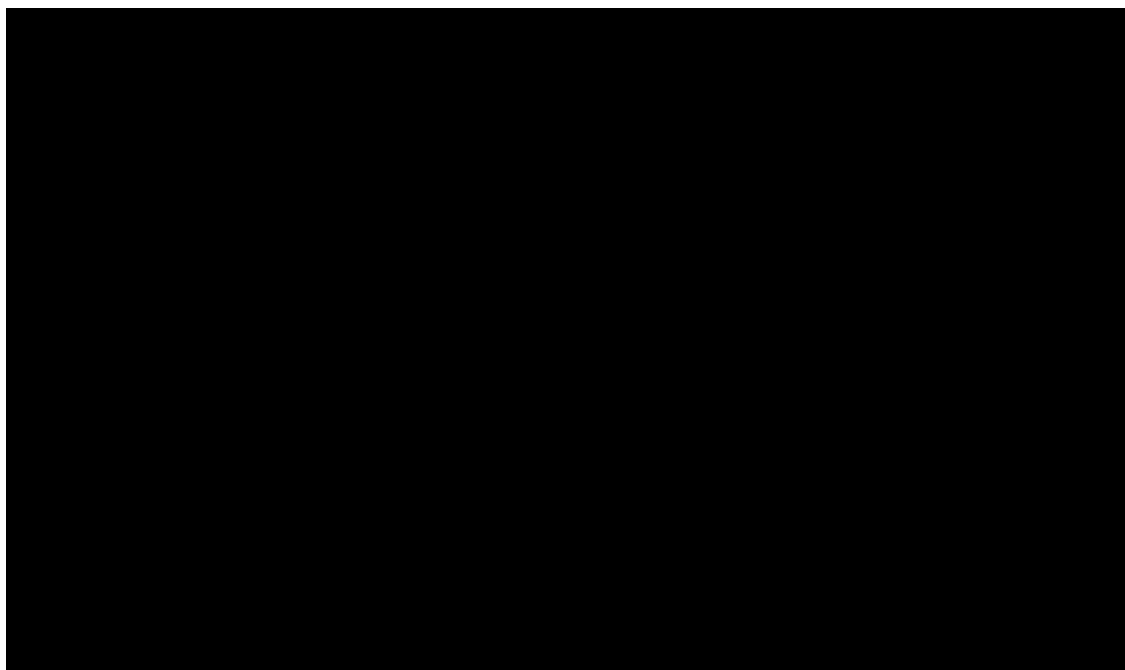


図 5.3-1 プロトタイプ機器（製品）と製品合否試験イメージ<sup>[5.3-1]</sup>

### 5.3.1 PBF 法

詳細については STEP2 の結果を踏まえて 2023 年度に計画する。

### 5.3.2 DED 法

詳細については STEP2 の結果を踏まえて 2023 年度に計画する。

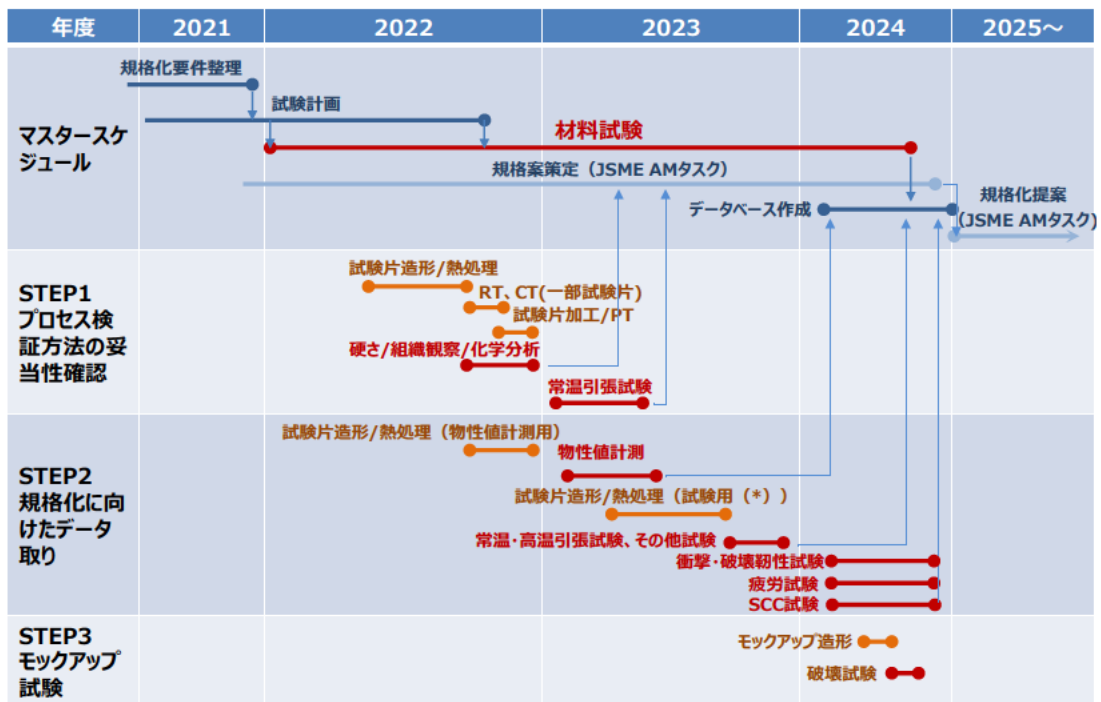
### 参考文献

[5.3-1] D. Armstrong & Gandy WEC-EPRI, ML20344A011, “316L Stainless Steel Manufactured via Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Data Package & Code Case”, (2020)



## 5.4 試験工程

各 STEP の試験仕様を踏まえて本事業の試験工程を検討した。2022 年度では STEP1 試験(常温引張試験、組織試験、硬さ測定、化学分析)に使用する試験片の AM 造形及び熱処理、造形物の非破壊検査 (RT、PT、X-線 C-T)、STEP1 試験(常温引張試験、組織試験、硬さ測定、化学分析)及び STEP2 試験 (材料物性試験) に使用する試験片の AM 造形及び熱処理を実施した。STEP2 試験のうち材料物性試験は 2022 年度で造形した試験片を用いて実施し、STEP2 のその他の試験の試験片の造形、熱処理及び非破壊検査は 2023 年度に実施する予定である。STEP2 の試験の内、材料物性試験、常温・高温引張試験、組織試験、硬さ測定、化学分析、腐食試験は 2023 年度に実施するが、シャルピー衝撃試験、破壊靱性試験、疲労試験、SCC 試験は 2024 年度に実施する予定である。STEP3 モックアップ試験については、2023 年度に実施内容を検討し 2024 年度にモックアップ造形と破壊試験を実施の予定である。本事業の全体工程及び年度ごとの試験項目は図 5.4-1 及び表 5.4-1 に示す。



(\*) : 引張試験、SCC試験、腐食試験、シャルピー衝撃試験、破壊靱性試験、疲労試験

図 5.4-1 本事業の全体試験工程

表 5.4-1 年度ごとの試験項目

次期	実施項目
2022 年度	<ul style="list-style-type: none"> <li>● STEP1 試験(常温引張試験、組織試験、硬さ測定、化学分析)に使用する試験片の AM 造形及び熱処理</li> <li>● STEP1 の造形物の非破壊検査 (RT、PT、X-線 C-T)</li> <li>● STEP1 試験(常温引張試験片加工、組織試験、硬さ測定、化学分析)</li> <li>● STEP2 試験 (材料物性試験) に使用する試験片の AM 造形及び熱処理</li> </ul>
2023 年度	<ul style="list-style-type: none"> <li>● STEP1 試験(常温引張試験)</li> <li>● STEP2 試験 (常温・高温引張試験、組織試験、硬さ測定、化学分析、腐食試験、疲労試験、SCC 試験、シャルピー衝撃試験、破壊靱性試験) に使用する試験片の AM 造形及び熱処理</li> <li>● STEP2 の造形物 (一部) の非破壊検査 (RT、PT)</li> <li>● STEP2 試験(材料物性試験、常温・高温引張試験、組織試験、硬さ測定、化学分析、腐食試験)</li> </ul>
2024 年度	<ul style="list-style-type: none"> <li>● STEP2 試験(疲労試験、SCC 試験、シャルピー衝撃試験、破壊靱性試験)</li> <li>● STEP3 モックアップの AM 造形及び熱処理</li> <li>● STEP3 モックアップの破壊試験</li> </ul>

## 6 まとめ

### (1) STEP1 検証プロセス方法の妥当性確認

材料品質が確保された領域を認定するプロセスの検証方法の妥当性を確認するためのデータ取得、評価を行った。データ取得は4社が独立して実施し、得られた4バッチ分のデータによる評価を行った。

#### 1. 試験方案策定

- ✓ 2021年度の成果に基づき、試験マトリクス、試験片形状、試験方法など4社間で共通となる試験基本仕様を定義した。
- ✓ PBF造形装置、使用粉末、造形条件、後処理方法など試験片造形に関わる仕様を検討し、各社毎に異なる項目の仕様を定義した。

#### 2. 試験片の製作

- ✓ 各社は1項で定義した仕様に従い、試験片を造形した。
- ✓ 外観検査、非破壊検査、熱処理チャートなど、仕様に従い品質記録を残した。

#### 3. 材料試験

- ✓ 各社は、それぞれ造形した試験片に対し、1項で定義した仕様に従い材料試験を実施した。試験項目は常温引張試験、硬さ試験、組織試験、化学分析とし、2022年度はこのうち常温引張試験を以外の項目についてのデータ取得を行った。

#### 4. 評価

- ✓ 材料試験で得られたデータからプロセス検証方法の妥当性を評価し、国内規格としての対応案を策定した。

### (2) STEP2 規格化に向けた材料データの取得

AM材の規格化に向けては、材料特性が既存材料に対する要求を満足することを示すか、又は新規材料採用ガイドラインに基づく手続きをとる必要があるが、いずれの場合においてもそのバックグラウンドとなる材料データの取得が必要である。2022年度は物性値データ取得用の試験片製作までを実施範囲とした。

#### 1. 物性値取得向け試験片の製作

- ✓ 各社保有のPBF造形装置を用い、任意の位置で物性値取得用試験片を造形した。造形条件はSTEP1向けに定義したものと同一とした。
- ✓ 熱処理は従来規格で要求されている固溶化熱処理と、品質向上に有意であるHIP（HIP+固溶化熱処理）を施した2パターンとした。
- ✓ DEDについては、1社が試験片を造形した。
- ✓ DEDの熱処理は、固溶化熱処理と、DEDの特徴であるフランジなどの追加造形の可能性を考慮し、熱処理なしの2パターンとした。

### (3) 2022 年度以降実施試験の試験計画策定

2022 年度以降、実施する、STEP1：常温引張試験、STEP2：常温引張試験、高温引張試験、疲労試験、硬さ試験、腐食試験、SCC 試験、組織試験、化学分析、材料物性値試験、破壊靱性特性試験、非破壊検査、STEP3：モックアップ試験の試験計画を具体化した。

なお、JSME 原子力専門委員会及び AM 技術規格検討タスクからの助言に基づき、破壊靱性特性試験を追加で実施することとした。

### JSME 原子力専門委員会 AM 技術規格検討タスクのレビュー状況(第三者レビュー)

2022 年 5 月 26 日、8 月 24 日、11 月 25 日、2023 年 2 月 16 日の合計 4 回にわたり昨年度の受託の成果、今年度実施中の受託の内容について AM 技術規格検討タスクに説明を実施し、内容のレビューをいただいた。

- ✓ 2022 年度の実施計画（含、前年度計画からの修正点）をタスク委員に説明し、タスク内で検討している規格化方針（必要となる材料データ、および工程）との整合性について委員のレビューを仰ぎ、了解を得た。
- ✓ 規格骨子に関するタスク内議論の中で、次年度以降の本委託事業の実施計画において反映又は考慮すべき項目について意見を得た。

(委員意見とその対応の例)

- 対象プロセス（PBF に絞るべきとの意見あり）  
→当初計画通り、PBF/DED の 2 手法を対象とする。
- 対象材料の拡大  
→まずは 316L 材を対象とした規格策定を目指す（変更なし）。
- 破壊靱性のチェックの必要性  
→データ取得計画に破壊靱性試験を追加
- ✓ 2023 年度のタスク会議では、本委託事業で得られた材料試験データとその評価に関するレビューを受けるとともに、2024 年度実施計画に対する意見を伺う。

