# 令和5年度原子力産業基盤強化事業

# (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

2024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

1	事業目的1-1
2	事業計画
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	2024 年度実施試験の試験計画策定
2.2	事業体制2-4
2.3	事業工程2-5
3	STEP1 検証プロセス方法の妥当性確認3-1
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
3.3.3	化学分析
3.3.4	常温引張試験
3.4	評価
3.4.1	材料試験結果の評価
3.4.2	国内規格としての対応案策定3-220
4	STEP2 規格化に向けた材料データの取得4-1
4.1	2022 年度に造形を開始する試験4-1
4.1.1	試験方案策定4-1
4.1.2	試験片の製作4-16
4.2	2023、2024 年度に開始する試験4-31
4.2.1	試験方案策定4-31
4.2.2	試験片の製作4-60
4.3	材料試験4-162
4.3.1	PBF 法4-162
4.3.2	DED 法4-173
4.4	評価
4.4.1	PBF 法4-177
4.4.2	DED 法4-190

目次

5	2024 年度実施試験の試験計画策定	5-1
5.1	STEP2 規格化に向けた材料データの取得	5-2
5.1.1	SCC 試験	5-3
5.2	STEP3 モックアップ検証方法の妥当性確認	5-8
5.2.1	PBF 法······	5-9
5.2.2	DED 法	-18
6	まとめ・・・・・・	6-1

# 本事業報告書の留意事項

本委託事業は令和3年度より実施しており、本年度は令和4年度に実施した内容から引続 き実施した内容が多く含まれる。そのため、本年度の事業報告書は令和4年度の事業報告 書に対して、本年度の成果を追加・更新して構成している。本年度の成果を明確にするた め、本年度、新規に追加、更新した部分を以下の通り明確にする。

(ししは追加した部分、ししは更新した部分を示す)

×	令和4年度事業報告書目次		令和5年度事業報告書目次
1	事業目的	1	事業目的
2	事業計画	2	事業計画
2.1	事業内容	2.1	事業内容
2.1.1	STEP1 検証プロセス方法の妥当性確認	2.1.1	STEP1 検証プロセス方法の妥当性確認
2.1.2	STEP2 規格化に向けた材料データの取	2.1.2	STEP2 規格化に向けた材料データの取得
	得		
2.1.3	2022 年度以降実施試験の試験計画策定	2.1.3	2024 年度実施試験の試験計画策定
2.2	事業体制	2.2	事業体制
2.3	事業工程	2.3	事業工程
3	STEP1 検証プロセス方法の妥当性確認	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	試験方案策定
3.1.1	試験基本仕様	3.1.1	試験基本仕様
3.1.2	試験片造形に関わる仕様	3.1.2	試験片造形に関わる仕様
3.2	試験片の製作	3.2	試験片の製作
3.2.1	試験片の造形、造形の記録	3.2.1	試験片の造形、造形の記録
3.3	材料試験	3.3	材料試験
3.3.1	硬さ試験	3.3.1	硬さ試験
3.3.2	組織試験	3.3.2	組織試験
3.3.3	化学分析	3.3.3	化学分析
		3.3.4	常温引張試験
3.4	評価	3.4	評価
			(3.4.1(4)常温引張試験を追加、3.4.1(1)硬さ
			試験を一部更新)
3.4.1	材料試験結果の評価	3.4.1	材料試験結果の評価
3.4.2	国内規格としての対応案策定	3.4.2	国内規格としての対応案策定
4	STEP2 規格化に向けた材料データの取 得	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	2022 年度に造形を開始する試験
4.1.1	試験方案策定	4.1.1	試験方案策定
			(4.1.1(1)②試験方法を追加)
4.1.2	試験片の製作	4.1.2	試験片の製作
		4.2	2023、2024 年度に造形を開始する試験
		4.2.1	試験方案策定
		4.2.2	試験片の製作
		4.3	材料試験
		4.3.1	PBF 法
		4.3.2	DED 法
		4.4	評価
		4.4.1	PBF 法
		4.4.2	DED 法
5	2022 年度以降実施試験の試験計画策定	5	2024 年度実施試験の試験計画策定
5.1	STEP1 検証プロセス方法の妥当性確認		

1	令和4年度事業報告書目次	令和5年度事業報告書目次			
5.1.1	常温引張試験				
5.2	STEP2 規格化に向けた材料データの取	5.1	STEP2 規格化に向けた材料データの取得		
4	得				
5.2.1	常温引張試験				
5.2.2	高温引張試験				
5.2.3	疲労試験				
5.2.4	硬さ試験				
5.2.5	腐食試験				
5.2.6	SCC 試験	5.1.1	SCC 試験		
5.2.7	組織試験				
5.2.8	化学分析				
5.2.9	材料物性試験				
5.2.10	破壊靭性特性の確認試験				
5.2.11	非破壞検査				
5.3	STEP3 モックアップ検証方法の妥当性	5.2	STEP3 モックアップ検証方法の妥当性確認		
	確認				
5.3.1	PBF 法	5.2.1	PBF 法		
5.3.2	DED 法	5.2.2	DED 法		
5.4	試験工程				
6	まとめ	6	まとめ		

本事業報告書について、疲労試験に関する項目は、既存データの比較の観点から、疲労試験の条件等に、(一社)日本溶接協会原子力研究委員会 FQA3 小委員会ナレッジプラットフォーム公開資料(2019年): DFC2 小委員会「設計疲労線図の策定にかかる調査(2016年度報告書)-付録 4-」の成果を含む部分がある。

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:	NC1) 日本機械学会 発電用原子力設備規格 溶接規格 (JSME S NB1)
JSME 溶接規格: MHI:	NC1) 日本機械学会 発電用原子力設備規格 溶接規格 (JSME S NB1) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.の略。(三菱重工業株式会社)
JSME 溶接規格: MHI: PBF:	NC1) 日本機械学会 発電用原子力設備規格 溶接規格 (JSME S NB1) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.の略。(三菱重工業株式会社) Powder Bed Fusion の略。(粉末床溶融結合(法))
JSME 溶接規格: MHI: PBF: PT:	NC1) 日本機械学会 発電用原子力設備規格 溶接規格 (JSME S NB1) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.の略。(三菱重工業株式会社) Powder Bed Fusion の略。(粉末床溶融結合(法)) Penetrant Testing の略。(浸透探傷試験)
JSME 溶接規格: MHI: PBF: PT: RT:	NC1) 日本機械学会 発電用原子力設備規格 溶接規格 (JSME S NB1) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.の略。(三菱重工業株式会社) Powder Bed Fusion の略。(粉末床溶融結合(法)) Penetrant Testing の略。(浸透探傷試験) Radiographic Testing の略。(放射線透過試験)
JSME 溶接規格: MHI: PBF: PT: RT: SA:	NC1) 日本機械学会 発電用原子力設備規格 溶接規格 (JSME S NB1) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.の略。(三菱重工業株式会社) Powder Bed Fusion の略。(粉末床溶融結合(法)) Penetrant Testing の略。(浸透探傷試験) Radiographic Testing の略。(放射線透過試験) Solution Annealing の略。(固溶化熱処理)
JSME 溶接規格: MHI: PBF: PT: RT: SA: SCC:	NC1) 日本機械学会 発電用原子力設備規格 溶接規格 (JSME S NB1) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.の略。(三菱重工業株式会社) Powder Bed Fusion の略。(粉末床溶融結合(法)) Penetrant Testing の略。(浸透探傷試験) Radiographic Testing の略。(放射線透過試験) Solution Annealing の略。(固溶化熱処理) Stress Corrosion Cracking の略。(応力腐食割れ)
JSME 溶接規格: MHI: PBF: PT: RT: SA: SCC: SR:	<ul> <li>NC1)</li> <li>日本機械学会 発電用原子力設備規格 溶接規格 (JSME S NB1)</li> <li>Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.の略。(三菱重工業株式会社)</li> <li>Powder Bed Fusion の略。(粉末床溶融結合(法))</li> <li>Penetrant Testing の略。(浸透探傷試験)</li> <li>Radiographic Testing の略。(放射線透過試験)</li> <li>Solution Annealing の略。(固溶化熱処理)</li> <li>Stress Corrosion Cracking の略。(応力腐食割れ)</li> <li>Stress Release の略。(応力除去(熱処理))</li> </ul>
JSME 溶接規格: MHI: PBF: PT: RT: SA: SCC: SR: 東芝 ESS(TSB):	NC1) 日本機械学会 発電用原子力設備規格 溶接規格 (JSME S NB1) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.の略。(三菱重工業株式会社) Powder Bed Fusion の略。(粉末床溶融結合(法)) Penetrant Testing の略。(浸透探傷試験) Radiographic Testing の略。(放射線透過試験) Solution Annealing の略。(成射線透過試験) Stress Corrosion Cracking の略。(応力腐食割れ) Stress Release の略。(応力除去 (熱処理)) 東芝エネルギーシステムズ株式会社
JSME 溶接規格: MHI: PBF: PT: RT: SA: SCC: SR: 東芝 ESS(TSB): 目立 GE(HGE):	NC1) 日本機械学会 発電用原子力設備規格 溶接規格 (JSME S NB1) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.の略。(三菱重工業株式会社) Powder Bed Fusion の略。(粉末床溶融結合(法)) Penetrant Testing の略。(浸透探傷試験) Radiographic Testing の略。(放射線透過試験) Solution Annealing の略。(放射線透過試験) Stress Corrosion Cracking の略。(応力腐食割れ) Stress Release の略。(応力除去(熱処理)) 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

#### 1. 事業目的

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。

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(2)-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。



表 1(2)-1. AM 各方式の模式図

### (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。

(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.

#### 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。

- 日本機械学会での議論内容に基づき、規格化に必要となる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、2023 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 年度に化学成分分析・硬さ試験・組織 観察が完了しており、2023 年度は引張試験を行う。なお、本項目については粉末 床溶融結合法(PBF 法)に対して実施する。

- (1) 材料試験
  - ✓ 各社は、2022 年度にそれぞれ造形した試験片に対し、2022 年度に定義した仕様に従い材料試験を実施する。なお、試験項目は2022 年度に未実施の常温引張試験とする。

- (2) 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、また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。2023年度は以下に示すデータ取得を実施範囲とする。

試験項目	試験片の製作	材料試験/評価
引張試験(常温・高温)	○※	-(2024年度に実施)
硬さ試験	0	-(2024年度に実施)
組織観察	0	-(2024年度に実施)
化学成分分析	0	-(2024年度に実施)
耐食性試験	0	-(2024年度に実施)
材料物性值試験	-(2022年度に製作済)	○※
疲労試験	0	-(2024年度に実施)
破壊靭性特性試験	0	-(2024年度に実施)

○:実施、-:他年度に実施済み/実施予定

※:一部は2024年度に実施

- (1) 試験片の製作
  - ✓ 各社の PBF 造形装置を用い、任意の位置で試験片を造形する。造形条件は STEP1 向けに定義したものと同一とする。試験項目によって、4 社全てで実施 する、1 社のみで分担して実施することを検討する。
  - ✓ 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パターンとするが、試験の性質を考慮して1パターンとすることも検討する。
  - ✓ 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パターンとするが、試験の性質を考慮して1パターンとすることも検討する。
- (2) 材料試験
- ✓ 各項目に対して材料試験を実施し、材料データを取得する。

- ✓ 引張試験(常温・高温)、硬さ試験、組織観察、化学成分分析、耐食性試験、疲労試験、破壊靭性特性試験は2024 年度に実施する。
- (3) 評価
  - ✓ 材料試験で得られたデータを整理し、従来製法による材料特性との比較を行うとともに、AM材としての特徴有無について考察する。
- 2.1.3 2024 年度実施試験の試験計画策定
  - (1) 2024 年度、引張試験(常温・高温)、硬さ試験、組織観察、化学成分分析、耐食 性試験、疲労試験、破壊靭性特性試験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) 2024 年度、モックアップ検証方法の妥当性確認を行うが、試験結果や海外の動向を踏まえて、モックアップの必要要否も含めた検討を実施する。

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

2023年度の実施スケジュールを以下に示す。

	2023年度							
	8	9	10	11	12	1	2	3
1. STEP1 検証プロセス方法の妥当性確認								
(1) 材料試験								
(2)評価								
2. STEP2 規格化に向けた材料データの取得								
(1) 試験片の製作								
(2) 材料試験								
(3) 評価								
3. 2024年度実施試験の試験計画策定								
(1) 2024年度実施試験の試験計画策定								
1 = > bb							1 <b>1</b>	終報告
τ. <u>δ</u> ( <sup>6</sup> )								
	1 8		1 1					1 8 1

- 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
   溶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溶融箇所の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実施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(の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)



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)

計殿百日	試験片		소락		
武家項口	採取方向	上段	中央	下段	
	垂直	25	25	25	75
常温引張試験	水平	13	13	13	39
	斜角(45°)			12	12
硬さ試験*	3 (5)	3 (5)	3 (5)	9 (15)	
ミクロ試験,	3 (5)	3 (5)	3 (5)	9 (15)	
化学分析		5	5	5	15

表 3.1.1(1)-1 STEP1 の試験マトリックス

<sup>\*</sup>合計9か所の試験座標: la、3c、5eの上段、中段、下段 合計15か所の試験座標: la、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。

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

表 3.1.1(2)①-1 引張試験片加工マトリックス



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		JIS Z	測定点数は各5
四隅	1×4	1×4	1×4	15 か所	YZ 面	2244	点とする。
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	JIS Z	測定点数は各5
二隅	1×2	1×2	1×2	9か所	及び	2244	点とする。
中央部	1	1	1	(18 面)	YZ 面		

# 表 3.1.1(2)②-3 硬さ試験マトリックス

		試験片位	置	観察面	規格	備考	
	上部	中部	下部	合計	XY 面	JIS Z	測定点数は各5
四隅	1×4	1×4	1×4	15 か所	及び	2244	点とする。
中央部	1	1	1	(30 面)	YZ 面		

パターン 3 : AM 造形位置による影響確認 (2 光源)(2 バッチ)



(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)



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ャ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。

JISG0553「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	$\mathbb{P}$	IJ	ック	ス
---------------	-------	--------------	----	----	---

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

### 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	JIS G	マクロ領域:1
四隅	1×4	1×4	1×4	15 か所	及び	0321	領域、ミクロ領
中央部	1	1	1		YZ 面		域:3領域



3-17







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JISG0321「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		規格	
PBF AM 造		上部	中部	下部	合計	JIS G
形材	四隅	1×4	1×4	1×4	15 か所	0321
(316L)	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%)

С	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Mo
0.030	1.00	2.00	0.045	0.030	12.00	16.00	2.00
以下	以下	以下	以下	以下	~15.00	~18.00	~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。

分析元素	分析方法(JIS)
C,S	燃焼-赤外線吸収法(CG 1211-3:2018, SG 1215-4:2018)
	表面付着・吸着炭素除去-燃焼-赤外線吸収法(CG1211-4:2018)
	二酸化ケイ素重量法(SiG1212:1997)
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)
Р	モリブドりん酸青吸光光度法 (G1214:1998)
	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	ペルオキソニ硫酸アンモニウム酸化 KMnO4 滴定法(G 1217 : 2017)
	ICP 発光分光分析法(G 1258-2:2014)
0	不活性ガス融解-赤外線吸収法(G1239:2014)
Ν	不活性ガス融解-熱伝導度法(G 1228-3:2022)

表 3.1.1(2) ④-3 各元素の分析方法



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)


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)

			熱如	処理			封殿上		試験片数			
造形方法	造形装置	鋼種	HIP 処理	固溶化 熱処理	項目	実施内容	採取方向	上段	中段	下段	実施機関	
					治111132	HC 7 2241 144 日 計 殿 上 12 分 1 計 殿 上 11	垂直	25	25	25		
					吊価51	JIS Z 2241   14A	水平	13	13	13		
					// ///	工で11 7。	斜角 (45°)	0	0	12		
	SLM280 (SLM Solutions)	Type316L	なし	あり	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	三菱重工業株式会社	
					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			
					一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	US72241 144 号試験上に従い試験上加	垂直	25	25	25		
					市価力派試練	JIS Z 2241 14A 写試練月に使い試練月加 工を行う。	水平	13	13	13		
		Type316I			// ///		斜角 (45°)	0	0	12		
	M2 (Concept Laser)	M2 (Concept Laser)	typestolなしあり硬さ測定パターン3 に る。なしあり硬さ測定マクロ1枚+3 察を行う。	あり	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	東芝エネルギーシステ ムズ株式会社	
				マクロ1枚+ミクロ3領域(×2倍率)での観 察を行う。	-	5	5	5				
PBF 方式					化学分析	切粉を採取して分析を行う。	-	5	5	5	-	
(SLM)	(SLM)			一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	<b>IIS 7 2241 144 </b> - 封殿上に従い封殿上加	垂直	25	25	25			
		M290 (EOS) Type316L			片 加 丁	JIS Z 2241   14A 亏訊駛力 に促い訊駛力 加   エを行う	水平	13	13	13	日立 GE ニュークリ ア・エナジー株式会社	
			なし あり 硬さ測定 パターン1に従い、各試 組織試験 マクロ1枚+ミクロ3領域 察を行う。	あり	// ///		斜角 (45°)	0	0	12		
	M290 (EOS)				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		
				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		
					治111132	HC 7 2241 144 日封殿上江谷小封殿上加	垂直	25	25	25		
					吊価51	吊温り振訊映 JIS Z 2241 14A 方試験月に促い試験月加 □	水平	13	13	13		
		Type316I			// ///	工で11.7。	斜角 (45°)	0	0	12		
	M290 (EOS)	Typestor	なし	あり	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	株式会社 IHI	
						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		

表 3.1.1(2)-1 STEP1 試験マトリクスと各社分担

STEP1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)

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	50µm 程度のきずが確認できる品質とする。

以上、①~⑦を踏まえ、STEP1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。

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

表 3.1.2(1)-1 試験片造形に用いた PBF 装置一覧

(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。各実施機関で用いた粉末の成分一覧を表 3.1.2(2)-1 に示 す。

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

表 3.1.2(2)-1 試験片造形に用いた SUS316L 粉末一覧

(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。各実施機関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	ミラメータ	レーザ出力[W]	スキャン速度[mm/sec]
実施機関	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実施機関 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。

	( )	```	/	
実施機関	プレート・		応力除去条件	
	サポート除去	目標温度	保持時間	冷却方法
	タイミング	[°C]	[h]	
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)-1 固溶化熱処理(SA)前作業

表 3.1.2(4)-2	固溶化熱処理(SA)条件
--------------	--------------

実施機関		固溶化熱処理条件	:
	目標温度	保持時間	冷却方法
	[°C]	[h]	
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 10mm×10mm×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、リコート方向に対し 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 80mm 程度であることから、270mm の造 形材より試験片中心がベースプレート面から 40mm、140mm、240mm 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・ミクロ試験・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・ミクロ試験・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、リコート方向に対し 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・ミクロ試験・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、リコート方向に対し 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。外観不良の詳細は 別紙-M-1 に示す。



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。固溶化熱処理の実施記録については別紙-M-2~別紙-M-4 に示す。 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。

<u>ガスフロー方向</u>

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

<u>造形高さ</u>

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。

<u>リコート方向</u>

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

## <u>レーザのラップする領域</u>

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)

	2 S	NH I - A N - T P -
		1-1- L-A
120	Contraction and the second	N STATESTICS
		U 20
015		1-2- L
		H
		T10-0 2023-1-25
	S 2	



健全部の例)



不合格指示の例1)※



(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 φ0.5~1.0mm のポロシティーおよび L1.0~1.5mm の融合不良を複数検出

不合格指示の例2)※



試験片全体に φ0.5~1.0mm ポロシティーおよび L1.0~2.0mm 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

採取	試験片	判定	試験片	判定	試験片	判定	試験片	判定	試験片	判定
位置	ID		ID		ID		ID		ID	
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①垂直方向 RT 結果(MHI)

採取	試験片	判定	試験片	判定	試験片	判定	試験片	判定	試験片	判定
位置	ID		ID		ID		ID		ID	
上段	_	1	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	Ţ	ļ	T-HT2d (TP-2-9-U)	合格	T-HT2e (TP-2-8-U)	不合格
	5	I	Ţ	J	T-HT3c (TP-2-7-U)	合格	<u>_</u>	J	J	J
	T-HT4a (TP-2-6-U)	合格	T-HT4b (TP-2-5-U)	合格	<u> </u>	ļ	T-HT4d (TP-2-4-U)	合格	T-HT4e (TP-2-3-U)	不合格
	5	I	T-HT5b (TP-2-2-U)	合格	5	J	T-HT5d (TP-2-1-U)	不合格	J	J
中段	J	J	T-HM1b (TP-2-13-M)	合格	<u>_</u>	J	T-HM1d (TP-2-12-M)	合格	J	J
	T-HM2a (TP-2-11-M)	合格	T-HM2b (TP-2-10-M)	合格	5	J	T-HM2d (TP-2-9-M)	合格	T-HM2e (TP-2-8-M)	不合格
	5	I	Ţ	J	T-HM3c (TP-2-7-M)	合格	<u>_</u>	J	J	J
	T-HM4a (TP-2-6-M)	合格	T-HM4b (TP-2-5-M)	合格	~	<u> </u>	T-HM4d (TP-2-4-M)	合格	T-HM4e (TP-2-3-M)	不合格
	_	Į	T-HM5b (TP-2-2-M)	合格	_	J	T-HM5d (TP-2-1-M)	不合格	_	ļ
下段	_	<u>_</u>	T-HB1b (TP-2-13-L)	合格	<u> </u>	<u> </u>	T-HB1d (TP-2-12-L)	合格	<u>_</u>	_
	T-HB2a (TP-2-11-L)	合格	T-HB2b (TP-2-10-L)	合格	5	J	T-HB2d (TP-2-9-L)	合格 (指示有)	T-HB2e (TP-2-8-L)	不合格
	5	_	~	_	T-HB3c (TP-2-7-L)	合格	<u> </u>	_	5	_
	T-HB4a (TP-2-6-L)	合格	T-HB4b (TP-2-5-L)	合格	~	<u> </u>	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②水平方向 RT 結果 (MHI)

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

表 3.2.1(1)④-1 造形③45 度方向 RT 結果 (MHI)



## 表 3.2.1(1)④-2 不合格品の発生確率

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)





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 指示模様の間の距離が 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。

PT 結果の外観写真を別紙-M-5 にまとめる。PT 指示が認められた試験片については、その試験体の中で最も大きい指示模様が認められる面の拡大写真を撮影した。

採取	試験片	判定								
位置	ID									
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①垂直方向 PT 結果(MHI)

試験片	試験片	判定								
採取位置	ID									
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
	_	_	_	_	Т-НМ3с	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②水平方向 PT 結果(MHI)

採取	試験片	判定								
位置	ID									
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	_	_

表 3.2.1(1)⑥-1 造形③45 度方向 PT 結果(MHI)

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ると考えた。

・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)
   リコータ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-HB4e(下流側)を選定、 また、造形高さの高/低のものとして、T-HT4e(高側)、T-HB4e(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 μm 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 μm 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、□10mm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

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

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 る。また、レーザラップ部においても、造形高さ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)

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[µA]	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	Cu 0.5		
	[mm])			
	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)⑦-1 CT 撮影条件(MHI)

造形方向	試験片	試験片 ID	撮影結果
	採取位置		
造形① 垂直方向	下段	T-VB4c	<ul> <li>↓ A</li> <li>▶ A</li> <li>▶ B</li> <li>▶ B</li></ul>
造形② 水平方向	上段	T-HT3c	<ul> <li>形のきずが約 30 個確認された。</li> <li>↓ A</li> <li>▶ B</li> <li>▶ B</li></ul>

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
		T-HT4e	↓ A         B
			約1.2mmの不定形の多数のきずが確認された。
	下段	T-HB3c	↓ A B — B 矢視 A
			(注意)       (注意)
14			約13個確認された。





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・ミクロ 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・ ミクロ試験・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、リコート方向に対し 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、リコート方向に対し 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 cc'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、リコート方向に対し 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

②造形結果

表 3.1.2(3)-1 の条件を用いて造形を実施した。造形後の外観を図 3.2.1(2)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(2)2-1 造形後外観(東芝 ESS)

③熱処理結果

図 3.2.1(2)②-1 に示した造形物について、表 3.1.2(4)-1 にて示した SR を実施した後にプレート及びサポート材の除去を実施した。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。熱処理の実施記録については別紙 T-1 参照。
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)

採取	試験片	判定								
位置	ID									
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)④-1 造形①垂直方向 RT 結果(東芝 ESS)

採取	試験片	viai 📥	試験片	्रांधा 🚔	試験片	्रांता 🚔	試験片	Val 🕁	試験片	加合
位置	ID	刊化	ID	刊化	ID	刊化	ID	刊化	ID	刊化
上段	_	_	T-HT1b	合格	_		T-HT1d	合格	_	Ι
	T-HT2a	合格	T-HT2b	合格	_		T-HT2d	合格	T-HT2e	合格
	_		_		T-HT3c	合格	_		_	Ι
	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
	_	_	—	_	Т-НМ3с	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)④-2 造形②水平方向 RT 結果(東芝 ESS)

表 3.2.1(2)④-3 造形③45°方向 RT 結果(東芝 ESS)

採取	試験片	判定								
位置	ID									
下段			T-DB1b	合格			T-DB1d	合格	_	
	T-DB2a	合格	—		T-DB2c	合格	—	Ι	T-DB2e	合格
	_	—	T-DB3b	合格	_	—	T-DB3d	合格		Ι
	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、ASTM E165 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。

採取	試験片	判定								
位置	ID									
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)⑥-1 造形①垂直方向 PT 結果(東芝 ESS)

採取	試験片	viai 📥	試験片	्रांता 🚔	試験片	्रांता 🚔	試験片	्रांधा 🚔	試験片	)에 수
位置	ID	刊化	ID	刊化	ID	刊化	ID	刊化	ID	刊化
上段	_	_	T-HT1b	合格	—		T-HT1d	合格	_	Ι
	T-HT2a	合格	T-HT2b	合格	_		T-HT2d	合格	T-HT2e	合格
		_	_		T-HT3c	合格	_		_	Ι
	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
			_		Т-НМ3с	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	_	Ι
	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)⑥-2 造形②水平方向 PT 結果(東芝 ESS)

表 3.2.1(2)⑥-3 造形③45°方向 PT 結果(東芝 ESS)

採取	試験片	判定								
位置	ID									
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	_	Ι
	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(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 ボイドが検収された試験片の 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。

10252 *CX		
CT 装置	メーカー	ニコン
	型式	TXH320
撮影条件	電流[μA]	150μΑ
	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)

造形方向	試験片	試験片	撮影結果
	採取位置	ID	
造形①	上段	T-VT3c	最大 0.23mm のボイドが検出。
垂直方向	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	上段	T-HT3c	欠陥の検出無し。
水平方向	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。

表 3.2.1(2)⑦-2 CT 結果



平行部の結果



最大ボイドの位置 (a)T-VT3c





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=8mm,y=5mm 位相を変えて配 置した。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ト方向に対し 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・ミクロ組織試 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・ミクロ組織 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ト 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ト方向に対し 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。固溶化熱処理の実施記録については別紙-H に参照。

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(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(φ0.5 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。







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。

採取	試験片	判定								
位置	ID									
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) ④-1 造形①垂直方向 RT 結果(日立 GE)

採取	試験片	判定	試験片	判定	試験片	判定	試験片	判定	試験片	判定
位置	ID		ID		ID		ID		ID	
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
	_	-	-	-	Т-НТ3с	合格	-	_	-	_
	T-HT4a	合格	T-HT4b	合格	-	-	T-HT4d	合格	T-HT4e	不合格
	]	1	T-HT5b	合格	<u> </u>	_	T-HT5d	合格	1	J
中段	_	_	Т-НМ1Ь	合格	-	_	T-HM1d	合格	-	J
	T-HM2a	合格	Т-НМ2Ь	合格	-	_	T-HM2d	合格	T-HM2e	不合格
	_	-	-	-	Т-НМ3с	合格	-	_	-	_
	T-HM4a	合格	T-HM4b	合格	-	-	T-HM4d	合格	T-HM4e	不合格
	1		Т-НМ5Ь	合格	_	_	T-HM5d	合格	1	ļ
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) ④-2 造形②水平方向 RT 結果(日立 GE)

表 3.2.1(3) ④-3 造形 ③ 45 度方向 RT 結果(日立 GE)

採取	試験片	判定	試験片	判定	試験片	判定	試験片	判定	試験片	判定
位置	ID		ID		ID		ID		ID	
下段	ļ	ļ	T-DB1b	合格	ļ	J	T-DB1d	合格	ļ	l
	T-DB2a	合格	<u> </u>	ļ	T-DB2c	合格	1	ļ	T-DB2e	合格
	<u> </u>	_	T-DB3b	合格	_	ļ	T-DB3d	合格	_	I
	T-DB4a	合格	_	ļ	T-DB4c	合格	-	ļ	T-DB4e	合格
	ļ	1	T-DB5b	合格	_	J	T-DB5d	合格	_	1

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 引張試驗片形状(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)

採取	試験片	判定								
位置	ID									
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)⑥-1 造形①垂直方向 PT 結果(日立 GE)

試験片	試験片	判定								
採取位	ID									
置										
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
	_	-	-	-	Т-НТ3с	合格	_	_	-	_
	T-HT4a	合格	T-HT4b	合格	-	_	T-HT4d	合格	T-HT4e	不合格
	1	_	T-HT5b	合格	_	ļ	T-HT5d	合格	1	ļ
中段	-	-	T-HM1b	合格	-	-	T-HM1d	合格	~	-
	T-HM2a	合格	Т-НМ2Ь	合格	-	-	T-HM2d	合格	T-HM2e	不合格
	-	-	-	-	T-HM3c	合格	_	_	-	-
	T-HM4a	合格	T-HM4b	合格	_	ļ	T-HM4d	合格	T-HM4e	不合格
	1	-	Т-НМ5Ь	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	1	-

表 3.2.1(3)⑥-2 造形②水平方向 PT 結果(日立 GE)

表 3.2.1(3)⑥-3 造形③45 度方向 PT 結果(日立 GE)

採取	試験片	判定								
位置	ID									
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影響が確認された。

CT 装置	メーカー	日立製作所
	型式	HiXCT-9/6M-SP
撮影条件	電流[μA]	_
	電圧[kV]	9 MV

表 3.2.1(3)⑦-1 CT 撮影条件(日立 GE)



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)

水平方向	試験片	試験片 ID	CT 撮像結果の例	撮影結果
	採取位置		(欠陥指示あり)	
	上段	T-HT4e	000	複数撮影位置にφ0.5mm 以上の欠 陥は検出された。
造形方向 造形②	中段	T-HM4e	00	複数撮影位置に $\phi$ 0.5mm 以上の欠 陥は検出された。
	下段	T-HB4e	000	複数撮影位置に $\phi$ 0.5mm 以上の欠 陥は検出された。

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)

(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。またリコータ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。



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(4)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)

③熱処理結果

図 3.2.1(4)②-1 に示した造形物について、プレート及びサポート材が付いたまま表 3.1.2(4)-2 にて示した条件にて固溶化熱処理を実施し、条件通りに熱処理が完了した ことを確認した。固溶化熱処理の実施記録については別紙-I-3-1~I-3-3 参照。 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溶融不足となった可能性が考えられる。



採取	試験片	判定								
位置	ID									
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)④-1 造形①垂直方向 RT 結果(IHI)

採取	試験片	判定	試験片	判定	試験片	判定	試験片	判定	試験片	判定
位置	ID		ID		ID		ID		ID	
上段	-	T	T-HT1b	合格	-	-	T-HT1d	合格	-	1
	T-HT2a	合格	Т-НТ2Ь	合格	1	1	T-HT2d	合格	T-HT2e	合格
	1770) 1777)	Į.	Ţ	1	T-HT3c	合格	1	ļ	Ţ.	ļ
	T-HT4a	合格	T-HT4b	合格	<u></u>	-	T-HT4d	合格	T-HT4e	合格
	1000 C	æ	T-HT5b	合格		-	T-HT5d	合格		-
中段	-	1	T-HM1b	合格	1	1	T-HM1d	合格	1	1
	T-HM2a		Т-НМ2Ъ	合格	H.	Ŧ	T-HM2d	合格	T-HM2e	合格
	-	-	-	1	T-HM3c	合格	-	1	-	1
	T-HM4a	合格	Т-НМ4Ъ	合格	H.	-	T-HIM4d	合格	T-HM4e	合格
	-	-	T-HM5b	合格	-	-	T-HM5d	合格	-	-
下段	<del></del>	<del></del>	T-HB1b	合格		1	T-HB1d	合格	<del>ER</del>	1
	T-HB2a	合格	T-HB2b	合格	1	ļ	T-HB2d	合格	T-HB2e	不合格
	-	-		-	T-HB3c	合格		-		-
	T-HB4a	合格	T-HB4b	合格	-	1	T-HB4d	合格	T-HB4e	不合格
		1	Т-НВ5Ъ	合格	22	1	T-HB5d	合格	2	1

表 3.2.1(4) ④-2 造形 ②水平方向 RT 結果 (IHI)

表 3.2.1(4)④-3 造形③45 度方向 RT 結果(IHI)

採取	試験片	判定								
位置	ID									
下段	-	Ţ	T-DB1b	合格	I	1	T-DB1d	合格	1	-
	T-DB2a	合格	I	1	T-DB2c	合格	-	1	T-DB2e	合格
	Ţ	1	T-DB3b	合格	I	1	T-DB3d	合格	I	1
	T-DB4a	合格	1	1	T-DB4c	合格	1	1	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。

採取	試験片	判定	試験片	判定	試験片	判定	試験片	判定	試験片	判定
位置	ID		ID		ID		ID		ID	1
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) 6-1 造形①垂直方向 PT 結果(IHI)

試験片	試験片	判定	試験片	判定	試験片	判定	試験片	判定	試験片	判定
採取位	ID		ID		ID		ID		ID	
置										
上段	<b>1</b> 70	P.	T-HT1b	合格	1	P	T-HT1d	合格	-	ł
	T-HT2a	合格	Т-НТ2ь	合格	_	-	T-HT2d	合格	T-HT2e	合格
	-	-	-		T-HT3c	合格	-	-	1 <u></u>	-
	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	<del></del> )		T-HM1b	合格	-	-	T-HM1d	合格	-	Ļ
	T-HM2a		Т-НМ2Ъ	合格	-	Ļ	T-HM2d	合格	T-HM2e	不合格
		4	1	-	Т-НМЗс	合格	-	-		1
	T-HM4a	合格	Т-НМ4ь	合格	-	Į.	T-HM4d	合格	T-HM4e	不合格
	-	4	Т-НМ5Ъ	合格	-	4	T-HM5d	合格	-	4
下段	<u> </u>	Ţ	T-HB1b	合格	<del></del>	Ţ.	T-HB1d	合格	-	1
	T-HB2a	合格	T-HB2b	合格	-	ļ	T-HB2d	合格	T-HB2e	不合格
	-	-		-	T-HB3c	合格	_	-	-	1
	T-HB4a	合格	T-HB4b	合格	-	-	T-HB4d	合格	T-HB4e	不合格
	-	-	T-HB5b	合格	<u> </u>	-	T-HB5d	合格		-

表 3.2.1(4) ④-2 造形②水平方向 PT 結果(IHI)

表 3.2.1(4)⑥-3 造形③45 度方向 PT 結果(IHI)

採取	試験片	判定								
位置	ID									
下段	-	ļ	T-DB1b	合格	1	ļ	T-DB1d	合格	1	1
	T-DB2a	合格	1	1	T-DB2c	合格	_	-	T-DB2e	合格
	-	-	T-DB3b	合格	-	-	T-DB3d	合格	-	1
	T-DB4a	合格	-	-	T-DB4c	合格	-	-	T-DB4e	合格
	-	1	T-DB5b	合格	_	-	T-DB5d	合格	-	I



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、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)

CT 装置	メーカー	ニコン
	型式	MCT225
撮影条件	電流[µA]	160
	電圧[kV]	220

表 3.2.1(4)⑦-1 CT 撮影条件(IHI)



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	試験片	撮影結果
	採取位置	ID	
造形①	上段	T-VT1a	きずの検出なし。
垂直方向		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	上段	T-HT4a	きずの検出なし。
水平方向		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	上段	T-DT2c	きずの検出なし。
45 度方向		T-DT4e	0.1mm ほどのきずが点在。



T-HB2e



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 JIS G4303:2012 SUS316L の規格値である 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 JIS G4303:2012 SUS316L の規格値である 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 JIS G4303:2012 SUS316L の規格値である 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 JIS G4303:2012 SUS316L の規格値である HV200 以下を満足した。

試験片 ID		XY 面							YZ 面				
武厥月 ID	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 3.3.1-1 ビッカース硬さ試験結果(材料: Type316L、実施機関: MHI、HV1.0)

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

試験片 ID			XY	(面			YZ 面					
式家方 ID	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

試験片 ID			XY	I 面			YZ 面					
武駛力 ID	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 3.3.1-3 ビッカース硬さ試験結果(材料: Type316L、実施機関:日立GE、HV1.0)

試験片 ID			XY	7 面			YZ 面					
叫砍刀 ID	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

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

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、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。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カ所(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 la、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 50μm 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模様が見られ、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。

		1a	1e	3c	5a	
L. F.L.	XY					
	YZ					a the state of the
中市	XY					
中权	YZ					
	XY					
ト段	YZ					

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



		×100	10 <u>0µ</u> m		×500
1. 67.	XY				
上段	YZ			12-ph	
<b>-</b> + ғ.	XY				A
中段	YZ			M. J.S.	2 Joseph
	XY				J.A.
下段	YZ			ALA	

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



			×100	10 <u>0µ</u> m		×500
上段	XY					Sol
	YZ				AR	
	XY					
中段	YZ	No.			1 And	1 States
下段	XY					
	YZ				Sand less	1/24

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



		×100	10 <u>0µ</u> m		×500
上段	XY			Start Start	
	YZ		A PARTINE AND	string (	
中段	XY			A A A	
	YZ		0 5 2 5 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1		AA
下段	XY				in the second
	YZ				A A A

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



		×100	10 <u>0µ</u> m		×500
LFT	XY			2011	5723
	YZ			SAA	E. C.
中段	XY			Rost	
	YZ			Maria	
下段	XY			est of the	
	YZ				As fr

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



		×100	10 <u>0µ</u> m		×500
L FA	XY				
上校	YZ			(ASD)	J.J.J.
th ER	XY			200	
中段	YZ			MA Col	
下段	XY		Total a start		
	YZ		A CALLER CONTRACTOR	Why have	

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



		1a	1e	3с	5a	
L. F.T.	XY					
	YZ					
-t- 57L	XY					
TR	YZ					
下段	XY			Inn		
	YZ			<u>Pro-</u>		

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



	×100				×400	
上郎	XY	200µm	200µm	200µm	50µm	2 de la
	YZ	200µm	200µm	200µm	50µm.	
- <del>1</del> 57	XY	200µm.	200µm	200µm.	<u>50μm</u>	
中段	YZ	200µm	200µm	200µm	50µm	
TER	XY	200µm	<u>200µт</u>	200µm	50µm.	
下段	YZ	<u>200µm</u>	200µm	200µm	50µm	

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



			×100			×400
上段	XY	<u>200µm</u>	200µm	<u>200µm</u>	50µm.	
	YZ	<u>200µm</u>	200µm	200µm	50µm.	
中段	XY	200µm	200µm	200µm	<u>30µm</u>	A ANA
	YZ	200µm	200µm	200µm	50µm.	
下段	XY	200µm ;	200µm.	200µm .	50µm .	5
	YZ	200µm	200µm	200µm	50µm	

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



			×100			×400
上段	XY	200µm	200µm	<u>200µm</u>	50µm.	
	YZ	200µm	200µm	200µm	50µm	
中段	XY	200µm	200µm	200µm	50µm	A SA
	YZ	200µm	200µm	200µm.	50µm.	
下段	XY	200µm .	200µm .	200µm	50µm.	
	YZ	200µm	200µm	200µm	50µm	

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



			×100	-		×400
上四	XY	<u>200µm</u>	<u>200µm</u>	<u>200µm</u>	50µm	
	YZ	200µm	200µm	200µm	50μm	
中段	XY	200µm	200µm	<u>200µт</u>	50µm	
	YZ	<u>200µm</u>	200µm	<u>200µm</u>	50µm	
下段	XY	200µm	200µm	200µm	δυμη	
	YZ	200µm	200µm	200jum	50µm	

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



			×100			×400
L FJ	XY	200µm	<u>200µm</u>	<u>200µm</u>	50µm.	10
	YZ	<u>200µm</u>	200µm	<u>200µm</u>	50µm	
中印	XY	<u>200µm</u>	200µm	<u>200µm</u>	50µm	
中段	YZ	200µm	200µm	200µm	50µm	
TER	XY	<u>200um</u>	200µm	<u>200µm</u>	50µm	
下段	YZ	200µm	200µm	200µm	<u>50µm</u>	

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



		la	3с	5e
上段	XY			
	YZ			
山邸	XY			
	YZ			
下码	XY			
	YZ			

表 3.3.2-13 組織試験結果(マクロ組織観察、材料: Type316L、実施機関:日立GE、エッチング液:塩酸+過酸化水素+水、図中1目盛1mm)

			×100	-		×400
上段	XY		100/19	100 pre-	A DO A DO A	
	YZ	1091	1.00pm	ingen		2500
中段	XY	100 μ π	104.0	10 gra	Contraction of the second	
	YZ	Тойн	3.00 раз	100µm	25μ	25µm
下印	XY	103,25	10 <u>#</u>		The second se	
下段	YZ	100µm	100pm	109µm	25µm	25 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4

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



			×100	-		×400
LFR	XY	100 gr 4	10 <i>u</i> =	100grm	25,00	A Contraction
	YZ	100pm	100pm	TODAL	25µ0	25µm
中四	XY	10 / 4	100 ji a	100 u m	25,28	
TEX	YZ		Toolar	Todate	25µm	25µm
T	XY					Strong of the state of the stat
	YZ	Tooline	100	<u>100µm</u>		1 25µm

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



			×100			×400
上邸	XY	100 x m		1 IO Ha	2540	Con ?
	YZ	-100µm			25ym	Le Las
中段	XY		100 µ m	100 J**		
	YZ	IOIN	Isoine	Tooline	25μ0	2590
下印	XY	10021	100 m m		2500	
下段	YZ	a opine.		Fociaria	25µm	25pm

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



	1	la	3c	5e
上段	XY			
	YZ			
	XY			
ΤŲ	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、実施機関: IHI、エッチング液: 塩酸(約 70℃)、図中1 目盛1 mm)

			×100	-		×400
上段	XY	Пірт.	тария Парала	Пуля.		E / / / / / / / / / / / / / / / / / / /
	YZ	lõum	i de la compañía de l Itôjum	logan.	<del>ара</del>	25µ
	XY	Taylor		отран Порт	an and a second s	
甲段	YZ	Longert		Doper.	Zim	
	XY	mil	िंद्रम	Topra	Zijm	
下段	YZ	ισμπ	ο Γοζωτι	ο Ο Ο Ο Ο Ο Ο Ο Ο Ο Ο Ο Ο Ο Ο	Zijm	

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



			×100			×400
L FL	XY	πųΰ	τοτμπ	ο Γύτρπ	<u>а</u> рт	25
	YZ	100µm	100µm	ти01	To a construction of the second se	are a construction of the second
	XY		Infûl	100jan	Tiper.	
甲段	YZ	COlum	ίΩμπ.	100µm	Zījen	
下段	XY	m(00)	πįΩ	100jum	Total and the second seco	200 - 200 - 200 - 200 - 200 - 200 - 200 - 200 - 200 - 200 - 200 - 200 - 200 - 200 - 200 - 200 - 200 - 200 - 200
	YZ	l ŪΩμπ	ο Γιατροποί Γιατροποί Γιατροποί Γιατροποί Γιατροποί Γιατροποί Γιατροποί Γιατροποί Γιατροποί Για Γιατροποί Για Γιατροποί Για Γιατροποί Για Για Για Για Για Για Για Για Για Για	iOjun	25pm	

表 3.3.2-19 組織試験結果(ミクロ組織観察、材料: Type316L、実施機関: 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	Dojan	n Indem	Tārīm.	Таулт	27
	YZ	Table of the second	Tourn	indexes and indexes	The second se	The second se
	XY	TOOLTT.	πųση	Iŭgun	алан алан алан алан алан алан алан алан	28
甲段	YZ	π <sub>ρ</sub> σοι		ο Ο Ο Ο Δ μ ο Ο Ο μ ο Ο Ο μ ο Ο Ο Ο Ο Ο Ο Ο Ο Ο Ο Ο Ο Ο	September 2014	25,
	XY	TOJum	ίσ <sub>μ</sub> π	TOyan	25gm	
下段	YZ	10garra	Dym	Town	Zym	2

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



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。

元素	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Мо	Ν	0
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

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

\*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

元素	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Мо	N	0
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

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

\*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
元素	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Мо	Ν	0
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

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

\*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

元素	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Мо	Ν	0
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

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

\*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

3.3.4 常温引張試験

表 3.3.4-1 に MHI にて造形した試験片に対する常温引張試験結果を示す。垂直方向 引張試験片について、0.2%耐力は 316~327 MPa、引張強さは 507~528 MPa、伸びは 38~63 %、絞りは 40~78 % であり、いずれの試験片も JIS G5121:2003 SCS16A の規格 値を満足したものの、伸びについては 2 本の試験片が、絞りについては 21 本の試験 片が JIS G4303:2012 SUS316L の規格値を下回った。

水平方向引張試験片について、0.2%耐力は340~366 MPa、引張強さは592~627 MPa、伸びは38~52%、絞りは48~65%であり、いずれの試験片もJIS G5121:2003: SCS16Aの規格値を満足したものの、伸びについては2本の試験片が、絞りについて は18本の試験片がJIS G4303:2012 SUS316Lの規格値を下回った。

45°方向試験片について、0.2%耐力は 332~379 MPa、引張強さは 561~650 MPa、伸びは 36~54%、絞りは 40~70%であり、いずれの試験片も JIS G5121:2003 SCS16Aの 規格値を満足したものの、伸びについては 1本の試験片が、絞りについては 3本の試 験片が JIS G4303:2012 SUS316L の規格値を下回った。

表 3.3.4-2 に東芝 ESS にて造形した試験片に対する常温引張試験結果を示す。

垂直方向引張試験片について、0.2%耐力は219~244 MPa、引張強さは544~553 MPa、伸びは57.6~67.2%、絞りは60.3~73.7%であり、いずれの試験片もJIS G4303:2012 SUS316L と JIS G5121:2003 SCS16A の規格値を満足した。

水平方向引張試験片について、0.2%耐力は214~233 MPa、引張強さは567~574 MPa、伸びは55.3~60.8%、絞りは59.2~72.3%であり、いずれの試験片もJIS G5121:2003 SCS16Aの規格値を満足したものの、絞りについては1本の試験片がJIS G4303:2012 SUS316Lの規格値を下回った。

45°方向試験片について、0.2%耐力は228~245 MPa、引張強さは567~572 MPa、伸びは55.8~59.0%、絞りは54.1~70.6%であり、いずれの試験片もJIS G5121:2003 SCS16A の規格値を満足したものの、絞りについては1本の試験片がJIS G4303:2012 SUS316L の規格値を下回った。

表 3.3.4-3 に日立 GE にて造形した試験片に対する常温引張試験結果を示す。

垂直方向引張試験片について、0.2%耐力は 337~354 MPa、引張強さは 529~562 MPa、伸びは 43~68 %、絞りは 44~76 %であり、いずれの試験片も JIS G5121:2003 SCS16A の規格値を満足したものの、絞りについては 2 本の試験片が JIS G4303:2012 SUS316L の規格値を下回った。

水平方向引張試験片について、0.2%耐力は347~398 MPa、引張強さは603~646 MPa、伸びは28~49%、絞りは36~70%であり、伸びについては2本の試験片がJIS G5121:2003 SCS16A の規格値を、4本の試験片がJIS G4303:2012 SUS316L の規格値を

3-133

下回り、絞りについては 5 本の試験片が JIS G4303(2012) SUS316L の規格値を下回った。

45°方向試験片について、0.2%耐力は347~396 MPa、引張強さは586~649 MPa、伸びは44~52%、絞りは66~75%であり、いずれの試験片もJIS G4303:2012 SUS316L とJIS G5121:2003 SCS16Aの規格値を満足した。

表 3.3.4-4 に IHI にて造形した試験片に対する常温引張試験結果を示す。

垂直方向引張試験片について、0.2%耐力は 308~335 MPa、引張強さは 539~558 MPa、伸びは 52~59.6%、絞りは 61.8~73%であり、いずれの試験片も JIS G4303:2012 SUS316L と JIS G5121:2003 SCS16Aの規格値を満足した。

水平方向引張試験片について、0.2%耐力は 311~368 MPa、引張強さは 584~615 MPa、伸びは 39.1~46.9%、絞りは 48.4~66.1%であり、いずれの試験片も JIS G5121:2003 SCS16A の規格値を満足したものの、伸びについては 1 本の試験片が、絞 りについては 3 本の試験片が JIS G4303:2012 SUS316L の規格値を下回った。

45°方向試験片について、0.2%耐力は329~371 MPa、引張強さは570~627 MPa、伸びは43.6~48.4%、絞りは64.3~71.1%であり、いずれの試験片もJIS G4303:2012 SUS316L とJIS G5121:2003 SCS16A の規格値を満足した。

試験	採取	試験片 ID	0.2%耐力	引張強さ	伸び	絞り
<u> </u>	业癿		(MPa)	(MPa)	(%)	(%)
	上段	1-V11a	319	515	56	/5
刀凹			320	513	62	/5
			321	512	<u>60</u>	/3
		I-VII0 TVT1-*1	323	51/	51	57
			323	524	51	49
		1 - V I 2a	318	515	53	/0
		1-V12b	320	515	58	/6
		1 - V I 2C	320	515	58	/1
		$1 - V I 2 d^{-1}$	322	522	38	12
		1-V12e <sup>-1</sup>	322	510	40	38
		1-V13a	321	519	55	76
		1-V130	320	519	50	/0
		1-V13C T VT24*2	323	525	55	72
		$1 - V 1 30^{-2}$	322	525	29	/ 5
		T VT40	327	525	56	43
		1-V14a T VT4b	320	519	56	12
		T-V140	320	510	57	75
		1-V14C	322	522	50	/5
		1 - V 140 T VT4 $a^{*1}$	225	525	39	52
		T VT5	323	511	40 60	33
		T-V15a	321	520	56	72
		T V T 5 c	322	520	50	77
		T-V150	324	520	59	66
		$T_{-}VT5e^{*1}$	326	528	50	55
	由邸		320	518	58	76
	TK	T V M1b	320	514	50	70
			323	514	63	73
		$T_V M1d^{*2}$	323	518	54	57
		T-VM1e <sup>*1</sup>	323	522	40	42
		T-VM2a	318	516	56	78
		T-VM2b	320	514	60	70
		T-VM2c	320	516	58	74
		$T-VM2d^{*1}$	322	522	48	49
		T-VM2e <sup>*1</sup>	323	526	40	48
		T-VM3a	321	519	56	77
		T-VM3b	319	518	56	78
		T-VM3c	321	521	54	77
		T-VM3d <sup>*1</sup>	321	522	55	61
		T-VM3e <sup>*1</sup>	323	527	42	46
		T-VM4a	316	509	60	74
		T-VM4b	318	519	56	76
		T-VM4c	323	519	59	77
		T-VM4d	321	522	56	64
		T-VM4e <sup>*1</sup>	324	524	45	43
		T-VM5a	319	509	61	71
		T-VM5b	320	517	57	75
		T-VM5c	323	521	60	76
		T-VM5d	323	521	60	74
		T-VM5e <sup>*1</sup>	325	522	38	45

表 3.3.4-1 常温引張試験結果(材料: Type316L、実施機関: MHI)(1/3)

封驗	採販		0.2% 耐力	] 正論 と	伸び	絞り
両の	位置	試験片 ID	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)
垂直	下段	T-VB1a	320	520	58	78
方向	1 123	T-VB1b	322	515	62	76
		T-VB1c	322	514	61	73
		T-VB1d	323	518	44	48
		T-VB1e <sup>*1</sup>	324	526	48	55
		T-VB2a	320	519	55	76
		T-VB2b	321	517	61	76
		T-VB2c	323	518	60	75
		T-VB2d <sup>*1</sup>	324	521	52	53
		T-VB2e <sup>*1</sup>	321	528	46	52
		T-VB3a	321	520	58	78
		T-VB3b	321	519	58	77
		T-VB3c	324	525	56	62
		T-VB3d*1*5	-	-	-	-
		T-VB3e <sup>*1</sup>	324	527	44	42
		T-VB4a	317	507	60	73
		T-VB4b	321	519	57	76
		T-VB4c <sup>*4</sup>	322	519	57	73
		T-VB4d	322	521	58	76
		T-VB4e <sup>*1</sup>	325	525	40	50
		T-VB5a	318	509	62	72
		T-VB5b	319	518	56	75
		T-VB5c	322	518	58	76
		T-VB5d	320	517	49	59
		T-VB5e <sup>*1</sup>	322	524	40	40

表 3.3.4-1 常温引張試験結果(材料: Type316L、実施機関: MHI) (2/3)

\*5:伸び計取付不良により過大荷重を負荷、計測不可

試験 方向	採取 位置	試験片 ID	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)
水平	上段	T-HT1b	354	603	44	59
方向		T-HT1d	359	615	42	62
		T-HT2a	342	609	40	62
		T-HT2b	342	611	42	60
		T-HT2d	360	615	52	61
		T-HT2e <sup>*1</sup>	352	623	49	62
		T-HT3c <sup>*4</sup>	346	592	41	58
		T-HT4a	347	617	40	54
		T-HT4b	349	602	43	59
		T-HT4d	351	625	44	63
		<u>T-HT4e*1*4</u>	354	625	40	48
		1-H15b	352	599	45	61
	ць rп.		357	609	42	60
	甲段	T-HMIb	353	601	43	61
		I-HMId	358	614	44	58
		I-HM2a	343	609	43	65
		T UM24	350	616	40	59
			251	620	39	59
			345	614	42	63
		T-HM/a	340	609	40	60
		T-HM4b	347	619	38	62
		T-HM4d	357	609	47	60
		T-HM4e <sup>*1</sup>	353	627	45	56
		T-HM5b	350	596	47	62
		T-HM5d*1	356	608	44	56
	下段	T-HB1b	357	609	43	57
		T-HB1d	365	620	41	57
		T-HB2a	344	611	44	58
		T-HB2b	347	616	44	62
		T-HB2d*2	366	621	46	59
		T-HB2e <sup>*1</sup>	352	622	42	58
		T-HB3c <sup>*4</sup>	354	600	44	58
		T-HB4a*4	344	612	44	64
		T-HB4b	356	609	44	60
		I-HB4d	353	626	40	62
		T UD 5h	333	602	44	59
		Т-ПБ30 Т-ПБ30	355	617	42	56
150	下所	T DD1h	222	561	<del>4</del> 0	70
4.5 古向	ΓĘ	T DB1d	352	612	<u> </u>	63
22101		T-DB1a	361	626	53	61
		T-DB2a	376	644	48	59
		T-DB2e <sup>*2</sup>	370	635	48	65
		T-DB3b	350	599	46	64
		T-DB3d	336	573	54	67
		T-DB4a	377	650	51	54
		T-DB4c	362	625	48	64
		T-DB4e <sup>*1</sup>	379	644	36	40
		T-DB5b	335	568	52	67
		T-DB5d	355	609	42	64

表 3.3.4-1 常温引張試驗結果(材料: Type316L、実施機関: MHI) (3/3)

試験 方向	採取 位置	試験片 ID	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)
垂直	上段	T-VT1a	236	550	62.3	71.5
方向		T-VT1b	233	547	62.0	72.0
		T-VT1c	226	548	60.1	67.8
		T-VT1d	225	549	61.7	68.4
		T-VT1e	238	550	61.1	64.6
		T-VT2a	232	546	61.7	68.5
		T-VT2b	229	551	61.7	68.5
		T-VT2c	234	548	60.8	66.8
		T-VT2d	233	547	61.5	70.0
		T-VT2e	229	549	63.2	72.0
		T-VT3a	238	545	62.9	69.0
		T-VT3b	230	549	61.9	66.8
		T-VT3c <sup>*4</sup>	244	546	62.3	70.9
		T-VT3d	229	548	60.1	60.3
		T-VT3e	229	553	61.1	65.8
		T-VT4a	241	547	63.2	69.4
		T-VT4b	229	549	62.3	71.1
		T-VT4c	233	547	61.4	68.1
		T-VT4d	230	546	61.6	69.3
		T-VT4e	229	551	62.1	71.2
		<u>1-V15a</u>	237	549	61.3	69.2
		1-V15b	227	550	62.5	66.1
		1-V15C	230	548	62.7	69.3
		1-V150	227	548	64.3	/0.2
	中印	1-V15e	242	550	58.0	62.8
	甲段	1 - V M la	232	547	62.1	69.2
			230	547	62.1	03./
		T-VM1d	225	548	64.2	71.0
			221	540	62.0	68.6
		$T_VM2_2$	233	545	62.5	71.1
		T-VM2h	270	550	64.3	68.8
		T-VM2c	227	547	61.3	66.8
		T-VM2d	227	546	61.2	72.1
		T-VM2e	220	548	63.3	71.5
		T-VM3a	237	545	61.9	69.4
		T-VM3b	226	548	62.4	72.2
		T-VM3c	242	547	57.6	65.7
		T-VM3d	224	547	62.0	62.9
		T-VM3e	227	553	63.1	70.4
		T-VM4a	235	546	65.0	68.3
		T-VM4b	225	547	62.9	68.9
		T-VM4c	229	545	61.8	69.6
		T-VM4d	225	548	62.7	71.3
		T-VM4e	228	552	63.8	72.3
		T-VM5a	236	547	60.4	62.7
		T-VM5b	226	548	62.3	64.9
		T-VM5c	226	548	60.9	71.4
		T-VM5d	222	547	62.6	72.9
		T-VM5e	232	549	61.9	66.4

表 3.3.4-2 常温引張試驗結果(材料: Type316L、実施機関:東芝 ESS) (1/3)

試験 方向	採取 位置	試験片 ID	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)
垂直	下段	T-VB1a	235	545	67.2	73.3
方向		T-VB1b	234	546	61.9	71.0
		T-VB1c	219	544	64.8	70.9
		T-VB1d	232	550	58.5	64.9
		T-VB1e	232	547	65.8	70.4
		T-VB2a	238	545	62.3	67.9
		T-VB2b	226	549	61.7	71.6
		T-VB2c	225	546	62.5	71.4
		T-VB2d	224	546	60.6	60.6
		T-VB2e	222	546	61.5	66.1
		T-VB3a	239	546	63.1	71.3
		T-VB3b	223	548	62.4	67.6
		T-VB3c	239	545	64.3	71.2
		T-VB3d	222	547	61.5	63.1
		T-VB3e	223	550	61.5	67.7
		T-VB4a	230	544	62.7	69.3
		T-VB4b	225	547	60.6	69.6
		T-VB4c	228	547	61.7	71.0
		T-VB4d	225	548	62.3	68.6
		T-VB4e	226	551	63.2	70.2
		T-VB5a	236	544	64.6	73.7
		T-VB5b	224	549	63.5	69.5
		T-VB5c*4	225	545	65.1	71.3
		T-VB5d	224	547	62.0	72.7
		T-VB5e	237	547	64.0	73.6

表 3.3.4-2 常温引張試験結果(材料: Type316L、実施機関:東芝 ESS) (2/3)

試験 方向	採取 位置	試験片 ID	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)
水平	上段	T-HT1b	225	572	57.7	66.8
方面	1.12	T-HT1d	223	573	57.5	68.7
2013		T-HT2a	225	571	58.6	71.6
		T-HT2b	226	571	60.3	69.3
		T-HT2d	230	573	56.7	69.0
		T-HT2e	228	574	57.8	62.7
		T-HT3c	232	572	59.3	70.2
		T-HT4a	224	571	57.5	69.2
		T-HT4b	230	572	55.7	67.8
		T-HT4d	229	572	55.3	65.1
		T-HT4e	229	572	55.3	65.4
		T-HT5b	229	572	55.3	71.2
		T-HT5d	230	574	56.3	71.7
	中段	T-HM1b	223	570	57.5	67.4
		T-HM1d	222	570	58.0	65.3
		T-HM2a	222	567	57.4	65.8
		T-HM2b	227	570	57.4	66.7
		T-HM2d	225	571	57.8	64.3
		T-HM2e	220	570	60.8	70.8
		I-HM3C	232	5/1	59.0	69.6
		I-HM4a TUM4b	224	509	58.0	04.2
			228	572	57.8	/0.1
			226	573	50.2	66.7
		T-HM5b	220	571	56.8	69.6
		T-HM5d	220	571	59.0	70.0
	下段	T-HR1b	223	570	59.0	70.4
	1 +2	T-HB1d	223	571	60.3	70.7
		T-HB2a	214	569	58.9	59.2
		T-HB2b	226	571	59.7	69.4
		T-HB2d	225	571	57.3	66.1
		T-HB2e	226	570	58.1	63.8
		T-HB3c	233	571	59.9	72.3
		T-HB4a	222	570	60.6	68.4
		T-HB4b	225	571	59.2	63.4
		T-HB4d <sup>*5</sup>	222	571	58.3	66.2
		T-HB4e	225	570	57.4	65.7
		I-HB5b	225	570	58.1	69.3
450	сл.		225	570	57.7	/0.2
45° 士后	下按	I-DBIb	235	569	56.0	6/.4
刀凹			231	560	56.6	07.8
		T-DB2a	233	571	57.4	60.3
		T-DB2c	272	567	59.0	54.1
		T-DB20	220	569	56.2	68.1
		T-DR3d	235	567	58.3	65.1
		T-DB4a	236	572	57.3	70.6
		T-DB4c	245	569	55.8	65.4
		T-DB4e	228	568	58.6	64.6
		T-DB5b	239	569	56.7	65.4
		T-DB5d	233	568	58.1	67.5

表 3.3.4-2 常温引張試験結果(材料: Type316L、実施機関:東芝 ESS) (3/3)

\*5:伸び計に異常が発生したため参考値扱いとする。

試験	採取	對野子 ID	0.2%耐力	引張強さ	伸び	絞り
方向	位置	时间天/ ID	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)
垂直	上段	T-VT1a	344	538	61	75
方向		T-VT1b	347	544	62	75
		T-VT1c	348	548	62	72
		T-VT1d	345	547	60	73
		T-VT1e	351	559	60	75
		T-VT2a	348	543	64	75
		T-VT2b	347	544	60	75
		T-VT2c	350	548	62	76
		T-VT2d	347	550	60	76
		T-VT2e	348	556	59	76
		T-VT3a	349	545	62	76
		T-VT3b	349	544	60	76
		T-VT3c	346	544	64	73
		T-VT3d	349	550	60	73
		T-VT3e	352	558	57	71
		T-VT4a	348	543	62	74
		T-VT4b	350	546	62	76
		T-VT4c	348	549	62	76
		T-VT4d	347	552	59	69
		T-VT4e	351	562	56	73
		T-VT5a	342	534	68	75
		T-VT5b	346	542	63	75
		T-VT5c	349	546	60	71
		T-VT5d	341	552	60	75
		T-VT5e	354	560	57	76
	中段	T-VM1a	340	535	66	72
		T-VM1b	341	537	66	72
		T-VM1c	344	542	64	75
		T-VM1d	344	547	62	72
		T-VM1e	344	554	58	73
		T-VM2a	342	539	66	73
		T-VM2b	346	542	64	74
		T-VM2c	341	543	60	73
		T-VM2d	343	548	60	73
		T-VM2e	346	555	58	68
		T-VM3a	346	538	64	73
		T-VM3b	342	540	64	73
		T-VM3c	343	544	64	72
		T-VM3d	341	549	60	13
		T-VM3e	348	559	56	66
		1 - V M4a	342	537	62	/3
		1-VM40	342	542	63	72
		1 - V IVI4C	34/	545	64	/3
		$\frac{1 - V W 40}{T W M 40}$	342	560	01	/4
		1-VM4e	330	522	33	04
		1-V M5h	240	526	66	/ 3
			240	540	64	13
			242	542	60	72
			240	550	54	13
		1-v MDe	348	539	30	00

表 3.3.4-3 常温引張試験結果(材料: Type316L、実施機関:日立GE)(1/3)

試験 方向	採取 位置	試験片 ID	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)
垂直	下段	T-VB1a	338	534	62	72
方向		T-VB1b	341	541	62	73
		T-VB1c	346	545	62	70
		T-VB1d	348	549	59	73
		T-VB1e	353	554	58	72
		T-VB2a	344	539	62	70
		T-VB2b	347	544	62	73
		T-VB2c	346	548	61	72
		T-VB2d	343	553	62	73
		T-VB2e	352	561	58	72
		T-VB3a	348	542	65	75
		T-VB3b	349	546	62	74
		T-VB3c	349	547	60	73
		T-VB3d	349	555	60	72
		T-VB3e	351	560	44	45
		T-VB4a	342	540	62	72
		T-VB4b	346	545	62	74
		T-VB4c	344	548	58	73
		T-VB4d	348	551	60	74
		T-VB4e	348	560	43	44
		T-VB5a	339	529	66	73
		T-VB5b	344	538	62	73
		T-VB5c	349	543	61	74
		T-VB5d	346	549	60	74
		T-VB5e	350	560	54	64

表 3.3.4-3 常温引張試験結果(材料: Type316L、実施機関:日立GE) (2/3)

試験 方向	採取 位置	試験片 ID	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)
水平	上段	T-HT1b	387	638	43	61
方向		T-HT1d	393	643	45	60
		T-HT2a	367	627	40	66
		T-HT2b	396	643	44	64
		T-HT2d	367	635	42	67
		T-HT2e*1*3	368	622	30	36
		T-HT3c	393	646	46	61
		T-HT4a	369	632	41	66
		T-HT4b	372	633	40	63
		T-HT4d	398	641	45	64
		T-HT4e*1*3*4	354	603	28	39
		T-HT5b	386	634	47	59
		T-HT5d	394	644	46	65
	中段	T-HM1b	364	621	46	66
		T-HM1d	374	626	46	67
		T-HM2a	364	618	44	67
		T-HM2b	365	622	42	68
		T-HM2d	377	629	46	66
		T-HM2e <sup>*1*3</sup>	362	619	42	60
		T-HM3c	362	625	42	68
		T-HM4a	359	618	44	68
		T-HM4b	378	627	46	67
		1-HM4d	365	622	44	69
		I-HM4e <sup>1134</sup>	347	608	34	45
		I-HM5b	3/2	621	4/	69
	<del></del> сл.	I-HM5d	3//	627	46	68
	下按	I-HBID	3/0	622	48	66
		I-HBI0	380	629	44	65
		I-HB2a T UD2h	339	620	42	0/
		Т-ПБ20 Т-ПБ20	360	620	4/	70
			359	620	44	63
		T HB <sub>2</sub> c	386	632	42	67
		T-HB4a	360	617	40	66
		T-HB4h	361	621	42	68
		T-HB4d	381	630	47	68
		T-HB4e	355	616	38	51
		T-HB5b	378	622	49	65
		T-HB5d	380	627	48	68
45°	下段	T-DB1b	347	586	50	73
方向	1 123	T-DB1d	352	602	46	73
		T-DB2a	389	634	52	70
		T-DB2c	384	635	46	69
		T-DB2e*1*3	374	628	50	68
		T-DB3b	356	604	44	74
		T-DB3d	354	591	50	74
		T-DB4a	396	649	48	66
		T-DB4c	387	633	50	69
		$T-DB4e^{*1*3*4}$	385	634	49	70
		T-DB5b	350	586	48	75
		T-DB5d	355	602	46	74

表 3.3.4-3 常温引張試験結果(材料: Type316L、実施機関:日立GE) (3/3)

試験	採取	對驗片 ID	0.2%耐力	引張強さ	伸び	絞り
方向	位置	武家月 ID	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)
垂直	上段	T-VT1a	320	540	56.8	71.0
方向		T-VT1b	325	544	56.5	70.1
		T-VT1c	330	551	55.5	68.5
		T-VT1d	327	554	54.9	71.3
		T-VT1e	318	553	53.7	69.5
		T-VT2a	323	542	58.2	72.1
		T-VT2b	331	544	58.2	72.6
		T-VT2c	334	547	57.3	71.3
		T-VT2d	331	552	55.9	72.1
		T-VT2e	315	553	53.8	67.7
		T-VT3a	328	543	56.8	72.2
		T-VT3b	331	543	57.1	69.9
		T-VT3c	333	546	57.4	72.2
		T-VT3d	330	550	56.5	72.1
		T-VT3e	315	555	54.0	68.6
		T-VT4a	328	543	56.5	70.6
		T-VT4b	333	545	57.0	71.4
		T-VT4c	335	549	56.4	71.5
		T-VT4d	331	552	55.6	71.5
		T-VT4e	313	554	52.9	67.7
		T-VT5a	326	544	56.0	69.2
		T-VT5b	333	547	55.9	71.4
		T-VT5c	335	552	54.6	68.4
		T-VT5d	330	554	54.7	69.4
		T-VT5e	318	554	53.8	69.1
	甲段	T-VM1a	319	539	57.6	69.4
		T-VM1b	322	542	57.7	70.9
		T-VM1c	326	550	56.2	72.0
		T-VMId	322	551	54.8	71.0
		1-VMIe	313	552	55.6	/1.2
		1 - V M2a	322	539	58.0	71.2
		1-VM20	330	542	57.9	/1.3
			224	54/	57.2	/1.0
		1 - V M 2a	324	552	5/.5	/1.2
		T VM2e	309	541	58.2	72.8
		T-VM3b	327	542	59.6	72.8
		T-VM3c	320	545	58.0	72.2
		T-VM3d	325	550	54.3	72.5
		T-VM3e	309	552	54.4	70.5
		T-VM4a	327	542	58.0	70.3
		T-VM4b	332	545	58.0	71.0
		T-VM4c	333	548	56.8	71.0
		T-VM4d	326	551	56.1	71.3
		T-VM4e	308	555	53.9	69.9
		T-VM5a	326	542	56.0	72.9
		T-VM5b	332	545	55.3	70.4
		T-VM5c	334	552	54.3	71.8
		T-VM5d	327	554	55.7	70.6
		T-VM5e	315	554	53.7	69.0

表 3.3.4-4 常温引張試験結果(材料: Type316L、実施機関: IHI)(1/3)

試験	採取	試験片 ID	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)
垂直	下段	T-VB1a	321	540	58.1	72 1
方向	1 12	T-VB1b	324	543	55.8	71.0
		T-VB1c	329	552	55.2	69.2
		T-VB1d	324	553	54.5	66.2
		T-VB1e	314	555	54.2	70.8
		T-VB2a	325	539	56.6	72.6
		T-VB2b	333	546	57.1	72.1
		T-VB2c	334	552	56.0	71.0
		T-VB2d	326	555	55.6	71.8
		T-VB2e <sup>*3</sup>	312	554	54.0	70.7
		T-VB3a	331	542	57.9	73.0
		T-VB3b	333	546	57.4	71.5
		T-VB3c <sup>*4</sup>	333	551	56.0	72.2
		T-VB3d	328	553	55.0	72.1
		T-VB3e	312	556	53.5	67.9
		T-VB4a	330	542	56.5	72.3
		T-VB4b	335	548	56.6	70.8
		T-VB4c	335	554	55.9	70.3
		T-VB4d*3	328	555	54.6	61.8
		T-VB4e	310	557	53.2	65.6
		T-VB5a <sup>*3</sup>	328	544	55.6	71.2
		T-VB5b	333	547	56.2	72.6
		T-VB5c	335	554	55.2	72.1
		T-VB5d	330	556	53.6	72.6
		T-VB5e*3*4	317	558	52.0	67.6

表 3.3.4-4 常温引張試験結果(材料: Type316L、実施機関: IHI) (2/3)

試験 方向	採取	試験片 ID	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)
水亚	上臣	T-HT1b	352	605	45.9	62.5
方面	1.4X	T-HT1d	355	611	45.7	64.5
20100		T-HT2a	335	597	42.3	65.4
		T-HT2b	365	611	45.8	63.3
		T-HT2d	347	601	43.1	65.2
		T-HT2e	328	598	43.6	63.5
		T-HT3c	366	612	45.9	62.9
		T-HT4a	337	596	42.2	64.6
		T-HT4b	345	599	41.7	65.3
		T-HT4d	365	613	45.2	63.5
		T-HT4e*3	322	594	41.3	57.2
		T-HT5b	360	605	45.5	64.4
		T-HT5d	363	612	46.0	65.4
	中段	T-HM1b	355	606	45.6	63.4
	1 124	T-HM1d	352	611	46.5	65.5
		T-HM2a	339	599	43.2	65.4
		T-HM2b	343	599	42.6	65.0
		T-HM2d	353	610	46.4	63.4
		T-HM2e <sup>*3</sup>	311	592	45.0	64.2
		T-HM3c	345	600	41.3	63.9
		T-HM4a	337	599	43.1	64.2
		T-HM4b	361	610	46.9	62.4
		T-HM4d	338	598	42.5	65.1
		T-HM4e <sup>*3</sup>	312	590	44.0	62.3
		T-HM5b	363	610	45.8	64.2
		T-HM5d	361	611	45.2	65.3
	下段	T-HB1b	354	607	45.0	64.9
		T-HB1d	357	611	45.9	64.6
		T-HB2a	347	601	42.5	65.7
		T-HB2b	362	613	45.3	62.7
		T-HB2d	339	603	43.4	65.7
		T-HB2e*1*3*4	319	594	42.3	53.8
		T-HB3c <sup>+</sup>	363	615	46.0	64.9
		T-HB4a	346	601	41.5	64.1
		I-HB46	348	604	41./	65.3
		I-HB40	358	612	46.4	64.4
		T UD5h	314	584	39.1	48.4
		1-ПБЗО Т ЦР54	308	612	40.1	64.2
150	一下「戶几		303	570	43.0	04.2
45 古向	下权	T DD14	329	580	47.2	/1.1
기미			330	509 617	44.0	66.5
		T DB2a	368	622	40.4	64.3
		T DB2c	3/3	600	40.5	64.4
		T-DB2C	344	587	43.6	68.5
		T-DB30	337	576	45 7	70.8
		T-DB3u	371	627	46.8	65 7
		T-DB4c	366	620	46.6	67.0
		T-DB4e <sup>*4</sup>	349	615	46.9	64.7
		T-DB5b	336	573	45.6	68.4
		T-DB5d	342	591	44.8	68.7

表 3.3.4-4 常温引張試験結果(材料: Type316L、実施機関: IHI) (3/3)

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)

宇坛挑剧	測定結果(全点、HV1.0)					
<i>夫</i> 肔饿眹	範囲	平均值				
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		XY 面		YZ 面			
機関	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。硬さと相関のある引張試験結果 (3.4.1(4)項参照)ではリコート及びガスフロー方向の中央近傍で強度が上昇する傾向 が認められていないこと、測定値全域に渡って明瞭な差が認められないことから、 硬さ測定値に及ぼす造形位置に影響は小さいものと考えられる。

士占	始	端	中	央	終端		
刀叩	最大	最小	最大	最小	最大	最小	
	18.8%	18.8%	21.9%	3.1%	9.4%	28.1%	
9 <u> </u>	(6/32)	(6/32)	(7/32)	(1/32)	(3/32)	(9/32)	
ガフフロー	18.8%	12.5%	18.8%	8.5%	16.7%	25.0%	
7770-	(9/48)	(6/48)	(9/48)	(4/48)	(8/48)	(12/48)	

表 3.4.1(1)-3 各方向で硬さが最大、最小値となる割合

(2) 組織試験

①マクロ/ミクロ組織試験

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±10℃×2h)、造形位置 2 ケ所: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。

		IQ マップ	Phase マップ	IPF マップ	KAM マップ
上段	XY	800 un	500 um	50 m	200 ut
	YZ	50 sn	100 um	50 m	50 um
山印	XY	500 um	500 um	50 m	
甲权	YZ	500 um		50 m	500 um
	XY	50 um	500 um	50 un	500 um
	YZ	80° um		50 un	500 um
			オーステナイト相 ろフェライト相	001 101	Min Mar 0 5

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





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



(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、造形位置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る。























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)-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)

(4) 常温引張試験

表 3.4.1(4) – 1 に各実施機関の常温引張試験結果のまとめを示す。表中には比較対 象として JIS 規格の SUS316L 及び SCS16A 並びに ASTM 規格の PBF Type316L の規 格値を示す。

0.2%耐力について、いずれの平均値も全規格値を満足した。また、全測定点も全 規格値を満足した。

引張強さについて、いずれの平均値も全規格値を満足した。一方で、MHIの垂直 方向試験片については ASTM F3184 の規格値(≧515MPa)を一部下回った。

伸びについて、いずれの平均値も全規格値を満足したが、MHI、日立 GE 及び IHI の一部試験片において JIS G4303 及び JIS G4304 の規格値( $\geq$ 40%)を下回った。一方 で、JIS G5121( $\geq$ 33%)を下回る試験片は 2本、ASTM F3184 ( $\geq$ 30%)を下回る試験片 は 1本のみであった。なお、これら規格値を下回った試験片の多くは非破壊検査 (NDT)において不合格と判定されたが、合格と判定されたものもある。

絞りについて、MHIの水平方向試験片以外の平均値は全規格値を満足したが、い ずれの実施機関においても JIS G4303 (≧60%)を下回る試験片が多く認められた。な お、これら規格値を下回った試験片の多くは NDT において不合格と判定された が、合格と判定されたものもある。一方で、ASTM F3184の規格値(≧30%)は全測定 点で満足した。

以上より、PBF の 0.2%耐力及び引張強さは JIS 規格の SUS316L、SCS16A を十分 上回ることが予想される。伸びについては JIS G4303 及び JIS G4304 の SUS316L 規 格値(≧40%)を下回る可能性があるが、適用規格を JIS G5121 の SCS16A とすると、 殆どの試験片が規格値(≧33%)を満足する見込みである。一方で、絞りに関しては JIS G4303 の SUS316L で≧60%が要求されるが、この要求値を全測定点で満足させ ることは困難である。

ASTM F3184 と比較すると、0.2%耐力、伸び及び絞りは規格値を十分上回ることが想定されるが、引張強さに関しては規格値を下回る可能性も見られた。

次に、造形方向、造形位置等が引張特性値に及ぼす影響を確認するために、以下 の観点で評価を行う。

・ 造形方向の影響(垂直、水平、斜角)

- ケ陥の影響
- ・ 造形高さの影響(上段、中段、下段)
- ・ ガスフロー方向の影響
- ・ リコーター方向の影響
- ・ レーザラップ面の影響
- ・ レーザ光源距離の影響

実施	試験		0.2%耐力	引張強さ	伸び	絞り	
機関	方向	項日	MPa	MPa	%	%	
	T. +	範囲	316 ~ 327	507 ~ 528	38 ~ 63	40 ~ 78	
	垂直	全点平均点	321.6	519.1	54.3	67.3	
	(14 7 - 7)	σ	2.1	4.8	6.7	11.9	
	ित्रम	範囲	340 ~ 366	592 ~ 627	38 ~ 52	48 ~ 65	
MHI	水平	全点平均点	351.8	612.3	43.0	59.6	
	(39 / - 7)	σ	6.3	9.1	2.8	3.1	
	M 7.	範囲	332 ~ 379	561 ~ 650	36 ~ 54	40 ~ 70	
	新用 (12データ)	全点平均点	357.6	612.2	47.8	61.5	
	(12) (12)	σ	16.7	31.1	5.0	7.9	
	玉古	範囲	219 ~ 244	544 ~ 553	57.6 ~ 67.2	60.3 ~ 73.7	
	 (75 データ)	全点平均点	229.9	547.6	62.3	69.0	
	(137 77)	σ	6.0	2.0	1.6	3.0	
中中	-te Tr	範囲	214 ~ 233	567 ~ 574	55.3 ~ 60.8	59.2 ~ 72.3	
宋 C F C C	小平 (30 データ)	全点平均点	225.7	571.0	58.0	67.7	
LOO	(397 7)	σ	3.7	1.4	1.5	2.9	
	創品	範囲	228 ~ 245	567 ~ 572	55.8 ~ 59	54.1 ~ 70.6	
	新円 (12データ)	全点平均点	235.4	568.9	57.3	66.1	
	(12)))	σ	5.1	1.4	1.0	4.2	
	垂直 (75 <i>データ</i> )	範囲	337 ~ 354	529 ~ 562	43 ~ 68	44 ~ 76	
		全点平均点	345.9	546.8	60.8	72.1	
		σ	3.7	7.7	4.0	5.2	
ㅁ 士	水平 (39データ) 創み	範囲	347 ~ 398	603 ~ 646	28 ~ 49	36 ~ 70	
GE		全点平均点	372.3	626.4	43.3	63.4	
OL		σ	12.9	9.6	4.5	7.8	
		範囲	347 ~ 396	586 ~ 649	44 ~ 52	66 ~ 75	
	- 赤子円 (12.データ)	全点平均点	369.1	615.3	48.3	71.3	
	(12) ))	σ	18.3	22.3	2.3	2.9	
	壬古	範囲	308 ~ 335	539 ~ 558	52.0 ~ 59.6	61.8 ~ 73.0	
	王旦 (75 データ)	全点平均点	325.7	548.6	55.9	70.7	
	(,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	σ	7.5	5.3	1.6	1.9	
	水亚	範囲	311 ~ 368	584 ~ 615	39.1 ~ 46.9	48.4 ~ 66.1	
IHI	バー (39 データ)	全点平均点	347.4	604.1	44.2	63.5	
		σ	16.0	7.7	1.9	3.4	
	斜角	範囲	329 ~ 371	570 ~ 627	43.6 ~ 48.4	64.3 ~ 71.1	
	小「八」 (12 データ)	全点平均点	348.8	599.7	46.2	67.4	
		σ	14.4	20.9	1.4	2.4	
JIS G 4303「ステンレス鋼棒」 SUS316L		・ ンレス鋼棒」 16L	≧175	≧480	≧40	≧60	
JIS G ス翁	4304「熱間 岡板及び鋼帯	圧延ステンレ 帯」SUS316L	≧175	≧480	≧40	—	
ЛS G	5121「ステ 品」SC	ンレス鋼鋳鋼 S16A	≧205	≧480	≧33	—	
ASTM F3184 UNS S31603			≧205	≧515	≧30	≧30	

表 3.4.1(4)-1 各実施機関の常温引張試験結果のまとめ

造形方向の影響

a. 垂直方向 · 水平方向 · 斜角方向

PBF 方式では金属組織に異方性が残留する可能性が高いことから、応力の負荷方向によってその特性が変わりうる。本項では垂直方向、水平方向、斜角方向に造形した試験片の引張特性を比較し、造形方向が引張特性に及ぼす影響を評価する。なお、本項では造形方向のみの影響を見たいことから、評価する上で外乱となりうる以下の試験片は対象外とする。

- ・ NDT (RT、PT、CT) で不合格又は指示有りと評価された試験片
- 試験中に不具合が発生した試験片

表 3.4.1(4)①a-1及び図 3.4.1(4)①a-1に各実施機関における垂直、水平及び 斜角方向の引張特性を示す。また、図 3.4.1(4)①a-2~図 3.4.1(4)①a-5に各実 施機関における引張特性のヒストグラムを示す。

0.2%耐力について、東芝 ESS では試験方向による明確な差は認められないも のの、MHI、日立 GE、IHI では垂直方向が最も小さくなる傾向が認められた。 また、水平方向と斜角方向については明瞭な差は認められなかった。東芝 ESS 材は組織観察で異方性が殆ど認められていないことから、造形方向による影響 が明確に認められなかったものと考えられる。ヒストグラムからデータの分布 傾向を見ると、MHI、日立 GE 及び IHI では垂直方向は比較的分布が収束して いるが、水平方向と斜角方向は垂直方向よりもバラツキが大きい傾向が認めら れた。一方で、東芝 ESS では水平方が最もバラツキが小さい傾向が認められ た。

引張強さについて、いずれの実施機関においても垂直方向が最も小さくなる 傾向が認められた。また、水平方向と斜角方向については明瞭な差は認められ なかった。ヒストグラムからデータの分布傾向を見ると、MHI、日立 GE 及び IHI では垂直方向及び水平方向は比較的分布が収束しており、斜角方向はバラ ツキが大きい傾向が認められた。一方、東芝 ESS ではいずれの方向でも比較的 分布は収束していた。

伸びについて、MHI、日立 GE 及び IHI では水平方向が最も小さくなる傾向 が認められた。東芝 ESS の水平方向と斜角方向の伸びはほぼ同等であり、垂直 方向よりも小さかった。また、いずれの実施機関においても垂直方向の伸びが 最も大きくなる傾向が認められた。ヒストグラムからデータの分布傾向を見る と、いずれの実施機関においても、各方向の分布が比較的収束している傾向が 認められた。

絞りについて、MHI、日立 GE 及び IHI では水平方向が最も小さくなる傾向 が認められた。東芝 ESS は斜角方向が最も小さい値を示すが、バラツキを考慮 すると水平方向との差は小さいものと考えられる。また、いずれの実施機関に おいても垂直方向の絞りが最も大きくなる傾向が認められた。ヒストグラムか らデータの分布傾向を見ると、垂直方向及び水平方向は比較的分布が収束して いるが、斜角方向はバラツキが大きい傾向が認められた。

				測定	官値			標準	偏差	
実施 機関	試験 方向	データ 数	0.2% 耐力	引張 強さ	伸び	絞り	0.2% 耐力	引張 強さ	伸び	絞り
			MPa	MPa	%	%	MPa	MPa	%	%
	垂直	52 /75	321	517	57.5	73.4	2.0	3.9	3.3	5.8
MHI	水平	27 /39	351	611	42.7	60.3	6.6	7.7	2.9	2.5
	斜角	10 /12	354	607	49.0	63.3	16.1	31.2	3.7	4.5
**	垂直	73 /75	230	548	62.2	68.9	5.9	2.0	1.5	3.0
果之 ECC	水平	38/39	226	571	58.0	67.8	3.7	1.4	1.5	2.9
LOO	斜角	12 /12	235	569	57.3	66.1	5.1	1.4	1.0	4.2
	垂直	75 /75	346	547	60.8	72.1	3.7	7.7	4.0	5.2
日 立 C E	水平	33 /39	375	628	44.6	66.0	11.9	8.4	2.3	2.7
GE	斜角	12 /12	369	615	48.3	71.3	18.3	22.3	2.3	2.9
	垂直	70 /75	326	548	56.0	70.8	7.4	5.2	1.5	1.6
IHI	水平	33 /39	352	606	44.4	64.4	10.8	5.8	1.8	1.0
	斜角	11/12	349	598	46.1	67.7	15.1	21.3	1.4	2.3

表 3.4.1(4)①a-1 引張特性に及ぼす造形方向の影響







図 3.4.1(4) ①a-1 引張特性に及ぼす造形方向の影響





東芝 ESS



図 3.4.1(4)①a-2 各実施機関における 0.2%耐力のヒストグラム





図 3.4.1(4)①a-3 各実施機関における引張強さのヒストグラム



図 3.4.1(4)①a-4 各実施機関における伸びのヒストグラム



10

5

0

404244464850525456586062646668707274

IHI

■垂直 ■水平 ■斜角

10

5

30 33 36 39 42 45 48 51 54 57 60 63 66 69 72 75 78

■垂直 ■水平 ■斜角

日立 GE

図 3.4.1(4)①a-5 各実施機関における絞りのヒストグラム

b. 水平方向(X方向、Y方向)

STEP1では水平方向試験片をX方向、Y方向にそれぞれ造形している。a項 のバラツキ評価において、水平方向試験片のバラツキ傾向が比較的大きかった ことを受け、本項では水平方向試験片におけるX方向とY方向の影響について 評価する。なお、本項では造形方向のみの影響を見たいことから、評価する上 で外乱となりうる以下の試験片は対象外とする。

・ NDT (RT、PT、CT) で不合格又は指示有りと評価された試験片

試験中に不具合が発生した試験片

表 3.4.1(4)①b-1 および図 3.4.1(4)①b-1 に各実施機関における X 方向、Y 方向の引張特性を示す。

**0.2%**耐力について、東芝 ESS では X 方向、Y 方向で明確な差は認められなかった。一方、MHI、日立 GE 及び IHI では X 方向が小さくなる傾向が認められた。

引張強さについて、東芝 ESS では X 方向、Y 方向で明確な差は認められなかった。一方、MHI では Y 方向が、日立 GE では X 方向が若干小さい傾向が認められたが、バラツキを考慮するとその差は非常に小さいものと考えられる。また、IHI では X 方向が小さい傾向が認められた。

伸びについて、東芝 ESS では X 方向、Y 方向で明確な差は認められなかった。一方、MHI では X 方向が若干小さい傾向が認められたが、バラツキを考慮 するとその差は非常に小さいものと考えられる。また、IHI 及び日立 GE では X 方向が小さい傾向が認められた。

絞りについて、MHI及びIHIではX方向、Y方向で明確な差は認められなかった。一方、東芝ESSではX方向が、日立GEではY方向が若干小さい傾向が 認められたが、バラツキを考慮するとその差は非常に小さいものと考えられる。

表 3.4.1(4) ①b-2 に引張特性に及ぼす X 方向・Y 方向の影響評価結果を示 す。組織試験において異方性が認められた MHI、日立 GE 及び IHI では造形方 向による差が見られることが多かったが、異方性の少ない東芝 ESS では造形方 向の影響は小さい傾向が認められた。また、日立 GE と IHI は同じ装置メーカ を使用しており、絞りは傾向に少し差が見られたもののその程度は小さく、概 ね同様の傾向を示すことが確認された。

					測定値			標準偏差			
実施 機関	試驗 方向	免 可	データ 数	0.2% 耐力	引張 強さ	伸び	絞り	0.2% 耐力	引張 強さ	伸び	絞り
				MPa	MPa	%	%	MPa	MPa	%	%
	水平	Ź.	27 /39	351	611	42.7	60.3	6.6	7.7	2.9	2.5
MHI	* 17	Х	12 /19	346	615	41	61	3.8	5.9	2.2	2.8
	水平	Y	15 /20	356	607	44	60	4.6	7.5	3.1	2.1
市坊	★★ 水平		38 /39	226	571	58.0	67.8	3.7	1.4	1.5	2.9
FCC	水平	Х	19/19	225	571	58	66	4.1	1.6	1.5	3.0
Loo		Y	19 /20	226	571	58	69	3.3	1.1	1.5	2.3
日公	水平	Ż	33 /39	375	628	44.6	66.0	11.9	8.4	2.3	2.7
GE	* 17	Х	13/19	364	624	42	67	4.2	6.2	1.5	1.7
UL	小十	Y	20 /20	382	632	46	65	9.2	8.2	1.4	2.9
	水平	Ż.	33 /39	352	606	44.4	64.4	10.8	5.8	1.8	1.0
IHI	水亚	Х	14/19	341	600	42.5	64.9	5.8	2.2	0.7	0.7
	水平	Y	19 /20	360	610	45.8	64.1	5.1	2.6	0.5	1.1

表 3.4.1(4) ①b-1 引張特性に及ぼす X 方向・Y 方向の影響

-00	-2σ	-1 <b>σ</b>	+1σ	+2σ	±1σ区間におさまる確率→約 68%
~	$\sim$	~	$\sim$	$\sim$	±2σ区間におさまる確率→約95%
-2σ	-1σ	+1σ	+2σ	œ	σ:水平方向の全データから算出



図 3.4.1(4) ①b-1 引張特性に及ぼす X 方向・Y 方向の影響
表 3.4.1(4) ①b-2 引張特性に及ぼす X 方向・Y 方向の影響評価結果

実施機関	MHI	東芝 ESS	日立 GE	IHI
装置	SLM280	Concept Laser M2	EOS M290	EOS M290
異方性*	多	少	多	多
0.2%耐力	X <y< td=""><td>X≒Y</td><td>X<y< td=""><td>X<y< td=""></y<></td></y<></td></y<>	X≒Y	X <y< td=""><td>X<y< td=""></y<></td></y<>	X <y< td=""></y<>
引張強さ	X≧Y	X≒Y	X≦Y	X <y< td=""></y<>
伸び	X≦Y	X≒Y	X <y< td=""><td>X<y< td=""></y<></td></y<>	X <y< td=""></y<>
絞り	X≒Y	X≦Y	X≧Y	X≒Y

\*異方性:組織試験結果をもとに分類分け。

- ⇒ : 概ね同等
  ≦, ≧ : 概ね同等か僅かに差がある程度

<,> : 差が認められる

c. 斜角方向(X+方向、X-方向、Y+方向、Y-方向)

斜角方向試験片は X 方向、Y 方向に加え、Z 方向もパラメータとして加味さ れている。図 3.4.1(4)①c-1に斜角方向試験片の分類と、造形方向の呼称を示 す。a 項のバラツキ評価において、斜角方向試験片のバラツキ傾向が比較的大 きかったことを受け、本項では引張特性に及ぼす X+方向、X-方向、Y+方向、 Y-方向の影響について評価する。なお、本項では造形方向のみの影響を見たい ことから、評価する上で外乱となりうる以下の試験片は対象外とする。

・ NDT (RT、PT、CT) で不合格又は指示有りと評価された試験片

試験中に不具合が発生した試験片

表 3.4.1(4)①c-1 および図 3.4.1(4)①c-2 に各実施機関における X+方向、X-方向、Y+方向、Y-方向の引張特性を示す。

0.2%耐力について、MHI、日立 GE 及び IHI では Y+方向が最も小さく、次い で Y-方向、X+方向、X-方向の順であった。また、斜角方向を 4 方向に分類する ことでバラツキは大幅に低減した。一方、東芝 ESS では方向による明確な差は 認められなかった。

引張強さについて、MHI、日立 GE 及び IHI では Y+方向が最も小さく、次い で Y-方向、X+方向、X-方向の順であった。また、斜角方向を4方向に分類す ることでバラツキは大幅に低減した。一方、東芝 ESS では方向による明確な差 は認められなかった。

伸びについて、MHI、日立 GE 及び IHI では Y-方向が最も小さかった。一 方、東芝 ESS では方向による明確な差は認められなかった。

絞りについて、MHI、日立 GE 及び IHI では X-方向が最も小さく、次いで X+ 方向、Y-方向、Y+方向の順であった。なお、MHI の X-方向が顕著に低いが、 これは 2 データ中1 点が 54%と絞り値が顕著に低いデータを含んでいるためで ある。他のデータと比較しても極端に低いことから外れ値として除外すると、 X-方向は 59%となるが、それでも X-方向が最も小さい傾向が示された。一方、 東芝 ESS では X+方向が他の方向と比較して小さい傾向が認められた。これは 3 データ中1 点の絞り値が他の2 点と比べて顕著に低いためである。1 点が 54.1%、残りの2 点が 67.3%、65.4%であることを勘案すると、当該データは外 れ値として扱うことが適当である。外れ値を除外する場合、X+方向は 66.4%と なる。この場合、東芝 ESS では X+方向及び Y+方向の絞り値がほぼ同値で最も 低い傾向を示した。

表 3.4.1(4)①c-2 に引張特性に及ぼす X+方向、X-方向、Y+方向、Y-方向の影響評価結果を示す。組織試験において異方性が認められた MHI、日立 GE 及び IHI では造形方向による差が見られることが多かったが、異方性の少ない東芝 ESS では造形方向の影響は小さい傾向が認められた。また、MHI、日立 GE 及び IHI は使用した装置に関わらず、概ね同様の傾向を示すことが確認された。





	3				測定	官値			標準(	扁差	
実施 機関	試願 方[	険 句	データ 数	0.2% 耐力	引張 強さ	伸び	絞り	0.2% 耐力	引張 強さ	伸び	絞り
				MPa	MPa	%	%	MPa	MPa	%	%
	斜角	角	10/12	354	607	49.0	63.3	16.1	31.2	3.7	4.5
		X+	2 /3	362	626	50.5	62.5	0.7	0.7	3.5	2.1
MHI	余岳	X-	2 /3	377	647	49.5	56.5	0.7	4.2	2.1	3.5
	<b>赤</b> 十円	Y+	3 /3	334	567	52.0	68.0	2.1	6.0	2.0	1.7
		Y-	3 /3	354	607	44.7	63.7	4.0	6.8	2.3	0.6
	斜	角	12 /12	235	569	57.3	66.1	5.1	1.4	1.0	4.2
市士		X+	3 /3	236	568	57.1	62.3	8.5	1.2	1.7	7.1
来 ECC	斜角	Х-	3 /3	235	570	57.8	68.2	7.0	2.1	0.7	3.2
ESS		Y+	3 /3	236	568	57.2	66.0	2.3	1.2	1.0	1.3
		Y-	3 /3	234	569	57.1	67.8	3.6	0.6	1.0	0.3
	斜角	争	12 /12	369	615	48.3	71.3	18.3	22.3	2.3	2.9
日子		X+	3 /3	383	632	50.7	69.0	8.1	3.2	1.2	1.0
GE	公伍	Х-	3 /3	388	639	47.7	68.3	6.7	8.4	1.5	2.1
UL	<b>赤</b> 十円	Y+	3 /3	350	588	49.3	74.0	3.5	2.9	1.2	1.0
	2	Y-	3 /3	354	603	45.3	73.7	2.1	1.2	1.2	0.6
	斜	角	11/12	349	598	46.1	67.7	15.1	21.3	1.4	2.3
		X+	3 /3	357	615	47.5	66.0	12.5	5.7	0.9	1.4
IHI	公白	X-	3 /3	370	625	46.6	65.0	2.1	3.5	0.4	1.0
	<b>师</b> 月	Y+	3 /3	334	573	46.2	70.1	4.4	3.0	0.9	1.5
		Y-	2 /3	341	589	44.3	68.7	3.1	2.0	0.6	0.2

表 3.4.1(4)①c-1 引張特性に及ぼす X+方向・X-方向・Y+方向・Y-方向の影響

-00	-2σ	-1σ	+lσ	+2σ	±1σ区間におさまる確率→約 68%
~	$\sim$	$\sim$	$\sim$	$\sim$	±2σ区間におさまる確率→約95%
-2σ	-1σ	+1σ	+2σ	ø	σ:斜角全方向の全データから算出



図 3.4.1(4)①c-2 引張特性に及ぼす X+方向・X-方向・Y+方向・Y-方向の影響

表 3.4.1(4)①c-2	引張特性に及ぼす X+方向	・X-方向・Y+方向	・Y-方向の影響評価結果
----------------	---------------	------------	--------------

実施機関	MHI	東芝 ESS	日立 GE	IHI
装置	SLM280	Concept Laser M2	EOS M290	EOS M290
異方性*	多	少	多	多
0.2%耐力	Y+	方向差なし	Y+	Y+
引張強さ	Y+	方向差なし	Y+	Y+
伸び	Y-	方向差なし	Y-	Y-
絞り	Х-	X+、Y+	X-	X-

\*異方性:組織試験結果をもとに分類分け。

表中には最も小さい傾向を示した試験片方向を示す。

# d. 全造形方向

表 3.4.1(4)①d-1に NDT(RT、PT、CT)で不合格又は指示有りと評価され た試験片または試験中に不具合が発生した試験片を除く、各実施機関における 全造形方向の引張特性を示す。表中の青字は、a~c項での検討結果を踏まえ、 各実施機関において引張特性が最も小さくなると考えられる箇所を示してい る。なお、一つの特性に複数の青字を示している場合、それらの差は小さく、 概ね同等であることを示している。MHIの絞りについては、水平方向と斜角方 向(X-)がいずれも同程度であり最も低い。また、東芝 ESS の伸びについては、 水平方向と斜角方向がいずれも同程度であり最も低く、絞りについては水平方 向と X+方向、Y+方向がいずれも同程度であり最も低い。

表 3.4.1(4) ①d-2 に引張特性に及ぼす造形方向の影響評価結果を示す。組織 試験において異方性が認められた MHI、日立 GE 及び IHI では、使用した装置 に依らず同等の傾向を示した。一方で、組織試験において異方性が認められな かった東芝 ESS では造形方向の影響が認められない特性もあったが、造形方向 依存性が認められた特性については MHI、日立 GE 及び IHI と同様の傾向を示 した。

~					測定	官値	1 1		標準	偏差	
実施 機関	試	験 向	データ 数	0.2% 耐力	引張 強さ	伸び	絞り	0.2% 耐力	引張 強さ	伸び	絞り
	1000		2222	MPa	MPa	%	%	MPa	MPa	%	%
	垂直		52 /75	321	517	57.5	73.4	2.0	3.9	3.3	5.8
MHI	水	平	27 /39	351	611	42.7	60.3	6.6	7.7	2.9	2.5
	-	X	12/19	346	615	41.4	61.0	3.8	5.9	2.2	2.8
	水平	Y	15 /20	356	607	43.8	59.7	4.6	7.5	3.1	2.1
MHI	斜	角	10 /12	354	607	49.0	63.3	16.1	31.2	3.7	4.5
		X+	2 /3	364	626	50.5	62.5	0.7	0.7	3.5	2.1
	斜岳	X-	2 /3	377	647	49.5	59.0*	0.7	4.2	2.1	3.5
	赤†円	<b>Y</b> +	3 /3	334	567	52.0	68.0	2.1	6.0	2.0	1.7
		Y-	3 /3	354	607	44.7	63.7	4.0	6.8	2.3	0.6
	垂	直	73 /75	230	548	62.2	68.9	5.9	2.0	1.5	3.0
	水	平.	38 /39	226	571	58.0	67.8	3.7	1.4	1.5	2.9
	-	Х	19 /19	225	571	57.9	66.5	4.1	1.6	1.5	3.0
市坊	小平	Y	19 /20	226	571	58.0	69.1	3.3	1.1	1.5	2.3
FSS	斜	角	12 /12	235	569	57.3	66.1	5.1	1.4	1.0	4.2
ESS		X+	3 /3	236	568	57.1	66.4*	8.5	1.2	1.7	7.1
	公伍	X-	3 /3	235	570	57.8	68.2	7.0	2.1	0.7	3.2
	<b>新</b> 円	<b>Y</b> +	3 /3	236	568	57.2	66.0	2.3	1.2	1.0	1.3
0		Y-	3 /3	234	569	57.1	67.8	3.6	0.6	1.0	0.3
	垂直		75 /75	346	547	60.8	72.1	3.7	7.7	4.0	5.2
	水	平	33 /39	375	628	44.6	66.0	11.9	8.4	2.3	2.7
	水亚	Χ	13 /19	364	624	42.4	67.2	4.2	6.2	1.5	1.7
日寸	<b>W</b> T	Y	20 /20	382	632	46.1	65.2	9.2	8.2	1.4	2.9
GE	斜	角	12 /12	369	615	48.3	71.3	18.3	22.3	2.3	2.9
OL		X+	3 /3	383	632	50.7	69.0	8.1	3.2	1.2	1.0
	斜角	X-	3 /3	388	639	47.7	68.3	6.7	8.4	1.5	2.1
	11/3	Y+	3 /3	350	588	49.3	74.0	3.5	2.9	1.2	1.0
		Y-	3 /3	354	603	45.3	73.7	2.1	1.2	1.2	0.6
	垂	直	70 /75	326	548	56.0	70.8	7.4	5.2	1.5	1.6
	水	平	33 /39	352	606	44.4	64.4	12.6	6.3	1.7	1.1
	水亚	Χ	15/19	341	600	42.5	64.9	5.8	2.2	0.7	0.7
IHI	小十	Y	19 /20	360	610	45.8	64.1	5.1	2.6	0.5	1.1
	斜	角	11 /12	349	598	46.1	67.7	15.1	21.3	1.4	2.3
		X+	3/3	357	615	47.5	66.0	12.5	5.7	0.9	1.4
	斜角	X-	3 /3	370	625	46.6	65.0	2.1	3.5	0.4	1.0
	11/3	Y+	3/3	334	573	46.2	70.1	4.4	3.0	0.9	1.5
		Y-	2 /3	341	589	44.3	68.7	3.1	2.0	0.6	0.2

表 3.4.1(4) ①d-1 引張特性に及ぼす造形方向の影響

青字:前述の検討結果を踏まえ、各実施機関において

各特性が最も小さくなると考えられる箇所

\*外れ値を除外した平均値を参考として示す。

表 3.4.1(4) ① d - 2	引張特性に及ぼす造形方向	(斜角)	の影響評価結果
--------------------	--------------	------	---------

実施機関	MHI	東芝 ESS	日立 GE	IHI
装置	SLM280	Concept Laser M2	EOS M290	EOS M290
異方性*	多	少	多	多
0.2%耐力	垂直	垂直、水平、斜角	垂直	垂直
引張強さ	垂直	垂直	垂直	垂直
伸び	水平	水平、斜角	水平(X)	水平(X)
絞り	水平、斜角(X-)	水平、斜角(X+、Y+)	水平	水平

\*異方性:組織試験結果をもとに分類分け。

表中には最も小さい傾向を示した試験片方向を示す。

② 欠陥の影響

試験片のNDT(RT、PT、CT)ではガスフロー下流側で多くの欠陥が発生し、 不合格となる試験片が多く認められた。本項では欠陥が引張特性に及ぼす影響を 評価する。

表 3.4.1(4)②-1に NDT で不合格又は指示有りと評価された試験片の引張特性 を示す。また、図 3.4.1(4)②-1~図 3.4.1(4)②-4に NDT で合格の試験片と、不 合格又は指示有りと評価された試験片の引張特性の比較を示す。なお、表中に示 すように斜角方向は比較する試験本数が少ないこと、造形方向が特性に及ぼす影 響が大きいことから、本項では評価対象外とする。

0.2%耐力について、垂直方向は NDT の合格/不合格(または指示有り)に関わら ず、概ね同程度であることが確認された。一方、水平方向については NDT の合 格/不合格(または指示有り)に関わらず概ね同程度か、不合格(または指示有り)が 若干小さい傾向が認められた。

引張強さについて、垂直方向は NDT の合格/不合格(または指示有り)に関わら ず概ね同程度か、合格が若干小さい傾向が認められた。水平方向については NDT の合格/不合格(または指示有り)に関わらず概ね同程度か、不合格(または指示有 り)が若干小さい傾向が認められた。

伸びについて、垂直方向及び水平方向ともに、NDTの合格/不合格(または指示有り)に関わらず概ね同程度か、不合格(または指示有り)が若干小さい傾向が認められた。

絞りについて、垂直方向および水平方向ともに、NDTの合格/不合格(または 指示有り)に関わらず概ね同程度か、不合格(または指示有り)が若干小さい傾向が 認められた。

同じ装置メーカである日立 GE 及び IHI については水平方向のみ比較することができるが、いずれも同じ傾向を示した。

以上より、0.2%耐力、伸び及び絞りについてはいずれの方向においても合否で 同程度、又は不合格(または指示有り)が若干小さいこと、引張強さについては垂 直方向と水平方向で異なる傾向が示された。

	<del>4</del> 4€				測定	官値			標準	偏差	
実施 機関	武殿 方向	NDT	データ 数	0.2% 耐力	引張 強さ	伸び	絞り	0.2% 耐力	引張 強さ	伸び	絞り
			C. TATE IN	MPa	MPa	%	%	MPa	MPa	%	%
	垂古	合格	52 /75	321	517	57.5	73.4	2.0	3.9	3.3	5.8
	王旦	不合格	22 /75	323	524	46.7	52.9	1.6	2.9	6.5	10.0
MIT	-te Tr	合格	27 /39	351	611	42.7	60.3	6.6	7.7	2.9	2.5
MHI	小平	不合格	12/39	353	615	43.6	58.0	5.5	11.2	2.4	3.9
	於伊	合格	10 /12	354	607	49.0	63.3	16.1	31.2	3.7	4.5
	<b>新</b> 开	不合格	2 /12	375	640	42.0	52.5	6.4	6.4	8.5	17.7
	元古	合格	73 /75	230	548	62.2	68.9	5.9	2.0	1.5	3.0
	王旦	不合格	2 /75	235	546	63.7	71.1	13.4	0.7	2.0	0.3
東芝	水亚	合格	38/39	226	571	58.0	67.8	3.7	1.4	1.5	2.9
ESS	小千	不合格	0/39	10-12	2. <del>5-5</del> 1	10-10	1			ľ	10-12
	斜角	合格	12 /12	235	569	57.3	66.1	5.1	1.4	1.0	4.2
	<b>新</b> 州円	不合格	0 /12		ļ	ĺ	_	<u> </u>		l	-
	五古	合格	75 /75	346	547	60.8	72.1	3.7	7.7	4.0	5.2
	王旦	不合格	0 /75			ļ	I	3 <del></del>	<del>11-</del> 33	1	12 <del>-11</del>
日立	JU JE	合格	33 /39	375	628	44.6	66.0	11.9	8.4	2.3	2.7
GE	小平	不合格	6/39	358	615	35.7	49.0	7.2	7.7	6.0	11.0
	余日	合格	12 /12	369	615	48.3	71.3	18.3	22.3	2.3	2.9
	赤十 円	不合格	0 /12			]		I			
	垂古	合格	70 /75	326	548	56.0	70.8	7.4	5.2	1.5	1.6
	王旦	不合格	5 /75	324	552	54.4	68.7	8.7	5.3	1.6	4.2
шп	Tr Jr	合格	33 /39	352	606	44.4	64.4	10.8	5.8	1.8	1.0
ш	小十	不合格	6/39	324	595	43.0	58.5	19.8	10.6	2.6	6.5
	彩色	合格	11/12	349	598	46.1	67.7	15.1	21.3	1.4	2.3
	<b>朴</b> 円	不合格	1 /12	349	615	46.9	64.7	_	<del>8 -</del> 9		10-12

表 3.4.1(4) ②-1 引張特性に及ぼす造形方向の影響(NDT 不合格/指示有りデータ)

\*不合格はRT、CTでの指示有も含む



図 3.4.1(4)②-1 NDT 合格/不合格(又は指示有り)試験片の 0.2%耐力の比較 (図中の数値は試験片数を示す。不合格は RT、CT での指示有も含む。)



図 3.4.1(4)②-2 NDT 合格/不合格(又は指示有り)試験片の引張強さの比較 (図中の数値は試験片数を示す。不合格は RT、CT での指示有も含む。)



図 3.4.1(4)②-3 NDT 合格/不合格(又は指示有り)試験片の伸びの比較 (図中の数値は試験片数を示す。不合格は RT、CT での指示有も含む。)



図 3.4.1(4) ② - 4 NDT 合格/不合格(又は指示有り)試験片の絞りの比較 (図中の数値は試験片数を示す。不合格は RT、CT での指示有も含む。)

3 造形高さの影響

STEP1では高さ方向に上段(T)、中段(M)、下段(B)の三領域でそれぞれ試 験片を造形している。本項ではT、M、Bでそれぞれ造形した試験片の引張特性 を比較し、造形高さが引張特性に及ぼす影響を評価する。なお、本項では造形方 向のみの影響を見たいことから、評価する上で外乱となりうる以下の試験片は対 象外とする。

・ NDT (RT、PT、CT) で不合格又は指示有りと評価された試験片

試験中に不具合が発生した試験片

表 3.4.1(4)③-1 及び図 3.4.1(4)③-1 に各実施機関における T、M、Bの引張特性を示す。

0.2%耐力について、MHI、東芝 ESS 及び IHI の垂直方向及び水平方向では造形 高さで明確な差は認められなかった。一方、日立 GE の垂直方向では造形高さで 明確な差は認められなかったものの、水平方向では T 側で若干大きい傾向を示し た。

引張強さについて、MHI、東芝 ESS 及び IHI の垂直方向及び水平方向では造形 高さで明確な差は認められなかった。一方、日立 GE の垂直方向では造形高さで 明確な差は認められなかったものの、水平方では T 側で大きい傾向を示した。

伸びについて、いずれの実施機関の垂直方向及び水平方向においても造形高さ で明確な差は認められなかった。

絞りについて、MHI、東芝 ESS 及び IHI の垂直及び水平方向では造形高さで明確な差は認められなかった。一方、日立 GE の垂直方では造形高さで明確な差は認められなかったものの、水平方向では T 側で小さい傾向を示した。

日立 GE においてのみ、水平方向の T 側で異なる影響が見られたが、これは 3.3.3 項の化学成分分析結果に示すように、T 側では異なるチャージの粉末を継ぎ 足したことにより材料の化学成分値が変わったことに起因するものと推測され る。そのため、途中で異なるチャージの粉末の継ぎ足しを行わなければ、造形高 さに関する影響は小さいものと考えられる。

					測知	自信			標準	偏差	
実施 機関	試験 方向	高さ	データ 数	0.2% 耐力	引張 強さ	伸び	絞り	0.2% 耐力	引張 強さ	伸び	絞り
				MPa	MPa	%	%	MPa	MPa	%	%
	垂	直	52 /75	321	517	57.5	73.4	2.0	3.9	3.3	5.8
		Т	18 /25	321	517	57.0	73.3	2.0	3.9	2.6	5.0
	垂直	Μ	17 /25	321	517	58.2	74.8	2.1	3.9	2.4	3.4
MUI	2	В	17 /25	321	517	57.2	72.1	1.8	4.3	4.6	8.1
MITH	水	平	27 /39	351	611	42.7	60.3	6.6	7.7	2.9	2.5
		Т	9 /13	351	611	43.6	60.1	6.5	8.3	3.6	2.7
	水平	Μ	10/13	349	609	42.4	61.1	5.9	7.5	3.1	2.0
		В	8 /13	355	614	42.3	59.4	6.9	7.3	1.8	2.7
	垂	直	73 /75	230	548	62.2	68.9	5.9	2.0	1.5	3.0
		Т	24 /25	232	549	61.8	68.3	4.7	1.8	1.2	2.9
	垂直	Μ	25 /25	229	548	62.3	69.0	6.2	1.9	1.5	3.0
東芝		В	24 /25	229	547	62.7	69.5	6.2	1.9	1.8	3.3
ESS	水平 38/		38/39	226	571	58.0	67.8	3.7	1.4	1.5	2.9
	水平	Т	13 /13	228	572	57.2	68.4	2.7	1.0	1.6	2.7
		Μ	13 /13	225	570	57.9	67.5	3.2	1.4	1.2	2.3
		В	12/13	224	570	58.9	67.4	4.3	0.7	1.1	3.8
	垂	垂直 7:		346	547	60.8	72.1	3.7	7.7	4.0	5.2
		Т	25 /25	348	548	60.9	74.3	2.9	6.9	2.5	1.9
	垂直	Μ	25 /25	343	545	62.0	71.9	3.0	7.9	3.4	2.8
日立	-	В	25/25	346	547	59.5	70.2	3.8	8.3	5.4	8.0
GE	水	平	33 /39	375	628	44.6	66.0	11.9	8.4	2.3	2.7
		Т	11/13	384	638	43.5	63.3	12.5	6.0	2.5	2.7
	水平	Μ	11/13	369	623	44.8	67.5	6.9	3.7	1.7	1.0
		В	11/13	372	624	45.5	67.1	10.5	5.4	2.5	1.5
	垂	直	70 / 75	326	548	56.0	70.8	7.4	5.2	1.5	1.6
		Т	25 /25	327	548	55.8	70.5	6.8	4.7	1.5	1.5
	垂直	Μ	25 /25	324	547	56.4	71.2	7.7	5.1	1.7	1.0
IHI	2	В	20 /25	327	550	55.7	70.9	7.7	5.9	1.4	2.1
	水	平	33 /39	352	606	44.4	64.4	10.8	5.8	1.8	1.0
		Т	12/13	352	605	44.4	64.2	13.1	6.6	1.7	1.0
	水平	Μ	11/13	350	605	44.5	64.3	9.8	5.7	2.0	1.0
		В	10 /13	354	608	44.3	64.8	9.3	4.9	1.9	1.0

表 3.4.1(4) ③-1 引張特性に及ぼす造形高さの影響

-00	-2σ	-1σ	+1σ	+2σ	±1σ区間におさまる確率→約 68%
~	~	~	$\sim$	$\sim$	±2σ区間におさまる確率→約95%
-2σ	-1σ	+1σ	+2σ	ø	σ: 垂直、水平方向からそれぞれ算出



図 3.4.1(4)③-1 引張特性に及ぼす造形高さの影響

④ ガスフロー方向の影響

試験片の非破壊検査においてガスフローの下流側では欠陥が生じる可能性が高 く、欠陥による材料特性への影響が予想される。本項ではガスフローの上流側、 下流側の各行、列の試験片の平均値、標準偏差を算出し、引張特性に及ぼす影響 を評価する。なお、本項では欠陥が生じている試験片の影響も見たいことから、 非破壊検査で不合格又は指示が確認されたデータについても同じデータ群として 扱うこととする。

表 3.4.1(4)④-1 及び表 3.4.1(4)④-2 並びに図 3.4.1(4)④-1 及び図 3.4.1(4)④-2 にガスフロー方向の上流側から下流側にかけての引張特性を示す。また、参考に 各実施機関のリコート方向、ガスフロー方向、X 方向および Y 方向を図 3.4.1(4) ④-3 に示す。以降に各実施機関の評価結果を示す。



図 3.4.1(4) ④-3 各実施機関のリコート方向、ガスフロー方向、X方向及びY方向

## a. MHI

(a)垂直方向試験片

0.2%耐力について、ガスフロー下流側に向かって大きくなる傾向が認められた。

引張強さについて、ガスフロー下流側に向かって大きくなる傾向が認められた。

伸びについて、ガスフロー下流側に向かって小さくなる傾向が認められた。 絞りについて、ガスフロー下流側に向かって小さくなる傾向が認められた。

(b)水平方向試験片

0.2%耐力について、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で差が あることから、その差異を加味して比較評価を行う。ガスフロー最上流(a行)及 び最下流(e行)は全てX方向試験片であることから、a行、e行で比較すると、 ガスフロー下流側に向かって0.2%耐力が大きくなる傾向が認められた。また、 b行及びd行はX方向試験片3つとY方向試験片9つの同じ比率で構成されて いることから、b行及びd行でも同様に比較すると、ガスフロー下流側に向か って0.2%耐力が僅かに大きくなる傾向が認められた。そのため、水平方向試験 片の0.2%耐力は上流<下流と評価した。

引張強さについて、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で僅か に差があることから、その差異を加味して比較評価を行う。ガスフロー最上流 (a行)及び最下流(e行)は全てX方向試験片であることから、a行、e行で比較す ると、ガスフロー下流側に向かって引張強さが大きくなる傾向が認められた。 また、b行及びd行はX方向試験片3つとY方向試験片9つの同じ比率で構成 されていることから、b行及びd行でも同様に比較すると、ガスフロー下流側 に向かって僅かに引張強さが大きくなる傾向が認められた。そのため、水平方 向試験片の引張強さは上流<下流と評価した。

伸びについて、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で僅かに差 があることから、その差異を加味して比較評価を行う。ガスフロー最上流(a行) 及び最下流(e行)は全てX方向試験片であることから、a行、e行で比較する と、ガスフロー下流側に向かって僅かに伸びが大きくなる傾向が認められた が、その差はバラツキを考慮すると非常に小さいものと考えられる。また、b 行及びd行はX方向試験片3つとY方向試験片9つの同じ比率で構成されてい ることから、b行及びd行でも同様に比較すると、伸びはガスフローの上流か ら下流にかけてほぼ同値であり、明確なガスフローの影響は認められなかっ た。そのため、水平方向試験片の伸びは上流≦下流と評価した。 絞りについて、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で明確な差 はないことから、ここでは同等の値であると想定して比較評価を行う。絞りは ガスフロー下流側に向かって僅かに小さくなる傾向が認められた。そのため、 水平方向試験片の絞りは上流≧下流と評価した。

(c)斜角方向試験片

0.2%耐力について、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+ 方向、Y-方向で差があることから、その差異を加味して比較評価を行う。ガス フロー最上流(a行)、中央(c行)及び最下流(e行)は全てX+方向試験片1つとX-方向試験片1つの同じ比率で構成されていることから、a行、c行及びe行で比 較すると、ガスフロー下流側に向かって僅かに0.2%耐力が大きくなる傾向が認 められたが、その差はバラツキを考慮すると非常に小さいものと考えられる。 そのため、斜角方向試験片の0.2%耐力は上流≦下流と評価した。

引張強さについて、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+方 向、Y-方向で差があることから、その差異を加味して比較評価を行う。ガスフ ロー最上流(a行)、中央(c行)及び最下流(e行)は全てX+方向試験片1つとX-方 向試験片1つの同じ比率で構成されていることから、a行、c行及びe行で比較 すると、引張強さはガスフローの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確 なガスフローの影響は認められなかった。そのため、斜角方向試験片の引張強 さは上流≒下流と評価した。

伸びについて、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+方向、 Y-方向で差があることから、その差異を加味して比較評価を行う。ガスフロー 最上流(a行)、中央(c行)及び最下流(e行)は全てX+方向試験片1つとX-方向試 験片1つの同じ比率で構成されていることから、a行、c行及びe行で比較する と、伸びはガスフロー下流側に向かって小さくなる傾向が認められた。そのた め、斜角方向試験片の0.2%耐力は上流>下流と評価した。

絞りについて、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+方向、 Y-方向で差があることから、その差異を加味して比較評価を行う。ガスフロー 最上流(a行)、中央(c行)及び最下流(e行)は全てX+方向試験片1つとX-方向試 験片1つの同じ比率で構成されていることから、a行、c行及びe行で比較する と、絞りはガスフロー上流から中央に向かっては僅かに増加しているように見 えるが、再度下流側に向かうと大幅に小さくなる傾向が認められた。そのた め、斜角方向試験片の絞りは上流>下流と評価した。 b. 東芝 ESS

(a)垂直方向試験片

0.2%耐力について、ガスフローの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なガスフローの影響は認められなかった。

引張強さについて、ガスフローの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明 確なガスフローの影響は認められなかった。

伸びについて、ガスフローの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確な ガスフローの影響は認められなかった。

絞りについて、ガスフローの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確な ガスフローの影響は認められなかった。

(b)水平方向試験片

0.2%耐力について、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で明確 な差はないことから、ここでは同等の値であると想定して比較評価を行う。 0.2%耐力は中央で僅かに増加しているように見えるが下流側は上流側とほぼ同 値であり、明確なガスフローの影響は認められなかった。そのため、水平方向 試験片の 0.2%耐力は上流≒下流と評価した。

引張強さについて、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で明確 な差はないことから、ここでは同等の値であると想定して比較評価を行う。引 張強さはガスフローの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なガスフロ ーの影響は認められなかった。そのため、水平方向試験片の引張強さは上流≒ 下流と評価した。

伸びについて、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で明確な差 はないことから、ここでは同等の値であると想定して比較評価を行う。ガスフ ロー下流側に向かって僅かに伸びが小さくなる傾向が認められたが、その差は バラツキを考慮すると非常に小さいものと考えられる。そのため、水平方向試 験片の伸びは上流≧下流と評価した。

絞りについて、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で僅かに差 があることから、その差異を加味して比較評価を行う。ガスフロー最上流(1列) 及び最下流(5列)は全てY方向試験片であることから、1列、5列で比較する と、ガスフロー下流側に向かって僅かに絞りが大きくなる傾向が認められた が、その差はバラツキを考慮すると非常に小さいものと考えられる。また、2 列及び4列はX方向試験片9つとY方向試験片3つの同じ比率で構成されてい ることから、2列及び4列でも同様に比較すると、伸びはガスフローの上流か ら下流にかけてほぼ同値であり、明確なガスフローの影響は認められなかっ た。そのため、水平方向試験片の伸びは上流≦下流と評価した。 (c)斜角方向試験片

0.2%耐力について、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+ 方向、Y-方向で明確な差はないことから、ここでは同等の値であると想定して 比較評価を行う。0.2%耐力はガスフローの上流から下流にかけてほぼ同値であ り、明確なガスフローの影響は認められなかった。そのため、斜角方向試験片 の0.2%耐力は上流≒下流と評価した。

引張強さについて、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+方 向、Y-方向で明確な差はないことから、ここでは同等の値であると想定して比 較評価を行う。引張強さはガスフローの上流から下流にかけてほぼ同値であ り、明確なガスフローの影響は認められなかった。そのため、斜角方向試験片 の引張強さは上流≒下流と評価した。

伸びについて、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+方向、 Y-方向で明確な差はないことから、ここでは同等の値であると想定して比較評 価を行う。伸びはガスフローの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確な ガスフローの影響は認められなかった。そのため、斜角方向試験片の伸びは上 流≒下流と評価した。

絞りについて、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+方向、 Y-方向で差があることから、その差異を加味して比較評価を行う。ガスフロー 最上流(1列)、中央(3列)及び最下流(5列)は全てY+方向試験片1つとY-方向試 験片1つの同じ比率で構成されていることから、1列、3列及び4列で比較する と、絞りはガスフローの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なガスフ ローの影響は認められなかった。そのため、斜角方向試験片の絞りは上流≒下 流と評価した。

## c. 日立 GE

(a)垂直方向試験片

0.2%耐力について、ガスフロー下流側に向かって僅かに大きくなる傾向が認められたが、その差はバラツキを考慮すると非常に小さいものと考えられる。

引張強さについて、ガスフロー下流側に向かって大きくなる傾向が認められ た。

伸びについて、ガスフロー下流側に向かって小さくなる傾向が認められた。 絞りについて、ガスフロー下流側に向かって小さくなる傾向が認められた。 (b)水平方向試験片

0.2%耐力について、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で差が あることから、その差異を加味して比較評価を行う。ガスフロー最上流(a行)及 び最下流(e行)は全てX方向試験片であることから、a行、e行で比較すると、 0.2%耐力はガスフローの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なガスフ ローの影響は認められなかった。また、b行及びd行はX方向試験片3つとY 方向試験片9つの同じ比率で構成されていることから、b行及びd行でも同様 に比較すると、0.2%耐力はガスフローの上流から下流にかけてほぼ同値であ り、明確なガスフローの影響は認められなかった。そのため、水平方向試験片 の0.2%耐力は上流≒下流と評価した。

引張強さについて、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で差が あることから、その差異を加味して比較評価を行う。ガスフロー最上流(a行)及 び最下流(e行)は全てX方向試験片であることから、a行、e行で比較すると、 ガスフロー下流側に向かって僅かに引張強さが小さくなる傾向が認められた が、その差はバラツキを考慮すると非常に小さいものと考えられる。また、b 行及びd行はX方向試験片3つとY方向試験片9つの同じ比率で構成されてい ることから、b行及びd行でも同様に比較すると、引張強さはガスフローの上 流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なガスフローの影響は認められなか った。そのため、水平方向試験片の引張強さは上流≧下流と評価した。

伸びについて、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で差がある ことから、その差異を加味して比較評価を行う。ガスフロー最上流(a行)及び最 下流(e行)は全てX方向試験片であることから、a行、e行で比較すると、伸び はガスフロー下流側に向かって小さくなる傾向が認められた。また、b行及びd 行はX方向試験片3つとY方向試験片9つの同じ比率で構成されていることか ら、b行及びd行でも同様に比較すると、伸びはガスフローの上流から下流に かけてほぼ同値であり、明確なガスフローの影響は認められなかった。そのた め、水平方向試験片の伸びは上流>下流と評価した。

絞りについて、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で明確な差 はないことから、ここでは同等の値であると想定して比較評価を行う。絞りは ガスフロー下流側に向かって小さくなる傾向が認められた。そのため、水平方 向試験片の絞りは上流>下流と評価した。

# (c)斜角方向試験片

0.2%耐力について、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+ 方向、Y-方向で差があることから、その差異を加味して比較評価を行う。ガス フロー最上流(a行)、中央(c行)及び最下流(e行)は全てX+方向試験片1つとX- 方向試験片1つの同じ比率で構成されていることから、a行、c行及びe行で比較すると、0.2%耐力はガスフロー下流側に向かって小さくなる傾向が認められた。そのため、斜角方向試験片の0.2%耐力は上流>下流と評価した。

引張強さについて、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+方 向、Y-方向で差があることから、その差異を加味して比較評価を行う。ガスフ ロー最上流(a行)、中央(c行)及び最下流(e行)は全てX+方向試験片1つとX-方 向試験片1つの同じ比率で構成されていることから、a行、c行及びe行で比較 すると、ガスフロー下流側に向かって僅かに引張強さが小さくなる傾向が認め られたが、その差はバラツキを考慮すると非常に小さいものと考えられる。そ のため、斜角方向試験片の引張強さは上流≧下流と評価した。

伸びについて、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+方向、 Y-方向で差があることから、その差異を加味して比較評価を行う。ガスフロー 最上流(a行)、中央(c行)及び最下流(e行)は全てX+方向試験片1つとX-方向試 験片1つの同じ比率で構成されていることから、a行、c行及びe行で比較する と、伸びはガスフローの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なガスフ ローの影響は認められなかった。そのため、斜角方向試験片の伸びは上流≒下 流と評価した。

絞りについて、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+方向、 Y-方向で差があることから、その差異を加味して比較評価を行う。ガスフロー 最上流(a行)、中央(c行)及び最下流(e行)は全てX+方向試験片1つとX-方向試 験片1つの同じ比率で構成されていることから、a行、c行及びe行で比較する と、絞りはガスフローの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なガスフ ローの影響は認められなかった。そのため、斜角方向試験片の絞りは上流≒下 流と評価した。

# d. IHI

(a)垂直方向試験片

0.2%耐力について、ガスフロー下流側に向かって小さくなる傾向が認められた。

引張強さについて、ガスフロー下流側に向かって大きくなる傾向が認められた。

伸びについて、ガスフロー下流側に向かって小さくなる傾向が認められた。 絞りについて、ガスフロー下流側に向かって小さくなる傾向が認められた。 (b)水平方向試験片

0.2%耐力について、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で差が あることから、その差異を加味して比較評価を行う。ガスフロー最上流(a行)及 び最下流(e行)は全てX方向試験片であることから、a行、e行で比較すると、 0.2%耐力はガスフロー下流側に向かって小さくなる傾向が認められた。また、 b行及びd行はX方向試験片3つとY方向試験片9つの同じ比率で構成されて いることから、b行及びd行でも同様に比較すると、0.2%耐力はガスフローの 上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なガスフローの影響は認められな かった。そのため、水平方向試験片00.2%耐力は上流>下流と評価した。

引張強さについて、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で差が あることから、その差異を加味して比較評価を行う。ガスフロー最上流(a行)及 び最下流(e行)は全てX方向試験片であることから、a行、e行で比較すると、 引張強さはガスフローの上流から下流にかけて小さくなる傾向が認められた。 また、b行及びd行はX方向試験片3つとY方向試験片9つの同じ比率で構成 されていることから、b行及びd行でも同様に比較すると、引張強さはガスフ ローの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なガスフローの影響は認め られなかった。そのため、水平方向試験片の引張強さは上流>下流と評価し た。

伸びについて、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で差がある ことから、その差異を加味して比較評価を行う。ガスフロー最上流(a行)及び最 下流(e行)は全てX方向試験片であることから、a行、e行で比較すると、伸び はガスフローの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なガスフローの影 響は認められなかった。また、b行及びd行はX方向試験片3つとY方向試験 片9つの同じ比率で構成されていることから、b行及びd行でも同様に比較す ると、伸びはガスフローの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なガス フローの影響は認められなかった。そのため、水平方向試験片の伸びは上流≒ 下流と評価した。

絞りについて、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で明確な差 はないことから、ここでは同等の値であると想定して比較評価を行う。絞りは ガスフロー下流側に向かって小さくなる傾向が認められた。そのため、水平方 向試験片の絞りは上流>下流と評価した。

### (c)斜角方向試験片

0.2%耐力について、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+ 方向、Y-方向で差があることから、その差異を加味して比較評価を行う。ガス フロー最上流(a行)、中央(c行)及び最下流(e行)は全てX+方向試験片1つとX- 方向試験片1つの同じ比率で構成されていることから、a行、c行及びe行で比較すると、0.2%耐力はガスフロー下流側に向かって小さくなる傾向が認められた。そのため、斜角方向試験片の0.2%耐力は上流>下流と評価した。

引張強さについて、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+方 向、Y-方向で差があることから、その差異を加味して比較評価を行う。ガスフ ロー最上流(a行)、中央(c行)及び最下流(e行)は全てX+方向試験片1つとX-方 向試験片1つの同じ比率で構成されていることから、a行、c行及びe行で比較 すると、引張強さはガスフロー下流側に向かって小さくなる傾向が認められ た。そのため、斜角方向試験片の引張強さは上流>下流と評価した。

伸びについて、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+方向、 Y-方向で差があることから、その差異を加味して比較評価を行う。ガスフロー 最上流(a行)、中央(c行)及び最下流(e行)は全てX+方向試験片1つとX-方向試 験片1つの同じ比率で構成されていることから、a行、c行及びe行で比較する と、伸びはガスフローの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なガスフ ローの影響は認められなかった。そのため、斜角方向試験片の伸びは上流≒下 流と評価した。

絞りについて、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+方向、 Y-方向で差があることから、その差異を加味して比較評価を行う。ガスフロー 最上流(a行)、中央(c行)及び最下流(e行)は全てX+方向試験片1つとX-方向試 験片1つの同じ比率で構成されていることから、a行、c行及びe行で比較する と、絞りはガスフロー下流側に向かって小さくなる傾向が認められた。そのた め、斜角方向試験片の絞りは上流>下流と評価した。

e. 傾向のまとめ

表 3.4.1(4)④e-1 にガスフローの影響評価結果をまとめる。適用する PBF 装置ごとに引張特性に及ぼすガスフローの影響の傾向が異なることが確認された。

						測定	官値			標準	偏差	
実施	試験	行/	位置	データ	0.2%	引張	伸了的	絞り	0.2%	引張	伸び	絞り
機関	方向	列	関係	数	耐力	強さ	140.	NX 9	耐力	強さ	140.	NX 9
					MPa	MPa	%	%	MPa	MPa	%	%
			<del></del> :	74 /75	322	519	54.3	67.3	2.1	4.8	6.7	11.9
		a	上流	15/15	319	514	57.6	75.1	1.6	4.7	2.6	2.5
	垂直	b		15/15	320	517	58.0	76.0	1.3	2.2	2.3	1.2
		С	中央	15/15	322	518	58.4	73.7	1.2	3.6	2.3	3.7
		d		14/15	323	521	54.1	63.3	1.5	2.1	4.7	9.9
		e	下流	15/15	324	525	43.2	48.2	1.7	2.2	4.3	5.5
			<u>91 - 1</u>	39/39	352	612	43.0	59.6	6.3	9.1	2.8	3.1
		a	上流	6/6	343	611	41.8	60.5	2.3	3.1	2.0	4.1
MHI	水亚	b		12 /12	351	606	42.9	60.4	4.2	7.1	2.3	1.7
101111	111	С	中央	3 /3	348	602	42.7	59.7	4.9	11.1	1.5	2.9
		d		12 /12	357	616	43.4	59.6	5.6	6.0	3.7	2.4
		e	下流	6/6	353	624	43.7	56.8	1.5	2.6	3.1	4.8
			<u></u>	12 /12	358	612	47.8	61.5	16.7	31.1	5.0	7.9
		a	上流	2 /2	369	638	52.0	57.5	11.3	17.0	1.4	4.9
	斜角	b		3 /3	339	576	49.3	67.0	9.6	20.2	3.1	3.0
		с	中央	2 /2	369	635	48.0	61.5	9.9	13.4	0.0	3.5
		d		3 /3	350	598	47.3	64.7	11.9	21.7	6.1	2.1
		e	下流	2 /2	375	640	42.0	52.5	6.4	6.4	8.5	17.7
			<u></u>	75 /75	230	548	62.3	69.0	6.0	2.0	1.6	3.0
		1	上流	15 /15	230	548	62.6	69.4	6.0	1.8	2.2	2.7
	垂直	2		15/15	228	547	62.0	68.9	6.0	1.8	1.0	3.1
	王臣	3	中央	15/15	231	548	61.9	67.6	7.6	2.6	1.5	3.5
		4		15/15	229	548	62.5	69.9	4.4	2.3	1.1	1.2
		5	下流	15 /15	230	548	62.4	69.1	6.1	1.7	1.7	3.7
				39 /39	226	571	58.0	67.7	3.7	1.4	1.5	2.9
		1	上流	6/6	223	571	58.3	68.2	1.4	1.3	1.1	2.1
東芝	水亚	2		12 /12	225	571	58.4	66.6	4.2	1.8	1.3	3.7
ESS	41	3	中央	3 /3	232	571	58.3	70.7	0.6	0.6	2.2	1.4
		4		12 /12	226	571	57.6	66.6	2.8	1.2	1.6	2.0
		5	下流	6 /6	227	571	57.2	70.3	2.3	1.5	1.3	0.9
			<del></del>	12 /12	235	569	57.3	66.1	5.1	1.4	1.0	4.2
		1	上流	2 /2	233	569	56.8	67.6	2.8	0.0	0.2	0.3
	斜角	2		3 /3	235	569	57.7	63.6	7.0	2.0	1.2	8.3
	11/3	3	中央	2 /2	237	568	57.3	66.6	2.1	1.4	1.5	2.1
		4		3 /3	236	570	57.2	66.9	8.5	2.1	1.4	3.3
×		5	下流	2 /2	236	569	57.4	66.5	4.2	0.7	1.0	1.5

表 3.4.1(4)④-1 引張特性に及ぼすガスフロー方向の影響(1/2)

-00	-2σ	-1σ	+1σ	+2σ	±1σ区間におさまる確率→約 68%
2	$\sim$	~	$\sim$	$\sim$	±2σ区間におさまる確率→約95%
-2σ	-1σ	+1σ	+2σ	80	σ: 各方向の全データから算出

					測定値				標準偏差			
実施 機関	試験	行/	位置関係	データ 数	0.2%	引張	引張伸び		0.2%	引張	伸び	統ち
	方向	列			耐力	強さ	140	NX 9	耐力	強さ	140	形とり
					MPa	MPa	%	%	MPa	MPa	%	%
				75 /75	346	547	60.8	72.1	3.7	7.7	4.0	5.2
		a	上流	15/15	343	538	63.9	73.4	3.9	4.5	2.2	1.6
	垂直	b		15/15	345	542	62.7	73.9	3.2	3.2	1.8	1.3
		С	中央	15 /15	346	545	61.9	73.1	2.8	2.4	1.9	1.7
		d		15/15	345	550	60.2	73.1	2.8	2.3	0.9	1.6
		e	下流	15/15	350	558	55.3	67.0	2.7	2.5	5.0	10.0
				39 /39	372	626	43.3	63.4	12.9	9.6	4.5	7.8
· · · 21		a	上流	6/6	363	622	42.5	66.7	4.3	6.3	1.8	0.8
日立	水亚	b		12 /12	376	628	45.1	65.3	10.5	7.7	2.8	3.1
GE	111	с	中央	3 /3	380	634	44.7	65.3	16.3	10.7	2.3	3.8
		d		12 /12	379	631	45.3	66.4	11.9	8.0	1.6	2.7
		e	下流	6/6	358	615	35.7	49.0	7.2	7.7	6.0	11.0
			<u>~</u>	12 /12	369	615	48.3	71.3	18.3	22.3	2.3	2.9
		a	上流	2 /2	393	642	50.0	68.0	4.9	10.6	2.8	2.8
	斜角	b		3 /3	351	592	47.3	74.0	4.6	10.4	3.1	1.0
		С	中央	2 /2	386	634	48.0	69.0	2.1	1.4	2.8	0.0
		d		3 /3	354	598	47.3	73.7	1.5	6.4	2.3	0.6
		e	下流	2 /2	380	631	49.5	69.0	7.8	4.2	0.7	1.4
	垂直			75 /75	326	549	55.9	70.7	7.5	5.3	1.6	1.9
		a	上流	15 /15	325	541	57.1	71.7	3.6	1.7	0.9	1.2
		b		15/15	330	545	57.1	71.3	3.8	2.0	1.1	0.8
		с	中央	15/15	332	550	56.2	71.1	2.8	2.9	1.1	1.4
		d		15/15	327	553	55.3	70.4	2.8	2.1	1.0	2.8
		e	下流	15 /15	313	554	53.8	69.0	3.2	1.8	0.8	1.5
			<del></del>	39 /39	347	604	44.2	63.5	16.0	7.7	1.9	3.4
		a	上流	6/6	340	599	42.5	64.9	5.1	2.0	0.6	0.7
тнт	水正	b		12 /12	356	607	44.8	64.1	8.1	4.7	1.8	1.2
m	AN-T-	с	中央	3 /3	358	609	44.4	63.9	11.4	7.9	2.7	1.0
		d		12/12	354	609	45.1	64.7	9.2	5.0	1.4	0.8
		e	下流	6 / 6	318	592	42.6	58.2	6.6	4.7	2.1	6.3
			<u>-</u>	12/12	349	600	46.2	67.4	14.4	20.9	1.4	2.4
		a	上流	2 /2	367	622	47.6	66.1	5.7	7.1	1.1	0.6
	斜角	b		3 /3	336	577	45.5	69.3	7.5	9.1	1.8	1.5
	加西	с	中央	2 /2	367	621	46.5	65.7	1.4	1.4	0.2	1.9
		d		3 /3	339	585	45.0	69.5	2.6	8.1	0.6	1.2
		e	下流	2 /2	346	612	47.2	64.6	4.2	4.2	0.4	0.2

表 3.4.1(4) ④-2 引張特性に及ぼすガスフロー方向の影響(2/2)

-00	-2σ	<b>-</b> 1σ	+1σ	+2σ	±1o区間におさまる確率→約 68%
~	~	$\sim$	~	~	±2σ区間におさまる確率→約95%
-2σ	-1σ	+1σ	+2σ	ø	σ:各方向の全データから算出



図 3.4.1(4) ④-1 引張特性に及ぼすガスフローの影響(1/2)



図 3.4.1(4) ④-2 引張特性に及ぼすガスフローの影響 (2/2)

実施機	関	MHI	東芝 ESS	日立 GE	IHI	
装置		SLM280	Concept Laser M2	EOS M290	EOS M290	
	垂直	上流<下流	上流≒下流	上流≦下流	上流>下流	
0.2%耐力	水平	上流<下流	上流≒下流	上流≒下流	上流>下流	
	斜角	上流≦下流	上流≒下流	上流>下流	上流>下流	
	垂直	上流<下流	上流≒下流	上流<下流	上流<下流	
引張強さ	水平	上流<下流	上流≒下流	上流≧下流	上流≧下流	
5	斜角	上流≒下流	上流≒下流	上流≧下流	上流>下流	
	垂直	上流>下流	上流≒下流	上流>下流	上流>下流	
伸び	水平	上流≦下流	上流≧下流	上流>下流	上流≒下流	
	斜角	上流>下流	上流≒下流	上流≒下流	上流≒下流	
	垂直	上流>下流	上流≒下流	上流>下流	上流>下流	
絞り	水平	上流≧下流	上流≒下流	上流>下流	上流>下流	
	斜角	上流>下流	上流≦下流	上流≒下流	上流>下流	

表 3.4.1(4)④e-1 引張特性に及ぼすガスフロー方向の影響評価結果のまとめ

÷ :概ね同等

≦,≧:概ね同等か僅かに差がある程度

<,> : 差が認められる

⑤ リコート方向の影響

本項ではリコートの上流側、下流側の各列の試験片の平均値、標準偏差を算出し、引張特性に及ぼす影響を評価する。

表 3.4.1(4)⑤-1及び表 3.4.1(4)⑤-2並びに図 3.4.1(4)⑤-1及び図 3.4.1(4)⑤-2 にリコート方向の上流側から下流側にかけての引張特性を示す。なお、後述する ように斜角試験片は比較する試験片数が少ないことから、今回の評価結果は参考 扱いとする。また、東芝 ESS が使用する装置はリコート方向とガスフロー方向が 同じ方向であり、④項で評価済みであることから、本項では評価対象外とする。 また、MHI が使用する装置はリコート方向が1層ごとに逆転することから、上流 側、下流側は存在しない。以降に各実施機関の評価結果を示す。

### a. MHI

(a)垂直方向試験片

0.2%耐力について、リコートの上下流側(1列目と5列目)と中央(3列目)でほぼ同値であり、明確なリコート方向の影響は認められなかった。

引張強さについて、リコートの上下流側(1列目と5列目)と中央(3列目)でほぼ同値であり、明確なリコート方向の影響は認められなかった。

伸びについて、リコートの上下流側(1列目と5列目)と中央(3列目)でほぼ同 値であり、明確なリコート方向の影響は認められなかった。

絞りについて、リコートの上下流側(1列目と5列目)と中央(3列目)でほぼ同 値であり、明確なリコート方向の影響は認められなかった。

### (b)水平方向試験片

3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で引張特性に差があることから、各方向で比較評価を行う。表 3.4.1(4)⑤a(b)-1にX方向試験片とY方向 試験片におけるリコート方向の影響を示す。なお、リコートの中央(3列目) のX方向試験片及びY方向試験片それぞれ2個及び1個しか存在せず、比較対 象が少ないことから本評価結果は参考扱いとする。

0.2%耐力について、X方向試験片ではリコートの上下流側(2列目と4列目)と 中央(3列目)でほぼ同値であり、明確なリコート方向の影響は認められなかっ た。Y方向試験片についてはリコート中央部分で僅かに低下するようにも見受 けられるが、比較する試験片数が少なく判断は難しい。

引張強さについて、X方向試験片ではリコートの上下流側(2列目と4列目)と 中央(3列目)でほぼ同値であり、明確なリコート方向の影響は認められなかっ た。Y方向試験片についてはリコート中央部分で僅かに低下するようにも見受 けられるが、比較する試験片数が少なく判断は難しい。 伸びについて、X方向試験片ではリコートの上下流側(2列目と4列目)と中央 (3列目)でほぼ同値であり、明確なリコート方向の影響は認められなかった。Y 方向試験片についてはリコートの上下流側(1列目と5列目)と中央(3列目)でほ ぼ同値であり、明確なリコート方向の影響は認められなかった。

絞りについて、X方向試験片ではリコートの上下流側(2列目と4列目)と中央 (3列目)でほぼ同値であり、明確なリコート方向の影響は認められなかった。Y 方向試験片についてはリコートの上下流側(1列目と5列目)と中央(3列目)でほ ぼ同値であり、明確なリコート方向の影響は認められなかった。

(c)斜角方向試験片

3.4.1(4)①b項で記載したように、斜角試験片はX+方向、X-方向、Y+方向及 びY-方向で引張特性に差がある。MHIが使用する装置はリコート方向が1層ご とに逆転することを考慮すると、比較対象となる試験片は1列目及び5列目と 3列目となるため、Y+方向及びY-方向試験片が比較対象となる。1列目、3列 目、5列目の試験片の構成数はY+方向試験片1つ、Y-方向試験片1つと比率は 同じであるが、1列目、5列目は下流側にY-方向が、3列目は下流側にY+方向 試験片が位置している。3.4.1(4)④a項で記載したように、引張特性はガスフロ ーの影響を受けることを考慮すると、ガスフローの上流下流での試験片方向の 比率も一致していないと正確な比較評価は行えないため、斜角方向試験片につ いては比較評価は実施できない。

b. 日立 GE

(a)垂直方向試験片

0.2%耐力について、リコートの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確 なリコート方向の影響は認められなかった。

引張強さについて、リコートの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確 なリコート方向の影響は認められなかった。

伸びについて、リコートの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なリ コート方向の影響は認められなかった。

絞りについて、リコートの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なリ コート方向の影響は認められなかった。

# (b)水平方向試験片

0.2%耐力について、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で差が あることから、その差異を加味して比較評価を行う。リコート最上流(1列)及び 最下流(5列)は全てY方向試験片であることから、1列、5列で比較すると、 0.2%耐力はリコートの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なリコート 方向の影響は認められなかった。また、2列及び4列はX方向試験片9つとY 方向試験片3つの同じ比率で構成されていることから、2列及び4列でも同様 に比較すると、0.2%耐力はリコート方向の上流から下流にかけてほぼ同値であ り、明確なリコート方向の影響は認められなかった。そのため、水平方向試験 片の0.2%耐力は上流≒下流と評価した。

引張強さについて、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で差が あることから、その差異を加味して比較評価を行う。リコート最上流(1列)及び 最下流(5列)は全てY方向試験片であることから、1列、5列で比較すると、引 張強さはリコートの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なリコート方 向の影響は認められなかった。また、2列及び4列はX方向試験片9つとY方 向試験片3つの同じ比率で構成されていることから、2列及び4列でも同様に 比較すると、引張強さはリコート方向の上流から下流にかけてほぼ同値であ り、明確なリコート方向の影響は認められなかった。そのため、水平方向試験 片の引張強さは上流≒下流と評価した。

伸びについて、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で差がある ことから、その差異を加味して比較評価を行う。リコート最上流(1列)及び最下 流(5列)は全てY方向試験片であることから、1列、5列で比較すると、リコー ト下流側に向かって僅かに伸びが大きくなる傾向が認められたが、その差はバ ラツキを考慮すると非常に小さいものと考えられる。また、2列及び4列はX 方向試験片9つとY方向試験片3つの同じ比率で構成されていることから、2 列及び4列でも同様に比較すると、伸びはリコート方向の上流から下流にかけ てほぼ同値であり、明確なリコート方向の影響は認められなかった。そのた め、水平方向試験片の伸びは上流≦下流と評価した。

絞りについて、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で明確な差 はないことから、ここでは同等の値であると想定して比較評価を行う。絞りは リコート方向の上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なリコート方向の 影響は認められなかった。そのため、水平方向試験片の絞りは上流≒下流と評 価した。

### (c)斜角方向試験片

0.2%耐力について、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+ 方向、Y-方向で差があることから、その差異を加味して比較評価を行う。リコ ート最上流(1列)、中央(3列)及び最下流(5列)は全てY+方向試験片1つとY-方 向試験片1つの同じ比率で構成されていることから、1列、3列及び5列で比較 すると、0.2%耐力はリコート方向の上流から下流にかけてほぼ同値であり、明 確な影響は認められなかった。そのため、斜角方向試験片の0.2%耐力は上流≒ 下流と評価した。

引張強さについて、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+方 向、Y-方向で差があることから、その差異を加味して比較評価を行う。リコー ト最上流(1列)、中央(3列)及び最下流(5列)は全てY+方向試験片1つとY-方向 試験片1つの同じ比率で構成されていることから、1列、3列及び5列で比較す ると、引張強さはリコート方向の上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確 な影響は認められなかった。そのため、斜角方向試験片の引張強さは上流≒下 流と評価した。

伸びについて、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+方向、 Y-方向で差があることから、その差異を加味して比較評価を行う。リコート最 上流(1列)、中央(3列)及び最下流(5列)は全てY+方向試験片1つとY-方向試験 片1つの同じ比率で構成されていることから、1列、3列及び5列で比較する と、伸びはリコート方向の上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確な影響 は認められなかった。そのため、斜角方向試験片の伸びは上流≒下流と評価し た。

絞りについて、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+方向、 Y-方向で差があることから、その差異を加味して比較評価を行う。リコート最 上流(1列)、中央(3列)及び最下流(5列)は全てY+方向試験片1つとY-方向試験 片1つの同じ比率で構成されていることから、1列、3列及び5列で比較する と、リコート下流側に向かって僅かに絞りが大きくなる傾向が認められたが、 その差はバラツキを考慮すると非常に小さいものと考えられる。そのため、斜 角方向試験片の絞りは上流≦下流と評価した。

# c. IHI

### (a)垂直方向試験片

0.2%耐力について、リコート下流側に向かって僅かに大きくなる傾向が認め られたが、その差はバラツキを考慮すると非常に小さいものと考えられる。。

引張強さについて、リコートの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確 なリコート方向の影響は認められなかった。

伸びについて、リコートの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なリ コート方向の影響は認められなかった。

絞りについて、リコートの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なリ コート方向の影響は認められなかった。 (b)水平方向試験片

0.2%耐力について、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で差が あることから、その差異を加味して比較評価を行う。リコート最上流(a行)及び 最下流(e行)は全てX方向試験片であることから、a行、e行で比較すると、 0.2%耐力はリコート下流側に向かって大きくなる傾向が認められた。また、b 行及びd行はX方向試験片3つとY方向試験片9つの同じ比率で構成されてい ることから、b行及びd行でも同様に比較すると、0.2%耐力はリコート方向の 上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なリコート方向の影響は認められ なかった。そのため、水平方向試験片00.2%耐力は上流<下流と評価した。

引張強さについて、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で差が あることから、その差異を加味して比較評価を行う。リコート最上流(1列)及び 最下流(5列)は全てY方向試験片であることから、1列、5列で比較すると、引 張強さはリコートの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なリコート方 向の影響は認められなかった。また、2列及び4列はX方向試験片9つとY方 向試験片3つの同じ比率で構成されていることから、2列及び4列でも同様に 比較すると、引張強さはリコート方向の上流から下流にかけてほぼ同値であ り、明確なリコート方向の影響は認められなかった。そのため、水平方向試験 片の引張強さは上流≒下流と評価した。

伸びについて、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で差がある ことから、その差異を加味して比較評価を行う。リコート最上流(1列)及び最下 流(5列)は全てY方向試験片であることから、1列、5列で比較すると、伸びは リコートの上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なリコート方向の影響 は認められなかった。また、2列及び4列はX方向試験片9つとY方向試験片 3つの同じ比率で構成されていることから、2列及び4列でも同様に比較する と、伸びはリコート方向の上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なリコ ート方向の影響は認められなかった。そのため、水平方向試験片の伸びは上流 ≒下流と評価した。

絞りについて、3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で明確な差 はないことから、ここでは同等の値であると想定して比較評価を行う。絞りは リコート方向の上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確なリコート方向の 影響は認められなかった。そのため、水平方向試験片の絞りは上流≒下流と評 価した。

### (c)斜角方向試験片

0.2%耐力について、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+ 方向、Y-方向で差があることから、その差異を加味して比較評価を行う。リコ ート最上流(1列)、中央(3列)及び最下流(5列)は全てY+方向試験片1つとY-方 向試験片1つの同じ比率で構成されていることから、1列、3列及び5列で比較 すると、0.2%耐力はリコート方向の上流から下流にかけてほぼ同値であり、明 確な影響は認められなかった。そのため、斜角方向試験片の0.2%耐力は上流≒ 下流と評価した。

引張強さについて、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+方 向、Y-方向で差があることから、その差異を加味して比較評価を行う。リコー ト最上流(1列)、中央(3列)及び最下流(5列)は全てY+方向試験片1つとY-方向 試験片1つの同じ比率で構成されていることから、1列、3列及び5列で比較す ると、引張強さはリコート方向の上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確 な影響は認められなかった。そのため、斜角方向試験片の引張強さは上流≒下 流と評価した。

伸びについて、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+方向、 Y-方向で差があることから、その差異を加味して比較評価を行う。リコート最 上流(1列)、中央(3列)及び最下流(5列)は全てY+方向試験片1つとY-方向試験 片1つの同じ比率で構成されていることから、1列、3列及び5列で比較する と、伸びはリコート方向の上流から下流にかけてほぼ同値であり、明確な影響 は認められなかった。そのため、斜角方向試験片の伸びは上流≒下流と評価し た。

絞りについて、3.4.1(4)①c項で記載したように、X+方向、X-方向、Y+方向、 Y-方向で差があることから、その差異を加味して比較評価を行う。リコート最 上流(1列)、中央(3列)及び最下流(5列)は全てY+方向試験片1つとY-方向試験 片1つの同じ比率で構成されていることから、1列、3列及び5列で比較する と、リコート下流側に向かって僅かに絞りが小さくなる傾向が認められたが、 その差はバラツキを考慮すると非常に小さいものと考えられる。そのため、斜 角方向試験片の絞りは上流≧下流と評価した。

d. 傾向のまとめ

表 3.4.1(4)⑤d-1にリコート方向の影響評価結果をまとめる。垂直方向試験 片についてはいずれの実施機関でもリコート方向の影響は殆ど認められなかっ た。水平方向及び斜角試験片については比較する試験数が少ないことから判断 が難しいが、一部でリコート方向の影響が僅かに見受けられる程度のものであ り、引張特性へ及ぼす影響は小さいものと考えられる。

			位置	データ	測定値				標準偏差			
実施	試験	石山			0.2%	引張	伯ブド	絞り	0.2%	引張	伸び	然ち
機関	方向	24	関係	数	耐力	強さ	140	版ソリ	耐力	強さ	140	私又リ
					MPa	MPa	%	%	MPa	MPa	%	%
			—	74 /75	322	519	54.3	67.3	2.1	4.8	6.7	11.9
		1	上下流	15 /15	322	517	55.1	65.4	1.5	4.2	7.0	12.5
	垂直	2		15/15	321	519	53.9	67.4	1.7	4.8	6.3	11.6
	王臣	3	中央	14 /15	322	522	52.8	67.4	2.0	3.1	6.4	13.7
	0	4		15/15	321	518	54.4	68.9	2.8	5.4	6.8	11.1
		5	上下流	15/15	322	518	54.9	67.3	2.5	5.4	7.4	12.0
			_	39 /39	352	612	43.0	59.6	6.3	9.1	2.8	3.1
		1	上下流	6/6	358	610	42.8	59.0	4.3	7.4	1.2	2.1
MHI	水亚	2		12 /12	350	614	43.6	60.4	7.4	6.7	3.8	2.2
WIIII		3	中央	3 /3	348	602	42.7	59.7	4.9	11.1	1.5	2.9
	2	4		12/12	351	617	42.4	58.9	5.2	8.7	2.7	4.4
		5	上下流	6/6	355	605	43.3	59.7	4.0	7.6	2.5	3.0
			-	12 /12	358	612	47.8	61.5	16.7	31.1	5.0	7.9
	斜角	1	上下流	2 /2	345	587	48.0	66.5	18.4	36.1	2.8	4.9
		2		3 /3	369	635	49.7	61.7	7.5	9.0	2.9	3.1
		3	中央	2 /2	343	586	50.0	65.5	9.9	18.4	5.7	2.1
		4		3 /3	373	640	45.0	52.7	9.3	13.1	7.9	12.1
		5	上下流	2 /2	345	589	47.0	65.5	14.1	29.0	7.1	2.1
			3.	75 /75	230	548	62.3	69.0	6.0	2.0	1.6	3.0
	垂直	1	上流	15/15	230	548	62.6	69.4	6.0	1.8	2.2	2.7
		2		15/15	228	547	62.0	68.9	6.0	1.8	1.0	3.1
		3	中央	15 /15	231	548	61.9	67.6	7.6	2.6	1.5	3.5
		4		15/15	229	548	62.5	69.9	4.4	2.3	1.1	1.2
		5	下流	15/15	230	548	62.4	69.1	6.1	1.7	1.7	3.7
			-	39 /39	226	571	58.0	67.7	3.7	1.4	1.5	2.9
64 - 27335		1	上流	6/6	223	571	58.3	68.2	1.4	1.3	1.1	2.1
東芝	水亚	2		12/12	225	571	58.4	66.6	4.2	1.8	1.3	3.7
ESS		3	中央	3 /3	232	571	58.3	70.7	0.6	0.6	2.2	1.4
		4		12/12	226	571	57.6	66.6	2.8	1.2	1.6	2.0
		5	下流	6/6	227	571	57.2	70.3	2.3	1.5	1.3	0.9
				12 /12	235	569	57.3	66.1	5.1	1.4	1.0	4.2
		1	上流	2 /2	233	569	56.8	67.6	2.8	0.0	0.2	0.3
	斜角	2	8	3 /3	235	569	57.7	63.6	7.0	2.0	1.2	8.3
	州内	3	中央	2 /2	237	568	57.3	66.6	2.1	1.4	1.5	2.1
		4		3 /3	236	570	57.2	66.9	8.5	2.1	1.4	3.3
		5	下流	2 /2	236	569	57.4	66.5	4.2	0.7	1.0	1.5

表 3.4.1(4)⑤-1 引張特性に及ぼすリコート方向の影響(1/2)

	-2σ	<b>-</b> 1σ	+1σ	+2σ	±1σ区間におさまる確率→約 68%							
$\sim$	~	~	~	$\sim$	±2σ 区間におさまる確率→約 95%							
-2σ	-1σ	+1σ	+2σ	œ	σ:各方向の全データから算出							
						測	定値			標準	偏差	
--------	------	-----------	--------------------	--------	------	------	-------	------	------	------	-------	------
実施	試験	石山	位置	データ	0.2%	引張	伯丁ド	体わ	0.2%	引張	伸えど	約
機関	方向	20	関係	数	耐力	強さ	1甲 〇、	形又リ	耐力	強さ	1甲 〇、	私又り
					MPa	MPa	%	%	MPa	MPa	%	%
			24 <del>-0</del> .	75 /75	346	547	60.8	72.1	3.7	7.7	4.0	5.2
		1	上流	14 /15	345	545	61.6	72.8	4.2	7.3	2.5	1.4
	垂直	2		15 /15	346	548	61.2	73.3	3.0	6.5	2.3	2.3
	포ഥ	3	中央	15/15	347	548	60.1	71.0	3.2	7.0	5.2	7.6
		4		15/15	346	549	59.4	70.7	3.2	7.5	5.2	8.0
	10	5	下流	15/15	345	545	61.5	72.6	4.7	10.1	4.0	3.3
				39/39	372	626	43.3	63.4	12.9	9.6	4.5	7.8
		1	上流	6 /6	378	630	45.3	64.2	10.8	8.9	1.8	2.9
日立	水平	2		12 /12	369	625	42.1	63.5	10.9	7.7	4.3	9.1
GE AT	1.1	3	中央	3 /3	380	634	44.7	65.3	16.3	10.7	2.3	3.8
		4		12 /12	367	622	41.1	61.2	14.0	10.9	5.5	10.2
		5	下流	6/6	381	629	47.2	65.7	7.8	8.6	1.2	3.7
			-	12 /12	369	615	48.3	71.3	18.3	22.3	2.3	2.9
斜角	1	上流	2 /2	350	594	48.0	73.0	3.5	11.3	2.8	0.0	
	2		3 /3	382	632	49.3	69.0	7.6	3.8	3.1	1.0	
	3	中央	2 /2	355	598	47.0	74.0	1.4	9.2	4.2	0.0	
	4		3 /3	389	639	49.0	68.3	5.9	9.0	1.0	2.1	
	5	下流	2 /2	353	594	47.0	74.5	3.5	11.3	1.4	0.7	
			-	75 /75	326	549	55.9	70.7	7.5	5.3	1.6	1.9
垂直	1	上流	15/15	322	548	55.8	70.3	5.0	5.8	1.3	1.5	
	2		15/15	325	548	56.5	71.3	8.0	5.4	1.5	1.3	
· · ·	프프	3	中央	15/15	326	548	56.4	71.4	7.8	5.1	1.8	1.5
		4		15/15	327	549	55.9	70.0	9.1	5.1	1.6	2.9
		5	下流	15 /15	328	550	54.8	70.6	6.6	5.1	1.2	1.7
				39 /39	347	604	44.2	63.5	16.0	7.7	1.9	3.4
		1	上流	6 /6	354	609	45.8	64.2	1.9	2.8	0.5	1.1
тнт	水亚	2		12 /12	341	602	43.8	63.6	16.0	6.7	1.5	3.3
IIII .		3	中央	3 /3	358	609	44.4	63.9	11.4	7.9	2.7	1.0
		4		12 /12	340	600	43.0	62.2	17.4	8.8	2.3	4.9
		5	下流	6/6	363	610	45.6	64.9	2.9	2.7	0.4	0.8
		3 <u></u>	12 /12	349	600	46.2	67.4	14.4	20.9	1.4	2.4	
	1	上流	2 /2	334	580	45.9	70.0	6.4	13.4	1.8	1.6	
	斜角	2		3 /3	358	616	47.4	65.1	13.2	6.6	1.1	1.2
1	4173	3	中央	2 /2	341	582	44.7	69.7	4.9	7.8	1.5	1.6
斜角	4		3 /3	362	621	46.8	65.8	11.5	6.0	0.2	1.2	
		5	下流	2 /2	339	582	45.2	68.6	4.2	12.7	0.6	0.2

表 3.4.1(4) ⑤-2 引張特性に及ぼすリコート方向の影響 (2/2)

-00	-2σ	-1σ	+1σ	+2σ	±1σ区間におさまる確率→約 68%
$\sim$	~	~	~	~	±2σ区間におさまる確率→約95%
-2σ	<b>-</b> 1σ	+1σ	+2σ	ø	σ:各方向の全データから算出



図 3.4.1(4) ⑤-1 引張特性に及ぼすリコート方向の影響(1/2)



図 3.4.1(4) 5-2 引張特性に及ぼすリコート方向の影響 (2/2)

						測定	E値			標準	偏差	
実施 機関	試験 方向	列	位置 関係	データ 数	0.2% 耐力	引張 強さ	伸び	絞り	0.2% 耐力	引張 強さ	伸び	絞り
			a no becara.		MPa	MPa	%	%	MPa	MPa	%	%
			-	19 /19	348	618	42.3	59.8	4.7	6.5	2.6	4.0
		1	上下流	0 /0	1000							
	水平	2		9 /9	347	615	42.8	60.7	4.2	5.5	2.9	2.4
	(X)	3	中央	1 /1	345	614	43.0	63.0	5 <u></u>	14 <u></u> 71	1. <u></u>	
		4		9 /9	349	621	41.7	58.7	5.1	6.7	2.5	5.2
MUT		5	上下流	0 /0			<u> </u>			:: <del>:</del> ::		
IVITI				20 /20	356	607	43.7	59.3	5.1	8.1	2.8	2.0
		1	上下流	6/6	358	610	42.8	59.0	4.3	7.4	1.2	2.1
	水平	2		3 /3	359	612	46.0	59.7	8.1	10.8	6.0	1.2
水平 (Y)	3	中央	2 /2	350	596	42.5	58.0	5.7	5.7	2.1	0.0	
		4		3 /3	354	607	44.7	59.7	4.4	4.0	2.1	0.6
		5	上下流	6/6	355	605	43.3	59.7	4.0	7.6	2.5	3.0

表 3.4.1(4)⑤a(a)-1 引張特性に及ぼすリコート方向の影響(MHI、X 方向、Y 方向)

表 3.4.1(4)⑤d-1 引張特性に及ぼすリコート方向の影響評価結果のまとめ

実施機	関	MHI	東芝 ESS**	日立 GE	IHI
装置	:	SLM280	Concept Laser M2	EOS M290	EOS M290
	垂直	上下流≒中央	上流≒下流	上流≒下流	上流≦下流
0.2%耐力	水平*	上下流≧中央	上流≒下流	上流≒下流	上流<下流
	斜角*	13 <u></u>	上流≒下流	上流≒下流	上流≒下流
	垂直	上下流≒中央	上流≒下流	上流≒下流	上流≒下流
引張強さ	水平*	上下流≧中央	上流≒下流	上流≒下流	上流≒下流
	斜角*	1	上流≒下流	上流≒下流	上流≒下流
	垂直	上下流≒中央	上流≒下流	上流≒下流	上流≒下流
伸び	水平*	上下流≒中央	上流≧下流	上流≦下流	上流≒下流
	斜角*	t	上流≒下流	上流≒下流	上流≒下流
	垂直	上下流≒中央	上流≒下流	上流≒下流	上流≒下流
絞り	水平*	上下流≒中央	上流≒下流	上流≒下流	上流≒下流
	斜角*		上流≦下流	上流≦下流	上流≧下流

÷ : 概ね同等

≤, ≧ : 概ね同等か僅かに差がある程度<,> : 差が認められる

\*比較するデータが少ないことから参考扱いとする。

\*\*表 3.4.1(4)④e-1の結果を転記。東芝 ESS が使用した装置はガスフロー方向とリ コート方向が一致しているため、参考として扱う。

⑥ レーザラップ面の影響

MHI及び東芝 ESS の PBF 装置は二つのレーザ光源を使用して試験片を造形し ているが、一部、両レーザ光源を用いて造形する領域が存在する。これらレーザ ラップ面は単一のレーザで造形した場合と異なる特性を持つ可能性もあることか ら、本項ではレーザラップ面を有する試験片と、単一のレーザ光源で造形した試 験片とを比較し、その影響を評価する。なお、本項ではレーザラップと欠陥生成 の相関可能性も考慮し、非破壊検査で不合格又は指示が確認されたデータについ ても同じデータ群として扱うこととする。

表 3.4.1(4)⑥-1及び図 3.4.1(4)⑥-1に引張特性に及ぼすレーザラップ面の影響 を示す。以降に各実施機関の評価結果を示す。

#### a. MHI

(a)垂直方向試験片

複数レーザでの造形位置は3列目であり、いずれもガスフロー方向に沿って 配列している。垂直方向試験片の場合、レーザラップ面は引張方向に対して平 行に位置する。いずれの特性についても、レーザラップ面の有無の影響は明確 に認められなかった。

(b)水平方向試験片

複数レーザでの造形位置は3列目であり、いずれもガスフロー方向に沿って 配列している。3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で引張特性に 差があることから、各方向で比較評価を行う。

X方向試験片について、レーザラップ面は引張方向に対して直交する面に位置する。なお、3列目のX方向試験片は1つのみしか存在しないことから、本評価結果は参考扱いとする。いずれの特性についても、レーザラップ面の有無の影響は明確に認められなかった。

Y方向試験片について、レーザラップ面は引張方向に対して平行に位置する。なお、3列目のY方向試験片は2つのみしか存在しないことから、本評価結果は参考扱いとする。いずれの特性についても、レーザラップ面の有無の影響は明確に認められなかった。

### b. 東芝 ESS

(a)垂直方向試験片

複数レーザでの造形位置は c 列目であり、いずれもガスフロー方向に沿って 配列している。垂直方向試験片の場合、レーザラップ面は引張方向に対して平 行に位置する。いずれの特性についても、レーザラップ面の有無の影響は明確 に認められなかった。

(b)水平方向試験片

複数レーザでの造形位置は3列目であり、いずれもガスフロー方向に沿って 配列している。3.4.1(4)①b項で記載したように、X方向、Y方向で絞りに僅か に差が認められることから、各方向で比較評価を行う。

X方向試験片について、レーザラップ面は引張方向に対して平行に位置す る。なお、3列目のX方向試験片は1つのみしか存在しないことから、本評価 結果は参考扱いとする。引張強さ、伸び及び絞りについて、レーザラップ面の 有無の影響は明確に認められなかった。0.2%耐力についてはレーザラップ面を 有する試験片と単一レーザで造形した試験片とで僅かに差異があるようにも見 受けられるが、比較する試験片数が少なく判断は難しい。

Y方向試験片について、レーザラップ面は引張方向に対して直交する面に位置する。なお、3列目のY方向試験片は2つのみしか存在しないことから、本評価結果は参考扱いとする。引張強さ、伸び及び絞りについて、レーザラップ面の有無の影響は明確に認められなかった。0.2%耐力についてはレーザラップ面を有する試験片と単一レーザで造形した試験片とで僅かに差異があるようにも見受けられるが、比較する試験片数が少なく判断は難しい。

c. 傾向のまとめ

図 3.4.1(4) ⑥c-1 にレーザラップ面の影響評価結果をまとめる。垂直方向試 験片についてはいずれの実施機関でもレーザラップ面の影響は認められなかっ た。水平方向試験片については比較する試験数が少ないことから判断が難しい が、引張特性へ及ぼす影響は小さいものと考えられる。

						准形	引張方向		測知	官值			標準	偏差	
実施 機関	試験 方向	行	列	デ・	ータ 数	レーザ 数	に対する レーザ ニープ	0.2% 耐力	引張 強さ	伸び	絞り	0.2% 耐力	引張 強さ	伸び	絞り
						352	ラップ面	MPa	MPa	%	%	MPa	MPa	%	%
	垂直	a~e	3	14	/15	複数	平行	322	522	52.8	67.4	2.0	3.1	6.4	13.7
7	方向	a~e	1,2,4,5	60	/60	単一	2	322	518	54.6	67.3	2.2	4.9	6.7	11.6
MHI 方向· (X) 水平 方向· (Y)	с	3	1	/1	複数	直交	345	614	43.0	63.0	Ţ	I	-	-	
	a,b,d,e	2,4	18	/18	単一	<u>,                                     </u>	348	618	42.2	59.7	4.8	6.6	2.7	4.0	
	с	3	2	/2	複数	平行	350	596	42.5	58.0	5.7	5.7	2.1	0.0	
	b,d	1,2,4,5	18	/18	単一	12-12	356	608	43.8	59.4	4.8	7.5	2.9	2.1	
	垂直	с	1~5	15	/15	複数	平行	230	547	62.0	69.5	7.1	1.4	1.9	2.0
	方向	a,b,d,e	1~5	60	/60	単一	1 <u>1 - 1</u> 1	230	548	62.4	68.8	5.8	2.1	1.5	3.2
東芝 ESS (X) 水平 古向 (X)	с	3	1	/1	複数	平行	232	571	55.8	69.6	Ţ	1	8	H	
	a,b,d,e	2,4	18	/18	単一	5. <del></del>	225	571	58.0	66.3	3.9	1.7	1.4	3.0	
	с	3	2	/2	複数	直交	233	572	59.6	71.3	0.7	0.7	0.4	1.5	
	) (Y)	b,d	1,2,4,5	18	/18	単一	12	225	571	57.9	68.7	2.6	1.1	1.4	2.2

表 3.4.1(4)⑥-1 引張特性に及ぼすレーザラップ面の影響



図 3.4.1(4) ⑥-1 引張特性に及ぼすレーザラップ面の影響

表 3.4.1(4)⑥c-1 引張特性に及ぼすレーザラップ面の影響評価結果のまとめ

実施機	と関	MHI	東芝 ESS
装置	1	SLM280	Concept Laser M2
	垂直	単一≒複数	単一≒複数
0.2%耐力	<b>水平(X)*</b>	単一≒複数	単一≦複数
	水平(Y)*	単一≒複数	単一≦複数
	垂直	単一≒複数	単一≒複数
引張強さ	<b>水平(X)*</b>	単一≒複数	単一≒複数
	水平(Y)*	単一≒複数	単一≒複数
	垂直	単一≒複数	単一≒複数
伸び	水平(X)*	単一≒複数	単一≒複数
	水平(Y)*	単一≒複数	単一≒複数
	垂直	単一≒複数	単一≒複数
絞り	水平(X)*	単一≒複数	単一≒複数
	水平(Y)*	単一≒複数	単一≒複数

÷ :概ね同等

≦,≧ :概ね同等か僅かに差がある程度

<,> : 差が認められる

\*比較するデータが少ないことから参考扱いとする。

⑦ レーザ光源距離の影響

レーザ光源は造形ステージの上部に固定されており、光源からの距離によって 照射形状に差が生じる。具体的には、光源から離れるほど溶融箇所のレーザ形状 は楕円形となる。本項ではレーザ光源からの距離が引張特性に及ぼす影響を評価 する。

今までに評価してきた①~⑥項の評価結果も踏まえると、試験片方向、ガスフ ローの影響が最も大きいことが想定されることからその影響を避けながら比較評 価を行う。水平方向試験片及び斜角方向試験片は試験片の造形方向も影響するこ とから、本項では造形方向の影響のない垂直方向試験片を対象に評価を行うこと とする。

図 3.4.1(4)⑦-1~図 3.4.1(4)⑦-4 に各座標位置における引張特性を示す。図中の各座標位置の値は T、B、Mの平均を示している。以降に各実施機関の評価結 果を示す。

a. MHI

レーザ光源座標は2c、4cであり、レーザラップ面を有するのは3列目の試験 片である。垂直方向試験片の引張特性に対し、ガスフロー方向(a行目⇒e行 目)は影響があること、リコート方向(上流:1,5列目、中央:3列目)は影響 がないことを考慮し、比較する際には同じ行の試験片を比較することとする。 また、ガスフローの最下流側は最も欠陥が導入されやすく、データのバラツキ が大きいことが想定されることから、本評価では a~c 行目に着目して評価を行 うこととする。さらに、レーザラップ面である3列目は比較対象外とする。

0.2%耐力について、各行ごとに1列目及び2列目並びに4列目と5列目を比較すると、いずれもほぼ同値であり、明確なレーザ光源距離の影響は認められなかった。

引張強さについて、各行ごとに1列目及び2列目並びに4列目と5列目を比 較すると、いずれもほぼ同値であり、明確なレーザ光源距離の影響は認められ なかった。

伸びについて、各行ごとに1列目及び2列目並びに4列目と5列目を比較す ると、いずれもほぼ同値であり、明確なレーザ光源距離の影響は認められなか った

絞りについて、各行ごとに1列目及び2列目並びに4列目と5列目を比較す ると、いずれもほぼ同値であり、明確なレーザ光源距離の影響は認められなか った。 但し、いずれの特性についても、比較対象となったそれぞれの試験片の造形 位置は大きく離れておらず、レーザ光源の影響が両者であまり出ていなかった 可能性も考えられる。

b. 東芝 ESS

レーザ光源座標は 3b、3d であり、レーザラップ面を有するのは c 行目の試験 片である。垂直方向試験片の引張特性に対し、ガスフロー方向及びリコート方 向は影響がないこと、レーザラップ面である c 列目は比較対象外とすることを 考慮し、a,b 行内の全試験片の中で、また、d,e 行内の全試験片の中でそれぞれ 比較表を行うこととする。

0.2%耐力について、レーザ光源距離からの遠近による一貫した傾向は認めら れなかった。

引張強さについて、レーザ光源距離からの遠近による一貫した傾向は認めら れなかった。

伸びについて、レーザ光源距離からの遠近による一貫した傾向は認められなかった。

絞りについて、レーザ光源の直下である座標 3d において、顕著に低くなる傾向が認められた。同座標には T,M,B の 3 点のデータが存在し、それぞれ 60.3、 62.9、63.1%であり、いずれも他の領域と比較して値が低い傾向にあった。一方で、レーザ光源座標 3b では上記のような傾向は認められなかった。

c. 日立 GE

レーザ光源座標は 3c である。垂直方向試験片の引張特性に対し、ガスフロー 方向(a行目⇒e行目)は影響があること、リコート方向(1列目⇒5列目)は 影響がないことを考慮し、比較する際には同じ行の試験片を比較することとす る。また、ガスフローの最下流側は最も欠陥が導入されやすく、データのバラ ツキが大きいことが想定されることから、本評価では a~c 行目に着目して評価 を行うこととする。

0.2%耐力について、b,c行目については、各列はいずれもほぼ同値であり、レ ーザ光源距離からの遠近による一貫した傾向は認められなかったが、a行目に ついては最もレーザ光源から遠い1列目と5列目の値が3列目よりも僅かに小 さい傾向が認められた。

引張強さについて、b,c行目については、各列はいずれもほぼ同値であり、レ ーザ光源距離からの遠近による一貫した傾向は認められなかったが、a行目に ついては最もレーザ光源から遠い1列目と5列目の値が3列目よりも僅かに小 さい傾向が認められた。 伸びについて、b,c行目については、各列はいずれもほぼ同値であり、レーザ 光源距離からの遠近による一貫した傾向は認められなかったが、a行目につい ては最もレーザ光源から遠い5列目の値が3列目よりも僅かに大きい傾向が認 められた。但し、同じ距離にある1列目では同様の傾向は認められなかった。

絞りについて、各列はいずれもほぼ同値であり、レーザ光源距離からの遠近 による一貫した傾向は認められなかった。

#### d. IHI

(a)垂直方向試験片

レーザ光源座標は 3c である。垂直方向試験片の引張特性に対し、ガスフロー 方向(a行目⇒e行目)は影響があること、リコート方向(1列目⇒5列目)は 影響がないことを考慮し、比較する際には同じ行の試験片を比較することとし た。また、ガスフローの最下流側は最も欠陥が導入されやすく、データのバラ ツキが大きいことが想定されることから、本評価では a~c 行目に着目して評価 した。

0.2%耐力について、各列はいずれもほぼ同値であり、レーザ光源距離からの 遠近による一貫した傾向は認められなかった。

引張強さについて、各列はいずれもほぼ同値であり、レーザ光源距離からの 遠近による一貫した傾向は認められなかった。

伸びについて、各列はいずれもほぼ同値であり、レーザ光源距離からの遠近 による一貫した傾向は認められなかった。

絞りについて、各列はいずれもほぼ同値であり、レーザ光源距離からの遠近 による一貫した傾向は認められなかった。

#### e. 傾向のまとめ

表 3.4.1(4)⑦e-1にレーザ光源距離の影響評価結果をまとめる。垂直方向試 験片について、レーザ光源距離の遠近によって僅かに傾向差がある装置も見ら れたが、同じ装置で一貫した傾向が取れていないこと、また概ね同等の値であ ることを考慮すると、本評価でレーザ光源距離の影響があるとは断定できず、 その影響は小さいものと考えられる。

			←IJ	コータ	$\rightarrow$			
MH	I	5	4	3	2	1	1	
0.2%耐力	[MPa]	319	318	321	319	320	a	
全点平均	322	320	320	320	320	322	b	
標準偏差	2.15	323	322	323	321	322	c	
変動係数	0.007	323	322	322	323	323	d	
		324	325	325	322	323	e	

11 -2

←ガスフロー・リコーター

 【東芝 B	ESS	5	4	3	2	1	
0.2%耐力	[MPa]	236	235	238	237	234	a
全点平均	230	226	226	226	226	234	b
標準偏差	6.03	227	230	242	229	223	c
変動係数	0.026	224	227	225	226	226	d
		237	228	226	224	234	e

レーザ光源座標:3b,3d/複数レーザ造形部:c行目

			←リコーター								
【日立(	【日立 GE】		4	3	2	1					
0.2%耐力[MPa]		339	344	348	345	339	a				
全点平均	346	343	346	347	347	343	b				
標準偏差	3.71	347	346	346	346	346	c				
変動係数	0.011	344	346	346	344	346	d				
		351	350	350	349	349	e				

レーザ光源座標:3c/複数レーザ造形部:無

			ل →	リコー	ター		
【IHI	[]	5	4	3	2	1	
0.2%耐力	0.2%耐力[MPa]		328	329	323	320	a
全点平均	326	333	333	331	331	324	b
標準偏差	7.49	335	334	332	333	328	c
変動係数	0.023	329	328	328	327	324	d
		317	310	312	312	315	e

レーザ光源座標:3c/複数レーザ造形部:無

-00	-2σ	-1σ	+1σ	+2σ	±1σ区間におさまる確率→約 68%
$\sim$	~	~	~	~	±2σ区間におさまる確率→約95%
-2σ	-1σ	+1σ	+2σ	ø	

図 3.4.1(4) ⑦-1 各座標位置における垂直方向引張試験片の 0.2% 耐力

			←IJ	コータ	$\rightarrow$			
[N	<b>IHI</b>	5	4	3	2	1		
引張強	îさ[MPa]	510	509	519	517	518	a	
全点平均	匀 519	518	519	519	515	514	b	
標準偏差	差 4.77	520	519	523	516	513	c	
変動係数	数 0.009	520	522	522	522	518	d	
		525	524	526	527	524	e	

11 2.

←ガスフロー・リコーター

【東芝 E	ESS	5	4	3	2	1	
引張強さ	[MPa]	547	546	545	545	547	a
全点平均	548	549	548	548	550	547	b
標準偏差	2.01	547	546	546	547	547	c
変動係数	0.004	547	547	547	546	549	d
		549	551	552	548	549	e

レーザ光源座標:3b,3d/複数レーザ造形部:c行目

			← !	リコー	ター			
【日立	GE】	5	4	3	2	1		
引張強さ	[MPa]	532	540	542	540	535	a	
全点平均	547	539	544	543	543	541	b	
標準偏差	7.73	544	547	545	546	545	c	
変動係数	0.014	550	551	551	550	548	d	1
		560	561	559	557	556	e	

レーザ光源座標:3c/複数レーザ造形部:無

			ل ←	リコー	ター		
【IHI	[]	5	4	3	2	1	
引張強さ	[MPa]	543	542	542	540	540	a
全点平均	549	546	546	544	544	543	b
標準偏差	5.29	553	550	547	549	551	c
変動係数	0.010	555	553	551	552	553	d
		555	555	554	553	553	e

レーザ光源座標:3c/複数レーザ造形部:無

-00	-2σ	-1σ	+1σ	+2σ	±1σ区間におさまる確率→約 68%
$\sim$	~	~	~	~	±2σ区間におさまる確率→約95%
-2σ	-1σ	+ <b>1</b> σ	+2σ	œ	

図 3.4.1(4)⑦-2 各座標位置における垂直方向引張試験片の引張強さ

			←IJ	コータ	$\rightarrow$		
MH	I	5	4	3	2	1	1
伸び[	%]	61	59	56	55	57	a
全点平均	54	56	56	57	60	61	b
標準偏差	6.67	59	58	55	59	61	c
変動係数	0.123	56	58	55	53	50	d
		43	42	41	44	46	e

←ガスフロー・リコーター

【東芝 B	ESS	5	4	3	2	1	
伸び[	%]	62	64	63	62	64	a
全点平均	62	63	62	62	63	62	b
標準偏差	1.55	63	62	61	62	62	c
変動係数	0.025	63	62	61	61	61	d
		62	63	62	63	63	e

レーザ光源座標:3b,3d/複数レーザ造形部:c行目

		←リコーター							
【日立	GE】	5	4	3	2	1			
伸び[	%]	67	62	64	64	64	a		
全点平均	61	64	62	62	62	63	b		
標準偏差	4.02	62	61	63	61	63	c		
変動係数	0.066	60	60	60	61	60	d		
		56	51	52	58	59	e		

レーザ光源座標:3c/複数レーザ造形部:無

		7-	コーク	ע→			
	1	2	3	4	5	]	【IHI
a	58	58	58	57	56	%]	伸び[
b	57	58	58	57	56	56	全点平均
c	56	57	57	56	55	1.57	票準偏差
d	55	56	55	55	55	0.028	変動係数
e	55	54	54	53	53		

レーザ光源座標:3c/複数レーザ造形部:無

-00	-2σ	-1σ	+1σ	+2σ	±1σ区間におさまる確率→約 68%
$\sim$	~	~	~	~	±2σ区間におさまる確率→約95%
-2σ	<b>-</b> 1σ	+ <b>1</b> σ	+2σ	œ	COSE EASE TO BE REALIZED CARE TO PERFORM THE REAL PROPERTY AND ADDRESS OF THE REAL PROPERTY ADDRESS OF THE REAL PROPERTY.

図 3.4.1(4) ⑦-3 各座標位置における垂直方向引張試験片の伸び

			←IJ	コータ	$\rightarrow$		
<b>[</b> MH	I	5	4	3	2	1	
絞り[	%]	72	73	78	77	76	a
全点平均	67	76	76	77	76	75	b
標準偏差	11.91	76	75	70	73	73	c
変動係数	0.177	66	72	68	58	54	d
		47	49	44	53	49	e

22

←ガスフロー・リコーター

1	2	3	4	5	SS	【東芝 E
71	69	70	69	69	%]	絞り[
70	70	69	70	67	69	全点平均
70	68	69	70	71	3.01	標準偏差
68	68	62	70	72	0.044	変動係数
68	70	68	71	68		

レーザ光源座標:3b,3d/複数レーザ造形部:c行目

	←リコーター								
【日立	GE】	5	4	3	2	1			
絞り[	%]	74	73	75	73	72	a		
全点平均	72	74	74	74	74	73	b		
標準偏差	5.23	73	74	73	74	72	c		
変動係数	0.073	74	72	73	74	73	d		
		69	60	61	72	73	e		

レーザ光源座標:3c/複数レーザ造形部:無

		←リコーター						
【IHI	[]	5	4	3	2	1		
絞り[	%]	71	72	73	72	71	a	
全点平均	71	71	71	71	72	71	b	
標準偏差	1.90	71	71	72	71	70	c	
変動係数	0.027	71	68	72	72	70	d	
		69	68	69	69	71	e	

レーザ光源座標:3c/複数レーザ造形部:無

-00	-2σ	-1σ	+1σ	+2σ	±1σ区間におさまる確率→約 68%
$\sim$	~	~	~	~	±2σ区間におさまる確率→約95%
-2σ	-1σ	+1σ	+2σ	ø	

図 3.4.1(4) ⑦-4 各座標位置における垂直方向引張試験片の絞り

表 3.4.1(4)⑦e-1 引張特性に及ぼすレーザ光源距離の影響評価結果のまとめ

実施機関		MHI	東芝 ESS	日立 GE	IHI
装置		SLM280	Concept Laser M2	EOS M290	EOS M290
0.2%耐力	垂直	近≒遠*	近≒遠	近≧遠	近≒遠
引張強さ	垂直	近≒遠*	近≒遠	近≧遠	近≒遠
伸び	垂直	近≒遠*	近≒遠	近≦遠	近≒遠
絞り	垂直	近≒遠*	近≦遠	近≒遠	近≒遠

÷ :概ね同等

≤, ≧ : 概ね同等か僅かに差がある程度<,> : 差が認められる

\*比較するデータが少ないことから参考扱いとする。

3.4.2 国内規格としての対応案策定

3.4.1 項の評価結果をもとに、各因子が材料特性に及ぼす影響度合いを表 3.4.2-1 にま とめる。表より、造形方向とガスフローが材料特性に及ぼす影響が大きいことが分かる。 従って、材料品質が確保された領域を認定するプロセス(要領認定)においては、これ らの影響を加味した試験片の造形、試験が望ましい。

図 3.4.2-1 に ASME PTB-13 における要領認定の考え方を示す。図中の L3、L4 ではガ スフローの上流側と下流側での試験片の造形を要求しており、ガスフローの影響が考 慮されている。また、図中では 0.2%耐力及び引張強さが最も低い傾向を示す垂直方向 引張試験片と、伸び及び絞りが最も低い傾向を示す水平方向引張試験片の造形を要求 しており、造形方向の影響が考慮されている。以上より、ASME PTB-13 における要領 認定の考え方は概ね妥当であると考えられる。上記評価結果から、国内規格における要 領認定方法は、ASME PTB-13 を参考に策定する方針とする。

また、本評価結果をもとに、現状のASME PTB-13の要領認定の考え方の合理化及び 改善の可能性が考えられる。実際に国内規格化の際に採用するか否かは今後の議論で あるが、現状考えうる合理化・改善案を以下に示す。

- (1) リコートパス、レーザ光源距離、レーザラップ面の影響度合いは小さいことから、これら領域における試験片の造形は合理化の余地があるものと考えられる。
- (2) ASME PTB-13 では L1~L6 の各位置に対して造形範囲の上面近傍と下面近傍での組織観察を要求しているが、本評価により造形位置による組織の差異が小さいことが明らかになったことから、合理化の余地があるものと考えられる。但し、組織観察により欠陥の分布状況なども確認しうることから、両観点を考慮した合理化が望ましい。
- (3) ASME PTB-13 では水平方向試験片の造形位置を「AM 製造者が定義する中間位置」としているが、伸び及び絞りは水平方向試験片で最も小さくなる傾向があること、ガスフローの最下流で伸び及び絞りが低下することを考慮すると、造形位置を更に限定するなどの改善の余地があるものと考えられる。

		引張	特性		2 4 4	化学	
影響因子	0.2% 耐力	引張 強さ	伸び	絞り	硬さ	組織	成分
造形方向	大	大	大	大	小	小	小
造形高さ	小	小	小	小	小	小	小
ガスフロー	中	中	大	大	小	小	小
リコート	小	小	小	小	小	小	小
レーザ光源距離	小	小	小	小	小	小	小
レーザラップ面	小	小	小	小	小	小	小

表 3.4.2-1 各因子が材料特性に及ぼす影響度合い

大:影響が大きい 中:大と小の間の影響度 小:影響が小さい



位置	詳細
L1	リコートパスの開始領域
L2	リコートパスの終了領域
L3	ガスフローの始端側で、各レーザ源からの光線距離が最大となる位置
L4	ガスフローの終端側において、各レーザ源からの光線距離が最大となる位置
1.5	1 つの認定試験片を複数のレーザ源を使用して造形する場合、
L3	各レーザ源からの光線距離が最大となる位置
L6	各レーザ源からの光線距離が最小となる位置
L7	AM 製造者が定義する中間位置

位墨	引張試験		靭性	届イ	ミクロ	化学
112. [E.	垂直	水平	(垂直)	使で	組織	成分
L1~L6	0		0	$\bigcirc$	0	$\bigcirc$
L7	_	0	_	0	_	0

図 3.4.2-1 ASME PTB-13 における要領認定の考え方

- 4. STEP2 規格化に向けた材料データの取得
  - 4.1 2022 年度に造形を開始する試験
    - 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。造形条件は後述の表 4.1.1(2)①c-1 に示す。



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」<sup>[4.1-1]</sup>のオーステナイト系ステ ンレス鋼で規定されている、20℃、50℃、75℃、100℃、125℃、150℃、175℃、200℃、 225℃、250℃、275℃、300℃、325℃、350℃、375℃、400℃、425℃の条件とした。 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℃、25℃(常温)、 100℃、150℃、200℃、250℃、300℃、350℃、400℃、450℃の 10 条件とし、ポア ソン比についても同様とした。

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)、 および 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 み合わせとし、n=1にて採取した。

熱伝導率・温度伝導率については 2024 年度実施事項であり、本試験の残材を用いて試験を実施する予定である。試験温度について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条件とする。

		ション しょうしょう しょう	試験片採取数	
試験項目	温度条件	武) 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一	熱	処理
		1木収刀问	SA	HIP+SA
	20°C、50°C、75°C、100°C、125°C、	垂直	1	1
<b>纳</b> 時纪毛 核 米ケ	150°C、175°C、200°C、225°C、	水平(X)	1	1
脉脑尔尔茨	250°C、275°C、300°C、325°C、	→k 亚(V)	1	1
	350°C、375°C、400°C、425°C	八十(1)	1	1
総部界校務	-75℃、25℃(常温)、100℃、150℃、	垂直	1	1
ポアソンド	200°C、250°C、300°C、350°C、	水平(X)	1	1
	400°C、450°C	水平(Y)	1	1
	-75℃、25℃(常温)、100℃、150℃、	垂直	1	1
款 你 得 华 、	200°C、250°C、300°C、350°C、	水平(X)	1	1
—————————————————————————————————————	400°C、450°C	水平(Y)	1	1

表 4.1.1(1)①a-1 STEP2 材料物性試験の試験マトリックス

b. DED 法

STEP2 では DED 法にて造形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 からの実施とした。

一般に DED 法は材料に関して、金属粉末を材料とするパウダーDED 法と、金属 ワイヤを材料とするワイヤ DED 法の大きく二種類があり、また熱源に関して、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。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した。(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溶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 年度に造形を実施した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の造形を行った。 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(SA)を実施するケースと、造形ままのケース、2 種類を準備することとした。

試験内容に関しては PBF 法と同様であるため、4.1.1(1)①a.PBF 法を参照とする。

### 記験方法

a. PBF 法材料物性值試験(線膨張係数)

JSME S NJ1「材料規格」<sup>[4.1-1]</sup>では、オーステナイト系ステンレス鋼の線膨張係 数は、20℃、50℃、75℃、100℃、125℃、150℃、175℃、200℃、225℃、250℃、 275℃、300℃、325℃、350℃、375℃、400℃、425℃の条件が規定されている。こ れらのデータと比較することを勘案し、線膨張係数のデータを取得した。

各社における測定条件を下表 4.1.1(1) ②a-1 に示す。

	MHI	東芝 ESS	日立 GE	IHI		
	熱機械分析法	押棒式変位検	熱機械分析法	押棒式変位検		
側足力伝	(TMA)	出法	(TMA)	出法		
測定雰囲気	ヘリウム	アルゴン	ヘリウム	アルゴン		
昇温速度	5 °C/min	5°C/min	5 °C/min	5°C/min		
⇒±+×1+>+:	$\phi 4 \text{ mm} \times 18$	$\phi 4 \text{ mm} \times 20$	$\phi 4 \text{ mm} \times 18$	$\phi$ 4mm $ imes$		
武府小五	mm	mm	mm	20mm		
	NETZSCH 製	アドバンス理	NETZSCH 製	アドバンス理		
測定装置	高精度熱機械	工製縦型熱膨	高精度熱機械	工製縦型熱膨		
	分析装置	張計	分析装置	張計		
	TMA402F1	DL-7000	TMA402F1	DL-9600		

表 4.1.1(1)②a-1 線膨張係数の測定条件

b. 材料物性値試験(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、JSME S NJ1「材料規格」<sup>[4.1-1]</sup> において、-75℃、25℃(常温)、100℃、150℃、200℃、250℃、300℃、350℃、400℃、 450℃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。

各社の共振法による測定条件を表 4.1.1(1)②b-1 に、超音波法による測定条件を表 4.1.1(1)②b-2 に示す。

	MHI	東芝 ESS	日立 GE	IHI
測定方法	自由共振法	自由共振法	自由共振法	自由共振法
測定雰囲気	大気中	大気中	大気中	大気中
<u>⇒+</u> -¥1-+-\+	$2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$	$2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$	$2 \text{ mm} \times 10$	$2mm \times 10mm$
政府行行公	× 60 mm	$\times$ 60 mm	$mm \times 60 mm$	×60mm
	[ヤング率]日	[ヤング率]日	[ヤング率]日	[ヤング率]日
	本テクノプラ	本テクノプラ	本テクノプラ	本テクノプラ
	ス製室温ヤン	ス製室温ヤン	ス製室温ヤン	ス製室温ヤン
	グ率測定装置	グ率測定装置	グ率測定装置	グ率測定装置
测学准要	JE-RT 型	JE-RT 型	JE-RT 型	JE-RT 型
侧足表直	[剛性率] 日本	[剛性率] 日本	[剛性率] 日	[剛性率] 日
	テクノプラス	テクノプラス	本テクノプラ	本テクノプラ
	製室温剛性率	製室温剛性率	ス製室温剛性	ス製室温剛性
	測定装置 JG-	測定装置 JG-	率測定装置	率測定装置
	RT 型	RT 型	JG-RT 型	JG-RT 型

表 4.1.1(1)②b-1 共振法による測定条件

	MHI	東芝 ESS	日立 GE	IHI
測定方法	超音波法	超音波法	超音波法	超音波法
	大気中		大気中	
	(25°C)		(25°C)	
測定雰囲気	アルゴン中	アルゴン中	アルゴン中	アルゴン中
	(低温および		(低温および	
	高温)		高温)	
	$\phi$ 16 mm × 10			
	mm, φ16 mm	+ 16 mm × 10	4 16 mm × 10	12mm × 12mm
試料寸法	× 5 mm	φ 10 mm	φ 10 mm	× 10mm
	(DED : As-	111111	111111	~ 1011111
	built のみ)			
	RITEC 製バー	RITEC 製バー	RITEC 製バ	RITEC 製バ
测学准要	スト波音速測	スト波音速測	ースト波音速	ースト波音速
側止装直	定装置 RPR-	定装置 RPR-	測定装置	測定装置
	4000	4000	RPR-4000	RPR-4000

c. 材料物性值試験(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、線膨張係数と同様の条件でデータを取得する。

本項目の測定は2024年度実施予定である。

各材料物性値試験において、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」、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」、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」 に従うこととする。また、繰り返し数はいずれも1とする

材料物性試験の概要を下記に示す

AM 造形: PBF、DED

熱処理:PBF 造形材:HIP+SA、SA

DED 造形材:As-built、SA

試験片位置:4.1.2(1)①a(a)、b(a)、c(a)、d(a)の造形方案を参照

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 Z 2280「金属材料の高温ヤング率試験方法」

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」

温度条件:線膨張係数、熱伝導率、温度伝導率

20°C、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

(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。

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

表 4.1.1(2)①a-1 試験片造形に用いた PBF 装置一覧

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

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。各実施機関にて選定した造形条件を表 4.1.1(2)①c-1 に 示す。

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

表 4.1.1(2)①c-1 造形条件

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実施機関で検討した。

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 2023 年度以降も原則同じ条件と する。

実施機関	プレート・	応力除去条件		
	サポート除去	目標温度	保持時間	冷却方法
	タイミング	[°C]	[h]	
MHI	HIP 処理前又は	(実施しない)	(実施しない)	(実施しない)
	SA 前			
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	(実施しない)	(実施しない)	(実施しない)
	SA 前			

表 4.1.1(2)①d-1 固溶化熱処理前作業(2022 年度造形分)

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

実施機関	熱間等方圧加圧法(HIP)条件						
	保持圧力	目標温度	保持時間	冷却方法			
	[MPa]	[°C]	[h]				
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			

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

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

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。

実施機関		МНІ				
造形	メーカー	前田工業株式会社自社開発				
装置	外観					
	装置概要	・ 造形委託先(前田工業株式会社)の Wire-DED 装置				
		・ レーザ発振器: IPG 社製イッテルビウムファイバーレーザ(公称出力 30kW)				
		・ HOT 電源、ワイヤ送給装置、多軸ロボット				

表 4.1.1(2) ②a-1 試験片造形に用いた DED 装置

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。

元素	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Мо	Cu	Nb	Ν
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

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)

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 As-built 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。

固溶化熱処理条件						
目標温度	保持時間	必扣卡汗				
[°C]	[h]	作动力伝				
1060	1	水冷				

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

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、各ロ25×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。外観不良の詳細は別紙-M-6 に示す。



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。HIP 処理及び固溶化熱処理の実施記録については別紙-M-7~8 参照。

	試験片番号	HIP 実施有無
	P-IX	
x z	P-IY	
P-IIZ P-IZ	P-IZ	有
	P-IIIX	(HIP+SA)
	P-IIIY	
P. IVZ	P-IIIZ	
P.IIX	P-IIX	
	P-IIY	
	P-IIZ	有
	P-IVX	(SA のみ)
SAወታ HIP+SA	P-IVY	
	P-IVZ	

表 4.1.2(1)①a(c)-1 HIP 処理の実施有無

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、リコート方向に対し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) 熱処理結果

図 4.1.2(1)①b(b)-1 に示した造形物について、表 4.1.1(2)①d-1 にて示した SR を実施した後、造形後にプレート及びサポート材の除去を実施した。そ の後、表 4.1.1(2)①d-2 にて示した条件にて固溶化熱処理及び HIP+固溶化熱 処理を実施した。表 4.1.2(1)①b(c)-1 に各試験片の熱処理状況を示す。熱処理 の実施記録については別紙 T-2 参照。



表 4.1.2(1)①b(c)-1 HIP 処理の実施有無

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ト方向 に対し 10 度傾けるものとした。



図 4.1.2(1)①c(a)-1 STEP2 物性值取得用試驗片造形 (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(b)-1 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。固溶化熱処理の実施 記録については別紙-H-2 参照。また、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。

	試験片番号	HIP 実施有無
HIP+SA SAOD	SX1	有
	SX3	(HIP+SA)
SX3 SX4	SY1	
SY3 SY4	SY3	
SZ3 SZ4	SZ1	
	SZ3	
SAT SAE	SX2	無
SY1 SY2	SX4	(SA のみ)
SZI SZZ	SY2	
<b>@</b> @	SY4	
	SZ2	
	SZ4	

表 4.1.2(1)①c(c)-1 HIP 処理の実施有無

# 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ト方向に対し 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。HIP 及び固溶化熱処理の実施記録については別紙 I-4-1 及び I-4-2 参照。



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As-built、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 As-built、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)② a(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。



固溶化熱処理の実施記録については別紙-M-9参照。

図 4.1.2(1)②a(c)-1 固溶化熱処理の実施有無



熱処理なし(As-built)



熱処理あり(SA)



熱処理なし(As-built)







熱処理なし(As-built)



熱処理あり(SA)

(参考文献)

[4.1-1] 発電用原子力設備規格 材料規格(2020年版) JSME S NJ1-2020

- 4.2 2023、2024年度に開始する試験
  - 4.2.1 試験方案策定
    - (1)試験基本仕様
      - ①試験マトリクス

STEP2の内、2023、2024年度に開始する試験と分担及び試験員数を表 4.2.1(1)① -1 に示す。試験員数の内訳の詳細は、4.2.1(1)②を参照のこと。本試験は試験を合 理的に進めるため、PBF 法に関しては、MHI、東芝 ESS、日立 GE、IHI の 4 社で 実施内容を分担し、DED 法に関しては、MHI にて実施した。なお、RT、PT につい ては、常温引張試験、高温引張試験、疲労試験、破壊靭性特性の確認試験に供する 試験片に対して実施する。

分担		DED 法				
試験	MHI	MHI 東芝 ESS 日立 GE IHI		IHI	MHI	
常温引張試験	〇 <sup>1)</sup>	〇	〇	〇	〇	
	(4 本)	(4 本)	(4 本)	(4 本)	(4 本)	
高温引張試験	〇 <sup>1)</sup>	〇	〇	〇	〇	
	(32 本)	(32 本)	(32本)	(32 本)	(32本)	
疲労試験	〇	〇	〇	〇	〇	
	(28本)	(56本)	(28本)	(28 本)	(56本)	
硬さ試験	〇	〇	〇	〇	〇	
	(2 本)	(2 本)	(2 本)	(2 本)	(2 本)	
組織観察	〇	〇	〇	〇	〇	
	(2 本)	(2 本)	(2 本)	(2 本)	(2 本)	
化学分析	〇	〇	〇	〇	〇	
	(2 本)	(2 本)	(2 本)	(2 本)	(2 本)	
腐食試験	_	—	—	〇 (36本)	〇 (18本)	
破壊靭性特性 の確認試験	_	_	_	○ (衝撃試験 54本、 破壊靱性試験 8本)	○ (衝撃試験 54本、 破壊靱性試験 8本)	
RT	0	0	0	0	0	
PT	0	0	0	0	0	

表 4.2.1(1)①-1 2023、2024 年度に開始する試験

注1)2024年度から造形開始するものを示す。

②試験方法

a.常温引張試験

STEP 2 の常温(10~35℃)引張試験は STEP 1 同様、JIS Z 2241「金属材料引 張試験方法」に準拠して実施する。ひずみ速度は規格内で推奨される速度を適用 することとし、降伏点までは 2.0~3.0×10<sup>-4</sup>/s、引張強さまでは 5.37~8×10<sup>-3</sup>/s とす る。引張試験片形状は JIS Z 2241 で規定されている 14A 号試験片を採用する。 評価項目は引張強さ、0.2%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。

STEP 1 では引張特性に及ぼす造形方向および造形位置の影響を把握するため、 垂直方向、水平方向及び斜角方向の試験片を造形ステージ上に網羅的に造形し、 常温引張試験に供した。STEP 1 により、造形時に発生する内部欠陥等によって 材料品質が確保できない領域を把握できたため、STEP 2 では材料品質が確保さ れた領域内の任意の位置で試験片を造形する。

材料の熱処理条件は2種類とする。PBF については SA 及び HIP+SA とし、 DED については As-built (熱処理無し)及び SA とする。

常温引張試験の概要を以下に示す。

AM 造形: PBF、DED

熱処理:PBF 造形材:HIP+SA、SA

DED 造形材:As-built、SA

試験片位置:STEP1の評価結果を踏まえ、材料品質が確保された領域

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(図 4.2.1(1) 2a-1 参照)

試験温度:常温(10~35℃)

試験速度: 2.0~3.0×10<sup>-4</sup>/s(降伏点まで)

5.37~8×10-3 /s (降伏点から引張強さまで)

評価項目:引張強さ、0.2%耐力、伸び、絞り、応力ひずみ線図 繰り返し数:2



# 図 4.2.1(1) ②a-1 常温引張試験片形状

b.高温引張試験

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」に準拠して実施する。ひずみ速度は規格内に記載の方法 A で推奨される速度を適用することとし、降伏点までは 7×10<sup>-5</sup>/s±20% (=5.6~8.4×10<sup>-5</sup>/s)、引張強さまでは 1.4×10<sup>-3</sup>/s±20% (=1.12~1.68×10<sup>-3</sup>/s)とする。引張試験片形状は、試験中の変位を正確に測るため、JIS G 0567 で規定されているつば付き試験片を採用する。評価項目は引張強さ、0.2%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。

日本機械学会 発電用原子力設備規格 材料規格(JSME SNJ1-2022)の添付1「新 規材料採用ガイドライン」では、新規に材料を採用する際には常温から最高使用 温度より50℃高い温度までの50℃ごとの引張試験データを取得することを要求 している。材料規格で規定される各引張特性の温度条件を加味し、温度条件は 65℃、100℃、150℃、200℃、250℃、350℃、400℃、450℃の8条件とする。

試験片の造形位置は a 項の常温引張試験片の考え方を踏襲し、STEP 1 で材料 品質が確保された領域で造形する。

材料の熱処理条件は2種類とする。PBF については SA 及び HIP+SA とし、 DED については As-built (熱処理無し)及び SA とする。

高温引張試験の概要を以下に示す。

AM 造形: PBF、DED

熱処理:PBF 造形材:HIP+SA、SA

DED 造形材:As-built、SA

試験片位置:STEP1の評価結果を踏まえ、材料品質が確保された領域 適用規格:JISG0567「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」 試験片形状:JISG0567つば付き試験片(図4.2.1(1)②b-1参照) 試験温度:65℃、100℃、150℃、200℃、250℃、350℃、400℃、450℃ 試験速度:5.6~8.4×10<sup>-5</sup>/s(降伏点まで)

1.12~1.68×10<sup>-3</sup>/s(降伏点から引張強さまで) 評価項目:引張強さ、0.2%耐力、伸び、絞り、応力ひずみ線図 繰り返し数:2



図 4.2.1(1) ② b-1 高温引張試験片形状

c.疲労試験

JSME S NC1「設計・建設規格」<sup>[42-1]</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。また、電力共同研究「大 気中設計疲労線図合理化に関する研究」<sup>[42-2]</sup>においては、大気中設計疲労線図の検 討のために、オーステナイト系ステンレス鋼(SUS316LTP)についても基礎疲労試験 が実施されている。図 4.2.1(1)②c-1 に設計建設規格で定める SUS316 の設計疲労曲 線の例、図 4.2.1(1)②c-2 に電共研の基礎疲労試験で得られた SUS316LTP 材の S-N 線図を示す。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 1×10<sup>7</sup>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 1×10<sup>7</sup>を目標とすることを検討したが、2024 年度 の実施工程を考慮すると 1×10<sup>6</sup>を目標の繰り返し回数とすることとし、他の繰り 返し回数は 5×10<sup>2</sup>、1×10<sup>3</sup>、1×10<sup>4</sup>、1×10<sup>5</sup>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 2~3 とする。本委託で実施する疲労試験 は比較時に元データの条件が容易に把握可能な電共研の基礎疲労試験の試験条件 を踏襲することとする。

次に、疲労特性に影響を与えうる AM 材の使用条件としては、熱処理条件、表面 状態、造形方向(異方性)が考えられる(図 4.2.1(1)②c-3 参照)。熱処理条件は、PBF 法では SA 又は HIP+SA の 2 条件、DED 法では SA 又は As-built の 2 条件が想定さ れる。表面状態は、PBF 法では、造形まま、ブラスト処理又は機械加工の条件が想 定されるが、粗度は造形ままが最も粗く、機械加工が最も細かいことが想定される。 DFD 法では基本的に機械加工のみが想定される。造形方向については、PBF 法で は積層方向(Z)、それと直交するガスフロー方向(X)、そのほかの方向(Y)があり、 DED 法では積層方向(Z)、それと直交する造形パス方向(X)、そのほかの幅方向(Y) がある。

これらの試験条件、使用条件を踏まて、試験マトリックスは表 4.2.1(1)②c-1 の通りとする。

疲労試験の概要(案)を下記に示す。

AM 造形: PBF、DED

- 採取方向: PBF: 積層方向、水平方向 DED: 積層方向、水平方向
- 熱処理:PBF 造形材:HIP+SA、SA

DED 造形材:As-built、SA

表面状態:PBF:平滑処理、造形まま

DED:平滑処理

- 試験片: Φ8 の丸棒試験片(図 4.2.1(1)②c-4 参照)。平滑処理としてエメリー紙で #200→#400→#600→#800→#1000 で軸方向に研磨する。造形まま材は 造形ままとする。ただし、AM 造形で R320 の指定は困難なため、造 形まま材はストレートとする。
- 環境:常温、大気中
- 負荷方法:完全両振り、軸荷重
- 制御:ひずみ制御
- 繰り返し速度:試験片が発熱しないように調整する
- 寿命定義: N25(ある繰り返し回数で引張側の荷重がこの繰返し数の 1/2 の時の 引張側の荷重の 25%以上に低下した場合)又は破断
- 測定項目:ひずみ(高サイクルは断続的でも可)、荷重
- 目標繰り返し回数:5×10<sup>2</sup>~1×10<sup>6</sup>以上

試験員数:2~3



図 4.2.1(1)②c-1 SUS316 の設計疲労曲線の例(JSME)<sup>[4.2-1]</sup>











図 4.2.1(1) ② c-4 疲労試験片形状

手法 士向		裁加田	<b>志</b> h An TH	去h An 1100	志바 6대 11대	丰工业能	八十四		E	目標繰り返し回	回数	
于伝 万问	烈处理	衣囬扒悲	分担	5×10 <sup>2</sup>	1×10 <sup>3</sup>	1×10 <sup>4</sup>	1×10 <sup>5</sup>	1×10 <sup>6</sup> 以上				
垂直 PBF 水平	S A	平滑	4 社	2	2	2	3	3				
	SA	造形まま	東芝 ESS	-	-	-	2	3				
	HIP+SA	平滑	4 社	2	2	2	3	3				
		造形まま	東芝 ESS	-	-	-	2	3				
	SA	平滑	東芝 ESS	-	2	-	-	3				
	HIP+SA	平滑	東芝 ESS	-	2	-	-	3				
垂直	SA	平滑	MHI	2	2	2	3	3				
	垂旦	As-built	平滑	MHI	2	2	2	3	3			
DED	-₩ W	SA	平滑	MHI	2	2	2	3	3			
	水平	As-built	平滑	MHI	2	2	2	3	3			

表 4.2.1(1)②c-1 疲労試験の試験マトリックス(案)

d. 硬さ試験

STEP1では、PBF造形位置の硬さに及ぼす影響を把握するため、複数箇所を対象に 硬さ試験を実施した。STEP1で硬さに対する造形位置の影響は特段認められないた め、STEP2では、有意な内部欠陥を生じない領域内の任意の位置で PBF 試験片を造形 する。PBF 試験片は垂直方向のみの造形とし、1つの試験片のうち X-Y 面及び Y-Z 面 のそれぞれを測定面とする(DED 造形材も同様)。作製した試験片に対し、STEP1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。測定点数は各測定面に対し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-built 材、SA 材のデータを取得す る。

硬さ試験の概要を下記に示す。本試験は、2024年度に実施予定である。

AM 造形: PBF、DED

熱処理:PBF 造形材:HIP+SA、SA

DED 造形材: As-built、SA

試験片位置:STEP1の評価結果を踏まえ、有意な内部欠陥を生じない位置で造形 適用規格:JISZ2244-1「ビッカース硬さ試験—第1部:試験方法」

測定点数:各測定面に対し、5点

測定面: X-Y 面、Y-Z 面

e. 組織試験

STEP1では、PBF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した。STEP1で金属組織に対する造形位置の影響は特段認められないため、STEP2では、有意な内部欠陥を生じない領域内の任意の位置でPBF試験片を造形する。PBF試験片は垂直方向のみの造形とし、1つの試験片のうちX-Y面及びY-Z面のそれぞれを測定面とする(DED造形材も同様)。採取した試験片に対し、JISG 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SA材及びHIP+SA材のデータを取得する。DEDについては、As-built材、SA材のデータを取得する。

組織試験の概要を下記に示す。本試験は、2024年度に実施予定である。

AM 造形: PBF、DED

熱処理:PBF 造形材:HIP+SA、SA

DED 造形材:As-built、SA

試験片位置:STEP1の評価結果を踏まえ、有意な内部欠陥を生じない位置で造形 適用規格:JISG 0553「鋼のマクロ組織試験方法」

観察面: X-Y 面、Y-Z 面

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)

f. 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 STEP 1 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 化学分析を実施した。STEP 1 で化学成分に対する造形位置の影響は特段認められない ため、、STEP2 では、有意な内部欠陥を生じない領域内の任意の位置で試験片を造形す 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-built 材、SA 材のデータを取得する。

化学分析の概要を下記に示す。本試験は、2024年度に実施予定である。

AM 造形: PBF、DED

熱処理:PBF 造形材:HIP+SA、SA

DED 造形材: As-built、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:JISG0321「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 (1) 試験基本仕様

② 試験方法

g. 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、注文者の指定がある場合、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、耐食性について注文者の指定がある場合は、硫酸・硫酸 銅腐食試験を行うことが規定されている。そのため、腐食試験の規格は、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」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、STEP1の評価結果を踏まえて決定した。また造 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とした。試験片員数については、 JISG4303およびJISG4304では、同一溶綱、同一熱処理条件ごとに1個となっ ているが、JISG0575では試験片員数に関する規定はないため、本試験での繰り 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-built、SA

試験片位置: PBF 造形材は 4.1.2(1)①d(a) 、DED 造形材は 4.1.2(1)②a(a)の造形方案を参照

造形方向:3方向(水平2方向、垂直1方向)

適用規格:JISG 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、JISG 0575 に準拠した要領で行うこととする。JISG 0575 では評価対象の供試材の形状によって 試験片寸法が規定されており、本検討対象のAM 材は、板,帯,管(厚さ5mm を超え,外径38mmを超えるもの),棒,線(径5mm以上)に相当するため、 JIS G 0575 に従って、試験片寸法を厚さ 5mm 以下、幅 25mm 以下、長さ 30~70mm に加工する。また、造形/熱処理肌をそのまま使用することが想定され る PBF 造形部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。その影響の有無を評価するため、試験片は、造形部材の表面を除 去した内部、および表面を含むもの、それぞれを採取して試験に供する。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。そのため鋭敏化熱処理を、JIS G 0575 記載の条件に て実施する。試験片寸法を図 4.2.1(1)②g-1 に示す。

試験条件(案)を表 4.2.1(1)②g-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≧90°とした。

結果の評価は、JIS G 0575 に従い、試験後の曲げ部外面の頂点部を拡大鏡(5~15倍)、もしくは顕微鏡(100~200倍)で観察し、粒界腐食の有無を調べる こととする。観察部について図 4.2.1(1)②g-2 に示す。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、表 4.2.1(1)②g-2 に示す項目を報告することとする。

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	・試験片は、試験中に常に銅片と接触させる				
	・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				
	・造形表面を含む試験片の場合は、製造時の表				
	面が曲げ部の外面となるようにする				

表 4.2.1(1) ②g-1 試験条件(案)

	表4	.2.1(1	)2g-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	試験片の曲げ部外面の頂点部全体の外観状況を記録
腐食試験後の断面観察結果	試験片の曲げ部頂点部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



\_\_\_\_\_\_ \$ mm以下

図 4.2.1(1) ②g-1 腐食試験片寸法





図 4.2.1(1) ②g-2 曲げ試験後の試験片、粒界腐食観察部

h. 破壊靭性特性の確認試験

STEP 2 の破壊靭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 踏まえて決定した。AM 材の破壊靭性特性確認に関して、シャルピー衝撃試験 及び破壊靭性試験が考えられる。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>[4,2,3]</sup>を参考に-200°C、-150°C、-100°C、0°C、RT、100°C、200°C、288°C、325°Cに決定した。 シャルピー衝撃試験片形状は、JIS Z 2242 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ASTME1820 「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、ASTME1820で規定され、0.5 T CT 試験片とする。予き裂導入 においては、荷重、変位、き裂発生位置、長さ、応力拡大係数などを記録し、 破壊靱性試験の評価項目は J-R 曲線、破壊靱性 JIc 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-built 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-built、SA

試験片位置: PBF 造形材は 4.1.2(1)①d(a) 、DED 造形材は 4.1.2(1)②a(a)の造形方案を参照。

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℃、-150℃、-100℃、0℃、RT、100℃、200℃、288℃、325℃ 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

破壞靱性試験

AM 造形: PBF、DED

熱処理:PBF 造形材:HIP+SA、SA

DED 造形材:As-built、SA

試験片位置:4.1.2(1)①a(a)、b(a)、c(a)、d(a)の造形方案を参照。 適用規格:ASTME1820「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

#### i. 非破壞検查

STEP 1 で造形位置等が内部欠陥の有無や機械的特性に及ぼす影響は把握しているた め、STEP 2 では、有意な内部欠陥を生じない任意の領域内で試験片を造形する。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、シャル ピー衝撃試験片、破壊靭性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、 シャルピー衝撃試験片、破壊靭性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 と同様に下表 4.2.1(1)②i-1、4.2.1(1)②i-2 の仕様で実 施する。

表 4.2.1(1)②i-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 4.2.1(1)②i-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の分						
	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)						

非破壊検査の概要を下記に示す。

AM 造形: PBF、DED

熱処理:SA、HIP+SA (PBF)

As-built, SA (DED)

試験片位置:STEP1の評価結果を踏まえ、有意な内部欠陥を生じない位置で造形 検査時期:表4.2.1(1)②i-3に記載の通り

試験内容	RT	РТ		
引張試験		試験片加工後		
疲労試験	<b>計</b> 段 世 加 丁 光			
シャルピー衝撃試験	<b>武</b> 阙 / 加 上 則			
破壞靭性試験(CT 試験片)		試験片加工前		

表 4.2.1(1)②i-3 試験片の検査時期

(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 4.2.1(2)①a-1 に示す。表 4.2.1(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。

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

表 4.2.1(2)①a-1 試験片造形に用いた PBF 装置一覧

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。各実施機関で用いた粉末の成分一覧を表 4.2.1(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 4.2.1(2)①b-1 試験片造形に用いた SUS316L 粉末一覧(2023 年度造形分)

元素		С	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Mo
(参考)JIS 規格 SUS316L[%]		0.030	1.00	2.00	0.045	0.030	12.00	16.00	2.00
		以下	以下	以下	以下	以下	~15.00	~18.00	~3.00
実施機関 MHI		0.015	0.84	0.73	0.010	0.006	12.57	17.24	2.07
(粉末メーカー/	(山陽特殊製鋼社								
型式)	/PSS316L- (-45 +15µm)								
	東芝 ESS	0.009	0.53	0.32	0.008	0.001	12.82	16.97	2.19
(-/-) 日立 GE (-/-)									
		0.015	0.84	0.73	0.010	0.006	12.57	17.24	2.07
	IHI	0.01	0.57	1.53	0.012	0.004	12.93	17.32	2.34
	(aerlikon								
	metco/MetcoAdd 316L-								
	A(-45 +15µ)-10 l)								
c. 造形条件

表 4.2.1(2)①a-1 の装置及び表 4.2.1(2)①b-1 の粉末を用い、図 4.2.1(1)①a-1 の モデルの造形を実施した。各実施機関にて選定した造形条件を表 4.2.1(2)①c-1 に 示す。

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

表 4.2.1(2)①c-1 造形条件

d. 後処理方法

造形した図 4.2.1.(1)①a-1 のモデルの後処理方法について各実施機関で検討した。

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 4.2.1(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 4.2.1(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 4.2.1(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 では各実施機関において 2024 年度以降も 原則同じ条件とする。

実施機関	プレート・	応力除去条件		
	サポート除去	目標温度	保持時間	冷却方法
	タイミング	[°C]	[h]	
MHI	HIP 処理前又は	(実施しない)	(実施しない)	(実施しない)
	SA 前			
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	(実施しない)	(実施しない)	(実施しない)
	SA 前			

表 4.2.1(2) ① d-1 固溶化熱処理前作業(2023、2024 年度造形分)

表 4.2.1(2) ① d-2 熱間等方圧加圧法(HIP)条件(2023、2024 年度造形分)

実施機関	熱間等方圧加圧法(HIP)条件				
	保持圧力	目標温度	保持時間	冷却方法	
	[MPa]	[°C]	[h]		
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	

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

表 4.2.1(2) ①d-3 固溶化熱処理(SA)条件(2023、2024 年度造形分)

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 4.2.1(2)②a-1 に示 す。

実が	飯機関	МНІ		
造形	メーカー	前田工業株式会社自社開発		
装置	外観			
	装置概要	・ 造形委託先(前田工業株式会社)の Wire-DED 装置		
		・ レーザ発振器: IPG 社製イッテルビウムファイバーレーザ(公称出力 30kW)		
		・ HOT 電源、ワイヤ送給装置、多軸ロボット		

表 4.2.1(2) ②a-1 試験片造形に用いた DED 装置

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 4.2.1(2)②b-1 に 示す。

元素	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Мо	Cu	Nb	Ν
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

表 4.2.1(2)②b-1 試験片造形に用いた SUS316L 線材一覧(2023 年度造形分)

c. 造形条件

表 4.2.1(2)②a-1 の装置及び表 4.2.1(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 4.2.1(2)②c-1 に示す。

表 4.2.1(2)②c-1 造形条件

レーザ出力[kW]	HOT 電流[A]
5.0	110~140

#### 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。そこで、固溶化熱処理を実施するケースと As-built のケースの 2 種類の材料を準備した。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 4.2.1(2)②d-1 に示す条件にて実 施した。なお、2024 年度は、大型サンプルにおいて十分な冷却速度を得るため に各試験片用の造形物を小割にした状態で冷却方法をガス冷とする。

固溶化熱処理条件					
目標温度	保持時間	必却七社			
[°C]	[h]	行动力伝			
1060	1	ガス冷			

表 4.2.1(2) 2d-1 固溶化熱処理(SA)条件(2023 年度造形分)

4.2.2 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

MHI における STEP2 の造形は 4.2.1(1)①の試験マトリクスに従い、常温引張試 験片 4 本、高温引張試験片 32 本、疲労試験片 28 本、硬さ試験・ミクロ試験・化学 分析用造形物 2 本である。このうち、2023 年度は疲労試験片 28 本、硬さ試験・ミ クロ試験・化学分析用造形物 2 本を造形する。これらの試験片を予備も含めて造形 するため、疲労試験片 12 本、硬さ試験・ミクロ試験・化学分析用造形物 2 本を 1 バッチとして合計 3 バッチを造形した。なお、造形配置は STEP1 での評価結果を 受け、ガスフロー下流側を避けた配置とした。

図 4.2.2(1)①a(a)-1 に造形方案を示す。図示で示す間隔で配置した。疲労試験片用 造形物のサイズは 20mm×20mm×150mm、硬さ試験・ミクロ試験・化学分析用造形 物のサイズは 10mm×10mm×80mm 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、リコート方向に対し 10°傾けるものとした。

なお、各試験片の試験片 ID(造形物 ID)は図 4.2.2(1)①a(a)-2 に示す通りとした。



図 4.2.2(1)①a(a)-1 造形方案



図 4.2.2(1)①a(a)-2 試験片 ID

#### (b) 造形結果

表 4.2.1(2)①c-1 の条件を用いて造形を実施した。造形後の外観を図 4.2.2(1)① a(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 4.2.2(1)①a(b)-1 造形後外観

(c) 熱処理結果

図 4.2.2(1)①a(b)-1 に示した造形物について、ベースプレートから造形物を切り離した状態で、表 4.2.1(2)①d-2~4.2.1(2)①d-3 にて示した条件にて固溶化熱処理又は HIP+固溶化熱処理を実施した。なお、図 4.2.2(1)①a(c)-1 に各方案の造形位置と対応する熱処理条件を示す。熱処理の実施記録については別紙 M-10 及び 11 参照。



図 4.2.2(1)①a(c)-1 熱処理条件

(d) RT 結果

熱処理の完了した造形物の内、疲労試験用造形物に対し、4.2.1(2)②-(i)項「⑤放 射線透過試験 (RT)」の仕様に基づき、図 4.2.2(1)①a(d)-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 4.2.2(1)①a(d)-1 に示す。判定の結果、いずれの試験片においても、基準 を超える欠陥は検出されなかった。合格と判定された試験片の代表的な造形結果 を図 4.2.2(1)①a(d)-2 に示す。これは、今年度は、昨年度欠陥が検出されたガスフロ 一下流側の造形エリアを避けた配置で造形したことが主要因と考えられる。





表 4.2.2(1)①a(d)-1 疲労試験用造形物 RT 結果

注)予備試験片のため、検査は実施していない。

	HHL-AN-TP-	29
		1 = F = 1 A = A
ده \$17		1 - F - 1 B
		1 = F = 10



合格判定造形材の例)



図 4.2.2(1)①a(d)-2 疲労試験用造形物 RT 造形結果の代表例

(e) 試験片加工

熱処理及び RT の完了した造形物に対して試験片加工を実施した。

疲労試験片は、電力共研「大気中設計疲労線図合理化に関する研究(平成27年度)」の基礎疲労試験の試験片(図4.2.2(1)①a(e)-1参照)を踏襲することとし、評価部をR320とする疲労試験片(加工例:図4.2.2(1)①a(e)-2参照)を加工した。ただし、2023年度は疲労試験片の研磨を実施せずに機械加工面でPTを実施し、2024年度に再び研磨後のPTを実施する計画である。



図 4.2.2(1)①a(e)-1 疲労試験片形状



図 4.2.2(1)①a(e)-2 疲労試験片外観例

(f) PT 結果

加工の完了した各種試験片に対し、4.2.1(1)②j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項目目については、面積が3750mm<sup>2</sup>となる長方形ではなく、試験片の 評価部を評価対象としてきずの判定を実施した。

表 4.2.2(1) ①a(f)-1 に PT 試験の判定結果を示す。疲労試験片において、36 本中 1 本のみ指示模様が確認されたが、基準を超える欠陥は検出されなかった。図 4.2.2(1) ①a(f)-1 に指示模様が確認された試験片の代表写真を示す。

#### 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 指示模様の間の距離が 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 4.2.2(1)①a(f)-1 疲労試験片の PT 結果

注)予備試験片のため、検査は実施していない。



図 4.2.2(1)①a(f)-1 基準内の指示模様が検出された試験片(ID.2-F-1a)

#### b. 東芝 ESS

#### (a) 造形方案

東芝 ESS における STEP2 の造形は 4.2.1(1)①の試験マトリクスに従い、常 温引張試験片 4本、高温引張試験片 32本、疲労試験片 56本、硬さ試験・ミク ロ試験・化学分析用造形物 2本である。これらの試験片を予備も含めて造形す るため、常温引張試験片、高温引張試験片、硬さ試験・ミクロ試験・化学分析 用造形物を 2バッチ、疲労試験片を 4 バッチとして合計 6 バッチを造形した。 なお、造形配置は STEP1 での評価結果を受け、造形エリア全体で材料品質が 確保されていることが確認できたことから、造形エリア全体を使った配置と した。

図 4.2.2(1)①b(a)-1 に造形方案を示す。図示で示す間隔で試験片を配置し、2 レーザの境界部での造形は行わなかった。常温引張試験片および高温引張試 験片のサイズは 15mm×15mm×100mm とし、垂直方向試験片とした。硬さ試験・ ミクロ試験・化学分析用造形物のサイズは 20mm×20mm×50mm とした。疲労 試験片はブロック体から機械加工して製作するタイプと、ゲージ部を造形ま まの表面状態とするタイプの 2 種類とした。機械加工タイプの疲労試験片の 垂直用試験片サイズは 20mm×20mm×120mm、水平用試験片を採取するための ブロックサイズは 20mm×120mm×100mm とし、造形まま表面タイプの疲労試 験片は後述する疲労試験片形状に沿った形状とした。また、リコータと造形物 との接触負荷を下げるため、リコート方向に対し 3°傾けるものとした。

なお、各試験片の試験片 ID(造形物 ID)は図 4.2.2(1)①b(a)-2 に示す通りとした。



1、2バッチ目:引張試験片・硬さ・組織・化学成分用試験片



3、4 バッチ目:疲労試験片(垂直方向)







図 4.2.2(1)①b(a)-2 試験片 ID (1/3)



3 バッチ目 (HIP+SA)



4 バッチ目 (SA のみ)

図 4.2.2(1) ①b(a)-2 試験片 ID (2/3)



5 バッチ目 (SA のみ)



図 4.2.2(1) ①b(a)-2 試験片 ID (3/3)

(b) 造形結果

表 4.2.1(2)①c-1 の条件を用いて造形を実施した。造形後の外観を図 4.2.2(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 4.2.2(1)①b(b)-1 造形後外観

\*2バッチ目の疲労試験片6本は、事前練習用に造形した造形物である。

#### (c) 熱処理結果

図 4.2.2(1)①b(b)-1 に示した造形物について、ベースプレートから造形物を 切り離した状態で、表 4.2.1(2)①d-2~4.2.1(2)①d-3 にて示した条件にて固溶化 熱処理及び HIP+固溶化熱処理を実施した。なお、図 4.2.2(1)①b(b)-2 に示した 1、4、5 バッチ目が SA のみで、2、3、6 バッチ目が HIP+SA である。熱処理 の実施記録については別紙 T-3 参照。 (d) RT 結果

熱処理の完了した常温引張試験片、高温引張試験片および疲労試験片の造 形物に対し、4.2.1(1)②i項「⑤放射線透過試験(RT)」の仕様に基づき、図4.2.2(1) ①b(d)-1に示すX線照射方向にてRTの撮影を実施した。なお、図中に示すタ イプ1は疲労試験用ブロックを例とした20×20×120mmの試験片で、タイプ 2は疲労試験用の造形まま試験片である。なお、引張試験用ブロックは15×15 ×100mmのタイプ1であるが、刻印位置と撮影方向の関係は疲労試験片ブロ ックと同じである。

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 4.2.2(1)①b(d)-1 に示す。判定の結果、いずれの試験片において も、基準を超える欠陥は検出されなかった。



図 4.2.2(1)①b(d)-1 RT 撮影方向



表 4.2.2(1)①b(d)-1 RT 結果(1/3)



### 表 4.2.2(1)①b(d)-1 RT 結果(2/3)



表 4.2.2(1)①b(d)-1 RT 結果(3/3)

(e) 試験片加工

熱処理及び RT の完了した造形物に対して試験片加工を実施した。常温引張 試験片は JIS Z 2241 で規定された 14A 号試験片とし、高温引張試験片は JIS G 0567 で規定するつば付き試験片とした。図 4.2.2(1)①b(e)-1 に常温引張試験片 形状を、図 4.2.2(1)①b(e)-2 に常温引張試験片の外観例を、図 4.2.2(1)①b(e)-3 に 高温引張試験片形状を、図 4.2.2(1)①b(e)-4 に高温引張試験片の外観例を示す。

疲労試験片は、電力共研「大気中設計疲労線図合理化に関する研究(平成27 年度)」の基礎疲労試験の試験片(評価部:R320)とした。図4.2.2(1)①b(e)-5 に疲労試験片形状を、図4.2.2(1)①b(e)-6 に疲労試験片の外観例を示す。疲労 試験片は全面機械加工するタイプと、評価部近傍のみ造形まま表面としたタ イプの2種類を加工した。



図 4.2.2(1) ① b(e)-1 常温引張試験片形状



図 4.2.2(1) ① b(e)-2 常温引張試験片外観例 (T01)



図 4.2.2(1) ①b(e)-3 高温引張試験片形状



図 4.2.2(1) ①b(e)-4 高温引張試験片外観例 (T03)



図 4.2.2(1) ①b(e)-5 疲労試験片形状 (東芝 ESS)



疲労引張試験片(FZ01)



疲労試験片(造形まま、FA01)

図 4.2.2(1) ①b(e)-6 疲労試験片外観例 (東芝 ESS)

(f) PT 結果

加工の完了した各種試験片に対し、4.2.1(1)②j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、 種試験片の評価面積内においてきずの判定を実施した。

表 4.2.2(1)①b(f)-1 に PT 試験の判定結果を、図 4.2.2(1)①b(f)-1 に常温引張、 高温引張及び疲労試験片の PT 試験後の外観例を示す。判定の結果、いずれの 試験片においても、基準を超える欠陥は検出されなかった。

#### 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 指示模様の間の距離が 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 4.2.2(1)①b(f)-1 PT 結果(1/3)



表 4.2.2(1)①b(f)-1 PT 結果(2/3)



## 表 4.2.2(1)①b(f)-1 PT 結果(1/3)

図 4.2.2(1)①b(f)-1 常温引張、高温引張および疲労試験片の PT 試験後の外観例

疲労試験片(造形まま、FA01)

疲労試験片(FZ01)

# 高温引張試験片(T03)



# 常温引張試験片(T01)


c. 日立 GE

(a) 造形方案

日立 GE における STEP2 の造形は 4.2.1(1)①の試験マトリクスに従い、常温引張 試験片用モデル 2 本、高温引張試験片用モデル 32 本、疲労試験片用モデル 28 本、 硬さ試験・ミクロ試験・化学分析用試験片用モデル 2 本である。これらのモデルを 3 バッチに分けて造形した。なお、造形配置は STEP1 での評価結果を受け, ガスフ ロー下流側を避けた配置とした。

図 4.2.2(1)①c(a)-1 に造形方案①を示す。本方案での造形は、疲労試験片用モデル20本とし、図示で示す間隔で配置した。疲労試験片用モデルの造形物のサイズは20mm×20mm×140mm、とした。なお、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°傾けるものとした。



図 4.2.2(1)①c(a)-1 造形方案①

図 4.2.2(1)①c(a)-2 に造形方案②を示す。本方案での造形は、疲労試験片用モデル 8 本、硬さ試験・ミクロ試験・化学分析試験片用モデル2本とし、図示で示す間隔 で配置した。疲労試験片用モデルのサイズは20mm×20mm×140mm、硬さ試験・ミ クロ試験・化学分析用試験片用モデルのサイズは,20mm×20mm×90mmとした。 なお、リコータ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°傾ける ものとした。



図 4.2.2(1)①c(a)-2 造形方案②

図 4.2.2(1)①c(a)-3 に造形方案③を示す。本方案での造形は、常温引張試験片モデル4本、高温引張試験片用モデル32本とし、図示で示す間隔で配置した。常温引 張試験片モデルおよび高温引張試験片用モデルのサイズは 20mm×20mm×95mm と した。なお、リコータ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° 傾けるものとした。





(b) 造形結果

表 4.2.1(2)①c-1 の条件を用いて造形を実施した。造形後の外観を図 4.2.2(1)① c(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 4.2.2(1)①c(b)-1 造形後外観(日立 GE)

(c) 熱処理結果

図 4.2.2(1)①c(b)-1 に示した造形物について、表 4.2.1(2)①(d)-2 にて示した SR を 実施した後にベースプレートから造形物の切断採取を実施した。その後、表 4.2.1(2) ①(d)-2~4.2.1(2)①(d)-3 にて示した条件にて固溶化熱処理及び HIP+固溶化熱処理 を実施した。図 4.2.2(1)①c(c)-1 に各方案の造形位置と対応する熱処理を示す。熱 処理の実施記録については別紙 H-3 参照。



図 4.2.2(1)①c(c)-1 各方案の造形位置と対応する熱処理

(d) RT 結果

熱処理の完了した造形物に対し、4.2.1(1)②i項「⑤放射線透過試験 (RT)」の仕様 に基づき、図 4.2.2(1)①c(d)-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 4.2.2(1)①c(d)-1~表 4.2.2(1)①c(d)-3 に示す。判定の結果、基準を超える きずは検出されなかった。これは、STEP1 で確認した、スパッタが粉末床に落下す ることに起因する内部欠陥の発生が懸念される造形領域を除外したことの効果で あると考えられる。



図 4.2.2(1)①c(d)-1 RT 撮影方向(日立 GE)

採	取	試験片	判定	
位	置	ID		
1行	1列	F11	合格	
	2 列	F12	合格	
	3 列	F13	合格	
	4 列	F14	合格	
	5 列	F15	合格	
2行	1列	F21	合格	
	2 列	F22	合格	
	3 列	F23	合格	
	4 列	F24	合格	
	5 列	F25	合格	3行
3行	1列	F31	合格	4行 🔽 💭 💭 🛄
	2 列	F32	合格	
	3 列	F33	合格	疲労試験片用モデル
	4 列	F34	合格	
	5 列	F35	合格	
4行	1列	F41	合格	
	2 列	F42	合格	
	3 列	F43	合格	
	4 列	F44	合格	
	5 列	F45	合格	

表 4.2.2(1)①c(d)-1 造形方案①RT 結果(日立 GE)

採	取	試験片	判定	
位	置	ID		
1行	1列	F61	合格	
	2 列	A62	合格	<ul> <li>○ 硬さ試験・2クロ試験・化学分析試験片用モデル ○</li> </ul>
	3 列	F63	合格	1列 2列 3列 4列 5列
	4 列	A64	合格	
	5 列	F65	合格	
2行	1列	F71	合格	在公司称于 田王子川
	2 列	F72	合格	ער לש מה האפיים גלאני
	3 列	F73	合格	
	4列	F74	合格	0
	5 列	F75	合格	

表 4.2.2(1)①c(d)-2 造形方案②RT 結果(日立 GE)

採	取	試験片	判定	採取		試験片	判定
位	置	ID		位	置	ID	
1行	1列	H11	合格	4行	1列	H41	合格
	2 列	H12	合格		2 列	H42	合格
	3列	H13	合格		3列	R43	合格
	4 列	H14	合格		4 列	R44	合格
	5 列	H15	合格		5 列	H45	合格
	6列	H16	合格		6列	H46	合格
2行	1列	H21	合格	5行	1列	H51	合格
	2列	H22	合格		2 列	H52	合格
	3列	H23	合格		3 列	H53	合格
	4列	H24	合格		4 列	H54	合格
	5 列	H25	合格		5列	H55	合格
	6列	H26	合格		6列	H56	合格
3行	1列	H31	合格	6行	1列	H61	合格
	2 列	H32	合格		2列	H62	合格
	3列	R33	合格		3列	H63	合格
	4 列	R34	合格		4 列	H64	合格
	5列	H35	合格		5列	H65	合格
	6列	H36	合格		6列	H66	合格
		1列 1行 2行 3行 4行 5行 6行		4 <i>9</i> 1	57) 67	0	

表 4.2.2(1)①c(d)-3 造形方案③RT 結果(日立 GE)

(e) 試験片加工

熱処理及び RT の完了した造形物に対し、JIS Z2241「金属材料引張試験方法」の 14A 号引張試験片(図 4.2.2(1)①c(e)-1 参照)に従い引張試験片(加工例:図 4.2.2(1) ①c(e)-2 参照)を、JIS G 0567「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」(図 4.2.2(1)①c(e)-3 参照)に従い高温引張試験片(加工例:図 4.2.2(1)①c(e)-4 参照)を 加工した。

疲労試験は電力共研「大気中設計疲労線図合理化に関する研究(平成27年度)」 を踏襲することとし、評価部をR320とする疲労試験片(図4.2.2(1)①c(e)-5参照) を加工した。ただし、本年度は疲労試験片の研磨を実施せずに機械加工面でPT検 査するため、研磨代を残した図4.4.2(1)①c(e)-6の形状(加工例:図4.2.2(1)①c(e)-7)に加工した。



図 4.2.2(1)①c(e)-1 引張試験片形状(日立 GE)



図 4.2.2(1) ① c(e)-2 引張試験片外観例(日立 GE)



図 4.2.2(1)①c(e)-3 高温引張試験片形状(日立 GE)



図 4.2.2(1)①c(e)-4 高温引張試験片外観例(日立 GE)



図 4.2.2(1)①c(e)-5 疲労試験片 最終形状(日立 GE)



図 4.2.2(1)①c(e)-6 疲労試験片 本年度加工形状(日立 GE)



図 4.2.2(1)①c(e)-7 本年度加工の疲労試験片外観例(日立 GE)

(f) PT 結果

加工の完了した各種試験片に対し、4.2.1(1)②j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 NB1-2012 (2013 年追補) 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。

表 4.2.2(1)①c(f)-1~表 4.2.2(1)①c(f)-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。

採	取	試験片	判定	
位	置	ID		
1行	1列	F11	合格	
	2 列	F12	合格	
	3列	F13	合格	
	4 列	F14	合格	
	5列	F15	合格	
2行	1列	F21	合格	
	2列	F22	合格	
	3列	F23	合格	
	4列	F24	合格	
	5列	F25	合格	3行 🛄 🛄 🛄
3行	1列	F31	合格	
	2列	F32	合格	
	3列	F33	合格	疲労試験片用モテル
	4列	F34	合格	0
	5列	F35	合格	
4行	1列	F41	合格	
	2列	F42	合格	
	3列	F43	合格	
	4 列	F44	合格	
	5 列	F45	合格	

表 4.2.2(1)①c(f)-1 造形方案①PT 結果(日立 GE)

採	取	試験片	判定	
位	置	ID		
1行	1列	F61	合格	
	2 列	A62	合格	<ul> <li>○ 硬さ試験・2クロ試験・化学分析試験片用モデル ○</li> </ul>
	3 列	F63	合格	1列 2列 3列 4列 5列
	4 列	A64	合格	
	5 列	F65	合格	
2行	1列	F71	合格	( ) ( ) ( ) ( ) ( ) ( ) ( ) ( ) ( ) ( )
	2 列	F72	合格	ער כש נדר די אייים נכאונ
	3 列	F73	合格	
	4 列	F74	合格	
	5 列	F75	合格	

表 4.2.2(1)①c(f)-2 造形方案②PT 結果(日立 GE)

採	取	試験片	判定	採取		試験片	判定
位	置	ID		位	置	ID	
1行	1列	H11	合格	4行	1列	H41	合格
	2 列	H12	合格		2 列	H42	合格
	3列	H13	合格		3列	R43	合格
	4 列	H14	合格		4 列	R44	合格
	5列	H15	合格		5 列	H45	合格
	6列	H16	合格		6列	H46	合格
2行	1列	H21	合格	5行	1列	H51	合格
	2列	H22	合格		2 列	H52	合格
	3列	H23	合格		3列	H53	合格
	4列	H24	合格		4 列	H54	合格
	5列	H25	合格		5 列	H55	合格
	6列	H26	合格		6列	H56	合格
3行	1列	H31	合格	6行	1列	H61	合格
	2 列	H32	合格		2 列	H62	合格
	3列	R33	合格		3列	H63	合格
	4 列	R34	合格		4 列	H64	合格
	5列	H35	合格		5 列	H65	合格
	6列	H36	合格		6列	H66	合格
		1列 1行 2行 3行 4行 5行 6行		4列 :	551 631	Ø	

表 4.2.2(1)①c(f)-3 造形方案③PT 結果(日立 GE)

## d. IHI

(a) 造形方案

IHI における STEP2 の造形は、4.2.1(1)①項の試験マトリクスに従い、常温引張 試験片用モデル4本、高温引張試験片用モデル32本、疲労試験片用モデル28本、 硬さ試験・ミクロ試験・化学分析用試験片用モデル2本、耐食性試験片用モデル6 個、シャルピー衝撃試験片用モデル6個、破壊靱性(CT)試験片用モデル15個で ある。これらのモデルを6バッチに分けて造形した。なお、造形配置はSTEP1で の評価結果を受け、リコートの始端側、終端側、およびガスフロー下流側を避けた 配置とした。また各造形方案共通の仕様として、リコータと造形物の接触負荷を下 げるため、リコート方向に対して10°傾け(モデル⑤においては15°)、ベースプ レートとの接合部は残留応力による剥がれを防止するため、フィレットを追加(R 形状は造形物サイズによって調整)している。

図 4.2.2(1)①d(a)-1 に造形方案①を示す。本方案での造形は、耐食性試験用モデ ル6個、硬さ試験・ミクロ試験・化学分析用試験片用モデル2個とし、図で示すよ うに配置した。耐食性試験片用モデルの造形物のサイズは7mm×70mm×80mmとし、 x、y、zの3方向で取得できるようサイズ、向きを調整した。硬さ試験・ミクロ試 験・化学分析用試験片用モデルの造形物のサイズは20mm×20mm×30mm、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、リコート方向に対し10°傾ける ものとした。



試験片 ID を図 4.2.2(1)①d(a)-2 に示す。

図 4.2.2(1)①d(a)-1 造形方案①



図 4.2.2(1)①d(a)-2 造形方案①の試験片 ID

図 4.2.2(1)①d(a)-3 に造形方案②を示す。本方案での造形は、常温引張試験片モ デル4本、高温引張試験片用モデル20本とし、図で示すように配置した。常温引 張試験片モデルおよび高温引張試験片用モデルのサイズはどちらも 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 ート方向に対し10°傾けるものとした。

試験片 ID を図 4.2.2(1)①d(a)-4 に示す。



図 4.2.2(1)①d(a)-3 造形方案②



図 4.2.2(1)①d(a)-4 造形方案②の試験片 ID

図 4.2.2(1)①d(a)-5 に造形方案③を示す。本方案での造形は、疲労試験片用モデル14本、引張試験片用モデル6本とし、図で示すように配置した。疲労試験片用 モデルのサイズは20mm×20mm×120mm、引張試験片用モデルのサイズは、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、リコート 方向に対し10°傾けるものとした。本方案での造形は2バッチ行い、1つをHIP+ SA、もう一つを SA のみで処理するバッチとした。

試験片 ID を図 4.2.2(1)①d(a)-6、図 4.2.2(1)①d(a)-7 に示す。



図 4.2.2(1)①d(a)-5 造形方案③







図 4.2.2(1)①d(a)-7 造形方案③2<sup>nd</sup> batch の試験片 ID

図 4.2.2(1)①d(a)-8 に造形方案④を示す。本方案での造形は、シャルピー衝撃試験片モデル6個とし、図で示すように配置した。シャルピー衝撃試験片用モデルのサイズは117mm×12mm×57mmとした。またリコータと造形物の接触負荷を下げるため、リコート方向に対し10°傾けるものとした。

試験片 ID(造形物)および、造形物から切り出した試験片 ID を図 4.2.2(1)①d(a)-9に示す。



図 4.2.2(1)①d(a)-8 造形方案④



図 4.2.2(1) ①d(a)-9 試験片 ID(造形物)および、切り出した試験片の ID

図 4.2.2(1)①d(a)-10 に造形方案⑤を示す。本方案での造形は、破壊靭性(CT) 試験片モデル 15 個とし、図で示すように配置した。破壊靭性(CT) 試験片用モデル のサイズは 35mm×15mm×35mm とした。またリコータと造形物の接触負荷を下げ るため、リコート方向に対し 15°傾けるものとした。 試験片 ID を図 4.2.2(1)①d(a)-11 に示す。



図 4.2.2(1)①d(a)-10 造形方案⑤



図 4.2.2(1)①d(a)-11 造形方案⑤

## (b) 造形結果

表 4.2.1(2)①c-1 の条件を用いて造形を実施した。造形後の外観を図 4.2.2(1)① d(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 4.2.2(1)①d(b)-1 造形後外観(IHI)

## (c) 熱処理結果

図 4.2.2(1)①d(b)-1 に示した造形物について、表 4.2.1(2)①d-2、および表 4.2.1(2) ①d-3 にて示した条件にて固溶化熱処理(SA)及び HIP+固溶化熱処理(SA)を実施した。造形物のベースプレートからの切断採取は熱処理後に実施した。図 4.2.2(1) ①d(c)-1 に各方案の造形位置と対応する熱処理を示す。造形方案③については、2 バッチ造形し、それぞれ固溶化熱処理と、HIP+固溶化熱処理を実施している。熱 処理の実施記録については別紙 I-4-3 参照。



図 4.2.2(1) ①d(c)-1 各造形方案の造形位置と熱処理

(d) RT 結果

熱処理の完了した造形物の内、常温引張試験片用造形物4本、高温引張試験片用 造形物32本、疲労試験片用造形物28本、シャルピー衝撃試験片用造形物6個に 対し、4.2.1(1)②i項「⑤放射線透過試験(RT)」の仕様に基づき、図4.2.2(1)①d(d)-1に示すX線照射方向にてRTの撮影を実施した。

また JSME 発電用原子力設備規格の設計・建設規格 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 4.2.2(1)①d(d)-1~表 4.2.2(1)①d(d)-4 に示す。判定の結果、基準を超えるきずは確認されなかった。これ は STEP1 で確認され、推定される欠陥発生要因としての、Ar フロー上流側を造形 した際に発生したスパッタの Ar フロー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することでレーザーが阻害されることに よる溶融不足、これらが懸念される造形領域を除外したことによる効果であると 考えられる。



図 4.2.2(1)①d(d)-1 RT 撮影方向(IHI)

採	取	試験片	和学	
位	置	ID	Τ.	<i>运形为朱</i>
а	1	1T-V-1a	合格	
	2	1T-V-2a	合格	
	3	1T-V-3a	合格	
	4	1T-V-4a	合格	
	5	1T-V-5a	合格	
	6	1T-V-6a	合格	
b	1	1T-V-1b	合格	
	2	1T-V-2b	合格	1T-V-6a
	3	1T-V-3b	合格	6 5 4 3 2 1 1T-V-1a
	4	1T-V-4b	合格	
	5	1T-V-5b	合格	
	6	1T-V-6b	合格	Y Y
d	1	1T-V-1d	合格	
	2	1T-V-2d	合格	
	3	1T-V-3d	合格	<→ 1T-V-1e
	4	1T-V-4d	合格	
	5	1T-V-5d	合格	
	6	1T-V-6d	合格	
e	1	1T-V-1e	合格	
	2	1T-V-2e	合格	
	3	1T-V-3e	合格	
	4	1T-V-4e	合格	
	5	1T-V-5e	合格	
	6	1T-V-6e	合格	

表 4.2.2(1)①d(d)-1 造形方案②RT 結果(IHI)

採取位置		試験片	Val 📥			
		ID	刊止	垣形万条		
а	1	2T-V-1a	合格			
	2	2T-V-2a	合格			
	3	2T-V-3a	合格			
	4	2T-V-4a	合格			
	5	2T-V-5a	合格			
	6	2T-V-6a	合格			
b	1	2F-V-1b	合格	2T-V-6a 2T-V-1a		
	2	2F-V-2b	合格			
	3	2F-V-3b	合格	2F-V-5b 2F-V-1b		
	4	2F-V-4b	合格	Y 2F-V-5c 5 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		
	5	2F-V-5b	合格	2E-V-5d		
c	1	2F-V-1c	合格			
	2	2F-V-2c	合格	160mm		
	3	2F-V-3c	合格			
	4 2F-V-4c 合格					
	5	2F-V-5c	合格			
d	2	2F-V-2d	合格			
	3	2F-V-3d	合格			
	4	2F-V-4d	合格			
	5	2F-V-5d	合格			

表 4.2.2(1)①d(d)-2 造形方案③1<sup>st</sup> batch RT 結果(IHI)

<b>抠</b> 页位置		試験片	判定	告形 古安				
177.1	闪正直	ID	TILE	运动分末				
а	1	3T-V-1a	合格					
	2	3T-V-2a	合格					
	3	3T-V-3a	合格					
	4	3T-V-4a	合格					
	5	3T-V-5a	合格					
	6	3T-V-6a	合格					
b	1	3F-V-1b	合格	3T-V-6a 3T-V-1a				
	2	3F-V-2b	合格					
	3	3F-V-3b	合格	3F-V-5b				
	4	3F-V-4b	合格	→ 3F-V-5c 5 +				
	5	3F-V-5b	合格	3E-V-Ed				
с	1	3F-V-1c	合格					
	2	3F-V-2c	合格	160mm				
	3	3F-V-3c	合格					
	4	3F-V-4c	合格					
	5	3F-V-5c	合格					
d	2	3F-V-2d	合格					
	3	3F-V-3d	合格					
	4	3F-V-4d	合格					
	5	3F-V-5d	合格					

表 4.2.2(1)①d(d)-3 造形方案③2<sup>nd</sup> batch RT 結果(IHI)

採取位置	試験片 ID	判定	造形方案
a	CI-H-a	合格	CI-H-a
b	CI-H-b	合格	
с	CI-H-c	合格	Y E C d
d	CI-H-d	合格	e f
e	CI-H-e	合格	←160mm CI-H-f
f	CI-H-f	合格	

表 4.2.2(1)①d(d)-4 造形方案④RT 結果(IHI)

(e) 試験片加工

熱処理及びRTが完了した、常温引張試験片用造形物4本、高温引張試験片用造 形物32本、疲労試験片用造形物28本、シャルピー衝撃試験片用造形物6個に対 し、試験片加工を施した。試験片は、常温引張試験片用造形物から、JIS Z2241「金 属材料引張試験方法」の14A号引張試験片(図4.2.2(1)①d(e)-1参照)に従い引張 試験片(加工例:図4.2.2(1)①d(e)-2参照)を、高温引張試験片用造形物32本から、 JIS G 0567「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」(図4.2.2(1)①d(e)-3参照) に従い高温引張試験片(加工例:図4.2.2(1)①d(e)-4参照)を作製した。

疲労試験片は電力共同研究「大気中設計疲労線図合理化に関する研究(平成27 年度)」<sup>[4.2-2]</sup>の基礎疲労試験の試験片を踏襲することとし、疲労試験片用造形物28 本に対し、評価部をR320とする疲労試験片(図4.2.2(1)①d(e)-5参照)に加工した。

(加工例:図4.2.2(1)①d(e)-6参照)

またシャルピー衝撃試験片は、シャルピー衝撃試験片用造形物 6 個から、JIS Z 2242「金属材料のシャルピー衝撃引張試験方法」(図 4.2.2(1)①d(e)-7 参照) に従い シャルピー衝撃試験片 (加工例:図 4.2.2(1)①d(e)-8 参照) を作製した。



図 4.2.2(1)①d(e)-1 引張試験片形状(IHI)



図 4.2.2(1) ①d(e)-2 引張試験片外観例(IHI)



図 4.2.2(1) ①d(e)-3 高温引張試験片形状(IHI)



図 4.2.2(1)①d(e)-4 高温引張試験片外観例(IHI)



## 図 4.2.2(1) ①d(e)-5 疲労試験片形状(IHI)



図 4.2.2(1) ①d(e)-6 疲労試験片外観例(IHI)



図 4.2.2(1) ①d(e)-7 シャルピー衝撃試験片形状(IHI)



図 4.2.2(1) ①d(e)-8 シャルピー衝撃試験片外観例(IHI)

(f) PT 結果

加工の完了した常温引張試験片4本、高温引張試験片32本、疲労試験片28本、 シャルピー衝撃試験片54本に対し、4.2.1(1)②j項「⑥浸透探傷試験(PT)」の仕様 に基づき、PTを実施した。

表 4.2.2(1) ①d(f)-1 ~表 4.2.2(1) ①d(f)-4 に PT の判定結果を示す。いずれの試験片 においても判定基準を超える PT 指示は認められなかった。

採取		試験片	判定	<b>进</b> 形士安
位	置	ID	TILE	垣形刀柴
а	1	1T-V-1a	合格	
	2	1T-V-2a	合格	
	3	1T-V-3a	合格	
	4	1T-V-4a	合格	
	5	1T-V-5a	合格	
	6	1T-V-6a	合格	
b	1	1T-V-1b	合格	
	2	1T-V-2b	合格	1T-V-6a
	3	1T-V-3b	合格	6 5 4 3 2 1 <u>1T-V-1a</u>
	4	1T-V-4b	合格	
	5	1T-V-5b	合格	
	6	1T-V-6b	合格	Y Y
d	1	1T-V-1d	合格	
	2	1T-V-2d	合格	e la
	3	1T-V-3d	合格	<→ 1T-V-1e
	4	1T-V-4d	合格	
	5	1T-V-5d	合格	
	6	1T-V-6d	合格	
e	1	1T-V-1e	合格	
	2	1T-V-2e	合格	
	3	1T-V-3e	合格	
	4	1T-V-4e	合格	
	5	1T-V-5e	合格	
	6	1T-V-6e	合格	

表 4.2.2(1)①d(f)-1 造形方案②PT 結果(IHI)

拉币位里		試験片	和中	生形士安				
採り	以业直	ID	刊化	垣形刀条				
a	1	2T-V-1a	合格					
	2	2T-V-2a	合格					
	3	2T-V-3a	合格					
	4	2T-V-4a	合格					
	5	2T-V-5a	合格					
	6	2T-V-6a	合格					
b	1	2F-V-1b	合格	2T-V-6a 2T-V-1a				
	2	2F-V-2b	合格					
	3	2F-V-3b	合格	2F-V-5b 2F-V-1b				
	4	2F-V-4b	合格	2F-V-5c 2F-V-1c				
	5	2F-V-5b	合格	2E-V-5d				
с	1	2F-V-1c	合格					
	2	2F-V-2c	合格	Icomm 160mm				
	3	2F-V-3c	合格					
	4	2F-V-4c	合格					
	5	2F-V-5c	合格					
d	2	2F-V-2d	合格					
	3	2F-V-3d	合格					
	4	2F-V-4d	合格					
	5	2F-V-5d	合格					

表 4.2.2(1)①d(f)-2 造形方案③1<sup>st</sup> batch PT 結果(IHI)

採取位置		試験片 ID	判定	造形方案
а	1	3T-V-1a	合格	
	2	3T-V-2a	合格	
	3	3T-V-3a	合格	
	4	3T-V-4a	合格	
	5	3T-V-5a	合格	
	6	3T-V-6a	合格	
b	1	3F-V-1b	合格	3T-V-6a 3T-V-1a
	2	3F-V-2b	合格	
	3	3F-V-3b	合格	3F-V-5b
	4	3F-V-4b	合格	Y 3F-V-5c 5 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	5	3F-V-5b	合格	3E-V-2d
c	1	3F-V-1c	合格	
	2	3F-V-2c	合格	160mm
	3	3F-V-3c	合格	
	4	3F-V-4c	合格	
	5	3F-V-5c	合格	
d	2	3F-V-2d	合格	
	3	3F-V-3d	合格	
	4	3F-V-4d	合格	
	5	3F-V-5d	合格	

表 4.2.2(1)①d(f)-3 造形方案③2<sup>nd</sup> batch PT 結果(IHI)



表 4.2.2(1)①d(f)-4 造形方案④PT 結果(IHI)
② DED 法

a. MHI

(a) 造形方案

STEP2 の造形は 4.2.1(1)①の試験マトリクスに従い、常温引張試験片 4 本、高温 引張試験片 32 本、疲労試験片 56 本、硬さ試験・ミクロ試験・化学分析用造形物 2 本、腐食試験片 18 本、破壊靭性特性の確認試験用として衝撃試験片 54 本、破壊靭 性試験試験片(CT 試験片)8 本の製作が必要である。これらの試験片を合理的に製 作するため、疲労試験要造形物を一体にまとめた造形物(疲労試験用)と、疲労試験 以外の造形物を一体にまとめた造形物(疲労試験以外)の 2 バッチを造形した。

図 4.2.2(1)②a(a)-1 に造形方案を示す。各造形物は、それぞれの試験片が採取で きるように次に示すのサイズをブロック形状に造形した。常温及び高温引張試験 用造形物のサイズは 13.1mm×13.1mm×90mm、疲労試験用造形物のサイズは 20mm×20mm×150mm、硬さ試験・ミクロ試験・化学分析用造形物のサイズは 10mm×10mm×80mm、腐食試験用造形物のサイズは 25mm×10mm×70mm、衝撃試 験用造形物のサイズは 13.1 mm×13.1mm×60mm、破壊靭性試験用造形物のサイズ は 35mm×35mm×15mm とした。

なお、各造形物の試験片 ID(造形物 ID)は図 4.2.2(1)②a(a)-2 に示す通りとした。







図 4.2.2(1) ②a(a)-2 試験片 ID(1/2)



図 4.2.2(1)②a(a)-2 試験片 ID(2/2)

(b) 造形結果

表 4.2.1(2)②c-1 の条件を用いて造形を実施した。造形後の外観を図 4.2.2(1)② a(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 4.2.2(1) ②a(b)-1 造形後外観(MHI)

(c) 熱処理結果

図 4.2.2(1)②a(b)-1 に示した造形物について、各試験片用の造形物に小割した状態で、表 4.2.1(2)②d-1 にて示した条件にて固溶化熱処理を実施した。なお、図 4.2.2(1)②a(c)-1 に各方案の造形位置と対応する熱処理条件を示す。熱処理の実施記録については別紙 M-12 参照。



図 4.2.2(1) ②a(c)-1 熱処理条件(1/2)



図 4.2.2(1) ②a(c)-1 熱処理条件(2/2)

(d) RT 結果

熱処理の完了した造形物の内、疲労試験用造形物、引張試験用造形物、衝撃試験 用造形物、破壊靭性試験用造形物に対し、4.2.1(2)②-(i)項「⑤放射線透過試験 (RT)」 の仕様に基づき、図 4.2.2(1)②a(d)-1~4.2.2(1)②a(d)-3 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 4.2.2(1)②a(d)-1~4.2.2(1)②a(d)-5 に示す。各試験用の造形物について、 合格と判定された代表的な造形結果と、不合格と判定された造形物のある疲労試 験、引張試験、衝撃試験については併せて不合格判定となった造形材の代表的な造 形結果を図 4.2.2(1)②a(d)-4~4.2.2(1)②a(d)-7 に示す。合格と判定された試験片にお いても、 φ 0.5mm 以下のポロシティが試験片全体に多数見られるケースが散見さ れ、 φ 0.6~1.0mm 以下のポロシティがみられるケースもあったが、いずれも試験視 野\*において合格の範囲であった。

(※:母材の厚さ25mm以下は10×10mm、25mm超え50mm以下は10×20mm)

上記のポロシティ発生原因について、積層造形時の溶融不安定化により溶融池 にシールドガスが巻き込まれ、放出される前に凝固した、あるいは、ガスシールド の不安定化により空気が溶融池に混入して、放出される前に凝固した等の可能性 が考えられた。



図 4.2.2(1)②a(d)-1 疲労試験用造形物の RT 撮影方向



図 4.2.2(1)②a(d)-2 引張試験用及び衝撃試験用造形物の RT 撮影方向



図 4.2.2(1)②a(d)-3 破壊靭性試験用造形物の RT 撮影方向



表 4.2.2(1) ②a(d)-1 疲労試験用造形物(垂直) RT 結果 (MHI)



表 4.2.2(1) ②a(d)-2 疲労試験用造形物(水平) RT 結果 (MHI)

	NH1-AX-1P-	S 25
		0 F 1 - k
51) S1)		UF2

撮影全景

合否判定造形材の例)※



不合格判定造形材の例)※



¢0.6~1.0mmのポロシティが試験視野に3個以上認められる。

(※:画像処理を行い指示を識別しやすく加工)

図 4.2.2(1)②a(d)-4 疲労試験用造形物 RT 造形結果の代表例



表 4.2.2(1) ②a(d)-3 引張試験用造形物 RT 結果 (MHI)

	M H I - A M - T P -	S 25
		DT 1 - A
∽ S12		DT2
		DT 3
		D T 7

撮影全景

合格判定造形材の例)※



不合格判定形材の例)※



¢0.6~1.0mmのポロシティが試験視野に3個以上認められる。

(※:画像処理を行い指示を識別しやすく加工)

図 4.2.2(1)②a(d)-5 引張試験用造形物 RT 造形結果の代表例



表 4.2.2(1) ②a(d)-4 衝擊試験用造形物 RT 結果 (MHI)

10000			
		M H I - A M - T P -	S S
			D I 1 - B
	S12		D I 2
			D I 3
			D I 7
	100		

撮影全景

合格判定造形材の例)※



不合格判定造形材の例)※



φ0.6~1.0mmのポロシティが試験視野に3個以上認められる。

(※:画像処理を行い指示を識別しやすく加工)

図 4.2.2(1)②a(d)-6 衝撃試験用造形物 RT 造形結果の代表例



表 4.2.2(1) ②a(d)-5 破壞靭性試験用造形物 RT 結果 (MHI)



撮影全景

合格判定造形材の例)



図 4.2.2(1) ②a(d)-7 破壊靭性試験用造形物 RT 造形結果の代表例

(e) 試験片加工

熱処理及び RT の完了した造形物に対して試験片加工を実施した。

常温引張試験では、JIS Z2241「金属材料引張試験方法」の14A 号引張試験片(図 4.2.2(1)②a(e)-1 参照)に従い引張試験片(加工例:図4.2.2(1)②a(e)-2 参照)を加工 した。

高温引張試験では、JISG 0567「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」(図 4.2.2(1)②a(e)-3 参照)に従い引張試験片(加工例:図4.2.2(1)②a(e)-4 参照)を加工 した。

疲労試験では、電力共研「大気中設計疲労線図合理化に関する研究(平成27年度)」の基礎疲労試験の試験片(図4.2.2(1)②a(e)-5参照)を踏襲することとし、評価部をR320とする疲労試験片(加工例:図4.2.2(1)②a(e)-6参照)を加工した。ただし、2023年度は疲労試験片の研磨を実施せずに機械加工面でPTを実施し、2024年度に再び研磨後のPTを実施する計画である。

シャルピー衝撃試験片は、JIS Z 2242「金属材料のシャルピー衝撃試験方法」の フルサイズ 2mmV ノッチ試験片(図 4.2.2(1)②a(e)-7 参照)に従い、シャルピー衝撃 試験片(加工例:図 4.2.2(1)②a(e)-8 参照)を加工した。

破壊靭性試験片(CT試験片)は、ASTME1820「Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness」に従い、0.5TCT 試験片(図 4.2.2(1)②a(e)-9 参照)を加工した。 なお、本試験片は疲労予亀裂導入、サイドグルーブ加工を行うが、PT はそれらの 導入、加工前に実施した(図 4.2.2(1)②a(e)-10 参照)。加工例を図 4.2.2(1)②a(e)-11 に 示す。

なお、腐食試験では、JIS G 0575「ステンレス鋼の硫酸・硫酸銅腐食試験方法」 に従い腐食試験片を加工するが、加工は 2024 年度実施予定のため、2023 年度は 25mm×10mm×70mmの造形物のままとした。



図 4.2.2(1) ②a(e)-1 常温引張試験片形状





図 4.2.2(1) ②a(e)-3 高温引張試験片形状



図 4.2.2(1) ②a(e)-4 高温引張試験片外観例



図 4.2.2(1) ②a(e)-5 疲労試験片形状





図 4.2.2(1) ②a(e)-7 シャルピー衝撃試験片形状



図 4.2.2(1)②a(e)-8 シャルピー衝撃試験片外観例



図 4.2.2(1) ②a(e)-9 破壊靭性試験片形状



図 4.2.2(1)②a(e)-10 破壊靭性試験片加工ステップ



図 4.2.2(1) ②a(e)-11 破壞靱性試験片外観例

(f) PT 結果

加工の完了した各種試験片に対し、4.2.1(1)②-(j)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項目目については、面積が3750mm<sup>2</sup>となる長方形ではなく、各試験 片の評価部を対象としてきずの判定を実施した。

表 4.2.2(1)②a(f)-1~5 に PT 試験の判定結果を示す。疲労試験片において、56 本中 9 本に指示模様が確認されたが、基準を超える欠陥は検出されなかった。引張試験 片において、36 本中 7 本に指示模様が確認されたが、基準を超える欠陥は検出さ れなかった。衝撃試験片において、54 本中 4 本に指示模様が確認されたが、基準を 超える欠陥は検出されなかった。破壊靭性試験片において、8 本中 1 本に指示模様 が確認されたが、基準を超える欠陥は検出されなかった。図 4.2.2(1)②a(f)-1~4 は 指示模様が確認された各種試験片の代表写真を示す。

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 指示模様の間の距離が 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 4.2.2(1) ②a(f)-1 疲労試験用試験片(垂直) PT 結果 (MHI)



表 4.2.2(1) ②a(f)-2 疲労試験片(水平) PT 結果 (MHI)



表 4.2.2(1) ②a(f)-3 引張試験片 PT 結果 (MHI)



表 4.2.2(1)②a(f)-4 シャルピー衝撃試験片 PT 結果 (MHI)

熱処理条件	試験片 ID	判定	熱処理条件	試験片 ID	判定				
SA -	DCT1	合格	SA	DCT5	合格				
	DCT2	合格		DCT6	合格				
As-built	DCT3	合格		DCT7	合格				
	DCT4	合格	As-built	DCT8	合格				
<u>مت من </u>									
	SA As-built								

表 4.2.2(1) ②a(f)-5 破壞靱性試験片 PT 結果 (MHI)



図 4.2.2(1)②a(f)-1 基準内の指示模様が検出された疲労試験片の代表例(ID.DF3)



図 4.2.2(1)②a(f)-2 基準内の指示模様が検出された引張試験片の代表例(ID.DT14)



図 4.2.2(1)②a(f)-3 基準内の指示模様が検出されたシャルピー衝撃試験片の代表例(ID.DI4)



図 4.2.2(1)②a(f)-4 基準内の指示模様が検出された破壊靭性試験片の代表例(ID.DCT6)
参考文献:

[4.2-1] 発電用原子力設備規格 JSME S NC1-2020 設計・建設規格(2020 年版)
[4.2-2] 電力共同研究「大気中設計疲労線図合理化に関する研究(平成 27 年度)」
[4.2-3] 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.

4.3 材料試験

4.3.1 PBF 法

(1) 材料物性値試験

①線膨張係数

表 4.3.1(1)①-1 に MHI にて造形した試験片に対する線膨張係数の試験結果を示す。

線膨張係数は、測定温度が高くなるに伴い上昇する傾向が確認できた。また造 形方向及び HIP の有無による有意差は確認されなかった。

表 4.3.1(1)①-2 に東芝 ESS にて造形した試験片に対する線膨張係数の試験結果 を示す。

線膨張係数は、測定温度が高くなるに伴い、上昇し、しだいに飽和する傾向を 示した。造形方向および HIP の有無による差は小さかった。

表 4.3.1(1)①-3 に日立 GE にて造形した試験片に対する線膨張係数の試験結果 を示す。

線膨張係数は、測定温度が高くなるに伴い上昇する傾向が確認できた。また造 形方向及び HIP の有無による有意差は確認されなかった。

表 4.3.1(1)①-4 に IHI にて造形した試験片に対する線膨張係数の試験結果を示す。

線膨張係数は、測定温度が高くなるに伴い上昇する傾向が確認できた。また造 形方向による有意差は確認されなかった。同じ造形方向試験片で、SAのみと HIP+SA とを比べると、HIP+SA を施した試験片の方が若干高い線膨張係数を示し たが、わずかであり、有意差があるとは判断できない結果である。

# 表 4.3.1(1)①-1 線膨張係数試験結果

<b>劫加田</b> 1)	<b>士</b> 向 2)		温度(℃)									
然处理。	刀叫"	20(常	字温) <sup>3)</sup>	50	75	100	125	150	175	200		
	Х		15.8	16.1	16.2	16.3	16.4	16.6	16.8	17.0		
SA	Y		16.0	16.1	16.2	16.3	16.4	16.6	16.8	17.0		
	Z		16.1		16.2	16.3	16.4	16.6	16.8	17.0		
	Х		15.9	16.1	16.2	16.3	16.4	16.6	16.8	17.0		
HIP+SA	Y		16.0	16.1	16.2	16.3	16.4	16.6	16.8	17.0		
	Z		16.0	16.1	16.2	16.3	16.4	16.6	16.8	17.0		
素加 <i>加</i> (111)	士向 <sup>2)</sup>		温度(℃)									
然处理 /	刀间	225	250	275	300	325	350	375	400	425		
	Х	17.1	17.2	17.4	17.5	17.6	17.7	17.8	17.8	17.9		
SA	Y	17.1	17.2	17.3	17.4	17.5	17.6	17.7	17.8	17.9		
	Z	17.1	17.2	17.4	17.4	17.5	17.6	17.7	17.8	17.9		
	Х	17.1	17.2	17.4	17.4	17.6	17.6	17.7	17.8	17.9		
HIP+SA	Y	17.1	17.2	17.4	17.4	17.6	17.6	17.7	17.8	17.9		
	Z	17.1	17.2	17.4	17.4	17.6	17.6	17.7	17.8	17.9		

(材料:Type316L、実施機関:MHI、×10<sup>-6</sup>mm/mm℃)

1) SA=固溶化熱処理のみ実施、HIP+SA=熱間等方圧加圧法後に固溶化熱処理を実施

2) 試験片長手方向が、X=リコート方向に平行、Y=ガスフロー方向に平行、Z=積層方向に 平行。

	(1311.	1)101	0=( )()			~~\	10 11111					
素加 <i>加</i> (1111)	士由 2)				温度(℃)							
·····································	刀叫 ⁄	20(常	字温) <sup>3)</sup>	50	75	100	125	150	175	200		
	Х			11.9	15.2	15.8	15.9	16.3	16.4	16.6		
SA	Y		—	11.2	15.4	15.7	15.9	16.3	16.6	16.6		
	Z		—	15.1	16.2	16.2	16.5	16.6	16.7	16.9		
	Х		—	13.3	16.2	16.2	16.3	16.5	16.6	16.8		
HIP+SA	Y		_	13.4	16.1	15.9	16.3	16.5	16.6	16.8		
	Z		_	13.8	16.2	16.0	16.5	16.6	16.7	16.8		
表th An エ田 1)	士白2)		温度(℃)									
款处理 /	刀叫/	225	250	275	300	325	350	375	400	425		
	Х	16.7	16.9	17.0	17.1	17.2	17.2	17.4	17.4	17.3		
SA	Y	16.7	16.9	17.0	17.1	17.2	17.3	17.4	17.5	17.4		
	Z	17.0	17.1	17.2	17.3	17.4	17.5	17.6	17.6	17.5		
	Х	16.8	17.1	17.1	17.2	17.3	17.4	17.5	17.5	17.5		
HIP+SA	Y	16.9	17.0	17.1	17.2	17.3	17.4	17.5	17.5	17.4		
	Z	16.9	17.0	17.2	17.2	17.4	17.4	17.5	17.6	17.5		

# 表 4.3.1(1)①-2 線膨張係数試験結果

(材料:Type316L、実施機関:東芝ESS、×10<sup>-6</sup>mm/mm℃)

1) SA=固溶化熱処理のみ実施、HIP+SA=熱間等方圧加圧法後に固溶化熱処理を実施

2) 試験片長手方向が、X=リコート方向及びガスフロー方向に平行、Y=リコート方向及び ガスフロー方向に直交、Z=積層方向に平行。

		21	• • •			•		,		
<b>蒸加田</b> 1)	<b>士</b> 向 2)				Ŷ	昷度(℃)	)			
然处理 /	刀叫 /	20(常	[温) <sup>3)</sup>	50	75	100	125	150	175	200
	Х		15.9	16.0	16.1	16.2	16.3	16.5	16.7	16.8
SA	Y		16.0	16.0	16.1	16.2	16.3	16.5	16.7	16.9
	Z		15.8	16.0	16.0	16.2	16.3	16.4	16.6	16.8
	Х		15.9	16.0	16.1	16.2	16.3	16.5	16.7	16.9
HIP+SA	Y		15.9	16.0	16.1	16.2	16.3	16.4	16.6	16.8
	Z		15.9	16.0	16.0	16.2	16.3	16.4	16.6	16.8
劫加理1)	士白2)				Ŷ	昷度(℃)	)			
烈火吐生 /	刀叫/	225	250	275	300	325	350	375	400	425
	Х	17.0	17.1	17.2	17.3	17.4	17.5	17.6	17.7	17.8
SA	Y	17.0	17.1	17.2	17.3	17.4	17.5	17.6	17.7	17.8
	Z	17.0	17.1	17.2	17.3	17.4	17.5	17.6	17.7	17.8
	Х	17.0	17.1	17.2	17.3	17.4	17.5	17.6	17.7	17.8
HIP+SA	Y	17.0	17.1	17.2	17.3	17.4	17.5	17.6	17.7	17.8
	Z	17.0	17.1	17.2	17.3	17.4	17.5	17.6	17.7	17.8

# 表 4.3.1(1)①-3 線膨張係数試験結果

(材料:Type316L、実施機関:日立GE、×10<sup>-6</sup>mm/mm℃)

1) SA=固溶化熱処理のみ実施、HIP+SA=熱間等方圧加圧法後に固溶化熱処理を実施

2) 試験片長手方向が、X=リコート方向に平行、Y=ガスフロー方向に平行、Z=積層方向に 平行。

<b>素加田</b> 1)	<b>士</b> 卣 2)		温度(℃)							
然处理 /	刀叫 /	20(常	[温) <sup>3)</sup>	50	75	100	125	150	175	200
	Х		-	16.3	16.4	16.6	16.7	16.8	16.9	17.1
SA	Y		-	16.3	16.5	16.6	16.7	16.8	16.9	17.0
	Z		-	16.3	16.5	16.7	16.8	16.9	17.0	17.1
	Х		-	16.3	16.5	16.7	16.8	16.9	17.0	17.1
HIP+SA	Y		-	16.5	16.5	16.6	16.7	16.8	16.9	17.0
	Z		-	16.5	16.7	16.8	16.9	17.0	17.1	17.2
素加.F田 1)	士由 2)				Ŷ	昷度(℃	)			
	刀叫/	225	250	275	300	325	350	375	400	425
	Х	17.2	17.3	17.4	17.5	17.6	17.7	17.8	17.9	18.0
SA	Y	17.1	17.2	17.3	17.4	17.5	17.6	17.7	17.8	17.9
	Z	17.2	17.3	17.4	17.5	17.6	17.7	17.8	17.9	17.9
	Х	17.2	17.3	17.4	17.6	17.7	17.8	17.8	17.9	18.0
HIP+SA	Y	17.1	17.3	17.4	17.5	17.6	17.7	17.8	17.9	18.0
	Z	17.3	17.4	17.5	17.6	17.7	17.8	17.9	18.0	18.1

### 表 4.3.1(1)①-4 線膨張係数試験結果

(材料:Type316L、実施機関:IHI、×10<sup>-6</sup>mm/mm℃)

1) SA=固溶化熱処理のみ実施、HIP+SA=熱間等方圧加圧法後に固溶化熱処理を実施

2) 試験片長手方向が、X=リコート方向に平行、Y=ガスフロー方向に平行、Z=積層方向に 平行。

②縦弾性係数、ポアソン比

表 4.3.1(1)②-1 に MHI にて造形した試験片に対する縦弾性係数、ポアソン比の 試験結果を示す。

縦弾性係数は、測定温度が高くなるに従い、小さくなる傾向が確認できる。熱処理条件の違いは、HIP 有の試験片で縦弾性係数が大きい。造形方向の違いは、 Z 方向の試験片で縦弾性係数が大きい。

ポアソン比は、測定温度が高くなるに従い、わずかに上昇する傾向が確認できる。熱処理条件の違いは、HIP 有の試験片でわずかにポアソン比が小さい。造形 方向の違いは、Z 方向の試験片でポアソン比がわずかに小さい。

また、常温で実施した、共振法の縦弾性係数とポアソン比は、超音波法と比較 しても大きな差が見られた。

表 4.3.1(1)②-2 に東芝 ESS にて造形した試験片に対する縦弾性係数、ポアソン 比の試験結果を示す。

縦弾性係数は、測定温度が高くなるに伴い、小さくなる傾向が確認できる。熱 処理条件、造形方向の違いによる縦弾性係数の影響は小さい。

ポアソン比は、測定温度が高くなるにしたが、わずかに上昇する傾向が確認で きる。熱処理条件、造形方向の違いによるポアソン比の影響は小さい。

また、常温における共振法の縦弾性係数およびポアソン比は、超音波法による 結果とほぼ同等であった。

表 4.3.1(1)②-3 に日立 GE にて造形した試験片に対する縦弾性係数、ポアソン 比の試験結果を示す。

縦弾性係数は、測定温度が高くなるに従い、小さくなる傾向が確認できる。熱 処理条件の違いによる縦弾性係数の影響は小さい。造形方向の違いは、X 方向の 試験片で縦弾性係数が大きい。

ポアソン比は、測定温度が高くなるに従い、わずかに上昇する傾向が確認できる。熱処理条件の違いによるポアソン比の影響は小さい。造形方向の違いは、X 方向の試験片でポアソン比がわずかに小さい。

また、常温で実施した、共振法の縦弾性係数とポアソン比は、超音波法と比較 しても大きな差が見られた。

表 4.3.1(1)②-4 に IHI にて造形した試験片に対する縦弾性係数、ポアソン比の 試験結果を示す。 縦弾性係数は、測定温度が高くなるに従い、小さくなる傾向が確認できる。熱処理条件の違いは、HIP 有の試験片で縦弾性係数が大きい。造形方向の違いは、 X 方向の試験片で縦弾性係数が大きい。

ポアソン比は、測定温度が高くなるに従い、わずかに上昇する傾向が確認できる。熱処理条件の違いは、HIP 有の試験片でわずかにポアソン比が小さい。造形 方向の違いは、X 方向の試験片でポアソン比がわずかに小さい。

また、常温で実施した、共振法の縦弾性係数とポアソン比は、超音波法と比較 しても大きな差が見られた。

<b>素加和111</b> 1)	<b>士</b> 向 2)			温度	$(^{\circ}C)$		
烈处理。	刀叫,	25(常温) <sup>3)</sup>	-75	25(字	常温)	100	150
	v	192		181	179	176	174
	Λ	0.17	0	0.32	0.32	0.32	0.32
SA	v	211		180	180	177	175
SA	1	0.80	0	0.35	0.35	0.34	0.34
	7	181		192	200	196	194
	L	0.42	0	0.29	0.27	0.27	0.27
	x	167		194	189	186	184
	Λ	-0.06	0	0.28	0.29	0.29	0.29
HIP+SA	v	195		193	183	180	178
1111 + 574	1	0.51	0	0.32	0.34	0.33	0.33
	Z	178		215	207	203	201
	2	0.34	0	0.23	0.25	0.26	0.26
埶仉理 <sup>1)</sup>	方向 <sup>2)</sup>			温度	É(°C)		1
熱処理1)	方向 <sup>2)</sup>	200	250	温度 300	É(℃) 350	400	450
熱処理1)	方向 <sup>2)</sup> X	200 172	250 169	温度 300 166	<u>š(°C)</u> 350 162	400	450 155
熱処理」	方向 <sup>2)</sup> X	200 172 0.32	250 169 0.32	温度 300 166 0.32	(°C) 350 162 0.33	400 159 0.33	450 155 0.33
熱処理 <sup>1)</sup>	方向 <sup>2)</sup> X Y	200 172 0.32 172	250 169 0.32 169	温度 300 166 0.32 166	(°C) 350 162 0.33 163	400 159 0.33 159	450 155 0.33 156
熱処理 <sup>1)</sup> SA	方向 <sup>2)</sup> X Y	200 172 0.32 172 0.35	250 169 0.32 169 0.35	温度 300 166 0.32 166 0.35	(°C) 350 162 0.33 163 0.35	400 159 0.33 159 0.35	450 155 0.33 156 0.35
熱処理 <sup>1)</sup> SA	方向 <sup>2)</sup> X Y Z	200 172 0.32 172 0.35 191	250 169 0.32 169 0.35 188	温度 300 166 0.32 166 0.35 184	(°C) 350 162 0.33 163 0.35 181	400 159 0.33 159 0.35 176	450 155 0.33 156 0.35 172
熱処理 <sup>1)</sup> SA	方向 <sup>2)</sup> X Y Z	200 172 0.32 172 0.35 191 0.28	250 169 0.32 169 0.35 188 0.28	温度 300 166 0.32 166 0.35 184 0.28	(°C) 350 162 0.33 163 0.35 181 0.28	400 159 0.33 159 0.35 176 0.29	450 155 0.33 156 0.35 172 0.29
熱処理 <sup>1)</sup> SA	方向 <sup>2)</sup> X Y Z X	200 172 0.32 172 0.35 191 0.28 181	250 169 0.32 169 0.35 188 0.28 178	温度 300 166 0.32 166 0.35 184 0.28 174	350 350 162 0.33 163 0.35 181 0.28 171	400 159 0.33 159 0.35 176 0.29 167	450 155 0.33 156 0.35 172 0.29 163
熱処理 <sup>1)</sup> SA	方向 <sup>2)</sup> X Y Z X	200 172 0.32 172 0.35 191 0.28 181 0.29	250 169 0.32 169 0.35 188 0.28 178 0.29	温度 300 166 0.32 166 0.35 184 0.28 174 0.29	350           350           162           0.33           163           0.35           181           0.28           171           0.29	400 159 0.33 159 0.35 176 0.29 167 0.29	450 155 0.33 156 0.35 172 0.29 163 0.30
熱処理 <sup>1)</sup> SA HIP+SA	方向 <sup>2)</sup> X Y Z X X	200 172 0.32 172 0.35 191 0.28 181 0.29 175	250 169 0.32 169 0.35 188 0.28 178 0.29 172	温度 300 166 0.32 166 0.35 184 0.28 174 0.29 169	350           350           162           0.33           163           0.35           181           0.28           171           0.29           166	400 159 0.33 159 0.35 176 0.29 167 0.29 162	450 155 0.33 156 0.35 172 0.29 163 0.30 158
熱処理 <sup>1)</sup> SA HIP+SA	方向 <sup>2)</sup> X Y Z X Y	200 172 0.32 172 0.35 191 0.28 181 0.29 175 0.33	250 169 0.32 169 0.35 188 0.28 178 0.29 172 0.34	温度 300 166 0.32 166 0.35 184 0.28 174 0.29 169 0.34	$\begin{array}{c} (^{\circ}\mathbb{C}) \\ \hline 350 \\ \hline 162 \\ 0.33 \\ \hline 163 \\ 0.35 \\ \hline 181 \\ 0.28 \\ \hline 171 \\ 0.29 \\ \hline 166 \\ 0.34 \\ \hline \end{array}$	400 159 0.33 159 0.35 176 0.29 167 0.29 162 0.34	450 155 0.33 156 0.35 172 0.29 163 0.30 158 0.34
熱処理 <sup>1)</sup> SA HIP+SA	方向 <sup>2)</sup> X Y Z X Y Z	200 172 0.32 172 0.35 191 0.28 181 0.29 175 0.33 198	250 169 0.32 169 0.35 188 0.28 178 0.29 172 0.34 194	温度 300 166 0.32 166 0.35 184 0.28 174 0.29 169 0.34 191	$\begin{array}{c} (^{\circ}\mathbb{C}) \\ \hline 350 \\ \hline 162 \\ 0.33 \\ \hline 163 \\ 0.35 \\ \hline 181 \\ 0.28 \\ \hline 171 \\ 0.29 \\ \hline 166 \\ 0.34 \\ \hline 187 \\ \hline 187 \\ \end{array}$	400 159 0.33 159 0.35 176 0.29 167 0.29 167 0.29 162 0.34 183	450 155 0.33 156 0.35 172 0.29 163 0.30 158 0.34 178

表 4.3.1(1)②-1 縦弾性係数、ポアソン比試験結果

(材料: Type316L、実施機関: MHI、縦弾性係数(上段)×10<sup>3</sup>MPa、ポアソン比(下段)-)

1) SA=固溶化熱処理のみ実施、HIP+SA=熱間等方圧加圧法後に固溶化熱処理を実施

2) X=リコート方向に平行、Y=ガスフロー方向に平行、Z=積層方向に平行

# 表 4.3.1(1)②-2 縦弾性係数、ポアソン比試験結果

# (材料: Type316L、実施機関:東芝 ESS、

桃理性術数(上校)へ10°MPa、 ルノノン比())	従弾性係数	^ソン比(下段)-)
----------------------------	-------	------------

素加 <i>加</i> .4田 1)	士山 2)	温度(℃)										
派处理 /	刀时,	25(常温) <sup>3)</sup>	-75	25(字	<b>渚温)</b>	100	150					
	v	199.1	20	)3.1	198.7	194.6	190.9					
	Λ	0.29	(	).29	0.29	0.30	0.30					
S A	V	198.2	20	)2.1	198.5	194.6	190.5					
SA	I	0.29	(	).29	0.29	0.29	0.30					
	7	196.4	20	03.0	198.9	195.0	191.1					
	L	0.30	(	0.29	0.29	0.29	0.30					
	v	199.0	20	03.1	198.8	194.4	190.9					
	Λ	0.29	(	0.29	0.29	0.30	0.30					
LID+SA	v	197.1	20	02.2	198.4	193.8	189.9					
IIII + SA	1	0.29	(	0.30	0.29	0.30	0.30					
	7	196.9	20	02.5	198.0	193.8	189.7					
	L	0.30	(	).29	0.30	0.30	0.30					
奉丸/加.7田 1)	<b>古</b> 向 2)			温度	ť(°C)	-						
熱処理1)	方向 2)	200	250	温度 300	€(°C) 350	400	450					
熱処理1)	方向 <sup>2)</sup> X	200 186.5	250 182.6	温度 300 178.5	<u>š(°C)</u> 350 174.5	400 170.6	450 165.3					
熱処理」	方向 <sup>2)</sup> X	200 186.5 0.30	250 182.6 0.30	温度 300 178.5 0.31	350           174.5           0.31	400 170.6 0.31	450 165.3 0.32					
熱処理 <sup>1)</sup>	方向 <sup>2)</sup> X V	200 186.5 0.30 186.4	250 182.6 0.30 182.2	温度 300 178.5 0.31 178.4	350           174.5           0.31           174.4	400 170.6 0.31 170.2	450 165.3 0.32 165.2					
熱処理 <sup>1)</sup> SA	方向 <sup>2)</sup> X Y	200 186.5 0.30 186.4 0.30	250 182.6 0.30 182.2 0.30	温度 300 178.5 0.31 178.4 0.31	350           174.5           0.31           174.4           0.31	400 170.6 0.31 170.2 0.31	450 165.3 0.32 165.2 0.32					
熱処理 <sup>1)</sup> SA	方向 <sup>2)</sup> X Y	200 186.5 0.30 186.4 0.30 187.3	250 182.6 0.30 182.2 0.30 182.7	温度 300 178.5 0.31 178.4 0.31 178.5	350           174.5           0.31           174.4           0.31           174.0	400 170.6 0.31 170.2 0.31 169.7	450 165.3 0.32 165.2 0.32 164.6					
熱処理 <sup>1)</sup> SA	方向 <sup>2)</sup> X Y Z	200 186.5 0.30 186.4 0.30 187.3 0.30	250 182.6 0.30 182.2 0.30 182.7 0.30	温度 300 178.5 0.31 178.4 0.31 178.5 0.30	350           174.5           0.31           174.4           0.31           174.0           0.31	400 170.6 0.31 170.2 0.31 169.7 0.31	450 165.3 0.32 165.2 0.32 164.6 0.32					
熱処理 <sup>1)</sup> SA	方向 <sup>2)</sup> X Y Z X	200 186.5 0.30 186.4 0.30 187.3 0.30 187.0	250 182.6 0.30 182.2 0.30 182.7 0.30 183.0	温度 300 178.5 0.31 178.4 0.31 178.5 0.30 178.8	350           350           174.5           0.31           174.4           0.31           174.0           0.31           174.2	400 170.6 0.31 170.2 0.31 169.7 0.31 170.0	450 165.3 0.32 165.2 0.32 164.6 0.32 165.4					
熱処理 <sup>1)</sup> SA	方向 <sup>2)</sup> X Y Z X	200 186.5 0.30 186.4 0.30 187.3 0.30 187.0 0.30	250 182.6 0.30 182.2 0.30 182.7 0.30 183.0 0.30	温度 300 178.5 0.31 178.4 0.31 178.5 0.30 178.8 0.31	350           174.5           0.31           174.4           0.31           174.0           0.31           174.2           0.31	400 170.6 0.31 170.2 0.31 169.7 0.31 170.0 0.31	450 165.3 0.32 165.2 0.32 164.6 0.32 165.4 0.32					
熱処理 <sup>1)</sup> SA HIP+SA	方向 <sup>2)</sup> X Y Z X V	200 186.5 0.30 186.4 0.30 187.3 0.30 187.0 0.30 186.1	250 182.6 0.30 182.2 0.30 182.7 0.30 183.0 0.30 181.7	温度 300 178.5 0.31 178.4 0.31 178.5 0.30 178.8 0.31 176.9	350           174.5           0.31           174.4           0.31           174.0           0.31           174.2           0.31           174.2           0.31	400 170.6 0.31 170.2 0.31 169.7 0.31 170.0 0.31 168.0	450 165.3 0.32 165.2 0.32 164.6 0.32 165.4 0.32 165.4 0.32 163.4					
熱処理 <sup>1)</sup> SA HIP+SA	方向 <sup>2)</sup> X Y Z X Y	200 186.5 0.30 186.4 0.30 187.3 0.30 187.0 0.30 186.1 0.30	250 182.6 0.30 182.2 0.30 182.7 0.30 183.0 0.30 181.7 0.30	温度 300 178.5 0.31 178.4 0.31 178.5 0.30 178.8 0.31 176.9 0.31	350           350           174.5           0.31           174.4           0.31           174.0           0.31           174.2           0.31           174.2           0.31           174.2           0.31	400 170.6 0.31 170.2 0.31 169.7 0.31 170.0 0.31 168.0 0.32	450 165.3 0.32 165.2 0.32 164.6 0.32 165.4 0.32 163.4 0.32					
熱処理 <sup>1)</sup> SA HIP+SA	方向 <sup>2)</sup> X Y Z X Y Z	200 186.5 0.30 186.4 0.30 187.3 0.30 187.0 0.30 186.1 0.30 185.8	250 182.6 0.30 182.2 0.30 182.7 0.30 183.0 0.30 181.7 0.30 181.7	温度 300 178.5 0.31 178.4 0.31 178.5 0.30 178.8 0.31 176.9 0.31 177.7	350           350           174.5           0.31           174.4           0.31           174.0           0.31           174.2           0.31           174.2           0.31           174.2           0.31           174.3	400 170.6 0.31 170.2 0.31 169.7 0.31 170.0 0.31 168.0 0.32 169.3	450 165.3 0.32 165.2 0.32 164.6 0.32 165.4 0.32 165.4 0.32 163.4 0.32 164.4					

1) SA=固溶化熱処理のみ実施、HIP+SA=熱間等方圧加圧法後に固溶化熱処理を実施

2) X=リコート方向及びガスフロー方向に平行、Y=リコート方向及びガスフロー方向に直 交、Z=積層方向に平行

# 表 4.3.1(1)②-3 縦弾性係数、ポアソン比試験結果

# (材料:Type316L、実施機関:日立GE、

### 縦弾性係数(上段)×10<sup>3</sup>MPa、ポアソン比(下段)-)

素丸 /JT.F田 1)	士白 2)	温度(℃)										
派处理 /	刀时,	25(常温) <sup>3)</sup>	-75	25(字	<b>渚温)</b>	100	150					
	v	163.8		196	193	190	187					
	Λ	-0.08	0	.28	0.28	0.28	0.28					
S A	V	211.4		178	175	172	169					
SA	I	0.61	0	.35	0.35	0.35	0.35					
	7	190.6		183	180	178	175					
	L	0.45	0	.32	0.32	0.32	0.32					
	v	165.3		195	192	189	186					
	Λ	-0.07	0	.28	0.28	0.28	0.28					
HID+SA	v	209.7		178	175	173	171					
IIII + SA	1	0.62	0	.35	0.35	0.34	0.34					
	7	191.8		184	181	178	175					
	L	0.45	0	.33	0.33	0.33	0.33					
			温度(℃)									
李玑カ儿 + 田 1)	一方向 2)				( )							
烈処埋 <sup>1)</sup>	方向 2)	200	250	300	350	400	450					
熱処埋り	方向 <sup>2)</sup> X	200 183	250 180	<u>300</u> 176	<u>350</u> 173	400 169	450 165					
	方向 <sup>2)</sup> X	200 183 0.28	250 180 0.29	300 176 0.29	350 173 0.29	400 169 0.30	450 165 0.30					
烈処理 <sup>1)</sup>	方向 <sup>2)</sup> X V	200 183 0.28 166	250 180 0.29 163	300 176 0.29 159	350 173 0.29 156	400 169 0.30 152	450 165 0.30 148					
熱処理 <sup>1)</sup> SA	方向 <sup>2)</sup> X Y	200 183 0.28 166 0.35	250 180 0.29 163 0.35	300 176 0.29 159 0.35	$     \begin{array}{r}       350 \\       350 \\       0.29 \\       156 \\       0.35     \end{array} $	400 169 0.30 152 0.36	450 165 0.30 148 0.36					
熱処理 <sup>1)</sup> SA	方向 <sup>2)</sup> X Y Z	200 183 0.28 166 0.35 171	250 180 0.29 163 0.35 168	300 176 0.29 159 0.35 164	$     \begin{array}{r}       350 \\       350 \\       0.29 \\       156 \\       0.35 \\       161     \end{array} $	400 169 0.30 152 0.36 157	450 165 0.30 148 0.36 153					
熱処理 <sup>1)</sup> SA	方向 <sup>2)</sup> X Y Z	200 183 0.28 166 0.35 171 0.33	250 180 0.29 163 0.35 168 0.33	300 176 0.29 159 0.35 164 0.33	$     \begin{array}{r}       350 \\       350 \\       0.29 \\       156 \\       0.35 \\       161 \\       0.33 \\     \end{array} $	400 169 0.30 152 0.36 157 0.34	$ \begin{array}{r}     450 \\     165 \\     0.30 \\     148 \\     0.36 \\     153 \\     0.34 \\ \end{array} $					
熱処理 <sup>1)</sup> SA	方向 <sup>2)</sup> X Y Z X	200 183 0.28 166 0.35 171 0.33 183	250 180 0.29 163 0.35 168 0.33 180	300 176 0.29 159 0.35 164 0.33 177	$     \begin{array}{r}       350 \\       350 \\       173 \\       0.29 \\       156 \\       0.35 \\       161 \\       0.33 \\       173 \\     \end{array} $	400 169 0.30 152 0.36 157 0.34 169	$\begin{array}{r} 450 \\ 165 \\ 0.30 \\ 148 \\ 0.36 \\ 153 \\ 0.34 \\ 164 \end{array}$					
熱処理 <sup>1)</sup> SA	方向 <sup>2)</sup> X Y Z X	200 183 0.28 166 0.35 171 0.33 183 0.28	250 180 0.29 163 0.35 168 0.33 180 0.28	300 176 0.29 159 0.35 164 0.33 177 0.28	$\begin{array}{r} 350 \\ \hline 350 \\ 0.29 \\ \hline 156 \\ 0.35 \\ \hline 161 \\ 0.33 \\ \hline 173 \\ 0.29 \end{array}$	400 169 0.30 152 0.36 157 0.34 169 0.29	$\begin{array}{r} 450 \\ 165 \\ 0.30 \\ 148 \\ 0.36 \\ 153 \\ 0.34 \\ 164 \\ 0.30 \end{array}$					
熱処理 <sup>1)</sup> SA HIP+SA	方向 <sup>2)</sup> X Y Z X V	200           183           0.28           166           0.35           171           0.33           183           0.28           168	250 180 0.29 163 0.35 168 0.33 180 0.28 165	$     \begin{array}{r}       300 \\       300 \\       176 \\       0.29 \\       159 \\       0.35 \\       164 \\       0.33 \\       177 \\       0.28 \\       162 \\       \end{array} $	$\begin{array}{r} 350 \\ \hline 350 \\ 0.29 \\ \hline 156 \\ 0.35 \\ \hline 161 \\ 0.33 \\ \hline 173 \\ 0.29 \\ \hline 158 \end{array}$	400 169 0.30 152 0.36 157 0.34 169 0.29 155	$\begin{array}{r} 450 \\ 165 \\ 0.30 \\ 148 \\ 0.36 \\ 153 \\ 0.34 \\ 164 \\ 0.30 \\ 150 \end{array}$					
熱処理 <sup>1)</sup> SA HIP+SA	方向 <sup>2)</sup> X Y Z X Y	200 183 0.28 166 0.35 171 0.33 183 0.28 168 0.35	$\begin{array}{r} 250 \\ 180 \\ 0.29 \\ 163 \\ 0.35 \\ 168 \\ 0.33 \\ 180 \\ 0.28 \\ 165 \\ 0.35 \end{array}$	$     \begin{array}{r}       300 \\       300 \\       176 \\       0.29 \\       159 \\       0.35 \\       164 \\       0.33 \\       177 \\       0.28 \\       162 \\       0.35 \\     \end{array} $	$\begin{array}{r} 350 \\ \hline 350 \\ 0.29 \\ \hline 156 \\ 0.35 \\ \hline 161 \\ 0.33 \\ 173 \\ 0.29 \\ \hline 158 \\ 0.35 \\ \end{array}$	$\begin{array}{r} 400\\ 169\\ 0.30\\ 152\\ 0.36\\ 157\\ 0.34\\ 169\\ 0.29\\ 155\\ 0.35\\ \end{array}$	$\begin{array}{r} 450\\ 165\\ 0.30\\ 148\\ 0.36\\ 153\\ 0.34\\ 164\\ 0.30\\ 150\\ 0.36\end{array}$					
熱処理 <sup>1)</sup> SA HIP+SA	方向 <sup>2)</sup> X Y Z X Y Z	200 183 0.28 166 0.35 171 0.33 183 0.28 168 0.35 173	$\begin{array}{r} 250 \\ 180 \\ 0.29 \\ 163 \\ 0.35 \\ 168 \\ 0.33 \\ 180 \\ 0.28 \\ 165 \\ 0.35 \\ 169 \end{array}$	$\begin{array}{r} 300 \\ \hline 300 \\ 176 \\ 0.29 \\ 159 \\ 0.35 \\ \hline 164 \\ 0.33 \\ 177 \\ 0.28 \\ \hline 162 \\ 0.35 \\ \hline 166 \end{array}$	$\begin{array}{r} 350 \\ \hline 350 \\ 0.29 \\ \hline 156 \\ 0.35 \\ \hline 161 \\ 0.33 \\ \hline 173 \\ 0.29 \\ \hline 158 \\ 0.35 \\ \hline 162 \\ \end{array}$	$\begin{array}{r} 400\\ 169\\ 0.30\\ 152\\ 0.36\\ 157\\ 0.34\\ 169\\ 0.29\\ 155\\ 0.35\\ 158\end{array}$	$\begin{array}{r} 450\\ 165\\ 0.30\\ 148\\ 0.36\\ 153\\ 0.34\\ 164\\ 0.30\\ 150\\ 0.36\\ 154\\ \end{array}$					

1) SA=固溶化熱処理のみ実施、HIP+SA=熱間等方圧加圧法後に固溶化熱処理を実施

2) X=リコート方向に平行、Y=ガスフロー方向に平行、Z=積層方向に平行

赤加 理 1)	士白 2)			温度	€(°C)			
杰处理 7	刀叫 "	25(常温) <sup>3)</sup>	-75	25(字	常温)	100	150	
	v	180.78	3	194	192	189	186	
	Λ	0.09	) (	0.29	0.29	0.29	0.29	
S A	v	211.67	7	183	181	178	176	
SA	1	0.57	7 (	0.34	0.34	0.34	0.34	
	7	194.76	5	185	182	180	177	
	L	0.41	(	0.34	0.33	0.33	0.33	
	v	188.29	)	212	208	205	202	
	Λ	0.19	) (	0.26	0.26	0.26	0.26	
HIP+SA	v	199.85	5	195	192	189	187	
IIII ' SA	1	0.38	3 (	0.31	0.31	0.31	0.31	
	7	193.69	)	193	190	187	185	
	L	0.34	4 (	0.31	0.31	0.31	0.31	
埶仉理 <sup>1)</sup>	方向 <sup>2)</sup>			温度(℃)				
	2010	200	250	300	350	400	450	
	x	183	180	176	172	169	164	
		0.29	0.29	0.29	0.29	0.30	0.30	
SA	Y	173	171	168	164	161	157	
	-	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	
	Z	174	171	168	165	162	158	
	-	0.33	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	
	X	199	196	192	188	184	179	
		0.26	0.26	0.27	0.27	0.27	0.28	
HIP+SA	Y	185	181	178	174	170	166	
		0.31	0.31	0.31	0.31	0.32	0.32	
1		182	179	175	172	168	164	
	Z	102						

表 4.3.1(1)②-4 縦弾性係数、ポアソン比試験結果

(材料: Type316L、実施機関: IHI、縦弾性係数(上段)×10<sup>3</sup>MPa、ポアソン比(下段)-)

1) SA=固溶化熱処理のみ実施、HIP+SA=熱間等方圧加圧法後に固溶化熱処理を実施

2) X=リコート方向に平行、Y=ガスフロー方向に平行、Z=積層方向に平行

4.3.2 DED 法

(1) 材料物性值試験

①線膨張係数

表 4.3.2(1)①-1 に MHI にて造形した試験片に対する線膨張係数の試験結果を示す。

線膨張係数は、高温になるにつれ高くなる傾向が確認された。固溶化熱処理材の200℃を超える温度域において積層方向(Z方向)の結果を除き、造形方向の違いによる有意差は確認されなかった(X方向≒Y方向≒Z方向)。固溶化熱処理の有無による相違点として、固溶化熱処理材はAs-builtに比べてわずかに高い傾向が確認された。

# 表 4.3.2(1)①-1 線膨張係数試験結果

劫加理1)	士白 2)				ì	温度(℃)	)					
烈火吐生 7	刀叫,	20(常	·温) <sup>3)</sup>	50	75	100	125	150	175	200		
	Х		15.6	15.8	16.0	16.0	16.2	16.4	16.6	16.8		
SA	Y		15.8	15.9	16.0	16.1	16.2	16.4	16.6	16.8		
	Z		15.7	15.8	15.9	16.0	16.1	16.3	16.5	16.6		
	Х		15.3	15.4	15.6	15.7	15.8	16.0	16.2	16.4		
As-built	Y		15.3	15.5	15.5	15.6	15.8	16.0	16.2	16.3		
	Z		15.2	15.4	15.5	15.6	15.8	16.0	16.2	16.3		
麦丸 ADL FEE 1)	士由 2)	温度(℃)										
	刀间,	225	250	275	300	325	350	375	400	425		
	X	16.0	170									
	11	10.9	17.0	17.1	17.2	17.3	17.4	17.5	17.6	17.7		
SA	Y	16.9	17.0	17.1 17.2	17.2 17.2	17.3 17.3	17.4 17.4	17.5 17.5	17.6 17.6	17.7 17.7		
SA	Y Z	16.9 16.7	17.0 17.0 16.7	$     \begin{array}{r}       17.1 \\       17.2 \\       16.8     \end{array} $	17.2 17.2 16.8	17.3 17.3 16.8	17.4 17.4 16.9	17.5 17.5 17.0	17.6 17.6 17.2	17.7 17.7 17.3		
SA	Y Z X	16.9 16.7 16.5	17.0 17.0 16.7 16.6	17.1 17.2 16.8 16.7	17.2 17.2 16.8 16.8	17.3 17.3 16.8 16.9	17.4 17.4 16.9 17.0	17.5 17.5 17.0 17.1	17.6 17.6 17.2 17.2	17.7 17.7 17.3 17.3		
SA As-built	Y Z X Y	$   \begin{array}{r}     16.9 \\     16.9 \\     16.7 \\     16.5 \\     16.5 \\     16.5   \end{array} $	$     17.0 \\     17.0 \\     16.7 \\     16.6 \\     16.6 $	$     \begin{array}{r}       17.1 \\       17.2 \\       16.8 \\       16.7 \\       16.7 \\       16.7 \\       \end{array} $	17.2 17.2 16.8 16.8 16.8	$   \begin{array}{r} 17.3 \\     17.3 \\     16.8 \\     16.9 \\     16.9 \\     16.9 \\   \end{array} $	17.4 17.4 16.9 17.0 17.0	17.5 17.5 17.0 17.1 17.1	17.6 17.6 17.2 17.2 17.2	17.7 17.7 17.3 17.3 17.2		

(材料:Type316L、実施機関:MHI、×10<sup>-6</sup>mm/mm℃)

1) SA=固溶化熱処理のみ実施

2) 試験片長手方向が、X=パス方向に平行、Y=パス方向に直交、Z=積層方向に平行

②縦弾性係数、ポアソン比

表 4.3.2(1)②-1 に MHI にて造形した試験片に対する縦弾性係数、ポアソン比の 試験結果を示す。

縦弾性係数は、測定温度が高くなるに従い、小さくなる傾向が確認された。固 溶化熱処理を実施していない材料の内、X方向とY方向の300℃以上の温度域に 関しては計測が不可であった。造形方向の違いによる有意差は確認されなかっ た。固溶化熱処理の有無による相違点として、固溶化熱処理材の造形方向依存性 は顕著に認められなかったが、As-built 材は造形方向に依存して縦弾性係数の差 が大きかった。

ポアソン比は、測定温度が高くなるに従い、わずかに上昇する傾向が確認された。固溶化熱処理の有無による相違点として、固溶化熱処理材の造形方向依存性は顕著に認められなかったが、As-built材は造形方向に依存してX方向のポアソン比が小さかった。

また、比較として常温で実施した共振法の縦弾性係数とポアソン比は、超音波 法と差が大きかった。

<b>素加和111</b> 1)	士白 2)			温度	€(°C)			
然处理 /	刀间,	25(常温) <sup>3)</sup>	-75	25(*	常温)	100	150	
	v	181		202	198	195	192	
	Λ	0.20	(	0.29	0.29	0.29	0.29	
SA	v	190		197	195	192	190	
SA	1	0.28	(	0.30	0.30	0.30	0.30	
	7	188		198	191	188	186	
	L	0.19	(	0.30	0.31	0.31	0.31	
	x	145		207	207	203	200	
		-0.18	(	0.23	0.25	0.25	0.25	
As-built	Y	169		178	175	173	171	
	1	0.02	(	0.35	0.34	0.34	0.34	
	Z	180		175	173	170	168	
		0.07	(	).34	0.35	0.35	0.35	
埶仉理 <sup>1)</sup>	方向 <sup>2)</sup>	-		温度(℃)				
	201.1	200	250	300	350	400	450	
	X	189	186	183	179	175	170	
		0.29	0.29	0.29	0.30	0.30	0.30	
SA	Y	187	184	180	177	173	168	
		0.30	0.30	0.30	0.30	0.31	0.31	
	Z	183	180	177	174	169	165	
		0.31	0.31	0.31	0.31	0.32	0.32	
	Х	197	194	4)	4)	4)	4)	
		0.25	0.25					
As-built	Y	168	165	4)	4)	4)	4)	
		0.34	0.34	1(05)	1 = = = 5)	1 5 45)	1,505)	
	Z	166	163	1603	15/3)	1543)	$150^{3}$	
		0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	

表 4.3.2(1)②-1 縦弾性係数、ポアソン比試験結果

(材料: Type316L、実施機関: MHI、縦弾性係数(上段)×10<sup>3</sup>MPa、ポアソン比(下段)-)

1) SA=固溶化熱処理のみ実施

2) 超音波法試験片の板厚方向および共振法試験片の長手方向が、X=パス方向に平行、Y=パス方向に直交、Z=積層方向に平行

- 3) 共振法による結果を示す(ポアソン比は等方性材料を前提として算出した値)。特記な き結果は超音波法による結果を示す。
- 4) As-built 材の X、Y 方向の 300~450℃では、横波が検出されず、弾性率算出不可であった。
- 5) As-built 材の Z 方向の 300~450℃では、横波振幅がベースラインと同等であるため、当該 温度域での結果は参考値とする。

#### 4.4 評価

#### 4.4.1 PBF 法

#### (1) 材料物性値試験

①線膨張係数

表 4.3.1(1)①-1,2,3,4 に示したデータ、および表 4.4.1(1)①-1 に示す、JSME S NJ1「材料規格」によるオーステナイト系ステンレス鋼の平均線膨張係数のデー タ<sup>[4,4-1]</sup>について、図 4.4.1(1)①-1,2,3,4 にグラフで示す。

全体的な傾向として、温度が上昇すると平均線膨張係数も大きくなる。各社の 温度ごとにおけるばらつきが小さいことから、造形方向や熱処理による有意差は ないと判断する。また、東芝 ESS の結果においては 100℃以下の領域で値にばら つきがみられたため、2024 年度に再測定を検討する。

各社の平均値データと、JSME S NJ1「材料規格」のオーステナイト系ステンレ ス鋼の平均線膨張係数の値を用いたグラフを図 4.4.1(1)①-5 に示す。JSME S NJ1 「材料規格」の値と比べると、温度が上がるにつれ平均線膨張係数も高くなる傾 向は同じであり、平均線膨張係数の値も同程度となった。一方で、4 社の値と、 JSME S NJ1「材料規格」の値とを比べると、若干低温側で高く、高温側で低くな る傾向がみられた。4 社とも同様の傾向であるため AM に起因する要因の可能性 があるが、一方でばらつきの範囲か判断が困難である。

温度による傾向を検討する場合には、典型的な SUS316L 材を比較材として評価、検討することが考えられる。

表 4.4.1(1)①-1 JSME S NJ1「材料規格」オーステナイト系ステンレス鋼の平均 線膨張係数<sup>[4.4-1]</sup>

温度、℃	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425
線膨張係数、 ×10-6(1/℃))	15.6	15.9	16.2	16.4	16.6	16.8	17.0	17.2	17.4	17.5	17.7	17.8	17.9	18.0	18.1	18.2







図 4.4.1(1) ①-2 平均線膨張係数 東芝 ESS





図 4.4.1(1) ①-3 平均線膨張係数 日立 GE

図 4.4.1(1) ①-4 平均線膨張係数 IHI



図 4.4.1(1)①-5 各社平均線膨張係数の平均値、および JSME S NJ1「材料規格」のオーステ ナイト系ステンレス鋼の平均線膨張係数

② 縦弾性係数、ポアソン比

表 4.3.1(1)②-1,2,3,4 に示した超音波法により測定した縦弾性係数のデータ、および表 4.4.1(1)②-1 に示す JSME S NJ1「材料規格」によるオーステナイト系ステンレス鋼の縦弾性係数のデータ<sup>[4.4-1]</sup>について、図 4.4.1(1)②-1,2,3,4 に、またポアソン比について図 4.4.1(1)②-5,6,7,8 に示す。

縦弾性係数は、温度が上がるにつれ減少する傾向である。東芝 ESS 以外の3社 においては、造形方向により縦弾性係数の値に差があり、東芝 ESS のみ差が見ら れなかった。また MHI と IHI においては、HIP+SA の方が SA のみよりも値が大 きくなっており、東芝 ESS と日立 GE では熱処理による値の差は見られなかっ た。JSME S NJ1「材料規格」の値と比べると、東芝 ESS は同等であり、MHI、 IHI は HIP+SA の平均値が同等、日立 GE は縦弾性係数の高い造形方向の値が同等 であった。

ポアソン比は温度が上がるにつれ、わずかに上昇する傾向であった。また縦弾 性係数と同様、東芝 ESS 以外の3社においては、造形方向により値に差が確認さ れた。HIP+SA と SA のみを比較すると、MHI と IHI においては、若干ポアソン 比に差が出ており、縦弾性係数とは逆に HIP+SA の方が低い値となっている。東 芝 ESS と日立 GE は、熱処理による差は見られなかった。

縦弾性係数、およびポアソン比を共振法で取得したデータを、表 4.4.1(1)②-2 に示す。東芝 ESS 以外の3社において、ポアソン比の値のばらつきが非常に大き く、-0.08~0.80まで、広い範囲で値がばらついている。東芝 ESS 以外の3社にお いては、超音波法における縦弾性係数の測定結果で造形方向による差が出てお り、また引張試験結果、2022年度における組織観察結果においても異方性がある ことが確認されている。そのため共振法では異方性の影響で、測定が正しくでき なかったと考えられる。一方、東芝 ESS の値は、超音波法の値と同等であり、正 確に測定できていると判断する。

東芝 ESS 以外の3 社で、造形方向により縦弾性係数に差がでていることから、 造形物が異方性を有している可能性が考えられる。黒須らの論文<sup>[4,4,2]</sup>において は、SUS316L のレーザービーム積層造形において、造形方向とビームスキャンパ ターンによって結晶方位配向性を持たせることで、特性に差が出ることが確認さ れている。図 4.4.1(1)②-9 はスキャン方向と機械的特性、およびヤング率につい て文献にて示された図である。また縦弾性係数は X-scan 条件で 117GPa から 244GPa まで大きく変化し、典型的な XY-scan 条件では、159 から 168GPa とばら つきが少ない。上記より、本試験において、東芝 ESS 以外の3 社については、造 形条件により若干だが造形物が結晶方位配向性を有し、それが縦弾性係数の差と して出た可能性があると考えられる。

造形物における異方性の検討は、EBSDによる結晶方位測定による評価を行う ことが考えられる。

また、MHIとIHIにおいては、SAのみとHIP+SAで縦弾性係数に差が出ており、HIP+SAの方が若干高い値となった。一方で、東芝ESSと日立GEは、熱処理による差は出ていない。各社の熱処理条件は、MHIとIHIはHIP前のSRを行っておらず、東芝ESSと日立GEはSRを行っている。このことから、HIP+SAの方がSAのみより縦弾性係数が若干高くなる傾向となる理由として、残留応力が要因の一つである可能性が考えられる。国峯らの論文<sup>[4,4,3]</sup>において、表面仕上げ加工後の薄板ばねに対し熱処理を行うことで、図4.4.1(1)②-10に示すように縦弾性係数が回復したことが示されている。これより、SRを実施しなかったSAのみの造形物においては若干残留応力が残っており、HIP+SAを行った造形物に置いては残留応力が解消され、SAのみと比べ若干高い縦弾性係数となった可能性が考えられる。また、もう一つ考えられる要因として、高温での加熱となるHIP処理を行うことで、組織が再結晶組織となり、その結果異方性が小さくなった可能性が考えられる。異方性が小さくなることで、一般材の特性、JSMESNJ1「材料規格」の値に近づいた可能性も考えられる。

2024年度実施予定の硬さ試験、組織検査において、熱処理により有意な差が出るか確認する。

温度、℃	-75	25	100	150	200	250	300	350	400	450
縦弾性係数、 GPa	201	195	189	186	183	179	176	172	169	165

表 4.4.1(1)2-1 オーステナイト系ステンレス鋼の縦弾性係数[4.4-1]







図 4.4.1(1) 2-2 縦弾性係数 東芝 ESS







図 4.4.1(1) 2-4 縦弾性係数 IHI



図 4.4.1(1)②-5 ポアソン比 MHI



図 4.4.1(1)2-6 ポアソン比 東芝 ESS



図 4.4.1(1)②-7 ポアソン比 日立 GE



図 4.4.1(1)②-8 ポアソン比 IHI

	熱処理		ヤング率 [GPa]	ポアソン比		熱処理		ヤング率 [GPa]	ポアソン比
			25℃	25℃				25℃	25℃
MHI	SA	Х	192	0.17	東芝	SA	Х	199	0.29
		Y	211	0.80			Y	198	0.29
		Z	181	0.42	E22		Z	196	0.30
	HIP+SA	Х	167	-0.06		HIP+SA	Х	199	0.29
		Y	195	0.51			Y	197	0.29
		Z	178	0.34			Z	197	0.30
	熱処	□理	ヤング率 [GPa]	ポアソン比		熱処	心理	ヤング率 [GPa]	ポアソン比
	熱処	理	ヤング率 [GPa] 25℃	ポアソン比 25℃		熱処	型理	ヤング率 [GPa] 21℃	ポアソン比 21℃
	熱処	<sup>L</sup> 理 X	ヤング率 [GPa] 25℃ 164	ポアソン比 25℃ -0.08		熱処	<sup>心理</sup> X	ヤング率 [GPa] 21℃ 181	ポアソン比 21℃ 0.09
日立GE	熱処 SA	<sup>业</sup> 理 X Y	ヤング率 [GPa] 25℃ 164 211	ポアソン比 25℃ -0.08 0.61	IHI	熱处 SA	<sup>L</sup> 理 X Y	ヤング率 [GPa] 21℃ 181 212	ポアソン比 21℃ 0.09 0.57
日立GE	熱処 SA	L理 X Y Z	ヤング率 [GPa] 25℃ 164 211 191	ポアソン比 25℃ -0.08 0.61 0.45	IHI	熱处 SA	L理 X Y Z	ヤング率 [GPa] 21℃ 181 212 195	ポアソン比 21℃ 0.09 0.57 0.41
日立GE	熱処 SA	心理 X Y Z X	ヤング率 [GPa] 25℃ 164 211 191 165	ポアソン比 25℃ -0.08 0.61 0.45 -0.07	IHI	熱处 SA	心理 X Y Z X	ヤング率 [GPa] 21℃ 181 212 195 188	ポアソン比 21℃ 0.09 0.57 0.41 0.19
日立GE	熱処 SA HIP+SA	<sup></sup> ユ マ ス ス Y	ヤング率 [GPa] 25℃ 164 211 191 165 210	ポアソン比 25℃ -0.08 0.61 0.45 -0.07 0.62	IHI	熱( SA HIP+SA	心理 X Y Z X Y	ヤング率 [GPa] 21℃ 181 212 195 188 200	ポアソン比 21℃ 0.09 0.57 0.41 0.19 0.38

表 4.4.1(1) 2-2 各社の共振法による測定結果



図 4.4.1(1) ②-9 スキャン方向と機械的特性、およびヤング率[4.4-2]



図 4.4.1(1) 2-10 熱処理の影響とヤング率[4.4-3]

4.4.2 DED 法

(1) 材料物性值試験

①線膨張係数

図 4.4.2(1)①-1 に MHI にて DED 造形した試験片に対する線膨張係数の試験結 果を示す。

線膨張係数は、高温になるにつれて高くなる傾向が確認された。固溶化熱処理 材の 200℃を超える温度域における積層方向(Z 方向)の結果を除き、造形方向の違 いによる有意差は確認されなかった。固溶化熱処理材は As-built に比べてわずか に高い傾向が確認された。また、100℃未満の低温データを除き、線膨張係数は JSME S NJ1 材料規格に記載の従来材料のオーステナイト系ステンレス鋼(区分 I、TE6)の規格値より小さい傾向を示したが、温度に対する挙動は同様であっ た。

これらの違いが有意な差であるかに関しては、他の試験の結果やJSME 委員会の意見を踏まえて考察する必要がある。



図 4.4.2(1)①-1 線膨張係数の測定結果(超音波法)

② 縦弾性係数、ポアソン比

図 4.4.2(1)②-1、2 に MHI にて DED 造形した試験片に対する縦弾性係数、ポア ソン比の測定結果(超音波法)を示す。

縦弾性係数は、測定温度が高くなるに従い、小さくなる傾向が確認された。固 溶化熱処理を実施していない材料の内、X方向とY方向の300℃以上の温度域に 関しては計測が不可であった。固溶化熱処理の有無による相違点として、固溶化 熱処理を実施しない場合は造形方向依存性が確認された(X方向>Y方向≒Z方 向)。これは造形材の組織異方性の影響によるものと推定される。固溶化熱処理を 実施した材料において造形方向の違いによる有意差は確認されず、JSME S NJ1 材料規格に記載の従来材料のオーステナイト系ステンレス鋼(区分 E1-9)の規格値 とほぼ同等であった。

ポアソン比は、測定温度が高くなるに従い、わずかに上昇する傾向が確認された。固溶化熱処理の有無による相違点として、固溶化熱処理材の造形方向依存性は顕著に認められなかったが、As-built材は造形方向に依存してX方向のポアソン比が小さい。これは造形材の組織異方性の影響によるものと推定される。

また、比較として常温で実施した共振法の縦弾性係数とポアソン比は、超音波 法と差が大きかった。これは造形材の組織異方性の影響で測定が正しくできなか ったと考えられる。

これらの違いが有意差であるかに関しては、他の試験の結果やJSME 委員会の 意見を踏まえて考察する必要がある。









4-193

(参考文献)

[4.4-1] 発電用原子力設備規格 材料規格(2020年版) JSME S NJ1-2020

[4.4-2] 黒須信吾,池浩之,レーザービーム金属積層造形法によるステンレス鋼 SUS316L 造形品の組織制御,鋳造工学, Vol.91, No.9 (2019), pp.664–669.

[4.4-3] 国峯辰雄; 松江清美; 吉岡慎一. 薄板ばねのばね限界値, ヤング率に及ぼす表面仕上 げの影響. ばね論文集, 1997, 42: 39-43.

5. 2024 年度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、2023 年度の成果を踏まえて、2024 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。2024 年度以降に実施する試験項目は以下のとお りである。

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(熱伝導率、温度伝導率)
- (10) 非破壊検査

STEP3: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 2: 規格化に向けた材料データの取得

2024 年度以降、STEP 2 では、(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(熱伝導率、温度伝導率)、(10)破壊靭性特性確認試験、(11) 非破壊検査の試験を 実施する。このうち、2022 年度に造形を開始した、(9)については、4.1.1(1)②項に、2023、 2024 年度に造形を開始する、(1)、(2)、(3)、(4)、(5)、(7)、(8)、(10)及び(11)については、 4.2.1(1)②項に詳細を示す。なお、(6) SCC 試験については、優先度を考慮しての実施を 検討しており、5.1.1 項に詳細を示す。
5.1.1. 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>[5.1-1]</sup>を図 5.1.1(1)-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>[5.1-1]</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[5.1-<sup>1</sup>では、ASTME647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 25-30MPa√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>[5.1-2]</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 5.1.1(1)-2)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。

5-3

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:STEP1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℃ (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-built (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℃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>[5,1,3]</sup>に準拠し、定期的除負荷し た後に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>[5,1,4]</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>[5,2-4]</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、I	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℃ 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



図 5.1.1(1)-1 SCC 進展試験結果例<sup>[5.1-1]</sup>



図 5.1.1(2)-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>[5.1-2]</sup>

(参考文献)

[5.1-1] GE Global Research, "Environmental Cracking and Irradiation Resistant Stainless Steels by Additive Manufacturing", DE-NE0008428

[5.1-2] JSME, JSME S NA1-2016, "発電用原子力設備規格 維持規格", (2016)

[5.1-3] EPRI Technical report, "Stress Corrosion Cracking Testing Guidelines with Emphasis on High Temperature Water", Final report, Aug. 2020.

[5.1-4] MRP-458, "Stress Corrosion Crack Growth Rates in Stainless Steels in PWR Environments (MRP-458)", Final Report, Aug. 2022.

5.2 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。



図 5.2-1 プロトタイプ機器(製品)と製品合否試験イメージ[5.2-1]

5.2.1 PBF 法

(1) MHI

①検証方針

製品品質に影響を及ぼす可能性のある因子を把握可能な特徴的な形状を考慮し たプロトタイプ機器を製造する。プロトタイプ機器とその傍で同時に造形される 製品合否試験での品質の差異を確認し、プロトタイプ機器の必要性について検証 する。

PBF 法において製品品質に影響を及ぼす可能性のある因子は下記に例示するものを考慮する。

装置依存の影響因子

- 試験片採取方向
- ガスフロー(上流側/下流側)
- 複数光源の境界
- レーザ中心からの距離など

構造依存の影響因子

- 冷却速度
- 造形傾き
- 照射面積など

熱処理依存の影響因子

- HIP 熱処理有無
- 冷却速度など

② 造形方案および試験片採取イメージ

図 5.2.1(1)②-1 に、プロトタイプ機器の造形方案および試験片採取イメージを示 す。プロトタイプ機器は、①に示す装置依存、構造依存、熱処理依存の影響因子を 確認できるように、板厚の異なる 45° エルボ 2 体(Sch160、80)を製作すること とする。このうち Sch80 については、HIP 有無による影響を把握するため、製品を 中心で 2 分割し、片側を HIP 有条件での検証に供するものとする。





③ 試験項目

引張試験、硬さ試験、化学成分分析、非破壊検査などの、既存材の規格で要求される試験を実施して、PBF法による製品が既存の規格における相当材の要求値を 満足するか確認する。また、寸法・粗度の確認、組織観察を行い、PBF法による製品の品質、材料特性を把握する。 (2) 東芝 ESS

① 検証方針

一つの造形物に薄肉部と厚肉部を有するようなプロトタイプ機器を造形し、薄 肉部と厚肉部の造形品質の差異を確認する。また、STEP1では材料品質に対する ガスフローの影響が大きいことが明らかとなったことから、機器は造形ステージ を広く使って造形し、上流、下流領域での造形品質を確認する。さらに、傾斜部を 有する部分を造形し、オーバーハング部での造形性を確認する。プロトタイプ機器 の造形時には、その近傍に別体試験体も併せて造形し、機器から採取した試験片と の特性差を評価する。

② 造形方案および試験片採取イメージ

図 5.2.1(2)②-1 にプロトタイプ機器の造形方案を示す。プロトタイプ機器は薄肉 部、厚肉部の造形品質を確認できるように、外筒部および内筒部は厚肉構造とし、 羽根部は薄肉構造とする。また、外筒部の直径は造形ステージの大きさと同程度と し、ガスフローの最上流側と最下流側に機器の一部が配置されるような形状とす る。羽根は外筒部の内部に螺旋状に設置し、傾斜部を設ける。また、機器の造形の 際にはその近傍に別体試験体を造形する。

熱処理は実際の製造を考慮し、作業工程の少ない SA のみを適用することとする。試験片は外筒、内筒部の厚肉部、羽根の薄肉部、および別体試験体より採取し、 試験に供するものとする。



図 5.2.1(2)②-1 PBF 法におけるプロトタイプ機器の造形方案および試験片採取

## ③ 試験項目

既存規格で要求される引張試験、硬さ試験、化学成分分析を実施し、規格値を満 足するか評価する。また、組織観察および非破壊検査を実施し、造形物の均質性な どの観点で評価を行う。さらに、耐食性を確認するため、粒界腐食試験を実施する。 各種試験・分析等の要領は、基本的に STEP2 にて実施した要領と同様とする。 (3) 日立 GE

①検証方針

表 5.2.1(3)①-1 に、造形方案に反映する要素、およびその考え方を整理した検証 方針を示す。基本方針として、STEP1 および STEP2 で得られた知見を基に、製品 の材料特性に影響を及ぼすと想定される要素を盛り込んだ形状を設定する。チャ ンバー内の造形領域については、STEP1 の試験片の非破壊検査(RT)で許容でき ない欠陥が生じる範囲の知見を得ていることから、その範囲を回避した領域内で 造形し、造形領域による内部欠陥の影響を排除した上で検証することとする。

表 5.2.1(3)①-1 モックアップ検証方法の妥当性確認における基本方針 (日立 GE)

要素	考え方
形状全般	STEP1 および STEP2 で得られた知見を基に、製品の材料特性に
	影響を及ぼすと想定される要素を盛り込んだ形状を設定する。
	モックアップ本体とは別に、比較用の別体試験体を設ける。
方向	STEP1の検証で造形方向により引張強度に有意な差を生じる可
	能性が示唆されたため、垂直・水平・斜角のいずれの造形方向
	も含む形状とする。
位置	STEP1の検証で許容できない欠陥を生じた範囲を回避すれば、
	位置による有意な影響は見られないため、位置の影響は主要な
	評価項目としない(結果的に複数位置の試験片を評価すること
	はあり得るが、同じ造形方向・高さで位置のみ変える、といっ
	た検証はしない)。
高さ	STEP1の検証で特段の有意な影響が見られないため、高さの影
	響は主要な評価項目としない(結果的に複数高さの試験片を評
	価することはあり得るが、同じ造形方向・位置で高さのみ変え
	る、といった検証はしない)。
領域	STEP1の検証で許容できない欠陥を生じた範囲は回避し、造形
	領域による内部欠陥の影響を排除する。
員数	各造形方向につき、少なくとも2体とする。方向が同じであれ
	ば、位置や高さは異なってもよい。

② 造形方案および試験片採取イメージ

図 5.2.1(3)②-1 に、プロトタイプ機器の造形方案および試験片採取イメージを示 す。上記①の検証方針に従い、垂直・水平・斜角(45°)のいずれも方向の試験片 も採取できる形状とする。特に斜角(45°)方向については、STEP1の検証におい て、同じ斜角でも平面の方向(X 方向か Y 方向)で強度特性が異なる傾向が生じ ている場合があったため、いずれの方向も評価できる方案とする。なお、STEP2の 試験結果によって、試験項目は必要に応じて変更することとする。

モックアップ本体の他に、比較用の別体試験体を造形する。比較用のため造形方 向は垂直方向のみに限定し、各種材料特性のうち、引張強度のみ評価する。



図 5.2.1(3) ②-1 プロトタイプ機器の造形方案および試験片採取イメージ

③ 試験項目

引張試験・衝撃試験・硬さ試験による基礎的な機械特性の評価を基本としつつ、 同一造形物内の品質のばらつき有無の確認のため、化学成分分析・組織観察を実施 することとする。また、試験片を対象に非破壊試験(RT)を実施し、亀裂や融合欠 陥の有無を確認する。なお、STEP2の試験結果によって、試験項目は必要に応じて 変更することとする。各種試験・分析等の要領は、基本的に STEP2 にて実施した 要領と同様とする。 (4) IHI

①検証方針

表 5.2.1(4)①-1 に、造形方案に反映する要素、およびその考え方を整理した検証 方針を示す。また造形対象は「マルチステージディスク」と呼ばれる、シビアサー ビスに使用するバルブの弁内部構造部品をターゲットとする。本ターゲットに対 して所定の材料試験・検査を実施するとともに流量・圧損性能試験を実施し、従来 製法によるマルチステージディスクと性能上の比較をするとともに、差異がない ことを検証する。

表 5.2.1(4) ①-1 モックアップ検証方法の妥当性確認における基本方針(IHI)

要素	考え方		
形状全般	実際に適用を検討する機器形状等を踏襲する。材料試験用の試験片		
	は、採取できる位置もしくは必要により本試験対円筒部など一部形状		
	を追加して採取する。		
試験項目	実機での性能を検証するため本模擬体であれば製品に組み込んでの		
	性能試験(差圧、流量測定)を行う。材料試験について、製品部材に		
	要求される性能を勘案し、同等の試験を試験体端材部より採取し行		
	<b>う</b> 。		
方向	材料特性を見る場合には、STEP1の検証で造形方向により引張強度に		
	有意な差を生じる可能性が示唆された垂直及び水平方向を含む形状		
	とする。		
位置	STEP1の検証で許容できない欠陥を生じた範囲を回避すれば、位置に		
	よる有意な影響は見られないため、位置の影響は主要な評価項目とし		
	ない(結果的に複数位置の試験片を評価することはあり得るが、同じ		
	造形方向・高さで位置のみ変える、といった検証はしない)。		
高さ	STEP1の検証で特段の有意な影響が見られないため、高さの影響は主		
	要な評価項目としない(結果的に複数高さの試験片を評価することは		
	あり得るが、同じ造形方向・位置で高さのみ変える、といった検証は		
	しない)。		
領域	STEP1の検証で許容できない欠陥を生じる傾向にある範囲(具体的に		
	は Ar ガス下流部)は回避することで、造形領域による内部欠陥の影		
	響を排除する。		
員数	原則製品模擬体1体とし、材料試験用の試験片については、機器形状		
	部の残材もしくは必要に応じて延長した円筒部より採取を行う。		

② 造形方案

図 5.2.1(4)②-1 に、モックアップ造形のターゲットであるマルチステージディス クのイメージを示す。上記①の検証方針に従い、実際に適用を検討する機器形状等 を踏襲したものとする。また試験片採取については、機器形状部もしくは必要に応 じて延長した円筒部から行うものとする。なお、試験項目については、STEP2の試 験結果やマルチステージディスクの造形検討状況によって、必要により変更する こととする。



図 5.2.1(4) 2-1 マルチステージディスクイメージ

③ 試験項目

通水試験による性能実証(差圧、流量測定)試験を主とする。また、当該製品に 要求される特性を満たしていることを確認するため、以下の材料試験及び検査を 企図する。

·化学成分分析

- ・硬さ計測
- · 金属組織観察
- ・表面粗さ
- ・曲げ試験
- ・外観検査
- ・寸法検査
- ・非破壊検査 (PT)

5.2.2 DED 法

(1) MHI

①検証方針

製品品質に影響を及ぼす可能性のある因子を把握可能な特徴的な形状を考慮し たプロトタイプ機器を製造する。プロトタイプ機器とその傍で同時に造形される 製品合否試験での品質の差異を確認し、プロトタイプ機器の必要性について検証 する。

DED 法において製品品質に影響を及ぼす可能性のある因子は下記に例示するものを考慮する。

装置・条件依存の影響因子

- 造形方向
- 造形条件
- パス間温度など

構造依存の影響因子

- 熱容量
- ガスシールド性
- 始終端部など

熱処理依存の影響因子

- 固溶化熱処理有無

② 造形方案および試験片採取イメージ

図 5.2.2(1)②-1 に、プロトタイプ機器の造形方案および試験片採取イメージを示 す。プロトタイプ機器は、①に示す装置・条件依存、構造依存、熱処理依存の影響 因子を確認できるように、管台形状とする。DED は固溶化熱処理を実施するケー スと実施しないケースの 2 通りの利用が想定されるが、固溶化熱処理の有無によ る影響はプロトタイプ機器と製品合否試験で差異が生じないことが予想される。 したがって、固溶化熱処理の有無による影響は STEP2 の結果から検証可能である から、STEP3 においては固溶化熱処理有のケースのみを想定して検証を行うこと とする。



6B管台(Sch160)

図 5.2.2(1)②-1 DED 法におけるプロトタイプ機器および試験片採取イメージ

③ 試験項目

引張試験、硬さ試験、化学成分分析、非破壊検査などの、既存材の規格で要求される試験を実施して、DED 法による製品が既存の規格における相当材の要求値を 満足するか確認する。また、組織観察を行い、DED 法による製品の品質、材料特 性を把握する。

(参考文献)

[5.2-1] D. Armstrong & Gandy WEC-EPRI, ML20344A011, "316L Stainless Steel Manufactured via Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Data Package & Code Case", (2020)

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。2022 年度に化学成分分析・硬さ試験・組織 観察が完了しており、2023 年度は引張試験を行った。なお、本項目については粉末 床溶融結合法(PBF法)に対して実施した。

- 1. 材料試験
  - ✓ 各社は、2022年度にそれぞれ造形した試験片に対し、2022年度に定義した 仕様に従い材料試験を実施した。なお、試験項目は2022年度に未実施の常 温引張試験としている。
- 2. 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。

得られた試験結果を整理、評価した結果、参考としている ASME PTB-13 で規定されている検証方法は妥当であることが確認された。

(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、また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。 2023年度は以下に示すデータ取得を実施範囲とした。

試験項目	試験片の製作	材料試験/評価
引張試験(常温・高温)	○※	-(2024年度に実施)
硬さ試験	0	-(2024年度に実施)
組織観察	0	-(2024年度に実施)
化学成分分析	0	-(2024年度に実施)
耐食性試験	0	-(2024年度に実施)
材料物性值試験	-(2022年度に製作済)	○※
疲労試験	0	-(2024年度に実施)
破壊靭性特性試験	0	-(2024年度に実施)

〇:実施、一:他年度に実施済み/実施予定

※:一部は2024年度に実施

- 1. 試験片の製作
  - ✓ 各社の PBF 造形装置を用い、任意の位置で試験片を造形した。造形条件は STEP1 向けに定義したものと同一とした。試験項目によって、4 社全てで実施 する、1 社のみで分担して実施することとした。
  - ✓ 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。
- 2. 材料試験
  - ✓ 各項目に対して材料試験を実施し、材料データを取得した。
  - ✓ 引張試験(常温・高温)、硬さ試験、組織観察、化学成分分析、耐食性試験、疲労試験、破壊靭性特性試験は2024 年度に実施する。
- 3. 評価
  - ✓ 材料試験で得られたデータを整理し、従来製法による材料特性との比較を行うとともに、AM材としての特徴有無について考察した。

2024 年度に実施する試験の試験片の製作を実施した。2022 年度に造形を開始した 試験の内、材料物性値(ヤング率、ポアソン比、線膨張係数)の取得を行い、既存 材との比較を実施した結果、定性的には既存材と変わらない特性を示すことを確認 したが、定量的な判断は他の試験結果やJSME 委員会等の意見を参考にして引続き 検討を実施することとする。

- (3) 2024 年度実施試験の試験計画策定
- 1. 2024 年度、引張試験(常温・高温)、硬さ試験、組織観察、化学成分分析、耐食性 試験、疲労試験、破壊靭性特性試験を実施する予定である。これら試験の試験計 画を具体化した。
- 2.2024 年度、モックアップ検証方法の妥当性確認を行うが、試験結果や海外の動向 を踏まえて、モックアップの必要要否も含めた検討を実施計画を策定した。

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 年度は 2022 年 5 月 26 日、8 月 24 日、11 月 25 日、2023 年 2 月 16 日の合計 4 回にわたり受託の成果、および実施概要について 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。
- ✓ 規格骨子に関するのタスク内議論の中で、2023 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)。
  - 破壊靭性のチェックの必要性
    →データ取得計画に破壊靭性試験を追加

2023 年度は 2023 年 5 月 30 日、8 月 22 日、11 月 20 日、2023 年 2 月 19 日の合計 4 回にわたり開催されたタスク会議にて、取得した材料試験データ、および今後の計 画概要について委員に説明し、内容のレビューをいただいた。

- ✓ STEP1 引張試験結果の概要について報告した。報告内容に対して疑義は呈されず、ガスフロー等の影響因子に対する傾向について引き続き分析を進めることとした(3.3章、3.4章)。
- ✓ STEP2 疲労試験の計画について、JSME 原子力専門委員会 疲労評価分科会傘 下の疲労線図作業会のレビューを受ける方針とし、本委託事業の従事者より リエゾンを派遣することに合意。2023 年 10 月 19 日、2024 年 1 月 29 日の疲 労線図作業会にて試験マトリクス、および試験方法について委員より出され たコメントを計画に反映することとなった(4.2 章)。

2024 年度は引き続き、本委託事業で得られた材料試験データとその評価に関して AM 技術規格検討タスクのレビューを受けるとともに、JSME 内の上位委員会(規格 委員会、原子力専門委員会)、関連する委員会(材料専門委員会)および分科会(設 計建設分科会、溶接分科会等)にも意見を求める。 別紙 -MHI-













## 別紙-M-1





























別紙-M-5-1

另1)紙-M-5



另小纸-M-5



別紙-M-5-3

另小纸-M-5





另小纸-M-5


## 另U新-M-5



另1)紙-M-5











另U新-M-5



另小紙-M-5







另U新-M-5



另U紙-M-5



另U紙-M-5

另1)新-M-5









另U紙-M-5













另1)紙-M-5







## 別紙-M-6












































別紙 -東芝 ESS-























別紙

-日立 GE-





























































別紙 -IHI-



別紙-I-3-1



別紙-1-2

別紙-I-3-2


別紙-1-3

別紙-I-3-3



別紙-I-4-1



別紙-1-5

別紙-I-4-2















