令和3年度原子力産業基盤強化事業委託 (原子力機器へのAM材適用に向けた材料データベース構築)

実施報告書

2022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	图的	1-1
2.	事業	計画	2-1
	2.1	事業内容	2-1
	2.1.1	AM 技術の規格化に向けた材料データベース策定方針の検討	
	2.1.2	材料データ取得計画の策定	2-2
	2.2	事業体制	
	2.3	事業工程	2-3
3.	AM	技術の規格化に向けた材料データベース策定方針の検討	3.1-1
	3.1	AM 技術の種類と特徴	3.1-1
	3.1.1	AM 技術の種類とそれぞれの方式	3.1-1
	3.1.2	造形方式毎の造形物の特性、精度、強度	3.1-18
	3.2	国内外の規格動向調査	
	3.2.1	ASME PTB-13-2021 の概要	
	3.2.2	ISO/ASTM 他の AM 関連規格調査	
	3.2.3	ASME/JSME 新規材料採用ガイドラインの調査	
	3.3	AM 材の材料物性値の調査	3.3-1
	3.3.1	試験片造形方針の調査	3.3 - 1
	3.3.2	既存材料データの把握	3.3-3
	3.4	規格化に必要な要件抽出	3.4-1
	3.5	材料データベース策定方針	
4.	材料	↓データベース取得計画の策定	4.1-1
	4.1	AM 技術の選定	
	4.2	対象材料	
	4.3	造形条件	4.3 - 1
	4.4	後処理方法	
	4.5	試験項目	4.5-1
	4.6	試験方法	4.6-1
	4.6.1	STEP1:プロセス検証方法の妥当性確認	4.6-3
	4.6.2	STEP 2: 規格化に向けたデータ取り	
	4.7	試験マトリクス	
	4.8	試験工程	4.8 - 1
5.	まと		

目次



1. 事業目的

(1) 事業の背景

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

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

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

(2) AM の技術と種類

米国 NEI (Nuclear Energy Institute) が 2019 年 5 月に提出したレポート^[1-1]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 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 (BJ: 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、BJ 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。BJ 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 1-1 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。

- ① 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 年度の具体的な実施内容と実施すけは以下の通知でたる。かた、検討な用は第

2021 年度の具体的な実施内容と実施方法は以下の通りである。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 AM 技術の規格化に向けた材料データベース策定方針の検討

AM 規格は、国内外の他産業界では規格やガイドラインが策定されつつあり、それ らに基づき実機適用が進んでいる。原子力産業として AM 材を適用する場合でも国内 外の他産業界の動向を見極めつつ、適切な規格や材料試験方針を検討する必要がある。 そのため、他産業界の第三者認証機関の協力のもと、国内外の他産業界の AM 規格や ガイドライン、材料試験要領・評価結果の動向を把握するために、以下を実施する。

- (1) AM 技術の種類と特徴の調査
 - ✓ AM 技術の種類(パウダーベッド方式,デポジション方式,バインダージェット方式)とそれぞれの方式の特徴(造形可能な寸法,造形速度,造形自由度)
 - ✓ 造形方式毎の造形物の特性(寸法精度,強度,表面粗度)
- (2) 国内外の規格動向の調査
 - ✓ 各項目(パウダーに関する要求、プロセス管理に関する要求、試験方法に関す る要求、検査方法に関する要求等)の抄訳を作成する。
 - ✓ ASME のガイドラインに関連する ISO/ASTM の規格をリストアップし、その 抄訳を作成する。
- ✓ ASME/JSME 材料規格新規材料採用ガイドラインについても調査する。
- (3) AM 材の材料物性値の調査
 - ✓ AM 材の材料特性評価結果に関わる文献等の公開情報を調査し整理する。調査 する公開情報は4社で分担し、抄訳を作成する。
- (4) 規格化に必要な要件抽出
- ✓ 規格化に必要な要件を抽出する。
- (5) 材料データベース策定方針

- ✓ 調査結果を基に、材料データベース策定方針を作成する。材料試験以外に必要 な要件がある場合には、その内容についてもまとめる。
- 2.1.2 材料データ取得計画の策定

原子力産業に使用する材料は、規格上適切な材料であることを確認する必要がある が、現時点で、原子力産業として評価する手法は確立されていない。従って、2.1-1項 で整理された材料データベース策定方針に従い、評価方針を具体化させるために、以 下を検討する。

- (1) AM 技術の選定
 - ✓ AM技術の種類と特徴の調査結果に基づき、対象とする AM 技術を選定する。
- (2) 対象材料
 - ✓ オーステナイト系ステンレス鋼またはニッケル基合金を想定し、対象材料の 絞り込みを行う。また、金属粉末や造形材のチャージ数を検討する。
- (3) 造形条件
 - ✓ AM 技術の特徴を考慮して、試験片採取のための造形位置、造形方向、造形形状、造形数等を検討する。
- (4) 後処理方法
 - ✓ AM 材の特性改善・品質安定のための造形後の後処理方法(熱処理条件、熱間 等方圧加圧法(HIP)条件等)について検討する。
- (5) 試験項目
 - ✓ 規格化に必要な材料特性・物性を抽出し、その試験項目を検討する。
- (6) 試験方法
 - ✓ 試験項目に基づき、AM 材の特徴を考慮して試験方法を検討する。
- (7) 試験マトリックス
- ✓ 上記検討結果を基に、試験マトリックスを作成し、各社の分担を決定する。
- (8) 試験工程
 - ✓ 上記検討結果を基に、試験工程を作成する。
- 2.2 事業体制

実施体制を以下に示す。プロジェクトリーダー(幹事会社)は三菱重工とし、プロジェクトの進捗管理、全体取り纏めを実施する。実施機関は三菱重工、東芝エネルギーシステムズ、日立GEニュークリア・エナジー、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(図2.2-1)。



図 2.2-1 事業体制

2.3 事業工程

2021年度の実施スケジュールを以下に示す。

	2021年									
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
1. AM技術の規格化に向けた材料データベース策定方針の検討										
(1)AM技術の種類と特徴										
IHI担当										
(2) 国内外の規格動向の調査										
		++-							\vdash	
(3) AMMの材料物性値の調査 二美手工取し締め	_									
二変里工取り継(の) (A) 相換化に必要な更低抽出										
「「「「「「「」」」」「「」」」「「」」」「「」」」「「」」」「「」」」」「「」」」」										
<u></u>										
=菱重丁相当										
2. 材料データベース取得計画の策定										
(1) AM技術の選定										
IHI取り纏め										
(2) 対象材料										
IHI取り纏め					1					
(3) 造形条件										
東芝ESS取り纏め										
(4) 後処理方法										
<u>東芝ESS取り纏め</u>										
(5) 試験項目										
<u>日立GE取り纏め</u>										
(6) 試験方法										
日立GE取り纏め										
(7) 試験マトリックス										
、) (1) (1) 三菱重工担当										
3. まとめ										
三菱重工担当										

- 3. AM 技術に規格化に向けた材料データベース策定方針の検討
- 3.1 AM 技術の種類と特徴
- 3.1.1 AM 技術の種類とそれぞれの方式

金属の粉末やワイヤーを材料として、3次元部品を造形するための金属造形装置(以下、AM装置と略)は主としてパウダーベッド方式(以下 PBF 方式と略)とデポジッション方式(以下 DED 方式と略)、バインダージェット方式(以下、BJ 方式)の3種類に分類される。以下にその特徴を記す。

(1) パウダーベッド方式

図 3.1-1 に示すように、PBF 方式の AM 装置は円形もしくは矩形の金属プレート (以下、ベースプレート)上にリコーターと呼ばれる刷毛を用いて金属粉末を塗布し、 造形する部分に選択的に熱源を照射し、金属粉末を溶融・凝固させることで金属部 品の造形を行う。1 層の造形が完了すると、ベースプレートを粉末塗布厚さと同程 度降下させ、再び粉末を塗布し、造形を繰り返すことで 3 次元形状の部品を造形 する手法である。層毎に粉末を溶融させる領域は、3 次元 CAD 形状を図 3.1-2 の ようにスライスしたデータを事前に作成しておき、部品形状に相当する領域に熱 源を照射することで任意の 3 次元形状を造形することができる。



図 3.1-1 PBF 方式^[3 1-1]



図 3.1-2 3DCAD データとスライスデータ

PBF 方式は通常チャンバーと呼ばれる筐体内で造形するためのベースプレート および昇降機構、リコーター、粉末タンク、熱源等が設置されている。そのため造 形可能な大きさはベースプレートの大きさと、ベースプレートの昇降高さの範囲 に限定される。一方で粉末が溶融されない領域にも塗布されるため、図 3.1-3 に示 すようなオーバーハングした部位も溶融していない粉末により支えられることで 重力による溶け落ちを生じずに造形することができるため、造形可能な部品形状 の自由度が高いことが特徴である。造形物はベースプレートの表面上に溶融して 取り付けられるため、造形後にはスタートプレートから放電加工等により切り離 す必要がある。また造形時に塗布された粉末のうち、未溶融の粉末は回収し、シー ビング装置と呼ばれる篩にかけて、造形中に発生したスパッタや異物(リコーター の破片や造形中に脱落した造形物等)を取り除き、再利用することが可能である。



図 3.1-3 造形自由度の高い PBF

PBF 方式の AM 装置は粉末を溶融させる熱源により 2 種類に大別される。一般 的な装置は、溶融熱源にファイバーレーザーを用いた Selective Laser Melting(以下 SLM と略)と呼ばれる装置で、ドイツやフランス等の多くのメーカーが存在する。 一方、少数派であるが溶融熱源に電子ビームを用いた Electron Beam Melting(以下 EBM と略)と呼ばれる造形装置が、主としてスウエーデンや英国等のメーカーが存 在する。以下にそれぞれの手法の特徴を記す。

① SLM

図 3.1-4 に示すように出力 200~1kW 程度のファイバーレーザーを熱源とし、ス キャナー(ガルバノミラー)を介して任意の位置にレーザーを照射することで、粉末 を溶融させる AM 装置である。装置の照射範囲や造形速度に応じて 1~4本程度の 熱源及びスキャナーを含む光学系を備えている。近年では大型の装置もリリース されており、熱源が 10本前後の装置も存在する。レーザーの走査速度はスキャナ ーの機械的な動作に依存するため数 m/s 程度となる。一般的な金属を溶融させる ためには 200~400W 程度の出力のレーザーを数百mm/s 程度の走査速度で照射する ことで溶融することが可能である。アルミ合金や銅合金のような粉末を用いて造 形する場合、一般に用いられているファイバーレーザーは波長 1050nm 前後の赤色 光のため、反射率が高く粉末に付与できるエネルギーが低下し前記の出力では溶 融することが困難である。このような場合に 400W を超える熱源が用いられる。

SLM では粉末の粒径が 15~50µm 程度の比較的細かな粉末を用い、直径 100µm 程度の細いレーザーを用いて造形するため、比較的精密な造形が可能であり後述 する EBM より表面粗度が良好な造形物が得られる。一方で、粉末は高温に予熱す ることができないため、割れやすい材料の造形には適していない。また溶融速度は 1~3mm³/s であり生産性は DED 方式の 1/3 程度である。造形サイズはチャンバ ー内のビルドエリアに制限されるため、一般には 400 mm角以上の造形は困難であ る。リコーターは金属製や樹脂製、ゴム製など装置メーカーにより様々な材質が用 いられており、粉末材料や造形物に応じて使い分ける。

図 3.1-4 において、造形中の装置の動きについて簡単に説明する。中央に設置さ れたビルドチャンバ、左側のコレクタータンク、右側にディスペンサータンクが配 置されており、それぞれのタンクには昇降するアクチュエータが取り付けられて いる。造形開始時にはビルドチャンバとコレクタータンクは最も高い位置、ディス ペンサータンクは最も低い位置となっている。造形に伴い、ディスペンサータンク に投入された粉末を供給するためディスペンサータンクのテーブルを上昇する。 リコータによってビルドチャンバエリアに十分な粉末を塗布し、余分な粉末をコ レクタータンクで回収する。1 層の造形が完了するとビルドタンクとディスペンサ ータンクのテーブルを降下させる。ディスペンサータンクから供給される粉末は1 層の積層厚さとビルドタンクの面積を乗じた体積量に加えて、前層の粉末が溶融 し高さが低下した領域の粉末も供給するため、粉末不足にならないように供給量 を調整する必要がある。供給量の調整は造形物の形状によって調整される。

なお造形装置によっては後述する EBM と同様にディスペンサータンクを造形面 より高い位置に設置し、アクチュエータを使わずに重力によって供給する方式や、 コレクタータンクに昇降機構を設けずに単に粉末を自由落下で回収する様式のも のも存在する。



図 3.1-4 SLM 造形装置の模式図^[31-2]

SLM 装置は造形時に粉末溶融時の酸化を防止するため、チャンバー内を Ar に 代表される不活性ガスに置換した状態で造形が行われる。装置は造形前にチャン バー内の大気をポンプにより吸い出しながら不活性ガスを導入し、チャンバー内 を不活性ガスに置換する方法が一般的である。装置によってはポンプにより一旦 低真空状態とし、その後不活性ガスをチャンバー内に充填させることで残留酸素 の低減を図る造形装置もある。チャンバー内の酸素濃度に配慮した造形装置では 酸素濃度を数十ppm程度まで抑えるが、旧型の造形装置等では酸素濃度が数百ppm になるので活性材料である Al や Ti の合金の造形は苦手である。

またチャンバー内を不活性ガスで充填させる以外にも、熱源により粉末を溶融 した際に生じるヒュームガスを除去する目的から、図 3.1-5 に示すように塗布面直 上には不活性ガスを流す必要がある。装置によってチャンバーの前後もしくは左 右方向、あるいは上方から側方に不活性ガスを流す仕組みが設けられている。チャ ンバー内のヒュームの除去が十分でない場合、レーザー光の窓にヒュームが付着 しレーザー出力の低減による溶融不足や、ヒューム付着に伴い窓の温度上昇が起 きてレンズ効果よりレーザーの焦点ずれに伴う造形不良が生じる。一方でヒュー ム除去のために不活性ガスの速度や流量を増やすと、塗布した粉末が不活性ガス の流れで飛ばされて、塗布厚の偏りが生じ造形品質に悪影響を及ぼすこととなる ため、適度な流速の設定が必要となる。そのため装置によっては塗布面直上の不活 性ガスの流れのほかにレーザー光の窓付近に不活性ガスの流す機構を有する装置 がある。また一般的に造形装置が大型化するほど、塗布面直上の不活性ガスの流れ を均一にすることが困難になることから造形装置における不活性ガスの流す機構 の完成度は造形品質に著しく影響することとなる。

レーザーはスキャナーの偏向により塗布面の任意の場所を走査することができ るが、照射範囲には限界がある。通常の照射範囲は 300 mm前後の円形もしくは矩 形の範囲が限界である。図 3.1-6 に示すように照射範囲の中心位置から離れるほど、 光学的な距離が増加するため、端部に近づくほど焦点のずれが顕著となりビーム 品質が低下するためである。そのため直径 200~300 mmぐらいまでの範囲を1本の レーザーでカバーする装置が多く、400 mm角の装置で熱源が4本、500 mm角の装置 で9 本程度が必要となる。このようにレーザーの本数が増加した際に、それぞれ のレーザーの照射範囲が重なる領域が生じる。大型の部品を造形する場合は、照射 範囲の重なる部分で異なるレーザーからの加熱を複数回の照射を受けるため、継 ぎ目部で溶融欠陥等を起こさないような造形条件が必要となる。装置メーカー毎 に継ぎ目の照射方法については様々な工夫がなされている。



図 3.1-5 SLM 造形装置の不活性ガス流の模式図

図 3.1-6 レーザーの照射範囲

図 3.1-7(a)に示すように横方向に熱源を走査し造形した場合、溶融池の凝固収縮 に伴い溶接と同様に走査方向に高い引張残留応力が生じる。残留応力が発生する と、造形物の変形による造形停止や造形物の割れにつながることから、溶かす順序 や大きさを工夫し残留応力の発生を抑える必要がある。そのため図 3.1-7(b)に示す ように格子状に造形領域を分割し、隣接する格子ごとに熱源の走査方向を変える ことで、一方向の強い残留応力発生を抑制することができる。装置メーカーによっ ては矩形の格子のほか、三角形あるいは六角形の格子(チェッカーパターン)や図 3.1-7(a)に示すような直線状の縞模様(ストライブ)が採用されており、このような照 射方法をストラテジーと称する。また金属積層造形では層毎に造形がなされるが、 すべての層の熱源の走査方向が常に同じ方向の場合、造形物の異方性が顕著とな る。そのため図 3.1-7(c)に示すように層毎に位相差を設けて熱源の走査方向を変え、 造形物の異方性を緩和するローテーションと称される機能を有している。



(a) 走査方向と残留応力の関係 (Line Scaning)

(Island Scaning) 図 3.1-7 熱源の走査パターン

(c)ローテーション

造形条件は粉末材料によって異なるが、造形条件の代表的なパラメータを以下 に記す。またそれぞれのパラメータを図 3.1-8 に模式図を示す。

- ・レーザー出力 P(W)
- ・走査速度 V(mm/S)
- ・走査ピッチ d(mm)

·積層厚さt(mm)



熱源を走査し粉末を溶融凝固させる際に付与される熱量は単位体積当たりの熱 量 q として評価される場合が多く、以下の式により得られる。

$$q = \frac{P}{Vdt}$$

単位体積当たりの入熱量が少なすぎる場合は、粉末を十分に溶かすことができ ないため粉末未溶融に伴う欠陥が生じる。一方単位体積当たりの入熱量が多すぎ る場合は、レーザー溶接のキーホールと同様に過度に溶け込みが深くなり溶融池 が不安定になり、空孔の巻き込みによる欠陥生成・ビード形状の不安定さに伴うハ ンピングビードや表面粗度の悪化を招く。そのためプロセス開発はこれらのパラ メータを組み合わせ、造形欠陥が発生しない条件の範囲(通称プロセスウィンドウ) を見つけることになる。これらの最適なパラメータの組み合わせを造形レシピと 称する。

これらの造形条件は造形品内部を造形するためのハッチング(塗りつぶし)条件、 造形物の表面粗度を改善するためのコンター(輪郭)条件についてそれぞれ最適値 を決める必要がある。コンターは造形部品の傾斜面の角度に応じて造形条件を付 与すれる。一般的には垂直(ミドル)に加えて上面(アップ)、下面(ダウン)の3 種類 に切り替えられるが装置によっては側面の角度に応じて、上面、下面の造形条件を 変更することで表面祖度を改善することもある。垂直用の条件と上面、下面への切 り替えは側面の角度が45°前後で切り替える装置が多いが、ユーザーが設定可能 な装置が多い。

1層の造形ではハッチング、コンター、サポートなど部位ごとに応じて順番に実施される。それぞれ目的に応じて使用するレーザーの出力や速度が異なるためである。また前述のようにコンターは上面・垂直面・下面ごとの造形条件(装置によっては側面の角度に応じて造形条件が異なる場合)毎に、分けて造形される。ハッチングとコンター、サポートの造形順序は装置メーカーにより異なるが、ユーザーが順序を変える機能を有する場合が多い。

装置メーカーや粉末メーカーが造形条件に関する最適値を有償で提供している が、汎用的な造形条件であり特定の造形物によっては造形条件が最適でない場合 がある。そのためユーザーがプロセス開発を行うことで、造形形状に応じて最適値 を決めることもできる。また装置メーカーが提供する造形条件については適宜ア ップデートされている場合もあり、レシピの完成度に応じて造形品質が異なる場 合がある。

造形物は通常、図 3.1-9 に示すようにビルドプレート上にサポートを介して造形 される。サポートは通常薄い板や細い棒状の形状が用いられ、造形物と同様に粉末 を溶融して生成される。サポートを介さずに造形物をビルドプレートに直付けで 造形することもできるが、サポート部材と比較して通常は造形物の剛性が高いた め、直付けすると造形物に発生した残留応力が大きく、ビルドプレートの変形や造 形物の割れが生じることがある。そのため造形物とビルドプレートの剛性の差を 吸収するために剛性の低いサポートを介して造形するのが一般的である。しかし サポートの剛性を低くするためサポート量や板厚を減らしすぎると、造形中にサ ポートが破断による造形中断のリスクが高まることから、必要最低限な強度が必 要である。一方で、サポートは造形後にハンドツール等により造形物をビルドプレ ートから切り離す必要があり、過度にサポートの剛性を高めすぎると、サポートの 除去性が悪化することとなる。そのためサポート形状や配置については造形技術 者のノウハウ的な要素が高い。またサポートは粉末を溶融して製造するが、基本的 には破棄される部材のためサポート量の増大は歩留まりも低下する要因となる。

横方向に張り出した(オーバーハングと称する)部材を造形する場合、造形中の変 形を抑制や寸法精度を高めるためにサポートを配置する必要がある。通常オーバ ーハング部は垂直面から 45°を超えるとサポートの造形が必要となる。

造形中に生じる残留応力により造形部品がビルドプレートから剥離するのを防 ぐために、サポートを設けずに直付けする場合もあるが、この場合はハンドツール での除去が不可能なため、造形後にビルドプレートから切り離す際に放電加工に よる切断工程が必須となる。放電加工以外にも鋸刃などの切断ツールを用いるこ ともできるが、切しろが増加するため放電加工を利用することが多い。また前述の ように SLM は造形中に高い残留力が生じるため、ビルドプレートとサポートもし くは造形部品が剥離するリスクが高い。ビルドプレートと造形部品との接合部の 強度を高めるため、ビルドプレートの材質は基本的に造形する粉末と同材が用い られる場合が多い。ビルドプレートの選定についても造形技術者のノウハウによ るところが多い。ビルドプレートは造形後に熱による塑性変形が生じていなけれ ば、繰返し使用することが可能である。



EBM は図 3.1-10 に示すように造形エリア上方に電子銃を配置し、チャンバー内

² EBM

は真空を保つ必要があるため、筐体は SLM より堅牢な構造を有している。粉末塗 布機構や粉末の供給方法は SLM と同様である。電子ビームの出力は 3kW~6kW の ものが多く、60 kVの加速電圧で 50mA の電流値により 3kW 程度の出力となる。電 流値の増大とともにビーム径が増加する傾向にあるため、実際の造形に用いる電 流は 30mA 程度であり出力は 1.5 kW程度となる。それでも一般的な SLM に比べて 4 倍程度の出力を有している。SLM ではスキャナーによる機械的な動作で熱源を 走査するが、EBM の場合は偏向コイルの磁場により熱源の走査を行うため最大数 千 m/S の速度で走査が可能である。粉末の溶融に必要な単位体積当たりの入熱量 は SLM と大差ないため EBM の出力が SLM の 4 倍であるため、走査速度も 4 倍程 度で造形が可能である。



図 3.1-10 EBM 装置

EBM の最大の特徴は熱源の走査速度を生かして、粉末の溶融だけでなく粉末床 の予熱を行うことができる。電子銃から電子が粉末に照射され粉末間の接触部を 通じて、電子はアース線に流れるが、何らかの理由により電子の照射量に対してア ースに流れる電流が阻害された場合、粉末に電荷が蓄積することとなる。粉末に電 荷が蓄積されると図 3.1-11 左図に示すように隣接する粉末間に斥力が発生し、図 3.1-11 右図に示すように粉末が飛び散るスモークと称する現象が起きる。スモーク が起きるとレーキで塗布した粉末が崩れてしまい、その後の造形が継続できなく なる。そのため EBM ではこのスモークを抑えるために電子ビームにより塗布した 粉末に予熱を与え、粉末同士をわずかに焼結(仮焼結と称する)させ電荷の蓄積によ る斥力が働いても粉末が飛び散らないようにしている。Ti-6AI-4V 合金粉末の場合 700℃程度、Inconel718 粉末で約 900℃程度の予熱温度が必要となる。そこで予熱 中は図 3.1-12 に示すように粉末床全体が赤熱したような状態となる。予熱時には 電子ビームのビーム径を絞る必要がなくより短時間で予熱温度にするため、装置 で出力することができる最大電流値に近い電流値を用いて予熱することが一般的 である。SLM では局所的な加熱により粉末の溶融凝固に伴い高い引張残留応力が 生じるが、EBM は予熱によって、造形中に発生する残留応力を大幅に緩和するこ とができる。そのため SLM では造形が困難な割れやすい Ni 基合金の造形など EBM では適用可能である。また EBM は電子ビームを用いるためチャンバー内が真空の ため Ti 合金のような活性な材料の造形に向いている。前述のように大きな出力の 熱源により高い走査速度で造形が可能であるが、予熱に時間を要するため、実質的 な溶融速度は SLM とほぼ同程度となる。



図 3.1-11 スモーク現象[31-3]



図 3.1-12 EBM における予熱中の様子

前述のように EBM はスモーク現象のリスクを低減させるため、粉末間の接触頻 度を減らすために粒径 50~100μm 程度の比較的大きな粉末を用いる。そのため積 層厚さも 50~100μm程度となる。熱源である電子ビームの径は 200~500μm と太 いため、SLM と比べると精緻な造形は苦手である。また積層厚さが厚くなり粉末 粒径も大きいことから表面粗度も SLM に比べて粗くなる傾向にある。

EBM の造形サイズは現在のところ、直径 350 mm程度、高さ 400 mm程度が限界で

ある。図 3.1-6 に示す SLM の照射範囲と同様に、EBM でも外周部になるほど焦点 がずれて、ビーム径増大やビーム形状の真円度が維持できなくなる。これを防ぐた め、磁場補正を加えてビーム形状を真円となるように修正がなされるが、造形品質 を確保する限界もあるため前述のような範囲が現実的な照射範囲となる。また EBM の造形寸法はチャンバーサイズだけでなく材料に応じた予熱温度に依存する。 予熱温度が 700℃であれば直径 350 mmの範囲が造形可能な大きさとなるが、予熱 900℃になると造形可能な寸法は直径 160 mm程度に限定される(3kW の電子銃の場 合)。EBM プロセスにおいて予熱領域に与えた入熱は、その大半が粉末床上面から の輻射熱として放出されることから、予熱温度に対する輻射熱と電子ビームの加 熱量の釣り合う面積が持続的に造形可能な大きさとなる。一般に輻射熱は加熱部 の温度の 4 乗で増大するため前述のように 200℃程度の差であっても急激に造形 可能な領域が限定される。

また SLM では複数のレーザー発振器を用いることでより大きな寸法の部品を造 形することができるが、現在のところ EBM は複数の熱源を用いた造形装置はリリ ースされていない。原理的に複数の電子ビームが同時に近い場所に照射された場 合、一方の電子ビームによって生じた磁場が他方の電子ビームの照射位置に影響 を与える可能性があるためと考えられる。

EBM の造形中のパラメータは図 3.1-8 に示す SLM とほぼ同様である。また EBM では予熱により引張残留応力を抑制することができるので、図 3.1-7(b)に示すよう な格子状に造形領域を分割する必要はないが、積層に伴う造形部品の異方性を緩 和する目的から図 3.1-7(c)に示すようなローテーションは SLM と同様に用いられ ている。プロセス開発は SLM と同様にハッチングの造形条件とコンターの造形条 件を決める必要がある。新しい材料のプロセス開発を行う際には前述の適正な予 熱条件も決める必要があり、EBM のプロセス開発は SLM に比べて時間を要する。

EBM の粉末塗布機構は基本的に SLM と同様であるが、粉末が予熱されて常に 数百度以上の温度となるため、リコーターは金属製(通常はオーステナイト系ステ ンレス製)が用いられる。

EBM は造形中の引張残留応力を抑制することができるが溶融凝固に伴う収縮は 起きるため、図 3.1-9 に示すようなオーバーハング部に対しては SLM と同様にサ ポートを配置する必要がある。一方で、EBM は造形後に SLM のような高い引張残 留応力が生じてないため、ベースプレートから造形部品を切り離す前の残留応力 除去焼鈍は不要である。また造形中におけるサポートへの残留応力も小さくなる ため、EBM では粉末材料によらず、SUS304 製のベースプレートが用いられる。

EBM ではスモーク現象を抑えるために造形部品の周辺の粉末を予熱により仮焼 結させているため、造形後は専用のブラスト装置を用いて仮焼結粉末を解砕して回 収する必要がある。ブラストのメディアは造形と同じ粉末を用いるため、破砕し回 収した粉末は篩により異物やスパッタを除去した後、造形に再使用することが可能 である。この粉末回収の工程があるため、細かなメッシュ状のサポートを作成する と造形後の粉末回収が困難になる場合がある。

(2) デポジション方式

デポジション方式(Directed Energy Deposition、以下 DED)は粉末またはワイヤー を供給しながら熱源で溶融させ、肉盛溶接のように積み重ねて造形物を製作する 方式である。材料には主に金属粉末及び溶接用ワイヤーが用いられる。図 3.1-13 に DED 装置構成例を示す。レーザーヘッド(溶接の場合はトーチ、以降レーザーヘッ ドとする)は産業用の6軸ロボットや直交ロボットに持たせ、造形物側の固定は定 盤の他、ポジショナーを用いることで軸の追加が可能である。造形はベースプレー ト上の他、曲面上に造形することも可能であり、製造過程の製品へ付加的に造形す ることや補修といった用途が期待される。

DED の溶接姿勢は最も安定するレーザーヘッドが下向きの姿勢をとることが多 いが、DED では造形中のオーバーハング面に PBF のようなサポートが無いため、 造形物側が固定の場合溶け落ちによりオーバーハング形状の造形は難しい。造形 する形状によっては、図 3.1-14 に示すようにポジショナーなどでベースプレート もしくはワークを傾け、溶け落ちが発生しない姿勢に調整しながら造形すること が有効である。そのため造形可能な形状自由度には多少制約がある。また DED は PBF 方式ほどの汎用性は低い。連続的に造形をした際に形状や造形条件によって は熱がこもり、造形部分が熱ダレを起こして所定の形状にならない場合がある。そ の際に造形を一旦停止により冷却させたり、造形条件を見直すなどの処置が必要 なことから個別のプロセスの作りこみが必要となる。

造形ファイルは、PBFと同様に3次元 CAD モデルを元にして、事前に選定した 入熱や材料供給速度、スキャンパスの条件を設定して作成する。





図 3.1-14 軸の追加による造形形状の拡張イメージ

金属粉末を用いた DED の熱源としてはレーザーが一般的であり、図 3.1-15(a)に 示すように粉末材料を 1 点に収束させるようにシールドガス(Ar 等の不活性ガス) とともに噴射し、レーザーにより溶融させて造形する。この方式は DLD(Directed Laser Deposition)もしくは LMD(Laser Metal Deposition)と称されることが多い。シー ルドガスは溶融池を酸化から保護する役割があるが、チタンなど酸化による品質 劣化が著しい材料に対してレーザーヘッドから噴射されるシールドガスでは不十 分な場合、チャンバー内全体をシールドガスで置換するといった対処が必要であ る。DLD はレーザーで粉末を直接加熱するのではなく、基材もしくはすでに造形 された部位にレーザー照射により溶融池を形成し、溶融池に粉末を供給すること で部位を形成していく。しかし近年では溶融池に供給される前の粉末をレーザー で直接加熱する手法も開発されている。この場合、基材もしくはすでに造形された 部位に溶融池の形成が最低限となり、低入熱の造形により造形物の変形を抑制す ることができる。

使用する粉末粒径は 50~100µm 程度であり、ほぼ EBM と同様のものを用いる ことが多い。造形中に噴射された金属粉末のうち溶融されずに造形範囲から漏れ た粉末はチャンバー内に飛散するため、清浄なままの回収は難しいことから通常 は廃棄される。ただし DED で造形に使われる粉末は PBF と比較してわずかであ り、歩留まりも良いことから積極的に粉末をリサイクルすることのメリットは薄 い。

市販の DLD 装置で造形可能なサイズについては、使用する軸の数にもよるが大型のものでは RPMI 社 XR シリーズの 1.5m×1.5m×2.1m 程度の寸法まで造形が可能である(表 3.1-1 参照)。

DLD 方式の造形速度は PBF 方式より速く、推奨される条件では 3~10mm³/s 程度 であり、材料にもよるが重量では 1~2kg/h となる。造形速度が優先される場合は、 装置のスペック範囲で高出力/高速度条件を選ぶことでより速い造形速度を得るこ とも可能である。 また、3 軸もしくは 5 軸のマシニングセンターに DLD のレーザーヘッドを搭載 し、DLD で造形した部位をそのまま切削加工することのできる複合機も国内外の 多くのメーカー(国内は DMG 森精機, マザック, オークマ等)よりリリースされて いる。これにより通常の DLD 単体の造形装置では造形後に加工が困難な内面側を 造形の途中に切削加工ができる。一例としてオークマ社の LASER EX シリーズの DLD の機能の部分を表 3.1.-1 内に記す。

ワイヤーを材料とした DED の場合、熱源はレーザー、電子ビーム及びアークで あり、アークが熱源の場合は CMT(Cold Metal Transfer)溶接機などを用いる。特に ワイヤー材料でアークを熱源とするものは WAAM(Wire and Arc Additive Manufacturing)、電子ビームを熱源とするものは EBAM(Electron Beam Additive Manufacturing)と呼ばれる。図 3.1.-15(b)~(d)にワイヤー材料と各種熱源を組み合わ せたレーザーヘッドおよびトーチの模式図を示す。レーザー及び電子ビームが熱 源の場合はビームの照射位置に任意の方向からワイヤーを供給する。使用するワ イヤーは市販の φ1.6mm までの太さのものが一般的に用いられるが、電子ビームで はさらに太い φ4mm まで使用される。造形速度はいずれの熱源との組み合わせで も 1kg/h 以上であり、レーザー<アーク<電子ビームの順に速い。最も造形速度が 速い EBAM では、で最大 9kg/h(Sciacky 社の公称値)に達する。

Directed Metal 3D 社よりリリースされている MELTIO シリーズでは粉末とワイ ヤーの両方を選択可能であり、造形する部位に求められる精度や品質によって材 料を変更するといった使い方が可能である。さらに拡張型の MELTIO ENGINE で はトーチを取り付けるロボットや加工機をユーザー側で選べる特徴があり、造形 可能な寸法は取り付け先のポジショナーに依存する。



図 3.1-15 DED トーチ構造模式図 (a)粉末+レーザー (b)ワイヤー+レーザー (c)ワイヤー+EB (d)ワイヤー+アーク

メーカー	RPMI	オークマ	Gefertec		Sciacky	Directed	Metal 3D
製品名	XRシリーズ	LASER EX シリーズ	3DMP Arc		EBAM	MELTIO M450	MELTIO ENGINE
熱源	レーザ	レーザ	アーク	アーク	電子ビーム	レーザ	レーザ
材料	粉末	粉末	ワイヤ	ワイヤ	ワイヤ	粉末+ワイヤ	粉末+ワイヤ
最大造形サイ ズ[mm]	1500×1500× 2100	ϕ 650 × 1000	φ 900 × 700	1100×1400× 1550	5791×1219× 1219	150 × 200 × 450	取り付ける 装置による
軸構成	XYZステージ+ ポジショナー (5軸)	5軸制御 マシニングセ ンタ	XYZステージ+ ポジショナー (5軸)	XYZステージ (3軸)	XYZステージ+ ポジショナー (5軸)	XYZステージ (3軸)	取り付ける装 置による

表 3.1-1 市販の DED 装置例

(1) BJ 方式

バインダージェット方式(以下 BJ 方式と略)は図 3.1-16 に示すように造形装置と しては PBF と同様にベースプレートの昇降機構、粉末供給やリコート機能を有し ている。しかし BJ 方式は PBF 方式や DED 方式と異なり造形過程において粉末の 溶融凝固は伴わないことが最大の特徴である。金属粉末をベースプレート上に一 様に塗布し、造形位置にインクヘッドによりバインダーを選択的に塗布し金属粉 末を固める。PBF 方式と同様、層状にこの工程を繰り返すことで任意の 3 次元形 状の部品を成型することが可能である。形状自由度については PBF と同様、高い 自由度の造形が可能である。ただし後述するように造形後の焼結過程前に不要な 金属粉末を除去する必要があるため、内部流路などが存在する部品では内部の金 属粉末を除去することが可能な形状等の制約がある。装置メーカーにより異なる が造形に用いられるバインダーは概ね約 80%程度が水分、残りがアルコールや樹 脂等で構成されている。



図 3.1-16 バインダージェット方式造形装置の模式図 [31-4]

BJ 方式の工程を図 3.1-17 に示す。BJ 方式プリンターで造形された部品はグリー ン体と称される。グリーン体は金属粉末をバインダーで繋げた状態なので、この段 階では直接手で触れると崩れる程度の状態である。そのためバインダーで成形さ れたグリーン体は粉末床から取り出す前に大気中 200℃程度で加熱し、バインダー の乾燥および硬化の工程を行う。バインダー中の水分を除去するとともにバイン ダー中の樹脂の架橋反応を促進することでグリーン体をハンドリングできる程度 の強度にすることができる。次に圧縮エアー等を吹き付けてグリーン体の周辺の 粉末を除去し、焼結前に脱脂工程を行う必要がある。脱脂工程は乾燥および硬化の 工程で残った樹脂分を焼結前に除去する工程で、水素もしくは真空環境下で400℃ 程度に加熱し樹脂分を分解・除去する。その後、水素もしくは真空環境下で金属粉 末が焼結する温度(材料によって異なる)まで加熱し、焼結することで機械的な性能 を有する部品を作成することができる。なお装置メーカーによって脱脂と焼結を 一連の加熱工程で連続的に行うこともあるが、装置メーカーによっては脱脂時と 焼結時の雰囲気を変えるために加熱バッチを分ける場合もある。



図 3.1-17 バインダージェット方式の造形工程

BJ 方式のプリンターでは、塗布性に問題がなければ、ガスアトマイズの粉末だけでなく水アトマイズで作成されたような真球率の低い金属粉末を用いることも

可能であり、部品単価を低く抑えることが可能である。グリーン体造形時の造形速 度は150cc/s程度とPBFやDEDに比べて速い。グリーン体製造時のパラメータは 装置メーカーにより異なるが、バインダーの塗布量と塗布ピッチ、積層厚さ及び粉 末塗布速度となる。バインダーは図 3.1-18 に示すように粉末床に塗布されると、 金属粉末とバインダーの濡れ性に応じて粉末床に浸透する。バインダーの浸透性 や塗布量が適切であれば積層厚さ以上にバインダーが浸透することで、前層との 結合させることができる。



図 3.1-18 バインダーの浸透性と塗布ピッチ[31-4]

造形可能な寸法は装置依存であるが、最も大きな装置で 800 mm×500 mm×400 mmと なっている。しかし後述するようにグリーン体が製造できても、その後の工程での ハンドリングや焼結過程の変形により 1 個当たりの部品寸法は 100 mm前後が限界 と考えられる。そのため BJ 方式は小型の部品を大きな造形エリアで1度のバッチ で大量に製造し、低コストで部品を製造する方法として用いられている。また BJ 方式ではグリーン体製作時に溶融凝固を伴わないため、PBF 方式のようなサポー トの造形は必要ないが、装置メーカーによっては焼結時の変形を抑制するために サポートを付与することを推奨する場合もある。

BJ 方式の最大の問題点は造形物の相対密度が他の AM ほど高い値が得られない ことにある。PBF や DED は適正な造形条件を選ぶことで 99.5%程度の相対密度が 得られるが、BJ 方式の場合は 90~99%程度である。相対密度が他の方法に比べて 低めになる要因は、グリーン体作成時の見掛け密度(粉末の充填率)が図 1.-19 に示 すように 50%~60%程度になるためである。粉末と粉末の隙間にバインダーが充 填された状態となっており、硬化、脱脂工程でバインダーが除去されたのち焼結過 程でこの隙間が解消されるため、物理的に収縮量が大きくなる。焼結過程での相対 密度は焼結温度と焼結時間に依存する。より高温で焼結するほど相対密度は増加 するが、結晶粒が肥大化するため強度が低下する。また粉末の粒径が小さいほどグ リーン体の見掛け密度が上昇するため、焼結過程での収縮を抑制することができ る。さらに粉末粒径が小さいほどより粉末間の接触面積が多く、表面エネルギーが 大きいことから少ないエネルギー(加熱)で焼結が進むことから、最適な焼結条件は 粉末粒径にも依存する。そのため BJ 方式は 15µm 以下の細かな粉末を用いること が多い。その結果として表面粗度が良好な造形が可能である。

BJ 方式のリコーターは PBF 方式と同様に通常のブレードが用いられ場合もあるが、グリーン体の粉末充填率を高めるためにローラー方式が用いられる場合もある。



図 3.1-19 BJ の粉末重点率の模式図^[31-4]

3.1.2 造形方式毎の造形物の特性、精度、強度

(1)金属組織および機械的特性

①PBF 方式

PBF で造形した部品の金属組織は圧延材と比較して微細な結晶構造となる場合が 多い。また図 3.1-20 に示すように造形方向に結晶粒が針状に成長する。このような 特異な組織となるのは粉末が過熱され溶融し凝固するまでの時間が他の製造プロセ スに比べて著しく短時間で起きることが要因である。PBF で熱源が走査された局所 的な温度を計測することは光学的な手法(高速度カメラと 2 色温度計の組み合わせ) で実測することも可能であるが、チャンバーの窓越しからの計測の造形装置の改造 が必要であるため一般的ではない。図 3.1-21 は光学的な手法により SLM の溶融池 の温度を定点観測した結果の一例を示す。溶融から凝固までの時間は 0.001 秒以下 であり、一般的な溶接の溶融凝固の時間に比べて数オーダー高速な現象となる。そ のため数値解析を援用して溶融凝固の様子を検討に用いることもある。この特異な 金属組織の影響を受け、面内と造形方向で機械的な特性に差異が生じる。図 3.1-22 に SLM と SUS316L 粉末を用いて試験片を造形し、様々な熱処理温度を行った試験 片の引張試験の応力ひずみ関係および降伏応力と熱処理温度の関係を示す。面内及 び造形方向に造形した試験片の引張試験の結果を示す。概ね長手方向を造形方向に 一致させた試験片は長手方向を面内方向に一致させたものに比べて破断延びが小さ いことがわかる。また引張強度についても造形方向がわずかに低いが、造形後の熱 処理により緩和することが可能である。

AM で造形した部材の機械的特性を圧延材と比較し場合、降伏応力や引張強度は AM で造形した部材が圧延材に比べて高い傾向になる。これは前述のように AM が 微細な結晶粒を有することが主な理由と考えられる。一方 AM で造形した部材が圧 延材と比較して伸びは小さくなる傾向にある。これは造形の過程において繰返し入 熱により都度、残留応力が生じその間の加工硬化により延性が消耗した状態になる ためと考えられる。

また PBF で用いる金属粉末は塗布性が求められるため、真球度の高いガスアトマ イズやプラズマアトマイズにより製造された粉末を用いる。これらの粉末製造過程 で粉末内部に 10 µ m前後の気孔が含まれてしまう。前述のように PBF の溶融凝固は 他のプロセスに比べて短時間で起きるため、熱源で金属粉末を溶融した際に、粉末 内部の気孔が抜けきらないうちに凝固してしまうことから、原料由来の気孔が造形 物に残ってしまうことが多い。そのためこの気孔が応力集中部となり、AM で造形し た部材の疲労強度は圧延材料に比べて低くなる傾向がある。この気孔の影響を抑制 するために造形後に HIP 処理を行う場合がある。なお適切な造形条件を用いて造形 された部材は気孔が存在しても引張強度に影響することはない。



図 3.1-20 PBF 方式の造形物の金属組織例^[3 1-5]



図 3.1-21 SLM の溶融池の温度測定結果の一例^[3 1-6]



図 3.1-22 SLM を用いた SUS316L の造形部品の機械的強度の一例^[31-7]

②DED 方式

DED 方式の場合は、前述のように PBF に比べて溶融地が大きく、溶融凝固に伴う 時間が溶接に近いこともあり、PBF ほど結晶粒径が微細化するわけではない。強度 は溶融凝固に伴う加工硬化により一般に溶接金属に近い性質を持ち、高い強度を有 する。また疲労強度は PBF 方式より高く、鍛造品並みの性質を有することが多い。 DED 方式が PBF 方式より高い疲労強度が得られる理由としては造形物内の微小な 気孔が少ないためと考えられる。一般に AM に使用される粉末はガスアトマイズに より製造されるが、製造時に粉末内に 10µm 以下の小さな気孔が製法上含まれるこ とが多い。この粉末を用いて PBF 方式で造形すると、前述のように溶融凝固現象が 著しく短時間で起きることから、粉末が溶融しても気孔が抜けきらないうち凝固が 起きるため造形物に気孔が残留してしまう。一方 DED 方式は溶融凝固が比較的遅 く、粉末内の気孔は凝固前に浮上し気孔が溶融池内に残留することがないため、粉 末材料由来の気孔は生じにくい。

表 3.1-2 に示す条件にて造形された DED の造形ブロック外観を図 3.1-23 に示す。 造形されたブロックの高さ方向に対する硬さの分布を図 3.1.-24 に示す。ベースプレ ートとの混合領域を除けば、ほぼ一様な硬さ(205±11HV)を示している。また、造形 高さと面内方向に切り出した試験片を用いた引張強度の関係を図 3.1-25 に示す。引 張強度についてはややばらつきがあり 588±53MPa である。伸びについてはトップ面 付近で顕著な傾向があり 30%程度に低下している。また図 3.1-26 の SEM 観察画像 からは、ベース材の軟鋼材と SUS316L の混合領域を超えたところから造形方向に柱 状に成長していることが示されている。

表 3.1-3 に鍛造品と DED(DLD)の引張特性の比較を示す。本プロジェクトで特に 取り上げる材料においては、SUS316L では引張強度で 12~16%程、降伏応力で倍ほ ど DLD の方が強い結果であるが、伸びについては鍛造の値(40%)に対してバラツキ がある。また溶体化・焼鈍後の Inconel718 では、引張強度はほぼ同等であるが、降 伏応力は鍛造の方が高く、伸びも鍛造の方が高い値である。

次に、DED 方式で造形した部品の機械的性質における異方性の有無を表 3.1-4 に 示す。材質により差はあるが、積層面内方向(X)の引張強度が積層方向(Y)よりも高 い傾向を示している。



表 3.1-2 SUS316L ブロック 造形パラメータの一例^[31-8]



図 3.1-23 A)軟鋼製プレート上に造形されたブロック外観 B)機械特性・組織観察位置^[31-8]



図 3.1-24 造形ブロックにおける造形高さと硬さの関係 [31-8]



図 3.1-25 SUS316L ブロック 造形高さと面内方向引張強度の関係^[31-8]



図 3.1-26 SUS316L ブロック 造形高さ別 SEM 観察画像^[31-8] A) ボトム B)ミドル C)トップ D)ベース-HAZ-混合領域 E)混合領域-SUS316L ボトム



表 3.1-3 鍛造と DED(粉末、レーザー)造形物の機械的性質の比較^[31-9]

表 3.1-4 DED 造形物の異方性^[3 1-9]



③BJ 方式

BJ 方式は前述のように部品形状に成形されたグリーン体(粉末の塊)を炉内で加熱 することにより焼結させるため、PBF 方式に特異な微細組織や異方性や生じず、得 られた金属組織は圧延材と同様に等軸組織を有する。図 3.1-27 に SUS316L 粉末を用 いて BJ 方式で作成した造形部品の金属組織の一例を示す。図中では積層厚さ(LT)と バインダー量(BS)を変えた 4 種類の組織を比較しているが、いずれも一般的な金属 組織の様相を示している。

BJ 方式の造形部品の相対密度は前述のように粉末粒径、グリーン体の充填率や焼 結条件に依存する。表 3.1-5 に BJ 方式で作成した造形部品の相対密度の計測結果の 一例を示す。比較的粒径の大きな粉末を用いたものは焼結部品の相対密度が低い傾 向を示している。

強度は焼結条件に大きく依存し、適正な焼結条件で製造すれば表 3.1-6 に示すよ うに鍛造品並みの機械的特性が得られる。しかし焼結条件が不十分な場合、相対密 度が低下し引張強度が低下する。一方で過度な焼結条件で十分な相対密度が得られ た場合も、焼結時の過加熱により結晶粒が肥大化し引張強度が低下する。BJ 方式は PBF 方式や DED 方式と比較して、表面粗度は優れているが相対密度が低いため疲 労強度は低い傾向にある。



図 3.1-27 BJ 方式により造形された部品の金属組織^[3 1-10]



表 3.1-5 BJ 方式の造形部品の相対密度^[31-4]

表 3.1-6 BJ 方式による造形部品の機械的特性^[3 1-4]



(2)寸法精度

①PBF 方式

PBF 方式は金属粉末の溶融凝固に伴う収縮および残留応力が、造形部品の寸法 精度に影響を及ぼす。EBM は前述のように造形中の予熱により、残留応力は大幅 に緩和されるが、溶融凝固に伴う収縮は発生する。SLM は溶融凝固の収縮に加え て、残留応力により造形中に変形が進行し図 3.1-28 に示すような部材の反り返り・ 剥離・割れ等が生じる場合がある。残留応力や凝固に伴う収縮により造形部品は図 面形状(3D データ)との乖離が生じる。現在市販されている大半の造形装置は、こ の収縮を考慮して熱源の照射範囲を補正し、図面と造形形状の乖離を抑制する機 能が搭載されている。しかし部品形状によってはこの補正だけでは修正しきれな い形状もある。その場合は、図面と造形部品の寸法のずれを元の図面に反映し、再 び造形することで寸法の乖離を抑えていく必要がある。所定の寸法精度を達成す るためには、この修正を数回繰返し実施する必要がある。近年の造形装置は再現性 が良好であり、多少時間を要するがこの工程を繰返すことで、必要な寸法精度は達 成できると考えられる。また図 3.1-9 に示すようなオーバーハングを伴う形状は造 形中の残留応力で反り返りの変形が起きやすく、寸法精度を確保するために適切 なサポートを配置する必要がある。

また SLM では図 3.1-29 に示すような造形に伴う変形解析ツールが市販されてお り、数値解析結果をもとに、図面データの補正により試作回数を減らすことも可能 である。同ツールでは造形途中の変形や応力をもとに造形停止リスクの推定や変 形を抑制するためのサポート配置の検討などを行うことができるため、少ない試 作回数で所望の形状を得るための有効なツールである。



図 3.1-28 造形中の割れや変形例 ^[3 1-11] (a)Inconel718 部品の割れ (b)Ti-6Al-4V 部品の割れ (c)境界部の割れ (d)サポートなしのオーバーハング部材のひずみ (e)ベースプレートからの剥離 (f)試験片造形時のベースプレートの変形


図 3.1-29 PBF を模擬した変形解析ツール [3 1-12]

SLM の場合、熱源のビーム径が 100µm 程度であること、さらには 15~50µm程 度の粒径の金属粉末を用いることから 1 mm程度の薄板や小さな穴の造形も可能で ある。一方、EBM は SLM と比較して熱源のビーム径が 200~500µmと太く、金属 粉末も 50~100µm程度のため、1 mm以下の薄板や細かな穴などの造形には不向き である。材料と造形条件によって造形可能な形状の限界を判断するため図 3.1-30 に示すような部品を造形し、検証を行うことができる。この造形によりサポートな しでどの程度のオーバーハングが実現できるか、あるいは細かなスリットの造形 可否等を検討することができる。



図 3.1-30 造形限界の検証試験の一例 [31-13]

②DED 方式

デポジション方式で造形可能なビードの最小幅は使用する材料と熱源との組み 合わせによって異なり、粉末とレーザー熱源の組み合わせにより 1mm 程度の造形 が可能であるが、溶接ワイヤーと溶接機を使用する WAAM では 3~4mm 程度とな る。

一例として Inconel718 粉末を用いて DED で三角形状に造形した例と造形条件を

図 3.1-31 と表 3.1-7 に示す。ビードが細い条件ほどシャープな形状が得られ、太い ほど端部の角はだれる形となる。DED の造形条件は、低い入熱量と粉末供給量で 最終形状に近い形状(ニアネットシェイプ)で造形するか、加工仕上げ前提で高い入 熱量と粉末供給量により造形速度を優先するか、造形対象の要求に応じて選定す ることが必要である。

また、造形後の残留応力による変形は寸法外れを助長する原因となるため、造形 後に材質に応じた残留応力除去焼鈍を行うことが望ましい。



図 3.1-31 Inconel718 粉末とレーザー熱源 DED を用いた三角形状造形例 [31-14]



表 3.1-7 Inconel718 粉末+レーザーDED 造形条件例 [31-14]

③BJ 方式

BJ 方式の造形部品は焼結に伴う収縮が寸法精度に大きな影響を与える。収縮は前述のようにグリーン体の充填密度が低いほど焼結に伴う収縮が大きくなる。そのためグリーン体形成時に粉末と粉末の隙間を埋めるためにナノスケールの細かな粉末

を充填することでグリーン体の充填密度を高めて、変形を抑制する試みも報告されている。

またグリーン体の焼結過程のおける重力や摩擦が変形挙動に与える影響も無視す ることができない。そのため部品形状によっては変形抑制のためにサポートや治具、 焼結炉内での部品の置き方を工夫する必要がある。また PBF と同様に焼結後の形状 と図面形状の差異をもとに、グリーン体の造形形状を修正することで最終部品形状 に近い形状に調整することが可能であり、部品形状によってはこの工程を繰返すこ とで所定の寸法精度に抑えることが可能である。しかし部品の大きさが大きい場合、 焼結過程のおける部品内の温度差に伴う焼結具合の差異が生じることから熱収縮の 制御が困難になるため、BJ 方式で大きな部品を作るのは難易度が高いといえる。

BJ 方式は PBF 方式に比べて細かな粉末を用いていることから、厚さ1 mm以下の 薄板や細かな穴やスリットを有する造形への適用が期待される。BJ を適用する際に はグリーン体の造形後に乾燥・硬化させた後の粉末除去のための圧縮エアー吹き付 け時にグリーン体の形状が保つことができれば、精密形状部品への造形に適用する ことができると考えられる。

(3)表面粗度

図 3.1-32 に各製造プロセス別の表面粗さを示す。鍛造や鋳造に比べて AM 部品の 表面粗度が低下する要因としては、2 つの要因に大別される。

1つは金属積層造形の大半が3次元データをスライスして2次元データとして分割 し、層状に造形を行うことに起因している。元の図面が連続的な面も、AM で造形に 用いられる形状はスライスの処理により端部の形状は必然的に図 3.1.-33 に示すよう な階段状の形状となる。PBF や DED などの造形中に溶融・凝固を伴うプロセスでは、 端部は金属粉末の溶融時の濡れ性により凹凸が緩和されるが、積層に伴う周期的なう ねり成分が残るため表面粗度は低下する。この傾向は積層厚さが増加するほど、表面 粗度は低下する傾向にある。図 3.1-32 において比較的積層厚さの厚いプロセスほど表 面粗度が荒い傾向を示している。

2つ目の理由としては PBF や DED では端部の溶融・凝固状態が表面粗度に直結し、 細かな凹凸が残ってしまう。また粉末焼結プロセスである BJ の場合は表面の粉末の 形状により表面の凹凸として残るため、粉末粒径の大きさや充填度が表面粗度に影響 を与える。後者の細かな凹凸は造形後の後加工により緩和することができるが、前者 の積層厚さに伴ううねり成分を緩和するのは困難である。大まかな傾向に加えて造形 方式毎の表面粗さに与える影響について以下に記す。



図 3.1-32 造形プロセス別 表面粗さ比較 [31-15]



図 3.1-33 積層に伴う表面粗度への影響 [31-16]

① PBF 方式

PBF 方式では前述のように積層厚さが表面粗度に影響を与える。多くの SLM 方式 の装置は積層厚さを造形パラメータとしている。20~30µmの積層厚さで表面粗度を 改善する一方、造形速度は低下する。逆に積層厚さを 40~60µmにすることで、積層 回数を減らし造形速度を向上させることができるが、表面粗度は低下する。EBM 方 式は 50~90µm程度の積層厚さとしていることが多い。SLM と EBM で積層厚さが約 2 倍異なるのは用いる粉末粒径の差異による。前述のように SLM が 15~50µmの粒径 分布の粉末を用いているのに対して、EBM はスモーク現象のリスクを低減させるた めに 50~100µm程度の粉末を用いていることに起因する。

PBF 方式は、前述のように部品内部をハッチング、部品外周をコンターと呼ばれる

工程で造形している。ハッチングは造形速度を向上させるため比較的高い入熱条件と 走査速度を組み合わせて造形させる。しかしこの条件で部品外周も造形すると表面粗 度が低下する。そのため外周部のみコンターと呼ばれる入熱を押さえた条件で造形す ることにより表面粗度を改善することができる。入熱が大きいと不連続に配置された 粉末を溶融させるために加熱領域の側面の形状が不安定になり、さらに隣接する粉末 の一部だけを溶融して図 3.1-34 に示すように粉末が表面に付着した状態となるため、 表面粗度が低下する。また図 3.1-35 に示すようなオーバーハング形状の下面(ダウン スキン)を造形する場合、入熱が大きいと溶け落ちが起きて、所定の形状にすることが 困難になる。造形装置によっては特定の角度のダウンスキン面においてさらに入熱を 抑えたコンター条件を設定し、表面粗度を改善する手法が用いられている。



図 3.1-34 SLM 造形部品の表面に付着した金属粉末の様子^[3 1-19]



図 3.1-35 積層に伴う表面近傍の断面の様子 [3 1-16]

②DED 方式

造形時点での粗さとしては、レーザーPBF やバインダジェット(Ra20µm 以下)と比較して DED は粗く、粉末 DED で Ra=15~60µm、ワイヤ DED では Ra=45~100µm と最も粗い。

製品に対して造形ままの表面粗さで要求に満たない場合の表面処理方法として、 機械加工の他にブラストやバレル研磨といった手法が挙げられる。

また図 3.1-36 に示すように造形後にレーザーで再溶融させることで表面粗度を向 上させる手法の検討もされており、再溶融後では概ね Ra=5µm 以下の滑らかな表面 が得られることも報告されている。



図 3.1-36 SUS316L 表面 SEM・トポグラフィー画像^[3 1-18]
 (上段:造形まま 下段:レーザーによる再溶融後)

BJ 方式

BJ 方式ではグリーン体を焼結炉で焼き固める過程において溶融凝固を伴わない ことから、図 3.1-37 に示すようにグリーン体の表面粗度が焼結後の表面粗度に大き な影響を与える。グリーン体の表面粗度は他の造形方法と同様に粉末の粒径と造形 過程における積層厚さが大きな影響を与える。積層厚さに応じてグリーン体の表面 粗度を計測した結果を図 3.1-38 に示す。積層厚さの増加に伴い、コンターレンジが 大きくなっていることからも表面粗度が低下していることがわかる。これは図 3.133 に示すように階段状になるため影響が大きいと考えられる。



図 3.1-37 BJ 方式の表面粗度の様子^[3 1-17]



図 3.1-38 BJ 方式の積層厚さの変更に伴う表面粗度に与える影響^[31-20]

【参考文献】

- [3.1-1] https://ecoms.sus.co.jp/magazine/pdf/EC_0042.pdf
- [3.1-2] J. Gunasekaran et al., Metallic material fabrication by selective laser melting: A review, Materials Today: Proceedings, 37(2021), pp252-256
- [3.1-3] J. Milberg and M. Sigl: Prod. Eng. Res. Devel. (2008) 2:117–122.
- [3.1-4] Ming Li et al., Metal Binder Jetting Additive Manufacturing: A Literature Review, J of manufacturing science and engineering, 142(2020), 090801-1-117
- [3.1-5] Javed Akram et al., Understanding grain evolution in additive manufacturing through modeling, Additive Manufacturing, 21(2018), pp255-268
- [3.1-6] Paul A.Hooper, Melt pool temperature and cooling rates in laser powder bed fusion, Additive Manufacturing, 22(2018), pp.548-559
- [3.1-7] Tobias Ronneberg, et al., Revealing relationship between porosity, microstructure and mechanical properties of laser powder bed fusion 316L stainless steel through heat treatment, Materials and Design, 189(2020), 108481
- [3.1-8] D.R. Feenstra et al., Effect of build height on the properties of large format stainless steel 316L fabricated via directed energy deposition, Additive Manufacturing, 34 (2020) 101205
- [3.1-9] Nima Shamsaei et al., An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing;Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control, Additive Manufacturing, 8 (2015) 12–35
- [3.1-10] Nora Lecis et al., Effects of process parameters, debinding and sintering on the microstructure of SUS316L stainless steel produced by binder jetting, Material Science & Engineering A, 828(2021),142108
- [3.1-11] Ze-Chen Fang et al., Review on residual stress in selective laser melting additive manufacturing of alloy parts, Optics and Laser Technology, 129(2020), 106283
- [3.1-12] MSC Software Simufact AM HP, 2021
- [3.1-13] Ho Yeung, et al., Part geometry and conduction-based laser power control for powder bed fusion additive manufacturing, Additive Manufacturing, 30,(2019), 100844
- [3.1-14] J.Kittel et al., Case study on AM of an IN718 aircraft component using the LMD process ; 11th CIRP Conference on Photonic Technologies [LANE 2020] on September 7-10, 2020, Procedia CIRP 94 (2020) 324–329
- [3.1-15] Hamed Kalami et al., Exploration of surface roughness measurement solutions for additive manufactured components built by multi-axis tool paths, Additive Manufacturing, 38 (2021) 101822
- [3.1-16] Zhuore Chen et al., Surface roughness of Selective Laser Melted Ti-6Al-4V alloy components, Additive Manufacturing, 21(2018), pp.91-103

- [3.1-17] Amir Mostafaei, et al., Characterizing surface finish and fatigue behavior in binder-jet 3Dprinted nickel-based superalloy 625, Additive Manufacturing, 24(2018), pp200-209
- [3.1-18] Seung Yeong Cho et al., Effect of laser remelting on the surface characteristics of 316L stainless steel fabricated via directed energy deposition, Journal of materials research and technology, 15(2021), pp.5814-5832
- [3.1-19] Milad Hamidi Nasab, et al., On morphological surface feature of the parts printed by selective laser melting(SLM), Additive Manufacturing,24(2018), 373-377
- [3.1-20] Jun Zhang, et al, Binder jetting of well-controlled powder agglomerates for breakage studies, Advanced Powder Technology, 32(2021), pp.19-29

3.2 国内外の規格動向調査

本項では国内外の規格動向として調査した、ASME PTB-13-2021、ISO/ASTM、および ASME/JSME 新規材料材用ガイドラインについての調査結果をまとめる。

3.2.1 ASME PTB-13-2021 の概要

ASME Boiler & Pressure Vessel Code(ASME BPVC) 委員会では、AM 規格策定に向け て以下に示す委員会で闊達な議論が行われている(図 3.2-1)。

- Task Group on Advanced Manufacturing (SG-MFE, BPV III)
- Task Group on Div5 AM Components (SG-HTR, BPV III)
- BPTCS/BNCS Special Committee on Use of Additive Manufacturing for Pressure Equipment

この中で、規格策定委員会をオーバーサイトする組織である BPTCS (Board on Pressure Technology Codes and Standards)と BNCS (Board on Nuclear Codes and Standards)が PBF 法を耐圧機器に適用するための基準書(ASME PTB-13-2021 - Criteria for Pressure Retaining Metallic Components Using Additive Manufacturing^[3,2-1])を 2021 年 5 月に発行 した。本項では規格化要件整理の入力情報として、また規格化のための材料データ取得計 画の参考にするために、本基準書 (ASME PTB-13-2021) の概要をまとめる。



図 3.2-1 ASME BVPC 委員会の構成

ASME PTB-13-2021は、PBF法の耐圧機器への適用に向けた規格策定における材料、設計、 製造、試験、検査・品質保証に関する基準をまとめたものであり、以下の目次で構成される。

<u>ASME PTB-13-2021 の目次</u>

- 1章:適用範囲
- 2章: AM 仕様書
- 3章:材料
- 4章:熱処理
- 5章:粉末要求
- 6章: AM 設計要求
- 7章: AM 製造要領
- 8章: AM 製造要領認定
- 9章: AM 機器の品質認定試験
- 10章:製品造形サイクル
- 11章:化学成分分析
- 12章:機械特性試験
- 13章:金属組織評価
- 14章:造形時モニタリング
- 15章:品質プログラム
- 16章:記録
- 17章:定義

各章は、それぞれの項目に対する要件の箇条書きと解説で構成されており、ASME における AM 材規格化のための基準とするとしている。

記載内容および章構成から、ASME PTB-13-2021 は、製造、試作、実機品の各段階で要 求事項を検証することにより AM 機器の健全性担保する仕組みとしていると考えられる。 すなわち、造形装置および造形プロセスに対する検証である製造要領認定、設計要求事項を 満足できることを試作品(モックアップ)により検証する品質認定を行った上で、実機適用 に移行し、製品造形サイクルでは製品仕様に対する適合性を製品試験により検証を行う仕 組みとし、図 3.2-2 に示す通り、左側に示す 2~7 章での仕様、要求事項、要領の定義に対し て右側の 8~10 章の検証方法が対応する構成(V プロセス)となっていると解釈される。



図 3.2-2 ASME PTB-13-2021 の章構成

3.2.2 ISO/ASTM 他の AM 関連規格調査

AM 関連技術については ISO/TC261、ASTM F42 において製造方法、語句と定義、試験方法、プロセスの繋がり等の議論がなされており、規格化の審議が完了したものが順次発行されている状況である。ここでは、これら発行済みの ISO/ASTM 規格を調査し、それぞれの抄訳を作成した())。また、これに基づき、3.2.1 項で調査した ASME PTB-13-2021 を補完する情報の有無、また規格化に向けた材料データ取得計画の検討の上での参考となるかについて検討を行った。結果の概要を表 3.2-1 に示す。

表 3.2-1 ISO,ASTM、他規格の概要

規格 No.	名称	概要	ASME PTB- 13-2021 の補 完となるか ^{注)}	解説	材料データ取 得計画の参考 となるか ^{注)}	解説
ASTM F2971	Standard Practice for Reporting Data for Test Specimens Prepared by Additive Manufacturing AM テストサンプルのレポートのための 標準技法	 ・AMにより製作された試験片の評価及び評価結果を 報告するために必要な要件がまとめられている。 ・主に材料、加工、試験、検査情報に関する報告要件 が記載されている。 		PTB-13-2021 では AM 製造要領(7~8章)で認定試 験片を作成することになっているが、評価報告に関 する記載は具体的ではないため、本規格で補完す る。	0	試験片の評価及び評価結果を報告するため に必要な要件がまとめられている。
ASTM F3049	Standard Guide for Characterizing Properties of Metal Powders Used for Additive Manufacturing Processes AM に用いる金属粉末の特性評価のため の標準指針	金属粉末の購入者,販売者および製造者向けに,金属 粉末の特性評価において参照する既存規格を示す。	0	金属粉末に関する要件が詳細化されている。	0	試験に使用する金属粉末への要求が必要の ため
ASTM F3122	Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made via Additive Manufacturing Processes AM プロセスによる金属材料の機械的性 質を評価するための標準指針	AM によって造形された試験片に対する機械試験の要 領を示す。	0	PTB-13-2021 では具体的な試験方法まで規定されて いないため、本規格で各試験に対して具体的に参考 とすべき規格(ASTM、ISO)を規定する。	0	本規格で各試験に対して具体的に参考とす べき規格(ASTM、ISO)を規定する。
ASTM F3184	Standard Specification for Additive Manufacturing Stainless Steel Alloy (UNS S31603) with Powder Bed Fusion ステンレス鋼(UNS S31603)の PBF の標準 仕様	ステンレス鋼(UNS S31603)製 AM 部品の購入者お よび製造者向けに、要求事項の定義と部品特性の保証 方法について記載する。	0	PTB-13-2021 では具体的な試験方法及び要件まで規定されていないため、本規格で各試験に対して具体的に参考とすべき規格(ASTM、ISO)を規定する。	0	引張強度特性の Criteria が必要なため
ASTM F3187	Standard Guide for Directed Energy Deposition of Metals DED の標準指針	DED の適用領域と制限、DED システムのセットアッ プでの考慮事項、装置動作、プロセスの文書化、作業 手順、利用可能なシステム、プロセスの監視技術を定 義するためのガイド	×	ガイドであり、認定要領、クライテリア、規定値を 示したものではないため	×	ガイドであり、認定要領、クライテリア、 規定値を示したものではないため
ASTM F3301	Standard for Additive Manufacturing – Post Processing Methods – Standard Specification for Thermal Post-Processing Metal Parts Made Via Powder Bed Fusion1, 2 後処理法-PBF 部品の後熱処理	・PBF で造形された部品の熱処理に関する要件がま とめられている。 ・記載されている材料はチタン合金、Co-28Cr-6Mo 合 金、Alloy718、Alloy625、Type316L、AlSi10Mg であ る。 ・それぞれの材料について、応力緩和熱処理、固溶化 熱処理、熱間等方圧加圧法、時効熱処理などの熱処理 条件が記載されている。	0	PTB-13-2021 では中間熱処理を実施してもよいこと が明記されているが、方針は具体的ではないため、 本規格で具体的な熱処理条件を規定する。	0	PBF 向けの具体的な熱処理条件が規定され ているため
ASTM F3413	Additive Manufacturing — Design — Directed Energy Deposition 設計-DED	・DED 部品と典型的な機能特性と、これら特性に寄 与するプロセスの考察、また造形プロセスの制限に関 する情報をまとめて、設計者に提供することで、 DED を活用し、不具合を回避できるようにするため のガイドである。 ・ISO/ASTM52910(一般的な設計ガイド)の拡張版	×	ガイドであり、認定要領、クライテリア、規定値を 示したものではないため	×	□ガイドであり、認定要領、クライテリ ア、規定値を示したものではないため
ASTM STP1631	Structural Integrity of Additive Manufactured Materials and Parts 造形材料および部品の構造的完全性	AM 部品の構造強度に関する技術論文がまとめられている。	×	技術紹介であり、要件を示したものではないため。	×	技術紹介であり,要件を示したものではな いため。
ASTM ISO/ASTM 52901	Standard Guide for Additive Manufacturing - General Principles - Requirements for Purchased AM Parts 一般原則 - 購入した AM 部品要求	AM 部材を購入する際の必要最小限の要求事項がまと められている。	×	購入する際の要求事項であり、事業者が定めればい ため	×	購入する際の要求事項であり、材料データ 取得とは関係がないため
ASTM ISO/ASTM 52902	Additive manufacturing — Test artifacts — Geometric capability assessment of additive manufacturing systems AM (付加製造技術) –試験アーティフ ァクト編-AM システムの幾何学的能力 評価	本規格では、AMシステムの性能を評価するために造 形するベンチマーク用試験片の幾何学的形状の一般的 な説明と、ベンチマーク用試験片を基に実施する定量 的および定性的な測定方法を記載している。この性能 評価には、以下の2つの目的がある。 - AMシステムの能力評価 - AMシステムのキャリブレーション	×	AM システムの性能評価のためのガイドであり、認定要領、クライテリア、規定値を示したものではないため	×	AM システムの性能評価のためのガイドで あり、認定要領、クライテリア、規定値を 示したものではないため

規格 No.	名称	概要	ASME PTB- 13-2021 の補 完となるか ^{注)}	解說	 材料データ取 得計画の参考 となるか^{注)} 	解説
ASTM ISO/ASTM 52904	Additive Manufacturing – Process Characteristics and Performance: Practice for Metal Powder Bed Fusion Process to Meet Critical Applications AM 基準—プロセスの特性と性能:重要 なアプリケーションに適合するための PBF プロセスの実践	認定をする上での造形前の確認事項や定期的な予防保 全、装置などの認定や管理のプロセスが記載されてい る。 また、製造計画に必要な要件が記載されている。	0	具体的な認定要領が記載されているため。	0	製造プロセスの認定方法であり、認定され た装置を前提として、試験片を造形する。
ASTM ISO/ASTM 52907	Additive manufacturing — Feedstock materials — Methods to characterize metallic powders 原材料:金属粉末の特性評価方法	AM 用の金属粉末の供給に関して、プロセスに関わら ず、供給者と購入者の関係を簡易化するためのもの。 本規格の目的は新基準の開発推進ではなく、積層造形 に適した金属粉末に特化した既存の標準を広めるこ と。	0	金属粉末に関する要件が詳細化されている。	0	試験に使用する金属粉末への要求が必要の ため
ASTM ISO/ASTM 52910	Additive manufacturing - Design - Requirements, guidelines and recommendations 設計 - 設計要件ガイドライン	製品設計に AM を使用する場合の要求,指針,提言 について記載したもの。	×	AM 設計での要求,指針,提言であり、認定要領、 クライテリア、規定値を示したものではないため	×	AM 設計での要求,指針,提言であり、、 認定要領、クライテリア、規定値を示した ものではないため
ASTM ISO/ASTM 52911-1	Additive manufacturing — Technical design guideline for powder bed fusion — Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals PBFの技術設計ガイドライン - Part 1: 金 属レーザ PBF	 ・ 金属用 PBF-LB の特徴を規定し、詳細な設計推奨 事項を提言している。 ・ PBF に関する知見を取り入れ、ISO/ASTM 52910 の適用範囲を拡大することで、PBF の使用に関連す る設計ガイドラインの最新情報を提供している。 	×	設計のガイドラインであり、認定要領、クライテリ ア、規定値を示したものではないため	×	設計のガイドラインであり、認定要領、ク ライテリア、規定値を示したものではない ため
ASTM ISO/ASTM 52921	Standard Terminology for Additive Manufacturing—Coordinate Systems and Test Methodologies 一般原理 - 座標系と試験方法	AM 技術の座標系および試験方法に関連する用語の説明や定義を示す。		定義は統一する必要があるため	×	定義は統一する必要があるが試験には影響 はないため
ISO ISO/ASTM TR 52912	Additive manufacturing - Design - Functional graded additive manufacturing - First Edition 傾斜設計- AM の機能区分	機能傾斜材料(FGM)を入り口とし、機能傾斜付加 製造(FGAM)の概念を説明している。 FGAMを採用するために必要な材料開発の観点や、 造形方法についていくつかの例を交えながら紹介した 文書である。	×	機能傾斜材料を対象とする予定はないため	×	機能傾斜材料を対象とする予定はないため
ISO/ASTM 52941	Additive manufacturing —System performance and reliability —Standard test method for acceptance of powder-bed fusion machines for metallic materials for aerospace application 航空宇宙機器への適用に向けた金属粉末 床溶融結合付加製造機器のシステム性能 と信頼性確認試験	本規格は航空宇宙機器への適用に向けた PBF で用い るレーザービーム機器の認定(Qualification)と再認定 の要求事項と試験方法を規定している。添付には試験 記録のサンプルが示されている。		製造プロセス認定の補完になる可能背はある	Δ	製造プロセスの認定方法であり、認定され た装置を前提として、試験片を造形する。
ASTM ISO/ASTM 52942	Additive manufacturing — Qualification principles — Qualifying machine operators of laser metal powder bed fusion machines and equipment used in aerospace applications PBF 装置および航空宇宙用途で使用され る装置のオペレータ認定	オペレータ認定試験の内容、証明書の内容、再試験の 内容について記載されている。		ASME ではオペレータを認定は規定されていないため	×	試験片造形にはオペレータ認定は必要ない と思われるため
ISO 17296-2	Additive manufacturing — General principles — Part 2: Overview of process categories and feedstock —般原理 - Part2: プロセスカテゴリと原 料の概要	 □ 造形方法ごとに異なる原料を使用して製品を形成 する方法の説明。 □ 材料の規定、及び造形方法と現材料の組み合わせ によって製造される部品の要求事項は含まれない。 □ 一般原則を示したものであり、認定要領、クライ テリア、規定値を示したものではない。 	×	造形概要を示すものであり、認定要領、クライテリ ア、規定値を示したものではないため	×	造形概要を示すもののため
ISO 17296-3	Additive manufacturing — General principles — Part 3: Main characteristics and corresponding test methods —般原理 - Part3:主な特性と試験方法	・積層造形プロセスによって製造された部品のテスト に適用される主要な要件として「部品の主な品質特性 の指定」「適切なテスト手順の指定」「テストおよび供 給契約の範囲と内容の推奨事項」を示すものである。		AM 部品の推奨要求試験に関する主要な要件を示す ものであるため。		Safety requirement に応じた試験項目の選定 や ISO 試験規準も示されているため

規格 No.	名称	概要	ASME PTB- 13-2021 の補 完となるか ^{注)}	解説	材料データ取 得計画の参考 となるか ^{注)}	解説
ISO 17296-4	Additive manufacturing — General principles — Part 4: Overview of data processing 一般原理 - Part4:データ処理の概要 (ISO/ASTM52950 により置き換え)	□ AM のためのデータ交換に適用される主要な考慮事 項を説明したものであり、形状、または部品を形成す る情報をやり取りできるよう用語やフォーマットを定 義したもの。	×	□ 形状データの取り扱いを示したものであり、認定 要領、クライテリア、規定値を示したものではない ため。	×	□ 形状データの取り扱いを示したものであり、認定要領、クライテリア、規定値を示したものではないため。
ASME Code Case 3020 :	Qualification of Gas Metal Arc Additive Manufacturing (GMAAM) Procedures Section IX ガスメタルアーク AM の SectionIXでの手 順の認定	□ ガスメタルアーク AM を使用した付加製造で使用 する溶接要領と溶接金属の特性を認定するための規則 を示したもの。 セクションIXで規定されている溶接要領認定の規 則に本コードケースの項目を追加することで GMAAM として認定する。	0	DED の Criteria Document が発行されるまで、本 CodeCase が DED の指針となるため	0	DED の要領認定のための試験方法を参照 できるため
AWS D20.1	Specification for Fabrication of Metal Components using Additive Manufacturing AM を使用した金属部品の製造に関する 仕様	本規格は、AMを用いて金属部品を製造するための一 般的な要件や、エンジニアと請負業者の間の対話に関 するガイダンス、設計方針を提供している。また、 AMで製造された構成部品の認定、製造、検査および 受け入れ、仕様の解説が含まれている。	0	PTB-13-2021 で、要領認定試験記録、装置認定試験 記録や空隙率の参照文献として本規格が読み込まれ ているため。	Δ	製造プロセスの認定方法であり、認定され た装置を前提として、試験片を造形する。

注) ○:補完/参考となる。△:検討要 ×:補完/参考とならない。

3.2.3 ASME/JSME 新規材料採用ガイドラインの調査

新規材料を採用する際の指針として JSME から「新規材料採用ガイドライン」が発行され ており、AM 材を新規材料として採用する場合もこの指針に沿うことが必要条件になる。そ こで、この「新規材料採用ガイドライン」を確認し、材料データ取得このため、材料データ 取得計画に関連する内容を整理した。なお、ASME においても同様のガイドライン(ASME Section II Part D Appendix 5)があるため、JSME で記載がない項目で、材料データ取得計画で 考慮すべき内容が無いか調査した。調査結果を表 3.2-2 に示す。

表 3.2-2 によると要件は「新規材料採用ガイドライン」で ASME での要求が包絡されて いるが、材料データ取得計画に際し、以下要件は ASME の方が詳細な要求事項や追加記載 事項があるため、試験方法立案の際には考慮する必要がある。

- (6) 化学成分
- ・(7) マクロ及びミクロ組織
- ・(11) 応力-ひずみ特性
- (21) 疲労
- ・(22) その他特性

	JSME 新規材料ガイドラ	ASME Section II Part D	材料データ取得計画におけ
	イン	Appendix 5	る考慮
標本数 (1) 材料の 基本化学 成分及び	最低3本 同一溶解、同一板厚、及 び同一熱処理条件を同時 に満足するもの 材料の基本化学成分及び 用途	最低3ヒート 同一溶解、同一化学成分、同 ー製造プロセスで製造された もの。 (5-700 REQUIRED SAMPLING) (6)参照。	バッチ数設定において考慮 する。
用途	。	禾昌今へ以下を報生・	
(2) 材料の 仕様	 a. 適合規格 適合規格名もしくは 申請中又は申請予定の規格名を記載すること。 b. 化学成分制限 適用する機器等に対して成分制限が必要な場合、記載すること。 c. 機械的性質 常温の規格値。 d. 寸法制限(径、厚さ他) 適用する機器等に対して寸法制限が必要な場合、記載すること。 e. 形状寸法(寸法公差) 	 委員会へ以下を報告: ・承認を受けたい Code Division ・想定使用温度範囲、 ・変動荷重の考慮要否 ・外圧作用の考慮要否 ・製品形態 ・サイズ ・材料仕様及び使用要件 ・想定使用温度範囲における 使用経験 (5-200 APPLICATION) 上記以外に JSME 新規材料ガ イドラインで求められている 化学成分、機械的特性は 5-200 では明記されていない が、以降の章で要求されている。 	同上
(3) 使用条 件	 a. 適用範囲 b. 温度範囲(最高温度、低温の機器等の場合、最低使用温度) c. 外圧設計が必要な機器等への適用の有無 		
(4) 特徴及 び使用上の 留意事項	 a. 特徴 新規材料の開発経 緯、特徴、メリッ ト及び特記すべき 物理的性質 b. 新規材料に関する特許 及びライセンスの有 無 ライセンスがある 場合、製造に関す る制約。 	本 Appendix には要求はな い。	最終的に規格化する際に必 要な情報であり、材料デー タ取得計画における考慮は 不要

表 3.2-2 新規材料採用ガイドラインの概要と材料データ取得計画における考慮

	JSME 新規材料ガイドラ イン	ASME Section II Part D Appendix 5	材料データ取得計画におけ ス考慮
(5) 製造方 法及び製造 条件	 a. 製造方法(溶解、精 錬、製造及び加工) b. 熱処理(温度、加熱・ 冷却方法、速度) c. 検査(検査方法等) 	独立した項目としては要求さ れないが、他項の規定を見れ ば、これらの情報を含めるこ とは必要と考えられる。	試験対象となる材料の仕様 として材料データ取得計画 の中で定義する。
(6) 化 学成分(溶鋼分析又は溶湯分析、製品分析)	化学成分範囲、試験用供 試材の標本ごとの製品分 析値	どのようなデータを提出する かという規定はない。ただ し、化学成分範囲の決定根 拠、金属組織との関係(例え ば、析出物とその形態、粒 径、相への影響)、熱処理の効 果(例えば、強化メカニズムと その安定性)及び機械的性質と の関係を説明しなければなら ないとしている。 (5-300 CHEMICAL COMPOSITION)	最終的に規格化する際に必 要な情報であり、材料デー タ取得計画における考慮は 不要
(7) マクロ 及びミクロ 組織	マクロ及びミクロ組織	承認を受けようとする状態を 実現するための熱処理条件と 共に組織に関する情報を提 出。 (5-400 METALLURGICAL STRUCTURE AND HEAT TREATMENT)	マクロ/ミクロ組織観察を 材料データ取得計画に盛り 込む。
 (8) 実用試 験(へん平 試験、押し 広げ試験) 	実用試験(へん平試験、 押し広げ試験)	本 Appendix には要求はな い。	管材に対する要求であり、 本プロジェクトでの材料デ ータ取得計画における考慮 は不要
(9) 加工 性、加工条 件	チューブについては、必 要に応じて曲げ加工性に ついての試験結果	本 Appendix には要求はな い。	同上
(10) 機械的性質	 a. 引張特性(引張強さ、 降伏点又は耐力、伸 び、絞り) b. 靭性 靭性が要求される材料の場合、最低使用 温度と板厚範囲に対する切欠靭性データ (溶接構造物の場 合、溶接金属、溶接 熱影響部のデータを 含む)。 c. 硬さ 	 引張特性(引張強さ、降伏応 カ又は耐力、伸び、絞り) 鋼、ニッケル合金、コバ ルト合金及びアルミニウ ム合金:最高使用温度が 40℃を超えない場合を 除き、室温、及び100℃ から最高使用温度の 50℃高い温度まで 50℃ 間隔 鋼合金、チタン合金及び ジルコニウム合金:最高 使用温度が 40℃を超え ない場合を除き、室温、 65℃、100℃から最高使 用温度の 50℃高い温度 まで 50℃ 間隔 (5-800 TIME-INDEPENDENT PROPERTIES) 	 引張特性、硬さについて本プロジェクトでの材料データ取得計画に入れる。 本プロジェクトで対象とする材料はType316Lであり、靭性データは不要。 引張特性データ取得における試験温度は(12)項の記載に従う。
(11) 応力 -ひずみ特	応力-ひずみ曲線(引 張、圧縮)。	圧縮荷重(例えば外圧)下で使 用する構成部品に材料を適用	材料データ取得計画に盛り 込む。

	JSME 新規材料ガイドラ	ASME Section II Part D Appendix 5	材料データ取得計画におけ ス考慮
性 (12) 高温 及び低温引 張特性	 外部から圧力を受ける機器等に使用する場合、設計温度範囲より広い温度範囲までの 50℃ごとの数値データ 引張特性(引張強さ、降伏点又は耐力、伸び、絞り) 	する場合は、3 ヒートについ て、室温から最高使用温度よ り 50°C 高い温度まで 50°C 間 隔で応力-ひずみプロット (引 張または圧縮) を提出。 (5-1200 STRESS-STRAIN CURVES) (10) と同じ	材料データ取得計画におけ る試験温度の設定の中で考 慮する。
	 a. 常温から最高使用温度 より 50℃高い温度まで の 50℃ごとのデータ b. 常温以下の温度で使用 する場合で、低温での 設定応力を高くしたい 場合は、最低使用温度 を含む 50℃ごとの引 張試験データ 		
 (13) クリ ープ及びク リープ破断 特性 	 必要に応じてクリープ速度、クリープ破断強度 a. 最高使用温度より 50℃高い温度までの 50℃ごとのデータ。 b. 溶接金属及び溶接継手に関しては、クリープ破断強度のみ 	時間依存特性(クリープ)設計 を要する温度での承認を要す る場合は以下を考慮したデー タを準備。 試験温度域 ・ 許容応力がクリープ支配 となる温度から使用 を想定する温度から使用 を想定する温度の50℃ 以上高い温度まで。 試験温度間隔 ・ 破断時間-応力依存性を 明確にあること。 ・ 時間に対する強度安定性 の高い材料:50℃以下 ・ 時間に対して強度が変化 する可能性のある材料: 25℃以下。ただし、隣 接温度間が50℃以下 ・ 時間に対して強度が変化 する可能性のある材料: 25℃以下。ただし、隣 接温度間が10000hr 以上であるよう に設定必要な場合もあ る。 ・ 各ヒート、各温度での最 大の破断時間が10000hr 以上であること。 ・ 各ヒート、各温度で破断 時間が500hr 以上のデー タが3以上あること。 ・ 強度を支配する組織因子 の安定性が不明確な新材 料の場常使用される温度以 上での許容応力を設定し ようとする場合は	本プロジェクトではクリー プ設計を要する温度を材料 適用範囲としておらず、材 料データ取得計画での考慮 は不要。

	JSME 新規材料ガイドラ	ASME Section II Part D	材料データ取得計画におけ
(14) 時 効 後靱性	JSME 新規材料ガイドラ イン 時効硬化を考慮する必要 があると想定される材料 については以下の項目を 含むこと。 a. 最高使用温度等を考慮して時効させた材料の シャルピー衝撃試験結果 b. 材料が時効脆化する場合は、溶接線手のシャ	ASME Section II Part D Appendix 5 30000hr 以上のデータ。 その他 ・ 少なくとも 22 ヒートに 対し、各温度で 2 応力以 上のクリープひずみ-時 間カーブを取得するこ と。これは最小クリープ 速度が 3×10-4%/hr 以下 になるような応力でのデ ータを含んでいること。 (5-900 TIME-DEPENDENT PROPERTIES) 本 Appendix には要求はな い。ただし、Construction Code 適用の場合はその指示 による靭性データを提供。 (5-1100 TOUGHNESS DATA)	材料データ取得計画におけ る考慮 初期の材料データ取得計画 には含めず、組織観察の結 果によりデータ取得要否を 判断する。
(15) 溶接 性(溶接性、 溶接区分)	 a. 新規材料を溶接して使用する場合は、材料の溶接性に関するデータを提出すること。(データには、日本機械学会発電用原子力設備規格溶接規格、ASMESec.IX しくは ASMESec.IX しくは ASMESec.XI 等による施工法確認試験データを含めること。) b. 後熱処理、硬化性、溶接方法の影響、熱影響部及び溶接金属の切欠き靭性、溶接施工実績に関する情報 	左記の JSME と概ね同様 (JSME が ASME に倣ってい る)。これに加えクリープ破 断データの要求も明記。 (5-1500 DATA REQUIREMENTS FOR WELDS, WELDMENTS, AND WELDABILITY)	AM 材を溶接して使用する ことは想定する場合は、材 料データ取得計画で考慮す る必要がある。
(16) 耐食 性	腐食環境下で材料の組織 又は機械的性質に及ぼす 影響の評価結果。(実験室 的腐食試験を行い、腐食 損傷量、腐食形態等を評 価する。)	本 Appendix には要求はな い。	耐食性に関する試験を材料 データ取得計画に盛り込 む。
(17) 設計 降伏点	各温度における降伏点又 は耐力のデータ	本 Appendix には要求はな い。ASME の委員会のみが値 を設定できるためである。	材料データ取得計画での考 慮は不要。 (引張特性試験結果から評 価される)

	JSME 新規材料ガイドラ	ASME Section II Part D	材料データ取得計画におけ
	イン	Appendix 5	る考慮
(18) 設計	各温度における引張強さ	本 Appendix には要求はな	同上
引張強さ	のデータ	い。ASME の委員会のみが値	
		を設定できるためである。	
(19) 設計	各温度における応力強さ	本 Appendix には要求はな	同上
応力強さ	のデータ	い。ASME の委員会のみが値	
		を設定できるためである。	
(20) 許容	各温度における引張応力	本 Appendix には要求はな	同上
引張応力	のデータ	い。ASME の委員会のみが値	
		を設定できるためである。	
(21) 疲労	疲れ線図作成のためのデ	変動荷重下での挙動を考慮す	疲労試験を材料データ取得
()		る必要がある場合、使用温度	計画に盛り込む。
		範囲において 10 ³ サイクルか	
		ら少なくとも 106 サイクルま	
		でのデータを取得	
		(5-1300 FATIGUE DATA)	
(22) その	要求あれば以下のデータ	少なくとも1ヒートについ	左記の項目のデータ取得を
他特性	を提示すること。	て、線膨張係数、熱伝導率お	材料データ取得計画に盛り
	(使用温度範囲より広い	よび拡散率、弾性係数、ポア	込む。
	温度範囲までのデータ)	ソン比、および密度の値を確	ヒート数、試験温度につい
	a. 線膨張係数	立するために必要な十分なデ	ては ASME の規定を参考
	b. 熱伝導率	ータをボイラーおよび圧力容	とする。
	c. 温度伝導率	器材料委員会に提出。	
	d. 縦弾性係数	少なくとも材料の使用温度範	
	e. ポアソン比	囲において、50℃以下の温度	
		間隔でデータを取得するこ	
		と。	
		(5-1400 PHYSICAL	
		PROPERTIES)	

3.3 AM 材の材料物性値の調査

本項では、AM 材規格の制定に必要な材料データ取得方針の検討に資するため、材料 データを取得するための試験片造形方針、および材料試験結果について、発行済みの AM 関連規格(ASTM、ISO)、公開文献(雑誌、論文等)、及び装置メーカー/材料メー カーのデータシート・ホワイトペーパー類(

3.3.1. 試験片造形方針の調査

材料データを取得するために必要な試験片造形方針を調査した。調査対象は以下の 通りとした。

・製造方法: PBF、パウダーDED、ワイヤーDED(熱源は問わない)

・材種:金属で材種は問わない(試験方針は材種によらないと考えられるため) 調査結果の概要を以下に示す(**」**)。なお、DED は調査対象としたもののデータはなかったため、以下の内容はいずれも PBF に対するものである。

i. 試験片造形の目的

調査対象の規格類が言及する試験の目的は AM を新材料として認定するための材 料特性の取得ではなく AM プロセスや AM 装置の適格性評価、ベンチマークを目的 としている。

ii. 試験片形状

機械的特性を取得するための試験片形状は、既存規格、特にASTM E8/E8M に準拠 しているものが多い。

- 試験片採取位置
 製品と同時造形する試験片、または AM 装置の適格性評価のために単独で造形する
 試験片が用いられていた。調査した範囲では試作品から試験片を切り出して破壊試験を実施した例はなかった。
- iv. 試験片の個数(n数)

プロセスの適合性評価についての国際規格では「統計的に有意な数」をn数とする よう規定されており、例えば、ISO/ASTM NP 52908 ドラフト版(現時点では国際 規格としては使用できない): Additive manufacturing of metals — Finished Part properties — Post-processing, inspection and testing of parts produced by powder bed fusion:「PBFで製造された部品の各種特性の試験及び認定の方法・手順の定義」で は、以下のn数としている。

- ・引張試験:ビルドスペース内(注1)の方位ごとに n=5 以上
- ・曲げ試験:ビルドスペース内(注1)の方位ごとに n=5 以上
- ・S-N線図を作成するための試験:n=6~10、ただし経験上統計的信頼性確保のため

には n=30

・シャルピー衝撃試験:引張試験と同様に配置して n=5 以上

なお、同一パラメータ、同一原材料で繰り返し造形し、再現性を評価するような場合には、複数のバッチによる評価が求められる。その際、同じロットの粉体を使用 すると、製品量産時よりバラつきが少なくなってしまうので、原材料ロットも複数 使用する必要がある。

注1) PBF では、ビルドボリューム(ビルトスペース)の位置によって、造形 品の特性が変わる(それが許容限度を超えていれば調整する)。また、典 型的な不具合の一つにレイヤー不良(ある層が全てダメになってしまう) がある。そのため、試験片をビルドボリューム内に複数並べて造形する ような場合、例えば下図のように XY 全体、Z 方向全体をカバーするよう に配置することが必要となる。



一方、設計値を導出するための試験は、MSFC-STD-3716(NASA資料): ADDITIVE MANUFACTURING REQUIREMENTS FOR SPACEFLIGHT SYSTEMSで示されてお り、統計学的には、最低100の自由度(試験片とロット)が必要とされており、300 未満の自由度で示された設計値はマージンを取ることが求められている。これは、 非常に多くの試験が必要となり現実的ではないため、解析により設計し、実際に造 形されたものの材料特性を調査し、最も低い強度になったとしても設計値を下回ら ないことを証明する方が容易と考えられる。 3.3.2. 既存材料データの把握

公開情報から以下に着目し、SUS316Lの材料データを調査した。

- ・ 機械的特性データ
- 組織データ
- ・ 物性値データ

調査結果の概要を以下に示す(**Manage Manage**)。なお、**DED** は調査対象としたもののデータはなかったため、以下の内容はいずれも PBF に対するものである。

◇引張強さ



造形方向で異方性が見られ、、水平方向に造形された試験片より、垂直方向に造 形された試験片の方が、強度が低く、ばらつきが大きい。JIS の SUS316L の引張 強さ下限の 480MPa は垂直方向の As-Built 下限でも達成する。

◇伸び



造形方向で異方性が見られ、、水平方向に造形された試験片より、垂直方向に造 形された試験片の伸びが大きい。これは、層間剝離が連続して起こることによる ものと考えられている。応力除去でばらつき低減し、固溶化処理、焼きなましで 伸び増加の可能性がある。



(元データが上限下限を示しているものは、上限、下限値をプロットしている) (元データが HV であるものは HBR に換算した)

As-Built、応力除去では、JIS 上限を超えるデータが確認できる。造形方向による 異方性は明確ではない。データ数が少ないため、実態を表しているのか判断でき ないが、固溶化処理により硬さが抑えられる可能性が考えられる。また、As-built のデータのうち、極端に低いデータが確認されている。これは、当該公開文献で 評価した結果のばらつきの下限値を示していると思われる。公開文献データは n 数、造形向きに対してどちら側で計測しているか不明であることを考慮すると、 As-build での硬さは造形要領・測定位置によって大きくばらつく可能性が考えら れる。

◇絞り



⁽元データが上限下限を示しているものは、上限、下限値をプロットしている)

◇硬さ

絞りは熱処理により減少しているように見受けられる。一方、固溶化処理により伸びが大きくなれば、絞りも大きくなると予想されるが、本データは数が少ない(各熱処理で2~4データ)ため、実態を表していない可能性が考えられる。



◇シャルピー吸収エネルギー

(元データが上限下限を示しているものは、上限、下限値をプロットしている) (シャルピー衝撃値が記載されていたものは吸収エネルギーに換算した)

造形方向で異方性が見られ、、水平方向に造形された試験片より、垂直方向に造 形された試験片の方がシャルピー吸収エネルギーが大きい。すなわち、垂直方向 の方が靭性が高い。これは伸びが垂直方向で高い理由と同じく、層間剝離が連続 して起こることによるものと考えられている。固溶化処理で靭性回復の可能性が ある。

◇疲労強度

通常、疲労強度は引張強度に比例する。AMの引張強度は従来製法品と比較して 大きい傾向にあるが、AMの疲労破壊はvoidを起点とすることと、As-Built 状態 での表面粗さの影響を受け、必ずしも従来製法を上回らない。なお、疲労強度に 影響を与える項目としては、レイヤー厚、レーザー出力、走査速度、サポートの 有無(除去による表面性状改善)、造形方向(上面、or下面(下面の方が、表面 性状が粗くなり、疲労強度は弱くなる))などがある。

(組織)

溶け残りがなく、完全に固溶化していることの確認や、空隙率、オーステナイト組織ができていることを評価している。既存 AM 規格では、組織が従来材料と同等で

あることは求められておらず(明記されておらず)、機器の機能を満足することで、 その機器の品質を保証している。

なお、結晶粒度はパラメータによるばらつきを学術的な観点で評価していた(工学 的には、超音波透過性に着目したい)。

(物性値)

◇縦弾性係数



(造形方向:H(水平・XY方向)、V(垂直・Z方向))

(熱処理:As-built(造形まま)、SA(固溶化処理)、SR(応力除去)、

Annealed (その他焼きなまし))

As-Builtの状態では造形方向で異方性が見られ、、水平方向に造形された試験片より、垂直方向に造形された試験片の方が、縦弾性係数が小さく、ばらつきが大きい。このばらつきは応力除去で改善する可能性がある。なお、実際の製品では、経験上、SR をほぼすべての製品で実施している。

◇密度

PBF のデータのみ得られた。パラメータの最適化により As-built 状態で相対密度 99.9%が達成可能である。固溶化熱処理や HIP を実施することによる改善効果に ついては言及されていなかった。

◇その他物性値

熱伝導率、熱膨張係数、比熱、熱拡散率のデータは一部装置メーカーから開示されている。従来材料との比較を以下に示す。ただし、データ数が少ないため AM 材としての特性を表すものとしてよいかの判断はできない。

- ・熱伝導率:13.5W/m・K (3データの平均値)
 - ←伝熱工学便覧のSUS304(伝熱工学便覧ではSUS316Lのデータがないため) は16W/m・Kのため、従来材料と比べ、低めとなっている。

- ・熱膨張係数:15.7×10⁻⁶mm/mm/K(7データの平均値)
 - ←JSME 材料規格(2012 年度版)では 15.3×10⁻⁶mm/mm/K のため、従来材料 と比べ高めとなっている。
- ・比熱:468J/K・kg (2データの平均値)
 - ←伝熱工学便覧の SUS304 は 499J/K・kg のため、従来材と比べ、低めとなっている。
- ・熱拡散率:3.4×10⁻⁶m²/s
 - ← 伝熱工学便覧の SUS304 は 4.07×10⁻⁶m²/s のため、従来材と比べ、低めとなっている。

上記調査結果に基づき、AM 材の材料特性の傾向を以下にまとめる。

- ・引張強度、降伏強度、伸びには異方性がある。
- ・疲労強度は空隙、表面性状の影響を受ける。
- ・材料特性は造形位置、造形姿勢、造形場所、装置、造形パラメータ、後工程(熱処理、HIP等)に依存する。
- ・物性値については AM 材の傾向を捉えるに足るデータが見つからなかった。

3.3.3. まとめ

公開文献調査結果から、JSME 規格化に向けた考察を以下にまとめる。

【試験の目的】

AM は、PBF を例にすると、粉体の原材料に熱を照射し、素材を作ると同時に形状を作 る製法のため、機器の品質や機能特性を最適化するためのプロセス・パラメータは、試験 片の材料特性を最適化するためのものと異なると考えられる。そのため、多くの公開文献 で示されている材料試験は、材種ごとの材料特性を定める観点ではなく、造形プロセス適 合性を示す観点で実施していた。

すなわち、要求される特性を満足する試験片はプロセス・パラメータを最適化すること で造形できるが、その試験片を造形したプロセス・パラメータでは製品は造形できず、材 種ごとの特性値を規定したところで、評価通りの製品の品質を確保できるとは限らないと 考えられる。

上記に示す通り、プロセスによって都度変わる材種ごとの物性値を規定するのではな く、製品特性を保証する仕組み(品質保証システム)を要求することが、既存 AM 規格で は一般的である。

一方、従来のJSME 設計建設規格は、材料に対する要求事項、設計評価内容および許容 基準などを規定し、それらを満足することを示すことで製品の品質を確保する考え方とな っている。この考え方を踏襲するのであれば、設計評価の中で行う強度計算を実施するた めに、採用する材料の応力許容値と物性値を規定する必要がある。

ここで、製品となる材料に対して規定した応力許容値と物性値を使用して問題ないこと を示すため製品の特性と同等もしくは明確に下限(極限値)以下となるよう造形された試 験片を用いた評価を行うとともに、既存 AM 規格と同様に、AM で製造された機器の品質 の高さ、一貫性を要求するために、AM 機器の品質保証システムを規定することも必要で あると考えられる。

なお、AM で作られた試験片を用いた試験の結果報告のための標準手順は ASTM F2971: Standard Practice for Reporting Data for Test Specimens Prepared by Additive Manufacturing で示されているため、材料データ取得の参考とする。

【試験片の形状】

既存規格、特に ASTM E8/E8M に準拠する。

【試験項目】

従来のJSME設計建設規格の考え方に基づきAM材料の特性値を一定程度規定する場合は、ASTM F3184と同様、化学組成、引張強さ・降伏強さ・伸び・絞り(水平

方向、垂直方向、各熱処理別)等の最小限に限定(As-Built状態では化学組成のみの 規定)し、製品保証は品質保証システムで規定することが考えられる。但し、上記 に加え、公開文献調査の結果、通常JSMEで規定されている物性値のうち、データが ない、もしくは少ない、高温強度、温度依存による機械的特性等は規格値を作成す る、もしくは受渡当事者間で合意とするか決める必要がある。

疲労強度については、As-builtの表面状態や造形姿勢によって影響を受ける。製品 がAs-builtで使用するものなのか、表面は機械加工して使用するものなのか、各製品 で疲労強度が異なってくる。従って、疲労強度を規格化するためには、一般的に最 も弱くなるとされる状態(造形不良が無いことが前提)を包絡できるような疲労曲 線を設定する必要がある。

なお、規格化できない材料物性値については、受渡当事者間で合意し、品質保証 システムを維持することが望ましい。品質保証システムの中には、設計ベリフィケ ーション、製造プロセスバリデーション、品質管理などがある。それらの中で、各 工程のアウトプットが要求品質を満足させられることを科学的・統計的に証明する 必要があり、その下限値としてASTM F3184や既存規格で材料特性値を規定するこ とが考えられる。なお、品質保証システムは製法に寄らずISO52920: Additive manufacturing - Qualification principles - Requirements for industrial additive manufacturing sitesで一般化されている。

【その他】

製品検査としては、プロトタイプでの機能証明、非破壊検査での造形品質証明 (継手効率のような考え方の既存AM規格はない)、機器の最弱部から試験片を採取 し造形要領証明を実施することが考えられる。機器最弱部から試験片を採取するた めには、試験片を採取する箇所が妥当であるか証明する必要がある。そのために、 機器の形状、作用荷重に加え、ビルトチャンバー内でのばらつき、ハッチ戦略(注 1)等の装置・造形対象物固有のプロセス・パラメータを考慮する必要がある。

注1) ある層内を造形する際に、レーザー(電子ビーム)は、スキン(輪郭)と コア(塗りつぶし)を照射する。コアは、通常ハッチングで塗りつぶされ る。ハッチングの角度やスペース、コアをどのように分割してどの順番で ハッチングしていくかなどが総称してハッチ戦略と呼ばれる。

3.4 規格化に必要な要件抽出

3.2 項で調査した国内外の規格動向の調査結果に基づき、原子力分野での AM 材の規格 を制定する際の基準として、ASME PTB-13-2021^[3,4,1]を参照することとする。

ここに記載される材料/設計/製造/試験/検査及び品質管理に関する要件を整理するととも に、規格案策定に向けた解釈についてまとめる。

ここでは、

(1) 材料に関する要件と解釈

ASME PTB-13-2021 での「材料」に関する要件は、造形物、熱処理、原料粉末に対す る要求に分けて述べられている。ここで、造形物は基本的に ASME 材料規格に適合し たものから選択するものとし、化学成分、粒径、硬さ、機械的性質の要求は既存の材 料規格と同一としている。このうち ASME 材料規格については、国内向け規格案で は"ASME 材料規格"は"JSME 材料規格"に読み替えればよいが、いずれにしても既存 の材料仕様をそのまま使用することの妥当性の確認が必要となる。すなわち、機械的 性質だけではなく熱処理等の要求が既存の材料仕様と同一でよいか、確認が必要であ る。また、本要件の前提として、「複数の AM 製造者のデータをレビューし、AM 製造 者が厳格な認証試験を通じて AM プロセスを管理すれば AM 機器の性質は仕様を満た すこと」について、JSME 委員会としての確認が必要と考えられる。この点において、 どのようなデータが必要となるかは JSME 委員会の意見の確認を含めて検討を進め、 材料データ取得計画に反映することとする。

熱処理については既存材料仕様に沿って実施する。今回、検討対象とした SUS316L 材では既存材の規格では製法(鍛造材、圧延材、鋳造材等)に関わらず最終熱処理と して固溶化熱処理が要求されていることから、AM 材に対しても固溶化熱処理を施す こととする。一方、製造プロセスの中間段階での熱処理にとして挙げられる応力除去 熱処理、HIP 処理(熱間等方圧加圧法)等について、基準として取り込むことの要否 については議論が必要である。ASME PTB-13-2021 では PBF 法による造形では、HIP 処理により緻密化され欠陥が減少し材料特性が改善しうるが、必ずしも仕様を満足さ せるため要するものではないため、基準上は要求しないとしている。HIP 処理の実施 を基準上の要件することの要否については材料試験により判断すべく、HIP 処理有無 の材料データ取得を計画する。なお、ワイヤーDED 法による造形については HIP 処 理による特性改善に関する報告は見当たらず、現段階では基準上の要件とはしない計 画だが、今後の追加情報によっては PBF 法と同様の検討を行うこととする。

PBF 法における原料粉末に対する要件として、ASME PTB-13-2021 では元素粉末 (粉末の組成が単一元素からなること)の使用を認めていない。これは、元素粉末を 混合した場合に組成が不均一になるリスクを排除するためとしており、JSME 規格検 討においてもこの要件を基準上の要求として取り込むこととする。ただし、主成分以 外の添加元素については材料特性のコントロールの観点では使用を許可するのが合理 的と考えられることから、将来の技術進展、知見拡充により、化学成分の均一性担保 方法の規定が可能となった場合は適宜規格を見直していくことを考える。

(2) 設計に関する要件と解釈

ASME PTB-13-2021 では AM 造形品の設計は基本的に ASME の設計基準に従うこ ととしており、これは"JSME 設計建設規格[1.4-2]"に読み替えればよい。これに加え て ASME PTB-13-2021 には以下の要件が挙げられている。

- ① AM 造形中に造形される材料のうち、余造形部(cosmetic material)として指定される部分は応力解析において荷重保持部材として使用してはならない。
- ② 繰り返し荷重が作用する表面は、液体浸透探傷検査のためにアクセス可能な設計としければならない。
- ③ 造形時にのみ必要なサポートと接触する機器表面はサポートの除去及び液体浸 透探傷検査のために全面にアクセス可能としなければならない。
- ④ AM 造形後に除去しないサポートの影響は応力解析に含めなければならない。
- ⑤ 応力解析において荷重保持材として使用されるサポートは本文書で特定された 全ての基準を満たさなければならない。
- ⑥ 全ての AM 機器にはデザインレポートが要求される。

要件①に記載のある余造形部(cosmetic material)については、AM 造形品特有のもの であり、JSME 規格において、考え方の統一と明確な定義が必要である。また、液体浸 透探傷検査の実施に関する要件(②、③)については、ASME PTB-13-2021に記載の ない他の非破壊検査に関する要求と合わせて、どのように基準として取り込むか検討 が必要である。ここで、液体浸透探傷検査を要件としている背景には、AM 材の疲労 強度が既存材料と比べて低い傾向との知見がある。ただし、AM 材の疲労強度につい て公開されているデータは限られていることから、材料データ取得計画に疲労試験を 加え、その結果を基準上の要求事項の検討に反映することとする。要件⑥のデザイン レポートに相当するものとして、国内では工事認可対象部材に対して強度に関する説 明書、耐震性に関する説明書の提出が法令で定められているが、基準上は要件となっ ていない。このため、AM 機器に対しても基準上はデザインレポート作成を要件とし ないこととする。

(3) 製造に関する要件と解釈

AM 製造要領は溶接施工における溶接施工要領書(WPS)に近い概念と考えられ、す なわち材料認定用試験片による試験結果等の裏付け(溶接施工における溶接施工方法 確認試験記録(PQR)に近い概念)を経て、その要領が認定されるものであり、造形物 の品質保証の観点からも、JSME 規格案策定の際に考慮すべき事項と考えられる。た だし、ASME PTB-13-2021 で選定された造形プロセス変数に過不足が無いかの確認は 必要である。また、要領内に規定される造形プロセス変数を変更する場合、造形物に 及ぼす影響度を事前に確認する必要があり、その度合いは変更する変数によって異な ることから、要領の再認定に必要となるレベルも異なる。この判断基準の考え方につ いても議論が必要である。なお、ASME PTB-13-2021 に記載の要件を全て満たすこと を製造要領認定の条件とする場合、認定の度に膨大な作業(例えば以下①~④)が必 要となることが想定される。これら要件すべてを JSME 規格案へ踏襲するかは今後の 検討課題とする。

- ① 認定造形には、最低3バッチの粉末を使用し、最低3回の造形を行う。
- ② 材料造形限界位置は、エネルギー源毎に設定する。
- ③ 材料認定用試験片は少なくとも 4.3 項で後述する PQ1~PQ8 から採取する。なお、 PQ1~PQ8 は「業界の経験」により定義されたものである。
- ④ 材料認定試験として、垂直方向引張、水平方向引張、垂直方向靭性、硬さ、ミクロ組織、化学成分を実施する。
- (4) 試験に関する要件と解釈

AM 材の材料特性は基本的に要領認定試験にて確認されるが、それに加えて行うプ ロトタイプ試験による総合的な検証は、V プロセスの考え方からも妥当と考えられ、 JSME 規格案策定の際に考慮すべき事項と考える。すなわち要領認定試験で認定され た製造プロセスにより実機品のプロトタイプを製造し、破壊試験等による検証を行う ことを要件とする。ASME PTB-13-2021 には認定試験の具体的な手法として、切り出 し試験片による材料特性試験のほか静水圧試験、繰返荷重に対する漏洩試験について 具体的な要領の記載があるが、これらの試験は耐圧部材を対象にしたものである。 JSME 規格案は炉心支持構造物等の非耐圧部材も適用範囲として考えていることから 要件については独自に定義する必要があり、今後の検討課題とする。

製品造形サイクルにおける試験(製品試験)は最終的な製品品質を保証するもので あり、JSME 規格案策定の際に考慮すべき事項と考える。ASME PTB-13-2021 では、 製品造形と同時に、要領認定試験で定められた少なくとも2箇所の材料造形限界の位 置で造形空間の全高にわたって垂直方向の確認用試験片を造形することとしている。 この試験片採取位置についての要件は JSME 規格案にも取り込む予定である。一方、 ASME PTB-13-2021 には、製品試験における非破壊検査(NDE) についての言及がな いが、規格案では現行の設計建設規格[1.4-2]における非破壊試験要求(PVB-2400) に 倣い AM 機器に適用する検査方法、時期、判定基準を定義することが考えられる。ま た、炉心支持構造物の溶接部継手効率(CSS-3150)と同様に検査程度に応じた効率係 数の定義も検討する。なお、ASME PTB-13-2021 には、繰り返し部品製造の際の製品 品質担保の考え方が記されているが、量産化の場合の確認試験の頻度については、対
象とする適用製品によって異なるため、従来品に対する要求内容を参考にして、事業 者やメーカで検討するべき内容であり、基準上の要件とはしない。

(5) 検査に関する要件と解釈

製品検査についての要件は前項に記した。ここでは AM 材の製造時モニタリングに 関する要件について述べる。

ASME PTB-13-2021 では、AM 装置の運転を制御する製造時モニタリング方法の使 用は不可としている。すなわち、モニタリングの結果を造形装置の制御にフィードバ ックしてはならないと解釈される。造形したものが、認証されたプロセスと品質的に 同一であることを示すのは困難となるようなフィードバック制御は許容できないが、 各造形パラメータに対して範囲をもって認定された造形要領の認定範囲内での条件調 整は、それが製造時モニタリングからのフィードバックであっても、制御が要領認定 の範囲内であることを示す記録をとることを要件として許容するのが合理的と考えら れ、規格案策定における検討課題とする。一方、製造中のリアルタイム欠陥モニタリ ングについては、AM 機器は複雑形状の場合、造形後の非破壊検査は難しいことから、 AM 造形物の品質保証の観点で有効な手段となると考えられるものの、ASME 委員会 では、その技術が検証されるまでは厳密なプロセス管理が最も実用的な方法としてお り、将来的な技術と考え、現時点での規格案への取込みは行わない。

(6) 品質管理に関する要件と解釈

ASME PTB-13-2021 では、ASME 建設規格に従うことを品質管理の要件としてい るが、国内では設計建設規格に品質プログラムに関する要件がない。よって、JSME 規 格では要件とせず、個別案件にて事業者と AM 製造者が協議して定めることとする旨 規格に盛り込むことが考えられる。

参考文献

- [3.4-1] ASME PTB-13-2021, Criteria for Pressure Retaining Metallic Components Using Additive Manufacturing
- [3.4-2] JSME, JSME S NC1-2019, "発電用原子力設備規格 設計・建設規格", (2019)

3.5 材料データベース策定方針

前項で記した通り、原子力分野において AM 材による機器を適用するための規格を制定 する際の基準として、ASME PTB-13-2021 を参照することにした。ASME PTB-13-2021 での健全性担保の仕組みは、図 3.5-1 に示す通りプロセス検証、モックアップ検証、製品 試験での検証の 3 段階である。

このうち、プロセス検証は AM 材造形に使用する装置および造形要領を認定するための ものであり、具体的な方法が ASME PTB-13-2021 に記されているが、その方法が妥当で あることの確認は必要である。一方、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 3.2.3 項で述べた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。また、健全性担保の仕組みの妥当性を確認するため、 モックアップ検証の妥当性確認が必要である。これらを整理すると、本事業で実施すべき 事項をまとめると以下のとおりとなる(詳細は表 3.5-1 参照のこと)。

・STEP1:プロセス検証方法の妥当性確認

ASME PTB-13-2021 に記されたプロセス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。

・STEP2:規格化に向けた材料データ取得 機械的特性、物性値等の材料データ取得を行い、AM 特有の物性値・機械的特性

・STEP3:モックアップ検証方法の妥当性確認

等の設定要否を調査する。

モックアップによる検証方法の妥当性確認として、造形物が設計要求を満足で きることをプロトタイプにより検証する。

なお、検証の最終段階である製品試験方法の妥当性確認については、製品の品質保証を 目的として当事者間で必要に応じて実施すべきものであり、本事業の対象外でである。



項目 文献	文献	調査	課題・町部部定の考え上18書1並返当かの確認が以更	本事業での確認	将来の確認
プロセス 検 証 方 徳 証 方 きにプロセス検証方法につ きい、 (要求され、 や 要求され、 を の 妥 いて記載あり。 規定した造形 っ の よ の で プロセス にて 村 料 特性が得ら が不可 な の な い で 二 で つ の 、 、 の 、 、 、 の 、 、 、 の 、 、 、 、 、 、 、 の 、 、 、 、 、 の 、 、 、 の 、 、 、 の 、 、 、 の 、 、 、 の 、 、 、 の 、 、 、 の 、 、 、 の 、 、 、 の 、 、 、 の 、 、 、 の 、 、 の 、 、 の 、 、 の 、 、 の 、 の 、 、 の 、 、 の 、 、 の 、 、 の 、 の 、 、 の の 、 、 の の 、 、 の の 、 、 の の 、 、 の の 、 、 の の 、 、 の の 、 、 つ の 、 、 の の 、 、 一 の の 、 、 、 の 、 、 の 、 、 の 、 、 の 、 、 の 、 、 の 、 、 の 、 、 の 、 の 、 、 の 、 の 、 、 の 、 の 、 、 の 、 の 、 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の の 、 の 、 の 、 の 、 の の 、 の の 、 の 、 の 、 の 、 の の 、 の 、 の の の 、 の の 、 の 、 の の 、 の の の 、 の 、 の の の の の の 、 の の の 、 の の の 、 の の の 、 の の の 、 の の の の の の の の の の の の の	 ・要項認及 ASME PTB-13-2021の7章、8 (要求され、 章にプロセス検証方法につ ~8)、造形 いて記載あり。規定した造形 ・プロセス3 プロセスはて材料特性が得ら が不明なパ れることを検証する。 Fullで要領 	 ・ 埃 頃 認 込 ・ 火 切 と お い ・ プ ロ と ス 3 ・ プ ロ と ス 3 ・ ガ コ セ ス 3 か 不 田 な パ i 置 や 変 更 っ Fullで 要 領 	この考え力(8年)か安当かい雑誌かか安 ているバッチ数、試験片の造形位置(PQI (方向、材料試験内容など) 医数の変更に伴う要領の再認定の度合い とめ確認が必要(例えば、装置の設置位 まるなどの軽微な変更があった場合に、 認定を行うか等)	・ASME PTB-13において、プロセス検 証の際に要求されているバッチ数、試 験片の造形位置(PQ1~PQ8)、造形方 向、材料試験内容などが妥当である か、各社試験片ベースで造形を行い、 材料評価を行う。	・プロセス変数の変更 に伴う要領の再認定の 要件(7章に該当)に関 する検討
公開文献調査結果 ・データ数が少ない材料特性 ・データ数が少ない材料特性 に向けた まとめた文献が無い) ・HIPなどの ・高温特性データが無い ・HIPなどの ・材料特性に及ぼす後処理 が必要	 公開文献調査結果 ・デーク数が少ない材料特性 ・デーク数が少ない材料特性 ボ多い。(体系的にデークを確認が必要まとめた文献が無い) ・自温特性デークが無い ・引料特性に及ぼす後処理 が必要の影響が不明 	•AM造形 て、同等、 確認が必要 確認が必要 ・HIPなどの 化する際に が必要	れは他の鍛造材、圧延材の規格と比較し またはそれ以上の材料特性を有するかの 5。 の中間熱処理の影響の確認、および規格 5. 中間熱処理を要件に入れ込むかの検討	•STEP1で妥当性を確認したプロセス検 証方法を基に、材料品質の確保された 領域内で試験片を採取し、規格化に 必要となる材料データ(高温特性、疲 労特性、後処理の影響など)を取得す る。取得したデータと圧延材や鍛造材 の既存規格を比較する。	•SUS316L以外の材料 の規格化
 モックア ASME PTB-13-2021の6章、9 プロトタイン プ検証 ウンプ検証 ウンプ検証 ウンで記載あり。造形物が設 位置(CQ1- 致当体 ロトタイプ試験により検証す 検討が必要 確認が必要 	ASME PTB-13-2021の6章、9 ・プロトタイプ 章にモックアップ検証方法に 確認が必要 ついて記載あり。造形物が設 位置(CQ1- 計要求を満足できることをプ ・耐圧機器 にの のう	・プロトタイプ 確認が必要 位置(CQ1。 ・耐圧機器 検討が必要	プの認定試験の考え方(9章)が妥当かの 5。(要求されている試験片の造形・採取 -3)、材料試験内容など) 以外を対象とした場合の認定試験方法の	 ・モックアップ試験は本来実機導入前に当事者間で必要に応じて実施すべきものであるが、最低限の要求事項を規定するかでからいては要検討。 ・本国プロでは、実際に造形した部品が既存規格を満足しているかを確認するため、単純形状物(ブロック体や配管など)を対象とした破壊試験を実施する。 	•耐圧機器以外を対象 とした場合の認定試験 方法の検討
 製品試 ASME PTB-13-2021の10章 製品試 に製品の検証方法について 妥当かの確 験方法 記載あり。製品造形サイクル の造形位置の 妥当 にて実製品の品質が維持さ ・生産数の/ 性確認 れることを製品試験により検 PTB-13-202 	 ASME PTB-13-2021の10章 ASME PTB-13-2021の10章 シ製品造形 に製品の検証方法について 妥当かの確 記載あり。製品造形サイクル 必当形の確 にて実製品の品質が維持さ ・生産数の 加ることを製品試験により検 PTB-13-202 	 製品造形サ 製品造形サ 愛当かの確 の造形位置 生産数の 生産数の PTB-13-202 	トイクルにおける試験の考え方(10章)が 認が必要(繰返し造形数、確認試験片 、造形数、材料試験内容など) 少ない機器への適用を考慮した際に 10考え方が馴染むか検討が必要	対象外	 製品試験は本来実機 導入前に当事者間で 必要に応じて実施す べきものであり、規格 化の対象外である。

表3.5-1 各ステップの課題と本事業での実施内容

4. 材料データベース取得計画の策定

4.1 AM 技術の選定

部品製造に AM を適用する場合、部品形状と大きさ、材料に応じて適切な造形方法を選定する必要がある。1章に記したように PBF 方式は形状自由度が高いものの、造形可能な寸法は 400 mm角の範囲に限られる。一方で DED 方式は装置のポジショナーによっては 1 m角程度の範囲を造形可能であるが、造形自由度には制限が生じる。BJ 方式は造形自由度が高く、表面粗度も良好であるが焼結時の変形を抑制することが難しいため 100 mm程度の大きさに限定される。一方材料については Ti-6Al-4V 合金、SUS316L、Inconel718 等はどの造形方法でも可能であるが、ステンレス鋼以外の材料は PBF での適用は困難であり、DED もしくは BJ 方式となる。

部品や機器の製造に対して AM を適用する場合、従来と大きく製造方法が異なるため健 全な部品製造のためのノウハウ等の蓄積は十分ではない。国内で AM 普及の遅れもあり、 特に品質保証体系の整備は欧米諸国に比べて 5~10 年程度遅れている。そのため先行して いる欧米の指針を参考にするのが望ましいと考えられる。特に原子力機器に対する AM 適 用の指針の整備については米国が先行しており、ASME が中心となって指針を整備しつつ あり、2021 年現在 PBF 方式については Criteria Document (ASME PTB-13-2021)が発行され た。さらに DED 方式についてはドラフト版が議論中である。そのためこれらの指針を参 考に国内の原子力機器へ AM を適用するための検討としては、2022 年度のデータベース整 備については既に Criteria Document が整備されている PBF 方式から検討するのが望ましい と考えられる。また 2023 年度については、2022 年度の PBF 方式での得た知見や ASME に おける DED 方式の Criteria Document 整備を見越して、DED 方式の検討が望ましいと考え られる。

そこで本プロジェクトに参加する企業で造形を予定する装置の一覧を図 4.1-1 および図 4.1-2 に示す。図 4.1-1 に示す PBF 方式はいずれも代表的な SLM 方式装置メーカーを用い ており、造形品質が比較的安定した中型の造形装置である、300 mm以下の部品に対して適 用が可能である。装置メーカーの重複が一部であることから、同じ粉末を用いて試験片を 造形し得られた機械特性を比較することで、装置メーカーの差異を含めてデータベースの 整備が可能であると考えられる。

DED については図 4.1-2 に示すようにレーザー溶接用の装置とポジショナーを組み合わ せた装置を予定している。ワイヤーを用いた DED 方式はレーザー溶接用の装置を転用す る場合が多く、市販のレーザー発振器とヘッド、さらにはポジショナーを独自に組み合わ せて開発した装置である。またこれらの装置は、ワイヤーに加えて金属粉末も使用するこ とが可能である。レーザーヘッド側に3軸のポジショナーが用いられるため、ワークを保 持するポジショナー側に回転機構がない場合は、オーバーハング部の造形は造形角度に制 約が生じると考えられる。

担	当会社	三菱重工業	東芝	日立製作所	IHI
	メーカー	SLM Solution	Concept Laser	EOS	EOS
	型番	SLM280	M2	M290	M290
造形装置	外観				
	造形サイズ	$280\times280\times350\text{mm}$	$250\times250\times325\text{mm}$	$250\times250\times325\text{mm}$	$250\times250\times325\text{mm}$
	レーザー出力	400W×2	400W×2	400W	400W
	造形速度	-	-	—	-
	造形材料	ステンレス鋼 Ni基合金 チタン合金	ステンレス鋼 Ni基合金 など	ステンレス鋼、鉄系 アルミ合金 Ni基合金 チタン合金	ステンレス鋼、鉄系 アルミ合金 Ni基合金 チタン合金

図 4.1-1 本プロジェクトで造形に用いる予定の PBF 装置

担	当会社	三菱重工業
	メーカー	自社開発
	型番	_
	外観	
装置	造形サイズ 各軸ストローク	X:3000mm Y:2300mm Z:1000mm
	レーザー出力	\sim 10kW
	造形速度	\sim 20m/min
	造形材料	ステンレス鋼 Ni基合金 マルエージング鋼 チタン合金 (ワイヤー、粉末とも可)

図 4.1-2 本プロジェクトで造形に用いる予定の DED 装置

4.2 対象材料

原子力機器に用いられている主な材料としては以下のものが挙げられる。

- ・炭素鋼
- SUS304L/SUS316L
- Inconel625
- Inconel718

このうち AM 用の金属粉末としては炭素鋼を除けば、市販化されている。いずれの材料 も比較的溶接性の良い材料のため、SLM や DED で造形は可能である。炭素鋼は溶接用の ワイヤーとしては広く流通しており、これを用いてワイヤーを材料とした DED で造形が 可能である。AM は溶接以上に繰返し入熱を受けることから、炭素鋼の造形は割れが発生 しやすく SLM での適用が難しいとされている。

本プロジェクトにおいて取り扱う材料は AM の技術的制約および経済性を勘案し、1次 冷却系主要機器の内部品(含、炉内構造物、燃料集合体構成部品)への適用検討を優先的 に進めることとする。1次冷却系の接液部に用いられる部品の材質の多くには、SUS304, SUS316, SUS304L, SUS316L 等のオーステナイト系ステンレス鋼が用いられている。さらに AM は溶接に近い製法であることから、上記の中で原子力製品向け溶接材料として最も多 くの実績を有する SUS316L を最優先材料として選定した。なお、SUS316L の許容応力は SUS304/316 と比較して若干劣るが、想定している適用先(内部品)は十分な強度余裕が確 保されている例が多く、従来 SUS304/316 材を採用してきた製品に対して SUS316L を適用 しても強度上の問題は生じないと考えられる。

そこで PBF 方式で用いるための SUS316L 粉末を対象に、入手可能な金属粉末について 調査を行った。なお調査範囲は品質面を考慮し、代表的な粉末メーカーであること、さら には国内で入手可能なことを条件として調査した。調査結果一覧を表 4.2-1 に示す。2022 年度以降に造形を実施する会社ごとに使用実績の有無や適用可否に応じて粉末を選定する こととなる。

メーカー	代理店	製品名	単価(円/kg)	粒径分布(µm)	適用確認済み 装置
3D-System	キャノン販売	LaserForm 316L			
Erikon	エリコンジャパン	1093739 MetcoAdd 316L-A			EOS、SLM、 TruPrint
EOS	NTT XAM	Stainres Steel 316L			
GE Additive (AP&C)	森村商事	SUS316L			ConceptLaserSLM のみ
CPP	愛知産業	CT Powder Range316L			市販されている SLM装置
Aubert&Duval	ERAMET	販売休止中			
	ヘガネス	AM316L-6-00			大気溶解*1
<u>ヘカネス</u>	ジャパン	AMPER PR NT 0717.074			真空溶解*1
サンドビック	豊通マテリアル	SUS316L			
山陽特殊鋼		PSS316L			
大同特殊鋼		DAP316L			

表 4.2-1 入手可能な SUS316L 粉末

*1 一般的な SLM での使用実績あり

4.3 造形条件

AM で造形した Type316L の材料データベース策定に向け、ASME PTB-13-2021「Criteria for Pressure Retaining Metallic Components Using Additive Manufacturing」を参考に以下の3つの Step に沿った検討を行う。

Step1:プロセス検証方法の妥当性確認

Step2:規格化に向けた材料データ取得

Step3:モックアップ検証方法の妥当性確認

Step1 では材料品質が確保された領域を認定する造形プロセスの検証を行い、Step2 では Step1 で検証した造形領域内において、試験片の造形および規格化に向けた材料データの取 得を行う。Step3 ではブロック体や配管などの単純形状のプロトタイプを試作し、破壊試験 および非破壊試験に供することで、プロトタイプにおいても材料特性が既存規格を満足し ていることを示すためのデータを取得する。なお、DED に関しては、PBF と異なり造形領 域を規定する必要が無いため、Step1 は実施せず、Step2 から実施する。

本項では、Step1 における試験片の造形位置、造形方向、造形形状、および造形数を検討し、造形方案を策定する。なお、Step2、Step3 の具体的な造形条件については、2022 年度に 実施予定の Step1 の材料試験結果を踏まえ、2022 年度以降に検討する。 (1) プロセス検証方法の妥当性確認に向けた造形条件(Step1)

a. ASME PTB-13-2021 におけるプロセス検証方法

ASME PTB-13-2021 では、製品を造形する前に、その造形領域において所定の材料特 性が得られることを確認するためのプロセス検証(要領認定: Procedure Qualification) を行うことを規定している。材料特性は、造形領域内に材料認定試験片(Material Qualification Specimens)を造形し、材料試験に供することで取得する。表 4.3-1 にプロ セス検証を行う際に材料認定試験片を造形しなければならない領域を、表 4.3-2 に造形 した材料認定試験片に対し実施しなければならない材料試験を示す。また、図 4.3-1 に 表 4.3-1 で示す領域を模式的に表したものを示す。

ASME PTB-13-2021 の解説では、表 4.3-1 の造形位置(PQl~PQ8)は AM 業界の経験 に基づき定義したとの記載があるのみで、具体的なデータや考え方は示されていない。

位置	記載事項	最小サンプル数
PQ1	リコートパス*1の開始領域	1個
PQ2	リコートパスの終了領域	1個
PQ3*2	PBF-EB*32において、各エネルギー源からの光線	エネルギー源に対して2個
	距離が最大となる位置	
PQ4	PBF-LB*4のシールドガス吸入方向において、各エ	エネルギー源に対して1個
	ネルギー源からの光線距離が最大となる位置	
PQ5	PBF-LB のシールドガス排出方向において、各エ	エネルギー源に対して1個
	ネルギー源からの光線距離が最大となる位置	
PQ6	1 つの認定サンプル(qualification sample)を複数の	複数エネルギー源が重なる領域に
	エネルギー源を使用して造形する場合の、各エネ	対して1個
	ルギー源からの光線距離が最大となる位置	
PQ7	各エネルギー源からの光線距離が最小となる位置	エネルギー源に対して1個
PQ8	AM 製造者が定義する中間位置	エネルギー源に対して4個

表 4.3-1 要領認定のための材料認定試験片の造形位置(ASME PTB-13-2021 表 8-1 参照)

*1 PBF 方式の造形過程において粉末を平坦に均すプロセス

*2 本検討はレーザー式の PBF を対象としているため、電子ビームは対象外。

*3 PBF-EB : Powder Bed Fusion - Electron Beam

*4 PBF-LB : Powder Bed Fusion - Laser Beam

位置	垂直方向 引張	水平方向 引張	垂直方向 靭性	硬さ	ミクロ組織	化学成分
PQ1~PQ7	0	_	0	(*	_ **	<u></u>
PQ8	_	0	_	0*	_	0***

表 4.3-2 各造形位置の材料認定試験片に要求される材料試験

*引張強度の最大値が得られた造形範囲にある造形物から採取した試験片で実施する。 **造形容積内の底面近傍と上面近傍

***AM 製造者が決めた位置で、1 つの試験片に対して化学成分分析を実施する。



造形ステージ

★:エネルギー源

図 4.3-1 要領認定のための材料認定試験片の造形領域(ASME PTB-13-2021 表 8-1 参照)

b. Step1 の造形方案

前出の表 4.3-1 では、リコータの移動方向、シールドガスの流れ方向、およびレーザ ーの光線距離に着目した造形領域を設定している。これらに着目した理由としては、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 ること、シールドガスの流れ方向については、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こと、レーザー光線距離については、光源からの距離によ ってレーザー形状に差が生じること(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)などが考えられるが、いずれも ASME PTB-13-2021 内に明確な理由の記載 はない。そこで、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 ト上に網羅的に試験片を造形し、材料試験に供することで、材料特性の分布を把握し、 リコータの移動方向、シールドガスの流れ方向、およびレーザーの光線距離に着目した 造形領域の考え方の妥当性を確認する。

また、前出の表 4.3-2 では、造形した試験片に対する材料試験内容および試験方位が 限定的であり、これら試験によって得られた材料特性が、造形領域の材料品質を代表す るものになるかが不明である。そこで、試験片は複数方位で造形し、また、ベースプレ ート上に網羅的に造形した試験片に対し、網羅的に材料試験を実施することで、表 4.3-2 で要求される材料試験の妥当性を確認する。なお、本事業で対象とする材料は延性材 料である Type316L であることから、靭性試験は対象外とする。

表 4.3-3 に 1 バッチ分の試験マトリックスを、図 4.3-2 に 1 バッチ分の Step1 の造形 方案(代表例)を、図 4.3-3 に Step1 の造形方案のうち造形②の各高さの断面図(代表 例)を示す。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 4.3-2 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可能な限り全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)、および斜角(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)、斜角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、水平および斜角方向の試験片は、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(約20mm×20mm×80mm)から加工 して採取する。試験片形状はJIS Z2241:2011「金属材料引張試験方法」に基づ くものとする。
- 硬さ測定、ミクロ組織観察、および化学成分分析用試験片は、造形②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する。

- ▶ 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 10°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(RT: Radiographic Testing)を、試験片加工後の全試験片に対 して浸透探傷検査方法(PT: Penetrant Testing)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 CT (Computed Tomography) による欠陥評価を実施する。
- ▶ Step1の造形は三菱重工、東芝エネルギーシステムズ、日立 GE ニュークリア・エ ナジー、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。合計4バッチ分の試験片を材料試験 に供することで、バッチ間のばらつきの有無を評価する。
- 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(詳細は 4.4 項参照)。

図 4.3-2 および図 4.3-3 には ASME PTB-13-2021 の要領認定における造形位置である PQ1~8(前出の表 4.3-2 および図 4.3-1 参照)を記載しているが、いずれの造形位置も 網羅した造形方案となっている。2022 年度は上記造形の考え方を基に試験片を造形し、 材料試験に供することで、ASME PTB-13-2021 におけるプロセス検証方法が妥当である かを確認するとともに、Step2 で実施する規格化に向けたデータ取得に向け、材料品質 が確保される造形領域を決定する。

	1 .			, . ,	
計殿百日	試験片		試験片個数		△卦
武家項日	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
硬さ測定		5	5	5	15
ミクロ組織観	察	5	5	5	15
化学成分分标	F	5	5	5	15

表 4.3-3 Step1 の試験マトリクス(1 バッチ分)



図 4.3-2 1 バッチ分の Step1 の造形方案(代表例)

注)いずれの造形物もリコータ面に対し10°程度傾けて配置する。 図中のPQ1~8はASME PTB-13の要領認定における造形位置に該当



注)いずれの造形物もリコータ面に対し10°程度傾けて配置する。 図中のPQ1~8はASME PTB-13の要領認定における造形位置に該当

図 4.3-3 Step1 の造形方案のうち造形②の各高さの断面図(代表例)

- (2) 規格化に向けた材料データ取得に関する造形条件(Step2)
 - a. PBF 方式

Stepl で取得した材料特性データを基に、材料品質の確保された造形領域内で試験片 を造形する。造形位置および造形方位などは、Stepl の材料特性評価結果を受け、デー タのばらつきや異方性を考慮した造形方案を 2022 年度に検討する。バッチ数は Stepl と同様に、三菱重工、東芝エネルギーシステムズ、日立 GE ニュークリア・エナジー、 IHI の4社でそれぞれ1バッチずつ造形し、合計4バッチとする。試験項目等について は4.5項以降に記載する。

b. DED 方式

異方性などを考慮した造形方案を2022年度に検討する。バッチ数は三菱重工にて造 形する1バッチとする。試験項目等については4.5項以降に記載する。 4.4 後処理方法

後処理の適用は、材料の特性改善だけでなく、品質の安定化にも繋がることから、AM 材 を規格化する上で後処理方法をどのような要件として規定するかは重要な検討項目である。 本項では後処理条件として固溶化熱処理と熱間等方圧加圧法(HIP: Hot Isostatic Pressing) に着目し、ASME PTB-13-2021に記載の後処理方法や国内の JIS 規格等の熱処理条件を参考 に、プロセス検証方法の妥当性確認を行う Step1 と、規格化に向けた材料データ取得を行う Step2 の後処理条件について検討を行う。

(1) ASME PTB-13-2021 における後処理方法

ASME PTB-13-2021 では、AM 材の最終熱処理は ASME 材料規格に規定された条件での実施を要求している。表 4.4-1 にステンレス鋼(SUS316L)に関する主な ASME 材料規格の熱処理条件と、AM 材に関連する規格として ASTM F3301-18a に記載の固溶化熱処理条件をまとめる。いずれの条件も 1040℃以上の急冷条件を要求している。そのため、AM 材が板材などの従来材と同等の材料特性を得るためには、最終熱処理として固溶化熱処理の実施が必要であるものと考えられる。

次に、表 4.4-2 に ASME および ASTM 規格における HIP 条件をまとめる。ASME PTB-13-2021 では中間熱処理については ASTM F3301 を、HIP については ASTM A988、ASTM A1080 をガイダンスとして使用することを許可しているが、要求事項として規定してい ない。各規格を比較すると、いずれの規格も圧力を 100MPa 以上とし、冷却の温度につい ては若干の差はあるものの、不活性雰囲気下で約 425℃以下までとなっており、概ね一致 している。一方で、温度に関しては ASTM-F3301-18a の温度範囲が狭く、時間も範囲が規 定されている。

ASME PTB-13-2021の解説では、HIP により欠陥が減少し材料特性が改善することを記載しているが、材料、ミクロ組織、欠陥の形状などによっては、HIP が必ずしも材料特性を改善するとは限らないとも記載している。そのため、HIP を国内規格で必須要件とするか否かを判断するため、HIP による効果を確認する必要があるものと考えられる。

規格番号	規格名	鋼種	熱処理条件
ASME	Criteria for Pressure Retaining		
PTB-13	Metallic Components Using	—	・最終熱処理は ASME 材料規格による
-2021	Additive Manufacturing		
ASME SA-182/ SA-182M -2021	Standard Specification for Forged or Rolled Alloy and Stainless Steel Pipe Flanges, Forged Fittings, and Valves and Parts for High- Temperature Service	F316L (鍛造材)	・固溶化熱処理 (1040℃以上、液体急冷または他の 方法で急冷)
ASME SA-240/ SA-240M -2021	Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications	316L (板材)	・ASTM A480/A480M による。
ASTM A480/ A480M -2021	Standard Specification for General Requirements for Flat-Rolled Stainless and Heat-Resisting Steel Plate, Sheet, and Strip	316L (板材)	・固溶化熱処理 (1040℃以上、水冷または他の方法 で急冷)
ASME SA-312/ SA-312M -2021	Specification for Seamless, Welded, and Heavily Cold Worked Austenitic Stainless Steel Pipes	TP316L (管材)	・固溶化熱処理 (1040℃以上、水冷または他の方法 で急冷)
ASME SA-351/ SA-351M -2021	Specification for Castings, Austenitic, Austenitic-Ferritic (Duplex), for Pressure-Containing Parts	CF3M (SUS316L 相当、 鋳造材)	・固溶化熱処理 (1040℃以上、水冷または他の方法 で急冷)
ASTM F3301-18a	Standard for Additive Manufacturing – Post Processing Methods – Standard Specification for Thermal Post-Processing Metal Parts Made Via Powder Bed Fusion	UNS S31603	・ASTM A484/484M 等による
ASTM A484/ A484M-21	Standard Specification for General Requirements for Stainless Steel Bars, Billets, and Forgings	316L	・1040℃以上、水冷または他の方法で急冷

表 4.4-1 316L に関する主な ASME 規格および ASTM 規格における熱処理条件

		A	
規格番号	規格名	鋼種	条件
ASME PTB-13 -2021	Criteria for Pressure Retaining Metallic Components Using Additive Manufacturing	_	 ・中間熱処理は ASTM F3301 をガイダンス として使用してよい。 ・HIP は ASTM A988、ASTM A1080 をガイ ダンスとして使用してよい。
ASTM F3301 -18a	Standard for Additive Manufacturing – Post Processing Methods – Standard Specification for Thermal Post-Processing Metal Parts Made Via Powder Bed Fusion	UNS S31603	 ・圧力:100MPa以上 ・温度:1120~1163℃±14℃ ・時間:4h±1h ・冷却:不活性雰囲気下で427℃以下まで ・最低限 ASTM A1080 に従うこと
ASTM A1080/ A1080M -19	Standard Practice for Hot Isostatic Pressing of Steel, Stainless Steel, and Related Alloy Castings	316L	 ・ 圧力:100MPa 以上 ・ 温度:1080 ~ 1235℃ ・ 時間:2h 以上 ・ 冷却:不活性雰囲気下で425℃以下まで
ASTM A988/ A988M -17	Standard Specification for Hot Isostatically-Pressed Stainless Steel Flanges, Fittings, Valves, and Parts for High Temperature Service	_	・具体的な HIP 条件の記載なし

表 4.4-2 316L に関する ASME 規格および ASTM 規格における HIP 条件

(2) 国内規格の熱処理要求

表 4.4-3 に SUS316L に関する主な JIS 規格の熱処理条件を示す。いずれの JIS 規格も SUS316L 材に対して固溶化熱処理を要求していることが分かる。そのため、AM 材が板 材などの従来材と同等の材料特性を得るためには、最終熱処理として固溶化熱処理の実 施が必要であるものと考えられる。なお、HIP に関する JIS 規格は現状存在しない。

	☆ 1.1- 3 303310L (⊂ 戻) つ 上 /3		のの意思性本目
規格番号	規格名	鋼種	条件
JIS G 4303 : 2021	ステンレス鋼棒	SUS316L	・固溶化熱処理 (1010~1150℃、急冷、 代表的な熱処理条件の例)
JIS G 4304 : 2021	熱間圧延ステンレス鋼板 及び鋼帯	SUS316L	・固溶化熱処理 (1010~1150℃、急冷、 代表的な熱処理条件の例)
JIS G 3459 : 2021	配管用ステンレス鋼鋼管	SUS316LTP	・固溶化熱処理 (1010℃以上、急冷)
JIS G 3214 : 1991	圧力容器用ステンレス鋼鍛鋼品	SUSF316L	・固溶化熱処理 (1010~1150℃、急冷)
JIS G 5121 : 2003	ステンレス鋼鋳鋼品	SCS16A (SUS316L 相当)	・固溶化熱処理 (1030~1150℃、急冷)

表 4.4-3 SUS316L に関する主な JIS 規格における熱処理条件

(3) Step1 および Step2 における後処理の適用方針

固溶化熱処理条件について、前出の表 4.4-1 および表 4.4-3 より、ASME 規格および ASTM 規格ともに、1040℃以上で加熱し、その後水冷または他の方法で急冷することを要 求し、JIS 規格では 1010(または 1030)~1150℃(一部温度上限なし)で加熱し、その後急 冷することを要求しており、いずれも温度域は同程度であった。本事業における材料デー 夕取得は国内での規格化に向けたものであり、国内規格との整合を取るためにも、JIS 規 格に合わせた固溶化熱処理条件であることが望ましいものと考えられる。

HIPに関しては前出の表4.4-2より、温度範囲と時間に差があった。ASTM A1080/A1080M-19は従来製法による材料を対象としているのに対し、ASTM-F3301-18aはAM材を対象とし た規格であることを考慮すると、ASTM-F3301-18aの方がAM材に適した条件と考えられるも のの、ASME PTB-13-2021ではどちらの規格もガイダンスとしての使用を許可しているこ とから、条件を幅広く設定し、製造者の選択肢を増やす方が望ましいと考えられる。

以上の検討より、固溶化熱処理および HIP は以下の条件(案)にて実施する方針とする。なお、温度の狙い値や熱処理時間については各社がそれぞれ設定することとする。

【固溶化熱処理条件(案)】 温度:1010~1150℃ 冷却:水冷

【HIP 条件(案)】

圧力:100MPa以上
温度:1080 ~ 1235℃
時間:2h以上
冷却:不活性雰囲気下で425℃以下まで
※上記HIPを実施した後に、固溶化熱処理を実施する。

次に、各 Step で施す後処理条件について検討する。表 4.4-4 に各 Step で実施する後処 理(案)をまとめる。Step1 では ASME PTB-13-2021 のプロセス検証方法の妥当性を確認 し、Step2 で実施する規格化に向けたデータ取得に向け、材料品質が確保される造形領域 を決定することを目的としていることから、ASME PTB-13-2021 で規定されている最終熱 処理(固溶化熱処理)を基準とした材料特性評価を実施する。

Step2の PBF-LB については、ASME PTB-13-2021 では要求事項となっていない HIP を 国内規格で必須要件とするか否かを判断するため、基準となる固溶化熱処理のみを施す 場合と、HIP+固溶化熱処理を施す場合の2パターンを行う。DED はその使用用途として、 直接、既存の大型製品への溶着という場合も考えられることから、熱処理が実施できない 可能性がある。そのため、DED に関しては、造形ままの場合(As-Build)と、固溶化熱処 理のみを施す場合の2パターンの試験片を用意し、それらを材料試験に供することで、熱 処理の影響評価を行う。

Step	方式	SA	HIP+SA	As-Build
1	PBF-LB	0	_	_
2	PBF-LB	0	0	_
2	DED	0	_	0

表 4.4-4 各 Step で実施する後処理(案)

○:実施

SA: Solution Annealing(固溶化熱処理)

HIP: Hot Isostatic Pressing (熱間等方圧加圧法)

As-Build:造形ままの状態

4.5 試験項目

本項では、AM 材の規格化のために実施すべき試験項目を検討した。検討にあたり、参照 したガイドラインおよび規格とその概要を以下に示す。また、各ガイドラインおよび規格で 要求のある試験項目を整理、比較した結果を表 4.5-1 に示す。また、JIS 規格、JSME 材料規 格で要求のある項目についても表 4.5-1 に併せて整理した。なお、本事業では、オーステナ イト系ステンレス鋼 SUS316L を対象に検討していることから、JIS 規格の例として、JIS G 4303「オーステナイト系ステンレス鋼棒」および JIS G 4304「熱間圧延ステンレス鋼板及び 鋼帯」を参照した。

Criteria for Pressure Retaining Metallic Components Using Additive Manufacturing (ASME PTB-13) [4.5-1]

PBF 法の耐圧機器への適用に向けた規格策定における材料、設計、製造、試験、検査・品質保証に関する基準をまとめたもの。

- ▶ JSME 材料規格 新規材料採用ガイドライン ^[4.5-2] 発電用原子力設備の機器等で使用するために、新規材料を JSME 材料規格において 規格化する上で必要な試験項目や評価方法等を示したガイドライン。
- Additive manufacturing General principles Part 3: Main characteristics and corresponding test methods (ISO 17296-3)^[4.5-3]
 AM プロセスによって製造された部品のテストに適用される主要な要件として「部品の主な品質特性の指定」「適切なテスト手順の指定」「テストおよび供給契約の範囲と内容の推奨事項」を示すもの。
- Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made via Additive Manufacturing Processes (ASTM E 3122)^[4.5-4]
 AM によって造形された試験片に対する機械的特性評価に適用可能な既存の試験方 法やその種類、要領を示したガイド。
- Standard Specification for Additive Manufacturing Stainless Steel Alloy (UNS S31603) with Powder Bed Fusion (ASTM E 3184)^[4.5-5] ステンレス鋼 (UNS S31603) 製 AM 部品の購入者および製造者向けに、要求事項の 定義と部品特性の保証方法について記載したもの。

	-			たすて文化にすいの		/7/1/ 1/1	
No.	試験項目	ASME PTB-13	JSME 新規材料 短田ガイドライン	ISO-17296-3	ASTME 3122	ASTM F 3184	材料規格 (IIS/ISME)
							(TIMEC/CTC)
1	化学成分分析	0	0	×	×	0	有
2	組織観察	0	0	×	×	0	I
c,	実用試験(へん 平試験、押し広 げ試験)	×	0	×	×	×	ı
4	加工性確認試験	×	\bigtriangleup *2	×	×	×	I
5	引張試験(引張 強さ、耐力、伸 び、絞り)	0	0	0	0	0	有
9	靭性試験	riangle *1	\bigtriangledown	\bigcirc (H, M) \bigtriangleup (L)	0	×	-
L	時効後靭性試験	×	\bigtriangledown	×	×	×	T
8	硬さ試験	0	0	0	0	×	有
6	曲げ試験	×	O *3	\bigcirc (H) \bigcirc (M, L)	0	×	I
10	圧縮試験	0	×	\bigcirc (H, M) \bigtriangleup (L)	0	×	
11	疲労試験	0	0	$(H) \bigcirc (H) \land (H) $	0	×	- (ただし、設計・建設 規格 ^{[4 5-0}]に規定あり)

表 4.5-1 各ガイドラインおよび規格で要求される試験項目の整理結果(1/2)

	材料規格 TS/ISME)		ı	1	ı	,	ı	有**	有	ı	ı	有	I	
	84 A	2												-
(2/2)	ASTM F 318		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
項目の整理結果	ASTM E 3122		×	0	0	×	×	×	×	×	×	0	0	要求なし
で要求される試験	ISO-17296-3) //	(H) (W) ○ ⊲ ×	\bigcirc (H) \bigcirc (M, L)	$(\mathbf{H}) \bigcirc (\mathbf{H})$	$(1) \times (H) \bigcirc$	×	×	×	×	×	×	×	♂試験実施。×:∃
ドラインおよび規格、	JSME 新規材料 採用ガイドライン		×	×	×	0	0	0	\bigtriangledown	\bigtriangledown	\bigtriangledown	\bigtriangledown	\triangleleft	場合に一部のヒートで
表 4.5-1 各ガイ	ASME PTB-13		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	。△:要求がある
	試験項目		摩擦摩耗試驗	せん断試験	き裂進展試験(疲 労き裂)	クリープおよびク リープ破断特性確 認試験	溶接性確認試験	耐食性確認試験	線膨張係数	熱伝導率	温度伝導率	縦弾性係数	ポアソン比	てのヒートで試験実施
	No.		12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	(): 全

Т Т Т

タガメドラメンな上が指格が更ポされる試験項目の整理結果 (30)

Г

H:安全要求部品・製品。M:安全要求のない部品・製品。L:試作品等のプロトタイプ部品

Τ

*1:ASME 建設規格基準で要求される場合に実施。*2:チューブ品に対し必要に応じ実施。*3:溶接性試験に含む。

*4:発注者の要求がある場合に実施。

いずれかのガイドラインおよび規格に要求のある試験項目として、No.1~22 が抽出され た。これらの試験項目に加え、原子力材料への要求事項として必要と考えられる、SCC 試 験および非破壊検査について、本研究での実施要否を検討した。なお、実施要否の判断に あたっては、以下に示す STEP1、2 の目的に従い、基本的には ASME PTB-13、JSME 新規 材料採用ガイドラインおよび材料規格(JIS、JSME)における要求事項であるか否かで判 断することとし、その他の規格で要求がある場合は、AM 材に特有な性状や特性を勘案し て必要に応じて本研究での実施を検討することとした。

STEP1:プロセス検証方法の妥当性確認

採用した造形装置および規定した造形プロセスにおいて、所定の材料特性を有する材料を 造形可能であることを検証することを目的とする。本Stepでは、試験片ベースの造形を行 い、常温での基本的な材料特性試験を行い、材料特性に及ぼす造形位置、造形方向の影響 やばらつきを評価する。

STEP2:規格化に向けたデータ取り

STEP1で妥当性を確認した造形プロセスに基づき、材料品質の確保された領域内で試験片 を造形、採取し、規格化に必要となる材料特性データを取得する。取得した材料特性デー タと圧延材や鍛造材の既存規格データや材料特性データを比較し、AM材の規格化を検討 することを目的とする 以下に各試験項目と本研究での実施要否と実施 STEP を示す。

No.1 化学成分分析

ASME PTB-13、JSME 新規材料採用ガイドラインにおける要求事項であり、JIS や ASTM での材料規格の基本規定となるため、本研究での実施要と判断した。各 STEP の目的を鑑み、STEP 1 および STEP 2 での実施が必要と考えられる。

<u>No.2 組織観察</u>

ASME PTB-13、JSME 新規材料採用ガイドラインおよび F3184 における要求事項であり、 材料の均質性を確認するために通常実施されている試験であり、造形位置決定の基本情報 となると考えられることから、本研究での実施要と判断した。各 STEP の目的を鑑み、 STEP 1 および STEP 2 での実施が必要と考えられる。

No.3 実用試験(へん平試験、押し広げ試験)

JSME 新規材料採用ガイドラインにおける要求事項であるが、管形状に対しての要求事項 であり、本研究での実施は不要と判断した。

No.4 加工性

JSME 新規材料採用ガイドラインにおける要求事項であるが、管形状など所定の形状に成 形するときに必要となる要求事項であり、本研究での実施は不要と判断した。

No.5 引張試験(引張強さ、耐力、伸び、絞り)

参照した全てのガイドライン、規格における要求事項であり、JIS や ASTM での材料規格 の基本規定であり、JSME 材料規格の許容応力を決定するために不可欠なデータであるた め、本研究での実施要と判断した。各 STEP の目的に鑑み、STEP 1 および STEP 2 での実 施が必要と考えられる。なお、STEP 1 では、常温試験のみ実施し、高温試験は STEP 2 で 実施する。

<u>No.6 靭性試験</u>

本研究では対象材料を SUS316L(オーステナイト系ステンレス鋼)としており、靭性影響 は小さいと考えられることから、本研究での実施は不要と判断した。

No.7 時効後靭性試験

本研究では対象材料を SUS316L(オーステナイト系ステンレス鋼)としており、靭性影響 は小さいと考えられることから、本研究での実施は不要と判断した。

No.8 硬さ試験

ASME PTB-13、JSME 新規材料採用ガイドライン、ISO-17296-3 および ASTM E3122 にお ける要求事項であり、JIS や ASTM での材料規格の基本規定となるため、本研究での実施 要と判断した。各 STEP の目的を鑑み、STEP 1 および STEP 2 での実施が必要と考えられ る。

<u>No.9 曲げ試験</u>

ASME PTB-13 では要求はなく、JIS 及び JSME 新規材料採用ガイドラインにおいて溶接部 に対する要求事項であることから、本研究での実施は不要と判断した。

No.10 圧縮試験

耐圧部材に対する要求事項であり、本研究での実施は不要と判断した。

No.11 疲労試験

ASME PTB-13、JSME 新規材料採用ガイドライン、ISO-17296-3 および ASTM E3122 にお ける要求事項であり、JSME 設計・建設規格においてオーステナイト系ステンレス鋼の疲 労曲線が規定されていることから、本研究での実施要と判断した。各 STEP の目的を鑑 み、STEP 2 での実施が必要と考えられる。

No.12 摩擦·摩耗試験

ASME PTB-13、JSME 新規材料採用ガイドラインおよび材料規格には要求がないため、本研究での実施は不要と判断した。

<u>No.13 せん断試験</u>

ASME PTB-13、JSME 新規材料採用ガイドラインおよび材料規格には要求がないため、本研究での実施は不要と判断した。

<u>No.14 き裂進展試験(疲労き裂)</u>

ASME PTB-13、JSME 新規材料採用ガイドラインおよび材料規格には要求がないため、本研究での実施は不要と判断した。

No.15 クリープおよびクリープ破断特性確認試験

発電用原子力設備においてはクリープ発生温度域での使用は考えにくいことから、本研究 での実施は不要と判断した。

No.16 溶接性確認試驗

ASME PTB-13 では要求はなく、JSME 新規材料採用ガイドラインおよび材料規格では溶接 部に対する要求事項であることから、本研究での実施は不要と判断した。

<u>No.17</u> 耐食性試験

ASME PTB-13 には要求はないが、JSME 新規材料採用ガイドラインでの要求事項であることおよび材料規格の要求事項となる場合もあるから、本研究での実施要と判断した。各 STEP の目的を鑑み、STEP 2 での実施が必要と考えられる。

No.18 線膨張係数

ASME PTB-13 には要求はないが、JSME 新規材料採用ガイドラインでは、必要に応じて要求とされているものの、JSME や ASME の材料規格では物性値として規定されていることから、本研究での実施要と判断した。各 STEP の目的を鑑み、STEP 2 での実施が必要と考えられる。

No.19 熱伝導率

ASME PTB-13 には要求はないが、JSME 新規材料採用ガイドラインでは、必要に応じて要 求があること、及び材料の基本物性の一つであることから、本研究での実施要と判断し た。各 STEP の目的を鑑み、STEP 2 での実施が必要と考えられる。

No.20 温度伝導率

ASME PTB-13 には要求はないが、JSME 新規材料採用ガイドラインでは、必要に応じて要 求があること、及び材料の基本物性の一つであることから、本研究での実施要と判断し た。各 STEP の目的を鑑み、STEP 2 での実施が必要と考えられる。

No.21 縦弾性係数

ASME PTB-13 には要求はないが、JSME 新規材料採用ガイドラインでは、必要に応じて要求とされているものの、JSME や ASME の材料規格では物性値として規定されていることから、本研究での実施要と判断した。各 STEP の目的を鑑み、STEP 2 での実施が必要と考えられる。

<u>No.22 ポアソン比</u>

ASME PTB-13 には要求はないが、JSME 新規材料採用ガイドラインでは、必要に応じて要求があること、及び材料の方位依存性を示す指標となることから、本研究での実施要と判断した。各 STEP の目的を鑑み、STEP 2 での実施が必要と考えられる。

以上、No.1~22の各試験項目について、実施要否と実施 STEP を示した。

以下の No.23 および No.24 の試験項目は、各規格、ガイドラインの要求項目にはないが、原子力機器への適用を鑑み、確認しておくべき事項として示す。

No.23 SCC 試験

SCC は原子力機器において発生する主要な材料劣化事象であり、適用する際に確認してお くべき材料特性であると考えられることから、本研究での実施要と判断した。各 STEP の 目的を鑑み、STEP 2 での実施が必要と考えられる。

No.24 非破壊検査

欠陥の有無及び寸法を確認しチア上で、適切に造形されているのかを把握しておく必要が あることから、本研究での実施要と判断した。各 STEP の目的を鑑み、STEP 1 および STEP 2 での実施が必要と考えられる。 以上より、各 STEP で必要な試験項目を下記の通り、抽出した。

STEP 1

- (1) 化学成分分析
- (2) 組織観察
- (3) 引張試験 (常温)
- (4) 硬さ試験
- (5) 非破壊検査

STEP 2

- (1) 化学成分分析
- (2) 組織観察
- (3) 引張試験 (常温、高温)
- (4) 硬さ試験
- (5) 疲労試験
- (6) 耐食性試験
- (7) 材料物性試験(線膨張係数、熱伝導率、温度伝導率、縦弾性係数、ポアソン比)
- (8) SCC 試験
- (9) 非破壊検査

【参考文献】

- [4.5-1] ASME, ASME PTB-13-2021, "Criteria for Pressure Retaining Metallic Components Using Additive Manufacturing", (2021)
- [4.5-2] JSME, JSME S NJ1-2020, "発電用原子力設備規格 材料規格" 添付 1 新規材料採用 ガイドライン, (2020)
- [4.5-3] ISO, ISO 17296-3, "Additive manufacturing General principles Part 3: Main characteristics and corresponding test methods", (2014)
- [4.5-4] ASTM E 3122, "Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made via Additive Manufacturing Processes", (2014)
- [4.5-5] ASTM E 3184, "Standard Specification for Additive Manufacturing Stainless Steel Alloy (UNS S31603) with Powder Bed Fusion", (2016)
- [4.5-6] JSME, JSME S NC1-2019, "発電用原子力設備規格 設計・建設規格", (2019)

4.6 試験方法

本項では、4.5項で実施すべき試験項目として抽出した各試験項目について、具体的な 試験方法を検討した。抽出した試験項目は以下のとおりである。

STEP1:プロセス検証方法の妥当性確認

(1) 化学成分分析

- (2) 組織観察
- (3) 引張試験 (常温)
- (4) 硬さ試験
- (5) 非破壊検査

STEP 2: 規格化に向けたデータ取り

- (1) 化学成分分析
- (2) 組織観察
- (3) 引張試験 (常温、高温)
- (4) 硬さ試験
- (5) 疲労試験
- (6) 耐食性試験
- (7) 材料物性試験(線膨張係数、熱伝導率、温度伝導率、縦弾性係数、ポアソン比)
- (8) SCC 試験
- (9) 非破壊検査

これらの試験項目と 4.5 項で参照した各ガイドラインおよび規格に記載のある適用試験 規格を表 4.6-1 に整理した。また、今後の AM 材を発電用原子力設備で使用するための JSME での規格化を勘案すると、基本的には JIS もしくは JSME 規格に規定のある材料特性及び材 料物性に関するデータを取得することが必要と考えられる。そのため、各試験項目に対応す る JIS/JSME 規格も併せて整理した。

No.	試験項目	ASME PTB-13	ISO-17296-3	ASTM E 3122	ASTM F 3184	JIS/JSME
1	化学成分分析	要求項目だが適用規格なし	-	-	要求項目だが適用規格なし	JIS G 0320 (溶鋼分析)
						JIS G 0321 (製品分析)
2	組織観察 ASTME3(ミクロ組織)		-	-	ASTM E 3	JIS G 0553 (マクロ組織観察)
		ASTM E 407 (エッチング方法)			ASTM E 407	JIS G 0551 (結晶粒度), G 0555 (非金属介在物)
3	引張試験	ASTME8(常温)	ISO 6892-1 (常温)	ASTM E8, ISO 6892-1 (常温)	ASTM E 8 (常温)	JIS Z 2241 (常温)
	(常温、高温)	ASTM E 21 (高温)		ASTM E21, ISO 6892-2 (高温)	ISO/ASTM 52921 (位置)	JIS G 0567 (高温)
				ISO 15579 (低温)	ASTM F2971 (報告)	
				ASTM E 1450, ISO 19819		
				(液体ヘリウム中)		
4	硬さ試験	ASTM E 10 (ブリネル)	ISO 6507(ビッカース)	ASTM E 10, ISO 6506-1 (ブリネル)	-	JIS Z 2243 (ブリネル)
		ASTM E 18 (ロックウェル)		ASTM E 384, ISO 6507-1 (ビッカース)		JIS Z 2245 (ロックウェル)
		ASTM E 92 (ビッカース)		ASTM E 18, ISO 6508-1 (ロックウェル)		JIS Z 2244 (ビッカース)
				ASTM E 448 (Scleroscope)		
				ASTM E 384, ISO 4545-1 (Knoop)		
5	疲労試験	要求項目だが適用規格なし	ISO 1099 (軸力制御法)	ASTM E 466, ISO 1099 (軸力制御法)	-	JIS Z 2279 (低サイクル疲労)
			ISO 1143 (曲げ疲労)	ASTM E 606, ISO 12106 (低サイクル疲労)		
				ASTM E 2368, ISO 12111 (熱機械疲労)		
				E2789(フレッティング疲労)		
				ISO1143 (曲げ疲労)		
				ISO1352(トルク管理疲労)		
6	耐食性試験	-	-	-	-	JIS G 0571 (10%シュウ酸エッチング試験)
						JIS G 0575 (硫酸・硫酸銅腐食試験)
7	材料物性試験	-	-	ASTM E 1875, E 1876 (ポアソン比)	-	JIS Z 2285 (線膨張係数)
						JIS R 1611 (熱伝導率)
						JIS Z 2280 (縦弾性係数、剛性率、ポアソン比)
8	SCC 試験	-	-	-	-	SCC 発生試験 (CBB 試験、UCL 試験)
						SCC 進展試験
9	非破壊検査	-	ISO 5579 (放射線透過)	-	-	JSME S NC1 第3章
			ISO 3452-1,2 (浸透探傷)			GTN-2000 (垂直法による超音波探傷)
			IEC 61675-1,2 (断層影像法)			GTN-3000 (斜角法による超音波探傷)
			ISO 9934-1 (磁粉探傷)			GTN-4000 (放射線透過)
						GTN-5000 (渦流探傷)
						GTN-6000 (磁粉探傷)
						GTN-7000 (浸透探傷)
						GTN-8000(目視)

表 4.6-1 各試験項目と各規格で規定する適用規格の整理

4.6.1 STEP 1: プロセス検証方法の妥当性確認

4.5 項で整理した通り、STEP1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 のプロセス検証方法の妥当性を確認することを目 的として、(1) 化学成分分析、(2) 組織観察、(3) 引張試験(常温)、(4) 硬さ試験、(5) 非 破壊検査が実施すべき試験項目として抽出された。本項では、抽出した STEP 1 での各試 験項目について、具体的な試験方法を検討した。なお、STEP 1 の熱処理条件は、JIS 規格 での SUS316L(棒材、板材)の要求仕様を参考に固溶化熱処理 (SA)のみとする。

(1) 化学成分分析

JISG4303「ステンレス鋼棒」、JISG4304「熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯」では、 オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316Lの化学成分として以下を規定している。

そのため、AM 造形材についてもこれらと同等の化学成分の確認が分析が必要であると 考えられる。また、O及びNのガス成分の確認も必要と考えられる。

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

表 4.6-2 JIS 規格で規定される SUS316L の化学成分

化学成分分析には、AM 造形材を活用することが考えられるため、溶鋼分析ではな く製品分析であることから、JISG0321「鋼材の製品分析方法及びその許容変動値」に 従い、化学成分分析をすることが考えられる。

図 4.6-1 に硬さ測定、組織観察、化学成分分析用部材の配置例と試験片採取位置例 を示す。化学成分分析位置は、造形位置による影響を把握する観点から、四隅および 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 象に分析することが考えられる。

化学成分分析についての検討結果を下記に示す。

AM 造形: PBF

熱処理:SA

試験片位置:15か所(5か所(四隅および中央部)×3部位(上部、中部、下部)) 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



図 4.6-1 硬さ測定、組織観察、化学成分分析用部材の配置例と試験片採取位置例
(2) 組織観察

図 4.6-1 に示した通り、AM 造形位置による金属組織への影響を把握する観点から、 四隅および中央部の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 か所を対象に組織観察用試験片を採取する。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、組織観察を 行う。また、各試験片に対し、マクロ観察1領域、ミクロ組織観察3領域の組織観察 を行う。ミクロ組織観察は、1領域を2つの倍率(x100、x400)で行う。

組織観察についての検討結果を下記に示す。

試験片位置:15か所(5か所(四隅および中央部)×3部位(上部、中部、下部)) 適用規格:JISG0553「鋼のマクロ組織試験方法」 観察領域:各試験片合計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、ミクロ組織観察:2倍率(x100、x400)

(3) 引張試験 (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°方向の3方位を対象に試験を実施する。図4.6-2~図4.6-4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す る。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する。垂直方向、水平方向の引張試験により、上下 方向の配置による影響は把握できるものと考えられることから、45°方向の引張試験片 については、下部のみ12か所を対象に引張試験片を作製する。なお、繰り返し数は1 とする。

常温(10~35℃)での引張試験は、JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」に従い実施 する。引張試験片形状は、本規格で規定され、図 4.6-5 に示す 14A 号試験片とし、寸 法は作製可能な AM 造形材寸法に従い決定する。垂直方向、水平方向、45°方向に造 形した引張試験用部材の形状は、この引張試験片が採取できるよう、例えば 20×20×80 mm を候補とする。

引張試験速度について、ISO 6892-1 "Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature (MOD)"では、ひずみ速度制御法による方法を方法 A、応力増加速度制御による方法を方法 B として規定している。これを基にした JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」では、方法 A を附属書 JB、方法 B を本編で規定している。引張試験では、降伏点までとそれ以降とで試験速度を変更するのが一般的である。JIS Z

2241 付属書 JB (方法 A)では、降伏点までは 2.5×10⁴±0.5×10⁴/s (=2.0~3.0×10⁴/s)、引張 強さまでは 6.7×10⁻³±1.33×10⁻³/s(=5.37~8.03×10⁻³/s)が推奨されている。。また、JIS Z 2241 本編 (方法 B)では、降伏点までは 3~30MPa/s、引張強さまでは 3~8×10⁻³/s と規 定している。本試験では、方法 A に基づくひずみ速度制御の引張試験方法を候補とす る。この場合、降伏点までは、2.0~3.0×10-4/s、引張強さまでは 5.37~8×10⁻³/s を推奨条 件とする。。なお、評価項目は、引張強さ、耐力、伸び、絞り、応力ひずみ線図とす る。

引張試験についての検討結果を下記に示す。

AM 造形: PBF

熱処理:SA

試験片位置:垂直方向 75 か所(25 か所×3 部位(上部、中部、下部)) 水平方向 39 か所(13 か所×3 部位(上部、中部、下部))

45°方向 12 か所(12 か所×1 部位(下部))

適用規格: JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」

試験片形状:14A 号試験片

試験速度: 2.0~3.0×10⁻⁴/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、耐力、伸び、絞り、応力ひずみ線図 繰り返し数:1



図 4.6-2 垂直方向引張試験用部材の配置例



図 4.6-3 水平方向引張試験用部材の配置例





図 4.6-4 45°方向引張試験用部材の配置例



図 4.6-5 引張試験片形状例 (JIS Z 2241 14A 号試験片)

(4) 硬さ試験

図 4.6-1 に示した通り、AM 造形位置による硬さへの影響を把握する観点から、四隅 および中央部の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する。硬さ測定方法は、例えば、JIS Z 2243-1「ブ リネル硬さ試験—第1部:試験方法」、JIS Z 2244-1「ビッカース硬さ試験—第1部: 試験方法」、JIS Z 2245「ロックウェル硬さ試験—試験方法」があり、いずれの方法で 試験をしても換算は可能である。しかしながら、ブリネル硬さ試験やロックウェル硬 さ試験の場合、荷重条件により圧痕が大きくなり、測定点数確保が困難になる可能性 があること、造形位置による硬さへの影響を把握する観点から、ビッカース硬さ試験 による硬さ測定が望ましいと考える。なお、試験力は9.8N とし、測定点数は各5点と する。

硬さ試験についての検討結果を下記に示す。

AM 造形:PBF

熱処理:SA

試験片位置:15か所(5か所(四隅および中央部)×3部位(上部、中部、下部)) 適用規格:JIS Z 2244-1「ビッカース硬さ試験—第1部:試験方法」 試験力:9.8N

測定点数:各試験片に対し、5点

(5) 非破壊検査

STEP 1 における非破壊検査の目的は、適切な AM 造形がなされているか、きずや欠 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、全ての引張試験用部材に対して放射線透過試験 (RT)を実施する。また、その部材から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)を実施する。それに加えて、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。なお、RT、PT については、それぞれ JSME S NC1「設計・建設規格」第3章で規定される GTN-4000 (RT)、GTN-7000 (PT)に従うことを候補とする。

非破壊検査についての検討結果を下記に示す。

AM 造形: PBF 熱処理: SA 試験片位置: 垂直方向 75 か所(25 か所×3 部位(上部、中部、下部)) 水平方向 39 か所(13 か所×3 部位(上部、中部、下部)) 45°方向 12 か所(12 か所×1 部位(下部))

適用規格:JSME S NC1「設計・建設規格」第3章

GTN-4000 (RT), GTN-7000 (PT)

検査時期:引張試験片加工前(RT、一部 X線 CT 併用)

引張試験片加工後 (PT)

以上、(1)~(5)を踏まえ、STEP1の試験フロー例を図4.6-6に示す。



図 4.6-6 STEP 1 の試験フロー例

4.6.2 STEP 2: <u>規格化に向けたデータ取り</u>

4.5 項で整理した通り、STEP 2 では、STEP 1 で妥当性を確認した造形プロセスに基づ き取得した材料特性データと既存規格データを比較し、AM 材の規格化を検討することを 目的として、(1) 化学成分分析、(2) 組織観察、(3) 引張試験(常温、高温)、(4) 硬さ試験、 (5) 疲労試験、(6)耐食性試験、(7) 材料物性試験(線膨張係数、熱伝導率、温度伝導率、 縦弾性係数、ポアソン比)、(8) SCC 試験、(9) 非破壊検査が実施すべき試験項目として抽 出した。本項では、抽出した STEP 2 での各試験項目について試験方法を検討したが、STEP 1 の結果により、見直す可能性がある。なお、STEP 2 の熱処理条件は、PBF は SA、熱間 等方圧加圧法(HIP)+SA の 2 条件、DED は熱処理なし(As-build)、SA の 2 条件とする。 以下に試験方法、試験条件の案を記載する。

(1) 化学成分分析

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、化学成分分析をする。

STEP 1 では、造形位置の化学成分に及ぼす影響を把握するため、複数個所を対象に 化学分析を実施する計画とした。STEP 1 で造形位置の影響は把握できるものと考えら れることから、STEP 2 では、AM 造形、熱処理毎に代表とする AM 造形物から 1 ヶ所 ずつ試験片を採取し化学成分分析を実施することとする。なお、PBF については STEP 1 で SA 材のデータを取得しているため、HIP+SA 材のデータのみを取得する。DED に ついては As-build 材、SA 材のデータを取得する。

化学成分分析についての検討結果を下記に示す。

AM 造形: PBF、DED

熱処理: HIP+SA (PBF)

熱処理なし、SA (DED)

試験片位置:AM造形、熱処理毎に代表AM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 (2) 組織観察

STEP1では、造形位置の金属組織に及ぼす影響を把握するため、複数箇所を対象に 組織観察を実施する計画とした。STEP1で造形位置の影響は把握できるものと考えら れることから、STEP1の評価結果を踏まえて決定する。STEP2では、採取方向の影 響を把握するため、3方向(水平2方向、垂直1方向)に作製したAM造形物から試 験片を採取し、組織観察を実施する。採取した試験片に対し、JISG0553「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、組織観察を行う。 また、各試験片に対し、マクロ観察1領域、ミクロ組織観察3領域の組織観察を行 う。ミクロ組織観察は1領域を2つの倍率(x100、x400)で行う。 組織観察についての検討結果を下記に示す。

AM 造形: PBF、DED

熱処理: HIP+SA (PBF)

熱処理なし、SA(DED)

試験片位置:STEP1の評価結果を踏まえて決定 採取方向:3方向(水平2方向、垂直1方向) 適用規格:JISG0553「鋼のマクロ組織試験方法」 観察領域:4領域(マクロ領域:1領域、ミクロ領域:3領域)

観察倍率:マクロ観察1倍率、ミクロ観察2倍率(x100、x400)

(3) 引張試験 (常温、高温)

STEP1では、造形位置、採取方向が引張強度に及ぼす影響を把握するため、複数個 所、複数方向を対象に試験を実施する計画とした。STEP1でこれらの影響は把握でき るものと考えられることから、STEP2ではこれらの影響を考慮し、試験片採取位置を 決定する。

(a) 常温引張試験

常温試験は、STEP1同様、JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」に従い、降伏点までは 2.0~3.0×10⁻⁴/s、引張強さまでは 5.37~8×10⁻³/s とする。なお、PBF については、 STEP1で SA 材のデータを取得しているため、STEP2では HIP+SA 材のデータを取得する。DED については、As-build 材、SA 材のデータを取得する。

(b) 高温引張試験

JSME S NJ1「材料規格 添付 1 新規材料採用ガイドライン」では、常温から最高 使用温度より 50℃高い温度までの 50℃ごとのデータを取得することが規定されてい る。JSME S NJ1「材料規格」で規程される各引張強度の温度条件を加味し、高温試 験は、65℃、100℃、150℃、200℃、250℃、300℃、350℃、400℃、450℃の9条件 とする。また高温試験は、JISG 0567「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」 に従い、実施する。JISG 0567 では、ひずみ速度制御による試験方法(方法A)およ びひずみ速度範囲を拡大した試験方法(方法 B)を規定している。ここで、方法 B について JISG 0567 では、金属のひずみ速度感受性は、常温よりも高温の方がより 高い可能性があり、試験速度が規定範囲内であっても、測定する特性の値に影響を 与える場合がある、としている。また、一方、方法 A は、ISO 6892-2 "Metallic materials — Tensile testing — Part 2: Method of test at elevated temperature"の大幅改訂に 伴い、ISO 6892-2 を基に新たに追加された方法であることから、方法 A を採用する のが望ましいと考えられる。なお、方法Aにおいて、特に規定のない限り推奨する 試験速度として、降伏点までは 7×10⁻⁵/s±20% (=5.6~8.4×10⁻⁵/s)、引張強さまでは 1.4×10⁻³/s±20% (=1.12~1.68×10⁻³/s) としている。試験片形状は、変位を正確に測るた め、JISG 0567 で規定するつば付き試験片とする。図 4.6-7 に試験片形状例を示す。 寸法は作製可能な AM 造形材により決定する。また、引張試験片を採取可能な造形 部材の寸法として、20×20×80 mm を候補とする。評価項目は、引張強さ、耐力、伸 び、絞り、応力ひずみ線図とし、繰り返し数はいずれも2とする。 引張試験についての検討結果を下記に示す。

- AM 造形: PBF、DED
- 熱処理:常温試験

HIP + SA (PBF)

熱処理無し、SA (DED)

高温試験

SA、HIP+SA (PBF)

熱処理無し、SA (DED)

- 試験片位置:STEP1の評価結果を踏まえて決定
- 適用規格:JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」

JISG 0567「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」

- 試験片形状:14A 号試験片(常温試験)
 - つば付き試験片(高温試験)
- 試験速度:常温試験
 - 2.0~3.0×10⁻⁴/s(降伏点まで)

5.37~8×10-3/s(降伏点から引張強さまで)

- 高温試験
- (65°C、100°C、150°C、200°C、250°C、300°C、350°C、400°C、450°C)
- 5.6~8.4×10⁻⁵/s(降伏点まで)
- 1.12~1.68×10⁻³/s(降伏点から引張強さまで)

評価項目:引張強さ、耐力、伸び、絞り、応力ひずみ線図 繰り返し数:2



図 4.6-7 試験片形状例 (JIS G 0567 つば付き試験片)

(4) 硬さ試験

STEP1では、造形位置の金属組織に及ぼす影響を把握するため、複数箇所を対象に 組織観察を実施する計画とした。STEP1で造形位置の影響は把握できるものと考えら れるため、STEP1の評価結果を踏まえて決定する。一方、採取方向の影響を把握して おくため、STEP2では、採取方向3(水平2方向、垂直1方向)のAM造形材から試 験片を採取し、硬さ試験を実施することが考えられる。作製した試験片に対し、STEP 1同様、JISZ2244-1「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。試験力は9.8Nとし、測定点数は各5点とする。なお、PBFについては、STEP 1でSA材のデータ取得しているため、HIP+SA材のデータを取得する。DEDについ ては、As-build材、SA材のデータを取得する。

硬さ試験についての検討結果を下記に示す。

AM 造形: PBF、DED

熱処理: HIP+SA (PBF)

熱処理なし、SA (DED) 試験片位置:STEP1の評価結果を踏まえて決定 採取方向:3方向(水平2方向、垂直1方向) 適用規格:JIS Z 2244-1「ビッカース硬さ試験—第1部:試験方法」 試験力:9.8N 測定点数:各試験片に対し、5点

(5) 疲労試験

JSME S NC1「設計・建設規格」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、本研究で取得する AM 材の疲 労試験データをこの設計疲労線図と比較する。図 4.6-8 に設計建設規格で定めるオー ステナイト系ステンレス鋼および高ニッケル合金の設計疲労線図を示す。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 1×10⁷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 1×10⁷を目標とし、設計疲労線図との傾向比較のため、他の繰り返し回数は 5×10²、 1×10³、3×10³、1×10⁴、1×10⁵、1×10⁶を目標とする。また、バラつきを考慮し、各繰り 返し数の条件に対し、試験員数は 2 とする。引張圧縮疲労試験について、高サイクル 疲労試験の JIS 規格は廃止となっている。また、低サイクル疲労試験については、JIS Z 2279「金属材料の高温低サイクル疲労試験方法」があるが、高温環境での試験を対 象とした規格である。そのため、高サイクル疲労試験については ASTM E 466 "Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials"、低サイクル疲労試験については ASTM E 606 "Standard Test Method for Strain – Controlled Fatigue Testing"が候補となる。 疲労試験についての検討結果を下記に示す。

AM 造形: PBF、DED

熱処理:SA、HIP+SA (PBF)

熱処理なし、SA (DED)

試験片位置:STEP1の評価結果を踏まえて決定

採取方向:1方向

適用規格:ASTM E 466 (高サイクル疲労試験)

ASTM E 606 (低サイクル疲労試験)

許容繰り返し回数:5×10²、1×10³、3×10³、1×10⁴、1×10⁵、1×10⁶、1×10⁷ 試験員数:各2



図 4.6-8 オーステナイト系ステンレス鋼および高ニッケル合金の設計疲労線図[46-1]

(6) 耐食性試験

JIS G 4303「ステンレス鋼棒」、JIS G 4304「熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯」で は、要求がある場合、腐食試験を実施することが規定されており、JIS G 0571「ステ ンレス鋼のしゅう酸エッチング試験方法」、JIS G 0572「ステンレス鋼の硫酸・硫酸第 二鉄腐食試験方法」、JIS G 0573「ステンレス鋼の 65%硝酸腐食試験方法」、JIS G 0575 「ステンレス鋼の硫酸・硫酸銅腐食試験方法」のいずれの方法で実施しても良いとさ れている。一方、JIS G 5121「ステンレス鋼鋳鋼品」では、要求がある場合実施する 腐食試験は、硫酸・硫酸銅腐食試験とすることが規定されている。そのため、耐食性 試験としては、JIS G 0575「ステンレス鋼の硫酸・硫酸銅腐食試験方法」を候補とす る。試験片採取位置については、STEP 1 の評価結果を踏まえて決定することとし、採 取方向が耐食性に及ぼす影響を把握するため、3 方向(水平 2 方向、垂直 1 方向)の AM 造形材から試験片を採取することが考えられる。なお、JIS G 0575 では、試験片 員数に関する規定はないが、JIS G 4303 および JIS G 4304 では、同一溶綱、同一熱処 理条件ごとに 1 個としているため、繰り返し数は 1 とすることが考えられる。

耐食性試験についての検討結果を下記に示す。

AM 造形: PBF、DED

熱処理:SA、HIP+SA (PBF)

熱処理なし、SA (DED)
試験片位置:STEP1の評価結果を踏まえて決定
採取方向:3方向(水平2方向、垂直1方向)
適用規格:JISG0575「ステンレス鋼の硫酸・硫酸銅腐食試験方法」
繰り返し数:1

(7) 材料物性試験(線膨張係数、熱伝導率、温度伝導率、縦弾性係数、ポアソン比) 試験片採取位置については、STEP1の評価結果を踏まえて決定することとし、採取 方向が材料物性値に及ぼす影響を把握するため、3方向(水平2方向、垂直1方向) の AM 造形材から試験片を採取する。

(a) 線膨張係数

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

(b) 熱伝導率、温度伝導率

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

(c) 縦弾性係数、ポアソン比

オーステナイト系ステンレス鋼の縦弾性係数は、材料規格において、-75℃、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。なお、線膨張係数についてはJIS Z 2285「金属材料の線膨張係数の測定方法」、 熱伝導率、温度伝導率についてはJIS R 1611「ファインセラミックスのフラッシュ法 による熱拡散率・比熱容量・熱伝導率の測定方法」、縦弾性係数、ポアソン比につい てはJIS Z 2280「金属材料の高温ヤング率試験方法」に従う。繰り返し数はいずれも 1とする。

材料物性試験についての検討結果を下記に示す。

- AM 造形: PBF、DED
- 熱処理:SA、HIP+SA(PBF)

熱処理なし、SA (DED)

試験片位置:STEP1の評価結果を踏まえて決定

- 採取方向:3方向(水平2方向、垂直1方向)
- 適用規格:JIS Z 2285「金属材料の線膨張係数の測定方法」
 - JIS R 1611「ファインセラミックスのフラッシュ法による熱拡散率・比熱 容量・熱伝導率の測定方法」

JIS Z 2280「金属材料の高温ヤング率試験方法」

温度条件:線膨張係数、熱伝導率、温度伝導率

20°C(常温)、50°C、75°C、100°C、125°C、150°C、175°C、200°C、 225°C、250°C、275°C、300°C、325°C、350°C、375°C、400°C、425°C 縦弾性係数、ポアソン比

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

繰り返し数:1

(8) 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。

AM 材による SCC 進展試験結果例^[4-2]を図 4.6-9 に示す。SCC 進展速度は試験片採 取方向により異なり、X-Z 方向と Z-X 方向では 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。本知見では、ASTM E 647 に従い、試験片寸法として 0.5TCT 試験片(厚 さ 12.7mm、幅 25.4mm)を採用しており、本研究でも同様に 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。比較材としては、 JIS G 4304「熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯」が考えられ、図 4.6-10 に示す試験片 採取方向のうち、SCC 進展速度が最も速いと考えられる T-L 方向とする。試験温度は BWR、PWR 環境を考慮し設定する。なお、試験片員数は、バラつき等を考慮し、AM 材は 4 個、比較材は 2 個とする。熱処理条件は、PBF は SA、DED は熱処理なしで良 いこととした。。

SCC 試験についての検討結果を以下に示す。

AM 造形: PBF、DED

熱処理:SA (PBF)、熱処理なし (DED) 試験片位置:STEP1の評価結果を踏まえて決定 採取方向:X-Z 方向 (AM 材)

T-L 方向(比較材)

試験温度:288℃(BWR)

325°C (PWR)

繰り返し数:4(AM材)

2(比較材)



図 4.6-9 SCC 進展試験結果例^[4 6-2]



図 4.6-10 試験片採取方向

(9) 非破壊検査

STEP 1 で造形位置等が機械的特性に及ぼす影響は把握できているものと考えられ、 STEP 2 では、材料品質が確保された領域内で造形するものと考えられる。STEP 2 では AM 材の規格化に向けたデータ取得が目的であることから、疲労試験片、SCC 試験片、 及び引張試験片の加工前の AM 造形材に対し内部欠陥有無を確認するため、放射線透 過試験 (RT)を実施する。また、加工後の疲労試験片及び引張試験片に対し、浸透探傷 試験 (PT)を実施する。RT 及び PT は、STEP 1 と同様に、JSME S NC1「設計・建設規 格」第 3 章で規定される GTN-4000 (RT)及び GTN-7000 (PT)が候補となる。。

非破壊検査についての検討結果を下記に示す。

AM 造形: PBF、DED

熱処理:SA、HIP+SA(PBF)

熱処理無し、SA(DED)

- 試験片位置:STEP1の評価結果を踏まえて決定
- 適用規格:JSME S NC1「設計・建設規格」第3章 GTN-4000 (RT)、GTN-7000 (PT)
- 検査時期:引張、SCC、及び疲労試験片加工前(RT) 引張及び疲労試験片加工後(PT)

以上、(1)~(9)を踏まえ、STEP2の試験フロー例を図 4.6-11 に示す。



図 4.6-11 STEP 2 の試験フロー例

【参考文献】

[4.6-1] JSME, JSME S NC1-2019, "発電用原子力設備規格 設計, 建設規格", (2019) [4.6-2] GE Global Research, "Environmental Cracking and Irradiation Resistant Stainless Steels by Additive Manufacturing", DE-NE0008428

4.7 試験マトリクス

4.1 項から 4.6 項での対象とする技術、材料、造形方法等の検討結果に基づき試験マトリ クスを設定し、各社の分担を検討した。なお、STEP2 試験のうち、物性値計測以外の試験に ついては 2022 年度に実施予定の STEP1 試験の結果を踏まえて試験方法、試験片方位、繰り 返し数など詳細内容を検討する計画であり、ここでは試験項目と分担のみ整理した。また STEP3 試験計画については、次年度以降に検討を行う予定であり、本年度の成果には含め ていない。

検討結果を表 4.7-1~表 4.7-3 に示す。

造形方法		鋼種 (使用粉末)	熱処理				計時止	試験片数						
	造形装置		HIP 処理	固溶化 熱処理	試験項目	試験内容	採取方向	上段	中段	下段	担当会社			
	SLM280 (SLM Solution)	Type316L (oerlikon 社)		あり	常温引張試験	一世祖本の引進封験を実施1 0.20/ 耐力 引	垂直	25	25	25				
			なし			常温での引張試験を実施し、0.2%耐力、引 張強さ、伸び、絞りを取得する。	水平	13	13	13				
							斜角 (45°)	0	0	12				
					硬さ測定	ビッカース硬さを各試験片5点測定する。	-	5	5	5	三菱重工業株式会社			
					組織観察	マクロ1枚+ミクロ3領域×2倍率での観 察を行う。	-	5	5	5				
					化学成分分析	切粉を採取して湿式分析を行う。	-	5	5	5				
		Type316L (未定)	なし	あり	常温引張試験	常温での引張試験を実施し、0.2%耐力、引 - 張強さ、伸び、絞りを取得する。 -	垂直	25	25	25				
							水平	13	13	13				
	M2 (Concept Laser)						斜角 (45°)	0	0	12	市共エウッギ ショニ			
					硬さ測定	ビッカース硬さを各試験片5点測定する。	-	5	5	5	- RZエイルキーシステ ノブサゴム社			
					組織観察	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					化学成分分析	切粉を採取して湿式分析を行う。	-	5	5	5	1			
(SLM)	M290 (EOS)	Type316L (未定)	なし	あり	常温引張試験	一些沢本の引進寺時代安佐1 000年十 引	垂直	25	25	25	_			
						常価での分振試験を実施し、0.2%耐力、分 張強さ、伸び、絞りを取得する。	水平	13	13	13				
							斜角 (45°)	0	0	12				
					硬さ測定	ビッカース硬さを各試験片5点測定する。	-	5	5	5	ロエ GE ーユークリ			
					組織観察	マクロ1枚+ミクロ3領域×2倍率での観 察を行う。	-	5	5	5) " 工)) " 休式去社			
					化学成分分析	切粉を採取して湿式分析を行う。	-	5	5	5				
		Type316L (未定)	なし	あり	常温引張試験	一会沢本の引進計時た実体1 0.20/計力 引	垂直	25	25	25				
	M290 (EOS)					吊温での引振訊験を夫他し、0.2%剛刀、5	水平	13	13	13				
						派通さ、仲ひ、叔りを取得する。	斜角 (45°)	0	0	12				
					硬さ測定	ビッカース硬さを各試験片5点測定する。	-	5	5	5	株式会社 IHI			
					組織観察	マクロ1枚+ミクロ3領域×2倍率での観 察を行う。	・クロ1枚+ミクロ3領域×2倍率での観 - 5 5 5 € 5							
					化学成分分析	切粉を採取して湿式分析を行う。	-	5	5	5				

表 4.7-1 Stepl 試験マトリクスと各社分担

		鋼種	熱処理				D	封盼山粉	担当会社	
造形方法	造形装置	(使用粉末またはワイヤベ	HIP 仉理	固溶化	試験項目	A. 方向	B. 繰返し数	武 秋 「 (A × B)	試験片造形	試驗実施注2)
		ンダー)		熱処理				(11 D)	注1)	时间天天加回
	SLM280	Type316L (oerlikon 社)			線膨張係数	3	1	3		C 社
			なし	あり	熱伝導率(熱拡散率、比熱、密度)	3	1	3		
					剛性率(縦弾性係数、横弾性係数、ポアソン比)	3	1	3	мні	
	(SLM Solution)		あり	あり	線膨張係数	3	1	3	101111	
					熱伝導率(熱拡散率、比熱、密度)	3	1	3		
					剛性率(縦弾性係数、横弾性係数、ポアソン比)	3	1	3		
		Type316L (未定)	なし	あり	線膨張係数	3	1	3		
	M2 (Concept Laser)				熱伝導率(熱拡散率、比熱、密度)	3	1	3		
PBF 方式 (SLM)					剛性率(縦弾性係数、横弾性係数、ポアソン比)	3	1	3	市本 Fee	
			あり	あり	線膨張係数	3	1	3	■ 泉之 ESS	
					熱伝導率(熱拡散率、比熱、密度)	3	1	3		
					剛性率(縦弾性係数、横弾性係数、ポアソン比)	3	1	3		
	M290 (EOS)	Type316L (未定)	なし	あり	線膨張係数	3	1	3		
					熱伝導率(熱拡散率、比熱、密度)	3	1	3		
					剛性率(縦弾性係数、横弾性係数、ポアソン比)	3	1	3		
			あり	あり	線膨張係数	3	1	3	日立GE	
					熱伝導率(熱拡散率、比熱、密度)	3	1	3		
					剛性率(縦弾性係数、横弾性係数、ポアソン比)	3	1	3		
		Type316L (未定)	なし	あり	線膨張係数	3	1	3		
	M290 (EOS)				熱伝導率(熱拡散率、比熱、密度)	3	1	3		
					剛性率(縦弾性係数、横弾性係数、ポアソン比)	3	1	3		
			あり	あり	線膨張係数	3	1	3	IHI	
					熱伝導率(熱拡散率、比熱、密度)	3	1	3		
					剛性率(縦弾性係数、横弾性係数、ポアソン比)	3	1	3		
DED 方式 (レーザーワイ ヤーDED)	MHI 自社開発	Type316L (日本 WEL)	なし	なし	線膨張係数	3	1	3		
					熱伝導率 (熱拡散率、比熱、密度)	3	1	3		
					剛性率(縦弾性係数、横弾性係数、ポアソン比)	3	1	3		
			なし	あり	線膨張係数	3	1	3	MHI	
					熱伝導率 (熱拡散率、比熱、密度)	3	1	3		
					剛性率(縦弾性係数、横弾性係数、ポアソン比)	3	1	3		

表 4.7-2 Step2 試験マトリクスと各社分担(物性値計測)

注1) MHI:三菱重工業株式会社、東芝 ESS:東芝エネルギーシステムズ株式会社、日立 GE:日立 GEニュークリア・エナジー株式会社、IHI:株式会社 IHI

注2) 試験実施担当会社は今後の各社見積結果等により最終決定する。

造形方法	造形装置	鋼種 (使用粉末またはワイヤ)	熱処理		試験実施担当会社注2)											
			HIP 処理	固溶化 熱処理	高温引張 試験	疲労試験	硬さ試験	腐食試験	SCC 試験 (BWR)	SCC 試験 (PWR)	組織観察	化学成分 分析	非破壊試 験(CT)	□ 孤駚斤 垣 ル 担当会社 ^{注 1)}		
PBF 方式 (SLM)	SLM280 (SLM Solution)	Type316L (MetcoAdd 316LA)	なし	あり	B 社	A 社	D 社	D 社	C 社	A 社	D 社	D 社	B 社	MIII		
			あり	あり										WITH		
	M2 (Concept Laser)	Type316L (未定)	なし	あり										車芝 FSS		
			あり	あり												
	M290 (EOS)	Type316L (未定)	なし	あり										日立 GE		
			あり	あり												
	M290 (EOS)	Type316L (未定)	なし	あり										ІНІ		
			あり	あり												
DED 方式 (レーザーワイ ヤーDED)	MHI 自社開発	ž Type316L	なし	なし										МНІ		
			加加 口 化 肋 尤	wmi 日仁州光	MIII 日社用光	(日本 WEL)	なし	あり								

表 4.7-3 Step2 試験マトリクスと各社分担(物性値計測以外)

注1) MHI:三菱重工業株式会社、東芝 ESS:東芝エネルギーシステムズ株式会社、日立 GE:日立 GEニュークリア・エナジー株式会社、IHI:株式会社 IHI 注2) 試験実施担当会社は今後の各社見積結果等により最終決定する。 4.8 試験工程

4.1 項から 4.7 項までの検討結果を基に、試験工程を検討した(図 4.8-1)。

2022 年度は原材料となる粉末の手配、および造形パラメータの検討から開始し、Step1 試験片の造形、熱処理を完了させた後、非破壊検査、試験片加工を経て引張試験等を実施する。 試験結果により製造要領認定方法の妥当性が検証され、その成果は JSME AM 技術規格案検 討のバックグランド情報とする予定である。

Step2 試験のうち物性値計測用の試験片準備は Step1 試験片の造形完了に引き続き開始し、 熱処理、試験片加工を経て物性値計測までを 2022 年度作業として完了させる。一方、機械 特性、耐 SCC 性など、物性値計測以外の試験については 2022 年度に引き続き試験詳細計画 を進める予定であり、その一部の内容は、Step1 試験の成果の反映が必要となるため、これ らの試験片準備は Step1 試験の評価完了後の開始となる。2022 年度は試験片準備までを完 了させ、試験は 2023 年度の開始とする。疲労試験、SCC 試験を含む Step2 の全試験の完了 は 2024 年度となり、これらの成果は最終的な AM 材料仕様を確立するためのデータベース として用いられる。

Step3 モックアップ試験については、2023 年度に実施内容を検討し 2024 年度にモックア ップ造形と破壊試験を実施の予定である。



図 4.8-1 材料試験工程

5. まとめ

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のうち、今年度は規格化に向 けた材料データベース策定方針の検討と材料データ取得計画の策定を行った。

規格化に向けた材料データベース策定方針の検討においては、ASME が発行した AM 材 適用のための基準書 ASME PTB-13-2021 の指針に沿った規格案の策定を検討する方針とし たが、その前提としてこの基準書による品質担保のしくみが妥当であることの確認が必要 であり、そのための材料データを取得することとした。具体的には、プロセス検証方法の妥 当性確認(STEP1)、規格化に向けた材料データの取得(STEP2)、モックアップ検証方法の妥当 性確認(STEP3)、製品試験方法の妥当性確認(STEP4)の4段階となるが、このうち、本事業で は STEP1 から STEP3 に対応した材料データ取得を実施する計画とした。

材料データ取得計画の策定では、本事業で優先とする造形技術(PBF 法、ワイヤ DED 法)、 対象材料(SUS316L)をそれぞれ選定し、造形条件、試験項目、方法の検討を行った。STEP1 試験は、これらの検討結果を反映して試験マトリクスおよび各社分担の設定を行った。 STEP2 試験の試験マトリクス、分担については STEP1 の結果を踏まえて次年度に最終化す る。また STEP3 試験についても STEP1/2 の成果に基づき次年度以降に計画を進める予定と した。