

「付加製造（3Dプリンティング）に関するガイドライン」の紹介

大滝 一紀*

1. はじめに

近年、3Dプリンティングに代表される付加製造技術を用いた金属製品の開発が急速に普及し、特に自動車、航空宇宙、医療、産業機器等の分野において同技術が活用されている。その理由として、付加製造の特徴である、従来は不可能であった形状の造形能力が挙げられる。この能力により、三次元の複雑形状、格子構造、傾斜構造等の造形が実現し、高度に設計された製品の製造が可能となることから、今後のものづくりに大きな変革をもたらす技術といわれている。

付加製造の歴史は長く、1980年代初頭に日本において紫外線及び感光性樹脂を用いた光造形法を発明したことに始まるといわれ、後に米国企業や日本企業が事業化した。当初は樹脂造形を中心としたものであったが、米国において金属材料への適用についても研究が開始され、現在までに多数の付加製造装置が開発されている。

昨今、各種製造業においてはコスト削減や生産性向上が強く求められており、その打開策として省人化しつつ効率的に製品製造が可能となる付加製造技術が注目されている。加えて、付加製造装置の市場規模も年々拡大している。このため、付加製造技術を用いる製品製造の分野は今後更に拡大し、船用機器の分野においても活用されることが見込まれる。

このような背景から、本会では付加製造技術の紹介を目的として、用語、当該技術の分類、特徴等を纏め、加えて、当該技術を用いて製造された金属製船用機器等の承認要件についても取り纏めた付加製造（3Dプリンティング）に関するガイドラインを策定した。以下、当該ガイドラインの内容を紹介する。

2. ガイドラインの紹介

2.1 付加製造に関する基礎知識（本会ガイドライン中の第1部）

2.1.1 用語

本ガイドラインにて使用する用語は付加製造

(Additive Manufacturing：以下、「AM」という。)技術における基本的な用語であることから、ISOやJIS等の国際規格又は国家規格を参考に規定している。具体的に参考とした規格は以下の通りである。

- (1) ISO/ASTM 52900：2015 “Additive manufacturing – General principles – Terminology”
- (2) JIS B9441：2020 「付加製造（AM）-用語及び基本的概念」

2.1.2 付加製造技術（AM技術）

AM技術の種類として、以下の表1に掲げる7種が定義されている。このうち、現在、金属製品の製造に主として用いられているAM技術は、粉末床溶融結合（Powder Bed Fusion）及び指向性エネルギー堆積（Direct Energy Deposition）が一般的であるが、本ガイドラインにおいては、表1に掲げる全7種のAM技術に対する概要、造形用材料、積層後の工程を紹介している。その他、各造形用材料に対して使用されている主なAM技術の分類についても紹介している（図1）。

表1 AM技術の種類

	AM技術
1	結合剤噴射 (Binder Jetting : BJT)
2	材料噴射 (Material Jetting : MJT)
3	粉末床溶融結合 (Powder Bed Fusion : PBF)
4	指向性エネルギー堆積 (Directed Energy Deposition : DED)
5	シート積層 (Sheet Lamination : SHL)
6	液槽光重合 (Vat Photopolymerization : VPP)
7	材料押出 (Material Extrusion : MEX)

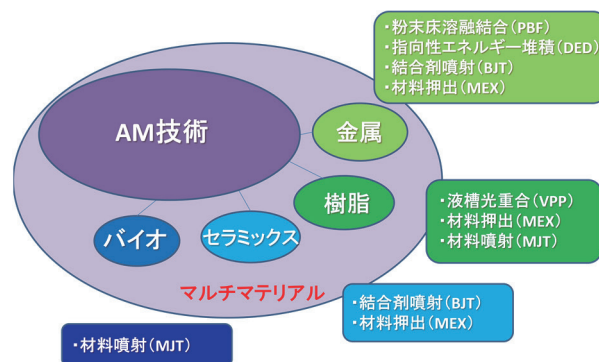


図1 各造形用材料に対して使用されている主なAM技術の分類

* 開発本部 機関開発部

2.2 AMにより製造される金属製船用機器等の取り扱い（本会ガイドライン中の第2部）

2.2.1 一般

(1) 適用

本会ではAM技術は鋳造技術の代替手法と捉え、これまで鋳造技術を用いて製造されてきた製品・部品が、近い将来AM技術を用いて製造される場合があることを予想している。従って、船舶に使用される鋳造製品であり、且つ本会が承認を要求している製品が本ガイドラインの適用対象となると考えている。具体的な対象としては、船用材料・機器等の承認及び認定要領第1編3章に掲げる金属製品（NK船用材を使用）（表2）を想定している。一方で、表2以外の金属製品（非NK船用材を使用）に対する承認要望へも応えられるようにすべく、別途承認スキームを用意しており、その内容は2.2.5で紹介する。

表2 適用対象となる製品例

材料区分	用途区分	
鋳造品	炭素鋼鋳鋼品*	(1) 船体用部品（例：船尾材、舵骨、舵頭材等）
	低合金鋼鋳鋼品	(2) 内燃機関用部品（例：連接棒、ピストン棒、ピストンクラウン、シリンドカパー等）
	ステンレス鋼鋳鋼品	(3) クランク軸
	低温度用鋳鋼品	(4) 推進軸系用部品（例：スラスト軸、中間軸、プロペラ軸等）
鍛造品	球状黒鉛鋳鉄	(5) 動力伝達装置用部品（例：減速歯車、減速歯車軸等）
	ねずみ鋳鉄品	(6) 蒸気タービン用部品（例：タービンロータ、タービンディスク、タービン羽根等）
	炭素鋼鍛鋼品*	(7) 配管用部品（例：弁、管取付け物等）
	低合金鋼鍛鋼品	(8) 揚貨装置用部品（例：グースネックピン、グースネックブラケット）
鋼品	ステンレス鋼鍛鋼品	(9) ボイラ及び圧力容器（低温度は除く）用部品
	低温度用鍛鋼品	(10) 液化ガスばら積船用部品

(2) 承認までの流れ

本ガイドラインにおける承認の流れを図2に示す。前(1)で述べた通り、表2に該当する製品をAM技術を用いて製造する際、図2における「NK船用材」と記したフローが適用となる。一方、表2以外の金属製品（非NK船用材を使用）に対して任意での承認を希望する場合には、「非NK船用材」と記したフローが適用となる。なお、図2に示すフロー中の各項目の詳しい内容については、2.2.2に「造形用材料の認定」、2.2.3に「製造方法の承認」、2.2.4に「製品の試験・検査」、2.2.5に「製造予定製品の事前審査」に関する内容を記載している。

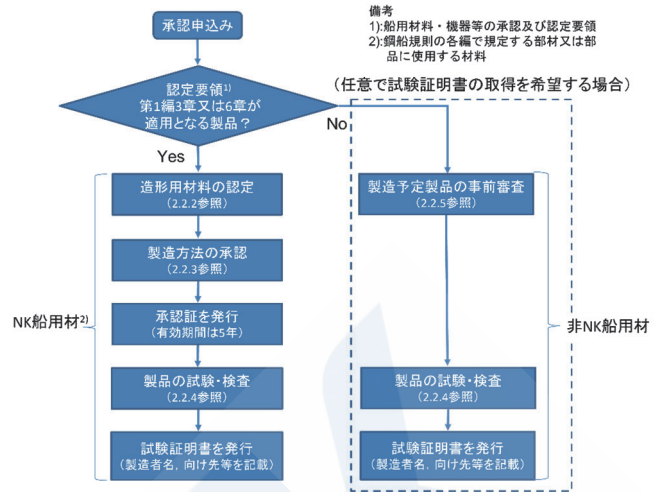


図2 承認の流れ

(3) 造形用材料と製品の材料記号

AMに関する造形用材料と製品の材料記号については、本会の鋼船規則K編又は本会が適当と認める国際規格又は国家規格等（例JIS、ISO等）の公的規格に規定される材料記号を使用する。

AM用の造形用材料については、同材料記号の後ろに-F-AM、続いて以下に記載の熱処理の表示記号（表3）、AM技術に関する表示記号（表4）を追加する。必要に応じて、本会の鋼船規則M編6章に規定される水素量に関わる記号（-H5、-H10、-H15）も使用する。

AMにより製造された製品については、同材料記号の後ろに-AM、続いて表3に記載の熱処理の表示記号、表4に記載のAM技術に関する表示記号を追加する。

表3 熱処理の表示記号

-A	付加製造まま(as printed)
-SR	応力除去焼鈍(stress relieve heat treated)
-SA	溶体化処理(solution annealed / e.g. for homogenization)
-HIP	熱間等方圧加工法(hot isostatic pressed)
-HPHT	高圧熱処理(high pressure heat treatment)
-X	その他の熱処理

表4 AM技術に関する表示記号

MJT	材料噴射 (material jetting)
PBF-LB	レーザービーム粉末床溶融結合 (powder bed fusion for laser beam melting)
PBF-EB	電子ビーム粉末床溶融結合 (powder bed fusion for electron beam melting)
PBF-SL	レーザー焼結粉末床溶融結合 (powder bed fusion for selective laser melting)
LMD	直接金属レーザー焼結法 (laser metal deposition)
WAAM	ワイヤアーク焼結法 (wire arc additive manufacturing)
その他のAM技術	本会の適当と認めるところによる。

一例として、材料記号の記載例を以下に示す。

KSCA45-F-AM-A-WAAM:

ワイヤアーク焼結法によってAMされたままの低合金鋼鋳鋼品KSCA45用の造形用材料

KFCD45-AM-A-PBF-LB:

レーザービーム粉末床溶融結合によってAMされたままの球状黒鉛鋳鉄KFCD45のAM製品

2.2.2 造形用材料の認定

(1) 認定までの流れ

造形用材料の認定の流れを図3に示す。ここでいう「申込」は、造形用材料の材料供給者が行うことを想定している。なお、各項目の詳細については、以下の(2)以降で紹介する。本会では、本会船級船として登録している船舶における船体構造やエンジン等の主要な構造物等に対し、本会が承認した材料の使用を要求しており、AMにより製造される金属製船用機器等の材料においても同じ考え方を適用している。



図3 造形用材料の認定までの流れ

(2) 提出書類

認定に際し、最低限提出が必要となる書類を表5に示す。なお、既に造形用材料について本会の認定を受けており、その際に提出した書類と重複するものがある場合にあっては、提出書類の一部を省略することができる。

表5 造形用材料の認定のための提出書類

提出書類	
①	造形用材料の認定申込書
②	認定試験方案（合否基準を含む）
③	製造工場の概要 (a) 製造所名及び所在地 (b) 沿革 (c) 組織及び従業員数
④	製造工程に関する資料 (a) 製造工程（主要製造工程毎のフローチャートを含む） (b) 主要製造設備の概要
⑤	造形用材料に関する資料（材料供給者に関する社名、所在地等の情報を含む） (a) 造形用材料の製造方法、タイプ (b) 造形用材料特性（例：粉末の場合は、粉末の流動性、充填性。） ● ワイヤタイプ：心線の種類、化学成分、受入、伸線、防錆、ワイヤ径に関する資料 ● 粉末タイプ：主要成分、密度、表面積、粒度分布、流動特性、均一性/同等性、形態的特徴、粒子間摩擦、粒子凝集等に関する資料 (c) 付加製造した製品の特性（引張強度範囲等/付加製造技術毎） (d) 造形用材料製造所における管理方法 (e) 再利用基準及びその方法（該当する場合）
⑥	造形用材料の品質管理に関する資料 (a) 品質管理体制、管理基準 (b) 社内検査規格及び検査設備 (c) 社内検査部門及び苦情処理部門 (d) 出荷証明書等の例
⑦	主要な造形用材料の製造実績に関する資料
⑧	造形用材料の化学成分に関する資料
⑨	熱処理に関する資料（実施する場合）
⑩	貯蔵方法及び開封前/開封後の保存期間に関する資料
⑪	包装、荷造、表示、トレーサビリティに関する資料
⑫	使用方法、適用する付加製造技術（推奨条件等を含む）に関する資料
⑬	その他本会が必要と認める資料

(3) 認定基準調査（実情調査）

本調査では、造形用材料を安定した作業の下で認定試験に使用した造形用材料と同等又はそれ以上のものを均一且つ継続した品質で製造し得る能力（設備、技術、品質管理及び社内検査部門）があるか否かを確認することを目的としている。なお、調査に際し、主に以下の項目について確認を行うこととしている。

- 製造工程
- 社内検査部門及び苦情処理部門
- 製造設備及び検査設備
- 各種社内規格、作業標準及び品質管理体制とその実施状況

(4) 認定試験

承認された試験方案に従い、以下の項目（表6）に関する試験の実施を規定している。本試験では、材料の健全性を確認することを目的としている。

表6 認定試験

試験項目	試験内容
化学成分分析	JIS G 0321等の本会が適当と認める方法で化学成分分析を実施し、分析結果が事前に提出した資料（提出資料⑧）の数値通りとなっているか確認する。
引張試験	造形用材料を用いて製造される製品（認定最大寸法）と同時に作成された試験片を用いて、引張試験を実施し、試験結果が事前に承認された試験方法に記載の合否基準に適合するか確認する。なお、引張試験片に関しては、急激な溶融凝固による組織の異方性を考慮し、図4から図6に示すように各角度に対し少なくとも3本の試験片を作成しなければならない。
組織観察	試験片に対し、x, y, z各方向の断面における組織観察を実施し、破壊の原因となり得る欠陥（空隙や未溶融不良等）が無く、組織が連続となっていることを確認する。
その他の試験 (本会が必要と認めた場合)	硬さ試験、曲げ試験、衝撃試験、表面粗度試験、脆性破壊試験、疲労試験、腐食試験、水素試験、粉末再利用試験、粒度分布試験、粒子形態試験、金属粉末流量試験、安息角試験、せん断強度試験、圧縮強度試験等を追加で要求することがある。

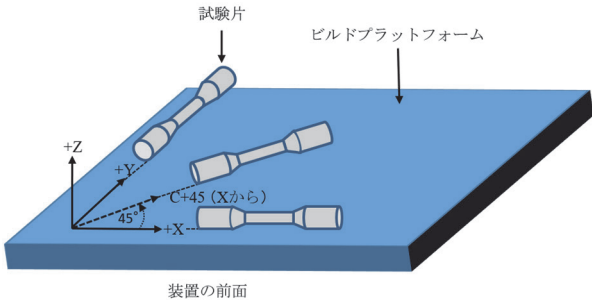


図4 引張試験片【0°】

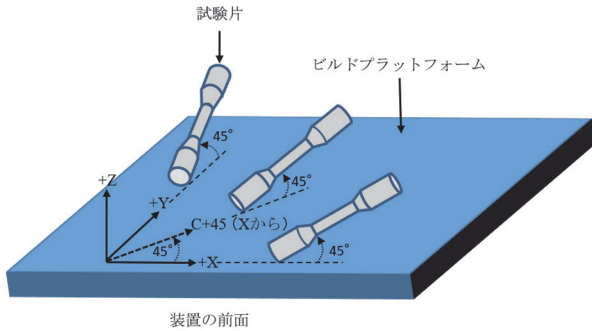


図5 引張試験片【45°】

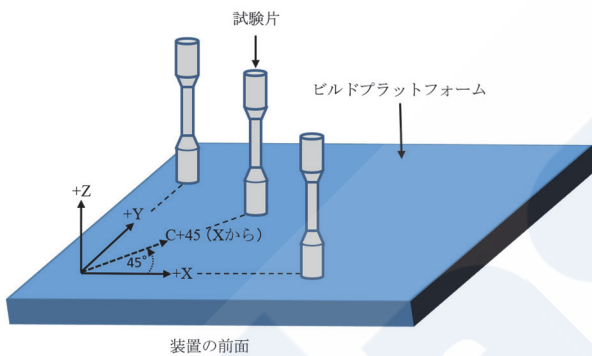


図6 引張試験片【90°】

する製造方法として適切であると判断できた際の証明を意味する。当該承認における流れを図7に示す。なお、ここでいう「申込」はAMシステムの全体を管理する所有者が行うことを想定している。



図7 製造方法の承認までの流れ

(2) 提出書類

承認に際し、最低限提出が必要となる書類を表7に示す。なお、既に製品について本会の承認を受けており、その際に提出した資料と重複するものがある場合は、提出資料の一部を省略することができる。

表7 製造方法の承認のための提出書類

	提出書類
①	製造方法の承認申込書
②	承認試験方案 (合否基準を含む)
③	製造工場の概要 (a) 製造所名及び所在地 (b) 沿革 (c) 組織及び従業員数
④	使用する付加製造装置に関する資料 (最大寸法, 最大板厚を含む)
⑤	製造工程に関する資料 (溶着速度, トポロジー最適化に関する資料を含む)
⑥	造形用材料に関する資料 (材料供給者に関する社名, 所在地等の情報を含む) (a) 製造方法 (b) 造形用材料特性 (例: 粉末の場合は, 粉末の流動性, 充填性。) (c) 管理方法 (d) 再利用基準及びその方法 (該当する場合) (e) 品質管理
⑦	製品の品質管理に関する資料 (試験機等を含む) (a) 品質管理体制, 管理基準 (b) 社内検査規格及び検査設備 (c) 社内検査部門及び苦情処理部門 (d) 出荷証明書の例
⑧	熱処理方法に関する資料 (該当する場合) (a) 熱処理炉 (タイプ, 寸法, 熱源熱電対位置等) (b) 熱処理条件 (温度, 保持時間, 冷却媒質等) (c) 熱処理記録方法
⑨	非破壊試験に関する資料 (従事者名簿を含む)
⑩	主要製品の製造実績に関する資料
⑪	製品の化学成分及び機械的性質に関する資料
⑫	製品の溶接性に関する資料 (該当する場合)
⑬	表面状態 (粗度, 仕上げ状態等)に関する資料
⑭	補修要領に関する資料 (きずの許容条件を含む)
⑮	その他本会が必要と認める資料

(5) 合否基準

合否基準は鋼船規則K編又は本会が適当と認める国際規格又は国家規格等 (例JIS, ISO等)の公的規格に基づき、申込者が設定することとしている。

(6) 認定通知

実情調査及び試験成績書により、本会が適当と認めた造形用材料に対して、銘柄ごとに、認定品証明書を発行する。なお、当該証明書の有効期限は発行日から1年を経過した日とする。

2.2.3 製造方法の承認

(1) 承認までの流れ

製造方法の承認とは、製品の品質の均一性を前提として、あらかじめ代表的な個品に対する製造方法、品質管理を確認した上で、製品に対して審査、試験及び検査を行い、当該製品に対

(3) 実情調査

本調査は、申込者が製品を均一な品質で製造できる設備、工程、品質管理等を有していることの確認を目的としている。なお、本調査は実際のAMシステム及び製造工程等を調査できるよう、適当な時期に行うこととしている。

(4) 承認試験

承認された試験方案に従い、以下の項目 (表8)に関する試験の実施を規定している。本試

験では、あらかじめ決められた製造方法に基づき製造された製品を用いて、当該製造方法の妥当性について確認することを目的としている。

表8 製造方法の承認試験

試験項目	試験内容
引張試験	製品と同時に作成された試験片を用いて、引張試験を実施し、試験結果が事前に承認された試験方法に記載の合格基準に適合するか確認する。なお、引張試験片に関しては、造形用材料の認定試験と同様に、前図4から図6に示すように各角度に対し少なくとも3本の試験片を作成しなければならない。
組織観察	試験片に対し、x, y, z各方向の断面における組織観察を実施し、破壊の原因となり得る欠陥（空隙や未溶融不良等）が無く、組織が連続となっていることを確認する。
非破壊試験	製品に対し、使用上有害と認められる内部欠陥及び表面欠陥を検知できる方法で非破壊試験を実施し、当該製品の内部及び表面に使用上有害と認められる欠陥の有無を確認する。
外観検査	製品に対し、目視により外観検査を実施し、製品表面において、使用上有害と認められる欠陥の有無を確認する。
化学成分分析	JIS G 0321等の本会が適当と認める方法で化学成分分析を実施し、分析結果が事前に提出した資料（提出資料⑩）の数値通りとなっているか確認する。
その他の試験 （本会が必要と認めた場合）	硬さ試験、曲げ試験、衝撃試験、表面粗度試験、脆性破壊試験、疲労試験、腐食試験、せん断強度試験、圧縮強度試験、溶接性試験等を追加で要求することがある。

(5) 合格基準

合格基準は鋼船規則K編又は本会が適当と認める国際規格又は国家規格等（例JIS, ISO等）の公的規格に基づき申込者が設定することとしている。

(6) 承認証

実情調査及び試験成績書により、本会が適当と認めたAMシステムを用いた製品に対する製造方法を承認し、承認証を発行する。なお、当該承認証の有効期限は承認の日から5年とする。

2.2.4 製品の試験・検査

(1) 製品の試験・検査の流れ

製品の出荷に先立ち行う試験・検査手順の流れを図8に示す。なお、ここでいう「申込」はAMシステムの所有者や本試験・検査の実施を請け負ったAMシステムの所有者が行うことを想定している。



図8 製品の試験・検査の流れ

(2) 提出書類

製品の試験・検査に際し、本会へ試験・検査方案の提出が必要となる。なお、本試験・検査に対する合格基準についても当該方案へ含めることとしている。

(3) 試験・検査

承認された試験・検査方案に従い、以下の項目（表9）について試験・検査の実施を規定し

ている。本試験では、代表的な製品を用いて製品の健全性を確認することを目的としている。

表9 製品の承認試験

試験項目	試験内容
機械試験	以下の試験を行い、承認された試験・検査方法に記載の合格基準に適合するか確認する。 (1) 引張試験（表6参照） (2) 硬さ試験 (3) 衝撃試験※ （※使用する造形用材料によっては、本会が本試験の省略を認める場合もある。）
組織観察	試験片に対し、x, y, z各方向の断面における組織観察を実施し、破壊の原因となり得る欠陥（空隙や未溶融不良等）が無く、組織が連続となっていることを確認する。
非破壊試験	製品に対し、使用上有害と認められる内部欠陥及び表面欠陥を検知できる方法で非破壊試験を実施し、当該製品の内部及び表面に使用上有害と認められる欠陥の有無を確認する。
外観検査	製品に対し、目視により外観検査を実施し、製品表面において、使用上有害と認められる欠陥の有無を確認する。
寸法計測	製品の寸法計測を行い、設計通りの寸法となっているかの確認をする。
化学成分分析	JIS G 0321等の本会が適当と認める方法で化学成分分析を実施し、分析結果が事前に提出した資料（提出資料⑩）の数値通りとなっているか確認する。
その他の試験 （本会が必要と認めた場合）	曲げ試験、表面粗度試験、脆性破壊試験、疲労試験、腐食試験、せん断強度試験、圧縮強度試験等を追加で要求することがある。

(4) 合格基準

合格基準は鋼船規則K編又は本会が適当と認める国際規格又は国家規格等（例JIS, ISO等）の公的規格に基づき申込者が設定することとしている。

(5) 刻印

試験・検査に合格した製品について、本会印を刻印する。一方、刻印することが適当でない場合には、適宜押印等の他の方法で対応する。

(6) 証明書

前(5)に加え、試験及び検査に合格したことを示す「試験検査証明書」を発行する。なお、当該証明書には有効期限に関する記載は無く、あくまで事実証明を行うものとなる。

2.2.5 製造予定製品の事前審査

(1) 審査の流れ

本審査は、表2以外の金属製品（非NK船用材を使用）に対して任意での承認を希望する場合に適用する要件であり、その審査の流れを図9に示す。なお、ここでいう「申込」はAMシステムの所有者が行うことを想定している。



図9 製造予定製品の事前審査の流れ

(2) 提出書類

AMシステムを用いた製造を予定する製品に

対する本ガイドライン適用の妥当性を確認するため、審査に際し、表10に示す書類の提出が必要となる。審査の結果、本ガイドラインの適用に特段の問題が無ければ、本会は前2.2.4に規定する試験・検査の申込を行うよう申込者へ通知する。

表10 製造予定製品の事前審査のための提出書類

	提出書類
①	製造を予定する製品の詳細資料（例：構造図面、材料供給者、造形用材料の銘柄、積層構成、内部構造等）
②	使用するAM装置の仕様書
③	製造を予定する製品のAM工程に関する資料（ビルドチャンバ内又はビルドプラットフォーム上のどの位置においても、均一な品質でAMが可能であることを示す資料を含む）
④	品質管理に関する資料（造形用材料の受け入れ基準を含む）
⑤	製品の化学成分及び機械的性質に関する資料
⑥	その他本会が必要と認める資料

表11 付録1における記載内容（概要）

金属粉末の特徴：	<ul style="list-style-type: none"> ✓ AMにおいて求められる金属粉末は、流動性、拡がり性、充填性が重要である。 ✓ AM技術において使用される粉末の一般的な粒径サイズは以下の通りである。 <ul style="list-style-type: none"> ・レーザービームパウダーベッド方式：20～45 μm ・電子ビームパウダーベッド方式：45～105 μm ・デポジション方式：45～105 μm
保管・管理方法：	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 湿気の多い場所は避け、冷暗所での保管が必要。加えて、乾燥剤を入れた容器又は不活性ガスで密閉して保管することが必要である。 ✓ 管理方法のマニュアル化が望ましい。 ✓ 粉末の使用前には湿度計を用いて必ず水分量（湿度）を計測し、自社で定めた閾値未満であることの管理が必要である。 ✓ 再利用粉末は、定期的に粉末形状や酸素量を測定し管理する必要がある。
不慮の事故への対策と対応：	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 金属粉末の燃焼は、①可燃物、②酸素、③着火源があることにより発火するため、これら三要素のうちいずれかを排除することが必要である。 ✓ 作業時に発火した際には、金属粉火災用消火器、乾燥砂を使用し、酸素を遮断することが必要である。なお、泡消火器は使用せず、水による消火も水素を発生するため厳禁である。

参考文献

- 1) 日本海事協会，付加製造（3Dプリンティング）に関するガイドライン，（2021）

(3) 試験・検査

前2.2.4の要件に規定する試験・検査を実施し、製品の健全性を確認する。当該試験・検査に際し、合否基準を含む試験・検査方案を作成し、本会へ提出することが必要となる。また、当該合否基準作成にあつては、鋼船規則K編又は本会が適当と認める国際規格又は国家規格等（例JIS, ISO等）の公的規格によることとしている。

(4) 刻印

前2.2.4と同様に、試験・検査に合格した製品に対し、本会印を刻印する。一方、刻印することが適当でない場合には、適宜押印等の他の方法で対応する。

(5) 証明書

前2.2.4と同様に、試験及び検査に合格したことを示す「試験検査証明書」を発行する。

2.3 金属粉末の特徴（本会ガイドライン中の付録1）

AM技術を用いた金属製品の製造において重要となる金属粉末に焦点をあて、その特徴、保管・管理方法、不慮の事故への対策と対応に関する基本事項を付録1として纏めている。各項目の概要は以下の通り（表11）である。