

NRA 技術ノート

NRA Technical Note Series

先進製造技術の開発及び原子力分野への適用の 現状に関する調査

Review of the current status of the development of advanced
manufacturing technologies and their application in the nuclear field

山内 紹裕

YAMAUCHI Akihiro

小澤 正義

OZAWA Masayoshi

システム安全研究部門

Division of Research for Reactor System Safety

東 喜三郎

AZUMA Kisaburo

地震・津波研究部門

Division of Research for Earthquake and Tsunami

原子力規制庁

長官官房技術基盤グループ

Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

令和6年9月
September 2024

本報告は、原子力規制庁長官官房技術基盤グループが行った安全研究等の成果をまとめたものです。原子力規制委員会は、これらの成果が広く利用されることを期待し適時に公表することとしています。なお、本報告の内容を規制基準、評価ガイド等として審査や検査に活用する場合には、別途原子力規制委員会の判断が行われることとなります。

本報告の内容に関するご質問は、下記にお問い合わせください。

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ システム安全研究部門
地震・津波研究部門

〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9 六本木ファーストビル

電話： 03-5114-2223 (システム安全研究部門)
03-5114-2226 (地震・津波研究部門)

ファックス： 03-5114-2233 (システム安全研究部門)
03-5114-2236 (地震・津波研究部門)

先進製造技術の開発及び原子力分野への適用の現状に関する調査

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ
システム安全研究部門 山内 紹裕、小澤 正義、
地震・津波研究部門 東 喜三郎

要 旨

Advanced Manufacturing は、先進技術を用いて既存の製造方法の改善、及び新製品を生産するための革新的な製造方法を指す用語である。Advanced Manufacturing により省資源・省エネルギー化、廃番パーツの復元、製造コスト低減等が期待される。米国原子力規制委員会は先進製造技術（Advanced Manufacturing Technology、以下「AMT」という。）を、従来原子力産業で使用されておらず、標準化されていない製造技術と定義している。特に原子力産業では、付加製造、熱間等方加圧を用いた粉末冶金法、電子ビーム溶接等の AMT の適用が検討されている。

本技術ノートでは、AMT の原子力分野への適用の現状を把握することを目的とし、AMT に係る国際機関、各国の標準化団体及び規制機関の活動調査した内容を概説する。続いてそれぞれの AMT の概要、研究開発動向及び技術的課題について説明する。

現在、世界的に AMT の利用は検討されており、国際原子力機関や経済協力開発機構／原子力機関では、AMT を含む先進技術の適用可能性や課題を分析するために、加盟国間で情報を共有するための活動が進められている。米国では、標準化団体が AMT を原子力産業に適用するための規格基準類の策定を進めている。そのため、米国原子力規制委員会も審査に用いるガイド文書等を整備している。欧州では、原子力施設における付加製造部品の適格性評価プロセスを開発するとともに、供用期間中の材料特性を評価するためのプロジェクトが実施されている。我が国では、一般社団法人日本機械学会が付加製造材の技術規格化について検討を開始した。対応してプラントメーカーは、その規格策定に必要な材料特性データベースの整備を進めている。

しかし、AMT の原子力分野への適用には課題が残されている。付加製造では、製造プロセスの最適化、サイバーセキュリティの確保、最終製品の品質保証が課題とされている。コールドスプレー法及び熱間等方加圧-粉末冶金法は、製造された部品の機械的性質、高経年化の影響、非破壊検査の手法等に関する知見が不足していることが課題とされている。電子ビーム溶接は、我が国では低合金鋼製蒸気発生器への適用事例がある。現在、欧米では小型モジュール炉圧力容器への適用が検討されており、この新たな用途に対しては、溶接部の熱時効や中性子照射による脆化に関する知見の不足が課題とされている。

Review of the current status of the development of advanced manufacturing technologies and
their application in the nuclear field

YAMAUCHI Akihiro and OZAWA Masayoshi
Division of Research for Reactor System Safety,
Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

AZUMA Kisaburo
Division of Research for Earthquake and Tsunami,
Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

Abstract

Advanced manufacturing refers to the innovative practice of using advanced technologies to improve existing manufacturing process and to create new products. It is expected that advanced manufacturing enables manufactures to save resources and energy, remanufacture obsolete parts, and decrease manufacturing costs. The US Nuclear Regulatory Commission defines advanced manufacturing technologies (AMTs) as those techniques and material processing methods that have not been traditionally used and have yet to be formally standardized by the nuclear industry. The use of AMTs such as additive manufacturing, powder metallurgy – hot isostatic pressing, and electron beam welding is especially under consideration in the nuclear industry.

This technical note summarizes the activity of international organizations, and standards developing organizations and regulatory body in each country for AMTs. In addition, the note provides an overview of AMTs, research and development trends, and technical issues.

The use of AMTs is currently under consideration around the world. The International Atomic Energy Agency and the Nuclear Energy Agency under the Organization for Economic Co-operation and Development have conducted information exchanges to identify the opportunities and challenges of the innovative technologies. Standards developing organizations in the United States have been developing codes and standards for applying AMTs to the nuclear industry. Accordingly, the U.S. Nuclear Regulatory Commission is also in the process of developing guidance documents for their review process. In Europe, a research project was launched to develop the qualification process and provide the evaluation of in-service behavior of additively manufactured components in

a nuclear installation. In Japan, the Japan Society of Mechanical Engineers has established a task to develop codes and standards for materials fabricated by additive manufacturing. In response to this activity, equipment manufacturers have been establishing a database of material properties necessary for the standardization.

However, there are remaining challenges for the deployment of AMTs in nuclear fields. The challenges of additive manufacturing are data collection to optimize manufacturing process, to ensure cyber security and the quality of the end products. There is a lack of knowledge of cold spray and powder metallurgy – hot isostatic pressing including the mechanical properties, the effects of aging, and non-destructive inspection methods for the components fabricated by using these technologies. In Japan, electron beam welding has been applied to low-alloy steel steam generators, while it has not been applied to small modular reactor pressure vessels considered in the U.S. and Europe. Therefore, the lack of knowledge on thermal aging and irradiation embrittlement of the weld metals is identified as a challenge for its application to the pressure vessels.

目 次

1. はじめに	1
2. 本論	2
2.1 国際機関の活動状況.....	2
2.2 各国の動向	3
2.2.1 米国	3
2.2.2 欧州	5
2.2.3 日本	5
2.3 AMT の詳細.....	5
2.3.1 付加製造 (AM)	5
2.3.2 コールドスプレー法 (CS)	15
2.3.3 熱間等方加圧を組み合わせた粉末冶金法 (PM-HIP)	18
2.3.4 電子ビーム溶接 (EBW)	22
3. まとめ	28
参考文献一覧	30
執筆者一覧	44

図 目 次

図 1	PBF による造形手順の模式図	7
図 2	DED による造形の概要図（粉末を原料として用いる場合）	9
図 3	コールドスプレー装置の概念図	15
図 4	ガスアトマイズ装置の概念図	18
図 5	HIP 装置の概念図	19
図 6	電子ビーム溶接機の構成例	23
図 7	EBW プロセスの概略図	23

略 語 表

AM	Additive Manufacturing (付加製造)
AMM	Advanced Manufacturing Methods (先進的製造方法)
AMT	Advanced Manufacturing Technology (先進製造技術)
ASME	American Society of Mechanical Engineers (米国機械学会)
BJ	Binder Jetting (結合材噴射法)
BWR	Boiling Water Reactor (沸騰水型原子炉)
CS	Cold Spray (コールドスプレー法)
DED	Directed Energy Deposition (指向性エネルギー堆積法)
DOE	Department Of Energy (米国エネルギー省)
EBW	Electron Beam welding (電子ビーム溶接)
ECT	Eddy Current Testing (渦電流探傷試験)
EPRI	Electric Power Research Institute (電力研究所)
EU	European Union (欧州連合)
EURATOM	European Atomic Energy Community (欧州原子力共同体)
IAEA	International Atomic Energy Agency (国際原子力機関)
InFORM	Intelligent Fixtures for Optimised and Radical Manufacture
HIP	Hot Isostatic Pressing (熱間等方加圧)
IoT	Internet of Things (モノのインターネット)
LPBF	Laser Powder Bed Fusion (レーザー粉末床溶融結合法)
NIST	National Institute of Standards and Technology (米国国立標準技術研究所)
Nuclear AMRC	Nuclear Advanced Manufacturing Research Centre
NUCOBAM	Nuclear Components Based on Additive Manufacturing
OECD/NEA	Organisation for Economic Co-operation and Development / Nuclear Energy Agency (経済協力開発機構／原子力機関)
PBF	Powder Bed Fusion (粉末床溶融結合法)
PM	Powder Metallurgy (粉末冶金)
PWHT	Post Weld Heat Treatment (溶接後熱処理)
SCC	Stress Corrosion Cracking (応力腐食割れ)
SMR	Small Modular Reactor (小型モジュール炉)
TWI	The Welding Institute (接合・溶接研究所 (英国))
USNRC	U. S. Nuclear Regulatory Commission (米国原子力規制委員会)
UT	Ultrasonic testing (超音波探傷試験)
10CFR	NRC Regulations Title 10, Code of Federal Regulations (連邦規則 Title 10)

1. はじめに

Advanced Manufacturing は、既存製品の製造方法の改善と、先端技術によって可能になった新製品の生産とがイノベーションを起こすことと定義される¹。Advanced Manufacturing を適用した柔軟で効率的な産業活動を目指す取組が世界的に検討されており^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8}、現在、この技術の原子力分野への適用について特に欧米を中心に検討が進められている。米国原子力規制委員会 (U. S. Nuclear Regulatory Commission、以下「USNRC」という。) は、先進製造技術 (Advanced Manufacturing Technology、以下「AMT」という。) を「これまで原子力産業で使用されておらず、標準化されていない製造技術を幅広くカバーするための包括的な呼称」として定義した⁹。原子力規制委員会委員からの調査指示 (令和 5 年度 原子力規制委員会 第 39 回会議、令和 5 年 10 月 25 日) により、国際機関、欧米の規制機関及び産業界における AMT に関する動向について、技術基盤グループで調査を行った。

現在欧米で原子力分野への適用について検討が進められている AMT としては、後述の積層造形に代表される付加製造 (Additive Manufacturing、以下「AM」という。)、コールドスプレー法 (Cold Spray、以下「CS」という。)、熱間等方加圧を用いた粉末冶金法 (Powder Metallurgy-Hot Isostatic Pressing、以下「PM-HIP」という。)、電子ビーム溶接 (Electron Beam Welding、以下「EBW」という。) 等がある。

AMT は大きく、AM の様な新しい材料製造技術、他産業では既に実用化されている PM-HIP のような材料製造技術並びに CS のような補修技術及び EBW のような溶接技術に分けられる。

容器、配管、弁、部品等の製造に AM や PM-HIP を導入すると、必要な形状を切削加工や溶接を施すことなく得られ、省資源・省エネルギーの達成、工数の削減による製造時間の短縮を図ることができる^{10, 11, 12}。また、廃番になった部品 (Obsolete Parts) の形状データを測定し、それに基づいて部品の復元・製造が期待できる¹²。EBW においては溶接時間の短縮による製造コストの低減が期待される¹³。

原子力分野においては、既存の軽水炉、改良型軽水炉、小型モジュール炉 (Small Modular Reactor、以下「SMR」という。) 等を対象として、原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する圧力容器、給水入口ノズルなどのクラス 1 機器、チャンネルファスナー等の燃料に関する部品等の製造技術として AM や PM-HIP の適用が検討されている^{10, 14, 15}。また、既存の軽水炉に対しては、廃番になった弁の交換品を AM により製造し実機に適用するなどの実用化¹⁶、又は実用化に向けた検討が進められている¹⁷。

一方、補修技術として、CS は高耐食性皮膜の形成により応力腐食割れの緩和や補修への適用が期待されている¹⁴。また、溶接技術としては、溶接時間の短縮を目的として既存の材料又は AMT で製造した材料への EBW の適用が検討され、同プロセスによる溶接部の特性評価について知見拡充が進められている^{10, 14, 15}。

AMT の原子力産業への適用においては、各国の民間規格の整備の検討が進められ^{13, 18}、米国や欧州では規制に向けた取り組みも行われている^{19, 20}。

本技術ノートでは、原子力分野への適用が検討されている AMT の現状を整理した。

2.1 節では国際機関の活動状況、2.2 節では各国の動向、2.3 節では AMT として各国で取り組みが進んでいる AM、CS、PM-HIP、EBW を抽出し、それぞれの AMT の概要、研究開発動向及び実用拡大に向けた技術的課題について解説した。

2. 本論

2.1 国際機関の活動状況

将来的な脱炭素社会の実現に向け、脱炭素エネルギーの一つとして、各国で既設の原子力発電所の運転延長や革新炉の新設等が計画されている。これらの計画の遂行のためには、革新的な技術の活用が必要であると考えられており²³、国際原子力機関(International Atomic Energy Agency、以下「IAEA」という)や経済協力開発機構/原子力機関(Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency、以下「OECD/NEA」という)では、AMT を含む先進技術について、加盟国間で情報を共有するための活動を進めている。

IAEA は、2023 年に AMT を含む様々な技術革新について各国が協力するためのプラットフォームとして the International Network on Innovation to Support Operating Nuclear Power Plants を発足させた²¹。本プラットフォームは、既設炉に革新的技術を導入するために各組織が協力し、技術的知見の共有を促すとともに、専門家らの技術的な助言を受けることができる場として機能することを目指している。活動の対象は、原子力産業の持続可能性に寄与する全ての種類の技術革新であるとされており、2023 年時点で AMT に関する活動を行うグループが発足している²²。

将来的に原子力施設を新設する場合においても、AMT の活用が重要であると考えられている。OECD/NEA は、新設炉を計画する際の主要な課題の一つである建設コストに着目し、プラントの建設コストを削減する方法について、2020 年にレポートをまとめている²³。本レポートでは、建設コストを削減する方法を短期的に実行できるものと、長期的に取り組むべきものに分類しており、このうち AMT の活用は短期的に実行できる方法の一つとして紹介されている。この中で、AMT の活用により建設コストを大きく削減し得る加工プロセスとして、圧力容器等の圧力バウンダリを構成する機器の溶接が挙げられている。ただし、これまでに原子力設備に見られるような大型機器に対して AMT を適用した事例は少ない。OECD/NEA は、原子力分野での AMT の適用に係る情報共有を進めるため、2022 年に関連するワークショップを開催し、先進的な建設及び製造技術を主要なテーマとして取り上げている²⁴。

その他、OECD/NEA の Working Group on Codes and Standards では、原子力機器に AMT を活用する場合の当該技術の適格性(Qualification)について、レポートを作成している²⁴。これらの活動により、原子力産業における技術革新に関して、国際協力と情報共有を進めている。

2.2 各国の動向

2.2.1 米国

欧米各国は、AMT を既存の軽水炉、SMR、ナトリウム冷却高速炉等に広く原子炉技術に適用することを想定している²⁵。米国エネルギー省（Department Of Energy、以下「DOE」という。）は、ADVANCED MANUFACTURING 戦略¹に基づき人材育成も含め広く施策を展開している。後述の原子力分野での適用事例²⁶又は適用検討事例²⁷は DOE が資金提供しているプログラム²⁸である。また、DOE は 2022 年から先進材料及び製造技術プログラム（Advanced Materials and Manufacturing Technologies program）を開始し、5 年間のロードマップを公表している¹⁴。このプログラムは、稼働中の原子力発電所に加え、SMR、ナトリウム冷却高速炉、高温ガス炉等の新型炉を対象として、先進的な材料や製造技術を開発、品質の適格性評価（材料の経年変化の考慮を含む）の枠組みの確立、新材料と製造技術の商業化の加速を目標としている。ロードマップでは、まず「新しい」技術である AM に注目して種々の検討を実施することとなっている。このような中、米国の電力研究所（Electric Power Research Institute、以下「EPRI」という。）は、原子力産業のための先進的製造方法（Advanced Manufacturing Methods、以下「AMMs」という。USNRC が用いている AMT と同義）のロードマップ（2021～2027 年以降）を公表している^{17, 29}。このロードマップは、改良型軽水炉及び稼働中のプラントの修理/保守、SMR 及び非軽水炉型革新炉への適用を考慮し、「AMMs の理解とそれぞれの適用性」、「サイズに応じた AMMs のデモンストレーション」及び「特定の AMMs の実施をサポートする米国機械学会（American Society of Mechanical Engineers、以下「ASME」という。）データパッケージとコードケースの開発」による AMMs 普及のための戦略的計画を提示している。この計画は、AMMs の適用性について一次系圧力バウンダリ（Class 1）機器、原子炉内の燃料関係の部材・制御棒駆動装置の部品、廃番部品等について部材のサイズごとに検討するものとなっている。

上述の取り組みの一つとして、さらに EPRI は AM として Powder Bed Fusion、以下「PBF」という。）と Directed Energy Deposition、以下「DED」という。）を対象として原子力産業のための金属材料の積層造形ロードマップを策定し公表している¹⁷。ここでは、①原料品質ガイドライン（2024 年に完了予定）、②AM で製造したままの材料の疲労データ整備（2024 年に完了予定）、③製造方法のガイドライン（PBF については作成済み、DED については作成中で 2024 年に完了予定）、④欠陥許容基準の技術的根拠整備（2024 年に完了予定）、⑤非破壊検査ガイドライン（2025 年に完了予定）や⑥ASME コード検査範囲設定（2026 年以降に完了予定）等についてそれぞれの項目について、ニーズ、ニーズに向けて取り組むべき課題としてのギャップ、ギャップを埋めるためのアクションを整理し検討スケジュールが示されている。

この一連の取り組みの中で、EPRI は DOE のプロジェクトで Laser Powder Bed Fusion、以下「LPBF」という。）による 316L ステンレス鋼の製造について製造パラメータデータシート、製造材の引張特性疲労データ等を整理したデータパッケージとそれに基づく ASME Code

Case（ドラフト）を開発した³⁰。

米国原子力エネルギー協会（Nuclear Energy Institute (NEI)）は、原子力機器を AMT で製造する場合に、規制当局の承認を得る上で考慮すべき事項として、例えば、機器に要求される機能によって規制上必要になるプロセスが変わりうることを報告書にまとめている。また、本報告書には、将来的に AMT が早期に採用されるために、原子力業界で検討されているアプローチも提示されている³¹。

米国アルゴンヌ国立研究所（Argonne National Laboratory）は DOE の支援を受け、LPBF で製造した Type 316 ステンレス鋼を原子力産業で用いるために米国機械学会事例規格 ASME Code Case を策定する計画を公表した^{32, 33}。Messner はこの ASME Code Case のドラフト版の完成は 2026 年以降となると報告している³³。

USNRC では、前述の産業界の AMT 開発の動向を受け、原子炉部品に適用される可能性の高い AMT を特定すること、特定した AMT の調査・評価を通じて技術ギャップを特定するとともに基盤知識を形成すること、審査に用いるガイド文書を整備すること等を目的とした活動を実施中である^{34, 35}。USNRC は、原子炉部品に適用される AMT として、LPBF、DED、CS、EBW 及び PM-HIP の 5 つを特定し、初期の活動として注力するとした。これらは、いずれも産業界が導入を予定しているものである。また、特定した各 AMT について、従来技術との差異、その差異が安全性に及ぼし得る影響、現行の規格基準では扱いのない点等について調査・評価し、レポート類としてまとめた（詳細については 2.3 において後述する。）^{19, 36, 37, 38, 39}。さらに、USNRC は、AMT の審査ガイドライン案⁴⁰を整備しており、AMT の審査において USNRC が確認すべき情報（すなわち提出文書に含めるべき情報）を特定・解説している。本ガイドライン案において、USNRC は AMT の適用が申請された用途に対して容認可能であると証明されるには、大きく分けて以下の 2 つのアプローチがあるとしている。

- ① AMT を適用する場合でも、その部品等が、従来手法を適用する場合と同等かそれ以上の性能を持ち、ライセンシーの現在のライセンス要件を満たすのに十分であることを実証する。この場合は設計要件を見直すことなく AMT の採用を検討することができる。
- ② AMT を適用した場合に、その部品等が現行の設計・ライセンス条件を満たすことを実証できない場合、設計を変更し AMT の適切性を示す。この場合、適用する AMT が変更後の要件を満たすことを別途実証する必要がある。

また、本ガイドライン案では、②の場合においてスタッフが審査において確認すべき情報として、品質保証、工程適格性、補足試験、製造工程管理及び検証、性能監視を挙げている。USNRC は、AMT 実用に係る規制の手段として、新しい規則の制定、ライセンスの追補、民間規格・標準のエンドース⁴¹といった具体例を想定している⁴⁰。USNRC は、今後も引き続き活動計画に基づき準備を実施するとしている⁴⁰。

2.2.2 欧州

欧州連合（European Union、以下「EU」という。）では、産業界が主導して製造技術開発が行われている¹⁰。また、ヨーロッパ原子力共同体（European Atomic Energy Community、以下「EURATOM」という。）が資金提供するプロジェクトとして、Nuclear Components Based on Additive Manufacturing（以下「NUCOBAM」という。）が実施されている^{20, 42}。NUCOBAMは、原子力設備におけるLPBFによって製造した部品の使用を可能にする適格性評価プロセスの開発及び積層造形部品の供用期間中の挙動評価（中性子照射環境における316Lステンレス鋼の適合性の実証を含む。）研究を実施している。NUCOBAMの目標は、プロジェクトの成果が短期的には安全運転の継続とメンテナンスの最適化のために既存の原子力発電所で使用されること、中期的には性能と安全性を向上させた新しい燃料部品設計を提供すること、長期的には将来の原子炉構成要素（大型原子炉又はSMR）の設計の最適化を可能にすることであるとされている。

英国は、Nuclear Advanced Manufacturing Research Centre（以下「Nuclear AMRC」という。）を設立した（2009年）⁴³。Nuclear AMRCは、英国内の製造業者に対して技術的支援を行っており^{43, 44}、DOEのSMRプロジェクトにEPRI及びニュースケール・パワー社と提携して参加している⁴⁵。Rolls-Royce社は、英国政府から資金援助を受け、Future Advanced Structural Integrityプロジェクトにより低合金鋼製圧力容器をPM-HIPとEBWで製造する技術開発を行っている⁴⁶。

2.2.3 日本

国内では、一般社団法人日本機械学会（以下「日本機械学会」という。）がAM技術規格検討タスクを設置し、LPBF等のAMにより製造した材料の技術規格化について議論を開始している⁴⁷。これに関連して、国内プラントメーカーは、AM（LPBF及びDED）で製造した材料を原子力製品へ適用するための規格化に必要な材料特性データベースを整備中である^{48, 49, 50}。また、一般社団法人原子力学会（以下「原子力学会」という。）材料部会は「原子力材料分野のロードマップ」を策定・公表し、軽水炉及び高速炉において取り組むべき技術分野としてAMを取り上げている⁵¹。

2.3 AMTの詳細

2.3.1 付加製造（AM）

AMとは、国際標準化機構規格⁵²及び日本産業規格⁵³において、「3Dモデルデータを基に、材料を結合して造形物を実体化する加工法」と定義されている。また、それら規格においては、AMは多くの場合、造形層を積み重ねる形態を取るとされており、そのような製造手法は「積層造形」又は「3Dプリンティング」としても知られている。上記規格^{52, 53}では、AMの技術として7つのカテゴリが定義されているが、そのうちで金属材料に適用されるものは、以下の3つである。

- ・ 結合材噴射法 (Binder Jetting)
- ・ 粉末床溶融結合法 (Powder Bed Fusion)
- ・ 指向性エネルギー堆積法 (Directed Energy Deposition)

このうち、現在では PBF 及び DED が主流の技術とされている⁵⁴。USNRC でも直近で考慮すべき AMT として挙げられている^{34, 35}ため、本報告書でもこの 2 手法に的を絞って解説する。

(1) AM の原理及び特徴

積層造形を含む AM では、製造対象の部品・製品の 3D データから 2 次元断面形状を取得し、ある断面を材料物質で層として成形した後に、同様に次の層を成形・結合（積層）するというプロセスを繰り返すことで、目的となる 3 次元構造を造形する。このような手法は、鋳造、切削、塑性加工といった従来の成形加工技術では実現が不可能あるいは極めて困難な形状でも成形可能という利点がある。また、切削時に生じる端材や鋳造時に余る溶湯が発生しないため、歩留まりが良いという利点もある。さらに、造形用のデータを各地の工場にインターネットを介して送信し、その場で必要な部品のみ製造することが可能なため、ハードウェアの輸送及び在庫管理に係るコストが軽減されるという利点もある。なお、インターネットの活用に伴い必要となるサイバーセキュリティ対策については後述する。

本項では AM 技術の PBF 及び DED についてそれぞれ原理及び特徴について述べる。

①PBF の原理及び特徴

PBF は、JIS B 9441⁵³において、「熱エネルギーを使用して粉末床を選択的に溶融凝固する AM プロセス」として定義されている。なお、粉末床とは、プレート等の上に原料粉末を平坦に敷き詰めたものを指す。図 1 に PBF における造形手順の模式図を示す。PBF では、目的となる 3 次元構造のうち、着目した 2 次元断面に従って何らかの熱源により粉末床を溶融・結合させて造形物層を形成する。その後、プレートを造形された層の厚みに相当する距離だけ下方に移動し、再度原料粉末を敷き詰めて粉末床を形成した後、再度原料粉末を溶融・結合させて次の層を形成する。このプロセスを繰り返して目的となる 3 次元構造を形成する。

本手法の開発当初は、粉末粒子は溶融せずに焼結されるに留まっていたため、造形物は粉末粒子間の空隙が閉じた空間として材料中に残存した気孔（欠陥となり得る。）を多く含むものであった。後に、ファイバーレーザーや電子ビームといった高出力のビームを用いて粉末粒子を完全に溶融させて造形することが可能となった。この方式は、焼結と異なり生成した液相が粉末粒子間を充填しやすいため、気孔率の低い造形物が得られるようになった⁵⁵。

粉末粒子に照射されたビームは、ビーム種、波長、エネルギー、材料、粉末形状及び粉末表面状態により決まる吸収率で粉末粒子に吸収される。粉末粒子の温度が上昇し、融点以上に達すると溶融し、周囲の粉末粒子及び既にビームが照射され溶融凝固した下層と融合する。ビーム出力と走査速度が適切であれば幅が粉末粒子の数倍～数十倍に走査方向に伸張した溶融池を形成し、溶融池は走査速度と同じ速度で移動する。溶融池のサイズ・形状が安定して移動すると連続したビード(溶融した粉末が一体化した部分)が形成される。ビーム出力が不十分、又は走査速度が不適切で入熱が不十分であるなどして溶融池が正常に形成されない場合、造形物中に気孔や亀裂等の欠陥が生じる。

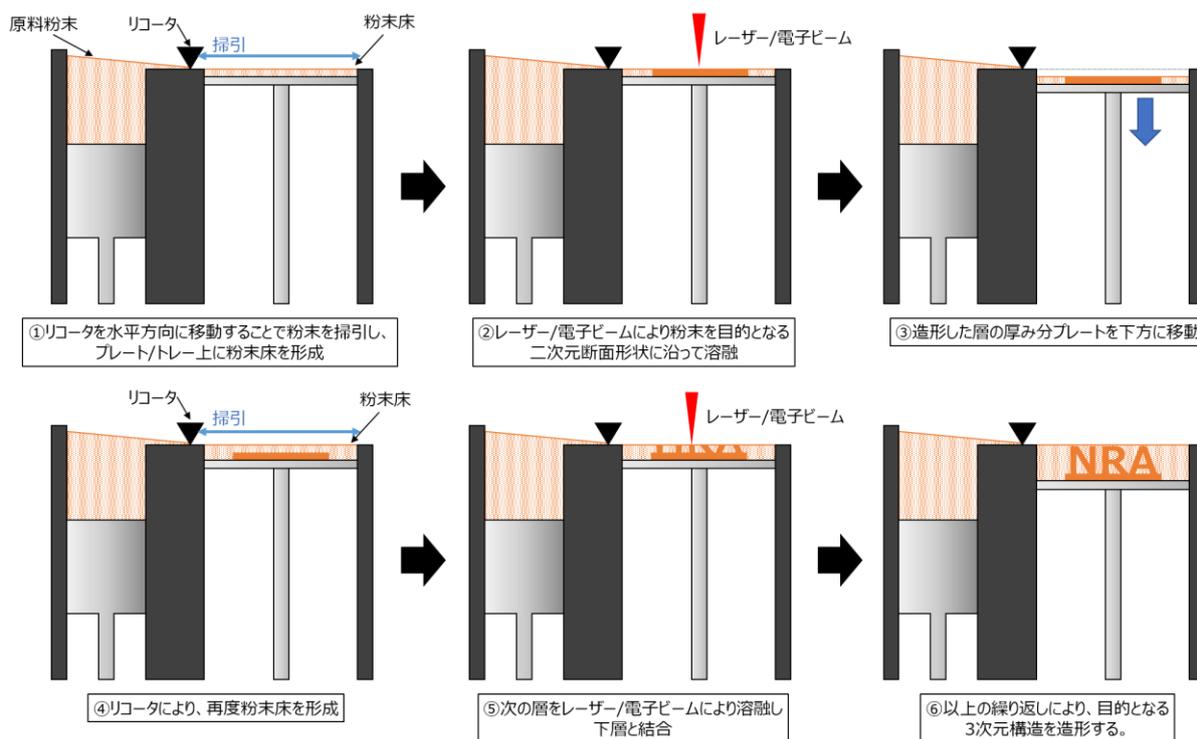


図1 PBFによる造形手順の模式図

Figure 1 Schematic diagram of the printing process with PBF.

現在 PBF において主として用いられている熱源はレーザー又は電子ビームであるが、両者の物理的差異により、加工特性及びプロセス制御に相違が生じる^{56, 57}。なお、2.2 で述べたとおり、米国においては現在産業界がレーザーを熱源とした方式である LPBF の原子炉材料への適用を検討しており^{29, 15}、USNRC も規制ガイド案作成、技術的レビュー等を実施中である^{34, 35, 36}。我が国においては、国内プラントメーカーが原子力製品への適用に向けた準備・検討として、LPBF で製造したオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS316L) 材料の基礎的な材料特性データベースを整備中である^{48, 49, 50}。

レーザーを利用する場合には、多くの場合光学ガラス等を用いて集光することでエネルギー密度を高め、金属材料を融点以上に加熱することを可能としている。また、目標とな

る形状の2次元断面に沿ってビームを走査させるためにはレーザーを偏向させる必要があるため、鏡等の機械構造部品を制御・動作させることとなるが、その際それらの自重により慣性力が生じるため動作の高速化・高精度化には限界があるとされる^{56, 57}。これは、造形速度に影響を与える。電子ビームを利用する場合にも同様にビームを偏向させる必要があるが、ビームの集束及び走査はすべて電磁氣的に制御されるため、高速の動作が可能であるとされている^{55, 56, 57}。

電子ビームは、進路上に気体分子が存在する場合、それらとの衝突により電子が弾かれたりエネルギーを失ったりするため、大気中ではエネルギーの減衰が大きくなる⁵⁸。そのため、電子ビームをPBFの熱源として用いる場合には、真空下で熔融造形を行うことが一般的である。これは、加工中の金属材料の酸化の影響が極めて少ない利点がある一方で、目標となる真空度に耐える真空チャンバーが必要となり装置設計の自由度が下がるデメリットがある。レーザーを用いる場合は不活性ガス雰囲気下での造形が一般的であるが、チタン等の活性金属を用いる場合には酸化の影響が生じる懸念があるため、最適な雰囲気条件について検討する必要がある。

電子ビームを予備加熱していない粉末床に照射すると、粉末が飛散して煙状に舞い上がるスモーク現象が生じ、これにより正常な熔融池の形成が阻害され造形に影響を及ぼす。スモーク現象は、金属粉末表面に形成された酸化膜が電子ビームの照射により負に帯電し、斥力により飛散することが原因と考えられている^{56, 57}。電子ビームを用いる場合には、スモーク現象の発生を防ぐため、ビーム照射前に粉末を600~1100°C(材料によって異なる)に予備加熱を実施することが一般的である^{55, 57}。これは、仮焼結により粉末同士を弱く結合させるとともに、温度上昇により粉末表面の酸化膜の電気抵抗が低下することで、粉末床全体として電気伝導が生じるようになることを利用していると考えられている⁵⁶。予備加熱は造形にかかるプロセス・エネルギーが増加する一方、造形中の熱応力による残留ひずみや内部亀裂の発生を防ぐことができる利点がある。一方、レーザーを用いる場合では粉末床の予備加熱が不要であるが、レーザーの入熱による局所的な熔融と凝固を繰り返すため、造形物に大きな残留応力が生じることで反りや亀裂に繋がる懸念があり、後述するスキンストラテジーの検討が重要である。

②DEDの原理及び特徴

DEDは、JIS B 9441⁵³において、「収束させた熱エネルギーを利用して材料を熔融し、結合し、堆積させるAMプロセス」として定義されている。ここで、当該JISにおいては、「収束させた熱エネルギー」としてレーザー、電子ビーム又はプラズマアークを想定しているが、現在はレーザーを用いる方式が主流とされている⁵⁵。また、2.2で述べたとおり、米国においては現在産業界が本方式の原子炉材料への適用を検討しており^{15, 29}、USNRCも規制ガイド案作成、技術的レビュー等を実施中である^{19, 34, 35}。我が国においては、国内プラントメーカーが原子力製品への適用に向けた準備・検討として、レーザーを熱源としたDED

で製造したオーステナイト系ステンレス鋼(SUS316L)材料の基礎的な材料特性データベースを整備中である⁵⁰。

DEDによる造形の概要図を図2に示す。DEDでは、原料となる粉末やワイヤー状の金属を造形したい箇所に局部的に供給しつつ、高エネルギービームによりそれら原料を加熱・溶融し積層することで目的となる形状を造形する。DEDは、造形箇所に直接原料を供給するという点でPBF(一層ごとに粉末床を形成する。)とは異なり、既存の金属部品等に対して新しく造形部を追加することができる特徴がある。そのため、既存部品の補修等へのアプリケーションも期待されている。また、基材に直接造形していく方式のため、粉末床がサイズに関する制限要素として働くPBFと比較して大型部品の造形に適するという利点もある。さらに、造形速度がPBFと比較して早い⁵⁹、造形途中に供給する材料を変更することで異種金属を積層することができるといった特徴もある。

DEDでは、基材にレーザー等のビームが照射されると同時に照射位置に原料が供給されることで両者が溶融・結合することで造形を進めていく。熱源には、前述のとおり、多くの場合レーザーが用いられる。また、材料には多くの場合粉末が用いられるが、ワイヤーが用いられることもある。ワイヤーを用いる場合は、粉末の場合と比較して造形精度はあまり高くないが、供給した原料のほぼ100%が造形物に使用されることから、粉末を用いる場合に比べて材料消費の歩留まりがよく、気孔生成の確率も低い特徴がある⁵⁵。熱源として電子ビームを用いる場合は、PBFの場合と同様真空雰囲気で行う必要があり、粉末を搬送するためのガスが使えないため、材料供給は必然的にワイヤー供給式となる。

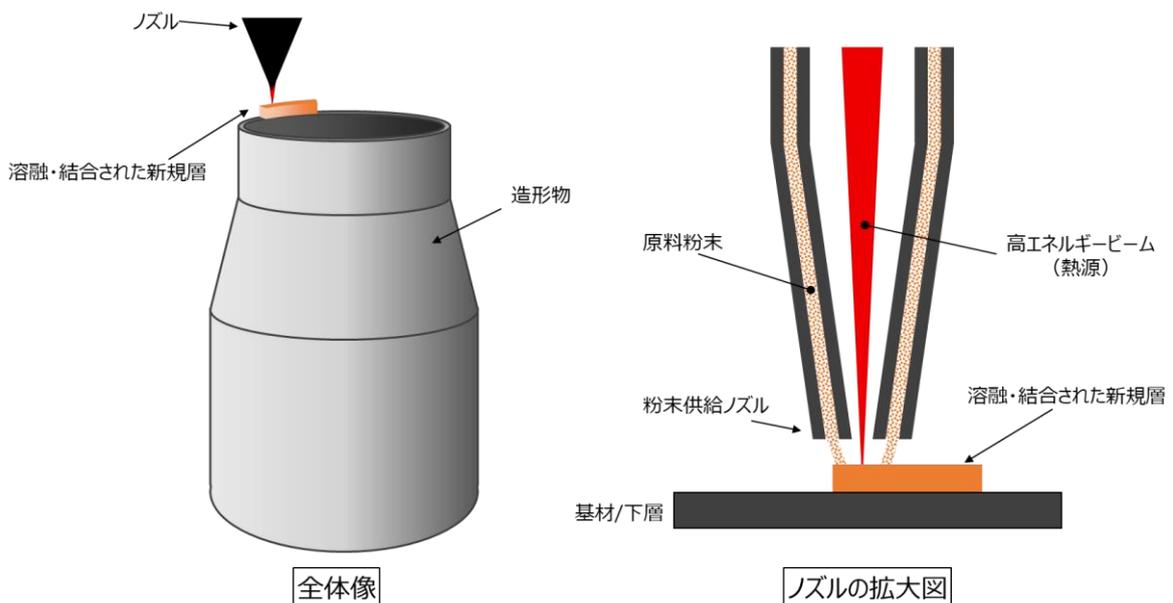


図2 DEDによる造形の概要図(粉末を原料として用いる場合)

Figure 2 Schematic diagram of the printing process with DED (when powder is used as feedstock).

(2) 研究開発動向及び実用拡大に向けた課題

金属材料の AM 技術は、近年装置の高機能化が加速されてきており、自動車産業、航空宇宙産業等において本手法により製作された部品が実用化された例が報じられている。2020 年には、GE Aviation 社が開発した Boeing777 用の GE9X エンジンが米国連邦航空局に認証されたが、このエンジンには 300 個以上の AM 技術で作成された部品（以下「AM 部品」という。）が使用されている⁶⁰。また、BMW グループは、AM を世界的な生産システムに不可欠な要素と位置づけ、1500 万ユーロの投資により、技術開発等を目的とした施設を開設しており⁶¹、2019 年には AM によって約 30 万個の部品を生産したことが報じられている。

原子力分野においては、Westinghouse 社が AM 技術で製造したプラギングデバイス（燃料集合体上部に挿入して集合体に流れる冷却水の流量を調整する機器）が米国の Byron 1 号機⁶²に（2020 年）、燃料集合体の異物フィルタ（燃料集合体の燃料有効部への異物の進入を防止するフィルタ）がフィンランドの Olkiluoto 2 号機及びスウェーデンの Oskarshamn 3 号機⁶³に（2022 年）、それぞれ使用されている。また、ENGIE 社が AM 技術で製造した 2 次系圧力逃し弁がベルギーの Doel 3 号機に使用されている（2019 年）¹⁶。さらに、Framatome 社が AM 技術で製造したチャンネルファスナーが米国の Browns Ferry 2 号機²⁶に使用されている（2021 年）。なお、これら AM 部品のうち、米国商用原子炉に装荷されたもの（いずれも燃料集合体の構成部品のひとつ）は、USNRC から安全への影響度が小さいと判断され、10CFR50.59 に基づきライセンスの変更無く使用が認められている。

以上の実用化例が報告されているものの、現状、AM 技術は、広い用途で従来製法を代替するには至っておらず、現在も実用拡大に向けて研究開発が進められている段階である。以下で AM に係る課題について概説する。

①製造工程に係る課題

・粉末の製造・管理

前述したとおり、PBF は何らかの熱源により金属材料粉末を熔融結合することで目標となる 3 次元構造を造形するため、原料粉末の性状が最終製品の性能に影響を及ぼし得る。DED においても、原料として粉末を用いる場合は同様である。

PBF において各層ごとの造形を安定化させるには、粉末掃引時に高密度な粉末層を平滑かつ均一な厚みで形成することが必要となるため、原料粉末には高い流動性及び均一性（付着粒子がなく、球形状）が求められる^{55、66}。

また、DED において熔融・結合のプロセスを安定させるためには、原料の供給量のコントロールも重要であるが、供給量は粉末の流動性にも影響を受ける。原料粉末のロットによりノズルから吐出される金属量が異なったことで造形物の密度や造形性に差異が生じた事例が報告されており⁶⁴、原料粉末の品質及びその管理がプロセス安定化及び最終製品の品質確保に重要である。

粉末の製造プロセスにおいて粉末中に気泡が生じた場合、造形物においても欠陥として

残存してしまうため、気泡を含まない粉末を用いることが重要である⁵⁵。また、表面酸化膜の形で原料粉末中にわずかに含まれる酸素は、それを用いて造形した最終製品中にも残存するが、酸素濃度が高い、又は酸化物が分散している場合は破壊靱性が低下し得ることが報告されている⁶⁵。さらに、造形の条件が同じでも、原料粉末の形状が異なる場合、粉末の熔融挙動が異なる等の要因により造形物の性質（密度、空孔率）に相違が生じることも報告されている⁶⁶。このように、金属粉末の品質は最終製品の性能に大きな影響を与えることから、質の良い金属粉末を得るための手法、貯蔵中の管理・検査手法（汚染・劣化の防止）の整備が重要である。米国産業界も粉末原料の品質確保には注目しており、現在 EPRI が粉末の製造・管理手法に関するガイドラインを整備中である¹⁵。なお、現在は、AM に用いる粉末には、これまで粉末冶金分野で製造され市場に流通しているものが使われており、それらは主にガスアトマイズ法で製造されている。金属粉末の製造法については、2.3.3 で後述する。

・材料に依存したプロセス検討

ビームによる入熱が不十分であるなどの場合は、造形物中に気孔や亀裂等の欠陥が生じてしまうため、プロセス中は安定した熔融池を形成することが重要である。AM では様々な材料物質の適用が検討されているが、材料ごとに融点・熱伝導率等の物性が異なるため、用いる材料に応じて最適な熔融・結合プロセスを検討・構築することが必要である。例えば、Ti-6Al-4V 合金⁵⁷では、融点が 1650°C と高い一方で、熱伝導率が 7.5 W/(m・K) と小さい⁶⁷ため、高エネルギー密度の熱源を用いれば安定して粉末を熔融させることができると考えられる。一方、A1050 アルミニウムは、融点が 650°C 前後と低いものの、熱伝導率が 230 W/(m・K) と大きく⁶⁸、Ti-6Al-4V 合金の場合と比較してビーム走査中に大きな熱損失が生じると考えられ、欠陥のない製品製造のためには最適なプロセスを個別に検討する必要があると考えられる。また、電子ビームを用いる場合には材料の電気抵抗を⁵⁷、レーザーを用いる場合にはレーザー波長に対する材料のエネルギー吸収率をも適切に考慮する必要がある⁶⁹。さらに、PBF において電子ビームを用いる場合は、前述したとおりスモーク発生を避けるために予備加熱が必要であるが、高温での材料強度が金属粉末の掃引・敷詰めに影響を及ぼすため、安定した粉末床を形成するためには、やはり使用する材料に応じたプロセス最適化の過程が必要となる⁵⁷。

・スキャンストラテジー

AM においては、ビームの出力、スキャン速度、スキャン方向等のスキャンストラテジーが造形物の強度⁷⁰、破壊靱性⁷¹、空孔率⁷²に影響を及ぼすことが報告されている。したがって、欠陥の無い高品質の部品を造形するためには、ビーム熔融凝固現象についての理解を深め、製品に求める特性に応じたスキャンストラテジーを検討することが必要である⁷³。それらの検討のため、高速度カメラを用いた熔融池の詳細観察⁷⁴やモデリング⁷⁵による現象理

解、熔融凝固挙動のシミュレーション^{76, 77}等の研究がなされており、プロセスの最適化に資する知見が拡充されている。

また、結晶方位や集合組織⁷⁸、残留応力⁷⁹もスキャンストラテジーによって異なることが報告されており、プロセスの制御により最終製品の力学特性の等方性・異方性を制御可能であることが示唆されている。このように、AM の特徴に起因してこれまでとは異なる性能を発揮する優れた材料が得られることも期待されている一方で、そのような特性を再現性よく発現させるためには、種々の造形条件が製品の組織、特性、性能に与える影響に関して更に知見を拡充する必要がある。

・造形後の処理（表面仕上げ、熱処理）

AM 技術により造形されたままの製品は、表面が粗く、また、内部に空孔（欠陥）が存在するため、鍛造材と比較して低い疲労強度を示すことが報告されている⁸⁰。

表面の粗さに由来する疲労強度低下は、造形後の表面仕上げ（切削、研磨、サンドブラスト、ピーニング等）により改善することができるが、米国オークリッジ国立研究所は、その加工が疲労特性を確かに改善すること、加工後も要求される寸法公差を維持すること等を確認することが重要であり、処理工程の最適化及び適格性確認が必要であると分析している⁸¹。一方、造形されたままの部品が十分な疲労強度を持つことを示すことができれば、最終製品として使用可能であり経済性の観点からは望ましく、EPRI は産業界にそのようなニーズがあると述べている¹⁵。しかし、疲労強度の評価について定めた既存の規格（ASME Boiler & Pressure Vessel Code）は、表面が滑らかな試料を用いた試験結果を基にしており、AM により造形されたままの部品に対しては適用出来ない（又は非保守的である）。そのため、EPRI は、造形されたままの部品の疲労特性データを取得・拡充し、上記規格との対応について検討する必要があると分析しており、今後、材料・プロセスごとの疲労予測式を整備する計画である¹⁵。

部品中の空孔に由来する疲労強度低下は、熱間等方加圧（Hot Isostatic Pressing、以下「HIP」という。）により改善できることが報告されている⁸¹。また、HIP 中の熱処理により、残留応力を除去する効果及び結晶構造の異方性や不均一性を改善する効果も期待される。しかし、スキャンストラテジーの項で述べたとおり、AM 部品はその微細構造がプロセスに依存して異なるため、最適な HIP 処理条件（温度、圧力、時間等）もプロセスに応じて異なる可能性がある。これを踏まえ、USNRC 及び米国オークリッジ国立研究所は、適切な処理条件を見出すために、材料、プロセスごとにさらなるデータ取得が必要であると分析している^{19, 36, 81}。

②AM 技術により製造された部品の検査及び品質保証について

AM 技術の実用拡大に際しての重要なステップのひとつは、最終製品の品質保証及び検査手法の確立である。これまで述べてきたとおり、AM 部品は、従来製法とは異なる特性

(金属組織、異方性、欠陥特性等)を持ち、それらの特性が既存の品質保証及び検査手法の適用性に影響を与える可能性がある。

例えば、AM 部品は、積層方向(鉛直方向)に結晶が成長しやすく列状の組織を形成する傾向がある⁸¹。このように生じた結晶方位の異方性により、造形方向により機械的性質(引張強度⁷⁰、破壊靱性⁷¹等)は異なる。さらに、AM 部品は、部品内部に微細構造の3次元的不均一性(結晶方位や結晶粒径、空孔率等が部品中の部位によって異なる状態)が生じることが指摘されている⁸¹。したがって、品質確認試験に当たって試験片を採取する際は、当該試験片が代表性を持つよう、方向・部位等について注意深く考慮する必要がある。一方、米国オークリッジ国立研究所は、現状ではそのような試験片採取方法は確立されておらず、今後の課題であると分析している⁸²。

検査手法については、例えば、超音波探傷試験(Ultrasonic Testing、以下「UT」という。)においては、S/N比、散乱、減衰に対して結晶粒組織が影響を及ぼすため、上述のとおり結晶方位の依存性及び微細構造の3次元的不均一性を持つAM部品に対しては、従来の検査手法がそのまま適用可能とは限らない。EPRIは、従来の欠陥探査手法は、AM部品に対して有効ではあるものの、完全な適用は困難又は不可能であると分析している¹⁵。一方、製造後の検査ではなく、製造時のモニタリングデータを使用して欠陥を検出し、部品の品質を評価する技術について検討が進められている^{83, 84, 25}。EPRIは、今後信頼性の高い製造時モニタリング技術に関してレビューを実施し、標準化団体や規制当局との協力により、それら技術を検査要件に適合させるための検討を実施するとしている¹⁵。

部品の使用に伴う中性子照射による材料劣化(脆化及び空孔生成)及び照射誘起応力腐食割れは、原子炉材料としての潜在的な懸念であるが、それら中性子照射の影響については、これまでごく限られた研究がLPBFにより製造された316Lステンレス鋼部品に対して実施されたのみである^{81, 82}。USNRCは、従来製法で製造された部品とAM部品との照射挙動における相違については現状では不明であり、今後更にデータを拡充することが重要であると分析している^{36, 37}。また、欧州のNUCOBAMにおいては、中性子照射環境における316Lステンレス鋼の適合性の実証を目的の一つとして、研究が実施されている。

③インターネットの活用によるサイバーセキュリティ対策について

インターネットを活用して世界的に相互に接続されたインテリジェントなサイバーフィジカルシステムを活用することで、設計、製造から運用、サプライチェーン、サービスメンテナンスに至るまで、産業運営のあらゆる段階を自動化する、いわゆる、スマートマニュファクチュアリングを目指す取り組みがなされている^{1, 5}。これらの取り組みにおいて、Internet of Thing、以下「IoT」という。)を活用したAMは主要な構成要素として位置づけられている^{1, 3, 85, 86}。スマートマニュファクチュアリングでは、製造装置やセンサー等から得られる情報に基づき製造装置を制御するサイバーフィジカルシステム⁸⁷が利用されている。サイバーフィジカルシステムにおいては国内自動車部品メーカーがランサムウェア攻

撃を受けサーバがダウンしたり⁸⁸、産業用制御システムのネットワーク資源と接続された産業用制御機器に関する情報を収集するターゲットにしたマルウェアが発見されたり⁸⁹、米国 Wolf Creek 原子力発電所の業務システムが侵入されたり⁹⁰、あるいは自動車の電子制御システムへの攻撃による操舵を完全に遠隔で実行する⁹¹等の事例が報告されている。

サイバーフィジカルシステムを利用し、高度にコンピュータ化した AM 製造システムにおいても、製造プロセスのデータを書き換え健全な AM 材の製造を妨げたり、製造データを盗用したりするなどのサイバーセキュリティ上のリスクが指摘されている^{92、93、94、95}。これらのリスクに対して、プロセスパラメータのモニタリングによる検知^{96、97、98}、サイバーセキュリティを含むセキュリティ対策に関するリスク評価手法も検討されている⁹⁹。

このような状況の中で各国はサイバーフィジカルシステムにおけるサイバーセキュリティ上の対策に取り組んでいる。ここでは、主な取り組みの例として、EU、米国及び我が国の状況を概説する。

EU は IoT に関連するサイバーセキュリティの課題を認識し、欧州ネットワーク情報セキュリティ機関（European Union Agency for Network and Information Security（ENISA））は 2017 年に「IoT のベースラインセキュリティに関する提言」を公表し、IoT の概念が生み出されたことで出現したサイバーセキュリティの問題を体系的に示した。さらに、EU は EU の市場に投入されるデジタル要素を含むハードウェア及びソフトウェア製品に対するサイバーセキュリティ要件を定めた法的枠組みとして「欧州サイバーレジリエンス法（The European Cyber Resilience Act）」を 2024 年 3 月に可決した^{100、101}。

米国は、社会全体のデジタル技術への依存度の高まりや、悪意あるサイバー活動による、米国の安全保障や経済的への影響を踏まえ、「国家サイバー戦略」を公表している¹⁰²。また、アメリカ国立標準技術研究所（National Institute of Standards and Technology、以下「NIST」という。）は産業界、政府機関、その他の組織がサイバーセキュリティ・リスクへの対策・対応を提示するガイダンスとして NIST Cybersecurity Framework（CSF）2.0 を公表している¹⁰³。

我が国においては、経済産業省が、産業界が直面するサイバーセキュリティの課題を洗い出し、関連政策を推進していくため、産業界、学識者等から構成される「産業サイバーセキュリティ研究会」を 2017 年に設置し、議論を重ねている¹⁰⁴。同研究会ワーキンググループ 1（制度・技術・標準化）工場サブワーキンググループは「工場システムにおけるサイバー・フィジカル・セキュリティ対策ガイドライン」¹⁰⁵を策定し、インターネットに接続された製造現場におけるセキュリティ対策を企画・実行するに当たり、参照すべき考え方やステップを「手引き」として示している。また、内閣府が中心となり、関係府省・機関が連携して推進する戦略的イノベーション創造プログラム（Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program（SIP））の中では個々の IoT 機器やサービスのセキュリティを強化し、多様な IoT システム・サービスやサプライチェーン全体のセキュリティ確保を実現する上で必要な信頼創出・証明技術の多角的な研究開発等が実施されている¹⁰⁶。

国際規格としては国際自動制御学会（International Society of Automation（ISA））及び国際電気標準会議（International Electrotechnical Commission（IEC））が開発した、産業用オートメーション及び制御システム（Industrial Automation and Control System（IACS））のセキュリティを確保するためのISA/IEC 62443シリーズがある^{107、108、109}。

2.3.2 コールドスプレー法（CS）

(1) コールドスプレー技術の原理及び特徴等

耐食性が重視される機器では、耐食性改善のために表面処理が施される。各種の表面処理法の中でも、溶融又は半溶融状態に加熱した溶射材料の粒子を素材に吹付けて、表面に積層した皮膜を形成させる手法を溶射という¹¹⁰。粒子の付着・積層には一定以上のエネルギーが必要であるため、溶射には高温又は高速のガスが用いられる。この際、ガス温度が粒子の融点以下の低温である場合にはCS法又は低温溶射法と呼ばれる。

CS装置の概念図を図3に示す。粉末粒子を吹き付けるために用いるガスにはヘリウムや窒素等の不活性ガスが用いられる。ガスには作動ガスと粉末輸送用のガスがあり、作動ガスは粉末粒子の融点を超えない程度にヒーターで加熱される。続いて、加熱した作動ガスの流れの中に、固相状態のままの粉末を粉末輸送ガスによって投入し、一般に300 m/sを超える高速で対象物に吹き付ける¹¹¹。衝突の際に界面付近で塑性変形が生じるとともに温度が上昇することにより、粒子と基材の間に固相结合が生じ、被膜が生成されると考えられる¹¹²。CS法では10mm以上の厚膜も作成できるため、表面改質技術としてのみならず、AM技術としても応用することも可能である¹¹³。

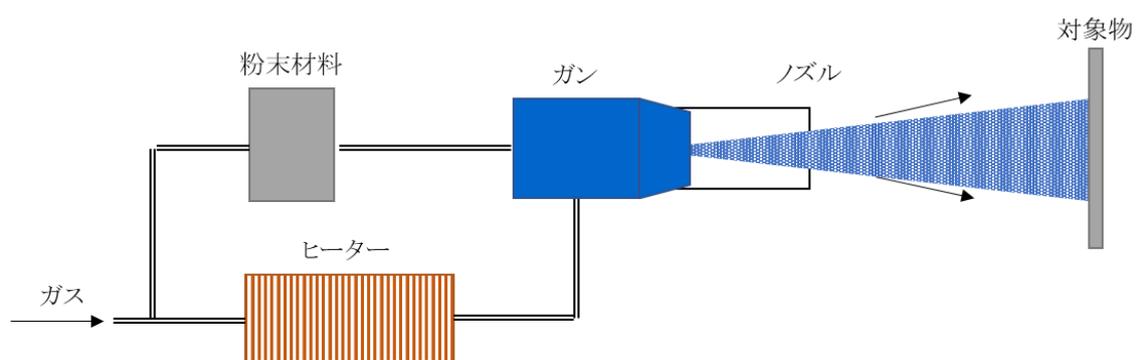


図3 コールドスプレー装置の概念図

Figure 3 Schematic diagram of the cold spray system.

CS法の利点として、融点よりも十分に低い温度で粉末金属を吹き付けるため、酸化が起きないことが挙げられる¹¹⁴。また、積層工程で熱応力が発生せず、積層時に表面に圧縮残留応力を付与されるため、引張応力で生じる割れの抑制につながる¹¹⁵。これらの特性から、CS法は腐食環境中での応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking、以下「SCC」という。）の対策又は発生後の補修方法に応用できると期待されている。

(2) 研究開発動向及び実用拡大に向けた課題

CS 法は、経済性に優れた防食技術として、他の産業では実用化されている技術であり、例えば航空機用エンジンのマグネシウム合金製ギアボックスの補修等に既に用いられている¹¹⁶。今後、CS 法は耐食性の向上を目的として原子力分野にも広く応用される可能性があると考えられているが、現時点では軽水炉環境での適用事例は限られており、その性能は十分に実証されていない。そこで、本節では USNRC 及び米国パシフィックノースウェスト国立研究所のレポート^{115, 117}を参照し、米国において CS 法を軽水炉環境で利用する際に実用上の課題と考えられている事項のうち、特に影響が大きいと予想されるものを概説する。

・非破壊評価

CS 法は、衝突速度及び熱処理による粒子間の接合状態の差異によって皮膜特性が異なるため、施工条件に注意しなければならない¹¹⁸。CS を施した機器に生じうる欠陥として、空隙の発生や皮膜の付着不良が考えられる¹¹⁹。

欠陥の検出には UT や渦電流探傷試験 (Eddy Current Testing、以下「ECT」という。) が有効であると考えられる¹²⁰。超音波は金属材料中の微小空隙によって散乱反射するため、散乱減衰による UT の音圧低下を測定することで空隙量を推定することができる¹²¹。また、渦電流探傷では導電性の変化を測定することで、空隙等による材料の不均一性を確認することができる¹²⁰。

条件によっては、UT や ECT は、CS による皮膜内部のみならず、付着不良等によって生じる界面の欠陥まで検出することも可能であると考えられている。例えば、放電加工で欠陥を導入したステンレス鋼の平板に、CS で薄いインコネル 625 の皮膜を塗布した試験片を対象にした場合、皮膜下に導入した内部欠陥が ECT で検出できることが報告されている¹²²。ただし、皮膜が厚い場合や、皮膜自体に空隙等の不良がある場合には、検出精度に影響する可能性がある。したがって、皮膜が厚い場合には、非破壊評価が有効な深さについても調査していなければならない。CS をした製品に対して、最適な非破壊評価方法を確立することは、今後の大きな課題であると考えられる¹¹⁷。

・エッジ効果

CS の皮膜の周辺部が腐食環境に曝された際に、応力集中や腐食が発生する可能性がある。このような軽水炉環境におけるエッジ効果については、十分なデータが得られていないため、その影響について十分に調査する必要がある¹¹⁷。

・耐 SCC 性及び耐疲労性

SCC は、環境・材料・応力の 3 つの要因が重なった時に発生するため、CS で耐食性の高い材料でコーティングすることで耐 SCC 性を向上させることが期待されている。そこで、

CSによる耐 SCC 性の向上を確認するための研究プロジェクトが進められている¹²³。

また、CSによる積層時に皮膜及び皮膜近傍の基部に付与される圧縮残留応力によって、疲労寿命が向上することも期待できる。ただし、皮膜及び対象物の材料の熱膨張係数が大きく異なる場合には、熱応力による疲労が発生する可能性がある。

現在のところ、原子力施設で想定される環境条件で、CSでコーティングした機器の耐 SCC 性及び耐疲労性を確認した試験データは限られている。今後、実環境を模擬した条件で、CSの有効性を示す試験データを拡充することが重要である¹¹⁷。

・機械的性質

CS材は、従来の製法で製造された材料とは異なる機械的性質を示すことが確認されている。例えば、CSで製造した銅のバルク (bulk) 試験片で、熱処理を行わない場合には、材料中に存在する欠陥の影響で、延性が低下することが報告されている¹²⁴。このような機械的性質の変化は、熱処理によって改善することが可能であるものの、同時に表面硬さも変化することに留意しなければならない¹¹¹。

これまでのところ原子力分野において CS 処理した材料の機械的性質は十分には調べられていない。ただし、非構造部材として扱う場合には、その機械的性質は問題にならない可能性もあるため、実機に適用する際には、当該部材に設計上要求される機械的性質を確認することが重要である。そして、機械的性質が問題になる場合には、代表的な試験条件における試験データを収集することが必要になると見られる¹¹⁷。

・経年劣化事象

原子力施設の長期運転では、長期間に渡って材料が中性子照射や高温環境に曝される。特に CS 材は耐食性の向上を目的に使用されることが多いため、厳しい環境での使用が見込まれる。このような環境では、破壊靱性等の機械的性質が変化するおそれがある。CS 材は従来の鍛造品等とは異なる微細構造を持つため、これらの経年劣化事象が、CS 材の材料物性に及ぼす影響は明確ではない。CS 材を構造部材として扱う場合は特に、実機への適用を想定した代表的な試験条件のデータを収集し、設計要求と比較して、これらの経年劣化事象の影響が限定的であることを確認することが重要である¹¹⁷。

以上のように、CSは基材の耐食性を向上し、応力改質によって割れを防止する効果が期待されるが、CS材は従来工法で製造した部材とは異なる微細構造を持つため、その特性が未だ十分には理解されていない部分が多い。ただし、CS材を非構造部材として扱うのであれば、構造部材として利用する場合に比べ、従来製品との特性の違いが大きな問題にならない可能性も考えられる。原子力機器へのCS法の適用にあたっては、CS材の設計上の取り扱いを判断した上で、必要に応じて高温・照射環境における材料特性に関するデータを拡充し、その特性が運転期間中に渡って設計要求を満足することを確認する必要がある。

2.3.3 熱間等方加圧を組み合わせた粉末冶金法（PM-HIP）

(1) PM-HIP 技術の原理及び特徴等

金属材料は、用途に合わせて鍛造、鋳造又は焼結等の成形技術が用いられる。焼結とは、粉末の集合体を加熱して、粒子同士の接触部を結合させる製法で、陶磁器やファインセラミックス等の無機材料で一般に用いられる技術である。特に、金属材料の粉末の製造、粉末の配合・混合、圧粉成形、及び焼結を行う加工プロセスを粉末冶金という¹¹⁰。

粉末冶金における金属粉末の製造方法は、(1) 機械的エネルギーで金属を粉砕する方法、(2) 還元、電気分解等の化学反応によって粉末を製造する方法、(3) 液体状に溶解させた金属（溶湯）を流体の運動エネルギーやディスクの遠心力によって飛散させ、凝固させて粉末を製造する方法（アトマイズ法）に分類できる¹²⁵。金属粉末の製造工程は材料の品質に大きく影響すると考えられるため、製造方法は注意深く選定する必要がある。本工程において、広く実用化されている方法の一つが、高圧噴霧媒体にガスを用いるアトマイズ法（ガスアトマイズ法）である。ガスアトマイズ装置の概念図を図 4 に示す。ガスアトマイズ法では、誘導加熱等で原料の金属を溶解し、高圧ガスで飛散させる。金属粉末中の不純物酸素の含有量を抑えたい場合には、高圧ガスにアルゴンや窒素ガス等の不活性ガスを用いる。チャンバー内で飛散した熔融金属を数十 μm 以上の球状に凝固させることで金属粉末が得られる¹²⁶。

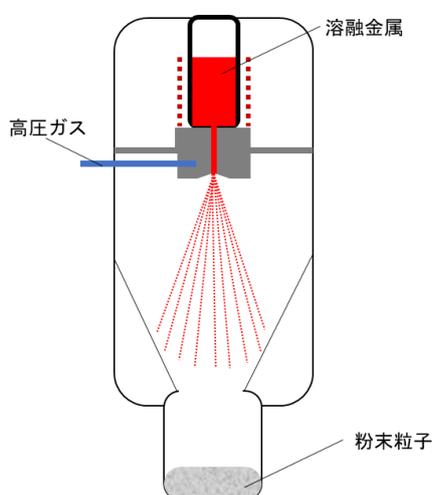


図 4 ガスアトマイズ装置の概念図

Figure 4 Schematic diagram of the gas atomization system.

製造された金属粉末は、目的の合金を得るために必要に応じて他の粉末と混合され、成形及び焼結が行われる。成形・焼結工程において、流体を圧力媒体として高温環境で静水圧加圧する工法を HIP という¹²⁷。HIP 装置の概念図を図 5 に示す。HIP は乾式加圧成形と呼ばれる成形法の一つで、密閉された高圧容器で粉末を成形する。製品の最終形状に近い

形状の低合金鋼等の鋼製の容器（以下「封入容器」という）に粉末を封入後、焼結過程で空気中の不純物元素が金属粉末と反応しないように、真空操作が行われる。続いて、高压容器内でアルゴン等の不活性ガスを圧力媒体として高温と等方加圧を加えることで、粉末の構成元素が拡散し、接合する。焼結過程の HIP 装置内の温度及び圧力は、高いもので 2000°C、200 MPa にまで到達する¹²⁸。焼結体は冷却後、必要に応じて熱処理が行われる。最後に成形に用いた封入容器部分を化学的又は物理的に取り除き、表面仕上げが行われる。

熱間等方加圧を組み合わせた PM-HIP は、高温・高压で焼結するため、密度が高く、緻密な焼結体が得られやすい。また等方加圧で焼結を行うため、初期の形状と相似形の成形体を得られることも大きな特徴である。同じように高温・高压で粉末を成形する方法としてホットプレスがあるが、こちらは 1 軸加圧であるため、初期形状は保たれない。将来的に、PM-HIP であれば、材料物性が均一で、従来工法では実現が難しい組成の合金を製造することも可能になると期待されている¹²⁹。

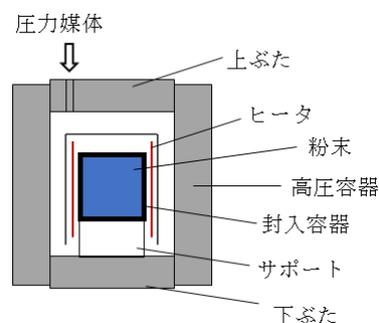


図 5 HIP 装置の概念図

Figure 5 Schematic diagram of the HIP system.

(2) 研究開発動向及び実用拡大に向けた課題

PM-HIP は、原子力以外の分野では従来から実用化されている技術である。PM-HIP では製品の最終形状に近い形状で成形することができるため、従来の鍛造品の場合に必要な仕上加工を省略し、機器の製造コストの削減が期待できる。その上、PM-HIP で製造した機器は、微細で均一な結晶粒組織を持ち、等方的な機械的性質を示すと考えられることから、このような利点を活かし、近年では PM-HIP を原子力施設の機器の製造にも応用することが検討されている^{130, 131}。また、2013 年にはオーステナイト系ステンレス鋼 (Type 316 SS) の機器を製造するための米国機械学会事例規格 ASME Code Case N-834 が承認され、PM-HIP を応用するための規格基準類の制定も進められている¹³²。

PM-HIP の原子力分野への応用として、沸騰水型原子炉 (PWR) の冷却材ポンプや、革新炉の压力容器の鏡板のような大型機器を製作することが検討されている^{133, 134}。しかし、USNRC は、PM-HIP を大型の原子力機器に応用するには未だ多くの課題が残されていると分析している³⁹。本節ではこれらのレポートを参照して、PM-HIP と従来工法との違いによって生じる課題を概説する。

・金属粉末の製造

PM-HIP では原料に金属粉末を利用するため、金属粉末の品質が最終的な製品の品質にも大きく影響する。金属粉末の品質は製造プロセスによって大きく異なる。ガスアトマイズ法は、不活性ガスを用いることで比較的純度の高い粉末を製造することが可能であり、原子力機器に用いられるオーステナイト系ステンレス鋼、低合金鋼及びニッケル合金の金属粉末も製造することができる。また、粉末を混合させることで、精度良く合金の組成を調整できる。同じアトマイズ法であっても、媒体に水を用いる水アトマイズ法は不純物酸素の含有量が増加することや粉末形状が球状にならない等の問題が生じるため、原子力分野ではガスアトマイズ法の利用が期待されている。

Kyffin らの報告によれば、金属粉末の製造プロセスは統一されていないため、不純物元素の含有量は製造事業者によって異なる¹³⁵。特に酸素や窒素の含有量は、シャルピー衝撃値や引張強さ等の機械的性質に影響するため、注意深く制御する必要がある。

同じ製造プロセスであっても、粉末の粒径分布が異なる場合には不純物含有量が増加する。粉末の粒径が小さいほど、体積に対する表面積の割合が増加し、環境中の酸素等に曝されやすくなるため、不純物が増加する可能性が高い。一方で、粉末の粒径が小さいほど、製品の密度が高くなるという利点があるため、一概に粒径を大きくすれば良いわけではない。最終的に必要な製品の品質を考慮した上で、ふるい等で目標の粒径分布に調整する必要がある。

このように PM-HIP では、粉末製造方法や粒径分布の影響があるが、USNRC によれば、ガスアトマイズ法による製造プロセスは十分に確立されており、高品質な粉末が製造できることから、これらの違いが最終的な製品の品質に与える影響は限定的であると分析している³⁹。

・封入容器の設計

HIP では、原料粉末を鋼製容器等に封入し、高温・高圧で焼結することで、密度が高い製品を製造する。焼結された材料の微細構造や密度は、温度・圧力増加速度、保持時間、冷却速度、粉末の粒径分布、粉末の組成等のパラメータによって変化することが知られている¹³⁶。

高密度な焼結体を得るためには、容器に封入する際のタップ密度（粉末間に生じる空隙を含む密度）が高いことが望ましい。過去に大型の圧力容器の製造を試みた試験によれば、粉末金属の充填が十分でない場合に、HIP 処理後の製品に歪みが残ることが報告されている¹³⁷。粉末が球状であれば効率よく容器を充填でき、タップ密度が高くなることから、ガスアトマイズ法のように粉末が球状になりやすい方法と HIP を組み合わせることが有効であると考えられている。またタップ密度に影響する粉末の粒径分布も、粉末粒子の局所的な再結晶化しやすさに影響するため、その最適化も重要になる¹³⁶。

HIP 過程では、金属粉末を焼結するという製法の特性上、最終製品の密度を上げる際、

粉末を封入する容器の体積が大きく減少する。この体積減少量を予測し、HIP 後の仕上げ工程を効率化するためにも、封入容器の設計が重要になる。封入容器は、HIP 過程で破損しないように一定の肉厚を持たせた上で、高い強度と靱性を有する材料で設計される。製品の形状が複雑かつ大型になるほど、体積減少量を予測して目標どおりの形状に焼結することが困難になる。このため USNRC は、封入容器の設計は、最終的な製品の品質に影響しうる要因の一つとして分析している³⁹。

・真空操作過程

粉末は、体積に対する表面積の比率が大きいため、大気中のガス状不純物の吸着による汚染に注意しなければならない。吸着した不純物の処理を行わずに焼結を行うと、焼結体の緻密化に悪影響を及ぼす可能性がある。そのため、原料粉末は、鋼製容器に封入された後、吸着した不純物を除去するための真空操作が行われる。真空操作効率には、使用する真空ポンプの性能、容器の設計、真空操作時の温度が影響する。温度を上げることで表面に物理吸着した分子を除去しやすくなるが、一方で熱エネルギーによってより強固な化学吸着（例えば水素結合、イオン結合、共有結合等）が生じる可能性があるため、温度の管理には注意が必要である。

PM-HIP で製造する機器が複雑で大型になるほど、効率良く真空操作をすることが困難になると考えられる。しかし、現時点で大型機器を対象とした事例は限られており、大型機器に有効な真空操作方法は十分に実証されていないため、最終的な製品の品質に大きく影響する可能性があると考えられている³⁹。

・HIP のパラメータ

真空操作過程で不純物を取り除いた粉末は、昇温・昇圧、目標温度・圧力の保持、冷却・減圧の3つの過程を経て焼結される。この際の温度及び圧力の変化速度や保持時間等のパラメータは製品の密度や微細構造に影響する可能性がある。例えば、大型機器を短時間に昇温すると、部位によって緻密化のしやすさが異なるため、歪みが生じる可能性がある。また、冷却速度に分布がある場合にも歪みが生じる場合がある。冷却速度を減少させれば温度分布のばらつきを抑えることができるが、冷却速度は材料の機械的性質にも影響するため注意が必要である。

大型機器に対するHIPのパラメータの最適化は十分に検証されていないため、USNRCは、HIPのパラメータの設定は最終的な製品の品質に影響しうる要因の一つとして分析している³⁹。

・確認試験

PM-HIP で製造された機器の密度や機械的性質は、当該機器と同条件でHIP処理した確認用試験片（witness specimen）を用いて確認が行われる。確認用試験片は、(1)粉末を封入

した容器を製作する際に、機器の端部にあたる部分に突出部を設け、HIP 処理後に切り出したもの、又は(2)HIP 装置内で別の容器に入れた粉末を焼結して、取り出したものである。確認用試験片は、製造した機器の微細構造の不均一性を確認するため、機器の寸法に合わせたものでなければならず、大型機器の場合は最大肉厚に合わせたものが用いられる。

ただし、大型機器の場合に、確認用試験片が製品の物性を代表したものであることは十分に実証されていない。USNRC は、確認用試験片の妥当性の検証を、PM-HIP の応用において大きな影響を及ぼす可能性があるものとして分析している³⁹。

・表面仕上げ

HIP 処理後に残存する封入容器部分を化学的又は物理的に取り除き、表面仕上げを行うことで、製品が完成する。表面仕上げ加工の方法は、従来の製造工程と同様であることから、この工程によって HIP で製造した機器の品質に懸念が生じるものではないと考えられる³⁹。

・材料固有の問題

上記の HIP 工程と従来工程との違いは、製品の様々な機械的性質に影響する。例えば、軽水炉の圧力容器に用いる低合金鋼は、高い靱性が要求される。しかし、EPRI が他機関と協力して実施したプロジェクトによれば、PM-HIP で SMR の圧力容器の一部を模擬した試験体を製造したところ、靱性の低下が無視できないことが報告されている¹³⁸。靱性低下の理由として、材料中に不均一に存在する不純物酸素が影響している可能性がある¹³⁹と指摘されている¹³⁹。不純物酸素は粉末製造、保管、真空操作の各工程で混入するため、製造工程全体で管理しなければならない。このような機器の靱性低下の問題は、PM-HIP の原子力機器への応用に大きく影響するとみられる³⁹。

また、圧力容器では、運転期間中の疲労や中性子照射の影響を考慮しなければならない。現在のところ、PM-HIP で製造された低合金鋼の疲労特性や中性子照射の影響を材料試験で調べた事例は少ない^{140、141}。材料試験データの拡充は、PM-HIP を原子力分野で実用化する上で、大きな課題になると考えられている³⁹。

以上のように、PM-HIP を用いて、大型の原子力機器を製造するプロセスを確立することは容易ではない。PM-HIP で製造した製品の特性を理解し、HIP 工程が製品の機械的性質に及ぼす影響等を把握することが、PM-HIP の実用化における課題になると考えられる。

2.3.4 電子ビーム溶接 (EBW)

(1) EBW 技術の原理及び特徴

EBW は、レーザー溶接とともに高エネルギービーム溶接に分類^{142、143}され、電子ビームのエネルギーを用いる溶接法である。

EBW 溶接機の構成例を図 6 に示す^{142、144、145、146}。電子銃内で陰極から放出される電子は

高電圧で加速され、収束コイルで高エネルギー密度の電子ビームとなる。電子ビームは、偏向コイルにより被溶接物への照射位置を調整できる。被溶接物は移動システムにより、溶接位置を調整できる。

EBW は、高エネルギーの電子ビームを材料に照射することにより材料を溶融させて接合する方法である^{145, 146}。EBW プロセスの概略を図 7 に示す。被溶接物は電子ビーム照射により溶融するとともに蒸発する。この蒸発により板厚方向に細長いビーム孔 (Capillary) が、金属蒸気の流路として、形成される。このビーム孔により電子ビームは板厚方向に深く到達することができるため、EBW では 0.01 mm~250 mm の厚さの鉄鋼材料の溶接が可能であるとされている¹⁴⁵。

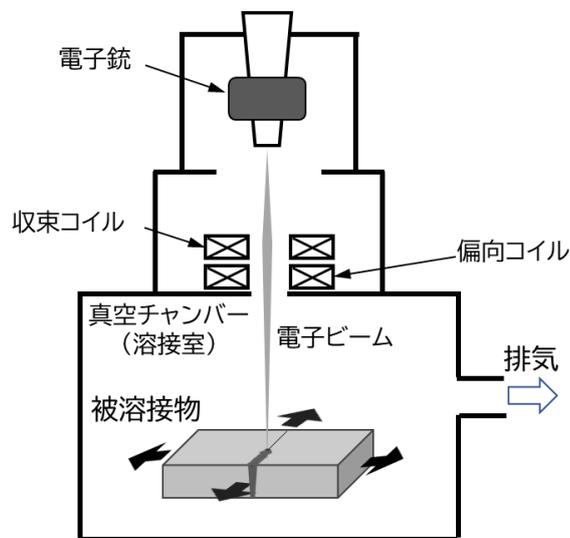


図 6 電子ビーム溶接機の構成例

Figure 6 Schematic of electron beam welding system.

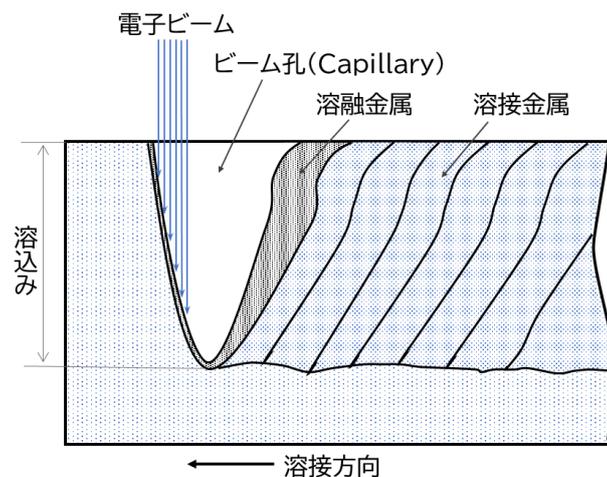


図 7 EBW プロセスの概略図

Figure 7 Schematic of electron beam welding process.

EBW は、出力の増大にほぼ比例して深い溶込み（母材の溶けた部分の最頂点と、溶接する面の表面との距離（JIS Z 3001）（図 7 参照））が得られ、出力 60 kW 程度で 200 mm 程度の溶込みがあるとされている¹⁴⁷。なお、同じ高エネルギービーム溶接に分類されるレーザー溶接では溶接時に発生するプラズマの中でレーザーの吸収や屈折が起こり、母材に入るレーザーパワーやエネルギー密度が減少するために深い溶込みが得られず、欠陥が発生しやすくなることがある¹⁴⁸。

電子ビームの電子は雰囲気中のガス粒子との衝突により散乱したり、エネルギーを失ったりする¹⁴⁹。そのため、EBW は溶接時の雰囲気ガス圧力（真空度）の影響を受ける。橋本は 1 Torr（約 133 Pa）の低真空で溶接した時の 304 ステンレス鋼の最大溶込み深さが真空度 10^{-4} Torr（約 10^{-2} Pa）の時に比較して 2 割程度減少すると報告している¹⁵⁰。

EBW は、真空の程度により大きく 3 つに分類される¹⁵¹。

- ① 高真空 EBW： 10^{-4} Torr（約 10^{-2} Pa）以上の真空度の真空容器中で行われる EBW
- ② 低真空 EBW：高真空で電子ビームを発生させ、電子ビームの進路の真空度を徐々に低下させ、最終的に $10^{-2} \sim 10^{-3}$ Torr（ $1 \sim 10^{-1}$ Pa）前後の低真空容器中で行われる EBW
- ③ 大気中 EBW：高真空で電子ビームを発生させ、電子ビームの進路の真空度を徐々に低下させ、最終的に大気圧中で被溶接物に電子ビームを照射する EBW¹⁵²

一般的に、EBW は上記①又は②の真空環境で行われるため、被溶接物の全体を真空チャンバーに設置して溶接が行われる。そのため、被溶接物の大きさは真空チャンバーの大きさに制限を受けることとなる¹⁴²。

EBW は、前述のとおり深い溶込みが得られることから、小入熱で、厚板の 1 パス溶接（溶接作業を 1 回で完了すること。高エネルギービーム溶接以外の溶接法では溶接作業を何回も行うマルチパス溶接を行う。）が可能となり、溶接熱影響部が狭く、溶接ひずみや変形が少ない等の長所があるとされている^{142, 145}。一方、溶接時の真空環境確保のために被溶接物の大きさに制約があること、高い開先精度（開先加工精度及び被溶接物の設置精度）が要求されること、被溶接物などが磁気を帯びると電子ビームが偏向して照射位置にずれが生じること、装置が高価であること等が短所であるとされている^{142, 145}。また、EBW では金属材料に電子ビームを照射するため物理現象として X 線が発生する。作業者の X 線の被曝被爆を許容レベルまで低減するために EBW 機器の遮蔽が必要とされる¹⁵³。

(2) 研究開発動向及び実用拡大に向けた課題

英国の The Welding Institute（以下「TWI」という。）は約 0.8 Torr の真空度で溶接できる減圧 EBW を開発した¹⁵⁴。英国では、Intelligent Fixtures for Optimised and Radical Manufacture（以下「InFORM」という。）事業において、TWI が開発した減圧 EBW を Cambridge Vacuum

Engineering 社が応用して局部真空方式 EBW 装置を開発し、同装置を使用して原子炉圧力容器を模した試験体（板厚 80 mm）の周方向溶接試験を実施し、同装置により溶接が実行可能であることを確認した¹³。局部真空方式 EBW は、溶接部位のみの真空を確保するための移動式の真空チャンバーを用いて溶接する方法である。既往の EBW は、真空チャンバーの中で溶接を行うため、被溶接物の大きさは真空チャンバーの大きさにより制約を受けたが、局部真空方式 EBW は被溶接物の大きさは真空チャンバーによる制約を受けない。InFORM 事業の報告書では今後の実用化のための課題として、安定した真空度の確保のためのシール交換に係る設計変更、溶接工具等の残留磁気、溶接継手の位置合わせ等が挙げられている。なお、同調査では溶接に掛かる時間を従前の工法であるアーク溶接に比較して大幅に短縮できることを実証したと報告している¹³。

我が国においては、三菱重工業株式会社が前述と同様の考え方による局所真空動シール方式 EBW の長手継手及び円周継手について SUS304L 鋼及び SUS316L 鋼への適用性を検討した¹⁵⁵。その中で、SUS304L 鋼製のドーナツ型の核融合真空容器（外径 3.5 m、内径 1.7 m、板厚 25 mm）の円周継手溶接を実用化し、大型溶接構造物に同方法が適用可能であると報告している。

米国原子力産業界では、SMR の原子炉圧力容器の周方向溶接を行うための EBW 技術の実証研究が進められている²⁸。EPRI は、モジュール式チャンバー内 EBW 装置を使用して、SMR の上部及び下部ヘッドと同様に、厚い断面の周方向溶接部に対する EBW の使用を検討している¹⁴⁴。

PM-HIP と EBW は、非原子力分野では成熟した技術であると理解されている¹⁴が、それらを組み合わせることにより SMR の製造コストを低減することを意図して検討が進められている¹⁵⁶。

Warner らは、PM-HIP により低合金鋼製小型圧力容器（外径：850 mm、高さ：2400 mm、断面の厚さ：35～50 mm）を上下の二つのパーツで製造し、それらのパーツを EBW で溶接した¹⁵⁷。この報告では溶接後、その小型圧力容器にはノズルやそれ以外の部分で大きな折り目状の変形が認められたことが示されている。Warner らは、この変形は HIP の封入容器への粉末の充填不良に起因すると推定している。

なお、上記の Warner らの報告では、低合金鋼 HIP 材の靱性を鍛造材と同等にするためには原料粉末中の初期酸素含有量を 200 ppm より低くする必要があると考察している。一般的に溶接金属中の水素、窒素等のガスが凝固時に溶接金属に取り残され、空洞が生成されることが知られている¹⁵⁸。浦谷ら¹⁵⁹及び高野¹⁶⁰は、炭素鋼の EBW において、板厚 150 mm で材料中の窒素が 74 ppm 以上で溶接金属中に空洞が発生することを報告している。窒素ガスでアトマイズされた 316L ステンレス鋼粉末には、570～1100 ppm の窒素が含まれている（ASTM A988 規格値は 1000 ppm 以下¹⁶¹）ことが確認されている³⁹。また、浦谷らは板厚 80 mm の 304 ステンレス鋼の EBW において空洞が発生しない材料内のガス成分量は、窒素が 600 ppm 以下、酸素量が 100 ppm 以下であることを報告している¹⁶⁴。低合金鋼及びス

ステンレス鋼の HIP 材の溶接においては空洞の発生の観点から原料粉末の窒素量に注意しなければならない可能性がある。

また、浦谷ら¹⁵⁹は EBW の溶接金属の酸素量と窒素量は真空環境の溶接時の脱ガスにより母材より低くなっていることを報告している。EBW は、一般的に溶加材（溶接中に付加される材料）を用いないこと、真空中で溶接すること、冷却速度が大きいことなどから、溶接部の溶融金属（母材に由来）の構成元素量や金属組織が変化し、機械的特性に影響を及ぼすことが報告されている。そのため EBW を考慮して成分等を工夫した材料設計が種々検討されている^{162, 163}。DOE のプロジェクトでは SMR の製造において HIP で製造した圧力容器に EBW を適用することが検討されている¹⁵⁶が、そのような用途においては EBW を考慮した HIP 材料の設計も今後の検討課題であると考えられる。

我が国においては、三菱重工業株式会社等が 1980 年代を中心に研究を実施し実機への適用について検討している。浦谷らは、オーステナイト系ステンレス鋼製機器及び炭素鋼製圧力容器への EBW 適用性を検討し、実機への適用性を示した^{159, 164, 165}。ここでは、健全な溶接部が得られる溶接条件（電子ビーム加速電圧、ビーム電流、溶接速度、真空度等）、溶接欠陥（高温割れ、空隙）を防止するための母材の化学組成（リン、硫黄、窒素、酸素）、得られた溶接継手の強度や靱性等の諸特性について検討されている。また、山本ら¹⁶⁶及び高野¹⁶⁷は、低合金鋼圧力容器への EBW 適用性を検討し、実機への適用性を示した。ここでは、良好な溶接継手特性を得るための溶接条件、溶接後熱処理条件の検討に併せて、前述した局所真空動シール方式 EBW の適用性についても検討している。これらの技術は、後述するように既に実機に適用されている。

EBW は、使用済燃料貯蔵キャニスタへの適用も検討されている。伊東らは、使用済燃料貯蔵キャニスタ用広幅厚板 SUS329J4L 鋼への EBW の適用性を耐食性、靱性及び溶接性の観点から報告している¹⁶²。真空中で行われる EBW においては合金成分中の窒素の濃度が溶接部では低下することが知られている。そのため、この研究では靱性と耐食性を向上させる窒素量が溶接部で損なわれないための合金が設計された。また、Punshon らは米国のユッカ・マウンテン・プロジェクトにおける高レベル放射性廃棄物容器（Alloy22 合金）への減圧 EBW の適用を検討するため、従来の溶接法であるガスタングステンアーク溶接（Gas Tungsten Arc Welding（GTAW））部と減圧 EBW 溶接部の耐食性の評価を実施し、両者がほぼ同等の耐食性を有していることを報告している^{168, 169}。

USNRC は、原子力用途への EBW の適用に関連する技術的な懸念事項を整理している³⁸。この中で示されている主な懸念事項は、以下のとおりである。

①溶接中に発生する欠陥に対処するための補修溶接

EBW の溶接金属内には空隙（void）が発生することがある^{170, 171, 172}。EBW は通常、深いシングル・パス溶接に使用されるため、欠陥が発見された場合、その欠陥は溶接部の表面近くにならないこともあり得る。そのため、欠陥の深さまで到達するために、追加の機械加

工又は研削、あるいはその両方が必要になる場合がある。その手法や手続きが整備されていない。

②溶接後の熱処理（材料の内部残留応力を減らし、材質を改善するために行う熱処理）

EBW は、溶接施工条件によって溶接部の靱性が低下すること及び適切な溶接後熱処理（Post Weld Heat Treatment、以下「PWHT」という。）により靱性が改善することが知られている¹⁷³。ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III では、全ての炭素鋼と低合金溶接部の PWHT を要求している。ASME コードでは、材料の種類、炭素含有量、板厚、指定された予熱の適用に基づき、これらの要件に対するいくつかの適用除外が規定されている。高野は、厚板低合金鋼（SQV 2B 鋼）の靱性低下を防ぐための溶接条件及び PWHT 条件を見だし蒸気発生器の製作に EBW を適用できることを示した¹⁶⁷。しかし、USNRC は、研究データは少なく、厚肉鋼材への EBW に対するこれらの要求事項の妥当性は米国ではまだ実証中であり、EBW を適用した溶接部への PWHT 条件に関する知見が不足していると整理している。

②-a) PM-HIP 材同士の溶接及び鍛造品と PM-HIP 材の溶接

原子炉压力容器部品の PM-HIP による製造開発と並行して、PM-HIP で製造した原子炉压力容器部品同士の溶接、又は従来製品の鍛造低合金鋼と PM-HIP で製造した原子炉压力容器部品の溶接への EBW の適用が検討されているが、既往の研究が少なく、知見が不足している。

2.3.3.2 で材料固有の問題として記述したように、PM-HIP で製造した材料の靱性を確保するために原材料粉末の酸素が注目されている。一方で、2.3.4.2 で記述したように EBW による溶接部の空洞の発生を防止するためには材料中の酸素に併せて窒素の含有量を制限する必要がある。Warnerらは、鍛造低合金鋼と PM-HIP で製造した原子炉压力容器部品を EBW で溶接した¹⁵⁷。この報告では PM-HIP の原料粉末の酸素含有量を 200ppm 程度としているが、原料粉末及び PM-HIP で製造した材料の酸素と窒素の含有量や溶接部の空洞の発生状況は説明されていない。

②-b) 熱時効と照射脆化

原子炉压力容器鋼を EBW で溶接した溶接部の高温への長期暴露による熱時効や中性子照射による脆化に関する発表論文は見つかっていない。後述の我が国における実機適用事例には原子炉压力容器は含まれていない。2.3.4.2 で記述したように EBW は一般的に溶加材を用いないこと、真空中で溶接すること、冷却速度が大きいことなどから、溶接部の溶融金属（母材に由来）の構成元素量や金属組織が既往の溶接法（Tungsten Inert Gas (TIG) 溶接）によるものとは異なる。DOE のプロジェクトでは SMR の製造において HIP で製造した压力容器に EBW を適用することが検討されている¹⁵⁶が、そのような用途においては

EBW で溶接した溶接部の熱時効や中性子照射による脆化に関する知見の拡充が必要である。

(3) 実プラントへの適用例

我が国においては、EBW の原子力発電プラントへの適用を目指した財団法人発電用熱機関協会（現、一般財団法人発電設備技術検査協会）において、EBW 溶接方法確性試験委員会が組織され、EBW のオーステナイト系ステンレス鋼、炭素鋼及び低合金鋼の溶接への適用が検討され、それぞれ実機への適用が認められた^{147、164、165、166、174}。その結果を受け、実際にオーステナイト系ステンレス鋼機器¹⁶⁵、炭素鋼蓄圧タンク¹⁷⁵及び低合金鋼製蒸気発生器¹⁷⁶にそれぞれ適用されている。

一般社団法人日本機械学会発電用原子力設備規格溶接規格（2020年）では、溶接施工確認項目、溶接材料（溶加材）、溶接施工条件（シールドガス）、溶接機等が EBW における確認項目として示されており¹⁷⁷、事業者には当該規格に準じた施工が求められる。

なお、欧米においては、SMR の量産化を目指す中で、溶接時間が大幅に削減できる EBW に注目し、我が国で実用化された技術とは別に、独自に技術開発している状況であると理解される。

3. まとめ

AMT の原子力分野への適用の現状を把握することを目的とし、国際機関や各国の AMT に対する取り組みの状況を調査・整理するとともに、代表的な AMT 技術の概要、研究開発動向及び実用拡大に向けた課題について解説した。

IAEA や OECD/NEA では、AMT を含む先進技術について、加盟国間で情報を共有するための活動が進められている。IAEA は近年、AMT を含む様々な技術革新について各国が協力するためのプラットフォームを発足し、技術的知見の共有、専門家による技術的助言の提供等を実施している。また、OECD/NEA は近年、ワークショップの形で原子力分野での AMT の適用に係る情報共有を実施するとともに、傘下のワーキンググループにおいて AMT の活用に関するレポートを作成している。

米国では、DOE が資金提供しているプログラムの下で製造された燃料集合体構成部品が実用化された事例が報告されている。また、USNRC では、そのような AMT 開発の動向を受け、原子炉部品に適用される可能性の高い AMT 技術を特定するとともにそれら AMT 技術の調査・評価を通じて技術ギャップを特定し、審査に用いるガイド文書を整備することを目的とした活動を実施中である。

欧州では、EURATOM が資金提供するプロジェクト NUCOBAM において、AMT によって製造した部品の原子力設備における使用を可能にするための適格性評価プロセスの開発、供用期間中の挙動評価（中性子照射環境における経年変化等）に関する研究を実施している。

我が国においては、日本機械学会が積層造形に代表される AM に関する技術規格検討タスクを設置し、AM 部品の技術規格化について議論を開始している。これを受け、国内プラントメーカーは、AM で作製した材料を原子力製品へ適用するための規格化に必要な材料特性データベースを整備中である。また、原子力学会材料部会は「原子力材料分野のロードマップ」を策定・公表し、軽水炉と高速炉において取り組むべき技術分野として AM を取り上げている。

上記の調査に加え、本技術ノートでは、原子炉部品に適用される可能性の高い AMT として、AM、CS、PM-HIP、EBW に着目し、それぞれの技術の概要を解説するとともに、研究開発動向及び実用拡大に向けた主要な課題をまとめた。各々の技術の概要は以下のとおりである。

- 金属材料を対象とした AM は比較的新しい技術であり、現在、製造工程で生じる現象の理解・解明や、それらを通じたモデリング・プロセス最適化等の基礎的な研究が盛んにされている段階である。また、AM の活用に当たっては、サイバーセキュリティの確保も重要な課題である。
- CS、PM-HIP は原子力以外の分野では実用化されているものの、それら技術により製造された部品の機械的性質、高経年化の影響、非破壊検査の手法等に関する知見が不足しており、原子力分野での適用に当たってはそれらが課題である。
- EBW は、我が国においては、過去の検討によりオーステナイト系ステンレス鋼機器、炭素鋼蓄圧タンク及び低合金鋼製蒸気発生器への適用事例がある。しかし、原子炉圧力容器への適用はされていない。米国では SMR の圧力容器への EBW 適用について検討しているが、溶接部の熱時効や中性子照射による脆化に関する知見は得られていない。なお、欧米においては、我が国で実用化された技術とは別に独自に技術開発している状況であると理解される。

以上で述べたとおり、AMT は、現状では広い用途で従来製法を代替するには至っておらず、実用拡大に向けて各国で研究開発が進められている段階の技術である。

謝辞

本技術ノートの作成に当たって、永瀬文久博士及び久保田宙生氏には調査の進め方や取りまとめの方向性について御助言を頂いた。また、永瀬文久博士からは調査及び報告書執筆の各段階において技術的御助言を頂いた。さらに、久保田宙生氏及び坂田光太郎博士には作業について全面的な御協力を頂いた。各位に深く感謝の意を表す。

参考文献一覧

- 1 SUBCOMMITTEE ON ADVANCED MANUFACTURING COMMITTEE ON TECHNOLOGY of the NATIONAL SCIENCE AND TECHNOLOGY COUNCIL, USA: NATIONAL STRATEGY FOR ADVANCED MANUFACTURING, p.2, 2022.<https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/10/National-Strategy-for-Advanced-Manufacturing-10072022.pdf> (2024年9月12日確認)
- 2 清水那弥、桐原聡秀、「持続可能な開発目標に対するアディティブ・マニュファクチャリングの貢献」、スマートプロセス学会誌、第10巻、第4号、pp.152-158, 令和3年第5期科学技術基本計画（平成28年1月22日、閣議決定）、平成28年
<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index5.html> (2024年9月12日確認)
- 3 第6期科学技術・イノベーション基本計画（令和3年3月26日、閣議決定）、令和3年
<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index6.html> (2024年9月12日確認)
- 4 European Parliament: Industry4.0: Digitalisation for productivity and growth, 2015.
[https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2015\)568337](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2015)568337) (2024年9月12日確認)
- 5 European Commission: Industry 5.0- Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry, 2021. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/knowledge-publications-tools-and-data/publications/all-publications/industry-50-towards-sustainable-human-centric-and-resilient-european-industry_en (2024年9月12日確認)
- 6 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：2014年度～2022年度成果報告書 革新的新構造材料等研究開発/革新的新構造材料等研究開発、2023年
- 7 Wu, H., Yabar, H., "Impacts of additive manufacturing to sustainable urban–rural interdependence through strategic control", Results in Control and Optimization, 5, 2021. doi:10.1016/j.rico.2021.100066.
- 8 U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Draft AMT Review Guidelines", ADAMS Accession No. ML21074A037, 2021.
- 9 World Nuclear Association, "Advanced Manufacturing of Nuclear Components -Accelerating the harmonized development of codes and standards", Report No. 2022/004, 2022.
- 10 J López and C Vila, "An approach to Reverse Engineering Methodology for Part Reconstruction with Additive Manufacturing", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol.1193, 012047 (8pp). doi:10.1088/1757-899X/1193/1/012047, 2021.
- 11 多原竜輝、「米国原子力業界における積層造形技術の活用」、保全学(日本保全学会誌)、pp.45-50、令和2年
- 12 Nuclear AMRC, University of Sheffield, Intelligent Fixtures for Optimisedand Radical

- Manufacture – Project Report, NI1066-REP-01, pp. F-1 – F-30, 2019.
- 14 Meimei Li, M., Andersson, D., Dehoff, R., Jokisaari, A., Rooyen, V., I., Cairns-Gallimore., D., "Advanced Materials and Manufacturing Technologies (AMMT) 2022 Roadmap", Department of Energy Office of Nuclear Energy, 2022.
 - 15 EPRI, "Additive Manufacturing Roadmap for the Nuclear Power Industry, -Metal Alloy AM Technologies", 2021. <https://www.epri.com/research/products/000000003002022977> (2024年9月12日確認)
 - 16 CLAES, A., NARDONE, S., "ENGIE Experience with Additive Manufacturing and Related Nuclear Applications", NRC WORKSHOP ON ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGIES FOR NUCLEAR APPLICATIONS, Part II – Workshop Slides, U. S. NRC, pp. B-20 – B-36, 2021.
 - 17 Albert, M., Gandy, D., "Vision of Advanced Manufacturing Technology (AMT) Use in the Nuclear Industry", NRC WORKSHOP ON ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGIES FOR NUCLEAR APPLICATIONS, Part II - Workshop Slides, U. S. NRC, pp. B-82-B-93, 2021.
 - 18 Tanguy, R., "Harmonizing advanced manufacturing codes & standards, a key to the global SMR market", Presentation Material for IAEA Technical Meeting on Codes and Standards, Design Engineering and Manufacturing of Components for SMRs, 2022.
 - 19 U.S. Nuclear Regulatory Commission, "U.S. Nuclear Regulatory Commission Technical Assessment of Cold Spray", ADAMS Accession No. ML22118A090, 2022.
 - 20 European Commission, "CORDIS - EU research results, Nuclear Components Based on Additive Manufacturing", 2020. <https://cordis.europa.eu/project/id/945313> (2024年9月12日確認、doi: 10.3030/945313)
 - 21 IAEA, "IAEA BULLETIN, Nuclear Innovations for Net Zero", IAEA, pp.14-15, 2023.
 - 22 IAEA ウェブサイト
<https://www.iaea.org/services/networks/gfni> (2024年9月12日確認)
 - 23 OECD/NEA, "Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: A Practical Guide for Stakeholders", OECD/NEA, pp.81-82, 2020.
 - 24 OECD/NEA, "2022 NEA Annual Report", OECD/NEA, p.109, 2023.
 - 25 Li, M., Andersson, D., Dehoff, R., Jokisaari, A., Rooyen, I., Cairns-Gallimore, D., "DOE-NE Advanced Materials and Manufacturing Technologies (AMMT) Program Overview", Presentation material of 2023 Workshop on Advanced Manufacturing Technologies (AMTs) for Nuclear Applications, 2023.
 - 26 Framatome ウェブサイト

- <https://www.framatome.com/medias/framatome-tva-oak-ridge-national-laboratory-to-load-first-3d-printed-component-in-commercial-reactor/> (2024年9月12日確認)
- 27 Jack Beuth, “Additive Manufacturing of Spacer Grids for Nuclear Reactors”, 2020. https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/CMU_FINAL%20Beuth%20Nuclear_Project_resentation.pdf (2024年9月12日確認)
 - 28 舟木健太郎、「原子力イノベーションの追求」、SMR等革新炉の安全と安全規制について-今後の取組-フォローアップセミナー講演資料、p.32、令和3年
 - 29 EPRI, "ADVANCED MANUFACTURING METHODS ROADMAP FOR THE NUCLEAR ENERGY INDUSTRY", 2021.
 - 30 D. Gandy, D., Tate, S., Albert, M., Armstrong, C., "316L Stainless Steel Manufactured via Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing, Data Package & Code Case", NRC WORKSHOP ON ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGIES FOR NUCLEAR APPLICATIONS, Part II - Workshop Slides, U. S. NRC, pp. B-284 – B-301 2021.
 - 31 USNEI, “Roadmap for Regulatory Acceptance of Advanced Manufacturing Methods in the Nuclear Energy Industry”, 2019.
 - 32 Messner, M., Barua, B., Huning, A., Arndt, S., Massey, C., Taller, S., Dehoff, R., Russell, M., Scime, L., Snow, Z., Ziabari, A., Halsey, W., Cooper, S., Oryanchik, V., Sprayberry, M., Knapp, G., Stump, B., Paquit, V., Butcher, T., McMurtrey, M., Patterson, T., Meher, S., Rooyen, J. van, Isabella, "ASME Code Qualification Plan for LPBF 316 SS"(ANL-AMMT-009), Argonne National Laboratory, 2023.
 - 33 Messner, M., "Qualifying Laser Powder Bed Fusion 316H for use with ASME Section III, Division 5", Presentation Material for 2023 NRC Workshop on AMTs for Nuclear Applications,2023.
 - 34 U.S. Nuclear Regulatory Commission, DRAFT Action Plan for Advanced Manufacturing Technologies (AMTs), ADAMS Accession No. ML19029B355, 2019.
 - 35 U.S. Nuclear Regulatory Commission, Revision 1 of the Action Plan to prepare the U.S. nuclear regulatory commission or review of industry use of advanced manufacturing technologies, ADAMS Accession No. ML19933B972, 2020.
 - 36 U.S. Nuclear Regulatory Commission, "NRC Technical Assessment of Additive Manufacturing – Laser Powder Bed Fusion", ADAMS Accession No. ML20351A204, 2021.
 - 37 U.S. Nuclear Regulatory Commission, "NRC Technical Assessment of Additive Manufacturing – Laser-Directed Energy Deposition", ADAMS Accession No. ML21292A188, 2022.
 - 38 U.S. Nuclear Regulatory Commission, "NRC Technical Assessment of Electron Beam

- Welding", ADAMS Accession No. ML22143A929, 2022.
- 39 U.S. Nuclear Regulatory Commission, "NRC Technical Assessment of Powder Metallurgy – Hot Isostatic Pressing", ADAMS Accession No. ML22164A439, 2022.
- 40 U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Draft Advance Manufacturing Technologies Review Guidelines", ADAMS Accession No. ML21074A037, 2021.
- 41 U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Implementation of Quality Assurance Criteria and 10 CFR 50.59 for Nuclear Power Plant Components Produced Using Advanced Manufacturing Technologies AMT Regulatory Basis Document AMT Action Plan, Revision 1, Subtask 2A", ADAMS Accession No. ML21155A043, 2021.
- 42 Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNETP), "NUCOBAM FACTSHEET", <https://nucobam.eu/> (2024年5月30日確認)
- 43 Nuclear Advanced Manufacturing Research Centre ウェブサイト <https://namrc.co.uk/about/background/> (2024年9月12日確認)
- 44 Nuclear Advanced Manufacturing Research Centre ウェブサイト <https://namrc.co.uk/centre/rolls-royce-smr-support-phase2/> (2024年9月12日確認)
- 45 EPRI, "Program on Technology Innovation: Small Modular Reactor Vessel Manufacture and Fabrication Phase 1—Progress (Year 3)", 2021.
<https://www.epri.com/research/programs/065093/results/3002021037> (2024年9月12日確認)
- 46 John Sulley, "Rolls - Royce' s Introduction of HIP Nuclear Component, "NRC WORKSHOP ON ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGIES FOR NUCLEAR APPLICATIONS, Part II – Workshop Slides", U. S. NRC, pp. B-37 - B-57, 2021.
- 47 日本機械学会「第105回 発電用設備規格委員会 原子力専門委員会 議事録」、令和3年 <https://www.pgc.jsme.or.jp/GIJIROKU/PUBLIC/SC-N-105.pdf> (2024年9月12日確認)
- 48 三菱重工業、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「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(令和3年度原子力産業基盤強化事業委託(資源エネルギー庁))」、令和4年
https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2021FY/000730.pdf (2024年8月22日確認)
- 49 三菱重工業、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「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(令和4年度原子力産業基盤強化事業委託(資源エネルギー庁))」、令和5年
https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2022FY/000428.pdf (2024年8月22日確認)
- 50 三菱重工業、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「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(令和5年度原子力産業基盤強化事業委託(資源エネルギー庁))」、令和6年
https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2023FY/000067.pdf (2024年8月22日確認)
- 51 原子力学会材料部会、「原子力材料分野のロードマップ」、令和3年
- 52 ASTM International, "Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies", ASTM F2792-12a, 2015.
- 53 日本規格協会、「JIS B 9441: 2020 付加製造 (AM) -用語及び基本的概念」、令和2年
- 54 Roland Berger ウェブサイト
https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/Roland_Berger_Additive_manufacturing_3.pdf (2024年6月5日確認)
- 55 小泉雄一郎、千葉晶彦、野村直之、中野貴由、「金属系材料の3次元積層造形技術の基礎」、まてりあ、56巻、pp. 686-690、平成29年
- 56 千葉晶彦、「電子ビーム積層造形技術による金属組織の特徴」、計測と制御、54巻、6号、pp.395-404、平成27年
- 57 宮田淳二、古川哲義、三村誠一、村上和之、「電子ビーム粉末床溶融結合法(金属3Dプリンタ)の紹介」、軽金属、72巻、6号、pp.358-363、令和4年
- 58 堀洋一郎、「真空とビーム寿命」、放射光、16巻、6号、pp.358-361、平成15年
- 59 倉本博久、「金属積層造形の種類とパウダDED方式三次元金属積層造形機LAMDAの紹介」、日本ロボット学会誌、39巻、4号、pp.326-330、令和3年
- 60 Metal Powder Industries Federation ウェブサイト
<https://www.mpif.org/News/FocusPM/TabId/979/ArtMID/3883/ArticleID/439/GE-Aviation%E2%80%99s-GE9X-Engine-Achieves-FAA-Certification.aspx> (2024年4月17日確認)
- 61 METAL AM ウェブサイト
<https://www.metal-am.com/bmw-group-opens-its-new-additive-manufacturing-campus/> (2024年4月17日確認)
- 62 Westinghouse ウェブサイト
<https://info.westinghousenuclear.com/news/westinghouse-installs-first-of-a-kind-3d-printed-fuel-component-inside-commercial-nuclear-reactor> (2023年12月6日確認)
- 63 Westinghouse ウェブサイト
<https://info.westinghousenuclear.com/news/westinghouse-creates-and-installs-industrys-first-3d-printed-fuel-debris-filter-for-nuclear-power-plants> (2023年12月6日確認)
- 64 藤井和慶、「金属3D積層技術開発の成果と今後の課題について」、第10回CMIシンポジウム、令和4年

- 65 Lou, X., Andresen, P., L., and Rebak, R., B., “Oxide Inclusions in Laser Additive Manufactured Stainless Steel and Their Effects on Impact Toughness and Stress Corrosion Cracking Behavior”, *Journal of Nuclear Materials*, vol. 499, pp. 182-190, 2018.
- 66 千葉晶彦、「電子ビームによる金属積層造形技術の基礎 —粉末特性と造形性の関係—」、*溶射*、58巻、3号、pp.135-141、令和3年
- 67 一般社団法人日本チタン協会ウェブサイト
http://www.titan-japan.com/technology/physical_properties.html (2024年4月22日確認)
- 68 一般社団法人日軽金アクト株式会社ウェブサイト
<https://group.nikkeikin.co.jp/act/technology/basic.html> (2024年4月22日確認)
- 69 小笹良輔、石本卓也、松垣あいら、中野貴由、「Additive Manufacturingの歩みとレーザービーム粉末床溶融結合法の基礎」、*スマートプロセス学会誌*、10巻、4号、令和3年
- 70 Akbari, M., Kovacevic, R., “An Investigation on Mechanical and Microstructural Properties of 316LSi Parts Fabricated by a Robotized Laser/Wire Direct Metal Deposition System”, *Additive Manufacturing*, Vol. 23, pp. 487–497, 2018.
- 71 Kono, D., Maruhashi, A., Yamaji, I., Oda, Y., Mori, M., “Effects of Cladding Path on Workpiece Geometry and Impact Toughness in Directed Energy Deposition of 316L Stainless Steel”, *CIRP Annals*, Vol. 67, No. 1, pp. 233–236, 2018. doi: 10.1016/j.cirp.2018.04.087
- 72 中本貴之、木村貴広、白川信彦、「金属粉末レーザー積層造形装置EOSINTによる材料加工特性」、*計測と制御*、54巻、6号、pp.392-398、平成27年
- 73 京極秀樹、池庄司敏孝、「Additive Manufacturing技術の最新動向（レーザーパウダーベッド造形における欠陥発生メカニズムと溶融凝固シミュレーションを中心に）」、*近畿大学次世代基盤技術研究所報告*、10巻、pp. 69-74、令和元年
- 74 Matthews, M., J., Guss, G., Khairallah, S., A., Rubenchik, A., M., Depond, P., J., King, W., E., “Denudation of metal powder layers in laser powder bed fusion processes”, *Acta Materialia*, Vol. 114, pp. 33-42, 2016.
- 75 Khairallah, S., A., Anderson, A., T., Rubenchik, A., King, W., E., “Laser powder-bed fusion additive manufacturing: physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones”, *Acta Materialia*, Vol. 108, pp. 36-45, 2016.
- 76 Watari, N., Ogura, Y., Yamazaki, N., Inoue, Y., Kamitani, K., Fujiya, Y., Toyoda, M., Goya, S., Watanabe, T., “Two-fluid model to simulate metal powder bed fusion additive manufacturing”, *J. Fluid Science and Technology*, Vol.13, No.2, 2018. doi: 10.1299/jfst.2018jfst0010
- 77 Ikeshouji, T., T., Nakamura, K., Yonehara, M., Imai, K., Kyogoku, H., “Selective Laser Melting of Pure Copper”, *Journal of Minerals, Metals and Materials Society*, Vol. 70, pp. 396-

- 400, 2018.
- 78 Sun, S., H., Hagihara, K., Nakano, T., “Effect of scanning strategy on texture formation in Ni-25 at. % Mo alloys fabricated by selective laser melting”, *Materials & Design*, Vol. 140, pp. 307-316, 2017.
- 79 井上陽太、佐々木信也、「レーザー粉末床溶融結合法におけるレーザー走査パターンがAl-10%Si-0.5%Mg造形物の残留応力分布に及ぼす影響」、*軽金属*、72巻、5号、pp.172-177、令和4年
- 80 DebRoy, T., Wei, H., L., Zuback, J., S., Mukherjee, T., Elmer, J., W., Milewski, J., O., Beese, A., M., Wilson-Heid, A., De, A., Zhang, W., “Additive Manufacturing of Metallic Components – Process, Structure and Properties” *Progress in Materials Science*, Vol. 92, No. Supplement C, pp. 112–224, 2018. doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001
- 81 Haley, J., Faraone, K., M., Gibson, B., Simpson, J., Dehoff, R., “Review of Advanced Manufacturing Techniques and Qualification Processes for Light Water Reactors – Laser-Directed Energy Deposition Additive Manufacturing”, ORNL/TM-2020/1829, 2021.
- 82 Simpson, J., Dehoff, R., “Review of Advanced Manufacturing Techniques and Qualification Processes for Light Water Reactors— Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing”, ORNL/NRCH Q2514D0004, 2020.
- 83 Snow, Z., Scimea, L., Ziabaria, A., Fisher, B., Paquit, V., “Scalable in situ non-destructive evaluation of additively manufactured components using process monitoring, sensor fusion, and machine learning”, *Additive Manufacturing*, Vol. 78, No. 103817, 2023. doi: 10.1016/j.addma.2023.103817
- 84 Ero, O., Taherkhani, K., Toyserkani, E., “Optical tomography and machine learning for in-situ defects detection in laser powder bed fusion: A self-organizing map and U-Net based approach”, *Additive Manufacturing*, Vol.78, No. 103894, 2023. doi: 10.1016/j.addma.2023.103894
- 85 Dilberoglu, U., Gharehpapagha, B., Yamana, U., Dolen, M., "The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0", *Procedia Manufacturing*, Vol.11, pp.545-554, 2017.
- 86 Mehrpouya, M., Dehghanghadikolaie, A., Fotovvati, B., Vosooghnia, A., Emamian, S., Gisario, A., "The Potential of Additive Manufacturing in the Smart Factory Industrial 4.0: A Review", *Applied Sciences*, Vol. 9, Issue 18, 3865, 2019. doi:10.3390/app9183865
- 87 岩野和生、高島洋典、「サイバーフィジカルシステムとIoT（モノのインターネット）-実世界と情報を結びつける」、*情報管理*、第57巻、第11号、pp.826-834、平成27年
- 88 経済産業省商務情報政策局、「第8回産業サイバーセキュリティ研究会事務局説明資料（第8回 産業サイバーセキュリティ研究会 資料3）」、令和6年

- 89 Hemsley, K., Fisher, R., "A HISTORY OF CYBER INCIDENTS AND THREATS INVOLVING INDUSTRIAL CONTROL SYSTEMS", Proceedings of the Critical Infrastructure Protection XII, pp.215-242, 2018.
- 90 U.S. Department of Justice, "Four Russian Government Employees Charged in Two Historical Hacking Campaigns Targeting Critical Infrastructure Worldwide", 2022.
<https://www.justice.gov/opa/pr/four-russian-government-employees-charged-two-historical-hacking-campaigns-targeting-critical> (2024年6月13日確認)
- 91 倉地亮、制御システムに対する脅威-自動車における事例、システム/制御/情報、第62巻、第4号、pp.124-129、平成30年
- 92 Yampolskiy, M., Skjellum, A., Kretzschmar, M., Overfelt, A., R., Sloan, R., K., Yasinsa, A., "Using 3D printers as weapons", International Journal of Critical Infrastructure Protection, Vol.14, pp.58-71, 2016.
- 93 Pearce, H., Yanamandra, K., Gupta, N., Karri, R., "Flaw3d: A trojan-based cyber attack on the physical outcomes of additive manufacturing", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 27, Issue: 6, pp.5361-5370, 2022.
- 94 Belikovetsky, S., Yampolskiy, M., Toh, J., Gartlin, J., Elovici, Y., "dr0wned – Cyber-Physical Attack with Additive Manufacturing", 11th USENIX Workshop on Offensive Technologies_WOOT17, 2017.
- 95 Krotofil, M., Ca ´ rdenas, A., Larsen, J., Gollmann, D., "Vulnerabilities of cyber-physical systems to stale data—Determining the optimal time to launch attacks", International Journal of Critical Infrastructure Protection, Vol.7, pp.213-232, 2014.
- 96 Rahman M., H., Shafae, M., "Physics-based detection of cyber-attacks in manufacturing systems: A machining case study", Journal of Manufacturing Systems, Vol.64, pp. 676–683, 2022.
- 97 Brandman, J., Sturm, L., White, J., Williams, C., A physical hash for preventing and detecting cyber-physical attacks in additive manufacturing systems, Journal of Manufacturing Systems, 56, pp.202-212, 2020.
- 98 Raeker-Jordan, N., Chung, J., Kong, Z., Williams, C., "Ensuring additive manufacturing quality and cyber–physical security via side-channel measurements and transmissions", Journal of Manufacturing Systems, Vol.73, pp.275–286, 2024.
- 99 Kumar, M., Epiphaniou, G., Maple, C., "Comprehensive Threat Analysis in Additive Manufacturing Supply Chain: A Hybrid Qualitative and Quantitative Risk Assessment Framework", Production Engineering, 2024. doi:10.1007/s11740-024-01283-1.
- 100 The European Cyber Resilience Act ウェブサイト

- <https://www.european-cyber-resilience-act.com/> (2024年9月12日確認)
- 101 European Parliament ウェブサイト
https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2024-0130_EN.html#title2 (2024年9月12日確認)
- 102 経済産業省商務情報政策局サイバーセキュリティ課、「経済産業省のサイバーセキュリティ政策について」(デジタル庁デジタル臨時行政調査会作業部会 テクノロジーベースの規制改革推進委員会 (第6回) 資料4)、令和5年
- 103 National Institute of Standards and Technology, "NIST Cybersecurity Framework (CSF) 2.0", 2024. doi: 10.6028/NIST.CSWP.29.
- 104 経済産業省産業サイバーセキュリティ研究会ウェブサイト
https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/sangyo_cyber/index.html (2024年9月12日確認)
- 105 産業サイバーセキュリティ研究会ワーキンググループ1(制度・技術・標準化) 工場サブワーキンググループ、「工場システムにおけるサイバー・フィジカル・セキュリティ対策ガイドライン (Ver 1.0)」、令和4年
- 106 新エネルギー・産業技術総合開発機構、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第2期/IoT社会に対応したサイバー・フィジカル・セキュリティ ウェブサイト
https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP2_100123.html (2024年9月12日確認).
- 107 International Electrotechnical Commission ウェブサイト
<https://www.iec.ch/blog/understanding-iec-62443> (2024年9月12日確認)
- 108 星野浩志、藤田淳也、神余浩夫、「IEC 62443制御システムセキュリティ規格の現状～概要と最新の状況の紹介～」、制御システムセキュリティカンファレンス 2023講演資料、令和5年
- 109 一般社団法人 JPCERT コーディネーションセンター制御システムセキュリティ対策グループ、「標準から学ぶ ICS セキュリティ#1 ICS セキュリティ標準 IEC 62443 シリーズの全体概要」、令和4年
https://www.jpccert.or.jp/ics/20220804_ICSecStandards-01.pdf (2024年9月12日確認)
- 110 日本機械学会、「機械工学便覧β2編 材料学・工業材料」、丸善出版、平成18年
- 111 Yin, S., Cavaliere, P., Aldwell, B., Jenkins, R., Liao, H., Li, W., Lupoi, R., "Cold spray additive manufacturing and repair: Fundamentals and applications", Additive Manufacturing, Vol. 21, Pages 628-650, 2018. doi:10.1016/j.addma.2018.04.017
- 112 榊和彦、「コールドスプレーの概要と最新動向」、溶射、47巻、3号、113-119、平成22年
- 113 榊和彦、「溶射 (コールドスプレー) による積層造形の最前線」、表面技術、74巻、5号、p. 250-255、令和5年

- doi:10.4139/sfj.74.250
- 114 Stoltenhoff, T., Borchers, C., Gärtner, F., Kreye, H., "Microstructures and key properties of cold-sprayed and thermally sprayed copper coatings", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 200, Issues 16-17, pp. 4947-4960, 2006.
- 115 Pacific Northwest National Laboratory, "Assessment of Cold Spray Technology for Nuclear Power Applications", PNNL-30299, technical letter report, ADAMS Accession No. ML21263A107, 2021.
- 116 Pelsoci, T., "Benefit Cost Analysis: ETSCP Funded Cold Spray Technology for DoD Applications", DoD Report, 2015.
- 117 U.S. Nuclear Regulatory Commission, "NRC Technical Assessment of Cold Spray", ADAMS Accession No. ML21263A105, 2022.
- 118 榊 和彦、「新しい溶射法コールドスプレーの現状と課題」、*表面技術*、59 巻、8 号、p. 490、平成20年
doi:10.4139/sfj.59.490
- 119 Jacob, R.E., Montgomery, R., Harrison, J.M., Komarasamy, M., Jiang, H., Ross, K.A., "Survey of Pre-service and In-service Nondestructive Evaluation Techniques of AMT-Fabricated Components", Pacific Northwest National Laboratory, PNNL-30759, 2020.
- 120 Glass, S.W., Larche, M.R., Prowant, M.S., Suter, J.D., Lareau, J.P., Jiang, X., Ross, K. A., "Cold spray NDE for porosity and other process anomalies." *AIP Conference Proceedings*, 2018. doi:10.1063/1.5031507
- 121 横野 泰和、「材料中の超音波の減衰の測定」、*溶接学会誌*、62 巻、7 号、p. 522-527、平成5年
doi:10.2207/qjws1943.62.522
- 122 Lareau, J. P., Larche, M. R., Diaz, A. A., Nove, C. A., "Baseline Evaluation of Eddy Current Testing for PWSCC Susceptible Materials", Pacific Northwest National Laboratory, PNNL-29113, 2019.
- 123 Ross K.A., Jiang, X., Alabi, M., Enderlin, C.W., "Investigation of Cold Spray as a Dry Storage Canister Repair and Mitigation Tool: Spent Fuel and Waste Disposition", Pacific Northwest National Laboratory, PNNL-30484, 2020.
- 124 Gärtner, F., Stoltenhoff, T., Voyer, J., Kreye, H., Riekehr, S., Koçak, M., "Mechanical properties of cold-sprayed and thermally sprayed copper coatings", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 200, Issue 24, pp. 6770-6782, 2006. doi:10.1016/j.surfcoat.2005.10.007
- 125 川村誠、大河内敬雄、「最近の合金粉末製造技術と粉末製品」、*電気製鋼*、第80 巻1号、pp. 139-145、平成21年

- 126 河合 伸泰、佐藤 義智、関 義和、「アトマイズ法による金属微粉末の製造」、資源処理技術、33 巻、4 号、p. 227-232、昭和61年. doi:10.4144/rpsj1986.33.227
- 127 日本機械学会、「機械工学便覧β3編 加工学・加工機器」、丸善出版、平成18年
- 128 Loh, N.L., Sia, K.Y., "An overview of hot isostatic pressing", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 30, Issue 1, Pages 45-65, 1992. doi:10.1016/0924-0136(92)90038-T
- 129 Torssell, K., "HIP Steel Components for the Manufacturing Industry", Springer Netherlands. pp. 195-208, 1992.
- 130 Gandy, D.W., "PM-HIP research for structural and pressuring retaining applications within the electric power industry", NEA, Structural Materials for Innovative Nuclear Systems Workshop Proceedings, 2015.
- 131 Sutton, B., Gandy, D., "Assessment of Powder Metallurgy-Hot Isostatic Pressed Nozzle-to-Safe End Transition Joints", Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 6A: Materials and Fabrication, V06AT06A014, 2017. doi:10.1115/PVP2017-65776
- 132 ASME, "ASME/BPVC CASE N-834 - N-834 ASTM A988/A988M-11 UNS S31603, Subsection NB, Class 1 Components Section III, Division 1", 2013.
- 133 Sulley, J., Mitchell, P., Mills, D., "Hot Isostatic Pressing of a Varying Thickness, Thick-Walled Vessel (Reactor Circulating Pump Bowl) for a Pressurised Water Reactor (PWR) Application." Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 6B: Materials and Fabrication, V06BT06A001, ASME, 2014. doi:10.1115/PVP2014-28013
- 134 David T. H., "The Use of Powder Metallurgy (PM) and Hot Isostatic Pressing (HIP) for Fabricating Components of Nuclear Power Plants (NPPs)", technical letter report, ADAMS Accession No. ML22164A438, 2022.
- 135 Kyffin, W., Gandy, D., Burdett, B., "A Study of the Material Properties and Performance of Hot Isostatically Pressed (HIP) Type 316L Stainless Steel Powders and HIP Processing Available From Today's International Supply Chain." Proceedings of the ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 6A: Materials and Fabrication, V06AT06A011, 2018. doi:10.1115/PVP2018-84072
- 136 Cooper, A. J, Tuck, O. C. G., Armson, S. A. J., Preuss, M., "On the Microstructural Evolution and Porosity Consolidation in 316L Stainless Steel During Hot Isostatic Pressing." Proceedings of Vol. 6A: Materials and Fabrication, V06AT06A001, 2019. doi:10.1115/PVP2019-93016
- 137 Warner, T., Sulley, J., Wallace, P., Stewart, D., Jones, G., Thatcher, D., "Further Developments in Nuclear Pressure Vessel Manufacture Using the Hot Isostatic Pressing Process and Thick-

- Section Electron Beam Welding," Proceedings of the ASME 2022 Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 4A: Materials and Fabrication, V04AT06A004, 2022. doi:10.1115/PVP2022-79403
- 138 Small Modular Reactor Vessel Manufacture and Fabrication: Phase 1—Progress (Year 4), EPRI, 3002023900, 2021.
- 139 Cooper, A. J, Dhers, J, Sherry, A. H., "Mechanistic Studies on Type 300 Stainless Steels Manufactured by Hot Isostatic Pressing: The Impact of Oxygen Involvement on Fracture Behaviour", Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 6A: Materials and Fabrication, V06AT06A012, 2016. doi:10.1115/PVP2016-63033
- 140 De Baglion, L., Cedat, D., Ould, P., Chitty, W., "Low Cycle Fatigue Behavior in Air and in PWR Water of a Type 304L Austenitic Stainless Steel Manufactured by Hot Isostatic Pressing Process." Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 1: Codes and Standards, V001T01A025, 2014. doi:10.1115/PVP2014-28329
- 141 De Baglion, L., Cedat, D., Ould, P., Chitty, W., "Low Cycle Fatigue Behavior in Air and in PWR Water of Type 304L and 316L Austenitic Stainless Steels Manufactured by Hot Isostatic Pressing Process", Proceedings of the ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 1A: Codes and Standards, V01AT01A034. 2015. doi:10.1115/PVP2015-45214
- 142 溶接学会、日本溶接協会編、「溶接・接合技術総論」、産報出版、pp.63-67、平成28年
- 143 小溝裕一、「鋼のレーザー、電子ビーム溶接と組織変化」、まてりあ(日本金属学会報)、41巻、4号、pp.263-268、平成14年
- 144 Faraone, K., Miller, R., Feng, Z., "Review of Advanced Manufacturing Techniques and Qualification Processes for Light Water Reactors - Electron Beam Welding", ADAMS Accession No. ML22143A928, 2022.
- 145 Weglowski, M. St., Błacha, S., Phillips, A., "Electron beam welding -Techniques and trends - Review", Vacuum, Vol.130, pp. 72-92, 2016. doi: 10.1016/j.vacuum.2016.05.004
- 146 黒田秀郎、「電子ビーム溶接(主として高電圧方式について)」、日本航空宇宙学会誌、20巻、218号、pp.42-61、昭和47年. doi: 10.2322/jjsass1969.20.158
- 147 尾上久浩、「電子ビーム溶接の実用化開発経緯と今後の展望」、溶接学会誌、54巻、2号、pp.102-106、昭和60年. doi: 10.2207/qjws1943.54.102
- 148 日本溶接協会溶接情報センター ウェブサイト
https://www-it.jwes.or.jp/qa/details.jsp?pg_no=0110010130 (2024年9月12日確認)
- 149 堀洋一郎、「真空とビーム寿命」、放射光、第16巻、第6号、pp.362、平成15年
- 150 橋本達哉、松田福久、大橋修、入江宏定、「低真空電子ビーム溶接に関する二三の実験」、溶接学会誌、第38巻、第10号、pp.1090-1097、昭和44年

- 151 入江宏定、「電子ビーム溶接」、溶接学会誌、第64巻、第8号、pp.582-597、平成7年
- 152 荒田吉明、「大気中電子ビームの発生装置とその応用」、生産と技術、第19巻、4号、pp.8-13、昭和42年
- 153 American National Standards Institute, An American National Standard, ANSI Z49.1:2012, “Safety in Welding, Cutting, and Allied Processes”, pp.44-45, 2012.
- 154 Punshon, S., C., 「発電機器への減圧電子ビームの応用」、溶接学会誌、第74巻、第2号、pp.120-123、平成17年
- 155 佐藤昭三、高野元太、南 正晴、榎並宏治、内川高志、久利修平、「局所真空動シール方式電子ビーム溶接技術の実用化」、三菱重工技報、第19巻、第4号、pp.359-365、昭和57年
- 156 Wharry P. J., "Irradiation studies on electron beam welded PM-HIP pressure vessel steel", DOE Award Number DE-NE0008907, Presentation material, 2020.
- 157 Warner, T., Sulley, J., Wallace, P., Stewart, D., Jones, G., Thatcher, D.,” Further Developments in Nuclear Pressure Vessel Manufacture Using the Hot Isostatic Pressing Process and Thick-Section Electron Beam Welding”, Proceedings of ASME 2022 Pressure Vessels & Piping Conference, 2022.
- 158 溶接学会、日本溶接協会編、「溶接・接合技術総論」、産報出版、p. 372、平成28年
- 159 浦谷良美、久利修平、佐藤正信、高野元太、山内崇賢、「炭素鋼への電子ビーム溶接適用の研究」、三菱重工技報、第24巻、第1号、pp.30-36、昭和62年
- 160 高野元太、「電子ビーム溶接による厚板低合金鋼大型圧力容器製作のための溶接金属高靱性化に関する研究、博士論文、大阪大学、pp.39-47、平成6年
- 161 Designation: A988/A988M-23, "Standard Specification for Hot Isostatically-Pressed Stainless Steel Flanges, Fittings, Valves, and Parts for High Temperature Service", ASTM, 2023.
- 162 伊東眸、重隆司、毛利純雄、松永健一、村上和夫、梶村治彦、柘植信二、松田隆明、「使用済み燃料貯蔵キャニスタ用広幅厚板 SUS329J4Lの耐食性、靱性および溶接性の改良」、鉄と鋼、第92巻、第8号、pp.507-515、平成18年.
- 163 TOMITA, Y., MABUCHI, H., KOYAMA, K., “Improving Electron Beam Weldability of Heavy Steel Plates for PWR-Steam Generator”, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 33, No. 11, pp.869-878, 1996. doi:10.1080/18811248.1996.9732022.
- 164 浦谷良美、久利修平、下山仁一、高野元太、「厚板オーステナイト系ステンレス鋼の電子ビーム溶接性の研究（第1報）」、溶接学会論文集、第1巻、第2号、pp.125-132、昭和58年
- 165 浦谷良美、久利修平、下山仁一、高野元太、山内崇賢、「厚板オーステナイト系ステ

- ンレス鋼の電子ビーム溶接性の研究(第2報)」、溶接学会論文集、第2巻、第3号、pp.419-428、昭和59年
- 166 山本光昭、青木繁幸、木村正宏、高野元太、名山理介、「低合金鋼への電子ビーム溶接適用に関する研究」、三菱重工技報、第30巻、第4号、pp.365-369、平成5年
- 167 高野元太、「電子ビーム溶接による厚板低合金鋼大型圧力容器製作のための溶接金属高靱性化に関する研究、博士論文、大阪大学、平成6年
- 168 Punshon, C., Dorsch, T., Fielding, P., Richard, D., Yang, N., Hill, M., DeWald, A., Rebak, R., Day, S., Wong, L., Torres, S., McGregor, M., Hackel, L., HL Chin, L, H, Rankin, J., "Reduced Pressure Electron Beam Welding Evaluation Activities on a Ni-Cr-Mo Alloy for Nuclear Waste Packages", UCRL-JC-I 55291, 2003.
- 169 S. Daniel Day, S., Wong, F., M., G., Gordon, R., S., Wong, L., S. Rebak, B., R., "Electrochemical Testing of Gas Tungsten Arc Welded and Reduced Pressure Electron Beam Welded Alloy 22", Proceedings of 2006 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, 2006.
- 170 志田朝彦、岡村久宣、鈴木宗伸、喜多久直、「電子ビーム溶接の欠陥発生および防止に関する研究(第3報)厚板電子ビーム溶接部の欠陥発生に及ぼす溶接因子の影響」、溶接学会誌、第46巻、第12号、pp.888-893、昭和52年
- 171 塚本 進、入江宏定、「電子ビーム溶接における局所的な凝固の遅れの形成因子」、溶接学会論文集、第8巻、第2号、pp.179-185、平成2年
- 172 溶接・接合技術データブック編集委員会 編 溶接学会、日本溶接協会 監修、「溶接・接合技術データブック:ものづくりを支える基盤技術」、p.83、産業技術サービスセンター、平成19年
- 173 高野元太、名山理介、坂元成夫、久利修平、Jozef Billy、松田福久、「厚板低合金鋼の電子ビーム溶接金属の靱性に関する研究」、溶接学会論文集、第12巻、第3号、pp. 411-418、平成6年
- 174 浦谷良美、「夢に挑戦」、溶接学会誌、第79巻、第3号、pp.207-209、平成22年.
- 175 正野進、「レーザー・電子ビーム溶接の大型構造物への展開」、溶接学会誌、第60巻、1号、pp.30-35、平成3年
- 176 鴨和彦、「溶接接合教室 実践編 第11回原子力 原子力(プロセス・施工編)、溶接学会誌、第83巻、第6号、pp.493-496、平成26年
- 177 日本機械学会、「発電用原子力設備規格 溶接規格(JSME S NB-1-2020)、表 WP-300-2 電子ビーム溶接における確認項目」、pp.第2部-16-18、令和2年

執筆者一覧

原子力規制庁	長官官房	技術基盤グループ	システム安全研究部門
山内 紹裕	副主任	技術研究調査官	
小澤 正義		システム安全政策研究官	
原子力規制庁	長官官房	技術基盤グループ	地震・津波研究部門
東 喜三郎	主任	技術研究調査官	