

溶接管理技術者の体験紹介

原子力機器への3D造形技術適用検討

三菱重工業株式会社
佐野 裕介

1. はじめに

筆者らは、原子力機器への3D造形技術適用に向けた技術開発に取り組むとともに、その製品の円滑な市場導入に向けた規格化の検討に取り組んでいる。本稿では、それらの取り組みのうち、大型原子力機器を経済性と品質を確保しつつ精度良く造形するための技術開発の一部を紹介する。

2. 背景

原子力プラントの安全性・信頼性の確保には構成機器の安全性・信頼性が重要な要素である。これらの機器の製作は、高度な製作ノウハウと作業者の技量を必要とするとともに、材料調達から納入まで長期のリードタイムが必要となっている。他方、国内では原子力発電所の再稼働が進みつつあるものの市場が見通せないことから、重要な原子力機器の部品や材料を供給するサプライヤーの撤退が増えており、サプライチェーンの衰退が始まりつつある。

これに対し、3D造形技術は、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る。設計自由度も拡大可能なため、合理的な設計により機器（部品）の機能や性能向上も期待できる。他方、原子力機器へ3D造形技術を適用するためには、大型部品の製作や原子力品質の確保といった技術的課題の解決とともに、経済性の確保や規格動向を見据えた実用に向けた取り組みが必要である。

このような背景を踏まえ、筆者らは、原子力機器への3D造形技術適用に向けた技術開発に取り組むとともに、その製品の円滑な市場導入に向けて規格化の検討に取り組んでいる。これにより高品質・高信頼性・高性能な原子力機器（部品）の安定供給による原子力プラントの安全性・信頼性ならびに経済効率性の一層の向上が期待できる。また、原子力関連製品（部品・材料）に係る一部メーカーの撤退などがあっても、それらを3D造形技術により補完できれば、原子力利用の安全性・信頼性を支えるサプライチェーンを維持することが可能となる。

3. 3D造形プロセスの評価

3D造形技術は、3次元モデルデータから立体形状を形成する製法である。金属3D造形技術には、主に(1)パウダーベッド方式(Powder Bed Fusion; PBF)と(2)デポジション方式(Directed Energy Deposition; DED)の2種類がある(図1)。



図1 3D造形技術の手法ごとの最適な適用範囲イメージ

PBF方式は、微小な金属粉末を薄く層状に敷き詰めたパウダーベッドにレーザーあるいは電子ビームを照射して選択的に溶融させ積層していく造形方法である。製作精度が良く精密部品の製作に適しているが、造形速度が遅く生産性に課題があり、また、装置寸法により製品寸法が制約されるため大型部品の造形は難しい。

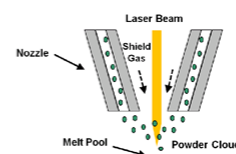
DED方式は、金属粉末あるいはワイヤを供給しながらレーザー、電子ビーム等で照射し、溶融・堆積して造形する。本方式は、PBF方式に比べ大型製品を高速で造形でき、かつ、マルチマテリアルの造形が容易などのメリットを有している一方、造形精度の向上が課題として挙げられる。

上記を踏まえ、筆者らは、大型の原子力機器への適用を目指し、これまでに原子力機器製造で培った高品質な溶接技術の発展・応用により、効率的な開発が可能と考え、DED方式の造形技術に着目した。DED技術のなかでは、図2に示すようにレーザーパウダDED、レーザーワイヤDED、WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) の比較を行い、溶加材としてワイヤを用いることで造形品質の向上、コスト低減が可能であること、熱源に高出力レーザーを用いることでビーム形状・寸法およびエネルギー密度分布の制御が可能であることなど優位性のあるレーザーワイヤDED方式の技術開発に取り組むこととした。

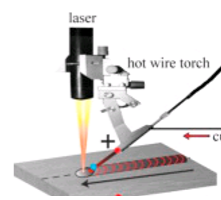
溶加材	パウダ	ワイヤ	ワイヤ
熱源	レーザー	レーザー (+ワイヤ通電)	アーク
熱ひずみ	◎	○	△
内部欠陥	△	◎	◎
熱影響層	◎	○	△
設備導入費	△	△	◎
材料費	△	◎	◎
材料取扱い	△	◎	◎
余肉 (解像度)	◎	○	△
溶着効率	△	○	◎
一般的な適用対象	薄肉・複雑形状	厚肉・単純形状	厚肉・単純形状 アルミ材等

劣△-○-◎優

今回対象：レーザーワイヤDEDの高能率、高精度化



【レーザー+パウダ】



【レーザー+ワイヤ】

図2 DED技術の比較

4. 開発技術の概要

レーザワイヤ DED 方式による大型原子力機器の造形において、経済性と品質を確保しつつ精度良く造形するためには、大きな部品（部位）には広幅で厚さが大きいビードを効率的に溶着させる高能率造形条件を適用し、小さな部品（部位）には細幅で厚さが小さいビードを精密に溶着させる高精度造形条件を適用し、それらを適切に組み合わせて造形することが必要である（図 3）。そのため、造形の効率・解像度（造形ビードのサイズ）に応じた施工条件の確立が課題となる。さらに、原子力品質を確保するためには、造形状況をモニタリングするプロセス監視・制御技術の高度化や検査技術などの開発も必要である。また、3D 造形のメリットを生かせる機器・部品の検討、要求仕様（3D 造形材料の機械的特性、製作精度、造形速度）の整理や最適な構造設計の検討、規格適合を見据えた材料基礎データの整備などが必要である。

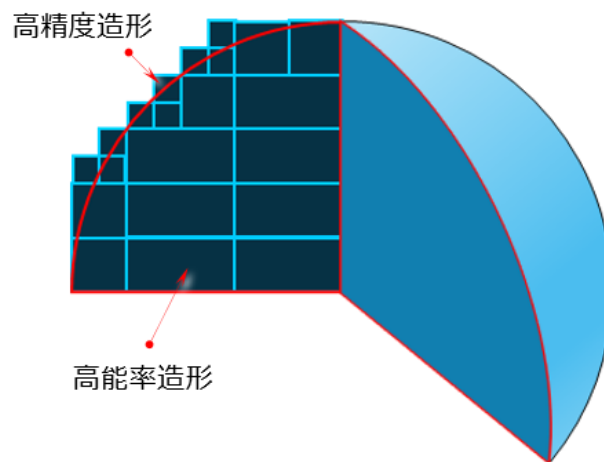


図 3 解像度に応じた造形のイメージ

4.1、4.2 項では、これらの課題に対する取り組みのうち、高能率造形と高精度造形の施工条件の検討について述べる。

4.1 高能率造形プロセス

経済性と品質を両立した高能率造形のためには、高出力のレーザ熱源で均一な熔融池を形成し、熔融池に効率的かつ安定的にワイヤを供給することが重要である。適用対象は炉心槽の出口ノズル（図 4）のように、比較的単純形状かつ調達リードタイムが長い部品が想定される。そこで筆者らは、レーザ熱源として出力 15kW の高出力レーザを採用し、光学素子（マイクロレンズアレイ）を用いてレーザスポットのサイズを幅 22mm、長さ 3mm の矩形に広げて均一にした（図 5）。これを用いて、広く均一な熔融池を形成し、ワイヤ供給の数、配置、供給量を変化させた試験を実施し、熱源分布に適した熔融材料の供給を検証した。なお、試験材料は原子力機器で用いられるオーステナイト系ステンレス鋼で、3D 造形の材料としても広く用いられている SUS316L を適用した。結果として、ワイヤを 3 本配置し、供給量を最適化することで凸ビード形状を改善しフラット化できることを確認した（図 6）。さらに、この造形条件での長時間の安定性とプロセス実現性を検証するため、図 7 に示す円筒形状の造形試験を実施した。図 8 に造形試験結果を示す。断面観察の結果、溶接欠陥は認められず、1 パスで幅約 20mm のビードを安定形成可能であることを確認できた。これにより SUS316L、φ 1.2mm のワイヤを 3 本供給し、9.6kg/h の造形効率を達成しつつ、多層溶接でも造形品質を維持で

きる幅広で平坦なビードを得る施工条件を確立することができた。

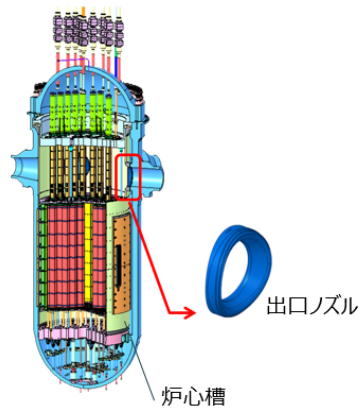


図4 高能率造形プロセスの適用想定部品の一例

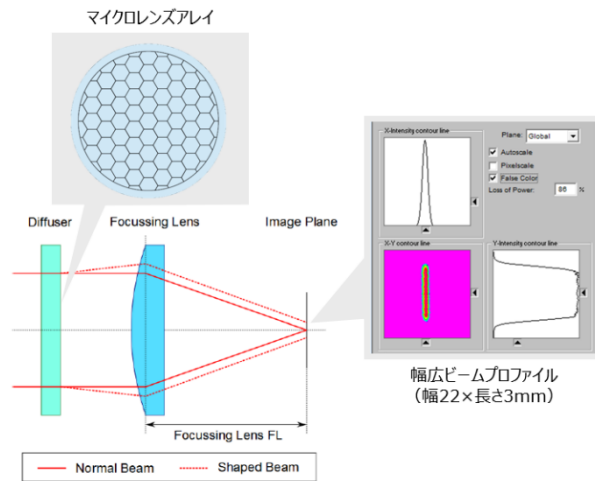


図5 マイクロレンズアレイによるビーム成形の概要

溶加材	レーザー出力 (kW)	造形速度 (m/min)	ワイヤ供給量 (kg/hour)
2 ワイヤ	15	0.4	5.4
3 ワイヤ	15	0.4	9.6

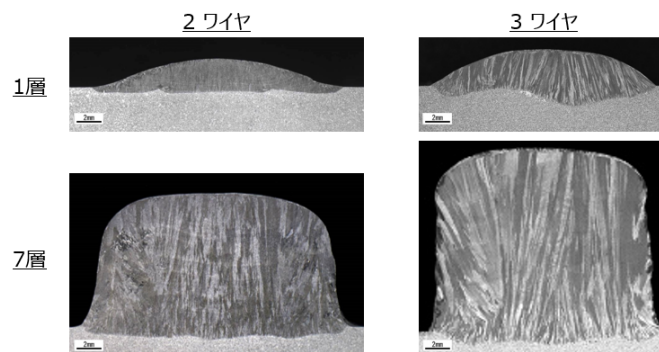


図6 高能率造形条件の断面マクロ

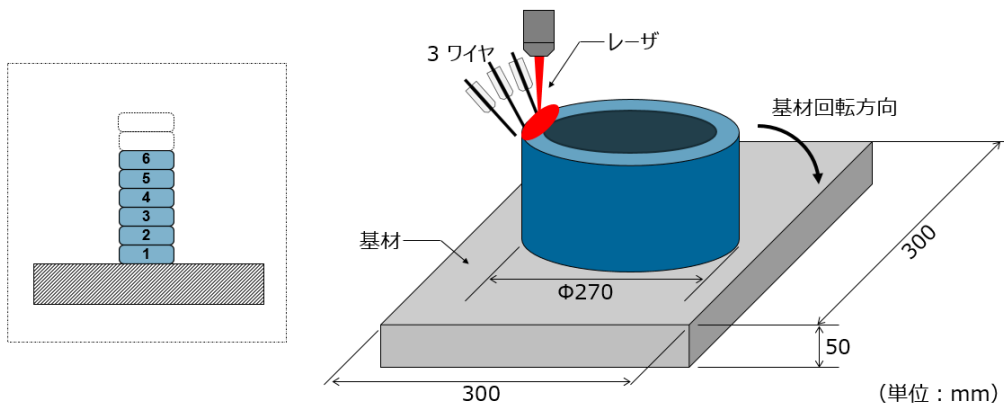


図7 円筒形状の造形試験概要

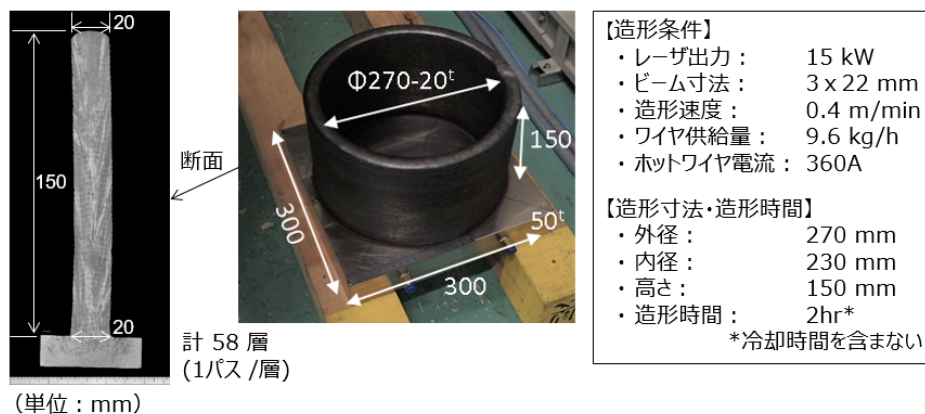
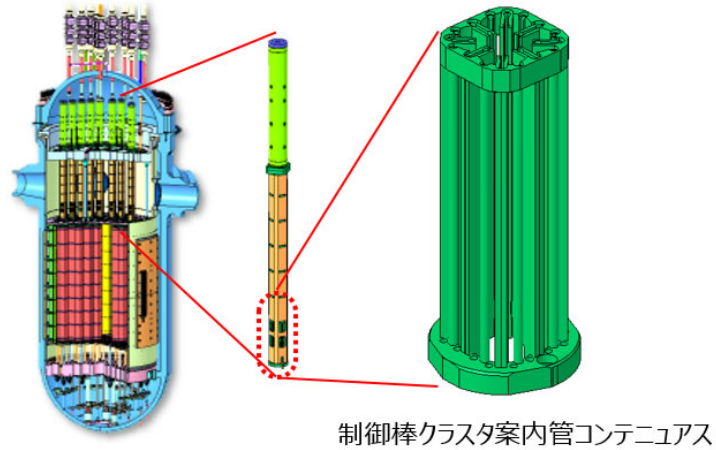


図8 円筒形状サンプルの試造形結果

4.2 高精度造形プロセス

造形の分解能（ビード）を小さくして高精度の造形を実現するためには、ワイヤの小径化と、小径のワイヤを位置精度良く安定して熱源に供給することが重要である。適用対象はRVのRCCA (Rod Cluster Control Assembly) 制御棒クラスタ案内管コンテニューアス（図9）のように、複雑形状かつ調達リードタイムが長い部品が想定される。筆者らは $\phi 0.2\text{mm}$ のSUS316Lワイヤについて安定した送給が可能な送給機構を検討し、送給装置を試作した。熱源には、200Wの低出力レーザーを用い、試作した送給装置でワイヤ送給量を変えた条件で試験を実施した。ワイヤ送給位置とビード重なり幅を最適化した後、選定した造形条件で薄板試験片の造形試験を実施した（図10）。図11に造形した薄板試験片の外観写真、図12に断面写真を示す。断面に顕著な溶接欠陥は認められず、断面から計測した板厚は $1.19 \pm 0.02\text{mm}$ であり良好な精度が得られた。結果として、板厚 1.19mm 、高さ 7.5mm の造形に対して、板厚 $\pm 0.02\text{mm}$ の精度で造形が可能であることを確認した。



制御棒クラスタ案内管コンテニューアス

図 9 高精度造形プロセスの適用想定部品の一例

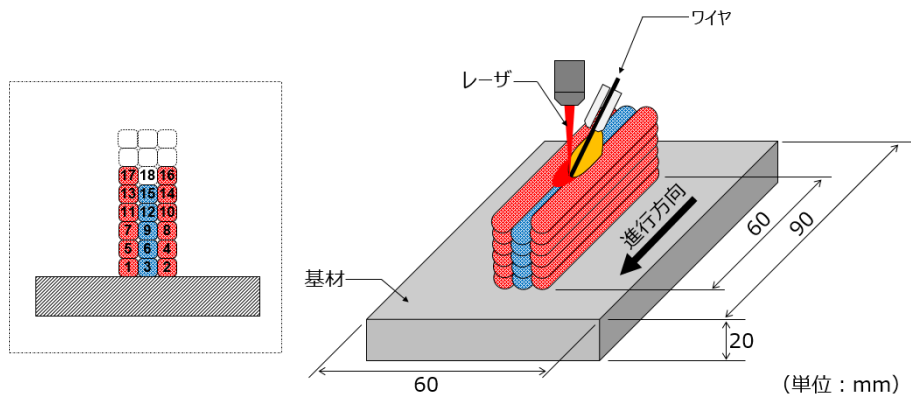
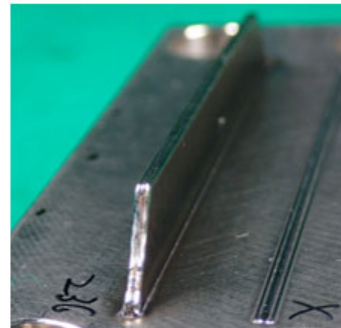


図 10 薄板造形試験概要



(i) 側面



(ii) 前面

- | 【造形条件】 | |
|------------|---------------|
| ・レーザー出力： | 200 W |
| ・ビーム寸法： | φ0.45 mm |
| ・造形速度： | 0.6~0.8 m/min |
| ・ワイヤ供給量： | 11 g/h |
| ・ホットワイヤ電流： | 無し |

図 11 薄板造形試験片の外観写真

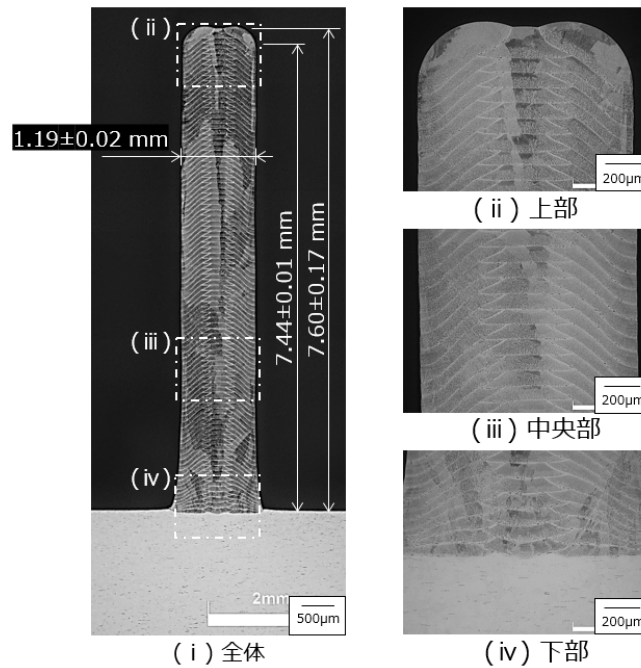


図 12 薄板造形試験片の断面写真

5. まとめ

高能率造形技術は大型で単純な形状の造形に適しており、造形部品自体が鍛造品や鋳造品の代替となる他、既存材料、溶接組み立て品に局所付加造形することにより、材料の入手性の確保やリードタイムの短縮、製造コストの削減につながる可能性がある。高精度造形技術については、精度を確保するために高解像度条件で造形すると造形効率が課題となるが、より精密なニアネット造形が可能であることを確認した。以上のことから、目的形状に合わせて高能率造形・高精度造形の施工条件を適切に選択・組み合わせすることで、大型部品の造形を高効率にし、造形後の加工を最小限にできる可能性があることが確認された。

今後も、大型原子力機器への3D造形技術適用に向け、本稿で紹介した造形技術の開発に加え、プロセス監視・制御技術の高度化や検査技術などの開発、規格化に取り組んでいく。

6. 謝辞

本稿に含まれる技術開発の一部は、経済産業省「原子力産業基盤強化事業補助金」の対象事業として実施されたものである。関係各位に謝意を表す。

<略歴>

佐野 裕介 (さの ゆうすけ)

2001年 大阪大学大学院 工学研究科 生産科学専攻修了
 2001年 三菱重工業株式会社 神戸造船所 プラント工作部配属
 発電用原子力機器の製造に溶接技術担当として従事
 2010年 三菱重工業株式会社 神戸造船所 原子力工作部 主任
 2022年 三菱重工業株式会社 原子力セグメント 原子力技術部 主席技師
 現在に至る