

「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業」 (終了時評価)

2019年度～2023年度 5年間

プロジェクトの詳細説明 (公開版)

2024年9月26日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

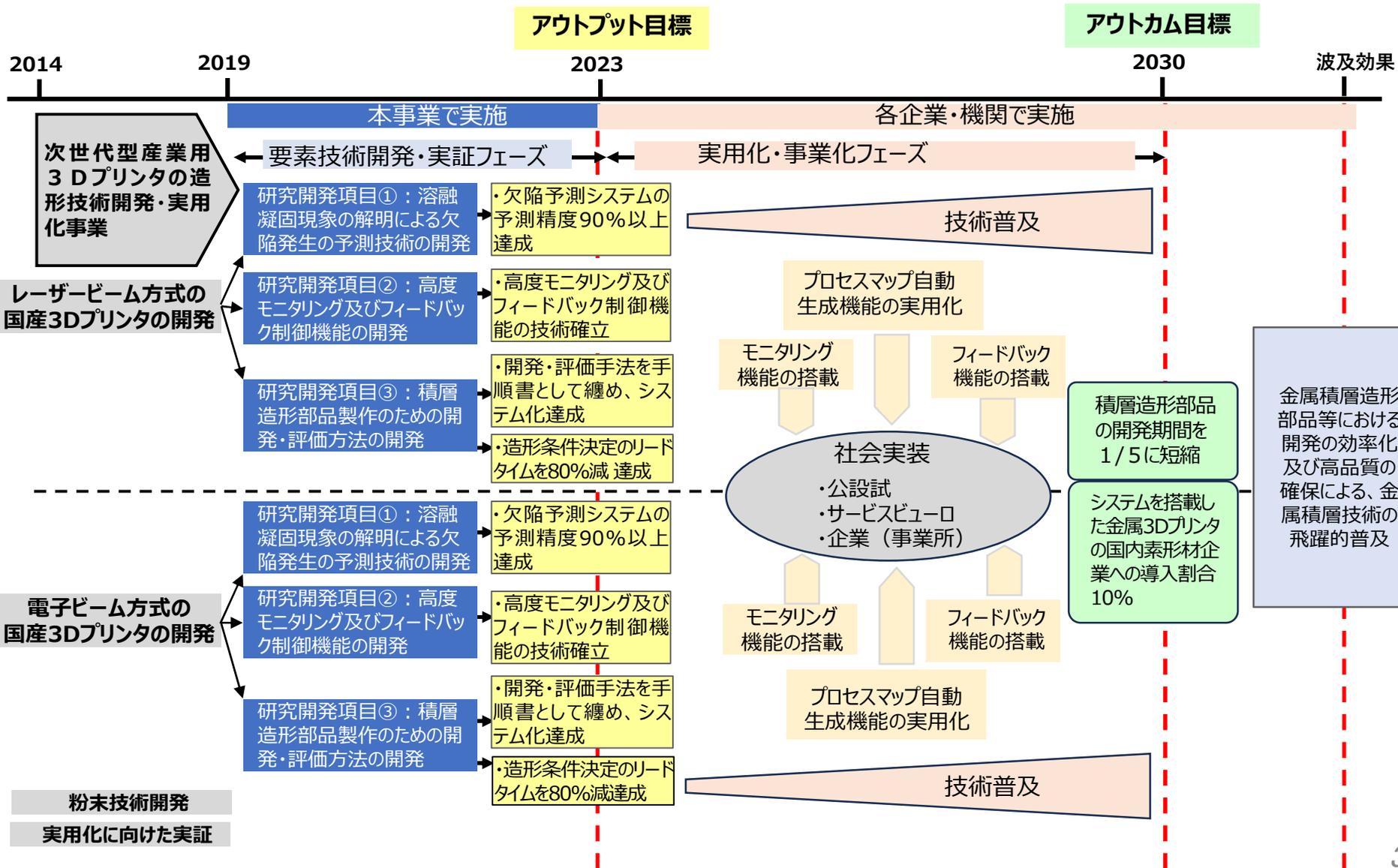
バイオ・材料部

用語集

用語	説明
積層造形	付加製造のうち造形層を積み重ねることによって3Dの造形物を実体化する加工法。
メルトプール	JIS Z3001溶接用語では、溶融池と定義されており、ここでは、レーザーあるいは電子ビームによる熱源によってできた溶融した金属のたまりをいう。
パウダーベッド	粉末床ともいい、ここでは粉末を積層し、造形を行う場所。
リコート	パウダーベッド方式の3Dプリンタにおける造形面に粉末を一定の厚みで敷き詰める動作。スキージ、レーキ等と呼ぶことがある。
エネルギー密度	造形パラメータとしてよく用いられるパラメータの一つで、ここでは体積当たり投入されるエネルギーを示す。
パターン投影法	縞模様を対象物に投光し、その反射光を画像センサで受光し、投光と反射光のパターン変化を解析して三次元画像を生成する方法。
プロセスマップ	造形における適切な条件を見出すために使用するパラメータの関連性を示す図。パラメータとして出力と走査速度による図を使用することが多い。
スパッタ	レーザーや電子ビームを照射した際に飛散する溶融金属の飛沫。
三次元プロファイラ	ここでは、光学的手段により三次元的な表面性状を計測する装置をいう。
教師データ	機械学習の学習用に用いる正解付きのデータ。
機械学習	コンピュータがデータから学習し、分類や予測などを実施するアルゴリズムやモデルを構築する技術のこと。
BSE(反射電子)、 反射電子像	BSE(Backscattered electron)は、真空中で物質表面に電子ビームを照射した際に、固体内で散乱し、再び真空中に放出された比較的エネルギーが大きい電子。この電子の放出量は照射された物質(平均原子番号)に依存するため、その放出電子量に相当する信号を用いて画像化すると平均原子番号に依存した組成コントラストが得られる。この画像を反射電子像と呼ぶ。
スモーク現象	粉末が電子ビームで帯電し、クーロン力で反発し、飛散する現象。
チャージアップ	帯電すること。
ベースプレート	造形に用いる金属製の基板。
熱電子	高温に加熱された物質表面から放出される電子。温度が高い程その放出量が多い。

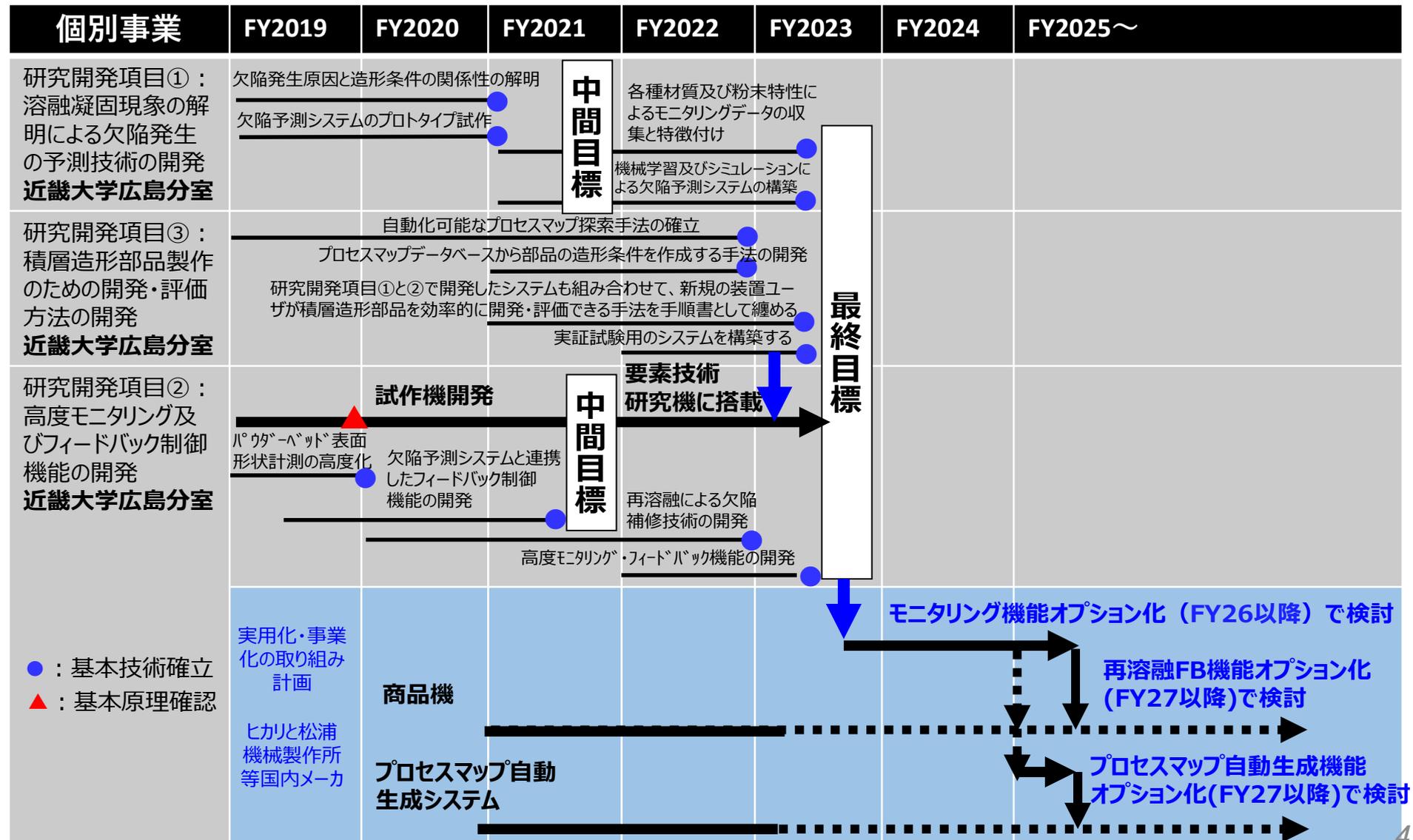
アウトカム達成に向けた戦略・具体的取組

研究開発項目：レーザービーム方式/電子ビーム方式における研究開発



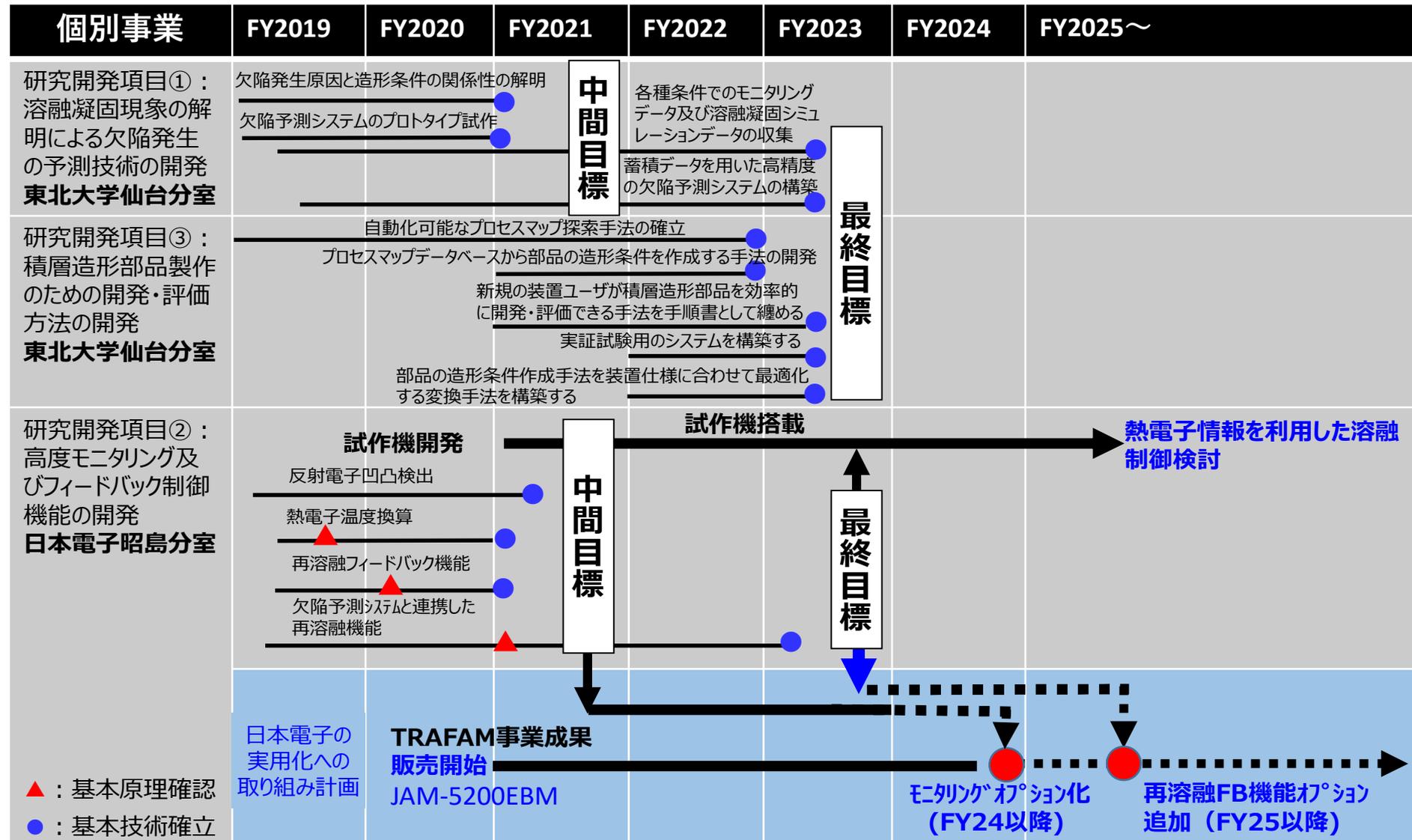
アウトカム達成に向けた戦略・具体的取組

研究開発項目：レーザービーム方式における研究開発



アウトカム達成に向けた戦略・具体的取組

研究開発項目：電子ビーム方式における研究開発



アウトカム目標の達成見込み (海外に対する優位性)

項目	海外機との比較
性能	当事業で開発した技術（表面モニタリング技術、フィードバック技術、欠陥予測技術）は、現時点の海外製品の状況（下表）と比較して、総合的に優位性があり、実用化により製品の優位性を確保できると考える。特に、造形面の表面状態からプロセスマップを自動的に生成する機能は他社にはない機能である。
コスト	レーザービーム方式は、既存技術であるパターン投影(pattern projection)方式による汎用型のモニタリング方式を採用しており、他社と比較して同等レベルと予想される。電子ビーム方式では他社にはない機能である。

金属パウダーベッド方式3Dプリンタ各社のプロセスモニタリングの動向

メーカー	国	方式	パウダーベッド 表面モニタリング	マルチプール モニタリング	造形面 表面モニタリング	フィードバック	本事業の 優位性
本事業	日本	レーザービーム方式 電子ビーム方式	3次元(*PP) 3次元(*BSE)	あり	表面性状と欠陥 との相関	あり(再溶融) プロセスマップ自動 調整機能	—
GE Additive	米国	電子ビーム方式	2次元	なし	温度	なし	あり
EOS	ドイツ	レーザービーム方式	2次元	あり	温度	あり 次回レーザー出力調整 (Smart Fusion)	あり
Velo3D	米国	レーザービーム方式	3次元(*PP)	あり	温度	なし (パウダーベッド監視)	あり

個別にモニタリング機能を製品化しているメーカー（代表例、他に9社ある）

Zeiss (2022~)	ドイツ	レーザービーム方式	3次元(*PP)	なし	なし	なし	あり
Phase3D (2023~)	米国	レーザービーム方式	3次元(*PP)	なし	表面性状とX線CT による欠陥との相関	なし	あり

PP : pattern projection、* BSE : backscattered electron

出典：Wohlers Report 2024 P175-P186、各社HP

アウトカム目標の達成見込み (市場動向)

市場動向とアウトカム目標

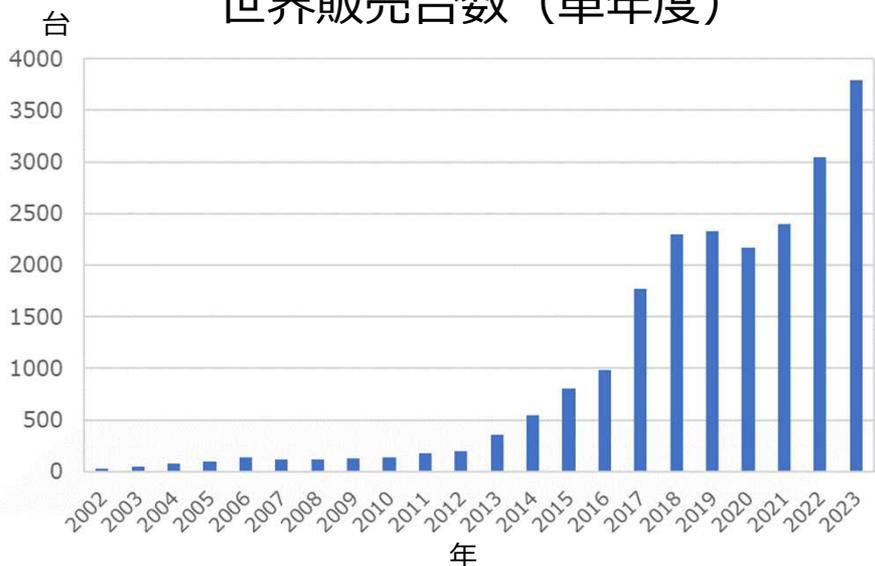
世界の金属積層造形装置の販売台数は、下表の通り増加傾向にある。この増加傾向が継続し、2030年には、単年度で1万台の販売台数、累計で7万台程度になると予想する。

現状の世界の累計販売台数約2.2万台の内、国内での販売台数(=導入台数、海外機を含む)は、現状600台程度(世界の3%程度)と推定している。

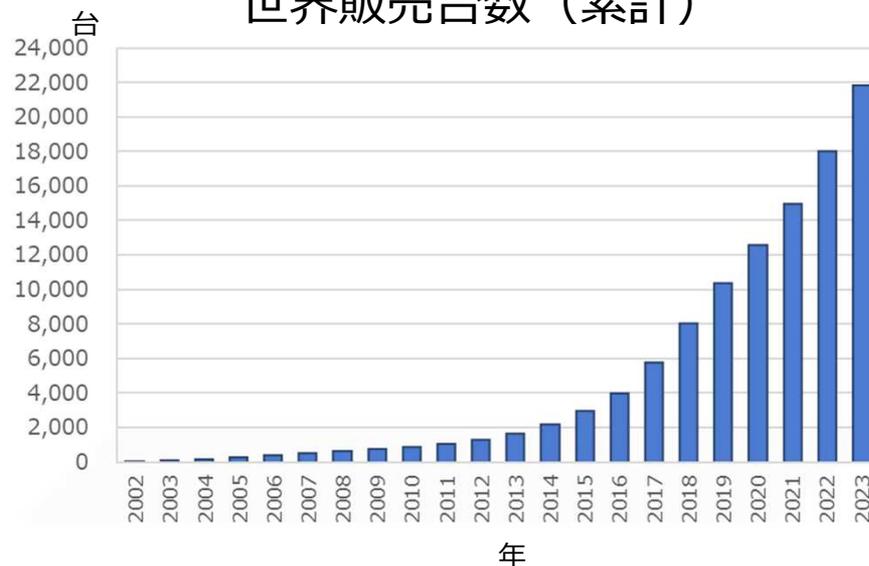
今後、国内企業の導入が加速し、世界の5%になったとすると、2024年~2030年の国内導入台数は、 $(7万台 - 2.2万台) \times 0.05 = 約2400台$ 。

以上より、アウトカム目標791台は、**今後2030年までに国内で導入される3Dプリンタの1/3に、本事業で開発した技術を実装する**ことを意味する。

世界販売台数 (単年度)



世界販売台数 (累計)



アウトカム目標の達成見込み

アウトカム目標	達成見込み	課題
<p>本プロジェクトの成果により、積層造形による部品等の造形の品質の向上、造形プロセスの繰り返し安定性の確保とともに、積層造形部品製作のための開発・評価手法が確立されることで、積層造形部品の開発期間が1/5に短縮されることを目指す。</p>	<p>・レーザービーム方式及び電子ビーム方式で、プロセス全体での開発期間の短縮に有効な手段であるプロセスマップ自動生成機能、ならびに試行錯誤による造形回数を減らして欠陥レスの高品質製品を造形するためのインプロセスモニタリング・フィードバック機能の開発を完了し、実証システム（試作品）の導入環境に近い環境での実証（TRL6レベル）を行い、短期アウトカムが達成できることを明らかにした。</p>	<p>・レーザービーム方式については、今後汎用型モニタリング装置の実用化に向けた改良と、プロセスマップ自動生成機能およびインプロセスモニタリング・フィードバック機能のオプション化を行い、製品・システムレベルでの実証（TRL7レベル）を行う必要がある。</p> <p>・電子ビーム方式については、モニタリング機能については、オプション化に向けて製品化が進んでいる。今後は、プロセスマップ自動生成機能およびインプロセスモニタリング・フィードバック機能の製品レベルでの実証、製品化を行う必要がある。</p>
<p>上記により、2030年度における本システムを搭載した金属3Dプリンタの国内素材材企業への導入割合10%（事業所ベース）を目指す。</p>	<p>・2030年度までには、我が国における装置導入も大幅に増加していき、高品質で安定した製品製造技術の確立がますます要求されるようになると予測され、インプロセスモニタリング・フィードバック機能の導入は必須となると予測される。現状では、別紙に示す通り、海外製品でも有効なインプロセスモニタリング・フィードバック機能は開発されておらず、TRAFAMユーザからも本システムの実用化が期待されている。実用化されれば導入が進むと考える。</p>	<p>・レーザービーム方式については、開発システムを製品化するとともに、成果を公開し、オプション搭載をする3Dプリンタメーカーを開拓していく必要がある。</p> <p>・電子ビーム方式については、本事業に参画している日本電子株式会社が開発技術を実装して実用化する計画であり、今後の事業化により、導入事業所の増加が期待される。</p>

副次的効果および波及効果

項目	波及効果
モニタリング機能	<p>現状は、高い品質レベルが要求される宇宙・航空機・自動車等の造形物では、造形後にX線CT等により欠陥がないか確認が必要である。本事業で開発したモニタリング機能により、欠陥の有無をリアルタイムまたは造形後短時間で確認することが可能になるため、高コストな外部特性評価への依存を最小限に抑えながら、Born-qualified(造形時点で品質が保証可能) が実現でき、大幅なコストダウンになる可能性がある。</p>
プロセスマップ自動生成機能	<p>現状は、新規の造形を行う場合、装置・使用材料粉末・造形物形状等毎に、最適条件を探索するためのプロセスマップの作成に約5～10週間要している。</p> <p>本事業で開発したプロセスマップ自動生成機能は、この作業を、自動でほぼ一晩で完了することも可能な技術であり、大幅な造形コストの低減ができるほか、適用材料の増加や、同材種でも異なる粉末の利用が増えることが予測されることから、本機能の有効性は非常に高く、その波及効果は非常に大きい。</p> <p>また、本機能の信頼性を向上させることで、金属積層造形技術のノウハウや経験が十分でなくとも、高品質な部品の造形が可能になるため、金属積層造形部品の採用や金属積層造形市場への新規参入の障壁が低くなり、金属積層造形の加速的な普及が期待できる。</p>
モニタリング・フィードバック機能	<p>現状は、造形後に外部特性評価によって欠陥がないか確認しているため、そこで欠陥が発見され、検討の結果、当該部品の要求品質（機械特性:引張強度、疲労強度等、物性：欠陥、空孔率等）を満足しないと判断された場合は、その部品は廃却され、再造形が必要となる。</p> <p>モニタリング・フィードバック機能を用いることで、欠陥レスの造形が可能となり、外部特性評価不要なBorn-qualified部品の一発造形が実現でき、大幅なコストダウンに繋がる可能性がある。</p>

個別事業ごとの目標と根拠(1/2)

個別事業	最終目標	根拠
研究開発項目①：溶融凝固現象の解明による欠陥発生予測技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> 欠陥発生予測システムの予測精度 95%以上 	<ul style="list-style-type: none"> 欠陥率0%の実現には、欠陥予測システムの予測精度が高い必要があるため、最終目標を 95%以上とした。
研究開発項目②：高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発 (レーザービーム方式)	<ul style="list-style-type: none"> 積層造形プロセスにおける粉末敷き詰め状態及び造形面について、精度 10μm以下で凹凸を計測 	<ul style="list-style-type: none"> 粉末の粒形が30~75μm程度であることを考慮して、粉末敷き詰め状態及び造形面を精度良く計測するために10μm以下とした。
	<ul style="list-style-type: none"> 造形面の欠陥部分を再溶融する機能を開発 	<ul style="list-style-type: none"> 不慮の現象で欠陥が発生した場合に再溶融機構が必要になるため。
	<ul style="list-style-type: none"> フィードバック制御機能による造形プロセス中の50μm以上の欠陥率 0% 	<ul style="list-style-type: none"> X線CTで計測可能な50μm以上を対象として欠陥率 0%とした。

個別事業ごとの目標と根拠(2/2)

個別事業	最終目標	根拠
<p>研究開発項目②：高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発（電子ビーム）</p>	<ul style="list-style-type: none"> 試験研究機に実装した状態で積層造形プロセスにおける粉末敷き詰め状態及び造形面について、精度10μm以下で凹凸を計測 	<ul style="list-style-type: none"> 粉末の粒径が45~110μm程度であること及び平坦な造形面の性状判定から欠陥予測することを考慮して、粉末敷き詰め状態及び造形面を精度良く計測するため、最終目標を10μm以下とした。
	<ul style="list-style-type: none"> フィードバック制御機能による造形プロセス中の50μm以上の欠陥率 0% 	<ul style="list-style-type: none"> X線CTで計測可能な50μm以上を対象として欠陥率 0%とした。
	<ul style="list-style-type: none"> 電子銃異常やチャージアップ発生を抑制・検知し装置を一時停止する機能の実装 	<ul style="list-style-type: none"> 電子銃異常やチャージアップの発生が欠陥に繋がるため、また粉末のチャージアップによって突発的に発生する粉末飛散(スモーク)は放置すると装置に損傷を与えるため、異常検知機能が必要。
<p>研究開発項目③：積層造形部品製作のための開発・評価方法の開発</p>	<ul style="list-style-type: none"> 開発・評価手法の開発のために必要な積層造形物に関する評価データを、金属材料4種類以上について蓄積する。 	<ul style="list-style-type: none"> 実際に多様な金属部品開発にも応用できるように、複数の種類の金属種でのデータ蓄積も重要であるため、最終目標として4種類以上とした。

個別事業ごとの目標達成状況

研究開発項目：レーザービーム方式における研究開発(1/2)

個別事業	目標 (2024年3月)	成果 (2024年3月)	達成度	達成の根拠/ 解決方針
1. 溶融凝固現象の解明による欠陥発生予測技術の開発	・インコネル718、チタン合金、ステンレス鋼及びアルミニウム合金の4種類以上の評価データを取得する。	・試験研究機を改良して、インコネル718合金、Ti-6Al-4V合金、SUS316合金、AlSi10Mg合金に加えて銅合金を対象として、リアルタイムでメルトプール、パウダーベッド及び造形表面の画像データを収集した。また、造形体の密度及び欠陥状況をX線CTにより収集した。	◎	・5種目となる銅合金データを取得したため、大幅達成と評価。
	・欠陥予測システムの予測精度を95%以上にする。	・試験研究機による上記教師データを用いて、機械学習を利用した欠陥予測システムを開発し、予測精度(再現率)95%以上を達成した。 再現率(Recall)：実際に欠陥であったものの内、欠陥と予測できた割合	○	・再現率0.97で、目標達成した。
2. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発	・フィードバック制御機能により造形プロセス中の50μm以上の大きさの欠陥率を0%とする。	・試験研究機により、収集した造形表面の画像データを用いて表面性状パラメータを計算し、50μm以上の大きさの欠陥率0%を満足する特定の表面性状パラメータを見出し、フィードバックのための再溶融による欠陥補修機能を開発した。 ・試験研究機を用いて、ユーザ実証によるフィードバックのための欠陥補修機能を検証し、その有効性を確認した。 ・実用化のための汎用型モニタリング装置を開発し、試験研究機用のシステムを改良して搭載し、モニタリング・フィードバック機能の有効性を確認した。	○	・開発した汎用型モニタリング装置にフィードバック制御機能を付加し、ユーザ実証(造形)を行い、目標の50μm以上の欠陥率0%を達成した。

個別事業ごとの目標達成状況

研究開発項目：レーザービーム方式における研究開発(2/2)

個別事業	目標 (2024年3月)	成果 (2024年3月)	達成度	達成の根拠/ 解決方針
3. 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発	開発・評価手法の開発のために必要な積層造形物に関する評価データを、金属材料4種類以上について蓄積する。	汎用型モニタリング装置によりインコネル718合金、Ti-6Al-4V合金、SUS316L合金、AlSi10Mg合金に加えて銅合金についても、リアルタイムでメルトプール、パウダーベッド及び造形表面の評価データを蓄積した。	◎	・5種目となる銅合金データを取得したため、大幅達成と評価。
	欠陥予測システムと高度モニタリング・フィードバック制御機能、ならびにプロセスマップ探索手法を用いて積層造形部品を効率的に開発・評価する手法をユーザが活用できる手順書として纏め、システム（ソフト）化する。本システムおよび手順書を用いて、造形条件決定のリードタイムを1/5（1-2週間）に短縮する。	試験研究機による欠陥予測システムと高度モニタリング・フィードバック制御機能、ならびにプロセスマップ自動生成機能を開発した。加えて、2022年度より実用化のための汎用型モニタリング装置の開発を行い、高度モニタリング・フィードバック制御機能、ならびにプロセスマップ自動生成機能を有するシステムを開発した。最終的に汎用型モニタリング装置による4社のユーザ造形品の造形を行い、開発した機能の有効性を確認し、ユーザが活用できる手順書として纏めた。 汎用型モニタリング装置におけるプロセスマップ自動生成機能の開発により造形条件決定のリードタイム1/5を達成。	○	・ユーザ実証により、開発した各機能の有効性を確認できた。 ・造形条件決定のリードタイム6週間(w)に対し、プロセス開発0.6w + 試作0.44w = 1.04wとなり、目標の1/5以下を達成した。

個別事業ごとの目標達成状況

研究開発項目：電子ビーム方式における研究開発(1/3)

個別事業	目標 (2024年3月)	成果 (2024年3月)	達成度	達成の根拠/ 解決方針
1. 溶融凝固現象の解明による欠陥発生予測技術の開発	・欠陥予測システムの予測精度を95%以上にする。	・Ti-6Al-4V合金パウダーベッドの放射率を計測し、シミュレーションによりTi-6Al-4V合金パウダーベッドの溶融凝固を解析した。 ・表面形状のデータから欠陥の有無を予測するソフトウェアとパウダーベッドの充放電シミュレーションソフトウェアを試作、予測精度(再現率)95%以上を達成した。 再現率(Recall)：実際に欠陥であったものの内、欠陥と予測できた割合	○	・熱放射率は高温で顕著に増加することを明らかにした。 ・再現率0.977で、目標達成した。
2. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発	・試験研究機に実装した状態でパウダーベッド表面及び造形表面を精度10 μm以下で計測できる三次元計測機能を開発する。	・光学式、及び電子ビーム方式の2方式で10μm以下の表面凹凸形状を反映した画像が得られる機能を開発し、目標達成した。 ・装置構成の簡素化/コスト低減を考慮し、電子ビーム方式のモニタリング(BSE像観察)に注力し、更なる高度化を図った。	○	・ベースプレート上に加工した10μmの段差が確認できた、及び造形中の造形表面において光学方式と同等の表面形状画像が取得できた。
	・フィードバック制御機能により造形プロセス中の50μm以上の大きさの欠陥率を0%とする。	・仙台分室で開発された欠陥予測システムを搭載し、再溶融FB機能の実機検証において、粉末ガスポア率を下回る欠陥率が確認でき、最終目標(粉末起因のガスポアを含まず)を達成した。	○	・最適条件から少しずらした造形条件でのFB制御を入れた造形において、粉末ガスポア率を下回る欠陥率が確認できた。

個別事業ごとの目標達成状況

研究開発項目：電子ビーム方式における研究開発(2/3)

個別事業	目標 (2024年3月)	成果 (2024年3月)	達成度	達成の根拠/ 解決方針
2. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発	<ul style="list-style-type: none"> 電子銃異常やチャージアップ発生を抑制・検知し装置を一時停止する機能を実装する。 	<ul style="list-style-type: none"> 電子銃ロバスト性向上やパウダーベッド面シールドカバーにより、電子銃異常やチャージアップ発生(スモーク発生含む)を抑制した。 電子銃のアノード電流やライナーチューブ電流を検出し、電子銃異常やスモーク発生時にインターロックが働き装置を安全停止させる機能を実装した。 	○	<ul style="list-style-type: none"> アノード電流やライナーチューブ電流異常を検知し、安定停止を確認。またソフト的なスモーク検知も実スモークで正常動作を確認した。
3. 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発	<ul style="list-style-type: none"> 部品開発・評価手法の開発のために必要な積層造形物に関する評価データを4種類以上の金属材料について蓄積する。 	<ul style="list-style-type: none"> 4種の合金系のデータを蓄積し、達成した。 Ti-6Al-4V合金でプロセスマップ探索手法を検証した。 純Cu、SCM440合金、AlSi10Mg合金の造形を完了した。 	○	<ul style="list-style-type: none"> Ti-6Al-4V合金、純銅、SCM440合金、AlSi10Mg合金のデータを蓄積し、目標達成した。
	<ul style="list-style-type: none"> 欠陥予測システムと高度モニタリング及びフィードバック制御機能、ならびにプロセスマップ探索手法を用いて積層造形部品を効率的に開発・評価する手法をユーザが活用できる手順書として纏め、システム(ソフト)化する。本システムおよび手順書を用いて、造形条件決定のリードタイムを1/5(1-2週間)に短縮する。 	<ul style="list-style-type: none"> プロセスマップ自動生成ソフトウェアを開発、動作検証完了。 形状による入熱への影響を計算するソフトウェアを開発。 熱電子画像シミュレーションソフトウェアを開発。 リードタイム1/5については、達成済み。 	○	<ul style="list-style-type: none"> 開発機能、開発ソフトウェアを用いた、積層造形部品開発のリードタイムを推定したところ、従来6週間(42日)に対し、8日で可能となり、目標のリードタイム1/5を達成した。

個別事業ごとの目標達成状況

研究開発項目：電子ビーム方式における研究開発(3/3)

個別事業	目標 (2024年3月)	成果 (2024年3月)	達成度	達成の根拠/ 解決方針
3. 積層造形部 品作製のための開 発・評価手法の開 発	・小型機のレシピを中型機の レシピに変換するポストプロ セッサを開発する。	・中型機（JAM-5200EBM）によるデータ収集。 ・小型機（電子ビーム試験研究機）のビーム径計測技 術の開発。 ・小型機のプロセスマップ構築実験。 ・改善完了した小型機でデータ収集開始。ポストプロセッ サが完成し、目標達成。	○	・レシピ開発用の 小型造形機と量 産用中型造形 機とのレシピ変換 する手法を開発 したことで、量産 部品のレシピ開 発の効率化に繋 がることが確認で きた。
	・フィードバック制御造形の ユーザ実証	・ユーザ実証（フィードバック制御なし/あり）が完了。 ・FB有により欠陥を修復でき、なおかつ原料粉末のガス ポア欠陥率よりも低い欠陥率であったため、造形欠陥 0%を達成。 ・また、ユーザ所有の市販装置での造形も実施し、本PJ で開発した装置とFB機能によって造形することで、欠陥 率をより低くできることを確認。 ・バルク溶融部が本PJの対象ではあるが、大型かつ輪郭 溶融が多い部材でもユーザ実証を行い、バルク溶融部 ではなく輪郭溶融部に欠陥が生じやすい傾向にあるな どの課題を抽出した。	○	・ユーザ実証が完 了し、FBが有効 であることを確認。 目標達成した。

レーザービーム方式の成果 (アウトプット目標達成度) と意義

1. 溶融凝固現象の解明による欠陥発生予測技術の開発

開発目標	主な成果
1.各種材質及び粉末特性によるモニタリングデータの収集と特徴づけ 2.機械学習及びシミュレーションによる欠陥予測システムの構築	1. インコネル718合金、SUS316L合金、Ti-6Al-4V合金、AlSi10Mg合金、銅合金を対象として、モニタリング装置によりメルトプール、パウダーベッド及び造形面の画像データを取得し、特定の表面性状パラメータによる造形密度及び欠陥予測が可能であることを解明。 【意義】 欠陥予測への適用可能であることを示した。(TRL2) 2. モニタリング装置より得られた造形表面画像データを教師データとして、機械学習による欠陥予測システムを構築し、予測精度95%以上を達成。【意義】造形表面画像データにより欠陥発生予測可能なことを確認した。(TRL2)

【各種材料におけるモニタリングデータの収集と特徴づけ】

- モニタリング装置によりメルトプール、パウダーベッド及び造形面の画像データを取得可能

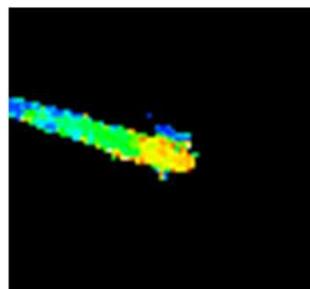


図1-1 レーザー試験研究機の外観と画像取得状況

【装置仕様】

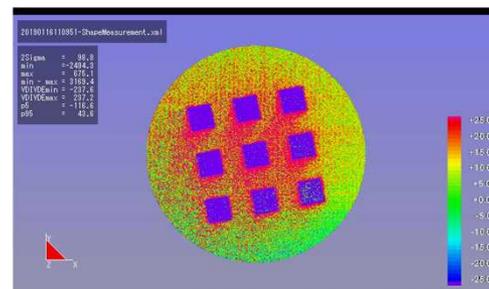
(造形部)

- ・レーザー：
1 kWシングルモードファイバレーザー
- ・造形体積：
φ150 mm×150 mm
- ・リコート：ハードブレード



【メルトプールモニタリング機能】

- ・メルトプール幅・長さ計測
- ・スパッタ数・総面積計測
- ・温度範囲：900-1600℃
- ・モニタリング：10000 fps



【表面性状モニタリング機能】

- ・パターン投影法
- ・表面性状パラメータ自動計測機能
- ・高さ分解能：10 μm以下

レーザービーム方式の成果 (アウトプット目標達成度) と意義

2. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発

開発目標	主な成果
1. 高度モニタリング・フィードバック (FB)機能の開発 2. 汎用型モニタリングFB機能の開発	1. レーザー試験研究機により、フィードバック機能として表面性状パラメータによる欠陥率0%を満足する再溶融条件の閾値を決定し、造形面の欠陥部分を再溶融する機能も開発して、インプロセスモニタリング・フィードバックシステムを構築した。 2. 2023年度に、汎用型モニタリング装置を要素技術研究機に実装し、インプロセスモニタリング・フィードバック機能の動作確認を行い、ユーザ実証により、その有効性を確認できた。 【意義】要素技術研究機での機能の有効性を確認した。(TRL6)

(1) 汎用型モニタリングFB装置の実装 (2023年度)



図2-1 汎用型モニタリング装置を実装した要素技術研究機の外観

レーザービーム方式の成果 (アウトプット目標達成度) と意義

3. 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発 1

開発目標

1. 新規装置ユーザが積層造形部品を効率的に開発・評価する手法(ソフト)の開発及びスタンドアロンで実証し、手順書として纏める。
2. ユーザ企業や研究機関等との間で造形評価の実証試験を行うために必要となるシステム構築を行い、検証する。

主な成果

1. 要素技術研究機に実装したプロセスマップ自動生成システムの有効性を確認できた。IN718合金、SUS316L合金、Ti-6Al-4V合金、AlSi10Mg合金及び銅合金のプロセスマップを作成した結果、IN718合金、SUS316L合金、Ti-6Al-4V合金では精度よく最適造形条件を予測できたが、AlSi10Mg合金、銅合金ではさらに精度向上が必要である。
2. ユーザ企業による実証試験を実施するため、ユーザ企業4社(金属種5種)の3DCADデータから造形データを作成し、プロセスマップ自動生成機能およびモニタリング・フィードバック機能の有効性を確認できた。
【意義】プロセスマップ自動生成による最適造形条件適用による高密度化と汎用型モニタリング・フィードバック機能により、50 μ m以上の大きさの欠陥を抑えた高品質な部品の造形が可能であることを確認(TRL6)⇒**事業化への第一歩**
3. 各種機能について手順書として纏めた。

(1) キューブ試験片の作製とプロセスマップ自動生成用データの収集 (IN718合金)

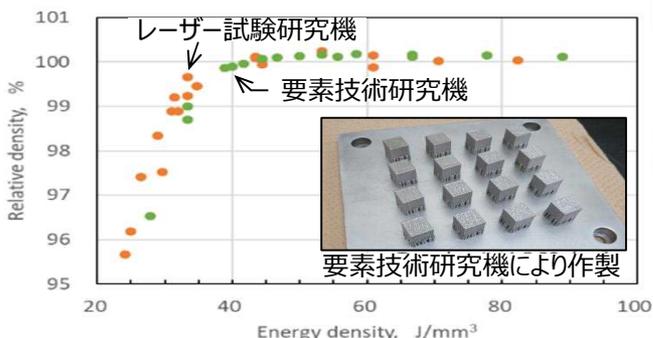


図3-1 アルキメデス法による相対密度とエネルギー密度の関係

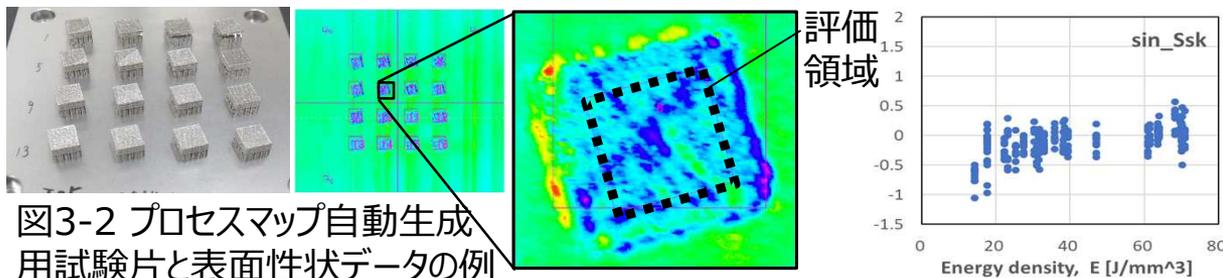


図3-2 プロセスマップ自動生成用試験片と表面性状データの例

- レーザー試験研究機の結果とほぼ同じ結果が得られた。
- 要素技術研究機に実装したプロセスマップ自動生成システムから各種合金における表面性状データを取得できた。

レーザービーム方式の成果 (アウトプット目標達成度) と意義

3. 積層造形部品作製のための開発・評価手法の開発 2

3. 開発目標

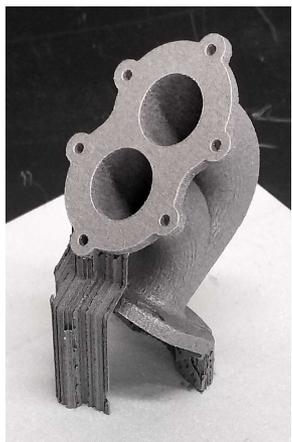
3. 欠陥予測システムと高度モニタリング及びフィードバック制御機能、ならびにプロセスマップ探索手法を用いて積層造形部品を効率的に開発・評価する手法をユーザが活用できる手順書として纏め、この手順書を用いて、造形条件決定のリードタイムを1/5 (1-2週間) に短縮する。

主な成果

1. 現状の積層造形部品開発期間について、TRAFAMユーザ会にて確認したところ、検証対象部品 (下記) で、11週間が見込まれることが判った。このうち本事業の範囲である「造形条件決定のリードタイム」は6週間を見込む。
 2. 開発したプロセスマップ自動生成機能およびフィードバック制御機能により、造形条件決定のリードタイムを1.04週間 (1/6) にすることができた。
- 【意義】アウトカム目標(積層造形部品開発期間を1/5に短縮)達成に繋げることができる。(TRL5)

検証対象部品

配管部品 (マニホールド)



造形物仕様:

大きさ:

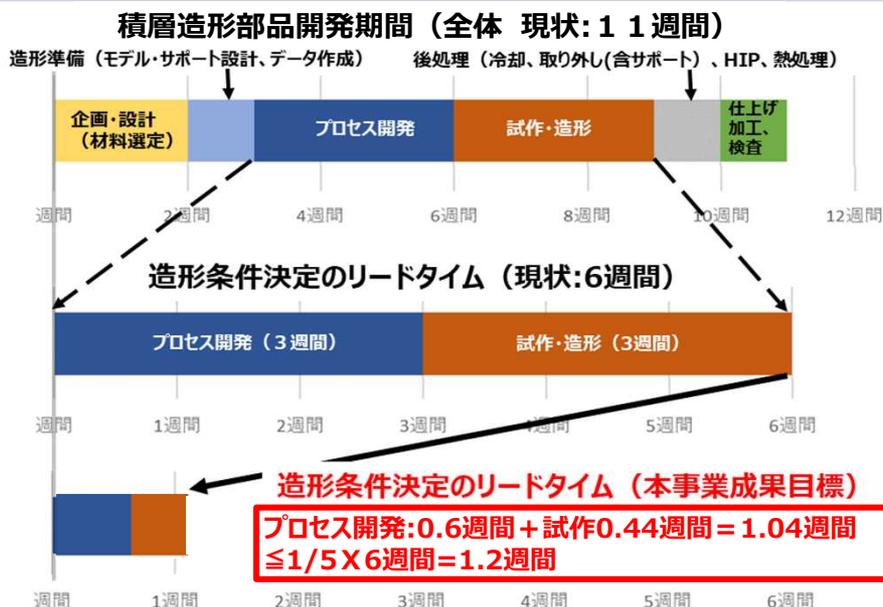
高さ120mm

材料: AISi10Mg

造形条件等:

造形時間: 約12時間

図3-2 積層造形部品の製造リードタイム



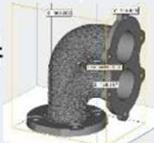
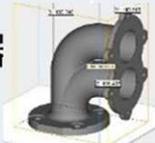
レーザービーム方式の成果 (アウトプット目標達成度) と意義

4. ユーザ造形による実証実験 (2023年度)

【ユーザ実証の結果】

⇒ユーザ4社のご協力により4種類のモデルを提供頂き、汎用型モニタリング・フィードバックシステムを搭載した要素技術研究機により造形。

■ 2023年度ユーザ造形 造形物一覧

ユーザー	材質	IN718	SUS316L	Ti64	AlSi10Mg	Cu合金
A社	航空宇宙分野 (ロケットエンジン部品)					
B社			輸送機器分野 		輸送機器分野 	
C社				航空宇宙分野 		
D社						電気機械器具分野 (高周波コイル) 

電子ビーム方式の成果 (アウトプット目標達成度) と意義

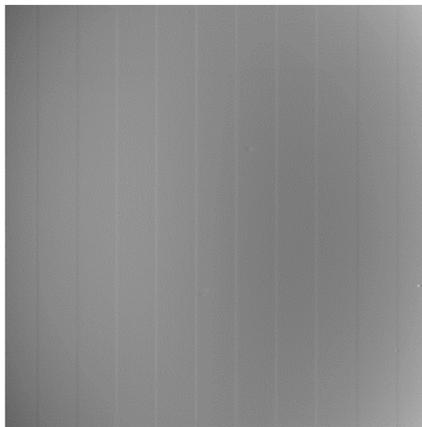
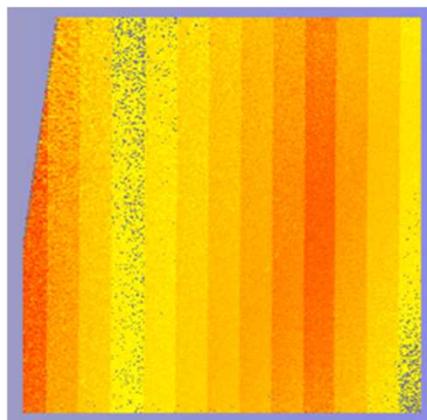
1. 溶融凝固現象の解明による欠陥発生の予測技術の開発

開発目標	主な成果
1. 欠陥発生原因と造形条件の関連性の解明	<p>1. Ti-6Al-4V合金と純銅、AlSi10Mg合金の熱放射率を測定し、各材料の熱放射率を明らかにした。 【意義】 各材料の溶融しやすさ、造形温度維持のしやすさの指標となるデータが得られた。(TRL1)</p>
2. モニタリングデータ及び溶融凝固シミュレーションデータの収集。	<p>2. 観察用電子ビームを用いたモニタリングデータの収集および溶融凝固シミュレーションデータを収集した。 【意義】 粉末の溶融凝固挙動を電子ビームを用いて直接観察した世界初のモニタリングデータを得た。また、シミュレーションによる電子ビーム方式の長所を明らかにした。(TRL1)</p>
3. 欠陥予測システムの開発	<p>3. 2種のBSE画像から得られる合成トポロジー画像を用いた欠陥予測システムを開発した。 【意義】 単純な形状の断面だけではなく、任意の形状の部品に対して、欠陥判別が実施でき、フィードバック制御による欠陥補修の実現に繋がる。(TRL4)</p>

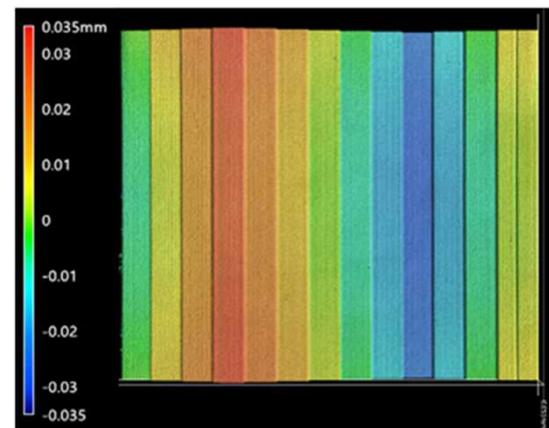
電子ビーム方式の成果 (アウトプット目標達成度) と意義

2. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発 1

開発目標	主な成果
<p>1. 試験研究機に実装した状態でパウダーベッド表面及び造形表面を精度10μm以下で計測できる三次元計測機能を開発する</p>	<p>パウダーベッド表面及び造形表面の高精度モニタリング：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 光学式、及び電子ビーム方式の2方式で10μmの段差が測定できることを確認した。商品機適用を考慮し、電子ビーム方式を選択した。 ・ 画像収取方法の改良、及びDF/DS/DT補正データ自動測定機能からの適切な補正データの適用による画質改善を実施。ビーム径測定により100μm程度のビーム径が得られていることが確認できた。 <p>【意義】欠陥予測に必要な計測精度を確保できた。(TRL5)</p>



10μmの段差付きベースプレートの光学方式の画像(左)、及び電子ビーム方式の画像(右)

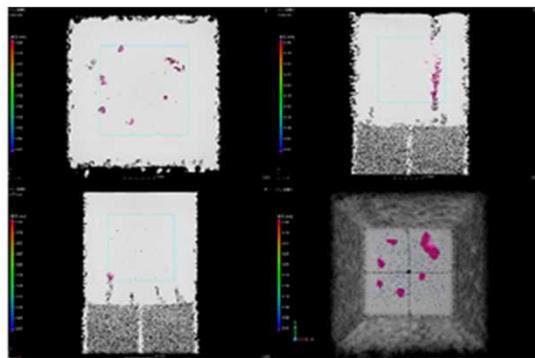
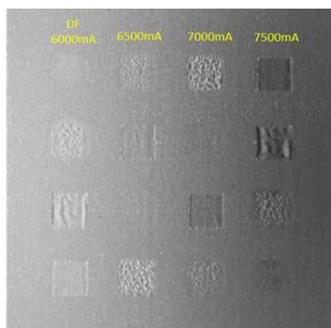
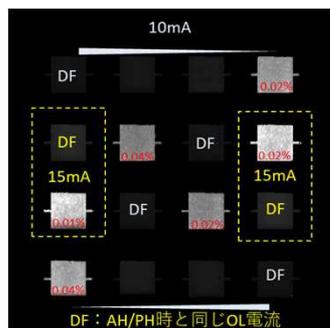


トレーサブルな標準試料で校正された3D形状測定機による段差の確認

電子ビーム方式の成果 (アウトプット目標達成度) と意義

2. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発 2

開発目標	主な成果
<p>2. フィードバック制御機能により造形プロセス中の50μm以上の大きさの欠陥率を0%とする</p>	<p>欠陥予測システムと連携した再溶融FB機能による欠陥率0%の達成：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 仙台分室で開発された欠陥予測システムを搭載し、再溶融FB機能の実機検証完了。 ・ 実造形では、熱電子信号の挙動を基に最適化を図った再溶融条件で粉末ガスポア率を下回る欠陥率が確認でき、最終目標(粉末起因のガスポアを含まず)を達成。 <p>【意義】最終目標の50μm以上の欠陥率0%を達成した。(TRL5)</p>



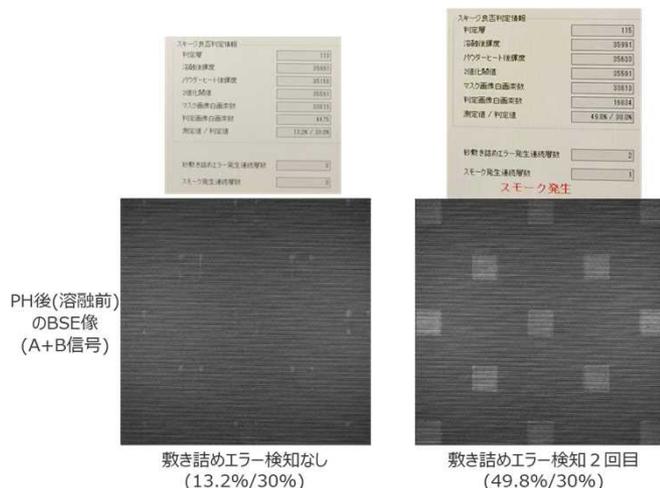
FBなし: 欠陥率1.10% FBあり: 欠陥率0.025% 262個
 欠陥予測システムと連携した再溶融FB機能の有無による欠陥率の比較

熱電子検出電極に+バイアス電圧を印加した場合の溶融時の熱電子像(左)、溶融後のBSE像(右)

電子ビーム方式の成果 (アウトプット目標達成度) と意義

2. 高度モニタリング及びフィードバック制御機能の開発 3

開発目標	主な成果
<p>3. 電子銃異常やチャージアップ発生を抑制・検知し装置を一時停止する機能を実装する</p>	<p>異常検知機能の開発：</p> <ul style="list-style-type: none"> 電子銃のアノード電流やライナーチューブ電流を検出し、電子銃異常やスモーク発生時にインターロックが働き装置を安全停止させる機能を実装した。 またBSE画像を用い次層でリカバリーさせるためのソフト的な機能を実装し、実スモーク発生による粉末敷き詰めエラーの連続検知でスモーク発生の判断・検知されることが確認できた。 <p>【意義】 実用化・事業化に必要な基礎技術を開発できた。(TRL5)</p>



BSE像による粉末敷き詰めエラー検知と連続検知によるスモーク判定

電子ビーム方式の成果 (アウトプット目標達成度) と意義

3. 積層造形部品作製のための開発評価手法の開発

開発目標	主な成果
1. 自動化可能なプロセスマップ探索手法の確立	1. 自動化可能なプロセスマップ探索手法を提案、実証した。 【意義】プロセスマップ探索の自動化に繋がる成果を得た。(TRL3)
2. 積層造形部品を効率的に開発・評価する手法の開発	2. 任意形状断面の入熱状態を簡易計算する方法を開発した。 【意義】種々サイズのプロセスマップを活用し、任意形状部品の条件最適化を簡易計算で実現できる可能性を示した。(TRL2)
3. 4種合金データベースの構築	3. Ti-6Al-4V合金、純銅、SCM440合金、AlSi10Mg合金のデータベースを構築した。 【意義】4種の合金データベースを構築したことで、同一材料の造形部品開発の効率化に繋がる。(TRL1)
4. 本システムおよび手順書を用いて、造形条件決定のリードタイムを1/5 (1-2週間) に短縮する。	4. プロセスマップ探索手法を用いた造形条件の絞り込みと絞り込んだ条件による部品造形で目標を達成できる目途を得た。 【意義】アウトカム目標(積層造形部品開発期間を1/5に短縮)達成に繋げることができる。(TRL5)
5. 装置間レシピ変換手法の開発	5. レシピ開発用の小型造形機と量産用中型造形機とのレシピ変換する手法を開発した。 【意義】レシピ開発用の小型機を用いることで、量産部品のレシピ開発の効率化に繋がる。(TRL2)
6. ユーザ実証	6. 実部品形状で欠陥予測・フィードバック制御で欠陥を減少させることに成功した。 【意義】実部品の欠陥レス造形の実現に繋がる。(TRL5-6)