

「次世代ファインセラミックス製造プロセスの基盤構築・応用開発」
基本計画

材料・ナノテクノロジー部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

①政策的な重要性

Society 5.0(超スマート社会)の実現に向けて、デジタル機器の小型化、高性能化及び高信頼化の要望が高まってきている。一般社団法人 電子情報技術産業協会の「電子情報産業の世界生産見通し 2020」によると、デジタル機器の安定作動を支える日本のファインセラミックス電子部品等は世界市場の約 4 割を占めている。今後市場が拡大するエネルギー・IoT 分野や医療・ヘルスケア分野でのデジタル化においても、海外の技術的な追い上げを許さない高い産業競争力と高い世界シェアを確保していく必要がある。

ファインセラミックスの製造プロセスは、原料粉末を成形し焼成する過程で、微構造等の形体や混合状態等の質が変化し、それらの形質変化の情報が製品にほとんど残らないため、リバースエンジニアリングが困難であり、ブラックボックス化されることで強いノウハウを生み出していた。その一方で、最適なプロセス条件の設計は「経験と勘」や「製造プロセス間の人的なすり合わせ」に多く頼ってきた。

本事業では、理論的なアプローチによる革新的なプロセス技術開発の確立を目指し、ファインセラミックスの製造工程で生じるメカニズムを理解するプロセス解析技術の高度化や、計算科学の進歩によるプロセスシミュレータでの設計を可能とする「ファインセラミックスのプロセス・インフォマティクス技術」の確立と産業利用に向けた基盤構築を目指す。

本技術開発は「統合イノベーション戦略 2020(2020 年 7 月閣議決定)」、マテリアル・イノベーション創出のための「マテリアル革新力強化」等の政府戦略の中で重点的に取り組むべき課題として位置付けられている。

②我が国の状況

ファインセラミックス産業は日本で戦略的に創出され、1990 年代の経済産業省主導の国家プロジェクト「通産省ファインセラミックスプロジェクト (1981-1992 年度)」や「経済産業省シナジーセラミックス開発 1994-2003 年度」等にて、産学連携でファインセラミックス技術開発が実施された。近年では、JST A-STEP「セラミックスの高機能化と製造プロセス革新 (2016 年～2020 年)」が実施され、アカデ

ミア主体での将来の革新プロセス技術創出に向けたシーズ創出研究が行われた。また、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（SIP：Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program）の中では、「高付加価値セラミックス造形技術の開発」（2014年－2018年）として、複雑形状のファインセラミックスの3D積層造形プロセス技術の開発やレーザー焼結技術・難焼結性セラミックスの反応焼結技術の基盤研究等が取り込まれ半導体設備向けの軽量複雑形状ステージ部材や複雑形状のフィルター部材等の試作技術開発が行われた。

我が国でのインフォマティクス技術を用いた材料研究は、材料予測から材料試作・検証を行い、「なにを作るか」にフォーカスした材料設計を加速する研究開発事業が主として行われている。例えば、SIP革新構造材料プロジェクトでの金属系構造材料開発でのマテリアルズ・インフォマティクス技術や文部科学省 MI2I プロジェクトでの電池・磁石・熱電材料等の革新構造材料や新規機能設計に関わる取り組みが挙げられる。また、経済産業省・国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合研究開発機構（以下「NEDO」という。）が進める「超先端材料超高速開発基盤技術プロジェクト」での取り組みは有機材料のナノスケールから高次構造までのマルチスケール設計や機能設計に関するものである。

このような中、計算科学を利用した、「どう作るか」にフォーカスしたファインセラミックス部品の製造プロセス開発プロジェクトは世界初の取り組みである。本プロジェクトは日本の素材産業のなかで世界シェアが高い電子部品等のファインセラミックス分野の産業競争力強化に繋がるものである。

③世界の取組状況

ファインセラミックスのプロセス研究開発では、米国 National Science Foundation（NSF）の制度で、大企業から中小企業までの産業界の要望に応えた革新的研究開発分野での開発プログラム Industry-University Cooperative Research Centers Program（IUCRC）の一つとして、Center for Dielectrics & Piezo-electrics において、次世代誘電体・圧電体に関する基礎研究開発が進められている。

中国では、2015年5月に中国国務院が公表した「中国製造2025」で、製造業の研究開発支出を10年で約2倍に引き上げる目標が掲げられており、具体的な「国家重点開発計画」のテーマの中で、新型特殊セラミックス材料革新技術や高性能セラミックス高機能性精密製造技術等の研究開発が行われている。

インフォマティクスを用いた材料研究に関しては、米国では、2011年6月に新たな素材開発インフラの構築を目指すプロジェクトとしてマテリアル・ゲノム・イニシアチブをオバマ政権が打ち出した。本プロジェクトでは、最先端素材の開発から市場導入までに要する時間を半減させることを目標に掲げ、素材開発に用いられる計算機シミュレーションや実験的手法等、様々なデジタルデータを活用した統合的アプローチにより素材開発基盤の高度化を図ることを目指し、金属、有機化合物、

無機化合物等未知の新材料開発を進めてきた。

中国でも中国科学院と中国工学院が連携して中国版マテリアルゲノム計画に着手している。

韓国は 2015 年から 10 年計画で同様のクリエイティブ・マテリアルズ・ディスカバリー・プロジェクトに取り組んでいる。

④本事業のねらい

一企業では困難な、ファインセラミックスの一連の工程を対象とした製造プロセス技術と計算科学の融合・連携により、次世代のファインセラミックスのプロセス基盤技術を確立するとともに、企業における実用化を支援する。

具体的には、理論的なアプローチに基づくプロセスメカニズム解析技術やファインセラミックスの原料粒子製造～成形～焼成～加工等のセラミックス部品製造の全工程をカバーするプロセスシミュレータ等の革新的なプロセス開発基盤の構築と企業における開発基盤を活用した製造プロセス開発をナショナルプロジェクトとして行うことで、これまでの「経験と勘」に基づいた製造プロセス開発を変革するとともに競争力の高い素材産業の優位性を確保する。

(2) 研究開発の目標

①アウトプット目標

次世代ファインセラミックスの製造プロセス開発支援を可能とする高度な計算科学、先端プロセス計測技術等を駆使して革新的なプロセス開発基盤を構築する。これらの開発基盤により、ファインセラミックス部品の新規製造プロセスを 20 種以上開発し、このプロセスを使用した新規部品の試作を実施する。

②アウトカム目標

セラミックス部品の低温焼結等の革新的なプロセス技術の開発により、2035 年に約 247 万トン／年の CO₂ 削減が期待される。また、本事業が関連産業の競争力強化に貢献することで 2035 年においてファインセラミックスの出荷額約 1 兆円の増加（2019 年比）が期待される。

③アウトカム目標達成に向けての取組

プロジェクトで確立する基盤技術は、NEDO の成果報告や展示会、セミナー等で積極的に宣伝し、国内のファインセラミックス開発研究者へ本基盤技術を周知することにより成果の拡大を促進する。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために以下のテーマについて、研究開発を行う。

具体的な開発内容は、別紙 1 の研究開発計画の通りとする。

【委託事業】

研究開発項目① 革新的プロセス開発基盤の構築

研究開発項目①-1 製造プロセスの可視化技術及びメカニズム解析技術の開発

研究開発項目①-2 製造プロセス支援用計算機システムの開発

研究開発項目①-3 次世代製造プロセス技術開発

研究開発項目①-4 高信頼性メカニズム等解析技術の開発

研究開発項目①-5 製品適用に向けたプロセス技術の開発

本研究開発は、長期間の開発を要しファインセラミックス産業分野の研究開発を支援する「基盤的技術」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施する事業であり、委託事業として実施する。

【助成事業】

研究開発項目② 革新的プロセス開発基盤の応用開発

本研究開発は、2023年度までに委託事業で開発された製造プロセス支援用計算機システム等のプロセス開発基盤を用いて、企業における製品化を加速するための助成事業（助成率：1/2 または 2/3）とする。

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

プロジェクトマネージャー（PM）にNEDO材料・ナノテクノロジー部 高宮 健治を任命して、プロジェクトの進行全体を企画・管理や、プロジェクトに求められる技術成果及び政策的効果を最大化させる。

NEDOは、公募によって研究開発実施者を選定する。研究開発実施者は、企業や大学等の研究機関等（以下「団体」という。）のうち、原則として日本国内に研究開発拠点を有するものを対象とし、単独又は複数で研究開発に参加するものとする。

研究開発能力を最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、NEDOは研究開発責任者（プロジェクトリーダー 藤代 芳伸 及びサブプロジェクトリーダー 木村 禎一）を選定し、各実施者はプロジェクトリーダーの下で研究開発を実施する。

本事業は、基盤技術の確立を目的としているため、研究開発実施者はNEDOと協議の上、可能な限り研究拠点を集約して、プロジェクトリーダー等の指揮の下、組織的に知見・ノウハウを蓄積しながら研究開発等を推進することとする。

(2) 研究開発の運営管理

NEDOは、研究開発全体の管理、執行に責任を負い、研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適時に把握し、必要な措置を講じるものとする。運営管理は、効率的かつ効果的な方法を取り入れることとし、次に掲げる事項を実施する。

① 研究開発の進捗把握・管理

NEDOは、経済産業省及び研究開発実施者と緊密に連携し、本事業の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて、技術推進委員会等における外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、随時、プロジェクトの進捗について報告を受けること等により進捗の確認及び管理を行うものとする。また、全体の最終目標の効率的かつ効果的な早期達成のため、(新たな課題の対応も含む) 関連技術や市場の動向を随時把握し、最新の技術や知見を取り込むこととし、毎年度、実施方針に掲げられた研究開発プロジェクトの目標や研究開発の内容を評価し、必要に応じて変更するものとする。早期実用化が可能と認められた研究開発については、期間内であっても研究を完了させ、実用化へ向けた実質的な研究成果の確保と普及に努める。

② 技術分野における動向の把握・分析

NEDOは、プロジェクトで取り組む技術分野について、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し、事業終了後にプロジェクトで構築したプロセス開発基盤を自立的かつ継続的に運用可能とする社会実装システムの構築に資する。なお、調査の効率化の観点から、本プロジェクトにおいて委託事業として実施する。

③ 研究開発テーマの評価

研究開発を効率的に推進するため、研究開発項目①を対象として、ステージ方式を適用する。その際、外部有識者による審査を活用し、研究開発項目①-5 から研究開発項目②への移行可否を決定する。

3. 研究開発の実施期間

2022年度から2026年度の5年間

4. 評価に関する事項

NEDOは、技術評価実施規程に基づき、技術的及び政策的観点から研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、プロジェクト評価を実施する。

評価の時期は、中間評価として2024年度、事後評価を2027年度に実施する。

なお、中間評価結果を踏まえ必要に応じて事業の加速・縮小・中止等の見直しを迅速に行う。評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、事業実施を前倒しする等、適宜見直すものとする。

5. その他重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

① 共通基盤技術の形成に資する成果の普及

研究開発実施者は、プロジェクトで構築したプロセス開発基盤を自立的かつ継続的に運用可能とする社会実装システムを企画・準備し、構築するものとする。NEDOは、研究開発実施者による研究成果の広範な普及を促進する。

② 知的財産権の帰属、管理等取扱い

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

③ 知財マネジメントに係る運用

委託事業である研究開発項目①は「NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」を適用する。

④ データマネジメントに係る運用

委託事業である研究開発項目①は「NEDOプロジェクトにおけるデータマネジメント基本方針」（委託者指定データを指定しない場合）を適用する。

(2) 「プロジェクト基本計画」の見直し

PMgrは、当該研究開発の進捗状況及びその評価結果、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、研究開発費の確保状況等、プロジェクト内外の情勢変化を総合的に勘案し、必要に応じて目標達成に向けた改善策を検討し、達成目標、実施期間、実施体制等、プロジェクト基本計画を見直す等の対応をおこなう。

(3) 根拠法

本プロジェクトは国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第十五条第一号ニ及び第九号に基づき実施する。

6. 基本計画の改訂履歴

(1) 2022年 3月、制定

(2) 2023年 2月、プロジェクトマネジャー及びサブプロジェクトリーダーの追加、研究開発テーマの評価の追加、中間評価時期の変更

(別紙1) 研究開発計画

研究開発項目① 革新的プロセス開発基盤の構築

次世代ファインセラミックスの製造プロセス開発支援を可能とする高度な計算科学、先端プロセス計測技術等を駆使して革新的なプロセス開発基盤を構築する。

研究開発項目①-1 製造プロセスの可視化技術及びメカニズム解析技術の開発

1. 研究開発の必要性

ファインセラミックスの市場競争力を確保するためには、従来の「経験と勘」を頼りに確立されてきた製造プロセス開発に代わり、近年飛躍的に進歩している高度な計算科学をベースとした「機能」と「製造プロセス」の予測を可能とするプロセスシミュレータによる開発の加速化が必要である。プロセスシミュレータの構築にあたり、プロセス可視化技術をもとにファインセラミックスの各製造プロセスのメカニズムを解析する技術を確立することが不可欠である。

2. 研究開発の具体的内容

各種計測技術、画像処理等を活用してファインセラミックスの各製造プロセスの可視化技術の開発を行う。また蓄積したプロセスデータをもとにプロセス間での状態変化等のメカニズム及び制御因子を明らかにする。

1) 成形プロセスの計測技術開発

セラミックスのスラリー・ペースト等の可視化技術及びメカニズム解析技術を開発する。

2) 乾燥・脱脂・焼成プロセスの計測技術開発

セラミックスの乾燥～脱脂～焼成プロセスの可視化技術及びメカニズム解析技術を開発する。

3. 達成目標

【中間目標（2023年度）】

対象とするプロセスの可視化に必要な装置・システムの開発及び可視化技術の開発を行う。また、可視化技術により得られたプロセスデータを活用する事により、プロセスシミュレータの開発に必要とされるプロセス間の状態変化等のメカニズムを解明するとともに各プロセスの制御因子を明らかにする。これにより、研究開発項目①-5において目標とするプロセス技術開発に資する。

【最終目標（2026年度）】

中間目標までに開発した可視化技術をもとに、プロセスシミュレータのブラッシュアップのために必要なプロセスデータを取得し、プロセス・インフォマティクス標準プラットフォームに蓄積する。これにより、ファインセラミックスの新規製造プロセス開発（20種以上）に資する。

研究開発項目①-2 製造プロセス支援用計算機システムの開発

1. 研究開発の必要性

研究開発項目①-1「製造プロセスの可視化技術及びメカニズム解析技術の開発」により得られる各プロセスのメカニズムや制御因子がファインセラミックスの一連の製造プロセスに与える影響を計算可能とする一気通貫のプロセスシミュレータの開発が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

ファインセラミックスの製造プロセスにおける一連の複雑な現象が関係した計算を一気通貫に扱うことのできるシミュレーション技術を開発し、ファインセラミックスのプロセス・インフォマティクスのための標準プラットフォームを構築する。

1) 要素プロセスシミュレーション技術の開発

成形・乾燥・脱脂・焼成等の各要素プロセスに対応したシミュレーション技術を開発する。

2) ファインセラミックスのプロセスシミュレータの開発

ファインセラミックスの一連の製造プロセスを一気通貫に扱うことのできるシミュレーション技術を開発する。

3) ファインセラミックスのプロセス・インフォマティクスのための標準プラットフォーム構築

プロセスデータの蓄積及びプロセス探索を可能とする「プロセス・インフォマティクス標準プラットフォーム」を構築する。

プロセス・インフォマティクスの標準プラットフォームは、研究開発項目①-1～①-4間の連携を明らかにし、ファインセラミックスの製造プロセス開発に資する革新的プロセス開発基盤として、一体化システムを開発する。

3. 達成目標

【中間目標（2023年度）】

成形・乾燥・脱脂・焼成等の各要素及び一連の製造プロセスを一気通貫に扱えるシミュレータを開発する。これにより、研究開発項目①-5において目標とするプロセス技術開発に資する。

【最終目標（2026年度）】

中間目標までに開発したプロセスシミュレータと実験から得られるプロセスデータの蓄積及びプロセス探索を可能とする「プロセス・インフォマティクス標準プラットフォーム」を構築する。これにより、ファインセラミックスの新規製造プロセス開発（20種以上）に資する。

研究開発項目①-3 次世代製造プロセス技術開発

1. 研究開発の必要性

次世代ファインセラミックスには、小型・高性能・高信頼性が必要とされるため、平均粒径ナノサイズでの原料粒子の作り分けや成形されたセラミックスの高充填密度化等が不可欠となる。

また、セラミックデバイスの小型化や多層化に伴って、従来焼結技術では目的とする複雑構造と信頼性を両立させることが難しくなりつつある。

さらに、ファインセラミックスの製造工程において排出される CO₂ の大半は脱脂・焼成工程で発生している。

上記問題を抜本的に解決する製造プロセス技術を開発する必要がある。

2. 研究開発の具体的内容

次世代ファインセラミックスに必要とされる小型・高性能・高信頼性を実現するための製造プロセスを開発する。

1) 革新的な原料粒子高速開発技術の開発

原料粒子の最適な合成条件を自動化等により高速探索することが可能となるセラミックナノ粒子の合成プロセス等を開発する。

2) 革新的な成形技術の開発

スラリーペーストの流動性を確保可能かつセラミック粒子体積率を増加可能な溶媒、バインダー等を開発し、高充填密度化されたセラミック成形体を作製する技術等を開発する。

3) 革新的な焼結技術の開発

従来よりも大幅に低い焼成温度条件の目標値を設定し、その温度条件下において異種材料から成る積層体を同時焼成する技術等を開発する。

例えば、プロセス・インフォマティクスによって開発された新規焼結技術によって、焼成温度を数百度低減する等。

3. 達成目標

【中間目標（2023年度）】

次世代ファインセラミックスに必要とされる製造プロセス技術を開発する。これにより、研究開発項目①-5において目標とするプロセス技術開発に資する。

【最終目標（2026年度）】

中間目標までに開発したファインセラミックスの新規製造プロセスのプロセスデータを取得し、プロセス・インフォマティクス標準プラットフォームに蓄積する。これにより、ファインセラミックスの新規製造プロセス開発（20種以上）に資する。

研究開発項目①-4 高信頼性メカニズム等解析技術の開発

1. 研究開発の必要性

次世代ファインセラミックスに必要とされる高信頼性を確保するために、内部欠陥の非破壊検査技術の向上、破壊現象のメカニズム解明及び新たな加速劣化試験方法の開発等を実施する必要がある。

2. 研究開発の具体的内容

次世代ファインセラミックスの高信頼性を確保するために必要となる計測・評価技術等を開発する。

1) 画像解析による破壊予知技術の開発

高分解能・高速での非破壊観察等により得られた画像データをベースに機械学習による欠陥予測技術を開発するとともに、データ駆動型の解析を実施し破壊現象と欠陥の関係を明らかにする。

2) 新たな加速劣化試験方法の開発

次世代セラミックスデバイスの実環境において発生する破壊を予測するため、作動環境下における応力推定のシミュレーション技術及び実測技術等を開発し、新たな加速劣化試験方法を開発する。

3. 達成目標

【中間目標（2023年度）】

欠陥の生成過程や進展過程等の評価に必要な計測・評価技術を開発する。これにより、研究開発項目①-5において目標とするプロセス技術開発に資する。

【最終目標（2026年度）】

中間目標までに開発した計測・評価技術により欠陥の生成過程や進展過程等のデータを取得し、プロセス・インフォマティクスの標準プラットフォームに蓄積する。これにより、ファインセラミックスの新規製造プロセス開発（20種以上）に資する。

研究開発項目①-5 製品適用に向けたプロセス技術の開発

1. 研究開発の必要性

研究開発項目①-1～①-4で開発したプロセス開発基盤と研究開発項目②におけるプロセス開発基盤を活用した企業での製品開発を繋ぐために、プロセス開発基盤の開発と並行して、製品群毎に必要なプロセス技術の開発及びプロセス開発基盤への反映を行う必要がある。

2. 研究開発の具体的内容

研究開発項目①-1～①-4 で開発したプロセス開発基盤を活用し、次世代電子部品、エンジニアリングセラミックス部品について材料設計・プロセス技術に関する課題を設定し実施する。

1) 次世代電子部品向けプロセス技術開発

ナノ欠陥構造を制御し、従来の 1/10 のシート膜厚及び単位体積当たり 10 倍の積層数の構造を作製するプロセス技術開発等。

2) 次世代エンジニアリングセラミックス部品向けプロセス技術開発

マイクロ欠陥構造を制御し、従来の 1/10 の厚さで同等以上の強度となる構造を作製するプロセス技術開発等。

3. 達成目標

【最終目標（2023年度）】

研究開発項目①-1～①-4 で開発したプロセス開発基盤を活用し、製品群毎に必要なプロセス技術の開発を行う。また、これらのプロセス技術をプロセス開発基盤へ反映する。これにより研究開発項目②におけるプロセス技術開発に資する。

研究開発項目② 革新的プロセス開発基盤の応用開発

1. 研究開発の必要性

日本のファインセラミックス産業の優位性を確保する観点から、早期に高付加価値なファインセラミックス製品を市場に提供することがきわめて重要である。そこで、2023年度までに開発したプロセス開発基盤を企業での製品開発へ適用し、実用化を加速する必要がある。

2. 研究開発の具体的内容

2023年度までに開発したプロセス開発基盤をもとに、新規製造プロセス開発のための課題を設定して実施する。

3. 達成目標

【最終目標（2026年度）】

2023年度までに開発したプロセス開発基盤を企業での製品開発に適用し、ファインセラミックスの新規製造プロセスを開発する。また、このプロセスを使用した新規部品の試作を実施する。

(別紙2) 研究開発スケジュール

