

「次世代ファインセラミックス製造プロセス
基盤構築・応用開発プロジェクト」

事業原簿
(公開)

担当部	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 材料・ナノテクノロジー部
-----	---

更新履歴

更新日	更新内容
2024 年 5 月 16 日	初版発行

目次

概 要	1
プロジェクト用語集	1
1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋	1-1
1.1. 事業の位置づけ・意義	1-1
1.2. アウトカム達成までの道筋	1-3
1.3. 知的財産・標準化戦略	1-7
2. 目標及び達成状況.....	2-1
2.1. アウトカム目標及び達成見込み	2-1
2.2. アウトプット目標及び達成状況	2-2
3. マネジメント.....	3-1
3.1. 実施体制	3-1
3.2. 受益者負担の考え方	3-2
3.3. 研究開発計画	3-2
4. 目標及び達成状況の詳細	4-1
4.1. 研究開発項目：①革新的プロセス開発基盤の構築	4-1
添付資料.....	1
●プロジェクト基本計画	1
●関連する施策や技術戦略.....	12
●プロジェクト開始時関連資料	4
●各種委員会開催リスト	4
●特許論文等リスト	5

概 要

プロジェクト名	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	プロジェクト番号	P22005
担当推進部/ プロジェクトマネージャーまたは担当者 及び METI 担当課	材料・ナノテクノロジー部 PMgr 高島 英彰（2024 年 5 月現在） 材料・ナノテクノロジー部 PMgr 高宮 健治（2022 年 6 月～2023 年 3 月） 素材産業課 革新素材室		
0. 事業の概要	本事業は、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、密接な産学連携体制のもとで実施し、これまでの「経験と勘」に基づいた製造プロセス開発の手法を変革し、我が国素材産業の優位性を確保するものである。		
1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋			
1.1 本事業の位置付け・意義	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。		
1.2 アウトカム達成までの道筋	事業前半で、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。事業後半で、開発されたプロセスシミュレータや画像解析技術等の開発基盤の手法を、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し、アウトカム目標に繋がる企業での開発手法としての活用へ繋げる。		
1.3 知的財産・標準化戦略	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」を適用し、企業活用へ繋げるための実施者間でのプロジェクト内でのオープンでの開発を進め、事業後半では企業への助成事業を実施しクローズでの開発も加速させる。		
2. 目標及び達成状況			
2.1 アウトカム目標及び達成見込み	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。当目標に向けて、次世代ファインセラミックスの製造プロセスの省エネ化や高性能化につなげるための高度なプロセス開発を短期間で進める手法としてのファインセラミックスの一連の工程を対象とする新たなプロセスシミュレータの開発等を事業前半で進めてきた。事業後半ではそれらの企業活用へ向けた開発を行い、アウトカム目標に繋がる手法へ繋げ、目標達成に向けて開発を進める見込み。		
2.2 アウトプット目標及び達成状況	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		

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ため以下を実施した。

- 1) 成形プロセスの計測技術開発
セラミックスの原料スラリー、原料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した。
- 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した。

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とともに、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した。具体的には、粒径 100nm～数 μm オーダーのセラミックス粒子に対して、10 nm オーダーのセラミックス粒子を含むスラリー中の分散状態可視化技術を開発した。さらに、10 nm オーダーのセラミックス粒子内の欠陥状態に関する評価手法について分光学的手法や核磁気共鳴法等の検討を進め、評価技術の信頼性確認を経て、データを収集した。開発した技術等を用いてプロセスシミュレーションを構築するためのデータセットを 10 種類以上蓄積した。

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

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群を開発し、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基盤プラットフォームを構築する開発を実施した。

- 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した。
- 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
要素シミュレータの連結および連続動作によってファインセラミックスの製造プロセス全体を取り扱うことができるシミュレーション技術を開発した。
- 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の構築
プロセスデータの蓄積とプロセス最適条件の探索、さらにはデータの逆問題解析を可能とする「プロセスインフォマティクス標準プラットフォーム」を構築した。

プロセスインフォマティクスの標準プラットフォーム構築では、研究開発項目①-1～①-4 間の相互連携による開発技術群の一体化を進め、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システムの構築を進めた。

実用プロセスに適用可能な精度を有する成形・乾燥・脱脂・焼成等の各要素プロセスシミュレータ、およびこれらの連結により製造プロセス全体を取り扱えるシミュレータを開発した。各要素シミュレーションの目標精度は原料粒子のサイズを基準に策定し、成形・乾燥脱脂シミュレーションにおいては原料粒子の「抜け」や「凝集」、焼結においてはこれらの「抜け」や「凝集」に起因する欠陥を再現・予測可能なシミュレータを開発した。より具体的には、200 nm の粒子を原料として用いるプロセスについて、成形・乾燥脱脂シミュレーションでは 100 nm (粒子サイズの 1/2) の空隙、焼結シミュレーションでは、50 nm (粒子サイズの 1/4) の空隙を再現・予測できることを可能とした。

研究開発項目①-3 次世代製造プロセス技術開発

次世代ファインセラミックスに必要とされる付加価値、すなわち小型・高性能・高信頼性を実現するための製造プロセス開発を実施した。

- 1) 革新的な原料粒子高速開発技術の開発
原料となるセラミックスナノ粒子の最適合成条件をデータ科学を活用して高速探索することが可能なナノ合成プロセスを開発した。
- 2) 革新的な成形技術の開発

	スラリーやペーストの流動性を確保しつつ、セラミックス粒子体積率を向上できる溶媒、バインダー等の設計、選定する技術を開発し、高充填密度のセラミックス成形体を作製する技術等を開発した。 3) 革新的な焼結技術の開発 焼成温度を従来よりも大幅に低減することを目的としたプロセス基盤技術を開発し、目標温度において異種材料層から構成される積層成形体を共焼成する技術等を開発した。 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の開発に向け、材料および部材の試作を進めた。微小原料粒子のフロー製造プロセスにおいては、複数の金属元素から構成される複合酸化物粒子の粒径や粒度分布の制御に関してプロセス条件一粒度解析データセットを 50 種類以上蓄積し、AI などを活用した最適な製造条件を探索する手法の有用性を例証した。また、スラリーについても同様に、データセットを構築する技術を確立した。固相原料では、セラミックス原料の平均粒径、粒度分布および平均粒径の異なる原料の混合による粒度分布の制御による成形体密度の向上、セラミックス原料粒子との接着性や融点等が異なる複数の代表的熱可塑性バインダー10 種以上を用いた成形、乾燥脱脂実験を行い、また、スラリーやペースト等の固液複合原料に関しては、溶媒／原料粒子の体積分率、分散剤の極性や分子サイズ、セラミックス粒子表面との結合状態が異なる 10 種以上のスラリーを用いたシート成形を行い、性状の異なる溶媒、分散剤およびバインダーからなる 20 種以上の固液複合原料を用いたグリーンシートを作製した。さらに、固相成分のみからなる原料では、データセットを用いたシミュレーションおよび AI などの活用から提案される最適条件の妥当性を実実験により検証し、開発技術の有用性を実証した。 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 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・評価技術等を開発した。 1) 画像解析による破壊予知技術の開発 高分解能の高速非破壊観察等により得られた画像データを用いて、機械学習による欠陥予測技術を開発するとともに、データの多面的解析により破壊現象と構造欠陥の関係を明らかにした。 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、実使用環境下において破壊の原因となる応力を推定できるシミュレーション技術及び実測技術等を活用し、新たな加速劣化試験方法を開発した。 欠陥の生成過程や亀裂の進展過程等の評価に必要な計測・評価技術を開発した。破壊現象メカニズム解明のための解析手法の開発では、破壊に影響を与える構造因子（いわゆるキラー欠陥等）を明らかにし、画像解析による数～数 10 μm オーダーの気孔や欠陥の定量化技術と予測・解析手法を探索した。また、熱応力解析技術ならびに温度変化に伴う部材の変形挙動等の計測技術を活用して劣化の要因となる構造上の因子を明らかにし、加速劣化試験法開発の開発指針を確認した。 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 共通基盤技術を各社の実用プロセスに適用するための検討を行った。 1) セラミックス/金属積層デバイスについて、モデル材料系およびモデルプロセスを設定し、開発したプロセスシミュレーションをプロセス最適化およびプロセス設計技術として用いるための基盤技術を構築するとともに、実用プロセスにおける課題を抽出した。 2) 非酸化物モデル材料について、顆粒作製から成形、焼結に至るプロセスを可視化し、さらにプロセスシミュレーションを適用することによって、実プロセスに対応したシミュレーションが構築できることを示した。 3) フィルター成形・成膜プロセスについて、モデル実験系を構築し、また流体計算を含む粒子堆積シミュレータを開発して、実部材サイズの堆積挙動のシミュレーション基盤を構築した。 4) 鋳込成形プロセスについて、給水型と高濃度スラリーからなるモデル実験系を開発し、プロセスシミュレーションの構築の際に考慮すべきプロセス現象と、シミュレーション取り込みの際の課題を抽出した。
--	---

	5) 異種材料接合技術について、新たなシミュレーション手法を適用し、微構造比較による妥当性評価を行い、実材料系への適用可能範囲を明らかにした。 実用プロセスの詳細は各企業が徹底した情報管理をしているため、委託事業における共通基盤技術開発では、ごく一般的なプロセスをモデル実験として取り扱い、対応するシミュレーション技術を構築してきた。プロジェクト後半では実際の製造プロセス技術を取り扱うこととなるため、参画企業が独自に共通基盤技術を検討評価し、自社事業への適用可能性についての判断を得た。各社によるプロセス上の詳細な工夫を完全に反映できるかは見通せない面があるものの、プロセスの本質的現象を取り扱う基盤は構築できており、実用プロセスへの適用を進められるとの見解を得た。					
3. マネジメント						
3.1 実施体制	プロジェクトマネージャー	NEDO 材料・ナノテクノロジー部 高島 英彰				
	プロジェクトリーダー	PL 産業技術総合研究所 材料・化学領域 研究部門長 藤代芳伸 SPL ファインセラミックスセンター 研究グループ長 木村禎一				
	委託先	国立研究開発法人 産業技術総合研究所 一般財団法人ファインセラミックスセンター 株式会社村田製作所 京セラ株式会社 太陽誘電株式会社 AGC 株式会社 日本特殊陶業株式会社 日本ガイシ株式会社 TOTO 株式会社 株式会社ノリタケカンパニーリミテド (再委託：東北大学、東京大学、筑波大学、横浜国立大学、長岡技術科学大学、東海大学、名古屋大学、京都工芸繊維大学、九州大学、中京大学、物質・材料研究機構)				
3.2 受益者負担の考え方	受益者負担の考え方 協調領域での共通基盤開発を進めるため、PJ の前半は委託事業として実施。					
	主な実施事項	2022fy	2023fy	2024fy	2025fy	2026fy
	研究開発項目①-1 製造プロセスの可視化技術およびメカニズム解析技術の開発	委託	委託			
	研究開発項目①-2 製造プロセス支援用計算・システムの開発	委託	委託			
	研究開発項目①-3 次世代製造プロセス技術開発	委託	委託			
	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	委託	委託			
	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	委託	委託			
	研究開発項目②		助成			

	革新的プロセス 開発基盤の応用 開発					
3.3 研究開発計画						
事業費推移 [単位:百万円]	主な実施事項	2022fy	2023fy	2024fy	2025fy	総額
	研究開発項目① -1 製造プロセス の可視化技術お よびメカニズム 解析技術の開発	7 6 5 (追加4 0 4)	1 6 2			9 2 7
	研究開発項目① -2 製造プロセ ス支援用計算・ システムの開発	5 1 0 (追加1 8 0)	1 1 7			6 2 7
	研究開発項目① -3 次世代製造 プロセス技術開 発	7 7 2 (追加3 3 3)	2 0 4			9 7 6
	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	6 3 3 (追加2 9 4)	2 8 6			9 1 9
	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 2 0	1 0 2			2 2 2
	研究開発項目② 革新的プロセス 開発基盤の応用 開発		3 3			2 2 2
	事業費	2022fy	2023fy	2024fy	2025fy	総額
	会計 (特別)	2 8 0 0	8 7 1			3、6 7 1
	追加予算	(1 2 1 1)	(3 3)			
	総 NEDO 負担額	2 8 0 0	9 0 4			3、7 0 4
	情勢変化への対 応	特に無し				
	中間評価結果へ の対応	推進委員会の実施 (2 回)、調査研究の実施 (2022 年)				
評 価 に 関 す る 事項	事前評価	2021 年度実施 担当部 評価部				
	中間評価	2024 年 中間評価実施				
	終了時評価	2027 年度 終了時評価実施見込み				
別添						
投稿論文	「査読付き」1 4 件、「その他」0 件					
特 許	「出願済」0 件、「登録」0 件、「実施」0 件 (うち国際出願 0 件) 特記事項：事業前半ではプロセスシミュレータ構築に絞り込んだ実施					
その他の外部発表 (プレス発表等)	・「100℃以下 “焼かないセラミックス” 製造プロセス確立 26 年度めど、NEDO 次世代ファインセラミックス製造プロセス基盤技術の開発スタート」 (日刊工業新聞 1 面掲載、2022/08/10) ・「NEDO と産総研、ファインセラミックス内部のキラー欠陥の可視化技術を開発」 (NEDO プレスリリース 日経新聞 Web 版等掲載、2024/3/8)					
	作成時期	2022 年 3 月 初版作成				

	基本計画に関する 事項	変更履歴	2023 年 2 月 改訂
--	----------------	------	---------------

プロジェクト用語集

用語	説明
プロセスインフォマティクス	計算科学手法や情報科学手法を活用するプロセス開発のための手法
要素シミュレータ	各プロセス（工程）の要素を扱う計算シミュレータ
統合シミュレータ	要素シミュレータを組み合わせて、複数のプロセス（工程）間の構造変化等を扱えるシミュレータ
物理シミュレータ	プロセスでの構造変化を物理（数理）モデルで記述し、物理定数等を任意にパラメータとして入力し、偏微分方程式での最適化により計算すシミュレータ。物理定数が分かれば実験でのパラメータ取得が無くても計算が可能。
実験シミュレータ	実験より計算でのフィッティングパラメータを取得する数理計算シミュレータ
モンテカルロ（MC）法	乱数を用いて構造発展を計算する手法
有限要素法（FEM）	偏微分方程式の近似解を要素に分けて計算する手法
フェーズフィールド法（PFM）	連続体モデルとして拡散界面等のモデルでの変化を計算する手法
離散要素法（DEM）	変形等を離散モデル（座標点）で計算する手法
拡張有限要素法（DFEM）	不連続な状態等の変化を記述し要素に分けて計算する手法

1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

1.1. 事業の位置づけ・意義

持続可能な社会の実現に向け、持続可能な開発目標（SDGs）への取り組みが世界的に活発になっている。日本では2050年までのカーボンニュートラル達成が政府目標として掲げられ、産学官を挙げた目標達成への気運が高まっている。また、新型コロナウイルスの世界的な感染拡大により様々な社会的リスクが顕在化した結果、強靱な経済社会システムの構築が強く求められている。SDGsの達成やカーボンニュートラルの実現、経済社会システムの強靱化は、第5期科学技術基本計画（2016-2020年）に提唱された「Society5.0」によって解決しようとしてきた社会課題そのものであり、その意味でSociety5.0は、「目指すべき近未来社会のイメージ」から、「早急に構築すべき社会の姿」へと変貌を遂げたと言っても過言ではない。

Society5.0の中核となるハードウェアはデジタル機器である。新型コロナウイルス感染症の感染拡大が続く中で、リモートワークやWeb会議が普及して人同士のコミュニケーションが進化し、モノをつなぐIoTの普及により多様な人・モノ・組織が密接なネットワークを形成するようになった。このようなデジタルネットワークの拡大は現実世界の新たな価値を創造しており、社会基盤としてのデジタル機器の重要性はますます高まっている。このようなデジタル機器を支える日本の電子セラミックスや電子部品製造等に関わるエンジニアリングセラミックスなどのファインセラミックス部材は、高い技術力を背景に世界市場の約40%を占めているが、今後の継続的発展、市場シェアの維持・拡大のためには、我が国セラミックス産業が特に強みとしてきた製造プロセス技術を飛躍的に発展させる取り組みが必要である。さらに、次世代通信技術（ポスト5G）を支える様々な電子部品、半導体製造設備の基幹部品、脱炭素、エネルギー問題などの解決に貢献する次世代セラミックス部材の実現のためには、ファインセラミックス製造プロセス技術のさらなる高度化とともに、国際競争力に打ち勝つ革新的な機能、革新的な構造制御技術の創出が求められる。部品性能の向上に伴ってセラミックス部品製造プロセスは複雑になっており、このような複雑プロセスの全体最適化技術の創出によって、部材の性能、信頼性、耐久性等の向上を果たすことが重要である。

ファインセラミックス製品の社会実装のイメージ・インパクト

新型コロナウイルス感染症の拡大を受け、動画配信、電子決済、遠隔医療、自動運転、リモートでの開発・生産など社会のデジタル化、および Society5.0 社会の実現のため **ポスト5G 高速通信技術の必要性が増大**。

新たなファインセラミックス材料開発を加速するための基盤構築
超高品質・超高信頼性・超耐久性



ファインセラミックス産業は、今後の超スマート社会(Society5.0)を牽引する日本が強みを持つ分野。10年先以降の新規市場における競争力・高いシェアを維持する革新的な技術開発が必要。

製造プロセスが複雑で模倣困難なファインセラミックス部材産業は近年堅調に成長し、2019年国内生産額は約3兆円。日本のシェアは世界の約4割を占める。



ファインセラミックス産業の2018年国別市場規模



最新電気自動車(EV)には、7,000~10,000個の電子セラミックス部材が搭載され、今後、さらに市場が拡大することが予想されている。



自動車向け積層セラミックコンデンサ(MLCC)の2017年度シェアと市場規模予想



マテリアル革新力強化のための戦略策定に向けた準備会合（第1回） 内閣府配付資料より（令和2年4月27日）

ファインセラミックス製造プロセスには、原料合成、成型、乾燥・脱脂、焼成（焼結）等の要素プロセスがあり、各要素プロセスにおいて形成される微構造が、部材の品質や信頼性、耐久性などの最終特性を左右する。しかし、各要素プロセスにおいて微構造が形成されるメカニズムは

必ずしも明らかではなく、このことが近年注目されている計算科学を活用したプロセス研究・プロセス開発の妨げとなってきた点は否めない。

そこで本事業では、強力な産官連携体制のもと、次世代の電子セラミックスやエンジニアリングセラミックスの高度化に不可欠な製造プロセスの設計および最適化を短期間かつ効率的に実現するため、プロセス現象の解明と理解に基づいて、各要素プロセスで形成される微構造を予測可能な計算シミュレーション技術を構築し、さらには複数の要素プロセスからなる製造プロセス全体に適用可能なシミュレーション技術の開発、プロセス条件と構造の相関などへの情報科学的アプローチを通じて、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を新たに開発し、高性能かつ高信頼性部材製造のための次世代プロセス技術開発プラットフォームを創出する。また、部材の信頼性低下の原因となる微構造を特定・検出するための評価技術を開発し、シミュレーション技術を活用した製造プロセス最適化を通じて高信頼性化を達成する。本提案の実施によって得られた成果は、Society5.0の早期実現に資するため、速やかな産業利用を図る。

なお、本事業は、NEDOマテリアル革新技術先導研究「ファインセラミックスのプロセスインフォマティクス基盤構築」（2021-2022年度）で得られた知見および明らかになった技術的課題を踏まえて実施する。

1.2. アウトカム達成までの道筋

我が国のファインセラミックス産業は世界シェアの40%を占め、中でも高い技術力を必要とするハイエンド・先端部材では、セラミックス電子部品で60%以上、パワー半導体向け放熱板で77%以上の圧倒的シェアを有する。このような状況は、各企業が保有する世界トップレベルの製造プロセス技術によってもたらされており、シェアの維持・拡大のためには、製造プロセス技術の持続的高度化が不可欠である。

Society5.0等の施策によって社会のデジタル化が急激に進展し、自動走行自動車や遠隔医療等の次世代技術の実現が目前に迫っている。これらの次世代技術では、安全・安心の確保のために部材の耐久性・安定性が特に求められ、キーマテリアルであるセラミックス部材の信頼性向上が急務である。また、情報化社会の根幹をなす社会インフラとして5G/6Gの高速通信技術が求められており、日本が高いシェアを有する部材群の性能向上は喫緊の課題である。また、脱炭素社会の実現に当たっても、新たな環境デバイス・エネルギーデバイスの開発が求められ、優れた機械的特性、高温特性、電気特性を有するセラミックス材料の活用は必須である。

ファインセラミックスの世界市場は2019年では651.5億ドルと想定され、2024年では934億ドルまで成長すると予想されている（日本ファインセラミックス協会調査）。このような状況の中で、我が国が高い市場シェアを獲得し続けるためには、セラミックインフォマティクスを活用した独自のプロセス技術革新を世界に先駆けて進めることが急務である。

本事業では、ファインセラミックス部材の高度化に向けたプロセス設計や開発スピードの加速を成し遂げるため、新たなプロセスシミュレーション基盤技術の確立及びその基礎となるプロセス現象の可視化技術、構造と部材特性の相関関係の解明、信頼性評価技術の開発を強力な産学官連携のもとで実施する。本事業の成果の活用を通じて、ファインセラミックス関連企業に次世代プロセス技術を普及させ、国内ファインセラミックスの市場規模を1兆円拡大させることを目指す。そのために、先導研究および調査研究で得られた知見をもとに、産業界、業界団体を含む広範で緊密な産学官連携体制を構築し、世界初のセラミックス製造プロセスインフォマティクス技術を創出する。プロジェクトへの参画企業および参画機関は、このような技術革新を先導すると

ともに、適切なオープン・クローズ戦略により我が国ファインセラミックス産業全体の競争力強化を図る。

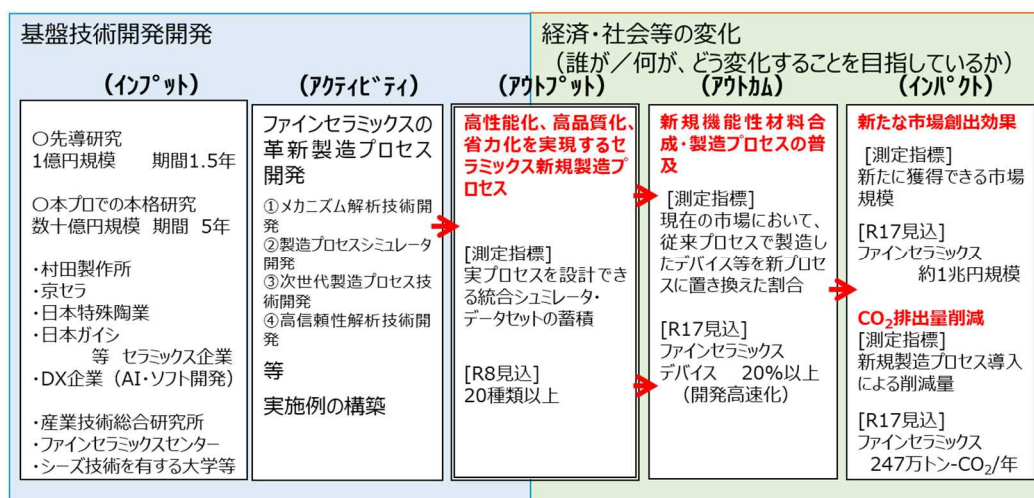
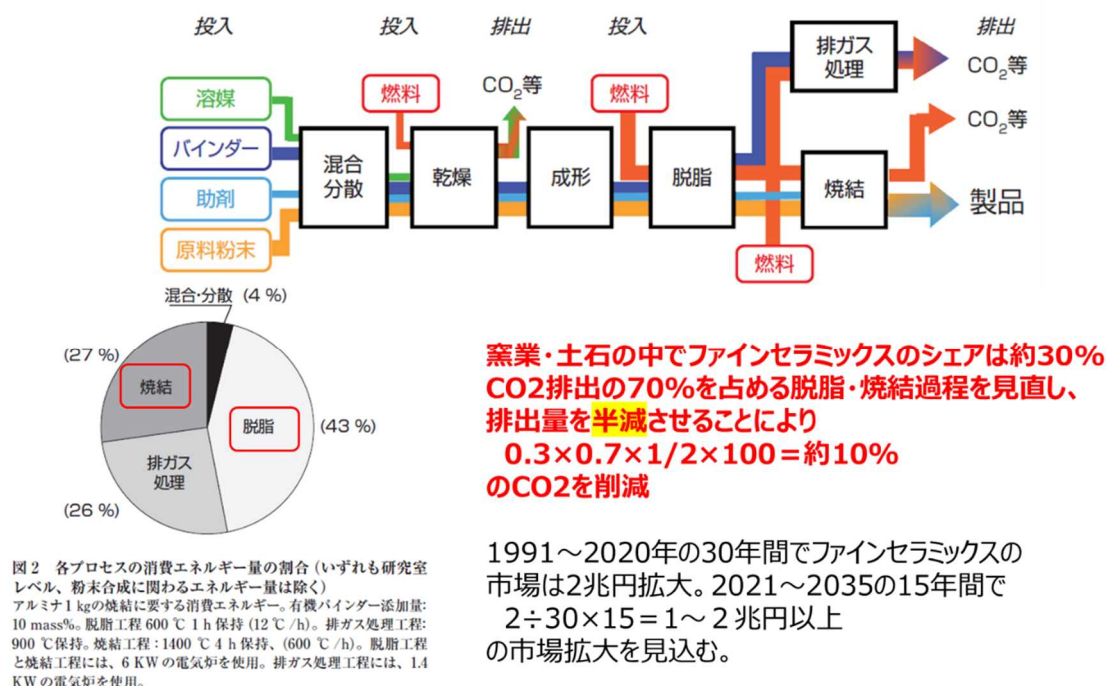


図 本事業でのアウトカムの戦略 (ロジックツリー)

また、省エネルギーに資する製造プロセスを新たに開発するには、多くの時間と人材が必要であるが、本事業で開発する計算科学支援開発手法の産業応用が進めば、開発に要する時間やエネルギーの低減と、セラミックス製造プロセスにおいて多くのエネルギーを消費する脱脂プロセスや焼成プロセス等の省エネルギー化に繋がり、セラミックス産業での二酸化炭素排出低減技術の進展に資する。



低温焼結プロセスの省エネと他の焼成プロセスとの比較

コールドシンタリング等の低温プロセスの優位性

○プロセスエネルギーの低減

BaTiO₃の原料粉末の緻密化（密度95%）に必要なエネルギーで比較した、コールドシンタリングのエネルギー低減効果

- ・古典的な大気炉での固相反応焼結の約1/100
- ・積層セラミックス等の焼結に用いられている高速焼結の約1/4

表. BaTiO₃粉末の焼結（95%緻密化）に要するエネルギー消費量の換算値

焼結法	BaTiO ₃ 粉末の焼結に要するエネルギー消費量の換算値
固相焼結	2800 kJ/g
液相焼結	2000 kJ/g
FAST焼成	1050 kJ/g
マイクロ波焼成	540 kJ/g
高速焼成	130 kJ/g
コールドシンタリングプロセス	30 kJ/g

D. S. B. Heidary et al., Journal of the European Ceramic Society, 38, 1018-1029 (2018)を基に、独自に表を作成

○低温焼結により、有機物との共焼結など、複合材料の選択肢が拡大

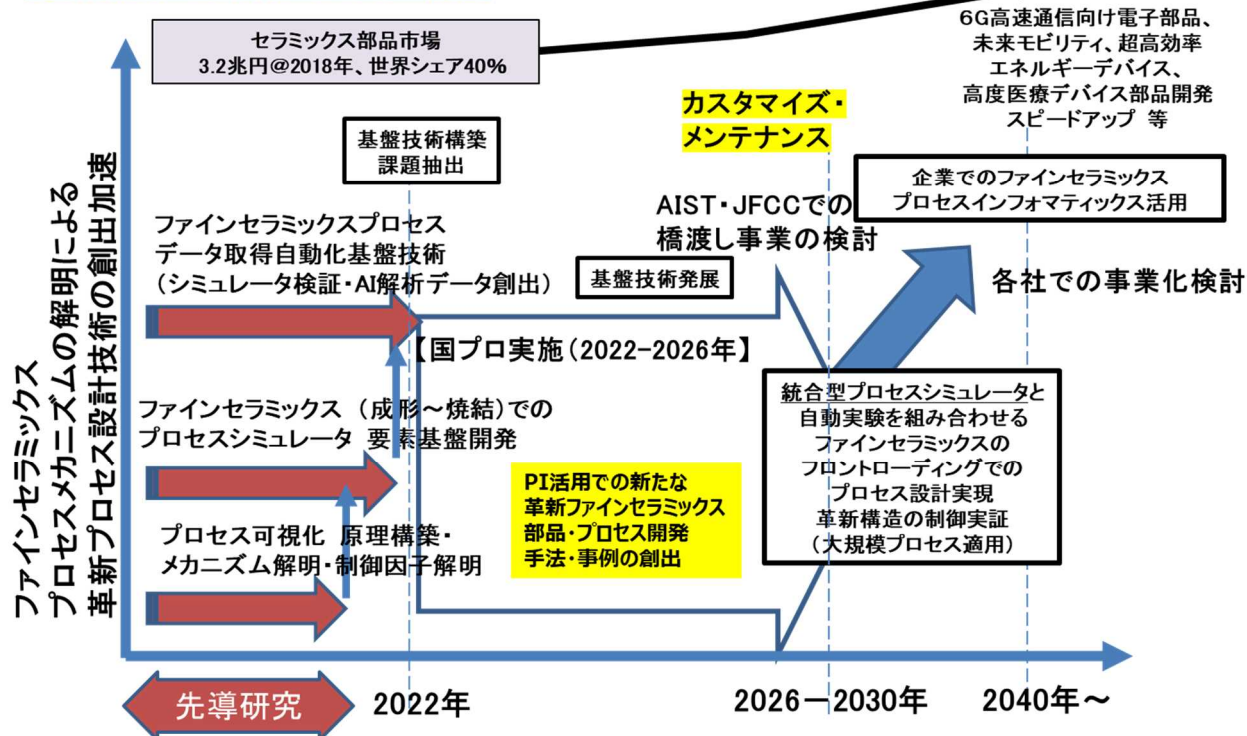
ファインセラミックス産業を含む窯業土石産業における2019年度のCO₂排出量は、およそ3,100万ton-CO₂/年。その中で、年間に310万トン程度がファインセラミックス産業からの排出量と考えられ、内約70%が電子デバイス関連として、セラミックス製造プロセスの中の焼結に關与するエネルギーは70%程度とした場合の試算。

コールドシンタリングにより、焼成温度を300℃に低温化を実現した場合、7割程度の電力削減が可能であることから、電子デバイス関連の製造低温化により、
 $3100 \times 0.1 \times 0.7 \times 0.7 = \text{約}152 \text{万ton-CO}_2/\text{年}$ （2019年度分で試算）削減の可能性がある。

セラミック電子デバイス関連は、近年、年2%程度の成長率で市場規模が拡大していることを考慮すると、2030年では約185万ton-CO₂/年の削減が期待できる。

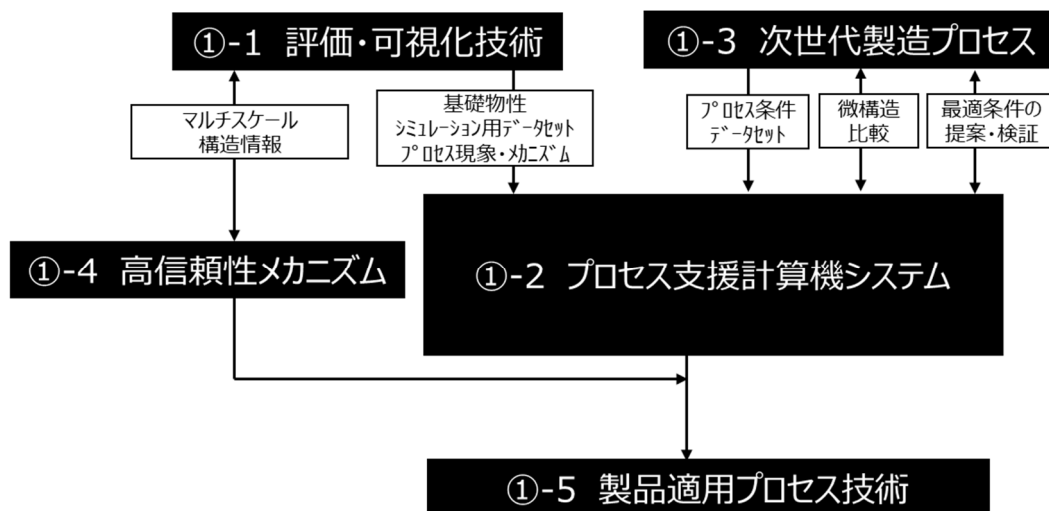
図 次世代プロセス開発による市場の拡大と二酸化炭素排出量削減への貢献

次世代ファインセラミックス製造プロセスの基盤構築 応用開発の活用シナリオ・構想



本技術開発を効率的に進めるために、事業前半では、研究開発項目① 革新的プロセス開発基盤の構築として、「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」の各項目を設けて下図のような連携のもと、集中研究拠点（集中研）において、参画機関が共同で研究開発を実施している。



図：研究開発項目①の各項目の位置づけと課題間連携

集中研は、国立研究開発法人 産業技術総合研究所と一般財団法人ファインセラミックスセンターを中核実施場所とする。

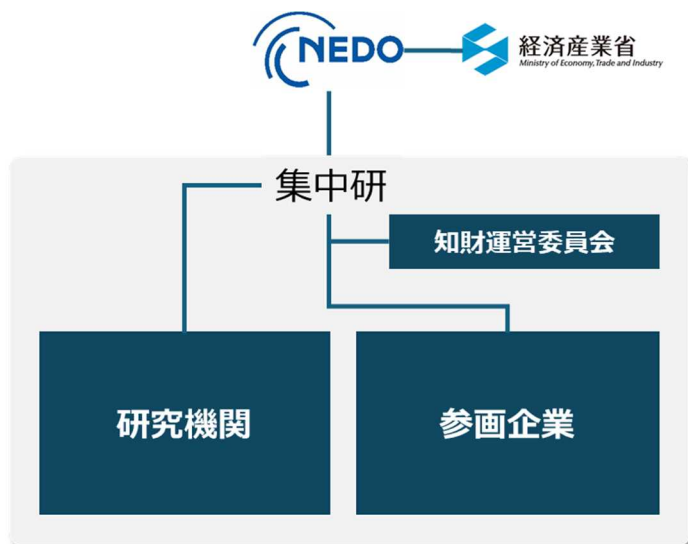
このうち、国立研究開発法人 産業技術総合研究所では、次世代ファインセラミックスの製造プロセス基盤技術として、新たな機能向上・信頼性向上と製品開発～企業での事業化を加速する高度な計算科学技術、先端プロセス計測技術、革新的なプロセス技術、並びに高信頼性向上に向けた革新的な破壊や劣化因子の解析技術を5年間で実施し、すでにスタートしているデータ駆動型コンソーシアム（2025年以降の第2期への展開）や社会実装のための事業組織を検討し、開発シミュレータやデータセット、開発計測技術等に関わる事業成果の移行による産業界での活用（有償）に向けた仕組みへ事業を展開する。さらに、基盤技術の構築状況等に応じて、ナショナルイノベーションエコシステムでの産業利用を加速するための外部企業等を活用する社会実装加速を検討することなどで、本研究開発事業終了後、ファインセラミックス企業での活用（カスタマイズやメンテナンスの有償実施）が進むよう研究の支援事業を進める予定である。

もう一方の、一般財団法人ファインセラミックスセンターでは、本プロジェクトの成果として得られるプロセスシミュレーション技術、プロセスシミュレーション用データセット構築技術、部材試作および評価技術を、プロジェクト終了後、直ちに、研究・試験評価事業として広く産業界に提供することを計画しており、企業受託研究、共同研究、試験評価などを通じてファインセラミックス産業を含む部材産業分野の発展に貢献する。

また、全ての参画機関は、本事業における基盤技術や応用技術で得られる成果に関して、内外との技術動向や市場動向についての調査・技術収集に努め、NEDO 担当部等との密接な連携を通じてプロジェクト終了後の社会実装システムの構築を進める。

1.3. 知的財産・標準化戦略

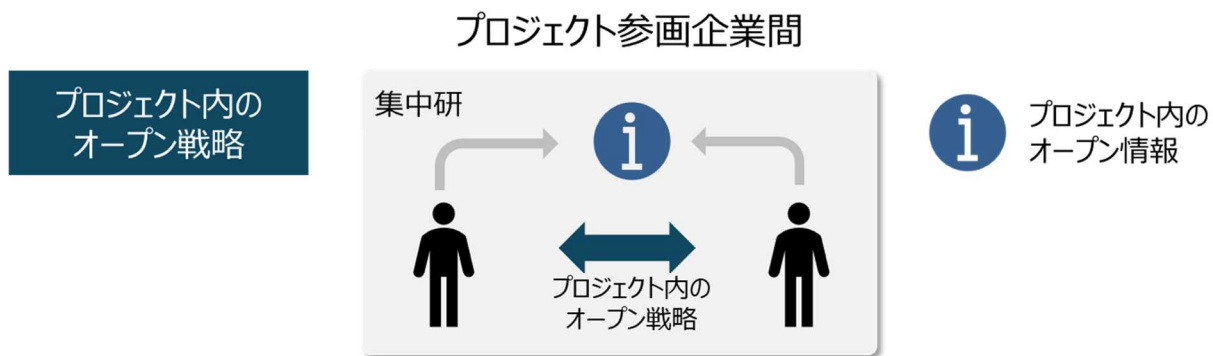
本事業では、研究機関を拠点とする集中研方式で研究開発を進め、最先端技術を取り入れた共通基盤技術を創出し、世界トップレベルの技術構築を目指す。集中研に知財運営委員会を設置し、オープン&クローズ戦略を策定し、関係機関での知財合意を踏まえて戦略を実施する。なお、当事業に関して、工業所有権情報・研修館からの知的財産プロデューサー派遣事業を通じてPD派遣を要請し、知財等に関しての支援を受けている。



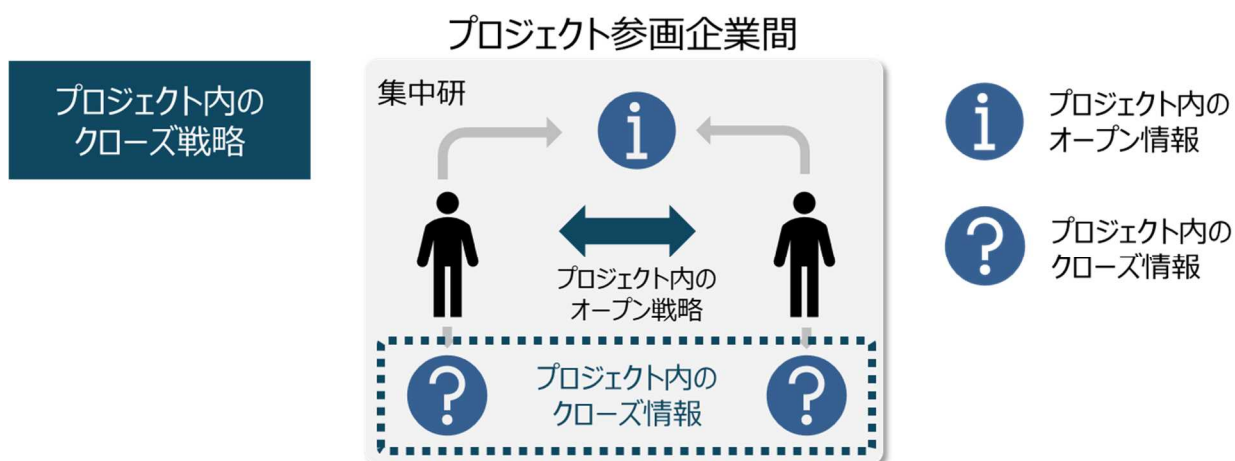
プロジェクト開始前の知的財産権等に関する検討

- ①プロジェクト開始前に、参画機関にて「知財の取扱いに関する合意書」を策定。
- ②合意書では、知財運営委員会や知財の帰属、秘密の保持等、プロジェクトの出口戦略において重要となる知財ルールを整備。
- ③オープン&クローズ戦略のスキームを基本計画に明文化。

基盤研究と応用研究を事業項目で分けて実施



- オープン開発では企業間の垣根を外す。
- 皆で共有できる研究テーマ（本質的なモデル構造・シミュレータ技術・革新プロセス）を扱う。
- 各社が一体となって分担・協力して課題解決に取り組む。
- 共有成果として、集中研の成果は、企業間も含む共同発表（論文発表前に関係機関へ共有）。
- 企業は将来の事業に関わる技術を開発（ノウハウを強化）
- 大学・国研研究者は知識拡充、新規テーマ創出



- 企業の事業領域へは踏み込まない。事業に関わることはプロジェクト外で議論（二面性・割り切り）。
- プロジェクト外（後）産総研が個別にサポート・メンテナンスを実施
- 成果発表は企業と相談。事業に関わる成果は企業間で調整、企業が知財化

＜プロジェクト内＞

・集中研究体制（研究機関＜委託、再委託＞・企業）での議論に必要な新たに創出した手法・創出データおよび持ち込まれたデータは、集中研究体制内ではオープン（共有）～知財合意の範囲内。

・ NEDO 事業外において登録・発表された各機関での技術＜バックグラウンド IP については、各機関より書面＜判断となるエビデンスを含め＞で知財委員会へ提出。～NEDO 事業で取り扱うプロセスシミュレータに関しては、コアとなるシミュレーション手法等、持ち込まれた根幹プログラム類は NEDO 事業前に作成されたものと理解＜NEDO 事業で機関間のアイデアで取り込まれ改良部分については取り扱いを統合シミュレータ開発終了後、整理し、著作権を尊重し、協議＞。

・ NEDO 事業内での開発成果については、NEDO 委託事業期間内、参画機関は活用可能。
 ・ 集中研の全機関に共有され、議論を進めた事業後創出された統合型プロセスシミュレータでのインプットとアウトプットでの計算データ（相関情報）成果（再委託先を含む）をプロジェクト成果とする。

＜プロジェクト外＞

・ モデル材料や検証プロセスとして、共有されたデータでも成果創出に企業が関わり、企業での事業創出に関わる成果（国益に関わる）は、プロジェクト外への持ち出しを行わない（クローズ）。具体的には、企業からの持ち込みデータやアイデア等が紐づいている新たな手法や新規創出データについては外部発表を行わない。

・ 企業からの持ち込みデータやアイデア等が紐づいていない検証段階での共有データについては、参画機関の意見を集約し＜産業利用ではなく学術的な貢献で重要なもの＞判断。

＜その他＞

- ・ オープン可能な情報・クローズ情報（および協議が必要な情報）の明文化・整理
- ・ プロジェクト終了後の共有プロセスシミュレータの企業での利用法の明文化
- ・ 個社の事業のみに関わるクローズ情報に関しては、助成事業で、企業が成果管理を行う。

PJ外 オープン	・公開文献等をもとにしたシミュレータでのインプットデータ、取得パラメータ、計算結果、公開版の報告書 ・発表研究機関でPJ前に所有していた実験データを用いたインプットデータと計算データ（BIP登録） （国外での発表は原則計算条件と結果が紐づかないもの）	
PJ内 オープン	・コンパイルされた開発プログラム（無償で機関共有） ・集中研内で共通基盤の議論で決定した、事業期間内で取得したモデル実験での取得パラメータ・計算条件・計算データ（インプット条件・アウトプット構造が紐づくもの）、計測データ（検証データ） ・発表の必要性を集中研で協議する	・企業で事業期間内に取得した検証用データ、計算データ
PJ外 クローズ	・開発プログラムソースコード（秘匿：開発機関で著作権、技術移転は著作権を有する機関と相談） ・集中研で企業と議論したアイデア、持ち込まれた企業の事業で用いている条件で実施したモデル実験データや取得パラメータ、計算条件、計算データ（インプット条件・アウトプット構造が紐づくもの）。計測データ検証データ。	・企業で事業期間前（未発表）、事業期間内に取得した検証用データ ・事業活用が想定される事業開始後取得した計算データ、検証データ（実験・計測）
	非競争領域	競争領域につながるもの

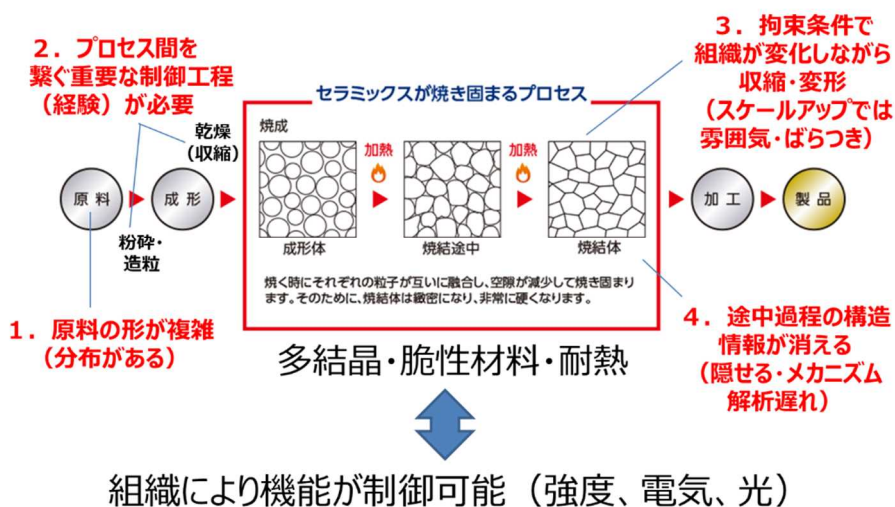
*** 取得計算データ、検証データ（実験・計測）は計算を実施した機関が管理
 PJ内オープン情報は、原則、共用するが、共有はしない データマネジメント**

2. 目標及び達成状況

2.1. アウトカム目標及び達成見込み

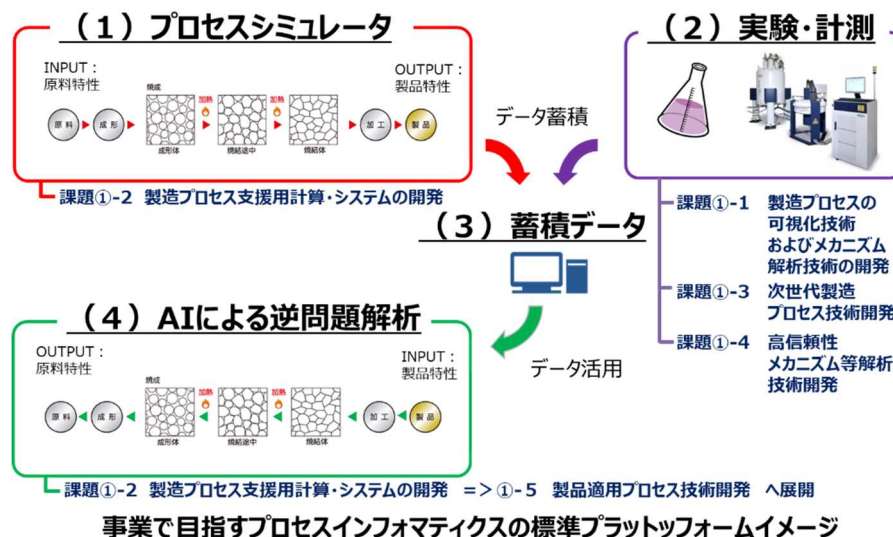
セラミックスの特性向上では、下記のような製造工程での組織制御が重要となる。本事業のアウトカム目標となっている経済効果や省エネ化を実現するために、従来は、経験と勘を含めた製造技術に関するノウハウを蓄積し、様々な試作や計測を繰り返して、製品製造技術を構築してきた。本事業では計算科学手法を新たに導入し、開発期間の短縮や効率化のための最短アプローチを提示する新たなプラットフォームの構築を進める。

ファインセラミックス（工業用セラミックス素材）



出典) 京セラ資料より

ファインセラミックスの製造プロセスデータの取得では、種々のプロセス条件の下で、成形から焼成に至る過程での構造変化を一貫してデータ化し蓄積する。事業前半では、シミュレーションを活用したデータの蓄積に重点を置き、各プロセスにおける成形～焼成の組織構造を再現／予測できるセラミックス製造プロセスシミュレータの開発と動作検証を進めた（下図(1)(2)）。また、集中研におけるシミュレーション結果を参画機関間で共有して検討を進め、さらには各参画企業において秘匿データを用いたシミュレーションが実施できるよう、開発シミュレータの共有とチュートリアルを段階的に進めた。各シミュレータの高度化も継続して進めており、取り扱える材料や実プロセスも拡大している。アウトカム目標として掲げたプロセスインフォマティクスプラットフォーム創りに向けて進展しており、事業後半では下図(3)(4)に記載した逆問題解析のためのデータ蓄積、逆問題解析の試行を重点的に推進する。



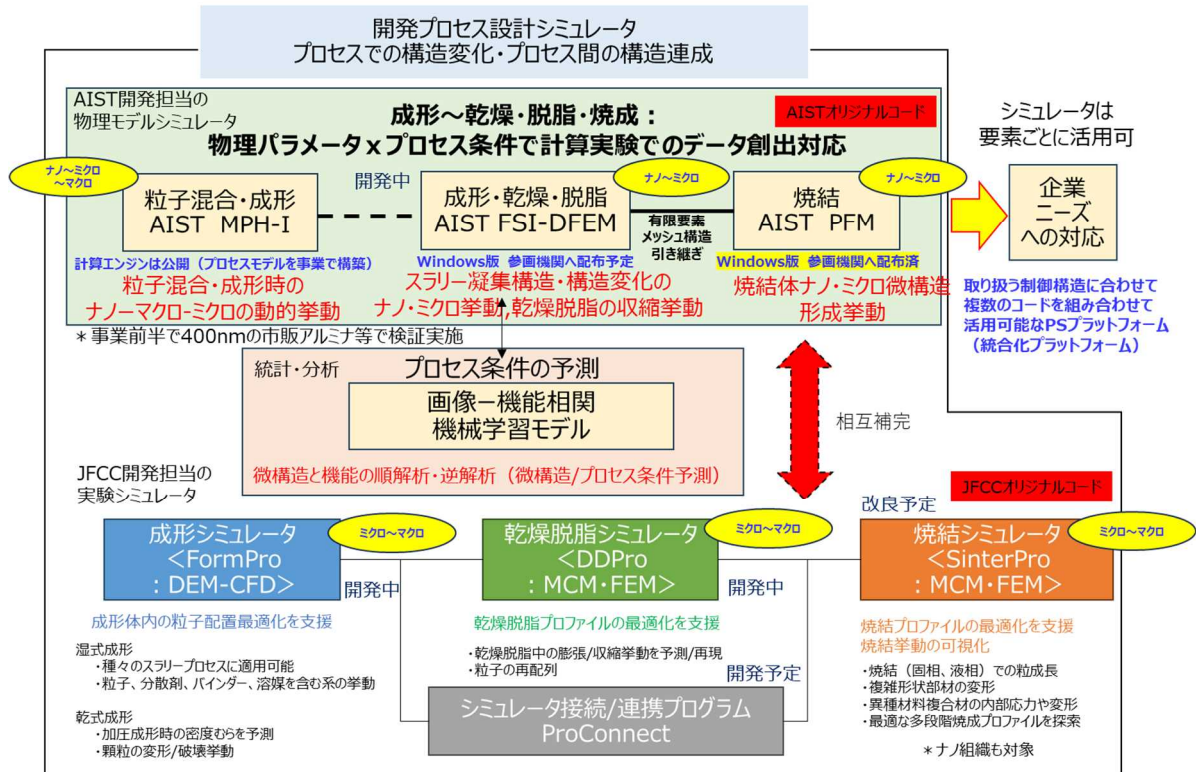
2.2. アウトプット目標及び達成状況

アウトプット目標として、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し、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ことを掲げた。具体的には、開発した基盤技術の活用により、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、このプロセスを適用した新規部品を試作する。

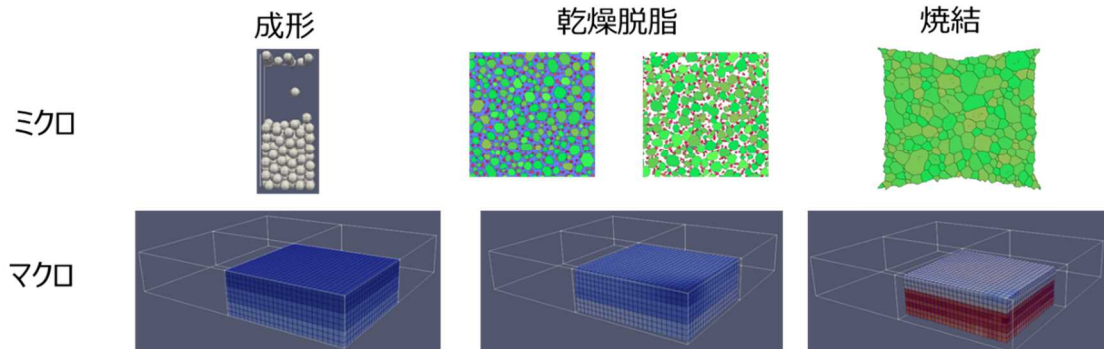
プロセスシミュレータの開発では、スラリーを用いて作製される積層体の製造プロセス、比較的大きな粒子を含むスラリーを用いた成形プロセス等を共通開発モデル（モデル材料、モデルプロセス）として課題を設定し、原料・スラリー合成プロセス、成形プロセス、乾燥脱脂プロセス、焼結プロセスに対応するシミュレータを開発した。事業後半では、実プロセスへの展開を想定して、各社独自のプロセスに対応可能な拡張性を有するシミュレータへと高度化させ、シミュレータによる最適条件の提案と、その提案に基づく試作を進めることとしているが、事業前半での取り組みは概ね計画通り進捗し、事業後半への準備が進んだ。

なお、新規プロセス技術20種については、事業前半での成果を考慮した各社の活用計画を取りまとめ、総計で26種のプロセス技術へと進展する見込みであり、アウトプット目標を達成できる見込みである。

次世代ファインセラミックス事業 開発統合型シミュレータの概要



○統合型シミュレータの動作テスト開始



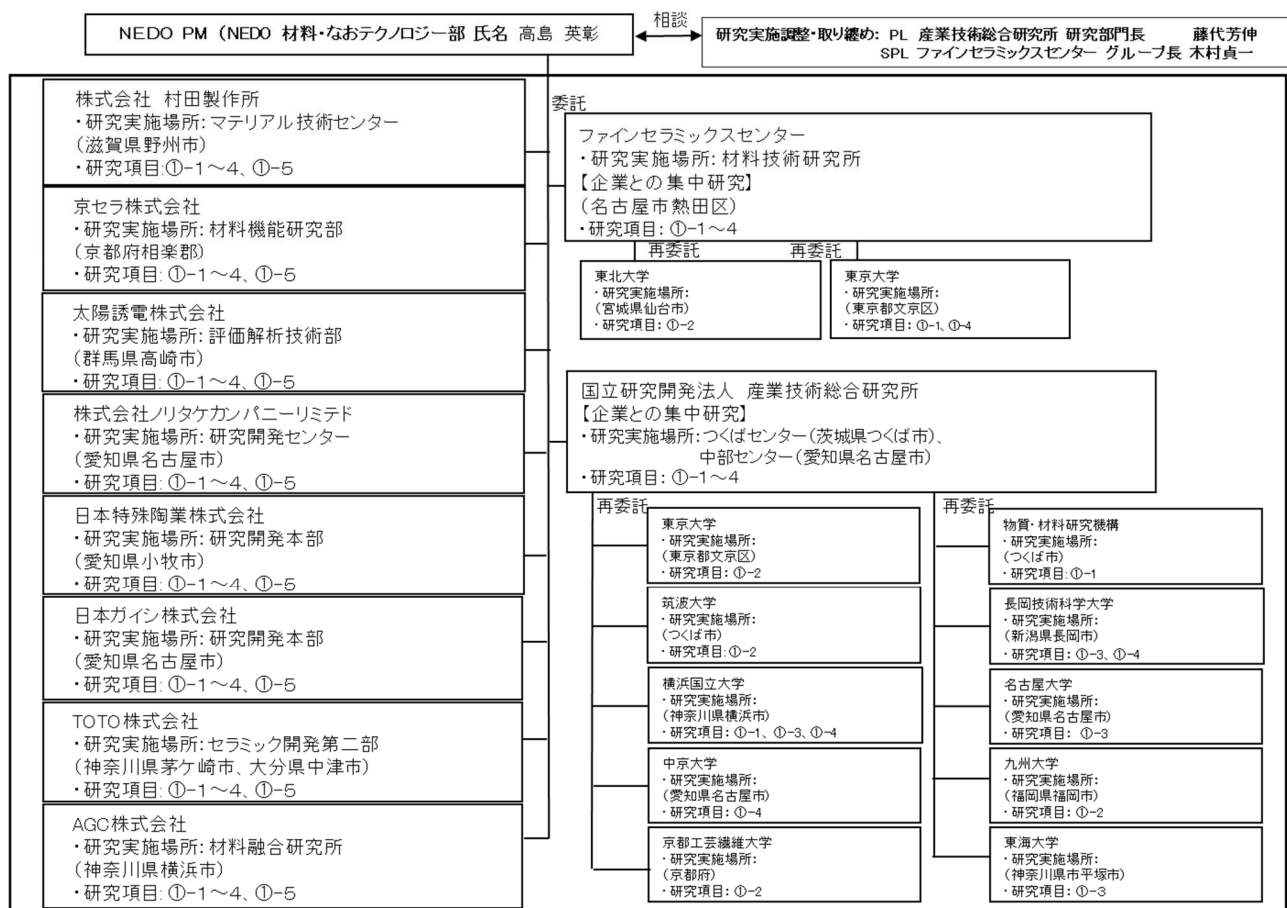
3. マネジメント

3.1. 実施体制

本事業では、進行全体の企画管理やプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させるために、プロジェクトマネージャー（PMgr）のもと、各実施者の研究開発ポテンシャルを最大限に活用し、効率的に研究開発を推進する観点から、プロジェクトリーダー（PL）およびサブプロジェクトリーダー（SPL）を指名し、産総研に事務局機能を設置して進めている。

本事業全体のPMとしてNEDO 材料・ナノテクノロジー部の高島 英彰を任命している。またPLとして産業技術総合研究 藤代芳伸 研究部門長、SPLとしてファインセラミックスセンター 木村禎一 グループ長を指名している。また、課題①—1～4については課題項目単位でグルーピングし、課題間を繋げる取りまとめ担当主査を指名し実施している。

「ファインセラミックスのプロセスインフォマティクス基盤構築」実施体制図



実施課題の概要と課題実施体制

2022-2023年度

NEDO PL・SPL 事務局	課題項目	課題取り組み
	課題 ①－１ 製造プロセスの可視化技術および メカニズム解析技術の開発 (先端プロセス計測技術等)	産総研 首席研究員 岡崎俊也
	課題 ①－２ 製造プロセス支援用計算・ システムの開発 (プロセスシミュレーション開発 等)	産総研 研究チームリーダー 松本純一 [物理シミュレータ] ファインセラミックスセンター グループ長 木村禎一 [実験シミュレータ]
	課題 ①－３ 次世代製造プロセス技術開発 (低温焼成プロセス・精密積層・異種構造制御プロセス等)	産総研 研究グループ長 A) 陶 究 [原料合成] ファインセラミックスセンター グループ長 C) 木村貞一 [固相、助剤、異種材料、バインダ] 産総研 上級主任研究員 B) 近藤直樹 [固液、低温焼結]
	課題 ①－４ 高信頼性メカニズム等解析技術の 開発 (迅速評価・画像解析等故障要因の解析技術等)	産総研 研究グループ長 福島学

研究開発の運営管理として、NEDO は研究開発全体の管理及び執行に責任を負い、研究開発の進歩のほか、外部環境の変化を適切に把握するために、2022 年度は調査研究事業を実施し、必要な措置を講じた。また運営管理として、実施での集中研技術会議への参加や、外部委員を含めた推進委員会を開催し、運営管理を効果的かつ効率的に進めている。

各課題について集中研の研究員および企業の研究員が共同で研究開発を進めてきた。

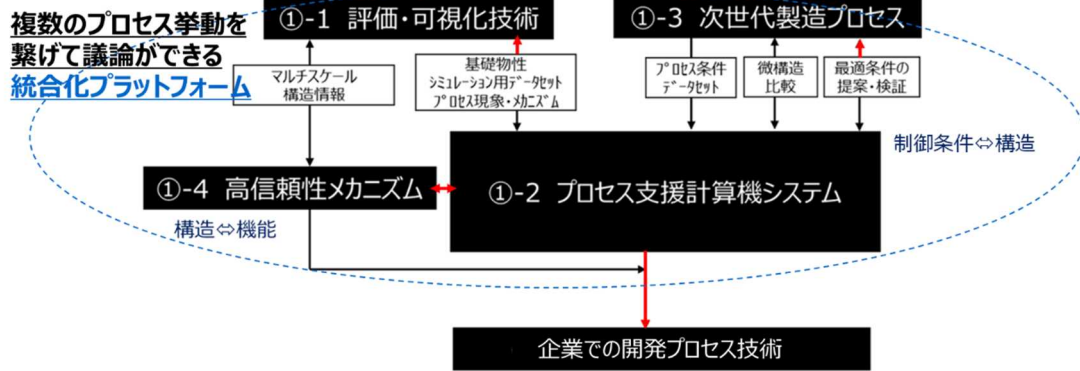
3.2. 受益者負担の考え方

事業前半の研究開発項目①は協調領域での共通基盤開発を進めるため委託事業として実施した。また事業後半に並行して開始する研究開発項目②は、企業各社による実用化研究であり、受益者負担の観点から助成事業として実施する。

3.3. 研究開発計画

実施計画に基づき、課題①－１～５で複数のプロセス挙動を繋げる研究計画を下表の線表の計画に沿って進めた。

次世代ファインセラミックス製造プロセス基盤構築・応用開発での各課題での連携（提案時のスキーム）



事業前半：PS共通基盤技術のインプット&検証データや理論モデル、計算コード等の開発・構築・PJ内共有
 => 事業後半：開発PS技術を活用しプロセスメカニズム解析高度化・学習モデル構築・
 次世代プロセス開発へ活用検証：赤矢印

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。

実施計画とマイルストーン

	2022	2023	2024	2025	2026
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	原料評価・可視化技術・プロセス現象の可視化技術開発 シミュレーション用データセット構築		プロセスメカニズムの解明・可視化高度化		
①-2 製造プロセス支援用計算機システムの開発	成形、乾燥脱脂、焼結シミュレーション技術の開発 物理手法を用いたファインセラミックスプロセスインフォーマティクス基盤技術の創出		プロセスシミュレータの共通基盤高度化・プロセス条件探索		
①-3 次世代製造プロセス技術開発	微小原料粒子製造プロセスの革新的高度化技術 成形、乾燥脱脂および焼結プロセスのプロセスデータ構築		革新的プロセス技術開発		
①-4 高信頼性メカニズム等解析技術の開発	部材特性を支配するキラー欠陥の特定および可視化技術 セラミックスの加速劣化試験方法の開発と破壊シミュレーションの基盤技術開発		構造-特性インフォーマティクス解析技術の高度化		
①-5 製品適用に向けたプロセス技術の開発(5A)~(5H)	モデル実験等でのデータ取得 プロセスシミュレーション適応性検討・課題抽出		課題② 開発PS基盤技術等を活用する 企業によるプロセス技術開発		

4. 目標及び達成状況の詳細

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、企業における実用プロセスへと展開することを目標とし、以下の課題①～⑤を設定し実施した。

研究開発項目①～④は共通基盤技術開発であり、参画企業の実用化研究(研究開発項目②)の実施に必要な基盤技術のうち、各課題に共通する技術課題を抽出して、集中研において研究開発を実施する。産総研つくばセンターでは、主として材料/原料データセットの構築と微構造データセットの構築、可視化技術開発、シミュレーション技術開発、微粒子製造プロセスの開発を実施し、産総研中部センターでは、主としてプロセスデータセットの構築と高信頼性メカニズムの解明、ファインセラミックスセンターでは主としてプロセスデータセットの構築とシミュレーション技術開発、信頼性評価を実施した。また、微粒子研究開発項目①～⑤では、共通基盤研究と実用化研究をシームレスにつなぐため、上記の共通基盤技術の中から各参画企業の製造プロセスに対応する要素技術をピックアップし、それぞれの要素技術について実用化研究の開始に必要な技術水準を達成するための取り組みを進めた。

4.1. 研究開発項目：①革新的プロセス開発基盤の構築

・4.1.1. 研究開発項目：①～① 革新的プロセス開発基盤の構築/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（産業技術総合研究所、ファインセラミックスセンター、村田製作所、京セラ、太陽誘電、AGC、日本特殊陶業、日本ガイシ、TOTO、ノリタケカンパニー、再委託：東京大学、横浜国立大学、物質・材料研究機構）

ファインセラミックス部材の製造プロセスでは、原料セラミックス粒子のみならず、バインダーや分散剤などの有機物、分散媒などが原料として用いられ、各要素プロセス中にそれぞれが複雑に変化しながら最終部材の微構造が形成される。そこで本研究開発項目では、各要素プロセス前後の微構造変化と、要素プロセス中に微構造が形成されていく過程の可視化によって、プロセスシミュレーションの構築に必要な微構造データセットおよび微構造形成メカニズムの解明に取り組んだ。

表1 2種のアルミナスラリー（粒径0.4 μm 、0.1 μm ）をもちいてシミュレーションに必要なパラメータを測定

	スラリー	測定法	状況
①	粒径サイズ・分布	・遠心沈降 ・SEM ・誘電率顕微鏡/液中SEM	○ ○ ○
②	粒径形状・分布	・SEM ・誘電率顕微鏡/液中SEM	○ ○
③	密度	密度計	○
④	粘度・レオロジー特性	レオメーター	○
⑤	濡れ性(接触角)	接触角計	○
⑥	表面張力	ペンダントドロップ法	○
⑦	比熱	ホットディスク法	○
⑧	熱伝導率	ホットディスク法	○
⑨	分解物成分	熱分解GC-MS/EGA-MS	○
⑩	蒸発熱・反応熱	示差走査熱量(DSC)	○
⑪	ヤング率・ポアソン比	引張試験	○

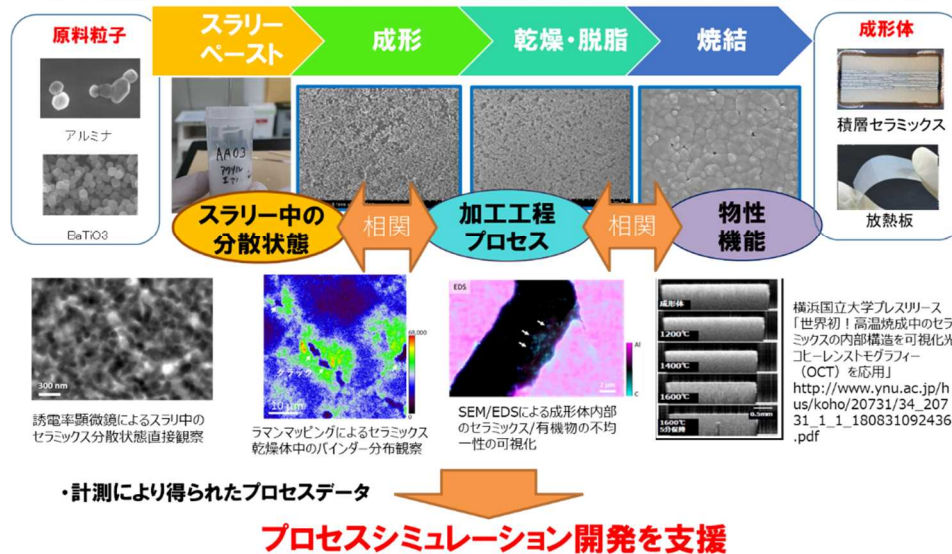
表2 相互作用可視化技術の適用範囲を検討

	状況・課題
熱分解GC-MS 発生ガス分析-質量分析 (EGA-MS)	バインダーの組成分析可能 脱脂過程における分解物成分分析法として有用
顕微IR	スラリーおよび成形体における有機物の空間分布を約10 μm の空間分解能で評価可能
液体/固体NMR	有機成分からの信号検出に成功。原理的に高感度化可能
誘電率顕微鏡/液中SEM	スラリー中のセラミックス粒子を可視化 バインダー種による分散状態の違いを観察
顕微ラマンイメージ	スラリーおよび成形体における有機物の空間分布を約0.1 μm の空間分解能で評価可能
高分解SEM/EDS	スラリーおよび成形体における有機物の空間分布を約0.01 μm の空間分解能で評価可能

・2種のアルミナ粒子（粒径0.4 μm 、0.1 μm ）からなる成形体の内部構造をSEM、ラマンマッピングなどにより取得

①-1 製造プロセスの可視化技術およびメカニズム解析技術の開発

ファインセラミックスの各種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。



その中で、粒径 100nm～数 μm オーダーのセラミックス粒子に対して、製造プロセス中で形成される 100 nm オーダー以下の各種欠陥や微構造変化を可視化する技術を開発し、さらに、10 nm オーダーのセラミックス粒子内の欠陥状態に関する評価手法について、分光学的手法や核磁気共鳴法等の計測を実施した。また、粒径 100nm～数 μm オーダーのセラミックス粒子に対して、10 nm オーダーのセラミックス粒子を含むスラリー中の分散状態可視化技術を開発した。さらに、10 nm オーダーのセラミックス粒子内の欠陥状態に関する評価手法について分光学的手法や核磁気共鳴法等の検討を進め、評価技術の信頼性確認を経て、データを収集した（達成率 100%）。

・研究の進捗状況

- ①アルミナ10種類のモデル系について、各種物性パラメータをほぼ取得済み。さらに、チタン酸バリウム4種類のモデル系についての測定を開始
- ②誘電率顕微鏡によって、スラリー中の粒径20nmチタン酸バリウム粒子の観察に成功
- ③誘電率顕微鏡中で元素分析をおこなうことで、スラリー中のアルミナ粒子、助剤、バインダーの分散状態を可視化
- ④遠心沈降法によってセラミックス・バインダーの相互作用を評価
高感度固体NMRによって、BTの結晶構造変化（欠陥）評価できる可能性を確認

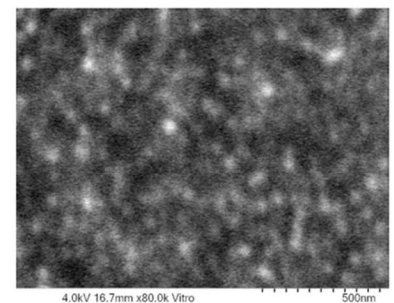


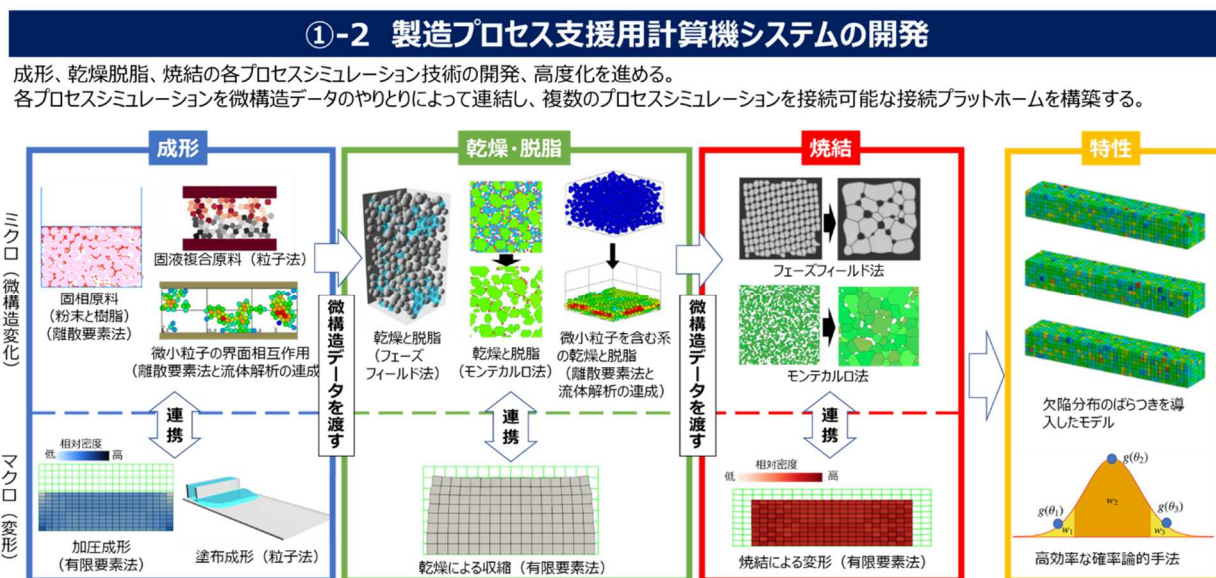
図 .スラリー中のチタン酸バリウム（粒径約20 nm）の誘電率顕微鏡像

また、ファインセラミックスセンターが開発している実験シミュレータでは、比較的簡易な実験を通じてシミュレータの入力パラメータを取得する必要があるが、成形シミュレータ、乾燥脱脂シミュレータ、焼結シミュレータのそれぞれについて、パラメータ取得実験を繰り返し、標準的なパラメータ取得プロトコルを策定した。（達成率 100%）

・4. 1. 2. 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（産業技術総合研究所、ファインセラミックスセンター、村田製作所、京セラ、太陽誘電、AGC、日本特殊陶業、日本ガイシ、TOTO、リタケカンパニー、再委託：京都工芸繊維大学、東北大学、東京大学、筑波大学、九州大学）

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では、プロセス条件－微構造－特性からなるデータセットを蓄積したプロセスデータベースを構築し、多数のデータ間の相関から制御すべきプロセス条件を見いだすことによって、非経験的なプロセス条件最適化が可能となる。しかし、ファインセラミックスの製造プロセスは一般に長時間を要するため、プロセス条件を網羅的に変化させた実験を通じてデータベースを構築することは現実的ではない。そこで、本研究開発項目では、研究開発項目①-1で実施するシミュレーション用データセットの実験的取得と、①-3で実施する実プロセスによる微構造データセットの取得実験と連携し、セラミックス組織構造解析プラズマ FIB での取得構造データなども活用することで、実験で得られたプロセス条件－微構造データを、プロセスシミュレーションで補完するデータ同化型のデータベース構築手法の開発を目的として、プロセスシミュレーション技術開発を進める。特に、分散型プロセスシミュレーション・プロセスインフォマティクス計算システムや先駆的シミュレーション技術を積極的に導入し、シミュレーション技術の高度化を図る。また、プロセス全体を取り扱うことができる「統合型」プロセスシミュレーションへの展開を企図して、各プロセスシミュレーションを微構造データのやりとりによって連結し、複数のプロセスシミュレーションを接続可能な接続を構築する。

ファインセラミックス製造プロセスは、成形、乾燥脱脂、焼結の各プロセスから構成され、各プロセスで進行する物理的・化学的現象は大きく異なる。また、各プロセスの手法は多岐にわたり、例えば成形プロセスだけでも、加圧成形、テープ成形、鋳込成形、押出成形、射出成形など、種々の手法がある。その一方で、成形時の粒子の移動、液相－固相混合系における液相流と固相粒子の変位など、複数の手法に共通する素過程があり、このような共通素過程のプロセスシミュレーション技術と、各手法に特有の特異な素過程のシミュレーション技術を組み合わせることによって、効率的なプロセスシミュレーション技術開発が進められる。このため、本研究開発項目では、研究期間前半(2年程度)で、共通素過程を含むモデルプロセスを選定して基盤となるシミュレーション技術を開発し、研究期間後半で、各手法の特異性を考慮した個別プロセスシミュレーションへの展開を進めている。



研究開発項目①-1で実施する可視化技術によって明らかになる種々のプロセス現象を再現可能なシミュレーションの要素基盤技術を開発し、項目①-3で実施する実験結果との比較を通じて、シミュレーションのさらなる高精度化のための課題をモデル材料での動作確認等により明らかにした。500 nm程度の粒子を原料として用いるプロセスについて、成形・乾燥脱脂シミュレーショ

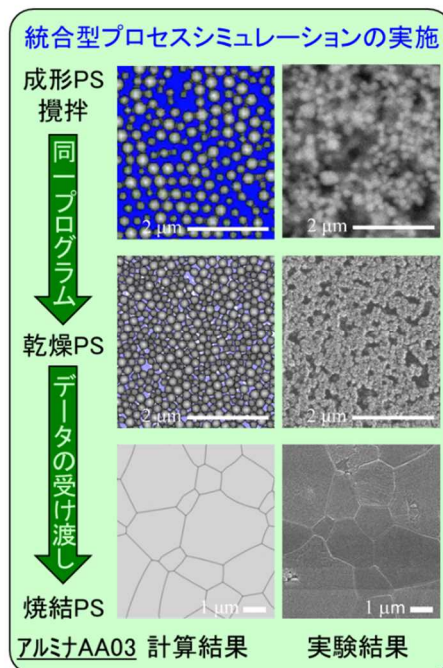
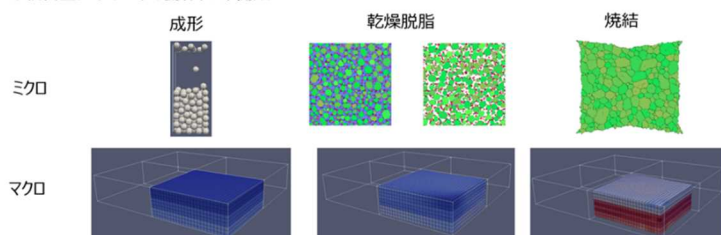
ンでは250 nm(粒子サイズの1/2)の空隙、焼結シミュレーションでは、125 nm(粒子サイズの1/4)の空隙を計算実験で、再現・予測可能とした。開発する各プロセスシミュレーションの目標精度は原料粒子のサイズを基準に策定し、成形・乾燥脱脂シミュレーションにおいては原料粒子の「抜け」や「凝集」、焼結においてはこれらの「抜け」や「凝集」に起因する欠陥が再現・予測可能なシミュレータを開発した。具体的には、200 nmの粒子を原料として用いるプロセスについて、成形・乾燥脱脂シミュレーションでは100 nm(粒子サイズの1/2)の空隙、焼結シミュレーションでは、50 nm(粒子サイズの1/4)の空隙を再現・予測可能とした(達成率100%)。

・研究の進捗状況

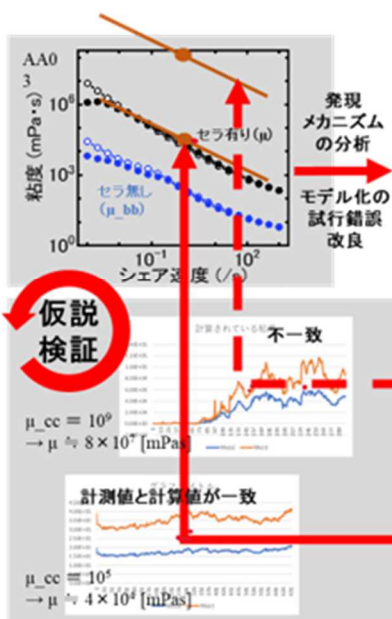
【統合型PSの実施と計算結果と実験結果の比較】

- ・研究課題①-1,3,4と連携し、実際(アルミナAA03)の実験データを反映(使用)したシート成形の統合型プロセスシミュレーション(成形、乾燥、焼結の一連の統合型PS)を実施し、実験との比較結果を9月15日に開催された集中研会議で発表した。
- ・成形と乾燥のPSは同一のプログラム、焼結PSは乾燥PSから得られたデータ(粒子の位置や形状情報)の受け渡しにより、一連の統合型PSを実現したシミュレータとなっている。
- ・フェーズフィールド法による焼結PSはWindows版を参画機関に配布し、計算実験のチュートリアルを実施した。

○統合型シミュレータの動作テスト開始



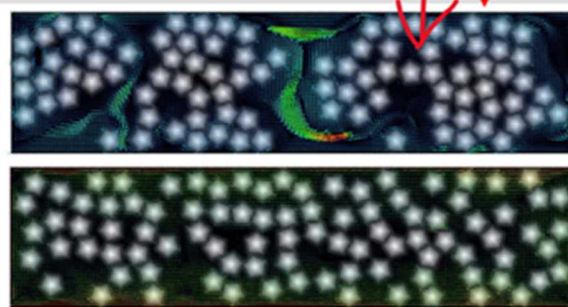
1. スラリー粘度の実験計測値



2. 実験値を分析し、空間分布を有する三つの粘度(μ)でスラリーをモデル化



3. 粘度評価PSによるパラメータ同定計算(μ_{bc} や μ_{cc})



開発プロセスシミュレータの特徴

2023年度末

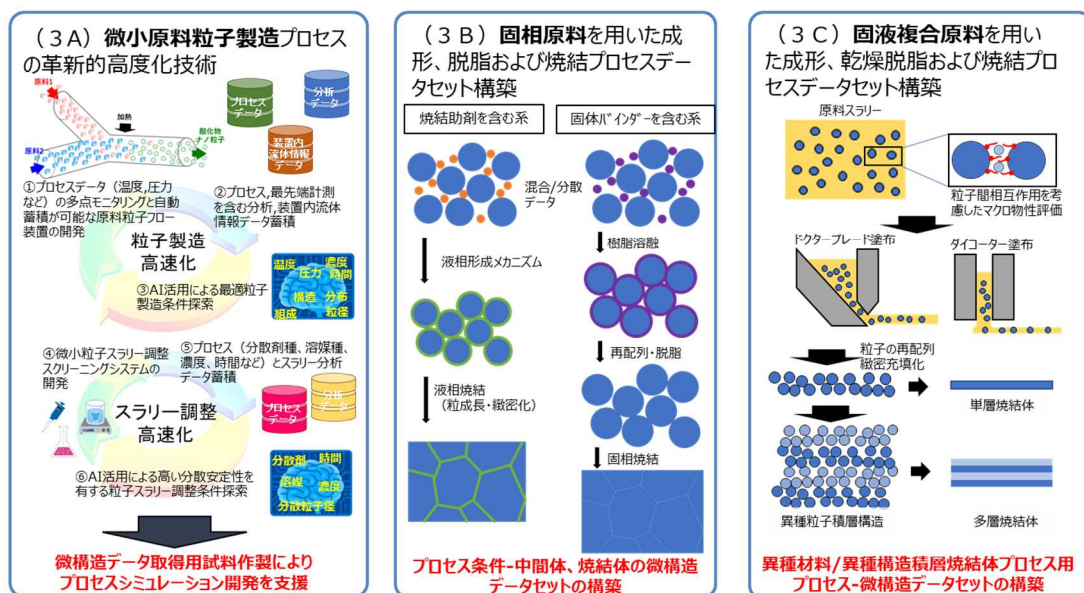
事業開発PS コード	ペースト 構造 (凝集構造)	成形構造 (湿式：バインダ・溶媒共存)				乾燥脱脂 構造		焼結構造	
使用 目的例	外力=> ペーストナノ ミクロ構造変化 (粒子複雑形 状・粒度分布)	外力=> ナノミクロ 成形挙動 (粒子複雑形状・ 粒度分布)	外力=> ナノミクロ 成形挙動 (粒子単一 形状)	外力=> ミクロマクロ 複雑成形挙動 (粒子単一形状・ 実プロセスに近い スケール検証)	温度・時間=> 有機層脱脂・収 縮 (粒子複雑 形状・粒度分 布)	温度・時間=> 有機層脱脂・収 縮 (粒子単一形 状)	温度・時間=> 焼結・収縮ナノ ミクロ構造変化挙 動	温度・時間=> 焼結・収縮ナノミ クロ構造変化挙動 (界面構造・空孔化を 精密計算・メカニ ズム考慮)	温度・時間=> 焼結・収縮 マクロ構造変化挙 動
MPH-I (粒子法)				○ 高粘度・粒子の密着 回転・複雑大規模変形					
FEM (有限要素法)									○ 実験より 実形/パラメータ等抽出 応力・変形
MC (モンテカルロ法)							○ 実験より 初期/パラメータ抽出・ 液相焼結対応		
PFM (フェーズフィールド法)								○ 任意の組織形状・分布で、 物理定数を使用し、任意 の設定条件を入力し計算 実験が可能 (すべり・密着 速度・焼結スケールの変化 異種材料定数、拡散係 数比率等も任意に設定)	
DEM (離散化要素法)			○ 相互作用力 未考慮			○ 相互作用力 未考慮			
DFEM (拡張有限要素法)	○ 相互作用力 考慮・ 計算量大	○ 相互作用力 考慮・ 計算量大				○ 相互作用力 考慮・ 計算量大			
構造データ フォーマット	各シミュレータでの計算構造出力を計算コードが異なっても汎用のCADフォーマット (microAVSなど) 等へ変換し、2D・3Dで一つのソフトウェア上でつなげて扱えるように工夫するなどを検討等								

4. 1. 3. 研究開発項目①-3 次世代製造プロセス技術開発 (産業技術総合研究所、ファインセラミックスセンター、村田製作所、京セラ、太陽誘電、AGC、日本特殊陶業、日本ガイシ、TOTO、ノリタケカンパニー、再委託:名古屋大学、横浜国立大学、長岡技術科学大学、東海大学)

研究開発項目①-1 で開発したプロセス可視化技術・評価技術によって得られたデータを、研究開発項目①-2 のシミュレーション技術・インフォマティクス技術に活用し、さらに、本研究開発項目で得られた実際の実験結果との比較検証を経て、新たなプロセス条件最適化技術あるいは革新的製造プロセスへと展開を目指した。そのために、正確なプロセス条件でのプロセス実験を通じて再現性のあるプロセス微構造データ取得用試料を作製することと、シミュレーション/インフォマティクスで提案された最適プロセス条件下での実験によって、新たなプロセス最適化技術としてのシミュレーション/インフォマティクスの有用性を明らかにするとともに、革新的製造プロセス技術を見いだすことを行った。なお、事業後半の研究内容は、事業前半までに開発したシミュレーション技術群を基盤とする「統合型」プロセスシミュレーションの有用性検証のためのモデル実験が研究開発項目①-3 全体の研究開発課題となることから、研究内容を整理統合し、一括して実施することとする。

①-3 次世代製造プロセス技術開発

次世代ファインセラミックスに要求される高性能化、高信頼性化、省力化等を実現するために必要となる次世代製造プロセス技術を開発する。

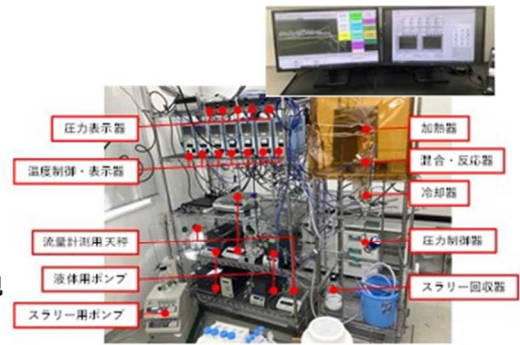


粒径10nmオーダーの微小原料粒子のフロー製造において多点モニタリングが可能な装置を開発することを目的とした。固相原料について、セラミックス原料の平均粒径との比、セラミックス原料粒子との接着性、融点等の異なる可塑性有機バインダーを用いて作製した5種以上の固相複合材料を用いた成形、乾燥脱脂実験を行った。さらに、焼結助剤の機能を勘案したモデル材料を策定して、成形、乾燥脱脂、焼結の実験を開始し、5種以上の性状が異なる粒子を対象にデータセットを構築した。固液複合原料では、溶媒成分の体積分率、分散剤の分子サイズ、セラミックス粒子表面との結合状態が異なる3種以上のスラリーを用いたシート成形を行い、溶媒およびバインダー成分の性状が異なる6種以上のシートを作製する。固相原料では、データセットを用いたシミュレーションおよびAIなどの活用から提案される最適条件の妥当性を、実実験により検証した。

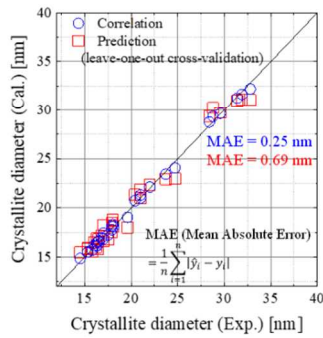
微小原料粒子のフロー製造において、複数の金属から構成される酸化物粒子の粒径や分布の制御に関するプロセス-分析データセットを50種類以上蓄積し、AIなどの活用による最適製造条件探索の有用性を例証する。また、スラリーデータセット構築のための技術を確認した。固相原料では、セラミックス原料の平均粒径との比、セラミックス原料粒子との接着性、融点等の異なる代表的可塑性有機バインダー10種以上を用いた成形、乾燥脱脂実験を行い、固液複合原料では、溶媒成分の体積分率、分散剤の分子サイズ、セラミックス粒子表面との結合状態が異なる10種以上のスラリーを用いたシート成形を行い、溶媒およびバインダー成分の性状が異なる20種以上のシートを作製した。固相原料では、前年度に引き続き、データセットを用いたシミュレーションおよびAIなどの活用から提案される最適条件の妥当性確認も検討した（達成率90%）。

・研究の進捗状況

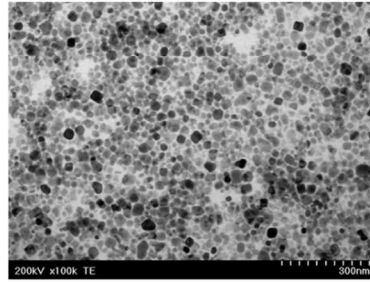
- ・多点モニタリングが可能な原料ナノ粒子のフロー製造装置を開発し、BTO系で95条件のプロセス-分析データセットを構築中（年内終了予定）
- ・AI（機械学習）により粒径20nmの粒子製造条件を推定し、実際に粒子を合成するとともに、集中研内で連携してスラリー調整から可視化、焼結データの取得までを検討中
- ・高濃度域までを含めたスラリーデータセット蓄積の体制を整備



多点モニタリングが可能な原料粒子のフロー製造装置



機械学習による結晶子径の相関・予測結果



合成粒子(20nm)で作成したスラリーの液中TEM像

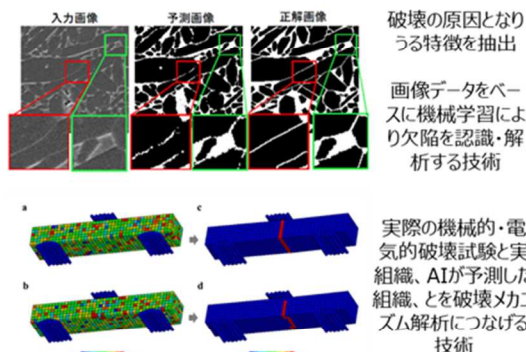
4. 1. 4. 研究開発項目①-4 高信頼性メカニズム等解析技術の開発（産業技術総合研究所、ファインセラミックスセンター、村田製作所、京セラ、太陽誘電、AGC、日本特殊陶業、日本ガイシ、TOTO、リタケカンパニー、再委託：中京大学、横浜国立大学、長岡技術科学大学、東京大学）

研究開発項目①-1～3によってプロセス条件と部材の微構造の相関が明らかになる一方で、部材に求められる性能を満足するための微構造は、微構造と特性の関係から明らかにする必要がある。そこで本研究開発項目では、対象とする部材の特性と微構造との相関を明らかにし、さらに、特性低下の主たる要因となるキラー欠陥の特定/推定を行うとともに、プロセス解析を通してこれらの欠陥構造を明らかにするための取り組みを進めた。さらに、ファインセラミックス部材の長期信頼性評価のために、新たな加速劣化試験方法の開発を実施した。なお、事業後半の研究内容は、「統合型」シミュレーションの実用化に重要な基盤技術となる微構造画像からの特徴量抽出、「統合型」プロセスシミュレータと接続可能な破壊現象インフォマティクス技術が研究開発項目①-4 全体の研究開発課題となることから、研究内容を整理統合し、一括して実施する。

①－４ 高信頼性メカニズム等解析技術の開発

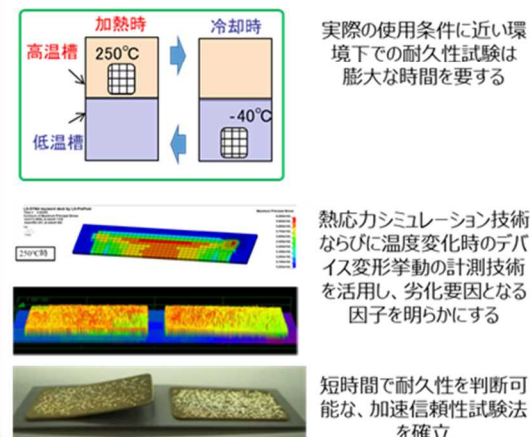
ファインセラミックスの内部欠陥観察等を通しての計測技術及び耐久性の保証等の評価技術を開発し、次世代ファインセラミックスの高信頼性確保のための材料物性予測手法等を確立する。

(1) 部材特性を支配するキラー欠陥の特定および可視化技術



実組織・AIが予測認識した組織をつなぎキラー欠陥を特定・可視化すると共に破壊メカニズムを解析する手法を確立

(2) セラミックスの加速信頼性試験方法の開発と破壊シミュレーションの基盤技術開発



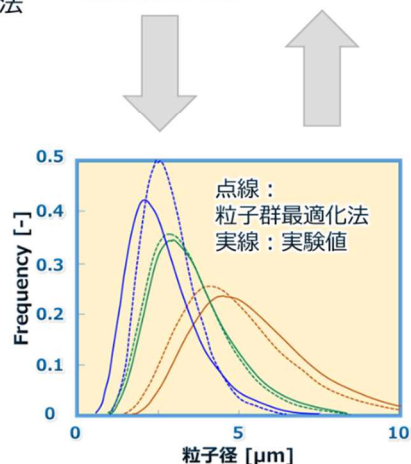
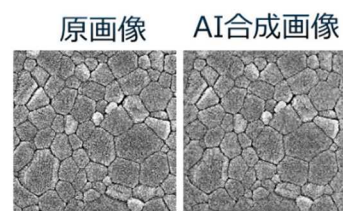
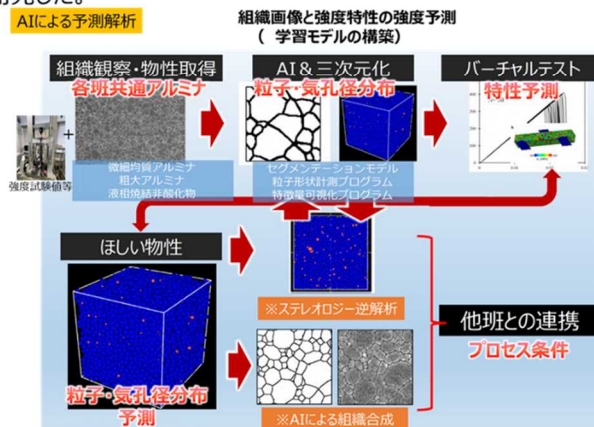
熱応力解析およびデバイス変形挙動の計測技術を活用し、加速信頼性試験方法確立

材料の信頼性に影響を及ぼす特徴的の微構造を抽出・可視化・数値化する方法を探索するとともに、物性予測シミュレーションに展開するため欠陥の存在確率を整理する方法を整理して実際の特性評価試験結果と比較し、使用するモデルの基本形を提案する。加えて、プロセスシミュレーションに向けて簡易モデルの準備を行った。またセラミックス/金属複合体の熱疲労現象を温度サイクルあるいは亀裂成長の観点から検証するため、セラミックス材の変形挙動の測定と、局所領域の応力最大値をシミュレーションにより解析する。さらに、数～100 μm オーダーの気孔や欠陥を予測・解析・数値化するための手法を開発した。

破壊現象メカニズムの解析手法を開発するにあたり、破壊に影響を与える構造因子を明らかにするとともに、数～数 10 μm オーダーの気孔や欠陥を予測・解析・数値化するための手法を探索する。また、熱応力解析技術ならびに温度変化時のデバイス変形挙動等の計測技術を活用し劣化要因となる因子を明らかにし、加速劣化試験法開発の方向性を見出した（達成率 100%）。

・研究の進捗状況

- ①組織観察結果から粒子・粒子・気孔をAIが予測し、その数値データをシミュレーションに接続すると共に、実験結果の整合性を検証した。
- ②これまで粒子・気孔総数1000-1500個の原画像から手作業で教師データ作成を行ってきたが、最低限のアノテーション（10-50個）でAIが組織合成する手法を開発した。
- ③逆解析にも着手し、要求物性を満たす粒子径・気孔径分布を粒子群最適化法により求めると共に、その特性となる人工画像生成法を開発した。



・4. 1. 5 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

研究開発項目①-1～4と連携し、電子材料に展開可能なPIの開発（株式会社村田製作所、産業技術総合研究所、ファインセラミックスセンター）、電子材料に適用可能な統合型シミュレータの開発（京セラ株式会社、産業技術総合研究所、ファインセラミックスセンター）、計算科学を活用したセラミック電子デバイスの開発と信頼性試験法の高度化の開発（太陽誘電株式会社、産業技術総合研究所、ファインセラミックスセンター）、高信頼性非酸化物焼結体の開発（AGC株式会社、産業技術総合研究所、ファインセラミックスセンター）、異種材料積層体の焼結整合性解析技術およびそのプロセスシミュレーション技術の開発（日本特殊陶業株式会社、産業技術総合研究所、ファインセラミックスセンター）、層形成シミュレーション技術、欠陥評価技術の開発（日本ガイシ株式会社、産業技術総合研究所、ファインセラミックスセンター）、セラミックスのプロセスシミュレーション技術の開発（TOTO株式会社、産業技術総合研究所、ファインセラミックスセンター）、金属と無機材料の異種接合温度の低温化（株式会社ノリタケカンパニーリミテド、産業技術総合研究所、ファインセラミックスセンター）の各課題について、実用化研究への展開に必要な課題を明確にするとともに、研究開発項目①-1～4の成果およびその高度化やカスタマイズによって課題解決が可能であることを確認した。

共通基盤技術開発で実施する共通モデル部材および共通モデルプロセスの策定を通じて、各項目に挙げる各製造プロセスへの適用に必要な基盤技術を明確化し、新製造プロセスの創出へとつなぐためのプロセスシミュレータ活用での開発での具体的指針を策定するための議論を行った。研究開発項目②の最終目標の達成のために、研究開発項目②と並行して実施する共通基盤技術開発の事業後半での課題の絞り込みの提案を行った。（達成率85%）。

・セラミックス/金属積層デバイスについて、モデル材料系およびモデルプロセスを設定し、開発したプロセスシミュレーションをプロセス最適化およびプロセス設計技術として用いるための基盤技術を構築するとともに、実用プロセスにおける課題を抽出した。

- ・非酸化物モデル材料について、顆粒作製から成形、焼結に至るプロセスを可視化し、さらにプロセスシミュレーションの適用によって、実プロセスに対応したシミュレーションが構築できることを示した。
- ・フィルター成形・成膜プロセスについて、モデル実験系を構築し、また流体計算を含む粒子堆積シミュレータを開発して、実部材サイズの堆積挙動のシミュレーション基盤を構築した。
- ・鋳込成形プロセスについて、給水型と高濃度スラリーからなるモデル実験系を開発し、プロセスシミュレーションの構築に当たって考慮すべきプロセス現象と、シミュレーション取り込みの際の課題を抽出した。
- ・異種材料接合技術について、新たなシミュレーション手法を適用し、微構造比較による妥当性評価を行い、実材料系への適用可能範囲を明らかにした。

添付資料

●プロジェクト基本計画

P22005

「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。

4.1.1. 2. 研究開発の実施方式

4.1.1.1 (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、ステージゲート方式を適用する。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

PM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。

3) 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。

4) 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貫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貫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貫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、セラミックス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。

2) 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ス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ス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

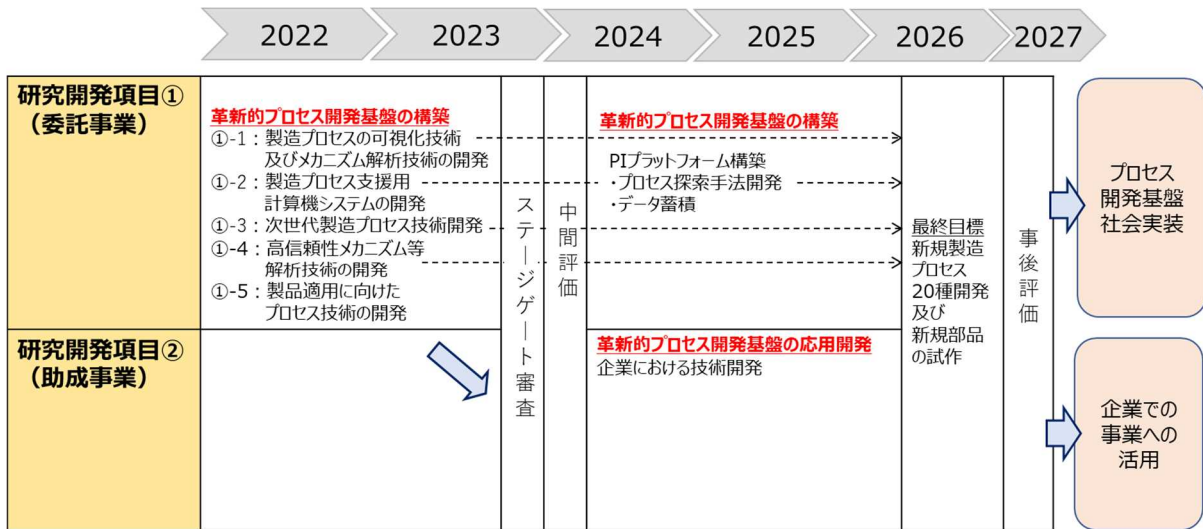
2023年度までに開発したプロセス開発基盤をもとに、新規製造プロセス開発のための課題を設定して実施する。

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





技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight

電子部品用ファインセラミックス分野の 技術戦略策定に向けて

2022 年 1 月

Vol. 107

はじめに	2
1 章 解決すべき社会課題と実現したい将来像	5
1-1 社会課題と将来像	5
1-2 解決・実現のための方法	6
1-3 環境分析とベンチマーキング	8
2 章 解決・実現手段の候補	15
2-1 セラミック電子部品の製造技術と技術課題	15
2-2 実現手段の候補	21
2-3 技術開発の方向性	26
3 章 おわりに	29

TSC とは Technology Strategy Center (技術戦略研究センター) の略称です。

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
技術戦略研究センター (TSC)

はじめに

ファインセラミックスは、図 1 に示すように、「高度に精選または合成された原料粉末」を用いて、「精密に調整された化学組成」を「十分に制御された製造プロセス」によってつくられた高精密なセラミックスであり¹、図 2²に示すような高い性能や精度が要求される各種産業用途に用いられている。

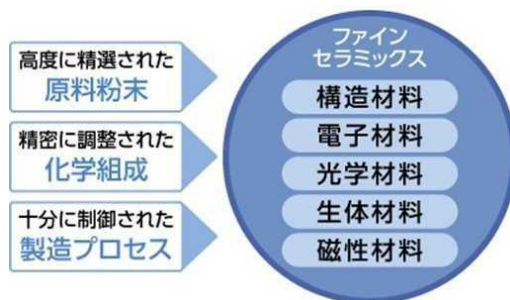
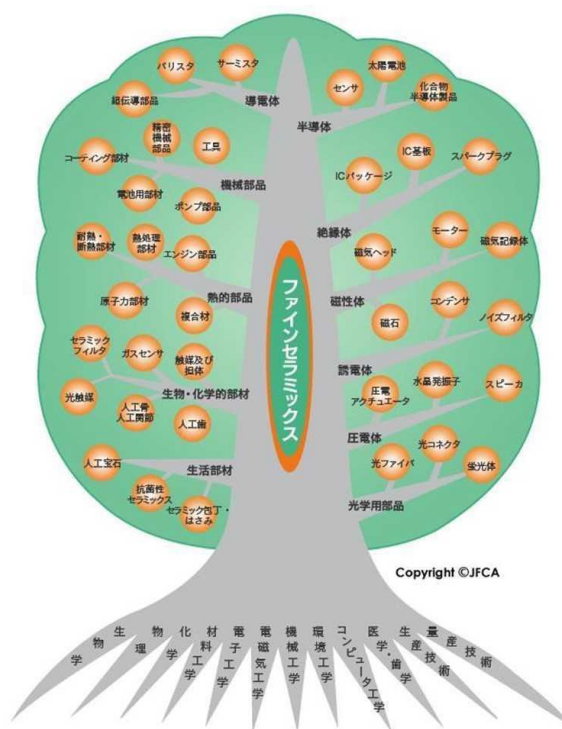


図 1 ファインセラミックスの概念図出典：京セラウェブサイト



図

2 ファインセラミックスの木

出典：日本ファインセラミックス協会ウェブサイト

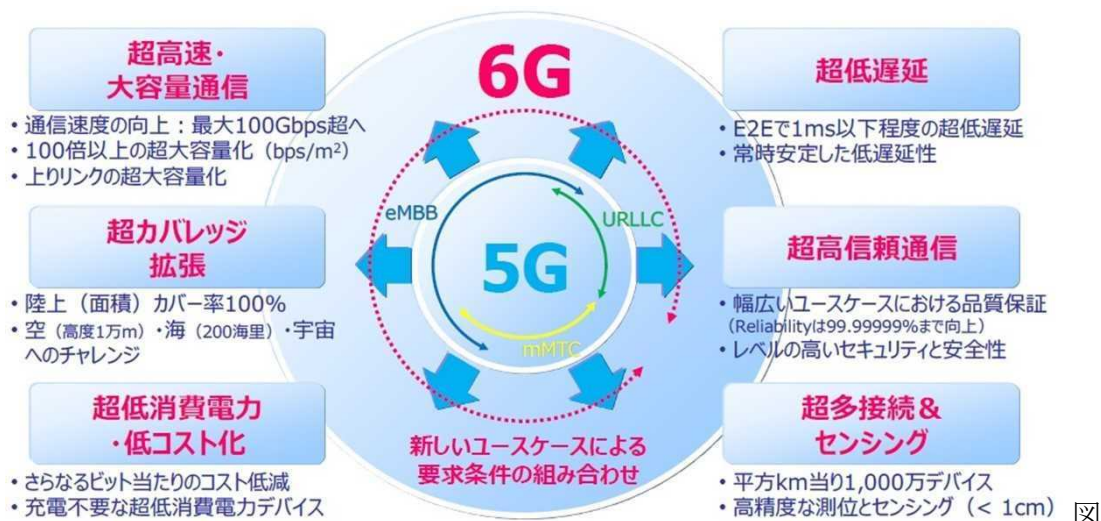
¹ “ファインセラミックスとは？”. 京セラ. <https://www.kyocera.co.jp/fcworld/first/about.html>

² <https://www.jfca-net.or.jp/tree.html>

20 世紀半ば以降、特にエレクトロニクス産業において、ファインセラミックスが大きな役割を果たすようになってきた。セラミックパッケージの開発により半導体が広く使われるようになり、また、小型・高性能のセラミック電子部品の開発により電子機器自体の小型化が実現した。さらに、半導体製造装置や液晶製造装置といった高精度を要求される大型装置には、数 m に及ぶ大型サイズのファインセラミックス部品が必須となっている。このように、ファインセラミックスが今日までのエレクトロニクス産業を支えてきたと言える³。2018 年には、積層セラミックコンデンサ（MLCC）の供給不足が世界的な問題として顕在化し⁴、セラミック電子部品がデジタル機器の安定動作を支えるデジタル技術の根幹部品であることが改めて認識されるとともに、主要サプライヤである日本企業数社が世界的に大きな影響力を持っている現状が浮き彫りになった。

テレワーク、電子決済、遠隔医療、自動運転、リモートでの開発・生産、動画配信などといった、社会のスマート化のニーズは従来からあったものだが、新型コロナウイルス感染症の拡大によってそのニーズは急激に増大した。社会のスマート化の実現に向けては、超高速・大容量通信が必要不可欠であり、具体的には最新の通信インフラである

5G、さらにその先 6G のネットワーク技術（図 3）の実装が必要である。



3 6G で目指す無線ネットワーク技術への要求条件

³ “ファインセラミックスの歴史”。京セラ。 <https://www.kyocera.co.jp/fcworld/first/history.html>

⁴ MLCC が深刻な品不足。中国勢と競争激化の引き金にも。ニューススイッチ（日刊工業新聞）。2018-08-21。 <https://newswitch.jp/p/14146>

出典：NTT ドコモ「5G の高度化と 6G（3.0 版）」（2021）

6G では 5G 以上の高速大容量通信を実現するためには高熱・高周波数での使用環境となることが予測され、電子部品に関してもそれらへの高い耐性が課題となる。

これらの課題に対して、本レポートで詳述するファインセラミックスは、元来熱膨張率が低くかつ高い熱伝導率を有していることから、高出力時の発熱に対応可能である。また、近年では低損失材料が開発され、高周波数帯域における誘電損失の増大という課題も解決しつつある。このように、6G 対応の電子部品用材料としてファインセラミックスが重要な役割を担うことが期待される（図 4）⁵。

今後、超スマート社会「Society5.0」の実現に向け、電子部品用ファインセラミックスがデジタル技術の革新を支える重要な材料となると考えられる。



4 4G から 6G に至る技術の変遷と、6G がもたらす社会像

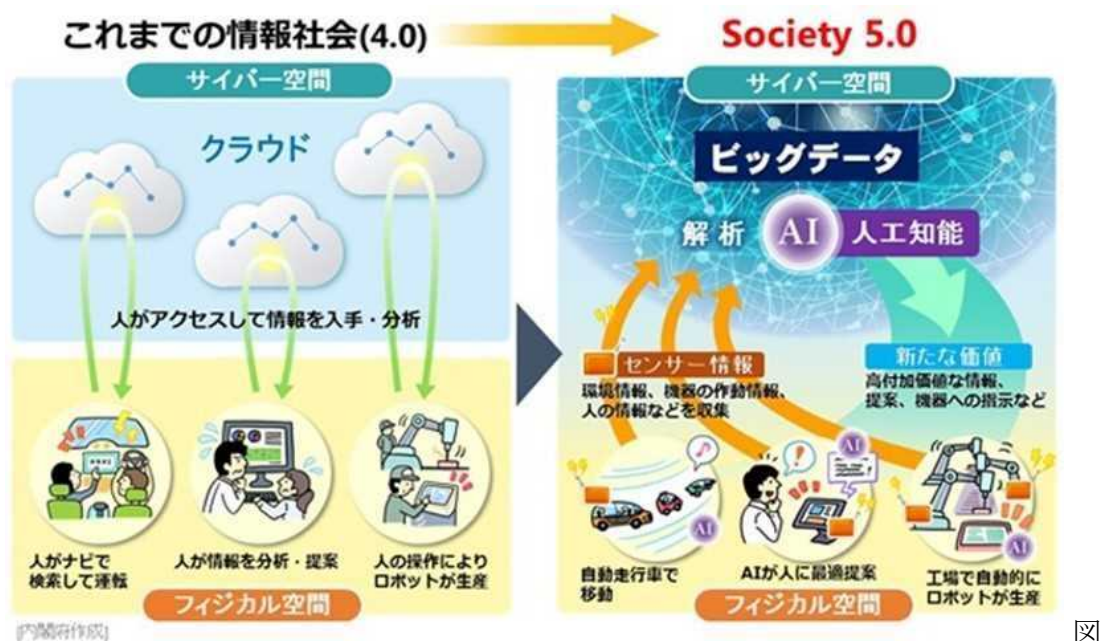
出典：産業技術総合研究所

⁵ “6G 実現に向けたセラミックデバイスのスペックロードマップを策定”. 産業技術総合研究所. 2020.

5.章 解決すべき社会課題と実現したい将来像

5.1. 1-1 社会課題と将来像

内閣府が掲げる超スマート社会「Society 5.0」（図 5）とは、サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立させる人間中心の社会（Society）である⁶。本社会では様々な情報がクラウドに自動収集され、人工知能（Artificial Intelligence：AI）を駆使したビッグデータ解析のアウトプットを、エッジに配置されたデジタル機器を通じてヒトに種々のサービスを提供することが想定されている。これらのサービスの安全・安心な利用は、クラウドとエッジコンピューティングを高度に融合したデジタルシステムが超高速かつ正確に動作することが必須であり、これを支える超高速性と高信頼性が確保されてはじめて成り立つものである。



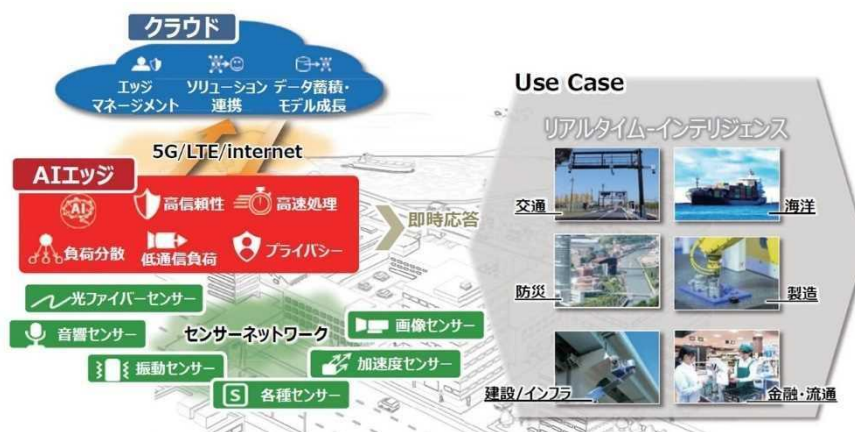
5 Society 5.0

出典：内閣府ウェブサイト（2016）

⁶ https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/

5.2. 1-2 解決・実現のための方法

超スマート社会の実現には、リアルタイムの制御を可能とする 5G/6G の高速・大容量・低遅延の通信技術が必要であるが、これにはエッジコンピューティングの寄与が大きい（図 6）。将来的に、エッジコンピューティングを普及させるには、搭載する AI や通信デバイス等の各種デバイスの超小型化が不可欠である。



図

6 AI エッジコンピューティングコンセプト

出典：OKI テクニカルレビュー 234 号「AI エッジコンピューティングが拓く高度 IoT 社会」
(2019)

スマートモビリティやヘルスケアは人命に直接係わる分野であり、特にこの分野のシステム・デジタル機器においては誤動作を起こさない高信頼性が最重要となる。

図 7 に示すように、医療機器（特にインプラント医療機器）や車載機器などの高信頼性機器では、民生機器に対して、そのコンセプトや信頼性の考え方が全く異なる。民生機器では、コストが一定重視される傾向があるのに対し、高信頼性機器では、信頼性にかなりの重きが置かれ、使用環境や寿命、評価基準も大きく異なる⁷。



図

7 高信頼性機器用電子部品のコンセプト

⁷ “医療機器向けコンデンサのコンセプト”. 村田製作所.

<https://www.murata.com/ja-jp/products/capacitor/ceramiccapacitor/medical>

出典：村田製作所ウェブサイト

このように、デジタル機器に用いられるセラミック電子部品の超小型化と高信頼性化の両立は、超スマート社会実現の基盤となる技術であると言える（図 8）。

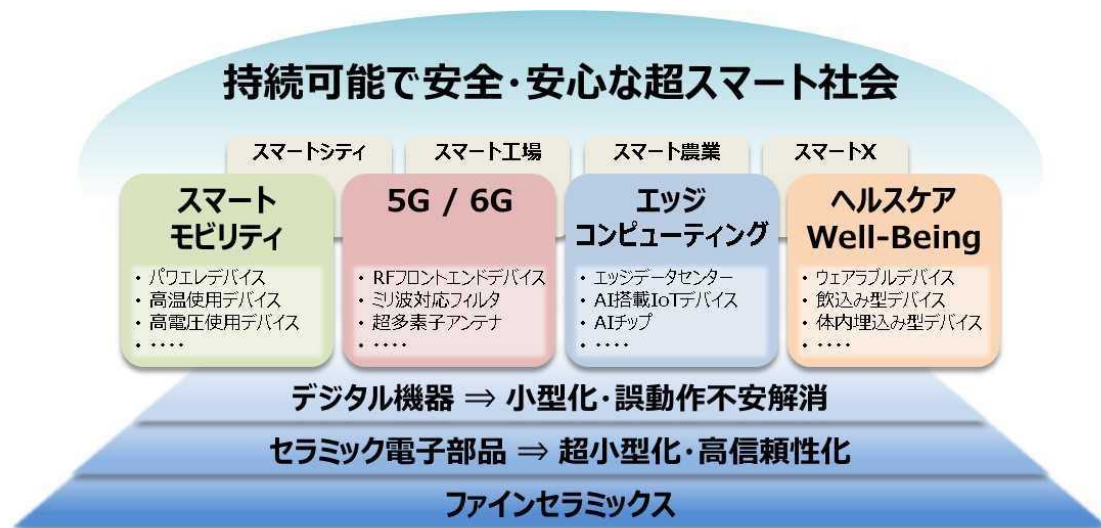


図 8 将来像「セラミック電子部品が支える超スマート社会」のイメージ

出典：NEDO 技術戦略研究センター作成（2021）

5.3. 1-3 環境分析とベンチマーキング

(1) 日本の電子部品分野の位置づけ

図 9 に示すように、電子情報産業の中で、最も大きな市場はソリューションサービス分野であり、ビッグテックが台頭する中、日本の存在感は低下しつつある。一方で、デジタル機器の安定動作を支える電子部品分野では、日本企業のシェアが 36%を占め、依然として存在感を示している。生産額としても、8.7 兆円であり、デジタル技術に係わる産業の中で、日本最大となっている。

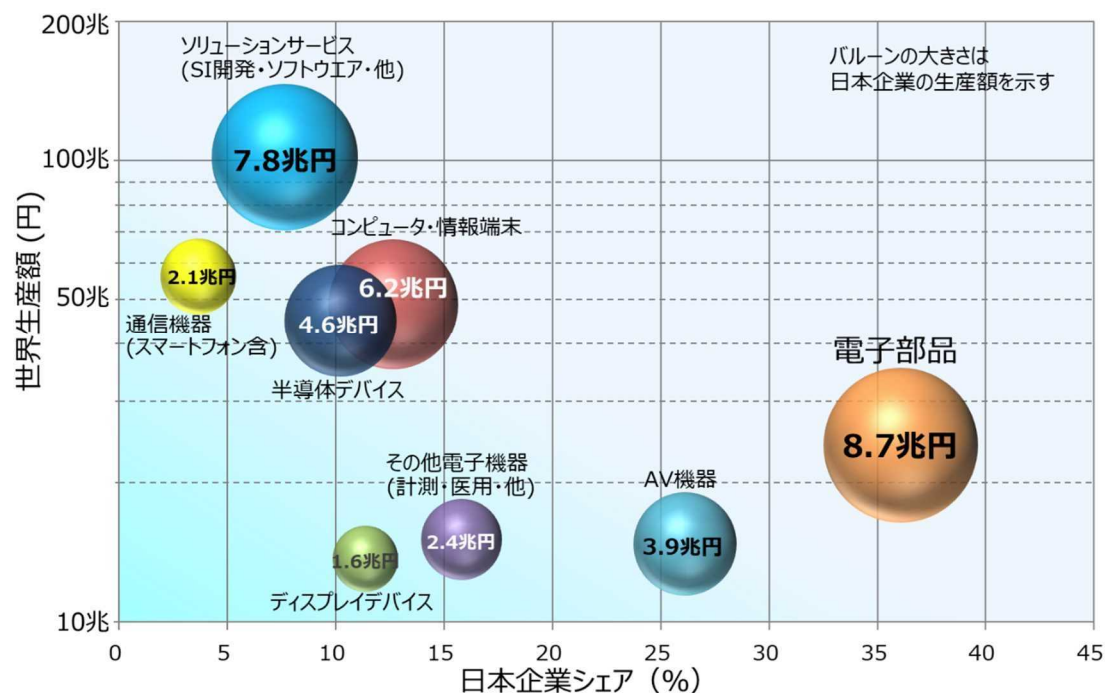


図 9 電子情報産業の世界生産額と日本企業シェア（2019 年実績）

出典：JEITA 電子情報産業の世界生産見通し 2020⁸ の
データを基に NEDO 技術戦略研究センター作成
(2021)

(2) 主要セラミック電子部品の日本企業シェア推移

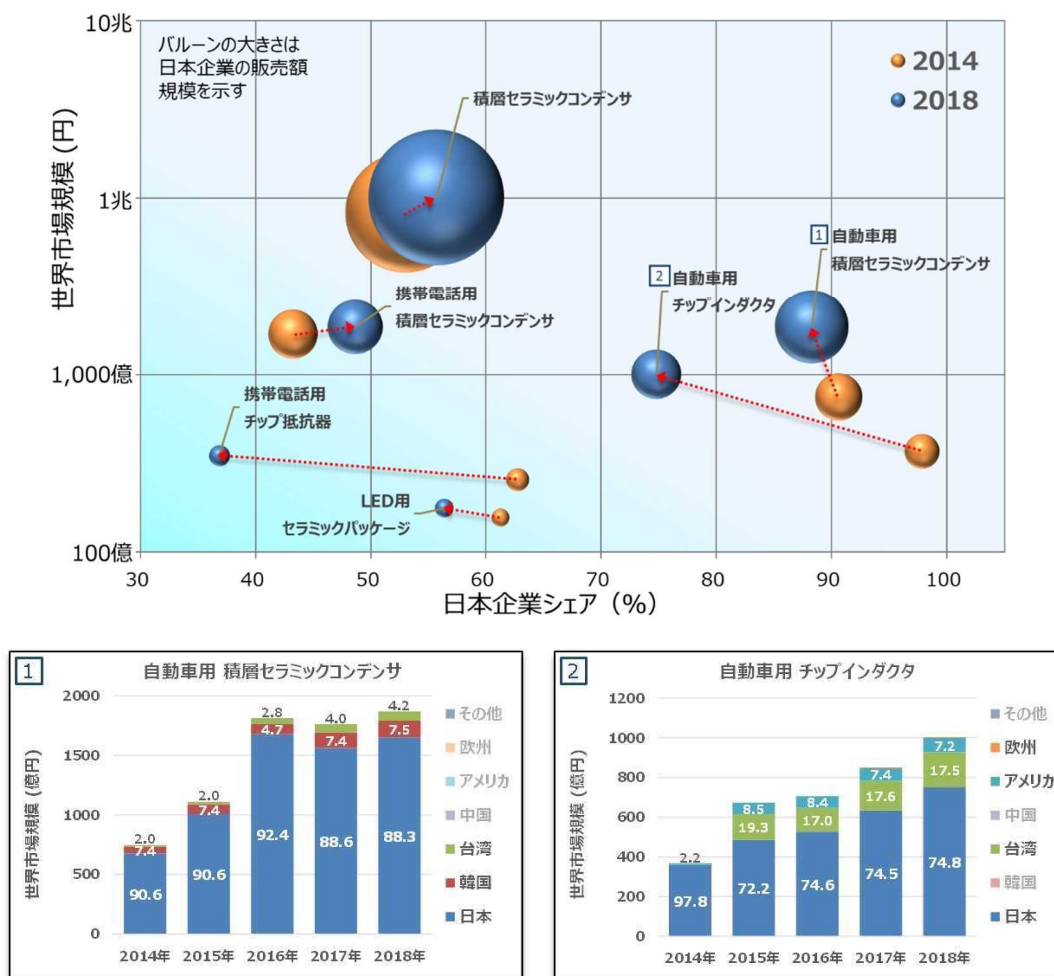
主要セラミック電子部品の 2014 年から 2018 年の日本企業のシェア推移を図 10 に示す。2018 年現在、日本企業はおおむね 40%以上の高シェアを維持している。一般グレードである携帯電話用積層セラミックコンデンサにおいては、韓国や台湾のシェアが大きくなってきているが、高信頼性が求められる自動車用電子部品（車載グレード⁹）においては、日本企業のシェアが高い。2014 年から 2018 年でシェア低下が見

られる自動車用の積層セラミックコンデンサやチップインダクタでは、市場の急激な伸びに追従しており、販売額自体は大きく増加している。

⁸ <https://www.jeita.or.jp/japanese/topics/2020/1216.pdf>

⁹ 電子部品製造企業においては、民生機器用を「一般グレード」、医療機器用、車載機器用をそれぞれ「医療グレード」、「車載グレード」、あるいは「高信頼グレード」として製品カテゴリーを分けている。

日本企業が積層セラミックコンデンサ開発の中で大きなシェアを獲得するに至った背景としては、「セラミック材料から製品までの一貫生産」、「材料・生産設備・プロセス技術の自前開発と内製化」、「長年にわたる開発・生産によるノウハウの蓄積」といった点にあると考えられる¹⁰。



図

10 セラミック電子部品の日本企業シェア推移 (2014～2018) 出典：NEDO

「2019 年度日系企業の IT サービス、ソフトウェア及びモノの国際競争
ポジションに関する情報収集」調査結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2021)

¹⁰ “積層セラミックコンデンサ”. 戦後日本のイノベーション 100 選, 発明協会.

http://koueki.jiii.or.jp/innovation100/innovation_detail.php?eid=00047&age=high-growth

(3) セラミック電子部品分野の市場動向

超スマート社会実現に向け、特にセラミック電子部品が重要な役割を担うと考えられる、5G/6G、エッジコンピューティング、スマートモビリティ、ヘルスケアの分野において、それぞれセラミック電子部品が関連する市場を図 11 に示す。いずれの分野についても大幅な成長が予測されており、特にヘルスケア分野については 2030 年に 38.4 兆円に及ぶ大きな成長が見込まれている。

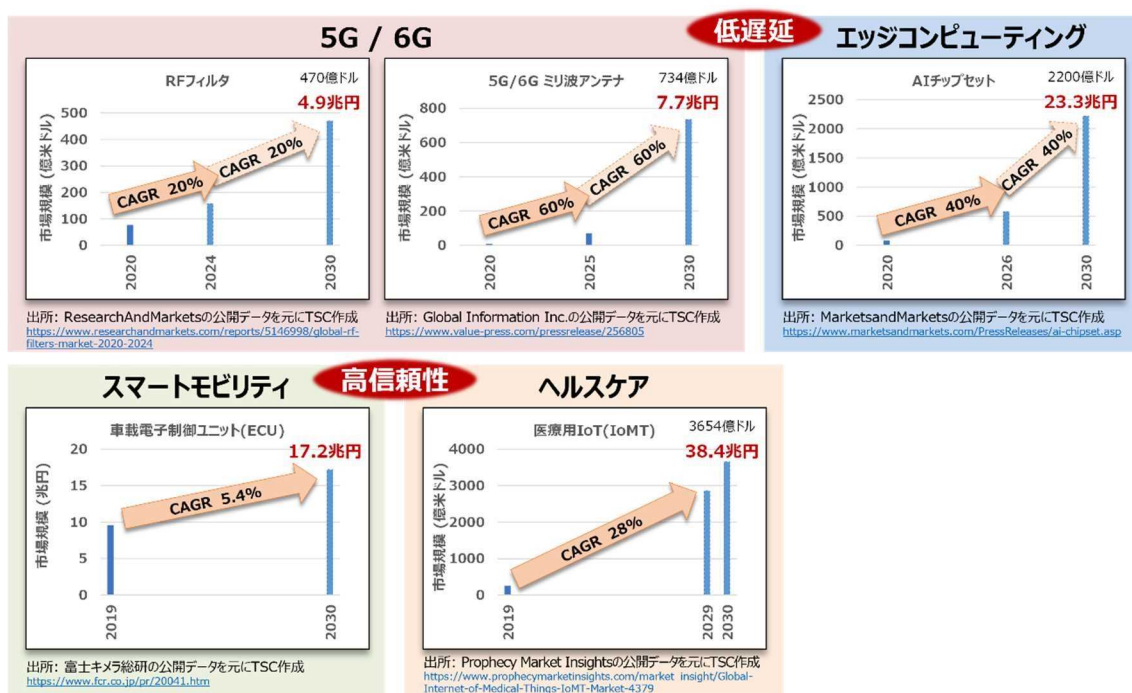


図 11 成長が期待される分野の 2030 年に向けた市場予測

出典：公開情報を基に NEDO 技術戦略研究センター作成（2021）

(4) セラミック電子部品分野の政策動向

各国・地域の政策動向として、近年のセラミック電子部品関連の研究プロジェクトを表 1 にまとめた。世界的には固体電解質、固体酸化物燃料電池、といった電池関係のプロジェクトが多い。

中国では、「国家重点研究開発計画」においてセラミックスの研究開発を支援している。2021 年 1 月には「基礎電子部品産業開発行動計画」を発表し、2023 年に達成すべき具体的な目標を挙げるなど、電子部品の国産化を加速する動きが見られる。表 1 国・地域別 近年の電子部品関連セラミックスの研究プロジェクト

国・地域	近年の電子部品関連セラミックスの 等	主な研究拠点研究プロジェクト
------	-----------------------	----------------

日本	【内閣府・NEDO・JST 等】 • 電解質材料: NEDO 「革新型蓄電池先端科学基礎研究事業」 (226 億円) • パッケージ材料: SIP 「次世代パワーエレクトロニクス」 (70 億円) • 誘電材料: JST 「ALCA 単結晶ナノキューブ」 (3 億円) • セラミックス全般: JST 「A-STEP セラミックスの高機能化と製造プロセス革新」 (約 10 億円)	• ファインセラミックスセンター (JFCC) • AIST • NIMS
アメリカ	【DOE・NSF 等】 ※ファインセラミックス全般は DOD、DOE、NASA が主要プレーヤー • 固体酸化物燃料電池: DOE 「Small-scale Solid Oxide Fuel Cell Systems」 (3,400 万ドル) • 固体酸化物燃料電池: ARPA-E 「Protonic Ceramics for Ammonia」 (460 万ドル) • 低温焼結: ARPA-E 「Cold Sintering Composite Structures」 (100 万ドル) • NNI 「Nanomanufacturing NSI」 、 「Nanoelectronics NSI」 にセラミックス関連研究が含まれる	• Center for Dielectrics and Piezoelectrics (CDP) (ノースカロライナ州立大学・ペンシルベニア州立大学・シェフィールド大学 (英))
欧州	【HORIZON 2020】 • 固体酸化物燃料電池: 4 件 ALifeInSOFCs / Micro-SOLUTION / Cell3Ditor / OxiGEN (計 554 万ユーロ) • 低温焼成セラミックス: 2 件 LTCeramics / FUNCOMP (計 30 万ユーロ)	• Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems IKTS
韓国	【科学情報通信部】 • 「政府の R&D 中長期の投資戦略」 (2019～2023) の中にセラミックス関連の研究が含まれる (2021 年計画: 1,237 億ウォン)	• KAIST
中国	【国務院】 • 「国家重点研究開発計画」 (2016～) の中にセラミックス関連の研究が含まれる (新型特殊セラミックス材料革新技術/新型セラミックス原料高効率合成調整/高安全性長寿命固体電池の基礎応用研究/高性能セラミックス高機能精密製造先端技術)¹¹ • 「基礎電子部品産業開発行動計画」 (2021～2023)¹²	• 中国科学院 上海セラミックス研究所

出典：公開情報を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2021)

¹¹ “中国ファインセラミックス産業の動向 (2019 年 7 月) 株式会社富士経済より”. 日本ファインセラミックス協会. 2019-08-01. <https://www.jfca-net.or.jp/overseas/view/3291>

¹² (仮訳) 基礎電子部品産業開発行動計画 (2021-2023). [2021-01-15]. JETRO. https://www.jetro.go.jp/ext_images/world/asia/cn/ip/gov/20210115_jp.pdf

セラミック電子部品分野の技術動向

図 12 に示すように、論文は全体的な傾向として、2000 年以降ほぼ一定に件数が増加してきている。その中でも、中国籍論文数の伸びは著しく、2000 年には全体の内の 11%であったものが、2019 年には 44%を占めるまでに至っている。

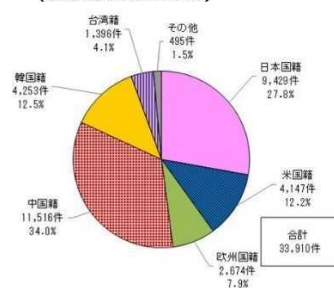


12 論文発表件数推移と国地域別シェア

出典：特許庁令和 2 年度機動的マイクロ調査「セラミックス（電子部品に係わるもの）」報告書（2020）

図 13 に示すように、特許出願動向（2012～2018 年）においても、中国が出願ファミリー件数でトップである。ただし、出願人別件数ランキングでは、日本国籍企業が上位を占め、日本が優位を保っている。中国では、出願件数の少ない出願人が多数存在すると考えられる。

出願人国籍(地域)別 出願ファミリー件数
(優先権主張 2012年-2018年)



順位	出願人	ファミリー数
1	三星電機株式会社 (韓国)	1,480
2	株式会社村田製作所	1,434
3	T D K株式会社	589
4	京セラ株式会社	460
5	太陽誘電株式会社	374
6	I B M (米国)	374
7	三菱マテリアル株式会社	358
8	日本特殊陶業株式会社	345
9	セイコーエプソン株式会社	323
10	三星電子株式会社 (韓国)	268
11	日本ガイシ株式会社	249
12	パナソニック株式会社	233
13	南京理工大学 (中国)	209
14	电子科技大学 (中国)	201
15	北京大学 (中国)	184
16	三星電機株式会社	171
17	インテル (米国)	171
18	ローベルトボツシュ (ドイツ)	170
19	J X金属株式会社	153
20	T S M C (台湾)	152
21	東宝光技術株式会社 (中国)	151
22	インフィニオン・テクノロジー (ドイツ)	150
23	キヤノン株式会社	138
23	グローバルファウンドリーズ (米国)	138

13 出願人国籍別出願ファミリー件数シェアと上位出願人

出典：特許庁令和 2 年度機動的マイクロ調査「セラミックス（電子部品に係わるもの）」報告書
(2020)

特許の出願動向の詳細な解析を行うと、中国のシェアが高い技術区分は、用途で「導波管（高周波用フィルタ）、アンテナ」、材料で「LTCC¹³」であった（表 2）。一方、材料と用途の組合せで見ると「LTCC」の主要用途は、「導波管（高周波用フィルタ）、アンテナ」であり、中国は 5G/6G を目標にした「LTCC」を用いた「導波管（高周波用フィルタ）、アンテナ」に注目していると考えられる（表 3）。

表 2 技術区分別出願動向と国地域別シェア

技術区分		全ファミリー数 2012-2018	国・地域別シェア						
			日本	アメリカ	欧州	中国	韓国	台湾	その他
用途	セラミックパッケージ	1790	2.6%	19.3%	10.1%	12.8%	6.9%	7.1%	1.2%
	コンデンサ	5358	2.0%	7.6%	3.6%	20.5%	24.4%	1.4%	0.6%
	固体電解質	1482	1.7%	19.6%	7.8%	12.8%	16.9%	0.7%	0.5%
	フィルタ（RFフィルタ等）	569	23.7%	30.2%	12.1%	16.0%	8.3%	1.2%	8.4%
	半導体用放熱材	1219	40.9%	7.5%	14.4%	28.7%	5.7%	2.5%	0.3%
	導波管（高周波用フィルタ等）	1606	6.5%	17.3%	8.2%	59.2%	4.7%	1.5%	2.6%
	アンテナ	3472	7.6%	18.7%	11.1%	41.6%	13.1%	5.3%	2.5%
	圧電素子	4202	40.1%	11.1%	9.5%	24.1%	11.4%	1.4%	2.3%
	プリント基板	8550	32.1%	10.4%	7.5%	28.4%	14.9%	5.8%	1.1%
	複合ウエハー	1225	11.6%	35.8%	7.7%	32.1%	4.7%	6.5%	1.7%
材料	チタン酸バリウム	1756	25.8%	8.1%	3.8%	36.2%	21.4%	3.3%	1.4%
	窒化ケイ素	2806	22.5%	17.2%	10.9%	33.2%	8.0%	6.2%	2.0%
	窒化アルミニウム、酸化アルミニウム	6532	22.9%	13.5%	7.9%	37.5%	12.3%	4.0%	2.0%
	チタン酸ジルコン酸鉛	1017	27.9%	16.4%	8.5%	26.9%	15.1%	1.8%	3.3%
	LTCC（低温同時焼成セラミックス）	1370	7.9%	10.5%	8.8%	56.4%	6.0%	3.8%	6.7%

出典：特許庁令和 2 年度機動的マイクロ調査「セラミックス（電子部品に係わるもの）」報告書（2020）のデータを基に NEDO 技術戦略研究センター作成（2021）

表 3 技術区分別出願動向の用途と材料との関係

¹³ LTCC（Low Temperature Co-fired Ceramics：低温同時焼成セラミックス）。900℃程度で焼成可能なセラミックス材料であり、一般にアルミナ+ガラスの組成。同時焼成する金属として、導電性のよい銀や銅を用いることができる。従来のセラミックスであるアルミナは 1,500℃以上での焼成が必要なため、同時焼成する金属が導電性の低いタングステンやモリブデンなどに限られていた。

用途別材料の集計 ファミリ件数 2012-2018		材料				
用途		チタン酸バリウム	窒化ケイ素	窒化アルミ・酸化アルミ	チタン酸ジルコン酸鉛	LTCC
	セラミックパッケージ	12	212	450	3	56
	コンデンサ	848	112	538	63	43
	固体電解質	40	44	384	18	0
	フィルタ (RFフィルタ等)	11	125	286	49	25
	半導体用放熱材	4	183	362	3	13
	導波管 (高周波用フィルタ等)	27	89	204	16	406
	アンテナ	49	348	294	17	188
	圧電素子	374	211	623	854	19
	プリント基板	294	506	1558	29	135
	複合ウエハー	9	637	289	13	8

出

典：特許庁令和 2 年度機動的マイクロ調査「セラミックス（電子部品に係わるもの）」報告書（2020）のデータを基に NEDO 技術戦略研究センター作成（2021）

(6) 環境分析のまとめ

日本は、車載グレードといった高信頼性を求められる電子部品で非常に高いシェアを有し、また、特許出願においても、出願人別ファミリ件数ランキングで、多くの日本企業が上位を占めている。日本の強みは、前述のように、「セラミック材料から製品までの一貫生産」、「材料・生産設備・プロセス技術の自前開発と内製化」、「長年にわたる開発・生産によるノウハウの蓄積」をベースにした日本企業の技術力の高さにあると言える。

韓国・台湾は、近年、一般グレード部品でシェアを伸ばしてきており、企業の技術力は上がってきている。

中国は、近年、特許出願件数や論文件数を急激に伸ばしてきている。また、国主導による電子部品の国産化加速の動きが見られる。現時点では市場シェアに表れていないものの、潜在的な脅威となっていると言える。

6. 章 解決・実現手段の候補

6.1. 2-1 セラミック電子部品の製造技術と技術課題

(1) セラミック電子部品の製造技術：積層同時焼成技術

代表的なセラミック電子部品である積層セラミックコンデンサの構造と製造工程を図 14 に示す¹⁴。

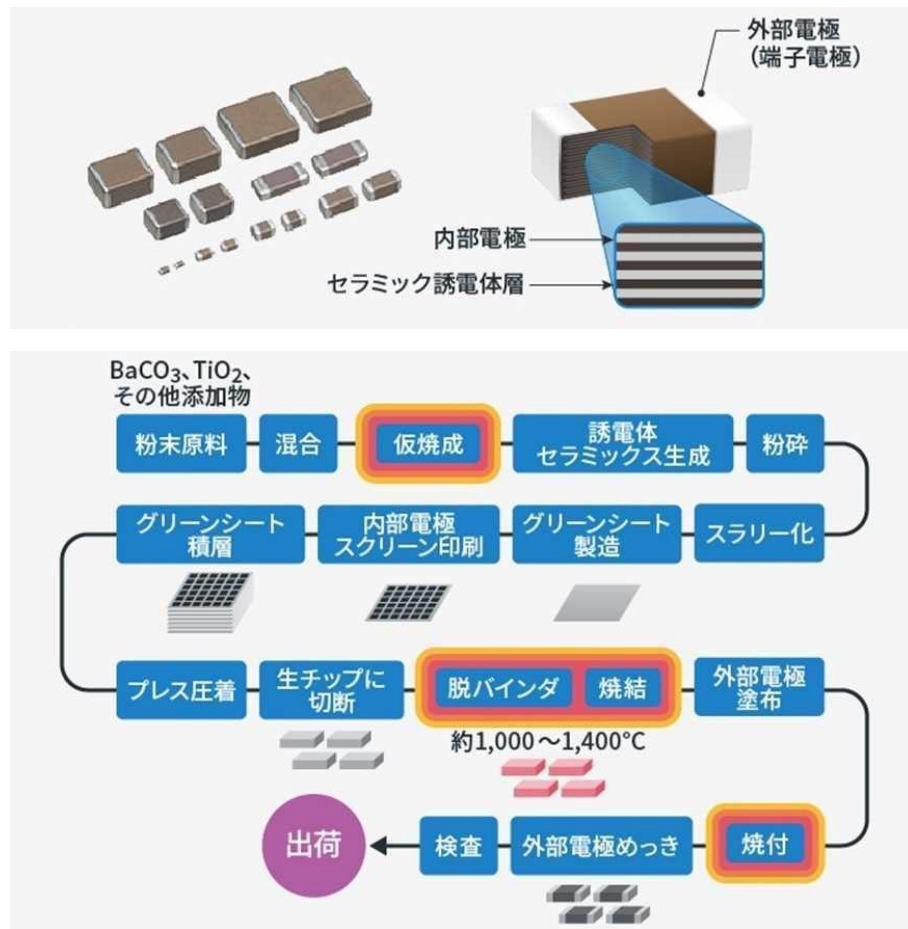


図 14

積層セラミックコンデンサの構造と製造工程（積層同時焼成）

出典：TDK ウェブサイト

まず誘電体セラミックスの微細粉を溶剤や分散剤、バインダ（結合剤）などと混合して泥状のスラリーとし、これをキャリアフィルム上に薄く伸ばして誘電体のグリーンシ

¹⁴ “積層セラミックチップコンデンサ（MLCC）と微細構造制御技術”. TDK のコアテクノロジー. Vol.4, TDK. 2021. <https://www.tdk.com/ja/tech-mag/core-technologies/04>

ート（生のシート）を形成する。次にこのグリーンシートに内部電極パターン（金属粉体

ペースト）をスクリーン印刷したものを、精密に位置合わせを行って積み重ねて圧着してから、多数のチップ個片に切断し、これを焼成炉でセラミックス化する^{14 15}。このように、内部電極パターンが印刷されたセラミックス粉体の薄いシートを積層して 3 次元的な電極回路を内包する電子部品の前駆体を形成し、次いでセラミックス粉体と金属粉体とを同時焼成することを特徴とするものである。焼成・セラミック化前の加工しやすい状態でチップ個片へ切断するため、ブレードによる垂直押切り方式が用いられている。ブレードによる垂直押切り方式は切断によるロス（切り代）が生じないことから、超小型のチップ個片への切断に非常に適している¹⁶。

経済産業省生産動態統計年報（2018）¹⁷によると、セラミックコンデンサの国内の年間生産数量は、1 兆 460 億個であり、生産金額は 5,208 億円となっている。単価は 0.50 円であり、非常に低コストで超大量生産を実現していると言える。この「積層同時焼成技術」はセラミック電子部品製造のコア技術としてとらえることができ、現在、種々の小型セラミック電子部品に適用されている（図 15）¹⁸。また、積層セラミックフィルタ（バンドパスフィルタ：BPF）とアンテナとを「積層同時焼成技術」の一種である LTCC 工法を用いて一体化した、5G（28 GHz）用のアレイアンテナ（アンテナインパッケージ：AiP）も製品化されている（図 16）¹⁹。

¹⁵ [TDK 広報部, ITmedia]. “積層セラミックチップコンデンサはこうして作られる”. EDN Japan. 2012. https://edn-japan.com/edn/articles/1205/24/news099_3.html

¹⁶ ブレードによる垂直押切り方式の例。“製品案内，電子セラミック用カット機”. 太平洋テック. https://pacific-technology.co.jp/service/e_greenenergy/電子セラミック用カット機/

¹⁷ 経済産業省生産動態統計年報，機械統計編. 2018. https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/gaiyo/resourceData/03_kikai/nenpo/h2dcd2018k.pdf

¹⁸ 特集，太陽誘電の価値創造. 統合報告書 TAIYO YUDEN Report 2020. <https://www.yuden.co.jp/jp/ir/2020ar/feature>

¹⁹ “5G”通信をサポートする TDK の“LTCC AiP”技術. TDK Front Line. vol.3, 2019. https://www.tdk.com/ja/tech-mag/front_line/003

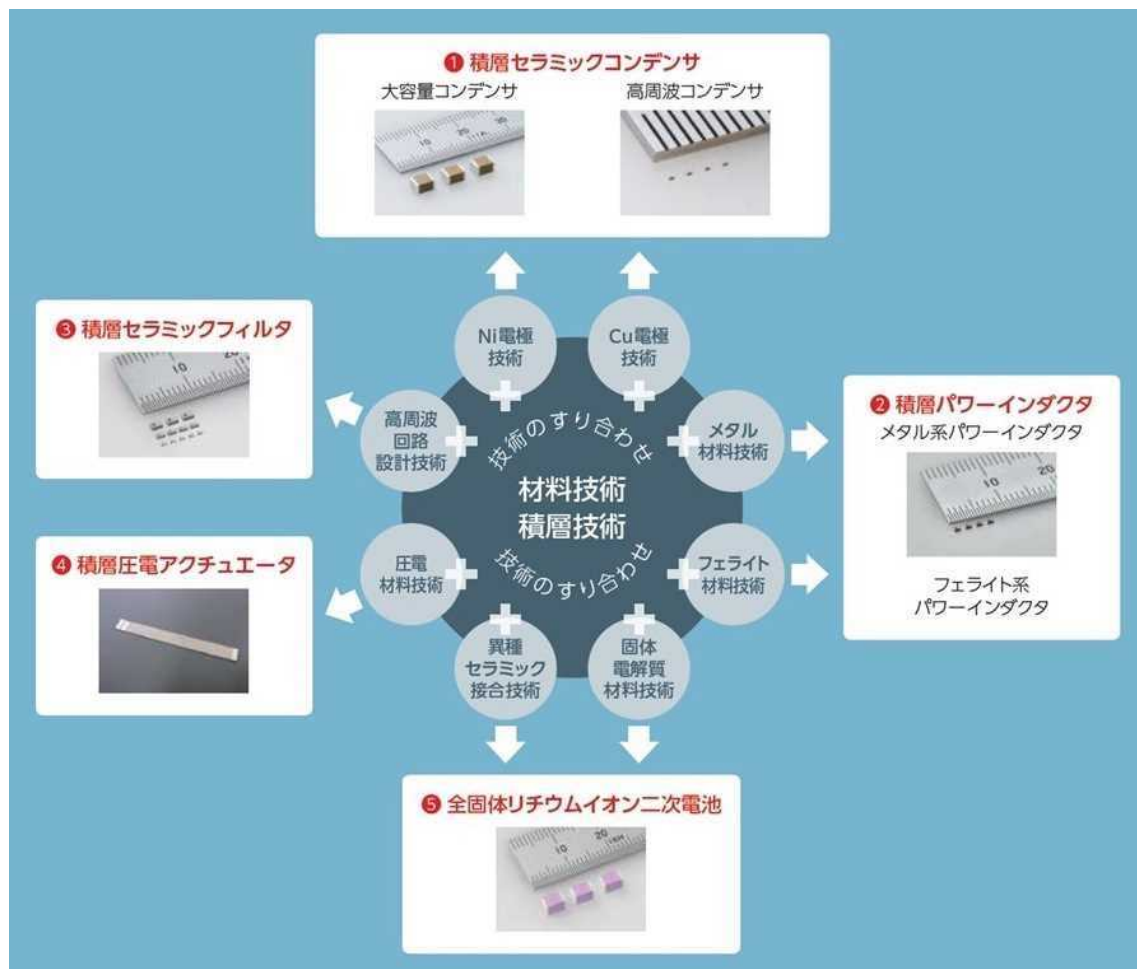


図 15 材料技術、積層技術を中心とした商品展開

出典：太陽誘電ウェブサイト

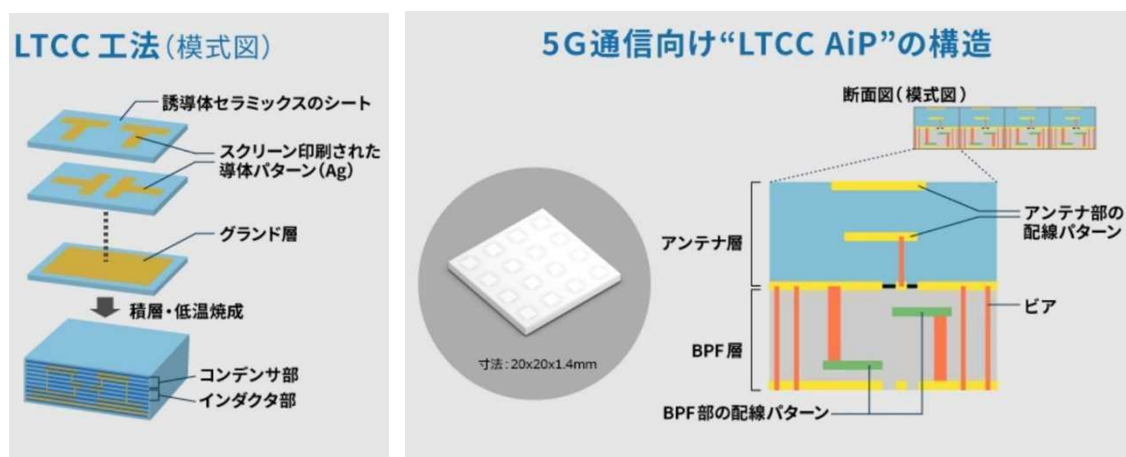
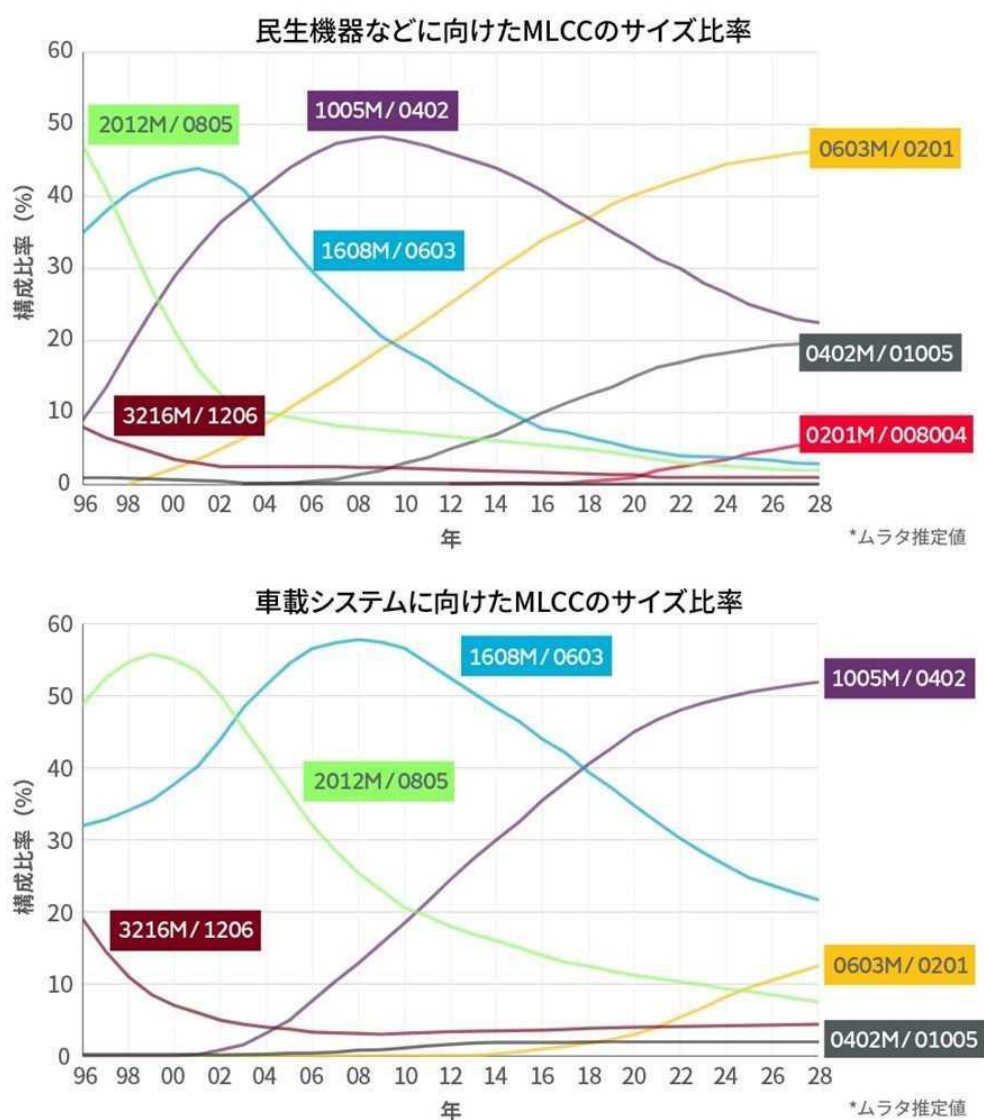


図 16 アンテナ素子と BPF を一体化した“LTCC AiP デバイス”

出典：TDK ウェブサイト

(2) セラミック電子部品の超小型化と高信頼性化の両立のための技術課題
 超スマート社会実現に向けて、セラミック電子部品は更なる超小型化と高信頼性化との両立が求められる。図 17 に積層セラミックコンデンサのサイズ比率予測²⁰を示す。
 このように、2020 年以降、スマートフォン等の民生用途では 0603M (0.6 mm×0.3 mm) 以下、車載用途では 1005M (1.0 mm×0.5 mm) 以下のサイズが主流になると予測されている。



17 積層セラミックコンデンサのサイズ比率予測

²⁰ “信頼性と小型・大容量を両立、CASE トrendに寄り添い進化する車載用 MLCC (3/3) ”. 村田製作所. 2021. <https://article.murata.com/ja-jp/article/automotive-mlcc-3>

セラミック電子部品の超小型化と高信頼性化の両立には、部品というパッケージを小さくしながらも機能を維持するために、部品の内部構造（図 14 の構造図を参照）自体を微細かつ精密に作り込むことが必須となる。これには、図 18²¹に示すような、「積層構造の各層の薄層化」、「セラミック原料粉体の微粒子化」、「正確な積層」による信頼性低下の原因となる欠陥（不均一な構造等）の低減が必要である。一般的に、微粒子化は凝集を生じやすく分散が困難となる傾向がある。これが欠陥増大の一因となっていると考えられる。

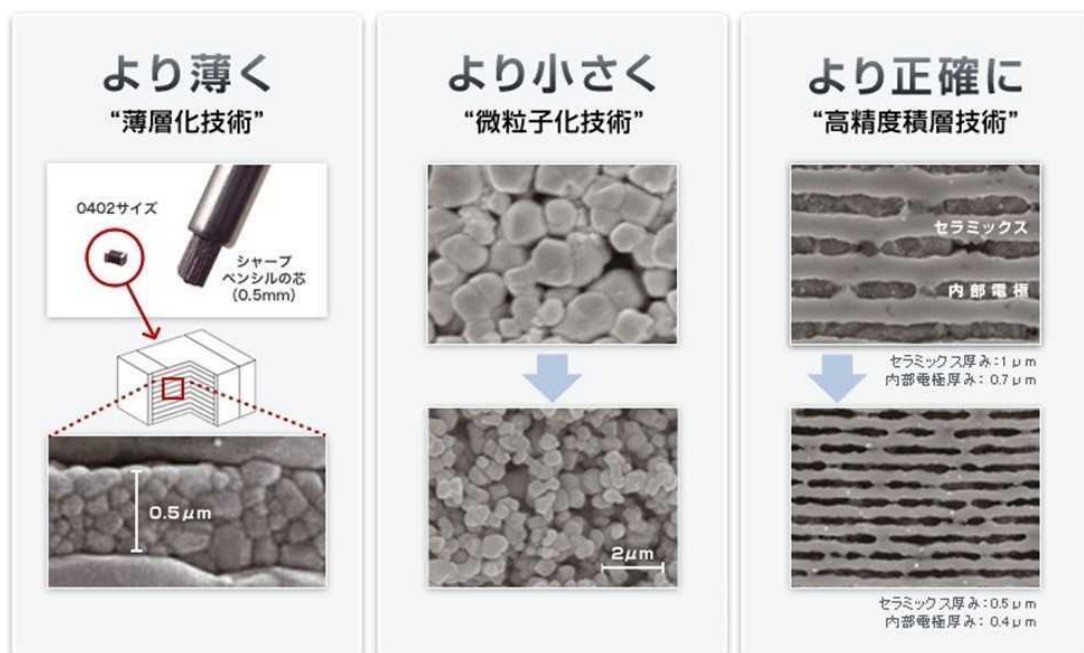


図 18 電子部品の超小型化と高信頼性化の両立に必要な技術例

出典：村田製作所ウェブサイト

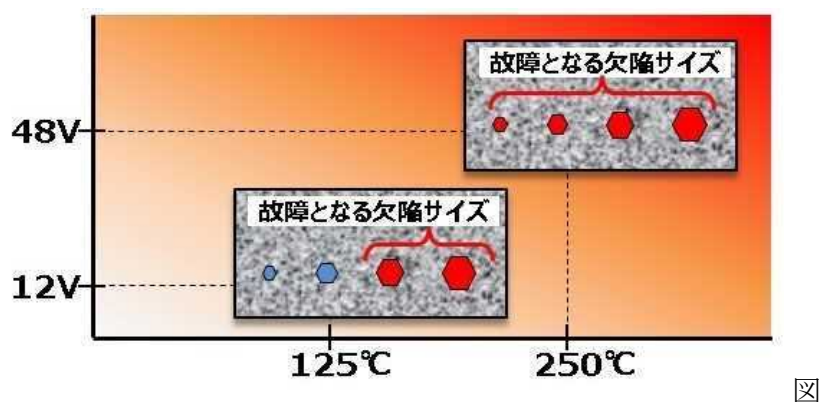
また、車載用電子部品では、電動化に伴うバッテリー電圧の高電圧化に耐え得る、より高い信頼性が要求されるものと考えられる²⁰。

さらに、次世代パワーエレクトロニクスにおいては、自動車向け SiC モジュール開発が進められている。戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）次世

²¹ “ムラタコンデンサの強み、開発力”. 村田製作所. <https://www.murata.com/ja-jp/products/capacitor/ceramiccapacitor/overview/strength>

代パワーエレクトロニクス研究開発計画（2018）²²においては、研究開発項目 I SiC に関する拠点型共通基盤技術開発の（2）-③次世代 SiC モジュールの技術開発、の項目で「モジュール化技術においては、素子開発で先行する 1 kV 級耐圧の SiC パワーデバイスを利用

する高電流密度型モジュールの開発を行い、超小型・高電流密度・高速モジュールの実現を目指す。併せて、モジュール実現に必要な高温・高電流密度に耐える受動素子、周辺材料と高耐圧用の受動素子、周辺材料開発を行う。」との記載があり、高温に耐える受動素子＝電子部品の開発が必要であることが言及されている。具体的な耐熱温度の目標は 250℃とされており²³、今後の車載用電子部品は、高電圧×高温という過酷な環境での高信頼性と超小型化との両立が求められることになる。高温×高電圧下では、より微小な欠陥が故障の起点となりうるため（図 19）、高信頼性確保には微小な欠陥までを含めた、欠陥を大幅に低減する、より高度な微細構造の精密制御技術が必要となると考えられる。



19 使用環境による欠陥サイズ許容度変化のイメージ

出典：公開情報を基に NEDO 技術戦略研究センター作成（2021）

近年、粒子径 15nm のセラミック誘電体粒子も開発されており²⁴、将来的にはこのような超微粒子を適用して、超小型セラミック電子部品を製造していくことが必要となると考えられる。そのためにはナノスケールの粒子の精密な制御を可能とする、プロセス技術の開発が課題である。

²² 戦略的イノベーション創造プログラム（SIP） 次世代パワーエレクトロニクス（どこでもパワエレ機器で豊かな省エネ社会）研究開発計画。内閣府。2018。 <https://www.nedo.go.jp/content/100877977.pdf>

²³ “戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）／次世代パワーエレクトロニクス”。NEDO。 https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100090.html

²⁴ “超微粒子酸化チタン「スーパータイタニア®」生産設備の増強を完了”。ニュースリリース，昭和電工。2018。 <https://www.sdk.co.jp/news/2018/27175.html>

超小型化と高信頼性化とを両立するセラミック電子部品の製造に必要な要件を整理すると、下記ようになる。

- A) 非常に微細な部品構造を制御して作りこむ高度製造技術
 - B) 年数兆個レベルの量産において安定品質を維持する製造管理に対応できる技術
 - C) 競争力のあるコストで製造可能な技術
-

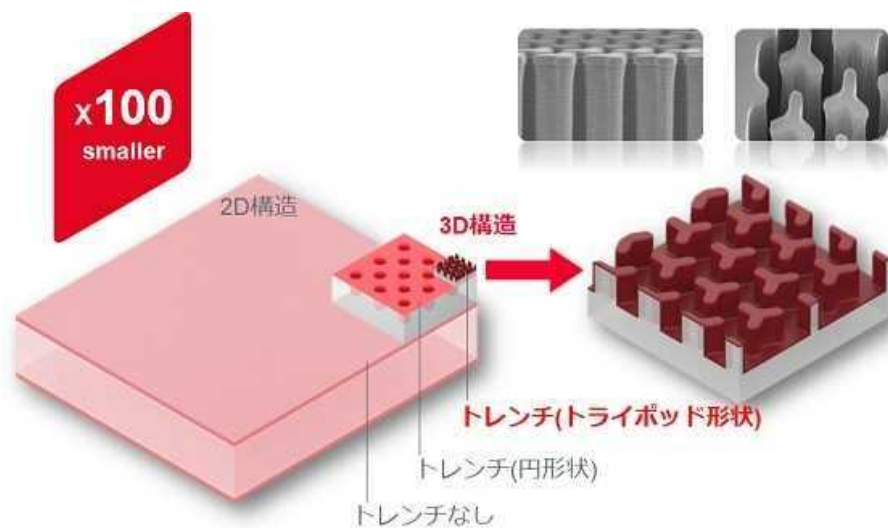
6.2. 2-2 実現手段の候補

実現手段の候補として、下記の①～③を挙げる。

① 半導体微細加工プロセスを適用する

先に示した必要な要件である「A) 非常に微細な部品構造を制御して作りこむ高度製造技術」の観点から、まず挙げられるのは、半導体加工プロセスの適用である。半導体加工プロセスは、ウェハー上にナノスケールの微細構造を精密に制御して作り込む技術として確立されている。近年、電子部品の製造技術としても注目され、図 20 に示すシリコンコンデンサやフィルタ等の高周波用部品が製品化されている。ただし、この手段では、先述したブレードによる垂直押切り方式を用いることができず、部品チップへの切断にダイシング加工²⁵を用いるため、少なくとも数 10 μm の切断幅（ストリート幅）が必要となり、これが切断ロスとなる。したがって、個々の部品サイズを小さくするほど切断ロスとなる面積が増加することになり、超小型部品の大量生産には適さないと考えられる。「C) 競争力のあるコストで製造可能な技術」の観点で、現行の「積層同時焼成技術」によるコストレベルには対応できないと考えられる。

²⁵ ダイシングによる切断方式の例。“砥石による切削加工ブレードダイシング”. ディスコ.
<https://technology.disco.co.jp/jp/method/dicing/>



図

20 シリコンコンデンサ

出典：村田製作所ウェブサイト

② 薄膜プロセスを適用する

同様に、「A) 非常に微細な部品構造を制御して作りこむ高度製造技術」の観点から、真空下での CVD やスパッタを用いる薄膜プロセスの適用が考えられる。薄膜プロセスはナノスケールの均一な薄膜形成に広く用いられる製造方法である。電子部品においても、セラミック誘電体層をスパッタで形成した薄膜コンデンサとして製品化されている。しかしながら現時点で、この手法は、誘電体層 1 層の構成のみ可能なものであり、積層には向いていない。【削除】したがって B)、C) の要件からすると、更なる研究開発を要するレベルであると考えられる。

③ 積層同時焼成プロセスを精緻化するためのツールを開発する

この手段は、高精度のプロセスシミュレーション等のツールを開発し、活用することにより、「積層同時焼成」の各工程におけるプロセスで生じる現象を科学的なアプローチで解明し、「A) 非常に微細な部品構造を制御して作りこむ高度製造技術」として確立させることを目指すものである。日本の強みである、企業が蓄積してきた技術やノウハウをデータとして活用することが可能であり、日本企業にとって特に有利な方法であると考えられる。「積層同時焼成技術」を継承することで、B)、C) の要件はクリアできると考えられる。

以上のことから、実現手段の候補の中で③が最も適しているものと考えられる。積層同時焼成プロセスの精緻化には、プロセスシミュレーション技術を、ファインセラミックス製造の全工程にまで拡張することが課題である。図 21 は、先に示した積層同時焼成の製造工程の図 14 を一般化したもので、上流工程の因子の下流工程への影響のイメージを表しているものである。ファインセラミックスは原料粉体と添加剤を出発材料とするが、連続する各工程で大きな形質変化が起こる（例えば、有機物の添加剤の「脱脂（脱バインダ）」の工程における焼失や、「焼成」工程におけるセラミック粒子の粒成長や化学変化など）。さらに、上流工程の因子が下流工程に、直接、あるいは間の工程をまたいで、横断的に影響することもある。したがって、製造工程全体を精緻化するには、一つ一つの工程を個別に精緻化した上で、さらに、前工程からの影響、及び、後工程への影響も考慮する必要がある。



図 21 ファインセラミックス製造工程における工程間の因子の影響のイメージ出

典：公開情報を基に NEDO 技術戦略研究センター作成

(2021)

現時点のプロセスシミュレーションの技術例としては、ファインセラミックスセンター（JFCC）の取り組みが挙げられる。JFCC では、独自の焼結シミュレーション技術を基に開発した焼結シミュレーションソフトウェア SinterPro（ver.2）による開発の支援を行っている²⁶。シミュレーションの例を図 22 に示す。2020 年度の研究成果集には、課題として「セラミックス製品の開発・製造では、試行錯誤を繰り返して焼結プロセスを最適化している。プロセス最適化

²⁶ “焼結時の課題を解決！シミュレーションソフト SinterPro”。T-7, 2020 年度 JFCC 研究成果集。
<https://www.jfcc.or.jp/result/20t07.html>

を高効率で短期間に進めるためには、プロセスシミュレーション技術の活用が不可欠である」との言及がある²⁷。

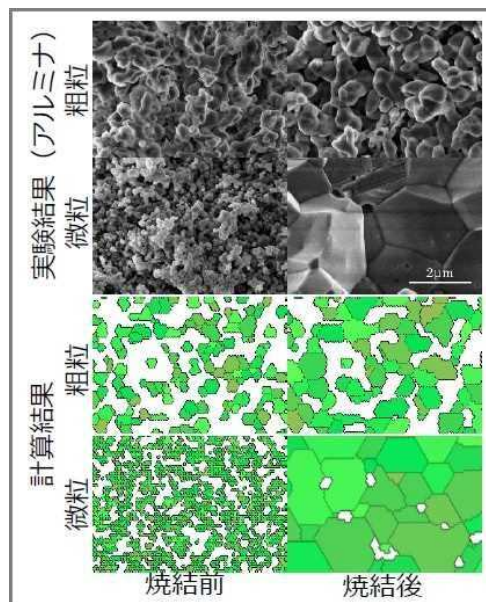


図 22 焼結・粒成長シミュレーションの例

出典：2020 年度 JFCC 研究成果集 R-22

プロセスシミュレーション技術をファインセラミックス製造の全プロセスにまで拡張するには、各プロセスで生じる現象のメカニズムを解明するための解析技術の開発も重要である。その中でもプロセス中の挙動をリアルタイムで解析する高解像度動的解析技術や、内部構造や欠陥の高解像度 3D 観察技術が特に求められている。

動的解析技術の例としては、横浜国立大学による光コヒーレンストモグラフィを用いたセラミックスプロセス中の構造形成過程のリアルタイム 3 次元観察が挙げられる（図 23）²⁸。

²⁷ “SinterPro を用いたプロセスシミュレーション技術の開発”. R-22, 2020 年度 JFCC 研究成果集.
<https://www.jfcc.or.jp/result/20r22.html>

²⁸ “セラミックスプロセスチェーン最適化を目指した構造形成過程のリアルタイム 3 次元 OCT 観察法による理解とその制御因子の科学的解明”. 横浜国立大学多々見・飯島研究室.
<http://ceramics.ynu.ac.jp/study.html>

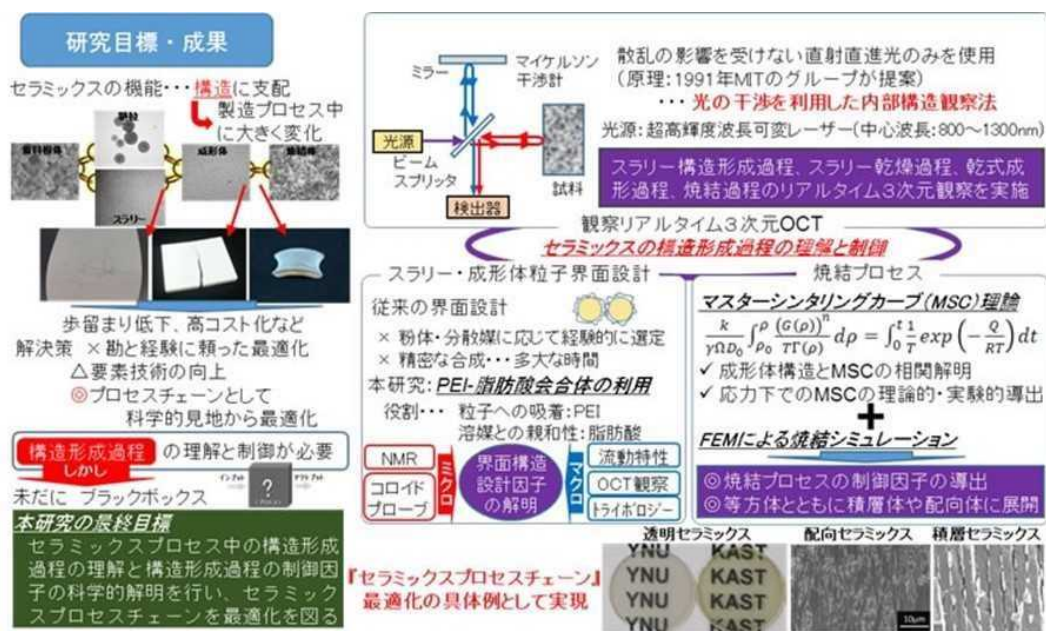


図 23 セラミックスプロセスチェーン最適化を目指した構造形成過程のリアルタイム
3 次元 OCT 観察法による理解とその制御因子の科学的解明

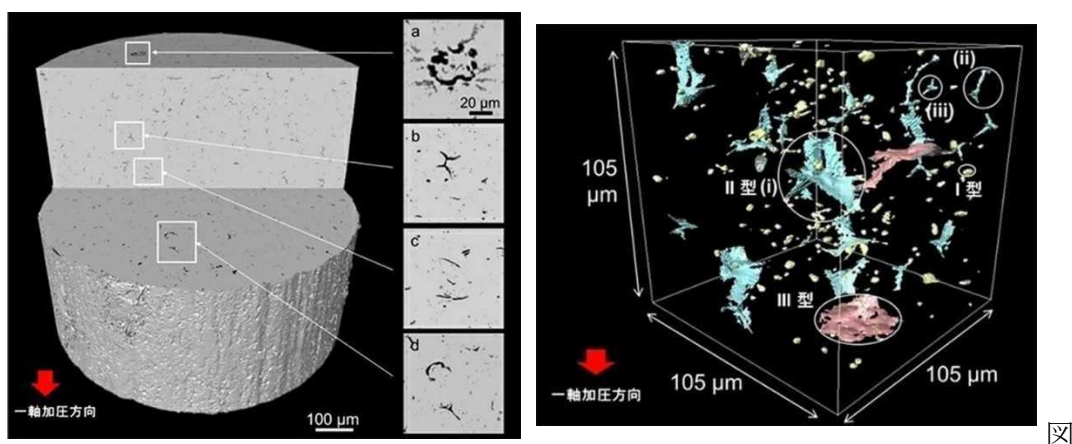
出典：横浜国立大学 多々見・飯島研究室ウェブサイト

また、高解像度 3D 観察技術の例としては、東京工業大学らの研究グループによる大型放射光施設 (SPring-8) を活用した、放射光マルチスケール X 線 CT が挙げられる (図 24) ^{29 30}。

²⁹ “放射光でセラミックス内部の欠陥観察に成功”。東工大ニュース。

<https://www.titech.ac.jp/news/2019/045066.html>

³⁰ 大熊他. 放射光マルチスケール CT で見るセラミックスの 3 次元内部欠陥構造. 粉体および粉末冶金. 2019, vol.66, no.12, p. 604-610. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspm/66/12/66_604/_pdf



24 放射光マルチスケール CT で見るセラミックスの 3 次元内部欠陥構造

出典：東京工業大学プレスリリース

6.3. 2-3 技術開発の方向性

ここでは実現手段③「積層同時焼成プロセスを精緻化するためのツールの開発」について詳述する。

セラミック電子部品製造のコア技術と言える「積層同時焼成」を精緻化するには、各工程において、原料粉体の超微粒子化などに伴って生じる新たな現象や特性に関わるメカニズムを解明するとともに、各工程で生じる現象の変化が最終的に焼結体製品の構造や信頼性に与える影響を、図 21 に示されているような「プロセスチェーン」として理解し、メカニズムに基づいた科学的アプローチで全工程を統一的に設計することが重要であると考えられる。

現状は、ファインセラミックス製造各工程で生じる現象のメカニズムの統一的理解が十分ではない状態である。ギャップ分析より、技術開発課題と具体的手段の候補を表 4 のようにまとめた。これら実現手段の候補は、それぞれが関係し合うものであり、図 25 に示すように連携させる、いわゆる「プロセスインフォーマティクス」手法を通じて技術開発を進めることが重要であると考えられる。

「プロセスインフォーマティクス」については、現時点で明確な定義はないが^{31 32}、本レポートでは、「材料の形状や化学的な質が時間軸で変化するプロセス設計・

³¹ 必ずしも明確な定義がある用語ではないが、広くは、材料合成プロセス開発にデータ科学の手法を導入し、これまでにできなかった材料の合成や、既存の材料の特性向上を可能にするサイエンス/テクノロジーとして理解されている。プロセスインフォーマティクスの俯瞰～材料合成プロセスへのデータ科学適用の現状と展望～、CRDS-FY2020-WR-06, 俯瞰ワークショップ報告書, JST, 2021.

<https://www.jst.go.jp/crds/report/report05/CRDS-FY2020-WR-06.html>

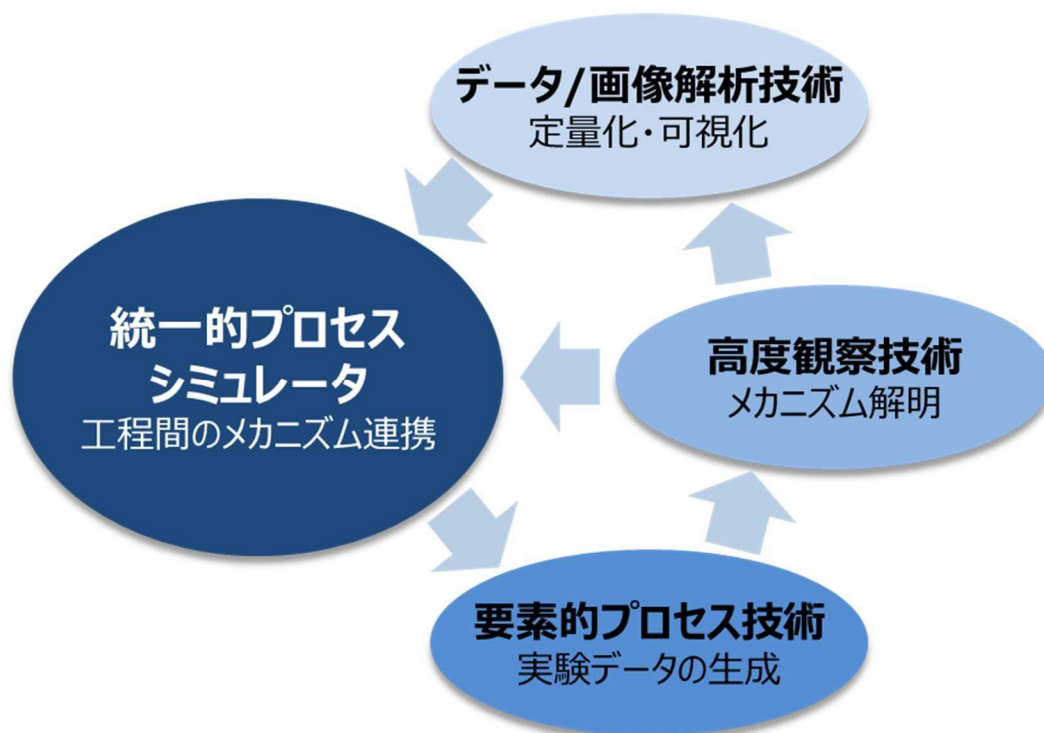
³² 「従来からの実験科学、理論科学、計算科学と、近年の進展が著しいデータ科学を、統合的・融合的に活用することにより、目的材料の合成プロセスを効率的かつ統合的に探索する方法」材料創製技術を革新するプロセス科学基盤～プロセス・インフォーマティクス～、CRDS-FY2021-SP-01, 戦略プロポーザル, JST, 2021. <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2021-SP-01.html> における定義。

制御のためのインフォマティックス技術。サイエンス（物理・化学）に基づき、多工程にわたる製造プロセスの基本設計や、そのスケールアップに活用できる計算科学と実験科学の融合技術」と定義する。

表 4 現状とのギャップと技術開発課題

現状とのギャップ・課題	必要となる技術	技術開発課題	具体的実現手段の候補
ファインセラミックス製造各工程で生じる現象のメカニズムの統一的理解	各工程で生じている現象のメカニズムを解明する技術	メカニズム解明のための観察技術の高度化	・高度観察技術
	各工程の前(入力)/後(出力)で生じる変化を特定する技術	原料、各工程後の中間体、焼結体の特性の定量化・可視化	・データ/画像解析技術
	前工程から後工程へと横断的に影響する因子に係わるメカニズムを解明する技術	各工程で生じる現象をメカニズムに基づいて全工程に連携させる、プロセスチェーンツールとしてのシミュレーション	・統一的プロセスシミュレータ
	シミュレーション結果を実現させる技術	メカニズム・シミュレーションに基づく知見の実プロセスへの反映	・要素的プロセス技術

出典：NEDO 技術戦略研究センター作成（2021）



図

25 プロセスインフォマティクスの連携イメージ

出典：NEDO 技術戦略研究センター作成（2021）

図 26 に、ファインセラミックスの製造工程と表 4 及び図 25 で具体的実現手段の候補として挙げた四つの技術開発項目との関係とその方向性を示した。2-2 でも述べたように、ファインセラミックス製造各工程で生じる現象のメカニズムの統一的理解を目指すためには、各技術開発項目ともに、全工程をカバーするような開発に取り組む必要があると考えられる。

高度観察技術の開発に関しては、図 24 に示したような、SPring-8 等の大型放射光施設の活用が望まれる。

また、統一的プロセスシミュレータの開発に関しては、ファインセラミックス粉体粒子一つ一つの挙動を、工程を連携させながら計算する、大規模で複雑なモデルを扱うことが想定されるため、大規模な計算リソースを持つ HPC（High Performance

Computing）システムの活用が望まれる。

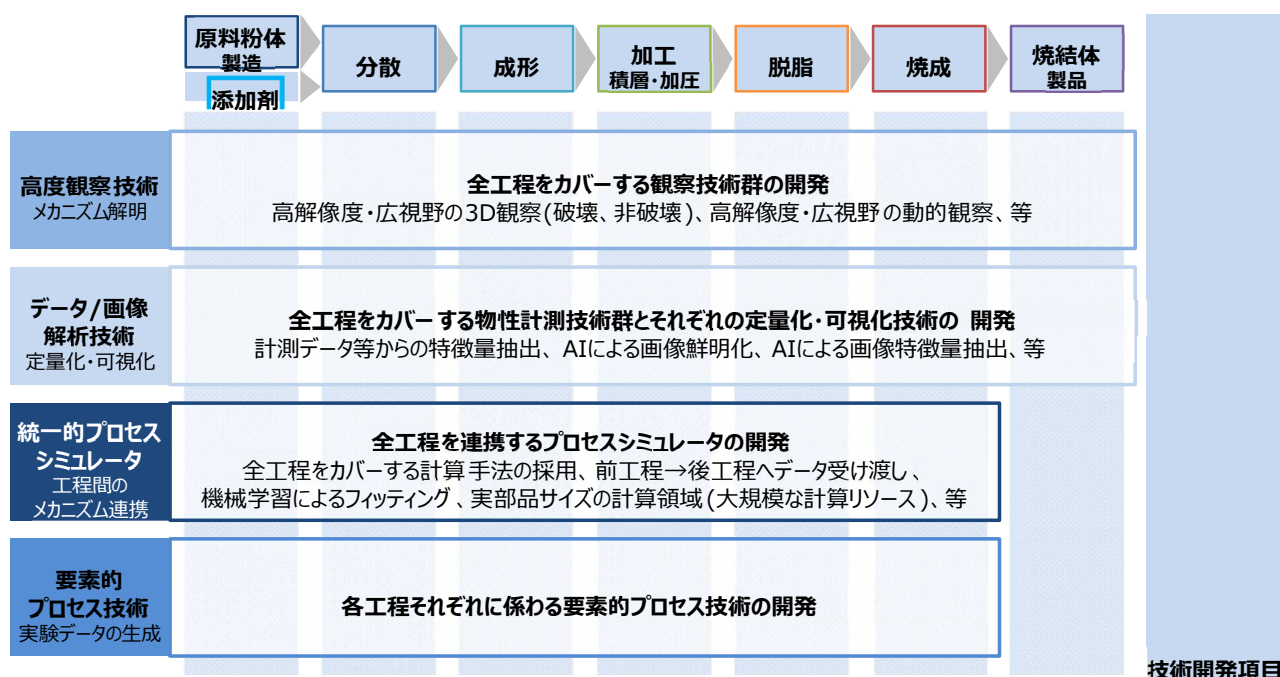


図 26 技術開発項目とその方向性

出典：NEDO 技術戦略研究センター作成（2021）

7.章 おわりに

電子部品用ファインセラミックス分野は、日本企業が競いながら技術力を高めてきた経緯があり、現在においても高い国際競争力を有している。しかし、超スマート社会の実現に向け、次世代のセラミック電子部品は、「超小型化と高信頼性化」を前提とした上で、求められる機能や性能も大きく変化することが予想される。また、中国をはじめとする海外勢の脅威も目前に迫っている。これらに対応した部品設計・材料・プロセスの技術開発の推進は喫緊の課題である。

本レポートで提案した方向に技術開発を推進するためには、国立の研究機関や大学などが有する高度な解析技術・装置の開発や高度な計算モデル設計手法の拡充や、大規模な計算リソースの活用が前提となる。さらに、激しい国際競争に対応するために垂直統合や水平分業といった様々なビジネスモデルを通じて、セラミック電子部品の製造に関わる多くの企業が協力・連携することが不可欠となる。このような、多様なプレーヤーによる有機的な連携を実現するためには、知的財産をはじめとする技術情報共有の仕組みづくり（例えば、「オープン・クローズ」の明確化）が重要であると考えられる。

本レポートを契機として、10 年先、そしてそれ以降も日本が本分野を技術でリードしていくことを目指した、次世代のセラミック電子部品製造の基盤となる革新的な技術開発を、産学官が一体となって取り組む必要がある。

TSC Foresight

2022 年 1 月 11 日発行

・研究員

・フェロー

Vol.107 電子部品用ファインセラミックス分野の技術

戦略策定に向けて

TSC Foresight Vol.107 電子部品用ファインセラミックス分野 作成メンバー

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構技術戦略研究センター(TSC)

■センター長 岸本 喜久雄

■センター次長 飯村 亜紀子

西村 秀隆 (2021 年 6 月まで)

■ナノテクノロジー・材料ユニット

・ユニット長 藤本 辰雄 森 孝博 岡田 明彦

松下 智子 (2021 年 4 月まで)

川合 知二 大阪大学産業科学研究所 招へい教授、東京都市大学特別教授北岡 康夫 大阪大学 共創機構産

業共創本部 副本部長／教授

井上 貴仁 国立研究開発法人産業総合研究所 材料・化学領域研究戦略部イノベーションコーディネータ三島 良直

国立研究開発法人日本医療研究開発機構理事長

●本書に関する問い合わせ先

電話 044-520-5150 (技術戦略研究センター)

●本書は以下 URL よりダウンロードできます。

<https://www.nedo.go.jp/library/foresight.html>

本資料は技術戦略研究センターの解釈によるものです。

掲載されているコンテンツの無断複製、転送、改変、修正、追加などの行為を禁止します。

引用を行う際は、必ず出典を明記願います。

●プロジェクト開始時関連資料

●各種委員会開催リスト

採択審査委員会		
件名	内容	実施日
第1回	採択審査委員会でのプロジェクト申請内容の説明	2022年4月26日

ステージゲート委員会		
件名	内容	実施日
	課題①—5 実施機関の課題②へのステージゲート審査	2024年1月16日

技術推進委員会		
件名	内容	実施日
第1回	外部委員を含めた事業の実施状況の確認と今後の開発への意見交換	2022年1月18日
サイトビジット	推進員の研究現場見学と意見交換（JFCC名古屋市）	2023年8月25日
第2回	外部委員を含めた事業の実施状況の確認と今後の開発への意見交換	2023年11月1日

●特許論文等リスト

【特許】

事業前半はプロセスシミュレータ群の開発のため知財出願は無し

【論文】 リスト例

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月 (掲載日)
1	Chihiro Ito, Toshio Osada, Shingo Ozaki	横浜国立大学	Finite element analysis of fracture behavior in ceramics: Competition between artificial notch and internal defects under three-point bending	Ceramics International, 48, (2022) 36460-36468 https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.08.206	有	2022/12/15
2	Gaku Okuma, Masaya Endo, Haruki Minagawa, Ryo Inoue, Hideki Kakisawa, Takuma Kohata, Toshio Osada, Takafumi Yamamoto, Masaki Azuma, Akihisa Takeuchi, Masayuki Uesugi, Olivier Guillon, Fumihiro Wakai	NIMS	3D visualization of morphological evolution of large defects during spark plasma sintering	Adv. Eng. Mater. 25 (2023) 2201534 https://doi.org/10.1002/adem.2022015349	有	2023/2/21
3	Hiromasa Kuroda, Junichi Tatami, Motoyuki Iijima, Takuma Takahashi	横浜国立大学	Novel operando observation technique based on combined optical coherence tomography-thermogravimetry for monitoring internal structural changes of drying ceramic slurries	Journal of the Ceramic Society of Japan 131 (2023) 37-41 https://doi.org/10.2109/jcersj2.23008	有	2023/2/25
4	Mariko Minami,	横浜国立大学	In-situ investigation on	Ceramics International 49 (2023) 15387-15394	有	2023/5/15

	Junichi Tatami, Motoyuki Iijima, Takuma Takahashi, Tatsuki Ohji		crack-initiation and deformation of Al2O3 green bodies during dewaxing process by combined OCT-TG-FTIR and TMA	https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.01.123		
5	Minh Chu Ngo; Hiroyuki Miyazaki; Kiyoshi Hirao; Manabu Fukushima	産総研	Measurement of Thermal Strain of Metalized Silicon Nitride Substrate in Thermal Cycling Test by Digital Image Correlation Method	Ceramics International 49 (2023) 15387-15394 https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.01.123	有	2023/5/23
6	Gaku Okuma, Fumihiro Wakai	NIMS	Synchrotron X-ray multiscale tomography: Visualization of heterogeneous microstructures, defects, and microfractures in ceramics	J Am Ceram Soc.107 (2024) 1706-1724 https://doi.org/10.1111/jace.19366	有	2023/8/3
7	Minh Chu NGO、宮崎 広行、平尾 喜代司、福島 学	産総研	Analysis of Thermal Strain of Metallized Silicon Nitride Substrate Under Cyclic Thermal Loading by Digital Image Correlation	Int J Appl Ceram Technol. 21 (2024) 1032-1041 https://doi.org/10.1111/ijac.14565	有	2023/10/10
8	白村佑真, 伊藤太陽, 松井七織, 秋庭祐弥, 青木公也, 中島佑樹, 平尾喜代司, 福島学	中京大学・産総研	Loss function for ambiguous boundaries for deep neural network (DNN) for image segmentation	Journal Electronics and Communications in Japan, 143 (2023) 914-921 https://doi.org/10.1002/ecj.12429	有	2023/12/2
9	伊藤 千紘, 前田太陽, 東龍之介, 長田 俊郎, 小幡 卓真, 尾崎 伸吾	横浜国立大学	Application of extreme value statistics to internal pore distribution in ceramics and prediction of size-dependency of strength scatter	Journal of the European Ceramic Society 44 (2024) 3381-3392 https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.12.021	有	2023/12/10
10	中島秀朗、松本尚之、小椋俊彦、近藤直樹、三村憲一、田中真司、鶴田彰宏、	産総研	Hidden correlation between rheological dynamics and crack formation	Journal of the European Ceramic Society 44 (2024) 4141-4149 https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.12.069	有	2023/12/20

	渡邊亮太、大石晃広、薄川隆太郎、小橋和文、岡崎俊也		in water-based slurry			
11	Ryuji Yoshida, Yasutoshi Mizuta, Takeharu Kato, Teiichi Kimura	JFCC	Large volume 3D reconstruction using Plasma FIB-SEM system vs X-ray CT	Microscopy 00 (2024) 00 1-4 https://doi.org/10.1093/jmicro/dfae003	有	2024/1/19
12	Kai-en Yang, Shuo LI, Guangtao DUAN, Mikio SAKAI	東京大学	On Fostering Predictions in Data-driven Reduced Order Model for Eulerian-Lagrangian Simulations: Decision of Sufficient Training Data:	Journal of Chemical Engineering of Japan 57 (2024) 2316155 https://doi.org/10.1080/00219592.2024.2316155	有	2024/2/22
13	Toshihiko Ogura, Hideaki Nakajima, Ryutaro Usukawa, Naoki Kondo, Toshiya Okazaki	NIMS、産総研	Direct observation and elemental analysis of material nanoparticles in solution using scanning electron-assisted dielectric microscopy and EDS	Applied Physics Letters 124 (2024) 092902 https://doi.org/10.1063/5.0190602	有	2024/2/26
14	Shuo Li, Guangtao Duan, Mikio Sakai	東京大学	On reduced-order modeling of gas-solid flows using deep learning	Physics of Fluids 36 (2024) 033340 https://doi.org/10.1063/5.0193480	有	2024/3/15

【外部発表】リスト

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	福島学	産総研	次世代パワーモジュールで使用するマルチマテリアル材開発と DX 技術の適用	2022 年度 マルチマテリアル・シンポジウム	2022/11/10
2	Minh Chu NGO、宮崎広行、平尾喜代司、福島学	産総研	Study of metalized silicon nitride substrate reliability under thermal cycling test using digital image correlation	47th International Conference and Exposition on Advanced Ceramics and Composites (ICACC 2023)	2023/1/24

3	秋庭祐弥、白村佑真、松井七織、伊藤大陽、村山賢人、三谷智輝、青木公也、中島佑樹、平尾喜代司、福島学	中京大学・産総研	人工的に生成された断面画像を用いたセラミックスの微細構造分布の予測	動的画像処理実利用化ワークショップ	2023/3/2
4	田中諭	長岡技術科学大学	窒化ケイ素のシート成形における成形体内部構造の可視化	日本セラミックス協会 2023 年年会	2023/3/8
5	中村 美佑・多々見 純一・飯島 志行	横浜国立大学	OCT で観察した温度上昇に伴うアルミナスラリーの内部構造変化	日本セラミックス協会 2023 年年会	2023/3/8
6	黒田 啓真・多々見 純一・飯島 志行・高橋 拓実	横浜国立大学	SiO ₂ スラリーの乾燥過程と焼結過程における 内部構造の同一視野 OCT その場観察	日本セラミックス協会 2023 年年会	2023/3/8
7	福島学・平尾喜代司・中島佑樹・青木公也・尾崎伸吾・中尾航	産総研	セラミックス材料評価技術への DX 技術の融合	日本セラミックス協会 2023 年年会	2023/3/9
8	Minh Chu NGO、宮崎広行、平尾喜代司、福島学	産総研	Measurement of Thermal Strain of Metalized Silicon Nitride Substrate in Thermal Cycling Test by Digital Image Correlation Method	International Conference on Electronics Packagin	2023/4/20
9	宮崎広行、Minh Chu NGO、平尾喜代司、福島学	産総研	Effect of Thermal Cycle Temperature Gap on Thermal Fatigue of Metallized Silicon Nitride Substrates for SiC Power Modules	International Conference on Electronics Packagin	2023/4/20
10	西村桃葉、中澤葵、坂根慎治、高木知弘	京都工芸繊維大学	粒子のサイズ分布を考慮した焼結過程の multi-phase-field シミュレーション	第 28 回計算工学講演会	2023/5/31
11	澤田有弘、松本純一	産総研	液中における粒子パッキングから焼結までの連成・連携解析	第 28 回計算工学講演会	2023/5/31
12	田中諭	長岡技術科学大学	Elucidation of the cause of defect formation in bulk ceramics by three-dimensional internal structure observation method	XVIII Conference of the European Ceramic Society	2023/7/6
13	寺坂宗太、野村浩、木村禎一	JFCC	セラミックスの成形～焼結プロセスミクロ/マクロシミュレーション	JFCC 研究発表会	2023/7/21
14	澤田 有弘、松本 純一	産総研	Computational FSI with contact method for multi-phase particulate flows	17th U.S. National Congress on Computational Mechanics	2023/7/25
15	楊 凱恩、李碩、段 广涛、酒井 幹夫	東京大学	A Novel Technique for Determination of Proper Sampling Interval for Data-driven ROM based Bead Mill Simulations	化学工学会山形大会 2023	2023/8/8
16	Shuo Li, Guangtao Duan, Mikio Sakai	東京大学	LPOD-based Reduced Order Model for Eulerian-Lagrangian Simulation of a Bead Mill	日本混相流学会 混相流シンポジウム 2023	2023/8/24

17	西村桃葉, 中澤葵, 坂根慎治, 高木知弘	京都工芸繊維大学	Effect of powder size distribution on the densification behaviour of alumina ceramics sintering: phase-field study	Sintering 2023	2023/8/28
18	Gaku Okuma	NIMS	Heterogeneous evolution of pore distribution during sintering of a submicron alumina powder visualized by using synchrotron X-ray CT	Sintering 2023	2023/8/28
19	高木知弘, 中澤葵, 西村桃葉, 坂根慎治	京都工芸繊維大学	Phase-field study of densification and grain growth during sintering	Sintering 2023	2023/8/29
20	吉田竜視、加藤丈晴、木村禎一	JFCC	プラズマ FIB を用いた無機材料の大領域 3 次元構築	SCANTECH2023	2023/8/31
21	Fumihiko Wakai	NIMS	Rigid body motion of multiple particles in solid-state sintering	国際会議 Sintering2023	2023/8/31
22	秋庭祐弥, 伊藤大陽, 松井七織, 三谷智輝, 村山賢人, 青木公也, 中島佑樹, 平尾喜代司, 福島学	中京大学・産総研	セラミックス焼結体 SEM 画像の画像生成手法の性能評価	第 28 回知能メカトロニクスワーク ショップ 2023	2023/9/3
23	岡崎俊也	産総研	セラミックス製造プロセスの可視化技術開発とメカニズム解明への挑戦	日本セラミックス協会 第 36 回秋季シンポジウム	2023/9/6
24	中島秀朗、松本尚之、小椋俊彦、近藤直樹、三村憲一、岡崎俊也	産総研	シート成形時のクラック形成に関する水系スラリーのレオロジカル挙動	日本セラミックス協会 第 36 回秋季シンポジウム	2023/9/6
25	小野巧、竹林良浩、陶究	産総研	機械学習を利用したセラミックスナノ粒子フロー製造プロセス開発の高度化	日本セラミックス協会 第 36 回秋季シンポジウム	2023/9/6
26	大熊 学, 長田 俊郎, 垣澤 英樹, 若井 史博, 皆川 開, 新井 優太郎, 井上 遼, 竹内 晃久, 上相 真之, 田中 諭	NIMS・長岡技術科学大学	Heterogeneous evolution of pore distribution during sintering of a submicron alumina powder observed by using synchrotron X-ray CT	日本セラミックス協会 第 36 回秋季シンポジウム	2023/9/6
27	山口 祐貴, 中山 麗, 鷲見 裕史	産総研	酸塩基反応を利用した BaZrO ₃ セラミックスの低温緻密化と機械特性のプロセス依存性	日本セラミックス協会 第 36 回秋季シンポジウム	2023/9/6
28	大久保岳人・田中諭	長岡技術科学大学	窒化ケイ素シート体の微構造に及ぼす焼結助剤の分散性の影響	日本セラミックス協会 第 36 回秋季シンポジウム	2023/9/6
29	中山 麗, 山口 祐貴, 鷲見 裕史	産総研	室温近傍での低温焼結プロセスを用いたチタン酸バリウムの作製とその物性	日本セラミックス協会 第 36 回秋季シンポジウム	2023/9/7
30	清野元紀・久保正樹・木村禎一・寺坂宗	東北大学・JFCC	離散要素法シミュレーションを用いた溶媒蒸発に伴う粒子の構造形成過程に及ぼす分散剤の影響の検討	日本セラミックス協会 第 36 回秋季シンポジウム	2023/9/7

	太・小池修・辰巳怜				
31	Shuqi Guo, Gaku Okuma, Kimiyooshi Naito, Hideki Kakisawa	NIMS	Mechanical Properties of Hot-Pressed VB2-SiC Composites With and Without WC	Ceramics International	2023/9/8
32	田中諭	長岡技術 科学大学	窒化ケイ素セラミックスのマル チスケール観察と機械的特性へ の影響	日本セラミックス協 会 第36回秋季シ ンポジウム	2023/9/8
33	小野巧、竹林 良浩、陶究	産総研	インフォマティクスを利用した セラミックスナノ粒子フロー製 造プロセス開発	化学工学会 第54 回秋季大会	2023/9/11
34	Shuo Li, Guangtao Duan, Mikio Sakai	東京大学	A graph neural network based surrogate model for granular flows with complex boundary geometries	DEM9	2023/9/17
35	大熊 学	NIMS	放射光 X 線 CT 技術を駆使し た高信頼性材料設計の革新	日本金属学会	2023/9/20
36	Shuo LI, Guangtao DUAN, Mikio SAKAI	東京大学	How modal-analysis techniques be applied to industrial granular flow simulations?	The 4th International Conference and Exhibition on Powder Technology Indonesia 2023	2023/9/21
37	東 龍之介, 前田 太陽, 平尾 喜代 司, 中島 佑 樹, 福島 学, 中尾 航, 尾崎 伸 吾	横浜国立 大学	曲げ試験結果に基づくアルミナ 焼結体の内部欠陥分布の逆推定	第30回機械材料・ 材料加工技術講演会	2023/9/27
38	石田 大樹, 長田 俊郎, 尾崎 伸吾	横浜国立 大学	仮想組織モデルを用いたステレ オロジーの精度検証	第30回機械材料・ 材料加工技術講演会	2023/9/27
39	福島学, 平尾 喜代司, 中島 佑樹, 青木公 也, 尾崎伸 吾, 中尾航	産総研	Strategy to Estimate Mechanical Properties of Engineering Ceramics by Using AI-determined Grain Information and Simulation	MS&T 2023	2023/10/3
40	Gaku Okuma, Fumihito Wakai	NIMS	Synchrotron X-ray multiscale tomography: Visualization of heterogeneous microstructures, defects, and microfractures in ceramics	MS&T 2023	2023/10/3
41	中澤葵, 坂根 慎治, 高木知 弘	京都工芸 繊維大学	焼結過程の材料組織と欠陥を高 精度に予測可能な multi- phase-field シミュレーション 法の開発	第9回材料 WEEK	2023/10/10
42	中澤葵, 坂根 慎治, 高木知 弘	京都工芸 繊維大学	Multi-phase-field 法による成 形体形成から焼結過程までの連 続シミュレーション	日本機械学会 第36 回計算力学講演会	2023/10/25
43	大久保岳人・ 田中諭	長岡技術 科学大学	窒化ケイ素シートにおける欠陥 形成原因の解明	日本セラミックス協 会東北北海道支部研 究発表会	2023/11/3
44	中山 麗, 山 口 祐貴, 鷲 見 裕史	産総研	化学焼結プロセスにおける含水 チタニアゲル中へのカチオン拡 散メカニズム	無機マテリアル学会 第147回学術講演会	2023/11/9

45	福島学, 平尾喜代司, 中島佑樹, 青木公也, 尾崎伸吾, 中尾航	産総研・中京大学・横浜国立大学	Reliability evaluations of ceramic materials by applying AI and simulation technology	第33回日本MRS年次大会	2023/11/14
46	中島秀朗	産総研	Correlation between rheological dynamics and crack initiation in aqueous slurries	第33回日本MRS年次大会	2023/11/14
47	中澤葵, 西村桃葉, 坂根慎治, 高木知弘	京都工芸繊維大学	Large-scale phase-field computation for predicting material microstructures from shape forming to sintering	The 11th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing	2023/11/19
48	植松昌子, 木村禎一	JFCC	共焦点蛍光顕微鏡を用いたスラリー内部粒子運動の3次元観察	東海支部学術研究発表会	2023/12/2
49	Minh Chu NGO, 宮崎広行, 平尾喜代司, 福島学	産総研	Thermal strain measurement of metallized silicon nitride substrate under thermal cycling test using digital image correlation	VANJ Conference 2023	2023/12/2
50	伊藤大陽, 松井七織, 秋庭祐弥, 三谷智輝, 村山賢人, 青木公也, 中島佑樹, 平尾喜代司, 福島学	中京大学・産総研	表現学習による機械的な判別困難性を考慮した領域分割DNNにおける損失関数の検討	ViEW2023 ビジョン技術の実利用ワークショップ2023	2023/12/7
51	松井七織, 伊藤大陽, 秋庭祐弥, 三谷智輝, 村山賢人, 青木公也, 中島佑樹, 平尾喜代司, 福島学	中京大学・産総研	粒子セグメンテーションDNN学習のためのカリキュラム学習によるアノテーションコスト低減手法の検討	ViEW2023 ビジョン技術の実利用ワークショップ2023	2023/12/7
52	中山 麗	産総研	室温近傍における金属複合酸化物の緻密化プロセス開発	日本セラミックス協会関東支部 第11回若手研究発表交流会	2023/12/9
53	Minh Chu NGO, 宮崎広行, 平尾喜代司, 福島学	産総研	Acoustic Emission Monitoring of Metallized Ceramic Substrate During Thermal Cycling Test	MRM2023/IUMRS-ICA2023	2023/12/11
54	Minh Chu NGO, 宮崎広行, 平尾喜代司, 福島学	産総研	Measurement of Thermal Strain of Metallized Silicon Nitride Substrate in Thermal Cycling Test by Digital Image Correlation Method	第6回次世代電子実装システム技術講演会	2023/12/11
55	Minh Chu NGO, 宮崎広行, 平尾喜代司, 大司達樹, 福島学	産総研	A DIC-Based Study of Thermal Stress-Strain Behavior of Cu on Metallized Si ₃ N ₄ Substrate under Thermal Cycling	48th International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites	2024/1/28
56	Taiyo Maeda, Toshio Osada, Shingo Ozaki	横浜国立大学	Numerical prediction of strength scatter of ceramics: Inverse estimation of microstructural	48th International Conference and Expo on Advanced	2024/1/28

			distribution based on strength test data	Ceramics and Composites	
57	Ryunosuke Higashi, Minh Chu Ngo, Hiroyuki Miyazaki, Kiyoshi Hirao, Manabu Fukushima, Shingo Ozaki	横浜国立大学・産総研	Finite element analysis of thermal cycling test for metallized ceramic substrate	48th International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites	2024/1/28
58	Shingo Ozaki, Taiyo Maeda, Ryunosuke Higashi, Toshio Osada	横浜国立大学	Numerical prediction of strength scatter of ceramics: Forward analysis of strength distribution based on microstructural information	48th International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites	2024/1/28
59	中澤葵, 坂根慎治, 高木知弘	京都工芸繊維大学	Large-scale phase-field computation for predicting material microstructures from shape forming to sintering	48th International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites	2024/1/28
60	高木知弘, 中澤葵, 坂根慎治	京都工芸繊維大学	Continuous phase-field simulation of powder compaction and subsequent sintering	48th International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites	2024/1/28
61	大司達樹、福島学, 平尾喜代司, 中島佑樹, 青木公也, 尾崎伸吾, 中尾航	京都工芸繊維大学	Computer-aided analyses for structural reliabilities of ceramic materials	48th International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites	2024/1/28
62	村山賢人, 伊藤大陽, 松井七織, 秋庭祐弥, 三谷智輝, 村上昂史, 青木公也, 小椋俊彦, 岡崎俊也, 中島秀明, 近藤直樹, 薄川隆太郎, 福島学	中京大・産総研	誘電率顕微鏡画像に基づくセラミックスラリーの粒子分散状態計測手法の検討	精密工学会・画像応用技術専門委員会主催 動的画像処理実利用化ワークショップ	2024/3/4
63	植松昌子、木村禎一	JFCC	鋳込成形における石膏型近傍の粒子挙動その場観察	日本セラミックス協会 2024 年年会	2024/3/14
64	中島秀朗, 小椋俊彦, 薄川隆太郎, 近藤直樹, 岡崎俊也	産総研	遠心沈降法を用いたアルミナスラリーの粒子-バインダー相互作用の定量解析	日本セラミックス協会 2024 年年会	2024/3/14
65	宮崎 広行、福島 学	産総研	蛍光型のレーザー顕微鏡と多光子励起顕微鏡を用いたビッカース圧痕の形態観察	セラミックス協会 2024 年年会	2024/3/15
66	宮崎 広行、中島祐樹、平尾喜代司、福島 学	産総研	蛍光型のレーザー顕微鏡と多光子励起顕微鏡を用いたセラミックス焼結体中の粗大欠陥観察	セラミックス協会 2024 年年会	2024/3/15

67	福島学	産総研	AI およびシミュレーションによるセラミックス材料の物性予測	セラミックス協会 2024 年年会	2024/3/16
----	-----	-----	--------------------------------	----------------------	-----------

(b) 新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	NEDO 他	100℃以下 “焼かないセラミックス” 製造プロセス確立 26 年度めど、NEDO 次世代ファインセラミックス製造プロセス基盤技術の開発スタート	日刊工業新聞	2022/08/10
2	NEDO、産総研	NEDO と産総研、ファインセラミックス内部のキラ欠陥の可視化技術を開発	NEDO プレスリリース 日経新聞 Web 版等	2024/3/8
3				

(c) その他 展示会への出展

番号	所属	タイトル	展示会名	発表年月
1	NEDO 他	次世代ファインセラミックス製造プロセス基盤構築・応用開発プロジェクト	Nanotech 2023	2023 年 1 月
2	NEDO 他	次世代ファインセラミックス製造プロセス基盤構築・応用開発プロジェクト	Nanotech 2024	2024 年 1 月
3				