



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

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

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。

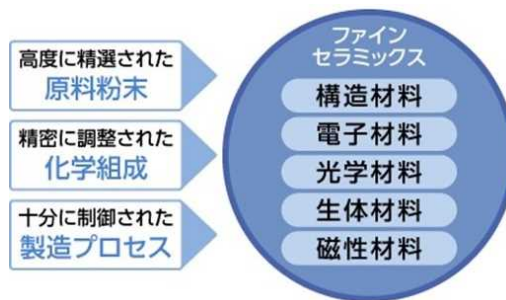


図 1 ファインセラミックスの概念図

出典: 京セラウェブサイト

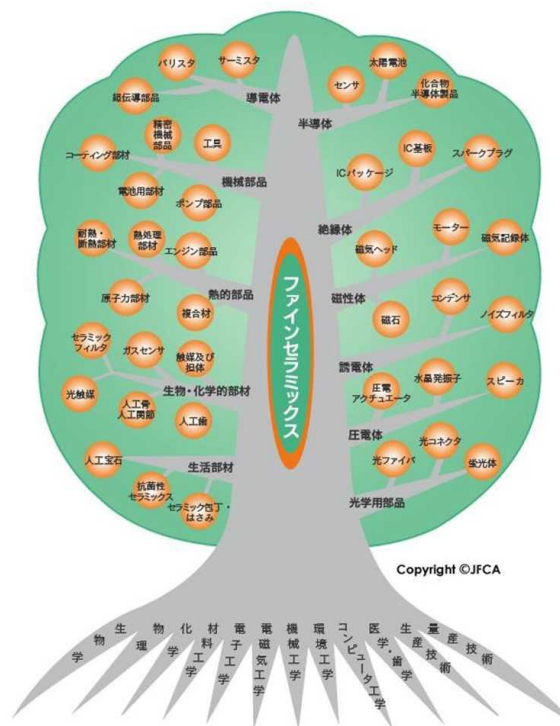


図 2 ファインセラミックスの木

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。

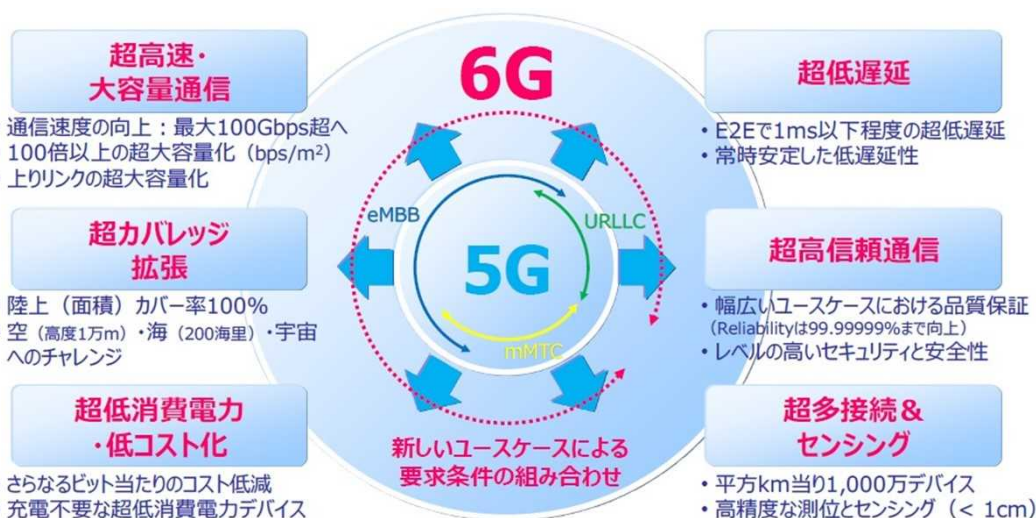


図 3 6G で目指す無線ネットワーク技術への要求条件

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。

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。ニュースイッチ(日刊工業新聞). 2018-08-21. <https://newswitch.jp/p/14146>

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。

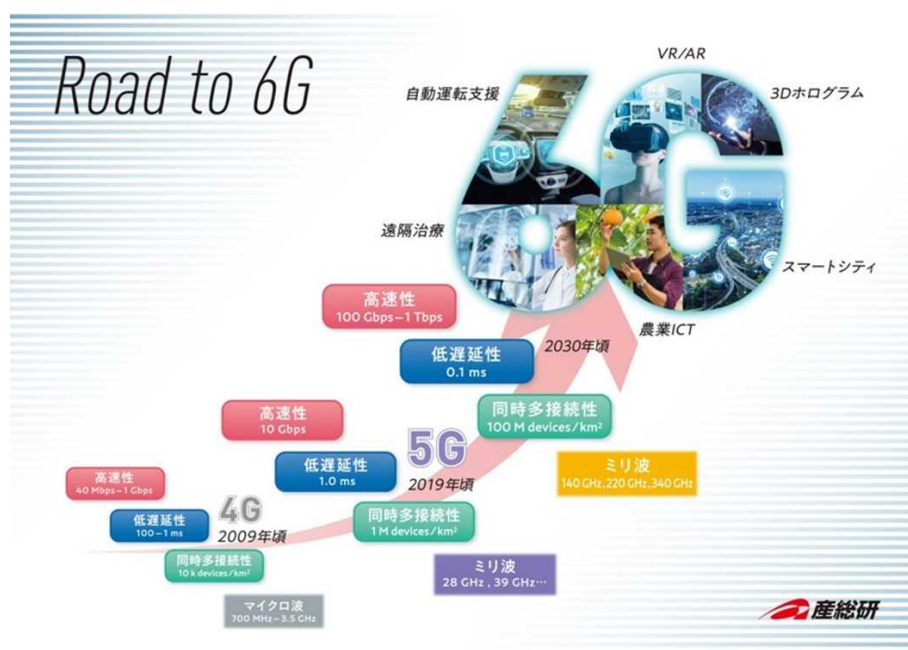


図 4 4G から 6G に至る技術の変遷と、6G がもたらす社会像

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.

1章 解決すべき社会課題と実現したい将来像

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。

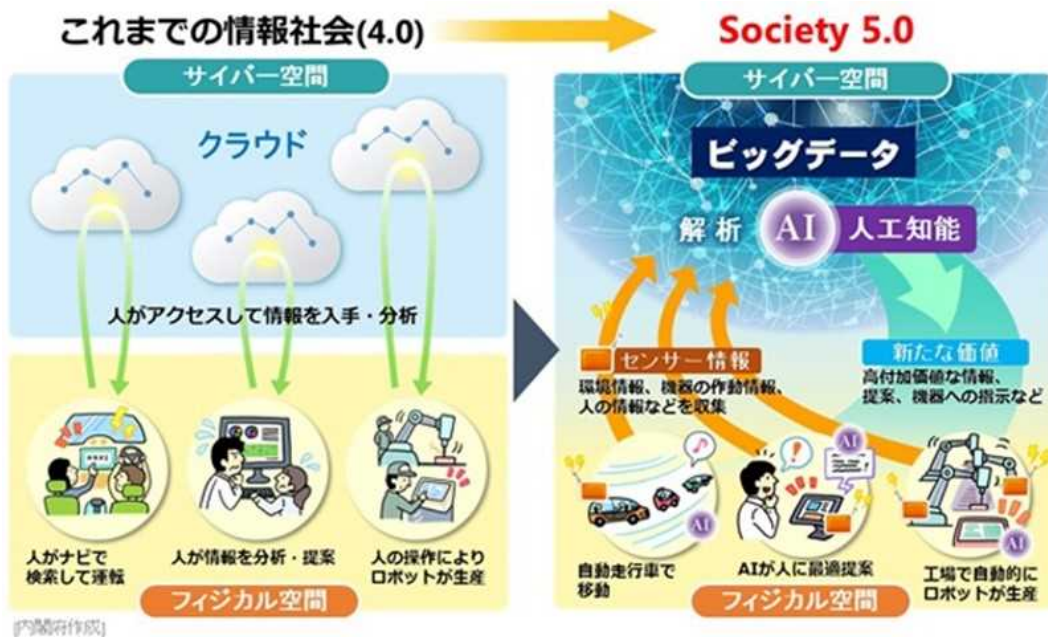


図 5 Society 5.0

出典:内閣府ウェブサイト(2016)

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

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。

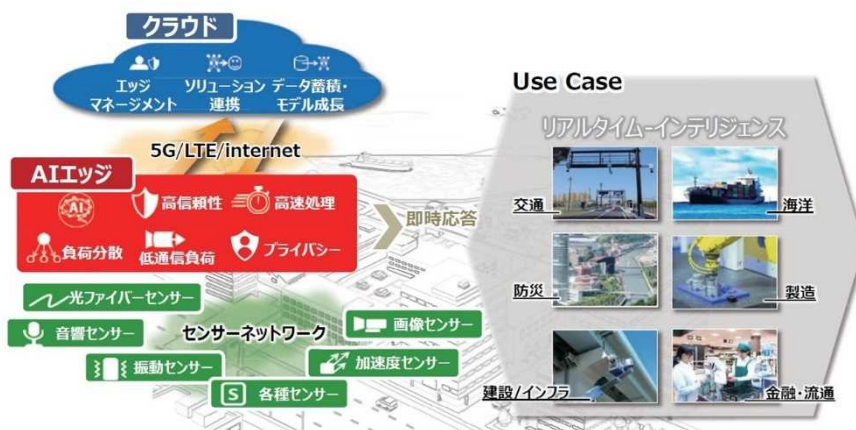


図6 AI エッジコンピューティングコンセプト

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。

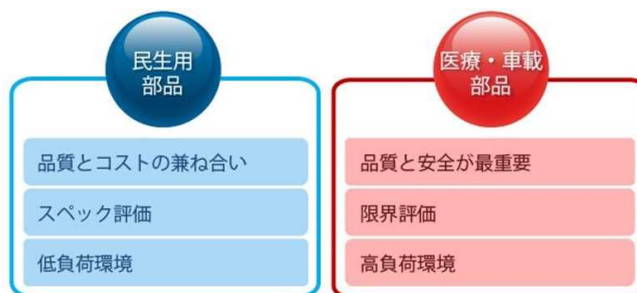


図7 高信頼性機器用電子部品のコンセプト

出典: 村田製作所ウェブサイト

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>

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)。

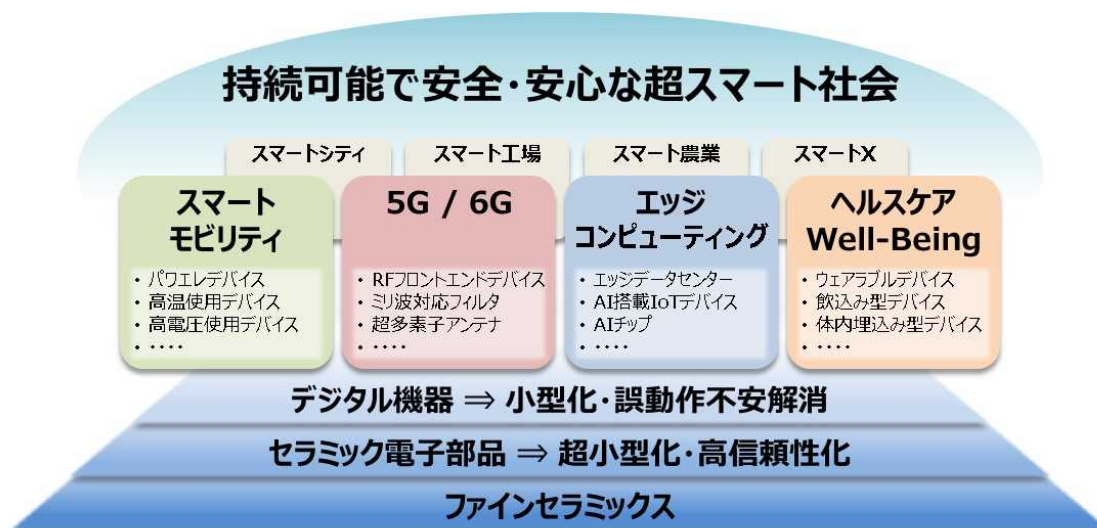


図 8 将来像「セラミック電子部品が支える超スマート社会」のイメージ

出典: NEDO 技術戦略研究センター作成(2021)

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。

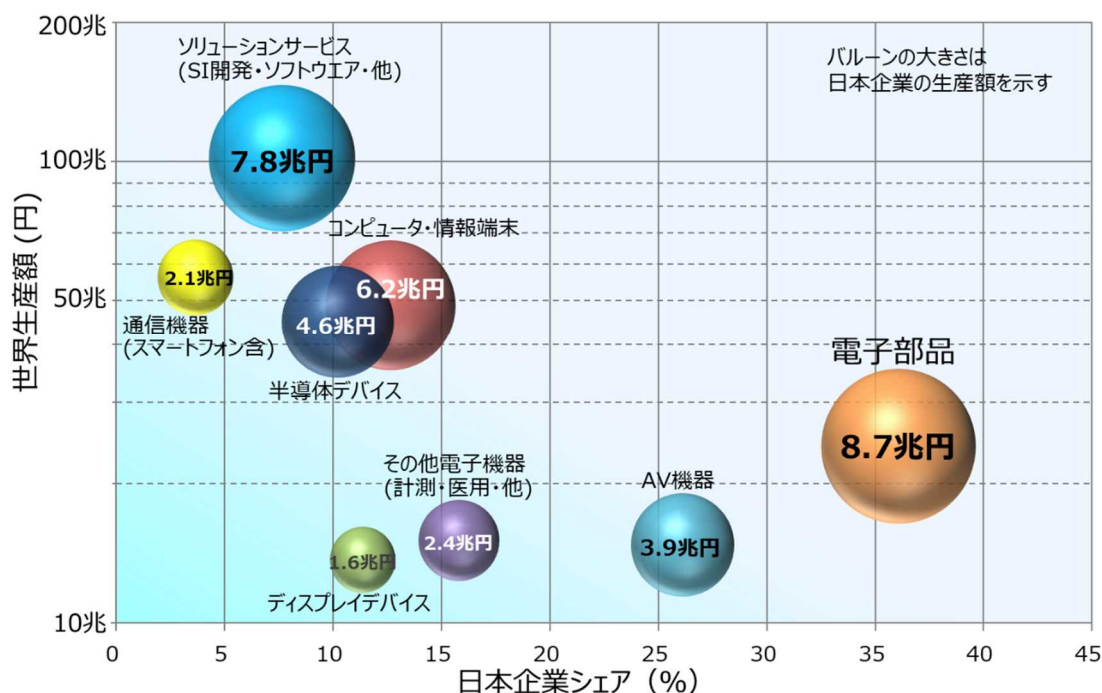


図 9 電子情報産業の世界生産額と日本企業シェア(2019 年実績)

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

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。

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。

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。

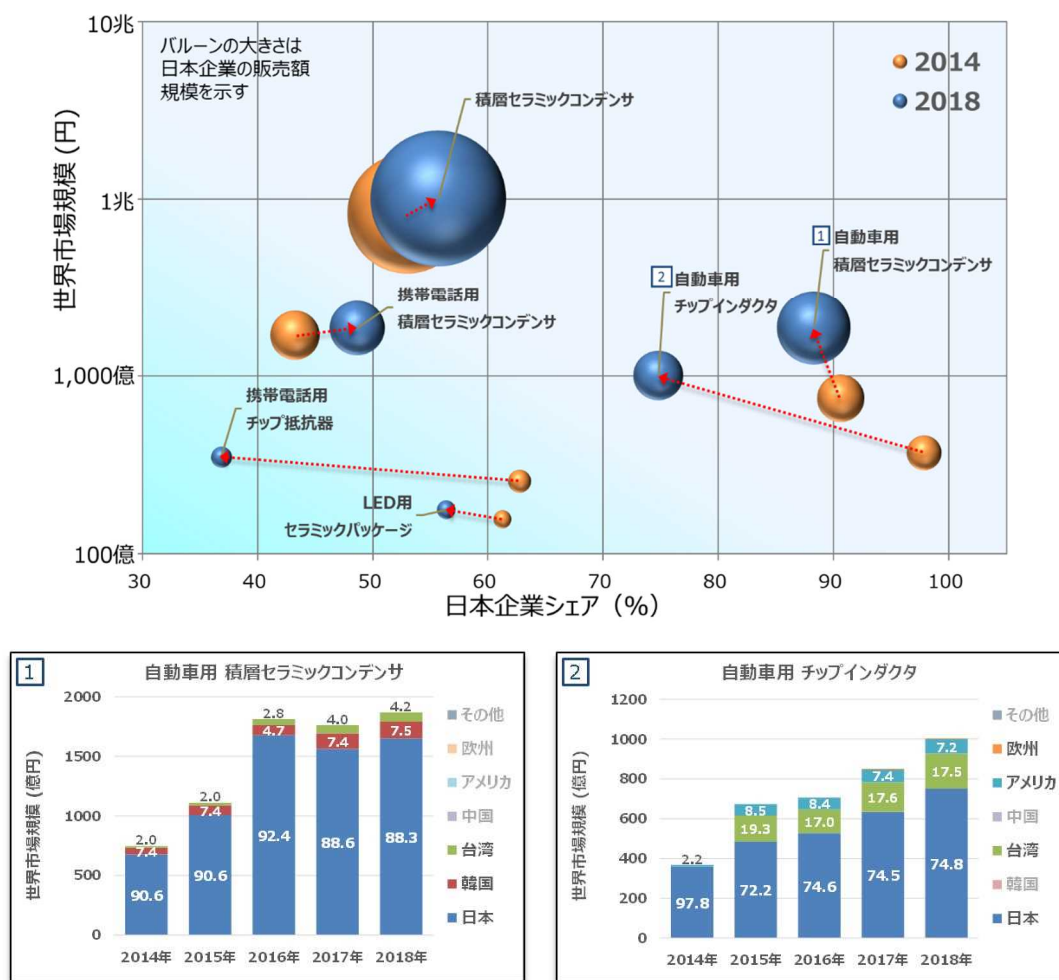


図 10 セラミック電子部品の日本企業シェア推移 (2014~2018)

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。

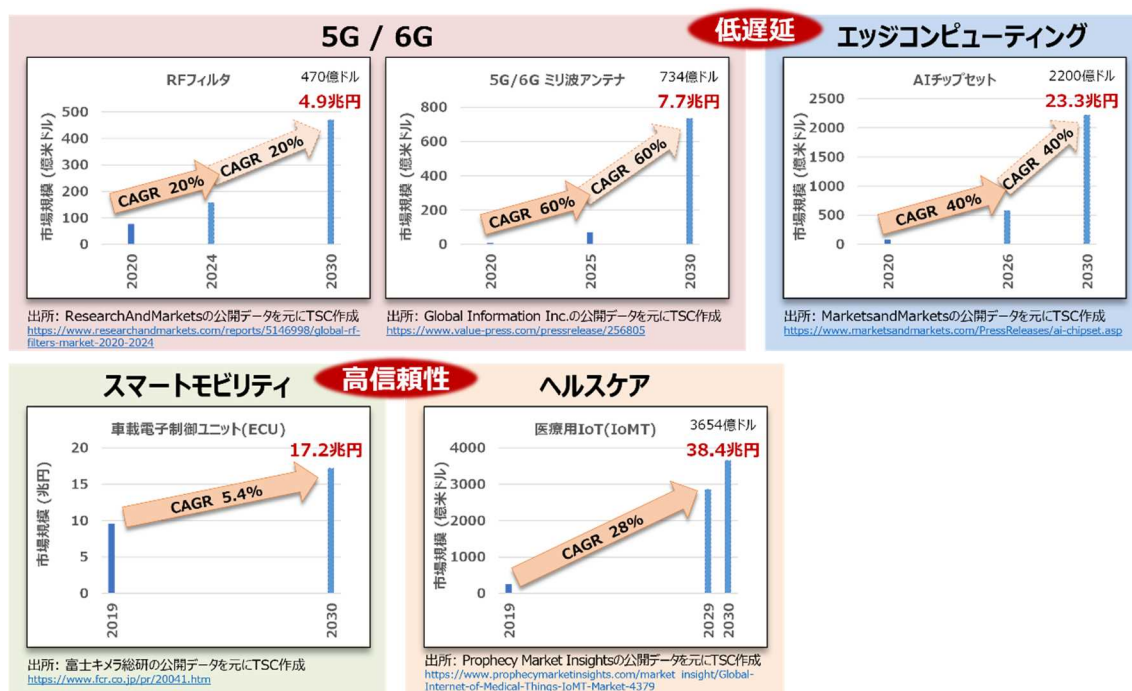


図 11 成長が期待される分野の 2030 年に向けた市場予測

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研究プロジェクト等	主な研究拠点
日本	<p>【内閣府・NEDO・JST 等】</p> <ul style="list-style-type: none"> 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) 	<ul style="list-style-type: none"> ファインセラミックスセンター (JFCC) AIST NIMS
アメリカ	<p>【DOE・NSF 等】</p> <p>※ファインセラミックス全般は DOD、DOE、NASA が主要プレーヤー</p> <ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 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	<p>【HORIZON 2020】</p> <ul style="list-style-type: none"> 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) 	<ul style="list-style-type: none"> Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems IKTS
韓国	<p>【科学情報通信部】</p> <ul style="list-style-type: none"> 「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) 	<ul style="list-style-type: none"> KAIST
中国	<p>【国務院】</p> <ul style="list-style-type: none"> 「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 	<ul style="list-style-type: none"> 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

(5) 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。



図 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。



図 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	全ファミリ件数 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	42.6%	19.3%	10.1%	12.8%	6.9%	7.1%	1.2%
コンデンサ	5358	42.0%	7.6%	3.6%	20.5%	24.4%	1.4%	0.6%
固体電解質	1482	41.7%	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%	26.7%	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%	2.9%
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

用途別材料の集計 ファミリ件数 2012-2018	材料				
	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
用途					
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)

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のため、同時焼成する金属が導電性の低いタンゲステンやモリブデンなどに限られていた。

(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、出願人別ファミリー件数ランキングで、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。

2章 解決・実現手段の候補

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。

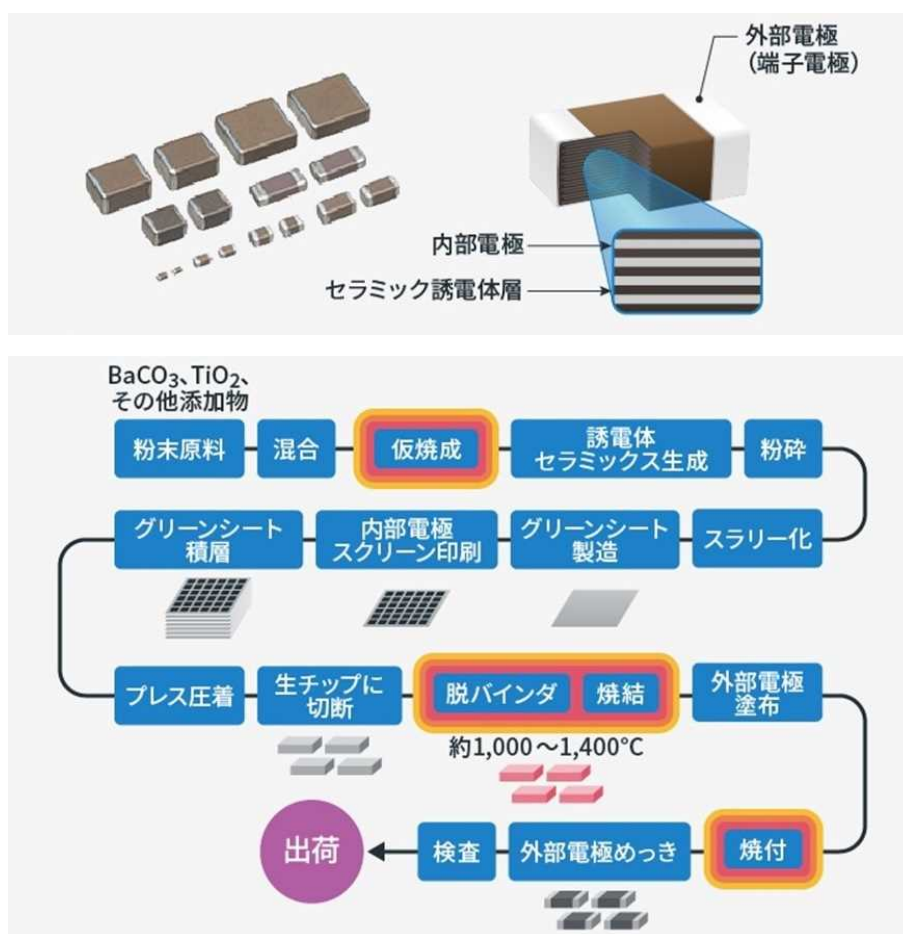


図 14 積層セラミックコンデンサの構造と製造工程 (積層同時焼成)

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

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>

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://ednjapan.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/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

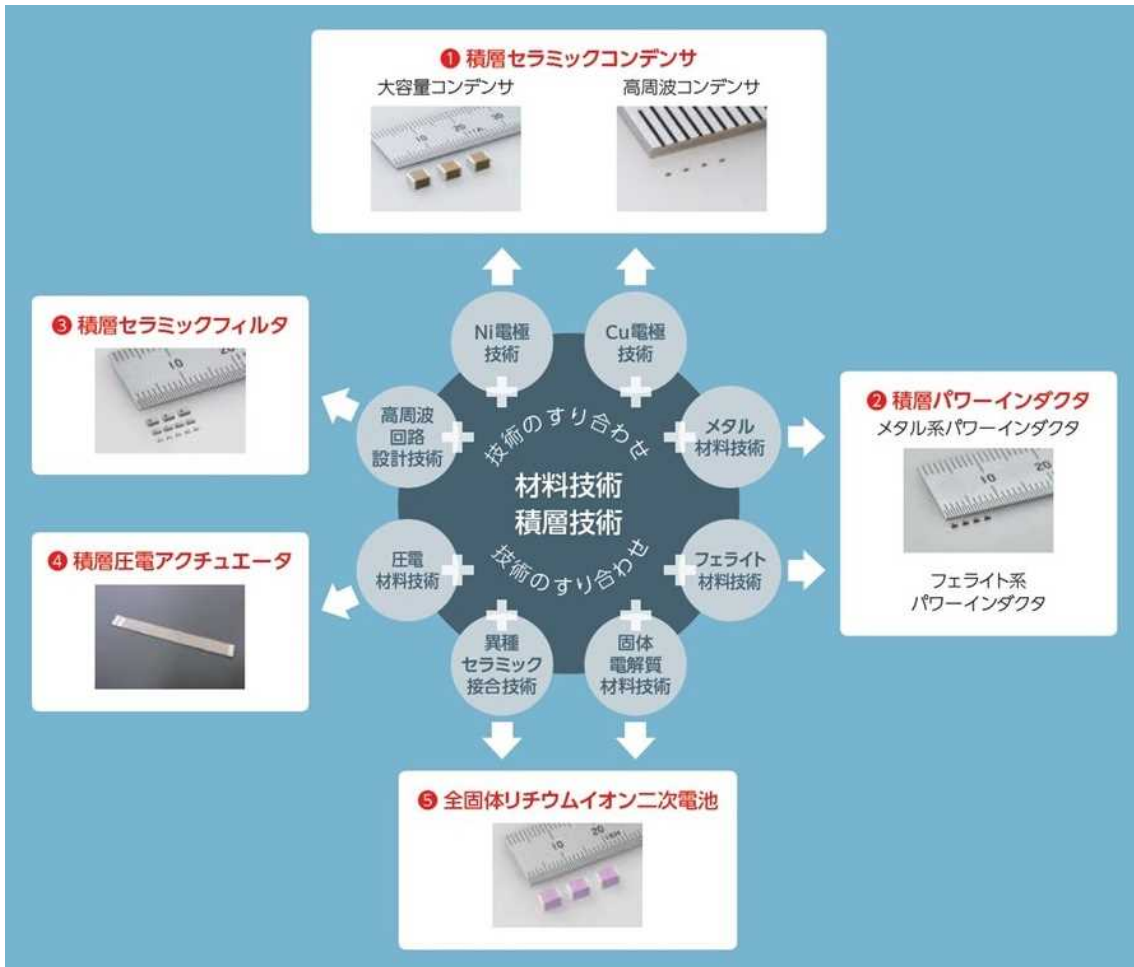


図 15 材料技術、積層技術を中心とした商品展開

出典: 太陽誘電ウェブサイト

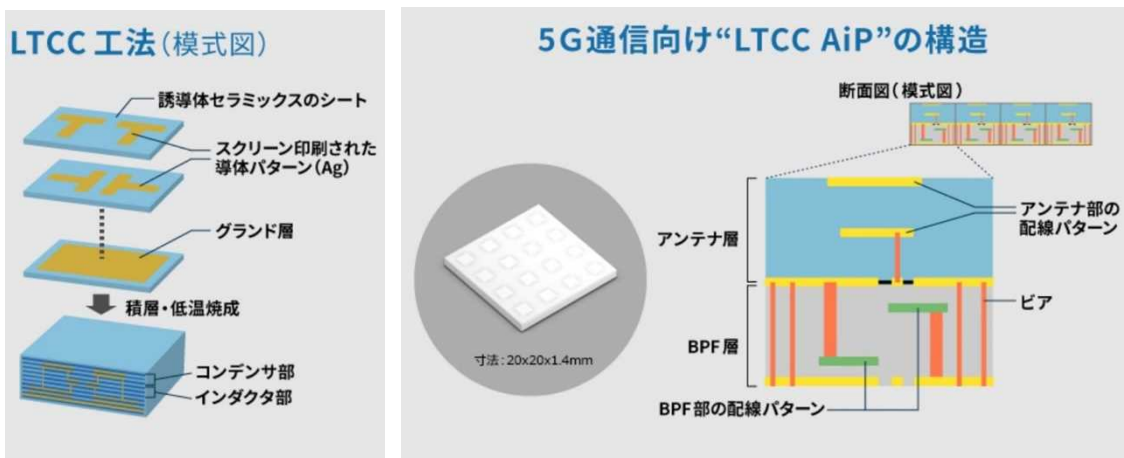


図 16 アンテナ素子とBPFを一体化した“LTCC AiP デバイス”

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。

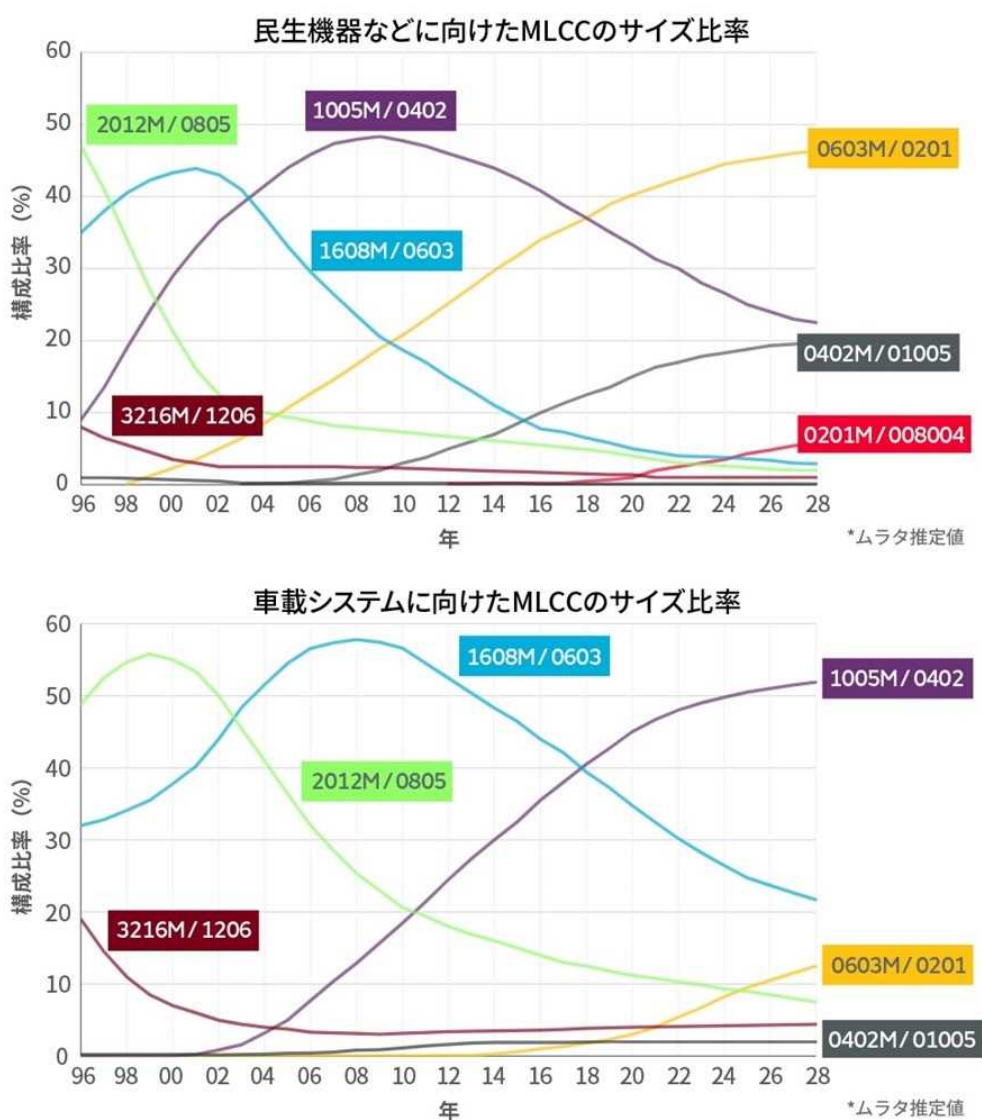


図 17 積層セラミックコンデンサのサイズ比率予測

出典: 村田製作所ウェブサイト

²⁰ “信頼性と小型・大容量を両立、CASEトレンド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。

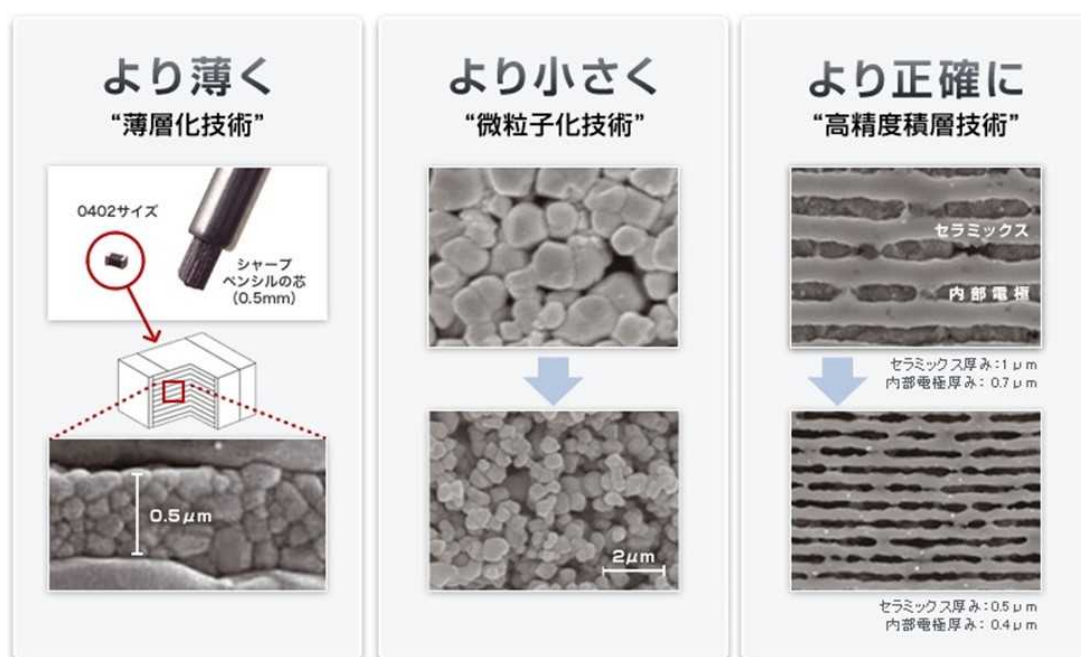


図 18 電子部品の超小型化と高信頼性化の両立に必要な技術例

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

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>

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>

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。

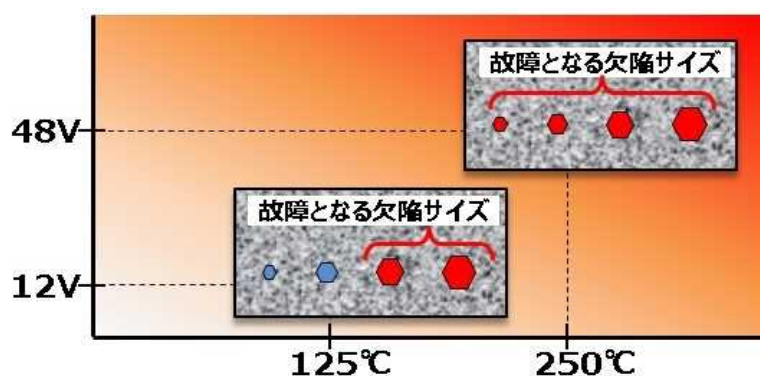


図 19 使用環境による欠陥サイズ許容度変化のイメージ

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。

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、下記のようなになる。

- 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

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>

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、ウエ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し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 $10\mu\text{m}$ 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。

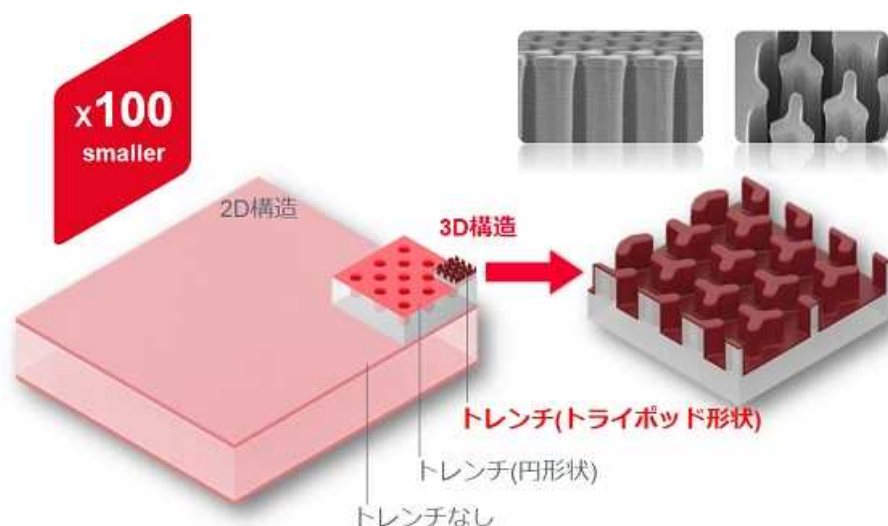


図 20 シリコンコンデンサ

出典: 村田製作所ウェブサイト

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/>

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。

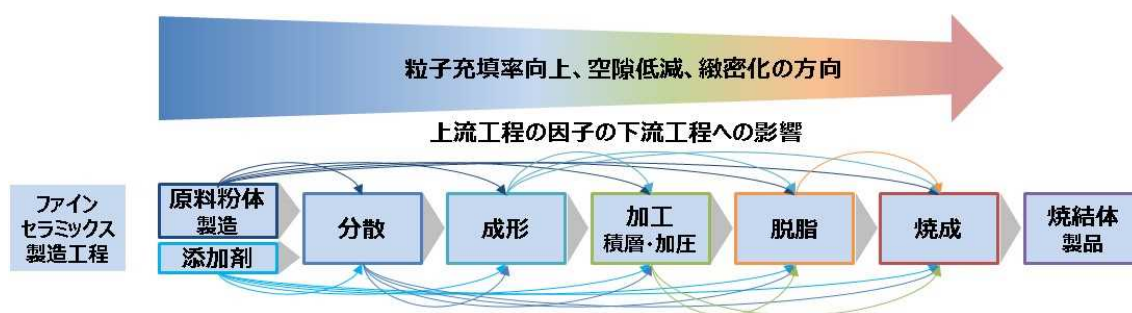


図 21 ファインセラミックス製造工程における工程間の因子の影響のイメージ

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。

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>

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>

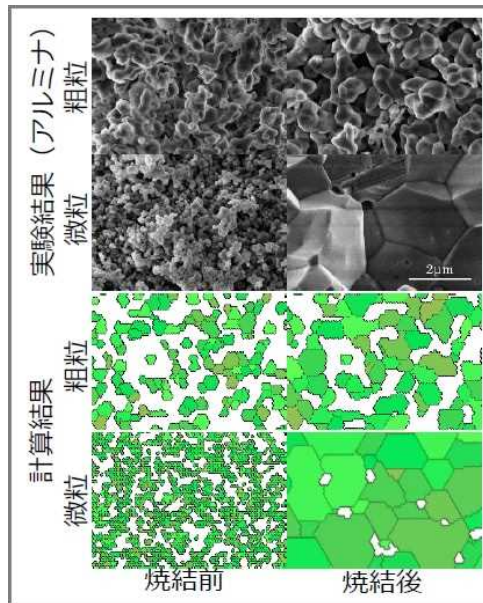


図 22 焼結・粒成長シミュレーションの例

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ー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。

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>

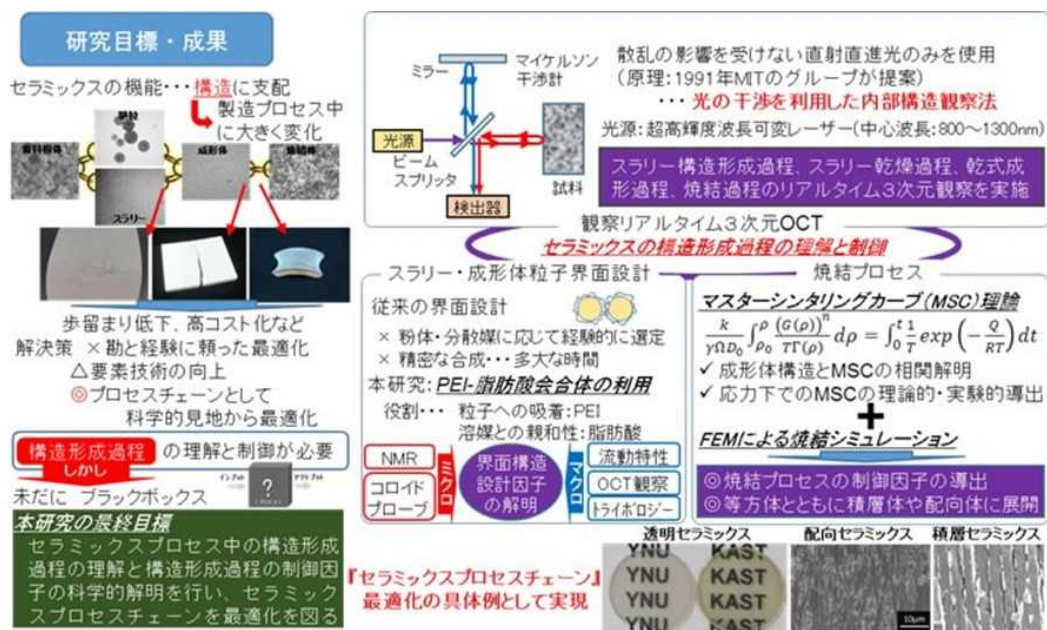


図 23 セラミックスプロセスチェーン最適化を目指した構造形成過程のリアルタイム 3次元 OCT 観察法による理解とその制御因子の科学的解明

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}。

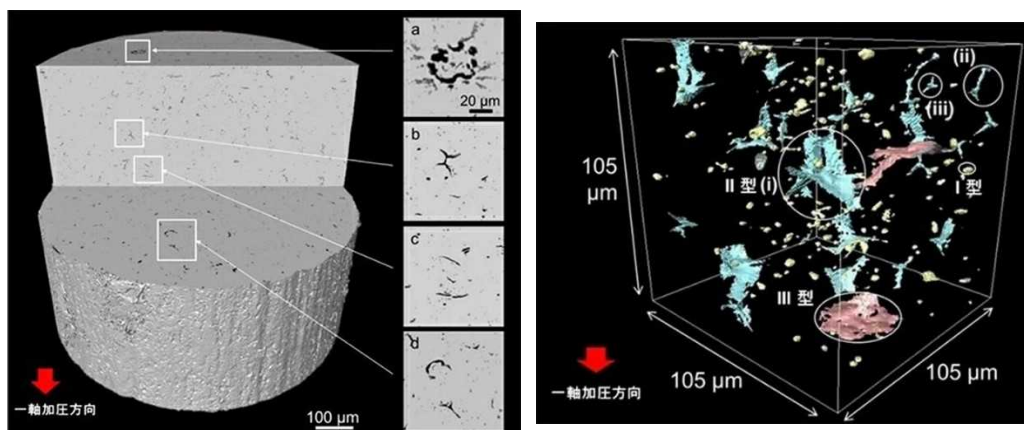


図 24 放射光マルチスケール CT で見るセラミックスの 3 次元内部欠陥構造

出典: 東京工業大学プレスリリース

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

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・制御のためのインフォマティクス技術。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。

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。

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	・統一的过程シミュレータ
	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	・要素的过程技術

出典：NEDO 技術戦略研究センター作成(2021)

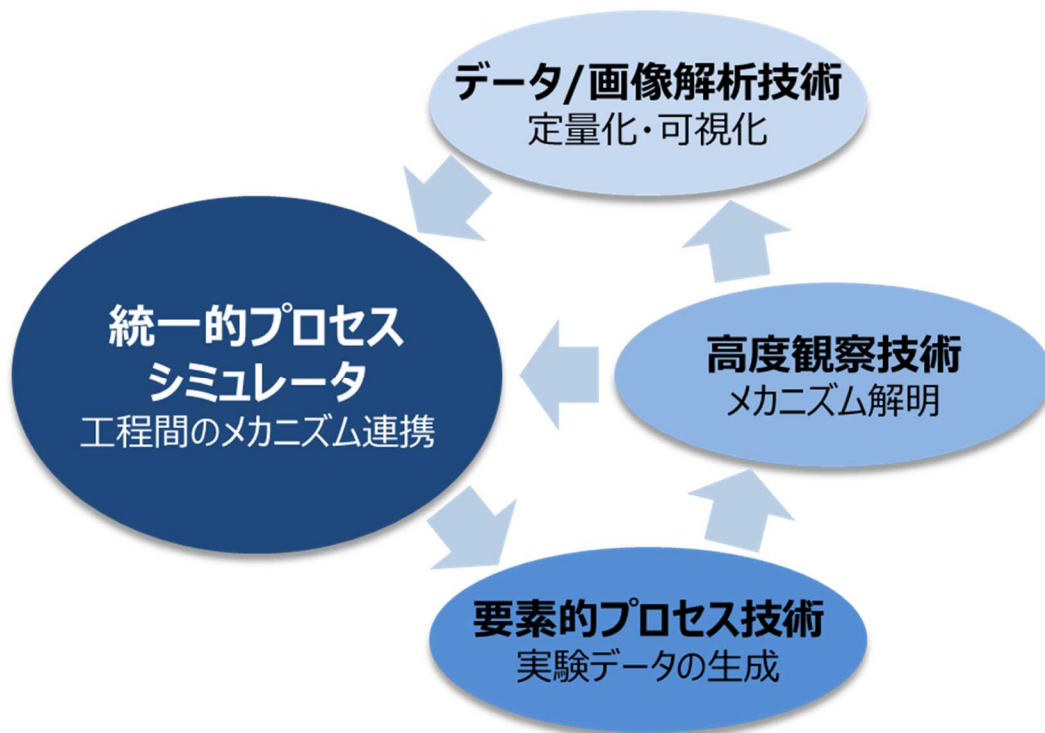


図 25 プロセスインフォマティクスの連携イメージ

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、統一的过程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。

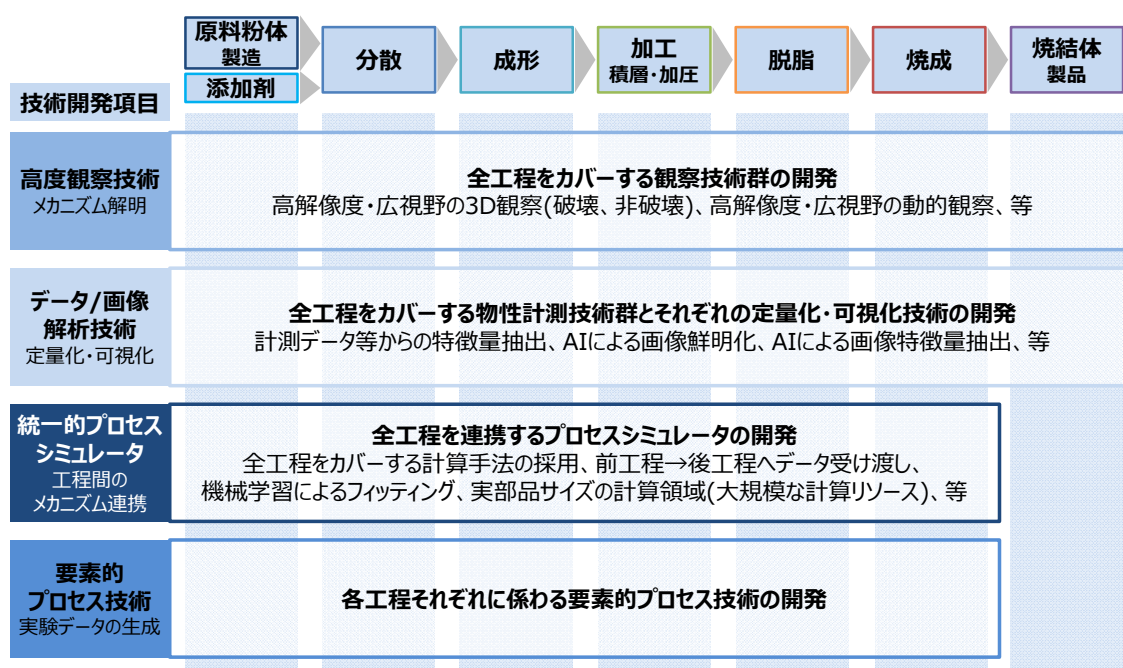


図 26 技術開発項目とその方向性

出典: NEDO 技術戦略研究センター作成(2021)

3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、多様なプレイ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。

技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight 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

2022年1月11日発行

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
- ・研究員 森 孝博
岡田 明彦
松下 智子 (2021年4月まで)
- ・フェロー 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。