

## エンジニアリングセラミックスの 研究開発動向と将来展望

Engineering Ceramics Trends and Prospects

Key-words : Carbon neutral, Road map, Applications, Technology, Material design

清原 正勝・北岡 諭・吉田 克己・飯田 正和・多々見 純一

Masakatsu KIYOHARA<sup>\*1</sup>, Satoshi KITAOKA<sup>\*2</sup>, Katsumi YOSHIDA<sup>\*3</sup>, Masakazu IIDA<sup>\*4</sup> and Junichi TATAMI<sup>\*5</sup>  
(\*<sup>1</sup>TOTO Ltd., \*<sup>2</sup>Japan Fine Ceramics Ceramic Center, \*<sup>3</sup>Tokyo Institute of Technology,  
\*<sup>4</sup>SHINAGA REFRACTORIES Co., Ltd., \*<sup>5</sup>Yokohama National University)

### 1. はじめに

エンジニアリングセラミックス部会は、セラミックスの持つ耐熱性、耐食性、硬度などの特徴を活かし、環境・エネルギー、輸送関連、航空宇宙、製造・産業機械などのさまざまな過酷な条件下で使用される材料として実用化<sup>1)~7)</sup>され、「利便性の向上」、「安心・安全」の社会実現を実現することをミッションに推進している。一方、我々を取り巻く世界経済、生活はCOVID-19によるパンデミックにより大きく変化した。このパンデミックは地球温暖化・環境の破壊が原因の1つではないと言われており、世界各国ではグリーン成長戦略が加速し、巨大な投資が計画されている。このような世界情勢の中で、我が国も2050年までに温室効果ガスの排出を実質ゼロとする「カーボンニュートラル」を宣言、経済産業省から「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」<sup>8)</sup>が策定され、今までのロードマップに大きな影響を与えられられる。

そこで、当部会では、この成長戦略の重点14分野から特に関係のある「環境・エネルギー」、「航空・宇宙」、「半導体・情報通信」分野に対して、エンジニアリングセラミックスが関与する技術・材料のロードマップ(図1)を策定するとともに、それを支える共通基盤技術について紹介する。(清原 正勝)

### 2. 技術・材料ロードマップ

#### 2.1 環境・エネルギー分野

##### 2.1.1 火力発電

再生可能エネルギーは自然界に常に存在するエネルギーであり、「枯渇しない」、「どこにでも存在する」、「CO<sub>2</sub>を排出しない(増加させない)」等の利点がある。

しかし、再生可能エネルギーの中でも、特に、今後大幅な導入拡大が想定される太陽光や風力は、年間平均設備利用率が低い上に、天候により出力が大きく変化する“変動電源”である。このため電気の安定供給(周波数安定化)を図るためには、電力需給をバランスさせることが不可欠であり、2050年までに蓄電池技術が飛躍的に向上したとしても、火力発電は再生可能エネルギーを補完する重要な位置づけになると考えられる。

そこで、将来の火力発電においては、化石エネルギーの大幅削減と、再生可能エネルギー由来の水素やアンモニア等のクリーン燃料の使用拡大が図られるとともに、発電技術のさらなる高効率化に向かう。それに対応する発電システムとしては、現行のガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクル発電から、この前段に固体酸化物型燃料電池SOFCを配置した発電効率60%超のガスタービン燃料電池複合発電に移行すると考えられている。

この究極の火力発電技術を達成する方法の一つとして、例えば、ガスタービン発電システムにおける高圧タービン入口温度のさらなる高温化と、燃焼ガスに曝される部材の耐熱性を向上させて部材冷却するのに要する圧縮空気量を削減すること等が考えられている。そのためには1700℃超の燃焼ガスに曝される耐熱部材には、それを保護する遮熱コーティング(TBC)が不可欠である。現在、ハイエントロピー合金の概念<sup>9)</sup>を、複数の副格子で構成されるセラミックスに拡張することで、超高温材料やTBCトップコート材料等の構造安定化や低熱伝導化を図る研究が精力的に行われている<sup>10)~12)</sup>。また、ハイエントロピー化が靱性向上に有効であるとの報告もある<sup>13)</sup>。さらに、近年では、

# グリーン成長戦略を支えるエンジニアリングセラミックス

分野	項目	開発技術		材料機能				
		2022	2025	2030	2035	2040	2045	2050
環境 エネルギー	火力発電	火力発電の効率向上とCO <sub>2</sub> ・NOxの削減						
		水素・アンモニア燃焼技術開発			社会実装促進			
		SOFC・ガスタービン等複合発電システム技術開発			再生可能エネルギー補完対応技術高度化			
		ガスタービン用部材超遮熱コーティング（低熱伝導・輻射熱反射・高剛化），SOFCシステムの耐熱サイクル性向上						
	原子力・核融合	革新的安全性向上及びカーボンニュートラルに向けた多様な原子力技術イノベーションの加速						
		軽水炉の安全性向上及び高度化技術開発，高温ガス炉／小型モジュール炉／次世代革新炉開発，核融合炉開発						
	事故耐性燃料開発，耐食性／耐放射線性／低放射化性高温部材							
	耐火物	高温産業のカーボンニュートラルを達成する革新的エネルギーセービング						
		革新的高温設備に最適な耐火物技術						
		超低熱伝導耐火物，低浸食耐火物			水素・アンモニアを利用した革新的産業プロセス対応耐火物			
高純度原料合成量の大幅削減技術								
リサイクル原料高含有耐火物			効率的な使用後耐火物の再資源化プロセス					
航空・宇宙	高速・高効率輸送	航空機エンジンの燃焼向上とCO <sub>2</sub> ・NO <sub>x</sub> 削減，並びに，超高速輸送の実現						
		デジタルツインを適用したCMCの安全性保証設計及び低コスト製造プロセス開発						
		CMCの耐熱性向上，超遮熱・環境遮熱コーティング（低熱伝導，輻射熱反射，高耐食性，高剛化）						
		超音速・極超音速飛行対応技術						
	超耐熱／耐酸化／耐アブレーション部材							
	宇宙フロンティア	宇宙空間の活用・開拓の実現						
		人工衛星・探査衛星開発，有人・無人宇宙船開発			月面基地・火星基地開発			
		耐宇宙環境／宇宙放射線被ばく低減／サーマルマネジメント／無潤滑超低摩擦部材						
環境清浄部材								
半導体 情報通信	製造・生産技術	高速通信／IoT／AI等のイノベーションがもたらす社会						
		次世代半導体製造装置における超高精度半導体デバイス開発・高スループット化						
低発塵性／低熱膨張化／帯電防止部材，軽量化／長寿命化／機能ユニット化								
共通基盤技術		原子・ナノレベル構造／機能解析技術						
		プロセス中／実使用環境下でのオペランド観測技術						
		理論・データ駆動に基づく材料プロセス設計						
		構造と機能のトランススケール制御技術（不均質性制御，マルチマテリアル接合，積層造形，複合化，自己修復etc.）						
		外場を利用した製造プロセス技術（フラッシュ焼結，コールドシタリング，宇宙空間利用etc.）						
		ハイエントロピー化技術						
		カーボンニュートラル技術による製造プロセス革新						

図1 エンジニアリングセラミックス部会 2022年度ロードマップ

燃焼ガス中の熱エネルギーに占める放射（近赤外線～中赤外線領域）の寄与が高温ほど急激に大きくなることに着目し、この波長領域の電磁波をトップコートで反射させることも検討されている<sup>14)</sup>。

また、変動する再生可能エネルギーを補完するためには、システムの起動・停止の頻度増加や、極め細やかな出力変動の調整が必要であり、急峻な温度変化に曝されるシステム全体の信頼性を確保するために、特に、SOFCの熱サイクル損傷に対する対策が必須となると考えられる。（北岡 諭）

### 2.1.2 原子力・核融合

2020年12月に策定された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」において、原子力は燃料投入量に対するエネルギー出力が極めて大きく、運転時には温室効果ガスの排出もないことから、カーボンニュートラルを実現する上で不可欠な重要分野の一つとして挙げられている<sup>15)</sup>。また、2021年10月に策定された第6次エネルギー基本計画の中で、原子力は、長期的なエネルギー需要構造の安定性に寄与する重要なベースロード電源と位置づけられている<sup>16)</sup>。原子炉の安全性・信頼性向上およびカーボンニュートラル実現に向けて、軽水炉の更なる安全性および信頼性向上および高温ガス炉、高速炉、小型モジュール炉等の革新炉や核融合に関する研究開発が進められている。

これらの研究開発を進める上で材料開発は極めて重要な役割を担っており、セラミックスの適用も期待されている。例えば、軽水炉の安全性・信頼性向上のための事故耐性燃料（ATF）の開発では、航空機ジェットエンジン用部材として注目されている炭化ケイ素繊維強化炭化ケイ素複合材料（SiC/SiC-CMC）を用いた燃料被覆管やチャンネルボックスの開発が行われている<sup>17)~19)</sup>。また、高温高圧水や熔融金属等の冷却材に対して耐食性に優れる材料の開発、中性子照射環境下において照射の影響を受けにくい耐放射線性（耐照射性）材料の開発、放射性廃棄物の処理や原子炉・核融合炉の保守・メンテナンスの観点から低放射化材料の開発が重要課題の一つとされており、国内外において研究が進められている<sup>18)</sup>。（吉田 克己）

### 2.1.3 耐火物

耐火物・断熱材は鉄鋼、セメント、ガラス等の素材製造設備やゴミ処理炉等、ほぼすべての工業炉に使用されており、断熱性強化による工業炉の炉体からの熱放散の最小化が求められている<sup>20),21)</sup>。材料の断熱性向上は多孔化によるものが一般的で、耐久性の低下を伴う。そこで、耐久性と断熱性を両立する材料・構造

の開発が必要となる。また、開発が進む水素やアンモニアの燃焼を利用する工業炉<sup>22),23)</sup>の高効率操業に対応するための技術の最適化が不可欠である。

工業炉の稼働により耐火物は炉内側が変質し浸食されるが、使用後耐火物には変質が僅かでリサイクル可能な部分も多い。そこで耐火物リサイクルの推進<sup>24)</sup>により産業廃棄物の削減とともに、多量のエネルギーを消費して製造されるMgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiCといった耐火物原料<sup>25)</sup>の低減が可能となる。このリサイクルの実現には使用後耐火物の分別、選別、原料化処理の技術開発がポイントであり<sup>24)</sup>、さらに耐火物へのリサイクルが困難な著しい変質部の利用先を開拓することで耐火物廃棄ゼロが可能となるため、今後は各種産業を超えた連携が必要である。（飯田 正和）

## 2.2 航空宇宙

### 2.2.1 高速・高効率輸送

航空機エンジンの燃費を改善し、地球温暖化ガス（CO<sub>2</sub>・NO<sub>x</sub>）排出量の大幅削減を図ることは、人類にとって極めて重要な問題となっている。水素を用いた燃料電池で発電し、モータを駆動させてプロペラを回転させる航空機の電動化は、航続距離が短く搭乗員数の少ないコミュタ機やリージョナル機には有効であり、近い将来、実用化されるものと期待される。しかし、搭乗員数が多く航続距離が7000 kmを超える中／長距離機においては、2050年時点でも、化石エネルギー由来のケロシンや再生可能エネルギー由来のバイオ燃料・水素等を用いたエンジンの低燃費化が、重要な位置を占めるものと予想される。

そこでエンジン燃費を向上させるには、火力発電用タービンの場合と同様に高温の燃焼ガスに曝される部材の耐熱性の向上に加えて、軽量化が有効となる。SiC/SiC-CMCは、現用の耐熱合金の1/3の軽さと100~200℃高い耐熱性を有するため、熱負荷の厳しいホットセクション前段の静止部品への適用が始まっている<sup>26)</sup>。今後のCMC部材の適用は、静止部品から、より厳しい動作条件が求められるブレード等の回転体の順に慎重に進められると考えている。

しかし、SiC/SiC-CMCは、高温の酸素・水蒸気を含む燃焼環境下における腐食劣化が問題となる。そのため、この部材を適用するためには、耐水蒸気性・耐酸化性に優れ、かつ、遮熱性と耐熱サイクル性に優れる遮熱・環境遮蔽コーティング（T/EBC）が不可欠となる。また、近年では、航空機エンジンの燃焼温度の上昇に伴い、エンジン内に取り込まれた火山灰や砂等が高温部品のコーティング表面に堆積・熔融し、T/EBCを損傷させることが問題となっている<sup>27),28)</sup>。

この堆積・溶融物の主成分がCa-Mg-(Fe)-Al-Si-Oであることから、それを総称して(CMAS)と呼ばれる。しかも、このCMAS損傷は、気候変動による干ばつや地球温暖化による気温上昇で砂漠化が進行するために、今後、ますます顕在化することが予想されている。したがって、次世エンジンに搭載するCMCの実用化を図るには、耐CMAS性に優れたT/EBCトップコートでなければならない。このような多機能コーティングの開発には、CMC基板との熱膨張係数差を小さくするために、耐熱合金用TBCに比べて熱膨張係数の小さい耐熱性酸化物が対象となる。

我が国においても、国産SiC/SiC-CMCの実用化に向けて、耐熱性SiC繊維の開発からCMC製造に係る各要素技術、CMC部材の試作・評価までの研究開発が進行している<sup>29),30)</sup>。最近では、“デジタルツイン”を適用したCMCの安全性保証設計と、それを用いた低コスト製造プロセスの開発に注目が集まっている。

また、近年では、マッハ5を超える極超音速飛行が可能な準軌道飛行用機体とエンジンへの応用も検討されている<sup>31)</sup>。極超音速飛行中の空力加熱により、機体を構成する鋭い先端部分の温度は2000℃超の高温になるため、炭化物やホウ化物等の高熱伝導率の超高温セラミックス(UHTC)が検討されている。現時点における課題は、大型部品の製造が可能なプロセスにてUHTCの熱伝導率、放射率、強度、靱性、並びに、耐酸化性を同時に大幅に改善することにある。

(北岡 諭)

### 2.2.2 宇宙フロンティア

2020年6月に閣議決定された宇宙基本計画において、宇宙安全保障の確保、災害対策・国土強靱化や地球規模課題の解決への貢献、宇宙科学・探査による新たな知の創造、宇宙を推進力とする経済成長とイノベーションの実現、産業・科学技術基盤を始めとする我が国の宇宙活動を支える総合的基盤の強化、を宇宙政策の目標として掲げられ、これらの目標に対する具体的なアプローチが示されている<sup>32)</sup>。

また、JAXAでは、2005年に長期ビジョン2025として、「世界最高の信頼性と競争力のあるロケットや人工衛星を開発し、安全で豊かな社会の実現」が掲げられている。また、トップサイエンスを推進するとともに独自の有人宇宙活動や月の利用への準備が進められ、さらにマッハ5クラスの極超音速実験機の実証が行われている。これらにより、「宇宙航空技術を活用することで、安全で豊かな社会の実現」、「宇宙の謎と可能性を探求することで、知の創造と活動領域の拡大」、「世界最高の技術により、自在な宇宙活動能力を

確立」、「自立性と国際競争力をもつ宇宙産業への成長」等の宇宙航空の基幹産業化に貢献することが、具体的なビジョンとして示されている<sup>33)</sup>。このことから宇宙空間の活用・開拓の実現に向けて、人工衛星・探査衛星、有人・無人宇宙船および月面基地・火星基地等の研究開発がより活発に進められ、その実現のためには、耐宇宙環境性材料、宇宙放射線被ばく低減材料、超低熱膨張材料および熱制御材料等のサーマルマネジメント材料、無潤滑超低摩擦部材、宇宙機の搭載機器や熱制御表面への付着により性能低下が懸念される宇宙機の使用材料からのアウトガスの吸着材(環境浄化部材)等の材料開発が重要となり、セラミックスおよび無機材料が候補材の一つとして研究が進められている<sup>34)~40)</sup>。(吉田 克己)

## 2.3 半導体・情報通信

### 2.3.1 製造・生産技術

高速通信、IoT、AI等の活用によりイノベーションがもたらすDx社会実現には、それを支える半導体デバイスの細線化は3~5nmまで進み、デバイスの小型化、高速・高機能化、低消費化はますます加速すると考えられている<sup>41)</sup>。この実現には半導体製造装置の進化が重要である。このような高機能の半導体デバイスを高スループットで生産できる次世代半導体製造装置の開発では、半導体の細線化に及ぼすプロセス上での課題として熱対策や帯電対策、さらには工程内で発生し歩留まりに大きく影響を及ぼす発塵などが考えられている。そこで、熱対策においては比剛性が高いコーディエライト材料を中心にしたゼロ熱膨張セラミックス部材の開発<sup>42)</sup>やチャンバー内部材からの発塵を抑制するために、チャンバー内壁に耐食性の強いY<sub>2</sub>O<sub>3</sub>のセラミックスをコーティングする技術開発<sup>43)</sup>が行われ商品化されている。

今後は更なる生産性を向上させるために長時間曝露にも耐えられるように、オキシフッ化イットリウム(YOF)やイットリウム・アルミニウム・ガーネット(YAG)製膜体<sup>44),45)</sup>を用いる商品開発も進められている。(清原 正勝)

## 3. 共通基盤技術ロードマップ

### 3.1 原子／ナノレベル構造／機能解析技術

セラミックスの特性の多くは、界面や表面などの原子・ナノレベルの構造に起因することは言うまでもない。その観察のための最たるものは透過型電子顕微鏡(TEM)である。現在の最新鋭のTEMでは、0.1nm以下の空間分解能も達成されているとともに、HやLiなどの観察困難な原子の直接観察も行われており、電

池材料の研究の格段の進展をもたらしている<sup>46),47)</sup>。収差補正技術の高度化による分解能のさらなる向上<sup>48),49)</sup>や、エネルギー分散型 X 線分析法 (EDS) や電子エネルギー損出分光法 (EELS) による原子分解能組成マッピング<sup>50),51)</sup> も進みつつあり、時間分解能観察が可能な 4D (四次元) 走査型透過型電子顕微鏡 (STEM) なども開発されている<sup>52)</sup>。セラミックスの機能の本質的な理解と制御のために、このような構造解析技術の一層の高度化が囑望される。(多々見 純一)

### 3.2 プロセス/実使用環境下のオペランド観測技術

近年、触媒分野を皮切りに、材料やデバイスに対する実使用下での時間分解計測によって、ナノからマクロな構造と機能の相関を見いだすことを目指した『オペランド観測』が注目されている。ラテン語で working や operating を意味するオペランドは、『時間変化』、『動作環境』、『その場』の 3 要素がそろったもので、急速な広がりを見せている。例えば、高温や液中、応力やひずみ、電圧などを印加しながら形態と機能を同時測定可能な走査プローブ顕微鏡を活用して、電池材料の動作原理を明らかにするための液中での電圧印加下などでのナノ～原子スケールの局所物性計測が国内外で行われつつある<sup>53)</sup>。また、前述の TEM における MEMS フォルダを用いたガス中、液中、加熱・冷却などの材料の動作環境での原子分解の観察も進みつつあり<sup>54)~56)</sup>、二次電池中の電極形状や結晶構造の変化、正極材料への Li イオンの挿入挙動のリアルタイム観察などが実施されている。放射光 X 線による水熱合成反応における材料合成過程の観測<sup>57)</sup> や特殊環境中性子回折装置を利用した蓄電池のイオン伝導メカニズムの解明なども行われている<sup>58)</sup>。さらに、医療応用で発達してきた光コヒーレンストモグラフィーを利用して、セラミックスの製造プロセスである成形中や焼結中の不均質構造の発展の様子をオペランド観測する試みもなされている<sup>59),60)</sup>。このように、オペランド観測技術は、今後ますます発展していくことが期待される。(多々見 純一)

### 3.3 理論/データ駆動に基づく材料プロセス設計

セラミックスに対する要求は年々高まっているが、これと二律背反になることの多い低コスト化や低環境負荷を実現することも同時に求められている。これに適確に応えるために、シミュレーションやデータサイエンスといったコンピュータ支援型材料設計であるマテリアルズインフォマティクスが進みつつあり、多くの成果が得られている<sup>61)</sup>。また、材料毎に異なることが多いプロセス因子も、多様なセラミックス製造プロセスのシミュレーション技術、リアルタイムなプロ

セスの計測技術、ロボット化技術などを活用することにより、データ科学的にアプローチして最適化していくことが強く求められるようになり、その土壤は整いつつある。例えば、パワーデバイスでの利用が期待される SiC 単結晶の融液成長プロセスにおける結晶成長デジタルツイン化による大口径化と均質化の両立や、ロボット化と機械学習の組み合わせによるセラミックス薄膜合成、粉体成膜プロセスのインフォマティクス化などが進展している<sup>62)</sup>。セラミックス製造プロセスの理論/データ駆動に基づくデザインをさらに深掘りし、普及拡大していくためには、プロセス中に生じる現象の原理・メカニズムの理解を進めるための基礎研究は必要であり、デジタルツイン化を実現するためのマルチスケール・マルチフィジックスシミュレーションの確立が大きな課題である。さらには、データサイエンスを実施するために不可欠な適確なデータ収集とその効率化や勘・コツの活用推進も行われるべきであろう。(多々見 純一)

### 3.4 構造と機能のトランススケール制御技術

セラミックスの特性は、全体の平均構造に起因するものだけでなく、点欠陥のような原子スケールから、き裂・気孔・密度分布のようなマクロスケールの不均質に支配されることも多く、不均質の制御と利用も重要である。また、異なる種類・機能の材料を有効に適用することで、部材全体の高機能化と多機能化を実現することも求められている。セラミックス自身だけでなく、金属、ポリマーなどとの接合によるマルチマテリアル化も進んでおり、これを実現するための多様な接合プロセス技術も進展すると期待される。

積層造形は CAD などのデータを利用したセラミックス製造法として注目されているが、このマルチマテリアル化に関する検討も広がっている<sup>63)</sup>。航空宇宙分野でも説明されたように、CMC やコーティングもマルチマテリアル化の 1 つである。また、自己修復セラミックスのようにミクロスケールで新たな機能を付与することで、セラミックスの信頼性向上を達成させようという動きも活発化している<sup>64)</sup>。

このように、セラミックスの特性は 1 つのスケールの構造や機能だけで決まるわけではない。そして、あるスケールの特徴は、隣り合うスケールの特徴と相関する。したがって、ナノ～メソ～マクロに至る階層間の連関を含めたトランススケールな構造と機能の制御の展開がさらに期待される。(多々見 純一)

### 3.5 外場を利用した製造プロセス技術

セラミックスの製造時に外場を利用することによる微構造制御や、それによる特異な機能の発現に関する

研究が進んでいる。例えば、放電プラズマ焼結法<sup>65)</sup>は低温で緻密なセラミックスを得ることが可能な方法として普及しているが、近年、類似の電場印加による焼結法としてフラッシュ焼結も研究されている<sup>66)</sup>。フラッシュ焼結法では、成形体に電界を印加しながら昇温することにより、ある温度で電流が急激に増加するとともに、極めて短時間で焼結が完了して緻密な焼結体が得られる手法である。また、粉体に水溶液を加えて加圧することで、300℃以下の低温にてセラミックスの緻密化を実現するコールドシンタリングと呼ばれる手法も発展しており、セラミックスの常識である『焼成』を行わないバルク体製造法として注目されている<sup>67)</sup>。近年では、常温での緻密化も進みつつある<sup>68)</sup>。このような外場を利用した製造プロセス技術は、従来法では得られない機能を発現するだけでなく、カーボンニュートラルにも資する点で、将来有望なプロセス技術であると言える。(多々見 純一)

### 3.6 ハイエントロピー化技術

これまでのエンジニアリングセラミックスで利用されている $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{SiC}$ 、 $\text{Si}_3\text{N}_4$ などの材料とは異なる、複数の機能の共存や相反する機能の両立する材料の創製が強く求められている。そのためには材料の探索範囲の拡大が欠かせないが、材料創製の研究として、多種の等量の元素を用いることによる混合や配置エントロピーを増大させる、いわゆるハイエントロピー化によって多様な局所構造を形成させることが注目されている。この考えは、近年、金属材料において軽量化と高強度の両立や高強度と強靱性の両立などで報告されている。セラミックスにおいては、窒化物薄膜の研究に始まり<sup>69)</sup>、2015年には酸化物においてもエントロピーの安定化について示され<sup>70)</sup>、多くの系でハイエントロピーセラミックスの研究開発が進んでいる。ハイエントロピーセラミックスは、2.1.1で述べた遮熱コーティングだけでなく、熱電変換材料<sup>71)</sup>や触媒<sup>72)</sup>、電池<sup>73)</sup>、生体材料<sup>74)</sup>などについて検討されている。複数の副格子で構成されるセラミックスにおいては、多様な機能発現が期待されることから、ハイエントロピー化技術は今後のさらなる発展が大いに囁望されている。この材料探索には、前述のマテリアルズインフォマティクスやプロセスインフォマティクスと組み合わせることも重要である。(多々見 純一)

## 4. おわりに

冒頭で述べたように、カーボンニュートラルを意識した材料開発とプロセス革新が強く求められている。

例えば、耐火物の項目で述べたような水素やアンモ

ニアの利用による焼成技術とともに、前述のフラッシュ焼結やコールドシンタリングを含む低温での焼成による緻密化技術、また、それを支える原料合成、高密度成形体作製、セラミックス自身の歩留まり向上を、外場の利用やプロセスインフォマティクス技術を駆使して進めることが必要であると考えられる。

日本セラミックス協会においても、新たに『セラミックス分野におけるカーボンニュートラル研究体』が立ち上がるが、カーボンニュートラル技術と製造プロセス革新はある分野に特化したものではなく、日本セラミックス協会全体として強く推進していくことが期待される。(多々見 純一)

### 文 献

- 1) 大司達樹, セラミックス, **46**, 1037-1046 (2011).
- 2) 須山章子, セラミックス, **50**, 462-465 (2015).
- 3) 小川裕二, セラミックス, **50**, 466-468 (2015).
- 4) 吉田克己, セラミックス, **50**, 469-473 (2015).
- 5) 堀田幹則, セラミックス, **50**, 474-478 (2015).
- 6) 伊藤義康, セラミックス, **50**, 479-484 (2015).
- 7) 安田公一, セラミックス, **50**, 485-488 (2015).
- 8) 経済産業省, <https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-4.pdf>
- 9) J. W. Yeh et al., *Adv. Eng. Mater.*, **6**, 299-303 (2004).
- 10) J. Gild et al., *J. Eur. Ceram. Soc.*, **38**, 3578-3584 (2018).
- 11) X. Ren et al., *Scripta Mater.*, **168**, 47-50 (2019).
- 12) Z. Zhao et al., *J. Mater. Sci. Technol.*, **35**, 2647-2651 (2019).
- 13) Y. Yao et al., *J. Am. Ceram. Soc.*, (2021), DOI:10.1111/jace.18053
- 14) 北岡 論ら, 日本ガスタービン学会誌, **49**, 216-222 (2021).
- 15) 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(2020年12月25日), <https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012.html>
- 16) 令和2年度版原子力白書, 原子力委員会 (2021).
- 17) 鵜飼 勝, 工業材料, **69**[6], 60-61 (2021).
- 18) P. Yvon, *Structural Materials for Generation IV Nuclear Reactors*, Elsevier (2017).
- 19) R. B. Rebak, *Accident-Tolerant Materials for Light Water Reactor Fuels*, Elsevier (2020).
- 20) 中村善幸ら, 耐火物, **72**, 258-263 (2020).
- 21) 飯田正和ら, 耐火物, **73**, 418-425 (2021).
- 22) バーナ・燃焼制御機器, 中外炉工業, <https://chugai.co.jp/hydrogen-burner/>, (accessed 2021-12-29).
- 23) アンモニアを燃やして発電, 国立研究開発法人科学技術振興機構, <https://www.jst.go.jp/seika/bt111-112.html>, (accessed 2021-12-29).
- 24) 今川浩志, 耐火物, **68**, 441-445 (2016).
- 25) 遠藤谷弘, 品川技報, **24**, 115-12 (1980).
- 26) J. Steibel, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **98**, 30-33 (2019).
- 27) D. L. Poerschke et al., *Ann. Rev. Mater. Res.*, **47**, 297-330 (2017).
- 28) W. D. Summers et al., *J. Am. Ceram. Soc.*, **103**, 5196-5213 (2020).
- 29) 松下智子, 工業材料, **69**[6], 18-21 (2021).
- 30) 竹村誠洋, 工業材料, **69**[6], 22-25 (2021).
- 31) N. P. Padture, *Nature Mater.*, **15**, 804-809 (2016).
- 32) 宇宙基本計画, 内閣府, <https://www8.cao.go.jp/space/plan/keikaku.html>
- 33) JAXA 長期ビジョン-JAXA 2025, [https://www.jaxa.jp/press/2005/04/20050406\\_sac\\_vision\\_j.html](https://www.jaxa.jp/press/2005/04/20050406_sac_vision_j.html)
- 34) 日本材料科学会編, 宇宙と材料, 裳華房 (1991).
- 35) 空と宙, No. **39**, 2010Nov/Dec (2010).

- 36) 野坂正隆ら, 日本航空宇宙学会誌, **58**, 303-313 (2010).
- 37) 神谷友裕, 精密工学会誌, **86**[12], 934-937 (2020).
- 38) 古瀬辰治, FC Report, **38/1** (2020).
- 39) G. Rioland et al., *Adsorption*, **23**, 395-403 (2017).
- 40) 山中理代ら, 日本化学会第101春季年会講演予稿集, A28-1pm-05 (2021).
- 41) 2021IEEE, The International Road Map For Devices and Systems: 2021.
- 42) 京セラ, [https://www.kyocera.co.jp/rd-openinnovation/catalog/ite\\_cera.html](https://www.kyocera.co.jp/rd-openinnovation/catalog/ite_cera.html)
- 43) 清原正勝ら, *Journal of The Vacuum of Japan*, **53**[10], 49-55 (2008).
- 44) Y. Shiba, *J. Vac.Sci. Technol.A*, **35**, 021405 (2017).
- 45) T. Ma, *J. Vac.Sci. Technol.A* **36**, 031305 (2018), doi: 10.1116/1.5026777
- 46) S. Findlay et al., *Appl. Phys. Express*, **3**, 116603 (2010).
- 47) R. Huang et al., *Appl.Phys. Lett.*, **98**, 051913 (2011).
- 48) H. Sawada et al., *Microscopy*, **64**, 213 (2015).
- 49) T. Akashi et al., *Appl. Phys. Lett.*, **106**, 074101 (2015).
- 50) 奥西英司ら, 顕微鏡, **47**, 172-175 (2012).
- 51) 熊本明仁ら, 日本結晶学会誌, **59**, 246-251 (2017).
- 52) V. Ortalan et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **133**, 10732-10735 (2011).
- 53) W. Yu et al., *J. Chem. Phys.*, **153**, 020902 (2020).
- 54) M. Gu et al., *Nano Lett.*, **13**, 6106-6112 (2013).
- 55) K. Yamamoto et al., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **49**, 4414-4417 (2010).
- 56) Z. Wang et al., *Nano Lett.*, **16**, 3760-3767 (2016).
- 57) S. Tominaka et al., *ACS Omega*, **3**, 8874-8881 (2018).
- 58) S. Taminato et al., *Scientific Reports*, **6**, 28843 (2016).
- 59) T. Takahashi et al., *Int. J. App. Ceram. Technol.*, **19**, 1171-1179 (2022).
- 60) M. Iijima et al., *J. Colloid Interface Sci.*, **607**, 290-297 (2022).
- 61) 伊藤 聡, セラミックス, **54**, 504-508 (2019).
- 62) 宇治原徹, セラミックス, **53**, 849-852 (2018).
- 63) T. Maruyama et al., *Opt. Mater. Express*, **10**, 2522-2532 (2020).
- 64) スマートマテリアル総覧 自己修復材料編, 日経BP (2018).
- 65) 鶴田正雄, セラミックス, **49**, 91-96 (2014).
- 66) 吉田英弘ら, *J. Jpn. Powder Powder Metallurgy*, **64**, 523-531 (2017).
- 67) J. P. Maria et al., *J. Mater. Res.*, **32**, 3205-3218 (2017).
- 68) E. Takahashi et al., *Ceram. Int.*, **47**, 5013-5018 (2021).
- 69) T.-K. Chen et al., *Surf. Coat. Technol.*, **188-189**, 193-200 (2004).
- 70) C. M. Rost et al., *Nat. Commun.*, **6**, 8485 (2015).
- 71) R.-Z. Zhang et al., *Inorg. Chem.*, **57**, 13027-13033 (2018).
- 72) H. Chen et al., *J. Mater. Chem., A* **6**, 11129-11133 (2018).
- 73) Q. Wang et al., *Electrochem. Commun.*, **100**, 121-125 (2019).
- 74) A. Vladescu et al., *PLOS ONE*, **11**, e0161151 (2016).

---

筆者紹介

清原 正勝 (きよはら まさかつ)

TOTO 株式会社 フェロー.

[連絡先] 〒 253-8577 神奈川県茅ヶ崎市本村 2-8-1 TOTO 株式会社  
茅ヶ崎工場

E-mail : masakatsu.kiyohara@jp.toto.com

北岡 諭 (きたおか さとし)

一般財団法人ファインセラミックスセンター 材料技術研究所 副所長.

[連絡先] 〒 456-8587 名古屋市熱田区六野 2 丁目 4 番 1 号 一般財団  
法人ファインセラミックスセンター 材料技術研究所

E-mail : kitaoka@jfcc.or.jp

吉田 克己 (よしだ かつみ)

東京工業大学 准教授.

[連絡先] 〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1 東京工業大学  
科学技術創成研究院 ゼロカーボンエネルギー研究所

E-mail : k-yoshida@zcc.iir.titech.ac.jp

飯田 正和 (いいた まさかず)

品川リフラクトリーズ株式会社 技術研究所長.

[連絡先] 〒 705-8577 岡山県備前市伊部 707 品川リフラクトリーズ  
(株)技術研究所

E-mail : m\_iida@shinagawa-ref.com

多々見 純一 (たたみ じゅんいち)

横浜国立大学 教授.

[連絡先] 〒 240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7 横浜国  
立大学 大学院環境情報研究院

E-mail : tatami-junichi-xv@ynu.ac.jp