

## 海外における耐火物研究開発の動向

## Trends in Refractories R &amp; D Overseas

田 村 信 一\*  
Shinichi TAMURA

## 抄 録

世界の鉄鋼生産量は18億トンに達し、高温設備を支える耐火物の重要性も増している。海外における耐火物の研究開発動向を調査した結果、欧州、中国等においては、大学や公立研究機関が耐火物の基盤研究や企業と協力した応用開発を活発に進めており、学部、大学院における教育や技術者の育成が積極的に行われている。欧州連合、各国の政府、財団法人から多様な資金の支援もあり、大規模な研究プログラムが設定されている。国際会議における最近のトピックスとして、MgO系、SiO<sub>2</sub>系の高純度・高機能性不定形耐火物の開発、大型築造壁の熱機械特性評価や数値シミュレーションの基盤研究および新たな測定・解析・評価技術の開発と適用などを紹介した。

## Abstract

Global steel production has grown to 1.8 billion tons, and the importance of refractories to support high-temperature equipment is increasing. As a result of investigating R & D trends in refractories overseas, universities and public research institutes in Europe and China are actively conducting basic research on refractories and application development in cooperation with refractory companies. Education in undergraduate and graduate schools and training of engineers are actively promoted. Large-scale research programs have been set up with various financial supports from the EU, each government and several foundations. Recent topics at international conferences on refractories include development of high-purity, high-functionality unshaped refractories based on MgO and SiO<sub>2</sub>, evaluation of thermo-mechanical properties of large lining walls, basic research on numerical simulation. New technology development and application on measurement, analysis, and evaluation were presented.

## 1. はじめに

鉄鋼の需要はアジア、インド等の発展する地域を中心に増大し、鉄鋼用耐火物の生産も年間約2500万トン以上になっている。世界の鉄鋼製造に対する耐火物原単位は10～20kg/トン-鋼へと減少してきており、鉄鋼生産操業技術および、耐火物の材料技術、使用技術の進展が著しい。

日本の耐火物技術は世界の先頭を駆け抜けてきたが、現在、必ずしも、その勢いが続いているとは言い難い側面もうかがえる。日本の現在、将来の耐火物技術がどうあるべきか、を考える上で海外の動向を把握することは不可欠である。ここでは、2019年10月に横浜で開催された耐火物統一国際会議 UNITECR2019 における発表機関、発表内容を中心に、その他の情報も加えて整理した。

## 2. 耐火物の需要

2018年の世界粗鋼生産量は約18億トンと言われ、中国が約9億トン、インドが約1億トン強、次いで日本も約1億トンを生産した。粗鋼生産の世界における耐火物原単位を15kg/トン-鋼と仮定すると、使用耐火物量は約2700万トン/年と推定される。鉄鋼用耐火物の割合を65%と仮定するならば、耐火物の総生産量は約4200万トン/年と推定される。図1はFreedonia Groupの2013年における予想値(年間増加率を約3%と想定)を参考にして類推したものであり、2016年世界の耐火物需要量はアジア/太平洋地域の耐火物需要量が圧倒的に多く約3300万トン/年、欧州が約600万トン/年、北米が約300万トン/年、アメリカ/中東および南米がそれぞれ約200万トン/年であり、合計は約4600万トン/年となる。いずれも推定の域を出

\* 日鉄総研(株) 客員研究員 東京都千代田区丸の内3-1-1 〒100-0005

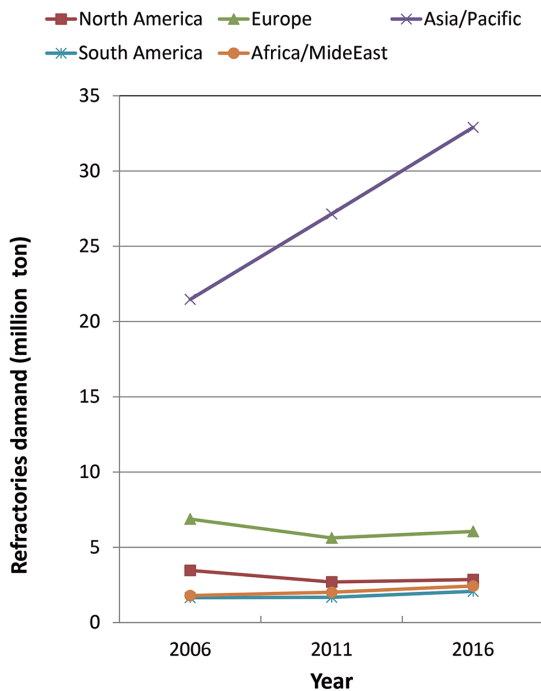


図1 世界の耐火物の需要  
Refractories demand in the world

ないが、近年の世界の耐火物の総生産量、総需要量に関してオーダー的には4500万トン/年ぐらいと思われる。

アジア/太平洋地域における約3300万トン/年のうち、中国の占める量は約2400万トン/年と推定している。アジア/太平洋やアフリカ/中東などの地域では、今後もインフラストラクチャーの開発の拡大が続き、鉄鋼、セメント、ガラスなどの需要は増加し、耐火物の生産量も増えると考えられる。

中国の耐火物生産量については、正確な状況を把握することは難しい。Semler<sup>2)</sup>によれば、2012年の中国の耐火物生産量は2800万トンに近いとの報告もある。

耐火物供給メーカーに関しては、近年、企業同士の大型合併も多く、上位10程度の企業が世界市場で約20～25%のシェアを占めるとも言われている。上位の大手企業として、RHI Magnesita (オーストリア)、Vesuvius PLC (イギリス)、黒崎播磨、品川リフラクトリーズ、Saint-Gobain Performance Ceramics & Refractories (フランス)、Imerys SA (フランス)、Calderys (フランス)、ポスコケムテック (韓国)、朝鮮耐火 (韓国)、Morgan Advanced Materials (イギリス)、HarbisonWalker International (アメリカ)等が挙げられる。Semler<sup>2)</sup>によれば2012年段階で、中国の150の耐火物供給メーカー (中国耐火物産業協会所属会員) は世界の耐火物生産の約37%を占めるとの報告がある。

### 3. 海外の主要な耐火物研究開発機関

UNITECR2019の予稿集では238件の報告のうち海外の大学や公的研究機関が著者に含まれている論文数は97件あり、他方、日本国内の大学や公的研究機関が著者に含ま

れている論文数は20件であった。また、UNITECR2017 (チリのサンティアゴ開催)の予稿集では、160件の報告のうち海外の大学や公的研究機関が著者に含まれている論文数は74件あり、日本は0件であった。日本においては耐火物の研究開発に携わる大学や公的研究機関は急激に減少しており、寂しい限りである。一方、海外、特に欧州や中国、ブラジル等の大学や公的研究機関は、耐火物に対し活発に研究開発を行っており、UNITECR2019に参加した大学や公的研究機関を調査した。

#### 3.1 ドイツ

##### 3.1.1 欧州耐火物センター (The European Centre for Refractories: ECRF)

当センターは、“欧州における耐火物に関するテーマの設定と関係当局への働きかけ”、“資金支援や賞の授与に関するプログラム作成”や“標準化活動の運営”を行っている。保有する評価等設備を活用してドイツおよび欧州の耐火物製造業者を支援し、教育/訓練、研究開発の調整およびネットワークの強化等により耐火物産業の地位向上に貢献している。“地域開発のための欧州構造基金”等の公的資金も活用している。

大学、公的研究機関や企業、また“The European Refractories Producers Federation (欧州耐火物生産者連合)”等と幅広く連携している。所在地はドイツのヘル・グレンツハウゼン (Höhr-Grenzhausen) であり、ドイツ耐火物およびセラミックス研究所 (DIFK) とは同一敷地内にある。また、コブレンツ応用科学大学の西部校舎にも隣接している。

##### 3.1.2 ドイツ耐火物およびセラミックス研究所

(Deutsches Institut für Feuerfest und Keramik GmbH: DIFK)

化学特性、物理特性、鉱物特性や高温特性に関する多数の高度な試験装置を有し、材料の測定、解析、評価を行う。DIFKは独立したテストラボラトリとして機能し、常に中立性と信頼性を維持している。正確に再現可能な特性値を決定するために、特別に開発された設備や専門技術者を擁しており、例えば、高温で、同時に機械的ストレスを伴う腐食性環境条件下で、鉱物組成を変化させながら、材料性能を評価することもできる。

顧客からの要請により、サンプルの収集、準備も支援する。欧州耐火物センター (ECRF)、ドイツ耐火物産業協会 (Verband der Deutschen Feuerfest Industrie) や耐火物研究コミュニティ (Forschungs-Gemeinschaft Feuerfest) とも密接に連携している。

##### 3.1.3 コブレンツ応用科学大学 (Hochschule Koblenz) (Koblenz University of Applied Sciences)

ラインラントプファルツ州の公立大学 (旧 Fachhochschule

Koblenz または FH Koblenz) で、現在の大学は 1996 年に設立された。ヘール・グレンツハウゼンの陶芸教育は古くからあり、材料工学部、ガラスおよびセラミックス学部のルーツは、19 世紀にまでさかのぼる。ウェスターヴァルト地域で採掘される高品質の塑性粘土により工芸陶器やセラミックスがこの地域に強く根付いている。当大学の西部キャンパスではガラスとセラミックスの材料科学と工学に焦点を当てた工学科と研究所があり、ドイツ耐火物およびセラミックス研究所 (DIFK) や欧州耐火物センター (ECRF) とともに連携している。

### 3.1.4 フライベルグ工科大学 セラミックス, ガラス, 建築材料研究所 (Technische Universität Bergakademie Freiberg Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik)

当大学は“Bergakademie: 鉱業アカデミー”に示されているように鉱物資源に関わる 250 年以上の歴史を有する大学である。1903 年頃からけい酸塩工学の研究が見られ、セラミックスとセメント技術者の教育が始まった。セラミックス研究所、けい酸塩技術研究所などの名称を経て、2002 年にセラミックス, ガラス, 建築材料研究所に改名された。フライベルグに所在し、現在約 50 名の研究者が活動している。

### 3.1.5 アーヘン工科大学 (Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen)

アーヘン工科大学はキャンパスに集約された大学ではなく、校舎はアーヘン都心部に分散している。アーヘン工科大学の鉱物工学研究所は 45 年以上にわたり、耐火材料の評価と開発に携わってきた。その間、高品質の酸化物および非酸化物合成原材料の耐火物への応用が進展した。鉄鋼業の拡大、廃棄物焼却炉の要請、石炭ガス化のプロセス革新などによって高性能耐火物の開発が促進された。鉱物工学研究所は、過酷な使用条件下における耐火材料の適合性と信頼性を評価するための新しい評価技術の開発に携わり、DIN, EN-DIN, ISO, ASTM, AFNOR, BS 規格に準拠した評価技術、および特殊な動作条件をシミュレートする非標準テスト法等を開発した。鉱物工学研究所には、“セラミックスと耐火材料の部門”および“ガラスとセラミックス複合材料の部門”がある。

### 3.1.6 エアランゲン・ニュルンベルク大学 (Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg: FAU)

1742 年にブランデンブルクのバイロイト伯フリードリヒによってバイロイトに設立され、1743 年にエアランゲンに移動した。1961 年に、ニュルンベルクの 1919 年設立の経済社会科学単科大学が併合され、大学名にエアランゲン・ニュルンベルクが付加され、1966 年にエアランゲンのスー

ドゲレンデ (南キャンパス) に工学部が設立された。バイエルン州第二の規模を持つ大学である。

## 3.2 フランス

### 3.2.1 オルレアン大学 PRISME 研究所 (Université d'Orléans Laboratoire Pluridisciplinaire de Recherche en Ingénierie des Systèmes, Mécanique, Énergétique) (システム工学, 力学, エネルギーの学際的研究室 英語名: Multidisciplinary Research Laboratory in Systems Engineering, Mechanics, Energy)

教皇クレメント 5 世によって 1306 年に設立されたオルレアン大学は、欧州で最も古い大学の 1 つである。1960 年代に、オルレアン南部にキャンパスが設立され、それ以来、Centre-Val de Loire 地域で発展、拡大している。

PRISME Laboratory は、オルレアン大学と INSA-CVL の研究所 (国立応用科学センターヴァルドゥワール研究所) から構成されている。PRISME 研究所の流体, エネルギー, 燃焼, エンジン (FECP) 部門は、輸送 (自動車, 航空) 分野, エネルギーシステム (燃焼, エネルギー材料, 高温材料など) の分野で研究活動を展開している。PRISME Laboratory は、22 人の教授を含む 90 名の研究者, ポストドクター 10 名, 博士課程学生 52 名, 技術スタッフ 11 名で構成されている。

### 3.2.2 オルレアン大学 極限条件材料, 高温, 放射研究施設 (Le CEMHTI et l'Université d'Orléans: Conditions Extrêmes et Matériaux Haute Température et Irradiation)

CEMHTI は、オルレアン大学と契約しており、1) 理学部、2) IUT (Institut Universitaire de Technologie は 2 年制の職業大学であり、技術大学ディプロマ: DUT を付与する)、3) ポリテックオルレアンの教員、研究者が含まれる。CEMHTI は、地域間または全国レベルでプロジェクトに関与している。研究対象は、透明 (ガラス) セラミックスおよび耐火セラミックス/耐火材料 (腐食, 特性評価, 応用)、NMR の利用 (構造とダイナミクス)、エネルギーと溶融塩の材料、エネルギーと環境のためのナノ多孔質材料、材料の光学と熱工学などである。実験施設として、イオンビームの応用設備、高分解能固体および高温 NMR、高温評価施設等を有している。

CEMHTI の高温プラットフォーム (HITEM) では特性評価に特化したユニークな機器の開発を通して、高温および超高温材料 (3000°C) の開発を目指している。ツールと高度なスキルを駆使して“非接触温度測定と巨視的特性の in situ 観察、固体から超高温の液体まで in situ での構造とダイナミクスの観察、測定および加熱装置の開発等”に取り組んでいる。設備としては、

・膨張計、変形を測定するための高解像度カメラと連携し、

1700℃まで測定

・高速イメージング(1000画像/秒)と組み合わせた浮揚システム(3000℃)

・固体および液体の電気伝導率(1Hz~1MHz, 1650℃)

等がある。

### 3.2.3 リモージュ大学 セラミックス研究所

(Université de Limoges Institut de Recherche sur les Céramiques: IRCER)

IRCERはセラミックスプロセスと表面処理プロセスに関する材料研究を目的としている。IRCERは欧州セラミックスセンターリモージュ(Centre Européen de la Céramique, Limoges)の建物に約200人のスタッフを擁している。またIRCERはXLIM研究所(Sigma-Lim Laboratory of Excellence: 複数の地理的サイトにある学際的な研究機関)のパートナーであり、キーワードとしては、セラミックス/生体材料/エコマテリアル/微細構造と構造が制御された材料/多孔性が制御された材料/材料とナノ構造の堆積物/高温材料/エネルギーと環境の材料/情報技術と材料/固体化学/結晶化学/セラミックスプロセス/表面処理プロセス(プラズマ, 火炎, CVD, レーザーアブレーション…)等である。

### 3.2.4 工業用セラミックスの国立学校(École Nationale Supérieure de Céramique Industrielle: ENSCI)

ENSCIは1893年にセーブルに設立された官立の陶磁器学校が基礎となり1950年に現在の形になった。2017年ENSCIは国立リモージュ国立高等技術者学校(École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Limoges: ENSIL)と合併した。公立の高等教育機関であり、粉末から完成品までのプロセス工学や非金属鉱物材料の成形に関連する専門技術者を育成する。ENSCIは、経済および産業界と緊密に連携し、海外の大学、研究所、または企業と30以上の協定、またはパートナーシップを締結している。3年間のトレーニングの最後に、学生は少なくとも1回は海外に滞在する計画になっている。所在地はリモージュの北にあるエステルテクノポールにある欧州セラミックスセンターリモージュの施設内であり、リモージュ大学セラミックス研究所(IRCER)と同じ建物に入っていると思われる。

## 3.3 中国

### 3.3.1 武漢科技大学(Wuhan University of Science and Technology)

1958年、武漢鉄鋼研究所として学部教育を行うために設立された。1995年、武漢冶金学院、武漢建築学院、および旧冶金省に所属する武漢冶金医科大学が合併し、武漢冶理工科大学が設立された。1998年、全国の高等教育管理システムの改革に応じて、中央政府と地方政府の共同建設を

実施した最初の学校の1つとして1999年に武漢科技大学に改名された。現在、青山、黄家湖、紅山の3つのキャンパスがあり、学部生は24000人以上、博士課程および大学院生は6000人以上が在学している。

大学は湖北省が所有する大学および大学の最初の国家重点研究室“耐火物および冶金の国家重点研究室”(State Key Laboratory in Refractory Materials and Metallurgy)および大学の最初の国家工学研究センター“高温材料および炉ライニング技術のための全国および地方の共同工学研究センター”を2016年に設置しており、省エネルギー対策、パイロットテスト、実証およびエンジニアリングや技術コンサルティングサービスを提供している。また、30以上の大企業と協力しており、キャンパス共同建設研究拠点として“武漢科技大学宜興(ぎこう)セラミックス耐火物研究所”や“武漢科技大学淄博(しはく)耐火物研究所”を立ち上げた。

### 3.3.2 洛陽耐火材料研究院(中鋼集団洛陽耐火材料研究院有限公司)(Sinosteel Luoyang Institute of Refractories Research Co., Ltd.: LIRR)

1963年の設立当時は冶金省が直轄する中国の耐火物専門分野で唯一の大規模な総合研究機関であった。現在は国有企業であり、耐火物原料および製品、省エネルギー材料、超硬材料、試験装置、高温装置等の開発、生産、販売および耐火物性能試験、冶金・工業炉のエンジニアリングを業務としている。河南省洛陽市に位置しており、主に国立耐火物工学研究センターと国立ハイテクノロジー工業化特殊耐火物実証施設、材料製造の役割を担っている。製造部門としての機能は、複合材料、高品質耐火物等を年間60000トン以上生産している。400人を超える専門技術者、100人を超える博士、修士、教授レベルの上級エンジニアを擁し、R&Dセンターは、ポストドクター研究ワークステーションを備えている。設立以来45年で、研究所は耐火材料の分野で300を超える国家科学技術開発計画と科学技術研究プロジェクトに携わってきた。

但し、耐火物の生産、販売を行うようになってからは、他の耐火物メーカーにとって競合者となり、中立的な研究開発機関としての位置づけは弱体化していると思われる。

### 3.3.3 河南科技大学(Henan University of Science and Technology)

河南科技大学は河南省洛陽市にあり、河南大学、鄭州大学とともに河南省重点大学の1つである。理学、工学、農学、医学、経済学、教育学など23学部を擁し、教職員は1700人、学生数は27000人で、そのうちの1000人が大学院生である。西苑、景華、周山、開元の4キャンパスが存在する。1952年“北京施拉機工業学校”として創設され、1953年に天津市に移転し天津汽車工業学校と統合し“天津汽車施拉機工

業学校”に改組、さらに“天津施拉機製造学校”に改称した。1956年に河南省洛陽市に移転し“洛陽施拉機製造学校”，1982年“洛陽工学院”に改称，2002年に洛陽医学高等専科学校，洛陽農業高等専科学校と統合し“河南科技大学”となった。

材料科学工学部に高温材料研究所が設置されている。ここでは、高温産業、特に冶金産業を支援するために、高温材料としては、新しい合成耐火材料、アモルファス耐火物、耐熱工業用セラミックスおよび応用技術を主要な研究対象としている。産学共同研究を積極的に実施し、実用化の促進を担う。河南工科大学 (Henan Polytechnic University 河南省焦作市) は別の大学である。

### 3.3.4 鄭州大学 (Zhengzhou University)

1956年に設立，1961年に鄭州師範学院，1991年に黄河大学，1992年に河南体育専科学校を編入し，2007年に鄭州工業大学および河南医科大学が合併して現在の“鄭州大学”となった。

教育部直轄で河南省人民政府が共同管理する国家“211プロジェクト”に選定された重点大学である。理学，工学，医学，文学，史学，哲学，法学，経済学，管理学などの学科を有するハイレベルな総合大学で，51000人以上の学部生，19000人以上の大学院生，98か国から2500人以上の留学生が在学している。

鄭州大学高温材料研究所は，2000年に設立された高温機能材料の重点研究所であり，構造研究室，高温性能研究室，高温シミュレーション研究室が含まれ，高温炉における耐火物の損傷メカニズムに関する研究も行われている。中国の高温機能材料の研究開発拠点になることを目指し，耐火物の技術進歩と耐火物産業の発展を促進している。

### 3.3.5 北京科技大学 (University of Science and Technology Beijing)

1952年設立の公立大学で，計算機・通信工程学院，北洋大学冶金系・采磁系金属磁組，唐山鐵道学院冶金系，北京工業学院冶金・採磁と鋼鐵機械專業，西北工学院冶金系，山西大学冶金系，清華大学採磁系採金属組が合併し“北京鋼鐵工業学院”を設立，1988年に名称を北京科技大学に変更した。学生約27000人，教職員約3000人である。

無機材料の分野は材料科学工学部に所属し，構造用セラミックス，特殊耐火物，無機機能性材料，エネルギー材料の研究，設計，開発を行っている。新材料技術研究所には無機非金属材料部，粉末冶金および先進セラミックス研究部等が含まれる。また，先端金属材料および材料の国家重点研究所 (State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials) は1999年に設定された。

### 3.3.6 中国の大学における耐火物教育<sup>3)</sup>

中国で耐火物研究室や講座を設けているのは安徽工業大学 (Anhui Univ. of Technology)，河北理工大学 (Hebei Polytechnic Univ.)，河南科技大学 (Henan Univ. of Science and Technology)，東北大学 (Northeastern Univ.)，北京科技大学 (Univ. of Science and Technology Beijing)，遼寧科技大学 (Univ. of Science and Technology Liaoning)，武漢科技大学 (Wuhan Univ. of Science and Technology)，西安建築科技大学 (Xi'an Univ. of Architecture and Technology)，鄭州大学 (Zhengzhou Univ.) の9大学である。在籍学生は学部生が1500人程度，大学院生が200人程度と言われており，世界でも最大の技術者，研究者の供給基地である。

## 3.4 ブラジル

### 3.4.1 サンカルロス連邦大学 (Universidade Federal de São Carlos: UFSCar)

ブラジルのサンパウロ州サンカルロスにある公立の大学であり，1968年に設立された。約16000人の学生と1000人の教授と研究者が在籍している。材料工学科のVictor C Pandolfelli教授が活発な研究活動で知られている。

## 3.5 その他の国の耐火物の研究をおこなっている研究機関や大学

### 3.5.1 KU ルーヴェン大学 (Katholieke Universiteit Leuven)

1425年設立，英語によるプログラムが多く開講されており，その地理的立地からも欧州を中心とした留学生に広く門を開いている。国際的に高い水準と認められている大学間における協働体制作りを推進する組織である“コインブラ・グループ<sup>\*1)</sup>”において中心的な存在であり，また2002年に設立された欧州研究重点大学の同盟 (League of European Research Universities) (欧州研究大学連盟<sup>\*2)</sup>) にもベルギー唯一の大学として加盟している。欧州連合域内の大学との学生交流にも力を入れている。

### 3.5.2 スウォンジー大学 (Swansea University)

1920年にウェールズ大学の4番目のカレッジとして設立された。学部課程と大学院課程に約19000人が在籍している。工学系は1920年に設置後，2001年に全ての工学部門が合併して工学部が形成され，2015年に大学のベイキャンパスに移転した。現在，5つのエンジニアリング棟があり，30000m<sup>2</sup>の実験室を擁する。ロールスロイス材料試験技術センターのある構造材料研究所 (ISM) やエネルギー安全

<sup>\*1)</sup> コインブラ・グループ (Coimbra Group) は1985年に創設され，1987年に憲章を採択して正式に発足した欧州の大学連盟であり，加盟大学数は39。本部はベルギーのブリュッセル，名称はポルトガルの都市コインブラに由来する。

<sup>\*2)</sup> 欧州研究大学連盟は学術研究分野において質・量ともに優れていることが加盟の条件であり，2002年に12の大学により発足した。2015年の加盟大学数は21，本部はベルギーのルーヴェンにある。

研究所 (ESRI) が含まれる。また、戦略的技術センターとして、材料研究センター (MRC)、システムおよびプロセスエンジニアリングセンター (SPEC) や Zienkiewicz 計算工学センター (ZCCE) がある。

### 3.5.3 セラミックスとガラス研究所 (Institute de Ceramica y Vidrio Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Cientificas: ICV-CSIC)

ICV は“高等科学研究評議会 (CSIC)”に属する 130 のセンターの 1 つであり、所在地はスペインのマドリードである。研究所で実施する R&D プロジェクトは、スペイン国立研究計画、欧州連合フレームワークプログラム、地域プログラム等からも資金が提供されている。ICV はスペインの産業と強力な連携があり、民間契約による資金源も重要となる。高品質の科学的知識を生産部門に移転することによりセラミックスとガラスの分野で新しい用途をカバーし、効率的な開発を目指している。ICV は、学生、研究者、技術者向けのコース、ワークショップ、セミナーをマドリード自治大学 (Universidad Autónoma de Madrid: UAM) の理学部と共同で開催している。同じ建物内に非営利団体のスペイン陶磁器協会 (SECV) の管理本部がおかれ、セラミックスとガラスに関連する科学技術の普及を目指している。

### 3.5.4 AGH 科学技術大学 (Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie) (AGH University of Science and Technology)

クラクフに本部を置き 1919 年に設置されたポーランドの国立大学である。工科大学として学生数約 27000 名、教職員約 1800 名を擁する。欧州を始めとし世界各地の大学と交換留学、各種企業との共同研究なども多数実施している。“AGH”は“Akademia (大学)”, “Górniczo (鉱業)”, “Hutnicza (冶金)”の頭文字であり、以前は“クラクフ鉱業冶金大学”の名でも知られていた。岩石特性および石材製品研究所、建物およびセラミックス材料研究所、構造解析研究所、輸送および材料の技術的手段の研究所、地球化学研究所、振動音響学研究所の研究施設を所有している。

### 3.5.5 セラミックスと建築材料研究所、耐火物部門 グリヴィツェ、ポーランド (Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych: ICiMB) (Institute of Ceramics and Building Materials, Refractory Division in Gliwice, Poland)

1951 年にけい酸塩技術研究所が、1953 年にグリヴィツェの耐火材料研究所が、そして 1954 年にオポーレの鉱物建築材料研究所が設立された。2010 年にコンクリート産業研究開発センターが加わり、セラミックスと建築材料研究所となった。クラクフにガラスと建築材料部門、オポーレに建築材料エンジニアリング部門、グリヴィツェに耐火物部

門が存在する。クラクフの AGH 科学技術大学やワルシャワ工科大学などの学術センターと緊密な協力関係を結び、共同研究プロジェクトを実施している。

### 3.5.6 ベレジネフ記念ウクライナ耐火物研究所

(Український научно-дослідницький інститут огнепоров им. А.С.Бережного, АО) (Ukrainian Research Institute of Refractories named after A.S. Berezhnoy)

1927 年に設立され、国内の耐火材料の開発と、輸入の大幅な削減を目的とした研究と生産の組織である。第二次世界大戦中、ウラルの原材料からの耐火物生産に寄与し、鉄鋼の製錬能力増強に貢献した。その後、コランダム、ジルコニア系、クロム酸化物、セラミックスファイバー系および不定形耐火物等の開発に取り組んだ。耐火物の振動成型技術を開発し、大型で高品質の製品を製造している。所在地はハリコフである。

### 3.6 その他、UNITECR2019 で発表された研究開発を支援した機関

- (1) University of Leoben (Montanuniversität Leoben) (オーストリア)
- (2) TU Vienna (Technische Universität Wien) (オーストリア)
- (3) Technical University Graz (Technische Universität Graz) (オーストリア)
- (4) University of Bonn (Universität Bonn) (ドイツ)
- (5) University of Poitiers (Université de Poitiers) (フランス)
- (6) Imperial College London: ICL (イギリス)
- (7) Kingston University: KUL (イギリス)
- (8) University of Exeter (イギリス)
- (9) University of Oulu (Oulu yliopisto) (フィンランド)
- (10) University of Coimbra (Universidade de Coimbra) (ポルトガル)
- (11) University of Minho (Universidade do Minho) (ポルトガル)
- (12) McGill University (カナダ)
- (13) University of Connecticut: UConn (アメリカ)
- (14) The New York State College of Ceramics (NYSCC) at Alfred University (アメリカ)
- (15) University of Sao Paulo (Universidade de São Paulo: USP) (ブラジル)
- (16) Argentine Steel Institute (Instituto Argentino de Siderurgia) (アルゼンチン)
- (17) Seoul National University: SNU (韓国)
- (18) Yonsei University (韓国)

Semler<sup>2)</sup>によればアメリカの大学における耐火物教育に関して、1960 年代には 14 大学で 14 のプログラムが進行したが、2013 年には 2 大学の 2 プログラムまで減少している。

## 4. 研究開発のネットワーク

海外の大学や研究機関は、公的や財団等からの資金援助を受ける場合が多い。UNITECRにおける論文の発表にも学生が支援を受けて海外出張しており、耐火物分野の研究者、技術者養成に貢献している。大学においても、学生や大学院生が耐火物を対象としたテーマに正面から取り組んでいる。日本では、大学における耐火物関連の講座や講義は殆どなくなっていると言っても過言ではない程であり、高温産業を支える基盤技術に対する取組みの違いを痛感する。ここでは海外における研究開発支援のネットワークに関して、UNITECR2019 発表論文の謝辞を参考に例示する。

### 4.1 耐火物の研究、教育に関する国際連盟 FIRE

(Federation for International Refractory Research and Education: FIRE)

耐火物の分野で活躍する学術機関および企業（メーカー、ユーザー、その他のサービス供給者）の世界的なネットワークで、大学および民間の非営利組織であり、理事会によって管理される。資金はメンバー企業の会費や助成機関から支援される。

学術機関としては、現在、下記に示す 10 機関が参加している。

- ・ Montanuniversität Leoben (オーストリア)
  - ・ Universidade Federal de São Carlos (ブラジル)
  - ・ Seoul National University (韓国)
  - ・ Wuhan University of Science and Technology (中国)
  - ・ École Nationale Supérieure de Céramique Industrielle – Limoges (フランス)
  - ・ Polytech'Orléans - Orléans CEMHTI-CNRS (フランス)
  - ・ RWTH Aachen (ドイツ)
  - ・ TU Freiberg - Institute of Ceramic, Glass and Construction (ドイツ)
  - ・ 名古屋工業大学 (日本)
  - ・ University of Missouri-Rolla (アメリカ)
- また、支援している企業を下記に示す。
- ・ TENARIS Siderca (アルゼンチン)
  - ・ TATA Steel Ceramics Research Centre (インド)
  - ・ RHI Magnesita (オーストリア)
  - ・ IMERYS - Minerals for Refractories Imerys Refractory Minerals (フランス)
  - ・ Kerneos (フランス)
  - ・ Elkem AS, Materials (スウェーデン)
  - ・ Almatic, inc. (アメリカ)
  - ・ Pyrotek (アメリカ)
  - ・ Calderys Center for Abrasives and Refractories Research & Development (フランス)
  - ・ Alteo Alumina (フランス)

- ・ Saint Gobain (フランス)
- ・ POSCO Technical Research Laboratories (韓国)

FIRE の主な狙いは、将来のためにエンジニアを教育することであり、耐火物のライフサイクル全体を最適化するために、複雑で付加価値のある耐火物製品を考案、設計、実装、運用できる若いエンジニアの育成が必要となる。マルチパートナー研究プログラムを通じて国境を越えた国際的な研究と産業コンソーシアムを目指している。

### 4.2 耐火物ライニングの高度な熱機械的マルチスケールモデリングプロジェクト ATHOR

Advanced Thermomechanical Multiscale Modelling of Refractory Linings (ATHOR) と称するものであり、欧州のマリー・キュリー革新的トレーニングネットワーク (a Marie Skłodowska-Curie Action European Training Network–Innovative Training Network: ETN ITN) の一環とみられる。ATHOR は 7 学術的機関と 8 民間パートナーを結びつける革新的、共同的、学際的なプロジェクトであり、ATHOR ネットワークは、耐火物の研究、教育に関する国際連盟 (FIRE) のイニシアチブを支援し、研究とトレーニング活動の組み合わせを提供している。

7 学術的機関を下記に示す。

- ・ University of Limoges (フランス)
  - ・ AGH University of Science & Technology (ポーランド)
  - ・ RWTH Aachen (ドイツ)
  - ・ Montanuniversität Leoben (オーストリア)
  - ・ University of Orléans (フランス)
  - ・ University of Minho (ポルトガル)
  - ・ University of Coimbra (ポルトガル)
- 8 民間パートナーを示す
- ・ Altéo Alumina – Gardanne (フランス)
  - ・ Imerys Refractory Minerals – Villach (オーストリア)
  - ・ RHI-Magnesita (オーストリア)
  - ・ Pyrotek Scandinavia AB - Ed (スウェーデン)
  - ・ Saint-Gobain – Cavaillon (フランス)
  - ・ TataSteel – IJmuiden (オランダ)
  - ・ FIRE – Montréal (カナダ)
  - ・ Safran (フランス)

ATHOR ネットワークの目的は、最先端のモデリング技術と実験技術を耐火物に適合させて開発し、使用温度範囲で信頼性の高い計算と測定を目指す。材料科学および数値シミュレーションの分野におけるエンジニアリングテクノロジーの開発を目標としており、より堅牢で信頼性の高い耐火物ライニングの設計に活かす。

### 4.3 支援資金の例

FIRE, ATHOR 以外で UNITECR2019 報告論文の謝辞に記載されていた支援資金の例を挙げる。

- (1) ドイツ産業連盟 (AiF)
- (2) ドイツ連邦経済技術省 (BMW)
- (3) ドイツ研究財団 (DFG)
- (4) オーストリア連邦政府による財政支援
- (5) 欧州連合の Horizon 2020
- (6) 中国国立自然科学財団の重要プロジェクト
- (7) 中国奨学金評議会

## 5. 耐火物の研究開発の最近の動向

UNITECR2019 における論文発表から動向を調査した。材料では不定形耐火物系が多く、根本である結合組織や粒子特性に着目すること、および MgO や SiO<sub>2</sub> 等の特性を活かした機能性の高い不定形耐火物を目指す姿勢がみられた。

微構造の制御では、触媒的化合物やナノ粒子の添加により、加熱焼成中に目的とする板状生成物を作製して耐火物の特性向上を狙った。

超低炭素鋼の製造では低炭素耐火物の開発が促進され、セラミックスと金属の性質を合わせ持つ化合物やマトリックスの組織制御、結合システムの進化等で、炭素を削減、削除しても耐熱衝撃性の飛躍的な向上を狙った。

耐火物を大型築造体として使用するに際して材料の熱間特性、築造体としての構造力学、熱変化に伴う発生応力の数値解析、シミュレーション等が不可欠であり、欧州を主体に基礎的な研究が数多く報告された。

耐火物の物性測定、解析、評価に関して新たな視点で取り組んでいる例が報告された。

### 5.1 不定形耐火物

表 1 には不定形耐火物に関して興味深い報文例を示す。

#### 5.1.1 MgO 系不定形耐火物

MgO の水和による板状ブルーサイトを用い、脱水プロセ

スの調整でバインダーとして活かす。セメントフリー結合の開発 (A-1) や MgO キャスタブルのバインダーに使用しているマイクロシリカを減少させ、合成 MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 系バインダーを添加することで、熱間強度、耐熱性、耐食性を向上させる開発が進められている (A-2)。塩基性不定形耐火物において、MgO の特性を最大限発揮させるための結合組織の開発が期待される。

#### 5.1.2 SiO<sub>2</sub> 不定形耐火物

非晶質溶融シリカを用いたキャストブルを事前熱処理することにより、熱衝撃試験を繰返しても、通常の珪石れんがより動ヤング率の維持率が向上して劣化性は少ないことが期待される (A-3)。珪石やマイクロシリカを原料とした不定形振動成型を行った。ゾルゲル法を適用したセメントフリーの 96% シリカのキャストブルが期待できる (A-4)。コークス炉や高温熱風炉など高純度シリカ耐火物への要請も増している。特に、大型耐火物や複雑形状耐火物に対しては、不定形化、プレキャスト、熱処理化が検討されている。

#### 5.1.3 不定形耐火物における粒子形状の効果

粗粒域で破片形状と立方体粒子の爆裂に与える影響が検討され、立方体粒子はインターロック性が弱く、爆裂しやすい傾向がみられた (A-5)。粗粒域で破片形状と立方体粒子を溶鋼取鍋用不定形耐火物に適用し、耐用性を検討した結果、破片状粗粒子の方が、凝集力が大きく耐用性に優れた (A-6)。

## 5.2 微構造

表 2 には微構造に関して興味深い報文例を示す。

サイアロン結合の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C 作製において、触媒機能添加物の影響を調べた。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加により、マトリックス中に板状 β-サイアロンを形成し、強度および熱衝撃試験後の強度維持率が向上した (B-1)。

表 1 不定形耐火物に関するトピックス  
Topics for refractory castables

No.	Title	Author
A-1	14-B-15 Assessment of a New Magnesia-based Binder Concept for Refractory Castables <sup>4)</sup>	IMERYS, Paris, France
A-2	14-E-18 Optimization of Magnesia Castables by Introduction of Pre-synthesized Magnesium Silicate Hydrate <sup>5)</sup>	Wuhan Univ. of Science and Technology, Univ. of Exeter
A-3	14-E-11 The Influence of Crystallisation on Thermal Shock Behaviour of a Fused Silica Refractory Castable Concrete <sup>6)</sup>	RWTH Aachen Univ., Ceramics Research Centre, Tata Steel, IJmuiden, the Netherlands
A-4	14-E-12 Newly Developed Low Cement and Cement-free Castables Based on Silica <sup>7)</sup>	P-D Refractories CZ a.s. Czech Republic
A-5	14-B-17 Splintered versus Cubic Grains in High Alumina Castables–Part I: Examination of the Impact of the Particle Shape on the Explosion Resistance <sup>8)</sup>	Hochschule Koblenz, Forschungsgemeinschaft Feuerfest e.V. at the European Centre for Refractories, INISMa, Institut Interuniversitaire des Silicates, Belgium
A-6	14-B-19 Splintered versus Cubic Grains in High Alumina Castables–Part III: Assessment of the Failure Tendency in the Wear Lining of a Modelled Steel Ladle Using the Drucker-Prager Failure Criterion <sup>9)</sup>	Forschungsgemeinschaft Feuerfest e. V., Hochschule Koblenz, INISMa Institut Interuniversitaire des Silicates, Mons, Belgium



ナノアルミナの使用により、焼成時に板状の  $CA_2$ 、 $CA_6$  が生成することにより機械的特性が改善し、耐熱衝撃性が大幅に向上した (B-2)。

### 5.3 低炭素耐火物

表 3 には低炭素耐火物に関して興味深い報文例を示す。

清浄鋼生産に対して耐火物中の炭素量削減が要請されている。黒鉛の一部を Ti-MAX (金属とセラミックスの性質を備えた化合物) 相への置換を試みた。結果として  $Ti_3AlC_2$  の酸化および分解が溶損した界面での黒鉛の急速な酸化を抑制する効果がみられたが、他方、体積膨張に伴う悪影響も考慮された (C-1)。

MgO-C にナノカーบอนを加え、フェノール樹脂の炭化過程における Ni および金属 Al の触媒作用を検討した結果、MgO ウィスカーやスピネルウィスカーを発生し、微細構造を改善し、破壊強度、破壊までの変位、耐熱衝撃性を向上

させた (C-2)。ナノカーボン粒子や複合グラファイトブラックを微量添加し、樹脂バインダーの加熱中にウィスカーや針状化合物をマトリックス中に生成させて特性を向上させる手法は以前からも検討されていた<sup>10)</sup>。

超低炭素鋼に適用される取鍋メタルラインにカーボンレスの非焼成アルミナマグネシアれんがを開発した。独自のバインダーシステムを用い、180℃で熱処理後は焼成製品と同様の機械的特性を示した。取鍋運転条件の下で、焼成れんがよりも優れた性能を示した (C-3)。

### 5.4 機械特性、数値解析

表 4 には熱間機械特性、数値シミュレーション等に関して興味深い報文例を示す。

脆性挙動と亀裂分岐を示す疑似連続体媒体である耐火物の破壊メカニズムをシミュレートするために、離散要素法 (Discrete Element Method: DEM) を使用した。既存の亀

表 2 微構造に関するトピックス  
Topics for microstructures

No.	Title	Author
B-1	15-A-11 Effect of Catalysts on Mcrostructure and Thermo-mechanical Properties of $Al_2O_3$ -C Refractories <sup>11)</sup>	Wuhan Univ. of Science and Technology
B-2	15-A-21 Mcrostructure and Phase Evolution of Corundum-Spinel Based Castables Containing Nano Phases <sup>12)</sup>	Wuhan Univ. of Science and Technology, Zhejiang Zili Corp. Ltd, China

表 3 低炭素耐火物に関するトピックス  
Topics for law carbon and carbon free refractories applied to ultra low carbon steel

No.	Title	Author
C-1	14-B-16 The Application of Ti-Max Phase in Low Carbon Refractories and Elucidating Its Related Role <sup>13)</sup>	Wuhan Univ. of Science and Technology, Univ. of Exeter
C-2	14-C-15 Improved Mechanical Properties and Thermal Shock Resistance of Low Carbon MgO-C Refractories via the Catalytic Formation of Nanocarbons and Ceramic Bonding Phases <sup>14)</sup>	Wuhan Univ. of Science and Technology
C-3	14-D-18 Refractory without Carbon for the Production of Ultra-low Carbon Steels <sup>15)</sup>	Usiminas, Brazil, RHI Magnesita, Brazil

表 4 熱間機械特性、数値シミュレーションに関するトピックス  
Topics for thermomechanical properties and numerical simulations

No.	Title	Author
D-1	14-A-14 Numerical Modeling of Wedge Splitting Test by Discrete Element Approach: Flat Joint Contact Model <sup>16)</sup>	IRCER laboratory, Centre Européen de la Céramique, France
D-2	15-D-2 Discrete Element Modeling—A Promising Method for Refractory Application <sup>17)</sup>	Federal Univ. of São Carlos, Univ. of São Paulo, Tata Steel R&D, IJmuiden, The Netherlands
D-3	14-E-16 Modeling of Nonlinear Behavior at High Temperature of Refractory Masonries Without Mortar <sup>18)</sup>	Univ. Orléans, Univ. Tours, INSA-CVL, LaMé
D-4	14-E-17 Thermomechanical Modelling of Refractory Mortarless Masonry Wall Subjected to Biaxial Compression <sup>19)</sup>	Univ. Orléans, Univ. Tours, INSA-CVL, LaMé
D-5	15-C-11 Thermomechanical Behaviour of an Alumina Spinel Refractory for Steel Ladle Applications <sup>20)</sup>	Univ. of Limoges, IRCER, Centre Européen de la Céramique, Limoges, Univ. of Poitiers, Institut Pprime, Univ. of Orléans, Laboratoire de Mécanique
D-6	15-E-17 Matrix Design in High Alumina Refractory Castables—Part II: Assessment of the Brittle-ductile Transition Temperature and Ways to Influence It <sup>21)</sup>	Forschungsgemeinschaft Feuerfest e. V. at the European Centre for Refractories, Hochschule Koblenz, Institute of Ceramics and Building Materials, Refractory Division, Gliwice, Poland

裂を考慮して、マクロスケールで耐火性セラミックスの準脆性挙動と脆性の減少を再現しうる (D-1)。

離散要素法 (DEM) は、材料の不連続性を表し、微構造をその巨視的な挙動に結びつける可能性がある。結果として、モデルとヤング率やポアソン比の測定の実験間で 90% を超える類似性を示し、この方法が耐火物の機械的挙動を解明する有用なツールになり、不定形耐火物の研究に活用しうることを期待する (D-2)。

溶鋼取鍋の空目地れんが築造体は高温で非線形の機械的挙動を示す。ここでは、BNM (Bingham-Norton's rheological Model) のクリープ則を使用して等方性粘弾性挙動のモデル化を行った。目標は取鍋のシミュレーションで使用し、さまざまな層での時間に対する応力の変化を示したい (D-3)。

三次元熱機械モデルは、空目地築造壁の機械的挙動に対する接合部の閉鎖／再開の影響を分析するために開発された。築造体の接合部が徐々に閉じられ、接合部のパターンが変化するため、直交異方性で非線形となり、除荷後、最終的な目地の厚さは通常最初の厚さよりも薄くなり、両方向に永久的な変形が生ずる (D-4)。

アルミナスピネル耐火物を適用した取鍋ライニングの操業条件における微構造と熱機械特性の数値モデルの作成が目的で、1200℃で非線形挙動を示し、熱処理中のヤング率の変化やヒステリシス等の調査にアコースティックエミッション、超音波、一軸引張試験やブラジル提案の機械試験法を用いた。微小亀裂の存在、高温粘性相等の微構造により、耐熱衝撃性が向上する (D-5)。

高温ウェッジスプリット測定により高アルミナ不定形耐火物の破壊エネルギーを算出した。マトリックスで、より微細な粒子を使用すると高温で非破壊エネルギーが増加する傾向がみられ、高温での不定形耐火物の延性改善に効果があると考えられる (D-6)。

## 5.5 測定、解析、評価

表 5 には測定、解析、評価等に関して興味深い報文例を示す。

高温での耐火物の機械的特性を得るために、ブラジル提案の機械試験法を組み合わせた統合デジタル画像相関

(Integrated Digital Image Correlation: I-DIC) を一次元引張試験および圧縮クリープ試験の代替として検討した。材料の特性評価に必要な試験数を削減でき、かなりのレベルの精度を維持できるため、この方法は有望である (E-1)。

熱サイクル条件下でヤング率、機械的ダンピング、およびアコースティックエミッション測定によって評価した結果、サブミクロンスピネル粒子の量が多いキャストブルは、高温でより優れた減衰能力を発揮し、応力緩和能力の増加により、耐熱衝撃性を改善する。ヤング率の温度依存性は耐熱衝撃性に大きな影響を与える (E-2)。

鉱物反応と組織の変化は、in situ ハイパースペクトルラマンイメージング (HSRI) によって研究された。高温における HSRI が焼結反応解明のための強力なツールであり、準安定相だけでなく、少量の相も検出でき、さらに異なる多形を区別できることも利点である (E-3)。

レーダー信号は、固体材料中の遊離水を非常に敏感に検出する。不定形耐火物の加熱に伴う結合水、水和水等の遊離温度の異なる放出水の挙動を非破壊、非接触で検出できる (E-4)。

## 6. おわりに

- (1) 海外における大学や公的研究機関の参加が多く、活発に研究開発を行っている。ドイツ、フランスを中心にブラジル等も含め、欧州で広く連携しており、公的、財団等の資金援助を受けて、基盤的な研究を続けている。学生や大学院生が出張してきて発表するケースも数多く、耐火物の研究をアカデミアで正面から受け止めている。
- (2) 中国は、多くの大学で耐火物の研究開発に取り組んでおり、学生数の多さ、研究設備の充実化も著しい。国家重点研究施設として重要性が認められており、高温材料研究所や炉ライニング技術の工学研究センター等も設置されている。鉄鋼生産 9 億トン／年、耐火物生産量 (鉄鋼用以外も含む) 2500 万トン／年以上の規模において、耐火物技術への取組みの勢いは強烈なものと思われる。
- (3) 大学や公的研究機関における研究開発内容は基盤的な

表 5 測定、解析、評価に関するトピックス  
Topics for measurement, analysis and evaluation

No.	Title	Author
E-1	16-E-4 Creep Characterization of Refractory Materials at High Temperatures Using the Integrated Digital Image Correlation <sup>22)</sup>	Univ. Orléans, Univ. Tours, INSA-CVL, LaMé
E-2	16-E-8 Alumina-Spinel Castables under Thermal Cycling Conditions–In Situ Characterisation <sup>23)</sup>	RWTH Aachen Univ., IRCER - Univ. of Limoges, RHI Magnesita, Leoben, Imerys Aluminates, Paris
E-3	16-E-14 Hyperspectral Raman Imaging: A Powerful Tool for Time-, Space-, and Temperature-resolved in Situ Studies Using the Example of the CaO-SiO <sub>2</sub> -System <sup>24)</sup>	Hochschule Koblenz, Univ. Bonn
E-4	16-E-15 Radar Based Investigation of the Decomposition of Hydrate Phases in Calcium Alumina Concrete <sup>25)</sup>	Hochschule Koblenz

対象が多く、各企業においては共通技術としてみなされるところで協力している。人材・資金面でも一企業で研究開発の全てをやり果せないとの見方もあると思う。

- (4) UNITECR2019 における耐火物技術の動向として、高機能不定形耐火物の開発、大型建造体の信頼性向上のための熱機械特性把握や評価の基盤研究などが地道に進められていると感じた。

#### 参照文献

- 1) American Ceramic Society: Ceramic Tech Today. March 22 (2013)
- 2) Semler, C.: Am. Ceram. Soc. Bull. 93 (2), 34-39 (2014)
- 3) 林 煒：品川技報. 52, 87-96 (2009)
- 4) UNITECR2019 Proceedings. 14-B-15, 2019, p. 65-68
- 5) *ibid.* 14-E-18, 2019, p. 206-209
- 6) *ibid.* 14-E-11, 2019, p. 178-181
- 7) *ibid.* 14-E-12, 2019, p. 182-185
- 8) *ibid.* 14-B-1, 2019, p. 73-76
- 9) *ibid.* 14-B-19, 2019, p. 81-84
- 10) Tamura, S., Ochiai, T., Matsui, T., Goto, K.: Nippon Steel Technical Report. (98), 18-28 (2008)
- 11) UNITECR2019 Proceedings. 15-A-11, 2019, p. 254-257
- 12) *ibid.* 15-A-21, 2019, p. 293-296
- 13) *ibid.* 14-B-16, 2019, p. 69-73
- 14) *ibid.* 14-C-15, 2019, p. 109-112
- 15) *ibid.* 14-D-18, 2019, p. 162-165
- 16) *ibid.* 14-A-14, 2019, p. 23-26
- 17) *ibid.* 15-D-2, 2019, p. 464-467
- 18) *ibid.* 14-E-16, 2019, p. 198-201
- 19) *ibid.* 14-E-17, 2019, p. 202-205
- 20) *ibid.* 15-C-11, 2019, p. 419-422
- 21) *ibid.* 15-E-17, 2019, p. 605-608
- 22) *ibid.* 16-E-4, 2019, p. 896-899
- 23) *ibid.* 16-E-8, 2019, p. 912-915
- 24) *ibid.* 16-E-14, 2019, p. 937-940
- 25) *ibid.* 16-E-15, 2019, p. 941-944



田村 信一 Shimichi TAMURA  
日鉄総研(株) 客員研究員  
東京都千代田区丸の内3-1-1 〒100-0005