



2022 / 2023

北海道大学大学院工学研究院附属エネルギー・マテリアル融合領域研究センター

**Center for Advanced Research of Energy and Materials**

**Faculty of Engineering Hokkaido University**

**Brochure**



## ご挨拶

本センターは、工学研究院附属の研究センターとして、材料科学ならびにエネルギー工学を基礎としたSDGsに資する新たなクリーンエネルギーの創生と高効率変換に関する基盤研究を行っています。現在、グローバルな環境・エネルギー問題が顕在化し、従来の石炭や石油に主に依存したエネルギー社会から脱却し、太陽光、風力、バイオマスなどの多様な再生可能エネルギー源の利用に供する高効率で安全なエネルギー変換システムの構築が求められています。そこで本センターでは、①高効率なエネルギー変換を達成するシステム及びマテリアルの開発に関する研究、②エネルギーに関する学際的かつ融合的な研究教育活動、③エネルギーに関連する分野を融合する産学連携を含む研究ネットワークの形成を行うことをミッションとしています。その実現のため、光・熱エネルギー変換材料分野、量子エネルギー変換材料分野、マルチスケール機能集積分野、エネルギー変換システム設計分野、エネルギーメディア変換材料分野の5研究室を設置し、高効率エネルギー変換やエネルギー貯蔵に不可欠な機能性材料の創製ならびにその材料の原子レベル構造・機能解析を行っています。さらに、それらを用いた新規エネルギー変換プロセス・エネルギーメディアに関する最先端研究を推進し、グリーンイノベーションに資する研究教育拠点として貢献することを目指しています。教育面では工学院および総合化学院の協力講座として学部生・大学院生の教育にも参画し、エネルギーに関連した次世代の人材育成にも貢献しています。



また、本センターでは、マテリアルの動的プロセスを原子レベルで観察可能な、世界的にもユニークなイオン加速器2基とパルスレーザー発振器を敷設したマルチビーム超高压電子顕微鏡を擁する複合量子ビーム超高压顕微鏡解析研究室、さらには材料の中性子線解析を可能とする最大加速エネルギー45MeVの電子線型加速器を擁する中性子材料解析研究室を2018年4月に設置いたしました。電子線と中性子の両方の量子ビームを利用した先端的な構造解析システムの利便性を上げ、お互いを相補的に活用する環境を整備しています。ロバスト農林水産工学国際連携研究教育拠点構想を始めとする本学大学院工学研究院の研究教育拠点構想や学内外の研究者の融合研究、学際研究を支援しています。

令和4年4月吉日  
センター長 渡辺 精一

## SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS

私たちは持続可能な開発目標(SDGs)を支援しています



## Greetings from the Director

The Center for Advanced Research of Energy and Material (CAREM) belongs to Faculty of Engineering and conducts the basic research on materials science and energy related engineering to provide development of new clean energy resources and highly efficient energy conversion that contributes to the SDGs.

Nowadays, human beings are facing global energy-environmental problems. We need to get out from the conventional energy societies in which we have been depending mainly on fossil fuels such as coal and petrol, and we must construct other safe and highly efficient energy converting systems out of various renewable energy sources such as sunlight, wind and biomass.

*Our three missions to perform at CAREM:*

1. Studying on development of systems and materials to improve the efficiency of energy conversion.
2. Conducting interdisciplinary and fusional research on energies.
3. Formation of research networks along with industry-academia collaboration based on fusion of energy-related fields.

*CAREM consists of five laboratories of:*

①Photon and Thermal Energy Conversion Materials, ②Quantum Energy Conversion Materials, ③Integrated Function Materials, ④Chemical Energy Conversion Systems and ⑤ Energy Media. All of them are aiming to contribute to highly efficient energy conversion, tailoring essential materials for energy storage and analyzing atomic-scale structures and functions of the materials. In addition, we will continue striving for excellence in advance research on new energy conversion processes and energy medias using novel materials as a research institute that makes a significant contribution to green innovations.

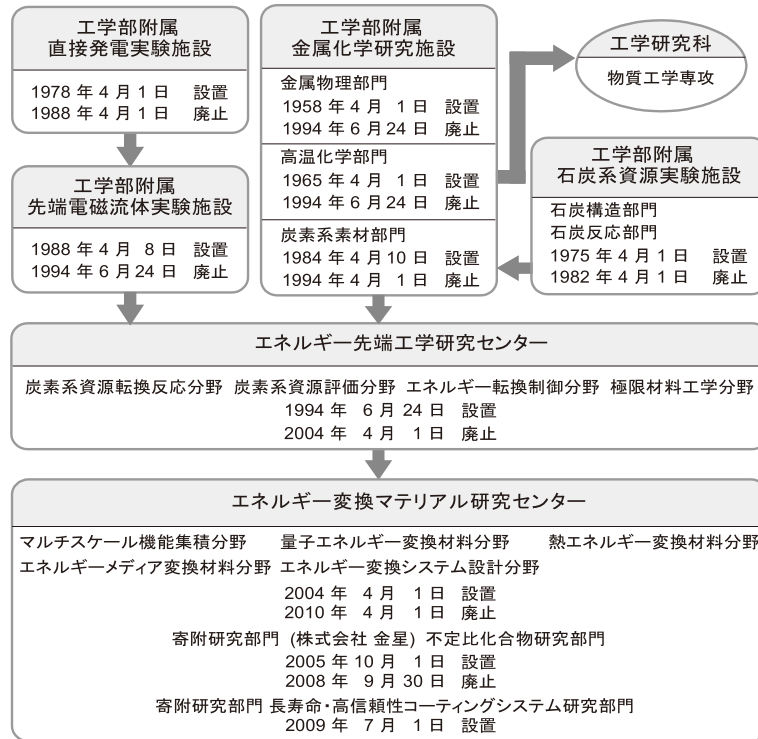
CAREM is also contributing to the education of undergraduate and graduate students of School of Engineering, Graduate School of Engineering and Graduate School of Chemical Sciences and Engineering to foster the next generation of researchers and engineers in energy fields.

The Multi-Quantum Beam High Voltage Electron Microscope Laboratory also belongs to CAREM that has a unique high voltage electron microscope equipped with two ion accelerators and a pulsed-laser oscillator that enables us to observe dynamic processes of materials at atomic level. In addition, Neutron Materials Analysis Laboratory was settled in April 2018. This laboratory is equipped with a 45MeV electron linear accelerator that enables us to perform analysis of materials by both electron and neutron beams, so that we can provide a good research environment to utilize our facilities complementarily.

We support the projects of Hokkaido University such as “Research and Education Center for Robust Agriculture, Forestry and Fishery Industry” and fusion / interdisciplinary research with off-campus researchers.

Professor Seiichi Watanabe  
Center Director  
April 2022





## エネルギー・マテリアル融合領域研究センター

マルチスケール機能集積分野      量子エネルギー変換材料分野      光・熱エネルギー変換材料分野  
 エネルギーメディア変換材料分野      エネルギー変換システム設計分野      超高压電子顕微鏡室

長寿命・高信頼性  
 コーティングシステム分野(寄附分野)  
 2010年4月1日 設置

長寿命・高信頼性  
 コーティングシステム分野(寄附分野)  
 2012年6月30日 廃止

複合量子ビーム超高压顕微解析研究室      中性子材料解析研究室  
 2018年4月1日 設置

## History

Three research institutes were active in the Facility of Engineering, Hokkaido University as affiliated research institutes before June, 1994.

- Metal Chemistry Research Institute (founded on March 4, 1937 and revised on April 1, 1958)
- Coal Research Institute (founded on April 1, 1975)
- Advanced Magnetohydrodynamic Research Institute (founded on April 4, 1988)

Center for Advanced Research of Energy Technology (CARET) was established on June 24, 1994.

- Reaction Engineering in Carbonaceous Resource Conversion
- Characterization and Analytical Chemistry of Carbonaceous Resources
- Division of Energy Conversion and Control

Center for Advanced Research of Energy Conversion Materials (CAREM) was established on April 1, 2004.

- Laboratory of Integrated Function Materials
- Laboratory of Quantum Energy Conversion Materials
- Laboratory of High Temperature Materials
- Laboratory of Energy Media
- Laboratory of Chemical Energy Conversion Processes

Division of Non-stoichiometric Compounds (KINBOSHI Co. Ltd. Endowed) was established in October 2005.

Advanced Coating Laboratory was established in July 2009.

Center for Advanced Research of Energy and Materials was established on April 1, 2010.

- Laboratory of Integrated Function Materials
- Laboratory of Quantum Energy Conversion Materials
- Laboratory of High Temperature Materials
- Laboratory of Energy Media
- Laboratory of Chemical Energy Conversion Systems
- High-Voltage Electron Microscope Laboratory

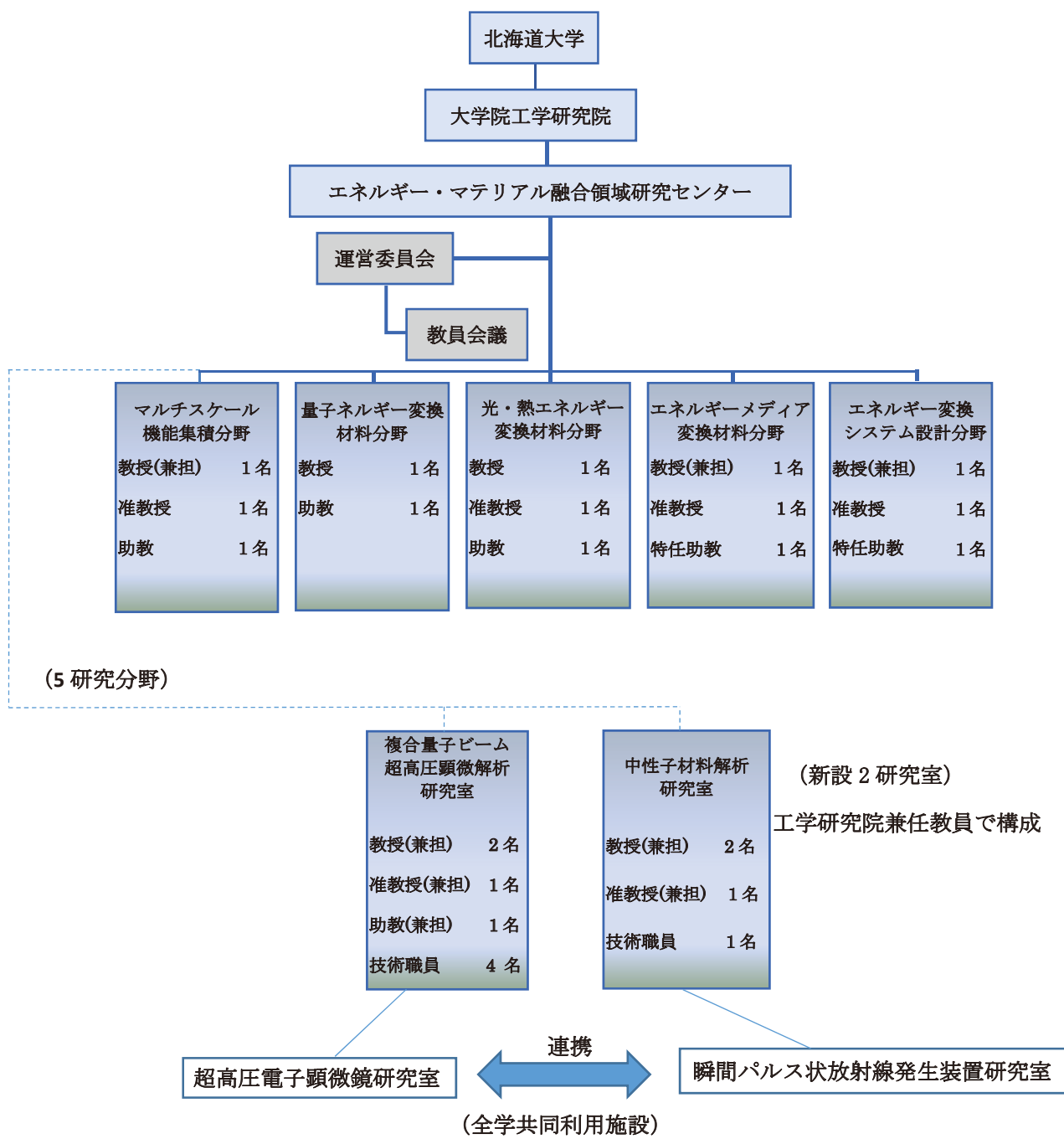
Advanced Coating Laboratory was discontinued from June 30, 2012.

Laboratory of Photon & Thermal Energy Conversion Materials was established on April 1, 2015

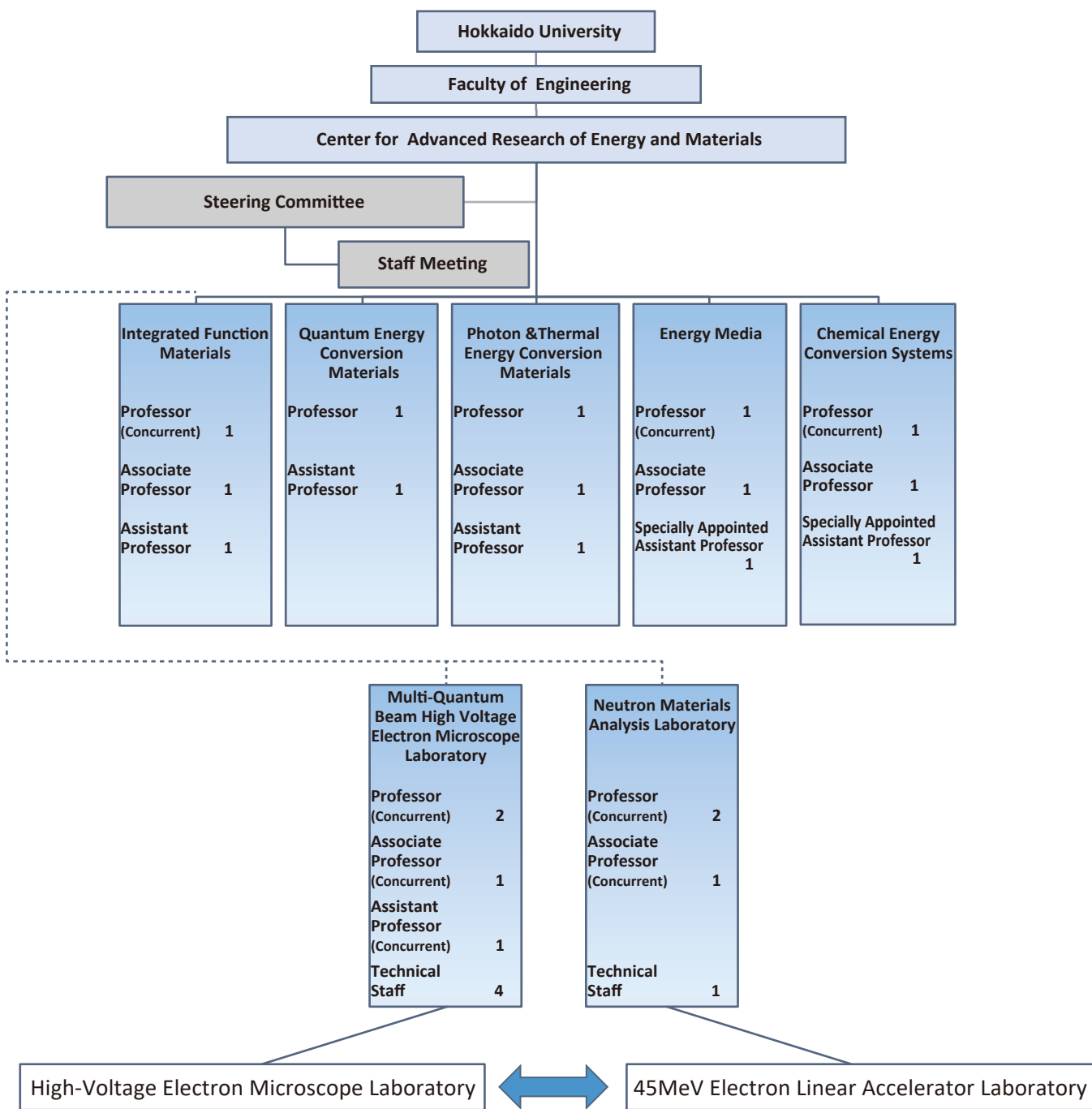
Multi-Quantum Beam High Voltage Electron Microscope Laboratory was established on April 1, 2018

Neutron Materials Analysis Laboratory was established on April 1, 2018

# 組織



# Organization

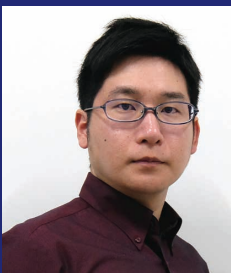


## マルチスケール機能集積分野

教授(兼) 柴山 環樹



准教授  
坂口 紀史  
Associate Professor  
Norihito Sakaguchi  
sakaguchi@eng.hokudai.ac.jp



助教  
國貞 雄治  
Assistant Professor  
Yuji Kunisada  
kunisada@eng.hokudai.ac.jp

エネルギー利用の高効率化とそのためマテリアル開発基盤を構築するため、原子レベルの構造評価、ナノ計測技術、計算機シミュレーションを組み合わせ、材料のナノからマクロまでの特性とその起源をマルチスケールで解析・評価している。そこから得られた知見に基づき、イオン注入・電子線照射などを応用したエネルギー材料の機能化のための研究を展開している。(図1)

現在実施している研究テーマ例を以下に示す。

### (1) 先進電子顕微鏡を用いた nm オーダーの光学特性測定手法の開発

電子エネルギー損失分光法(EELS)は材料の誘電関数などの光学的特性の評価が可能である。我々は、電子線を用いた誘電関数測定時の問題点を解決し、nm オーダーでの光学的性評価手法を開発している。本手法を用い、モノクロメータを備えた先進電子顕微鏡と電磁気学シミュレーションを組み合わせ、プラズモニクス材料をはじめとする種々のエネルギー変換材料の特性解析を原子スケールで実施するとともに、先進エネルギー変換材料の開発とそれらの特性解明に向けた研究を遂行している。

### (2) 先進電子顕微鏡を用いたセラミックス蛍光体中の三次元ドーパント分布の解明

蛍光体材料などにおいて、材料中のドーパント分布は材料物性に大きな影響を与える。我々は、通常では二次元的な構造情報しか得ることができない電子顕微鏡を用い、材料中のドーパントの三次元分布を原子スケールで測定する手法を開発している。本手法と電子顕微鏡像シミュレーションを組み合わせ、蛍光体材料の構造解析を原子スケールで実施している。(図2)

### (3) 先進電子顕微鏡と電子状態計算を組み合わせた酸素吸蔵材料の開発

EELS は材料の化学結合に関する有益な情報をもたらすが、その詳細な解釈には第一原理電子状態計算から得られる知見が必要不可欠である。我々は、先進電子顕微鏡と第一原理電子状態計算を組み合わせ、酸素吸蔵材料の化学状態分析を原子スケールで実施し、酸素吸蔵特性の発現機構の解明と新規高性能材料の開発に向けた研究を遂行している。

### (4) 量子ダイナミクス計算を用いた水素関連材料の開発

材料の水素脆化による劣化を低減するためには、材料中への水素侵入を抑制しなければならない。一方、水素透過膜や水素分離膜には高い水素透過特性が求められる。このように材料中への水素の侵入特性を制御することは、水素関連材料の開発において重要である。我々は、第一原理電子状態計算と原子核の量子ダイナミクス計算を活用し、材料中での水素の固溶・拡散特性及びその同位体効果を調査し、水素遮蔽被覆膜や水素透過膜の開発に向けた研究を遂行している。

### (5) 先進電子顕微鏡と電子状態計算を組み合わせた省貴金属触媒の開発

持続可能なクリーンエネルギー社会の実現には、高活性的かつ耐久性に優れた省貴金属触媒材料の開発が必要不可欠である。触媒劣化特性や触媒反応特性を解明するためには、触媒動作中の電子や原子の振る舞いを理解する必要がある。我々は、第一原理電子状態計算や原子核の量子ダイナミクス計算などの化学反応シミュレーションに基づいた反応速度論や熱力学的解析を用い、触媒金属サブナノクラスターの凝集プロセスや触媒反応機構を素過程から理解するための研究を推進している。ここから得られる知見を活用し、新規触媒材料を設計している。また、設計した材料を電子線照射による欠陥導入を応用して作製している。(図3)





## Laboratory of Integrated Function Materials

Professor (concurrent) Tamaki Shibayama  
Associate Professor Norihito Sakaguchi  
Assistant Professor Yuji Kunisada

A highly efficient energy conversion material has been studied through atomic structure analysis and property assessment in extended range between nanoscopic and macroscopic dimension, employing high-resolution analytical electron microscopy and computer simulations. Our study aims at new functional materials design to contribute efficient use of various energy resources. Correlation among atomic structure, electronic structure and property of the interfaces, surfaces and atomic-scale functional sites of materials is intensively studied. (Fig. 1)

### (1) Nanometer-order resolution measurements of optical properties by STEM-EELS

Electron energy-loss spectroscopy (EELS) combined with electromagnetic simulations is one of the powerful tools for analyzing the optical properties of very small regions of various energy conversion materials. The spherical aberration-corrected STEM with a monochromator gun enables us to reveal the dielectric properties of nanostructured materials.

### (2) Three-dimensional distribution analysis of dopants in ceramic phosphors

Spatial distribution of rare-earth dopants in ceramic phosphors dominates their emission behaviors. We performed the three-dimensional distribution analysis of Ca and Eu dopants in Ca- $\alpha$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup> using through-focus HAADF-STEM with multi-slice simulations and statistical analysis. (Fig. 2)

### (3) Development of oxygen sorption materials

STEM-EELS gives the information of atomic structure including element mapping and atomic-scale chemical bonding states. We clarify the oxygen sorption mechanism of ceramic materials. *Ab initio* calculations are also performed to obtain the detailed information of local chemical bonding states.

### (4) Computational design of hydrogen permeation barrier coatings

Suppression of hydrogen embrittlement in materials is one of the key technologies for hydrogen society. We investigated the hydrogen absorption and diffusion mechanism in the ceramic materials,

and design new hydrogen permeation barrier coatings using *ab initio* calculations.

### (5) Computational design of Long-life catalyst

Long-life fuel cell electrode catalysts are required to realize hydrogen society. We revealed the degradation mechanism of catalysts, and design Long-life catalysts based on first-principles calculations. We also fabricate the designed catalysts using the electron beam irradiation. (Fig. 3)



Fig. 1 Our research concept.

図1 本研究室の研究コンセプト。

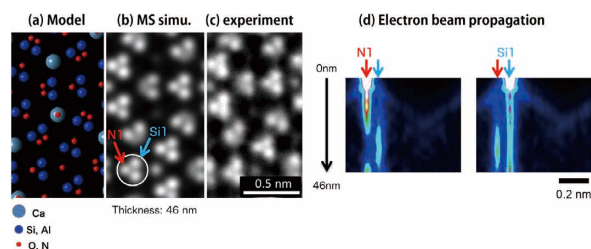


Fig. 2 (a) Atomic model, (b) multi-slice simulated image, (c) experimental HAADF image and (d) the channeling behaviors of Ca- $\alpha$ -SiAlON.

図2 Ca- $\alpha$ -SiAlONの(a)原子構造モデル、(b)マルチスライス計算像、(c)HAADF-STEM像、ならびに(d)N1及びSi1カラムに入射した場合の電子線チャネリング。

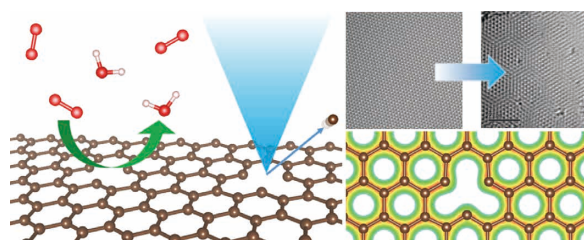


Fig. 3 Catalyst fabrication using electron beam irradiation.

図3 電子線照射を用いた触媒開発の模式図。

## 量子エネルギー変換材料分野



教授  
柴山 環樹  
Professor  
Tamaki Shibayama  
shiba@qe.eng.hokudai.ac.jp



助教  
中川 祐貴  
Assistant Professor  
Yuki Nakagawa  
y-nakagawa@eng.hokudai.ac.jp

ポスドク Postdoctoral Fellow  
杨 苏冰  
Yang Subing yangsubing@eng.hokudai.ac.jp

本分野は、先進エネルギー利用システムの確立とそれに必要な材料開発を中心に研究を進めている。次世代原子力プラントや高効率なエネルギー変換システムの開発のためには超高温、強腐食条件下などの過酷環境に耐えうる材料創製が必要とされているが、この要請に応えるために、(1)中性子や非平衡プラズマに曝される耐候性材料、長寿命化炉あるいは超臨界水型炉などの次世代原子炉の実用化に向けた照射環境用の構造材料開発研究、および(2)世界的に比類のない130万ボルトの複合量子ビーム超高压電子顕微鏡とイオン加速器を用い、電子線・粒子線の量子エネルギービーム利用によるナノ材料創成研究を行っている。また、新たにプラズマや光量子ビームを用いたナノ材料開発にも着手している。主な研究テーマと最近の成果は次の通りである。

### (1)量子ビーム利用による材料基礎研究

イオン加速器付マルチビーム超高压電子顕微鏡にレーザー光照射系を新規設備し、試料物質に対し電子、イオン、レーザー光の量子ビームを逐次的または同時に照射し、材料のナノスケール観察や非平衡環境下における新規創製が期待される。現在、顕微鏡内レーザー光照射効果の定量的見積もりを得るために、顕微鏡

外照射実験をコロジオン高分子膜上塗布炭素、炭素片および白金鉄片に対して行い、Nd:YAGレーザー光のアブレーション効果による炭素微粒子の生成や炭素、白金鉄の表面ナノピットパターン形成が確認できている。

### (2)過酷環境用先進材料の開発

原子炉内発生中性子が材料に与えるボイドスエリング、誘起偏析、脆化などの問題に対し、各種のイオンビーム照射と超高压電子顕微鏡を用いた電子線照射による材料微細組織変化についてビーム損傷の観点より調べている。Nb-Al 焼結合金に、TEM 内で電子ビーム照射を行い、微細組織変化挙動をその場観察した結果、室温照射では、NbAl<sub>3</sub> に特徴的な回折斑点が消滅し、Al の回折リングが出現し、高温(350℃)での照射では、規則化が進み NbAl<sub>3</sub> 相が母相中に形成した。285℃から 485℃の範囲での加熱実験では顕著な微細組織変化は見られないことから、電子線照射による組織変化が温度状態の違いにより異なって起こることが確認された。

### (3)高効率量子エネルギー変換材料ならびに原子エネルギーに関する材料開発

ガス冷却高速炉炉心の耐熱性物質として期待される SiC/SiC 複合材について、新たに TEM 内 in-situ クラック伝播試験用試料ホルダーの開発を行うと共に、実際に TEM 内でクラックを与え、動的なその場観察から伝播経路の解明を行っている(図1)。あらたな原子力エネルギー源の供給のため、安全で高効率な次世代型原子炉の開発に向けた炉材料研究に着手している。

### (4)水素化物系エネルギー変換材料(固体電解質、水素センサー、水素吸蔵合金)の開発

水素化物には、車載用の水素吸蔵合金以外にも、水素センサー材料やリチウム高速イオン伝導を示す固体電解質材料など、新たな機能性を持つ材料が見つまっている。我々は、量子ビームを用いた顕微解析により、そのエネルギー関連機能の発現機構解明に取り組んでいる。表面改質した水素吸蔵金属チタンの STEM-EELS 解析(図2)、水素イオン照射によるクロミック着色反応の評価や水素化物系固体電解質の分析 TEM による局所構造解析などをベースにして、新奇の機能性材料創製に取り組んでいる。



## Laboratory of Quantum Energy Conversion Materials

Professor Tamaki Shibayama  
Assistant Professor Yuki Nakagawa  
Postdoctoral Fellow Yang Subing

Achieving advanced energy-utilization system using new efficient energy conversion materials is a key issue to be solved. The main research objective of our laboratory is R&D of innovative materials for severe environments, such as heavily corrosive conditions and very high temperature, for the development of advanced atomic energy plant or highly efficient energy conversion system.

For that purpose, research subjects carrying out in our lab are (1)researches on development of weatherproof materials exposed to nonequilibrium plasma and neutron field, and of structural materials for use in irradiation environment, intended to practical application of next-generation reactors such as longer-lasting reactors and supercritical water reactors, and (2)researches on nano-material creation by utilizing quantum energy beams of electron, ion using ion accelerators and the Multi-Quantum Beam High-Voltage Electron Microscope (MQB-HVEM) with worldwide incomparable 1.3 MV. We have started development of nano-materials newly using plasma and photon (laser) beam.

Our main themes and recent results are as follows.

### (1) Basic research of material by utilizing quantum beam

We are trying to install a laser-light irradiation system on MB-HVEM with existing ion accelerators. From the viewpoint of nano-scale observation or creation of new materials under nonequilibrium environment, it is thought useful to apply quantum beams of electron, ion and laser light onto material, successively or simultaneously. Outside an electron microscope, a series of irradiation experiments are now performing onto carbon powder sprayed on collodion polymer film, carbon slab and iron-platinum alloys slab, for obtaining quantitative estimation of laser-light irradiation effect in an electron microscope. Results show the creation of ultrafine carbon particles and nano-pit pattern on both surfaces of carbon and iron-platinum.

### (2) Development of advanced material for severe environment

Nb-Al sintered alloy is irradiated by electron beam in HVEM and in-situ observation of behavior of fine-structure changes was performed. Result showed that in the case of irradiation at room temperature characteristic diffraction spots of NbAl<sub>3</sub> disappeared and diffraction ring of Al newly appeared, and in the case of irradiation at high

temperature space(350°C). NbAl<sub>3</sub> phase was formed in parent phase after regularization made progress. Since no apparent fine-structure change is observed in heating experiment from 285°C to 485°C, it is supposed that the structure change by electron beam irradiation occurs in different manner corresponding to the temperature state.

### (3) Material development for high efficiency quantum energy conversion and nuclear energy utilization

Since SiC/SiC composite material is expected as heat-resistant material in the core of gas-cooled fast breeder reactor, we have developed a new sample holder for dynamically in-situ testing of crack propagation in TEM and examined the route of crack propagation by actually generating crack in sample (Fig.1).

Moreover, we are undertaking researches of reactor materials for the development of next-generation nuclear reactors ensuring both safety and high-efficiency, and for the supply of new nuclear energy source

### (4) Development of energy conversion materials based on hydrides (solid electrolyte, hydrogen sensor and hydrogen storage alloy)

Metal hydrides attract considerable attention as hydrogen storage materials, fast ionic conductors and hydrogen sensors. Our group works on elucidating the mechanism of their functionalities by using quantum beam (electron, ion, laser etc.) technologies. For instance, we have performed STEM-EELS analysis of surface-modified titanium for hydrogen storage applications (Fig.2), the analysis of chromic reaction by hydrogen ion irradiation, and the local structure analysis of hydride-based electrolyte by analytical TEM.

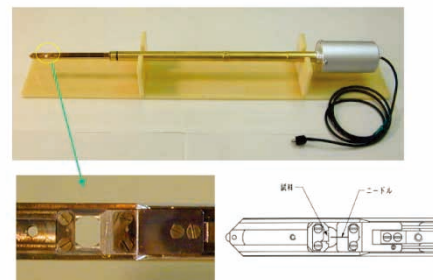


Fig.1 Electron microscope holder for nano-mechanical analysis.

図1 ナノメカニクス解析用電顕ホルダー装置。

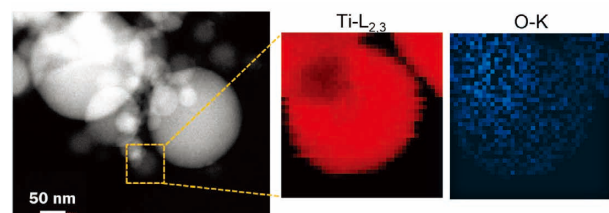


Fig.2 STEM-EELS mapping of Ti nanoparticles.

図2 Ti ナノ粒子のSTEM-EELS マッピング。

## 光・熱エネルギー変換材料分野



教授  
渡辺 精一  
Professor  
Seiichi Watanabe  
sw004@eng.hokudai.ac.jp



准教授  
沖中 憲之  
Associate Professor  
Noriyuki Okinaka  
oki@eng.hokudai.ac.jp



准教授  
張 麗華  
Assistant Professor  
Lihua Zhang  
zhanglihua@eng.hokudai.ac.jp

本分野では、物質の多様な物性を材料科学の立場から最大限に活用して、高効率で環境低負荷な光エネルギー変換、熱電エネルギー変換のための高度な機能を持つ新しい材料の開発創製研究を進めている。

将来のクリーンエネルギーとして期待される水素を、太陽光を用いて水から直接製造する「太陽光水素製造(水の光分解)」の研究を中心に、光エネルギーを用いて有害物質を分解無害化する「光環境浄化」などのグリーンテクノロジー研究を進め、これらに供する新機能材料システムの開発研究を進めている。

水素は燃料電池の燃料となるだけでなく、二酸化炭素や窒素と反応させることにより各種の有用資源へと変換可能のため、次世代グリーン化学応用も期待されており。その他、人工光合成による水分解反応は、尽蔵の太陽光と比較的安価な光触媒材料を用いて、水から水素を直接製造できる可能性がある。しかし、従来の光触媒材料ではその吸収波長が主として紫外光領

域に限られるものが多く、太陽エネルギーの変換効率向上のためには、可視光から赤外光領域の光を利用できるように、光触媒の吸収波長を長波長化することが課題の一つとなる。このため、可視光域の光を多く吸収する光触媒材料を探索すると同時に、光触媒による水分解において水素の発生と酸素の発生を担う光触媒材料を使い分けることで、材料選択の多様性が期待されている。

### (1) 光誘起ナノ材料創製(水中結晶光合成)

水と光により、水の光誘起分解を伴いながら金属酸化物のナノ結晶が成長することを見出し、水中結晶光合成 (SPSC: Submerged Photo-Synthesis of Crystallites)と命名した。現在、この新奇現象を利用して様々な、金属酸化物のナノ粒子、ナノ表面構造を創るグリーンマテリアル研究開発を進めている。

### (2) 太陽光利用材料創製(グリーンナノテクノロジー)

ナノメートルオーダーの微小空間における「光」及び「物質」間の相互作用(原理)を解明し、それらに基づいて新奇の機能性材料を創製する開発研究に取り組んでいる。

### (3) 液相燃焼合成製 SrTiO<sub>3</sub> による可視光応答光触媒の開発

可視光照射下での水素生成に活性な光触媒材料として期待されているチタン酸ストロンチウム(SrTiO<sub>3</sub>)に着目し、それらの開発研究を行っている。開発には短時間・省エネルギー製造が可能で大量生産に適しており、高比表面積の製品が得られる液相燃焼合成法を用いている。

### (4) 燃焼合成技術を用いた熱電変換材料の開発

燃焼合成(固相燃焼および液相燃焼合成)により高精度に量論比を制御した不定比酸化物(酸素欠損および酸素過剰)はドーピング不要の半導体となり、高い実用性が期待できる。これら不定比酸化物を中心とした熱電変換材料の研究は、高いエネルギー変換効率をもつ材料の開発とそれらの背後にある学理の理解を指向している。



## Laboratory of Photon & Thermal Energy Conversion Materials

Professor Seiichi Watanabe  
Associate Professor Noriyuki Okinaka  
Assistant Professor Lihua Zhang

We are developing new materials for photo energy conversion and thermoelectric energy conversion with high conversion efficiency and low environmental impact by take full advantage of the wide variety of physical properties of the materials from the viewpoint of materials science.

Hydrogen is expected to be used as green energy in the future. Our lab is focused on “solar hydrogen production (photocatalytic water splitting)”, which means the direct production of hydrogen from water by sunlight. We are promoting the research of green technology ‘photocatalysis environmental cleanup’ and developing the new functional materials systems.

Hydrogen is not only expected as the fuel of the fuel cell, but also expected in the application of next generation green chemistry because of the possible conversion into various useful resources by reaction with carbon dioxide or nitrogen. It is possible to produce hydrogen from water by exhaustless sunlight and inexpensive photocatalyst, in which the water splitting reaction is caused by the artificial photosynthesis. However, the absorption wavelength of the traditional photocatalyst is limited to ultraviolet light range. In order to improve conversion efficiency of solar energy from the visible light region to the infrared light region, it’s necessary to develop new photocatalyst which could absorb longer wavelength. Therefore, our lab are working on the researches to find new photocatalytic materials which could absorb more light in the visible light region, at the same time the photocatalyst could be used properly for the generation of oxygen and hydrogen from water by splitting reaction.

### (1) Submerged photosynthesis of crystallites (SPSC)

We have a new production pathway for a variety of metal oxide nanocrystallites via submerged illumination in water: submerged photosynthesis of crystallites (SPSC). Similar to the growth of green plants by photosynthesis, nanocrystallites shaped as

nanoflowers and nanorods are hereby shown to grow at the protruded surfaces via illumination in pure, neutral water. The process is photocatalytic, accompanied with hydroxyl radical generation via water splitting; hydrogen gas is generated in some cases, which indicates potential for application in green technologies. The nanobumped surface, as well as aqueous ambience and illumination are essential for the SPSC method. Therefore, SPSC is a surfactant-free, low-temperature technique for metal oxide nanocrystallites fabrication.

### (2) Solar-driven material fabrication

We are elucidating the light matter coupling process in nano-space and are working on the development study which creates new functional materials using SPSC for application in green technologies.

### (3) Development of a visible light responsive photocatalyst using solution combustion synthesized SrTiO<sub>3</sub>

The strontium titanate (SrTiO<sub>3</sub>) photocatalyst is attracting considerable attention as a material for hydrogen production. We research SrTiO<sub>3</sub> for a visible light reactive photocatalyst using solution combustion synthesis.

### (4) Development of thermoelectric materials based on combustion synthesis

Thermoelectrics are able to generate electrical power from any type of temperature difference. Our researches have been directed toward development of materials which have high conversion efficiency and understanding of the physics lying behind them.

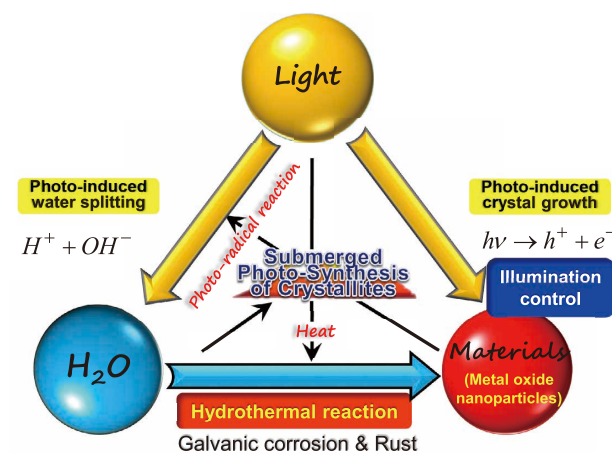


Fig.1 Characteristics of SPSC.

図1 SPSCの特徴.

## エネルギーメディア変換材料分野

教授(兼) 渡辺 精一



准教授  
能村 貴宏  
Associate Professor  
Takahiro Nomura  
nms-tropy@eng.hokudai.ac.jp



特任助教  
メルバート ジェーム  
Specially Appointed  
Assistant Professor  
Melbert Jeem  
m\_jeem@eng.hokudai.ac.jp

ポスドク Postdoctoral Fellow

アデ クルニアワン

Ade Kurniawan ade\_kurniawan@eng.hokudai.ac.jp

本研究分野が目指す究極の目的は、ホメオスタシスエネルギー社会の創成である。この実現に向けて、エネルギーを高密度に貯蔵、輸送、高効率に変換可能なマテリアル、プロセスを探索している。具体的には、(1) 太陽熱やプロセス排熱を高密度に貯蔵、輸送可能な次世代蓄熱材料、(2) エクセルギー再生原理を応用した省エネルギー空気分離・酸素製造プロセス、(3) 低品位炭材、アンモニア等を燃料とした新製鉄法、(4) 燃焼合成法によるファインセラミックスの省エネルギー・短時間合成、(5) エコ・コンビナートの設計、を基軸に研究を展開している。

### (1) 次世代蓄熱材料の探求

PCM (相変化物質: Phase Change Material) を用いた潜熱蓄熱技術は、PCM の固液相変化潜熱を利用するため高密度に蓄熱可能、かつ相変化温度一定で熱を回収・輸送・供給可能である。当グループでは、室温から 500°C 超の高温領域まで、それぞれの温度に適した新規 PCM の開発、及びプロセス設計を実施している。具体的には、①次世代パワーデバイスの熱管理技術のための高熱伝導性PCM複合材開発、②中低温未利用熱(排熱・太陽熱)利用のための糖アルコール系PCM開発、③エクセルギー再生技術、太陽熱発電のための合金PCM開発を実施している。特に最近、300°C 超の高温領域で利用可能なマイクロカプセルPCMを開発した。この技術は、長年固体顕熱蓄熱技術の独壇場であった高温プロセスにお

ける蓄熱、熱輸送技術基盤を革新する可能性がある。(図1参照)。

### (2) エクセルギー再生原理を応用した省エネルギー酸素製造プロセス

わずかな圧カスウィングのみで空気から酸素を分離可能な酸化物系酸素吸蔵材料を開発している。この材料の利用により、従来空気分離技術の半分以下のエネルギーで酸素を製造できる可能性が見出されている。

### (3) 低品位炭材、アンモニアを燃料とした新製鉄法

エクセルギー多消費産業である鉄鋼業は、資源・環境・エネルギーの三問題を抱えている。当グループはこの三重苦の解決を目標に、材料科学、プロセス工学の観点からアプローチしている。具体的には、①化学気相浸透法(CVI: Chemical Vapor Infiltration)を応用した低品位原燃料の高品位化技術、②NH<sub>3</sub>を還元材として使用する画期的NH<sub>3</sub>製鉄法、③製鉄所における高温排熱の有効利用技術をキーテクノロジーとして、基礎実験からプロセス設計、システム創造まで幅広い視点で研究を進めている。

### (4) 燃焼合成法によるファインセラミックスの省エネルギー・短時間合成

粉体原料間発熱反応の自己伝播を利用する燃焼合成は、省エネルギー・短時間・省プロセスでの材料合成が可能である。当研究室は燃焼合成法を長年探求し、窒化物、酸窒化物、ペロブスカイト、水素吸蔵合金などあらゆる材料の合成に成功している。その中でも近年特に、窒化物(AIN、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、BNなど)および酸窒化物(SiAlON)が注目されている。例えば、AIN、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>及びBNは高熱伝導率かつ、電気絶縁性のため、電子部品の放熱材として魅力的である。当グループは、燃焼合成技術を基盤として窒化物や酸窒化物への微量元素のドーピングや、それらの形状制御(ナノ粒子、ナノファイバー等、図2参照)による新規機能性材料の開発及びその機能性発現機構の解明を実施している。

### (5) エコ・コンビナート設計

ここでは真のエネルギー評価の尺度、エクセルギーを用いて損失の総和が最小となるシステムの設計を目指している。さらに恒常的にシステムを維持するために先進的なネットワーク理論による解析を進め、異業種が共生するエコ・コンビナートの設計に役立てている。



## Laboratory of Energy Media

Professor (concurrent) Seichi Watanabe

Associate Professor Takahiro Nomura

Specially Appointed Assistant Professor

Melbert Jeem

Postdoctoral Fellow Ade Kurniawan

The ultimate goal of our field of research is the creation of a society of energy homeostasis. To achieve this goal, we are pursuing materials and processes capable of high-density energy storage, energy transportation, and high-efficiency energy conversion. Specifically, we are pursuing research focused on (1) next-generation heat storage materials capable of high-density storage and transportation of solar heat and process waste heat; (2) energy-saving air separating & oxygen manufacturing processes that apply exergy recovery principles; (3) new iron manufacturing processes that use low-grade lime and ammonia as fuel; (4) fast, energy-saving synthesis of fine ceramics through combustion synthesis; and (5) eco-friendly industrial complex design.

### (1) Next-generation heat storage materials

Latent heat storage technology using phase change materials (PCMs) offers the potential for high-density heat storage due to the latent heat from the PCM's transition between a solid and a liquid phase. This technology is also capable of recovering, transporting, and supplying heat through phase changes occurring at a fixed temperature. Our group is developing new PCMs suitable for a variety of temperatures from room temperature to 500 °C and above; we are also executing process design. Specifically, we are developing 1) high-conductivity PCM composites to provide heat-control technology for next-generation power devices; 2) sugar alcohol-based PCMs to utilize unused heat in low-to-mid temperature ranges (waste heat and solar heat); and 3) alloy PCMs for exergy recovery technologies and solar thermal power generation.

In particular, we have recently developed a microencapsulated PCM (MEPCM) usable in areas where temperatures exceed 300 °C. This technology has the potential to revolutionize the basis of heat storage and transportation technologies in high-temperature processes for which solid sensible heat storage technology has long remained unchallenged (see Fig. 1).

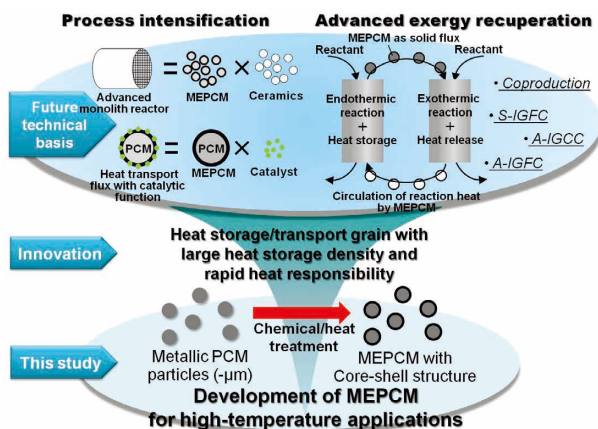


Fig. 1 Expected MEPCM applications.  
Ref. T. Nomura et al: Sci. Rep., 5(2015), 9117.

### (2) Energy-saving oxygen manufacturing processes that apply exergy recovery principles

We are developing an oxide-based oxygen-storing material capable of separating oxygen from air using only a slight pressure swing. The use of this material has been determined to have the potential to produce oxygen using less than half the energy of traditional technologies.

### (3) New iron manufacturing processes that use low-grade lime and ammonia as fuel

The exergy-intensive steel industry faces three challenges: resources, the environment, and energy. Our group is approaching this triple threat from the perspectives of materials science and process engineering to find solutions. Specifically, we are conducting research from a wide variety of perspectives, from basic experimentation to process design and system creation, with 1) technology that uses chemical vapor infiltration (CVI) to improve the quality of low-grade raw fuels, 2) a ground-breaking NH<sub>3</sub> ironmaking technology that uses NH<sub>3</sub> as a reduction material, and 3) technology that makes effective use of the steelworks' high-temperature waste heat, implemented as key technologies.

### (4) Fast, energy-saving synthesis of fine ceramics through combustion synthesis (CS)

CS that uses the self-propagation of an exothermic reaction between powdered materials has the potential to synthesize materials via a quick, energy-saving process. Fig. 2 shows a photo of a CS process. Our research laboratory has spent many years investigating CS methods and has succeeded in synthesizing a variety of materials, such as nitrides, oxynitrides, perovskite, and hydrogen storage alloys. In recent years, we have had a particular focus on nitrides (such as AlN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, and BN) and oxynitrides (SiAlON). For example, AlN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, and BN are appealing as heat dissipation materials for electronic components due to their high heat conductivity and capacity for electric insulation. As the basis of our CS technology, our group is conducting research into new functional materials created through doping nitrides and oxynitrides with trace elements and controlling the shape of the materials (such as nanoparticles and nanofibers). We are also identifying the mechanisms through which these materials' functionalities express themselves.

### (5) Eco-friendly industrial complex design

Here, our goal is system design that minimizes the total of losses using exergy and a true energy evaluation scale. We are also conducting analyses using cutting-edge network theory to keep systems in homeostasis and make use of eco-friendly industrial complex design where different types of businesses coexist.

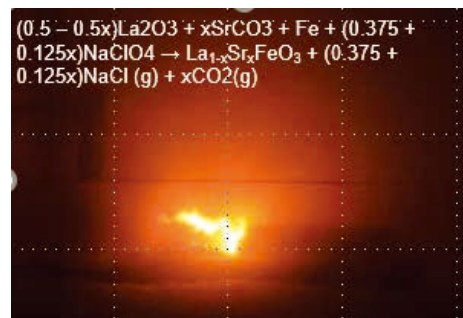
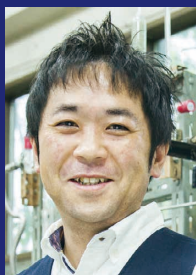


Fig. 2 A photo of a CS process.

## エネルギー変換システム設計分野

教授(兼) 幅崎 浩樹



准教授  
坪内 直人  
Associate Professor  
Naoto Tsubouchi  
tsubon@eng.hokudai.ac.jp



特任助教  
望月 友貴  
Specially Appointed  
Assistant Professor  
Yuuki Mochizuki  
mochi@eng.hokudai.ac.jp

ポスドク Postdoctoral Fellow

篠原 祐治 Yuji Shinohara

yshinohara@eng.hokudai.ac.jp

研究支援推進員 Research Support Staff

林 隆太郎 Ryutaro Hayashi

ryutaro.hayashi@eng.hokudai.ac.jp

当研究室では、化学の力により『資源・エネルギー・環境』に係る問題の解決を目指し、主に劣質・未利用化学資源の高度利用法の開発を推し進めている。

具体的には、現在未利用の炭素資源(バイオマスや低品位石炭など)をクリーンエネルギーや高価値化学原料などに効率よく変換できるプロセス、劣質な鉄鉱石資源(リモナイト鉱や脈石成分リッチ鉱石など)をアップグレードし製鉄原燃化するシステムおよび一旦排出されたCO<sub>2</sub>を再度利用する技術(CCUやカーボンリサイクルなど)の開発に取り組んでいる。さらに、食品ロス等の視点から、海洋生物資源(魚介類など)の鮮度管理システムに関する化学工学的研究も進めている。

### (1) クリーン・コール・テクノロジー

経済産業省は、CO<sub>2</sub>排出量の多い老朽化した石炭火力を2030年度までに休廃止する一方、環境性能の優れた石炭火力の新設は認める方針を示した(2020)。石炭ガス化と燃料電池から成るガス化燃料電池複合発電(IGFC)法は、高い発電効率を実現できることから、現行技術と比較し、CO<sub>2</sub>排出量を30%以上削減可能な次世代型発電法として有望である。このような観点から、我々はIGFC用高活性触媒の開発、生成する燃料ガス(主成分はH<sub>2</sub>とCO)中に含まれるヘテロ化合物(HCl、

H<sub>2</sub>S、NH<sub>3</sub>など)の挙動解析と高温除去技術の確立を進めている(特開2005-162988、特開2015-024400)。また、計算化学に基づき、劣質・未利用炭素資源から高強度コークスを製造する手法の開発も行っている。

### (2) 環境調和型製鉄プロセス

よく知られているように、鉄は現代文明社会を支える基幹素材の1つである。現在、その主要な原料である鉄鉱石は100%輸入に依存しており、今後、不純物の増加により鉄量が低下(劣質化)すると予想されている。これは、製鉄プロセスにおける①エネルギー使用量の増加、②CO<sub>2</sub>排出量の増大および③生産性の低下を引き起こす。そこで当研究室では、アルカリ水熱処理を用いる低品位鉄鉱石アップグレードプロセスの開発(NEDOプロジェクト)や化学気相浸透法を用いる炭素内装鉄鉱石の製造(NEDOプロジェクト、特開2017-193742)に取り組むとともに、NH<sub>3</sub>還元製鉄技術・製鉄由来Hg化合物の排出制御技術・製鋼スラグからのPの選択的回収技術の開発を推し進めている。

### (3) カーボンリサイクル

本研究では、『資源・エネルギー・環境』の3大問題を同時解決することを最大の目的に、バイオマスなどの劣質・未利用炭素資源を原料として用い、エネルギー効率が大きく、さらに、CO<sub>2</sub>も資源と捉え、これを分離・回収して工業ならびに触媒の原料として再利用できる炭素循環型発電システムの開発を目指している。このシステムでは、バイオマスや低品位石炭に水溶性金属イオンを加え、セルフリプレイス効果により高いガス化反応性を有する新燃料に転換し、これを熔融炭酸塩型燃料電池のセル内でガス化して、H<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>は電池内で循環させる一方、余剰CO<sub>2</sub>は電極側で濃縮し、それを水酸化物に吸収させ固定化して、その固定化物を再び添加触媒や工業原料として用いる点に最大の特徴を有する。我々は、また、火力発電所や製鉄所といった大規模な施設から排出されるCO<sub>2</sub>に特化したCO<sub>2</sub>転換触媒の設計・開発も推し進めている。

### (4) 水圏水産サイエンス

魚介類の生産地や消費地における卸売市場では、鮮度が取引価値を決定する重要な基準となっており、その評価指標としてK値が提唱されている(本学提唱)。しかし、この値は致死後の魚介類の任意部位を採取し、種々の前処理後に成分分析を行い求めるため、流通現場でのリアルタイム評価は不可能である。このような観点から、当研究室では魚介類の大きさ、死後の経過時間や保存温度などの情報から、K値を予測する評価システムを開発した(国内出願・PCT出願・台湾出願)。現在、産業技術総合研究所北海道センターと共同で、鮮度と食べ頃の『見える化装置(MIRASAL)』の開発を進め、その社会実装を目指している。





## Laboratory of Chemical Energy Conversion Systems

Professor (concurrent) Hiroki Habazaki

Associate Professor Naoto Tsubouchi

Specially Appointed Assistant Professor Yuuki Mochizuki

Postdoctoral Fellow Yuji Shinohara

Research Support Staff Ryutaro Hayashi

The present research group aims to solve problems related to “Resources, Energy and the Environment” using the power of chemistry, and we are primarily promoting the development of advanced utilization methods of low-quality and unused chemical resources. Specifically, we are working on developing processes that can efficiently convert currently unused carbon resources (e.g., biomass and low-rank coal) to clean energy and high-value raw material chemicals, systems that can upgrade low-quality iron ore resources (e.g., limonite and gangue-rich ores) into raw materials for ironmaking processes, and technology for reusing CO<sub>2</sub> emissions (carbon recycling). In view of the issue of food loss, we are also conducting chemical engineering research on a freshness management system for marine biological resources, including fish and shellfish. The results are expected to contribute significantly to the achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs) such as Goal 7, Goal 9, Goal 13 and Goal 14.

### (1) Clean Coal Technology

The Ministry of Economy, Trade and Industry announced the policy of gradually discontinuing and abolishing old coal-fired power plants that emit large amounts of CO<sub>2</sub> by FY2030, while permitting the establishment of new coal-fired power plants that exhibit excellent environmental performances (July 3, 2020). Integrated gasification fuel cell (IGFC) technology, which combines coal gasification and fuel cells, is a promising next-generation power generation methodology that can reduce CO<sub>2</sub> emissions by more than 30%, compared with current pulverized coal-fired plants, because it can achieve high power generation efficiency. Based on this perspective, our laboratory has been working on developing a highly active catalyst for use in IGFCs. We are also analyzing the behavior of heterocompounds, including HCl, H<sub>2</sub>S and NH<sub>3</sub>, present in trace amounts in the generated fuel gases (main components: H<sub>2</sub> and CO) and establishing a high-temperature removal system for such compounds (WO2005-162988, WO2015-024400). Moreover, we are developing methods for producing high-strength coke from low-quality and unused carbon resources, based on organic resource chemistry and computational chemistry.

### (2) Environmentally Friendly Ironmaking Process

As is well known, iron is one of the key materials supporting the modern-day society. Currently, Japan is 100% reliant on imports, mainly (90%) from Australia and Brazil, to

obtain iron ores (the main raw material of iron). Furthermore, with the rise in impurity levels, the iron content in ores is expected to decrease (deteriorate) in the future. This would lead to increased energy consumption during the ironmaking process, increased CO<sub>2</sub> emissions and reduced productivity. Thus, the present research group is working on the development of a low-grade iron ore upgrading process using alkali treatment (NEDO Project) and the manufacturing of carbon-containing ores using chemical vapor filtration (NEDO Project, WO2017-193742). We are also promoting the development of a method for controlling mercury compound emissions related to ironmaking processes and a method for the selective recovery of phosphorus from steelmaking slag.

### (3) Carbon Recycle

In this research, our biggest objective is to simultaneously solve three problems: resource, energy and the environment. With this in mind we are aiming to develop a carbon recycling power generation system that uses low-quality and unused carbon resources, such as biomass, as raw materials; has high energy efficiency; and considers CO<sub>2</sub> as a resource; and separates and collects it for reuse as a raw material for industrial processes and catalysts. In this system, water-soluble metal cations are added to biomass and low-rank coal and converted to fuels with high gasification reactivity by the self-replacement effect. This fuel is then gasified in the cells of the molten carbonate fuel cell. Thus, the H<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> gases are circulated in the cell, with excess CO<sub>2</sub> being concentrated on the electrode side, absorbed by hydroxide compounds and subsequently immobilized. The biggest feature of the system is the reuse of this immobilized CO<sub>2</sub> as an added catalyst or raw material in industrial processes. We are also promoting the design and development of CO<sub>2</sub> conversion catalysts to convert CO<sub>2</sub> originating from large-scale facilities such as pulverized coal-fired and ironmaking plants.

### (4) Aquatic Production Sciences

In the production and consumption areas of fresh seafood wholesale markets, the freshness of the product is one of the most important criteria for determining the value of the product, and the K value has been proposed as an indicator to evaluate freshness. However, this value is calculated by sampling an arbitrary part of the fish/shellfish after death and performing component analysis after various forms of pre-treatment. Thus, it is not suitable for real-time evaluation in the site of distribution. With this in mind, our laboratory has been developing an evaluation system that predicts the K value based on information such as the size of the product, length of time elapsed after death and storage temperature (WO2020-037546 etc.). Moreover, we are currently developing a system for evaluating freshness of marine products using devices (MIRASAL) that visualize the best timing of consumption, jointly with the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) and Tokyo Denki University.



## 複合量子ビーム超高压顕微解析研究室

教授(兼) 柴山 環樹

教授(兼) 渡辺 精一

准教授(兼) 坂口 紀史

助教(兼) 中川 祐貴

技術専門職員 Technical Specialist 3名

大久保 賢二 Kenji Ohkubo

ohkubo@eng.hokudai.ac.jp

谷岡 隆志 Takashi Tanioka

tanioka@eng.hokudai.ac.jp

大多 亮 Ryo Ota

oota@eng.hokudai.ac.jp

技術職員 Technical Staff 1名

横平 綾子 Ryoko Yokohira

kurishiba@eng.hokudai.ac.jp

研究支援推進員 Research Support Staff

小西 哲也 Tetsuya Konishi

tetsuya.konishi@eng.hokudai.ac.jp

北海道大学における透過型電子顕微鏡(以下電顕と略記)による研究は昭和 17 年に始まる。1948 年に工学部に加速電圧 5 万ボルト、分解能 3nm の日立製作所製の HU4 型が設置されて以来、電顕が学内に共同利用実験施設として、全学的組織で運用することを目的に、工学部に電子顕微鏡管理委員会が結成された。以来、電子顕微鏡の性能向上と高電圧化に伴い、100kV、200kV の電顕が更新設置された。現在まで数十台の汎用電顕が各学部、研究所等に設置され、材料科学、医学・生物の分野で多大の成果を挙げってきた。

1965 年代から急速に超高压電顕に対する関心が世界的に高まるなかで、本学工学部に、1971 年 3 月、650kV の超高压電顕の設置が認められ、超高压電顕による医学・生物および物質・材料に関する物性研究が本格的に開始された。特に本学の超高压電子顕微鏡はエネルギー材料である原子炉材料中性子照射に代わり電子線によるシミュレーション照射研究を全国に先駆けて開始した。

その後、電顕の性能向上と照射損傷に関する研究を中心に行う目的から、1981 年 3 月に新たに、1300kV の超高压電子顕微鏡が完成した。この電子顕微鏡は 300kV のイオン加速器を連結した日本で唯一のデュアルビーム型超高压電子顕微鏡システムとして、国内外

の原子力材料の照射効果研究に使用されてきた。さらに、従来のエネルギー材料研究に加え、社会的ニーズから物質の原子・分子レベルでの解析と未知機能の材料創製プロセスとして電顕を活用した基礎・萌芽研究の必要性が期待されてきた。そこで、「COE 形成のための研究環境高度化支援プログラム」の一環として、1995 年度から 3 年間の歳月を経て、1998 年 3 月に、2 台の高エネルギーイオン加速器と 1300kV の超高分解能超高压電顕(日本電子(株)製 JEM-ARM-1300)を連結したマルチビーム型超高压電子顕微鏡システムが、新世代先端材料研究実験棟に設置されている。

### 主な特徴

- ・ **二基のイオン加速器と三基のレーザーを連結：**
  - 300kV, 400kV 加速器によるイオン注入
  - ナノ秒パルスレーザー, フェムト秒パルスレーザー, 連続発振紫外線レーザーの照射
  - 複合量子ビーム(電子, イオン, レーザー)の照射が可能
- ・ **優れた分解能：**
  - 点分解能 0.117nm
  - 投影ポテンシャル像の観察が容易
  - CCDカメラによる「その場」観察が可能
- ・ **フレキシブルな観察が可能：**
  - 厚い試料(例えば生体片)も観察可能
  - 低温, 加熱, ガス環境等の各種ホルダー

### 複合量子ビーム超高压電子顕微鏡の特徴

2007 年には短パルスレーザーを敷設したレーザー超高压電子顕微鏡(L-HVEM)を開発、さらに 2009 年には、イオン加速器(試料照射真空チャンバー)に短パルスレーザー装置を備えたイオン・レーザー照射単独装置の開発を実施してきました。未踏であるレーザー・電子線・イオンの 3 種類の量子ビームを複合して物質との相互作用をその場観察出来る実験システムの実現に向け準備を進め、平成 26 年度にはレーザー照射系を増設し、ナノ秒パルスレーザー(266nm~1064nm)に加えてフェムト秒パルスレーザーや連続発振の紫外線レーザーも利用出来るようになり、世界で初めての複合量子ビーム超高压電子顕微鏡が完成しました。これによりフォトン(レーザー光)、レプトン(電子)、ハドロン(イオン)というすべての素粒子系の代表が揃います。最近、イオン液体を利用した液体中での物質と量子ビームの相互作用に関する研究を開始し、バイオマテリアルや創薬などのライフサイエンス分野への展開も期待されています。更に、複合量子ビーム照射中のフォトルミネッセンス等を測定して物性の変化などを捉えることができるその場計測システムの技術開発を進めており、今後グリーンナノ、エネルギー分野への国際的な研究展開が期待されます。



**Multi-Quantum Beam High Voltage Electron Microscope Laboratory**  
 Professor (concurrent) Tamaki Shibayama  
 Professor (concurrent) Seiichi Watanabe  
 Assoc. Prof. (concurrent) Norihito Sakaguchi  
 Asst. Prof. (concurrent) Yuki Nakagawa  
 Technical Specialist Kenji Ohkubo  
 Technical Specialist Ryo Ohta  
 Technical Specialist Takashi Tanioka  
 Technical Staff Ryoko Yokohira  
 Research Support Staff Tetsuya Konishi

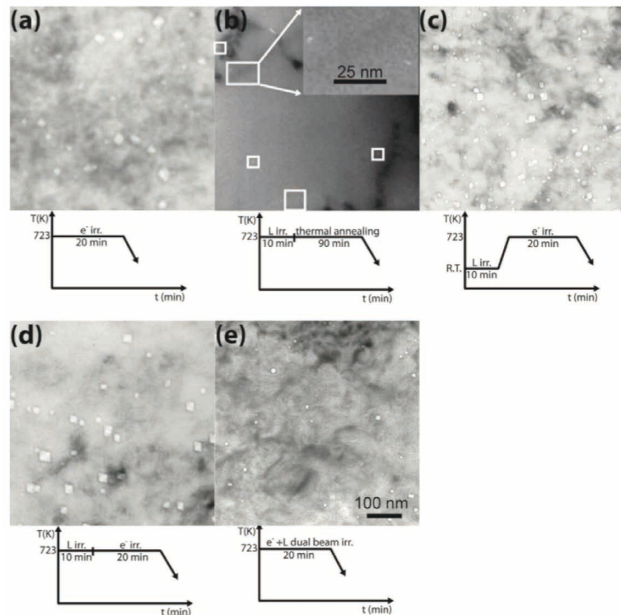
Multi-Quantum Beam HVEM at Hokkaido University is eligible for Radiation Effect Study & In-Situ Experiment with multi-beams by two ion accelerators and a 1.3-MV HVEM.

**Our MQB-HVEM is capable of following studies on nonequilibrium process:**

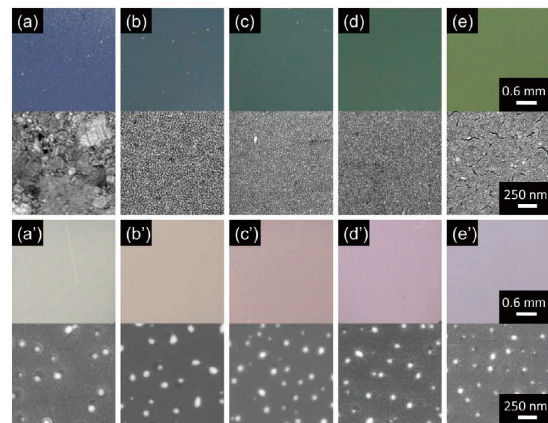
- a) Dynamic observation of irradiation process and microstructural development.
- b) Atomistic direct observation on lattice defect include cascade damage
- c) Simulation of neutron irradiation damage in nuclear reactors
- d) Simultaneous implantation of transmuted elements such as H, He and Ti, Cr and so on
- e) Synthesis and modification for developing nonequilibrium materials
- f) Aerospace materials development withstanding space debris and radiation
- g) Materials science at far-from equilibrium for functional device



(1) Void formation under (a) electron, (b) laser, (c,d) laser irradiation followed by electron irr. (e) simultaneous laser and electron dual-beam irradiation.

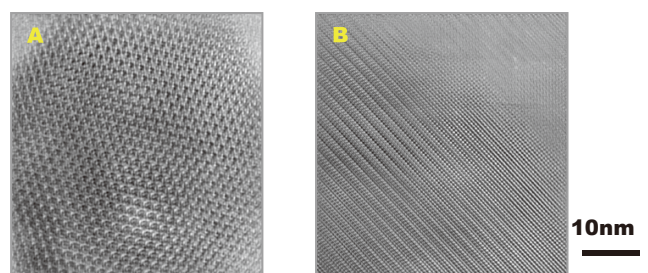
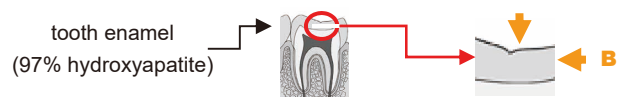


(2) SEM images of Ag–Au bimetallic nanospheroids in SiO<sub>2</sub> glass substrate with tunable surface plasmon resonance frequency by ion irradiation



J. App. Phys. 114, (2013) 054308

(3) Bio-Science: HREM observation on tooth enamel of human



## 中性子材料解析研究室



教授  
大沼 正人  
Professor  
Masato Ohnuma

ohnuma\_masato@eng.hokudai.ac.jp



教授  
加美山 隆  
Professor  
Takashi Kamiyama

takashik@eng.hokudai.ac.jp



准教授  
佐藤 博隆  
Associate Professor  
Hirotaka Sato

h.sato@eng.hokudai.ac.jp

### 技術職員 Technical Staff

長倉 宏樹

Hiroki Nagakura nagakura.h@eng.hokudai.ac.jp

中性子は物質の原子レベルでの構造や運動状態の研究に欠くことができない粒子であり、その独特の性質を利用した物質研究(新材料開発や生体物質機能解明など)や産業利用(航空機・ロケット部材の製品検査や原子力製品の残留応力解析など)が進められている。本学では電子線形加速器を一次ビーム発生源に用いる小型パルス中性子源が稼働しており、それを利用した材料研究が可能なことが大きな利点となっている。本研究室では中性子による材料研究を目標に、中性子生成源やビームライン等の基盤技術の開発、中性子小角散乱やイメージングといった利用手法の開発、中性子やX線の単独/複合利用の材料解析への応用を研究している。

最近の主な研究テーマと最近の研究成果は以下の通りである。

#### (1) 鉄鋼およびその他の合金におけるナノ構造の定量的・非破壊的特性評価のための中性子中角散乱装置の開発

高強度鋼の最近の発展は、一般にナノスケール領域まで正確な微細構造の制御を必要とする。析出硬化を含む分散強化は、分散した粒子の数密度およびサイズに敏感である。したがって、これらのパラメータの特性評価方法は、製品の品質を制御し、さらに高性能鋼の開発を制御するために重要である。小角散乱(SAS)法からは、析出相の平均サイズおよび数密度について統計的に代表的な値を容易に得ることができる。合金コントラスト変動(ACV)法として知られている SANS

法と SAXS 法の組み合わせでは、X線と中性子間の各元素の散乱長差を利用して、析出物の相や母相中の異物の組成に関する情報が得られる。金属母相に埋め込まれたナノ構造を特徴付けるために、新設計の中性子中角散乱装置(iANS, 図1)を開発した。その特徴は試料~検出器間の距離を短くし中性子飛行時間法と組み合わせたことであり、ナノスケール構造に注目するとき、運動量Qの分解能を緩めることで従来のSANS装置よりも適当な運動量範囲に焦点を合わせることができるようになる。この結果、小型加速器駆動中性子源を使用しても、絶対単位での定量分析に十分な高品質プロファイルが得られるようになった。

#### (2) パルス中性子ブラッグディップ透過イメージングによる多結晶鋼板のバルク結晶粒の逆極点図マッピング

結晶粒とそれらの配向のマッピングは、材料特性とその微細構造の相関を調べる有力な方法であるため、SEM-EBSDやXRDイメージング等の手法が開発されている。これらに対し、中性子はより高い浸入深さを持っており、材料内奥までの組織情報を得易いのが特徴である。このため、パルス中性子源を用いる中性子ブラッグディップ透過法で得たスペクトルの解析により多結晶体の結晶粒個々の配向を示すことが可能な新しいマッピング手法を開発した(図2)。これは、中性子の入射ビームに沿った方向に関する結晶粒数およびそれらの結晶方位が決定でき、これらの結晶学的特性をマッピング可能な新しい組織情報評価ツールとして期待される。

#### (3) 中性子とX線の相乗イメージングによる元素分布マッピング法の開発

中性子ラジオグラフィにおいて高分解能中性子イメージを得るために、中性子とX線画像の位置合わせとマッピングに基づく相乗イメージング法を開発した。これは、中性子線とX線の断面積の違いを利用して、より高い空間分解能で核種分布画像を得る手法である。相乗イメージングの概念は、相互情報(MI)を用いた画像位置合わせ技術から開発されている。中性子とX線画像の間で2次元ヒストグラムを計算し、形状決定マップを比較することによって、元素分布を決定する。この方法による試料の元素分布決定例を図3に示す。中性子とX線の相乗効果により生成される画像は、高分解能画像の空間分解能をほぼ維持するため、X線画像の空間分解能と同等となる。



Fig.1 Intermediate-angle neutron scattering instrument iANS.

図1 中性子中角散乱装置 iANS。



## Neutron Materials Analysis Laboratory

Professor Masato Ohnuma

Professor Takashi Kamiyama

Associate Professor Hiroataka Sato

Technical Staff Hiroki Nagakura

The Neutron is an indispensable particle for studies of the microstructure of materials and atomic-scale dynamics, and used for researches on materials in industry. In our university, a compact pulsed neutron source using an electron linac is in operation, and it is a great advantage for the materials research. Our missions are to apply neutrons to the materials research and to develop the basic technologies, such as the development of neutron sources and beam lines, and techniques for small-angle neutron scattering (SANS), imaging, etc.

(1) Intermediate-angle neutron scattering instrument for quantitative and non-destructive characterization of nanostructures in alloys

Recent developments in high-strengthened steels generally require accurate microstructure control down to the nanoscale region. Dispersion strengthening is sensitive to the number density and size of the dispersed particles. Therefore, characterization methods for those parameters are important to control the quality of the products and further the development of high performance steels. Small-angle scattering (SAS) can easily give statistically representative values for average size and number densities of the heterogeneities. The combination of SANS and SAXS techniques, which is known as the alloy contrast variation (ACV) method utilizes the scattering length difference of each element between X-rays and neutrons, can determine phase of precipitate. In addition to phase determination, it can give information about the composition of the heterogeneities embedded in the matrix. To characterize such nanostructures embedded in a metallic matrix, a newly designed intermediate-angle neutron scattering instrument (iANS, Fig. 1) has been developed. It shortens the distance between the sample and detector and is combined with a time-of-flight (TOF) technique. Since the momentum transfer ( $Q$ ) resolution can be relaxed to provide an optimum  $Q$ -range when we focus on characterizing nanoscale heterogeneity, a much higher neutron flux can be utilized for the measurements than those available in a conventional small-angle neutron scattering (SANS) instrument. Consequently, iANS gives sufficiently high quality profiles for quantitative analysis on an absolute unit scale even using a compact accelerator driven neutron source.

(2) Crystalline grain orientation mapping in a

polycrystalline material by pulsed neutron Bragg-dip transmission imaging

Because the mapping of crystal grains and their orientations is a powerful technique to investigate the correlation between material properties and its microstructure, those such as SEM-EBSD and XRD imaging have been developed. On the other hand, neutrons have a higher penetration depth against the electrons or X-rays, which is characterized by easy acquisition of texture information inside the material. For this reason, we developed a new mapping method of individual crystal grains and their orientations in a polycrystalline material by analysis of spectrum obtained by neutron Bragg-dip transmission method using pulsed neutron source. The example of the mapping is shown in Fig. 2. This is expected as a new texture information evaluation tool capable of determining the number of crystal grains and their crystal orientations in the direction along the incident neutron beam and mapping these crystallographic characteristics.

(3) Element distribution mapping by synergy imaging of neutron and X-ray

To obtain high-resolution neutron image, we developed the resolution enhancement method consisting of the image alignment and the mapping based on the neutron and X-ray synergy imaging. It is an imaging technique which obtains an element distribution image with higher spatial resolution using the differences between cross sections of neutron and X-ray. The concept of the synergy imaging is developed from the image alignment technique using the mutual information (MI). By calculating the two-dimensional histogram between neutron and X-ray image and comparing the geometry decision map, the element distribution is created. Fig. 3 shows the element distribution of the sample by the method. Since the image created by the synergetic use of neutron and X-ray almost keeps a spatial resolution of a higher-resolution image, the spatial resolution of the element distribution was approximately equal to that of the X-ray image.

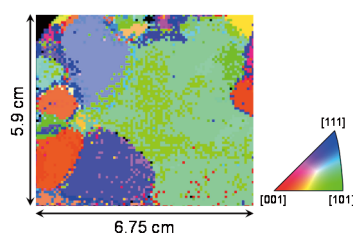


Fig.2 Crystal grain map with their orientations by neutron Bragg-dip transmission method.  
図2 中性子ブラッグディップ透過法による結晶粒と方位のマップ。

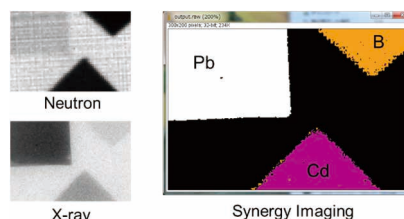


Fig.3 Element distribution map by neutron and X-ray synergy imaging.  
図3 中性子/X線相乗イメージングによる元素分布マップ。

## 客員教授

### Guest Professors

客員教授 長坂 徹也

Guest Professor  
Tetsuya Nagasaka



東北大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering,  
Tohoku University

客員教授 葛西 栄輝

Guest Professor  
Eiki Kasai



東北大学大学院環境科学研究科

Graduate School of Environmental  
Studies, Tohoku University

客員教授 藤林 晃夫

Guest Professor  
Akio Fujibayashi



一般財団法人 省エネルギーセンター

The Energy Conservation Center, Japan

客員教授 鷹觜 利公

Guest Professor  
Toshimasa  
Takanohashi



国立研究開発法人 産業技術総合研究所

National Institute of Advanced Industrial  
Science and Technology

客員教授 齋藤 公児

Guest Professor  
Koji Saito



日鉄総研株式会社

Nippon Steel Research Institute  
Corporation

客員教授 柏谷 悦章

Guest Professor  
Yoshiaki Kashiwaya



京都大学大学院 エネルギー科学研究科  
エネルギー応用科学専攻

Energy Science and Technology Dept.,  
Kyoto University

## 運営委員 Steering Committee Members

教授 郷原 一壽  
Professor Kazutoshi Gohara 応用物理学部門

教授 向井 紳  
Professor Shin Mukai 応用化学部門

教授 橋本 直幸  
Professor Naoyuki Hashimoto 材料科学部門

教授 大沼 正人  
Professor Masato Ohnuma 応用量子科学部門

教授 佐藤 努  
Professor Tsutomu Sato 環境循環システム部門

※エネルギー・マテリアル融合領域研究センター専任教員の教授、准教授は記載していません。

## 人員構成 Number of Constituents

		Numbers
センター長	Professor	1
教授	Professor	2
客員教授	Guest Professor	6
准教授	Associate Professor	5
助教	Assistant Professor	3
特任助教	Specially Appointed Assistant Professor	2
技術専門職員	Technical Specialist	3
技術職員	Technical Staff	2
博士研究員・ポスドク	Postdoctoral Fellow	3
学術研究員	Assistant Technician	6
研究支援推進員	Research Support Staff	2
事務補助員	Assistant Clerk	6
技術補助員	Assistant Technician	4

as of April, 2022

## 研究業績 Research Activities

	原著論文 Papers published in referred journal	著書・総説 Books and Reviews	国際会議論文 Papers presented at international conference	特許 Patents	学会賞 Prizes
FY2017	49	3	8	5	9
FY2018	40	8	17	4	18
FY2019	51	6	13	2	6
FY2020	36	1	3	4	4
FY2021	36	0	2	5	8

## 外部資金導入 (円) Research Funds from External Sources (JPY)

	寄付金 Donations	科学研究費補助金 Grant from the Ministry of Education, Science, Sports and Culture (KAKENHI)	受託共同研究費 Grant for Collaborative Research	合計 Total
FY2017	10,700,000	24,700,000	39,620,000	75,020,000
FY2018	14,000,000	17,030,000	36,709,240	67,739,240
FY2019	6,092,630	26,520,000	42,413,712	75,026,342
FY2020	12,450,000	53,950,000	78,127,500	144,527,500
FY2021	2,530,000	49,205,000	82,627,898	134,362,898

## 教育 (学生数) Education (Number of Students)

	博士課程 <sup>1)</sup>	修士課程 <sup>1)</sup>	学部4年 <sup>2)</sup>	合計
2016~2020年度 (修了者・卒業者数)	9	65	86	160
2021年度 (在学者数)	7	35	14	56

1) 材料科学専攻, 量子理工学専攻および総合化学専攻

2) 応用マテリアル工学コース, 応用化学コースおよび機械情報・システムコース







〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目  
北海道大学大学院工学研究院附属エネルギー・マテリアル融合領域研究センター  
Center for Advanced Research of Energy and Materials, Faculty of Engineering,  
Hokkaido University, Kita 13 Nishi 8, Kita-ku, Sapporo 060-8628, Japan

<https://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/carem/>



