

京都大学
エネルギー理工学研究所

現 状 と 課 題

平成 22 年度-平成 24 年度

京都大学エネルギー理工学研究所

はじめに

エネルギー理工学研究所は、平成 8 年の発足以来、「エネルギーの生成、変換、利用の高度化」を目的に、人類の持続的発展に貢献するため、エネルギー需要の増大とそれともなう資源の枯渇や地球環境問題の克服のための先導的研究を行ってきました。研究面では、環境調和性と社会受容性に優れた新エネルギー源とエネルギー有効利用システムに関する開発研究を進展・進化させるとともに、教育面では、大学院エネルギー科学研究科の協力講座として、最前線の研究活動の中で修士および博士課程の学生教育と若手研究者の育成に精力的に取り組んできました。平成 16 年の大学の法人化とともに始まり、これまで経験したことのない様々な変化への対応を求められた第 1 期中期目標・中期計画（第 1 期計画）が平成 21 年度に終了しました。その 6 年間の成果と評価に基づいて研究所の目標を再構築し、平成 22 年から第 2 期中期目標・中期計画（第 2 期計画）をスタートさせましたが、早くも前半を折り返し、今年度（平成 25 年度）から後半にさしかかりました。この期間は、第 2 期計画の仕上げであるとともに、平成 28 年度からスタートする第 3 期中期目標・中期計画（第 3 期計画）の目標と計画を定める期間でもあります。

第 2 期計画では、第 1 期計画において附属センターを中心に実施してきた 3 重点複合領域（「プラズマ」、「バイオ」、「光」）研究を連携・融合させ、「先進プラズマ・量子エネルギー」と「光・エネルギーナノサイエンス」の 2 つの重点複合領域研究に集約させて、それらを学術基盤とする核融合や太陽光などの新エネルギー源やエネルギー有効利用システムに関する総合的なエネルギー理工学の展開を立案しました。

これを実現するには、エネルギーに関わる国内外の幅広い関連分野の研究者・技術者との密接な連携・協力と視座を共有するプラットフォームとしてのコミュニティ形成を進めることが不可欠との考えのもと、文部科学省が平成 22 年度から始めた「共同利用・共同研究拠点（ゼロエミッションエネルギー研究拠点）」に申請しました。本申請は、第 2 期計画の重要な目標の一つでしたが、文部科学省の認定を受けるに至り、平成 23 年度から拠点活動を開始しました。エネルギーに関する概念を拠点名とした拠点活動への参画は、研究所にとって大きな決断でしたが、関連研究者からの多くの支援と協力を受け、運営組織や課題公募などのソフト面および多様な実験装置や先端施設などのハード面の双方を整備・拡充してきました。3 年目にあたる平成 25 年度には提案課題数が 76 件に上り、拠点活動は順調に推移・浸透していると判断できます。拠点化とほぼ時を同じくして発生した東日本大震災は、わが国のエネルギー構造の脆弱性を改めて浮き彫りにすると同時に、エネルギー研究における私たちの使命にもインパクトを与え、安心安全なエネルギーに向けて、全国の研究者と実質的に連携した研究の重要性を再認識することになりました。

この拠点活動に牽引される形で、平成 25 年度からは革新的太陽光利用技術の開発に関する特別経費プロジェクトの立ち上げに成功するとともに、核融合科学研究所との双方向型共同研究も順調に進展しています。さらに、第 1 期計画後半（平成 19 年）から実施してきた先端研究施設共用促進創出事業については、平成 25 年度からは先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業として継続発展させました。この間、科学研究費補助金の採択件数も増加するとともに、原子力システム開発事業、NEDO 事業や CREST 事業をはじめとする多様な競争的資金なども獲得し、研究所活動を大きく支えています。

また、学内連携も積極的に進めてきました。21世紀COEプログラムに続いて、平成20年度には、エネルギー科学研究科、工学研究科原子核工学専攻、原子炉実験所とともにグローバルCOEプログラム「地球温暖化時代のエネルギー科学拠点」を実施し、平成25年3月に5年の期間を終了しました。上述の共同利用・共同研究拠点は、このプログラムで得た成果や活動を継承・発展させる枠組みとしても位置付けられます。これと相補的に、生存基盤科学研究ユニットや次世代開拓研究ユニット活動を通して、学際研究や人材育成での学内連携を一層強めてきました。

一方、本研究所ではこれら様々な活動を国際連携の下に進めています。設立以来、世界各国の研究機関との交流協定は31件（平成24年3月31日現在）を数え、著名な研究者を招聘した国際シンポジウムを独自に開催して、国際的な交流と情報発信を積極的に行っています。また、アジア地域との交流に力を入れ、日本学術振興会（JSPS）の「拠点大学方式による学術交流事業（日韓）（平成10-19年）」や「アジア研究教育拠点事業（日中韓）（平成20-平成24年）」においては、先進エネルギー科学における15年に及ぶわが国のハブとしての実績に基づく東アジアとの交流、東南アジア諸国との新エネルギーフォーラム（SEE Forum）やユネスコとの協働事業などの活動を行ってきました。更に欧州においては、平成13年に開始したドイツ・エアランゲン大学との交流にもとづいて、平成21年度に先進エネルギーと材料に関するシンポジウムをエアランゲンにて開催し、平成23年度からは、ドイツ・カールスルーエ工科大学（KIT）と博士課程学生の派遣交流を開始しています。

本報告書は、第2期中期目標・中期計画期間前半（平成22-24年度）の3年間の研究活動を自己点検・自己評価書としてまとめたものです。この間、東日本大震災に復興に向けた官民挙げての不断の努力の中、大学の担う役割と責務が一層大きくなり、大学ミッションの再定義や教育改革、国際化や研究力向上など、大学機能強化に向けた様々な取り組みが行われています。このような情勢の中で、共同利用・共同研究拠点としての研究所の役割や在り方が問われています。元来エネルギー研究は様々なスケールの時空間（現在から近未来・遠未来、地域から日本・地球・宇宙）に広がる概念を内包し、捉え方や取組方も様々です。近年、科学の発展は目覚ましく、自然の摂理や原理に深く切り込んだ緻密で調和したメカニズムが日々解き明かされ、これらを利用した応用研究が様々な分野で急速に進展しています。そのような時代背景を正しく見据え、多様性と複雑性に満ちた自然を規範として、21世紀に相応しいエネルギーの基本を司る新しい指導原理を追求するとともに、概念そのものも深化・発展させていくことが求められます。

今回の自己点検・評価を実施するに当たり、第2期計画前半における研究活動を本誌「現状と課題（平成22年度～平成24年度）」本編およびその資料編（Ⅰ）ならびに（Ⅱ）にまとめました。これらは、第2期計画後半の研究活動をさらに効果的なものとし、第3期計画に向けた研究力向上と研究所の永続的発展の礎となるものであり、より進んだ概念に基づく今後の研究およびその実現に向けた組織や運営面の具体策の検討において、重要な指針を与えるものと考えています。皆様のご指導、ご助言、ご鞭撻をいただければ幸いです。

平成25年7月
京都大学エネルギー理工学研究所
所長 岸本 泰明

目次

| | |
|--|------------------------|
| 1. 研究所の概要 | 1 |
| 1.1. 理念、目標 | 1 |
| 1.2. 組織・運営 | 2 |
| 1.3. 財政状況 | 5 |
| 1.4. 研究活動・研究交流の状況 | 7 |
| 1.5. 教育および社会との連携 | 10 |
| 1.6. 施設設備 | 12 |
| 1.7. 将来計画 | 12 |
| 1.8. 自己点検・評価に関する今後の課題および留意事項 | 13 |
| 2. 重点複合領域研究成果の概要 | 17 |
| 2.1. 先進プラズマ・量子エネルギー重点複合領域研究 | 18 |
| 2.2. 光・エネルギーナノサイエンス重点複合領域研究 | 28 |
| 3. 研究部門・研究分野における研究の現状 | 45 |
| 3.1. エネルギー生成研究部門 | 46 |
| 3.2. エネルギー機能変換研究部門 | 56 |
| 3.3. エネルギー利用過程研究部門 | 66 |
| 3.4. エネルギー複合機構研究センター | 76 |
| 4. 拠点形成促進事業 | 83 |
| 4.1. 共同利用・共同研究拠点（ゼロエミッションエネルギー研究拠点） | 84 |
| 4.2. 双方向型共同研究（Heliotron J） | 87 |
| 4.3. 文部科学省「先端研究施設共用促進事業（ADMIRE 計画）」 | 90 |
| 4.4. 次世代太陽電池研究拠点（有機太陽電池研究） | 93 |
| 4.5. JSPS アジア研究教育拠点（Asian CORE）「先進エネルギー科学」 | 96 |
| 4.6. センター共同研究 | 99 |
| 4.7. グローバル COE「地球温暖化時代のエネルギー科学拠点」事業 | 102 |
| 5. 生存基盤科学研究ユニットの概要とエネルギー理工学研究所 | 105 |
| 6. 次世代ユニットの活動状況 | 106 |
| 7. 中期目標・中期計画の概要 | 107 |
| 8. まとめ | エラー! ブックマークが定義されていません。 |

1. 研究所の概要

1. 研究所の概要

京都大学エネルギー理工学研究所は、平成 8 年 5 月、前身の原子エネルギー研究所がヘリオトロン核融合研究センター（当時）の一部との統合・再編を経て、「エネルギーの生成、変換、利用の高度化」を設置目的とする研究所へと改組された。研究所の沿革の詳細は資料編 (I)：沿革に記したとおりである。以来、先進的なエネルギーに関する理工学分野において、革新的なエネルギーの基礎学理と、人類存続に不可欠な新しいエネルギー関連技術の確立を目指して、多様な研究を展開してきた。平成 14 年度からの 21 世紀 COE プログラム（以降、21COE）および平成 20 年度からのグローバル COE プログラム（以降、GCOE）活動を経て、平成 23 年度には、共同利用・共同研究拠点に認定され、エネルギー理工学の拠点形成を進めてきた。

設立より 17 年が経過した現在、第 2 期中期目標・中期計画前半（平成 22 年度から平成 24 年度）までの活動を振り返り、平成 25 年度からの第 2 期後半の活動と平成 28 年度以降の第 3 期の活動を一層効果的なものにするため、研究所の活動を自己点検・評価する。

1.1. 理念、目標

平成 18 年度までの研究成果を踏まえ、研究所の長期目標ならびに平成 22 年度より開始した第 2 期中期目標・中期計画（平成 22 年度～平成 27 年度）における目標を策定するにあたり、平成 19 年度初頭に、研究所の理念・基本的目標を以下のように明確化した。

エネルギー理工学研究所は、「エネルギーの生成、変換および利用の高度化」を設置目的とし、人類文明の持続的発展に貢献する。この目的のため、エネルギー需要の増大とエネルギー資源の枯渇ならびに地球環境問題の深刻化に伴って生じるエネルギー問題の解決を目指した先導的研究を行う。特に、社会的受容性の高い新規エネルギー源やエネルギー有効利用システムの実現を目指す。本研究所が有する多様な学術基盤を生かし、異なる研究領域を有機的に連携させることにより、挑戦的かつ独創的なエネルギー理工学の研究領域の開拓を進める。

以上の理念に基づき、以下を長期目標とする。

- (1) 社会の要請に応えるため、先進的かつ社会的受容性の高い基幹エネルギーシステムの構築と多様なエネルギー選択を可能とするシステムの実現を目指し、学際研究としてのエネルギー理工学に新たな展望を拓く。
- (2) 多様な学術基盤をもつ研究者の連携及び、基礎から応用に至る研究の発展により、世界的な先進エネルギー理工学研究拠点としての展開を図る。
- (3) 優れた設備群を整備・活用して、エネルギー理工学における優秀な研究者と高度な専門能力を持つ人材を育成する。

さらに、以上の長期目標を達成するために、以下を第 2 期中期目標とする。

- (1) 重点複合領域研究として「先進プラズマ・量子エネルギー」および「光・エネルギーナノサイエンス」を推進する。
- (2) 国内外の研究機関・研究者との連携を深め、地球規模のエネルギー問題に対応するためのエ

エネルギー理工学研究ネットワークのハブ機能を強化する。

- (3) 先進エネルギー領域における指導的研究者・技術者等の人材を育成するとともに、学生等の教育活動に貢献する。
- (4) 産官学連携活動等を通じて、研究成果を社会に還元する。
- (5) 研究所の研究成果等をホームページや公開講演会等を通じて、広く社会に公開する。
- (6) これらの目標の達成のために、適切な研究所運営に努める。

これらの中・長期目標に基づいて策定された第2期中期目標・中期計画およびその計画の年度毎の進捗状況については、第5章ならびに別冊資料「京都大学エネルギー理工学研究第2期中期目標・中期計画関連資料集」に記す。

1.2. 組織・運営

前節に掲げた理念および目標を実現するために、本研究所には、3つの研究部門（エネルギー生成研究部門、エネルギー機能変換研究部門、エネルギー利用過程研究部門）と1つの附属施設（附属エネルギー複合機構研究センター）を設置している（資料編(II) 1.1 参照）。研究部門は、客員の2分野を含めた合計14の研究分野で構成されている（図 1.2.1）。また、附属センターには、当初よりセンター附属研究分野を置き、准教授1名を配置していたが、平成20年度からはさらに教授1名を配置した（資料編(I) 3.4.1）。平成19年度から24年度までの人員数を表 1.2.1 に示す。なお、平成24年度からエネルギー貯蔵研究分野、生物機能科学研究分野および生体エネルギー研究分野は、それぞれ、エネルギー基盤材料研究分野、生物機能化学研究分野およびエネルギー構造生命科学研究分野に分野名を変更している。

部門・分野間の横断的な研究の中核を担う附属センターは、開所当時から3つの重点複合領域研究（「プラズマエネルギー」、「バイオエネルギー」、「光エネルギー」）に取り組んできたが、これらの領域間の連携が強まり、統合再編成の必要性が生じたため、平成18年に附属センターを改組し、これら3つの重点複合領域研究を「先進プラズマ・量子エネルギー研究推進部」と「光・エネルギーナノサイエンス研究推進部」の2つの研究推進部に集約し、現在に至っている。また、これに加え、国内外との共同研究ネットワークの強化を目的とした「国際流動・開発共同研究推進部」を設置し、拠点形成に向けた活動を展開してきた。

このような研究の機動性・柔軟性・流動性を高める体制づくりは、学校教育法の改訂にともなって施行された教員制度改革（准教授制、助教制）の趣旨とも合致するものである。平成19年度には、各研究推進部のそれぞれに3ないし4つの研究推進領域や推進室を設置し、多種多様なプロジェクト的研究課題・連携研究を推進するための体制が整備された。

平成23年度には、共同利用・共同研究拠点として文部科学省の認定（平成23年度から平成27年度）を受け、「ゼロエミッションエネルギー研究拠点」活動を開始し、現在に至っている。

研究所の運営は、所長および所内外の専任の教授からなる「協議員会」の議にしたがう。協議員会では、諸規程の制定・改廃、所長候補者の選考、教員人事、財政など、研究所の運営に係る重要事項が審議される。一方、研究所運営に関する意見集約および報告の場として、「研究所会議」、「拡大教授会」および「教授会」が設置されている。研究所会議は教授・准教授・助教・技術職員・非常勤職員

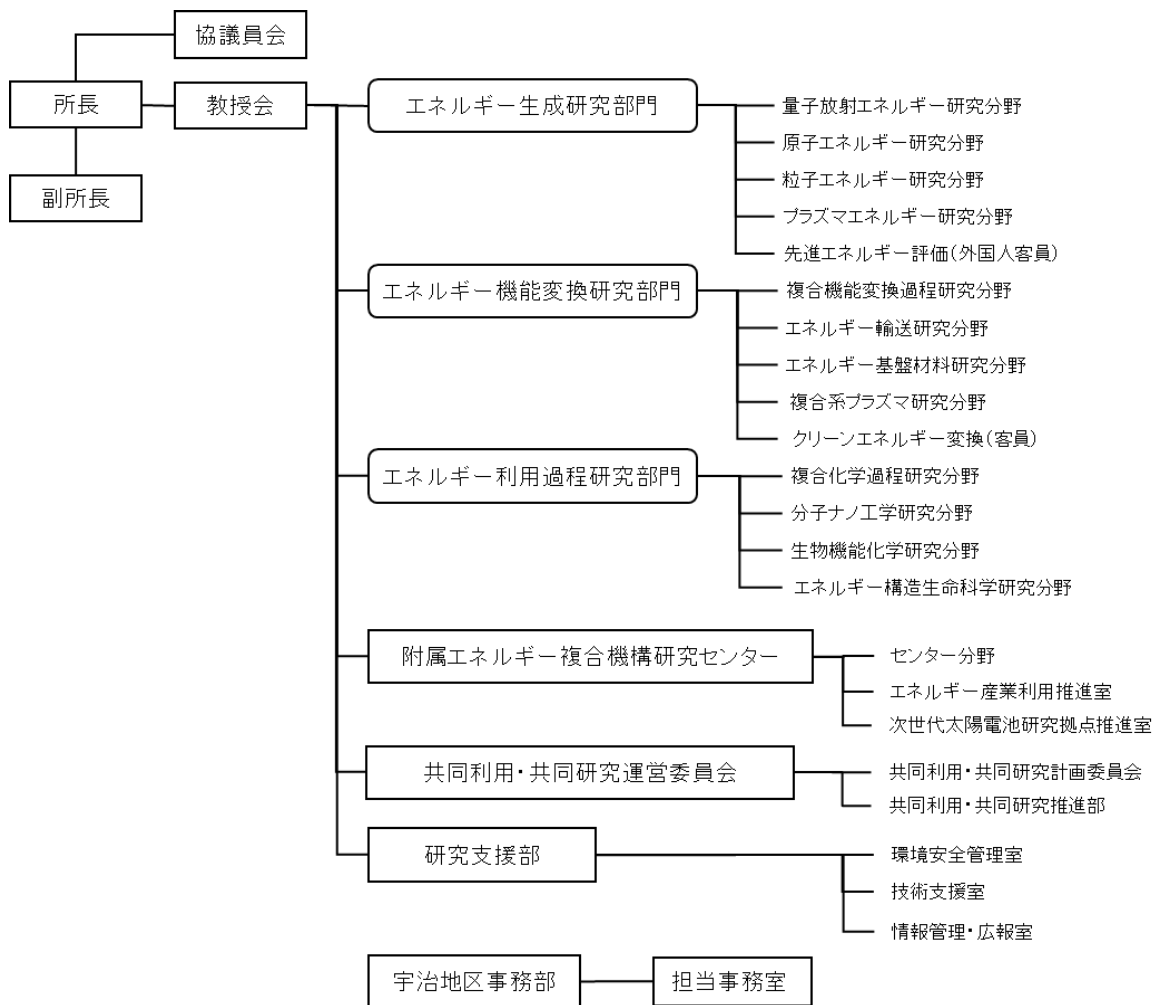


図 1.2.1 研究所組織図

| | H19 | H20 | H21 | H22 | H23 | H24 |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 教授 | 13 | 13 | 11 | 13 | 13 | 13 |
| 准教授 | 10 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| 講師 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 助教 | 11 | 10 | 12 | 12 | 11 | 10 |
| 技術職員 | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 9 |
| 総計 | 44 | 45 | 45 | 47 | 46 | 45 |
| 外国人客員教授 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 0 |
| 外国人客員准教授 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 外国人客員研究員 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 客員教授 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 客員助教授 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 非常勤講師 | 6 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 非常勤研究員 | 3 | 3 | 6 | 4 | 3 | 4 |
| 研究支援推進員 | 4 | 4 | 7 | 6 | 6 | 3 |
| その他研究員 | 21 | 19 | 20 | 14 | 13 | 12 |
| その他職員 | 26 | 46 | 47 | 40 | 71 | 75 |
| 総計 | 65 | 82 | 90 | 73 | 102 | 103 |

表 1.2.1 平成 19 年度から 24 年度までの人員数

から構成され、拡大教授会は教授・准教授・助教および専任の教員、教授会は専任の教授で構成される（いずれも所長を含む）。また、事務担当者がいずれの会合にも参加する。研究所運営の詳細については、「教授会」が中心的な役割を果たす。その実務については、所長が定める各種委員会やワーキンググループが遂行する。平成 16 年度より試行してきた「研究支援部」については、平成 19 年度より教授会直下に移動させ、その中に「技術支援室」、「環境安全管理室」、「情報管理・広報室」が設置されている。そこでは、それぞれの室長のもとで、技術支援、労働安全衛生、情報管理などの日常業務を行っている。なお、研究所の事務組織は、京都大学事務組織規程に定められている。

所長のリーダーシップ体制を補佐するため、所長のもとに、副所長、センター長、研究部門長、研究支援部長（副所長兼務）等からなる「補佐会」が設置されている。ここでは、所長の日常的な認可事項等を処理する他、研究企画と運営の基本的な在り方についての検討を行う。こうした補佐会機能をより効率化・充実化させる方策については、拡大教授会を母体とする「将来構想検討委員会」で検討されている。

平成 23 年度に認定された共同利用・共同研究拠点活動は、所長の諮問機関である共同利用運営委員会に委ねられている。運営委員会は、学内外からの委員 13 名（学外委員は内 7 名）からなり、関連するコミュニティの意見が反映されやすい体制としている。運営委員会の下に、学外委員が過半数を占める計 13 名からなる共同利用・共同研究計画委員会を置き、共同利用・共同研究の年次計画、課題の公募や採択、実施に関わる議論や検討を行っている。さらに、運営委員会の下に共同利用・共同研究推進室を置き、共同利用・共同研究の実施に関わる実務を行っている。

附属センターの運営に関する重要事項については、センター長の諮問機関である「センター運営協議会」が設置され、協議されている。これは、センター長および所内外の教員、学外の学識経験者によって構成されている。

横断的研究の中核を担う附属センターでは、その特徴的な活動として、主に所員を対象とする公募型の共同研究を実施している。これは、研究所が設立以来継続して行っている事業であるが、所内外・学内外の研究者が、本研究所が先導する基盤研究や学際萌芽的な研究などに取り組むための共通基盤を提供するものである。さらに附属センターでは、談話会、シンポジウム、共同研究成果報告会などを通じて、研究者の交流を図っている。

こうした研究者交流は、国内だけでなく、国外に対しても盛んである。平成 10 年度から平成 19 年度までは、日本学術振興会拠点大学交流事業日韓拠点大学交流「エネルギー理工学分野」を実施し、さらに、平成 20 年度から平成 24 年度までは、日本・中国・韓国の 3 カ国間交流事業「アジア研究教育拠点事業：先進エネルギー科学」(<http://cup.iae.kyoto-u.ac.jp/default.htm>) を実施している。

研究所活動の点検・評価、および将来構想の検討に関しては、教授会を母体とする「評価委員会」や、拡大教授会を母体とする「研究所将来構想検討委員会」において検討している（資料編 (II) 1.2.1 参照）。また、研究所の将来問題の在り方に関しては、学内外の学識経験者を含む「京都大学エネルギー理工学研究所在り方検討委員会」（外部評価委員会）で審議される。平成 19 年度に実施した外部評価では、「重点複合領域研究評価」と「総合評価」の 2 段階に分けて評価を実施した。

こうした研究所全体の活動に対する点検・評価に加え、平成 19 年度には、全所員に対する個人評価も行った。これは個人の業務・研究活動等に対して、所長および副所長が合議により評価を下すものである。この最初の個人評価を受け、平成 20 年度には「個人評価 WG」が設置され、評価法そのもの

の妥当性が議論され、その検討結果は2回目の「個人評価」（平成22年度）に反映されている。

人材の登用については、全国的な視野に立って人事交流を図るために、改組以来、一貫して公募人事を実施してきた。その結果、平成8年度の改組以来、新規任用専任教員48名中33名については学外から任用するに至っている（平成24年3月31日現在）。平成19年度から平成24年度にかけての教員の人事異動については、昇任が3名、外部機関からの採用が13名であり、転出者は10名、定年退職者は5名である。また、本研究所においては、平成14年9月より採用した教員（内部昇格も含む）に対して任期制を設けている。任期制教員を再任するための手続きについては、平成17年に内規を制定し、平成25年3月31日時点、再任評価を実施した教員は、教授2名、准教授3名および助教3名であり、全員が再任可の評価を受けている。

本研究所では、こうした常勤教員の外、外部資金を基盤とする様々なプログラムを使って特定有期雇用教員や非常勤教員・研究員（その他研究員）を採用している（表1.2.1参照）。宇治キャンパスの4つの研究所が中心に取り組んでいる生存基盤科学研究ユニット（平成18年度～）や次世代開拓研究ユニット（平成18年度～）、エネルギー科学研究科などとともに取り組んでいるGCOEプログラム「地球温暖化時代のエネルギー科学拠点－CO2ゼロエミッションをめざして－」（平成20～24年度）（<http://www.energy.kyoto-u.ac.jp/gcoe/summary>）の学内プロジェクトの外、原子力システム開発事業（平成17年度～平成21年度）やADMIREエネルギー産業利用（平成19年度～）、太陽電池開発事業（平成21年度～）を始めとする外部資金を使って、特定教授、特定助教、特定研究員、リサーチアシスタントなどを採用し、常勤教職員だけでは成し得ない機動的な研究を展開している。

1.3. 財政状況

平成19年度以降の財政状況（研究所予算決定額）を図1.3.1に示す。外部経理による競争的資金も含め、外部資金の占める割合は、ほぼ1/3から1/2を維持している。平成8年度から24年度までの科学研究費補助金をはじめとする外部競争的資金の獲得状況を図1.3.2に、外部資金の構成割合を図1.3.3(a)（平成19年度から平成21年度）および図1.3.3(b)（平成22年度から平成24年度）に示す。省庁等からの競争的資金の獲得、民間企業・外部研究機関等との受託研究費・共同研究費の占める割合が平成18年以降、高い水準を維持しており、社会的要請に対応したエネルギー研究の発展やそれに伴う先端研究施設整備が進み、先導的、学際的なエネルギー理工学の研究拠点としての活動を精力的に展開した。その一方で、科学研究費補助金の獲得金額に関しては、平成18年に大幅な増額を実現した後は顕著な増加が見られず、毎年1億円程度に収まっている。

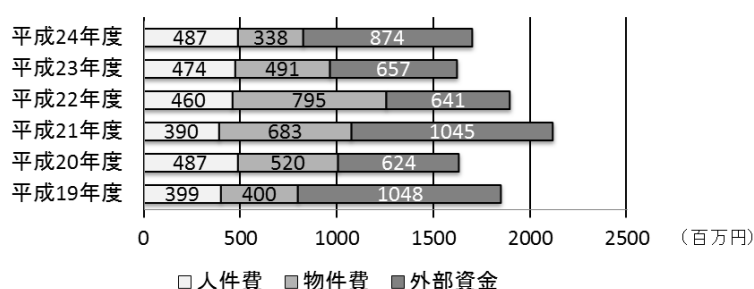


図 1.3.1 平成19年度以降の財政状況（研究所決算、H21年度までは予算）

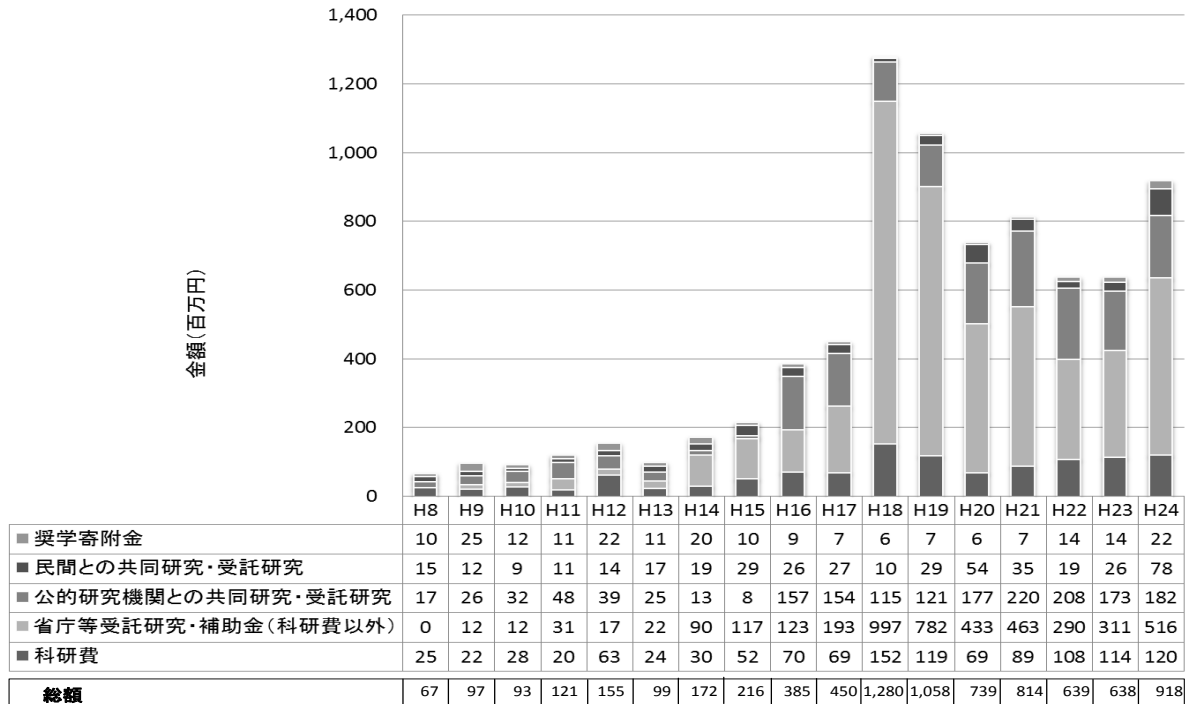


図 1.3.2 平成 8 年度から 24 年度までの競争的外部資金の獲得状況

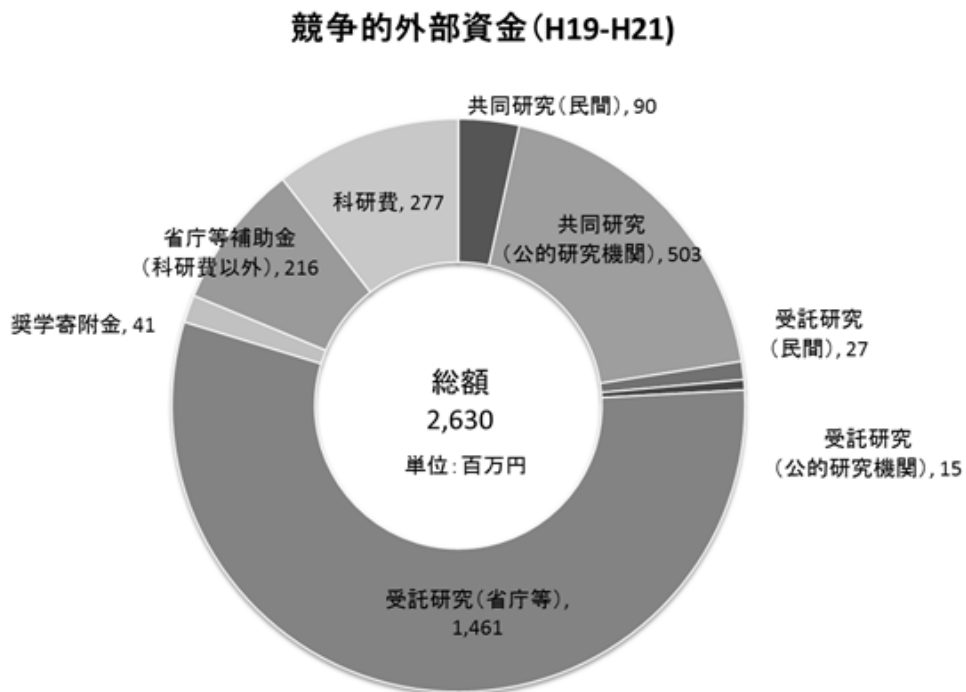


図 1.3.3(a) 平成 19 年度から 21 年度までの外部資金(総額)の内訳

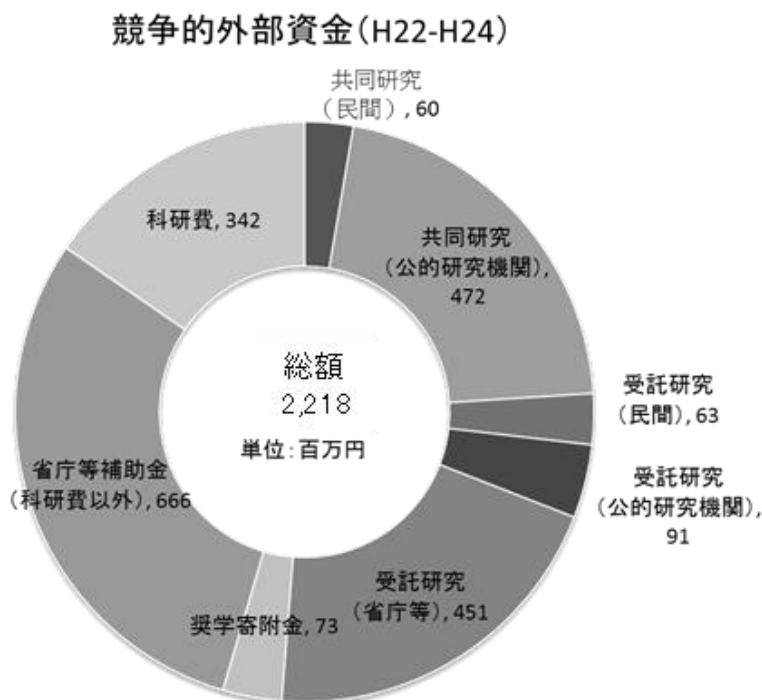


図 1.3.3(b) 平成 22 年度から 24 年度までの外部資金(総額)の内訳

1.4. 研究活動・研究交流の状況

平成 8 年の改組以来、研究所の理念や目標に沿って、また、在り方委員会による提言を取り入れながら、エネルギー理工学の研究・教育活動を進めてきた。先端的なエネルギー技術の創成、大型の研究施設や設備を中心としたプロジェクト型研究の推進および学内外や国際共同研究推進に重点をおいていること、などを特徴としている。特に研究面では、研究所全体としての特徴・総合力を発揮すべく、2 つの重点複合領域研究に代表される横断的な課題研究に重心が移動してきている。重点複合領域研究成果の概要は、本編第 2 章「重点複合領域研究成果の概要」に纏めてある。また、各研究部門・研究分野における研究の概況および成果の発表の詳細については、本編第 3 章ならびに資料編 (I) 第 3 章に記されている。研究所全体としての論文等の発表件数の推移を図 1.4.1 に示す。各研究分野の特許・発明、受賞状況の詳細については資料編 (I) 第 4 章に纏めている。

平成 23 年度より開始した共同利用・共同研究拠点（ゼロエミッションエネルギー（以後、ZE）研究拠点）事業は、本研究所の目標であるエネルギー理工学の国際的研究拠点形成に向け、国内における拠点基盤形成のための研究活動でもある。独創的、先端的な ZE 研究を総合的に展開する目的で、企画型研究（研究所の重点複合領域研究に即した研究）、提案型研究（所外研究者の提案による独創的な研究）および共同利用研究（所外研究者による施設利用研究）の 3 つのタイプの課題を公募している。共同利用・共同研究で採択された課題数は、平成 23 年度が 72 課題、平成 24 年度は 79 課題であり、参画している機関数および受け入れ人数は、平成 23 年度が 34 機関、233 名、平成 24 年度は 26 機関、212 名に及んでいる。また、本事業の成果としての論文の数は、平成 23 年度が 39 編（所外研究者による成果 24 編）、平成 24 年度は 61 編（所外研究者による成果 45 編）と増加している。本拠点

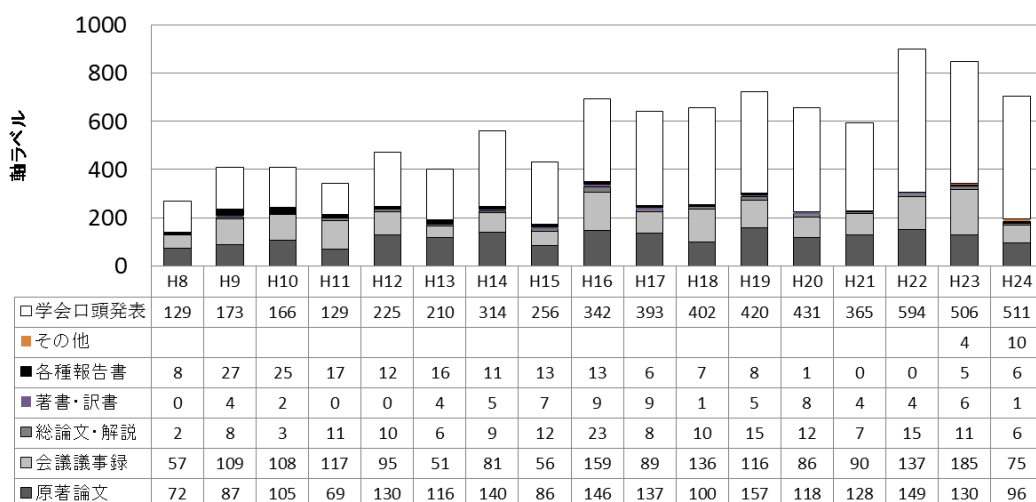


図 1.4.1 研究所の成果発表件数の推移

活動では、エネルギー工学の特徴でもある分野融合・新領域研究の推進に重点を置いているが、平成 24 年度の採択 79 課題のうち、8 課題が異分野研究者間の情報交換から提案されるに至っている。本拠点活動に並行し、有機薄膜太陽電池の開発事業(CREST:平成 21 年度～平成 25 年度および NEDO:平成 22 年度～平成 26 年度)が進展し、平成 25 年度からは、エネルギー科学研究科との協力により、概算要求「革新的高効率太陽光利用技術の開発」研究(平成 25 年度～平成 30 年度)が開始されている。

附属センターが推進する大型プロジェクトとして、「双方向型共同研究(核融合科学研究所)」、「先端研究施設共用促進事業(通称 ADMIRE 計画)(JST)」および「次世代太陽電池開発(NEDO)(平成 25 年度からセンターに設置)」がある。前 2 者は、附属センターの基幹装置である高度エネルギー機能変換実験装置(通称、ヘリオトロン J および二重イオンビーム材料照射実験(DuET)施設)を使った研究プロジェクトである。「双方向型共同研究」は、大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所によって、平成 16 年度から開始されている公募型共同研究である。これには、独創的閉じ込め磁場配位をもつヘリオトロン J 装置が全国の共同利用として使われ、平成 22 年度からこれまで、毎年、採択研究課題数は約 20 件程度、参画機関数は 13 件程度、参加者数は約 110 名を数えている。平成 19 年度に開始された先端研究施設共用促進事業(ADMIRE 計画)は、文科省の産官学連携事業「先端研究施設共用イノベーション創出事業」(平成 22 年度から「先端研究施設共用促進事業」に変更)であり、拠点形成の直接的な社会貢献の場として位置付けられている。複合イオンビーム照射の可能な DuET 施設や、マルチスケール解析・評価を行うための MUSTER 装置群が共用に供され、開始以来、民間企業 71 社、153 件の課題(無償・有償利用)に取り組み、企業技術・研究者の受賞 4 件、特許申請 10 件に直接貢献した。

また、先端研究施設共用促進事業に参画している各機関との連携を図り、平成 19 年度に名古屋大学との 2 大学連携を開始し、平成 23 年度には、6 大学連携へと発展させ、地域間連携を進めることができた。特に、東北大学とは東日本大震災罹災地の企業との産学連携を促進するための連携協力活動を協働して実施した。また、平成 24 年度は、京都大学が主催となり、全国産官学連携シンポジウムを開

催し、当該事業を牽引するなど、産学共用拠点形成を推進した。なお、先端研究施設共用促進事業は、平成 25 年度からは「先端研究基盤共用・プラットフォーム形成促進事業」と名称変えて継続している。

この他、附属センターでは、様々な資金を活用した研究、すなわち、小型自由電子レーザー装置（KU-FEL）の開発・研究、各種装置の効率的利用、新装置や解析法の開発、核磁気共鳴装置（NMR）を用いたバイオエネルギー関連の理論ならびに応用研究が行われている。

平成 14 年度から始まった文部科学省による 21COE プログラムは、エネルギー科学研究科、宙空電波科学研究センター（当時）と合同で応募した「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」が採択されたもので、平成 18 年度と同 COE プログラム終了まで、本研究所の研究遂行上の大きな支えの一つとなってきた。この活動は、平成 20 年度からは GCOE に継承され、エネルギー科学研究科、エネルギー理工学研究所、工学系研究科原子核工学専攻および原子炉実験所が連携協力し、「地球温暖化時代のエネルギー科学拠点」（学際・複合・新領域区分）として採択（平成 20 年度～平成 24 年度）され、2100 年までに化石資源に依存しないエネルギーシステムの開発シナリオの実現に向け、教育者、研究者、政策立案者を育成するとともに、国際的な研究活動や交流を通じて、国際的教育研究拠点を形成することを目的として実施された。

研究所の特徴である部門・分野を越えた共同研究については、上述の附属センターでの重点複合領域研究を中心としたセンター共同研究や、GCOE プログラムの他、平成 17 年度より宇治地区研究所を中心に発足した学内組織「生存基盤科学研究ユニット」ならびに平成 18 年度に発足した「次世代開拓研究ユニット」への積極的な参画によって推進してきた。また、競争的外部資金等による学外研究機関との共同研究・受託研究にも主体的・積極的に参加しており、各研究分野が元来実施していた研究所の内・外との共同研究の強化を含め、幅広い共同研究ネットワークが出来あがってきたと言える。

国際交流については、外国人客員教員ポストを活用して、常時、海外から優秀な研究者を招聘して研究交流を深めているほか、外部資金等による研究者招聘・派遣も積極的に実施している。また、日本学術振興会が行っている日米科学技術協力事業核融合分野の共同研究には、本研究所関連分野の研究者が活動の主体となって参加している。このほか、海外の研究機関と研究交流協定を締結し（平成 24 年 3 月現在、31 件）、学術交流を行っている（資料編 (II) 2.7.2.7）。

日本学術振興会（JSPS）の国際プロジェクト「アジア研究教育拠点事業」（平成 20 年～平成 24 年）による日中韓研究交流では、日本側拠点校として、韓国のソウル大学および中国の精華大学との連立拠点としての役割を果たし、毎年それぞれの大学に数十人規模で短期滞在交流を実施した。

また、平成 18 年より開始した SEE Forum（Sustainable Energy and Environment Forum）活動では、アジア地域でより一層の協調と連携を図るための国際的な研究者ネットワークづくりを推進し、平成 24 年 2 月までに 9 回の SEE Forum をアセアン地域の大学や研究機関において開催している。また、平成 13 年からは、タイ王国ラジャマンガラ大学と Eco-energy and Materials Science and Engineering Symposium（EMSES）を毎年開催し、現在に至っている。

平成 13 年に開始したドイツエアランゲン大学との交流に関しては、平成 21 年度に先進エネルギーと材料に関するシンポジウムをエアランゲンにて開催し、本学から 16 名の教員および学生が参加した。また、平成 23 年度には、ドイツカールスルーエ工科（KIT）大学との間で日独学生交流事業を開始し、KIT から 5 名の博士課程学生と 2 名の教員を招聘した。平成 24 年度には、本研究所の博士課程学生 7 名および教員 3 名を派遣した。

1.5. 教育および社会との連携

本研究所は、「科学全般に関する広い視野と総合的な判断力を備え、特にエネルギー理工学分野に関して深い専門知識を持つ人材・研究者を養成すること」を基本的目標とした教育を行っている。研究所の全教員は、平成8年度に同時に発足した大学院エネルギー科学研究科の協力講座として、先端科学技術に関する大学院教育に参画している。また、一部の教員は、総合人間科学部、工学部および工学研究科等の非常勤講師も勤め、大学院ならびに学部の教育にも携わっている。このほか、全学共通科目や少人数セミナー（ポケットゼミ）等を通して、学部生の教養教育にも積極的に携わっている。

大学院の入学・進学希望者に対しては、本研究所は研究科と連携しながら、専攻ごとの入学説明会を実施し、学生の受け入れ方針や選抜方法等の周知を図っている。また、こうした説明会とともに、平成15年度からは、本研究所の公開講演会において大学院説明会（エネルギー科学研究科）を毎年実施し、より多くの人々に大学院の受け入れに関する情報周知を行っている。こうした取り組みにより、近年、本研究所所属の大学院生の数が次第に増加している。平成19年度に学生数が一時減少したが、それ以降は、年々学生数が増加している。図1.5.1および図1.5.2に在籍学生数および学位取得者数の推移を示す。

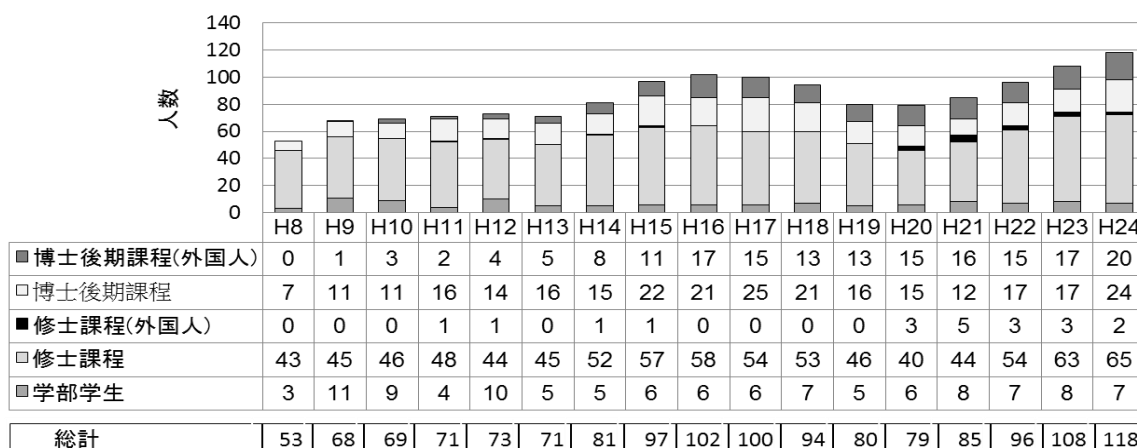


図 1.5.1 本研究所に在籍する学生数の推移

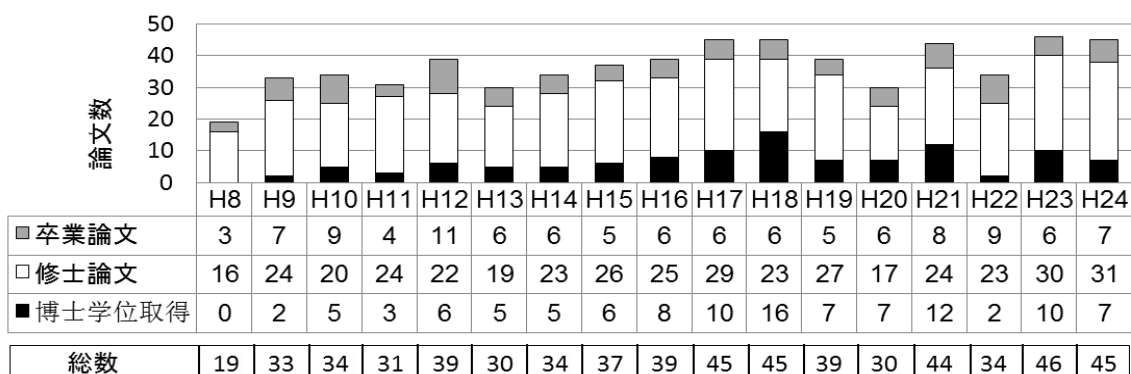
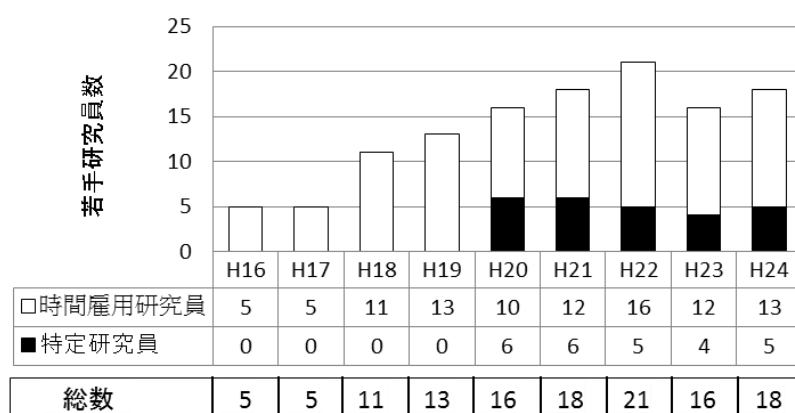


図 1.5.2 学位取得者数の推移

外部資金と教育の関連については、文部科学省の委託事業（平成 20-24 年度 GCOE プログラム「地球温暖化時代のエネルギー科学拠点」事業）として、教育研究環境の整備のみならず、他研究機関との交流や国際研究集会での発表の機会増大など、大学院生の国際性を涵養する教育を行っている。また、同事業を柔軟に運用することにより、RA（リサーチアシスタント）制度を通して、学生への充実した経済支援も行った。さらには、同事業や、その他の外部資金プロジェクト（例えば、学内連携の生存基盤科学研究ユニットや次世代開拓研究ユニットなど）を利用して、博士号取得後の雇用も積極的に進めている。今後も、卒業後の進路拡大を図るなどして、博士号取得者の進路問題を解消し、また、そうした努力によって関連の研究科とともに、博士後期課程大学院生の定員充足率の向上を図っている。図 1.5.3 に若手博士研究員数の推移を示す。

図 1.5.3 若手博士研究員数の推移



研究所の広報活動については、研究所が刊行するレポートとして、「Research Report」「Annual Report」「共同研究成果報告書」などがある。これらはそれぞれ、個別の研究成果の詳細を記述した報告書、毎年の部門・分野ごとの研究活動報告書、さらにはエネルギー複合機構研究センターによる共同研究報告書である。このような刊行物のほか、研究所の紹介冊子「概要」や近況活動報告「News Letter」の発行、さらにはインターネットホームページ（<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp>）による広報活動がある。なお、ホームページは、情報管理・広報室で管理している。

このほか、本研究所主催の公開講演会、他部局と合同で開催する「京大附置研究所・センターシンポジウム」、さらには、宇治キャンパス内の他部局と合同で開催する「宇治キャンパス公開」などがある。それぞれの対象は研究者向けから一般向けまで様々であり、広範囲に広報活動・情報発信を展開している。また、平成 19-24 年度の文部科学省委託事業（「先端研究施設共用イノベーション創出事業」ADMIRE 計画）を通じた産官学連携活動や、平成 20-23 年度の文科省事業（生存基盤科学研究ユニットのサイト型機動研究）を通じた地域連携活動などにも積極的に参画している。中には、政府委員会（内閣府：原子力安全研究専門委員）での政策提言や、国の代表として国際組織における委員長（国際熱核融合実験炉テストブランケットモジュール計画委員長）やリーダー（国際原子力エネルギー機関国際共同研究専門委員会リーダー）として活躍する教員もいる。

1.6. 施設整備

改組以前の原子エネルギー研究所およびヘリオトロン核融合研究センターから継続して研究に使用されている設備・機器類のうち、比較的規模の大きいものは附属エネルギー複合機構研究センターの所属とし、管理・運営を行ってきた。基幹装置としての在り方を検討した結果、(1)研究所で独自に開発した装置（または装置システム）であって、共同利用・共同研究に供する役割を担う基幹的な（または大型の）装置、(2)当該装置（装置システム）を用いて、他研究機関や産官学のコミュニティとの双方向または連携融合の研究が格段に推進され、エネルギー理工学研究の拠点形成に資するものを「センター基幹装置」として指定し、研究所の将来構想と併せて原則として中期目標・中期計画ごとに見直しながら、装置運転の維持管理および更新や改修を行っていくこととなった。第2期中期目標・中期計画期間のセンター基幹装置として、ヘリオトロンJ装置（Heliotron J）、複合ビーム材料照射装置（DuET）、自由電子レーザー発生装置（KU-FEL）および高分解能核磁気共鳴スペクトル装置（NMR）を選定した。これらのほかにも、マルチスケール評価開発研究基盤群（MUSTER）やフェムト秒レーザーなど大型装置の整備も計画的に実施してきた。

平成19年度以降整備された研究設備リストを資料編(I)第3章に記載する。平成17-21年度には、外部競争的資金（原子力システム開発事業：2件、15億円）を利用し、北1号棟ならびに南1号棟の整備・再開発を実施して、電界放出型透過電子顕微鏡などの先端研究設備・装置を新規購入し、MUSTERの拡充を行った。また、平成20年度から22年度にかけて、学内特別設備経費（1.2億円）を用いて、複合ビーム加工観察装置などを整備した。平成21年度には、補正予算（1.7億円）により、フェムト秒レーザーが導入され、平成22年度には特別教育研究経費（2.2億円）にて光エネルギー材料連携研究設備が導入された。平成24年度の補正予算では、国立大学法人施設整備費補助金として革新的太陽光エネルギー利用設備（0.8億円）の導入ならびに先端研究施設共用促進事業の主要設備 DuET および MUSTER の高度化のための補正予算の配分（2.3億円）があり、これらの先端設備・装置の導入により、研究拠点としての機能強化が実現した。

南2号棟については、平成19-20年度に再整備に着手し、高温液体ナトリウム伝熱実験装置のナトリウム撤去と装置解体撤去作業を法令遵守して安全に実施するとともに、内装および外装を整備・再開発し、高分解能核磁気共鳴スペクトル装置をはじめとする実験装置を設置した。

建物・設備については、一研究所のみからの観点ばかりでなく、全学的な観点からの整備計画が進められ、平成18年度の補正予算により、宇治キャンパス研究棟の耐震改修工事が行われ、平成22年度に工事が完了している。この工事に伴い、研究所の総床面積が増大している。研究所の他の実験棟の整備に関しては、南3号棟の浸水対策工事および北4号棟の耐震改修工事が平成24年度に行われた。

1.7. 将来計画

本研究所は、研究所の理念と目標を実現するため、発足以来、優れた人的資源の確保と研究施設群の整備・拡充を行い、研究と運営の双方の活動基盤の充実を行ってきた。具体的には、質と量の双方を満足する高品位エネルギー実現の基礎となる生成、変換および利用に関する原理的・先鋭的研究を推進する3部門・12分野体制を基本に、これらの成果を環境調和性と社会受容性の双方に優れたシステムとしての新エネルギー源に結実させるため、附属エネルギー複合機構研究センターを中心に、部

門・分野を横断した複合領域研究を企画・推進してきた。

平成18年度の附属エネルギー複合機構研究センター改組にあたり、3つの重点複合領域研究（プラズマ、バイオ、光）を統合した学際的・独創的な2つの重点複合領域研究（先進プラズマ・量子エネルギーおよび光・エネルギーナノサイエンス）の推進部をセンター内におき、これらを学術基盤とする核融合や太陽光などの新エネルギー源やエネルギー有効利用システムなどの先進エネルギー研究の推進と研究拠点としての役割を果たすという方向性を打ち出した。また、平成23年度から文部科学省の共同利用・共同研究拠点事業「ゼロエミッションエネルギー研究拠点」として活動を開始した。応募課題数は2年に渡って着実に増加し、拠点活動は順調に推移・浸透している。

第2期後半においては、2つの重点複合領域研究を各部門・分野で着実に進展させるとともに、当該分野を世界的にリード・牽引する信頼度の高いインパクトのある研究成果として結実させていく必要がある。一方、先進エネルギーの研究は、多様性と複雑性を内包する高度な総合科学として位置付けられるため、既成概念にとらわれることなく、関連研究者が分野の壁を乗り越えて積極的に交流を図るとともに、英知を結集することによって新しい概念と原理を創出しつつ、新展開を目指す戦略的研究を企画し、推進していく必要がある。

本研究所の目指す先進エネルギーの実現に向け、研究機能の深化・向上を図るため、第2期中期目標・中期計画を調整しつつ、上述の研究所の基本戦略を着実に履行する必要がある。第3期計画においては、研究所の各部門・分野・附属センターなどの組織の在り方や人員配置を含む資源配分、学内他部局や学外の研究機関・研究者との有機的連携・協力、優秀な人材の確保と流動を促進する仕組みの導入など、研究所の体制を再検討することが求められよう。

研究所の方向性を定める将来計画については、急激に進展している国内外の研究開発状況や社会情勢のような外的要因の変化に対応すべく、これを常に検討しておく必要がある。第4期科学技術基本計画に見られるように、東日本大震災および福島原発事故の社会的影響は大きく、外部環境は更に大きく変化してきている。大学の国際競争力の増強や機能強化に向け、大学の強みを効率的・効果的に発揮するための組織改編の動きと定数削減への対応など、今後検討すべき課題が山積されている。

総合的な「エネルギー理工学」の全国あるいは国際的な研究拠点としての基盤を確立し、先導的な研究活動を展開して行くためには、本研究所の規模では関連する主要な領域や分野を網羅することは容易ではない。今後は、エネルギー科学研究科など、学内の他部局との連携を一層堅実なものとし、関連部局との調整などを通して、より効果的に「エネルギー理工学」研究を推進するための全学的組織改革を視野に入れておくことも重要であろう。

1.8. 自己点検・評価に関する今後の課題および留意事項

本研究所が発展していくためには、エネルギーの生成、変換、利用研究をベースとした各部門・分野の研究において、十分高度で独創的な成果をあげていることが必要であることは言を俟たない。今後はさらに、個々の分野の連携による重点複合領域分野の展開やそれに基づく新領域分野の発掘が重要となる。今回の自己点検・評価の結果、各部門・分野の研究においては、十分な成果が達成されたと分析・評価しているが、研究所の現状と将来計画を分析検討する過程においては、これらの研究活動が様々なエネルギー研究の寄せ集めではなく、エネルギー理工学研究所という、一つの独立部局において有機的な連携のもとで展開していることの意義を明らかにし、その効果を社会に示していく必

要がある。

研究所の重点複合領域研究の活動、共同利用・共同研究拠点事業および附属エネルギー複合機構研究センターを軸とする各種の共同研究は、複合領域分野や新領域分野の展開に効果的であり、学際研究の発展や社会貢献への取り組みとして、形あるものとして見ることができる。具体的な研究成果も分野や部門にまたがり、また学内外との共同研究を通じて、先進エネルギー研究という本来学際的人格を持ち、また多面的に人類の生存と繁栄に欠くべからざるものを対象とする、特殊な研究領域にふさわしいものが生まれている。

一方、ゼロエミッションエネルギー研究は、多様な研究分野及び関連研究者コミュニティがその重要性を認識しているにも拘わらず、固有のコミュニティが未だできていないのが現状である。これまで、それら多様な分野の研究者間の連携を図る新たなコミュニティ形成に向け、「ゼロエミッションエネルギー・ネットワーク」を立ちあげたが、その試みは途についたばかりである。大学や国研を対象とする共同利用・共同研究への参加者のみならず、民間等との共同研究や受託研究の参加者を含めた国際シンポジウムや国内外の研究集会の場などを活用して、関連研究分野及び研究者へのエネルギー理工学研究に関する最新情報の交換・発信を行うと併に、ゼロエミッションエネルギーに対する意識啓発と研究参入の勧誘を行い、コミュニティ形成へ繋げていく必要がある。また、改めて「ゼロエミッションエネルギー」の概念について熟議し、さらに深化させていくことが必要である。

財政面における課題としては、今後、エネルギー理工学の研究拠点機能をさらに向上させるためには、先端機器の整備・拡充を継続的に進め、コミュニティの要請に応えていく必要がある。一方、拠点活動として認可された予算は限られていることから、他の競争的資金との効率的な運用や共同申請を外部コミュニティに対しても積極的に働きかけるなど、拠点を効果的に維持・運営していくための方策を考えておく必要がある。

また、将来のエネルギー研究を担う若手研究者や人材養成も重要なミッションである。研究所内でのプロジェクト研究の推進に携わる特定助教、博士研究員、大学院生（RA）などの若手人材を育成することにも重点を置く必要がある。これは、「教育再生実行会議」の「これからの大学教育等の在り方について（第三次提言）」で強調されている「理工系人材育成戦略」（仮称）を実施するものでもある。これらの領域において国際的に活躍できる人材の育成や国際的な共同研究を推進し、エネルギー理工学研究所の特色を活かしながら「人材・システムのグローバル化による世界トップレベルの拠点形成」をめざすことが求められる。

今回の自己点検・評価の結果、いくつかの留意点を認識あるいは再認識することができた。先ず、総合的なエネルギー理工学研究においては、固定した視点からの硬直化した基準に囚われることなく、より俯瞰的、発展的な視点からの評価が重要であることがあげられる。今回の評価においては、社会や学界、政策における先進エネルギー研究への期待に応え、その目標設定を的確かつ柔軟に行っているか、また、エネルギー理工学としての学術自体のもつ内在的な要求に従った深化が達成されているか、の双方について評価した。いずれも中期目標・中期計画の一定期間に対して十分短い時定数で変化しうるものであり、また、それらは一致することも矛盾することもありうることに留意する必要があるだろう。

従前より認識されていることではあるが、目標設定、目標に対するアプローチ法、その達成度と成果の評価において、社会の客観的な意見を取り入れつつも、被評価者たるエネルギー理工学研究所自

らが、十分な考察と柔軟な発想、客観的な評価姿勢を持ち続けることが何よりも重要である。

また、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災により、我が国は、将来のエネルギー施策に係わる極めて重要な局面に立たされている。エネルギー理工学研究が直接あるいは間接的に社会貢献を果たしうる機会でもあり、今後の評価においては、震災がもたらした教訓への対応なども評価の対象となるであろう。

2. 重点複合領域研究成果の概要

2. 重点複合領域研究成果の概要

第1期中期目標・中期計画（平成16-21年度）においては、将来の基幹エネルギーとして期待される「プラズマエネルギー複合領域」、社会的受容性が高い「バイオエネルギー複合領域」および高機能かつ基盤的な測定ツールとしての開発が期待される「光エネルギー複合領域」の3領域を重点複合領域とした。平成22-24年度は、第2期中期目標・中期計画（平成22-27年度）の前半3年間に相当する。第2期中期目標・中期計画においては、第1期に発展させた3重点複合領域研究の成果に基づき、その展開を図ると共に、研究所の設置目的や長期目標に則り、重点複合領域研究として「先進プラズマ・量子エネルギー」および「光・エネルギーナノサイエンス」の2つの領域を推進するとした。平成8年の改組以来展開してきた社会的受容性の高い高品位エネルギーの生成、変換および利用研究を基盤とする連携研究体制を充実させ、部門・分野間の横断的研究をより一層推進することにより新領域研究へと展開することを目指した。

特に、GCOEプログラム「地球温暖化時代のエネルギー科学拠点」（平成20-24年度）においては、再生可能エネルギーと先進原子力エネルギーの開発研究を進める一方、これらの先進技術の研究開発との協調を図りながら、CO₂ゼロエミッションエネルギーシステムへの移行シナリオ策定研究を理工系、人文社会系の研究者、学生等が参画して、俯瞰的視点に立ち進めることで、地球温暖化時代のエネルギー科学の国際的教育研究拠点を形成することを目的とした。

第2期中期目標・中期計画における「先進プラズマ・量子エネルギー」の中核的研究としては、Heliotron J装置によるプラズマ、核融合炉材料・システム工学、先進原子力材料、慣性静電閉じ込め核融合中性子源、SiC複合材料の開発などがあげられ、「光・エネルギーナノサイエンス」としては、KU-FEL（自由電子レーザー）、超短パルスレーザー、レーザーアブレーション分析、革新的ナノ炭素細線創製とその光物性、高機能DNAタンパク質ナノ組織体、抗プリオンアプタマー、物質複合系の非線形挙動などがある。これらの研究の多くは、附属センターを軸とする所内共同研究を通じて、分野間の連携協力のもとで実施されており、分野あるいは部門間の複合領域研究として位置付けられている。

平成23年度に開始した共同利用・共同研究拠点事業においては、学外研究者との交流が深められ、異分野共同研究の開始へと展開しつつあり、2年目終了時には、異分野複合領域研究課題数が全体の採択課題数の一割を占めるまでになっている。

以下、各複合重点領域研究の平成22-24年度研究成果の概要を述べる。

2.1. 先進プラズマ・量子エネルギー重点複合領域研究

| | | |
|-------|---------------|--|
| 関連分野： | エネルギー生成研究部門 | 原子エネルギー研究分野 粒子エネルギー研究分野 プラズマエネルギー研究分野 |
| | エネルギー機能変換研究部門 | 複合機能変換過程研究分野 エネルギー基盤材料研究分野 複合系プラズマ研究分野 |
| | | 附属エネルギー複合機構研究センター附属分野 |

本重点複合領域研究では、ヘリオトロン J 装置によるプラズマ閉じ込めの高性能化、耐極限環境先進構造材料の開発、可搬放電型中性子源の高性能化、さらには基盤研究として、エネルギーシステム設計および評価方法論研究を中心とした研究を展開している。

Heliotron J 装置は、エネルギー複合機構研究センターの基幹装置として、センター共同研究における先進プラズマエネルギー研究領域の開拓・推進に寄与している。無電流・磁気井戸・立体磁気軸ヘリカル系の柔軟な磁場構造の特徴を活かして、LHD と相補的なヘリカル系プラズマ閉じ込めの高性能化に向けた実験的・理論的研究の展開を可能にしている。

これに関連する研究として、核融合環境に曝される構造材料の開発が進められている。酸化物分散強化 (ODS) 鋼の接合技術開発やポーラス炭化ケイ素複合材料 (SiC/SiC) の開発研究に新たな展開があり、素材開発研究から実用化に向けた研究へと移行している。競争的外部資金による先端装置の導入とその効果的な利用による研究の進展が見られた。

慣性静電閉じ込め (IEC) 核融合中性子源の開発研究は、爆薬や違法薬物等の探知機開発を目指しており、その可能性を示すための研究が進められた。核融合中性子を安全・安心、医療、産業、国際貢献などの発電以外の応用分野で活用する。

システム・材料インテグレーション研究では、システム設計と材料開発を統合的に論じながら進め、システム構造体の最終形としての寿命評価法が開発された。液体 Pb-Li ブランケットにおけるトリチウム挙動や低放射化フェライト鋼、ODS 鋼および SiC 複合材料などの核融合炉ブランケット材料の開発研究と連動させ、素材開発から実用化開発に至る過程においてブランケットの設計サイドからの技術要件の双方向の検討を行った。これらは、ダイバータシステムの統合研究へと発展している。

先進プラズマ・量子エネルギー重点複合領域研究は、核融合エネルギーの開発に向けた研究へとベクトルが向いており、核融合プラズマ、炉システム工学および低放射化材料の研究を統合的、包括的に議論するシステム・インテグレーションを中心とする複合領域研究へと展開している。以下に、平成 22-24 年度の当該重点複合領域研究成果の概要を述べる。

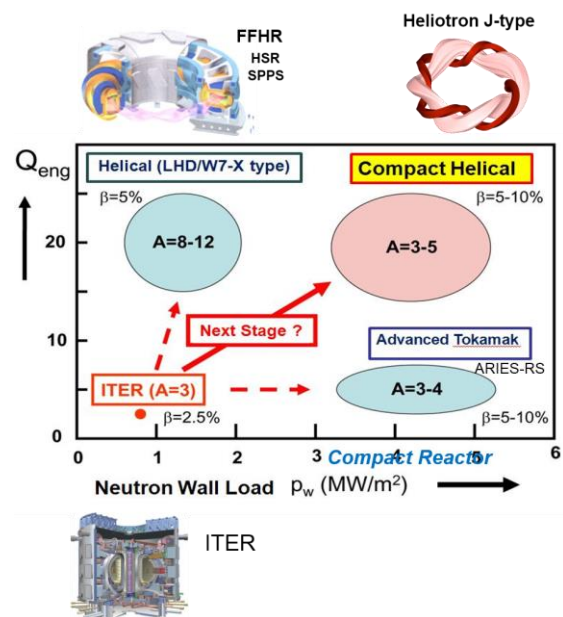
2.1.1. Heliotron J 装置によるプラズマ閉じ込めの高性能化

(粒子エネルギー研究分野、プラズマエネルギー研究分野
複合系プラズマ研究分野、センター附属研究分野)

2.1.1.1. 背景

エネルギー理工学研究所では、京都大学において独自に創案されたヘリオトロン閉じ込め磁場配位（ヘリカル軸ヘリオトロン）を有するプラズマ実験装置 Heliotron J を用い、ヘリカル系閉じ込め磁場配位の最適化に向けた先進的磁場配位制御によるプラズマ閉じ込めの高性能化研究を推進してきた。研究所附属エネルギー複合機構研究センターの基幹装置研究、核融合科学研究所との双方型共同研究による全国共同利用・共同研究、さらには、核融合科学研究所国際共同研究拠点ネットワーク活動の一環としての研究を展開し、(1) トーラスプラズマ閉じ込めの総合的理解と、その学術的な普遍化への寄与（萌芽研究・要素研究）、(2) 立体磁気軸ヘリカル系の配位の新規性が生み出す新しい物理の探究、特に、閉じ込め改善と高ベータ化、高エネルギー粒子閉じ込め、ブートストラップ電流制御、ダイバータ基礎研究など、無電流プラズマ閉じ込めの改善に向けた中・小型装置の展開、(3) 未だ確立されていない先進ヘリカル炉の実現に求められる定常・高ベータ・コンパクトプラズマの生成・維持のための磁場分布制御の新手法の開拓、等の研究を推し進めている。

主たる成果としては、(1) 磁場配位制御による超音速分子ビーム (SMBI) や高強度ガスパフ (HIGP) を用いた高密度プラズマの生成と閉じ込め改善、(2) CXRS を用いた磁場に平行なプラズマフローや平行イオン粘性の実験的・理論的比較研究、(3) SX,BES, 磁気プローブアレイなどをを用いた高エネルギーイオン駆動 MHD 不安定性 (GAE、EPM) の実験的模式同定と理論シミュレーションとの比較研究、(4) 広帯域の背景揺動が高エネルギーイオン駆動 MHD 不安定性と結合した結果生じるバルクの揺動駆動（異常）粒子輸送の実験的評価、(5) ブートストラップ電流や電子サイクロトロン電流駆動 (ECCD) の物理過程の解明と高エネルギー粒子励起 MHD 安定化への適用、(6) ICRF 少数イオン加熱モード実験による高エネルギー粒子閉じ込めのバンピー磁場制御、(7) 高 β プラズマ生成を目的とした 2.45 GHz マイクロ波アシストによる NBI プラズマ着火研究、(8) 複数のトロイダル位置に設置された高速カメラ、静電プローブを用いた周辺部のプラズマ揺動、フィラメント構造などの特性研究など、ヘリカル軸ヘリオトロンの炉心プラズマ制御に向けて、着実な研究成果を積み上げてきた。



2.1.1.2. 成果の概要

2.1.1.2.1. 給気制御による Heliotron J プラズマの高密度化（発表論文 1）

Heliotron J 装置では、ヘリカル軸ヘリオトロン磁場配位の特徴を検証するために、プラズマの高 β （あるいは高密度）化が重要な鍵となっている。固体ペレットに代わる高密度化に向けた給気制御法として SMBI 法を、ヘリカル系装置としては初めて Heliotron J へ適用した。従来のガスパフ法では、プラズマ周辺領域での過剰な中性ガスによるエネルギー損失のため高密度領域で蓄積エネルギーの低下が見られたが、SMBI 法により閉じ込め劣化のない高密度プラズマ生成に成功した。同時に、HIGP 法を開発し、 10^{20}m^{-3} を越える高密度プラズマの生成にも成功した。

2.1.1.2.2. Heliotron J SMBI プラズマにおける AM 反射計を用いた電子密度分布挙動解析（発表論文 2）

SMBI によって閉じ込めが改善した Heliotron J プラズマの電子密度分布を、マイクロ波 AM 反射計を用いて計測した。通常のガスパフ粒子供給よりもプラズマ内に深く粒子を供給する SMBI パルスでは、入射直後から平均電子密度が増大するとともに、電子密度分布が急激にピークすることを明らかにした。Langmuir プローブで計測した周辺電子密度は低下すること、また、軟 X 線分布はピークしており、反射計による計測結果と矛盾しない。この結果は、SMBI による粒子閉じ込め・輸送の改善がプラズマ蓄積エネルギーの増大と関係していることを示唆している。

2.1.1.2.3. トロイダルミラーリップルに対するプラズマ回転速度の応答と平行粘性に関する研究 (発表論文 3)

Heliotron J では磁場のフーリエ成分を制御することで、トロイダルリップルを変化させることができる。実験的にトロイダルミラーリップルを変え、磁場に平行方向のプラズマ回転速度の応答を調べたところ、プラズマ中心部ではリップル強度の増加に対してプラズマ回転速度の低下が観測された。一方で、周辺部では回転速度はリップル強度に対して鈍感であった。中心部における回転速度の応答の要因の一つとして、新古典平行粘性の増加が予想される。

2.1.1.2.4. 低磁気シアヘリカルプラズマにおける高速イオン励起 MHD 不安定性の特性研究 (発表論文 4)

先進ヘリカルプラズマにおける高速イオン励起 MHD 不安定性を先駆的に調べる目的で、Heliotron J において高速イオン励起 MHD 不安定性を実験的・数値解析的に調べた。実験結果とシアアルヴェンスペクトル計算に基づく数値解析との比較により、NBI プラズマで観測される高周波の MHD 不安定性は大域的アルヴェン固有モード (GAE) であると同定した。また、その回転変換依存性を調べ GAE の特性を明確化した。加えて、装置ならびプラズマパラメータがほぼ等しく、且つ、回転変換のみが大きく異なるスペイン CIEMAT 研究所の TJ-II 装置において同様に研究を行い、低磁気シア・低トロイダル周期数を有する先進ヘリカルプラズマでは、基本的に GAE が問題であり、且つ、回転変換が高くなるとヘリシティ誘起 AE (HAE) も問題となることを示した。

2.1.1.2.5. 高エネルギー粒子駆動不安定性が周辺プラズマに与える影響 (発表論文 5)

中性粒子ビーム加熱プラズマにおいて、高速イオン励起不安定性が背景揺動や周辺ポテンシャル構造に対して影響を与えていることをプローブ計測によって見出した。バイコヒーレンス解析や、エンヴェローブ解析をプローブ信号に適用することで、高速イオン励起不安定性が背景の広帯域揺動および揺動駆動粒子束に影響していることを明らかにした。また、径方向アレイプローブを開発し実際の計測に適用、高速イオン励起不安定性に起因して周辺ポテンシャルおよび電場構造が変化していることを確認した。この応答は、イオン飽和電流の応答とビーム放射分光計測の解析結果から、高速イオンの径方向輸送に起因する現象であると考えられる。これらの結果は、背景揺動への非線形的な影響あるいは電場構造の変化によって、高速イオン励起不安定性がバルクプラズマの閉じ込め特性に影響を与える可能性を示唆している。

2.1.1.2.6. ECCD に対する捕捉粒子の影響と高速イオン励起 MHD 不安定性の安定化 (論文 6)

第 2 高調波 ECCD の特性を調べ、磁場リップルの山に近い位置での吸収の場合に最大 EC 駆動電流が得られた。捕捉粒子効果が含まれる平行運動量保存モデルを用いたレイトレーシング計算コード TRAVIS により評価された EC 駆動電流は実験値と定量的に一致した。 $N_{||}$ と B に対する依存性も再現し、Fisch-Boozer 効果と Ohkawa 効果を明らかにした。また、ECCD を用いて高速イオン励起 MHD 不安定性の一つである Energetic Particle Mode (EPM) の安定化に成功した。安定化には磁気シアが関連している可能性が高く、磁気シアに安定化の閾値があることを示唆する実験結果が得られた。

2.1.1.2.7. 高速イオンの生成と閉じ込め (発表論文 7)

核融合炉での加熱源として重要な α 粒子を模擬し、ヘリカル軸ヘリオトロン配位での高速粒子閉じ込めを研究するため、少数イオンモードで ICRF 加熱を行い高速イオン生成・閉じ込めとバルクイオン加熱について調べた。中心加熱の条件下であっても、磁場配位によっては高速イオンのエネルギースペクトルについて、磁場配位によっては計測位置の依存性が大きいことが確認され、閉じ込めを議論する場合、トロイダル面の広範囲での計測が不可欠であることが分かった。また、モンテカルロ計算によっても、トロイダルミラーリップルに対するエネルギースペクトル変化について再現することができた。

2.1.1.2.8. 非共鳴マイクロ波アシストによる新しい NBI プラズマ着火法の開発 (発表論文 8)

非共鳴マイクロ波を入射することでプラズマを予備電離させ、その後、中性粒子ビーム (NBI) によるプラズマ加熱を行いプラズマを着火する新しい着火法を開発した。特徴として、主加熱パワーと比べて 1/100 以下の低パワーでの予備電離が可能であり、高パワーの電子サイクロトロン波加熱等を必要としないこと、磁場強度によらないプラズマ着火が可能であることが挙げられる。本手法の開発により運転領域の拡大が可能となり、今後建設が予定される大型装置において加熱パワーの低減やプラズマ着火装置の簡略化が期待される。

(発表論文)

- 1) T. Mizuuchi et al., "Effects of supersonic molecular beam injection (SMBI) on Plasma Performance in Heliotron J", *Contrib. Plasma Phys.* 50 (2010) 639–645.
T. Mizuuchi, et al., "Gas fueling effect on plasma profile in Heliotron J", *J. Nucl. Mater.*, in press (Available online 17 Jan., 2013).
- 2) K. Mukai, K. Nagasaki, et al., "Electron density profile behavior during SMBI measured with AM reflectometer in Heliotron J plasma", *Plasma Fus. Res.*, 6 (2011) 1402111
- 3) H.Y. Lee, S. Kobayashi et al., "Effect of magnetic field configuration on parallel plasma flow during neutral beam injection in Heliotron J", *Plasma Phys. Control. Fusion* 55 035012 (2013).
H.Y. Lee, S. Kobayashi et al., "Magnetic field configuration dependence of momentum transport in Heliotron J", 39th EPS Conf. Plasma Phys., Stockholm, Sweden, July 2-6, 2012, P2.031.
- 4) S. Yamamoto, et al., "Studies of energetic-ion-driven MHD instabilities in helical plasmas with low magnetic shear", 24th IAEA Fusion Energy Conference, San Diego, USA, Oct. 8-13, 2012, EX/5-2
- 5) S. Ohshima, et al., "Edge Plasma Response to Beam-driven MHD Instability in Heliotron J", 24th IAEA Fusion Energy Conference, San Diego, USA, Oct. 8-13, 2012, EX/P4-17
- 6) K. Nagasaki, et al., "Influence of trapped electrons on ECCD in Heliotron J", *Nucl. Fusion* 51 (2011) 103035.
K. Nagasaki, et al., "Stabilization of Energetic-Ion-Driven MHD Mode by ECCD in Heliotron J", 24th IAEA Fusion Energy Conference, San Diego, USA, Oct. 8-13, 2012, EX/P8-10.
- 7) H. Okada, et al., "Numerical analysis of ICRF minority heating in Heliotron J", *Plasma Fus. Res.* 6 (2011) 2402063.
- 8) S. Kobayashi, K. Nagasaki, et al., "Plasma startup using neutral beam injection assisted by 2.45 GHz microwaves in Heliotron J", *Nucl. Fusion*, 51, 62002 (2011).

2.1.1.3. 意義 (学術的・社会的重要性)

Heliotron J 装置は、エネルギー複合機構研究センターの基幹装置としてのセンター共同研究における先進プラズマエネルギー研究領域の開拓・推進とともに、京都大学における工学部電気電子工学科の学生および大学院エネルギー科学研究科の修士・博士課程の学生のプラズマ教育に重要な位置づけをもっており、これらの役割と整合させつつ、第2期中期計画期間における双方向型共同研究の全国的な展開および国際拠点共同研究に寄与している。無電流・磁気井戸・立体磁気軸ヘリカル系の柔軟な磁場構造の特徴を活かして、LHD と相補的なヘリカル系プラズマ閉じ込めの高性能化に向けた実験的・理論的研究展開が可能である。例えば、周辺プラズマ閉じ込めの微視的・巨視的不安定性の制御の方法論の研究 (特に周辺磁気井戸効果)、高エネルギー粒子閉じ込めの改善の研究、コンパクト・高ベータ・ヘリカル炉の可能性に向けた実験データ基盤の確立などがある。今後、新概念開発研究として、LHD との相補的課題の解明とともに、これまで実験的に検証された基本性能を高性能化してゆくことが可能となるだろう。トロイダルプラズマ物理の総合的な理解が一層深まり、定常ヘリカル系原型炉の高性能化に至る優れた展望が開けることが期待される。

2.1.1.4. 今後の計画

立体磁気軸ヘリカル系 Heliotron J の閉じ込め改善の原理 (磁場フリー成分の適切な調整を用いたドリフト軌道改善および MHD 磁気井戸安定化) は、LHD の閉じ込め改善の原理である磁気軸シフトを用いたドリフト軌道改善および MHD 磁気シア安定化とは極めて対照的かつ相補的な原理である。この原理の有効性を実験的に確実なものとして提示するためには、閉じ込め高性能化の一段の発展を実現する運転領域 (高密度化) の実験的探索と高ベータ領域の MHD 研究が不可欠となる。従って、今後の計画としては、立体磁気軸ヘリカル系に特徴的な 3 次元磁場の効果、特に、輸送と安定性の物理解について学術的な展開を強化・推進することを予定している。プラズマの径方向輸送の詳細な解析を行うことを目的に、YAG トムソン散乱計測、遠赤外干渉計、多チャンネル SX アレイ、多チャンネル静電プローブ、高速イオン損失プローブ、2 次元 BES、密度揺動計測反射計などのプラズマ分布計測システムの導入を現在進めている。加熱システムとしては、ECH/ECCD システムのアップグレードによるパワー変調制御や電子バースタイン波を用いた高密度電子加熱を行なってゆく予定である。一方、LHD 型ヘリカル系原型炉のダイバータ設計では、ダイバータデタッチメントを含むダイバータプラズマの熱・粒子制御の研究が重要な課題となる。境界プラズマ制御の観点から、周辺磁気井戸による境界プラズマ閉じ込めの研究、SOL のエルゴディック層における不純物を含む輸送の研究に取り組むとともに、将来的には、ヘリカル・ダイバータと磁気島ダイバータの性能比較研究等に取り組むことを計画している。

2.1.2. 核融合炉材料のナノ・マイクロスケールメカニクスに関する研究

(原子エネルギー研究分野、エネルギー基盤材料研究分野)

2.1.2.1. 背景

先進プラズマエネルギーの利用において、優れた耐照射性を有する革新的な材料開発は重要であり、そのための基盤となる学理の構築を進める必要がある。一方、原子力エネルギーについては、福島第一原子力発電所の事故を受けて、エネルギー戦略の動向に関わらず、安全性に関連する研究は益々重要になっている。研究所の基幹装置のひとつであるイオン加速器 DuET は、これらのシステムにおける中性子照射損傷を模擬可能な装置であり、ODS 鋼や SiC 材料の開発研究に用いられる他にも、多くの共同利用実績を有している。しかし、イオン加速器による照射損傷領域は、材料表面から数 μm 程度に留まるため、ナノ・マイクロスケールの材料強度特性を高度かつ高精度に評価する手法の開発が求められている。

2.1.2.2. 成果の概要

本研究では、ナノインデンテーション法によるイオン照射材の強度特性評価法を新たに開発した。本手法は、ナノ・マイクロスケールのメカニクスに基づき、イオン照射領域のナノインデンテーション硬さからバルク材相当の硬さを実験的に導出可能な画期的な手法である(発表論文 1)。本手法は、鉄鋼材料のみならずジルコニウム材料(発表論文 2)等の幅広い先進プラズマ・量子エネルギー材料に適用可能であり、関連する分野において注目を集めており、共同利用の拡充にも貢献している。

(発表論文)

- 1) R. Kasada, Y. Takayama, K. Yabuuchi, A. Kimura, "A new approach to evaluate irradiation hardening of ion-irradiated ferritic alloys by nano-indentation techniques", Fusion Engineering and Design, 86 (2011) 2658-2661.
- 2) N. Oono, R. Kasada, T. Higuchi, K. Sakamoto, M. Nakatsuka, A. Hasegawa, S. Kondo, H. Matsui, A. Kimura, "Irradiation hardening and microstructure evolution of ion-irradiated Zr-hydride, Journal of Nuclear Materials 419 (2011) 366-370.

2.1.2.3. 意義(学術的・社会的的重要性)

核融合・原子力材料の照射硬化は、照射脆化に関係する重要な材料劣化現象であり、高精度な脆化予測や革新的な耐照射性材料の開発のためにも、機構論的な解明が求められる。本研究において開発したナノインデンテーション法の解析法は、従来定性的な評価に留まっていたイオン照射材料の強度特性評価について、機構論的かつ実用的にバルク特性として定量評価可能な手法に昇華させた応用研究として意義がある。

2.1.2.4. 今後の計画

ナノインデンテーション法における更に微小な(Real-Nano)変形挙動に着目し、イオン照射材料の臨界せん断応力に対する照射影響を直接測定する実験研究に展開している。同じくナノスケールを取り扱う分子動力学法による転位-照射欠陥相互作用のシミュレーションと直接結び付けることも可能になり、先進プラズマ・量子エネルギー材料の照射硬化現象のマルチスケールモデルの構築に寄与できると考えられる。

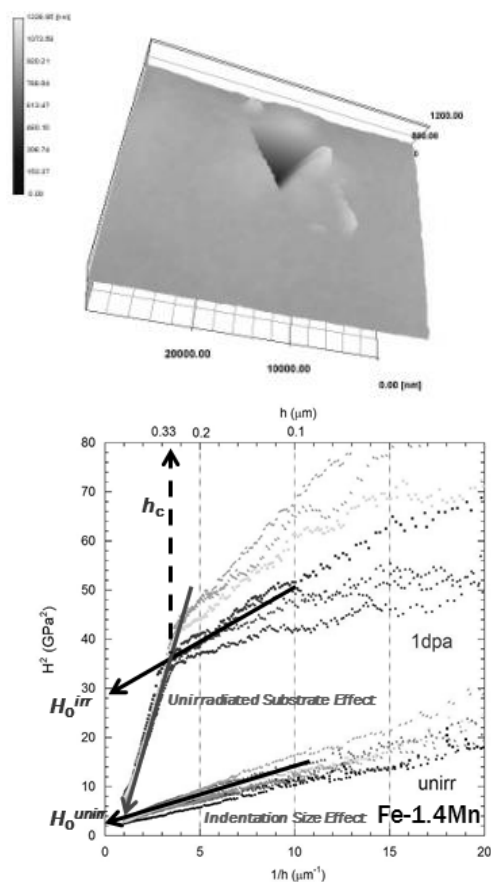


図1 (上) ナノインデンテーションによる圧痕のAFM像と(下) ナノインデンテーション硬さからバルク相当硬さを求めるための解析法

Kimura, "Irradiation hardening and microstructure evolution of ion-irradiated Zr-hydride, Journal of Nuclear Materials 419 (2011) 366-370.

2.1.3. 慣性静電閉じ込め核融合中性子源の応用

(粒子エネルギー研究分野)

2.1.3.1. 背景

爆薬や違法薬物等の探知技術の研究開発において専ら用いられてきたビーム対固体ターゲット型の中性子管と比較して、慣性静電閉じ込め (IEC) 核融合中性子源はプラズマ中のガス分子をターゲットとしている点に大きな特徴があり、そのため大電力投入が可能で、D-T 核融合反応のおよそ 1/100 の断面積しかない D-D 反応でも、D-T 中性子管と同等以上の中性子出力が既に得られている。また、長時間連続の定常運転が可能であることや、ターゲット交換などのメンテナンスが不要であることも実用上大きな利点であり、小型中性子発生装置としては後発ではあるが十分な競合性を有するため、我々の IEC 中性子源が認識され注目を集め始めている。

2.1.3.2. 成果の概要

多段電圧導入端子 (発表論文 1) などの技術開発により従来の 10 倍の DD 中性子発生率向上を達成して、パルス IEC 中性子源を用いた特定核物質 (^{235}U , ^{239}Pu) の探知技術の開発を進めた。検査対象である海運コンテナにパルス中性子線を照射し、隠匿された特定核物質内に誘起された核分裂反応で発生する中性子を計測する (右図)。中性子による特定核物質探知については多くの先行研究が行われてきたが、最大の課題は、核物質から発生する二次中性子と、照射したプローブ中性子とを如何に区別して計測するかにある。本研究では、DD 核融合で発生する 2.45 MeV の単色中性子線をプローブとして核分裂反応で発生する 2.45 MeV 以上の二次中性子を計測する方法、および、核分裂連鎖反応に伴う中性子放出に特有の統計的特徴を捉える遅発中性子雑音解析法と呼ばれる新たな手法を開発した (発表論文 2)。

一方、既設の定常 IEC 中性子源を用いて、中性子ラジオグラフィへの適用を実験的に検討し、必要な撮像時間や撮像可能な対象物の厚さの制約等の課題を明らかにした。この定常 IEC 中性子源は、医療分野等の共同利用・共同研究にも供している。

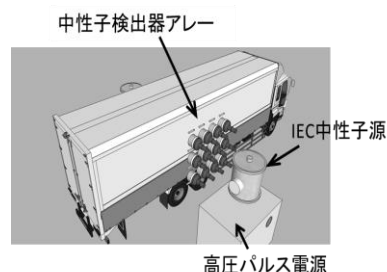


図 海運コンテナ内に隠された特定核物質の探知システム

(発表論文)

- 1) K. Masuda et al., “Numerical Study of Ion Recirculation in an Improved Spherical Inertial Electrostatic Confinement Fusion Scheme by Use of a Multistage High-Voltage Feedthrough”, Fusion Sci. Tech. 60-2 (2011) 625-629.
- 2) H. Ohgaki et al., “Non-Destructive Inspection System for Special Nuclear Material using Inertial Electrostatic Confinement Fusion Neutrons and Laser Compton Scattering Gamma-rays”, Proc. 12th IEEE Intl. Conf. Tech. Homeland Security (2012) 666-671.

2.1.3.3. 意義 (学術的・社会的的重要性)

海運コンテナに隠された特定核物質を、非開封、短時間で物流を妨げることなく探知する検査装置の開発は、核テロ対策のための喫緊の課題となっており、開発した 2 つの探知技術はいずれも、このような検査装置に必要な探知能力を有する。加えて、トリチウムを用いない DD-IEC 核融合中性子源の安全性や可搬性を活かし、検問等でも利用可能な移動式の検査装置 (特願 2012-191500) が実現すれば、核テロを未然に防ぐために極めて有効である。ラジオグラフィについては未だ基礎的な段階にあるが、専ら用いられている原子炉や加速器などの大型中性子源施設と比較して極めて小型、安価で簡易な中性子ラジオグラフィ撮像装置 (特願 2012-25129) の可能性を示すことができた。

2.1.3.4. 今後の計画

開発した特定核物質探知技術を用いた検査装置の実用化を目指す。また、核融合で発生する特徴的な単色中性子線の利用技術の研究開発を引き続き進め、核融合中性子利用研究の場を拡大したい。そのため、トリチウムを用いるため可搬性は失われるものの 2 桁高い出力が得られる DT 運転に向けた研究開発も進めている。ラジオグラフィについては、IEC 中性子源が同時に硬 X 線も発生する特徴を活かし、中性子・X 線同時ラジオグラフィ撮像によって Li や B などの特定の元素に対するコントラストを向上させることが出来れば、より応用範囲を拡大できる可能性がある。他に、 ^3He の枯渇に伴う代替中性子検出器の研究開発や、核融合発電に向けて計画されている大型装置における DD, DT 実験において必要となる計測機器開発のための較正用中性子源としての利用も提案していきたい。

2.1.4. 低圧力下における慣性静電閉じ込め核融合反応率の電流への非線形依存性

(粒子エネルギー研究分野)

2.1.4.1. 背景

慣性静電閉じ込め (IEC) 核融合も含めた既存の可搬中性子発生装置はいずれも、イオンビームとターゲット (IEC の場合にはガス) との衝突を利用しているため、ビーム電流に比例した出力しか得られない。このような従来のスキームから脱却し、投入電流の 2 乗に比例した飛躍的な高出力化が期待されるビーム対ビーム衝突反応の生起を目差し、環状イオン源を内蔵した IEC 装置を開発してきた。

2.1.4.2. 成果の概要

本方式 (右図) では、従来の構成のイオン源付き IEC における線形ビーム同士の衝突とは異なり、環状のイオン源から半径方向中心にイオンを集束するため、中心で高い電流密度が期待できる。また、イオン源として直流マグネトロン放電を採用したことで、数 mPa の低圧力下で高い電流対圧力比が可能となった。

この環状イオン源駆動方式の装置において、中性子発生率の圧力・電流依存性を調べたところ、低圧力・高電圧の条件下で核融合反応率の電流依存性が 1.7 乗以上に遷移した (発表論文 1)。さらに、一旦非線形性を見せた電流依存性は、運転を続けると数日かけて徐々に線形に遷移するが、その後印加電圧を高めると再び非線形性を示すことも判明した (発表論文 1)。非線形から線形への長時間かけての遷移においては同時に核融合反応率が上昇していることから、電極への入射イオンの吸蔵によりビーム対ターゲット反応の寄与が徐々に増加して線形に移行したとも考えられ、このような効果の解析も試みている (発表論文 2)。

(発表論文)

- 1) K Masuda et al., “Cathode grid current dependence of $D(d, n)^3He$ reaction rates in an inertial electrostatic confinement device driven by a ring-shaped magnetron ion source”, *Plasma Phys. Control. Fusion* 52 (2010) 95010.
- 2) J. Kipritidis et al., “Modeling the time-variation of beam-grid fusion reaction rates in a RS-MIS IEC device”, *Plasma Phys. Control. Fusion* 53 (2011) 45006.

2.1.4.3. 意義 (学術的・社会的的重要性)

1960 年代に Hirsch らの理論・数値解析研究の予測したビーム対ビーム衝突反応の実現と電流の 2 乗に比例した核融合反応率の向上を目的として、ガス分子との衝突荷電交換によるイオンビームの損失を低減するために低圧力・大電流動作を目指した様々な方式の装置開発が米・豪・韓・日の研究機関で進められてきたが、依然としてビーム対ガス衝突が圧倒的に支配的な状況にあった。ビーム対ビーム衝突反応率がビーム対ガス衝突反応率を上回るためには、極めて単純化して考えると、ビームの集束する中心におけるイオン密度が、ガス分子の密度を上回る必要がある。我々は、これまでに提案された構成のイオン源付 IEC 核融合装置ではこの条件の達成は困難であると考え、環状イオン源駆動型の新方式 IEC を提案し、初めて電流に非線形に依存する核融合反応率を達成した。

2.1.4.4. 今後の計画

前述のような小型中性子源としての応用の他に、陽子線源としての利用を含む中長期的な応用範囲拡大に向けては、核融合反応率に飛躍的な向上が必要である。そのようなブレークスルーを達成するには、一つには、初めて核融合反応率の非線形な電流依存性を示した環状イオン源を用いる本方式が有望であると考えている。

IEC 研究の分野においては、我々のグループは、前述のような中性子源としての応用研究のみならず、プラズマ中の空間電位分布や中性粒子エネルギー分布などの分光計測や放電シミュレーションコードの開発、D-D 及び D- 3He 核融合反応で発生する高エネルギー陽子の計測や、これを利用した核融合反応空間分布の同定などの基礎研究においても成果を挙げ、IEC 核融合研究の拠点の一つとして認識されている。これらの計測技術などのツールを利用して、本方式で見られた新奇な現象の機構解明を目指すと共に、D- 3He などの先進燃料も含む IEC 核融合プラズマの基礎的研究も引き続き推進する。

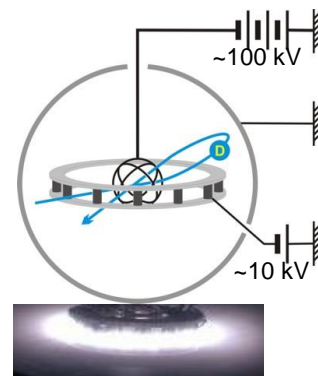


図 環状イオン源駆動型 IEC の模式図 (上) とマグネトロン放電の様子 (下)

2.1.5. ポーラス SiC 複合材料の開発

(複合機能変換過程研究分野)

2.1.5.1. 背景

CO₂ゼロエミッションを実現するエネルギーシステム構築のために、光・エネルギーナノサイエンス重点領域研究では、太陽エネルギーを中心とする自然エネルギーの高効率利用を目指している。そのためには、ナノサイエンスを基盤として新しい光エネルギーの効率利用を可能にする、ナノ物質の創生・探索およびそこにおける新しい光機能発現、さらにそれをエネルギー応用へと繋げてゆく道筋が必要となる。そこで、本研究では、ナノカーボン物質の一つであるカーボンナノチューブに着目し、その特異な光機能ならびに応用への研究を展開した。

2.1.5.2. 成果の概要

1000℃以上でも使える、新しいコンセプトの耐酸化・高靱性ポーラス SiC セラミックス複合材料を開発した。マトリックスは、液相焼結法、反応焼結法により形成した。ポーラス SiC を形成するために、気孔率に対応する余剰 C 粉末を含んだ状態でマトリックスを焼成し、高温大気化で脱炭処理を行うことにより、ポーラス SiC マトリックスを形成した。図 1 は液相焼結法で作製したポーラス SiC 複合材料の電子顕微鏡写真である。製造プロセスは非常に簡略化できると、材料間の特性のばらつきは小さい。従来の C 繊維や SiC 繊維を用いたセラミックス複合材料に比べて、構成要素が SiC のみなので、耐酸化特性をはじめとする耐環境特性が著しく向上し、1000℃を超える大気雰囲気においても、耐酸化被覆無しで強度劣化が無く、脆性的な破壊をせず靱性を示す。1100℃、100 時間の大気暴露後の材料に関しても、C 界面のような致命的な酸化による劣化は生じないため、300MPa 近い、健全な材料特性を維持した。

(発表論文)

- 1) 檜木達也、”高靱性多孔質炭化珪素複合材料の開発”、FINE CERAMICS REPORT, 30 (2012) 155-159.

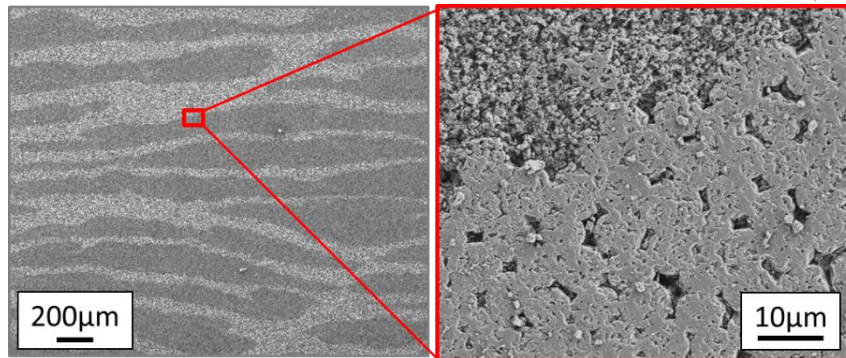


図 1 液相焼結法で作製したポーラス SiC 複合材料の走査電子顕微鏡写真

2.1.5.3. 意義 (学術的・社会的的重要性)

シンプルな製造方法が可能で歩留まりも著しく向上し、従来に比べ 1/10 程度のコストで作製することができる。航空・宇宙分野、エネルギー分野を中心に 5~20 年での応用が検討されている。

基本特許を取得し、JST のサポートにより国際出願 (特許出願番号 PCT/JP2011/76004) を行った。民間企業への独占ライセンス契約を結び実用化技術の開発を進めている。単独のライセンス契約の規模としては、平成 23 年度京都大学全体で首位である。本技術は化学工業日報、日刊工業新聞 (2 回) 報道されている。平成 24 年から 4 年間の大型の外部資金 (文科省原子力システム開発事業) 獲得にも繋がっている。

2.1.5.4. 今後の計画

本研究は、重点複合領域研究における先進エネルギー材料の開発の研究である。基本的な材料の概念は構築しているが、先進エネルギーシステムで求められる耐環境特性の向上は更に進めていく計画である。また、産学連携による開発技術の移転及び実用化を促進し研究成果を社会に還元することを目指している。

2.1.6. 核融合および先進原子力システム・材料統合研究

(エネルギー基盤材料研究分野。原子エネルギー研究分野)

2.1.6.1. 背景

スーパーODS 鋼の実用化においては、接合技術開発が課題となっている。ODS 鋼の場合、その高い性能を発現させている氧化物粒子の分散形態を変えないようにするため、材料を溶かして接合する、いわゆる「溶接法」を採用することができず、接合技術開発は重要かつ困難な課題とされている。また、核融合炉のダイバータ設計において、タングステン (W) をプラズマ対向材料とし、支持構造体として ODS 鋼を使用することが想定されているが、材料間の熱膨張係数が著しく異なり、W-ODS 鋼の異材接合もまた極めて困難な課題とされている。接合の問題は、素材のみならず、接合により組み合わせられて製作されるシステム構造体としての問題として捉える必要が有るため、核融合システム・炉材料インテグレーション (統合) に関わる重点領域研究と位置付けて実施した。

2.1.6.2. 成果の概要

ODS 鋼同士の接合方法として、固相拡散接合 (SSDB) (発表論文および摩擦攪拌接合 (FSW) を採択した。開発した SSDB 材の接合強度を評価した結果、図 1 に示すように、母材に匹敵する引張強度が得られ、ODS 鋼バルク材の接合技術開発に世界で初めて成功した (発表論文 1))。接合界面の組織に損傷は認められず、接合処理前の表面処理法の重要性が判明した。FSW 後の攪拌速度依存性を調べた結果、高速の場合、結晶粒組織の顕著な粗大化が認められたが、低速の場合は動的再結晶による結晶粒粗大化の抑制されることが判明した。この粗大化は、実用化において大きな障害にはならない程度であり、攪拌速度の低下など、改良の余地がまだ残されている (発表論文 2))。接合材の評価に合わせ、ODS 鋼自体の高性能発現機構解明のため、高分解能 FE-TEM を用いて、粒子/母相界面の整合性を定量的に評価し、整合性が酸化物の種類のみならず、粒子サイズに依存することを初めて見出した (発表論文 3))。

W/ODS 鋼の異材接合には、SSDB および液相拡散接合 (TLPB) を採用した結果、TLPB 法において 300MPa の高い接合強度が得られた。SSDB 法では、接合時の熱膨張差が接合終了後の冷却時に異材界面間に大きな熱応力を発生させ、微小亀裂を生じさせてしまうことが判明した (発表論文 4))。現在、インサート材に変態超塑性を示す材料を用いることを検討しており、さらに接合強度の向上を目指している。

(発表論文)

- 1) S.H. Noh, R. Kasada, A. Kimura, "Solid-state diffusion bonding of high-Cr ODS ferritic steel", *Acta Materialia* 59(8) (2011.05) 3196-3204.
- 2) S.H. Noh, R. Kasada, A. Kimura, S.H.C. Park, S. Hirano, "Microstructure and mechanical properties of friction stir processed ODS ferritic steels", *J. Nucl. Mater.* 417 (2011.10.01) 245-248.
- 3) P. Dou, A. Kimura, T. Okuda, M. Inoue, S. Ukai, S. Ohnuki, T. Fujisawa, F. Abe "Polymorphic and coherency transition of Y-Al complex oxide particles with extrusion temperature in an Al-alloyed high-Cr oxide dispersion strengthened ferritic steel", *Acta Materialia* 59 (2011) 992-1002.
- 4) N. Oono, S.H. Noh, N. Iwata, T. Nagasaka, R. Kasada, A. Kimura, "Microstructures of brazed and solid-state diffusion bonded joints of tungsten with oxide dispersion strengthened steel", *J. Nucl. Mater.* 417 (2011.10.01) 253-256.

2.1.6.3. 意義 (学術的・社会的的重要性)

システム・材料インテグレーション研究は、システム設計と材料開発を統合的に論じながら進めて行くことで、システム構造体の最終形としての寿命評価につながる。接合技術開発は、その根底になるべき材料の技術課題であり、素材開発から実用化開発に至る重要なマイルストーンとなる。本研究により、ODS 鋼の実用化開発研究が格段に進展すると期待できる。

2.1.6.4. 今後の計画

ODS 鋼の SSDB に関しては、大型化対応技術開発を残すのみであり、これは産業界マターとなる。FSW については、攪拌速度などの接合条件に改良の余地が残されている。W/ODS 鋼の異材接合技術開発については、ITER への適用を目指し、開発研究を加速させる。

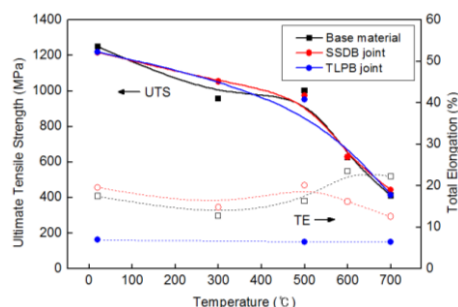


図 1：拡散接合 ODS 鋼材の引張特性

2.1.7. 先進原子力・核融合エネルギーシステムの安全に関する研究

(エネルギー基盤材料研究分野)

2.1.7.1. 背景

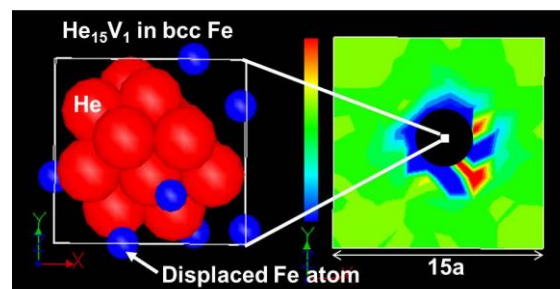
原子力エネルギーシステムの安全性を向上させるには、安全に配慮した設計を行うだけでは不十分である。運転開始後の保全活動を継続的に実施することが何よりも大切である。とはいえ、部品などを定期的に交換すれば安全性が維持されるわけではなく、果たしてその保全行為がどれくらいシステム安全に効果的かを考えつつ、その保全重要度に応じた対応が必要になる。これを実現するためには、例えばシステムの経年化対策（または老朽化対策）に関しては、材料劣化予測の手法開発が重要な技術となる。こうしたエネルギーシステムの保全計画については、設計・建設の段階から考慮しておくことが重要であることから、重点研究として進めている先進原子力や核融合炉などの基盤エネルギーの開発研究においても、今の段階からしっかりと検討しておくことが肝要である。

2.1.7.2. 成果の概要

原子炉・核融合炉環境で使用される材料の劣化予測手法を開発するのに必要な照射下材料内のミクロ構造発達に関するモデル化研究を実施した。第一原理量子計算、分子動力学法、モンテカルロ法など種々の計算機シミュレーション手法を相補的に活用することにより、マルチスケールモデリング手法とよぶ特色ある手法を開発した。そして、材料照射効果の照射場による違いを理論的に説明しうるモデルを構築した。従来曖昧な理論的扱いがなされていた核生成プロセスを適切にモデル化することにより、欠陥集合体形成の照射場依存性（照射損傷速度（dpa/s）依存性）を明らかにした（発表論文1）。こうした研究は、既存の核分裂炉照射から得られる材料照射データをもとに、未だ存在しない核融合炉環境下での材料挙動の予測に有効であるため、核融合炉等の材料設計や保全最適化の検討に重要な知見を与える。また、原子炉核燃料被覆管材料の酸化プロセスの原子レベルシミュレーションを行い、現象論的に得られている酸化挙動を理論的に説明することに成功した（発表論文2）。これにより、酸化プロセスの予測性の向上が期待され、原子炉保全の最適化にとても有用である。

(発表論文)

- 1) Y. Yamamoto, J. Yoshimatsu, K. Morishita, “Damage rate dependence of defect cluster nucleation in tungsten during irradiation”, Journal of Nuclear Materials (in press, 2013).
- 2) Yasunori Yamamoto, Kazunori Morishita, Hiroto Iwakiri, Yasunori Kaneta, “Stress dependence of oxygen diffusion in ZrO₂ film”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B303, (2013) pp. 42-45.



2.1.7.3. 意義（学術的・社会的重要性）

学術的には、材料挙動の時間的空間的マルチスケール性を考慮したモデルを構築するという点に意義がある。種々の時間・空間スケールをシームレスにつなぐこと、もしくは連結性が悪い場合の予測精度を明らかにしておくことが重要である。社会的には、こうした研究の結実として、原子炉（や核融合炉）の安全性向上につながるという点に意義がある。地震予測、津波予測、SPEEDIによる放射能拡散予測など、予測研究は、社会の中でも重要であり、かつ、実用化に向けて解決すべき種々の問題が存在することが顕在化している。

2.1.7.4. 今後の計画

材料挙動予測研究を通じて原子炉・核融合炉の保全の高度化に寄与すること。また、原子炉・核融合炉の安全研究を通じて、住民が安心するシステム（ハード、ソフト、運用ルール）の構築に係る検討に寄与すること。

2.2. 光・エネルギーナノサイエンス重点複合領域研究

| | | |
|-------|---------------|-------------------------|
| 関連分野： | エネルギー生成研究部門 | 量子放射エネルギー研究分野 |
| | エネルギー機能変換研究部門 | 複合機能変換過程研究分野 |
| | | レーザー科学研究分野 |
| | エネルギー利用過程研究部門 | 複合化学過程研究分野 |
| | | 分子ナノ工学研究分野 |
| | | 生物機能化学研究分野 |
| | | エネルギー構造生命科学研究分野 |
| | | 附属エネルギー複合機構研究センター附属研究分野 |

光エネルギーは様々な基盤研究、応用研究、さらには産業界応用など、幅広い分野で利用可能なエネルギーの1つの形態であり、分野融合・新領域研究の発展が望まれる。

自由電子レーザーの開発では、施設の小型化および中赤外領域の自由電子レーザーの大幅な安定化を達成し、単一パルス計測法と波長揺らぎ計測法の開発研究を実施した。また、フェムト秒レーザー光を用いて、全く新しいレーザー加工技術の開発研究を実施し、その有効性を示した。一方、レーザー応用として、十分希薄なプラズマを水中に生成させる方法を開発し、レーザーアブレーションを用いた水中固体表面のその場元素分析法として実用化技術開発に寄与した。

太陽電池材料の開発研究においては、その利用が期待されているグラフェンナノリボンを基板上に大量合成する手法を開発した。基礎、応用の両面で大きなインパクトと研究投資の加速が期待される。また、ナノカーボン物質の一つであるカーボンナノチューブに着目し、その特異な光機能ならびに応用への研究を展開した結果、カーボンナノチューブでは荷電励起子が室温でも安定に存在することを世界に先駆け実験的に示した。

ナノバイオ関連研究としては、DNA 結合性タンパク質を固定化するためのアダプターとして利用することで、簡便かつ高効率に目的タンパク質を DNA ナノ構造体の任意の場所に配置することが可能となった。また、RNA アプタマーとプリオンタンパク質の複合体に関し、NMR 法を用いて立体構造の決定を行い、タンパク質捕捉機構を相互作用エネルギーの観点から解明し、さらに同アプタマーがプリオンタンパク質の蓄積を阻害する事を神経細胞を用いて実証した。

多孔質シリコン内の白金の電析反応に関する研究では、シリコン電極表面を疎水性有機分子で修飾し、負水和を示す十分大きな白金錯イオンを用いる表面誘起相転移方法により、ナノ空間内化学反応を劇的に加速する方法を開発した。

「光・エネルギーナノサイエンス」複合領域研究は、光学とナノ構造材料化学およびナノバイオ領域の連携協力による新領域研究へと展開しつつある。太陽エネルギー関連の分散型エネルギーとして位置付け、当該研究分野の先端的な研究拠点形成に向けた活動を展開している。

以下に、平成 22-24 年度の当該重点複合領域研究成果の概要を述べる。

2.2.1. 自由電子レーザーの発生および利用に関する研究

(量子放射エネルギー研究分野)

2.2.1.1. 背景

本重点領域研究では、光が本来秘めている未知の可能性を開拓することを目的として、これまでにない機能を備えた光源の開発・利用、光反応ダイナミクスの解明などを通して、光エネルギー利用の飛躍的高度化を目指している。特に小型加速器を用いた自由電子レーザー光のような、高出力で広範囲での波長可変レーザーは、エネルギー材料開発等に貢献が可能と考えられ、所内外の太陽エネルギー関連研究者に、安定で高性能なレーザー光を開発・供給する事が重要である。

2.2.1.2. 成果の概要

本研究所で開発してきた、中赤外自由電子レーザーを安定して発振させ、それを利用した応用研究を進めることを目標とし、自由電子レーザー装置の基盤技術開発研究および自由電子レーザーを利用した試験研究を実施した。

熱陰極高周波電子銃を用いることで自由電子レーザー施設の小型化を実現できた反面、陰極への戻り電子による過熱現象に伴うビームエネルギー不安定性が安定発振の妨げとなっていた。そこで、陰極材料の最適化¹⁾、空洞共振周波数の調整によるビームエネルギー補償法の開発を実施し、中赤外領域の自由電子レーザーの大幅な安定化を達成した。これにより、自由電子レーザーを利用した応用研究の実施が本格的に可能になり、外部ユーザーによる利用研究や、自由電子レーザー照射による高調波発生の研究を実施した²⁾。

また、より長波長の THz 帯における加速器を用いた小型 FEL 増幅器の設計研究を進め、原理実証試験のための具体的な装置設計を完成させた³⁾。

(発表論文)

- 1) Mahmoud Bakr, R. Kinjo, Y.W. Choi, M. Omer, K. Yoshida, S. Ueda, M. Takasaki, K. Ishida, N. Kimura, T. Sonobe, T. Kii, K. Masuda, and H. Ohgaki “Back Bombardment for Dispenser and Lanthanum Hexaboride Cathodes”, Phys. Rev. STAB, V 14, June 2011 pp. 060708-1~060708-9
- 2) K. Yoshida, T. Sonobe, M. Bakr, T. Sakka, T. Sagawa, E. Nakata, T. Morii, T. Kii, K. Masuda and H. Ohgaki, “Material Analysis Laboratory in KU-FEL, Kyoto University”, Energy Procedia 9 (2011) 483 – 490; X. Wang, T. Nakajima, H. Zen, T. Kii, H. Ohgaki, “Single-shot spectra of temporally selected micropulses from a mid-infrared free-electron laser by upconversion”, Optics Letters 37 (24), 5148-5150(2012); Y. Qin, Heishun Zen, Xiaolong Wang, Toshiteru Kii, Takashi Nakajima, and Hideaki Ohgaki, “Pulse duration and wavelength stability measurements of a midinfrared free-electron laser”, OPTICS LETTERS / Vol. 38, No. 7 / April 1, 2013, pp.1068-1070
- 3) Higashimura, K., Ueda, S., Yoshida, K., Kinjo, R., Bakr, M.A., Sonobe, T., Masuda, K., Kii, T., Ohgaki, H., “Short bunch effect on tabletop THz FEL amplification”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, Volume 637, Issue 1, Supplement 1, Pages S83-S86 (2010)

2.2.1.3. 意義 (学術的・社会的重要性)

中赤外から THz にかけての波長領域は、分子内の原子間固有振動から、複数の分子間の集団運動のエネルギーに対応している。従来は微弱な分光用光源を利用した分析研究が中心であったが、FEL による高強度の波長可変光は、これらの振動や運動を光量子エネルギーにより選択的に直接操作することを可能にし、光・エネルギーナノサイエンスにおける新しい研究手法を提供できる。特に、時間的に制御された量子放射光を複合照射することで、生化学反応とそれに伴う構造変化、機能発現についての本質的な理解につながる事が期待できる。

2.2.1.4. 今後の計画

中赤外自由電子レーザーの安定度向上を行い、利用研究の推進を図るほか、FEL と他の光源とを時間・空間・エネルギーを高度に制御して照射するシステムを構築することで、既存光源ではできなかった量子放射光を利用した新しい研究手法の開拓を目指す。

また、光源高度化としては、光陰極高周波電子銃の導入による光パルス間隔制御の自由度の向上、THz 領域の波長可変 FEL 増幅器の開発研究を行う。これらにより、生化学反応の動的な解析といった新しい応用研究の展開が期待できる。これらは現在、明確な予算が獲得できておらず、科研費申請等への予算申請を行い、計画を進める。

2.2.2. バルク超伝導体を用いたアンジュレータの研究

(量子放射エネルギー研究分野)

2.2.2.1. 背景

本重点領域研究では、光が本来秘めている未知の可能性を開拓することを目的として、これまでにない機能を備えた光源の開発・利用、光反応ダイナミクスの解明などを通して、光エネルギー利用の飛躍的高度化を目指している。特に放射光施設や自由電子レーザーに必須のアンジュレータ装置の高度化は、光源の小型化や放射ビームの高性能化が可能であり、様々なエネルギー関連研究に大きく貢献できる。このために、本分野では、バルク高温超伝導体を用いた、独自の短周期アンジュレータの開発を行っている。

2.2.2.2. 成果の概要

バルク超伝導体を用いることで、既存技術の限界を大きく超える強力な周期交代磁場生成を実現することを目標として、新型アンジュレータの開発研究を進めた。

新方式の周期磁場生成手法について、原理検証試験を行うことで、磁場生成メカニズムを明らかにした¹⁾。精密に制御された磁場分布の実現に向けて、磁場補正手法の提案および検証²⁾を行ったほか、精密な磁場分布計測システムの開発を実施した³⁾。さらに、20 K以下の極低温領域での性能予測を行い⁴⁾、さらに動作温度6 Kにおいて、既存の磁場生成方式を上回る強力な交代磁場の生成に成功した⁵⁾。

(発表論文)

- 1) T. Kii, R. Kinjo, M.A. Bakr, T. Sonobe, K. Higashimura, K. Masuda, H. Ohgaki, K. Yoshida, H. Zen, Conceptual Design of a Novel Insertion Device using Bulk Superconducting Magnet, Physica C: Superconductivity, 471, 21-22, (2011) 897-900.
- 2) R. Kinjo, T. Kii, M. A. Bakr, Y. W. Choi, K. Yoshida, S. Ueda, M. Takasaki, T. Sonobe, K. Masuda, K. Nagasaki, H. Ohgaki, "END FIELD TERMINATION FOR BULK HTSC STAGGERED ARRAY UNDULATOR", Proceedings of IPAC10, pp.3156-3158(2010).
- 3) M. Shibata, R. Kinjo, Y.W. Choi, M. Omer, H. Negm, T. Konstantin, K. Yoshida, T. Komai, K. Shimahashi, H. Imon, K. Okumura, H. Zen, T. Kii, K. Masuda, H. Ohgaki, "Development of a field measurement system for the Bulk HTSC SAU", Journal of Physics: Conference Series, vol.425, 32021(2013).
- 4) T. Kii, R. Kinjo, N. Kimura, M. Shibata, M. A. Bakr, Y. W. Choi, M. Omer, K. Yoshida, K. Ishida, T. Komai, K. Shimahashi, T. Sonobe, H. Zen, K. Masuda, and H. Ohgaki, "Low-Temperature Operation of a Bulk HTSC Staggered Array Undulator", IEEE TRANS. ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 22, NO. 3, JUNE 2012, 1051.
- 5) R. Kinjo, M. Shibata, T. Kii, H. Zen, K. Masuda, K. Nagasaki, H. Ohgaki, "Demonstration of a High-Field Short-Period Undulator Using Bulk High-Temperature Superconductor", Applied Physics Express, vol.6, 42701(2013).

2.2.2.3. 意義 (学術的・社会的重要性)

本研究では、バルク超伝導体を用いた新方式磁場生成原理を、77Kプロトタイプを用いた実証実験において検証し、更には極低温試験で世界最強アンジュレータ磁場の発生を達成しており、短周期アンジュレータの研究開発において、理論解析も含めて世界の最先端の位置にある。背景に述べたように、本研究は大型放射光施設並のハードX線を、中規模放射光施設において発生させ、放射光の利用を更に加速させるものであり、新方式の確立はエネルギー材料分野のみならず、様々な分野に貢献可能である。また、大型放射光施設においても、更なる高エネルギーX線発生と、その新たな応用分野の開拓にも寄与するものである。

2.2.2.4. 今後の計画

アンジュレータ実用機では、高精度の磁場分布整形技術開発が不可欠である。そこで、真空中での3次元精密磁場測定技術開発および磁場分布計算手法の高度化研究をおこなう。また、量産された個々の超伝導体の特性評価、特性制御技術開発を行う。さらに放射光施設への設置に不可欠な高輝度電子ビームとの相互作用や、放射光による発熱等、様々な課題をより詳細に研究する必要がある。このために、大型の予算を獲得する努力を行い、実機に近いプロトタイプを作製し、実用化を目指した研究を展開して行く。

2.2.3. ナノカーボン物質の光物性・機能とエネルギー応用の研究

(複合機能変換過程研究分野)

2.2.3.1. 背景

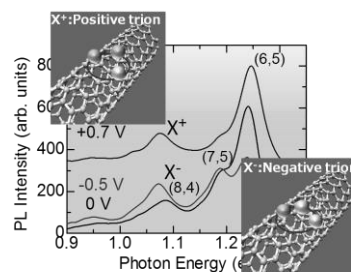
CO₂ゼロエミッションを実現するエネルギーシステム構築のために、光・エネルギーナノサイエンス重点領域研究では、太陽エネルギーを中心とする自然エネルギーの高効率利用を目指している。そのためには、ナノサイエンスを基盤として新しい光エネルギーの効率利用を可能にする、ナノ物質の創生・探索およびそこにおける新しい光機能発現、さらにそれをエネルギー応用へと繋げてゆく道筋が必要となる。そこで、本研究では、ナノカーボン物質の一つであるカーボンナノチューブに着目し、その特異な光機能ならびに応用への研究を展開した。

2.2.3.2. 成果の概要

カーボンナノチューブの光学的性質に深く関与する電子状態の理解は、様々な光物性・機能の発現や光エネルギーの高効率利用に向けた要となっている。それらは同時に、ナノカーボン物質における新しい光機能の発現、さらにそれらを利用した省エネルギーデバイス創成などに向けた課題でもある。我々は、キャリアをドーピングしたカーボンナノチューブにおいて、ドーパされたホールと光で生成された電子とホールの三つの粒子が束縛した状態である“正に帯電した荷電励起子”もしくは“正のトリオン”と呼ばれる状態（固体中での水素分子イオン様な状態）が安定に存在していることを見いだしており、これは、室温という非常に高い温度領域で安定に存在する初めての観測例である。さらに、電気化学ドーピングという手法を利用し、二つの電子と一つのホールが束縛した“負に帯電した荷電励起子”（負のトリオン）も、カーボンナノチューブでは安定に存在することを世界に先駆けて実験的に示すことができた（発表論文1）。また、上記以外にもキャリアドーピングされたカーボンナノチューブの特異な光物性（発表論文2）、さらには下記に詳しく述べるような太陽電池デバイス応用に向けた研究成果が得られた（発表論文3）。

(発表論文)

- 1) J.S. Park, Y. Hirana, S. Mouri, Y. Miyauchi, N. Nakashima, and K. Matsuda, “Observation of negative and positive trions in the electrochemically carrier-doped single-walled carbon nanotubes” *J. Am. Chem. Soc.* 134, (2012) 14461-14466.
- 2) S. Konabe, K. Matsuda, and S. Okada, “Suppression of exciton-electron scattering in doped single-walled carbon nanotubes” *Phys. Rev. Lett.* 109, (2012) [187403-1]-[187403-5].
- 3) D. Kozawa, K. Hiraoka, Y. Miyauchi, S. Mouri, and K. Matsuda, “Analysis of the photovoltaic properties of single-walled carbon nanotube/silicon heterojunction solar cells”, *Appl. Phys. Exp.* 5, (2012) [042304-1]-[042304-3].



2.2.3.3. 意義（学術的・社会的的重要性）

本成果では、様々な物質を通して室温という非常に高い温度で安定に存在する荷電励起子（トリオン）の初めての観測例であり、正と負に帯電した荷電励起子（トリオン）も、カーボンナノチューブでは安定に存在することを世界に先駆けて実験的に示すことができた学術的な意味をもつ。またこれと同時に、室温において動作しうるスピンを利用した省電力デバイス・量子デバイスに向けた第一歩であると考えられる。

2.2.3.4. 今後の計画

本研究を通して、ナノサイエンスを基盤として新しいエネルギーの効率利用を可能にするナノ物質として、ナノカーボン物質が高いポテンシャルを有していることが明らかとなった。今後は、スピンを利用した省電力デバイス・量子デバイスへの検討を行う事、高機能・高率なカーボンナノチューブをベースにした太陽電池の実現に向けた研究を推進していきたいと考えている。

2.2.4. KU-FEL を用いた中赤外超高速非線形光学に関する研究

(レーザー科学研究分野、量子放射エネルギー研究分野)

2.2.4.1. 背景

KU-FEL は本研究所で開発された中赤外域(5-15 μm)の波長可変自由電子レーザーである。これまで、量子放射エネルギー研究分野が中心となって FEL の開発・改良・整備がなされてきたが、レーザー科学研究分野との共同研究を平成 23 年度より開始し、中赤外超高速非線形光学の研究を進めている。ここでは、FEL スペクトルの単一パルス計測法および波長揺らぎ計測法の開発について紹介する。

2.2.4.2. 成果の概要

KU-FEL は中赤外域(5-15 μm)で発振する自由電子レーザーであり、1つのマクロパルス(約 1.5 μs)内に約 0.7ps のマイクロパルスが 350ps 間隔で数 1000 パルス発生する。KU-FEL の分光応用に先立ち、FEL スペクトルをまずは正確に知ることが重要であるが、中赤外用のアレイ型光検出器は時間応答性が悪いため、個々の FEL ミクロパルスのスペクトルを時間分解計測する事は到底無理である。そこで我々は、20 ns または 800 ps の外部レーザー(波長 1064 nm)を KU-FEL に時間同期させ、非線形光学結晶を用いて近赤外の和周波を発生させることにより、可視～近赤外用の安価な小型 CCD 分光器によって FEL ミクロパルススペクトルを時間分解計測するシステムを開発した(発表論文 1)。

また、干渉計の導入により FEL パルスの波長(周波数)情報を干渉フリンジの時間周期情報へと移行させることにより、干渉フリンジの明度変化から FEL の波長安定性を計測するスキームを独自に考案し、この方法を実際に用いる事によって KU-FEL の波長揺らぎが約 1.3%であることを実測した(発表論文 2)。

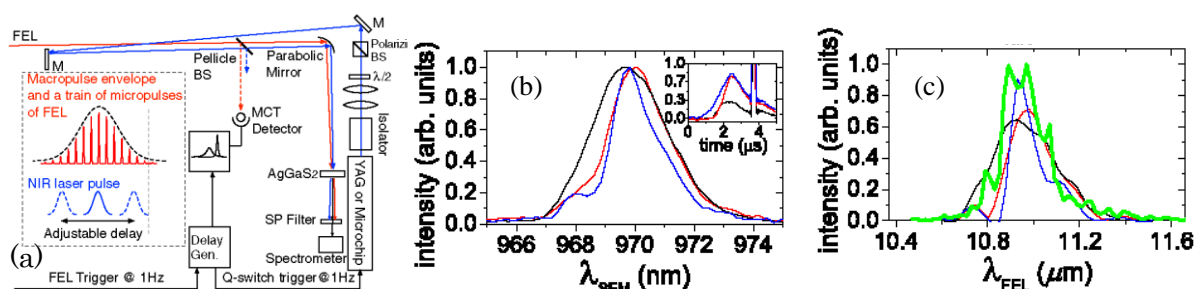


図. (a) 和周波発生に用いた光学系. (b) 得られた和周波光のスペクトル. (c) 逆変換によって得られた中赤外 FEL パルスのスペクトル.

(発表論文)

- 1) X. Wang, T. Nakajima, H. Zen, T. Kii, and H. Ohgaki, "Single-shot spectra of temporally selected micropulses from a mid-infrared free-electron laser by upconversion", *Optics Letters* 37, 5148 (2012).
- 2) Y. Qin, H. Zen, X. Wang, T. Kii, T. Nakajima, and H. Ohgaki, "Pulse duration and wavelength stability measurements of a midinfrared free-electron laser", *Optics Letters* 38, 1068 (2013).

2.2.4.3. 意義(学術的・社会的的重要性)

中赤外波長域では可視域ほど高速な光検出器がないなどの問題のため、KU-FEL のパルス特性はこれまで計測できていなかった。本研究では、時間分解 FEL ミクロパルススペクトルおよび波長揺らぎについて、それぞれ新たな計測スキームを開発した。これらの計測は世界に類似研究がなく、独創的な成果である。また、今後、分光応用を進める上でも KU-FEL 光源の重要な基礎データとなる。

2.2.4.4. 今後の計画

KU-FEL は共同利用が可能な本研究所の基幹装置である。今後は、共同利用者にとってさらに便利な施設となるよう、特に時間分解計測ができる光源として整備を進めていきたい。そのためには現状のパルス列構造では使い勝手が悪く、今後は、例えばプラズマシャッターの導入によってパルス列から単一若しくは数個だけのマイクロパルスを切り出すことにより、時間分解計測が可能な高輝度の中赤外光源として整備をする予定である。これと同時に、上記和周波発生光学系をさらに進化させることにより、単一パルスで過渡吸収分光ができる分光計測システムを構築したいと考えている。

2.2.5. 超短パルスレーザーを用いたナノ加工技術の開発

(レーザー科学研究分野)

2.2.5.1. 背景

ナノメートルオーダーの微細加工技術の開発が、次世代の先端科学と持続的な産業界発展のための基盤として位置付けられている。その要素技術の一つとして、レーザーのような伝搬光による光プロセスが注目され、活発に研究が行われているが、空間分解能は原理的に回折限界によって光の波長程度に制限されてしまう。これまでに、フェムト秒レーザーを誘電体及び半導体表面に集光照射すると、波長の1/10から1/5の周期構造が生成されることはすでに知られており、光の回折限界を超える新しいナノ加工技術として期待されていた。しかし、物理メカニズムが未知であるのに加え、構造自体が不均一であることから実用化は困難とされていた。

2.2.5.2. 成果の概要

フェムト秒レーザーによって誘起される周期ナノ構造形成の物理メカニズムが、表面プラズモンポラリトンとそれに付随した近接場であることを提案し、それを実証することに成功した(発表論文1)。また、この物理過程を基にして、ワイドギャップ半導体である窒化ガリウム表面に100 nm オーダー周期の均一なナノ格子[図1]を形成できる光ナノプロセッシング技術を開発した。本成果は、アメリカ光工学会のトップニュース記事として配信された(発表論文2)。

(発表論文)

- 1) G. Miyaji, K. Miyazaki, K. Zhang, T. Yoshifuji, and J. Fujita, "Mechanism of femtosecond-laser-induced periodic nanostructure formation on crystalline silicon surface immersed in water", *Opt. Express*, 20 (2012) 14848-14856.
- 2) G. Miyaji and K. Miyazaki, "Nanograting fabricated with femtosecond laser pulses", *SPIE Newsroom*, 10.1117/2.1201210.004516 (2012).

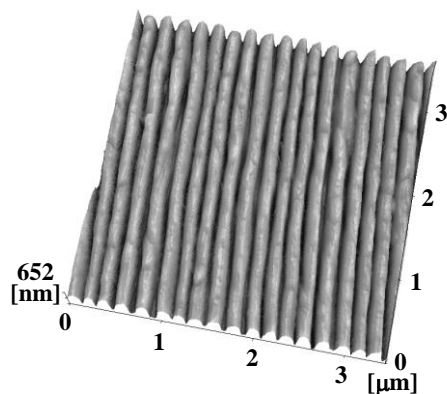


図1. GaN表面に作製したナノ格子の走査プローブ顕微鏡画像

2.2.5.3. 意義(学術的・社会的的重要性)

レーザーアブレーションはいわゆる破壊のプロセスに類似しており、一般的にそのモデル化は非常に困難である一方、物質の結合構造と形態が高速で変化するレーザーアブレーションのダイナミクスを、コヒーレントな電子・分極応答を基礎とする表面素励起の視点から考察し、モデル化に成功している。その研究例は学術的に新奇であり、前例がない。

一般的に広く利用されているレーザー加工機では、レーザー光の空間的な強度分布を利用して加工しているため、加工形状の空間分解能は光の伝搬特性によって波長程度に制限されてしまう。本研究により開発した手法は、レーザー光を原理的な制約を受けない表面プラズモンへポラリトンへと変換して利用する全く新しい加工技術であるため、レーザー加工の技術革新となることが期待されている。将来的には、電子ビーム描画に匹敵するナノ構造を簡便かつ効率良く生成するための新規のナノプロセス技術へと発展する大きな可能性を有している。

2.2.5.4. 今後の計画

高機能な光エネルギーの発生・制御・利用に関する研究開発によって次代の科学技術基盤を創出することが本重点研究領域の目標である。物性の異なる誘電体、半導体、金属等に物理モデルを適用・拡張することにより、10~300 nmサイズのナノ構造を設計・製作できる簡便なレーザーナノプロセッシング手法の開発し、次代の共通基盤技術となることを目指す。

2.2.6. レーザーアブレーションを利用した液相環境中でのその場元素分析

(複合化学過程研究分野)

2.2.6.1. 背景

レーザーアブレーション放出種の発光スペクトルを測定することで、液中固体表面のその場元素分析が可能である。この手法が実用化されると、海底でのエネルギー資源の探索を格段に高効率化することができる。ところが、水中ではプラズマの膨張が妨げられ、その密度が非常に高くなるため、パルス照射直後に強い連続スペクトルが発生する。照射方法を工夫することによって、元素特有の発光スペクトルが明瞭になることを報告してきたが、検出器を特定の時間幅だけ動作（ゲート動作）させて時間分解測定をする必要があり、実用化における装置上の問題となっていた。また、発光種のプラズマ中での分布についても不明であり、測定対象のプラズマの理解も不足していた。

2.2.6.2. 成果の概要

低出力なダブルパルスやマルチパルスレーザーを照射することにより十分に密度の低いプラズマが生成すること、また最適なパルス間隔（15～50 μs）では、時間分解測定（時間ゲート測定）することなしに明瞭なスペクトルが得られることを見いだした（発表論文1）。また、気泡をシャドウグラフで撮影したところ、時間とともに膨張し、最大の大きさになった後収縮していた。気泡サイズが大きい時間と、変形の小さいスペクトルが得られ第2パルス照射のタイミングが一致することを示した。

計測対象であるプラズマの直径は0.1 mm程度と小さいが、プラズマ中で各元素の分布が異なると定量分析の結果に誤差が生じる。高解像の対物レンズを用いてプラズマを拡大結像させ、4本の光ファイバーに取り込むことにより、プラズマの異なる4点のスペクトルを同時計測する手法を開発した（発表論文2）。4本の光ファイバーからの光は結像分光器で同時に結像させることで同時計測が可能であった。得られた結果から、ターゲット由来の元素と溶液由来の元素のプラズマ中での分布は明確に異なっていることが明らかになった。

さらに、中心からはずれた特定の位置のみを分光計測することで、時間分解することなく明瞭なスペクトルが得られることが明らかになった（発表論文3）。図1は生成初期および成長後のプラズマの画像、および時間ゲートなしで測定されたスペクトルである。画像中の円で囲んである領域が選択的に計測されており、それにより初期の高密度のプラズマからの発光が除外されていることがわかる。

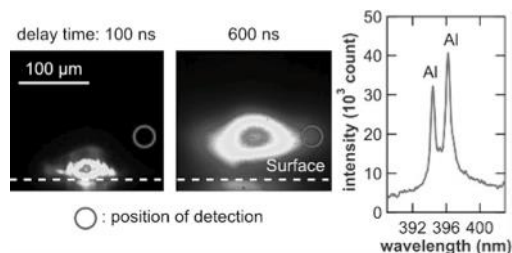


図1 左から、生成初期および成長後のプラズマの画像、および測定されたスペクトル

(発表論文)

- 1) Tetsuo Sakka, Ayaka Tamura, Takashi Nakajima, Kazuhiro Fukami, Yukio H. Ogata, "Synergetic effects of double laser pulses for the formation of mild plasma in water: Toward non-gated underwater laser-induced breakdown spectroscopy", J. Chem. Phys., 136 (2012) 174201.
- 2) Ayumu Matsumoto, Ayaka Tamura, Kazuhiro Fukami, Yukio H. Ogata, Tetsuo Sakka, "Two-dimensional space-resolved emission spectroscopy of laser ablation plasma in water", J Appl. Phys., 113 (2013) 053302.
- 3) Ayumu Matsumoto, Ayaka Tamura, Kazuhiro Fukami, Yukio H. Ogata, Tetsuo Sakka, "Single-pulse underwater laser-induced breakdown spectroscopy with nongated detection scheme", Anal. Chem., 85 (2013) 3807– 3811.

2.2.6.3. 意義（学術的・社会的的重要性）

十分希薄なプラズマを水中に生成させる方法を開発し、ゲート動作を必要としない測定が可能であることを示した。また、プラズマ中の発光種の分布や水相に溶解している物質の影響についても明らかにした。とくに前者は、レーザーアブレーションを用いた水中固体表面のその場元素分析法として実用化するための装置開発に寄与する重要な進展である。

2.2.6.4. 今後の計画

実用面では、装置開発のための技術開発に取組み、装置の小型化およびそれを耐圧容器に格納することによって深海で運用可能な装置の開発を目指す。また、プラズマの状態を精密に測定し、安定したプラズマの生成および発光測定のための基礎研究を続ける。これらの研究にもとづいて、高精度な海底探査センサーを実用化し、エネルギー資源の高効率な探索技術の開発に資する。

2.2.7. 多孔質シリコンへの白金電析における表面誘起水和構造の影響

(複合化学過程研究分野)

2.2.7.1. 背景

平均孔径が 3 nm のマイクロ孔を有する多孔質シリコンは高い比表面積を有する材料であり、センサーや触媒担体、化学反応場としての利用が期待されている。また、多孔質シリコンは半導体特性を有する多孔質構造であるため、多孔質半導体電極としての利用が注目を集めている。物質移動の観点からは、孔径が小さいが故に物質の拡散が阻害されることが最も主要な課題となっている。孔底部まで原料物質を供給し、高い比表面積を十分に生かして電気化学反応を進行させるための制御方法に関する知見は欠如していた。

2.2.7.2. 成果の概要

マイクロ多孔質シリコン電極を用いた白金電析に取り組んだ。シランカップリングによりプロピオール酸またはプロピオール酸メチルを多孔質シリコンに修飾し、孔壁を親水性または疎水性にそれぞれ改質した電極を用いることで、孔壁の溶媒和特性の影響を調べた。親水性多孔質シリコン電極では細孔内で白金の電析反応が全く進行しなかったのに対して、疎水性多孔質シリコン電極の場合に細孔内で優先的な白金析出が確認された(発表論文1)。疎水性孔壁近傍の白金錯イオンの密度分布を調べるために分子性液体の積分方程式論による解析を行った。疎水性孔壁近傍ではバルクの白金錯イオン濃度に比べて高い密度で錯イオンが存在していることが明らかになった。また、錯イオン径が大きくなるにつれて疎水性孔壁近傍における白金錯イオンの密度が急激に上昇することが分かった。

一方、バルクの溶液中の $[\text{PtCl}_4]^{2-}$ 濃度の影響についても調べた。1 mM から 10 mM ずつ濃度を段階的に上げていくと、9 mM と 10 mM で細孔内における白金析出挙動が急激な変化をみせた。より具体的には、9 mM 以下の場合には細孔内での析出がみられず、最表面にまばらに析出した。一方、10 mM 以上のときは細孔内に均一に白金が析出することを見出した。理論解析の結果、この閾値濃度を境に細孔内の液体状態が変化し、高濃度側では細孔表面に誘起された相転移が起こったものと示唆される結果が得られた(発表論文2)。

白金電析で得られた知見をもとに次世代蓄電池用の金属負極に関する検討を進めた。蓄電池の金属負極では高速充電時に発生する dendrite 状結晶成長が短絡をもたらすことから、その抑制方法に関する検討が進められている。我々のグループではマイクロ細孔を有する多孔質シリコンを電極として金属亜鉛の充電挙動を調べた。平滑電極では dendrite 発生が顕著になる極めて高い電流密度下においても、多孔質シリコン電極を用いた場合は多孔質シリコン最表面に dendrite 状結晶成長は確認できなかった。これは、細孔内に亜鉛が優先的に析出することに起因し、細孔内での亜鉛電析反応の電流効率が低い値を比較的長時間維持することが分かった(発表論文3)。

(発表論文)

- 1) K. Fukami, R. Koda, T. Sakka, T. Urata, K. Amano, H. Takaya, M. Nakamura, Y. Ogata, M. Kinoshita, "Platinum electrodeposition in porous silicon: The influence of surface solvation effects on a chemical reaction in a nanospace", Chem. Phys. Lett., 542 (2012) 99-105.
- 2) K. Fukami, R. Koda, T. Sakka, Y. Ogata, M. Kinoshita, J. Chem. Phys., 138 (2013) 094702.
- 3) R. Koda, K. Fukami, T. Sakka, Y.H. Ogata, "A physical mechanism for suppression of zinc dendrites caused by high efficiency of the electrodeposition within confined nanopores", ECS Electrochem. Lett., 2 (2013) D9-D11.

2.2.7.3. 意義(学術的・社会的重要性)

ナノメートルサイズの細孔内においては系を適切に設計することにより、化学反応を細孔内でより促進することが可能になることを示した。これは、多孔質材料を用いた化学反応場の設計において極めて重要な知見を示したものと考えられる。近年では、キャパシタや蓄電池、触媒担体などに多孔質材料が広く用いられている。細孔内の液体状態をより精密に制御することでこれらのデバイスの更なる高性能化が期待される。

2.2.7.4. 今後の計画

半導体多孔質電極の細孔内液体状態の制御による高効率な光-化学エネルギー変換について取り組み、これまでに得た知見を最大限に活用しエネルギー生成を可能にする。半導体側でのキャリアの移動と細孔内の液体状態の最適な組み合わせを検討し、最も効率良く光電気化学反応が進行する状態を設計する。一方、これまでに進めている次世代蓄電池用金属負極に関する研究も継続する。電位印加時の細孔内における液体状態をより詳細に調べ、高速充放電を可能にする蓄電池開発へ展開する。

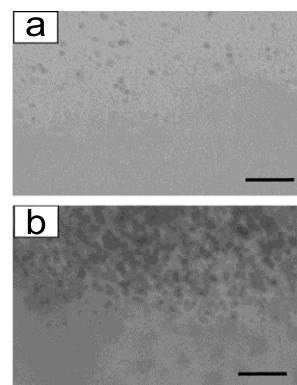


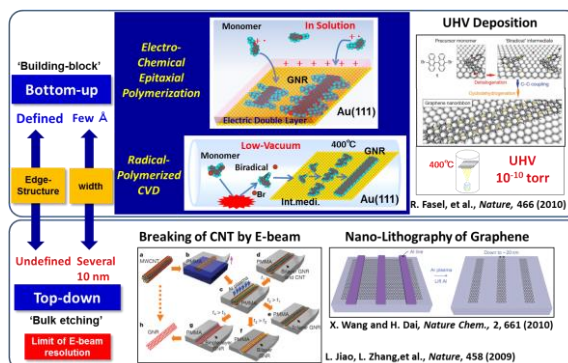
図 3.2.2 多孔質シリコン内に析出した白金ナノ粒子の TEM 像。(a) と (b) の試料はそれぞれ $[\text{PtCl}_4]^{2-}$ と $[\text{PtBr}_4]^{2-}$ を原料として作製した。析出した粒子の数密度が白金錯イオンの種類によって大きく変化することが分かる。

2.2.8. 革新的ナノ炭素細線製造法の研究

(分子ナノ工学研究分野)

2.2.8.1. 背景

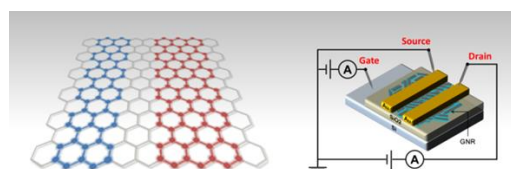
金属表面は、有機分子との強い電子の相互作用により、分子を二次元配列させる原子スケールの鑄型である。我々は、単一分子レベルで導電性高分子の長さ・密度・方向・形を任意に制御しながら金属表面上に構築する新しい分子細線合成技術“電気化学エピタキシャル重合”を開発した (*Nature Materials*, 3, 551 (2004))。この方法は原料 (モノマー) を含む電解質液中で、ヨウ素で表面修飾した単結晶金電極に電圧パルスを印加することにより、ヨウ素原子配列に沿って導電性高分子を精密に重合させる表面合成法である。更に電子的性質の異なる二種類の導電性高分子細線を基板上で連結させることにも世界で初めて成功した (*Science*, 310, 1002 (2005))。金属鑄型上の分子組織化を利用して、これまでに無い新しい機能性物質・材料の表面合成とデバイス化が望まれている。



グラフェンナノリボン (GNR) は“有限幅を持つグラフェン”であり、分子幅に依存して優れた半導体的性質を持つことが理論的に予測されている。しかしながら、微細加工技術、特殊な反応場、超高真空技術が必要であり、極微量合成や限られた性質については報告されているものの、デバイス化や従来未知であるこの材料の物性解明につながる大量合成法は未開拓であり、その確立が世界的に望まれている。

2.2.8.2. 成果の概要

そこで我々は、従来に無い新しい化学気相成長法 (ラジカル重合型化学気相成長法) を開発し、これまで超高真空 (10^{-10} torr) 環境を必要とした蒸着合成法を遥かに凌駕した著しい低真空環境 (1 torr) での大量合成を達成した。今までに GNR の大量合成に成功した例は無い。その理由は、反応系内で芳香族分子ビラジカルを発生させてラジカル重合させなければならないが、化学気相成長法が行われる 1 Torr 程度の低真空環境では、系内の極微量の不純物によりビラジカルが失活し、大きく反応効率を妨げられるからである。このため、これまで報告された GNR の微量合成は、超高真空環境 (10^{-10} Torr) を必要とする蒸着重合の報告 (Fasel, et al., *Nature*, 2010) のみである。本研究では、①石英反応管を化学・高温処理することで系内のラジカル失活不純物を極度に減らし、②蒸発させた原料分子を清浄化した高温石英管に吹き付け、ビラジカルを失活させることなく石英管表面に高密度に生成させ、③ラジカルが局在化した石英管面に密着させた金属基板上でラジカル重合と脱水素縮環を効率良く行わせることにより、従来に無い GNR の高効率合成を低真空環境 (1 Torr) にもかかわらず達成した。合成した金単結晶表面上の GNR の走査トンネル顕微鏡 (STM) 像は、長さ 20nm の GNR が金 (111) 面上に多層に成長していることが明らかになった。更に、ベンゼン 2 個及び 3 個の異なる幅を持つ GNR を金単結晶上に形成させ、理論予測されていたバンドギャップ値を実験的に初めて明らかにした。更に、金属基板上に合成した GNR を絶縁基板上にウェットプロセスにより転写・単離する方法を開発し、アモルファスシリコンを凌駕するボトムアップ合成 GNR のキャリア移動度や、光学物性など従来未知であったグラフェンナノリボンの基礎物性を明らかにすることができた。



(発表論文)

- 1) H. Sakaguchi, “Bottom-up Massive Production of Graphene Nanoribbons”, The 2013 New Diamond and Nanocarbon conference, invited (2013).
- 2) Hiroshi Sakaguchi, Maki Yano, Takahiro Nakae, “Bottom-up Massively Grown Graphene Nanoribbons Films” submitted.

2.2.8.3. 意義 (学術的・社会的的重要性)

本研究での気固界面の高い反応性を有機合成した原料分子に適用する独創的合成技術により、合成や単離・機能開発が困難であった新しい物質群であるグラフェンナノリボンを基板上に大量合成し、デバイス化することが可能になれば、日本発のナノ炭素材料の画期的合成技術として大きな脚光を浴びることは間違いない。基礎、応用の両面で大きなインパクトと研究投資の加速が期待される。

2.2.8.4. 今後の計画

本研究で開発されたラジカル重合型化学気相成長法を用いて、世界で初めてのジグザグエッジ型 GNR のボトムアップ表面合成を目指す。また、太陽光エネルギー利用を目指した太陽電池試作のための GNR からの光電流発生に関する研究や、低消費電力デバイスとしての電界効果トランジスタ作成によるキャリア移動度に関する研究を通して、これら GNR デバイスの高性能化に関を目指す。これらは本研究所が指向する光・エネルギーナノサイエンスに合致する。

2.2.9. 電気化学エピタキシャル重合による二次元共役系高分子の構築

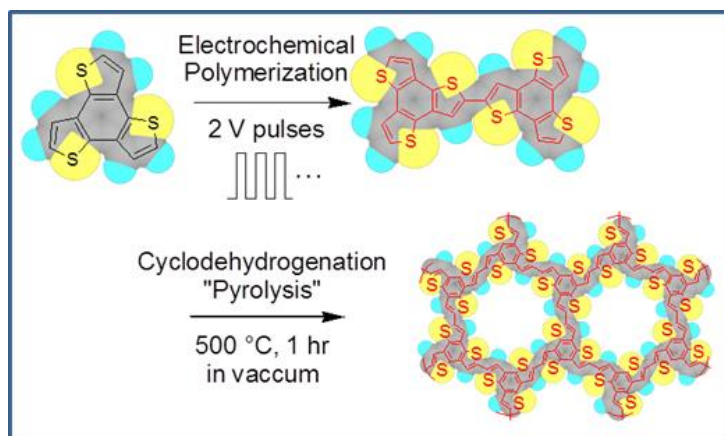
(分子ナノ工学研究分野)

2.2.9.1. 背景

共役系高分子は、一次元の電子状態を持つ有機材料であり、エネルギー応用を含めて様々な分野での応用が期待されて来た。しかしながら、その性能を向上させるためには、電子が更に広がった二次元系の共役系高分子の構築が望まれている(F. Rosei, Science 2009)。

2.2.9.2. 成果の概要

上記アイデアを実現するため、我々はパーツ分子（低分子原料）を用いて、金属単結晶上で電気化学的に二次元共役系高分子を形成させる新しい手法の開発を行った。発達した二次元共役系高分子は、不溶不融であるため、従来の合成化学的手法では困難である。表面を反応場に用いる表面ビルドアップ重合法である、電気化学的構築法は正にこの困難を克服できる可能性を持つ。合成したトリベンゾチオフェンモノマーを用いて、電気化学エピタキシャル重合を行ったところ、熱重量減少、ラマン分光、吸収スペクトルを用いて測定から、チオフェンが三回対称に発達した二次元共役高分子を得ることに成功した。



(発表論文)

- 1) Takahiro. Nakae, Shingo. Mizobuchi, Maki. Yano, Hiroshi. Sakaguchi, et al., Benzo[b]trithiophene Polymer Network Prepared by Electrochemical Polymerization with a Combination of Thermal Conversion, Chem. Lett., 41(2) (2012) 140-141.
- 2) 坂口浩司, 電気化学エピタキシャル重合, 分子細線の組織化と機能, 第 60 回高分子討論会, 60(2), 2011, 2146-2148 招待講演.

2.2.9.3. 意義 (学術的・社会的的重要性)

二次元共役系高分子の構築は材料科学分野で非常に望まれているため、本研究はこの目的を実現するための有用な手法を提供する。

2.2.9.4. 今後の計画

他のモノマー分子への適用とエネルギー応用のためのデバイス構築を目指す

2.2.10. 高機能 DNA タンパク質ナノ組織体の構築の研究

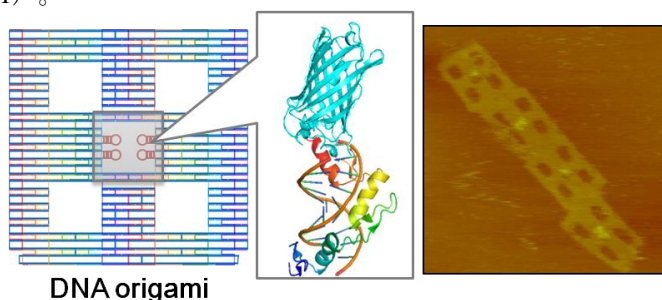
(生物機能化学研究分野)

2.2.10.1. 背景

生体内においては、タンパク質や RNA などの機能性分子が相互作用しながら、過渡的な超分子組織体を形成し、物質生産・変換システムを構築している。このようなシステムを模範とし、任意の機能性分子を特定の位置にナノスケールの精度で配置することができれば、それぞれの要素を単純に混ぜ合わせただけでは達成することのできないような高効率な物質変換システムを細胞外で構築することができるかと期待される。本研究では DNA ナノ構造上の個別の配列情報を利用した足場を用いて、高度デバイスを作製し、新しい機能を発揮することを目指す。本研究は、戦略的創造研究推進事業 (CREST) 科学技術振興機構 (JST) 研究領域「プロセスインテグレーションに向けた高機能ナノ構造体の創出」における課題として遂行した。

2.2.10.2. 成果の概要

本研究では、機能性分子を高精度に配置させるための足場として、DNA を基盤としたナノ構造体に注目した。近年開発された DNA の高い分子認識能と自己集合能を利用して、一本鎖 DNA を設計通りの形に折りたたみ、様々な高次構造体 (DNA origami) を自在に形成させる方法論 (P. W. Rothemund, *Nature* **2006**, *440*, 297–302.) を利用し、DNA origami 上に酵素をはじめとする複数の機能性分子を配置するためのアダプター分子の開発をおこなった。我々が注目したのは、亜鉛フィンガータンパク質に代表される DNA 結合性タンパク質である。DNA と結合する一群の蛋白質であり、様々な配列を異なる結合様式にて強固に結合することが知られている。我々は、亜鉛フィンガータンパク質やロイシンジッパータンパク質を採用し、DNA ナノ構造体への結合能を評価し、これらが、お互いに競合することなく、同一 DNA ナノ構造体上の異なるアドレスにそれぞれ機能性タンパク質を配置できることを明らかにした。(発表論文 1)。



3.1.2. Zinc Finger 蛋白質を介した DNA ナノ構造体上への機能性タンパク質の固定化。

(発表論文)

- 1) E. Nakata, F.F. Liew, C. Uwatoko, S. Kiyonaka, Y. Mori, Y. Katsuda, M. Endo, H. Sugiyama, T. Morii, “Zinc finger proteins for site-specific protein positioning on DNA origami.”, *Angew Chem. Int. Ed.*, **51** (2012) 2421–2424.

2.2.10.3. 意義 (学術的・社会的的重要性)

DNA ナノ構造体とタンパク質の複合体による機能化を目指した研究は、これまでも試みられてきた。しかしながら、幅広い研究展開を困難としていたのは、複数のタンパク質・酵素を効率的に DNA 上に固定化するための方法論が希少であったためである。本研究は、DNA 結合性タンパク質を固定化するためのアダプターとして利用することで、簡便かつ高効率に目的タンパク質を DNA ナノ構造体の任意の場所に配置することが可能となった。本研究は、第 2 期中期目標・中期計画に掲げた「先進的ナノバイオ機能材料の創出」に該当し、生体高分子を含む様々な機能性分子をナノスケールの精度で配置することで、新しい機能を発揮することを目的としている。

2.2.10.4. 今後の計画

本研究で開発した DNA とタンパク質のナノ組織体の構築方法は、生体内で一過的に構築される超分子組織体を試験管内で実現することや、由来の垣根なく様々な優れた機能性分子を融合した組織体を構築することができるかと期待される。これら複数の機能性分子の空間的配置と機能の相関関係を明らかとしていくことで、精微に設計された多段階物質変換ナノデバイス「分子コンビナート」へと展開していく。

2. 2. 11. RNA-ペプチド複合体を用いた機能性分子の創製

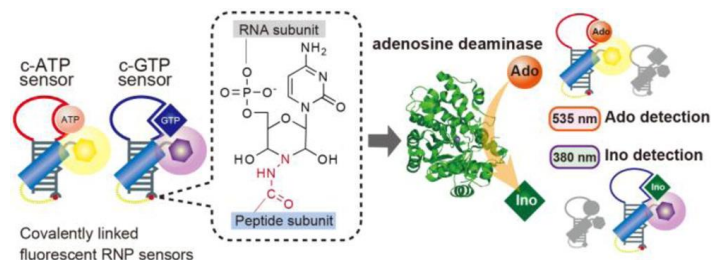
(生物機能化学研究分野)

2. 2. 11. 1. 背景

環境に配慮したクリーンで高効率なエネルギー利用システムとして、クリーンなエネルギー生産および高効率な物質変換が統合された細胞内エネルギー利用システムが挙げられる。細胞内エネルギー利用システムを模倣、応用することで、自然環境との調和・共存を目指す持続可能社会の実現が可能となると期待されるが、そのためには、その基本原理に基づいたボトムアップ的システムの構築が必要不可欠である。本研究では、テーラーメイドな機能を有する酵素の創製を目指すうえで必要不可欠な生体高分子設計法および高選択的かつ高効率な物質変換反応を目指すものであり、科学研究費補助金基盤研究 (A) 「モジュール設計による機能性 RNA-タンパク質複合体創製原理の確立」における課題として遂行した。

2. 2. 11. 2. 成果の概要

当分野でこれまでに開発した RNA-ペプチド複合体 (RNP) センサー構築方法論 (*J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *128*, 12932) では、RNP に *in vitro* セレクション法を適用することによって、特定の標的物質を認識するリセプターを創製することが可能である。ATP 結合性 RNP センサーの認識様式を詳細に検討することによって、ATP 結合前後において RNP センサーのダイナミックな構造変化が誘起されており、これが基質認識に伴う蛍光変化に直接関与していることを明らかにした (発表論文 1)。この結果に基づいて、いくつかの蛍光性 RNP センサーの合理的設計が実現した (発表論文 2)。また、蛍光性 RNP センサーの RNA サブユニットと蛍光修飾 Rev ペプチドを、リンカーを介して共有結合により連結した蛍光性 RNP センサーを作製することで、それぞれの標的分子に対して異なる蛍光波長で応答する複数の蛍光性 RNP センサーの開発に成功した。これらの蛍光性 RNP センサーを同一溶液中で用いることで、酵素反応によって変換される基質と生成物を異なる蛍光波長で同時に検出することに成功した (発表論文 3)。



3.2.2. 共有結合化 RNP センサーを用いた酵素反応の基質と生成物の同時リアルタイム検出

(発表論文)

- 1) S. Nakano, T. Mashima, A. Matsugami, M. Inoue, M. Katahira, T. Morii, "Structural Aspects for the Recognition of ATP by Ribonucleopeptide Receptors." *J. Am. Chem. Soc.*, *133* (2011) 4567-4579.
- 2) S. Nakano, E. Nakata, T. Morii, "Facile conversion of RNA Aptamers to modular fluorescent sensors with tunable detection wavelengths." *Bioorg. Med. Chem. Lett.*, *21* (2011) 4503-4506. 他 3 報。
- 3) S. Nakano, M. Fukuda, T. Tamura, R. Sakaguchi, E. Nakata, T. Morii, "Simultaneous Detection of ATP and GTP by Covalently Linked Fluorescent Ribonucleopeptide Sensors." *J. Am. Chem. Soc.*, *135* (2013) 3465-3473.

2. 2. 11. 3. 意義 (学術的・社会的的重要性)

試験管内選択法に代表される分子進化工学的なアプローチは、テーラーメイドなリセプターを作製するために、有効な方法論である。我々の RNP センサー構築方法論は、三次元構造情報に基づいた合理的な分子設計法と組み合わせることで、簡便に任意の機能を有する RNP センサーを設計することができる。これは、生体由来分子のみで構成される従来法に比較し、多様で汎用性の高いセンサーの構築方法として注目される。また、共有結合化することでセンサーの安定化に成功しており、より複雑な環境下においても利用可能となったことで、診断等の分野での応用も期待される。本研究は、第 2 期中期目標・中期計画に掲げた「自然エネルギーの高効率利用原理の解明」に該当する研究と位置づけられる。

2. 2. 11. 4. 今後の計画

本研究で開発した RNP リセプターの段階的機能化法を応用することで、高い認識能を持つリセプターと高い触媒機能を持つ人工分子を融合した、RNP 触媒の創製も可能と期待される。これにより、天然にはない触媒機能を発揮するような半合成 RNP 酵素の創製ができると期待される。

2.2.12. 立体構造の決定に基づいたタンパク質-RNA 相互作用エネルギーの解明

(エネルギー構造生命科学研究分野)

2.2.12.1. 背景

プリオンタンパク質は通常は正常型をとるが、これが異常型に構造遷移するとウシの狂牛病、ヒトのクロイツフェルト・ヤコブ病などを引き起こす。現在異常型への遷移を阻害する薬剤の開発が望まれている。我々は、プリオンタンパク質に高い親和性で結合する RNA アプタマーを見出した。この両者の複合体の構造解析によって、高い親和性がもたらされる理由を相互作用エネルギーの観点から解明する事を目指した。またこのアプタマーが生細胞において抗プリオン活性を示すのかを検証した。また Musashi タンパク質は、標的遺伝子の 3' 非翻訳領域に結合して翻訳を阻害する事で、細胞の未分化状態の維持に関与している。同タンパク質と標的 RNA の複合体の立体構造に基づき、標的 RNA 認識機構を相互作用エネルギーの観点から解明する事を目指した。これらの研究は、光・エネルギーナノサイエンス重点領域研究におけるバイオ関連のナノサイエンス研究の一環として遂行した。

2.2.12.2. 成果の概要

RNA アプタマーとプリオンタンパク質の複合体に関し、NMR 法を用いて立体構造の解析を行った。その結果 RNA アプタマーは 2 量体し、各単量体がプリオンタンパク質の異なる箇所と同時に結合する事で相互作用エネルギーを 2 倍稼ぎ、高い親和性がもたらされている事が分かった(図 1) (発表論文 1)。また当該アプタマーが、異常型プリオンタンパク質の蓄積を阻害する抗プリオン活性を有する事を、マウスの神経細胞を用いたアッセイ系によって実証する事に成功した。また細胞の未分化状態の維持に関与する Musashi タンパク質と RNA の複合体の立体構造を決定し、標的 RNA 認識機構を相互作用エネルギーの観点から解明した(発表論文 2)。

(発表論文)

- 1) Tsukasa Mashima, Fumiko Nishikawa, Yuji O. Kamatari, Hiromichi Fujiwara, Masayuki Saimura, Takashi Nagata, Tsutomu Kodaki, Satoshi Nishikawa, Kazuo Kuwata, Masato Katahira, "Anti-prion activity of an RNA aptamer and its structural basis", *Nucleic Acids Res.*, 41 (2013) 1355-1362.
- 2) Ohyama, T., Nagata, T., Tsuda, K., Kobayashi, N., Imai, T., Okano, H., Yamazaki, T. and Katahira, M. (2012) *Nucleic Acids Res.*, 40, 3218-3231. "Structure of Musashi1 in a complex with target RNA: The role of aromatic stacking interactions"

2.2.12.3. 意義 (学術的・社会的的重要性)

高い親和性及び高い特異性がもたらされる理由を、原子レベルの分解能で相互作用エネルギーの観点から解明する事に成功した。また抗プリオン活性が生細胞で実証された事から、抗プリオン医薬品の開発に繋がる事が期待される。

2.2.12.4. 今後の計画

複合体の立体構造・相互作用エネルギーの解析結果を活用する事で、さらに親和性が高いアプタマーを創製する。現在実際そのようなアプタマーが得られつつある。これらのアプタマーの抗プリオン薬としての応用を目指して、医学部の研究者との共同研究を進めており、光・エネルギーナノサイエンス重点領域研究におけるバイオ関連のナノサイエンス研究の一つの柱としてこれを推進していく。

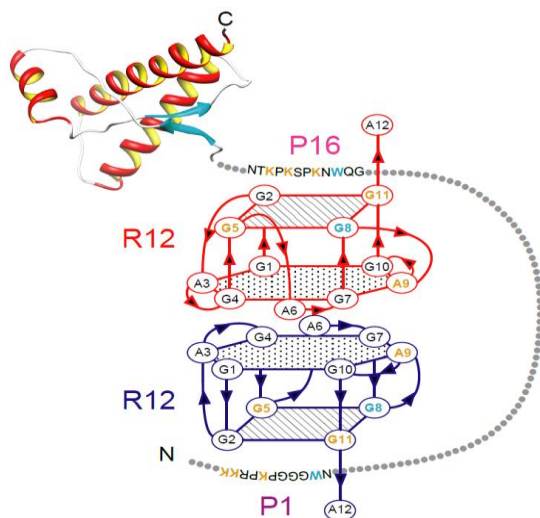


図 1 RNA アプタマーはプリオンタンパク質と 2 箇所と同時に結合する事で、安定化のエネルギーを 2 倍獲得する。これによって

$$K_d = \exp(-2\Delta G/RT) \\ = [\exp(-\Delta G/RT)]^2$$

より、解離定数は 2 乗分小さくなり、即ち非常に高い親和性がもたらされる事となる。

2. 2. 13. バイオマスの NMR 法による精密解析

(エネルギー構造生命科学研究分野)

2. 2. 13. 1. 背景

石油に代表される化石資源に替わるエネルギーとマテリアルの供給源として、カーボンニュートラルの考えが適用でき、CO₂等の温室効果ガスの排出量を大幅に削減できるバイオマスが有望視されている。光・エネルギーナノサイエンス重点領域研究においても、バイオマスの活用に向けた研究は主要な柱の一つとして位置づけられる。バイオマスの中でも食糧問題を引き起こさない非可食性木質バイオマスが注目されている。木質バイオマスの三大成分、セルロース、ヘミセルロース及びリグニンのうち、バイオエタノールの生産への活用が既に軌道に乗りつつあるセルロースに比して、他の2成分は活用が進んでいない。それはヘミセルロース、リグニンの『正体』、つまり分岐を含めた化学構造、及び複合体における超分子構造が未だ解明されていないからである。そこで我々は、溶液 NMR 法を用いた新しい方法論を開発・駆使する事で、この正体に迫っている。また将来の資源化を視野に入れて、活性汚泥バイオマスを構成する細菌由来の複合糖質の立体構造を NMR 法によって決定する事を行った。

2. 2. 13. 2. 成果の概要

木質バイオマスの3大成分の一つであるリグニンに関し、溶液 NMR 法を用いた解析手法を開発し、リグニンの活用に向けた基盤的情報を得た(図2)(発表論文1)。また活性汚泥バイオマスを構成する細菌由来の複合糖質の立体構造を NMR 法によって決定した(発表論文2)。

(発表論文)

- 1) Ando, D., Nakatsubo, F., Takano, T., Nishimura, H., Katahira, M. and Yano, H. (2013) *Holzforchung*, 67, 249-256, "Multi-steps degradation method for β -O-4 linkage in lignins: γ -TTSA method. Part 3. Degradation of milled wood lignin (MWL) from *Eucalyptus Globulus*"
- 2) Kondo, K., Takeda, M., Mashima, T., Katahira, M., Koizumi, J. and Ueda, K. (2012) *Carbohydrate Research*, 360, 102-108. "Conformational analysis of an extracellular polysaccharide produced by *Sphaerotilus natans*"

2. 2. 13. 3. 意義(学術的・社会的的重要性)

化石資源の代替としてバイオマスを活用しようとする際、バイオマスの正体(化学構造と超分子構造)が解明されていない事が、往々にしてネックになる。今回木質バイオマス等に特化・最適化した NMR の方法論を開発する事で、この正体に関する情報を原子レベルの分解能で取得する事に成功し、バイオマスの有効活用に向けた基盤の確立に貢献した。

2. 2. 13. 4. 今後の計画

¹³C 安定同位体標識した木質バイオマス試料を調製し、これを用いてより多くの構造情報を得る事に現在成功しつつある。こうして蓄積するバイオマスの正体に関する情報を活かし、バイオマスのエネルギーおよびマテリアル生産への活用を行い、光・エネルギーナノサイエンス重点領域研究におけるバイオに立脚した研究の発展に資する。

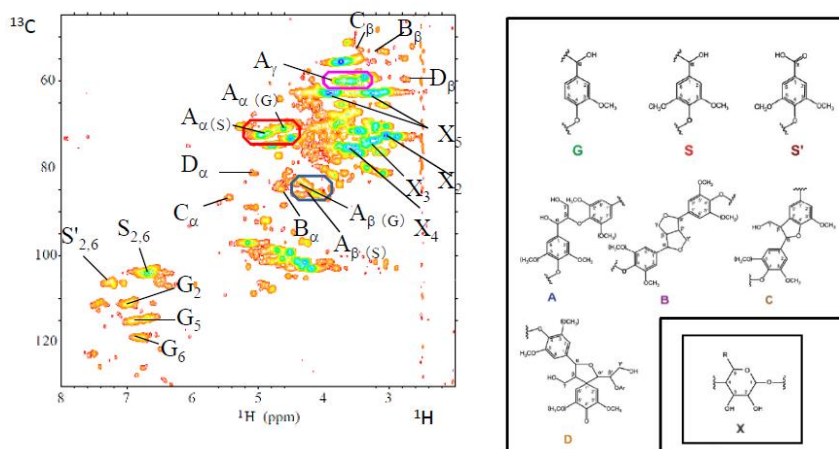


図2 木質バイオマスの ¹H-¹³C HSQC スペクトル. リグニンにおける単量体の連結様式、分岐様式、糖の構造等を、今回開発した溶液 NMR 法によって原子レベルの分解能で解析・同定する事ができるようになった。

2.2.14. 物質複合系の非線形挙動

(センター附属研究分野：理論生物物理学)

2.2.14.1. 背景

物質は、他物質と混じり合い（または接触し合い）、複合系を構成して初めて高度な機能を発揮する場合が多い。物質複合系の挙動は、各物質要素の挙動の重ね合わせからは到底想像もつかない高度なものになり得る。各要素を個別に眺めるのではなく、複数の要素の集まりを総合的にシステムとして捉えると、多くの新しいことが見えてくる。コロイド分散系、固液界面系、生体系などの物質複合系の非線形挙動を独自の統計力学・熱力学理論に基づいて研究している。別々に体系化された異分野の統合の必要性が大きな特徴である。例えば、金属－電解質水溶液界面に対しては、電解質水溶液なる古典系と金属なる量子系の接続という全く新しい問題が生じる。生体分子に対しては、水が決定的に重要な役割を果たすため、生化学のみならず液体の統計力学の知識が不可欠となる。物質複合系は斬新かつ高度な機能発現の宝庫であり、その研究は分野間の垣根を越えた新学術領域の創製を啓発する。

2.2.14.2. 成果の概要

今回は、本研究所複合化学過程研究分野の深見一弘助教との共同研究「表面誘起相転移を利用したナノ空間内化学反応の劇的加速」の成果について述べる。多孔質材料の大きな比表面積を利用した化学反応においては、細孔内への反応成分の拡散による供給がすぐに困難になるため、期待したほどの性能が得られないことが多い。我々は、多孔質シリコン内の白金の電析反応を例にとり、この種の問題を解決する斬新な方法を開発した。シリコン電極表面を疎水性有機分子で修飾し、負水和を示す十分大きな白金錯イオンを用いる。イオン濃度を徐々に上げて行くと、ある閾値において、細孔内が第2相（イオン濃度がバルク濃度よりも桁違いに高い）で急に満たされることを電気化学実験と液体の統計力学理論の両面から見出した（図1；発表論文1）。この表面誘起相転移を利用することにより、ナノ空間内化学反応の設計制御が可能となる。

(発表論文)

- 1) K. Fukami, R. Koda, T. Sakka, Y. Ogata, and M. Kinoshita, "Electrochemical Deposition of Platinum within Nanopores on Silicon: Drastic Acceleration Originating from Surface-Induced Phase Transition", *Journal of Chemical Physics*, 138, 094702(1-10) (2013).

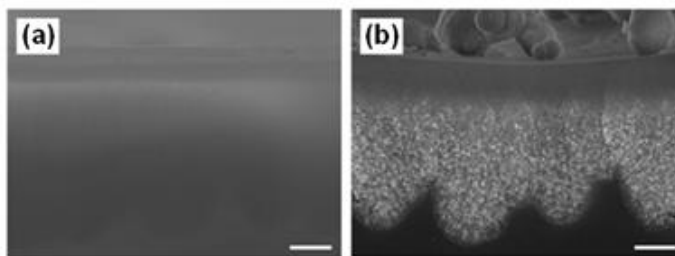


図1: 細孔内における白金の析出状況。[PtBr₄]²⁻濃度 = 0.004 M (a), 0.005 M (b)。両濃度で劇的な違いが見られる。白棒は 0.5 μm。

2.2.14.3. 意義（学術的・社会的重要性）

表面誘起相転移は、表面、水および微量成分が相関し合う結果として発現する興味深い現象であり、バルクが熱力学的に単相として安定な条件下でも起こり得る。疎溶媒性表面間に挟まれた微量の疎溶媒成分を含む極性溶媒や、親溶媒性表面間に挟まれた微量の親溶媒成分を含む無極性溶媒に対して起こり易い。拘束空間（表面近傍の空間や2つの表面間に挟まれた空間などを指す）内の液体はバルク液体とは顕著に異なる挙動を呈する。微量の疎水性分子を含む水中に疎水性表面が存在する場合を例にとると、表面近傍に疎水性分子の高濃縮層が形成される。木下らは、バルクの水-疎水性分子混合溶液が単相として安定な条件下でも、2通りのサブマイクロスケールの相転移（表面誘起相転移）が起こり、超長距離性の表面間引力が誘発され得ることを理論的に示した。本研究はその応用例であると共に、初めての実験的検証でもある。拘束空間内の流体の特異挙動なる新たな分野の開拓のみならず、センシングデバイス、触媒、電池電極など、ナノ細孔構造を利用した高機能性材料の開発にも結び付く。

2.2.14.4. 今後の計画

物質複合系の要素の1つが液体である場合、積分方程式論に代表される液体論が強力な武器になり得る。現在では、分子モデルを採用した分子性液体を対象とし、拘束空間内における構造と性質を解析することも可能になっている。今後は、反応には直接関与しない成分を添加し、操作変数を増やすことによって、ナノ空間内化学反応の制御性を向上させることを計画している。固体物理学者や生化学者との共同研究により、半導体－電解質水溶液界面やバイオセンサーの開発などの新たな課題とも取り組みたい。

2.2.15. 生体分子の自己組織化および分子認識機構の統一的解明

(センター附属研究分野：理論生物物理学)

2.2.15.1. 背景

バイオエネルギーナノサイエンスでは、生体分子が持つ自己組織化や分子認識の機能が利用される。とはいえ、それは多種多様であり、個別に理解することはあまり意味が無い。それら(ATP 駆動蛋白質の機能発現機構の解明を含む)を横断的に眺め、統一的に解明できる理論体系を構築することが不可欠である。それにより、得られた成果は生体系に限らない分子集合体やコロイド分散系にまで及ぶことになる。

2.2.15.2. 成果の概要

自己組織化によって形成された秩序構造は、高圧をかけると崩れる。蛋白質の圧力変性、F-アクチンのモノマーへの解離、アミロイド繊維の崩壊などが該当する。また、低温では構造形成力が弱まる。蛋白質の低温変性、ミオシンと F-アクチンの結合力の低下などが該当する。これらの現象は、種々の過程の横断的共通性の存在を物語っており、ある特定の因子が支配的に効くことを示唆している。木下らは、「この因子こそが、水の並進配置エントロピー効果の溶質-水間多体相関成分であり、その排除容積項が疎水性の本当の物理起源である」ことを世界に先駆けて示した。水の並進配置エントロピー効果の生体分子-水間多体相関成分を主軸とした独自の理論により、図 2 に示した種々の課題で成功を収めた(発表論文 1、2)。

(発表論文)

- 1) H. Oshima, S. Yasuda, T. Yoshidome, M. Ikeguchi, and M. Kinoshita, "Crucial Importance of Water-Entropy Effect for Predicting Hot Spots in Protein-Protein Complexes", *Physical Chemistry Chemical Physics*, 13, 16236-16246 (2011).
- 2) 木下正弘, 永山國昭, 「タンパク質水と理論の新機軸 I. 朝倉-大沢理論を越えて」, *生物物理* 52, 203-205 (2012); 「タンパク質水と理論の新機軸 II. 新理論の応用展開」, *生物物理* 52, 250-253 (2012); 「タンパク質水と理論の新機軸 III. 理論的考察」, *生物物理* 52, 300-303 (2012).

- 実験で観測された, apoPC の折り畳みに伴う大きなエントロピー利得の定量的再現
- 蛋白質の低温変性・圧力変性のメカニズム
- 蛋白質の熱安定性の指標の提案
- 蛋白質の熱安定性に及ぼす糖の添加効果
- 蛋白質立体構造予測に向けた自由エネルギー関数の開発
- NMR 実験で得られた蛋白質天然構造モデルのキャラクタリゼーション
- 蛋白質複合体におけるホットスポットの予測
- 分子認識のメカニズム
- アクチンフィラメントに沿ったミオシンの一方向移動
- シャペロンによる蛋白質折り畳みの援助機能
- F₁-ATPase におけるγ-サブユニットの一方向回転
- トランスポーターに見られる多剤排出のメカニズム

図2:水のエントロピー効果を主軸として我々が成功した課題。アンダーラインをほどこした課題では、エンタルピー成分をも考慮しないと失敗する。

2.2.15.3. 意義(学術的・社会的的重要性)

新しい機能を有する酵素触媒やバイオセンサーを開発する試み、生体分子の機能をうまく利用してナノ材料を創製する試みなどが注目されている。しかし、現状ではそれらはほとんど試行錯誤的に行われている。本研究は、高機能性材料の制御・設計の論理化をもたらす。ATP 駆動蛋白質の機能発現機構の解明は、ナノスペース内で目的に応じた機能を発揮できる人工ナノバイオマシンの設計に繋がる。エイズウイルスの増殖やインフルエンザウイルスの感染に必要な蛋白質の活性部位と選択的に結合し、それらを失活させる活性阻害剤(新薬)の設計、狂牛病やアルツハイマー病を引き起こす変性蛋白質のアミロイド線維形成のメカニズムの解明などは、薬学および医学分野にも波及効果がある。

2.2.15.4. 今後の計画

生体高分子、低分子、水、イオンなどは、単独で存在する場合には単なる「物質」であるが、それらが複雑に相関し合う結果、「生命」現象などの高度な挙動が発現する。その場合、水がいつも中心的な役割を果たすことを忘れてはならない。本研究所エネルギー構造生命科学研究分野の片平正人教授のグループと、標的分子と特異的に結合する RNA アプタマーの機能発現機構の解明に関する共同研究を開始した。生物機能化学研究分野の森井孝教授のグループと、アミノ酸置換によるレセプターとリガンドの結合力の制御に関する共同研究を開始する予定である。分子ナノ工学研究分野の坂口浩司教授のグループとも共同研究課題を検討中であり、複数の専門分野の結束によってバイオエネルギーナノサイエンスと取り組む予定である。

3. 研究部門・研究分野における研究の現状

3. 研究部門・研究分野における研究の現状

研究所の3部門である「エネルギー生成研究部門」、「エネルギー機能変換研究部門」および「エネルギー利用過程研究部門」は、平成8年（1996年）の改組以来、当初の目標に沿って、また、在り方委員会による提言等も取り入れながら、研究・教育活動を進めてきた。また、附属エネルギー複合機構研究センターを軸とした「先進プラズマ・量子エネルギー研究」および「光・エネルギーナノサイエンス研究」の2つの重点複合領域研究を推進し、「国際流動・開発共同研究」を展開してきた。分野に特化した、いわゆる専門性の高い研究においては、その分野における最先端の研究を先導するとともに、先端的な研究から見えてくる融合研究の必要性や新領域研究の動向など、常に俯瞰的な視野に立ち、先進エネルギーの研究に携わってきた。これらの一連の研究成果は、各専門分野において、高く評価されている。

平成20年からは、エネルギー科学研究科・工学研究科原子核工学専攻・原子炉実験所と合同で、GCOEプログラム「地球温暖化時代のエネルギー科学 ―CO₂ゼロエミッションを目指して―」の採択を受け、エネルギー学における理工学領域に特化した研究を推進している。本研究所からは、このプログラムに積極的に参画した研究分野が多く、特にアジアを舞台とする太陽光発電や原子力発電に係わる研究において国際協力が推進された。

エネルギー科学研究科の協力講座としての学生教育の観点からは、エネルギーを取り巻く環境は、ともすれば大きく変化しうるが、従来の「研究分野」の構成を頻繁に変えることは好ましくはないため、今後もエネルギー科学研究科との協力を継続し、新研究体制の下、協力講座としてよりよい教育環境の整備を行っていくことが肝要である。

各部門、分野での研究の進展に伴い、問題となっていた人員の増強、研究環境の改善、研究資金の増強など、以前からの課題については、外部資金の積極的獲得や研究所外プロジェクトへの積極的参加など、また研究所としての計画的な施設整備などにより、着実に緩和されてきている。しかしながら、特に研究資金増強に関しては、今後も一層の努力を続ける必要がある。また、全国的に課題となっている定数削減については、今後、将来計画を検討する中で、大部門の再編や分野構成、さらには附属センターの位置づけを明確にしつつ、その対応を検討していく必要がある。平成25年度からは、第2期中期目標・中期計画の後半に突入する。第3期中期目標・中期計画の策定に当たり、部門・分野研究の在り方が問われている。

各部門・分野の構成人員（平成25年3月31日現在）は資料編（II）1.1節に示した。各部門・分野における人事異動の状況は、資料編（II）1.3.1節に記載している。なお、各研究分野の最近の主要な研究課題は資料編（I）2章に、研究成果に対する評価の状況については同資料編4章にまとめている。また、各分野の財政の概況については、資料編（II）2.1節に示した。

3.1. エネルギー生成研究部門

平成8年(1996年)の研究所改組により、エネルギー生成研究部門は「社会性受容性の高い高品位エネルギーの生成についての研究」を担う部門として発足し、量子放射エネルギー研究分野、原子エネルギー研究分野、粒子エネルギー研究分野、プラズマエネルギー研究分野の4研究分野に加え、外国人客員分野として、先進エネルギー評価分野を擁している。

本研究部門では、21世紀に発展が期待される概念に基づいた量子放射エネルギー生成、未来エネルギー源としての核融合エネルギーシステムの設計と評価、エネルギーの有効利用のためのプラズマ制御の高度化研究のほか、核融合の利用・応用研究として、ブランケット、水素製造に関する研究、小型核融合中性子源開発研究など、産業応用を目指した研究も行っている。本研究部門の主たる研究対象である量子、粒子、プラズマなどを媒体とするエネルギーの高品位化は、学術的にも、またそれらエネルギーの社会的受容性を高めるうえでも緊急の課題であり、そのために「新しい高品位エネルギーの生成原理および生成技術に関する研究」により、他の2研究部門、即ちエネルギー機能変換、エネルギー利用過程両研究部門との密接な連携はもとより、他分野・他部局ならびに学外研究機関との共同研究を鋭意進めている。

外国人客員研究分野には、研究所教員の合議によって選抜された、世界的にも優秀な研究者を招聘し、活発な研究を行ってきている。

1. 構成員

教授：大垣英明、准教授：紀井俊輝 (H20. 11～)、助教：全 炳俊 (H23. 7～)

2. 研究の概要

量子放射エネルギー研究分野では、新しい概念に基づいた新量子放射エネルギーの発生と利用に関する研究を行っている。具体的には、1) 高品質高エネルギー電子ビームの発生、2) 高品質電子ビームを用いた自由電子レーザーの発生及び3) それを利用した研究、4) レーザー逆コンプトン散乱を用いた高輝度 X 線・ガンマ線ビームの発生および5) それを利用した研究、6) 新しい原理に基づく高輝度放射源発生のための周期磁場生成手法の研究を行っている。

3. 主な研究成果

3.1. 自由電子レーザーの発生および利用に関する研究 (発表論文 1-5)

赤外自由電子レーザーを安定して発振させ、それを利用した応用研究を進めることを目標とし、自由電子レーザー装置の基盤技術開発研究および自由電子レーザーを利用した試験研究を実施した。

熱陰極高周波電子銃を用いることで自由電子レーザー施設の小型化を実現できた反面、陰極への戻り電子による過熱現象に伴うビームエネルギー不安定性が安定発振の妨げとなっていた。そこで、陰極材料の最適化、空洞共振周波数の調整によるビームエネルギー補償法の開発を実施し、中赤外領域の自由電子レーザーの大幅な安定化を達成した。これにより、自由電子レーザーを利用した応用研究の実施が本格的に可能になり、外部ユーザーによる利用研究や、自由電子レーザー照射による高調波発生の研究を実施した。

また、より長波長の THz 帯における加速器を用いた小型 FEL 増幅器の設計研究を進め、原理実証試験のための具体的な装置設計を完成させた。

3.2. レーザー逆コンプトン散乱ガンマ線の生成および利用に関する研究 (発表論文 6-10)

電子ビームとレーザーとの正面衝突により発生させる高輝度ガンマ線ビームを用いた非破壊検査手法の確立をめざし、基礎研究を進めた。

原子核共鳴散乱を用いた、特定核物質の非破壊検査のための新しいスキームを提案し、原理検証試験を進めた。また、基盤技術である、レーザーパルス圧縮装置の開発、小型レーストラック型マイクロトロン設計、射出方向可変の衝突スキームの提案、 γ 線検出器の開発を行った。

3.3. バルク超伝導体を用いたアンジュレータの研究 (発表論文 11-15)

バルク超伝導体を用いることで、既存技術の限界を大きく超える強力な周期交代磁場生成を実現することを目標として、新型アンジュレータの開発研究を進めた。

新方式の周期磁場生成手法について、原理検証試験を行うことで、磁場生成メカニズムを明らかにした。精密に制御された磁場分布の実現に向けて、磁場補正手法の提案および検証を行ったほか、精密な磁場分布計測システムの開発を実施した。さらに、20 K 以下の極低温領域での性能予測を行い、さらに動作温度 6 K において、既存の磁場生成方式を上回る強力な周期交代磁場の生成に成功した。

(発表論文)

- 1) Mahmoud Bakr, R. Kinjo, Y. W. Choi, M. Omer, K. Yoshida, S. Ueda, M. Takasaki, K. Ishida, N. Kimura, T. Sonobe, T. Kii, K. Masuda, and H. Ohgaki "Back Bombardment for Dispenser and Lanthanum Hexaboride Cathodes", Phys. Rev. STAB, V 14, June 2011 pp. 060708-1~060708-9
- 2) H. Zen, M. A. Bakr, K. Higashimura, T. Kii, R. Kinjo, K. Masuda, K. Nagasaki and H. Ohgaki, "CAVITY DETUNING METHOD TO COMPENSATE BEAM ENERGY DECREMENT IN THERMIONIC RF GUN DUE TO BACKBOMBARDMENT EFFECT", Proceedings of IPAC10, pp.1725-1727(2010).
- 3) Bakr, M., Yoshida, K., Higashimura, K., Ueda, S., Kinjo, R., Zen, H., Sonobe, T., Kii, T., Masuda, K., Ohgaki, H., "FEL beamline for wide tunable range and beam sharing system at Kyoto University", AIP Conference Proceedings, Volume 1214, 2010, Pages 45-47; Zen, Heishun ; Shimahashi, Kyohei ; Shibata, M. ; Negm, H. ; Konstantin, T. ; Yoshida, K. ; Omer, M. ; Kinjo, Ryota ; Choi, Y. W. ; Kii, Toshiteru ; Masuda, K. ; Ohgaki, Hideaki "Status of mid-infrared Free-Electron Laser facility in Kyoto University" Proceedings of the 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 978-1-4673-1598-2, 2012.
- 4) K. Yoshida, T. Sonobe, M. Bakr, T. Sakka, T. Sagawa, E. Nakata, T. Morii, T. Kii, K. Masuda and H. Ohgaki, "Material Analysis Laboratory in KU-FEL, Kyoto University", Energy Procedia 9 (2011) 483 – 490; K. Yoshida, T. Sonobe, M. A. Bakr, Y. W. Choi, R. Kinjo, M. Omer, M. Takasaki, S. Ueda, N. Kimura, K. Ishida, K. Masuda, T. Kii

- and H. Ohgaki “Application of MIR-FEL Irradiation to Selectively Excite Phonons in Wide-gap Semiconductors”, *Journal of the Korean Physical Society*, V. 59, N. 5, November 2011, pp. 3235~3238; Y. Qin, T. Nakajima, T. Kii, and H. Ohgaki, “Use of Fringe-Resolved Autocorrelation for the Diagnosis of the Wavelength Stability of a Free Electron Laser”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 51, 102704 (2012); X. Wang, T. Nakajima, H. Zen, T. Kii, H. Ohgaki, “Single-shot spectra of temporally selected micropulses from a mid-infrared free-electron laser by upconversion”, *Optics Letters* 37 (24), 5148-5150(2012); Y. Qin, Heishun Zen, Xiaolong Wang, Toshiteru Kii, Takashi Nakajima, and Hideaki Ohgaki, “Pulse duration and wavelength stability measurements of a midinfrared free-electron laser”, *OPTICS LETTERS / Vol. 38, No. 7 / April 1, 2013*, pp.1068-1070; Kyohei. Yoshida, Heishun Zen, Kensuke Okumura, Kyohei Shimahashi, Marie Shibata, Takuya Komai, Hidekazu Imon, Hani Negm, Mohamed Omer, Yong-Woon Choi, Ryota Kinjo, Toshiteru. Kii, Kai. Masuda, and Hideaki Ohgaki, “Observation of high harmonic generation from 6H-SiC irradiated by MIR-FEL”, *Proceedings of FEL2012*, in printing.
- 5) Higashimura, K., Ueda, S., Yoshida, K., Kinjo, R., Bakr, M.A., Sonobe, T., Masuda, K., Kii, T., Ohgaki, H.,” Short bunch effect on tabletop THz FEL amplification”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, Volume 637, Issue 1, Supplement 1, Pages S83-S86 (2010)*; Shimahashi, K.; Zen, H.; Shibata, M.; Negm, H.; Yoshida, K.; Omer, M.; Choi, Y. W.; Kinjo, Ryota; Masuda, K.; Kii, Toshiteru; Ohgaki, Hideaki “Numerical evaluation of THz FEL using photocathode RF gun in KU-FEL”, *37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2012*
 - 6) H. Ohgaki, T. Kii, K. Masuda, M. Omer, T. Misawa, C. H. Pyeon, R. Hajima, T. Hayakawa, T. Shizuma, M. Kando, I. Daido and H. Toyokawa “Proposal of a Non-Destructive Detection System for Hidden Nuclear Materials Based on a Neutron / Gamma-ray Hybrid System”, *Journal of the Korean Physical Society*, V. 59, N. 5, November 2011, pp. 3155-3159; Hideaki Ohgaki, Mohamed Omer, Hani Negm, Toshitada Hori, Toshiteru Kii, Kai Masuda, Tsuyoshi Misawa, Cheolho Pyeon, Ryoichi Hajima, Takehito Hayakawa, Toshiyuki Shizuma, Mamoru Fujiwara, Masaki Kando, Izuru Daito, Shinya Fujimoto, Fumio Sakai, Seong Hee Park, “Non-Destructive Inspection System for Special Nuclear Material using Inertial Electrostatic Confinement Fusion Neutrons and Laser Compton Scattering Gamma-rays”, *IEEE TNS (in press)*
 - 7) I. Daito, M. Kando, T. Shizuma, T. Hayakawa, C. Angell, R. Hajima, H. Ohgaki, High Flux Laser-Compton Scattered Gamma-Ray Source by SBS Pulse Compressed Laser, *J. Plasma Fusion Res.* 88, 553-554 (2012)
 - 8) T. Hori, R. Kinjo, T. Kii, H. Ohgaki, H. Zen, M. Omer, I. Daito, H. Kotaki, M. Kando, R. Hajima, T. Hayakawa, F. Sakai, “Racetrack Microtron for Nondestructive Nuclear Material Detection System” , *Proceedings of the 2012 International Particle Accelerator Conference*
 - 9) T. Kii, M. Omer, H. Negm, Y.W. Choi , R. Kinjo, K. Yoshida, T. Konstantin, N. Kimura, K. Ishida, H. Imon, M. Shibata, K. Shimahashi, T. Komai, K. Okumura, H. Zen, K. Masuda, T. Hori, H. Ohgaki, ” Design Study for Direction Variable Compton Scattering Gamma Ray”, *J. Phys.: Conf. Ser.* 425, 192020.
 - 10) M. Omer, M.A. Bakr, R. Kinjo, Y.W. Choi, K. Yoshida, N. Kimura, K. Ishida, T. Komai, M. Shibata, K. Shimahashi, H. Imon, T. Sonobe, T. Kii, K. Masuda, H. Ohgaki, R. Hajima, T. Hayakawa, T. Shizuma, H. Toyokawa, “Assessment of LaBr3(Ce) Scintillators System for Measuring Nuclear Resonance Fluorescence Excitations near 2 MeV” , *Conference Record, 2011 IEEE Nuclear Science Symposium, NP5.S-98, 1627-1630, 2012*
 - 11) T. Kii, R. Kinjo, M.A. Bakr, T. Sonobe, K. Higashimura, K. Masuda, H. Ohgaki, K. Yoshida, H. Zen, Conceptual Design of a Novel Insertion Device using Bulk Superconducting Magnet, *Physica C: Superconductivity* , 471, 21-22, (2011) 897-900.
 - 12) R. Kinjo, T. Kii, M. A. Bakr, Y. W. Choi, K. Yoshida, S. Ueda, M. Takasaki, T. Sonobe, K. Masuda, K. Nagasaki, H. Ohgaki, ” END FIELD TERMINATION FOR BULK HTSC STAGGERED ARRAY UNDULATOR”, *Proceedings of IPAC10*, pp.3156-3158(2010).
 - 13) M. Shibata, R. Kinjo, Y.W. Choi, M. Omer, H. Negm, T. Konstantin, K. Yoshida, T. Komai, K. Shimahashi, H. Imon, K. Okumura, H. Zen, T. Kii, K. Masuda, H. Ohgaki, “Development of a field measurement system for the Bulk HTSC SAU”, *Journal of Physics: Conference Series*, vol.425, 32021(2013).
 - 14) T. Kii, R. Kinjo, N. Kimura, M. Shibata, M. A. Bakr, Y. W. Choi, M. Omer, K. Yoshida, K. Ishida, T. Komai, K. Shimahashi, T. Sonobe, H. Zen, K. Masuda, and H. Ohgaki, ” Low-Temperature Operation of a Bulk HTSC Staggered Array Undulator”, *IEEE TRANS. ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 22, NO. 3, JUNE 2012*, 1051.
 - 15) R. Kinjo, M. Shibata, T. Kii, H. Zen, K. Masuda, K. Nagasaki, H. Ohgaki, ”Demonstration of a High-Field Short-Period Undulator Using Bulk High-Temperature Superconductor”, *Applied Physics Express*, vol.6, 42701(2013).

1. 構成員

教授：小西哲之、准教授：山本 靖 (～H23. 3)、笠田竜太 (H23. 12～)

助教：竹内右人 (H8. 5～)

2. 研究の概要

地球環境と人類の持続可能な発展の問題を世界規模で根本的に解決する未来のエネルギー源として、核融合をはじめとするゼロエミッションエネルギーシステムを研究している。先進ダイバータやブランケットの開発、燃料として用いるトリチウムの炉内また環境での挙動の研究、エネルギー利用として、水素や合成燃料の製造法、電力システム、そしてシステム設計や社会への影響評価など、革新的エネルギー技術としての核融合エネルギーの発生から利用、評価までの研究を幅広く行っている。

3. 主な研究成果

3.1. バイオマス・核融合小型核融合炉設計に関する研究 (発表論文 1、9、10)

小型の核融合炉のブランケットから生成する高温を利用して、バイオマス廃棄物から水素や合成燃料を製造する「バイオマス・核融合ハイブリッドシステム」の概念設計を提案した。これは、主半径 5m 代、320MW 級のトカマクをベースにして ITER 程度の規模の核融合炉でも経済的に成立しうる革新的な概念である。熱出力をブランケット、ダイバータともに高温低圧の液体金属で取り出し、吸熱化学反応に利用することでカルノー効率の制約を受けず、核融合による発生エネルギーを極めて高効率で利用システムが構成できることを示した。さらにバイオマスの持つ化学エネルギーによるハイブリッド効果で、小型炉でも正味のエネルギー出力が可能であり、より市場性が高く地球環境問題で重要な、石油代替液体燃料を製造する。構成機器が ITER 類似の超電導磁石をはじめとする現実的な装置であるため経済性分析が可能で、近い将来に市場競争力を持ちうることを示した。

3.2. 先進液体金属増殖ブランケットシステムに関する研究 (発表論文 2-3)

核融合炉ブランケットの増殖冷却材として液体金属 LiPb 合金を用いたシステムに関する研究を行っている。液体ブランケットは充填率が高く別途冷却材チャンネルを設置する必要性が低いため高いトリチウム増殖性能を用いることを中性子輸送計算で示した。また熱利用に有利な高温熱媒体を取り出すことができる一方、高圧の冷却材を用いず安全性で利点のあることを指摘した。課題となるトリチウム回収特性について、発表論文 2 では、液体 Li-Pb ブランケットにおいて生成したトリチウムの抽出法として、真空中で落下する Li-Pb 液滴を用いた抽出法「真空シーブトレイ」を開発し、工学的に成立しうる装置サイズを明らかにするとともに、本手法が、従来検討されていたトリチウム抽出法を上回る高い効率を有することを実証した。一方、その駆動力として液体金属振動が流体力学的に発生するメカニズムを明らかにした。また、発表論文 3 では、高温液体 Li-Pb 中の SiC_f/SiC 複合材料の共存性を調べ、900°C、1000h の流動条件下における SiC_f/SiC 複合材料の表面における変質層の生成速度を評価するとともに、リチウム酸化物の介在した新しい変質過程が介在していることを明らかにした。

3.3. 核融合システムにおけるトリチウムに関するマルチスケール研究 (発表論文 4-5)

核融合炉におけるトリチウム燃料の取り扱い、核融合炉システムの成立性のみならず、安全性や安心感の観点においても極めて重要な課題である。当研究分野では、プラントシステムのみならずその周辺環境影響に至るトリチウム挙動のマルチスケール性を考慮した研究開発を進めている。発表論文 4 では、先進核融合ブランケット材料として期待されている SiC_f/SiC 複合材料におけるトリチウム透過挙動を実験的に調べ、定常状態におけるトリチウム透過係数が、 $9.5 \times 10^{-12} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であることを明らかにした。学術的には、複合材におけるトリチウム移行過程において、繊維部分とマトリックスで異なる拡散過程が関与していること、またそれらがトリチウム分圧に対しても異なる依存性を示すことを解明した。

一方、核融合プラントなどで想定される定常放出による環境中のトリチウム移行現象をコンパートメントモデルにより解析し、これまで考慮されてこなかった長期間広域のトリチウム挙動として、法定限度内でも有意な蓄積による濃度上昇が起こりうること、海洋など大規模な水面が、同位体希釈過程によってその影響を大幅に低減できることを明らかにした。また、トリチウムトレーサー実験において、その効果が水面と大気間の波浪などによる攪拌挙動で大きく影響されることを示した (発表論文 5)。さらに発表論文 6 では、食物 OBT やトリチウム水から DNA へのトリチウム移行挙動について、大腸菌細胞を用いて調べ、核融合炉プラント運転中の DNA におけるトリチウム濃度に関する

検討を行った。その結果、同じ被ばく量を与える環境トリチウムでは移行経路、特に食物を介した場合には DNA への移行に差異が生じ、したがって、細胞内でのトリチウムの β 線の飛程を考慮した場合、発がんリスクにも異なる影響がありうることを明らかにした。

3.4. 核融合炉の社会的受容性に関する研究（発表論文 7、11）

環境的にも社会的にも魅力的なオプションたる将来の核融合エネルギーの導入戦略について、安全性や資源問題の観点から検討した。トリチウム放出の能動制御に基づいて、通常運転時に少量のトリチウムを排出する核融合プラントとして、核融合炉の社会的受容性に考慮した対応が必要であることを指摘した。一方、能動的な安全機能によって、通常時および仮想的な事故時においても環境影響を大きく減じることができるシナリオを提示し、核融合の安全性と社会適合性に関して指針を与える成果を得た。

3.5. 円筒形放電型核融合中性子源の開発研究（発表論文 8）

放電型核融合中性子源における放電特性と核融合反応率のシミュレーションコードとして、一次元 PIC (particle-in-cell) MCC (Monte Carlo collision) コードを開発した。このコードは円筒放電管内を往復運動しながら中性子ガスのイオン化と核反応を行うグロー放電プラズマ中の粒子の挙動をモンテカルロ計算でシミュレートし、容易に本装置の形状に即した軸対称座標系に 2 次元化できる。本研究分野が開発した独創的な放電中性子源は放電の維持にイオンの往復動を利用し、電極表面での核反応で中性子を発生する独特な機構を持つので、本コードにより初めてその運転領域の定量的な評価と最適化が可能となった。

並行した中性子ビーム化のための輸送計算と放電実験により、中性子ビーム、それも特に高速、エピサーマルおよび熱中性子という、用途ごとにエネルギースペクトルを特化したビームの発生が可能であることを実証する一方、放電特性を計算と比較した。シミュレーションは粒子軌道から放電電圧が上げられない現象の原因を電極形状にあることを見出しており、今後中性子源の形状と運転条件の最適化に使用可能であることを示した。一方、可搬型装置で比較的低線量のスペクトル調整可能な中性子ビームの生成が可能となったことから、測定器や医療用など様々な応用に可能性が開けた。

（発表論文）

- 1) K. Ibano, H. Utoh, K. Tobita, Y. Yamamoto, S. Konishi, “Design studies of innovatively small fusion reactor based on biomass-fusion hybrid concept: GNOME”, Fusion Engineering and Design 86 (2011) 2779-2782.
- 2) F. Okino, K. Noborio, Y. Yamamoto, S. Konishi, “Vacuum sieve tray for tritium extraction from liquid Pb-17Li”, Fusion Engineering and Design 87 (2012) 1014-1018.
- 3) C. Park, K. Noborio, R. Kasada, Y. Yamamoto, S. Konishi, “Compatibility of SiCf/SiC composite exposed to liquid Pb-Li flow”, Journal of Nuclear Materials 417 (2011) 1218-1220.
- 4) K. Isobe, T. Yamanishi, S. Konishi, “Tritium permeation behavior in SiC/SiC composites”, Fusion Engineering and Design 85 (2010) 1012-1015.
- 5) Shibata, T., Noborio, K., Yamamoto, Y., Konishi, S. “Tritium concentration in the environment and genomic DNA” Fusion Science and Technology 60 (3) , pp. 1200-1203 (2011)
- 6) T. Shibata, K. Noborio, Y. Yamamoto, S. Konishi, “Tritium concentration in the environment and genomic DNA”, Fusion Science and Technology 60 (2011) 1200-1203.
- 7) S. Konishi, T. Shibata, K. Noborio, Y. Yamamoto, “Strategy for environmentally and socially attractive fusion tritium system”, Fusion Science and Technology 60 (2011) 1211-1214.
- 8) K. Noborio, S. Konishi, T. Maegawa, Y. Yamamoto, “Numerical calculation of reactions on electrode surfaces and in a volume of a discharge type fusion neutron source: By developing a one dimensional particle-in-cell Monte Carlo code”, Proceedings - Symposium on Fusion Engineering (2011) art. no. 6052315.
- 9) S. Konishi, “Hydrogen Production from Nuclear Fusion Energy“, Nuclear Hydrogen Production Handbook ,Chap.2 Edit by R. Hino, ISBN: 1439810834, CRC Press Mar 2011（分担執筆）
- 10) 小西哲之、「いろいろな核融合炉」テキスト核融合炉、プラ核誌 82, 2011
- 11) 小西哲之、「グリーン産業革命—社会経済システムの改編と技術戦略」：（佐和隆光らと共著）ISBN978-4-8222-4794-2 日経 BP, 2010

1. 構成員

教授：長崎百伸、准教授：増田 開 (H16.4～)、助教：大島慎介 (H24.4～)

2. 研究の概要

高パワー電磁波と荷電粒子ビームの相互作用を高度に制御する先進的エネルギー研究を推進する。特に、電子サイクロトロン共鳴加熱によるプラズマの生成・加熱・電流駆動、高度プラズマ計測装置の開発・揺動解析手法の開発によるプラズマ揺動の物理機構の理解を目指す。また、中性子源・陽子源として慣性静電閉じ込め核融合装置の高性能化と応用の研究や、先進 D-3He 核融合反応、高輝度相対論的電子ビームの生成と量子放射光の発生などの研究を進める。

3. 主な研究成果

3.1. 電子サイクロトロン電流駆動に対する捕捉粒子の影響 (発表論文 1)

第 2 高調波電子サイクロトロン電流駆動の特性をヘリオトロン J 装置において調べ、最大 EC 駆動電流は磁場リップルの山に近い位置での吸収の場合に $N_{||}=0.5$ において得られた。EC 駆動電流の増加に合わせて電子サイクロトロン放射の増大が観測されており、高エネルギー電子の役割の重要性を示唆している。捕捉粒子効果が含まれる平行運動量保存モデルを用いたレイトレーシング計算コード TRAVIS をヘリオトロン J 磁場配位に適用し理論的に評価した EC 駆動電流は実験値と一致した。 $N_{||}$ と B に対する依存性も再現し、Fisch-Boozer 効果と Ohkawa 効果を定量的に明らかにした。

3.2. JT-60SA におけるプラズマ着火のための ECRH 予備電離の理論解析 (発表論文 2)

超電導トカマク JT-60SA における電子サイクロトロン波を用いた予備電離アシストによるプラズマ着火をゼロ次元モデルを用いて理論解析した。JT-60SA ではトロイダル電場が 0.5 V/m に制限されているため、信頼性あるプラズマ着火のための実験条件を明確にする必要がある。空間的に一様と仮定したプラズマにおいて、電子と中性粒子の粒子輸送方程式、電子とイオンのエネルギー輸送方程式、電気回路方程式を解いた。数値計算の結果、中性粒子密度が $3.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ の場合、少なくとも 150kW の ECRH パワーが必要であることがわかり、酸素や炭素といった不純物密度を下げることでプラズマ着火に有効であることを示した。JT-60U のパラメータを用いた数値計算結果は、実験結果を定性的に再現した。

3.3. Heliotron J SMBI プラズマにおける AM 反射計を用いた電子密度分布挙動解析 (発表論文 3)

超音速分子ビーム入射 (SMBI) によって閉じ込めが改善した Heliotron J プラズマの電子密度分布を、マイクロ波 AM 反射計を用いて計測した。通常的气体パフ粒子供給よりもプラズマ内に深く粒子を供給する SMBI パルスでは、入射直後から平均電子密度が増大するとともに、電子密度分布が急激にピークすることを明らかにした。Langmuir プローブで計測した周辺電子密度は低下すること、また、軟 X 線分布はピークしており、反射計計測結果と矛盾しない。この結果は、SMBI による粒子閉じ込め・輸送の改善がプラズマ蓄積エネルギーの増大と関係していることを示唆している。

3.4. 静電プローブによる Heliotron J 周辺プラズマの揺動計測 (発表論文 4)

複数の静電プローブを用いて、プラズマ閉じ込め性能に重要であるヘリオトロン J 周辺プラズマの揺動計測を進めた。中性粒子ビーム加熱プラズマにおいて、高速イオン励起不安定性が周辺揺動や周辺ポテンシャル構造に対して影響を与えていることをプローブ計測によって見出した。径方向アレイプローブ計測器を開発、計測に適用し、高速イオン励起不安定性時に起因して周辺ポテンシャルおよび電場構造が変化していることを確認した。またイオン飽和電流の応答とビーム放射分光計測の結果から、高速イオンの径方向輸送に起因して、ポテンシャル構造が変化していることを示した。高速イオン励起不安定性が内場構造に影響を与え得ることを明確に示す実験結果であり、これらの過程を通じてバルクプラズマの閉じ込め特性に影響を与える可能性を示唆している。

3.5. Heliotron J における高密度プラズマ計測のための遠赤外レーザー干渉計の開発

高密度プラズマの密度計測、そして分布計測を目的として、既存干渉計より短波長の遠赤外 (FIR) 領域の多チャンネル干渉計システムの開発を進めた。これまで、遠赤外レーザーである HCN レーザー

の基本的な構築を迫え、発振を確認している。今後出力向上のためのレーザー運転条件の最適化を目指す。また、干渉計は線積分計測であるため、局所密度の情報を得る為には例えばアーベル変換などを用いて再構成する必要がある。ヘリオトロンJ装置では、しかしながら磁気面形状が著しく円形とは異なるため、再変換は容易ではない。数値計算によって、特に周辺部密度が高い場合に、再構成が困難になることを確認しており、これは磁気面形状が周辺部で特に円形形状からずれていることに起因すると考えられる。そこで、計算の仮定で Tikhonov の正則化法を適用することで、より現実に近い形状の分布を得ることが可能であることを示した。今後、実験データへの適用を目指す。

3.6. 慣性静電閉じ込め核融合中性子源の応用技術の開発（発表論文 5）

慣性静電閉じ込め（IEC）核融合は、小型装置で高い DD 核融合反応率が得られるため、安全な可搬中性子源としての応用が期待されている。爆薬探知技術の国際共同研究を引き続き進めると共に、多段電圧導入端子などの技術開発により従来の 10 倍となる $10^8/\text{sec}$ の DD 中性子発生率を達成して、これを用いた特定核物質探知技術の開発も進めている（特願 2012-191500）。また、現在は専ら大型中性子源施設で行われているラジオグラフィへの応用や（特願 2012-25129）、トリチウムを用いるため可搬性は失われるものの 2 桁以上高い出力が得られる DT 運転に向けた研究開発も進めている。

3.7. 低圧力下における慣性静電閉じ込め核融合反応率の電流への非線形依存性（発表論文 6）

既存の中性子発生管はいずれもイオンビームとターゲット（IEC の場合にはガス）との衝突を利用しているため、ビーム電流に比例した出力しか得られない。これに対し、H21 年度までに開発した環状イオン源駆動方式においては、低圧力・高電圧の条件下で核融合反応率の電流依存性が 1.7 乗以上に遷移することを見出した。この新奇な現象の機構解明と、非線形効果を利用した核融合反応率向上を目指し、イオン源の大電流化や核融合反応空間分布計測などの基礎的な研究を進めている。

3.8. 高輝度電子ビーム生成の研究（発表論文 7）

自由電子レーザーを始めとする量子放射光源の高度化に必要な電子ビームの高輝度化には、空間電荷効果が最も顕著な電子銃の高性能化が効果的である。熱陰極高周波電子銃の課題である逆流電子の抑制が可能な新奇の三極管型高周波電子銃の開発を行っている。また、電子銃シミュレーションの国内研究グループを立ち上げるなどして極低エミッタンス電子ビーム生成の基礎研究も進めている。

（発表論文）

- 1) K. Nagasaki, et al., "Influence of trapped electrons on ECCD in Heliotron J", Nucl. Fusion 51 (2011) 103035
- 2) K. Hada, K. Nagasaki, K. Masuda, R. Kinjo, S. Ide and A. Isayama, "Analysis of ECRH Pre-Ionization for Plasma Start-Up in JT-60SA", Plasma Fusion Res.7 (2012) 2403104
- 3) K. Mukai, K. Nagasaki, et al., "Electron Density Profile Behavior during SMBI Measured with AM Reflectometer in Heliotron J Plasma", Plasma and Fusion Research, 6 (2011) 1402111
- 4) S. Ohshima, et al., "Edge Plasma Response to Beam-driven MHD Instability in Heliotron J", 24th IAEA Fusion Energy Conference, San Diego, USA, Oct. 8-13, 2012, EX/P4-17
- 5) H. Ohgaki et al., "Non-Destructive Inspection System for Special Nuclear Material using Inertial Electrostatic Confinement Fusion Neutrons and Laser Compton Scattering Gamma-rays", Proc. 12th IEEE Intl. Conf. Tech. Homeland Security (2012) 666-671.
- 6) K Masuda et al., "Cathode grid current dependence of $D(d, n)^3\text{He}$ reaction rates in an inertial electrostatic confinement device driven by a ring-shaped magnetron ion source", Plasma Phys. Control. Fusion 52 (2010) 95010.
- 7) K. Masuda, T. Shiiyama, T. Kii, H. Ohgaki, K. Kanno and E. Tanabe, "Development of a Thermionic Triode RF Gun", Proc. 31st Intl. Free Electron Laser Conf. (2010) 281-284.

1. 構成員

教授：水内 亨、准教授：南 貴司 (H22.1～)、助教：小林進二 (H14.4～)

2. 研究の概要

本研究分野は、エネルギー媒質である高温プラズマを扱うためには、プラズマの物性を物理的・工学的に解明して行くことが不可欠との認識の下、未知の領域が広いヘリカル系磁場配位の閉じ込め特性の基礎的解明を進めつつ、プラズマエネルギーの制御に関する知識・技術の開拓とそれらの体系化を目指している。中でも、「ヘリカル軸ヘリオトロン磁場による核融合エネルギーの実用化」に向けた研究を進めており、多くの部分は、研究所重点複合領域「先進プラズマ・量子エネルギー」での分野間並びに部門間共同研究を進めている。同時に、中期計画の部局行動計画に掲げる核融合科学研究所との双方向型共同研究や同研究所国際共同研究拠点ネットワーク活動に密接に関わっている。この様な共同研究の下、平成 19 年度以降、下記のものを含め、多くの成果を得ることができた。近年、本研究分野を含む本研究所核融合プラズマ研究グループの努力並びに研究所を始めとする関係各位の御協力により、老朽化が目立ってきた加熱・計測装置の整備・更新並びに新規局所計測システムの開発・導入等により、一層精緻な実験並びに解析が可能となりつつある。同時に新たなプラズマ生成・制御手法の開発においても大きな進捗が見られており、これまで以上にプラズマエネルギー制御に関する知見の深化が期待される。

3. 主な研究成果

3.1. 給気制御による Heliotron J プラズマの高密度化 (発表論文 1)

京大独自の創案によるヘリカル軸ヘリオトロン磁場配位の実験的最適化を目指す Heliotron J 実験では、同配位の特徴を検証するため、高 β (あるいは高密度) 化が重要な鍵である。ペレットに代わる中型装置に適した高密度化に向けた給気制御法として、ヘリカル系装置としては初めて、超音速分子ビーム入射 (SMBI) 法を Heliotron J へ適用した。本手法により、従来のガスパフ法で観測される高密度域での閉じ込め劣化を伴わない高密度プラズマ生成に成功した。また、短時間に多量の中性ガスを導入する新手法 (HIGP 法) を開発、 10^{20}m^{-3} を越える高密度プラズマの生成にも成功した。

3.2. 非共鳴マイクロ波アシストによる新しい NBI プラズマ着火法の開発 (発表論文 2)

非共鳴マイクロ波による予備電離を用い、中性粒子ビーム (NBI) 単独でプラズマを生成する、新プラズマ着火法を Heliotron J で開発した。本手法では、予備電離による電力は、主加熱パワーの 1/100 以下の低パワーで良く、また、高パワーの電子サイクロトロン波共鳴加熱等を必要としないため、磁場強度に依存しないプラズマ着火が可能である。本手法により運転領域の拡大が可能となり、今後建設が予定される大型装置において加熱パワーの低減やプラズマ着火装置の簡略化が期待される。

3.3. 磁場のミラーリップルに対するプラズマ回転の応答と平行粘性に関する研究 (発表論文 3)

Heliotron J では磁場のフーリエ成分制御により、バンピー磁場制御によりミラーリップルを変化させることができる。実験的にミラーリップルを変えて、磁場に平行方向のプラズマ回転速度の応答を調べたところ、プラズマ中心部ではリップル強度の増加に対してプラズマ回転速度の低下が観測された。一方で周辺部では回転速度はリップル強度に対して鈍感であった。中心部における回転速度応答の要因の一つとして、平行粘性の増加が予想される。

3.4. 乱流揺動計測を指向したビーム放射分光計測装置の開発 (発表論文 4)

乱流揺動と異常輸送との関連性解明のため、プラズマ密度揺動計測用ビーム放射分光 (BES) 装置を開発、同手法による世界で初めての立体磁気軸配位における密度揺動計測に成功した。本装置により、異なる揺動強度分布を持つ複数周波数域に高速イオン励起 MHD 揺動が観測され、揺動の同定に向けた現象の理解が進んだ。また、プラズマ条件によっては、比較的広い周波数帯 (5-30kHz) で静電揺動的特徴を持つ揺動が観測されており、電子反磁性ドリフト方向に回転していることも見出された。

3.5. 高い波長・空間分解能を持つ荷電交換分光装置の開発 (発表論文 5)

プラズマ中のイオン温度・回転速度計測のため、高い波長・空間分解能を持つ荷電交換分光 (CXRS) 装置を開発した。立体磁気軸配位を利用した観測視線の最適化により、プラズマ中心から周辺部まで

高い空間分解能 ($\Delta r/a < 0.06$) でイオン温度・回転速度の計測が可能となった。高分散で明るい分光器の採用により、回転速度の計測誤差は実質的に 1km/s 程度に押さえられている。

3.6. Heliotron J 装置用 Nd:YAG Thomson 散乱計測装置の開発 (発表論文 6)

Nd:YAG レーザートムソン散乱計測装置用に最適なポリクロメータ、レーザー制御システム並びに高速 AD コンバータの開発を行った。ポリクロメータは 6 波長チャンネル (1 チャンネルは密度較正用) を有し、干渉フィルターの透過帯域最適化により全チャンネルで十分な光子数を検出可能とした。また、高速応答の APD 用前置増幅回路を用いることで S/N 特性改善を得ている。一方、H-mode のような自発遷移現象に伴うプラズマ分布の変化を正確に測定するため、遷移現象の前兆現象の発現に合わせてレーザーの入射タイミングを容易に制御できる、小型かつ安価のマイクロコントローラ PIC を利用したレーザー制御装置を開発した。また、データ処理システム用 AD 変換システムとして、最新の高速 A/D コンバータチップを用いて散乱信号の波形を直接デジタル信号に変換する方式を開発し、飛躍的に情報量を高め、計測精度の改善を図っている。

3.7. 双方向型共同研究センター間連携研究課題による粒子補給最適化研究 (発表論文 7)

核融合科学研究所双方向型共同研究におけるセンター間連携研究として、平成 24 年度より筑波大学プラズマ研究センターと粒子補給最適化に関する共同研究を開始した。双方で同一課題に取り組むことで、得られる知見の共有・相乗効果が期待されている。Heliotron J 装置においては HIGP 法を用いて $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ を越える高密度プラズマ生成に成功した。筑波大学 GAMMA 10 装置においては複数の高速カメラ観測とシミュレーションにより、SMBI のビーム入射特性を調べた。

(発表論文)

- 1) T. Mizuuchi et al., Contrib. Plasma Phys. 50 (2010) 639-645.
T. Mizuuchi, et al., J. Nucl. Mater., in press (Available online 17 Jan., 2013).
- 2) S. Kobayashi, et al., Nuclear Fusion, 51 (2011) 62002.
- 3) H.Y. Lee, et al., Plasma Phys. Cont. Fusion 55 (2013) 035012.
H.Y. Lee, et al., "Magnetic field configuration dependence of momentum transport in Heliotron J", 39th EPS Conf. Plasma Phys. (Stockholm, Sweden, July 2-6, 2012), P2.031.
- 4) S. Kobayashi, et al., Rev. Sci. Inst. 83 (2012) 10D535. S. Kobayashi, et al., Rev. Sci. Inst. 81(2010) 10D726.
- 5) S. Kobayashi, et al., J. Plasma Fusion Res. Series Vol. 9 (2010) 59-63.
- 6) T. Minami, et al., Plasma Sci. Tech. 15 (2013)240-243.
N. Kenmochi et al., "Development of a high time resolution Nd:YAG Thomson scattering system for Heliotron J", 22nd Int. Toki Conf. (Toki, Gifu, Nov. 19-22, 2012) P1-31.
- 7) T. Mizuuchi, et al., "Study of Fueling Control for Confinement Experiments in Heliotron J", IAEA-FEC2012 (San Diego, USA, Oct. 8-13, 2012) EX/P3-07.
K. Hosoi, et al., Plasma Fusion Res. 7 (2012) 2402126.

先進エネルギー評価研究分野（外国人客員）

国際的視点から将来のエネルギー問題を見据えた先進エネルギーの開発・利用と評価の研究を行う外国人研究分野である。原則として年度毎に担当部門を決め、当該部門の受け入れ教員の推薦を基に招聘研究員選考を行うことにより、広い視点からの時宜に適した客員教員を決定している。平成 22-24 年度の招聘者、期間、受入教員については、資料編(II) 1.4.1 を参照されたい。

招聘期間の重複が認められたことにより、招聘がよりフレキシブルに実施できるようになった。広範囲な先進エネルギーの開発・利用と評価の研究が担当研究分野関連分野教員との密接な連携を通して行われ、双方にとって多くの実りある成果を得ている。また、この招聘を契機に、国外との共同研究協定の締結や共同研究の一層の促進がなされた場合が多い。

3.2. エネルギー機能変換研究部門

平成8年(1996年)の研究所改組により、エネルギー機能変換研究部門は「エネルギーの機能的利用にとって重要な、エネルギー機能変換の効率化、高度化について研究する。そのために、エネルギーと物質との相互作用の原理・機構の解明、新しいエネルギー変換原理の解析、エネルギー機能材料の創製とその応用などの研究を行う。」との研究内容を担う部門として発足し、5つの研究分野；複合機能変換過程研究分野、レーザー科学研究分野、エネルギー基盤材料研究分野(平成22年度までは、エネルギー貯蔵研究分野)、複合系プラズマ研究分野、クリーンエネルギー変換研究分野(客員分野)から成る。

本研究部門では、エネルギーの高効率機能変換と新機能創出を目的として、各種エネルギーと物質との相互作用機構の解明と利用、エネルギー機能変換過程の高効率化・高性能化、エネルギー機能材料の創製と応用等の研究を推進している。プラズマ(Heliotron-J)やフェムト秒レーザーならびに加速イオンなどの高エネルギー粒子線と物質の相互作用研究は、材料科学の基礎から応用にわたる広範囲な領域での展開が期待され、その成果に基づいて革新的な材料の開発研究が進展している。

国内客員研究分野では、研究所教員の合議によって選抜された研究者を招聘し、環境負荷の少ないクリーンエネルギーシステムを目指し、再生型自然エネルギーやバイオエネルギー領域も含め、エネルギー生成・変換の高効率化ならびにその有効利用システムの研究等の研究を所内研究分野との密接な連携の下実施している。

1. 構成員

教授：松田一成、准教授：檜木達也（H18.4～）、助教：神保光一（H8.5～）

特定助教：近藤創介（H21.4～）

2. 研究の概要

ナノ材料・ナノ複合材料は、エネルギーの高効率生成・利用の観点から高いポテンシャルを有する。そこで、新しいナノ材料の創生とナノ材料で起こる物性を明らかにし、次世代の高効率太陽電池などに向けた新しい光エネルギー利用のための高効率光電変換の学理の追求や新しい光機能性創出の研究を進めている。さらに、ナノスケールでのプロセス制御により、超高温環境下や中性子照射環境下などの苛酷環境下で使用可能なセラミックスを中心とした新材料の開発を行っている。

3. 主な研究成果

3.1. ナノカーボン物質の光物性・光機能性に関する研究（発表論文 1-5）

ナノカーボン物質の一つであるカーボンナノチューブは、直径がわずか 1nm の細長い筒状のナノ物質であり、近年のナノサンスやナノテクノロジー研究を象徴する物質である。ナノサイエンスを基盤にした新しい物質科学やそのエネルギー応用を展開する研究舞台として、カーボンナノチューブなどのナノカーボン物質は非常に興味深い系である。このようなカーボンナノチューブの光学的性質に深く関与する電子状態の理解は、様々な量子光物性の発現や光エネルギーの高効率利用に向けた要となっている。それらは同時に、ナノカーボン物質における新しい光機能の発現、さらにはそれらを利用した省エネルギーデバイス創成などに向けた課題でもある。

カーボンナノチューブでは、光で生成された電子とホールがクーロン力で束縛した状態である“励起子”（固体中での水素原子様な状態）が、その光学的性質（光物性）に大きな影響を及ぼす。我々は、キャリアをドーピングしたカーボンナノチューブにおいて、ドーピングされたホールと光で生成された電子とホールの三つの粒子が束縛した状態である“正に帯電した荷電励起子”もしくは“正のトリオン”と呼ばれる状態（固体中での水素分子イオン様な状態）が安定に存在していることを見いだしており、これは、室温という非常に高い温度領域で安定に存在する荷電励起子（トリオン）の初めての観測例である。それとともに、カーボン系材料において初めてのトリオンというスピン自由度の量子状態制御が可能な素励起を発見したことを意味する。さらに、電気化学ドーピングという手法を利用し、二つの電子と一つのホールが束縛した“負に帯電した荷電励起子”（負のトリオン）も、カーボンナノチューブでは安定に存在することを世界に先駆けて実験的に示すことができた。また、上記以外にもキャリアドーピングされたカーボンナノチューブの特異な光物性・機能、さらには下記に詳しく述べるような太陽光の効率利用に向けたエネルギーデバイス応用に向けた様々な研究成果が得られたことを付記しておく。

3.2. ナノカーボン太陽電池の研究（発表論文 6）

我々は、次世代のエネルギー生成に向けた高機能・高付加価値の太陽電池を実現するために、ナノ物質（カーボンナノチューブ）をベースにした太陽電池の研究を進めている。ここではまず、カーボンナノチューブと Si のヘテロ構造太陽電池をモデルケースとして研究した。そのモデルケースで、光電変換メカニズムを解明することにより、変換効率を向上するための指針を得るという方針を取った。まず、*n* 型 Si 基板上に *p* 型カーボンナノチューブネットワークを形成したヘテロ接合太陽電池デバイスを製作し、その電流電圧特性を測定した。暗状態ではダイオード特性を示し、光照明した状態では発電していることが確認された。ここで測定された電流-電圧特性のデータから、光電変換効率 η : 2.4%、解放電圧 V_{oc} : 0.39V、短絡電流 J_{sc} : 14.6mA/cm² であることがわかった。

次に、この変換効率を最適化するために、カーボンナノチューブネットワークの膜厚を変化させ作製したデバイスの光電変換効率を調べた結果、膜厚と変換効率には強い相関があることがわかった。この振る舞いを等価回路モデルで解析し、変換効率 η を、(1) Si に入射する光量、(2) 太陽電池面内の有効な *pn* 接合の割合、(3) 直列抵抗、並列抵抗等による損失、を考慮することで、実験結果を良く再現できることがわかった。これらの考察から、デバイスの高効率化のカギは、ナノチューブを *n*-Si 表面に高密度に並べ、実効的に *pn* 接合密度を高くすることであることを明らかにし、効率向上に向けた設計指針を得た。ここで得られた知見は、原著論文発表とともに企業との共同での特許申請へと繋がっている。

3.3. ポーラス SiC 複合材料の開発 (発表論文 7)

1000°C以上でも使える、新しいコンセプトの耐酸化・高靱性ポーラス炭化珪素 (SiC) セラミックス複合材料を開発した。マトリックスは、液相焼結法、反応焼結法により形成した。ポーラス SiC を形成するために、気孔率に対応する余剰 C 粉末を含んだ状態でマトリックスを焼成し、高温大気化で脱炭処理を行うことにより、ポーラス SiC マトリックスを形成した。製造プロセスは非常に簡略化できると、材料間の特性のばらつきは小さい。従来の C 繊維や SiC 繊維を用いたセラミックス複合材料に比べて、構成要素が SiC のみなので、耐酸化特性をはじめとする耐環境特性が著しく向上し、1000°Cを超える大気雰囲気においても、耐酸化被覆無しで強度劣化が無く、脆性的な破壊をせず靱性を示す。1100°C、100 時間の大気暴露後の材料に関しても、C 界面のような致命的な酸化による劣化は生じないため、300MPa 近い、健全な材料特性を維持した。本技術では基本特許を取得し、JST のサポートにより国際出願 (特許出願番号 PCT/JP2011/76004) を行った。民間企業への独占ライセンス契約を結び実用化技術の開発を進めている。単独のライセンス契約の規模としては、平成 23 年度の京都大学全体で首位である。本技術は化学工業日報、日刊工業新聞 (2 回) でも報道された。

(発表論文)

- 1) S. Mouri, Y. Miyauchi, M. Iwamura, and K. Matsuda, "Temperature dependence of photoluminescence spectra in hole-doped single-walled carbon nanotubes: Implications of trion localization" *Phys. Rev. B* 87 (2013) [045408-1]-[045408-5].
- 2) S. Konabe, K. Matsuda, and S. Okada, "Suppression of exciton-electron scattering in doped single-walled carbon nanotubes" *Phys. Rev. Lett.* 109, (2012) [187403-1]-[187403-5].
- 3) J. S. Park, Y. Hirana, S. Mouri, Y. Miyauchi, N. Nakashima, and K. Matsuda, "Observation of negative and positive trions in the electrochemically carrier-doped single-walled carbon nanotubes" *J. Am. Chem. Soc.* 134, (2012) 14461-14466.
- 4) S. Mouri, and K. Matsuda, "Exciton-hole interactions in hole-doped single-walled carbon nanotubes evaluated by absorption spectral changes, *J. Appl. Phys.* 111, (2012) [094309-1]-[094309-6].
- 5) S. Mouri, Y. Miyauchi, and K. Matsuda, "Dispersion-process effects on the photoluminescence quantum yields of single-walled carbon nanotubes dispersed using aromatic polymers", *J. Phys. Chem. C* 116, (2012) 10282-10286.
- 6) D. Kozawa, K. Hiraoka, Y. Miyauchi, S. Mouri, and K. Matsuda, "Analysis of the photovoltaic properties of single-walled carbon nanotube/silicon heterojunction solar cells", *Appl. Phys. Exp.* 5, (2012) [042304-1]-[042304-3].
- 7) 檜木達也, "高靱性多孔質炭化珪素複合材料の開発", *Fine Ceramics Report* 30 (2012) 155-159.

1. 構成員

教授：宮崎健創、准教授：中嶋 隆（H10.4～）、助教：畑 幸一（H8.5～）、宮地悟代（H16.4～）

2. 研究の概要

高品質かつ高機能の光、すなわちレーザーを用いることにより、様々な物質に様々な状況下で発現する、主に超高速の非線形現象を発見、理解、および制御して、未来につながる科学技術基盤を創出することが当該分野の研究目標である。対象としては、原子・分子、固体、薄膜などの一般的によく使われる物質からナノ粒子やメタマテリアルのような物質まで幅広く、また、用いる波長も極端紫外～紫外～近赤外～中赤外までと異なる波長域におけるレーザー物質相互作用を理論および実験研究の対象とする。

3. 主な研究成果

3.1. メタマテリアルを用いたフェムト秒パルスの伝搬速度制御（発表論文1）

メタマテリアルとは、入射電磁波の波長よりはるかに小さなサイズの構造を持つ人工物質であり、回折限界を超えた超高分解能レンズや高性能アンテナなど、様々な応用が考えられている。本研究では、メタマテリアルを超短光パルスの伝搬媒質とした場合に、その伝搬速度がパルスのチャープによって制御できることを理論的に示した。

3.2. 超短パルス列を用いた超高速核スピン偏極スキームの提案および解析（発表論文2）

核スピン偏極は、原子核物理や高エネルギー物理学のような基礎科学のみならず、核磁気共鳴画像法（MRI、magnetic resonance imaging）を応用した医療診断でも重要な技術であるが、本研究では J-PARC の物質・生命科学実験施設で生成する超低速ミュオンを効率よく偏極させるのに適したスキームを新たに考案した。

3.3. ドップラー広がりを持つ室温ガスを用いた真空紫外パルスの高効率発生（発表論文3）

真空紫外光の高効率発生は、レーザーが発明された半世紀前から常にチャレンジングなテーマであり、今なお決め手となるような高効率発生法は確立されていない。本研究では、室温の希ガスを非線形波長変換媒質として用いた場合について、レーザー誘起コヒーレンスをうまく使うことにより、レーザーパルス間のジッターにも、また、ドップラー広がりにも影響されることなく、安定かつ高効率な真空紫外パルス発生が可能であることを理論的に示した。

3.4. 中赤外自由電子レーザー（KU-FEL）の波長安定性計測法の開発（発表論文4）

自由電子レーザーの波長安定性測定については世界でも報告例はないが、本研究では波長安定性を計測するためのシンプルなスキームを独自に考案し、また、実際にこれを用いて、KU-FEL の波長揺らぎが約 1.3%であることを実験的に計測した。

3.5. 和周波発生を用いた中赤外自由電子レーザーの単一パルススペクトル計測（発表論文5）

KU-FEL のような発振器型 FEL は μs 程度のマクロパルスの中に短い時間間隔（350 ps）で多数のマイクロパルスが存在しているというパルス構造を持つため、分光応用のためには重要であるにもかかわらず、個別マイクロパルスのスペクトル計測は極めて難しい。本研究では、KU-FEL と外部レーザーを時間同期させることによって KU-FEL パルスに時間ゲートをかけ、近赤外の和周波を発生させることによって、小型 CCD 分光器で時間選択されたマイクロパルススペクトルを単一パルス計測する事に成功した。

3.6. 超短パルス高強度レーザーによる分子配向と高次高調波発生を利用した分子分光技術の開発（発表論文6-7）

高強度なフェムト秒レーザーで配向された分子から誘起される高次高調波発生を利用することにより、分子の回転温度を高精度に測定できる新しい技術を開発し、それを用いることによって単一分子からの高次高調波発生特性を測定することに成功した。これまで分子は集団としてしか取り扱えなかったが、本成果により初めて単一分子からの物理的描像を明らかにしたため学術的インパクトは大きく、原著論文が Physical Review Letters 誌に掲載された。

3.7. 超短パルスレーザーによるナノプロセッシング技術の開発（発表論文 8-9）

固体表面にフェムト秒レーザーを照射することにより励起される表面プラズモンポラリトンおよび光近接場効果を利用し、使用するレーザー光の波長よりも微細な格子構造を作製できる全く新しい光プロセス技術を開発した。この技術を利用することにより、ワイドギャップ半導体である窒化ガリウム表面に周期サイズが 100 nm オーダーの均一なナノ格子を作製することに成功した。本手法の新奇性・速報性により、本成果は国際光工学会（SPIE）が配信しているニュース記事の中で、平成 24 年 10 月 24 日付のトップ記事として配信された。

（発表論文）

- 1) V.Y. Fedorov and T. Nakajima, “Controlling the propagation velocity of a femtosecond laser pulse with negative index metamaterials”, *Phys. Rev. Lett.* 107, 143903 (2011).
- 2) T. Nakajima, “A scheme to polarize nuclear-spin of atoms by a sequence of short laser pulses: application to the muonium”, *Optics Express* 18, 27468-27480 (2010).
- 3) L. Deng and T. Nakajima, “Generation of vacuum-ultraviolet pulses with a Doppler-broadened gas utilizing high atomic coherence”, *Optics Express* 20, 17566 (2012).
- 4) X. Wang, T. Nakajima, H. Zen, T. Kii, and H. Ohgaki, “Single-shot spectra of temporally selected micropulses from a mid-infrared free-electron laser by upconversion”, *Optics Letters* 37, 5148 (2012).
- 5) Y. Qin, H. Zen, X. Wang, T. Kii, T. Nakajima, and H. Ohgaki, “Pulse duration and wavelength stability measurements of a midinfrared free-electron laser”, *Optics Letters* 38, 1068 (2013).
- 6) K. Yoshii, G. Miyaji and K. Miyazaki, “Measurement of Rotational Temperature in a Molecular Beam with Femtosecond Laser Pulses”, *J. Laser Micro/Nanoengineering*, 5 (2010) 121-124.
- 7) K. Yoshii, G. Miyaji, and K. Miyazaki, “Retrieving angular distributions of high-order harmonic generation from a single molecule”, *Phys. Rev. Lett.*, 106 (2011) 13904/1-4.
- 8) G. Miyaji, K. Miyazaki, K. Zhang, T. Yoshifuji, and J. Fujita, “Mechanism of femtosecond-laser-induced periodic nanostructure formation on crystalline silicon surface immersed in water”, *Opt. Express*, 20 (2012) 14848-14856.
- 9) G. Miyaji and K. Miyazaki, “Nanograting fabricated with femtosecond laser pulses”, *SPIE Newsroom*, 10.1117/2.1201210.004516 (2012).

1. 構成員

教授：木村晃彦、准教授：森下和功（H11.3～）、助教：笠田竜太（～H23.11）
特定助教：岩田憲幸（H23.9～H25.3）

2. 研究の概要

エネルギープラントの構造材料開発および保全に関する基礎研究。核エネルギー発電プラントの圧力容器鋼や炉内構造物の材料挙動予測を可能とする材料物性基礎研究、次世代の高効率発電プラント用の高性能・高機能を付与した酸化物分散強化（ODS）鋼の開発研究および低放射化フェライト鋼を用いた核融合炉ブランケットの性能評価などの材料・システムインテグレーション基礎研究を行っている。高エネルギー粒子線照射による材料損傷組織の形成機構解明のための計算機模擬実験など。

3. 主な研究成果

3.1. ODS 鋼の耐照射性能発現機構の解明（発表論文 1-3）

先進原子力材料として期待されている ODS 鋼の優れた耐照射性の発現機構が提案され、実証された一連の研究である。論文 1) は、非照射材におけるナノ粒子と母材の結晶学的相関を高分解能 FE-TEM で詳細に調べた研究で、粒子/母相界面の整合性を定量的に評価し、整合性が酸化物の種類のみならず、粒子サイズに依存することを初めて見出した。論文 2) は、ヘリウム (He) 照射した ODS 鋼の微細組織観察と論文 1) の結果に基づき、直径が数 nm の酸化物粒子と母相との界面は、He 原子の有効な捕獲サイトになることを示した。これらの研究により、京大で開発した ODS 鋼（論文 3）の耐照射性の観点からの開発方針が明確になり、海外における多くの招待講演の依頼を受けることとなった。

3.2. ODS 鋼の超臨界圧水中における耐食性評価（発表論文 4）

ODS 鋼の超臨界圧水中における酸化被膜の生成挙動に及ぼす再結晶熱処理および Al 添加の影響を FE-EPMA を用いて調べた結果、生成される酸化被膜は Al 添加により、ヘマタイト単層からヘマタイトとマグネタイトを外層とし、 Al_2O_3 を内層とする二層構造に変化し、耐食性を向上させていることを初めて見出した。これにより、Al 添加 ODS 鋼の耐食性向上のメカニズムが判明した。また、実用化において重要となる再結晶処理が耐食性に影響を及ぼさないことが判明し、再結晶 ODS 鋼を管材として使用することにより懸念されていた耐食性の劣化が生じないことを確認した。Al 添加 ODS 鋼の超臨界圧水プラントや核融合ブランケットへの適用性が確認された重要な成果である。

3.3. 核融合炉材料の接合技術開発（発表論文 5-6）

核融合ブランケットの製作における重要な技術として、構造材料の接合技術があげられており、論文 5) では、接合が困難とされていた ODS 鋼の拡散接合技術開発に挑み、接合強度が接合前の母材にほとんど等しい接合体を作製することに世界で初めて成功した。ODS 鋼の実用化に不可欠な課題が解決された貴重な成果であり、国の内外において注目された。論文 6) では、熱膨張係数が顕著に異なるタングステン (W) と ODS 鋼の接合技術開発を行い、約 300MPa の高い接合強度を得ることができた。W-ODS 鋼ダイバータは、ITER や DEMO 炉への適用が検討されており、懸念されていた接合強度の課題に解決の目途を与える重要な成果である。

3.4. 軽水炉材料の保全研究（発表論文 7-9）

軽水炉シュラウドの粒内型応力腐食割れ (TGSCC) 感受性が溶存水素環境下において促進されることを示した論文 7) は、従来採用されていた軽水炉の SCC 対策として水素を注入する方法が妥当では無いことを示した。論文 8) は、圧力容器の監視試験法に係る論文で、監視試験片不足に対応するための方策として、微小試験片技術が有効であることを示した。論文 9) は、九州電力の原子炉で話題となった脆化予測に関わる研究で、圧力容器鋼の主要元素である Mn は、高照射量領域において、照射脆化を促進する事を示している。この結果に基づけば、新しい脆化式が理論的に示される可能性のあることを意味しており、学術的、社会的にもインパクトの高い研究成果として注目されている。

3.5. 核融合炉材料の照射効果のモデリングに関する研究（発表論文 10）

核融合炉材料開発に必要な材料照射相関則を構築するため、照射下材料内のマイクロ構造発達に関するモデリング研究を実施した。第一原理量子計算、分子動力学法、モンテカルロ法など種々の計算機

シミュレーション手法を相補的に活用したマルチスケールモデリング手法による独創的な手法を開発し、照射場の違いによる材料照射効果の違いを理論的に説明することに成功した。従来曖昧な理論的扱いがなされていた核生成プロセスを適切にモデル化し、欠陥集合体形成の照射損傷速度 (dpa/s) 依存性を明らかにしたことは特筆に値する。

3.6. 原子炉核燃料被覆管の酸化プロセスに関するモデリング研究 (発表論文 11-12)

原子炉で使われる核燃料被覆管は、酸化に伴う脆化を含む種々のプロセスにより損傷することが知られている。それらのプロセスを物理的に正しく理解し、材料劣化を精度よく予測するための方法論を構築しておくことは、原子炉の安全性向上に重要である。本研究では、第一原理量子計算により酸化膜中の酸素拡散の応力依存性を調べ、そこから得られた知見をもとに拡散方程式を解いた。その結果、従来から現象論的には知られていたジルコニウム合金の酸化プロセスを理論的に説明することに成功した。ジルコニウム合金の酸化速度は、原子力規制における被覆管健全性評価や事故時評価でも必要とされており、こうした研究は、原子炉安全を規制面から補強する上で重要である。

(発表論文)

- 1) P. Dou, A. Kimura, T. Okuda, M. Inoue, S. Ukai, S. Ohnuki, T. Fujisawa, F. Abe “Polymorphic and coherency transition of Y-Al complex oxide particles with extrusion temperature in an Al-alloyed high-Cr oxide dispersion strengthened ferritic steel”, *Acta Materialia* 59 (2011) 992-1002.
- 2) L.L. Hsiung, M.J. Fluss, S.J. Tumey, B.W. Choi, Y. Serruys, F. Willaime, A. Kimura, “Formation mechanism and the role of nanoparticles in Fe-Cr ODS steels developed for radiation tolerance”, *Physical Review B* 82 (2010.11) 184103.
- 3) A. Kimura, R. Kasada, N. Iwata, H. Kishimoto, C.H. Zhang, J. Isselin, P. Dou, J.H. Lee, N. Muthukumar, T. Okuda, M. Inoue, S. Ukai, S. Ohnuki, T. Fujisawa, T.F. Abe, “Development of Al added high-Cr ODS steels for fuel cladding of next generation nuclear systems”, *J. Nucl. Mater.* 417 (2011.10.01) 176-179.
- 4) J. Isselin, R. Kasada, A. Kimura, “Corrosion behavior of 16%Cr-4%Al and 16%Cr ODS ferritic steels under different metallurgical conditions in a supercritical water environment”, *Corrosion Science* 52(10) (2010.10) 3266-3270.
- 5) S.H. Noh, R. Kasada, A. Kimura, “Solid-state diffusion bonding of high-Cr ODS ferritic steel”, *Acta Materialia* 59(8) (2011.05) 3196-3204.
- 6) N. Oono, S.H. Noh, N. Iwata, T. Nagasaka, R. Kasada, A. Kimura, “Microstructures of brazed and solid-state diffusion bonded joints of tungsten with oxide dispersion strengthened steel”, *J. Nucl. Mater.* 417 (2011.10.01) 253-256.
- 7) M. Nono, T. Nakajima, M. Iwama, R. Kasada, A. Kimura, “SCC behavior of SUS316L in the high temperature pressurized water environment”, *J. Nucl. Mater.* 417 (2011.10.01) 878-882.
- 8) K. Yabuuchi, M. Saito, R. Kasada, A. Kimura, “Neutron irradiation hardening and microstructure changes in Fe-Mn binary alloys”, *J. Nucl. Mater.* 414 (2011.07.31) 498-502.
- 9) B.J. Kim, H. Mistui, R. Kasada, A. Kimura, “Evaluation of impact properties of weld joint of reactor pressure vessel steels with the use of miniaturized specimens”, *J. Nucl. Sci. Technol.* 49(6) (2012.05) 618-631.
- 10) Y. Yamamoto, J. Yoshimatsu, K. Morishita, “Damage rate dependence of defect cluster nucleation in tungsten during irradiation”, *Journal of Nuclear Materials* (in press, 2013).
- 11) Y. Yamamoto, K. Morishita, H. Iwakiri, Y. Kaneta, “Theoretical investigation of oxidation mechanism of fuel cladding in light-water reactor”, *E-Journal of Advanced Maintenance*, Vol. 5-1 (2013) 01-06, Japan Society of Maintenology
- 12) Y. Yamamoto, K. Morishita, H. Iwakiri, Y. Kaneta, “Stress dependence of oxygen diffusion in ZrO₂ film”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B303, (2013) pp. 42-45.

1. 構成員

教授：佐野史道、准教授：花谷 清 (～H24.3)、門信一郎 (H25.2～)、助教：山本 聡 (H20.4～)

2. 研究の概要

研究所重点領域研究の1つである先進プラズマエネルギー研究を、研究所附属エネルギー複合機構研究センターのセンター基幹装置 (Heliotron J) 研究、センター公募型共同研究、研究所共同利用・共同研究拠点 (ゼロエミッションエネルギー研究拠点) 活動、核融合科学研究所双方向型共同研究 (Heliotron J) および核融合科学研究所国際共同研究拠点ネットワーク活動を通じて「ヘリオトロン J の閉じ込め最適化とその実証」を目標に、電磁場・プラズマ複合系の制御およびプラズマエネルギーの輸送・変換過程の高度化に関わる実験的・理論的研究を推進している。

3. 主な研究成果

3.1. Heliotron J 装置によるプラズマ閉じ込めの高性能化 (発表論文 1-5)

Heliotron J 装置のプラズマ閉じ込め高性能化の実験的・理論的研究を推進している。特にモンテカルロ法を用いた無衝突領域における非軸対称系の輸送係数の高精度導出法の開発とともに、実験的には Heliotron J の運転領域の拡大について標準配位または高バンピー磁場配位と比較してトロイダル磁場成分を減少させた新しい配位での閉じ込め研究が進展した。新しい低トロイディシティ配位ではコア部の高密度化 (10^{20} m^{-3}) が実現した。70GHz ECH プラズマをターゲットとし NBI 追加熱プラズマ ($B=1.3\text{T}$) において強くピーキングした密度分布が得られ、このとき中心密度は $1.3 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ である。2.45GHz マイクロ波アシスト NBI プラズマでは、よりファットな密度分布が得られ、 $r/a=0.5$ 近傍の密度が 10^{20} m^{-3} に達する。磁場をより減少させた運転 ($B=0.8 \text{ T}$) においても $r/a=0.5$ 近傍の密度が $8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ に達する。今後、より高密度の運転領域を開拓するため粒子補給の条件を最適化する必要があり、ペレット入射実験および壁調整の検討を進めている。一方、プラズマ輸送解析については磁場に平行方向のフローとフローの減衰機構である粘性の実験的な評価および関連した数値シミュレーション解析が進展した。磁場のバンピー成分によるフロー制御を目的とした実験研究において荷電交換分光計測 (CXRS) 法による C^{6+} 不純物イオンの平行方向フロー速度の計測が成果を上げている。MHD 平衡条件を満たす磁場において NBI による外部運動量入力を考慮した上で、新古典輸送理論に基づいたモーメント法によって平行方向フローを計算し CXRS 法による計測結果との比較検討を行った。プラズマ分布等の実験データをもとにして得られたモーメント法による C^{6+} フローの計算予測値は CXRS 法による実測結果と比較的よく一致し、平行方向フローに関しては新古典輸送理論に基づく評価が概ね適用できることが示された。一方、高衝突領域では差が小さいと考えられてきた炭素イオンと水素イオンのフロー速度に明確な差が存在することが見出された。この速度差の原因に関して粘性や摩擦といった視点から今後詳細な考察を行う必要がある。バンピー磁場成分の変化による制御の視点からの理論的な検証や複数種イオンが存在することによる影響についても議論を進める。本研究成果は 18th International Stellarator/Heliotron Workshop (29 January-3 February 2012, Canberra, Australia) の招待講演として報告された。また、19th International Stellarator/Heliotron Workshop (16-20 September, 2013, Padova, Italy) の招待講演としても報告される。

3.2. 低磁気シアヘリカルプラズマにおける高速イオン励起 MHD 不安定性の解明 (発表論文 6-8)

将来の核融合炉において自己点火を担うアルファ粒子の良好な閉じ込めが欠かせない。しかしながら、その高速イオン閉じ込めを悪化させる物理機構として高速イオン励起電磁流体力学的 (MHD) 不安定性によるアルファ粒子等の高速イオンの異常損失が挙げられ、問題視されている。そこで、本研究では先進ヘリカルプラズマにおける高速イオン励起 MHD 不安定性を解明する目的で、低磁気シア・低トロイダル周期と言った先進ヘリカルプラズマの磁場配位特性を有する Heliotron J での高速イオン励起 MHD 不安定性の特性を実験的・数値解析的に調べた。Heliotron J の中性粒子入射 (NBI) プラズマにおいて大域的 (長波長) な MHD 不安定性を観測した。この不安定性は高速イオンが存在する NBI プラズマでのみ観測されること、ポロイダル方向にはイオンの反磁性ドリフト方向に伝搬していること、そして、その周波数の時間変化がアルヴェン速度に比例していることなどから、高速イオン励起 MHD 不安定性の一種であるアルヴェン固有モード (AE) であることが解った。磁気プローブアレイ (磁場揺動) ならびに軟 X 線揺動検出器 (電子の密度・温度揺動) による解析で、トロイダル (n)/ポロイダル (m) 方向の各波数は $n=1/m=2$ で有り、振幅の径方向分布形状は規格化小半径 $r/a=0.5$ 近傍に最大値を持つことが解った。AE はトロイダル AE (TAE) を代表として幾つかに分類できる。そこで、

Heliotron Jで観測されたAEがどのAEで有るかを同定する目的で、観測時の実験条件を考慮したMHD平衡を再構築し、それに基づき簡略化MHD方程式における安定な固有関数を求め実験結果と比較した。なお、本研究では磁場の三次元性を適切に考慮した。得られた離散的固有値の中で実験結果と周波数および空間構造が良く一致したのが見つかった。これはごく少数のフーリエモードから構成され、その周波数はシアアルヴェン連続スペクトルの僅か上または下に位置する大域AE (GAE) である。また、GAEの回転変換依存性に着目し、回転変換のみを変えた別の磁場配位でNBI実験を行い、得られた観測モードの回転変換依存性が数値解析で得られたGAEの回転変換依存性と良く一致した。このことから、Heliotron Jで観測された高速イオン励起のAEはGAEであることを同定した。さて、低磁気シアにおけるAEの回転変換依存性を解析式から評価すると、磁場の三次元性が生み出すヘリシティ誘起AE (HAE) はHeliotron Jの様な低回転変換磁場配位では周波数がMHz帯と高く不安定化しにくいと思われる。一方、回転変換が高い磁場配位では、その周波数が回転変換に比例して減少し低周波数化して問題となると予測される。そこで、Heliotron Jと類似の装置・プラズマパラメータを有し、回転変換が大きく異なるスペインCIEMAT研究所のTJ-IIでHeliotron Jと同様の実験・解析を行い比較したところ、TJ-IIにおいて観測されたAEはGAEおよびHAEであることが解った。GAEとHAEではその構成しているフーリエモード数やモード数が大きく異なるため、高速イオンへの影響も異なると考えられる。これら解析結果は先進ヘリカルにおける高速イオン励起MHD不安定性の回転変換依存性の観点からまとめられ、今後の先進ヘリカルプラズマでのAEの指針を与える先駆的な研究となった。また、24th IAEA Fusion Energy Conference (8 - 13 October 2012, San Diego, USA) の口頭発表としてこれらを報告した。加えて、本研究を進展させたMHD安定性制御に関して19th International Stellarator/Heliotron Workshop (16-20 September, 2013, Padova, Italy) の招待講演として報告する。

3.3. 損失高速イオンプローブの開発(発表論文 9)

前節の高速イオン励起MHD不安定性は波動と粒子の共鳴相互作用により、シアアルヴェン波が高速イオンよりエネルギーを得て不安定化し、逆に高速イオンの軌道に影響を及ぼす。その際に高速イオンは炉心プラズマ外へと排出され、加熱効率の低下や局所的な炉壁の損傷を導く恐れがある。そこで、本研究では高速イオン励起MHD不安定性による高速イオンへの影響の物理機構解明と高速イオン損失の低減を目指し、損失高速イオンを直接計測し、そのエネルギーやピッチ角を測定可能な損失高速イオンプローブをHeliotron J用に開発した。なお、本研究は特に双方向型共同研究との連携によって行われている。大型プラズマ閉じ込め実験装置で用いられるシンチレータを用いた方法は非常に高価であるため、安価且つ高速イオン束の絶対量計測が可能なファラデーカップ型損失高速イオンプローブ (FLIP) を開発した。FLIPは二重のスリットによりプラズマ中から排出された高速イオンのみを計測可能で、エネルギー範囲は2 keV~ 40 keVで順方向に周回する軽水素イオンを測定できる。このFLIPを用い、損失高速イオンの特性の評価、損失イオン量の磁場揺動強度との相関性や時間変化などから、高速イオン励起MHD不安定性による高速イオン損失の物理機構が解明できる。FLIPは今サイクルの実験から稼働し、高速イオン損失の物理機構解明に用いられる予定である。

(発表論文)

- 1) 佐野史道、「先進ヘリカルによるプラズマ構造形成・不安定制御と閉じ込め磁場最適化の研究」、核融合科学研究所双方向型共同研究報告書(平成24年度)、平成25年3月。
- 2) F. Sano et al., "Physics of Heliotron J Confinement", Plasma and Fusion Research, Vol.5 (2010) S2003.
- 3) A. Matsuyama and K. Hanatani, "A δf drift-kinetic simulation for off-diagonal neoclassical transport coefficients in quasi-symmetric toroidal configurations", Plasma and Fusion Research 5(2010)005.
- 4) A. Matsuyama and K. Hanatani, "Monte Carlo calculation of the neoclassical transport matrix by the Einstein-Helfand relation in nonaxisymmetric toroidal plasmas", Physics of Plasmas 17(2010)032501.
- 5) A. Matsuyama, K. Hanatani, et al., "A Monte Carlo based calculation of neoclassical flows and viscosity for nonaxisymmetric toroidal plasmas", Contrib. Plasma Phys. 50(2010)635-638.
- 6) S. Yamamoto et al., "Studies of MHD Stability Using Data Mining Technique in Helical Plasmas", Plasma and Fusion Research 5(2010)34.
- 7) A. V. Melnikov et al., "Internal measurements of Alfvén eigenmodes with heavy ion beam probing in toroidal plasmas", Nuclear Fusion 50(2010)084023.
- 8) S. Yamamoto, et al., "Studies of energetic-ion-driven MHD instabilities in helical plasmas with low magnetic shear", 24th IAEA Fusion Energy Conference, San Diego, USA, Oct. 8-13, 2012, EX/5-2.
- 9) K. Ogawa et al., "Development of Lost Fast-Ion Probe Based on Thin Faraday Films in Heliotron J", 22nd International Toki Conference, Toki, Japan, 19-22, November, 2012, P1-30.

クリーンエネルギー変換研究分野（国内客員）

環境負荷の少ないクリーンエネルギーシステムを目指し、再生型自然エネルギーやバイオエネルギー領域も含め、エネルギー生成・変換の高効率化ならびにその有効利用システムの研究を行う客員分野である。平成 22 年度以降の年次別担当者については資料編 (II) 1.4.2 を参照されたい。

3.3. エネルギー利用過程研究部門

平成8年(1996年)の研究所改組により、エネルギー利用過程研究部門は「エネルギーの高度利用を実現するための研究を行う。そのために物質生産システムにおける複合過程の解明、精密、高性能なエネルギーの利用に関わる物質化学的な研究ならびに高効率化学生産システムの構築に関する研究などを行う。」との研究内容を担う部門として発足し、複合化学過程研究分野、分子ナノ工学研究分野(平成22年度までは、分子集合体設計研究分野)、生物機能化学研究分野(平成22年度までは、生物機能科学研究分野)、エネルギー構造生命科学研究分野(平成22年度までは、生体エネルギー研究分野)の4つの研究分野から構成されている。

本研究部門では、表面形態制御や光と界面現象を利用したエネルギーナノ材料研究、新世代太陽電池の開発、生物機能を原理とした高効率物質変換とエネルギー利用、バイオマスからの有用物質生産など、化学を基盤としてエネルギーを指向したナノ・バイオ機能材料およびプロセスの研究を推進している。太陽光エネルギーの利用に着目し、分散型エネルギーの飛躍的な高効率化に向けた基礎研究ならびに応用研究が進展している。

1. 構成員

教授：尾形幸生、准教授：作花哲夫（～H24.8）、助教：深見一弘（H18.12～）

2. 研究の概要

シリコンの電気化学溶解で形成する多孔質構造の形成機構を明らかにすると共に、作製した多孔質シリコンを電極とした金属電析により、細孔内に金属微細構造を作製することで半導体/金属の複合材料の創製を目指している。一方、レーザーアブレーションを利用した液相環境中でのその場元素分析の研究では、時間分解が不要なレーザー照射方法の開発と、分析技術としての実用化に向けた検討を進めている。

3. 主な研究成果

3.1. レーザーアブレーションを利用した液相環境中でのその場元素分析（発表論文1）

水中の固体表面をパルスレーザーで照射することにより水中でもプラズマを形成させることができる。このような手法で生成させたプラズマは、通常非常に高密度であり、衝突広がりやシュタルク広がりのために線スペクトルから大きく変形した発光スペクトルを示す。分光化学分析に応用するためには、このようなスペクトルを、明瞭な線スペクトルが得られるように改善する必要がある。これまでに、ダブルパルス照射によりスペクトルが改善することが知られていたが、本研究では低出力なダブルパルスやマルチパルスレーザーを照射することにより十分に密度の低いプラズマが生成することを新たに発見した。低エネルギーのダブルパルス照射の場合、最適なパルス間隔（15～50 μs ）では、時間分解測定（時間ゲート測定）することなしに明瞭なスペクトルが得られることも見いだした。また、気泡をシャドウグラフで撮影したところ、時間とともに膨張し、最大の大きさになった後収縮していた。気泡サイズが大きい時間と、変形の小さいスペクトルが得られた第2パルス照射のタイミングが一致することを示した。また、気泡と発光を同時に測定する方法を提案し、プラズマと気泡の位置関係を測定したところ、プラズマが気泡中に存在し、気泡境界と発光領域の間に十分な隙間がある場合に明瞭なスペクトルが得られることが明らかになった。

3.2. ミクロ多孔質シリコンへの白金電析における表面誘起溶媒和構造の影響（発表論文2）

平均孔径が3 nmのミクロ孔を有する多孔質シリコンは高い比表面積を有する材料であり、センサーや触媒担体、化学反応場としての利用が期待されている。一方で、孔径が極めて小さく、ミクロ細孔内で化学反応を如何に制御すれば良いか明らかにされていない。我々はミクロ多孔質シリコンを電極として白金の電析反応を試みた。白金の析出位置や析出した粒子の数密度などを分析することで細孔内における原料（白金錯イオン）の分布を間接的に可視化することにより、細孔内における反応機構を調べた。シランカップリング処理により多孔質シリコンを親水的にすると、細孔内で白金電析は殆ど進行せず、最表面に連続膜として析出した。一方、同様に疎水化した多孔質シリコンを用いると、ミクロ細孔内で優先的に白金が析出した。電析条件は孔壁の溶媒和特性が異なる以外は両者で全く同じである。孔壁の影響を明らかにするために分子性液体の積分方程式論を用い、孔壁表面近傍における白金錯イオンの密度分布を解析した。疎水性表面では白金錯イオンが濃縮されバルクの溶液に比べてイオンの密度が上昇することが分かった。さらに、疎水性表面への白金錯イオンの濃縮効果は錯イオンの径が大きい程より顕著になることが分かった。この成果は、ミクロ細孔内における化学反応の制御において表面に誘起された溶媒和構造が強く影響を与えることを示唆している。

3.3. 水中レーザープラズマの二次元空間分解での原子発光スペクトル測定（発表論文3）

水中の固体ターゲットにパルスレーザーを照射したときに生成するプラズマの直径は0.1 mm程度と小さい。このプラズマからの発光を分光することによりプラズマを構成している元素種がわかり、元素分析に利用することが可能であるが、元素種によりプラズマ中での分布が異なる場合、定量分析の結果に誤差が生じる。本研究では、高解像の対物レンズを用いてプラズマを拡大結像させ、4本の光ファイバーに取り込むことにより、プラズマの異なる4点のスペクトルを同時計測する手法を開発した。4本の光ファイバーの出射端を結像分光器の入射スリットに並べ、出射する光を入射スリットから分光器に導入し、インテンシファイヤ付きCCD検出器（ICCD検出器）に同時に分光結像させた。このとき、二次元検出器であるCCD上の縦方向にそれぞれ異なるファイバーからの光のスペクトルが並んだ画像が得られる。得られた画像からそれぞれのファイバーに入射した光のスペクトルを得た。

Cu をターゲットとして NaCl 水溶液中でレーザーを照射したときに得られるプラズマを上記の方法で解析した結果、プラズマ中での元素分布が、ターゲット由来の元素と溶液由来の元素で明確に異なっていることが明らかになった。さらに、中心からはずれた特定の位置のみを分光計測することで、時間分解することなく明瞭なスペクトルが得られることが明らかになった。生成初期の高密度なプラズマは十分に小さいため、その外側に測定スポットを設定することで成長後の希薄なプラズマからの発光のみを測定することが可能であり、時間ゲートなしで初期の高密度のプラズマからの発光が除外された明瞭なスペクトルが得られることを実証した。

(発表論文)

- 1) Tetsuo Sakka, Ayaka Tamura, Takashi Nakajima, Kazuhiro Fukami, Yukio H. Ogata, "Synergetic effects of double laser pulses for the formation of mild plasma in water: Toward non-gated underwater laser-induced breakdown spectroscopy", J. Chem. Phys., 136 (2012) 174201.
- 2) Kazuhiro Fukami, Ryo Koda, Tetsuo Sakka, Tomoko Urata, Ken-ichi Amano, Hikaru Takaya, Masaharu Nakamura, Yukio Ogata, Masahiro Kinoshita, "Platinum electrodeposition in porous silicon: The influence of surface solvation effects on a chemical reaction in a nanospace", Chem. Phys. Lett., 542 (2012) 99-105.
- 3) Ayumu Matsumoto, Ayaka Tamura, Kazuhiro Fukami, Yukio H. Ogata, Tetsuo Sakka, "Single-Pulse Underwater Laser-Induced Breakdown Spectroscopy with Nongated Detection Scheme", Anal. Chem., 85 (2013) 3807-3811.

1. 構成員

教授：坂口浩司、准教授：佐川 尚 (～H24.11)、助教：鈴木義和：(～H23.3)

2. 研究の概要

ナノ工学を用い、表面上で原料有機分子を反応させて組み立て、エネルギー利用に資する従来に無い新物質や材料を開発することを目的とする。また開発した材料を使い、太陽電池、電界効果トランジスタ、発光素子、触媒などの様々なデバイスを作成し、高効率エネルギー利用を目指した研究を行う。具体的には、我々が世界に先駆けて開発した“電気化学エピタキシャル重合”や“ラジカル重合型化学気相成長法”を用いて従来に無い分子細線材料を開発し、デバイス応用を目指す。

3. 主な研究成果

3.1. 革新的ナノ炭素細線製造法の研究 (発表論文 1-2)

金属表面は、有機分子との強い電子的相互作用により、分子を二次元配列させる原子スケールの鋳型である。我々は、単一分子レベルで導電性高分子の長さ・密度・方向・形を任意に制御しながら金属表面上に構築する新しい分子細線合成技術“電気化学エピタキシャル重合”を開発した (*Nature Materials*, 3, 551 (2004))。この方法は原料 (モノマー) を含む電解質液中で、ヨウ素で表面修飾した単結晶金電極に電圧パルスを印加することにより、ヨウ素原子配列に沿って導電性高分子を精密に重合させる表面合成法である。更に電子的性質の異なる二種類の導電性高分子細線を基板上で連結させることにも世界で初めて成功した (*Science*, 310, 1002 (2005))。金属鋳型上の分子組織化を利用して、これまでに無い新しい機能性物質・材料の表面合成とデバイス化が望まれている。

グラフェンは、二次元にベンゼンからなる縮環炭素シートであり、ゼロギャップ半導体、すなわち擬似金属性を示す材料である。擬似金属であるためその応用は、透明電導膜やタッチパネル等の一部のデバイス応用に限定される。このため半導体特性を有する新しい炭素材料が世界で望まれている。これに対し、グラフェンナノリボン (GNR) は“有限幅を持つ一次元グラフェン”であり、分子幅に依存して優れた半導体的性質を持つことが理論的に予測されている。しかしながら、微細加工技術、特殊な反応場、超高真空技術が必要であり、極微量合成や限られた性質については報告されているものの、デバイス化や従来未知であるこの材料の物性解明につながる大量合成法は未開拓であり、その確立が世界的に望まれている。

そこで我々は、従来に無い新しい化学気相成長法 (ラジカル重合型化学気相成長法) を開発し、これまで超高真空 (10^{-10} torr) 環境を必要とした GNR の表面支援蒸着合成法を遥かに凌駕した著しい低真空環境 (1 torr) での大量合成を達成した。今までに GNR の大量合成に成功した例は無い。その理由は、反応系内で芳香族分子ピラジカルを発生させてラジカル重合させなければならないが、化学気相成長法が行われる 1 Torr 程度の低真空環境では、系内の極微量の不純物によりピラジカルが失活し、大きく反応効率を妨げられるからである。このため、これまで報告された GNR の微量合成は、すべて超高真空環境 (10^{-10} Torr) を必要とする蒸着重合の報告 (Fasel, et al., *Nature*, 2010) のみである。本研究では、①石英反応管を化学・高温処理することで系内のラジカル失活不純物を極度に減らし、②蒸発させた原料分子を清浄化した高温石英管に吹き付け、ピラジカルを失活させることなく石英管表面に高密度に生成させ、③ラジカルが局在化した石英管面に密着させた金属基板上でラジカル重合と脱水素縮環を効率良く行わせることにより、従来に無い GNR の高効率合成を低真空環境 (1 Torr) にもかかわらず達成した。合成した金単結晶表面上の GNR の走査トンネル顕微鏡 (STM) 像は、長さ 20nm の GNR が金 (111) 面上に多層に成長していることが明らかになった。

更に、ベンゼン 2 個及び 3 個の異なる幅を持つ GNR を金単結晶上に形成させ、理論予測されていたバンドギャップ値を実験的に初めて明らかにした。更に、金属基板上に合成した GNR を絶縁基板上にウェットプロセスにより転写・単離する方法を開発し、GNR の電気物性 (電導度、キャリア移動度) や光学物性などの従来未知であったグラフェンナノリボンの基礎物性を明らかにすることができた。得られた GNR の光学吸収は、理論予測通り、その分子幅に大きく依存して、赤外まで伸びた吸収を示した。ベンゼン 2 個幅 (ポリペリナフタレン) GNR で、0.7eV、ベンゼン 3 個幅 (ポリペリアントラセン) で 1.5eV の値を示し、これまで未知であった値を実験的に初めて確定できた。また表面酸化シリコン基板に GNR を転写して、ボトムアップ合成 GNR 初の電界効果トランジスタを作成し、加熱処理した GNR のキャリア移動度を測定したところ、 $4 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ とアモルファスシリコンを凌駕する大きな値を記録した。今後、電極ギャップ長の短小化や (ランダム系に対する) ドーピング処理により、更に大きな値を記録するものと期待される。

以上得られた結果から、我々が世界で初めて合成した“sub-1nm 幅の GNR フィルム”は、幅広い吸収帯や大きなキャリア移動度により、今後、太陽電池、スーパーキャパシタ等様々なエネルギー応用デバイスとしての利用が期待される。

3.2. 電気化学エピタキシャル重合による二次元共役系高分子の構築 (発表論文 3-4)

共役系高分子は、一次元の電子状態を持つ有機材料であり、エネルギー応用を含めて様々な分野での応用が期待されて来た。しかしながら、その性能を向上させるためには、電子が更に広がった二次元系の共役系高分子の構築が望まれている (F. Rosei, Science 2009)。

上記アイデアを実現するため、我々はパーツ分子 (低分子原料) を用いて、金属単結晶上で電気化学的に二次元共役系高分子を形成させる新しい手法の開発を行った。発達した二次元共役系高分子は、不溶不融であるため、従来の合成化学的手法では困難である。表面を反応場に用いる表面ビルドアップ重合法である、電気化学的構築法は正にこの困難を克服できる可能性を持つ。合成したトリベンゾチオフェンモノマーを用いて、電気化学エピタキシャル重合を行ったところ、熱重量減少、ラマン分光、吸収スペクトルを用いて測定から、チオフェンが三回対称に発達した二次元共役高分子を得ることに成功した。

3.3. 電気化学エピタキシャル重合により構築した分子細線の機能 (発表論文 5-6)

電気化学エピタキシャル重合を用いて作成した分子細線を絶縁性基板上に転写して電界効果トランジスタを作成し、大きなホール移動度を示すことを見出した。具体的には、チオフェンモノマーを含む電解質液中で、ヨウ素で表面修飾した原子平坦な金 (111) 電極上にパルス電圧を印可し、ヨウ素原子配列に沿って表面エピタキシャル的にモノマーを重合させ、導電性高分子細線を高度に配列させながら金属基板上に一軸方向に配列させて合成した。分子細線の成長は、基板表面を埋めた後、更に細線の上に π 電子相互作用しながら2層、3層と段階的に成長が続き、レイヤー by レイヤーで、且つ分子レベルで制御しながら高度に配列した分子細線の“結晶” (ポリチオフェン積層構造) を得ることに成功した。厚さは電圧パルス印可数で調整し、数十 nm までの膜厚を得た。得られた薄膜の光吸収スペクトルの測定を行い、分子細線の配列状態に関する知見を明らかにした。この結果、転写した分子細線は、スピコートフィルムに比べ約 200 nm もの長波長シフトを示し、高度に配列した“ポリチオフェン結晶”を電気化学的に形成できることを明らかにした。

従来の誘電体に比べ、有機半導体と誘電体の界面への強電界印可に基づく高密度キャリア注入を可能にする電解質を誘電体として用いる電気二重層型電界効果トランジスタ構造を持つ、分子細線トランジスタを作製した。トランジスタ作製のためには、分子細線を金属基板上ではなく、絶縁性基板上に形成させる必要がある。このため電気化学エピタキシャル重合を用いてヨウ素修飾金 (111) 単結晶上に形成させた分子細線“結晶”を、接着性高分子を用いてガラスなどの絶縁性基板に接着させ、裏側から金単結晶を剥がし取り、金属基板上の分子細線“結晶”の構造を乱さず、絶縁性基板上に転写した。これは、金属表面上の分子細線の構造を維持したまま絶縁性基板への転写に成功した初めての例である。次に絶縁性基板上に転写した分子細線にマスクを介して金を真空蒸着し、ソースとドレイン電極を取り付けた。ソース、ドレイン金電極で挟んだチャンネル上に微細な (数ナノリットル) イオン液体の液滴を接触させ、誘電体層として用い、電気二重層型電界効果トランジスタ構造を作製した。絶縁基板上に転写した分子細線にソース、ドレイン電極を 10 μm のギャップを介して金蒸着し、ゲート電極を接触させたイオン液体を誘電層として用い電気二重層型 FET を作成した。従来報告されているポリチオフェンのスピコート膜 ($1 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$) と同等の大きな値 ($0.7 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$) を示すことを明らかにした。

(発表論文)

- 1) Hiroshi Sakaguchi, “Bottom-up Massive Production of Graphene Nanoribbons”, The 2013 New Diamond and Nanocarbon Conference, 55, (2013) invited.
- 2) Hiroshi Sakaguchi, Maki Yano, Takahiro Nakae, “Bottom-up Massively Grown Graphene Nanoribbon Films” submitted.
- 3) Takahiro Nakae, Shingo Mizobuchi, Maki Yano, Hiroshi Sakaguchi, et al., Benzo[b]trithiophene Polymer Network Prepared by Electrochemical Polymerization with a Combination of Thermal Conversion, Chem. Lett., 41(2) (2012) 140-141.
- 4) T. Nakae, R. Ohnishi, Y. Kitahata, T. Soukawa, H. Sato, S. Mori, T. Okujima, H. Uno, H. Sakaguchi, Effective Synthesis of Diiodinated Picene and Dibenzo[a,h] anthracene by AuCl-Catalyzed Double Cyclization, Tetrahedron Lett., 53(13) (2012) 1617-1619.
- 5) 坂口浩司, 電気化学エピタキシャル重合, 分子細線の組織化と機能, 第 60 回高分子討論会, 60(2), 2011, 2146-2148 招待講演.
- 6) T. Nakae, H. Sakaguchi, Growth of Single-Molecular Wires on a Metal Surface”, International Chemical Congress of Pacific Basin Societies, 491, (2010) Invited.

1. 構成員

教授：森井 孝、講師：中田栄司 (H22.10～)、特定助教：仲野 瞬 (H24.12～)

2. 研究の概要

生物は、太陽光エネルギーを利用して化学エネルギーを生産し、生命活動に必要な様々な生体高分子を産出している。そして、これらの生体高分子を用いて、温和な条件下で高効率にエネルギーを利用するとともに、化学エネルギーとして保存している。このような生物のエネルギー利用原理を模範とし、高い機能を発揮する生体高分子を創製し、それらを利用することによって、化学エネルギーを活用するクリーンで高効率なエネルギー利用システムの実現を目指している。

3. 主な研究成果

3.1. DNA ナノ構造体上への機能性分子固定化技術の開発 (発表論文 1)

DNA ナノ構造体を足場として様々な機能性分子を精微に配置できれば、バルク中や膜上で混合するだけでは達成困難な高効率な物質変換システムの構築や機能評価システムの構築が期待できる。しかしながら、生体内での機能面のほとんどをおこなっているタンパク質を自由自在に DNA ナノ構造体へと配置する技術は乏しく、集積化による効能についても未知数な部分が多い。そこで、我々は、DNA 結合性タンパク質を用いた DNA ナノ構造体への機能性タンパク質の配置について検討している。DNA 結合性タンパク質は、DNA と結合する一群の蛋白質であり、様々な配列を異なる結合様式にて強固に結合することが知られている。我々は、まず亜鉛フィンガー タンパク質を採用し、DNA ナノ構造体への結合能を評価した。亜鉛フィンガータンパク質は、そのアミノ酸配列を変えることで、DNA 配列への選択性を自在に設計することができることが知られている。そこで、異なる 2 種類の亜鉛フィンガー タンパク質(Zif268 と AZP4)のキメラタンパク質を作製し、DNA ナノ構造体への結合能を評価したところ、それぞれのキメラタンパク質が、亜鉛フィンガー タンパク質を介してアドレス(亜鉛フィンガー認識配列)と特異的に結合していることが明らかとなった。また、異なる性質を持つアダプターとして、ロイシンジッパータンパク質にも着目し、評価をおこなっている。ロイシンジッパータンパク質は、ホモまたはヘテロな二量体を形成して、特定の認識配列と強固に結合するため、一般的な酵素が取る二量体構造を DNA ナノ構造体上に配置する上で、より適していると考えられる。実際に、ロイシンジッパータンパク質と亜鉛フィンガータンパク質とは、お互いに競合することなく、同一 DNA ナノ構造体上の異なるアドレスにそれぞれ結合していることが明らかとなった。この知見は、高効率な物質生産システムを DNA ナノ構造体上に構築していくための基礎として非常に有用である。

3.2. RNA-ペプチド複合体を用いた機能性分子の創製 (発表論文 2-7)

温和な条件下で高効率に物質変換がおこなえるようなテーラーメイド酵素が創製できれば、環境に配慮したクリーンで高効率なエネルギー利用システムとしての展開が期待される。

我々はこれまでに RNA-ペプチド複合体(RNP)を基盤として、リガンドの認識に伴い蛍光強度が変化する蛍光性 RNP センサーの構築に成功している(*J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *128*, 12932)。まず、ATP 結合性 RNP センサーの認識様式の詳細を明らかとすることで、ATP 結合前後で RNP センサーがダイナミックな構造変化が蛍光変化に直接関与している事を明らかにした。この知見は、蛍光性 RNP センサーの合理的設計において重要であった。特に、試験管内人工進化法(SELEX 法)における分子選択方法に対する工夫やモジュールを組み替えることによる検出対象・検出感度・検出波長などの改変等の試みにより、テーラーメイドな機能改変をおこなうにあたっての重要な知見を得ることができた。これらの知見を活かして、GTP やドーパミンなど様々な生体内重要物質を検出することができる蛍光性 RNP センサーの開発に成功した。さらには、蛍光性 RNP センサーの RNA サブユニットと蛍光修飾 Rev ペプチドを、リンカーを介して共有結合により連結した蛍光性 RNP センサーを作製することで、それぞれの標的分子に対して異なる蛍光波長で応答する複数の蛍光性 RNP センサーの開発に成功した。これらの蛍光性 RNP センサーを同一溶液中で用いることで、酵素反応によって変換される基質と生成物を異なる蛍光波長で同時に検出することを実証した。

3.3. タウタンパク質由来の凝集性ペプチドのアミロイド線維形成能に関する研究 (発表論文 8)

タウタンパク質のアミロイド線維形成は過剰リン酸化により制御されていることが示唆されている。タウタンパク質由来の凝集性ペプチド(PHF)をモデルに使用することで、アミロイド線維形成におけるリン酸化効果の分子機構の解明に取り組むとともに、リン酸化によるナノ構造形成の制御と機能

性バイオマテリアルへの応用を目指している。これまでに、PHF配列内の被リン酸化が繊維状構造体の形成を促進する機構が、分子内あるいは繊維間での静電相互作用の形成によるものである事を明らかにしている (*Biochemistry*, **2008**, *47*, 11847)。また、被リン酸化部位の周辺残基との位置的バランスが、その凝集特性に大きく影響を与えることを新たに見出し、異なる凝集性を持つペプチドが混在した場合、単独のそれとは異なる凝集体形成能を示すことを明らかとした。凝集体形成能の新たな制御方法として注目している。

(発表論文)

- 1) E. Nakata, F. F. Liew, C. Uwatoko, S. Kiyonaka, Y. Mori, Y. Katsuda, M. Endo, H. Sugiyama, T. Morii, “Zinc finger proteins for site-specific protein positioning on DNA origami.”, *Angew Chem. Int. Ed.*, *51* (2012) 2421-2424.
- 2) S. Nakano, T. Mashima, A. Matsugami, M. Inoue, M. Katahira, T. Morii, “Structural Aspects for the Recognition of ATP by Ribonucleopeptide Receptors.” *J. Am. Chem. Soc.*, *133* (2011) 4567-4579.
- 3) S. Nakano, E. Nakata, T. Morii, “Facile conversion of RNA Aptamers to modular fluorescent sensors with tunable detection wavelengths.” *Bioorg. Med. Chem. Lett.*, *21* (2011) 4503-4506.
- 4) F. F. Liew, T. Hasegawa, M. Fukuda, E. Nakata, T. Morii, “Construction of dopamine sensors by using fluorescent ribonucleopeptide complexes.” *Bioorg. Med. Chem.*, *19* (2011) 4473-4481.
- 5) F.-F. Liew, H. Hayashi, S. Nakano, E. Nakata, T. Morii, “A ribonucleopeptide module for effective conversion of an RNA aptamer to a fluorescent sensor.” *Bioorg. Med. Chem.*, *19* (2011) 5771-5775.
- 6) C. Annoni, E. Nakata, T. Tamura, F.-F. Liew, S. Nakano, M. L. Gelmi, T. Morii, “Construction of ratiometric fluorescent sensors by ribonucleopeptides.” *Org. Biomol. Chem.*, *10* (2012) 8767-8769.
- 7) S. Nakano, M. Fukuda, T. Tamura, R. Sakaguchi, E. Nakata, T. Morii, “Simultaneous Detection of ATP and GTP by Covalently Linked Fluorescent Ribonucleopeptide Sensors.” *J. Am. Chem. Soc.*, *135* (2013) 3465-3473.
- 8) M. Inoue, T. Konno, K. Tainaka, E. Nakata, H. Yoshida, T. Morii, “Positional effects of phosphorylation on the stability and the morphology of tau-related amyloid fibrils.” *Biochemistry*, *51* (2012) 1396-1406.
- 9) K. Matsumoto, E. Nakata, T. Tamura, I. Saito, Y. Aizawa, T. Morii, “A Peptide Nucleic Acid (PNA) Heteroduplex Probe Containing an Inosine–Cytosine Base Pair Discriminates a Single-Nucleotide Difference in RNA.” *Chem. Eur. J.*, *19* (2013) 5034-5040.

1. 構成員

教授：片平正人、准教授：小瀧 努（H9.4～）、助教：永田 崇（H23.9～）

2. 研究の概要

バイオマス、機能性核酸、およびタンパク質に関し、NMR 法等を用いた構造生物学的なアプローチによって、エネルギー・マテリアル資源としての正体（化学構造と超分子構造）および機能発現機構を、分子・原子レベルの分解能で解明する。得られた知見に立脚して、バイオマスの資源としての活用法の開発、および酵素等の機能性核酸・タンパク質の高度化と応用法の開発を行う。

3. 主な研究成果

3.1. 抗プリオンアプタマーの動作原理の解明と抗プリオン活性の実証（発表論文 1）

プリオンタンパク質は哺乳類に広く存在する。通常は正常型をとるが、これが異常型に構造遷移するとウシの狂牛病、ヒトのクロイツフェルト・ヤコブ病などを引き起こす。現在異常型への遷移を阻害する薬剤の開発が望まれている。我々は、プリオンタンパク質に高い親和性で結合する RNA アプタマーを見出した。RNA アプタマーとプリオンタンパク質の複合体に関し、NMR 法を用いて立体構造・相互作用エネルギーの解析を行った。その結果 RNA アプタマーは 2 量化し、各単量体がプリオンタンパク質の異なる箇所と同時に結合する事で相互作用エネルギーを 2 倍稼ぎ、高い親和性がもたらされている事が分かった。また当該アプタマーが、異常型プリオンタンパク質の蓄積を阻害する抗プリオン活性を有する事を、マウスの神経細胞を用いたアッセイ系によって実証する事に成功した。

上記の立体構造・相互作用エネルギーの解析を活かして、さらに親和性が高いアプタマーを創製する事に成功しつつある。これらのアプタマーの抗プリオン薬としての応用を目指して、医学部の研究者との共同研究を進めている。

3.2. バイオマスの NMR 法による精密解析（発表論文 2-3）

石油に代表される化石資源に替わるエネルギーとマテリアルの供給源として、カーボンニュートラルの考えが適用でき、CO₂等の温室効果ガスの排出量を大幅に縮減できるバイオマスが有望視されている。中でも非可食性である木質バイオマスが注目されているが、その『正体』、つまり分岐を含めた化学構造、および複合体における超分子構造が解明されていない事が、活用法を開発する上でネックとなっている。そこで我々は木質バイオマスの 3 大成分の一つであるリグニンに関し、溶液 NMR 法を用いた解析手法を開発し、リグニンの活用に向けた基盤的情報を得た。また将来の資源化を視野に入れて、活性汚泥バイオマスを構成する細菌由来の複合糖質の立体構造を NMR 法によって決定した。

現在 ¹³C 安定同位体標識した木質バイオマス試料を調製し、これを用いてより多くの構造情報を得る事に成功しつつある。こうして蓄積するバイオマスの正体に関する情報を活かし、バイオマスのエネルギーおよびマテリアル生産への活用技術の開発を行っていく。

3.3. 抗 HIV 活性を示すデアミネースの酵素活性のリアルタイムモニタリング（発表論文 4-5）

ヒトの APOBEC3G タンパク質(A3G)は、HIV のマイナス鎖 DNA に作用し、シトシン塩基を脱アミノ化してウラシル塩基に変換する酵素である。これによって HIV のゲノム情報は破壊され、A3G は抗 HIV 活性を示す。我々は NMR シグナルを用いる事で、この塩基変換反応をリアルタイムでモニタリングする事に成功した。CCC 配列の 3 番目のシトシン塩基が脱アミノ化反応の標的となるが、CCC 配列が 5'端近くに位置するほど脱アミノ化反応が早く進行する事を、この手法によって見出した。

次にこの実験事実を合理的に説明する事を試みた。上記の手法によって得られた実験データを、カイネティックモデルを用いて解析した。その結果 A3G の脱アミノ化反応の触媒活性は、A3G が DNA 上を上流に向かってスライディングしながら CCC に到達した際(kcat1)の方が、下流に向かってスライディングしながら CCC に到達した際(kcat2)より大きい、とする事で上記の現象が説明できる事が分かった。5'端に近い CCC ほど、その下流に結合した A3G が、上流に向かってスライディングしながら当該箇所へ到達する確率が高くなる。その際に kcat1 > kcat2 であれば、5'端に近い CCC ほど脱アミノ化が早く生じる事になる。

またヒトのヒートショックタンパク質 70 が、A3G のユビキチン化を防ぐ事で抗 HIV 活性を示す事も見出した。

3.4. カリウムイオンを検知して活性がスイッチングする核酸酵素の創製（発表論文 6）

水溶液中において RNA 配列 (GGAGGAGGAGGA) (R12)は、カリウムイオンの添加とともに伸びた一本鎖状態から、コンパクトな四重鎖構造へと構造変換する。また、ハンマーヘッドリボザイム (Rz) は、自身 RNA でありながら、配列特有的な RNA 切断活性を有する。Rz は、2 つの分断された酵素部位

がステムにより連結されてコンパクトな構造を形成し、それにより酵素活性を発揮する。本研究では、Rz と R12 をキメラ化することで、カリウムイオンにより酵素活性がスイッチングする分子の創製を試みた。Rz のステムを削除し、R12 で置き換えた分子を作成した結果、カリウムイオンの添加とともに酵素活性が増強する事が分かった。生体内の K^+ イオン濃度は、細胞の外では~10 mM、内側では~100 mM であることが分かっている。本成果は、細胞内に導入されたときに活性型にスイッチングする核酸酵素の創製に応用できると考えられ、創薬・工業応用が期待される。

3.5. 細胞の未分化の維持に関与する Musashi タンパク質の標的 RNA 認識機構の解明 (発表論文 7)

Musashi タンパク質は、標的遺伝子の 3' 非翻訳領域に結合して翻訳を阻害する事で、細胞の未分化状態を維持する。Musashi と RNA の複合体の立体構造・相互作用エネルギーを解析し、標的 RNA の認識機構を解明した。

3.6. ATP アプタマーの捕捉機構の解明 (発表論文 8)

ATP を捕捉する RNA アプタマーに関し、NMR 法を用いた複合体の構造解析を担当し、捕捉機構の解明に貢献した。

3.7. バイオマスのエタノール変換に関わる重要酵素の機能変換 (発表論文 9)

バイオマスからエタノールなどを高効率に生産するためには、グルコースなどのヘキソース（六炭糖）のみならず、キシロースなどのペントース（五炭糖）も効率よくエタノールに変換する必要がある。酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*) は、エタノール生産能は優れているが、ペントースを炭素源として用いる能力がない。他のキシロース代謝酵母のキシロース還元酵素 (xylose reductase; XR) とキシリトール脱水素酵素 (xylitol dehydrogenase; XDH) 遺伝子を導入した遺伝子組換え酵母は、キシロース代謝能を獲得するが、XR と XDH の補酵素依存性 (NAD(H) または NADP(H)) の違いによる細胞内酸化還元環境のアンバランスにより発酵効率が悪いことが指摘されている。この問題の解決のために、すでに XDH に関して、補酵素要求性を変換した変異酵素を作製し、その酵素を用いることによりキシロース→エタノール変換効率の効率化に成功している。本研究では、もう一つの重要酵素である XR について、部位特異的変異法により補酵素依存性変異酵素の作製を行い、野生型 XR は NADH および NADPH とともに利用できるのに対し、NADPH のみに完全に依存した変異酵素の作製に成功した。本変異 XR を以前作製した NADP⁺ に完全に依存した変異 XDH と共に酵母に導入することにより、キシロース→エタノール変換効率をさらに効率化することが期待される。

(発表論文)

- 1) T. Mashima, F. Nishikawa, Y. O. Kamatari, H. Fujiwara, M. Saimura, T. Nagata, T. Kodaki, S. Nishikawa, K. Kuwata, M. Katahira, "Anti-prion activity of an RNA aptamer and its structural basis", *Nucleic Acids Res.*, 41(2013)1355-1362.
- 2) Ando, D., Nakatsubo, F., Takano, T., Nishimura, H., Katahira, M. and Yano, H. (2013) *Holzforchung*, 67, 249-256, "Multi-steps degradation method for β -O-4 linkage in lignins: γ -TTSA method. Part 3. Degradation of milled wood lignin (MWL) from *Eucalyptus Globulus*"
- 3) Kondo, K., Takeda, M., Mashima, T., Katahira, M., Koizumi, J. and Ueda, K. (2012) *Carbohydrate Research*, 360, 102-108. "Conformational analysis of an extracellular polysaccharide produced by *Sphaerotilus natans*"
- 4) A. Furukawa, K. Sugase, R. Morishita, T. Kodaki, A. Takaori, A. Ryo, T. Nagata, M. Katahira, "Real-time monitoring of the cytidine deamination along single-stranded DNA by an anti-HIV factor, APOBEC3G", 第 50 回 NMR 討論会国際シンポジウム (2011) (優秀若手ポスター賞受賞)
- 5) Sugiyama, R., Nishitsuji, H., Furukawa, A., Katahira, M., Habu, Y., Takeuchi, H., Ryo, A. and Takaku, H. (2011) *J. Biol. Chem.* 286, 10051-10057. "Heat shock protein 70 inhibits HIV-1 Vif-mediated ubiquitination and degradation of APOBEC3G"
- 6) T. Nagata, Y. Sakurai, Y. Hara, T. Mashima, T. Kodaki, M. Katahira, "'Intelligent' ribozyme whose activity is altered in response to K^+ as a result of quadruplex formation", *FEBS J.*, 279(2012)1456-1463.
- 7) Ohyama, T., Nagata, T., Tsuda, K., Kobayashi, N., Imai, T., Okano, H., Yamazaki, T. and Katahira, M. (2012) *Nucleic Acids Res.*, 40, 3218-3231. "Structure of Musashi1 in a complex with target RNA: The role of aromatic stacking interactions"
- 8) Nakano, S., Mashima, T., Matsugami, A., Inoue, M., Katahira, M. and Morii, T. (2011) *J. Am. Chem. Soc.*, 133, 4567-4579. "Structural aspects for the recognition of ATP by ribonucleopeptide receptors"
- 9) S.M.R. Khattab, S. Watanabe, M. Saimura, and T. Kodaki, "A novel strictly NADPH-dependent *Pichia stipitis* xylose reductase constructed by site-directed mutagenesis", *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 404(2011)634-637.

3.4. エネルギー複合機構研究センター

エネルギー複合機構研究センター（以後センターと略称）は、平成 8 年度の研究所改組により、研究所固有の研究教育分野とは一線を画した、プロジェクト的性格のより強い共同研究を機動的かつ横断的に遂行できるよう設置されたもので、既存の大型設備を充実・発展させるとともに、研究所が設定した「重点研究課題（プロジェクト）」に関わる共同研究を推進してきた。

しかし、センター発足当時の情勢に比べ、現在のエネルギー資源の枯渇化、地球温暖化などの諸問題はますます顕在化し、人類が解決すべき喫緊の重要課題となっています。そこで平成 18 年度より、これまでのセンター研究を「プラズマエネルギーに関する学理・技術の新領域開拓」および「エネルギー指向型先進的ナノバイオ機能材料創出」をミッションとする 2 つの複合研究領域に集中、特化させ、センターが培ってきた研究基盤施設を最大限に活用し、また国内外の他研究機関との連携融合研究を一層強化するため、研究体制を改組・再編した。

新体制では、先進プラズマ・量子エネルギー研究推進部および光・エネルギーナノサイエンス研究推進部が上述の複合研究領域の活動する母体となり、国際流動・開発共同研究推進部は国際的な活動を中軸とする流動・開発連携を推進します。これらの体制によって、これまで研究所の行ってきた各種設備整備ならびに 21 世紀 COE プログラム「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」での設備整備をベースに、先端的・先導的共同研究等を通して先進エネルギー領域における中核を形成する人材や指導的人材を育成し、また、核融合科学研究所との双方向型共同研究によるプラズマエネルギー研究の推進をはじめとした国内外の教育・研究機関との連携を深め、地球規模のエネルギー・環境問題に対応できるエネルギー理工学研究ネットワークの拠点形成を推進する。現在、センター附属研究分野がおかれ、教授 1 名および准教授 1 名が配属されている。

1. 構成員

教授：木下正弘、特定助教：吉留 崇 (H21.6~H24.5)

2. 研究の概要

蛋白質の折り畳み、分子認識、生体分子の高次構造形成など、生命を支える種々のプロセスのメカニズムを「水の並進配置エントロピーの役割」に重点を置いて解明する。独自の統計熱力学理論（分子性流体用積分方程式論と形態熱力学的アプローチの統合型方法論など；生体分子の立体構造を原子レベルで考慮し、水をも分子集団として扱う；蛋白質複合体などの非常に大きな対象をも取り扱うことができる）を構築しつつ、生体分子の水和の熱力学、蛋白質の折り畳みと変性の微視的機構、蛋白質立体構造予測法、ATP 駆動蛋白質の機能発現機構などの重要課題と取り組む。ナノバイオテクノロジーの基礎を与えると共に、新学術領域の開拓を目指す。

3. 主な研究成果

3.1. 生体系における自己組織化過程の統一的理解（発表論文 1-7）

生体分子が自己組織化を起こすと、生体分子が水分子に対して生成する排除容積が減少し、これが主たる要因となり、共存する水の並進配置エントロピーの利得が生じる。この利得は、生体分子の構造エントロピー損失とエンタルピー変化（生体分子-水分子間の水素結合の切断を生体分子内または生体分子間の水素結合で必ずしも補償できないため、むしろ正になることが多い）の和を凌駕し、自己組織化の強力な推進力になる。この「エントロピー駆動の秩序化の概念」と「分子性流体用積分方程式論と形態熱力学的アプローチの統合型方法論」を新機軸として、生体系における自己組織化過程を統一的に説明できる理論体系を構築しつつある。

自己組織化によって形成された構造は、高圧をかけると崩れる。蛋白質の圧力変性、F-アクチンのモノマーへの解離、アミロイド繊維の崩壊などが該当する。また、低温では構造形成力が弱まる。蛋白質の低温変性、低温におけるミオシンと F-アクチンの結合力の低下などが該当する。これらの現象は、種々の過程の横断的共通性の存在を物語っており、ある特定の因子が支配的に効くことを示唆している。この因子が、水の並進配置エントロピー効果の溶質-水間多体相関成分であり、その排除容積項が「疎水性」の本当の物理起源であることを示した。個々の水分子の存在も他の水分子にとっての排除容積を生成しており、この意味において水分子間にエントロピックな相関が生じる。溶質の自己組織化による水分子間の相関の変化がまさに溶質-水間多体相関成分である。

3.2. ATP 駆動蛋白質の機能発現機構（発表論文 8-12）

ミオシンヘッド (S1) の F-actin 上における一方向移動のメカニズムに対する斬新な物理描像を提案した：①水分子の並進移動に起因して、F-actin 近傍の S1 にエントロピーポテンシャル場が形成されることを示した；②S1 は、ATP や ADP+Pi と結合していない S1 に対して形成されるポテンシャル場と、ATP または ADP+Pi との結合によって幾何学的形状が変化した S1 に対して形成されるそれを行き来することによって、一方向移動を実現できる。シャペロニン (GroEL) において、水分子の並進移動に起因したエントロピー力により、変性蛋白質がシャペロニン内キャビティーのほぼ中央部へ挿入されることを示した。蛋白質が折り畳むと、排除容積の減少によってエントロピー力が弱まり、親水性の増大によって蛋白質がバルク水で水和されることを好むようになる（後者はエンタルピー成分の作用）。以上のようにして、挿入から放出への転換が起こることを示した。F₁-ATPase の回転のメカニズムに対し、新しい物理描像を提案した：水のエントロピー効果により、 $\alpha_3\beta_3\gamma$ 複合体に充填度の異なる 3 通りの領域が常に形成され、それらのサイクリックな交換が γ -サブユニットの回転を誘発する。

ATP 駆動蛋白質の機能発現機構に対する新しい横断的描像を構築した。①ATP 濃度が十分高く、ADP 濃度が十分低い条件下では、ATP との結合；ATP の加水分解；分解生成物 (Pi, ADP) の解離（以下、これを ATP の作用と呼ぶ）のうちのどれもがシステムの自由エネルギー低下に結び付く：つまり、自発的に起こる。これが 1 つの重要なポイントとなる。②水が、ミオシン-F-actin、蛋白質-シャペロニン、溶質-トランスポーター、 $\alpha_3\beta_3-\gamma$ の各ペア間に平均力のポテンシャル (Potential of Mean Force; PMF) を形成することを示した。③PMF は、ペアの立体構造と性質に強く依存して変化する；ATP の作用により、ペアの立体構造と性質が摂動を受け、PMF が変化する。④以上のメカニズムにより、ミオシンの一方向移動、蛋白質や溶質の挿入／放出、 γ -サブユニットの一方向回転などが起こる。ATP 加水分解自由エネルギー F_{ATP} 分の低下が、上記のサイクルを駆動する。

3.3. 蛋白質立体構造予測法の構築 (発表論文 13-16)

水及び疎水環境中における蛋白質の立体構造安定性を解析し、その違いを明らかにした。また、疎水環境中蛋白質立体構造予測用の自由エネルギー関数を構築し、膜蛋白質立体構造予測に極めて有望であることを実証した。実験で得られた蛋白質天然構造モデルのキャラクタリゼーション法を開発した。この方法により、実験で得られたモデルの特徴や弱点を明らかにすることができ、より良いモデルを作成するための有用な指針が得られる。生物情報科学分野で用いられる手法を用いて多数の候補構造を発生させ、水環境中における蛋白質用の自由エネルギー関数に最低値を与える構造を選定する方式を試みたところ、幾つかの蛋白質において非常に有望な結果が得られた。

(発表論文)

- 1) M. Kinoshita, "Molecular Origin of the Hydrophobic Effect: Analysis Using the Angle-Dependent Integral Equation Theory", *Journal of Chemical Physics*, 128, 024507(1-14) (2008).
- 2) T. Yoshidome, M. Kinoshita, S. Hirota, N. Baden, and M. Terazima, "Thermodynamics of Apoplastocyanin Folding: Comparison between Experimental and Theoretical Results", *Journal of Chemical Physics*, 128, 225104(1-9) (2008).
- 3) M. Kinoshita and T. Yoshidome, "Molecular Origin of the Negative Heat Capacity of Hydrophilic Hydration", *Journal of Chemical Physics*, 130, 144705(1-11) (2009).
- 4) T. Yoshidome, Y. Harano, and M. Kinoshita, "Pressure Effects on Structures Formed by the Entropically Driven Self-Assembly: Illustration for Denaturation of Proteins", *Physical Review E*, 79, 011912(1-10) (2009).
- 5) H. Oshima, T. Yoshidome, K. Amano, and M. Kinoshita, "A Theoretical Analysis on Characteristics of Protein Structures Induced by Cold Denaturation", *Journal of Chemical Physics*, 131, 205102(1-11) (2009).
- 6) K. Oda, R. Kodama, T. Yoshidome, M. Yamanaka, Y. Sambongi, and M. Kinoshita, "Effects of Heme on the Thermal Stability of Mesophilic and Thermophilic Cytochromes c: Comparison between Experimental and Theoretical Results", *Journal of Chemical Physics*, 134, 025101(1-9) (2011).
- 7) T. Yoshidome and M. Kinoshita, "Physical Origin of Hydrophobicity Studied in terms of Cold Denaturation of Proteins: Comparison between Water and Simple Fluids", *Physical Chemistry Chemical Physics*, 14, 14554-14566 (2012).
- 8) K. Amano, T. Yoshidome, M. Iwaki, M. Suzuki, and M. Kinoshita, "Entropic Potential Field Formed for a Linear-Motor Protein near a Filament: Statistical-Mechanical Analyses Using Simple Models", *Journal of Chemical Physics*, 133, 045103(1-11) (2010).
- 9) K. Amano, H. Oshima, and M. Kinoshita, "Potential of Mean Force between a Large Solute and a Biomolecular Complex: A Model Analysis on Protein Flux through Chaperonin System", *Journal of Chemical Physics*, 135, 185101(1-14) (2011).
- 10) T. Yoshidome, Y. Ito, M. Ikeguchi, and M. Kinoshita, "Rotation Mechanism of F1-ATPase: Crucial Importance of the Water-Entropy Effect", *Journal of the American Chemical Society*, 133, 4030-4039 (2011).
- 11) T. Yoshidome, Y. Ito, N. Matubayasi, M. Ikeguchi, and M. Kinoshita, "Structural Characteristics of Yeast F1-ATPase before and after 16-Degree Rotation of the γ Subunit: Theoretical Analysis Focused on the Water-Entropy Effect", *Journal of Chemical Physics*, 137, 035102(1-8) (2012).
- 12) Y. Ito, T. Yoshidome, N. Matubayasi, M. Kinoshita, and M. Ikeguchi, "Molecular Dynamics Simulation of Yeast F1-ATPase before and after 16-Degree Rotation of the Gamma Subunit", *Journal of Physical Chemistry B*, 117, 3298-3307 (2013).
- 13) T. Yoshidome, K. Oda, Y. Harano, R. Roth, Y. Sugita, M. Ikeguchi, and M. Kinoshita, "Free-Energy Function Based on an All-Atom Model for Proteins", *Proteins – Structure Function and Bioinformatics*, 77, 950-961 (2009).
- 14) S. Yasuda, T. Yoshidome, Y. Harano, R. Roth, H. Oshima, K. Oda, Y. Sugita, M. Ikeguchi, and M. Kinoshita, "Free-Energy Function for Discriminating the Native Fold of a Protein from Misfolded Decoys", *Proteins – Structure Function and Bioinformatics*, 79, 2161-2171 (2011).
- 15) H. Mishima, S. Yasuda, T. Yoshidome, H. Oshima, Y. Harano, M. Ikeguchi, and M. Kinoshita: Characterization of Experimentally Determined Native-Structure Models of a Protein Using Energetic and Entropic Components of Free-Energy Function, *Journal of Physical Chemistry B*, 116, 7776-7786 (2012).
- 16) S. Yasuda, H. Oshima, and M. Kinoshita, "Structural Stability of Proteins in Aqueous and Nonpolar Environments", *Journal of Chemical Physics*, 137, 135103(1-14) (2012).

1. 構成員

准教授：岡田浩之（H17.8～）

2. 研究の概要

トーラスプラズマ中の高速粒子閉じ込めの磁場構造に対する依存性とその結果として生ずるバルクプラズマ加熱の研究、高速イオンとプラズマ対向材との相互作用、TV トムソン計測装置の開発を主な研究テーマとした。イオンサイクロトロン周波数帯（ICRF）加熱により、プラズマ中に粒子源を用いることなく少数イオンモードの加熱によって、磁場に垂直方向の少数イオン加速を行い、エネルギースペクトルの磁場配位、空間分布を調べヘリカル軸ヘリオトロンプラズマ閉じ込めを解明する。

3. 主な研究成果

3.1. ヘリオトロンJでのICRF加熱を用いた高速イオン生成・閉じ込めの実験研究（発表論文1）

ヘリオトロンJ装置のICRF加熱実験では閉じ込め磁場のコーナー部に設置した同一ポロイダル面での2本のシングルターンのループアンテナを用い、弱磁場側からの波動励起により少数イオン加熱実験が行われている。アンテナ位置はヘリオトロンJの標準配位では、トロイダル方向の磁場強度分布の極大点となるポロイダル面に対応する。また、このポロイダル面での等磁気圧分布は大半径方向に小さくなり、トカマク装置の磁場分布と類似している。少数イオン加熱で用いているのは水素マイノリティ、重水素マジョリティである。バンピネスとしては0.15（高バンピー配位）、0.06（中バンピー配位）、0.01（低バンピー配位）の3条件で実験を行っているが今回は中バンピネスの場合について報告する。入射周波数は23.2MHzと19MHzであり、前者は水素のサイクロトロン層が強磁場側（off-axis）にある場合であり、後者はサイクロトロン層がプラズマ中心を横切る場合（on-axis）である。ICRF加熱は電子サイクロトロン加熱（ECH、250-300kW）で生成されたプラズマに対して行った。高速イオンのエネルギースペクトルおよびバルクイオン温度については荷電交換中性粒子エネルギー分析器（CX-NPA）を用いて、トロイダル方向、ポロイダル方向に角度を変え異なるピッチ角および空間位置の粒子を観測した。磁気軸を含む視線で荷電交換中性粒子エネルギー分析器（CX-NPA）のトロイダル角を変え、異なるピッチ角の少数イオンのエネルギースペクトルを計測したところ、計測を行ったほとんどのピッチ角で、少数イオンの高エネルギーテールは高バンピー配位で最大であった。定量的な比較のため1-7keVのエネルギー範囲で実効温度を評価してもこの傾向は認められる。ヘリオトロンJの真空磁場では多くの場合ピッチ角90度付近に損失領域があるため、計測されたエネルギースペクトルも単純に90度の角度で成長しているわけではない。高バンピーの場合は120度付近に実効温度の極大が現れる。バルクイオンの加熱についても高バンピー配位が最も効率的であることも分かっている。

3.2. ヘリオトロンJでの高速イオンのモンテカルロシミュレーション研究（発表論文1）

ヘリオトロンJ磁場は対称性のない磁場配位であり、高速粒子閉じ込めを考える場合、三次元的取り扱いが不可欠である。実験で得られた少数イオンのエネルギースペクトルのピッチ角分布について、モンテカルロ法を用いた三次元モデル計算で再現を試みた。使用したコードは軌道追跡、クーロン衝突、ICRFによる粒子加速モデルを含んでいる。粒子出発点の初期分布としてはトロイダル方向、ポロイダル方向には一様分布、小半径方向には放物線分布である。速度空間ではイオン温度である0.2keVのマックスウェル分布とし、パワー吸収は放物線分布を仮定した。正味のパワー吸収としては全ての場合について約100kWとした。以前よりも多数の粒子を用いることによって、20keV近くまでのエネルギースペクトルを計算することができた。最も多く高エネルギー粒子が観測されたピッチ角120度付近のエネルギースペクトルの実験値と計算値とを比べると、良い一致を見た。中バンピー、低バンピーの実験値で10keV以上に点がないのは、検出器にカウントがなかったためである。計算でも高バンピー配位で20keV付近までの粒子が再現されている。また、計算ではピッチ角90度を含め、広い範囲でエネルギースペクトルの評価を行い、さらに実効温度を指標としての検討を行った。これらの結果を通して、実験、数値計算から捕捉粒子を主体とした高速イオン閉じ込めに対するバンピー成分の効果がほぼ明らかになった。

3.3. ヘリオトロンJでのTVトムソン散乱計測装置による電子温度・密度分布の研究（発表論文2）

京都大学エネルギー理工学研究所のヘリカル軸ヘリオトロン装置であるヘリオトロンJでは、磁場配位最適化のため磁場のフーリエ成分に対する閉じ込め性能の変化について調べている。グローバル

な閉じ込めについては、回転変換、トロイダル方向の磁場リップル（バンピネス）についての依存性について実験結果が得られた。また、様々な配位で閉じ込め改善を伴う遷移現象も観察されている。これらのさらなる解析のためにはプラズマパラメータの分布測定が重要である。そのひとつとして電子温度、密度計測のために TV トムソン散乱計測装置が設置されている。これまで実験障害となっていた光伝送のためのファイバーバンドルを更新し、散乱光を取得できるようになった。中性粒子ビーム入射によるプラズマに対し、粒子補給法に超音速分子ビーム入射などを利用したプラズマを計測した結果、プラズマ中心で電子密度 $1.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ を超えるようなプラズマが生成されていることが初めて分かった。電子密度についてはレーラー散乱より較正データを求めているが、マイクロ波干渉計から得られた線積分値と一致することも確認した。また、計測系のうちビームダンプの劣化も明らかになり、これを改善することにより迷光減少が期待でき、低密度プラズマに計測対象を広げられる見込みも得られた。

3.4. PC UNIX 用いたマルチカード ADC システムの開発

京都大学エネルギー理工学研究所で行っているヘリオトロン J を用いたプラズマ実験用として、低価格、長時間のデータ蓄積、表示システムの開発が必要となった。コイルに電源を供給する MG 電源系のモニター用であり、異常時などには 3 分程度のデータ記録を行う。要求される諸元としては、サンプリング周波数 2kHz 以上、データ保存 3 分間（通常は 20 秒）以上、チャンネル数 21 以上である。要求サンプリングが低いため、市販のメモリー無の廉価 ADC カードの使用を考えた。ヘリオトロン J グループでは単一インターフェースを用いたマルチチャンネル VUV 信号の取り込みなどで PC-UNIX を用いた実時間制御専用ドライバーを開発した経験がある。今回は、チャンネル数が多いため複数インターフェースに対応した新しいドライバーを開発し、システムを作成した。使用したインターフェースは（株）インターフェースの PCI-3173A、4 枚である。ADC は 10μ 秒の変換速度である。1 枚当たり 8 チャンネルでありルチプレクサを用いているためチャンネル切り替えに 60μ 秒掛かる。PCI への命令送出の順序を工夫することによって、24 チャンネルの全てのチャンネルで 2.5 kHz の動作を実現した。通常の 1 データごとのデータ取得では UNIX の他プロセスの割り込みによってデータ取得が連続でなくなる。今回開発したドライバーでは 24 チャンネルを用いても問題なくデータ取得が可能である。データ取得中はカーネルモードで動作し、データ取得動作以外の OS の機能は停止する。データサンプリング時間以外はネットワークを含め PC-UNIX の全ての機能が利用できる。データ表示は X-Window 上で行う。

（発表論文）

- 1) H. Okada, et al., "Numerical Analysis of ICRF Minority Heating in Heliotron J", Plasma Fusion Res. 6 (2011) 2402063.
- 2) T. Mizuuchi, et al., "Study of Fuelling Control for Confinement Experiments in Heliotron J", Proc. 24th IAEA Fusion Energy Conference (2012) EX/P3-07.

4. 拠点形成促進事業

4. 拠点形成促進事業

本研究所は、開所以来、先進エネルギー開発における国際的な研究拠点形成を目指し、自助努力（所内経費）や豊富な競争的外部資金により、施設・設備投資を行い、拠点としての機能付与に努めてきた。平成 24 年度までに、以下の事業を実施している。

- 1) 共同利用・共同研究拠点（ゼロエミッションエネルギー研究拠点）
- 2) 双方向型共同研究（Heliotron J）
- 3) 先端研究施設共用促進事業
- 4) 次世代太陽電池研究拠点
- 5) アジア研究教育拠点
- 6) センター共同研究
- 7) グローバル COE プログラム

4.1. 共同利用・共同研究拠点（ゼロエミッションエネルギー研究拠点） 平成 23 年度～

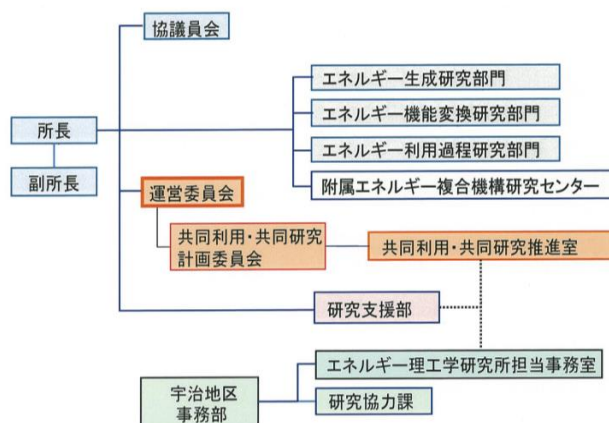
1. 事業の目的・目標

本研究所の第Ⅱ期中期目標・中期計画の中では、「国内外の研究機関・研究者との連携による地球規模のエネルギー問題に対応できるエネルギー理工学研究ネットワークのハブ機能強化」、「先進エネルギー領域における指導的研究者・技術者等の人材育成、並びに学生等の教育への貢献」が掲げられている。本事業は、この中期目標の観点から、文部科学省が平成 22 年度に開始した共同利用・共同研究拠点制度に申請し、平成 23 年度から開始した事業である。二酸化炭素や有害物質を可能な限り発生しない「ゼロエミッションエネルギー（ZE）システム」の実現に向けたエネルギー関連分野の研究者コミュニティを支援するとともに、ZE 研究者コミュニティの形成を図ることを目的としている。

このため、研究所の有する特色ある先端施設や複数分野の複合・統合した学理の研究基盤を共同利用・共同研究に供するとともに、ZE の視点で既存分野を融合させた学際的研究を実施、(1) エネルギー生成・変換・利用において有害物質放出や環境負荷を最小化する視点を導入することで、従来の単一の研究分野では達成できない総合的かつ分野融合的な ZE 研究の中核としての役割を果たす、(2) 研究所が培ってきた国際交流基盤を基に、日本の ZE 研究を代表し、多国間国際協力の拠点としての指導的役割を果たす、(3) エネルギー科学研究科等における教育研究活動とも連携し、ZE 社会建設のための多様なエネルギーによる総合システム概念を構築し、その中での研究拠点としての機能を果たすことを目標としている。

2. 体制および運営状況

エネルギー関連研究者コミュニティの要望を拠点運営に反映させるため、共同利用による研究の実施に関する重要事項について所長の諮問に応ずる共同利用運営委員会(学外委員 7 名、学内委員 6 名)、同委員会の下におかれ、公募課題の選定、募集、選考等に関し、必要な専門的事項を調査及び審議し、運営委員会及び研究所協議委員会の議を経て、その実施にあたる共同利用・共同研究計画委員会(学外委員 6 名(平成 25 年度より 7 名)、学内委員 6 名)による企画・運営を行う。応募課題の整理等、共同利用・共同研究計画委員会からの委



組織図における ZE 研究拠点の位置付け

託業務や共同利用・共同研究の実施に係る施設・設備の利用状況の把握・調整、各種情報の整理、研究成果の公開および研究活動の広報などを担当する共同利用・共同研究推進室が宇治地区事務部と連携して、共同利用・共同研究の実施を支援する。各研究部門・分野は関連コミュニティ各分野の研究を中心に、また、学際的融合を促進する共同利用・共同研究は本研究所附属センターを中心に展開、新研究領域の発展・普及を図るなど、本研究所が一体となって実施する。拠点活動に関しては、大学本部は、必要に応じて、「全学経費」や、「総長裁量経費」、「戦略定員」等の諸制度を活用した支援を行う体制となっている。

3. 活動状況

3.1. 公募型共同利用・共同研究の実施

幅広い共同研究者の参画の下に独創的・先端的 ZE 研究を総合的に展開するため、視点の異なる 3 種のカテゴリーを設け、各々、所外研究者を代表とする共同利用・共同研究を公募している。

共同利用・共同研究(企画型研究)：本研究所の得意とする二つの基本テーマ(「太陽光・レーザー・バイオ等を利用したエネルギーシステムに関する研究」ならびに「先進原子力システム及びプラズマ利用に関する研究」)に沿った課題。(平成 23 年 17 件、平成 24 年 30 件)

共同利用・共同研究（提案型研究）：テーマを限定せず、エネルギー関連コミュニティ研究者が独自のアイディに基づき自由に提案する課題。（平成 23 年 55 件、平成 24 年 47 件）

共同利用研究：ZE を指向する幅広い研究促進とコミュニティ支援のため、所外の研究者が独自に本研究設備・施設を利用する研究課題。（平成 23 年 該当枠無、平成 24 年 2 件）

公募型共同利用・共同研究の参加状況

| 区分 | 平成 23 年度 | | | | | | |
|------------|----------|------|------|------|------|-----|------|
| | 機関数 | 受入人数 | | 延べ人数 | | 外国人 | 大学院生 |
| | | 外国人 | 大学院生 | 外国人 | 大学院生 | | |
| 学内（法人内） | 3 | 9 | 0 | 2 | 20 | 0 | 6 |
| 国立大学 | 17 | 72 | 0 | 14 | 163 | 0 | 44 |
| 公立大学 | 3 | 6 | 0 | 1 | 6 | 0 | 1 |
| 私立大学 | 2 | 98 | 0 | 4 | 174 | 0 | 7 |
| 大学共同利用機関法人 | 2 | 18 | 1 | 1 | 31 | 2 | 2 |
| 独立行政法人等 | 4 | 24 | 4 | 0 | 78 | 25 | 0 |
| 民間機関 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 外国機関 | 1 | 1 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 |
| その他 | 2 | 5 | 0 | 0 | 11 | 0 | 0 |
| 計 | 34 | 233 | 5 | 22 | 489 | 27 | 60 |
| 区分 | 平成 24 年度 | | | | | | |
| | 機関数 | 受入人数 | | 延べ人数 | | 外国人 | 大学院生 |
| | | 外国人 | 大学院生 | 外国人 | 大学院生 | | |
| 学内（法人内） | 1 | 15 | 0 | 2 | 31 | 0 | 6 |
| 国立大学 | 14 | 92 | 1 | 43 | 171 | 2 | 88 |
| 公立大学 | 1 | 3 | 0 | 1 | 3 | 0 | 1 |
| 私立大学 | 2 | 49 | 0 | 17 | 60 | 0 | 22 |
| 大学共同利用機関法人 | 1 | 17 | 0 | 3 | 20 | 0 | 4 |
| 独立行政法人等 | 5 | 32 | 0 | 0 | 70 | 0 | 0 |
| 民間機関 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 外国機関 | 1 | 2 | 0 | 0 | 9 | 0 | 0 |
| その他 | 1 | 2 | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 |
| 計 | 26 | 212 | 1 | 66 | 374 | 2 | 121 |

3.2. 技術講習会の開催

研究所の先端設備機器等を円滑かつ有効に使用するため、年 1 回程度の講習会を企画・実施している。本講習会は、研究者のみではなく、大学院生・学部生にも開放し、次世代を担う人材養成にも役立っている。（平成 23 年：遠隔講義システム講習会、平成 24 年：NMR 講習会）

3.3. 国際シンポジウム等研究集会の開催

研究所と協働し、国際シンポジウムやセミナー・研究会等を定期的・計画的に開催し、国内外の関連研究者とコミュニティに対し、当該分野の世界的研究動向の把握と情報発信を行っている。

研究会・シンポジウム等の実施状況（研究所関連分も含む）

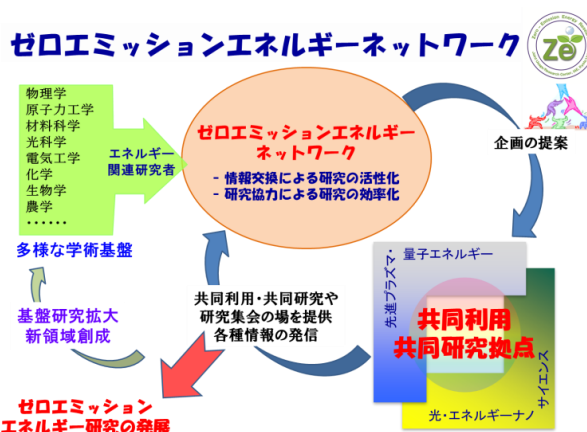
| 年度 | シンポジウム | | 講演会 セミナー | | 研究会 ワークショップ | | その他 | | 合計 | |
|----|--------|------|-------------|------|----------------|------|-----|------|----|-------|
| | 件数 | 参加人数 | 件数 | 参加人数 | 件数 | 参加人数 | 件数 | 参加人数 | 件数 | 参加人数 |
| 23 | 8 | 995 | 20 | 410 | 4 | 82 | 1 | 20 | 33 | 1,507 |
| 24 | 7 | 852 | 15 | 393 | 4 | 100 | 1 | 30 | 50 | 2,482 |

3.4. ゼロエミッションエネルギーネットワーク活動

ZE 研究の研究者コミュニティ形成と、これを基盤とする多様なエネルギーによる総合エネルギーシステムの概念構築に向け、将来的には、多様な研究分野の中でエネルギー研究に関心のある研究者や学生等を対象とし、ZE の視点をもった関連エネルギー研究の効率的な推進を支援する、関連研究者による自主・自律した組織へと発展させるべく、「ゼロエミッションエネルギーネットワーク」を始動した。その活動の端緒として、本拠点活動参加者を中心に、所外約 200 名を含むメーリングリストを作成、ZE 研究に関する情報提供や、本拠点活動、やネットワーク活動に関する意見・要望聴取等を行っている。また、共同利用運営委員会を中心に、組織としてのネットワーク作りへ向け準備作業を始めた。

4. 主な成果

公募型共同利用・共同研究成果は、毎年度末に発刊する成果報告書に纏められている。本共同利用・共同研究による論文数は、拠点活動開始の平成 23 年度は 39 編（拠点外研究者による成果 24 編）であったが、2 年目の平成 24 年度は 61 編（拠点外研究者による成果 45 編）と増加した。中でも、国際学術誌掲載論文数では、平成 23 年度 16 編（拠点外研究者によるもの 11 編）から 37 編（拠点外研究者によるもの 22 件）と大きく増加している。また、拠点活動参加を通じて他分野研究者とのコンタクトを果たした事例も多い。特に、核融合や原子力、太陽光やレーザーあるいはバイオマス関連研究分野において、これらの関連研究者間の学術交流が実現され、分野融合研究課題（平成 24 年度 79 課題中、8 課題）が提案されるに至っている。



共同利用・共同研究を活用して発表された論文数

| 区分 | | 平成 23 年度 | | 平成 24 年度 | |
|------------------|--|--|-----------|----------|------------|
| 論文数 | | 8 | | 13 | |
| 内、国際学術誌に掲載された論文数 | | (3) | 5 (3) | (11) | 9 (2) |
| 役割 | | コレスポンディングオーサー あるいは、指導した大学院生/PD が ファーストオーサー | | | |
| 区分 | | 平成 23 年度 | | 平成 24 年度 | |
| 論文数 | | 31 | | 48 | |
| 内、国際学術誌に掲載された論文数 | | (21) | 11 (8) | (34) | 28 (20) |

※下段の（ ）内は、拠点外の実験者による成果（内数）。

5. 今後の課題と計画

- エネルギー研究は非常に広い領域にわたり、多様な科学分野においてエネルギー関連研究を行っている研究者が存在する。このため、多くの既存領域毎のコミュニティの部分集合的な構成となっており、中心となり得る固有のコミュニティが存在しない。本拠点活動では、ZE 研究に関する固有のコミュニティ形成を視野に入れ、ゼロエミッションエネルギーネットワークを設けたが、現状は、こちらからの情報発信が主であり、情報交換の場としては未発達である。このネットワークを情報交換の場として定着させることと共に、今後、関連学協会において、ZE に関する分科会等の設置へと展開させたい。
- ZE システムを「二酸化炭素、有害物質を最大限発生しないエネルギーシステム」と定義して拠点活動を行っているが、必ずしも本来の趣旨を、具体的なイメージを伴う形で伝え切れていない面がある。拠点 HP 等の充実を行い、核融合や太陽光などの環境適合型エネルギー源の研究のみではなく、エネルギーシステムの質的变化を通じた高品位のエネルギー生成や変換・利用へ向けた研究も ZE 研究の大きな要素であることを示して行く必要がある。
- 本拠点での共同利用・共同研究によるコミュニティからのコメントや議論を通して、研究所のポテンシャルを向上させることに成功し、その結果、ZE 研究の主要分野の一つである光・ナノサイエンスに関わる研究分野の発展に資する特別経費プロジェクト（「革新的太陽光利用技術の開発 - ゼロエミッション文明への変革を加速する-」）を立ちあげる事ができた。これにより、ゼロエミッションのエネルギー変換利用学理を創出する化学、物理学、工学にまたがる融合的エネルギー研究を展開して行く。

ZE を普及させていくためには、上記を含め、現認可期間（～平成 27 年度）での成果を上げ、次期拠点期間にも認可されるよう最大の努力をして行く必要がある。

4.2. 双方向型共同研究 (Heliotron J)

平成 16 年度～

1. 事業の目的・目標

双方向型共同研究は、筑波大学プラズマ研究センター、京都大学エネルギー理工学研究所エネルギー複合機構研究センター、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター、九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センターの 4 センターが、核融合研との間で双方向性のある共同研究を進めるために、平成 16 年度に開始された制度である。プラズマ核融合研究に於ける重要課題を解決するため、各センターの特徴を活かし、大学全体がプラズマ核融合研究を推進する上での課題を核融合研が取りまとめ、各センターが重要課題を分担すること、各センターのプラズマ装置を、核融合研の共同利用設備と同等なものとし、全国の大学からの共同研究を受け入れることとした。京都大学の双方向型共同研究 (Heliotron J) はヘリオトロン J 装置に関わる全国規模の共同研究となっている。ヘリオトロン J 装置は、京大グループから提案されたヘリカル軸ヘリオトロン配位の実験的最適化を目指して設計・製作されたヘリカル型プラズマ実験装置であり、双方向型共同研究の第 1 期中期計画期間 (平成 16-21 年) では、将来の核融合炉心プラズマに必要とされる要素還元研究の 1 つとして、磁場分布制御技術を用いたプラズマ輸送・安定性改善の研究を進め、先導的な閉じ込め装置としての基本的性能を検証してきた。第 2 期中期計画期間 (平成 22-27 年) では、能動的なプラズマ分布制御を含む新たな制御技術の視点に立脚し、磁場配位によるプラズマ構造形成・不安定制御の研究および閉じ込め磁場最適化の研究を進展させることを研究の主目的とするとともに、核融合科学研究所の LHD 装置の高性能化および環状プラズマの総合的理解に貢献し、定常環状プラズマ型核融合炉の実現を目指す理学・工学の体系化に寄与する計画である。

2. 体制および運営状況

京都大学エネルギー理工学研究所エネルギー複合機構研究センターでは、ヘリオトロン J 双方向型共同研究委員会が設置され、核融合研の双方向型共同研究委員会と密接な連携のもと、双方向型共同研究 (Heliotron J) の公募、採択、予算計画、実施計画、評価の作業を行っている。核融合研運営会議の双方向型共同研究委員会は、共同研究委員会の中に設置され、学術的な視点から、公募計画や実験計画の企画立案の審議が行われている。この委員会の委員の半数は核融合研外の運営会議委員やネットワークの代表で構成されている。一方、ヘリオトロン J 双方向型共同研究委員会においても、委員の半数以上がエネルギー理工学研究所外の委員であり、委員長も所外の委員が務めている。平成 20 年、双方向型共同研究の第 1 回外部評価が実施され、全国的な共同研究の活性化と大学院教育への効果について高い評価を得た。しかし、核融合分野では核融合炉実現に向けた研究の更なる加速が要請されており、双方向型共同研究の新たな展開が期待されるに至った。双方向型共同研究委員会での議論の結果、平成 22 年度より核融合工学の推進を計画し、富山大学水素同位体研究センターと東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センターの 2 センターが新たに双方向型共同研究に参画した。新たな 6 センター体制のもと、「ジャイロトロンを使った高密度プラズマ加熱」と「境界領域における熱粒子制御」をセンター間連携研究として展開することとなった。京都大学の双方向型共同研究においても、他大学のセンターとの連携強化の中で、研究者・学生の流動性を高め、効果的な若手人材育成が進展できることが期待される。

3. 活動状況

京都大学の双方向型共同研究代表者のほとんどが学外研究者である。第 2 期中期計画期間における採択研究課題数は毎年約 20 課題程度、参画機関数は約 13 機関程度、参加者数は約 110 名程度である。毎年度末、核融合科学研究所にて成果報告会が開催され、活動状況の評価が行われる。本双方向型共同研究によって、学外からの新規・高精度計測器の導入・開発など、新しい視点からの研究アイデアの発掘、比較研究の迅速化、データ解析の効率化が進展している。核融合研の豊富な研究者集団との情報交換・討論が活性化した。その支援を得て、中型装置の機動性を活用した実験研究や、解析コードでの比較・検証が効果的に実施できる機会が増大している。新領域の研究展開に効果的に貢献できるようになり、その成果を高温プラズマ実験に反映させていくことが期待される。またセンター共同研究だけでは不十分であった幅広い研究者による実験研究と理論・シミュレーション研究との強いリンクを構築した共同研究が効果的に展開できるようになりつつある。平成 22 年 11 月、第 27 回プラズマ核融合学会にてシンポジウム「双方向型共同研究の意義と新たな展開」を開催し、活動状況の報告と今後の展開が議論された。

4. 主な成果

ヘリオトロンJでは、無電流・磁気井戸・立体磁気軸ヘリカル系の磁場構造の特徴を活かして、LHDと相補的なヘリカル型プラズマ閉じ込めの高性能化に向けた研究を推進している。関連する重要課題として、周辺プラズマ閉じ込めの微視的・巨視的不安定性の制御の方法論の研究（特に周辺磁気井戸効果）、高エネルギー粒子閉じ込めの改善の研究（準等磁場原理・バンピー磁場制御、低磁気シアにおけるアルフヴェン固有モードの制御）、コンパクト・高ベータ・ヘリカル炉の可能性に向けた実験データ基盤の確立（磁気島ダイバータの基礎研究を含む）などがある。

第1期中期計画期間では、主としてバンピー磁場制御の効果について、閉じ込め装置の基本的性能の検証を進めてきた。今後、新概念開発研究として、これまで実験的に検証された基本性能を如何に高性能化していくかが研究計画の重要な着眼点となる。

第2期中期計画期間前半3年間（H22-24）での主な成果は、具体的に以下のとおりである。

(1) コア・周辺のプラズマ揺動の構造形成の課題について、平均密度 $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ のNBI加熱を対象に、標準配位（最外殻磁気面内側6mm）において、ラングミュア・プローブ法による浮遊電位の揺動を調べ、高速イオン励起MHD（ $\sim 60 \text{kHz}$ ）による背景乱流およびバルク閉じ込め特性への影響、特に高速イオン損失と関連するポテンシャル構造変化を観測した[S. Ohshima et al., FEC2012 (IAEA) EX/P4-17]。磁気プローブ計測から、実験条件により定常的な揺動と、強くバーストする揺動の2種類が判別されるが、バースト性の揺動は、これと同期するポテンシャルの構造形成（最外殻磁気面内側でより負方向、外側でより正方向の変化）が見出され、高速イオン損失プローブの測定との対応関係の確認が待たれる。なお、同じ実験条件でビーム放射分光法（BES）による密度揺動の径方向分布が計測され、 $r/a \sim 0.7$ 近傍において磁気プローブ信号との良好な相関を有する数%程度の密度揺動強度のピーク（極大）が存在することが見出されている。

(2) 粒子補給制御等による閉じ込め改善の課題については、超音速分子ビーム入射法（SMBI）と高強度短パルス・ガスパフ（HIGP）とのプラズマ生成の相違を、NBIの段階入射条件で比較し、SMBIによる粒子補給法が到達プラズマエネルギー、コア部電子温度、イオン温度ともに優れ、特に電子密度は中心にピークした分布が得られることがTVトムソン散乱計測から確認された。またL-H遷移の閾値密度近傍のSMBIによる周辺分布制御による閉じ込め改善が実証された[T. Mizuuchi et al., FEC2012(IAEA)EX/P3-07]。

(3) 高速イオン励起MHD不安定性の理解と制御の課題では、磁気プローブ（MP）および軟X線（SX）検出器によるGAEの周波数スペクトラムおよび揺動の空間分布および位相関係から、実験的に観測されるモード数や位相速度を同定し、これとシミュレーション（STELLGAP/AE3D）から予測される固有モードと比較した。GAE周波数の回転変換角依存性の実験・シミュレーション比較から、実験結果は比較的良くシミュレーション予測を再現すること、しかしシミュレーションで予測される50kHz以下のGAEは実験的には観測されないこと、またシミュレーションで予測されないブランチのGAEが実験的には観測されるなど、今後の比較研究に有用な成果が多く得られた[S. Yamamoto et al., FEC2012(IAEA)EX/5-2]。

(4) 電子サイクロトロン電流駆動（ECCD）を用いた回転変換制御とMHD安定化の課題では、ECH入射角可変システムを活用し、ECH平行屈折率 $N_{\parallel} = 0.0$ の実験条件（ECH+NBIプラズマ）で励起している高速イオン励起MHD不安定（EPM）を、ECH平行屈折率 $N_{\parallel} = -0.3$ において1kA程度のEC電流を駆動し、効果的に安定化できることを実証した。安定化機構として、磁気シアの閾値が存在することが実験的に示唆される [K. Nagasaki et al., FEC2012(IAEA) EX/P8-10] 。

(5) 標準配位または高バンピー磁場配位と比較して、トロイダル磁場成分を減少させた新しい配位での閉じ込め研究が進んだ。特に、新しい配位ではコア部の高密度化（ 10^{20}m^{-3} ）が実現した。70GHz ECHプラズマをターゲットとし、NBI追加熱プラズマ（ $B = 1.3 \text{T}$ ）において、強くピーキングした密度分布が得られ、このとき中心密度は $1.3 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ である。2.45GHzマイクロ波アシストNBIプラズマでは、よりファットな密度分布が得られ、 $r/a = 0.5$ 近傍の密度が 10^{20}m^{-3} に達する。磁場をより減少させた運転（ $B = 0.8 \text{T}$ ）においても、 $r/a = 0.5$ 近傍の密度が $8 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ に達する。今後、より高密度の運転領域を開拓するため、粒子補給の条件を最適化する必要があり、ペレット入射実験および壁調整の検討を進める。

(6) 局所プラズマ計測器の整備が進んだ。バルクイオン温度及びプラズマ平行流速度計測用荷電交換分光法（CXRS）の整備が進んだ。乱流輸送計測用の多チャンネル・ラングミュア・プローブの整備が完了した。密度分布計測用AM反射計の整備が完了し、密度揺動計測用反射計の整備が進行中である。密度揺動計測用ビーム放射分光法（BES）の整備が進んだ。新規Nd:YAGトムソン散乱計測

装置の建設が進行中である。新規 HCN 干渉計の建設が進行中である。新規の高速イオン損失輸送過程計測用装置 (LIP) の整備が進行中である。

(7) センター間連携研究としての電子バーンスタイン波 (EBW) 加熱・電流駆動及び EBE 計測の課題については、NIFS との共同研究により、低磁場 ($B=0.09T$) において $2.45GHz$ $20kW$ マイクロ波を用いて、カットオフ密度の約 20 倍の電子密度のオーバードレンスプラズマの特性評価を進めている。詳細な空間分布計測により、動作ガス依存性・強いドップラーシフト共鳴等、EBW 加熱の物理特性を明らかにした。この結果をもとに、高磁場 ($B=1.25T$) における電子バーンスタイン波放射を用いたオーバードレンスプラズマでの電子温度計測の準備を進めている。

(8) センター間連携研究としての境界プラズマ・ダイバータ熱粒子制御の課題については、東北大学、筑波大学、広島大学等との共同研究により、バイアス実験により基礎的な L-H 遷移の物理研究が、また高感度高速カメラを用いた 2 次元イメージ計測に基づく周辺プラズマ揺動解析の計測手法開発では、ヘリオトロン J の NBI プラズマの境界プラズマにおける Blobs (filaments) のポロイダル回転の計測が進展した。特に、SMBI 直後にフィラメントの回転方向がイオン反磁性方向の回転から、電子反磁性方向の回転へと変化することを見出した。これは、L-H 遷移時と同様の傾向である。また、第 1 壁熱・粒子負荷評価のための新規プローブの設計を進め、実機への適用を計画している。

(9) 筑波大学とのセンター間連携研究では、特に粒子補給最適化に向けた研究を進め、ヘリオトロン J において新たな粒子供給法 (High-Intense Gas Puffing) を用い、 $1 \times 10^{20} m^{-3}$ を超える高密度プラズマの生成に貢献するとともに、筑波大学 GAMMA 10 装置においては複数の高速カメラとシミュレーションを用いて、超音速分子性ビーム入射 (SMBI) のビーム入射特性を調べた。センター間で同一課題のテーマに取り組むことで、得られる知見の共有・相乗効果が期待され、炉心プラズマに外挿可能な基礎研究が推進できる [K. Hosoi, Y. Nakashima, S. Kobayashi, et al., Plasma Fusion Res, 7 2402126 (2012)]。

今後、以上のような研究成果および準備研究を基盤に、次ぎの段階としての磁場最適化の物理原理の探索及び定常ヘリカル型原型炉に向けた物理研究へと本双方向型共同研究を展開していく計画である。

5. 今後の課題と計画

現在、研究が進展している LHD 型ヘリカル炉概念設計では、高密度プラズマ ($> 5 \times 10^{20} m^{-3}$) の中心加熱として、 $170GHz$ 、MW 級ジャイロトロンを適用するとき、EBW 加熱が必要となる。ペレット入射等による密度分布制御に伴って、O-X-B モード変換窓が移動するため、高い中心加熱効率を維持するためには、EBW 加熱最適化シナリオの開発・実証研究が不可欠となる。ヘリオトロン J では、まず、これに関連した高密度プラズマの EBW 加熱最適化の物理研究に取り組む計画である。一方、LHD 型ヘリカル炉のダイバータ設計では、ダイバータデタッチメントを含むダイバータプラズマの熱・粒子制御の研究が重要な課題となる。ヘリオトロン J では、境界プラズマ制御の観点から、周辺磁気井戸による境界プラズマ閉じ込めの研究、SOL のエルゴディック層における不純物を含む輸送の研究、ヘリカル・ダイバータと磁気島ダイバータの性能比較研究等に取り組むことを計画している。周辺 3 次元シミュレーション・コードによる数値計算予測と実験データの比較から、核融合炉設計での予測精度向上に寄与できる実験データ基盤の確立を目指すことになる。更に、関連する局所プラズマ計測器の整備・拡充を進める。このような双方向型共同研究の新たな展開のなかで、トロイダルプラズマ物理の総合的な理解が一層深まり、定常ヘリカル型原型炉の高性能化に至る優れた展望が開けることを期待する。



4.3. 文部科学省「先端研究施設共用促進事業（ADMIRE 計画）」

平成 19 年度～

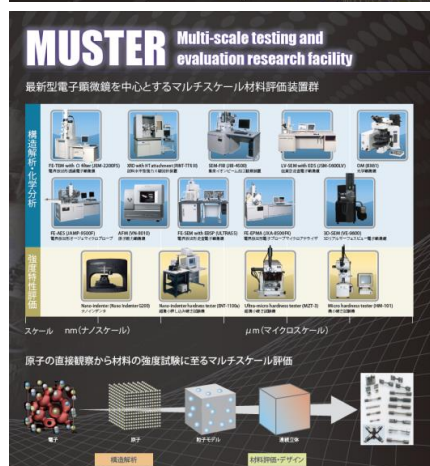
1. 事業の目的・目標

本事業は、文部科学省「先端研究施設共用促進事業」の補助を受けて実施している産官学連携事業であり、「イオン加速器とマルチスケール材料評価装置群による産業支援」（通称「ADMIRE（アドマイア）計画」）と呼ばれている。本研究所の保有する「超高温での材料照射が可能な複合ビーム材料照射装置（DuET）」と「原子レベルから工学的・実用化レベルまでの幅広い領域をマルチスケールで解析・評価できるマルチスケール材料評価基盤設備(MUSTER)」およびそれらの応用技術やソフト技術を広く社会に提供するため、施設共用を促進し、革新的なエネルギー材料の開発と機器・設備・建造物の保全研究のための産業利用を支援することを目的としている。中期目標・中期計画に掲げている先端的研究の推進や国内外の機関との共同研究の推進および社会との連携による社会貢献を目指している。



2. 体制および運営状況

エネルギー産業利用推進室に、1名の共用促進リエゾン（以下、リエゾン）、4名の施設共用技術指導研究員（以下、研究員）、2名の技術指導補佐員（以下、指導補佐員）および1名の補助員を配置し、技術相談、利用のスケジュール調整、技術指導などの共用業務を執り行っている。利用の事務手続きに関しては、宇治地区事務部が行い、利用状況を相互に確認できる仕組みとした。利用者の利便性を考え、約款による簡略化した手続きを採用している。リエゾン一人を配置し、展示会や個別の訪問説明による広報活動、利用相談への対応、利用者の取得したデータの解釈等に関する相談を行っている。



3. 活動状況

課題の募集は、各年度2回の公募により実施している。共用ナビ及びADMIRE ホームページで公募通知を行うとともに、イベント等で交流のあった企業に対しては、公募案内を電子メールや郵送で知らせている。また、研究所資料室および京都大学産学連携推進本部を通じた事業の広報及び課題の募集を行うとともに、応募案内を京都府中小企業技術センターのメールマガジンに掲載することで、地域の中小企業にも連絡を浸透させるようにしている。事業開始から現在までの採択研究課題数の推移を図1に示す。課題数は増え続けており、事業としては好ましい。トライアルユースは無償利用であり、ユーザーからの希望で共同研究に発展するケースが増えている。また、成果占有を希望する有償利用の件数も増えてきている。

産業利用相談は、メール等で受け付け、事前予約制とし、来所した相談者にリエゾンや研究員、研究所教員等が専門的な相談に応じている。また、各種所内行事の機会にも産業相談のためのデスクを設けて技術的な相談や施設見学等に応じている。

課題選定委員会は、研究所長、副所長、事業代表者、研究所各部門長、

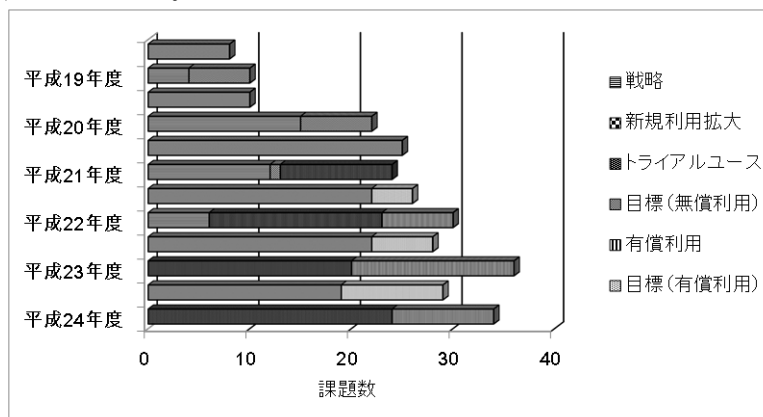


図1：採択課題数の推移

附属エネルギー複合機構研究センター長、京都大学産学官連携本部の教職員、京都大学以外の学識経験者9名、その他事業代表者が指名した者5名からなる計22名で構成されている。なお、平成24年度以降は、6大学（京都大学、名古屋大学、東北大学、大阪大学、名古屋工業大学、東京理科大学）連携協力活動を強化し、京都大学および名古屋大学以外の4大学から課題選定委員会メンバーとして、各1名ずつ、計4名を増員した。また、6大学で採択した課題に対しては、審査無しで、他大学で利用できるような仕組みを提唱し、6大学間において、原則、受け入れ可能な仕組みを構築した。

4. 主な成果

4.1 研究成果

本事業により得られた主な成果については、利用者の合意が得られた範囲で公表することが可能であり、以下に3つの例を挙げる。

課題①「粒界拡散したネオジウム磁石の微細構造の研究」社名：インターメタリックス(株)

・ネオジウム磁石の電気自動車モーター用途では、摩擦熱による温度上昇に伴う磁力の低下を防ぐため、希少金属ディスプロシウム（Dy）の添加が不可欠であるが、インターメタリックス社では、その添加量を減らし、かつ性能を向上させる技術（粒界拡散法）を開発した。粒界拡散の機構解明とさらなる改良のための研究をADMIREで実施し、その成果（図2参照）は、特許申請および複数の学会発表に至った。なお、利用責任者（佐川氏）は、この分野での高い評価により平成24年の日本国際賞を受賞している。現在、製造ラインを建設中で、稼働すれば年間売上げ100億円程度の経済効果と大きな雇用効果が期待されている。

課題②「高温耐摩耗性材料の開発」社名(株)KVC 特殊弁製造会社

・石炭ガス化発電炉IGCCの心臓部とも言える高温過酷環境で使用される弁（図3）の開発において、その軸受け材料に不安要素があり、ADMIREでの支援を求められた。数千時間使用後の当該部品の組織観察、硬度測定、その他の結果から、硬化処理した表面層がすべて摩滅し、硬度の低い下地金属が露出する状態となっていることが判明し、別の材料を探索する必要があることが分かった。トライアルユース後H24年度より共同研究として実施中である。IGCCのエネルギー源としての重要性から、大きな経済効果、雇用効果が期待されている。

課題③「黒鉛材料のイオン照射における照射挙動の分析」社名：イビデン(株)

・黒鉛は高温ガス炉の炉心材料であるが、照射中に寸法変化（図4参照）することが問題である。ADMIREでの加速器照射では短時間・高精度での試験が可能であり、本課題ではこれまで困難だった照射後寸法変化を評価する手法を開発し、学会発表および特許出願を行った。今後の同型炉の世界で急速な展開をみると、経済効果、雇用効果は大きいと期待される。

4.2 産学連携シンポジウムの開催

本事業の開始当初、各事業体間の連携協力が期待されていたことから、名古屋大学との連携を開始し、平成19年度から平成22年度まで、2大学産学官連携シンポジウムを開催した。本事業の活動を広く一般に公開するとともに、一層の共用事業促進活動を展開した。平成23年度からは、名大・京大の他に4つの大学の事業体との連携へと強化し、現在の6大学連携（前述）へと活動の範囲を広げている。特に、平成24年度は、本研究所が主体となり、吉田キャンパス（百年記念時計台）において、第一回目の全国産学官連携シンポジウムを開催したところ、全国に散在している27の事業体が一堂に

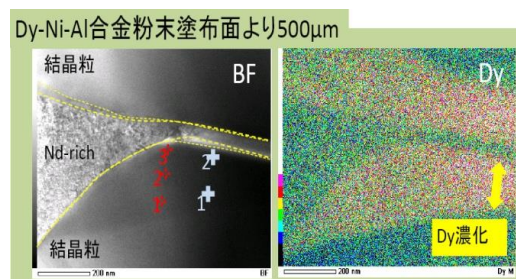


図2：ネオジウム磁石の粒界におけるディスプロシウムの分布

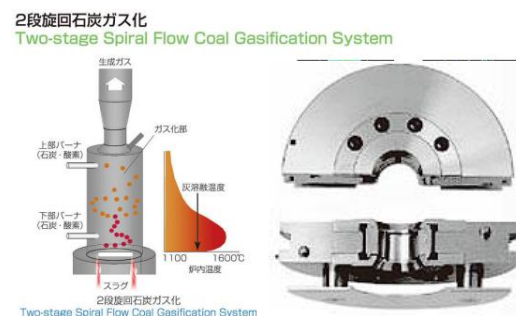


図3：石炭ガス化発電炉IGCCの弁軸受

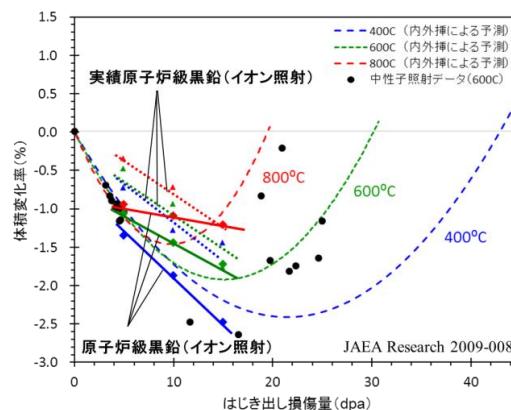


図4：イオン照射による黒鉛の体積変化率の損傷量および温度依存性

会し、本事業の成果を社会に公開報告するとともに、今後の当該事業の在り方について議論することができた。

これらの活動は、平成 24 年度の補正予算配分（2.3 億円）に反映され、共用施設（DuET および MUSTER）の高度化（性能向上、新機能付与）を行うことができた。本研究所の基盤研究施設の先端性の確保に貢献した。

4.3 研究成果などの新聞報道など

本事業に関する研究成果、先端研究施設の紹介および連携シンポジウムの開催に係わる新聞報道などは、以下のとおりである。

- 1) 京都新聞（平成 19 年 3 月 30 日）：研究設備公開
- 2) 奥羽日報（平成 21 年 3 月 4 日）：京大・名大シンポジウム開催
- 3) NHK 取材（平成 22 年 6 月 27 日）：「ルソンの壺」番組放映（パールトーン社）
- 4) 鉄鋼新聞（平成 23 年 11 月 4 日）：特許査定取得（東京ステンレス研磨興業社）
- 5) 日刊工業新聞（平成 24 年 3 月 30 日）：共同開発（グンゼ社）

4.4 人材育成、若手のキャリアアップ

本事業では、博士研究員を雇用し、先端施設の整備及び共同研究を支援している。採択課題の中には成果占有利用を希望する場合があります、博士研究員の貢献を公開できない等の課題も多いが、この事業に参画した博士研究員 4 名のうち、3 名がそれぞれ北海道大学助教、久留米高等専門学校准教授および韓国基礎物理研究所研究員に採用されている。

5. 今後の位置づけと計画

「先端研究施設共用促進事業」は、平成 25 年度より「先端研究施設共用・プラットフォーム形成事業」と名称を変えて、新たにスタートしている。本補助事業の目的と役割は、従前と大きく変わることはないが、技術プラットフォームの形成促進を新たに目的に添えている。

共用取組の位置づけとしては、この事業目的が研究所の設置目的である「エネルギーの生成、変換、利用の高度化に関する研究を行うとともに、全国の研究機関の研究者の共同利用に供する。」と合致しており、中期計画・中期目標である「産官学連携活動等を通じて研究成果を社会に還元する」ことを目指していく。先端施設共用促進事業は、産業界の利用に限定し、全国共同利用・共同研究拠点事業は、大学や国研に限定することで、それぞれの役割を分担し、本研究所の目標である「先進エネルギー理工学研究拠点」としての展開を図っていく。

そのため、より研究所の特色を出すため、平成 24 年度までは、イオン加速器（DuET）とマルチスケール材料評価基盤装置群（MUSTER）を共用装置としていたが、平成 25 年度からは、核磁気共鳴装置（NMR）と自由電子レーザー（FEL）を新たに共用装置に加えて、エネルギー産業界の多様な要求に応えられる設備の整備を進めていく。また、「情報収集共用センター」（Center of Information Gathering and Sharing: CIGS）の設立に向け、共用ネットワークのソフト面におけるハブ的機能を構築することで、異分野技術情報収集、異分野融合技術の発信などを行い、全国規模の共用ネットワークの拡大に努めると共に、技術開発イノベーションの効率化・加速化・高度化・多様化を促進していく予定である。

以上、本事業を通して、エネルギー・環境分野における拠点機能を整備し、産業界への関わりを強固に維持することで、研究所の目標とするエネルギー理工学研究の拠点化に活用していく。

6. 課題

本事業は、先端施設の効果的な利用による産業技術のイノベーションを加速するものであるが、施設や装置の先端性の維持は容易ではなく、設備投資や更新が不可欠である。平成 24 年度の補正予算の配分により、今回は現状の施設の高度化を実現することができたが、今後、さらに投資を継続していく必要があり、そのために必要な財源の確保および先端性を具現化するための人材の育成が課題となる。

プラットフォーム形成事業は、先端性維持のための財源を獲得するためのシステムでもあり、今後、どのような形態でプラットフォームに参画するかについて、検討していく必要がある。



図 5：NHK 番組「ルソンの壺」で放映

4.4. 次世代太陽電池研究拠点（有機太陽電池研究）

平成 15 年度～

1. 事業の目的・目標

次世代太陽電池の有力候補として、高効率で軽量安価な有機太陽電池を研究開発し、シリコンには無い特性を活かした次世代太陽電池実用化のための研究開発を行う。

京都大学中期目標・中期計画において、エネルギー理工学研究所は「エネルギーの生成、変換、利用の高度化を設置目的とし、人類文明の持続的発展に貢献する。この目的のため、エネルギー需要の増大とエネルギー資源の枯渇、および、地球環境問題の深刻化に伴って生じるエネルギー問題の解決を目指した先導的研究を行う。特に、社会的受容性の高い新規エネルギー源、およびエネルギー有効利用システムの実現を目指す」とうたっている。このような中期目標を実現していくためには、持続可能な次世代エネルギーシステムのひとつである太陽光発電は最も期待される再生可能エネルギーの候補である。しかしながら、未だ高価でエネルギーペイバックタイム（EPT）も2年以上と長いなど問題点も多く、安価で大面積化が可能な次世代太陽電池開発への期待が高まっている。

このような要請を受け、「次世代太陽電池研究拠点」においては EPT が半年以下と短く軽量・安価・フレキシビリティに富んだ有機太陽電池開発にフォーカスした研究を進め、この分野の OPV-Center Of Excellence (OPV-COE) の構築を目指す。そのため、有機太陽電池分野の国家プロジェクトを積極的に推進するとともに、有機太陽電池研究コンソーシアムを設立し、CELIV など他では得られない先端装置を整備する。また、京都大学はじめ各大学の研究人材を結集し、産業界にシーズ技術の移転を図ることにより、産学連携の推進による多様な新産業の創成を図り、もって我が国エネルギー産業の活性化に貢献することを目標とする。

2. 体制および運営状況

本研究拠点は先端イノベーション拠点施設に研究室を置き、次世代太陽電池に関する国のプロジェクトを実施する中で研究活動を進めている。今年度より、エネルギー理工学研究所 附属エネルギー複合機構研究センターの中に次世代太陽電池研究拠点推進室を設けることにより、大学としてオーソライズを行うとともに、国からの推進・支援を受けることのできる体制を作っている。プロジェクトにより獲得してきた諸施設をベースに、他機関にはない有力な装置類を備えることによって、OPV-COE としての自主確立を図っている。

特に有機太陽電池については、シリコンに代わる次世代太陽電池の切り札として近年注目を集めていることから、我が国でも実用化への期待が高まるなか、産業界との連携を目指して今年1月に「有機太陽電池研究コンソーシアム」を立ち上げ、ローム、富士フィルム、東洋紡、東レリサーチ、アイシンコスモス、ダイセル、日本精工など企業10社とともに産業化のための検討を進めている。特に今年には用途分野を明確にしたうえで製造プロセス、信頼性など実用化に不可欠な課題に重点を置き検討することから、関連した企業委員を中心に調査を進めるとともに、近未来の展開が期待される農業・建材など新たな用途を見据えた研究を進めるべく、関連分野の委員を加えた議論をすすめているところである。既に2回の例会を開催し、特に初回は NEDO/JST の代表を含む100名以上の参加者のもと、大学基礎研究の実用に向けた取り組みなどイノベーション戦略論で大いに議論が盛り上がったところで、関心の高さを物語っている。

3. 活動状況

現在、有機太陽電池に関しては3つの研究課題を進めている。以下にその概要を示す。また、「OPV 研究コンソーシアム」を立ち上げ、産業界10社、大学研究機関20名の計30名のメンバーで研究会をスタートした。2回の例会の参加者は其々110名、および40名であった。その他4月15日には、かずさ DNA 研究所とともに「農業と太陽光発電」というテーマで東京オフィスでのシンポジウムを開催し、東京地区での産学官公連携を図った。本シンポジウムにおいても参加者は100名を超している。

1) 科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業（CREST）の研究領域「二酸化炭素排出抑制に資する革新的技術の創出」 研究課題名「有機薄膜太陽電池の高効率化に関する研究（H21-H25）」研究代表:吉川暹、参画機関：京都大学、大阪市立工業研究所、東京工業大学、横浜薬科大学

世界のトップに並ぶ10%セルの開発と、光電変換の学理の旧名を目標に研究を進めている。

今年度の研究は前年度に引き続いて、高分子ハイブリッドセルに関しては新たに吸収波長領域を広げた共役系高分子の開発を進めるとともに、傾斜構造素子化することにより10%以上の高効率化を実現することとしている。また、CELIVにより光電変換能など素子の諸特性を評価し、素子性能を支配する因子についての解析を進め、バルクヘテロ構造の最適化するとともに、超階層ナノ構造セルを形成し、高分子ハイブリッドセルの最適化に関する材料の選択とデバイスの調製条件の最適化を図って

いる。また、迅速な新材料開発を実現するためにコンビケム手法による HTS 手法を開発し、各種ドナー・アクセプター分子の合成手法、分子集合体の設計手法・構造形成の最適化手法を進め、高度な変換効率向上手法の実現を目指している。

2) NEDO 研究開発事業「太陽光発電システム次世代高性能技術」・研究課題名「有機薄膜太陽電池モジュール創製に関する研究開発 (H22-H26)」研究代表者・吉川暹、参画機関：京都大学、東芝、住友化学、出光興産、産業技術総合研究所

NEDO 次世代高性能化技術の一環として、10%の OPV モジュールの開発が目標である。このため、pn 半導体分子の分子設計指針を提案し「新材料・新構造技術」の創製を目標に、物性・素子特性などを測定して光電変換「機構解明」の進展を図り、評価環境を整備してセルの「最適化技術」を実現し、企業グループと協力して 10%モジュールの実現をめざす。具体的には、以下の 5 研究項目をそれぞれ企業との連携による新材料・新構造素子の特許化を進めている。p 型材料の開発では poly(3-hexylthiophene) (P3HT) よりも優れたドナー・アクセプター (D・A) 共重合 p 型材料として高 J_{sc} モデルと高 V_{oc} モデルに基づき新規材料を開発する。n 型材料の開発では [6,6]-phenyl C₆₁-butyric acid methyl ester (PC₆₁BM) の性能を越える新規フルラーレン誘導体を開発する。素子構造の開発では OPV の特徴を生かした新たな素子構造を開発する。機構解明の研究では材料、界面モルフォロジー、膜構造、光電変換特性の相関性を明らかにし新材料設計にフィードバックさせる。素子特性の最適化では、素子特性を支配する多様な因子の最適化手法を開発しつつ、優れた評価環境を整備することにより、素子特性最適化をめざしている。

4. 主な成果

有機太陽電池はシリコンに代わる次世代太陽電池の切り札として近年注目を集めている。特に昨年、我々を含む世界 5 グループから有機薄膜太陽電池で 10%を超える効率が報告され、いよいよ産業化の時期を迎えようとしている。京都大学 NEDO コンソグループでも 9.5%を実現しており、シングルセルとしてはトップクラスの性能を出すことが可能となっている。このような成果を背景に、今年 1 月に有機太陽電池研究コンソーシアムを立ち上げ、企業 10 社とともに実用化研究を開始している。今年、製造プロセス、信頼性、など実用化に重心を置き、農業・建材など新たな用途を見据えた議論を進めている。

学術的な基礎研究として、種々の 1D 半導体材料を用いた超階層ナノ構造素子を構築し高効率なセル構造を実現しようという提案しているが、前年度は特に、ZnO ナノロッド材料と、ZnO のパーティクルを複合化することにより、其々の単体よりも効率的な電荷輸送を実現できることを示した (下図 1)。また、薄膜の形成技術が性能に大きく影響を与えることが知られているが、今回は付加的溶媒を用いるダブルスプレー法により任意の構造を持つセルが形成できることを示した。(下図 2)。その他、半導体材料のエレクトロスピンニングによる高効率な電荷輸送系の実現を図っている。研究コンソーシアム、論文、著書、展示会などの成果を以下に示した。

ITO/Sq 色素修飾 ZnO-NP and/or NRs/P3HT/VO_x/Ag
ハイブリッドセルの I-V 特性

| Substrate | J_{sc} (mA/cm ²) | V_{oc} (V) | FF | PCE (%) |
|-------------|-----------------------------------|-----------------|-------|------------|
| Dense layer | 0.54 | 0.383 | 0.536 | 0.111 |
| NPs | 1.10 | 0.437 | 0.426 | 0.205 |
| NRs | 1.42 | 0.356 | 0.512 | 0.259 |
| NP+NRs | 2.07 | 0.437 | 0.537 | 0.486 |
| NPs/dye | 1.47 | 0.419 | 0.559 | 0.345 |
| NRs/dye | 5.52 | 0.323 | 0.574 | 1.02 |
| NP+NRs/dye | 6.04 | 0.424 | 0.536 | 1.37 |

図 1. NR, NP のハイブリッドセルのセル特性

■バルクヘテロ構造の最適化:
付加的溶媒スプレー塗布法

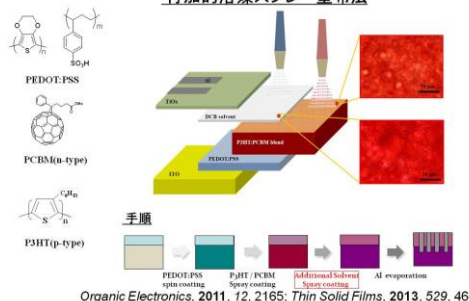


図 2. 各種薄膜構造を持つ活性層調製

【有機太陽電池研究コンソーシアムの設立と第9回シンポジウムの開催】

平成25年1月17日、京都大学品川オフィスにおいて標記研究コンソーシアムを立ち上げた。

昨年の第8回CREST有機太陽電池シンポジウムに引き続き、今年も7月12-13日に2日間をかけて第9回を実施する。例年250名を超える参加者の下、この分野のリーダーによる約30件の講演と活発な議論を行う予定である。

【論文・著書】

- 1) Fast screening of an optimal ratio of polymer: fullerene mixture for organic solar cells by novel coating method, Jae-hyeong Lee, Takashi Sagawa, Susumu Yoshikawa, *Energy Technology*, 2013, 1, 85-93(DOI: 10.1002/ente.201200011).
- 2) Thickness dependence of photovoltaic performance of additionally spray coated solar cells, Jae-hyeong Lee, Takashi Sagawa, Susumu Yoshikawa, *Thin Solid Films*, (DOI:10.1016/j.tsf.2012.07.080) 印刷中.
- 3) Polymer based organic photovoltaics with one-dimensional nanomaterials, Part IV Organic Thin Film Solar Cells and Printable Technologies, Chapter 1, Takashi Sagawa, Susumu Yoshikawa, *Trends in Advanced Sensitized and Organic Solar Cells*, edited by Tsutomu Miyasaka, CMC-Press, pp. 213-219 (2012).

5. 今後の課題と計画

既に、OPVに関しては我が国の拠点の一つとして活動しており、これからは国際拠点として世界的な活動を重視していく。そのためこの分野の国際的なCOEである、*EPFL, I-mec, FH-ISE, NREL*との連携を強め、共同研究体制を構築する。また、産業界との連携は一部にスタートしているが充分ではなく、用途に応じた複数の連携を図ることがこれからの課題である。

そのため、有機太陽電池研究コンソーシアムの拡充を図り、コンソ内に用途別の分科会形成を模索し、例えば農業、建築などの分野への展開を図っていく。これまでシリコン系太陽電池は一般家庭の屋根やメガソーラなど定置固定型の発電を前提として開発が進められてきたが、農業との共生や建材としての太陽光発電では、軽量・大面積・フレキシビリティなどこれまでとは違った特性を持つ太陽電池が求められている。既に、NEDOグループを中心に多くの独自技術を確立していることより、今後、大学発OPVベンチャーを検討し、次世代太陽電池研究拠点としての整備を加速する。

4.5. JSPS アジア研究教育拠点 (Asian CORE) 「先進エネルギー科学」 平成 20～24 年度

1. 事業の目的・目標

本事業は JSPS のアジア研究教育拠点(Asian CORE) 事業に応募して採用されたものである。本事業の目的を JSPS の募集要項から引用する。「独立行政法人日本学術振興会 (Japan Society for the Promotion of Science: JSPS) は、我が国において先端的かつ国際的に重要と認められる研究課題について、我が国とアジア諸国の研究教育拠点機関 (以下、「拠点機関」といいます。) をつなぐ持続的な協力関係を確立することにより、当該分野において世界的水準の研究教育拠点の構築とともに、次世代の中核を担う若手研究者の養成を目的としてアジア研究教育拠点事業を実施します。本事業においては、我が国とアジア諸国の拠点機関が、対等な協力関係に基づく双方向交流として、「共同研究」、「学会会合 (セミナー)」、「研究者交流」を効果的に組み合わせて実施するものとし、また、本事業による支援期間終了後も、拠点機関においては、我が国とアジア諸国における中核的な研究教育拠点として継続的な活動を実施することが期待されています。」

このように本研究所にとって本事業は、本来行っているエネルギー研究にとどまらず、同分野の日本の拠点として、さらにアジア地域の広域的拠点形成を目指した活動の一環として実施されている。エネルギーは特に日本、韓国、中国が共通に持つ脆弱性であり、かつ世界的な問題である。応募、採択を受けて人類の持続的発展に向け、地球環境問題とエネルギーの安定的供給の課題に応える先進エネルギー科学の協調的研究交流基盤を 3 国間に形成することを目標にして、平成 20～24 年度の 5 年間実施した。具体的には、先進的原子力エネルギー、バイオエネルギー、プラズマ・核融合、量子放射エネルギー応用、エネルギー材料などの環境調和型エネルギーの科学と基盤技術について、参加国の施設間の共同利用、共同研究、情報交換、人的交換によって、効率的な研究の推進、東アジア地域の特徴に適した未来型エネルギー技術体系の構想、そのための共通学術基盤の確立をめざした。先進的原子力や核融合、循環型社会を目指したバイオエネルギー、先進エネルギー材料など、日中韓 3 国に共通の課題であり、かつそれぞれが独自に世界的に高度な技術を開発している課題について、効果的に協力を推進する体制を構築することを目指した。日中韓三国間でネットワークを利用した緊密で効果的な共同研究の推進を行い、高度技術による環境調和型エネルギーシステムという新しい概念での研究展開を図り、5 年間でアジア地域を中心とし、世界をリードしうる先進エネルギー科学の学術コミュニティの形成を目指す活動を 24 年度末に完了した。

本事業は大学・研究所の中期計画・中期目標においても大きな効果と貢献が期待され、明記されている。すなわち、大学院学生の国内外の研究機関との交流やプロジェクト参加の機会、国内外における発表機会を飛躍的に増加させるとともに外国人研究者・学生の受け入れを充実させることを目的とした活動として、本研究所をわが国と世界の拠点として位置付ける上で重要な役割を果たした。

2. 体制および運営状況

日本側拠点機関：京都大学エネルギー理工学研究所、他約 70 大学、機関が参加

韓国側拠点機関：ソウル国立大学、他約 60 大学、機関が参加

中国側拠点機関：清華大学、約 10 大学、機関が参加

これら 3 拠点大学が 3 極それぞれの中核となっており、極東アジアにまたがる広域的な学術協力、交流を運営した。つまり、各極からそれぞれ他極への訪問と受け入れを、これら 3 校が窓口となって取りまとめ、予算と旅費を配算し、また共同研究、ワークショップ、セミナーなどの事業を計画、遂行した。合計して平均約 80 件程度の交流を毎年実施した。

事業には概ね毎年 1,080 万円の予算が配分され、これはほぼすべて交流のための旅費であり、実際大部分が旅費および交流事業の運営に支出されている。対等な交流であり、援助的な性格を持たないため、「マッチングファンド」と言われる、ほぼ同等かそれ以上の資金の提供が相手側機関にも要求された。実際はこの事業に相当するプロジェクトが相手国側に存在せず、また JSPS と同等の機能を持つ機関が相当する国際交流を実施していたわけではないため、これらのマッチングファンドは、中国、韓国それぞれが、全く別の事業による交流経費から支出した。しかし、韓国、中国においても研究者や学生の国際交流のための事業や予算は様々な形で確保されており、かつ韓国におけるソウル国立大学、中国における清華大学は、本研究所と同じようにそれぞれの国内における拠点としての機能を持っている。よってこれら 3 大学がエネルギー科学研究のアジアでの発展を期して協力し、学生や研究者を交換したことには変わりがない。旅費の支出は、パターン 2 と呼ばれる規則で、渡航費はそれぞれ

の国からの出張者はそれぞれの国から支出される一方、相手国側における滞在費は、相手国側が負担した。

3. 活動状況

サブテーマとして、先進原子力・核融合、プラズマ物理、バイオエネルギー、原子力材料、加速器・高品位エネルギーの5テーマを設定し、日中韓それぞれの国内においてサブテーマリーダーをキーパーソンとして交流を実施した。年度開始前にサブテーマごとに交流計画を立て、また複数テーマにまたがるセミナーを年に1回ずつ実施した。

各サブテーマにおいて、この5年間においても重点テーマはそれぞれの分野のトピックにおいて状況により新しいものが選ばれた。先進原子力では計算や原子炉物理、核融合ブランケット、プラズマ対向機器などの分野が新たな研究分野として、中韓での盛り上がりを反映して本事業でも活発な活動が計画実施された。材料では、先進複合材料、鉄鋼系材料について、電子顕微鏡やナノ材料のテーマを重点化した。バイオエネルギーでは、バイオマス化合物の変換のための構造化学が焦点となっており、特にNMRが新たな共通分野であり、短期滞在による共同研究やワークショップなどを行った。高品位エネルギーは、電子線加速、自由電子レーザーを重点的に絞って実施する。昨年度、中韓からの来日に困難が生じた事態に対して、今年度はセミナーをわが国の東北地方で企画し、若手研究者・学生の企画運営による研究集会やサマースクールなどを計画、実施した。

交流内容は、予算的な制約と事業趣旨に対する戦略として、極めて短期間の派遣と情報交換に特化した。JSPSの同事業で採択された他の活動については、より長期間、少数の派遣を指向したものも多いが、本事業は、特に距離的に近い3か国であること、課題が、エネルギーというかなり広範囲な科学技術分野であることもあり、本事業では短期間の情報交換で集中すべき課題や共同研究、留学などを計画し、他の資金や制度も利用して長期間の派遣はそれらによるという戦略を取った。もともとのJSPS事業が研究そのものではなく、国際交流経費を趣旨としたものであるため、本事業における活動は、交流事業の計画と実施、旅費と滞在費の支給に限定されている。しかし、それによって3極間で、国内のみで実施した場合に比べて極めて効果的に共同研究や学生・若手の教育育成が実施されている。

4. 主な成果

3極とも、先進的なエネルギー工学を志向し、化石燃料からの脱却と低炭素化を目標としている。共通に原子力を積極的に導入する政策を取り、特に安全性の高い先進的原子力やITER計画など核融合開発、バイオエネルギー、高機能エネルギー材料、加速器工学でも、世界をリードするレベルにある。これらは先端的科学技術の複合領域であり、学術的にも基礎分野のフロンティアであり、環境科学やナノテクノロジーとの関連も深い。先端高度技術を通じて社会や産業との関わりが深く、3極共通に科学技術政策において重要課題に挙げられている。最近重要性が特に強く認識される地球環境問題と、原子力の安全性確保に係る学術分野としても期待が大きな分野であり、人類の持続可能性に抜本的解決を与える重要な先端学術であり、本事業による交流は、それぞれの国の拠点を結合して広域化することで学術上の成果を上げた。

以下、サブテーマにおける特徴的な状況と成果を例示する。

先進原子力、核融合については、韓国、中国の方が今や我が国よりも活発な動きを見せている。韓国では世界で唯一の核融合エネルギー法に則った国家戦略として原型炉開発計画が今年度着手され、一方中国は小型核融合エネルギー試験炉CFETRの設計研究が開始された。これらの研究活動は、国家機関が主に実施しているITERに比べると、両国において研究体制が手薄なことから、若手人材の育成と並行して実施されていて大学の役割が大きく、わが国教育機関との協力が意欲がある。したがって、本事業の枠組みを利用して、中韓の若手、学生とわが国の間で核融合原型炉分野で研究協力体制が、本事業を通じて構成された。

プラズマ物理では、アジアでは超電導トカマクの運転・建設が順調に進んでおり、KSTAR（韓国）、EAST（中国）が現在運転中であり、JT-60SA（日本）が建設を始めたところである。核融合炉心プラズマ物理、特に、ゾーナル流と閉じ込めとの関連に焦点を置いた乱流・揺動に関する実験・理論シミュレーション共同研究、ECHプラズマ生成物理解析、ECHを用いた予備電離に関する共同研究を推進した。

バイオエネルギー研究分野においては、これまでにソウル大学及び武漢大学（中国）のグループと核酸化学を基盤とした、また、東国大学研究グループ（韓国）とはタンパク質工学を基盤とした協力体制を構築した。光州科学技術院（韓国）とペプチド化学、タンパク質工学、バイオマスを基盤としたバイオエネルギー研究協力体制を確立した。

先進原子力材料は、研究はわが国が先行していても原子力研究自体は、韓国、中国でより活発である。特に低放射化材料の照射化効果と水素吸蔵材料の分野を重点とした協力は新たな成果である。

加速器ビーム分野では、中国側では上海応用物理学研究所（SINAP）との交流が活発化した。これは、SINAPが主催してアジアンコアの研究会を開いて以来、中国側でも本拠点活動についての評価が

高まったためである。このように本研究所が主催する国際会議の開催を機会に、研究者交流の一層の加速が行われた。

このように、研究者レベルでの交流は本事業によって活発化され、共同研究が様々な形で展開されて成果が上がったが、共同研究は必ずしも本研究所のみが実施したわけではない。中には、わが国と中国韓国の拠点校以外の間での交流媒介した例も多く、またそのような交流のハブ機能を果たしたことが、本研究所が先進エネルギー理工学分野において特徴的な拠点としての地位を確立していることを示す成果である。

交流成果は、世界先端レベルでの研究者間の協力にとどまらない。若手研究者の育成や、大学院生の交流や教育機会という意味でも、本事業は大きな成果を上げた。特に毎年サブテーマ単独で行ったワークショップ、サブテーマ合同で行ったセミナーやスクールなどは、運営そのものに若手や学生が積極的に関与し、発表や議論の機会が与えられた。他事業によるより長期の派遣や留学、交換の機会がこれらの機会にアレンジされ、関連するテーマでの留学生在が多数来日するなど、構造的に学生の減少という問題に直面するわが国において、本研究所が多く外国人留学生を受け入れている一因となっている。

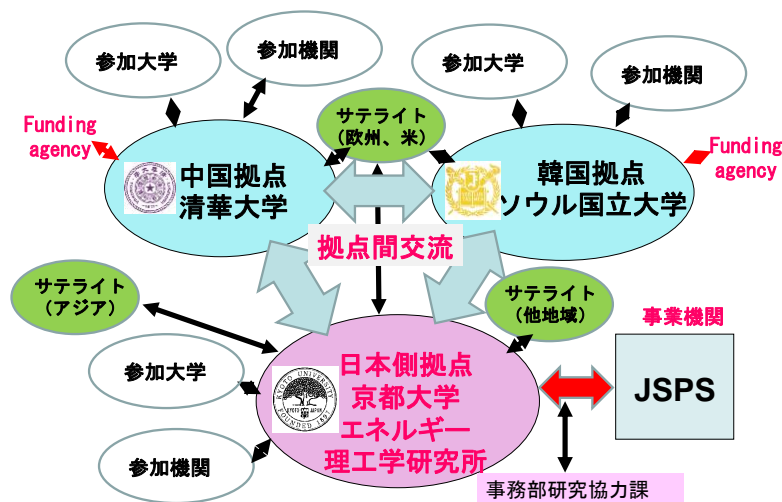
社会的にも、エネルギー科学分野における国際交流は意義と効果があり、本研究所の国際貢献、社会貢献としての効果があった。アジア地域内における交流は、国際協力が対欧米を中心に行われてきた例が多いのに対し、エネルギー分野での直接の、対等なパートナーシップに基づく交流関係を構築してきた。同分野での産業技術、人材育成、学生教育への要請は圧倒的にこの3極において多く、アジアの学術拠点としてこれら3国の緊密な連携を通じて、世界をリードしうる先端的な学術コミュニティが形成されつつある。

一方、東アジアに特徴的な社会的な状況においても、本事業による交流を通じて、本研究所は社会的な貢献を行ったと言える。特に東日本大震災後、外国から我が国への科学技術分野での訪問の減少や対日研究者の帰国が発生したが、その中でも本事業はわが国への来日研究者、学生を確保し続けた。領土問題などの政治問題に対しても影響を受けずに強固な友好関係を維持しているなど、科学技術、研究教育にとどまらない効果もある。

5. 今後の課題と計画

本事業は24年度を以て終了しており、この協力交流関係は、資金源を他に求め、若干規模を縮小しながらも、永続的な継続が図られている。少なくとも確立されたアジアでの協力体制、拠点としての本研究所の地位の維持を図ることが課題である。

また、本研究所の行っている他地域との国際協力関係と連携し、さらに対象地域を広げた面的な国際拠点化をはかることも今後の課題である。すでいくつか利用可能な事業制度への応募が検討されており、またその実現が課題となっている。



図：アジアコア交流事業の実施体制

4.6. センター共同研究

平成8年度～

1. 事業の目的・目標

センター共同研究はエネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センターが主催する重要な活動である。「第1期中期目標・計画」におけるエネルギー複合機構研究センターの位置づけは、研究所における共同研究制度支援の中核的研究組織としての機能強化であり、そのための措置として平成18年、新たなセンターとして研究体制の改組・再編を行った。

エネルギー理工学研究所の目標・理念を達成するために、「第1期中期目標・計画」の目指すべき研究の方向性として、研究所発足以来展開してきた社会的受容性の高い高品位エネルギーの生成、変換および利用の高度化を基盤とする連携研究体制を充実させ、部門横断的な複合領域研究をさらに推進することにより、新領域研究へと展開することを掲げている。

これに続く「第2期中期目標・計画」では第1期で掲げた目標を継承しつつ、エネルギー理工学に新たな展望を拓く世界的な先進エネルギー理工学研究拠点としての展開を図り、優秀な研究者と高度な専門能力を持つ人材を育成することを長期目標として掲げている。センター共同研究は、第2期の目標のうち(1)重点領域研究として先進プラズマエネルギーおよび量子エネルギー研究、光エネルギーおよびエネルギーナノサイエンス研究を推進する、(2)国内外の研究機関・研究者との連携を深め、地球規模のエネルギー問題に対応できるエネルギー理工学研究ネットワークのハブ機能を強化する、という目的に対し重要な活動と位置づけられる。平成23年度からゼロエミッションエネルギー研究拠点の全国共同利用・共同研究拠点の活動が開始されたため、それ以後は所外との共同研究の場を上記の拠点活動に移し、主にエネルギー理工学研究所が包括する様々な研究分野横断的複合領域研究の場を提供することを目的としている。

2. 体制および運営状況

平成8年の研究所発足にあたり、研究所の設置目的を具現化するために、3つの重点研究課題を設け、センターにおける共同研究はこの重点課題を推進するものと定めた。平成12年、研究所教員ならびに研究体制の充実に伴い、センター共同研究の重点課題の見直しを行い、新しく研究所が推進すべき重点的な研究領域、すなわち「研究所重点推進領域」を設定した。さらに、第1期中期計画策定に際し、当該期間の研究の柱となるべく重点複合領域研究（プラズマエネルギー重点複合領域研究、バイオエネルギー重点複合領域研究、光エネルギー重点複合領域研究）を設定した。一方、平成18年からはセンター改組に伴い3研究推進部制に移行し、中期計画に挙げられた3重点複合領域研究を更に加速させるため、センターのどの推進部に属する研究かを踏まえた公募研究に切り替え、それぞれのプロジェクト研究に対応する研究組織を明確化し、これまで進めてきた共同利用・共同研究活動の構築のさらなる発展に努め、より重要となったアカウンタビリティの所在も明らかにしている。この3推進部体制で「第2期中期目標・計画」の重点領域研究である先進プラズマ・量子エネルギー研究、光・エネルギーナノサイエンス研究を精力的に推進している。センターの組織構成の現状は、センター長のもとに、重点化した研究活動に整合する研究組織として、国際流動・開発共同研究推進部、先進プラズマ・量子エネルギー研究推進部、光・エネルギーナノサイエンス研究推進部が設置されている。センター共同研究はこれら推進部のもとに実行されている。また、具体的な運営・企画についてはセンター研究計画委員会・予算委員会で議論され年度計画を立案している。

3. 活動状況

平成23年度からゼロエミッションエネルギー研究拠点の全国共同利用・共同研究拠点の活動が始まったが、それまで研究所内外の研究者による共同研究の中心をセンター共同研究が担ってきた。所外との共同研究は平成23年度から原則的にゼロエミッションエネルギー研究拠点に移った。そのため研究課題数は平成23年度から半減している。研究申請は3推進部に関して行い、センター研究計画委員会が審査し、予算配分を行う。共同研究にはセンターで課題を決め募集する比較的規模の大きい「基盤」研究と萌芽的な研究を含む「奨励・企画」の2分類で課題募集を行っている。採択課題数は32件（平成23年度、所内30件）、30件（平成24年度、所内29件）であった。参加者については、250名（平成23年度）、206名（平成24年度）であった。センター共同研究の結果については、毎年センター共同研究成果報告会を開催し、周知している。センターでは共同研究と並行して年4回程度の談話会を開催している。これは研究所の幅広い研究活動を紹介し合い、横断的な研究を促すことを目的としている。これらの活動結果は年度ごとにセンター共同研究成果報告書にまとめられている。

4. 主な成果

エネルギー理工学研究所は第2期中期目標期間において、環境調和・社会基盤型エネルギーシステムの実現に向けたエネルギー理工学研究の推進がその責務として求められる。この目的を効果的に達成するためには、研究所の全国的・国際的な共同利用・共同研究拠点の形成およびネットワークの構築を図り、またエネルギー理工学の総合的・先端的研究現場における人材育成に努めなければならない。この目標に向けて進めてきたセンター共同研究が発展し、平成23年度から始まったゼロエミッションエネルギー研究拠点による全国共同利用・共同研究活動の開始が大きな成果といえる。また、研究所の分野横断的な学際研究については3研究推進部を中心に順調に研究が発展している。

[先進プラズマ・量子エネルギー研究推進部]

先進プラズマ・量子エネルギー研究では、プラズマエネルギー応用のひとつである核融合炉開発のための基礎的研究が重要な柱となっている。ヘリオトロンJ装置によるプラズマ閉じこめの高性能化、DuET/MUSTER 施設による耐極限環境先進構造材料の開発、可搬放電型中性子源の高性能化と応用、さらには基盤研究として、エネルギーシステム設計および評価方法論研究を中心とした研究を展開してきた。耐極限環境先進構造材料開発関連研究は、核融合開発のみではなく、次世代原子力システム等からの期待も大きく、この方面からの大型外部資金獲得が行われるとともに、産学連携も含め、学外組織との連携的共同研究活動が活発になってきた。

また、核融合開発に密接に関連する部分については、核融合科学研究所を中心とする全国的な双方向型共同研究の課題「先進的磁場分布制御によるプラズマ輸送・安定性改善の研究」への主体的な参画によっても、これを推進し、核融合科学研究所における平成20年度の双方向型共同研究外部評価においても、『外部の研究者との交流が活性化し、研究課題数や論文数等研究成果の量的拡大が進んでおり、研究成果の水準は向上している』との評価を得た。「第2期中期目標・計画」では能動的なプラズマ分布制御を含む新たな制御技術の視点に立脚し、磁場配位によるプラズマ構造形成・不安定制御の研究および閉じ込め磁場最適化の研究を発展させることを研究の主目的とし、さらに、これまでに開発してきた基幹装置や人材の資源を活用することにより、プラズマ・材料システム統合研究を展開してきた。

[光・エネルギーナノサイエンス研究推進部]

光エネルギー研究は、高品質・高機能な光エネルギーの生成・制御・利用に関する研究開発により、今後予想される生産システムの構造変化や多様なニーズに柔軟に対応できる新しい科学技術基盤の創出とその実用化を目指した。特に、光エネルギー機能の飛躍的高度化をもたらす先端的レーザーの開発と、それを利用した分野横断的な学際的研究を重点的に推進し、新しい科学技術基盤の創出に向けた「高機能光エネルギー生成・利用研究」の拠点形成を行った。

具体的には、光エネルギー機能の高度化とその利用による新領域の開拓のための基幹装置として、これまで開発を続けてきた2種類の装置、すなわち、広帯域波長可変・偏光可変機能を備えた小型高輝度な自由電子レーザー（FEL）、および位相制御機能を備えた超短パルス高強度レーザーを完成・高性能化すると共に、利用に不可欠な光エネルギービームの制御技術を確立した。これらレーザー装置を研究所のユニークな基幹装置かつ学際的共同研究のための先端的ツールとして機能させた。すなわち、高性能・高機能なレーザーを利用し、次世代高効率太陽電池の研究、および光エネルギーの特長を生かしたその他の先進的研究を推進し、共同利用施設としての機能を果たすに至っている。

エネルギーナノサイエンス研究は、バイオおよびナノテクノロジーを融合させたバイオ・ナノテクノロジーを基盤とし、光エネルギー研究との融合により、光電変換技術をもとにした太陽電池開発や太陽光発電による水素製造ならびにバイオマスを含む自然エネルギー利用のための生物機能変換等、環境調和適応型エネルギーシステムおよび物質変換システムの開発のための「太陽エネルギーシステム研究」の拠点形成を推進した。具体的には、太陽エネルギーシステム研究の遂行に必要な光エネルギー、ナノテクノロジーおよびバイオエネルギーの融合研究を高効率に実施するために「光・ナノ・バイオ融合研究統合基盤」を構築し、世界をリードできる研究基盤の整備を行った。さらに、研究拠点活動成果を基盤に、太陽電池をはじめ、水素、バイオマスおよび二酸化炭素等の高度利用の連携複合研究を展開した。同時に、企業との共同研究を通じて、上記の研究成果を物質生産技術に応用することにより、環境に優しい物質生産システム（グリーンケミストリー）の構築と、持続可能社会の実現のための産業育成に寄与できる研究開発を推進した。とくに独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）委託事業である「太陽光発電システム未来技術研究開発」を推進した。

[国際流動・開発共同研究推進部]

本推進部の目標である「国際的なエネルギー理工学研究のネットワーク拠点化を推進する。関連機関との連携・融合による学際的な先進エネルギー理工学研究を促進し、先進エネルギーの実用化を目指す中核研究および先進エネルギー産学利用推進研究を実施する。」に沿った活動を行っている。

平成19年より5年計画で開始された文部科学省による「先端研究施設共用イノベーション創出事業」の一つとして採択された「エネルギー機器材料の創製と保全研究のための産業利用支援」では、附属エネルギー複合機構研究センター国際流動・開発共同研究推進部にADMIREエネルギー産業利用推進室(Office for energy-industrial use for ADMIRE)を設け、センター保有の複合ビーム材料照射装置(DuET)とマルチスケール材料評価基盤設備(MUSTER)の利用を対象とし、同時にこれらの装置に関連する応用技術や解析ソフト技術等を広く社会に提供することでエネルギー材料に留まらず、幅広い材料開発研究やエネルギーシステムを軸とする保全研究等の産業利用を支援し、イノベーション創出を通じた社会貢献を目指す活動を行った。

[社会貢献での成果]

慣性静電閉じ込め核融合中性子源を用いた地雷探知技術の開発では、地雷中の爆薬成分(窒素、水素)を中性子捕獲 γ 線により直接検知する方式で、従来技術では困難であったプラスチック製地雷の検知も可能であり、これまでに中性子の熱化と地雷源方向(下方)への集束と、長時間安定動作を可能とする冷却との二つの機能を兼ねた水冷構造付きの小型実用機プロトタイプを開発、模擬地雷を用いた試験により実用レベルの性能を示すことに成功した(JST事業)。

5. 今後の課題と計画

エネルギー理工学研究所の目指す研究目標を貫徹するためには、既存の、また将来のエネルギーシステムとエネルギー源をしっかりとデッサンして、それをもとに基礎研究と応用研究を強化する必要がある。具体的には、センター研究の中核となる先進プラズマ・量子エネルギー研究および光・エネルギーナノサイエンス研究の2研究領域において、大型特殊装置および先端実験施設の共同利用・共同研究を集中的に行う場を提供するため、共同利用装置の改善・整備を今後も継続する必要がある。また、本研究所の特色である学際的なエネルギー研究を推進するとともに、萌芽的研究へのバックアップもセンター共同研究に求められている。そのため、以下の課題を掲げる。

先進プラズマ・量子エネルギー研究：

未来エネルギーシステム創出につながる挑戦的なプラズマエネルギー研究をとりあげ、これまでの成果を基盤に、プラズマエネルギー科学と先進エネルギー材料学の融合を目指した研究を展開する。とくに、関連研究グループが培ってきたヘリオトロンJ、DuET、MUSTER、IECなどを中心とするハードおよびソフト面での特色を活かして、当該分野研究の一層の個性化ならびに高度化を通じてプラズマエネルギー技術の社会貢献を目指す。

光・エネルギーナノサイエンス研究：

CO2ゼロエミッションを実現する次世代の再生可能エネルギーシステムの構築には、新しいコンセプトに基づく革新的な機能性材料が不可欠である。太陽エネルギー、バイオエネルギーを中心とする自然エネルギーの高効率利用原理の解明と、先進的ナノバイオ機能材料の創出を行い、光・ナノ・バイオテクノロジーを融合した新学術領域である「光・エネルギーナノサイエンス」の確立を目指す。研究所重点領域研究、京都大学21COEおよびGCOE拠点形成で推進してきた特色ある研究ならびに、触媒材料創製・機能解析システム、ナノ構造体創製光電変換特性評価装置、太陽シミュレーター、電子顕微鏡、走査プローブ顕微鏡、テラワット級フェムト秒レーザー装置や中赤外自由電子レーザー装置などを中心とする充実した装備により、次世代エネルギーシステムの構築に寄与する。陽電池の開発等を含む光・バイオエネルギー研究を推進する。

- 1) これまでにセンターが実施してきた国際共同研究を拠点研究として実施し、研究所が目指すグローバルなエネルギー理工学研究拠点の形成に貢献する。
- 2) 機器操作ならびに実験補助等の研究補助員の増員といった人的リソースの充実が必要不可欠である。これと同時に、設備機器の稼働時間の増加が予想される。これに対する光熱水費や、設備機器の保安・維持費の増額が求められる

4.7. グローバル COE「地球温暖化時代のエネルギー科学拠点」事業 平成 20～24 年度

1. 事業の目的・目標

京都大学第 2 期中期目標「先端的、独創的、横断的研究を推進して、世界を先導する国際的研究拠点機能を高める」のため掲げられた中期計画「世界トップレベル研究拠点プログラムの「物質－細胞統合システム拠点 (iCeMS)」、iPS 細胞研究センター (CiRA)、「卓越した教育研究拠点の確立と国際競争力のある大学づくり」を目指すグローバル COE プログラム採択拠点ならびに先端医療開発特区 (スーパー特区) 等で推進されている先導的研究活動を支援し、国際的研究拠点として発展させる」に従い、本研究所では部局行動計画に「グローバル COE プログラム採択拠点「地球温暖化時代のエネルギー科学拠点」等で推進されている先導的研究活動を推進し、国際的研究拠点として発展させる」とし、エネルギー科学研究科、工学研究科原子核工学専攻、および原子炉実験所と協力してグローバル COE「地球温暖化時代のエネルギー科学拠点」事業を平成 20 年度より推進した。本事業は、再生可能エネルギーと先進原子力エネルギーの開発研究を進める一方、これらの先進技術の研究開発との協調を図りながら、CO₂ ゼロエミッションエネルギーシステムへの移行シナリオ策定研究を理工系、人文社会系の研究者、学生が参加して俯瞰的視点から進めることで、地球温暖化時代のエネルギー科学の国際的教育研究拠点を形成することを目的とした。

これに付随し、「RA 制度の計画的かつ柔軟な運用法等を検討し、効果的な経済的支援を行えるシステムを推進する」との部局行動計画に則り RA の雇用を行うとともに、「グローバル COE プログラムや国際プロジェクト等を利用して、国際研究集会の開催や研究協力協定の締結、外国人研究者の受入の充実等、交流の一層の活性化に努める。また、現在すすめている日中韓交流や、日アセアン交流等により進めている研究交流活動を強化・発展させる」との部局行動計画を設定し、グローバル COE 事業を通じて研究交流活動を活発に行う事を目標にした。

2. 体制および運営状況

本事業は本研究所、エネルギー科学研究科、工学研究科原子核工学専攻、および原子炉実験所が協力して実施した。事業責任者はエネルギー科学研究科 八尾健 教授であり、拠点運営委員会に本研究所から 3 名が加わり事業運営を行った。

3. 活動状況

1) 国際・国内シンポジウム・ワークショップの開催

国際・国内シンポジウム・ワークショップを企画開催、また関連する国際・国内シンポジウム・ワークショップを他の機関と協力し共催してきた。

なかでも本 GCOE が中心となって行う企画として、国際シンポジウムを以下の通り平成 21 年度以降毎年開催してきた。

| | | |
|-------------|---------------------|--------------------------|
| H21.8.20-21 | 第 1 回 GCOE 国際シンポジウム | 京都大学百周年時計台記念館 |
| H22.8.19-20 | 第 2 回 GCOE 国際シンポジウム | 京都大学宇治キャンパスおうばくプラザ |
| H23.8.18-19 | 第 3 回 GCOE 国際シンポジウム | 韓国水原アジョウ大学 Paldal Hall |
| H24.5.22-23 | 第 4 回 GCOE 国際シンポジウム | タイ王国バンコク Siam City Hotel |

特に、第 3、4 回については海外 (韓国およびタイ) での開催を実現し、本 GCOE プログラム所属の研究者・学生だけでなく学内外を含めいずれも百数十名の参加者を集め、また各国独自のエネルギー事情についての紹介があった。これらの国際シンポジウムでは第一線の国内外研究者を招いた招待講演や、シナリオ策定研究グループ、エネルギー社会・経済研究グループ、太陽光エネルギー研究グループ、バイオマスエネルギー研究グループ、先進原子力エネルギー研究グループ等に分かれたパラレルセッションなどが行われ、日頃の研究成果を発表・議論するとともに相互の交流を深めることに役立った。また、所属学生それぞれの課題と、本プログラムに独特なグループ研究成果のポスター発表も行われ、毎回活発な議論が繰り広げられた。このポスター発表では、厳正な審査に基づき優れた発表への優秀賞の授与が行われた。

以上に挙げた国際シンポジウムだけでなく、種々のワークショップやシンポジウム等の企画・運営も定期的、あるいは社会情勢に対応して臨時に行ってきた。特に平成 23 年の東日本大震災直後の 5 月 9 日には、災害に強く安全安心なエネルギーシステムおよび 2030 年までに考えられるエネルギーシナリオについての緊急公開シンポジウム「将来のエネルギーについて考えよう～安全・安心な社会をめざして～」を開催し、学内外から 200 名以上の参加者が集まり、報道機関も取材に訪れる大変注目度の高いシンポジウムとなった。

4. 主な成果

研究面においては、本 GCOE 独自の 2100 年 CO₂ ゼロエミッションエネルギーシステムの構築に向け日本、東南アジア、中東と世界における独自の調査に基づいてシナリオ策定研究を行った。また、最先端研究を社会経済、太陽光エネルギー、バイオマスエネルギー、先端原子力エネルギーの 4 グループにおいて推進した。以下にそれぞれの研究成果の主な概要を記述する。

社会経済研究グループ：輸送、食料、冷暖房、情報アクセス、照明などエネルギーの最終需要の分類をしつつ、2050 年までの日本のエネルギー効率の根本的改善可能性について推計を行った。エネルギー効率は、技術におけるエネルギー効率、社会システムにおける効率、そしてライフスタイルの組合せにより定まる。この中で技術によるエネルギー効率の向上の一例として IT 機器があり、従来の紙ベースの情報に比べてエネルギー消費を大きく減らすことが可能である事が明示された。

太陽光エネルギー：高効率太陽電池、2 次電池などの新しいエネルギー技術に不可欠なエネルギー材料、太陽光エネルギーを利用した物質生産、そして新しい光機能の評価について研究を進めた。これらの研究により、新しい有機太陽電池、リチウムイオン 2 次電池電極材料の充電ならびに放電におけるリチウムの拡散挙動の解明、太陽電池用高純度シリコンの安価製造法の開発、高効率太陽電池製造のためのフェムト秒レーザープロセッシング技術および高い光機能を持つ新規界面微細構造を液相プロセスにより形成させる方法の開発、人工光合成システムを構築する上で必要なナノ空間上に精微に配置された複合体を構築する方法の開発などの成果をあげた。本研究成果により、環境負荷が小さく二酸化炭素を排出しない高効率太陽光エネルギー利用システムが創成されることが期待されている。

バイオマスエネルギー：当研究グループでは、酢酸発酵による新規なバイオエタノール生産技術について研究を進めた。本技術は、加圧熱水処理、酢酸発酵および水素化分解の工程により構成され、木質系バイオマスの 2 段階加圧熱水処理により得られる糖類、ウロン酸類、糖過分解物、有機酸類、リグニン由来分解物などが酢酸発酵により効果的に酢酸へと変換され、最後に水素化分解によりエタノールへと変換することで高収率なバイオエタノール生産が実現することを明らかにした。本プロセスにより、環境負荷が小さく二酸化炭素を排出しない高効率バイオエタノール生産システムが創成されることが期待されている。

先進原子力エネルギー：2100 年 CO₂ ゼロエミッションのシナリオにおいては、原子力エネルギー利用が不可欠であり、このシナリオ実現のためには、原子力の安全性向上が喫緊の課題である。本研究グループでは、「安全・安心」の原子力エネルギー利用への貢献を目的として、1) 安全性を向上させた新型の軽水炉および高速炉の開発に関する研究、2) 高レベル廃棄物等の核変換による処理に利用できる加速器駆動未臨界炉の開発、3) 長期的なエネルギー源となる核融合炉の開発、4) これらの先進原子力システムで利用できる材料の開発を進め、世界初の加速器駆動未臨界炉の実験を 2009 年に開始するとともに、核融合炉-バイオマスハイブリット炉の導入による核融合の早期実現の可能性の提示、酸化物分散強化鋼の寿命を現行材料に比べ 1 桁以上向上させることに成功するといった成果を挙げた。

本グローバル COE は、2100 年までに化石燃料に依存しない CO₂ ゼロエミッションエネルギーシステムに到達するシナリオの実現に向けた技術の創出・政策提言を行いうる教育者・研究者・政策立案者を育成する国際的教育研究拠点形成を主な目的とした。このために、エネルギー科学 GCOE 教育ユニットを設置して博士後期課程学生を選抜し、CO₂ ゼロエミッションの実現に向けた人材育成を目指した「CO₂ ゼロエミッション教育プログラム」を提供した。この教育プログラムは、独自のカリキュラムを構成し、(1) シナリオ策定研究グループに参加しながら理工学研究分野に人文社会科学研究分野を含む、CO₂ ゼロエミッションに向けた総合的なグループ研究を、研究費を支給して自主的に企画実施する「国際エネルギーセミナー（公募型グループ研究）」、(2) 最先端重点研究クラスターに独立した研究者として参加させ、創造性・自立性を修得させる「最先端重点研究」、(3) 原子力発電所等、リアリティのあるフィールドに派遣し、問題の本質を実地に学習させる「フィールド実習」、(4) 国際学会や産学連携セミナー、並びに国際研究集会で発表する「研究発表」を必修科目とし、さらに国外機関における「国際研修」や英語による講義等を実施した。国際会議や国内外の学会等への参加旅費の助成を行い、自発的な研究企画能力、国際的視野、コミュニケーション能力等の育成を図った。

また、これら GCOE の活動や成果について、年次報告書、自己点検評価書、各種報告書を発行するとともに、毎年開催した GCOE 国際シンポジウムの研究発表を取りまとめて“Zero-Carbon Energy Kyoto”と題するシリーズ市販本を毎年シュプリンガー社から出版した。プログラムに参加した学生・教員の研究成果を公開し、他機関における研究者との協働を促進するため、国際会議 4 件、国内会議 8 件、国際 GCOE セミナー 6 回、市民講座 3 回を主催し、加えて国際会議 25 件、国内会議 8 件を他の研究機関等と協力して開催した。一方、拠点の研究成果を市民生活に広く周知するため市民講座を開催し、平成 23 年の東日本大震災後には、「将来のエネルギーについて考えよう」と題して緊急公開シンポジウムを開催した。また、産業活動との連携を促進するため産学連携シンポジウムを毎年開催した。国内関連機関（Japan SEE Forum 等）や海外関連機関（SEE Forum, CEREL 等）との交流・連携活動を行い、積極的に海外研究機関との学術交流協定の締結や協力を行った。また、各種シンポジウムの開催や講師の派遣等を行い、東アジアや東南アジア諸国への研究成果の波及活動を行った。

5. 今後の課題と計画

中期目標・中期計画には、グローバル COE 終了後は「ポストグローバル COE の取り組みを行う」とあるが、現時点で文部科学省において直接の後継プログラムは存在しない。ただし、リーディング大学院プログラムが行われており、本研究所の一部の教員が参画している。しかしながら、研究所全体での事業ではない上、エネルギーを標榜する大学院プログラムでもないので、これをもって上記目標を達成しているとは言い難い。よって、今後のポストグローバル COE への取り組みが必要である。なお、ゼロエミッション拠点活動は研究所全体での事業であり、かつ、その目標もグローバル COE において方向づけられた CO2 ゼロエミッションエネルギーシステムへの移行のための理工学研究という事であり、研究面においては、ある意味これがポストグローバル COE の活動と考える事も可能ではある。本研究所にとっての問題点は、グローバル COE 事業が博士後期課程学生育成のための教育プログラムであった点であり、ポストグローバル COE にはエネルギー科学研究科との連携が必須となる。この意味において、教育事業として平成 24 年度から開始された大学の世界展開力事業「人間の安全保障」開発を目指した日アセアン双方向人材育成プログラムの構築も、ポストグローバル COE の取り組みの一つとして位置付ける事ができる。

5. 生存基盤科学研究ユニットの概要とエネルギー理工学研究所

1. ユニット活動の目的

生存基盤科学研究ユニットは、生存基盤科学高等研究院を前身とし、化学研究所、エネルギー理工学研究所、生存圏研究所、防災研究所、東南アジア研究所により、既存の部局組織に縛られることのない、また専門分野にとらわれず学際的な研究を行う研究ユニットとして、京都大学宇治キャンパスに平成18年4月に設置された。エネルギー理工学研究所は、その中核的メンバーとして設立当初より運営と研究に主体的に参加し、平成20年からの5年間はユニット長を輩出し、世話部局として活動した。

ユニットは人類の生存に関わる地球規模の問題に学際的に文理融合のアプローチを行うことを目的に、京都大学に特有な自由の学風に基づいた独自性の高い研究を自主的に行ってきた。これに加え、設立当初から4年間は、科学技術振興調整費を得て「サステナビリティ」の学際的研究を行い、萌芽研究、融合研究、総合研究の3つのカテゴリーで、生存基盤に関わる様々な分野融合的研究を行った。

生存基盤科学研究ユニットは、第1期中期計画においては「学問分野の発展に応じて、学部、研究科、附置研究所、研究センター等の新設・再編・廃止等について全学及び部局等における検討に取り組み、研究実施体制の整備・充実・弾力化を図る。」とされたことに対応して設置された組織である。この目的に対しては、学際的領域、新領域の開拓を含む広範な研究活動を実施するための部局横断組織として、その機能を果たしている。広範な理工系学術のみならず、経済など社会的な要因にも関連するエネルギー理工学研究所にとって、このユニットの研究は共通点も多く、また主体的な活動はその目的にかなうものと言える。

2. ユニットの活動状況（特に第2期期間とエネルギー理工学研究所の活動）

第2期中期目標・計画において本学は「学問体系の構築と学術文化の創成を通じて地球社会の調和ある共存に資する」ものと期待されており、本研究所はユニットを通じてこの活動でも予算要求におけるコンセプトの提案に始まり、企画段階から参加した。この結果平成20年度からの4年間は、生存基盤科学研究ユニットとしての概算要求が認可され、地域と密着した生存基盤科学研究を展開する「サイト型機動研究」が実施された。このサイト研究では、滋賀サイトと青森サイトを立ち上げて地元大学、研究者と本学のエネ研以外の研究者も含めた共同研究を行った。

ユニットにはさらに平成22年4月には地球環境学堂と経済研究所が参画、平成23年4月からは学際融合教育研究推進センターに所属して活動している。

本研究所はこの多くの研究でこれらのサイトで共同研究を実施した。

3. 成果など

ユニットの研究対象は、エネルギー、資源、環境、大規模災害など人類の生存を脅かす諸問題であり、学際的な取り組みでなければその全体像のわからないような課題である。これに対して京都大学の伝統であるフィールド研究を基盤に、個別の地域コミュニティに密着した研究を推進した。特に、物質循環、生態メタゲノム、危機対応に焦点をあて、人文社会、理工、生物等の分野横断型の研究を、青森サイトおよび滋賀サイトで展開した。エネルギー理工学研究所が推進した研究としては、滋賀サイトでの「湖沼に繁殖する藻類の組み換え酵母によるエタノール化」、「琵琶湖の湖水および湖底環境のその場元素分析法の開発」、青森サイトでは「放射性物質の自然環境漏洩の予測・制御に必要な物質移行モデル」、「むつ小川原地域における大型研究施設の経済的効率性に関する研究」をはじめとするテーマを遂行した。

4. 今後の展開など

生存基盤科学研究ユニットでは人類の持続的発展に重要な科学技術シーズを産み出すことを目指している。そのため、ユニットは既製の学問体系にとられない異分野間の接点となり、「創造的融合研究の具現化・推進」ならびに「多様な分野における先進的研究の総合化」を推進するために、今後の展開としては「寿命」をキーワードに研究活動を開始している。また、これまではサイト研究を中心として主として国内での活動を行ってきたが、今後の展開としてはアジアを中心とした国際展開を図る。この点でも本研究所は、東南アジア、中国、韓国などにおいてすでに活発な協力を実施しており、今後のユニットの国際展開においても重要な役割を果たすことが期待されている。

6. 次世代ユニットの活動状況

1. 目的など

文部科学省の科学技術振興調整費による「若手研究者の自立的な研究環境整備促進」プログラムに採択され、平成18年7月31日に設置された。次世代開拓研究ユニットでは、高い独立性をもって高度な研究を遂行することができ、早い段階から国内外に自己の研究成果をアピールできる環境を提供することで、新たな若手研究者人材システムのモデルを構築することを主たる目的としている。

2. 活動状況など

国際公募により優秀な若手研究者を採用し、先端理工学の開拓研究分野での「光理工学の追究」および「生存基盤科学の創成」を目指す独創的な研究が推進された。若手研究者それぞれにメンターを2名配置して、若手研究者による研究を実施するにあたっての助言をおこなった。5年間の育成期間の3年目に中間評価を最終年度に最終評価が実施されたが、それぞれ3段階にわたって評価委員会を設置し、公正かつ透明な審査をおこなった。第1次評価では外部の専門家にも参加してもらいも得て分野の専門性を評価した。第2次審査では広く研究者としての適格性を評価する観点から面接審査などを取り込んでおこなった。第3次審査は運営協議会で審査の過程と結果について確認した。当初5年の育成期間の後、最終的には6名をテニュア任用（うち1名は期間途中での採用）したほか、5名が他大学のテニュアポジションに採用された。エネルギー理工学研究所にも1名の若手研究者が次世代開拓研究ユニットでのテニュアトラックの後に、助教として着任した。

平成23年度からは、学際融合教育研究推進センターの教育研究連携ユニットとして従前ユニットのミッションを継続し、テニュアトラック制度を通じた新しい人材登用システムを実践している。

3. 成果など

テニュアトラックの後にエネルギー理工学研究所に着任した教員は、先進ヘリカル磁場配位プラズマ中の乱流と輸送の物理機構の検証と最適化のための実験的研究をおこなった。周辺プラズマの乱流揺動に関する実験研究を推進し、乱流揺動を決定するとともに閉じ込め・輸送の改善をもたらす帯状流の物理機構を明らかにした。これにより、トカマク型核融合炉と比較して定常性・安定性に優れた先進ヘリカル型プラズマ装置の閉じ込め・輸送特性の優位性を示す知見を得た。

これらの結果をもとにして、ヘリカル型を用いた核融合実験装置の設計に関する将来的な指針を示すことが可能となった。

この成果は、我々の社会を支えるとともに、従来のエネルギー源に比べて環境負荷・二酸化炭素排出の少ない基幹エネルギー源の開発を通じ、世界最先端の低炭素社会の実現に資すると期待される。

4. 今後の展開など

学際融合教育研究推進センターの教育研究連携ユニットとして従前ユニットのミッションを継続し、テニュアトラック制度を通じた新しい人材登用システムを実践する。

7. 中期目標・中期計画の概要

1. 第1期中期目標・中期計画（平成16年度～平成21年度）の概要

研究所発足以来展開してきた社会的受容性の高い高品位エネルギーの生成、変換および利用研究を基盤とする連携研究体制を充実させ、部門横断的な複合領域研究をさらに推進することにより、新領域研究へと展開する。とくに、第1期中期計画においては環境調和型エネルギーシステム構築を目的とした重点複合領域研究を設定し、エネルギー理工学の研究拠点としての役割（21世紀COEプログラム）を果たすと共に、プラズマエネルギー複合領域研究、バイオエネルギー複合領域研究および光エネルギー複合領域研究を3重点複合領域研究プロジェクトとして推進するとともに、各重点複合領域研究の統合により、学際的・独創的な新領域研究を開拓し、その国際的研究拠点の形成を目指す。

科学全般に関する広い視野と総合的な判断力を備え、とくに大学院教育を通じてエネルギー理工学分野に関して深い専門知識を持つ人材・研究者を養成する。学部学生に対して、エネルギー理工学分野への興味・インセンティブを高めると共に、研究所で行っている研究領域の意義を理解させる。大学院学生に対しては、協力講座として所属する各専攻と協力し、研究所で行われている最先端の研究に積極的に参加させることにより、国際的な活動を展開できる研究者や大型プロジェクト研究におけるリーダーを育成するための教育を行う。

3重点複合領域研究の中核的研究として、ヘリオトロンJ装置によるプラズマ閉じこめの高性能化、耐極限環境先進構造材料の開発、可搬放電型中性子源の高性能化、ナノ材料創製と同材料を用いた次世代太陽電池の高効率化を推進すると共に、基盤研究として、バイオマス資源のクリーン燃料化、生物型酵素を用いた高効率物質変換反応の開発、高度機能赤外線自由電子レーザー装置や高度機能超短パルスレーザー装置の開発、エネルギーシステム設計及び評価方法論研究の発展を図る。加えて、エネルギー分野における萌芽研究の育成に努める。

各種計測評価用最先端装置を研究領域全体で横断的に有効活用するため「マルチスケール評価研究基盤群」および「光・ナノ・バイオ融合研究基盤」を整備すると共に、21世紀COEプログラム「環境調和型エネルギーシステム」の成果を継続・発展させるため、関連施設の新営計画を含む「太陽エネルギー研究基盤」の統合化を目指す。

21世紀COEプログラムや国際プロジェクト等を利用して、国際研究集会の開催や研究協力協定提携、および外国人研究者の受け入れを充実させ、交流の一層の活発化に努める。また、現在進めている日韓共同研究（日本学術振興会拠点校方式共同研究）や、タイとの協力協定によって進めている研究者交流活動を強化・発展させる。

次世代原子力開発や核融合開発等の中核として国際的な共同研究の場を形成し、交流の活発化を推進する。加えて、超小型核融合中性子源の高性能化による地雷探知技術開発など、原子力エネルギー分野における国際貢献を目指す。

2. 第2期中期目標・中期計画（平成22年度～平成27年度）の概要

エネルギー理工学研究所は、「エネルギーの生成、変換、利用の高度化」を設置目的とし、人類文明の持続的発展に貢献する。この目的のため、エネルギー需要の増大とエネルギー資源の枯渇、および、地球環境問題の深刻化に伴って生じるエネルギー問題の解決を目指した先導的研究を行う。特に、社会的受容性の高い新規エネルギー源、およびエネルギー有効利用システムの実現を目指す。本研究所が有する多様な学術基盤を活かし、異なる研究領域を有機的に連携させることにより、挑戦的かつ独創的なエネルギー理工学の研究領域の開拓を進める。

以上の長期目標を達成するために、以下を第2期中期目標とする。

- ・重点複合領域研究として先進プラズマ・量子エネルギー、光・エネルギーナノサイエンスを推進する。
- ・国内外の研究機関・研究者との連携を深め、地球規模のエネルギー問題に対応できるエネルギー理工学研究ネットワークのハブ機能を強化する。
- ・先進エネルギー領域における指導的研究者・技術者等の人材を育成するとともに、学生等の教育活動に貢献する。
- ・産官学連携活動等を通じて研究成果を社会に還元する。
- ・研究所の研究成果等をホームページ、公開講演会等を通じて広く社会に公開する。
- ・これらの目標の達成のために、適切な研究所運営に努める。

8. まとめ

この自己点検評価は、第2期中期目標・中期計画（平成22-27年度）の前期の活動内容を自己分析し、第2期後半から第3期への展開に向けて新たな計画を立案するため、先ず、研究所の現在の研究活動を客観的に認識することを目的とした。

第2期中期目標・中期計画の前半においては、重点複合領域研究である「先進プラズマ・量子エネルギー」および「光・エネルギーナノサイエンス」を学術基盤として先進的エネルギー研究を展開するとともに、平成23年度に文部科学省から共同利用・共同研究拠点の認定を受け、「ゼロエミッションエネルギー」の拠点形成活動を推進できたことの意義は大きい。さらに、GCOEプログラムなどの事業を活用し、特にアジア諸国の研究機関・研究者との連携を深め、地球規模のエネルギー問題に対応できるエネルギー理工学研究ネットワークのハブ機能を強化することができた。また、これらの活動や生存基盤科学研究ユニットおよび次世代開発研究ユニットを通じて、先進エネルギー領域における指導的研究者・技術者等の人材を育成するとともに、学生等の教育活動に貢献することができた。大型装置、ヘリオトロンJの双方向型共同研究にも大きな発展がみられた。産官学連携活動に関しては、文部科学省の事業である文部科学省の先端的研究基盤共用・プラットフォーム形成事業やNEDO事業・CREST事業などの競争的資金に基づく開発研究が実施され、第2期中期目標・中期計画の期間を通じて、研究成果を社会に還元することができた。国際協力では、JSPSアジア拠点事業やJGSEEなどアジアを舞台とする活動が活発に行われた。このように、これまでの達成状況は、概ね、満足すべき状況にあると言える。

中期目標・中期計画の達成は重要であり、その上で、研究所の理念や目標に沿って、着実に組織の充実化と研究成果の蓄積を行い、新たな展開を図っていくことが肝要である。上記の活動は、今後も形を変えながらも、本研究所の重要な活動として位置付けられよう。また、平成25年度からは、概算要求「革新的高効率太陽光利用技術の開発」が開始されている。これらの活動基盤を支えるため、競争的外部資金の獲得については、今後も引き続き努力していくことが肝要である。

エネルギーを取りまく社会や学界の状況変化は予断を許さない。研究の方向性については、今後も柔軟かつ適切な対応が必要である。一方、研究所の理念や目標に則した、大きくは変わらない基本的な研究課題も存在する。今後も、自己点検評価は、本研究所、大学、我が国と世界の科学の発展などの様々な視点から眺め、俯瞰的な立場と適切な分析に基づき、実施されるべきであろう。

平成25年7月

京都大学エネルギー理工学研究所
自己点検・評価委員会