京都大学
エネルギー理工学研究所

現 状 と 課 題

平成 28 年度-平成 30 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、環境への調和（質）と社会への供給（量）の双方にすぐれた次世代を担うエネルギーの在り方や、それを実現する学理と技術を自然の摂理や原理まで立ち返って探求することを目的に、平成 8 年 5 月に設立された研究所です。

具体的には、エネルギーの基本要素である生成・変換・利用に関わる 3 部門 14 研究分野（客員 2 分野を含む）と、それらを結合したプロジェクト性の高い研究課題や国内外の共同研究を推進する附属エネルギー複合機構研究センター（3 分野を含む）を設置し、エネルギーレンジの異なる「プラズマ・量子エネルギー」と「ソフトエネルギー」の二つのアプローチから研究を展開しています。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多くの留学生を含む修士、および博士課程の学生教育と若手研究者の育成に取り組んでいます。

平成 23 年度からは、研究所の理念を「ゼロエミッションエネルギー」という言葉に込め、エネルギーの概念をタイトルに持つ共同利用・共同研究拠点として、国内外の幅広い学術分野の研究機関や研究所と連携・協力しながらエネルギー研究を展開してきました。この拠点活動は、順調に成果を挙げて平成 27 年度に第 1 期を無事終了し、平成 28 年度から第 2 期をスタートさせることができました。本拠点にご協力とご支援をいただいた皆様に感謝いたします。

この間、科学研究は世界的にも大きな変革期に差し掛かるとともに、その中での大学の役割や位置付けも急速に変わってきています。とりわけ、これからの科学研究の飛躍的発展は、限られた分野の発想からだけでは困難であるとの認識の下、異なった分野の連携や融合をとおした新しい学問領域の創出や、それを通じたイノベーションが強く求められています。京都大学においても、平成 26 年度から研究連携基盤が設置され、異分野交流による挑戦的な未踏科学研究を率先して企画するとともに、平成 29 年度からは指定国立大学の認定を受け、海外学術機関との連携を含む国際共同研究や産官学連携による成果の社会還元などに力点をおいた研究力向上に向けた仕組みが検討されています。学理・学術の構築を謳う大学の研究所として、こ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、より進化したエネルギーの基本を司る新しい概念を開拓・発展させていくことが求められています。

自己点検・評価は、研究の実施母体としての研究所の見識が問われることになりますが、第三者の視点で自身の研究を見つめ直すことが新たな研究の展開につながるとも考え、三年ごとに行っています。今回は、各分野や各研究者の成果に対する点検・評価を基本に置きつつ、異なった分野・部門の研究者が連携して、どのような独創的なアイディアをもとにして、どのような挑戦的な課題に取り組み、どのような新しい研究の芽を見出したか、それらを推進するためにどのような工夫を施したかなどについて点検・評価できるような基礎資料としてとりまとめを行いました。

これらをとおして、21 世紀のエネルギー研究をリードする開かれた研究所を形作る基礎資料としたいと考えています。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 30 年 10 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 …… 2
1.1.　理念、目標 …… 3
1.2.　組織・運営 …… 4
1.3.　財政状況 …… 8
1.4.　研究活動・研究交流の状況 …… 9
1.5.　教育および社会との連携 …… 13
1.6.　施設整備 …… 15
1.7.　国際連携 …… 16
1.8.　将来計画 …… 19
1.9.　自己点検・評価に関する今後の課題および留意事項 …… 20

2.　研究部門・研究分野における研究の現状 …… 25
2.1.　エネルギー生成研究部門 …… 28
2.2.　エネルギー機能変換研究部門 …… 51
2.3.　エネルギー利用過程研究部門 …… 69
2.4.　エネルギー複合機構研究センター …… 85

3.　重点複合領域研究成果の概要 …… 97
3.1.　プラズマ・量子エネルギー複合領域研究 …… 98
3.2.　ソフトエネルギー複合領域研究 …… 111

4.　拠点形成促進事業 …… 122
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） …… 122
4.2.　双方向型共同研究（Heliotron J） …… 127
4.3.　先端研究施設共用制度「（ADMIRE 計画）」 …… 131
4.4.　センター共同研究 …… 134
4.5.　革新的高効率太陽光利用技術の開発 …… 137
4.6.　グリーンイノベーションに資する高効率スマートマテリアルの創製研究 …… 141

5.　研究ユニットの概要 …… 144
5.1.　未踏科学研究ユニット（学知創生ユニット） …… 144
5.2.　未踏科学研究ユニット（グローバル生存基盤展開ユニット） …… 146
5.3.　スマートエネルギーマネジメント研究ユニット …… 148

6.　中期目標・中期計画の概要 …… 149

7.　まとめ …… 151

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（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・発足したものである。研究所の沿革の詳細は資料編に記したとおりである。以来、幅広いエネルギーに関する理工学分野において、人類存続に不可欠な中長期的視点に立った新しいエネルギー概念の開拓とそれを支えるエネルギー理工学の基礎学理の構築を目指して、多様な研究を展開してきた。

この間、四回の外部評価（平成 13 年・16 年・19 年・25 年）を受けるとともに、そこでの議論と指摘を参考にし、平成 18 年度には附属エネルギー複合機構研究センターの改組、平成 20 年度には三重点複合領域研究の設定、平成 22 年度には二重点複合領域研究への集約などの組織改革を行ってきた。

平成 23 年度には、「ゼロエミッションエネルギー研究拠点」として、文部科学省の進める共同利用・共同研究拠点の認定（第 1 期）を受けたことに伴い（平成 23～27 年）、ゼロエミッションエネルギー研究を通して「全国の大学その他の研究機関の研究者の共同利用に供する」新たな役割を担うこととなった。平成 25 年度の外部評価では、本拠点活動を含めた研究所の組織改革と研究活動に関する議論と指摘を頂き、それらを受けて、第 2 期拠点申請（平成 28～33 年）を行った結果、認定を受け、第 3 期中期目標・中期計画期間も共同利用・共同研究拠点が継続されることとなり、現在に至っている。

この間、平成 14～18 年度の 21 世紀 COE 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－」(以降、21COE）や平成 20～24 年度のグローバル COE プログラム「地球温暖化時代のエネルギー科学拠点」（以降、GCOE）ならびに文部科学省特別経費プロジェクト「革新的高効率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－」（平成 25～30 年度）など、他部局と連携・協働した研究教育プログラムの展開、あるいは日本学術振興会アジア研究教育拠点「先進エネルギー科学」（平成 20～24 年度）などの国際活動により、エネルギー理工学の拠点形成研究活動を着実に進めてきた。さらに、「双方向型共同研究」による Heliotron J 装置の共同利用を通じて核融合科学研究所による公募型共同研究に主体的に参加するとともに、文部科学省「先端研究施設共用促進事業」（平成 19～22 年度)、「先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業」（平成 23～27 年度）など、産学連携にも注力している。平成 28 年度から本学で導入された学域・学系制度では、本研究所の常勤教員は自然科学域エネルギー理工学系に所属している。

1.1. 理念、目標

本研究所の理念・目標は、発足時の内容を基本にしつつ、これまでの外部評価委員会での議論や指摘を参考にして修正してきた。第 2 期の中期目標・中期計画（平成 22～27 年度）、第 3 期の中期目標・中期計画（平成 28～33 年度）の策定において微小の修正を加え、以下に至っている。

理念：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」に関する研究を行うことを設置目的とし、全国の大学やその他の研究機関に所属する研究者の共同利用に供するとともに、人類文明の持続的発展に貢献します。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ているエネルギー問題の解決を目指した先導的研究を行います。とくに、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します。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ます。

長期目標：上記の研究所理念に基づき、以下を長期目標とする。

（1） 社会の要請に応え、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、および、基礎から応用に至る研究の発展により、世界的な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。

また、これらの長期目標の達成に向け、以下を中期目標とする。

（1） 研究所重点複合領域研究として、プラズマ・量子エネルギー複合領域研究、およびソフトエネルギー複合領域研究を推進し、ゼロエミッションエネルギーに関する学術基盤の構築・展開を図る。

（2） 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、国際共同研究・国際連携活動の強化・推進を通じ、国内外の研究者・研究機関との連携を深め、地球規模のエネルギー問題に対応できる国際的な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） ゼロエミッション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、学生等の教育を行う。

（4） 研究成果の積極的な社会還元に努める。

（5） 産官学連携活動を推進する。

（6） 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発信する。

（7） 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 3 期中期目標・中期計画およびその計画の年度ごとの進捗状況については、第 6 章ならびに別冊資料「京都大学エネルギー理工学研究所第 3 期中期目標・中期計画関連資料集」に記す。

1.2.　組織・運営

組織構成：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 つの附属施設として附属エネルギー複合機構研究センター（以下、附属センター）を設置している。研究部門は、部門あたり 4 研究分野に加え、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、平成 30 年度から新たに寄附部門を研究分野として配置し、現在 3 研究分野を配している。平成 28 年度から 30 年度までの研究所教職員数を表 1.2.1 に示す。研究所に所属する研究者は、個々の研究分野・研究者の研究に加え、それらの有機的結合を図る重点複合領域研究（後述）を展開している。附属センターは、この重点複合領域研究を始め、部門・分野間の横断的な研究の中核を担う場として活動を展開している。

平成 18 年には部門・分野間の連携・融合研究機能の一層強化を目指し附属センターを改組した。この改組において、分野を横断した複合領域研究（プラズマ・バイオ・光）を重点的に推進する観点から研究推進部制を導入し、研究所の研究者がいずれの研究推進部にも参加できるような体制とした。研究推進部には、平成 22 年度の重点複合領域研究の二領域研究への集約を受けて、「プラズマ・量子エネルギー研究推進部」と「ソフトエネルギー研究推進部」、および国内外との共同研究ネットワークの強化を目的とする「国際・産官学連携研究支援推進部」を設置し、拠点形成に向けた活動を展開している。

各推進部は、研究の進展によって、それぞれに 3～4 つの研究推進領域や推進室を機動的に設置することを可能とし、多種多様なプロジェクト的研究課題・連携研究を柔軟且つ効率的に推進す

るための体制となっている。これまでに、平成 19～27 年度には ADMIRE エネルギー利用推進室、平成 22～27 年度には次世代太陽電池研究拠点推進室を配置した。

運営体制：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」の議にしたがうこととしている。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。研究所会議は非常勤も含む研究所全教職員から構成され、拡大教授会は研究所専任教員と特定教員、教授会は専任教授と特定教授で構成されている（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。

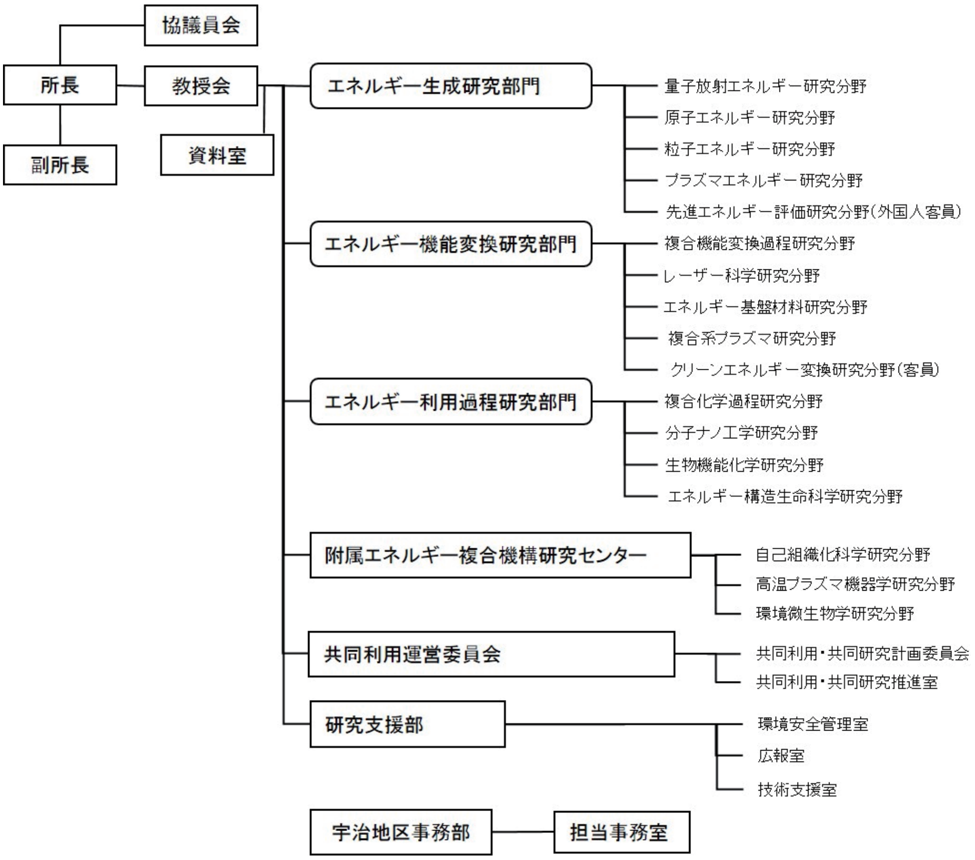


図 1.2.1　研究所組織図

	H28	H29	H30
教授	11	11	11
准教授	13	14	12
講師	3	2	3
助教	12	14	13
技術系職員	9	9	9
特定職員	0	1	1
小計	48	51	49
外国人客員教授	3	1	0
外国人客員准教授	0	1	0
外国人客員研究員	3	1	0
客員教授	1	1	1
客員准教授	1	1	1
非常勤講師	3	3	3
非常勤研究員	2	1	2
研究支援推進員	3	2	2
その他研究員	15	17	12
その他職員	18	20	20
小計	49	48	41
総計	97	99	90

表 1.2.1　平成 28～30 年度までの教職員人員数
※平成 30 年度は 7 月末現在

研究所運営の具体的な事柄については、「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担当する。平成 19 年度より、副所長を長とする「研究支援部」を教授会直下に設置し、その中に「技術支援室」、「環境安全管理室」、「広報室」、を配している。そこでは、それぞれの室長の下で、技術支援、労働安全衛生管理、情報管理、広報などの業務を行っている。なお、研究所の事務組織は、京都大学事務組織規程の定めに従っている。また、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、「補佐会」が設置され、副所長（研究支援部長兼務）、センター長、研究部門長等から構成されている。補佐会では、軽度の日常的な認可事項等を処理するほか、研究所の企画と運営の基本的在り方についての予備検討を行う。将来を見据えた研究所運営に関しては、拡大教授会を母体とする「将来構想検討委員会」での検討が行われる。

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。部門・分野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、公募型の共同研究（以下、センター共同研究）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。但し、平成 23 年度の拠点認定後は、対象者を主として所内研究者としている。また、センター共同研究の運営に関しては、研究計画委員会および予算委員会で協議しており、上記センター共同研究のほか、談話会、シンポジウム、共同研究成果報告会などを企画・実行しており、これらを通じて研究者の交流を図っている。

本研究所は、平成 23 年度に共同利用・共同研究拠点として文部科学大臣の認定を受け、「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。共同利用・共同研究拠点活動は、研究所内共同研究活動の一つとして、所長の諮問機関として専用に設けた共同利用運営委員会に委ねられている。同運営委員会は、学内外からの委員 15 名（学外委員は内 9 名）からなり、関連するコミュニティの意見を的確に反映する体制としている。同運営委員会の下に、学外委員が過半数を占める計 13 名（学外委員は内 7 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、同運営委員会の下に 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。

点検・評価体制：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。また、研究所活動の現状および将来計画の点検・評価は、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）で定期的に審議される。研究所発足以降、平成 13 年度、16 年度、19 年度、25 年度の 4 回実施されている。

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、研究所独自の活動として、全教員に対する個人評価を行った。これは個人の業務・研究活動に関する自己評価報告資料等を基に、所長および副所長の合議により作成された評価コメントを本人へ文書で伝えるものである。第 1 回の個人評価の後、平成 20 年度には「個人評価 WG」で評価法そのものの妥当性を含めた改善策が議論され、その検討結果は 2 回目（平成 22 年度）の「個人評価」に反映された。第 3 回の個人評価（平成 27 年度）は、並行して実施された本学の教員評価との整合性も勘案して実施された。

人事体制：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 73 名中 39 名については学外から任用するに至っている（平成 30 年 7 月 31 日現在）。平成 28 年度から平成 30 年度にかけての教員の異動については、昇任が 1 名、外部機関からの採用が 6 名であり、転出者は 8 名、定年退職者は 1 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。任期制教員の再任手続きについては、平成 17 年に内規を制定し、これによる評価を行っている。平成 30 年 7 月 31 日時点で再任評価を受け再任された教員は、教授 4 名、准教授 5 名および助教 3 名となっている（再任後転出した教員も含む）。

平成 28 年度から本学で導入された学域・学系制度では、本研究所の常勤教員は自然科学域エネルギー理工学系に所属している。エネルギー理工学系では、教員の採用および承認に関する事項、エネルギー理工学研究所への配置、教員の人事選考の方針および定員管理計画の策定、教員の服務およびエフォート管理に関する業務を行っている。

本研究所では、こうした常勤教員のほか、外部資金を基盤とする様々なプログラムを使った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）。宇治キャンパスの 4 つの研究所が中心に取り組んだ生存基盤科学研究ユニット（平成 18～27 年度）や次世

代開拓研究ユニット（平成 18〜24 年度）、エネルギー科学研究科などとともに取り組んだ 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）等の学内プロジェクトのほか、原子力システム開発事業（平成 17〜21 年度）や ADMIRE エネルギー産業利用（平成 19〜27 年度）、太陽電池開発事業（平成 21〜27 年度）を始めとする外部資金や大学改革強化推進事業などを使って、特定教授、特定講師、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、この間、専任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。平成 30 年度には、特定教授 1 名、特定准教授 1 名からなる寄附部門を附属センターに研究分野として配置した。また、再配置定員による外国人教員の採用（平成 26 年度）や、本学研究連携基盤未踏科学研究ユニットへの参画による外国人教員の採用（平成 27 年度〜）も積極的に行っている。

1.3. 財政状況

平成 8 年度から 29 年度までの財政状況（研究所決算額）の推移を図 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 以上を維持している。平成 8 年度から 29 年度までの科学研究費助成事業をはじめとする研究所予算の推移を表 1.3.1 に示す。科学研究費助成事業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ないが、毎年 1 億円強を獲得している。省庁等からの競争的資金、民間企業・外部研究機関等との受託研究費・共同研究費の獲得も、平成 27 年以降、ほぼ同じ水準を保っている。

定常的な外部資金の獲得により、分野研究を推進するとともに先端研究施設を整備することができ、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の精力的な展開に繋がっている。また、それらの施設・装置は、共同利用・共同研究拠点事業（平成 23 年度〜）の推進にも貢献している。

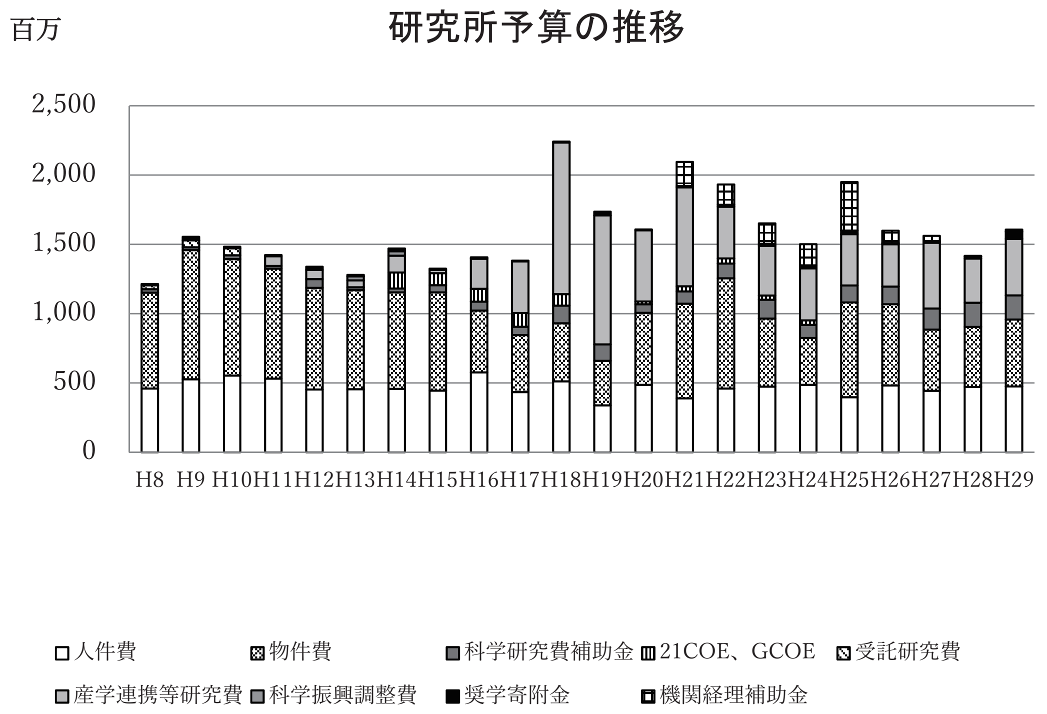


図 1.3.1 研究所予算の推移

	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18
人件費	460	527	554	532	453	455	457	445	577	435	512
物件費	692	931	840	793	734	715	696	709	445	411	419
科研費	25	22	27	20	63	21	28	52	65	60	127
21COE、GCOE	0	0	0	0	0	0	116	86	92	99	83
受託研究費	27	49	50	0	0	0	0	0	0	0	0
産学連携等研究費	0	0	0	71	67	49	122	23	217	372	1094
科学振興調整費	0	0	0	0	0	29	32	0	0	0	0
寄附金	10	25	12	8	22	11	20	10	10	6	6
計	1214	1554	1483	1423	1338	1280	1470	1325	1407	1383	2241

	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29
人件費	339	487	389	460	474	487	398	482	444	472	475
物件費	321	520	683	795	491	338	683	586	441	432	483
科研費	119	62	89	107	136	95	122	127	152	175	174
21COE、GCOE	0	20	36	37	30	32	0	0	0	0	0
産学連携等研究費	931	513	714	373	359	375	371	306	475	319	407
寄附金	27	6	9	14	14	22	25	8	11	15	53
機関経理補助金	0	0	175	146	148	152	350	89	38	4	15
計	1736	1608	2095	1932	1652	1501	1949	1598	1561	1417	1607

表 1.3.1　平成 8～29 年度までの財政状況　（単位：百万円）

1.4.　研究活動・研究交流の状況

分野・部門・複合領域研究活動：平成 8 年の改組以来、本研究所は、その理念・目標に沿って、「京都大学エネルギー理工学研究所在り方検討委員会」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。それらは、先端的なエネルギー技術の創成を目指した

3 部門の各分野での研究だけでなく、研究所の特徴を生かした学際融合・連携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の推進を特徴としている。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 2 章ならびに資料編に記されている。とくに、研究所全体としての特徴・総合力は、研究所の二つの重点複合領域研究に代表される部門・分野横断的なプロジェクト研究で発揮されている。重点複合領域研究成果の概要は、本編第 3 章「重点複合領域研究成果の概要」に纏めてある。また、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 および表 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に纏めている。

共同利用・共同研究拠点活動：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、本研究所の目標でもあるエネルギー理工学の国際的研究拠点形成に向けた、国内拠点基盤形成のための主要な研究活動となっている。本拠点活動では、エネルギー理工学の特徴でもある分野融合研究と新領域研究を推進しており、その一環として、独創的、先端的な ZE 研究を総合的に展開する目的で公募型共同利用・共同研究を実施している。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）の三つのタイプの課題に加え、研究集会の企画も公募している。これらの課題の研究代表者は、全て所外研究者であり、所内研究者は、共同研究者として当該課題の研究をサポートする。共同利用・共同研究で採択された課題数は、平成 28 年度が 92 課題、平成 29 年度は 100 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 28 年度が 42 機関、340 名、平成 29 年度は 42 機関、460 名（来所実績数）に及んでいる。

各種プロジェクト研究活動：本拠点活動に並行して、有機薄膜太陽電池の開発事業（CREST：平成 21～25 年度および NEDO：平成 22～26 年度）が進展した。平成 25 年度からは、文部科学省特別経費プロジェクト「革新的高効率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－」（平成 25～30 年度）、平成 30 年度からは、教育研究活動プロジェクト「国際先端エネルギー科学研究教育センター国際共同ラボの形成–ダブルディグリー推進体制の強化–」（平成 30～35 年度）を、エネルギー科学研究科との協力により開始した。平成 25 年度からは、化学研究所、生存圏研究所との協働により、文部科学省特別経費プロジェクト「グリーンイノベーションに資する高効率スマートマテリアルの創製研究－アンダーワンルーフ型拠点連携による研究機能と人材育成の強化－」（平成 27～32 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）」がある。これは、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、Heliotron J）を活用し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。本研究所はこの共同研究に主体的に参画し、この仕組みを通じて、本研究所の独創的閉じ込め磁場配位をもつ Heliotron J 装置が全国の共同利用として利用され、毎年、採択研究課題数は約 25 件程度、参画機関数は 15 件程度、参加者数は約 100 名を数えている。

平成 19 年度から平成 27 年度まで継続された ADMIRE 計画事業は、文部科学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、研究所の直接的な社会貢献の場として位置付けられた。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 92 社、266 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 6 件、特許申請 16 件に直接貢献した。この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、平成 27 年度まで継続され、平成 28 年度からは、これまでの先端研究施設共用基盤を利用した有償利用制度を継続している。

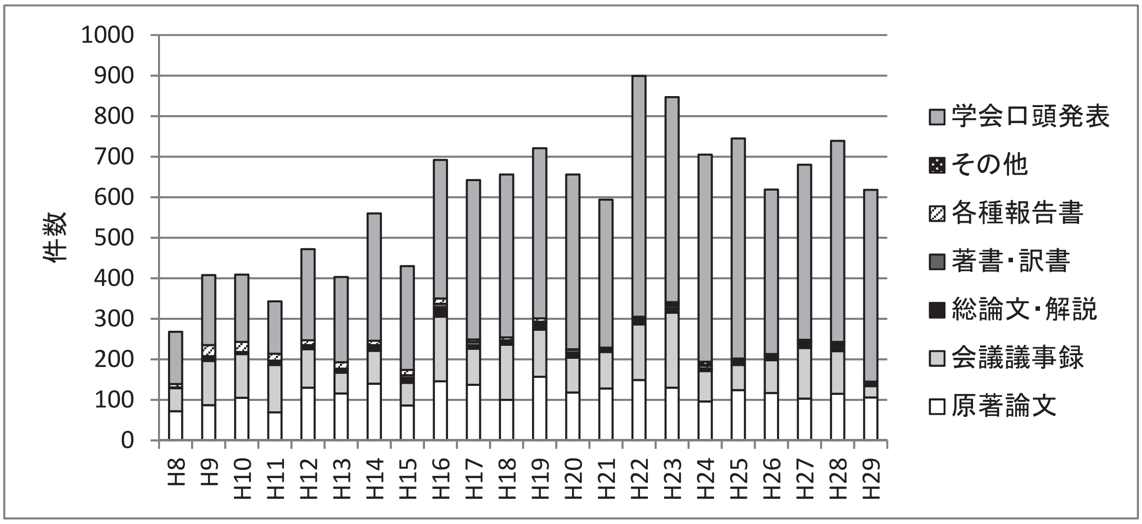


図 1.4.1 研究所の成果発表件数の推移

	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18
原著論文	72	87	105	69	130	116	140	86	146	137	100
会議議事録	57	109	108	117	95	51	81	56	159	89	136
総論文・解説	2	8	3	11	10	6	9	12	23	8	10
著書・訳書	0	4	2	0	0	4	5	7	9	9	1
各種報告書	8	27	25	17	12	16	11	13	13	6	7
学会口頭発表	129	173	166	129	225	210	314	256	342	393	402
総計	268	408	409	343	472	403	560	430	692	642	656

	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29
原著論文	157	118	128	149	130	96	124	117	103	115	106
会議議事録	116	86	90	137	185	75	62	81	125	105	28
総論文・解説	15	12	7	15	11	6	9	10	12	13	9
著書・訳書	5	8	4	4	6	1	2	4	3	5	2
各種報告書	8	1	0	0	5	6	0	0	3	2	0
その他					4	10	5	1	2	3	0
学会口頭発表	420	431	365	594	506	511	543	406	432	496	473
総計	721	656	594	899	847	705	745	619	680	739	618

表 1.4.1　研究所の成果発表件数の推移

このほか、附属エネルギー複合機構研究センター（以下、センター）では、小型自由電子レーザー装置（KU-FEL）の開発・研究、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 26 年度以降、これらの基幹装置群も「先端研究基盤

共用・プラットフォーム形成促進事業」に組み込まれ、事業終了後も先端研究施設共用促進に貢献している。

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 年度の同 21COE 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であった。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－CO2 ゼロエミッションをめざして－」（学際・複合・新領域区分）として採択（平成 20～24 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提案、教育者、研究者、政策立案者の育成への貢献、国際的な研究活動や交流を通じた国際的教育研究拠点形成に貢献した。同プログラム終了後も、これらの研究基盤に基づいて、エネルギー科学研究科と協力し、上記文部科学省特別経費プロジェクト「革新的高効率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－」（平成 25～30 年度）および教育研究活動プロジェクト「国際先端エネルギー科学研究教育センター国際共同ラボの形成–ダブルディグリー推進体制の強化–」（平成 30～35 年度）を活用した独自のポスト GCOE 研究教育活動を継続している。

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、上述の研究所重点複合領域研究を中心とした共同研究プロジェクトや GCOE プログラムのほか、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」等への積極的な参画によっても推進してきた。同ユニット活動は、平成 27 年度に本学附置研究所・センターの一層の連携強化を目指して発足した学内組織「研究連携基盤」が主催する未踏科学研究ユニット群の中の「グローバル生存基盤展開ユニット」に引き継がれている。さらに、同ユニット群の「学知創生ユニット」にも参画して異分野融合研究を推進している。この他、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、各研究分野が研究所内外との共同研究を実施することにより、幅広い共同研究ネットワークができあがっている。

研究協力活動：国際交流については、研究所の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。さらに上記研究連携基盤未踏科学研究ユニット活動の一環としても、外国人研究者の雇用・招聘を実施している。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 30 年 7 月現在、38 件）、学術交流を行っている。

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ている。また、平成 13 年からは、タイ王国ラジャマンガラ工科大学と Eco-energy and Materials Science

and Engineering Symposium（EMSES）を毎年開催し、現在に至っている。日本学術振興会（JSPS）の「大学の世界展開力強化（日アセアン双方向人材プログラム）（平成 24〜28 年度）」にも主体的に参画してきた。

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始まる欧州の大学との交流活動に関しては､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 年度からは、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た。さらに平成 27 年度には、大学の補助を受け、英国オクスフォード大学との連携を開始した。平成 25 から 26 年度には本学スーパージョン万プログラムにチーム型として採用され、研究所若手教員二名、および博士課程学生二名がシンガポール国立大学に滞在し、共同研究を行った。

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。

教育活動：研究所の全教員は、本学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（ILAS セミナー）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。また、海外の大学からの短期留学生および国内外大学からのインターンシップ、高等専門学校からのインターンシップ、SSH 校を始めとする高等学校生徒の見学の受け入れ、さらには宇治市との連携による小学校児童や中学校生徒への特別授業なども実施している。
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、こうした研究科主体の説明会とともに、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）を毎年実施するなど、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。図 1.5.1 および表 1.5.1 に在籍学生数、ならびに学位取得者数の推移を表 1.5.2 に示す。
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大学院生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きた。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きた。GCOE プログラム終了後も、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。また、平成 23 年度に採択された文科省博士課程教育リーディングプログラム「京都大学大学院思修館」の実施組織として平成 25 年度に新設された 5 年制博士課程一貫教育を実施する大学院｢総合生存学館｣(思修館)

の大学院生 指導にも携わっている。表 1.5.3 に博士研究員数の推移を示す。大学院エネルギー科学研究科での博士学位取得者について、平成 28 年度は 19 名中 4 名、平成 29 年度は 17 名中 9 名を当研究所の研究分野から輩出した。

広報活動：研究所の出版・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」、「センター共同研究成果報告書」、「ゼロエミッションエネルギー研究拠点 共同利用・共同研究成果報告書」などがある。これらはそれぞれ、研究所研究分野の研究成果を詳細に記述した報告書、毎年の部門・分野ごとの研究活動報告書、エネルギー複合機構研究センターによる、あるいは ZE 拠点研究拠点による共同研究の年次報告書である。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）、SNS による広報活動がある。なお、ホームページは広報室で管理しており、平成 29 年度に大幅な刷新作業を行った。

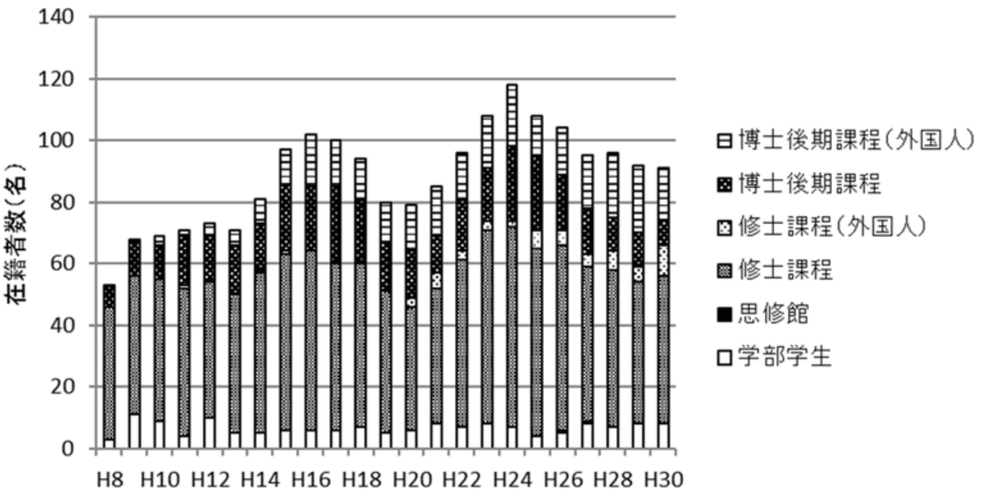


図 1.5.1　本研究所に在籍する学生数の推移

	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19
学部学生	3	11	9	4	10	5	5	6	6	6	7	5
思修館												
修士課程	43	45	46	48	44	45	52	57	58	54	53	46
修士課程(外国人)	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0
博士後期課程	7	11	11	16	14	16	15	22	21	25	21	16
博士後期課程(外国人)	0	1	3	2	4	5	8	11	17	15	13	13
総計	53	68	69	71	73	71	81	97	102	100	94	80

	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30
学部学生	6	8	7	8	7	4	5	8	7	8	8
思修館							1	1			
修士課程	40	44	54	63	65	61	60	50	51	46	48
修士課程(外国人)	3	5	3	3	2	6	5	4	6	5	10
博士後期課程	15	12	17	17	24	24	18	15	11	11	8
博士後期課程(外国人)	15	16	15	17	20	13	15	17	21	22	17
総計	79	85	96	108	118	108	84	95	96	92	91

表 1.5.1　本研究所に在籍する学生数の推移（思修館は平成 25 年創設）

博士学位取得	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29
人数	0	2	5	3	6	5	5	6	8	10	16	7	7	12	2	10	7	8	9	6	4	9
※1 内:留学生数	0	0	0	0	1	1	2	0	5	6	7	3	3	5	2	4	1	5	5	3	0	5
※2 内:女性数	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	2

修士学位取得	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29
人数	16	24	20	24	22	19	23	26	25	29	23	27	17	24	23	30	31	28	36	25	25	25
※1 内:留学生数	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	2	3	0	0	1	3	0	1	3
※2 内:女性数	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	0	1	1	2	3	3	2	3	2	1	2

学士学位取得	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29
人数	3	7	9	4	11	6	6	5	6	6	6	5	6	8	9	6	7	4	3	4	6	7
※1 内:留学生数	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
※2 内:女性数	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0

表 1.5.2　学位取得者数の推移

年度	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29
特定研究員	0	0	0	0	6	6	5	4	5	4	3	2	3	4
時間雇用研究員	5	5	11	13	10	12	16	12	13	22	24	22	15	16
総数	5	5	11	13	16	18	21	16	18	26	27	24	18	20

表 1.5.3　博士研究員数の推移

このほか、本研究所主催の公開講演会、エネルギー科学研究科主催の公開講演会、本学附置研・センター長会議（平成 27 年度からは、京都大学研究連携基盤）が主催する「京都大学附置研究所・センターシンポジウム」や「丸の内セミナー」、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。多数の高校生、高等専門学校生が研究所見学に訪れており、毎年見学に訪れる学校も少なくない。

1.6.　施設整備

改組以前の旧組織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て管理・運営を行ってきた。センターの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、あるいは (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中期目標・中期計画ごとに見直すことを原則としながら、装置の運転・維持管理を行っていくこととなった。第 3 期中期目標・中期計画期間のセンター基幹装置として、Heliotron 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）群を選定している。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。但し、従来担当していた研究者が退職や異動で不在となった設備に関しては、今後どうするかが検討課題となっている。

平成 19 年度以降 整備された研究設備リストを資料編に記載する。平成 17～21 年度には、研

究所経費や外部競争的資金（原子力システム開発事業：2件、15億円）などを利用し、北1号棟ならびに南1号棟を整備・再開発して、電界放出型透過電子顕微鏡などの先端研究設備・装置を新規導入し、MUSTERの拡充を行った。また、平成20〜22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年度の補正予算により、革新的太陽光エネルギー利用設備（0.8億円）を導入し、先端研究施設共用促進事業の主要設備 DuET および MUSTERを高度化（2.3億円）した。さらに、平成25年度には補正予算によりナノバイオ材料検出・計測システム（0.4億円）が導入された。また、平成28年度にエネルギー損失分光装置（0.3億円）が、平成29年度には汎用マルチ波長域プラズマ分光診断システム（0.5億円）が、全学経費（設備整備経費）で導入された。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を図っている。

建物・設備については、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年度に本館の工事が完了した。この工事による増床やエネルギー科学研究科の一部移転に伴い、研究所の総床面積が増大した。研究所別棟の整備に関し、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。また、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。平成24度には北4号棟の耐震改修工事が行われた。さらに、平成27年度には、南1号棟別棟の整備（小規模耐震補強工事）が実施されている。

1.7. 国際連携

本研究所では、以下に示すように大学の国際化の流れに先立ち、研究および教育（人材育成）の両面から国際連携活動を推進してきた。平成22年度から毎年開催されている国際シンポジウムも国際連携活動の一環である。また、平成29年度より、附属エネルギー複合機構研究センターに国際・産官学連携支援室が設置され、組織的な活動への展開が期待されている。一方、財源は個人ベースの外部資金に頼らざるを得ず、現状は教員（分野）個々の活動に留まっている。以下に評価期間での主要な国際連携活動を記す。

1.7.1 国際共同研究

1) JSPS頭脳循環を加速する戦略的国際研究ネットワーク推進プログラム「世界の成長と共存を目指す革新的生存基盤研究のための日本・アセアン協働強化（平成26年度〜平成28年度）」代表者：河野康之（本学東南アジア研究所）

・担当研究者：大垣英明

・ASEAN対象に、若手研究者の招聘と派遣を行い、日・ASEANの共通課題に対する解決策について共同研究を実施した。本研究所からは、一名の博士課程学生の派遣と一名のPDの受け入れを行った。

2) SICORP（JST）“Japan-ASEAN Science Technology Innovation Platform (JASTIP)”,
「日 ASEAN 科学技術イノベーション共同研究拠点―持続可能開発研究の推進―（平成 27 年度～平成 31 年度)」代表者：河野康之（本学東南アジア研究所)

・WP2 リーダー：大垣英明、石原慶一（エネルギー科学研究科)

・本事業では、SDGs への科学技術イノベーションからの貢献を目標に、日 ASEAN 科学技術イノベーション共同研究拠点を海外に設置してオールジャパン、オール ASEAN の研究活動を推進している。本研究所では環境・エネルギー研究班（WP2）としてタイの NSTDA に拠点を設置し、総括班（WP1）からのコーディネーターが一名常駐して活動している。JASTIP 全体で平成 27 年度～平成 28 年度までに、原著論文 36 編（共著 14 編)、学会発表 104 件、WS・セミナー開催 26 件､受賞 7 件､特許 1 件､新聞等報道 25 件､人材交流 314 人の実績をあげている（http://jastip.org/)。

3) 「JSAP-OSA Joint Symposia Nanocarbon and 2D materials（平成 28 年度～)」

・session organizer, 松田一成、宮内雄平

・応用物理学会（JSAP）と米国光学会（OSA）とのジョイントシンポジウムが毎年 9 月に行われており、平成 27 年度以降、ナノカーボンと二次元物質に関する英語セッションを開催し、毎年二名の海外研究者を招待講演者として招聘した（https://meeting.jsap.or.jp/english/jsap-osa-joint-symposia)。

4) IAEA Research Coordination Program (CRP code: T14003) 「Accelerator Simulation and Theoretical Modelling of Radiation Effects-II (SMoRE-II)（平成 28 年度～平成 31 年度)」Chair: Gary T, Was, U. of Michigan

・日本側代表者：木村晃彦

・国際原子力エネルギー機関の傘下に組織された研究プログラム（CRP-IAEA）で、世界各国の代表研究機関が参画し、先進的な核エネルギープラントの高効率安全利用に不可欠な革新的原子力材料の開発に関する国際共同研究を実施している。平成 29 年度に実施した国際ラウンドロビン試験により、照射条件の異なる各国の照射施設を利用して、多岐にわたる材料照射データベースが構築されつつある。本プログラムでこれまでに得られている照射データベースは、IAEA-WS/publication として発行される予定である（http://cra.iaea.org/cra/explore-crps/advanced-search.html)。

5) JSPS 二国間交流事業共同研究「極短パルス電子ビームによる CSR および自由電子レーザーに関する研究（中国科学技術大学)（平成 28 年度～平成 30 年 12 月 31 日)」

・代表者：大垣英明

・中国科学技術大学、北京大学と本研究所、および東北大学との間で電子加速器を用いた国際共同研究を実施した。毎年、4-5 名の招聘派遣とワークショップを開催した。

6) その他

上記以外に、外国人客員研究員招聘制度を活用した国際共同研究が、各研究グループで進められている。

1.7.2 人材育成

1) 大学の世界展開力強化事業「｢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（平成 24 年度～平成 28 年度）」代表者：縄田英二、
・事業推進者：大垣英明、石原慶一（エネルギー科学研究科）
・本事業では、ASEAN University Network 傘下の大学との間で修士課程のダブルディグリープログラムの開発を行うことを目標に、本学学部生対象のサマースクールや ASEAN 学部生対象のウィンタースクール、シンポジウム等の活動を行った。
2) 京都大学若手人材海外派遣事業 ジョン万プログラム「ゼロエミッションエネルギーのための光・ナノ科学材料に関する研究」平成 25 年度スーパージョン万プログラム採択（チーム型）
・代表者：小島 崇寛
・渡航期間　仲野瞬：平成 27 年 1 月 5 日～平成 27 年 3 月 25 日および平成 27 年 3 月 31 日～平成 27 年 6 月 30 日、田村智樹：平成 27 年 8 月 2 日～平成 27 年 10 月 30 日：次世代を担う若手人材を対象に、海外経験等の機会を支援し、国際的な活動を奨励・促進することを目的に、シンガポール国立大学 Chang Young-Tae 研究室との共同研究を行った。共同研究の成果は
S. Nakano, T. Tamura, R. K. Das, E. Nakata, Y.-T. Chang, T. Morii "A diversity-oriented library of fluorophore-modified receptors constructed from a chemical library of synthetic fluorophores" ChemBioChem 2017, 18, 2212-2216.
として共著論文となっている（http://www.john-man.rp.kyoto-u.ac.jp/researcher/adption25sjmp.html）。
2) 「JST さくらサイエンスプログラム（平成 27 年度～平成 30 年度（単年度ごとのプログラム））」
・事業担当者：大垣英明
・本事業は、アジア地区の、来日経験のない学生・若手教員を対象に、日本での文化活動を含む体験をさせることを目的にしており、本研究所ではエネルギー科学研究科の協力のもとに、平成 27 年度にミャンマー（ヤンゴン大学）から 10 名の博士課程の学生を一ヵ月間インターシップの受け入れを行った。また、中国科学技術大学からは平成 27 年度より、毎年 10 名の学部生から PD まで、10 日間のプログラムを実施した。
3) 「Frédéric Joliot/Otto Hahn Summer School on "Nuclear Reactors Physics, Fuels, and Systems"（平成 11 年度～）」
・講義提供者：木村晃彦
・仏国の CEA と独国の KIT が共催する欧州教育プログラムであり、平成 13 年から毎年 9 月上旬に欧州の若手研究者、および博士課程学生を対象とした原子力材料・燃料の講義が行われている。平成 11 年から連携協力し、「先端原子力材料の開発研究の現状と課題」についての講義提供を行った（http://cadarache.cea.fr/cad/Documents/Emplois-stages-formations/FJOH/2016/FJOH%202016%20first%20announcement.pdf）。
4) ワイルド&ワイズ共学教育受入れプログラム事業「アセアンエネルギー若手研究者短期インターンシッププログラム（平成 28 年度～平成 30 年度）」
・代表者：大垣英明
・JASTIP（WP2）の国際共同研究先の大学から、10 名の修士、博士課程学生を一ヵ月間インターシップ生としてエネルギー科学研究科、工学研究科、環境学堂と協力して受け入れた。
5) 「中谷 Research and International Experiences for Students（RIES）フェローシッププログラム（平成 29 年度～）」

・受入担当者：松田一成、宮内雄平
・中谷財団が平成 28 年度より開始した日本および海外の理系大学生を対象とした国際学生交流事業により、毎年米国ライス大学の学部生一名ずつを受け入れた。これまでに、受け入れ学生との共著の論文
Evidence for line width and carrier screening effects on excitonic valley relaxation in 2D semiconductors
Y. Miyauchi, S. Konabe, F. Wang, W. Zhang, A. Hwang, Y. Hasegawa, L. Zhou, S. Mouri, M. Toh, G. Eda and K. Matsuda, Nat. Commun. 9 (2018) 2598.
が出ている（http://nakatani-ries.rice.edu）。

1.8. 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、研究面と運営面の両面において活動基盤の充実化を図ってきた（1.2 組織・運営を参照）。具体的には、質と量の双方を満足するエネルギー実現の基礎となるエネルギーの生成、変換および利用に関する原理的・先鋭的研究と教育を 3 部門・12 分野体制を基本にして推進し、研究成果を環境調和性と社会受容性の双方に優れた新エネルギーシステムとして結実させることと、そのための人材育成を目指している。第 1 期中期目標・中期計画期間（平成 16～21 年）である平成 18 年度に附属エネルギー複合機構研究センターを改組し、「プラズマ・量子エネルギー研究推進部」と「ソフトエネルギー研究推進部」および「国際・産官学連携研究支援推進部」（平成 30 年現在）の三推進部体制を導入して、部門・分野の枠を越えて、附属センター二研究推進部に対応する重点複合研究領域プロジェクトに参加し易い体制を整えた。各推進部の下には、複数の研究領域や外部資金プロジェクトに対応した推進室を設置できるため、今後も研究活動の機動性を高めることができる。また、第 2 期中期目標・中期計画期間（平成 22～27 年）である平成 23 年度からは、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。応募課題数は着実に増加しており、拠点活動は順調に推移・浸透しており、今後ともコミュニティを支援する活動を継続する。

第 3 中期目標・中期計画期間（平成 28～33 年）では、第 1 期・第 2 期中期目標・中期計画期間での進展を引き継ぎ、二つの重点複合領域研究の着実な進展を図るとともに、ゼロエミッションエネルギー研究の国内外への普及に努め、当該分野を世界的に牽引する研究成果を結実させていく。エネルギー理工学研究には、多様性と複雑性を内包する高度な総合科学としての特徴がある。このため、関連研究者が、既成概念にとらわれることなく、分野の壁を乗り越えて積極的に交流できる機動的な研究体制を、常に見直していくべきであろう。また、第 3 期中期計画期間である平成 28 年度からは、本学が新たに設けた学域学系制度の下、人事はエネルギー理工学系へ移った。それに伴い、学系との連携を密にしつつ、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的・物的資源の配分、学内他部局や学外の研究機関・研究者との連携・協力、優秀な人材の確保と流動を促進する制度の導入など、研究所の運営体制を一層強化するための具体策を考案する。

第５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、エネルギー研究を取り巻く国内外の環境は大きく変化してきている。大学の研究力や国

際競争力の強化に向けた様々な取り組みへの対応など、今後も継続的に検討していくべき課題は多い。研究所の将来計画の検討に際しては、急速に変化する国内外の研究開発環境や社会情勢などの外的要因の変化に迅速に対応する必要がある。その一方で、大学の附置研究所としての長期的展望に基づいた計画を議論する必要がある。

将来のエネルギー研究を担う若手研究者や人材養成も、大学附置研究所としての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）などの若手人材の育成にも引き続き重点を置く。理工系人材育成戦略等を踏まえ、異分野融合・新分野創成を推し進めて国際的に活躍できる人材の育成や、エネルギー理工学研究所の特色を生かした「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。京都大学が掲げる大学の国際化に向けた活動は、環境調和性と社会受容性の双方に優れた新エネルギーシステムの開発を目指す、本研究所の方針に合致するものであり、今後も世界のゼロエミッションエネルギー研究を先導する国際的な研究拠点機能を高めていく。

1.9. 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、利用研究をもとにした各部門・分野が、高度で独創的な研究成果をあげることが大前提である。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、充分な成果が達成されていると分析・評価している。研究所の現状と将来計画を分析、検討する過程において、これらの多様なエネルギー理工学研究活動が、エネルギー理工学研究所という一つの部局において展開している意義と効果を社会に示していく。ゼロエミッションエネルギー研究における多様な学術分野の研究者間の連携を図るためにも、分野研究の多様性は重要である。それとともに、異分野融合によるさらなる重点複合領域研究の展開と新分野の創成を目指す。

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、異分野融合と新分野創成にむけた取組として効果を発揮しつつある。分野や部門にまたがるだけでなく、学内外との共同研究を通じて、エネルギー理工学研究という、学際的性格を持ち、人類の生存と繁栄に欠くべからざる多面的な対象を扱う研究領域にふさわしい具体的な研究成果がうまれており、今後もさらなる新分野創成にむけた研究を加速したい。

ゼロエミッションエネルギー研究は、多様な研究分野の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形成されていない現状を鑑み、それらの多様な分野の研究者間の連携を図る新しいコミュニティ形成に向けて、「ゼロエミッションエネルギー・ネットワーク」を平成 25 年度に立ち上げた。学外幹事を置くなどして、その展開にも注力しているが、引き続き、大学や国研を対象とする共同利用・共同研究への参加者だけでなく、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などを活用して、関連研究分野および研究者へのゼロエミッションエネルギー研究に関する最新情報を交換・発信する。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と繋げていく現在の活動を強化・発展させるとともに、幹事団を中心に積極的な提言が行えるような組織作りにも努めたい。また、研究所国際シンポジウムでたびたび議論してき

た「ゼロエミッションエネルギー」の概念を、さらに熟議し深化させていく。

今後、エネルギー理工学 研究所の研究拠点機能をさらに向上させるために、基盤研究を重視しつつ、先端的、独創的、学際的研究を推進する。共同研究拠点としてコミュニティの要請に応えていくうえで、拠点活動として認可された予算は限られている。そのため、他の競争的資金の効率的な運用、所外コミュニティとの共同申請などにより最先端設備を導入し、共同利用拠点としての魅力を維持・発展させる方策を考える必要がある。

総合的なエネルギー理工学研究は、俯瞰的な視点から評価される。すなわち、社会や政策におけるエネルギー研究への期待に応えた目標設定を行っているか、また、学術として世界を先導するエネルギー理工学が達成されているか、などの点から評価される。それらは一致することも、相反することもありうる。研究所活動の目標設定、目標に対するアプローチ、その達成度と成果の評価において、外部からの客観的な意見を取り入れつつも、被評価者たる本研究所自らが、客観的な評価姿勢を持ち続けることが重要である。

2. 研究部門・研究分野における研究の現状

研究部門・研究分野における研究の現状・課題・展望

本研究所では、第 1 章に掲げた理念・目標を実現するため 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」および「エネルギー利用過程研究部門」）と一つの附属施設（附属エネルギー複合機構研究センター）を設置している。各部門およびセンターでは、それぞれを構成する研究分野を中心とし第 3 期中期目標・中期計画に沿い、それぞれの分野における最先端の研究を推進するとともに、新しい融合研究や新領域研究のへの展開を常に意識しつつ、エネルギー理工学研究に携わり着実に成果をあげている。

本章では、第 3 期中期目標・中期計画における本評価期間（平成 28〜30 年度）において 3 部門 1 センターを中心として行われた先導的な研究の現状を記載する。なお、中期目標として定めた研究所重点複合領域研究に関する分野間連携研究の現状は第 3 章に、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」活動を代表としたエネルギー研究拠点形成に関する現状は第 4 章に記載する。

各部門・分野の構成人員（平成 30 年 3 月 31 日現在)、各部門・分野における人事異動の状況は資料編に記載している。

エネルギー生成研究部門

（A-1）量子放射エネルギー研究分野：加速器からの高品位電子ビームの生成とその高度化や、これを用いた利用研究を進めている。特に本グループで開発してきた中赤外自由電子レーザーは、国内トップレベルの性能であり、外部を含む多くの外部ユーザーに提供され、様々なエネルギー関連研究の推進に貢献している。

（A-2）原子エネルギー研究分野：核融合エネルギーの生成変換利用システムと社会環境適合性の研究を行っており、バイオマス核融合ハイブリッド概念により、核融合の早期実現、将来型電力システムへの適合、革新的エネルギー変換システム、ネガティブエミッション化が可能であることを提案している。また小型中性子源の産業、および医療応用の開発を行っている。

（A-3）粒子エネルギー研究分野：高パワー電磁波と荷電粒子ビームの高度制御に関する研究を行っており、核融合プラズマの閉じ込めの生成と加熱、マイクロ波加熱・電流駆動システムの開発、プラズマ揺動現象の物理機構の解明、超小型核融合装置を用いたエネルギー粒子の発生と利用、高輝度電子ビームの発生と制御などの研究を実験・理論の両側面から推進している。

（A-4）プラズマエネルギー研究分野：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て、磁場閉じ込めプラズマに内在する物理を解明しつつ、新たな加熱手法や粒子供給手法によるプラズマ制御法を探究し、高度化された高精度局所計測システムを開発し適用することによって、プラズマ制御学の新たな地平を開拓することを推進している。

エネルギー機能変換研究部門

（B-1）複合機能変換過程研究分野：ナノ材料やナノ複合材料を舞台に、そこで発現する物性や機能を明らかにすることで、光エネルギー利用に向けた新しい光科学の学理の構築とそのエネルギー応用の研究を進めている。また、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。

（B-2）レーザー科学研究分野：ターゲット物質に触れること無く瞬時にエネルギーの受け渡しができるというレーザーの特徴を生かしたナノ材料創成法の開発、および、レーザー－物質相互作用の深い理解をベースとした光学的先進分析手法の開発を主に進めている。これからも引き続き、物理、化学、生物といった既存の枠にとらわれることなく、光科学のエネルギー応用という観点から研究を進める。

（B-3）エネルギー基盤材料研究分野：ナノ・メゾ構造制御による革新的な性能向上と機能発現を目指すエネルギー基盤構造材料の開発研究や極限環境下における材料挙動予測のための材料・システム統合基礎研究を行っており、実用化のための材料技術開発が課題となっている。革新的原子力材料の開発により、核エネルギーの高効率安全利用に貢献する。

（B-4）複合系プラズマ研究分野：本研究所のヘリカル軸ヘリオトロン、他機関の大型ヘリカル装置やダイバータ模擬装置、分野所有のグロー放電装置などを活用し、プラズマの粒子や波動としての電磁気的な性質、および光子場としての複合的な性質を解明、利用することによって、将来の核融合原型炉開発を見据えた高温プラズマの学術研究、人材育成を目標に掲げ推進している。

エネルギー利用過程研究部門

（C-1）複合化学過程研究分野：電気化学および生物化学を学術基盤とし、太陽光発電やバイオエネルギー等の再生可能エネルギーを主要一次エネルギーとするために、基礎から実用化まで見据えた研究開発を行っている。

（C-2）分子ナノ工学研究分野：自然のエネルギー変換システムの原理である自己組織化、分子認識反応拡散などに学び、表面科学、合成化学、材料科学を融合した新しい高効率エネルギー変換材料の合成や新しい合成手法を開発する。

（C-3）生物機能化学研究分野：狙った機能を発揮するタンパク質や RNA の合理的な設計法と、「細胞の中」で機能するタンパク質や RNA の過渡的な組織体を、その機能を保持したまま「細胞の外」で構築する方法論を開発して、クリーンで高効率なエネルギー利用システムを実現する。

（C-4）エネルギー構造生命科学研究分野：NMR 法等を用いた構造解析に立脚して、酵素・機能性核酸等の生体分子の機能発現機構の解明と、エネルギーと有用物質の獲得に向けて木質バイオマスを解析・活用する方法論を開発することを進展させてきている。

附属エネルギー複合機構研究センター

（D-1）自己組織化科学研究分野：生体内で起こる自己組織化過程を横断的に説明できる理論体系を構築している。平衡閉鎖系内における分子レベルの過程を対象とし、独自に開発した統計熱力学理論を駆使しつつ、水の並進配置エントロピーの効果に主眼を置いた新たな観点に立って研究を進めている。

（D-2）高温プラズマ機器学研究分野：将来の基幹エネルギーの一つとして期待されている核融合炉を目指した高温プラズマ閉じ込め高度化を研究の目標としている。高周波加熱装置を用いた加熱、水素固体ペレット入射装置を用いた高密度化などをとおして最適な閉じ込め装置設計を追求する。

（D-3）環境微生物学研究分野：微生物が過酷な自然で生き抜く過程で獲得したエコロジカルニッチ（生態的地位）な機能をモチーフにして、これを産業へと応用するための研究を行っており、積極的に産学連携を推進していく。

2.1. エネルギー生成研究部門

平成 8 年（1996 年）の研究所改組以来、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」を担う部門であり、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。

本研究部門は、物理・電磁気に軸足のある先進的なエネルギー研究を行う点に特徴がある。本部門では、テラヘルツ領域から赤外線領域までのコヒーレント光を発生する自由電子レーザーや逆コンプトン散乱γ線までを扱うほか、未来エネルギー源として期待される核融合のためのヘリオトロンプラズマの閉じ込め、制御、基礎的な物理の研究、マイクロ波加熱、診断などのプラズマ物理の他、核融合エネルギーの利用のためのブランケット、ダイバータ、エネルギー利用系に関する研究、小型核融合中性子源開発研究とその中性子応用を目指した研究も行っている。さらにはエネルギーシステムの設計と社会環境影響の研究やバイオマスの有効利用に関する研究、アジア地区での再生可能エネルギー実装に関する研究も展開している。本研究部門は、量子、粒子、プラズマなどの物理と工学を軸とし、社会科学的な面にも触れるような学際融合領域にも視野を広げ、他の二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・海外研究機関との共同研究を進めている。

外国人客員研究分野には、世界的にも優秀な研究者を三か月ずつ招聘し、様々な分野の研究を行うとともに、これによる国際的な協力関係の構築を行ってきている。

エネルギー生成研究部門

A-1　量子放射エネルギー研究分野（A-1-1）

1. **構成員**：教授：大垣英明、准教授：紀井俊輝、助教：全柄俊

2. **分野題目**：高品位量子放射エネルギー源の開発と応用

3. **研究概要**

加速器からの高品位電子ビームや、これを用いた自由電子レーザーや放射光は、エネルギー材料物性研究を初めとして、様々なエネルギー関連研究にこれまでにない計測分析手法を提供することが可能である。このため本研究分野では、電子ビームの高輝度化や、自由電子レーザーの高度化、広帯域化を目指した研究やこれらのビームを用いた新しい応用研究を推進する。

4. **研究目標**

1) 加速器駆動大強度小型赤外光源の開発とその応用研究
2) バルク超伝導体の放射光生成への応用
3) レーザー逆コンプトン散乱ガンマ線による光核共鳴散乱（LCS-NRF）を用いた同位体断層イメージ（CT）の開発

5. **研究手法**

中赤外自由電子レーザー（KU-FEL）は、宇治キャンパスにて建設・開発を行い、現在これを用いて、熱陰極高周波電子銃の光陰極モード動作や、FEL の完全同期研究を行うとともに、ワイドギャップ半導体の特定フォノンモード励起等の利用研究を行っている。また、バルク超電導スタッガード型アンジュレータ（Staggered Array Undulator）に関しては、シミュレーション研究から実験的研究にまで、活動の幅を広げている。LCS－NRF に関しては、分子科学研究所 UVSOR にビームラインを新設して、実験研究を進めるとともに、宇治キャンパスにてシミュレーション研究を行っている。

6. **学術領域**：光量子科学、ビーム物理、加速科学、物理・応用物理（超電導応用、光物性、非線形光学）、赤外分光学、エネルギー学、原子力

7. **関連学会**：物理学会、加速器学会、物理学会

8. **研究課題**

(1) 中赤外自由電子レーザーの高度化・広帯域化
(2) バルク超伝導体の放射光生成への応用
(3) レーザー逆コンプトン散乱ガンマ線による光核共鳴散乱（LCS-NRF）を用いた同位体断層イメージ（CT）の開発

9. **分野の自己評価**

論文等の発表リストにあるように、加速器技術の分野から、光物性等の利用研究分野にて、研究成果を公表し評価を得ている。これらの結果、平成 30 年度現在、学会評議員 1（加速器学会）、学会幹事 2（原子力学会、加速器学会）、プログラム委員 2（原子力学会、加速器学会）、国内・国際会議議長 2、国際会議プログラム委員 2 と、活発な学会活動を行っている。これに加えて小規模の国内・国際ワークショップ等や共同研究拠点での共同研究者受け入れ、国際共同研究（日中）等、国際的にも貢献している。

研究課題（1）：加速器駆動大強度小型赤外光源の開発とその応用研究

（大垣英明、紀井俊輝、全柄俊）

1.1　背景

本研究分野ではエネルギー関連研究への応用を目指し、小型線形加速器を用いた大強度赤外光源（中赤外自由電子レーザー(KU-FEL)および THz コヒーレントアンジュレータ放射(THz-CUR)光源）の開発を行ってきた。研究所理念に基づき、これら装置を所内外の研究者の共同利用に供している。

1.2　成果の概要

KU-FEL は、安定した運転が行われるとともに、装置の調整が進み、当初目標であった 5～20 μm を超える 3.4～23 μm において平成 28 年度から発振可能となっており、様々な応用研究に利用されている。また、準単色大強度 THz 放射である THz コヒーレントアンジュレータ放射(THz-CUR)の発生に成功し、その特性評価を行った。本光源では電子バンチの電荷量を大きくした際に放射強度が飽和する現象が観測された。

1) H. Zen et al., Physics Procedia, 84, pp. 47-53 (2016).
2) M. Kagaya et al., Japanese Journal of Applied Physics, 56, 022701 (2017).
3) S. Suphakul et al., International Journal of Magnetics and Electromagnetism, 3, 008 (2017).

1.3　成果の意義

大強度中赤外波長可変光源は未だ発展途上の分野であり、自由電子レーザーの果たす役割は大きい。3.4～23 μm という幅広い波長域で発振可能となったことで、今後、多種多様な応用実験に利用可能である。また、小型電子加速器を用いた準単色 THz 放射光源は世界で様々な装置が立ち上げられ始めている。本装置は低い周波数領域(0.16～0.65 THz)において容易に波長可変でピークパワー最大 10 kW の出力を得られるとともに、液体ヘリウムを要しない焦電型検出器で測定できるだけの強度を持つ。大電荷時に見られた強度の飽和現象は、空間電荷効果により電子ビーム長が伸長した事が原因であり、より高い出力を得る為には、空間電荷効果を低減するための工夫が必要である。

1.4　今後の計画

KU-FEL は、引き続き性能向上に向けて研究開発を続ける。また、中赤外レーザーを用いたガス高次高調波アト秒 X 線発生に KU-FEL を利用できないか、検討を開始しており、これに向けた研究開発を進めていく。一方、THz-CUR 光源においては、数値計算を用いて、空間電荷効果を低減する方策を検討中であり、陰極より放出される電子の初期時間分布や位置分布を制御する事で、より多くの電荷をより短い時間に閉じ込めた状態の電子ビームをアンジュレータに供給できる可能性が示唆されている。これを実験的に証明するとともに、より高い出力を持つ準単色 THz 放射の発生を目指す。

1.5　課題の自己評価

KU-FEL は、安定に運転され、所内外の共同利用に広く利用されるとともに、年々性能が向上しており、好ましい状態にある。THz-CUR 光源からは既に放射が得られており、今後の強度増大および応用研究の展開が期待される。

研究課題（2）：バルク超伝導体の放射光生成への応用

（紀井俊輝、大垣英明、全炳俊）

2.1　背景

本研究分野では高品位な量子放射エネルギーを生成し、応用研究を展開している。本課題では、塊状の超伝導体（バルク超伝導体）を用いた新型アンジュレータの実現で、放射光生成の基盤技術を格段に進展させ光利用研究の革新的な発展をもたらすことを目標としている。

2.2　成果の概要

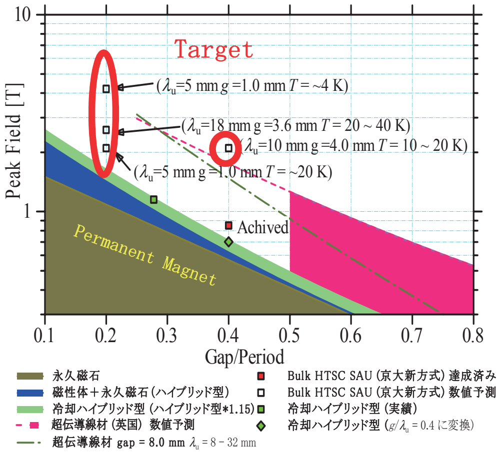
バルク超伝導体を放射光発生に活用する新奇な試みで、従来技術である永久磁石や超伝導線材での技術限界を数倍超えるポテンシャルを持つ。プロトタイプで永久磁石の材料限界を超える磁場強度を達成したほか、磁場補正法や数値計算技術の開発が進行中である。

1) T. Kii, Application of shielding current in bulk HTS to control magnetic field distribution, Journal of Physics: Conference Series, 695, 12005, 2016

2) T. Kii, Potential of Bulk MgB2 Superconductor for Bulk Superconducting Staggered Array Undulator, Proceedings of PASJ2017, pp.347-350 (2017).

2.3　成果の意義

放射光発生用の磁場強度は永久磁石や超伝導線材の材料特性の制限を超えられず右図に示すように限界を迎えていた。当グループの提案するバルク超伝導体により性能限界は三倍程度向上し、アンジュレータのブレークスルーとなりうることが示された。新方式として確立できれば放射光研究に格段の発展をもたらすことができる。



放射光用強磁場発生の現状

2.4　今後の計画

平成 30 年度内に導入予定の新規ソレノイドにより、二ほう化マグネシウム(MgB2)超伝導体を用いた場合の磁場分布制御の高度化に関する研究を進め、端部磁場補正、精密磁場補正の技術を 2020 年頃までに確立させる。その後、この基盤技術を活用し、実際の放射光施設で利用可能なプロトタイプアンジュレータの設計・試作を進め、放射光施設での光発生を目指す。

2.5　課題の自己評価

新型アンジュレータに関する磁場補正法と数値計算法の研究が進み、放射光施設への実機導入に必要不可欠な性能を明らかにしつつある。海外機関から類似装置の設計案などが提案され始めたが、成果の後追いの域にとどまり当グループが世界をリードしている。

研究課題（3）：レーザー逆コンプトン散乱ガンマ線による光核共鳴散乱（LCS-NRF）を用いた同位体断層イメージ（CT）の開発

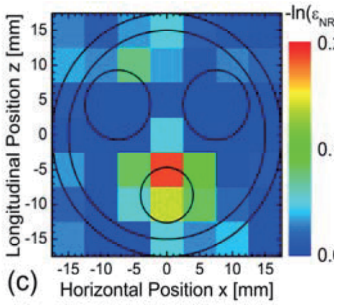
（大垣英明、紀井俊輝、全柄俊）

3.1 背景

原子力分野では、核安全保障や使用済み核燃料の最終処分のため、核燃料集合体等内部の核物質分布情報が必要とされている。現在、このために重い元素と別の重い元素、更には同位体までも非破壊で識別できる断層イメージング(CT)技術が求められている。

3.2 成果の概要

非破壊で任意の核種の分布を計測するため、レーザーコンプトン散乱(LCS)γ 線を用いた核共鳴蛍光散乱(NRF)による CT 技術を提案し(NRF-CT)、世界に先駆けて研究を行ってきた。原理実証のために、UVSOR 放射光施設に 2μm のファイバーレーザーを導入して、約 5.5MeV の LCSγ 線の生成を行った。次に、この LCSγ 線を用いて、鉄の容器に内蔵した鉛の CT 画像の取得に成功し（右図）、本手法の原理実証を行った。



同位体断層イメージの測定例

1) H. Ohgaki et al., “Nondestructive Inspection System for Special Nuclear Material Using Inertial Electrostatic Confinement Fusion Neutrons and Laser Compton Scattering Gamma-rays”, IEEE Transactions on Nuclear Science, Volume: 64, No.7, July (2017), 1635-1640.

2) H. Zen et al., “Generation of High Energy Gamma-ray by Laser Compton Scattering of 1.94-μm Fiber Laser in UVSOR-III Electron Storage Ring”, Energy Procedia 89 (2016), 335 – 345.

3.3 成果の意義

本手法に関しては、これまでシミュレーション研究がなされたのみで、実証実験を行ったのは我々のグループが世界でも初めてである。本研究成果により、現在ルーマニアに建設中の世界最強強度の γ 線研究施設 ELI-NP において、本研究課題が産業利用として採択されており、将来的には核廃棄物に対して検証実験を行う計画になっている。

3.4 今後の計画

上記 ELI-NP において実験が可能になる 2020 年以降、本格的な実験を ELI-NP にて行う予定である。それまでの間、ビームラインの増強と、実際に同位体を用いた実証実験を UVSOR にて実施する。本実証実験には、これまでの研究チームに加え、国際共同研究として ELI-NP からの研究者も参加する予定である。

3.5 課題の自己評価

本研究は実験研究としては世界唯一であり、実験手法やシミュレーション手法の確立を行ってきている。その成果と重要性は海外では高く評価されおり、その結果 ELI-NP での当初実験の一つとして、採用されている。

エネルギー生成研究部門

A-1 量子放射エネルギー研究分野（A-1-2）

1. **構成員**：特任教授：三浦孝一、教授：大垣英明、准教授：紀井俊輝、助教：全柄俊

2. **分野題目**：バイオマス等の有効利用技術の開発

3. **研究概要**

地球温暖化の抑制とエネルギー源確保の観点から，低品位炭やバイオマスを効率的に利用できる技術の開発が世界中で望まれており、本研究所が取り組むべき重要な課題の一つと言える。また先端赤外・中赤外分光や、国際共同研究による再生可能エネルギーの実装研究を行っている本分野において、本研究課題は技術開発と実装の両面から取り組む一つの事例である。

4. **研究目標**

タイ国産の低品位炭やバイオマスを高効率で利用する方法を、国際共同研究にて開発する。手法としては、新しい技術として提案している溶剤改質法を用い、バイオ燃料や炭素材料の生成を行う。

5. **研究手法**

本研究課題はタイ国環境・エネルギー合同大学院（JGSEE）との国際共同研究（SATREPS）のもとで、宇治キャンパスおよびJGSEEバンケンティエンキャンパスに共同研究ラボを設置して、相互に研究者が行き来して研究を進めている。更にタイ国石油公社（PTT）内には試験プラントを新たに設置し、商用化のための試験研究を行っている。また、国内（秋田大学、電力中央研究所、神戸製鋼所）とも産学連携を進めて研究を行ってきている。

6. **学術領域**：工業化学、エネルギー学

7. **関連学会**：工業化学学会、石炭化学学会

8. **研究課題**

(1) 低品位炭、バイオマス等の有効利用技術の開発

9. **分野の自己評価**

本研究課題は、再生可能エネルギー（バイオマスエネルギー）の技術開発とその実装研究の両面を、国際産学連携の形式で取り組んでいるものであり、１．日タイ共同研究ラボの設置（基礎研究）、２．タイ国PTTに実証プラントを設置（実用化研究）、３．技術のASEAN域内への技術移転展開（実装展開）といったユニークな特徴を有する。

研究課題（1）：低品位炭、バイオマス等の有効利用技術の開発

（三浦孝一、大垣英明、紀井俊輝、全柄俊）

1.1 背景

地球温暖化の抑制とエネルギー源確保の観点から、低品位炭やバイオマスを効率的に利用できる技術の開発が世界中で望まれている。このような技術の開発は、本研究所が取り組むべき重要な課題の一つである。我々は、タイ国との国際共同研究を通じて本課題に取り組んでいる。

1.2 成果の概要

低品位炭やバイオマスを脱水・交換品質化できる溶剤改質法という新しい技術を開発した。これを種々の低品位炭やバイオマス廃棄物に適用し、高品位の固体燃料や灰分や水をまったく含まないクリーンな Soluble と呼ぶ改質物の製造に成功した。Soluble は高付加価値をもつ炭素材料や液体燃料の原料として有望である。

1) Trairat Muangthong-on, Janewit Wannapeera, Hideaki Ohgaki, Kouichi Miura*, TG-DSC Study To Measure Heat of Desorption of Water during theThermal Drying of Coal and To Examine the Role of Adsorption of Water Vapor for Examining Spontaneous Heating of Coal over 100 °C, *Energy Fuels* 2017, vol. 31, pp. 10691-10698.S
2) Kouichi Miura *, Hideaki Ohgaki, Formulation of the Heat Generation Rate of Low-temperature Oxidation of Coal by Measuring Heat Flow and Weight Change at Constant Temperatures Using Thermogravimetry-Differential Scanning Calorimetry, Energy Fuels 2017, vol. 31, pp. 11669-11680.
3) Trairat Muangthong-on, Janewit Wannapeera Hideaki Ohgaki, Kouichi Miura *, Examination of Interactions of Solvent-Treated Coal with Oxygen and Water Vapor at Over 100 °C by means of TG-DSC for Examining Propensity to Spontaneous Heating of the Solvent-Treated Coal, *Energy Fuels* 2017, vol. 31, pp. 11723-11730.

1.3 成果の意義

タイ国が抱えるエネルギー不足と気候変動への影響という問題の解決に直接的にも大きく貢献できる。それとともに、開発した技術は普遍性を有するので、タイ国のみにとどまらず、他の ASEAN 諸国への普及することによって、地球規模のエネルギーと環境の問題の解決にも貢献できると考えている。

1.4 今後の計画

タイ国との共同研究は平成 30 年度で終了するが、その成果を大垣がエネルギー環境分野の代表を務める JST の SICORP（JASTIP プログラム）等を通じて広く ASEAN 諸国に展開する計画である。

1.5 課題の自己評価

本研究所にとって重要な課題に取り組み、上記のような成果を挙げると同時に、タイ国の当該分野の研究環境の整備、タイ研究者やタイ留学生の指導等を通じて、両国の緊密な協力関係を構築した。これらは当分野が国際的に誇れる成果である。

エネルギー生成研究部門

A-1　量子放射エネルギー研究分野（A-1-3）

1. **構成員**：特定講師：Hooman Farzaneh（～H30.3）、教授：大垣英明

2. **分野題目**：再生可能エネルギーの導入に関する文理融合的国際共同研究

3. **研究概要**

本研究課題は、文理融合的なアプローチにより、再生可能エネルギーを現実社会に導入するために必要とされるトップダウン的な政策レベルの研究と、ボトムアップ的な実装レベルの研究を、アジア地区を対象に行う。所理念である「エネルギー問題の解決を目指した先導的研究」により国連の持続可能開発目標（SDGs）の目標（Goal）7「Energy for All」に主に寄与する。

4. **研究目標**

1) アジア大都市におけるクリーンエネルギー政策に関する研究
2) アセアン地区の非電化地区に対する再生可能エネルギー実装に関する研究

5. **研究手法**

アジア地区の共同研究者との文理融合の国際共同研究により、現地データを収集して解析を行い、政策提言を目標に進める。独自のモデル化や、データ収集法による文理融合のメリットを生かした数的政策評価法を開発し、研究を進めていく。

6. **学術領域**：エネルギー学

7. **関連学会**：研究・イノベーション学会

8. **研究課題**

(1) アジアのメガシティにおけるクリーンエネルギー政策の多角的便益に関する研究
(2) アセアン地区の非電化地区に対する再生可能エネルギー導入による住民生活への影響に関する研究

9. **分野の自己評価**

本研究課題は、研究所の学際研究領域を文理融合分野にまで拡大するものであり、本研究所の多くのエネルギー基盤研究に対し、社会実装に関する視点を与えるものといえる。また、国際共同研究をベースにしており、研究所の国際化推進に貢献するとともに、国際社会に対しても寄与するものである。

10. **備考・留意事項**

国連の掲げるSDGsに対して、持続可能開発目標達成のための科学技術（S&T for SDGs）が国内・国際的に議論されているが､本研究課題はSDGsのエネルギーに関する目標のGoal 7のみならず、その他の目標にも貢献可能な研究である。

研究課題（1）：Study on Multiple Benefits of Clean Energy Policies in Asian Mega-cities
（アジアのメガシティにおけるクリーンエネルギー政策の多角的便益に関する研究）
（Hooman Farzaneh、大垣英明）

1.1　背景

This research aims to develop and demonstrate a new strategic planning mechanism for achieving multiple benefits of Low Emission Development Strategies (LEDS) in Asian Megacities, together with a robust analytical framework that can be used to assess those benefits during the development and implementation process.

1.2　成果の概要

A modeling framework was developed in order to quantify the effect of LEDS on four main areas of energy systems, environment, public health and local economy at the city level. The model was applied to two mature mega-cities in Asia, Tokyo, and Seoul, as well as on two rapidly growing mega-cities, Shanghai and Delhi. The model was used to quantify the implications of the proposed LEDS and to estimate the potential impacts on both sides of demand and supply. The optimal (least cost) plausible portfolio of LEDS was found in each selected city and the multiple benefits (Energy, Environment, public health and economic development) of the optimal portfolio was estimated. Finally, the policy objectives of the optimal plausible portfolio were prioritized across the drivers/barriers in each city and a roadmap (strategic plan) of LEDS was developed (up to 2050).

1) Hooman Farzaneh, “Development of a Bottom-up Technology Assessment Model for Assessing the Low Carbon Energy Scenarios in the Urban System”, Energy Procedia, 107, pp.321-326 (2017).
2) Hooman Farzaneh, “Multiple benefits assessment of the clean energy development in Asian Cities”, Energy Procedia, 136, pp.8-13 (2017).
3) Nikolaos Iliopoulos, Hooman Farzaneh, Hideaki Ohgaki, “Tokyo’s Low-Emission Development Strategies Underlying the Promotion of Energy Efficiency in Public and Private Buildings”, Devising a Clean Energy Strategy for Asian Cities, Springer, ISBN 978-981-13-0782-9, 205-222 (2018). doi.org/10.1007/978-981-13-0782-9_10

1.3　成果の意義

- Four international expert workshops on clean energy development in Asian Cites (From 2016-2018)
- Several stakeholders meetings with the local experts at each city to present outcomes and get feedback on strategic plan
- Two international conference
- Three international journal papers
- Four chapter book
- One book "Devising a clean energy strategy for Asian cities" which is recently published by Springer Nature

1.4　今後の計画

We have revealed that the twin challenges of global climate change and energy insecurity can be solved with rapid development and diffusion of Low Carbon Technologies (LCTs), both for energy supply and energy efficiency. So, the next step of this research would focus on the establishment of Energy Technological Innovation Systems (ETIS) for enhanced diffusion of Low Carbon Technologies (LCT) in developing countries.

1.5　課題の自己評価

The interdisciplinary research is valuable not only for its benefits the research but also for keeping the door open to diverse paths in the IAE through introducing a team-based approach that many researchers and students at Kyoto university eventually take.

研究課題（2）：アセアン地区の非電化地区に対する再生可能エネルギー導入による住民生活への影響に関する研究

（大垣英明、Hooman Farzaneh）

2.1　背景

現在、世界の 10 億人以上の人々は近代的な電力へのアクセスができていない。このために、これまで多くの再生可能エネルギーによる電力導入プロジェクトが行われてきたが、数年の運用で放棄されるプロジェクトが多々ある。これにはハードウェア的問題と運用等のソフトウェア的問題が指摘されているが、これらを統合的に評価して、再生可能エネルギーによる持続可能な電力導入プログラムの提示が求められている。

2.2　成果の概要

これまで、Sarawak 州（マレーシア）の非電化四集落に対してインタビュー調査を平成 28 年度から平成 29 年度に実施した。そのうちのある集落では、平成 29 年度に戸別 PV システムが導入され、別の集落では地方電力網の拡張が行われた。そこで平成 30 年度ではこの二集落に対して再度インタビュー調査を行った。現在、これらの調査結果は解析中である。更に電化率がアセアンで最低のミャンマーやカンボジアでも平成 29 年度より、また、タイ、インドネシアの非電化地区に対しても調査研究を実施している。

1) Hideaki Ohgaki, Hooman Farzaneh, Nasrudin Abd Rahim, Hang Seng Che, Mohd Amran Mohd Radzi, Wallace ShungHui Wong, Lai Chean Hung, "Study on Quality of Life Change for Rural Community through Rural Electrification by Renewable Energy: Preliminary Result", ASEAN Journal of Management & Innovation, Volume 4 Number 2、pp.1-8 (2017).
2) Pimnapat Bhumkittipich and Hideaki Ohgaki, “Development Strategy for Sustainable Solar Home System in the Akha Upland Community of Thailand”, Energies, 11(6), 1509 (2018).

2.3　成果の意義

本研究課題は最終的に、再生可能エネルギーによる持続可能な電力導入プログラムをハードとソフト両面から提示することを目標にしており、実社会に大きく貢献するものである。一方、ハード面での学術的な共同研究も進めており、ハイブリッドミニグリッドシステムを提案中である。また、文理融合的な国際共同研究は本研究所の国際化、国際貢献に寄与するものである。

2.4　今後の計画

住民の電化の影響は、経済面に関してもある程度時間が必要であり、教育面での影響は更に長期的な観察が必要となる。このため、小規模でも継続的な予算獲得を行い、調査研究を進める予定である。一方のハード開発に関してはある程度の予算が必要となるため、国際共同研究のための外部資金の獲得を目指す。

2.5　分野の自己評価

本研究は実社会に直接貢献するものであり、また、京都大学の特徴の一つと言われる、フィールド型の分離融合研究であり、本研究所にとって、新しい研究アプローチを示すものである。システム解析や数値評価法等、学術的な価値も高く評価されており、その結果、Farzaneh 講師は平成 30 年度より九州大学で准教授のポストを得ている。

エネルギー生成研究部門

A-2　原子エネルギー研究分野

1. **構成員**：教授：小西哲之、准教授：笠田竜太（～H29.9）、講師：八木重郎（H30.6～）、
   助教：竹内右人（～H28.9）、助教：向井啓祐（H29.5～）

2. **分野題目**：核融合等革新的エネルギーシステムの開発と社会環境経済適合性評価の研究

3. **研究概要**

人類の持続可能な発展を可能とする物質エネルギー循環システムの構築を目指して革新的エネルギーの生成変換利用系の概念を構築し、斬新な発想に基づく先鋭的な機器とプロセスを実験室規模で実証する一方、超長期世界レベルでのシナリオをモデル分析で評価し、開発戦略として提示する。

4. **研究目標**

1) バイオマス核融合ハイブリッドシステムの開発と環境社会適合性評価研究
2) 小型核融合装置の工学産業医療応用システムの開発研究
3) 先進的核融合炉内機器の開発研究

5. **研究手法**：核融合工学機器要素の開発と実験、エネルギーシステムモデル評価･シナリオ検討、
   核融合炉システム設計

6. **学術領域**：核融合工学、原子力工学、放射線利用、社会環境経済

7. **関連学会**：日本原子力学会、プラズマ・核融合学会

8. **研究課題**

(1) 先進的核融合炉工学機器の開発研究
(2) 耐照射性・耐環境性に優れた核融合炉材料の開発とその評価に関する研究

9. **分野の自己評価**

人類の持続可能な発展の観点で、バイオマス核融合ハイブリッド概念はエネルギーと環境の関係を根本的に変える大きなインパクトを持つ。中性子ビーム分析、医療応用、燃料不要起動シナリオ、先進ブランケット熱交換、ダイバータ熱輸送の開発は独創性が高い。

10. **備考・留意事項**

革新的バイオマス燃料化は第５期科学技術基本計画、エネルギー基本計画にも明示されており、本分野の提示する概念は世界でも唯一本課題に具体的対応を与えるもので、むしろ先取りしているといえ、大学からのエネルギー科学の発信としてふさわしい。核融合炉工学では、独創性で世界の原型炉開発にインパクトを与える研究成果を出している。

研究課題（1）: 先進的核融合炉工学機器の開発研究（小西哲之、笠田竜太、八木重郎、向井啓祐）

1.1　背景

核融合エネルギー開発に不可欠なブランケットでは、増殖燃料と発生エネルギーの取り出しプロセスとして具体的に利用可能な方法が開発されていない。本研究は熱とトリチウムを連続、かつ環境汚染を極小にして取り出す方法を提供する。「エネルギーの生成変換利用の高度化」のところの理念に対応した革新的装置概念を開発する。

1.2　成果の概要

先進核融合ブランケットとして液体 LiPb 金属方式を用い、真空中に微細液滴として滴下しながら熱と増殖トリチウムを回収する画期的な装置 VST(vacuum Sieve Tray)を開発した。図 1（左）は本研究によるブランケットからの熱とトリチウムの同時取り出しシステムの概念である。
真空中の液滴形成の基礎流体方程式からノズル形状を設計し、図 1 右側に示すように実験によって実際に液滴を形成し、その液滴径分布が理論に従うことを示すと同時に水素同位体回収性能が要求値を満たすことを実証した。

1.3　成果の意義

国際熱核融合実験炉のテストブランケットモジュール（ITER/TMB）をはじめ、ブランケットからのトリチウムと熱の回収は世界的にどこも現実的な設計を持たず、実証もしていない。この概念を初めて示すと同時に、学術的にも独創的で高度であると同時に現実的に製造でき、特にゼロエミッション化を可能とする成果であり、欧州も主案のひとつとして採用を決定し、共同研究を提案した。

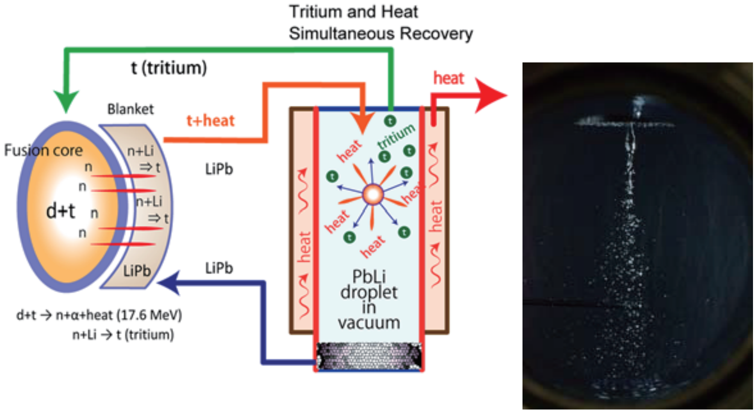


図 1 ブランケットからの熱とトリチウム取り出しの概念（左）と液滴生成実証試験（右）

1.4　今後の計画

所内外との共同研究により ITER や核融合原型炉に向けた開発につなげ、具体的な設計を提供する。また、独創的技術として特許出願して産業界からも着目されており、他分野への応用と実用化を目指す。

1.5　課題の自己評価

世界的に大型プロジェクトで推進される ITER や核融合原型炉の開発において、大学が独創的な概念と小規模実験で有力案を実証する例は少なく画期的な成果と言える。また、核融合の課題である冷媒に伴う程度売トリチウム放出を大幅に低減するゼロエミッション概念の提示でもある。

1) F. Okino, L. Frances, D. Demange, R. Kasada, S. Konishi, ”Tritium Recovery Efficiency from an Array of PbLi Droplets in Vacuum”, *Fus.Sci.Technol.*, **71(4),** 575(2017).

研究課題（2）：耐照射性・耐環境性に優れた核融合炉材料の開発とその評価に関する研究
（小西哲之、笠田竜太、八木重郎、向井啓祐）

2.1　背景

核融合エネルギーの実用化のためには、耐照射性・耐環境性に優れた材料が必要であり、核融合中性子照射効果を予測するために、イオン照射法を用いた評価・予測技術の高度化を進めることが期待されている。本研究では、特に核融合炉のダイバータやブランケットに用いられる材料の開発と、インデンテーション法による照射硬化評価技術の高度化を進めた。

2.2　成果の概要

核融合炉のダイバータ用ヒートシンク材料として用いられる銅合金の延性と耐照射性の改善を目指して、極低温圧延法による集合組織制御の適用性と、得られた合金の中性子照射影響について調べた。極低温圧延を施したCuCrZr合金では、同じく極低温圧延した純銅とは異なる集合組織が得られたが、延性を損なうことなく強度を上昇させることに成功した（図2）。また、その効果は中性子照射によっても保持されることを明らかにした。
イオン照射したオーステナイト鋼単結晶の照射硬化のひずみ速度依存性をナノインデンテーション法によってはじめて明らかにした。この結果、ディスラプションなどによって高ひずみ速度の負荷が加わることが懸念される核融合炉構造材料の強度特性のひずみ速度依存性評価がイオン照射法においても可能であることが示された。

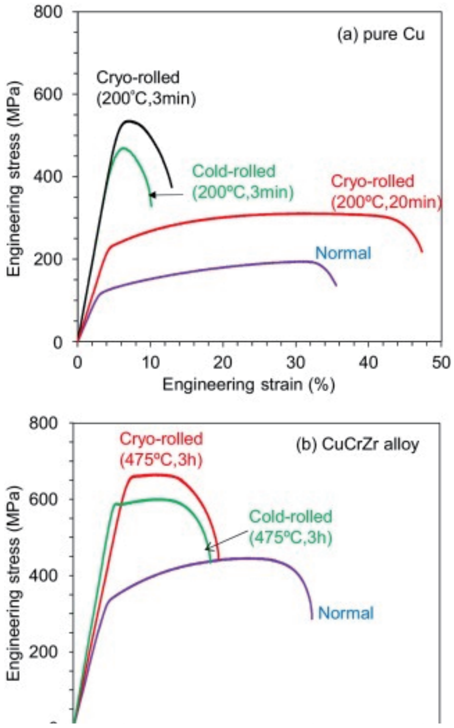


図 2　室温引張試験による(a)純銅および(b)CuCrZr 合金の応力ひずみ曲線

1) R, Ihira, H. Gwon, R. Kasada, S. Konishi, “Improvement of tensile properties of pure Cu and CuCrZr alloy by cryo-rolling process”, *Fus. Eng. and Des.* **109-111** (2016) 485-488.
2) R. Kasada., S. Konishi, D. Hamaguchi, M., Ando, H. Tanigawa, “Evaluation of strain-rate sensitivity of ion-irradiated austenitic steel using strain-rate jump nanoindentation tests”, *Fus. Eng. Des.* **109-111** (2016)1507-1510.

2.3　成果の意義

CuCrZr 合金と純銅の圧延集合組織の形成挙動の温度依存性の違いを明らかにしたことは材料組織制御の観点においても優れた成果である。また、イオン照射材における数 μm 深さ程度の照射硬化領域について、ひずみ速度依存性を評価可能とした成果は、DuET 等を活用したイオン照射法の適用範囲を拡大する成果である。

2.4　今後の計画

これらの成果をもとに、耐照射性・耐環境性に優れた新たな銅合金開発を展開する予定である。また、イオン照射法の高度化のために、ナノインデンテーション法等の超微小試験技術の高精度化・高度化を踏まえて、イオン照射場-中性子照射場相関論の構築を進めていく。

2.5　課題の自己評価

これらの研究成果は、科学研究費助成事業採択（基盤 A 分担等）や担当教員の人事異動に繋がっており、核融合炉材料開発における重要な研究への展開が期待されていると考えられる。

エネルギー生成研究部門

A-3　粒子エネルギー研究分野

1. **構成員**：教授：長﨑百伸、准教授：増田開、助教：大島慎介

2. **分野題目**：高パワー電磁波と荷電粒子ビームの高度制御

3. 研究概要

電磁波と荷電粒子の線形相互作用の高度利用により、核融合プラズマの生成と加熱、マイクロ波加熱・電流駆動技術の開発、プラズマ揺動現象の物理機構の解明、超小型核融合装置を用いたエネルギー粒子の発生と利用、高輝度電子ビームの発生と制御などの研究を行い、先進エネルギー生成を実験・理論の両側面から推進する。

4. 研究目標

1) 核融合プラズマの生成・加熱・電流駆動・計測
2) 高温プラズマ中の多階層揺動の挙動の解明と揺動計測・解析手法の開発
3) 小型核融合中性子源を用いた先端計測技術の開発
4) 高輝度電子ビームの生成と量子放射光源への応用

5. **研究手法**：プラズマ実験、高電圧放電、シミュレーション、マイクロ波利用、放射線計測

6. **学術領域**：核融合学、プラズマ科学、加速器科学、中性子科学

7. **関連学会**：物理学会（領域 2)、原子力学会、プラズマ・核融合学会、電気学会、
日本電磁波エネルギー応用学会、加速器学会、日本中性子科学学会

8. 研究課題

(1) マイクロ波領域電磁波・静電波を用いた核融合プラズマ加熱・電流駆動・計測
(2) MHD 現象が乱流、および電場構造へ与える非線形的影響
(3) 慣性静電閉じ込め核融合中性子源の開発

9. 分野の自己評価

電磁波と荷電粒子の線形相互作用の高度利用に向け、国内外の共同研究を展開、学外からの支援事業、協力事業などの支援を得るとともに、国際会議の招待講演やパネリストとしての招待を受け、また、国際ワークショップを主催するなど活発な活動を行っている。

10. 備考・留意事項

マスタープラン「高性能核融合プラズマの定常実証研究」の連携機関として参画している。第５期科学技術基本計画では「さらに、将来に向けた重要な技術である核融合等の革新的技術、核燃料サイクル技術の確立に向けた研究開発にも取り組む。」とされており、また、第５次エネルギー基本計画では「核融合エネルギーの実現に向け、（中略）技術の多様性を確保する観点から、ヘリカル方式・レーザー方式や革新的概念の研究を並行して推進する。」とされており、本分野の研究はこれらに合致する。

研究課題（1）：マイクロ波領域電磁波・静電波を用いた核融合プラズマ加熱・電流駆動・計測

（長﨑百伸、増田開、大島慎介）

1.1　背景

核融合プラズマでは、マイクロ波を用いたプラズマの生成・加熱・電流駆動・計測が信頼性の高い手法として利用されている。原型炉・大型装置において、高密度領域での適用、電磁流体力学（MHD）不安定性の抑制手法等の開発など、これまでの適用領域を拡大することが求められている。

1.2　成果の概要

Heliotron J 装置では、70GHz 電子サイクロトロン加熱電流駆動（electron cyclotron heating and current drive, ECH/ECCD）システムがプラズマ生成・加熱・電流駆動手法として開発され、電子内部輸送障壁の形成、ECCD を用いた高エネルギー粒子 MHD 不安定性の抑制など、多くの成果を挙げている。また、高密度領域での新しい電子温度計測手法として静電波の一つである電子バーンスタイン波（EBW）を用いた BXO モード変換計測の開発が進められ、XO モード変換窓の特定（図 1）、電子温度分布計測のためのマルチチャンネル・ラジオメータを用いてオーバーデンスプラズマの電子温度計測が可能となった。

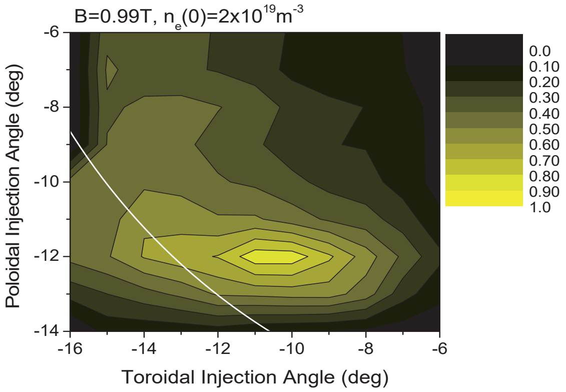


図 1　Heliotron J における 35GHz XO モード変換効率等高線。カットオフを超える密度において、電子サイクロトロン波である O-mode と X-mode の変換効率の高い視線領域がある。

1) S. Yamamoto, et al., Nucl. Fusion 57 (2017) 126065
2) K. Nagasaki, et al., Plasma Fus. Res. 11 (2016) 2402095

1.3　成果の意義

マイクロ波帯域電磁波は、プラズマ生成・加熱・電流駆動だけでなく、輸送解析、MHD 不安定性の抑制、輸送解析等、多岐にわたる目的に利用されており、これまでの研究により局所性・制御性といった優位性を示してきた。一方、静電波の利用は未だ開発が十分に行われておらず、これまでにない高密度領域でのプラズマ加熱・電流駆動、電子温度計測への展開が可能である。強いドップラーシフト共鳴、衝突過程を通した減衰による非共鳴吸収・放射など、他研究分野での電磁波伝搬・吸収に共通する物理過程を見出すことが期待される。

1.4　今後の計画

高パワーマイクロ波を用いた MHD 不安定性制御の高度化を行うとともに、プラズマの応答性から熱・粒子・運動量径方向輸送を解明する。また、静電波を用いた計測、炉心プラズマ領域での電子温度揺動計測など、新たなプラズマ計測手法の開発を行う。

1.5　分野の自己評価

マイクロ波を用いた ECH/ECCD・計測手法の開発は核融合研究分野の重要課題の一つとして位置づけられており、特に、ECH/ECCD システムは、現在建設が進められている ITER 装置、JT-60SA 装置においても重要な加熱手法である。本研究課題は、核融合科学研究所との双方向型共同研究、量子科学技術研究開発機構、米国・コロンビア大学、ドイツ・マックスプランク研究所、スペイン・CIEMAT、等との国内・国際共同研究として展開している。

研究課題（2）：MHD 現象が乱流、および電場構造へ与える非線形的影響
（大島慎介、長﨑百伸、増田開）

2.1　背景

磁場閉じ込めプラズマの周辺部の輸送障壁形成に代表されるように、周辺プラズマの特性はプラズマの閉じ込め性能に重大な影響を与える。近年、MHD 不安定性が乱流やポテンシャル構造に影響する過程を経て、グローバルなプラズマの閉じ込め特性に影響を与えうるという理論的予測、および実験結果が示されつつある。Heliotron J において、プローブによる周辺プラズマ揺動計測を軸として、MHD 不安定性が与える詳細な影響を、高精度の計測と先進的解析手法を駆使し、その物理過程の解明に取り組んでいる。

2.2　成果の概要

高速イオンによって駆動される MHD 不安定性が周辺プラズマに与えている影響を明らかにすると同時に、その物理過程を解明した。周辺プラズマ計測用プローブを用いて、高速イオン励起 MHD 不安定性の発現時の周辺のプラズマの構造、揺動特性、高速イオンの挙動について明らかにした。間欠的に現れ、非線形的挙動を示す MHD 現象は周辺部のポテンシャル構造を変化させており、このとき高速イオンの損失も同時に観測した。イオン損失による電場構造変化の可能性は予想されてきたが、実験によって明確に計測した初めての結果である。また、プラズマコアから周辺の密度揺動を計測可能な Beam Emission Spectroscopy（BES）計測器を用いて、瞬時位相に着目した考案した新しい解析手法を適用することで、バースト時の MHD 不安定性の非線形構造発展（図 2）を解明した。MHD 不安定性の非線形構造発展が、実/速度空間の高速イオンに影響し損失をもたらし、そしてその損失が電場構造に影響を与えている一連の過程を示した。加えて、この MHD 不安定性が乱流、および乱流が生み出す粒子束に影響を与えていることも明らかにした。

1) S. Ohshima, Nucl. Fusion 56 016009 (2016)
2) S. Ohshima, Review of Scientific Instruments 85, 11E814 (2014)

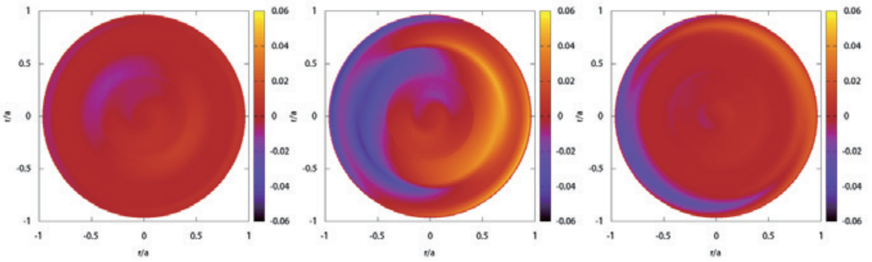


図 2　ビーム放射分光計測によって計測したあるプラズマ断面の密度の揺らぎの非線形構造発展。不安定性が発生するたびに、らせん状構造が形成され、消失していく。

2.3　成果の意義

MHD 不安定性が乱流へ与える影響、電場構造の変化など、従来注目されてこなかった副次的な非線形効果を実験的に示すことに成功した。これまでの MHD 不安定性研究の枠組みを拡張し、上述したような乱流等への非線形的な影響も含めての検討が重要であることを示す結果である

2.4　今後の計画

MHD 揺動と乱流の結合の物理素過程を詳細に解明する必要がある。このためには、波数分解できるような二次元の多点計測器を準備する必要があり、現在検討を進めている。

2.5　課題の自己評価

MHD 不安定性の非線形効果は最近活発に議論されている研究課題である。双方向型共同研究や、米国ウィスコンシン大学マディソン校、スペイン CIEMAT、中国西南物理研究所等のグループとの共同研究とも強く関連している。

研究課題（3）：慣性静電閉じ込め核融合中性子源の開発（増田開、長﨑百伸、大島慎介）

3.1　背景

我々の開発した慣性静電閉じ込め（IEC）方式の核融合中性源は、この装置規模の中性子源としては最高レベルの強度を有し、重点複合領域研究として進めている新規計測技術の開発研究に利用してきたほか、ZE 共同利用・共同研究において放射線科学や創薬研究などの所外研究者の利用にも供している。

3.2　成果の概要

ポータブル化と高強度化による利用範囲拡大を目指し、多段分割高電圧印加方式とチタン陽極を導入することで、従来装置と比べて直径で 30%の小型化と 9 倍の高強度化を達成した。多段分割高電圧印加方式は以前に我々が提案していたもので、今回実際に 3 段電極構造（図 3）を設計・製作することで、単段方式の従来装置と比べて 30%の高電圧化と 30%の小径化を同時に達成し、本手法が放電限界電界強度の向上に有効であることを実証した。また、専ら利用されてきた SUS 製に加えて新たにチタン合金製の陽極（真空容器）を同一形状で製作して実験で比較した。チタン製では、高速中性粒子の注入による陽極での核融合反応によると考えられる中性子発生率の上昇が運転開始から数時間後まで見られ、結果として SUS 製の 4 倍程度の高強度化が得られた。

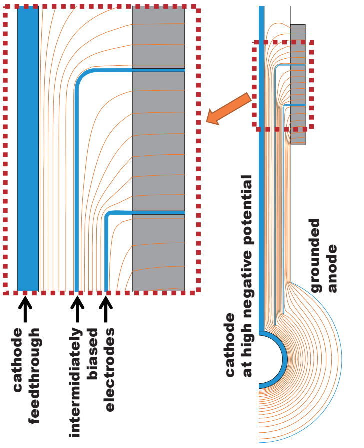


図 3　3 段分割高電圧印加電極構造

1) H. Ohgaki et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** (2017) 1635.
2) K. Masuda et al., *Conf. Laser & Accelerator Neutron Sources & Appl.*, Yokohama, Japan (2017).
3) M. Onishi et al., *Fusion Eng. Design*, **109** (2016) 1709.

3.3　成果の意義

多段分割高電圧印加方式の成果は、経験則として知られていた放電限界電界強度の電極間距離への非線形依存性を利用した提案方式による小型化・高電圧化を実証したものであり、高電圧真空機器に広く利用可能である。
チタン陽極による成果は、中性子源開発における実際的な高強度化手法を提供した一方で、学術的には IEC 方式における中性子発生機構の理解に繋がる成果でもあり、具体的には、IEC 方式の利点の一つとされてきたガス分子をターゲットとした核融合反応が残念ながら支配的ではないことを明らかにした。

3.4　今後の計画

放射線発生装置としての承認条件の上限強度に達したため開発装置の最高性能は未だ評価できていない。更に十倍程度の高出力での運転が可能と見込んでいる。また、IEC 方式によらない新たな核融合中性子発生方式の開発も計画している。

3.5　課題の自己評価

この研究課題は NEDO 戦略的基盤技術高度化支援事業（プロジェクト委託型）を得て推進した。国際会議の招待講演やパネリストとして招待を受けるなど、開発した中性子源の応用研究と合わせて高い評価を受けている。また、日米科学技術協力事業（核融合分野）においてこの研究課題に関する日米ワークショップを毎年主催している。

エネルギー生成研究部門

A-4　プラズマエネルギー研究分野

1. **構成員**：教授:水内亨（～H30.3）、准教授：南貴司、助教：小林進二

2. **分野題目**：核融合エネルギー実現のためのプラズマエネルギー制御学の探究

3. **研究概要**

核融合エネルギーの生成のために「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」に向けて、磁場閉じ込めプラズマに内在する物理を解明しつつ、新たな加熱手法や粒子供給手法によるプラズマ制御法を探究し、高度化された高精度局所計測システムを開発し適用することによって、プラズマ制御学の新たな地平を開拓することを目標とする。

4. **研究目標**

1) 閉じ込め改善のためのプラズマ分布、プラズマ流、プラズマ電流分布制御
2) 磁場分布制御によるプラズマ構造制御と、それによる輸送改善
3) 新粒子供給、加熱シナリオの探究によるプラズマ制御
4) 高ベータプラズマ生成手法の開発による運転領域拡大

5. **研究手法**：新プラズマ粒子供給法、プラズマ加熱手法の探究、高度プラズマ計測技術開発、プラズマ理論シミュレーション

6. **学術領域**：核融合学

7. **関連学会**：プラズマ・核融合学会、物理学会

8. **研究課題**

(1) 水素ヘリカルプラズマの輸送に対する同位体効果の研究
(2) 先進ヘリカル配位プラズマに対する電子内部輸送障壁形成実験と物理機構の解明
(3) 先進ヘリカル配位における径方向電場が輸送に与える役割の解明

9. **分野の自己評価**

（1）先進ヘリカルプラズマのグローバルな粒子輸送に対する同位体効果を明らかにした。(2) 先進ヘリカルプラズマでは、より少ない電子加熱入力パワーで電子内部輸送障壁を形成できることを明らかにした。(3）ポロイダルフロー測定機器を開発することで先進ヘリカルプラズマの輸送改善に径電場分布制御が重要な役割を果たしていることを明らかにした。以上の成果を得ることでプラズマ制御による先進ヘリカルプラズマ装置高性能化の推進に貢献した。

研究課題（1）：水素ヘリカルプラズマの輸送に対する同位体効果の研究

（水内亨、南貴司、小林進二）

1.1　背景

磁場閉じ込め核融合エネルギー生成の燃料として重水素と三重水素を使うことが想定されている。ヘリカル型核融合炉の実現のためには、重水素を用いても軽水素と同様の輸送特性が得られるか同位体効果を実験的に確かめる必要がある。本課題は核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)実験計画においても主要研究課題と位置づけられており、Heliotron J 装置における成果は LHD 実験計画の遂行に貢献できる。

1.2　成果の概要

Heliotron J 装置において、HCN レーザー干渉計を開発して取り付け密度変調法を用いて軽水素プラズマと重水素プラズマの粒子輸送特性の比較実験を行った。図 1(a) (b)は、それぞれ変調周波数に対する水素、重水素プラズマの粒子拡散係数、対流速度を表している。重水素プラズマの粒子輸送拡散係、対流速度は軽水素プラズマと比べて同程度または小さい。また、それぞれの差が変調周波数に依存していることも確かめられた。

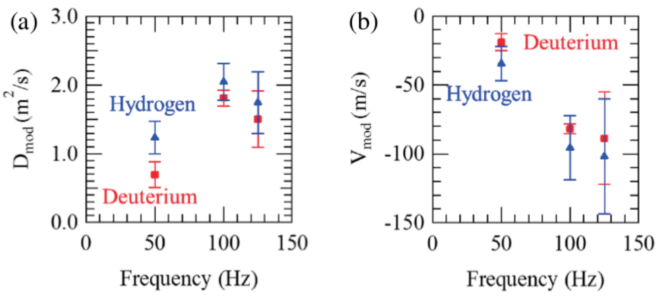


図 1 変調周波数に対する水素（青）重水素（赤）プラズマの（a）粒子拡散係数（b）対流速度の測定結果

1) Y. Ohtani, K. Tanaka, T. Minami, et al., Journal of the Physical Society of Japan 86, 064501 (2017).

2) Y. Ohtani, S. Ohsima, N. Asavathavornvanit, T. Akiyama, T. Minami, et al., Plasma and Fusion Research Volume 10, 1402091 (2015).

1.3　成果の意義

ヘリカルプラズマにおいて重要な課題でありLHD 実験計画においても主要課題である同位体効果をLHD 重水素実験開始に先駆けて確かめることができた。トカマクプラズマの実験結果に比較して、ヘリカルプラズマの同位体効果を確認した実験結果は少なくヘリカル型装置の高性能化に貢献しうる成果である。

1.4　今後の計画

（1）密度測定干渉計の性能の高度化をはかり、さらに高精度な実験を推進する、(2) 磁場配位が粒子輸送同位体効果へ、どのように影響しているか明らかにし粒子輸送に対する磁場配位最適化を行う（3）プラズマの熱輸送に関する同位体効果も同時に明らかにし、ヘリカルプラズマの輸送に対する同位体効果の物理を総合的に明らかにすることである。

1.5　課題の自己評価

未だ解明されていない課題が多いヘリカルプラズマ輸送の同位体効果に対する研究に、実験的な知見を加えることができたことは重要だと考える。本研究は、今後、他のヘリカル型装置やトカマク型装置における実験結果と比較を行うことで、核融合プラズマに対する普遍的な同位体効果に対する知見を得ることができると考えており現在研究を進めている。

研究課題（2）：先進ヘリカル配位プラズマに対する電子内部輸送障壁形成実験と物理機構の解明
（水内亨、南貴司、小林進二）

2.1　背景

磁場閉じ込め核融合エネルギー生成実現のために最も重要な課題はプラズマ閉じ込め性能の改善である。ヘリカルプラズマの電子内部輸送障壁は、電子サイクロトロン波加熱によりプラズマを加熱し電子とイオンの輸送特性の違いを利用してプラズマ中に大きな正電場を生成し閉じ込め改善を行う手法である。

2.2　成果の概要

ヘリカル軸ヘリオトロン磁場を有する唯一の先進ヘリカル配位装置である Heliotron J において、初めて電子内部輸送障壁を形成することに成功した。図 2 は電子サイクロトロン加熱により電子内部輸送障壁を形成したプラズマの電子温度、密度分布を輸送法壁が形成されていないプラズマの分布とともに示している。この電子内部輸送障壁の特性を調べて他装置で生成されたヘリカルプラズマと比較し、Heliotron J においては他装置に比べて、より少ない加熱入力で障壁形成が可能なことを明らかにした。

1) N. Kenmochi, T. Minami, C. Takahashi, S. Mochizuki, K. Nishioka, et al., Plasma Phys. Control. Fusion 59 (2017) 055013.

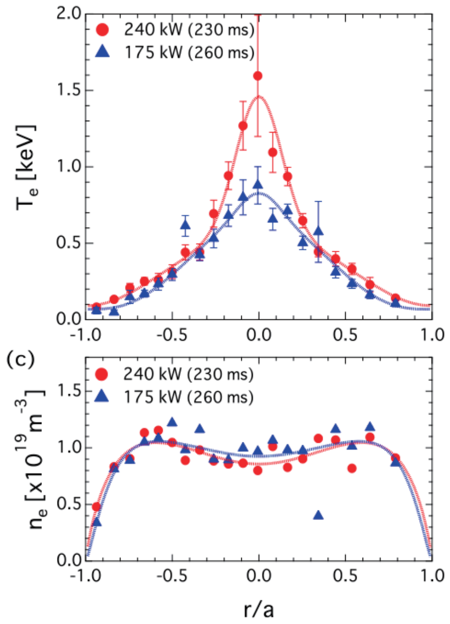


図 2　電子サイクロトロン加熱により電子内部輸送法壁を形成したプラズマの電子温度および密度分布。比較のため内部輸送障壁形成時（赤）とともに非形成時（青）の分布も示した。

2.3　成果の意義

ヘリカル型装置において閉じ込め改善は、最も重要な課題である。特に Heliotron J 装置においては、他のヘリカル型装置より少ない加熱入力で障壁形成に成功したのは重要な成果と考える。トカマク型装置と比べても特に磁場配位に多様性を有するヘリカル型装置においては、内部輸送障壁形成が普遍的な現象であることを明らかにする必要がある。また、ヘリカル型装置の核融合炉実現のために必要な障壁形成のための加熱入力パワースケーリングは、未だ明らかでなく、今回の結果はスケーリング則を得るための重要な知見を与えた。

2.4　今後の計画

（1）多様な磁場配位が形成可能である Heliotron J 装置の特性を生かして、磁場構造が障壁形成にあたえる影響を解明すること（2）測定装置の高度化により、特に障壁形成に伴う電場構造を明らかにすること（3）プラズマの高性能化に対してはイオンに対しても障壁を形成することが重要であり、その手法を解明することである。

2.5　課題の自己評価

装置によって多様な磁場配位を有するヘリカル型装置においては、閉じ込め現象が普遍的な現象であることを明らかにすることが重要で、この結果は重要な知見を与えた。また、より少ないパワー入力で障壁形成が可能なことを発見したことは核融合エネルギー実現に有望な結果であり、その原因、物理機構を解明することにより Heliotron J 装置の性能向上に繋がる成果である。

研究課題（3）：先進ヘリカル配位における径方向電場が輸送に与える役割の解明
（水内亨、南貴司、小林進二）

3.1　背景

本研究では Heliotron J における径方向電場と熱輸送との関連性を実験的に調べ、先進ヘリカル配位最適化研究において、最適化に必要な配位要素を探究することを目的とする。本研究は当研究所の高度プラズマエネルギー源開発にとって重要な課題である。

3.2　成果の概要

プラズマ中のポロイダルフロー速度を測定する機器（荷電交換再結合分光装置）を整備することで、径方向電場を評価することができるようになった。磁場のトロイダル成分を弱くした配位において短パルスガスパフ法(HIGP)を中性粒子ビーム入射加熱プラズマに適用したところ、周辺部の圧力勾配の成長（密度の増加）とともに径電場シアが増加することが明らかになった（図 3)。HIGP 法の適用で周辺部の輸送が改善していることが実験的に観測されており、圧力勾配の成長（輸送の改善)、周辺部中性粒子密度の低下に伴う荷電交換損失・粘性の低下、径電場シアの増加が正のフィードバックとして働いていることが考えられる。

1) X. Lu, S. Kobayashi, et al., Plasma Fusion Res, **13** (2018) 1202077.
2) S. Kobayashi, et al., 26th IAEA FEC, 2016.10.17-22, Kyoto, Japan (2016) EX/P8-17.

3.3　成果の意義

先進ヘリカル配位における高ベータプラズマの生成・制御法に重要な知見を与えるだけでなく、一般的なトーラス装置における周辺部輸送改善の物理の解明に貢献することが期待される。

3.4　今後の計画

径電場と輸送との関係が実験的明らかになったが、新古典輸送解析による理論予測を進め、加えて乱流揺動計測の高度化による乱流輸送との関連性を明らかにすることを計画する。

3.5　課題の自己評価

高温プラズマ中における径電場の輸送に与える役割を明らかにし、高性能プラズマ制御法を構築することで、プラズマエネルギー制御、および先進ヘリカル配位の配位最適化の方向性に関する知見が深化した。

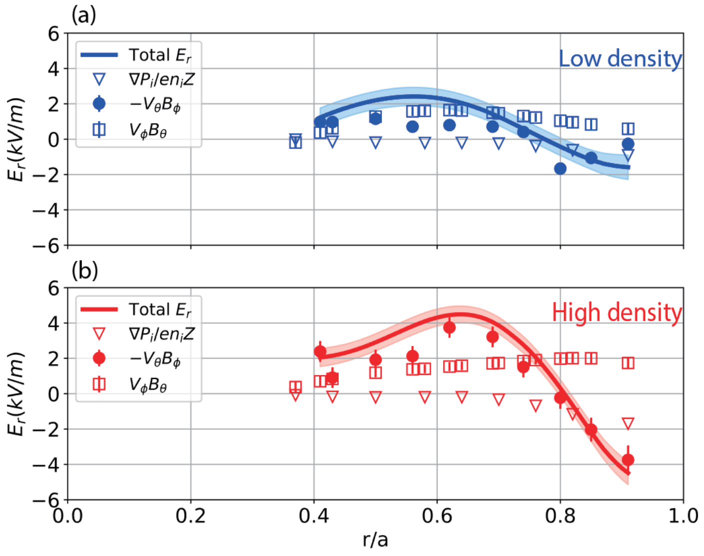


図 3 (a) 低密度、(b) 高密度プラズマにおける周辺部の径方向電場分布。密度の増加（圧力勾配の成長）に伴い周辺部の径電場シアの増加が観測された。

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。原則として年度ごとに担当部門を決め、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。以下に評価期間中での招聘研究者と研究題目等を掲げる。

氏名	受入期間	研究題目	所属
Christine S. Chow	2016.4.15-7.14	修飾塩基を導入した RNA の機能解析	ウェイン州立大学化学科・教授（アメリカ）
Chinnusamy Saravanan	2016.7.1-9.30	新規フラレン誘導体を用いる太陽有機電池研究	ソナ工科大学・先端有機材料センター・助教授（インド）
Joon Hwa Lee	2016.8.9-11.8	NMR 法を用いた機能性核酸の構造－機能相関	Gyeongsang 大学 化学科・教授（大韓民国）
Geir Haarberg	2017.1.1-3.31	溶融塩電気化学を用いたエネルギー材料の創製	ノルウェー科学技術大学・教授（ノルウェー）
Zang Linge	2017.10.1-2018.3.31	先進核融合炉開発に向けたトーラス磁場閉じ込め・輸送研究	西南物理研究所・准教授（中華人民共和国）
Antonio Jose Junqueira Botelho	2017.12.1-2018.2.28	アジア太平洋地域の低炭素政策の多重評価に関する研究	カンディド・メンデス大学・教授（ブラジル）

Chow 教授はプラチナ錯体処理した RNA とペプチド修飾した RNA との相互作用について研究を行い、プラチナ錯体反応速度の利用が RNA と-薬物の相互作用研究の有用なツールであることを実証した。

Sarawanan 助教授は、化学蒸着法によって合成されたグラフェンナノリボンのための新しい前駆体の設計、および合成について研究を行った。

Lee 教授は NMR 分光法により、NaCl 中の caZαPKZ により誘導される B-Z 遷移を研究した。この結果、塩の増加により NaCl caZαPKZ の B-Z 転移活性は著しく損なわれ、B-DNA に対する結合親和性も激減することが分かった。すなわち、caZαPKZ の B-DNA 結合型についての化学シフトの差異は、溶液中に存在する B-DNA 結合状態であり、これは塩濃度によって変化する。よって、B-DNA 結合型の caZαPKZ は、B-Z 遷移の程度を定量化する分子定規として使用することができることを明らかにした。また、この研究成果は

Lee A.R. et al. Biochem. Biophys. Res. Commun.482 (2017).

として、論文発表された。

Haarberg 教授は、太陽電池用シリコンの電気化学的製法について、シリコンと合金化しない液体陰極の使用を提案し、陰極材料としてはガリウムが最適であることを見出した。

Zang 准教授は、Heliotron J においてプラズマ周辺領域に局在化した低周波アルフヴェン固有モード（low-frequency Alfvén eigenmode, LF-AE)について実験、および STELLGAP code シミュレーション計算を行い、AE モードの各物理量の導出を行った。また、LF-AE モードはある条件でサイドバンドが発生することを確認し、低周波帯構造とベータ誘導 AE モードの間の非線形相互作用に起因する AE モードの飽和メカニズムに関する最新の情報をもたらした。

Botelho 教授は、アジアの大都市におけるクリーンエネルギー開発について研究を行い、デリー、クアラルンプール、ソウル、上海、シドニー、東京の 6 つのアジア大都市におけるクルーンエネルギー政策の多重便益についての持続可能性の調査を行った。

これらの招聘研究者や送り出し機関とは、この招聘研究を契機として国際共同研究が発展している。たとえば、Zang 准教授とは帰国後も共同研究を継続しており、Heliotron J で得られた高エネルギー粒子励起 MHD 不安定性、特に、ベータ誘導 AE モードに関する論文を Nuclear Fusion Journal に投稿中である。また、2019 年 10 月から中国・西南物理研究所から学生が留学博士課程学生として Heliotron J 実験に参加予定である。一方、Haarberg 研究室には野平教授が 2017 年 9 月に訪問した。さらに、博士後期課程 1 年の学生が 2017 年 9 月から一ヵ月間、同じく Haarberg 研究室に滞在した。2018 年 1 月から Haarberg 教授がサバティカルにて複合化学過程研究分野（野平研）に六ヵ月間滞在して共同研究を行った。現在、2018 年 3 月より 12 月までの予定で、PD 研究員が日本学術振興会特別研究員として Haarberg 研究室に滞在し、共同研究を進めている。

以上のように、本研究分野はエネルギー理工学研究所にとって国際共同研究の発展に役立ってきていると言えるが、全体としての位置づけはやや曖昧で、研究室個々の活動になっている点は問題として今後検討する必要がある。

2.2. 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、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）からなる。

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。ナノサイエンスに基づく新たなナノ材料創成とその物性の研究、レーザー利用によるナノ材料の創成や光応答の研究、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の研究および高温プラズマ揺動の制御・抑制によるプラズマの高性能化の研究は、材料科学や光学、電磁気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エネルギー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。

エネルギー機能変換研究部門

B-1　複合機能変換過程研究分野（B-1-1）

1. **構成員**：教授：松田一成、准教授：檜木達也、宮内雄平、特定准教授：近藤創介（～H30.3）
   助教：神保光一、特定助教：篠北啓介（H29.4～）

2. **分野題目**：ナノサイエンスに立脚した光・材料科学の開拓とエネルギー応用

3. **研究概要**

我々は、エネルギーの高効率生成・利用において高いポテンシャルを有するナノ材料やナノ複合材料を舞台に、そこで発現する特異な物性や機能を明らかにすることで、ナノサイエンスに立脚した新しい光・材料科学の学理の構築とそのエネルギー応用の研究を進めている。また、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。

4. **研究目標**

1) ナノカーボン物質の光科学と生命科学・エネルギー応用
2) 新しい物理自由度を利活用したフォトニクスの創生
3) 耐環境セラミックスおよびセラミックス複合材料の開発

5. **研究手法**：ナノ材料作製、先端分光、光エネルギーデバイス、耐環境セラミックス

6. **学術領域**：総合理工、数物系科学、工学

7. **関連学会**：物理学会、応用物理学会、フラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会、
セラミックス協会

8. **研究課題**

(1) ナノカーボン物質の光機能と生命科学・エネルギー科学への応用
(2) バレースピン・フォトニクスの創生と応用
(3) 耐環境セラミックス、およびセラミックス複合材料の開発

9. **分野の自己評価**

ナノサイエンスに立脚した光・材料科学の開拓と機能発現の研究を通して、新しい光・材料科学の学理の構築を進めた。さらに、それらの成果を基盤として新しい工学応用の道筋を示し、エネルギー応用においても新しい研究の展開を図ることができた。

10. **備考・留意事項**

我々が目指す「ナノサイエンスに立脚した光・エネルギー科学の開拓とエネルギー応用」は、第５期科学技術基本計画中での柱である「超スマート社会」の実現（Society 5.0）において新たな価値創出のコア技術（素材・ナノテクノロジー、光・量子）とも深く関連している。

研究課題（1）：ナノカーボン物質の光機能と生命科学・エネルギー科学への応用

（松田一成、宮内雄平、篠北啓介）

1.1　背景

カーボンナノチューブに代表されるナノカーボン物質の光機能の開拓は、我々が目指す新しい光科学の展開に向けた鍵となっている。同時に、ナノカーボン物質で発現する特異な光機能を利用することによって、生命科学やエネルギー科学において従来とは異なる新しい光応用を可能とすることが期待される。

1.2　成果の概要

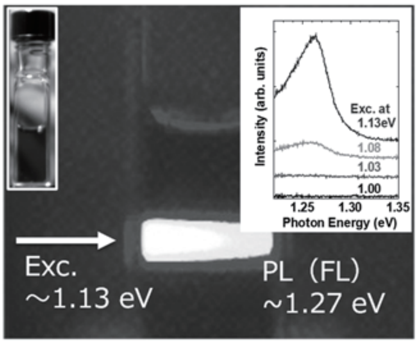


図 カーボンナノチューブでのアップコンバージョン発光の様子とスペクトル

これまでにカーボンナノチューブにおいて、アップコンバージョン発光と呼ばれる特異な光学現象が生じることを見出し、それが効率よく起こるメカニズムを明らかにしている（*Nat. Commun.* **6**, (2015) 8920）。我々は、このアップコンバージョン発光を生体深部バイオイメージングへ応用した。アップコンバージョン発光では、近赤外領域の低エネルギー（長波長）の光を吸収し高エネルギー（短波長）の光を発光として生じ、さらに、この波長は「生体の窓」と呼ばれ光が生体組織に遮られにくい領域にあたる。実際にカーボンナノチューブを導入したマウスにおいて、アップコンバージョン発光を利用した生体イメージングを行った。その結果、通常のストークス発光での生体イメージングにおいて大きな問題となる自家蛍光を避け、生体深部のクリアなイメージングが可能であることが明らかとなった（論文準備中）。また、カーボンナノチューブをホール輸送層として用いた、新しいペロブスカイト太陽電池の研究などを進めた（発表論文 2）。

1) Y. Maeda, K. Matsuda, Y. Miyauchi *et al.*, *Nanoscale* **8**, (2016) 16916.
2) F. Wang, A. Wakamiya, K. Matsuda *et al.*, *Nanoscale* **8**, (2016) 11882.

1.3　成果の意義

カーボンナノチューブで発現する特異な光機能性を、バイオイメージングなどの生命科学分野への研究に応用した。特に、カーボンナノチューブのアップコンバージョン発光が、従来の方法では技術的に困難な、生体深部のイメージングに非常に有用であることを示した点は高い学術的な意義をもつ。

1.4　今後の計画

今後、アップコンバージョン発光に代表されるカーボンナノチューブの特異な光機能性を、生体イメージングに留まらず生体内部の非接触・高感度な温度センシングなど、広く生命科学のツールへと発展させることを計画している。

1.5　課題の自己評価

「ナノカーボン物質における光機能と生命科学・エネルギー科学への応用」を通して、ナノカーボン物質が有する高いポテンシャルを明らかにし、我々が目標とする新しい光科学の学理の構築を大きく進めることができた。さらに、それらを基盤としてエネルギー応用についても進展があった。

研究課題（2）: **バレースピン・フォトニクスの創生と応用**（松田一成、宮内雄平、篠北啓介）

2.1　背景

近年、グラフェンの研究が契機となって新たな原子一層（数層）の物質系が出現し、物質科学・光科学の分野で大きなパラダイムシフトを迎えつつある。単層遷移金属ダイカルコゲナイドに代表される半導体原子層物質では、極限的な量子閉じ込めや波数空間での谷（バレー）とスピン自由度の結合など新しい物性が発現する。特に、バレーとスピン自由度が結合したバレースピンを活用することで、従来の電子の電荷の自由度のみを利用した電子（エレクトロニクス）・光（フォトニクス）応用とは大きく異なる新たな研究分野・工学応用へと発展しつつある。

2.2　成果の概要

バレースピンを利活用した新しいフォトニクスの実現に向け、その第一歩として原子層物質の光学的性質を詳細に調べた。複数の単層遷移金属ダイカルコゲナイドからなる原子層人工ヘテロ構造において、層間で高効率なエネルギー移動が生じる事を明らかにした（発表論文 1)。また、工学応用上重要な Type I と呼ばれるバンドアラインメントを有する原子層人工ヘテロ構造を実現することに成功した（発表論文 2)。さらに、バレースピン・フォトニクスの実現に向け鍵となるバレースピン緩和の物理メカニズムを明らかにし、バレースピン制御に向け重要な指針を得た（発表論文 3)。

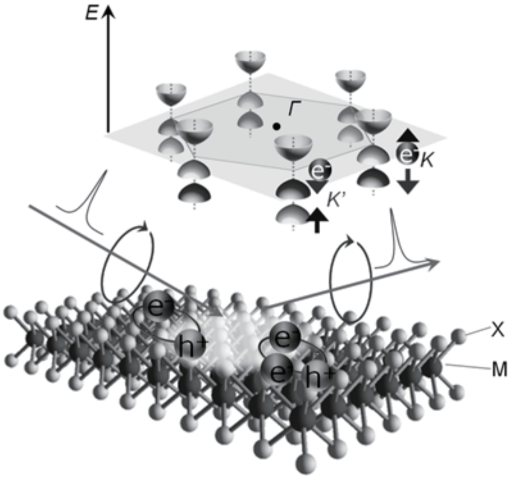


図 原子層物質でのバレースピン自由度。バレースピンに関与する励起とトリオンの模式図

1) D. Kozawa, K. Matsuda, G. Eda, *et al.*, Nano Lett. **16**, (2016) 4087.
2) T. Yamaoka, H-E. Lim, K. Matsuda, *et al.*, Adv. Func. Mater. (2018) 1801021.
3) Y. Miyauchi, S. Konabe, K. Matsuda, *et al.*, Nat. Commun. **9**, (2018) 2598.

2.3　成果の意義

我々が新たに提案しているバレースピン・フォトニクスの実現に向け、バレースピン緩和の物理メカニズムを明らかにできた点は、その基礎となるバレースピンの発生・検出・制御に向けた大きなマイルストーンであるといえる。

2.4　今後の計画

バレースピンのコヒレント制御やバレースピン流を利用した熱散逸が少ない低エネルギー損失の量子光デバイスの検討を進めている。それらを通して、新しい物質科学・光科学を礎としたバレースピン・フォトニクスの実現を目指す。

2.5　課題の自己評価

我々が推し進める原子層物質における光科学の開拓を通して、新しい物理自由度であるバレースピンを利活用した光応用（フォトニクス）へと研究の展開ができた。

研究課題 (3) : **耐環境セラミックス、およびセラミックス複合材料の開発**（檜木達也、近藤創介）

3.1 背景

安全で高効率のエネルギーを達成するには、水蒸気等の過酷環境での耐熱性を備えた材料が鍵となる。炭化珪素繊維強化セラミックス複合材料は、優れた耐熱性等から航空・宇宙や原子力等の過酷環境下での利用が検討され、航空機エンジンへの実用化が進められている。

3.2 成果の概要

従来の材料は、繊維、母材、繊維母材間の界面層で形成されていたが、界面層に用いる C や BN の酸化特性により、BN 界面層を用いても耐酸化被覆無しでは、1100℃程度が上限である。本研究では、耐熱性と生産性を大幅に向上させた、界面層がなく母材に C や BN を分散させた新たな複合材料開発と、酸化・拡散反応を利用した新たな耐水蒸気表面改質技術により 1500℃を超える耐酸化特性を有する材料開発を行った。炭化珪素は軽水炉における事故耐性燃料として期待されているが、イオン照射を用いて、照射欠陥による高温水腐食促進効果を明らかにし、照射欠陥による表面電位の変化との関係から腐食メカニズムの解明を進めている。また、粒界制御による耐腐食特性の改善も行った。

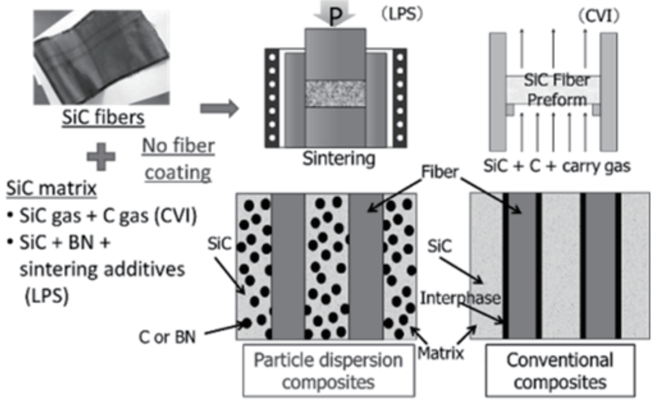


図 炭化珪素複合体での分散プロセスの開発

1) Y. Maeda, K. Fukami, S. Kondo, A. Kitada, K. Murase, T. Hinoki, Electrochem. Commun, 91 (2018) 15.
2) S. Kondo, S. Mouri, Y. Hyodo, T. Hinoki, F. Kano, Cor. Sci. 112, (2016) 402.

3.3 成果の意義

破壊力学に基づく新たな概念の炭化珪素複合材料の開発、酸化・拡散反応を利用した新たな表面改質技術の開発、腐食メカニズムの理解に基づく耐食技術の開発を行った。これらは、基礎研究に基づく基盤となる技術であるため、3 件の特許申請を行った。

3.4 今後の計画

炭化珪素複合材料は実用化を進め、表面改質技術は、拡散・反応に関する理論に基づく最適化を進め、高温水腐食はメカニズムの解明とそれに基づく被覆・表面改質を進めていく。

3.5 課題の自己評価

関連する成果の国際学会での招待講演や論文での発表以外に、基盤となる技術の特許申請、特許技術の大型のライセンス契約、経済産業省のプロジェクト、民間企業 6 社との共同研究に発展し、全体として大きく発展したものと考えられる。

エネルギー機能変換研究部門

B-1　複合機能変換過程研究分野（B-1-2）

1. **構成員**：助教：神保光一

2. **分野題目**：ハドロン加速器（電子加速器ではないという意味）における加速器物理学の課題を研究する。

3. **研究概要**

Synchrotron 構造の加速器ないし閉じ込めリングにおいて、特に Synchrotron、および Betatron 振動に注目し、振動間の共鳴に付随する現象を物理的に明らかにして、加速器が直面する様々な課題を克服する。

4. **研究目標**

Synchrotron、および Betatron 振動間の共鳴を記述する新たな Hamiltonian から、Synchrotron を抑える新たな物理手法を提案し、それに基づいてビームの微細制御を可能にする。

5. **研究手法**：京大エネ研において、理論的に加速器物理学における新たな手法を提案し、共同研究を通じてそれを実験的に検証する。

6. **学術領域**：加速器物理学

7. **関連学会**：加速器学会、物理学会、プラズマ・核融合学会

8. **研究課題**

(1) 加速器物理学におけるビーム振動に伴う新たな現象の解明

9. **分野の自己評価**

著名な研究者 S.Y. Lee 氏から直接、あるいは野田晃教授（平成 25 年定年退職）を通じて間接的に問い合わせがあるなど、新しい手法が少しずつ国際的に評価されている。

10. **備考・留意事項**

加速器学会（2016 幕張）、NAPAC16（2016Chicago）、IPAC17（2017Copenhagen）、物理学会（2018 野田）、IPAC18（2018Vancouver）において研究発表を行った。

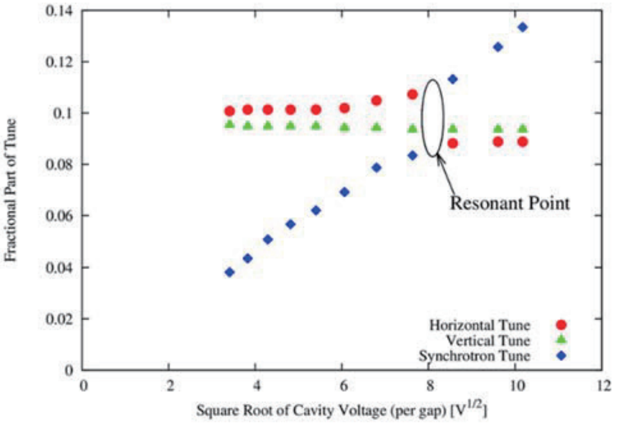
研究課題（1）：加速器物理学におけるビーム振動に伴う新たな現象の解明（神保光一）

1.1　背景

神保によって提案された Hamiltonian composed of coasting, synchrotron and betatron motions を加速器物理へ応用し、この新たに得られた手法に基づいた仮説を実験的に検証することを通じて、新たな物理現象の発見をめざしている。

1.2　成果の概要

京都大学化学研究所の the small laser equipped storage ring (S-LSR)における synchrotron and betatron coupling の実験で、初めて resonant point において tune jump が観測された。この現象は、Hamiltonian composed of coasting, synchrotron and betatron motions によって物理的に説明された。この Hamiltonian の有意義性は徐々にではあるが、加速器物理の分野で認知され始めている。



共鳴点近傍のシンクロ・ベタートロン結合の図

1) K. Jimbo, Phys. Rev. ST Accel. Beams **19**, 010102 (2016).

1.3　成果の意義

シンクロトロン振動とベータートロン振動は広く知られた加速器物理における代表的物理現象である。これまでは各々独自に研究されてきた。神保によって提案された Hamiltonian は、シンクロトロン振動、ベータートロン振動、および軌道運動の三つの要素からなっている。この Hamiltonian を使うと、これら三つの運動の相互関係を含んで系統的に調べることが可能となった。現在世界的に見て、大きな加速器の数は限られており、その数が増える見込みもない。したがって小中規模な加速器を使ったビーム物理の基礎的な研究が主流となっており、加速器を使ったがん治療などで、ビーム微細制御への応用などで現実に大きな成果を上げている。この Hamiltonian はそれらの研究に、新たな研究手段を与えることとなる。

1.4　今後の計画

これまでに、シンクロトロン振動下でもリングを回る周回粒子の粒子速度が一定となり、その結果縦方向のシンクロトロン振動は、横方向のシンクロトロン振動に働くコリオリのような力によって引き起こされるなど、新たな興味ある物理現象の存在を示してきた。これらを加速器実験において検証することを目指す。

1.5　課題の自己評価

ハドロン加速器物理は、装置の巨大化とともにもっぱら装置学として発展してきた。新たな Hamiltonian の提案による基礎物理に焦点を当てた研究手法は、新たな研究方向の現実的な提案として高く評価されている。その例として、S.Y. Lee 氏(Indianan University)から直接、研究内容に興味があり、新たなパラメーターでの実験の提案があった。新たに装置を使った実験が困難となった現状において、理論的に興味あるテーマを放医研で共同実験として研究する道も模索している。

エネルギー機能変換研究部門

B-2　レーザー科学研究分野

1. **構成員**：准教授：中嶋隆

2. **分野題目**：レーザーを利用した高機能材料の創成と先進分析法の開発

3. **研究概要**

本研究分野では、物質と物理的に接触することなく、高いエネルギー密度で瞬時にエネルギーの受け渡しをすることができるというレーザーの特徴を生かしたナノ材料創成法の開発やエネルギー材料を対象とした先進分析手法の開発を進めている。創成したナノ材料については、導電性やプラズモニクス特性を付与することにより、エネルギー材料としての活用を目指す。

4. **研究目標**

1) レーザーを利用した材料創成法の開発と評価
2) レーザーを用いた先進分析手法の開発

5. **研究手法**：金属薄膜、高分子薄膜、レーザー誘起ナノ構造化、レーザー－物質相互作用理論

6. **学術領域**：応用光学、薄膜、量子エレクトロニクス

7. **関連学会**：応用物理学会、物理学会

8. **研究課題**

(1) CO2 レーザーを用いた金薄膜の高速その場ナノ構造化
(2) プラズモニックナノバブル成長における数密度依存性の実時間観測

9. **分野の自己評価**

教員は一名、配属の修士課程大学院生は各学年一名で計二名という制約の中での研究活動のため、マンパワーの不足は否めないが、これまでに関連研究の経験がない、新しい研究テーマにチャレンジしている点は評価されてもよいであろう。

10. **備考・留意事項**

当該分野で進める研究は、第５期科学技術基本計画における４本柱の中の「未来の産業創造と社会変革に向けた新たな価値創出の取組」で言及されている素材・ナノテクノロジー、および光・量子という新たな価値創出のコアとなる強みを有する技術、および「経済・社会的対応」で言及されているエネルギー利用の効率化や資源の安定的確保と循環的な利用に密接に関連している。すなわち、レーザーを利用してエネルギーの高効率利用に有利な高導電性天然高分子ナノ材料を創成、分析することを目指している。

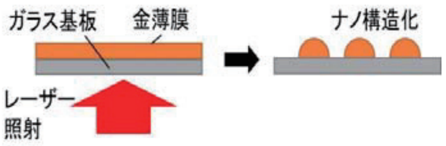
研究課題（1）：CO_2 レーザーを用いた金薄膜の高速その場ナノ構造化（中嶋隆）

1.1　背景

ナノ構造を有する材料は、高効率太陽電池材料等エネルギー関連の用途のみならず、微量分析やバイオセンシング、ケモセンシング等、幅広い活用が可能である。電子ビームリソグラフィーのようなボトムアップ法を用いれば精緻な加工が可能であるが、莫大なコストと時間がかかる。コストがかからないトップダウン法でナノ構造を効率よく作成する技術の開発が望まれる。

1.2　成果の概要

時間はかかるがポリマー膜に 120℃程度の熱アニールをすると表面粗さが増大することを示した（発表論文 1)。次に、ガラス基板上に 5nm の厚さでスパッタ蒸着した金薄膜に出力 4~6W の CO_2 レーザーをわずか数秒間照射するだけで高密度の金ナノ構造を誘起できることを実験的に示した（発表論文 2)。金ナノ構造が誘起されたことは、消光スペクトル、XRD、および SEM 像から確認できた。粒子サイズと粒子密度は照射するレーザーの出力と照射時間に依存することも分かった。



ガラス基板上の金薄膜が CO_2 レーザー照射によってナノ構造化する様子

1) Y. Uto, K. Mizobata, S. K. Maurya, T. Akiyama, and T. Nakajima, “Morphological change of crystalline polymer films by annealing: substrate- and heating/cooling-rate-dependent surface roughness”, Surf. Interface Anal. **49**, 577-583 (2017).

2) S. K. Maurya, Y. Uto, K. Kashihara, N. Yonekura, and T. Nakajima, “Rapid formation of nanostructures in Au films using a CO_2 laser”, Appl. Surf. Sci. **427**, 961-965 (2018).

1.3　成果の意義

紫外レーザーを利用した金薄膜のナノ構造化は既知の技術であるが、直径数 10 μm に集光したビームを用いるため広い面積をナノ構造化するには効率が悪い。これに対し、我々が開発した CO_2 レーザーを用いる手法では、直径 10 mm 程度の非集光ビームを数秒照射するだけで金ナノ構造を誘起することができるため、極めてナノ構造化効率が良い。

1.4　今後の計画

作成したナノ構造化金薄膜が微量分析（表面増強ラマン散乱）やバイオセンサー基板としてどの程度の性能を有するかを実験的に確認する。

1.5　課題の自己評価

一般に、CO_2 レーザーは安価で高出力な工業加工用レーザーとして知られているが、薄膜のナノ構造化にも簡便かつ安価に活用できることを初めて示したことは、学術的意義はもちろん工学的意義も大きい。

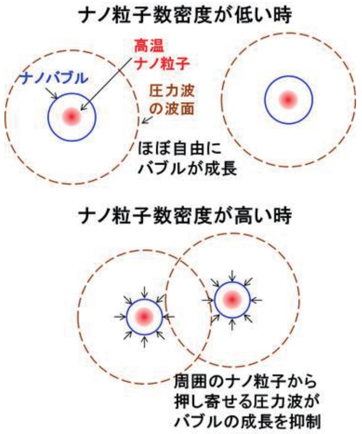
研究課題（2）：**プラズモニックナノバブル成長における数密度依存性の実時間観測**（中嶋隆）

2.1　背景

金属ナノ粒子が分散した溶液にレーザーパルスを照射すると光熱反応が起こり、ナノ粒子が数100℃以上の高温となってナノ粒子表面近傍の溶液が瞬時に蒸発し、プラズモニックナノバブルが発生する。これはレーザーを用いたナノ粒子の生成時に必ず起こるプロセスでもあり、そのダイナミクスを正確に理解することは、エネルギー材料としてはもちろんのこと、汎用材料としても有用な高機能ナノ粒子の生成にもつながる。レーザーとナノ粒子の相互作用に関しては、レーザー波長、フルエンス、パルス時間幅、および照射ショット数をパラメータとしてこれまでに相当な数の論文が発表されているが、数密度に着目した研究は見当たらない。

2.2　成果の概要

我々が独自に開発したシングルビーム法を用い、直径100nm の銀ナノ粒子が分散した溶液の数密度を 10^7~10^8/cm^3 の範囲で変化させて波長 532nm のレーザー照射を行ったところ、照射フルエンスが高い場合には、数密度が高いほどバブル成長が抑制されることがわかった。これに対し、照射フルエンスが低い場合にはバブル成長は数密度に依存しない。これらの結果は、隣接するバブル同士が圧力を介して押し合いをすると考えればうまく説明できる。実際、互いに隣接するナノ粒子から発生する圧力波の影響下でナノバブルが成長するというモデルを作り理論計算を行ったところ、実験結果とよく一致した(発表論文 1)。



レーザー照射後のナノバブルの成長

1) T. Nakajima, X. Wang, S. Chatterjee, and T. Sakka, “Observation of number-density-dependent growth of plasmonic nanobubbles”, Sci. Rep. 6, 28667 (2016).

2.3　成果の意義

プラズモニックナノバブルの成長が数密度に依存する、という既存の描像では説明できない結果を実験的に示し、さらには新しいモデルによって説明したことには大きな学術的意義がある。また、複数の材料を超高圧・超高温のバブル内で反応させることによる新規物質の創成も期待できる。

2.4　今後の計画

本研究で開発したプラズモニックナノバブルの計測システムを元に、電気分解によって発生するナノバブルの生成過程を計測するシステムを開発する。

2.5　課題の自己評価

既存の描像では説明できない現象を実験的に観測し、新モデルによってそれを説明したことには大きな学術的意味がある。また、最近着手した電解バブルへの研究展開はエネルギー貯蔵に関連した国のエネルギー政策にも合致し、今後の研究進展が期待される。

エネルギー機能変換研究部門

B-3　エネルギー基盤材料研究分野

1. **構成員** : 教授 : 木村晃彦、准教授 : 森下和功、助教 : 藪内聖皓、特任教授 : 松井秀樹（～H28.9）、特定准教授 : 近藤創介（～H28.3、H28.5～H28.9）、特定助教 : 張哲先（H29.5～H30.2）

2. **分野題目** : 高性能エネルギー基盤材料の研究開発と材料挙動予測

3. **研究概要**

ナノ・メゾ構造制御による革新的な性能・機能発現を目指すエネルギー基盤構造材料の開発研究や極限環境下における材料挙動予測のための材料・システム統合的基礎研究。高効率エネルギー変換と核エネルギーの安全利用を可能にする革新的原子力・核融合材料の開発に向け、材料物理・化学の基礎から、製造プロセスなどの実用化のための材料技術開発研究を推進している。高エネルギー粒子線と材料の相互作用における損傷組織形成の素過程の解明および材料寿命の高精度予測が課題。

4. **研究目標**

1) 極限環境下における炉心構造材料の長寿命化（一桁以上）の実現
2) 核融合炉材料の照射損傷組織形成機構の解明と寿命評価への適用
3) 原子力材料の保全に関する高精度予測

5. **研究手法** : 高エネルギー粒子線照射法、原子炉照射法、照射相関法、格子欠陥論、転位論、ナノ構造 in-situ 観察、ナノ・メゾ組織化学分析、力学特性評価、環境強度評価試験、計算機模擬試験　等

6. **学術領域** : 材料工学、構造材料、原子力材料、核融合炉材料、耐熱材料

7. **関連学会** : 日本原子力学会、プラズマ・核融合学会、日本金属学会、日本鉄鋼協会、日本腐食防食協会

8. **研究課題**

(1) 革新的原子力構造材料（ODS 鋼）の研究開発と耐照射性発現機構の解明
(2) 核融合炉材料における照射損傷形成素過程の解明とその応用
(3) システム保全学構築に向けたマルチスケール・マルチフィジックスモデリング研究

9. **分野の自己評価**

革新的原子力・核融合構造材料の開発研究、および材料挙動予測研究において拠点的な役割を果たした。外部資金の獲得、博士研究員の採用による若手研究者の育成、産学連携活動（ADMIRE 計画）の実施、ZE 拠点共同研究の推進において良好な成果が得られたと評価する。

10. **備考・留意事項**

今後もエネルギーの確保と安全性・経済性の向上に向け、核エネルギープラント用の構造材料分野からの社会貢献を目指す。ADMIRE 計画による産学連携やイオン加速器（DuET）を用いた ZE 共同研究を推進するとともに、革新的原子力材料の研究開発を国際的視野に立って先導する。

研究課題（1）：革新的原子力構造材料（ODS 鋼）の研究開発と耐照射性発現機構の解明

（木村晃彦、藪内聖皓、近藤創介（B-1）、張哲先）

1.1 背景

ナノ・メゾ構造制御による革新的な性能向上と機能発現を目指すエネルギー基盤構造材料（酸化物分散強化（ODS）鋼）の開発を目的とした。実用化のための材料技術開発が課題となっており、事故耐性燃料被覆管材料や核融合炉ブランケット構造材料としての利用が期待されている。核エネルギーの高効率安全利用に貢献することを目標とした。

1.2 成果の概要

熱力学と反応速度論に基づき、酸化物の分散形態を制御することで、Al 添加型 ODS フェライト鋼の高性能化を実現した（図 1）。革新的原子炉や核融合炉における高温かつ高照射量に及ぶ過酷な照射環境に適合可能であることを示した。国プロの一環として電子ビーム溶接や加圧抵抗溶接の研究開発が実施され、ODS 鋼の実用化接合技術開発に大きな進展があった。

1) A. Kimura, W. Han, H.I. Je, K. Yabuuchi, R. Kasada, "Oxide Dispersion Strengthened Steels for Advanced Blanket Systems", Plasm. Fusion Research: Overview Articles 11 (2016.04) 2505090.
2) P. Dou, A. Kimura, R. Kasada, T. Okuda, M. Inoue, S. Ukai, S. Ohnuki, T. Fujisawa, F. Abe, S. Jiang, Z. Yang. "TEM and HRTEM study of oxide particles in an Al-alloyed high-Cr oxide dispersion strengthened ferritic steel with Hf addition", J. Nucl. Mater, 485 (2017.03) 189-201.
3) S. Yamashita, F. Nagase, M. Kurata, T. Nozawa, S. Watanabe, K. Kirimura, K. Kakiuchi, T. Kondo, K. Sakamoto, K. Kusagaya, S. Ukai, A. Kimura, "Technical Basis of Accident Tolerant Fuel Updated Under a Japanese R&D Project", (2017.09) A-173_F-176.
4) P. Song, D. Morrall, Z. Zhang, K. Yabuuchi, A. Kimura, "Radiation response of ODS ferritic steels with different oxide particles under ion-irradiation at 550 °C", J. Nucl. Mater., 502 (2018) 76-85.

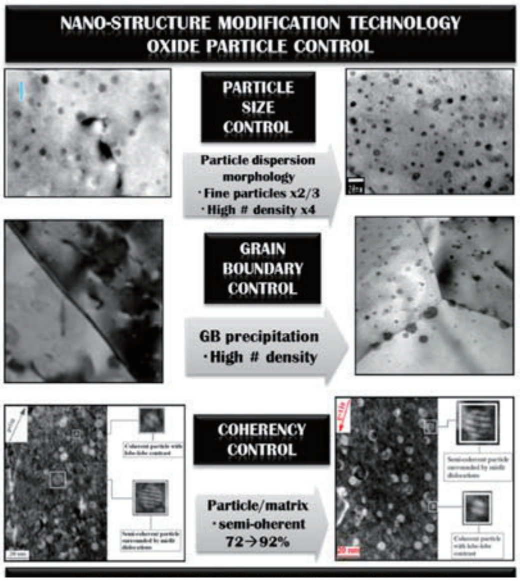


図 1 高強度付与を可能にした Zr 安定型イットリア酸化物粒子の分散制御

1.3 成果の意義

本研究成果は、原子力材料の照射損傷組織形成による照射損傷機構を格子欠陥論や反応速度論に基づいて明らかにしており、当該研究分野の展開に貢献するとともに、当該材料の耐照射性の発現機構の解明と材料寿命予測の高度化に貢献した。また、国プロとして実施されている接合技術開発は、事故耐性型 Al 添加 ODS 鋼の実用化を飛躍的に促進させたといえる。

1.4 今後の計画

革新的原子力材料として京都大学が開発した Al 添加型 ODS 鋼の早期実用化を目指し、今後は量産技術開発を実施する。国プロである事故耐性燃料被覆管開発研究（軽水炉対象）が 2021 年度まで継続予定である。国際的な研究活動の拠点としての役割を果たしていく。

1.5 課題の自己評価

国の内外を問わず Al 添加型 ODS 鋼の研究開発を先導しており、大型予算国プロへの参画、科研費の取得、人材育成などの面において、良好な研究活動を行ったと評価できる。

研究課題（2）：核融合炉材料における照射損傷形成素過程の解明とその応用

（木村晃彦、藪内聖皓、松井秀樹、近藤創介（B-1）、張哲先）

2.1　背景

極限環境下における材料挙動予測のための材料・システム統合基礎研究を通じて、核融合炉材料や革新的原子力材料の高精度寿命予測を目的とした。様々な照射環境下における材料挙動予測のため、照射損傷形成の素過程を格子欠陥学の基礎に基づいて原理的に解明し、将来の核エネルギープラントの設計、および安全利用に貢献することを目指した。

2.2　成果の概要

核融合炉のダイバータ候補材料タングステン（W）（図 1）、ブランケット構造材料低放射化フェライト鋼（RAFS）、および配管材料オーステナイトステンレス鋼（SUS310S）の照射下における材料挙動を照射影響メカニズムに着目して解明した。W の照射硬化の方位依存性、RAFS 接合部の微細組織形成機構、および SUS310S の SCC メカニズムを提案した。

1) E. Hasenhuetl, Z. Zhang, K. Yabuuchi, A. Kimura, “Effect of damage level on the ion-irradiation affected zone evolution in W single crystals”, J. Nucl. Mater. 495 (2017) 314-321.
2) S. Noh, M. Ando, H. Tanigawa, H. Fujii, A. Kimura, “Friction stir welding of F82H steel for fusion applications”, J. Nucl. Mater. 478 (2016.09) 1-6.
3) Y.J. Huang, K. Kawakita, A. Kimura, “Stress corrosion cracking susceptibility of 310S stainless steel in hydrogenated hot water”, Nuclear Materials and Energy 15 (2018.05) 103-109.

2.3　成果の意義

1）タングステン：ダイバータ用 W の照射脆化予測に関する基礎的データが得られ、破壊靭性が課題となっているプラズマ対抗材料の寿命予測の高精度化に貢献した。

2）RAFS：ブランケットの製作において課題となっている接合組織形成機構の解明により、ナノ・メゾ接合組織制御が可能になった。

3）SUS310S：核融合炉内の水素環境下における SCC 発生機構を明らかにした。冷却管の腐食寿命評価と配管設計に貢献すると期待できる。

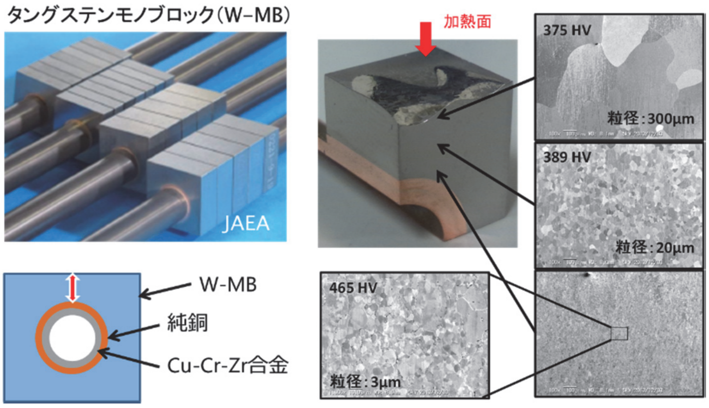


図 1　高熱負荷を受けた ITER 用 W モノブロックの損傷形成機構の解明

2.4　今後の計画

核融合照射環境を模擬することの可能なイオン加速器（DuET）を用いて、核融合炉材料のイオン照射下挙動解明のための研究を継続する。特に、ITER 環境対応から DEMO 環境対応に向けた材料開発研究、およびそれらの寿命予測技術開発研究を推進する。

2.5　課題の自己評価

イオン加速器（DuET）の有効利用により、核融合炉模擬環境下での各種構造材料の照射損傷組織の形成過程や基本的材料特性の研究を国内拠点として実施することができた。産学連携共同研究を推進した。これらの研究課題は良好であると評価できる。

研究課題（3）：システム保全学構築に向けたマルチスケール・マルチフィジックスモデリング研究（森下和功）

3.1　背景

原子力システムの材料は照射等の影響により経年劣化する。劣化管理を適切に行うには、保全の実施時期や程度を最適化するために、保全重要度を決定する必要がある。すなわち、供用中の材料の健全性の程度、もしくは、材料の機能喪失の程度を定量化する必要がある。ここでは、材料学とシステム工学の観点から、照射脆化現象を対象に、保全指標を提案した。

3.2　成果の概要

軽水炉圧力容器鋼の照射脆化現象を対象に、まずは材料学の観点から、メカニズム究明の研究を行った。各種計算機シミュレーション手法を使い、鉄中の銅析出物（脆化種）の核生成・成長現象をモデル化した。特に、核生成の照射速度依存の発現メカニズムを明らかにしたことは、軽水炉における中性子照射影響（照射速度が遅い）の評価を、イオン加速器（照射速度が速い）を用いて定量化できることを意味する。次に、照射脆化がシステム挙動に与える影響を調べるために、冷却水喪失事故を想定した熱流動・構造連成解析を行った。事故時の応力拡大係数変化を求め、脆化による破壊靱性値低下との関係から、材料の脆性破壊確率を定量化した。この確率（リスク値）を保全指標として提案した。

1) T. Nakasuji, K. Morishita, X. Ruan,　Monte-Carlo simulation of defect-cluster nucleation in metals during irradiation,　Nuclear Instruments and Methods B 393,　110-113,　2016
2) K. Morishita, T. Nakasuji, X. Ruan, Evaluation of the energetics of copper-vacancy clusters in Fe, Nuclear Instruments and Methods B 393,　101-104,　2016
3) X. Ruan, T. Nakasuji, K. Morishita,　Coupled 3D CFD and FEM assessments of RPV stress intensity factor during PTS events,　Proc. ICAPP 2017,　17136 (9 pages),　2017

3.3　成果の意義

マルチスケールの視点で、材料とシステム研究の融合を図った（図 1）。現象のメカニズム究明がなされ、システム保全を、リスク基準で考えるための学術基盤の構築が可能になる。

3.4　今後の計画

引き続きシステム保全学の構築を図るとともに、ベイズ統計や AI の利用から、脆化予測の精度向上に向けた研究に着手する。

3.5　課題の自己評価

マルチスケールの視点で様々な評価手法に熟知することで、例えばシステム学のリスク評価法を材料評価に援用することに成功した。俯瞰するものの見方は、学生教育にも有用である。

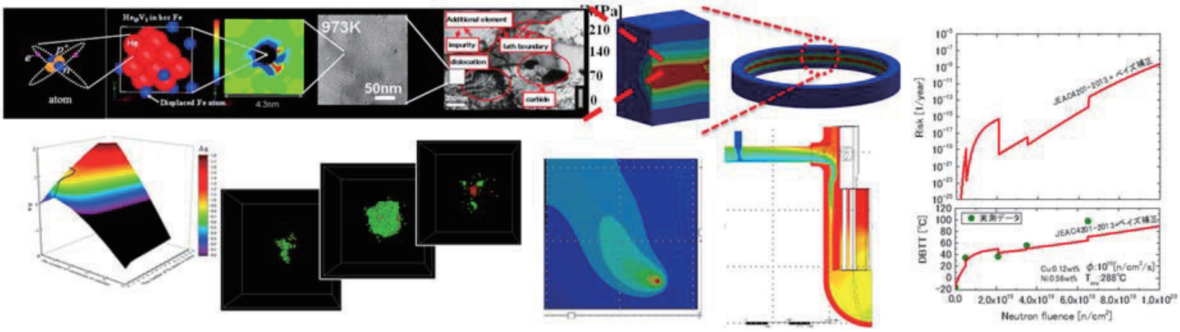


図 1 材料・システム挙動を予測するためのマルチスケール・マルチフィジックス解析

エネルギー機能変換研究部門

B-4　複合系プラズマ研究分野

1.　**構成員**：准教授：門信一郎、助教：山本聡

2.　**分野題目**：磁場閉じ込めプラズマにおける複合現象の解明

3.　**研究概要**

プラズマ現象のうち、粒子的な特徴が強く現れる側面においては個々の粒子のエネルギー分布や磁場中の軌道などが、流体としての性質が色濃く現れる側面では不安定性や乱流現象が対象となる。そのような複合的な側面を光学的診断による可視化や数値シミュレーション等により解明し、核融合エネルギーの早期実現、および社会への広い認知を目指す。

4.　**研究目標**

1) 先進ヘリカル配位における高速イオン励起 MHD 不安定性に起因した高速イオン損失の物理機構解明
2) プラズマ中の原子分子過程や輸送現象に対する光学的診断法の開発と適用

5.　**研究手法**：プラズマ計測、プラズマ実験、粒子軌道計算、波動-粒子ハイブリッド
シミュレーション

6.　**学術領域**：プラズマ科学、核融合学、分光学

7.　**関連学会**：物理学会、プラズマ・核融合学会

8.　**研究課題**

(1) 高速イオン励起 MHD 不安定性に起因した高速イオン損失の物理機構解明
(2) 磁場閉じ込めプラズマに対する近赤外分光法の適用

9.　**分野の自己評価**

それぞれの構成員が国際共同研究、大学間連携、学内連携を通じた幅広い研究活動、学会等の運営活動、および社会へのアウトリーチ活動に推進している。継続的な競争的資金の獲得も実現している。

10. **備考・留意事項**

平成 23 年の東日本大震災に起因する東京電力福島第一原子力発電所事故により、エネルギー政策の転換を余儀なくされているなか、より環境負荷が小さく、かつベースロード電源となりうる代替エネルギーの開発が急務である。第 5 期科学技術基本計画に関連する答申に挙げられた創出すべき革新的技術として、核融合エネルギーの開発は長期的視野をもって取り組むべき課題である。本分野では、プラズマの電磁場、および光子場としての複合的な性質を解明し、核融合級の高温プラズマの学術としての側面、人材育成の側面を主軸に、原型炉開発に向けた研究開発を推進している。

研究課題（1）：高速イオン励起 MHD 不安定性に起因した高速イオン損失の物理機構解明

（門信一郎、山本聡）

1.1　背景

エネルギー問題解決に有望な核融合炉実現において必須となるアルファ粒子の良好な閉じ込めを実現するため、高速イオン励起電磁流体力学的(MHD)不安定性とアルファ粒子を含む高速イオンとの共鳴的相互作用の物理機構解明と、高速イオン損失の低減を目的としている。

1.2　成果の概要（論文 1）

プラズマ閉じ込め領域から損失する高速イオンの速度ベクトルや損失量を直接計測し、損失の原因である高速イオン励起 MHD 不安定性との相関を調べることで、高速イオンと MHD 不安定性間の共鳴的相互作用を実験的に調べた。まず比較的安価なファラデーカップ型高速損失イオンプローブ(FLIP)を用いて高速イオン損失の概要を捉え、その後、より速度ベクトルの分解能に優れたシンチレータ型損失イオンプローブ(SLIP)により、高速イオン損失の物理機構を詳細に調べた。Heliotron J では中性粒子入射(NBI)実験時に高速イオン励起 MHD 不安定性が観測されており、それらによる高速イオン損失が予測されている。FLIP により、高速イオン励起 MHD 不安定性の発生・消滅と同期する高速イオン損失を観測した。損失高速イオンは、そのエネルギーが NBI 入射エネルギーと同程度であり、数値解析との比較から同方向に周回するイオンであることがわかった。また、損失した高速イオン量は高速イオン励起 MHD 不安定性の揺動強度と関係していることがわかった。さらに、詳細を調べる目的で新たに SLIP を導入した。SLIP はシンチレーション光を計測することで高速イオンの測定を行うもので、CCD カメラにより高速度ベクトル分解能で計測可能であるとともに、光電子増倍管も用いることで、高速イオンを高時間分解能で計測することが可能である。SLIP を用いた実験の結果、FLIP では困難であったより詳細な損失高速イオンの速度ベクトルや MHD 不安定性の周波数(~100kHz)と高い相関を持つ損失高速イオン揺動を観測した（図 1）。SLIP で捉えた粒子は遷移また捕捉イオンであったが、閉じ込め磁場と MHD 不安定性の電場揺動による ExB ドリフトによりそれらが損失したことが推定された。

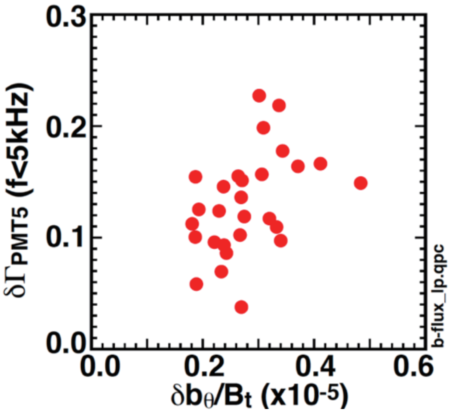


図 1　高速イオン励起 MHD 不安定性強度に対する高速イオン損失量.

1) S. Yamamoto *et al.*, Review of Scientific Instruments **87** (2016) 11D818

1.3　成果の意義

高速イオンと MHD 波動との共鳴的相互作用は、粒子と波動の共鳴的相互作用であり、同現象は地磁気圏での荷電粒子の異常加速を説明する物理機構として知られている。プラズマ・粒子のパラメータが異なるために普遍的な物理現象解明に役立つものと思われる。

1.4　今後の計画

損失イオンプローブは局所計測であるために、プラズマ全体での説明が困難なことがある。そこで、粒子-波動間相互作用の数値解析コード(MEGA)の導入を進めている。将来的に実験結果と数値解析との比較により物理機構解明を果たすとともに、損失高速イオン量の低減を目指す。

研究課題（2）：磁場閉じ込めプラズマに対する近赤外分光法の適用（門信一郎、山本聡）

2. 1　背景

プラズマからの光は情報の宝庫である。本課題では、平成 29 年度より、従来紫外～可視領域が中心であった観測スペクトル領域を近赤外（900-2100 nm 程度）まで拡張する試みを始めている。これによって診断の対象となる輝線スペクトルや連続スペクトルの選択肢が大きく拡がり、新たな研究課題の探索、および国内外を含む研究連携の構築を目指すものである。

2. 2　成果の概要（論文 2）

近赤外分光の利点は、水素やヘリウムの重要な輝線が存在し、かつ不純物による輝線の混濁が少ないこと、紫外域では減衰が大きい光ファイバーの利用が可能であるといったことが挙げられる。さらにこの領域は、制動放射の強度が小さく、かつ 1400 K から 3200 K に対する黒体輻射のピーク値を含むため、真空容器などからの黒体輻射のスペクトルへの感度が高い。Heliotron J において近赤外の簡易分光器を導入して近赤外領域のスペクトルを測定したところ、輝線強度は可視に比べ弱いものの、固体ペレット入射では細い(25μm)スリットを用いた場合でも水素原子のパッシェン系列を三本同定することできた。ヘリウム放電では、輝線強度比の測定に使える輝線数を増やせることを明らかにした。

さらに、電子サイクロトロン加熱による比較的低密度のプラズマにおいては、真空容器壁に高エネルギー電子の局所的な衝突によるものと推定されるホットスポットの発する連続スペクトルを初めて観測し、2000 K 以上の温度に上昇していることを明らかにした（図 2）。

2)　S. Kado *et al.*, Rev. Sci. Instrum. (2018) *in press*.

2. 3　成果の意義

簡易的な近赤外分光器を用いて、初めて Heliotron J における近赤外スペクトルを観測し、水素やヘリウムのスペクトルを同定した。真空容器内機器のホットスポットをモニタし、機器の保全や不純物制御に活用できる可能性が示唆された。

2. 4　今後の計画

現在、本結果を基に、より高感度、高波長分解能の近赤外分光システムを導入中であり、プラズマの密度や温度を反映する輝線強度比の計測や、ペレット溶発雲の情報を有するスペクトル形状の計測、さらには、積極的に不純物を入射し、発光スペクトルの変化を追跡する「レーザーアブレーション」へと展開する予定である。

2. 5　課題の自己評価

近赤外領域の分光診断は未開拓の分野であり、科研費基盤(C)「近赤外領域の分光法を用いた核融合プラズマ診断法の新展開　（平成 28-30 年度)」として採択されている。

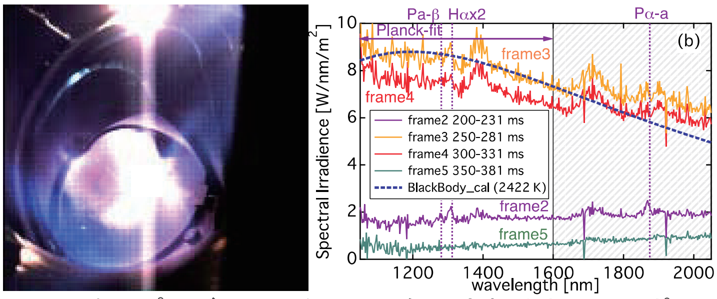


図 2 （左）プラズマモニタにより観測されるホットスポット。（右）感度較正後の近赤外スペクトル（二次回折光の影響をうける部分を除いて色温度を求めた。（論文 2））

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、およびその有効利用システムの研究を行う客員分野である。以下に、評価期間中での招聘研究者と研究題目等を掲げる。

職　名	氏　名	任用期間	担当科目	本　務
教　授	内橋貴之	2016.4.1- 2017.3.31	エネルギー構造生命科学に関する研究	金沢大学理工研究域・ 教授
准教授	鈴木康浩	2016.4.1- 2017.3.31	核融合科学・プラズマ物理	核融合科学研究所・ 准教授
教　授	日渡良爾	2017.4.1- 2018.3.31	核融合炉設計工学	量子科学技術研究開発機構・ 主幹研究員
准教授	加藤俊顕	2017.4.1- 2018.3.31	複合機能変換に関する研究	東北大学大学院工学研究科・ 准教授
教　授	笠田竜太	2018.4.1- 2019.3.31	エネルギー材料	東北大学金属材料研究所・ 教授
准教授	森　　健	2018.4.1- 2019.3.31	生物機能化学に関する研究	九州大学工学研究院・ 准教授

内橋教授は、原子間力顕微鏡（AFM）の高度化により、100 ms 以下の高速で AFM 画像を得ることができる装置を開発し、生体高分子の立体構造とそのダイナミカルな動きを視覚化する研究を行ってきた。今回、転写・細胞増殖を制御する TLS/FUS タンパク質が、この制御の鍵となる非コード RNA との相互作用によって大きな構造遷移を起こす様子を、AFM 画像によってリアルタイムで直接的に観測することに成功した。これにより、同タンパク質が転写・細胞増殖を制御するメカニズムが明らかとなった。

鈴木准教授は、核融合プラズマにおける電磁流体力学（MHD）平衡・安定性理論・実験的検証と周辺プラズマ輸送の理論・シミュレーション研究を進めている。Heliotron J において共鳴摂動磁場コイルに対するプラズマの応答性を MHD 平衡・安定性の観点から解析を行い、磁気島の構造がプラズマの巨視的閉じ込め性能に影響を与えていることを示した。

日渡教授は、次世代エネルギーシステムが研究対象である。現在、核融合エネルギー実現を目指した原型炉設計合同特別チームのグループリーダーとして核融合炉概念検討を推進中である。過去には、EV 用交通シミュレーター「EV-OLYENTOR」を開発し、経済産業省とともに日本全国の EV 用充電インフラ設置モデルプランの制作や、発電技術の評価手法の開発を手がけた。

加藤准教授は、荷電粒子、および、化学的活性種を多量に含むプラズマ状態を自在に制御することによる一次元・二次元原子層物質（カーボンナノチューブ、グラフェン、グラフェンナノリボン、遷移金属ダイカルコゲナイド）の原子レベルでの構造制御合成、光・電子物性制御、および、それらを用いた革新的ナノエネルギーデバイス開発について研究を進めている。

笠田教授は、核融合炉ダイバータのアーマー冷却管材料としての使用が期待されている「酸化物分散強化型銅合金の開発」に関する研究を実施するとともに、当該研究分野の大学院生の指導を行った。今後、教員や大学院生の相互乗り入れによる連携協力体制を整え、両研究所が保有する最先端装置を効率的に利用することが可能な「先端装置共用制度」の拡充を進めていく。

森准教授は、化学による医学への貢献をモットーにして、化学修飾に基づく細胞機能の改変技術、酵素増感フローサイトメトリー、抗体のエフェクター機能を制御する中分子薬について研究している。

2.3. 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、ソフトエネルギーを利用し、ロス無く高効率なエネルギー・分子変換を達成する自然・生物に学ぶ革新的ものつくりの学理「創発材料」を実現することを目的として、シリコン太陽電池の超大量生産を目指した電解技術、分子建築技術を用いる高効率クリーンエネルギー物質材料の開発、生体高分子による高効率物質変換とエネルギー利用、バイオマスやタンパク質の構造機能研究等の、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。

エネルギー利用過程研究部門

C-1 複合化学過程研究分野

1. **構成員**：教授：野平俊之、准教授：小瀧努、助教：山本貴之（H29.4～）、
   特定助教：楊肖（～H28.5）

2. **分野題目**：電気化学的および生物化学的アプローチによるエネルギー問題の解決

3. 研究概要

太陽光発電やバイオエネルギー等の再生可能エネルギーを主要一次エネルギーにするために、基礎から実用化まで見据えた研究開発を行い、「ゼロエミッションエネルギーシステム」の実現に貢献する。

4. 研究目標

1) シリコン等の太陽電池用材料の新規製造法の開発
2) 元素戦略的に有利で安全性の高い大型二次電池の開発
3) バイオマスからのバイオエタノール高効率生産システムの開発

5. **研究手法**：電気化学実験、遺伝子組替

6. **学術領域**：電気化学、金属生産工学、生物工学

7. **関連学会**：電気化学会、日本化学会

8. 研究課題

(1) 溶融塩電解を用いた新規太陽電池用シリコン製造法の開発
(2) イオン液体を用いたナトリウム、およびカリウム二次電池の開発
(3) バイオマスからのバイオエタノール高効率生産システムの開発

9. 分野の自己評価

それぞれの研究課題について着実に成果が得られている。また、競争的資金の獲得や査読付ジャーナルへの論文掲載も順調である。さらに、構成員の異なる専門分野をうまく融合させた新しい研究テーマ「イオン液体を利用した木質バイオマスからのバイオエタノール高効率生産」も出てきている。

10. 備考・留意事項

研究目標は全て、第５期科学技術基本計画の第３章「経済・社会的課題への対応」で設定されている七つの重要政策課題の一つ「ネルギーの安定的な確保とエネルギー利用の効率化」に直接的に貢献するものである。

研究課題（1）：溶融塩電解を用いた新規太陽電池用シリコン製造法の開発（野平俊之）

1.1　背景

結晶系シリコン太陽電池は、高効率、高耐久性、無害、豊富な資源量といった特長を有することから、現在最も普及している太陽電池であり、将来の大量普及も有望である。しかし、高純度のシリコン（99.9999%以上）が必要であり、現在の製法では大幅な低コスト化が難しいため、新たな太陽電池級シリコン製造法の開発が求められている。当分野では、「溶融塩電解を用いて高純度シリカ(SiO_2)から高純度シリコンを製造する方法」、および「溶融塩電解を用いて安価な基板上に高純度シリコン膜をめっきする方法」を研究している。

1.2　成果の概要

溶融 $CaCl_2$ 中において固体 SiO_2 を効率的に電解還元する方法を検討した。まず、SiO_2 粉末に予め Si 粉末を添加することで、電解還元が効率的に進行することを見出した（論文 1）。また、図 1 に示すように、電解還元で得られた Si 粉末を浮遊帯溶融法により Si インゴットとし、さらに切断することで Si ウェハとした（論文 2）。この Si ウェハについては、純度分析、およびキャリアライフタイム測定を行い、半導体特性を評価した。さらに、従来の固体カソードではなく、液体 Zn カソードを用いる新たな電解法を提案した（論文 3）。実際に電解還元可能であることを実験的に実証するとともに、平衡分配計算により、Si-Zn 合金から Si が析出する際に高い不純物除去効果が得られることを示した。溶融 KF-KCl 中において、Si 源として $SiCl_4$ を用いる新しい Si 膜めっき法を提案・実証した（論文 4）。

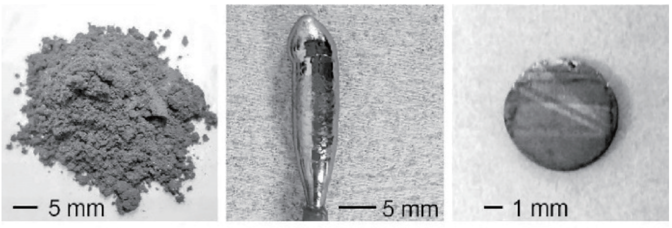


図 1 (a) 1123 K の溶融 $CaCl_2$ 中で SiO_2 を電解還元して得られた Si 粉末. (b) 浮遊帯溶融法により Si 粉末から作製された Si インゴット. (c) Si インゴットを切断して得られた Si ウェハ.

1) "Effect of Si Addition on the Electrochemical Reduction Rate of SiO_2 Granules in Molten $CaCl_2$", M. Zhong, X. Yang, K. Yasuda, T. Homma, T. Nohira, *Metal. Mater. Trans. B*, 49, 341-348 (2018).
2) "Purity and Minority Carrier Lifetime in Silicon Produced by Direct Electrolytic Reduction of SiO_2 in Molten $CaCl_2$", M. Zhong, K. Yasuda, T. Homma, T. Nohira, *Electrochemistry*, 86, 77-81 (2018).
3) "Electrolytic Production of Silicon Using Liquid Zinc Alloy in Molten $CaCl_2$", K. Yasuda, T. Shimao, R. Hagiwara, T. Homma, T. Nohira, *J. Electrochem. Soc.*, 164, H5049-H5056 (2017).
4) "Silicon Electrodeposition in a Water-Soluble KF–KCl Molten Salt: Utilization of $SiCl_4$ as Si Source", K. Yasuda, K. Maeda, R. Hagiwara, T. Homma, T. Nohira, *J. Electrochem. Soc.*, 164, D67-D71 (2017).

1.3　成果の意義

太陽電池用シリコンの新規な低コスト製造法の開発は、さらなる太陽電池の普及のために極めて重要である。また、新原理による製造法の研究開発は、学術的にも大変意義深い。

1.4　今後の計画

シリカ電解還元については、液体 Zn カソードを用いる方法の高効率化やシステム全体の開発を、シリコンめっきについては、高純度化と半導体特性の評価を予定している。

1.5　課題の自己評価

シリカ電解還元、およびシリコンめっきともに、反応メカニズム解明や電解条件最適化が進んでいる。今後は、得られたシリコンの特性評価や実プロセスに向けた検討が必要である。

研究課題（2）：イオン液体を用いた安全性の高いナトリウム、およびカリウム二次電池の開発

（野平俊之、山本貴之）

2.1　背景

太陽光発電や風力発電は間欠性のエネルギーであるため、大量導入するためには電力貯蔵設備の併設が必要となる。その候補の一つとして高エネルギー密度であるリチウムイオン電池(LIB)が注目されている。しかし、LIB は電解液に可燃性の有機溶媒が用いられており安全性に課題がある。また、リチウム資源は南米等に偏在しているため、将来の大量普及に際しては資源問題の懸念がある。そこで、当分野では、難揮発性・難燃性であるイオン液体を用いることで安全性が高く、元素戦略的に有利な Na、および K を用いた二次電池を研究している。

2.2　成果の概要

Na 二次電池用イオン液体として、Na[FSA]–[C_3C_1pyrr][FSA] (FSA = bis(fluorosulfonyl)amide; C_3C_1pyrr = *N*-methyl-*N*-propylpyrrolidinium)を開発し、多くの負極活物質、および正極活物質の充放電特性を評価してきた。代表的な負極活物質としては、資源量が豊富で安全性の高い TiO_2 が挙げられる。高温（90℃）において、278 mAh g^{-1} という可逆容量が得られるのは、新たな充放電メカニズムによることを示した（論文 1）。代表的な正極活物質としては、資源量が豊富で安全性の高い $Na_2FeP_2O_7$ が挙げられる。Na[FSA]濃度の高いイオン液体を高温（90℃）で用いることで、20000 mA g^{-1} という超高速放電が可能になることを示した（論文 2）。さらに、ナトリウムよりも高起電力の電池が構築可能なカリウム二次電池用の新たなイオン液体 K[FSA]–[C_3C_1pyrr][FSA]を開発し、状態図を作成するとともに、基本物性を明らかにした（図 2、論文 3）。

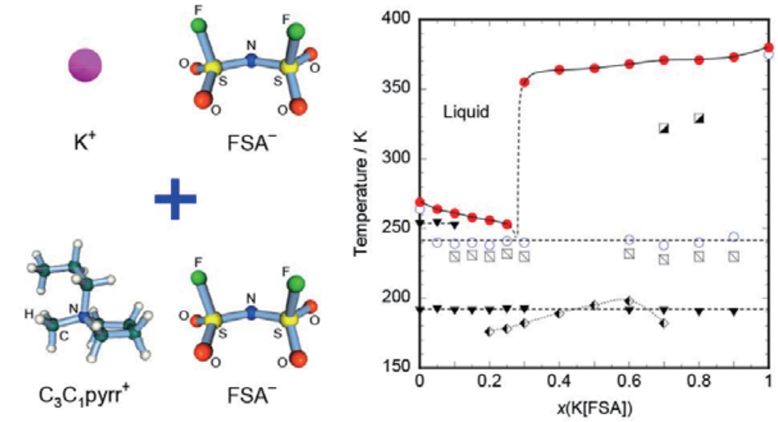


図 2　イオン液体を構成するカチオンとアニオン(左図)，K[FSA]–[C_3C_1pyrr][FSA]二元系状態図(右図).

1) "A new sodiation–desodiation mechanism of the titania-based negative electrode for sodium-ion batteries", C. Ding, T. Nohira, R. Hagiwara, *Phys. Chem. Chem. Phys*., 18, 30770-30776 (2016).
2) "Ionic liquid electrolytes with high sodium ion fraction for high-rate and long-life sodium secondary batteries", C. Chen, T. Kiko, T. Hosokawa, K. Matsumoto, T. Nohira, R. Hagiwara, *J. Power Sources*, 332, 51-59 (2016).
3) "Physicochemical and Electrochemical Properties of K[N(SO_2F)$_2$]-[*N*-Methyl-*N*-propylpyrrolidinium][N(SO_2F)$_2$] Ionic Liquids for Potassium-Ion Batteries", T. Yamamoto, K. Matsumoto, R. Hagiwara, T. Nohira, *J. Phys. Chem. C*, 121, 18450-18458 (2017).

2.3　成果の意義

元素戦略的に有利で安全性の高い二次電池の開発は、再生可能エネルギーの大量導入に不可欠であり、普遍的な意義がある。LIB に比べて知見が少ないため、学術的にも重要である。

2.4　今後の計画

ナトリウム二次電池については、フルセル性能の向上、カリウム二次電池については、さらに高性能なイオン液体の開発を計画している。

2.5　課題の自己評価

ナトリウム、およびカリウムともに順調に研究が進んでいるが、LIB の性能を超えるようなブレークスルーを起こすためには、基礎的知見の積み上げが大切と考えられる。

研究課題（3）：バイオマスからのバイオエタノール高効率生産システムの開発

（野平俊之、小瀧努）

3.1 背景

バイオマスは「カーボンニュートラル」であるとされ、「ゼロエミッションエネルギー」としてさらなる有効利用が求められている。とりわけ、バイオエタノールの生産・利用拡大が世界的規模で行われているが、食糧価格高騰等の弊害がおきている。この問題を解決するために、木質バイオマスなどの非食物系バイオマスからのエタノールの生産の高効率化を目指して様々な研究手法による研究開発を行っている。

3.2 成果の概要

非食物系バイオマスからのエタノールの生産のためには、多くのプロセスにおける高効率化が必要である。本評価期間では、バイオマスの効率的な糖化プロセスに注目し、以下の二つの技法により効率化を試みた。一つ目として、バイオマスの単糖への糖化を行える新規酵母を取得し、その酵母により効率的に単糖への糖化ができることを見出した（図 3）。二つ目として、セルロースの結晶性を低下させ加水分解を促進することが知られているイオン液体に関して、木質バイオマスの主成分であるセルロースとキシランの混合物をイミダゾリウム系イオン液体に溶解したのち、セルラーゼ、およびキシラナーゼによる加水分解を試みた。さらに、得られた糖のイオン液体存在下での発酵を、作製済みのキシロース－エタノール高効率変換遺伝子組換酵母を用いて行い、イオン液体存在下でも効率的に発酵できることを明らかにした。

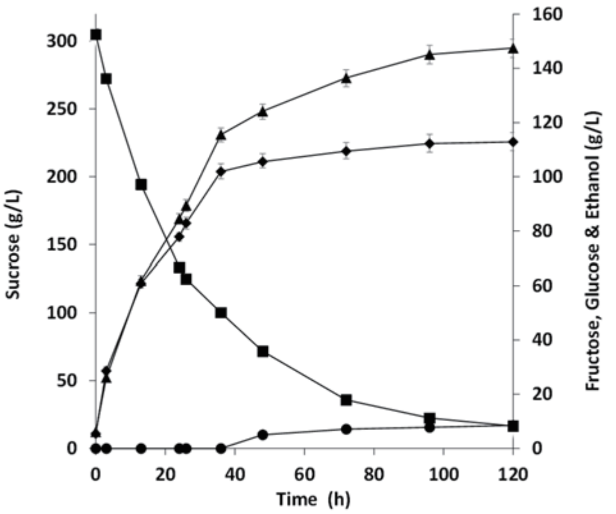


図 3 新規単離酵母（*Meyerozyma guilliermondii* SK-ENNY）を用いたテンサイ由来の糖蜜からの単糖生産。ショ糖（■）、グルコース（▲）、フルクトース（◆）、エタノール（●）。

1) "A novel production method for high-fructose glucose syrup from sucrose-containing biomass by a newly isolated strain of osmotolerant *Meyerozyma guilliermondii*", S.M.R. Khattab, T. Kodaki, *J. Microbiol. Biotechnol.,* 26, 675-683 (2016).

3.3 成果の意義

非食物系バイオマスの有効利用は普遍的テーマであり、今後ますます重要性が増してくる分野である。また、イオン液体のバイオマス有効利用への活用は、新規イオン液体の開発など学術的にも興味あるテーマである。

3.4 今後の計画

個々のプロセスにおける研究成果を関連させることにより、システムとしての高効率化を実現する。

3.5 課題の自己評価

個々のプロセスにおける効率化はある程度達成できているが、システム全体の完成に向け、さらなる研究開発が必要である。

エネルギー利用過程研究部門

C-2　分子ナノ工学研究分野

1. **構成員**：坂口浩司、助教：小島崇寛、助教：中江隆博（～H30.3）、助教：信末俊平（H30.6～）

2. **分野題目**：自然のエネルギー変換原理に学ぶエネルギー新材料の開発

3. **研究概要**

自然のエネルギー変換システムの原理である自己組織化、分子認識、反応拡散などに学び、表面科学、合成化学、材料科学を融合した新しい高効率エネルギー変換材料の合成や新しい合成手法を開発することを目的とした。重点複合領域研究「ソフトエネルギー」、文科省特別経費プロジェクト「革新的高効率太陽光利用」と「スマートマテリアル」が掲げるロスの少ない高効率エネルギー材料開発の目標に沿った研究である。

4. **研究目標**

1) 表面を用いるエネルギー変換新物質合成
2) 表面を用いる新有機合成法の開発

5. **研究手法**：表面科学、合成化学、材料科学

6. **学術領域**：ナノ・マイクロ科学

7. **関連学会**：日本化学会

8. **研究課題**

(1) 表面キラル構造変換を用いる新グラフェンナノリボンの表面合成
(2) 表面分子歪みが駆動する新しい有機合成反応

9. **分野の自己評価**

文科省特別経費プロジェクト「革新的高効率太陽光利用」と「スマートマテリアル」の目標に沿った研究を展開した。また、拠点では他機関との共同研究を推進した。これらの成果は、二つのネイチャー姉妹紙に掲載され、京大プレス発表を行い、国内外から大きな注目を集めた。

10. **備考・留意事項**

第５期科学技術基本計画においては、エネルギーコストのかからない効率良い合成手法の開発が掲げられている。本分野が掲げる目標の一つである自然のエネルギー変換原理に学ぶ新合成手法の開発は、これに沿ったものである。

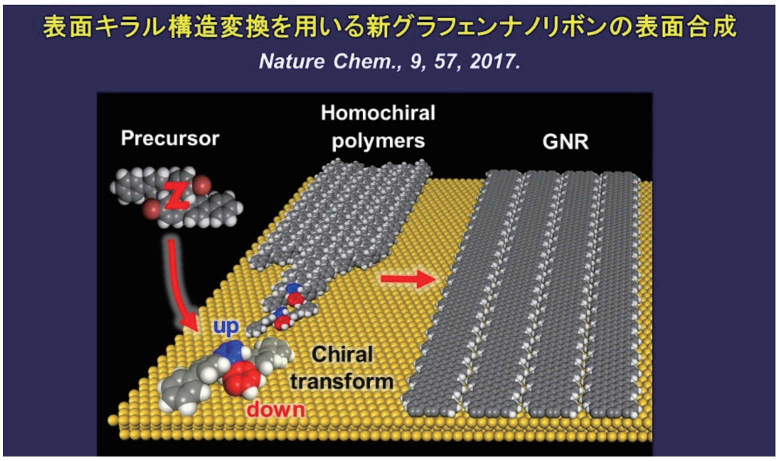
研究課題（1）：表面キラル構造変換を用いる新グラフェンナノリボンの表面合成

（坂口浩司、小島崇寛、中江隆博、信末俊平）

1.1　背景

本研究課題は、重点複合領域研究「ソフトエネルギー」、文科省特別経費プロジェクト「革新的高効率太陽光利用」と「スマートマテリアル」が掲げるロスの少ない高効率エネルギー材料開発の目標に沿った研究である。

1.2　成果の概要



従来、固体表面触媒作用とは、分子と金属表面との強い電子的相互作用を利用して原料の分解と化学反応を行う“ハード”機構が定説であった。我々は従来の定説を覆す「生物模倣触媒」という生物触媒（酵素）に類似した“ソフト”な機構に基づく従来に無い新しい表面触媒作用を発見し、これを用いたグラフェンナノリボン合成法を確立した。具体的には、柔軟性と剛直性を持つ様に分子設計・有機合成したZ型前駆体を、我々が開発した2ゾーン化学気相成長法を用いて合成すると、Z型前駆体がAu(111)表面上で非対称（表面キラル）構造に変形し、表面上で頭尻的に自己組織化しホモキラル重合により脱水素反応に最適の形である「平面型ホモキラル高分子構造」を形成し、著しく高い効率で新種アセン型グラフェンナノリボン（ジグザグ型と同じ成長軸を持つ）に変換することに成功した。我々が発見した新しい表面触媒作用は、キラル、分子変形、自己組織化、高効率化学反応、選択的成長等の生物触媒に見られる概念を人工的に実現した初めての例である。この手法により合成したアセン型グラフェンナノリボンは成長した金属基板から単離可能であり、優れた半導体的性質を示すことを明らかにした。

1) H. Sakaguchi *et al., Nat. Chem.*, 9, 57, 2017.

1.3　成果の意義

従来、固体触媒作用は吸着した分子を分解して原子組み換えを行う“ハード”機構が定説であった。我々は従来の定説を覆す「生物模倣触媒」という生物触媒（酵素）に類似した“ソフト”な機構に基づく従来にない新しい表面触媒作用を発見し、これを用いたグラフェンナノリボン合成法の道を拓いた。

1.4　今後の計画

今後は、本研究成果により見出したキラル表面変形機構を応用し、分子自体で立体キラル性を有する非対称分子を有機合成し、非対称型グラフェンナノリボン表面合成を行う。

1.5　課題の自己評価

本成果は、文科省特別経費プロジェクト「革新的高効率太陽光利用」と「スマートマテリアル」の目標に沿った研究であり、ネイチャー姉妹紙に掲載され京大プレス発表を行い、国内外から大きな注目を集めた。国際会議ICPAC2018においてシンポジウムアワードを受賞した。

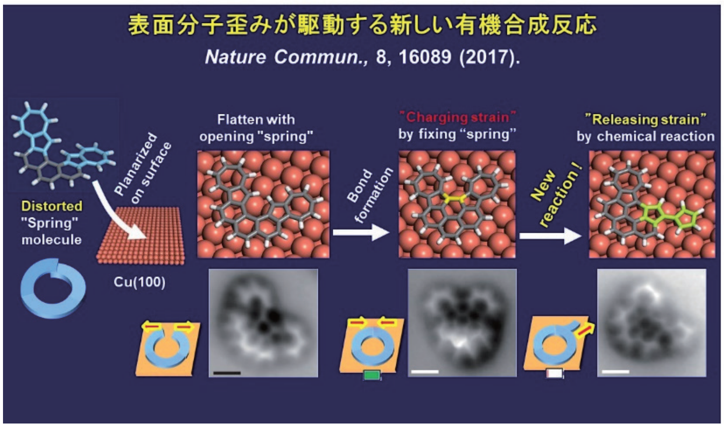
研究課題（2）：表面分子歪みが駆動する新しい有機合成反応

（坂口浩司、小島崇寛、中江隆博、信末俊平）

2.1　背景

本研究課題は、重点複合領域研究「ソフトエネルギー」、文科省特別経費プロジェクト「革新的高効率太陽光利用」と「スマートマテリアル」が掲げるロスの少ない高効率エネルギー材料開発の目標に沿った研究である。

2.2　成果の概要



有機ELディスプレイ等の薄くて曲がるデバイスを構成する半導体材料である機能性有機分子は、従来、フラスコ中での有機合成反応を用いて作られてきた。しかし、超伝導などの優れた特性を示すある種の機能性有機分子は、有機合成に大きな活性化エネルギーを必要とし数百度の高温でも合成が困難であり、新しい原理に基づく合成法が望まれていた。我々は、ねじれた"ばね"型有機分子を設計し、"ばね"型有機分子をCu(100)金属表面で歪ませることで高エネルギー状態を作り出すことにより高い活性化エネルギーを乗り越え、従来法では合成困難であった機能性材料フルバレン骨格物質を著しく高い原子効率で合成する新しい炭素骨格組み換え反応の開発に成功した。

1) H. Sakaguchi *et al.*, *Nat. Commun.*, 8, 16089 2017.

2.3　成果の意義

従来、機能性有機分子合成は、大きな活性化エネルギーを必要とし数百度の高温でも合成が困難であった。本研究では、"ばね" 型有機分子を金属表面で歪ませ高エネルギー状態を作り出す新提案により、従来法では合成困難であった機能性材料フルバレン骨格物質を著しく高い原子効率で合成する新しい炭素骨格組み換え反応の開発に成功した。本成果は、従来にない新しい原理に基づく有機合成法の道を拓いた。

2.4　今後の計画

今後は、本研究で開発した高い原子効率で合成する新しい炭素骨格組み換え反応を用い、新しい"ばね" 型有機分子を設計し新しい物質合成を目指す。

2.5　課題の自己評価

本成果は、拠点における他機関（東大、愛媛大）との共同研究に拠る。また文科省特別経費プロジェクト「革新的高効率太陽光利用」と「スマートマテリアル」の目標に沿った研究であり、ネイチャー姉妹紙に掲載され京大プレス発表を行い、国内外から大きな注目を集めた。

エネルギー利用過程研究部門

C-3　生物機能化学研究分野

1. **構成員**：教授：森井孝、准教授：中田栄司、講師：Arivazhagan Rajendran、助教：仲野瞬

2. **分野題目**：高効率なエネルギー利用を可能にするタンパク質やRNAのテーラーメイド設計原理の確立

3. **研究概要**

生物は、タンパク質、核酸など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している。このような生物のエネルギー利用原理を理解して、高い機能を発揮する生体高分子を合目的に作製することで、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を実現する。

4. **研究目標**

1) 特定の空間に配置した酵素・受容体による高効率物質・エネルギー変換
2) 機能性生体高分子複合体の合目的な作製法の開発

5. **研究手法**：有機化学、生物化学、タンパク質工学実験、分光法、原子間力顕微鏡

6. **学術領域**：生物分子科学、生体関連化学、生物機能化学

7. **関連学会**：日本化学会、日本核酸化学会、日本ケミカルバイオロジー学会、高分子学会

8. **研究課題**

(1) DNAナノ構造体を用いたタンパク質・酵素ナノ組織体による分子コンビナートの開発
(2) RNA-ペプチド複合体を用いた触媒と蛍光センサーの構築

9. **分野の自己評価**

タンパク質や酵素をナノメートルの精度で1分子ずつ配置する方法の開発により、従来不可能だった、細胞内を模した空間に配置した酵素や受容体の新しい化学分野を開拓できる。また、RNA-ペプチド複合体を利用して、基質特異性と触媒活性を兼ね備えた人工触媒の作製に初めて成功し、汎用的な人工酵素の開発に向けて画期的な知見を得た。

10. **備考・留意事項**

「エネルギーの安定的な確保と利用の効率化」を推進するためには、生物の環境適合性と利用効率に優れたエネルギー・物質変換システムの構築が重要である。精緻な生体高分子組織体の構築と、狙った機能を発揮する生体高分子を作製する原理の探究によって、基礎研究力を強化し、新しい学術分野を創成できる。

研究課題（1）：DNA ナノ構造体を用いたタンパク質・酵素ナノ組織体による分子コンビナートの開発（森井孝、中田栄司、仲野瞬）

1.1　背景

生体内で見られるタンパク質や RNA の精緻な組織体を、機能を保持したまま「細胞の外」で構築することができれば、人工光合成や人工代謝系によりクリーンで高効率なエネルギー生産・変換系の構築できる。本研究では、複数種の酵素を DNA オリガミの狙った位置に狙った数だけ、１分子ずつ配置する技術を開発し、高効率な物質変換系を実現する。

1.2　成果の概要

我々が開発した、DNA オリガミ上に位置を制御してタンパク質を定量的に配置するアダプター法（*Angew Chem. Int. Ed.* **2012**, *51*, 2421.; *Chem. Commun.* **2015**, *51*, 1016.; 論文 2 など）を利用して、連続反応に関与する複数種の酵素を、距離や数を制御して配置し、酵素間距離と連続反応の効率の相関関係を明らかにした（論文 1, 2）。また、細胞膜上で多量体構造を形成するイオンチャネルの集積状態を規制して、その活性を制御することにも成功し、アダプター法が細胞内外で過渡的に形成されるタンパク質組織体を構築できることを示した（論文 3）。

1) T.A. Ngo *et al.* “Spatially Organized Enzymes Drive Cofactor-Coupled Cascade Reactions.” *J. Am. Chem. Soc.* **2016**, *138*, 3012-3021.
2) T.M. Nguyen *et al.* “Design of Modular Protein-Tags for the Orthogonal Covalent Bond Formation at Specific DNA Sequences” *J. Am. Chem. Soc.* **2017**, *139*, 8487-8496.
3) T. Kurokawa, *et al.* “DNA Origami Scaffolds as Templates for Functional Tetrameric Kir3 K^+ Channels” *Angew. Chem. Int. Ed.* **2018**, *130*, 2616-2621.

1.3　成果の意義

ナノメートルの精度で、複数種類の生体高分子を１分子ずつ距離や数を制御して配置した組織体を構築する技術は他にはなく、生物の高効率なエネルギー・物質変換を支えるタンパク質、酵素集合体の空間配置にもとづいた化学を新しく展開できる。

1.4　今後の計画

本手法を三次元の DNA ナノ構造体を用いた組織体作製技術へと展開し、生体内で酵素、受容体、RNA 組織体によって高効率な化学反応が進行する原理を明らかにする。

1.5　課題の自己評価

従来の方法では化学的な検証が不可能だった、生体高分子が組織体として機能する生命現象や化学反応を、細胞内外で解析できるため、生物化学の新分野が創成できる。

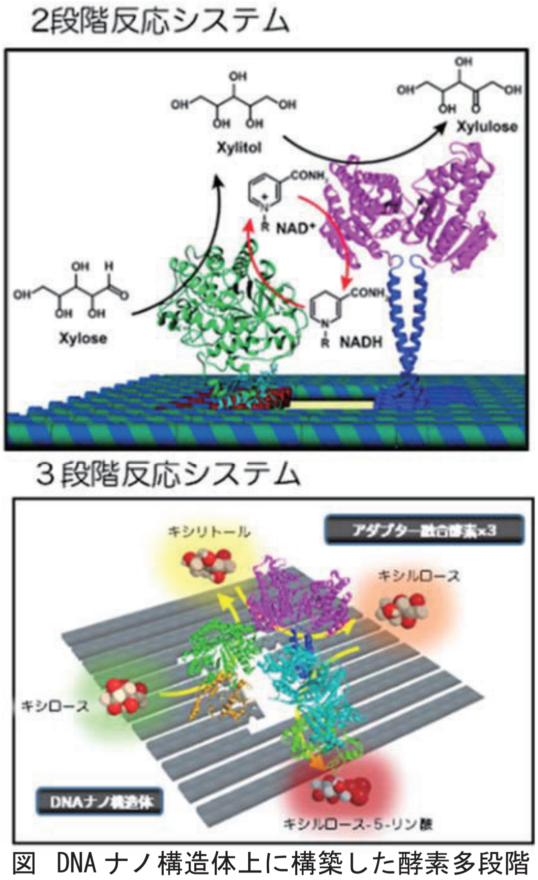


図　DNA ナノ構造体上に構築した酵素多段階反応システム（上）２段階（下）３段階

研究課題（2）：RNA-ペプチド複合体を用いた触媒と蛍光センサーの構築

（森井孝、中田栄司、仲野瞬）

2.1　背景

生体内では、タンパク質と RNA の複合体が高効率で物質変換を行っている。しかし、これらの複合体に合目的な機能を発揮させる分子設計法は、まだ開発されていない。RNA-ペプチド複合体を基本骨格とすると、RNA 単体よりも高効率に反応を促進する人工酵素や高い特異性で分子を検出するバイオセンサーなどが構築できる可能性がある。

2.2　成果の概要

RNA-ペプチド複合体（RNP）の RNA サブユニットの塩基配列を多様化したライブラリーの中から、標的基質に対して特異的に結合する RNP を選択して受容体を作製できる。この RNP 受容体のペプチドサブユニットを、合目的にライブラリー化して分子選択を行うことにより、受容体の高い基質特異性を生かした RNP 触媒分子（論文 1）や、蛍光センサー（論文 2）を作製する方法を開発した。ペプチドサブユニットに様々なリンカーを介して触媒分子を修飾した「多様な構造を持つ触媒分子修飾 RNP 受容体ライブラリー」から触媒活性を指標として、エステル加水分解反応を加速する RNP 触媒を選出した。また、蛍光分子ライブラリーを用いた「蛍光分子修飾 RNP 受容体ライブラリー」から、蛍光強度変化を指標として標的基質を特異的に検出できる蛍光性 RNP センサーを選出できた。

1) T. Tamura, S. Nakano, E. Nakata, T. Morii “Construction of a library of structurally diverse ribonucleopeptides with catalytic groups.” *Bioorg. Med. Chem.* **2017**, *25*, 1881-1888.
2) S. Nakano, T. Tamura, R.K. Das, E. Nakata, Y.-T. Chang, T. Morii “A diversity-oriented library of fluorophore-modified receptors constructed from a chemical library of synthetic fluorophores” *ChemBioChem* **2017**, *18*, 2212-2216.

2.3　成果の意義

我々が作製した RNP 受容体をもとにして、基質特異性を持つ RNP 触媒を作製する方法論を開発したほか、特定の RNP 受容体を効率的に蛍光性センサーに変換する新たな方法を開発した。これらの結果は、RNA-ペプチド複合体から作製した RNP 受容体を段階的に機能化できることを示しており、狙った機能を持つ機能性生体高分子を作製する一般的な方法論の確立につながる。

2.4　今後の計画

RNP 触媒の活性をさらに向上させるために、分子設計と分子選択条件をさらに検討する。特に、RNP に段階的ライブラリー法を適用する際に、遷移状態アナログを利用して、普遍的な人工酵素作製法の開発を目指す。本手法の確立により、標的の化学反応を高効率に進行する触媒を目的に合わせて作製することで、高効率かつクリーンな人工の物質変換系の構築に貢献する。

2.5　課題の自己評価

RNP 複合体の段階的機能化によって、RNP 触媒の作製に初めて成功した。これは、天然に匹敵する高い基質特異性や触媒活性を持つ人工酵素を作製するための方法論を確立するうえで画期的な成果である。なお、発表論文 2 は国際共同研究の成果である。

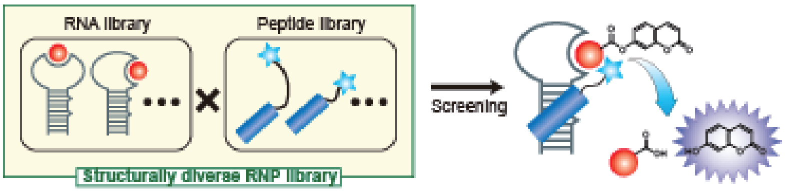


図 多様な構造を持つ触媒分子修飾 RNP 受容体ライブラリーを用いた RNP 触媒の作製

研究課題 (3)：Development of new method for screening anticancer drugs that target topoisomerases by using DNA origami (Arivazhagan Rajendran、森井孝、中田栄司、仲野瞬)

3.1 背景

The mechanism of action of the anticancer drug molecules targeting the topoisomerase enzymes (Topos) is not well known. Also, the typical methods, such as ethidium bromide assay, to measure the topoisomerase inhibitory activity are not reliable. Thus, to understand the Topos reaction and the mechanism of the inhibitors, it is necessary to develop a versatile method. In this work, I have constructed a DNA origami frame with a topologically-interlocked DNA as a possible substrate for Topos. As for the target structures for the Topo reactions, I have constructed topologically interlocked DNA catenane- and rotaxane-like structures inside the DNA origami frame and characterized the structures by high-speed AFM.

3.2 成果の概要

To analyse the Topo reactions and their inhibitors, I have selected the topologically-interlocked DNA nanostructures such as DNA catenane and rotaxane. These topologically-interlocked structures were prepared inside a frame shaped DNA origami template (Figure 1). The formation of the DNA origami and the insertion of the catenane- and rotaxane-like structures were confirmed by both gel electrophoresis and AFM imaging. The experimental conditions for the formation of these structures were optimized. The stability of these structures were increased by ligating the nicks in the DNA strands. I am now investigating the Topo reactions on these functional structures. After successful investigation of the Topo reactions, these structures will be used for the screening of Topo inhibitors. Such a screening will be carried out by the direct and real-time characterization methods. In addition, the fabrication of the topologically interlocked structures with a DNA origami nanostructure is also promising in the fields of molecular switches, motors, sensors, and logic devices that are useful for the bioenergy conversion and utilization.

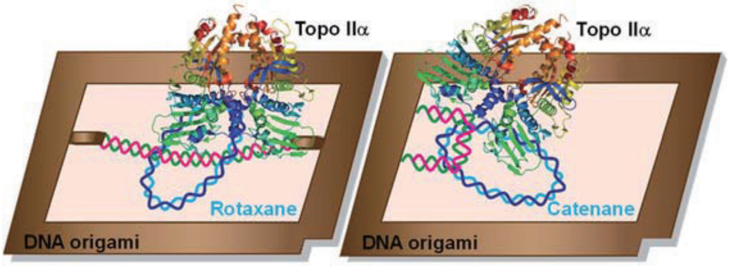


Figure 1. Schematic representation of the DNA rotaxane and catenane structures inside a DNA origami frame and investigation of the Topo IIα reaction on these structures.

1) A. Rajendran, E. Nakata, S. Nakano, T. Morii, "Nucleic-acid-templated enzyme cascades", *ChemBioChem*, **2017**, *18*, 696-716.

2) A. Rajendran, N. Shigi, J. Sumaoka, M. Komiyama, "One-pot isolation of a desired human genome fragment by using biotinylated pcPNA/S1 nuclease combination", *Biochemistry*, **2018**, *57*, 2908-2912.

3.3 成果の意義

The results obtained in this project are highly significant in the fields of molecular switches, motors, sensors, and logic devices. In addition, this study is important for the development of nanotechnological methods to investigate the enzymatic reactions and their kinetics that are useful for the bioenergy conversion and utilization.

3.4 今後の計画

The developed DNA nanotechnological method will be used for the fabrication of molecular switches and devices, and also for the bioenergy conversion.

3.5 課題の自己評価

Topologically-interlocked DNA rotaxane and catenane structures were fabricated inside a frame shaped DNA origami. These structures are used for the analysis of topoisomerase reactions and screening of drugs.

エネルギー利用過程研究部門
C-4　エネルギー構造生命科学研究分野

1. **構成員**：教授：片平正人、准教授：永田崇、助教：真嶋司

2. **分野題目**：構造生命科学に立脚した生体分子の機能発現機構の解明と木質バイオマスを解析・活用する方法論の開発

3. **研究概要**

木質バイオマスからエネルギーと有用物質を獲得する方法論の開発は、化石資源への依存度の減却と CO_2 の排出量の削減に繋がり、研究所が標榜するゼロエミッションエネルギーとも合致する。酵素等の生体分子の機能発現機構の理解に基づいて、木質バイオマスを解析・活用する方法論の開発を推進した。

4. **研究目標**

1) 木質バイオマスからエネルギーと有用物質を獲得する方法論の開発
2) 蛋白質の機能発現機構の解明
3) 核酸の機能発現機構の解明

5. **研究手法**：NMR 法、結晶構造解析、蛍光・円偏光二色性、原子間力顕微鏡、分子生物学・生化学実験

6. **学術領域**：構造生物科学、生物物理学、物理系薬学、生体関連化学、木質科学

7. **関連学会**：核磁気共鳴学会、生物物理学会、分子生物学会、蛋白質科学会、RNA 学会、核酸化学会、農芸化学会、木材学会

8. **研究課題**

(1) 木質バイオマスを解析・活用する方法論の開発と木質分解酵素の大量調製系の確立
(2) 酵素が標的を見出して酵素反応を行う動作原理の解明
(3) 機能性核酸が機能を発揮するメカニズムの解明

9. **分野の自己評価**

科研費、CREST、ALCA 等の外部資金を数多く獲得し、上記の分野課題に精力的に取り組んだ。その結果、高いインパクトファクターの雑誌に掲載された論文を含む数多くの論文を発表し、プレスリリースも行い、大きな成果を挙げた。

10. **備考・留意事項**

木質バイオマスからエネルギーと有用物質を獲得する方法論の開発を行うことで、地球規模の課題である CO_2 の排出量の削減に貢献することを目指している。

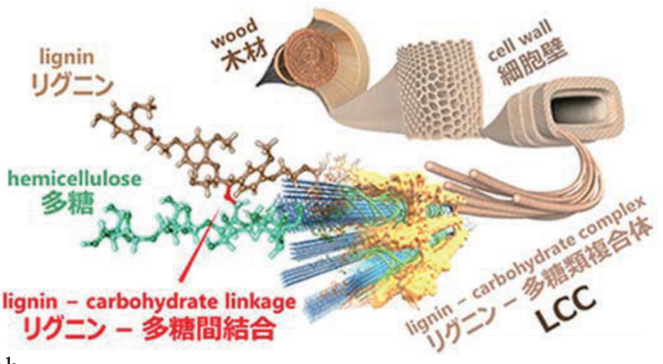
研究課題（1）：木質バイオマスを解析・活用する方法論の開発と
木質分解酵素の大量調製系の確立（片平正人、永田崇、真嶋司）

1.1　背景

木質バイオマスからエネルギーと有用物質を獲得する方法論の開発は、化石資源への依存度の減却と CO_2 の排出量の削減に繋がり、研究所が標榜するゼロエミッションエネルギーとも合致する。木質バイオマスを解析・活用する方法論の開発を推進した。

1.2　成果の概要

木質バイオマスの構造解析と定量を NMR 法によって行う方法論を開発した（発表論文 1)。これを実木質バイオマスに適用し、ヘミセルロースとリグニンの間の共有結合の分子構造を世界で初めて実験的に解明し（発表論文 4)、プレスリリースも行った。また、木質バイオマスを効果的に分解できるために、同バイオマスの利活用に有用である木材腐朽菌由来の各種の酵素に関し、大腸菌や酵母等の異種宿主を用いた大量発現・大量精製に成功した。さらに、これらの酵素の特性を解明した（発表論文 2,3,5)。



木質バイオマスの主要成分間の結合様式の決定

1) Okamura, H., Nishimura, H., Nagata, T., Kigawa, T., Watanabe, T. and Katahira M. (2016) Sci. Rep., 6, 21742. "Accurate and molecular-size-tolerant NMR quantitation of diverse components in solution"
2) Lin, M.I., Nagata, T. and Katahira, M. (2018) Protein Expr. Pur., 145, 45-52. "High yield production of fungal manganase peroxidases by *E. coli* through soluble expression, and examination of the activities"
3) Wan Osman, W.H., Lin, M.I., Kondo, K., Nagata, T. and Katahira, M. (2018) Int. J. Biol. Macromol., 113, 1158-1166. "Characterization of the glutathione S-transferases that belong to the GSTFuA class in *Ceriporiopsis subvermispora*: Implications in intracellular detoxification and metabolism of wood-derived compounds"
4) Nishimura, H., Kamiya, A., Nagata, T., Katahira, M. and Watanabe, T. (2018) Sci. Rep., 8, 6538. "Direct evidence for α ether linkage between lignin and carbohydrates in wood cell walls"
5) Lin, M.I., Hiyama, A., Kondo, K., Nagata, T. and Katahira, M. (2018) Appl. Microbiol. Biotech., in press. "Classification of fungal glucuronoyl esterases (FGEs), and characterization of two new FGEs from *Ceriporiopsis subvermispora* and *Pleurotus eryngii*"

1.3　成果の意義

今回開発した構造決定・定量の方法論は汎用性が高く、木質バイオマスの解析に広く適用が可能である。またヘミセルロースとリグニンの間の共有結合の分子構造の決定は世界初であり、意義深い。さらに、木質バイオマスの利活用に有用な酵素群を大量に調製できるようになり、それらの酵素としての特性も解明されたことから、これらの酵素群を実木質バイオマスの利活用に応用することが視野に入ってきた。

1.4　今後の計画

今回大量調製に成功した酵素群を用いて木質バイオマスを分解し、その生成物を我々が開発した方法論で解析することにより、木質バイオマスの利活用を進めていく。

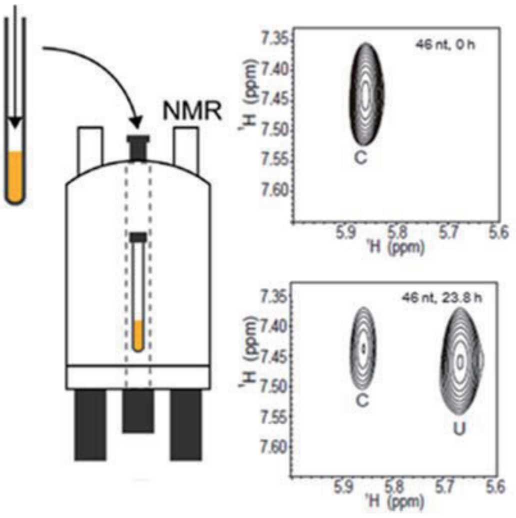
1.5　課題の自己評価

木質バイオマスの利活用に資する木材腐朽菌由来の分解酵素群の大量調製と、NMR 法を用いた木質バイオマスの構造解析・定量法の開発とその応用は、ともに世界初の成果であり、プレスリリースによる成果の情報発信も含めて高く評価される。今回調製された酵素群と NMR の方法論を武器とすれば、実木質バイオマスの利活用にブレークスルーをもたらし得ると考えている。

研究課題（2）：酵素が標的を見出して酵素反応を行う動作原理の解明
（片平正人、永田崇、真嶋司）

2.1 背景
エネルギー・マテリアル資源としてのタンパク質に関し、NMR 法等によって機能発現機構を、化学構造・超分子構造の観点から分子・原子レベルの分解能で解明し、エネルギー利用の高度化に向けたタンパク質ツールの開発を視野に入れた研究を推進した。

2.2 成果の概要
ヒト APOBEC3 は、遺伝子に変異を起こすシトシン脱アミノ化酵素である。そのうち、A3G と A3F は HIV の遺伝情報を破壊するのに対し、A3B はヒト細胞のがん化に関わっている。我々が開発した NMR 実時間計測法を用いて、これらの酵素による基質の変換をリアルタイムで追跡した結果、A3G、A3F、A3B について、DNA 鎖の上をスライディングすることとカップルした酵素反応を行う機構を解明した（発表論文 1,3,4）。他方、各種幹細胞やがん細胞の未分化状態と増殖能の維持を担う Musashi1 と、筋萎縮性側索硬化症の原因因子 FUS/TLS は、いずれも遺伝子発現制御に関わる核酸結合タンパク質である。これらについて NMR 法を用いた構造機能相関解析を行い、核酸認識機構を原子レベルの分解能で明らかにした（発表論文 2,5）。



酵素反応の NMR 実時間モニタリング

1) Kamba, K., Nagata, T. and Katahira, M. (2016) *Front. Microbiol.*, 7, 587, "Characterization of the deamination coupled with sliding along DNA of anti-HIV factor APOBEC3G on the basis of the pH-dependence of deamination revealed by real-time NMR monitoring"
2) Iwaoka, R., Nagata, T., Tsuda, K., Imai, T., Okano, H., Kobayashi, N. and Katahira, M. (2017) *Molecules*, 22, E1207. "Structural insight into recognition of r(UAG) by Musashi-1 RBD2, and construction of a model of Musashi-1 RBD1-2 bound to the minimum target RNA"
3) Wan, L., Nagata, T., Morishita, R., Takaori-Kondo, A. and Katahira, M. (2017) *ACS Chem. Biol.*, 12, 2704-2708. "Observation by real-time NMR, and interpretation of length- and location-dependent deamination activity of APOBEC3B"
4) Wan, L., Nagata, T. and Katahira, M. (2018) *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 20, 3109-3117. "Influence of the DNA sequence/length and pH on deaminase activity, as well as the roles of the amino acid residues around the catalytic center of APOBEC3F"
5) Kondo, K., Mashima, T., Oyoshi, T., Yagi, R., Kurokawa, R., Kobayashi, N., Nagata, T. and Katahira, M. (2018) *Sci. Rep.*, 8, 2864. "Plastic roles of phenylalanine and tyrosine residues of an RGG motif of TLS/FUS in binary and ternary complex formation with the G-quadruplex structures of telomeric DNA and TERRA"

2.3 成果の意義
今回 A3G、A3F、A3B の脱アミノ化反応の動作機構、および、Musashi1、FUS/TLS の核酸認識機構が解明されたので、これらを阻害する低分子化合物を探索することで、創薬研究が促進すると期待される。また、今回適用した酵素反応の NMR 実時間計測法や構造機能相関解析のための NMR 法は、生体内カスケードの解析、およびバイオマスの利活用に関連した酵素の反応解析においても強力であり、現在すでにこのような活用を進行させている。

2.4 今後の計画
ここで用いた生化学・遺伝子工学的手法や、開発・適用した NMR 法を発展させ、現在、微生物や酵素の作用機序、および木質バイオマスの分解産物の動態解析を進めている。

2.5 課題の自己評価
NMR 法を用いた酵素反応の実時間計測法の開発・適用、および構造機能相関解析の実施により、病気や創薬の研究分野で成果を上げた。またこれらの手法は酵素を用いた木質バイオマスのエネルギー利用の高度化の研究にそのまま応用でき、実際にこれを進行させている。以上の点は評価される。

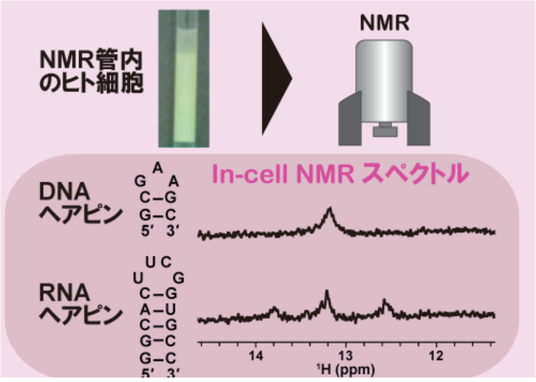
研究課題（3）：**機能性核酸が機能を発揮するメカニズムの解明**（片平正人、永田崇、真嶋司）

3.1 背景

機能性核酸が機能を発揮する原理を、NMR 法を中心にした構造生命科学の観点から解明する。得られた知見を基に、エネルギーの獲得・有効利用に資する核酸性デバイスの開発を視野に入れた。

3.2 成果の概要

Arid5a は自己免疫疾患に関わる蛋白質であり、 Stat3 蛋白質の mRNA の 3’非翻訳領域に結合して、CD4 陽性 T 細胞の分化を制御する。今回 3’非翻訳領域がステムーループ構造を形成することを NMR 法によって決定し、Arid5a がいかにして mRNA の 3’非翻訳領域を認識・結合するのかを解明した（発表論文 1）。また、ヒト生細胞中に存在する DNA、および RNA に由来する NMR シグナルの観測に世界に先駆けて成功し、細胞内の分子混雑状態におけるこれらの分子の構造に関する知見を得た（発表論文 3）。さらに、二重鎖 DNA 中の T-T ミスマッチを選択的にアルキル化する vinyldiaminotriazine(VDAT)-acridine 複合体が、チミンの N3 の位置を選択的にアルキル化することを明らかにした（発表論文 4）。人工的に設計・開発した機能性核酸の構造と機能発現について、分子・原子レベルの分解能で解析し、設計通りに機能を発現していることも確認した（発表論文 2,5）。



ヒト生細胞中の核酸の NMR シグナルの初観測

1) Masuda *et al.* (2016) *J. Exp. Med.*, 213, 605-619. "Arid5a regulates naïve $CD4^+$ T-cell fate through selective stabilization of Stat3 mRNA"
2) Yamaoki, Y., Nagata, T., Mashima, T. and Katahira, M. (2017) *Chem. Commun.*, 53, 7056-7059. "Development of an RNA aptamer that acquires binding capacity against HIV-1 Tat protein via G-quadruplex formation in response to potassium ions"
3) Yamaoki, Y., Kiyoishi, A., Miyake, M., Kano, F., Murata, M., Nagata, T. and Katahira, M. (2018) *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 20, 2982-2985. "The first successful observation of in-cell NMR signals of DNA and RNA in living human cells"
4) Onizuka, K., Usami, A., Yamaoki, Y., Kobayashi, T., Hazemi, M., Chikuni, T., Sato, N., Sasaki, K., Katahira, M. and Nagatsugi, F. (2018) *Nucleic Acids Res.*, 46, 1059-1068. "Selective alkylation of T-T mismatched DNA using vinyldiaminotriazine-acridine conjugate"
5) Katahira, M. and Mashima, T. (2018) *Encyclopedia of Biophysics 2nd Edition*, in press, "Introduction to Nucleic Acids NMR", Springer

3.3 成果の意義

機能性核酸の構造と機能発現の相関を明らかにしたことで、関連する生命現象の理解や創薬研究の発展がもたらされる。またヒト生細胞内環境での核酸の NMR スペクトルの観測が今回初めて可能となったことで、ヒト生細胞内における核酸分子に関して、よりリアルな描像が得られる。さらに、設計・開発した機能性核酸が意図した機能を発揮することを示せたことは、核酸性デバイスの研究開発の活性化に繋がる。

3.4 今後の計画

本研究で得られた機能性核酸の構造と機能発現についての分子・原子レベルの分解能の情報を基に、エネルギーの獲得・有効利用に資する核酸性デバイスの創製を目指す。

3.5 課題の自己評価

機能性核酸の動作原理を国際共著論文、および高いインパクトファクターの雑誌に掲載の論文（発表論文 1,4）等によって明らかにし、さらにヒト生細胞中における機能性核酸の NMR シグナルの観測に世界に先駆けて成功した点は評価される。

2.4. エネルギー複合機構研究センター

附属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設置された。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することを設置目的としている。センターでは、研究所が設定した「重点研究課題」研究や単一の分野で困難な研究、多数分野や所内外の協力に基づく研究を大型設備を用いて推進するとともに、装置設備を充実・発展させてきた。機動的にプロジェクト研究を遂行するという目的から、内外の研究状況や部局の事業目的に合わせて、テーマは定期的に変遷している。改組発足以来 10 年間を経て、平成 18 年度にはセンター研究を「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二つの複合研究領域に集中・特化させた「研究推進部」によって共同研究を実施している。

現在は、「プラズマ・量子エネルギー研究推進部」、および「ソフトエネルギー研究推進部」が上述の複合研究領域の活動母体となって、二つの重点目標に対して分野を越えたプロジェクト的な共同研究を推進している。さらに、「国際・産官学連携研究推進部」を設置、国際的な活動を中軸とする流動・開発連携を推進することとした。また、各種外部資金による共同研究プロジェクトに柔軟に対応し、研究所としてのポテンシャルを生かしたプロジェクト推進が可能となるよう、産業利用をはじめとする「推進室」を機動的に設置できるようにしている。これらの体制によって、センターの本務である分野・部門の枠を越えた先端的・先導的共同研究等を推進するとともに、それら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ている。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している。

現在、二つのセンター附属研究分野「自己組織化科学研究分野」、「高温プラズマ機器学研究分野」がおかれ、教授一名、および准教授一名が配属されている。これに加え、平成 30 年度からは、寄附研究部門による「環境微生物学研究分野」が設置され、特定教授、特定准教授が外部資金による研究活動を行っている。センターには大型装置設備のための技術室が設置されており、技術専門員、技術系職員はセンターに所属してこれら装置群の管理運営にあたっている。センターは機動的な研究を遂行する場であるとともに次のプロジェクトの萌芽を発掘する場でもあり、不定期に開かれるセンター談話会や内外の講師によるセミナー、センター共同研究などによって情報交換を進めながら新しい研究テーマを探索している。

附属エネルギー複合機構研究センター

D-1　自己組織化科学研究分野

1.　**構成員**：教授：木下正弘

2.　**分野題目**：生体系における自己組織化過程の統一的解明と応用

3.　**研究概要**

生体系に隠された仕組みを解明しつつ、それらを手本として、低いエネルギー消費で高度な機能を達成できる新たなテクノロジーを開発するための基礎を与える研究である。蛋白質の立体構造形成、分子認識、ATP 駆動蛋白質の機能発現などに共通して見られる温度・圧力・塩の効果に着目し、それらを横断的に説明できる理論体系を構築する。溶媒の並進配置エントロピーの効果、なかでも生体分子の自己組織化に伴う周囲に存在する溶媒分子間の相関の変化を軸として、生命現象発現機構を統計熱力学的に独自の切り口で研究する。

4.　**研究目標**

1) 生体系における水・ATP・蛋白質の連携機構の解明
2) 与えられたレセプターと選択的に強く結合するリガンドの特定法の構築
3) 数多くの膜蛋白質立体構造の新たな決定とそれに基づく薬剤設計・新薬の開発

5.　**研究手法**：液体の統計力学，積分方程式論，数値解析学，形態計測学的アプローチ，溶媒和の統計熱力学理論，分子動力学シミュレーション

6.　**学術領域**：　生物物理学、物理化学、構造生物学、薬学

7.　**関連学会**：　生物物理学会、化学会、物理学会、分子生物学会、薬学会

8.　**研究課題**

(1) 蛋白質に対する新しい水和理論の構築
(2) 水を主役とした ATP、およびプロトン駆動蛋白質の機能発現機構の研究
(3) G 蛋白質共役型受容体(GPCR)の立体構造を安定化させるアミノ酸置換の理論的特定法の開発

9.　**分野の自己評価**

従来の方法や固定観念にとらわれることなく、斬新な概念や独自に開発した理論を用いている点で独創性が高いと考えている。基礎的な面で多くの成果が得られているが、実践的にも複数の GPCR の立体構造の安定化、および立体構造の新たな決定に成功している。

10.　**備考・留意事項**

構造生物学・生化学・薬学・医学分野における実験研究者と密接な共同研究を行っており、すでに数多くの共著論文が公開されている。分野間の垣根を越えた理論と実験の融合による新学術領域の開拓を目指している。GPCR に関する研究では 4 件の製薬会社との共同研究も進行中であり、新薬の開発を通して近い将来に社会に貢献したいと考えている。

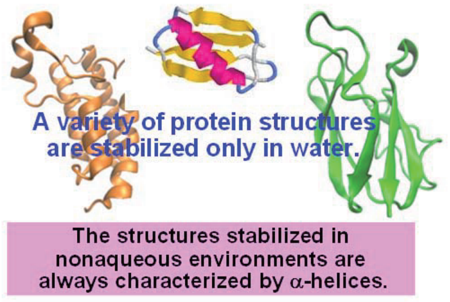
研究課題（1）：蛋白質に対する新しい水和理論の構築（木下正弘）

1.1　背景

蛋白質の立体構造形成は水和特性に大きく影響されるが、それについては未だに統一的な見解が得られていない。本研究では、疎水性水和と親水性水和の基本的な性質を解明しつつ、蛋白質の折り畳み、および熱・圧力・低温変性のみならず、それらに及ぼす塩や共溶媒の添加効果を統一的に説明できる理論体系を構築する。

1.2　成果の概要

系全体における水分子間の混み合い（エントロピックな相関）の緩和による水の並進配置エントロピーの利得が蛋白質折り畳みの推進力であることを示した。折り畳みに伴う蛋白質分子内水素結合形成は、蛋白質－水間の水素結合の切断なる大きなペナルティーを被る。疎水性部位の接触による構造化を起こした水の量の減少に起因する水のエントロピー利得の寄与は極めて小さい。上述推進力に力点を置いた理論によってのみ、蛋白質の折り畳み、および熱・圧力・低温変性、さらには、糖・アルコール・塩などの添加効果のすべてを説明できることを示した。



溶媒の種類が蛋白質立体構造に及ぼす効果

1) H. Oshima and M. Kinoshita, J. Chem. Phys., 142, 145103(1-15) (2015).
2) S. Murakami and M. Kinoshita, J. Chem. Phys., 144, 125105(1-10) (2016).
3) S. Murakami, T. Hayashi, and M. Kinoshita, J. Chem. Phys., 146, 055102(1-15) (2017).
4) M. Kinoshita and T. Hayashi, Phys. Chem. Chem. Phys., 19, 25891-25904 (2017).
5) T. Hayashi, M. Inoue, S. Yasuda, E. Petretto, T. Škrbić, A. Giacometti, and M. Kinoshita, J. Chem. Phys., 149, 045105 (1-17) (2018).

1.3　成果の意義

蛋白質の折り畳みは生体系における最も基本的な自己組織化である。得られた成果は、それ以外の種々の自己組織化（蛋白質の高次構造形成、分子認識など）にも適用できる汎用性の高いものである。

1.4　今後の計画

蛋白質の立体構造安定性を高効率で評価できる自由エネルギー関数を開発できたので、それを応用することにより、60 年来未解決の難問である「アミノ酸配列から蛋白質の立体構造を予測する問題」と取り組む。

1.5　課題の自己評価

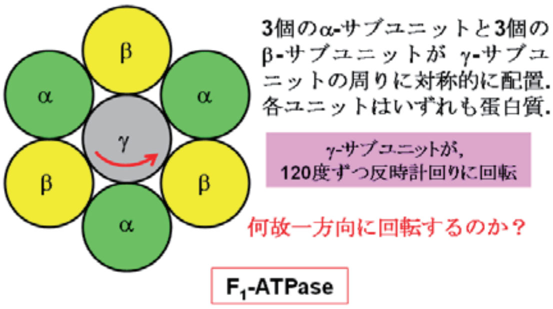
蛋白質折り畳みの推進力について生化学の教科書に書かれていることを塗り替えるべき結果が得られている。折り畳み、熱・圧力・低温変性、それらに及ぼす塩や共溶媒の添加効果を各論的に扱うのではなく、横断的、および統一的に扱って初めて得られる成果であると評価できる。

研究課題（2）：水を主役とした ATP およびプロトン駆動蛋白質の機能発現機構の研究（木下正弘）

2.1 背景

「ATP の蛋白質への結合→結合した ATP の加水分解→分解生成物である Pi と ADP の蛋白質からの解離」という ATP の加水分解サイクルを利用する ATP 駆動蛋白質や、プロトンの高濃度側から低濃度側への移行を利用するプロトン駆動蛋白質の機能発現機構はほとんど理解されていない。本研究では、水の役割に主眼を置いた独自の理論により、これらの蛋白質の機能発現に対する斬新な描像を構築する。

2.2 成果の概要



ATP 駆動蛋白質の機能発現の例として、F1-ATPase 中におけるγサブユニットの一方向回転とアクチンフィラメント上におけるミオシンの一方向移動を取り上げ、そのメカニズムについて一般の化学ー力学変換とは異なる説明を与えた。ATP の加水分解という不可逆過程とカップルすることにより、蛋白質が立体構造変化を起こし、それに起因して系内の水の自由エネルギーが低下する方向にγサブユニットを回転、あるいはミオシンを移動させようとする力が作用する。プロトン駆動蛋白質の典型例として AcrB を取り上げ、その機能的回転のメカニズムを初めて解明するとともに、F1-ATPase で見られる上記回転のメカニズムとの類似性を指摘した。

1) M. Kinoshita, Biophys. Rev., 5, 283-293 (2013).
2) H. Mishima, H. Oshima, S. Yasuda, and M. Kinoshita, J. Phys. Chem. B, 119, 3423-3433 (2015).
3) M. Kinoshita, Springer Briefs in Molecular Science, Springer, ISBN: 978-981-10-1484-0 (2016).
4) M. Kinoshita, In "The Role of Water in ATP Hydrolysis Energy Transduction by Protein Machinery", Chapter 18, Part III: Functioning Mechanism of Protein Machineries Based on Water Functions, Springer Briefs in Molecular Science, Springer, ISBN: 978-981-10-8459-1, pp. 303-323 (2018).

2.3 成果の意義

ATP 駆動蛋白質の機能発現に関する従来の考えでは、ATP を高エネルギー化合物として中心的に扱っており、水の役割が軽視されている。本研究で得られた成果は、分子機械の設計や利用に貢献できるものと期待できる。

2.4 今後の計画

ATP の加水分解が化学平衡に達していれば、γサブユニットあるいはミオシンはランダム回転あるいはランダムウォークするはずである。逆に ADP と Pi から ATP の合成が行われる濃度条件下では、それらは逆方向に回転または移動するものと考えられる。これらのことを一分子計測の実験研究者と共同で検証する。

2.5 課題の自己評価

基本的な考え方が従来のものと本質的に異なるため、広く一般の研究者に受け入れられるまでにはまだ時間がかかるものと考えられるが、それが達成されればインパクトも高いものと期待できる。

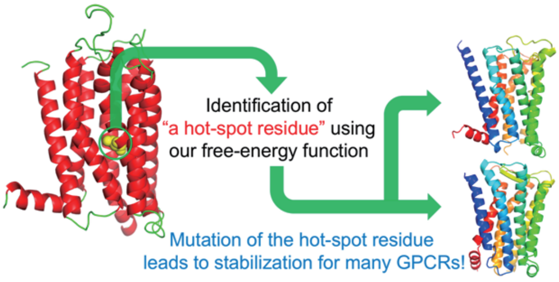
研究課題（3）：G 蛋白質共役型受容体（GPCR）の立体構造を安定化させるアミノ酸置換の
理論的特定法の開発（木下正弘）

3.1　背景

GPCR は細胞外から細胞内に情報を伝達する重要な役割を果たすが、それに問題が生じると様々な病気にかかる。GPCR は非常に重要な創薬のターゲットであるが、立体構造が崩れ易いため、立体構造を決定することや薬剤との結合特性を調べることが困難である。本研究では、立体構造の安定性向上（耐熱化）に繋がるアミノ酸置換を理論的に予測する方法を開発する。

3.2　成果の概要

膜中の炭化水素基集団の並進配置の微視的状態数に対応するエントロピーができる限り大きくなる立体構造を GPCR はとらされるという効果を新しく導入した統計熱力学理論を開発した。鍵残基とホットスポットを発見した。鍵残基とは、「それを置換して得られる変異体の多くが大きく耐熱化する」残基であり、各 GPCR に複数個存在する。数多くの GPCR に保存され共通に鍵残基となる残基がホットスポットである。クラス A の不活性型 GPCR に対するホットスポットの 1 つを特定し、それをアルギニンまたはリジンに置換することで数多くの GPCR の安定化および立体構造の新たな決定に成功した。



ホットスポットのアルギニンorリジンへの
置換による数多くのGPCRの耐熱化に成功

1) S. Yasuda, Y. Kajiwara, Y. Takamuku, N. Suzuki, T. Murata, and M. Kinoshita, J. Phys. Chem. B, 120, 3833-3843 (2016).
2) S. Yasuda, Y. Kajiwara, Y. Toyoda, K. Morimoto, R. Suno, S. Iwata, T. Kobayashi, T. Murata, and M. Kinoshita, J. Phys. Chem. B, 121, 6341-6350 (2017).
3) Y. Kajiwara, S. Yasuda, S. Hikiri, T. Hayashi, M. Ikeguchi, T. Murata, and M. Kinoshita, J. Phys. Chem. B, 122, 4418-4427 (2018).
4) Y. Toyoda, et al., Nature Chem. Biol., in press.
5) R. Suno, et al., Nature Chem. Biol., in press.

3.3　成果の意義

実験に携わる共同研究者（千葉大学大学院理学研究科、および京都大学大学院医学研究科のグループ）により、複数種類の GPCR の立体構造が X 線結晶解析によって新たに決定された。立体構造に基づいた論理的・効率的な創薬の実現に向けた大きな進展である。

3.4　今後の計画

クラス A の活性型 GPCR や、他のクラスの GPCR に対してもホットスポットを見出す。個々の GPCR に特有の有効なアミノ酸置換をも次々と特定していく。開発した理論を GPCR 以外の膜蛋白質（トランスポーター、イオンチャンネルなど）にも広く適用できるように拡張する。

3.5　課題の自己評価

国内特許 1 件が取得でき、国際特許 1 件を出願中である。新聞報道も 2 回行われており、すでに高い評価を得ている。4 件の製薬会社との共同研究も進行中であり、新薬の開発を通して近い将来に社会に貢献したい。

附属エネルギー複合機構研究センター

D-2　高温プラズマ機器学研究分野

1. **構成員**：准教授：岡田浩之

2. **分野題目**：ヘリカル軸ヘリオトロンプラズマ閉じ込め装置における高度プラズマ閉じ込め制御

3. 研究概要

将来の基幹エネルギーの一つとして開発されている核融合炉を目指した高温プラズマ閉じ込め高度化を研究の目標としている。トーラスプラズマ内での高速イオン生成、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イオン加熱の Heliotron J を用いた実験研究を主とし、モンテカルロ計算を含めて、ヘリカル軸ヘリオトロンプラズマにおける高速イオン生成・閉じ込めを解明する。

4. 研究目標

1) ヘリカル軸ヘリオトロンプラズマの高速イオンの生成・閉じ込め
2) ヘリカル軸ヘリオトロンプラズマのバルクイオン加熱の高度化

5. **研究手法**：Heliotron J における高温プラズマ実験、高周波加熱、モンテカルロシミュレーション

6. **学術領域**：プラズマ・核融合

7. **関連学会**：物理学会、プラズマ・核融合学会

8. 研究課題

(1) Heliotron J における ICRF と NBI の重畳加熱による高速イオン生成

9. 分野の自己評価

高速イオンの研究範囲の拡大とピッチ角についての研究を進め、ヘリオトロン・ステラレータ磁場閉じ込めに対するバンピネス、トロイディシティの効果を実験的に検証した。また、双方向型共同研究を推進した。

10. 備考・留意事項

文科省の第５期科学技術基本計画の中では「エネルギーの安定的な供給」の中の核融合等の革新的技術の開発の範疇に入るものである。

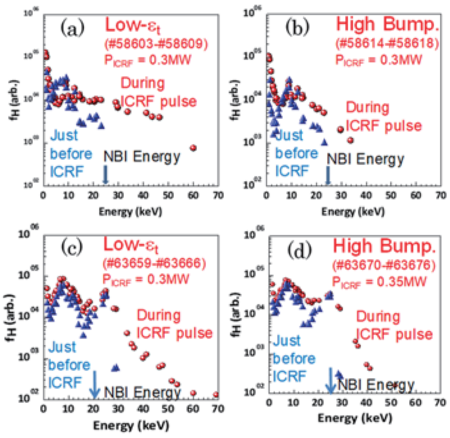
研究課題（1）: Heliotron J における ICRF と NBI の重畳加熱による高速イオン生成
（岡田浩之）

1.1　背景

核融合プラズマにおけるα粒子を実験的に模擬し、その閉じ込めなどを調べるため Heliotron J ではイオンサイクロトロン周波数帯（ICRF）加熱のうち少数イオン加熱によって高速イオンを生成し、その閉じ込めを研究してきた。中性粒子ビーム入射（NBI）加熱を併用しエネルギー領域の拡大と磁場配位に対する依存性研究を目的とした。

1.2　成果の概要

これまでの研究で 35keV まで確認された高速イオンのエネルギー範囲を拡張するために、ICRF と入射エネルギー25keV の NBI との重畳加熱を中密度域(1×10^{19} m^{-3}) で行った。磁場配位としてはトーラス方向成分のリップルを大きくした高バンピネス配位と、さらにトーラス内側・外側の磁場強度比を実効的に小さくした低ε_t 配位である。低ε_t 配位はこれまでの実験にてエネルギー閉じ込めが良いことが分かっており、新古典理論からも閉じ込めの効率化が予想されていた。ヘリシティで規格化したトロイディシティ、バンピネスは低ε_t 配位、高バンピネス配位に対してそれぞれ(0.77, -1.04)、(0.86, -1.16)である。ICRF パルスが印加されると低ε_t 配位では 60keV までの粒子束が観測された。高バンピネスではエネルギースペクトルは低ε_t 配位とは異なり、エネルギー範囲も 35keV までしか得られず、高速イオン閉じ込めに関しても低ε_t 配位の優位性が示された。



ICRF と NBI 重畳加熱時の軽水素エネルギースペクトル。上段は counter 入射、下段は co 入射。ICRF 印加前は△、入射後は○で示した。左列は低ε_t、右列は高バンピネス配位。

1) H. Okada, et al., “Fast Ion Generation by Combination Heating of ICRF and NBI in Heliotron J”, 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto Japan, 7-22 October 2016, EX/P8-18.
2) H.Okada et al.,” Studies of Magnetic Field Configuration in Heliotron J”, 1st AAPPS-DPP, Chengdo, China, 18-23 September, 2017, MF-OV14.

1.3　成果の意義

NBI、および ICRF 加熱を利用し、高速イオン閉じ込めに対する閉じ込め磁場フーリエモードのうち、バンピネス、トロイディシティの有効性を確認した。

1.4　今後の計画

ICRF 加熱装置の電源を復旧し、高パワー、長パルス運転を可能にすることでプラズマへの加熱入力を増大させ、高エネルギーテールの伸長のみならず高イオン温度プラズマの生成、および準定常 H-mode の実現を図る。

1.5　課題の自己評価

ICRF、および NBI 加熱を用いることで高速イオンのエネルギー範囲の拡大とピッチ角についての研究を進め、ヘリオトロン・ステラレータ磁場閉じ込めに対するバンピネス、トロイディシティの効果を実験的に検証した。

附属エネルギー複合機構研究センター

D-3　環境微生物学研究分野

1. **構成員**：特定教授：原富次郎（H30.4～）、特定准教授：髙塚由美子（H30.4～）

2. **分野題目**：微生物の有用な代謝—触媒機能を再強化し、人工的に再構築する。

3. **研究概要**

「微生物」は自然が生み出した極小エネルギーで稼働する究極の機能性マイクロデバイスである。人の経済活動と地球環境が持続的に機能するために微生物応用は不可欠である。本研究分野では野生型の微生物の触媒機能をより強化するため、遺伝子工学を駆使して、人工の酵素や微生物を生み出し、環境へ応用することを目標とする。

4. **研究目標**

1) 高塩素化ポリ塩化ビフェニル類を効率良く脱クロル化できる人工酵素を創出する。
2) グリコシダーゼ類による複合的糖加水反応が、効率良く水稲伝染性糸状菌の細胞壁構造を破壊できるか検証する。

5. **研究手法**：微生物学（細菌学・真菌学）、応用微生物学、遺伝子工学、分子生物学、生化学、環境工学

6. **学術領域**：合成生物学、農芸化学

7. **関連学会**：生物工学会、農芸化学会

8. **研究課題**

(1) 塩素系環境汚染物質の浄化研究
(2) 水稲伝染性の糸状菌を防除する研究

9. **分野の自己評価**

今回の自己点検は構成員の着任早々に行われたため、現段階で本分野の成果を示すことができなかった。今後は、これまでに積み重ねてきた知見へ、本研究所の理念を折り込みつつより磨きをかけ、実用的な成果となるよう目指して研究を推進したい。

10. **備考・留意事項**

研究を遂行する上で留意していることは、経済・社会的課題への対応であり、その成果が社会実装化されることによって持続的社会発展に貢献したいと希望する。

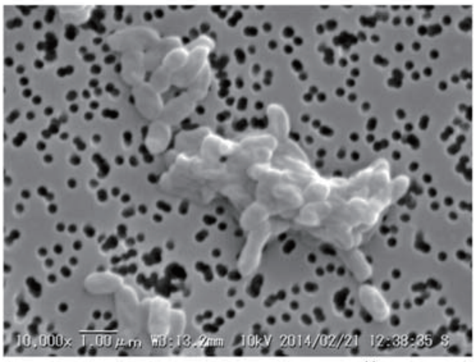
研究課題（1）：塩素系環境汚染物質の浄化研究（原富次郎、髙塚由美子）

1.1　背景

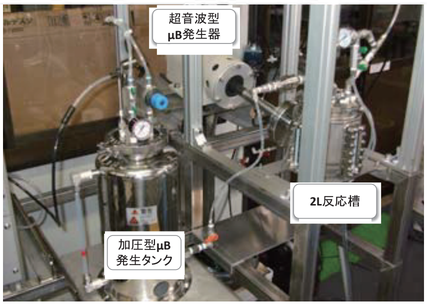
ポリ塩化ビフェニル類（PCBs）は難分解性かつ高残留性であり、多様な塩素置換体から成る同族体群が特徴となって、その特異な物理化学的特性が支持される環境汚染物質である。世界中にはPCBsに汚染された土壌河川が数多くあり、浚渫除去された大量の汚染汚泥も保管されたままで、有効な浄化法は無い。本研究は高塩素化 PCBs を分解する、複合系微生物触媒の開発を目的とする。

1.2　成果の概要

本分野へ着任以降の成果は未だない。過去においては、構成員らは自然環境中から PCBs を強力に分解するコマモナス･テストステロニ YU14-111 株と YAZ2 株を取得した。
とりわけ YAZ2 株では PCBs 代謝機構を含めた全ゲノム解析を終了し、本株の特異な遺伝子構造に加え、PCBs 分解の初発に働くビフェニルジオキシゲナーゼ（BDO）等を遺伝子組換え技術で製作して分解特性を調査し、ベンゼン等の汚染物質に対する浄化特性をも有することを明らかにした。PCBs は天然物でない。そのため PCBs 代謝関連遺伝子群である *bph* オペロンを制御するプロモーターを活性化できず、よって野生株による PCB 生物浄化が困難なことを予見し、工業的制御が容易な大腸菌株を用いた人工型 PCB 分解細菌株の再構築に成功した。さらに酸素マイクロバブル（O_2-μB）添加型のバイオリアクターを試作し、基質特異性の異なる BDO を発現する二種類の遺伝子組換え型 PCB 分解微生物触媒と O_2-μB による反応で、40 mg/kg の PCBs（カネクロール KC-300 と KC-400 相当を含む。）を 24 時間以内に 99.9%以上分解させ、国が定める廃棄物処理基準（0.5 mg/kg 以下）を満たす生物触媒の開発に成功した。



コマモナス・テストステロニYU14-111株



PCB分解バイオリアクター実験機

1.3　成果の意義

PCBs の同族体群に対し二つの異なる基質特異性を示す遺伝子組換え型 BDO を複合させ、さらに酵素と基質の反応場へ過剰な分子状酸素を強制供給することで、100 種類近い PCB 同族体を 24 時間で 99.9%以上分解できる工業的手法を開発した。本法はこれまでに世界に類を見ない PCBs 生物浄化法である。従来の生物浄化法では野生の微生物株を用いた方法が主流であったのに対し、本成果は PCB という非天然な物質共存下で生残できるエコロジカルニッチな機能を獲得したコマモナス・テストステロニ YU14-111 株や YAZ2 株、およびこれらに類する細菌株の特異的なエネルギー獲得システムを、工業的に調教された大腸菌株へ人工的に異種移植することによって、その機能を現在の手技手法の範囲内で簡便かつ大幅に強化改善できることを示し、これまでの環境浄化法を変革し得る普遍的な知見を与えた。

1.4　今後の計画

今後は、本複合系触媒をさらに改良することで、カネクロール KC-500 に代表される、より高塩素化された PCBs を簡便に浄化できるよう研究を進展させる。

1.5　課題の自己評価

今回の自己点検は構成員の着任早々に行われたため、現段階で本分野の成果を示すことができなかった。今後は、これまでに積み重ねてきた知見へ、本研究所の理念を折り込みつつより磨きをかけ、実用的な成果となるよう目指して研究を推進したい。

研究課題（2）：**水稲伝染性の糸状菌を防除する研究**（原富次郎、髙塚由美子）

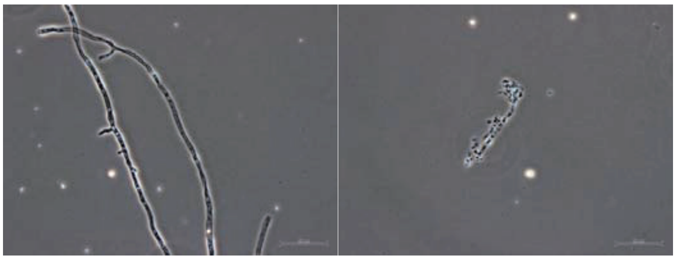
2.1　背景

世界人口は増加の一途であり、近未来においては大きな食糧難が懸念されている。そのため効率的な食糧生産法が求められており、エネルギー効率の点からも生態的地位を上手に利用する方法が見直される。本研究は、糸状菌の細胞壁を構成する糖鎖構造に着目し、糖転移や分解活性を有するグリコシダーゼを応用した創農薬を目的とする。

2.2　成果の概要

本分野へ着任以降の成果は未だない。過去においては、グリコシダーゼ型の農薬候補を探索する過程において、リゾクトニア・ソラニ D138 株という糸状菌（カビ）が作るグリコシダーゼの防除性について調査した。D138 株は麸（ふすま）培地で様々な酵素を分泌し、β-1,3-グルカナーゼ活性のほかに、ヘミセルラーゼやペクチナーゼ、アミラーゼなどのグリコシダーゼ活性を示した。水稲伝染性糸状菌株とグリコシダーゼ類の反応実験では、これら複合系酵素がフザリウム（イネ馬鹿苗病菌）、トリコデルマ（イネ立枯病菌）、ピリキュラリア（イネいもち病菌）を防除した。同様の比較データとして、本調査の以前にバシラス綱細菌株からクローニングした遺伝子組換えキチナーゼとの反応実験では、リゾクトニアとピリキュラリアを防除した。結果から、複合系酵素は単独系酵素に較べて高い防除活性を持つことを示唆した。

健全なカビ（菌糸）　酵素処理したカビ（菌糸）



Trichoderma viride, 30℃, 6hインキュベート
400×, scale bars; 50 μm

2.3　成果の意義

本研究で農薬候補となる酵素の生産株として対象となった D138 株は、水稲伝染性糸状菌の一種である。まだ仮説の段階だが、複合系グリコシダーゼの防除特性は、D138 株が植物を宿主とした際に起き得るであろう他の伝染性微生物との競合関係において、エコロジカルニッチを獲得したと想定され、それを裏付ける証拠として、本複合グリコシダーゼが D138 株と同属同種のリゾクトニア・ソラニに対しては防除性を示さなかったこともあり、本仮設が、今後より深化研究されることで支持されるであろう。現在のところ、D138 株が示した β-1,3-グルカナーゼやヘミセルラーゼ、ペクチナーゼ、アミラーゼ等のうち、いずれのグリコシダーゼが重要な鍵酵素か不明であるものの、異種属の糸状菌では細胞壁を構成する糖鎖の種類や構造が異なるため、グリコシダーゼ類の種類とその配合比が防除性を決定する上で重要な因子であろうと想定する。

2.4　今後の計画

引き続き、グリコシダーゼで切断された植物伝染性の糸状菌細胞壁の糖鎖断片を質量分析等で精査することにより、細胞壁構造と構成糖鎖に対するグリコシダーゼの基質反応性の関係をより理解し、水稲のみならず、大豆や麦等を含む穀類の病害防除に対しても汎用性の高い酵素カクテルを作出したい。

2.5　課題の自己評価

今回の自己点検は構成員の着任早々に行われたため、現段階で本分野の成果を示すことができなかった。今後は、これまでに積み重ねてきた知見へ、本研究所の理念を折り込みつつより磨きをかけ、実用的な成果となるよう目指して研究を推進したい。

3.　重点複合領域研究成果の概要

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」の三領域を重点複合領域とした。第 2 期中期目標・中期計画（平成 22～27 年度）においては、第 1 期に発展させた三重点複合領域研究の成果の展開を図るとともに、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」の二つの領域を推進し、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た。さらに第 3 期中期目標・中期計画（平成 28～33 年度）においては、平成 29 年度から、前述の二つの領域を、プラズマエネルギー科学とエネルギー材料学の融合を目指した「プラズマ・量子エネルギー」、および自然エネルギーの変換と利用を目指した「ソフトエネルギー」と改称するとともに、部門・分野間の横断的研究により異分野融合研究を推進し、新研究分野の創成を目指している。本評価期間（平成 28～30 年度）に重点複合領域研究として、以下の分野間を横断した異分野融合研究を行った。

「プラズマ・量子エネルギー」の複合領域研究としては、Heliotron J 装置によるプラズマ閉じ込めの高性能化、核融合中性子源の応用、原型炉プラズマ対向材料の中性子照射効果、国際ラウンドロビン試験として革新的原子力構造材料の開発、国内研究拠点形成を目指したイオン加速器を用いた材料照射基礎研究を実施した。

「ソフトエネルギー」の複合領域研究としては、自由電子レーザーKU-FEL の深紫外レーザーパルス長を二光子吸収によって計測する方法、結晶性高分子の構造変化を KU-FEL を用いてマイクロ秒の時間分解能で光学的にその場計測するシステム、低出力の CO_2 レーザーを利用した天然高分子系ナノコンポジット材料のその場創成、市販測定器の 100 倍の時間分解能で光学的に標的分子とタンパク質との高選択的な結合を測定できる装置の開発、NMR を用いた電気化学的デバイスの電解液や草木バイオマスの分解に適した新種イオン液体の物理化学的特性解明、二つの生体分子の結合自由エネルギー等を計算する新しい手法による統一的な分子認識機構の提案などが実施された。

これらの研究はすべて、分野あるいは部門間の複合領域研究として実施され、そのうちのいくつかは附属センターの所内共同研究として支援されている。このほか、文部科学省 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、特別経費「革新的高効率太陽光利用技術の開発」、自然科学研究機構核融合科学研究所との双方向型共同研究を基盤として推進した重点複合領域研究は、異分野共同研究を進展させて国内外の研究機関・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している。

以下、各重点複合領域研究の平成 28～30 年度研究成果の概要を述べる。

3.1. プラズマ・量子エネルギー複合領域研究

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（A-2）
		粒子エネルギー研究分野（A-3）
		プラズマエネルギー研究分野（A-4）
	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（B-1）
		エネルギー基盤材料研究分野（B-3）
		複合系プラズマ研究分野（B-4）
	附属エネルギー複合機構研究センター	高温プラズマ機器学研究分野（D-2）

プラズマ・量子エネルギー重点複合領域研究は、中・長期的な視野に立った基幹エネルギーとして、高性能でコンパクトな定常核融合プラズマ、革新的原子力構造材料や核融合燃料の生成などを中心とした核融合実現に不可欠な学術・技術基盤を構築し、核融合エネルギーを中心とした革新的エネルギー利用システムや安全性・社会受容性に関する研究を推進している。特に、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、包括的に議論する複合領域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、双方向型共同研究、センター共同研究におけるプラズマエネルギー研究領域の開拓・推進、および先進ヘリカルシステムの国際拠点形成に寄与している。無電流・磁気井戸・立体磁気軸ヘリカル系プラズマ閉じ込め装置の柔軟な磁場構造の特徴を生かし配位あるいは同位体効果による閉じ込め特性変化の実験的検証を進め、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。

エネルギー材料分野では、核融合・核分裂を含めた原子力環境に曝される構造材料の開発を進めた。DuET 等を用いた核融合模擬照射実験が可能になり、照射損傷組織形成の素過程の理解が進み、照射欠陥論の基盤形成に貢献した。また、核融合炉のダイバータの候補材料であるタングステンの中性子照射効果研究を日米科学技術協力の下で進めている。革新的原子炉構造材料の ODS 鋼や SiC/SiC は原子炉炉心や核融合炉ブランケットへの利用が期待されている。これらの照射データベースの構築を IAEA 原子力材料専門家グループ研究として推進することで、本重点複合領域研究は国際協力拠点形成に貢献している。また、材料・機械・社会システムにおける現象をマルチスケールの視点からシステム保全学を構築した。

慣性静電閉じ込めプラズマ核融合中性子源の応用研究として、不審物中に隠匿された特定核物質を非開封で検知可能な可搬型検査装置を開発した。また、核融合炉ブランケットのトリチウム増殖性実測を可能にした。この研究は、ソフトエネルギー複合領域の分野との共同研究である。また、同様の共同研究で低エミッタンスの電子ビーム生成について研究した結果、自己線形化現象を用いることで、従来よりはるかに高性能な機器設計の可能性を示した。

以下に、平成 28-30 年度の当該重点複合領域研究成果の概要を述べる。

プラズマ・量子エネルギー複合領域研究課題

A-1　Heliotron J 装置によるプラズマ閉じ込めの高性能化
関連分野：粒子エネルギー研究分野（A-3）、プラズマエネルギー研究分野（A-4）、
複合系プラズマ研究分野（B-4）、高温プラズマ機器学研究分野（D-2）

A-2　核融合等革新的エネルギーシステムの開発と社会環境経済適合性評価の研究
関連分野：原子エネルギー研究分野（A-2）、ソフトエネルギー複合領域研究分野

A-3　小型核融合装置の工学産業医療応用システムの開発研究
関連分野：原子エネルギー研究分野（A-2）、粒子エネルギー研究分野（A-3）、
生物機能化学研究分野（C-3）、エネルギー構造生命科学研究分野（C-4）

A-4　核融合中性子源の応用
関連分野：粒子エネルギー研究分野（A-3）、量子放射エネルギー研究分野（A-1）、
生物機能化学研究分野（C-3）

A-5　高輝度電子ビームの生成に関する研究
関連分野：粒子エネルギー研究分野（A-3）、量子放射エネルギー研究分野（A-1）

A-6　原型炉プラズマ対向材料の中性子照射効果
関連分野：複合機能変換過程研究分野（B-1）、原子エネルギー研究分野（A-2）、
エネルギー基盤材料研究分野（B-3）

A-7　革新的原子力構造材料の開発研究（国際ラウンドロビン試験）
関連分野：エネルギー基盤材料研究分野（B-3）、複合機能変換過程研究分野（B-1）

A-8　イオン加速器を用いた材料照射基礎研究（国内研究拠点形成）
関連分野：エネルギー基盤材料研究分野（B-3）、原子エネルギー研究分野（A-2）

A-9　ゼロエミッションエネルギーシステムの安全に関する研究
関連分野：エネルギー基盤材料研究分野(B-3)、原子エネルギー研究分野(A-2)

A-1　Heliotron J 装置によるプラズマ閉じ込めの高性能化

関連分野：粒子エネルギー研究分野（A-3）、プラズマエネルギー研究分野（A-4）、
複合系プラズマ研究分野（B-4）、高温プラズマ機器学研究分野（D-2）

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）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・維持のための磁場制御の新手法の開拓、等の研究を推し進めている。平成 28-30 年度は、高密度領域で観測される閉じ込め改善を調べるため、ペレット入射装置を含む様々なプラズマに対する給気法の開発を行い、高密度領域でのプラズマ研究を進展させた。また、核融合プラズマの物理研究で重要な課題として位置づけられている、MHD 揺動、乱流揺動についても、多点プローブ、ビーム放射分光法などを用いた計測等を中心に研究を進めた。

1.2　成果の概要

1.2.1　ペレット入射による電子密度制御の研究[1]

超音速分子ビーム入射（SMBI）法、高強度ガスパフ（HIGP）法に次ぐ新たな粒子補給法として、双方向型共同研究の下、プラズマコア部への粒子補給が一層有効であると考えられる水素ペレット入射装置の開発を進めてきた［1］。本入射装置は、Heliotron J プラズマに対する有効な粒子補給とするため、ペレットの入射速度 300m/s 以下、直径 1 ㎜以下で設計が行われた。中性粒子入射（NBI）および電子サイクロトロン加熱（ECH）+NBI によるプラズマをターゲットとして入射実験を行ったところ、線平均電子密度増加は最大約 5×10^{19} m^{-3} であり、到達最大電子密度は 6.3×19 m^{-3}、プラズマ蓄積エネルギーは 5.4 kJ に達した（図 1）。このプラズマ蓄積エネルギーは通常のガスパフ供給では到達できないものであり、ペレット入射による燃料供給の有効性を示している。また、ECH+NBI プラズマに対して Hα線アレイ検出器を用いてペレットの侵入長を調べたところ、ペレットがプラズマ中心まで到達することで閉じ込め改善がなされていることがわかった。

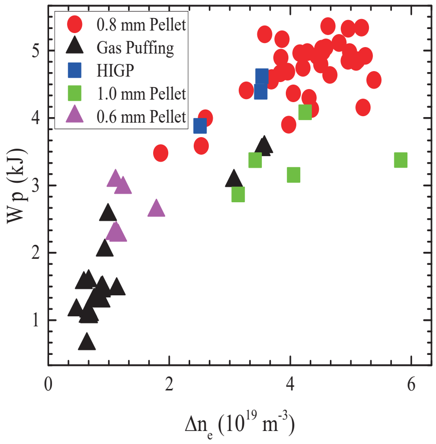


図 1 Heliotron J におけるプラズマ蓄積エネルギーの電子密度依存性。ペレット入射により、高いプラズマ蓄積エネルギーが得られるとともに、電子密度増加分も高い

1.2.2　高強度ガスパフ（HIGP）によって誘起された NBI プラズマの H モード遷移の研究[2]

低トロイディシティ（low-ε_t）磁場配位において、HIGP 法により達成される NBI プラズマで H-mode 遷移が発見されたことを受け、NBI の 1 MW 入射条件（磁場強度は 1.3 T）での H-mode 遷移と遷移前後の密度揺動との関連に着目した研究を進めた。プラズマ蓄積エネルギーは HIGP 終

了後少し減少するが、その後回復し、増加する。HIGP 開始後 5 kHz～30 kHz の周波数帯に間欠的揺動がビーム放射分光（BES）計測によって観測される。BES による密度揺動の径方向分布計測から間歇的揺動が径方向外側に伝播していることも示された。この結果から、低周波揺動が粒子排出現象を誘起していることが示唆された。

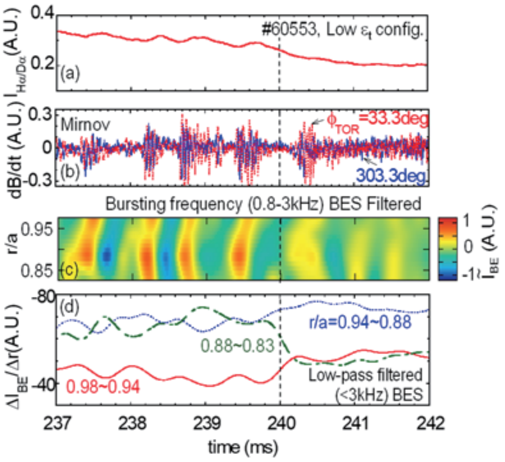


図 2 Heliotron J における HIGP によって観測された H-mode

1.2.3　乱流揺動の長距離相関（LRC）と非線形結合に関する同位体効果の研究[3, 4]

乱流揺動の長距離相関(LRC)は核融合プラズマの閉じ込め、特に、同位体効果と関連すると考えられており、近年、いくつかの装置において計測が進められている。同位体効果物理の解明を目指し、Heliotron J において、帯状流の特徴を示す LRC に対する同位体比依存性を調べた。その結果、トカマク同様に LRC の振幅強度・相関強度ともに重水素が支配的になるにつれて増大することが示された(図 3)。これは、帯状流の増大によって乱流輸送が低減されていることを示唆する。また、重水素プラズマにおいて、異なる周波数の揺動間の結合度を表すバイコヒーレンスの値が上昇しており、非線形結合度の違いが帯状流の駆動・乱流抑制に寄与している可能性がある。密度変調実験で重水素プラズマにおける粒子輸送の改善が示唆されており、その結果とも整合している。

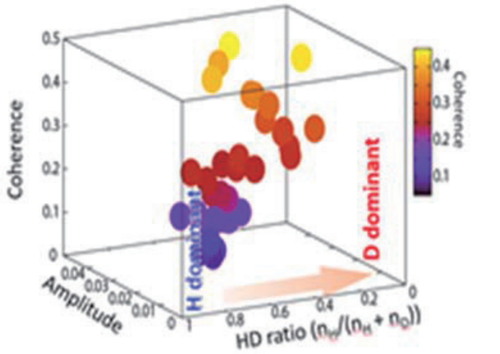


図 3 Heliotron J における帯状流の長距離相関の水素同位体比依存性。トカマク同様に重水素 が支配的になるにつれて長距離相関・強度とともに増大している

1.2.4　荷電交換再結合分光（CXRS）によるポロイダル流計測[5]

ヘリカル系装置におけるプラズマ輸送に重要なパラメタの一つである径電場評価に向け、ポロイダル回転速度計測用 CXRS の改良を行った。Heliotron J における CXRS システムでは、磁場平行流計測に対しては十分な実績を得ているが、ポロイダル流に対しては改良の余地があった。そのため、高分散・小 F 値の分光器を新規導入し、検出装置として ANDOR 製の CCD カメラ(DV-897 CSO-BV)を用いた。この改良により、ポロイダル速度換算精度が 1.7km/s から 0.51km/s に改善した。この結果、NBI-only プラズマにおいてプラズマ全体にわたって電子の反磁性方向の流れであり、ECH を重畳した場合にはプラズマの中心部で流れの反転が観測された。

1.2.5　高エネルギー粒子励起 MHD 不安定性の特性と制御に関する研究[6][7]

核融合炉では自己点火を担うアルファ粒子の良好な閉じ込めが必須であるが、高エネルギー粒子（FP）励起 MHD 不安定性がアルファ粒子閉じ込めを劣化させる可能性があり、問題視されている。そこで、FP 励起 MHD 不安定性を外部から制御し安定化させる目的で、Heliotron J において電子サイクロトロン加熱 / 電流駆動(ECH/ECCD)による安定化を試みた。Heliotron J は無磁気シアであるため、ECCD によるプラズマ電流で磁気シアを外部制御することによって、磁気シアの

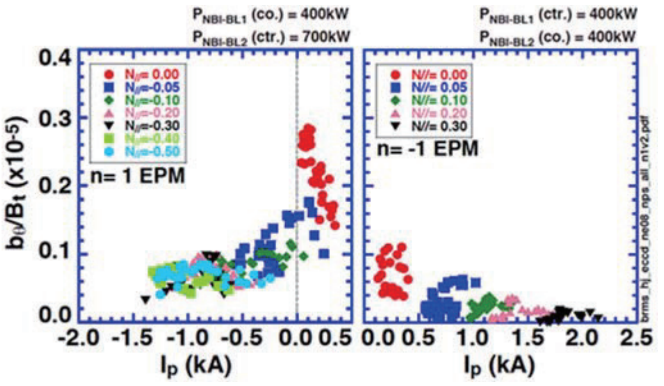


図 4 ECCD によるプラズマ電流(横軸)に対する高速イオン励起 MHD 不安定性の揺動強度の変化. 正負に依らず、磁気シアと関連するプラズマ電流増加に伴い揺動強度が減少していることがわかる

FP 励起 MHD 不安定性に与える影響を明確化できる。ECCD によりポロイダル磁場を強める、または弱める方向に電流を流した際に観測されていた Global Alfven Eigenmode (GAE)や、Energetic Particle Mode (EPM)の揺動強度を減少させることに成功した（図 4）。これは連続減衰と呼ばれる減衰機構が増加したためであることが数値計算の結果、明らかとなった。一方、ECH では、入射電力の増加に伴い高速イオン励起 MHD 不安定性の揺動強度を変化させることができることがわかった。また、高速粒子閉じ込めへの影響を調べるため、粒子エネルギーとピッチ角を分別可能なシンチレータ型損失イオンプローブ（SLIP）を導入した。NBI プラズマを計測した結果、Counter-NBI に同期して SLIP 信号に 50-150kHz の揺動が観測され、m/n~2/1 の EPM であると同定した。

1) G. Motojima, et al., “Injection barrel with a tapered structure for a low speed and small size cryogenic hydrogen pellet in medium-sized plasma fusion devices”, Rev. Sci. Instrum. **87**, (2016) 103503.
2) S. Kobayashi, et al., “Study of H-mode transition triggered by high-intensity gas puffing in NBI plasmas of Heliotron J”, 26th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2016), Kyoto, 17-22 Oct., 2016, EX/P8-17.
3) S. Ohshima, et al., “Long Range Correlation Experiments with Multiple Langmuir Probes”, J. Plasma Fusion Res. **94**, No.1 (2018) 3 -11.
4) Y. Ohtani, “Initial Results of Density Modulation Experiment for Study of Hydrogen Isotope Effects on Particle Transport in Heliotron J”, J. Phys. Soc. Jpn. 86, 064501 (2017).
5) X. Lu, et al., “Poloidal Flow Velocity Measurement in High-Density NBI Plasmas of Heliotron J”, Plasma Fusion Res. **13** (2018) 1202077.
6) S. Yamamoto et al., “Suppression of fast-ion-driven MHD instabilities by ECH/ECCD on Heliotron J”, Nucl. Fusion **57** 126065-1~9 (2017).
7) S. Yamamoto, et al., “Faraday-cup-type lost fast ion detector on Heliotron J”, Rev. Sci. Instrum. **87** (2016) 11D818.

1.3　成果の意義

Heliotron J 装置は、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生かして、核融合科学研究所の LHD 装置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。ペレット、HIGP による高密度化、ECH/ECCD による MHD 不安定性制御、高エネルギー粒子閉じ込めの研究は、コンパクト・高ベータ・ヘリカル炉の可能性に向けた基礎データとして意義がある。また、ポロイダル流研究、乱流揺動の研究も閉じ込め特性研究に対し重要課題である。今後、新概念開発研究を行う上で、これまで実験的に検証された基本性能を高性能化していくことが必要である。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。

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（磁場フーリエ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。これらを実現するため、低磁場領域での効率的なプラズマ生成およびイオンサイクロトロン周波数帯加熱の入射パワーの増強などを予定している。また、高密度領域の中心加熱を目的とした電子バーンスタイン波を用いた電子加熱もターゲットとなる。一方、核融合研究としてはダイバータを含む周辺プラズマについても重要な課題であると考えられる。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、LHD におけるヘリカル・ダイバータと Heliotron J における磁気島ダイバータとの性能比較研究等に取り組むことを計画している。

1.5　研究課題の自己評価

高密度化を達成するためのペレット入射装置の開発も終わり、局所計測装置も順調に整備されている。長距離相関研究では同位体効果も検出され、ECH/ECCD による MHD 揺動制御にも成功し、物性研究は着実に進んでいる。今後は磁場配位に対する依存性を系統的にまとめる必要がある。

A-2　核融合等革新的エネルギーシステムの開発と社会環境経済適合性評価の研究

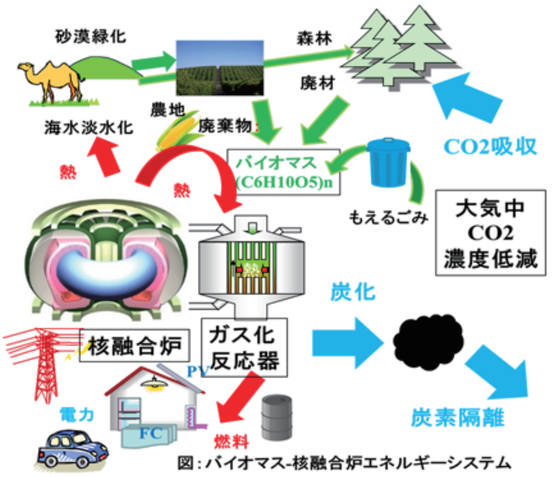
関連分野：原子エネルギー研究分野（A-2）、ソフトエネルギー複合領域研究分野

2.1　背景

本研究所の基本的な目標・理念である「エネルギーの生成、変換、利用の高度化」である人類の持続可能のための革新的エネルギーシステムについては、学術的研究の展開はされているが、具体的で社会実装可能なエネルギーシステムは必ずしも提示されていない。本研究はこの具体例をプラズマとバイオマスの結合システムとして示すとともに、成立性と意義を評価実証することを目的としている。特にエネルギーの社会的受容、有効利用を需要供給環境影響の点で評価した例は少ないため、学際的手法で提示する。

2.2　成果の概要

核融合エネルギーを発電ではなく化学的な吸熱反応プロセスで廃棄物バイオマスの燃料化を行うとともに、木炭を生成して大気中の二酸化炭素を隔離するシステムを提案し、主要プロセスを実証した。
生成燃料は中小規模の燃料電池発電に利用できるが、この電力はカーボンフリーのバイオ燃料から負荷追従して供給できるためグリッド適合性が高く、小規模で安定性の乏しい途上国にも導入でき、再エネ導入による弊害を防止することができる。また排出権を生成するという新たなエネルギー利用法を提示する。人類全体でネガティブエミッションを達成しエネルギー需要と経済成長、環境影響を分離する。本研究は同時に、核融合の社会環境性を高める研究としても展開しており、従来不可能と思われていた初期装荷燃料の外部供給を不要とする方法、わずかに放出されるトリチウムによる環境影響を完全に防止する戦略も提示した。



バイオマス核融合ハイブリッドの概念

1) S. Konishi and R. Kasada, “Myth of initial loading tritium for DEMO-Modelling of fuel system and operation scenario”, *Fus.Eng.Des.*, **121, 111**(2017).

2.3　成果の意義

従来、大規模定常発電炉と考えられていた核融合エネルギーの生成、変換、利用を根本的に変革するとともに、環境回復のためにエネルギーシステムを構築するという観点で、パラダイム変換を迫る成果。地球上のエネルギー物質循環と人類活動を一体的に記述する普遍性を持つ。
プラズマエネルギーとソフトエネルギー、さらに、所外のバイオマス生成、コミュニティ研究者も糾合した学際的、かつ普遍的な研究テーマを構築した。

2.4　今後の計画

限界費用ゼロエネルギーシステムとして経済的にも途上国の成長を確保しつつ、人類社会の変革と安定化につなげるシステムを構築するため、人文社会系の分析を補強する。要素技術はそれぞれ産業界等からのオファーに対応してスケールアップと社会実装研究を進める。

2.5　課題の自己評価

研究所、および学会の課題に応え、エネルギーと人類の関係でさらに上位の概念を提示できたことは満足できるが、社会実装のための戦略を軌道に乗せるには相当の増強が必要である。

A-3　小型核融合装置の工学産業医療応用システムの開発研究

関連分野：原子エネルギー研究分野（A-2）、粒子エネルギー研究分野（A-3）、生物機能化学研究分野（C-3）、エネルギー構造生命科学研究分野（C-4）

3.1　背景

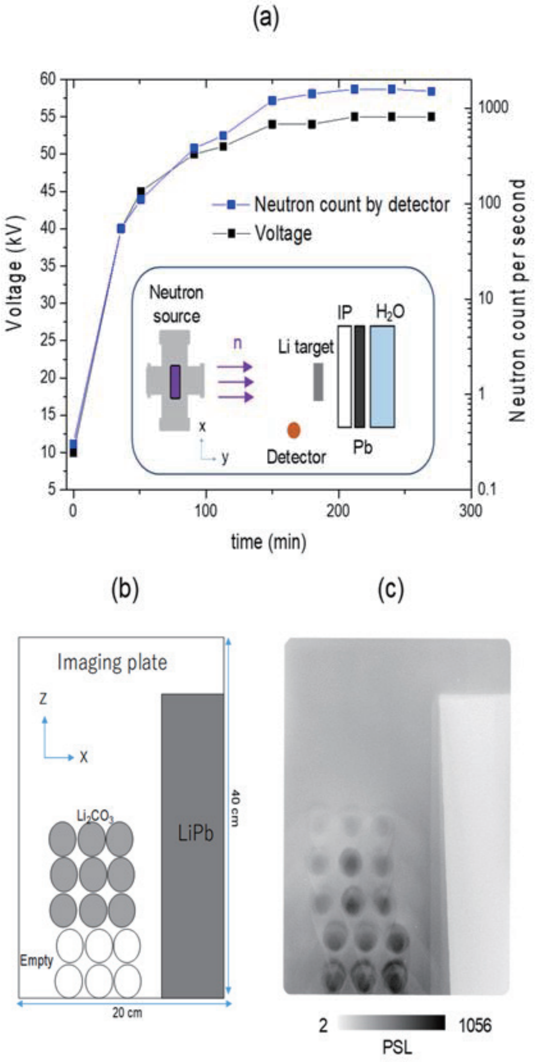
世界的に研究用原子炉は減少の一途で利用可能な炉が極めて限られており、中性子利用は大規模加速器に限られる。本研究は、小型核融合中性子源により簡便で安全な中性子ビームの産業医療応用を目的とする。

3.2　成果の概要

小型ビーム中性子源と、中性子エネルギースペクトルを制御したビームの発生法開発とイメージングプレートにより二次元的に画像化して分析する高分解能画像検出に成功し、軽元素分布の非破壊測定法として原理実証を行った。この結果、核融合炉ブランケットのトリチウム増殖性能の実測が初めて可能となった。また、従来にない低線量率放射線医療応用の概念を構築した。

3.3　成果の意義

学術的には、従来原子炉や大型加速器施設でなければ困難と思われていた中性子利用計測を実験室レベルで可能とし、特に核融合研究の重要課題であったブランケットのトリチウム増殖性能の空間分布の実測を世界で初めて示した。この成果はこれまで原子炉による放射化分析でのみ可能であった多種の元素の非破壊同時高感度分析に応用できる普遍性を持つ。また、小型中性子ビームを用いた低線量率医療応用という新しい概念を示し、他分野への展開も期待できる。



中性子源、模擬体系とイメージングプレート(IP)による核融合ブランケットの実験。(a) 実験系と中性子発生、(b)リチウムを用いたターゲットと IP、(c)得られた中性子像。

3.4　今後の計画

核融合原型炉計画の一環としてブランケット工学研究分野と連携するほか、企業との共同研究で元素分析装置としての実用化を図る。また、小型中性子ビーム装置として産業応用への展開を図る。

3.5　研究課題の自己評価

小型核融合中性子源としての開発と同時に、イメージングプレートの利用による高分解能中性子空間分布測定は他分野との協力の成果であり、また、核融合エネルギー開発でも多くの関連分野と展開力を持つ研究である。さらに、産業応用や医学生物学方面での利用も考えられ、重点複合領域として理想的な展開例と考える。

A-4　核融合中性子源の応用

関連分野：粒子エネルギー研究分野（A-3）、量子放射エネルギー研究分野（A-1）、
生物機能化学研究分野（C-3）

4.1　背景

核融合は、核分裂を除けば、中性子を発生する核反応の中で最も低エネルギーで生起可能であるため、小型可搬中性子源としての利用に適している。中性子の単色性などの特徴もある。我々は、これらの特徴を生かした応用技術の開拓と、そのための小型核融合中性子源の開発により、核融合が中性子源としても社会に貢献可能な魅力的な科学技術であることを発信してきた。

4.2　成果の概要

表 1 試作機の検知性能評価試験結果

	評価試験	ANSI 規格
検知対象中の ^{235}U 量 [g]	71	975
検査時間 [sec]	90±3	90
検知率 [%]（信頼度 68%）	>97.8	>90
誤検知率 [%]（信頼度 68%）	<3.6	<5
不審物の他の内容物	無し	無し、新聞紙、アルミ又は鉄鋼

特定核物質の中でも特に検知が困難な ^{235}U を検知できる装置は、技術的難易度の高いポータブル型はおろか、据置型も未だ存在しない。外部資金による三年間の産学連携事業において、不審物中に隠匿された特定核物質を非開封で検知可能なポータブル型検査装置の試作機（図 1）を開発した。核融合中性子の単色性を利用した提案検知原理に基づき、この検知原理に適した特異な性能を有する準安定流体検出器を採用した。

^{235}U を 0.7%含む天然ウランを用いた実験により、開発した試作機の検知性能を評価した。その結果、不審物中に他の内容物を含まないなど限定的な条件下ではあるものの、危険物検知装置の性能要件を定めた ANSI 規格（IEEE Standard N42.41-2007, Category A）の約 1/7 の量の ^{235}U に対して、同規格の要件を満たす検知性能（検査時間、検知率、誤検知率）が得られた（表 1）。この ANSI 規格を満たす製品は存在しないうえに、試作機開発レベルにおいても満たすことを示す実験結果は報告されていない。

1) B. Archambault et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** (2017) 1781.
2) H. Ohgaki et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** (2017) 1635.

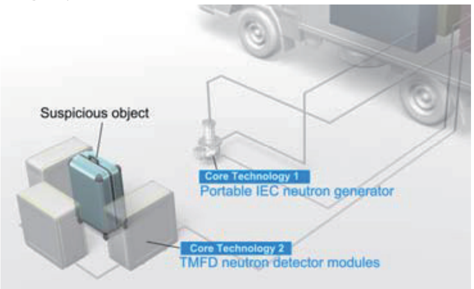


図 1 不審物中の隠匿特定核物質の検知

4.3　成果の意義

先行研究における課題であったバックグランド抑制を、核融合中性子の単色性と準安定流体検出器の閾エネルギー特性を組み合わせて利用することで可能とした。同様の手法は、他の中性子利用計測技術においても、その高度化や簡易装置による産業への普及に貢献できる可能性がある。

4.4　今後の計画

特定核物質非破壊検知装置は連携民間企業における製品化開発段階にある。世界を核テロの脅威から解放するため、テロ対策の現場で実用可能な検査装置を早期に実現したい。
一方で、同様に小型核融合中性子源と準安定流体検出器を用いた新規 ^{10}B 定量分析法の研究にも着手している。創薬化学、ナノ医療、生物有機化学、放射線計測を専門とする研究者との異分野連携体制で研究を推進し、QOL の高い新たな癌治療法として期待されているホウ素中性子捕捉療法の臨床研究や創薬研究に資する ^{10}B 定量分析技術の開発を目指す。

4.5　研究課題の自己評価

この研究課題に対しては科学研究費助成事業や NEDO 戦略的基盤技術高度化支援事業（プロジェクト委託型）を受けているほか、平成 28 年度以降、国際会議招待講演 2 件、総説記事 2 件、国際シンポジウムのパネリストとして招待を受けるなど、高い評価を受けている。

A-5　高輝度電子ビームの生成に関する研究

関連分野：粒子エネルギー研究分野（A-3）、量子放射エネルギー研究分野（A-1）

5.1　背景

先端科学技術分野における革新的ツールの代表である高輝度量子放射光源のさらなる高度化のためには、エミッタンスがより低く集束性の良い電子ビームを生成することが不可欠である。特に電子エネルギーが低く空間電荷効果の最も顕著な電子銃の性能向上が極めて重要である。我々は、電子銃の飛躍的な低エミッタンス化のための物理的基礎の確立を目指し、従来の数値解析コードの計算精度では見落とされてきた陰極の極近傍での非線形空間電荷効果の数値解析研究に取り組んできた。一方で、現在多くの高輝度電子ビーム源に用いられている光陰極における課題である量子効率の向上に繋がると期待される熱励起補助光電子放出の研究にも取り組んでいる。

5.2　成果の概要

陰極の近傍での非線形な空間電荷効果により、電子ビームの径方向位相空間分布は急激に非線形化してエミッタンスが増大する。この分布が、条件が整えば、外力によらず電子ビーム自身の空間電荷力によって再び線形化し、従来の常識を覆すような極低エミッタンスまで低減することを数値解析により見出した。さらに、熱陰極における温度分布などによる初期電流密度分布の非一様性がある場合にも自己線形化が起こり得ること、また、非一様性の程度によって最も線形化するまでに要する時間（陰極からの距離）が大きく変化することを数値解析で明らかにした（図 1）。
一方、熱励起補助光陰極の候補材料について放出電流の陰極温度やドライブレーザー波長などへの依存性を明らかにし（図 2）、従来のモデルでは説明できない依存性を示すことを見出した。

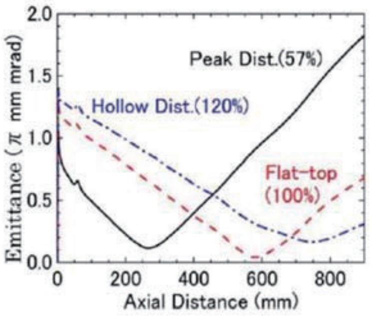


図 1　陰極近傍で一旦増加したエミッタンスが、外力によらず極低エミッタンスまで減少する様子（自己線形化）。初期電流密度分布の違いによりエミッタンス挙動が大きく異なる。

1) K. Trogasin et al., *Phys. Rev. ABST* **20** (2017) 073401.
2) H. Yamashita et al., *Proc. IPAC2017*, THPAB023 (2017).
3) K. Morita et al., *Proc. IPAC2016*, WEOAB03 (2016).

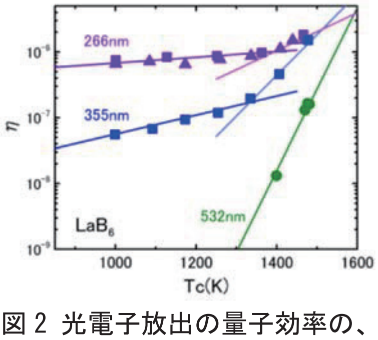


図 2 光電子放出の量子効率の、陰極温度とドライブレーザー波長への依存性。

5.3　成果の意義

自己線形化現象の理解に基づく電子銃と入射器設計により、従来の達成値をはるかに下回る低エミッタンスが実現できる可能性がある。特に自己線形化が比較的低い加速電界でより顕著に生じることも重要であり、高輝度電子銃開発における従来の高電界化を目指す動向を転換させる可能性もある。
熱励起補助光電子放出の実験結果は、従来モデルの修正を迫るものであり、光電子放出機構の理解の深化に繋がると期待される。

5.4　今後の計画

実験による自己線形化現象の観測を目指す。そのため、今回明らかにした初期電流密度への依存性から不可欠であることがわかった熱陰極温度分布計測系の構築に取り組んでいる。

5.5　研究課題の自己評価

この研究課題は科学研究費助成事業（挑戦的萌芽研究）を受けて実施しており、また、日本加速器学会年会賞と日本原子力学会部会賞優秀講演賞を受けるなど、高い評価を得ている。

A-6　原型炉プラズマ対向材料の中性子照射効果

関連分野：複合機能変換過程研究分野（B-1）、原子エネルギー研究分野（A-2）、
エネルギー基盤材料研究分野（B-3）

6.1　背景

核融合炉のダイバータではタングステン材料が有力な候補材料であるが、材料特性に及ぼす中性子照射の影響に関しては国際的にも非常に限られた知見しか得られていない。各種タングステン材料の中性子照射効果の基本的な理解を得ることを目的とし、日米科学技術協力の PHENIX 計画を国内の大学と米国の国立研究所、大学とともに実施した。

6.2　成果の概要

米国のオークリッジ国立研究所にある High Flux Isotope Reactor (HFIR）を用いて中性子照射試験を行った。タングステンの場合、熱中性子によるレニウムの生成等核変換の影響が大きい。これまでは 800℃程度までの照射が中心であるが、ダイバータでは最大 1500℃程度までの温度が想定されている。純タングステンでは 1000℃以上での再結晶が生じるが、1000℃以上での中性子照射は非常に限られている。本研究では熱中性子遮蔽技術開発を行い、500℃、800℃、1100℃程度で 1dpa 程度の中性子照射を行った。比較的核変換の影響が小さい低線量の照射は熱中性子遮蔽なしで、800℃、1100℃で実施した。熱中性子遮蔽により、熱中性子束は約一桁以上下がったものと考えられ、核融合炉のスペクトルに近い条件での照射が実施された。

図：PHENIX プロジェクトにおいて RB*カプセルで照射した試料とカプセルのホルダー

1) Y. Katoh, D. Clark, Y. Ueda, Y. Hatano, M. Yoda, A.S. Sabau, T. Yokomine, L.M. Garrison, J.W. Geringer, A. Hasegawa, T. Hinoki, M. Shimada, D. Buchenauer, Y. Oya, T. Muroga, “Progress in the U.S./Japan PHENIX project for the technological assessment of plasma facing components for DEMO reactors,” Fusion Science and Technology, 72[3] (2017) 222-232.

6.3　成果の意義

タングステンの中性子照射効果に関して実際の核融合環境に近い条件で、各種タングステンに関して系統的な知見が得られることは、国際的にも重要な成果である。

6.4　今後の計画

2019 年度から開始される日米科学技術協力核融合分野では、構造材料とタングステンを中心としたプラズマ対向材料との界面に着目した中性子照射研究を計画している。

6.5　研究課題の自己評価

中性子照射研究は計画の立案から中性子照射の準備、実施、冷却、照射後試験まで非常に時間のかかる研究であり、PHENIX 計画においても 6 年間のプロジェクトである。2018 年度は最終年度であるが、無事計画どおり照射後試験により新たな知見も生まれきており、核融合炉原型炉開発にも貢献できる成果が得られるものと考えられる。

A-7　革新的原子力構造材料の開発研究（国際ラウンドロビン試験）

関連分野：エネルギー基盤材料研究分野（B-3）、複合機能変換過程研究分野（B-1）

7.1　背景

革新的な原子力材料として開発されている酸化物分散強化（ODS）鋼や炭化ケイ素複合材料（SiC/SiC）は、原子炉の炉心や核融合炉ブランケットの構造材料としての利用が期待されている。京都大学は、いずれの材料においてもその開発研究を国際的に先導しており、国際原子力エネルギー機関（IAEA）の傘下で組織されている原子力材料専門家グループ研究に当該材料を標準試料として提供し、各国際機関が所有する高エネルギー粒子線照射装置や原子炉を用いて、国際ラウンドロビン試験を実施した。

7.2　成果の概要

革新的原子力材料として国際的に注目されている ODS 鋼、および SiC/SiC の照射影響評価研究により、当該材料の優れた耐照射性が確認された。特に、原子炉の炉心材料としての高燃焼度対応性や高耐食性に関しては、顕著な性能向上が立証された。国際協力による標準材の照射後試験が進行しており、当該材料の照射データベースが順調に集積されつつある。

1) Z.N. Ding, C.H. Zhang, Y.T. Yang, Y. Song, A. Kimura, J. Jang, Hardening of ODS ferritic steels under irradiation with high-energy heavy ions, J. Nucl. Mater., 493(2017)53-61.
2) W. Han, P. Liu, X. Yi, Q. Zhan, F. Wan, K. Yabuuchi, H. Serizawa, A. Kimura, “Impact of friction stir welding on recrystallization of oxide dispersion strengthened ferritic steel”, J.Mater. Sci. & Tech., 34(1) (2018) 209-213.
3) V. Casalegno, S. Kondo, T. Hinoki, M. Salvo, M. Ferraris, CaO-Al_2O_3 glass-ceramic as a joining material for SiC based components: A microstructural study of the effect of Si-ion irradiation, J. Nucl. Mater., 501(2018)172-180

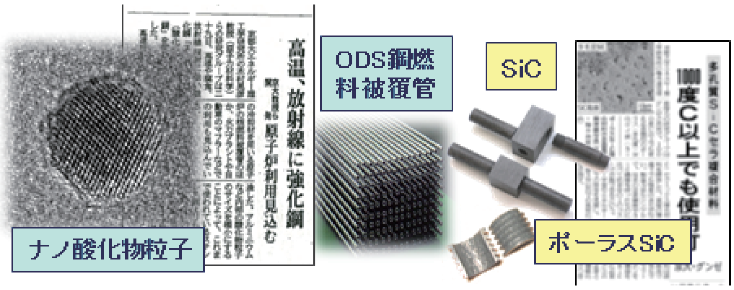


図　京大で開発された ODS 鋼および SiC 国際標準試料

7.3　成果の意義

世界各国の照射装置を用いて得られた材料照射データベースにより、照射条件（照射粒子、粒子エネルギー、温度、損傷速度）の変化が照射効果の発現に大きな影響を与えることが明らかとなり、いわゆる照射相関論の発展に寄与した。また、これらの照射データベースの構築は、安全で高効率な先進原子炉や核融合炉のシステム設計に寄与すると期待できる。

7.4　今後の計画

IAEA 原子力材料専門家グループ研究（Coordinated Research Project, Accelerator Simulation and Theoretical Modelling of Radiation Effects-II (SMoRE-II) T14003-CR-1）に参画し、ODS 鋼や SiC/SiC の国際共同研究を継続推進する。原子力材料の国際ラウンドロビン試験をさらに推進し、革新的原子力材料開発研究を先導していく。

7.5　研究課題の自己評価

IAEA 傘下の専門家グループ国際共同研究において、標準材料の提供やイオン加速器の共用活動を通じて革新的原子力材料 ODS 鋼および SiC/SiC の開発研究を先導しており、国際研究拠点形成に貢献してきた。研究課題は良好であったと評価する。

A-8　イオン加速器を用いた材料照射基礎研究（国内研究拠点形成）

関連分野：エネルギー基盤材料研究分野（B-3)、原子エネルギー研究分野（A-2)

8.1　背景

国内の研究用原子炉の運転停止に伴い、国内材料照射研究は中性子照射実験からイオン照射実験に移行しており、ゼロエミッション（ZE）共同研究においては、イオン加速器（DuET）の利用件数が増加している。ZE 共同研究を通じて、イオン加速器を用いた照射影響照射データベースを協働的に取得し、高性能先進原子力材料や核融合炉材料の開発に貢献するとともに、原子力材料・核融合炉材料の国内研究拠点としての役割を果たすことを目標とした。

8.2　成果の概要

評価期間（平成 28-30 年度）中の ZE 共同研究の平均の年間採択件数は 36 件に及んでおり、ZE 研究全体の 3 割から 4 割に達したことは、本研究拠点が核エネルギー材料の国内研究拠点として十分な役割を果たしていることを示している。国内研究機関の多岐にわたる材料の照射研究と照射データベースの構築が進められている。

1) N. Oono, K. Nakamura, S. Ukai, T. Kaito, T. Torimaru, A. Kimura, S. Hayashi, “Oxide particle coarsening at temperature over 1473 K in 9CrODS steel”, Nuclear Materials and Energy, 9 (2016.12) 342-345.
2) Y. Iwata, R. Kasada, A. Kimura, T. Okuda, “Effects of MA environment on the mechanical and microstructural properties of ODS ferritic steels”, Fusion Engineering and Design, 126 (2018.01) 24-28.
3) D. Morrall, J. Gao, Z. Zhang, K. Yabuuchi, A. Kimura, T. Ishizaki, Y. Maruno, “Tensile properties of mechanically alloyed Zr added austenitic stainless steel”, Nuclear Materials and Energy, 15 (2018.05) 92-96.

8.3　成果の意義

国内照射施設が運転停止している状況下において、ZE 共同研究を通じてイオン加速器（DuET）を用いた核融合模擬照射実験が可能になっている意義は大きい。本拠点研究を通じて、照射損傷組織形成の素過程の理解が進み、照射欠陥制御と耐照射性付与の手法が提案されるに至っている。格子欠陥論の基盤形成に貢献している。

8.4　今後の計画

ZE 共同研究を推進し、先進原子力・核融合材料のイオン照射下における材料挙動に関する照射データベースの構築に努める。照射データベースに基づき、各候補構造材料に対する希求要件の Design Window を作成し、核エネルギープラント設計に貢献する。

8.5　研究課題の自己評価

材料照射影響評価研究の国内研究拠点としての役割を果たすまでになったと感じており、「材料照射研究会」の主催など、実質的な拠点活動を展開することができた。具体的な共同研究成果も得られており、研究課題は良好であったと評価できる。

イオン加速器を用いた材料照射研究

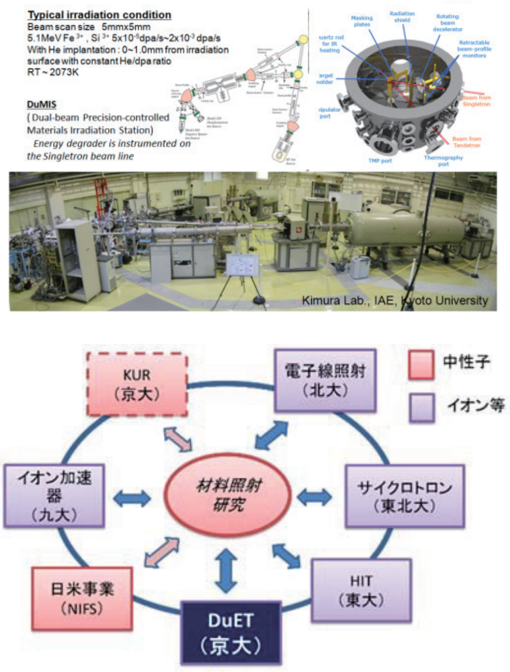


図 イオン加速器を用いた材料照射研究の国内研究拠点形成

A-9　ゼロエミッションエネルギーシステムの安全に関する研究

関連分野：エネルギー基盤材料研究分野（B-3）、原子エネルギー研究分野（A-2）

9.1　背景

地球環境や人類の持続的発展に関する問題解決のためのゼロエミッションエネルギーシステムを社会実装するには、広く国民に受容されるためにも、環境社会影響や安全評価等、社会的説明性を向上させる必要がある。ここでは、材料学、システム工学、社会学における関連分野に横串を通し、安全の議論をベースに、システム安全や社会影響に関する研究を行う。

9.2　成果の概要

安全に関するホルナゲルの議論を援用し、材料・機械・社会システムにおける事象・機能の「ゆらぎ」に注目する。ゆらぎの重ね合わせ現象を制御し、リスク管理、およびシステム安全に寄与する方法を開拓した。材料内のゆらぎで創発される微細構造変化から、圧力容器鋼の照射脆化現象に至る例で、マルチスケールモデリングを行った。次に、機械システム内のゆらぎによる事故事象について、冷却水喪失事故を例に、構造・流体連成解析を実施し、リスク値を安全の定量尺度として提案した。さらに、社会的論点のゆらぎによる原子力の社会的受容に関する ISM（Interpretive Structural Modeling）分析を実施し構造化した。種々のシステムの分析のアナロジーから、例えばシステム工学の手法を材料評価に援用し、評価手法を高度化した。また、トリチウム環境動態と社会的受容の分析から、1F 汚染水問題を汚染拡大と風評の観点で論じた。

1) T. Nakasuji, K. Morishita, Nuclear Instruments and Methods B, 393, 110-113, 2016
2) X. Ruan, et al., Proc. ASME 2017 Pressure Vessels & Piping Conf., 65072 (10 pages), 2017
3) 村吉範彦他，日本原子力学会 2017 年秋の大会，北海道大学，2017.9.13-15
4) 小西哲之，エネルギーフォーラム 753,83-84,2017(9).

9.3　成果の意義

従来、分野ごとに個別になされてきた安全の議論をマルチスケールの視点に立って一体的に扱い、様々なスケールで俯瞰し、安全指標を定量化したシステム保全学を構築した。工学分野の枠を超え社会的視点からの安全受容現象を分析しエネルギーシステムに反映した。

9.4　今後の計画

原子力・核融合エネルギーに関する材料・機械・社会システム内での現象のマルチスケール性を利用し、システム分析の方法論により構造化と挙動予測を実施する。また、放射性物質の環境挙動と人類の生活圏、社会活動からエネルギー利用影響の社会受容を分析し、ゼロエミッションエネルギーから人類の持続可能システムへと議論を展開する。

9.5　研究課題の自己評価

材料・機械・社会システムを対象に、マルチスケールの視点でそれぞれの分析手法のアナロジーを議論した。システム工学で使われる確率論的リスク評価法を材料評価に援用することに成功し、材料に関する安全指標を提案することができた。

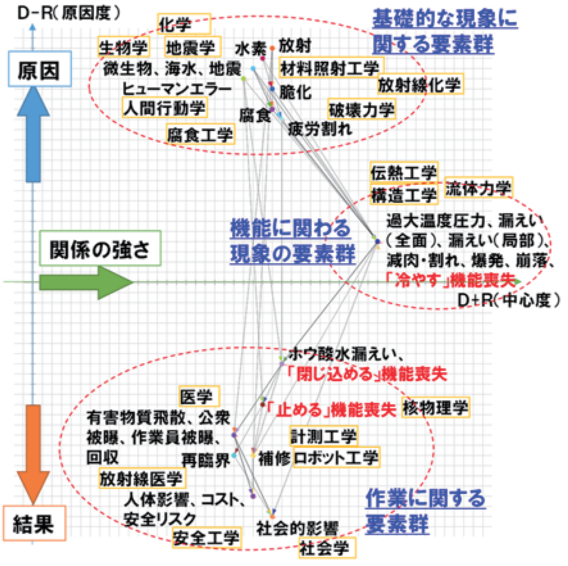


図　知識体系の構造化の例（事故炉廃止措置）

3.2. ソフトエネルギー複合領域研究

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（A-1）
粒子エネルギー研究分野（A-3）
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（B-1）
レーザー科学研究分野（B-2）
エネルギー利用過程研究部門　複合化学過程研究分野（C-1）
生物機能化学研究分野（C-3）
エネルギー構造生命科学研究分野（C-4）
附属エネルギー複合機構研究センター　自己組織化科学研究分野（D-1）

ソフトエネルギー複合領域研究の研究目標は、細胞や酵素、タンパク質を利用したバイオエネルギー、電気化学反応や自己組織化を利用した化学エネルギー、太陽光エネルギー、およびレーザーや電子ビーム等の量子ビームに関連する様々な研究分野の異分野融合によって学際的研究を推進し、究極的にはエネルギーに関する新領域の研究を生み出すことである。以下に概要を述べる。

自由電子レーザー(KU-FEL)は、熱陰極型から光陰極型電子源への移行によってピーク強度を6.5 倍にすることに成功したが、光陰極における電子発生に用いる深紫外レーザーのパルス長をサファイア結晶中での二光子吸収によって計測するシステムを開発した。また、結晶性高分子の構造変化をKU-FEL を用いてマイクロ秒の時間分解能で光学的にその場計測するシステムも開発した。材料応用に関しては、低出力の CO_2 レーザーを利用して天然高分子系ナノコンポジット材料をわずか数 10 秒でその場創成する技術も開発した。

標的分子と迅速かつ高選択的に反応する架橋反応分子の合理的な設計、および生成には反応速度パラメータを高精度で評価することが必要であるが、このパラメータを市販測定器の 100 倍の時間分解能で光学的に測定できる装置を開発した。また、タンパク質などの機能性分子をナノメートルの精度で選択的、かつ高収率で配置するための DNA ナノ構造体上にさまざまな距離と位相で酵素を配置した場合、その集合状態によって酵素活性に違いが生じるということを明らかにした。現在はこの実験的事実を説明するための理論研究も進めている。近年、化学分野で活発に新種が開発、および活用されているイオン液体については、電気化学的デバイスの電解液や草木バイオマスの分解に適した新種のイオン液体を開発し、NMR を用いてその物理化学的特性を明らかにした。生体系における分子認識機構については、二つの生体分子の結合自由エネルギー等を計算する新しい手法を開発し、従来は別物と考えられていた二つのタイプの分子認識機構を統一的に説明する描像を提案した。これは、構造生物学と水和の統計熱力学の融合によって初めて実現しえたものである。

このように、当該重点複合領域は、異分野の連携協力によって着実に新しい研究領域へと進展しつつある。次頁以降に、平成 28～30 年度の当該重点複合領域の研究成果を述べる。

ソフトエネルギー複合領域研究課題

B-1　二光子吸収を用いた光陰極駆動用ピコ秒深紫外レーザーのパルス長測定

関連分野：量子放射エネルギー研究分野（A-1）、レーザー科学研究分野（B-2）、
粒子エネルギー研究分野（A-3）

B-2　中赤外波長可変レーザーを用いた結晶性高分子の構造変化モニタリング

関連分野：レーザー科学研究分野（B-2）、量子放射エネルギー研究分野（A-1）

B-3　レーザーを利用した天然高分子系ナノコンポジット材料の創成

関連分野：レーザー科学研究分野（B-2）、生物機能化学研究分野（C-3）

B-4　時間分解蛍光異方性測定による反応速度解析法の確立とそれを利用した DNA 塩基配列選択的な架橋形成タンパク質の開発研究

関連分野：生物機能化学研究分野（C-3）、複合機能変換過程研究分野（B-1）

B-5　DNA ナノ構造体に配置した酵素集合体の反応

関連分野：生物機能化学研究分野（C-3）、自己組織研究分野（D-1）

B-6　クラウンエーテル包摂ヒドロニウムイオンをカチオンとする新規酸性イオン液体の開発

関連分野：エネルギー構造生命科学研究分野（C-4）、複合化学過程研究分野（C-1）

B-7　生体系における分子認識機構の解明

関連分野：自己組織化科学研究分野（D-1）、エネルギー構造生命科学研究分野（C-4）

B-1　二光子吸収を用いた光陰極駆動用ピコ秒深紫外レーザーのパルス長測定

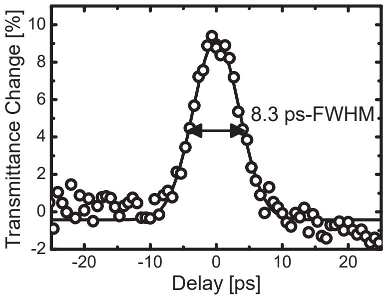
関連分野：量子放射エネルギー研究分野（A-1）、レーザー科学研究分野（B-2）、
粒子エネルギー研究分野（A-3）

1.1　背景

京都大学小型中赤外自由電子レーザー装置(KU-FEL)では熱電子放出陰極 LaB_6 が電子源として用いられてきた。この陰極に深紫外レーザーパルス列を入射し、発生させた光電子を加速し、自由電子レーザーを発振させることで、熱電子放出を利用した場合の約 6.5 倍のピーク強度の達成に成功している。より高いピーク強度を得るためには、レーザーの時間分布、空間分布の最適化が必要であり、そのためには、現在の深紫外レーザーのパルス長の測定が不可欠である。本研究ではサファイア結晶中での二光子吸収を用いて、光陰極励起用ピコ秒深紫外レーザーのパルス長測定を行った。

1.2　成果の概要

深紫外レーザーをビームサンプラーにより強い光（ポンプ光）と弱い光（プローブ光）の二つに分け、ポンプ光を光学遅延路に通した後、厚さ 1 mm のサファイア基板上の一点に集光した。プローブ光のポンプ光に対する光学遅延量を変化させながら、プローブ光の透過率変化を計測した。結果として、右図のような結果を得、深紫外レーザーのパルス長を 5.8 ps-FWHM と結論付けた。



プローブ光透過率の
時間遅延量依存測定結果

1) H. Zen, T. Nakajima, T. Kii, K. Masuda, and H. Ohgaki, “Pulse duration measurement of pico-second DUV photocathode driving laser by autocorrelation technique using two-photon absorption in bulk material”, Proceedings of FEL2017, 439-441 (2018).

1.3　成果の意義

光陰極駆動用ピコ秒レーザーのパルス長を測定可能な系を構築し、その測定が可能となった。本手法がこれまで 1 ps を下回る極短パルス計測に用いられてきたが、ピコ秒程度の長いパルス長でも適用可能であることが示された。

1.4　今後の計画

本ピコ秒深紫外レーザーを光陰極に照射し、発生させた光電子を加速し、利用する中赤外自由電子レーザー、および THz コヒーレントアンジュレータ放射光源の開発を進め、より大強度な赤外放射光の発生を目指す。

1.5　研究課題の自己評価

本研究課題では、加速器を専門とする二つのグループとレーザーを専門とする一つのグループが協力することで、加速器で使用される深紫外レーザーのパルス長測定に成功した。加速器駆動光源の性能向上にはレーザー発生・計測技術は無くてはならないものとなっている。このような協力関係が構築できていることは、今後のさらなる加速器駆動光源開発にとって喜ばしいことである。

B-2　中赤外波長可変レーザーを用いた結晶性高分子の構造変化モニタリング

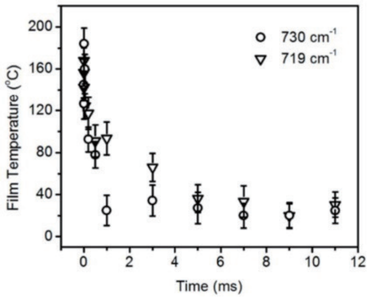
関連分野：レーザー科学研究分野（B-2）、量子放射エネルギー研究分野（A-1）

2.1　背景

形状の自由度が高く軽量な高分子材料は様々な分野で活用されつつある。その中でも結晶性高分子材料は、非結晶部分と結晶部分の比率(結晶化度)によって機械的、電気的、化学的特性が大きく変化する。より高機能な高分子材料の作成、および開発には、溶融から冷却の間に刻一刻と結晶構造が変化する過程を詳細に知ることが重要であるが、結晶構造の変化を実時間モニタリングした例はない。

2.2　成果の概要

ターゲットとして厚さ 2μm のポリエチレン膜を用いた。近赤外ポンプレーザー照射によってターゲットを瞬時に加熱溶融し、その後の自然冷却に伴う再結晶化までの構造変化を構造敏感な振動モードと共鳴になるよう波長調節した中赤外プローブレーザー(KU-FEL)の透過プローブ光強度の時間変化から実時間モニタリングする手法を開発した。また、高分子膜の温度変化もプローブ光強度の時間変化から右図のようにミリ秒オーダーで計測できた。ただし、本測定法の時間分解能は、ポンプパルス、およびプローブパルスの時間幅の長い方で制限されるので、時間分解能の限界値はマイクロ秒である。



ポリエチレン膜
(厚さ 2μm)の温度変化

1) S. K. Maurya, T. Nakajima, K. Mizobata, H. Zen, T. Kii, and H. Ohgaki, "Real-time observation of structural change in semi-crystalline polymer films through mid-IR transmission spectroscopy: determination of instantaneous film temperature during recrystallization", Optics Express **26**, 21615-21625 (2018).

2.3　成果の意義

ほぼ全ての結晶性高分子に適用可能なモニタリング手法を開発した。高分子膜の局所温度をマイクロ秒の時間分解能で評価する手法を確立できたことは、今後の高分子材料開発に貢献するものと期待される。

2.4　今後の計画

開発したモニタリング手法を金属－結晶性高分子ナノコンポジット膜に応用し、導電特性の向上など、エネルギー材料としてより高機能な材料開発を目指す。

2.5　研究課題の自己評価

本研究課題では、二つのグループがその長所を生かしながら協力することによって、結晶性高分子の構造変化を実時間でその場モニタリングする手法を開発することができた。二次元光検出器を導入すれば結晶部分が二次元的に成長する過程をモニタリングすることも可能である。つまり、高分子科学において基本的でありながらも未解決な問題の一つである、ラメラの成長過程の解明につながる。

B-3　レーザーを利用した天然高分子系ナノコンポジット材料の創成

関連分野：レーザー科学研究分野（B-2）、生物機能化学研究分野（C-3）

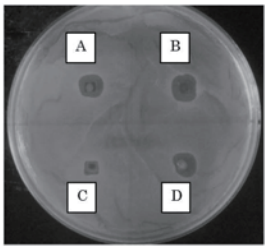
3.1　背景

近年、様々なタイプのナノコンポジット材料の開発、および光学材料、触媒材料、太陽電池材料などへの応用が盛んになってきた。しかし、それらの簡便かつ効率的な創成法が確立されているわけではなく、未だ色々な創成法が提案されている段階である。特に、地球上に最も多く存在する天然高分子であるセルロースをマトリクスとしたナノコンポジット材料は生分解性を有し、人体も含めた環境への負荷も極めて低い。フィラーの導入によって高機能化したセルロース系ナノコンポジットの開発は、貴重な埋蔵資源の節約やエネルギーの有効利用につながる。

3.2　成果の概要

セルロース誘導体の一種であるメチルセルロース(MC)マトリクス内に銀(Ag)ナノ粒子が生成した MC-Ag ナノコンポジット膜を数 10 秒の CO_2 レーザー照射によって創成することができた。大腸菌を用いた抗菌テストを行った結果、小さなレーザーパワーで小さな Ag ナノ粒子を MC 膜内で生成した場合により高い抗菌性能が得られることがわかった。

1) H. Nishikawa, E. Nakata, S. Nakano, T. Nakajima, T. Morii, “CO_2 laser-based in-situ synthesis of silver-methylcellulose nanocomposite films”（論文投稿準備中）.



照射条件（a）90s@0.8W, (b) 30s@0.8W, (c) 90s@1W, (d) 30s@1W によって作成した MC-Ag 膜の抗菌性.

3.3　成果の意義

0.5-1W の低出力 CO_2 レーザーをわずか数 10 秒照射するだけで、天然高分子系ナノコンポジット膜(MC-Ag)を簡単、かつ迅速にその場創成することができた。本研究では抗菌性に注目してナノコンポジット膜の特性を評価したが、適切なマトリクス材料や金属フィラーを選択することにより、所望の特性を持つナノコンポジット材料が創成できると期待される。

3.4　今後の計画

開発したナノコンポジット膜の創成法をセルロース－銀または銅ナノコンポジット膜に応用し、フィラーである金属ナノ粒子の粒径や数密度、セルロースマトリクスの配向や分散状態の制御を試みて導電特性の向上を目指す。このようなナノコンポジット膜は、低環境負荷型エネルギー材料として期待が持てる。

3.5　研究課題の自己評価

天然高分子をマトリクスに用いたナノコンポジットの CO_2 レーザー創成は環境調和型エネルギー材料として大きな期待が持てる。また、既に知られている UV レーザー創成法に比べ、開発した CO_2 レーザー創成はプロセス速度がはるかに速く、また、膜質も格段に良い。ナノコンポジット膜の簡単かつ迅速な創成法を開発した点は高く評価される。

B-4　時間分解蛍光異方性測定による反応速度解析法の確立とそれを利用したDNA 塩基配列選択的な架橋形成タンパク質の開発研究

関連分野：生物機能化学研究分野（C-3)、複合機能変換過程研究分野（B-1）

4.1　背景

生物機能化学研究分野では、「迅速かつ高選択的に標的分子と反応し、安定な共有結合（架橋構造）を形成する」という架橋反応性分子が、選択的な複合体形成と共有結合形成、それぞれの反応速度パラメータに基づいて合理的に設計できることを提唱している(*J. Am. Chem. Soc.* **2017**, *139*, 8487)。その重要な要素の一つである反応速度パラメータを精度良く算出するために、時間分解蛍光異方性測定装置の開発を、複合機能変換過程研究分野との分野間連携で進めている。

4.2　成果の概要

現在、作成した試作機では、10 msec 以下の時間分解能で反応が追跡できている。現在保有する市販の測定機器の時間分解能が 1 sec 程度であることを考えると、時間分解能が 100 倍向上した。これにより、これまで算出できなかった速い過程の反応速度パラメータを算出できるようになると期待される。

4.3　成果の意義

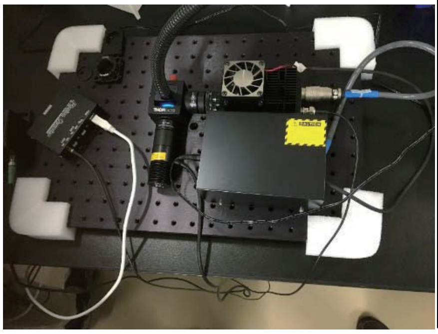
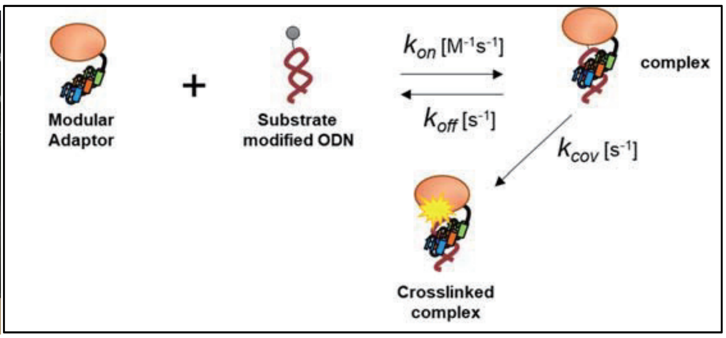
これまで「定量的かつ高選択的な架橋反応分子」は試行錯誤により合成されてきた。本研究で取り組む「反応速度に基づいた合理的設計」が実現できれば、容易に最適な分子が設計できるようになる。この分子設計指針は、DNA—タンパク質架橋反応に限定されず、ケミカルバイオロジーなど、様々な研究分野において応用展開が可能である。

4.4　今後の計画

現在、再現性よく蛍光異方性を測定できるように、試作機で実測しながら光学系の改良を進めている。まず、DNA 塩基配列選択的な架橋形成タンパク質の開発に応用し、その結果をもとに様々な研究分野で利用可能な分子の設計へと展開する。

4.5　研究課題の自己評価

これまで試行錯誤をするしかなかった分子設計を、合理的な設計指針を基にしておこなえるようになれば、大幅に研究が進展することが期待できる。様々な分子の反応速度データを蓄積することで、それらのデータを多くの分野で有用な分子の設計に利用できる。

（左）時間分解蛍光異方性測定装置、（右）架橋反応分子による反応機構

B-5　DNA ナノ構造体に配置した酵素集合体の反応

関連分野：生物機能化学研究分野（C-3）、自己組織研究分野（D-1）

5.1　背景

DNA ナノ構造体は、タンパク質などの機能性分子をナノメートルの精度で配置するための足場として広く注目されている。生物機能化学研究分野（森井研究室）で開発された「DNA 結合性アダプター法」（*Chem. Comm.* **2015**, *51*, 1016; *J. Am. Chem. Soc.* **2017**, *139*, 8487 など）を利用すると、DNA ナノ構造体上の任意の位置に導入した結合部位に選択的、かつ高収率でタンパク質を配置して、様々なタンパク質の集合状態を設計どおりに構築することができる。現在は、特定の集合状態にある酵素活性について研究を進めている。

5.2　成果の概要

これまでに開発した DNA 結合性アダプター法を用いて、DNA ナノ構造体上にさまざまな距離と位相で酵素を配置し、それらの酵素集合体の反応を解析した。その結果、酵素の集合状態によって酵素活性に違いが生じていることが明らかとなった。現在、自己組織化科学研究分野（木下研究室）で開発された水和の統計熱力学理論に基づき、この現象の化学的解釈に努めている。

5.3　成果の意義

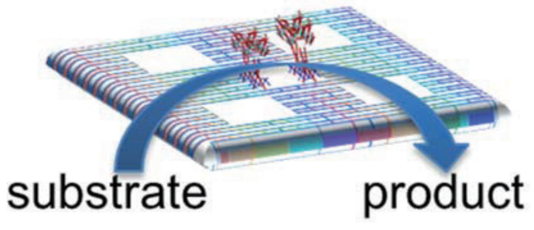
これまで酵素やタンパク質を 1 分子の精度で数や距離を制御して配置することは困難であったが、DNA ナノ構造体を足場とし、森井研究室で開発された開発した DNA 結合性アダプター法を利用すると、さまざまな集合状態で酵素やタンパク質を配置することが可能となった。これにより、これまで溶液中で比較することが困難であった、様々な集合状態における酵素反応を評価することができるようになり、水和の統計熱力学理論との融合によって新たな学術領域の展開が期待できる。

5.4　今後の計画

様々なパラメータを変化させた酵素集合状態を構築することにより、生体内を模倣した空間配置での酵素活性の評価、およびその化学的解釈について研究を進めていく予定である。

5.5　研究課題の自己評価

DNA ナノ構造体の任意の位置にタンパク質をナノメートルの精度で配置できる DNA 結合性アダプター法を開発したことで、これまでは不可能だった様々な空間配置における酵素の反応を詳細に解析できる。今後、生体内を模した空間配置でのタンパク質・酵素の化学を探究する。生物機能化学と理論生物物理学の連携によって新たな展開も見られている。



DNA ナノ構造体に配置した酵素集合体の反応

B-6 クラウンエーテル包摂ヒドロニウムイオンをカチオンとする新規酸性イオン液体の開発

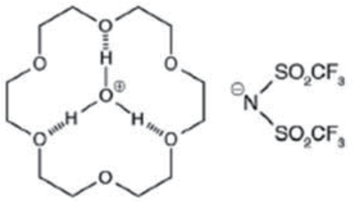
関連分野：エネルギー構造生命科学研究分野（C-4)、複合化学過程研究分野（C-1）

6.1 背景

イオン液体は常温で液状、また、不揮発性、難燃性、さらに、水分などにも安定という特徴をもつ。このため、各種電気化学デバイスの電解液への適用が期待されている。一方、イオン液体は水溶性の低い草木バイオマスを可溶化し、しかも酸触媒として働き分解する活性ももつ。イオン液体の開発、機能と物性を解明することはエネルギー高度利用に直結する。

6.2 成果の概要

ヒドロニウムイオンを包摂させたクラウンエーテル 18-crown-6 と、対イオンとして疎水性、および化学的安定性の高い Tf2N⁻を構成成分とする新しいイオン液体を開発した（発表論文 1)。既存のヒドロニウム包摂クラウンエーテルイオン液体と比べて融点が 40℃以上低い、酸性度が最も高い、吸湿性が低い、非荷電分子を含まないなどの新規物理化学的物性をもつことを明らかにした。さらに、NMR 法による分子拡散係数測定により、プロトン伝導性が著しく高く、配位子交換に基づく伝導性機構が働いていることを解明した（発表論文 2)。



クラウンエーテル 18-crown-6 と
対イオン Tf2N⁻

1) Kitada, A., Takeoka, S., Kintsu, K., Fukami, K., Saimura, M., Nagata, T., Katahira, M. and Murase, K. (2018) J. Electrochem. Soc. 165, H121-H127. "A Hydronium Solvate Ionic Liquid: Facile Synthesis of Air-Stable Ionic Liquid with Strong Brønsted Acidity"
2) Kitada, A., Kintsu, K., Takeoka, S., Fukami, K., Saimura, M., Nagata, T., Katahira, M. and Murase, K. (2018) J. Electrochem. Soc., in press. "A hydronium solvate ionic liquid: Ligand exchange conduction driven by labile solvation"

6.3 成果の意義

ヒドロニウム包摂 18-crown-6 イオン液体を開発し、その新規物理化学的物性を明らかにしたことによって、今後新たな高機能酸塩基触媒のデザイン、および開発が活性化すると期待される。将来的にはエネルギー・マテリアル資源の高効率な取得に向けた道筋をつけられると考えられる。

6.4 今後の計画

開発したヒドロニウム包摂 18-crown-6 イオン液体が有する新規物理化学的物性を生かし、各種電気化学デバイスの電解液としての活用法や草木バイオマスを分解するための触媒としての活用法を探索し、エネルギー高度利用に関わる研究として発展させることを目指す。

6.5 研究課題の自己評価

分野間共同研究により、新規ヒドロニウム包摂 18-crown-6 イオン液体を開発し、これまで培ってきた NMR の方法論を活用し、物理化学的な物性やプロトン伝導性の分子機構を解明した。NMR 法がエネルギーの高度利用に繋がる新分子の解析に活用できることを実証した点は高く評価される。

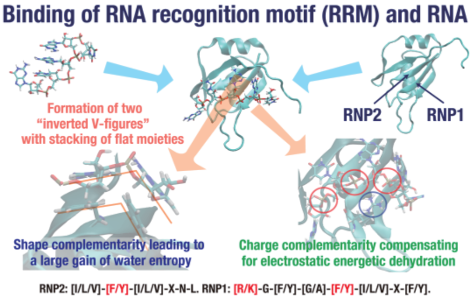
B-7　生体系における分子認識機構の解明

関連分野：自己組織化科学研究分野（D-1）、エネルギー構造生命科学研究分野（C-4）

7.1　背景

生命現象発現において重要な役割を果たす分子認識には、大きく分けて、各酵素がある特定の基質とのみ選択的に結合するタイプと、天然変性蛋白質が標的蛋白質の立体構造に合せて立体構造を形成しつつそれと結合するタイプがある。本研究では、一般の考え方と異なり、両方のタイプを同じ理論で扱うことができることを示す。与えられたレセプターと選択的に強く結合するリガンドの特定法の構築を目指す。

7.2　成果の概要



RNA と蛋白質の結合メカニズム

(1) 二つの生体分子の結合自由エネルギー、およびその種々のエネルギー的・エントロピー的成分を計算するため、二通りの水和の統計力学理論と分子動力学シミュレーションを統合した方法論を開発した。(2) 上記二通りのタイプの結合の推進力が、生体分子の構造エントロピー損失を凌駕する系内の水の並進配置エントロピー利得であることを示した。この利得は、生体分子の結合界面における原子レベルの形の相補性によって十分に大きくすることができる。生体分子間の静電引力相互作用の獲得は、生体分子－水間のそれの喪失を補償するために重要ではあるが、それ自体は結合の推進力にはならない。(3) プリオン蛋白質の部分ペプチド P16 と RNA アプタマーR12 の結合自由エネルギーの計算値が実測値と良好に一致した。(4) RNA－蛋白質認識機構について、横断的な描像を与えることに成功した。(5) MDM2 は、腫瘍の成長を抑制する蛋白質 p53 と結合して p53 の作用を無くしてしまう。p53 よりも強く MDM2 と結合するペプチド MIP が知られているが、その理由を初めて明らかにした。

1) T. Hayashi, H. Oshima, T. Mashima, T. Nagata, M. Katahira, and M. Kinoshita, Nucleic Acids Res., **42**, 6861-6875 (2014).

2) H. Oshima, T. Hayashi, and M. Kinoshita, Biophys. J., **110**, 2496-2506 (2016).

3) T. Hayashi, T. Matsuda, T. Nagata, M. Katahira, and M. Kinoshita, Phys. Chem. Chem. Phys., **20**, 9167-9180 (2018).

7.3　成果の意義

MIP よりもさらに強く MDM2 と結合できるペプチドを設計できる可能性が高い。より一般的に、標的蛋白質の活性部位と結合してその好ましくない作用を失わせる薬剤の効率的な設計に貢献するものと期待される。

7.4　今後の計画

現在のところ、実験で明らかにされた生体分子の結合様式に対して、詳細かつ定量的な解析ができるようになっている。今後は，結合様式をも予測可能にしたい。

7.5　研究課題の自己評価

分子認識の研究では、生体分子の結合体の詳細な立体構造情報が不可欠である。一方、その情報のみで結合のメカニズムを解明することはできない。構造生物学と水和の統計熱力学の融合によって初めて独創的な成果が得られるのである。

4.　拠点形成促進事業

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）第 1 期：平成 23 年度～27 年度、第 2 期：平成 28 年度～33 年度

1. 事業の目的・目標

本研究所の第 2 期中期目標・中期計画では、「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、ならびに学生等の教育への貢献」が掲げられた。この中期目標に従い、文部科学省の共同利用・共同研究拠点制度へ申請して採択され、平成 23 年度から本拠点事業を開始した。第 1 期は平成 27 年度に終了し、期末評価において A 評価を受けた。本事業は本所の第 3 期中期目標・中期計画とも合致することから、第 2 期の申請も行い、これが採択され平成 28 年より引き続き本事業を推進している。

本拠点事業は、有害物質や環境負荷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する。このため、研究所所有の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、多国間国際協力の拠点としての指導的役割を果たす、③大学院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の概念を構築し、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する。

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反映させた拠点運営を担保するため、共同利用・共同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 9 名、学内 6 名）、公募課題の選定、募集、選考等に関する必要な専門的事項を調査、および審議し、運営委員会、および研究所協議員会の議を経て、その実施にあたる共同利用・共同研究計画委員会（学外 7 名、学内 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等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、共同利用・共同研究実施を支援する。各研究部門・分野は各関連コミュニティ分野の研究を、また、学際的融合を促進する共同利用・共同研究は本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、本所が一体となって実施する。また、大学本部は、必要に応じて本学諸制度を活用した支援を行う（図 1）。

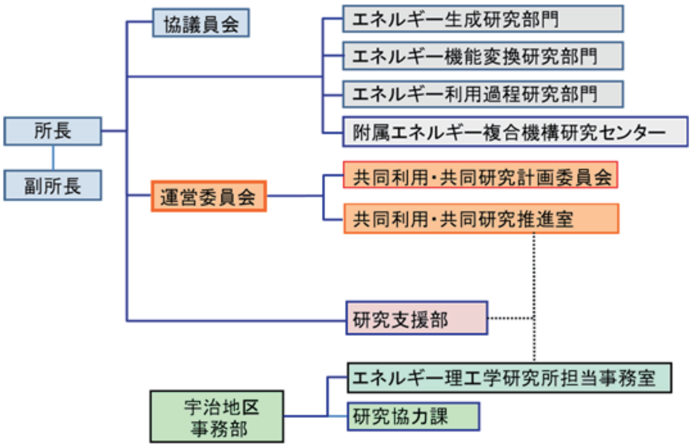


図 1 研究所における ZE 研究拠点の位置付け

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 研究を展開するため、異なる 4 カテゴリーにより、所外研究者を代表とする公募型共同利用・共同研究を実施している。

- 共同利用・共同研究（企画型研究）: 本所の得意とする基本課題（「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」、および「先進原子力システム、およびプラズマ利用に関する研究」）に沿う課題。（平成 28 : 33 件、平成 29 : 36 件、平成 30 : 38 件）
- 共同利用・共同研究（提案型研究）: エネルギー関連研究者が独創的アイデアに基づき自由に提案する課題。（平成 28 : 47 件、平成 29 : 52 件、平成 30 : 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所設備・施設を利用する研究課題。（平成 28 : 11 件、平成 29 : 11 件、平成 30 : 10 件）
- 研究集会 : ZE 研究に関連する研究集会の開催。（平成 28 : 1 件、平成 29 : 1 件、平成 30 : 2 件）

※平成 30 の件数は平成 30 年 8 月現在のもので、今後期間外申請により若干増加する予定である。

共同利用・共同研究の参加状況

平成 28 年度									
区分	機関数	受入人数	外国人	若手研究者 35 歳以下	大学院生	延べ人数	外国人	若手研究者 35 歳以下	大学院生
学内（法人内）	1	10	0	1	1	18	0	5	5
		(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)
国立大学	22	87	3	55	33	152	5	84	51
		(1)	(0)	(1)	(0)	(2)	(0)	(2)	(0)
公立大学	4	48	0	17	14	60	0	23	20
		(12)	(0)	(1)	(1)	(17)	(0)	(3)	(3)
私立大学	6	14	0	2	0	26	0	6	0
		(1)	(0)	(0)	(0)	(1)	(0)	(0)	(0)
大学共同利用機関法人	1	7	0	1	0	14	0	1	0
		(1)	(0)	(0)	(0)	(1)	(0)	(0)	(0)
独立行政法人等 公的研究機関	6	21	1	2	0	58	1	2	0
		(1)	(0)	(1)	(0)	(1)	(0)	(1)	(0)
民間機関	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)
外国機関	1	2	0	0	0	12	0	0	0
		(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)
その他	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)
計	42	189	4	78	48	340	6	121	76
		(16)	(0)	(3)	(1)	(22)	(0)	(6)	(3)

平成29年度									
区分	機関数	受入人数	外国人	若手研究者 35歳以下	大学院生	延べ人数	外国人	若手研究者 35歳以下	大学院生
学内（法人内）	1	1	0	0	0	3	0	0	0
		(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)
国立大学	21	108	11	64	42	212	21	114	76
		(8)	(0)	(6)	(3)	(19)	(0)	(14)	(9)
公立大学	4	97	0	10	3	101	0	13	4
		(43)	(0)	(2)	(0)	(45)	(0)	(4)	(0)
私立大学	6	30	0	11	0	68	0	31	0
		(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)
大学共同利用機関法人	1	4	0	1	0	13	0	2	0
		(1)	(0)	(1)	(0)	(2)	(0)	(2)	(0)
独立行政法人等公的研究機関	8	23	0	3	2	55	0	7	6
		(1)	(0)	(0)	(0)	(1)	(0)	(0)	(0)
民間機関	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)
外国機関	1	2	0	0	0	9	0	0	0
		(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)
その他	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)
計	42	265	11	89	47	461	21	167	86
		(53)	(0)	(9)	(3)	(67)	(0)	(20)	(9)

※受入人数、延べ人数については上段に総数を、下段に（）で女性の内数を記入した。

3.2. 技術講習会の開催

研究所の先端的設備機器等を円滑かつ有効に使用するため、年二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てている。（平成28：「高速液体クロマトグラフィーの測定原理と利用」、「各種顕微鏡の測定原理と応用」、平成29：「スウェージロック継手」、「NMR超高感度検出器（クライオプローブ）の原理と使い方」）

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。特に、拠点と研究所が共催の国際シンポジウムを毎年開催し、国内外の関連研究者との最新情報の交換を行ってきた。同シンポジウムは、全体会議、パネルディスカッション、ポスター発表、パラレルセミナー、およびサテライトミーティングで構成される。全体会議においては、海外、および国内の著名な研究者による招待講演を中心に行った。パネルディスカッションにおいては、海外、および国内のコミュニティ代表者による討論を行い、コミュニティの現状把握とコミュニティからの要望の吸い上げを行うとともに、異分野融合による新分野の創成、および今後の拠点の国際化に向けた議論を行った。ポスター発表においては、公募研究に採択されたすべての研究者による研究成果の発表を行った。パ

ラレルセミナーとサテライトミーティングにおいては、特定のテーマに関する、より詳細にわたる討論を行った。また 3.1 項で記載のように公募型共同利用・共同研究の第 4 のカテゴリーとして「研究集会」を設置し、コミュニティからの要請が高い集会の支援をしてきた。

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
28	7	942	12	547	3	146	1	10	23	1,645
29	7	1,012	24	638	11	473	7	104	49	2,227

3. 4. ゼロエミッションエネルギーネットワーク活動

ZE 研究のコミュニティ形成と、これを基盤とする先進エネルギーシステムの概念構築に向け、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」を構築した。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、学外幹事を設け、組織としてのネットワーク作りを進めている（図 2）。

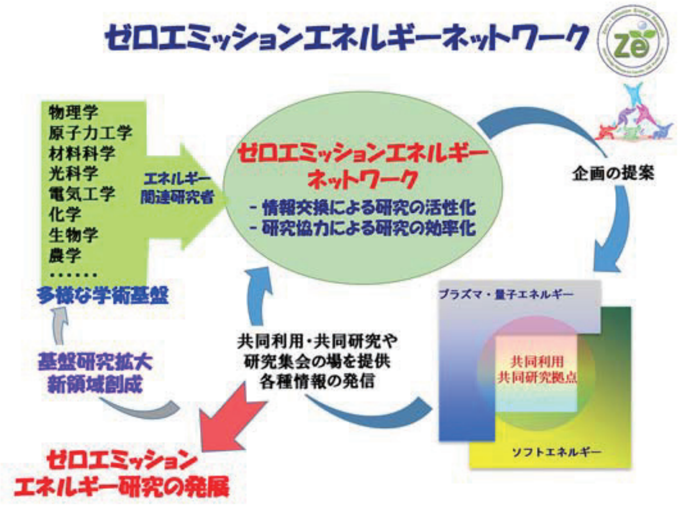


図 2 ゼロエミッションエネルギーネットワーク

3. 5. 女性研究者と若手研究者の育成

拠点で採択された研究課題には、平成 28 年度は 16 人、平成 29 年度は 53 人の女性が研究代表者・研究協力者として参画しており、拠点おける共同利用・共同研究活動を通じて女性研究者の育成を行った。また、当研究所には女性の博士研究員が平成 28 年度には 4 名、平成 29 年度にも 4 名在籍し、さらに、女性の博士後期課程の学生が平成 28 年度は 10 名、平成 29 年度は 11 名在籍した。これらの女性博士研究員、および女性博士後期課程学生も直接的・間接的に共同利用・共同研究に参画しており、当該活動を通じて女性研究者の育成を行った。女性休養室も備えている。

一方、共同利用・共同研究の研究代表者・研究協力者として若手研究者（35 歳以下）を平成 28 年度は 78 名、平成 29 年度は 89 名受け入れた。また、同研究協力者として大学院生を平成 28 年度は 48 名、平成 29 年度は 47 名受け入れた。さらに、学部生（高等専門学校専科生も含む）も積極的に共同利用・共同研究に参加させた。以上により、共同利用・共同研究を通じた実践的な研究・教育を行い、次世代のエネルギー研究を担う若手の育成を行った。

3. 6. 国際化への対応

拠点のホームページに関して英語版も作成し、拠点の仕組み・活動内容・成果等を世界に発信して

いる。また、共同利用可能な施設・設備のリスト、公募型共同利用・共同研究の募集要項と同申請書に関しても英語版を作成し、常時研究所ホームページで公開し、海外からの応募を受け付けている。さらに、研究所のすぐ近くに英語対応が可能な研究者用宿泊施設があり、短期滞在から長期滞在まで国外の研究者に利用されている。

3.7. 拠点関係者と機構法人、および産業界との連携・組織的な対話

当研究所では大学共同利用機関法人自然科学研究機構・核融合科学研究所等との各種共同研究を通じた連携により、ゼロエミッションエネルギーの一つとして、核融合エネルギー実現に不可欠な高性能プラズマの生成・制御と炉工学・先進材料に関する研究、および、それらを通じた人材交流・育成を積極的に推進するとともに、今後の核融合研究の進め方について組織的対話を行ってきた。また、京都府中小企業技術センター、および公益財団法人京都産業 21 と連携して「京都大学宇治キャンパス産学交流会」を開催し、拠点からは研究シーズを発表し、参加企業や会員企業からは企業紹介等を行い、産学共同研究、研究力向上、人材育成等に関する組織的な対話を行ってきた。

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、平成 28 年度 55 編、平成 29 年度 69 編となっている。なかでも、国際学術誌掲載論文数では、平成 28 年度 44 編、平成 29 年度 67 編となっている。Nature Chem.、Nano Lett.、JACS、Nature Commun.、Angewandte Chem.等の高いインパクトファクターを有する雑誌に掲載された論文も毎年複数件ある。また、本拠点活動が契機となり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–」、「グリーンイノベーションに資する高効率スマートマテリアルの創製研究 –アンダーワンルーフ型拠点連携による研究機能と人材育成の強化–」（化学研究所、エネルギー理工学研究所、生存圏研究所）が立ちあがった。さらに、CREST、NEDO、ALCA 等のプロジェクトの開始にも繋がった。

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 28 年度	平成 29 年度
論文数	55	69
内、国際学術誌に掲載された論文数	44	67

5. 今後の課題と計画

- 第 3 期中期期間の後半においては、ZE 研究拠点の一層の機能強化のため、①共同利用・共同研究による多様なエネルギー関連分野への貢献強化、②エネルギー研究の学術基盤構築へ向けた活動の国際化促進、世界的視点からの異分野融合研究推進、③国際感覚の養成を目指した人材育成を行う。また、④民間企業が利用する先端研究基盤共用促進事業等との連携など、本拠点活動で生まれるシーズの実用化の仕組みを検討することで、社会への貢献のスピード化を図る。これらを通じ、多様なエネルギー関連の既存研究者コミュニティ群の ZE の視点を共有する研究者コミュニティへの統合を図り、新しいエネルギーパラダイムを切り拓くコミュニティを形成し、エネルギー理工学、特に ZE に関する学理の構築を目指すとともに、大学の機能強化へも貢献する。
- 学部・大学院生や若手研究者を交えた拠点活動の一層の活性化を通じて、エネルギー理工学に関する広い視野を持ち、プロジェクトを牽引できる人材育成を目指す。
- 国際研究拠点化を推進する大学の機能強化の枠組みや当研究所独自の提案と連携させ、ZE 研究活動を世界のエネルギー関連研究者を巻き込んだ国際的な活動へと展開する。

これらにより、ゼロエミッションエネルギー概念の国際的な拡大・定着を図り、世界的な ZE 研究ネットワークのハブとなることを目指す。

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附属エネルギー複合機構研究センター（附属センター）、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、核融合科学研究所（NIFS）との間で双方向性の共同研究を進めるために、平成 16 年度に NIFS と各大学センターの間で設けられた制度である。我が国の大学全体が核融合プラズマ研究を推進する上での課題を NIFS が取りまとめ、核融合プラズマ研究における重要な学術的課題の解決へ向け、各センターがその特徴を生かした重要課題を分担する。その際、各センターがそれぞれ NIFS と共同研究契約を結ぶことにより、各センターのプラズマ装置を NIFS の共同利用設備と同等なものと見なし、全国の大学から共同研究を受け入れることを可能とした。これにより、当研究所附属センターの双方向型共同研究（Heliotron J）は、Heliotron J に関わる全国規模の共同研究となっている。

Heliotron J は、京大グループにおいて発案された先進磁場配位である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な要素還元研究の一つとして、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た。第 2 期中期計画期間（平成 22～27 年）では、能動的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するとともに、核融合科学研究所大型ヘリカル装置 LHD との相補的なヘリカル型プラズマ閉じ込めの高性能化、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ことを目指した。

平成 28 年度から始まった第 3 期中期計画期間では、これまでの実験的研究により確認されつつあるヘリカル軸ヘリオトロン配位の基本的性能を如何に高性能化していくか、に重点を置き、分担課題として「磁場分布制御を活用したプラズマ構造形成制御とプラズマ輸送改善」を設定した。特に、第 2 中期期間で整備された局所プラズマ計測器、およびプラズマ分布制御技術の高度化を図り、質の高い実験データの拡充・蓄積を行いつつある。これにより、LHD 装置と相補的なヘリカル型プラズマ閉じ込めの高性能化を進めるとともに、環状プラズマの総合的理解に貢献するとともに、定常環状プラズマ型核融合炉の実現をめざす理学・工学の体系化に寄与することを目指している。

2. 体制、および運営状況

双方向型共同研究では、NIFS 運営会議共同研究委員会の中に双方向型共同研究委員会（NIFS 双方向委員会）が設置され、学術的視点から同共同研究全体の公募計画や実験計画に関する企画立案の審議が行われるとともに、公募課題の最終審査・採否決定を行っている。この委員会の半数は NIFS 以外からの運営会議委員やネットワーク代表者で構成されている。課題公募に際しては、各センター代表者の申請する「ベース課題」も含め、厳格な審査過程が適用されている。一方、当研究所附属センターでは Heliotron J 双方向型共同研究委員会を設置し、NIFS 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）の公募原案の作成、公募課題の審査（センター審査）、予算計画、実施計画、評価の作業を行っている。Heliotron J 双方向型共同研究委員会も半数以上が当研究所外の委員であり、委員長も所外委員が務めている。

平成 20 年実施の NIFS 双方向型共同研究外部評価結果を踏まえた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、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二センターが新たに双方向型共同研究に参画した。さらに、従来の視点に基づく課題研究に加え、定常ヘリカル型原型炉に向けた「電子サイクロトロン

加熱・電流駆動（ECH／EBW）の研究」、および「境界プラズマ制御の研究」をセンター間連携研究として特設、NIFS、ならびに各センター間の連携により展開することとなった。双方向型共同研究（Heliotron J）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なされている。

3. 活動状況

双方向型共同研究（Heliotron J）では、ベース課題を除き、全てを学外研究者が研究代表を務めることとしており、所内研究者は、各課題の所内世話人、あるいは共同研究者として参画した。第 3 期中期計画期間である平成 28～30 年度の三年間における共同研究は、平成 28 年度において研究採択数 28 件、共同研究者数 333 名、平成 29 年度において研究採択数 25 件、共同研究者数 357 名、平成 30 年度において研究採択数 25 件、共同研究者数 344 名の共同研究を実施した。第 2 中期計画期間に引き続き、第 3 期中期計画期間においても本双方向型共同研究（Heliotron J）によって、学外からの新規・高精度計測器の導入・開発なども含め、新たな視点からの研究アイデアの発掘、比較研究の迅速化、データ解析の深化・効率化が進展している。同時に、核融合科学研究所の豊富な研究者集団との情報交換・討論が活性化し、その支援を得て中型装置である Heliotron J の機動性を活用した実験研究、共通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た。また、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。採択研究課題と研究参加者の増加のため、平成 29 年度より「課題代表者ミーティング」を開催し、研究計画作成のための実験テーマの洗い出し、研究グループ（研究テーマ）間の情報共有とそれによる共同（相乗り）実験の可能性の検討、新計測器等の現状、準備状況の紹介、実験スケジュールの周知を行っている。また、毎年度末、NIFS にて年度成果報告会を開催し、公開の場で活動状況の評価が行われるとともに、各センターの双方向型共同研究の研究成果、ならびに進捗状況は成果報告書として公開している。

4. 主な成果

Heliotron 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生かして、核融合科学研究所で稼動する LHD 装置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、平成 28～30 年度は、（1）先進ヘリカルの磁場配位制御によるプラズマ輸送制御と関連するプラズマ構造形成機構の理解、ならびに制御の研究、（2）高密度プラズマ生成と高ベータプラズマ閉じ込めに関する研究、（3）先進ヘリカルの磁場配位による不安定性制御に関する研究、（4）先進ヘリカルにおけるプラズマ電流制御とその閉じ込め制御への応用に関する実験的研究、（5）局所プラズマ計測の拡張・高度化、輸送解析ツールの整備・拡張、（6）ECH/EBW 加熱機構の解明とその高性能化に関する研究、（7）先進ヘリカルにおける境界プラズマ制御に関する実験的研究、などを重点研究課題として掲げ、双方向型共同研究を実施した。

第 3 期中期計画期間である平成 28～30 年度での主な成果を以下に列挙する。

⑴　閉じ込め改善現象に対する磁場の三次元効果：
閉じ込め改善現象の磁場配位に対する依存性を明らかにするため、電子熱輸送障壁への影響に着目し、トロイダルプラズマにおける遷移現象に与える磁場構造の三次元効果を調べた。多様な三次元磁場構造を形成できる Heliotron J を用い、磁場配位、および電流制御により磁場構造が輸送障壁の形成機構に与える影響を解析した。これまでにトムソン散乱計測による分布情報を基にした輸送解析から、同装置で未解明であった電子内部輸送障壁(eITB)に与える磁場構造の影響を確認している。さらに、磁気島の位置による eITB フット位置の移動や、磁気島の存在が eITB 形成の密度領域を拡大することを示唆する結果を得ている。この実績を発展させ、磁場配位制御による閉じ込め性能向上の手法を提案することが期待される。【N. Kenmochi, et al., ISHW2017, October 2-6 2017, Shiran-kaikan, Kyoto, P1-27】

(2)　中心部コヒーレント密度揺動の ECH 印加・内部輸送障壁形成への過渡応答

ECH プラズマに中性粒子ビーム加熱(NBI)を重畳したプラズマにおいて、中心付近にコヒーレントな電子密度揺動が観測された。ECH パワーに矩形波モジュレーション(MECH)を加えると、中心温度勾配に顕著な構造が生成・消滅を繰り返す。ECH パワーが高いフェイズでは、密度揺動の周波数が 7kHz から 15kHz へと、およそ倍増した。一方、空間構造はほぼ変わらず、振幅が微増することが明らかになった。周波数増加は ECH 印加に伴う揺動の実験室フレームでの伝播速度（ExB 速度）が増加したためと解釈される。揺動位相速度が変化しないと仮定した場合、背景電場の増加は新古典モデルが予測する電場増加とおおよそ一致した。【T. Kobayashi, et al., Phys. Plasmas 25, 012513 (2018)】

(3)　ペレット入射による電子密度制御：

Heliotron J 装置における SMBI 法に次ぐ新たな粒子補給法として、双方向型共同研究の下、プラズマコア部への粒子補給が一層有効であると考えられる水素ペレット入射装置の開発を進め、平成 28 年度から本格的な入射実験を開始した。今回 NBI、および ECH+NBI によるプラズマをターゲットとして入射実験を行い、入射直後からの線平均電子密度は急激に増加し $5x10^{19}$ m^{-3} を超えた。プラズマ蓄積エネルギーは一時的に減少するものの、その後増加し 3.4kJ に達している。ECH+NBI ターゲットプラズマに対して、Hα線アレイ検出器を用いてペレットの侵入長を調べたところ、プラズマ中心を通る視線まで Hα線強度の増加が認められた。【G. Motojima, et al., Rev. Sci. Instrum. 87, (2016) 103503】

(4)　粒子輸送に対する同位体効果、質量効果に関する研究

Heliotron J において密度変調実験を行い、粒子輸送に対する同位体効果、質量効果について調べた。ECH プラズマでは、粒子拡散係数は D プラズマの方が H プラズマよりも小さく、磁気軸中心へ向かう対流速度（内向き対流速度）は D プラズマの方が H プラズマよりも小さく評価され、粒子輸送に水素同位体効果があることを示した。また、Heliotron J、LHD、CHS で得られたデータから、イオン種効果の規格化衝突周波数依存性の観点からの比較を行ったところ、H プラズマに限れば、装置に依らず、粒子拡散係数自体には同様の規格化衝突周波数依存性が見出されるものの、イオン種効果に関しては、規格化衝突周波数依存性は装置間で必ずしも同一ではないことが示され、他のパラメータの重要性を示唆している。【Y. Ohtani, et al., Journal of the Physical Society of Japan 86, 064501 (2017)】

(5)　高速カメラを用いた周辺プラズマ揺動計測

間欠的な周辺プラズマ揺動 “ブロッブ(blob)“は多くの装置で広く認識されており、世界の各研究機関での計測や理論・シミュレーション研究が盛んに行われている。Blob は，エネルギー閉じ込め性能や粒子閉じ込め性能に多大な影響を及ぼし、特に、粒子損失の 50%以上を担うと認識されている。本共同研究では、HJ の#11.5 の上ポートから真空窓と真空容器内金属鏡を取り付けることで、通常ポートの窓からは困難であった磁力線の接線方向からの視野を確保することができ、ペレット入射実験において初めて blob が磁気面を横切る画像を得た。三次元的な位置を特定するために、磁力線追跡プログラム NAKASUGA コードを使用し、フィラメント状搖動の画像と一致する磁力線位置を特定させることにより、フィラメント状搖動の三次元情報を算出することに成功した。【N. Nishino, et al., ISHW2018, October 2-6 2017, Shiran-kaikan, Kyoto, P1-40】

(6)　2 チャンネルマイクロ波反射計を用いた密度揺動計測による Heliotron J の閉じ込め特性に関する研究：

炉心プラズマの閉じ込め性能に寄与する乱流機構の解明のため、高時間分解能での多点同時計測が必要とされている。Heliotron J において 2 チャンネル反射計の開発を進めており、今回、密度揺動、ポロイダル回転速度の同時計測を目指しアンテナの設置を変更することで、ドップラー反射計として動作するよう改良した。Heliotron J における ECH、および ECH+NBI 加熱時における 2 チャンネル反射計で得られた電子密度揺動を計測し、得られたデータから径方向における二点間の相関解析を行い、それぞれの相関長を評価した。1mm 以下のオーダーの相関長であること、計測点距離を遠ざけると指数

関数的に相関長が低下することが確認された。【高田真人、福田武司、他、PLASMA2017、2017 年 11 月 20－24 日、姫路商工会議所、23P-17】

(6)の課題は双方向型共同研究（Heliotron J）として大阪大学大学院生が参加し、プラズマ実験のデータを解析することで得られた成果であり、修士論文としても取り纏められている。このほかにも、京都大学のみではなく、東北大学、大阪府立大学、香川工業専門学校等、他大学の若手研究者の育成にも貢献している。

5. 今後の課題と計画

双方の共同研究者による総合的な視点から研究計画を進め、順調な成果を得ている。ヘリカル型磁場閉じ込め研究では平成 28 年度から LHD の重水素実験がスタートし、イオン温度 10keV の達成するなど順調な進展が見られている。この重水素実験にはテーマリーダーや共同研究者として Heliotron J グループからも実験に参加し、これらの成果に貢献している。また、W7-X（独）実験が開始されるとともに、核融合炉に向けた LHD 型ヘリカル炉概念設計も進められている。ヘリカル型の閉じ込め装置の特徴の一つに高密度プラズマの生成・維持がある。これらの特性と閉じ込め改善に向けた磁場最適化が今後さらに重要になる。一方、閉じ込めに対する同位体効果、ヘリカル系におけるダイバータ性能も重要な課題である。これらの課題に対し、精度の高い実験データ基盤の構築を目指し、Heliotron J プラズマ実験の結果と EMC3-EIRENE などの三次元シミュレーション・コードによる数値計算予測との比較から、核融合炉設計への予測精度向上に寄与する。このため、実験的研究により確認されつつあるヘリカル軸ヘリオトロン配位の基本的性能の高性能化を目指し、様々な視点から実験的・理論的に研究を展開する。今回本報告で紹介した成果のほかに、高密度領域での閉じ込め改善、高エネルギー粒子励起 MHD 不安定性の抑制研究、周辺乱流輸送と炉心プラズマとの相関研究、不純物輸送研究が進展するとともに、ICRF に関しては高圧電源系の整備が終了し、長パルス、高パワー領域での研究が可能になると考えられる。また、近赤外分光、トムソン散乱計測装置のマルチパス化計画など、新たな計測手法の導入へ向けた準備研究等にも成果が得られている。今後、粒子供給シナリオや加熱シナリオの最適化などにより、さらにプラズマのパラメータ範囲を拡大し、閉じ込め磁場最適化へ向け、プラズマ構造形成・不安定制御の理解を深め、高ベータ研究への道を拓くシナリオを探る。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実現に向け優れた展望が開けることを期待する。

4.3. 先端研究施設共用制度（ADMIRE 計画）平成 28 年度～

1. 本制度の目的・目標

本制度は、産官学連携事業として平成 19 年度から 27 年度にかけて実施した「先端研究施設共用促進事業（文部科学省）」の補助が終了した後も自立的に継続して実施しているものであり、「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. 活動状況

課題の募集は公募により実施している。共用ナビ、および 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した事業の広報、およ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。

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。

3. 主な成果

3.1 研究成果

課題①「究極の高均一性・高磁気特性・高生産性 Nd-Fe-B 焼結磁石の製造装置開発」：NDFEB 株式会社

・NdFeB 焼結磁石は、情報機器（磁気メモリー）・家電製品（クーラー）・電気自動車（モータ）など幅広い製品に用いられるため、用途に合わせて、多彩な磁石形状が求められ、低コストで形状の自由度の高い磁石製造法の確立が求められている。本研究では、磁石の均一性を評価するための定性的、あるいは定量的な方法を確立するため、新 PLP 法（Press-less process 法）を用いて作製された磁石を対象に、EBSD-IQ Map/IFP Map を利用して、結晶粒径分布や結晶粒配向性などの材料組織学的因子と磁石性能の関係を調査している（図 1）。これまでに、結晶粒配向分布と保磁力の間に良い相関のあることが判っている。

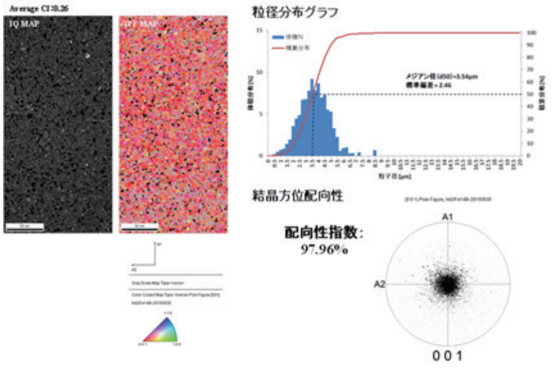


図 1 ネオジム磁石の結晶粒径分布や結晶粒配向性の調査

課題②「軽水炉圧力容器鋼実機アーカイブ材の材料特性評価」社名：中部電力株式会社

・原子炉圧力容器の内面には耐食性に優れたステンレス鋼がクラッドされており、クラッド直下の鋼組織はいわゆる溶接熱影響を受けている。図 2 に示す

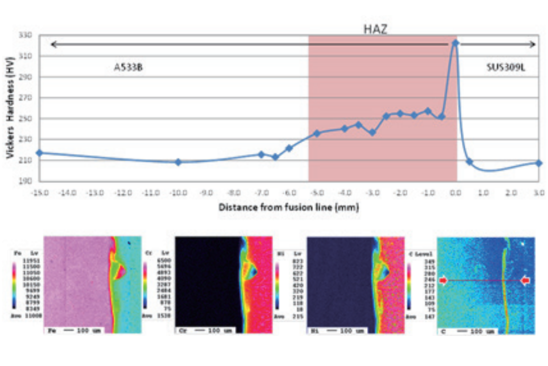


図 2 圧力容器クラッド部における高度分布および元素分析結果

ように、この熱影響部の強度特性と鋼組織の相関を調査した結果、クラッド界面では硬度のピークが存在すること、その箇所にはマルテンサイト組織が形成されていることが判明した。また、この熱影響部近傍の TEM/EDS 成分分析を行った結果、炭素が偏析していることが明らかとなった。現在は、衝撃特性、破壊靭性、および引張特性などの破壊強度試験を実施しており、熱影響を受けた部分は受けていない部分に比べ、延性脆性遷移温度がやや高温側にシフトすることが判明している。今後は、破壊強度評価に及ぼす試験片サイズの影響を調べる予定である。

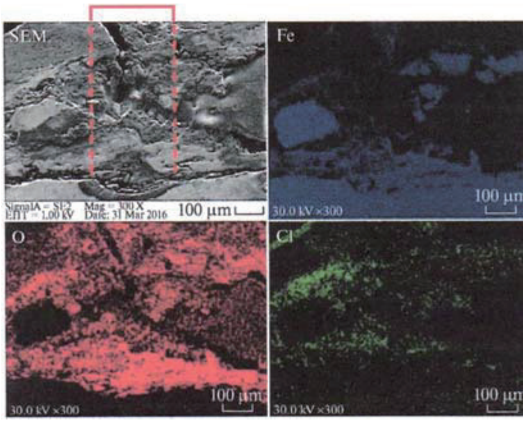


図 3 海水模擬溶液中における腐食挙動

課題③「鋼材表面に生成した自己組織化酸化物膜の防食機構の解明」社名：株式会社京都マテリアルズ

・橋梁をはじめとする鉄鋼製構造物は、防錆塗料塗布などしても経年により腐食が進行することが避けられない（図 3）。京都マテリアルズが開発した反応性防錆塗料 PatinaLock は錆を保護性の高い緻密なものに変性することにより、格段に長期にわたり腐食の進行を止める画期的な性能を有する。その防錆の機構を明らかにするための研究を進めている。

3.2　研究成果の効果など

本事業に関する研究成果は実用化に向けた開発へと展開し、国プロ（サポイン事業：エネ庁）や民間の投資による共同研究へと進展している（京都マテリアルズ、中部電力）。

3.3　人材育成、若手のキャリアアップ

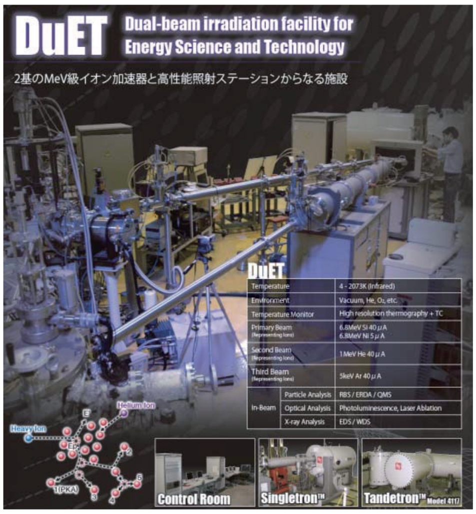
本事業では、特定教員、および研究員を雇用し、先端施設の整備、および共同研究を支援している。採択課題の中には成果占有利用を希望する場合があり、博士研究員の貢献を公開できない等の課題も多いが、この事業に参画した博士研究員二名は、それぞれが東北大学准教授、ネバダ大学博士研究員に採用されている。

4.　今後の位置づけと計画

本事業は平成 27 年度をもって文部科学省からの支援は終了しているが、本事業において制度化した「有償利用システム」を継続し、民間との装置共用は今後も「ADMIRE 計画」として、引き続き実施していく。これまで京都大学では、設備の共用化については部局レベルの取り組みに留まっており、全学的な体制構築には至っていなかった。このような状況下において、平成 29 年度には設備共用を全学的に促進するための検討委員会が立ち上げられ、本学の中長期的な設備整備計画（設備マスタープラン）に、本学が有する設備の共同利用、特に国際共同利用を見据えた学外共同利用を積極的に促進することが盛り込まれた。具体的には、こうした設備共用の全学的な取り組みを推進するため、既存の部局の枠組みを越え、宇治地区研究所が連携して学内外に対して設備共用を効率的・効果的に実施するための制度設計が行われている。今後は宇治キャンパス内の設備サポート事業に参画し、他の研究所と連携しながら施設共用の拠点形成を推進していく。

5. 課題

本制度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（図 4）。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。



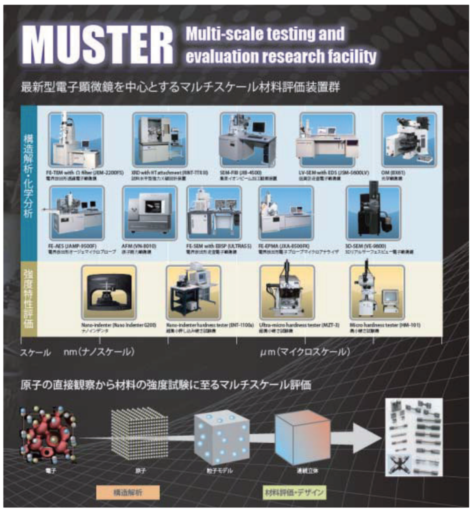


図 4 イオン加速器（DuET）および基盤装置群（MUSTER）

4.4 センター共同研究 平成8年度～

1. 事業の目的・目標

センターは研究所における部門・分野横断的研究の中核的施設として、研究所改組当初から設置されている組織である。これらの研究の基盤として、センター共同研究は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。

エネルギー理工学研究所は、その目標・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た。「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年に新たなセンターとして研究体制の改組・再編を行った。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た。センター共同研究は、第2期中期期間の目標のうち（1）重点領域研究としてプラズマエネルギー・量子エネルギー研究、ソフトエネルギー（平成28年度まではそれぞれ先進プラズマ・量子エネルギー、光・エネルギーナノサイエンス）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た。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利用・共同研究は上記拠点活動として展開することとした。

2. 体制、および運営状況

センターの組織構成としては、センター長のもとに、重点化した上記研究活動に整合する研究組織として、プラズマ・量子エネルギー研究推進部、ソフトエネルギー（平成28年度まではそれぞれ先進プラズマ・量子エネルギー、光・エネルギーナノサイエンス）研究推進部が対応している。さらに、共同研究展開のグローバル化を睨み、「国際・産官学連携研究支援推進部」を設置している。センター共同研究の具体的な運営・企画についてはセンター研究計画委員会で議論され、年度計画を立案、これに従い研究課題を所内公募し、同型各委員会での審査を経て実施することとしている。また、センターでの研究活動を遂行するためにセンター機器の運転・整備が必須であり、技術系職員がこれらの業務を行っている。

3. 活動状況

センター共同研究としては、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」の二分類で課題募集を行っている。基盤研究は各推進部長が分野融合・連携研究として企画・提案するものとし、奨励・企画研究は、若手研究者を支援する視点を取り込み、萌芽的研究の提案を受け入れ、拠点における全国的規模の共同研究課題のシーズ作りにも役立てている。センター共同研究の申請は、センターの三推進部の研究領域に分類され、センター研究計画委員会が審査し、予算配分を行っている。

［1］センター共同研究基本方針

当センターでは、三研究推進部により共同研究を推進することになっている。共同研究の申請課題もこれらの推進部の研究活動の主旨に沿ったものを優先して進める。共同研究は、以下の二種に分類し、公募する。さらに平成30年度からは二つのカテゴリーを廃止し、さらに分野横断的かつ競争的な募集形態とするよう変更された。

（1） 基盤共同研究：
優れた研究計画で、かつ、センター研究推進部の趣旨に沿った研究（2〜3 件）に、重点的な予算配分を設け公募を行う。

（2） 奨励・企画調査共同研究：
「基盤」共同研究と同様に研究推進部の研究活動の趣旨に沿った研究で 1 件あたり 50 万円以下で推進できる研究課題を募集する。また、研究会やセミナーの開催を通じて共同研究を行うものについては「企画調査」として公募する。この枠内でも優れた研究には重点的な配分を行う。

［2］センター3 推進部の基本方針

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要素である。このことも含め、各推進部としての基本方針を見直した。

A1. 国際・産官学連携研究支援推進部：

エネルギー理工学に関する先進的な国際共同研究を支援する。このために研究所の国際会議・シンポジウム・ワークショップ等を企画・開催・支援する。また、産官学連携の推進のために、外部資金等を獲得する活動等を支援する。さらに、若手研究者育成のために、若手研究者・学生の海外派遣・招聘を行う。以上により、研究所の認知度を上げるとともに、国際共同研究の支援と国際的な人材の養成へ寄与し、研究成果の社会還元を目指す。

A2. プラズマ・量子エネルギー（先進プラズマ・量子エネルギー）研究推進部：

本研究推進部は、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関連研究をとりあげ、これまでの研究成果を基盤に、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へと展開する。とくに、関連研究グループが培ってきた Heliotron 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生かして、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。

A3. ソフトエネルギー（光・エネルギーナノサイエンス）研究推進部：

自然界で実現されている光合成、代謝、炭素循環など、自然エネルギー（数 eV 程度）を高効率、かつ、ロスなく電気や化学物質に変換・利用するエネルギー材料系に学び、サステナブルエネルギー社会を実現するために、新しいコンセプトに基づく革新的なエネルギー材料・システムの創出を目指す。このために、光（太陽光やレーザー、テラヘルツ領域）、ナノ、バイオ、およびそれらの融合などの多岐の分野にわたる実験・理論研究を融合（創発）した新しい学際領域研究「ソフトエネルギー創発科学」を推進する。自由電子レーザー、NMR 装置、太陽電池研究設備、ナノバイオ材料計測装置群などを中心とする充実した設備により、次世代再生可能エネルギー材料・システムの構築に寄与する。

また、センターでは共同研究と並行して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。活動は年度によって特徴があり、新任の教員の研究内容の紹介、外部の研究者などを招いた講演会様式のもの、所内の教員の相互理解と、あらたな研究シーズを発掘するためのものなど多岐にわたる。談話会も共同研究の活性化の一端を担っている。

4. 主な成果

各年度におけるセンター共同研究採択課題数の推移（平成 28-29 年度分）を下表に示す。

年度	A1：国際・産官学連携研究支援推進部		A2：プラズマ・量子エネルギー研究推進部*		A3：ソフトエネルギー研究推進部*	
	基盤	奨励・企画	基盤	奨励・企画	基盤	奨励・企画
平成 28 年	1 件	4 件	1 件	11 件	1 件	7 件
平成 29 年	1 件	4 件	1 件	9 件	1 件	8 件

*平成 28 年度は先進プラズマ･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

これらの採択課題の年度ごとの研究成果は、センター共同研究成果報告書（一課題につき一編（A4 用紙二枚以内））にまとめられている。

5. 今後の課題と計画

センター共同研究については何度かの変更が行われているが、平成 30 年度の研究計画委員会において、それまで多くの研究者に機会を付与する形式から、集中的に予算配分をする形式とすることが決定され、プラズマ・量子エネルギー研究推進部、およびソフトエネルギー推進部については今年度からこの方針に沿った形で募集が行われている。将来研究所の基幹的な研究課題となるような研究課題のみならず、萌芽的・魅力的な研究課題などを含め推進する。国際・産官学連携研究支援推進部については平成 29 年度から国際会議、セミナーなどを開催、および助成に関する活動に軸足を移し、所員からの申請に基づき推進部が対応している。

一方、センター組織的には、これまでセンター機器の運転・整備に優れた功績のある技術系職員団の高年齢化が問題となっている。センター所属の優れた特色ある機器の操作、点検・整備のための人材確保と技術の伝承、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、予想される設備機器の稼働時間の増加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。

4.5 文部科学省特別経費プロジェクト
革新的高効率太陽光利用技術の開発
ーゼロエミッション文明への変革を加速するー
平成 25 年度～平成 30 年度

1. 事業の目的・目標

現在の文明が抱えるエネルギー・環境問題は、エネルギーの大量生産・大量消費という根本的な原因があるため、再生可能資源による代替エネルギー開発だけでは解決しない。「商品としてのエネルギーを大量生産、大量消費する」現在の文明から、「エネルギーを需要に対して最も効果的に生産・分配供給し、廃棄物を出さない」ゼロエミッション文明へと発想を転換するための学理の構築とそれに立脚した革新的ゼロエミッションエネルギー技術が必要である。

本事業では、ゼロエミッション文明に転換するための具体的なエネルギー技術として、ゼロエミッションエネルギー研究コミュニティからも要請の高い革新的な太陽光エネルギー利用とバイオマス利用に特化し、

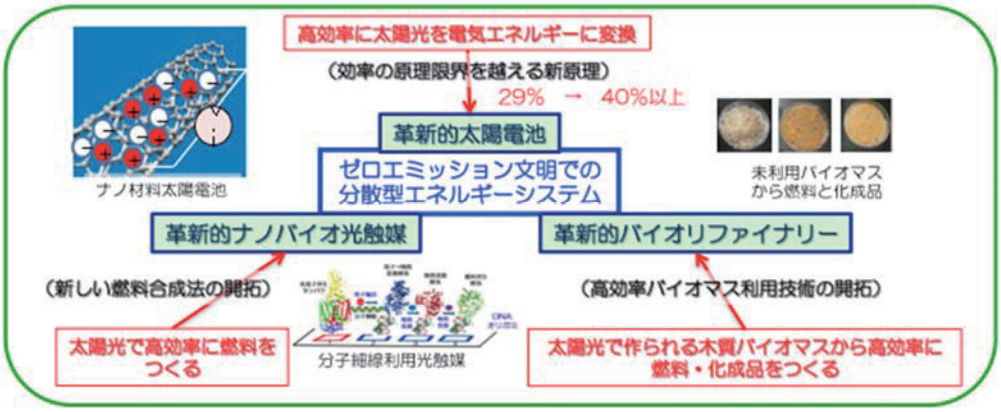
① 既存の原理限界を超える高効率太陽電池

② 太陽光による燃料生産

③ 高効率バイオリファイナリー

を可能にする新しい原理と、それに立脚した要素技術の創出に向けて、化学、物理、工学にまたがる融合的エネルギー研究を行う。この成果をもとにして研究所活動の新しい柱を確立するとともに、京都大学内の太陽光エネルギー研究のハブとなる組織を設立、ゼロエミッションエネルギー研究コミュニティへの共同利用・共同研究拠点機能をさらに充実させ、太陽光エネルギー研究において、京都大学が世界をリードすることを目指す。

本事業は、第 2 期中期目標に掲げる「学問の源流を支える基盤的研究を重視するとともに、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」事業であり、本研究所でこれまでに推進してきた「光・エネルギーナノサイエンス」そして「ソフトエネルギー」研究で培った物理、化学、工学、材料、生物、光科学の成果を融合させ、高効率太陽光エネルギー利用研究の深化と新展開を目指す戦略的研究を促進する。同時に、先導的融合研究環境を維持発展させる支援体制を整備することにより、本研究所の研究機能の深化と拡充を目指し、太陽光エネルギー利用研究を研究所の一つの柱として確立する。その研究支援体制をもとにして、ゼロエミッションエネルギー研究コミュニティへの共同利用・共同研究拠点機能をさらに充実させ、中期目標に掲げた「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」ために、学際的領域、新領域の開拓を含む広範な研究活動を支援する。これらの活動通じて、京都大学内の太陽光エネルギー利用研究のハブとなる組織の設立を目指す。

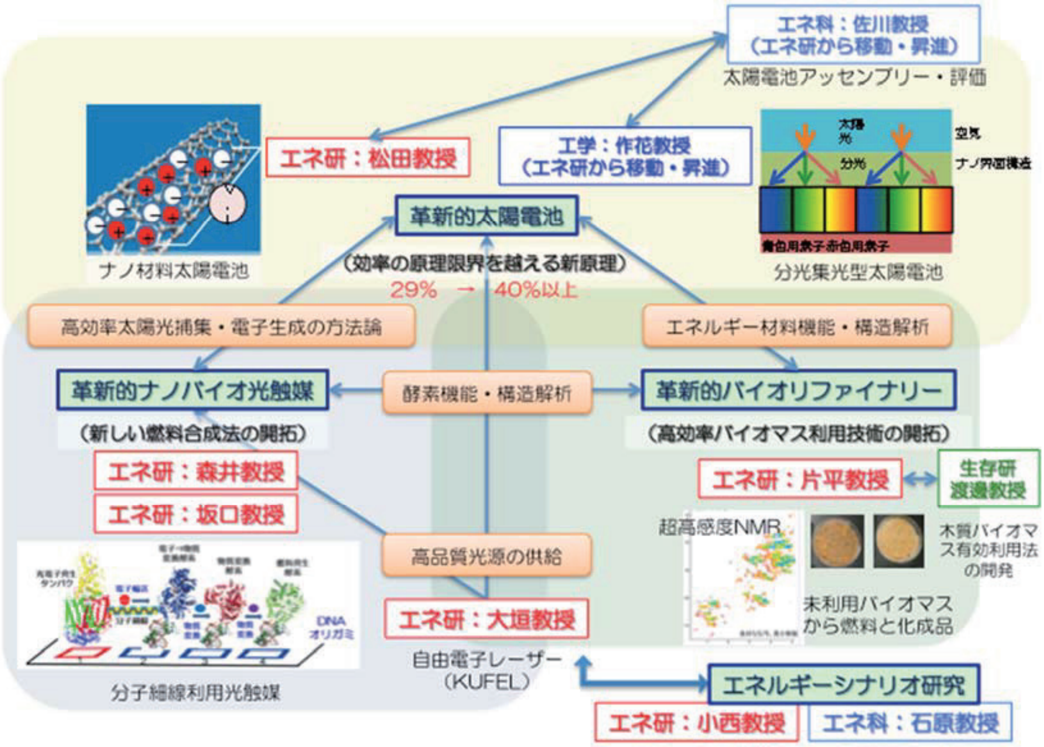


2. 体制、および運営状況

高効率太陽光エネルギー利用技術への基礎研究ですでに成果をあげている物理、化学、電気などの各異分野の本研究所教員が、エネルギー科学研究科、および工学研究科の教員、および新たに雇用した特定助教、博士研究員、博士課程学生（RA）とともに効果的に融合研究を行う体制を整備し、革新的な太陽光エネルギー利用技術の新しい原理の確立と新たな学術領域の構築を目指す。グローバル COE 活動の成果である CO2 ゼロエミッション社会の実現に向けた独自のエネルギーシナリオ研究成果を指針としつつも、エネルギー科学研究科、および工学研究科の教員と協力してさらに見直しを加えながら、高効率太陽光利用にむけた融合研究を促進する。

エネルギー研究コミュニティの学内（化学研究所、生存圏研究所、理学研究科、農学研究科など）研究者、そしてゼロエミッションエネルギー拠点に集結した国内研究コミュニティ、本研究所がこれまでに研究交流協定を締結した海外 27 研究機関と国内外の協力体制を充実させ、融合研究プロジェクトグループとの学内、国内、海外との共同研究を加速する。

3. 活動状況



【国内シンポジウムの開催】

高効率太陽光利用研究に関する国内シンポジウムを、以下のとおり、平成 25 年度以降毎年開催してきた。

- 平成 25 年 10 月 2 日　第 1 回シンポジウム Exploring novel principles for highly efficient utilization of solar energy　京都大学宇治キャンパス（30 名）
- 平成 26 年 10 月 2 日　第 2 回シンポジウム Exploring novel principles for highly efficient utilization of solar energy　京都大学宇治キャンパス（30 名）
- 平成 27 年 9 月 3 日　第 3 回シンポジウム Exploring novel principles for highly efficient utilization of solar energy　京都大学宇治キャンパス（30 名）
- 平成 28 年 9 月 7 日　第 4 回シンポジウム Exploring novel principles for highly efficient utilization of solar energy　京都大学宇治キャンパス（30 名）

・平成 29 年 9 月 7 日　第 5 回シンポジウム Exploring novel principles for highly efficient utilization of solar energy　京都大学宇治キャンパス（30 名）

4. 主な成果

平成 28 年度以降の主な成果は以下のとおりである。

(1) 高効率太陽光利用材料研究では、ナノ炭素材料の新しい光エネルギー変換原理を開拓し、それを理解するうえで重要となる高効率・高機能太陽電池の研究を進めた。界面構造形成による革新的光利用機能の創出を目指し、光電極として利用可能な半導体電極上へ自発的に二次元周期構造を形成する手法を新たに開発した。

・オールカーボン正孔輸送層による高安定ペロブスカイト太陽電池を開発。
[Matsuda, K. *et al*., *Nanoscale* **2016**, *8*, 11882]

・単層 WSe2-MoS2 横ヘテロ構造のスケーラブル合成と電界発光特性。
[Matsuda, K. *et al*., *Advanced Func. Materials* **2018**, doi:10.1002/adfm.201801021]

・新しい層状半導体である硫化ゲルマニウムを利用して、幅広い波長、および高温領域で極めて高い感度を有した光検出器の作製に成功。
[Matsuda, K. *et al*., *Nano Scale* **2017**, *9*, 12435]

・炭酸ガスレーザーを使って金ナノ構造を高速成長させることに成功。
[Nakajima, T. *et al*., *Applied Surf. Sci.* **2018**, DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.09.044]

・中赤外自由電子レーザーを使って Gd3Al2Ga3O12:Ce 結晶中の隠れた電子トラップ 準位を可視化。
[Zen, H. *et al*., *Applied Phys. Lett.* **2018**, DOI: 10.1063/1.5008632]

(2)ナノバイオ光触媒研究では、DNA ナノ構造体に酵素を精密に配置した連続反応システムを開発した。また、配電盤上の部品間での高効率電子移動を達成するために、ジグザグエッジ型炭化水素分子合成法を開発した。

・生物を模倣した従来にない触媒反応を開発し、エネルギー・半導体応用が期待される機能性炭素細線（炭素ナノリボン）の合成に成功した。合成された新種の炭素ナノリボンは優れた電気特性を持ち、次世代半導体材料や太陽電池としての応用も期待される。
[Sakaguchi, H., *et al*., *Nature Chem*. **2017**, *9*, 57]

・「ばね」型有機分子を金属表面で歪ませることにより「高エネルギー充電状態」を作り出し、従来法では合成できなかった機能性材料を著しく低いエネルギーで合成する新しい炭素骨格組み換え反応の開発に成功した。有機 EL や太陽電池などに利用できる新しい有機エレクトロニクス材料開発への応用も期待される。
[Sakaguchi, H., *et al*., *Nature Commun*. **2017**, *8*, 16089]

・DNA ナノ構造体上の特定の DNA アドレスに対して、酵素などの機能性タンパク質を安定かつ定量的に配置するために、アドレス DNA と共有結合を形成可能なモジュール型アダプターを開発した。これらを用いて、複数の酵素が関与する連続反応の効率が、それら酵素の空間配置によりどのように影響を受けるかを詳細に検討した。
[Morii T., *et al*., *J. Am. Chem. Soc*. **2016**, *138*, 3012]

・三種類の酵素を DNA ナノ構造体に設定した狙った場所へ一分子ずつ正確に並べることに成功。単に酵素を混ぜ合わせただけでは達成できない、新しい人工代謝経路を可能にする「分子コンビナート」の創製が期待できる。[Morii T., *et al*., *J. Am. Chem. Soc*. **2017**, *139*, 8487]

(3)バイオリファイナリー研究では、リグニンと糖間のエーテル結合とエステル結合を NMR 法によって実験的に初めて示した。またゲノム情報を活用してリグニン、および糖を分解する木材腐朽菌由来の酵素の大量精製に成功した。

・NMR 法によるバイオマス産物の定量的な解析手法を開発した。
[Katahira, M., *et al*., *Sci. Rep*. **2016**, *6*, 21742]

・植物細胞壁中の芳香族高分子であるリグニンと多糖間の共有結合を NMR 法によって初めて解明した。地球上に最も多く存在するバイオマスの利活用開発につながる。
[Katahira, M., *et al*., *Sci. Rep*. **2018**, *8*, 6538]

これらの研究成果によって、科学研究費助成事業では基盤研究(S) 1 件、基盤研究(A) 3 件、基盤研究(B) 3 件などの多件数の競争的資金を獲得した。

5. 今後の課題と計画

本研究所を中心として学内の材料科学、生物科学、光科学研究を融合させ、高効率太陽光エネルギー利用学理を創出する独創的な先端研究・融合研究を、若手人材を中心として推進する。これまでの研究活動で、京都大学内の太陽光エネルギー利用研究グループ間の連携が培われてきた。今後は、この連携活動をさらに発展させ、本学での太陽光エネルギー研究のハブとなる組織の設立を目指す。既存の原理限界を超える高効率太陽電池、太陽光による燃料生産、高効率バイオリファイナリーを実現するための基盤原理と要素技術の確立をとおして、共同利用・共同研究機能を向上させ、学術・社会のイノベーション創出、および若手人材の育成に貢献し、世界的な研究大学としての研究教育活動を大幅に改善する。

4.6 文部科学省特別経費プロジェクト
グリーンイノベーションに資する高効率スマートマテリアルの創製研究―
アンダーワンルーフ型拠点連携による研究機能と人材育成の強化―
平成 27 年度～平成 32 年度

1. 事業の目的・目標

人類の生存環境の維持と持続可能社会の構築は、現在我々が直面している最大の課題である。年々世界で増大する物質・エネルギー消費をまかなうことは、従来からの延長上の社会システムではもはや限界に達しつつあり、物質・エネルギーの大量生産に伴って生じる有害副生成物や余剰熱（浪費される熱エネルギー）の排出は地球環境への極めて大きな負荷となっている。この問題の根本的な解決のため、我々は、生物のシステムに着目した。例えば、細胞膜を通じての物質の高選択性輸送と細胞内の高効率な物質・エネルギー変換は、分子認識能と能動性の賜物である。1991 年ノーベル物理学賞受賞者の de Gennes の言葉を待つまでもなく、このような生物機能を参照規範とする材料（bio-inspired material；生物機能に学び、これを超える機能を発揮する材料）は、グリーンイノベーションに資する機能性材料の筆頭に挙げられる。

本事業は、平成 27 年度から分子認識能と自立性・能動性を特質とする生物系を規範として、物質・エネルギーの生産・輸送・使用に伴うロスをゼロに導くことを目指し、グリーンイノベーションにも大いに資するこれらの材料、すなわち高効率スマートマテリアルの創製とその研究体制の構築を目的として開始された。

具体的にはオンデマンドで物質やエネルギーの高効率生産・変換を行う革新技術基盤として、
①究極の分子認識能をもつ高効率生物システムの抽出・応用
②ナノからマイクロスケールにわたる超階層構造化を実現する制御技術
③レアメタル不要の革新的分子触媒で高効率物質変換を実現する元素戦略と分子設計
を基本要素と捉え、三研究所の有機的な連携・融合により、個々では実現不可能な（〔全体計画〕に記す）革新機能材料を開発する。同時に、ミッションの異なる研究所が「連携プラットフォーム」を構築し、学際融合研究を戦略的に推進して顕著なシナジー効果を生み出す新研究体制として、また、次世代研究者の育成の場として、その有効性を実証することも重要な目的である。

本事業では、同期末に飛躍的展開の基盤を構築し第 3 期での画期的伸展を期して、化学研究所、エネルギー理工学研究所、生存圏研究所が、研究所の枠を越えた組織的・戦略的連携により、革新機能を導く新物質・新プロセスを創出する。本学第 2 期中期目標の第 2 項（1）「研究水準、および研究の成果等に関する目標」に記載の「学問の源流を支える基盤的研究」重視の立場から、本学が強みとする「化学」、「生物」、「材料」分野の高いポテンシャルを生かした研究連携体制の構築に臨むのが本事業である。その成果は、本学、ならびに各研究所の中期目標達成に大きく貢献し、各々が認定を受けている共同利用・共同研究拠点の活動促進にも還元され、関連研究者コミュニティの強い期待に応えるものとなる。

2. 体制、および運営状況

リエゾンオフィス機能を具備する連携プラットフォームを設置し、戦略的融合研究の柔軟性、迅速性と機動性を担保する。プラットフォームは三研究所所長が合議によって戦略的に運営するが、研究展開に主体的に貢献する専門分野の連携教授 9 名を三研究所からエフォートを管理して選任するとともに、より高いエフォート率でプラットフォーム全体の企画推進と研究教育を統括するプラットフォームリーダー（教授）を配置する。各研究所の現有リソースである研究上の（国際連携等の）グローバル性やイノベーション創出機能を円滑に活用できるとともに、人材養成機能の強化、他研究機関・組織との柔軟性・機動性に富む広域・マルチネットワーク形成の核としての役割を果たしうる。スマートマテリアルの◇分子設計／材料設計、◇構造解析と機能発現機構解明、◇機能・物性評価に及ぶ本研究の三つのフェーズを手掛けるハイレベルな若手研究員を育成する。

3. 活動状況

【国内シンポジウム】

平成 28 年 3 月 7-8 日 ICRIS’16 -Research Network Based on ICR MOU-（京都大学宇治キャンパス）において、スマートマテリアル創製研究に関する発表を本プロジェクトに参画する生物機能化学研究分野（森井研）、分子ナノ工学研究分野（坂口研）、エネルギー構造生命科学研究分野（片平研）が行った。平成 29 年度、平成 30 年度には、高効率膜透過分子の創製（生物機能化学研究分野・化学研究所 生体機能化学研究系）、レアメタル不要のナノ反応によるバイオマス有効活用（エネルギー構造生命科学研究分野・化学研究所 有機分子変換化学研究系）など、高効率スマートマテリアル創製のパラダイム確立に向けた共同研究を実施した。

4. 主な成果

(1) 基本要素の深化と相互連携：分子認識、超階層構造化、元素戦略と分子設計の三つの基本要素に立脚したスマートマテリアルの分子設計／材料設計を遂行した。

(2) 「連携プラットフォーム」体制の整備：各研究所の全面的バックアップのもと、情報の集約・共有、研究進捗状況の把握、人的交流・連携の支援を担う体制の構築について議論を進めた。

(3) アンダーワンルーフ型共通研究基盤の整備に関して議論した。

5. 今後の課題と計画

化学研究所、エネルギー理工学研究所、生存圏研究所は、学内の防災研究所、東南アジア研究所、経済研究所、地球環境学堂と連携して京都大学生存基盤科学研究ユニット（平成 18 年～）を運営してきた。これらの事業内容は互いに独立であるが、そうした連携や各拠点活動の実績を踏まえて本事業を融合的・発展的に推進する。三研究所はミッションを異にしながらそれぞれ共同利用・共同研究拠点活動を行っている。本事業は三研究所によるアンダーワンルーフ型連携をハブとしつつ、各研究所の共同利用・共同研究拠点の研究活動との連動、すなわち、国際的にも今後一段と推進される共同研究を通じて、それぞれの多彩な研究者コミュニティとの個別連携（垂直貢献）を促進するとともに、コミュニティの拡張や相互連携（水平貢献）を増進し、共同利用・共同研究拠点の機能強化（グローバル化とネットワーク拡張）を導く基本的に新たな事例を提供するものである。

本事業の実施にあたり三研究所の現有リソースの一層の有効活用を図るべく、「連携機器センター」（仮称）を設置し、研究所間での先端機器の相互利用はもちろんのこと、共同研究、そして国内産官学のみならず国際的な共同利用・共同研究拠点活動への貢献を図る。平成 30 年度に文部科学省「先端研究基盤共用促進事業」に申請したが、採択には至らなかった。今後、学内の共用促進支援に宇治地区サポート拠点（仮称）として申請する。

5.　研究ユニットの概要

5.1. 未踏科学ユニット（学知創生ユニット）

1. ユニット活動の目的

情報科学と人文社会科学の境界領域分野であるデジタルヒューマニティーズに関する先端的研究として、本学の学術資料を「学知」として高度利用に資する大規模知識データベースの開発と、この先端的データベースを活用した自然科学分野と人文社会科学研究のベストプラクティスを実施する。研究対象としては、東南アジア諸国において顕著な人間の安全保障に関する諸問題をとりあげ、最終的には、クラウド環境に適応したビッグデータの統合利用による人文社会科学と自然科学の融合学際研究の革新的な展開を目指す。

2. ユニットの活動状況

本研究ユニットは、地域研究統合情報センターの原正一郎教授をユニット長に、16 部局（人文科学研究所、エネルギー理工学研究所、経済研究所、東南アジア研究所、生態学研究センター、学術情報メディアセンター、フィールド科学教育研究センター、こころの未来研究センター、医学研究科、農学研究科、エネルギー科学研究科、アジア・アフリカ地域研究研究科、総合博物館、附属図書館、人間の安全保障開発連携研究ユニット）から申請を行い、平成 27 年 6 月に設置が承認され、活動を同年 9 月から開始している。

本ユニットでは「未踏科学領域を創生」するため、情報化時代に対応した、①既存学術資料の大規模知識データベース化、②サイバー空間上をリアルタイムで駆け巡る学術データの大規模知識データベース化、③人文社会科学諸分野を超えた大規模知識データベースの利活用により、新たな知識や洞察、および精度の高い予測値を得るための、革新的な情報技術の創出・高度化・体系化を目指している。

そこで本研究ユニットでは、「学知創生プラットフォーム研究」、および「人間の安全保障に関するトランスボーダー研究」の二つのサブユニットを形成し、大規模知識データベースの構築とアプリケーションに関する先端的研究を実施している。エネルギー理工学研究所では、主にこの大規模知識データベースの事例研究として「人間の安全保障に関するトランスボーダー研究サブグループ」（グループリーダー：大垣英明教授）を主導し、多元化する地球社会での流動や停滞、葛藤や抗争、人口増加や少子高齢化、資源枯渇や温暖化といった危機に対して、耐性のある社会の在り方を探求している。特に、Hooman Farzaneh 外国人特定講師を平成 27 年度から平成 29 年度まで雇用し、エネルギー・環境・公衆衛生・経済・資源等のデータを利用した多面的な評価方法に関する研究を行った。この研究は、統計データ等を統合して、クリーンエネルギーの導入（法令）が大都市（東京・上海・ニューデリー・ソウル・クアラルンプール・シドニー）の環境に与える影響を定量的に評価している。

3. 成果など

本ユニットに関連して、エネルギー理工学研究所において

平成 28 年 3 月 28～29 日に 1st International Workshop on Clean Energy development in Asian Cities (Technological and political perspectives)、平成 29 年 2 月 22 日に 2nd International Workshop on Clean Energy Development in Asian Cities (Learning From Real Cases)、平成 30 年 2 月 3 日に 3rd International Workshop on Clean Energy Development in Asian Cities (Experiences from Asia and Latin America)

という一連の国際ワークショップを開催し、その成果を Springer より「Devising a Clean Energy Strategy for Asian Cities」（ISBN 978-981-13-0782-9）として平成 30 年度に出版した。なお、平成 30 年 2 月 1～3 日には JSPS Japan-Brazil Joint Workshop “Towards Sustainable Urban Energy Systems: Experiences from Asia and Latin America”も上記ワークショップに合わせて開催した。

原著論文

1) H. Farzaneh, "Development of a Bottom-up Technology Assessment Model for Assessing the Low Carbon Energy Scenarios in the Urban System", Energy Procedia, 107, pp.321-326 (2017).

2) H. Farzaneh, "Multiple benefits assessment of the clean energy development in Asian Cities", Energy Procedia, 136, pp.8-13 (2017).

3) N. Iliopoulos, H. Farzaneh, H. Ohgaki, "Tokyo's Low-Emission Development Strategies Underlying the Promotion of Energy Efficiency in Public and Private Buildings", Devising a Clean Energy Strategy for Asian Cities, Springer, ISBN 978-981-13-0782-9, 205-222 (2018).

4. 今後の展開など

本研究ユニットでは、クラウド環境に適応したビッグデータの統合利用による革新的な人文社会科学分野の創生を目指すとともに、人文社会科学から自然科学に跨がる国際共同研究の展開による「人間の安全保障」に関するトランスボーダー研究に関する方法論の確立と実践型研究者の育成を行っていく予定である。なお、Farzaneh 特定講師は平成 30 年 4 月より九州大学に准教授として転出したが、引き続き本研究課題に関して共同研究として継続予定である。また、短期外国人研究者を招聘し、「人間の安全保障」に関するトランスボーダー研究に関する研究を進める。

5.2. 未踏科学ユニット（グローバル生存基盤展開ユニット）

1. ユニット活動の目的

京都大学は全学組織として平成 27 年に「研究連携基盤」を設置し、異なる視点を持つ研究者の知を結集した異分野融合と新分野創生の促進をはかっている。その構成部局の多彩な学術領域をベースにボトムアップ的な学術領域を目指すのが未踏科学ユニットで、四つの研究事業ユニットが所属しているが、本研究所はそのうちの二つのユニットに当初設立メンバーとして主体的な活動を行っている。

グローバル生存基盤展開ユニットはそのような学際研究の場としては最も早くから設立されたもののひとつで、平成 18 年に宇治 4 研究所と東南アジア研究所によって設立された「生存基盤科学研究ユニット」が発展的に移行して平成 27 年度に未踏科学ユニット傘下に結成され、本学の 7 部局（化学研究所、防災研究所、エネルギー理工学研究所、生存圏研究所、東南アジア研究所、地球環境学堂、経済研究所）の教員の有志が参画している。設立当初より、人類の生存と持続可能性に関わる資源・エネルギー・環境・コミュニティの問題に取り組んでおり、時代背景とともに研究の重心や対象、方法は内外の資金とともに少しずつ変遷しているが、メインテーマ自体はほとんど変わらず、むしろ当初設定した課題目標の先見性と普遍性を物語っている。

人類の歴史の初期においては地球上の資源のごく僅かしか消費されなかったため、人類の存在が地球規模での資源・環境に与えた影響は微々たるものであったと推測される。しかし、最近の数百年間で人類が消費してきた資源の総量は爆発的に増加し、その結果として、現在、石油やレアアースの不足や地球温暖化の問題などに代表される資源の枯渇と環境劣化が地球規模で進行し、社会的問題のみならず深刻な国際問題も誘発している。

2. ユニットの活動状況

そこで最近の数年は、この問題に対応するうえで自然環境、生物圏、人間社会と文明、人間個人、そして物質一般に関わる全ての事象がそれぞれに固有の「寿命」を持つことを重要な鍵ととらえ、人類が活動を行う限り資源の消費と環境変化（劣化）は避けられないという認識の下で、自然環境、生命、人間社会、物質それぞれの寿命に応じた分析と対応策の統合的、かつ整合的な計画・遂行が本ユニットの主要テーマであった。人類の生存と持続可能性の問題を逆に、本来的に持続可能性を持たない寿命現象から探るものであり、本研究所からも毎年数件の学際研究を提供してこの活動にあたった。この中では、自然環境、人間社会、生命、物質の各分野における先端研究を推進してきた上記 7 部局の研究者が分野横断的な共同研究を通じて、それぞれが対象とする系の寿命がどのような因子で決まっているのかを明らかにし、さらに、対象系の寿命の相対評価（人類のタイムスケールにおける自然環境、物質などの脆弱さの評価）という視点を踏まえて研究成果を統合することで、生存基盤構築の方策を提示することを計画している。この方策は人類の生存基盤が万古普遍ではないことを念頭に置いた動的かつ地球規模での本質的な問題の解決であり、限定的な地域における単純な右肩上がりの発展だけを目指す従来の「持続可能な成長」とは一線を画するものであり、より広範な時定数を持ち、また多層的な地球と生物の理解に基づいている。エネルギーはこの生命現象すべての駆動源であり、本研究所はこの学際研究において重要な一翼を担うとともに、また本研究所の研究にもフィードバックが得られている。

3. ユニットの活動成果

本ユニットでは物質生産と人間社会・自然環境のフィードバック、エネルギー源の高効率・長寿命と有害物質の無排出（ゼロエミッション化）、卓抜機能物質の創製・長寿命化・再生を三本柱として分野横断的な共同研究を進めてきた。この方針の下で、平成 27 年度にはエコシステムの安定性に関する研究などの 13 件の萌芽研究を実施した。（詳細は、ユニットホームページ http://iss.iae.kyoto-u.ac.jp/iss/ で公開している。）また、外国人教員 4 名を雇用し、バイオマス生産に関する研究などのグローバルな視点に重点を置いた共同研究 4 件を開始した。これらの研究成果は自然環境、生命、人間社会、物質それぞれの寿命に焦点を当て、地球規模での地域連携に基づいて生存基盤を構築するための重要な出発点となると期待されている。現在ユニットの研究課題は「地球規模物質エネルギー生産利用系」と「地球規模生活圏基盤構築系」の二つの大分野で展開しており、本研究所はバイオマス生産利用とプラズマエネルギーを中核とする研究で前者に参加している。現在、の課題は多くの Sustainable Development Goals (SDGs)に大きな寄与をなすと考えられている。

4. 今後の展開など

グローバル生存基盤展開ユニットは基本的に萌芽研究を公募で実施し、外国人教員の研究も組み込んで上記ユニットの目標とする学際的研究に取り組んでおり、本研究所は引き続いてこの活動に主体的に参加する。また積極的に海外との協力や海外での研究展開も実施する予定である。一例を挙げれば、核融合エネルギーによるバイオマス利用の高度化を研究しているが、これは生存圏研究所におけるバイオマス研究や東南アジア圏、地球環境学堂におけるアジアのバイオマス開発とも密接に関連している。また、核融合中性子の利用法としてのテロや危険物の検知研究も安心安全な生活圏の構築に貢献する。これらは本研究所内の共同研究が、そのままユニットの趣旨や主要テーマに沿ったものとして展開される。

5.3. スマートエネルギーマネジメント研究ユニット

1. ユニット活動の目的

従来のエネルギー科学・工学に情報通信ネットワーク、情報処理技術を融合させたスマートエネルギーマネジメントは、再生可能エネルギーの研究開発や、CO2 の排出権取引、再生可能エネルギーの固定価格買取制度など、21 世紀型の社会経済体制の構築にも深い関わりを持つ。

本ユニットでは、本学エネルギー科学研究科やエネルギー理工学研究所、工学研究科が培ってきたエネルギー科学・工学に関する多くの研究成果を深化、発展させるとともに、最新の情報通信ネットワーク技術、情報処理技術との融合を図ることによって、スマートエネルギーマネジメントに関する学際的研究開発を推進し、産官学連携による研究開発プロジェクトを実施、得られた研究成果を基に環境・エネルギー関連の学内外研究開発プロジェクトとの連携、さらには本学におけるエネルギーの効率的利用を推進するサステイナブルキャンパス活動を支援することを目的とする。

2. ユニットの活動状況

本研究ユニットは、学術情報メディアセンターの岡部寿男教授をユニット長に、6 部局（学術情報メディアセンター、情報学研究所、経済研究所、エネルギー理工学研究所、エネルギー科学研究科、工学研究科）から申請を行い、平成 28 年 4 月から活動を開始している。

エネルギーマネジメントに関わる多様な専門分野の研究者が学際的な研究活動を展開する機会を提供し、新たな学術的研究成果および実社会で有効に機能する材料、デバイス、装置、システム、経済モデルなどを生み出すため、研究活動としては、ユニットにおいて定例研究討論会を開催し、学際研究の推進を図っている。

また、産学連携活動としては本ユニット構成員の生み出した研究開発成果を紹介、議論するための研究発表会を定期的に開催し、産業界との連携を深め、研究開発成果の実用化を目指した企業との共同研究への展開を目指している。

さらに、学内活動としては、本ユニットで得られた研究成果を基に環境安全保健機構、および施設部との連携を図り、機器の省エネ化を一歩進め、スマートエネルギーマネジメントというシステム指向に基づいた省エネ、省 CO2 の深化を目指し、サステイナブルキャンパス実現を支援することも目指している。

3. 成果など

「スマートエネルギーマネジメント研究ユニット創設記念シンポジウム」を、平成 28 年 5 月 11 日に京都大学時計台記念館国際交流ホールで開催した。また、「第一回スマートエネルギーマネジメントシンポジウム」、および「第二回スマートエネルギーマネジメントシンポジウム」を、それぞれ平成 28 年 12 月 13 日、および平成 30 年 3 月 29 日に京都大学時計台記念館国際交流ホールで開催した。さらに、「松山隆司先生追悼 エネルギーの情報化シンポジウム」を平成 29 年 3 月 16 日に京都大学楽友会館で開催した。なお、成果の詳細は、ユニットホームページ（http://site.smart.kyoto-u.ac.jp/home）において報告している。

4. 今後の展開など

本研究ユニットでは、農学研究科において現在検討が進められている新農場での Green Energy Farm プロジェクトと連携を図り、農業におけるエネルギーマネジメントという実践的研究開発を推進する予定である。

6. 中期目標・中期計画の概要

1. 第 3 期中期目標・中期計画（平成 28 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。以上の長期目標を達成するために、第 3 期中期期間では、以下のような重点項目・目標を設定し研究・教育活動を展開した。

・ 第 1 期（平成 16 年度～平成 21 年度）では、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三重点複合領域研究プロジェクトとして推進してきた。第 2 期（平成 22 年度～平成 27 年度）では、「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」の二重点複合領域を設定した。これらの成果を踏まえ、第 3 期（平成 28 年度～）では、「プラズマ・量子エネルギー」、「ソフトエネルギー」の二重点複合領域を設定し、分野・部門の垣根を越え、学際的・融合的なエネルギー理工学研究を展開している。

・ 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」の活動を通じ、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の更なる強化を図るとともに、研究所二重点複合領域研究活動、附属エネルギー複合機構研究センター共同研究を展開し、併せて自然科学研究機構 核融合科学研究所との双方向型共同研究、特色ある研究活動、および横断的な研究活動を支援し、国内外との先端的共同研究を推進した。

・ エネルギー理工学研究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、学生等の教育を行った。科学全般に関する広い視野と総合的な判断力を備え、エネルギー理工学に関して深い専門知識を持つ人材・研究者の養成に努めた。特に、大学院教育を通じて、大学院学生に対しては協力講座として所属するエネルギー科学研究科各専攻と協力し、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で、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を育成するための実践的な教育を行った。

・ 国際共同研究・国際連携研究活動の強化・推進を通じて、エネルギー理工学に関連する新たな学術の展開を図った。ゼロエミッションエネルギー開発の国際共同研究や研究者育成を行うため、既存の海外ネットワーク、JSPS、JST のプログラムや JICA の SEED-Net 事業等を利用して、エネルギー理工学分野における国際貢献を目指す「日 ASEAN 科学技術イノベーション共同研究拠点－持続可能開発研究の推進－」にて NSTDA（タイ）に設置する国際共同研究拠点、研究連携基盤内の未踏科学ユニット等を活用するなど、エネルギー・環境分野での共同研究、および人材育成を推進した。

・ 先端研究施設共用制度（ADMIRE 計画）等を通じて、民間企業の研究・開発支援を行うなど、産官学連携活動を推進、その知見や技術などの研究成果の積極的な社会還元に努めた。

・ 広報・資料室を強化、研究所ホームページをリニューアルし、一般・学外研究者にわかりやすいホームページにするとともに、大学の広報、研究所が発行するニュースレター、ならびにホームページなどを通じ、研究成果を広く社会に周知・公開することに努めた。さらに、毎年エネルギー理工学研究所公開講演会、ならびに宇治キャンパス公開などの場を通じたアウト

リーチ活動を進めた。中学・高校からの見学・研修の要望に積極的に対応し、児童・生徒が高度な学術にふれる機会を拡大するとともに、高等専門学校へ出向いての研究所紹介、高専学生に対するインターンシップの実施を開始した。

- 目標の達成のために、適切な研究所運営に努めた。上述の第 3 期中期計画期間での目標達成をサポートするため、研究所構成員が研究・教育に専念できるよう、所長を中心とした適切な研究所運営体制を構築した。

7. まとめ

国立大学の法人化以降、各大学組織は六年ごとの中期目標・中期計画を作成、それに沿った着実な研究教育活動を実行するとともに、当該組織の強化・充実化を含めた新たな展開を図っていくことが求められている。本自己点検・評価は、第 3 期中期目標・中期計画期間（平成 28～30 年度）前期の当研究所活動データを取り纏め、その内容を分析することにより、第 3 期中期目標・中期計画後期、また、その後の研究教育活動の改善・進展に資することを目的としたものである。

本研究所は平成 28 年 5 月に研究所発足二十周年を迎えた。本自己点検・評価の期間である第 3 期中期目標・中期計画期間の前半は、発足時の理念・目標を基本にしつつ、ゼロエミッションエネルギーに関する学術基盤の構築を図るべく、研究所二重点複合領域研究として「プラズマ・量子エネルギー」および「ソフトエネルギー」といったエネルギーレンジの異なる二つのアプローチから研究を展開した。平成 23 年度に文部科学大臣認定共同利用・共同研究拠点に認定された「ゼロエミッションエネルギー（ZE）」研究の共同利用・共同研究拠点としての活動は、平成 28 年度からも継続し、本研究所の目標でもあるエネルギー理工学の国際的研究拠点形成に向けた国内拠点基盤形成のための主要な研究活動となっている。今後、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向上に努める必要があるとともに、ZE 研究に関する国際連携のさらなる展開が求められている。

競争的外部資金等による各種プロジェクトとして、文部科学省特別経費プロジェクト「革新的太陽光利用技術の開発」、教育研究活動プロジェクト「国際先端エネルギー科学研究教育センター国際共同ラボの形成」（エネルギー科学研究科、エネルギー理工学研究所）、文部科学省特別経費プロジェクト「グリーンイノベーションに資する高効率スマートマテリアルの創製研究」（化学研究所、エネルギー理工学研究所、生存圏研究所）、自然科学研究機構核融合科学研究所との双方向型共同研究などが、研究所における研究活動の大きな柱となっている。昨今は複数の本学部局が参画する共同研究プロジェクトが重視されるようになっており、これらのプロジェクト実績を基盤として、今後も引き続き外部資金等の獲得の努力を続けていく。また、学内組織「研究連携基盤」が主催する未踏科学研究ユニット活動等を積極的に利用し、新しい学際領域の開拓を目指す学際的な萌芽研究の推進も重要である。教育面においても、本学大学院エネルギー科学研究科の協力講座として、今後も多くの留学生を含む修士、および博士課程の学生教育と若手研究者の育成に積極的に取り組んでいく。

第 3 期中期目標・中期計画の後半を迎え、研究の方向性の不断の点検と柔軟かつ適切な対応が一層重要となっている。京都大学は平成 29 年度から指定国立大学の認定を受け、海外学術機関との連携を含む国際共同研究や産官学連携による成果の社会還元などに力点を置いた研究力向上に向けた仕組みを検討している。こうした動向を反映させ、今後も、21 世紀に相応しい、より進化したエネルギーの基本を司る新しい概念を開拓・発展させていくため、様々な視点からの俯瞰的な立場と適切な分析に基づいた自己点検・評価を実施していく。

平成 30 年 10 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