

京都大学  
エネルギー理工学研究所

# 現 状 と 課 題

平成 25 年度-平成 27 年度

京都大学エネルギー理工学研究所



## はじめに

国立大学の法人化とともに始まった中期目標・中期計画の仕組みですが、ご承知のように今年、平成 28 度から第 3 期中期目標期間が始まります。第 3 期では、第 2 期期間中に国立大学改革の一環として文部科学省の指導により各国立大学が提示した「ミッション再定義」を踏まえた大学の機能強化が求められます。本研究所が属する本学工学分野の研究面では「世界に誇る独創的かつトップレベルの研究の一層の深化と展開を図り、関連分野の拠点としての役割を果たす」ことが求められています。同時に教育面では「京都大学の理念に基づき、自由の学風のもと、基礎学術研究の知見を展開し先端応用・学際領域を切り拓くことのできる人材を養成する」ことが求められています。本研究所の教員は本学大学院エネルギー科学研究科の協力講座を担当していることもあり、研究、教育両面にわたり、正に今、研究所の真価が問われていると言えます。これまでに研究所が蓄積してきた研究・教育活動を基盤として、それに甘んずることなく一層の体力強化に努め、これらの要請に応じて行く必要があります。このような背景の下、第 2 期中期目標・中期計画の期間前半（平成 22～24 年度）を対象とした前回の自己点検・評価を引き続き、第 2 期後半三年間（平成 25～27 年度）の研究所活動を自己点検・自己評価を行うこととしました。

本研究所は、「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」ことを目的として、平成 8 年に設置されました。爾来、高い環境調和性を保証する「質」と、社会的需要を賄うに十分な「量」の確保を高次元に両立するエネルギーを「先進エネルギー」と位置付け、幅広い視点を持つ学際的なエネルギー研究を通じてその在り方を探求し、新しいエネルギーの学理と先進技術の創出をめざしています。定員数としては余り大きくない研究所ながら、多彩な分野と学術基盤を持つ教職員を擁し、エネルギー研究に資する大小様々な特色ある実験装置・設備を有する本研究所は、先進エネルギーをキーワードに、個々の教職員独自の研究に加え、それらの有機的結合を図る研究所重点複合領域研究の二段構えでの研究を展開しています。特に第 2 期中期目標・中期計画期間では、第 1 期に設定した三重点領域（「プラズマ」、「バイオ」、「光」）研究を、「先進プラズマ・量子エネルギー」と「光・エネルギーナノサイエンス」の二つの重点複合領域研究に発展・集約させて、それらを学術基盤とする核融合エネルギーや太陽光エネルギーなどの新しい魅力あるエネルギー源やエネルギー有効利用システムに関する総合的なエネルギー理工学の展開に挑んでまいりました。また、研究交流のグローバル化を図るとともに、国際的エネルギー研究拠点へ向けた活動、特にアジア地域における活動も積極的に進めています。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修士および博士課程の学生教育と若手研究者の育成に精力的に取り組んでいます。

第 2 期中期目標・中期計画期間では、エネルギーに関わる国内外の幅広い関連分野の研究者・技術者との密接な連携・協力と先進エネルギーシステムへ向けた概念を共有するプラットフォームとしてのコミュニティ形成を進めることが不可欠との考えのもと、平成 23 年度から、文部科学大臣認定の共同利用・共同研究拠点（ゼロエミッションエネルギー研究拠点）としての活動も展開しています。関連研究者からの多くのご支援・ご協力を受け、年度毎に公募型共同利用・共同研究への申請課題数も増え、拠点活動は順調に推移・浸透しているものと考えています。お陰様で平成 27 年の期末評価では「A」評価を受け、平成 28 年度からの第 3 期中期目標・中期計画の期間においても、文部科学大臣認定「ゼロエミッションエネルギー研究拠点」として活動いたします。全国の研究者とこれまで以上に連携を深め、当該拠点としての機能を拡充し、その役割を果たすための活動を通じ、ゼロエミッションエネルギーの社会実装を促進する研究にも歩みを進めていきたいと思っております。

この拠点活動に牽引される形で、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」の立ち上げに成功するとともに、核融合科学研究所との核融合研究に関する双方向型共同研究も順調に進展しています。さらに、第 1 期中期目標期間後半（平成 19 年）から実施してきた先端研究施設共用促進創出事業については、平成 25 年度からは先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業として継続発展させるなど、産業界との連携にも貢献してきました。

エネルギー科学研究科等との連携により開始したグローバル COE プログラム「地球温暖化時代のエネルギー科学拠点」（平成 20～24 年度）は平成 25 年 3 月に終了しましたが、上述の共同利用・共同研究拠点はこの G-COE プログラムの成果を継承・発展させる取り組みとしても位置付けられます。これと相補的に、生存基盤科学研究ユニット活動等の学内ユニット活動を通して、学際研究や人材育成での学内連携を一層強めてきました。また、平成 27 年度から開始された本学化学研究所を主局とする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ー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ー」にも参画しています。また、平成 27 年度からは本学組織として「研究連携基盤」が誕生し、本学の誇る附置研究所・センター間の一層の連携強化が進められています。とくに、同基盤に 4 つの未踏科学研究ユニットが設けられ、ユニークな視点を持った学際融合研究が始められており、本研究所は、この内 2 つのユニットに参画して「未踏」な領域への研究を開始しました。

一方、国際連携では、本研究所は世界各国の研究機関との交流協定は 37 件（平成 28 年 3 月 31 日現在）を数え、著名な研究者を招聘した国際シンポジウムを独自に開催して国際的な交流と情報発信を積極的に行っています。また、アジア地域との交流に力を入れ、日本学術振興会（JSPS）の「大学の世界展開力強化ー「人間の安全保障」開発を目指した日アセアン双方向人材プログラムの構築ー（平成 24～28 年）」への参画や先進エネルギー科学における 15 年に及ぶわが国のハブとしての本研究所の実績に基づく東アジアとの交流、東南アジア諸国との新エネルギーフォーラム（SEE Forum）やユネスコとの協働事業などの活動を行ってきました。更に欧州においては、平成 23 年度から始まったドイツ・カールスルーエ工科大学（KIT）との博士課程学生派遣交流を継続しています。また、上記研究連携基盤の未踏科学研究ユニット活動の中で雇用・招聘される外国人研究者との連携、次世代研究者の派遣・招聘支援活動も、新たな国際連携の種になるものと期待しています。

今回の自己点検・評価として、第 2 期中期目標・中期計画の期間後半における研究活動を、本誌「現状と課題（平成 25～27 年度）」本編およびその資料編（Ⅰ）ならびに（Ⅱ）にまとめました。これらは、第 3 期中期目標・中期計画に向けた研究力向上と研究所の更なる発展の礎となるものであり、より進んだ概念に基づく今後の研究およびその実現に向けた組織や運営面の具体策の検討において、重要な指針を与えるものと考えています。

今後とも、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 28 年 6 月  
京都大学  
エネルギー理工学研究所  
所長 水内 亨

# 目次

1.	研究所の概要	1
1.1.	理念、目標	1
1.2.	組織・運営	2
1.3.	財政状況	5
1.4.	研究活動・研究交流の状況	7
1.5.	教育および社会との連携	10
1.6.	施設整備	12
1.7.	将来計画	13
1.8.	自己点検・評価に関する今後の課題および留意事項	14
2.	重点複合領域研究成果の概要	17
2.1.	先進プラズマ・量子エネルギー重点複合領域研究	18
2.2.	光・エネルギーナノサイエンス重点複合領域研究	29
3.	研究部門・研究分野における研究の現状	47
3.1.	エネルギー生成研究部門	48
3.2.	エネルギー機能変換研究部門	58
3.3.	エネルギー利用過程研究部門	68
3.4.	エネルギー複合機構研究センター	80
4.	拠点形成促進事業	87
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）	88
4.2.	双方向型共同研究（Heliotron J）	92
4.3.	文部科学省「先端研究施設共用促進事業（ADMIRE 計画）」	95
4.4.	次世代太陽電池研究拠点（有機太陽電池研究） エラー! ブックマークが定義されていません。	
4.5.	JSPS アジア研究教育拠点（Asian CORE）「先進エネルギー科学」 .....エラー! ブックマークが定義されていません。	
4.6.	センター共同研究	98
4.7.	グローバル COE「地球温暖化時代のエネルギー科学拠点」 事業エラー! ブックマークが定義されていません。	
5.	生存基盤科学研究ユニットの概要とエネルギー理工学研究所	107
6.	次世代ユニットの活動状況	97

7.	中期目標・中期計画の概要 .....	110
8.	まとめ .....	111

## 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（I）：沿革に記したとおりである。以来、先進的なエネルギーに関する理工学分野において、革新的なエネルギーの基礎学理と、人類存続に不可欠な新しいエネルギー関連技術の確立を目指して、多様な研究を展開してきた。平成23年度には、文部科学大臣認定の共同利用・共同研究拠点「ゼロエミッションエネルギー研究拠点」に認定されたことに伴い、研究所の設置目的は「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とともに、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」と改定されている。拠点認定は、第3期中期目標・中期計画期間も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、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。

## 1.1. 理念、目標

本研究所では、平成18年度までの研究成果を踏まえ、研究所の長期目標ならびに第2期中期目標・中期計画期間（平成22～27年度）を見据えた中期目標を策定するにあたり、平成19年度初頭に、研究所の理念・基本的目標を以下のように明確化した。また、平成27年度末には、第3期に向けて見直し、「中期目標」にやや変更があった。なお、「理念」および「長期目標」に変更はない。

**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とともに、全国の大学その他の研究期間の研究者の共同利用に供する」ことを設置目的とし、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。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。

**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) 社会の要請に応えるため、先進的かつ社会的受容性の高い基幹エネルギーシステムの構築

と多様なエネルギー選択を可能とするシステムの実現を目指し、学際研究としてのエネルギー理工学に新たな展望を拓く。

- (2) 多様な学術基盤をもつ研究者の連携及び基礎から応用に至る研究の発展により、世界的な先進エネルギー理工学研究拠点としての展開を図る。
- (3) 優れた設備群を整備・活用して、エネルギー理工学における優秀な研究者と高度な専門能力を持つ人材を育成する。

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

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

## 1.2. 組織・運営

前節に掲げた理念および目標を実現するために、本研究所には、3つの研究部門（エネルギー生成研究部門、エネルギー機能変換研究部門、エネルギー利用過程研究部門）と1つの附属施設（附属エネルギー複合機構研究センター）を設置している（資料編（Ⅱ）1.1参照）。研究部門は、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、当初よりセンター附属研究分野を配している（資料編（Ⅰ）3.4.1）。平成25年度から27年度までの研究所教職員数を表1.2.1に示す。

研究所研究者は、個々の研究者独自の研究に加え、それらの有機的結合を図る研究所重点領域研究の二段構えでの研究を展開している。附属センターは、この重点領域研究を始め、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、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、研究推進部制とし、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。研究推進部としては、当時の研究所重点研究の発展・統合の流れを先取りした形の「先進プラズマ・量子エネルギー研究推進部」と「光・エネルギーナノサイエンス研究推進部」、ならびに国内外との共同研究ネットワークの強化を目的とする「国際流動・開発共同研究推進部」を設置し、拠点形成に向けた活動を展開している。各研究推進部には、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・連携研究を推進するための体制となっている。これにより、ADMIRE エネルギー利用推進室（平成 19～27 年度）、次世代太陽電池研究拠点推進室（平成 22～27 年度）を国際流動・開発共同研究推進部に配置するなど、外部資金プロジェクト等にも柔軟且つ効率的な対応が可能となっている。

このような拠点活動の実績により、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。

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、教授会は専任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。

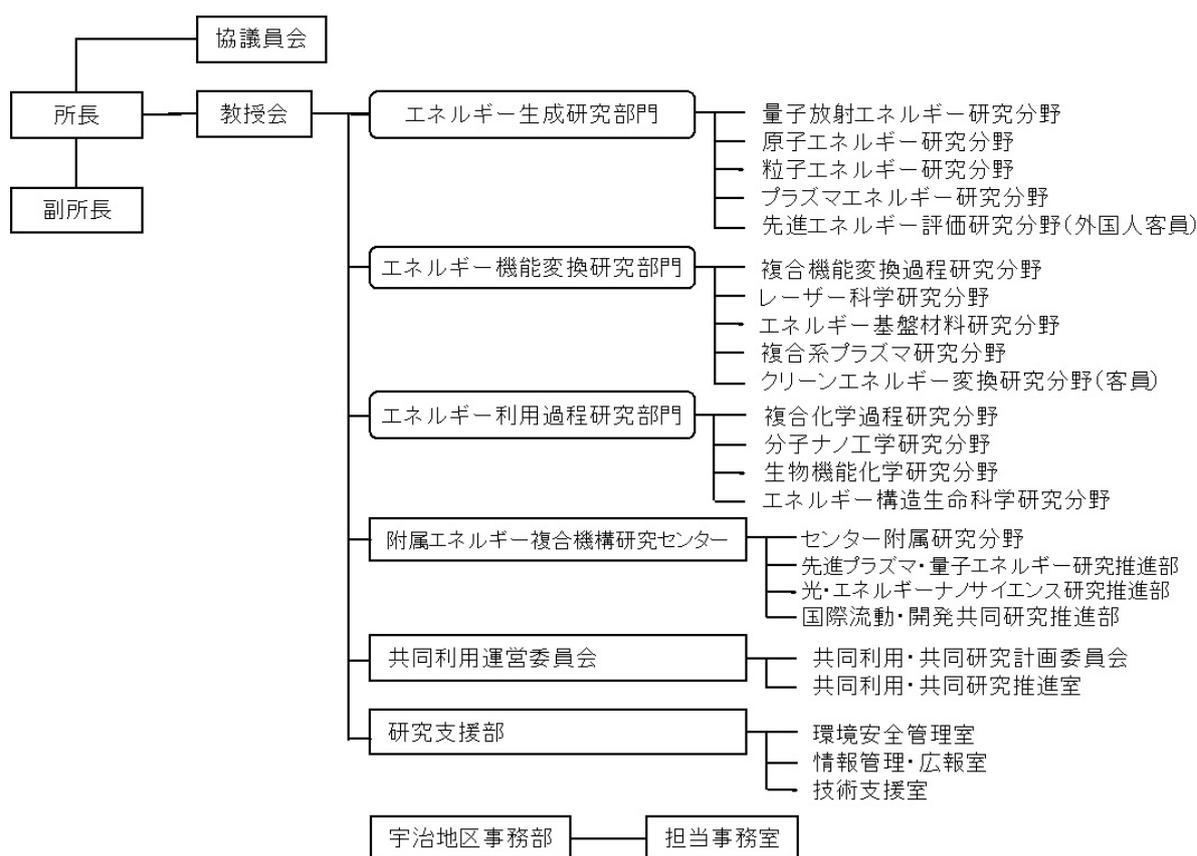


図 1.2.1 研究所組織図

	H25	H26	H27
教授	11	11	11
准教授	10	11	13
講師	1	1	4
助教	13	12	13
技術職員	9	9	9
小計	44	44	50

外国人客員教授	0	3	1
外国人客員准教授	3	0	1
外国人客員研究員	1	0	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	4	3	3
研究支援推進員	3	3	3
その他研究員	25	24	24
その他職員	23	34	26
小計	64	72	63
総計	108	116	113

表 1.2.1 平成 25～27 年度までの教職員人員数

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」、「情報管理・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。

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他、研究企画と運営の基本的在り方についての予備検討を行う。補佐会機能を始め、より効率的な研究所運営に向け、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。

平成 23 年度に認定された共同利用・共同研究拠点活動に関しては、研究所活動の一つであるとの認識の下、所長の諮問機関として専用で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。

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、センター研究の運営に関しては、研究計画委員会で協議しており、上記センター共同研究の他、談話会、シンポジウム、共同研究成果報告会など企画・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。

研究所活動の点検・評価、および将来構想の検討に関しては、教授会を母体とする「評価委員会」や、拡大教授会を母体とする「研究所将来構想検討委員会」において検討している（資料編（Ⅱ）1.2.1 参照）。また、研究所活動の現状ならびに将来計画の点検・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。

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下に、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、平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ている。

人材の登用については、全国的な視野に立って人事交流を図るために、改組以来、一貫して公募人事を実施してきた。その結果、平成 8 年度の改組以来、新規任用専任教員 68 名中 35 名については学外から任用するに至っている（平成 28 年 3 月 31 日現在）。平成 25 年度から平成 27 年度にかけての教員の異動については、昇任が 3 名、外部機関からの採用 5 名であり、転出者は 2 名、定年退職者は 2 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 28 年 3 月 31 日時点で再任評価を受け再任された教員は、教授 3 名、准教授 3 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。）

本研究所では、こうした常勤教員の他、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 参照）。宇治キャンパスの 4 つの研究所が中心に取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—CO<sub>2</sub>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他、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、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。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 27 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 27 年度までの科学研究費補助金をはじめとする外部競争的資金の獲得状況を表 1.3.1 に示す。科学研究費補助金の獲得金額に関しては、平成 18 年に大幅な増額を実現した後は顕著な増加が見られないが、毎年 1

億円強を獲得している。

省庁等からの競争的資金の獲得、民間企業・外部研究機関等との受託研究費・共同研究費の占める割合が平成18年以降、高い水準を維持しており、社会的要請に対応したエネルギー理工学研究が促進され、実用化に向けた研究開発が発展的に継続されている。比較的規模の大きな事業費の獲得により、先端研究施設整備を進めることができ、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、先端研究施設共用促進事業（平成19～27年度）や共同利用・共同研究拠点事業（平成23年度～）の推進にも貢献している。

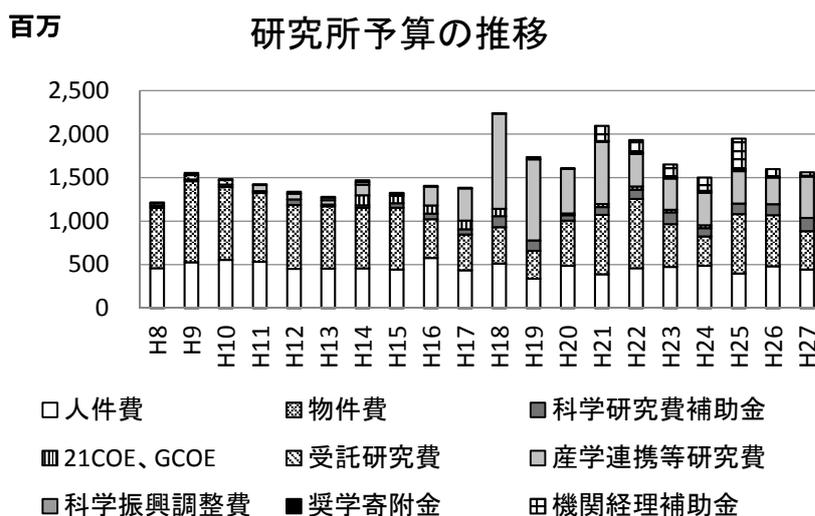


図 1.3.1 研究所予算の推移

	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17
人件費	460	527	554	532	453	455	457	445	577	435
物件費	692	931	840	793	734	715	696	709	445	411
科学研究費補助金	25	22	27	20	63	21	28	52	65	60
21COE、GCOE	0	0	0	0	0	0	116	86	92	99
受託研究費	27	49	50	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
科学振興調整費	0	0	0	0	0	29	32	0	0	0
奨学寄附金	10	25	12	8	22	11	20	10	10	6
機関経理補助金	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
計	1214	1554	1483	1423	1338	1280	1470	1325	1407	1383

	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27
人件費	512	339	487	389	460	474	487	398	482	444
物件費	419	321	520	683	795	491	338	683	586	441
科学研究費補助金	127	119	62	89	107	136	95	122	127	152
21COE、GCOE	83	0	20	36	37	30	32	0	0	0
受託研究費	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
産学連携等研究費	1094	931	513	714	373	359	375	371	306	475
科学振興調整費	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
奨学寄附金	6	27	6	9	14	14	22	25	8	11
機関経理補助金	0	0	0	175	146	148	152	350	89	38
計	2241	1736	1608	2095	1932	1652	1501	1949	1598	1561

表 1.3.1 平成8～27年度までの財政状況

## 1.4. 研究活動・研究交流の状況

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、研究所の特徴を活かした学際融合・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推進に重点をおいていることなどを特徴としている。とくに、研究所全体としての特徴・総合力を発揮すべく、研究所の2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に重心を移動してきている。重点複合領域研究成果の概要は、本編第2章「重点複合領域研究成果の概要」に纏めてある。また、各研究部門・研究分野における研究の概況および成果の発表の詳細については、本編第3章ならびに資料編（I）第3章に記されている。研究所全体としての論文等の発表件数の推移を図1.4.1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（I）第4章に纏めている。

平成23年度より開始した共同利用・共同研究拠点（ゼロエミッションエネルギー（以後、ZE）研究拠点）事業は、本研究所の目標でもある先進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・新領域研究の推進に注力しており、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3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体制である。共同利用・共同研究で採択された課題数は、平成25年度が78課題、平成26年度は81課題、平成27年度は91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25年度が33機関、206名、平成26年度は45機関、132名、平成27年度は42機関、155名に及んでいる。本拠点活動に並行し、有機薄膜太陽電池の開発事業（CREST：平成21～25年度およびNEDO：平成22～26年度）が進展し、平成25年度からは、エネルギー科学研究科との協力により、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25～30年度）が開始されている。

附属センターが推進する大型プロジェクトとして、「双方向型共同研究（核融合科学研究所）」、「先端研究施設共用促進事業（ADMIRE計画）（JST）」および「次世代太陽電池開発（NEDO）」がある。前2者は、附属センターの基幹装置である高度エネルギー機能変換実験装置（通称、ヘリオトロンJおよび二重イオンビーム材料照射実験（DuET）施設）を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ヘリオトロン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。一方、平成19年度に開始された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、拠点形成の直接的な社会貢献の場として位置付けられている。複合イオンビーム照射の可能なDuET施設や、マルチスケール解析・評価を行うためのMUSTER装置群が共用に供され、開始以来、

民間企業 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。また、先端研究施設共用促進事業に参画している各機関との連携を図り、平成 19 年度の名古屋大学との 2 大学連携を皮切りに、平成 23 年度には 6 大学連携へと発展させ、地域間連携を進めてきた。とくに、東北大学とは東日本大震災罹災地の企業との産学連携を促進するための連携協力活動を協働して実施した。平成 24 年度は、京都大学が主催となり、全国産官学連携シンポジウムを開催し、当該事業を牽引するなど、産学共用拠点形成を推進した。なお、先端研究施設共用促進事業は、平成 25 年度からは「先端研究基盤共用・プラットフォーム形成促進事業」と名称変えて平成 27 年度まで継続されている。平成 28 年度からは、これまでの基盤を利用し、有償利用制度を継続する計画である。

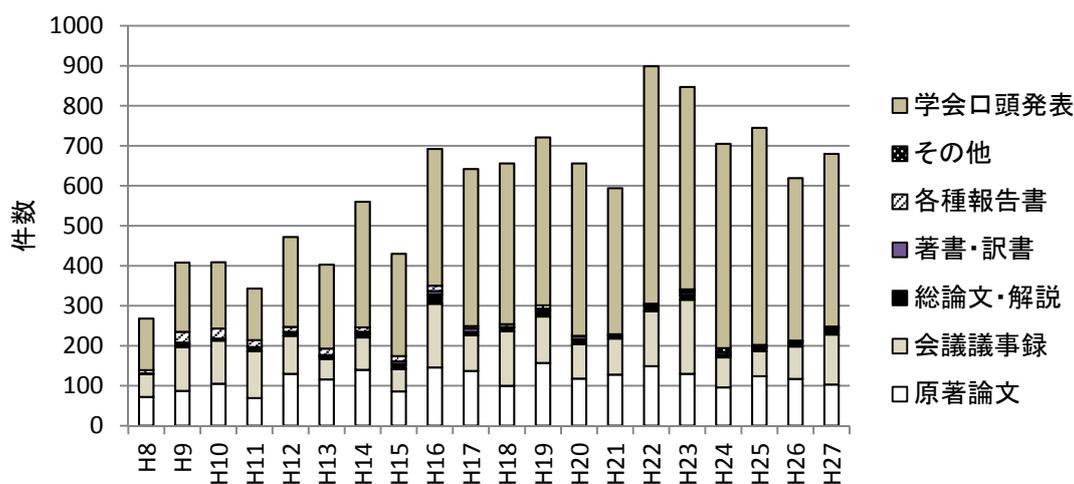


図 1.4.1 研究所の成果発表件数の推移

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

	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27
原著論文	100	157	118	128	149	130	96	124	117	103
会議議事録	136	116	86	90	137	185	75	62	81	125
総論文・解説	10	15	12	7	15	11	6	9	10	12
著書・訳書	1	5	8	4	4	6	1	2	4	3
各種報告書	7	8	1	0	0	5	6	0	0	3
その他	—	—	—	—	—	4	10	5	1	2
学会口頭発表	402	420	431	365	594	506	511	543	406	432
総計	656	721	656	594	899	847	705	745	619	680

表 1.4.1 研究所の成果発表件数の推移

この他、附属センターでは、様々な資金を活用したプロジェクト研究、すわなち、小型自由電子レーザー装置 (KU-FEL) の開発・研究、特色ある核磁気共鳴装置 (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、これらの特色ある装置群も ADMIRE 計画事業に組み込まれ、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 年度と同 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は、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—」等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 プログラムの他、平成 17 年度より宇治地区研究所を中心に発足した学内組織「生存基盤科学研究ユニット」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」にも参画することとなった。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、各研究分野が元来実施していた研究所の内・外との共同研究の強化を含め、幅広い共同研究ネットワークが出来あがってきていると言える。

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 28 年 3 月現在、37 件)、学術交流を行っている (資料編 (II) 2.7.2.7)。

平成 18 年より開始した SEE Forum (Sustainable Energy and Environment Forum) 活動では、アジア地域でより一層の協調と連携を図るための国際的な研究者ネットワークづくりを推進し、平成 27 年 3 月までに 12 回の SEE Forum をアセアン地域の大学や研究機関において開催している。また、平成 13 年からは、タイ王国ラジャマンガラ大学と Eco-energy and Materials Science and Engineering Symposium (EMSES) を毎年開催し、現在に至っている。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いる。

平成 13 年に開始したドイツ エアランゲン大学との交流に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大学（KIT）大学との間で日独学生交流事業を開始し、KITから5名の博士課程学生と2名（平成23、25年度）の教員を招聘した。平成24年度および平成27年度には、本研究所の博士課程学生7名（平成24年度）、5名（平成27年度）および教員3名（平成24年度）、2名（平成27年度）をKITに派遣した。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、博士課程学生6名、教員3名を派遣することができた。

## 1.5. 教育および社会との連携

本研究所は、「科学全般に関する広い視野と総合的な判断力を備え、特にエネルギー理工学分野に関して深い専門知識を持つ人材・研究者を養成すること」を基本的目標とした教育を行っている。

研究所の全教員は、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（ポケットゼミ）等を通して、学部生の教養教育にも積極的に携わっている。また、高等専門学校からのインターンシップ受け入れ、SSH校を始めとする高等学校生徒の見学受入、さらには宇治市との連携による小学校児童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）の院生指導にも携わっている。表1.5.3に若手博士研究員数の推移を示す。

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」、「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、研究所研究分野の個別の研究成果の詳細を記述した報告書、毎年の部門・分野ごとの研究活動報告書、さらにはエネルギー複合機構研究センターによる、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>) による広報活動がある。なお、ホームページは、情報管理・広報室で管理しており、現在、刷新作業が進められている。

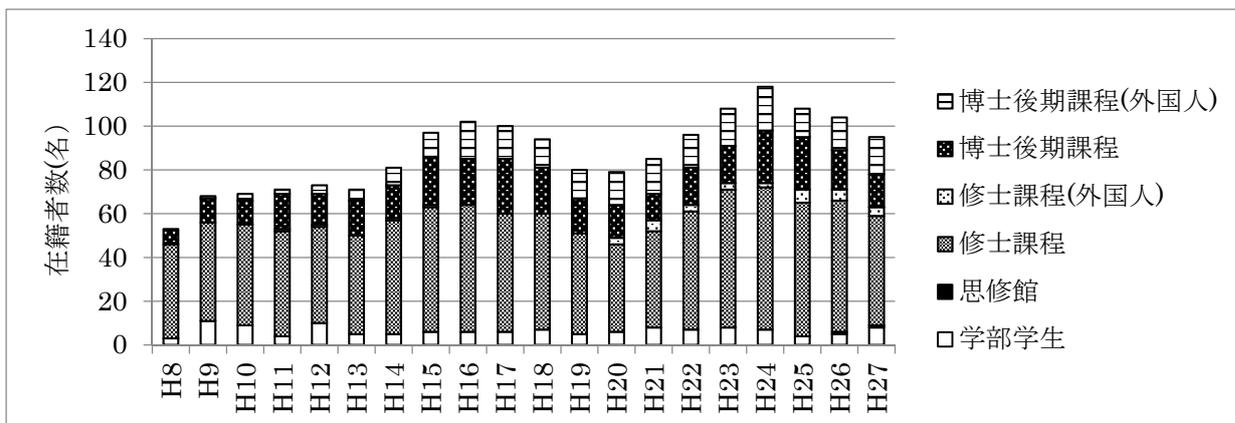


図 1.5.1 本研究所に在籍する学生数の推移

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

	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27
学部学生	7	5	6	8	7	8	7	4	5	8
思修館	—	—	—	—	—	—	—	—	1	1
修士課程	53	46	40	44	54	63	65	61	60	50
修士課程(外国人)	0	0	3	5	3	3	2	6	5	4
博士後期課程	21	16	15	12	17	17	24	24	18	15
博士後期課程(外国人)	13	13	15	16	15	17	20	13	15	17
総計	94	80	79	85	96	108	118	108	84	95

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
人数	0	2	5	3	6	5	5	6	8	10	16	7	7	12	2	10	7	8	9	6
※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
※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

修士論文	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27
人数	16	24	20	24	22	19	23	26	25	29	23	27	17	24	23	30	31	28	36	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
※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

卒業論文	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27
人数	3	7	9	4	11	6	6	5	6	6	6	5	6	8	9	6	7	4	3	4
※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
※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

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
特定研究員	0	0	0	0	6	6	5	4	5	4	3	2
時間雇用研究員	5	5	11	13	10	12	16	12	13	22	24	22
総数	5	5	11	13	16	18	21	16	18	26	27	24

表 1.5.3 若手博士研究員数の推移

このほか、本研究所以主催の公開講演会、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「品川セミナー」、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。また、平成 19～24 年度の文部科学省委託事業（「先端研究施設共用イノベーション創出事業」ADMIRE 計画）を通じた産官学連携活動や、生存基盤科学研究ユニットのサイト型機動研究を通じた地域連携活動などにも積極的に参画してきた。所員の中には、内閣府専門委員や文科省参事の役割も果たしている者もいる。

## 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 2 期中期目標・中期計画期間のセンター基幹装置として、ヘリオトロン J 装置 (Heliotron J)、複合ビーム材料照射装置 (DuET)、自由電子レーザー発生装置 (KUFEL) 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、フェムト秒レーザー関連の設備に関しては、従来担当していた研究者が退職や異動で不在となっており、**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 (I) 第 3 章に記載する。平成 17～21 年度には、外部競争的資金（原子力システム開発事業：2 件、15 億円）を利用し、北 1 号棟ならびに南 1 号棟の整備・再開発を実施して、電界放出型透過電子顕微鏡などの先端研究設備・装置を新規導入し、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 年度の補正予算では、国立大学法人施設整備費補助金として革新的太陽光エネルギー利用設備 (0.8 億円) の導入ならびに先端研究施設共用促進事業の主要設備 DuET および MUSTER の高度化のための補正予算の配分 (2.3 億円) があり、これらの先端設備・装置の導入により、研究拠点としての機能強化を図っている。

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ている。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。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. 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。研究教育の推進としては、具体的には、質と量の双方を満足する先進エネルギー実現の基礎となる生成、変換および利用に関する原理的・先鋭的研究を推進する 3 部門・12 分野体制を基本に、これらの成果を環境調和性と社会受容性の双方に優れたシステムとしての新エネルギー源として結実させるため、附属エネルギー複合機構研究センターを中心に、部門・分野を横断した複合領域研究を企画・推進してきた。

平成 18 年度には、附属センターを改組し、3 推進部（先進プラズマ・量子エネルギー研究推進部、光・エネルギーナノサイエンス研究推進部、および国際流動・開発共同研究推進部）体制として、部門・分野の枠を越えて研究所重点領域プロジェクトに参加し易くなるように体制を整えた。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する推進室を設定できるようにされており、研究の機動性を増している。また、平成 23 年度から文部科学省の共同利用・共同研究拠点事業「ゼロエミッションエネルギー研究拠点」として活動を開始した。応募課題数は着実に増加し、拠点活動は順調に推移・浸透している。

第 3 中期目標・中期計画期間では、この様な第 2 期中期目標・中期計画期間までの進展を引き継ぎ、2 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世界的普及に努め、当該分野を世界的にリード・牽引する信頼度の高いインパクトのある研究成果として結実させていく必要がある。また、先進エネルギーの研究は、多様性と複雑性を内包する高度な総合科学として位置付けられるため、既成概念にとらわれることなく、関連研究者が分野の壁を乗り越えて積極的に交流を図るとともに、英知を結集することによって新しい概念と原理を創出しつつ、新展開を目指す戦略的研究を企画し、推進していく必要がある。

本研究所の目指す先進エネルギー、あるいはゼロエミッションエネルギーの実現に向け、研究所の体力強化、則ち、研究機能の深化・向上を図る必要がある。第 3 期においては、大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ることになるが、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・研究者との有機的連携・協力、優秀な人材の確保と流動を促進する仕組みの導入など、研究所の体制の一層の強化へ向けた具体策の立案が必要である。

第 4 期科学技術基本計画に見られるように、東日本大震災および福島原発事故の社会的影響は大きく、外部環境は更に大きく変化してきている。大学の国際競争力の増強や機能強化に向け、大学の強

みを効率的・効果的に発揮するための組織改編の動きと定数削減への対応など、今後検討すべき課題が山積されている。研究所の方向性を定める将来計画検討に際しては、急激に進展している国内外の研究開発状況や社会情勢のような外的要因の変化に対応すべく、これを常に検討しておく必要があることは言をまたないが、大学の附置研究所として、短期的視点のみではなく、超長期的展望に基づいた計画を議論する必要がある。

総合的な「エネルギー理工学」の国際的な研究拠点としての基盤を確固たるものとして、先導的な研究活動を展開して行くためには、エネルギー科学研究科を始め学内他部局との連携を一層堅実なものとし、さらには国内外の関連研究機関との連携、共同利用・共同研究拠点間連携などを通して、より効果的に「エネルギー理工学」研究を推進して行く。

一方、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重要なミッションである。研究所内でのプロジェクト研究の推進に携わる特定助教、博士研究員、大学院生（RA）などの若手人材を育成することにも重点を置く必要がある。これは、「教育再生実行会議」の「これからの大学教育等の在り方について（第三次提言）」で強調されている「理工系人材育成戦略」（仮称）を実施するものでもある。これらの領域において国際的に活躍できる人材の育成や国際的な共同研究を推進し、エネルギー理工学研究所の特色を生かしながら「人材・システムのグローバル化による世界トップレベルの拠点形成」をめざすことが求められる。京都大学が掲げる大学の国際化に向けた活動は、先進エネルギー開発を目指す本研究所の今後の方針に合致するものであり、今後もゼロエミッションエネルギー研究の国際的な研究拠点形成活動を推進していく。

## 1.8. 自己点検・評価に関する今後の課題および留意事項

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

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

一方、ゼロエミッションエネルギー研究は、多様な研究分野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でき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たなコミュニティ形成に向け、「ゼロエミッションエネルギー・ネットワーク」を平成25年度に立ち上げている。また、学外幹事をおくなど、その展開にも注力している。

大学や国研を対象とする共同利用・共同研究への参加者のみならず、民間等との共同研究や受託研究の参加者を含めた国際シンポジウムや国内外の研究集会の場などを活用して、関連研究分野及び研究者へのエネルギー理工学研究に関する最新情報の交換・発信を行うと共に、ゼロエミッションエネルギーに対する意識啓発と研究参入の勧誘を行い、コミュニティ形成へと繋げていく現在の努力を強化・発展させて行くとともに、幹事団を中心に積極的な提言が行えるような組織作りへの努力も必要であろう。また、改めて「ゼロエミッションエネルギー」の概念について熟議し、さらに深化させていくことも必要である。

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

総合的なエネルギー理工学研究においては、固定した視点からの硬直化した基準に囚われることなく、より俯瞰的、発展的な視点からの評価が重要であることがあげられる。従って、社会や学界、政策における先進エネルギー研究への期待に応え、その目標設定を的確かつ柔軟に行っているか、また、エネルギー理工学としての学術自体のもつ内在的な要求に従った深化が達成されているか、の双方についての評価指標があるが、いずれも中期目標・中期計画の一定期間に対して十分短い時定数で変化するものであり、また、それらは一致することも矛盾することもありうることに留意しておく必要がある。従前より認識されていることではあるが、目標設定、目標に対するアプローチ法、その達成度と成果の評価において、社会の客観的な意見を取り入れつつも、被評価者たるエネルギー理工学研究所自らが、十分な考察と柔軟な発想、客観的な評価姿勢を持ち続けることが重要である。

## 2. 重点複合領域研究成果の概要

## 2. 重点複合領域研究成果の概要

第1期中期目標・中期計画（平成16～21年度）においては、将来の基幹エネルギーとして期待される「プラズマエネルギー複合領域」、社会的受容性が高い「バイオエネルギー複合領域」および高機能かつ基盤的な測定ツールとしての開発が期待される「光エネルギー複合領域」の3領域を重点複合領域とした。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3重点複合領域研究の成果に基づき、その展開を図ると共に、研究所の設置目的や長期目標に則り、重点複合領域研究として「先進プラズマ・量子エネルギー」および「光・エネルギーナノサイエンス」の2つの領域を推進するとした。平成25～27年度は第2期中期目標・中期計画の後半3年間に相当しており、平成8年の改組以来展開してきた社会的受容性の高い高品位エネルギーの生成、変換および利用研究を基盤とする連携研究体制を充実させ、部門・分野間の横断的研究をより一層推進することにより新領域研究へと展開することを目指した。

第2期中期目標・中期計画における「先進プラズマ・量子エネルギー」の研究としては、Heliotron J装置における先進プラズマ研究、核融合・先進原子炉構造材料の超微小試験技術や被覆法の研究開発、国際ラウンドロビン試験、マルチスケール現象とそのゆらぎ、およびシステム安全の研究、高エネルギー粒子線と材料との相互作用に関する研究、慣性静電閉じ込めプラズマ核融合中性子源の応用、革新的原子力炉心SiC複合材料の開発を推進してきた。「光・エネルギーナノサイエンス」としては、中赤外光源KU-FELを用いた固体材料における選択的格子振動励起、パルス特性計測法の開発、光学的手法による結晶性高分子薄膜の構造変化検出、ナノカーボン・原子層物質の光物性・機能とエネルギー応用、太陽電池用シリコン製造、結晶性シリコン膜の電析、革新的ナノ炭素細線製造法、新規ナノ炭素細線の表面成長、タンパク質-DNAナノ組織体の構築、DNAナノ構造体上での高効率な物質変換反応の実現、アミロイド線維形成するペプチドの凝集機構の解明、自己集合型蛍光プローブを用いたバイオイメーキングツールの開発、バイオマスを解析する新しいNMRの方法論の開発とその活用、リアルタイムNMR法を活用した複雑な酵素反応機構の解明、物質複合系の非線形挙動、生体分子の自己組織化および分子認識機構の統一的解明がある。これらの研究の多くは、附属センターを軸とする所内共同研究を通じて、分野間の連携協力のもとで実施されており、分野あるいは部門間の複合領域研究として位置付けられている。

重点複合領域研究を推進するにあたっては、文部科学省 共同利用・共同研究拠点（平成23～27年度）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、先端研究施設共用促進事業（ADMIRE計画）を基盤として、異分野共同研究の開始へと展開が進展しており、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、各複合重点領域研究の平成25～27年度研究成果の概要を述べる。

## 2.1. 先進プラズマ・量子エネルギー重点複合領域研究

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

先進プラズマ・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、先進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先進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、包括的に議論するシステム・インテグレーションを中心とする複合領域研究へと展開している。

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先進プラズマエネルギー研究領域の開拓・推進、及び、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の柔軟な磁場構造の特徴を活かし、LHD と相補的なヘリカル系プラズマ閉じ込めの高性能化に向けた実験的・理論的研究の展開を可能にしている。

これに関連する研究として、核融合・先進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・先進原子炉構造材料の超微小試験技術や被覆法の研究開発、スーパーODS 鋼の国際ラウンドロビン試験、マルチスケール現象とそのゆらぎ、およびシステム安全の研究や革新的原子力炉心 SiC 複合材料の開発研究に進展があった。第2期中期目標・中期計画に引き続き、競争的外部資金による先端装置の導入とその効果的な利用による研究の進展が見られた。

慣性静電閉じ込めプラズマ核融合中性子源の応用研究としては、港湾等に設置してコンテナ貨物を非開封・非破壊で、しかも物流を妨げることなく短時間で全量検査可能な核燃料物質検知技術を開発した。また、据置型より更に技術的難易度の高いポータブルの検査装置としての製品化開発を産学連携事業として開始するとともに、BNCT に向けた創薬研究も行っている。

以下に、平成 25～27 年度の当該重点複合領域研究成果の概要を述べる。

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

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

### 2.1.1.1. 背景

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

(3) 未だ確立されていない先進ヘリカル炉の実現に求められる定常・高ベータ・コンパクトプラズマの生成・維持のための磁場分布制御の新手法の開拓、等の研究を推し進めている。

主たる成果としては、(1) 磁場配位制御による超音速分子ビーム (SMBI) や高強度ガスパフ (HIGP) を用いた高密度プラズマの生成と閉じ込め改善、(2) CXRS を用いた磁場に平行なプラズマフローや平行イオン粘性の実験的・理論的比較研究、(3) 複数のトロイダル位置に設置された高速カメラ、静電プローブを用いた周辺部のプラズマ揺動、フィラメント構造などの特性研究、(4) ECH/ECCD を用いた高速イオン駆動 MHD 不安定性 (GAE、EPM) の制御に関する研究、(5) 電子内部輸送障壁 (eITB) の生成とその特性に関する研究、(6) 高 $\beta$ プラズマ生成を目的とした 2.45 GHz マイクロ波アシストによる NBI プラズマ高速着火研究、(7) ICRF 少数イオン加熱モード実験による高エネルギー粒子閉じ込めのバンピー磁場制御、(8) 広帯域の背景揺動が高エネルギーイオン駆動 MHD 不安定性と結合した結果生じるバルクの揺動駆動（異常）粒子輸送の実験的評価など、ヘリカル軸ヘリオトロンの炉心プラズマ制御に向けて、着実な研究成果を積み上げてきた。

### 2.1.1.2. 成果の概要

#### 2.1.1.2.1. Heliotron Jにおける高密度領域のプラズマ特性研究（発表論文1）

low- $\beta$  磁場配位において NBI プラズマに短パルス高強度ガスパフ (HIGP) を用いることによって、高密度、高プラズマエネルギーのプラズマ生成を行うことができた。HIGP によって、プラズマ周辺領域で密度の傾きが急峻に保たれプラズマ閉じ込め領域での高密度状態が実現された。電子温度、イオン温度については HIGP 以前とほぼ同じであったため、密度上昇によって高エネルギープラズマの生成が可能になった。中心での電子、イオン温度が 0.2 keV から 0.3 keV で電子密度が約  $10^{20} \text{m}^{-3}$  の NBI プラズマが達成された。プラズマエネルギーが最大になる減少に伴い  $\text{H}\alpha/\text{D}\alpha$  線の減少と周辺部揺動の減少も確認されており、このことは HIGP 後の閉じ込め改善を示唆している。

#### 2.1.1.2.2. NBI 加熱時のプラズマ平行フローの研究（発表論文2）

プラズマ中の流れは MHD 揺動の抑制や乱流制御に対し重要な因子であるため、プラズマフローの駆動機構、減衰機構を解明する必要がある。プラズマ平行流は平行方向の粘性の影響を受ける。核融合科学研の CHS では磁場リップル強度 ( $\gamma$ ) を指標として、トロイダルフロー速度を研究した結果がある。新古典論において磁場に平行方向の粘性はプラトー領域では  $\gamma^2$  に比例する。ここで  $\gamma$  は  $\gamma = ((\partial B / \partial s)^2 / B^2)^{1/2}$  と定義される。対向して設置された 2 台の接線入射中性粒子ビーム入射 (NBI) を用い、CXRS により、フロー速度を計測した。磁場制御の効果を調べるため  $\gamma$  の 2 つの場合について、co 方向、counter 方向、それぞれ片方の NBI を用い、電子密度は  $0.9 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 、NBI の入射パワーは co 方向が 0.58 MW、counter 方向が 0.35 MW の条件で実験を行った。標準  $\gamma$  配位では中心付近での速度が co、counter の場合、それぞれ 10 km/s、-12 km/s である。高  $\gamma$  配位では 4 km/s、-6 km/s と両方向ともに減少する。 $r/a > 0.6$  ではどちらの入射方向でも正方向の速度を持ち、その速度は 4 km/s 以下である。得られたプラズマ平行フロー速度の実験値は新古典論から求められるものと概ねよく一致した。また、プラズマ周辺部のフローは外部からの入力によらず自発的なものと考えられる。

#### 2.1.1.2.3. 最外殻磁気面周辺の電場揺動の研究（発表論文3）

最外殻磁気面 (LCFS) 周辺の磁場揺動を調べ、Reynolds 応力をとおして微視的乱流がメソスケール構造の帯状流へと変化する過程にマルチスケール相互作用の非線形結合が寄与していることが分かった。多くの装置で観測された帯状流の空間・時間構造は基本的には類似しているが、異なる点もある。ヘリオトロン J プラズマでは 4 kHz 以下の周波数帯で静電的揺動が観測されている。この揺動は帯状流と類似しているが、径方向波長が比較的長い。この観測で長距離相関がみられる周波数帯に非

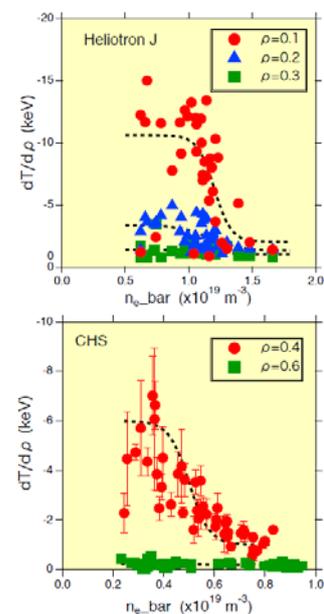
線形結合があることが観測された。LCFS から 1cm 内側の径方向電場  $\delta E_r$  とポロイダル方向電場  $\delta E_\theta$  の各揺動成分の計測値に対し、異なる周波数成分間の位相関係を求めるためバイコヒーレンス解析を行った。実験では多点の静電プローブを用いて揺動を計測している。数 kHz の領域でクロスバイコヒーレンスが高い部分が認められた。 $\delta E_r$  成分はメゾスケール成分と乱流成分を含むのに対し、 $\delta E_\theta$  は乱流成分のみであると考えられる。この結果は乱流がトロイダル対称の揺動と非線形結合していることを示唆する。また、 $\delta E_r$  と  $\delta E_\theta$  間の非線形結合によって Reynolds 応力の生成過程を通して乱流がメゾスケール揺動を励起している可能性を示した。

#### 2.1.1.2.4. ECCD による高速イオン励起 MHD モードの安定化研究 (発表論文 4)

Heliotron J プラズマ中の高速イオン励起 MHD 不安定性を安定化するために第 2 高調波電子サイクロトロンによって駆動されるトロイダル電流を用いた。50-80kHz の高速粒子励起 MHD 不安定性 (EPM) の励起が NBI 加熱プラズマにて確認されている。ECCD によって磁場に対し正方向及び逆方向に電流を流した結果、 $m=2/n=1$  の EPM はプラズマ電流の絶対値が増加すれば抑制されることが分かった。この結果は磁気シア増加に伴う連続減衰の減衰率増加による安定化効果が効いていることを示している。しかしながら、 $m=4/n=2$  の EPM に関しては電流の絶対値での抑制については同様であるが、強度のピークについては偏りが大きい。この結果については今後さらに検討が課題として残された。

#### 2.1.1.2.5. 電子内部輸送障壁 (eITB) に対する 3 次元磁場配位効果の研究 (発表論文 5)

電子内部輸送障壁 (eITB) はヘリカル系の閉じ込め装置におけるプラズマ閉じ込めに対し重要な役割を演じると考えられている。eITB に対する磁場配位の効果を、核融合科学研の CHS 装置での結果比較を含めて調べた。eITB は電子サイクロトロン加熱によって径方向電場の分岐から形成されると考えられている。CHS では実効的な磁場リップルが大なる配位で、eITB がより容易に出現した。Heliotron J 装置においても ECR 加熱中に eITB を観測することができた。実験ではプラズマのコア領域に電子温度の径方向傾きの大なる領域が現れた。この傾きについては密度に大きく依存し、特に  $\rho=0.1$  での変化が線平均電子密度が  $1.2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  以下の領域で急激に大きくなっていることがわかる。このとき ECH 入射パワーは約 330 kW である。装置規模として同程度の CHS の場合は、ECH 入射パワーは 130 kW であり、 $\rho=0.4$  での電子温度の傾きの変化が  $0.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  以下で観測されている。このように Heliotron J では温度の傾きの変化量が CHS と比較して 2 倍程度大きいことが分かる。また、傾き変化の表れる規格化小半径も異なる。これらは 3 次元磁場配位の差から生じている可能性がある。



#### 2.1.1.2.6. 非共鳴マイクロ波による予備電離を用いた NBI プラズマの高速生成法の研究 (論文 6)

非共鳴マイクロ波による予備電離を用いた NBI プラズマの高速生成法を試み、以下のような成果を得た。NBI によるプラズマ生成は LHD や W7-AS で行われたが、入射経路長やプラズマ生成時間に制限のある場合、予備電離を用いることは有用であると考えられる。Heliotron J では 0.6 T から 1.3 T の磁場範囲で 20 kW 以下の 2.45 kW マイクロ波を予備電離に用いて高速プラズマ生成に成功した。マイクロ波によって高エネルギー電子の生成が行われることは ECE 計測から分かった。そこに少量のガスパフを加えると種プラズマの電子密度を最大で  $0.45 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  へと効果的に増加させることができた。この密度は O モードのカットオフ密度よりも高い。その後 NBI を入射し、さらにガスパフを追加することにより数 10 ms で  $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  を超える電子密度に到達することができる。NBI によるプラズマ生成が成功するためには種プラズマに電子密度の閾値 ( $2-3 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$ ) があることが分かった。磁場、マイクロ波パワー、ガス密度などが制御パラメタである。

プラズマ中心領域と温度傾きが小さい周辺領域での電子温度傾きの電子密度依存性。上はヘリオトロン J、下は CHS 装置

#### 2.1.1.2.7. ICRF と NBI 超高加熱による高速イオンの生成の研究 (発表論文 7)

イオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) の少数イオン加熱を NBI 加熱に重畳することにより、 $\alpha$  粒子閉じ込め研究を目指し、50 keV を超える高エネルギーイオン生成を行った。加熱出力はそれぞれ NBI が BL2 (水素入射、約 400 kW)、ICRF (約 300 kW)、ECH (約 330 kW) である。荷電交換中性粒子分析器を入射エネルギー ( $E_0$ ) 24 keV の BL-2 による入射粒子の方向に向け、約 10% の少数イオンである水素を観測した。プラズマ生成の供給ガスは重水素である。ICRF パルス入射前のイオン

温度は 100 eV から 200 eV で、磁場配位が low- $\epsilon$  配位および高バンピネス配位で少数イオンのエネルギースペクトルを調べたところ、low- $\epsilon$  では 60keV までのイオンを計測した。また、高速イオン生成・閉じ込めのバンピネス依存性で最も効率の良い高バンピネスよりも良い可能性がある。この傾向はモンテカルロ計算の結果と一致した。

#### (発表論文)

- 1) T. Mizuuchi, et al., "A new operation regime for high-density plasma in Heliotron J", 25<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference, (FEC2014), Saint Petersburg, Russia, 13-18 Oct., EX/P4-29.
- 2) S. Kobayashi, et al., "Parallel flow dynamics and comparison with neoclassical transport analysis in NBI plasma of Heliotron J", 25<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference, (FEC2014), Saint Petersburg, Russia, 13-18 Oct., EX/P4-28.  
K. Nishioka, et al., "Neoclassical parallel flow calculation in the presence of external parallel momentum sources in Heliotron J", Phys. Plasmas **23** (2016) 032511.
- 3) S. Ohshima, et al., "Observation of a toroidally symmetrical electric field fluctuation with radially elongated structure in Heliotron J", 25<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference, (FEC2014), Saint Petersburg, Russia, 13-18 Oct., EX/P4-26.  
S. Ohshima, et al., "Edge plasma responses to energetic-particle-driven MHD instability in Heliotron J", Nucl. Fusion **56** (2016) 016009.
- 4) S. Yamamoto, et al., "External control of energetic-ion-driven MHD instabilities by ECH/ECCD in Heliotron J Plasmas", 25<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference, (FEC2014), Saint Petersburg, Russia, 13-18 Oct., EX/P4-27.  
K. Nagasaki, et al., "Stabilization of energetic-ion-driven MHD modes by ECCD in Heliotron J", Nucl. Fusion **53** (2013) 113041.
- 5) T. Minami, et al., "3D magnetic field effect on electron internal transport barrier in Heliotron J", 20<sup>th</sup> International Stellarator/Heliotron Workshop, Greifswald, Germany, 5-9 Oct., 2015, S1-14.  
T. Minami, et al., "Present Status of the Nd:YAG Thomson Scattering System Development for Time Evolution Measurement of Plasma Profile on Heliotron J", Plasma Science and Technology, **15**, (2013) 240-243.
- 6) S. Kobayashi, et al., "Rapid NBI plasma initiation using pre-ionization method by non-resonant microwave injection in Heliotron J", 20<sup>th</sup> International Stellarator/Heliotron Workshop, Greifswald, Germany, 5-9 Oct., 2015, S3-O2.
- 7) H. Okada, et al. "Magnetic field optimization study for fast ions generated by ICRF heating in Heliotron J", 20<sup>th</sup> International Stellarator/Heliotron Workshop, Greifswald, Germany, 5-9 Oct., 2015, P2S3-36.

### 2. 1. 1. 3. 意義 (学術的・社会的的重要性)

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

### 2. 1. 1. 4. 今後の計画

立体磁気軸ヘリカル系 Heliotron J の閉じ込め改善の原理 (磁場フ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。従って、今後の計画としては、立体磁気軸ヘリカル系に特徴的な 3 次元磁場の効果、特に、輸送と安定性の物理解について学術的な展開を強化・推進することを予定している。プラズマの径方向輸送の詳細な解析を行うことを目的に、YAG トムソン散乱計測、遠赤外干渉計、多チャンネル SX アレイ、多チャンネル静電プローブ、高速イオン損失プローブ、2 次元 BES、密度揺動計測反射計などのプラズマ分布計測システムの導入計画も順調に行われ、分布を含めた解析が可能になった。高密度 (高ベータ) プラズマ生成の試みも SMBI、HIGP のもとに順調に進展している。さらに水素ペレット入射の準備も整い、プラズマコアへの直接的な粒子供給の研究も開始されようとしている。加熱システムとしては、ECH/ECCD システムのアップグレードによるパワー変調制御も可能となり、今後さらに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、LHD 型ヘリカル系原型炉のダイバータ設計では、ダイバータデタッチメントを含むダイバータプラズマの熱・粒子制御の研究が重要な課題となる。境界プラズマ制御の観点から、周辺磁気井戸による境界プラズマ閉じ込めの研究、SOL のエルゴディック層における不純物を含む輸送の研究に取り組むとともに、将来的には、ヘリカル・ダイバータと 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。

## 2.1.2. 先進プラズマ・量子エネルギー材料の超微小試験技術研究開発

(原子エネルギー研究分野、エネルギー基盤材料研究分野)

### 2.1.2.1. 背景

本重点領域研究においては、基幹装置であるイオン加速器システム「高度エネルギー機能変換実験装置／材料実験装置 DuET」を活用して、先進プラズマ・量子エネルギー材料の開発研究を推進している。本装置の特徴として、核融合炉環境や原子炉環境におけるはじき出し損傷やヘリウム生成を模擬できることがあげられるが、重イオン照射に晒された材料における損傷領域は深さ方向に対して数 $\mu\text{m}$ 程度しかないため強度特性評価が困難であり、中性子照射材料との直接的比較が可能な強度特性評価法の開発が必要であった。

### 2.1.2.2. 成果の概要

本研究グループでは、超微小試験技術であるナノインデンテーション法を駆使することによって、ほんの数 $\mu\text{m}$ 程度のイオン照射領域からバルク相当の硬さを導出可能なモデルの開発に成功している(発表論文1)。当該機関においては、本モデルを発達させてバルク相当硬さの深さ依存性(Fig.1)を導出可能な改良モデルを提案した(発表論文2)。また、重イオンビームだけではなくプロトンビームのような飛程の長い照射材料を用いることによって本モデルが妥当であることを示した(発表論文3)。また、我が国における硬さ研究の中心である日本材料試験技術協会の和文誌において解説論文が出版されている(発表論文4)。

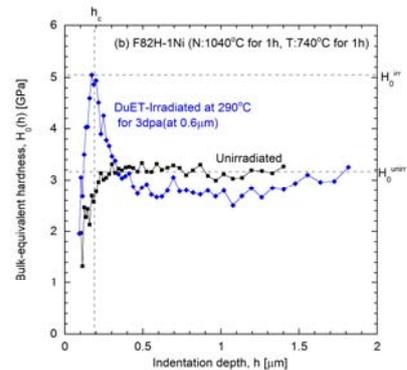


Fig. 1 DuETによる $\text{Fe}^{3+}$ イオン照射前後のF82Hのバルク相当硬さの深さ依存性[2]。

- 1) Takayama, Y., Kasada, R., Sakamoto, Y., Yabuuchi, K., Kimura, A., Ando, M., Hamaguchi, D., Tanigawa, H., “Nanoindentation hardness and its extrapolation to bulk-equivalent hardness of F82H steels after single- and dual-ion beam irradiation”, *Journal of Nuclear Materials*, 442 (2013) S23-S27.
- 2) Kasada, R., Konishi, S., Yabuuchi, K., Nogami, S., Ando, M., Hamaguchi, D., Tanigawa, H., “Depth-dependent nanoindentation hardness of reduced-activation ferritic steels after MeV Fe-ion irradiation”, *Fusion Engineering and Design*, 89 (2014) 1637-1641.
- 3) Yabuuchi, K., Kuribayashi, Y., Nogami, S., Kasada, R., Hasegawa, A., “Evaluation of irradiation hardening of proton irradiated stainless steels by nanoindentation”, *Journal of Nuclear Materials* 446 (2014) 142-147.
- 4) 笠田竜太, 「原子炉・核融合炉材料の照射硬化評価のための硬さ試験とナノインデンテーション」, 材料試験技術 Vol. 60 No. 1 2015年1月. .

### 2.1.2.3. 意義(学術的・社会的的重要性)

本研究で開発された手法と解析モデルは、イオン照射材料の強度特性評価法として標準的あるいは参照すべき手法(Kasada method)として世界的に認識されつつあり、関連論文(Kasada et al. *FED* 86 (2011) 2658-2661)は2011年以降の*Fusion Engineering and Design*誌における参照数ベスト5

(34 : Scopus2016年4月8日)に入るなど高い評価を受けているといえる。また、先進プラズマ・量子エネルギー材料分野に限らず、ソフトマテリアル、高機能被覆材料分野における共同研究も進みつつある。

### 2.1.2.4. 今後の計画

当該分野におけるイオン照射法の世界的拠点であるDuET施設の高度化を進めるとともに、イオン照射後の材料評価法として新奇の超微小試験技術法の開発を進める。強度特性評価、微細組織評価、理論・シミュレーションを組み合わせた構造・物性変化に関するモデリング研究も強化する計画である。

## 2.1.3. 先進プラズマ・量子エネルギー材料用被覆法の研究開発

(原子エネルギー研究分野・エネルギー基盤材料研究分野)

### 2.1.3.1. 背景

本重点領域研究において推進している先進プラズマ・量子エネルギー材料においては、厳しい粒子線負荷や環境負荷の低減のために、材料被覆技術の開発が必要となる。核融合炉におけるプラズマ対向材料においては、高エネルギー粒子に対する耐スパッタリング性能に優れた高Z材であるタングステン材料の被覆が求められる。核融合炉ブランケット環境や次世代型原子力システムにおいては、液体金属腐食に優れた被覆法が求められる。

### 2.1.3.2. 成果の概要

異なる分野との共同研究によって、低放射化フェライト鋼や酸化物分散強化鋼等の構造材料に対して、減圧プラズマ溶射法、拡散接合法、ロウ付け法、水中爆接法 (Fig.2) によるタングステン被覆法を開発した (発表論文 1,2,3)。また、耐液体金属腐食被覆として、改良ゾルゲル法によって緻密なイットリア強化型アルミナ被覆の開発に成功した (発表論文 4)。

- 1) Noh, S., Kasada, R., Kimura, A., Nagasaka, T., Sokolov, M.A., Kim, T.K., “Interfacial microstructures and hardness distributions of vacuum plasma spraying W-coated ODS ferritic steels for fusion plasma facing applications”, Fusion Engineering and Design, 89 (2014) 289-293.
- 2) Himei, Y., Yabuuchi, K., Kasada, R., Noh, S., Noto, H., Nagasaka, T., Nogami, S., Kimura, A., “Ion-irradiation hardening of brazed joints of tungsten and oxide dispersion strengthened (ODS) ferritic steel”, Materials Transactions, 54 (2013) 446-450.
- 3) Mori, D., Kasada, R., Konishi, S., Morizono, Y., Hokamoto, K., “Underwater explosive welding of tungsten to reduced-activation ferritic steel F82H”, Fusion Engineering and Design, 89 (2014) 1086-1090.
- 4) Kasada, R., Dou, P., “Sol-gel composite coatings as anti-corrosion barrier for structural materials of lead-bismuth eutectic cooled fast reactor”, Journal of Nuclear Materials, 440 (2013), pp. 647-653.

### 2.1.3.3. 意義 (学術的・社会的的重要性)

本研究で開発された被覆技術は、核融合エネルギーの利用に向けて大きな壁となっている過酷環境に耐えうる材料の開発という点において重要な工学的成果である。これらの成果は、第6回つくば国際コーティングシンポジウムにおける招待講演として発表されるなど高い評価を受けている (笠田竜太 2014年12月)。

### 2.1.3.4. 今後の計画

開発された被覆部材に対して、DuET 施設や液体金属ループを用いた耐照射・耐環境試験を行うことによって、実用化に向けた基礎的知見の取得を進める。

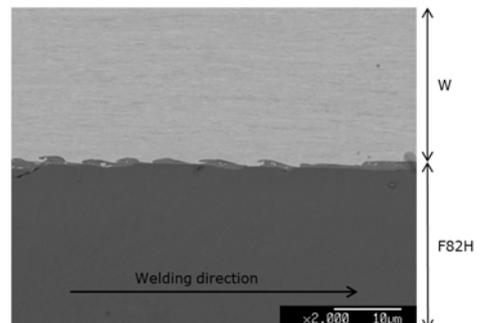


Fig. 2 水中爆接法によって作製したW被覆F82Hの断面組織に見られる特徴的な波状構造[3]。

## 2.1.4. 慣性静電閉じ込めプラズマ核融合中性子源の応用

(粒子エネルギー研究分野)

### 2.1.4.1. 背景

核融合は、核分裂を除けば、中性子を発生する他の核反応と比べて低いエネルギーで生起可能であるため、小型のポータブル中性子源としての利用に潜在的に適している。このような用途に専ら用いられてきたビーム対固体ターゲット型の核融合中性子管と比較して、我々の開発してきた慣性静電閉じ込めプラズマ核融合中性子源はプラズマ中のガス分子をターゲットとしている点に大きな特徴がある。そのため大電力投入が可能で、トリチウムを使用する D-T 反応の 1/100 の断面積しかない D-D 反応でも、D-T 中性子管と同等以上の中性子源強度が得られる。強度や安全性の他にも、長時間連続定常運転が可能であることや、ターゲット交換が不要であるなどメンテナンスが容易であることにも実用上大きな利点があり、小型中性子源の新たな応用の開拓に期待が寄せられている。

### 2.1.4.2. 成果の概要

港湾等に設置してコンテナ貨物を非開封・非破壊で、しかも物流を妨げることなく短時間で全量検査可能な核燃料物質検知技術を開発した。従来の課題であった照射中性子と核燃料物質から放出される二次中性子との弁別を可能とするため、D-D 核融合中性子の単色性を利用した計測・解析技術を開発し、

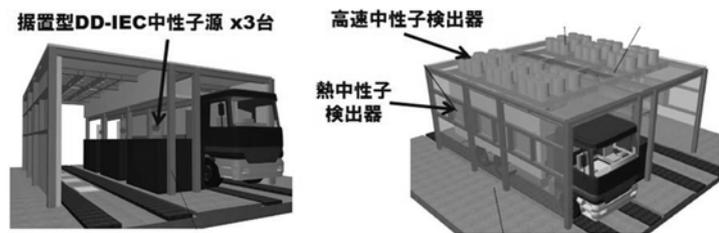


図1 海運コンテナ内に隠匿された核燃料物質の検知装置

实用レベルの検査装置の設計を示した(図1、発表論文1、2)。平成27年10月からは、据置型より更に技術的難易度の高いポータブルの検査装置(特願2012-191500、PCT/JP2013/073042、US14/423095、EU13832574.1、RUS2015111528)としての製品化開発を、外部資金による2.5年間の産学連携事業として開始した。一方、開発してきた中性子源は共同利用・共同研究にも供しており、He-3代替中性子検出器開発や創薬研究(発表論文3)にも貢献した。

1) K. Masuda et al., “Compact Intense Neutron Generators based on Inertial Electrostatic Confinement of D-D Fusion Plasmas”, *Proc. Proc. Nuclear Physics and Gamma-ray Sources for Nuclear Security and Nonproliferation* (2014) 195-202.

2) Y. Takahashi et al., “Development of Active Neutron-Based Interrogation System with D-D Neutron Source for Detection of Special Nuclear Materials”, *ibid.*, 341-346.

3) H. Hori, R. Tada, Y. Uto, E. Nakata, T. Morii and K. Masuda, “A Neutron Dynamic Therapy with a Boron Tracedrug UTX-51 Using a Compact Neutron Generator”, *Anticancer Res.* **34** (2014) 4557-4560.

### 2.1.4.3. 意義(学術的・社会的的重要性)

CBRNe(化学、生物、放射性物質、核、爆薬)と呼ばれる5つの脅威の中で唯一、核テロに対しては、形状認識によらず物質そのものを検知する装置が存在しない。この弱点を補強する本成果を実用化に繋げることができれば、テロに対する防備を劇的に高め、安全・安心な社会の実現に大きく貢献することができる。このような技術の研究は、早くから核テロを現実の脅威と捉えてきた米国では特に精力的に進められてきたが、据置型装置も未だ実用化されていない。利用範囲の各段に広いポータブル装置を世界に先駆けて実現すれば、唯一の被爆国である我が国に相応しい輸出産業となる。上記特許については、本学からの国内特許出願の後、PCT出願と各国移行はJSTのサポートにより行った。

### 2.1.4.4. 今後の計画

ポータブル核燃料物質検知装置については、2.5年間の外部資金による産学連携事業の間に製品レベル試作機を開発して技術移転する。事業終了後、技術移転先企業による2018年度販売開始、2020年東京五輪での社会実装と海外への販路獲得を目指している。

慣性静電閉じ込めプラズマ核融合中性子源の開発と応用の研究は、平成26年3月の外部評価において、重点複合領域研究の「特に評価される成果」として「学術的に非常に興味深く、種々の応用も期待できる」と評価される一方、原子炉や加速器中性子源など他の中性子源とは異なった応用展開への期待が寄せられている。ポータビリティを活かしたテロ対策技術による社会貢献はもちろん、大型中性子源施設と比べてオンデマンドで使い易い中性子源として利用範囲の拡大を図ると共に、応用技術や高性能化を目指した基礎研究も引き続き推進していく。

## 2.1.5. 安全性を追求した革新的原子力炉心 SiC 複合材料の開発

(複合機能変換過程研究分野)

### 2.1.5.1. 背景

安心・安全な量子エネルギーを実現させるためには、過酷環境下で耐えうる革新的な材料の開発が必要である。SiC の優れた耐酸化特性から、SiC 複合材料は、軽水炉における事故耐性燃料として応用が期待されている。SiC 複合材料は、作製方法により結晶粒サイズや不純物が異なり、原子炉での通常時の耐高温水特性や事故時の耐高温水蒸気特性は、これらの材料特性に大きく依存する。液相焼結材においては、アルミナやイットリア等の残存不純物が腐食を促進することが懸念される。また、SiC 複合材料においては繊維/マトリックスに C 相が存在する場合は、高温酸化雰囲気で大きく強度特性は劣化してしまう。本研究では、高温水特性や高温水蒸気特性に及ぼす材料特性の影響を考慮した、炉心用 SiC 材料の開発を目的とした。

### 2.1.5.2. 成果の概要

液相焼結材は、基本的に焼結助剤量を減らすと密度や強度が低下する傾向にある。耐腐食特性を考えた場合に、アルミナやイットリアの焼結助剤量を減らす必要があるが、強力な分散が可能なスパイクミルを用いても、3wt%程度が密度を極端に下げない限界であった。特に耐高温水特性に優れた焼結助剤成分の検討を行い、Al 成分を低減することで、耐高温水特性に非常に優れていることが明らかになり、焼結助剤の調整を行い、気孔率を 3%以内に制御した材料を開発し、耐高温水特性を飛躍的に向上させた SiC 材料の開発に成功した。SiC 複合材料に関しては、粒子分散マトリックス複合材料の開発を行い、耐高温水、耐高温水蒸気特性に優れた SiC 複合材料を開発した。

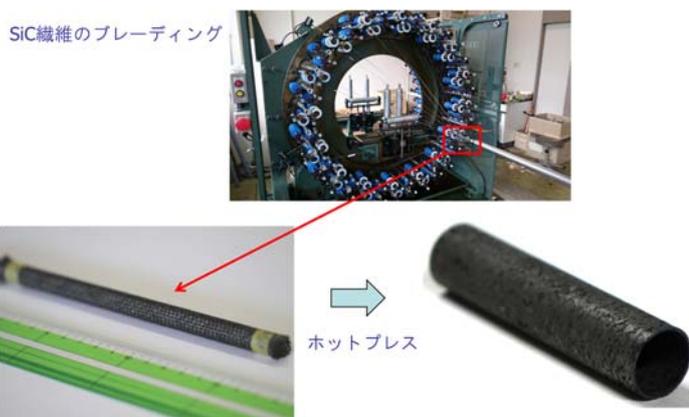


図 事故耐性 SiC 複合材料燃料被覆管の開発

本研究内容はエネルギー対策特別会計に基づき、文部科学省から株式会社東芝が受託した「安全性を追求した革新的炉心材料利用技術に関する研究開発」の成果である。

1) S. Kondo, M. Lee, T. Hinoki, Y. Hyodo and F. Kano, "Effect of irradiation damage on hydrothermal corrosion of SiC," JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS, 464 (2015) 36-42.

### 2.1.5.3. 意義 (学術的・社会的的重要性)

東日本大震災に伴う津波に起因する福島第一発電所の事故では、冷却不全により炉心の温度が上昇し、水蒸気と炉心材料の反応で大量の水素が発生し、炉心損傷と水素爆発が引き起こされた。エネルギーの安定供給の観点では原子力は重要なエネルギー源であり、安全性を高めることは非常に重要である。深層防護の観点で安全性の向上は図られているが、本研究は想定外の事故が起きたときの受動的な安全性を担う重要な要素であり、原子炉の安全性向上に大きく貢献するものである。

### 2.1.5.4. 今後の計画

本研究は、先進プラズマ・量子エネルギーの先進エネルギー材料研究である。高温水や高温水蒸気に対する腐食挙動の理解に基づき、材料開発を進めてきたが、高温水腐食挙動に及ぼす照射効果に関しては、まだ十分な知見が得られていない。本研究では DuET を用いたイオン照射や中性子照射により、高温水腐食挙動に及ぼす照射効果を明らかにしていく予定である。

## 2.1.6. 核融合・先進原子炉用構造材料の国際ラウンドロビン試験

(エネルギー基盤材料研究分野)

### 2.1.6.1. 背景

核融合および先進原子炉システムにおいては、革新的な性能を持つ構造材料の開発が不可欠である。文部科学省および経済産業省の公募事業に採択されて開発を進めた「スーパーODS鋼」は、従来の鉄鋼材料に比べ、高温強度、高温での耐食性および耐照射性能のいずれにおいても格段に優れており、その実用化技術開発が待たれている。なかでも、耐照射性能については、ODS鋼においては引張延性の低下が極端に抑制されており、国際的にも強い関心もたれている。そこで、国際原子力エネルギー機構 (IAEA) の傘下の取り組みとして、スーパーODS鋼の国際ラウンドロビン試験が各国の原子力関連の研究機関において実施されている。近年、その研究成果が発表されるようになり、国際共同研究論文の発表に繋がっている。これらの研究成果を統合的にまとめ、今後の改善に向けた材料開発指針を整理している。

### 2.1.6.2. 成果の概要

核融合炉構造材料の寿命に関わる重要な因子として、耐ヘリウム (He) 脆性があげられる。直径が数 nm の酸化物粒子を高密度に含有する ODS 鋼においては、酸化物粒子・母相界面が He 原子の捕獲サイトになりうることから、界面構造の詳細な観察による捕獲容量の見積もりが重要な課題となっている。

XRD データ解析より、酸化物粒子の構造として、蛍石構造、パイロクロア構造、 $\delta$  相の3つのタイプの可能性が示された。これらの構造は蛍石構造から派生した構造である。蛍石構造は、 $\text{MO}_2$  (M=金属イオン) として書け、 $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{CeO}_2$ 、 $\text{HfO}_2$  など多くの酸化物がこの構造を取っている。この蛍石構造に別の金属イオンをドーピングすることで、酸素サイトに空孔を位置する構造ができ、これを欠陥蛍石構造と呼ぶ。欠陥蛍石構造は、金属イオンサイトに2種類の金属イオンが不規則に入る。この不規則性の無い構造がパイロクロア構造である。そのため、パイロクロア構造はその単位胞が欠陥蛍石構造よりも  $2 \times 2 \times 2$  倍大きくなる超格子を取る。また、このパイロクロア構造は Al 添加前の ODS 鋼中で多く報告された  $\text{Y}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$  と同じ構造である。 $\delta$  相は蛍石構造を歪ませてできた三方晶である。

- 1) H.Q. Zhang, C.H. Zhang, Y. Yang, Y.C. Meng, J.S. Jang, A. Kimura, J. Nucl. Mater. 455(1-3) (2014) 349.
- 2) C.H. Zhang, Y.T. Yang, Y. Song, J. Chen, L. Zhang, J. Jang, A. Kimura, J. Nucl. Mater. 455(1-3) (2014) 61.
- 3) H.Y. Fu, T. Nagasaka, T. Muroga, A. Kimura, J.M. Chen, Fusion Eng. Des. 89(7-8) (2014) 1658.
- 4) S.H. Noh, A. Kimura, T.K. Kim, Fusion Eng. Des. 89(7-8) (2014) 1746.
- 5) T. Yamamoto, Y. Wu, G.R. Odette, K. Yabuuchi, S. Kondo, A. Kimura, J. Nucl. Mater. 449(1-3) (2014) 190.
- 6) L. Fave, M.A. Pouchon, M. Döbeli, M. Schulte-Borchers, A. Kimura, J. Nucl. Mater. 445(1-3) (2014) 235.

### 2.1.6.3. 意義 (学術的・社会的的重要性)

これらの研究成果は、ODS鋼の耐 He 脆性発現機構の解明に大きく貢献している。特に、高分解能 TEM を用いた酸化物・母相界面における原子列の直接観察は界面に大きな歪が存在することを明らかにしており、酸化物粒子と He 原子あるいは点欠陥の捕獲サイトとして有効に作用することを示している。これにより、従来懸念されていた He 脆性化の抑制には、ひずみ場を持つ欠陥を均一に形成することで、He を全体的に捕獲し、粒界などの特有の場所への集積を妨げることが効果的であると判明した。核融合発電においては、構造材料の長寿命化が不可欠とされており、本研究成果は、そのための重要な因子である耐 He 脆性の促進に貢献すると期待される。

### 2.1.6.4. 今後の計画

国際ラウンドロビン試験は、国際協力により各国が有する照射施設を効率的・効果的に利用して実施するものであり、原子炉材料としての ODS 鋼の可能性を示すためには今後も不可欠である。引き続き、国際基準に基づいて原子炉材料としての性能評価を実施して行く。また、当該分野の人材育成を含め、原子力構造材料開発の新たな展開に向け、国際連携協力を一層進めていく。

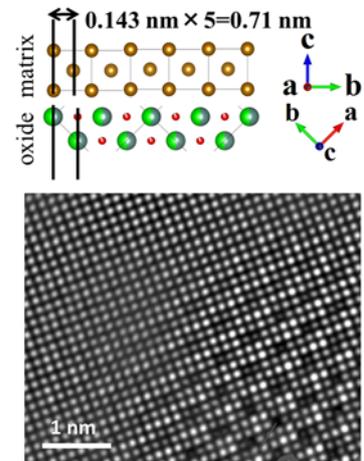


図1: 酸化物・母相界面の高分解能電子顕微鏡像

## 2.1.7. マルチスケール現象とそのゆらぎ、およびシステム安全の研究

(エネルギー基盤材料研究分野)

### 2.1.7.1. 背景

ベースロード電源として軽水炉を利用し、基盤エネルギー源として核融合炉を模索するには、科学的・経済的合理性や社会的受容性を議論することになる。これらに共通の論点は「安全」である。そこでは、機械システムのロバスト性、運用時の人間の動作、エネルギー問題に対する住民合意を対象に、それらを構成する要素の挙動の「ゆらぎ」や随伴する不確実性（あいまいさ）を検討することになる。ゆらぎの重ね合わせが安全に関わる想定外事象を創発するからだ。

### 2.1.7.2. 成果の概要

本研究では、安全設計や保全活動における種々の「あいまいさ」の科学的評価、それに基づく残留リスクの管理や適切な対処に関する方法論を考える。ホルナゲルの安全の議論に基づき、種々のシステム（材料システム、機械システム、社会システム）のそれぞれで観察される「ゆらぎ」に注目する。ゆらぎの重ね合わせにより創発される現象を制御することこそ、リスク管理ひいてはシステム安全の向上に寄与することになる。まず、材料システム内のゆらぎにより創発される照射欠陥集合体の核生成・成長プロセスについて、種々の計算機シミュレーション手法を駆使した材料マルチスケールモデリングを行った。水素・ヘリウム損傷の評価や照射脆化予測法を構築した（発表論文 1-4）。また、機械システム内の諸機能のゆらぎにより創発される残留リスク評価に使われる確率論的リスク評価手法を材料分野にも援用し、軽水炉燃料リークの保全の最適化問題に応用した（発表論文 5）。さらには、ヒューマンファクターのゆらぎにより失敗事象が創発されるというホルナゲルのモデルにもとづき、軽水炉において報告されているトラブル事例を対象に、機能共鳴分析 FRAM を行った（発表論文 6）。

- 1) Y. Yamamoto, K. Morishita, et al., “Theoretical investigation of oxidation mechanism of fuel cladding in light-water reactor”, E-Journal of Advanced Maintenance 5 (2013) 1.
- 2) Y. Watanabe, K. Morishita, et al., “Helium effects on microstructural change in RAFM steel under irradiation: Reaction rate theory modeling”, Nuclear Instruments and Methods B352 (2015) 115.
- 3) T. Nakasuji, Y. Yamamoto, K. Morishita, “Numerical Evaluation of Material’s Degradation under Various Irradiation Conditions”, E-Journal of Advanced Maintenance 7 (2015) 160.
- 4) D. Kato, K. Morishita, et al., “Super-Saturated Hydrogen Effects on Radiation Damages in Tungsten under High-Flux Divertor Plasma Irradiation”, Nuclear Fusion 55 (2015) 083019.
- 5) Y. Yamamoto, K. Morishita, “Development of methodology to optimize management of failed fuels in light water reactors”, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 52, No. 5, (2015), pp. 709-716.
- 6) 村吉範彦, 森下和功, 岩切宏友, 中筋俊樹, 原子力発電所のトラブル事例分析, 日本原子力学会, 2016年春の年会, 東北大学, 2016年3月.

### 2.1.7.3. 意義（学術的・社会的重要性）

材料システム内の物質流れのゆらぎが「核生成現象」を創発する。機械システム内の機器・部品の挙動、人間動作、使用環境のゆらぎが「トラブル事象」を創発する。社会システム内の住民の意思や心情のゆらぎが「社会的合意」を創発する。あらゆる事象に共通なのは、マルチスケール性を有すること、および、異なるスケール間を結びつける鍵が「ゆらぎ」であることだ。材料マルチスケールモデリング、機械システムの確率論的リスク評価、社会システムの機能共鳴分析などの評価手法のアナロジーを考察することは、それぞれの分野の評価手法の改善につながる。本研究は、マイクロ（材料システム）からマクロ（社会システム）までのあらゆる事象を対象に、そのマルチスケール性を構造化し、壮大なマルチスケールモデリングを実施するとともに、原子炉・核融合炉の安全性向上に資する知見を提供する。学術的にも社会的にも重要である。

### 2.1.7.4. 今後の計画

巨大複雑系社会経済システムである原子炉や核融合炉に関連する材料システム、機械システム、社会システムで起こるマルチスケールな現象を対象に、関連要素の挙動やそのゆらぎを構造化し、安全性の議論に資する学術体系（マルチスケールシステム保全学）を構築する。

## 2.1.8. 高エネルギー粒子線と材料との相互作用に関する研究

(エネルギー基盤材料研究分野)

### 2.1.8.1. 背景

核融合エネルギーの実現において、プラズマを閉じ込めるためのコンポーネントやプラズマ周辺で使用される機器の信頼性を担保することは極めて重要である。核融合プラズマから放出される高エネルギーの中性子線や粒子線に曝されることでコンポーネントを構成している材料の特性が劣化することは昔からよく知られている。その劣化度合いを正しく評価することは核融合炉の設計や安全性の確保において必要不可欠であり、そのための基盤となる基礎学理の構築が求められている。材料の特性劣化は粒子線の照射によって材料中に様々な欠陥が一次的もしくは二次的に形成されることに起因している。これらの欠陥形成メカニズムもさることながら、形成した欠陥の特性劣化に及ぼす影響について明らかにすることも重要である。本研究では、本研究所の有するイオン加速器 DuET を活用し、高エネルギー粒子線が材料に及ぼす影響について基礎から応用までの研究を幅広く展開している。

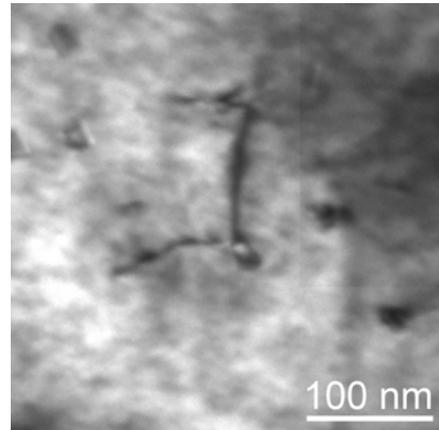


図 1 空孔集合体と転位との相互作用を透過型電子顕微鏡を用いて観察した例。

### 2.1.8.2. 成果の概要

最近の特筆すべき成果として、空孔集合体と転位の相互作用について、実験・計算の両面から明らかにしたことが挙げられる (発表論文 1)。これまで球状の空孔集合体を扱ったシミュレーション研究しかなかったが、本研究では多面体の空孔集合体をターゲットとして研究を進め、より現実に近い系での現象を取り扱っている点が画期的である。

1) Ryosuke Nakai, Kiyohiro Yabuuchi, Shuhei Nogami, Akira Hasegawa, "The effect of voids on the hardening of body-centered cubic Fe", *Journal of Nuclear Materials*, 471 (2016) 233-238.

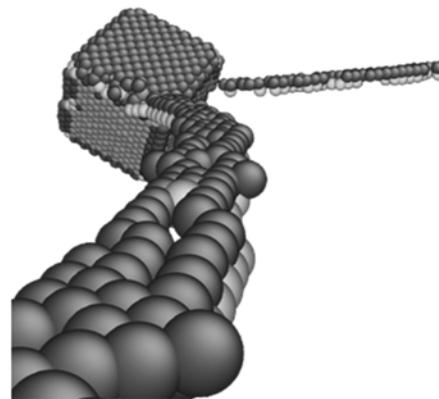


図 2 空孔集合体と転位との相互作用を分子動力学シミュレーションで検証した例

### 2.1.8.3. 意義 (学術的・社会的的重要性)

転位と欠陥との相互作用は材料の特性劣化に関わる極めて重要な現象である。材料特性劣化を評価するための核融合中性子照射施設が存在しない現在、イオン加速器を用いた基盤研究は核融合炉の設計、安全性を検討するために必要不可欠である。本研究は其中でも機械特性の劣化に関わる極めて重要な現象を取り扱っており、学術的意義もさる事ながら、工学的意義も極めて大きい研究である。

### 2.1.8.4. 今後の計画

高エネルギー粒子線と材料との相互作用に関する研究は、学術的にも工学的にも先進プラズマ・量子エネルギー分野において重要である。本研究では、様々な材料の様々な特性変化に対して、イオン加速器 DuET を活用して取り組んでいく予定である。

## 2.2. 光・エネルギーナノサイエンス重点複合領域研究

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

光・エネルギーナノサイエンス研究領域では、異分野融合・新領域研究の創生を通じて、分散エネルギーとしての光エネルギー・バイオエネルギーの高効率生成・利用などに資する学術・技術基盤を構築するための研究を推進している。

太陽電池材料の開発研究においては、熔融塩中におけるシリカ直接電解還元という手法により、太陽電池用シリコン製造法として高い生産性を得る事に成功した。また、光エネルギー応用としてその利用が期待されている1nmを切る幅のグラフェンナノリボンを高効率合成する手法を開発した。また、ナノカーボン物質の一つであるカーボンナノチューブに着目し、その特異な光機能ならびに応用への研究を展開した結果、カーボンナノチューブの発光効率の大幅な向上とアップコンバージョン発光という特異な光学現象を見出した。自由電子レーザーの開発では、中赤外領域の自由電子レーザーの大幅な安定化・波長域の拡大を達成し、研究所内・学内・学外ユーザへ大強度中赤外レーザーを提供し、学術・産学間研究に活用されている。さらに、理論的研究から原子系におけるレーザー誘起スピン偏極などのダイナミクスを明らかにした。

ナノバイオ関連研究としては、DNA 結合性タンパク質を固定化するためのアダプターとして利用することで、目的タンパク質を DNA ナノ構造体の任意の場所に配置する技術を高度化し、高効率に化学反応に進めるスキームを示した。また、バイオマスを解析する新しい NMR の方法論の開発とその活用を進め、NMR 法の一つである TROSY スペクトルを用い正確な物質質量を得る方法論を開発する事に成功した。さらに、天然変性蛋白質は単独では変性状態にあるが、標的分子に合わせた特定の立体構造を形成しつつそれと結合する。天然変性蛋白質のこのような分子認識機構は一般に特別扱いされているが、実は鍵と鍵穴モデルや適合融合モデルで記述できる分子認識機構と基本的に同じメカニズムを共有することを示した。

「光・エネルギーナノサイエンス」複合領域研究は、光学とナノ構造材料科学およびナノバイオ領域の連携協力によって、新しい領域研究へと展開しつつあり、当該研究分野の先端的研究拠点形成に向けた活動を展開した。

以下に、平成 25～27 年度の当該重点複合領域研究成果の概要を述べる。

## 2.2.1. 自由電子レーザーを用いた固体材料における選択的格子振動励起の研究

(量子放射エネルギー研究分野)

### 2.2.1.1. 背景

格子振動は、電気伝導特性、磁気特性、熱伝導特性など、あらゆる材料の特徴的な物性の発現と密接に関係する重要な要素である。従来、固体中の電子と格子振動との相互作用（電子格子相互作用）の研究では、一般に格子振動を熱的に励起（非選択的励起）し、温度制御により励起準位の分布を制御することで電子格子相互作用の分析が行われてきた。エネルギー制御性の良い中赤外レーザーを用いて格子振動を選択的に励起し分析することが可能になると、各種物質における電子格子相互作用と固体物性との関係をより明確に把握可能になることが期待できる。

### 2.2.1.2. 成果の概要

我々は、レーザー発振波長制御を可能とした京都大学中赤外自由電子レーザー（KUFEL）を用いることで、世界で初めて固体材料の格子振動を選択的に励起し、直接的観測することに成功した。（発表論文 1）極低温に固体試料を冷却し振動励起を抑制した固体試料に、格子振動エネルギーに等しい中赤外パルスレーザーを照射し、ラマン散乱光の観測を行った。その結果、特定の振動励起状態にある格子振動由来のラマン散乱光が観測され、選択的格子振動励起が明瞭に確認された。図1に赤外 FEL 励起アンチストークスラマン分光の概念図を示す。

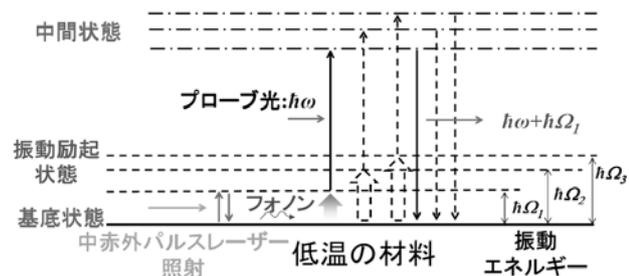


図1 極低温に冷却した固体材料に格子振動エネルギー $\hbar\Omega_1$ に対応する中赤外パルスレーザーを照射し選択励起状態に遷移させた際に、アンチストークスラマン散乱光 $\hbar\omega + \hbar\Omega_1$ が観測された。

1) K. Yoshida, et al., Applied Physics Letters, American Institute of Physics, Vol.103, 182103 (2013)

### 2.2.1.3. 意義（学術的・社会的的重要性）

電子格子相互作用は、電気伝導特性や磁気特性といった固体の物性に影響を与える重要な因子であり、どの格子振動がどのような固体物性を発現させているかを明らかにする手段を得ることで、省エネルギーな電子デバイスの開発、また超伝導現象の発生メカニズムの解明が進み、より高温条件で超伝導となる物質（室温超伝導物質など）の開発などに寄与できる。さらに、選択的格子振動励起を行うことで絶縁体状態の固体を金属状態に変化させることができるという報告もあり、光による固体材料の状態制御への応用も期待されている。

### 2.2.1.4. 今後の計画

固体材料を対象とした格子振動の選択励起の研究をより一層進め、偏光依存性、振動状態の寿命測定等を可能にし、光エネルギーによる固体材料物性基礎研究、さらには新奇エネルギーデバイスの開発基礎研究への展開を目指す。

## 2.2.2. ナノカーボン・原子層物質の光物性・機能とエネルギー応用の研究

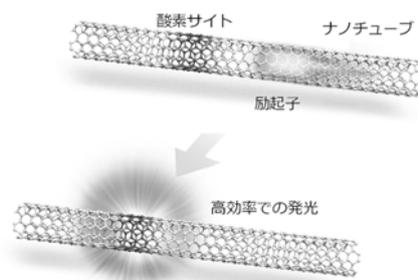
(複合機能変換過程研究分野)

### 2.2.2.1. 背景

CO<sub>2</sub>ゼロエミッションを実現するエネルギーシステム構築のために、光・エネルギーナノサイエンス重点領域研究では、太陽エネルギーを中心とする自然エネルギーの高効率利用を目指している。そのためには、ナノサイエンスを基盤として新しい光エネルギーの効率利用を可能にする、ナノ物質の創生・探索およびそこにおける新しい光機能発現、さらにそれをエネルギー応用へと繋げていく道筋が必要となる。そこで、本研究では、ナノカーボン・原子層物質に着目し、その特異な光機能ならびに応用への研究を展開した。

### 2.2.2.2. 成果の概要

ナノカーボン・原子層物質（カーボンナノチューブ、グラフェン、遷移金属ダイカルコゲナイド）の光学的性質に深く関与する電子状態の理解と新たな光機能性の発現は、次なる光科学の展開に向けた要となっている。それらは同時に、ナノカーボン・原子層物質を利用した高効率なエネルギー生成・省エネルギーデバイス創成などに向けた課題でもある。我々は、カーボンナノチューブをモデルシステムとして、新たな光機能性の発現と応用に向けた研究を進めた。ナノチューブは、通信用省エネルギー光源等への応用が期待されているが、通常その発光効率は非常に低く（約1%程度）、実用化に向け大幅にその効率を上げることが強く求められている。これに対して我々はそれを実現するために、炭素原子から構成されるナノチューブに酸素をドーピングした酸素ドーピングナノチューブを作製し、その発光効率を詳細に調べた。その結果、室温において酸素サイトの部分では、ナノチューブ固有の部分（約1%程度）と比べ、約20倍以上の高い効率で発光（約18%程度）していることを明らかにした。これは構造を制御し変調することで、ナノチューブ固有の性質を超える、新たな光機能性が発現しうることを示している（発表論文1）。また、上記以外にも高効率なアップコンバージョン発光の観測（発表論文2）、さらには、ナノチューブを利用した高効率太陽電池デバイスの実現などの成果が得られた（発表論文3）。



- 1) Y. Miyauchi, M. Iwamura, S. Mouri, T. Kawazoe, M. Ohtsu, and K. Matsuda, "Brightening of excitons in carbon nanotubes on dimensionality modification", Nat. Photonics 6, (2013) 715-719.
- 2) N. Akizuki, S. Aota, S. Mouri, K. Matsuda, and Y. Miyauchi, "Efficient near-infrared up-conversion photoluminescence in carbon nanotubes" Nat. Commun. 6, (2015) 8920.
- 3) F. Wang, D. Kozawa, Y. Miyauchi, K. Hiraoka, S. Mouri, Y. Ohno, and K. Matsuda, "Considerably improved photovoltaic performance of carbon nanotube-based solar cells using metal oxide layers", Nat. Commun. 6, (2015) 6305.

### 2.2.2.3. 意義（学術的・社会的重要性）

本成果では、ナノカーボン物質に光・エネルギー応用する上で大きな問題とされてきた低い発光効率を、大幅に向上する事に成功するとともに、構造を制御することでナノ物質固有の性質を超える、新たな光機能性が発現しうることを示したという、学術的な意味をもつ。またこれと同時に、室温において動作しうる省電力光デバイス・量子デバイスに向けた第一歩であると考えられる。

### 2.2.2.4. 今後の計画

本研究を通して、ナノサイエンスを基盤として新しいエネルギーの効率利用を可能にするナノ物質として、ナノカーボン物質が高いポテンシャルを有していることが明らかになることができた。今後はナノカーボン物質・原子層物質を利用した、省電力光デバイス・量子デバイスへの検討を行いながら、高機能・高効率太陽電池などのエネルギー応用に向けた研究を推進してゆきたいと考えている。

## 2.2.4. 中赤外光源 (KU-FEL) に適したパルス特性計測法の開発

(レーザー科学研究分野、量子放射エネルギー研究分野)

### 2.2.4.1. 背景

KU-FEL は中赤外域 (5-20  $\mu\text{m}$ ) で動作する発振器型の波長可変自由電子レーザーであり、材料や生体分子の分析などにおいての活用が期待されている。これらは、環境にやさしい「ソフトエネルギー」の開発および応用に関連した重要な研究領域であることは言うまでもない。平成 22~24 年度に引き続き、平成 25~27 年度もまず、光源特性を正確に把握するための計測手法の開発に力を注いだ。

### 2.2.4.2. 成果の概要

ナノ秒パルスによって動作するプラズマミラーを応用した FEL パルスの時間的な切り出しと、それに伴う照射損傷閾値の大幅な改善に成功した (発表論文 1)。また、非ガウスのビーム形状を持つ FEL パルスの空間特性を評価するためのデータ解析法を開発した (発表論文 2)。

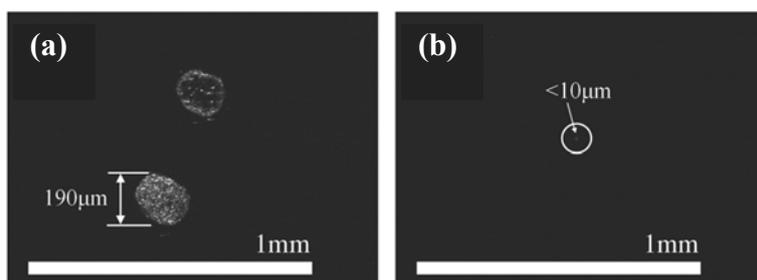


図. FEL 照射 Ge 基板の表面画像. (a) 光強度  $<6 \text{ GW/cm}^2$  の FEL パルス ( $11 \mu\text{m}$ ) を 4000 個  $\times$  1 回照射した場合と (b) プラズマミラーを使って時間的に切り出した光強度  $60 \text{ GW/cm}^2$  の FEL パルス ( $11 \mu\text{m}$ ) を 15 個  $\times$  3600 回照射した場合.

- 1) X. Wang, T. Nakajima, H. Zen, T. Kii, and H. Ohgaki, “Damage threshold and focusability of mid-infrared free-electron laser pulses gated by a plasma mirror with nanosecond switching pulses”, Appl. Phys. Lett. 103, 191105 (2013).
- 2) Y. Qin, T. Nakajima, H. Zen, X. Wang, T. Kii, and H. Ohgaki, “Characterization of non-Gaussian mid-infrared free-electron laser beams by the knife-edge method”, Infrared Phys. Technol. 66, 146-151 (2014).

### 2.2.4.3. 意義 (学術的・社会的的重要性)

プラズマミラーによって良好な集光特性を得るには、フェムト秒~ピコ秒のスイッチングパルスが必要不可欠であると信じられていたが、我々は安価なナノ秒パルスをスイッチングに用いても良好な集光特性が得られること、およびターゲットの照射損傷閾値が約 1 桁向上することを示した。FEL ビームの空間特性評価においては、非ガウスビームに対する評価法を報告したのは我々が最初である。

### 2.2.4.4. 今後の計画

平成 23 年度から開始した KU-FEL のパルス特性評価および光源整備的な仕事はこれで一段落したので、今後は、KU-FEL を利用した照射実験や分光実験を主に進めていく予定である。ただし、発振波長域がさらに長波長の THz 領域にまで拡大された場合には、そのパルス特性評価や分光実験なども適宜行う。

## 2.2.5. 光学的手法による結晶性高分子(ポリエチレン)薄膜の構造変化検出

(レーザー科学研究分野、量子放射エネルギー研究分野)

### 2.2.5.1. 背景

高分子材料の光学的な分析には、多くの場合、FTIR が用いられている。しかし、FTIR には時間分解能がないため、構造変化等のダイナミクスを調べるには向いていない。本研究では、中赤外パルス光源を用いて、結晶性高分子材料(ポリエチレン)の構造変化を実時間で検出する計測系を開発する。

### 2.2.5.2. 成果の概要

結晶性高分子の構造敏感な振動モードと共鳴な波長の中赤外パルスをレーザー加熱した結晶性高分子薄膜に照射し、その透過信号強度の変化を検出することにより、結晶性高分子が結晶性から非晶性へと構造変化したことを光学的に時間分解実時間検出することに成功した(発表論文1)。

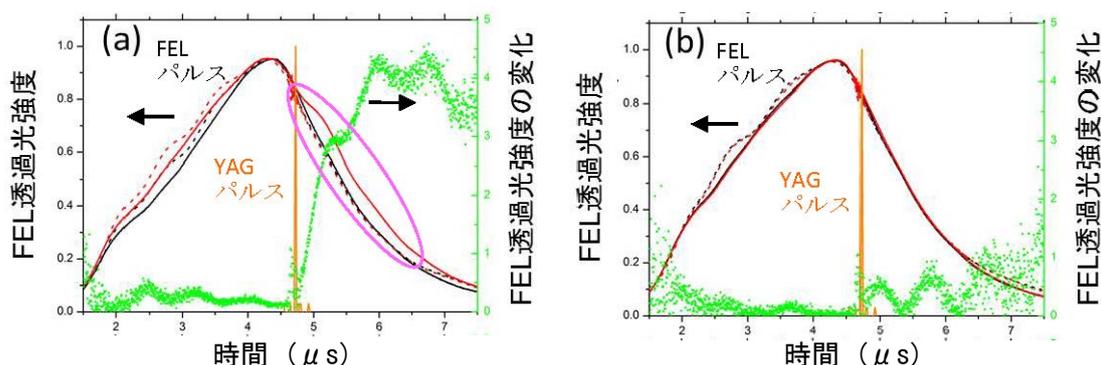


図. ポリエチレン薄膜への加熱用 1064nm パルス照射に伴う中赤外 FEL パルス透過光強度の時間変化. (a)  $\lambda=730\text{cm}^{-1}$  および  $F_{1064\text{nm}}=390\text{mJ}/\text{cm}^2$ , (b)  $\lambda=730\text{cm}^{-1}$  および  $F_{1064\text{nm}}=77\text{mJ}/\text{cm}^2$ . (a) では、1064nm パルスのフルエンスが十分であるため、加熱溶融によって高分子構造が結晶性→非晶性と変わり、4.7 $\mu\text{s}$ 以降で FEL パルスの透過信号強度が増大している。FEL 波長が吸収ピークに合わせてあり、かつ、YAG パルスのフルエンスが十分に高い時(図(a))のみ YAG パルス照射後に透過光強度が増大する。

- 1) Eduard Ageev, Keisuke Mizobata, Takashi Nakajima, Heishun Zen, Toshiteru Kii, and Hideaki Ohgaki: "Time-resolved detection of structural change in polyethylene films using mid-infrared laser pulses", Appl. Phys. Lett. 107, 041904 (2015).

### 2.2.5.3. 意義(学術的・社会的的重要性)

本研究では、様々な用途で利用可能な結晶性高分子薄膜の構造変化を、波長可変な中赤外パルスを使って実時間検出することに初めて成功した。こうして得られる情報は、高分子の構造変化がどのように起こっているかを知る糸口になる。時間分解のみならず、空間的にも分解して検出する手法にまで開発を進めることができれば、結晶性高分子の結晶成長過程を詳細に調べることも可能となる。

### 2.2.5.4. 今後の計画

湿式法によって作製が容易な非晶性高分子を母材としたナノコンポジット薄膜は、これまで数多く報告されているが、作成が困難な結晶性高分子を母材としたナノコンポジット薄膜は報告例がほとんどない。しかし、結晶性高分子の結晶度や配向を積極的に制御することができれば、非晶性高分子に比べより高機能なナノコンポジット薄膜につながる可能性がある。そこで今後は、結晶性高分子の結晶度や配向を実時間観測しつつ制御する手法の開発を試みる。時間および予算が許せば、顕微光学系の導入により、時間および空間分解能を併せ持つ分光計測装置の開発も行う。

## 2.2.6. 溶融 CaCl<sub>2</sub> 中におけるシリカ直接電解還元を利用した太陽電池用シリコン製造の研究

(複合化学過程研究分野)

### 2.2.6.1. 背景

結晶系 Si 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、将来の大量普及に際しても主役として期待されている。結晶系 Si 太陽電池には、高純度 Si(99.9999%以上)が必要であり、現在は半導体用 Si と同様の方法で製造されている。しかし、この方法では大幅な低コスト化が難しく、新たな太陽電池用 Si 製造法の開発が求められている。我々は、光・エネルギーナノサイエンス重点領域研究の一環としてシリコン太陽電池の大量普及を実現するために、高純度化したシリカをそのまま高純度シリコンへ還元する溶融塩電解法を開発している。

### 2.2.6.2. 成果の概要

新しい溶融塩電解還元法の概念図を図 1-a に示す(発表論文 1)。セル上部から粉末状 SiO<sub>2</sub> を投入し、電解セル底部のカソードで Si へ電解還元する。底部に留まった生成 Si は、定期的に溶融 CaCl<sub>2</sub> と共にセル底部から抜き取られる。図 1-b に典型的な電解還元後の様子を示す(発表論文 1)。底部の Si 板の上部に電解還元された Si が存在していることが分かる。このサンプルを洗浄したところ、Si 粉末が得られた。さらに浮融帯溶融法(FZ法)により、図 1-c に示すような結晶 Si 棒を作製することに成功した(発表論文 1)。また、原料となるシリカ粒子の粒径が電解還元速度に与える影響を解明し、最適な粒径を見出した(発表論文 2)。

(発表論文)

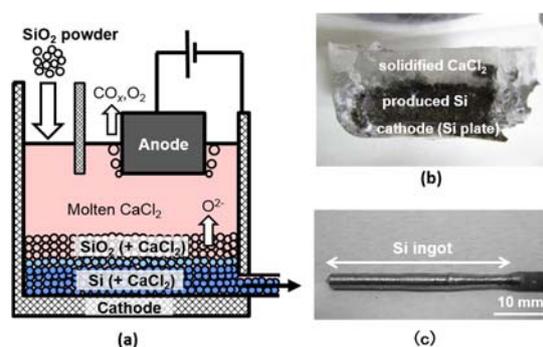


図 1 (a)溶融塩電解による新シリコン製造法. (b) 電解還元後の様子. (c)FZ 法により作製された結晶 Si 棒.

1) T. Homma, N. Matsuo, X. Ynag, K. Yasuda, Y. Fukunaka, T. Nohira, “High purity silicon materials prepared through wet-chemical and electrochemical approaches”, *Electrochimica Acta*, 179 (2015) 512-518.

2) X. Yang, K. Yasuda, T. Nohira, R. Hagiwara, T. Homma, “The Role of Granule Size on the Kinetics of Electrochemical Reduction of SiO<sub>2</sub> Granules in Molten CaCl<sub>2</sub>”, *Metallurgical and Materials Transactions B* 47B (2015) 788-797.

### 2.2.6.3. 意義(学術的・社会的的重要性)

シリコン系太陽電池の大量普及を考える上でボトルネックとなっている高純度 Si のコストを格段に下げる可能性があり、社会的に極めて重要な成果である。また、溶融塩中における酸化物電解に関して、還元速度に与える粒子サイズの影響を明らかにした点は学術的に意義が大きい。

### 2.2.6.4. 今後の計画

今後は、光・エネルギーナノサイエンス重点領域研究の目標である太陽エネルギーの社会への導入を目指し、さらなる電解還元速度の向上、連続電解における生産性向上を目指した改良、生成 Si の純度向上などを行う予定である。

## 2.2.7. 溶融 KF-KCl 中における結晶性シリコン膜の電析

(複合化学過程研究分野)

### 2.2.7.1. 背景

現在、結晶系シリコン太陽電池は、シーメンス法で作製した太陽電池級シリコンをチョクラルスキー法等で結晶塊とし、100~200  $\mu\text{m}$  程度の厚さに切断することで作製されている。しかし、切断工程におけるカーブロス（切りしろロス）が大きい、その後のセル製造工程が複雑であるといった課題があり、コスト増大の一因となっている。我々は、光・エネルギーナノサイエンス重点領域研究の一環としてシリコン太陽電池の大量普及を実現するために、溶融塩電析法により安価な基板上に結晶性シリコン膜を直接成膜する方法を提案し研究している。

### 2.2.7.2. 成果の概要

我々は、図 2 に示すような原理に基づく新規 Si 電析法を提案した（発表論文 1）。溶融 KF-KCl を電解質に用い、安価かつ高純度化が容易な  $\text{SiCl}_4$  を Si イオン源として使用する。溶融塩の成分である KF および KCl は、どちらも水への溶解度が高く、電析物に付着した塩の水洗除去が容易である。まず、各種の電気化学測定を行い、923 K の溶融 KF-KCl 中において、Ag 電極上での  $\text{Si(IV)} + 4\text{e}^- \rightarrow \text{Si}$  の反応が非可逆過程であることを明らかにした（発表論文 1）。また、Ag を基板として結晶性かつ緻密な Si 膜（約 70-80  $\mu\text{m}$ ）が得られることも実証した（発表論文 1）。さらに、923 K の溶融 KF-KCl 中において添加  $\text{Si(IV)}$  イオン濃度および電流密度をパラメータとして種々の電析サンプルを準備し、それらの断面 SEM 観察を行うことで緻密かつ平滑な Si 膜が得られる最適電解条件を明らかにした（発表論文 2）。

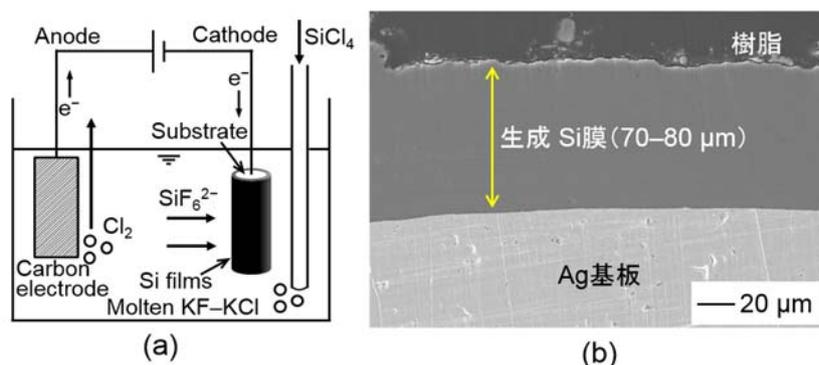


図 1 (a) 太陽電池用シリコン膜の製膜法の原理図. (b) 基板上に成膜した平滑シリコン膜.

(発表論文)

- 1) K. Maeda, K. Yasuda, T. Nohira, R. Hagiwara and T. Homma, “Silicon Electrodeposition in Water-Soluble KF-KCl Molten Salt: Investigations on the Reduction of Si(IV) Ions”, J. Electrochem. Soc., 162 (2015) D444-D448.
- 2) K. Yasuda, K. Maeda, T. Nohira, R. Hagiwara and T. Homma, “Silicon Electrodeposition in Water-Soluble KF-KCl Molten Salt: Optimization of Electrolysis Conditions at 923 K”, J. Electrochem. Soc., 163 (2016) D95-D99.

### 2.2.7.3. 意義（学術的・社会的的重要性）

シリコン系太陽電池の全く新しい製造法につながる可能性があり、社会的に重要な成果である。また、溶融塩中の電析反応に関して、最適電解条件を明らかにした点は学術的にも意義が大きい。

### 2.2.7.4. 今後の計画

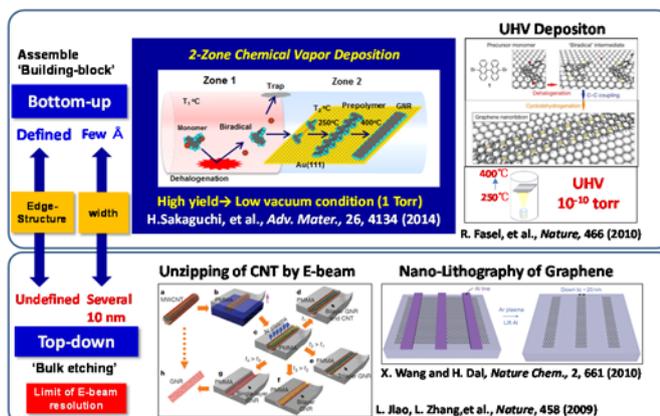
今後は、光・エネルギーナノサイエンス重点領域研究の目標である太陽エネルギーの社会への導入を目指し、Si 膜の品質向上や基板として安価な炭素等を用いることに取組む予定である。

## 2.2.8. 革新的ナノ炭素細線製造法の研究

(分子ナノ工学研究分野)

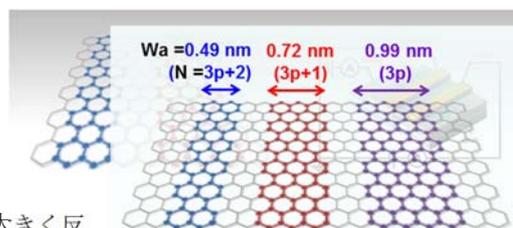
### 2.2.8.1. 背景

金属表面は、有機分子との強い電子的相互作用により、分子を二次元配列させる原子スケールの鋳型である。我々は、単一分子レベルで導電性高分子の長さ・密度・方向・形を任意に制御しながら金属表面上に構築する新しい分子細線合成技術“電気化学エピタキシャル重合”を開発した (*Nature Materials*, 3, 551 (2004))。更に電子的性質の異なる二種類の導電性高分子細線を基板上で連結させることにも世界で初めて成功した (*Science*, 310, 1002 (2005))。金属鋳型上の分子組織化を利用して、これまでに無い新しい機能性物質・材料の表面合成とデバイス化が望まれている。グラフェンナノリボン (GNR) は“有限幅を持つグラフェン”であり、分子幅に依存して優れた半導体的性質を持つことが理論的に予測されている。しかし、従来法では特殊な反応場、超高真空技術が必要であり極微量合成にとどまっている。このため、新しい大量合成法の確立が世界的に望まれている。



### 2.2.8.2. 成果の概要

そこで我々は、従来に無い新しい化学気相成長法 (2ゾーン型化学気相成長法) を開発し、これまで超高真空 (10<sup>-10</sup> torr) 環境を必要とした蒸着合成法を遥かに凌駕した著しい低真空環境 (1 torr) での GNR 大量合成を達成した。今までに GNR の大量合成に成功した例は無い。その理由は、反応系内で芳香族分子ピラジカルを発生させてラジカル重合させなければならないが、系内の極微量の不純物によりピラジカルが失活し、大きく反応効率を妨げるために超高真空環境が必要であるためである (超高真空



蒸着重合の報告 (Fasel, et al., *Nature*, 2010) 等)。もう一つの理由は、超高真空蒸着重合では、加熱した金属基板に蒸発させた前駆体分子を直接吹きかけるためラジカルの生成と重合反応が同一場所で行われるため、それぞれの効率を独立制御できない理由による。本研究では、従来法の欠点を克服し、ラジカル発生場 (ゾーン1) と重合反応場 (ゾーン2) を独立に温度制御する新しい2ゾーン化学気相成長法を開発した。更に、①石英反応管を化学・高温処理することで系内のラジカル失活不純物を極度に減らし、②蒸発させた原料分子を清浄化した高温石英管に吹き付け、ピラジカルを失活させることなく石英管表面に高密度に生成させ、③ラジカルが局在化した石英管面に密着させた金属基板上でラジカル重合と脱水素縮環を効率良く行わせることにより、低真空環境 (1 Torr) にも関わらず従来に無い GNR の高効率合成に成功した。合成した金単結晶表面上の GNR の走査トンネル顕微鏡 (STM) 像は、長さ 20nm の GNR が金 (111) 面上に多層に成長していることが明らかになった。更に、ベンゼン 2 個、3 個、4 個の異なる幅を持つアームチェ型 GNR を金 (111) 基板上に成長させることに成功した (発表論文 1)。これらの GNR の理論予測されていたバンドギャップ値を実験的に初めて明らかにした (発表論文 2)。

1) Hiroshi Sakaguchi, Yoshiyasu Kawagoe, Yoshitaka Hirano, Taku Iruka, Maki Yano, Takahiro Nakae, "Width-Controlled Sub-Nanometer Graphene Nanoribbon Films Synthesized by Radical-Polymerized Chemical Vapor Deposition" 26 (2014) 4134-4138.

2) Hiroshi Sakaguchi, "Bottom-up Massive Production of Graphene Nanoribbons", The 2013 New Diamond and Nanocarbon conference, invited (2014).

### 2.2.8.3. 意義 (学術的・社会的的重要性)

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

### 2.2.8.4. 今後の計画

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

## 2.2.9. 新規ナノ炭素細線の表面成長に関する研究

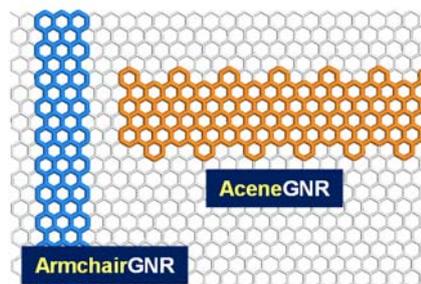
(分子ナノ工学研究分野)

### 2.2.9.1. 背景

従来報告されてきたグラフェンナノリボン (GNR) は、アームチェア型のエッジ構造を持つものがほとんどであり、異なるエッジ構造を持つ GNR の合成が世界的に望まれている。これは、アームチェア型が幅に依存する半導体的性質を持つことが予測されているのに対し、ジグザグ型は磁性を持つことが予測されている。アセン型は、ジグザグ型と同じ成長軸方向を持つ新しい GNR であり、高キャリア移動度が予測されている。

### 2.2.9.2. 成果の概要

我々が開発した2ゾーン型化学気相成長法を用いて、新規に分子設計した“Z型連結分子”を前駆体として用いて、アセン型 GNR の表面合成に成功した。またこの成長過程において従来報告されていない新規な表面化学反応（表面ホモキラル重合、コンフォーメーション依存脱水素縮環反応）を発見した。更に、金(111)基板上に形成した GNR を絶縁基板上にウエットプロセスにより転写・単離する方法を開発し、これまでのボトムアップ合成 GNR のキャリア移動度中で最高の値 ( $0.26\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) や大きな ON/OFF 比など、優れた半導体特性を有することを明らかにした。(発表論文3)



3) “Graphene Nanoribbons Produced by 2-Zoned Chemical Vapor Deposition”, H. Sakaguchi, Pacificchem2015, Honolulu, USA, invited.

### 2.2.9.3. 意義（学術的・社会的重要性）

新規エッジ構造を持つ GNR の構築は材料科学分野で非常に望まれており、本研究はこの目的を実現するための有用な手法を提供する。

### 2.2.9.4. 今後の計画

開発した新規アセン型 GNR の更なる基礎物性の解明やエネルギー応用のためのデバイス構築を目指す。

## 2. 2. 10. タンパク質-DNA ナノ組織体の構築に関する研究

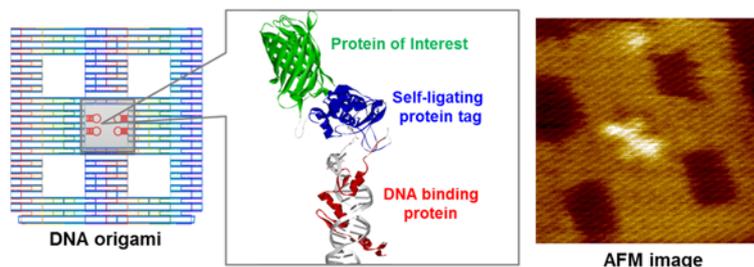
(生物機能化学研究分野)

### 2. 2. 10. 1. 背景

生体内でタンパク質は高機能な分子であり、相互に作用しながら物質生産・変換システムを構築している。このようなシステムを試験管内で実現するためには、基盤上にこれらを精微に配置する技術の開発が必要不可欠である。我々は、DNA origami (P. W. Rothemund, *Nature* **2006**, *440*, 297.) に代表される DNA ナノ構造体が、機能性タンパク質を高精度に配置するための基盤として有用であることに着目し、DNA 結合性タンパク質をアダプター分子とした配置技術の開発に注力してきた。

### 2. 2. 10. 2. 成果の概要

DNA 結合性タンパク質をアダプターとして用いるメリットとしては、遺伝子組み換えによって目的の機能性タンパク質と DNA 結合性タンパク質を融合したキメラタンパク質を容易に作製可能であること、そして多種多様な結合様式や認識配列を持つ DNA 結合性タンパク質が知られており、多種類のタンパク質・酵素を配置するのに選択肢が多いことが挙げられる。我々はこれまでに、DNA 結合性タンパク質である Zinc Finger タンパク質(ZFP) (*Angew Chem. Int. Ed.*, **2012**, *51*, 2421.)や Leucine Zipper タンパク質(bZIP) (*Methods*, **2014**, *67*, 142.)が、機能性タンパク質を配置するためのアダプターとして有用であることを示してきた。しかしながら、これら DNA 結合性タンパク質と DNA 間の相互作用は可逆的であるため、融合タンパク質を DNA ナノ構造体上に定量的に配置するためには過剰量のタンパク質が必要であった。また、過剰なタンパク質を洗浄により除去した場合、DNA ナノ構造体上に配置されたタンパク質も一部解離してしまう問題点もあった。そこで、DNA 結合性タンパク質が DNA ナノ構造体上のアドレスを認識した後に DNA と融合タンパク質の間に共有結合を形成させる技術として、モジュール型アダプター ZF-SNAP を開発した(発表論文 1)。これにより、DNA ナノ構造体上に目的のタンパク質を短時間で定量的に配置することが可能となった。



- 1) E. Nakata, H. Dinh, T. A. Ngo, M. Saimura, T. Morii "A modular zinc finger adaptor accelerates the covalent linkage of proteins at specific locations on DNA nanoscaffolds" *Chem. Commun.* **2015**, *51*, 1016-1019.

### 2. 2. 10. 3. 意義 (学術的・社会的重要性)

DNA ナノ構造体とタンパク質の複合体による機能化を目指した研究は、これまでも試みられている。しかしながら、幅広い研究展開を困難としていたのは、複数のタンパク質・酵素を効率的に DNA 上に固定化するための方法論が希少であったためである。また、その効率や定量性にも大きな問題があった。本研究は、安定的かつ定量的に機能性タンパク質を DNA ナノ構造体の任意の場所に配置することが可能となった。本研究は、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」にも関する研究と位置づけられる。

### 2. 2. 10. 4. 今後の計画

本技術を応用することで、複数の酵素を配置して高効率な物質変換反応を実現することにも既に成功している (3-2.参照)。さらに、複数の酵素を配置できるよう本技術を拡張すること、また本技術で実現された DNA とタンパク質のナノ組織体でしか達成できないような新規な物質変換反応の確立を目指していく。

## 2. 2. 11. DNA ナノ構造体上での高効率な物質変換反応の実現

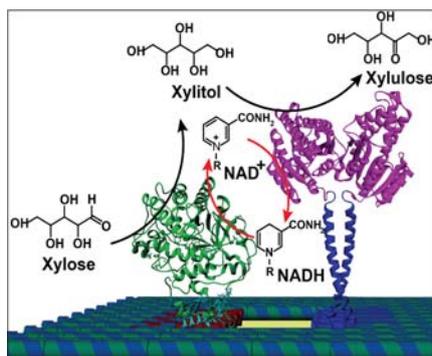
(生物機能化学研究分野)

### 2. 2. 11. 1. 背景

生体内では、複雑に組み合わさったネットワークが多数存在しており、その中で様々な物質が多段階に変換され、さらに相互に干渉しながら生命活動を営んでいる。このような生体内ネットワークに倣い、有用な部分を抽出して、試験管内で再構築することができれば、高機能な物質変換システムの創製が期待される。我々は、DNA ナノ構造体が、機能性タンパク質を高精度に配置するための基盤として有用であることに着目し、DNA 結合性アダプターを開発してきた。その技術を応用し、目的の機能性タンパク質を任意の位置に高精度に配置させたシステム“分子スイッチボード”の構築をおこない、細胞内で見られる複雑なタンパク質ネットワークを模倣した高効率な物質変換反応を人為的に創製することを目指している。

### 2. 2. 11. 2. 成果の概要

これまでに開発した DNA ナノ構造体上に目的タンパク質を配置する DNA 結合性アダプター (*Angew Chem. Int. Ed.*, **2012**, *51*, 2421; *Methods*, **2014**, *67*, 142; *Chem. Commun.* **2015**, *51*, 1016) を複数組み合わせることで、DNA ナノ構造体上に連続する代謝反応を触媒する 2 種類の酵素を配置した分子スイッチボードの開発をおこなった。モデルとなる反応として、酵母におけるキシロースからのエタノール生産経路の最初に位置する重要な 2 段階の酵素反応に着目した。関連する 2 種類の酵素、キシロースリダクターゼ(XR)とキシリトールデヒドロゲナーゼ(XDH)に、それぞれ遺伝工学的手法を用いて DNA 結合性アダプターを融合し、DNA ナノ構造体上に配置した。その上で、2 段階の代謝反応の効率が、空間配置を変化させることでどのように変化するかを詳細に評価した。また、2 種類の分子 (基質と補酵素) が酵素間を移動する場合と、1 種類の分子 (補酵素のみ) が移動する場合における、空間配置の影響についても詳細に検討し、新たな知見を得ることに成功した (発表論文 1)。



- 1) T. A. Ngo, E. Nakata, M. Saimura, T. Morii “Spatially Organized Enzymes Drive Cofactor-Coupled Cascade Reactions” *J. Am. Chem. Soc.* **2016**, *138*, 3012-3021.

### 2. 2. 11. 3. 意義 (学術的・社会的的重要性)

DNA ナノ構造体を基盤とすることで、アドレスを任意の空間位置に配置できるようになった。我々の開発した DNA 結合性アダプターにより、酵素などの機能性タンパク質をアドレスに対して定量的に配置できるようになり、数や距離などのパラメータを変化させることでその連続する代謝反応との相関関係について議論できるようになった。本研究では、実際のバイオエタノール生産プロセスにおいて効率化が望まれる代謝反応に注目し、その高効率化に向けた空間配置に対する知見を得ることに成功した。他のモデルシステムへの展開も容易であり、様々な応用が期待される。本研究は、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」にも関する研究と位置づけられる。

### 2. 2. 11. 4. 今後の計画

本研究で示した DNA ナノ構造体を基盤とした機能性タンパク質のナノ組織体は、様々な生体内システムを試験管内で構築することができる。さらに、関与する複数の機能性分子の空間的配置と機能の相関関係を明らかとしながら、精微に設計された多段階物質変換ナノデバイス (分子コンビナート) の開発への展開を目指していく。

## 2. 2. 12. アミロイド線維形成するペプチドの凝集機構の解明

(生物機能化学研究分野)

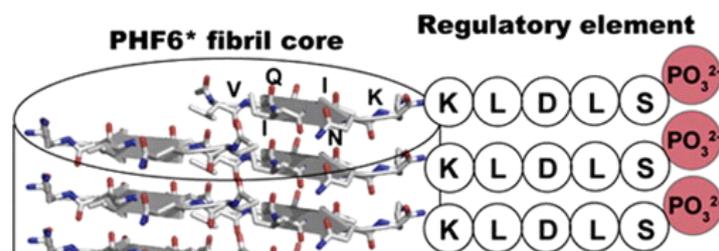
### 2. 2. 12. 1. 背景

環境に配慮したクリーンで高効率なエネルギー利用システムとして、クリーンなエネルギー生産および高効率な物質変換が統合された細胞内エネルギー利用システムが挙げられる。細胞内エネルギー利用システムを社会で構築することができれば、自然環境との調和・共存を目指す持続可能社会の実現が可能となると期待されるが、そのためには、その基本原理に基づいたボトムアップ的システムの構築が必要不可欠である。本研究では、自己組織化し線維を形成するペプチドの構造体形成の原理を明らかにし、テーラーメイドな機能を有する生体高分子構造体設計に必要な条件を明らかにしようとするものである。

### 2. 2. 12. 2. 成果の概要

当分野ではこれまでに、アルツハイマー病に関連する凝集性タンパク質 tau の凝集体形成におけるコア配列と知られ、ペプチド単独でもアミロイド線維を形成する PHF6 について、PHF6 およびそのリン酸化体・アミノ酸変異体を用いて、凝集特性と線維形成に関与する物理化学的特性を明らかにしてきた (*Biochemistry* **2012**, *51*, 1396-1406., *Biochemistry* **2008**, *47*, 11847-11857. など)。PHF6 の線維形成において PHF6 内アミノ酸のリン酸化によって分子間および分子内での静電相互作用が制御されている事を明らかとした。また、被リン酸化部位の周辺残基との位置関係が、その凝集特性に大きく影響を与えることを新たに明らかにしてきた。

tau タンパク質には PHF6 のほかに、同様に線維を形成するペプチドとして、PHF6\* が知られている。PHF6\* のリン酸化が線維形成に与える効果について、PHF6 と同様に PHF6\* のリン酸化体を利用して解析し、pH および分子内および分子間の正味電荷と、線維の形状や形成速度との関連性を明らかにした (発表論文 1)。



3.2.2. PHF6\*(VQIINKKLDLS)におけるリン酸化部位。

- 1) M. Inoue, S. Kaida, S. Nakano, C. Annoni, E. Nakata, T. Konno, T. Morii “Phosphorylation regulates fibrillation of an aggregation core peptide in the second repeat of microtubule-binding domain of human tau.” *Bioorg. Med. Chem.* **2014**, *22*, 6471-6480.

### 2. 2. 12. 3. 意義 (学術的・社会的的重要性)

生体高分子の自己組織化現象の原理の解析は、生理現象の解明につながるだけでなく、高効率な細胞内のエネルギー利用システムを模倣したテーラーメイドな生体高分子構造体を設計・作製し、高度に制御された機能性分子修飾の為の足場や化学反応場を構築するために有効である。タウタンパク質はアルツハイマー病に関連する凝集性タンパク質として知られ、そのリン酸化反応が線維形成に影響を与えることが知られていたが、その詳細な凝集機構についての知見はまだまだ不十分であった。PHF6 および PHF6\* に関するリン酸化と凝集特性との相関性を明らかにした我々の研究成果は、生体高分子集合体の構造制御および機能性の発現に有用な知見となる。また、高齢化社会における課題のひとつとして近年注目される、アルツハイマー病に関連する基礎的な知見としても重要である。

### 2. 2. 12. 4. 今後の計画

本研究で明らかにしたペプチドの構造体形成機構に基づいた分子設計により、リン酸化によるナノ構造形成の制御と機能性バイオマテリアルへの応用を検討していく。

## 2. 2. 13. 自己集合型蛍光プローブを用いたバイオイメージングツールの開発

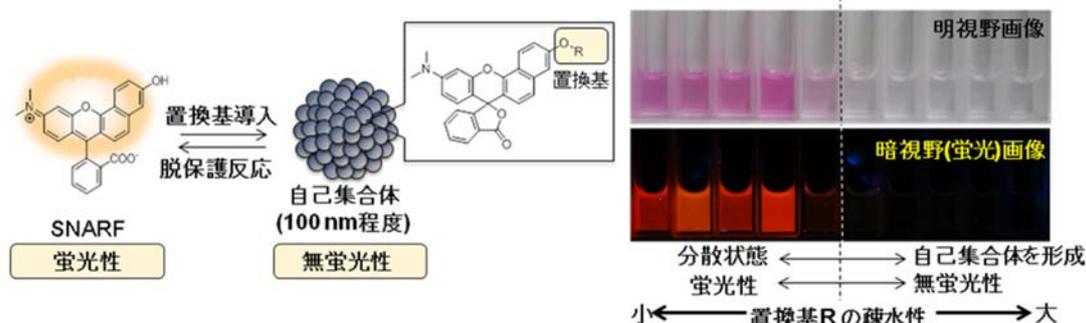
(生物機能化学研究分野)

### 2. 2. 13. 1. 背景

細胞の中で活動する酵素は、その姿形を細胞内で直接捉えることはできないが、様々な生命機能に関与しており、生命機能を理解する上で非常に重要であることは疑う余地もない。さらにそれを利用した医療応用や工学応用などを目指し、細胞機能を人為的に操作するためには、その存在と活性を検出することは非常に重要である。

### 2. 2. 13. 2. 成果の概要

酵素反応を非侵襲的に可視化し、分子レベルで理解することを目的とし、自己集合した蛍光色素誘導体が細胞内酵素との反応をトリガーとして分散することを基本原理とした自己集合型蛍光プローブの開発に成功している (*Bioorg. Med. Chem.*, **2009**, *17*, 6952; *Chem. Comm.*, **2010**, *46*, 3526 など)。より一般性の高いツールとして活用するために、構造と活性の相関関係を詳細に評価し、自己集合型蛍光プローブの合理的設計法を提案することに成功した。殊に導入する置換基の疎水性置換基数により集合状態を予測することも可能となり、さらには細胞内導入過程の同定にも成功している。また、本手法を応用することで、洗浄操作をおこなうことなく、細胞内の pH の変化を検出できる蛍光プローブの開発に成功している (発表論文 1)。さらには、水質環境測定において重要な検出対象であるフッ素イオンを検出することが可能なフッ素イオンセンサーの開発にも成功した (発表論文 2)。



(左) 自己集合型ナノプローブの概念図 (右) 誘導体化の簡便性とデザイン性の一例。置換基の疎水性を指標とすることで、自己集合状態と分散状態をコントロールすることが可能。

- 1) E. Nakata, Y. Yukimachi, Y. Nazumi, M. Uwate, H. Maseda, Y. Uto, T. Hashimoto, Y. Okamoto, H. Hori, T. Morii, "A novel strategy to design latent ratiometric fluorescent pH probes based on self-assembled SNARF derivatives", *RSC Adv.* **2014**, *4*, 348-357.
- 2) E. Nakata, Y. Nazumi, Y. Yukimachi, Y. Uto, H. Hori, T. Morii, "Self-Assembled Fluorescent Nanoprobe for the Detection of Fluoride Ions in Aqueous Solutions", *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **2015**, *88*, 327-329.

### 2. 2. 13. 3. 意義 (学術的・社会的的重要性)

検出対象選択的な蛍光プローブの設計には、検出対象との反応前後でのシグナル変化をどうやって誘起するかが重要であり、そのための合理的な設計戦略の構築は大いに意義がある。本研究で確立した反応前後での蛍光色素の分散性の違いを利用したシグナル変化は、これまでにない新しい検出メカニズムであり、これまでの戦略のみでは、設計が困難である検出対象選択的な蛍光プローブの開発が実現できると期待される。

### 2. 2. 13. 4. 今後の計画

今後は様々な検出対象への用途の拡大を目指す。また、色素骨格を変更することによってより精微な調節が可能となると期待されるため、そのような展開も視野に入れている。

## 2. 2. 14. バイオマスを解析する新しい NMR の方法論の開発とその活用

(エネルギー構造生命科学研究分野)

### 2. 2. 14. 1. 背景

我々は木質バイオマスからバイオエネルギーと各種製品の原料を効率的に取得する手法を確立し、バイオリファイナリーへのパラダイムシフトを志向した研究を行っている。木質バイオマスを利活用する上で、同試料中にどのような物質がどの程度含まれているのかを知る事は必須である。木質バイオマス中の多様な構成成分の物質量の決定には、NMR 法の一つである HSQC スペクトルが有用で、現在広く使われている。しかし構成成分の分子量や化学構造の違い等によって、物質量の定量値が歪められてしまうという問題があった。

### 2. 2. 14. 2. 成果の概要

NMR 法の一つである TROSY スペクトルを用いてこの歪みを正す事で、正確な物質量を得る方法論 (TAF(Tolerant of Any Factors)法) を開発する事に成功した。実バイオマス試料を用い、今回開発した手法が実際に有効に機能する事が証明された (発表論文 1)。また各種 NMR 法を駆使することにより、バイオマスの有用主成分であるリグニン (発表論文 2,3) および糖 (発表論文 4,5) に関する解析を進展させた。

(発表論文)

- 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) Ando, D., Nishimura, H., Katahira, M., Takano, T., Yano, H. and Nakatsubo, F. (2013) Holzforschung, 67, 249-256. "Multi-step degradation method for  $\beta$ -O-4 in lignins:  $\gamma$ -TTSA method. Part 2. Reaction of lignin model polymer (DHP)"
- 3) Ando, D., Nakatsubo, F., Takano, T., Nishimura, H., Katahira, M. and Yano, H. (2013) Holzforschung, 67, 835-841. "Multi-steps degradation method for  $\beta$ -O-4 linkage in lignins:  $\gamma$ -TTSA method. Part 3. Degradation of milled wood lignin (MWL) from Eucalyptus Globulus"
- 4) Kondo, K., Umezu, T., Shimura, S., Narizuka, R., Koizumi, J., Mashima, T., Katahira, M. and Takeda, M. (2013) Internat. J. Biol. Macromol., 59, 59-66. "Structure of perosamine-containing polysaccharide, a component of the sheath of *Thiothrix fructosivorans*"
- 5) Kawasaki, Y., Kondo, K., Narizuka, R., Endo, T., Katahira, M., Kawamura, I., Sato, M. and Takeda, M. (2016) Internat. J. Biol. Macromol., 82, 772-779. "Presence of N-L-lactyl-D-perosamine residue in the sheath-forming polysaccharide of *Thiothrix fructosivorans*"

### 2. 2. 14. 3. 意義 (学術的・社会的重要性)

今回開発した方法論は、バイオマスに含まれる有用構成成分の物質量を正確に定量できる世界初の手法であり、今後のバイオマスの利活用にはずみがつくと期待される。なお当該研究成果に関するプレスリリースを行い、成果を報じる記事が化学工業日報、日経バイオテク等に掲載された。

### 2. 2. 14. 4. 今後の計画

バイオマスを解析・利活用する為の方法論の開発を今後も推進し、これを実バイオマスに応用し、バイオリファイナリーへのパラダイムシフトに貢献していく。

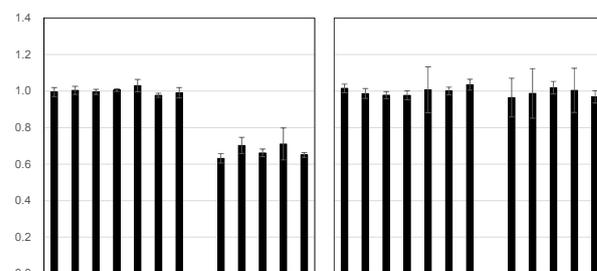


図 リグニン2量体・カードラン・リグニン2量体・カードラン  
に対し、HSQC スペクトルを用いて物質量の決定を行  
うと、高分子量のカードランの物質量が低く見積  
もられてしまう (左)。TROSY 法によって歪みを較  
正すると物質量を正確に決定する事ができる (右)。

## 2. 2. 15. リアルタイム NMR 法を活用した複雑な酵素反応機構の解明

(エネルギー構造生命科学研究分野)

### 2. 2. 15. 1. 背景

ヒトがもつ APOBEC3G タンパク質 (A3G) は、HIV の遺伝子に含まれるシトシン塩基をウラシル塩基に脱アミノ化することで HIV の遺伝情報を破壊する抗 HIV 因子である。A3G は HIV が産生する一本鎖 DNA (ssDNA) にまず非特異的に結合し、引き続きその ssDNA 上をスライディングして標的となるシトシンに到達、そして脱アミノ化反応を引き起こす。一連の反応は、ssDNA 上の複数の標的シトシンにおいて同時並行で進行する。このように A3G の酵素反応機構は複雑であるため、新たな解析方法の開発が望まれていた。

### 2. 2. 15. 2. 成果の概要

A3G が HIV ゲノムのモデル ssDNA に含まれる複数のシトシンを同時並行で脱アミノ化する反応を、NMR 法により同時かつリアルタイムで追跡した。そして、A3G の複雑な酵素反応モデルを構築し、得られたデータを定量的に解析した。その結果、A3G は ssDNA 上、方向非依存的にスライディングすること、しかし、5'端方向にスライディングしているときに標的シトシンに到達した方が、その逆よりも脱アミノ化反応の速度が速いことがわかった (発表論文 1)。また ssDNA にヌクレオチド誘導体を導入したり、塩強度や pH の溶液条件を変えたりするなどして上記 NMR 法を行ったところ、A3G は主に ssDNA のリン酸骨格と静電相互作用することによりスライディングすることが明らかとなった (発表論文 2)。

(発表論文)

- 1) Ayako Furukawa, Kenji Sugase, Ryo Morishita, Takashi Nagata, Tsutomu Kodaki, Akifumi Takaori-Kondo, Akihito Ryo, Masato Katahira, "Quantitative analysis of location- and sequence-dependent deamination by APOBEC3G using real-time NMR spectroscopy", *Angew Chem Int Ed Engl*, 53 (2014) 2349-2352.
- 2) Keisuke Kamba, Takashi Nagata, Masato Katahira, "Catalytic analysis of APOBEC3G involving real-time NMR spectroscopy reveals nucleic acid determinants for deamination", *PLoS One*, 10 (2015) e0124142.

### 2. 2. 15. 3. 意義 (学術的・社会的的重要性)

A3G の抗 HIV 活性の根幹である脱アミノ化反応の動作機構を解明したことで、A3G を利用した抗 HIV 薬の創製が活発化すると期待できる。また、開発した酵素反応のリアルタイム NMR 法と定量解析法は、生体内カスケードの解析及びバイオマスの利活用に関連した酵素群の反応解析にも応用できる。

### 2. 2. 15. 4. 今後の計画

微生物やそれが産生する酵素によってバイオマスを分解し、エネルギーや化成品等の有用物質を得ようという研究を現在行っている。今回開発したリアルタイムモニタリング法を進展させ、時事刻々変わる分解生成物の動態を解析することに活用することを、進めている。

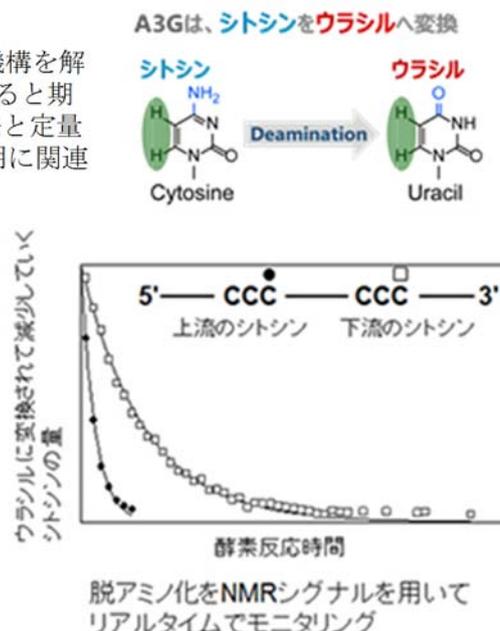


図2 (上) A3G は、HIV の DNA のシトシン塩基をウラシル塩基に脱アミノ化することでその遺伝情報を破壊する。(下) DNA 上の複数箇所において同時並行で進行する酵素反応をリアルタイム NMR 法でモニタリング。

## 2. 2. 16. 物質複合系の非線形挙動

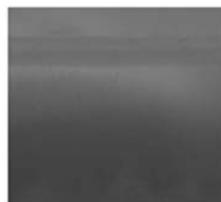
(センター附属研究分野：理論生物物理学)

### 2. 2. 16. 1. 背景

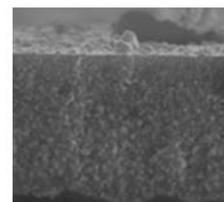
物質複合系の挙動は、各物質要素の挙動の重ね合わせからは想像もつかないものになり得る。その解明には、別々に体系化された異分野の統合が必要である。例えば、金属-電解質水溶液界面に対しては、電解質水溶液なる古典系と金属なる量子系の接続という問題が生じる。生体分子に対しては、水が決定的に重要な役割を果たすため、生化学のみならず液体の統計力学の知識が不可欠となる。物質複合系は斬新かつ高度な機能発現の宝庫であり、その研究は分野間の垣根を越えた新学術領域の創製を啓発する。

### 2. 2. 16. 2. 成果の概要

比表面積の大きい多孔質材料は、化学反応などに関連した種々の目的に利用できる。しかし、ナノ細孔内における化学反応では、反応が起こるとバルクから細孔内への反応成分の拡散による供給がすぐに困難化し、反応のさらなる進行が妨げられるという問題がある。我々は、多孔質シリコン電極を用いた白金析出反応（反応成分は白金錯イオン、化学反応は白金の電析反応）を例として取り上げ、この種の問題を解決する斬新な方法を開発した（発表論文 1, 2）。電極表面を疎水性にし、サイズが大きく疎水的な白金錯イオンを用いる。理論解析結果によると、ある細孔径ではイオン濃度が閾値よりも高い場合に、あるイオン濃度では細孔径が閾値よりも小さい場合に、イオン濃度がバルクにおけるよりも桁違いに高い第 2 相で細孔内が満たされる。表面誘起相転移の典型例である（図参照）。実験結果によると、転移が起こる条件下で電析反応が劇的に加速され、理論解析結果とつじつまが合う。以上は電気化学者との共同研究である。



イオン濃度 < 閾値  
細孔径 > 閾値



イオン濃度 > 閾値  
細孔径 < 閾値

白金錯イオンを細孔内に拡散で供給することが困難。細孔内が白金で満たされるのに長い時間がかかる。

白金錯イオン濃度が桁違いに高い第 2 相を細孔内に形成すべく、細孔内表面-白金錯イオン間に長距離性の強い力が作用。細孔内が白金で迅速に満たされる。

- 1) R. Koda, A. Koyama, K. Fukami, N. Nishi, T. Sakka, T. Abe, A. Kitada, K. Murase, and M. Kinoshita, "Effect of Cations Species on Surface-Induced Phase Transition Observed for Platinum Complex Anions in Platinum Electrodeposition Using Nanoporous Silicon", *Journal of Chemical Physics*, **141**, 074701(1-11) (2014).
- 2) Koyama, K. Fukami, T. Sakka, T. Abe, A. Kitada, K. Murase, and M. Kinoshita, "Penetration of Platinum Complex Anions into Porous Silicon: Anomalous Behavior Caused by Surface-Induced Phase Transition", *Journal of Physical Chemistry C*, **119**, 19105-19116 (2015).

### 2. 2. 16. 3. 意義（学術的・社会的的重要性）

表面誘起相転移は、バルクが単相として安定な条件下でも起こり得る。疎溶媒性表面間に挟まれた微量の疎溶媒成分を含む極性溶媒や、親溶媒性表面間に挟まれた微量の親溶媒成分を含む無極性溶媒に対して起こり易い。拘束空間内の流体の特異挙動なる新たな学問分野の開拓のみならず、センシングデバイス、触媒、燃料電池の電極構造体など、ナノ細孔構造を利用した高機能性材料の開発にも結び付く。

### 2. 2. 16. 4. 今後の計画

反応には直接関与しない成分を添加し、操作変数を増やすことによって、ナノ空間内化学反応の制御性を向上させる研究をさらに推し進める。固体物理学者や生化学者、構造生物学者との共同研究により、半導体-電解質水溶液界面やバイオセンサーの開発などの新たな課題とも取り組みたい。

## 2. 2. 17. 生体分子の自己組織化および分子認識機構の統一的解明

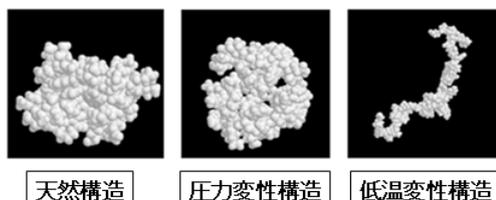
(センター附属研究分野：理論生物物理学)

### 2. 2. 17. 1. 背景

バイオエネルギーナノサイエンスでは、生体分子が持つ自己組織化や分子認識の機能が利用される。とはいえ、それは多種多様であり、個別に理解することはあまり意味が無い。それら(ATP 駆動およびプロトン駆動蛋白質の機能発現機構の解明を含む)を横断的に眺め、統一的に解明できる理論体系を構築することが不可欠である。

### 2. 2. 17. 2. 成果の概要

水の並進配置エントロピー効果の生体分子-水間多体相関成分を主軸とした独自の理論により、以下に示す種々の課題で成功を収めた(発表論文 1-3):疎水性および親水性水和理論の確立;自己組織化で形成された構造が高压をかけると崩れること(蛋白質の圧力変性、アミロイド線維の崩壊、アクチン重合体のモノマーへの解離、蛋白質会合体の崩壊など)および低温では構造形成力が弱まること(蛋白質の低温変性、ミオシンとアクチンの結合力の低下、非イオン性界面活性剤のミセルの平均サイズの低下など)の統一的理解(図参照);種々のタイプの分子認識機構の統一的説明;シャペロンによる蛋白質折り畳み援助機能の発現機構の解明;ABC トランスポーターおよび TolC による多剤排出機構の解明;AcrB の機能的回転機構の解明;ATP 加水分解サイクルおよびプロトン移動の役割に対する新しい考え方の提案;アミノ酸置換および共溶媒の添加による水溶性蛋白質の立体構造安定性変化のメカニズムの解明;G 蛋白質共役型受容体(GPCR)の立体構造安定性を向上させるアミノ酸置換の理論的予測法の構築。



- 1) M. Kinoshita, "A New Theoretical Approach to Biological Self-Assembly", *Biophysical Reviews*, **5**, 283-293 (2013).
- 2) S. Yasuda, T. Hayashi, and M. Kinoshita, "Physical Origins of the High Structural Stability of CLN025 with Only Ten Residues", *Journal of Chemical Physics*, **141**, 105103(1-14) (2014).
- 3) H. Oshima and M. Kinoshita, "Essential Roles of Protein-Solvent Many-Body Correlation in Solvent-Entropy Effect on Protein Folding and Denaturation: Comparison between Hard-Sphere Solvent and Water", *Journal of Chemical Physics*, **142**, 145103(1-15) (2015).

### 2. 2. 17. 3. 意義(学術的・社会的重要性)

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

### 2. 2. 17. 4. 今後の計画

構造生物学者や製薬会社との共同研究により、GPCR の立体構造安定性を向上させるアミノ酸置換の理論的予測に重点を置く。立体構造が未知の GPCR に対する予測を可能にし、関連する病(アレルギー・胃潰瘍・高血圧・うつ病・不整脈など)の治療薬の開発に繋げる。EP4 に対してすでに立体構造決定を実現している。サーモフィリックロドプシン(TR)をさらに熱安定化させ、以下のことを目指す:マウスの脳の中に TR を発現させ、それに光刺激を与えることによってマウスを操ること(オプトジェネティクス)を可能にし、パーキンソン病の治療に役立てる;TR をセンサーチップとして利用する。

### 3. 研究部門・研究分野における研究の現状

### 3. 研究部門・研究分野における研究の現状

研究所の3部門である「エネルギー生成研究部門」、「エネルギー機能変換研究部門」および「エネルギー利用過程研究部門」は、平成8年（1996年）の改組以来、当初の目標に沿って、また、在り方委員会による提言等も取り入れながら、研究・教育活動を進めてきた。平成22年度からスタートした第2期中期目標・中期計画では、附属エネルギー複合機構研究センターを軸とした「先進プラズマ・量子エネルギー研究」および「光・エネルギーナノサイエンス研究」の2つの重点複合領域研究を推進するとともに、エネルギー理工学に関する世界レベルの質の高い国際共同研究の遂行と国際的な人材の養成を目指し、「国際流動・開発共同研究」を展開してきた。分野に特化した、いわゆる専門性の高い研究においては、その分野における最先端の研究を先導するとともに、先端的研究から見えてくる融合研究の必要性や新領域研究の動向など、常に俯瞰的な視野に立ち、先進エネルギーの研究に携わってきた。これらの一連の研究成果は、各専門分野において、高く評価されている。平成25年度からは、第2期中期目標・中期計画の後半に入り、これまでの研究部門・研究分野における研究の方向性を継続するとともに、第3期中期目標・中期計画に向けて新たな研究の展開の準備を進めた。

平成23年度から開始された文部科学省拠点形成促進事業「ゼロエミッションエネルギー研究拠点」、核融合科学研究所との双方向型共同研究、先端研究施設共用促進事業（ADMIRE計画）、平成25年開始の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」、平成27年度からは新たに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」による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形成などを推進し、研究部門・研究分野の研究に新たな展開を図っている。

エネルギー科学研究科の協力講座としての学生教育の視点からは、エネルギーを取り巻く環境は、ともすれば大きく変化しうるが、従来の「研究分野」の構成を維持し、エネルギー科学研究科との協議を継続し、新研究体制の下、協力講座として学生教育を進めてきた。今後より社会に優秀な人材を供給すべく教育環境の整備を行っていく。

各部門、分野での研究の進展に伴い、研究環境の改善、研究資金の増強など、以前からの課題については、外部資金の積極的獲得や研究所外プロジェクトへの積極的参加、また、研究所としての計画的な施設整備などの努力を継続しているものの、特に研究資金増強に関しては、今後も一層の努力が必要である。また、本学で進められている定数削減の中において、分野構成の再編、さらには附属センターの位置づけを明確にしつつ、今後、将来計画を検討していく必要がある。

各部門・分野の構成人員（平成28年3月31日現在）は資料編（II）1.1節に示した。各部門・分野における人事異動の状況は、資料編（II）1.3.1節に記載している。なお、各研究分野の最近の主要な研究課題は資料編（I）2章に、研究成果に対する評価の状況については同資料編4章にまとめている。また、各分野の財政の概況については、資料編（II）2.1節に示した。

### 3.1. エネルギー生成研究部門

平成8年(1996年)の研究所改組以来、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。量子放射エネルギー生成では、テラヘルツ領域から、赤外線を発生する自由電子レーザー、 $\gamma$ 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的设计と社会環境影響の研究も展開している。本研究部門の主たる研究対象は量子、粒子、プラズマなどの物理と工学であり、さらにエネルギーの高品位化と社会的受容性を目指した学際領域にも視野を広げ、他の2研究部門、即ちエネルギー機能変換、エネルギー利用過程両研究部門との密接な連携はもとより、他分野・他部局ならびに学外研究機関との共同研究を鋭意進めている。

外国人客員研究分野には、世界的にも優秀な研究者を3か月ずつ招聘し、様々な分野の研究を行うとともに、国際的な協力関係の構築も目指している。

## 1. 構成員

教授：大垣英明、准教授：紀井俊輝 (H20. 11～)、助教：全炳俊 (H23. 7～)、  
特定講師：フーマンファルザネ (H27. 10～)

## 2. 研究の概要

量子放射エネルギー研究分野では、高品質高エネルギー電子ビームの発生と中赤外から THz 帯域の自由電子レーザーの発生及び自由電子レーザー利用研究、レーザー逆コンプトン散乱を用いた高輝度 X 線・ $\gamma$ 線ビームの発生と $\gamma$ 線を利用した核セキュリティ技術研究、超伝導技術による高強度周期磁場生成の研究を行っている。また、ASEAN 地区とのエネルギーに関する共同研究・教育事業では、SATREPS での低品位炭・バイオマスの溶媒改質法の研究や、SICORP による JASTIP (WP2) 事業の推進を行っている。

## 3. 主な研究成果

### 3.1. 京都大学小型中赤外自由電子レーザーの高性能化に関する研究 (発表論文 1-5)

当分野では小型の線形加速器を用いた中赤外自由電子レーザーの開発を行っており、平成 20 年度にレーザー発振を達成した後、研究所内・学内・学外ユーザへ大強度中赤外レーザーを供給している。1) 非破壊型ビーム位置モニタ導入とリアルタイム位置測定に基づく制御の導入による自由電子レーザーの安定性向上、2) アンジュレータと新設計光共振器の導入による発振可能波長域の拡張、3) 既存電子銃の熱陰極へのピコ秒紫外レーザー照射により発生させた電子バンチを用い、中赤外自由電子レーザーピークパワーの増強等を達成し、利用研究に貢献した。

### 3.2 THz 自由電子レーザー装置開発に関する研究 (発表論文 6-8)

高周波電子銃・バンチ圧縮器・アンジュレータで構成される非常にシンプルな小型 THz 自由電子レーザー装置の開発を進めている。これまでに高周波電子銃の運転条件とバンチ圧縮条件に関する数値計算による検討に基づき、電子銃・集束電磁石・偏向電磁石を設置し、ピコ秒紫外レーザーにより光電効果による電子を電子銃に供給し、電子ビームを発生させそのビーム特性を調査した。

### 3.3 中赤外自由電子レーザーによる炭化ケイ素の選択的格子振動励起の直接的証明 (発表論文 9)

炭化ケイ素の電子伝導等の物性は電子格子相互作用が重要な役割を担っており、その相互作用解明に特定の振動モードを選択励起 (選択的格子振動励起) する技術が必要とされている。本論文では、中赤外自由電子レーザーによって炭化ケイ素の選択的格子振動励起が可能であることを、アンチストークスラマン散乱分光法を用いて直接的に証明した。

### 3.4 レーザー逆コンプトン $\gamma$ 線と NRF による核物質検知装置の開発 (発表論文 10)

港湾施設に設置し、輸出入される 20 フィートコンテナに隠匿された核物質を検知する装置開発を、平成 22 年度から平成 26 年度にかけて、JST プログラムのもとに行い、物流を妨げない処理速度で核物質検知が可能な装置の開発に成功した。本論文では本装置に必要な $\gamma$ 線検出器の配置の最適化を計算器コード GEANT4 を用いて行い、核物質検知に必要な測定時間を評価した。

### 3.5 バルク超伝導体内部の遮蔽電流を用いた磁場分布制御法の研究 (発表論文 11)

複数のバルク超伝導体を空間中に適切に配置し、外部磁場変化を与えたときに励起される 10 K 程度で 10 kA/mm<sup>2</sup> を超える遮蔽電流を制御することで交互に磁場の向きが変わる複雑な磁場分布を生成できる。本論文では、複雑な数値計算によらず直感的な方法で磁場分布をデザインする手法を紹介し、一様磁場、傾斜磁場、ヘリカル磁場を例にバルク超伝導体配置の方法を示した。

### 3.6 低品位炭・バイオマスの溶媒改質法の研究 (発表論文 12-13)

JST と JICA が支援する SATREPS と呼ばれる 2 国間プロジェクトの一環として「低品位炭とバイオ

マスのタイ国におけるクリーンで効率的な利用法を目指した溶剤改質法の開発」を平成 25 年度より 5 年の予定で実施し、タイ側研究者の受け入れ、日本側研究者のタイでの研究指導、タイ側研究機関への種々の実験機材の導入を主活動とした共同研究を推進している。バイオマス廃棄物から炭素繊維や製鉄用コークス製造用の粘結材の製造技術の開発に成功したほか、溶剤改質物が高品位の固体燃料として利用できることなどを明らかにしている。

### 3.7 国際教育事業

21 世紀 COE や GCOE で進めてきた SEE Forum 活動の推進を継続し、11<sup>th</sup>~13<sup>th</sup> SEE Forum (11<sup>th</sup>:2013 年 12 月、フィリピン、12<sup>th</sup>:2014 年 11 月、タイ、13<sup>th</sup>:2016 年 2 月、タイ)を開催し、アジア地区の大学・研究機関との交流を行なっている。またタイ国ラジャマンガラ工科大学タンヤブリ校と共同で EMSES 国際会議を継続開催し(11<sup>th</sup>:2013 年 12 月、プーケット、12<sup>th</sup>:2015 年 6 月、クラビ)、主に地域の若手研究者を対象にエネルギー研究の発展に貢献している。このような取り組みの発展として、2009 年度よりエネルギー教育事業である、UNESCO-COMPETENCE プログラムに参画するとともに、ODA-UNESCO 支援事業としてヴェトナム、ラオス、カンボジア、ミャンマーでのエネルギー科学教育事業を展開してきた。これらは更に、ASEAN University Network (AUN) と共同で 2012 年度開始された、大学の世界展開力事業『「人間の安全保障」開発を目指した日アセアン双方向人材育成プログラムの構築』へと発展するとともに、JSPS の頭脳循環プログラムによる若手研究者招聘・派遣事業(2014-2016 年度)、更には 2013 年度からの SATREPS (項目 3.6 参照)といったプロジェクトへと発展している。2015 年度には JST の戦略的国際共同研究プログラムに提案した「日アセアン科学技術イノベーション共同研究拠点」が採択され、ASEAN との国際共同研究プラットフォーム形成を開始した。

#### (発表論文)

- 1) H. Zen, et al., Proceedings of FEL2012, Pages 449-452 (2013)
- 2) H. Ohgaki, et al., Proceedings of IPAC2013, Pages 2968-2970 (2013).
- 3) K. Okumura, et al., Proceedings of FEL2013, Pages 602-605 (2013).
- 4) H. Zen, et al., Proceedings of FEL2013, Pages 711-714 (2013).
- 5) H. Zen, et al., Proceedings of IPAC2014, Pages 1745-1747 (2014).
- 6) S. Suphakul, et al., Proceedings of FEL2014, Pages 501-504 (2015).
- 7) K. Damminsek, et al., Proceedings of FEL2015, Pages 85-88 (2015).
- 8) S. Suphakul, et al., Proceedings of IRMMW-THz2015 (2015)
- 9) K. Yoshida, et al., Applied Physics Letters, American Institute of Physics, Vol.103, 182103 (2013)
- 10) H. H. Negm, et al., 2015 IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security, DOI:10.1109/THS.2015.7225324 (2015)
- 11) T. Kii, Journal of Physics: Conference Series 695, 12005 (2015)
- 12) X. Li, et al., Energy & Fuels, vol. 28, No.9, Pages 5690-5695 (2014)
- 13) R. Ashida, et al., ISIJ International, vol. 54, No. 11, Pages 2432-2438 (2014)

## 1. 構成員

教授：小西哲之、笠田竜太 (H23. 12～)、助教：竹内右人 (H8. 5～)

## 2. 研究の概要

本研究分野は核融合を中心とする先進的なエネルギーシステムについて、特に核融合反応で扱わなければならない高エネルギー中性子やその他の粒子のエネルギーの変換、使用機器について、その構成材料やデバイス、システムを設計、開発するとともに、その社会や環境への適合性を、経済性や社会的影響、環境中での放射性物質の移行、気候変動問題への貢献、世界エネルギーモデルにおける影響まで含めて、検討評価する。斬新な発想に基づく先鋭的なエネルギー利用機器を実験室規模で試験し、原理実証を行う一方では、世界レベルで 100 年程度の視野でのエネルギーシステム全体を考察し、またその結果を個々の核融合装置の設計や開発戦略に反映するという手法を取っている。

## 3. 主な研究成果

### 3.1. バイオマス・核融合ハイブリッドシステムに関する研究 (発表論文 1)

本研究は核融合エネルギーを用いて廃棄物系バイオマスを高温吸熱反応によって燃料 ( $\text{CO}+\text{H}_2$ ) 化するという独創的な概念に基づく核融合炉エネルギー利用システムの設計を中心としているが、核融合エネルギーの社会・環境適合性評価を含むため極めて広い視野を持つ。炉設計においては ITER 規模の比較的小型で数 100 MW 出力の核融合炉設計を提案した。バイオマス核融合ハイブリッドでは、吸熱反応の利用により熱機関の効率の影響を受けない一方、バイオマス本来の持つ化学エネルギーも有効に利用できるため、核融合発電で主半径 8m 以上でなければ正味のエネルギー生産が行えないのに対し、主半径 5～6 m で、しかもパルス炉でも成立する。LiPb ブランケットと、10MW/m<sup>2</sup> 以下のダイバータで、ポンプ動力も含めてエネルギー収支を評価し、特に発電に対しても、製造燃料を SOFC と組み合わせることで効率、低コストで発電できることを示した。

さらに本研究の延長では、製造燃料中に含まれるトリチウムが法定濃度限度を大きく下回るようなシステム設計のウィンドウを示すとともにそれが十分可能である技術的な概念を提案し、そのトリチウムの長期広域での拡散蓄積挙動を評価した。核融合発電所からの通常放出トリチウムが、被ばく量で問題にならない一方、十分環境中で検出可能であることから風評被害の恐れがあることは既報であるが、この燃料使用によるトリチウム環境挙動では、特定の施設に汚染は集中せず、経路を工夫すれば環境蓄積も防げること、また風評被害を起しにくいことも示した。

一方では、核融合電力の持つ本質的な不安定性の電力グリッドへの影響評価を行い、核融合炉の導入可能なグリッド条件を示した。バイオマスハイブリッドはこの制約を受けない。

### 3.2. 核融合炉トリチウム燃料自給法に関する研究 (発表論文 2)

本研究は従来核融合原型炉では不可欠と思われていた初期装荷用トリチウムが不要であるという概念に基づいている。さらにシステムダイナミクスコードを用い、重水素 NBI による DD 反応を主体とした試験運転を行ったときのトリチウム生成量を評価し、数か月の運転で DT 定常運転時のインベントリーに相当するトリチウムが自給可能であることを明らかにした。さらに、DD および DT パルス運転における燃料系のトリチウム挙動を解析した結果、燃料系各部に分散したトリチウムが、最終的には複合的な時定数で同位体分離から燃料貯蔵系に回収される特性を明らかにした。この結果を用いて原型炉の現実的な運転シナリオの検討を行い、実質的に初期装荷トリチウムが全く不要であることを示した。LiPb ブランケットは、トリチウム増殖比の制御性などの利点を持つが、DD 反応では増倍反応が有効に活用しにくいことも示した。

### 3.3. 核融合炉液体増殖ブランケットからのトリチウム抽出法の開発 (発表論文 3)

真空中を落下する液滴中での水素同位体輸送が、静的な拡散より約 2 桁大きいことを見出し、それに基づいて高効率なトリチウム回収が低落差で行えることを指摘した。これにより例えば、LiPb を限られた空間で循環する TBM などにも利用可能となる。この原理については、多数ノズルで液滴を落下させた時の相互作用の評価の課題が残っており、その影響が十分小さい見通しであることを解析で確認した。この技術を用いれば、高温で循環する LiPb ブランケットシステムにおいて、特に複雑なトリチウム回収媒体などを導入せずに、高純度のトリチウムが回収でき、ポンプ動力などの懸念も少ない。LiPb を主案の一つとする欧州がこの技術に関心を持っており、本研究所との間での共同研究が計画されている。

### 3.4. 核融合炉ダイバータにおける ELM 様熱負荷の影響に関する研究（発表論文 4）

トカマク核融合装置では、閉じ込めのよいモードでは、ELM と呼ばれる急峻なピークを持つ不安定性が知られている。本研究は、この過渡的、かつ空間的に限定された熱負荷が、それまで平均値では問題とならなかった大きさでも極端に大きな応力を瞬間的に及ぼすことを見出し、指摘した。この熱負荷はレーザーで実験的に模擬することができ、その影響は定性的に一致した。今後のダイバータ開発、特に ITER や原型炉での影響評価に重要な成果である。

さらに、熱移送装置としてのダイバータ開発を進め、プラズマ対向面にはタングステンの薄板を水中爆発接合で接着する方法を開発し、その効果を評価した。また、ヒートシンク材に銅合金の使用を検討するとともに、熱輸送系にヒートパイプ概念を組み込んだブランケット素子を開発した。これにより少ない温度差で高温の熱をダイバータから熱利用系に輸送することが可能となり、核融合エネルギーの実用化に寄与するダイバータ概念が原理的に示されたことになる。

#### （発表論文）

- 1) Ibano, K., Kasada, R., Yamamoto, Y., Konishi, S., “Neutronics and pumping power analyses on the Tokamak reactor for the fusion-biomass hybrid concept”, *Fusion Engineering and Design*, 88 (2013) 2881-2884.
- 2) Kwon, S., Sato, S., Kasada, R., Konishi, S., “Neutronics of SiC- high temperature blanket for tritium production”, *Fusion Science and Technology* 64 (2013) 599-603.
- 3) Okino, F., Noborio, K., Kasada, R., Konishi, S., “Enhanced mass transfer of deuterium extracted from falling liquid pb-17li droplets”, *Fusion Science and Technology* 64 (2013), pp. 543-548.
- 4) Gwon, H., Matsuda, S., Kasada, R., Konishi, S., “Evaluation of thermal structural behavior of divertor under ELM”, *Fusion Engineering and Design* 98-99 (2015) 1318-1322.

## 1. 構成員

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

## 2. 研究の概要

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

## 3. 主な研究成果

### 3.1. Heliotron Jにおける ECCD を用いた高エネルギー粒子励起 MHD モードの安定化 (発表論文 1)

Heliotron Jにおいて、第 2 高調波電子サイクロトロン電流駆動 (ECCD) を用いて高エネルギー粒子励起 MHD モードの安定化を行った。中性粒子ビーム入射によって励起された、高エネルギー粒子励起 MHD モードの一つである 60-90kHz の高エネルギー粒子モード (EPM) を counter-ECCD を用いて安定化することに成功した。EC 駆動電流をスキャンした実験において、安定化には磁気シアに閾値があることを明らかにした。

### 3.2. JT-60SA における ECRH アシストプラズマ着火の 1 次元解析 (発表論文 2)

現在、日本原子力研究開発機構において建設が進められている JT-60SA トカマクにおける第 2 高調波 X-mode ECRH によってアシストされたプラズマ着火に 1 次元モデルを用いて解析した。電子・イオンのエネルギー輸送方程式、電子・水素原子の粒子輸送方程式、及び、トロイダル電流方程式から構成されるモデル方程式を用いた解析の結果、プラズマ着火成功には ECRH に閾値があり、プラズマ着火成功のために約 1MW の ECRH パワーが必要であることを示した。閾値パワーは誤差磁場に強く依存し、計画されている最大 ECRH パワーでは 8 mT 以下に抑える必要がある。

### 3.3. ヘリオトロン J 周辺プローブ計測による揺動研究 (発表論文 3、4)

ヘリオトロン J プラズマの周辺プラズマ揺動を主として静電プローブを用いて研究を進めており、成果として(i)MHD バースト時の周辺プラズマポテンシャルの変化と、(ii)ヘリオトロン J 装置での長距離相関現象の発見、(iii)超音速分子ビーム入射時の周辺揺動の応答、(v)長距離相関現象に対する水素同位体効果について明らかにした。

### 3.4. 解析信号法の揺動解析法の開発 (発表論文 3、5)

揺動解析において、非線形的挙動を示す MHD バーストなどの表現には広く使われている高速フーリエ解析に対し、瞬時振幅・瞬時位相を評価可能である解析信号がより適している。本研究では解析信号を用いて瞬時位相差を評価することを揺動解析法として提案し、ビーム放射分光計測で得られた揺動信号に適用することで MHD バーストの構造の時間発展を詳細に明らかにした。

### 3.5. 遠赤外レーザー干渉計の開発とそれを用いた物理研究 (発表論文 6-9)

遠赤外レーザー干渉計の設計・開発、そして開発した干渉計を用いて物理研究を進めている。多チャンネルの干渉計システムの設計と並行し、1 チャンネルの遠赤外レーザー干渉計の開発・構築を終え運用を開始した。ヘリオトロン J 装置においてこれまで計測できていなかった線平均密度  $5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  以上の高密度プラズマの計測を実現し、また SMBI や HIGP プラズマの密度の時間的応答を初めて明らかにした。

### 3.6. 慣性静電閉じ込めプラズマ核融合中性子源の開発と応用 (発表論文 10、11)

慣性静電閉じ込めプラズマ核融合中性子源は、安全な小型中性子源として原子炉や加速器中性子源など他の中性子源とは異なった応用展開が期待されている。DD 核融合中性子の単色性を利用した計測・解析技術を開発し、港湾等に設置してコンテナ貨物を非開封・非破壊で、しかも物流を妨げることなく短時間で全量検査可能な核燃料物質検知技術を開発した。さらに、据置型よりも技術的難易度が高いものの利用範囲の各段に広いポータブルの検査装置としての製品化開発を産学連携事業とし

て開始した（特願 2012-191500、PCT/JP2013/073042、US 14/423095、EU 13832574.1、RUS 2015111528）。

### 3.7. 高輝度電子ビーム生成の研究（発表論文 12）

自由電子レーザーを始めとする量子放射光源の高度化には、電子ビームの高輝度化が要求される。エネルギーが低いために空間電荷効果が最も顕著で、しかも鏡像効果による非線形力を受ける陰極の近傍で、電子ビームのエミッタンスは急激に増加する。定性的には理解されていたものの、解析的記述も十分な精度の数値解析も困難なため、不可避なものとしてしか認識されていなかった鏡像効果によるエミッタンス増加を高精度に解析可能な数値計算手法を開発した。数値解析の結果、一旦増加したエミッタンスがその後、条件によっては、外力によらずビーム自身の空間電荷効果によって減少し、従来の電子銃の達成値を遙かに下回る極低エミッタンスとなることを見出した。

#### （発表論文）

- 1) K. Nagasaki, et al., "Stabilization of energetic-ion-driven MHD modes by ECCD in Heliotron J", Nucl. Fusion 53 (2013)
- 2) K. Hada, K. Nagasaki, K. Masuda, et al., "One-Dimensional Analysis of ECRH-Assisted Plasma Start-Up in JT-60SA", Fusion Science and Technology 67 (2015) 693-704
- 3) S. Ohshima, et al., "Edge Plasma Responses to Energetic-Particle-Driven MHD Instability in Heliotron J", Nuclear Fusion (2016) 56 016009
- 4) L. Zang, S. Ohshima, et al., "Effect of supersonic molecular-beam injection on edge fluctuation and particle transport in Heliotron J", Phys Plasmas 21(2014) 042308
- 5) Y. Ohtani, K. Tanaka, T. Minami, S. Ohshima, K. Nagasaki, et al., "Gas puff modulation experiment measured by interferometers in Heliotron J", JINST (2016) 11 C02035.
- 6) Y. Ohtani, S. Ohshima, et al., "Development of a new far infrared laser interferometer in Heliotron J and first results", Plasma and Fusion Research (2015) 10 1402091
- 7) S. Ohshima, S. Kobayashi, S. Yamamoto, K. Nagasaki, T. Mizuuchi, S. Kado, H. Okada, T. Minami, H. Y. Lee, L. Zang, N. Kenmochi, K. Kasajima, Y. Ohtani, N. Shi, Y. Nagae, S. Konoshima and F. Sano, "Highly Time-resolved Evaluation Technique of Instantaneous Amplitude and Phase Difference using Analytic Signals for Multi-channel Diagnostics", Rev. Sci. Instrum. (2014), 85, 11E814
- 8) N Shi, S. Ohshima, et al., "Electron Density Reconstruction and Optimum Beam Arrangement of Far-Infrared Interferometer in Heliotron J", Plasma and Fusion Research, 9 (2014) 3402043
- 9) N Shi, S. Ohshima, et al., "A novel electron density reconstruction method for asymmetrical toroidal plasmas", Rev. Sci. Instrum. 85 (2014) 053506
- 10) K. Masuda et al., "Compact Intense Neutron Generators based on Inertial Electrostatic Confinement of D-D Fusion Plasmas", Proc. Nuclear Physics and Gamma-ray Sources for Nuclear Security and Nonproliferation (2014) 195-202.
- 11) Y. Takahashi et al., "Development of Active Neutron-Based Interrogation System with D-D Neutron Source for Detection of Special Nuclear Materials", ibid., 341-346.
- 12) A. Mizuno, K. Masuda and M. Yamamoto, "Reduction of Transverse Emittance in Electron Injectors Caused by Space Charge Effects", Nuclear Inst. Meth. Phys. Res. A 774 (2014) 51-59.

## 1. 構成員

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

## 2. 研究の概要

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

## 3. 主な研究成果

### 3.1. Heliotron J 装置のための Nd:YAG Thomson 散乱計測装置の開発（発表論文 1）

高繰り返し Nd:YAG トムソン散乱計測装置は、プラズマの特性を決定する電子温度と電子密度分布の時間発展を計測する装置である。空間チャンネル数 25 点、空間分解能 $\sim 1\text{cm}$  で二台の Nd:YAG レーザーを用いて時間間隔 10ms でプラズマ分布の計測が可能である。口径の 800mm の大型の集光ミラーを用いて立体角を増加と球面収差の減少を行い Heliotron J 装置において測定電子温度領域 10eV-10keV、測定電子密度領域  $5 \times 10^{18}\text{m}^{-3}$  以上を達成した。

### 3.2. Heliotron J 装置のための遠赤外レーザーを用いた干渉計の開発（発表論文 2）

高密度域での密度分布計測のための遠赤外（FIR）レーザー干渉計の開発を行った。FIR レーザーとして波長  $337\mu\text{m}$  の HCN レーザー開発を行い約 30mW のパワーで発振させることに成功した。新しく線形正則化法の一つである Phillips-Tikhonov 法の  $\gamma$  パラメータを GCV 法によって最適化する方法を開発し、Heliotron J 装置においてもマルチコード干渉計から十分な精度をもった密度再生像を得ることが可能なことを明らかにした。

### 3.3. Heliotron J プラズマの内部輸送障壁形成による閉じ込め改善（発表論文 3）

ヘリカルプラズマの電子内部輸送障壁は ECH 加熱により径方向電場をプラズマ内部に形成してプラズマ乱流を抑制する。この電子内部輸送障壁を Heliotron J プラズマにおいて実現する実験を行い輸送障壁生成に成功した。電子密度が約  $1 \times 10^{19}\text{m}^{-3}$  であるとき、プラズマの中心付近で拡散係数が低減したため、電子温度勾配が急上昇し、そのため中心電子温度が約 2keV に達するという結果が得られた。

### 3.4. 新たな給気法を用いた閉じ込め改善モードプラズマの制御（発表論文 4）

ペレット入射等を用いずに通常のガス給気装置から短時間に多量の中性ガスを導入する新手法（HIGP 法）を用いることで、 $10^{20}\text{m}^{-3}$  を越える高密度プラズマの生成に成功した。また、HIGP ガス量・パルス幅を最適化させることで、HIGP 切断後に周辺部輸送障壁の形成が観測された。この時エネルギー閉じ込め・粒子閉じ込めとも改善しており、閉じ込め改善モードへの遷移であることが明らかとなった。

### 3.5. 非共鳴マイクロ波入射補助を用いた早期 NBI プラズマ着火手法の実現（発表論文 5）

非共鳴マイクロ波の入射による予備電離を用い、中性粒子ビーム（NBI）単独でプラズマを生成する、新しいプラズマ着火法を Heliotron J で開発した。予備電離に要する電力は主加熱パワーの 1/100 以下の低パワーであり、また、磁場強度に依存しない NBI プラズマ着火が可能となった。本手法により運転領域の拡大が可能となり、マックスプランク研究所の大型ヘリカル装置 W7-X のよう

に、NBI 吸収効率の悪い条件下においても NBI プラズマ着火が可能となることが期待される。なお、本研究はドイツ・マックスプランク・プラズマ物理研究所との共同研究で進めている。

### 3.6. Heliotron J プラズマの干渉計を用いた密度変調実験による粒子輸送の研究 (発表論文 6)

L-mode プラズマの粒子輸送に対する同位体効果を調べるため、ECW によって加熱し、重水素でパフされたプラズマと軽水素によりパフされたプラズマに対して密度変調法で拡散係数と対流速度を求める実験を行った。重水素パフ(H/(H+D)~20%)の場合と軽水素パフ(H/(H+D)~80%)の場合で変調の振幅と位相にわずかな違いがみられ L-mode プラズマに同位体効果が存在する可能性を示した。

### 3.7. 磁気リップルに対する平行フロー速度の応答と高精度予測手法の開発 (発表論文 7)

Heliotron J では磁場のフーリエ成分を制御することで、磁場のミラーリップル (磁気リップル) のみを変える事ができる。この手法を用いて磁気リップルに対する平行フロー速度の応答を詳細に調べた。また異粒子種間の衝突の効果・平行粘性および外部トルクを考慮した新古典輸送モデルを新たに構築し、実験結果とのよい一致を得た。本研究により炉心プラズマにも適用可能なフローの高精度予測手法が確立された。

#### (発表論文)

- 1) T. Minami, et al., Fusion Science and Technology **15**, No.3, 240 (2013).  
M. Kenmochi et al., Plasma and Fusion Research **8**, 2402117 (2013).  
N. Kenmochi, et al., Rev. Sci. Instrum. **85**, 11D819 (2014).
- 2) N. Shi, et al., Rev. Sci. Instrum. **85**, 053506 (2014)  
Y. Ohtani, et al., Plasma and Fusion Research **10**, 1402091 (2015)
- 3) T. Minami, et al., “3D magnetic field effect on electron internal transport barrier in Heliotron J and CHS”, 20<sup>th</sup> Int. Stellarator-Heliotron WS, (Oct. 5-9, 2015) S1-14,. Submitted to Plasma Phys. Contr. Fusion. (2015)
- 4) T. Mizuuchi, et al., “A New Operation Regime for High-Density Plasma in Heliotron J” IAEA-FEC 2014 (Saint Petersburg, Russia, Oct. 13-18, 2014) EX/P4-29.  
S. Kobayashi, et al., “Experimental study of high density plasma operation in Heliotron J” 40<sup>th</sup> EPS conf. Plasma Phys. (Espoo, Finland, July 1-5, 2013) P1.148.
- 5) S. Kobayashi, et al., “Rapid NBI plasma initiation using pre-ionization method by non-resonant microwave injection in Heliotron J” 20<sup>th</sup> Int. Stellarator-Heliotron WS, (Oct. 5-9, 2015) S3-O2.
- 6) Y. Ohtani, et al., “Gas puff modulation experiment measured by interferometers in Heliotron J”, 会  
Journal of Instrumentation **11**, February (2016)
- 7) S. Kobayashi, et al., “Parallel Flow Dynamics and Comparison with Neoclassical Transport Analysis in NBI Plasmas of Heliotron J” IAEA-FEC 2014 (Saint Petersburg, Russia, Oct. 13-18, 2014) EX/P4-28.
- 8) H.Y. Lee, et al., Plasma Phys. Contr. Fusion. **55** 035012 (2013).

## 先進エネルギー評価研究分野（外国人客員）

国際的視点から将来のエネルギー問題を見据えた先進エネルギーの開発・利用と評価の研究を行う外国人研究分野である。原則として年度毎に担当部門を決め、当該部門の受け入れ教員の推薦を基に招聘研究員選考を行うことにより、広い視点からの時宜に適した客員教員を決定している。平成 25-27 年度の招聘者、期間、受入教員については、資料編(II) 1.4.1 を参照されたい。

認められている招聘期間の一部重複などを利用し、フレキシブルな運用を実施している。広範囲な先進エネルギーの開発・利用と評価の研究が担当研究分野関連分野教員との密接な連携を通して行われ、双方にとって多くの実りある成果を得ている。また、この招聘を契機に、国外との共同研究協定の締結や共同研究の一層の促進がなされた場合が多い。大学からの招聘研究員用研究予算がなくなったため、研究遂行に問題が生じる場合があり、招へい研究者の研究が有効に進められるために今後解決を図る必要がある。

## 3.2. エネルギー機能変換研究部門

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

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

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

## 1. 構成員

教授：松田一成、准教授：檜木達也（H18.4～）、宮内雄平（H26.10～）、  
助教：神保光一（H8.5～）

## 2. 研究の概要

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

## 3. 主な研究成果

### 3.1. ナノカーボン物質・原子層物質における光科学（発表論文 1-4）

近年、原子一層（数層）の物質系が実現し、物質科学・光科学・エネルギー科学の分野で大きなパラダイムシフトを迎えつつある。これらは、炭素のハニカム構造からなる「グラフェン」、グラフェンを一巻きしたシリンダー（筒）構造の「カーボンナノチューブ」、グラフェンと類似の構造を有する「遷移金属ダイカルコゲナイド」など、原子層という共通部分を有しながら構造・物性は多彩である。ナノサイエンスを基盤にした新しい物質科学やそのエネルギー応用を展開する研究舞台として、これら一連の物質は非常に興味深い系である。このような物質の光学的性質に深く関与する電子状態を理解し、特異な光学現象の発現やエネルギー生成・省エネルギーデバイスなど光エネルギーの高効率利用へと繋げてゆくことが求められている。

カーボンナノチューブは、光励起によって近赤外光領域において発光することが知られており、将来のナノサイズの光ファイバー通信用省エネルギー光源や高感度な光検出器等への応用が期待されている。しかし、通常その発光効率は非常に低く（約 1%程度）、実用化に向け大幅にその効率を上げることが強く求められている。これに対して我々はそれを実現するために、炭素原子から構成されるナノチューブに酸素をドーピングした酸素ドーピングナノチューブを作製し、その発光効率を詳細に調べた。これにより、励起子（電子-ホール対）を局所的に閉じ込める役割を担う非常に希薄な特異点（酸素サイト）をナノチューブ上に作ることができた。その結果、室温において特異点（酸素サイト）部分は、ナノチューブ固有の部分（約 1%程度）と比べ、約 20 倍以上の高い効率で発光（約 18%程度）していることが明らかとなった。このことは、カーボンナノチューブの構造を制御し変調することで、ナノチューブ固有の性質を超える非常に高い発光効率を達成できることを示している。

さらに、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た。通常発光現象では、物質を励起する高エネルギー（短波長）の光を吸収し、低エネルギー（長波長）の光を発光として生じる。これに対して、ナノチューブに 1150nm 程度の波長の近赤外光を照射すると、波長約 980nm のアップコンバージョン発光が得られた。さらに、そのアップコンバージョン発光が効率良く起こるメカニズムを明かにした。従来、ナノチューブの発光を用いた生体内部のイメージングには、波長 1100～1400nm 程度の通常発光が用いられてきた。波長 1400 ナノメートル程度までの近赤外の波長領域は「生体の窓」と呼ばれ、光が生体組織に遮られにくいいため、このアップコンバージョン発光現象は、ナノチューブを利用したバイオイメージングの新たな展開を開くものであると考えられる。

### 3.2. ナノカーボン物質を利用した光電変換機能と太陽電池応用（発表論文 5）

カーボンナノチューブやグラフェン関連物質は、その特徴的な構造や電子状態から特異な光電変換機能を有している。ここでは、ナノカーボン物質の中で代表的なカーボンナノチューブを利用した太陽電池デバイスについて研究を進めた。まずプロトタイプとして、ナノチューブ/シリコンのヘテロ構造太陽電池をモデルデバイスとして、その電流-電圧特性を詳細に解析することによって光電変換機構を解明した。その結果、ナノチューブ/シリコンヘテロ構造太陽電池の光電変換効率を上げるための指針として、デバイス中のシリーズ抵抗低下、金属とホール輸送層となるナノチューブ間のショットキーバリアの低下、が重要であることがわかった。実際に、高透過性・低抵抗性を有するナノチューブ薄膜を利用し、デバイスの構造パラメーターを最適化することにより、12.5%の光電変換効率を有するナノチューブ/シリコンのヘテロ構造太陽電池の開発に成功した。さらに、酸化モリブデン層をナノチューブと電極間に挿入することで、キャリアの再結合ロスの原因となるショットキー

バリアの低下に成功し、その結果、ナノカーボン物質を利用した太陽電池としては世界最高となる17.0%の非常に高い光電変換効率を有するデバイスを実現した。これらの研究によって、ナノカーボン物質を利用した新しい機能・高性能な太陽電池の実現と新たな太陽電池の設計指針を示すとともに、ナノ物質中での光電変換特性の解明について重要な知見が得られた。

### 3.3. 安全性を追求した革新的原子力炉心 SiC 複合材料の開発 (発表論文 6)

SiC の優れた耐酸化特性から、SiC 複合材料は軽水炉における事故耐性燃料として応用が期待されている。SiC 複合材料は、作製方法により結晶粒サイズや不純物が異なり、通常時の耐高温水特性や事故時の耐高温水蒸気特性は、これらの材料特性に大きく依存する。液相焼結材は、基本的に焼結助剤量を減らすと密度や強度が低下する傾向にある。耐腐食特性を考えた場合に、アルミナやイットリアの焼結助剤量を減らす必要があるが、強力な分散が可能なスパイクミルを用いても、3wt%程度が密度を極端に下げない限界であった。特に耐高温水特性に優れた焼結助剤成分の検討を行い、Al 成分を低減することで、耐高温水特性に非常に優れていることが明らかになり、焼結助剤の調整を行い、気孔率を3%以内に制御した材料を開発し、耐高温水特性を飛躍的に向上させた SiC 材料の開発に成功した。SiC 複合材料に関しては、粒子分散マトリックス複合材料の開発を行い、耐高温水、耐高温水蒸気特性に優れた SiC 複合材料を開発した。

本研究内容はエネルギー対策特別会計に基づき、文部科学省から株式会社東芝が受託した「安全性を追求した革新的炉心材料利用技術に関する研究開発」の成果である。

#### (発表論文)

- 1) Y. Miyauchi, M. Iwamura, S. Mouri, T. Kawazoe, M. Ohtsu, and K. Matsuda, "Brightening of excitons in carbon nanotubes on dimensionality modification", *Nat. Photonics* 6, (2013) 715-719.
- 2) S. Mouri, Y. Miyauchi, and K. Matsuda, "Tunable photoluminescence of monolayer MoS<sub>2</sub> via chemical doping", *Nano Lett.* 13, (2013) 5944-5948.
- 3) D. Kozawa, R. Kumar, A. Carvalho, K. K. Amara, W. Zhao, S. Wang, M. Toh, R. M. Ribeiro, A. H. Castro Neto, K. Matsuda and G. Eda, "Photocarrier relaxation pathway in two-dimensional semiconducting transition metal dichalcogenides", *Nat. Commun.* 5, (2014) 4543.
- 4) N. Akizuki, S. Aota, S. Mouri, K. Matsuda, and Y. Miyauchi, "Efficient near-infrared up-conversion photoluminescence in carbon nanotubes" *Nat. Commun.* 6, (2015) 8920.
- 5) F. Wang, D. Kozawa, Y. Miyauchi, K. Hiraoka, S. Mouri, Y. Ohno, and K. Matsuda, "Considerably improved photovoltaic performance of carbon nanotube-based solar cells using metal oxide layers", *Nat. Commun.* 6, (2015) 6305.
- 6) S. Kondo, M. Lee, T. Hinoki, Y. Hyodo and F. Kano, "Effect of irradiation damage on hydrothermal corrosion of SiC," *J. Nucl. Mat.* 464 (2015) 36-42.

## 1. 構成員

准教授：中嶋 隆 (H10.4～)、助教：畑 幸一 (H8.5～H27.3)、宮地悟代 (H16.4～H26.2)

## 2. 研究の概要

レーザーや分光学的手法を駆使することによって、原子・分子、固体、薄膜、ナノ物質など、種々の物質のダイナミクスを分析、さらには積極的に制御する手法を開発し、エネルギー科学技術の発展に資することを旨とする。研究は、理論および実験の両側面から行う。

## 3. 主な研究成果

### 3.1. レーザー誘起スピン偏極 (発表論文 1-4)

現在、J-PARC (大強度陽子加速器施設) では、大型装置の 1 つとして物質・生命科学実験施設が稼働している。この装置は、核反応によって発生する数 MeV のミュオンを数 eV にまで減速し、物質の表面や界面における磁気情報を原子レベルで観測できるユニークな性能を持っているが、減速の際に生じる核スピンの減偏極をいかに回復させるか (再偏極) が、装置の性能を大きく左右する。本研究では、光イオン化によって生成した光電子信号から偏極度を評価する新手法や、レーザーによって再偏極を実現する際に必ず必要な 122nm 光を効率良く発生するために必要な高コヒーレンスを原子媒質内に生成するための新手法を考案し、それを理論的に評価した。また、ミュオンが減速する際に電子捕獲して中性原子になった、ドップラー広がりを持つミュオニウムを光イオン化する効率を理論的に評価した。また、少し派生した研究テーマとして、量子ドットをフェムト秒パルスによって超高速スピン偏極させる新スキームも検討した。

### 3.2. X 線パルス照射による内殻励起ダイナミクス (発表論文 5)

近年、世界の幾つかの施設で、高強度 X 線パルスを発生する自由電子レーザーがユーザーに利用可能となってきたが、それに伴い、物質内の内殻電子ダイナミクスを時間分解して調べることができるようになった。本研究では、まず手始めとして、高強度 X 線パルスによって共鳴励起された希ガス原子の内殻電子ダイナミクスを、オージェ電子のエネルギースペクトルを参照して理論的に調べた。X 線パルスと共に可視の光パルスを同時照射すれば、内殻電子ダイナミクスをある程度制御できることが分かった。

### 3.3. メタマテリアルの光学応答 (発表論文 6、7)

メタマテリアルとは、光の波長オーダーよりも微細な構造を持つ光学素子のことであり、構造に対応した局所電場の発生によって、ユニークな光学特性を発現する。本研究では、透磁率  $\mu$  がほぼゼロであるメタマテリアルに適切な偏光と波長を持つ光を入射した場合、入射角度にかかわらず、透過光は必ずメタマテリアル界面に垂直な方向となる、ということを実験的に示した。また、異なる 2 つの媒質が平面を界面にして接している場合について、光が界面を超えて伝搬していく様子を、特に「負の屈折率」が実現できるかどうか注目して、第 1 原理から出発して理論的に調べた。その結果、メタマテリアルの両界面が平行である場合には、正の屈折しか起こらないが、界面が飛行でない場合は、特定の条件下では負の屈折が実現できることを理論的に示した。

### 3.4. 中赤外自由電子レーザーのパルス特性計測法の開発 (発表論文 8、9)

中赤外自由電子レーザー (KU-FEL) は発振器型 FEL であり、マイクロ秒のマクロパルスの中にサブピコ秒のマイクロパルスが 350 ピコ秒間隔で約 4000 個存在するため、試料に集光照射すると瞬時に材料損傷が起こる。プラズマミラーを用いてマクロパルスを時間的に切り出せば、損傷閾値が 1 桁以上向上することを実験的に示した。また、非ガウスの横モードのレーザービームについて、ナイフエッジ法を用いた場合の横モード解析法を開発し、KU-FEL に適用した。その結果、KU-FEL の横モードは非ガウス型であるが、比較的良好な集光特性を持っていることが分かった。

### 3.5. 中赤外自由電子レーザーを用いた結晶性高分子薄膜の構造変化検出 (発表論文 10)

近赤外レーザーパルス照射によって瞬時に加熱溶解した結晶性高分子薄膜に中赤外パルスを照射し、その透過信号の時間変化から、高分子構造が結晶性→非晶性へと変化する様子を時間分解その場検出する手法を開発した。このような光学的時間分解その場計測法を用いれば、高分子科学でよく用いられる FTIR や XRD では計測できないダイナミクスを測定できる。

(発表論文)

- 1) Li Deng, Masahiko Iwasaki, and Takashi Nakajima, “Nuclear-spin polarimeter using photoelectron signals”, *Phys. Rev. A* 88, 013409 (2013).
- 2) Li Deng and Takashi Nakajima, “Detuning-induced stimulated Raman adiabatic passage in atoms with hyperfine structure”, *Phys. Rev. A* 89, 023406 (2014).
- 3) Rakesh Mohan Das, Souvik Chatterjee, Masahiko Iwasaki, and Takashi Nakajima, “Ionization efficiencies of Doppler-broadened atoms by transform-limited and broadband nanosecond pulses: one-photon resonant two-photon ionization of muoniums”, *J. Opt. Soc. Am. B* 32, 1237-1244 (2015).
- 4) Parvendra Kumar and Takashi Nakajima, “Coherent population trapping in negatively charged self-assembled quantum dots using a train of femtosecond pulses”, *Phys. Rev. A* 91, 023832 (2015).
- 5) Souvik Chatterjee and Takashi Nakajima, “Manipulation of resonant Auger processes using a strong bichromatic field”, *Phys. Rev. A* 91, 043413 (2015).
- 6) Vladimir Yu. Fedorov and Takashi Nakajima, “All-angle collimation of incident light in  $\mu$ -near-zero metamaterials”, *Optics Express* 21, 27789-27795 (2013).
- 7) Vladimir Yu. Fedorov and Takashi Nakajima, “Negative refraction of inhomogeneous waves in lossy isotropic media”, *J. Opt.* 16, 035103 (2014).
- 8) Xiaolong Wang, Takashi Nakajima, Heishun Zen, Toshiteru Kii, and Hideaki Ohgaki, “Damage threshold and focusability of mid-infrared free-electron laser pulses gated by a plasma mirror with nanosecond switching pulses”, *Appl. Phys. Lett.* 103, 191105-1-4 (2013).
- 9) Yu Qin, Takashi Nakajima, Heishun Zen, Xiaolong Wang, Toshiteru Kii, and Hideaki Ohgaki, “Characterization of non-Gaussian mid-infrared free-electron laser beams by the knife-edge method”, *Infrared Phys. Technol.* 66, 146-151 (2014).
- 10) Eduard Ageev, Keisuke Mizobata, Takashi Nakajima, Heishun Zen, Toshiteru Kii, and Hideaki Ohgaki, “Time-resolved detection of structural change in polyethylene films using mid-infrared laser pulses”, *Appl. Phys. Lett.* 107, 041904 (2015).

## 1. 構成員

教授：木村晃彦、准教授：森下和功（H11.3～）、藪内聖皓（H26.12～）

## 2. 研究の概要

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

## 3. 主な研究成果

### 3.1. 核融合炉材料の接合技術開発（発表論文1-4）

核融合ブランケットの製作における重要な技術として、構造材料の接合技術があげられており、論文1), 2), 3)では、接合が困難とされていた ODS 鋼の摩擦攪拌接合技術開発に挑み、接合強度が接合前の母材の 80%に達する接合体を作製することに世界で初めて成功した。ODS 鋼の実用化に不可欠な課題が解決された貴重な成果であり、国の内外において注目された。論文4)では、熱膨張係数が顕著に異なるタングステン（W）と ODS 鋼の接合技術開発を行い、プラズマ溶射法を用いて優れた性質の W 被覆を得ることができた。W-ODS 鋼ダイバータは、DEMO 炉への適用が検討されており、懸念されていた接合強度の課題に解決の目途を与える重要な成果である。これらの研究により、京大で開発した ODS 鋼の耐照射性の観点からの開発方針が明確になり、海外から多くの招待講演の依頼を受けた。

### 3.2. ODS フェライト鋼の長時間熱時効効果（発表論文5、6）

Cr を 14%以上含んだフェライト鋼においては、熱時効による Fe/Cr 二相分離が脆化を引き起こすとされており、発電プラントなどの実用化における懸念材料となっている。本研究は、最も熱時効の効果が発現しやすい 475°Cにおいて、10,000 時間までの熱時効の影響を調べたもので、ODS 鋼においては熱時効脆化が 2,000 時間までに飽和し、室温における引張伸びの低下が他の材料に比べ格段に小さいことを初めて見出している。この新たな現象は、ODS 鋼のナノ粒子構造に起因しており、硬化に伴う局所変形がナノ粒子と転位の相互作用により抑制されるためとした。

### 3.3. ODS 鋼の超臨界圧水中における SCC 感受性評価（発表論文7）

ODS 鋼の超臨界圧水（SCPW）中における応力腐食割れ（SCC）感受性に及ぼす水環境の影響を調べ、他の候補材料 F82H 鋼および SUS316L 鋼と比較した結果、ODS 鋼の SCC 感受性は F82H 鋼と同様に、SUS316L 鋼に比べ、十分小さいことが判明した。これにより、SCPW 中における主な候補構造材料の SCC 挙動の理解が進んだ。また、酸化被膜の生成挙動に及ぼす再結晶熱処理および Al 添加の影響を FE-EPMA を用いて調べた結果、実用化において重要となる再結晶処理が耐食性に影響を及ぼさないことが判明し、再結晶 ODS 鋼を管材として使用することにより懸念されていた耐食性の劣化が生じないことを確認した。Al 添加 ODS 鋼の超臨界圧水プラントや核融合ブランケットへの適用性が確認された重要な成果である。

### 3.4. 核融合炉ダイバータ材料の照射影響評価（発表論文8-10）

ITER 核融合実験炉ダイバータのアーマー材に指定されているタングステン（W）におけるイオン照射損傷組織の発達の素過程に関する基礎的研究を実施した結果（論文8), 9)）、1,000°Cでの鉄イオン照射により格子間型転位ループが格子状に配列する、いわゆる loop lattice が形成されることを初めて見出した。ループ格子は母相の W と同じく BCC 格子であり、格子定数は約 45nm である。また、W 単結晶の照射硬化の深さ方向分布を求めた結果、硬化領域は単結晶の方位に依存し、照射表面が {011} の時は損傷領域の分布が計算結果によく一致するが、{001} の時は計算結果に比べ、ほぼ2倍の深さにまで到達することが判った。TEM 観察の結果、{001} W の場合は、損傷組織の形成が計算結果の2倍の深さまで到達していることが明らかとなった。

### 3.5. 核融合炉・軽水炉材料の照射効果モデリングに関する研究（発表論文11-14）

核融合炉材料開発や軽水炉予防保全に必要な材料照射相関則を構築するため、照射下材料内のミクロ構造発達に関するモデリング研究を実施した。第一原理量子計算、分子動力学法、モンテカルロ

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

### 3.6. 軽水炉燃料被覆管の酸化プロセスに関するモデリング研究 (発表論文 15、16)

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

#### (発表論文)

- 1) W. Han, A. Kimura, D.S. Chen, Z.X. Zhang, H. Serizawa, Y. Morisada and H. Fujii, "Parameter Selection in Dissimilar Friction Stir Welding of ODS Ferritic Steel and RAFM Steel F82H", J. Plasma Fusion Res. SERIES, 11 (2015) 65-68.
- 2) W. Han, A. Kimura, N. Tsuda, H. Serizawa, D.S. Chen, H.I. Je, H. Fujii, Y.S. Ha, Y. Morisada, H. Noto, "Effects of mechanical force on grain structures of friction stir welded oxide dispersion strengthened ferritic steel", J. Nucl. Mater. 455(1-3) (2014) 46-50.
- 3) K. Yabuuchi, N. Tsuda, A. Kimura, Y. Morisada, H. Fujii, H. Serizawa, S. Nogami, A. Hasegawa, T. Nagasaka, "Effects of tool rotation speed on the mechanical properties and microstructure of friction stir welded ODS steel", Mater. Sci. Eng. A 595 (2014) 291-296.
- 4) S.H. Noh, R. Kasada, A. Kimura, T. Nagasaka, M.A. Sokolov, T.K. Kim, "Interfacial microstructures and hardness distributions of vacuum plasma spraying W-coated ODS ferritic steels for fusion plasma facing applications", Fusion Eng. Des. 89(4) (2014) 289-293.
- 5) D.S. Chen, A. Kimura, W. Han and W. Tang, "Effect of Long-Term Thermal Aging on Microstructure and Mechanical Property Changes of Fe-15Cr Ferritic Alloys", J. Plasma Fusion Res. SERIES, 11 (2015) 57-60.
- 6) D.S. Chen, A. Kimura, W. Han, "Correlation of Fe/Cr phase decomposition process and age-hardening in Fe-15Cr ferritic alloys", J. Nucl. Mater. 455(1-3) (2014) 436-439.
- 7) H.I. Je, A. Kimura, "Stress corrosion cracking susceptibility of candidate structural materials in supercritical pressurized water", J. Nucl. Mater. 455(1-3) (2014) 507-511.
- 8) Z.X. Zhang, D.S. Chen, W.T. Han, A. Kimura, Fusion Eng. Des. In Press, Available online 2015.07.20.
- 9) Z.X. Zhang, W. Han and A. Kimura, "Correlation of Microstructure Evolution and Hardening in Ion-Irradiated Pure Tungsten", J. Plasma Fusion Res. SERIES, 11 (2015) 94-98.
- 10) H. Noto, S. Taniguchi, H. Kurishita, S. Matsuo, T. Ukita, K. Tokunaga, A. Kimura, "Effect of grain orientation and heat treatment on mechanical properties of pure W", J. Nucl. Mater. 455(1-3) (2014) 475-479.
- 11) Y. Watanabe, K. Morishita, Y. Yamamoto, "Displacement damage rate dependence of defect cluster formation in  $\alpha$ -Fe during irradiation", Nucl. Instrum. Meth. B 303 (2013) 100-103.
- 12) T. Nakasuji, Y. Yamamoto, K. Morishita, "Numerical Evaluation of Material's Degradation under Various Irradiation Conditions", E-Journal of Advanced Maintenance, Jpn. Soc. of Maintenology, 7(2) (2015) 160-165.
- 13) D. Kato, H. Iwakiri, Y. Watanabe, K. Morishita, T. Muroga, "Super-Saturated Hydrogen Effects on Radiation Damages in Tungsten under High-Flux Divertor Plasma Irradiation", Nuclear Fusion 55 (2015) 083019.
- 14) Y. Watanabe, K. Morishita, T. Nakasuji, M. Ando, H. Tanigawa, "Helium effects on microstructural change in RAFM steel under irradiation: Reaction rate theory modeling", Nucl. Instrum. Meth. B 352 (2015) 115-120.
- 15) Y. Yamamoto, K. Morishita, H. Iwakiri, Y. Kaneta, "Stress dependence of oxygen diffusion in ZrO<sub>2</sub> film", Nucl. Instrum. Meth. B 303 (2013) 42-45.
- 16) Y. Yamamoto, K. Morishita, "Development of methodology to optimize management of failed fuels in light water reactors", J. Nucl. Sci. Tech. 52 (5) (2015) 709-716.

## 1. 構成員

教授：佐野史道 (～H27.3)、准教授：門信一郎 (H25.2～)、助教：山本 聡 (H20.4～)

## 2. 研究の概要

研究所重点領域研究の1つである先進プラズマエネルギー研究を、研究所附属エネルギー複合機構研究センターのセンター基幹装置 (Heliotron J) 研究、センター公募型共同研究、研究所共同利用・共同研究拠点 (ゼロエミッションエネルギー研究拠点) 活動、核融合科学研究所双方向型共同研究 (Heliotron J) および核融合科学研究所国際共同研究拠点ネットワーク活動を通じて「ヘリオトロン J の閉じ込め最適化とその実証」を目標に、電磁場・プラズマ複合系の制御およびプラズマエネルギーの輸送・変換過程の高度化に関わる実験的・理論的研究を推進している。さらに、双方向型共同研究 (筑波大学) においてダイバータ・境界層プラズマにおける原子分子素過程の解明および計測法の開発や信頼性評価に関する研究に着手している。

## 3. 主な研究成果

### 3.1. ヘリカルプラズマにおける ECH/ECCD を用いた高速イオン励起 MHD 不安定性の安定化 (発表論文 1-2)

核融合炉では重水素と三重水素の核融合反応で生ずる高エネルギーのアルファ粒子によりプラズマ自らを温め、外部からの加熱入力無しに継続的に核融合反応が起こる自己点火プラズマの安定的な保持が必要となる。しかしながら、そのアルファ粒子からエネルギーを得て不安定化する電磁流体力学的 (MHD) 不安定性は、逆にエネルギー源であるアルファ粒子閉じ込めの悪化や損失を誘起し、場合によっては自己点火プラズマ保持を困難にさせることが懸念されており、各装置で粒子-波動の共鳴的相互作用の物理機構解明などの研究開発が精力的に進められている。将来的にはアルファ粒子閉じ込め悪化の原因である高速イオン励起 MHD 不安定性の安定化が必要となるため、制御性に優れ、実績の高い電子サイクロトロン加熱 (ECH) ならびに電子サイクロトロン電流駆動 (ECCD) を用いて高速イオン励起 MHD 不安定性を安定化 (制御する) 手法を開発した。また、本研究は国内外のヘリカルプラズマとの国際共同研究にて実施することで、複雑で理解が難しいヘリカルプラズマでの統一的な理解・開発を得ようと考えている。

エネルギー理工学研究所の基幹装置であるヘリオトロン J において、中性粒子入射装置 (NBI) を用いてプラズマを加熱すると、NBI 由来の高速イオンによって高速粒子不安定性 (energetic particle mode: EPM) と呼ばれる MHD 不安定性が発生する。この高速イオン励起 MHD 不安定性も核融合炉においてはアルファ粒子閉じ込めに悪影響を及ぼすと考えられていることから、この不安定性の ECH/ECCD を用いた安定化を試みたところ、ECCD によりプラズマ中の電流を増加させた際に EPM の強度が減少することがわかった。プラズマ電流の分布ならびに EPM の安定化機構を調べたところ、プラズマ電流の増加に伴って磁気シアが増加し、連続減衰と呼ばれる減衰機構が増加することで EPM が安定化したことを明らかにした。また、本研究は磁気シアが非常に弱いヘリオトロン J の特性を活用することによって得たものである (発表論文 6)

ヘリオトロン J で発見した ECCD による磁気シア操作による高速イオン励起 MHD 不安定性の安定化を、ヘリオトロン J 同様に磁気シアが弱いが、プラズマのねじれ具合が異なるスペイン TJ-II において同様に ECH/ECCD を利用し、安定化機構の詳細検討ならびに TJ-II で観測される高速イオン励起 MHD 不安定性の安定化を試みた。ECH システムの問題から ECCD の利用が困難であったが、ECH のパワー増加に伴う高速イオン励起 MHD 不安定性の安定化が観測された。具体的な安定化機構の同定ができていないものの、一般に ECH パワー増加でより不安定になると考えられていた高速イオン励起 MHD 不安定性が安定化された実験結果は物理的に非常に興味深いものである。なお、ヘリオトロン J ならびに TJ-II での研究成果は International Stellarator/Heliotron Workshop の招待講演 (S. Yamamoto, 19th ISHW and 16th IEA-RFP workshop, 16-20 September, 2013, Padova, Italy) に選出された。(発表論文 7)

### 3.2. ダイバータ・境界層プラズマの原子分子素過程の解明および計測法開発 (発表論文 3-7)

ダイバータ領域や閉じ込め境界層の低温プラズマにおける原子分子素過程は、炉心プラズマのソース項として重要な役割を担っている。同時にこの領域は高温プラズマからの粒子束・熱流速を受け止める緩衝領域として作用するため、適切なモニタリング手法とその適用が望まれる。そこで H26 年度に東京大学から筑波大学へ移設されたダイバータ・境界層プラズマ模擬装置 MAP-II を双方向共同研究 (筑波大学) として活用を始めている。

従来から広く用いられている静電プローブによる電子エネルギー分布関数計測法である Druyvesteyn 法は、球座標における等方的な無衝突プラズマを前提としているため、磁化プラズマや円筒プローブの利用ではその仮定が崩れ、計測の誤差となり得ることが懸念される。そこで近年提唱された積分方程式による手法を用い、プローブ形状や磁化度が結果に影響を与えることを示した（発表論文 4）。

一方、プラズマ分光診断においては、2次元検出器の高性能化に伴い、輝線毎のイメージング計測、すなわちスペクトルカメラへの要請が高まってきた。そこで複数の輝線に透過波長を変化させたイメージング計測を目的として、可変波長液晶リオフィルタと帯域フィルタの役割を備えたカラー CCD 検出器を組み合わせた方式などの開発を行ってきた（発表論文 6）。

スペクトラカメラは、発光の詳細な空間分布測定に特に有用である。近赤外分光器を開発し、MAP-II のヘリウム放電に適用して得られたヘリウム原子の 1 重項 2P 準位は、他の可視スペクトルに比べ空間的に有意に広がっていることが観測されていたが、分布形状の詳細計測は困難であった。そこでスペクトラカメラによる可視光の分光イメージング診断を行うことで、基底準位との光学的結合の大きい共鳴準位である 1 重項 3P 準位からの発光も、他の可視スペクトルにくらべや広がっていることが確認された。よって、より強い共鳴準位である 1 重項 2P 準位の空間広がりが輻射捕獲過程によるものであることが実験的に示された（発表論文 5）。

純ヘリウムプラズマにおいて構築されている衝突・輻射モデルを、低温の水素・ヘリウム混合プラズマの分光診断に適用した場合、ヘリウム原子の輝線強度比に予期しない修正が生じることを実験的に確認し、核融合生成物であるヘリウムを含有しているプラズマにおける再現検証の必要性を示唆した（発表論文 3）。

いわゆる接触プラズマ（電離進行プラズマ）と非接触プラズマ（体積再結合プラズマ）では、占有密度に寄与する素過程が異なる。非接触プラズマでは、低い主量子数  $n$  からの発光は、主に原子からの励起成分を反映するが、 $n$  が大きくなると、再結合プラズマではイオンから流入成分が支配的となり、他方高密度の電離進行プラズマでは、多段階の衝突励起プロセス中に生じる荷電交換による加熱現象が観測される。この仮説に従い、低  $n$ 、共鳴線の高  $n$ 、三重項の高  $n$  からの 3 輝線のスペクトル形状を高分散の分光器を用いて測定することにより、原子温度、電子密度、励起準位温度（電離進行プラズマの場合）あるいはイオン温度（再結合プラズマの場合）の 3 つの物理量を測定できる手法を確立し、再結合プラズマにおいて、電子温度、イオン温度、原子温度が同じ温度に近づいていく粒子種間の熱平衡を達成していること、電離進行プラズマにおいて原子温度を測定するには、輝線の選択に注意を要することを示した（発表論文 7）。

（発表論文）

- 1) K. Nagasaki, S. Yamamoto, S. Kobayashi, K. Sakamoto, Y. Nagae, Y. Sugimoto, Y.I. Nakamura, G. Weir, N. Marushchenko, T. Mizuuchi, H. Okada, T. Minami, K. Masuda, S. Ohshima, S. Konoshima, N. Shi, Y. Nakamura, H.Y. Lee, L. Zang, S. Arai, H. Watada, H. Fukushima, K. Hashimoto, N. Kenmochi, G. Motojima, Y. Yoshimura, K. Mukai, F. Volpe, T. Estrada, F. Sano, "Stabilization of energetic-ion-driven MHD modes by ECCD in Heliotron J", Nucl. Fusion, 53 (2013) 113041-1-8.
- 2) K. Nagaoka, T. Ido, E. Ascasibar, T. Estrada, S. Yamamoto, A.V. Melnikov, A. Cappa, C. Hidalgo, M.A. Pedrosa, B.Ph. van Milligen, "Mitigation of NBI-driven Alfvén eigenmodes by electron cyclotron heating in the TJ-II stellarator" Nucl. Fusion, 53 (2013) 072004-1-6.
- 3) Y. Iida, S. Kado and S. Tanaka, "On the application of He I collisional-radiative model to the He-H2 mixture plasmas in MAP-II divertor simulator", J.Nucl. Mater. 438, p. S1237-S1240(2013).
- 4) 渡邊智史「直線型プラズマ装置における静電プローブ用いた電子エネルギー分布関数計測法に関する研究」（修士論文紹介, 指導 門信一郎）, J. Plasma Fusion Res. 90 (2014) pp.568-571.
- 5) S. Kado, Y. Iida, T. Amemiya, "Measurement of Near-Infrared Atomic Helium Line for the Evaluation of Radiation Trapping in MAP-II Divertor Simulator", J. Phys. Soc. Japan. (conf. proc.) 015019 (pp.1-4) (2014).
- 6) M. Yamano, S. Kado S. Watanabe, S. Tanaka, "Liquid-Crystal-Based Tunable Lyot Filter Spectra Camera System Combined with Color CCD Detector", J. Phys. Soc. Japan. (conf. proc.) 015015(pp.1-4) (2014).
- 7) S. Kado, Thermal Equilibrium/Disequilibrium Features in the Excited-state Temperature of Atomic Helium in MAP-II Divertor Simulator, Journal of Nuclear Materials, 463 (2015) 902-906.

## クリーンエネルギー変換研究分野（国内客員）

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

### 3.3. エネルギー利用過程研究部門

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

本研究部門では、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・生物に学ぶ革新的なものづくりの学理「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。

## 1. 構成員

教授：野平俊之、准教授：小瀧 努（H9.4～）、特定助教：楊 肖（H27.1～）

## 2. 研究の概要

シリコン太陽電池の大量普及を実現するために、高純度化したシリカをそのまま高純度シリコンへ還元する熔融塩電解法を開発している。また、熔融塩電析法により安価な基板上に直接結晶性シリコン膜を成膜する方法を研究している。さらに、生物化学的技法により酵素などの機能変換を行い、バイオマスの有用物質への効率的変換技術の開発を行っている。

## 3. 主な研究成果

### 3.1. 熔融塩中におけるシリカ直接電解還元による太陽電池用シリコン製造（発表論文 1、2）

結晶系 Si 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、将来の大量普及に際しても主役として期待されている。しかし、現在の太陽電池用 Si の製造法は、高エネルギー消費・高コストである。そこで我々は、低エネルギー消費・低コストが期待できる新しい製造法として、高純度化したシリカをそのまま高純度シリコンへ還元する熔融塩電解法を開発している。新しい熔融塩電解還元法では、セル上部から粉末状 SiO<sub>2</sub> を投入し、電解セル底部のカソードで Si へ電解還元する。底部に留まった生成 Si は、定期的に熔融 CaCl<sub>2</sub> と共にセル底部から抜き取られる。実際に 850°C の熔融 CaCl<sub>2</sub> 中においてシリカを電解還元して Si 粉末を得た。さらに、これを原料として浮融帯熔融法（FZ 法）により結晶 Si 棒を作製することに成功した。また、原料となるシリカ粒子に関して種々のサイズのものを用いて電解還元速度に与える影響を検討し、最適な粒径を見出した。さらに、電解初期の電流密度が約 0.7 A cm<sup>-2</sup> に達することを示した。これは、ホール・エルー法による Al 電解製錬と同等の値であることから、本電解還元法は新たな太陽電池級シリコン製造法として十分に高い生産性を有することを実証した。

### 3.2. 熔融 KF-KCl 中における結晶性シリコン膜の電析（発表論文 3、4）

現在、結晶系 Si 太陽電池は、単結晶もしくは多結晶のインゴットを 100~200 μm 程度の厚さに切断することで作製されている。しかし、切断工程におけるカーブロス（切りしろロス）が大きい、その後のセル製造工程が複雑であるといった課題があり、コスト増大の一因となっている。そこで我々は、熔融塩電析法により安価な基板上に結晶性 Si 膜を直接成膜する方法を開発している。熔融 KF-KCl を電解質に用い、安価かつ高純度化が容易な SiCl<sub>4</sub> を Si イオン源として使用する方法を世界で初めて提案した。熔融塩の成分である KF および KCl は、どちらも水への溶解度が高く、電析物に付着した塩の水洗除去が容易である。まず、各種の電気化学測定を行い、923 K の熔融 KF-KCl 中において、Ag 電極上での Si(IV)+4e<sup>-</sup> → Si の反応が非可逆過程であることを明らかにした。また、Ag を基板として結晶性かつ緻密な Si 膜(約 70-80 μm)が得られることも実証した。さらに、923 K の熔融 KF-KCl 中において添加 Si(IV)イオン濃度および電流密度をパラメータとして種々の電析サンプルを準備し、それらの断面 SEM 観察を行うことで緻密かつ平滑な Si 膜が得られる最適電解条件を明らかにした。

### 3.3. 酵素機能変換によるバイオマス—エタノール高効率変換酵母の開発（発表論文 5）

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

(発表論文)

- 1) T. Homma, N. Matsuo, X. Ynag, K. Yasuda, Y. Fukunaka, T. Nohira, “High purity silicon materials prepared through wet-chemical and electrochemical approaches”, *Electrochimica Acta*, 179 (2015) 512-518.
- 2) X. Yang, K. Yasuda, T. Nohira, R. Hagiwara, T. Homma, “The Role of Granule Size on the Kinetics of Electrochemical Reduction of SiO<sub>2</sub> Granules in Molten CaCl<sub>2</sub>”, *Metallurgical and Materials Transactions B* 47B (2015) 788-797.
- 3) K. Maeda, K. Yasuda, T. Nohira, R. Hagiwara and T. Homma, “Silicon Electrodeposition in Water-Soluble KF–KCl Molten Salt: Investigations on the Reduction of Si(IV) Ions”, *J. Electrochem. Soc.*, 162 (2015) D444-D448.
- 4) K. Yasuda, K. Maeda, T. Nohira, R. Hagiwara and T. Homma, “Silicon Electrodeposition in Water-Soluble KF–KCl Molten Salt: Optimization of Electrolysis Conditions at 923 K”, *J. Electrochem. Soc.*, 163 (2016) D95-D99.
- 5) S.M.R. Khattab, M. Saimura, and T. Kodaki, “Boost in bioethanol production using recombinant *Saccharomyces cerevisiae* with mutated strictly NADPH-dependent xylose reductase and NADP+-dependent xylitol dehydrogenase”, *J. Biotech.* 165(2013) 153-156.

## 1. 構成員

教授：坂口浩司、助教：小島崇寛 (H25. 4～)、助教：中江隆博 (H26. 4～)

## 2. 研究の概要

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

## 3. 主な研究成果

### 3.1. 革新的ナノ炭素細線製造法の研究 (発表論文 1-2)

金属表面は、有機分子との強い電子的相互作用により、分子を二次元配列させる原子スケールの鑄型である。我々は、単一分子レベルで導電性高分子の長さ・密度・方向・形を任意に制御しながら金属表面上に構築する新しい分子細線合成技術“電気化学エピタキシャル重合”を開発した (Nature Materials, 3, 551 (2004))。更に電子的性質の異なる二種類の導電性高分子細線を基板上で連結させることにも世界で初めて成功した (Science, 310, 1002 (2005))。金属鑄型上の分子組織化を利用して、これまでに無い新しい機能性物質・材料の表面合成とデバイス化が望まれている。グラフェンナノリボン (GNR) は“有限幅を持つグラフェン”であり、分子幅に依存して優れた半導体的性質を持つことが理論的に予測されている。しかし、従来法では特殊な反応場、超高真空技術が必要であり極微量合成にとどまっている。このため、新しい大量合成法の確立が世界的に望まれている。

そこで我々は、従来に無い新しい化学気相成長法 (2ゾーン型化学気相成長法) を開発し、これまで超高真空 (10<sup>-10</sup> torr) 環境を必要とした蒸着合成法を遥かに凌駕した著しい低真空環境 (1 torr) での GNR 大量合成を達成した。今までに GNR の大量合成に成功した例は無い。その理由は、反応系内で芳香族分子ピラジカルを発生させてラジカル重合させなければならないが、系内の極微量の不純物によりピラジカルが失活し、大きく反応効率を妨げるために超高真空環境が必要であるためである (超高真空蒸着重合の報告 (Fasel, et al., Nature, 2010) 等)。もう一つの理由は、超高真空蒸着重合では、加熱した金属基板に蒸発させた前駆体分子を直接吹きかけるためラジカルの生成と重合反応が同一場所で行われるため、それぞれの効率を独立制御できない理由による。本研究では、従来法の欠点を克服し、ラジカル発生場 (ゾーン 1) と重合反応場 (ゾーン 2) を独立に温度制御する新しい 2ゾーン化学気相成長法を開発した。更に、①石英反応管を化学・高温処理することで系内のラジカル失活不純物を極度に減らし、②蒸発させた原料分子を清浄化した高温石英管に吹き付け、ピラジカルを失活させることなく石英管表面に高密度に生成させ、③ラジカルが局在化した石英管面に密着させた金属基板上でラジカル重合と脱水素縮環を効率良く行わせることにより、低真空環境 (1 Torr) にも関わらず従来に無い GNR の高効率合成に成功した。合成した金単結晶表面上の GNR の走査トンネル顕微鏡 (STM) 像は、長さ 20nm の GNR が金(111)面上に多層に成長していることが明らかになった。更に、ベンゼン 2 個、3 個、4 個の異なる幅を持つアームチェ型 GNR を金(111)基板上に成長させることに成功した (発表論文 1)。これらの GNR の理論予測されていたバンドギャップ値を実験的に初めて明らかにした (発表論文 2)。

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

### 3.2. 新規ナノ炭素細線の表面成長に関する研究 (発表論文 3)

従来報告されてきたグラフェンナノリボン (GNR) は、アームチェ型のエッジ構造を持つものがほとんどであり、異なるエッジ構造を持つ GNR の合成が世界的に望まれている。これは、アームチェ型が幅に依存する半導体的性質を持つことが予測されているのに対し、ジグザグ型は磁性を持つことが予測されている。アセン型は、ジグザグ型と同じ成長軸方向を持つ新しい GNR であり、高キャリア移動度が予測されている。我々が開発した 2ゾーン型化学気相成長法を用いて、新規に分子設計した“Z型連結分子”を前駆体として用いて、アセン型 GNR の表面合成に成功した。またこの成長過程において従来報告されていない新規な表面化学反応 (表面ホモキラル重合、コンフォーメーション依存脱水素縮環反応) を発見した。更に、金(111)基板上に形成した GNR を絶縁基板上にウエットブ

プロセスにより転写・単離する方法を開発し、これまでのボトムアップ合成 GNR のキャリア移動度中で最高の値 (0.26cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>) や大きな ON/OFF 比など、優れた半導体特性を有することを明らかにした。

(発表論文)

- 1) H. Sakaguchi, Y. Kawagoe, Y. Hirano, T. Iruka, M. Yano, T. Nakae, “Width-Controlled Sub-Nanometer Graphene Nanoribbon Films Synthesized by Radical-Polymerized Chemical Vapor Deposition” 26 (2014) 4134-4138.
- 2) H. Sakaguchi, “Bottom-up Massive Production of Graphene Nanoribbons”, The 2013 New Diamond and Nanocarbon conference, invited (2014).
- 3) H. Sakaguchi, “Graphene Nanoribbons Produced by 2-Zoned Chemical Vapor Deposition”, Pacifichem2015, Honolulu, USA, invited.

## 1. 構成員

教授：森井 孝、講師：中田栄司 (H22.10～)、助教：仲野 瞬 (H25.8～)

## 2. 研究の概要

生物は、太陽光エネルギーを利用して化学エネルギーを生産し、生命活動に必要な様々な生体高分子を産出している。そして、これら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模範とし、高い機能を発揮する生体高分子を利用することで、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の実現を目指す。

## 3. 主な研究成果

### 3.1. DNA ナノ構造体への酵素配置技術の開発と高効率な物質変換反応への展開 (発表論文 1-3)

DNA ナノ構造体を基盤として様々な機能性分子を精微に配置できれば、バルク溶液中で混合するだけでは達成困難な高効率な物質変換システムの構築や機能評価システムの構築が期待できる。しかしながら、生体内での機能面のほとんどを担っているタンパク質を自由自在に DNA ナノ構造体へと配置する技術は乏しく、集積化による効能についても未知な部分が多い。そこで、我々は、DNA 結合性タンパク質を用いた DNA ナノ構造体への機能性タンパク質の配置について検討してきた。DNA 結合性タンパク質は、DNA と結合する一群のタンパク質であり、様々な DNA 配列に対して異なる結合様式にて配列特異的かつ強固に結合することが知られている。我々はこれまでに、DNA 結合性タンパク質の一つである Zinc Finger タンパク質(ZFP)が、単量体の機能性タンパク質を DNA ナノ構造体上のアドレスに選択的に配置するためのアダプターとして有用であることを示してきた(*Angew Chem. Int. Ed.*, 2012, 51, 2421.)。また、異なる配列選択性を有する DNA 結合性タンパク質である Leucine Zipper タンパク質(bZIP)が、ホモ二量体を形成する機能性タンパク質を配置するためのアダプターとして有用であることを示した (発表論文 1)。しかしながら、これらの DNA 結合性タンパク質と DNA 間の相互作用は可逆的であるため、融合タンパク質を DNA ナノ構造体上に定量的に配置するためには過剰量のタンパク質が必要であった。また、過剰なタンパク質を洗浄により除去した場合、DNA ナノ構造体上に配置されたタンパク質も一部解離してしまう問題点もあった。そこで、DNA 結合性タンパク質が DNA ナノ構造体上のアドレスを認識した後に DNA と融合タンパク質の間に共有結合を形成させる技術として、モジュール型アダプター-ZF-SNAP を開発し、報告した (発表論文 2)。また、これまでに開発した DNA ナノ構造体上に目的タンパク質を配置する手法を組み合わせ、酵母におけるキシロースからのエタノール生産経路の初発の重要な 2 段階の酵素反応を触媒するキシロースリダクターゼ(XR)とキシリトールデヒドロゲナーゼ(XDH)を、DNA ナノ構造体上に配置し、その空間配置を変化させることで、酵素連続反応の効率がどのように変化するかを詳細に評価した。また、2 種類の分子 (基質と補酵素) が酵素間を移動する場合と、1 種類の分子 (補酵素のみ) が移動する場合における、空間配置の影響についても詳細に検討し、報告した (発表論文 3)。今後は、更にパラメータを拡張しながら、それらと酵素連続反応の効率の相関関係について、より知見を深めていくことができると期待される。

### 3.2. タウタンパク質由来の凝集性ペプチドのアミロイド線維形成能に関する研究 (発表論文 4)

タウタンパク質のアミロイド線維形成は過剰リン酸化により制御されていることが示唆されている。タウタンパク質由来の凝集性ペプチド(PHF)をモデルに使用することで、アミロイド線維形成におけるリン酸化効果の分子機構の解明に取り組みるとともに、リン酸化によるナノ構造形成の制御と機能性バイオマテリアルへの応用を目指している。これまでに、PHF 配列内の被リン酸化が線維状構造体の形成を促進する機構が、分子内あるいは線維間での静電相互作用の形成によるものである事を明らかとしている(*Biochemistry*, 2008, 47, 11847)。また、被リン酸化部位の周辺残基との位置関係が、その凝集特性に大きく影響を与えることを新たに見出し、異なる凝集性を持つペプチドが混在した場合、単独のそれとは異なる凝集体形成能を示すことを明らかとしている(*Biochemistry*, 2012, 51, 1396)。本研究では、異なる配列の凝集性ペプチド(PHF6\*)とその誘導体の凝集挙動とその配列の相関関係について詳細に議論した。これら一連の成果は、凝集体形成能の新たな制御方法となると考えられ、注目している。

### 3.3. 自己集合化蛍光プローブを用いたバイオイメーシング (発表論文 5-6)

生体内の分子過程を時空間的に計測するプローブの開発は、基礎科学における生命現象の解析のための有力な手段としてのみならず、医療診断や環境分析・食品管理等の多岐にわたる応用利用も期待される技術である。殊に非侵襲的かつ特異的な検出を可能とする蛍光プローブは、生命機能や疾患の解明に重要な情報を得るための有力なツールとして認知されている。我々は、自己集合状態の変化という独自の戦略に基づく蛍光プローブの合理的設計戦略の確立に成功しており、細胞内の疾病等に関わる重要な酵素反応を可視化することに成功している (発表論文 5)。また、この手法をフッ素イオンの検出用プローブへと応用することにも成功している (発表論文 6)。

### 3.4. 細胞内温度センサーの開発と生体内熱産生機構の可視化 (発表論文 7-8)

生体内では、細胞内小器官ごとに複雑な化学反応を伴う機能を有しているため、小器官ごとに温度が異なることが十分に考えられるが、これまでに有用な細胞内温度の測定法は存在していなかったため、全く評価されてこなかった。本研究では、遺伝子工学的な手法を用いて細胞内および細胞内小器官の温度計測を可能とする温度センサータンパク質を開発し、世界で初めて生体の恒常性を担う熱産生機構の可視化に成功した。

### 3.5. 生体内システムから着想を得た DNA 結合性タンパク質の機能改変 (発表論文 9-10)

生体内では、遺伝情報を司る DNA を DNA 結合性タンパク質が配列特異的に認識することで転写などを制御していることが知られている。本研究では、その結合を人為的に操作するための化学的アプローチを Leucine Zipper タンパク質 (bZIP) をモチーフとして展開した。DNA がフラン誘導体によって酸化的にダメージを受けることを利用し、DNA と bZIP 間を高選択的に架橋することに成功した (発表論文 9)。また、我々のこれまでの成果 (M. Ueno, T. Morii, et al., *J. Am. Chem. Soc.* **1993**, *115*, 12575) を発展させ、bZIP の DNA 認識部位を新たな骨格によって連結した人工転写因子モデルを創製した (発表論文 10)。

#### (発表論文)

- 1) T.A. Ngo, E. Nakata, M. Saimura, T. Kodaki, T. Morii, "A protein adaptor to locate a functional protein dimer on molecular switchboard" *Methods* 2014, *67*, 142-150.
- 2) E. Nakata, H. Dinh, T. A. Ngo, M. Saimura, T. Morii "A modular zinc finger adaptor accelerates the covalent linkage of proteins at specific locations on DNA nanoscaffolds". *Chem. Commun.* 2015, *51*, 1016-1019.
- 3) T.A. Ngo, E. Nakata, M. Saimura, T. Morii "Spatially Organized Enzymes Drive Cofactor-Coupled Cascade Reactions" *J. Am. Chem. Soc.* 2016, *138*, 3012-3021.
- 4) M. Inoue, S. Kaida, S. Nakano, C. Annoni, E. Nakata, T. Konno, T. Morii, "Phosphorylation regulates fibrillation of an aggregation core peptide in the second repeat of microtubule-binding domain of human tau." *Bioorg. Med. Chem.* 2014, *22*, 6471-6480.
- 5) E. Nakata, Y. Yukimachi, Y. Nazumi, M. Uwate, H. Maseda, Y. Uto, T. Hashimoto, Y. Okamoto, H. Hori, T. Morii, "A novel strategy to design latent ratiometric fluorescent pH probes based on self-assembled SNARF derivatives", *RSC Adv.* 2014, *4*, 348-357.
- 6) E. Nakata, Y. Nazumi, Y. Yukimachi, Y. Uto, H. Hori, T. Morii, "Self-Assembled Fluorescent Nanoprobe for the Detection of Fluoride Ions in Aqueous Solutions", *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 2015, *88*, 327-329.
- 7) S. Kiyonaka, T. Kajimoto, R. Sakaguchi, D. Shinmi, M. Omatsu-Kanbe, H. Matsuura, H. Imamura, T. Yoshizaki, I. Hamachi, T. Orii, T. Mori, "Genetically encoded fluorescent thermosensors visualize subcellular thermoregulation in living cells", *Nat. Methods* 2013, *10*, 1232-1238.
- 8) S. Kiyonaka, R. Sakaguchi, I. Hamachi, T. Morii, T. Yoshizaki, Y. Mori "Validating subcellular thermal changes revealed by fluorescent thermosensors" *Nature Methods* 2015, *12*, 801-802.
- 9) L.L. Carrette, T. Morii, A. Madder, "Toxicity inspired cross-linking for probing DNA-peptide interactions", *Bioconjug. Chem.* 2013, *24*, 2008-2014.
- 10) L.L. Carrette, T. Morii, A. Madder, "Peptidosteroid Tweezers Revisited: DNA Binding Through an Optimised Design." *Eur. J. Org. Chem.* 2014, 2883-2891.

## 1. 構成員

教授：片平正人、准教授：永田 崇（H23.9～）、助教：真嶋 司（H26.4～）

## 2. 研究の概要

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

## 3. 主な研究成果

### 3.1. バイオマスを解析する新しい NMR の方法論の開発とその活用（発表論文 1）

我々は木質バイオマスからバイオエネルギーと各種製品の原料を効率的に取得する手法を確立し、バイオリファイナリーへのパラダイムシフトを志向した研究を行っている。木質バイオマスを利活用する上で、同試料中にどのような物質がどの程度含まれているのかを知る事は必須である。木質バイオマス中の多様な構成成分の物質量の決定には、NMR 法の一つである HSQC スペクトルが有用で、現在広く使われている。しかし構成成分の分子量や化学構造の違い等によって、物質量の定量値が歪められてしまうという問題があった。今回 NMR 法の一つである TROSY スペクトルを用いてこの歪みを正す事で、正確な物質量を得る方法論（TAF(Tolerant of Any Factors)法）を開発する事に成功した。実バイオマス試料を用い今回開発した手法が実際に有効に機能する事が証明された。なお当該研究成果に関するプレスリリースを行い、成果を報じる記事が化学工業日報、日経バイオテク等に掲載された。

### 3.2. 抗 HIV 活性をもつヒトシチジン脱アミノ化酵素のリアルタイムモニタリング（発表論文 2、3）

ヒト APOBEC3G (A3G) は HIV が産生するマイナス鎖 DNA を標的とし、CCC 配列を CCU 配列に変換する脱アミノ化酵素である。これにより HIV ゲノムに複数の変異が導入され遺伝情報が破壊される。我々は、一本鎖 DNA (ssDNA) 上複数箇所ですべて同時に進行する変換反応について、NMR 法によりリアルタイムでモニタリングすることに成功した。そして ssDNA 上、より 5' 端側にある CCC ほど効率的に変換されることを見出した。この 3' → 5' 極性について速度論モデルを構築し、定量的なデータ解析を行った結果、A3G は ssDNA に非特異的に結合した後、方向非依存的にスライディングすること、しかし A3G が CCC に 3' 側から到達した場合の方が、その逆から到達した場合よりも変換の反応速度が高いことを明らかにした。また、ssDNA にヌクレオチド誘導体を導入したり、塩強度や pH の溶液条件を変えたりするなどしてリアルタイムモニタリングを行ったところ、A3G のスライディングの原動力は主に ssDNA のリン酸骨格との静電相互作用であることが明らかとなった。

### 3.3. プリオン活性を抑える RNA 分子の構造解析（発表論文 4、5）

狂牛病やクロイツフェルト・ヤコブ病に代表されるプリオン病は、異常型プリオンタンパク質の蓄積が原因で生じると考えられている。我々は異常型プリオンタンパク質の蓄積を抑制する抗プリオン活性を有する RNA 分子を得て、その立体構造と作用メカニズムを NMR 法によって決定した。RNA 分子はプリオンタンパク質の 2 ヶ所の部位へ同時に結合することで、高い親和性を達成していることを明らかにした。またこの RNA 分子とプリオンタンパク質の複合体の形成には、水分子のエントロピー利得が駆動力となっていることも明らかにした。

### 3.4. カリウムイオンに応答して酵素活性をスイッチングする機能性核酸の開発（発表論文 6、7）

我々はカリウムイオン(K<sup>+</sup>)の濃度差によって四重鎖構造を形成し、酵素活性をスイッチングする核酸分子(QHR)を開発してきた。今回この QHR のスイッチング機構をより精密に制御する方法論を構築した。QHR に対する相補鎖 RNA (CS)および、自身も分子内四重鎖を形成することが可能な相補鎖 DNA (QCS)を導入することで、K<sup>+</sup>非存在下における意図しない酵素活性を抑制させ、スイッチング能の向上に成功した。細胞外における K<sup>+</sup>濃度は約 5 mM であるのに対し、細胞内では約 100 mM である。K<sup>+</sup>を感知して自らの活性を制御できる機能性核酸は、細胞の内と外で活性を切り替え可能な分子ツールと成り得、医薬品やドラッグデリバリーシステムなどへの応用が期待できる。

### 3.5. 非コード RNA とタンパク質の構造と相互作用の解析（発表論文 8）

近年、cyclin D1 遺伝子のプロモーターから転写された長鎖非コード RNA が同遺伝子の転写調節領域に繫留されること、そして TLS タンパク質はこの RNA との結合を介して同遺伝子の発現を抑制することが見出された。我々は cyclin D1 遺伝子のプロモーターから転写される 600 nt 程の長鎖非コード RNA の配列を同定した。このうち、TLS と結合する 30 nt 程の RNA の二次構造を NMR 法によ

て決定し、5'側の1本鎖領域と、3'側のステムループ構造から成ることを明らかにした。また TLS における Arg-Gly-Gly に富む3つ目のドメイン (RGG3)が5'側の1本鎖領域を認識して結合することを、NMR法による相互作用解析によって明らかにした。

### 3.6. 特異な核酸構造の決定 (発表論文 9、10)

特徴的な機能を発揮する核酸分子に関し、その構造を NMR によって決定し、機能を発現する機構を解明した。DNA の2本の鎖を架橋する試薬は、抗癌剤として広く応用されている。4-amino-6-oxo-2-vinylpyrimidine (AOVP)を DNA の片方の鎖に組み込むと、相手鎖のグアニン塩基(G)あるいはその酸化損傷によって生じる8オキソグアニン塩基(8-oxoG)と架橋を形成する。架橋構造を NMR 法によって決定する事に成功した。得られた情報は有効な抗癌剤の開発に向けた貴重な知見となった。また DNA 中に組み込まれた 5-hydroxyuracil(UOH)が、金属イオン(M)を真ん中に挟んだ UOH-M-UOH 塩基対を形成する事を NMR 法等によって見出した。UOH は adenine(A)と UOH-A 塩基対を形成する事も可能で、この二面性を生かしたスイッチング素子としての活用の可能性が示唆された。

#### (発表論文)

- 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) Furukawa, A., Sugase, K., Morishita, R., Nagata, T., Kodaki, T., Takaori, A., Ryo, A. and Katahira, M. (2014) Angew. Chem. Int. Ed., 53, 2349-2352. "Quantitative analysis of the location- and sequence-dependent deamination by APOBEC3G using real-time NMR"
- 3) Kamba, K., Nagata, T. and Katahira, M. (2015) PLoS One, 10, e0124142. "Catalytic analysis of APOBEC3G involving real-time NMR spectroscopy reveals nucleic acid determinants for deamination"
- 4) Mashima, T., Nishikawa, F., Kamatari, Y., Fujiwara, H., Saimura, M., Nagata, T., Kodaki, T., Nishikawa, S., Kuwata, K. and Katahira, M. (2013) Nucleic Acids Res., 41, 1355-1362. "Anti-prion activity of an RNA aptamer and its structural basis"
- 5) Hayashi, T., Oshima, H., Mashima, T., Nagata, T., Katahira, M. and Kinoshita, M. (2014) Nucleic Acids Res., 42, 6861-6875. "Binding of an RNA aptamer and a partial peptide of a prion protein: Crucial importance of water entropy in molecular recognition"
- 6) Yamaoki, Y., Mashima, T., Nagata, T. and Katahira, M. (2015) Chem. Commun., 51, 5898-5901. "Boosting of activity enhancement of K<sup>+</sup>-responsive quadruplex hammerhead ribozyme"
- 7) Yamaoki, Y., Nagata, T., Mashima, T. and Katahira, M. (2015) Biochem. Biophys. Res. Commun., 468, 27-31. "K<sup>+</sup>-responsive off-to-on switching of hammerhead ribozyme through dual G-quadruplex formation requiring no heating and cooling treatment"
- 8) Yoneda, R., Suzuki, S., Mashima, T., Kondo, K., Nagata, T., Katahira, M. and Kurokawa, R. (2016) Cell Biosci., 6, 4. "The binding specificity of translocated in liposarcoma/fused in sarcoma with lncRNA transcribed from the promoter region of cyclin D1"
- 9) Kusano, S., Ishiyama, S., Lam, S. L., Mashima, T., Katahira, M., Miyamoto, K., Aida, M. and Nagatsugi, F. (2015) Nucleic Acids Res., 43, 7717-7730. "Crosslink reactions with 4-amino-6-oxo-2-vinylpyrimidine (AOVP) to guanine derivatives and structural analysis of the adducts"
- 10) Takezawa, Y., Nishiyama, K., Mashima, T., Katahira, M. and Shionoya, M. (2015) Chem. Eur. J., 21, 14713-14716. "Bifacial base-pairing behaviors of 5-hydroxyuracil DNA bases both through hydrogen bonding and metal coordination"

## 1. 構成員

講師 : Arivazhagan Rajendran (H27. 2～)

## 2. 研究の概要

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 the current project, I have been developing a novel single-molecular method by using DNA origami nanostructure for the direct analysis of Topos activity on the DNA catenane and the mechanism of Topo inhibitors.

## 3. 主な研究成果

### 3.1. Formation of DNA catenane and analysis of topoisomerase II $\alpha$ activity inside a DNA origami frame (発表論文 1-8)

The topoisomerase enzymes regulate the DNA topology such as overwinding or underwinding that arises due to the intertwined nature of the double helical structure of DNA (J. Biol. Chem., 1995, 270, 15739-15746.). These enzymes also play important role in replication, transcription, recombination, and chromosome condensation and segregation. During DNA replication and transcription, overwinding problem occurs. If it is not repaired, it eventually inhibits the ability of the enzymes involved in replication process. Topos control these DNA topological problems by transiently cleaving the phosphodiester bond, which generates a Topo-DNA cleavage complex. Once the winding problem is resolved, the enzyme-mediated DNA break is resealed. This process is critical for the healthy cells to survive and function normally, and failure to resealed the DNA break can ultimately lead to cell death. Topos are classified into two types based on the number of strands cleaved in one round of action: i) Type I: cuts one strand of DNA, topological changes happen, and then reanneal the cleaved strand; and ii) Type II: cuts both the strands of one DNA duplex, topological stress is released, and then reseals the cleaved strands. Both the types of Topos (in general) or the Topo-DNA cleavage complex (in particular) is of great interest as a potential target for the development of anticancer drugs (Nat. Rev. Cancer, 2009, 9, 338-350.). In addition to the cleavage complex, various steps involved in the Topos function were also targeted by several anticancer drugs. Topos involve several step-by-step process in releasing the topological stress of DNAs. The typical steps in the enzyme reaction cycle are binding of Topo to DNA, ATP driven strand passage, strand cleavage by Topo, formation of Topo-DNA cleavage complex, religation of cleaved DNA, and catalytic cycle after DNA cleavage/enzyme turnover. Blocking any of these reaction steps would lead to the inhibition of the enzyme which culminate to cell death.

In the current research work, I have utilized a “scaffolded DNA origami” structure as a novel scaffold for the preparation of topologically constrained catenane, and for the analysis of Topo reaction and drug screening. In 2006, “scaffolded DNA origami” method - the folding of DNA strand to create almost any arbitrary two- and three-dimensional nanostructures, was developed by Rothemund (Nature, 2006, 440, 297-302). Since then it was successfully utilized for the nanopatterning of transition metals, nanoparticles, proteins, virus-like particles, and other functional components into deliberately designed arrangements. It was also applied for the analysis of various reactions and functions at single-molecule level. To the best of my knowledge, DNA origami nanostructures were not used for the screening of any drug molecule. Thus, by considering the potential of DNA origami, it is of great interest at the current situation to use these nanostructures for the formation of the topologically constrained DNA structure, analyze the function of DNA topology specific proteins such as Topo enzymes, and further to investigate the inhibition mechanism of the protein reactions by drug molecules.

As designed, the DNA origami frame is now successfully prepared. I have also inserted a catenane structure inside the origami frame which is characterized by the high-speed atomic force microscopy. However, the yield of the catenane inside the origami frame is too low. The optimization of the conditions for the formation and insertion of the catenane inside the DNA origami frame are now underway. Further, I have investigated the stability of the DNA origami frame and the catenane structure in the presence of various kinds of Topo inhibitors. Both the origami and the catenane are stable against the Topo inhibitors for several hours at room temperature. This indicated that the DNA origami based analysis of Topo inhibitors could be

successfully carried out. After increasing the yield of the catenane inside the origami frame, the Topo reaction and the drug screening will be carried out.

(発表論文)

- 1) A. Rajendran, M. Endo, K. Hidaka, M.-P. Teulade-Fichou, J.-L. Mergny, H. Sugiyama, Small molecule binding to G-hairpin and G-triplex: A new insight in anticancer drug design targeting G-rich regions, *Chem. Commun.*, **2015**, *51*, 9181-9184.
- 2) A. Rajendran, M. Endo, H. Sugiyama, State-of-the-art high-speed atomic force microscopy for investigation of single-molecular dynamics of proteins, *Chem. Rev.*, **2014**, *114*, 1493-1520.
- 3) A. Rajendran, M. Endo, H. Sugiyama, Single-molecule analysis using DNA origami, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2012**, *51*, 874-890.
- 4) A. Rajendran, M. Endo, K. Hidaka, H. Sugiyama, Direct and single-molecule visualization of the solution-state structures of G-hairpin and G-triplex intermediates, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2014**, *53*, 4107-4112.
- 5) A. Rajendran, M. Endo, K. Hidaka, P.L.T. Tran, J.-L. Mergny, R. Gorelick, H. Sugiyama, HIV-1 nucleocapsid proteins as molecular chaperones for tetramolecular antiparallel G-quadruplex formation, *J. Am. Chem. Soc.*, **2013**, *135*, 18575-18585.
- 6) A. Rajendran, M. Endo, K. Hidaka, P.L.T. Tran, J.-L. Mergny, H. Sugiyama, Controlling the stoichiometry and strand polarity of a tetramolecular G-quadruplex structure by using a DNA origami frame, *Nucleic Acids Res.*, **2013**, *41*, 8738-8747.
- 7) A. Rajendran, M. Endo, K. Hidaka, H. Sugiyama, Direct and real-time observation of rotary movement of a DNA nanomechanical device, *J. Am. Chem. Soc.*, **2013**, *135*, 1117-1123.
- 8) A. Rajendran, M. Endo, Y. Katsuda, K. Hidaka, H. Sugiyama, Photo-cross-linking-assisted thermal stability of DNA origami structures and its application for higher-temperature self-assembly, *J. Am. Chem. Soc.*, **2011**, *133*, 14488-14491.



### 3.6. エネルギー複合機構研究センター

エネルギー複合機構研究センター（以後センターと略称）は、平成8年度の研究所改組により、研究所固有の研究教育分野とは一線を画した、プロジェクト的性格のより強い共同研究を機動的かつ横断的に遂行できるよう設置されたもので、既存の大型設備を充実・発展させるとともに、研究所が設定した「重点研究課題」に関わる共同研究を推進してきた。平成18年度、改組発足以来10年間の研究所重点研究課題の進展状況、ならびに国内外のエネルギー理工学研究関連分野の状況変化に鑑み、センター研究を「プラズマエネルギーに関する学理・技術の新領域開拓」および「エネルギー指向型先進的ナノバイオ機能材料創出」をミッションとする2つの複合研究領域に集中・特化させ、センター基幹装置を始めとする、センターが培ってきた研究基盤施設・施設を最大限に活用し、また国内外の他研究機関との連携融合研究を一層強化するため、研究体制を改組・再編した。

新体制下では、「先進プラズマ・量子エネルギー研究推進部」および「光・エネルギーナノサイエンス研究推進部」が上述の複合研究領域の活動する母体となり、加えて、「国際流動・開発共同研究推進部」を設置、国際的な活動の中軸とする流動・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活かしたプロジェクト推進が可能となるよう、「ADNIRE エネルギー産業利用推進室」を始めとする「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・先導的共同研究等の推進と、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、センター附属研究分野がおかれ、教授1名および准教授1名が配属されている。

## 1. 構成員

教授：木下正弘

## 2. 研究の概要

蛋白質の折り畳み、種々のタイプの分子認識、生体分子の高次構造形成など、生命を支える種々のプロセスのメカニズムを「水の並進配置エントロピーの役割」に重点を置いて解明する。独自の統計熱力学理論（生体分子の立体構造を原子レベルで考慮し、水をも分子集団として扱う）を構築しつつ、生体分子の水和の熱力学、蛋白質の折り畳みと変性の微視的機構、ATP 駆動およびプロトン駆動蛋白質の機能発現機構、立体構造が未知の膜蛋白質の安定性を高めるアミノ酸置換の予測などの重要課題と取り組む。ナノバイオテクノロジーの基礎を与えると共に、新学術領域の開拓を目指す。

## 3. 主な研究成果

## 3.1. 種々のタイプの分子認識機構の統一的説明（発表論文1、2）

天然変性蛋白質は単独では変性状態にあるが、標的分子に合わせた特定の立体構造を形成しつつそれと結合する。天然変性蛋白質のこのような分子認識機構は一般に特別扱いされているが、実は鍵と鍵穴モデルや適合融合モデルで記述できる分子認識機構と基本的に同じメカニズムを共有することを示した。2つの生体分子が結合すると、(a)生体分子間の静電引力相互作用の獲得によるエネルギー低下、(b)生体分子間のファン・デル・ワールス引力相互作用の獲得によるエネルギー低下、(c)生体分子-水分子間の静電引力相互作用の喪失によるエネルギー上昇、(d)生体分子-水分子間のファン・デル・ワールス引力相互作用の喪失によるエネルギー上昇、(e)水のエントロピー利得、(f)生体分子の構造エントロピー損失が生じる。(c)と(d)には水構造の再構成に起因するエネルギー変化も含まれる。2つの生体分子が結合できる場合、(a)と(c)、(b)と(d)は互いに相殺し合う傾向にあるが、(c)は(a)よりもやや大きく、(b)は(d)よりもやや大きい。結果として、全エネルギー変化(a)+(b)+(c)+(d)はほとんどゼロとなる。一方、(e)は(f)を凌駕し、結合の駆動力となる。(e)が駆動力となる場合、2つの生体分子の原子レベルの「形の相補性」が極めて重要になる。2つの生体分子が結合できないのは、(e)を十分に大きくしようとする(a)+(c)が大きな正の値になってしまう場合にみられる。すなわち、2つの生体分子の結合部位の「電荷の相補性」も重要となる。これら2つの相補性がうまく実現できる場合のみ、2つの生体分子は結合できる。「水のエントロピー利得」をもたらす主要因子は、結合に伴って水分子の並進移動に利用可能な空間の体積が増加し、水分子間の混み合いが緩和されることである。

## 3.2. ATP 駆動およびプロトン駆動蛋白質の機能発現機構の統一的説明（発表論文3、4）

「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（以下、サイクル）を利用するモーター蛋白質と呼ばれる一連の蛋白質がある。それらの機能発現機構に対する斬新な描像を以下の例題と取り組みつつ構築した：①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；②ABC トランスポーターによる多剤排出（種々の性質を持つ溶質を挿入・放出できるという意味）；③シャペロニンによる変性蛋白質の挿入と折り畳みを終えた蛋白質の放出；④F1-ATPase 中の・サブユニットの一方向回転。①～③に対して、水分子の並進移動に起因したエントロピー効果を軸として、蛋白質複合体-溶質 or ミオシン間に平均力のポテンシャル（両者が無限に離れた場合を基準にした、両者がある位置関係に存在するときの系の自由エネルギー）の空間分布が形成されることを示した。種々の大きさを持つ溶質を挿入・放出できるという「多剤性」を初めて説明した。

プロトン駆動蛋白質（プロトンの高濃度側から低濃度側への移行を利用して機能する蛋白質）の例として 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共に、④で見られる回転のメカニズムとの類似性を明らかにした。AcrB の研究においては、以下を示すことができた：プロトマー単独で薬剤排出を行うための構造変化を行うことは、途中で水の自由エネルギーの非常に大きな上昇が要求されるため事実上不可能である；しかし、トリマーでは、あるプロトマーの構造変化が水の自由エネルギー上昇を伴うとき、他の2つのプロトマーがそれを打ち消すように構造変化をすることにより、水の自由エネルギーをほぼ一定に保つことができる；その結果、1サイクルで、たった1個のプロトマーを高濃度側から低濃度側に移行させることによって生じる僅かな自由エネルギー低下で薬剤排出のための構造変化が可能となる。「水の自由エネルギーをほぼ一定に保つことができるような構造変化」には、主として水分子の並進移動に起因するエントロピー効果が主導的な役割を果たす。この成果は、生物の高効率なエネルギー利用システムの理解を深めるものである。

例えば、AcrB や F1-ATPase では、回転の前後で蛋白質複合体の立体構造は全く同じである。それ

なのに何故一方向の回転が起こるのか。回転が「水溶液中における ATP の加水分解」や「プロトンの高濃度側から低濃度側への移行」という不可逆過程とカップルし、自由エネルギー低下を伴うからである。

### 3.3. アミノ酸置換や共溶媒添加による蛋白質立体構造安定性の変化の予測 (発表論文 5, 6)

アミノ酸置換や、種々の糖・種々の 1 価および多価アルコール・尿素などの共溶媒を添加した場合に生じる熱変性温度  $T_m$  の上昇あるいは低下の度合いを定量的に予測できる統計熱力学理論を構築し、実験データとの比較によってその有効性を検証した。多重アミノ酸置換に対しては、有名な予測法 FOLD-X よりも優れた性能を有することを示した。同じモル濃度で比較すると、1 価アルコールでは  $T_m$  は低下しその度合いはアルコール分子中の疎水基が大きいほど大きいこと、多価アルコールでは  $T_m$  は上昇しその度合いはアルコール分子中の OH 基の数が多いほど大きいこと、糖では  $T_m$  は上昇しその度合いはグルコースよりもスクロースの方が大きいことを見事に説明できた。

G 蛋白質共役型受容体(GPCR)は非常に重要な創薬のターゲットであるが、立体構造安定性が低い(立体構造が崩れ易い)ため、X 線結晶解析によって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。GPCR の立体構造形成に伴う自由エネルギー低下  $\Delta G$  の理論計算法を構築し、その立体構造安定性が向上する(すなわち、 $-\Delta G$  が大きくなる)アミノ酸置換を予測できる有効な方法を開発した。膜蛋白質の立体構造安定性に、細胞膜を構成する炭化水素基の並進移動に起因するエントロピー効果が極めて重要な役割を果たすことを初めて指摘し、その効果を取り入れた独創性の高い計算法である。計算時間が極めて短いので、非常に多くのアミノ酸置換をテストできることも大きな強みである。第一段階として、立体構造が分かっているアデノシン A2a 受容体に対して予測的中率が従来法と比較にならないほど高いことを実験的に確認した。

(発表論文)

- 1) T. Hayashi, H. Oshima, T. Mashima, T. Nagata, M. Katahira, and M. Kinoshita, "Binding of an RNA Aptamer and a Partial Peptide of a Prion Protein: Crucial Importance of Water Entropy in Molecular Recognition", *Nucleic Acids Research*, 42, 6861-6875 (2014).
- 2) T. Hayashi, H. Oshima, S. Yasuda, and M. Kinoshita, "Mechanism of One-to-Many Molecular Recognition Accompanying Target-Dependent Structure Formation: For the Tumor Suppressor p53 Protein as an Example", *Journal of Physical Chemistry B*, 119, 14120-14129 (2015).
- 3) H. Mishima, H. Oshima, S. Yasuda, K. Amano, and M. Kinoshita, "On the Physics of Multidrug Efflux through a Biomolecular Complex", *Journal of Chemical Physics*, 139, 205102(1-13) (2013).
- 4) H. Mishima, H. Oshima, S. Yasuda, and M. Kinoshita, "Statistical Thermodynamics for Functionally Rotating Mechanism of the Multidrug Efflux Transporter AcrB", *Journal of Physical Chemistry B*, 119, 3423-3433 (2015).
- 5) H. Oshima and M. Kinoshita, "Effects of Sugars on the Thermal Stability of a Protein", *Journal of Chemical Physics*, 138, 245101(1-12) (2013).
- 6) S. Murakami, H. Oshima, T. Hayashi, and M. Kinoshita, "On the Physics of Thermal-Stability Changes upon Mutations of a Protein", *Journal of Chemical Physics*, 143, 125102(1-13) (2015).
- 7) T. Yoshidome, K. Oda, Y. Harano, R. Roth, Y. Sugita, M. Ikeguchi, and M. Kinoshita, "Free-Energy Function Based on an All-Atom Model for Proteins", *Proteins – Structure Function and Bioinformatics*, 77, 950-961 (2009).
- 8) S. Yasuda, T. Yoshidome, Y. Harano, R. Roth, H. Oshima, K. Oda, Y. Sugita, M. Ikeguchi, and M. Kinoshita, "Free-Energy Function for Discriminating the Native Fold of a Protein from Misfolded Decoys", *Proteins – Structure Function and Bioinformatics*, 79, 2161-2171 (2011).
- 9) H. Mishima, S. Yasuda, T. Yoshidome, H. Oshima, Y. Harano, M. Ikeguchi, and M. Kinoshita: Characterization of Experimentally Determined Native-Structure Models of a Protein Using Energetic and Entropic Components of Free-Energy Function, *Journal of Physical Chemistry B*, 116, 7776-7786 (2012).
- 10) S. Yasuda, H. Oshima, and M. Kinoshita, "Structural Stability of Proteins in Aqueous and Nonpolar Environments", *Journal of Chemical Physics*, 137, 135103(1-14) (2012).

## 1. 構成員

准教授：岡田浩之（H17.8～）

## 2. 研究の概要

高速イオン生成、トラスプラズマ中の高速粒子閉じ込めの磁場構造に対する依存性とその結果として生ずるバルクプラズマ加熱の研究、高速イオンとプラズマ対向材との相互作用、TV トムソン計測装置の開発を主な研究テーマとした。イオンサイクロトロン周波数帯（ICRF）加熱および中性粒子ビーム入射（NBI）加熱を組み合わせ、NBI入射粒子のさらなる加速も行い、エネルギー範囲の拡大を行った。モンテカルロ計算を含めて、速度分布の磁場配位、空間分布を調べヘリカル軸ヘリオトロンプラズマ閉じ込めを解明する。

## 3. 主な研究成果

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

非軸対称磁場を持つヘリオトロンJで実現される様々な磁場配位に対し、ICRFで生成される高速イオンのエネルギースペクトルを、さまざまなピッチ角（磁場と速度のなす角）で計測し、さらにモンテカルロ法を用いたモデル計算によって、実空間および速度空間での分布を評価する。これらから磁場の性質を特徴づけるフーリエ成分との関係性を求め、非軸対称磁場中でのICRF加熱の機構を解明するとともに、よりよい加熱を行えるような加熱位置、アンテナ電流分布などを求め、高効率な加熱法の確立を目指すことを目的とする。磁場配位のうち、バンピネス（Boozer座標におけるトロイダル方向の磁場リップル）を0.15（高バンピネス配位）、0.06（中バンピネス配位）、0.01（低バンピネス配位）の3条件で変えて実験、計算を行った。ここでは計算結果について述べる。

低密度プラズマにおける実験条件の磁場配位、プラズマパラメータを入力値として、ICRF加熱は共鳴層を少数水素イオンが通過するときに加速されるというモデルでモンテカルロ計算を行った。プラズマのトロイダル方向、ポロイダル方向をそれぞれ16分割してデータを取得した。ヘリオトロンJプラズマはトロイダル方向に4周期であるため、同一部分は合算して評価した。ここで比較したのはプラズマのコーナー部（ZONE1）と直線部（ZONE3）である。計算は高バンピネス、中バンピネス、低バンピネスについて行った。高バンピネスではピッチ角 $120^\circ$ 、 $60^\circ$ 付近に高速イオンのテールが生成された。中バンピネス、低バンピネスではテールの角度が $90^\circ$ 側に少しずつ接近している。また、中バンピネスでは $60^\circ$ 付近のテール形成が最も小さい。ZONE1とZONE3とを比較すると、ZONE1の高速イオンが、ZONE3と比較すると多いが、その差は全ての場合において大きくはない。

### 3.2. NBIおよびICRF重畳加熱による高速イオン生成（研究論文2）

中性粒子ビーム入射でプラズマ中に生成された25keVのイオンにICRFパルスを重ねし、高速粒子のさらなる加速を試みた。また、新古典論から良好な閉じ込めが期待される低 $\epsilon_t$ 配位での実験も開始した。NBI加熱とECHで生成されたターゲットプラズマにICRFを重ねし、 $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の密度での加熱実験を行なった。NBIはBL2（約400kW）、ICRF（約300kW）、ECH（約330kW）という条件である。

荷電交換中性粒子分析器（CX-NPA）を入射エネルギー（E0）25keVのBL-2による入射粒子の方向に水平角を向け、少数イオンである水素を観測した。プラズマ生成の供給ガスは重水素であるが、NBIは水素入射、接線入射である。ここで少数イオンである水素比はICRFパルス中で10%程度である。また、ICRFパルス入射前のイオン温度は100eV–200eVである。磁場配位はlow- $\epsilon_t$ および高バンピネスで、両者ともCX-NPAの水平視線角を $12^\circ$ にした場合である。トラス中心を見込む角度を $0^\circ$ と定義した。low- $\epsilon_t$ 配位でのICRF入射前の水素のエネルギースペクトルでは、ICRF入射前の水素のエネルギースペクトルにE0/3、E0/2にピークがあるのが分かる。ピークは若干低エネルギー側にシフトしている。4keVから10keVの範囲ではICRFパルス中に粒子束は減少しているが、それ以上のエネルギーでは粒子数が増加している。最大検出エネルギーは60keVに達している。の高バンピネス配位ではICRFパルス中にはほぼすべての観測エネルギー範囲で計測された中性粒子束が増加している。最大観測エネルギーは33keVでありlow- $\epsilon_t$ の場合と比較すると低い。NBIを用いないICRF加熱とECHのみの場合の低密度範囲の実験では高バンピネスは最も高エネルギーイオンが生成・閉じ込められる配位であるが、この実験からlow- $\epsilon_t$ 配位においてさらに高効率の高エネルギーイオン生成の可能性があることが分かった。今後ピッチ角依存を含めさらに広範囲の高イオン計測し、加熱特性を含めプラズマ全体の総括的な特性を調べる必要がある。

実験条件の磁場配位、プラズマパラメータを入力値として、ICRF加熱は共鳴層を少数水素イオンが通過するときに加速されるというモデルでモンテカルロ計算を行った。入射粒子としてNBIビームを想定し一定速

度の 5000 粒子をヘリオトロンプラズマの直線部プラズマ中心の 1 点から出発させ、ヘリオトロン J の磁場配位で軌道計算を行い、クーロン衝突によるピッチ角散乱、エネルギー散乱を含めて、ICRF 加熱による粒子加速を求めた。磁場配位は low- $\epsilon t$  および高バンピネスである。計算開始から 1.5 ms から 2.0 ms までを積算した結果を比較した。RF 電場とクーロン散乱によって加速と速度空間での広がりがみられる。最大加速方向は low- $\epsilon t$  では 55°付近、高バンピネスでは 45°付近である。両者を比較すると low- $\epsilon t$  の方が高エネルギーまでの分布の広がりが観測される。これは実験の結果と同様の傾向を示している。

### 3.3. PC UNIX 用いたガスパフ制御システムの開発

京都大学エネルギー理工学研究所で行っているヘリオトロン J を用いたプラズマ実験用として、ガスパフ制御システムの開発が必要となった。ガスパフシステムはヘリオトロン J への粒子供給を行う主要な装置であり、密度制御には不可欠である。このシステムはピエゾ素子を利用したガスバルブを制御するものであるが、2つのモードが存在する。最初のもはヘリオトロン J の通常のプラズマ実験用にたいするものである。プラズマ持続時間が 0.2 秒程度であり、バルブの時間応答なども考慮に入れた結果 1 ms 程度の時間で、現状最低 2 チャンネルの制御が必要であり、拡張も考えて 4 チャンネルを用意することとした。また、トリガもコイルの立ち上がり、プラズマ生成、コイルの立下りと 3 つのトリガを認識する必要があり、それぞれに独自の電圧パターンの出力が必要である。これらの機能を市販の汎用 PCI バスの DAC カードと I/O カードとを用いて、ヘリオトロン J のデータ処理システムに組み込んで動作可能なように PC UNIX 上のシステムを開発した。また、実験上の要請から通常の 10 ms 間隔のガス制御とは別に、異なる時間間隔でのガス制御も可能なようプログラムを作成した。プログラムは通常のユーザプログラムと UNIX カーネルの一部であるデバイスドライバとからなる。電圧設定などはユーザプログラムで、トリガ制御およびアナログ電圧出力はデバイスドライバ上で動作する。ノイズ抑制も重要な点であり、同一シーケンス中での複数回の同一トリガ入力の抑制や、インターバル中のトリガ入力禁止などを行った結果、ノイズによる誤動作を解消することができ、現在は安定してガス供給を行うシステムとして稼働中である。

もう一つのモードは放電洗浄用で、通常 8 時間程度継続して 1 分間のプラズマの生成、1 分間の休止を繰り返し行うものである。ガスについては一定量を供給する形になるが、手動でその設定を変えるようにするとともに、一定間隔でピエゾバルブのリフレッシュのためパルス的な電圧消滅を行う必要がある。また、ガスの供給データ保存と表示を行う必要がある。データ表示に関しては過去のデータ参照機能も備えたものとして作成した。通常の実験モード、放電洗浄モードについて、チャンネル数がさらに必要な場合にも DAC カードを増設することにより容易にシステムを拡張可能なように設計した。

#### (発表論文)

- 1) H. Okada, et al., “Analysis of fast ion distribution generated by ICRF heating in Heliotron J”, Plasma Conference 2014, Nov.18-21, 2014, Toki Messe, Niigata, 21PA-016.
- 2) H. Okada, et al., “Magnetic Field Optimization Study for Fast Ions Generated by ICRF Heating in Heliotron J”, 20th International Stellarator-Heliotron Workshop (ISHW), Oct.5-9, 2015, Greifswald, Germany, P2S3-36.



#### 4. 拠点形成促進事業

## 4. 拠点形成促進事業

本研究所は、開所以来、先進エネルギー開発における国際的な研究拠点形成を目指し、自助努力（所内経費）や豊富な競争的外部資金により、施設・設備投資を行い、拠点としての機能付与に努めてきた。平成27年度までに、以下の事業を実施している。

- 1) 共同利用・共同研究拠点（ゼロエミッションエネルギー研究拠点）
- 2) 双方向型共同研究（Heliotron J）
- 3) 先端研究施設共用促進事業
- 4) 革新的高効率太陽光利用技術の開発
- 5) 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

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

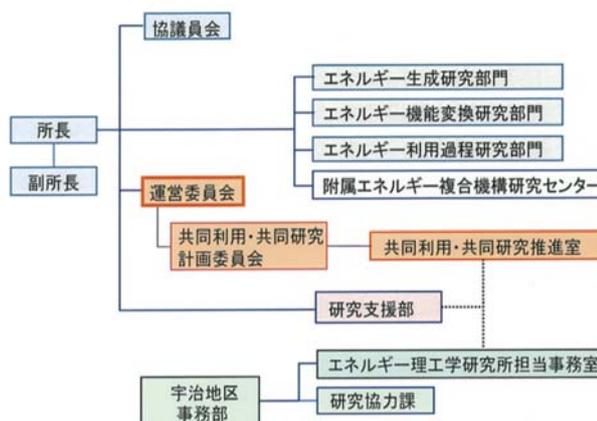
平成 23 年度～

### 1. 事業の目的・目標

本所の第 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、並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、平成 23 年度から本拠点事業を開始した。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エネルギー科学研究科等における教育研究活動とも連携し、ZE 社会建設のための多様なエネルギーによる総合システム概念を構築し、その中での研究拠点としての機能を果たすことを目標とする。

### 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及び審議し、運営委員会及び研究所協議委員会の議を経て、その実施にあたる共同利用・共同研究計画委員会（学外 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。



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」ならびに「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。（H25：32 件、H26：25 件、H27：32 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ィに基づき自由に提案する課題。（H25:44 件、H26:47 件、H27:46 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。(H25:1件、H26:3件、H27:7件)
- ・研究集会：ZE研究に関連する研究集会の開催。(H26:1件(試行期間)、H27:1件)

区分	平成 25 年度								
	機関数	受入人数				延べ人数			
			外国人	若手	院生		外国人	若手	院生
学内(法人内)	0	0	0	-	0	0	0	-	0
国立大学	16	71	12	-	27	145	16	-	55
公立大学	3	50	2	-	22	50	2	-	22
私立大学	6	42	0	-	2	81	0	-	5
大学共同利用機関法人	3	24	0	-	12	58	0	-	19
独立行政法人等 公的研究機関	4	15	0	-	0	34	0	-	0
民間機関	0	0	0	-	0	0	0	-	0
外国機関	1	2	0	-	0	9	0	-	0
その他	0	2	0	-	0	4	0	-	0
計	33	206	14	-	63	381	18	-	101
区分	平成 26 年度								
	機関数	受入人数				延べ人数			
			外国人	若手	院生		外国人	若手	院生
学内(法人内)	1	5	0	3	3	5	0	3	2
国立大学	17	50	1	9	20	118	2	20	58
公立大学	3	37	0	0	17	20	0	0	21
私立大学	12	7	0	2	1	13	0	3	1
大学共同利用機関法人	0	2	0	0	0	4	0	0	0
独立行政法人等 公的研究機関	8	25	0	6	0	44	0	14	0
民間機関	0	0	0	0	0	0	0	0	0
外国機関	3	3	2	0	1	16	9	0	4
その他	1	3	0	0	0	15	0	0	0
計	45	132	3	20	42	235	11	40	86
区分	平成 27 年度								
	機関数	受入人数				延べ人数			
			外国人	若手	院生		外国人	若手	院生
学内(法人内)	4	12	1	7	5	22	1	11	5
国立大学	22	80	10	39	15	150	15	65	26
公立大学	2	17	0	5	10	24	0	4	12
私立大学	5	17	0	3	1	28	0	7	1
大学共同利用機関法人	1	6	0	3	0	9	0	0	0
独立行政法人等 公的研究機関	1	10	1	5	0	24	4	2	0
民間機関	0	0	0	0	0	0	0	0	0
外国機関	2	3	1	1	0	12	4	4	0
その他	0	0	0	0	0	0	0	0	0
計	37	145	13	59	31	269	24	104	44

### 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1回程度の講習会を企画・実施している。本講習会は、研究者のみではなく、大学院生・学部生にも開放し、次世代を担う人材養成にも役立てた。(H25:高速原子間力顕微鏡取扱講習会、H26:全反射照明蛍光(TIRF)顕微鏡講習会および超解像測定技術紹介、H27:新TV会議システム講習会)

### 3.3. 国際シンポジウム等研究集会の開催

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

研究会・シンポジウム等の実施状況(研究所関連分も含む)

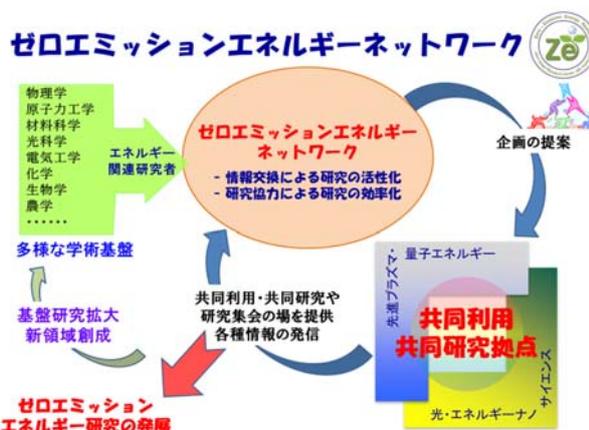
年度	シンポジウム		講演会 セミナー		研究会 ワークショップ		その他		合計	
	件数	参加人数	件数	参加人数	件数	参加人数	件数	参加人数	件数	参加人数
25	7	949	29	1,040	5	126	1	6	42	2,121
26	5	648	9	414	12	940	3	50	29	1,602
27	11	1,116	21	541	13	419	4	57	49	2,133

### 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」を始動した。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へ向け作業を始めた。

### 4. 主な成果

公募型共同利用・共同研究成果は、毎年度末に発刊する成果報告書に纏められている。本共同利用・共同研究による論文数は、平成25年度37編(所外研究者によるもの31編)、平成26年度55編(同、48編)、平成27年度71編(同、55編)となっている。中でも、国際学術誌掲載論文数では、平成25年度23編(所外研究者によるもの21編)、平成26年度52編(同、46件)、平成27年度61編(同、44編)となっている。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 -アンダーワンループ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。



#### 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25年度		平成26年度		平成27年度	
論文数	37		55		71	
内、国際学術誌に掲載された論文数	(31)	23 (21)	(48)	52 (46)	(55)	61 (44)

※下段の( )内は、拠点外の研究者による成果(内数)。

### 5. 今後の課題と計画

- 第3期中期期間においては、ZE研究拠点の一層の機能強化のため、①組織体制整備によるIR機能強化、②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、③先進エネルギー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、④国際感覚の養成を目指す。

指した人材育成を行う。また、⑤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等、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等、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開くコミュニティを形成、先進エネルギー（ZE）理工学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。

- 持続可能な発展に不可欠な「量」と「質」を保証する先進エネルギーとしての ZE の基本理念を、同時に、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 に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、核融合研の共同利用設備と同等なものとして見做し、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) はヘリオトロン J に関わる全国規模の共同研究となっている。

ヘリオトロン J は、京大グループから提案された先進磁場配位、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 1 つとして、磁場分布制御技術を用いたプラズマ輸送・安定性改善の研究を進め、先導的な閉じ込め装置としての基本的性能を検証した。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進展させることを研究の主目的とするとともに、核融合科学研究所 LHD 装置の高性能化および環状プラズマの総合的理解に貢献し、定常環状プラズマ型核融合炉の実現を目指す理学・工学の体系化に寄与することを目指した。

### 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共に、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ヘリオトロン 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。ヘリオトロン 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 2 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、「ジャイロトロンを使った高密度プラズマ加熱」と「境界領域における熱粒子制御」をセンター間連携研究として特設、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進展できることが期待されている。

### 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、全てが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する。第 2 期中期計画期間における採択研究課題数は毎年約 20 課題程度、参画機関数は約 13 機関程度、参加者数は約 110 名程度である。第 2 期中期計画期間において、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・効率化が急速に進展した。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、中型装置であるヘリオトロン 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。新領域の研究展開に効果的に貢献可能となり、その成果を高温プラズマ実験に反映させていくことが期待される。また、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。毎年度末、NIFS にて年度成果報告会が開催さ

れ、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並びに進捗状況は成果報告書として公開されている。

#### 4. 主な成果

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

第 2 期中期計画期間後半 3 年間（平成 25～27 年度）での興味深い主な成果を、以下に列挙する。

- (1) プラズマ閉じ込めと密接な関連を持つプラズマ流の実験的研究が進んだ。プラズマの磁場に平行な流れを荷電交換分光法で計測、異なる磁場配位における平行流の特性について、新古典輸送理論の予測と比較した。その結果、NBI による外部運動量注入効果は、平行粘性に関わる新古典輸送理論の予測と比較的良好一致を示すこと、また、実験的に見出される周辺部の自発的な流れの存在は、新古典論の予測と概ね矛盾しないことなどを明らかにした。【S. Kobayashi, et al., APPC (2013) D1-5-O4. S. Kobayashi, et al., IAEA-FEC 2014 (2014)】
- (2) 局所プラズマ計測器整備の一環として進められた Nd:YAG トムソン散乱計測装置が稼動を開始し、ECH プラズマにおいて電子輸送障壁 (eITB) が形成されていることを初めて示した。収束 ECH ビームをプラズマ中心軸に入射し、ECH 入射電力と密度をパラメータとして eITB 発現条件が調べられた。標準磁場配位で、入射電力 330kW では  $1.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  以下の密度で中心温度の急激な上昇が得られる。他のヘリカル装置における eITB 特性と比較することにより、eITB 物理に関する知見の深化が期待される。【T. Minami et al., 20th ISHW (2015)】
- (3) 標準磁場配位や高バンピー磁場配位と比してトロイダル磁場成分を減少させた配位 (low- $\epsilon_i$  配位) でのプラズマ性能の検証が進展した。本配位ではコア部の高密度化 ( $\sim 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ) が実現されているが、その際、H-モード遷移様の H $\alpha$  発光強度低下が観測されることがある。この様な遷移現象の前駆現象として幾つかの興味深い観測が行われ、それぞれの関連性が議論されている。【S. Kobayashi, et al., 15th H-mode WS (2015)】一方、ICRF 加熱実験では、本 low- $\epsilon_i$  磁場配位において効果的な fast ion tail 生成が観測され、今後、本配位におけるプラズマ特性の研究の進展とそれによる磁場配位の最適化への研究が期待される。【H. Okada, et al., 20th ISHW (2015)】
- (4) LHD 実験では、低次 MHD 揺動の発現により巨視的閉じ込め性能の劣化や共鳴有理面近傍の圧力勾配の劣化が観測され、その劣化度合いや劣化領域の大きさは、揺動強度に強く依存することが知られている。LHD と異なり、低磁場シア装置であるヘリオトロン J における閉じ込め性能の劣化度と LHD のそれを比較することで、磁気シア特性が閉じ込め性能へ与える影響を調べることが可能である。密度やプラズマ電流の時間変化制御により、放電途中で MHD 不安定性を発現させ、不安定性の特性と閉じ込め性能の変化を調査したところ、不安定性の発現により、巨視的閉じ込め性能が 10%程度劣化することが分かった。今後、圧力劣化領域と揺動強度・分布の関係を解析して行く。【K. Watanabe, et al., 平成 27 年度双方向型共同研究成果報告書】
- (5) 粒子補給制御等による閉じ込め改善を目指し、超音速分子ビーム入射法 (SMBI) や高強度短パルス・ガスパフ法 (HIGP) の開発と、それらによるプラズマ特性の相違を研究する中、ペレット入射法の開発も続けてきた。平成 27 年度、初めてのペレット入射実験に成功した。今後、SMBI や HIGP との組み合わせも含め、より高密度の運転領域開拓にむけ、粒子補給条件最適化研究が進むものと期待される。【G. Motojima, et al., 平成 27 年度双方向型共同研究成果報告書】
- (6) 電子サイクロトロン電流駆動 (ECCD) を用いた回転変換制御と高速イオン励起 MHD 不安定性の安定化制御の課題では、高速イオン励起不安定性を ECCD により磁気シア形成させ、関連する減衰機構を増加させることによって効果的に抑制できることを実験的に示した。【K. Nagasaki, et al., Nucl. Fusion 53 (2013) 113041. S. Yamamoto, et al., 19th ISHW (2013) IS5.]
- (7) 非共鳴マイクロ波補助による NBI プラズマの単独高速生成法を開発した。本手法による NBI プラズマ生成では、磁場強度、マイクロ波電力、ガス密度などが制御パラメータであり、とくに、種プラズマに電子密度の閾値 ( $2\text{-}3 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ ) があることを明らかにした。【S. Kobayashi, et al., 20th ISHW (2015)】
- (8) ヘリオトロン J に置いて観測された周辺プラズマ乱流特性と、理論シミュレーションモデルによる予測との比較が試みられた。シミュレーションでは、プロブやホール線の生成がイオン-電子の衝突頻度に支配される可能性が指摘され、トカマク装置 HL-2A での観測と矛盾しない結果を得た。一方、ヘリオトロン J の周辺プラズマ乱流データを統計処理すると、NBI プラズマの周辺プラズマにはプロブが存在するものの、ホールは余り観測されておらず、トカマクにおけるそれと異なる傾向を持つことが示唆された。【L. Zang, et al., PFR, 8 (2013) 1402066, J. Li, et al.

平成 25 年度双方向型共同研究成果報告書】

- (9) センター間連携研究課題「EBW 加熱・電流駆動及び EBE 計測」では、NIFS との共同研究により、低磁場下で 2.45GHz 波 (20kW) を用いて、遮断密度の約 20 倍の電子密度の over-dense プラズマの特性評価が進められ、動作ガス依存性・強いドップラーシフト共鳴等、EBW 加熱の物理特性を明らかにした。この結果を基に、高磁場下での EBE 計測準備を進めている。
- (10) センター間連携研究課題「境界プラズマ・ダイバータ熱粒子制御」では、東北大、筑波大、広島大等との共同研究が進められ、バイアス実験による L-H 遷移物理の解明、高感度高速カメラによる 2 次元画像計測に基づく周辺プラズマ揺動中の Blobs (filaments) 計測が進展した。また、粒子補給最適化に向けた研究も進展している。

この他、双方向型共同研究 (Heliotron J) による研究により東北大学大学院性が修士論文を完成させるなど、京都大学のみではなく、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

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する。また、W7-X (独) 実験が開始された。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 1 つは、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に対する磁場スペクトルとの関係を明らかにすること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とである。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、3 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。特に、第 2 中期期間で整備された局所プラズマ計測器の高度化、プラズマ分布制御技術の高度化、並びにそれらによる質の高い実験データの拡充・蓄積を行いつつ、ヘリオトロン J 装置の特徴である磁場分布制御を活用したプラズマ輸送改善とプラズマ構造形成制御の研究を推進する。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。



(京都大学、名古屋大学、東北大学、大阪大学、名古屋工業大学、東京理科大学) 連携協力活動を強化し、京都大学および名古屋大学以外の4大学から課題選定委員会メンバーとして、各1名ずつ、計4名を増員した。また、6大学で採択した課題に対しては、審査無しで、他大学で利用できるような仕組みを提唱し、6大学間において、原則、受け入れ可能な仕組みを構築した。

## 4. 主な成果

### 4.1 研究成果

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

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

・ネオジム磁石の電気自動車モーター用途では、ジュール加熱による温度上昇に伴う磁力の低下を防ぐため、希土類金属の添加が不可欠であるが、インターメタリックス社では、日本国際賞受賞者である佐川氏が主導して希土類の添加量を減らし、かつ性能を向上させる技術(粒界拡散法)を開発した。粒界拡散の機構解明とさらなる改良のための研究をADMIREで実施し、その成果(図2参照)は、特許申請および複数の学会発表に至った。

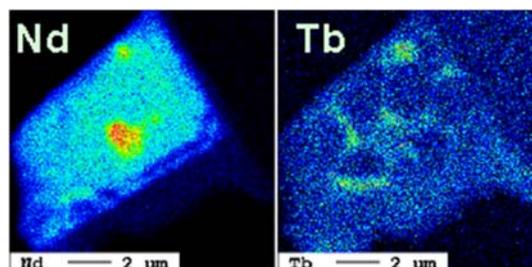


図2: ネオジム磁石の粒界におけるテルビウムの分布

#### 課題②「高温耐摩耗性材料の開発」社名(株)KVC

・石炭ガス化発電炉IGCCの心臓部とも言える高温過酷環境で使用される弁(図3)の開発において、軸受け材料の選定に引き続き、弁ボール表面硬化処理に関する研究を行った。数種類の硬化処理を行った候補材を実環境に近い条件で摩耗試験し、最適材料の選定のための必須データを取得した。トライアルユース後H24年度よりH27年度も共同研究として継続的に実施中である。IGCCのエネルギー源としての重要性から、大きな経済効果、雇用効果が期待されている。

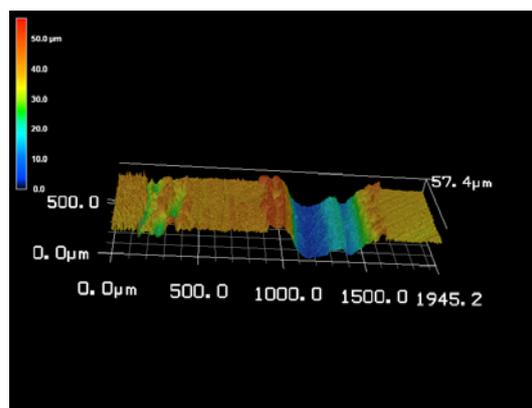


図3: 石炭ガス化発電炉IGCCの弁材料の摩耗試験

#### 課題③「黒鉛材料のイオン照射における照射挙動の分析」社名：イビデン(株)

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

#### 課題④「鋼材表面に生成した自己組織化酸化物膜の組成分析と防食機構の解明」社名：(株)京都マテリアルズ

・橋梁を初めとする鉄鋼製構造物は、防錆塗料塗布などでも経年により腐食が進行することが避けられない。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。図5の左の2枚の鉄板は塩水噴霧により錆を発生させたものであり、右の2枚はこれらにPatinaLockと一般の防錆塗料を施したものを、さ

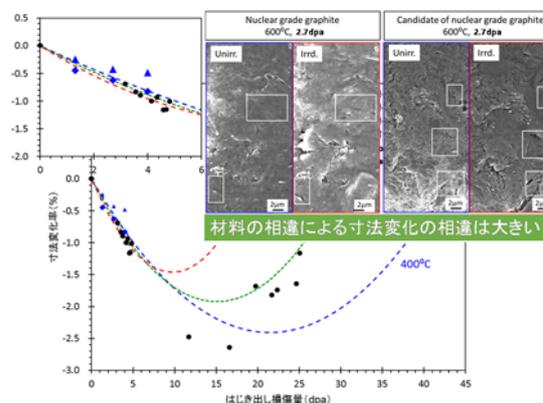


図4: イオン照射による黒鉛の体積変化率の損傷量および温度依存性

らに塩水噴霧試験したのちのもので、意図的に X 字型の傷を付けても PatinaLock を塗ったものは傷からも錆の生成がないことが分かる。ADMIRE ではこれらの試料の錆の分析を行い、防錆機構の解明に向けた重要な課題を分担している。

#### 4.2 研究成果などの新聞報道など

本事業に関する研究成果、先端研究施設の紹介に係わる報道などは、以下のとおりである。

1) NHK 取材(平成 27 年 10 月 16 日) : NHK-BS 「経済フロントライン」で放映(京都マテリアルズ)

#### 4.3 人材育成、若手のキャリアアップ

本事業では、博士研究員を雇用し、先端施設の整備及び共同研究を支援している。採択課題の中には成果占有利用を希望する場合があります、博士研究員の貢献を公開できない等の課題も多いが、この事業に参画した博士研究員 4 名のうち、3 名がそれぞれ中国北京科学技術大学講師、東北大学助教および日本原子力研究開発機構博士研究員に採用されている。

#### 5. 今後の位置づけと計画

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

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

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

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

#### 6. 課題

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

なお、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するが、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、引き続き実施して行く。



## 4.5. センター共同研究

平成8年度～

### 1. 事業の目的・目標

センター共同研究はエネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センターが主催する重要な活動の一つである。

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、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先進プラズマエネルギーおよび量子エネルギー研究、光エネルギーおよびエネルギーナノサイエンス研究を推進する、(2)国内外の研究機関・研究者との連携を深め、地球規模のエネルギー問題に対応できるエネルギー理工学研究ネットワークのハブ機能を強化する、という目的に対し重要な活動と位置づけられた。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、センター共同研究は、主にエネルギー理工学研究所が包括する様々な研究分野横断的複合領域研究の場を提供することを目的としている。

### 2. 体制および運営状況

平成18年のセンター改組により、第2期中期計画期間の目標を先取りした形で3研究推進部制を構築した。これにより、それぞれのプロジェクト研究(2重点領域研究推進ならびに国内外の研究機関・研究者との連携深化)に対応する研究組織を明確化し、これまで進めてきた共同利用・共同研究活動のさらなる発展に努め、同時に、より重要となったアカウンタビリティの所在も明らかにすることとした。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、先進プラズマ・量子エネルギー研究推進部、光・エネルギーナノサイエンス研究推進部が対応している。さらに、共同研究展開のグローバル化を睨み、「国際流動・開発共同研究推進部」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。

### 3. 活動状況

従来、研究所内外の研究者による共同研究の中心をセンター共同研究が担ってきたが、平成23年度から全国共同利用・共同研究拠点「ゼロエミッションエネルギー研究拠点」活動が始まったことを受け、所外研究者との共同研究は、平成23年度から原則的にゼロエミッションエネルギー研究拠点へ移行させた。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2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3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。

また、センターでは共同研究と並行して年4回程度の談話会を開催している。これは研究所の幅広い研究活動を紹介し合い、横断的な研究を促すことを目的としている。

#### 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 25-27 年度分）を下表に示す。

年度	A1： 国際流動・開発 共同研究推進部		A2： 先進プラズマ・量子 エネルギー研究推進部		A3： 光・エネルギーナノ サイエンス研究推進部		B： 共同利用
	基盤	奨励・企画	基盤	奨励・企画	基盤	奨励・企画	
平成 25 年	1 件	7 件 (1)	1 件	10 件	1 件	8 件	1 件 (1)
平成 26 年	1 件	4 件	1 件	11 件	1 件	5 件	0 件
平成 27 年	1 件	4 件	1 件	9 件	1 件	6 件	0 件

( ) は所外研究者が代表となったもの

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（1 課題につき 1 編（A4 用紙 2 枚以内））にまとめられている。

#### 5. 今後の課題と計画

##### [1] センター共同研究基本方針

当センターでは、上述の 3 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 2 種に分類し、公募する。なお、従来の「共同研究」枠は、所外研究者の共同利用は拠点の方で受け付けているため、平成 28 年度末のセンター研究計画委員会においてセンター共同研究としては本枠を設けないこととした。

##### (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 万円以下で推進出来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. 国際流動・開発共同研究推進部：

エネルギー理工学に関する先進的な国際共同研究の遂行を推進する。このために国際会議における研究成果の発信と国際動向の調査を行う。また海外の研究者を招聘して、シンポジウム・セミナー等を開催する。これらの活動によって醸成された基盤に基づいて、国際共同研究を実施する。また産官学共同研究を、文部科学省等および民間からの外部資金を獲得して遂行する。研究所内における分野間共同研究の活性化にも取り組む。さらに若手研究者のための勉強会を海外からも講師を招いて行う。以上により世界レベルの質の高い国際共同研究の遂行と国際的な人材の養成を達成する。

##### A2. 先進プラズマ・量子エネルギー研究推進部：

プラズマエネルギー科学と先進エネルギー材料科学の領域を中心として、各々の枠に囚われない自由な発想で、ゼロエミッションエネルギーシステムに代表される未来エネルギーシステムの創出につながる挑戦的・先進的なプラズマ・量子エネルギー研究を推進する。特に、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、双方向型共同研究等を通じて本研究所関連研究グループが培ってきたヘリオトロン J、DuET、MUSTER、IEC 等々のユニークな実験施設・装置を中心に、各々の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図るとともに、分野研究の融合を通じて新たな学術領域創成へ向けた活動を支援する。

##### A3. 光・エネルギーナノサイエンス研究推進部：

自然・生物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、かつロス無く電気や化学物資に変換・利用する自然の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、レーザーナノ、バイオ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、太陽電池研究施設、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。

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。

## 4.6. 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 年度～

### 1. 事業の目的・目標

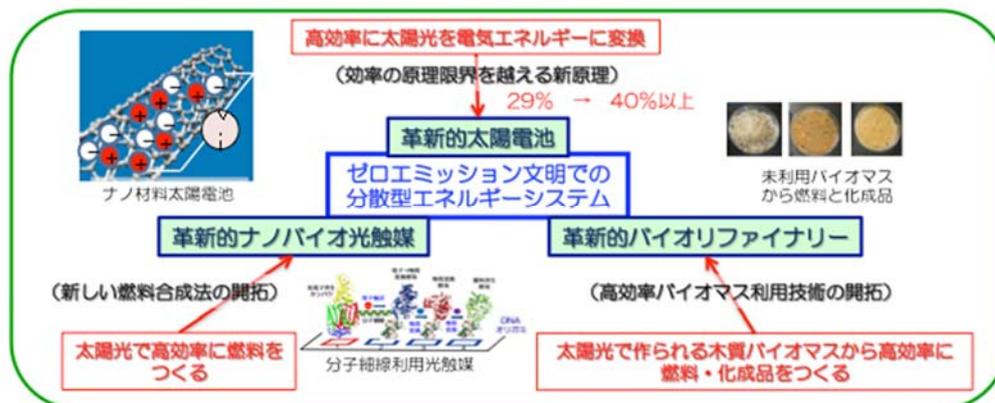
現在の文明が抱えるエネルギー・環境問題は、エネルギーの大量生産・大量消費に根本的な原因があるため、再生可能資源による代替エネルギー開発だけでは解決しない。「商品としてのエネルギーを大量生産、大量消費する」現在の文明から、「エネルギーを需要に対して最も効果的に生産・分配供給し、廃棄物を出さない」ゼロエミッション文明へと発想を転換するための学理の構築とそれに立脚した革新的エネルギー技術が必要である。

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」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柱として確立する。その研究支援体制をもとにして、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を設立、同時に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。



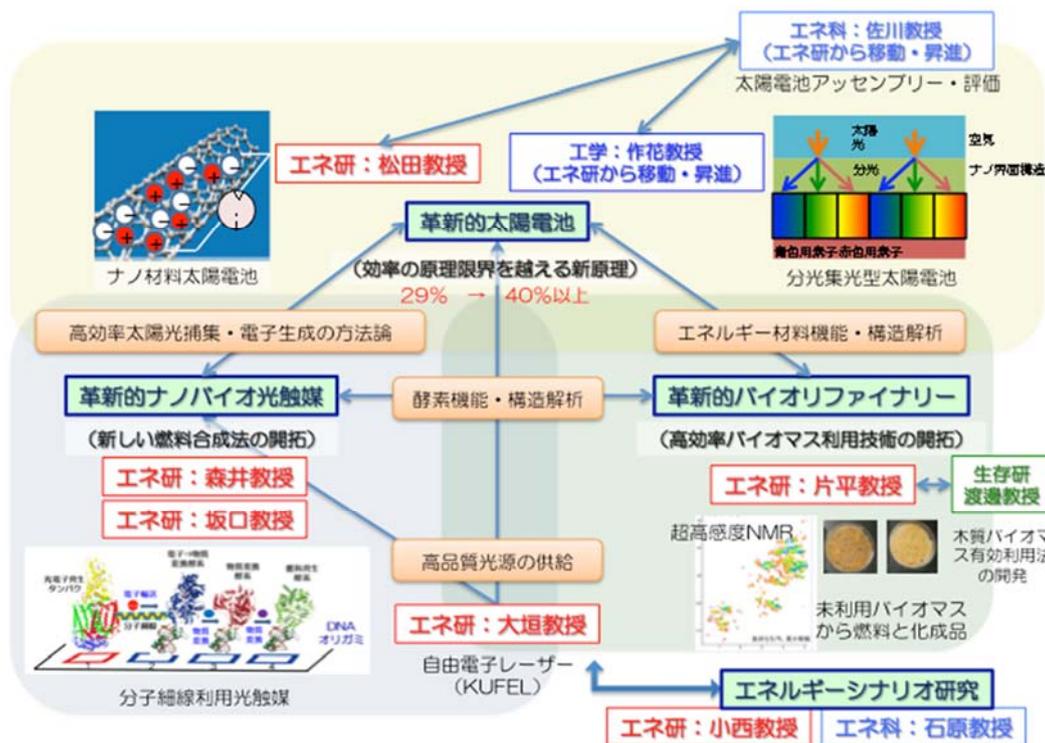
### 2. 体制および運営状況

既に、高効率太陽光エネルギー利用技術への基礎研究で成果をあげた物理、化学、電気など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及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い、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る。プロジェクト運営委員会に学内および国内、海外からの外部委員をおき、融合研究の年次評価を行うとともに、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】

高効率太陽光利用に関する国内シンポジウムを、以下の通り平成 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)

### 4. 主な成果

(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、それを理解する上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。

・省エネルギー発光デバイスの実現に向け、カーボンナノチューブの発光効率を約 20 倍向上させることに成功し、その発光効率向上のメカニズムを解明した。[Matsuda, K. et al., *Nature Photonics* 2013, 7, 715]

- ・中赤外自由電子レーザー(KU-FEL)を用いて、固体材料 (SiC) の原子の振動 (格子振動) を選択的に励起できることを、世界で初めて直接的に観測した。[Ohgaki, H., *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **2013**, *103*, 182103]
- ・表面誘起相転移を利用してシリコンナノ空間内化学反応を劇的に加速することに成功し、その機構を明らかにした。[Fukami, K., Sakka, T., Kinoshita, M., *et al.*, *J. Chem. Phys.* **2013**, *138*, 94702]
- (2)ナノバイオ光触媒研究では、DNA ナノ構造体に2種類の酵素を精密に配置した連続反応システムを開発した。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。
  - ・次世代半導体への応用が期待されるナノ炭素細線の合成で、低収率等従来の問題点を克服した。[Sakaguchi, H., *et al.*, *Adv. Mater.* **2014**, *26*, 4134]
  - ・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]
- (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]

## 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・融合研究について、若手人材を中心として推進する。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通して、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。

## 4.7. 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—

### 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、これを超越す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・使用に伴うロスゼロを目指すことを目指し、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。

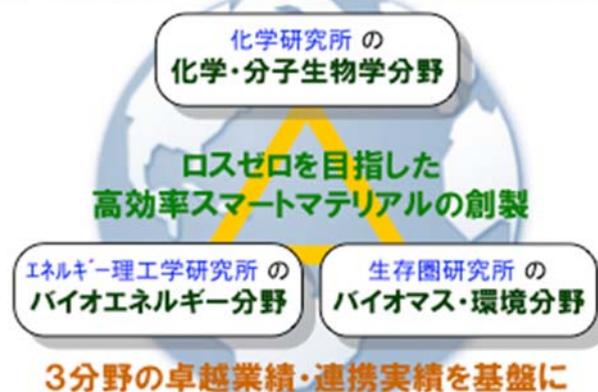
具体的にはオンデマンドで物質やエネルギーの高効率生産・変換を行う革新技術基盤として、

- 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、3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）革新機能材料を合目的的に開発する。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活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。

### 化学・生物学・材料科学の新規融合研究



### 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3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3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森井研、坂口研、片平研が行った。

### 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) アンダーワンループ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。3 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 3 研究所によるアンダーワンループ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 3 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）を設置する。研究所間での先端機器の相互利用はもちろんのこと、いや増す共同研究、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。



## 5. 生存基盤科学研究ユニット

### 1. ユニット活動の目的

生存基盤科学研究ユニットは、宇治キャンパスに平成18年4月に化学研究所、エネルギー理工学研究所、生存圏研究所、防災研究所、東南アジア研究所により設置され、当初計画10年間で人類の持続可能性にかかる学際的研究を開始した。設立当初から4年間は科学技術振興調整費を得て「サステナビリティ」の学際的研究を行い、萌芽研究、融合研究、総合研究の3つのカテゴリで生存基盤に関わる様々な分野融合的研究を行った。エネルギー理工学研究所はその中核的メンバーとして設立当初より運営と研究に主体的に参加し、平成20年からの5年間はユニット長を輩出し、ユニットとして概算予算の認可を受けるとともに平成22年4月には経済研究所、地球環境学堂を加えた7部局体制とし、地域と密着した生存基盤科学研究を展開する「サイト型機動研究」が実施された。このサイト研究では滋賀サイトと青森サイトを立ち上げて地元大学、研究者と本学のエネ研以外の研究者も含めた共同研究を行った。さらに平成25年からの3年間は、「生存基盤の寿命」をキーワードに人類の生存に関わる地球規模の様々な問題に学際的に文理融合のアプローチで学際的領域、新領域の開拓を含む広範な研究活動を実施するための部局横断型の研究チームを組織として先鋭的な研究を実施した。

### 2. ユニットの活動状況

第2期中期目標・計画において本学は「学問体系の構築と学術文化の創成を通じて地球社会の調和ある共存に資する」ものと期待されており、本研究所はユニットを通じてこの活動でも予算要求におけるコンセプトの提案に始まり、企画の枢要な部分に参加、または主導してきた。後半の3年間は前述の「生存基盤の寿命」研究に対応して時間的にも空間的にもマルチスケールの、多彩な研究が公募により実施された。本研究所からは、「エコシステムあるいはエネルギーシステムの安定性に及ぼすスケール因子と寿命の影響に関する研究」「人工関節の耐摩耗性向上に関する基礎研究」「海洋インバースダムを用いた持続可能型エネルギーシステムの社会適合性検討」が採択、実施された。平成27年度からは後で述べる未踏科学ユニットの傘下に入るため、「グローバル生存基盤展開ユニット」を設立し、外国人教員の雇用なども行って両組織が並立した。さらに27年度を以て「生存基盤科学研究ユニット」は当初予定通り活動を終了し、28年度からはすべての研究活動は問題解決型の新たな「グローバル生存科学展開ユニット」へと移行する。

### 3. 成果など

生存基盤科学研究ユニットでは、ニューズレターと研究成果報告書の発行と成果発表会を毎年実施してきた。研究対象として、エネルギー、資源、環境、大規模災害など人類の生存を脅かす諸問題に学際的な取り組みを行い、10年間かけて独特なスタイルの研究方法论がほぼ確立されたものと考えている。特にこの中期期間ではサイト研究で実施した、京都大学の伝統であるフィールド研究や個別の地域コミュニティに密着した研究をもとに「生存基盤の寿命」研究を推進し、右肩上がりではなく、停滞でもない、有限の時定数と寿命を持つ様々な生存現象を対象に多彩な研究成果が報告された。このような新たな学際的研究分野では学会や学術誌がないために通常の意味での論文などの形の成果は出にくい、独自にこうした成果を発表することで分野融合研究の成果とみることができる。

### 4. 今後の展開など

生存基盤科学研究ユニットは未踏科学ユニットに発展的に移行するため、本ユニットについては今後の展開はない。次の研究段階は「グローバル生存科学研究ユニット」に託されるが、これまで主として国内での活動を行ってきたが、今後の展開としてはアジアを中心とした国際展開が期待されている。

## 6. 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取りあげ、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、本学の学術資料ステークホルダーと情報科学関連部局が中心となり、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する。自然科学の分野においては、その根拠となるデータ自体の信頼性が最も重要である事は言を待たないが、社会問題に関係するような統計データには問題が多く存在しており、将来予測の不確定性を生んでいる。そこで本研究ユニットでは、サイバー空間をCrawlingし、必要な情報の抽出と分類を行うデータマイニングについての研究を行う。これらのデータは大規模知識データベースに統合される。この大規模知識データベースの事例研究として「人間の安全保障問題」を取り上げ、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する。

### 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Workshop on Clean Energy development in Asian Cities (Technological and political perspectives)という国際ワークショップを開催し、平成28年度の研究の方向性を確認するとともに、国際的な協力関係を構築した。

### 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行く予定である。

## 7. 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

本ユニットは、平成 18 年に設立され分野横断型の研究を展開してきた「生存基盤科学研究ユニット」が発展的に移行して未踏科学ユニット傘下で平成 27 年度に結成されたユニットで、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。

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。この問題に対応する上で自然環境、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対応策を統合的かつ整合的に計画・遂行することが本ユニットの目的である。

本ユニットでは、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方策であり、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方策とは一線を画するものとなる。

### 2. ユニットの活動状況

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 3 本柱として分野横断的な共同研究を進めている。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/> で内容を公開している。）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。これらの研究の成果は自然環境、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る。

一方では、新たなユニットとしての体制構築、部局ごとに異なる外国人教員採用手続きの調整、規定規則類の整備を行った。

### 3. 成果など

まだ発足間もない本ユニットでは十分な成果は出ていないが、研究計画および旧生存基盤科学研究ユニットの成果を引き継ぐ形で平成 28 年 2 月 29 日にキックオフシンポジウムとして初めての成果報告会を実施した。また、平成 28 年 3 月 12 日には附置研センターシンポジウムを品川インターシティホールにおいて実施し、そこで研究計画を発表した。

### 4. 今後の展開など

今後はグローバル生存基盤展開ユニットの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む。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。

## 8. 中期目標・中期計画の概要

### 1. 第2期中期目標・中期計画（平成22年度～平成27年度）の概要

エネルギー理工学研究所は、「エネルギーの生成、変換、利用の高度化」を設置目的とし、人類文明の持続的発展に貢献する。この目的のため、エネルギー需要の増大とエネルギー資源の枯渇、および、地球環境問題の深刻化に伴って生じるエネルギー問題の解決を目指した先導的研究を行う。特に、社会的受容性の高い新規エネルギー源、およびエネルギー有効利用システムの実現を目指す。本研究所が有する多様な学術基盤を活かし、異なる研究領域を有機的に連携させることにより、挑戦的かつ独創的なエネルギー理工学の研究領域の開拓を進める。以上の長期目標を達成するために、第2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。

- ・重点複合領域研究「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」推進

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3重点複合領域研究プロジェクトとして推進してきた。そこでの成果を踏まえ第2期では、「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2重点領域を設定し、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た。

- ・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強化

第2中期間内に開始された文部科学省共同利用・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」を推進し、国内外の様々な大学・公的研究機関に所属する研究者との共同研究を進めた。さらに毎年エネルギー理工学研究所国際シンポジウムを開催し、ゼロエミッションエネルギー研究に関する議論を深めた。これらの研究・拠点活動を基軸として、エネルギー理工学に関する国内外での研究ネットワークのハブ機能を果たした。

- ・先進エネルギー領域における指導的研究者・技術者等の人材を育成し、学生等の教育活動に貢献

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・研究者を養成に努めた。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ーを育成するための実践的な教育を行った。

- ・産官学連携活動等を通じた研究成果の社会還元

研究所で得られた研究成果を、積極的に学会・学術論文誌での発表や特許取得などの形で結実し、その知見や技術を学術・産業界に還元した。また、文部科学省先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業「ADMIRE計画」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した。

- ・研究所の研究成果等をホームページ、公開講演会等を通じて広く社会に公開

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。

- ・目標の達成のための適切な研究所運営

上記の第2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。

## 9. まとめ

国立大学の法人化以降、各大学組織は6年毎の中期目標・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2期中期目標・中期計画期間（平成22～27年度）後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・中期計画期間以降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。

第2期中期目標・中期計画期間の後半は、前半に引き続き研究所重点複合領域研究である「先進プラズマ・量子エネルギー」ならびに「光・エネルギーナノサイエンス」を学術基盤とした先進的エネルギー研究を展開した。前者においては平成23年の東日本大震災に伴う福島原子力発電所事故の影響を受け、とくに核融合エネルギー利用へ向けた基礎学術研究がより重要性を増し、本研究所の得意とするプラズマ、材料、炉システムに関する研究の進展に注力した。後者においては光・エネルギーナノサイエンスに関する学術基盤研究の展開が得られ、次期中期期間では、より出口が明確化した「ソフトエネルギー」複合領域研究として推進する計画である。また、平成23年度から開始した「ゼロエミッションエネルギー（ZE）」研究の文部科学大臣認定共同利用・共同研究拠点としての活動は平成27年度の期末評価結果を受け、平成28年度からも継続して共同利用・共同研究拠点到に認定された。この様に、第2期中期期間に設定された計画は順調に達成された。次期中期期間では、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。

第2期中期期間におい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」、文部科学省事業である先端的研究基盤共用・プラットフォーム形成事業や、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、NEDO事業・CREST事業などの競争的外部資金等による各種プロジェクトは研究所における研究活動の大きな柱となってきた。これらのプロジェクト実績を基盤とし、今後も引き続き外部資金等の獲得の努力を続けることが肝要である。平成27年度に開始した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、生存圏研究所）のように、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きている。平成27年度にスタートした本学組織「京都大学研究連携基盤」もその一つであり、この様な学内内部局連携によるプロジェクト立案も積極的に実施する必要がある。また、同基盤による未踏科学研究ユニット活動等を積極的に利用し、先進エネルギー領域における国際共同研究や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。

平成28年度より第3期中期目標・中期計画が開始するとともに、同年5月には本研究所発足20周年を迎え、新たな展開が求められており、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。今後も、本研究所、大学、我が国と世界の科学の発展などの様々な視点から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所存である。

平成28年6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