

京都大学
エネルギー理工学研究所

現 状 と 課 題

平成 19 年度-平成 21 年度

京都大学エネルギー理工学研究所

はじめに

エネルギー理工学研究所は平成 8 年の発足以来、持続可能社会の実現と地球環境の維持を基盤とする総合的なエネルギー理工学の構築を目指し、研究においては、環境調和型エネルギーの特殊・複合問題を研究対象として研究組織、研究基盤の整備・拡充を進め、教育においては、エネルギー科学研究科への協力体制の下、大学院教育や博士課程修了後の人材育成や高度な研究活動を精力的に展開してきました。平成 21 年度で第 1 期中期目標・中期計画期間を終了しますが、法人化後に生じた様々な変化への対応もようやく軌道に乗りつつあり、所員一同力を合わせて研究所の発展に努力しております。

第 1 期中期計画で掲げた部門横断的な 3 重点複合領域研究（プラズマエネルギー、光エネルギー、バイオエネルギー）は順調に進展し、新たな融合研究領域として 2 つの研究領域（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）に発展・統合する方向へ進んでいます。平成 18 年度の附属エネルギー複合機構研究センター改組では、これ为先取りする形で、センターに 3 つの研究推進部を設け、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融合研究活動のコアとなり、さらに、国際流動・開発共同研究推進部は国際的な活動の中軸とする流動・開発連携を推進する体制としています。研究環境整備としては、このほか、宇治本館の耐震改修と共に、研究所独自に研究棟の整備に努めるとともに、多様な研究装置の導入・整備・運用を進めてきました。宇治地区の他研究所との関係においても、生存基盤科学ユニットや次世代開拓研究ユニット活動等を通じて連携を深めています。核融合科学研究所双方向型共同研究、先進的原子力システム研究開発事業、先端研究施設共用促進事業、NEDO 事業、CREST 事業をはじめとする多様な競争的資金等に基づく研究活動においても、それぞれ大きな成果を挙げ、研究所研究活動の推進を大きく支えています。これらの研究所研究活動に対して、平成 20 年度に行われた国立大学法人評価委員会が行った「中期目標期間に係る業務の実績に関する評価結果（暫定）」において、当研究所は良い評価をいただきました。

10 年間にわたって成果を上げてきた日韓拠点大学交流（日本学術振興会拠点方式学術交流事業、平成 10 年度-平成 19 年度）に替わって、平成 20 年度からは、日中韓先進エネルギー科学拠点（日本学術振興会アジア研究教育拠点事業）を開始しました。これまで力を入れてきた東南アジア諸国との協力も含め、アジアのエネルギー理工学研究拠点となるべく努力を続けています。また、平成 18 年度で終了した 21 世紀 COE プログラム「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」に引き続き、平成 20 年度にはグローバル COE プログラム

「地球温暖化時代のエネルギー科学拠点」事業が開始され、エネルギー科学研究科、工学研究科原子核工学専攻、原子炉実験所と共に、その推進を担っています。

研究所はエネルギー理工学研究所への改組（平成 8 年）以来、公募型センター共同研究や国際交流を通じてエネルギー研究の拠点活動を展開してきました。文部科学省の新たな取り組みである「共同利用・共同研究拠点」制度に対し、平成 19 年度に行われた外部評価においては、これへの申請に対する積極的な評価と期待が寄せられました。しかしながら、平成 21 年度拠点認定申請については残念ながら認定されるに至りませんでした。研究所としては、この審査結果内容を真摯に検討し、申請内容を見直して平成 22 年度再度認定申請を行ないます。

本報告書は、第 1 期中期目標・中期計画期間後半（平成 19 年度-平成 21 年度）における研究所の活動のまとめを、自己点検・評価として行うものです。平成 22 年度からは第 2 期中期目標・中期計画期間が始まります。本報告書により、研究所のこれまでの成果・現状と課題をご理解頂き、第 2 期における一層の発展にむけて、今後の研究所のあり方についてご指導、ご助言、ご鞭撻をいただければ幸いです。

平成 22 年 4 月
京都大学エネルギー理工学研究所
所 長 尾形 幸生

目 次

1. 研究所の概要	1
1.1. 理念、目標	1
1.2. 組織、運営	3
1.3. 財政状況	6
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. 将来計画	13
1.7. 施設整備	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. 平成19-21年度 重点複合領域研究 研究成果の概要	16
2.1. プラズマエネルギー重点複合領域研究	17
2.2. バイオエネルギー重点複合領域研究	58
2.3. 光エネルギー重点複合領域研究	89
3. 研究部門・研究分野における研究成果の概要	115
3.1. エネルギー生成研究部門	117
3.2. エネルギー機能変換研究部門	120
3.3. エネルギー利用過程研究部門	123
3.4. エネルギー複合機構研究センター所属分野.....	126
4. 拠点形成の現状・課題・展望	127
4.1. 附属エネルギー複合機構研究センター	127
4.2. 21 世紀 COE プログラム・GCOE プログラム.....	137
4.3. 国内共同研究	139
4.4. 国際交流事業	148
5. 中期目標・中期計画のまとめと今後の展望	150
6. おわりに	151

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旧ヘリオトロン核融合研究センターの一部との統合、再編を経て、「エネルギーの生成、変換、利用の高度化を目的とする研究」を設置目的とする研究所へと改組された。研究所の沿革の詳細は資料編(I)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いる。設立より 10 年余が経過し、また平成 16 年の国立大学法人への移行に伴う第 1 期中期計画期間の完了を踏まえ、ここでは現在の研究所の活動をまとめる。

1.1. 理念、目標

これまでの研究成果を踏まえ、また、研究所の長期目標ならびに平成 16 年度から始まる第 1 期中期計画期間における目標を策定するにあたり、研究所の理念・基本的目標を以下のように明確化した。すなわち、

エネルギー理工学研究所は、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い、人類文明の持続的発展に貢献する。特に、人類生存にとって最大の課題であるエネルギー資源確保のための新規エネルギー源の開拓、および新規エネルギー確立までの人類生存を保証するエネルギー資源の有効利用システムの実現を研究目標とする。

この目的のため、社会的受容性の高い高品位な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探求を通して、近未来に想定されている、例えば水素エネルギー等による環境調和型エネルギーシステムの構築等、社会の要求に機動的に応えられるエネルギー理工学の高度化と具体化により社会に貢献する。

その研究の過程にあって、本研究所が有する人的資源・研究資源を、学術領域が未発達でかつ学際的であり、さらに社会に対して大きなインパクトをもつ特殊・複合問題である高品位エネルギーの研究に集中・特化し、多様な学術基盤を持つ研究者の集合である利点を活かして、挑戦的かつ独創的な研究活動を推進する。また、研究所がこれまでに培ってきた世界的な指導力・牽引力を有する研究領域をさらに強化し、一層の発展を目指すとともに、いくつかの研究領域を有機的に連携させることにより、エネルギー理工学における新しい学術研究領域の開拓を進め、人類社会の発展に貢献する。

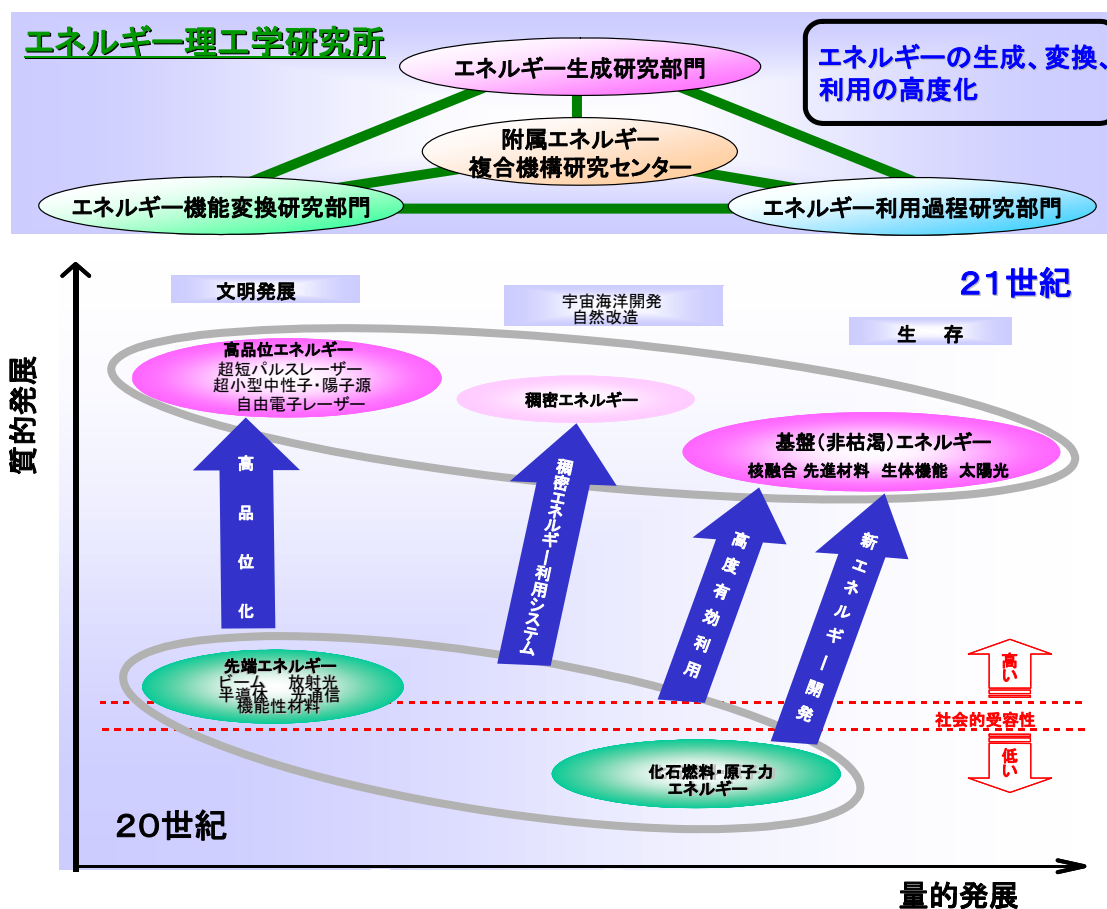


図 1.1 京都大学エネルギー理工学研究所の設立理念

この研究所の理念に基づき**長期目標**を以下とする。

- (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エネルギー源の開拓およびエネルギー資源有効利用システムの実現を目指し、基礎研究と応用研究の多様な発展と統合によりエネルギー理工学領域における世界的な先進エネルギー研究拠点としての展開を図る。
- (2) 多様な学術基盤を持つ研究者により構成される組織の特徴を活かし、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。
- (3) 優れた施設・設備群を整備・活用して当該学域における優秀な研究者と高度の専門能力を持つ人材を育成する。

以上の観点から、**第1期中期目標**として、以下を定めた。

- (1) 発足以来これまで継続発展させてきた環境調和型エネルギーシステム構築のための重点複合領域研究（プラズマエネルギー・バイオエネルギー・光エネルギーに関する各複合領域研究）をさらに推進し、併せて、21世紀 COE プログラム「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」（平成 14-18 年度）での研究拠点としての役割を

果たす。

- (2) 先端的・先導的研究等を通して先進エネルギー領域における指導的人材を育成する。
- (3) 国内外の研究機関との連携を深め、地球規模のエネルギー問題に対応できるエネルギー理工学研究ネットワークの拠点機能を強化する。

これらの中・長期目標に基づいて策定された第1期中期目標・中期計画(平成16-21年度)、ならびにその計画の年度毎の進捗状況については、第5章ならびに別冊資料「京都大学エネルギー理工学研究所第1期中期目標・中期計画関連資料集」に記す。

1.2. 組織・運営

前節に掲げた理念および目標を実現するために、本研究所には、3つの研究部門(エネルギー生成研究部門、エネルギー機能変換研究部門、エネルギー利用過程研究部門)と1つの附属施設(附属エネルギー複合機構研究センター)を設置している(資料編(II)1.1参照)。研究部門は、客員の2分野を含めた合計14の研究分野から構成される。また、附属センターには、平成20年より、新たにセンター附属研究分野を設置した(資料編(I)2.4.1)。

部門間の横断的な研究の中核を担う附属センターは、従来から3つの重点複合領域研究(「プラズマエネルギー重点複合領域研究」、「バイオエネルギー重点複合領域研究」、「光エネルギー重点複合領域研究」)に取り組んできた。平成18年、これら領域間の関連が一層強まったことから附属センターを改組し、これら3つの重点複合領域研究を新設の「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」に集約して実施することにした。また、これに加え、国内外との共同研究ネットワークの強化を目的とした「国際流動・開発共同研究推進部」も設置した。このような研究の機動性・柔軟性・流動性を高める体制づくりは、学校教育法の改訂にともなって施行された教員制度改革(准教授制、助教制)の趣旨とも合致するものである。平成19年度からは、3つの研究推進部のそれぞれに4つの研究推進領域もしくは推進室を設置した。こうして、多種多様なプロジェクト的研究課題・連携研究を実質的に進めるための体制ができた

研究所の運営は、所長および所内外の専任の教授からなる「協議員会」の議にしたがう。協議員会では、諸規定の制定・改廃、所長候補者の選考、教員人事、財政など、研究所の重要事項が審議される。

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」「教授会」が設置されている。研究所会議は、教授・准教授・助教・技術職員・非常勤職員から構成され、拡大教授会は教授・准教授・助教、さらに、教授会は専任の教授で構成される。

いずれの会合もオブザーバーとして事務担当者が参加する。こうした会合を通じて研究所の民主的な運営が担保され、また、協議員会に向けての所員の意見集約が図られる。

研究所運営の詳細については、所長のほか、所長が指名する副所長、附属センターのセンター長、各部門の部門長、および、各研究推進部の推進部長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により実行される。平成 16 年度より試行してきた「研究支援部」については、平成 19 年度より教授会直下に移動させ、その中に「技術支援室」、「環境安全管理室」、「情報管理・広報室」を設置した。そこでは、それぞれの室長のもとで、技術支援、労働安全衛生、情報管理などの日常業務を行っている。なお、研究所の事務組織は、京都大学事務組織規程に定められている。

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

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、議論されている。これは、センター長および所内外の教員、学外の学識経験者によって構成される。

附属センターが推進する大型プロジェクトとして、「双方向共同研究」と「先端研究施設供用促進事業（通称 ADMIRE 計画）」がある。いずれも、附属センターの基幹装置である複合プラズマ・材料実験装置（高度エネルギー機能変換実験装置、別名ヘリオトロン J および DuET 施設）を使った研究プロジェクトである。「双方向型共同研究」は、大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所によって、平成 16 年度から開始されている公募型共同研究である。これには、独創的閉じ込め磁場配位をもつヘリオトロン J 装置が全国の共同利用として使われている。他方の「先端研究施設供用促進事業」については、平成 19-23 年度に文部科学省から委託された事業「**先端研究施設共用イノベーション創出事業**」である。そこでは、複合イオンビーム照射を行う DuET 施設や、エネルギー機器材料のマルチスケール解析・評価を行う MUSTER 装置群が有効に使われている。この他、附属センターでは様々な外部資金を活用した研究、すわなち、小型自由電子レーザー装置（KU-FEL）の開発・研究、各種装置の効率的利用、新装置や解析法の開発、バイオエネルギー関連の理論研究などが行われている。

横断的研究の中核を担う附属センターでは、その特徴的な活動として、公募型の共同研究を実施している。これは、研究所の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、本研究所の先導する基盤研究や学際萌芽的な研究などに取り組むため

の共通基盤を提供するものである。さらに附属センターでは、談話会、シンポジウム、共同研究成果報告会などを通じて、研究者の交流を図っている。

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

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

こうした研究所全体の活動に対する点検・評価に加え、平成 19 年度には、全所員に対する個人評価も行った。これは個人の業務・研究活動等に対して、所長および副所長が評価を下すものである。この個人評価を受け、平成 20 年度には「個人評価 WG」が設置され、評価法そのものの妥当性が議論された。検討結果は次回の個人評価に反映されることになる。

人材の登用については、人事交流を全国的な視野に立って図るために、改組以来、一貫して公募人事を実施してきた。その結果、平成 8 年度の改組以来、新規任用専任教員 48 名中 33 名については学外から任用するに至っている（平成 22 年 3 月 31 日現在）。また、当研究所においては、平成 14 年 9 月より採用した教員（内部昇格も含む）に対して任期制を設けている。任期制教員を再任するための手続きについても、平成 17 年に、内規を制定したが、平成 22 年 3 月 31 日時点、まだ任期満了によって再任評価を受けた者はいない。

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て、特定有期雇用教員や非常勤教員・研究員を採用している。宇治キャンパスの 4 つの研究所が中心に取り組んでいる生存基盤科学研究ユニット（平成 18 年度～）や次世代開拓研究ユニット（平成 18 年度～）、エネルギー科学研究科などとともに取り組んでいるグローバル COE プログラム「地球温暖化時代のエネルギー科学拠点－CO2 ゼロエミッションをめざして－」（平成 20-24 年度）の学内プロジェクトの他、ADMIRE エネルギー産業利用やその他の外部資金プロジェクトを使って、特定教授、特定助教、特定研究員、リサーチアシスタントなどを採用し、常勤教職員だけでは成し得ない機動的な研究を展開している。

1.3. 財政状況

平成 19 年度以降の財政状況は資料編(II)2.1 に記載しているが、本研究所の特徴として、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が大きい。平成 8 年度から 21 年度までの研究費の状況を図 1.3.1 に示す。科学研究費補助金をはじめとする外部競争的資金の獲得状況を図 1.3.2 に、外部資金による研究の状況を図 1.3.3 に示す。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、学際的なエネルギー研究拠点としての活動が活発になりつつある。その一方で、科学研究費補助金の獲得金額に関しては、平成 18 年に大幅な増額を実現した後は以前の水準に戻っており、今後は研究費獲得に向け、研究のトレンドの更なる分析、申請内容の充実化を組織的に行う等の対策を行い、一層の努力を行うことが必要である。

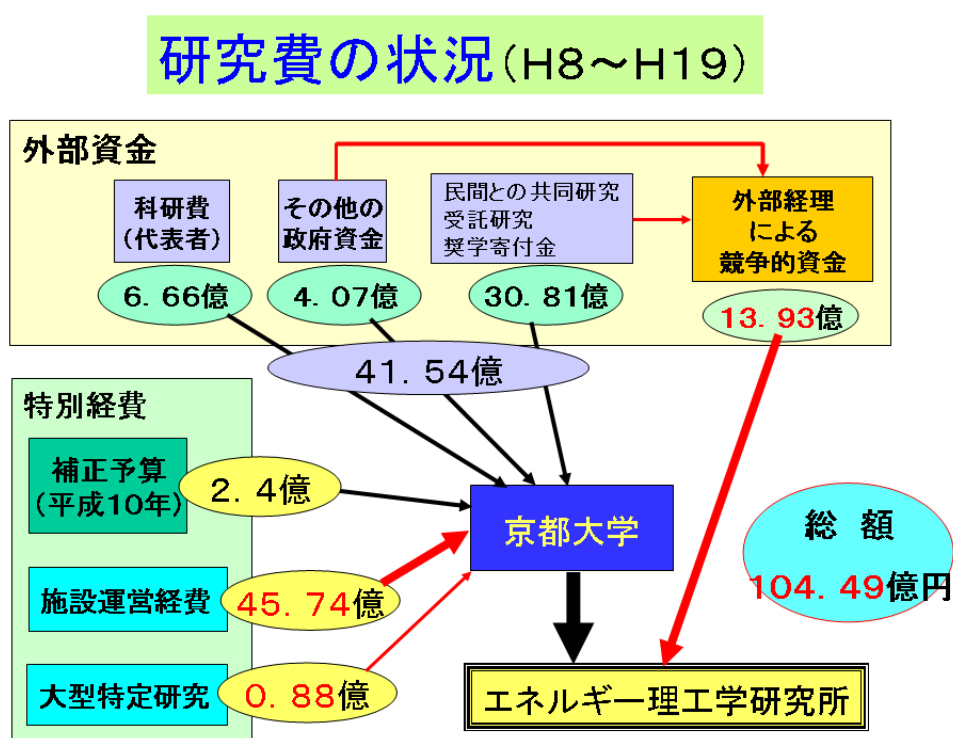
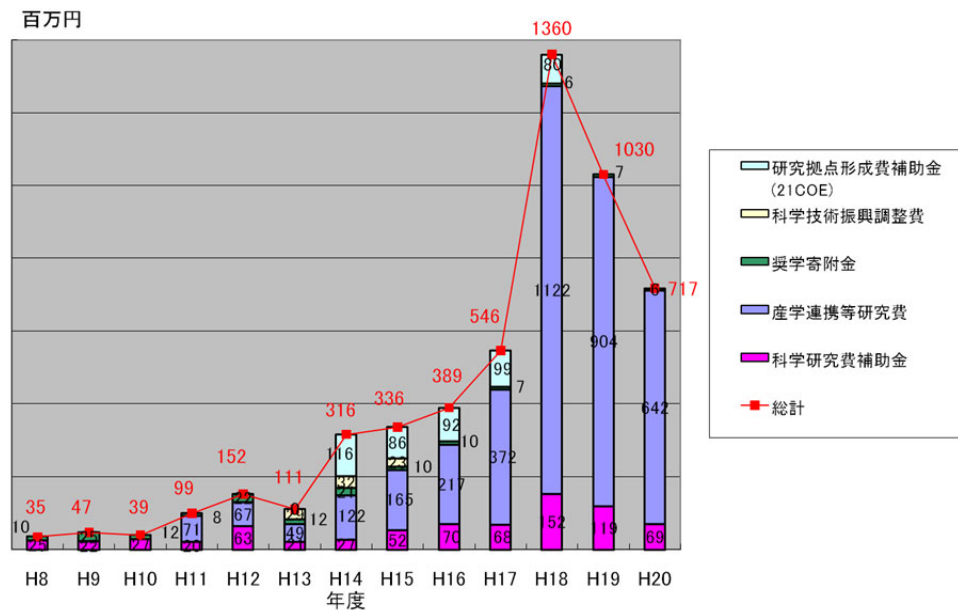


図 1.3.1 平成 8 年度から 21 年度までの研究費の状況

外部競争的資金の変遷



8

図 1.3.2 平成 8 年度から 21 年度までの外部競争的資金の獲得状況

1.4. 研究活動・研究交流の状況

研究所は、平成 8 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。先端的なエネルギー技術の創成、ハードウェアを重点としたプロジェクト的研究の推進、学内外および国際共同研究推進の核となっていること、などが他のエネルギー関連部局との際立った違いであり、「オンリーワン」の研究所としての特徴が顕著になってきていると言える。このような背景の下、とくに研究面では、研究所全体としての特徴・総合力を発揮すべく、附属エネルギー複合機構研究センターを中心とした、3 重点複合領域研究に代表される横断的な課題研究の遂行に、より一層の重心が移動してきている。重点複合領域研究成果の概要は、別冊「京都大学 エネルギー理工学研究所 平成 16-18 年度 重点複合領域研究 研究成果概要」に纏めてあるので参照願いたい。また、各研究部門・研究分野における研究の概況については本編第 3 章ならびに資料編(I)第 2 章に記す。研究所全体としての論文等の発表件数は図 1.4.1 を参照されたい。各研究分野の研究成果の公表状況の詳細については同資料編第 4 章に纏めている。

当研究所は、所内あるいは学内外、さらには国外との積極的研究交流も特徴の一つであ

り、多くの実績を有している。

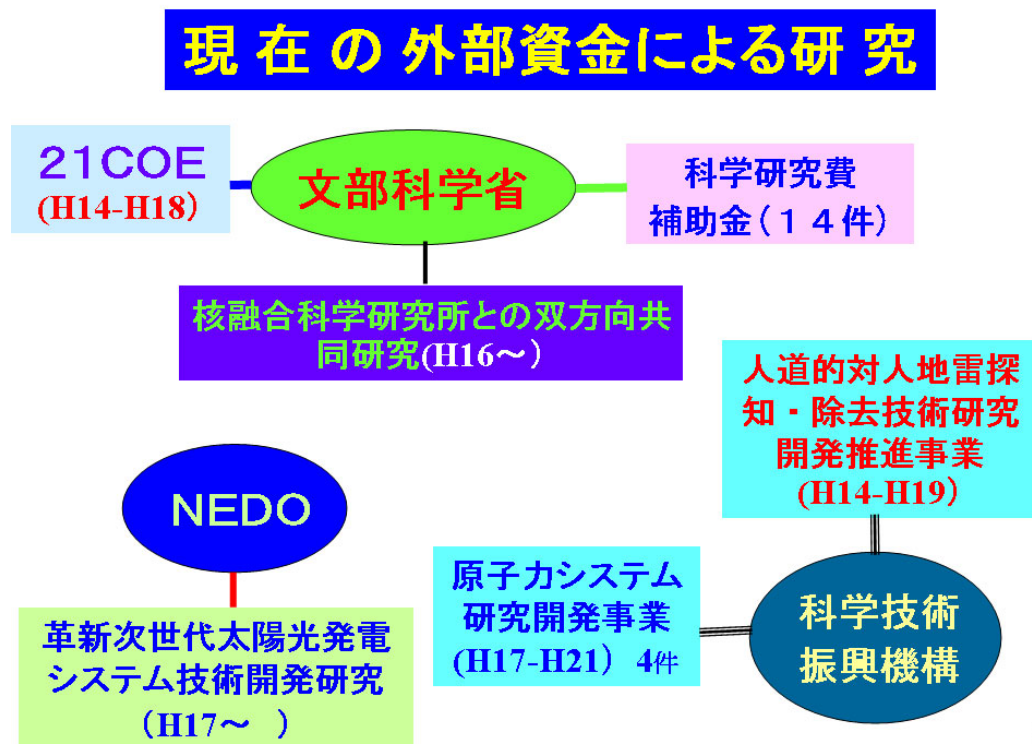


図 1.3.3 平成 8 年度から 21 年度までの外部資金による研究の状況

平成 14 年度から始まった文部科学省による 21 世紀 COE プログラムは、エネルギー科学研究科、宙空電波科学研究センター（当時）と合同で応募した「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」が採択されたもので、平成 18 年度と同 COE プログラム終了まで、本研究所の研究遂行上の大きな支えの一つとなってきた。本プログラムでは、平成 17 年度から、本研究所教授 吉川暹がプロジェクトリーダーを務め、同プログラムを牽引してきたほか、本研究所の教員は同 COE プログラムのいずれかの研究グループに属し、それぞれの立場からの研究を推進し、また、多くの共同研究も実施してきた。同 COE プログラムに関する活動状況の詳細は、同プログラムホームページや「21 世紀 COE 広報」などを参照されたい。なお、同 COE プログラムの成果を踏まえ、これをさらに展開して行くために、「国際新エネルギー研究連携機構」を設け、①新エネルギーイニシアティブの推進、②持続可能性指標（Sustainability Index）の提案、③ポスト COP3（次期京都議定書）への提言、SEE Forum の構築、④新エネルギーフォーラムの形成、⑤新エネルギーシステムを推進する人材の育成など、持続的な活動を展開することが計画されている。（第 4.2.章参照）

研究所の特徴である部門・分野を越えた共同研究の推進については、上述の附属センター

での重点複合研究を中心としたセンター共同研究や 21 世紀 COE プログラム (<http://energy.coe21.kyoto-u.ac.jp/>) 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 (<http://iss.iae.kyoto-u.ac.jp/iss/jp/index.html>)」ならびに平成 18 年度に発足した「次世代開拓研究ユニット (<http://kupru.iae.kyoto-u.ac.jp/>)」への積極的な参画によっても推進している。また、外部資金による学外研究機関と共同研究にも主体的・積極的に参加をしており、各研究分野が本来的に持っていた研究所内・外との共同研究強化をも含め、幅広い共同研究体制が出来あがってきたと言える。

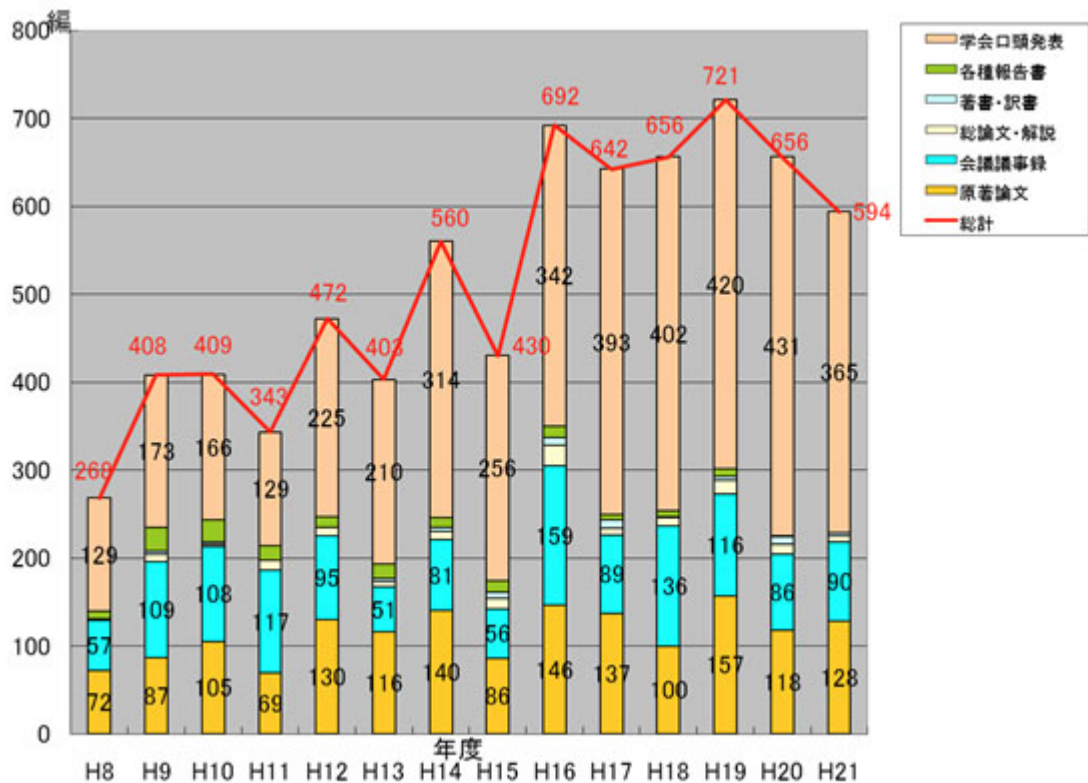


図 1.4.1 平成 8 年度から 21 年度までの研究活動

国際交流については、外国人客員教員ポストを活用して、常時、海外から優秀な研究者を招聘して研究交流を深めているほか、外部資金等による研究者招聘・派遣も積極的に実施している。また、日本学術振興会が行っている日米科学技術協力事業核融合分野の共同研究には、当研究所関連分野の研究者が中心的な活動の主体となって参加している。このほか、海外の多くの研究機関と研究交流協定を締結し学術交流を行っている（資料編 (II)2.5.2.7）。

さらに、日韓拠点大学方式学術交流事業 (<http://cup.iae.kyoto-u.ac.jp/default.htm>) による研究交流、21 世紀 COE プログラムによる海外研究教育拠点の形成や国際シンポジウムの開催など、活発な研究交流が進められた。

平成 20 年度には、グローバル COE プログラムに、八尾健エネルギー科学研究科長をリーダーとし、エネルギー科学研究科、エネルギー理工学研究所、原子炉実験所、工学研究科原子核工学専攻から申請した「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-」が採択された。本グローバル COE プログラムを活用して、地球温暖化時代のエネルギー・環境問題の解決をめざして、CO₂ ゼロエミッションに向けたエネルギーシステム構築のための総合的なエネルギー科学の国際的教育研究拠点を形成し、特徴的な人材育成を行っている。

1.5. 教育および社会との連携

本研究所は、「科学全般に関する広い視野と総合的な判断力を備え、特にエネルギー理工学分野に関して深い専門知識を持つ人材・研究者を養成すること」を基本的目標とした教育を行っている。研究所の全教員は、平成 8 年度に同時に発足した大学院エネルギー科学研究科の協力講座として、先端科学技術に関する大学院教育に参画している。また、一部の教員は、総合人間科学部、工学部、あるいは、工学研究科等の非常勤講師も勤め、大学院ならびに学部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。さらには、生存基盤科学研究ユニット内の教育活動の一つである「京都サステナビリティ・イニシアティブ（東京大学が中心となった「サステナビリティ学連携研究機構における連携教育プログラムの一環」）にも参画している。このように本研究所は、エネルギー理工学分野の教育に幅広く関わっている。

大学院の入学・進学希望者に対しては、本研究所は研究科と連携しながら、入学説明会を専攻ごとに実施し、学生の受け入れ方針や選抜方法等の周知を図っている。またこうした説明会とともに、平成 15 年度からは、本研究所の公開講演会において大学院説明会（エネルギー科学研究科）を実施し、より多くの人々に大学院の受け入れに関する情報周知を行っている。こうした取り組みにより、本研究所所属の大学院生の数も安定してきた。図 1.5.1 に在籍学生数の推移を、また、図 1.5.2 に学位取得者数の推移を示す。

外部資金との関連については、文部科学省の委託事業（平成 20-24 年度グローバル COE プログラム「地球温暖化時代のエネルギー科学拠点」事業）として、教育研究環境の整備のみならず、他研究機関との交流や国際研究集会での発表の機会増大など、大学院生の国際性を涵養する教育を行っている。また、同事業を柔軟に運用することにより、RA（リサーチアシスタント）制度を通して、学生への充実した経済支援も行った。さらには、同事業や、その他の外部資金プロジェクト（例えば学内連携の生存基盤科学研究ユニットや次世

代開拓研究ユニットなど）を利用して、博士号取得後の雇用も積極的に進めている。今後
も、卒業後の進路分野拡大を図るなどして博士号取得者の進路問題を解消し、また、そ
うした努力によって関連の研究科とともに、博士後期課程大学院生の定員充足率の向上を
図る。 図 1.5.3 に若手博士研究員数の推移を示す。

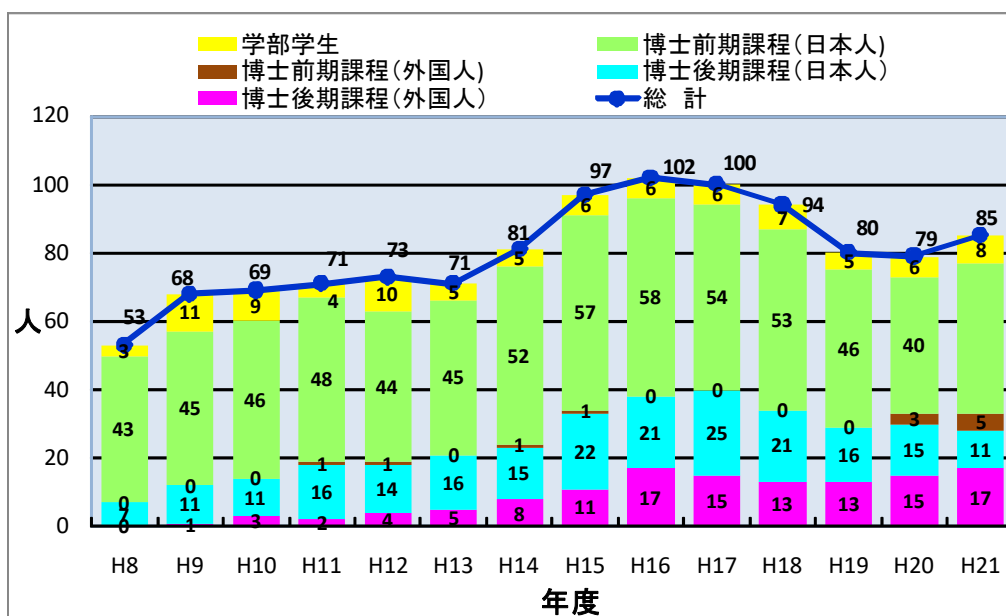


図 1.5.1 本研究所に在籍する学生数の推移

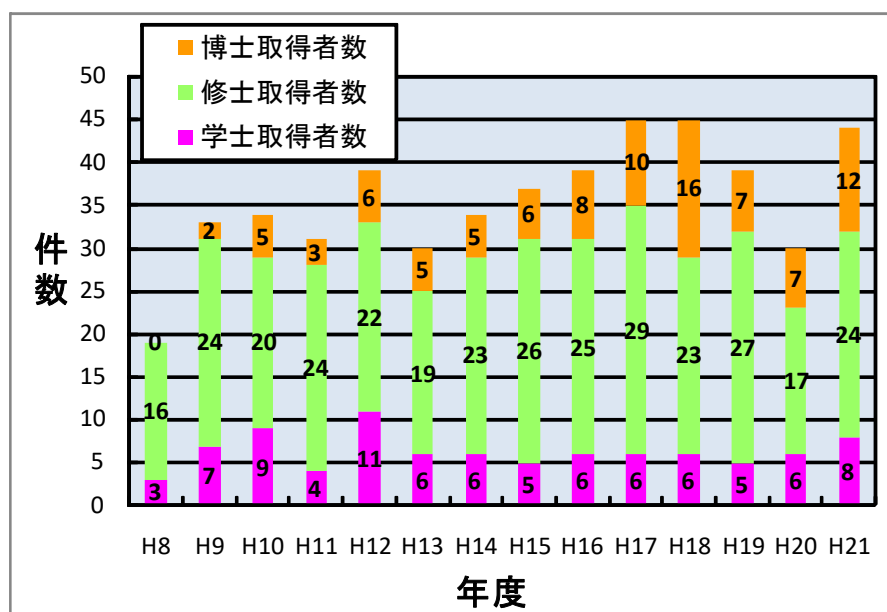


図 1.5.2 学位取得者数の推移

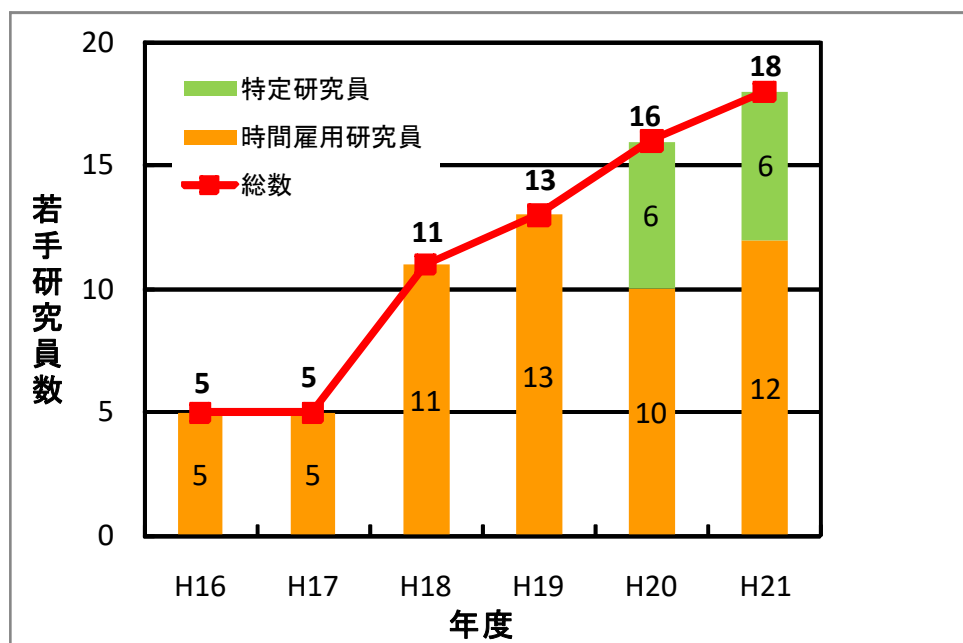


図 1.5.3 若手博士研究員数の推移

研究所の広報活動については、研究所が刊行するレポートとして、「Research Report」「Annual Report」「共同研究成果報告書」などがある。これらはそれぞれ、個別の研究成果の詳細を記述した報告書、毎年の部門・分野ごとの研究活動報告書、さらにはエネルギー複合機構研究センターによる共同研究報告書である。このような刊行物のほか、研究所の紹介冊子「概要」や近況活動報告「News Letter」の発行、さらにはインターネットホームページ (<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp>) による広報活動がある。ホームページは、情報管理・広報室で管理している。このほか、本研究所主催の公開講演会、他部局と合同で開催する「京大附置研究所・センターシンポジウム」、さらには、宇治キャンパス内の他部局と合同で開催する「宇治キャンパス公開」などがある。それぞれの対象は研究者向けから一般向けまで様々であり、広範囲に広報活動・情報発信を展開している。また、平成 19-23 年度の文部科学省委託事業（「先端研究施設共用イノベーション創出事業」ADMIRE 計画）を通じた産官学連携活動や、平成 20-23 年度の文科省事業（生存基盤科学研究ユニットのサイト型機動研究）を通じた地域連携活動などにも積極的に参画している。中には、政府委員会での政策提言や、国の代表として国際会議もしくは交渉に臨む教員もいる。

1.6. 将来計画

本研究所は、発足以来積み重ねてきた、研究・運営基盤の整備充実ならびに優秀な人材の確保へ向けた努力により、他の研究所にはない優れた研究施設群ならびに優れた人的資源が得られてきている。研究所発足以来展開してきた社会的受容性の高い高品位エネルギーの生成、変換および利用研究を基盤とする連携研究体制を充実させるために、部門横断的な複合領域研究を推進してきた。すなわち、第1期（平成16-21年度）中期計画においては、環境調和型エネルギーシステム構築を目的とする、3つの重点複合領域研究（プラズマエネルギー、光エネルギー、バイオエネルギー）を設定し、21世紀COEプログラムやグローバルCOEプログラムを通じて、エネルギー理工学の研究拠点としての役割を果たしてきた。また、平成18年度のセンター改組において、各重点複合領域研究の統合により、学際的・独創的な新領域研究（先進プラズマ・量子エネルギー、光・エネルギーナノサイエンス）を設定し、更なる研究拠点の形成を目指すという方向性が打ち出された。これに伴い、これら2つの新領域研究を柱とする、全国共同研究所への申請、ならびに第2期中期計画の策定を現在行っている。

しかしながら、研究所の方向性を定める将来計画については、社会情勢や研究開発の発展のような外的要因の急速な変化に対応すべく、これを常に検討しておく必要がある事は言を待たない。更に、第4期科学技術基本計画の改定などに見られるように、外部環境は更に大きく変化してきている。これらのことに留意し、第2期中期目標・中期計画を調整して行かねばならない。また、前回の外部評価にもご指摘頂いている、当研究所の特徴を十分に生かした研究のロードマップと、研究所の長期的な方向性についても十分検討していく必要がある。このため、将来構想検討委員会を中心に、中期計画・中期目標WGが連動しつつ、継続的な検討を進めている。

1.7. 施設整備

改組以前の原子エネルギー研究所およびヘリオトロン核融合研究センターから継続して研究に使用されている設備・機器類のうち、比較的規模の大きいものは附属エネルギー複合機構研究センターの所属とし、管理・運営を行ってきた。基幹装置としての在り方を検討した結果、(1)研究所で独自に開発した装置（または装置システム）であって、共同利用・共同研究に供する役割を担う基幹的な（または大型の）装置、(2)当該装置（装置システム）を用いて、他研究機関や産官学のコミュニティとの双方向または連携融合の研究が格段に推進され、エネルギー理工学研究の拠点形成に資するものを「センター基幹装置」として指定し、研究所の将来構想と併せて原則として中期目標・中期計画ごとに見直しながら、

装置運転の維持管理および更新や改修を行っていくこととなった。第 2 期中期目標・中期計画期間のセンター基幹装置として、ヘリオトロン J 装置 (Heliotron J)、複合ビーム材料照射装置 (DuET)、自由電子レーザー発生装置 (KUFEL) を選定した。これらのほかにも、マルチスケール評価開発研究基盤群 (MUSTER) やフェムト秒レーザー、高分解能核磁気共鳴スペクトル装置など大型装置の整備も計画的に実施してきた。平成 19 年度以降整備された研究設備リストを資料編(I)第 3 章に記載する。

平成 15 年度には、北 2 号棟の大規模整備を行ない、平成 16 年「量子光・加速粒子総合工学研究棟」としてスタートさせた。平成 17-18 年度には、北 1 号棟ならびに南 1 号棟の整備・再開発を実施し、MUSTER の一部や原子間力顕微鏡、あるいは Li-Pb ループなどの設備を拡充した。平成 19-20 年度には、南 2 号棟の再整備に着手し、高温液体ナトリウム伝熱実験装置のナトリウム撤去と装置解体撤去作業を法令遵守して安全に実施するとともに、内装および外装を整備・再開発し、高分解能核磁気共鳴スペクトル装置をはじめとする実験装置を設置した。建物・設備については、一研究所のみからの観点ばかりでなく、全学的な観点からの整備計画の立案も必要である。例えば、宇治地区における整備計画の一つで、平成 16 年には宇治キャンパス「総合研究実験棟」が竣工し、レンタルラボ方式の研究スペースが誕生した。これに伴い、当研究所においても外部資金による研究プロジェクトを展開するスペースと、同レンタルラボスペースの活用を継続して実施している。また、平成 18 年度補正予算で宇治キャンパス内建物の耐震改修工事が認められ、平成 19 年度より 4 年計画での改修工事が進められており、現在、第Ⅲ期工事まで完了した。この工事に伴い、ここ数年間は、研究スペースの仮移転ならびに縮小等により研究環境の悪化が懸念されたが、研究所内はもちろん、宇治キャンパス全体での協力の下、滞りなく研究を進めることができている。

1.8. 自己点検・評価に関する今後の課題および留意事項

本研究所で取り上げられている研究課題は、工学、物理学、化学、生物学など、学術の幅広い分野にわたっている。それら自体の研究内容が十分高度で独創的な成果をあげていくことが必要であり、またそれらは各分野の研究において十分達成され、またこの自己点検・評価においても分析されている。しかしながら、本研究所の存在意義を明確にし、より一層の成果を上げるべく研究所の現状と将来計画を分析検討する過程において、これらの研究活動が単なるさまざま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棟という、一つの独立部局において展開していることの意義を明らかにし、その効果を評価することの必要性が認識されている。これらは、研究所の重点複合領域研究の活動や成果、また附属エネルギー複合機構研究センターにおける各種の共同研究、研究所組織と

して二重構造になっている学際研究への取り組みにおいて、形あるものとして見るができる。具体的な研究成果も分野や部門にまたがり、また学内外との研究協力を通じて、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。

このような活動や成果に対する自己点検・評価は、固定した視点からの硬直化した考えに基づいては不可能である。一方では、社会や学界、政策における先進エネルギー研究への期待に応え、その目標設定を的確かつ柔軟に行うこと、また一方では、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を行うこと、の双方が必要である。そのどちらもが中期目標期間に対しても十分早い時定数で変化しうるものであり、またそれらは一致することも矛盾することもありうる。本評価の今後の課題、留意事項としては、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、その達成度と成果の評価において、十分な外部の客観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必要と考えられる。

2. 平成 19-21 年度 重点複合領域研究 研究成果の概要

平成 19-21 年度は第 1 期中期計画・中期目標（平成 16-21 年度）の後半 3 年間に相当しており、研究に関する目標としては前半 3 年間に引き続き、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、部門横断的研究をより一層推進することにより新領域研究へと展開することを目指した。

特に、環境調和型エネルギーシステムの構築を目指した 21 世紀 COE プログラム「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」（平成 14-18 年度）におけるエネルギー理工学の研究拠点としての役割を果たした後は、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）における最先端重要研究クラスタの拠点として本研究所は大きな役割を担っている。

第 1 期中期計画における重点複合領域としては、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」、そして高機能&基盤的な研究開発ツールとしての役割が期待される「光エネルギー複合領域」の 3 領域が設定されている。プラズマ複合領域の中核的研究としては、ヘリオトロン J 装置によるプラズマ閉じこめの高性能化、耐極限環境先進構造材料の開発、可搬放電型中性子源の高性能化を進めている。バイオエネルギー複合領域については、ナノ材料創製と同材料を用いた次世代太陽電池の高効率化、および基盤研究としてバイオマス資源のクリーン燃料化、生物型酵素を用いた高効率物質変換反応の開発が挙げられる。最後に光エネルギー複合領域については、中赤外域自由電子レーザー装置 (KU-FEL) および超短パルスレーザー装置の開発とその応用の他、基盤研究として種々のレーザー誘起現象の解明が挙げられる。

以下、各複合重点領域研究の平成 19-21 年度研究成果の概要を述べる。

2.1. プラズマエネルギー重点複合領域研究

(核融合エネルギー重点領域)

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
		エネルギー貯蔵研究分野
		複合系プラズマ研究分野
		附属エネルギー複合機構研究センター附属分野
		附属エネルギー複合機構研究センター

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

これまで推進してきた高度エネルギー機能変換実験装置（ヘリオトロン J/DuET）やマルチスケール評価開発研究基盤群（MUSTER）等を用いたエネルギー基礎研究を基盤に、プラズマ基礎研究に水素サイクル・材料研究を組み入れた新たな基礎学術研究としての「先進プラズマエネルギー理工学実験」として、プラズマエネルギー利用の高度化を目標とする研究を推進し、以て、新たな学域（プラズマエネルギー複合研究領域）を開拓し、当該研究分野における国際的研究拠点の形成を目指す。その具体的な研究目的は、①自律系プラズマの基礎的挙動の解明（プラズマ閉じ込めの高性能化）、②水素サイクルにおけるプラズマ反応プロセスの最適化、③プラズマ・材料相互作用制御の高度化、④先端的研究現場での学部・大学院（ボストクを含む）教育によるプラズマエネルギー関連分野の人材養成、⑤学内外のプラズマエネルギー理工学研究ネットワークの主要研究拠点としての共同利用体制の充実、である。その際、その成果の 1 つの応用分野である核融合開発に密接に関連する部分については、核融合科学研究所を中心とする全国的な双方向型共同研究の課題「先進的磁場分布制御によるプラズマ輸送・安定性改善の研究」への主体的な参画によっても、これを推進する。さらに、21 世紀 COE プログラム研究成果を基盤に、現在進められている地球温暖化に関するグローバル COE プログラムを連携しつつ、これまでに開発してきた基幹装置や人材の資源を活用することにより、プラズマ・材料システム統合研究へと展開する。

また、放電型核融合中性子源の高性能化に関する所内外の共同研究体制を整備し、プラズマエネルギー関連技術の社会貢献・産業応用として、医療や対人地雷探査等に貢献する

ための技術開発を推進する。

2.1.1. ヘリオトロンJ装置によるプラズマ閉じ込めの高性能化

2.1.1.1. 研究の概要

ヘリオトロンJ装置は、準等磁場配位概念を取り入れて京大グループから提案された「ヘリカル軸ヘリオトロン配位」の実験的最適化を目指して設計・製作された立体磁気軸を持つヘリカル系プラズマ実験装置である。ヘリカル軸ヘリオトロン配位は、従来のヘリカル・ヘリオトロン配位では容易に両立できなかった良好な粒子閉じ込めと MHD 安定性を高次に両立させるため、準等磁場配位概念を取り込むとともに、閉じ込め領域全体に磁気井戸を確保することを目指している。この先進磁場配位を、プラズマ実験を通じて最適化していくためには、磁場分布制御の自由度が大きいことが不可欠で、このためヘリオトロンJ装置では、各磁場コイルに独立した電源を持たせ、磁場分布制御の大きな自由度を確保している。平成 12 年度のプラズマ実験開始以来、加熱機器ならびに計測機器の整備を進め、これまでに低衝突領域の高温プラズマ生成（中心電子温度 ~ 1 keV 程度）、良好なエネルギー閉じ込め（ISS95 則の 1.5-2 倍）の実証など、高温プラズマ閉じ込め装置としてのポテンシャルの高さが実証されつつある。

平成 19-21 年度の実験では、主として閉じ込め装置の基本的性能の確認を進めてきた。これまでに(1)閉じ込めのバンピー磁場制御の効果、特にバルク電子・イオンの輸送と閉じ込め改善および高エネルギー粒子閉じ込めについて、(2)MHD 平衡・安定性における配位効果、特に MHD 不安定発現領域の実験的同定および MHD 揺動による高エネルギー粒子損失について、(3)バンピー磁場によるプラズマ電流制御・電流駆動の効果、特にブートストラップ電流の配位効果および電子サイクロトロン電流駆動（ECCD）の特性評価について、(4)ダイバータ基礎研究、特に周辺磁場構造の実験的挙動について、(5)ヘリカル軸ヘリオトロンの最適化に関する物理設計について、着実な研究成果を積み上げてきた。本章では特に、これらの成果のうち主要なものに限定して述べる。

2.1.1.2. 重点領域としての意義および社会的重要性

エネルギー理工学研究所に課せられた一つの研究目標として、「エネルギーの生成・変換・利用における物理的ならびに化学的複合過程の機構および機能の解明」を行うことが挙げられている。この研究目標に対し、現在我々が直面しているエネルギー・環境問題を考えるとき、これらを解決するための一つの有力なオプションである核融合エネルギー利用を目指すエネルギー基礎研究が緊急に必要な研究であり、研究所における重点領域としての大きな意義およびその社会的重要性を有するのは言を待たない。

高温プラズマの最大の応用研究は、核融合エネルギーの利用であり、地球温暖化ガスや大気汚染物質を放出しない環境調和性に優れた基幹エネルギー源として期待され、その研究開発が世界各国で強力に進められている。日本、欧州、ロシア、米国、中国、韓国、イ

ンド等の国際協力により、トカマク型プラズマ閉じ込め装置による国際熱核融合実験炉（ITER）の建設計画が進行中であり、2018 年頃の運転開始が予定されている。ここで ITER 計画の主たる目的は DT 反応による自己点火と長時間核燃焼の実証（科学的・工学的実証）であるが、ITER 計画におけるこれらの実証が成功した後においても、ITER 型核融合炉の実用化（経済的実証）には、なお多くの課題が残されている。それらは(1)プラズマ性能の更なる向上、(2)それに対応できる炉材料の開発、(3)発電熱効率の向上、(4)稼働率の向上等であり、これらが効果的に解決されなければ、商用核融合炉の実現は困難である。第一の課題であるプラズマ性能の更なる向上は、トーラス型磁気閉じこめ配位の喫緊の優先課題として必須のものであり、具体的には、ベータ値の向上（出力密度の向上）とその結果としての定常炉のコンパクト化および電流崩壊現象（ディスラプション）の抜本的回避とそれによる経済的な炉設計における安全性・安定性の向上が必要とされている。

このトーラス型磁気閉じ込め配位に残された課題を原理的に解決できる可能性をもつ磁気閉じ込め配位としてヘリカル系が期待されており、核融合科学研究所の大型ヘリカル実験装置（LHD）はトカマク型にとって替わりうる配位として、その優れた定常閉じ込め性能を明らかにしつつある。LHD 装置はヘリオトロン E 装置の成果（原理検証）を基盤として設計・建設された平面磁気軸型ヘリカル・ヘリオトロン配位であり、ヘリオトロン E 実験において既に高い評価を獲得した閉じ込め配位を用いて、これを格段に進歩・発展させるための大型プロジェクト研究の装置として大きな意義を有している。

一方、当研究所のヘリオトロン J 装置はヘリオトロン磁場の更なる高性能化を探求するため、京都大学のアイデアに基づく先進的でユニークなヘリカル軸ヘリオトロン配位を採用した。ヘリカル軸ヘリオトロン配位の核融合炉への可能性を追求するため、ヘリオトロン J 実験で探求され、検証される新しい閉じ込め物理を発展させる方策を見出し、炉心プラズマ技術の高度化および核融合科学の発展に寄与しようとする点、更にプラズマ核融合の基礎領域で未知の非平衡・非線形問題に挑戦する「問題発見型」の萌芽的プロジェクト研究を遂行しようとしている点に、本プロジェクト研究の特徴がある。

他方、大学におけるエネルギー基礎研究としては、学術の原理的理解の追求がより一層重要となる。この観点からは、現在 21 世紀の科学として、新しいアプローチにより非線形・非平衡問題に取り組む「複合・複雑系の科学」が発展しようとしており、プラズマに関わる複合・複雑系の実験研究は「複合・複雑系の科学」の一分野として、極めて重要な研究課題となりつつある。

このようにプラズマエネルギー重点複合領域研究において、ヘリオトロン J 実験が目指すものは、狭義のプラズマ閉じ込め物理の研究のみに留まるものではなく、プラズマエネルギーの生成・変換・利用に関わる基礎過程の解明に重点を置くと同時に、広範なエネルギーの生成・変換・利用に関わる基礎研究をも指向するものである。

2.1.1.3. 平成19年以降の主な成果

(a) プラズマ粒子制御と閉じ込め改善

ープラズマ給気制御によるプラズマ領域の拡大

磁場閉じ込めプラズマにおいて、燃料ガスの給排気制御は、単に密度およびその径方向分布制御のみならず、所謂「改善閉じ込めへの遷移」とも関係しており、とくに高密度領域で高性能プラズマを得るための重要な要素の一つである。磁場閉じ込めプラズマの密度を上昇させるためには外部から中性粒子を補給する必要があるが、閉じ込め領域周辺部における中性粒子密度を余り増やすことなく、プラズマ内部に効率的に粒子補給を行うためには、中性粒子の侵入長が深い給気法が必要である。これを実現する方法としては、燃料ガスを低温固化したペレットを高速で入射する方法が知られているが、燃料ガス固化のための冷却システムや高速入射のための加速システムなど、システムとして複雑であることに加え、ペレットサイズの小型化は必ずしも容易ではなく、プラズマ体積の小さい装置への適用は難しい場合が多い。一方、通常的气体パフよりも深い中性粒子侵入長を持ち得る給気法として、超音速分子ビームを利用する SMBI 法は、システムが比較的単純で、少注入量の制御も容易であり、中・小型装置に適している。

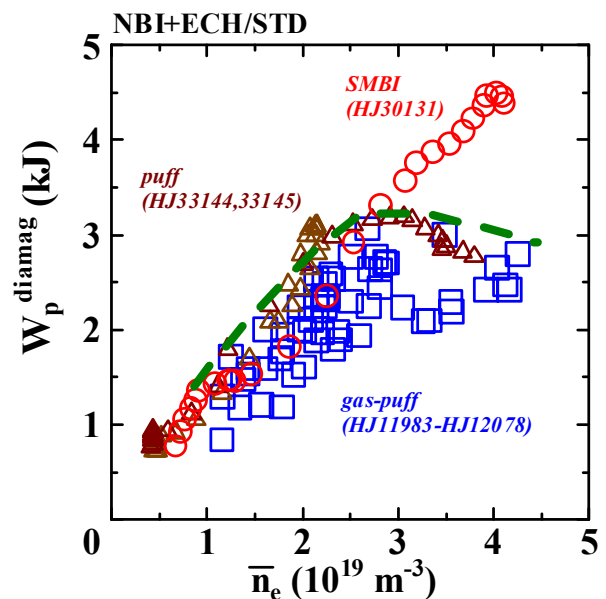


図 2.1.1 SMBI による達成プラズマ領域(密度—蓄積エネルギー領域)の拡大

ヘリオトロン J では、高密度領域での高性能プラズマ生成を目指し、SMBI によるガス給気制御の試みを開始した[1、2]。その初期成果として、第二高調波 X モード ECH (70 GHz、0.35 MW) と接線 NBI (0.67 MW) の複合加熱プラズマに対し、SMBI 給気を行ったところ、約 4.5kJ の蓄積エネルギーを持つプラズマ生成に成功した (図 2.1.1)。これは、従来のガスパフ法で得られていた値の約 1.5 倍の値である (図 2.1.1 中、○で表示)。従来のガスパフ法では、高密度になるに従い、到達可能な蓄積エネルギーの値が飽和 (あるいは減少) する (図 2.1.1 中、□で表示。それらの上限包絡線を — — — で表示) が、SMBI 給気の場合は、この飽和を越えて、高い値を得ることができている。このとき、通常的气体パフを用いて、短時間に大量のガスを噴出し、SMBI による急激な密度上昇を模擬してみたが、この場合、密度とともに蓄積エネルギーは上昇するが、上述の上限線を超えることはできなかった (図 2.1.1 中、△で表示)。

一方、ECH 単独加熱プラズマに対する少給気量 SMBI 実験では、高標的密度プラズマに対しては SMBI 直後、ECE 信号はどの観測チャンネルにおいてもほぼ同時に低下するが、低標的密度プラズマに対しては、低下するチャンネルと上昇するチャンネルが存在することが発見された。また、ECH+NBI プラズマに SMBI を実施した際の $1\mu\text{m}^{\text{t}}$ -Al フィルターを介した AXUV 信号のコードプロファイル変化においても、非局所的な輸送あるいは輸送障壁の出現を示唆する現象を見出している。

(b)電子サイクロトロン電流駆動(ECCD)

平成 21 年度、磁力線方向の屈折率 ($N_{\parallel}$) の制御および ECH ビームの収束入射のために、ECH の入射方式の変更を行った。 $N_{\parallel}$ の可変範囲は -0.05 から 0.6 で、磁気軸でのビーム半径は 0.03m となった。入射はほぼ X モードに偏波調整が行われ、第 2 高調波加熱である。 $N_{\parallel}=0.38$ 、入射パワー 270kW、線平均電子密度 $0.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の条件で磁場強度を変化させ、共鳴位置を変えたところ、共鳴位置を強磁場側にした方が図 2.1.2 に示すようにトロイダル電流が増加することが分かった。

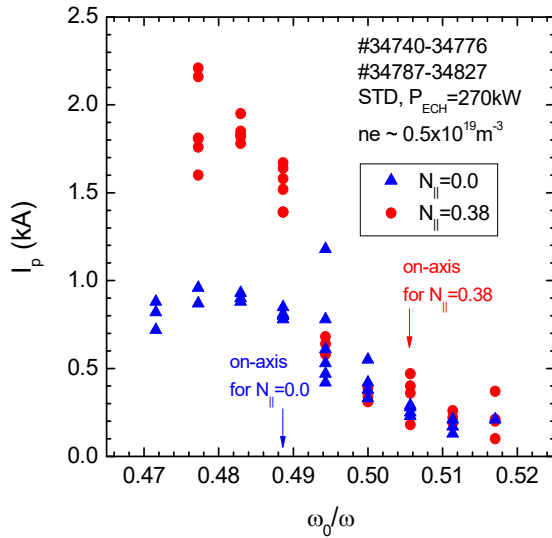


図 2.1.2 $N_{\parallel}=0$ と 0.38 に対し磁場強度を変化させた場合のトロイダル電流の変化

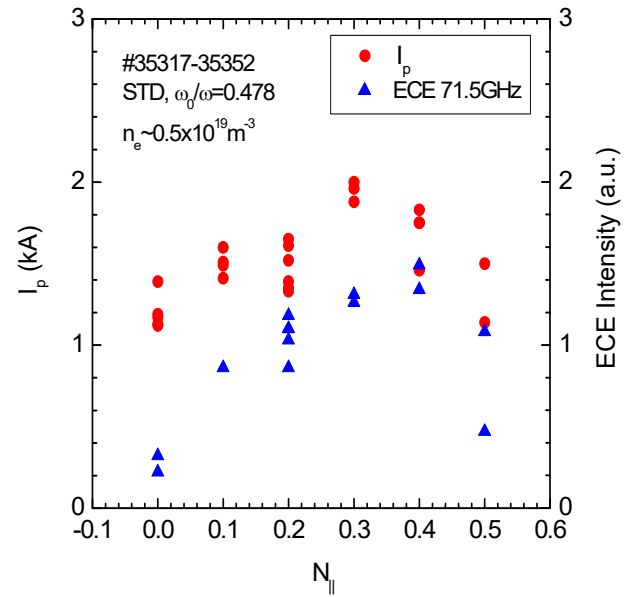


図 2.1.3 電子密度を $0.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ でのトロイダル電流と ECE 信号 (71.5GHz、 $\rho=0.15$) の $N_{\parallel}$ 依存性

$N_{\parallel}=0.0$ の場合も同様の傾向がみられるが誘導電流は無視できるため、この電流はブートストラップ (BS) 電流と考えることができる。両者の差を ECCD によるものとする、弱

磁場側の加熱では ECCD による電流は少であり、磁気軸を超え強磁場側まで ECCD による電流は増加すると考えられる。また、電流駆動方向は Fisch-Boozer 効果によるものと一致しており、これは前回（平成 19-20 年度）行った上ポートからの駆動実験と一致している。 $N_{||}$ に対するトロイダル電流値および ECE 信号を図3に示した。このとき $\omega_0/\omega=0.478$ である。 $N_{||}$ が 0.3 付近で電流差が最大になる。ECE 信号も同様である。ここでは ECE 信号は高速電子に起因するものと考えられ、それが電流駆動に影響を及ぼしていることを示唆している。ECH パワーは磁場強度がサドル状の部分で吸収され、 $N_{||}$ が大の場合には磁場構造から、吸収がプラズマの周辺に変化することもこの変化の一因と考えている。

(c)GAEによるNBI入射時の高速粒子輸送

核燃焼プラズマにおいて生成される α 粒子は、それ自身が励起するアルフベン固有モード(AE)に代表される MHD不安定性により α 粒子の異常輸送が引き起こされることが予測されており、第一壁の損耗が懸念される。従って、NBI等で生成される高速イオンによって励起される MHD不安定性が引き起こす高速イオンの輸送を調べ、将来の核融合炉に向けて外挿することは急務な課題となっている。環状プラズマにおいては、高速イオン励起MHD不安定性の揺動強度に対する高速イオン応答の依存性という観点から、高速イオンの損失モデルが提唱されている。本研究領域では双方向型共同研究により新たに設置されたハイブリッド型方向性プローブ(HDLP)を用いて、高速イオン輸送を議論することを目指す。図2.1.4にヘリオトロンJのCo方向入射NBIプラズマで観測される、高速イオン励起MHD不安定性の放電波形を示す。線平均密度が約 $1.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ においてAE周波数帯にバーストを伴ったモードが観測された。このモードでは70から40kHzへの周波数chirp downがあり、モード数は $m/n=1/2$ でイオンの反磁性ドリフト方向に伝搬している。このとき、HDLPのCo方向に向けたプローブに、バーストと同期したイオン束の応答が観測された。バーストによるイオン束の振幅はそのDC成分とほぼ同じである。なお、バーストが成長する前半のフェーズでCounter方向のプローブにも弱いながらバーストに同期した反応が観測されている。40-70kHzの周波数帯において、バースト中のイオン束は磁場揺動強度に対して線形的に増加していることが分かり（図2.1.5）、イオン束は揺動によって径方向に局所的に振動していることが予測

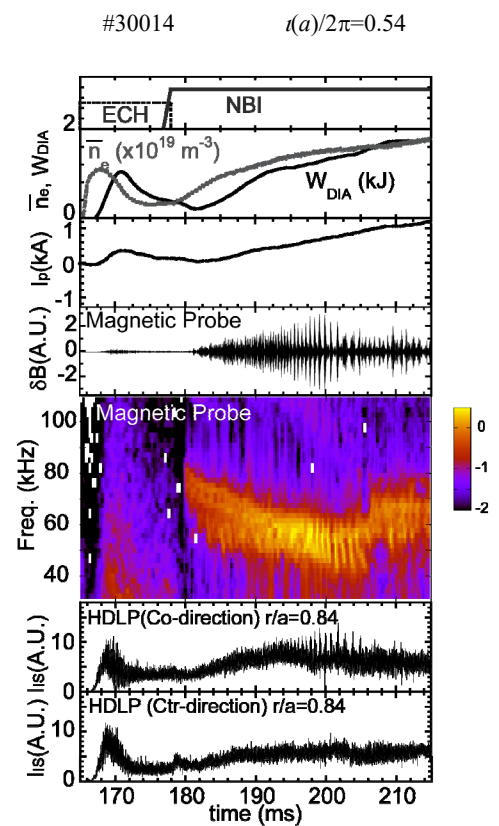


図 2.1.4 Typical bursting mode of energetic-ion-driven MHD activities obtained in NBI plasmas of Heliotron J.

される。この応答において、径方向へのイオン束は磁場揺動強度と局所的な高速イオン密度勾配の積に比例していると考えられる。この説明は磁場揺動強度で規格化されたイオン束の径方向分布でも支持される（図2.1.6 参照）。規格化されたイオン束は周辺部で低下しており、最外殻磁気面の外側では観測限界以下である。この分布は高速イオン密度勾配とこのモードの固有関数を反映していると考えられる。上記結果から、このバーストによる最外殻磁気面外側への高速イオンの損失はほとんど無いと予想される。

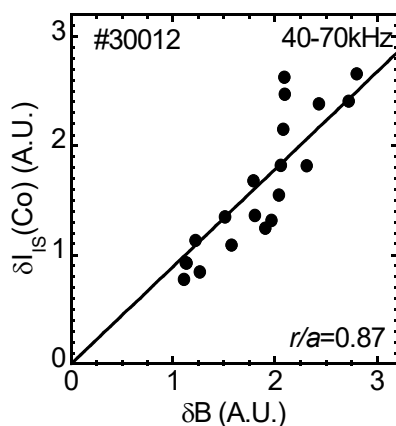


図 2.1.5. Ion flux response measured by HDLP as a function of mode amplitude.

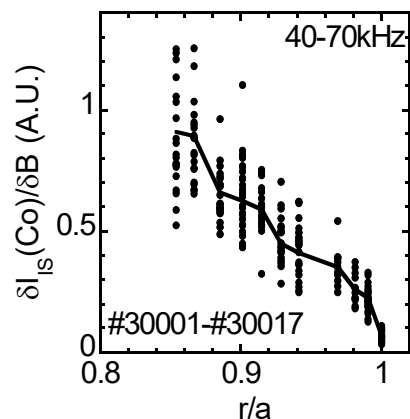


図 2.1.6 Radial profile of δI_{IS} with co-directed probe normalized by δB . The solid line is determined by the slope of the relationship between δI_{IS} and δB shown in Fig. 3.

(d)ICRF加熱

ヘリオトロンJ磁場を用いたプラズマ閉じ込めを考えると重要なのが、高速捕捉粒子閉じ込めである。単純ステラレータ配位では、温度が上がって粒子間のクーロン衝突が少なくなった場合の粒子閉じ込めには問題がある。ヘリオトロンJ磁場のような改善された磁場配位において、高速粒子の閉じ込め改善を実験的に検証することは、このような磁場改善手法の有用性の議論に欠かせない課題である。また、このような磁場配位での ICRF 加熱特性と加熱機構についても興味深い課題である。ここではヘリオトロンJ磁場の制御パラメータの一つであるト

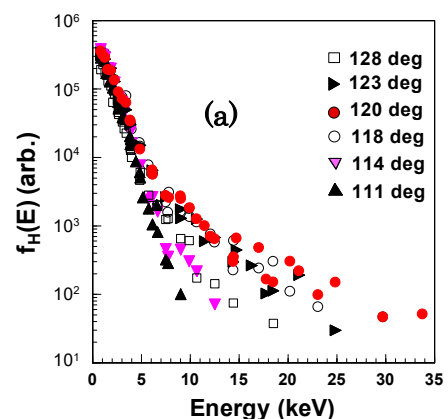


図 2.1.7 高バンピネスの場合の少数水素のエネルギースペクトル (a)

ロイダル方向の磁場リップル、すなわちバンピネス (ϵ_b) をパラメータに、高速イオンのエネルギースペクトルおよびイオン加熱効率について調べた結果について述べる。

ヘリオトロン J 装置の ICRF 加熱実験では閉じ込め磁場のコーナー部に設置した同一ポロイダル面での 2 本のハーフトーンのループアンテナを用い、弱磁場側からの波動励起により少数イオン加熱実験が行われている。アンテナ位置は標準配位では、トロイダル方向の磁場分布の極大点となるポロイダル面に対応する。また、このポロイダル面での等磁気圧分布は大半径方向に小さくなり、トカマク装置の分布と類似している。少数イオン加熱で用いているのは水素マイノリティ、重水素マジョリティである。磁場強度は ECH 入射位置で第 2 高調波加熱に対応する 1.25T に調整した。バンピネスの変化は 2 つのトロイダルコイル電流比を変えることで実現する。高速イオンのエネルギースペクトルおよびバルクイオン温度については荷電交換中性粒子エネルギー分析器 (CX-NPA) を用いて測定した。ピッチ角依存性を調べる場合には CX-NPA のトロイダル角、ポロイダル角を変え、プラズマ中心を見込む視線で、ピッチ角を変化させた。

バンピー磁場成分による高速イオンの生成・閉じ込めの変化については、高バンピネスの場合に高速粒子が最も多く観測され、テイル温度も高い。ICRF の周波数 23.2MHz で高バンピネス、19MHz で中バンピネス (標準配位) すなわち 2 ケース ($\epsilon_b=0.06$ 、0.15) の配位に対してエネルギースペクトルのピッチ角依存性を調べた。ICRF 周波数はそれぞれプラズマ中心に水素のサイクロトロン層が位置する周波数である。70GHz、300kW の ECH で生成されたターゲットプラズマは、電子密度 $0.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、バルクイオン温度 0.15-0.2 keV、マイノリティ比約 0.1 である。図 2.1.7 に観測された少数水素イオンのエネルギースペクトルの結果を示す。高バンピーに対するものが(a)、中バンピーに対するものが(b)である。

調べたピッチ角範囲は 111 度から 128 度である。高バンピーの場合には 30keV までの高速イオンが観測された。また、高速イオンの計数が最大になるのはピッチ角 90 度付近では

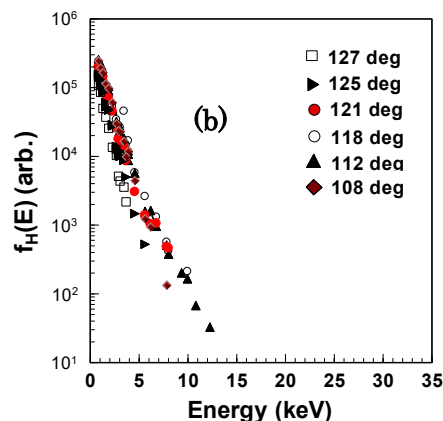


図 2.1.7 (b) 中バンピネスの場合

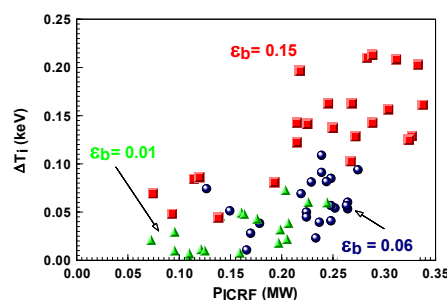


図 2.1.8 バンピネスを変化させた場合のバルクイオンである重水素の ICRF 加熱による温度上昇。それぞれの場合について入射パワーに対する変化を示している。

なく 120 度付近である。サイクロトロン加熱は磁場に垂直方向の加速であるのに対し、実験結果は異なる性質を示している。中バンピーの場合についてもピッチ角依存は同様である。ただし高エネルギー成分は少なく、10keV 以上の粒子はどのピッチ角に対しても観測されなかった。

加熱特性についてまとめたものが図2.1.8である。ICRFによるバルクイオンである重水素イオンの温度上昇を入射パワーに対して示している。ここからも高バンピーネスの場合の温度上昇が最も大きく効率的な加熱になっていることが分かる。これらの結果からイオンの磁場に垂直方向の加速機構であるサイクロトロン加熱機構を用いた場合に、高速イオンの生成閉じ込めおよびバルクイオン加熱に対するバンピーネス制御の有用性が示された。

(e)MHD解析（揺動解析）

ヘリカルプラズマの MHD 平衡・安定性の物理的理解を深め、更なる高ベータ化を目指すことは将来のヘリカル型核融合炉を展望する上で欠かせない研究課題である。そこで本研究では、ヘリカルプラズマにおける MHD 平衡・安定性の物理的理解を深めることを目的とし、データマイニング法による MHD 平衡・安定性のパラメータ研究を行い MHD 平衡・安定性の特性を調べた。

MHD 平衡・安定性を実験

的に調べる上で、磁気プローブアレイや多チャンネルの軟 X 線揺動検出器などの MHD 平衡・安定性の空間情報を高い時間分解能で測定可能な計測機器信号が欠かせない。これらデータは多チャンネル且つ多数のデータ点数といった特性上、一般にデータが多く、これらの中から MHD 平衡・安定性の情報を獲得することは技術的な困難を有するため、新たな何らかの解析手法の開発が必要となる。データマイニング法は大量のデータ群から統計学に基づいた判断基準を用いてデータを自動的にグルーピング(分類)する手法であり、特に本研究では MHD 不安定性のデータベース作成のために前述の磁気プローブアレイの信号にデータマイニング法を適用し、その結果を用いてデータベースを構築し MHD 不安定性の同定・パラメータ研究に応用した。この手法により迅速且つ正確にパラメータ研究が行

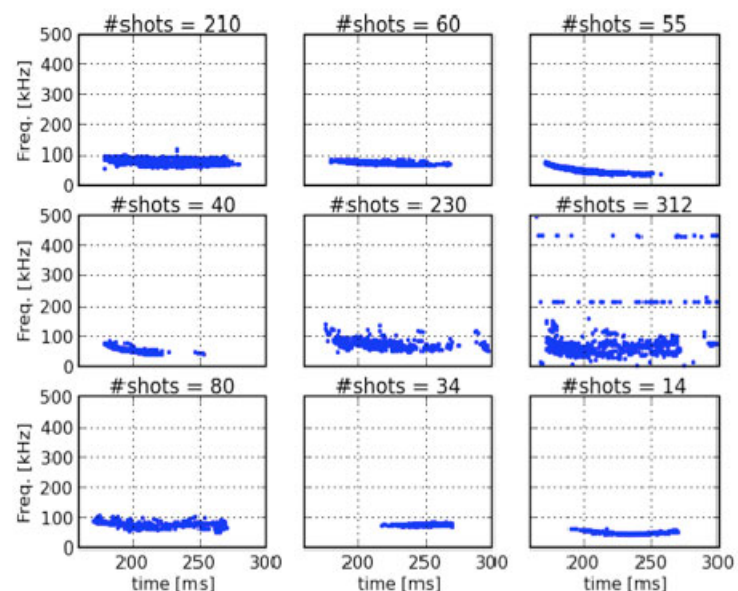


図 2.1.9 代表的な 9 種のクラスター

えることはもちろんのこと、更には新たな MHD 不安定性の発見等に繋がる可能性を秘めている。データマイニング法は(1)前処理工程、(2)クラスタリングによる主工程、(3)データの可視化工程の3工程で構成される。ヘリオトロンJにおいてデータマイニング法を適用する信号は14チャンネルで構成される磁気プローブポロイダルアレイの信号で、高周波のMHD不安定性も測定できるように1MHzでデータ収集されている。また、本研究では幾つかの磁場配位や加熱条件の異なる3786ショットの放電を解析対象とした。まず、各ショットの全磁気プローブ信号を放電時間に比べ十分に短く且つ揺動の定常性が保証できるような短時間(1024点、 $\Delta t \sim 1\text{ms}$)に区切り、それぞれの時間において磁気プローブの全チャンネル(N_c)と時間(N_s)で構成される行列 $S(N_c \times N_s)$ を生成し、それらを特異値分解法(SVD)により空間的(U :トポ)および時間的(V :クロノ)な特異値を含む行列に分離する。特異値分解によって分離された空間情報を持つ特異値行列トポの各成分において、同一の周波数および強度を有する二つのトポが存在するが、SVDは同一の進行波に対して幾つかの特異値に分離することが解っており、二つのトポの間に高いコヒーレンスがある際には、それぞれがある同一のMHD不安定性の正弦波成分と余弦波成分となりうる。そして、その2つのトポを逆SVD変換することで特定のMHD不安定性のみを含む、磁場揺動の時間変化信号に戻すことが可能である。クラスタリングはデータマイニングの主工程で、前処理により得られた各MHD不安定性の信号に対して、それぞれのプローブ間の位相差の正弦・余弦成分で構成される $2N_c$ 次元の空間($\Delta\psi$ 空間)にプロットする。そして、それらがあるモード数を持つMHD不安定性の位相差は $\Delta\psi$ 空間においてガウス分布の広がりを持って存在すると仮定し、それを最大尤度法(EM法)により判別しそれぞれのMHD不安定性を分類した。以下では、主に20kHz以上の周波数を持ち定常的に発生する高周波MHD不安定性に着目する。図9にEM法により分離された代表的な9種のクラスターを示す。またそれぞれにおいてそのMHD不安定性が観測された放電数が示してある。それぞれのクラスターは観測周波数が $f=30\sim 150\text{kHz}$ であり、高速イオン励起MHD不安定性の周波数帯に位置する。さらに、データベースに登録した各プラズマパラメータとの比較を行い、このMHD不安定性がイオンの反磁性ドリフト方向に伝搬していること、NBI入射時にのみ観測されていること等から観測されたMHD不安定性は高速イオン励起MHD不安定性であることが示された。

今後、低周波MHD不安定性へのデータマイニング法の適用ならびにプラズマパラメータのデータベース拡張を行い、まず、ヘリオトロンJでのMHD安定性を調べ詳細に調べる予定である。

(f)プラズマ計測器開発

磁場閉じ込め核融合プラズマの分布を制御することによりプラズマの高性能化、優れた閉じ込め性能を実現することは、すでにトカマク型装置やヘリカル型装置で行われており、その成果は内部輸送障壁や周辺輸送障壁の形成など多くの閉じ込め改善モードの発見につ

ながっている。立体磁気軸を有するヘリオトロン J 装置は、核融合発電を実用化する上で重要なコンパクトな高ベータ定常炉の実現という点で優れた装置であり、本装置においても分布制御により

閉じ込め改善が図れることが大いに期待できる。本研究を進めていくにはプラズマの分布を、その時間発展を含めて計測することが不可欠である。そこで高繰り返し Nd:YAG レーザートムソン散乱装置および HCN 遠赤外レーザー干渉計の開発を進めている。

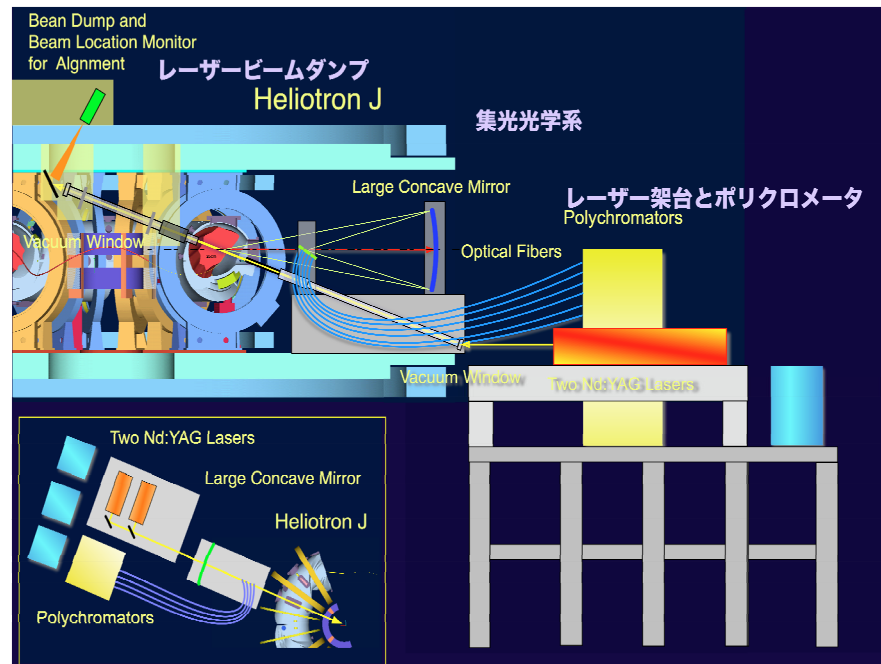


図 2.1.10 プラズマ分布制御のための高繰り返し Nd:YAG トムソン散乱計測

1. 高繰り返し Nd:YAG トムソン散乱計測装置の設計開発

プラズマの電子温度密度分布計測を行うためのマルチポイント・トムソン散乱計測方式として高繰り返し Nd:YAG レーザーを用いた装置の設計開発を行った。必要なトムソン散乱計測装置の性能の検討を行い以下の設計目標を設定した。

- (a) 測定空間点数 25
- (b) 空間分解能 $\sim 1\text{cm}$
- (c) 計測可能時間間隔 10ms (2 台のレーザーの発振間隔を調整して $\sim 20\mu$ 秒までの測定が可能)
- (d) 測定電子温度領域 10eV-10keV
- (e) 測定電子密度領域 $5 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ 以上

この目標が達成できヘリオトロン J 装置に取り付け可能なトムソン散乱計測装置の配置を検討した結果、図 2.1.10 に示すように斜め下方からレーザーを入射する配置がよいと判断した。レーザーとして 50Hz の Nd:YAG レーザー 2 台を(Continuum 製 550mJ)用いてビー

ム合成し、100Hz の時間間隔で計測を行う。散乱光は大型の凹面鏡（直径 80cm）用いて集光し、球面収差の影響を減らすために焦点距離は 180cm($f/2.25$)とした。その結果、全ての測定位置で計測立体角が 80mstr-100mstr と十分な値を得ることができる。検出された散乱光は凹面鏡による像が形成される位置に並べた光ファイバーによって 25 台のポリクロメーターに送る。性能をモデルシミュレーションで評価した結果十分上記の性能が得られると結論を得た。

2. 高時間分解密度分布計測のための HCN 遠赤外レーザー干渉計の設計

HCN レーザー干渉計は、高時間分解で電子密度分布の計測が可能であるという特徴を持ち、Nd:YAG トムソン散乱計測装置と相補的に運用することによってプラズマ分布特性を調べる。ヘリオトロン J 装置において生成されるプラズマの大きさと密度領域を検討した結果、レーザーとして波長 $337\mu\text{m}$ の HCN レーザーを用いるのが適していることがわかった。高時間分解で分布の時間発展を計測可能にするため、回転回折格子を真空中で回転させることによって大きな周波数変調が得られるスーパーローティンググレーティングを用いる。その結果、約 1μ 秒の高時間分解で密度分布の時間発展を計測できると考えられる。干渉計で計測される線積分密度から局所密度を再構成するためにアーベル変換を行う必要があるが、ヘリオトロン J 装置で生成されるプラズマは周辺領域で波状の形状をもっているため、それを加味した変換を行う必要がある。そのための変換コードの開発および密度再構成に適したプラズマ中のレーザービームパスの位置を探索する作業を進めている。

(g)ヘリカル磁場最適化の物理設計

ヘリカル型配位は高い定常性を原理的に有するため、核融合炉に適した磁場配位である。しかしながら炉の経済性を考えた際には、よりいっそうの高性能化が求められている。そのため、ヘリカルプラズマの最適化研究が世界的に行われており、実際に最適化された磁場配位を有する実験装置(先進ヘリカル装置)の設計、建設、実験が積極的に進められている。中型ヘリカル装置ヘリオトロン J も最適化研究により生み出された装置であり、良好な粒子閉じ込めを準等磁場配位で、また、高い MHD 安定性を低磁気シアと磁気井戸の組み合わせで実現する。装置の工学的な特徴としては、他の先進ヘリカルとは異なり極数 $L=1$ のヘリカルコイルを採用している点が挙げられ、コイル製作が比較的容易である点や磁場配位の

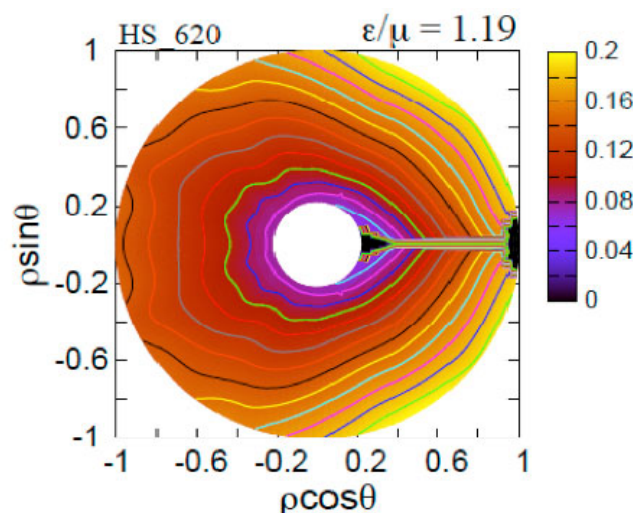


図 2.1.11 第二断熱不変量の等高線図

自由度、そして実験装置としてみた際にはポートへのアクセスの容易さが長所として挙げられる。しかしながら、ヘリカルコイルを利用するがために望む磁場以外のフーリエ成分が発生してしまい、その成分が粒子閉じ込めや新古典輸送に影響を及ぼすことが実験的にも理論的にも問題視されている。そこで、ヘリオトロン J 磁場配位をより高性能化することをめざし最適化研究を進めている。

磁場配位最適化は統合コード STELLOPT を利用した。STELLOPT は MHD 平衡計算コードを中心に、粒子軌道、新古典輸送、MHD 安定性そして電磁コイル設計が考慮可能な幾つかのコードで構成される。最適化の方法は、ユーザーが求め、入力として設定した各種プラズマならびに装置パラメータと各種コードの計算結果との

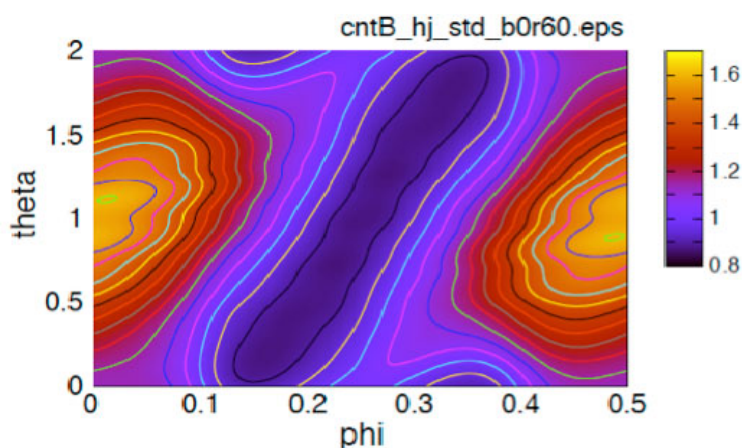


図 2.1.12 $r/a=0.6$ における磁場の等高線図

残差を最小化する方法であり、変数は最外殻磁気面や電磁コイル電流値そしてプラズマ圧力と電流分布である。最適化計算の流れとしては、まず初期条件となる磁場配位と最適化で考慮するプラズマ・装置パラメータを入力(拘束条件となる)として与え、そのプラズマでの残差を評価する。次に、各変数を変えることでそれぞれの残差を算出し、各変数変化に対する各残差を得たのち非線形最適化法により最適化の方向を決定し、繰り返し計算を行うことで残差を次々に最小化していく。なお、次元の異なる幾つかのプラズマ・装置パラメータを一律に取り扱うため、また、どのパラメータに最適化の重きを置くかを考慮するために残差には重み付けが必要となる。本研究で最適化を目指す研究領域は、重み付けが大きな順に、粒子閉じ込め、新古典輸送そして MHD 安定性とした。具体的には、第一に捕捉粒子の閉じ込め改善を目指し第二断熱不変量が磁束関数になるように、すなわち、磁気面から大きく逸脱しないように設定した。次に、最もピッチ角の大きな捕捉粒子の軌道を近似的に表す最小磁場の等磁場面を磁束関数となるようにした。そして、新古典輸送に関してはヘリカルプラズマの $1/\nu$ 領域で問題となる捕捉粒子に関連して、実効ヘリカルリップル率の低減ならびに拡散係数 D に比例する値の低減を目指した。更に、MHD 安定性に関しては低磁気シア且つプラズマ全領域での磁気井戸を満たすよう設定した。

最適化を行った結果、最も重きをおいた粒子閉じ込めに関しては、前述のように第二断熱不変量と $B_{\min}$ の磁気面からの逸脱を最小化するようにした。図 2.1.11 にあるピッチ角を有する捕捉粒子の第二断熱不変量の等高線図を示す。最適化によりプラズマ中心部においてはほぼ等第二断熱不変量面が閉じていることがわかる。 $B_{\min}$ に関しても同様で、両者から捕捉粒子閉じ込めの改善が期待できる。新古典輸送に関しては、実効ヘリカルリップル・拡散係数が最適化によりほとんどの閉じ込め領域において減少させることができた。最適化により得られた磁場構造について、図 2.1.12 に $r/a=0.6$ における磁場強度の等高線図を示す。これはヘリオトロン J の計画当初に検討されたモデル磁場に近くっており、閉じ込めに

悪影響を及ぼしていると考えられている磁場の高調波成分が減少し、良好な粒子閉じ込めが実現できたものと思われる。今後は現実味のある補助コイルのデザインを進めていく予定である。

2.1.1.4. 国内外に関連する領域の中での当該テーマの位置づけ

世界のヘリカル研究は核融合科学研究所のLHDの精力的な研究とともに、立体磁気軸配位を有する新概念装置（先進ヘリカル装置）のH-1NF（豪州、オーストラリア国立大学）、TJ-II（スペイン、CIEMAT研究所）、HSX（米国、ウィスコンシン大学）、ヘリオトロン J（京都大学）が稼働中であることに加え、2014年にはWendelstein 7-X（独国、マックスプランク研究所）が実験を開始する予定であり、相補的に研究が進められている。本研究では、立体磁気軸を有する先進ヘリカルプラズマの内部および周辺輸送障壁形成をはじめとする改善閉じ込めの比較研究を国際的な当該分野の役割分担を考慮しつつ、将来の核融合炉心プラズマ高性能化の観点から推進する位置づけを有している。

平成19年度から21年度事業にかけ整備されたハードウェアならびにソフトウェアをもとに、今後の実験研究により、プラズマ中のシア流の介在とこれによる乱流状態の自発的構造変化などの理解が進めば、ヘリカル系のみならずトカマク系との比較などを通じて、トラスプラズマにおける輸送・安定性制御に関わる知見を深めることが見込める。また、揺動解析の手法であるデータマイニング法によるデータ解析は、大量なデータから特異値解析を利用し特徴を抽出（グループ化）していく手法として、MHD不安定性等の大域的な揺動の物理機構解明に限らず、今後、乱流等の微視的な揺動の物理機構解明を含めた広い範囲で応用されていくことが期待できる。これまでの成果に基づきヘリオトロン Jと同様に立体磁気軸磁場配位を有するTJ-IIおよびH-1NFとの国際共同研究を更に進めることが重要である。特に、これら装置に共通の加熱手法、計測装置を用いることで、共通する物理課題の検討と理解を可能としている。加えてヘリオトロン Jプラズマの更なる高性能化を目的とした磁場配位の最適化を検討するために、米国オークリッジ国立研究所および米国プリンストンプラズマ物理研究所の協力を得て、ヘリカル磁場配位最適化コード群（通称STELLOPT）をヘリオトロン Jの磁場配位に適用し、最適化の検討を行っているところである。

国際共同研究拠点ネットワーク形成事業の一環として、核融合科学研究所双方向型共同研究や日米科学技術協力事業等の支援を得つつ、米国（特に HSX, CTH, QPSグループ）、EU（特にTJ-II, W7-Xグループ）、オーストラリア（H-1NFグループ）等と日本（ヘリオトロン J, LHDグループ）との密接な国際共同研究および連携研究を展開してきた。国際的な共同研究としては、平成21年度、TJ-IIグループとH-1NFグループに加え、ロシアのクルチャトフ研究所、中国の西南物理研究所との密接且つ活発な研究交流が実施された。また、オーストラリア国立大学よりDr. B. Blackwell氏を客員准教授（平成20年12月16日-平成21年3月31日）として、また、ウクライナ・ハリコフ研究所よりDr. V. Pankratov氏（平成21年1月1日-3月31日）を、またフランス・プロバンス大学よりProf. Dr. S. Benkadda氏 を客員教授（平成

21年12月1日-平成22年2月28日)として招聘し、ヘリカル系におけるMHD不安定性に関する実験研究および周辺プラズマに関する共同研究を行っており、国際ネットワークの充実と拠点形成活動を進めている。

更に、連携強化、拡大に関し、国内の共同研究グループとして、従来の核融合科学研究所、大阪大学、広島大学、筑波大学等に加えて、東北大学(TU-Heliac)および京都工芸繊維大学等との連携研究を進めつつある。次年度以降、更に国際共同研究、連携研究のための人的交流を拡大し、実験結果の比較検討や加熱、計測システムおよび解析ソフトの開発を通して、京都大学が中心的な機関となる先進ヘリカル国際共同研究拠点ネットワーク形成を推進してゆく計画である。

2.1.1.5. 今後の展望

現在、実験的・理論的に確認されたヘリオトロンJの閉じ込めの基本的性能を今後、如何に高性能化していくかを、新たな視点から実験的・理論的に研究して行く必要がある。次の段階としての新たな研究展開のなかで、トロイダルプラズマ物理のより総合的な理解が深まり、優れた核融合炉への展望が開けることを期待している。特に、第2期中期期間(平成22-27年)では、ヘリオトロンJ装置において、プラズマの分布制御を含む視点に立脚し、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推進し、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が重要である。また、この計画を効率的・効果的に達成するため、局所プラズマ計測器の整備を進めなければならない。

第2期中期期間におけるヘリオトロンJプラズマ閉じ込めの高性能化に向けた新たな視点は、(1)先進ヘリカル配位の学術研究、特に立体磁気軸ヘリカル系の異常輸送の解明、(2)プラズマ性能の向上、特に閉じ込め改善と高ベータ化、(3)核融合炉への展開、特に数値試験炉への寄与および国際共同研究への寄与と、ヘリオトロンJ装置の実験データ基盤の整備・拡充にある。さらに、これらに関連する基礎・学術研究が、ヘリオトロンJ装置を活用して広範に展開されることを期待している。

2.1.1.6. 主要論文リスト

- 1) T. Mizuuchi, et al., 18th Int. Toki Conf. (Toki, 2008) P2-16.
- 2) T. Mizuuchi, et al., 17th Int. Stellarator/Heliotron Workshop (Princeton, 2009).
- 3) T. Mizuuchi, et al., J. Plasma Fusion Res., 81 (2005) 949.
- 4) 長崎百伸, A. Fernández, 吉村泰夫, 本島厳, 岡田浩之, 水内亨, 小林進二, 馮震, 坂本欣三, 近藤克己, 中村祐司, 有本元, 渡邊真也, 野作雅俊, 松岡諭史, 友清喬, 佐野史道, A. Cappa, F. Castejon, J.M. Fontdecaba, V. Tribaldos, A. Tolkachev, E. Ascasibar, 磯部光孝, 西村伸, 秋山毅志, 鈴木千尋, 松岡啓介, 南貴司, 岡村昇一, “ヘリカル系における電子サイクロトロン電流駆動-Heliotron J, TJ-II, CHS での実験結果”, J. Plasma Fusion Res. Vol.83, No.9 (2007) 764-772.
- 5) Kazunobu NAGASAKI, Gen MOTOJIMA, Angela C. FERNÁNDEZ, Álvaro A. CAPPA, Jose Maria FONTDECABA, Yoshio YOSHIMURA, Takashi NOTAKE, Shin KUBO, Takashi SHIMOZUMA, Hiroe IGAMI, Katsumi IDA, Mikio YOSHINUMA, Takashi KOBUCHI,

- Heliotron J Team, TJ-II Team, CHS Team and LHD Team, "ECCD Experiments in Heliotron J, TJ-II, CHS, and LHD", Plasma and Fusion Research, Volume 3, S1008 (2008). .
- 6) K. Nagasaki, G. Motojima, S. Kobayashi, S. Yamamoto, T. Mizuuchi, H. Okada, K. Hanatani, S. Konoshima, K. Masuda, Y. Nakamura, S. Watanabe, K. Mukai, K. Hosaka, K. Kowada, S. Mihara, Y. Yoshimura, Y. Suzuki, A. Fernández, A. Cappa and F. Sano, "Effect of magnetic field ripple on electron cyclotron current drive in Heliotron J", Nucl. Fusion 50 (2010) 025003 (7pp) .
 - 7) H. Okada, S. Kobayashi, H. Takahashi, S. Mihara, D. Katayama, T. Mutoh, T. Mizuuchi, K. Nagasaki, Y. Nakamura, S. Yamamoto, H. Arimoto, G. Motojima, S. Watanabe, K. Mukai, H. Matsuoka, Y. Kowa, S. Konoshima, K. Hanatani, K. Kondo, F. Sano, "Velocity Distribution of Fast Ions Generated by ICRF Heating in Heliotron J", Proc. 22nd IAEA Fusion Energy Conference (2008) EX/P6-28. .
 - 8) H. Okada, Y. Torii, S. Kobayashi, M. Kaneko, H. Kitagawa, T. Tomokiyo, H. Takahashi, T. Mutoh, T. Mizuuchi, K. Nagasaki, Y. Nakamura, S. Yamamoto, H. Arimoto, K. Hanatani, K. Kondo, F. Sano, "Dependence of the confinement of fast ions generated by ICRF heating on the field configuration in Heliotron J", Nuclear Fusion, 47 (2007) 1346..

2.1.2. SiC/SiC複合材料利用システムの検討と実用化

2.1.2.1. 研究の概要

先進的な高性能セラミック材料は多岐にわたる原子力システムにおいて実用化が期待され、最近ではこれらの材料を主要材料とした先進原子力システム概念も珍しくない。マイクロ、ナノテクノロジーの発達に伴い、従来不可能であった製品コントロールが可能となっており、画期的な特性を有するセラミック材料も実用化に近づいている。NITE-SiC/SiC複合材料は高温エネルギー利用社会実現のためのイノベーションとも言える材料であり、これを利用するシステム検討および実用化研究を行っている。原子力システムにおいてもガス冷却の高効率GFRの炉心設計や、核融合炉液体ブランケット・固体ブランケットなど原子力利用のシステム検討が行われている。さらに最近では、ガス冷却炉やSFRの熱交換器、VHTR用制御棒、軽水炉における燃料の高燃焼度化を目指した燃料被覆管にまで応用範囲は広がり、全体を通して、実用部材の作製技術開発は重要な課題となっており、本研究所でも関連する加工技術、接合技術の高度化が図られ、熱交換のためのチャンネルを有し、SiC/SiC複合材料のパイプと接合したガス炉の中間熱交換器スケールモデルの開発に成功した。

2.1.2.2. 重点領域研究としての意義および社会的重要性

核融合研究は、21世紀において、いよいよその実用化を目指した研究へと発展することが切望されている。苛酷な核融合環境に耐えうる構造材料の開発研究は、核融合炉工学の核心となるものであり、核融合炉工学研究の発展とエネルギー源としての活用に向けて重要な研究として位置付けられている。また、近年原子力エネルギーはCO₂問題に対する安定的なエネルギー源として期待されている。我が国における安定的なエネルギーを確保するため、再処理・バックエンドを含めて安全且つ高経済性を有するエネルギーシステムを構築するには、1)燃料の効率的利用、廃棄物の最小化ならびに管理、核拡散抵抗性を確保したエネルギー源としての持続可能性、2)安全で信頼できる運転、敷地外緊張時対応が不要な安全性／信頼性の向上、3)他のエネルギー源とも競合できるライフサイクルコストの優位性を兼ね備えたGEN-IV、核融合ならびにそれらに匹敵する先進的原子力エネルギーシステム概念への拡張性も含めた検討、実現性が求められる。このため、セラミックス材料の先進原子力システムへの応用は、先進原子力システムの実現、高性能化の鍵であり、特に耐照射性、耐食性等に優れるSiCおよびSiC/SiC複合材料の開発は非常に重要である。

2.1.2.3. 調査期間における主な成果

(a) 先進セラミックス複合材料の開発

京都大学で開発したナノインフィルトレーション遷移共晶相焼結(NITE)法を用いた

SiC/SiC複合材料の実用化技術開発を行った。プロセスの柔軟性、SiC繊維改良の検討を行い、産業界と共同で、研究室で作製するものと同等の特性の大型部材、円管等の実用部材開発に成功した。文部科学省の「先進複合材コンパクト中間熱交換器の技術開発」では、新たな加工技術、接合技術開発に成功し、内部に熱媒体の流路を持つスケールモデル開発に成功した。高結晶性繊維を用いたSiC/SiC複合材料の開発では、世界に先駆けて研究を行い、従来繊維を用いた材料に比べ、強度に対する界面特性依存性が低く、界面層を、強度特性を損ねることなく大幅に減らすことができ、耐高温酸化特性や耐照射特性を向上させられることを明らかにした。界面の破壊機構を明らかにし、繊維の予備被覆を考案し、界面破壊挙動改善とマクロ強度特性向上に成功した。

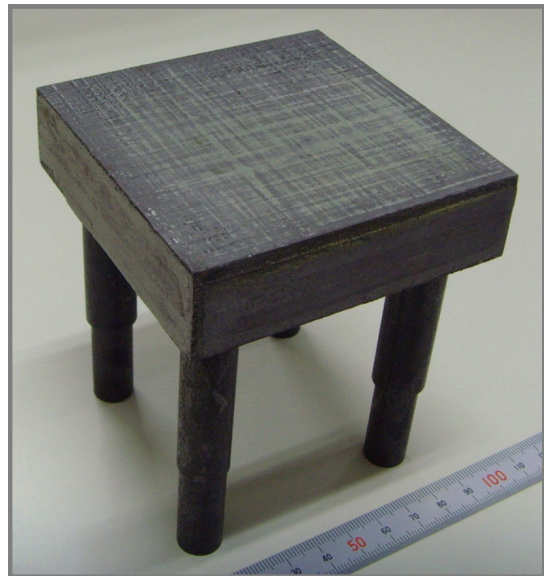


図 2.1.13. SiC/SiC 複合材料で作製した中間熱交換器のスケールモデル

(b) モノリシックSiCおよびSiC/SiC複合材料の照射効果

SiC/SiC複合材料の照射効果に関する研究に関しても世界をリードする研究を行った。従来のCVI材に加え、近年開発されたNITE-SiC/SiC複合材料に関しても、中性子照射、イオン照射を用いた研究を行い、形成されるマトリックスによる、微細組織、強度特性に及ぼす影響の評価を行った。図2.1.14に示されているように、中性子照射後の試験片に対し、引張試験のヒステリシスループ解析を行った。損傷関数や残留応力等の変化による挙動

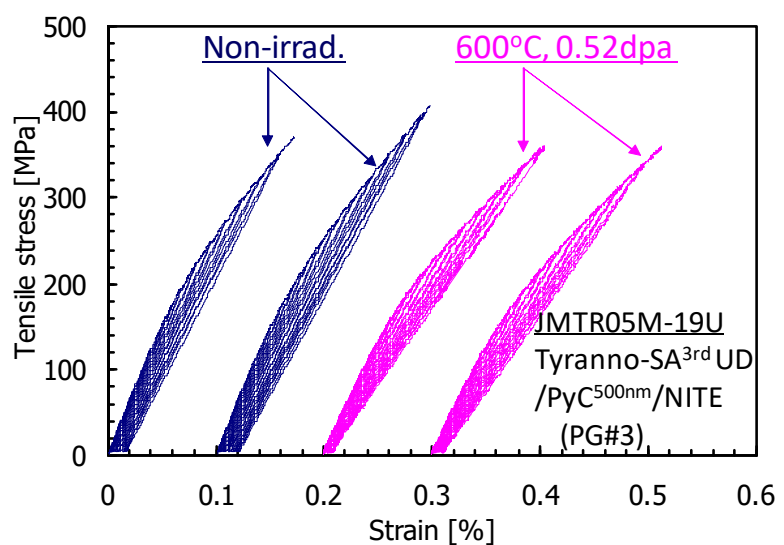


図 2.1.14 NITE-SiC/SiC 複合材料の引張強度特性に及ぼす中性子照射効果

の変化は見られたが、NITE-SiC/SiC複合材料に関しても、CVI-SiC/SiC複合材料と同様に、中性子照射後も非照射材と同等以上の比例限度応力、最大強度を示した。これらの変化の

要因としては、繊維とマトリックスの照射誘起スウェリングの違いが示唆され、DuET施設による重イオン照射と、MUSTER施設における高分解能像を含むTEM観察、超微小硬度試験機を用いた強度評価を進めた。焼結助材等の成分に依存するスウェリング機構等をMUSTER施設における解析で明らかにし、マクロ強度との関係を調べた。

2.1.2.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

SiC/SiC セラミックス複合材料は、核融合炉開発戦略においては動力炉構造の候補材料と位置付けられており、IEA において開発と評価における国際協調を目的としたワーキンググループが設置されている。本研究所はIEA ワーキンググループ活動へ積極的に参画している。本研究所は大型外部予算による材料システム開発プログラムと核融合炉用セラミックス複合材料開発評価における歴史的な役割とにより、材料開発の世界的な研究拠点のひとつに数えられるに至っている。本研究所で開発したNITE-SiC/SiC複合材料は、CVI材料以外で中性子照射環境下での優れた特性が確認されている唯一の材料であり、製造性、基本特性等から原子力分野への応用が検討されている。日欧の共同研究であるITER-BA活動においても、標準材料として採用されている。実用化における製造技術開発においても、大型の外部資金による研究開発により、世界をリードする立場にある。

2.1.2.5. 今後の展望

SiC/SiC複合材料の材料開発に関しては、基本的な素材の開発から、接合、被覆等のより工学的な応用研究に移っている。ITER-BA等の国際共同研究によりデータベースの充実も図られており、本研究所は何れにおいても国際的にも中心的な役割を担っていくことになる。応用分野においても、核融合開発から研究は始まったが、技術の進展とともに、先進核分裂炉、軽水炉へと、より近い将来に移りつつある。セラミック材料の先進原子力システムへの現実的な応用を検討し、早期実用化に向けた研究開発を実施する。特に既存の原子力システムの枠に捉われない横断的な研究活動を、産学密接な連携の下目指す。材料研究を基盤とするエネルギーシステム研究を材料/エネルギー粒子相互作用を核として進め、先進エネルギーシステム開発へ貢献することを目的とする。SiC、C材料のセラミックス材料を中心に、先進エネルギーシステムへの応用を目指し研究開発を進めていく。既存の金属を中心としたシステムへのセラミックス材料の応用を推進するとともに、セラミックス材料と金属材料の融合するシステム開発も視野に入れた研究も行う。基本製造プロセス開発においては、これまでの実績を基に、先進核分裂炉、核融合炉を対象にした開発を進める。構造部材から燃料まで広くセラミックス材料の原子力分野への応用を目指す。

2.1.2.6. 主要論文リスト

- 1) K. Shimoda, A. Kohyama and T. Hinoki, "High mechanical performance SiC/SiC composites by NITE process with tailoring of appropriate fabrication temperature to fiber volume fraction, "COMPOSITES SCIENCE AND TECHNOLOGY," 69[10] (2009) 1623-28.

- 2) T. Nozawa, T. Hinoki, A. Hasegawa, A. Kohyama, Y. Katoh, L.L. Snead, C.H. Henager and J.B.J. Hegeman, "Recent advances and issues in development of silicon carbide composites for fusion applications," *Journal of Nuclear Materials*, 386 (2009) 622-27.
- 3) G. Newsome, L.L. Snead, T. Hinoki, Y. Katoh and D. Peters, "Evaluation of neutron irradiated silicon carbide and silicon carbide composites," *Journal of Nuclear Materials*, 371 (2007) 76-89

2.1.3. 先進原子力システム構造材料開発研究

2.1.3.1. 研究の概要

原子力エネルギーは、国際的な関心となっている二酸化炭素の排出量削減に貢献すると期待され、近年、各国のエネルギー政策において重要な電力源として位置づけられている。一方で、過去における社会通念としての原子力の安全性が、原子力構造材料の腐食やひび割れなどの材料劣化に起因する冷却水漏れなどの事故により損なわれてきた。この様な背景の下、原子力を高効率にしかも安全に利用するための基盤研究として、原子力用の高性能材料の開発研究や構造材料の保全技術開発研究が挙げられる。そこで本研究では、これまでに整備してきたイオン加速器（DuET）（図 2.1.15）を効果的・効率的に活用し、以下の二つの観点から先進原子力エネルギー材料の開発に重点を置いた研究を実施している。

1) 次世代原子力システムの高効率利用に向けた革新的原子力材料の開発研究

2) 原子力エネルギーの安全利用のための構造材料保全研究

前者においては、高速炉燃料被覆管の開発研究と核融合炉ブランケットシステムに関わる要素技術開発研究を実施している。燃料被覆管は原子炉内において最も苛酷な環境に曝され、しかも核燃料を封じ込める極めて重要な役割を担っており、腐食やひび割れなどの損傷を未然に防ぐことが要求される。特に、高速炉においては、高温高強度、耐食性および耐照射性能の三つの全てを兼ね備えた被覆管材料の開発が望まれている。現状ではオーステナイト系のステンレス鋼が使用されているが、材料寿命が短期間であるため、燃料棒の交換頻度が高く、経済性が悪い実用化における課題となっている。本所では、上述の三つの特性を兼ね備えた革新的な高速炉用燃料被覆管として「スーパーODS 鋼」を提案し、

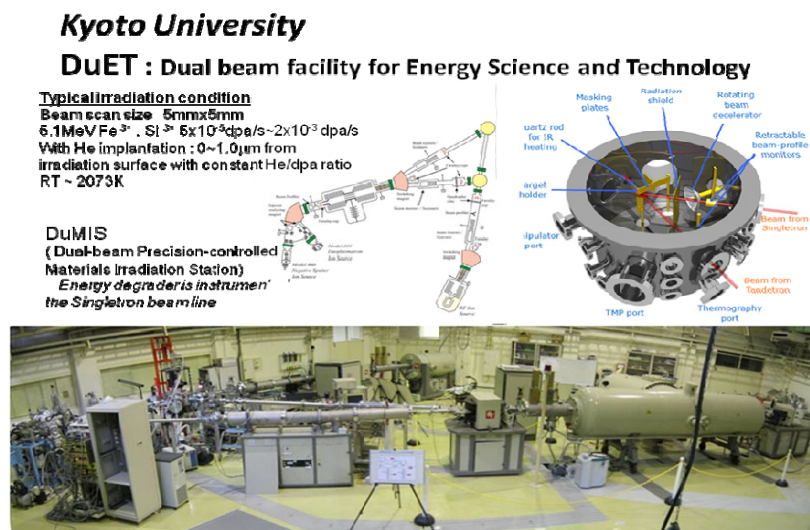


図 2.1.1 エネルギー理工学研究が所有する材料試験用イオン加速器（DuET）

文部科学省の「原子力システム開発事業（平成 17-21 年度）」として採択され、その開発に成功し、特許申請（平成 20 年 9 月）に至っている。

核融合炉ブランケット構造材料として、我が国の第一候補構造材料とされている低放射化フェライト鋼の開発研究においては、国際熱核融合実験炉（International Thermonuclear Experimental Reactor : ITER）の研究活動として、「Broader Approach 事業」に参加し、低放射化フェライト鋼の溶接技術開発研究および国際核融合材料照射施設（International Fusion Materials Irradiation Facility: IFMIF）を利用するために不可欠な微小試験片技術開発研究の実施担当機関に採用され、平成 19 年度より実施している。また、日米科学技術協力事業（核融合分野）「TITAN 計画」に参画するとともに、核融合科学研究所の全国共同利用公募事業の「ヘリカル共同研究」に採択され、先進材料の溶接・接合技術開発研究を実施し、酸化物分散強化鋼の固相接合技術開発に成功している。

材料保全研究に関しては、現在稼働中の軽水炉の高経年に伴う重要課題として、経験則を超えた科学的根拠に基づいた压力容器鋼の照射脆化予測および炉内構造物の応力腐食割れ（SCC）機構の解明に関する研究を実施し、照射脆化に及ぼす Mn 影響や SCC における水素の役割など、新しい材料科学的知見を提供した。

2.1.3.2. 重点領域としての意義および社会的重要性

平成 20 年度までの第 1 期中期計画における研究所の 3 重点研究領域の内、プラズマエネルギーに関連する研究分野として、核融合炉材料研究を位置付けている。また、核融合とは別に、次世代原子力システム用の構造材料開発研究を展開し、第 2 期中期計画における重点研究として先進原子力研究を特定し、平成 21 年度からは実質的な活動を展開している。プラズマエネルギー研究では、核融合プラズマと材料の相互作用を取り上げてきた。

異分野連携・融合利用研究の例としては、光エネルギー研究との関連では、高輝度レーザーの材料接合法への応用を視野に入れた研究開発への展開を計画している。また、バイオエネルギー関連では、原子炉用革新的被覆管材料をバイオエネルギー変換システムにおける反応容器材料として適用することを念頭に入れて開発を進めてきた。すなわち、本研究で開発中の材料は、原子力に限らず、様々な分野におけるエネルギー変換に関わるプラント用構造材料としての応用が可能であり、本所が目指す異分野連携・融合重点領域研究の成果を実用化するための基盤研究の一つとして位置づけている（図 2.1.16）。



図 2.1.16 研究所の異分野連携・融合利用研究と原子力材料研究の位置づけ

原子力利用が二酸化炭素の排出量削減に効果的であり、大きな社会貢献を果たすことは言を俟たないが、安全利用が必須の条件であり、本研究は、原子力の高効率安全利用に貢献するものである。さらに、近年の科学技術の進展は、材料に課せられる要件を益々苛酷なものにしている。高温高強度や耐食性は、システムの寿命や効率に直接関わる性質であり、その特性の向上を目指す研究が盛んに行われてきた。昨今は、材料の高性能化や高機能化に加えて、環境との親和性が重要な因子として新たに加わり、材料開発がますます困難になっている。この様な背景の下で、先進原子力システムは、高エネルギー中性子照射環境、腐食性環境および高温環境といった苛酷な環境を与える場として知られており、この環境下で耐え得る材料は既存の多くの環境下においてもその要件を満足すると期待される。その意味において、本研究課題は極めて適用範囲が広く、原子力エネルギー分野を始め、多様なエネルギー分野において要求されている、高性能・高機能材料を提供することが期待される。

2.1.3.3. 平成 19 年度以降の主な成果

(a) スーパーODS 鋼の開発

(a-1) 高速炉燃料被覆管材料

我が国で開発が進められている次世代高速炉は Na 冷却システムであるが、その他にも鉛ビスマス (Pb-Bi) 冷却システムや超臨界圧水 (SCPW) 冷却システムの開発研究が各国において進められている。Na 冷却システム用として開発された 9Cr-ODS 鋼は、Pb-Bi 液体共晶 (LBE) や SCPW 中での耐食性に問題があり、それらのシステム用の燃料被覆管としての適用は極めて困難である。そこで、高温強度や耐照射性に優れ、且つ、LBE および SCPW 中での耐食性にも優れた「スーパーODS 鋼」を提案し、開発研究を進めてきた。特に、文部科学省が実施している原子力システム開発事業において、平成 17 年度から 21 年度まで

実施した「高効率原子力システムに向けたスーパーODS 鋼の開発研究」においては、京都大学が中心となり、総額 15 億円を投じて研究開発が行われた。以下にその概要を研究項目ごとに述べる。

1) 高精度制御型アトライターの製作

本研究項目では、酸化物粒子径が過剰酸素量 (Y_2O_3 以外の酸化物を形成するための酸素量) に依存することに着目して、MA 処理工程において大気と接触しない構造のアトライター設備や回収した MA 粉末を不活性雰囲気中で処理するためのグローブボックスならびに新型押出カプセルを製作し、過剰酸素量を高精度に制御することが可能となった。

2) 高温大気中強度特性改良・評価

本研究項目では、高温クリープ・疲労特性および高温での組織変化に伴う靱性変化を評価した。Al 添加は耐食性確保の面で不可欠であるものの酸化物粒子が粗大化し、高温引張強度およびクリープ強度を低下させる。そこで粒子径制御元素として Zr を添加した結果、高温引張強度のみならず、クリープ強度が顕著に増大し、本事業の目的の達成の目処がついた(図 2.1.17)。

3) ナノ・メゾ組織制御評価

スーパーODS 鋼のナノ・メゾ組織を評価した結果、Zr あるいは Hf の炭化物や酸化物が粒内のみならず粒界上に多量に析出していることが判明した。また、Zr あるいは Hf 添加材の酸化物粒子のサイズ (約 3-5nm) が無添加鋼のサイズ (約 7nm) に比べて小さく、数

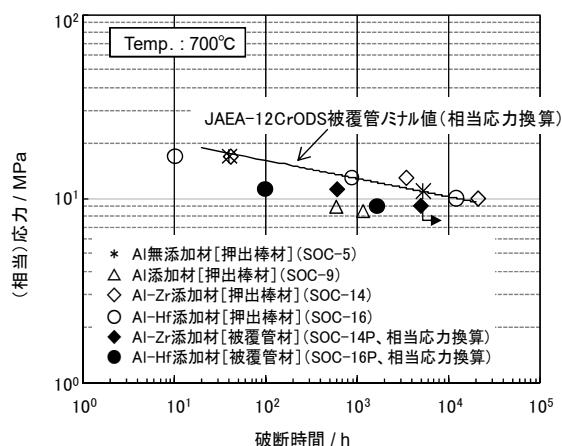


図2.1.1 第3元素添加によるクリープ特性の向上

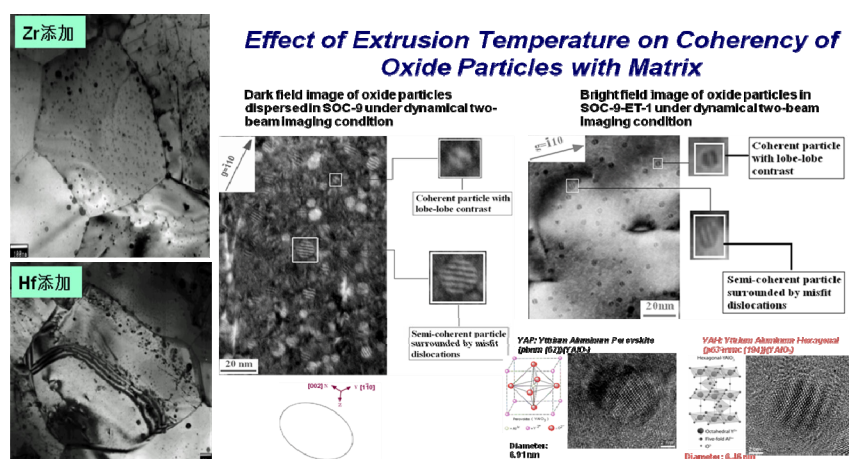


図 2.1.18(a) Zr および Hf 添加材において観察された炭化物および酸化物の粒界析出
(b) 酸化物粒子と母相との整合性の指標となる層状の組織 (高分解能TEM)

密度が高い（約 5 倍）。これらのナノスケール(酸化物粒子)およびメゾスケール（結晶粒）の組織制御によりクリープ強度が増大したと考えられる（図 2.1.18(a)）。スーパーODS 鋼の優れた特性の原因となっている酸化物粒子と母相の結晶学的方位関係は重要である。図 2.1.18(b)は、その関係进行评估するための高分解能顕微鏡写真であり、層状のコントラストを持つ粒子が観察されている。この層間隔はミスフィット転位の存在を意味しており、母相と粒子の整合性を評価でき、整合性の高低により、転位との相互作用の程度、すなわち硬化への寄与の度合いが判明した。

4) 超臨界圧水(SCW)中における耐食性評価

本研究項目では、超臨界水環境中腐食試験装置を用いて、開発されたスーパーODS 鋼の耐食性評価を実施した。超臨界圧水（600℃、25MPa）中での各種既存材料とスーパーODS 鋼（SOC-14）の耐食性を評価した結果、各種の既存材料に比べ、スーパーODS 鋼の腐食増量が少なく、優れた耐食性を示していることが判明している。腐食試験後の化学分析の結果、Al の添加は、材料表面に薄い（約 200nm）

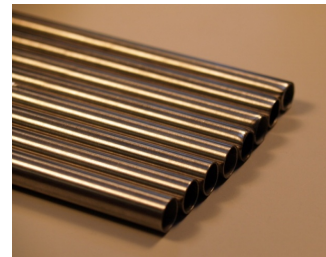


図 2.1.19 スーパーODS 鋼被覆管

アルミナ層を形成することにより耐食性を向上させていることが判明した。400℃、500℃および 600℃での実験結果に基づき、スーパーODS 鋼の腐食増量予測式を Curve fitting により求めて、腐食深さを見積もった結果、600℃の超臨界圧水中での 10 年間における腐食深さは約 10μm であり、目標値の 10 分の 1 に抑えることが可能であることを確認した。

5) 鉛ビスマス中における腐食試験および腐食機構の解明

溶存酸素量を変えた LBE 中溶解実験を 700℃において実施し、溶解量測定および界面観察を行った結果、酸素分圧の高い条件では比較的緻密な酸化物層が形成され、特に、Al を含有し、且つ高 Cr 濃度の条件では界面にアルミナのごく薄い層が形成されており、主要合金元素の LBE 中への溶解も抑制されることが判った。550℃および 650℃において、停留 LBE 中長時間腐食試験（5000 時間）した結果、Al を添加した基本化学組成（16Cr-4Al-2W）の候補材をはじめとし、Zr が添加されたスーパーODS 鋼は、良好な耐食性を示すことが明らかになった。腐食試験（試験温度 550℃および 650℃、LBE 中溶存酸素濃度 10^{-8} wt%、浸漬時間 1000 時間および 3000 時間）結果と放物線則に基づいた酸化皮膜成長予測式から 700℃/20 年

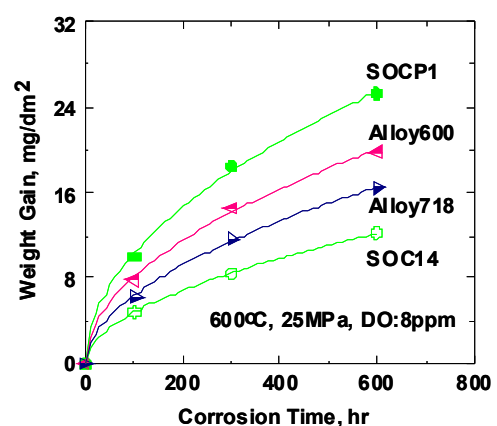


図 2.1.20 超臨界圧水中（600℃、25MPa、溶存酸素 8ppm）での腐食増量（SOCP-1、SOC14 共に Al 添加材）

後の酸化皮膜厚さを外挿法により求めた結果、約 25 μm と十分に小さいことを確認した。

6) 実用化に向けたスーパーODS 鋼の加工プロセス技術開発

スーパーODS 鋼に対する冷間圧延後の軟化熱処理温度を適切に選択することで、4 回の冷間圧延による被覆管の製造に成功するとともに（図 2.1.19）、4 回冷間圧延後に 1150 $^{\circ}\text{C}$ 以上の最終熱処理を施すことで等方的な再結晶組織の得られることを確認した。

ODS 鋼を照射下で使用する場合には課題となるのは、酸化物粒子の照射下での相安定性である。650 $^{\circ}\text{C}$ において最大 150 dpa までのイオン照射実験によると、酸化物粒子の形状に変化は生じず、極めて高い相安定性を示している。また、ODS 鋼は核変換ヘリウムの析出に伴う粒界脆化に対しても極めてその抵抗力の高いことが判明している。

以上により、次世代原子力システムにおける被覆管材料の要件を満たす革新的被覆管材料「スーパーODS 鋼」として、15.5Cr-2W-4Al-0.3Zr-0.35Y₂O₃ 鋼を提案した（特許申請）。

(a-2) 超臨界圧水プラント用配管材料

高 Cr 酸化物分散強化鋼は、高速炉用高燃焼度燃料被覆管としての研究開発が進められており、高温高強度、高温高耐食性および耐照射性能に優れた革新的な材料として注目を集めている。火力プラントや自動車用の配管材料など、原子力分野以外へのスピノフを視野に入れた展開も期待されている。現行の超臨界圧火力発電プラントの全てにおいて

運転温度を 50 $^{\circ}\text{C}$ 上昇させると、熱効率が 5%増大し、CO₂の排出が 3%削減されると試算されている。超臨界圧水は腐食性の環境であり、現状では Ni 基超合金が最も耐食性に優れているとされている。図 2.1.20 は、スーパーODS 鋼（SOC11 および SOC14）と Ni 基超合

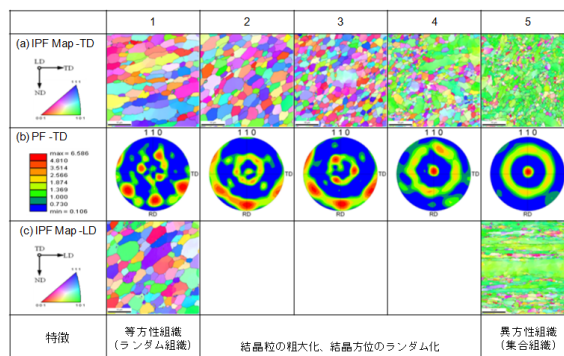


図 2.1.21 FSW による組織異方性の改善

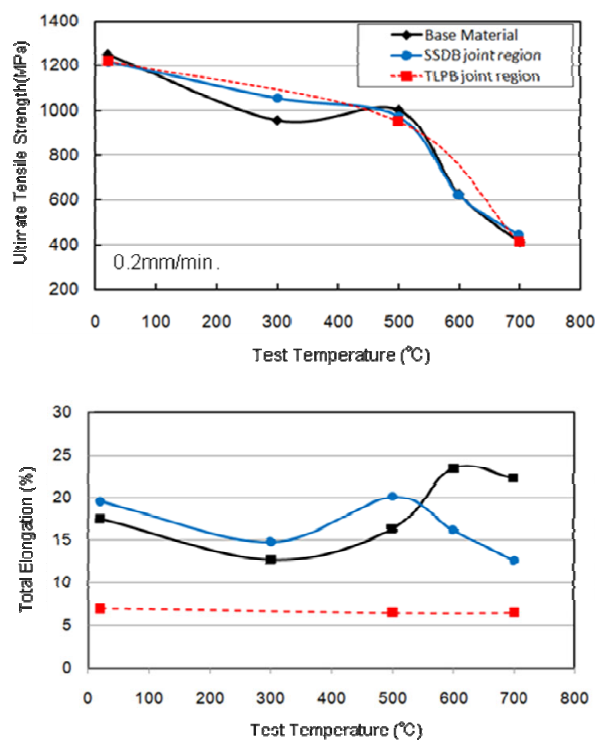


図 2.1.22 接合部の引張特性の比較
最大引っ張り応力（上）、全伸び（下）

金の超臨界圧水中での腐食量を測定した結果であり、SOC14 は Ni 基超合金よりも超臨界圧水中での耐食性に優れていることが判明した。超臨界圧水を用いる発電システムや反応系システム等の配管材料などへの適用が期待される。また、スーパーODS 鋼は、同様に液体鉛を用いるシステムにおいても応用が可能である。

(a-3) 核融合炉ブランケット作製のための先進接合技術開発

スーパーODS 鋼の開発等を通して、耐極限環境鉄鋼材料として革新的な素材性能を有する ODS 鋼の開発に成功しつつあり、本中期計画後半では、核融合ブランケットへの応用に向けて適切な接合技術開発を進める段階に至った。しかし、粉末冶金プロセスによって微細な酸化物粒子を分散させることで優れた特性が付与されている ODS 鋼では、溶解を伴う一般的な溶接法は酸化物粒子の微細分散状態を変化させることが懸念されるため、適用し難い。そこで本研究では、ODS 鋼を対象として、①摩擦攪拌接合 (FSW) 法、②液相拡散接合 (TLP) 法、③固相拡散接合 (SSDB) 法のような先進接合技術の適用性を調べた。ODS 鋼に対するこれらの手法の適用例は極めて少なく、今後の技術開発競争が活発に成り得る分野である。そこで我々のグループでは、接合部における機械的特性について、微小試験片を用いて評価し、組織学的な観点から接合条件の最適化を進めた。①の FSW 法については、ツールを回転させた状態でねじ込むことにより、固相のまま塑性流動によって接合部を一体化させる手法であるが、加工と摩擦熱による動的再結晶によって、ODS 鋼の結晶粒の粗大化を招くが、一方で、ODS 鋼において問題視されている組織と強度の異方性を改善させる (図 2.1.21) という、優れた結果も得られている。この時のナノ酸化物分散粒子の詳細な性状調査によると、FSW 処理に伴う酸化物粒子の形態変化は認められておらず、薄肉部材として用いられる場合の接合法として、FSW 法は有望であることが明らかになった。②と③の拡散接合法については、図 2.1.22 に示すように固相接合に関しては、高温引張強度特性および低温における破壊靱性のいずれの観点からも比較的良好な接合部が得られている。これらの結果をもとに、接合部における界面強度の向上のために、マイクロ組織の一体化を可能とする革新的な接合手法の開発を進めており、次期中期計画における ODS 鋼開発の方向性を明確にすることができた。

(b)核融合炉ブランケット作製のための要素技術開発

(b-1)低放射化フェライト鋼の経年劣化予測のための基盤構築

本研究は、原型炉ブランケットを製作するために必要な低放射化フェライト鋼の照射下における強度および破壊特性の評価および挙動予測技術について、照射効果やマルチスケールメカニクスに基づき向上させることを目的としている。尚、本研究は、日欧で進めるブローダー・アプローチ (BA) における F82H 鋼を対象とした共同研究も並行して進めており、低放射化フェライト鋼の照射下強度・破壊特性変化の機構論的予測モデルを構築するための基盤整備の一環として、当研究所保有する DuET 施設と MUSTER 施設を駆使し、イオン照射法による鉄鋼材料の照射硬化評価手法の高精度化を進めている。

図 2.1.23 に、低放射化フェライト鋼 F82H および、大量溶解時に不純物として想定される Ni を添加した材料に対し、290℃でイオン照射した場合のナノインデント硬度の増加量の照射量依存性を示している。ナノインデント法で得られたナノインデント硬度は、表面処理影響による技術的問題や、ひずみ勾配に起因するとされる押し込み深さの影響が大きいとされている。そこで、Nix-Gao モデルに基づく検討を行う

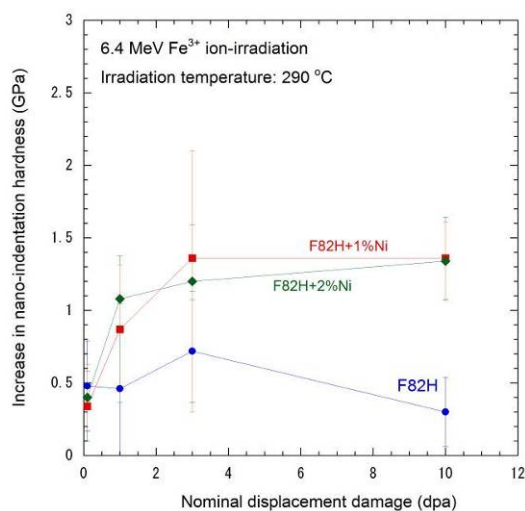


図 2.1.23 F82H の照射硬化に及ぼす照射損傷量の影響

たところ、図 2.1.24 に示すように、いわゆる押し込みサイズ効果が小さく、かつバラツ

キの少ない押し込み深さとして、200nm から 300nm 程度が適切であることが明らかになった。ただし、ここで確認された押し込み深さの影響について、核融合炉環境条件のみならず様々な照射条件から生じ得る照射硬化を示す鉄鋼材料に対してユニバーサルなものであるか、機構論的に更なる検討を進める必要がある。

(b-2) プラズマ対抗材料技術開発

低放射化フェライト鋼や酸化物分散強化鋼は、核融合炉の構造材料として優れた特性を有するものの、プラズマ対向第一壁として無垢のまま用いることはスパッタリング損耗の観点から難しい。そこで、高融点金属で耐熱性に優れ、スパッタリング損耗が小さく、水素のインベントリーも小さい高 Z 材料のタングステン(W)を第一壁材料として用いることが検討されている。我々が開発を進めている ODS 鋼は、低放射化フェライト鋼よりも高温での強度特性や耐照射性、耐食性が優れており、同じく高温での特性に優れた W と組み合わせ使用することが可能になれば、魅力的なブランケットを提案できると考えられる。そ

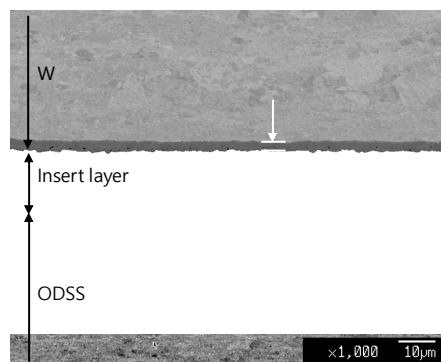


図 2.1.25 W-ODS 鋼ろう付け接合界面

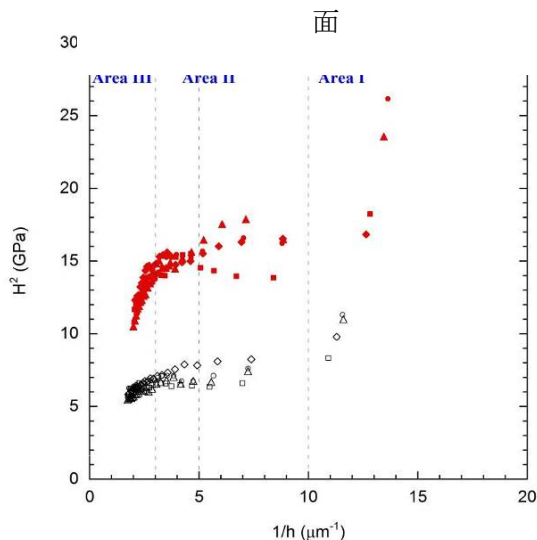


図 2.1.24 Nix-Gao モデルによるナノインデント硬度の試料表面深さ分布表示
照射材 (赤)、非照射材 (黒)

ここで本研究では、W 板材と ODS 鋼板材に対して固相接合法やろう付け法を適用し、接合プロセス・条件の最適化の検討を通して、優れた「W 被覆第一壁コンポーネント」の実現のための技術基盤の確立を目指している。尚本研究は、平成 20 年度より開始した核融合科学研究所の LHD 計画共同研究における W 溶射被膜技術開発と相補的に実施しており、多角的な W 被覆・接合手法の検討を進めている。

図 2.1.25 に、鉄基アモルファス合金箔をろう材として用いた場合の W と ODS 鋼の接合界面を示す。拡散影響による反応相が見られるものの、密着性の高い接合界面が得られている。熱膨張係数が大きく異なる W と鉄鋼材料の接合界面部では、温度上昇時に発生する熱応力に対するせん断強度特性が重要であると考えられる。そこで、固相接合材とともに、室温におけるねじり強度試験によって接合界面せん断強度特性を評価したところ、図 2.1.23 に示す結果が得られ、ろう付け法における接合強度が、タングステンや ODS 鋼のせん断強度に近い値を有する優れた特性を有することを示した。今後は、強度特性のみならず、耐プラズマ特性、トリチウム挙動、照射影響等の観点から、接合部材の改良を進め、総合的な性能として、従来の第一壁案を上回るコンポーネントの提案を目指す。

(c) 軽水炉高経年化技術開発

(c-1) 压力容器鋼の照射脆化予測

高経年軽水炉の監視試験（図 2.1.26(a)）においては、監視試験片の欠乏が予想されており、再生試験法で対応することが定められている。監視試験片の中で、溶接熱影響部（HAZ 部）の試験片に関しては、再生試験法が適用できないため、微小試験片技術の開発が重要となっている。図 2.1.26(b)は、試験片サイズの異なる衝撃試験片を用いて、母材、溶接金属、HAZ 部の衝撃特性を比較した図であり、リン濃度の低い場合と高い場合とでは、衝撃特性のノッチ部位依存性が異なる。すなわち、リン濃度が高い場合は、HAZ 部が最弱部位となるが、リン濃度の低い場合は HAZ 部が最も優れた特性を示している。すなわち、日本電気協会が定めている HAZ 部の監視試験の必要性については、压力容器鋼に含まれている不純物リン濃度に依存することがわかる。

高経年化におけるもう一つの課題は Mn 影響である。Mn 影響は、本研究所において見出された現象で、その詳細な機構は不明であるが、微細でしかも高密度の格子

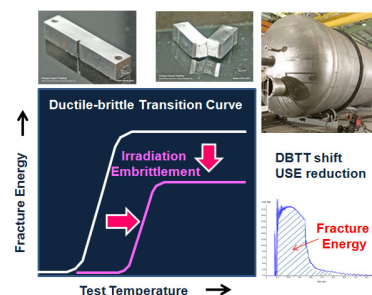


図 2.1.26(a) 監視試験法

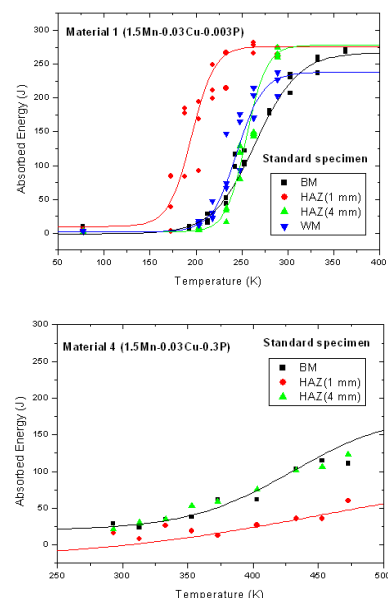


図 2.1.26(b) 標準材(上)、高 P 材(下)

間型転位ループが原因であることは示されている。

(c-2) 炉内構造物の応力腐食割れ（SCC）機構

高経年軽水炉において、応力腐食割れは重要な現象である。低炭素ステンレス鋼で製造された炉内構造物にひび割れが認められて以来、その発生機構について多くの研究が実施されてきた。SCC の成長に及ぼす溶存水素の影響に関する研究から、水素は SCC の成長を抑制することが知られており、炉水への水素注入は SCC 防止法として実機に適用されている。しかし、SCC の発生に対しては、水素注入の影響は不明であった。そこで、SSRT 試験法（試験温度：288℃、圧力：7.8 MPa、歪み速度： $5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ）を用いて、SUS316L 鋼の SCC 感受性に及ぼす溶存水素（DH）および溶存酸素（DO）の影響を調べた結果、図 8 に示す様に、（DO=8ppm、DH=0.0ppb）の場合は、全く SCC は発生しなかったのに対し、（DO=0.0ppb、DH=0.4ppm）の場合は、多くの SCC が発生していることが判明した（図 2.1.27）。すなわち、SUS316L 鋼における SCC の発生は、溶存水素量の増大により、生じやすくなる傾向にある。水素は安定な酸化被膜形成を妨げることと SCC 発生に、水素脆性機構が働いている可能性がある。

2.1.3.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置づけ

(a) 次世代原子力システム

第 4 世代国際フォーラム（Generation International Forum: GIF）と米国 DOE がまとめた“A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy System 2002、December”によると、次世代発電炉（高速炉）の実現

は、多くの場合、原子炉材料の開発に依存するとされている。特に、燃料被覆管は、重度の中性子照射、反応性冷却材および高温に曝されることから、これらの環境に耐え得る革新的な燃料被覆管材料の開発が望まれている。酸化物分散強化鋼は、高強度で優れた特性を持つと期待され、MA956 合金や MA957 合金等の様に、当初米国にて開発が進められていたが、製管技術開発の遅れや照射脆化の観点から、その実用化が問題視され、結局、1990 年代後半に開発が中止されている。

一方、日本原子力研究開発機構（JAEA）においては、MA956 や MA957 に含まれている Cr 量を減らした 9Cr-ODS 鋼の開発に従事し、優れたクリープ特性を有する Na 冷却用高速炉燃料被覆管の開発に成功している。しかし、9Cr-ODS 鋼は、耐食性に難があり、その耐食性を向上させる目的で、スーパー ODS 鋼の開発が本所においてスタートした。スーパー ODS 鋼は、成分的には MA956 や MA957 に近いが、高温強度や耐食性はもちろん、Mo や Ni などの照射脆化を促進する合金元素を含まず、極めて耐照射性に優れていることから、

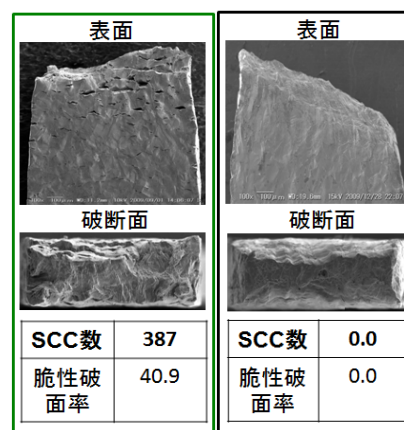


図 2.1.27 SSRT 試験結果

世界各国の主要な研究機関から、材料の提供を依頼されている。

国際原子力機関（IAEA）傘下で実施されている”“Accelerator Simulation and Theoretical Modeling of Radiation Effects (SMoRE) CRP No: 1488”の研究活動においては、10 カ国の研究機関の参加の下に、スーパーODS 鋼の照射影響サーベイランス試験が実施されている。この活動は、各国が所有する材料照射場（イオン加速器や原子炉）を有効に活用し、先進材料の諸特性評価を国際協力の下に実施することを通じて、原子力エネルギーの安全利用に貢献することを目的としている。

二国間共同研究としては、米国ローレンスリバモア国立研究所（LLNL）、米国オークリッジ国立研究所（ORNL）、米国イリノイ大学（UI）、米国 UCSB、仏国サックレー研究所（CEA-CENS）、スイスポールシェラー研究所（PSI）、独国カールスルーエ研究所（KIT）、韓国原子力研究所（KAERI）、韓国先進科学技術大学（KAIST）、韓国ソウル国立大学（SNU）、韓国東儀大学、中国科学技術員近代物理研究所（CAS-IMP）、露国クルチャトフ研究所と多岐に及んでいる。LLNL においては、Molten Salt-corrosion に関する共同研究および研究報告会を平成 20 年 2 月に実施した。ORNL との核融合炉材料接合研究においては、平成 19 年度から 3 カ年継続して、ワークショップ “Workshop on Joining and Welding Technology R&D on Advanced Fusion Materials”を日米の双方において日本側代表者として開催してきた。UCSB には、平成 21 年度に博士課程の学生を派遣し、共同研究を実施した。欧州関係では、CEA-CENS、PSI および KIT との共同研究を進め、それぞれ、原子炉、プロトン加速器および LBE-corrosion loop を利用した。また、KIT においては、平成 21 年 9 月に “Frédéric Joliot / Otto Hahn Summer School on Nuclear Reactors”の講師として招待を受け、“Advanced Nuclear Materials –Super ODS steels R&D”の講義を行った。韓国との共同研究は、平成 10 年度から本格的に開始した後、10 年以上の共同研究が継続されている。その間、受け入れた韓国人留学生は、平成 19 年度以降だけでも、4 名にのぼり、平成 22 年度からは、さらに 2 名が加わる予定である。これまでは、いずれの学生もスーパーODS 鋼の開発研究に携わってきた。

現在、国際的にみても、酸化物分散強化鋼の研究は、本所における活動が先導的役割を果たしていると言える。スーパーODS 鋼の応用例を図 2.1.28 に示す。

(b) 核融合炉材料

現在実施中の課題は、大きく二つに大別される。まず、日米科学技術協力事業核融合分野で実施している TITAN 計画においては、核融合炉ブランケットを実際に製造する場合の要素技術として不可欠な溶接・接合技術の開発研究を実施している。ここでは、低放射化フェライト鋼と酸化物分散強化鋼との接合技術開発タスクが実施されており、タスクの取りまとめを任されている。特に、ダイバータの研究開発に関しては、タングステンと酸化物分散強化鋼の組み合わせによる第一壁構造を提案し、スーパーODS 鋼を提供するなど、中心的な役割を果たしている。

また、日本原子力研究開発機構が実施している Broader Approach : BA 共同研究においては、低放射化フェライト鋼の照射下挙動予測と微小試験片技術開発に関する研究に従事し

ている。BA 共同研究は、EU との共同研究であり、ここにおいても最先端の研究をリードする立場にある。我が国の特殊製鋼技術は、不純物制御に優れており、不純物が鋼材の性能に及ぼす影響などについての研究は各国から注目されている。

中国科学院近代物理研究所は、高エネルギーイオン加速器を所有しており、核融合炉材料に特有の核変換ヘリウムによるヘリウム脆化に関する共同研究を実施している。平成 19 年度に博士研究員として 1 名を採用し、平成 21 年度には客員准教授として本学に招聘している。露国クルチャトフ研究所とは、外務省国際科学センター（International Science and Technology Center、ISTC）が実施している国際研究プログラム“Radiation tolerance of advanced nuclear materials for fission and fusion applications --High-energy ion irradiation experiments”を共同申請中である。このプログラムでは、スーパーODS 鋼の組織および強度特性に及ぼすヘリウム影響を調査することを目的としている。

(c) 次世代軽水炉

高経年軽水炉が増えていく我が国の将来において次世代軽水炉の開発は重要である。一方で、高経年軽水炉を如何に安全に運転できるかが問われている。すなわち、保全研究の重要性が指摘されている。世界的な情勢としては、今後、軽水炉の建設ラッシュがアジアを中心に、米国においても予想されており、原子炉の安全性を基盤から支える材料の研究はますます重要になる。新素材の開発研究と既存材料の保全研究は密接に関連し、表裏一体のものであることから、原子力総合材料科学として捉えながら展開させていく。

軽水炉材料の照射効果機構解明を目指す国際グループ、International Group of Radiation Damage Mechanism : IGRDM、研究会では、我々が見出した Mn 影響に関する研究が注目されている。従来、このグループでは、特に Cu 影響が議論されていたのに対し、最近 Mn 影響へとその中心が移行している。これは、軽水炉の高経年化に伴い、原子炉照射実験が従来に無い高照射領域に及んだことで、初めて示されたものであり、我々はこの分野における先駆的な役割を果たした。Fe-Mn 合金中における格子間原子集合体形成などのミクロ組織の発達過程の機構論的研究を実施している。

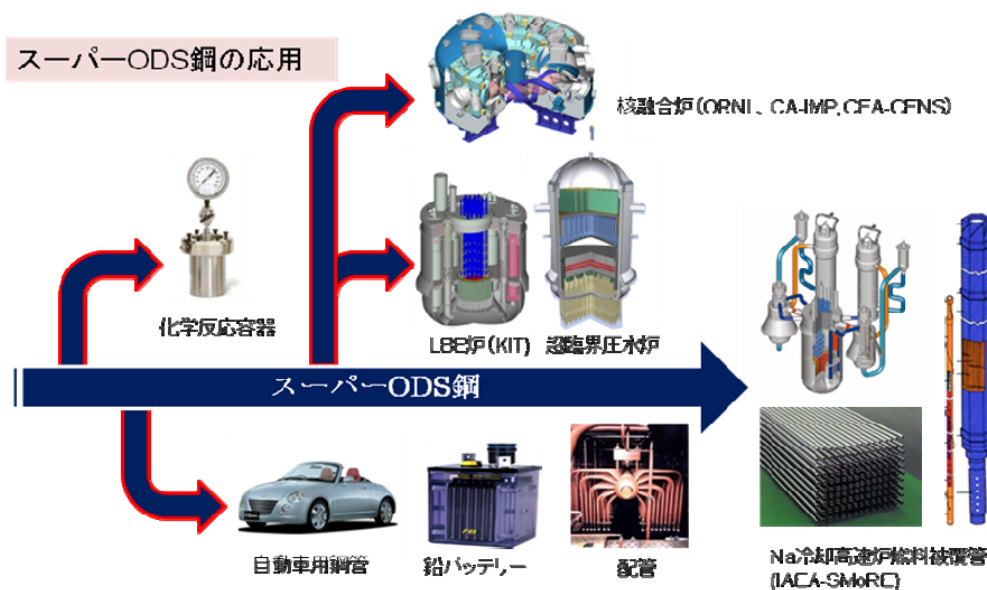


図 2.1.28 スーパーODS 鋼の応用例と海外共同研究における課題

2.1.3.5. 今後の展望

国際的な二酸化炭素排出規制の動きは、原子力エネルギーの高効率安全利用を益々重要なものになっている。開発研究と保全研究を表裏一体とみなす原子力総合材料科学は、今後もその重要性が変わることは無い。現行の軽水炉を安全に運転するための材料科学、次世代原子力システム開発に不可欠な革新材料の開発研究や核融合エネルギー実現に向けた材料工学の研究は、今後も互いに関連させながら展開させていくことが肝要である。

個別の材料の展望を考えると、スーパーODS 鋼燃料被覆管の開発研究は、商業用高速炉の実現には不可欠であり、その早期の開発が期待される。酸化物分散強化鋼に関する学術的基盤、製造技術、インフラの全てにおいて先導的な役割を担っている本所の研究活動や研究基盤に寄せられている期待は大きい。核融合研究における DEMO 炉用構造材料の研究においては、現在第一候補構造材料とされている低放射化フェライト鋼の性能を見極め、ブランケットの各要素における材料要件を高精度に予測する技術が必要である。高い材料要件が求められる個所には、酸化物分散強化鋼を適用する低放射化フェライト鋼・酸化物分散強化鋼カップリング技術開発研究へと展開される。

国際的な原子力志向という中で、世界の主要な発電プラントメーカーを抑えている我が国としては、原子力エネルギー技術開発は、材料開発を含め、国策として組織的に計画されるべきものである。その中で、軽水炉材料の健全性の確保や照射下挙動予測は、従来の経験的な予測式だけではなく、科学的な根拠に基づいたものであるべきとされており、大学の知識や情報が不可欠である。一方で、大学が行う原子炉照射実験は、年々困難になっている。本所が所有しているイオン加速器（DuET）とマルチスケール材料評価装置（MUSTER）を効果的に利用することが重要であり、共同研究の拠点としての役割を果た

すことが期待されている。また、原子炉の安全は、一国の問題では済まされない。我が国においては、隣国の韓国および中国との連携協力が不可欠である。特に、中国における今後の原子炉建設計画からは、材料健全性の確保を含んだ原子炉保全管理技術の提供と継承が不可欠であり、将来の中国の原子力技術を支える人材を育成する事業の果たす役割は大きい。そのための活動の一つとして、日中韓の3国連携による日中韓原子力材料東アジア研究拠点を本所に設け、東アジア連携体として、原子力材料国際共同照射実験研究を実施するための基盤形成を行っていく（図2.1.29）。



図 2.1.29 東アジアにおける原子力材料研究拠点形成事業への展開

2.1.3.6. 主要論文リスト

- 1) A. Kimura, H.S. Cho, N. Toda, R. Kasada, K. Yutani, H. Kishimoto, N. Iwata, S. Ukai and M. Fujiwara, "High Burnup Fuel Cladding Materials R&D for Advanced Nuclear Systems-Nano-sized Oxide Dispersion Strengthening Steels" J. Nucl. Sci. & Technol. 44(3) (2007) 323-328.
- 2) N. Baluc, D.S. Gelles, S. Jitsukawa, A. Kimura, R.L. Klueh, G.R. Odette, B. van der Schaaf and Jinnan Yu, "Status of Reduced Activation Ferritic/martensitic Steel Development", J. Nucl. Mater. 367-370 (2007) 33-41.
- 3) A. Kimura, R. Kasada, A. Kohyama, H. Tanigawa, T. Hirose, K. Shiba, S. Jitsukawa, S. Ohtsuka, S. Ukai, M.A. Sokolov, et al., "Recent Progress in US-Japan Collaborative Research on Ferritic Steels R&D", J. Nucl. Mater. 367-370 (2007) 60-67.
- 4) R. Kasada, N. Toda, K. Yutani, H.S. Cho, H. Kishimoto and A. Kimura, "Pre- and Post-deformation Microstructures of Oxide Dispersion Strengthened Ferritic Steels", J. Nucl. Mater. 367-370 (2007) 222-228.
- 5) J.S. Lee, C.H. Jang, I.S. Kim and A. Kimura, "Embrittlement and Hardening during Thermal Aging of High Cr Oxide Dispersion Strengthened Alloys", J. Nucl. Mater. 367-370 (2007) 229-233.
- 6) H.S. Cho, R. Kasada and A. Kimura, "Effects of Neutron Irradiation on the Tensile Properties of High-Cr Oxide Dispersion Strengthened Ferritic Steels", J. Nucl. Mater. 367-370 (2007) 239-243.
- 7) A. Kimura, H. Cho, N. Toda, R. Kasada, H. Kishimoto, N. Iwata, S. Ukai, S. Ohtsuka, M. Fujiwara, "Super ODS steels R&D for cladding of highly efficient nuclear plants", Societe Francaise d'Energie Nucleaire - International Congress on Advances in Nuclear Power Plants - ICAPP 2007, "The Nuclear Renaissance at Work" 4 (2008) 2148-2154
- 8) 木村晃彦, 永井康介, 藤井克彦, 西山裕孝, 曾根田直樹, 「高度解析技術が原子力材料研究に与えたインパクトー最新技術でここまでわかってきた!」, 日本原子力学会誌

50(10)(2008)22-26

- 9) 木村晃彦, “ニュークリア・マテリアル産業基盤技術”, 日本原子力誌 Vol.51, No.4 (2009)
- 10) N.Y. Iwata, R. Kasada, A. Kimura, T. Okuda, M. Inoue, F. Abe, S. Ukai, S. Ohnuki, T. Fujisawa, “Characterization of mechanically-alloyed powders for high-Cr oxide dispersion strengthened ferritic steel”, ISIJ International, Vol. 49, No. 12, pp. 1914-1919, 2009.
- 11) N. Okuda, R. Kasada, A. Kimura, “Statistical evaluation of anisotropic fracture behavior of ODS ferritic steels by using small push tests”, Journal of Nuclear Materials 386-388(2009) 974-978
- 12) H. Kishimoto, R. Kasada, O. Hashitomi, A. Kimura “Stability of Y-Ti complex oxides in Fe-16Cr-0.1Ti ODS ferritic steel before and after heavy-ion irradiation”, Journal of Nuclear Materials, Journal of Nuclear Materials Volumes 386-388, 30 April 2009, Pages 533-536

2.1.4. 小型放電型核融合中性子源の高性能化と応用

2.1.4.1. 研究の概要

慣性静電閉じ込め (IEC) 核融合は、小型装置で $10^6 \sim 10^8/\text{sec}$ 定常の D-D や D- ^3He 核融合反応率が得られるため、高エネルギー、単色、出力可変で安全な粒子源 (中性子、陽子) として産業応用が期待されている。

応用研究においては、超小型 IEC 核融合中性子源を用いた地雷探知技術の研究開発を行ってきた。爆薬等危険物の探知技術の研究に関しては、地雷探知の他に、IAEA 国際共同研究事業 (平成 16-21) やロシア国際科学技術センター共同研究事業 (平成 20～) に参画して国際共同研究を進めている。

これらの応用研究と同時に、中長期的な応用範囲拡大を目指し、核融合反応により当方的に発生する高速中性子の熱化・ビーム化の技術の開発や、高効率化・高出力化を目指した新方式 IEC の研究など、基礎的・学術的研究も進めている。

2.1.4.2. 重点領域研究としての意義および社会的重要性

慣性静電閉じ込め方式は核融合発電の観点では現時点で他方式との競合性を有していないが、今後も多額の研究投資が行われる核融合研究においては、安全・安心、医療、国際貢献などの発電以外の応用分野で見通しの良い中期的な貢献が可能であることを示すことが必要である。平成 21 年外部評価においても『先端科学技術に根ざした対人地雷探査技術開発は人道支援としての社会的な意義は核融合エネルギー開発を凌いでいる。独立法人としての京都大学エネルギー理工学研究所そのものの広報性を高めることにもなり、継続的に着実に進められることを希望する』との評価を受けている。

核融合炉開発研究への直接的な貢献の可能性としては、核融合発電へ向けて計画されている大型装置における D-D、D-T 実験において必要となる高精度中性子計測機器の較正用中性子源として利用可能な、小型で高出力の D-D、D-T 中性子源の開発を目指している。

2.1.4.3. 平成 19 年度以降における主な成果

(a) 人道的地雷探知への応用

慣性静電閉じ込め (IEC) 核融合中性子源を



図 2.1.30 超小型慣性静電閉じ込め核融合中性子源を用いた地雷探知機

用いた地雷探知機を開発した。本研究開発は、JST 事業（平成 14-H20、国内 10 機関）において当グループが代表機関として推進したもので、最終年度の H20 年には TNT および RDX 爆薬を被爆化した爆薬模擬材を用いた性能評価試験を実施した。

図 2.1.30 と図 2.1.31 に、開発した地雷探知機の写真と爆薬検知の原理を示す。この地雷探知機は主に、超小型の IEC 核融合中性子源と、10.8 MeV の高エネルギー γ 線を高効率検出可能で、しかも γ 線の飛来方向を弁別可能な BGO / NaI 複合検出器とからなる。中性子線を地雷原に照射して火薬のニトロ基を構成する窒素原子の中性子捕獲反応で発生する 10.8 MeV の γ 線を捉えることにより、火薬の有無を検知することができ、従来技術では困難であったプラスチック製地雷の検知も可能である。本開発では、IEC 核融合装置の真空容器

を二重槽構造の水冷式とすることで、直径 25 cm の超小型でありながら、数時間以上にわたって極めて安定・連続的に $10^7/\text{sec}$ 定常の高中性子生成率を得ることに成功した。

開発した地雷探知機による爆薬探知試験の様子を図 2.1.32 に示す。探知対象としては、土壤中に埋設された TNT 240g、TNT 100g、RDX 100g、RDX 29g の 4 種の爆薬模擬剤を用いた。これらのうち、RDX 29g は現存する最小の対人地雷を想定したものである。試験条件は、埋設深度 5、10、15 cm、土壤含水率 2、10、18.5 %、判定時間 15～20 分であった。探知率は土壤含水率、埋設深度、爆薬の種類と量に依存するが、平均すると、(1) 含水率 20 % 以下では 77 %、(2) 含水率 10 % 以下では 83 % の探知率が得られた。

(b) 中性子ビーム

原子過程を考慮した粒子シミュレーションコードによる IECF 装置の解析により、荷電交換など原子過程の寄与を明らかにし、低ガス圧においてイオンのエネルギー損失の低減と高電圧の印加が可能であることを示した。しかしながらビーム・バックグランド反応に依存する IECF 装置ではターゲットとなるバックグランドガス密度の低下により、ガス圧低減による利点を活かさないという問題点があった。そこで電極表面に吸着された粒子密度を

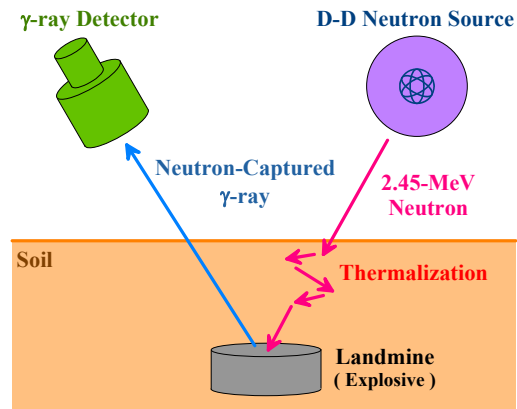


図 2.1.31 中性子線による埋設爆薬探知の原理

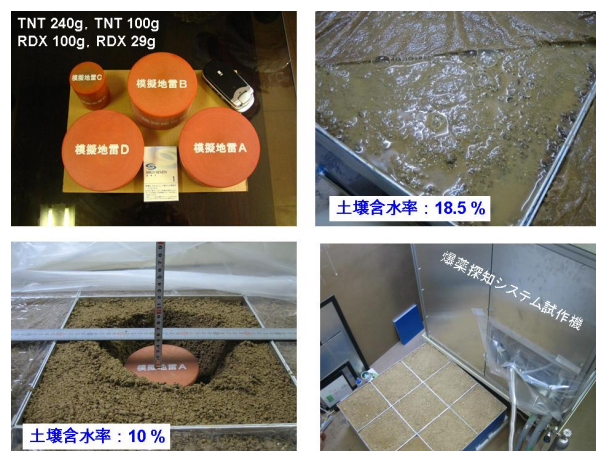


図 2.1.32 地雷探知機の性能試験

増加させることでこの吸着粒子と高エネルギー粒子との反応を増加させることを考え、シミュレーションコードによる評価と実験を行い、核融合反応が数倍に増加できることを見いだした（図 2.1.33）。

一方、中性子を用いた荷物検査などという

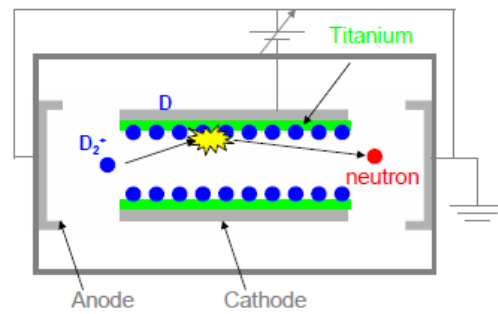


図 2.1.33 チタンコートによる中性子発生量の増加の概念

応用を考えた場合、線状やビーム状の中性子源、また低エネルギーの中性子が必要とされていることから、装置周囲に反射材や減速材を配置することで、目的にあった中性子源を構成する方法について、3次元中性子輸送コード MCNP を用いて検討と実験を進めている。計算では、上記のチタンコーティングを用いることを前提として、円筒形陰極の長さ／直径比による軸方向への中性子量の増大、反射材による収束について検討を進めている。図 2.1.34 に計算結果の一例を示す。軽水を反射材として使用することで軸方向の中性子束が 2 倍になる結果を得ている。反射材の従来の装置を用いた予備実験の結果、真空排気／高電圧導入部などが反射材配置において問題となることが明らかになったので、図 2.1.35 に示すように IECF 装置を水中に配置することとし、必要な改造を行って実験を進めた結果、図 2.1.36 に示す中性子束の角度分布測定結果から、ビーム化が行われていることが確認できたが、現状では、測定系の空間分解能が不十分であることも明らかとなった。今後は最適化を計るとともに、応用を考えエネルギースペクトルについても検討を進める予定である。

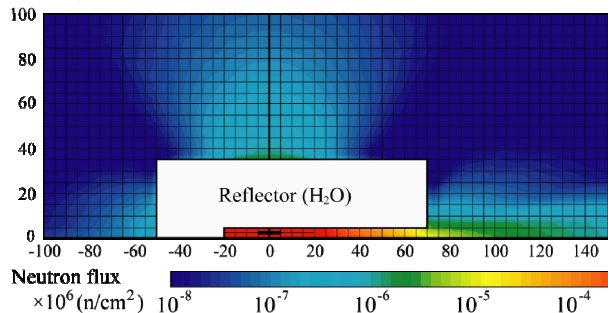


図 2.1.34 MCNP によるビーム化シミュレーション結果の一例

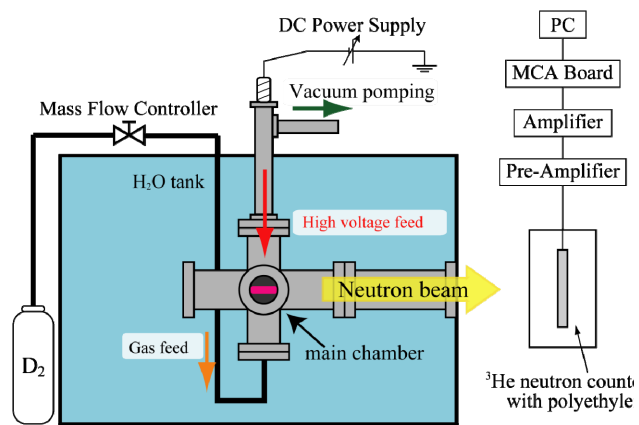


図 2.1.35 ビーム化試験の実験概要

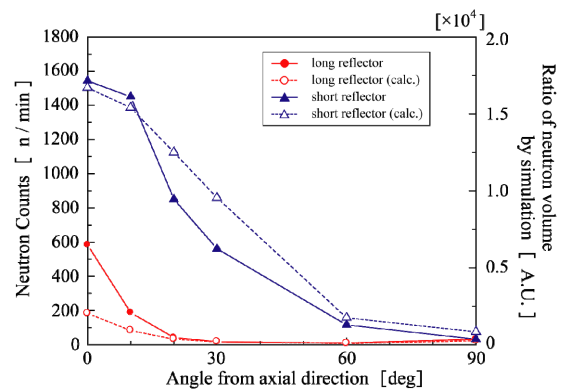


図 2.1.36 中性子束の角度依存特性

(c) 環状イオン源駆動方式の開発

慣性静電閉じ込め (IEC) 核融合中性子源も含め、既存の中性子発生管はいずれもイオンビームとターゲット (IEC では主にガス) との衝突核融合反応を利用しているため、投入電流に比例した出力しか得られない。本研究では、投入電流の 2 乗に比例した飛躍的な高出力化が期待されるビーム対ビーム衝突反応の生起を目

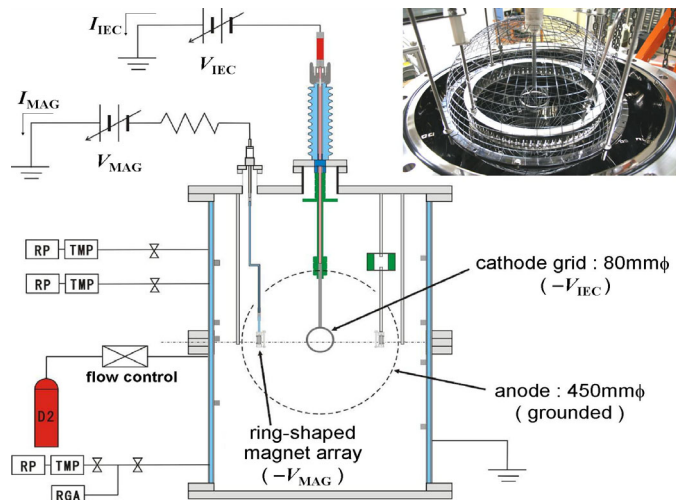


図 2.1.37 環状イオン源駆動方式 IEC 核融合装置

指し、高い電流対圧力比での動作を可能とする新方式 IEC 核融合装置を提案した。

本研究で提案・開発した環状イオン源駆動 IEC 核融合装置の断面模式図と装置内部写真を図 2.1.37 に示す。従来の IEC 核融合装置を構成する同心球状の接地陽極 (直径 450mm) と陰極 (直径 80mm、一数十 kV 印加) との間に、環状永久磁石列 (直径 360mm、一数十 kV) を設置した。永久磁石列と球形陽極との間に直流マグネトロン放電を生起して環状プラズマを生成する。生成された正イオンは磁石列の負電位に引かれて、一部は磁石列電極に衝突して二次電子を放出してマグネトロン放電の維持に寄与する。残りは磁石間の隙間を通過して、中心のグリッド陰極に加速・集束されて核融合反応に寄与する。既存のイオン源付 IEC 核融合装置に無い本方式の特長は、①数 mPa の低圧力で高い電流対圧力比での動作が可能、②陽極内の負電位でのイオン生成のためイオンが陽極に到達して失われることが無く、また、③従来の線形ビーム同士の衝突とは異なり、環状イオン源から半径方向中心にイオンを集束するため、中心での高い電流密度が期待できる。

この方式により、大幅な運転条件の拡大 ($> 5 \text{ mPa}$ 、 $< 1 \text{ mA}$) に成功した。また、中性子発生率の圧力・電流依存性を調べたところ、圧力が 10 mPa を下回り、電圧が 60 kV を上回ると、電流依存性は 1 乗から 2 乗へ、圧力との相関は正から負へ遷移した (図 2.1.38)。現

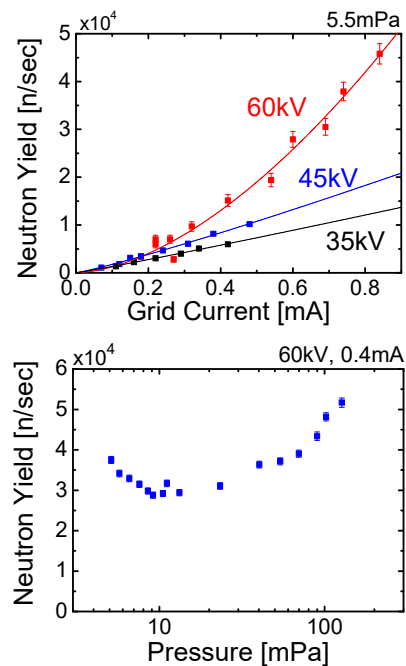


図 2.1.38 環状イオン源駆動方式 IEC 核融合装置による中性子発生率の圧力・電流依存性

在は、この新奇な電流依存性の 2 乗への遷移を支配している物理機構の解明と、この非線形効果を利用した核融合反応率の向上を目指し、核融合反応の空間分布計測や数値シミュレーション、大電流化のための装置改造などを進めている。

2.1.4.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

小型中性子源を用いた空港等での爆薬、危険物、違法薬物などの探知技術の研究については、国内よりも米国、欧州、ロシアなどで盛んに進められている。用いられる中性子源としては、我々と同じく慣性静電閉じ込め（IEC）核融合中性子源の使用を計画している例もいくつかあるが、多くは小型加速器タイプのビーム対固体ターゲット型の中性子発生管が用いられている。このような小型加速器型の中性子発生管と比較して、IEC 核融合中性子源はプラズマ中のイオンまたはガス分子をターゲットとしている点に大きな特徴があり、そのため大電力投入が可能で、D-T 核融合反応のおよそ 1/100 の断面積しかない D-D 核融合反応でも、D-T 中性子管と同等以上の中性子出力が既に得られている。また、長時間連続の定常運転が可能であることや、超寿命で、ターゲット交換などのメンテナンスが不要であることも実用上大きな利点であり、中性子発生管としては後発ではあるが十分な競合性を有するため、我々の IEC 核融合中性子源が認識され注目を集め始めている。

IEC 核融合研究の分野においては、我々のグループは、プラズマ計測技術やシミュレーションコード開発、D-³He 先進核融合反応などの基礎学術研究のみならず、IEC 核融合中性子源の応用研究においても成果を挙げ、IEC 核融合研究の拠点の一つとして認識されている。環状イオン源駆動方式 IEC に関連しては、1960 年代に Hirsch らの理論・数値解析研究の予測したビーム対ビーム衝突反応の実現と電流の 2 乗に比例した核融合反率の向上を目的として、ガス分子との衝突荷電交換によるイオンビームの損失を低減するために低圧力・大電流動作を目指した様々な方式の装置開発が米・豪・韓・日の研究機関で進められてきたが、依然としてビーム対ガス衝突が圧倒的に支配的な状況にあった。ビーム対ビーム衝突反応率がビーム対ガス衝突反応率を上回るためには、極めて単純化して考えると、ビームの集束する中心におけるイオン密度が、ガス分子の密度を上回る必要がある。我々は、これまでに提案された構成の IEC 核融合装置ではこの条件の達成は困難であると考え、環状イオン源駆動型の新方式 IEC を提案し、初めて電流の 2 乗に比例した核融合反応率を達成した。

2.1.4.5. 今後の展望

開発した地雷探知技術は、地雷に限らず空港・税関等での爆薬や禁止薬物の検知にも適用可能である。この他に、有効な検査技術が存在せず喫緊の課題である核物質検知など、危険物検査技術への応用と実用化を目指す。また、中性子の熱化・ビーム化技術の研究開発を引き続き進め、将来的には中性子散乱分析など中性子利用研究の場も提供したい。

その他の中長期的な応用範囲拡大に向けては、中性子あるいは陽子の発生率に飛躍的な

向上が必要である。そのようなブレークスルーを達成するには、一つには、初めて核融合反応率の非線形な電流依存性を示した前述の環状イオン源駆動方式が有望であると考えている。これまでに開発したシミュレーションや計測技術などのツールも用いて、引き続き基礎的・学術的研究も進めていく。

2.1.4.6. 主要論文リスト

- 1) K. Masuda, T. Fujimoto, T. Nakagawa, H. Zen, T. Kajiwara, K. Nagasaki, K. Yoshikawa, “Diagnostic System Development for D-D and D-3He Reaction Distributions in an Inertial-Electrostatic Confinement Device by Collimated Proton Measurements”, *Fusion Sci. Tech.*, vol. 56, no. 1, pp. 528-532 (2009).
- 2) K. Masuda, T. Nakagawa, T. Kajiwara, H. Zen, K. Yoshikawa and K. Nagasaki, “Built-In Ion Source for Inertial-Electrostatic Confinement in Low Pressure Regime”, *Fusion Sci. Tech.*, vol. 56, no. 1, pp. 523-527 (2009).
- 3) K. Yoshikawa, K. Masuda, T. Takamatsu, Y. Yamamoto, H. Toku, T. Fujimoto, E. Hotta, K. Yamauchi, M. Ohnishi, H. Osawa, S. Shiroya, T. Misawa, Y. Takahashi, Y. Kubo and T. Doi, “Research and Development of the Humanitarian Landmine Detection System by a Compact Fusion Neutron Source”, *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, vol. 56, no. 3, pp. 1193-1202 (2009).
- 4) K. Masuda, K. Yoshikawa, T. Misawa, K. Yamauchi, Y. Takahashi, S. Shiroya, E. Hotta, M. Ohnishi and H. Osawa, “Directional Detection of Nitrogen and Hydrogen in Explosives by Use of a DD-Fusion-Driven Thermal Neutron Source” in *Detection of Liquid Explosives and Flammable Agents in Connection with Terrorist Actions*, pp.155-166, H. Schubert A. Kuznetsov, Eds., (Springer: Dordrecht, the Netherlands), 2008.
- 5) K. Masuda and K. Yoshikawa, “Development of a Time-Independent Particle-In-Cell Code for Simulating DC Discharges in Inertial Electrostatic Confinement Devices”, *Fusion Sci. Tech.*, vol. 52, no. 4, pp. 1119-1123 (2007).
- 6) K. Noborio, Y. Yamamoto, S. Konishi, “Neutron Production Rate of Inertial Electrostatic Confinement Fusion Device with Fusion Reaction on Surface of Electrodes”, *Fusion Science and Technology*, 52(3), 1105-1109 (2007).
- 7) Y. Yamamoto, A. Ishidou, K. Noborio, S. Konishi, “Neutron Beam Generation by the Cylindrical Fusion Neutron Source”, *Fusion Science and Technology*, 56(2), 1536-1055(2009).

2.2. バイオエネルギー重点複合領域

関連分野： エネルギー利用過程研究部門 複合化学過程研究分野
分子集合体設計研究分野
生物機能科学研究分野
生体エネルギー研究分野
附属エネルギー複合機構研究センター附属研究分野
附属エネルギー複合機構研究センター

バイオおよびナノテクノロジーを融合させたバイオ・ナノテクノロジーを基盤とし、光エネルギー領域研究との融合により、光電変換技術をもとにした太陽電池開発や太陽光発電による水素製造ならびにバイオマスを含む自然エネルギー利用のための生物機能変換等、環境調和適応型エネルギーシステムおよび物質変換システムの開発のための「太陽エネルギーシステム研究」の拠点形成を目指す。

具体的には、太陽エネルギーシステム研究の遂行に必要となる光エネルギー、ナノテクノロジーおよびバイオエネルギーの融合研究を高効率に実施するために「光・ナノ・バイオ融合研究統合基盤」を構築し、世界をリードできる研究基盤の整備を図る。さらに、21世紀 COE プログラムの研究拠点活動成果から継承されたグローバル COE プログラムにおける太陽光エネルギー利用研究グループとバイオマスエネルギー研究グループを発展させ、太陽電池をはじめ、水素、バイオマスおよび二酸化炭素等の高度利用の連携複合研究を展開する。同時に、企業や他の国公立研究機関との産官学共同研究を通じて、上記の研究成果を物質生産技術に応用することにより、環境にやさしい（グリーンケミストリー）物質生産システムの構築と、持続可能社会のための産業育成に寄与できる研究開発を推進する。本重点複合領域では、以下の研究を進めている。

- 太陽光利用に関するナノ材料創製
- 次世代太陽電池等光エネルギー利用システムの開発
- 生物型酵素を用いた高効率物質変換反応の開発
- バイオマス資源のクリーン燃料化
- バイオエネルギー研究のための生命現象の解明とその利用

2.2.1. 太陽光利用に関するナノ材料創製

2.2.1.1. 多孔質シリコンの形態制御と多層膜化によるエネルギー関連物質の検知

2.2.1.1.1. 研究の概要

高い比表面積を有し、各種エネルギー応用における基板材料としての可能性を持つ多孔

質シリコンの構造制御に関わる研究を進めている。予め配列したエッチピットを形成したシリコンを用い、ミクロンサイズの孔径から成るマクロ多孔質構造の配列過程の解明に取り組んだ。マクロ孔の配列にはシリコン内に形成される電場のひずみが重要な因子であることを明らかにした。また、電流密度を正弦波状に変調することで得られる多孔質シリコンの多層構造（ルゲート型多孔質シリコン）を作製し、エネルギー関連物質である揮発性有機物の検知挙動について調べた。制御パラメータと得られる構造のずれを解消することで理想的なルゲート型多孔質シリコンの作製に成功した。反射スペクトルの異なるルゲート型多孔質シリコンを二層化し、多孔質層への有機物侵入過程を明らかにした。

2.2.1.1.2. 重点領域研究としての意義および社会的重要性

本課題は「バイオエネルギー研究領域」における太陽エネルギーの多角的な利用を目指した半導体複合材料の開発研究に位置付けられる。この目的のためには関連する材料の高機能化が要請される。シリコンは地殻上に普遍的に存在する元素であり、半導体素子として広く使われていることから高度に生成・加工技術が確立した材料である。このような材料を半導体素子以外においても活用する領域を広げることは大きな意義がある。シリコンでは容易に多孔質構造が得られ、各種エネルギー応用における基板材料として触媒や酵素の担体、微細構造体作製に資する鋳型としての可能性も有する。

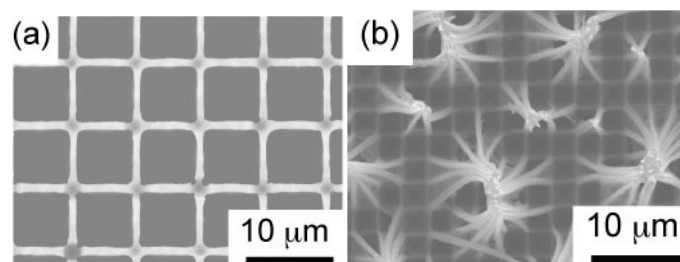
2.2.1.1.3. 平成19年度以降の主な成果

シリコン表面に予め配列したエッチピットをフォトリソグラフィーにより作製し、フッ酸溶液中で陽極酸化することで配列した多孔質シリコンが形成される。エッチピットが無ければランダムに分布したマクロ孔が形成するが、配列エッチピットを作製していても、実験条件によっては孔の配列が崩壊する。電気化学反応で溶解が進行することから、シリコン表面での電子移動、微細孔内での物質移動、シリコン内に形成される電場等の様々な因子が微細孔の配列過程に影響する。そこで、電流密度、初期エッチピットの形状が及ぼす影響を系統的に調べ、シリコン内に形成される電場が最も強く影響することを明らかにした。得られた知見を元に、初期エッチピットの形状を制御することでシリコン内の電場ひずみを制御し、配列したシリコンナノワイアの作製に成功した。

一方、多孔質シリコンの多孔度を正弦波状に変調することで多層膜（ルゲート構造）を作製すると構造色を示す、所謂1次元のフォトニック結晶が得られる。その光学特性は構成する物質の屈折率で決まることから、多孔質層内に化学物質が浸透するにつれて反射スペクトルが変化する。ルゲート型多孔質シリコンにより、バイオ燃料等として有用なエタノールの検知挙動について調べた。通常、ルゲート型多孔質シリコンは作製時の電流密度を正弦波状に変調することで作製する。しかし、単に正弦波状に電流密度を変調しても理想的なルゲート構造が作製できず、理想的な反射スペクトルが得られない。そこで、電流密度の変調を正弦波から非対称な周期関数とすることで理想的なルゲート型多孔質シリコ

ンが作製できることを明らかにした。その結果、反射スペクトルを用いたエタノールの

検知精度が向上した。また、異なる反射スペクトルを持つルゲート型多孔質シリコンを上下に重ね合わせて作製し、それらの反射スペクトルを同時測定することでエタノールによる孔内の毛管凝縮の動的挙動を調べた。その結果、エタノール蒸気の侵入とともに孔内部が一様に濡れ、その後凝集していく過程をリアルタイムで光学的に測定すると同時に、数値シミュレーションからも明らかにした。



(a)配列したマクロ多孔質シリコンと、(b)エッチピットパターンを制御して得られたシリコンナノワイヤアレイ

2.2.1.1.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

多孔質シリコンの持つ特異な多孔質構造を利用する新規デバイス、光学材料、バイオ材料、さらには燃料電池やリチウム二次電池などのエネルギー関連材料としての応用研究が進められている。これらの研究が実用化されるためには、多孔質構造制御につながる基盤的研究を進め、理解を深めることが必須である。わが国では化学的視点からこの研究に取り組んでいるものは非常に少ない。国外においては、特にフランスおよびドイツにおいて精力的な基盤研究が展開されている。このような状況の下、高い将来性を持つこの材料の基礎的理解を深める研究をわが国で継続することは有意義である。

2.2.1.1.5. 今後の展望

マクロ孔構造の発現については、孔中での電位分布や物質移動を考慮したモデルについて検討を行い、新たなモデルを提案することを目指す。また、数値シミュレーションを積極的に利用し、所望の多孔質構造を得るために実験にフィードバックさせる。現在は、2次元の初期パターンを高価でエネルギーコストの高いリソグラフィーを利用して作製しているが、今後は自己組織化プロセスによる2次元パターンニングを併用し、エネルギー負荷の小さい手法で3次元の半導体多孔質電極の作製を目指す。

ルゲート型多孔質シリコンにおいては、複数の化学物質が混合したガス又は溶液における各物質の侵入濃度等のリアルタイムモニタリングを行う。この研究を通じて、バイオエ

タノール等のエネルギー関連物質の生産時における不純物定量をその場で行う等の可能性が開ける。

2.2.1.1.6. 主要論文リスト

- 1) Haruaki Okayama, Kazuhiro Fukami, Rodica Plugaru, Tetsuo Sakka, Yukio H. Ogata, J. Electrochem. Soc., 157, D54-D59 (2010).
- 2) Mohamed S. Salem, Michael J. Sailor, Kazuhiro Fukami, Tetsuo Sakka, Yukio H. Ogata, Phys. Status Solidi C, 6 (7), 1620-1623 (2009).
- 3) Mohamed S. Salem, Michael J. Sailor, Kazuhiro Fukami, Tetsuo Sakka, Yukio H. Ogata, J. Appl. Phys., 103, 083516 (2008).

2.2.1.2. 多孔質半導体電極への金属および導電性高分子の充填

2.2.1.2.1. 研究の概要

光電気化学セルにおいては半導体電極が用いられ、光励起された電子または正孔による電気化学反応を利用する。半導体上での電気化学反応速度は遅く、白金等の触媒を付与して反応速度を向上させる必要がある。この視点から、半導体であるシリコン上への金属析出制御の研究に取り組んでいる。特に、表面に露出する金属の配置やサイズを制御するために鋳型電極として多孔質シリコンを用いた。また、多孔質シリコン電極への導電性高分子の電解重合にも取り組み、ナノファイバーやマイクロチューブのアレイを作製した。

2.2.1.2.2. 重点領域研究としての意義および社会的重要性

半導体上への金属析出は、電気化学的太陽光利用に必須である半導体電極の触媒性向上に密接に関係している。また、シリコンと導電性高分子の複合材料は太陽電池材料としても興味深い。これまで研究を続けてきた多孔質シリコンの高い比表面積を利用することで、金属／半導体あるいは導電性高分子／半導体の新しい構造の形成が可能である。これらの観点から、本研究は太陽エネルギーの多角的な利用を目指した半導体複合材料の開発研究において重要である。また、エネルギー材料も含め、他分野で要請されているナノ構造体形成の基盤材料として、その重要性が認識されている。

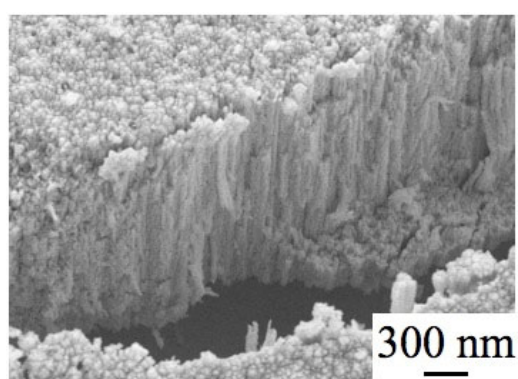
2.2.1.2.3. 平成19年度以降の主な成果

シリコンを用いた光電極では、反応を触媒するために白金等の金属を表面に付与する研究が行われている。平坦なシリコン表面にめっきや蒸着により金属微粒子を担持すると、粒子は大きさが不均一でランダムに分布する。本研究では、鋳型電極として開口径が5 μm 程度のマクロ多孔質シリコンを用い、その孔内部に金属を選択的にめっきすることで、サイズが揃った金属微細構造をシリコン表面に作製した。多くの場合、開口部で析出が優位に進行した結果、開口部が析出物で塞がれ、ボイドが残る。めっき液や印加電位を適切に制御することで孔底部から白金やパラジウム等の高い触媒活性を示す金属を充填できた。

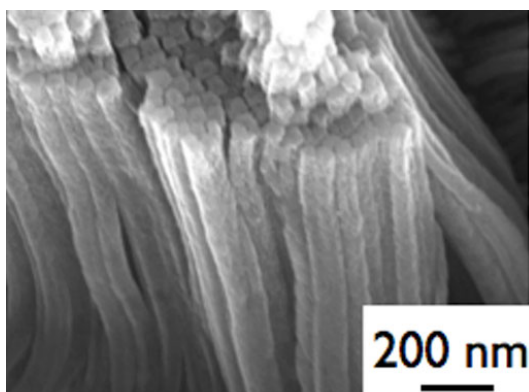
その結果、サイズが均一な白金マイクロロッドアレイの作製に成功した。

また、孔径が約 30 nm から成るメソ多孔質シリコンを電極として銅、金、白金などの金属めっきによる孔充填も試みた。孔径が小さくなると析出挙動が物質の移動による制限を受けることを見出し、極微小な電流密度でゆっくりと充填することが必要であることを実験および数値シミュレーションの両面から明らかにした。

一方、太陽電池等の材料にも有用な導電性高分子の充填挙動についても検討した。孔径が約 5 μm のマクロ孔から、30 nm のメソ孔まで、様々な孔径の多孔質シリコンを電極とし、導電性高分子であるポリピロールの電解重合を行った。どのサイズの孔にも比較的容易に高分子が充填され、ナノファイバーアレイが直径 1cm に渡り、均一に形成された。



メソ多孔質シリコンを鋳型電極として、電解めっきにより作製した白金ナノファイバーアレイ



マクロ多孔質シリコンを鋳型として作製したポリピロールファイバー

2.2.1.2.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

シリコン上への電気化学手法による金属析出は、平成 9 年に IBM 社が IC チップ配線に銅めっき技術を導入して以来、多くの研究者が取り組んでいる。近年は、ナノ構造体作製の重要手法として、三次元的な構造体への活発な取り組みがある。シリコンは、それ自身の

加工性のよさや物質充填後の基板除去が容易であることなどから、この目的に合致した出発物質であり、また、電気化学的手法は装置の簡便さや優れた制御性など、他の手法にはない利点を有している。光電極としてのシリコンは、光電気化学セル動作時における安定性の欠如から実用的な材料とはいえない。しかし、シリコンは良好な素材が入手可能であり、また多くの基礎物性が既存であることから研究材料として適当であり、光電極触媒作用研究におけるモデル系として得られる知見を他の半導体電極に還元できる。

2.2.1.2.5. 今後の展望

多孔質シリコンに貴金属を充填し、光電極として使用するためには、金属／半導体接合におけるショットキー障壁を可能な限り回避する必要がある。そのためには、担持する金属を数ナノメートルのサイズで制御しなければならない。そこで、孔径が数 nm からなるミクロ多孔質シリコンへ金属をめっきし、金属／多孔質シリコン複合電極を作製する。特に、孔径が数ナノメートルとなることで、物質移動や電場が強く影響を受けると考えられるため、それらを考慮した数値シミュレーションを積極的に併用する。

また、導電性高分子の電解重合では、陰極重合が可能で太陽電池の材料としても有用なチオフェン系の導電性高分子を多孔質シリコンに充填する。

2.2.1.2.6. 主要論文リスト

- 1) Kazuhiro Fukami, Yuki Tanaka, Mohamed L. Chourou, Tetsuo Sakka, Yukio H. Ogata, *Electrochim. Acta*, 54, 2197-2202 (2009).
- 2) Kazuhiro Fukami, Katsutoshi Kobayashi, Tasuku Matsumoto, Yosuke L. Kawamura, Tetsuo Sakka, Yukio H. Ogata, *J. Electrochem. Soc.*, 155, D443-D448 (2008).
- 3) Kazuhiro Fukami, Farid A. Harraz, Takeshi Yamauchi, Tetsuo Sakka, Yukio H. Ogata, *Electrochem. Commun.*, 10, 56-60 (2008).

2.2.1.3. 一次元ナノ材料の創製

2.2.1.3.1. 研究の概要

太陽電池や光触媒等の光電変換システムを開発するにあたり、ナノサイズで精緻に配置された高結晶性かつ大表面積の一次元導電性ナノ材料を設計して利用すると、光誘起電子（あるいは正孔）の電荷輸送層として高効率で輸送可能となることが期待される。これは、光電変換における、電荷分離サイトとしての p-n 接合の増大、電荷輸送過程におけるトラップサイトや再結合サイトとなり得る空隙や粒界の削減、電荷収集過程での外部回路との密着性の改善などによる。このような観点に基づいて、金属酸化物半導体の酸化亜鉛や酸化チタンのナノロッド、ナノチューブが、基板表面に垂直かつ高密度、高配向度で伸張したアレイの作製、および導電性ポリマーであるポリフェニレンビニレンやポリ(3-ヘキシルチオフェン)の高配向性ナノワイヤーの作製に成功した。さらに、これら一次元ナノ材料を、色素増感太陽電池や有機薄膜太陽電池用の電荷輸送層、あるいは水素発生用の光触媒へ応用し、無次元のナノ微粒子等との対比により、一次元構造の優位性を見出した。

2.2.1.3.2. 重点領域研究としての意義および社会的重要性

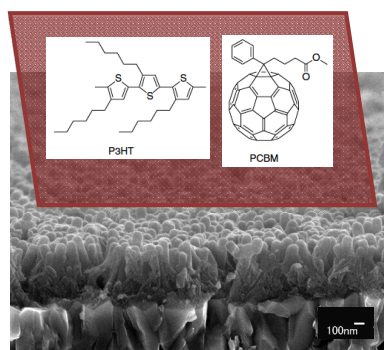
エネルギー源として持続可能かつクリーンな太陽光エネルギーを使用する光電変換システム開発における一次元ナノ材料の設計と応用は、低炭素社会を構築するための重要なツールの一つとして大いに期待される。とりわけ、従来の乱雑に設計されたマイクロメートル（あるいはそれ以上の）スケールの材料に比べて、一次元ナノ材料を使用すると、光捕集から電荷分離、電荷輸送、電荷収集に至る一連の光電変換プロセスの著しい高効率化が期待される。

2.2.1.3.3. 平成 19 年度以降の主な成果

水熱合成法により作製した酸化亜鉛ナノロッドアレイは、結晶性の高い直径 80-100 nm、長さ 350-400 nm のピラー状ナノ構造体であり、この酸化亜鉛ナノロッドアレイを鋳型として、液相析出法により、長さ 650 nm、内径 50 nm、外径 100 nm の酸化チタンナノチューブアレイの作製に成功した。

一方、ポリ（ビニルピロリドン）（PVP）の電界紡糸に関して、溶媒、PVP の分子量、濃度、印加電圧、電極間距離等の条件の違いが及ぼすファイバーの形状やサイズへの影響を精査することにより、直径 200 nm から 1.5 μm の範囲でファイバーの直径を作り分ける条件を見出した。この紡糸過程にチタニウム（IV）ブトキシドのゾル-ゲルプロセスを加えることにより、直径 260-355 nm の酸化チタンナノファイバーの作製を行い、450°C での焼成で高純度アナターゼ結晶相のナノフィブリルが束状に集まった繊維の構築に成功した。

ポリ（フェニレンビニレン）（MEH-PPV）と PVP を混合させた電界紡糸に関して、溶媒組成、PVP 濃度、印加電圧、ノズルとコレクター間の距離、ギ酸ピリジニウム有機塩添加効果等の作製条件を検討し、直径 43 nm から 1.7 μm の範囲でファイバーの太さを制御できる条件を見出すと共に、ソックスレー抽出で PVP のみを選択的に溶解除去した高純度かつリボン状の MEH-PPV ナノファイバー作製に成功した。



酸化チタンナノチューブアレイ

2.2.1.3.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

種々の化合物による種々のナノ材料構築法が提案されているが、当該テーマのように簡便

な液相法によるナノ材料のボトムアップ精密設計例は数少なく、高い汎用性を有しており、酸化亜鉛や酸化チタンのみならず、他の様々な金属酸化物材料や、他の機能性高分子材料への応用が可能であり、エネルギー利用・変換に関わる新素子開発に大きく貢献できるものと期待される。

2.2.1.3.5. 今後の展望

多次元の超階層構造素子の構築を展開すると共に、一次元有機および無機ナノ材料の複合化を図る。

2.2.1.3.6. 主要論文リスト

- 1) Thitima Rattanaavoravipa, Takashi Sagawa, Susumu Yoshikawa, Photovoltaic Performance of Hybrid Solar Cell with TiO₂ Nanotubes Arrays Fabricated through Liquid Deposition Using ZnO Template, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. **92**, Issue 11, pp. 1445-1449 (2008).
- 2) Yutaka Hayami, Yoshikazu Suzuki, Takashi Sagawa, Susumu Yoshikawa, TiO₂ Rutile Nanorod Arrays Grown on FTO Substrate Using Amino Acid at a Low Temperature, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. **10**, pp. 2284-2291 (2010).

2.2.1.4. ペプチドによるナノ構造体の構築

2.2.1.4.1. 研究の概要

本研究は、第1期中期目標・中期計画に掲げた「ナノ材料創製」に対応するものである。現在微細化技術の主流となっている半導体リソグラフィ技術は 50nm を切るところで加工限界に達するため、分子を組織化してナノ構造体を作製する「ボトムアップ型ナノテクノロジー」の発展は急務の課題になっている。近年ボトムアップ型ナノ配線の作製において、タンパク質アミロイド繊維を鋳型としたナノ配線の構築法が注目を集めている。アミロイド繊維は非常に剛直な配線構造であることからナノ配線の鋳型としては最適であり、アミロイド繊維表面に金属化合物を析出させることによりナノ配線として機能化すること可能になっている。本研究では、ナノ配線の一般的な合成法を確立することを目的として、タウ蛋白質内部に存在するコア配列のアミロイド繊維化機構を解明し、その繊維形状と表面環境を制御することを試みた。

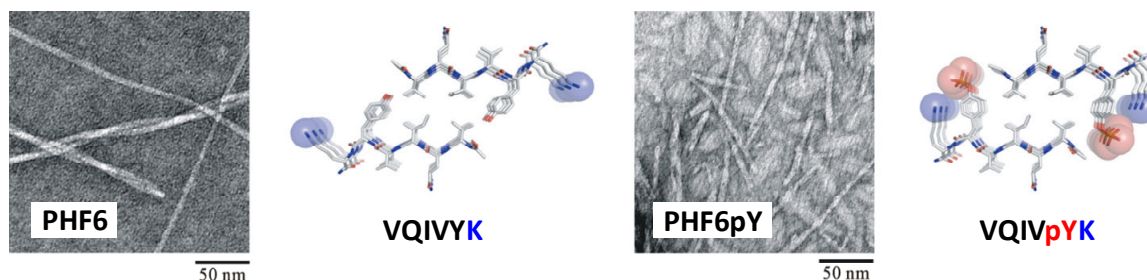
2.2.1.4.2. 重点領域研究としての意義および社会的重要性

エネルギー資源の有効利用法を開発するうえで、多岐にわたる分野の基盤的技術であるナノテクノロジーのエネルギー科学への応用に期待が寄せられている。環境負荷の少ないナノ構造体作製法として、生体高分子による自己組織化プロセスを利用した方法がある。生体高分子の高度な自己組織化能力と、タンパク質のバイオミネラライゼーション能力を組み合わせることにより、複雑多岐に亘るナノマテリアルを精緻に設計できると期待される。本研究において提案された方法論は、アミロイド表面環境を制御することにより利用目的に合致した様々なナノ配線の構築が可能であるため、その社会的重要性・貢献度は極めて

高い。

2.2.1.4.3. 平成19年度以降の主な成果

アミロイド繊維の基本骨格として、アルツハイマー病の繊維原性タンパク質タウの凝集コア配列を用いた。タウタンパク質は、タンパク質内のアミノ酸側鎖のリン酸化により繊維化することが報告されているため、タウタンパク質のコア配列およびそのアミノ酸側鎖のリン酸化がアミロイド繊維化に重要な役割を果たしていると考えられる。タウの繊維化に重要であると予想された配列（VQIVYK：PHF6）を選び、その繊維化の検討を行った。その結果、中性条件化において直径 10 nm、長さ数十～数百 nm の繊維状構造体が TEM により観測された（図）。また配列内部のチロシン残基をリン酸化した配列(PHF6pY)で同実験を行った結果、長さが 100 nm 程度の繊維構造が得られた。また VQIVYK 配列の電荷状態を変化させた人工アミロイドモチーフを合成することにより、電荷による凝集特性の変化を検討した結果、電荷の増加により凝集速度が低下することが示された。本研究において、PHF6 ペプチドの繊維形成には、アミノ酸側鎖の疎水性相互作用および静電相互作用が重要であることが示された。また PHF6 誘導体においても TEM により繊維形成が観測されたことから、このペプチドモチーフを用いて繊維状構造体の形状、表面電荷や疎水性環境を制御できることが示唆された。



PHF6 ペプチド（左）およびそのリン酸化体（右）の繊維状構造体の TEM 画像

2.2.1.4.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

アミロイド繊維を鋳型とした金属ナノ配線の構築法は Scheibel らによって報告されている。この手法では約 250 アミノ酸からなる Sup35 の NM ドメインを基としたアミロイド繊維

を鋳型に用いて金ナノ配線を作製している。しかし、この蛋白質は分子量が大きいため、その表面を改質するための設計・合成には多大な労力を有する。本手法は、数アミノ酸かなるペプチドを用いるため、アミロイド繊維の形状・表面電荷の制御が簡易であり、様々なナノ構造体の作製に応用できると考えられる。

2.2.1.4.5. 今後の展望

PHF6 誘導体を用いたナノ構造体の構築原理を明らかにすると共に、ナノ構造体をもとにして、酸化チタン・金・シリカなどの様々なナノ配線の合成を試みる。これらの材料の半金属触媒・光合成型太陽電池などのへの応用を図る。

2.2.1.4.6. 主要論文リスト

- 1) Konno, T., Oiki, S. and Morii, T. Synergic action of polyanionic and non-polar cofactors in fibrillation of human islet amyloid polypeptide. *FEBS Lett.* **2007**, 581, 1635-1638.
- 2) Hirata, A., Sugimoto, K., Konno, T., Morii, T. Amyloid-forming propensity of the hydrophobic non-natural amino acid on the fibril-forming core peptide of human tau. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* **2007**, 17, 2971-4.
- 3) Inoue, M., Hirata, A., Tainaka, K., Morii, T., Konno, T. Charge-pairing mechanism of phosphorylation effect upon amyloid fibrillation of human tau core peptide. *Biochemistry* **2008**, 47, 11847-57.

2.2.1.5. 高機能 DNA タンパク質ナノ組織体の構築

2.2.1.5.1. 研究の概要

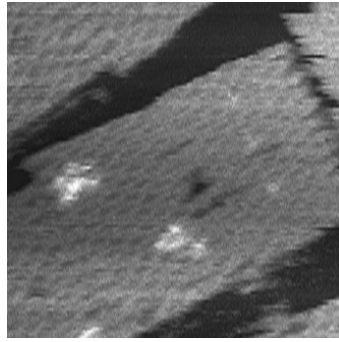
DNA の配列を設計することによって意図的にさまざまなナノ構造を形成させることができる。本研究では DNA ナノ構造上の個別の配列情報を利用して、タンパク質・RNA 等の生体分子をナノスケールで精密に集積させて組織化した高度デバイスを作成し、その空間で発現される新機能を開拓することを目指す。本研究は、戦略的創造研究推進事業 (CREST) 科学技術振興機構 (JST) 研究領域「プロセスインテグレーションに向けた高機能ナノ構造体の創出」における課題として遂行している。

2.2.1.5.2. 重点領域研究としての意義および社会的重要性

生体高分子や有機小分子などを数 nm～数十 nm の距離間隔で規則正しく望みの位置に固定化する技術は、ナノデバイスや細胞膜上での生体応答を再現するうえで、重要な方法論となる。本研究では、ナノスケールの空間に複数の酵素を配置することによって、多段階化学反応の効率を向上させることを試みる。

2.2.1.5.3. 平成 19 年度以降の主な成果

M13 ファージ由来の一本鎖 DNA と 32 ヌクレオチドから成るオリゴ DNA から形成される DNA 構造体は、ヘルパー DNA の配列を変化させることで、様々な形状を作成する事ができる。また、タイル上の特定の位置に配置した一本鎖 DNA や、ダンベル型の二本鎖 DNA を利用して、生体高分子や有機小分子をタイル上に固定することにより、分子を数 nm～数十 nm の距離に規則正しく配置する方法論の開発が期待できる。本研究では、天然に存在するジンクフィンガータンパク質 Zif268 の認識配列を持つ二本鎖 DNA をタイル上に形成させ、DNA タイルにジンクフィンガータンパク質を固定することにより、ジンクフィンガータンパク質を用いた DNA タイル上への機能性タンパク質配置法の基礎を構築した。



2.2.1.5.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

DNA を用いたナノ構造体形成は、ナノバイオテクノロジーのなかでも非常に注目されつつ競争の激しい分野である。本研究は、DNA ナノ構造体の特定位置の DNA 配列を DNA 結合タンパク質によって認識することにより、DNA ナノ構造体の特定位置にタンパク質を配置する「DNA タンパク質ナノ構造体」分野を世界に先駆けて開拓することを目指している。

2.2.1.5.5. 今後の展望

DNA ナノ構造体上の特定位置に DNA 結合タンパク質を配置する方法を利用して、酵素と DNA 結合タンパク質の融合体を DNA ナノ構造体上に規則的に配置した「DNA タンパク質ナノ構造体」を作製することにより、生体内の高効率化学反応場に匹敵する高いエネルギー変換効率を示す酵素ナノ構造体が開発できると期待される。

2.2.2. 次世代太陽電池等光エネルギー利用システムの開発

2.2.2.1. 次世代太陽電池の開発

2.2.2.1.1. 研究の概要

色素増感太陽電池を構築する上で重要な役割を果たす金属酸化物の電極に関して、酸化亜鉛や酸化チタンからなる一次元ナノ構造体を作製し、光電変換特性を高めるために重要な因子となる光電流発生量の増大や電極内での電子輸送特性と構造との相関と優位性を明らかにした。また、ガラス透明電極基板上に液相析出法により成膜した酸化チタンナノチューブアレイの表面に、ポリ（3-ヘキシルチオフェン）ドナー成分と、フラーレン誘導体の[6,6]-フェニル-C₆₁-ブタン酸メチルエステルアクセプター成分を 100 nm 程度に積層した有機薄膜太陽電池を作製し、一次元ナノ構造体の表面改質による光電変換効率の改善を見出した。さらに、ガラス透明電極の上に成膜した酸化チタンナノ微粒子の表面に、電界紡糸法により酸化チタンファイバーを塗布した複合電極を作製し、色素増感太陽電池を構築した結果、光閉じ込め効果による変換効率向上と高い外部量子収率を得た。

2.2.2.1.2. 重点領域研究としての意義および社会的重要性

太陽光発電は、持続可能かつクリーンな太陽光をエネルギー源として使用するため、低炭素社会を構築するための重要なツールの一つとして大いに期待されている。とりわけ、発電部位の材料として Si や CdTe などの無機物質を使用しない有機太陽電池は、製造プロセスが簡便かつ低コストであり、軽量かつ柔軟で加工性に富み、屋外のみならず室内の照明でも発電できるほど高感度であり、材料の種類が豊富でいろいろな波長の光源に対応可能であるために、既存の太陽電池とは利用方法や手段が異なる次世代の太陽電池として大いに期待されている。

2.2.2.1.3. 平成 19 年度以降の主な成果

色素増感太陽電池を構築する上で重要な役割を果たす金属酸化物の電極に関して、酸化亜鉛や酸化チタンからなる一次元ナノ構造体を作製し、光電変換特性を高めるために重要な因子となる光電流発生量の増大や電極内での電子輸送特性と構造との相関を解明した。

酸化亜鉛ナノロッドの表面に Ru 色素を吸着させた色素増感太陽電池を構築し、光強度変調光電流分光法（IMPS）と光強度変調光起電力分光法（IMVS）により、電極内を輸送する電子の拡散定数および電子寿命を計測すると、ナノロッドアレイはナノ微粒子よりも電子トラップサイトが浅く、酸化亜鉛に注入された電子は、外部回路に速やかに輸送されることを明らかにした。Ru 色素の代わりにインドリン色素を用いた展開も行い、酸化亜鉛電極内を輸送する電子の寿命はインドリン色素と Ru 色素で同程度であったものの、拡散距離に関してはインドリン色素の方がやや長く、電荷注入効率に優れていることを見出した。

酸化亜鉛ナノロッドをテンプレートとして酸化チタンの液相析出を行い、酸化チタンナ

ノチューブアレイを作製し、さらに 450 °C での焼成により、アナターゼ結晶相の比率を増大させることに成功した。酸化チタンの表面に Ru 色素を吸着させた色素増感太陽電池を構築し、市販の酸化チタンナノ微粒子 (P-25) の系とその光電変換特性を比較したところ、電極内を輸送する電子の寿命はナノチューブの方がナノ微粒子の 5 倍長く、サイクリックボルタンメトリー測定から注入電荷密度を求めると、ナノチューブの方がナノ微粒子よりも電荷注入特性に優れていることを明らかにした。

酸化チタンナノチューブの表面に四塩化チタン処理を施し、酸化チタンの微細な凹凸を付与した電極を用いた色素増感太陽電池を構築した。電極の表面積増大に基づき N719 色素吸着量が 3 倍増加し、短絡電流密度と変換効率の倍増に成功した。電極内を輸送する電子の寿命は四塩化チタン処理により 3 倍長くなり、電子拡散距離は未処理の場合より伸びることを明らかにした。

ガラス透明電極基板上に液相析出法により成膜した酸化チタンナノチューブアレイの表面に、ポリ (3-ヘキシルチオフェン) (P3HT) ドナー成分と、フラーレン誘導体の[6, 6]-フェニル-C₆₁-ブタン酸メチルエステル (PCBM) アクセプター成分を 100 nm 程度に積層して有機薄膜太陽電池を作製した。

水熱合成法により作製した酸化亜鉛ナノロッドアレイの表面に Ru 色素の N719 を吸着させた後、P3HT と PCBM を混合して成膜したバルクヘテロ接合型の有機薄膜を塗布したハイブリッドセルを構築すると、N719 を導入していない系と比較して 1.5 倍に増大した短絡電流密度 8.89 mA/cm² と 1.7 倍に向上した変換効率 2.0% が得られた。

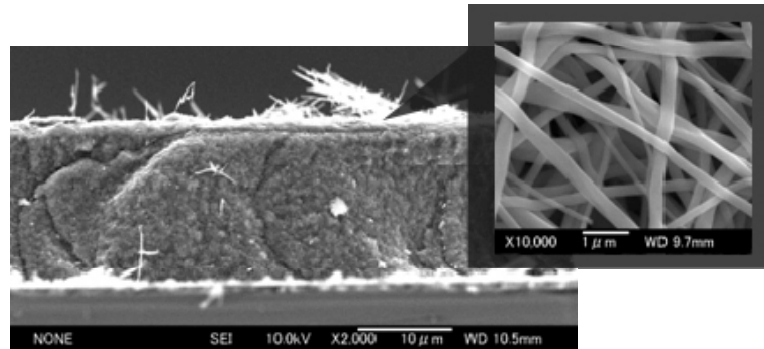
上記酸化亜鉛ナノロッドアレイを鋳型として、液相析出法により、酸化チタンナノチューブアレイを作製し、N719 を導入した P3HT-PCBM バルクヘテロ接合との複合セル構築で、短絡電流密度 (5.2 倍) と開放電圧 (6 倍) の増大を実現した。

Ru 色素 N719 のほかに、インドリン色素 D149、クマリン色素 NKX-2677 を酸化チタンナノチューブアレイあるいは酸化亜鉛ナノロッドアレイの表面に吸着させた場合、いずれの色素を用いても、短絡電流密度と開放電圧の増大が見られたが、それぞれの外部量子収率を測定すると、色素自身のモル吸光係数の大小が反映した光増感作用を確認でき、酸化亜鉛に D149 を吸着させたときに最も高い短絡電流密度 9.57-9.87 mA/cm² が得られ、本系で最大の変換効率 2.71% を達成した。

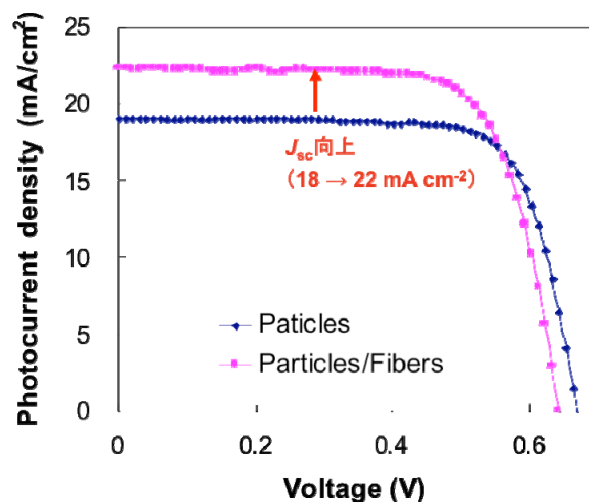
ポリスチレンラテックスビーズを鋳型とした泳動電着による酸化亜鉛ナノカリフラワーを作製し、D149 を導入した P3HT-PCBM との複合セルを構築し、ロッド長依存のセル特性改善方法 (1.9 倍) を実現した。

FTO ガラス透明電極の上に 15 μm の厚みで成膜した酸化チタンナノ微粒子の表面に、電界紡糸法により、φ 250 nm の酸化チタンファイバーを塗布した電極を作製し、色素増感太陽電池を構築した結果、光閉じ込め効果により 8.14% の変換効率と、540 nm で 85% の外部量子収率を得た。

これらのナノ材料作製手法とハイブリッド太陽電池の開発は、従来の色素増感太陽電池とバルクヘテロ接合型の有機薄膜太陽電池を融合させた応用性の高い内容であり、今後の新しい太陽光エネルギー利用システム開発に大きく貢献できるものと期待される。



色素増感太陽電池用の酸化チタンナノ微粒子／ナノファイバー複合電極



酸化チタンナノ微粒子電極あるいは酸化チタンナノ微粒子／ナノファイバー複合電極を使用した色素増感太陽電池用の電流-電圧曲線

2.2.2.1.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

シリコン系の基幹材料を利用したデバイスと対比して、有機太陽電池は色素増感太陽電池（最大変換効率 12%）と有機薄膜太陽電池（最大変換効率 7.9%）のいずれについても、分子設計可能な豊富な素材をはじめとして、数多くの改善の余地が残されており、次世代太陽電池の一つとして今後さらに発展するものと期待される。

2.2.2.1.5. 今後の展望

変換効率 10%を越えるさらなる高効率化と、大面積セルの作製および長期安定化（耐久性の向上）を展開する。

2.2.2.1.6. 主要論文リスト

- 1) Surawut Chuangchote, Takashi Sagawa, Susumu Yoshikawa, Efficient Dye-Sensitized Solar Cells Using Electrospun TiO₂ Nanofibers as a Light Harvesting Layer, *Applied Physics Letters*, Vol. **93**, pp. 033310/1-3 (2008).
- 2) Osamu Yoshikawa, Taro Sonobe, Takashi Sagawa, Susumu Yoshikawa, Single Mode Microwave Irradiation to Improve the Efficiency of Polymer Solar Cell Based on Poly(3-hexylthiophene) and Fullerene Derivative, *Applied Physics Letters*, Vol. **94**, pp. 083301/1-3 (2009).

2.2.2.2. 水素発生光触媒の開発

2.2.2.2.1. 研究の概要

環境調和性に優れた酸化チタンを中心とする先進ナノ材料の精密サイズ制御法ならびに 1 次元形態制御法を開発し、水素製造用光触媒として応用し、従来材料に比べて大幅に高い水素製造能を得ることに成功した。具体的には、ナノ材料として、破碎状ナノ粒子、球状微粒子、ナノフラワー、ナノワイヤー、ナノチューブ、あるいはナノロッド等、種々の形態をとる酸化チタンナノ構造体を、種々の条件における水熱合成法により精密に作製し、得られた材料の形状や結晶性を調べると共に、水素発生用光触媒として利用し、その光触媒活性の向上を図った。また、電界紡糸法により作製した酸化チタンナノファイバーは、水素発生用光触媒として有効であることを見出した。

2.2.2.2.2. 重点領域研究としての意義および社会的重要性

エネルギー源として持続可能かつクリーンな太陽光エネルギーを使用する光電変換システム開発における水素発生用光触媒の設計と応用に関して、環境調和性に優れた酸化チタンを利用して従来材料よりも大幅に高い水素製造能を得ることができれば、低炭素社会を構築するための重要なツールの一つとして新しいエネルギー変換・利用システム開発に大きく貢献できるものと期待される。

2.2.2.2.3. 平成 19 年度以降の主な成果

チタニウムブトキシドを出発原料として水熱合成法により酸化チタンの多孔質ナノ結晶を作製し、粉末 X 線回折測定、走査型電子顕微鏡観察、および透過型電子顕微鏡観察から結晶子径 8 nm のアナターゼ構造をもつ比表面積 215 m²/g の酸化チタンを得た。500°C で焼成した酸化チタンを、メタノールを犠牲剤とする水からの水素発生用光触媒として利用すると、市販の酸化チタン微粒子（石原産業社製 ST-01、4 mmol/h）よりも高い光触媒活性（16 mmol/h）が発現することを明らかにした。

粒子サイズを 250 nm から 2.5 mm の範囲で作り分けることが可能な花卉状酸化チタンナ

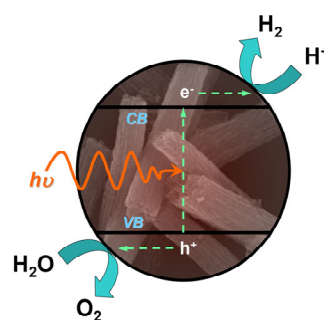
ノ構造体（ナノフラワー）を、テンプレートの利用を必要としない、簡便な水熱合成法により作製することに成功した。特徴的な花卉状の構造を有することから、その比表面積は著しく増大し、 $350.7 \text{ m}^2/\text{g}$ の微粒子を得た。水素発生光触媒活性は 68.4 mmol/h であり、さらに 500°C で焼成すると、アナターゼ結晶相の比率が増大し、ST-01 を上回る光触媒活性 (117.6 mmol/h) を得ることができた。

市販の酸化チタン粉末（デグサ P-25）を出発原料として、 10 M 水酸化ナトリウム中 150°C で 3 時間反応させる 1 段階の水熱合成プロセスにより、酸化チタンナノワイヤーを調製した。調製後の焼成操作に関して、 300°C から 1000°C の範囲で系統的に酸化チタンナノワイヤーの結晶相の変化を検討した結果、 300°C - 400°C では一次元構造を保持しつつ、 $\text{TiO}_2(\text{B})$ 構造をとることが判明し、 500°C - 800°C では、アナターゼに相転移することがわかった。さらに 900°C - 1000°C で焼成すると、ワイヤーの一部はロッド構造と変化しながらルチルに相転移することを明らかにした。これらの水素発生に関する光触媒活性を比較すると、調製後の焼成 (500°C) を経た酸化チタンナノワイヤー (19.1 mmol/h) は、原料 P-25 (1.6 mmol/h) よりも高活性であることがわかった。

市販の酸化チタン粉末（デグサ P-25）を出発原料として、 10 M 水酸化ナトリウム中で酸化チタン由来のナノチューブ（直径 10 nm - 20 nm ）を創製した。水熱合成後の焼成温度を 300°C にすると、 $\text{TiO}_2(\text{B})$ 構造のナノチューブが得られ、 400°C のときは、ナノチューブはナノ微粒子に構造を変えつつ、アナターゼ相へと転移する（ $\text{TiO}_2(\text{B})$ 構造も残存している二相である）ことがわかった。さらに 700°C 以上で焼成すると、微粒子はアナターゼ相からルチル相へと転移することを確認した。水素発生光触媒活性を比較すると、微粒子 (P-25: 1.6 mmol/h) よりも一次元ナノ構造体 (284 mmol/h) の方が高活性であることがわかった。

炭酸ストロンチウム、酸化タンタル (V)、酸化チタンを原料として 1000 度の固相反応により、タンタル酸ストロンチウム/チタン酸ストロンチウム複合光触媒の調製に成功した。この複合材料を含む 10% メタノール水溶液に水銀ランプ光を照射すると、 $\text{Sr}/\text{Ta}/\text{Ti} = 2/0.5/1.5$ (モル比) のときに最大 138 mmol/h という非常に高い効率で水素発生が可能であることを明らかにした。

メタノールを犠牲剤とする水の酸化による水素発生用光触媒に電界紡糸法で作製した酸化チタンナノファイバーを適用すると、最大 $54 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ という高い効率で水素発生が可能であることを明らかにした。



水素発生用電界紡糸酸化チタン
ナノファイバー光触媒

2.2.2.2.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

エネルギー技術に関連するナノ構造を有する金属酸化物材料に関して、とりわけ光エネルギーを駆動力とする水素発生用光触媒材料に焦点を絞り、ナノサイズの一次元構造をとる優位性、ならびに光化学的に安定かつ加工法が比較的容易で柔軟性に富む酸化チタンを利用する利点を明らかにした。高比表面積と高分散性を兼ね備えたナノ材料を作製する手法と異種成分との複合化に関する研究は、高い汎用性を有しており、酸化チタンによる水素発生のみならず、他の様々な金属酸化物材料による光触媒反応にも応用が可能であり、さらには光触媒としての用途のみならず、次世代太陽電池用の電極をはじめとする種々のナノデバイス・量子デバイスへの応用が期待される。

2.2.2.2.5. 今後の展望

水の完全分解による水素生産に関して、触媒自身の構造、形態を自在に制御しながら、それらの組成変化と併せて、さらなる最適化および、光電変換システム（すなわちフォトリアクター）としてのデバイス化を図る。

2.2.2.2.6. 主要論文リスト

- 1) Jaturong Jitputti, Thitima Rattanaavoravipa, Surawut Chuangchote, Sorapong Pavasupree, Yoshikazu Suzuki, Susumu Yoshikawa, Low Temperature Hydrothermal Synthesis of Monodispersed Flower-Like Titanate Nanosheet, *Catalysis Communications*, Vol. **10**, No. 4, pp. 378-382 (2009).
- 2) Surawut Chuangchote, Jaturong Jitputti, Takashi Sagawa, Susumu Yoshikawa, Photocatalytic Activity for Hydrogen Evolution of Electrospun TiO₂ Nanofibers, *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. **1**, No. 5, pp. 1140-1143 (2009).

2.2.2.3. 太陽光を利用する人工光合成酵素の創製

2.2.2.3.1. 研究の概要

太陽光エネルギーの化学エネルギーへの変換技術は、新たな太陽光エネルギー利用システムとして期待できる。我々は、植物の光合成における物質変換過程を模倣した人工光合成システムとして、光エネルギーを利用して酸化反応を触媒する光駆動型オキシダーゼとして、太陽光を捕集する「光アンテナ」、正孔を逆電子移動により失活させることなく酵素の活性中心まで輸送する「リレーユニット」、および光アンテナから伝達される正孔を用いて酸化反応を触媒する「オキシダーゼ」、を共役させた複合体の構築を目指している。これまでに、長距離の正孔輸送媒体として働く DNA を「リレーユニット」として、可視光を吸収する増感剤 Ru(II)錯体を「光アンテナ」として設計した「光アンテナリレーユニット」複合体を作製した。

2.2.2.3.2. 重点領域研究としての意義および社会的重要性

太陽光エネルギーの利用方法としては、熱エネルギーおよび太陽電池や太陽光発電などの電気エネルギーへの変換技術が開発されてきた。しかしながら、生物界では普遍的に行われている太陽光エネルギーを貯蓄が容易な化学エネルギーへと変換する方法論は確立されていない。本研究では、新しい太陽光エネルギー利用技術として太陽光を利用した物質変換システムの構築を目指しており、再生可能エネルギー研究に与える影響は大きいと考えられる。

2.2.2.3.3. 平成 19 年度以降の主な成果

Ru(II)錯体修飾 DNA が、可視光照射により正孔を発生し、DNA を経由した正孔輸送を誘発する「光アンテナリレーユニット」複合体として機能することを検証した。金電極上において Ru(II)錯体を修飾した DNA 自己組織化膜を作製し、可視光照射下における光電流応答の観測を行った。 -0.2 V の電位印加時、光照射下において Ru(II)錯体を含む DNA 自己組織化膜は、 $1.35 \pm 0.17\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ の電流応答を示した。また、負のポテンシャルを印加した場合、ポテンシャルの減少に対して光電流応答の増大が確認された。このことから、観測された光電流応答がカソード光電流応答であることが示唆され、Ru(II)錯体修飾 DNA が「光アンテナリレーユニット」複合体として機能することが実証された。



2.2.2.3.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

天然の光合成システムを模倣した人工光合成システムは未だに実現されていない。太陽光エネルギーを貯蔵が可能な化学エネルギーに変換することが可能になれば、現在熱および電気エネルギーへの変換に限定されている太陽光エネルギーの利用法が、飛躍的に拡大する。

2.2.2.3.5. 今後の展望

光エネルギーを利用して酸化反応を触媒する光駆動型オキシダーゼを実現するために、太陽光を捕集する「光アンテナ」、正孔を逆電子移動により失活させることなく酵素の活性中心まで輸送する「リレーユニット」、および光アンテナから伝達される正孔を用いて酸化反応を触媒する「オキシダーゼ」をもとにした超分子複合体を構築する。このために、DNA、タンパク質からなるナノ構造体の利用も視野に入れる。

2.2.3. 生物型酵素を用いた高効率物質変換反応の開発

2.2.3.1. RNA-ペプチド複合体を用いた機能性分子の創製

2.2.3.1.1. 研究の概要

本研究は、第1期中期目標・中期計画に掲げた「生物型酵素を用いた高効率物質変換反応の開発」に該当するもので、テラーメイド酵素の創製に必要な生体高分子設計法および生体高分子をもとにして分子を認識し光応答機能を創製することを目的とする。

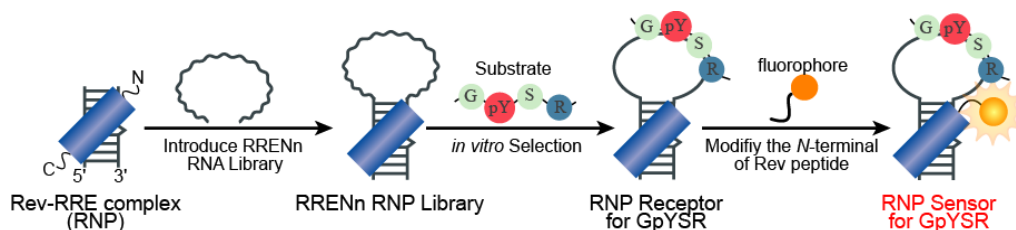
RNA-ペプチド複合体 (RNP) に *in vitro* セレクション法を適用することによって、特定のアミノ酸配列中のリン酸化チロシンを認識する RNP リセプターを作製する方法論、そして RNP リセプターを基本骨格として蛍光性バイオセンサー構築方法論の開発に成功した。これらの機能性分子創製法は化学反応性を有する RNP (RNP 酵素) を創製するための基盤的方法論であり、機能性 RNP 創製という新たな分野を開拓するものである。

2.2.3.1.2. 重点領域研究としての意義および社会的重要性

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あげられる。細胞内エネルギー利用システムを社会で構築する為には、その基本原理をもとにしたボトムアップ的システムの構築が必要である。

2.2.3.1.3. 平成19年度以降の主な成果

当分野で開発した RNP センサー構築方法論 (*J.Am.Chem.Soc.* **2006**, 128, 12932) をもとに、リン酸化チロシンだけでなく、その周辺のアミノ酸配列までも高選択的に認識できる RNP リセプターと RNP センサーの開発に成功した。試験管内選択法により作製したリン酸化チロシンを含むペプチド (Gly-pTyr-Ser-Arg) に対する RNP リセプターは、リン酸化チロシン周辺のアミノ酸配列も認識し、細胞内でリン酸化を受けるタンパク質のチロシンリン酸化部位を高選択的に識別した。RNP リセプターのペプチドサブユニットに蛍光分子を導入することにより、リセプター活性を保持したまま蛍光性 RNP センサーへの機能改変にも成功した。また、情報伝達分子ヒスタミン、ドーパミンに対する RNP リセプターおよびセンサーを開発した。ドーパミンに対する RNP センサーは、ドーパミンのカテコ-



ル部位と α 位のメチレンを高選択的に識別した。これらの結果により、個々のシグナル伝達経路に特徴的な情報伝達分子に対する一般的な方法論として RNP センサーが作製できる可能性を示した。

2.2.3.1.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

試験管内選択法に代表される進化分子工学的なアプローチは、テーラーメイドなリセプターを作製するには大変有効な方法論であり、三次元構造情報をもとにした分子設計法と組み合わせて開発された RNP センサー構築方法論は、蛍光分子を基質結合領域へ直接導入することなく、任意の波長で幅広い濃度域で応答するバイオセンサーが簡便に作製できる。従来の生体高分子を基にした蛍光センサー構築法の問題点を解消した汎用性が高いセンサーは、基礎的研究のみならず診断・創薬などの臨床応用の見地からみても極めて意義深い。

今後、RNP リセプターおよびセンサーを細胞内に導入する技術を開発し、細胞内における情報伝達分子の動態を制御もしくはリアルタイムに解析することを目指す。標的情報伝達分子に対して迅速かつ高感度に細胞内で検出できるバイオセンサーが開発できれば、細胞内エネルギー利用システムに関する情報伝達経路の知見を効率的に集積することができる。

2.2.3.1.5. 今後の展望

本研究で開発した RNP リセプターの段階的高機能化法は、化学反応の出発物質に親和性を示しつつも、反応遷移状態にはより高い親和性を示す RNP リセプターを作製するための、基盤的方法論となる。これらの方法を用いることにより、天然の酵素に見られる「化学反応の進行に伴う構造変化」と「厳密な配向性のもと基質が結合する」という特徴の設計が可能となり、天然の酵素に匹敵する触媒活性を有した RNP 酵素の作製を目指す。

2.2.3.1.6. 主要論文リスト

- 1) Hasegawa, T., Hagihara, M., Fukuda, M., Morii, T. Stepwise functionalization of ribonucleopeptides: optimization of the response of fluorescent ribonucleopeptide sensors for ATP. *Nucleosides Nucleotides & Nucleic Acids* **2007**, 26, 1277-1281.
- 2) Hasegawa, T., Hagiwara, M., Fukuda, M., Nakano, S., Fujieda, N., and Morii, T. Context-dependent fluorescence detection of a phosphorylated tyrosine residue by a ribonucleopeptide. *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, 130, 8804-8812.
- 3) Fukuda, M., Hayashi, H., Hasegawa, T., Morii, T. Development of A Fluorescent Ribonucleopeptide Sensor for Histamine. *Trans. Mat. Res. Soc. Jpn.* **2009**, 34, 515-527.

2.2.3.2. イノシトール四リン酸の細胞内リアルタイムセンシング

2.2.3.2.1. 研究の概要

本研究は、第 1 期中期目標・中期計画に掲げた「生物型酵素を用いた高効率物質変換反応の開発」に対応するもので、生物の用いている高効率かつクリーンなエネルギー変換システムを制御・利用するための生体内情報伝達機構の解明を目的とする。

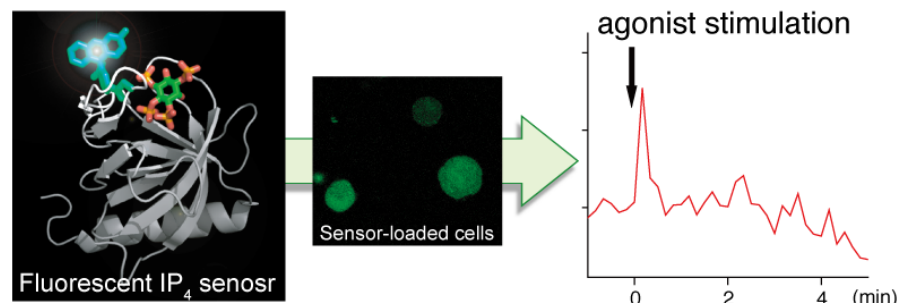
イノシトールリン酸類は、細胞内情報伝達物質として細胞の機能制御への関与が示唆されているが、その詳しい挙動は明らかにされていない。本研究では、イノシトール四リン酸 (IP₄) 選択的に結合することが知られているタンパク質をもとにして、IP₄ 濃度変化を蛍光強度変化として検出するセンサーを作製し、ほ乳細胞内 IP₄ の刺激に応答した濃度変化を蛍光によってリアルタイムに検出することに成功した。

2.2.3.2.2. 重点領域研究としての意義および社会的重要性

生物は細胞内において酵素を触媒とし、通常では高温・高圧・有機溶媒中でのみ進行する様々な化学反応を温和な条件下で進行させている。この高効率かつクリーンなエネルギー変換システムを制御・模倣できれば、現代社会の抱えるエネルギー・環境問題の改善に貢献できる。本研究では、テーラーメイド酵素作製法を応用して細胞内情報伝達物質の一つであるイノシトール四リン酸(IP₄)を標的とした蛍光性センサーを構築し、生物が実際にどのように細胞内において情報の伝達を行っているかを明らかにする方法論を開発した。

2.2.3.2.3. 平成 19 年度以降の主な成果

天然に存在する IP₄ を選択的に捕捉するタンパク質の三次元構造情報をもとにして、IP₄ との結合領域付近かつ IP₄ と相互作用しないアミノ酸残基に蛍光発色団を導入することにより、IP₄ 結合にともない発色団の周辺環境が変化する蛍光性センサーを作製した。IP₄ センサーは試験管内で IP₄ 濃度に依存した蛍光強度変化を示した。この IP₄ センサーを HeLa 細胞内に導入し、細胞内 IP₄ の検出を試みた。センサーを導入した細胞に IP₄ 産出を促すことが知られる受容体刺激を与えると、試験管での蛍光挙動に対応した蛍光強度変化が観測された。この蛍光応答は、IP₄ 産出を阻害する各種の薬剤で処置した細胞においては観察されなくなった。以上の結果から、細胞内 IP₄ 濃度変化のリアルタイム検出に世界で始めて成功した。



Real-time fluorescence monitoring of the IP₄ production in the single cells

2.2.3.2.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

細胞内情報伝達物質の濃度挙動を時間的・空間的に可視化する技術の確立は、医学・生物学などの研究分野で切望されている。本研究のように、生きた単一細胞内における情報伝達物質の濃度を選択的、リアルタイムに捕捉する技術は、今後の生体内情報伝達機構の研究に必須の手法になる。

2.2.3.2.5. 今後の展望

本研究で得られた知見をもとにして、それぞれのイノシトールポリリン酸類を選択的に捕らえることのできる人工リセプターの汎用的作製技術を開発するとともに、それぞれのイノシトールポリリン酸類の蛍光性バイオセンサーを作製して細胞内での濃度変化をリアルタイムモニターできる方法論を確立する。これによりイノシトールポリリン酸類の生体細胞内における挙動とシグナル伝達における役割を解明する。

2.2.3.2.6. 主要論文リスト

- 1) Sakaguchi, R., Endoh, T., Yamamoto, S., Tainaka, K., Sugimoto, K., Fujieda, N., Kiyonaka, S., Mori, Y., Morii, T. A single circularly permuted GFP sensor for inositol-1,3,4,5-tetrakisphosphate based on a split PH domain. *Bioorg. Med. Chem.* **2009**, *17*, 7381-7386.
- 2) Sakaguchi, R., Tainaka, K., Shimada, N., Nakano, S., Inoue, M., Kiyonaka, S., Mori, Y., Morii, T. An in vitro fluorescent sensor reveals intracellular Ins(1,3,4,5)P₄ dynamics in single cells. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2010**, *49*, 2150-2153.

2.2.4. バイオマス資源のクリーン燃料化

2.2.4.1. 生物化学・工学的アプローチによるバイオマスからの高エネルギー物質生産

2.2.4.1.1. 研究の概要

バイオマスの有効利用、特にバイオマスのエタノールへの高効率変換を行うときの最大の問題は、六炭糖のみから構成されるコーン等の穀物を出発原料とする場合と比べて、エタノール発酵能が優れている酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)が木質バイオマス中に多く存在する五炭糖を資化する酵素系を保有していないことである。本研究では、まず他の微生物のもつ五炭糖代謝関連酵素の高機能化に取り組み、酵素の補酵素要求性を本研究の目的に沿って変換することに成功した。さらに、それらの高機能化酵素を用いることによりバイオマス高効率変換系の作製に成功した。また、琵琶湖に異常繁殖し環境汚染問題ともなっている水草を出発材料のバイオマスとして、作成した五炭糖・六炭糖同時発酵遺伝子組換え酵母を用いることにより、エタノールを生産することに成功した。

2.2.4.1.2. 重点領域研究としての意義および社会的重要性

化石燃料枯渇あるいは地球温暖化などの環境問題等の地球規模の重大な問題を解決する一つの方策として、バイオマスの更なる有効利用が望まれる。本研究では、バイオマスの更なる高効率生産・変換および有効利用に向けて主にバイオエタノールに的を絞りバイオインフォマティクスおよびタンパク質工学手法を用いて研究を進めている。バイオエタノールは、世界的にガソリンの代替燃料としての導入が推進されており、日本でも、ガソリンにバイオエタノールを一定の割合で混合したバイオ燃料の実用化が計られている。

2.2.4.1.3. 平成19年度以降の主な成果

バイオマス由来の主要糖として、グルコースのほかに、キシロース等のペントース（五炭糖）も生産される。グルコースおよびキシロースからの同時高効率エタノール生産を目指して以下のような成果をあげた。まず、キシロース代謝系酵素の一つであるキシリトール脱水素酵素(XDH)について、補酵素依存性をタンパク質工学的な手法により改変する研究を行った。具体的には、キシロース代謝酵母 *Pichia stipitis* の XDH 遺伝子配列をターゲットとし、大腸菌内で補酵素結合部位のアミノ酸を部位特異的変異導入によって置換することにより、NAD⁺依存性の野生型 XDH から NADP⁺依存性の新規改変型 XDH を作成した。さらに、この補酵素依存性変換 XDH を野生型のキシロースレダクターゼ(XR)とともに、常時高発現型のプロモーターである PGK プロモータを利用し酵母 *S. cerevisiae* に形質導入しキシロース代謝効率を測定した。その結果、改変型 XDH を発現させた場合は、キシロースからのエタノール変換効率が上昇するとともに、中間代謝物質であるキシリトールの培地中への蓄積も抑制されることを見出した。

2.2.4.1.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

バイオエタノールは、ブラジル、米国などではすでにガソリンに一定量混合することによりエネルギーとして実用化されている。最近、日本でも同様な試みが行われている。現在は材料としてトウモロコシ、サトウキビなどの穀物が念頭に置かれているが、食糧との競合を考慮して、将来は木質バイオマスなどの非食物系バイオマスの有効活用が期待されている。本研究は、木質バイオマスなどの非食物系バイオマスからの高効率バイオエタノール生産に関するものであり、化石燃料の枯渇、地球温暖化防止、食糧不足問題などを考慮すると、ますます重要性は高まる研究である。

2.2.4.1.5. 今後の展望

今後は、今回作成した遺伝子組換え酵母のエタノール生産能を詳細に検討し、さらなる高効率エタノール発酵酵母システムの開発を目指していく。たとえば、この遺伝子組換え酵母に、キシロース以外の他のペントース代謝酵素遺伝子を導入して、アラビノース等のキシロース以外の他のペントースも高効率に変換できる酵母システムを構築する。また、より実用に即した研究として、実際の非食物系バイオマスの糖化液をもちいて、この遺伝子組換え酵母の実用性に関する検証を行うことを予定している。

2.2.4.1.6. 主要論文リスト

- 1) Watanabe, S., Saleh, A.A., Pack, S.P., Annaluru, N., Kodaki, T. and Makino, K. Ethanol production from xylose by recombinant *Saccharomyces cerevisiae* expressing protein engineered NADP⁺-dependent xylitol dehydrogenase. *J. Biotechnol.* **130**, 316-319 (2007).
- 2) Watanabe, S., Saleh, A.A., Pack, S.P., Annaluru, N., Kodaki, T. and Makino, K. Ethanol production from xylose by recombinant *Saccharomyces cerevisiae* expressing protein-engineered NADH-preferring xylose reductase from *Pichia stipitis*. *Microbiology* **153**, 3044-3054 (2007).
- 3) Matsushika, A., Watanabe, S., Kodaki, T., Makino, K., Inoue, H., Murakami, K., Takimura, O., and Sawayama, S. Expression of protein engineered NADP(+)-dependent xylitol dehydrogenase increases ethanol production from xylose in recombinant *Saccharomyces cerevisiae*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **81**, 243-255 (2008).

2.2.5. バイオエネルギー研究のための生命現象の解明とその利用

2.2.5.1. 水と生体分子が織り成す生命現象の化学物理

2.2.5.1.1. 研究の概要

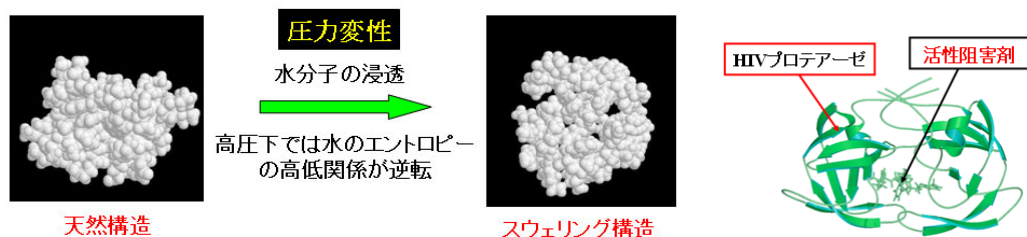
物質は、他物質と混じり合い（または接触し合い）、複合系を構成して初めて高度な機能を発揮する場合が多い。物質複合系の挙動は、各物質要素の挙動の重ね合わせからは到底想像もつかない高度なものになり得る。すなわち、物質複合系は、高機能発現の宝庫である。各要素を個別に眺めるのではなく、複数の要素の集まりを総合的にシステムとして捉えると、多くの新しいことが見えてくる。コロイド分散系、金属－電解質水溶液に代表される固液界面系、生体系などの物質複合系の非線形挙動を独自の複合型統計力学理論に基づいて研究している。最近では、特に生体系の研究に重点を置いている。複雑極まりない生体系を水も含めて原子レベルで統計力学理論的に（計算機シミュレーションではなく）扱うことを可能にしつつある。蛋白質の折り畳み、蛋白質の会合による高次構造形成、生体分子による自己組織化や分子認識など、生命を支える種々の秩序化過程の微視的機構に対し、水分子の並進移動に起因するエントロピー効果の重要性に焦点を当てた他に類を見ない新理論を構築している。蛋白質の折り畳みと表裏一体にある変性の問題とも取り組んでいる。

2.2.5.1.2. 重点領域研究としての意義および社会的重要性

生体系に隠された仕組みを解明しつつ、低いエネルギー消費で高度な機能を達成できる新たなテクノロジーを開拓することは、エネルギー問題の有力な解決策の一つである。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、生体分子の持つ自己組織化や分子認識機能をうまく利用してナノ材料を作成する試みなどが注目されている。しかしながら、現状では、それらの高機能性材料の開発はほとんど試行錯誤的に行われている。本研究における生命現象発現機構の解明、生体分子の自己組織化過程・分子認識機能の理論解析などは、高機能性材料の制御・設計を論理化するための基礎を与える極めて重要な課題である。エイズウイルスの増殖やインフルエンザウイルスの感染に必要な蛋白質の活性部位と選択的に結合し、それらを失活させる活性阻害剤（新薬）の設計、狂牛病やアルツハイマー病を引き起こす変性蛋白質のアミロイド線維形成のメカニズムの解明などは、薬学および医学分野にも波及効果がある。

2.2.5.1.3. 平成19年度以降の主な成果

分子性流体用積分方程式論と形態熱力学的アプローチの統合型方法論を開発し、蛋白質の折り畳みと変性の問題において世界をリードする成果が得られた。(1)アポプラスチアニンの折り畳みに伴う系の熱力学量変化に関する最新の実験データを定量的に再現するこ



蛋白質圧力変性のメカニズム

新薬の設計

とに成功した。

特に、大幅な水のエンタルピー利得の物理起源を明らかにした。(2)蛋白質の低温変性の微視的機構を解明し、実験的に知られている負のエンタルピー変化と負のエンタルピー変化を説明することができた。(3)熱安定性の有力な指標を提案すると共に、数多くの蛋白質に対するテストを行い、その指標が大きいほど熱変性温度が高くなることを確認した。(4)実験結果によると、高圧下では蛋白質の天然構造は変性し、蛋白質の会合体も崩れてしまう。この圧力効果を統一的に説明できる新しい統計熱力学理論を構築した。(1)～(4)の成果は、水和を的確に考慮し、しかも、蛋白質と共存する水分子の混み合い効果（蛋白質－水分子間の多体相関に基づくエントロピックな効果）を的確に考慮して初めて得られるものである。

2.2.5.1.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

生体高分子の自己組織化・分子認識・高次構造形成には、水や塩などの溶媒が決定的に重要な役割を果たしている。国内外には、生体高分子の研究に精通した生物関連の専門家が数多く存在する。しかし、視点が生体高分子に集中しており、溶媒効果の的確な取り込みがなされていない。一方、溶液化学・化学物理・液体の統計力学の専門家は、逆に生体高分子に関する知識が不十分であり、生物関連の専門家が満足できる成果をあげている言い難い。本研究では、生体高分子と溶媒の両方が最先端の方法論を駆使して同じレベルで扱われている。そのため、生体高分子と溶媒を総合的にシステムとして捉えて初めて解明できる種々の問題においてブレイクスルーが期待できる。

2.2.5.1.5. 今後の展望

有力な理論解析法が出揃い、種々の秩序化過程や蛋白質変性のメカニズムの解明において大きな進展を見た。生命に何故水が必要なのかという問いに対する一つの解答が得られた。今後は、新薬設計過程の論理化などの実践的な問題とも取り組みたい。また、生体分子の高次構造の予測法を開発すると共に、生体分子構造や溶媒環境を操作して、高次構造

から発現する機能を制御・設計するための方法論の構築を目指す。

2.2.5.1.6. 主要論文リスト

- 1) T. Yoshidome, M. Kinoshita, S. Hirota, N. Baden, and M. Terazima, “Thermodynamics of Apoplastocyanin Folding: Comparison between Experimental and Theoretical Results”, *Journal of Chemical Physics*, 128(22), 225104(1-9) (2008).
- 2) H. Oshima, T. Yoshidome, K. Amano, and M. Kinoshita, “A Theoretical Analysis on Characteristics of Protein Structures Induced by Cold Denaturation”, *Journal of Chemical Physics*, 131(20), 205102(1-11) (2009).
- 3) T. Yoshidome, Y. Harano, and M. Kinoshita, “Pressure Effects on Structures Formed by the Entropically Driven Self-Assembly: Illustration for Denaturation of Proteins”, *Physical Review E*, 79(1), 011912(1-10) (2009).

2.2.5.2. ATP 駆動蛋白質の機能発現における水の役割

2.2.5.2.1. 研究の概要

生体内には、細胞内に張り巡らされている「微小管」をレールのように使って必要な栄養素を目的地まで運んだり、筋肉を収縮させたり、細胞内から不要な物質を排出したりするナノバイオマシンと呼ばれる蛋白質が数多く存在する。ATP の加水分解によって得られる自由エネルギーを「仕事」に変換して作動すると言われているが、その具体的なメカニズムは謎に包まれている。本研究では、3次元積分方程式論や、大きな蛋白質や蛋白質の複合体を扱うことができる独自の方法論（分子性流体用積分方程式論と形態熱力学的アプローチの統合型）を武器として、ATP 駆動蛋白質の機能発現機構の解明を進めている。従来の研究とは異なり、水が主役であり、水分子の並進移動に起因したエントロピー効果に特に重点を置いている。現在は、以下の 4 つの例題と取り組んでいる；(1)F-アクチン上におけるミオシン（リニヤー分子モーター）の一方向移動；(2)F₁-ATPase（ロータリー分子モーター）の回転のメカニズム；(3)ABC トランスポーターの多剤排出作用；(4)シャペロニンのポリペプチドの取り込みと折り畳みを終えた蛋白質の排出。

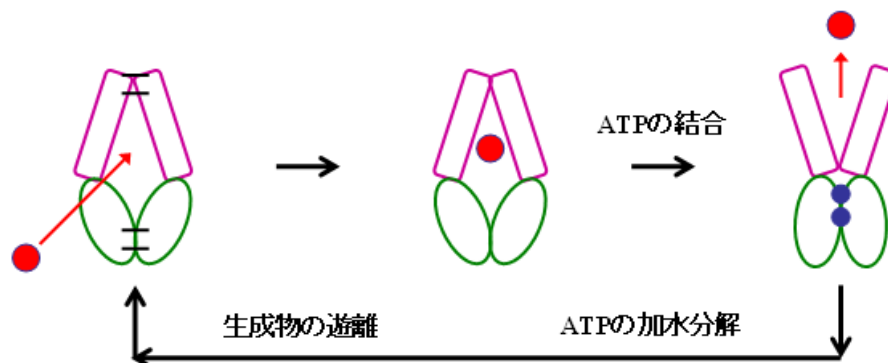
2.2.5.2.2. 重点領域研究としての意義および社会的重要性

機能が明らかな約 3000 種の蛋白質のうち、450 種は ATP 駆動蛋白質であり、その機能は実に多岐にわたる。細胞内に張り巡らされている「微小管」をレールのように使って必要な栄養素を目的地まで運んだり、筋肉を収縮させたり、細胞内から不要な物質を排出したりしており、ナノバイオマシンと呼ばれている。いずれも、「ATP との結合⇒ATP の加水分解⇒分解生成物の遊離」というサイクルを繰り返すという点で共通している。その機能発現機構を解明することができれば、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が可能になるものと期待される。まさに、次世代のナノバイオテクノロジーを切り開くための最先端の研究課題である。

2.2.5.2.3. 平成19年度以降の主な成果

生体高分子容器内への大きな溶質分子の挿入は、生体系における基本プロセスの一つである。3次元積分方程式論を用いて、溶媒粒子集団中における球状大粒子と円筒状容器間の平均力のポテンシャルの空間分布を計算した。かなり広範囲の大きさを持つ大粒子が、溶媒粒子の並進移動に起因するエントロピー力によって容器内に挿入され、ほぼ中央にある狭い空間内に（容器内表面に接触しないで）強く閉じ込められることが分かった。同様の解析をF-アクチン上におけるミオシンに対して行った。その結果、ミオシンはF-アクチンと接触した狭い空間内に強く拘束されることが分かった。また、「ミオシンは、ATPまたはADP+Piと未結合のミオシンに対して形成されるポテンシャル場と、ATPまたはADP+Piとの結合によって幾何学的形状が変化したミオシンに対して形成されるそれを行き来することによって、一方向への移動を実現する」という物理描像を得た。

F₁-ATPaseは、 γ -subunitを取り囲むように3個の α -subunitと3個の β -subunitが交互に並んだ構造を持つ。実験結果によると、3個の β は、各々「ATPのアナログと結合して閉じた構造(β_{TP})」、「ADPと結合して閉じた構造(β_{DP})」、「何も結合していない開いた構造(β_E)」をとる。 γ は非対称性の高い幾何学的形状を持つ。我々は、Group I(β_E 、 γ 、 α_E 、 α_{TP})、Group II(β_{TP} 、



ABC トランスポーターの多剤排出作用

γ 、 α_{TP} 、 α_{DP} ）、Group III(β_{DP} 、 γ 、 α_{DP} 、 α_E)のみを取り出し、各々の水和エントロピー S (負の量)を計算した。 $|S|$ はGroup毎に大きく異なっていた。水のエントロピー損失を最小に抑えるためには、3個のGroupに対してパッキングの不均一性を生じさせる必要があり、この不均一性が、F₁-ATPaseの回転を生み出す鍵となっているという新概念を提出した。

2.2.5.2.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

数多くの研究者の長年にわたる努力にも拘わらず、ATP駆動蛋白質の機能発現機構は一向に見えてこない。その理由は、水を脇役としか見ていないからである。「分子モーターは、ATPに蓄えられた化学エネルギーを使って、水の粘性抵抗に逆らって仕事をする」という描

像が主流となっている。つまり、水はむしろ分子モーターの動きを妨げており、それに対抗するためにATPが必要であると考えられている。このような従来の観念にはとらわれない斬新な考え方を導入しない限り、ブレイクスルーは期待できない。我々の概念では、ATP駆動蛋白質の機能発現において水が主導権を握っている。この概念と強力な理論的手段によって、すでに教科書を根本的に塗り替えるいくつかの成果が得られており、今後の進展が大いに期待される。

2.2.5.2.5. 今後の展望

F-アクチン上におけるミオシンの一方向移動およびF₁-ATPaseの回転のメカニズムに対しては、すでに基本的な骨格が出来上がっており、今後は、詳細な理論解析と実験研究者との連携によって、それらのメカニズムの解明に決着をつける。ABCトランスポーターの多剤排出作用や、シャペロニンのポリペプチドの取り込みと折り畳みを終えた蛋白質の排出のメカニズムの解明とも取り組む。上で述べたように、かなり広範囲の大きさを持つ大粒子が容器内に挿入されることをすでに明らかにしており、「多剤性」が説明できつつある。挿入過程のみならず、排出過程と取り組む必要がある。

2.2.5.2.6. 主要論文リスト

- 1) M. Kinoshita and M. Suzuki, “A Statistical-Mechanical Analysis on the Hyper-Mobile Water around a Large Solute with High Surface Charge Density”, *Journal of Chemical Physics*, 130(1), 014707(1-11) (2009).
- 2) M. Kinoshita and T. Yoshidome, “Molecular Origin of the Negative Heat Capacity of Hydrophilic Hydration”, *Journal of Chemical Physics*, 130(14), 144705(1-11) (2009).
- 3) K. Amano and M. Kinoshita, “Entropic Insertion of a Big Sphere into a Cylindrical Vessel”, *Chemical Physics Letters*, 488, 1-6 (2010).

2.2.5.3. 斬新な蛋白質立体構造予測法の構築

2.2.5.3.1. 研究の概要

蛋白質のアミノ酸配列からその立体構造（天然構造）を予測可能にするためには、最も複雑な分子構造を有する蛋白質と最も複雑な統計的振る舞いを呈する液体である水の相関を的確に記述する必要がある。立体構造予測の問題は60年来未解決の超難問であり、現在までに腕に覚えのある研究者が数多く挑戦したが、次々と敗退して行った。その主な理由は、決定的に重要な水の役割を的確にかつ効率良く考慮できる液体論に根ざした方法論を持ち合わせていなかったことにある。本研究の特徴は、積分方程式論（液体の精密な統計力学理論）の育成を軸として、水に対して現実的な分子モデルを適用し、蛋白質折り畳みのメカニズムを解明している点にある。蛋白質の水和の熱力学量を高精度でかつ高速で計算するための新しい形態熱力学的アプローチの開発や、水分子の並進移動に起因するエントロピー効果の重要性に着目している点などにも斬新さが見られる。さらに、蛋白質立体

構造予測法の開発に向けて、形態熱力学的アプローチと生物情報科学的なアプローチを統合し、実践的な立体構造予測ツールを構築しつつある。

2.2.5.3.2. 重点領域研究としての意義および社会的重要性

ヒトゲノム計画によって、人体内で合成される約3万種類の蛋白質のアミノ酸配列が明らかになった。各々の蛋白質は固有の立体構造（天然構造）に折り畳み、その立体構造に基づいた独自の機能を発揮している。ポストゲノム計画の中心課題は、それらの蛋白質の立体構造と機能を明らかにし、蛋白質を主役とする生命現象発現のメカニズムを解明することである。この課題が解決すれば、新しい機能を持つ人工蛋白質の創製も可能となる。

2.2.5.3.3. 平成19年度以降の主な成果

蛋白質の立体構造予測に不可欠な水和自由エネルギーの精密計算に対して、水の並進エントロピーに重点を置き、形態熱力学的アプローチを適用した独特の方法を開発した。それにより、所要計算時間が従来法を用いた場合の約1万分の1に短縮された。この成果を応用し、蛋白質立体構造予測用の自由エネルギー関数を構築した。上記の方法を用いると、パーソナルコンピュータで蛋白質の一つの立体構造当たり1秒足らずで自由エネルギー関数が計算できる。現在までに50種類以上の蛋白質に対し、各々天然構造と500-2500通りのデコイ（偽物）構造の中から、自由エネルギー関数が最低になる構造として天然構造を射当てるテストを実行し、すべてに対して成功を収めた。これは世界最高の成績である。「現代科学における最も難しい問題の一つ」とされる蛋白質立体構造予測法の確立に光明を投じた。

2.2.5.3.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

多くの研究者は、水-蛋白質系に全原子モデルを適用し、原子間の静電相互作用やレナード・ジョーンズ相互作用などを考慮して、計算機シミュレーションによって立体構造空間を探索するという方法を採用する。しかし、膨大な計算労力が深刻な問題となる。水を連続体として副次的に扱う方法もあるが、「分子集団」としての水の重要な役割が正しく考慮できない。さらに大きな問題は、観測される結果が、用いる蛋白質用力場パラメーターによって大きく変わり得ることである。そのため、現在では情報科学的方法が主流となっている。しかしながら、最良と判断される立体構造を特定する最終段階で行き詰る傾向がある。水の効果を考慮していないし、折り畳み機構の解明にもつながらない。本研究では、上記2通りの方法のいずれとも異なる極めて独創的な方法を展開している。



蛋白質の天然構造の例

2.2.5.3.5. 今後の展望

構築した自由エネルギー関数とその計算方法を生物情報科学的手法に組み込み、アミノ酸配列から立体構造を予測できる実践的ツールの開発を目指す。また、レセプターとリガンドが結合した場合に生じる自由エネルギー低下（結合自由エネルギーと呼ぶ）の計算法への拡張とも取り組む。「レセプターに対してアミノ酸置換をほどこした場合に、結合自由エネルギーがどのように変化するか」を定量的に予言することができる方法論を確立する。これによって、ある特定のリガンドとの結合選択性を論理的に高めることが可能となる。

2.2.5.3.6. 主要論文リスト

- 1) M. Kinoshita, “Molecular Origin of the Hydrophobic Effect: Analysis Using the Angle-Dependent Integral Equation Theory”, *Journal of Chemical Physics*, 128(2), 024507(1-14) (2008).
- 2) 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(4), 950-961 (2009).
- 3) S. Yasuda, T. Yoshidome, H. Oshima, R. Kodama, Y. Harano, and M. Kinoshita, “Effects of Side-Chain Packing on the Formation of Secondary Structures in Protein Folding”, *Journal of Chemical Physics*, 132(6), 065105(1-10) (2010).

2.3. 光エネルギー重点複合領域

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
原子エネルギー研究分野
粒子エネルギー研究分野
エネルギー機能変換研究部門 レーザー科学研究分野
エネルギー利用過程研究分野 複合化学過程研究分野
附属エネルギー複合機構研究センター

光エネルギーは様々な基盤研究、応用研究、さらには産業界応用など、実に幅広い分野で利用可能なエネルギーの 1 形態であり、エネルギー理工学の研究拠点としての使命を担う本研究所にとっても重要な研究領域である。光エネルギーの中でも特に、本重点領域研究における重要なツールであるレーザーの持つ特徴としては、他の類似する量子ビーム（粒子ビームなど）では実現がほぼ不可能な位のずば抜けた単色性、局所的エネルギー密度、および時間分解能が挙げられ、従って光エネルギーは極めて高品質である。また、光エネルギーは非接触の状態で物質と相互作用し、また、光の波長やエネルギー、時間幅、偏光特性などによって相互作用が大きく変化することから、極めて高機能であるとも言える。本重点領域研究では、光しか持ち得ないこれらの特徴を十分に活かし、科学基盤技術の創出とその応用、さらには実用化を念頭に、「高機能光エネルギー生成・利用研究」の拠点形成を目指している。そのために重要なことは、先端的レーザー光源の開発と新奇なレーザー誘起現象の発見およびそのダイナミクス解明であり、本重点複合領域ではこれらがバランス良く進められている。

すなわち、当該領域の基幹装置として広帯域波長可変・偏光可変自由電子レーザー (KU-FEL) と位相制御機能を備えた高強度超短パルスレーザーの開発・高性能化を引き続き実施し、学際的共同研究を目指した本研究所独自の先端的ツールとして機能させる。GCOE においては、最先端重要研究クラスタに積極的に参加し、フェムト秒レーザーによる固体表面のナノ加工、FEL を用いた種々の分析、新奇超高速現象の解明とその応用、固体/液体系におけるレーザープロセッシングやバイオ技術への応用等の研究を行う。

2.3.1. 中赤外域自由電子レーザー装置の開発とその利用

2.3.1.1. 研究の概要

KU-FEL と呼ぶ赤外域自由電子レーザー装置を完成させ、平成 20 年 3 月 12.4 μm の波長にて初のレーザー発振に成功した。その後、電子ビームの品質の向上を行い、平成 20 年 5 月には 13.2 μm の波長にて、レーザー出力の飽和を観測し、中赤外自由電子レーザー装置の開発について、初期の目標を達成した。これに伴い、自由電子レーザーのビーム評価を行い、

平均出力 5mW (1pps 時)、ピーク出力 3MW、バンド幅約 1%のレーザーである事を確認した。一方、装置開発としては、平成 20 年度から波長域の拡大やレーザーの安定発振といった高度化の段階に移るとともに、利用実験に向けたビーム伝送系の設置や、施設営繕費用を受け、利用実験室の整備を開始した。

FEL 装置の高度化研究として、電子逆流現象抑制に効果のある陰極材料の検討を進めるとともに、入射高周波の位相制御法の確立や電子ビーム位置モニターの開発を進めている。FEL 利用に関しては、中赤外レーザー光による、物性研究を目指し、フォトルミネッセンス実験装置の整備を行っている。更に、近年注目を集めている THz 領域のコヒーレント光源の提案を行い、その概念設計ならびにシミュレーションによる評価を行った。また従来より進めてきたバルク高温超伝導体スタガードアレイ型アンジュレータの研究を行うとともに、高エネルギー加速器研究機構の支援を受けた光陰極型高周波電子銃の開発や、所外グループとの共同研究による、レーザー逆コンプトン散乱ガンマ線の発生とその利用に関する研究を行ってきている。

また、文理融合研究として、生存基盤研究ユニットサイト型研究に参画し、青森県での大型原子力施設の経済効率に関する研究や、有機太陽電池の普及に関する研究を進めた。

2.3.1.2. 重点複合領域研究としての意義および社会的重要性

本研究課題が目標にしている中赤外から遠赤外域の FEL は、選択的な分子振動・回転励起や、化学結合の選択的な切断、多光子吸収等を利用した化学反応を引き起こす事が可能であり、バイオエネルギー重点複合領域研究との連携により、自然エネルギーの高効率利用が可能な機能材料の開発や生物機能変換に関する研究等を強力に推進するリソースと考えられる。近年の地球温暖化問題や、エネルギーセキュリティの観点から、脱化石燃料・低炭素化社会の実現が望まれており、本研究の推進により、高効率太陽電池や、高性能電池、石油を使わない物質合成等が可能になる。平成 22 年度から開始される次期中期計画では、本研究領域とバイオエネルギー研究領域を一体化し、新たに光・ナノエネルギーサイエンス研究領域として融合を進め、更なる自然エネルギー開発研究の推進を行うが、本中赤外 FEL 施設は、その融合研究の一つの拠点として機能する。

更に自由電子レーザー (FEL) 自体は、大出力・高効率・連続的波長可変性という特長から、現在播磨において X 線 FEL 装置の建設が進んでいるが、本研究における要素技術開発や、FEL の物理等での寄与を行っており、生物化学、生医学、タンパク質構造解析等の生命科学分野や材料科学等、広範な学術分野に飛躍的な進展をもたらし、社会的にイノベーションをもたらすものと期待されている。

一方、レーザー逆コンプトン散乱ガンマ線を用いた非破壊同位体検出に関する研究を進めており、核燃料サイクルや核の安全保障といった、原子力エネルギーを支える基盤技術と言える。

2.3.1.3. 平成 19 年度以降の主な成果

(a) FEL の発振

KU-FEL でのレーザー初発振を目指して、平成 19 年度から実験を開始した。この発振実験に用いた電子ビームのパラメータを表 2.3.1 に示す。電子エネルギーは 25 MeV を選んだ。これは、電子ビームが低エネルギーであるほど FEL ゲインは高いものの、レーザーの発振波長は長くなり、回折損失と呼ばれる真空ダクトでの光損失が大きくなるため、シミュレーションにより実効ゲインの最も大きくなる電子エネルギーやその他のビームパラメータを選んでいる。バンチ長は、180 度アークでのバンチ圧縮により 2 ps 程度になっている。高周波電子銃のカソード材料は、当初よりディスペンサータイプのタングステンであったが、ピーク電流がどうしても 10 A から増えず、増幅実験は難航したが、平成 19 年秋に LaB₆ に変更した結果、ピーク電流 17 A の電子ビームを生成することが可能となった。この値にしても、リニアック型 FEL では低い値であり、その理由は、熱陰極型高周波電子銃の backbombardment 現象に起因している。

表 2.3.1 レーザー増幅実験時の電子ビームパラメータ

エネルギー	24 MeV
エネルギー分散	0.8 %
バンチ長(rms)	0.5 ps
バンチ電荷	20 pC
ピーク電流	17 A
平均電流	115 mA
マクロパルス長	5.5 μ s
規格化エミッタンス σ_x 、 σ_y	3.5π mm mrad

ビーム電流に不満が残るものの、次章で述べる入射高周波の波形制御技術の確立と位相制御システムの開発により、電子ビームのマクロパルス長は 5.5 μ s に達しており、レーザー光の増幅が十分望める条件である。そこで、電子ビームのコンディショニングと光共振器のパラメータ探索を繰り返すことにより、図 2.3.1 のような自由電子レーザーの発振とレーザー増幅の飽和に成功した。増幅光の波形の立ち上がりから FEL ゲインは 33 %で、立下りから共振器損失 11 %という値を得た。図 2.3.2 にレーザー光のスペクトルを示す。中心波長 13.2 μ m を持ち、バンド幅約 1%のレーザー光が得られている事が分かる。現状で、FEL の発振可能波長域は 12 から 14 μ m であり、今後の利用研究のためには、更なる広帯域化が必要である。また、レーザー出力の安定度も、30 分の測定で 14% (RMS) であり、更なる安定化が要求されている。表 2.3.2 に現状の FEL 光パラメータを示す。

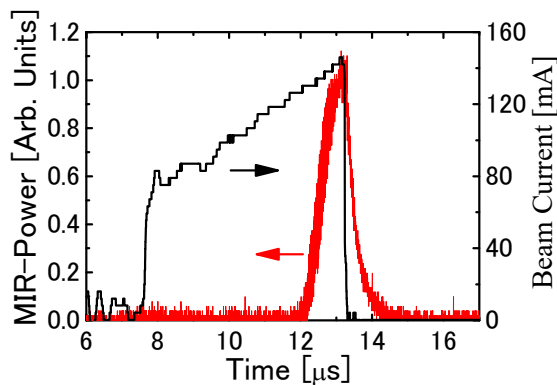


図 2.3.1 電子ビーム波形と FEL 光の出力波形

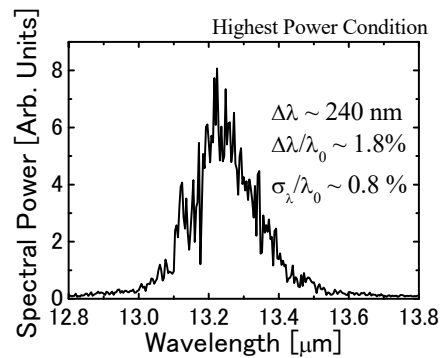


図 2.3.2 FEL 光のスペクトル

表 2.3.2 FEL 光のパラメータ

発振波長	12-14 μm
バンド幅 (RMS)	-1%
パルスエネルギー	5 mJ
ピークパワー	5 MW
平均パワー	5 KW
パルス幅 (マクロパルス)	1 μs
コヒーレント長 (FWHM)	200 mm
	350 fs
安定度 (RMS)@30 分	14%

(b)入射高周波の波形制御と位相制御システム開発

熱陰極 RF Gun では、熱陰極から引き出された電子が加速、逆加速された後、陰極に衝突し、陰極を加熱する Back-bombardment 現象により、電子ビーム電流がマクロパルス中で時間と共に増加する。このビーム電流増加は高周波共振空洞中の高周波負荷の増大として考えられ、その絶対値の変化が空洞電圧の低下を、位相角の変化が電圧位相の変

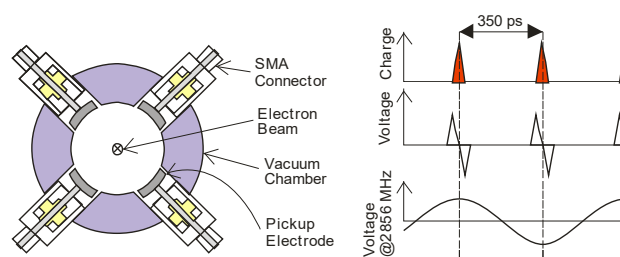


図 2.3.3 ボタン電極型ビーム位置モニターと観測信号

化を引き起こす。陰極から引き出された電子は共振空洞内に誘起されている高周波電圧の特定の位相に集群化(バンチング)される為、高周波電圧位相

の変化が電子バンチ位相の変化を引き起こす。そこで、この位相の変化を加速器に設置した電極から読みだし、これを高速の移相器にフィードフォワードする事により、一定に保つことが可能と考えられる。そこで、図 2.3.3 のような、ボタン電極型ビーム位置モニタ(BPM)の出力を用いて、図 2.3.4 にあるような制御回路を開発した。基準発振器から出力された高周波信号は電圧制御型移相器、前段増幅器を経て大電力高周波増幅器 Klystron に送られ、約 10MW まで増幅された後、熱陰極 RF Gun に投入され、電子ビームの生成・加速に用いられる。生成された電子ビームは直後に置かれた BPM に入射され、高周波電圧を誘起する。誘起された高周波信号は位相検出器により基準信号と位相比較される。また、実験では、電子ビーム負荷変動に起因する位相変動を正しく計測する為、RF Gun に投入される高周波電力の位相変動が生じない様、前段の電圧制御型移相器により調整した。

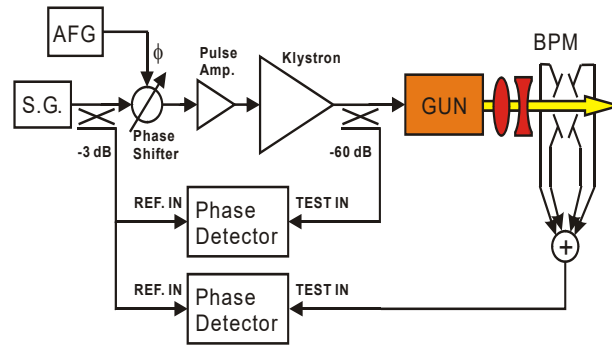
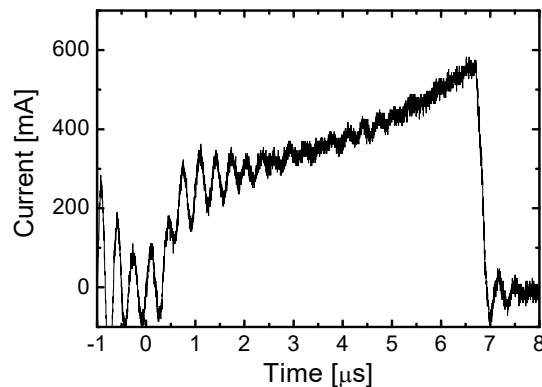
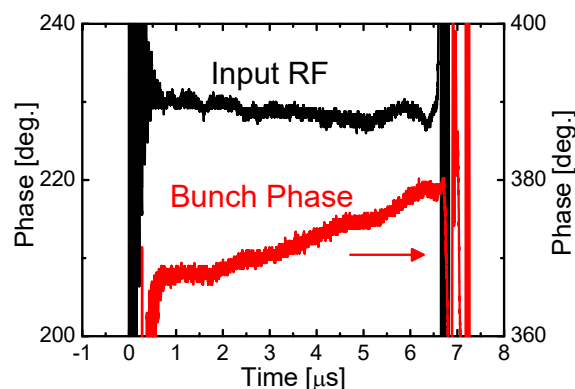


図 2.3.4 位相制御システムの概略図



(a)電子ビーム電流波形



(b)入力 RF 位相と出力バンチ位相の時間変化

図 2.3.5 電子バンチ位相変動

図 2.3.5 に電子ビームの電流波形(a)と移相の時間変化の測定結果(b)を示す。図 2.3.5(a)のように、電子ビーム電流がマクロパルス中で大きく変化する場合に、図 2.3.5(b)のように、電

子銃に投入されている高周波の位相は一定であるに関わらず、電子バンチ位相の大きな変化が見られた。観測されたマクロパルス中でのバンチ位相の変化は $13.5 \text{ 度}/6 \mu\text{s}$ と非常に大きく、加速器の運転、FEL 発振に大きな影響を与えると考えられる。そこで電子銃へ投入される高周波の位相を一定に保つ為に用いられてきた電圧制御型移相器を用いて電子バンチ位相の安定化を行った。その結果を図 2.3.6 に示す。投入高周波電力に位相変化を持たせることによって、電子バンチ位相変化をほぼ 2 度以内に抑える事に成功した。

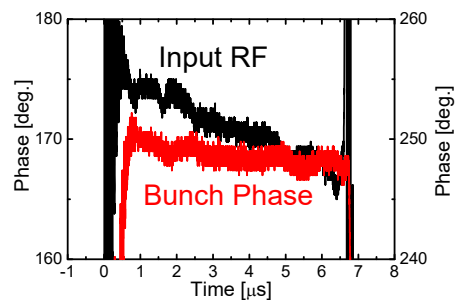


図 2.3.6 電子バンチ位相安定化結果

(c) レーザー逆コンプトン散乱ガンマ線を用いた非破壊同位体検出に関する研究

核燃料サイクルや核安全保障といった原子力エネルギーの根源的問題に対し、核物質の非破壊による定量測定が望まれており、同位体を非破壊で検査する技術として、我々はレーザー逆コンプトンガンマ線（以下、LCS ガンマ線）による光核共鳴蛍光散乱（NRF）による測定法を研究開発している。NRF とは、ある原子核に対し、その核種に固有の励起エネルギーと等しいガンマ線が入射された場合、ガンマ線が原子核に効率良く吸収され、続けて同じエネルギーのガンマ線を放出する現象である。この放出されるガンマ線は、原子核に固有のものであり、これを計測することで物質の核種を同定できる。この場合、励起エネルギーが数 MeV の範囲にあるため、必然的にプローブとして数 MeV のエネルギーのガンマ線を用いることになる。このような高エネルギーのガンマ線の物質透過力は高いため、数 cm の厚さの鉄や鉛を透過して、背後の物質の検知が可能という傑出した特長を有する。

ただし、この優れた非破壊計測技術の実現には、任意のエネルギーを有するガンマ線を自在に生成する技術が必要であり、我々は LCS ガンマ線を用いている。LCS ガンマ線は、加速器で加速された電子とレーザーの散乱によって生成され、準単色でエネルギー可変という他のガンマ線に無い特徴を有する。

本手法の有効性を確認するために、15mm 厚の鉄で囲まれた 20x20mm の鉛（模擬核物質 52.4%Pb-208）に対して、1 次元イメージング測定を試みた。実験には、産業技術総合研究

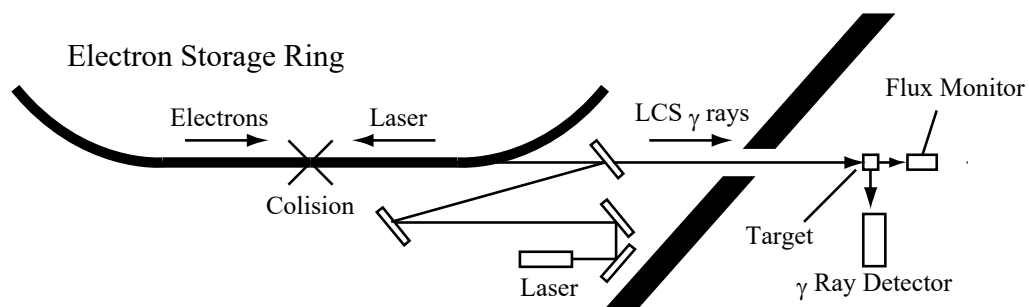


図 2.3.7 産総研 LCS ガンマ線施設における NRF 測定

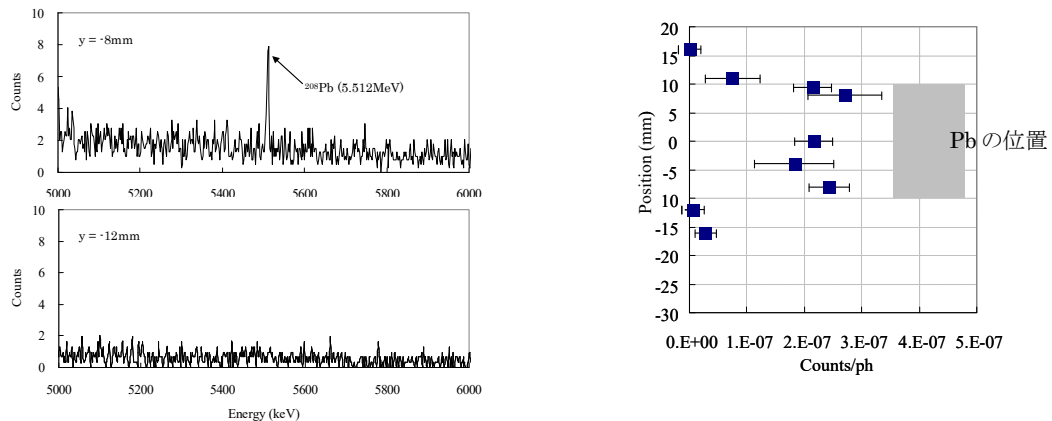


図 2.3.8 産総研における鉄中の Pb-208 の 1 次元イメージングの測定結果. は測定した NRF γ 線スペクトル. がある場合には、Pb-208 固有の γ 線が測定でき（左上）、無い場合には測定できない（左下）. 5mm の鉄に囲まれた 20mm の鉛の測定に成功（右）.

所（茨城県つくば市）の放射光施設 TERAS に設置された LCS ガンマ線装置を用いた（図 3.1.7）。Pb-208 の励起状態に等しい 5.5MeV に逆コンプトン γ 線の照射を行い、鉛が隠蔽された位置をスキャン測定した。

図 2.3.8 に実験結果を示す。厚さ 15mm の鉄を透過して、5.512MeV の Pb-208 のレベルの有無が、鉛 208 の有無に依っている事が分かる。本実験は、厚さ 1.5cm の鉄等の遮蔽を透過して内部に隠された任意の核種が測定可能であることを世界で初めて実証し、画像化したものである。

2.3.1.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

中赤外域（5-20 μm 、波数 2000-500 cm^{-1} ）は、現在 OPO レーザー或いは差周波法によって得られるが、その波長帯は 3-4 μm に留まっている。一方これより長波長側では CO₂ レーザーが用いられているが、その波長は 10.6 μm で固定であり、これ以外には殆ど実用的なレベルに達しているとは言いがたく、この波長領域は未開拓な部分が多い。これに対し、中赤外域自由電子レーザーは、国内では大阪大学自由電子レーザー研究施設において、5-20 μm の波長範囲で稼動しており、医療応用に特化した研究を行っている。一方、海外においてはオランダ FOM 研の共用の FELIX 施設があり、4-250 μm の波長帯を利用者に提供し bio-medicine、bio-chemistry、bio-physics に関する研究を展開している。これらは比較的大規模な施設を形成しているが、本研究課題では安価・小型化を目標に、高周波電子銃の高性能化を始め各種の要素開発を行っている点に特徴を有している。また応用研究に関しても自然エネルギーを利用した生物機能変換研究のようなエネルギー関連の研究を行う点に特徴を有する。

また、原子力エネルギーの安心・安全な利用を確保する技術である、NRF による同位体

検出法に関しては、米国 MIT において、制動放射ガンマ線を用いた研究がなされている。しかしながら、連続スペクトルを有する制動放射ガンマ線に対し、我々の用いている LCS ガンマ線は単色度が高く、SN 比の点で圧倒的に有利である。実際、MIT のグループも最近の論文において、実用レベルの強度での使用を考える場合には、我々のような単色度の高いガンマ線源を用いる必要のある事を認めている。

2.3.1.5. 今後の展望

本研究課題でこれまで整備して来た中赤外自由電子レーザー (KU-FEL) 装置を用いて、波長域 5 から 15 μm での FEL 発生を行い、光・ナノエネルギーサイエンス研究領域における融合研究の拠点として機能する。これは、将来的には太陽エネルギーを起源とする、再生可能エネルギー開発に繋がる研究の展開を期待している。一方、FEL 光源としては、利用研究に供与できる FEL の安定化や狭帯域化等の高度化や、THz 光発生といった新しい光源開発を行う事で、X 線 FEL の発展等に寄与する。また、逆コンプトン散乱による準単色のガンマ線による同位体検出技術について、実用化を睥んだ研究を展開する。これにより安全・安心な原子力エネルギーの推進に寄与可能である。更には、社会科学との融合を図り、これらの理工学的な研究成果を社会に実装していくための基盤固めを行っていく。

2.3.1.6. 主要論文リスト

- 1) Heishun Zen, Toshiteru Kii, Kai Masuda, Hideaki Ohgaki and Tetsuo Yamazaki, "Development of IR-FEL Facility for Energy Science in Kyoto University", Infrared Physics and Technology, Volume 51, Issue 5, pp.382-385(2008).
- 2) H. Ohgaki, T. Kii, K. Masuda, H. Zen, S. Sasaki, T. Shiiyama, R. Kinjo, K. Yoshikawa, T. Yamazaki, "Lasing at 12 μm Mid Infrared Free Electron Laser in Kyoto University", Jap. Jour. of Appl. Phys., Vol.47, No.10, pp.8091-8094(2008).
- 3) N. Kikuzawa, R. Hajima, N. Nishimori, E. Miinehara, T. Hayakawa, T. Shizuma, H. Toyokawa, and H. Ohgaki, "Nondestructive Detection of Heavily Shielded Materials by Using Nuclear Resonance Fluorescence with a Laser-Compton Scattering γ -ray Source", Applied Physics Express 2 (2009) 036502.
- 4) T. Hayakawa, H. Ohgaki, T. Shizuma, R. Hajima, N. Kikuzawa, E. Minehara, T. Kii, and H. Toyokawa, "Nondestructive detection of hidden chemical compounds with laser Compton-scattering gamma rays", Rev. of Science Instrum., vol. 80, (2009) pp.045110-1-5.
- 5) H. Zen, T. Kii, K. Masuda, R. Kinjo, K. Higashimura, K. Nagasaki, H. Ohgaki, "Beam Energy Compensation in a Thermionic RF Gun by Cavity Detuning", IEEE transaction on nuclear science, Vol. 56, No. 3, JUNE 2009, pp.1487-1491.
- 6) R. Hajima, N. Kikuzawa, N. Nishimori, T. Hayakawa, T. Shizuma, K. Kawase, M. Kando, E. Minehara, H. Toyokawa and H. Ohgaki, "Detection of radioactive isotopes by using laser Compton scattered γ -ray beams", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 608 (2009) S57-S61.

2.3.2. 超短パルス高強度レーザーの開発と先端的物質制御への応用

2.3.2.1. 研究の概要

光エネルギー重点複合領域の研究目標は、レーザーのみが備えている潜在的な光エネルギー機能を探索し、高品質・高機能な光エネルギーの発生・制御・利用によって次代の科学技術基盤を創出することである。当研究グループでは、高強度フェムト秒レーザーの高機能化の研究、同レーザーでのみ発現できる原子・分子の非摂動論的非線形相互作用の研究、および固体表面における超高速高密度励起現象の探索・解明に関する研究を行ってきた。

レーザー開発では、稼働中の高強度フェムト秒 (fs) Ti:sapphire レーザー増幅装置(尖頭出力 1 TW、パルス幅 $\Delta\tau = 40$ fs、10 Hz)について、繰返しパルス出力の高安定化を行うと共に、精密なポンプ・プローブ実験のため、偏光特性と時間遅延特性の精密自動制御装置を開発し、原子・分子との非摂動論的非線形相互作用の研究に応用した。また、固体表面のナノプロセッシングの研究に応用するために開発した $\Delta\tau = 100$ fs の Ti:sapphire レーザー増幅装置について、出力の短パルス化と高出力化を行うことにより、 $\Delta\tau = 50\sim 100$ fs で、尖頭出力 80~100 GW の高品質な空間ビーム特性を備えた fs パルスを出力できるように高性能化した。

さらに、新規の基幹装置として、モード同期レーザー発振パルスと増幅パルスの搬送波包絡線位相(CEP)を安定化でき、 $\Delta\tau = 7$ fs 以下の高強度なサイクルパルス(1 kHz)を発生する超短パルスレーザー増幅装置を設置し、極端紫外域のコヒーレントアト秒パルス発生装置の開発を進めた。以上により、先端的物質制御・計測手法の研究開発に応用する基幹レーザー装置整備を実現し、第1期中期計画の目標を達成した。

超短パルス高強度レーザーを用いた原子・分子相互作用の研究では、平成 16 年に当グループで初めて実証した高次高調波発生(HHG)による分子の配向・回復ダイナミクスの物理過程を解明するための研究を継続した。高強度 fs レーザーで過渡的に配向させた分子の時間発展を HHG によって実時間測定できるポンプ・プローブ法を発展させると共に、Bielefeld 大学(独)の理論グループとの共同研究によって構築した理論モデルを用いて、配向させた N_2 、 O_2 、 CO_2 分子からの HHG の物理過程の詳細を明らかにした。同時に、HHG の時間発展信号と角度分布の測定結果を基に、最高被占分子軌道(HOMO)を仮定せずに単一分子からの HHG 分布を再構成する手法を開発した。さらに、配向分子と HHG 過程を応用して、高時間・高空間分解能を備え、かつ汎用性に富む分子回転温度測定法を開発した。

固体表面相互作用の研究では、平成 14 年に当グループで発見したダイヤモンド状炭素(DLC)等の硬質薄膜表面のナノ周期構造の生成について、100 fs のレーザーを励起源として物理過程の解明とモデルの構築を目指して研究を継続した。従来の結果から、表面での局所的な電磁相互作用現象を予測し、パターン付き表面や完全平坦面を持つ DLC と半導体について系統的な研究を行った。その結果、レーザー照射で生成する自由電子によって過渡的に表面プラズモン・ポラリトン(SPP)が励起され、表面に周期的な増強近接場が形成されてナノメートル周期の局所的なアブレーションが誘起されることを突き止めた。同知見を

基に、近接場・SPP を基礎とするナノ構造形成モデルを構築し、その有効性を検証してきた。

2.3.2.2. 重点領域研究としての意義および社会的重要性

本課題では、当該重点複合領域研究の目標である次代の共通基盤の開発に資するため、超短パルス高強度レーザーが備えている代替不可能な機能を高度化し、極限時間・超高電磁場域でのレーザーと物質との相互作用現象を探索・解明・利用することにより、レーザーの潜在的な機能を探索・実証することを目指してきた。

超短パルス高強度レーザーは、光・電子技術、ナノ物質・材料科学、表面科学、エネルギー科学等、広範な先端科学技術分野において、先端的研究開発を先導するための基盤的ツールとして広く利用されるようになっている。同レーザーを高度化すると共に、その潜在的な機能を探索・発見、実証することは、先端科学技術の革新を一層促進すると共に、新規分野の開拓に大きく貢献する。

原子・分子の非線形相互作用に関する研究は、物質の新機能を探索・発見し、その制御によって新たな機能物質を開拓するための基礎として重要である。気相分子の空間配向とその高感度検出に関する研究により、レーザーによって分子の空間自由度を制御・実時間検出できるようになった。また、同手法を応用して分子に関する新規の先端計測手法が開発された。これらの成果は、分子科学と関連分野に新たな研究手法を提供すると共に、新物質機能の発見や制御手法の開発に応用・発展させることができる。

超短パルス高強度レーザーによるナノ周期構造生成の発見とその物理過程の解明によって、レーザーによる初めてのナノプロセッシング手法開発への展望が拓かれつつある。この研究では、物質のナノ領域での相互作用を制御できれば、回折限界を超えた微細加工が可能であることを実証してきた。レーザーによる初めてのナノプロセッシングという新たな共通基盤の構築が期待できる。

2.3.2.3. 平成 19 年度以降の主な成果

1. 超短パルス高強度レーザーの開発

既設の $\Delta\tau = 40$ fs、尖頭出力 1 TW の Ti:sapphire レーザー増幅装置について、モード同期発振器、および 3 段の増幅器のための励起源を更新することにより、パルス毎の出力変動を大幅に低下させ、高安定な fs パルス出力を実現した。この出力パルスの偏光特性と時間遅延特性の自動制御を行うことによって精密なポンプ・プローブ実験装置を開発し、原子・分子との非摂動論的非線形相互作用の探索・解明を進めた[1-5]。

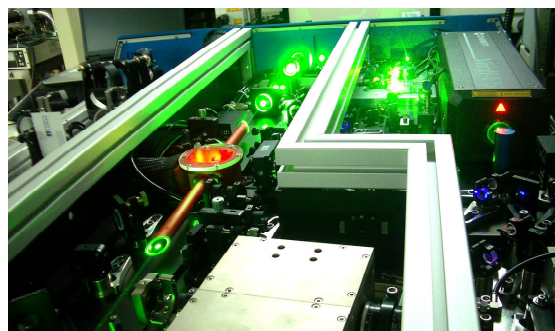


図 2.3.9 サイクルレーザーパルス増幅装置 (パルス幅 < 7 fs, 尖頭出力 ~ 0.1 TW, 1 kHz).

固体表面のナノプロセッシングの基礎研究に応用するために開発した $\Delta\tau = 100$ fs の Ti:sapphire 増幅器の励起源として、高品質な空間ビーム特性と伝搬特性を備えた Q スイッチ Nd:YAG レーザーを導入した。fs レーザーパルス出力と空間ビーム特性のパルス毎の再現性が著しく改善され、照射フルーエンスを高精細に制御してナノ期構造生成の実験を行えるようになった[1、6-8、10、12-14]。また、このレーザー増幅装置の出力を短パルス化するため、新しいカーレンズモード同期 Ti:sapphire レーザー発振器を導入すると共に、パルス伸長器、多重パス増幅器、およびパルス圧縮器を開発し、 $\Delta\tau = 50 \sim 100$ fs の高品質なビームを出力できる高強度 fs レーザーを固体表面相互作用の研究に利用できるようになった。

さらに、新規の基幹レーザー装置として、 $\Delta\tau = 6.8$ fs のモード同期レーザー発振パルス、および $\Delta\tau = 25$ fs の増幅パルスについて、搬送波包絡線位相(CEP)のスリップジッターを 200 mrad 以下に安定化でき、ホローファイバ圧縮装置によって $\Delta\tau < 7$ fs の高強度なサイクルパルスを $f = 1$ kHz で発生できる超短パルス Ti:sapphire レーザー増幅装置(図 2.3.9)を導入・整備した。同レーザーを用いて極端紫外域のコヒーレントアト秒パルス発生装置の開発を進めた。

以上により、先端的物質制御・計測手法の研究開発に応用する基幹レーザー装置整備を実現し、第 1 期中期計画の目標を達成した。

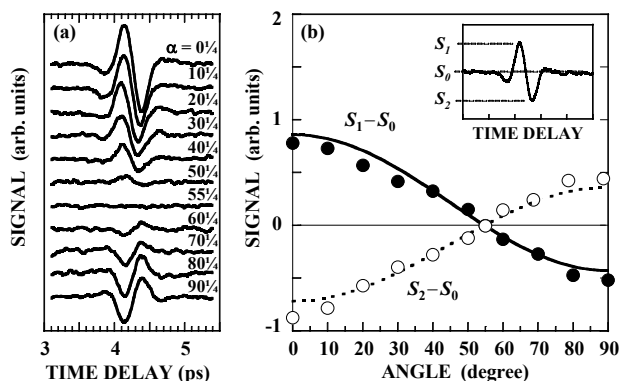


図 2.3.10 N_2 における 19 次高調波信号の角度 α 依存性.

(a) α の変化に対する配向分子からの高次高調波信号、および(b)変調信号の変化. 実線と点線は計算結果

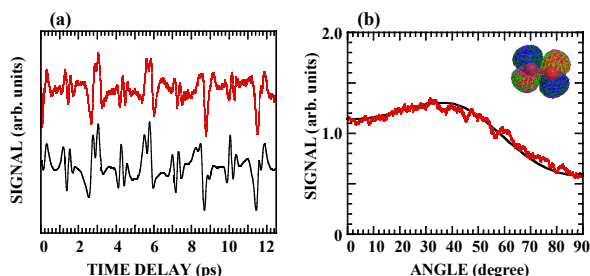


図 2.3.11 低回転温度(~ 40 K)の O_2 に対する高次高調波信号の時間発展(a)と角度 α 依存性(b). (b)の挿入図は O_2 の HOMO.

2. 超短パルス高強度レーザーと原子・分子の非線形相互作用

平成 16 年に当グループにおいて初めて実証した非断熱配向分子からの高次高調波発生(HHG)について、ドイツ Bielefeld 大学の理論グループとの共同研究によって完成させた理論モデル[3]の有効性を検証するため、 N_2 と O_2 分子の空間的な非等方性に起因する高調波信号の特性を、ポンプ・プローブ法を用いて詳細に測定した。以下に示すように、実験結果

を理論計算と比較することによって、同理論の有効性と汎用性を明確な形で証明した[4]。

高強度な fs レーザーパルスでコヒーレントに励起され、超高速で配向と回復を繰り返す分子の空間的な非等方性に起因する HHG の特性は、ポンプとプローブパルスの偏光の相対角度 α を変化させることによって観測できる。図 2.3.10 は、 N_2 について α を変化させて測定した第 19 次高調波信号の例である。(a)は、配向回復時間域で測定した信号であり、(b)は信号の変調の大きさを α に対してプロットしたものである。(b)で見られるように、 α に依存する高調波信号の振舞いは理論計算によって完全に再現できている。図 2.3.10(b)の結果を用いて、 N_2 や O_2 の HOMO に依存する単一分子からの HHG 効率を、分子軸とポンプレーザーパルスの偏光方向との相対角度 θ に対して再現できることを示した。

さらに、分子の回転温度 T_{rot} を低下すれば、単一分子の電荷分布に近い HHG 分布を観測でき、HOMO の形状に依存する分子軸周りの HHG 効率を直接観測できることを実証した。結果の例を図 2.3.11 に示す。(a)は観測した HHG 信号(上)と $T_{\text{rot}} = 40 \text{ K}$ での計算結果(下)であり、(b)は、HHG の α 依存性の実験結果と $T_{\text{rot}} = 40 \text{ K}$ での計算結果である。実験結果と理論計算とは良く一致しており、観測信号が理論によって正しく再現されていることが解る。以上の成果を基に、高調波信号に必然的に含まれる分子軸の統計的な空間配向分布の影響を正確に評価することにより、単一分子からの HHG 分布を HOMO を仮定せずに実験結果のみから再構成する手法を開発した。

構築した高調波信号の理論では、分子種、レーザー強度、パルス幅が既知であれば、回転温度 T_{rot} だけが任意パラメータとして残る。この事実を応用

し、分子の回転温度を測定する新手法を開発した[5]。測定法を検証するため、超音速ガスビームの背圧と分子ビーム中での相互作用位置の変化によって T_{rot} を変化させて高調波信号を測定した。結果の例を図 2.3.12 に示す。この時、 $T_{\text{rot}} = 20 \text{ K}$ を示しており、高い配向度とそれに伴う高調波信号の大きな変調が現れている。この方法を用いて超音速分子ビーム中の T_{rot} の空間分布が正確に測定できることを示した。

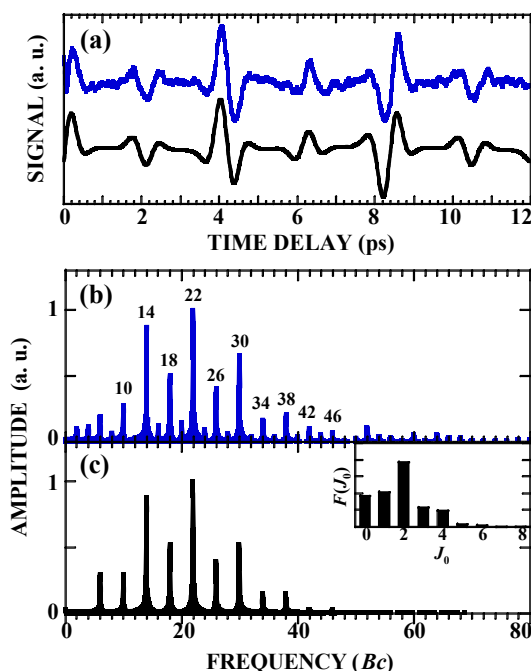


図 2.3.12 超音速パルス N_2 ビームの回転温度測定のための高次高調波信号. (a)時間発展信号の観測波形(上)と計算波形(下). (b)それらの周波数スペクトル.

3. フェムト秒レーザーによるナノプロセッシング

平成 14 年に当グループと福井高専等との共同研究において発見した fs レーザーパルスによる硬質薄膜表面のナノ周期構造生成について物理過程の解明を進めた[6-8、10-14]。従来の結果から、DLC 薄膜表面では、アブレーション開始に先行して結合構造の転移が進展すること、およびこの構造転移による体積膨張に伴って表面のナノ領域で電場が増強され、アブレーションしきい値を上回る局所場(近接場)が発生する過程を予測していた。

このナノ構造生成過程を検証するため、標的としてサブミクロンサイズのパターンを付与した DLC 膜を用意して実験を行った。図 2.3.13 は、照射フルーエンス F をアブレーションしきい値 F_{th} 以下に保ったまま、異なるパルス数 N で照射した表面の走査型プローブ顕微鏡 (SPM) 像である[6]。(a)は未照射、(b)~(f)は $N = 100 \sim 1000$ での表面である。レーザーパルスのフルーエンスが $F < F_{th}$

であるにも係わらず、ストライプの表面で優先的にレーザー電場 E と垂直な方向へアブレーション痕が成長する様子がわかる。表面で生成した自由電子によって発生する近接場が E に加わって局所的な電場が増強される結果、 $F > F_{th}$ の領域が出現してナノスケールのアブレーションが始まる。この過程は E と平行な凸面近傍で優先的に誘起されるため、アブレーション痕は E と垂直な方向へ成長する。

さらに、ナノレベルの周期性の起源を見るため、表面粗さが 1 nm 以下の平坦度の良い DLC を標的とし、 $F < F_{th}$ の直線偏光と円偏光パルスで照射してアブレーション初期の表面を詳しく観測した[8]。アブレーション痕が出現し始める初期においては、偏光に依存するような明確な周期構造は見られないこと、および F の増大と共にレーザーの偏光特性に依存した周期構造が出現すること等が新たに観測された。これらの知見と成果を基に、ナノ周期構造生成の主要な物理過程として、以下のモデルを構築した

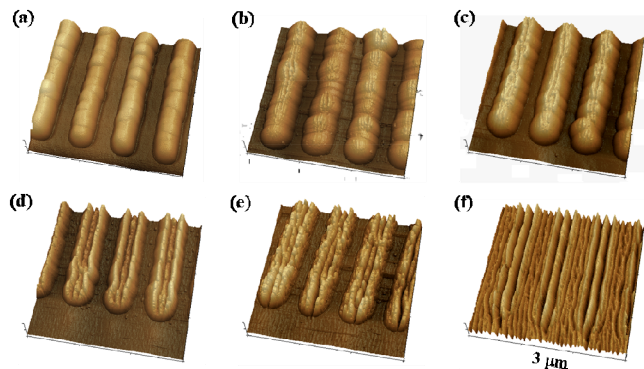


図 2.3.13 (a) $N = 0$, (b) $N = 100$, (c) $N = 200$, (d) $N = 300$, (e) $N = 500$, (f) $N = 1000$ で照射した DLC 表面のプローブ顕微鏡像. $F = 70 \text{ mJ/cm}^2$, 偏光方向はストライプと垂直.

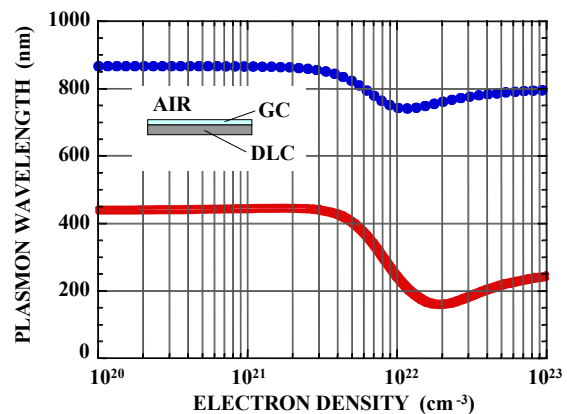


図 2.3.14 電子密度に対する DLC/GC 界面(実線)および大気/GC 面(点線)でのプラズモン波長の計算値.

[1, 8]。

すなわち、平坦な標的表面に $F < F_{th}$ で fs レーザーパルスを多重照射すると、表面では結合構造転移によってナノスケールの体積膨張がランダムに生じる。ナノレベルの凹凸ができると、自由電子のコヒーレントな振動によって近接場が発生し、 $F > F_{th}$ となる凸面周辺でナノスケールのアブレーションが始まる。このアブレーション痕は、曲率の大きな表面を増加させてさらに凹凸密度を増大させる。局所的な電場は、突起部だけでなく微小な亀裂やくぼみにおいても相対的に大きくなるため、アブレーション痕や亀裂の結合が進展する。表面に微小なアブレーション痕が生成されると、標的表面は様々な周波数成分を持つ周期的な凹凸構造で覆われることになる。その結果、表面層で生成する自由電子のコヒーレントな振動によって、表面プラズモン・ポラリトン(SPP)が過渡的に励起される条件が整う。SPP は表面電荷密度の空間変調であり、表面に周期的な増強近接場を形成する。この近接場によって実効的に $F > F_{th}$ が実現されるとアブレーションによるナノ周期構造が形成される。

図 2.3.14 は、表面での電子密度の増加に対して励起される SPP の波長 λ_{sp} を計算した結果である[8]。GC/DLC 界面で $\lambda_{sp} = 150 - 340 \text{ nm}$ になる。発生する増強近接場の周期は $\lambda_{sp}/2 = 75-170 \text{ nm}$ と考えられ、観測したナノ構造の周期間隔と良く一致する。SPP が共鳴状態にあるときに最小値に達する。ナノ周期構造の偏光依存性やフルーエンス依存性、形成されるナノ周期間隔 d がレーザー波長 λ にほぼ比例すること等、構造形成の特徴を同モデルでよく説明できる。

ナノ周期構造生成の応用として、TiN の広い表面に構造を生成し、優れたトライボロジー特性が実現できることを示した[9]。また、DLC では、標的を傾斜させることによりナノ構造の形状を制御できることを観測した[13, 14]。これらの結果により、fs レーザーによるナノ周期構造形成の現象に初めて具体的な物理的説明を与えることに成功した。

2.3.2.4. 国内外における関連する領域の中での当該テーマの位置づけ

高速性、波動性・粒子性、直進性、無質量エネルギー等の特性とそれに起因して発現する特徴的な現象によって、光は近代科学技術を牽引する大きな原動力であった。レーザーは、この光の優れた特性に加えて、干渉性、単色性、高輝度性、指向性等の高度な機能を獲得することによって、受動的な存在であった光を能動的なツールへと大きく変貌させてきた。超短パルス高強度レーザーは、光とレーザーの代替不可能な機能を高度に集約化することによって開発された技術であり、1990 年代初めから急速に発展して高度な実用化が進展した。現在では、標準的な実験室でフェムト秒の極限時間、および GV/cm 以上の超高電場域へアクセスするための光技術が実現し、物理、化学などの基礎科学分野だけでなく、電子素子・デバイス、物質・材料、ナノテクノロジー、バイオ、エネルギーをはじめとする様々な先端技術分野の革新を先導する基盤的ツールとして利用されている。

本テーマでは、この超短パルス高強度レーザーを中心として、光・レーザーの更なる潜在的機能を探索・発現すると共に、それらを実証するためのレーザー科学研究を進めてき

た。 $\Delta\tau = 50 \sim 100$ fs の光パルスを出力できるフェムト秒レーザーが広く普及しているが、本テーマでは、高強度な数サイクルパルスレーザー (パルス幅 < 10 fs) の開発、さらにアト秒 ($as = 10^{-18}$ s) 時間域でのコヒーレント極端紫外光源の開発を進めている。未踏の時間域とスペクトル域のレーザーは、多様な先端科学技術分野に新たなツールを提供し、その発展に貢献する。

超短パルス高強度レーザーによる分子の非断熱配向と配向分子の高次高調波発生の研究では、気相分子の超高速ダイナミクスを研究するための新手法を確立すると共に、同手法と知見を応用して、極限環境下にも適用できる新しい分子ダイナミクス計測手法を実証した。得られた成果は、超短パルス高強度レーザーによる超高速物質制御、分子イメージングや超高時間分解光計測、コヒーレント極端紫外光源等の研究開発など、分子を対象とする光科学や物質科学分野の研究開発のために広く利用できる。

光・レーザーによるナノレベルでの物質加工は、近接場光を利用した方法が唯一の方法として研究されているが、対象物質とその物理状態、操作・利用環境等についての制限が大きい。当該テーマでは、レーザーのような伝搬光を用いた初めてのナノプロセッシングを目指しており、世界的にも注目されている。伝搬光パルスでのナノ物質制御法が実現すれば、伝統的なレーザー加工と同レベルの機能や操作性を備えたナノプロセッシング手法が実現する。光エネルギーの新しい機能として、物質・材料、素子・デバイス分野などの進展を促すことが期待でき、その波及効果は大きい。

2.3.2.5. 今後の展望

超短パルス高強度レーザー技術は広範な先端科学技術分野において、未踏の領域を開拓する共通基盤技術として利用の裾野を拡大しつつある。今後、同レーザー機能の飛躍的高機能化を目的として、サイクル位相制御の研究開発、およびサブフェムト秒からアト秒時間域でのコヒーレント光源の開発を進める。

超短パルス高強度レーザーによる分子配向の研究で得られた成果は、分子科学とその関連分野の発展を促進する。原子・分子のサイクルレベルでのコヒーレント応答とそれによって発現する新規の量子現象の探索・解明がこれからの課題である。この研究は、CEP を安定化した高強度サイクルパルスレーザーとそれを用いたコヒーレントアト秒極端紫外光源によって可能になる。

本研究によって、ナノ周期構造生成の主要な物理過程が明らかになった。今後、種々の物質についてモデルの構築と検証を行う。一方、重要な課題も残されている。すなわち、フェムト秒時間域での超高速相互作用とアブレーション開始の間にはピコ秒域の時間遅延が存在する。DLC では、結合構造転移が相互作用を記録しているが、相互作用記録過程は、物質種や照射環境・条件に依存するはずである。今後、物性の異なる誘電体、半導体、金属等の開発モデルを拡張するため、ナノレベルでの相互作用を維持・記録するための物理過程の発現・制御の研究を進める。

2.3.2.6. 主要論文リスト

- 1) K. Miyazaki, "Nanostructuring of thin film surfaces in femtosecond laser ablation", in *Nanophotonics and Nanofabrication*, Chap.10, ed. by M.Ohtsu (Wiley-VCH Verlag, Weinheim, (2009) p.193-214.
- 2) 宮崎健創, 「超短パルス高強度レーザーによる超高速励起とダイナミクス計測 —配向分子からの高次高調波発生と表面のナノ構造形成—」, *J.Vac. Soc. Japan*, Vol.**53**, No.6 (2010), 印刷中.
- 3) F.H.M. Faisal, A. Abdurrouf, K. Miyazaki, and G. Miyaji, "Origin of Anomalous Spectra of Dynamic Alignments Observed in N_2 and O_2 ", *Phys. Rev. Lett.* Vol.**98**, 143001 (2007).
- 4) K. Yoshii, G. Miyaji, and K. Miyazaki, "Dynamic Properties of Angle-Dependent High-Order Harmonic Generation from Coherently Rotating Molecules", *Phys. Rev. Lett.*, Vol.**101**, 183902 (2008).
- 5) K. Yoshii, G. Miyaji, and K. Miyazaki, "Measurement of molecular rotational temperature in a supersonic gas jet with high-order harmonic generation", *Opt. Lett.*, Vol.**34**, 1651-1653 (2009).
- 6) G. Miyaji and K. Miyazaki, "Nanoscale ablation on patterned diamondlike carbon film with femtosecond laser pulses", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.**91**, 123102 (2007).
- 7) G. Miyaji, W. Kobayashi, and K. Miyazaki, "Femtosecond-laser-induced nanostructure formation and surface modification of diamond-like carbon film", *Electrochimica Acta*, Vol.**53**, 167-170 (2007).
- 8) G. Miyaji and K. Miyazaki, "Origin of periodicity in nanostructuring on thin film surfaces ablated with femtosecond laser pulses", *Opt. Express*, Vol.**16**, 16265 -16271 (2008).
- 9) N. Yasumaru, K. Miyazaki, J. Kiuchi, "Control of tribological properties of diamond-like carbon films with femtosecond-laser-induced nanostructuring", *Appl. Surf. Sci.*, Vol.**254** 2364–2368 (2008).
- 10) G. Miyaji and K. Miyazaki, "Nanostructuring with Femtosecond Laser Pulses on Patterned DLC Surface, *J. Laser Micro/Nanoengineering.*, Vol.**3**, 84-87 (2008).
- 11) S.N.Volkov, A.E.Kaplan, and K. Miyazaki, "Evanescent field at nanocorrugated dielectric surface", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.**94**, 041104 (2009).
- 12) G. Miyaji and K. Miyazaki (Invited paper), "Nanostructure formation processes in femtosecond laser ablation of thin film surfaces", *Proc. SPIE*, Vol.720102/1-11 (2009).
- 13) G. Miyaji and K. Miyazaki, "Shaping of nanostructured surface in femtosecond laser ablation of thin films", *Appl. Phys. A*, Vol.**98**, 927-930 (2010).
- 14) G. Miyaji and K. Miyazaki, "Control of Surface Shape in Nanostructure Formed with Femtosecond Laser Pulses", *J. Laser Micro/Nanoengineering.*, Vol.**5**, 86-89 (2010).

2.3.3. 超短レーザーパルス誘起超高速現象に関する研究

2.3.3.1. 研究の概要

超短レーザーパルス発生技術の目覚ましい進展に伴い、そのような極限的超短パルスを照射するとターゲットに何が起こり、さらにはそれをどう応用できるかが益々重要なテーマとなってきた。本研究では超短レーザーパルスによって誘起される超高速現象に着目し、極限的な超高速現象、超高速スピン偏極、フェムト秒ベッセルパルスを用いたフィラメント発生などのような異なった観点から研究を進めた。

これらのサブテーマのうち、極限的な超高速現象については、パルス列によって誘起されるキャリアエンベロープ位相依存現象の物理的解明と精度が高いアト秒パルス計測法の新スキームの提案をした。超高速スピン偏極については、従来の手法では考えられないくらい速い時間スケール（数ナノ秒）で核スピンを効率的に偏極させるスキームを考案・理論評価した。フェムト秒ベッセルパルス誘起フィラメント発生については、入射フェムト秒パルスの横モードを通常のガウスモードからベッセルモードに変換することによって、ガス媒質中のパルス伝搬特性が著しく改善することを理論的に示した。

2.3.3.2. 重点複合領域研究としての意義および社会的重要性

超短レーザーパルス光源は、今や物理や化学のような基礎分野のみならず、生物、医学、工学、および工業など、実に様々な分野で活用されている。それに伴い、パルス時間幅がより短く、光強度がより高いパルスを使うことによってどのような新しい現象や機能が発現し、そしてそれを応用できるのかを追究することが今後の光科学および広い意味でのエネルギー理工学の発展には重要であり、また、社会への成果還元につながる。しかしながら、超短レーザーパルスによって物質内に誘起される様々な超高速現象にはほとんどの場合、時間依存の様々な非線形光学現象が複雑に関与するため、理論の助けなく純粹に実験結果のみから正しく理解することは難しい。本研究では、このように複雑性を極める超高速現象をまずは理論的に正しく理解し、そこで得た知見を元にキャリアエンベロープ位相のモニタリングやアト秒パルス計測、スピン偏極源、フェムト秒フィラメント関連の応用技術などに活かすことを目指す。これらのサブテーマはどれも、中期目標・中期計画の中の「独創的な新領域開拓」に適合し、また、目標実現のための措置として述べた「エネルギー分野における萌芽研究の育成」に該当する。

2.3.3.3. 平成 19 年度以降の主な成果

(a)極限的な超高速現象に関する研究

キャリアエンベロープ位相依存現象は、パルス時間幅が極限的に短く（光周期で 2 サイクル程度、これは中心波長 800 nm のパルスの場合 5-6 フェムト秒に相当）なった時に初めて発現する現象である。非常に高強度なパルスの場合には、トンネルイオン化の原理から

明らかなように光電子放出に空間異方性が現れる。また、比較的低強度の場合には、我々がつい最近明らかにしたように、その広大なバンド幅から生じる量子干渉によってやはり光電子放出に異方性が生じる。すなわち、同じ位相依存現象といっても光強度によってその物理的起源が全く異なる。

以上はフーリエ限界パルスについて言えることである。当然生じる疑問として、パルスがフーリエ限界パルスでなくチャープしている場合にもキャリアエンベロープ位相依存現象が生じるかどうかを理論的に調べたところ、チャープしているパルスであっても、バンド幅さえ十分であれば位相依存現象が起こることを確認した。こうして、少なくとも光強度が比較的低い場合については、チャープの有無にかかわらずパルスのバンド幅が位相依存現象の原因となっていることを我々は解明した。

次の疑問として、孤立パルスではなくパルス列の場合にはどうかについて考えた。パルス列は周期性のあるパルスであり、ある周波数 ω の整数倍の成分 $n\omega$ の光を幾つかの n について合成することによって得ることが出来る(周波数コム)。最近ではラマンのサイドバンド合成によっても各パルスが数サイクル～サブサイクルの時間幅を持つパルス列を

生成することが可能となってきた。異なる周波数成分位相依存性の有無を調べるため、様々な条件下でアルカリ金属原子(Na)についてシュレーディンガー方程式を数値的に解いたところ、パルス列中の各パルスの時間幅が孤立パルスの場合と同じく2-3サイクル程度の場合には、予想通りパルス列の位相依存性は基本的に孤立パルスの場合と似ている事が分かった。すなわち、位相依存性は光電子スペクトルのピークとピークの間、つまり「谷間」に現れる。しかしながら、各パルスの時間幅が1サイクル以下(サブサイクル)となると、その極めて広大なスペクトル幅によって全く異なる結果が得られた。光電子エネルギーおよびキャリアエンベロープ位相を変化させた時、光電子放出の空間的非対称性がどのように変化するかの計算例を図2.3.15(a)に示す。図2.3.15(b)および(c)はキャリアエンベロープ位相が0および π である場合の光電子スペクトルであり、upおよびdownはレーザー偏光方向に対して上方および下方への光電子放出を意味している。各パルスの時間幅がサブサイクルであるようなパルス列の場合には、位相依存性が光電子スペクトルの「ピーク」に現れ

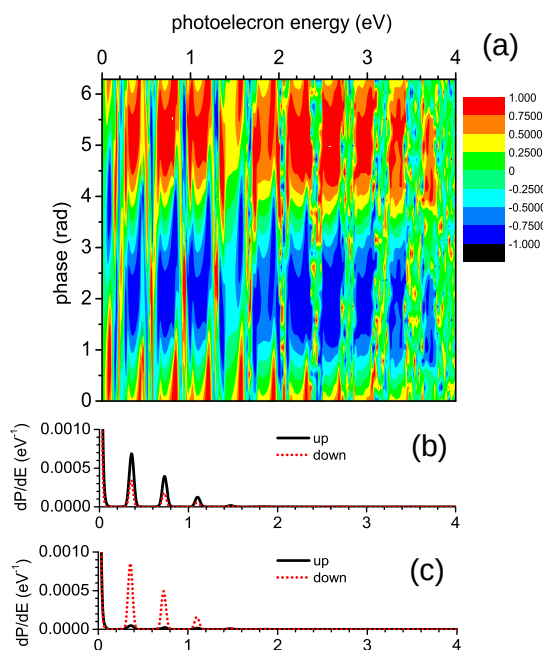


図 2.3.15 光電子放出異方性の光電子エネルギーおよびキャリアエンベロープ位相依存性。

る点が顕著に異なる点である。時間領域で考えようとするは一見不可解に見えるサブサイクルパルス列の位相依存性も、周波数領域で考えると異なる経路間の位相依存量子干渉として極めて明快に理解することができる。

アト秒パルス計測法については新たに図 2.3.16(a)のようなスキームを考案した。このスキームは、基本的には光領域における SPIDER 計測の光電子版であり、最大の特長は、アト秒パルスの再構築に通常良く用いられるようないかなる近似をも全く用いることなく、極めて短い 100 アト秒程度のパルス幅さえも正確に再構築することが出来るという点である。一例として、図 2.3.16(b)に示すような光電子スペクトルが得られたとしてパルス再構築を試みた。再構築されたアト秒パルスを図 2.3.16(c)に示す。このように、100 アト秒の極短パル

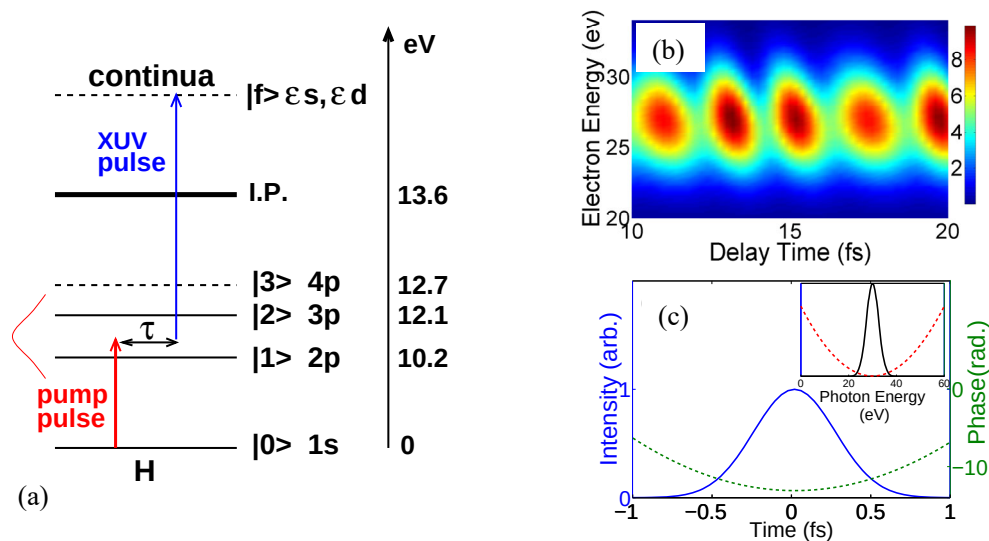


図 2.3.16 (a)アト秒パルス計測スキームと(b)光電子 SPIDER の信号の例、および(c)それから再構築されたアト秒パルス。

スであっても極めて正確に再構築できることが分かる。同様のパルス再構築精度はパルスが線形あるいは非線形チャープしている場合でも得られることも数値実験によって確かめた。

(b)超短レーザーパルス誘起超高速スピン偏極に関する研究

スピン偏極粒子は、原子・分子物理学、原子核物理学、高エネルギー物理学のような基礎科学はもとより、表面科学や材料科学、さらには医療診断など、極めて幅広い分野で活用可能なツールである。これまでの我々の研究では粒子として電子やイオンを考え、理論的なスキームの考案および理化学研究所のグループと共同で実験実証を行ったが、現在は核スピン偏極の実現を目指し、理論と実験の両面から理化学研究所のグループと協力して研究を進めている。レーザーを用いて核スピンを偏極させる手法として良く知られている方法は狭帯域連続発振(CW)レーザーを使った光ポンピング法である。これはターゲット原

子の超微細遷移線を狭帯域レーザーの極めて高い分解能によって分解し、円偏光励起と脱励起を繰り返すことによって核スピンを偏極させるというものである。これに対し、我々が考案した超高速核スピンの偏極スキームでは超微細構造を周波数領域で分解せず、代わりに時間領域で分解する。すなわち、複数の超微細準位を超短パルスでコヒーレントに励起し、励起状態の超微細相互作用によって核スピンを動的に偏極させる。偏極度が最大となったところで価電子をはぎ取れば核スピンの偏極は凍結される。我々が考案したこの方法の大きな特徴は、既知の手法では達成し得ないく

らい短い(数 ns の)時間で核スピンの偏極の実現が可能であり、従って不安定核種をも数ナノ秒で効率的に偏極させられる点である。原子核物理の観点から興味深いアルカリ土類金属元素について、到達可能な偏極度を理論的に計算した結果を図 2.3.17 に示す。核スピン値が大きな核種については到達可能な偏極度が低下するものの、それでも 30 %程度もの高い偏極度を実現しうることが分かった。現在は理化学研究所のグループと共同で Yb を使った実験実証に取り組んでいる。

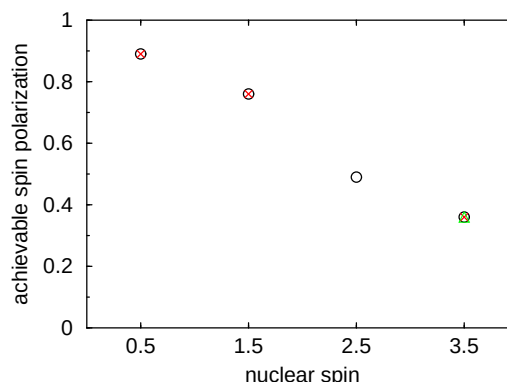


図 2.3.17 核スピン値の違いによる到達可能核スピン偏極度.

さらにごく最近では、超短パルス列によって光ポンピングする手法を考案した。これは、基本的には従来から良く知られている狭帯域 CW レーザーを用いた光ポンピング法と偏極原理は同じであるが、CW レーザーでは十分なレーザーパワーを得ることが出来ないほど短い波長(真空紫外)で光ポンピングしなければならない場合には非常に有効な方法であり、大雑把に言って自然放出寿命の 2-3 倍程度の時間間隔で 10^8 W/cm^2 程度のピコ秒パルスを 3-5 パルス照射するだけでもかなり高い偏極度を得ることができる。例えば、水素原子やミュオニウム(水素原子の陽子がミュオン(μ^+)という短寿命($2.2 \mu\text{s}$)レプトンで置き換えられた原子)の光ポンピングには 121 nm の真空紫外光が必要であるが、これは CW レーザーで十分なレーザーパワーを得ることは極めて難しい。それに対し、非線形光学結晶によってパルス幅 300 fs 程度のチタンサファイアレーザー(730 nm)の 2 倍波(365 nm)を発生させ、さらにその 3 倍波(122 nm)を希ガス媒質によって発生させれば、超短レーザーパルスの持つ高いピーク光強度によってかなり効率よく 121 nm の真空紫外光を発生させることが出来る。我々は、121 nm のピコ秒パルス列を用いた光ポンピングによって 20 ns 程度の時間でミュオニウムを 80 %ほど偏極させることが出来ることを示した。この結果は、核磁気共鳴(NMR)と類似した、 μSR と呼ばれるミュオンのスピン回転を用いた試料の内部磁場探索の感度向上にも大いに役立つはずである。 μSR と NMR は互いに相補的な時間スケールでのプローブ法であり、スピン偏極ミュオン源が材料科学へも応用しうる 1 つの方向を示している。

(c)フェムト秒ベッセルパルスを用いたフィラメント発生に関する研究

高強度フェムト秒パルスが希ガスや空気、水などの Kerr 媒質中を伝搬する際には、光強度依存非線形屈折率に起因するパルスの自己収束(self-focusing)と光イオン化によって発生する電子に起因するパルスの自己非収束(self-defocusing)および回折がうまくバランスすることがある。これらがうまくバランスすると、フェムト秒パルスはその断面形状を変えずに長く長い距離を空間伝搬する。これはフェムト秒フィラメントと呼ばれ、フェムト秒パルスの圧縮や 3 次元光導波路の作成、リモートセンシングなど、様々な分野において応用されている。その場合に重要なことは、いかにして質の良い（つまりより長い伝搬距離においてパルス断面形状が安定した）フィラメントを生成するかである。レーザー実験に通常用いられるのはガウスモード(TEM₀₀モード)であるが、これとは異なる横モードのパルスを用いれば、光強度の空間分布が異なるため、自己収束や自己非収束、回折などの全てが異なったものとなり、その結果、それらがバランスして形成されるフェムト秒フィラメントはガウスモードからのそれとはかなり違うものとなるであろうと予想される。横モードとして良く知られているのはベッセルモードとラゲールモードであり、我々はパルスの伝搬方程式を数値的に解くことによってパルス伝搬ダイナミクスの入射パルス横モード依存性を調べた。入射パルスに用いた 3 つの横モード、ベッセル、ガウス、およびラゲールモードの光強度分布を図 2.3.18 に示す。これらのパルスを用いた際に発生するフィラメントを図 2.3.19 に示す。図を見てすぐ分かるように、入射パルスがガウスモードの場合には、生成するフィラメントは最も短く、ベッセルモードの場合に最も長い。ラゲールモードの場合にはこれらの中間となる。さらに詳しく調べたところ、ベッセルモードの場合にフィラメントが安定する理由は、パルス中心部のエネルギーがイオン化等によって消失した分がビームの周辺部分にプールされているパルスエネルギーの流入によって補われるからであることが判明した。ガウスモードの場合には、このようなエネルギーのプールされる部分がないため、中心部分のエネルギー消失が大きくなった時点で自己収束と自己非収束のバランスが崩れ、フィラメントが終焉する。同様の傾向はパルス通過後の媒質に発生したプラズマの密度分布にも見られた。すなわち、

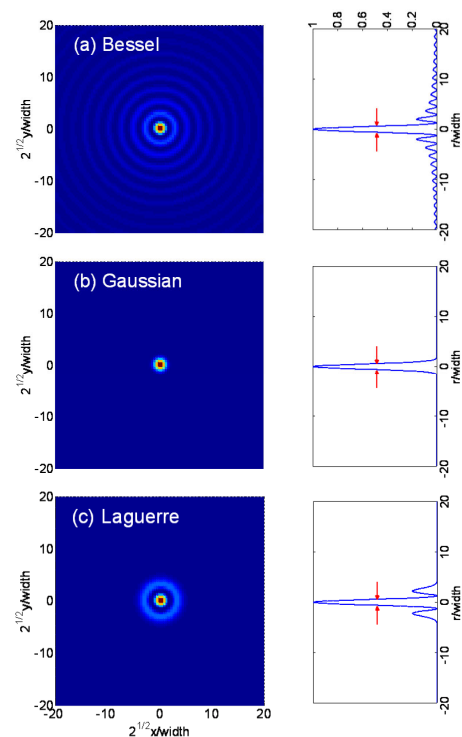


図 2.3.18. ベッセル、ガウス、およびラゲールモードの空間光強度分布。

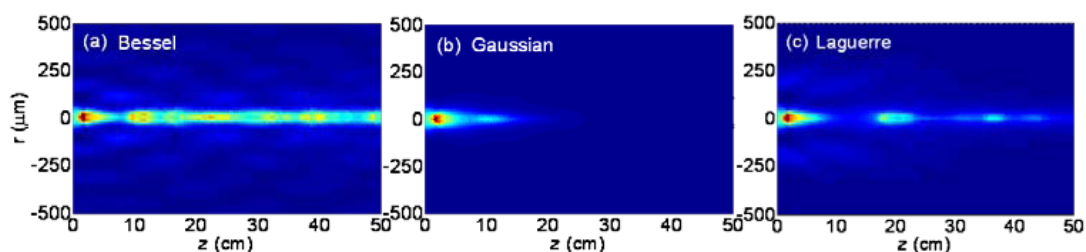


図 2.3.19 入射フェムト秒パルスの横モードがベッセル，ガウス，およびラグエルモードである場合のフィラメント．

ベッセルモードのフェムト秒パルス入射によって発生したプラズマチャネルは他の横モードの場合に比べ格段に長い。

2.3.3.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

極限的な超高速現象として、2000 年代前半から世界でキャリアエンベロープ位相依存現象の観測やアト秒パルス発生が報告され始めた。しかし、これまで考えられてきたキャリアエンベロープ位相依存現象は高強度パルスについてであり、低強度における位相依存現象は調べられていない。我々はチャープの有無にかかわらず、また、孤立パルスであるかあるいはパルス列であるかに関わらず、低強度のパルスについてキャリアエンベロープ位相効果が存在することを発見し、その物理的起源を明らかにした。これは、パルスのごくごく一部のエネルギーを使ってキャリアエンベロープ位相をリアルタイムでモニタするには非常に有用な発見である。また、アト秒パルスの計測法についても、我々が考案した手法は、現在ほとんどの研究者が用いている **Strong Field Approximation** という大きな近似を用いず、高精度で波動関数の分かっているヘリウムやアルカリ金属原子などを用いて摂動領域でパルスの再構築をする方法であり、非線形チャープした 100 アト秒程度の極短パルスでも高精度で再構築する事が出来る。

超高速核スピン偏極については、我々が考案した動的スピン偏極法自体が新奇であり、短寿命の不安定核種にも応用できる点が最大の特徴である。理論的考案だけでなく実験実証にも積極的に取り組んでおり、成功すれば原子核物理学において現在興味の中心となっている不安定核種の核物理解明に大きく役立つことが期待される。また、ごく最近考案したパルス列による光ポンピング法は、従来から知られている狭帯域 CW レーザーによる光ポンピング法の延長ではあるが、適応できる核種が飛躍的に増大し、今後非常に有力な偏極法として期待できる。特に、ミュオンのスピン偏極に応用すれば、NMR に類似した μ SR と呼ばれる手法によって物質内部磁場の大きさや変化を実時間で捉える感度が格段に改善することが期待される。

フェムト秒フィラメント発生に関する研究はまだ始めたばかりであるが、ベッセルパルスを用いるとパルス伝搬特性が大きく改善することを数値計算によって示した。ベッセルパルスは非回折パルスとも呼ばれ、回折が皆無であることから伝搬特性のみならず集光特性もガウスパルスとは異なるはずであり、実際、フェムト秒ベッセルパルスを用いた様々

な研究もここ数年報告が増えてきている。気体媒質のみならず凝縮媒質も考慮に入れ、これらベッセルパルスの特徴を十分に活かした応用に期待がかかっている。

2.3.3.5. 今後の展望

現段階では 3 テーマとも理論研究が主体であるが、理化学研究所や日本原子力研究開発機構関西光科学研究所のグループと協力し、共同実験研究も進めている。今後は国内および国外の諸機関との連携をさらに深め、研究を発展させていきたい。個別テーマに関しては、アト秒パルスに関してはアト秒パルス光源を効果的に用いた応用を考えること、超高速スピン偏極については、その超高速性を原子核物理学や μ SR 以外にも応用する手段を考えること、最後に、フェムト秒フィラメントについては、ベッセルパルスの特徴を効果的に利用した研究展開を目指したい。

2.3.3.6. 主要論文リスト

- 1) T. Nakajima, “Investigation of ultrafast nuclear spin polarization induced by short laser pulses”, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 024801 (2007).
- 2) T. Nakajima and E. Cormier, “Effects of the carrier-envelope phase of chirped laser pulses in the multiphoton ionization regime”, *Opt. Lett.* **32**, 2879-2881 (2007).
- 3) C. Liu, T. Nakajima, T. Sakka, and H. Ohgaki, “Above-threshold ionization and high-order harmonic generation by mid-infrared and far-infrared laser pulses”, *Phys. Rev. A* **77**, 043411 (2008).
- 4) T. Nakajima, Y. Matsuo, and T. Kobayashi, “All-optical control and direct detection of ultrafast spin-polarization in a multi-valence-electron system”, *Phys. Rev. A* **77**, 063404 (2008).
- 5) T. Sekikawa, T. Okamoto, E. Haraguchi, M. Yamashita, and T. Nakajima, “Two-photon resonant excitation of a doubly excited state in He atoms by high-harmonic pulses”, *Opt. Express* **16**, 21922 (2008).
- 6) C. Liu and T. Nakajima, “Controlling the strong field dynamics by a time-delayed near- and mid-infrared two-color laser field”, *Phys. Rev. A* **78**, 063424 (2008).
- 7) T. Nakajima, “Ultrafast nuclear spin polarization for isotopes with large nuclear spin”, *J. Opt. Soc. Am B* **26**, 572-580 (2009).
- 8) T. Nakajima, “Effects of the carrier-envelope phase on atomic ionization by the pulse train in the multiphoton-ionization regime”, *Phys. Rev. A* **79**, 043414 (2009).
- 9) Z. Song, Z. Zhang, and T. Nakajima, “Transverse-mode dependence of femtosecond filamentation”, *Opt. Express* **17**, 12217-12229 (2009).
- 10) J. Chen, R. Itakura, and T. Nakajima, “Characterization of attosecond XUV pulses utilizing a broadband UV~VUV pumping”, *Opt. Express* **18**, 2020-2035 (2010).

2.3.4. レーザーアブレーションを利用した液相環境中でのその場元素分析

2.3.4.1. 研究の概要

液体中の固体表面にパルスレーザーを照射してアブレーションさせ、放出種が形成する発光領域からの原子発光スペクトルを測定することで固体表面あるいは液体のその場元素分析が期待される。前回の自己点検では、長いパルスを用いることにより液相中の固体ターゲット表面のその場元素分析が実現可能となることを見出した研究について報告した。それに対して独創性はあるが目標設定にやや難があるとの評価意見があった。そこで、今期は電気化学プロセスおよび水環境中の元素モニタリングへの応用を目指した研究を推進した。電気化学プロセスは光

エネルギー変換に利用可能な化合物半導体薄膜材料の作製や表面処理に広く用いられているが、電解液中でのプロセスであるため電極表面のその場元素モニタリングは難しい。そこで、まず電解液中の電極表面分析に応用できることを実証し、同時に測定の問題点を明確化した。さらに、この方法では溶液自体のその場元素分析も原理的に可能であることから、地球温暖化にともなう湖沼環境中の元素分布変動のモニタリングに応用する可能性を検討するため、発光の定量性に関する研究を行った。

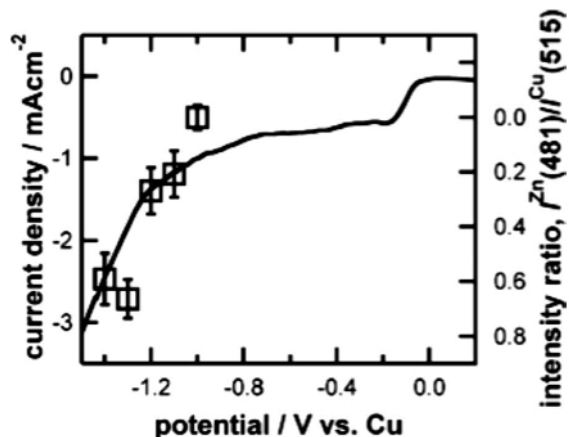


図 2.3.20.亜鉛および銅の電解析出における電流電位曲線 (—) といくつかの電位におけるレーザーアブレーション発光による亜鉛と銅のスペクトル強度比 (□)。

2.3.4.2. 重点複合領域研究としての意義および社会的重要性

液体中の固体表面のその場元素分析は、液体が邪魔となり気相中や真空中で行われる方法をそのまま適用できない。ここで取組んでいる手法は液体中の固体表面のその場元素分析法としては唯一の一般的方法となる可能性がある。このような新しい方法を開発し、エネルギー機能材料作製時のモニタリング、あるいはエネルギー問題と密接に関連する環境問題の議論の基盤となる環境モニタリングに応用することは光エネルギー重点複合領域の目的と合致している。本手法は特にエネルギー理工学分野では以下のような意義がある。つまり、化合物半導体など光電変換に資する材料を電解析出で作製する場合にその化学量論性が重要になるが、本手法による析出元素のモニタリングにより最適条件を見出すことが著しく容易になる。また、エネルギー問題と密接に関係する地球温暖化にともなう水圏環境における元素分布変動のモニタリングにも貢献できる。なお、これらの応用以外にも

本手法には大きな波及効果が期待される。例えば、めっきをはじめとする湿式表面処理プロセスにおける析出皮膜の管理、プラントにおける配管内壁の劣化にともなう元素組成変化のモニタリング、海底における迅速な物質探査、原子力施設における高放射能レベルの化学処理工程における無人での元素分析など、液体中の固体を対象とするさまざまなプロセスにおける元素モニタリングに応用でき、社会的なインパクトは大きい。

2.3.4.3. 平成 19 年度以降の主な成果

(i) 電解析出皮膜の元素組成のその場測定 [4]

電解析出は表面構造形成の重要な手法の一つである。電解析出による表面処理は電解浴中の電極表面でのプロセスであるため、プロセスのモニタリングのためには溶液中でのその場測定が必要になる。本研究では銅-亜鉛系を例として、同時析出反応による生成皮膜の元素組成分析の可能性を検討した。これまでに報告してきたように幅 150 ns の長いパルスを用いることにより銅および亜鉛原子の明瞭な線スペクトルが得られ、スペクトル強度を比較することができた。図 2.3.20 は電位電流曲線およびいくつかの電位で電解析出させたときの亜鉛原子と銅原子のスペクトル強度比をプロットした図である。水素発生と亜鉛の析出は電流電位曲線では区別できないが、-1.0 V vs. Cu で観測される電流は発光スペクトル測定から亜鉛の析出ではなく水素発生であることがわかる。本研究はアブレーション放出種の発光スペクトルによる電極表面のその場元素モニタリングを初めて実現したものがある。

(ii) 測定の定量性の検討 [6]

液相レーザーアブレーションでは放出種が形成する発光領域中に液相由来の元素も侵入して発光する。ターゲット組成と発光スペクトルから得られる組成比を比較して分析の定量性を検討した他、液中の溶存種についても濃度を反映した組成比がスペクトルから得られるかどうかを検討した。水中の銅-亜鉛合金 (Cu/Zn=1.86) をターゲットとした場合に、スペクトルから得られた Cu/Zn 比は約 0.2 であり、ターゲット組成と大きく異なることがわかった。照射後の水に存在する Cu と Zn の比はターゲット組成に近いことから、発光領域に取込まれて原子状での発光に至る過程で元素の性質が何らかの影響を及ぼすことがわかった。それに対して液中の溶存種についてはほぼ濃度に応じたスペクトル強度比が得られることがわかった。本研究により、固体表面の定量分析のためには検量線が必要であり、液相レーザーアブレーションにおける発光領域の形成過程は元素の性質に影響されるプロセスがあることがわかった。

(iii) 長いパルスの効果が出現するメカニズム [3、7]

長いパルスを用いた液相レーザーアブレーションによる放出種が、短いパルスの場合と異なり、明瞭な原子発光スペクトル線を与える理由について研究した。照射痕の測定から長いパルスの場合には放出量が少ないこと、発光画像の測定により長いパルスの場合に発光領域がより大きいことがわかり、長いパルスで照射したときに発光領域がより希薄な状態であることを明らかにし、これが明瞭な発光スペクトルを与える理由であることが示

唆された。長いパルスはパルスエネルギーのより多くの部分を放出種に直接与えるというメカニズムを提唱した。

2.3.4.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

液相レーザーアブレーションを材料プロセスに用いる研究は平成12年のわれわれの報告を契機として発表論文数が急激に増加している。しかし、その場元素分析の研究はダブルパルス法を用いた研究がいくつか報告されている以外には報告例がない。ダブルパルス法では第1パルスで生成した気泡を第2パルスでブレイクダウンしているが、我々の提案する単一の長いナノ秒パルスを用いる方法と比較して100倍程度のエネルギーで、数ns程度のパルス幅のレーザーを照射するため、表面損傷が大きいという難点がある。弱くて長い単一パルスを用いるわれわれの方法は、疑似非破壊的な分析手法であり利点が多い。エネルギー材料プロセスモニタリングや環境元素モニタリングをはじめとする応用分野の広さを考えると非常に重要性の高い研究であり、本研究所が主体となって研究を進展させることが重要と考えている。

2.3.4.5. 今後の展望

水圏環境のその場元素モニタリングへの応用では微量元素の検出が求められる。微量分析の実現に向けて検出限界を決めている因子を明らかにし、感度の向上を目指した基礎研究を行う。さらに、現状での問題点であるパルスごとのスペクトルのばらつきの原因を究明し、モニタリング技術としての安定性を向上させる。

2.3.4.6. 主要論文リスト

- 1) S. Masai, K. Hirata, T. Sakka, and Y.H. Ogata, Laser Ablation of Ag in Water and in Nitrogen Gas Atmosphere: Shift and Broadening of Emission Line Profile of Ablated Ag Atoms, J. Phys. Conf. Ser., **59**, 198-201 (2007).
- 2) T. Sakka, H. Oguchi, and Y.H. Ogata, Emission Spectroscopy of Ablation Plumes in Liquid for Analytical Purposes, J. Phys. Conf. Ser., **59**, 559-562 (2007).
- 3) H. Oguchi, T. Sakka, and Y.H. Ogata, Effects of Pulse Duration upon the Plume Formation by the Laser Ablation of Cu in Water, J. Appl. Phys., **102**, 023306 (2007). (Virtual Journal of Ultrafast Science, **6**(8), 2007 に再掲)
- 4) T. Nishi, T. Sakka, H. Oguchi, K. Fukami, Y.H. Ogata, In-Situ Electrode Analysis by Laser Induced Breakdown Spectroscopy, J. Electrochem. Soc., **155**, F237-F240 (2008).
- 5) 作花哲夫, 大口恒之, 深見一弘, 尾形幸生, レーザーアブレーションプラズマ分光法による電解析出皮膜のその場元素分析: 溶存元素種のスペクトルへの寄与, 表面技術, **59**, 934-936 (2008).
- 6) T. Sakka, H. Yamagata, H. Oguchi, K. Fukami, Y.H. Ogata, Emission Spectroscopy of Laser Ablation Plume: Composition Analysis of a Target in Water, Appl. Surf. Sci., **255**, 9576-9580 (2009).
- 7) T. Sakka, S. Masai, K. Fukami, Y.H. Ogata, Spectral profile of atomic emission lines and effects of pulse duration on laser ablation in liquid, Spectrochim. Acta B, **64**, 981-985 (2009).

3. 研究部門・研究分野における研究の現状

研究所は、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。先進的なエネルギー技術の創成、ハードウェアを重点としたプロジェクト的研究の推進、学内外および国際共同研究推進の核となること、などが他のエネルギー関連部局との際立った違いであり、「オンリーワン」の研究所としての特徴が顕著になってきているといえる。このような背景の下、とくに研究面では、研究所全体としての特徴・総合力を発揮すべく、附属エネルギー複合機構研究センターを中心とした、プラズマエネルギー複合領域・バイオエネルギー複合領域・光エネルギー複合領域研究の 3 重点複合領域研究に代表される横断的な課題を設定し、既存エネルギーシステムの次世代に来るべき、またはその可能性をもつエネルギーシステムを対象として研究を行ってきた。平成 18 年からは、上記 3 重点複合領域を推進する活動母体として「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」をエネルギー複合機構研究センターに組織するとともに、あらたに「国際流動・開発共同研究推進部」を設置し、国際的な活動の中軸とする流動・開発連携を推進している。平成 14 年から平成 18 年までの 5 年間のプログラムとしてエネルギー科学研究科とともに採択された 21 世紀 COE プログラム「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」は、平成 20 年からは、エネルギー科学研究科・工学研究科原子核工学専攻・原子炉実験所と合同で、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—CO2 ゼロエミッションを目指して—」の採択を受け、エネルギー学における理工学領域に特化した研究を推進している。

このように、新たな研究体制の構築により、研究所全体としての研究の取り組みに重心を動かしつつあるが、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、従来の「研究分野」構成をすぐに崩すことは困難である。今後も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、協力講座としてよりよい教育環境の整備を行っていくことが必要であろう。このような現状の下、各研究部門・分野においては

一方、将来計画を検討する中で、大部門の再編に関する議論も継続して行っているが、まだ結論を得るにいたっていない。

各部門、分野での研究の進展に伴い、問題となっていた、人員の増強、研究環境の改善、研究資金の増強など、以前より問題となっていた項目は、外部資金の積極的獲得や研究所外プロジェクトへの積極的参加など、また研究所としての計画的な施設整備などにより、十分ではないものの、ある程度緩和されて生きている。しかしながら、とくに、研究資金増強に関しては、今後も一層の努力を続け、これらの問題点解決を図る必要がある。

各部門・分野の構成人員（平成 22 年 2 月 1 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。研究所全体としての論

文等の発表件数は図 1.4.1(p9) を参照されたい。なお、各研究分野の最近の主要研究課題は資料編(I)2 章に、研究成果の好評状況については同資料編 4 章にまとめている。

3.1. エネルギー生成研究部門

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

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

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

3.1.1. 量子放射エネルギー研究分野

（教授：大垣英明、准教授：紀井俊輝）

（構成人員は、平成 22 年 3 月 1 日現在、以下同様）

本研究分野では、低炭素社会を実現する次世代の再生可能エネルギーや原子力エネルギーの安心・安全に関連する研究を量子放射光を用いて推進する事を目的に研究を行っている。特に、中赤外から遠赤外域の高出力レーザー光を利用した、自然エネルギーの高効率利用が可能な機能材料の開発や生物機能変換に関する研究に寄与すべく、赤外域自由電子レーザー装置（KU-FEL）の開発を行っている。

平成 19 年に本格的な発振実験に移行し平成 20 年 3 月に 12.4 μm の波長にて、初のレーザー発振に成功した。その後、電子ビーム品質の向上を行い、平成 20 年 5 月には 13.2 μm の波長にて、レーザー出力の飽和を達成した。平成 21 年度には、FEL 利用研究のためのレーザー光輸送システムの構築と、利用実験環境の整備を実施した。更に、平成 20 年度からは FEL 技術を用いたテーブルトップサイズの高出力 THz 光源の設計研究を開始し、性能予測を行った。

また、核セキュリティ技術として、レーザー逆コンプトンガンマ線による光核共鳴蛍光散乱（NRF）による非破壊測定法の研究では、平成 20 年度に厚さ 15mm の鉄に隠匿され

た鉛（核物質を想定）の NRF による検出と 1 次元イメージング等に成功した。

3.1.2. 原子エネルギー研究分野

（教授：小西哲之、准教授：山本靖、助教：竹内右人）

本分野では、先進的な核融合エネルギーシステムを、そのエネルギー発生から変換、利用、までを総合的に設計、開発している。その一方、社会適合、環境影響、未来エネルギーシナリオに至るまでの総合的なアセスメント、評価を行いながら、人類のエネルギーシステムのゼロエミッション化の戦略を検討し、持続可能な発展の道を探っている。このためには、物理、化学、電気、放射線など工学的な視点での実験と解析による研究の一方では、生物、環境、社会、経済など、文理融合の視点も必要であり、生存基盤科学研究ユニットや、KSI を通じた学内外との連携研究を行っている。

具体的な核融合エネルギーシステムとしては、先進 SiC セラミック-LiPb の組み合わせでの 900°C のブランケット概念を実証し、また先進原子力全般に利用可能なセラミック複合材によるコンパクト熱交換器を開発した。高温 LiPb ブランケットと技術としては世界初の実証であり、また高温での SiC-LiPb 共存性、トリチウム透過性、物質移行、伝熱挙動などの基礎的な学術基盤を確立した。さらにトリチウム回収系を設計、実証する一方、熱利用系としてのバイオマスの吸熱分解による水素製造、液体燃料製造プロセスを開発し、その特性を測定している。このバイオマスー核融合の組み合わせによるハイブリッドシステムを設計、提案し、近未来の技術で ITER より小型のトカマク装置を用いて、核融合エネルギーにより石油代替燃料を製造できることを示し、さらにその具体的な設計を進めている。

一方その社会適合性の検討として、トリチウム環境挙動と長期的な蓄積拡散効果、生体影響についての新たな考えを示し、特に海洋や解放水面との相互作用を積極的に利用することで環境へのトリチウム蓄積の起こらない、より安全性で環境適合性の高い核融合エネルギーシステムの概念を検討している。

3.1.3. 粒子エネルギー研究分野

（教授：長崎百伸、准教授：増田開）

本研究分野は高パワー電磁波と荷電粒子ビームの高度制御に関する先進的研究を行っており、核融合プラズマにおける電子サイクロトロン共鳴システムによるプラズマ生成・加熱・電流駆動、MHD 不安定性の抑制、慣性静電閉じ込め核融合による中性子源・陽子源開発、将来の中性子を出さない D-³He 先進核融合、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荷電粒子と電磁界との相互作用の関連する研究分野で研究を行うと共に、国内外の研究機関や大学等と研究交流・共同研究を進めてきた。特に、電子サイクロトロン共鳴加熱によるプラズマの加熱・電流駆動過程の実験および理論解析、新古典ティ

アリングモードなどの MHD 不安定性の抑制、プラズマ生成アシストの研究、30-100GHz 帯域のミリ波を用いた電子密度・温度・揺動計測、IEC 核融合メカニズムの解明を目的として実験およびシミュレーション研究、高エネルギー電子ビームを用いることによる従来のレーザ等にはない機能・波長領域・強度の新しい放射源の開発、また、新量子放射光源の性能の鍵を握る高輝度電子銃の研究を行っている。

3.1.4. プラズマエネルギー研究分野

(教授：水内亨、准教授：南貴司、助教：小林進二)

核融合基礎研究の観点から、「高温プラズマ閉じ込め制御」を主課題とし、当所重点複合領域研究「プラズマエネルギー重点複合領域研究」に参画、ヘリオトロン J を主装置とした「先進プラズマエネルギー理工学実験」を展開している。この中で、核融合開発に関連する研究は、核融合科学研究所双方向型共同研究により全国的共同研究を推進している。また、附属センターでは、主として「先進プラズマ・量子エネルギー研究推進部」における共同研究活動に参画、ヘリオトロン J の特性を活かした、主および周辺プラズマ制御に関する研究を実施している。これらは、国際エネルギー機関による国際ステラレータ・ヘリオトロン実施協定の下での国際的ヘリカル系研究の一翼を担うもので、核融合分野における国際貢献を果たしている。また、ヘリカル系研究に留まらず、原子力研究機構、西南物理研究所（中国）を始めとする国内外の研究機関との共同研究も進めている。

平成 19 年度以降は、特に、①バンピー磁場制御による NBI プラズマ閉じ込め制御、②高エネルギー粒子と MHD 挙動の相互作用、③自発的遷移現象、④超音速分子ビーム入射法による粒子制御、などに関する実験的研究を展開している。さらにプラズマ計測の高度化に向け、荷電交換再結合分光システム、ビーム放射分光システム、YAG レーザートムソンシステム、マイクロ波反射計、高速カメラ計測システム等の開発・整備を進めている。

3.1.5. 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 19-21 年度の招聘者、期間、受入教員については、資料編(II) 1.4.1 を参照されたい。招聘期間の重複が認められたことにより、招聘がよりフレキシブルに実施できるようになった。広範囲な先進エネルギーの開発・利用と評価の研究が担当研究分野関連分野教員との密接な連携を通して行われ、双方にとって多くの実りある成果を得ている。また、この招聘を契機に、国外との共同研究協定の締結や共同研究の一層の促進がなされた場合が多い。

3.2. エネルギー機能変換研究部門

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

本研究部門ではエネルギーの高効率機能変換と新機能創出を目的として、各種エネルギーと物質との相互作用機構の解明と利用、エネルギー機能変換過程の高効率化・高性能化、エネルギー機能材料の創製と応用等の研究を推進している。

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。

3.2.1. 複合機能変換過程研究分野

（准教授：檜木達也、助教：神保光一）

本研究分野は固体物理学の結晶格子欠陥論を基礎とし、高エネルギー粒子の、核分裂中性子・核融合中性子や加速荷電粒子等と材料との相互作用の機構論的な理解を通してエネルギー材料・システムの研究開発に貢献するものである。核融合工学における材料課題の解析とブランケット等の核融合炉構成要素の概念設計活動等の実施をめざし、SiC/SiC 複合材料や SiC セラミックスの研究を推進し、核融合エネルギー実現に向けた ITER-BA 計画への貢献を強化してきた。また、これらの Cross-cutting 技術開発として、LWR、VHTR、GFR、SFR 等へのセラミック材料の応用に関する研究を行っている。この間、原子力システム研究開発事業での SiC/SiC 複合材料の実用化技術開発や SiC を用いた GFR 用の高燃焼度燃料技術開発の推進も特筆される。格子欠陥に関する基礎研究は、材料における照射損傷のマルチスケール研究やイオン照射と中性子照射の相関に関する研究等において成果を挙げている。この背景には DuET や MUSTER 施設等の先進的な研究施設群の整備が挙げられる。国際・国内共同研究による中性子照射効果研究も進められた。

3.2.2. レーザー科学研究分野

(教授：宮崎健創、准教授：中嶋隆、助教：畑幸一、助教：宮地悟代)

レーザーのみが備えている潜在的な光エネルギー機能を探索し、高品質・高機能な光エネルギーの発生・制御・利用によって次代の科学技術基盤を創出することが一貫した研究目標であり、①先端的高強度フェムト秒レーザーの開発、同レーザーでのみ発現できる②原子・分子の非摂動論的非線形相互作用、および③固体表面における超高速高密度励起現象の探索・解明・利用に関する研究を進めた。

①では既設装置の高性能化と共に、搬送波包絡線位相を安定化できるレーザー増幅装置を導入し、それを用いて極端紫外域でのアト秒パルス発生装置の開発を行った。②では、当グループで初めて実証した高次高調波発生による気相分子の配向・回復現象の研究を継続した。実験研究と理論グループ(独)との共同研究により、非断熱配向分子からの高次高調波発生の詳細な物理過程を解明し、モデルを構築した。同成果を基に、単一分子の電荷分布とダイナミクス、分子の回転温度を測定する新規手法を開発した。③では、当グループで発見した硬質薄膜表面でのレーザー誘起ナノ構造形成を担っている主要な物理過程が、表面プラズモン・ポラリトンの励起とそれによる周期近接場形成であることを突き止めた。モデル構築により回折限界以下のナノプロセッシング技術の開拓を目指している。

3.2.3. エネルギー貯蔵研究分野

(教授：木村晃彦、准教授：森下和功、助教：笠田竜太)

平成 19 年度以降は、主として、原子力エネルギーの高効率変換に関わる高性能・高機能材料の開発研究を実施してきた。特に、平成 17 年度に採択された文科省の公募事業「原子力システム開発事業(平成 17-21 年度)」課題(高効率原子力システムに向けた高耐食性スーパー ODS 鋼の開発)研究においては、コベルコ科研など、5 機関との産学官共同研究を実施し、大型予算(総額 15 億円)により、先端的な分析装置や試験機(FE-EPMA、FE-AES、高温 XRD、超臨界圧水ループ)を整備し、高温高強度、耐食性および耐照射性のいずれをも付与した燃料被覆管材料として、「スーパー ODS 鋼」を開発し、その成果としてスーパー ODS 鋼の特許を申請した。また、先進原子力システムや核融合ブランケットシステムにおける材料挙動を科学的な根拠に基づいて理解するため、原子炉やイオン加速器を用いた照射実験を行い、実験と理論に基づいた材料挙動予測の研究を実施した。

経産省の公募事業「原子力人材育成事業(平成 19-21 年度)」においては、課題(圧力容器鋼の健全性評価における維持・基準に関する研究)が採択され、高経年軽水炉プラントにおいて問題視されている監視試験片数の欠乏への対応のための研究を行った。本研究には、修士学生 2 名および博士学生 2 名が参加し、福島高専の学生に対するインターンシップの開校などを通じて、原子力人材育成活動を展開した。

3.2.4. 複合系プラズマ研究分野

(教授：佐野史道、准教授：花谷清、助教：山本聡)

研究所重点領域研究である「プラズマエネルギー複合領域研究」を、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研究（ヘリオトロン J）、センター公募型共同研究および核融合科学研究所双方向型共同研究（ヘリオトロン J）、核融合科学研究所国際共同研究拠点ネットワーク形成事業とともに、「ヘリオトロン J の閉じ込め最適化とその実証」の観点から、その実験的・理論的研究を推進してきた。具体的には、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・変換過程の高度化を目指している。これまでに(1)閉じ込めのバンピー磁場制御の効果、特にバルク電子・イオンの輸送と閉じ込め改善および高エネルギー粒子閉じ込めについて、(2)MHD 平衡・安定性における配位効果、特に MHD 不安定発現領域の実験的同定および MHD 揺動による高エネルギー粒子損失について着実な研究成果を積み上げてきた。更に、(3)ヘリオトロン J などの非軸対称配位における新古典粘性、電流、プラズマ回転の計算を目的とした新しいモンテカルロ・コードを開発し、ヘリカル型装置の新古典輸送最適化研究および実験解析に有用な数値計算コードを整備した。今後、実験的・理論的に確認されたヘリオトロン J の基本性能を、更なるプラズマ高性能化（閉じ込め改善および高ベータ化）を達成する視点から開発・改良して行く必要がある。

3.2.5. 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 19 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、分子集合体設計研究分野、生物機能科学研究分野、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た。

本研究部門では表面形態制御や光と界面現象を利用したエネルギー材料研究、新世代太陽電池の開発、生物機能を原理とした高効率物質変換とエネルギー利用、バイオマスからの有用物質生産など、化学を基盤としてエネルギーを指向したナノ・バイオ機能材料およびプロセスの研究を推進している。

3.3.1. 複合化学過程研究分野

（教授：尾形幸生、准教授：作花哲夫、助教：深見一弘）

物質界面は太陽光などの光エネルギー変換プロセスが進行する場として重要な役割を果たす。太陽エネルギー有効利用を最終目標として、光エネルギー変換における界面現象の基礎的理解を深め、光エネルギー変換システムへの応用の可能性に取り組んでいる。具体的には、半導体表面形状制御と金属などによる半導体表面選択修飾、さらにはレーザーを用いた界面のキャラクタリゼーション、界面におけるエネルギー・物質変換や界面構造そのものの解明への光利用の可能性を追求している。平成 19 年度以降に得られた成果として、シリコン上の配列孔およびランダム孔生成の詳細なメカニズムの解明、ルゲート構造生成制御およびセンサーへの応用、高い触媒性を有する白金やパラジウムあるいは導電性高分子の多孔質シリコンへの電解析出による孔充填に成功したことが挙げられる。また、メソ多孔質シリコンへの孔充填における電流密度の効果を実験および数値シミュレーションの両面から明らかにした。さらに、レーザーアブレーションによる液中の固体表面のその場元素分析を電解析出皮膜に応用し、元素分析としての定量性を検討し、発光領域形成メカニズムの解明と合わせて考察した。

3.3.2. 分子集合体設計研究分野

（准教授：佐川尚、助教：鈴木義和）

太陽エネルギーを有効利用する新たな光電変換システムの提案と構築をめざして、金属酸化物や有機色素あるいは導電性ポリマーからなる一次元ナノ材料の創製、色素増感太陽

電池の開発、有機薄膜太陽電池の開発、水素発生光触媒の開発を進めてきた。とりわけ、NEDO 太陽光発電システム未来技術研究開発において「超階層ナノ構造を有する高効率有機薄膜太陽電池の研究開発」を企業や他の公設研究機関との連携で積極的に展開した。すなわち、バルクヘテロ構造素子の最適化を図るとともに、超階層ナノ構造素子に必要な電子輸送層・活性層・ホール輸送層の各材料を新たに開発した。平成 21 年 3 月に吉川暹教授が定年退職したが、佐川准教授と鈴木助教が引き続いて、新規ナノ材料の開発と、それら新材料を用いた光電変換システムの構築と評価に取り組んでいる。また、国際的には、タイ国ラジャマンガラ大学やチュラロンコーン大学の研究者との光触媒開発や色素増感太陽電池開発に関する共同研究の継続のみならず、連合王国インペリアルカレッジの研究者との機能性有機薄膜開発に関する共同研究や、フランスストラスブール大学との新規ナノ材料開発に関する国際連携を進めてきた。

3.3.3. 生物機能科学研究分野

(教授：森井孝、助教：田井中一貴)

生物機能科学分野は、平成 18 年 4 月より、分野名を機能性先進材料分野から現在の名称へと変更した。「第 1 期中期目標・中期計画」の目指すべき研究の方向性として掲げた「生物型酵素を用いた高効率物質変換反応の開発」、「バイオマス資源のクリーン燃料化」、そして「ナノ材料創製」に関する研究を実施してきた。平成 19 年度以降は、生物の自然エネルギー利用原理をもとにして、「分子認識」、「触媒機能」、「ナノ構造形成」、「太陽光エネルギー変換素子」などの機能を発揮する生体高分子を創り出すことにより、太陽光エネルギーを化学エネルギーとして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に重点をおいた研究をすすめている。そのために、ペプチド、タンパク質、タンパク質と RNA の複合体を合目的に設計し、その機能を評価することにより、テーラーメイドな機能性生体高分子を構築する方法論の確立を目指している。また、平成 18 年 4 月より生存基盤科学研究ユニット、同年 7 月より次世代開拓研究ユニットの活動に参画し、分野横断型の生存基盤科学研究を行っている。

3.3.4. 生体エネルギー研究分野

(教授：片平正人、准教授：小瀧努)

生体エネルギー研究分野では、化学・生化学の学問領域を基盤として、エネルギーおよび環境問題に密接に関連した研究について、バイオおよびナノテクノロジーなどの先端テクノロジーを用いるとともに、分子生物学・生化学・遺伝学などの学問的観点からも先端である課題に取り組んでいる。研究所重点領域研究のバイオエネルギー関連研究のなかでは、特にバイオマスの資源の有効利用を目指した研究課題に取り組んでいる。グローバル COE「地球温暖化時代のエネルギー科学拠点」の中では、バイオエネルギーグループに

参加し、バイオマスのさらなる有効利用を目指して、「タンパク質工学的手法による高効率バイオエタノール生産酵母の開発」の研究を進めている。主な研究成果としては、バイオマスのエタノール変換において最も重要である酵素の機能変換を世界で初めて達成した。さらに、その機能変換した酵素を用いることにより、バイオマスーエタノール変換の大幅な効率化が得られることを明らかにした。また、琵琶湖に異常繁殖し環境汚染問題ともなっている水草を出発材料のバイオマスとして、作成した五炭糖・六炭糖同時発酵遺伝子組換え酵母を用いることにより、エタノールを生産することに成功した。平成 22 年 2 月に片平教授を新たに迎え、複合バイオ系における事象の解明・理解に立脚したバイオマスから得られる代謝産物の幅広い利用を目指した研究を推進している。

3. 4. エネルギー複合機構研究センター附属分野

(教授：木下正弘、准教授：岡田浩之)

エネルギー複合機構研究センター附属分野では、物質複合系・強結合系の非線形挙動を研究することにより、それらの系における高機能発現機構の解明を目指している。

物質は、他物質と混じり合い（または接触し合い）、複合系を構成して初めて高度な機能を発揮する場合が多い。物質複合系の挙動は、各物質要素の挙動の重ね合わせからは到底想像もつかない高度なものになり得る。すなわち、物質複合系は、高機能発現の宝庫である。各要素を個別に眺めるのではなく、複数の要素の集まりを総合的にシステムとして捉えると、多くの新しいことが見えてくる。コロイド分散系、金属－電解質水溶液に代表される固液界面系、生体系などの物質複合系の非線形挙動を独自の複合型統計力学理論に基づいて研究している。最近では、特に生体系の研究に重点を置いている。複雑極まりない生体系を水も含めて原子レベルで統計力学理論的に（計算機シミュレーションではなく）扱うことを可能にしつつある。蛋白質の折り畳み、蛋白質の会合による高次構造形成、生体分子による自己組織化や分子認識など、生命を支える種々の秩序化過程の微視的機構に対し、水分子の並進移動に起因するエントロピー効果の重要性に焦点を当てた他に類を見ない新理論を構築している。蛋白質の折り畳みと表裏一体にある変性の問題とも取り組んでいる。

また、核融合の基礎研究として、トーラスプラズマ中の高速粒子閉じ込めの磁場構造に対する依存性とその結果として生ずるバルクプラズマ加熱の研究、高速イオンとプラズマ対向材との相互作用、磁場構造維持の制御装置としての磁気島検出装置の開発も研究テーマである。イオンサイクロトロン周波数帯加熱実験を用い、プラズマ中に粒子源を用いることなく少数イオンモードの加熱によって、高速イオンを生成し、磁場配位の成分の一つであるトロイダル方向の磁場リップルに対する依存性を明らかにした。磁気島検出については、平衡計算コードを用いた磁気島による磁場変化予測を行い、それに即したサドルループコイルを設計・敷設し、磁気島による信号変化を確認した。さらにデータ集積に努め有用性を確認する予定である。

4. 拠点形成の現状・課題・展望

4.1. 附属エネルギー複合機構研究センター

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は、平成 8 年「原子エネルギー研究所」および「ヘリオトロン核融合研究センター」の統合・再編により発足した「エネルギー理工学研究所」の附属施設として出発した。「エネルギー理工学研究所」の研究対象である、エネルギーの生成、機能変換、利用過程における多様な物理的、化学的複合過程の機構解明と応用を目的に、既存の大型装置および整備予定の装置類を一括して管理・運営すると共に、それらを用いた学際的研究を推進することを目的とした。」センターでは、技術職員を統合し、また既存の設備を整備・充実・発展させて研究所の固有研究分野とは一線を画し、プロジェクト的研究を機動的に展開できるよう、統括する教員を配置し、研究所の大部門研究分野の研究者が随時センター共同研究プロジェクトに参画できる研究体制を敷いてきた。

平成 17 年に設置後 10 年の時限を迎えるため、センター研究の在り方について部局自らによる点検・見直しが求められた。これにこたえるために平成 16 年、外部委員 16 名からなる「エネルギー理工学研究所在り方検討委員会」による外部評価を行い、研究所全体の研究目的、研究課題、研究成果、運営体制、附属施設等について、専門的、総合的両視点から外部評価を行ったうえで、附属施設の改組について重点的に検討・評価を行い、研究所が提示した改組拡充案に対して、『研究所の従来の実績・研究成果およびそこに包含される分野・課題の将来性の両面からみて、適切なものであると思われ、期待するところが大きい』との評価を受けた。

この結果をもとに平成 18 年、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 研究領域に集中、特化させ、それまでにセンターが培ってきた研究基盤施設を最大限に活用し、生存基盤科学の発展に寄与するとともに、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の国際流動・開発連携推進部を含めた研究体制へと改組・再編した。また平成 19 年、研究推進部体制を一部見直した。

センターの組織構成の現状は、センター長のもとに、重点化した研究活動に整合する研究組織として、国際流動・開発共同研究推進部、先進プラズマ・量子エネルギー研究推進部、光・エネルギーナノサイエンス研究推進部が設置されている。

4.1.1. 研究推進部における研究の現状・課題・展望

[現状]

(1) 国際流動・開発共同研究推進部

センターにおける国際的なエネルギー理工学研究ネットワーク拠点としての機能強化を図るための組織である。国内外の他研究機関との連携・融合によるエネルギー実用化中核研究および産業応用研究を推進している。競争的資金による設備整備を行い、関連する産官学機関との共同研究・連携協力・人的交流を推進している。本研究推進部のもとに、国際共同・連携研究推進領域、国内共同・連携研究推進領域、産官学共同研究推進領域、および文部科学省の公募事業の一環として ADMIRE エネルギー産業利用推進室が設置され、活動している。

(2) 先進プラズマ・量子エネルギー研究推進部

未来エネルギーシステム創出につながる挑戦的な先進プラズマエネルギー研究および量子エネルギー研究をとりあげ、これまでの成果を基盤に、プラズマエネルギー科学と先進エネルギー材料学の融合を目指した研究を展開している。とくに、関連研究グループが培ってきたヘリオトロン J (プラズマ実験装置)、DuET/MUSTER (材料実験装置)、IEC(慣性静電閉じ込め装置)などを中心とするハードおよびソフト面での特色を活かして、当該分野研究の技術的発展により社会的貢献を目指している。本研究推進部のもとに、先進プラズマエネルギー制御研究領域、プラズマ・水素・材料融合研究領域、プラズマエネルギー創成応用研究領域、先進原子力エネルギー研究領域が設置され、活動している。

(3) 光・エネルギーナノサイエンス研究推進部

光・ナノ・バイオテクノロジーを融合した新学術領域である「エネルギーナノサイエンス」の確立による太陽エネルギー、バイオエネルギーを中心とする自然エネルギーの高効率利用原理の解明と、先進的ナノバイオ高機能性材料の創出を行っている。触媒材料創製・機能解析システム、ナノ構造体創製光電変換特性評価装置などとともに、テラワット級フェムト秒レーザー装置や京都大学自由電子レーザー施設 (KU-FEL) を加え、次世代エネルギーシステムを構築するため、世界最先端のエネルギーナノサイエンス研究環境を創設しつつある。本研究推進部のもとに、ナノ素子創製研究領域、光ナノ反応ダイナミクス研究領域、コンビナトリアルマテリアル研究領域、光量子エネルギー創成研究領域が設置され、活動している。

[課題と展望]

第 1 期中期目標・計画におけるセンターの位置づけは、研究所における共同研究制度支援の中核的研究組織としての機能強化であり、そのための措置として平成 18 年、新たなセ

ンターとして研究体制の改組・再編を行った。

エネルギー理工学研究所の目標・理念を達成するために、「第1期中期目標・計画」の目指すべき研究の方向性として、研究所発足以来展開してきた社会的受容性の高い高品位エネルギーの生成、変換および利用研究を基盤とする連携研究体制を充実させ、部門横断的な複合領域研究をさらに推進することにより、新領域研究へと展開することを掲げている。とくに第1期中期計画においては環境調和型エネルギーシステム構築を目的とした3つの重点複合領域研究を設定し、エネルギー理工学の研究拠点としての役割（21世紀COEプログラム）を果たすと共に、各重点複合領域研究の統合により、学際的・独創的な新領域研究を開拓し、その国際的研究拠点の形成を目指すことを掲げた。

そのための措置として、(a)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いる。(b)3重点複合領域研究の中核的研究として、ヘリオトロンJ装置によるプラズマ閉じ込めの高性能化、耐極限環境先進構造材料の開発、可搬放電型中性子源の高性能化、ナノ材料創製と同材料を用いた次世代太陽電池の高効率化を推進すると共に、バイオマス資源のクリーン燃料化、生物型酵素を用いた高効率物質変換反応の開発、高機能性赤外線自由電子レーザー装置や高機能性超短パルスレーザー装置の開発、エネルギーシステムに関する理論解析手法の構築や解析・設計研究を発展させている。加えて、大学ならではの使命をも果たすべく、エネルギー分野における横断的基礎研究および萌芽的研究の育成に努めている。更に(c)共同研究制度支援の中核としての附属エネルギー複合機構研究センターの機能をさらに強化し、平成18年に新たな附属研究センターに改組する計画を掲げ、予定どおり改組を実現し、現在、順調にセンター研究を展開しているところである。

4.1.2. センター共同研究の成果

平成8年の研究所発足にあたり、研究所の設置目的を具現化するために、3つの重点研究課題を設け、センターにおける共同研究はこの重点課題を推進するものと定めた。平成12年、研究所教員ならびに研究体制の充実に伴い、センター共同研究の重点課題の見直しを行い、新しく研究所が推進すべき重点的な研究領域、すなわち「研究所重点推進領域」を設定した。さらに、第1期中期計画策定に際し、当該期間の研究の柱となるべく重点複合領域研究（プラズマエネルギー重点複合領域研究、バイオエネルギー重点複合領域研究、光エネルギー重点複合領域研究）を設定した。これに伴いセンターにおける共同研究計画も、重点複合領域研究の推進を基本として行っている。一方、平成18年からはセンター改組に伴い3研究推進部制に移行し、中期計画に挙げられた3重点複合領域研究を更に加速させるため、センターのどの推進部に属する研究かを踏まえた公募研究に切り替え、それ

ぞれのプロジェクト研究に対応する研究組織を明確化し、これまで進めてきた共同利用・共同研究活動の構築のさらなる発展に努め、より重要となったアカウンタビリティの所在も明らかにしている。現在、研究目標を第 2 期中期目標に向けて軌道修正しつつ、順調に成果を挙げつつある。

[プラズマエネルギー重点複合領域研究]

プラズマエネルギー重点複合領域研究では、プラズマエネルギー応用である核融合炉開発のための基礎的研究が重要な柱の一つとなっている。ヘリオトロン J 装置によるプラズマ閉じこめの高性能化、DuET/MUSTER 施設による耐極限環境先進構造材料の開発、可搬放電型中性子源の高性能化と応用、さらには基盤研究として、エネルギーシステム設計および評価方法論研究を中心とした研究を展開してきた。耐極限環境先進構造材料開発関連研究は、核融合開発のみではなく、次世代原子力システム等からの期待も大きく、この方面からの大型外部資金獲得が行われるとともに、産学連携も含め、学外組織との連携的共同研究活動が活発になってきた。

またプラズマエネルギー重点複合領域研究の一つの応用分野である核融合開発に密接に関連する部分については、核融合科学研究所を中心とする全国的な双方向型共同研究の課題「先進的磁場分布制御によるプラズマ輸送・安定性改善の研究」への主体的な参画によっても、これを推進し、核融合科学研究所における平成 20 年度の双方向型共同研究外部評価においても、『外部の研究者との交流が活性化し、研究課題数や論文数等研究成果の量的拡大が進んでおり、研究成果の水準は向上している』との評価を得た。さらに、21 世紀 COE プログラム研究成果と、これまでに開発してきた基幹装置や人材の資源を活用することにより、プラズマ・材料システム統合研究を展開してきた。

[バイオエネルギー重点複合領域研究]

バイオエネルギー重点複合領域研究は、バイオおよびナノテクノロジーを融合させたバイオ・ナノテクノロジーを基盤とし、光エネルギー重点複合領域研究との融合により、光電変換技術をもとにした太陽電池開発や太陽光発電による水素製造ならびにバイオマスを含む自然エネルギー利用のための生物機能変換等、環境調和適応型エネルギーシステムおよび物質変換システムの開発のための「太陽エネルギーシステム研究」の拠点形成を推進した。具体的には、太陽エネルギーシステム研究の遂行に必要となる光エネルギー、ナノテクノロジーおよびバイオエネルギーの融合研究を高効率に実施するために「光・ナノ・バイオ融合研究統合基盤」を構築し、世界をリードできる研究基盤の整備を行った。さらに、21 世紀 COE プログラムの研究拠点活動成果を基盤に、太陽電池をはじめ、水素、バイオマスおよび二酸化炭素等の高度利用の連携複合研究を展開した。同時に、企業との共同研究を通じて、上記の研究成果を物質生産技術に応用することにより、環境に優しい物質生産システム（グリーンケミストリー）の構築と、持続可能社会のための産業育成に寄与

できる研究開発を推進した。とくに独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）委託事業である「太陽光発電システム未来技術研究開発」を推進した。

[光エネルギー重点複合領域研究]

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

具体的には、光エネルギー機能の高度化とその利用による新領域の開拓のための基幹装置として、これまで開発を続けてきた 2 種類の装置、すなわち、広帯域波長可変・偏光可変機能を備えた小型高輝度な自由電子レーザー（FEL）、および位相制御機能を備えた超短パルス高強度レーザーを完成・高性能化すると共に、利用に不可欠な光エネルギービームの制御技術を確立した。これらレーザー装置を研究所のユニークな基幹装置かつ学際的共同研究のための先端的ツールとして機能させた。すなわち、高性能・高機能なレーザーを利用し、21 世紀 COE プログラム等における次世代高効率太陽電池の研究、および光エネルギーの特長を生かしたその他の先進的研究を推進し、共同利用施設としての機能を果たすに至っている。

[社会貢献での成果]

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

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

4.1.3. 課題と展望

(1) 現状の課題

① 第1期中期目標・計画の円滑な達成と次期の課題の抽出

研究所における共同研究制度支援の中核的組織としての機能強化について、平成18年のセンター研究体制の改組・再編によって、順調なスタートを切ったが、今後、第1期中期目標期間内に、たとえばプラズマエネルギー研究に係わる双方向型共同研究の更なる推進を含めて、国内外の他研究機関との連携融合研究の一層の強化を図る必要がある。

また当初の3重点複合領域研究（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、光エネルギー複合領域研究）から、第2期中期目標・計画に先立って、2研究領域（先進プラズマ・量子エネルギー研究領域、光・エネルギーナノサイエンス研究領域）への集中、特化を、段階的に進めているところであり、ハード・ソフト両面での研究体制の円滑な軌道修正に充分留意し、次期の課題を抽出する必要がある。

② ハード面での課題

センター発足以来、優れた施設・設備群を整備・活用し、基幹となる研究設備の整備を進めてきたところであるが、設備機器類の中には、老朽化の進んだものが含まれており、それらの更新が急務となってきている。これらの更新や改修には多額の費用を必要とするため、センターの長期的な研究構想と併せて検討を進めなければならない。

一方、建物・設備については、平成19年度から宇治地区本館耐震改修工事が開始され、建物関係の一部の整備が進行中であるが、この課題の根本的な解決については、センターのみの観点ばかりでなく、全学的な観点からの整備計画の立案が是非とも必要である。

③ ソフト面での課題

とくにセンター基幹装置を中心とする共同利用・共同研究活動の更なる充実・発展があげられる。プラズマエネルギーに関する学理・技術の新領域開拓とエネルギー指向型先進的ナノバイオ機能材料創出の2つのミッションの早期達成に向けて、国内外の共同利用・共同研究を受け入れ、当該コミュニティとともに成長・発展するセンター研究体制を拡大・発展させることで、研究所およびセンターのアクティビティを最大限に発揮していかなければならない。

共同利用・共同研究の実施に関しては、センター基幹装置に密接に係わる研究の他に、所内・外の研究者間の有機的繋がりを積極的に進めることにより、異分野の研究者間の交流を図り、研究上の新しい着目や学際的な研究成果を挙げる事を目指した萌芽的なセンター公募型共同研究を実施してきている。公募内容は、研究所で議論してきた研究課題の

方針とともに、随時、見直し・改善を行いながら現在に至っている。平成 16 年からは第 1 期中期計画策定とともに前述の 3 重点複合領域研究の課題についての公募型共同研究を行ってきたが、平成 18 年からはセンター改組に伴い 3 研究推進部体制のもとで、どの研究推進部に属す共同研究かを踏まえた公募型共同研究に切り替え、研究成果に対する説明責任を明確にした。しかしながら公募型共同研究を実施する上での予算的な裏づけがなく、共同研究を行う研究者が、共同研究の名の下に各自の研究費を持ち寄ってこれに充当している状況が続いている。最近の予算削減に伴い、公募型共同研究に充当できる予算総額は漸減している。公募型共同研究の推進・向上のために早急に予算的充実措置を考える必要がある。また、以前から旅費に使用できる予算がなく問題点に指摘されていたが、平成 16 年の国立大学法人化によりこれらの制限はなくなった。しかしながら予算総額は増加していないため、特に遠方の共同研究者にとっては公募型共同研究を進める上で旅費が大きな制約になっていることは否めない。

(2) 次期の課題

① エネルギー理工学研究所は第 2 期中期目標期間において、環境調和・社会基盤型エネルギーシステムの実現に向けたエネルギー理工学研究の推進がその責務として求められる。この目的を効果的に達成するためには、研究所の全国的・国際的な共同利用・共同研究拠点の形成およびネットワークの構築を図り、またエネルギー理工学の総合的・先端的研究現場における人材育成に努めなければならない。当センターにおける次期の課題も、この基本方針に従い、とくに大型特殊装置を活用した共同利用・共同研究を中心に、恒常的に必要な予算措置を確保することによって、その適切な役割を果たす必要がある。

② 既に(1)項で述べたセンターの現状の課題を解決することが、まず次期の課題として優先されるが、これに加えて共同利用・共同研究拠点化に対応するためには、研究者受け入れ業務従事者や、機器操作ならびに実験補助等の研究補助員の増員といった人的リソースの充実が必要不可欠である。これと同時に、設備機器の稼働時間の増加が予想される。これに対する光熱水費や、設備機器の保安・維持費の増額が求められる。また、センター運営組織に関しても、共同利用・共同研究拠点化に対応すべく見直しを行う必要があり得る。

③ 今後の共同利用・共同研究拠点化を考慮に入れると、共同研究者の宿泊施設や共同研究のための実験準備室等の整備が是非とも必要である。当然、全学、特に宇治地区の全国共同利用施設群との共用を図り、運用面も含めた効率的な整備計画を早急に立てていく必要がある。

(3) 展望

エネルギー理工学研究所の研究活動における今後の取組は、全国的・国際的な共同利用・共同研究拠点としての役割を果たし、当該分野の発展ならびに分野の垣根を越えた新たな学問領域の開拓に寄与していくことである。センターがこれまで培ってきた大型特殊装置や先端実験施設の運営および維持・整備を充実させ、共同利用・共同研究活動を通じて、関連コミュニティからの要望を着実に実現していくためには、研究所が共同利用・共同研究拠点として位置づけられることが是非とも必要であり、そのなかで研究所の横断的研究の中核的施設であるセンターの役割を積極的に果たしていくことが期待される。これによって、これまで小規模のプロジェクトに限定されていた将来性のある公募型共同利用・共同研究についても、全国の研究者の英知を結集して、効果的・効率的に展開できるようになり、飛躍的な研究成果の発信が見込めると期待される。この点における平成20年2月のエネルギー理工学研究所の外部評価である「在り方検討委員会」での議論を踏まえて、以下に具体的なセンター共同利用・共同研究活動に係わる今後の取組について述べる。

4.3.3.1. 組織運営面における取り組み

センター運営組織については、平成18年の改組における研究体制の整備によって、共同利用・共同研究拠点化に柔軟に対応できるが、専任教員や研究補助員等の人的リソースの拡充や大型特殊装置や先端実験施設の運転経費および維持・整備のための経費増大に対応した財政措置が不可欠である。また、外部に積極的に開かれた運営と、共同利用・共同研究の機会均等や透明性の確保のため、関連コミュニティとの連携を一層強化する必要がある。

センターの大型特殊装置や先端実験施設を用いた共同利用・共同研究、プロジェクト的な研究開発および個人による優れた新領域研究をそれぞれ円滑に実施するため、研究課題の採択と成果の評価は、透明性および公平性を確保しながら、常時、実施していく仕組みが必要である。

エネルギー科学研究科との人事交流、外部からの人材の導入を積極的に行い、また任期制を導入している他の大学等との教職員の人事の流動化を進め、その効果がセンター共同利用・共同研究の現場に現れる取組も必要であろう。

4.1.3.2. 研究教育活動面における取り組み

センターでは世界水準において突出した性能をもつ各種の大型特殊装置や先端の実験施設、設備・装置群を広く国内外の研究者や学生に提供し、多様な形態と研究体制による効果的・効率的な活用によって、学際的融合研究の新領域を開拓するとともに、人材育成のため、研究現場での実践的教育に活用している。このような本センターの特色を活かし、世界的に見ても評価され得る独自の戦略的目標と計画を構築するため、各研究領域におけ

る研究ロードマップを作成し、研究成果の社会への還元を推進する。作成したロードマップに基づき、グローバルなエネルギー理工学研究教育拠点を形成するため、国際的な共同利用・共同研究を展開する。

また、改組を行ったセンターのミッションを 3 重点課題から 2 課題に集約し、より効率的運営を推進しているが、一方で、今後新しい研究領域の開拓に向けては、研究推進部の在り方に関する検討を加えるなど、長期的なセンター研究の展開を一層強化する取組が必要である。

4.1.4. 次期の課題に対する具体的な目標等

エネルギー理工学研究所の目指す研究目標を貫徹するためには、既存の、また将来のエネルギーシステムとエネルギー源をしっかりとデッサンして、それをもとに目的基礎研究と応用研究を強化する必要がある。具体的には、次期のセンター研究の中核となる先進プラズマ・量子エネルギーおよび光・エネルギーナノサイエンスの 2 研究領域において、大型特殊装置および先端実験施設の共同利用・共同研究を集中的に行う場を提供し、先進エネルギー理工学研究の推進に寄与することを目標とする。そのため、以下の具体的な目標を掲げる。

① 研究所の共同利用・共同研究拠点化を促進する。

② 先進プラズマ・量子エネルギー研究：

- ・核融合科学研究所との双方向型共同研究を実施し、核融合科学の発展に貢献する。
- ・国際熱核融合実験炉開発（ITER）事業に参画し、核融合炉工学および核融合炉材料の開発研究を実施する。
- ・現行の文部科学省公募事業「次世代原子力システム技術開発」研究および経済産業省公募事業の「原子力人材育成プログラム」を推進する。
- ・現行の文部科学省公募事業「民間との連携協力（ADMIRE）」計画を推進し、先端実験施設の拡充に努める。

③ 光・エネルギーナノサイエンス研究：

- ・自由電子レーザーや高強度フェムト秒レーザーを用いた高精度物質解析研究や機能材料開発研究を推進する。
- ・次世代太陽電池の開発等を含む光・バイオエネルギー研究を推進する。

④ これまでにセンターが実施してきた国際共同研究を拠点研究として実施し、研究所が目

指すグローバルなエネルギー理工学研究拠点の形成に貢献する。

⑤ とくに研究所が取り組んでいる日米・日欧・日豪の科学技術協力事業核融合分野の共同研究、日中韓のアジア研究教育拠点事業（Asian CORE Program）や ASEAN 諸国との共同研究事業をはじめとする国際連携活動の拡大に貢献するため、センターの大型特殊装置や先端実験施設を国際共同利用・共同研究に提供する。

⑥ 大型特殊装置および先端実験施設の維持・整備を行うため、施設利用料や競争的資金の恒常的な獲得を目指す。

4.2. 21 世紀 COE プログラム・GCOE プログラム

4.2.1. 21 世紀 COE プログラム

本 COE は、平成 9 年の気候枠組み条約第 3 回締約国会議（COP3）において採択された京都議定書の要請に応える社会への変革を目指して、京都大学大学院エネルギー科学研究科、エネルギー理工学研究所、生存圏研究所（旧宙空電波科学研究センター）の 3 部局が合同で、「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」を目標とする提案を行い、平成 14 年度の文部科学省の COE プログラムに採択され 5 年間にわたり事業を進めた。

本研究拠点形成計画では、環境に優しい新エネルギーシステムとして、①太陽エネルギーの創製・変換・利用技術、②水素エネルギーの製造・貯蔵・利用技術、③バイオエネルギーの創製・利用技術、の研究開発を推進するとともに、④エネルギー削減型社会の形成を含む、真に環境に調和したエネルギーシステムの構築を目指した研究拠点形成を目的とした。一方、教育拠点形成では、エネルギー科学が世界的視野からの判断能力とバランス感覚が必要であることから、国内外のエネルギー研究機関との連携ならびに人文・社会系との連携を図り、国際社会ならびに地域社会のニーズを的確に把握し、国際的に通用する人材の養成を目指した。また、これらの研究教育拠点化活動を円滑に推進するための組織として、国際環境調和型エネルギー情報センターを設立し、エネルギー情報の発信・政策提言を行うとともに、国際連携、産官学連携を推進し、大学の社会的責務を果たすことを目的として活動を進めた。本研究所の教員は、上記 4 本柱のうち、主に「太陽エネルギー」、「バイオエネルギー」、について研究を推進した。また、国際環境調和型エネルギー情報センターの運営についても海外拠点形成事業に積極的に参画した。

本プログラム 5 年間の事業を通じて、太陽エネルギータスクでは、一次元ナノ材料による階層性のナノ構造をもつ有機薄膜太陽電池や色素増感太陽電池など、有機太陽電池の国際拠点を構築した。また、人工太陽ともいえるプラズマ核融合技術では、ヘリカル磁場や、球状トカマクなど、世界を先導する磁場閉じ込め方式の提案を行うとともに、熱流束と粒子束を制御するための炉工学の分野でも世界をリードする研究拠点を構築した。バイオエネルギータスクでは、人工光合成システムによる二酸化炭素のメタノールなどへのクリーン燃料化、高効率エネルギー利用・物質変換を目指したテラーメイド酵素、光応答性ミニチュアタンパク質、機能性ペプチド素子の開発に取り組んだ。さらに、バイオマス資源の有効利用を目指して、バイオエタノール高効率発酵プロセスの開発の研究を進め、バイオマスのエタノール変換において最も重要である酵素の機能変換を世界で初めて達成した。

国際連携では、アジアとのパートナーシップがとくに重要であることから、平成 15 年度にバンコクオフィスバンコク市内に設けるとともに、すでに協力協定を締結しているラ

ジャマンガラ大学タンジャブリー校内に国際共同研究のための実験室を開設し、以後タイ在任の調査専門員の協力のもとで、アジアの多くの大学との研究協力を進めた。平成 16 年度には、拠点設置以降の情報収集、研究交流の成果をもとに、タイにおける 21COE の国際事業などを共催した。とりわけ平成 16 年 12 月には HuaHin でエネルギー環境合同大学院大学（JGSEE）との共催による第 1 回 SEE Meeting（持続可能性エネルギーと環境国際シンポジウム）を開催した。

本 21COE プログラムは、平成 18 年度で終了したが、それまでの活動のほとんどは、GCOE 活動へと継承され、さらに発展させるべく、種々の取り組みが展開されている。例えば、SEE Meeting に関する国際連携活動は、その後も日本、タイ、インド、インドネシアその他の国々の主催と共催により継続して（現在までに通算で 6 回）開催されている（詳細は後述する）。

4. 2. 2. グローバル COE プログラム

本「グローバル COE プログラム」（以下、GCOE）は、文部科学省による「21 世紀 COE プログラム」の評価・検証を踏まえ、その基本的な考え方を継承しつつ、を一層充実・強化する観点で、より教育に重点を置きつつ、我が国の大学院の教育研究機能、国際競争力を目的として平成 19 年度より実施されている。京都大学は「地球温暖化時代のエネルギー科学拠点」として平成 20 年度に学際・複合・新領域区分に応募して採択された。（応募 111 件中採択 12 件）。実施体制は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、原子炉実験所が共同で、CO₂ ゼロエミッションを目指した研究と教育を行い、2100 年までに化石資源に依存しないエネルギーシステムに到達するシナリオの実現に向け、教育者、研究者、政策立案者を育成することを目的としている。

4. 3. 国内共同研究

研究所、センターはそれぞれが主体となってさまざまな共同研究を行っている。この中でセンターが主体となって行っているセンター共同研究については 4.1.ですすでに述べた。ここでは核融合科学研究所との間で平成 16 年度から行われている双方向型共同研究、平成 19 年より 5 年計画で開始された文部科学省による「先端研究施設共用イノベーション創出事業」の一つとして採択されたエネルギー機器材料の創製と保全研究のための産業利用支援（ADMIRE 計画）について述べる。

4. 3. 1. 双方向型共同研究

平成 16 年度の法人化と時を同じくして京都大学エネルギー理工学研究所のヘリオトロン J 実験グループと核融合科学研究所（以下、NIFS と略称）との双方向型共同研究が始まった。法人化の直前に、核融合コミュニティの総意として、これまで長年にわたり我が国の核融合研究を支えてきた大学と核融合研等の複数の実験計画・実験装置を整理・統合し、重点化・効率化する背策が実施されている。これは平成 15 年の科学技術・学術審議会学術分科会基本問題特別委員会核融合研究ワーキンググループの報告書「今後の我が国の核融合研究の在り方について」にまとめられている。

この報告では炉心プラズマに外挿可能なプラズマパラメータでの環状プラズマの総合的理解に対する継続的研究活動が必要であると指摘されている。また、大学の研究者は次のような核融合研究の重要課題の研究に貢献する必要があるとしている：1) 電場のプラズマ閉じ込めへの影響、2) 高ベータプラズマ物理、3) プラズマ閉じ込めに対する磁場配位の最適化、4) 常プラズマの生成など。NIFS は大学共同利用施設としてこれらの役割を先導するとしている。

過去の NIFS の共同研究は、大学の研究者が NIFS へ行きその研究活動に加わる形でなされていた。この双方向型共同研究は、その反対方向の

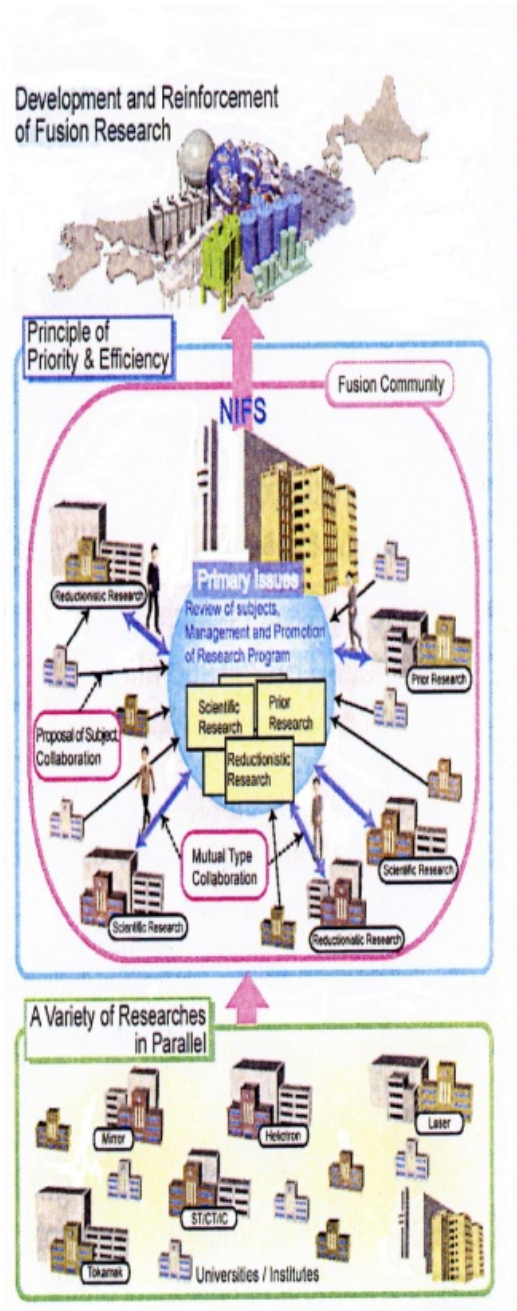


図 4.3.1 双方向型共同研究の概念図

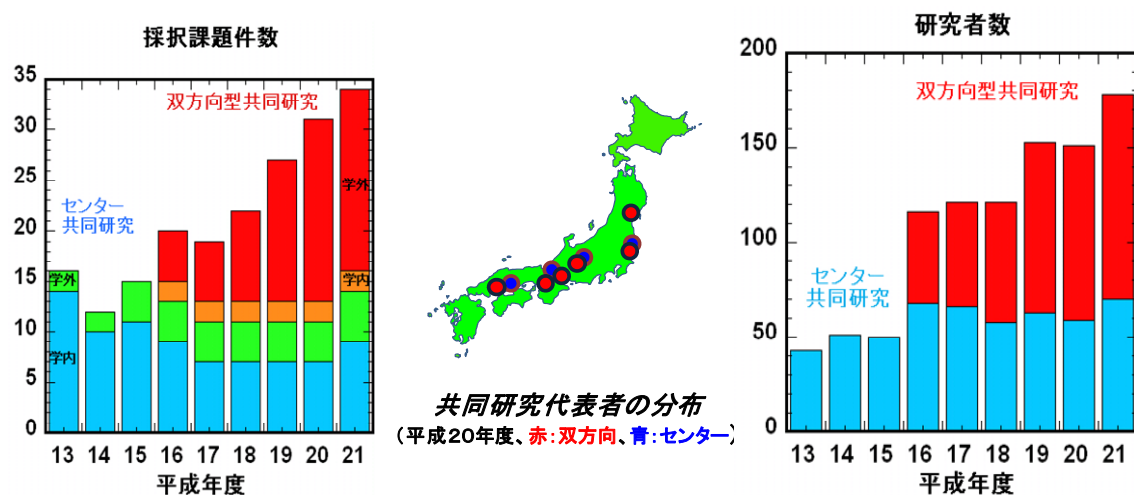


図 4.3.2 ヘリオトロン J に関する共同研究の採択課題の推移、共同研究者の分布、研究者数の推移。

研究活動を可能にした。すなわち、NIFS の研究者が大学へ赴き共同研究することができる。それゆえ両者の研究資源がより有効に活用でき、かつそれによる相乗効果も期待することができる。

平成 21 年度までは、NIFS と 4 大学の研究センターがこの共同研究に参加している。すなわち、筑波大学プラズマ研究センター、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、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター、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である。今後、活動の進展により炉工学関係の研究拠点も参画する予定である。これらの研究センターは NIFS との研究者間の共同研究のみならず、他大学の研究者を含めた独自の共同研究を企画することができる。これらの共同研究プログラムは NIFS の双方向型研究課題として支援を受けることとなる。

京都大学のヘリオトロン J 研究グループと LHD グループを含めた他大学との共同研究はここ 20 年継続されている。双方向型共同研究が開始されてからは、その活動は大いに促進されており、例えば、それは共同研究の採択数、参加研究者数に表れている。参加研究者の分布と課題数、研究者数の推移を示すと次のようになる。また、研究課題の募集に関しては、当研究所の担うべき課題を挙げ、それに則する研究課題を参加研究者に設定し、申請して頂いている。平成 21 年度の課題を例に挙げると次のようになる。① 先進的磁場分布制御による輸送および高エネルギー粒子閉じ込めの研究、② 先進的磁場分布制御による MHD 平衡・安定性の研究、③ 先進的磁場分布におけるプラズマ電流制御の実験的研究、④ ECH 加熱機構の解明とその高性能化、⑤ 先進的磁場分布制御による熱・粒子排出制御の研究、⑥ 重イオンビームプローブ (HIBP) 等の設置による密度揺動・ポテンシャル揺動の計測をめざした物理工学設計。平成 22 年度に始まる第 2 期中期目標・中期計画期間に向けたヘリオトロン J 実験グループの双方向型共同研究の総括とこれからの方針を定め

るため平成 21 年度 9 月に内外の研究者を集め、シンポジウムを開催した。このシンポジウムでは NIFS との共同研究課題として「定常環状プラズマ型核融合炉実現を目指した理学・工学の体系化」、分担課題として「磁場配位によるプラズマ構造形成・不安定制御、閉じ込め磁場最適化、局所プラズマ計測器整備」を掲げ、NIFS を始めとして全国の共同研究者とともに核融合炉実現に向けて研究を発展させることとした。

4.3.2. エネルギー機器材料の創製と保全研究のための産業利用支援（ADMIRE 計画）

本プロジェクトは文部科学省の委託事業である「先端研究施設共用イノベーション創出事業【産業戦略利用】」として、平成 19 年度より開始しているが、平成 21 年度からは補助金事業である「先端研究施設共用促進事業」に移行している。本事業の目的は、大学の研究設備を産業界に開放することで、施設共用を通しての産官学連携によるイノベーション創出することであり、全国で 16 の大学・公共研究機関が同じ枠組みで採択され平成 19 年度に事業を開始している。当研究所では、ADMIRE 運営委員会、エネルギー産業利用推進室、産業利用課題選定委員会を新たに設置し、企業の支援を行っている。

課題の採択された企業は、通常課題一件につき利用課題のテーマや利用設備により、最大で 2 年間の無料での施設利用が可能で、その間の施設利用経費が文部科学省から補助される仕組みとなっている。利用形態は単独利用と共同研究利用に分類され、単独利用の場合は企業による成果の占有が可能である。公共機関のプロジェクトであるため、利用終了時には報告書の提出が求められるが、書類の公開は最長で 2 年間の猶予が認められ、特許申請などにも配慮された仕組みになっている。また、無償利用終了後は共同研究等を通して、有償で施設を利用することもできる。



図 4.3.3 DuET 施設：2 基の MeV 級イオン加速器と精密照射ステージから成る

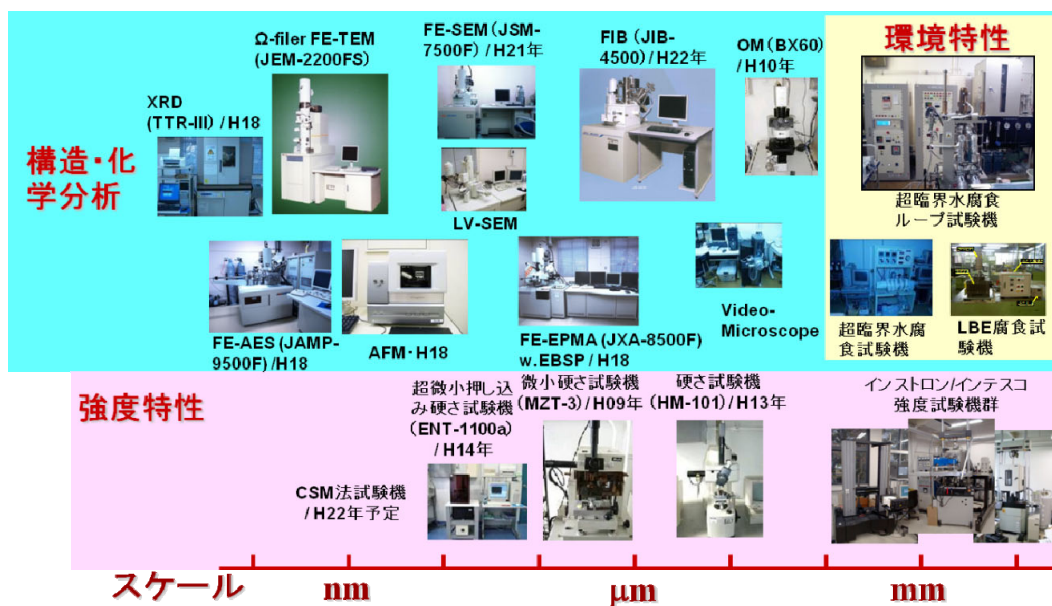


図 4.3.4 MUSTER 施設の概要

本研究所が共用対象としている装置は、複合ビーム材料照射装置(Dual-Beam Facility for Energy Science and Technology、DuET : 4.3.3)とマルチスケール材料評価基盤設備(Multi-scale testing and evaluation research、MUSTER : 4.3.4)である。DuET は 2 台の MeV 級加速器からなる装置で、液体ヘリウム温度から 1600℃までの温度領域、真空および制御された雰囲気下での複合同時照射実験が可能で、エネルギー材料工学研究に特化されたイオンビーム照射設備である。MUSTER は電界放出型透過電子顕微鏡を代表とする原子レベルの構造解析および化学分析装置群から、各種強度試験機など工学的実用化レベルの装置群までを集結した、マルチスケール材料評価施設である。これまで大学においては、DuET と MUSTER を有機的に連携させて用いることで、主に原子力エネルギー材料に関する体系的な研究を中核的に進めてきた。主要な成果としては、次世代原子力システムや核融合炉材料用の酸化物分散強化鋼の開発や、革新的セラミックス複合材料製造プロセスを開発し、産業化へ展開した例などが挙げられる。

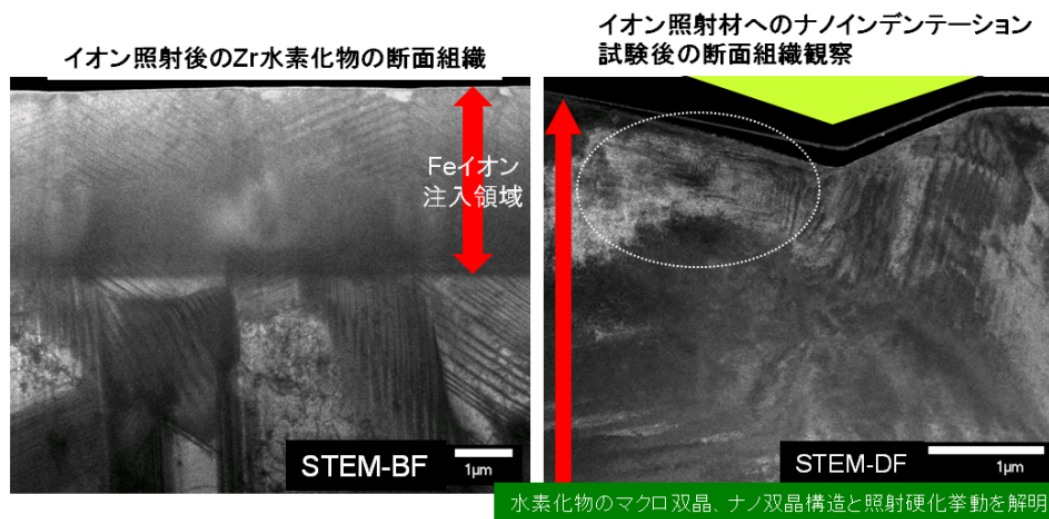


図 4.3.5 原子炉燃料被覆管材料の水素化物に対する照射効果の研究

ここで現在公開可能な範囲で成果の例をいくつか挙げることにする。図 4.3.5 は軽水炉燃料被覆管材料の寿命決定要因として重要なジルコニウム水素化物への照射効果の研究の例である。これは日本核燃料開発㈱が中心となって行っている「ジルコニウム水素化物の機械的特性に及ぼす照射損傷の影響」と題する研究で、DuET での照射後、ナノインデンターで照射による硬化を測定し、さらに圧痕直下の微細組織観察を行っている。この結果、水素化物中に生成している微細な照射 2 次欠陥を初めて観察に成功し、双晶変形が照射欠陥によって妨げられることによる硬化が生じている可能性などの重要な知見を得た。この成果は ADMIRE 職員と利用企業である日本核燃料開発㈱の共同研究として学会発表に至っている。

原子力以外のエネルギー分野の研究として強力磁石の開発の例を挙げる。これは平成 20

年度採択のインターメタリックス社と共同で実施した「粒界拡散したネオジム磁石の微細構造の研究」と題する研究である。ネオジム磁石は二十数年も前にインターメタリックス社の佐川社長が発明したものであるが、環境負荷の小さい電気自動車やハイブリッドカーのモーター用として、現在なくてはならない材料である。動力モーターへの応用で必要な耐熱化と、レアメタル添加元素 Dy の低減を同時に狙った研究である。この製法の中心的な技術である粒界拡散法はインターメタリックス社が開発したものであるが、特性向上の機構は明らかになっていなかった。図 4.3.6 は粒界拡散法による処理後のネオジム磁石の粒界付近の微細組織と Dy の分布状態を調べたものである。ネオジムに富む粒界相の外側に Dy に富む相が生成していて、これが磁化反転の核形成を防ぐことにより磁石の特性を向上させていることが分かった。またこの知見により、この処理法のさらなる高度化に向けた指針を得ることができた。利用企業はこれに基づいて特許を出願し、同時に事業として展開中である。

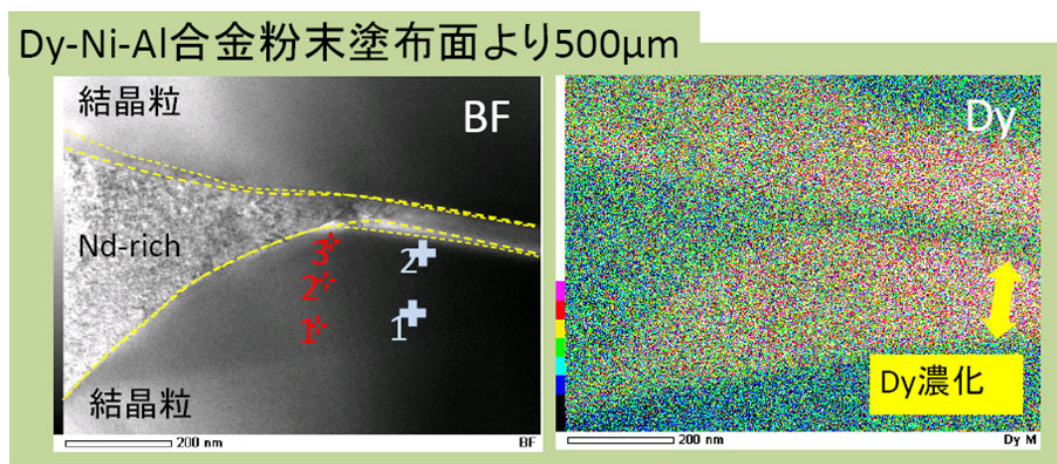


図 4.3.6 粒界拡散させたネオジム磁石の粒界付近の組織と化学組成

平成 19 年度採択の株式会社エネテック総研は、「次世代原子力エネルギーシステム用先進 SiC/SiC 複合材料の製造技術の開発」という課題名で研究を実施した。図 4.3.7 は本研究所で開発した NITE 法と呼ばれる製法で試作した炭化珪素を DuET で照射した際の微視組織である。この研究により、実験室規模で試作した材料と同等の特性を有する大型素材製造の見通しが立った。このように課題が早期成功したことから本研究所との共同研究に移行した。

環境負荷低減に関係して電子産業界では鉛フリーはんだへの移行が進められたが、これに伴う多くの不具合に悩まされている実態が ADMIRE への応募の傾向からも見て取れる。図 4.3.8 は IC を基盤に鉛フリーはんだで実装した後、千回の熱サイクルを加えた際の接合部の断面元素分布を示す写真である。ニッケル等が明瞭に複数の相に分離して存在するこ

とが分かるが、従来の懸念とは異なりニッケル濃度が低くなった部分でも接合が健全であることが明らかとなり、実用化の見通しが得られた。

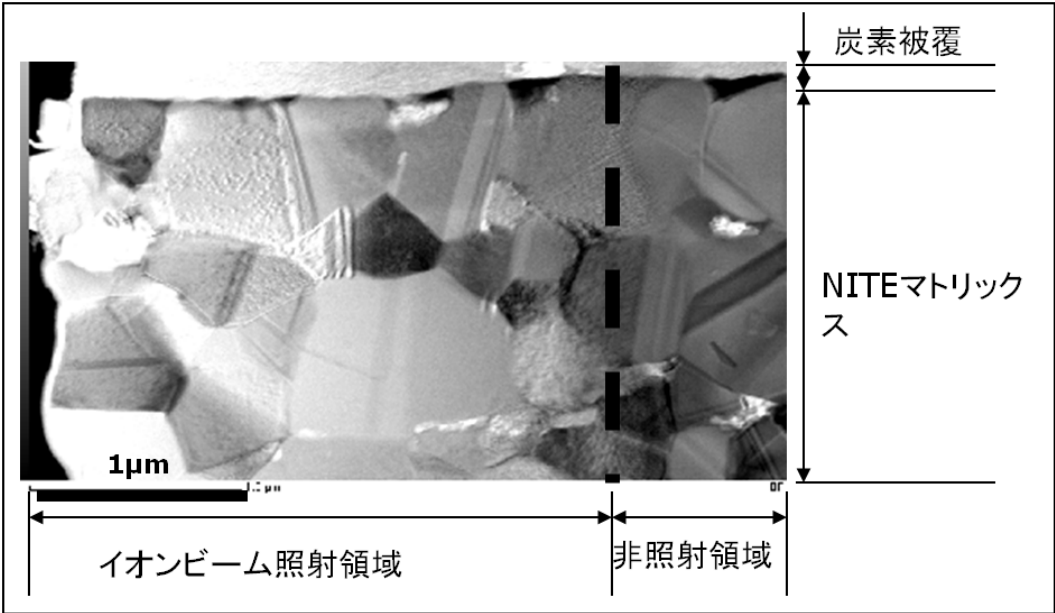


図 4.3.7 NITE 法で製造した炭化珪素の DuET 照射後組織

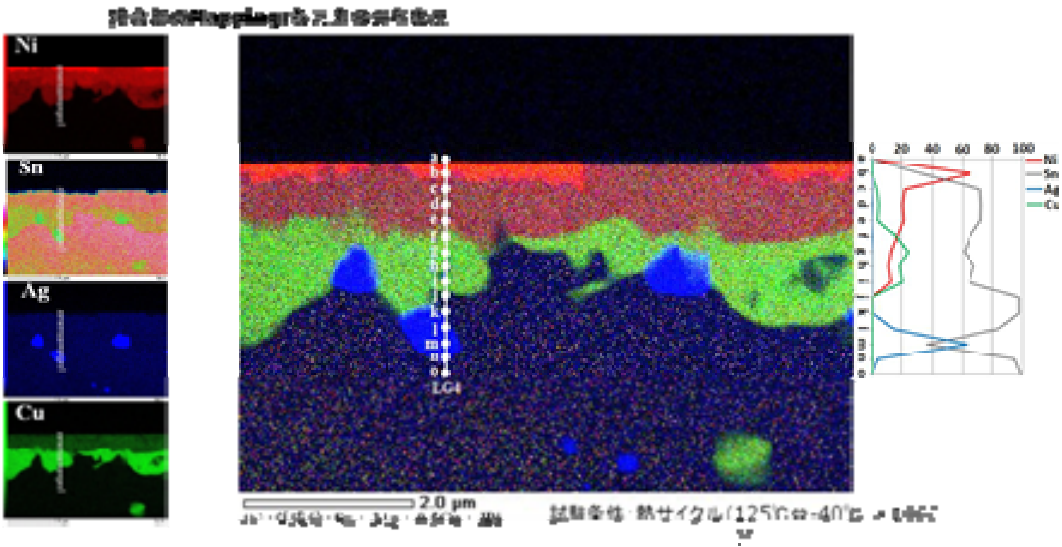


図 4.3.8 鉛フリーはんだ接合部の元素分布

ADMIRE 計画における取り組みが民間の分析評価サービス会社と大きく異なる点は、大学が分析・評価を請け負うのではなく、企業側が大学を訪れ直接装置を使用することであ

る。本研究所には本プロジェクトのためにエネルギー産業利用推進室が設けられ、施設共用技術指導研究員数名と特任教授 1 名が常駐しており、複雑な装置の使い方やデータ解析等に関して丁寧にサポートしている。また特任教授は外部への窓口リエゾンを担当しており、応募前の企業の産業利用相談に対応し、課題のマッチング活動を行っている。共同研究利用の場合は大学の学識者による問題解決へのきめ細かな指導も行っている。DuET、MUSTER は ADMIRE 計画が採択される以前から大学・研究所間での共同利用を進めており、施設運営・管理側のサポートも十分に整備されている。ADMIRE 計画の実施体制を図 4.3.9 に示す。

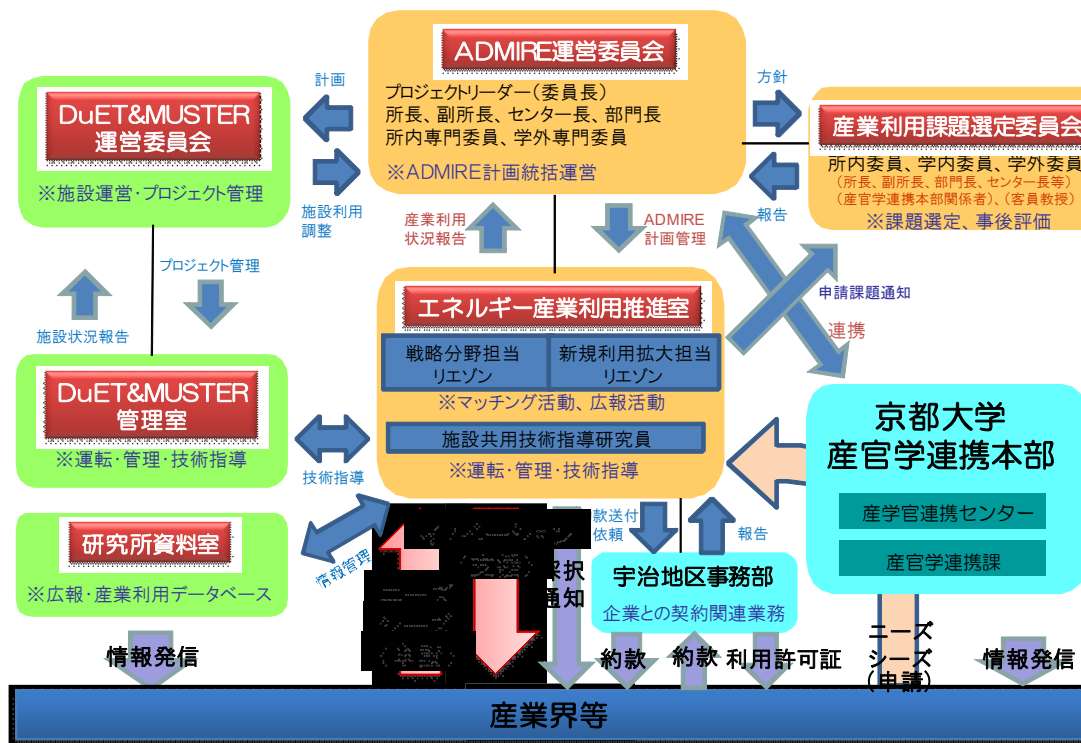


図 4.3.9 ADMIRE 計画の実施体制図

本プロジェクトでは、図 4.3.10 左の図に見るように、原子力業界だけでなく、金属、セラミックス、半導体デバイス、めっき・コーティング、食品など、実に様々な産業分野からのニーズに応じてきた。規模では大企業、中・小企業からバランスよく利用されていることが分かる。所在地別でみると、地元近畿地方を中心に、中部、関東、さらには外国企業からも広く利用されていることが分かる。

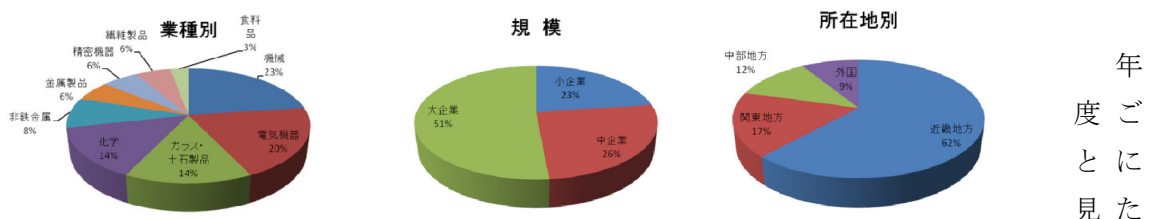


図 4.3.10 利用企業の統計分布

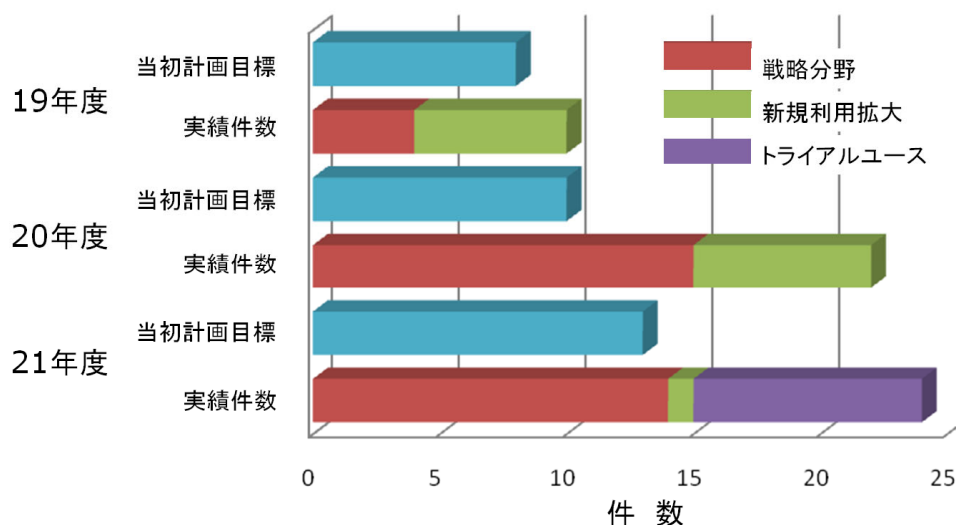


図 4.3.11 利用件数の推移

利用課題の当初計画数と実際の利用件数の内訳を図 4.3.11 に示した。年次を追って課題数は当初計画数を上回って順調に増加していることが分かる。すなわち平成 19 年度は 10 社、20 年度は 20 社(継続含む)、21 年度は 24 社(継続含む)の民間会社による施設共用が進められてきている。このように、ADMIRE 計画では、組織、人員の充実により、既存の施設をフル活用できる基盤、体制を整え、産業界の利用を確実に促進した。本事業は DuET/MUSTER 施設を産業界と学界・独立研究機関等とのインターフェースとして活用し、企業のシーズを大学の先端研究施設と知により育て、イノベーションを創出するというこれまでの産学連携とは異なる、新たなカタチの産学連携である。本事業は中期計画にも示されている「研究成果の社会への還元」や「社会との連携および協力の推進」を具現するとともに、エネルギー機器材料の創製と保全研究の開発拠点形成に繋がるものである。

ADMIRE のホームページ : <http://admire.iae.kyoto-u.ac.jp>

メールアドレス : admire-office@iae.kyoto-u.ac.jp

4. 4. 国際交流事業

4. 4. 1. 国際交流事業とその成果

エネルギー研究という学際領域の研究を推進するため、学内外、さらには国外との研究交流を積極的に実施し、多くの実績を有している。(資料編(II)第 2.3-2.5 節参照) これらのうち代表的なものを以下にまとめる。

平成 9 年から実施してきた日韓拠点大学方式学術交流は、平成 20 年より日本・韓国・中国の先進エネルギー科学の研究交流基盤の確立を目指した「アジア研究教育拠点事業」(Asian CORE program)へと発展させることで、東アジア地域におけるエネルギー科学研究の拠点としての機能を高めてきている。また、東南アジア諸国との交流については、SEE Forum、NEFSE (ASEAN COST+3 : New Energy Forum for Sustainable Environment (ASEAN プラス 3 科学技術委員会による持続可能な社会構築に向けた新エネルギーフォーラム、略称 NEFSE)) の中心メンバーとして関与し、ASEAN 諸国やインドを対象に、新エネルギーの研究・教育を通じて CO2 ゼロエミッション社会の実現を目的に、多国間・2 国間の共同研究の実施や人材育成、人材交流を行っている。平成 21 年現在で、15 カ国 53 機関が加盟し、東南アジア地域における低環境負荷エネルギー研究における中心的役割を果たしている。

東アジア地域における原子力エネルギー材料関連研究では、原子炉燃料・材料および核融合炉材料に関する日韓原子力学会連合ワークショップ (AESJ / KNS Joint Workshop 2009 on Nuclear Fuel and Materials、 and Fusion in conjunction with the Korea Nuclear Society the 40th year Anniversary Meeting) の開催 (平成 21 年 5 月) や、第 9 回先進エネルギー材料および核分裂・核融合材料に関する日中シンポジウム (9th China-Japan Symposium (CJS-9) on Materials for Advanced Energy Systems and Fission & Fusion Engineering) の開催 (平成 19 年 10 月) をはじめとした活発な研究交流を継続しているほか、日本原子力学会材料部会を中心とし、原子力システム材料に関する日韓サマースクールを主宰するなど、研究・教育の両面において「先進エネルギー科学分野におけるアジア研究教育拠点事業」の展開に大きな貢献を行っている。

日米間の研究交流としては、日米科学協力事業核融合分野の支援のもとで、核融合炉材料接合研究や慣性静電閉じ込め核融合において、複数の二国間共同研究を継続しており、核融合炉材料接合研究分野においては、平成 19 年度から 3 カ年継続して、“Workshop on Joining and Welding Technology R&D on Advanced Fusion Materials”を日米の双方において日本側代表者として開催してきたほか、慣性静電閉じ込め核融合においては、平成 21 年度実施分までに 11 回を数える“US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion”を日米交互に開催してきた。

日欧間における研究交流としては、ドイツ・エアランゲン大学との部局間協定に基づき、材料科学分野において研究交流を継続している。平成 20 年 8 月には第 3 回目となる 3rd Kyoto-Erlangen Symposium on Advanced Energy and Materials (先進エネルギーと材料に関する京都-エアランゲンシンポジウム) をドイツ・エアランゲン大学で開催し、双方の大学院学生を対象とした研修会を実施したほか、半導体材料、ナノ材料、電気化学、バイオテクノロジー、太陽電池、表面分析、原子力材料、高エネルギー粒子、自由電子レーザー等の分野において活発な議論を行った。また、平成 20 年 12 月には日仏研究者間交流推進団との「エネルギー分野における日-仏研究者間交流を推進するための調査」のための交流会を実施した。

4.4.2. 交流事業の課題と展望

前節に示したように、活発な研究交流事業を発展させることで、先進エネルギー理工学に関する学際的な研究拠点の形成へとつなげ、確実な成果をあげている。今後は、東アジア・日米間における先進原子力エネルギーや東南アジアにおける新エネルギー領域における研究拠点の更なる発展を目指すほか、附属エネルギー複合機構研究センターに新たに設置した国際流動・開発連携推進部を中心とし、個々の研究協定をより有機的に発展させることにより、学際的・独創的なエネルギー関連研究の推進を継続して行う予定である。

5. 中期目標・中期計画のまとめと今後の展望

今回の自己点検評価期間は平成 19-21 年度であり、これは第 1 期中期目標・中期計画（平成 16-21 年度）の後半 3 年間にあたる。中期目標・中期計画の進捗状況に関しては所内にワーキンググループを組織して、前年度の活動報告と自己判定、年次計画表の年度毎の更新、施策と評価確認表を補遺版として作成し、中期目標・中期計画の達成状況のチェックを行っている。この補遺版を各年度初めに教職員に配布することにより、年度計画実現に向けた注意の喚起を行っている。第 1 期中期目標・中期計画の達成状況に関しては、詳しくはこれら補遺版を参照願いたい、ほとんどの項目において順調に成果が達成された。

平成 22 年度から始まる第 2 期中期目標・中期計画については平成 21 年度に所内ワーキンググループを組織し、議論を重ねた上で第 2 期中期目標・中期計画（所内版）をとりまとめた。第 2 期中期目標・中期計画（所内版）では、学術交流事業も含めたエネルギー理工学研究拠点としての機能強化、およびそのための研究組織の再編成に関する検討、研究支援体制の強化などが謳われている。第 1 期中期目標・中期計画期間に経験した成果達成および反省を踏まえ、第 2 期ではより一層の社会貢献ができるよう、エネルギー理工学研究所の使命遂行に注力することが重要である。

6. おわりに

この自己点検評価は、国立大学法人となった京都大学の第1期中期目標・中期計画（平成16-21年度）の終了と、第2期への移行にあたり、前期の活動内容を自己分析し、将来に向けた新たな計画を実施する上での参考とする意図がある。第1期中期目標・中期計画の達成状況は概ね満足すべき状況にあり、きわめて高い評価を得ている部分も多い。

中期目標・中期計画の達成それ自体は重要なことであるが、その上で、研究所が発足当時目指した方向に向けて、着実に組織の充実と研究の蓄積を行い、新たな展開を図りつつあることも見逃せない。国内外での協力による活動や学際的な研究は様々に展開している。たとえば学内では、GCOEでの教育研究、生存基盤科学研究ユニット、国内ではヘリオトロンJの双方向研究、国際協力ではJGSEEやアジアンコアなどが進行しており、今後も形を変えながらも、本研究所の活動の重要な側面として重要な意義を持つ。外部資金による研究が大きな地位を占めることも本研究所の特徴であり、社会や産業界の期待する先進エネルギー研究の課題に込めている。

研究所を取りまく社会や学界の状況は大きく変わりつつあり、今後とも適切な対応が必要である。一方、研究所の基本的な目的に則した、大きくは変わらない中心的な課題も存在する。今後の自己点検評価は、このように、本研究所、大学、我が国と世界の科学の発展の様々な視点で、適切な分析と提言を目標として継続されるであろう。

平成22年7月

京都大学エネルギー理工学研究所
自己点検・評価委員会