

京都大学
エネルギー理工学研究所

現 状 と 課 題

平成 16 年度－平成 18 年度

平成 19 年 4 月

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、原子力研究を基本とする原子エネルギー研究所と核融合プラズマ研究を基本とするヘリオトロン核融合研究センターが、長年にわたる活動の成果を集約し、新たな研究の展開を図るべく、平成8年5月に併合し、改組発足したものです。

本研究所は時代の求めるエネルギー研究の新しい姿を示し、新しい学理を追求することをめざし、「エネルギーの生成、変換、利用の高度化研究」を設置目標としてきました。

本研究所発足以来、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的とし、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、エネルギー科学研究科への協力体制の下、大学院での高等教育・博士終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。

プラズマ科学に留まらず核融合工学への貢献も目指す、先進的なヘリカル・プラズマ装置、ヘリオトロンJの設計・建設・運用、次世代太陽エネルギーや次世代原子力エネルギー研究の展開、エネルギー材料開発やエネルギー工学の新たな展開を目指すDuET装置やMUSTER装置群を始めとする多様な研究施設の導入・整備・運用は、京都大学発の新しいエネルギー理工学を示し、人材育成や研究活力の強化において飛躍的な成果を挙げてきました。また、小さいながらも特色のある研究環境を作り上げ、世界を牽引する多くの研究を世に出してきたことや、大阪大学接合科学研究所との連携研究事業、拠点大学方式による日韓学術交流事業等、新しい学術交流の枠組みを提案し、実現させてきたことも特筆されます。

これらの研究所の取り組みに対し、改組5年目の平成13年度に実施した外部評価においては「今世紀の複雑なエネルギー問題に総合的に取り組む方向で、ここ5年間で長足の進歩を見せたと評価する。具体的には、新しいミッションの考え方に基づいて研究所を改組し、有能な人材を採用し、主要な機器や施設を建設し、かつ性能を向上させてきた。」との評価をいただきました。さらに、平成18年度に計画されていた附属センター改組とそれに伴う研究所の見直し計画を前にした第2回目の外部評価（平成16年度）では、「基盤整備の段階から発展の段階に順調に向かっている様子が窺え、」との評価をいただきました。また、センター改組や研究所の見直しについても、「センターのこれまでの活動は十分に評価に値するものであり、この活動を基盤に一層の飛躍を目指す組織の見直し計画は当を得たものと評価できる。」とされています。

この間、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」では「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」プログラムが初年度の最高額で採択されました。また、平成19年度から開始された「先進的施設の共用によるイノベーション創出事業」では、「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」がいち早く採用されています。これらの研究所としての活動以外にも、NEDO事業、CREST事業、さきがけ研究、革新的技術開発事業、先進的原子力研究事業を始めとする多様な競争的資金に基づく研究活動においても大きな成果を挙げ、研究所の研究教育の推進を大きく支えています。

今後も、これらの努力を更に強化・先鋭化させ研究所の教育・研究活動を充実・発展させるべく努めて参りたいと思います。

平成16年度からの独立法人化による新たな展開は社会との共存の強化をもたらし、研究所内での協調・協力や流動性・柔軟性の強化を生み出しつつあります。

本報告書は、独立法人化後の第一期中期目標・中期計画期の間まとめを、自己点検・評価として行うものです。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、今後の研究所のあり方について御指導、御助言、御鞭撻をいただければ幸いです。

平成19年4月

京都大学エネルギー理工学研究所
所 長 香 山 晃

目 次

1.	研究所の概要	1
1.1.	理念, 目標	1
1.2.	組織および運営	3
1.3.	財政状況	5
1.4.	研究活動・研究交流の状況	6
1.5.	教育および社会との連携	8
1.6.	将来計画	9
1.7.	施設設備	10
1.8.	自己点検・評価に関する今後の課題および留意事項	12
2.	平成 16-18 年度 重点複合領域研究 研究成果の概要	13
2.1.	プラズマエネルギー重点複合領域研究	14
2.2.	バイオエネルギー重点複合領域	40
2.3.	光エネルギー重点複合領域	70
3.	研究部門・研究分野における研究の現状	93
3.1.	エネルギー生成研究部門	93
3.2.	エネルギー機能変換研究部門	98
3.3.	エネルギー利用過程研究部門	101
3.4.	エネルギー複合機構研究センター所属分野	104
4.	拠点形成の現状・課題・展望	105
4.1.	附属エネルギー複合機構研究センター	105
4.2.	21 世紀 COE プログラム	115
4.3.	日韓拠点大学方式学術交流事業	117
4.4.	その他の研究交流事業	120
5.	中期目標・中期計画の現状と展望	121
6.	おわりに	123
7.	参考. 平成 16 年度「在り方検討委員会」報告書において提示された 課題等	I
7.1.	研究所の理念及び目標設定	I
7.2.	研究組織ならびに研究支援体制	I
7.3.	研究所の運営・組織の見直し	I
7.4.	研究活動・教育活動	II
7.5.	国際交流	II
7.6.	今後の研究所運営における留意事項	II

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もので、先進的なエネルギーに関する理工学分野において、特に社会的受容性の高い、いわゆる高品位エネルギーの特殊・複合問題を研究するために発足したものである。ここでは、既存の技術の改良等に留まらず、人類存続に不可欠である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。研究所の沿革は資料編 (I) 第 1 章に記した。

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 期の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、

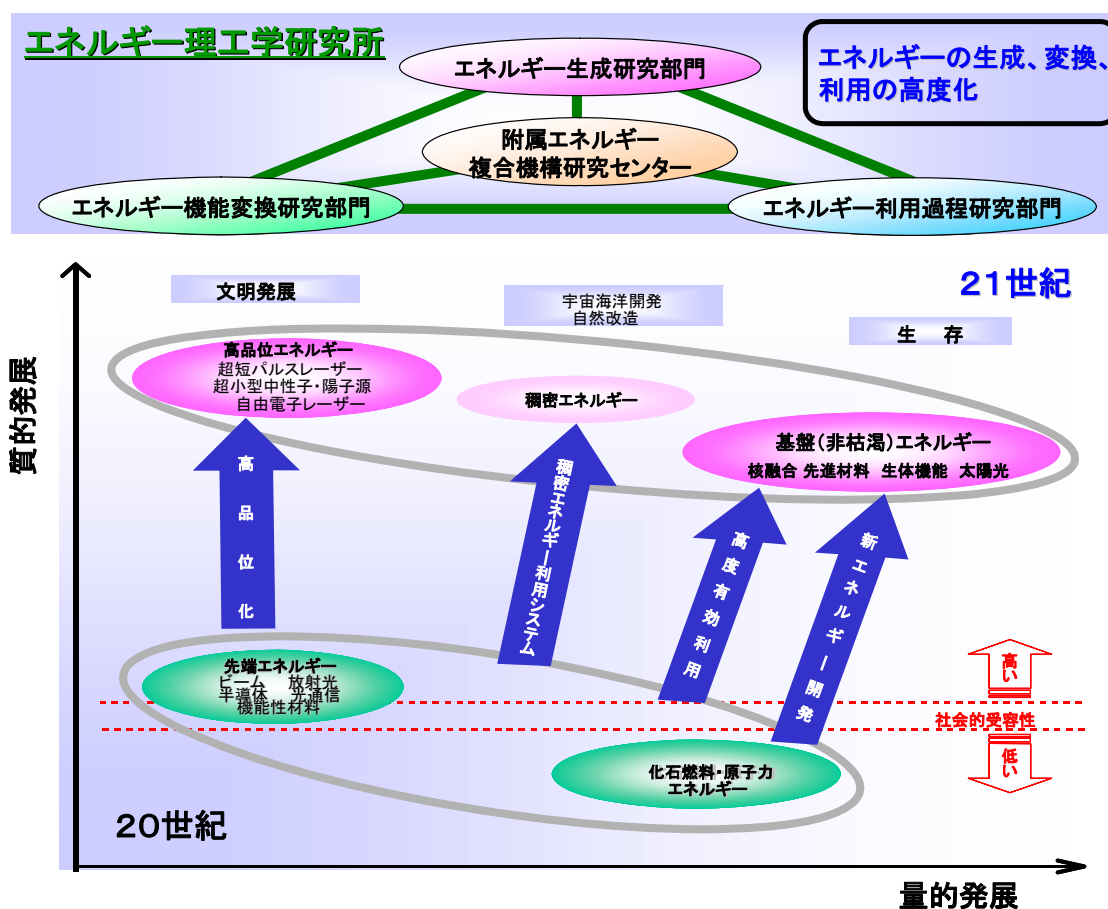


図 1.1 京都大学エネルギー理工学研究所の設立理念

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出現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。

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)、並びにその計画の年度毎の進捗状況については、第 5 章並びに別冊資料「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. 組織および運営

本研究所は、3 つの研究部門、すなわち「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、部門に共通する研究課題の追求や学内外の共同研究を実施するための「附属エネルギー複合機構研究センター」、並びに事務部で構成されている（資料編 (II) 1.1 参照）。研究部門は、合計 14 分野（客員 2 分野を含む）からなる。附属センターは、所長が指名するセンター長と、センター所属の人員により維持・管理される。同附属センターは、平成 18 年、センターを中心とする研究活動の更なる進展を図るため、新たな研究体制へと改組した。

なお、平成 12 年度に発足した宇治地区事務部に関しては、宇治地区教員と事務担当による事務改善委員会により事務改善計画が策定され、平成 17 年度、宇治地区事務組織改編が行われた。

研究所の運営は、所長と、所内および学内の教授からなる「協議員会」の議を経て実施される。協議員会では諸規定の制定・改廃をはじめ、所長候補者の選考、教員人事、財政に関することなど、重要事項を審議している（資料編 (II) 第 1.1 節参照）。

所内では、助手（教員制度改革により、平成 19 年度より「助教」）・技術職員を含む「研究所会議」、助手以上の教員が参加する「拡大教授会」、教授のみからなる「教授会」を、各々、月に一度開催して研究所の運営に関する審議や意見の交換を行い、トップダウンとボトムアップを融合させた研究所運営を可能としている。研究所活動の点検・評価、将来構想の検討に関しては、教授会を母体とした自己点検・評価委員会や拡大教授会を母体とした将来構想検討委員会を組織し、活動している（資料編 (II) 第 1.2.1 節参照）。なお、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も含む、「京都大学エネルギー理工学研究所在り方検討委員会」（以下、在り方検討委員会）で審議される。

平成 16 年度から大学が「国立大学法人」となったことを契機に、所の運営に関する検討を行い、所内各種委員会活動については、可能な限り組織を簡素化し、かつ実効性に富んだものにするため委員会の統合・合理化を実施している。また、法人化に伴う労働安全衛生法適用などに対応するための仕組みとして、研究所に研究支援部を設置し、その下に各種管理班を設置した（資料編 (II) 第 1.1 節参照）。同支援部は、平成 15 年度に構想を作り、平成 16 年度より試行しているところであるが、平成 16 年度在り方検討委員会において、「研究支援部の体制が明確ではない。」との指摘も受けており、所内委員会との整合を取り、効率の良い支援体制とするため、見直し・改善を行っているところである。大学が、国立大学法人として本格的に機能し始めていることによる大学や宇治キャンパス内委員会等の変更が頻発しているが、研究所としては、研究支援部を上手く運営することにより、効率的に対応していくよう心がけている。

一方、研究所運営における企画・立案・課題処理の機動性を図るために、各部門長、研究支援部長、センター長、副所長（平成 18 年度より）等による所長補佐体制を施行している。また、平成 18 年度からは、所長業務の一部分担や所長代理業務を行うため、副所長もおかれるようになった。これらにより、日常的認可事項等の処理が迅速に行われ、教授会審議内容の実質化が進んだ。しかしながら、所長補佐体制による企画や立案機能が十分に発揮されるまでには至っておらず、今後一層の機能の充実を図る必要がある。

附属エネルギー複合機構研究センターは、研究所全体での横断的な研究の中核となるべく設置されている。センター基幹装置として、独創的閉じ込め磁場配位を持つ複合プラズマ・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 装置および DuET 施設）が平成 12 年にほぼ完成し、以来、文字どおり世界最先端の研究が行われている。ヘリオトロン J 装置は、京都大学で創成された一連のヘリオトロン装置による研究成果を基盤とし、これをさらに発展させるべく、新たに斬新なアイデアを盛り込んで作られたプラズマ実験装置である。大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 核融合科学研究所が中心となって平成 16 年度から開始された公募型共同研究「双方向型共同研究」に応募することにより、同装置は、同共同研究における拠点装置の一つとして、全国の共同研究にも供されている。DuET 施設は、核融合炉材料研究用の複合加速器設備として特に適したイオン種と加速エネルギー、ビーム電流を提供するだけでなく、広範囲な電流密度やターゲット雰囲気・温度等への対応と卓越した制御性を有し、更に反応性雰囲気や応力場・電磁場・電子励起場等の環境を複合的に作り出すターゲットを備えている点において、世界的にも最高の総合性能と特徴的な機能を持つ設備である。このほか、マルチスケール評価開発研究基盤群（MUSTER）の整備、小型自由電子レーザー装置（KU-FEL）の開発・建設など、センター研究設備の整備が進められてきた。これらにより、同研究センターは、当研究所での学術的資産および研究設備を基盤とし、各種装置の有機かつ効率的な活用、新規装置の設計、解析ソフトの開発をはかるなど、その設置目的どおり、研究所全体での横断的な研究の中核的な施設となっている。

また、センター設立の趣旨として、所内・所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ために、センターを通じた公募型共同研究「センター共同研究」を実施している。さらに、センター主催の談話会、シンポジウム、共同研究成果報告会などを開催し、研究者間の交流を図っている。センター共同研究項目分類に関しては、平成 12 年度の整理・見直しの後、さらに平成 16 年度からは、第 1 期中期計画で示した研究所の掲げる 3 重点複合領域研究との整合性を高めるため、従来の 4 つのセンター共同研究項目（1. 複合・複雑系プラズマの挙動、2. エネルギー粒子・材料相互作用、3. 光・量子および化学エネルギー機能の高度化と利用、4. 生物・物質エネルギー機能の高度化と利用）を、プラズマエネルギー、バイオエネルギー、および光エネルギーに関する各複合領域研究に整理・統合した。

これらの成果を受け、平成 18 年度には、センターの更なる進展を図るため、新たな研究体制へと改組した。（詳細は第 4.1 章参照。）

人材の登用については、改組以来、全国的視野に立った人事交流をはかるべく公募人事

を貫徹し、外部からの人材の積極的登用による研究基盤形成と活性化に努めてきた。その結果、改組以来の新規任用専任教員 38 名中 24 名を学外から任用するに至っている（平成 19 年 2 月 1 日現在）。また、当研究所は、平成 14 年 9 月より採用教員（内部昇格も含む）に任期制を設けているが、当初、再任にかかわる評価や判定に関する決まりが明確でなく、平成 16 年度の在り方検討委員会でも、「十分な議論を経て、納得性のある仕組み作りに留意されたい。」との指摘を受けていた。研究所としては、平成 16 年度から任期制教員の再任にかかわる評価や判定に関する議論を行い、平成 17 年任期制教員の再任に関する内規（資料編（II）第 6 章参照）を定めた。

一方、エネルギー理工学領域における優秀な研究者と高度の専門能力を持つ人材の育成は、研究所長期目標の一つである。これまで、21COE プログラムを始めとする外部資金の

獲得による PD の採用や、研究所における RA の計画的な採用など、若手研究者並びに大学院生の育成や支援を積極的に行ってきた（資料編（II）1.4.4-1.4.5 参照）。さらに、平成 18 年度、科学技術振興機構（JST）による「科学振興調整費・若手支援プログラム（平成 18-22 年度）」に採択されたことに基づき京都大学に設置された研究組織「次世代開拓研究ユニット」にも、当研究所は、そのプログラム応募時

点より積極的に関与し、若手研究者のキャリアパスの開拓にも貢献している。

1.3. 財政状況

平成 16 年度以降の財務状況は資料編（II）第 2.1 節に記載しているが、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 18 年度までの研究

研究費の状況（H8～H18）

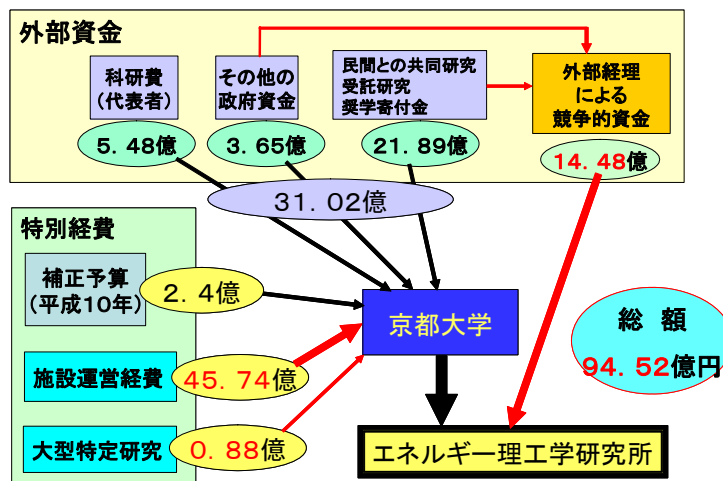


図 1.3.1 研究費の状況（平成 18～18 年度までの積算）

外部競争的資金の変遷

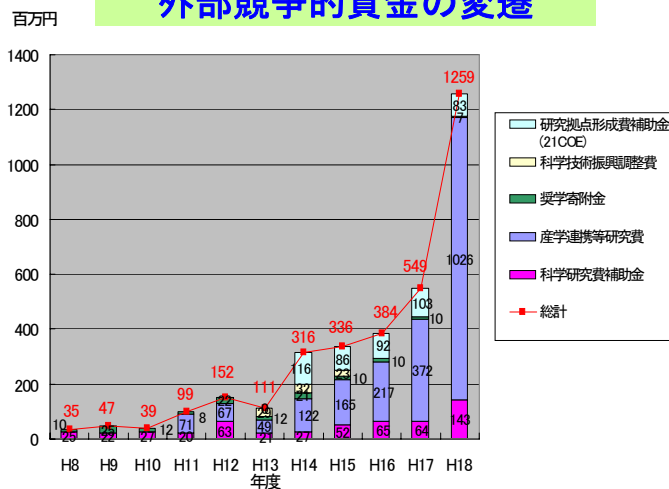


図 1.3.2 外部競争的資金の獲得状況

費の状況を図 1.3.1 に示す。科学研究費補助金を始めとする外部競争的資金の獲得状況を図 1.3.2、現在の外部資金による研究の状況を図 1.3.3 に示す。科学研究費補助金の獲得へ向けた意識改革や制度改革により、平成 18 年度獲得額は、増加したとは言え、他の研究所と比較して、必ずしも十分な水準とは言えない。今後一層の獲得へ向けた努力が必要であろう。

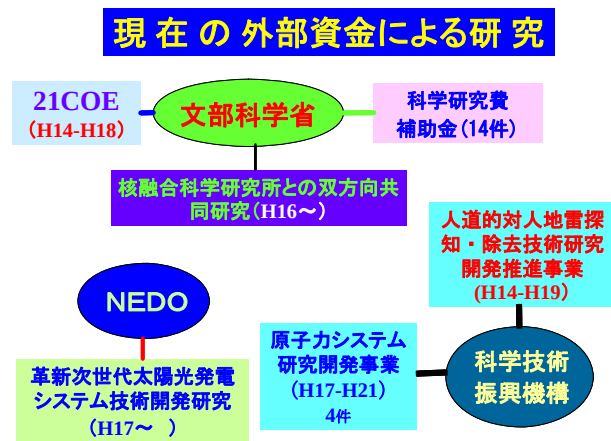
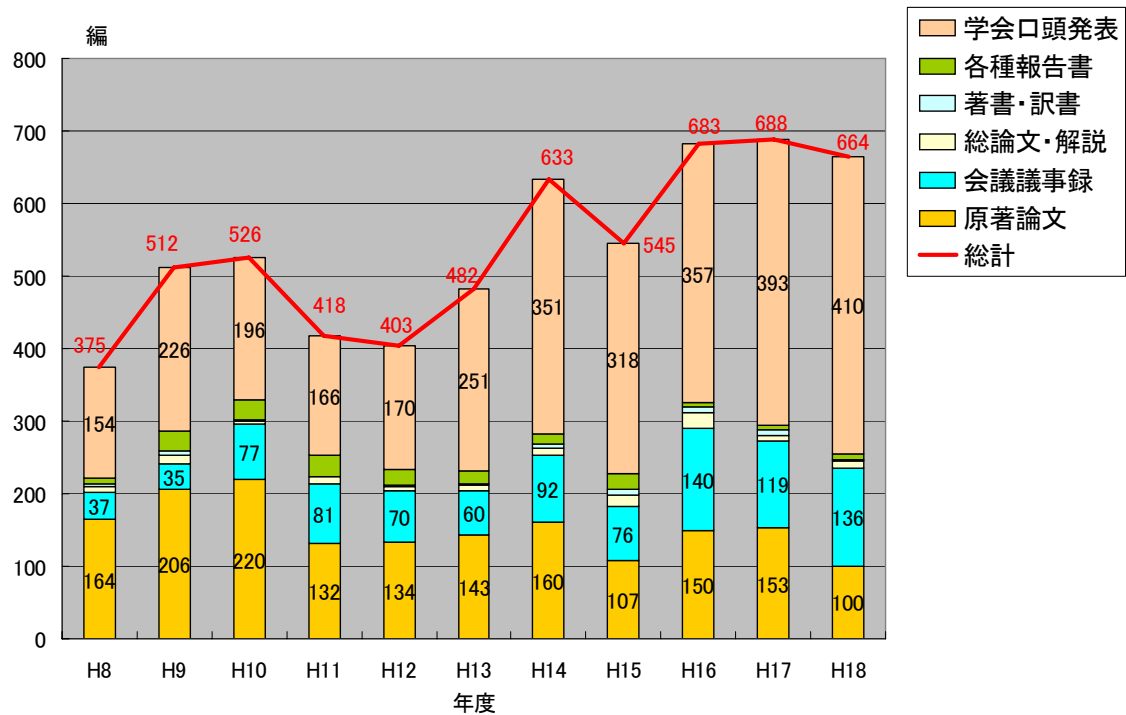


図 1.3.3 現在の外部資金による研究

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



研究発表件数の推移

図 1.4.1 研究発表件数の数値

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。この様な背景の下、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、三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 章並びに資料編 (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。

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 年度の同 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。

国際交流については、外国人客員教官ポストを活用して、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）第 2.5）節参照）。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。

しかしながら、21 世紀 COE プログラムは平成 18 年度で終了したため、これに替わる資金の確保に努め、これまで同 COE プログラムを活用して実施してきた国際交流活動を維持・発展させることが重要となっている。

1.5. 教育および社会と

の連携

教育に関しては、「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」を基本的な目標としている。研究所の助教授（教員制度改革により、平成 19 年度以降、「准教授」）以上の全教員は、大学院エネルギー科学研究科の協力講座を担当して、先端科学技術に関する大学院教育並びに優秀な人材の育成・確保に努めている。

平成 17 年度、より適切な教育課程実現のために、エネルギー科学研究科に協力講座配置の一部変更と、分野名の変更を申し入れ、平成 19 年度からの変更が了承された。また、助手（平成 19 年度以降、「助教」）を含む多くの教員が、総合人間学部、工学部、あるいは工学研究科等の非常勤講師を勤め、学部並びに大学院教育に携わっており（資料編（II）3.1.7 参照）、多くの在

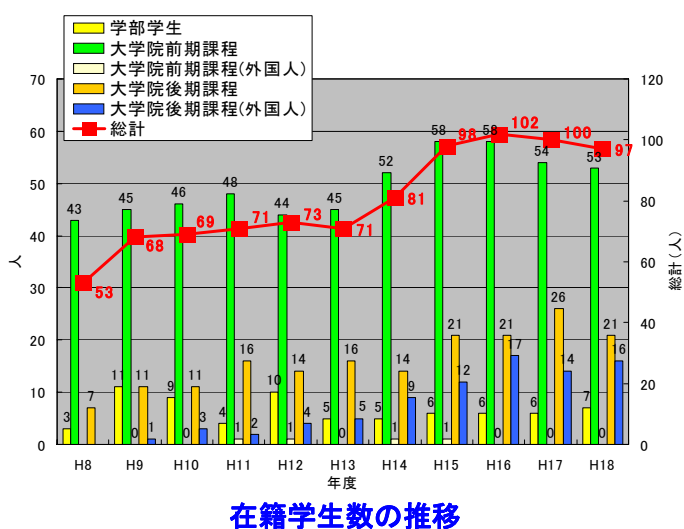


図 1.5.1 研究所在籍学生数の推移

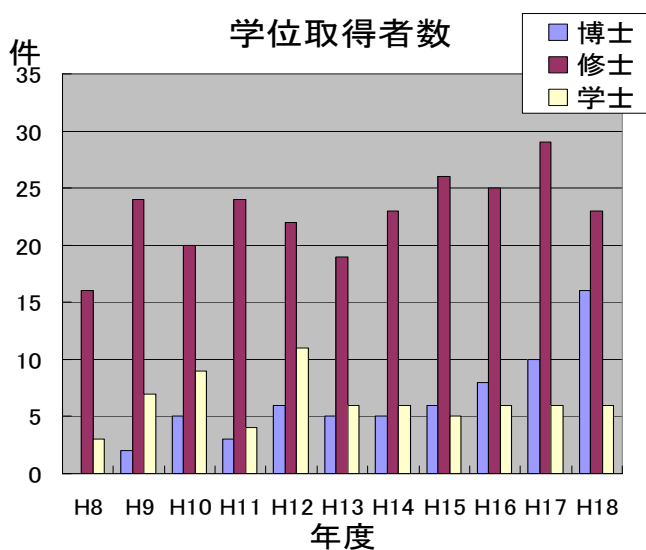


図 1.5.2 学位取得者数の推移

籍学生数（図 1.5.1）、学位取得者数（図 1.5.2）を維持している。卒業・修了指導学生数等の詳細は資料編（II）第 3.1 節を参照されたい。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（資料編（II）3.1.7 参照）、学士課程における教養教育にも積極的に携わっており、科学全般に関する広い視野と総合的な判断力の基礎となる知識を身につけさせるとともに、とくに学際的学問領域であるエネルギー理工学分野に対する関心を高める努力をしている。

また、上述の生存基盤科学研究ユニットにおける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）」にも参加し、幅広い教育活動を行っている。

学生の支援活動としては、RA 制度による経済的支援を実施（資料編（II）第 1.4.5 節）しており、また、21 世紀 COE プログラムを始めとする外部資金による PD 雇用も積極的に進めた（図 1.5.3、資料編（II）第 1.4.4 節）。生存基盤科学研究ユニットや次世代開拓研究ユニットを通じての若手人材の発掘、PD 雇用も進めている。

研究所が刊行するレポートとしては、個別の研究成果を詳細に記述した「Research Report」、毎年の研究活動を部門、分野ごとに紹介する「Annual Report」がある。またエネルギー複合機構研究センターでは「共同研究成果報告書」を刊行している。研究所の活動や研究成果、組織の概要等に関しては、上記刊行物も含め、研究所紹介冊子「概要」やインターネットのホームページ（<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp>）でも紹介している。ホームページに関しては、平成 16 年度に刷新し、情報管理・広報室による管理を開始している。また、平成 18 年度からは、吉田キャンパスの百周年時計台記念館に研究所紹介のリーフレットを常時設置し、見学者が自由に持ち帰れるようにするなど、広報活動にも一層の力を入れている。このほか、本研究所主催の公開講演会を毎年開催しており、学内他部局の講演会、学会のレビュー講演会などでも多数の教官が講演を依頼されている。

研究所の教員の多くは産学官の研究交流にも多大の貢献を果たしている。交流先は都道府県、企業などさまざまであり、技術開発の指導から共同研究まで多様な協力を行っている。また、政府の委員会で政策提言を行ったり、国の代表として国際会議、あるい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並びに優秀な人材の

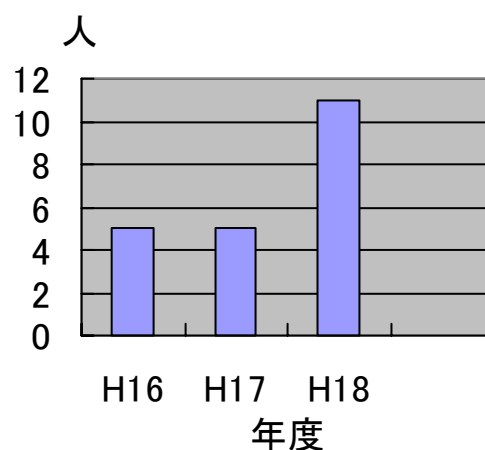


図 1.5.3 博士研究員数の推移

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並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より充実させ、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して行く計画である。

第1期（平成16—22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した3つの重点複合領域研究を継続して設定し、エネルギー理工学の研究拠点（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）としての役割を果たすとともに、各重点複合領域研究の統合により、学際的・独創的な新領域研究を開拓し、その国際的研究拠点の形成を目指しているところである。この中にあって、エネルギー理工学に関する学際的・独創的な新領域を開拓するために中心的な役割を果たしてきた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、先端的研究に対応するための方策として平成18年度にセンター改組を実施した。

しかしながら、研究所で行う研究推進の方向は、研究の進展にあわせて適切なものとする必要があり、6年毎の中期計画や、さらに先を見通した将来計画を常に検討しておかなければならない。また、第3期科学技術基本計画や最近の研究のあり方等に関する国での議論などに見られるように、外部環境は大きく変化してきている。さらに、京大宇治地区研究所群は、生存基盤科学研究ユニットに代表される「生存基盤科学」のキーワードの下、それぞれの特長を活かして研究を推進、発展させていくことが望まれている。これらのことに留意し、第1期中期計画後半の研究計画遂行並びに第2期中期目標・中期計画策定をしていく必要がある。とくに、これまでの研究成果、研究基盤整備の成果により顕在化してきている当研究所の特徴を十分発揮していくための議論が望まれる。このため、将来構想検討委員会を中心に継続的な検討を進めている。

1.7. 施設設備

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・機器類の内、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。これらの中には、老朽化の進んだ設備機器類が含まれており、それらの更新が必要となってきた。更新や改修には多額の予算を必要とするため、研究所の将来構想と併せて検討を進めているところである。その中で、高度エネルギー機能変換実験装置（Heliotron J/DuET）、マルチスケール評価開発研究基盤群（MUSTER）の整備、小型自由電子レーザー装置（KU-FEL）の開発・建設など、センター研究の基幹となる研究設備の整備が進められてきた。これらの研究設備整備に加え、研究施設の整備も計画的に実施してきた。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」として新たにスタートさせた。さらに、平成17-18年度には、北1号棟並びに南1号棟の整備・再開発を実施し、平成19年度に、新たなスタートを切る予定である。平成16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。

建物・設備については、位置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。特に宇治地区においては、建築年の古いものが多く、随所に老朽化が進んでおり、宇治地区共通の問題としての整備計画に参画している。このような中、平成 16 年には、宇治キャンパス「総合研究実験棟」が竣工、レンタルラボ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図っている。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開始されることとなった。この工事に伴い、ここ数年間は、研究スペースの仮移転並びに縮小等により研究環境の悪化が懸念される。研究所内はもちろん、宇治キャンパス全体での協力の下、難局を乗り越えて行きたいと考えている。

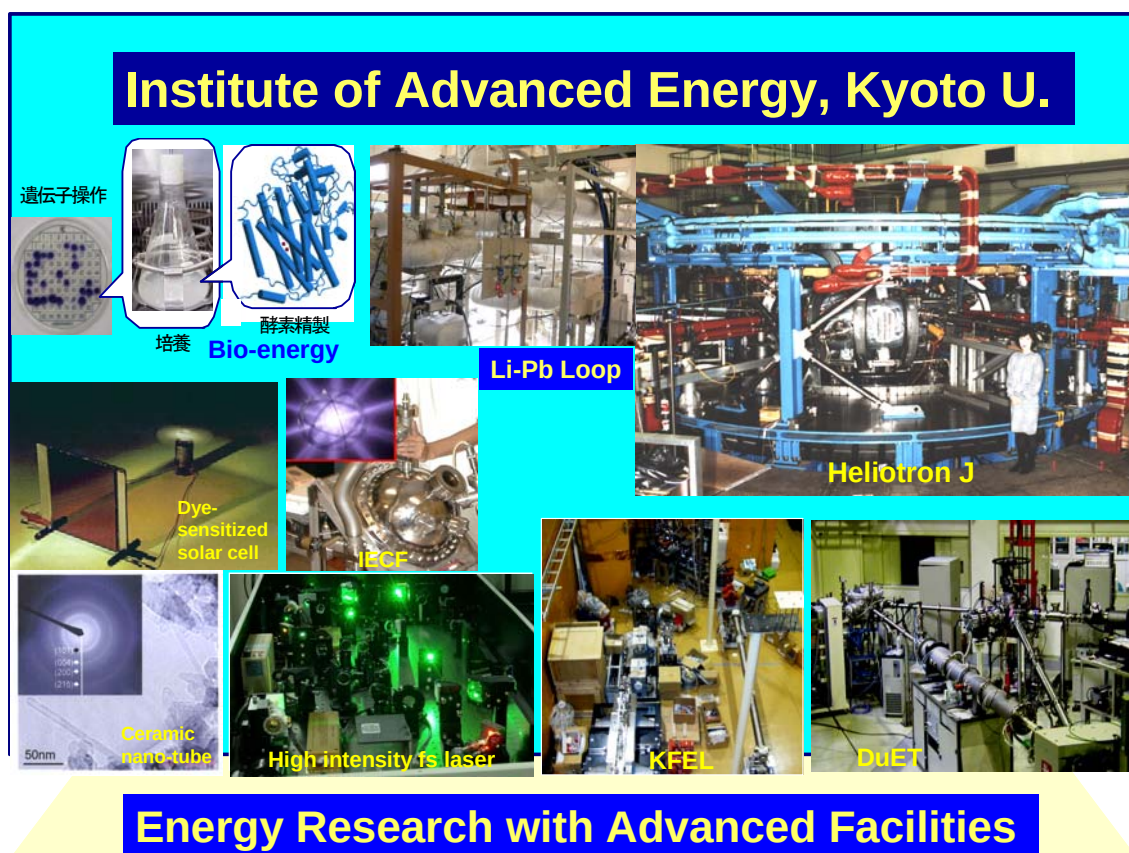


図 1.7.1 研究所設備群

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が、ともすれば、研究者は個別の分野に埋没しがちである。そのままでは、学内の他部局のエネルギー関連研究と何ら変わるところがなく、研究所の存在意義が問われることとなる。このため、研究所重点複合領域研究の設定やそれに基づくセンター共同研究の実施など、分野間や部門間の連携や学内外との研究協力に重点を置いているところであり、研究所の自己点検・評価にあたってはこの観点も基準としている。ただし、個別の分野に深化することにより、格段の研究成果が上がるのであれば、その可能性は助長すべきであり、硬直化した考えに基づく自己点検・評価とならぬよう留意する必要がある。また、自己点検・評価に当たっては、第3期科学技術基本計画や最近の研究のあり方等に関する国での議論の結果を的確に反映させる視点も重要であろう。

また、第一期中期目標・中期計画では、平成19年度より個人評価を含む自己点検・評価の客観的評価検証システムの検討に取り組むこととしており、十分な議論を経て、平成16年度在り方委員会で指摘されているように、「第三者のみではなく、被評価者が納得して受け入れられる評価システム」として練り上げていく必要がある。実施上の課題としては、広い分野にまたがる研究実績を評価する際、評価の目的の再定義、適切な評価の観点の選択、外部指揮者に評価を委託する場合、狭い専門分野の評価者が評価するために起こり得る問題の排除、等が挙げられる。

2. 平成 16-18 年度 重点複合領域研究 研究成果の概要

本研究所では、平成 16 年度からの 6 年次計画である第 1 期中期計画・中期目標を設定するに際し、研究に関する目標として、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、変換及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謳っている。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従来の 3 重点領域研究を継承・発展し、エネルギー理工学の研究拠点（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 年度と、同プログラム終了後の拠点機能）としての役割を果たすと共に、各重点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とした。

本中期計画における重点複合領域として、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**」及び高機能な基盤的ツールとして適用範囲の広い「**光エネルギー複合領域**」が設定されている。3 重点複合領域研究の中核的研究として、ヘリオトロン J 装置によるプラズマ閉じこめの高性能化、耐極限環境先進構造材料の開発、可搬放電型中性子源の高性能化、ナノ材料創製と同材料を用いた次世代太陽電池の高効率化を推進すると共に、基盤研究として、バイオマス資源のクリーン燃料化、生物型酵素を用いた高効率物質変換反応の開発、高度機能赤外線自由電子レーザー装置や高度機能超短パルスレーザー装置の開発、エネルギーシステム設計及び評価方法論研究の発展を図っている。

以下、各重点複合領域研究の平成 16-18 年度研究成果の概要を記す。

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
粒子的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分野

本重点複合領域研究では、ヘリオトロンJ装置によるプラズマ閉じこめの高性能化、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、さらには基盤研究として、エネルギーシステム設計及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（ポスドクを含む）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こめの高性能化

2.1.1.1. 研究の概要

中期目標・中期計画に掲げる3重点複合領域研究の一つであるプラズマエネルギー複合領域研究では、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。特に、次世代核融合炉開発には、3次元プラズマ閉じ込め物理に関する理解を深化し、プラズマ閉じ込めの高性能化を図ることが重要である。

平成16年度までの一連のヘリオトロン J 研究により、(a) 標準配位真空磁気面の健全性確認、(b) 国際ステラレータ比例則 (ISS95 比例則) の約2倍を超える ECH プラズマ閉じ込め性能の達成、(c) ECH プラズマの閉じ込め改善モードの実現、など、先進ヘリカル実験へ挑戦するためのデータ基盤が整備され、研究戦略を基準とする当初の年次計画における研究成果は十分に達成された。更に、ヘリオトロン J 装置は、その装置諸元や達成プラズマ領域の観点から、国際的なステラレータ (ヘリカルシステム) 研究の一翼を担う中型先進ヘリカル系装置として、国際エネルギー機関 (IEA) による国際ステラレータ実施協定のもとでの重要な国際共同研究を推進、核融合分野における国際貢献を果たしてきた。

これらの研究背景のもとに、平成16年度より、従来のヘリオトロン J 実験を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」に転換した。上記研究目的①は、従来の「複合・複雑系プラズマの基礎的挙動の解明」の先に展開される研究領域 (プラズマ閉じ込めの高性能化) であり、先進プラズマエネルギー生成の学理を実験的・理論的に探求する基礎学術研究を重点的に推進するものである。また、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 (仮称)」への主体的な参画によっても、これを推進している。

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、2016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1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こ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追求するため、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の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「自律系（複合・複雑系）の科学」が発展しようとしており、プラズマに関わる自律系（複合・複雑系）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。

このように本重点領域におけるヘリオトロンJ実験で目指すものは、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16年度以降の主な成果

(a) プラズマ閉じ込め改善

トーラス磁化プラズマの自己組織化現象に起因する輸送改善は、高性能閉じ込めを実現する上で重要な鍵となっている。本研究課題は、3次元磁化プラズマに生ずる自己組織化、並びに、それによる閉じ込め改善の物理を実験的に調

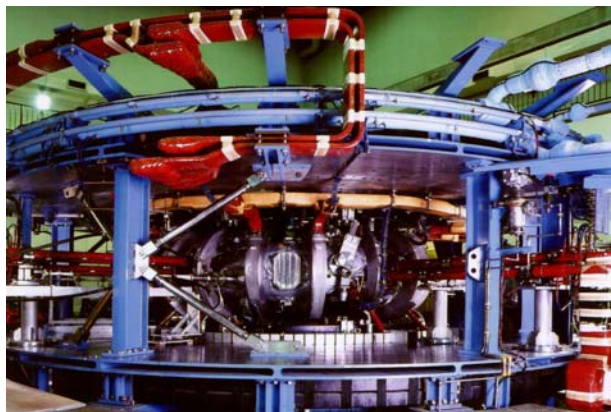


図 1.1.1 ヘリオトロンJ装置

べるもので、ヘリカル系装置研究の世界戦略の一翼を担うばかりでなく、広く、トーラス磁化プラズマの理解のためにも重要な意義を持つ。

ヘリオトロン J (図 1.1.1) では、プラズマ加熱・電流駆動の手法として、電子サイクロトロン共鳴加熱システム (ECH)、イオンサイクロトロン共鳴システム (ICRF)、中性粒子ビーム加熱 (NBI) を用いている。ECH・NBI プラズマ実験では、Heliotron E では実現できなかった自発的閉じ込め遷移現象 (H-モード遷移) を発見し、その発見機構及びその ISS95 比例則との比較に関する研究が進展した。とくに、高い閉じ込め改善度

($\tau_E^{\text{exp}}/\tau_E^{\text{ISS95}} < 1.8$) を持つ H-mode 発現領域が周辺回転変換角に依存し、主たる有理面よりわずかに離れた回転変換角の場合に実現できることを示した (図 1.1.2)。また、高い閉じ込め改善時に最外殻磁気面近傍の負径電場 ($E_r < 0$) 形成を確認した。また、最近の研究において、NBI プラズマにおいて、その入射方向により、H モードの発現に差がある可能性を示唆するデータを得ている。さらに、これまで試みることのできた加熱入力範囲は、トカマクにおける経験則をそのまま適用すると、トカマクでの閾値以上の領域にある。これらのことから、H モード発現機構を明らかにするため、より広範囲に加熱条件を変えて、実験データベースの蓄積を行っている。

第一期中期計画後半では、NBI の二つのビームラインや ECH 電流駆動などにより、遷移発現条件の同定が進むものと見込まれる。第二期中期計画では、遷移により得られる高閉じ込め状態におけるプラズマ電位構造や乱流輸送の変化を実験的に解明し、併せて磁場配位による制御性に関する調査を通じて、3 次元プラズマ閉じ込め物理に関する理解を深化し、プラズマ閉じ込め磁場配位の最適化を図る計画である。

(b) Heliotron J プラズマ閉じ込め特性に対するバンピー磁場制御効果

ヘリオトロン J 装置が探求している Helical 軸 Heliotron 配位は、準等磁場概念に基づき提案された磁場配位であり、閉じ込め磁場フーリエ成分 (Boozer 座標系) の最適な組合せにより、良好な閉じ込め磁場配位実現を目指している。特に、従来の主要磁場成分 (ヘリシティ、トロイディシティ) に加え、バンピー磁場成分を積極的に導入することによるプラズマ輸送制御を試みるものである。したがって、ヘリオトロン J 実験の目的の一つは、この様な同磁場配位の特徴を実験的に検証し、さらに最適化して行くことにある。周辺回転変換角をほぼ一定の条件でバンピー磁場を制御した実験により、ECH、NBI 並びに ICRF 加熱プラズマの特性、特に、バルクプラズマのエネルギー閉じ込めや NBI/ICRF で生成される高エネルギーイオン閉じ込め並びに加熱特性に与えるバンピー磁場成分制御効が調べられた。但し、新古典拡散に関する議論において総合的な新古典輸送への影響を議論する指標として提案されている「実効ヘリカルリップル」を DCOM コードにより算出すると、

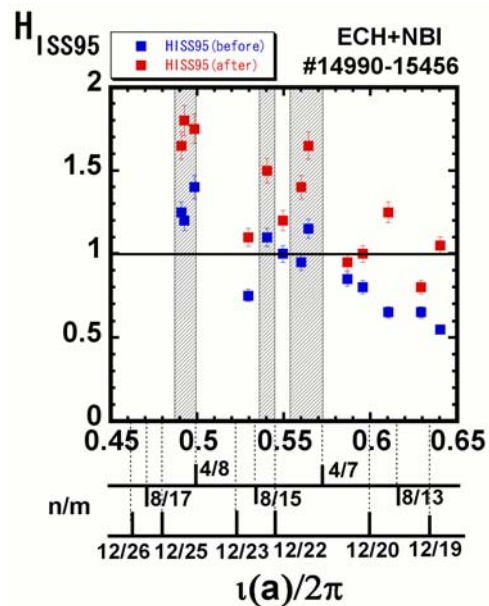


図 1.1.2 閉じ込め改善度の
周辺回転変換依存性

今回選択した3つの磁場配位における中強度のバンピー磁場成分を持つ配位で最も小さな値をとることが示されている。

イオン加熱を目指す NBI 実験、ICRF 実験では、バルクプラズマのエネルギー閉じ込め、並びに高エネルギーイオンの閉じ込め、両者とも、高バンピー配位での閉じこめ優位性が示唆される実験結果が得られている（図 1.1.3、図 1.1.4）。一方、電子加熱である ECH プラズマについては、バンピー磁場成分より、むしろ L-モード、H-モードにおける実効ヘリカルリップル率 ε_{eff} の閉じ込め性能への寄与が明らかになりつつある。新古典輸送最適化と異常輸送低減、および径電場の効果を含めた総合的な理解が必要となっている。

中期計画第一期後半では、より広範囲な磁場配位パラメータ領域での実験研究に加え、従来の DCOM コードなどとともに単一粒子軌道追跡に基づくモンテカルロシミュレーションなどにより、高エネルギーイオン閉じ込めとバルクプラズマのエネルギー閉じ込めに対する最適磁場配位の違いを理解することを目指す。その成果をもとに、第二期では両者の両立できる磁場配位の実現と実験的検証を計画する。また、理解が進むものと期待される。

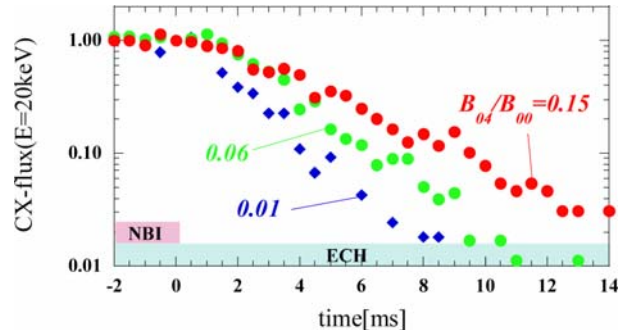


図 1.1.3 異なるバンピー磁場成分強度を持つ 3 磁場配位における NBI 遮断後の高エネルギーイオンの減衰の違い。

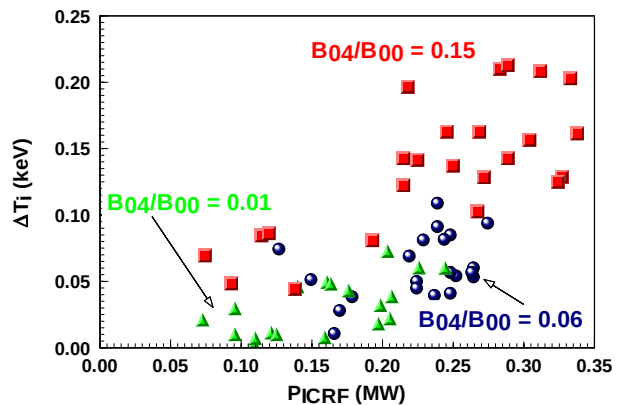


図 1.1.4 異なるバンピー磁場成分強度を持つ 3 磁場配位における ICRF によるイオン温度上昇

(c) ヘリオトロン J におけるトロイダル電流制御

ヘリカル系装置においては、基本的に閉じ込め磁場は外部コイルのみで構成できるため、プラズマ電流は必ずしも必要ではない。逆に、プラズマ電流の存在により回転変換が変化し、プラズマ閉じ込めに影響を与える可能性が懸念される。プラズマ電流は、いわゆる誘導電流の他、圧力勾配によるブーツストラップ電流や加熱起因の電流などの非誘導電流が存在する。ヘリカル系における電子サイクロトロン電流駆動 (ECCD) 研究は、トカマクに比べ誘導電流が存在しないことから、ECCD の物理過程を理解する上で有利である。また、圧力勾配によるブーツストラップ電流を抑制し回転変換を制御できる手法としての可能性を有している。

ヘリオトロン J 装置において、磁力線に平行方向の輸送現象である自発電流（ブーツストラップ電流）の磁場配位依存性は、概略、新古典輸送との良い一致を見出した。とくにバンピー磁場の制御で自発電流の向きを正負（零を含めて）に制御できることを実証し、磁場のトロイダル成分、ヘリカル成分に加えて、バンピー成分の寄与の重要性を明らかに

した（図 1.1.5）。

また ECH の斜入射による電流駆動(ECCD)を実証した。ECCD では、ECH が磁場リップルの山に吸収された場合、捕捉粒子効果（Ohkawa 効果）が弱くなり、Fisch-Boozer 効果によって電流駆動方向が決まることが予測される。ヘリオトロン J 実験において磁場リップル構造制御を行った実験で得られた結果はこの理論予測と定性的に一致する（図 1.1.6）。一方、リップルの谷に吸収された場合、Ohkawa 効果が強く、電流駆動方向は逆転する。駆動電流効率は線形理論よりも低く、捕捉粒子の効果がヘリカル系では強いことを示唆している。但し、駆動電流はブートストラップ電流と同程度であり、トータルでゼロとなる電流状態を形成することは可能であり、Heliotron J における ECCD で正味電流ゼロのオペレーションを実証した。さらに、装置規模・プラズマパラメタが同程度である中型ヘリカル系装置、ヘリオトロン J (京都大学、日本)、TJ-II (CIEMAT、スペイン)、CHS (NIFS、日本)の三台を用いた ECCD 共同実験を展開しており、これらの研究により、共通する電流駆動物理の抽出を目指している。

ヘリカル装置は 3 次元構造を持つため、シミュレーションが難しい側面があるが、最近、いくつかの 3 次元シミュレーションコードが整備されてきており、これらを援用することで、より理解が進むものと期待される。中期計画第一期後半では、電流駆動効率における磁場リップルの効果等の解明を進め、トカマクにおける ECCD との比較や理論予測との比較が進むものと見込まれる。第二期では、EBW による電流駆動に関する研究へと進展させる計画である。

一方、低磁気シアヘリカル装置では、プラズマ電流による磁場構造の大きな変化が予想され、閉じ込め領域内では、例えば MHD 挙動の活性化などが懸念される。さらに、ヘリカル装置では周辺磁場構造を利用したダイバータが構想されるため、プラズマ放電に伴う構造変化は、ダイバータ設計に重要な影響を与える。ヘリオトロン J での観測により、プラズマ蓄積エネルギー約 3kJ、プラズマトロイダル電流約 3kA 程度の放電において、その放電中に、ダイバータプラズマの位置が数センチメートルも変動することを実証した。その原因として、プラズマ中に流れるトロイダル電流が、周辺磁場構造を変化させることを示した。とくに、閉じ込め領域周辺に存在する磁力線の共鳴条件により、僅かの電流でも

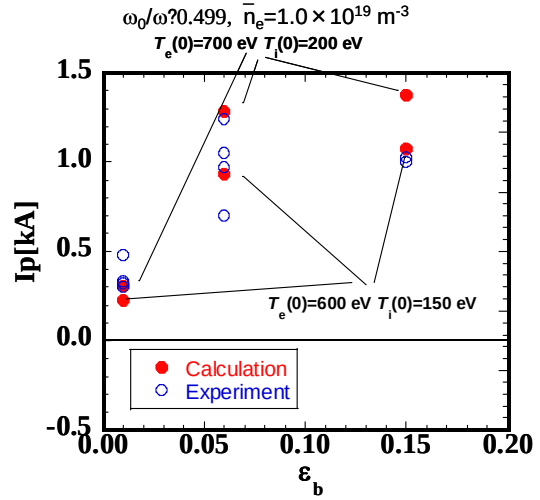


図 1.1.5 ブートストラップ電流のバンピー磁場成分強度依存性

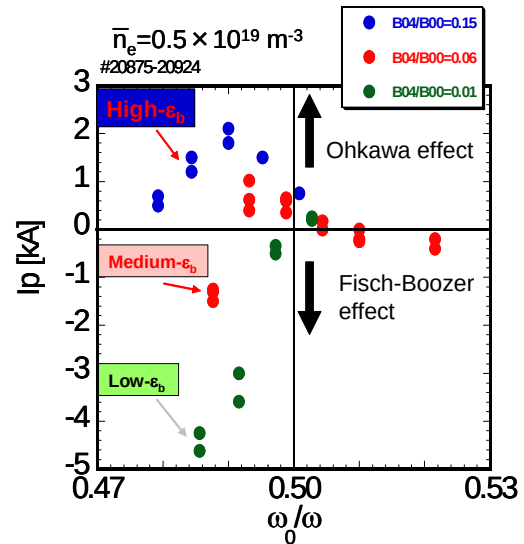


図 1.1.6 磁場配位並びに磁場強度の違いによる ECCD 電流の値

大きな変化をもたらしうることを指摘した。今後は、プラズマ放電に伴うダイバータプラズマ位置の変化を如何に制御するかが重要な研究テーマとなる。そのためには、非誘導電流駆動制御との組み合わせで研究を進める必要がある。

中期計画第一期後半では、HINT2 コードなどの三次元平衡コードに非誘導駆動電流分布を組み込んだ、より詳細なシミュレーション結果との比較検討を行う予定である。第二期では、さらに計測を多次元化し、詳細な変化を観測可能とすると共に、電流駆動法を組み合わせることにより、ダイバータプラズマ位置の制御へと進展させる計画である。

(d) MHD 安定性

ヘリオトロン J の磁場配位は、プラズマのない真空状態においては、低磁気シアであると共にプラズマ閉じ込め全領域で磁気井戸である。そのため回転変換分布が低次の有理面を横切らないように設定することで低次の MHD 不安定性を避けることが可能であることに加え、磁気井戸による安定化効果で MHD 安定性が不安定化しにくいといった特徴を有する。これは、低次の MHD 不安定性が問題となった平面磁気軸ヘリオトロンの高磁気シアや有限ベータ効果による局所磁気井戸といった特徴とは大きく異なる。そこで、ヘリオトロン J で採用したコンセプトの MHD に関する特性を実験的に調べ、その磁場配位の優位性を示すことで磁場配位の最適化を目指している。また、この磁場配位が有限ベータ効果やプラズマ電流により変化することで MHD 安定性がどのような影響を受けるかを調べることで、将来の核融合炉を見据えた高ベータプラズマの生成、保持のためにも重要である。

一方、高速イオンにより不安定化するアルヴェン固有モード (AE: Alfvén Eigenmode) 等の高速イオン励起 MHD 不安定性が、逆に励起源である高速イオンの輸送に影響を与える可能性があることから、核融合炉で重要なアルファ粒子物理に関連して注目されており、ヘリオトロン J のような磁場配位での高速イオン励起 MHD 不安定性の特性を調べることで重要である。

磁場配位を特徴づけるパラメータの回転変換に対する MHD 安定性の特性を調べる目的で、それぞれ異なる回転変換 ($i/2\pi = 0.49 \sim 0.65$) を有する磁場配位において ECH・NBI プラズマを対象に、MHD 安定性実験を行った。プラズマは ECH により生成され ECH および NBI により追加熱が行われた。とくに磁場揺動強度は圧力勾配駆動型と思われる低周波 ($f_{\text{exp}} < 20 \text{ kHz}$) の磁場揺動強度の回転変換依存性が調べられた (図 1.1.7)。回転変換が 0.5 および 0.6 近傍の磁場配位において圧力勾配型 MHD 不安定性と思われる揺動を観測した。また、真空磁場では共鳴面を有しない磁場配位において MHD 不安定性が観測される

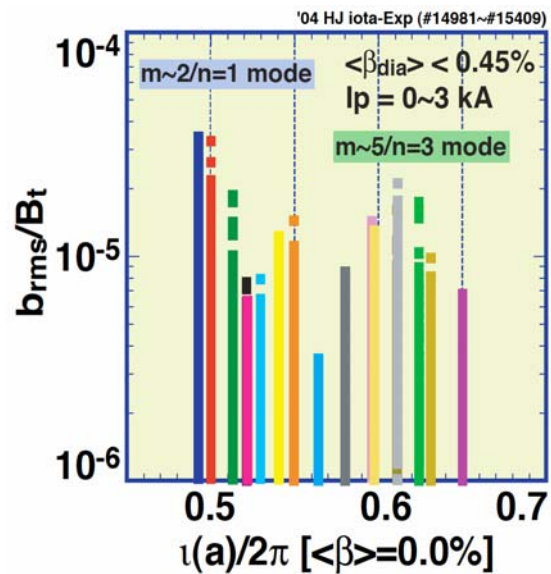


図 1.1.7 回転変換に対する磁場揺動強度

場合がある。順方向のプラズマ電流により回転変換が上昇し、真空では存在していなかった回転変換 0.5 の有理面が現れ、 $m/n = 2/1$ の MHD 不安定性が現れたものと思われる。このように、ヘリオトロン J では、真空で低次の有理面を含まない磁場配位であっても有限ベータ効果やプラズマ電流により MHD 平衡が変化し、有理面を含む際には対応する圧力勾配駆動型 MHD 不安定性が現れる可能性がある。ただし、低磁気シアである限り、更なる MHD 平衡の変化によりそれらの閉じ込めへの影響を最小化できる可能性があり、高ベータ化にはその生成方法（道筋）の最適化が重要であると思われる。

NBI 加熱プラズマにおいて高速イオン励起 MHD 不安定性と考えられる、

空間的にコヒーレントで高周波 ($f_{\text{exp}} > 30 \text{ kHz}$) の磁場揺動を幾つか観測した。観測周波数と理想 MHD 安定性解析コード CAS3D3 を用いた大域モード解析を比較により、観測された MHD 不安定性は固有関数が大域的にプラズマ全領域に広がった大域アルヴェン固有モード (GAE: global AE) と同定した。同様に $m/n = 4/2$ の MHD 不安定性も GAE と同定した。図 1.1.8 に示すように、ある磁場配位において GAE は大きな磁場揺動強度を伴いバースト的に発生、消滅を繰り返すが、それに同期した $H\alpha$ 等の変化が観測された。このことから GAE の磁場、電場揺動が共鳴的相互作用を起こしている高速イオンの輸送に影響を及ぼした可能性が考えられる。

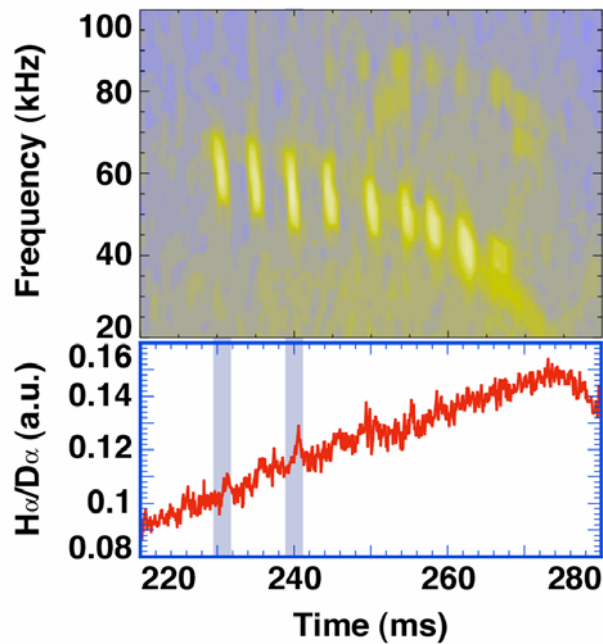


図 1.1.8 高速イオン励起 GAE の
高速イオン輸送への影響。

これらの成果は、Heliotron E 実験で残された課題である「良好な粒子閉じ込めと MHD 安定性の両立性」を探究するため、世界に先駆けて採用したヘリカル軸ヘリオトロン配位の新しい研究領域の開拓に大きく寄与するのみならず、異常輸送の改善、高エネルギー粒子閉じ込め等をはじめとするトラスプラズマ閉じ込めの普遍的諸問題に、先進磁場分布制御の観点から新たな知見を与えるものである。今後、Heliotron J における高ベータ実験、ダイバータ実験（磁気島ダイバータ）を展開していく中で、先進ヘリカルでなければならない、ユニークで、かつ学術的に普遍的な課題を解明し、人材養成とともに、将来の核融合炉心プラズマ開発に、大学の立場から貢献していく所存である。

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

我々は、ヘリオトロン路線における準等方力学 (quasi-isodynamic) 概念に基づく最適化アプローチを用いた閉じ込め配位の設計原理を開発するため、ヘリオトロン J によるヘリカル軸ヘリオトロンの実験を推進しており、本実験は世界のヘリカル系研究の枠組みに

において、その独自性だけでなく、先導的役割をも果たしている。ヘリカル磁場最適化の新しい潮流として、(1) 準対称系（対称性の方向の運動量が運動の恒量になることに基づく）と (2) quasi-isodynamic (omnigeneous) 系（磁気面上での縦の断熱不変量が一定であることに基づく）がある。準対称系配位は対称性の種類から、準ヘリカル対称、準軸対称、および準ポロイダル対称が考えられるが、準ヘリカル対称装置として米国ウィスコンシン大学の HSX 装置の実験が 1997 年より開始された。HSX 装置は ECH を主体とする実験計画である。準軸対称装置としては米国プリンストン大学プラズマ物理研究所が精力的に電流駆動型の準軸対称装置（NCSX 装置）の建設が始められており、2009 年 7 月頃の実験開始を目指している。オークリッジ国立研究所においては、準ポロイダル対称をねらった装置（QPS 装置）の設計を進めている。ドイツのマックス・プランク研究所では W-7X 装置が建設中であり、モジュラー・コイルを用いて最適化された quasi-isodynamic 系のヘリカル磁場最適化を目指している。W-7X 装置は 2013 年頃から実験を始める予定であるので、それまでにヘリカル軸ヘリオトロンの最適化についての実験的検証を行いたいと考えている。

また、最近、quasi-isodynamic の考え方に基づく更なる最適化配位の検討が、ロシア・ドイツを中心に開始されており、ヘリオトロン J での実験成果が注目されている。他方、これらとは異なった設計概念に基づいているヘリアック (heliac) 装置を用いた研究であるスペイン CIEMAT 研究所の TJ-II 装置の実験並びにオーストラリア国立大学の H-1NF 装置の実験とも連携を深めている。

ヘリオトロン J 実験に関し、本研究所はすでに米国ウィスコンシン大学マディソン校、オーストラリア国立大学、スペイン CIEMAT 研究所、ウクライナ・ハリコフ理工学研究所等と相互科学協力協定を結び、緊密な情報交換および共同研究を個別の研究課題を通じて実施している。これらの中で、平成 18 年 10 月 24 日、CIEMAT 研究所との間で核融合科学および核融合炉工学の分野における科学技術協力協定を更新し、双方の国際共同研究拠点機能を拡充するとともに、研究者交流を活発に行うことで合意した。また中国西南物理研究所 (HL-2A) の Q.W.Yang 教授が本エネルギー理工学研究所客員教授として来日したことを契機に、同研究所との共同研究の一層の強化を図っている。

平成 10 年 12 月に本研究所において開催した国際シンポジウム “International Symposium on Plasma Dynamics in Complex Electromagnetic Fields –for Comprehension of Physics in Advanced Toroidal Plasma Confinement–” に続き、平成 16 年 3 月には、日米科学技術協力事業と京都大学 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の形成」を活用して、国際研究集会「Joint Meeting of US-Japan Workshop and Kyoto University 21st COE symposium on “New Approach in Plasma Confinement Experiment in Helical Systems”」を開催した。平成 18 年 11 月には、京都大学 21 世紀 COE プログラムと日米科学技術協力事業の支援を得て、「The 2nd Joint Meeting of US-Japan Workshop and Kyoto University 21st Century COE Symposium on New Approaches In Plasma Confinement Experiments In Helical Systems」を米国アーバン大学において開催（京都大学・アーバン大学共催）した。新概念に基づくヘリカル磁場配位の最適化についての国際的な研究協力体制が構築される中、本研究所の国際共同研究拠点ネットワーク形成における求心力・存在感を高めた。第 3 回のワークショップ

を 2008 年に京都で開催の予定である。また科学研究費補助金特定領域研究（B）において「ヘリカル磁場配位の最適化」の課題（平成 11 年度－平成 16 年度）のもとに活発な国際共同実験研究を展開した。今後とも、京都大学 21 世紀 COE プログラムで形成された拠点機能、核融合科学研究所双方向型共同研究、日米科学技術協力事業等の支援を得つつ、米国（とくに HXS/NCSX/CTH/QPS グループ）、EU（とくに TJ-II/W7-X グループ）、オーストラリア国立大学（H1-NF グループ）等と日本（とくに Heliotron J/CHS/LHD グループ）との密接な国際共同研究・連携研究を展開して行きたい。

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）、京都工芸繊維大学等との連携研究を予定している。今後、さらに国際共同研究・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、加熱・計測システムや解析ソフトの開発を通して、京都大学がハブとなる先進ヘリカルの国際共同研究拠点ネットワーク形成を推進していく考えである。

2.1.1.5. 今後の展望

今後、(1) 3D プラズマの閉じこめ物理の解明、(2) プラズマ揺動計測の高度化技術の開発、さらにそれらを融合し、(3) コンパクト・高ベータ・3D プラズマの実現を原理検証できる実験的・理論的データ基盤を確立する学術基盤研究を実施したい。これまでのヘリオトロン J 装置を中心とした実験で遂行されてきた閉じこめ物理研究を更に発展させ、とくに 3D プラズマの閉じこめ物理に注目し、日本で確立・進展されてきた高温プラズマ閉じこめ計測の世界的リーダーシップを維持・発展させる。この研究戦略は、コンパクトで高性能の核融合炉を目指す将来の核融合研究に大きく貢献できると期待される。

2.1.1.6. 主要論文リスト

1. S. Yamamoto, et al., Fusion Sci. Tech., 51 (2007) pp.92-96.
2. G. Motojima, et al., Fusion Sci. Tech., 51 (2007) pp.122-128.
3. F. Sano, et al., “Configuration Control Studies of Heliotron J”, 21st IAEA FEC (Chengdu, China, 2006) EX/5-5Ra.
4. K. Nagasaki, et al., “Control of Non-inductive Current in Heliotron J”, 21st IAEA FEC (Chengdu, China, 2006) EX/P6-14. F. Sano, et al., Nuclear Fusion Vol.45, No.12 (2005), pp.1557-1570.
5. T. Mizuuchi, et al., “Spontaneous Shift of Divertor Plasma Footprints during a Discharge in a Helical-Axis Heliotron Device”, 21st IAEA FEC (Chengdu, China, 2006) EX/P4-18.
6. T. Mizuuchi, et al., Fusion Sci. Tech. 50 (2006) 352.
7. T. Mizuuchi, et al., J. Plasma Res. 81 (2005) 949.

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

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及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。汎用エネルギー源分野においてもシステム検討が進んでおり、無冷却セラミックタービンや超高温タービン用システム検討において超高温ガスタービンシステム用実機部品規模の部材の試作に成功し、耐熱性能試験においても優れた特性を実証している。

2.1.2.2. 重点領域研究としての意義及び社会的重要性

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。核融合炉材料の核融合模擬環境下における材料挙動に関する研究は、これからの核融合研究の発展を根底から支えるものであり、その意義は計り知れない。本研究領域は「先進核融合エネルギー」重点領域研究のなかでも、とくに複合粒子ビームと物質の相互作用の研究による先進材料開発および炉工学研究に重点を置く。本研究領域の主要な研究手段として整備した DuET 照射施設（2 重ビーム照射装置）は、核融合炉材料研究用の複合加速器設備として特に適したイオン種と加速エネルギー、ビーム電流を提供するだけでなく、広範囲な電流密度やターゲット雰囲気・温度等への対応と卓越した制御性を有し、更に反応性雰囲気や応力場・電磁場・電子励起場等の環境を複合的に作り出すターゲットを備えている点において、世界的にも最高の総合性能と特徴的な機能を持つ設備と言える。また同設備は固体-粒子相互作用に係る応用物理学研究や複合的なイオン注入による材料創製や表面改質、半導体やセラミックス材料の光・電子物性制御等の研究領域においてもユニークな機能を有している。このような設備の設計・設置・運用は、国際的な競争の中で本研究手法に係る永年の研究開発を精力的に実施してきた本研究組織によってのみ可能と考えられ、同時に、本研究組織を核としながら重点領域として推進することにより、国内外の研究者から広くコミットメントを得ることにより傑出した成果を挙げる事が可能になる。核融合炉材料の開発は、核融合以外のいわゆる極限環境下における材料特性の保全に対しても現象論的および機構論的応用が可能であることから、貴重な技術的 spin-off が期待される。核融合炉工学研究が現在の我が国における突出した超伝導工学技術の駆動力となったことは広く知られているが、核融合炉用低放射化鉄鋼材料として開発を進めてきた Fe-9Cr-2W 系フェライト・マルテンサイト鋼は、従来鋼と比較して優れた高温強度と相安定性を示すことが実証され、超鉄鋼開発計画に引き継がれ火力システム等における耐熱構造への応用が検討されている。更に、当該鋼を基本組成にして開発したナノスケール酸化物分散強化鋼（ODS 鋼）は、従来の金属材料に比較すると

格段に優れた耐照射性能を示すことが明らかとなっており、核融合炉以外の超臨界圧水炉や高燃焼度燃料被覆管への応用が期待されている。一方、核融合炉における要求から高い結晶性と熱伝導度を付与した炭化珪素繊維強化炭化珪素基セラミックス複合材料（SiC/SiC 複合材料）は、優れた高温物理化学特性と熱衝撃特性から、基盤エネルギーや航空宇宙分野における新規の耐熱材料として期待されている。また、超高温ガス炉あるいは高温高速ガス炉への応用も検討されている。更にセラミックスの照射効果に関する組織学的及び機構論的研究は半導体プロセスにおけるイオン注入に係る課題と共通因子が多く、Si や SiC 半導体のプロセス研究に役立っている。

2.1.2.3. 平成 16 年度以降の主な成果

(a) DuET/MUSTER の整備と有償利用体制の構築

DuET/MUSTER の更なる整備を進め、特に MUSTER は最新鋭のフィールドエミッション分析透過電子顕微鏡を導入するなど設備の充実を図るとともに、材料評価機器が一箇所に集中して設置され、利用研究者のワーキンググループと施設の管理室で一元管理される仕組みを整えた。平成 17 年度より、受益者負担の原則に基づき維持・運営費を賄うための施設利用料の導入を行っている。基本的には、前年度実績の必要経費と各装置の年間稼働時間から、各装置の単価を算定している。DuET に関しては、2 台の加速器の 5 年に 1 度実施予定のオーバーホール料金の 1 年分の単価を必要経費に含み、前年度に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から補助された分（センター経費）は必要経費から差し引き、必要経費を算定し学内の各装置の使用料を決定した。学内の使用料の根拠となる経費の算出には、センター経費が考慮されているのと、装置運用のための人件費は含んでいない。DuET/MUSTER の運営には、技術職員 2 人、助手 1 人が、ほぼ専任として付いており、これらの人件費を 2400 万円で計算し、2400 万円を各装置の昨年度使用経費に比例分配し人件費込みの必要経費を算出した。人件費込みの経費と使用時間から学

表 1.2.1. 施設利用料金

施設	学内料金	学外料金	使用時間
DuET	130,000	200,000	1 日
JEM2200FS	12,000	18,000	1 時間
JEM2010	2,000	3,000	1 時間
JSM6700F	2,000	3,000	1 時間
FIB	2,500	4,000	1 時間

内の使用料と同様な方法で学外用の使用料を決定した。この方法で計算した場合、DuET の学外利用料は 1 日当たり、30 万円となるが、DuET に関しては戦略的に共同利用を進めるために表のような料金設定としている。

(b) 核融合炉用低放射化鉄鋼材料の開発

低放射化フェライト鋼は、現在、核融合実証炉の第一候補構造材料として精力的に研究が進められており、構造材料開発計画における工学材料段階に位置付けられている。当研究所は、低放射化フェライト鋼の照射データベースの構築と照射効果機構解明のための中核的研究活動を展開している。当研究所において開発および研究されている 9%Cr-2%W マルテンサイト鋼（JLF-1）は、国際エネルギー機関（IEA）の共通試料に採擧されており、国際研究拠点としての役割を果たしている。最近の研究成果としては、更なるエネルギー

効率の向上と究極のエネルギー単価の低減を目指し、より高温特性を改善した JLS 鋼や、耐食性も考慮した高クロム ODS 鋼の開発が挙げられ、日本原子力研究所や核燃料サイクル機構や海外からの研究参加要請も多い。主な研究成果を以下に示す。

核融合環境における特徴的な材料学的課題の一つに、核変換ヘリウム効果があげられるが、低放射化フェライト鋼における核変換ヘリウムの材料挙動に及ぼす影響については、核分裂中性子やイオン加速器を用いた各種のシミュレーション照射法により研究されてきた。核分裂中性子を用いた研究としては、1) 10B 法、2) ^{54}Fe や ^{58}Ni 法を用いたアイソトープテラリング (IT) 法があり、これらの手法を用いた従来の研究によれば、フェライト鋼のヘリウム脆化感受性が極めて高いとされていた。しかし、DuET によるデュアルイオンビーム照射実験から、900 at.ppm のヘリウム量までは、ヘリウムによる照射硬化の促進は観察されないことが示された。また、米国の HFIR を用いた照射研究からは、これまで報告されてきた Ni-IT 法における顕著な照射硬化・脆化は、核変換ヘリウムによるものではなく、Ni 添加そのものの効果によるものであることを明らかとし、低放射化フェライト鋼がオーステナイト鋼等のほかの候補材料に比べ、耐ヘリウム脆化特性に優れていることを示した。また、日米協力核融合炉材料研究を通じて、中性子高照射量領域における低放射化フェライト鋼の材料挙動を詳細に調べ、強度特性、ボイドスエリング挙動、照射誘起析出および照射損傷組織の形成挙動を解明し、核融合環境下における材料挙動予測のための重要な基礎的知見を得ている。これらの結果と DuET を用いて得られた広範なデータベースを基に、材料挙動予測のためのシミュレーションコードを開発した。すなわち、温度変動・複合照射効果研究成果を評価対象に取り込み、照射実験による総合的な評価とそれに基づく理論的考察とモデル化を行い、低放射化フェライト鋼の照射効果機構を解明するとともに、照射損傷組織発達における要素過程の学術的解明に大きく貢献している。

(c) 核融合炉用 SiC/SiC セラミックス複合材料の開発

SiC/SiC 複合材料は、究極と言われる低放射化特性と 1000℃を優に超える高温運転を可能にすること等から、高品位な核融合動力炉の材料として大きな期待を背負っている。同時に SiC/SiC 複合材料は次世代ガスタービンや超臨界水システム、航空宇宙分野における推進システムや耐熱構造など次世代技術への幅広い応用が期待されている。本研究所では SiC/SiC 複合材料のプロセス開発と評価を鋭意進めており、既に米国オークリッジ国立研究所、仏ボルドー大学と並ぶ世界的な研究開発拠点として学界・産業界から広く認知されるに至っている。

耐環境性材料システムの要素技術開発をもとに基幹エネルギーシステムの環境負荷低減を目的とした研究では、セラミックス複合材料の設計・プロセス・構造化・システム化等に関連した多くの基礎的技術開発成果をあげた。とりわけ、革新的な超耐熱・耐環境性セラミックス複合材料プロセス技術 (ナノ・インフィルトレーション遷移共晶相 (NITE) プロセス) の開発は最も顕著な成果であり、これにより、既存の工業材料では望めなかった高温強度・耐酸化性・信頼性・気密性・接合性・コスト効率等を極めて高い水準で満足させる SiC 基セラミックス複合材料の製造が実証され、この発明はセラミックス構造材料の概念を一新するものとなった。本技術は、入り口温度 2000℃級のガスタービン実現への展望を開くものであり、産業用エネルギー機器や大型輸送機器、その他の熱利用機器への適

用により、エネルギーの生産・変換・貯蔵・輸送・利用に関わる効率や安全性を大幅に改善し環境負荷の低減に資することができる。

更にこれまでに開発した基礎技術に立脚して、NITE プロセスによる SiC 基セラミックス複合材料について構造化技術、利用技術及び生産技術を中心とした高度化を推進し（図 1.2.1 参照）、環境低負荷型基幹エネルギーシステムの成立性を具体的に示すとともに、周辺分野での幅広い新技術や新産業の創出効果を生み出すことを目標としている。本計画の基礎となる材料技術は、既実施研究によって得られた我が国独自の開発であり、現在のところ、外国においては類似製品すら購入不可能である。本計画の実施により材料プロセスおよび利用技術・製品化技術の両面を発展させ、周辺技術を含めた知的所有権を確保することは、本分野における我が国の国際的優位性の確保と維持においても極めて有効である。

これらの材料開発努力により、SiC/SiC 複合材料の基本性能は、同材料のブランケット構造への適用を想定した核融合動力炉設計における要求性能に対して多くの項目で近づき、一部では裕度を以って満たすまでに至っている。核融合炉材料としての最重要課題とされる中性子照射効果に関しては、従来材料においては僅かな中性子フルエンス（1 dpa 以下）で著しい強度劣化を呈していたが、先進近化学量論組成 SiC 繊維を用いて本研究所で特に照射特性を重視して作製した SiC/SiC 複合材料では 10 dpa までの中性子照射により一切の強度劣化を生じないことが実証され、核融合炉ブランケット構造への応用に向けて大きな一歩となった。またセラミックス材料の粒子線場応用における困難のひとつである照射誘起熱輸送特性低下についても、米国オークリッジ国立研究所と日本原子力研究所との 3 極協力により原子炉炉心での照射下熱伝導度変化測定に初めて成功し、高結晶性 SiC/SiC 複合材料では 700℃以上における熱伝導度が従来の懸念ほどには低下しないことが実証された。

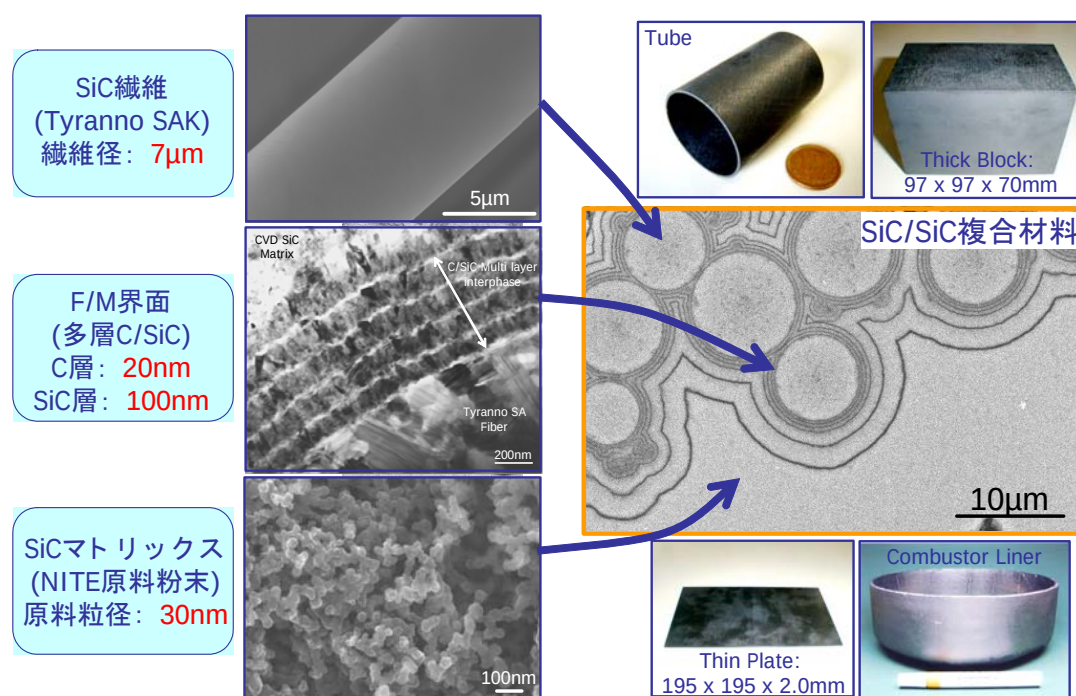


図 1.2.1 ナノテクノロジーによる SiC/SiC 複合材料開発

(d) ブランケット工学としての統合研究

核融合材料の研究は低放射化鉄鋼材料の開発に見られるように素材開発段階を終え、工業材料として材料データベースを整えつつ、炉設計活動とも協力してブランケット工学としての統合研究段階へ進みつつある。当研究所は上述したように核融合炉構造材料の代表的な候補材料である低放射化鉄鋼材料と SiC/SiC 複合材料の開発研究を進めてきており、これらをベースとして、ブランケット構成要素である中性子増倍材、トリチウム増殖材、冷却材等との共存性の研究やブランケット構成要素の製造プロセス開発等を開始している。また、理論およびモデリングは重要な要素であるが、分子動力学に基づく手法、モンテカルロ法、反応速度論を用いる手法等を統合するマルチスケールモデリングでの解析/評価等も進められている。これらは核融合分野での日米協力の重要テーマでもあり、日本原子力研究所と米国オークリッジ国立研究所との日米協力の一部ともなっている。これらの国際協力においても当研究所は牽引役を果たしている。

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

DuET は、核融合炉材料研究用の複合加速器型実験施設として、また先進材料の創製・改質・評価研究の施設として、世界的に見ても優れた総合性能と特徴的な機能を有する最新の設備となっている。本研究に係る本研究所の研究組織は、複合加速粒子ビームを応用する材料研究の分野において DuET を含む我が国の主要な実験装置の開発と利用研究の中心的役割を果たしてきており、設備および研究組織の両面において世界最先端の研究水準にある。複合加速器型の材料実験設備は本研究所のほかには東京大学、北海道大学、日本原子力研究所、精華大学（台湾）、米国アルゴンヌ国立研究所、同オークリッジ国立研究所および独ハーン・マイトナー研究所に設置されているが、これらの研究機関の研究者と本設備の企画段階から密度の濃い議論を重ねることにより、当初より相補性に配慮した機能設計を行うことと適切な協力関係と建設的な競争関係の維持が可能となっていることは、DuET および本研究組織の大きな特徴であると言える。

核融合炉材料開発では、米国においてはバナジウム合金やセラミックス複合材料など、いわゆる先進構造材料の研究が中心となっており、長期的展望に立った材料研究が主体となっている。これに対し、核融合実証炉構造材料として近い将来において最も実現性の高い低放射化フェライト鋼の研究は、我国と欧州において精力的に研究が進められている。エネルギー開発としての核融合研究を考慮した場合、低放射化フェライト鋼の有する優れた中性子照射耐性と大型構造物としての製造性は他の候補材料を圧倒的に凌いでおり、実証炉第一候補材料としての地位は不動と考えられる。低放射化フェライト鋼の開発研究は我が国の主導の下に進められており、中でも当研究所は材料開発研究の拠点のひとつとして位置付けられる。当研究所において開発・研究されている JLF-1 は、IEA の共通試料に採擇され、照射データベースの構築はもとより、照射損傷機構解明のための基礎的研究にも利用されている。更なるエネルギー効率の向上と究極のエネルギー単価の低減を目指してより高温特性を改善した JLF-S 鋼や JLF-ODS 鋼の開発が進められており、日本原子力研究所や核燃料サイクル機構や海外からの研究参加要請も多い。また、本所で開発された耐食性 ODS 鋼は、従来材料に比較すると格段に耐照射性能と耐食性能に優れており、核融

合炉、超臨界圧水炉および軽水炉高燃焼度化などの先進水冷却原子力プラント用の革新的な構造材料として期待されており、国際共同研究の準備が着々と進められている。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。

2.1.2.5. 今後の展望

先進エネルギーシステムに特有なエネルギー変換ならびにその他の機能・構造をつかさどる材料と高エネルギー粒子・量子線との相互作用の解明、ならびに、それに基づく先進エネルギー材料開発およびエネルギー生産システムの高度化を進めることが、高品位な基盤エネルギーシステムの実現のため不可欠である。とくに、核融合環境は、構造材料にとって極めて苛酷な環境であり、その開発に不可欠な技術的ならびに理論的な知見は、将来の科学技術の発達に伴い派生すると考えられるさまざまな特殊環境へも応用されると期待される。このような観点から、エネルギー理工学研究所の基幹実験装置として整備を進めてきた DuET に加え、マルチスケール材料評価設備群 (MUSTER) の施設整備を行った。Ω フィルター付の Field emission type transmission electron microscope (FE-TEM)、原子間力顕微鏡 (AFM) の導入をはじめとして、既存の高分解能走査形電子顕微鏡 (FE-SEM)、SEM、干渉顕微鏡、光学顕微鏡、集束イオンビーム試料作製装置 (FIB) 等を集めた統合施設 MUSTER の整備並びに実験に関する計画大綱の検討と策定を行い、DuET が設置してある北 2 号棟において整備を行った。この完成により先進電子顕微鏡およびエネルギー加速器複合実験研究が、DuET と MUSTER を有機的に協調発展させることで可能となる。これにより、センター共同研究のみならず、新たに参加する他大学からのメンバーとともに共同研究を実施し、先進エネルギープラント用構造材料開発においてエネルギー理工学研究所が日本、ひいては世界的な研究拠点となるための基盤が形成された。

中・長期展望としては、本所において開発・設置されているプラズマ発生装置や高輝度レーザ発生装置を材料開発に有効に応用するための研究機構への展開を検討している。すなわち、超高温プラズマや高輝度レーザーは状態図に存在しない非平衡相を創製することが知られており、未知の機能や性能を持った革新的な材料の開発が期待される。更に、プラズマやレーザーが化学結合や触媒機能に影響を与えることも良く知られており、重点領域研究の一つになっているバイオエネルギーへの応用も十分に見込まれる。

2.1.2.6. 主要論文リスト

1. 香山晃, “核融合炉・次世代原子炉を担うセラミック複合材料,” セラミックス第39巻第10号, 838-842, 2004.
2. T. Nozawa, T. Hinoki, L.L. Snead, Y. Katoh and A. Kohyama, “Neutron irradiation effects on high-crystallinity and near-stoichiometry SiC fibers and their composites,”

- Journal of Nuclear Materials, Vol. 329-342, 544-548, 2004.
3. Y. Katoh, A. Kohyama, T. Nozawa and M. Sato, "SiC/SiC composites through transient eutectic-phase route for fusion applications," Journal of Nuclear Materials, Vol. 329-346, 587-591, 2004.
 4. A. Kohyama, Y. Katoh and K. Jimbo, "Radiation Damage Study by Advanced Dual-Ion Irradiation Methods," Materials Transactions, Vol. 45, No. 1, 51-58, 2004.
 5. Akira Kohyama, "Advanced SiC/SiC Composite Materials for Fourth Generation Gas Cooled Fast Reactors," Key Engineering Materials, Vol.287, 16-21, 2005.
 6. Yutai Katoh, Takashi Nozawa, Masaki Kotani, Kazumi Ozawa, Akira Kohyama, "Microstructures and Flexural Properties of High Temperature-Pyrolyzed PIP-SiC/SiC Composites," Key Engineering Materials, Vol.287, 346-351, 2005.
 7. Kohyama, A., Current status of fusion reactor structural materials R&D, Materials Transactions, Volume 46, Issue 3, 384-393, 2005.
 8. Kohyama, A., Abe, K., Kimura, A., Muroga, T., Jitsukawa, S., Recent accomplishments and future prospects of materials R & D in Japan, Fusion Science and Technology, Volume 47, Issue 4, 836-843, 2005.
 9. Kishimoto, H., Ozawa, K., Kondo, S., Kohyama, A., Effects of dual-ion irradiation on the swelling of SiC/SiC composites Materials Transactions Volume 46, Issue 8, 1923-1927, 2005.
 10. Hinoki T. Kohyama A., Current status of SiC/SiC composites for nuclear applications, Annales de Chimie: Science des Materiaux Volume 30, Issue 6, 659-671, 2005.
 11. Kohyama A , Advanced SiC/SiC composite materials for fourth generation gas cooled fast reactors, ADVANCED SI-BASED CERAMICS AND COMPOSITES KEY ENGINEERING MATERIALS 287, 16-21, 2005.
 12. Katoh, Y. Nozawa, T. Snead, L.L. Hinoki, T Kohyama, A., Property tailorability for advanced CVI silicon carbide composites for fusion, Fusion Engineering and Design Volume 81, Issue 8-14 PART B, 937-944, 2006.
 13. Ogiwara, H., Kohyama, A., Tanigawa, H., Sakasegawa, H., Irradiation-induced hardening mechanism of ion irradiated JLF-1 to high fluences, Fusion Engineering and Design, Volume 81, Issues 8-14, 1091-1097, 2006.
 14. Sueishi, Y., Kohyama, A., Kinoshita, H., Narui, M., Fukumoto, K., Microstructure and nano-hardness analyses of stress corrosion cracking, utilizing 316L core shroud of BWR power reactors, Fusion Engineering and Design Volume 81, Issues 8-14, 1099-1103, 2006.
 15. Ogiwara, H., Kohyama, A., Tanigawa, H., Sakasegawa, H., Irradiation-induced hardening mechanism of ion irradiated JLF-1 to high fluences, Fusion Engineering and Design, Volume 81, Issue 8-14 PART B, February 2006, Pages 1091-1097, 2006.
 16. Kim, S.W., Kohyama, A., Yoon, H.K., Fatigue crack growth behavior and

microstructure of reduced activation ferritic/martensitic steel (JLF-1), Fusion Engineering and Design, Volume 81, Issue 8-14 PART B, February 2006, Pages 1105-1110, 2006.

17. Ozawa, K., Hinoki, T., Nozawa, T., Katoh, Y., Maki, Y., Kondo, S., Ikeda, S., Kohyama, A. Evaluation of fiber/matrix interfacial strength of neutron irradiated SiC/SiC composites using hysteresis loop analysis of tensile test, Materials Transactions, Volume 47, Issue 1, January 2006, Pages 207-210, 2006.
18. Sueishi Y, Kohyama A, Kinoshita H, Narui M, Fukumoto K, Microstructure and nano-hardness analyses of stress corrosion cracking, utilizing 316L core shroud of BWR power reactors, FUSION ENGINEERING AND DESIGN 81 (8-14): 1099-1103, 2006.

2.1.3. 耐極限環境先進構造材の開発

2.1.3.1. 研究の概要

核融合システムなどの先進発電プラントにおいては構造材料の使用温度域を上方拡大することで熱効率を上げる事が優先課題とされ、それに伴い高温強度に優れた構造材料の開発が重要な課題となっている。さらに科学技術の発達は材料にとって苛酷な環境を与え、材料要件もますます過酷になっている。高温では腐食が促進されるため、高温強度と共に耐食性が要求される。原子力発電プラントにおいては、これらに加え、耐照射性能が要求される。酸化物分散強化（ODS）鋼は、耐食性、高温強度および耐照射性に優れた材料としてその開発が期待されているが、高 Cr 化に伴う熱時効脆化や照射脆化の促進が懸念されている。本研究では、上記の3つの材料要件を兼ね備えた高 Cr-ODS 鋼の開発研究を行った。

また、軽水炉発電プラントの高経年化に伴い、軽水炉構造材料の照射下挙動予測の精度の向上が求められている。最近発達が目覚ましい計測技術や観察手法を用いて照射脆化機構解明し、科学的根拠に基づいたより合理的な方法で圧力容器鋼の脆化を予測するための基盤となるデータの構築を目的としている。

2.1.3.2. 重点領域研究としての意義及び社会的重要性

我が国の核融合炉システムの第一候補構造材料として低放射化フェライト鋼が指定されているが、核融合システムに求められている経済性や高熱効率の観点からは、その使用条件、すなわち、使用温度や耐久年数に限界がみられる。スーパーODS 鋼は、高温での強度特性に優れ、かつ、耐食性や耐照射性能に優れているため、低放射化フェライト鋼の向上的オプションとして位置づけられ、各国において研究開発が進められている。

一方、既存の軽水炉の健全性を予測するための技術開発は今後の我が国におけるエネルギー政策に密接に関わっている。原子力エネルギーの高効率安全利用研究として、原子力材料の照射下挙動予測研究の重要性は今後益々増すものと考えられる。

2. 1. 3. 3. 平成 16 年度以降の主な成果

(a) 原子力システムの高効率化に向けたスーパー ODS 鋼の開発

本研究は、平成14年から2カ年に渡って実施した「革新的原子力システム技術開発研究（経産省）」を継続して、実施されたものであり、その成果により、平成17年度からは「原子力システム開発事業研究（文科省）」へと展開している。具体的な成果としては、スーパーODS鋼の強度特性、耐食性および耐照射性能を評価した結果、新たに開発されたスーパーODS鋼の優れた特性が確認された。先ず、高温強度特性に着目すると、従来材に比べ、高温（800℃）での強度が2倍に向上し、耐食性においては、フェライト系の材料でありながら、ステンレス鋼の耐食性を凌駕する性能を示している。さらに、特筆すべき性能として、耐照射性能があり、従来の金属材料が照射を受けるとその伸びが顕著に低下するのに対し、スーパーODS鋼においては全く伸びの低下が認められず、優れた耐照射性能を示した。これらの優れた特性は、スーパーODS鋼に高密度に分散されたナノサイズの酸化物粒子によるものであることを確認した。

本研究で実施した高 Cr-ODS 鋼の開発研究を行った結果、以下の優れた特性が確認された。クロム濃度が 14 ないし 22% の ODS フェライト鋼の主な特徴として、1) 700℃における最大引張応力は約 300MPa と通常のフェライト鋼の 2 倍に及ぶ(図 1.3.1)、2) 290℃での中性子照射を受けても照射硬化は見られるが引張伸びは減少せず、優れた耐照射性を示す(図 1.3.2)。3) 14Cr-ODS 鋼の超臨界圧水中での耐食性は SUS316L 鋼を凌駕し、クロム濃度の増大はさらに耐食性を向上させる(図 1.3.3)。4) 高 Cr-ODS 鋼の鉛 - ビスマス中における耐食性は、4.5% Al の添加により顕著に向上する。5) 通常のフェライト鋼に比べ、熱時効脆化の発現が遅滞する傾向を示す。

ODS 鋼の優れた特性を引き出すためには、1) 酸化物粒子のサイズが数 nm であること、2) 結晶粒径がサブミクロン程度であること、が要求される。

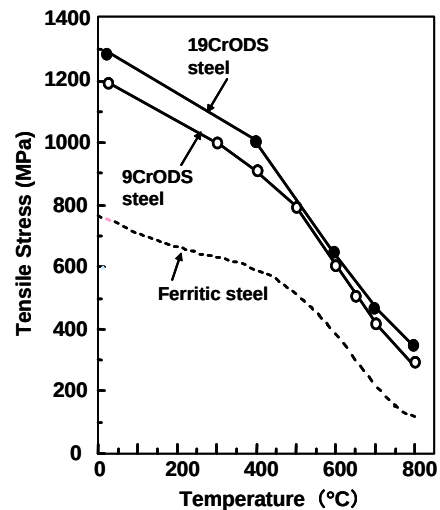


図 1.3.1.

引張強度の試験温度依存性

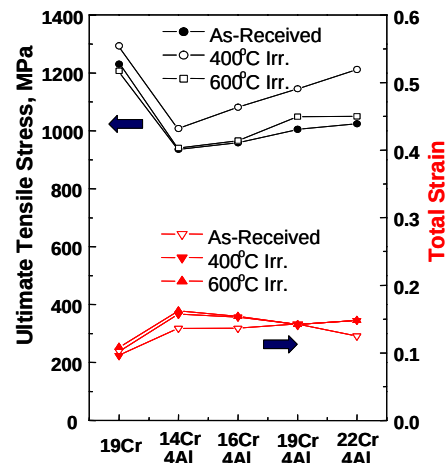


図 1.3.2

引張挙動に及ぼす中性子照射の影響

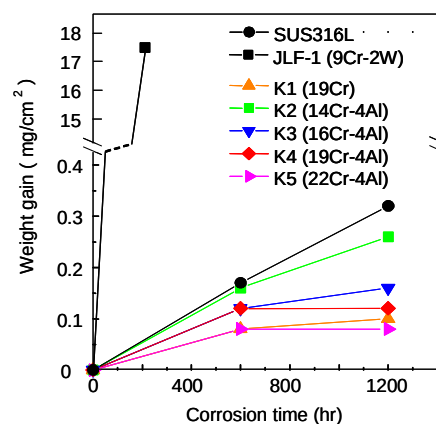


図 1.3.3

超臨界圧水中での腐食増量測定試験

いわゆるナノ・メゾスケールの組織制御により、高性能化が初めて可能となる。そのための、合金設計、合金化プロセス、固相化技術開発が進められ、耐食性と耐照射性能の向上が達成されている。現在、高強度化に向けた最終調整を行っている。

(b) 高経年化軽水炉の保全に関する研究

軽水炉発電プラントの高経年化に伴い、軽水炉構造材料の照射下挙動予測の精度の向上が求められている。本研究では、最近発達が目覚ましい計測技術や観察手法を用いて照射脆化機構解明し、科学的根拠に基づいたより合理的な方法で压力容器鋼の脆化を予測するための基盤となるデータを構築することを目的としている。具体的な成果としては、压力容器鋼の照射硬化挙動やマトリックス損傷形成過程についてこれまでに考慮されていなかった添加元素の影響の抽出及び定量化に関する研究を進めてきており、最近の特筆すべき成果として、Fe-Mn二元系モデル合金において、压力容器鋼の主要添加元素であるMnが中性子照射硬化・脆化を顕著に促進していることを始めて見出したことである。また、当該研究結果は、Mnがマトリックス損傷の形成過程に影響を及ぼし、高照射領域における照射硬化を促進する可能性を初めて指摘しており、国の内外問わず脆化予測式のあり方に多大なインパクトを与えている。本研究によって得られた知見は、高経年化RPV鋼の脆化予測式の高精度化に反映されていくものと考えられる。なお、米国ではMn影響を取り込んだ寿命予測式の提案がなされている。

JMTR において比較的高照射量の中性子照射実験を行なったところ、Fe-Mn 合金において Fe-Cu に匹敵する著しい照射硬化を生じ（図 1.3.4）、その硬化には Mn 量依存性、照射量依存性および照射温度依存性が見られること、Mn 添加により転位ループの微細化・高密度化が生じていること、Ni との相互作用は Mn 影響の抑制に繋がることなどを確認した。

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

ODS 鋼の研究開発は、ODS 鋼の持つ優れた特性ゆえに世界各国において進められているが、優れた特性を引き出すための技術を持っている研究グループは当該グループを置いて

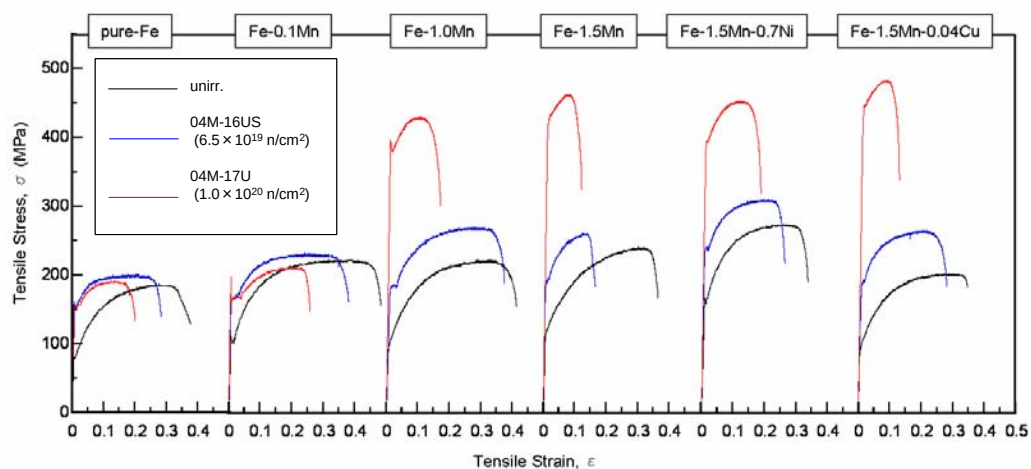


図 1.3.4. 鉄マンガ合金の中性子照射硬化に及ぼす Mn 量および第 3 元素の影響。

他にない。我々が開発したスーパーODS 鋼は国際的にも先進材料として認知されつつあり、世界各国から共同研究の依頼を受けている。それらの要望に応えるべく、現在、標準材料の作製を行っており、いずれ、国際サーベイランス材料として、世界各地の関連研究機関に配送する予定である。

軽水炉圧力容器の高経年化現象は国際的な問題になっており、保全の観点から、照射脆化をより高精度に予測する手法の開発のための材料照射研究が進められている。今回の我々の発見は、脆化予測式の見直しを検討する動機を与え、米国においては実際にマンガン影響を再調査し、マンガン影響を取り込んだ予測式を新たに提案している。

2.1.3.5. 今後の展望

現在、当該研究の開発段階は個々の特性の改善に向けた素材開発段階にある。今後は、実用化を目指した要素研究に展開していく事を計画している。具体的には、溶接に伴う熱時効脆化回避のための溶接法の開発や素管製作のための技術開発が重要な技術開発となる。

米国が我々の実験結果に速やかに対応したことから判断されるように、今回の発見は社会的なインパクトが大きい。しかしながら、我が国の脆化予測式に関しては、マンガン影響を考慮する検討は行われていない。今後は、マンガン影響発現のメカニズムを解明し、科学的根拠に基づいた我が国の圧力容器の照射脆化予測式の開発に貢献する。

2.1.3.6. 主要論文リスト

1. Akihiko Kimura et al., “J. Nucl. Sci. Tech., vol.44, No.3, (2007), in press
2. Kiyohiro Yabuuchi, Masashi Saitoh, Ryuta Kasada, Akihiko Kimura, “Effects of Manganese on the irradiation hardening of iron base alloys”, J. Nucl. Mater., To be published.

2.1.4. 可搬放電型中性子源の高性能化

2.1.4.1. 研究の概要

慣性静電閉じ込め核融合は、小型装置で $10^6\text{--}10^8/\text{s}$ の定常な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エネルギー源（中性子，陽子）として産業応用が期待されている。我々のグループは、慣性静電閉じ込めプラズマ計測、シミュレーションコード開発、 $\text{D-}^3\text{He}$ 先進核融合反応などの基礎学術研究のみならず、核融合中性子源の地雷探査への応用研究においても成果を挙げ、慣性静電閉じ込め核融合研究の拠点の一つとして認識されており、平成 17 年外部評価においても『核融合応用機器研究に関し（中略）京都大学エネルギー理工学研究所のグループは優れた成果を挙げており、当分野における世界の研究をリードしている存在である』との評価を受けている。今後は、医療や税関・空港などでの危険物探知など、社会の要請する課題への応用を実現するための高性能化研究と利用研究とを進める。

2.1.4.2. 重点領域研究としての意義及び社会的重要性

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、今後も超多額の研究投資が行われる核融合研究の中であって、このような安全・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。

また、核融合炉開発研究への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に理想的な較正用中性子源となり得る。

2.1.4.3. 平成 16 年度以降における主な成果

応用研究としては、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を行った。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る。これまでに、中性子の熱化と地雷原方向（下方）へ集束と、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ている。現在は、H19 年 9 月の国内最終試験に向けた改良を進めている。（JST 事業、共同研究体制：京大エネ研（代表：吉川潔）、京大原子炉、東工大、関西大学、株式会社日揮、他）

一方で、将来の要求に応える高性能化を目指した基礎研究も進めている。特に、イオン供給をグロー放電のみに頼った従来方式の問題点、すなわち印加電圧に比してイオンエネルギーが低いこと、残留ガスとの荷電交換反応によるイオン損失が大きいことに起因して、投入電力あたりの核融合反応率が低いという点を改善すべく、イオン源付加方式（イオン源アシスト型）の実験・数値解析研究を進めてきた。その結果、核融合反応率を投入電力とターゲットであるガス圧力とで除した「規格化反応率」について、従来方式の十倍以上の向上に成功した。また、核融合エネルギーを利用することで印加電圧 100 kV 程度の小型装置で 14.7 MeV の陽子エネルギーが得られるという潜在的な利点を有する D-³He 核融合反応の基礎実験研究にも着手し、計算機トモグラフィの解析技術を応用することで、D-³He 反応陽子の空間発生分布同定に初めて成功した。

数値解析研究においても、実機性能の予測可能な一次元コード開発に成功した。さらに、二次元コードの開発にも着手し、重水素ではなくヘリウム放電でのコード検証の段階ではあるが、二次元以上のコードでは初めて、原子・分子過程と空間電荷効果を同時に考慮して、放電特性を再現することに成功している。

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、国内よりもむしろ米国、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核融合核融合（IECF）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源が用いられている、このような加速器ベースの可搬型中性子源と比較して以下のような

優位性があり、後発ではあるが十分な競合性を有するため、我々の IECF 中性子源が認識され注目を集め始めている。まず、核融合反応率の高さの点で優位性がある。現状では、同程度の可搬性の加速器タイプ核融合中性子源では、パルス運転、D-T 反応で平均 $10^9/s$ 程度までの発生率が得られている。一方、IECF 中性子源では、D-D 反応で、定常運転で $10^8/s$ 、パルス運転ではピーク $10^{10}/s$ 程度の反応率が得られている。

IECF 中性子源でも D-T 反応は生起可能で、もちろんその場合には 2 桁以上高い発生率が期待できるが、特に実用時の安全性のため、現在は D-D と D- ^3He のみで実験が行われている。加えて、中性子捕獲 γ 線や散乱中性子での爆薬・違法薬物検出のためには、D-T 中性子のエネルギーは高過ぎ、減速して利用する場合にはその減速過程で雑音を発生してしまう、といった実用上の要請も、反応率の高い IECF 中性子源においては専ら D-D で実験が行われている理由でもある。

反応率の高さ以上に、加速器ベースの可搬型中性子源と大きく異なる点は、長寿命であることと大出力の定常運転が可能であることにある。これは、固体ターゲットではなくガスもしくはビーム自身がターゲットとなっていることに起因して、ターゲットの熱除去やスパッタリングの問題が遙かに少ないためで、同じ理由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大きな利点である。

中性子による爆薬探知技術については、特に地中の地雷中爆薬成分（窒素、水素）の検出に成功したのは我々が初めてである。

2.1.4.5. 今後の展望

応用研究としては、地雷に限らず空港・税関等での爆薬探知も含め、危険物探知応用への適用、実用化を目指す。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、一つには前述のイオン源アシスト型が有望であると考えている。さらに他の新方式の研究も含め、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を有効に用いて、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. T. Takamatsu, et al., Nucl. Fusion 46-1 (2006) 142-148.
2. K. Masuda, et al. “Simultaneous Measurements of Neutrons and Energetic Protons from D-D and D- ^3He Fusion Reactions in an Inertial Electrostatic Confinement Device”,
Proc. XXIIth Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, Japan, September 25-29 (2006) 624-627.
3. K. Yoshikawa, et al., “Research and Development of a Compact Discharge-driven D-D Fusion Neutron Source for Explosive Detection”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, in press.

2.1.5. エネルギーシステム設計及び評価方法論

2.1.5.1. 研究の概要

本課題は16年度から本格的に開始され、中期目標・中期計画策定当初からのものではないが、重点課題である環境調和型エネルギーシステムとしての核融合の設計と評価を行うものとして、重点複合領域の意義、具体像を示し説明する上で重要な役割を担うものとなった。第1期後半から、未来社会での核融合の役割の概念とその特色、技術的課題の摘出とフィジビリティ評価、ならびにグローバル・超長期のエネルギーシナリオ分析、を目標とし、学内外の協力体制の樹立と、所内での研究基盤の確立に努め、以下のように目標を大きく上回る成果が得られた。

- エネルギー利用システム設計：核融合エネルギー開発に必須のブランケットとして、当研究所の推進する先進材料を用いた高温高効率かつ近未来に実現可能な概念を示し、その基礎実験を開始した。さらに水素製造の可能性を実証した。
- エネルギーシステム評価：アジアを中心とした途上国展開、水素製造において核融合が他のエネルギーにない適応性と市場性を持つことを示し、開発の方向性を提案した。

2.1.5.2. 重点領域研究としての意義及び社会的重要性

重点領域研究は環境調和型エネルギーシステム構築を要請しており、核融合が実際に将来のエネルギーシステムで有意な貢献をなしうるためには、核融合エネルギー変換利用システムが不可欠である。本課題は、具体的な核融合エネルギーの変換利用を行う装置であるブランケットを提案、設計することで重点領域に直接寄与するものであるとともに、社会に対して核融合エネルギーの可能性を説明するものである。

本課題は、当研究所において開発の進められている低放射化鋼およびセラミック複合材を用いた液体金属増殖概念を提案し、他の方法に見られない高温、高効率でかつ、近い将来から段階的に開発実現する戦略を提示するものである。高温化により、核融合は核分裂や他の新エネルギーにはない市場可能性を持ち、特に本研究において可能性の確認されたバイオマスからの水素製造プロセスによって、発電のみによるよりはるかに大きな環境調和型エネルギーとしての可能性を持つことができる。

一方、本課題におけるエネルギーシステムの評価方法論においては、エネルギーをその技術的可能性や環境適合性のみではなく、社会や市場外を含む経済的な影響（外部性）によって総合的な社会適合性を分析する。これにより、核融合の持つ未来のエネルギーシステムにおける特徴と可能性が示され、特に単に資源制約と環境影響だけではなく、持続可能な社会システムの構築の上で大きな貢献をなしうることが明らかになった。

これらの成果は重点領域としての核融合研究の意義付けの上で重要な貢献であるとともに、本中期目標・中期計画の趣旨に沿い、具体的な回答を社会に提示するものである。

2.1.5.3. 平成16年度以降の主な成果

(a) 高温エネルギー変換と水素製造

核融合が環境調和型エネルギーであるためには社会の求める形に変換する必要があり、本課題では、このために刀剣急所で開発された超低放射化鉄鋼材料およびセラミック複合材を用いて、金属 LiPb をトリチウム増殖増倍および熱媒体に使用する概念を提案した。この概念を図 1.5.1 に示す。これは ITER の TBM で実験を開始できる着実に現実的な技術オプションであると同時に、適切な設計と SiC 冷却パネル

の開発成果によっては、早期に 900℃以上の高温ヘリウムガスを熱媒体として取り出すことの可能な概念であり、現在世界的に注目されている。このブランケットの開発研究を目的として LiPb ループ実証試験を開始した。本装置は、現在稼働中の世界で唯一の SiC-RAFM-LiPb ブランケットの実験ループであり、さまざまなブランケット特性の試験を行うことができ、世界最高温度のブランケット概念の実証試験を目指し、設計に必要な工学基礎データの蓄積を行っている。今後、個々の技術課題を解決しつつ、さらに核計算などを通じて、これら先進材料研究と連携して高温先進ブランケット概念を構築実証する計画である。

一方、このような高温のブランケットにより高温熱媒体を取り出せば、それを化学反応、特に吸熱反応に利用することで、核融合エネルギーを化学エネルギーに変換することができる。本課題ではバイオマスからの水素製造を提案し、実際にセルロースを分解して最大 40%の変換効率を実証した。

核融合によるバイオマスからの水素製造プロセスを図 1.5.2 に示す。核融合エネルギーは、水素として一時間に 280 トン、燃料電池自動車に供給したとすると、わが国の総需要の数分の 1 をまかなうことのできるレベルである。原料として想定するバイオマスは、生活ごみ（可燃物）として回収されているものだけでも年間

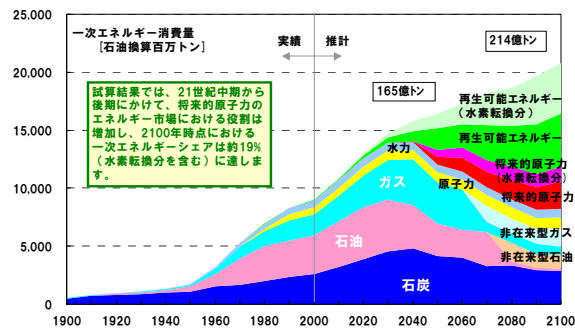


図 1.5.3 環境制約下での 21 世紀のエネルギー市場

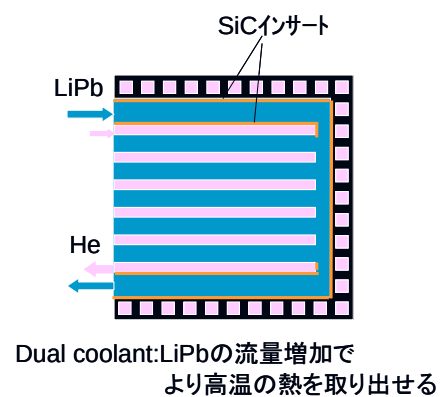


図 1.5.1 LiPb-SiC-RAFM
ブランケットの概念

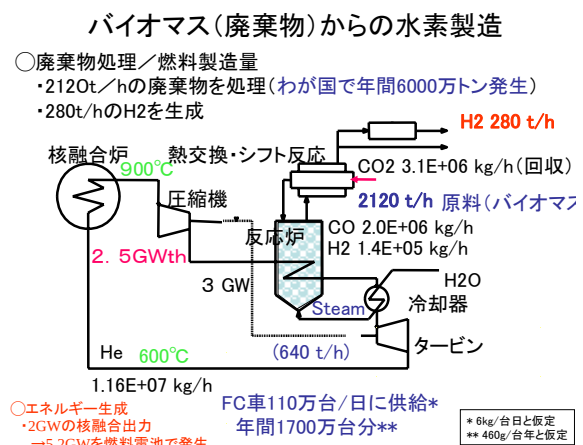


図 1.5.2 核融合エネルギーによる
バイオマスからの水素製造

6000 万トンにすでに達しており、核融合炉の出力は、このごみ処理の観点でもわが国全体の数分の 1 の規模に達する。

(b) エネルギーシステムの評価方法論

環境、社会的受容性、経済的競争力などを考慮した核融合の導入シナリオを検討し、社会に選択されるために、核融合が満たすべき条件や研究方向を検討した。図 1.5.3 に、核融合が将来のエネルギー市場において占めうる位置のモデル計算による一例を示す。核融合は、環境問題に配慮しないエネルギー供給シナリオにおいては、市場可能性がほとんどないこと、最大約 20%のシェアの可能性はあるが、途上国における可能性が大きいこと、水素製造が重要であることが示された。

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

ブランケット開発は現在国際的再編成の過程にあり、本研究は ITER における LiPb-TBM の国際協力の焦点となっている。またエネルギー評価は最近重視され始めた課題であり、まだ実施研究組織は多くないが、本研究は高い関心を受け、学会等でも注目されている。

2.1.5.5. 今後の展望

研究基盤の確立段階にあるが、今後内外との協力により、工学設計、実験研究を中心とした研究開発を展開する準備が整っている。

2.1.5.6. 主要論文リスト展望

1. S. Konishi, “Potential Fusion Market for Hydrogen Production Under Environmental Constraints” , Fusion Science and Technology, 47(2005), pp.1205-1209.
2. S. Konishi, K. Okano, Y. Ogawa, S. Nagumo, K. Tokimatsu and K. Tobita, “Evaluation of fusion study from socio-economic aspects” , Fusion Engineering and Design, 75-79(2005),1151-1155.

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

バイオ及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及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を発展継承するための新たな研究施設を設立し、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、環境にやさ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する。本重点複合領域研究では、以下の研究を進めている。

- 次世代太陽電池の開発
- 太陽光利用に関連するナノ材料創製
- 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. 次世代太陽電池の開発

2.2.1.1. 研究の概要

太陽光発電は究極の再生可能エネルギーであり、未来の基幹エネルギーシステムのひとつと位置付けられる。その開発には、多くのブレークスルーが必要である。当所が開発する独創的な新材料を用いた太陽電池は、これらの課題に答えうる極めて有望なものであり、世界一の効率を目指して研究を進めている。さらに、高効率な第三世代太陽電池を目指した基盤研究も推進している。

色素増感太陽電池開発では、より高効率な光電変換を目指し、ナノワイヤーとナノ粒子が複合化された部分ナノワイヤー化電極を作製し、色素増感太陽電池への適用を試みた。

また、微量ドーピングによるバンドチューニング、電極での光マネジメント、ナノロッドの2次元アレイ化などにも取り組んだ。

有機薄膜太陽電池開発では、従来の有機薄膜太陽電池が、励起子の失活と電荷の再結合が避けられず効率が低かった点を克服すべく、光合成系に類似した、励起子パスと電子・正孔パスを分離するという新しいコンセプトを有機薄膜太陽電池に導入し、新素子構造の構築とその評価を行ってきた。とりわけ、酸化チタンホールブロック層の導入やアニール・混合溶媒効果による電極結晶化の促進などにより、大気中プロセスでは世界最高レベルの4%台の高効率セルを得ることに成功した。

2.2.1.2. 重点領域研究としての意義及び社会的重要性

バイオエネルギー複合領域において、光合成のモデル化を指向してバイオ及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、環境調和型エネルギーシステム及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」の拠点形成につながる。

2.2.1.3. 平成16年度以降の主な成果

(a) 色素増感太陽電池の開発

部分ナノワイヤー化 TiO_2 を用いて色素増感太陽電池 DSC を作製した。多孔質電極の膜厚が $5.6\ \mu\text{m}$ と薄いにも関わらず、短絡電流密度 $11.9\ \text{mA}/\text{cm}^2$ 、開放電圧 $0.754\ \text{V}$ 、フィルファクター 0.673 とそれぞれ比較的高い値が得られた。変換効率 6.0% は、現在報告されている世界最高値（約 11% ）からすれば低い値であるが、1次元ナノ材料の分散が高効率化に寄与することを初めて示した。

酸化亜鉛 ZnO 等の2次元アレイ電極についても検討を行っており、高密度かつ高配向度の均質なアレイの作製に成功するとともに、1D ナノ結晶の長さも自在に制御しながら作製できた。これら1D ナノ結晶の長さが異なる電極を用いた DSC の変換効率は、図 2.1.1 のように長くするほど改善されることがわかった。

DSC は、電解液、色素、陰極、対極基板としての透明ガラス電極 FTO 等にて構成される。この FTO は、比較的高価であり、DSC のコストの約 60% を占めるとされている。またこの FTO は、比較的シート抵抗が高く（ $10\text{--}15\ \Omega/\square$ ）、破損されやすい等

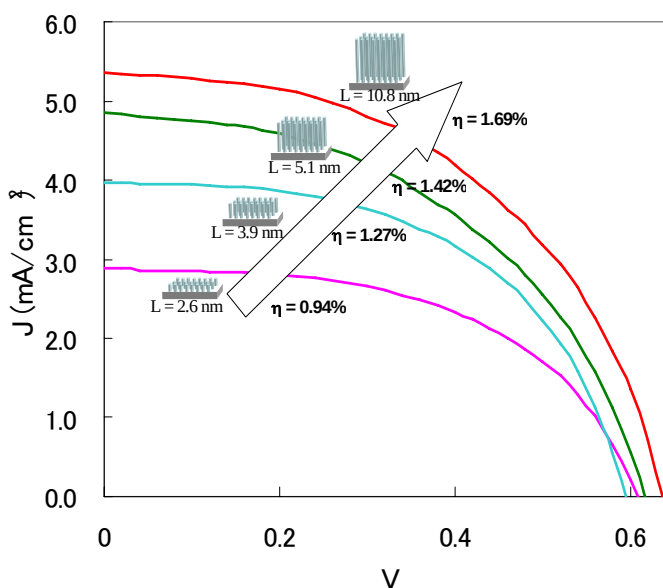


図 2.1.1. ZnO-1D を用いた DSC の光電変換特性

の欠点があった。基板のシート抵抗は、DSC の特性に関係することは知られており、セル面積が大きくなることにて効率が低下することも問題であった。そこでこの FTO 基板

の代わりに、シート抵抗が低く ($0.4\text{m}\Omega/\square$)、耐食性にも優れた金属チタンを基板に用いた DSC を調製し、評価した。セル面積の増加に伴い変換効率は低下するが、金属チタンを基板として用いることにより、この低下は抑えることが出来た(図 2.1.2)。これは、金属チタンのシート抵抗が低いために、セル面積の増加に伴うフィルファクターの低下が抑制されたものと思われる。この結果から、金属チタンを用いることにより、セルのスケールアップが図れるものと思われる。

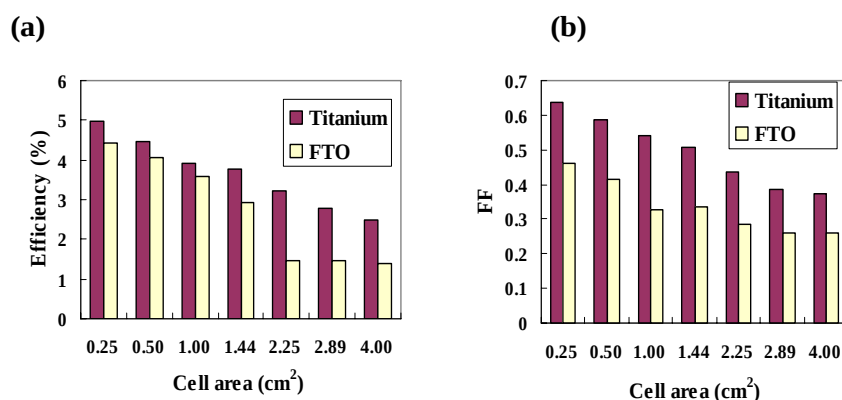


図 2.1.2. 金属チタンを陰極とする DSC の種々のセル面積での 変換効率(a)とフィルファクター(b)

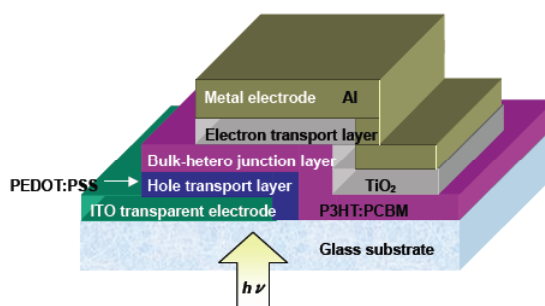


図 2.1.3. 開発した有機薄膜太陽電池の素子構造

(b) 有機薄膜太陽電池の開発

酸化チタン層を活性層と電極の間に導入し、エネルギー変換効率と耐久性の向上を検討した。すなわち、ITO 電極上に poly(styrenesulfonate)/poly(2,3-dihydrothieno-[3,4-b]-1,4-dioxin) (PEDOT:PSS) をスピコートし、さらに poly(3-hexylthiophene) (P3HT)と(6,6)-phenyl C61 butyric acid methyl ester (PCBM)の混合溶液をスピコートして活性層を成膜した後、酸化チタンアルコキサイドエタノール

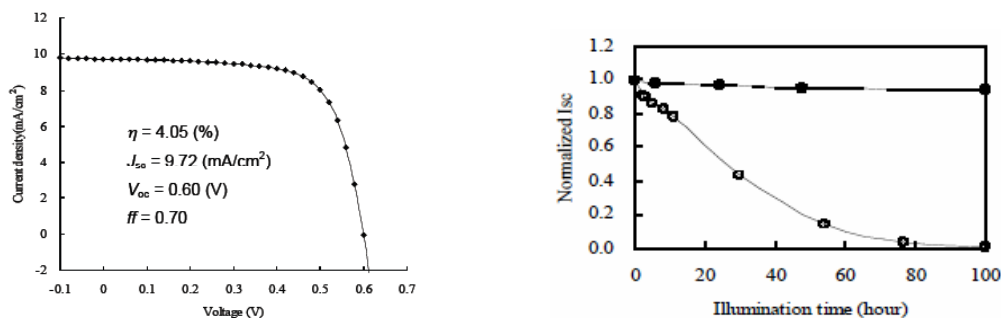


図 2.1.4. 有機薄膜太陽電池 (P3HT:PCBM 系) の 電流電圧曲線 (左) と長期安定性試験 (右)

溶液をスピコートし、酸化チタン層を成膜した。最後に Al を真空蒸着してセルを構築した (図 2.1.3)。

その結果、TiO₂ 薄膜がホールブロック層として有効であることが確認され、TiO₂を導入したバルクヘテロ接合セル (シングル) で大気下、変換効率 $\eta = 4.05$ (%), 短絡電流密度 $J_{sc} = 9.72$ (mA/cm²), 開放電圧 $V_{oc} = 0.60$ (V), フィルファクター $ff = 0.70$ という世界トップレベルの数値を達成した。さらに、大気雰囲気下、100 時間以上の AM1.5、100 mW 連続照射実験での効率劣化 (規格化した短絡電流密度の経時変化) 6%以下を達成することができた (図 2.1.4)。

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

色素増感太陽電池開発における当初の数値目標はセル変換効率 9 %であり、AM1.5、N719 色素使用、電極厚み 12 μ m、2 層構造の複合系セルにおいてセル変換効率 9.15 %を達成することができた。また、今後各要素技術を融合することで、11 %超の変換効率が期待できる結果が得られた。

有機薄膜太陽電池開発では、未封止の大気暴露下において世界トップレベルのセル特性と安定性を獲得することができた。

2.2.1.5. 今後の展望

色素増感太陽電池開発においては、大面積セルの作製と、変換効率 11 %を越えるさらなる高効率化を展開する。

有機薄膜太陽電池開発では、短絡電流密度と開放電圧の向上を目的に、電子輸送層材料、活性層材料、ホール輸送層材料の探索を中心に、高分子タンデムセル、低分子タンデムセル、および超階層ナノ構造セルの開発を行い、0.25 cm² の試作セルで効率 7 %を達成し、同時に、連続光照射下での大気暴露 100 時間による相対効率低下 10%以下の安定性獲得をめざす。

2.2.1.6. 主要論文リスト

1. H. Imahori, S. Hayashi, T. Umeyama, S. Eu, A. Oguro, S. Kang, Y. Matano, T. Shishido, S. Ngamsinlapasathian, S. Yoshikawa, "Comparison of Electrode Structures and Photovoltaic Properties of Porphyrin-Sensitized Solar Cells with TiO₂ and Nb, Ge, or Zr-Added TiO₂ Composite Electrodes," *Langmuir* 22, 11405 (2006).
2. P. Charoensirithavorn and S. Yoshikawa, *Proc. Sustainable Energy and Environment*, Vol. 1, 259 (2006).
3. K. Onoda, S. Ngamsinlapasathian, and S. Yoshikawa, *J. Photochem. Photobio. A* in press.
4. Yoshikawa, A. Hayakawa, T. Fujieda, K. Uehara, and S. Yoshikawa, *Proc. Sustainable Energy and Environment*, Vol. 1, 291 (2006).
5. A. Hayakawa, O. Yoshikawa, T. Fujieda, K. Uehara, and S. Yoshikawa, "A High Performance Polythiophene/Fullerene Bulk-Heterojunction Solar Cell with A TiOx

Hole Blocking Layer,” Appl. Phys. Lett. 2007 in press.

2.2.2. 次世代太陽電池に関連するナノ材料創製

化石燃料や天然ガスなどの資源の枯渇化および環境汚染問題が深刻化するなかで、持続可能な発展を維持するために、限られたエネルギー資源の有効利用法の開発が求められている。この技術の一つとして、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に期待が寄せられている。

ナノテクノロジーの展開において、ナノ材料の創製がキーとなる。当研究所は既に 15 種類以上の元素を用いた、セラミックナノチューブ・ナノワイヤー等の多様なナノ構造材料創出に成功しており、これを基盤としてナノテクノロジーの世界的な研究拠点を構築し世界をリードして行く。このような特徴をさらに発展させるため、独創的な新材料の持続的な創出、新しい学問領域の構築、論文など出版物による啓発を図ると共に、多くの応用分野を開拓し、わが国が優位な新産業領域育成のための拠点化を図る。

2.2.2.1. アミロイド繊維構造を鋳型とした金属ナノ配線の構築

2.2.2.1.1. 研究の概要

現在微細化技術の主流である半導体リソグラフィ技術は 50 nm 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」の発展が急務である。近年、ボトムアップ型ナノ配線作製において、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り、ナノ配線の鋳型として最適であり、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可能である。この鋳型法では、アミロイド表面の電荷や疎水性環境が金属の析出に大きな影響を与えるため、アミロイド繊維の表面状態の最適化設計が重要である。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、その繊維形状や表面環境を制御することを試みた。

2.2.2.1.2. 重点領域研究としての意義及び社会的的重要性

生体高分子による自己組織化プロセスを利用した方法は、省エネルギーでかつ環境負荷の少ないナノ構造体作製法である。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

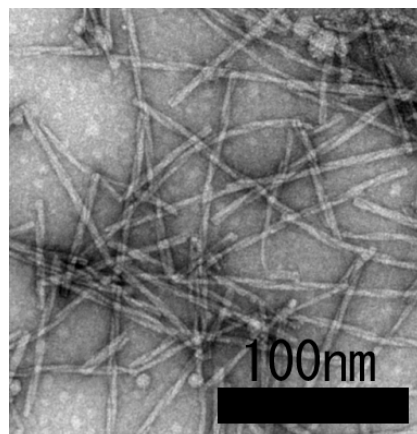


図 2.2.1. PHF6 ペプチドの繊維状構造体の TEM 画像

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と考えられる。

2.2.2.1.3. 平成 16 年度以降の主な成果

アミロイド繊維の基として、アルツハイマー病の繊維原性タンパク質タウのコア配列を用いた。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。特にタウタンパク質のコア配列及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。そこで、タウコア配列中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 2.2.1)。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、リン酸化していない配列と比較して長さが 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。またコア配列の凝集におけるチロシンの疎水性効果を検討するため、4-メチルフェニル、4-ピフェニル、4-フルオロフェニルをチロシン残基部に導入した非天然型タウコアペプチドを Fmoc 固相合成法により合成した。これらの全てのペプチドにおいて TEM により繊維状構造体の形成が確認できた。また PHF6 誘導体の凝集速度をチオフラビン T 試験により測定した結果、チロシン残基水酸基を疎水性官能基に変換することで、ペプチドの凝集速度が著しく増加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及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アミロイド繊維を作製することにより、繊維の表面電荷や疎水性環境を制御できることが示唆された。

2.2.2.1.4. 国内外の関連する領域の中での位置付け

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 らの報告がある。彼らの手法では約 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く、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、僅か数アミノ酸のペプチド配列を用いおり、そのアミロイド繊維の表面環境の制御が簡易であり、金ナノ配線のみならず様々な金属ナノ配線の作製に応用できると考えられる。

2.2.2.1.5. 今後の展望

表面改質を行ったアミロイド繊維に対して、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とにより、PHF6 誘導体を基としたアミロイド繊維によるナノ配線構築の可能性を模索する。またこれらの材料は半導体素子・金属触媒・光合成型太陽電池などの応用を図る。

2.2.2.1.6. 主要論文リスト

1. T. Konno, T. Morii, A. Hirata, S. Sato, H. Naiki, S. Oiki, and K. Ikura, Covalent

blocking of amyloid formation and protein aggregation by transglutaminase-catalyzed intra-molecular cross-linking. *Biochemistry* 44, 2072-2079 (2005).

2. T. Konno, T. Morii, H. Shimidzu, S. Oiki, K. Ikura, Paradoxical inhibition of protein aggregation and precipitation by transglutaminase-catalyzed intermolecular cross-linking. *J. Biol. Chem.* 280, 17520-5 (2005).

2.2.2.2. 半導体上への金属析出

2.2.2.2.1. 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。また、半導体上への金属析出は、微細配線技術や微細構造作製技術などにも大きく関わっている。シリコン上への置換めっき現象の把握に取り組み、その過程で開路条件下におけるシリコン電極の電子振動現象を発見した。一方、電解析出においては、n型シリコンにおいてもp型でのみ可能であった光アシストパターンニングを実現した。さらに、光強度を変調することによって析出金属粒子の径と分布を制御する新規な手法を提案している。また、マクロ孔を形成したシリコンを鋳型として微細構造体を形成し、種々の形態発現機構解明に取り組んでいる。

2.2.2.2.2. 重点領域研究としての意義及び社会的重要性

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おり、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。

2.2.2.2.3. 平成16年度以降の主な成果

これまでに、p型シリコンを用いてマスクやレジストなしに光照射を制御することによって金属パターンをシリコン上に描くことに成功している。この手法をn型シリコンに拡張した。n型シリコンの多数キャリアは電子であり、p型と同様な光励起によって表面上に金属パターンを描くことはできない。しかし、光照射によって正孔を励起することにより、位置選択的な多孔質層形成が可能である。多孔質シリコン層は平滑シリコン表面に比べ、高い還元性を有している。この特性を利用することにより、n型シリコン表面にも銅パターンの形成が可能となる。n型シリコン表面に光照射によって多孔質シリコン形成層を描き、その後銅置換めっき浴中に浸漬することで、多孔質層部分にのみ銅の置換めっきが起こる。この手法により、銅による光アシストパターンニングに成功した。

光電極を金属、特に貴な金属で表面修飾することで電極触媒性の向上が可能となる。この際、析出金属のサイズや分布も電極触媒性に影響を及ぼす。電析操作時においてp型シ

シリコン上への白金析出物のサイズおよび分布制御を光強度変調により実現することを試みた。白金は暗時においても、光照射時においても電析が起こる。析出形態は両条件により異なり、暗時においては成長した球状粒子が観察され、照射時には分散した微細粒子が生成する。この挙動の違いは両条件下における電荷移動過程が異なるために生じる。暗時では伝導帯に存在する電子が p 型シリコンで不足しているために、白金イオンの還元は価電子帯への正孔注入により進行する。一方、光照射条件下においては、伝導帯へ光励起された電子が白金イオンを還元する過程が支配的となり、還元速度が増す。金属析出速度の違いが異なる析出形態をもたらす。この特性を利用することによって、一定電位条件下で光強度変調を行うと、シリコン上に析出する白金のサイズと分布制御が可能になることを明らかにした。光強度変調による析出物の形態および分布制御は、白金に限らず、他の貴な金属系においても可能なはずである。この可能性を検証するために、金、パラジウム、および銅の p 型シリコン上への光強度変調電析による形態制御の可能性を検討した。その結果、銅のみが形態制御可能であった。パラジウムと金においては、置換めつき速度が速く、液に浸漬しただけでシリコン上に自発的な核生成が速やかに進行するために、形態制御できなかった。

マイクロメートル程度の孔径を有する多孔質シリコンを作製し、電析によりその孔内への金属充填を試みた。銅や白金においては暗時において孔底からの金属析出が進行する。貴な金属においては、酸化還元電位が価電子帯のエネルギー準位に接近しているために正孔注入による還元反応が可能である。電析後に基板であるシリコンを溶解することによって、金属のマイクロ構造体配列が得られる。銅や白金においてはマイクロロッド構造となる。孔充填は底部から優先的に、緻密かつ滑らかに進行し、シリコン孔の形態を忠実に転写するものであった。同様に貴な金属であるパラジウムや金を用いて暗時においてマイクロロッドの作製を試みたが、これらの金属では孔底部の析出が銅や白金の場合に比べて起こりにくかった。このような孔充填挙動の違いは、貴な金属系において可能となるシリコン壁への金属の置換めつき速度、孔壁の抵抗による電解時の電流分布、孔内における反応物質種の物質移動などの寄与によるものと考えられるが、詳細な解析は今後の課題である。一方、卑な金属であるニッケルにおいては価電子帯を介しての電荷移動が期待できないために暗時においては析出が起こらず、光を照射することによって孔壁全面において析出が起こる。この場合においてはマイクロチューブが得られる。この手法によりシリコンをテンプレートとして、微小構造体を形成する可能性を示した。

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

シリコン上への電気化学手法による金属析出は、1997 年に IBM 社が IC チップ配線に銅めつ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から、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。

2.2.2.2.5. 今後の展望

金属触媒を付与したシリコン電極の光照射下における水素発生電極挙動を検討し、光変換効率の向上に資する金属析出条件を検討する。一方、微小構造体形成に関しては、孔内への金属析出挙動を明らかにするとともに、より微細な孔への金属充填に取り組み、電気化学的な微小構造体作製技術の確立に努める。

2.2.2.2.6. 主要論文リスト

1. 黒川明成, 作花哲夫, 尾形幸生, n 型シリコン上へのマスクレス銅パターン形成, 表面技術, 56, 281-285, 2005
2. Y.L. Kawamura, T. Sakka, and Y. H. Ogata, Photo-assisted control of Pt electrodeposition on p-type Si, J. Electrochem. Soc., 152, C701-C705, 2005
3. K. Kobayashi, F. A. Harraz, S. Izuo, T. Sakka, and Y.H. Ogata, Microrod and microtube formation by electrodeposition of metal into ordered macropores prepared in p-type silicon, J. Electrochem. Soc., 153, C218-C222, 2006.

2.2.2.3. 1次元ナノ材料の創製

2.2.2.3.1. 研究の概要

色素増感太陽電池は、ナノサイズの酸化チタン TiO_2 半導体を多孔質膜とし、その表面に色素を吸着させることで効率良く太陽光から電子を生成させるというものであり、いかに高表面積で結晶性の高い半導体電極を作るかが高効率化を実現する上での鍵となっている。そのような考えに基づいて、界面活性剤を鋳型とするゾルゲル反応により調製した TiO_2 が、一次元ナノ材料のネットワークを形成することを報告してきたが、これまで一次元ナノ材料を高含率に含む電極の調製には成功していなかった。そこで、水熱合成・熱処理複合プロセスで、 TiO_2 ナノワイヤー・ナノロッドを作製した結果、熱処理条件等を変化させることによって結晶相とナノチューブからナノロッドまでの形状・サイズを自在に作り分ける技術を確立することができた。電界紡糸法によるポリフェニレンビニレンやポリチオフェン等導電性高分子の1D材料化にも取り組んでいる。

2.2.2.3.2. 重点領域研究としての意義及び社会的重要性

バイオエネルギー複合領域において、単なるナノ材料創製技術基盤の構築のみならず、分子集合体からナノ構造体が形成する学理の究明を通して、バイオミネラリゼーションの本質探求にも通じる研究であり、得られる新材料は、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に利用され、環境調和型エネルギーシステム及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」の拠点形成へとつながる。

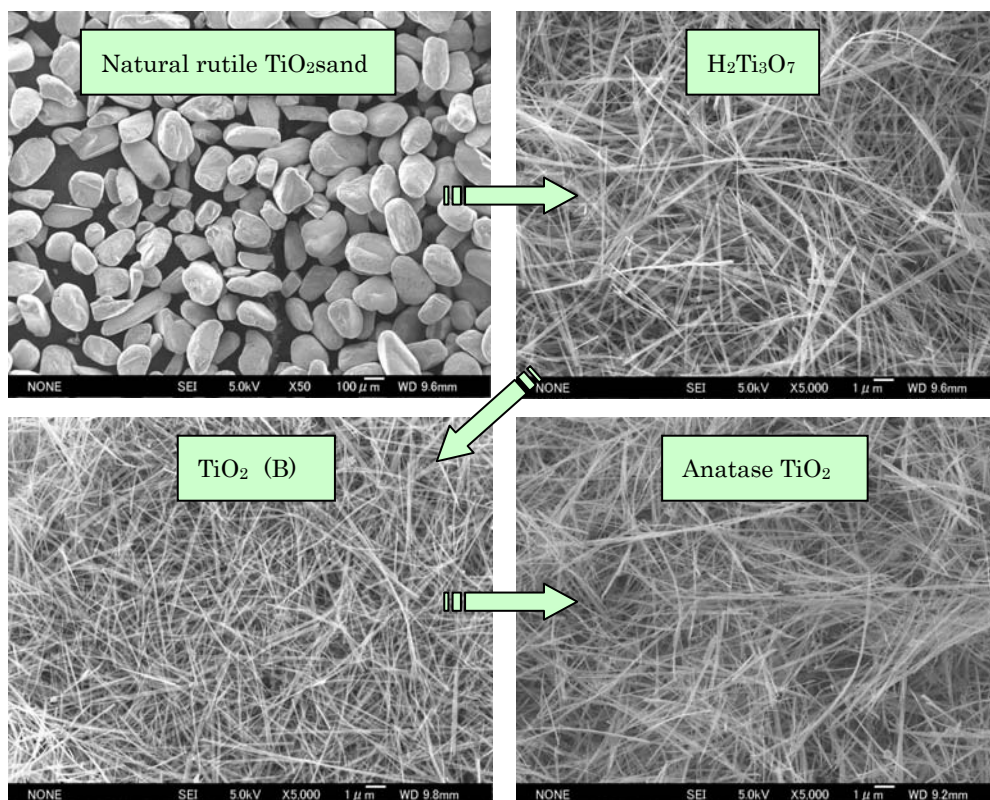


図 2.2.2. 水熱-熱処理複合プロセスによる $\text{TiO}_2(\text{B})$ および TiO_2 アナターゼナノワイヤー

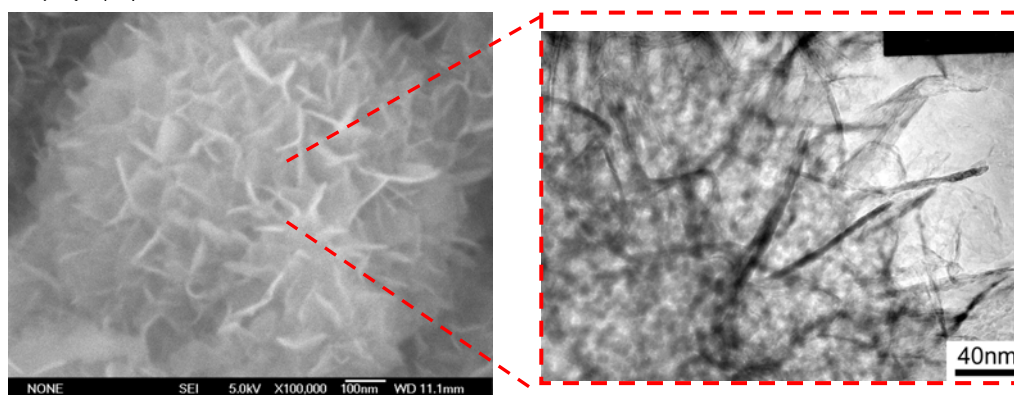


図 2.2.3. ナノシート状構造体酸化チタン

2.2.2.3.3. 平成 16 年度以降の主な成果

通常、水熱合成法でナノワイヤーを得るには、 NaOH 水溶液中であれば 150°C 以上で 48-120 h 程度の水熱処理を行う。この水熱合成を 24 h 程度に短縮することでナノワイヤーの結晶成長を途中の段階で停止させるとともに、酸によるイオン交換処理、大気中での熱処理を最適化することで、アナターゼナノワイヤーとやや大きなルチル粒子が混在した生成物を得ることができた。

水熱合成法における結晶成長をより一層進展させて、ナノチューブやナノワイヤーをはるかに凌駕する比表面積 $642 \text{ m}^2/\text{g}$ をもつナノシート状構造体酸化チタンの作製に成功した。

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

一般に結晶性が高く耐熱性に優れたナノワイヤーは比表面積が小さく、電極化した場合の実効表面積は低下することが明らかとなった。1次元ナノ材料を利用しつつ、高実効表面積を保つには、例えば次の3つのアプローチが考えられる。

- (a) 1次元ナノ材料自体を非常に細かな粒子にする（ナノロッド化）
- (b) 1次元ナノ材料とナノ粒子の複合電極を作製する（1次元+0次元構造）
- (c) 1次元ナノ材料の充填密度を上げる（2次元アレイ化）

とくに(b)は、高比表面積の等軸状粒子で生成させた電子を1次元のパスを使って流すという考え方であることから、(c)とともに光電変換効率の向上につながるものと期待される。

2.2.2.3.5. 今後の展望

二次元アレイ化および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。

2.2.2.3.6. 主要論文リスト

1. Y. Suzuki, S. Ngamsinlapasathian, R. Yoshida, S. Yoshikawa, Partially Nanowire-Structured TiO₂ Electrode For Dye-Sensitized Solar Cells, *Central European J. Chem.* **4** [3] 476-488 (2006).
2. S. Pavasupree, S. Ngamsinlapasathian, M. Nakajima, Y. Suzuki, S. Yoshikawa, Synthesis, Characterization, Photocatalytic Activity and Dye-sensitized Solar Cell, Performance of Nanorods/Nanoparticles TiO₂ with Mesoporous Structure, *J. Photochem. Photobio. A.* **184**, 163 (2006).
3. S. Pavasupree, S. Ngamsinlapasathian, Y. Suzuki, and S. Yoshikawa, Synthesis and Dye-Sensitized Solar Cell Performance of Nanorods/Nanoparticles TiO₂ from High Surface Area Nanosheet TiO₂, *J. Nanosci. Nanotech.* **6**, 3685 (2006).

2.2.2.4. コンビナトリアル・ケミストリー手法によるバイオ・ナノ材料開発

2.2.2.4.1. 研究の概要

化学合成ペプチドライブラリ法は有機溶媒中で親和性をもつ分子を探索可能であることなど有利な点が多い。化学合成法によりペプチドライブラリを合成し、種々のポルフィリン色素と結合するペプチド分子を見だし、その結合様式について分子動力学法を用いた予測と並行して明らかにした。

2.2.2.4.2. 重点領域研究としての意義及び社会的重要性

ハイスループットスクリーニングとナノマニピュレーション技術を利用しつつ、バイオ及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、環境調和型エネルギーシステム及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。

2.2.2.4.3. 平成16年度以降の主な成果

化学合成ペプチドライブラリ法により標的分子をつぎのように探索した。すなわち、化学合成法により5残基のペプチドライブラリを合成し、テトラカルボキシポルフィリンを始めとする種々のポルフィリン色素と結合するペプチド分子を見だし、その結合定数を決定した。それらの結合構造は分子動力学法を用いて予測でき、金属を含まないテトラカルボキシポルフィリンの場合にはN末端のアミノ基と2残基目の疎水基が重要なことなどを明らかにした。

2.2.2.4.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

ケミカルバイオロジーをはじめとして、コンビナトリアル・ケミストリー手法の一つである化学合成ペプチドライブラリ法は、とりわけドラッグデザインの分野でさかんに行われているものの、本テーマは、単なるアフィニティスクリーニングにとどまらず、とりわけ太陽電池開発や光触媒開発につながる光電変換機能の高効率発現を目指した新しい方法論の開拓に着目している点に特色がある。

2.2.2.4.5. 今後の展望

ハイスループットスクリーニングとナノマニピュレーション技術を利用しつつ、得られた材料の光電変換系への展開を図る。

2.2.2.4.6. 主要論文リスト

1. S. Sakamoto, A. Ito, K. Kudo and S. Yoshikawa, De Novo Design, Synthesis and Function of Semiartificial Myoglobin Conjugated with Coiled-Coil Two α -Herix Peptides, *Chem. A Euro. J.* **10** [15] 3717-3726 (2004).
2. K. Inai, M. Oshita, T. Hashimoto, S. Yoshikawa, Structure-dependent anti-thrombogenic peptides having two disulfide bonds. *Peptide Science* (2006), 43rd 309.
3. K. Inai, S. Yoshikawa, Screening of porphyrin binding peptides using chemically synthesized random peptide library. *Peptide Science* (2006), 43rd 346.

2.2.2.5. 多孔質シリコンの生成と応用

2.2.2.5.1. 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。本研究は、前回の外部評価において、「長期的な視点に立つ基盤研究であり、世界的にもユニークな研究が地道に続けられてい

る」との評価を受けた。シリコンにおけるサブミクロンからミクロンサイズの孔径を有するマクロ多孔質構造の発現機構の解明に取り組み、従来考えられてきた多孔構造発現モデルでは説明できない多孔構造生成挙動を見出し、現在、孔中での電位分布や物質移動を考慮した新たなモデルの検討を行っている。メソ多孔構造を持つ多孔質シリコンの多層構造作製にも取り組んでいる。多孔度をサイン波形で変調したルゲート構造体の作製条件を検討するとともにその光学特性を調べ、この構造をエネルギー関連物質等揮発性有機物質の検知に適用して、その可能性を示した。

2.2.2.5.2. 重点領域研究としての意義及び社会的重要性

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担体や微細構造体への適用の可能性を有する。

2.2.2.5.3. 平成 16 年度以降の主な成果

p 型シリコンにおけるマクロ多孔質構造の発現機構を検討した。シリコン自由表面を用いてマクロ孔生成を行うと、ランダムに分布したマクロ孔群が得られる。一方、フォトリソグラフィ法によってエッチピットを規則的に配列した試料を用いて陽極酸化を行うと、プリエッチパターンに従って規則的に配列したマクロ孔列からなる多孔構造が実現する。初期には横方向と深さ方向への孔成長が進行する。隣り合う孔を隔てる孔壁厚さがある値に達すると、横方向への成長が止まり、その後は深さ方向への成長のみが起こる。例えば、5 μm 間隔のエッチピットを与えたシリコンを 13 mAcm^{-2} の電流密度で 2 時間電解すると、孔径 4 μm 、深さ 50 μm の規則正しく整列した深さ方向での孔径が均一なマクロ孔が得られた。孔壁の厚さは 0.5 μm であった。この際、プリエッチピット間隔を変化させると、孔径および孔間壁の厚さが変化する。間隔が 2 μm 以下となると、孔間の壁の崩壊が起こり、規則配列が崩れた。この現象は、従来考えられてきた孔間の壁厚さがシリコン中の空間電荷層厚さにより決定されるという多孔構造発現モデルでは説明できない。マクロ多孔構造の生成について再考する必要があることを示唆する研究となっている。

メソ乃至はミクロ多孔構造を持つ多孔質シリコンの多層構造体は、異なる多孔度を持つ層が異なる屈折率を持つことから、光学材料としての応用が可能である。多孔質シリコンを電気化学的に生成する際の成長フロントは孔底に限られる。この特性により、多孔度が厚さ方向に変化した多層膜を容易に作製することができる。従来は二つの多孔度を持つ層のサンドイッチ構造からなるブラッグ反射体がこの対象として研究されてきた。一方、少数ではあるが多孔度をサイン波形で変調したルゲート構造を持つ多層膜も研究されている。この構造は、二値多層膜に比べ、その反射スペクトル中でサイドバンドや高調波が抑制される、また層間界面構造の均一性における厳密さに対する要求が緩和されるなどの利点を持つ。われわれは、多孔度をサイン波形で変調したルゲート構造体の作製条件を検討する

とともにその光学特性を調べた。高不純物濃度の p 型シリコンを用いてルゲート型多層膜構造を得、表面の酸化により生じる経時変化を防ぐために、あらかじめ電気化学的に陽極酸化することによって安定化させる手法を提案した。この構造をエネルギー関連物質等揮発性有機物質の検知に適用し、その可能性を示した。物質蒸気が細孔内で毛管凝縮を起こすことによって、孔内の空気が検知物質液体に置き換わり、多層膜の屈折率が変化する。その結果、多層膜からの反射スペクトルが変化する挙動を利用するものである。さらに、不純物濃度の低いシリコンを出発基板に用いることにより、孔構造が微細化し、物質検知応答時間が短くなることを見いだした。

2.2.2.5.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

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。

2.2.2.5.5. 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。この結果は、同構造そのもの、または鋳型とした微細構造作製における基本的考え方を提供できるものと期待される。さらに、多層構造作製とも関連して、現在系統的に作製することが困難となっている 50-300 nm 孔径の中間孔径を持つ多孔構造の作製条件を探る。この構造を用いてルゲート型多層膜を構成することによって、ウィルスなど分子より大きなサイズを持つバイオ関連種検知の可能性が開ける。

2.2.2.5.6. 主要論文リスト

1. F.A. Harraz, K. Kamada, T. Kobayashi, T. Sakka, and Y. H. Ogata, Random macropore formation in p-type silicon in HF-containing organic solutions: Host matrix for metal deposition, J. Electrochem. Soc., 152, C213-C220, 2005
2. K. Kobayashi, F. A. Harraz, S. Izuo, T. Sakka, and Y. H. Ogata, Macropore growth in a prepatterned p-type silicon wafer, Phys. Stat. Sol., in press
3. M. S. Salem, M. J. Sailor, F. A. Harraz, T. Sakka, and Y. H. Ogata, Electrochemical stabilization of porous silicon multilayers for sensing various chemical compounds, J. Appl. Phys., 100, 083520, 2006.

2.2.2.6. 高性能光触媒の開発

2.2.2.6.1. 研究の概要：

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高温固相反応により、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を作製した。この複合材料を含むメタノール水溶液に光照射すると、効率よく水素が発生することがわかった。チタニウムブトキシドを原料として水熱法によりナノ結晶多孔質酸化チタンを合成した。得られた酸化チタンはアナターゼの結晶相であった。BET 測定から多孔質体であることがわかった。焼成後、メタノール水溶液に酸化チタンを加えて光照射水分解を行うと、市販の酸化チタンよりも高効率で水素が発生することを明らかにした。

2.2.2.6.2. 重点領域研究としての意義及び社会的重要性

本テーマは、水の完全分解による水素生産を触媒するヒドロゲナーゼの機能を人為的に再現することを目指しており、バイオエネルギー複合領域において、バイオ及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、環境調和型エネルギーシステム及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」の拠点形成と関連する。

2.2.2.6.3. 平成 16 年度以降の主な成果

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を作製した。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、最大 $138 \mu\text{mol h}^{-1}$ で効率よく水素が発生することがわかった。チタニウムブトキシドを原料として水熱法によりナノ結晶多孔質酸化チタンを合成した。XRD, SEM および TEM 測定から、得られた酸化チタンはアナターゼの結晶相で 8 nm の結晶子径であった。BET 測定から孔径 6 nm、比表面積 $215 \text{ m}^2/\text{g}$ の多孔質体であることがわかった。500 °C で焼成した後、メタノール水溶液に酸化チタンを加えて光照射水分解を行うと、市販の酸化チタンよりも高効率で水素が発生した。

2.2.2.6.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

酸化チタンをはじめとする種々の光触媒を利用した水の完全分解による水素生産に関する研究は、以前から行われており、太陽光有効利用のための光触媒の可視光応答化や、水中での光溶解（自己分解）を抑制した安定化に関する開発は進められてきたものの、本テーマのように、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検討した例はほとんどない。

2.2.2.6.5. 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、(二次元アレイ化などの高次構造への展開も含めて)さらなる最適化を図る。

2.2.2.6.6. 主要論文リスト

1. T. Sreethawong, Y. Yamada, T. Kobayashi and S. Yoshikawa, Optimization of reaction conditions for cyclohexene epoxidation with H_2O_2 over nanocrystalline mesoporous TiO_2 loaded with RuO_2 , *J. Molec. Catal. A: Chem.* **248** [1-2] 226-232 (2006).
2. T. Sreethawong and S. Yoshikawa, Enhanced Photocatalytic Hydrogen Evolution over Pt Supported on Mesoporous TiO_2 Prepared by Single-Step Sol-Gel Process with Surfactant Template, *Int. J. Hydrogen Energy* **31**[6], 786-796 (2006).
3. J. Jitputti, S. Pavasupree, Y. Suzuki, S. Yoshikawa
4. Synthesis and photocatalytic activity for water splitting reaction of nanocrystalline mesoporous titania prepared by hydrothermal method
5. J. Solid State Chem., in press.

2.2.3. 生物型酵素を用いた高効率物質変換反応の開発

非天然アミノ酸の導入可能な、ペプチドを分子工学的に利用するペプチド工学が、我々が独立に提案し進める学問領域である。これをコンビナトリアル・ケミストリーにおけるライブラリー技術と組み合わせて、ペプチド触媒やレドックス触媒として利用していくことにより、優れた人工酵素の創出に結びつけることが可能となる。また、メタンからメタノール、バイオマスからの高度物質変換等にかかわる高活性進化酵素の創出・利用研究領域の創製にも貢献できる。

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、テラーメイド酵素の創製に必要な生体高分子設計法開発を目的とする。三次元構造が明らかな RNA-ペプチド複合体 (RNP) を基本骨格として、機能性 RNP の創製を行った。RNP は RNA とペプチドの 2 つのサブユニットから形成されているため、各サブユニットを順次機能化することにより高機能な RNP の創製が期待できる。当分野ではすでに、多様化した塩基配列を導入した RNA サブユニットに、*in vitro* セレクション法を適用することによりアデノシン三リン酸 (ATP) 結合性 RNP リセプターを作製する方法論を開発した。本研究では、上記方法論で得られた ATP 結合性 RNP リセプターのペプチドサブユニットにループ構造を導入し、RNP リセプターの ATP 親和性、ATP 選択性を段階的に向上させる方法論及び、基質 ATP を化学修飾したペプチドサブユニットを用いることにより、ある特定の位置、配向性で ATP と結合する RNP リセプターの開発を行った。こ

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、本研究は上記方法論を開発し機能性 RNP 創製という新たな分野を開拓することを目的とし研究を行っている。

2.2.3.1.2. 重点領域研究としての意義及び社会的重要性

持続可能社会においては、環境負荷が少なく、クリーンかつ高効率なエネルギー生産・利用システムの開発が望まれる。その一つとして酵素をはじめとする生体高分子によって構築されている生物のエネルギーシステムを利用する方法がある。生物のエネルギーシステムを社会で利用するためには、目的とする基質特異性と反応性を有するテラーメイド酵素を自在に設計、そして作製する方法論が必要である。本研究では、生体高分子を用いてテラーメイド酵素を作製する基盤的方法論の開発を行った。

2.2.3.1.3. 平成 16 年度以降における主な成果

ATP 結合性 RNP リセプターのペプチドサブユニットにループ構造を導入し、ループ構造を構成する 7 アミノ酸を、ファージディスプレイ法を用いてライブラリー化した。ライブラリー化したペプチドサブユニットと RNA サブユニットから得られる RNP リセプタープールから、新たに ATP 結合性 RNP リセプターを選択することにより、もとの RNA サブユニットのみを機能化した ATP 結合性 RNP リセプターよりも高い ATP 親和性と ATP 選択性をもつ ATP 結合性 RNP リセプターが作製できることを明らかにした。

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

現在までに、RNA およびタンパク質を利用した機能性生体高分子を目的に合わせて設計または作製する上で、RNA もしくはタンパク質をそれぞれ単独で機能化する方法は数多く試みられている。しかしながら、RNA - ペプチド複合体 (RNP) を用いた機能性生体高分子を作製する試みは、生体内に数多くの機能性 RNP が存在するにもかかわらず、未だ端緒についたばかりである。本研究では、RNP が複数のサブユニットから形成されているという利点を生かし、RNP を構成する RNA とペプチドサブユニットを段階的に機能化する方法論を開発した。

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。また、基質結合配向性を制御した RNP リセプター作製法は、ペプチドサブユニットに触媒活性基を導入し、合目的な分子設計により RNP 酵素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、天然の酵素に引けをとらない触媒活性を有した RNP 酵素の作製が期待できる。

2.2.3.1.6. 主要論文リスト

1. S. Sato, M. Fukuda, M. Hagihara, Y. Tanabe, T. Morii, Stepwise Molding of a

- Highly Selective Ribonucleopeptide Receptor. *J. Am. Chem. Soc.* **127**, 30-31 (2005).
2. T. Hasegawa, M. K. Ohkubo, S. Yoshikawa, T. Morii, A Ribonucleopeptide Receptor Targets Phosphotyrosine. *J. Surf. Sci. Nanotech.* **3**, 41-45 (2005).
 3. A. Hirata, M. Ueno, Y. Aizawa, K. Ohkubo, T. Morii, S. Yoshikawa, Dual DNA recognition codes of a short peptide derived from the basic leucine zipper protein EmBP1. *Bioorg. Med. Chem.* **13**, 3107-16 (2005).

2.2.3.2. RNA-ペプチド複合体を用いた蛍光バイオセンサーの開発

2.2.3.2.1. 研究の概要

本研究は、生体高分子をもとにして、分子を認識し光応答性を示す機能を創製することを目的とし、テラーメイド酵素の創製方法論の確立に資するものである。

RNA-ペプチド複合体 (RNP) を基本骨格としたテラーメイドなセンサー構築方法論を基盤として、生体内情報伝達分子に対して応答する蛍光性バイオセンサーを開発を行った。標的とする情報伝達分子として、細胞内情報伝達経路におけるタンパク質中のリン酸化チロシンや神経伝達物質であるドーパミンを選択した。現在、リン酸化チロシンを含むペプチドあるいはドーパミンに対して高い選択性と親和性を示す蛍光性 RNP センサーの作製に成功している。今後、この RNP センサーを用いて、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詳細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、よく理解されていない細胞内情報伝達経路の解明が促進するとともに、細胞内エネルギー利用システムに関する知見を効率的に集積することができる。

2.2.3.2.2. 重点領域研究としての意義及び社会的重要性

現在の化石資源に依存したエネルギー利用システムから脱却する為には、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を新たに構築する必要がある。その新たなエネルギー利用システムとして、化石資源を除いた生物由来の有機性資源であるバイオマスを利用したバイオエネルギーが着目されているが、クリーンなエネルギー生産及び高効率な物質変換とエネルギーの再利用というシステムが統合されて機能している細胞内エネルギー利用システムを原理としたバイオエネルギーも有用であると考えられる。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、その基本原理を探究することが重要であり、得られた知見を礎としてボトムアップ的にシステムの構築が達成されると期待できる。本研究における生体高分子を基盤としたバイオセンサーを活用した技術が確立されれば、細胞内エネルギー利用システムに関わる情報伝達経路の解明が促進され、細胞内エネルギー利用システムを社会で構築する為の知見がより短期間で集積することが期待できる

2.2.3.2.3. 平成 16 年度以降における主な成果

我々の開発した 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 センサーの構築を行った。その結果、リン酸化チロシンを含むペプチド (Gly-pTyr-Ser-Arg) に対して解離定数 $4.8 \mu\text{M}$ を示す RNP リセプターが試験管内選択法により作製できた。この RNP リセプターは、細胞内におけるリン酸化タンパク質に含まれるチロシンリン酸化部位を高選択的に識別し、リン酸化チロシン周辺のアミノ酸配列も分子認識に関与することが示唆できた。さらに 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 RNP センサーへの機能改変にも成功した。

一方、リン酸化チロシンとは異なった化学的性質を持つ情報伝達分子ドーパミンに対する RNP センサーも構築した。ドーパミンに対して解離定数 $5.2 \mu\text{M}$ を示す RNP センサーが作製でき、ドーパミンのカテコール部位と a 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。

2.2.3.2.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

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と考えられる。

2.2.3.2.5. 今後の展望

今後、細胞内へ RNP センサーを導入する方法論を開発することにより、エネルギー利用システムの根幹に関わる特定の細胞内情報伝達経路の解明が可能になり、細胞内エネルギー利用システムがより深く理解できるようになる。

2.2.3.2.6. 主要論文リスト

1. M. Hagihara, T. Hasegawa, S. Sato, S. Yoshikawa, K. Ohkubo, T. Morii, Ribonucleopeptides: functional RNA-peptide complexes. *Biopolymers* 76, 66-68 (2004).
2. M. Hagihara, M. Fukuda, T. Hasegawa, T. Morii, A modular strategy for tailoring fluorescent biosensors from ribonucleopeptide complexes. *J. Am. Chem. Soc.* 128, 12932-12940 (2006).

2.2.3.3. イノシトール四リン酸に対する細胞内センサーの構築

2.2.3.3.1. 研究の概要

イノシトール四リン酸 (IP4) 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、細胞内 IP₄ のリアルタイム検出を目指して、天然に存在し、IP₄ 選択的に結合することが知られているタンパク質を基に、これを化学修飾することで、IP₄ 濃度変化を蛍光強度変化として検出できるセンサーを作製した。このセンサーは、試験管内において IP₄ 濃度変化に伴い蛍光強度が変化した。また、このセンサーを導入したほ乳細胞は、IP₄ 産出を促す刺激に応答して蛍光強度の変化が検出された。今後、本研究で得られた知見をもとに、細胞内の他のイノシトールポリリン酸に対しても同様のセンサー開発を行い、生体内情報伝達経路の全貌の解明を目指す

2.2.3.3.2. 重点領域研究としての意義及び社会的重要性

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が、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い、エネルギー変換反応を制御しているかは明らかになっていない。本研究ではこのエネルギー変換機構を解明するため、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た。IP₄ は細胞外からの刺激により細胞内濃度が変化し、これによってシグナルが伝播することが分かっている。この濃度変化を可視化することで細胞内における情報伝達機構解明を目指した。

2.2.3.3.3. 平成 16 年度以降における主な成果

IP₄ を選択的に捕捉するセンサー作製のため、天然に存在するタンパク質の三次元構造情報を基に、IP₄ との結合領域付近かつ IP₄ と相互作用しない残基に蛍光発色団を付加することで、IP₄ 結合前後で発色団の周辺環境が変化することを期待した蛍光性センサーを設計した。付加蛍光発色団及び付加位置の異なるセンサーを作製し、これらは各々 *in vitro* において IP₄ 濃度依存的な蛍光強度変化を示した (図 2.3.1)。この IP₄ センサーを HeLa 細胞内に導入し、*in vivo* における IP₄ 検出を試みた。センサー導入細胞に IP₄ 産出を促すことが知られる受容体刺激を与えると、*in vitro* における蛍光挙動に対応した蛍光強度変化が観測された。この反応は、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 検出の成功が示唆された。

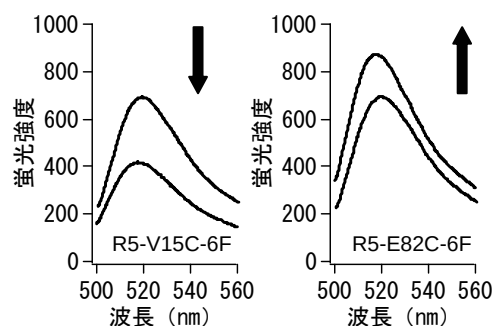


図 2.3.1. 作製した各 IP₄ センサーの基質濃度依存的な蛍光挙動。(破線：IP₄ 非存在下、実線：30μM IP₄ 添加時) 矢印は基質濃度上昇に伴う蛍光強度変化方向を示す。

2.2.3.3.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

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。現在までに国内外で、有機分子を用いて情報伝達

物質を捕捉する人工リセプターを作製する研究が行われてきているが、汎用的なセンサー作製方法はまだ確立されていない。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と期待され、生体内のエネルギー変換機構の解明に貢献すると考えられる。

2.2.3.3.5. 今後の展望

本研究で得られた知見を元にして、各 InsPn 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。また、これらを元に蛍光性バイオセンサーを作製し、各 InsPn 濃度をリアルタイムモニターできる方法論を確立する事を目的とする。これにより InsPn 類の生体細胞内における挙動を定量的に解析し、シグナル伝達におけるこれらの役割の解明を目指す。

2.2.3.3.6. 主要論文リスト

1. K. Sugimoto, M. Nishida, M. Otsuka, K. Makino, K. Ohkubo, Y. Mori, T. Morii, Novel real time sensors to quantitatively assess in vivo inositol 1,4,5-trisphosphate production in intact cells. Chem. Biol. 11, 475-485 (2004).
2. K. Sugimoto, R. Sakaguchi, Y. Mori, T. Morii, Recent advances in biosensing second messengers" Recent Res. Devel. Chem. 2, 73-89 (2004).
3. T. Yoshida, R. Inoue, T. Morii, N. Takahashi, S. Yamamoto, Y. Hara, M. Tominaga, S. Shimizu, Y. Sato, Y. Mori, Nitric oxide activates TRP channels by cysteine S-nitrosylation. Nature Chem. Biol. 2, 596-607 (2006).

2.2.3.4. 水と生体分子が織り成す生命現象の物理化学

2.2.3.4.1. 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。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ものになり得る。各要素を個別に眺めるのではなく、複数の要素の集まりを総合的にシステムとして捉えたと、多くの新しいことが見える。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。生体高分子は最も複雑な分子構造を有し、水は最も複雑な統計的振る舞いを呈する液体である。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（ときには脅かす）種々の秩序化過程の分子機構に対し、水分子の並進運動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。

2.2.3.4.2. 重点領域研究としての意義及び社会的重要性

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。蛋白質の高次構造は時には生命を脅かすこともあり、病気の治療法の開発にもつながる。

2.2.3.4.3. 平成16年度以降における主な成果

水分子の並進運動の重要性に着目したユニークな統計力学理論解析を行い、以下の結論を得た：(1) 蛋白質の折り畳み(図2.3.2)、酵素－基質間に見られるような分子認識、蛋白質分子の会合による高次構造形成など、生命を支える種々の秩序化過程に伴う「生体分子に対する膨大なエントロピー損失」の大部分は、「水分子の並進運動に利用できる空間の容積が増加すること」に起因する水の自由エネルギー利得」によって補償される；(2) このことは、非常に小さな分子サイズを有するにもかかわらず常温で密な液体として存在できる水の場合に初めて可能となる。

3次元積分方程式論を用いて、アミロイド線維形成機構に対する解析を行い、以下の結果を得た：(1) 球状に近い(天然構造の)蛋白質は孤立した状態で安定化するが、球状から大きく崩れる(変性する)と容易に会合を起こす；(2) 数多くの蛋白質が分子内水素結合を最大限に確保しつつ会合体を形成する場合、その方法として、球状に近い蛋白質の会合(a)、円筒状 α -ヘリックス構造の側面での会合(b)、広がった薄い形状(円盤状)を持つ β -シート構造の積み重なり(c)が考えられるが、水の並進エントロピー利得を最大にするという意味で(c)が最も安定である。定性的にはであるが、実験結果の多くを説明することに成功した。

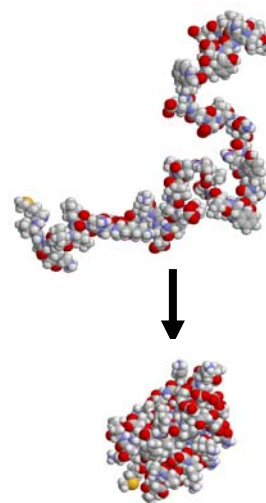


図 2.3.2. 蛋白質の折り畳み(生命現象発現の源)

2.2.3.4.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

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・物理化学・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得ているとは言い難い。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得られる斬新な成果が期待できる。

2.2.3.4.5. 今後の展望

種々の秩序化過程のメカニズムの解明が進み、有力な理論解析法がかなり出揃ってきた。今後、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。

2.2.3.4.6. 主要論文リスト

1. M. Kinoshita, “Ordered Aggregation of Big Bodies with High Asphericity in Small Spheres: A Possible Mechanism of the Amyloid Fibril Formation”, *Chemical Physics Letters*, 387, 54-60 (2004).
2. M. Kinoshita, N. Matubayasi, Y. Harano, and M. Nakahara, “Pair Correlation Entropy of Hydrophobic Hydration: Decomposition into Translational and Orientational Contributions and Analysis of Solute-Size Effects”, *Journal of Chemical Physics*, 124, 024512(1-7) (2006).
3. M. Kinoshita, Y. Harano, and R. Akiyama, “Changes in Thermodynamic Quantities upon Contact of Two Solutes in Solvent under Isochoric and Isobaric Conditions”, *Journal of Chemical Physics*, 125, 244504(1-7) (2006).

2.2.4. バイオマス資源のクリーン燃料化

木質資源等、多様なバイオマス資源から環境に優しいクリーン燃料製造プロセスを新たに開発すると共に、エンジン、発電等に利用できる環境適合燃料としての可能性をバイオプロセス試験プラント等により実証する。

2.2.4.1. 研究の概要

バイオマスの有効利用に関連する開発研究において、一つのアプローチとして、バイオインフォマティクスデータの整った酵母を用いている。ここでは、酵母の持つ本来の機能を改変・高機能化し最適化することが必須であり、さらには酵母の種々の環境耐性機構を解析し、酵母の特性を改変することが必須である。我々は、本研究の一環として、この点に関する研究を行っている。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、酵母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。ここでは、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、生産物であるエタノールへの耐性機構を解明しエタノール耐性酵母を創出する試みを行い、遺伝子レベルで検討することによってエタノール高耐性変異株の取得に成功した。

また、上とは異なるアプローチとして、複合体酵素をもとにしたミニチュア酵素の設計方法論の開拓も行っている。ここでは、水素貯蔵物質の効率的な生成を目的として、メタノール関わる反応を触媒するメタンモノオキシゲナーゼに着目した。その構成タンパク質であるメタンハイドロキシラーゼ (MMOH) は α サブユニットに二核鉄反応中心を含有しており、 α サブユニットを単量体で安定に用いることができれば新規メタン酸化触媒 (ミニチュア MMOH) が作製できると考えられる。しかしながら、この α サブユニットはまだ、大腸菌などにおいて可溶化された状態で異種発現されたことはない。そこで、結晶構造をもとにタンパク質表面のアミノ酸残基を改質し、可溶性の変化を検討した。結晶構造から同定した 2 つの大きな疎水性部位に対して削除および親水性アミノ酸残基へ置換する変異を導入したところ、発現タンパク質は不溶性画分に取り込まれた。しかし、リフォールディングの結果、これらの変異は可溶性を向上させることが分かった。現在、これらの変異体について金属と配位させ、活性の発現を試みている。以上の結果は様々な酵素を戦略的に改質できる可能性を秘めており、エネルギー経済に及ぼす影響も大きく、非常に良好といえる。

2.2.4.2. 重点領域研究としての意義及び社会的重要性

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。バイオマスの有効利用は多岐にわたり、エネルギー関連物質としての利用は、一部ですでにバイオディーゼルあるいはバイオエタノール等のバイオ燃料として実用化されているが、多くの解決すべき問題が残されている。また、すでに実現されつつある水素経済に向けては、メタノールやアンモニアといった単純な水素貯蔵物質の生成を自在に行なう必要がある。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、バイオエタノールに的を絞りタンパク質工学あるいはバイオインフォティクスなどの手法を用いた研究、並びに、上記水素貯蔵物質に関わる反応を触媒する MMOH を対象とする研究を進めている。

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 E3 燃料 (ガソリンにバイオエタノールを 3% 混合させたもの) 製造使用の実証実験が開始されている。また環境省は、2030 年までにバイオエタノールを使った E10 燃料の全面普及を目標として掲げている。バイオマスからバイオエタノールを高効率に生産するためには、多くのプロセスにおける高効率化が必要であるが、ここでは、まずバイオマス由来の糖のエタノール変換経路に注目して、この代謝経路において重要な役割を担う酵素の機能変換を行い、その機能変換酵素を用いてエタノール高効率生産システムの開発を目指している。

2.2.4.3. 平成 16 年度以降の主な成果

(a) 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

バイオマス由来の糖として、グルコースなどのヘキソース (六炭糖) と共に、キシロース等のペントース (五炭糖) も生産される。酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*) はエタノール生産能は優れているが、ペントースを炭素源として用いる能力がない。しかしながら、他のキシロース代謝酵母 *Pichia stipitis* のキシロース還元酵素 (xylose reductase; XR) お

よびキシリトール脱水素酵素 (xylitol dehydrogenase; XDH) 遺伝子を導入した形質転換酵母は、キシロース代謝能を獲得する。ところが、この形質転換酵母のエタノール生産能は満足できるものではない。その原因の一つとして、XR と XDH の補酵素依存性の違いによる細胞内酸化還元環境のアンバランスが指摘されてきた。すなわち、前者は両補酵素とも利用できるのに対し後者は NAD^+ 依存性を示す。そこでこの問題を解決するために、本研究では、XDH (図 2.4.1) と XR をターゲット

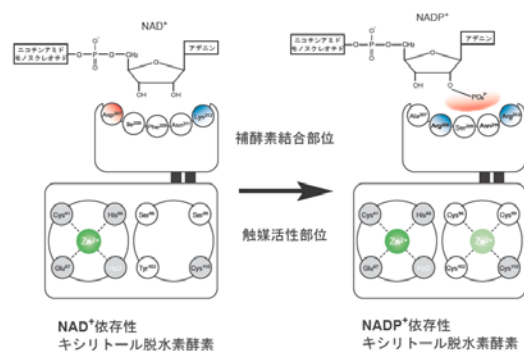


図 2.4.1. バイオテクノロジーによる酵素機能変換

トとして補酵素要求性を変換させた変異体を作成した。さらに、作出した機能変換酵素を酵母に形質導入し、その遺伝子組換え酵母のキシロース→エタノール変換効率の評価を行い、その遺伝子組換え酵母では、野生型の両酵素を導入した酵母と比較して変換効率が向上していることを明らかにした。

(b) 持続可能型エネルギー社会に向けたミニチュアメタン酸化酵素の創出

複合タンパク質である MMOH の α サブユニットを可溶性かつ単量体でメタン酸化能をもつミニチュア MMOH へと改変する研究を行ってきた。第一に可溶性の α サブユニットを作製することを重視して三次元構造情報をもとに疎水性の高い表面部位を同定した。続いて N 末端から 38 アミノ酸を削除した変異体 (39F) を作製した。次に、 α サブユニット中の 4 helix bundle 構造の表面に存在する疎水性アミノ酸残基を、親水性アミノ酸残基へと置換した (39Fm 変異体)。これらの変異体は、野生株由来の α サブユニット (WT) と同様に、大腸菌で発現させた際には不溶性画分に存在するが、精製後、リフォールディングさせることにより、WT に比べると高い溶解性を示した。

また、 α サブユニット変異体の特性評価を行うため、金属中心の再構成を行った。 α サブユニット変異体に Fe(II) を添加し、透析法により過剰な Fe(II) を取り除いた。変異体に結合した Fe(II) を呈色法により定量したところ、タンパク質 1 mol に対して Fe は約 2.5 mol 存在しており、 α サブユニット変異体に Fe が配位することが示唆された。天然の MMOH に Co(II) を配位させると、 Fe(II) の配位では観察されない $d-d$ 遷移由来の吸収スペクトルを観察できることが知られている。リフォールディング後の 39F と 39Fm に Co(II) イオンを加え、UV-vis 吸収スペクトルを測定した結果、MMOH の Co 置換体に類似した吸収スペクトルが観察された。これらの結果から、39F、39Fm は Co および Fe イオンと錯体を形成できることが示唆され、前述の変異導入は活性サイト近傍の構造へほとんど影響を与えていないと考えられる。

2.2.4.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

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。たとえば、関係省庁により、E3 燃料 (ガソリンにバイオエタノールを 3% 混合させたもの)

製造使用の実証実験が開始されている。また環境省は、2030年までにバイオエタノールを使ったE10燃料の全面普及を目標として掲げている。現在は材料としてトウモロコシ、コーン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、将来はいわゆる木質バイオマスの使用が期待されている。木質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本研究は、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。

一方、最近ではゲノム解析やタンパク質構造解析プロジェクトが数多く進行し、膨大な量のタンパク質構造データベースが出来上がってきている。そのため、新規酵素スクリーニングや進化工学などの従来の手法ではなく、構造情報・計算化学をベースとした本研究のような新しい酵素の創製が実現可能になってきていると考えられる。

2.2.4.5. 今後の展望

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、遺伝子組換え酵母に、エタノール高耐性などの性質を付加し、エタノール生産システムとしての実用性・安定性を高める。また、キシロース以外の他のペントースの高効率変換に向けて、それらの糖代謝経路の更なる分子論的解析を行う予定である。その結果を利用して、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。より実用に即した研究としてバイオマスの糖化サンプルなどを材料として用いて、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などを予定している。

一方、ミニチュア MMOH の完成に向け、更なる可溶性向上を目指して MMOH α サブユニットの改変を行っていく予定である。機能を発揮できる最小のドメイン構造を同定するため、様々な構造情報に基づき C 末端のアミノ酸残基を削除することや他の疎水性部位の改質を行い、メタン酸化触媒へと昇華させる。今後、こういった構造情報を基盤としたタンパク質設計を様々なタンパク質に適用することで多くの機能性高分子を作製できると考えられる。

2.2.4.6. 主要論文リスト

1. Watanabe, S., Kodaki, T., and Makino, K. Protein-engineering of dehydrogenase; complete reversal of coenzyme specificity and increased thermostability by introduction of new structural zinc. *J. Biol. Chem.* **280**, 10340-10349 (2005)
2. Watanabe, S., Kodaki, T., and Makino, K. Cloning, Expression and Characterization of Bacterial L-Arabinose 1-Dehydrogenase Involved in an Alternative Pathway of L-Arabinose Metabolism. *J Biol. Chem.* **281**, 2612-2623 (2006).

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. 研究の概要

バイオエネルギー重点領域の研究を推進していくためには、生命現象を学術的に明らかにし、その生命現象を利用することが不可欠である。

本研究では、特に生体内フリーラジカル小分子あるいはそれを生成する系に着目し、具体的には一酸化窒素の分子レベルによる遺伝子との相互作用及びプテリン誘導体の細胞レベルにおける過酸化水素生成とその細胞機能との相互作用応答に関して検討を行っている。一酸化窒素と遺伝子との相互作用に関しては、世界をリードする成果を上げており、グアニンからジアゾエートイオンを経るオキザニンの生成反応を解明した。これらの中間体及び損傷塩基生成は、これまで未解明であった環境変化等による生体内炎症部位等で過剰生産される一酸化窒素による生体機能への影響を明らかにするものである。また、このオキザニンを DNA マイクロアレイ技術に利用する試みも行っている。さらに、葉酸等の広く存在する化合物から生体内代謝で生産されるプテリン誘導体（特に 6 ホルミルプテリン）の細胞内過酸化水素生成能を発見し、特に白血球ファミリーの機能強化との関係を解明する研究を継続している。種々の 6 ホルミルプテリンの誘導体を有機合成することにより、この物質の水溶性を大幅に改善でき、その結果、この物質の生理的役割、医療への応用の可能性を広げることができた。

一方、生化学・生物工学を駆使したバイオエネルギー生産工学ならびに環境科学においては、バイオインフォマティクスデータの存在が不可欠であるが、ポストゲノム研究において遺伝子情報を迅速に獲得・整理するために不可欠であり効果的な解析技術である DNA マイクロアレイにおける種々の問題を解決するために、新規な発想に基づく DNA チップ技術の開発を行っている。DNA マイクロアレイ技術に関しては急速な蓄積が進んでいるが、解決することが不可欠な問題点を網羅的に探索し精査した結果、固体表面の修飾技術等の根幹に関わる基礎研究が今まで不十分であることが明らかとなった。そこで、分子生物学的背景を重視しつつ、有機・物理化学的見地から基礎的研究を行い、さらに実際に DNA マイクロアレイ技術に適用した。その結果、安定性、定量性に優れた DNA マイクロアレイシステムの構築に成功した。

2.2.5.2. 重点領域研究としての意義及び社会的重要性

バイオエネルギー重点領域の研究を推進していくためには、生命現象を学術的に明らかにし、その生命現象を利用することが不可欠である。さまざまな生命現象うち、環境中に存在する化合物と生命活動との関係を明らかにすることは、人類の存続のために最も重要な科学研究の一つである。本研究における一酸化窒素の分子レベルによる遺伝子との相互作用及びプテリン誘導体の細胞レベルにおける過酸化水素生成とその細胞機能との相互作用応答に関する検討は、発ガンのメカニズム解明にもつながるものであり、医療への応用へも視野に入れたものであり、その点からも社会的に重要な研究課題である。

遺伝子配列解析技術の向上によるゲノム情報の蓄積に伴い、生命現象をより深く理解するために網羅的解析が盛んに行われている。DNA マイクロアレイはその網羅的解析に不可欠の技術であるが、定量性、再現性などの種々の問題が未解決であり、新規な発想に基づく DNA チップ技術の開発が重要な課題となっている。本研究で行った、固体表面の修飾技

術等の根幹に関わる基礎研究や分子生物学的背景を重視しつつ有機・物理化学的見地から基礎的研究を基に開発した DNA マイクロアレイ技術は、安定性、定量性に優れ、ポストゲノム時代における重要な基本技術になると期待される。

2.2.5.3. 調査期間における主な成果

(a) 環境中に存在する生物フリーラジカル関連化合物と生物機能の相関解明と新しい医療システム構築への応用

環境中に存在する化合物と生命活動との関係を明らかにすることは、人類の存続のために最も重要な科学研究の一つである。本研究では、特に生体内フリーラジカル小分子あるいはそれを生成する系に着目し、具体的には一酸化窒素の分子レベルによる遺伝子との相互作用及びプテリン誘導体の細胞レベルにおける過酸化水素生成とその細胞機能との相互作用応答に関して検討を行ってきた。一酸化窒素と遺伝子との相互作用に関しては、当該研究室は世界をリードしており、グアニンからジアゾエートイオンを経るオキザニンの生成反応を解明した。これらの中間体及び損傷塩基生成は、これまで未解明であった環境変化等による生体内炎症部位等で過剰生産される一酸化窒素による生体機能への影響を明らかにするものである。また、このオキザニンを DNA マイクロアレイ技術に利用する試みも行っている。さらに、葉酸等の広く存在する化合物から生体内代謝で生産されるプテリン誘導体（特に 6 ホルミルプテリン）の細胞内過酸化水素生成能を発見し、特に白血球ファミリーの機能強化との関係を解明する研究を継続している。種々の 6 ホルミルプテリンの誘導体を有機合成（図 2.5.1 参照）することにより、この物質の水溶性を大幅に改善することができ、その結果、この物質の生理的役割、医療への応用の可能性を広げることができた。

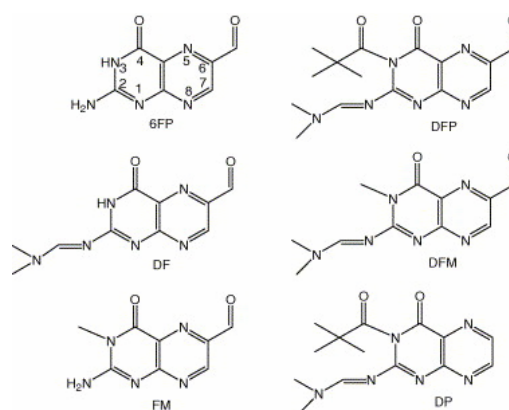


図 2.5.1. 種々の 6 ホルミルプテリン誘導体の合成

(b) 新規遺伝子情報解析法の開発

ポストゲノム時代における網羅的研究において必要不可欠な研究技術である DNA マイクロアレイシステムの問題点を精査し、その定量性、安定性、再現性を向上させることが

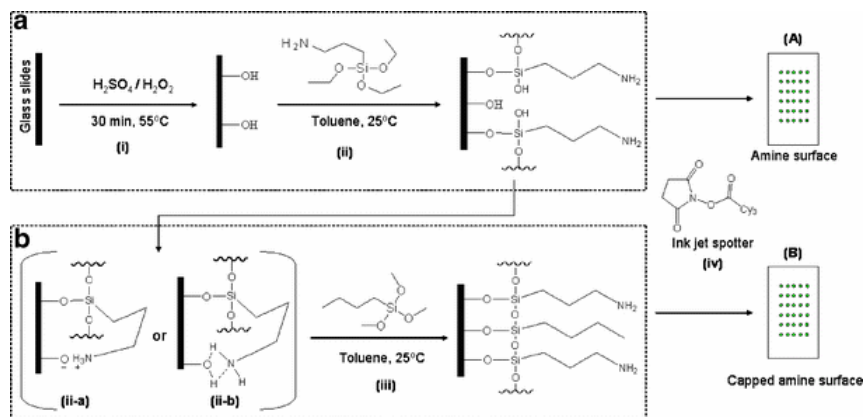


図 2.5.2. 表面修飾による DNA マイクロアレイシステムの改善

重要であると考え、以下のような実験研究を行った。すなわち、既存の DNA マイクロアレイでは DNA プローブをガラススライドなどの表面に固定化するのみであったため、ガラス表面に活性残基が残っていた。そのために、定量性、安定性、再現性が低下していた。その問題を解決するために、DNA 固定後さらに表面処理をすることにより、残存活性残基を不活化を行った (図 2.5.2)。その結果、DNA マイクロアレイの量性、安定性、再現性を改善することができた。さらに、当該研究室で発見した損傷塩基であるオキザニンの反応性を利用することにより、DNA マイクロアレイシステムのさらなる定量性、再現性の向上を目指している。

2.2.5.4. 国内外の関連する領域の中での当該テーマの位置付け

オキザニンは損傷塩基として我々のグループが発見したものであり、さらに、その生成メカニズムである、グアニンからジアゾエートイオンを経るオキザニン生成反応も我々のグループによりはじめて解明されたものである。最近、他の研究者からもオキザニン関連の研究発表がなされるようになってきており、このオキザニン関連の研究はこれからますます重要性が認められてくることが期待できる研究である。また、6 ホルミルプテリンはこれまで生理活性に興味は持たれていたものの、その水溶性の低さから実際に生物環境すなわち水溶液中での実験例は限られていた。本研究において世界で始めて合成に成功した水溶性の増大した 6 ホルミルプテリン誘導体を用いることにより、この物質関連の研究は盛んになることが期待される。

DNA マイクロアレイ研究技術はポストゲノム時代における網羅的解析に不可欠の技術であり盛んに開発研究が行われているが、定量性、再現性などの種々の問題が未解決であった。本研究のように、今まで不十分であった固体表面の修飾技術等の根幹に関わる基礎研究を行い、分子生物学的背景を重視しつつ有機・物理化学的見地から基礎的研究を行い、実際に DNA マイクロアレイ技術に適用した研究例は限られている。また、損傷塩基であるオキザニンを DNA マイクロアレイ技術に適応した例は他に見られず、その点からも非常に独創性のある研究である。

2.2.5.5. 今後の展望

オキザニンに関して様々な遺伝毒性、細胞毒性の問題が指摘されている中、生体中での挙動に関しては未だに詳しく明らかにされていない。今後は、生体内におけるオキザニンの分子的挙動の理解を深めるため、DNA と相互作用する様々な酵素とオキザニンとの相互作用を調べることにより、この物質の生理的役割を解明して行く予定である。また、DNA マイクロアレイシステムの定量性、安定性、再現性の向上を目指し、さらに異なった表面修飾法を模索する。オキザニンを DNA マイクロアレイ技術発展に利用することも推進する。さらに、6 ホルミルプテリンに関しては、水溶性の誘導体を用いてさらにこの物質および関連物質の生理的役割の解明および医療への応用を模索して行く予定である。

2.2.5.6. 主要論文リスト

1. Novel 6-Formylpterin Derivatives: Chemical Synthesis and O₂ to ROS Conversion Activities.

- M. Nonogawaa, T. Arai, N. Endo, S.P. Pack, T. Kodaki, and K. Makino *Org. Biomol. Chem.* 4, 1811-1816 (2006)
2. Reactive oxygen species generation through NADH oxidation by 6-formylpterin derivatives in the dark. M. Nonogawa, S.P. Pack, T. Arai, N. Endo, P. Sommani, T. Kodaki, and K. Makino *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 353, 1105-1110 (2007)
 3. Chemical synthesis and thermodynamic characterization of oxanine-containing oligodeoxynucleotides. S.P. Pack, M. Nonogawa, K. Kodaki, and K. Makino, *Nucleic Acids Res.* 33, 5771-5780 (2005)
 4. Development of an efficient amine-functionalized glass platform by additional silanization treatment with alkylsilane. N.K. Kamisetty, S.P. Pack, M. Nonogawa, K.C. Devarayapalli, T. Kodaki, and K. Makino, *Anal. Bioanal. Chem.* 386, 1649-1655 (2006).

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言及分野
		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部門	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分野

本複合領域研究は、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ている。とくに、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することにより、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」の拠点形成を目指すものである。

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する。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る。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を推進する。とくに、フェムト秒レーザーによる固体表面のナノ加工、FEL による電池材料の分子間結合選択励起、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開発を行う。また、コヒーレントな光エネルギーとの特徴的な相互作用に関する研究により、新たな光エネルギー機能を探索する。

2.3.1. 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の建設を進め、2003 年度までに 40 MeV までの電子ビーム加速に成功した。2004 年度には、研究所北 2 号棟を量子光・加速粒子総合工学実験棟として整備し、FEL 装置を移転・設置した。2006 年度にはアンジュレータと光共振器を設置し、4.6 μm 付近での自発放出光の発生とその測定に成功した。近い将来 FEL 発振実験を開始する予定である。

FEL 装置の要素開発として、電子逆流現象抑制の研究を進め、入射高周波の波形制御により、6 μs 程度の幅の電子ビームを得た。更にトモグラフィ法を用いたエミッタンスの測定や、FEL 過程のシミュレーション、光陰極型高周波電子銃、スタガードアレイ型アンジュ

レータ（高温超伝導材料を使用するものも含む）、エネルギー回収システム、といった様々な要素研究を行ってきている。

2.3.1.2. 研究所重点領域研究としての意義及び社会的重要性

自由電子レーザー（FEL）は、大出力・高効率・連続的波長可変性という特長から、例えば、核融合プラズマ加熱源、レーザー同位体分離、レーザー慣性核融合に代表される原子力科学分野への応用や、生物化学、生医学、たんぱく質構造解析等の生命科学分野、あるいは X 線レーザーリソグラフィや、レーザー加工、光 CVD 等の材料科学等、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。本研究課題が目指す高機能小型 FEL 装置は、波長・偏光可変でかつ電子ビーム閉じ込め性能の高い小型高機能アンジュレータ、光共振器ならびに光伝送系、小型・廉価かつ高輝度の電子銃・電子加速器、高輝度かつ長寿命・高安定の陰極材等、FEL に関する多くの要素開発研究を含んでいる。また、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、環境センシングに必要な赤外域検出器の開発研究や微量分析などに応用が可能であり、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を利用した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成り得る。

2.3.1.3. 平成 16 年度以降の主な成果

(a) 自発放出光の発生とその測定

FEL 発振のためには、高輝度電子ビーム、アンジュレータ、光共振器の 3 つの要素が重要であり、平成 18 年度、KU-FEL 装置にアンジュレータと光共振器を設置し、アンジュレータからの自発放出光の発生とその測定を行った。図 3.1.1 に自発放射光測定系を示す。測定系のアライメントは半導体レーザーをミラーをはずした上流のミラーチャンバーから入射し、下流ミラーに反射したレーザー光を放物面鏡で集光し、その焦点距離に分光器のスリットを設置することで行った。分光器は Digikrom 製 DK240、InSb 光検出器は Judson 製 J10D-M204-R01M-60 を使用した。

電子ビームはアンジュレータの中央部を通過するように調整が必要なため、アンジュレータ上流部と中央部に BPM（Beam Position Monitor）を設置、直径 2 mm の穴の開いた蛍光板を BPM に取り付け、その穴に電子ビームが通るように CCD カメラで観測しながらビーム調整を行った。なお、BPM の設置は、半導体レーザーが蛍光板の穴同士を通過するように位置調整を行っている。また、ビーム軌道の補正はアンジュレータ前に設置したステアリングコイルと双極電磁石によって行った。放射光の光軸はアライメント調整時の半導体レーザーの光軸と異なる可能性があるため、PC 制御で下流ミラーの水平方向と鉛直方向の傾きについて調整を行うことで、検出器へ入光する光軸を調整した。また、検出器もステージコントローラ上に設置することで鉛直方向、水平方向に制御でき、検出器の受光面への入射を容易に行うことができる。

測定で得られたスペクトルを図 3.1.2 に示す。この時の電子ビームのエネルギーは 41.5 MeV で、アンジュレータのギャップ長は 26 mm である。図には放射光計算コード SRW を用いて得られた、アンジュレータからの自発放射光スペクトルも示している。自発放出光

のピーク波長は $4.56\ \mu\text{m}$ であり、スペクトル幅は 4.5 % である。ピーク波長より電子ビームエネルギーは 41.5 MeV と計算される。測定されたスペクトル幅の広がる原因として、アンジュレータ磁場の減磁や、ミスアライメント、ビーム軌道の影響と電子ビームのエネルギー幅等が考えられ、今回の計算には、電子ビームの設置誤差とした鉛直方向及び水平方向の誤差をそれぞれ 1 mm ずつとし、またエネルギー幅 0.5% を考慮したスペクトル計算を行っている。しかし、スペクトル幅は計算値が 2 % (rms) であり、測定されたスペクトル幅を完全には再現できておらず、更なる詳細な解析が必要である。

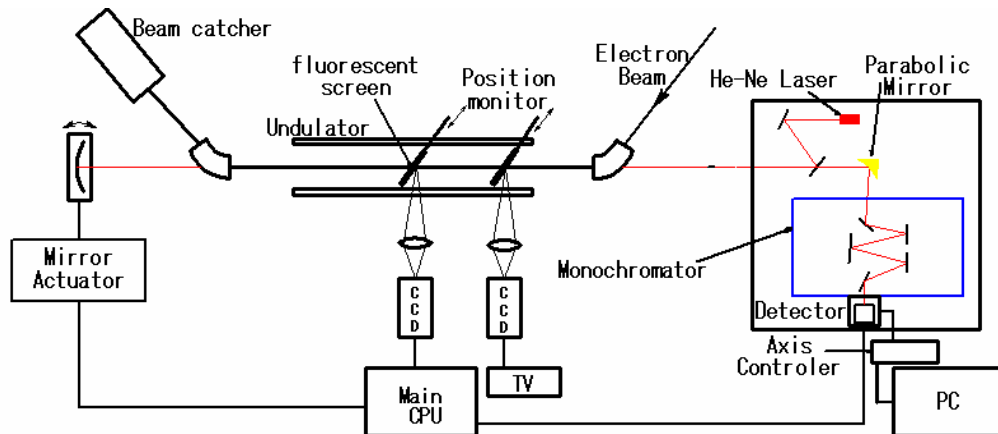


図 3.1.1 自発放射光測定系

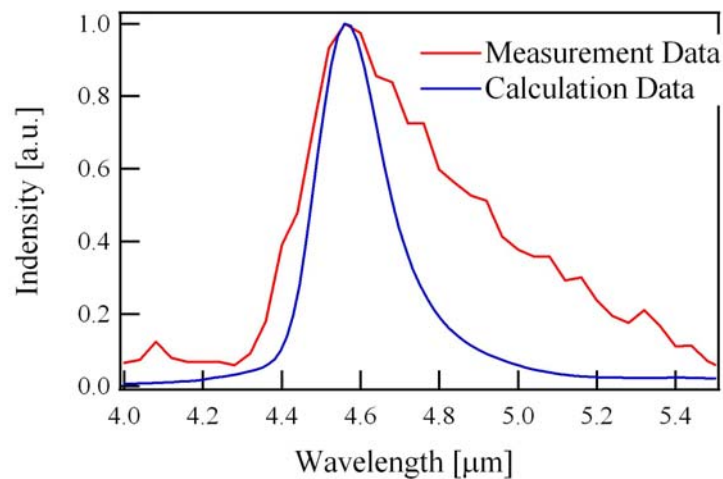


図 3.1.2 測定された自発放射光スペクトルと計算値

(b) 入射高周波の波形制御による電子ビームの長パルス化

熱陰極型高周波電子銃の陰極から発せられ高周波の加速位相の後半に加速された電子群

は、次の加速空洞に到達する前に減速位相に捕らえられ、最終的には陰極に向かって衝突する。この現象を Back-bombardment 現象と呼び、電子ビームに悪影響を及ぼす。

Back-bombardment 現象の電子ビームに与える影響を、解析的・実験的に研究を行った結果、Back-bombardment 現象による陰極表面温度の上昇が、陰極表面電流の増加を引き起こし、その結果加速電界の低下、或いは加速不能を招いている事を確認し、不足する加速電界を印加高周波電力の波形制御により補った。印加高周波電力波形は電子銃－電子ビームの等価回路を解く事でその時間応答を調べ、最適な条件を計算している。図 3.1.3 に通常の印加高周波電力波形と、波形制御を行った場合の高周波電力波形を示す。この結果、図 3.1.4 に示すように、熱陰極型高周波電子銃から生成される電子ビームの電流波形が 3 μ s から 4 μ s に広がると共に、大幅な電流の増加が見られた。

更に電子ビームの最大エネルギーの時間変化を観測すると、図 3.1.5 に示すように波形制御を行った場合はほぼ一定の電子エネルギーが得られている事が確認された。以上の結果、熱陰極型高周波電子銃からの電子ビームのエネルギー、電流量、時間幅の大幅な改善が可能になり、FEL の発振に必要な電子源の開発に成功した。

(c) 高周波三極管構造による高輝度電子ビーム生成の高度化

先端科学技術分野における革新的ツールの代表である自由電子レーザーなどの量子放射光源において、波長領域拡大等の更なる発展に必要となる要素研究課題の中で、電子ビームの高輝度化には最も大きな進展が要求されている。特に電子エネルギーの最も低く空間電荷効果の最も顕著な電子銃の性能がビーム輝度を制限しており、高輝度化には電子銃の高性能化が極めて効果的である。高周波電子銃には、従来の静電型電子銃に比して以下のような特長があり、自由電子レーザーを代表とする

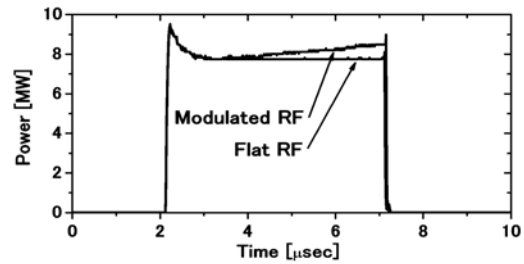


図 3.1.3 高周波電子銃に印加した高周波電力波形

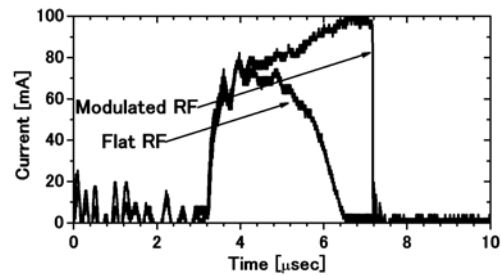


図 3.1.4 高周波電子銃からの出力電流

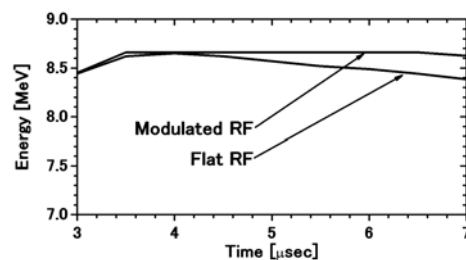


図 3.1.5 電子ビームの最大エネルギーの時間変化

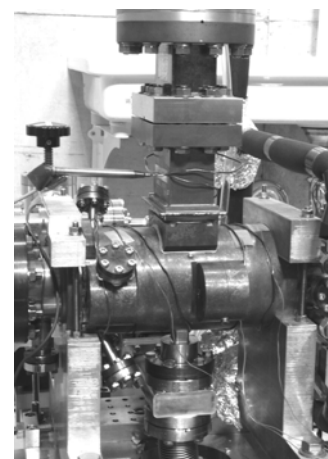


図 3.1.6

KU-FEL 用熱陰極 4+1/2
空洞高周波電子銃

量子放射光源用の高輝度電子源として期待されており、赤外自由電子レーザーKU-FELにおいても採用されている。すなわち、(a) 放電限界電界強度の高い高周波電界（数 GHz）を用いるため、飛躍的に高輝度が得られる、(b) 高電圧スタンドやバンチャ部などが不要であるため、コンパクトで運転が容易かつ安価にできる、(c) 高周波数で電子バンチが生成されるため、数十倍以上の高繰り返し・高平均電流が可能である。これら利点にも関わらず量子放射光源の電子源として広く利用されるに至っていない理由は、上述の Back-bombardment 現象にある。この問題を軽減するため、これまでに様々な方法が提案されてきたが、いずれも効果は限定的であり、根本的な解決には至っていない。本研究の目的は、熱陰極型高周波電子銃におけるこの唯一の欠点（Back-Bombardment 現象）を新規方式（三極管型高周波電子銃）によって解決することにある。

KU-FEL 用の高周波電子銃（図 3.1.6）は、動作周波数 2.856 GHz で、熱陰極を軸上に具えた 1 つの 1/4 波長空洞（half cell, 図 3.1.7 (a)）と、引き出された電子ビームを 9 MeV まで加速する後段の 4 つの半波長空洞（full cell）の 4+1/2 空洞からなる。図 3.1.7 (a) 中の $z=0$ 、軸上に設置された直径 6 mm の熱陰極からは、図中に電気力線の示された高周波電界の半周期に渡って電子が引き出されるが、そのうちの約 50 %は空洞出口まで到達せず、一部は陰極に逆加速されて衝突して前述の Back-Bombardment の問題を引き起こす。

これに対し、我々の提案している三極管型高周波電子銃（図 3.1.7 (b)）は、従来の熱陰極に換えて小型の同軸空洞付きの陰極を設置し、これに主高周波源とは位相・大きさとも独立に制御された高周波電力を供給することで戻り電子ビームを大幅に削減しようとするものである。この新方式について数値シミュレーションによる予備検討の結果、(i) 戻り電子ビーム電力を 9 割以上削減して問題をほぼ完全に解決できる可能性の高いこと、(ii) 追加空洞への印加高周波電力は数十 kW 程度で十分であり既設の主高周波電源（最大 10 MW）からの分岐により供給可能で追加高周波源は不要であること、が判明した。

そこで、平成 18 年度より科学研究費補助金事業において、KU-FEL 用高周波電子銃への

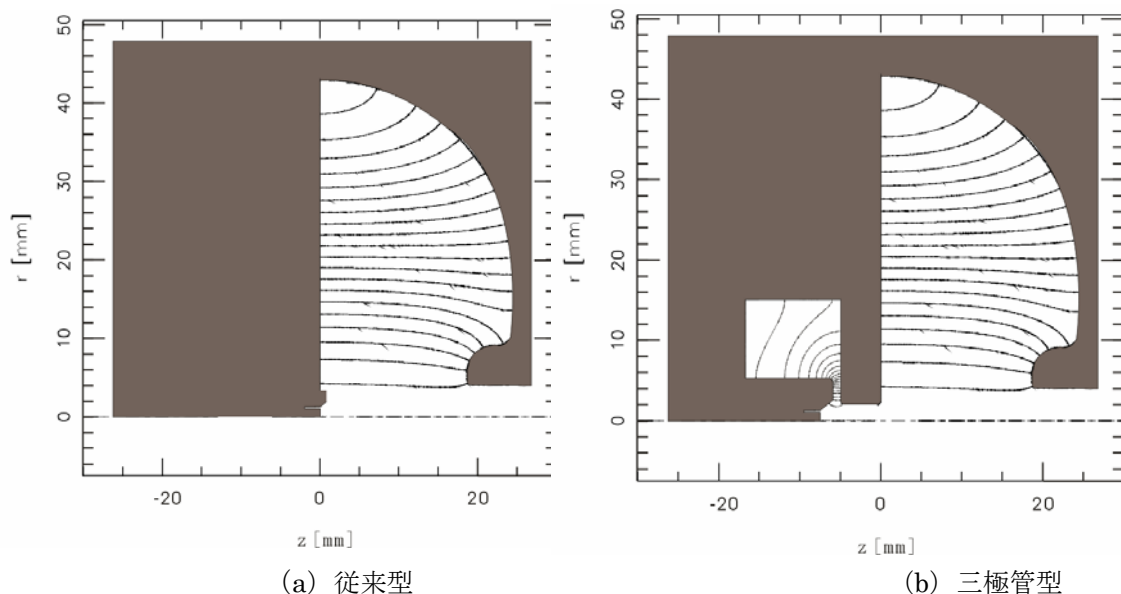


図 3.1.7 KU-FEL 用熱陰極高周波電子銃の第一空洞の断面と固有モード電界分布

導入を前提としたより現実的な空洞電極形状設計、特に、予備研究においては課題として残されていた、出力ビームの横方向エミッタンスの劣化を最小限に留めて同時に戻り電子ビーム電力を大幅に削減することを可能とするため、電極形状パラメータについて、二次元粒子シミュレーションを用いて最適化を行った。その結果、従来型高周波電子銃と比して、同じバンチ電荷 ΔQ 、つまり、同じ平均ビーム電流に対して、横方向エミッタンス $\varepsilon_{n,r}$ の増加無しで、陰極への戻り電子ビーム電力 P_{back} を約 90 %削減可能であるとの結果を得た。さらに、縦方向エミッタンス ε_z は 10 倍以上の改善、つまりピーク電流の増大も同時に期待できることが分かった。

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 CO_2 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い。よってこの波長領域は未開拓な部分が多いと言える。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。

高周波電子銃における陰極への戻り電子の影響を軽減する他の方法として、(i) 陰極付近への偏向磁場印加、(ii) 高周波振幅変調によるエネルギー補償、(iii) 光陰極型高周波電子銃（熱陰極に代えて光陰極を用いて短パルスレーザを放出電子が逆加速されない位相にのみ照射して電子を引き出す）、が提案されている。(i)、(ii) の方法は、我々のグループでも用いており一定の効果（具体的には、我々の電子銃では低電流動作でパルス長は約 6 μs まで）は見られているが、完全な解決策とはなり得ず、また、(i) の方法には、軸対称性が失われて電子ビーム輝度が犠牲になるという欠点もある。(iii) の光陰極型は近年広く用いられつつあるが、将来の超高輝度化と引き替えに、高周波電子銃の利点の一部が損なわれる。つまり、短パルスで位相ジッタの低い高性能ドライブレーザの増設・維持が必要であるため、幅広い利用にはそのコストと運転制御の難しさが障害となり、また、ドライブレーザのパルス繰り返し性能（数十 MHz 以下）により、電子ビーム、結果として放射光の高繰り返し性（平均出力）が熱陰極型の数十分の一に制限される。熱陰極型は、Back-Bombardment の欠点さえ解決されれば、KU-FEL 施設における我々の構想のような高繰り返し、高出力、小型経済的で広い応用を目指す長波長領域の量子放射源用の電子源としては理想的であり、我々の提案する高周波三極管構造方式は独創的で極めて簡便な方法（追加高周波電源不要）で熱陰極型高周波電子銃の欠点の根本的解決が期待される。

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 4 から 12 μm での FEL 発生を行い、バイオエネルギー重点複合領域との連携による応用研究を開始する。更に、利用研究に供与できる FEL の安定化等の高度化を行う。また、FEL 発生において光共振器内に蓄積される大強度光と電子ビームを用い、逆コンプトン散乱による準単色の X 線を発生させる事を試みる。これにより高輝度な X 線が利用可能となり応用研究の飛躍的な高度化が見込まれる。更に KU-FEL 電子リニアックでは、電子銃自身で既に 10 MeV に及ぶ高輝度電子ビームを生成可能であり、これを利用した THz 帯 FEL の発生を試みる。強強度の THz 帯光は医療、セキュリティ、検出器開発等の新分野を開拓できる光エネルギーの一形態として重要視されている。

2.3.1.6. 主要論文リスト

1. Toshiteru Kii, Yoko Nakai, Toshio Fukui, Heishun Zen, Kohichi Kusukame, Norihito Okawachi, Masatsugu Nakano, Kai Masuda, Hideaki Ohgaki, Kiyoshi Yoshikawa, Tetsuo Yamazaki, “Reducing energy degradation due to back-bombardment effect with modulated rf input in S-band thermionic rf gun” , AIP, Synchrotron Radiation Instrumentation, pp.248-251(2006).
2. H. Ohgaki, S. Hayashi, A. Miyasako, T. Takamatsu, K. Masuda, T. Kii, K. Yoshikawa, and T. Yamazaki, “MEASUREMENTS OF THE BEAM QUALITY ON KU-FEL LINAC” , Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A, vol.528, pp.366-370 (2004).
3. K. Masuda, K. Kusukame, T. Kii, H. Ohgaki, H. Zen, T. Fukui, Y. Nakai, K. Yoshikawa and T. Yamazaki, “Particle Simulation of Thermionic RF Gun with Triode Structure”, Proc. 27th International Free Electron Laser Conference, Stanford University, C.A. USA, August 21-26 (2005) 588-591.
4. K. Masuda, K. Kusukame, T. Shiiyama, H. Zen, T. Kii, H. Ohgaki, K. Yoshikawa and T. Yamazaki, “DESIGN STUDY OF RF TRIODE STRUCTURE FOR THE KU-FEL THERMIONIC RF GUN”, Proc. 28th International Free Electron Laser Conference, Berlin, Germany, August 28-September 1 (2006) 656-660.

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

高品質・高機能光エネルギーによる新しい科学技術基盤の開発に資するため、レーザーでのみ実現できる代替不可能な光エネルギー機能の開発が中期計画での目標である。そのため、稼働中の高強度フェムト秒 (fs) Ti:sapphire レーザーについて出力ビームの高品質化、長・短時間出力の高安定化、位相・偏光特性の精密制御等の高機能化を進め、原子・

分子・固体表面との新しい非線形相互作用の探索・解明・利用のための高機能化を行った。同時に、物質・材料のナノプロセッシング技術研究用として、高品質な空間・時間ビーム特性を備えたフェムト秒 Ti:sapphire レーザー増幅システムを開発した。後者は、パルス幅 100 fs、尖頭出力 80 GW、繰返し 10 Hz で動作し、メゾスコピック域及び極限時間域での固体表面相互作用の研究用として、時間・空間ビーム特性、及びチャープ特性に関する高度な制御機能を備えている。今後、開発してきたレーザー技術を基礎として、サブ 10 fs の光パルスを発生できる高強度サイクルパルスレーザーを開発し、サイクル位相制御技術の開発・応用を目指す。

レーザーによる先端的物質制御に関しては、まず、fs パルス（伝搬光）によるメゾスコピック域での新しい物質制御、さらには光ナノ加工の可能性を示唆する fs レーザーパルスと固体表面との新しい相互作用現象を発見した。反射率と表面形態変化の相関測定、並びにポンプ・プローブ法による超高速ダイナミクスの研究を行い、表面での結合構造転移と電離、及び非伝搬性の周期的局所場の生成を介してナノ領域でのアブレーションが誘起されることを実験的に突き止めた。さらに、超短パルス高強度レーザーと原子・分子との非摂動論的非線形相互作用においては、HHG により配向・回復のダイナミクスを実時間で高感度検出することに世界で初めて成功した。N₂、O₂、CO₂ 分子についてポンプ・プローブ実験を行い、分子が fs パルスとの相互作用後に配向すること、配向の時間発展が回転波束の特性で支配され、Field free 下で配向が周期的に回復すること、回転波束のコヒーレンスを HHG 信号の周波数スペクトルで同定でき、配向・回復の時間発展を再構築できること等を解明した。また、Bielefeld 大学の理論グループとの共同研究により、配向分子からの HHG に関する基礎理論を構築することに初めて成功した。

2.3.2.2. 重点領域研究としての意義及び社会的重要性

光エネルギー複合領域では、高品質・高機能な光エネルギーの生成・制御・利用に関する研究により新しい科学技術基盤を創出することが目標である。そのため、本課題では、フェムト秒高強度レーザーのみが備えている光エネルギー機能を可能な限り高度化すると共に、同レーザーを物質制御研究に応用することによってその機能を実証してきた。当該レーザーは制御性能に優れ新しい機能を備えた光エネルギー発生装置として、広範な科学技術分野の発展・革新を先導するための基盤技術となると共に新たな融合領域の発展を促進する。

レーザー機能を利用した物質・材料のプロセッシング技術は、優れた物質制御機能、および制御対象物質と操作環境についての大きな自由度を備えており、レーザー加工技術として様々な分野で利用されている。しかし、光の回折限界のため波長サイズを大幅に越えるような微細加工は原理的に不可能であることが知られている。本研究開発では、この制限を克服し、回折限界以下での光加工という全く新しい光エネルギー機能を実証した。この機能は、様々な物質・材料の制御・加工に適用可能であり、光ナノ加工技術として発展させることができれば、次代の科学技術基盤として大きな波及効果が期待できるばかりでなく、新たな融合領域を発展させる原動力となる。さらに、超短パルスレーザーによって分子の空間配向を制御できれば、新たな物質機能の発現・制御手法を開発でき、物質・材料科学に画期的な物質制御手法を提供できる。

2.3.2.3. 平成 16 年度以降の主な成果

(a) 超短パルス高強度レーザーの開発

既設の基幹装置として、チャープパルス増幅 (CPA) の手法を採用した Ti:sapphire レーザー増幅システム (図 3.2.1) が稼働しており、その高性能化研究を継続した。レーザーシステムは、モード同期 Ti:sapphire レーザー発振器、パルス伸長器、Ti:sapphire レーザー再生増幅器、複数の Ti:sapphire レーザー増幅器、及びパルス圧縮器から構成されている。最大尖頭出力 1

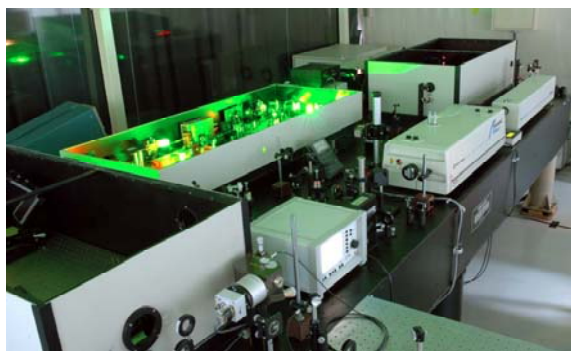


図 3.2.1. 高強度フェムト秒レーザーシステム

TW、パルス幅 40 fs、中心波長 800 nm、繰返し周波数 10 Hz である。この出力を基本波とする第 2・第 3 高調波発生により、青色 (400 nm) 域で尖頭出力 0.2 TW (パルス幅 60 fs)、紫外域 (267 nm) で 20 GW (パルス幅 140 fs) の尖頭出力を利用できる。同レーザー装置について、長・短時間出力の高安定化、偏光特性の精密制御、ビーム品質の向上、チャープ特性の高品質化等の高性能化、高機能化を行い、フェムト時間域における原子・分子の線形・非線形光学応答特性を精密制御できるポンプ・プローブ実験を可能にした。この近赤外基本波及び紫外出力を利用することにより、固体表面における周期的ナノ構造生成、並びに選択的表面改質現象を発見し、現象の発現特性を解明した [1]。また、サイクルレベルの時間遅延、偏光特性を精密制御できる fs 精密干渉計を開発し、同装置を用いて世界に先駆けて配向分子からの高次高調波発生に成功した [2]。

一方、上記のレーザー装置を用いて発見した固体表面のナノ構造生成と選択的結合構造転移現象の物理過程を解明するため、新たな高強度フェムト秒 Ti:sapphire レーザー装置を開発した。この固体表面での超高速励起過程の研究では、コヒーレント光学、レーザー分光、非線形光学の様々な手法を用いるため、光パルスの空間・時間特性、位相特性、スペクトル特性等の精密制御が重要になる。そのため、システム構成は既設装置とほぼ同じであるが、設計出力パルス幅を 100 fs とし、制御性能に優れた高安定パルスの発生を目指した。出力パルスエネルギーは 8 mJ、パルス幅は 100 fs である。図 3.2.2 は、出力

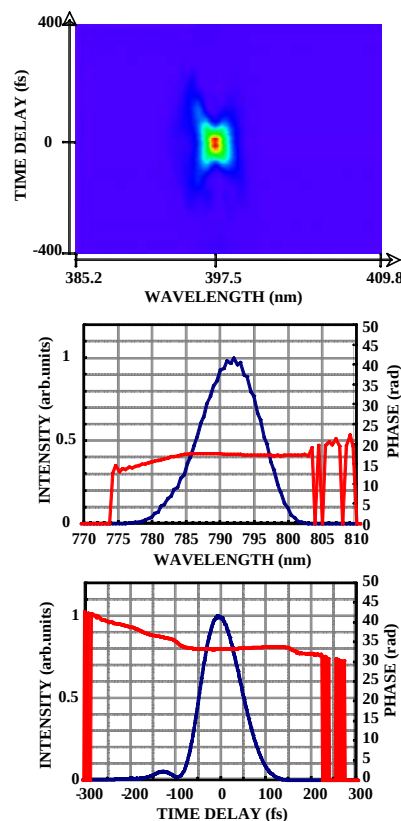


図 3.2.2. 出力パルスの時間・周波数・位相特性(FROG)の測定結果の例。

の時間・周波数特性 (FROG) の測定例である。出力パルスには残留チャープがほとんど無く、ほぼ変換限界に近い特性を持った良質の fs パルスが発生している。この出力パルスを用いて硬質薄膜のアブレーションの研究を行い、ナノプロセッシング技術開発への発展が期待できる新知見を得た [3]。

(b) フェムト秒レーザーによるナノ物質制御

超短パルスレーザーを用いて極短時間内に高密度な光エネルギーを物質中へ注入できるため、物質内でのエネルギー拡散を極端に抑制しつつ多様な物質・材料を精密に制御・加工できる。しかし、原理的に回折限界 ($\sim$ 波長 λ) を大幅に超える微細加工を行うことは不可能である。当グループでは、ダイヤモンド状炭素 (DLC) や TiN 等の硬質薄膜に fs レーザーパルス照射することにより、膜表面に間隔 $d \sim \lambda/10$ から $\sim \lambda/5$ の周期的構造を生成できることを発見し、光加工におけるこの空間分解能を克服できる可能性を実証した [4]。さらに、ナノ構造生成とほぼ同条件下で DLC がガラス状炭素 (GC) 層へ改質されることも発見した [5]。いずれも fs レーザーパルスで誘起された固体表面での新現象であり、光ナノ加工や光による新しい物質改質手法へ発展することが期待できる。そのため、fs レーザーパルスと薄膜表面との超高速相互作用過程の解明を目指して基礎研究を行った [6]。

図 3.2.3 は、直線偏光及び円偏光の fs レーザーパルスによって TiN と DLC 膜表面に形成された微細構造例である。直線偏光では、光電場 E と垂直な方向に細長い微粒子構造が周期的に形成されており、平均間隔は $d = 100 \sim 125 \text{ nm}$ である。一方、円偏光では、平均直径 $\phi = 80 \sim 130 \text{ nm}$ の粒状構造が出現する。レーザー電場の方向が表面形態に直接的な作用を及ぼしており、アブレーションの閾値 F_{th} に近い F で

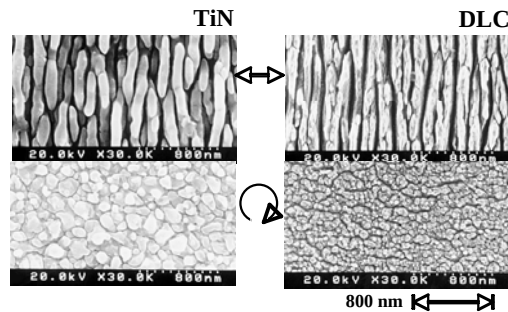


図 3.2.3. 直線偏光(上)及び円偏光(下)パルスで生成したナノ構造.

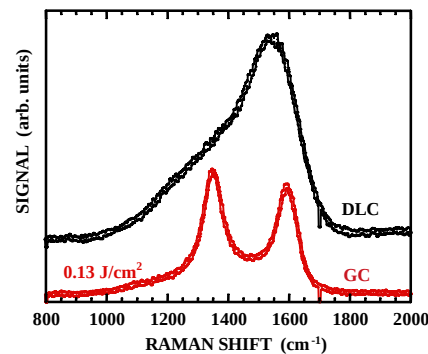


図 3.2.4. DLC 膜の照射前後でのラマンスペクトル.

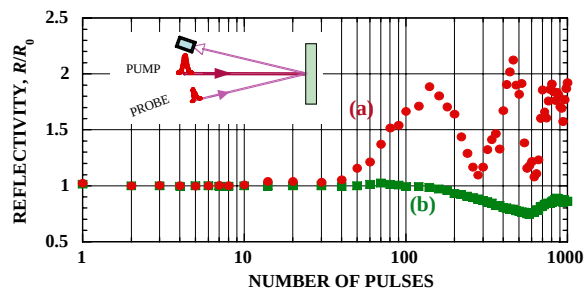


図 3.2.5. fs レーザーパルス数に対して測定した DLC の反射率の変化。ポンプとプローブパルスの偏光方向が (a) 平行と (b) 垂直な場合。

のみ観測される。ナノ秒レーザーパルスではこの微細構造は形成されない。また、紫外 fs レーザーパルス (267 nm/150 fs) では、 d と ϕ はレーザー波長 λ にほぼ比例して微細化した。

図 3.2.4 は、照射 DLC 膜表面のラマンスペクトルの例である。DLC 膜は sp³ と sp² 軌道が混在した非晶質の炭素膜で、スペクトルは幅の広い非対称形状を示す。小さい F で表面を照射すると sp³ → sp² の選択的な結合構造転移によって図 3.2.4 のように GC に改質される。この現象は fs レーザーによる GC 薄膜技術開発の可能性を示唆している。

ナノ構造生成と結合構造転移のいずれも新しい物質・材料プロセス技術へ発展する可能性を持っており、そのためには、現象を担っている物理過程の解明が必須である。現象を実時間検出するため、照射 fs レーザーパルスの反射率 R に着目し、F 及び N に対する特性を測定すると共に、表面形態及びラマンスペクトルの変化との相関を調べた。その結果、表面で吸収された光エネルギーの一部が結合構造の変化として膜内部に蓄積され、その後にメゾスコピックな領域において非熱的なアブレーションが誘起されること等を予測した。この過程を確認すると共により詳細な相互作用過程を解明するため、ポンプ・プローブ法を用いた反射率測定により、超高速で変化するアブレーション過程を追跡した。ポンプとプローブパルスを同時に照射し、反射率 R をパルス数 N の関数として測定した例を図 3.2.5 に示す。ポンプとプローブの偏光が平行の時、N の増加と共に R が周期的に増幅される。この特長的な R の変化から、アブレーションに先行して結合構造の転移が誘起されること、及び構造転移によって非伝搬性の周期的な局所場が成長してナノ領域でアブレーションが始まること等を明らかにし、定性的なモデルを構築した。

(c) 高強度レーザーと原子・分子の高次非線形相互作用

任意の分子を空間的に配向できると共にこの配向過程を制御する手法を確立できれば、新しい物質制御技術へ発展させることができる。我々は、レーザーによる先端的物質制御に関する研究の一環として、超短パルス高強度レーザーと原子・分子との非摂動論的非線形相互作用の研究を進めてきた。超短パルス高強度レーザーで気相分子を配向させることが知られていたが、従来、そのダイナミクスを実時間検出する方法がなく、物理過程の詳細は未解明であった。そこで、従来からの原子のトンネル電離や高次高調発生 (HHG)、及び分子のクーロン爆発現象の研究 [7] を基礎にして、分子の非線形光学応答が分子内の電荷分布の空間的な非一様性に大きく依存することに着目し、HHG を応用して配向の時間発展を高感度検出することに成功した [8-9]。この方法では高強度 fs レーザーの出力からポンプとプローブパルスを生成する。前者で分子の回転準位をコヒーレントに励起すると、分子は光パルスの偏光方向へ過渡的に超高速配向すると共に、この配向が相互作用後に一定の周期で回復

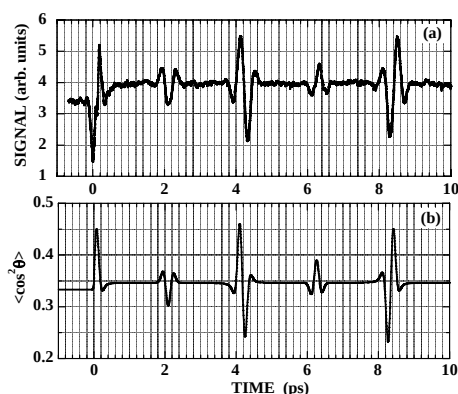


図 3.2.6. (a) ポンプとプローブパルス間の遅延時間の関数として観測した N₂ からの第 19 次高調波信号、及び (b) 計算による N₂ の配向度 $\langle \cos^2\theta \rangle$ の時間発展。

する。時間遅延 Δt を与えたプローブパルスをもとに照射して高次高調波発生 (HHG) を行うことにより、この配向・回復の時間発展を高感度に検出する。これは全く新しい手法であり、 N_2 、 O_2 、及び CO_2 分子の配向と高次高調波発生 (HHG) に関する研究を実験・理論の両面から進めた [8-10]。

図 3.2.6 に、(a) Δt の関数として観測した N_2 からの第 19 次高調波信号 ($\lambda \sim 42$ nm) の例、及び (b) 配向度の期待値の時間発展 $\langle \cos^2\theta \rangle(\Delta t)$ の計算結果を示す。HHG 効率は

$\langle \cos^2\theta \rangle(\Delta t)$ の変化と共に大きく変調されている。分子の配向は、 $\Delta t = T_{rev}/2 \sim 4.2$ ps 及び $T_{rev} \sim 8.4$ ps において回復している。図 3.2.7 は、図 3.2.6 (a) の HHG 信号の周波数スペクトルである。低温での N_2 分子の回転準位は、ポンプパルスによるラマン遷移 $\Delta J = 0, \pm 2$ で多くの準位 $E_J = 2\pi\hbar BcJ(J+1)$ へコヒーレントに励起される (B 、回転定数； J 、回転量子数)。この励起過程を反映して主スペクトルはビート周波数 $\omega_1 = (E_{J+2} - E_J)/\hbar = 2\pi Bc(4J+6)$ から構成される。さらに、HHG で初めて観測された $\omega_2 = (E_{J+4} - E_J)/\hbar$ 、及び $\omega_3 = [(E_{J+2} - E_J) \pm (E_{J+4} - E_J)]/\hbar$ 等の弱い周波数成分も見られる。 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 は、それぞれ、 $\langle \cos^2\theta \rangle$ 、 $\langle \cos^4\theta \rangle$ 、 $\langle \cos^2\theta \rangle \langle \cos^2\theta \rangle$ からの寄与である。弱い成分は分子波束内の高次のコヒーレンスと考えることができる。すなわち、分子の超高速配向・回復だけでなく、励起過程で生成された回転波束のコヒーレンスが HHG によって高感度に検出できることを示している。以上の結果は、Bielefeld 大 (独) との共同研究で構築された理論の結果 [10] と完全に一致する。 O_2 と CO_2 についてもそれぞれに特徴的な結果を得た。

この配向分子の HHG について、分子種及び電子配置に対する特性、ポンプ・プローブの偏光方向の相対角度依存性、高次高調波の次数依存性、レーザー強度依存性、並びに偏光依存性等の特性を測定・解析し、配向分子からの HHG に関する物理過程に関する実験・理論研究を進めてきた。その結果、HHG 過程と共に、高強度レーザーパルスによる分子の配向ダイナミクスの全容をほぼ解明した。

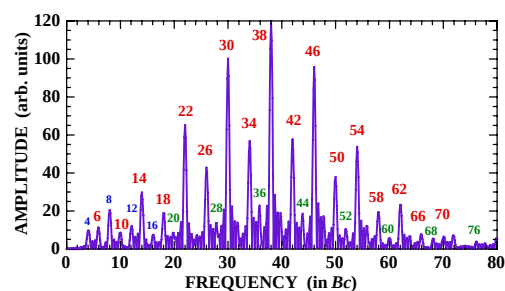


図 3.2.7. 図 3.2.6(a)の高調波信号の周波数スペクトル。

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

1990 年代初めから、極限時間域での光パルスを生じさせる fs レーザーとその増幅による超短パルス高強度レーザー技術が発展し「高強度レーザー科学」と呼ばれる新しい科学技術分野が開拓されてきた。このレーザー技術により、人類は、標準的な実験室において初めてフェムト秒の「極限時間」と GV/cm 以上の「超高電場」域へアクセスできるようになった。この新しい光技術は急速に裾野を拡げ、様々な科学技術分野の新領域や技術革新を先導する原動力の一つとなっている。当所では黎明期から当該レーザー技術の開発を開始し、世界的な拠点の一つとなっている。本課題では、この超短パルス高強度レーザーの高性能化によって同レーザーの潜在的な機能を発現・高度化し、その利用によって次代の科学技術基盤開発を目指している。特に、当該レーザーの新しい物質制御機能に着目し、必要な

レーザーの高機能化を進めつつそれを応用することによって新レーザー機能を実証してきた。

光を利用した物質・材料の微細制御手法として、近年、「近接場光」を利用した様々な方法が活発に研究され、半導体プロセスに匹敵するような微細化も進展しつつある。この近接場光応用が唯一の光ナノ加工技術であるが、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。我々は、レーザーのような伝搬光を用いて、広く実用化されている従来からのレーザー加工と同レベルの機能や操作性を備えた世界初のナノ制御・加工手法の開発を目指している。開拓してきたこの新しい光エネルギー機能によって、物質・デバイス科学技術分野の進展を促す新しい基盤的ツールを提供できる可能性がある。一方、材料、素子、デバイス、マイクロマシン、バイオ、エネルギー等の広範な科学技術分野では、微細化・精密化による技術革新が進展し、原子・分子レベルからの新しい物質制御技術の開発が様々な方法で進められている。超短パルスレーザーを用いた分子配向の手法は、適用条件について特別な制約がなく、気相・液相分子を対象とする各種の物質科学分野の共通基盤技術として発展することが期待できる。特に、分子イメージング等の先端計測分野、及びナノテクノロジー等の物質・材料科学分野の発展・革新を先導するキーテクノロジーとなることが期待できる。

2.3.2.5. 今後の展望

超短パルス高強度レーザー技術は、未踏の物理・化学領域を開拓する新しい基盤技術として広範な科学技術分野で受け入れられ、応用の裾野を急速に拡大しつつある。今後、サイクルレベルの時間特性を制御できるレーザー技術を開発し、光位相に依存する物質応答の制御によって新たな物質機能の発現と利用を目指す。中期計画では、レーザーの短パルス化によってサイクルレベルの高強度光パルス発生技術の開発を行い、同パルスと物質との特徴的な線形・非線形相互作用の探索・解明を行う。

フェムト秒レーザーによるナノ物質制御に関する我々の研究の報告以後、ガラスや半導体表面においても類似構造の形成が観測され、fs レーザーによる表面ナノ加工の研究が世界的に活発化しつつある。しかし、微細構造形成の物理過程は全く理解されておらず世界的に大きな課題となっている。本研究で得られた結果から、結合構造の転移、非一様な電子密度(非伝搬性プラズモン)の生成、周期的局所場(近接場)形成、メゾスコピック域でのアブレーション、ナノリップル形成、という一連の超高速過程から構成される定性的なモデルを実験研究によって実証しつつある。今後、このモデルを異なる物性を持つ誘電体、半導体、金属等に適用・拡張することにより、次代の共通基盤技術となる光ナノ加工技術を開発する。

高強度レーザーと原子・分子の高次非線形相互作用に関しては、これまで、 N_2 、 O_2 、及び CO_2 等の比較的小さい直線分子について研究を行ってきたが、異核 2 原子・多原子分子、有機分子等への適用、三次元配向手法の開発、それらを利用した分子気体・液体の光学特性(屈折率、分散、反射、回折等の特性)を初めとする物性制御手法の開発が今後の課題である。当該分子制御手法を高度に発展させることにより、物質の潜在的機能の探索・発現・利用等、分子科学・物質科学の新分野開拓を目指す。

2.3.2.6. 主要論文リスト

1. K.Miyazaki, N.Maekawa, W.Kobayashi, N.Yasumaru, and J.Kiuchi: "Reflectivity in femtosecond-laser-induced structural changes of diamond-like carbon film", Appl. Phys. A: Materials Science & Processing 80, 17-21 (2005).
2. M.Kaku, K.Masuda, and K.Miyazaki: "Observation of Revival Structure in Femtosecond-Laser- Induced Alignment of N2 with High-Order Harmonic Generation", Jpn. J. Appl. Phys. 43, L591 - L593 (2004).
3. G.Miyaji and K.Miyazaki: "Ultrafast dynamics of periodic nanostructure formation on diamond-like carbon films irradiated with femtosecond laser pulses", Appl. Phys. Lett. 89, 191902 (2006).
4. N.Yasumaru, K.Miyazaki, and J.Kiuchi, Appl. Phys. A, Vol.76, 983-985 (2003); Appl. Phys. A, Vol.81, 933-937 (2005); Appl. Phys. A, Vol.79, 425-427 (2004).
5. K.Miyazaki, N.Maekawa, W.Kobayashi, N.Yasumaru, and J.Kiuchi, Appl. Phys. A, Vol.80, 17-21 (2005).
6. G.Miyaji and K.Miyazaki, Appl. Phys. Lett. Vol.89, 191902 (2006).
7. K.Miyazaki, T.Shimizu, and D.Normand: "Femtosecond-laser-induced alignment in Coulomb explosion of N2", J.Phys. B: At. Mol. Opt. Phys, Vol.37, 753-761 (2004).
8. M.Kaku, K.Masuda, and K.Miyazaki: "Observation of revival structure in femtosecond-laser-induced alignment of N2 with high-order harmonic generation", Jpn J. Appl. Phys. Vol.43, L591-L593 (2004).
9. K.Miyazaki, M.Kaku, G.Miyaji, A. Abdurrouf, and F.H.M.Faisal: "Field-Free Alignment of Molecules Observed with High-Order Harmonic Generation", Phys. Rev. Lett. Vol.95, 243903 (2005).
10. F.H.M.Faisal, A.Abdurrouf, K.Miyazaki, and G.Miyaji: "Origin of Anomalous Spectra of Dynamic Alignments observed in N2 and O2", Phys. Rev. Lett. Vol.98, No.14, 143001 (2007).

2.3.3. 超短レーザーと物質の非線形相互作用に関する研究

2.3.3.1. 研究の概要

本課題では極限的にパルス時間幅の短い（＜数フェムト秒）光パルスと物質の超高速非線形相互作用を調べる。特に、キャリアエンベロープ位相やパルス時間幅の影響を詳細に調べる。また、「超短光パルス」をツールとして用いることにより、原子・分子物理学、表面科学、材料科学、原子核物理学、高エネルギー物理学などの実に様々な分野で活用可能なスピン偏極粒子（電子、イオン、核）を生成するスピン偏極法を開発する。本課題は学際的かつ横断的かつ独創的であり、研究水準および成果に関しては、中期目標・中期計画

の中の「独創的な新領域開拓」に整合する。また、中期目標・中期計画の中で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。

前回の外部評価ではやや孤立して研究を進めているとの指摘があったが、現在は一部、東京大学物性研究所や理化学研究所と共同して実験的研究も進め、理論の検証も同時に行っている。成果の社会への還元という意味では、Physical Review Lettersをはじめとする国際的にハイレベルな学術誌発表はもとより、日本物理学会誌にも解説記事を執筆、また、数件の招待講演（国際会議 2 件、国内研究会 1 件）を行い、特許も 3 件出願した。また、外国人研究者を半年から 1~2 年の滞在期間でこれまで 5 名招聘し、研究者交流の活性化にも寄与している。今後は更に国際拠点の形成を目指し研究を進めるとともに、産官学の交流を目指し研究を進める。

2.3.3.2. 重点領域研究としての意義及び社会的重要性

レーザー誘起現象を十分に理解することは、光エネルギーの高度利用のための重要なステップとなる。超短光パルスによって誘起される超高速非線形光学現象を理解し、さらには積極的に応用するためには、相互作用ダイナミクスに関する理論的解明が不可欠である。この様な超高速非線形光学現象は、光によってしか実現し得ない超高速プロセスであり、光エネルギーの高度利用という点では唯一無二の重要性を持ち、総合的なエネルギー理工学研究の進展には欠くことのできない研究領域である。

近年の目覚ましい超短レーザーパルスの技術の進展によって、キャリアエンベロープ位相まで制御安定化された光パルスが実験室で生成可能となりつつある。パルス時間幅がサイクル数にしてわずか数サイクルの場合には、物質との相互作用に位相依存性が現れる。これまで報告された位相効果は、極めて強い光強度領域（トンネルイオン化領域）で観測されており、トンネルイオン化という概念により物理現象を良く説明できた。もしパルスエネルギーが必要とされない低光強度領域（多光子イオン化領域）で何らかの位相効果が発見されれば、様々な意味で応用範囲が格段に増大するであろう。

一方、スピン偏極した粒子（電子、イオン、核等）は様々な物質との間の相互作用のスピン依存性を調べるには非常に有用であり、原子・分子物理学、表面科学、原子核物理学、高エネルギー物理学など極めて幅広い分野で活用可能なツールである。エネルギー理工学の観点から言えば、表面科学におけるスピン偏極粒子の応用が最も興味深いが、スピンとはすなわち磁気モーメントであるので、相互作用のスピン依存性から材料の磁性情報を得ることができる。特に、電子とイオンは質量が 3 桁違うことから、例えば偏極ビームを材料表面と相互作用させた場合に、異なる情報が得られる。ところが一般には偏極電子と偏極イオンの切り替えは容易ではない。これに対し、我々の方法では偏極した電子とイオンを同時に生成させ、さらに引き出し電場の極性を反転させることによって、そのいずれをも取り出すことができるため、切り替えが簡単なデュアル型偏極源としての応用が可能であり、表面科学や材料物性の研究のための新たな手段を提供することにもなる。さらに超高速スピン偏極を実現できれば、粒子が超短時間内にバンチングした偏極パルスビームも種々の応用において大きく役立つであろう。

2.3.3.3. 平成 16 年度以降の主な成果

(a) 極限的な超高速非線形光学現象に関する研究

パルスの時間幅が極限的に短くなって数サイクルとなると、物理現象によっては搬送波位相（絶対位相）の効果が現れる。トンネルイオン化領域と呼ばれる高強度レーザー場のもとでは、高次高調波や超閾イオン化信号に位相効果の現れることが知られている。しかしながら、多光子イオン化領域と呼ばれる低光強度レーザー場のもとで位相依存現象が現れるとは一般に考えられていなかった。

我々は、時間依存シュレーディンガー方程式を数值的に解くことにより、低光強度領域において位相効果が存在するかどうかを調べた。Cs 原子は価電子を 1 つだけ持つアルカリ金属原子であり、イオン化ポテンシャルは 3.89 eV と小さいため、図 3.3.1 に示すように密なエネルギー準位構造を持つ。従って低強度の光で励起およびイオン化が可能である。高い蒸気圧を得やすいという点でも実験上は好都合である。計算の結果を図 3.3.2 に示す。

多くの束縛状態はほとんど位相依存性を示さない。これは、Cs の励起およびイオン化は次数の低い非線形光学過程

であることからある程度予測できた結果である。しかしながら、共鳴からはるか離れた 5d、8p、4f などの状態は強い位相依存性を示す。イオン化過程がどの程度位相依存性に影響を及ぼすかを調べるため、イオン化が全く起こらないとして同様の計算をした結果を図 3.3.2 中に点線で示す。イオン化過程の有無により位相依存性に若干の違いが見られるものの、本質的にイオン化過程が位相依存性を引き起こしているわけではない、ということがわかる。つまり、トンネルイオン化領域ではイオン化過程が「エネルギーおよび角度分解した光電子信号」に見られる位相依存性の起源であったのに対し、多光子イオン化領域ではイオン化過程は位相依存性に本質的な影響を及ぼさない。多光子イオン化領域における位相効果の物理的起源は何かを探るために 3 準位モデルを使った考察をした結果、位相効果は共鳴項と交差項および反共鳴項の間で起こる量子干渉に起因するということがわかった。この説明によると、パルス時間幅が数サイクルよりも長くなれば遷移モーメントに対する共鳴項の寄与が常に他の項よりもはるかに大きくなって位相効果が消失するとい

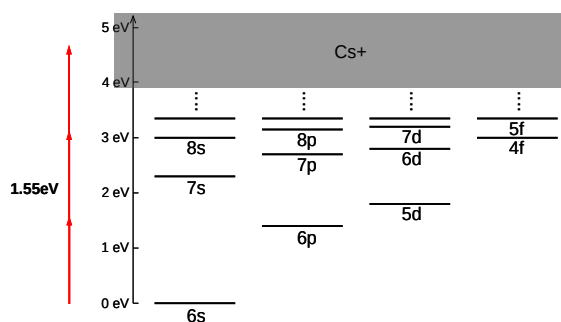


図 3.3.1. Cs 原子のエネルギー準位図

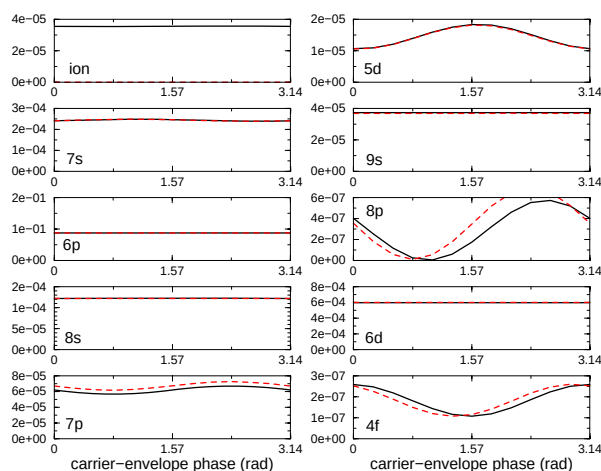


図 3.3.2. サイクル数=1 のパルスに対する Cs のいくつかの束縛状態の占有密度の位相依存性。ピーク光強度は 10^{11} W/cm^2 とした。

うこと、および、サイクル数がわずか1～2サイクルであっても近共鳴の準位については共鳴項の寄与が他項をはるかにしのぐため、やはり位相効果は消失するということとなり、図 1.3.4.2 の結果と完全に整合する。これに対し、トンネルイオン化領域における位相効果は、基底状態の原子がレーザー場によってトンネルイオン化する際、位相によって光電子放出が空間的に異方性を持つということであった。このように、2つの異なる光強度領域では位相依存性の起源について本質的な違いがあるということを明確にしたことが我々の研究の最大の成果である。また、H 原子の場合には、束縛状態の占有密度のみならず、全イオン化量にも顕著な位相依存性が見られるということを見いだした。

(b) 超短レーザーパルス誘起スピン偏極に関する研究

これまでの研究では、ナノ秒のパルスレーザーで光電子および光イオンのスピン偏極が同時に誘起できることを理論的・実験的に示した。実験によって得られた偏極度は Sr 原子について約 64%であり、理論値とよく一致した。本研究では、超高速スピン偏極を目指した新しいスピン偏極スキームの理論的提案と解析を行い、さらには理化学研究所との共同研究としてその実験実証を進めた。理論的に我々が独自に提案した超高速偏極スキームおよびその解析結果は以下に述べる実験結果と整合性がよいのでここでは省略する。実験配置図および偏極スキームを図 3.3.3 に示す。まず固体の Sr 試料に Nd:YAG レーザーの第 2 高調波 (532 nm) を照射し、レーザーアブレーションによって真空チェンバー内に Sr 原子ガスを発生させる。アブレーションルーム中に含まれるイオンがスピン偏極イオンの観測を妨げるのを防ぐため、アブレーションパルスの後、イオンデフレクターに約 300 V の電圧を印加し、約 50 μ s 後に右円偏光した波長 689 nm のナノ秒光パルスによって 5s5p 3P_1 ($m_J = +1$) に原子を励起する。この励起後、我々は 2 色のフェムト秒光パルスを使ってポンプ・プローブ実験を行った。まず、波長 794 nm、エネルギー約 1 mJ/パルス、時間幅 150 fs の光パルス (横偏光) は非線形光学結晶 (BBO) によって第 2 高調波 397 nm の光パルス (縦偏光) を発生する。794 nm 光は横偏光であるため、 $\lambda/2$ 波長板によって 397 nm と同じ縦偏光にする。その後、この 2 色フェムト秒パルスは delay line によってパルス間の時間遅延をフェムト秒の時間オーダーで制御され、397 nm、794 nm のパルスの順に励

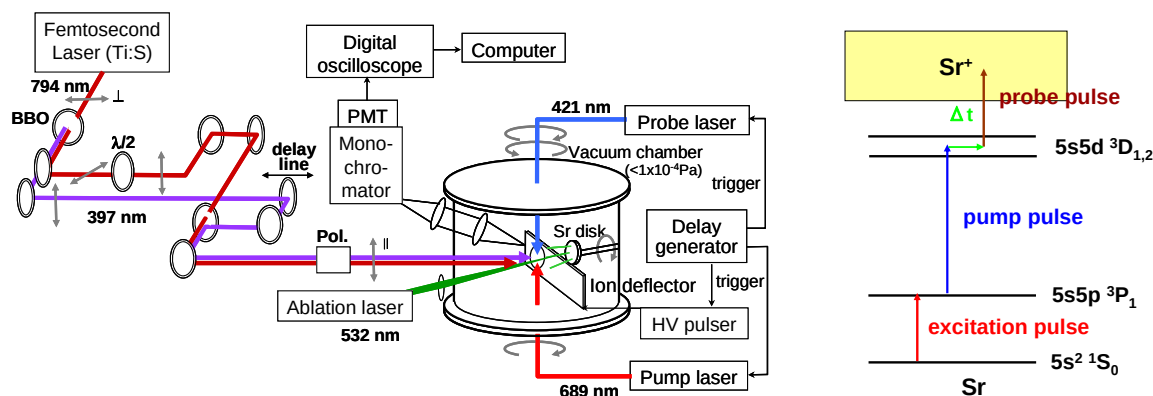


図 3.3.3. (左) 実験配置図と (右) 偏極スキーム

起状態にある $\text{Sr } 5s5p \ ^3P_1$ ($m_J = +1$) 原子ガスへと照射され、さらなる励起およびイオン化が起こる。この時、我々の理論によると、生成する Sr イオンのスピン偏極度は時間遅延の関数として変化するはずである。実際、レーザー誘起蛍光を使った光学的手法によってイオンのスピン偏極度を検出すると、時間遅延の関数として図 3.3.4 のように数ピコ秒の時間スケールで大きく変化した。この結果は我々の理論解析結果と非常に良く一致する。

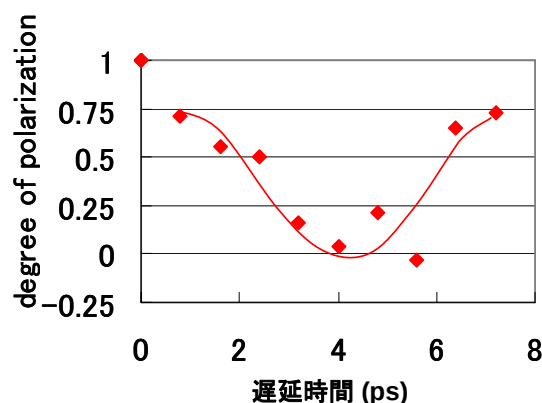


図 3.3.4. Sr イオンのスピン偏極度の時間遅延依存性

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

超高速光物理の分野では、数サイクルパルスによって誘起される位相効果に関する研究は非常に盛んであるが、そのほとんどは、光強度が極めて高いトンネルイオン化領域においての現象である。低光強度領域で位相依存性があることを示したのは我々が世界で最初であり、この発見により位相依存現象が発現すると考えられる光強度領域が飛躍的に増大した、極めてインパクトの大きい研究成果であるといえよう。

一方、スピン偏極を実現するには、狭帯域連続発振 (CW) レーザーを使った光ポンピング法が、国内外共に、よく用いられるが、使用可能な波長域 (可視近傍のみ) やレーザーパワー、およびスピン偏極に要する時間などの点で大きな制約がある。これに対し、我々は発想を全く新たにし、パルスレーザーを使ってスピン偏極ができないかという観点からアプローチをしている。従来、スピン偏極に関する研究は主に加速器物理学の研究者によって進められてきた分野であり、我々のようにレーザーのコヒーレンスをうまく使うことのできる研究者による新しいアプローチは、まさしく横断的研究といえる。

2.3.3.5. 今後の展望

超高速光物理に関しては、従来、近赤外波長 (800 nm 近辺) の数サイクルパルスを念頭に、主に位相依存現象に関する研究を進めてきた。今後は近赤外波長の数サイクルパルスとは全く異質な現象が見られる可能性を秘めるサブフェムト秒～アト秒光パルスと物質の超高速相互作用についても研究を進めていきたいと考えている。一方、これまでの研究で、電子やイオンのスピン偏極はナノ秒およびフェムト秒レーザーパルスを使ってかなり制御できることが理論的のみならず実験的にも証明することができた。今後、不安定核のスピン偏極が実現できれば原子核物理学の発展に大きく寄与することができる。また、医療用核磁気イメージング (Magnetic Resonance Imaging, MRI) の感度向上に寄与するには高強度・高繰返しの紫外パルス光源を開発する必要がある。これらのテーマについても順次取り組んでいく予定である。

2.3.3.6. 主要論文リスト

1. N. Miyamoto, M. Kamei, D. Yoshitomi, T. Kanai, T. Sekikawa, T. Nakajima, and S. Watanabe, “Observation of two-photon above-threshold ionization of rare gases by xuv harmonic photons”, Phys. Rev. Lett. **93**, 083903 (2004).
2. Takashi Nakajima and Shuntaro Watanabe, “Effects of the carrier-envelope phase in the multiphoton ionization regime”, Phys. Rev. Lett. **96**, 213001 (2006).
3. Takashi Nakajima and Shuntaro Watanabe, “Phase-dependent excitation and ionization in the multiphoton ionization regime”, Optics Letters **31**, 1920 (2006).
4. T. Nakajima, “Control of the spin-polarization of photoelectrons/photoions using short laser pulses”, Appl. Phys. Lett. **84**, 3786-3788 (2004).
5. N. Yonekura, T. Nakajima, Y. Matsuo, T. Kobayashi, and Y. Fukuyama, “Electron-spin polarization of photoions produced through photoionization from the laser-excited triplet state of Sr”, J. Chem. Phys. **120**, 1806 (2004).
6. 中嶋隆, “パルスレーザー誘起スピン偏極”, 日本物理学会誌 2007 年 4 月号 (印刷中)

2.3.4. 液相レーザーアブレーションを利用した液中固体表面の その場表面元素分析

2.3.4.1. 研究の概要

前回の自己点検では液相レーザーアブレーションの界面材料プロセスとしての可能性を前提とし、ブルームの発光スペクトル測定によるアブレーションメカニズムの研究を自己点検した。それに対する外部評価として、きわめて新規性に富み興味深い研究であるが、現状では萌芽的探索的であり、研究の進捗にしたがって目標の明確化が求められるといった意見が寄せられた。以降評価意見を念頭に、それまでの研究成果を発展させ、液中固体のその場表面元素分析への応用とそのための基礎研究を中心に研究を進めてきた。液中のブルームの発光スペクトルは極度にブロードニングし、そのままでは分光分析に使えないが、長いナノ秒レーザーを照射することで、元素特有の線スペクトルが明確に得られることを発見した。この成果は中期目標・中期計画を達成しており、学問的に非常に優れていると判断している。また、この成果をさらに発展させ、学問としての現象解明にもとづき、定量性や非破壊性の向上といった新しい技術展開を目指す。

2.3.4.2. 重点領域としての意義及び社会的重要性

液相レーザーアブレーションとは液体に浸漬した固体表面のレーザーアブレーションを指し、液相に直接コロイド粒子を生成させたり、材料表面に化学反応の場を提供する新しい方法となる。また、照射条件によっては、レーザー照射スポットに非常にユニークな構造が形成し、材料科学の観点からさまざまな応用が考えられる。特にエネルギー分野では、光エネルギー変換のための機能性材料表面の改質や、各種電極材料の表面構造形成への応

用が期待される。液相レーザーアブレーションはエネルギー材料創製だけでなく、材料界面の分析にも重要な役割を演じることを忘れてはならない。つまり、アブレーションプラズマの発光スペクトルを測定することで、ターゲット表面の元素分析が可能である。このような方法はレーザー誘起ブレークダウン分光（LIBS）と呼ばれている分析手法の一種であるが、固体表面のアブレーションにもとづくことから我々はレーザーアブレーションプラズマ分光（LAPS）と呼んでいる。LAPS は前処理を必要とせず、材料表面の迅速なその場表面元素分析を可能とする。そのため、電池の電極表面や原子力施設の燃料棒表面など液体中で固体が機能することが本質的であるようなシステムについて、固体表面のその場元素モニタリングに威力を発揮できる。本研究は固液系の新たなエネルギー機能を光を使って探索するという観点から、研究所の重点領域である光エネルギー複合領域における研究の一翼を担うものである。

この分光分析が分析手法として確立すると、エネルギー材料界面のその場モニタリングが可能になるだけでなく、多くの派生的な応用分野が開けることになる。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の内壁の元素組成の変化をとまなう劣化のモニタリング、海底探査における迅速な海底物質同定、原子力施設における燃料棒組成のモニタリングなど、液体中のあらゆる固体の表面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 16 年度以降の主な成果

(a) 長いナノ秒パルスによる液相レーザーアブレーションプラズマからの発光の先鋭化 [2]

液相レーザーアブレーションプラズマは、放出種の密度と温度が非常に高くまた空間分布が不均一であることに起因して発光線スペクトルが著しく広がり、さらに自己吸収による反転構造の形成などの影響を受けると同時に強い連続スペクトル発光を示す [1]。これらの現象は放出種を的確に検出することが求められる分光分析への応用では短所となる。発光スペクトルを表面分析に利用するためには、自己吸収のない安定したスペクトル形状が得られるようなプラズマを形成させることが必要である。我々はアブレーションに用いる Nd:YAG レーザーの Q スイッチパルス幅を 19 ns から 150 ns まで長くすることにより、スペクトルが著しく先鋭化することを発見した

(図 3.4.1.)。この成果は、単パルスの液相レーザーアブレーションが液中固体表面のその場元素分析に応用できることを初め

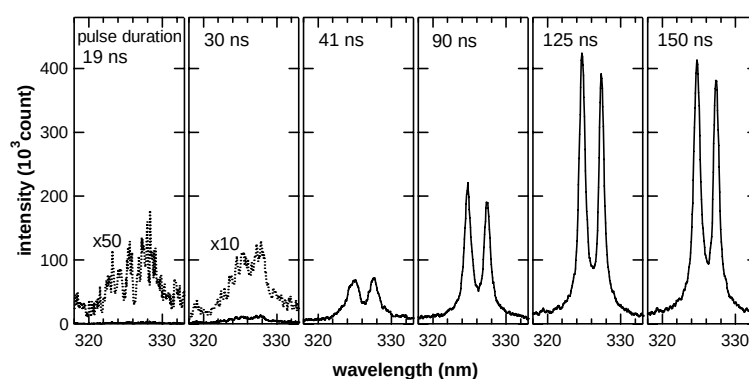


図 3.4.1 アブレーションパルスの幅をさまざまに変化させたときの水中に生成したプラズマ中の銅の微細構造分裂した 2 本の発光線スペクトル。アブレーションパルスのエネルギーは 1.7mJ と非常に小さい。

て示したものである。

(b) レーザーアブレーションプラズマ分光による 液中固体表面の疑似非破壊元素分析 [3]

図 3.4.2.より、パルス幅の増加にともない発光線の線幅が減少するだけでなく、発光強度が著しく増大することがわかる。白金上の厚さ 164 nm の銅の電析皮膜を試料として照射し、損傷を調べたところ、1 パルス照射あたり 13 nm 程度であることを見出した。現在のところ、パルスのエネルギーや波長あるいは発光の観測方向などの多くのパラメータは、損傷が最小になるように最適化していない。このことを考慮すると、ここで提唱している長いナノ秒レーザーを用いるレーザーアブレーションプラズマ分光による液中固体の表面元素分析は非破壊分析の観点からも非常に有望であり、「疑似非破壊表面元素分析」とも呼べるものである。

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

レーザー誘起ブレイクダウン分光を水中の固体表面分析に応用した研究が数報報告されている。それらは全てダブルパルス法を用いている。ダブルパルス法は、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する方法であり、気相のブレイクダウン分光と類似の結果を示す。この方法は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。液相でのパルスレーザー照射プロセスの研究は 2000 年のわれわれの報告を契機として発表論文数が増加している。しかし、液中でのその場元素分析を主眼とした研究は上記の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。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ることは明白であり、本研究が主体となって研究を進展させることが重要な分野である。

2. 3. 4. 5. 今後の展望

未知の部分が多い液相アブレーションの現象の解明を進め、その基礎研究の成果にもとづいて分析手法としての技術課題を解決し、実用化を目指す。現状での問題点は、パルスごとのスペクトルのばらつきが大きいことである。当面は明瞭な線スペクトルが得られるメカニズムの解明によりもたらされる知見により、この技術課題を解決することを目指す。

2. 3. 4. 6. 主要論文リスト

1. T. Sakka, K. Saito, and Y. H. Ogata, J. Appl. Phys., **97**, 014902/1-4 (2005).

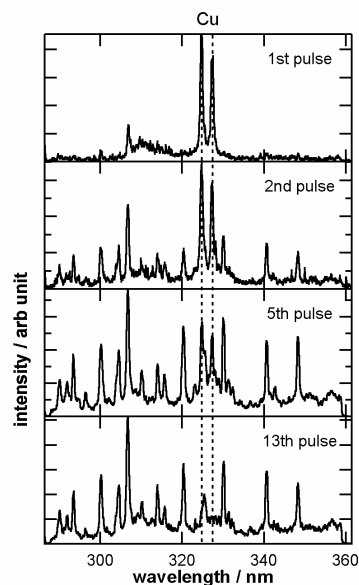


図 3.4.2. 白金上の厚さ 164 nm の銅の電析皮膜の同一点を照射し続けたときのスペクトルの変遷。銅に帰属される 325 および 327 nm の発光線が 13 回のパルス照射で消失することより、照射による表面損傷は 1 パルスあたり 13 nm 程度であることが見積もれる。

2. T. Sakka, H. Oguchi, S. Masai, K. Hirata, Y. H. Ogata, M. Saeki, and H. Ohba, Appl. Phys. Lett. **88**(6), 061120/1-3 (2006).
3. T. Sakka, H. Oguchi, Y. H. Ogata, Chem. Lett., **36**, 508-509 (2007).

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。この様な背景の下、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、付属エネルギー複合機構研究センターを中心とした、三重点複合領域研究に代表される横断的な課題研究に、より一層重心が動いている。しかしながらエネルギー科学研究科の協力講座としての視点からは、従来の「研究分野」構成をすぐに崩すことは困難であり、今後、エネルギー科学研究科との協議が必要であろう。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、まだ結論を得るに至っていない。

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、従来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設備整備などにより、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・分野の構成一覧（平成 19 年 02 月 28 日現在）は資料編（II）第 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）第 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 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）第 2 章に、研究成果の公表状況については同資料編第 4 章に纏めている。

3.1. エネルギー生成研究部門

平成 8 年（1996 年）5 月の研究所改組により、エネルギー生成研究部門は「社会的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他、核融合の利用・応用研究して、ブランケット、水素製造に関する研究、小型核融合中性子源開発研究など、産業応用を目指した研究も行っている。本研究部門の主たる研究対象である量子、粒子、プラズマなどを媒体とするエネルギーの高品位化は、学術的にも、またそれらエネルギーの社会的受容性を高めるうえでも緊急の課題であり、そのために「新しい高品位エネルギーの生成原理及び生成技術に関

する研究」により、他の 2 研究部門、すなわ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。

このほか、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」においては、本研究部門教員は、研究所他研究部門ならびにエネルギー科学研究科関連分野の教員と共に、太陽エネルギー、環境調和型トータルエネルギー評価など、関連のタスクに参画、次世代太陽電池の開発や人工太陽開発に関する基礎研究など、エネルギー生成に関わる研究ならびに教育も推進している。

平成 16 年には、北 2 号棟の大規模改修が行われ、新たに「量子光・加速粒子総合工学研究棟」となったが、その一部には、量子放射エネルギー分野が中心となって開発してきた S バンド線形加速器による赤外自由電子レーザー (KU-FEL) 施設を移設、4.5 空洞熱陰極高周波電子銃、3m 加速管、ビーム輸送系の設置を終え、調整運転を開始し自由電子レーザー発振を目指しており、最近 2006 年に 4.6 mm 付近での自発放出光の発生に成功した。

平成 17 年度より南 1 号棟にスペースを用意し、世界に先がけて先進 SiC セラミック LiPb 熱交換システムによる先進ブランケットに関する実験研究が、原子エネルギー分野が中心となって本格的にスタートした。

さらに、平成 17 年度新築のなった宇治キャンパス総合研究実験棟のオープンラボ部分に研究スペースを借り受け、地雷探知から医療用まで多様な応用が期待される超小型静電慣性核融合中性子・陽子源開発研究の一層の展開を図り、地雷探査の実証へ向けた研究が、粒子エネルギー分野を中心に急ピッチで進められている。

一方、プラズマエネルギー分野を中心に進められている高温プラズマ閉じ込め研究では、京都大学独自の発想に基づくヘリカルヘリオトロン磁場配位の更なる改良に向け、新たに提案された世界的にもユニークな先進的閉じ込め磁場配位であるヘリカル軸ヘリオトロン磁場配位によるヘリオトロン J 装置 (附属センター基幹装置、平成 12 年度プラズマ実験開始) により、ヘリカル軸ヘリオトロンの最適化と、そこにおけるプラズマ制御の高度化へ向けた研究を進め、着々と成果を出してきている。

外国人客員分野には、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聴し、活発な共同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：山崎鉄夫、助教授：大垣英明、助手：紀井俊輝)

(構成人員は、平成 19 年 3 月 1 日現在、以下同様)

当研究分野では、赤外自由電子レーザー (FEL) の発生と利用を目標にして、KU-FEL と呼ばれる FEL 装置の建設を、粒子エネルギー研究分野と協力して進めている。4.5 空洞熱陰極型高周波電子銃とコンパクトな 10-MW クライストロンパルス形成装置の試作を開始して、8 MeV 程度の電子ビームの発生に成功して、電子ビームの質の計測と改善の研究を進めてきた。2003 年度には 3-m 加速管と 20-MW クライストロンパルス形成装置を導入して、30 MeV (その後 40 MeV) 程度までの電子ビーム加速に成功した。これらの研究は、放射線遮蔽が完備している化学研究所の先端ビームナノ化学センターの施設の一隅を借り

て進めてきたが、当研究所で古くプラズマ研究に使用されていた建物の部屋を整備すると共に放射線遮蔽壁を追加して、イオンビームを使用する施設と共に量子光・加速粒子総合工学実験棟として 2004 年に完成させ、FEL 装置全体を移転して設置した。その後、アンジュレータと光共振器も整備して実験を再開して、最近 2006 年に 4.6 mm 付近での自発放出光の発生に成功した。近い将来 FEL 発振実験を開始する予定である。この装置は、KU-FEL と呼ばれている。FEL 装置の建設以外にも、トモグラフィ法を用いたエミッタンスの測定、FEL 過程のシミュレーション、光陰極型高周波電子銃、スタガードアレイ型アンジュレータ（高温超伝導材料を使用するものも含む）、エネルギー回収システム、といった様々な研究も行っている。特に、この種の電子銃の最大の問題点である電子逆流現象抑制の研究を進めている。これは、一部の電子の逆流による陰極のヒーティングによって、長マクロパルス電子ビームが得られないことであるが、最近入射高周波の波形を遠隔で制御することによって、7 s 程度の幅の電子ビームを得る目途が立った。また、3 極管型高周波電子銃の研究も行っている。

3.1.2. 原子エネルギー研究分野

（教授：小西哲之、助教授：山本靖、助手：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設計、開発する一方、社会、環境との関係で総合的に評価する研究を行っている。核融合エネルギーシステムのアセスメント研究において、環境、社会的受容性、経済的競争力などを考慮した核融合の導入シナリオを検討し、社会に選択されるために、核融合が満たすべき条件や研究方向の検討を行い、発展途上国の電力システムへの核融合の導入戦略、核融合の環境影響評価、二酸化炭素放出削減など地球環境問題と未来のエネルギーシステムと核融合の寄与の評価等を通じて、魅力的な核融合エネルギーシステムの設計研究を行っている。また、リサイクル資源としてのバイオマスから、核融合エネルギーを用いて水素を製造するプロセスを提案しており、これに関わる基礎実験とプラントの概念設計を行っている。さらに、核融合エネルギー変換の要であり、水素製造や高効率発電を可能とする先進性と、実験炉で実証可能な高い実現性から現在世界でもっとも注目される概念のひとつである液体リチウム鉛を用いた高温ブランケットに関し、世界に先がけて先進 SiC セラミックス-LiPb 熱交換システムの実験を実施しており、高温循環状態におけるリチウム鉛と各種構造材料の共存性、水素挙動、伝熱性能、電磁流体挙動について研究を行っている。この他、小型軽量な中性子源として、重水素放電を用いた核融合中性子源の研究を実験・シミュレーションも進めている。

3.1.3. 粒子エネルギー研究分野

（教授：吉川潔、助教授：増田開）

荷電粒子ビームの電磁場を介した高度・高精緻制御技術の確立により 21 世紀の人類に計り知れない恩恵をもたらす先進科学技術の開発を目指して、地雷や空港等での爆薬・違法物質探知や医療など多様な応用が期待される超小型慣性静電核融合中性子／陽子源や、自由電子レーザーを代表とする先進量子放射源を実現するための高輝度電子ビーム生成など

の研究を行っている。慣性静電核融合の研究では、科学技術振興機構（JST）事業（平成14年・19年9月）において、D-D核融合中性子の熱化と地雷原方向（下方）へ集束と長時間安定動作を可能とする冷却とを兼ねた水冷構造付きの小型実用機を開発、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。また、D-³He 先進核融合反応による高エネルギー陽子発生空間分布同定や、分子過程を考慮した二次元粒子シミュレーションコード開発などの基礎研究においても成果をあげた。一方、高輝度電子ビーム生成の研究では、従来の熱陰極高周波電子銃の欠点であった逆流電子による陰極衝突・加熱の問題を解決可能な新方式である高周波三極管構造を提案し、原理実証実験を科学研究費補助金事業で進めている。

3.1.4. プラズマエネルギー研究分野

（教授：水内亨、助教授：長崎百伸、助手：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」を主課題として、研究所重点領域研究「核融合エネルギー複合領域研究」に参画、ヘリオトロンJ研究を推進している。同研究は、平成16年度より、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」に転換した。これは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育成」（平成14-18年度）でのプラズマグループの目指した「プラズマエネルギー利用の高度化」にも必要なプラズマ・水素サイクル・材料融合研究の新学域開拓に挑戦する研究である。研究目的の1つに「自律系プラズマの基礎的挙動の解明とその応用」を掲げ、プラズマ閉じ込めの高性能化を目指している。特に、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主体的に参加、全国的共同研究を推進している。また、「プラズマ・材料相互作用制御の高度化」や「水素サイクルにおけるプラズマ反応プロセスの最適化」については、ヘリオトロンJ装置の磁場配位制御性を活かした先進的ダイバータ機構とそれによる制御に関する基礎研究を展開している。これらは、国際的ヘリカル系研究の一翼を担うものであり、国際エネルギー機関（IEA）による国際ステラレータ実施協定の下で重要な国際共同研究を推進、核融合分野における国際貢献を果たしている。また、本研究分野の研究対象はヘリカル装置だけに留まらず、原子力研究機構（JAEA）を始め、所外の関連分野の研究者との共同研究も推進している。

平成16年度以降、①電子サイクロトロン波電流駆動における磁場構造効果、②NBIによるプラズマ閉じ込め制御、③プラズマ電流による周辺プラズマ構造への影響、などの実験的検証並びにデータベースの拡充を図ってきた他、④自発的プラズマ遷移現象における有理解面の効果に関する基礎研究、⑤プラズマ・材料相互作用の理解・制御に重要な周辺プラズマ分布や揺動特性に代表される、先進磁場配位下の周辺プラズマ・データベースの蓄積、などを進めている。

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客員分野である。原則として、各年度頃に担当部門を決め、当該部門の

受入教員の推薦を下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 16-18 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や関連分野教官との密接な連携をとおして行われ、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、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）5 月の研究所改組により、エネルギー機能変換過程研究部門は「エネルギーの機能的利用にとって必要な、エネルギー機能変換の高効率化、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利用の原理・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、エネルギー輸送研究分野、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。

複合機能変換過程研究分野は、エネルギー機能変換に関わる複合過程をエネルギー材料の観点より取り扱い、特に高エネルギー粒子と材料との相互作用や超過酷環境下での材料挙動の理解に基づく材料開発において大きな成果を上げてきた。この間、最新鋭、最高性能の複合粒子照射解析装置（DuET 施設）の建設やマルチスケール材料試験・評価施設（MUSTER）の整備において中心的な役割を果たしつつ、MEXT の戦略的基礎研究プログラムや革新的原子力システム研究開発プログラムを通して低環境負荷エネルギー材料の開発や次世代原子炉材料の開発を進めている。

エネルギー輸送研究分野は、高機能・高品質な光エネルギーの発生・制御、及びその利用による新しい科学技術基盤の開発を目的として、先端レーザーの開発とそれを利用した物質制御に関する研究を進めてきた。基幹装置として Ti:sapphire レーザーをベースとする高強度フェムト秒レーザーシステムを開発し、レーザー誘起配向分子による高次高調波発生過程制御、伝搬レーザーパルスによる表面ナノ構造生成制御など、レーザーと原子・分子、及び固体表面との非摂動論的非線形相互作用、並びに極限時間・空間域での物質制御・機能発現に関する先導的研究を進めている。なお、当該分野は、研究内容との整合を図るために、平成 18 年度より分野名を「レーザー科学研究分野」に変更した。

エネルギー貯蔵研究分野は、エネルギーの変換貯蔵に関わる構造材料の開発研究が進められ、特に「革新的」な原子力材料の開発の観点より種々の鉄鋼材料の高エネルギー粒子線やプラズマ環境における強度特性の評価と材料寿命予測性の向上に努めてきた。この間、低放射化フェライト鋼の開発や「酸化物分散強化鋼」の開発において成果を挙げ、METI の実用原子炉開発研究事業や平成 17 年度からの MEXT の原子力システム研究開発事業での「スーパー ODS 鋼」の研究開発を進めている。

複合系プラズマ研究分野では、附属エネルギー複合機構研究センターと共同で、高性能核融合炉の実現を目指すエネルギー基礎研究の一環として、先進プラズマ閉じ込め装置 Heliotron J を設計・建設し、世界的にもユニークで、かつ新しいパラメータ領域のプラズマ閉じ込め特性の理解に資するため、ヘリカル軸ヘリオトロン配位の最適化に向けた実験的・理論的研究を推進してきた。この間国際エネルギー機関（IEA）による国際ステラレータ実施協定の下で、様々な国際共同研究を実施するとともに、国際ステラレータ比例則共同研究等において重要な国際貢献を果たしてきた。

3.2.1. 複合機能変換過程研究分野

(教授：香山晃、助教授：檜木達也、助手：神保光一)

本研究分野は固体物理学の一分野である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 複合材料や低放射化鉄鋼材料の研究を推進し、核融合エネルギー実現に向けた ITER 計画や 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、軽水炉における IASCC 等の材料関連課題の研究、LWR・VHTR・GFR・SBR 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、革新的原子力システム技術開発事業等での SiC/SiC 複合材料開発の工業化・実用化を目指す活動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新しい学問分野を形成し、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。

3.2.2. レーザー科学研究分野（平成 17 年以前はエネルギー輸送研究分野）

(教授：宮崎健創、助教授：中嶋隆、助手：畑幸一、宮地悟代)

高機能な光エネルギーの発生・制御・利用による次代の科学技術基盤の創出が一貫した研究目標であり、そのための先端レーザー開発とそれらを利用した物質制御に関する研究を進めた。レーザー開発では、新しい光エネルギー機能の開拓を目指して、既設の超短パルス高強度レーザーの高機能化を行うと共に、極限時間域での固体表面制御研究への利用を目的として、高品質な fs 光パルスを出力できるレーザーを開発した。これらを用いた硬質薄膜のレーザーアブレーションの研究において、表面ナノ構造生成と選択的結合構造転移の現象を発見し、物理過程を解明するための基礎研究を行った。その結果、従来原理的に不可能と考えられていたメゾスコピック域のレーザー物質制御技術への展望が拓けてきた。また、高強度 fs レーザーによる分子配向・回復現象を、高次高調波発生を用いて高感度を実時間検出することに世界で初めて成功した。この手法を基に極限時間域における分子制御の研究を進めた。

なお、21 世紀 COE プログラムでは、次代の光・エネルギー変換デバイスに応用できるレーザープロセッシング技術として、上記の発見を基にした固体表面のナノ構造生成・制御手法と新しい表面改質手法の開発を行った。

3.2.3. エネルギー貯蔵研究分野

(教授：木村晃彦、助教授：森下和功、助手：笠田竜太)

当研究分野では、高効率発電プラント用の革新的な構造材料の開発、高エネルギー粒子線照射場における材料挙動評価・予測、原子力発電プラント構造材料の保全に関わる研究

を実施してきた。具体的には、発電効率を上げるための材料開発としてスーパーODS 鋼の開発、イオン加速器を用いた鉄鋼材料およびそのモデル合金の照射影響評価とその挙動予測、軽水炉圧力容器鋼および炉内構造物の高経年化に向けた材料保全研究などである。特に、スーパーODS 鋼の開発研究は文部科学省「原子力システム開発事業」の一環として、大型予算の獲得の下に実施し、最新鋭の大型機器装置を設置し、多くの成果をあげつつある。

3.2.4. 複合系プラズマ研究分野

(教授：佐野史道、助教授：花谷清)

研究所重点領域研究である核融合エネルギーに関する研究（プラズマエネルギー複合領域研究）を、京都大学21世紀COEプログラムを活用しつつ、ヘリオトロンJ装置のプラズマ閉じこめ最適化を実証する立場から、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。更に、荷電粒子の磁場中での案内中心軌道の振る舞いとクーロン散乱を古典及び新古典的枠組みで記述する数値シミュレーションコードを開発し、3Dプラズマの輸送と加熱の理論解析を推進している。これらの実験的・理論的成果は、ヘリオトロンE実験で残された課題である「良好な粒子閉じ込めとMHD安定性の両立性」を探求するため、世界に先駆けて採用したヘリカル軸ヘリオトロン配位（Heliotron J）の新しい研究領域の開拓に大きく寄与しただけでなく、異常輸送の改善、高エネルギー粒子閉じ込め等をはじめとするトラスプラズマ閉じ込めの普遍的諸問題に、先進的な磁場分布制御の観点から新たな知見を与えるものとして期待される。ヘリオトロンJを核融合科学研究所の双方向型共同研究に、さらに国際エネルギー機関（IEA）のもとでの国際ステラレータ実施協定に基づく核融合国際共同研究活動に提供しつつ、多数の国内外の共同研究者の協力を得て研究を推進している。

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り、平成16年度以降、これまでの年次別担当者は資料編（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）5 月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科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、機能性先進材料研究分野（平成 18 年度より、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。

複合化学過程分野は、半導体表面の電気化学的表面改質による機能化、およびレーザーアブレーションや界面現象のレーザー解析などのレーザー界面化学の研究を進めてきた。分子集合体設計分野では、両親媒性分子集合体を用いるナノ材料創成や分離プロセスの応用や、流体系や流体界面構造物性の計算化学手法による解明に取り組んできたが、その後、コンビナトリアル・ケミストリー手法によるバイオ・ナノ材料開発や、ナノ構造体を用いた色素増感太陽電池などの次世代太陽電池開発の取り組みが開始され、現在に至っている。機能性先進材料分野（現 生物機能科学分野）は、当初、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の研究を進めた。その後、高効率物質変換を目指したテラーメイド酵素設計やペプチド素子の開発に取り組んでいる。生体エネルギー分野では、化学・生化学的機能改変による生化学反応の効率化と環境因子と生体との相互作用を中心に、一酸化窒素と遺伝子との相互作用、ペプチド触媒の開発、さらには酵母酵素の改変によるバイオマスからの高エネルギー物質生産や新規な DNA チップの開発に取り組んでいる。平成 15 年（2003）には新たな分野であるナノ工学分野を立ち上げ、界面活性剤を用いてナノ材料を創製し、その機能や構造を詳細解明すると共に、色素増感太陽電池への応用研究を進めたが、担当教員の定年退職に伴い、同分野は平成 17 年（2005）3 月に幕を閉じた。

本部門は改組当時、高度な生物機能を模倣して人工的な高効率物質・エネルギー生産システムを構築するという目標を掲げた。その後、新たに迎えた教員群の補強により、生物模倣に加えて生物そのものを積極的に利用しようという方向が育ってきた。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」においては、本部門教員は太陽エネルギーおよびバイオエネルギータスクに加わり、有機太陽電池を含む新世代太陽電池の開発やバイオプロセスによる燃料生産などのエネルギー研究を推進してきた。吉川暹はプログラム発足時点より、太陽エネルギーのタスクリーダーを務め、さらに、平成 17 年度（2005）より拠点リーダーに選出され、本プログラムの推進に貢献した。これらの活動の結果、材料関係におけるナノ材料研究の進展とバイオ関連研究の進展に伴い、「エネルギー指向型先進的ナノバイオ機能材料およびプロセス」が本部門の共通目標として浮かび上がり、分野間の連携を深めようという気運が盛り上がってきている。

3.3.1. 複合化学過程研究分野

(教授：尾形幸生、助教授：作花哲夫、助手：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、固体－液体や液体－液体界面を利用する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ると共に、それらの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、さらにはレーザーアブレーションの機構解明とレーザー分光による界面構造のマイクロ解析を行ない、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 16 年度以降に得られた主な成果として、シリコン上におけるマクロ孔生成機構に対する新規提案と多孔質シリコン多層膜の形成、シリコン上への光による金属析出形態制御および金属パターンニング、液中に置かれた固体物質からのレーザーアブレーション現象の解明、ヘテロダイン分光法を用いる二液相界面のダイナミック構造解析が挙げられる。これらの研究から、シリコンを鋳型とするマイクロ構造体の作製技術、長いパルス幅のレーザーを用いる液相中の固体表面のその場元素分析への応用を提案している。

3.3.2. 分子集合体設計研究分野

(教授：吉川遼、助教授：佐川尚、助手：鈴木義和)

コンビナトリアル・ケミストリー手法によるバイオ・ナノ材料開発や、有機薄膜太陽電池・色素増感太陽電池の高効率化、高機能光触媒の開発など、環境調和型エネルギーシステムの実現に向けた研究を進めてきた。とりわけ、酸化物ナノチューブやナノワイヤーなどの新規 1 次元ナノ材料を組み込んだ有機・無機ハイブリッドデバイスの開発を中心に、融合的な研究開発を展開し、企業との共同研究（産学連携）に積極的に取り組んできた。21 世紀 COE「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」では、平成 17 年度より吉川が拠点リーダーに選出され、本プログラムの推進に貢献してきた。平成 17 年度には NEDO「太陽光発電技術研究開発革新的次世代太陽光発電システム技術研究開発色素増感太陽電池の新技术先導調査研究」において「色素増感太陽電池の酸化物半導体電極及び素子構造の高度化に関する調査」を行い、平成 18 年度以降は、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」を進めている。また、国際的には、タイとの国際共同研究や研究拠点設置などで中心的役割を担い、国際連携を進めてきた。

3.3.3. 生物機能科学研究分野（平成 17 年度まで機能性先進材料研究分野）

(教授：森井孝、助手：杉本健二)

当分野は、機能性先進材料分野という分野名で、は大久保捷敏教授、森井孝講師、佐川尚助手の教員が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

化に関する研究を進めてきた。平成 17 年 3 月（2005）に大久保が定年退職し、同年 8 月に森井が教授に昇任し、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でいる。平成 18 年 4 月より、分野名を機能性先進材料分野から生物機能科学分野へと変更した。同年 4 月に、杉本健二助手が着任し、機能性ミニチュアタンパク質の構築およびペプチド組織体の構築に関する研究に取り組んでいる。平成 18 年 11 月からは、次世代開拓研究ユニットに着任した藤枝伸宇助手とミニチュアメタン酸化酵素の開発に関する共同研究を行っている。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。

本研究分野では、「第 I 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いる。テラーメイド酵素と新規ナノ材料の創製研究は、平成 16 年に行われた研究所重点領域評価において特に大学で必要とされ高く評価された、環境調和型エネルギーサイエンスとしての新しい潮流となり得る長期的な視野に立った基礎的研究である。

3.3.4. 生体エネルギー研究分野

（教授：牧野圭祐、助教授：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、エネルギー及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的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。21 世紀 COE「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」の中では、バイオエネルギーグループに参画し、バイオマスのさらなる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始めて達成した。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→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、環境関連の研究事項としては、環境物質一酸化窒素（NO）による生物機能障害として、DNA 塩基損傷に関して明らかにした新規損傷塩基が生体内で実際に生物機能に影響を及ぼしている可能性のあることを明らかにし、NO の生物機能への関与に関して分子論的観点から重要な知見を得た。さらに、バイオおよびナノテクノロジーをエネルギー・環境関連研究課題に適応するためには、精密・迅速な大量分析技術が必要とするが、そのような分析技術を達成するために、いわゆる DNA チップ技術とクロマトグラフィー技術を融合させた新規な発想に基づく、生物機能解析装置の開発に成功した。

3.4. エネルギー複合機構研究センター所属分野

(国際流動・開発連携研究推進部 流動開発推進研究領域)

(助教授：岡田浩之、助手：岸本弘立)

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を研究テーマとした。平成 16 年度にイオンサイクロトロン周波数帯加熱実験を開始し、電磁波を用いて高速イオンを生成し、荷電交換中性分子検出器でプラズマ中の高速粒子の計測を行い、高速粒子の生成・閉じ込めについての評価を開始した。平成 17 年度磁場配位依存性についての研究を開始し、その一つのパラメータであるバンピネスについての依存性を明らかにした。これらの結果は 2004 年、2006 年の IAEA 核融合エネルギー会議で報告した。このような粒子解析を行う上でプラズマの電子温度・電子密度分布が基礎パラメータである。これらを十分な空間分解能で測定するためのトムソン散乱計測装置の開発・整備も研究テーマの一つである。この目的のために高出力レーザー、高感度イメージインテンシファイアおよび CCD カメラを備えた計測システムの構築を行った。

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

附属エネルギー複合機構研究センターは平成 18 年 4 月 1 日、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」及び「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、こ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、研究体制の改組・再編を実施した。改組・再編前後の組織構成の比較を表 4.1 に示す。

本改組・再編に至る経緯を述べると、平成 8 年、当時の「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」の統合・再編による「エネルギー理工学研究所」が発足したが、「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、既存の大型装置及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ため「附属エネルギー複合機構研究センター（時限 10 年）」が設置された。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（助教授）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。

本「附属エネルギー複合機構研究センター」発足後、

- 1) 高度エネルギー機能変換実験装置 [Heliotron J および DuET]
(平成 8－11 年)
- 2) 触媒材料創製・機能解析システム (平成 11 年)
- 3) マルチスケール材料評価研究基盤群 [MUSTER] (平成 12－15 年)
- 4) 自由電子レーザー装置 [KU-FEL] (平成 15 年)
- 5) 極短パルス高強度レーザー装置 (平成 9－14 年)
- 6) 超小型静電慣性核融合装置 (平成 8－18 年)

などの中・大型基幹装置類が導入整備され、平成 16 年度研究所外部評価では、プラズマエネルギー、バイオエネルギー、光エネルギーの 3 つの重点研究領域で世界的に優れた研究成果を出してきたとの評価を受けた。また研究環境の整備について、建屋整備も進め、平成 16 年 12 月には、研究所北 2 号棟の全面的な大改装を行い、上述の DuET、MUSTER、ならびに放射線シールドを必要とする KU-FEL をも格納する「量子光・加速粒子総合工学研究棟」を整備完成させた。さらに、北 1 号棟並びに南 1 号棟の整備・改修についても年

度計画をたて、平成 18 年度末に大幅な改修を終えた。とくに北 1 号棟は、エネルギーナノサイエンス研究棟として整備され、従来各研究分野が分散して管理していた研究機器・装置群の内、原子間力顕微鏡 (AFM)、紫外・可視分光高度計 UV-4000、筒状電気炉、X 線回折測定装置、BET 吸脱着測定装置、天秤、ガスクロマトグラフィー、プラズマ処理装置、キセノンランプ光照射装置、電子拡散寿命測定装置、レーザー構成装置、X 線回折測定装置、水晶発振子マイクロバランス、キセノンランプ光照射装置、蛍光分光光度計、蛍光寿命測定装置、原子間力顕微鏡 (AFM)、ガスクロマトグラフィー、液体クロマトグラフィーなどの研究機器・装置群が集中配置された。

これらのセンター研究装置群の新設・整備により、により多くの研究成果を出してきており、平成 8 年の発足以来平成 15 年度までの 8 年間で、総発表件数は 4,011 件（そのうち原著論文数 1,022 件）を数えた。

以上の経緯からセンター発足時の当初の目的は概ね達成されたと言えるが、発足当時の情勢に比べ、現在のエネルギー資源、温暖化などの問題はますます顕在化しており、喫緊の解決すべき問題となっている。このような状況において、社会のエネルギーに対する新規ニーズに応え、これまでの成果を継承・発展させ、先鋭的かつ独創的な研究活動を効果的に展開していくためには、センターの研究体制を見直し、戦略的・機動的な運営が可能となるような体制に改組・再編することが不可欠かつ緊急の課題となってきた。

近年の中国を含む北東アジアにおけるエネルギー需要とそれに伴う二酸化炭素排出量の急増問題は、2005 年 2 月の地球温暖化防止京都議定書 (COP3) の発効にもかかわらず、地球社会の喫緊の解決すべき課題となりつつある。深刻さを増す地球規模のエネルギー・環境問題の解決のためには、環境調和型の新規エネルギー源の開拓、及び新規エネルギー出現までの人類生存を保障するエネルギー資源の有効利用システムの実現が不可欠であり、これらの目標達成に向け、長期的視点に立脚した研究開発が必要不可欠である。また、総合科学技術会議においても「環境・エネルギーに対応したナノテクノロジー」が分野別推進戦略にあげられており、とくに持続・再生可能型エネルギーシステムの構築に直接応用できる革新的な基盤技術を創製するため、ナノプロセスとバイオテクノロジーを融合した新学術領域「エネルギーナノサイエンス」開拓への挑戦が大学に求められている。

「エネルギー複合機構研究センター」の装置建設・施設整備が進み、センター活動の中で特徴のある成果が得られるようになった段階において、上記の社会的要請に応えるため、センター発足以来これまで推進してきた環境調和型エネルギーシステム構築の複数の研究領域を、それぞれの研究展開に最も相応しい研究体制に改組・再編して、これまでに当附属センターが培ってきた研究基盤施設・装置を最大限に活用し、さらなる飛躍的な進展を図る必要があった。

そこで、新たな二つのミッション（先進プラズマエネルギー複合領域研究、エネルギーナノサイエンス研究）を定義し、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」での設備整備をベースに、先端的・先導的共同研究等を通して先進エネルギー領域における指導的人材を育成し、また、国際流動・開発連携研究を強力に進めるため、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・環境問題に対応できるエネルギー理工学研究ネットワークの拠点形成を目指すこととした。このセンター組

表 4.1 改組・再編前後の組織構成比較表

改組・再編前					改組・再編後					
部門名等	定員				部門名等	定員				
	教授	助教授	助手	計		教授	助教授	助手	計	
センター長	(1)			(1)	センター長	(1)			(1)	
「エネルギーの生成・変換・利用における物理的並びに化学的複合過程の機構及び機能の解明」 センター分野	0	1	1	2	国際流動・開発連携研究推進部	推進研究領域 流動開発	教授	助教授	助手	計
							0	1	1	2
						研究クラス ター領域	双方向型共同研究			
							マルチスケール材料工学研究			
					利用推進室 共同研究 *21世紀COE等	21世紀 COE 共同研究				
						エネルギー複合領域 研究推進部 *先進プラズマ	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					
					ナノサイエンス 研究推進部 *エネルギー	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 デザイン研究領域				
技術室	教務職員	技術専門 職員	技術職員		技術室	教務職員	技術専門 職員	技術職員		
	1	7	3			1	7	3		
管理室	非常勤 2				管理室	非常勤 4				

*固定研究分野教員による兼任

組織の改編により、それぞれのプロジェクト研究に対応する組織がより明確化し、併せて法人化後、より重要となったアカウンタビリティの所在を明確にできることとなった。なお、平成16年度の「京都大学エネルギー理工学研究所在り方検討委員会」による外部評価では、研究所が提示した改組拡充案について、『研究所の従来の実績・研究成果及びそこに含まれる分野・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』との評価を受けている。

センター改組・再編後、1年が経過したが、プロジェクト研究体制の整備も順調に進みつつあり、各推進部を中心に目的とするミッションの達成に向けた取り組みが本格化している。改組・再編後、更にセンター共同研究の活動強化に向けて、引き続き教授会等で議論が積み重ねられてきており、京都大学の中期目標・中期計画の進捗状況調査と年度毎の点検評価のなかで、センター共同研究体制の強化に向けた不断の取り組みが続けられている。とくにプラズマエネルギー研究における核融合科学研究所との双方向型共同研究の推進については、平成17年、平成18年に渡り、核融合科学研究所における外部評価および文部科学省科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会原子力分野の研究開発に関する委員会「核融合研究作業部会」における外部評価が行われ、ともに高い評価を得ている。京都大学21世紀COE活動については、「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」を目標とする取り組みが推進され、今後は国際新エネルギー連携機構に引き継がれ、拠点活動を展開していく計画である。専任教員が担当する国際流動・開発連携研究推進部流動開発推進研究領域の設置により、これらの活動を支援するセンターの性格、目標が、これまで以上に明確になったことで、センターにおける国際共同・連携融合研究がより活性化されたと評価される。新規ミッションをリードするエネルギー理工学研究所の中核的研究グループの活動の更なる活性化に向けて、国内外との連携協力が蓄積され拠点機能が着実に強化されつつある。このような視点から、以下各研究推進部の現状・課題・展望を記す。

4.1.1. 研究推進部における研究の現状・課題・展望

4.1.1.1. 国際流動・開発連携研究推進部

国際流動・開発連携研究推進部は、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。以下に示す2領域、1推進室で構成されている。

流動開発推進研究領域

本領域はセンター全体の運営ならびに主に国際共同研究の企画運営を行い、エネルギー複合機構研究の国際的な展開に必要な研究情報の収集・整理およびセンター共同研究・共同利用の企画・管理・運営を統括している。本研究領域においては、とくに専任の教員を配置し、エネルギー理工学研究に関わる生存基盤科学研究開発のシーズ提示とニーズ探索を推進し、外部機関との接点における責任を明確化している。外部機関との連携の1つとして、研究所は現時点で国外22研究機関と科学技術研究協力協定を締結している。

また、研究所は、外国人客員分野を活用して、これまで多くの著名な外国人研究者を招聘してきた。国際流動・開発連携研究推進部では、センター活動に必要な外国人研究者の恒常的な招聘を図ると共に、競争的資金による招聘を積極的に推進する計画である。さらに、これまで研究所が主催した国際会議等の国際的な情報発信も、国際流動・開発連携研究推進部の重点活動として継続的に実施して行く。

(公募)採択課題件数

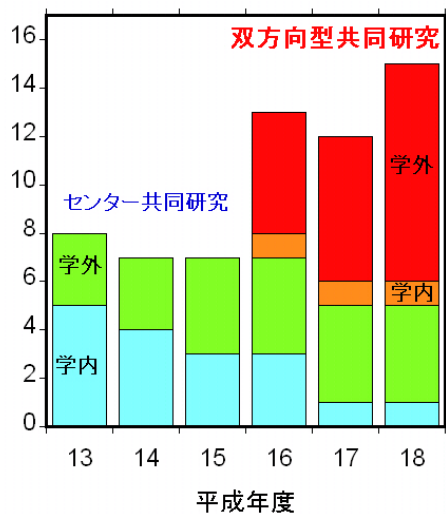


図 4.1.1 公募採択課題数の年次統計

研究者数

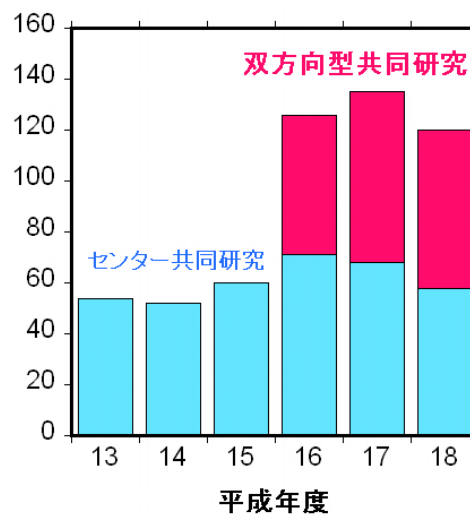


図 4.1.2 参画研究者数の年次統計

連携融合研究クラスター領域

本領域はセンターにおける全国共同研究（独立した研究所が連携する仮想的研究組織体の共同研究を含む）の企画運営を行っている。具体的には、他研究機関との連携・融合による学際的・先進エネルギー理工学研究を推進し、エネルギー実用化中核研究および産業応用研究として時限展開を図りつつある。また、社会的要請に即応的に対処するため、関連する研究分野の専門家集団を形成する国内の2、3の連携機関を特定した時限プロジェクト研究などを機動的に遂行することを目的としている。当面、

- (1) 核融合科学研究所との連携強化に基づく、当センターのヘリオトロンJ装置を全国的に活用する双方向型共同研究によるプラズマエネルギー研究
- (2) 当センターの MUSTER や DuET を活用するマルチスケール材料工学研究（プロジェクトリーダーは研究所教員が兼任）による先進エネルギー材料研究

を推進しているところである。

とくに、(1) の双方向型共同研究については、京都大学の中期目標・中期計画に記載され、その実施機関としてのエネルギー複合機構研究センターの研究・教育活動の重点課題となっている。平成16年度の双方向型共同研究の開始に伴い、センター共同研究（ヘリオトロンJ関連）への所外からの公募採択課題件数（図4.1.1）および参画研究者数（図4.1.2）の増加によって、センターにおける研究・教育活動の活性化に大きな効果を与えた。

21 世紀 COE 等共同研究利用推進室

本推進室は、21 世紀 COE プログラムにおける設備整備をベースに環境調和型エネルギーシステム構築のための産官学機関との共同研究利用を推進してきた。また、将来も展望に入れながら 21 世紀 COE 拠点形成プログラムをベースに、今後の「国際新エネルギー連携機構」を中心とする拠点活動において、新しいアイデアや解析手法の実用化を視野に入れた関連する産官学機関との共同研究・連携協力・人的交流を支援・推進する予定である。

4.1.1.2. 先進プラズマエネルギー複合領域研究推進部

先進プラズマエネルギー複合領域研究推進部は、未来エネルギーシステム創出につながる挑戦的なプラズマエネルギー研究をとりあげ、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へと展開して行くことを目標としている。とくに、関連研究グループが培ってきた、ヘリオトロン J、DuET、MUSTER などを中心とするハードおよびソフト面での特色を活かして、当該分野研究の一層の個性化ならびに高度化を通じてプラズマエネルギー技術の社会貢献を目指している。本研究推進部は、以下の 3 研究領域で構成し、それぞれにプロジェクトリーダーを置き、研究所教員（客員も含む）が兼任する。プロジェクトリーダーのもとに、研究所内外からの研究協力者を集め、本務における職位にとらわれず、プロジェクトを遂行する体制としている。先進プラズマエネルギー制御研究領域では、自律系プラズマの基礎的挙動の解明とその制御法の開発研究を目的とし、先進プラズマエネルギー生成の学理を実験的・理論的に探求する基礎学術研究を重点的に推進している。また、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、双方向型共同研究課題「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、これを推進している。プラズマ・水素・材料融合研究領域では、水素サイクルにおけるプラズマ反応プロセスの最適化とプラズマ・材料統合制御の高度化を目的としている。プラズマ熱流束・粒子流束の効果的な輸送や水素（燃料）サイクルの構成法に関する学理の体系化及び先進的ダイバータ機能の原理検証に関する基礎研究を行っている。またプラズマエネルギーが材料と効果的な相互作用を通じて輻射エネルギーや熱エネルギー等へ変換される多様な複合エネルギー変換過程の学理を解明し、プラズマ・材料相互作用の高度化を実現する基礎研究を展開している。プラズマエネルギー創成応用研究領域では、プラズマエネルギー利用の高度化とその応用基盤形成および促進を目的としている。プラズマエネルギーの高効率変換やクリーンエネルギー創生へ向けた基盤技術開発、他分野ならびに産業界への応用、波及効果ならびに社会貢献を目指したプラズマ応用研究を推進している。

4.1.1.3. エネルギーナノサイエンス研究推進部

持続・再生可能型エネルギーシステムの構築では新しいコンセプトにもとづく革新的な機能性材料が求められている。本研究推進部では、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、太陽光利用型先進的ナノバイオ機能材料の創出を行うことを目標としている。研究所重点領域研究および京都大学 21 世紀 COE 拠点形成で行われてきた特色ある研究成果ならびに触媒材料創製・機能解析システム、ナノ構造体創製光電変換特性評価装置、太陽シミュレーター、電子顕微鏡、走査プローブ顕微鏡などを中心とする充実した設備に加え、テラワット級フェムト秒レーザー装置や KU-FEL 装置を加え、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する努力が払われつつある。本研究推進部は、以下の 3 研究領域で構成し、それぞれにプロジェクトリーダーを置き、研究所教員

(客員も含む)が兼任している。プロジェクトリーダーのもとに、研究所内外からの研究協力者を集め、本務における職位にとらわれず、プロジェクトを遂行する体制としている。ナノ素子創製研究領域では、低コスト高効率な次世代太陽電池材料などに応用可能なナノ素子テララーリング手法の開拓と太陽光利用型ナノバイオ素子創製を目的としている。半導体表面界面ナノ素子テララーリング手法の開拓、および、溶液を出発原料とする太陽光利用型ナノ素子・ナノ材料の創製を行っている。また、ナノサイズの構造に起因する新しい現象の実証とその解析をもとにした新規な機能性ナノ素子の創製を実現する基礎研究を行っている。これらを通じてエネルギーナノサイエンスの学理の確立と世界への発信を目指している。光ナノ反応ダイナミクス研究領域では、太陽光利用型ナノ素子、ナノバイオ機能性材料の光反応ダイナミクスの解明による光エネルギー利用の高度化を目的としている。物質をナノメートルレベルで制御するための量子放射源の完成と、レーザーによるナノ構造高度機能性材料形成を可能にする新技術の創出、および光によるナノ素子の素反応ダイナミクスの解明を実現する基礎研究を展開するとともに、その成果をナノ素子創製およびコンビナトリアルマテリアルデザインへと応用する研究が推進されている。コンビナトリアルマテリアルデザイン研究領域では、化学・生物型コンビナトリアル手法を応用した次世代型太陽電池材料や太陽光利用型ナノバイオ機能性材料などの設計および創製を目的としている。次世代型太陽電池および太陽光を利用したメタン／メタノール変換を行うテララーメイド人工酵素の創製を実現することにより、環境適合型新物質・新材料創成の学理の確立を行うとともに、高度機能性材料をエネルギー生産・物質変換に応用することにより、自然エネルギーへの転換を加速し、持続可能社会の実現に貢献する研究を推進している。

エネルギーナノサイエンス研究推進部は、当研究所の設立以来重点領域として取り組みを進めてきたバイオエネルギー重点領域研究と光エネルギー重点領域研究での成果を中心に、持続・再生可能型エネルギーシステムの構築に必要な、光・ナノ・バイオテクノロジーを融合した新学術領域を開拓するものである。平成 18 年度に、エネルギーナノサイエンス研究棟に整備された研究機器・装置群は、エネルギーナノサイエンス研究推進部において共用設備として利用する事が可能であるため、それぞれの研究領域におけるプロジェクトの推進を大いに加速するものと期待される。

新学術領域としてのエネルギーナノサイエンスをどのように創成するかは、学術的な側面からの今後の課題である。エネルギーナノサイエンス研究推進部で目指す「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「太陽光利用型先進的ナノバイオ機能材料の創出」は、エネルギー理工学研究所の特色を活かした研究領域である。これらの研究領域においては、実用的な研究を短期的・集中的に推進するとともに、基礎的な研究を推進することによる新しい学理の創出が重要な課題となる。

現在推進中のエネルギーナノサイエンス研究推進部のプロジェクトの多くは、外部資金により研究費がまかなわれている。平成 18 年度は、科学研究費補助金として、基盤 A (2 件)、基盤 B(3 件)、基盤 C (1 件)、萌芽研究 (1 件)、若手研究 A (1 件)、若手研究 B (1 件)、特定領域研究 (1 件) を獲得するとともに、科学技術振興機構 (1 件)、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1 件) からの外部資金を得ている。今後とも、基礎研究と応用研究それぞれに対する外部資金の獲得による活発なエネルギーナノサイエンス研究の展開が望

まれる。

しかし、今後のエネルギーナノサイエンス研究推進部における活動において、早急に解決すべき問題は、外部資金では充当できないこれら共通研究機器・装置の保守費用および管理・保守に当たる人的支援の確保にある。また、大型プロジェクトを遂行する上での実験室面積を確保することも必要であるため、新しい人材配置案等を検討する必要がある。

4.1.2. センター共同研究

4.1.2.1. センター共同研究の位置付け

エネルギー理工学研究所では、各部門・分野間で密接な連帯をもって研究所の設置目的に即した研究を進めることが必要である。このような研究を実施するためにエネルギー複合機構研究センターが設置されており、共同研究を通して研究所の重点研究課題を推進する。平成8年5月の研究所発足にあたり、設置目的を具現化するために、重点研究課題（プロジェクト）を設けた。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。これに伴い A：研究所プロジェクト「エネルギー複合機構研究」、B：部門間プロジェクト、C：部門内プロジェクトの3カテゴリーを構成した。平成12年、研究所発足から4年後に、教員ならびに研究体制の充実に伴って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「研究所の重点推進領域」を設定した。その後、平成16年度を開始年とする研究所の第一期中期期間年次計画が策定され、その柱となる重点複合領域研究が設定された。これに伴いセンターにおける研究計画もこの推進を基本として行うこととなった。すなわち、

A1. プラズマエネルギー複合領域研究

プラズマエネルギー利用の高度化を目標に、プラズマ・水素サイクル・材料融合研究の新たな学域（プラズマエネルギー複合研究領域）の開拓に挑戦するため、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」を推進する。センター共同研究では、プラズマ閉じ込めの高性能化に関わる先進プラズマエネルギー生成の基礎学術研究、プラズマ熱流束・粒子流束の効果的な輸送や水素（燃料）サイクルの構成、先進的ダイバータ機能の原理検証のための基礎研究、プラズマ・材料相互作用制御の高度化・耐極限環境先進構造材料開発のための基礎研究などに関する研究を推進する。

A2. バイオエネルギー複合領域研究

環境調和型エネルギー・物質変換システムの開発を目標に、バイオテクノロジー、化学を基盤とするバイオミメティックテクノロジー、及びナノテクノロジーを融合させた、新たな基礎学術研究としてのバイオ・ナノテクノロジーの開拓に挑戦する基盤研究ならびに萌芽研究を推進する。センター共同研究では、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、バイオマス資源のクリーン燃料化、そして生物型酵素を用いた高効率物質変換反応の開発を目指して、生物機能あるいは

その人為的改変を利用した手法、並びに、生体模倣の手法を用いた環境調和型エネルギー・物質変換システムの開発と、それに係わる生物機能素過程の解明と改良、および物質・エネルギー利用に由来する環境変化の解明と対応に関する研究などを推進する。

A3. 光エネルギー複合領域研究

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」の拠点形成を目標に、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、それを利用することによって新たな科学・技術領域の創出を目指す分野横断的な学際的研究を重点的に推進する。センター共同研究では、従来から開発を続けてきた広帯域波長可変・偏光可変機能を備えた小型高輝度な自由電子レーザー及び位相制御機能を備えた超短パルス高強度レーザーの開発と高性能化、その利用に不可欠な光エネルギービームの制御技術の確立、これらの光エネルギービームを利用したナノ構造高度機能材料の形成技術や光反応ダイナミックスの解明、種々のレーザープロセッシングや化学反応制御技術の研究、あるいはコヒーレントな光エネルギーと物質との特徴的な相互作用などに関する研究を推進する。

である。これらの研究領域に沿った課題の研究を推進するため、各重点領域研究課題それぞれについて、「基盤」、「奨励」、「企画調査」の3種に分類したセンター共同研究を募集してきた。センター共同研究には、平成8年度の開始以来、年度ごとに約50件の申請があり、基盤以外は、ほぼ全ての申請が採用され共同研究が行われた。申請書のうち、所外からの申請の割合は約30%あり、この制度を利用した共同研究が広く学内、学外に渡って実施されていることを示している。

平成18年度の附属センター改組により、従来プラズマエネルギー、バイオエネルギー、光エネルギーの3つの重点課題に取り組んできたセンター研究を「プラズマエネルギーに関する学理・技術の新領域開拓」及び「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、国内外の研究機関との連携融合研究を一層強化することとなった。その結果、センターは3つの推進部から構成される組織になった。すなわち

- S1. 国際流動・開発連携研究推進部
- S2. 先進プラズマエネルギー複合領域研究推進部
- S3. エネルギーナノサイエンス研究推進部

である。センター共同研究は研究所の重点複合領域研究を推進するために継続的に実施されており、平成16年度からはA1からA3に分類され公募されている。共同研究の詳細については、資料編(II)第2.2節を参照されたい。

4.1.2.2. 課題と展望

センター共同研究は、研究所で議論され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A1からA3の3課題についての公募研究を行ってきた。また、平成18年からはセンター改組に伴いS1からS3の3推進部制に移行しセンターの更なる進展を図っている。同時に、

中期計画に挙げられた A1 から A3 の他に S1 から S3 のどの推進部に属す研究かを踏まえた公募研究に切り替えた。

しかしながらセンター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、共同研究に充当できる予算総額は漸減している。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が、難問である。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 年度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。

このような制約下ではあるが研究所内部の研究者のみならず外部の研究者の定常的な努力および協力に支えられてセンター共同研究は行われてきた。センターは研究所の研究者に研究の場を提供する役割を担っている。研究所の重点領域研究を円滑に行うためおよび研究所のアクティビティを内外に知らしめるため研究所共同研究の負うところは大である。運営に関してはセンター研究計画委員会、センター予算委員会を中心に順調に行われており、予算充実の方策を探ることが重要である。

4.2. 21 世紀 COE プログラム

本 COE は、1997 年の気候変動枠組み条約第 3 回締約国会合（COP3）において採択された京都議定書の要請に答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てきた。

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てきた。一方、教育拠点形成では、特に、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てきた。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てきた。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てきた。なお、平成 17 以降、本研究所吉川暹教授が本プログラム拠点リーダーを務めてきた。本 COE プログラムの成果は、同プログラムホームページのほか、別途報告書が出されることになっているので、それらを参照願いたい。以下では、当研究所教員が特に中心的に関わった研究分野の成果を簡単に紹介する。

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、1D ナノ材料による超階層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、人工太陽とも言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、バイオマスの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始めて達成した。

国際連携ではアジアとのパートナーシップが取り分け重要であることから、2003 年度にバンコクオフィスをバンコク市内に設けるとともに、既に協力協定を結ぶラジャマンガラ工科大学 (RIT) 内に国際共同研究のための実験室を開設し、以後タイ在住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。2004 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、バンコクオフィスを拠点に、タイにおける COE の国際事業などを共催した。また国際スクールをラジャマンガラ工科大学 (RIT) のパツンタニキャンパスで実施した。12 月には HuaHin で、JGSEE と (エネルギー環境合同大学院大学) の共催による 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。また、RIT 内に設けた共同研究ラボを整備し、バイオマス資源量の調査や太陽エネルギー利用などの共同研究をスタートした。その一環として環境適合型材料開発に向けラボ拠点長のソンマイ工学部副学部長を招聘し、エネルギー材料研究における共同研究を開始した。2005 年度にはバンコク拠点において太陽エネルギーなどの新エネルギー技術開発をすすめるとともに、アジア地域との連携をすすめた。特に、タイ在住の調査専門員の協力のもとで、バンコク周辺の大学との研究協力を行った。KMUT (キンモンクット大学) や JGSEE、RIT において、京大での研究活動を紹介するとともに、大気汚染物質サンプルの微細構造・成分調査などを共同で進めた。2006 年度は、JGSEE や RIT などの関連する大学との連携事業を実施した。さらに、海外拠点における情報収集、研究交流の成果をもとに、タイにおける COE の国際事業として 11 月にバンコク市で第二回目の JGSEE と京大の国際シンポジウムを開催した。多数の参加者が集まり海外拠点を足がかりにした活動の成果と、アジアにおいてのこれまでの活動が根付いたことを感じさせるものとなった。

本プログラムは、平成 18 年度で終了したが、今後、これまでの COE 活動を継承し、さらに発展させるべく、「国際新エネルギー連携機構」構想を計画している。

4.3. 日韓拠点大学方式学術交流事業

4.3.1. 目的

日本学術振興会の支援により、平成10年度より韓国ソウル大学との間で拠点大学方式による学術交流事業を実施している。日本と韓国は、地球上でもっともエネルギーの伸び率の高いアジアにあり、ともにエネルギー先進国であると言われている。本交流事業の主たる目的は、長い交流の歴史を有する隣国同士の日韓両国がエネルギー理工学の広範な領域において協力し合い、人と情報を交換しながら、中長期的視野からアジアと世界のエネルギー問題を考え、解決に向けての有効な指針を示すことである。

本交流計画ではエネルギー理工学に関して幅広く情報交換及び討論を行い、両拠点大学を核とする具体的な研究協力を進めることとしている。これらを通して、高品位エネルギー源の開発と先進エネルギーシステムへの応用や核分裂・核融合エネルギーの発生と利用、先進エネルギー材料の基盤および開発研究、クリーンエネルギー生産のための新規なバイオエンジニアリングシステムの構築、水素や燃料、電池などの先進的なエネルギー媒体、エネルギー変換技術など、環境適合型の先進的なエネルギーシステムに関する理学・工学の発展に寄与することが主な研究目標である。工学的に重要な材料開発活動との協力関係を深めることも目的の一つである。本計画で開発される先進エネルギー材料は、機械・電子・航空・土木などの多彩な工学分野への応用も期待されており、これらは日韓セミナーの開催や成果報告年報を通して広く還元する計画である。

以下の四つの研究テーマを設定し、各々専門的なサブテーマを設けることにより、研究を深く幅広く実施している。

(1) 高品位エネルギー源の開発と先進エネルギーシステムへの応用

- 1-1) 相対論的電子ビームによる高輝度放射の発生と先進的利用
- 1-2) プラズマ中の基礎課程とその応用
- 1-3) プラズマ科学・工学

(2) 先進エネルギーシステム材料

- 2-1) 超電導材料の大型応用調査研究
- 2-2) 原子力発電所の運転・保全技術の高度基盤化
- 2-3) 先進エネルギーシステム材料研究への電子顕微鏡の応用
- 2-4) 環境誘起高経年化劣化機構



テーマ:エネルギー理工学

期間:1998-2007(10年間)

拠点校:日本側一京都大学、韓国側一ソウル国立大学

参加機関数:日本側一60、韓国側一70

交流数:毎年110~130件

成果:セミナー、夏の学校、共同研究、共著論文(1000以上)

2-5) 核融合炉材料理工学

(3) 次世代原子力エネルギーシステムの開発研究

4-1) 先進燃料サイクル

4-2) 革新的原子力技術開発と材料・工学確証

4-3) 先進的核エネルギー変換

4-4) 先進的原子炉概念

(4) クリーンエネルギー生産システムに関する開発研究

3-1) クリーンエネルギー生産システムに関する開発研究

4.3.2. 日韓拠点方式学術交流事業の成果

拠点大学によるエネルギー分野の研究交流は、京都大学とソウル国立大学の間で平成 10 年に始まり、ますます活発に活動を展開しています。日韓交流日韓両国のエネルギー問題の構造は類似しており、両国の先進的なエネルギー技術への期待、関心は高く、この分野での研究協力には共通の動機が存在すると言える。しかし、大学や国の研究機関の研究者の間の学術的な交流については、よくいわれる「近くて遠い国」である状況はここでもみられ、両国とも国際協力といえはこれまでは欧米相手が中心であったため、拠点大学による直接の交流の確立は相手を知ることから始め、次第に関係者の努力によってネットワークが作られて行く、という経過をたどってきた。

交流は、各分野で、当初は情報交換、相互に交流の相手をまず探し、ついでその研究設備、能力、特色を調べ、それから実際の共同研究に入る、という段階で進められた。当初は京大とソウル国立大の間が中心で、いくつかの分野で相互に対応する研究組織が見つからない、という例もあり、また研究レベルの差への懸念もあったが、その後協力の進展とともに協力は実際の研究活動の活発な現場へと急速に対象が広がり、現在の参加大学・機関は各 70 程度にのぼっている。大学だけでなく、韓国の原子力、核融合研究の中核となる韓国先進科学技術大学(KAIST)、韓国原子力研究所(KAERI)、韓国基礎科学研究所(KBSI)などを加えて、より強力な研究活動に発展して来ている。これまでの実績を表にまとめた。内訳を見てわかるように、研究者交流からはじまって、4 年次以降はほとんどが共同研究になっており、毎年両方向に 110-130 件程度とおそらく拠点方式では最多の派遣数がある。距離が近いことを考えても大変な数であり、共同研究の成果は共著論文などとなって、論文、プロシーディングスなど合計 1000 報以上が日韓両国の研究者名で発表されている。詳細は、資料編 (II) 第 2.5 節を参照されたい。

研究テーマは広範なエネルギー分野に広がっており、それぞれに特徴ある協力活動が進められているが、特に先進エネルギー材料の共同研究は、相互に相手の特色ある照射装置を利用した協力研究が進められており、日本の超高压電子顕微鏡とイオン加速器を連結したマルチビーム型超高压電子顕微鏡による材料照射研究設備や、韓国側の原子炉による材料照射などのように、かなり大規模な施設の相互利用が進んでいる。また、高品位エネルギーに属するプラズマ核融合分野の研究でも、相互の特色ある装置を利用した共同研究

が開始されており、たとえば、ミラー型と呼ばれるプラズマ装置では韓国に HANBIT、日本には GAMMA-10 という装置があり、トーラス装置としては日本側の Heliotron J や LHD と建設中の韓国の KSTAR トカマクのように、特に韓国側の最近の設備、人員の充実は目を見はるものがある。

特筆すべきは、本交流の若手研究者育成への貢献である。多くの日韓合同セミナーが、この CUP プログラムのメンバーが中心となっていて行われているが、相互に講演者を招聘しあつての交流が進み、特に学生を交えて 100 名規模の夏の学校を 2 回、平成 13 年度と 17 年度実施した。また、短期間の交流をきっかけにわが国に来る韓国からの留学生の数が増加しており、博士課程などに在学して研究生活を送っている。次代を担う若い研究者が不足しがちな日本の研究が活性化する一方、留学生が韓国に帰国して研究の中核となり、その研究拠点から次の学生を派遣するという好循環が発生している。これも長期的なアジア地域の研究レベルの向上を意図する交流プログラムの趣旨にふさわしい成果であり、長い目で見ればアジア地域での学術レベルの向上と活性化、学術団体の国際化の点で、きわめて有意義な展開といえる。

このような、人のネットワークを作り、それが世代の間で循環するような協力は、成果を挙げるまでに長い年月が必要である。その間、継続的な人と資金の投入が必要であり、多くは関係者の個人的な努力や献身のおかげもあって、本交流は順調な成果が上がってきた。最近では交流は日韓を軸に、中国など近隣の国にも広がりつつある。

(なお、本事業の詳細は、<http://cup.iae.kyoto-u.ac.jp/default.htm>で公表されている。)

4. 4. その他の研究交流事業

4. 4. 1. その他の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)

上記日韓拠点大学方式学術交流事業や、タイとの国際交流を積極的に進めています。後者においては、平成 13 年には、エネルギー理工学研究所とラジャマンガラ工科大学 (RIT) との間で科学研究協力協定が締結され、環境・エネルギーと材料に関する国際会議の共同開催など、日タイ双方向の交流が盛んに行われています。平成 17 年 4 月には、第 3 回となる国際会議をタイ・チェンマイにて開催した。また、21 世紀 COE プログラムの国際エネルギー情報センター事業の一環として、平成 15 年 11 月にタイ・バンコク市内にオフィスを、また、バンコク近郊の RIT 本部キャンパス内には共同研究実験室を開設し、共同研究の場として広く活用している。現在では、交流の輪はさらに広がり、タイ科学技術開発庁 (NSTDA) やタイ環境・エネルギー連携大学院大学 (JGSEE) 等との国際交流も盛んに行われている。

これらのほか、国内外の研究機関と数多くの研究協力協定を締結し (資料編 (II) 第 2.5 節参照)、共同研究の推進や研究者交流の支援を行ってきた。既存の協定に対しても、必要に応じ、その見直しを行い、研究所の研究内容に合致した内容の強化に努めている。例えば、平成 18 年度、CIEMAT (スペイン) 核融合部門との研究協力協定を見直し、従来のプラズマ研究から、広く核融合研究に関する研究協力へ発展させた。また、研究成果については積極的にシンポジウムを主催し (資料編参照)、外部機関との協力関係の強化・拡大に努め、先進エネルギー研究の成果の公開を行っている。

4. 4. 2. 交流事業の課題と展望

これまでの協力協定は主に協力代表者同士の努力により推進されてきたが、今後はこれらの協力協定による成果を有機的に活用しエネルギー理工学に関する学際的・独創的な新領域を開拓することも視野に入れ、附属エネルギー複合機構研究センター改組にともない誕生した国際流動・開発連携研究推進部を中心に、一層の交流を深めていく予定である。

5. 中期目標・中期計画の現状と展望

平成 16 年度外部評価において、「研究開発のロードマップを作成し、可能な範囲で計画にマイルストーンを設定する必要がある。」との指摘を受けていたが、国立大学法人として提出を求められる中期目標・中期計画の策定は、長期的視点でのロードマップとしては不十分な点があるとは言え、「研究開発のロードマップ」に対する意識改革の良い機会となっていると言える。研究所では、大学並びに研究所の中期目標・中期計画に関して、「第一期中期目標・中期計画関連資料集」（別冊資料）を作成し、教職員に配布することにより、中期目標・中期計画に対する意識の向上を図っている。

中期目標・中期計画の進捗状況に関しては、年度毎に「第一期中期計画及び年度計画の進捗状況並びに事業年度に係る業務の実績に関する調査」が実施されており、これに回答する形で年度計画の達成状況のチェックが行われている。研究所では、この調査に基づき、各年度始めに、前年度の実績と当該年度の施策目標をまとめた「第一期中期目標・中期計画関連資料集」補遺版を作成、教職員へ配布し、年度計画実現へ向けた注意を喚起している。平成 18 年度までの進捗状況並びに達成状況の詳細については、この補遺版を参照願いたい。研究所単独で実施可能な項目に関しては、殆どの項目において、順調に進行していると言える。

中期計画策定に当たっては、事前に十分な議論を行ったとは言え、急速に進歩発展する学術的状況、また急激に変化する社会的要請などに的確に対応するには、とくに研究面の計画においては、若干の軌道修正も必要な場合もあるであろう。平成 19 年度からの第一期中期計画後半に当たっては、この点にも留意しながら、前半での研究成果に立脚し、かつ柔軟な計画遂行に精力を傾注する必要がある。

6. おわりに

平成 16 年度からの大学法人化に伴って開始された第一期中期目標・中期計画も半ばを過ぎ、中期目標の達成に向け、また、第二期中期目標・中期計画の具体的策定に向けた議論が急務となっている。一方、第 3 期科学技術基本計画や最近の研究のあり方等に関する国での議論など、外部環境は大きく変化してきておりいる。さらに、京大宇治地区研究所群は、生存基盤科学研究ユニットに代表される「生存基盤科学」のキーワードの下、それぞれの特長を活かして研究を推進、発展させていくことが望まれている。本研究所は大学とともに協力してこれらの動きに対処して行くことが基本であるが、研究所としての独自の観点からも今後の学術研究、とくに緊急を要するエネルギー問題解決の推進に貢献すべく自己努力を強化する必要があるのは言うまでもない。このような時点においては、自己点検・評価は従来以上に重要な意義をもつものと考えられる。当委員会は、本研究所、ひいては大学全体の発展のために、今後の課題の提示とその解決に向けてより充実した提言を続ける所存である。

平成 19 年 4 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

7. 参考. 平成 16 年度「在り方検討委員会」報告書において提示された課題等

平成 17 年 3 月の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受け、研究所運営、教育・研究活動の改善計画に反映させ、その改善に努めてきた。ここでは、同外部評価において示された課題並びに留意事項を再掲する。それぞれの項目に対する対応は、他章に記したとおりである。

7.1. 研究所の理念及び目標設定

- 長期目標と中期目標の関係をさらに明確にする必要がある。
- 研究開発のロードマップを作成し、可能な範囲で計画にマイルストーンを設定する必要がある。
- 具体的目標の達成に当たっては、優秀な研究者の存在が欠かせない。優秀で有為な研究者の獲得および育成に関する方策を練ることが必要であろう。

7.2. 研究組織ならびに研究支援体制

- 大部門の位置づけがやや不明確である。研究面で縦割りの利点をどのように生かすかを含め、大部門の在り方についての検討が必要であろう。分野横断的なプロジェクト研究と部門研究の在り方について、不断の検討を続ける必要がある。
- 研究支援部の体制が明確ではない。技術職員の処遇も含めてどのような運営を行うのか明らかにする必要がある。
- 教員や支援職員の配置および部門とセンターの関係について機能するシステムの検討と相互の関係の明確化が必要であろう。
- センター長を含めできるだけ専任教員をおいた方が、責任を持った活動の展開が期待できるのではないかと、可能性を検討すべきである。

7.3. 研究所の運営・組織の見直し

- 全体として、バランス良く研究組織ができあがっているが、適当な期間毎に組織の見直しを行うのが適切であろう。そのためには適切な評価システムの導入が必要である。
- 任期制に関して、再任方法を早く整備公開すべきである。
- 流動性を高めるための方策を検討する。
- 外部資金導入に一層の努力が望まれる。
- 研究教育活動も含め、評価システムを検討する必要がある。
- 社会へのアピール、研究成果の還元にはなお工夫の余地がある。研究成果の効果的なアピールや社会への成果移転を行うことための方策を検討する。情報発信の主要ツールである研究所 HP の現状は満足できる状態からは程遠く、意識改革が必要である。

- 老朽化した施設の更新など、早め早めに取り組み予算獲得の努力をすることが重要であろう。

7.4. 研究活動・教育活動

- 将来的には、重点領域見直しも必要となろう。研究所らしさを生かすように特徴あるものに特化することを目指すともに、研究テーマを設定するにあたり、社会的なニーズを知り、全構成員が認識と理解を共有し全体として確とした実施及び支援体制を築くことが肝要である。
- 修士課程学生はともかく、博士課程修了者の就職先は極めて限定されると思われるので、今後の開拓が課題であろう。

7.5. 国際交流

- 国際研究協力協定の実態調査を行うとともに、必要なら見直しを行う。

7.6. 今後の研究所運営における留意事項

最後に、研究所運営において、今後特に留意すべき事項を、これまでに触れた点も含め、以下に列挙する。

- (1) 大学は、研究者の自発性と創意を重視して、研究と教育の最大の効果を上げるのが使命である。そのためには、まず、①目標の明確化、②目標の共有、③目標遂行に向けた不断の議論、が必要である。概念や理念が共有化された後は効率的な運用を行うことが重要である。大学は、利益追求の組織とは異なり、必ずしもトップダウンの効率性のみを追及するわけには行かず、より良い研究成果を上げるための議論については可能な限りこれを尊重すべきである。
- (2) 学術上の要請及び社会的要請に的確に応えるために、組織の改編及び運営には柔軟性・機動性を発揮することに意を用いると同時に、常に研究所としての特色・個性を主張することも重要である。研究者個々人がそれぞれ独創性を発揮するのはもちろんだが、研究所全体として、まとまりと学術上・実用上のインパクトを実現することが必要である。
- (3) 急速に進歩発展する学術的状況、また急激に変化する社会的要請などに的確に対応するには、研究所の意思決定機構が柔軟かつスピーディに機能しなければならない。所長を始めとする幹部のリーダーシップが有効に発揮される仕組みが必要である。同時に、それにより個々の教官・研究者がその研究の方向性を共有するとともに、個々の興味・意欲や研究推進ならびに教育にかかわる努力を阻害されることなく、創造的な研究活動に邁進できるような制度・仕組みの整備が必要であろう。
- (4) 改革への努力は常に行うべきであり、戦略と評価に基づいた不断の検討が必要であろう。研究活動は研究所の命である。研究の阻害要因があればこれを徹底的に排除する努力（たとえば不要な会議の廃止、複雑多岐な事務手続きの簡素化など）、優れた研究成果を効率的に上げるための努力（学生・若手研究者の研修・育成、優れた知的環境の整備、適切な評価方法の採用など）に傾注されることを期待する。研究所の運用について、単に評価のみならず、定常的にアドバイスを受ける

れるアドバイザー機構があっても良いのではないか。

- (5) 法人化された今後の諸活動の企画・運用においては、以下の点が望まれる。①会議・意思決定のさらなる効率化・迅速化。②国内外の他の大学・研究機関等とより戦略的で有機的な交流・連携強化。③社会貢献・広報活動においてもより積極的な姿勢の提示。④研究・教育に関する諸活動の自己評価に関し、研究所全体及び各研究者の資質向上に資する形の業績評価が行える方法の検討。
- (6) 大学の社会的責任を果たすためや研究グループ・研究者のエンカレジのためにも評価の実施は必要である。評価については信頼性の向上と評価の反映が最も重要であり、当研究所に相応しい制度を作り上げることが期待したい。科学技術研究の中で特にエネルギー関連の研究は、比較的長期に亘るものであり、短期間での評価に馴染まない部分もある。また、研究プロジェクトの評価、研究実施組織の評価、研究者個人の評価はそれぞれ特徴や目的が異なるため、それぞれについて適切な方法の採用が必要である。学際的研究についての適切な評価のためには、一定の工夫が必要かも知れない。ここでは、
 - ① 適切な評価実施期間の検討、
 - ② 評価委員の適切な選択・評価者の育成、
 - ③ 負担を低減する効率的な評価方法の検討、
 - ④ 評価を適切に実行する所内体制の整備、
 - ⑤ 評価を研究の質の向上に有効に利用するシステムの検討、に留意して検討を進めるのが良い。
- (7) 教員の再任に関わる評価システムは、十分な議論を経て納得性のある仕組みづくりに留意されたい。これにも関連して、今後、全教官の毎年の評価はきちんと行う必要がある。短期的な評価を求めることは、却って自由闊達でかつ中長期的展望を持つ研究を阻害する可能性もないわけではないが、毎年の活動の記録をしておくことは必要であろう。
- (8) 今後、公募制が定着すれば、応募者が大学を選択できることにもなるので、真に優秀な研究者を獲得できるよう、研究所としての魅力、研究所のパフォーマンスを高めることが重要である。
- (9) 研究の成果を効率的に出すためには、重点化と時間軸を同時に定めること、すなわち研究のロードマップを作ることが重要である。企業のように短期間で製品化するためのロードマップでなくて良いが、重点領域内での研究テーマの相関が取れたものになれば、同じ研究領域内での研究者の目的意識も高揚する。
- (10) 世の中へのアカウンタビリティの遂行がより大事になる。当研究所の成果を学会以外にも積極的に開示し、世の中から評価されるように従来とは異なった情報開示の仕組みも重要になる

京都大学エネルギー理工学研究所
現状と課題 平成 16-18 年度

2007 年 4 月 発行

京都大学エネルギー理工学研究所

〒611-0011 宇治市五ヶ庄

TEL 0774-38-3400

FAX 0774-38-3411
