

自然科学研究機構 核融合科学研究所

# 双方向型共同研究外部評価報告書

2008年6月

核融合科学研究所  
双方向型共同研究外部評価委員会



## 経緯と目的

双方向型共同研究は、日本の核融合研究が新たなグランドデザインに沿って研究の重点化と効率化を図る流れの中で、大学と核融合科学研究所が持つ研究のポテンシャルを活かし、その発展を図るための新たな制度として、文部科学省と大学のご支援をいただき生まれたものである。

双方向型共同研究の特長の一つは、以前のように方式の異なる核融合炉の実現を目指して各大学が研究課題を個々に決めて進めるのではなく、将来我が国の核融合研究に必要とされる学術的重要課題を核融合科学研究所が大学と協議しながら集約後、これを各大学の大学共同利用機関・大学附置研究所・研究センターと分担、連携して進めることである。

もう一つの特長は、大学共同利用機関である核融合科学研究所が大型ヘリカル装置を代表とする研究施設を共同研究・共同利用に提供してきた従来の共同研究の仕組みとは逆、即ち、多数の研究者・専門家を抱える核融合科学研究所がその人的資源を各大学に提供し、大学において研究の活性化を図る仕組としたことである。「双方向型」という名称はこの特長に由来しており、この新しい共同研究は、核融合科学研究所の共同研究の形態の一つとして位置づけられた。このことにより、大学の研究センターにある設備を、核融合科学研究所の共同研究の枠組みの中で、全国の研究者に共同利用・共同研究設備として開放することが可能になった。

また、双方向型共同研究は、国立大学と直轄研の法人化後も、法人に跨るプロジェクト研究、あるいは、ネットワーク型共同研究として推進が可能な制度であり、特長の一つとなっている。予算は、核融合科学研究所から特別研究経費として、所謂、概算要求を行い、双方向型共同研究に参画している研究センターは各々の大学から個別に概算要求を行わない仕組みになっている。現在、核融合科学研究所と4つの大学の研究センターとの間で共同研究契約が結ばれ、予算が移管されて双方向型共同研究が実施されている。各大学の中期計画には、双方向型共同研究の実施を謳っていただいている。

双方向型共同研究を企画・運営しているのは核融合科学研究所運営会議の下に設けられた共同研究委員会・双方向型共同研究専門部会（双方向型共同研究委員会）である。双方向型共同研究委員会は、日本の大学における核融合研究の方向、施策を議論する場となっており、大学、コミュニティの意見が反映される委員構成となっている。

平成16年の双方向型共同研究開始以来、双方向型共同研究委員会はこの制度の定着と発展に向けて真摯な議論を重ね、双方向型共同研究を実施してきた。現在、国立大学法人は中期目標・計画の達成度評価を行い、第二期中期計画の設定に向けて動こうとしている。この時期に、核融合研究分野で生まれたこの新しい制度が専門分野の内外からの厳しい視点で評価を受けることは、第二期中期計画においても双方向型共同研究をさらに発展させる上で必須のステップであると双方向型共同研究委員会は判断し、外部評価を実施することとした。

評価委員には、分野の内外、また種々の視点から評価いただけるように配慮して、基礎／応用プラズマの研究に携わっておられる先生、大学共同利用機関で大型プロジェクト研究を推進されている先生、双方向型共同研究に参画している研究センターの所属する大学のマネジメントに携わっておられる先生、全く異なる分野の先生などをお願いした。評価の観点についてはこちらから案を提示させていただいたが、評価委員会での議論を踏まえて修正いただいた。評価委員の先生方には、年度末から年度当初にかけてのお忙しい時期をお願い申し上げたにもかかわらず、長い時間をかけて評価いただき、ここに改めてお礼申し上げます。

平成20年6月3日  
核融合科学研究所双方向型共同研究委員会  
委員長 吉田直亮

## 双方向型共同研究 評価の観点

### (1) 学術進歩への貢献、及び総合的観点から

- 双方向型共同研究が開始されたことが日本の核融合コミュニティの研究の進展に貢献しているか
- 大学共同利用機関として、核融合研は双方向型共同研究の推進者としての役割を果たしているか

### (2) 制度について

- 核融合研における、双方向型共同研究委員会を中心とした推進体制は適切か
- 双方向型共同研究委員会委員の決め方は適切か、また、委員会は適切に機能しているか
- 核融合研究を進める学術コミュニティの意見を集約・反映出来る場となっているか

### (3) 研究課題の立て方、公募から審査、採択までのプロセスについて

- 双方向型共同研究は、研究課題が公募により提案され、委員会で審査後、採択される仕組みとなっているが、この制度は適切か。また、審査方法は、公平性と透明性を確保するため、最善のものとなるように改善していきたいとしているが、現在の審査方法はこの方向に合致していると言えるか

### (4) 受入・実施体制について

- 各センターはそれぞれの持つ限られた資源や所属大学の事情の下で、双方向型共同研究に充てる資源配分を公平性と透明性を確保しながら決定するシステムなど、研究支援体制、研究環境の整備に工夫を凝らしているか
- 共同研究者の意見が反映される仕組みは用意されているか

### (5) 研究成果について

- 各センターにおける研究成果の水準は双方向型共同研究を始めたことで高まったか。または新しい研究方向への展開がなされたか
- 双方向型共同研究は、将来の核融合研究に必要とされる重要課題を4つのセンターと核融合研で分担して進めることにより、その課題解決に向けた成果を上げたか。すなわちWG報告書に示された重点化・効率化へ貢献したか。

### (6) その他

- 核融合研究のさらなる進展に向けた（研究体制面、研究領域面で）新しい芽が出ているか

# 双方向型共同研究外部評価報告書

平成 20 年 5 月 30 日

双方向型共同研究外部評価委員会



# 目 次

1	はじめに	1
2	双方向型共同研究に関わる評価レポート	2
3	まとめ	14

添付資料 1	核融合科学研究所双方向型共同研究外部評価委員会要項
添付資料 2	核融合科学研究所双方向型共同研究外部評価委員会委員名簿
添付資料 3	核融合科学研究所双方向型共同研究外部評価委員会日程

## 資料編

1. 双方向型共同研究成果報告書



# 1 はじめに

「双方向型共同研究」制度は、ITER の建設実現に向けての取組を進める状況の中で、長年にわたり日本における核融合研究を支えてきた大学と核融合科学研究所（以下、「核融合研」という。）等の実験計画・実験装置を整理・統合し、重点化・効率化することが求められたこと（「今後の我が国の核融合研究の在り方について」平成15年1月 科学技術・学術審議会学術分科会基本問題特別委員会核融合研究ワーキンググループ報告）と、国立大学の法人化という新しい状況を迎える中で、核融合ネットワークの場等での長時間にわたる議論を経て核融合コミュニティの総意として作られたものである。具体的には、それまで独自の観点で研究を進めてきた大学附置の4つのセンター（筑波大学プラズマ研究センター、京都大学エネルギー理工学研究所エネルギー複合機構研究センター、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター、九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センター）が、報告書に出された方向を踏まえ、「将来の核融合研究に必要とされる重要課題を分担する」役割を果たすと位置付けるとともに、大学共同利用機関である核融合研だけでなく、4つのセンターを核融合研究者の共同研究の場とする制度である。当面は、重点化された核融合研のLHDの目標である「環状プラズマの総合的理解」に関連する課題を核融合研と4つのセンターの分担課題とし、4つのセンターの属する国立大学の理解と協力を得て、各センターに措置されていた核融合研究予算の約2分の1を核融合研に移管し、核融合研の運営会議に設置された「双方向型共同研究委員会」において、課題を募集し、採択課題（案）と各センターに対する予算配分（案）を作成し、各センターでの審議を経て、最終的に「双方向型共同研究委員会」で決定するやり方で運用されて来た。

「双方向型共同研究外部評価委員会」は、平成16年の国立大学の法人化に併せて制度化されたこの「双方向型共同研究」の4年間の活動状況を評価することを目的として、平成20年に核融合研に設置された委員会である。この新しい制度を客観的に評価するために、評価委員会は、分野外の研究者や法人化された国立大学の経営陣を含めた委員による構成となった。

第1回の評価委員会では、核融合研及び4つのセンターから「双方向型共同研究」の制度と成果についての報告を受けた。報告に対して委員から出された追加説明要求に対しては、追加資料として会議後に委員に送付する形で提供された。第2回の委員会では、各委員から評価の過程で出された疑問点に対して、補足説明がなされ、質疑を通じて状況の理解を深める場となった。

以下の評価結果は、上記の2回の委員会の場での議論と、メールによる意見交換によりまとめたものである。

## 2. 双方向型共同研究に関わる評価レポート

### [1] 学術進歩への貢献、及び総合的観点から

#### (1) 双方向型共同研究が開始されたことが日本の核融合コミュニティの研究の進展に貢献しているか。

ITER 建設に伴う核融合研究の重点化・効率化という方向と国立大学の法人化を迎えるという状況下において、核融合ネットワークの場等での厳しい議論を踏まえ、関係大学の理解を得て、双方向型共同研究を発足させ、新たな枠組みで大学における核融合研究を展開したことは、日本の核融合コミュニティの研究にとって重要な進展である。双方向型共同研究の開始に伴い、各センターが研究目標を個々に定めるのではなく、核融合研究のコミュニティが核融合研を核として、日本の核融合研究に必要な重要課題を設定し、それを各センターが分担、連携して進める方式となったが、単にそれだけに留まらず双方向型共同研究の枠組みの中で、九州大学の **TRIAM-1M** の運用を停止し、**QUEST** 建設に取りかかり、更に大きな目標に向けた展開を実現したことは、高く評価される取組である。

双方向型共同研究の開始により、全国共同利用施設でなかったセンターを含め、各センターの活動に核融合研を含め全国の大学等からの研究者が幅広く参加する様になり、活動が活発化したことにもこの制度が研究の進展に寄与していることが表れている。同時に、双方向型共同研究の開始に伴い、研究の進展に加えて、大学院生等の人材育成面での重要性に関する意識が高まり、各センターから輩出された大学院生数や共同研究に参加する大学院生数が増加したことも核融合コミュニティに対する大きな貢献である。

#### その他委員からの具体的意見

- ・科学技術・学術審議会学術分科会基本問題特別委員会核融合研究ワーキング・グループ報告書「今後の我が国の核融合研究の在り方について」で打ち出された大学における研究方式の選択・重点化、また法人化以降の大学の裁量権の拡大など、大学における核融合研究環境が著しく変化し、大学における核融合研究の遂行が困難になっている。このような背景のもと、双方向型共同研究は、研究方式の選択・重点化という方針を踏まえつつ、大学が果たすべき学術的基礎研究の推進および人材の育成を行うためのシステムとして、大きな貢献を果たしていると考えられる。
- ・第一に、核融合研究動向として多岐路線から重点化時代に突入したことにおいて、研究相補性などの機能を有する4大学センターの存在意義を明確にしたこと、第二に、伝統的に行われてきた単一最大研究所へ集合する全国利用共同研究方式から研究者及び研究道具の逆の流れを形成する双方向型共同研究の開始は、世界の核融合研究の歴史的潮流を把握した戦略の一環として捉えることができ、日本の核融合コミュニティの研究に新しい息吹を発しその進展に貢献していると言える。
- ・①コミュニティでの審議・報告書、②核融合研運営協議会での決定、③コミュニティへの定期的な報告など、立ち上げ時だけでなく、その後の過程においてもコミュニティとの密接な議論が図れている。この点は、日本で新しい大型研究を進めるときに課題設定、組織運営、実践遂行などを速やかに進める点において、テストケースとなるべきである。そのような実践例が生み出されている点はインフラの有効活用・人材の有効活用も含めて重要な貢献である。
- ・各種の数値資料によれば、双方向型共同研究が、「日本の核融合研究の進展」に貢献していることは明白である。また「核融合コミュニティの進展」にとっても貢献している。双方向型共同研究は、今や重要な柱としての役割を明確にしつつある。
- ・大学共同利用機関の核融合研と、大学附置の4つの研究センターがネットワークを形成し、

## 2. 双方向型共同研究に関わる評価レポート

我が国の核融合科学のコミュニティーを包含するような共同研究機能を果たしており、当該研究分野の進展に大きく貢献していると評価できる。

- 双方向型共同研究委員会を中心として、様々な議論の場が設けられ、手法の異なった核融合研究に関わる研究者の共同研究が活発になっており、核融合コミュニティーの研究の進展には間違いなく貢献している。

### (2) 大学共同利用機関として、核融合研は双方向型共同研究の推進者としての役割を果たしているか。

核融合研は、運営会議の下に「双方向型共同研究委員会」を設置し、外部に開かれた形で「双方向型共同研究」の仕組みと推進体制を構築する等推進者としての役割を十分に果たしている。双方向型共同研究に関する予算の点でも、双方向型共同研究委員会における検討に基づき、戦略的にかつ計画的に推進することが運営会議で決められており、予算執行の点でも外部の研究者の協力を得ながら核融合研が推進者としての役割を果たしている。

その他委員からの具体的意見

- 双方向型共同研究において核融合研が果たすべき役割は、大学等にある装置、人的資源、研究環境を利用した共同研究体制を構築し、これによって核融合研究を活性化するとともに、研究課題の整理と重点化・効率化を図ることであろう。研究所は、核融合コミュニティーの中心的機関として、参加機関がその活性度を最大限に発揮できるような相互の研究推進体制を組織し、また、研究所の研究者を大学等に派遣して積極的に双方向型共同研究の推進に努力している。更に、参加機関が主導する運営会議にも委員を派遣し、核融合科学研究所が双方向型共同研究の推進者としての役割を積極的に果たしている。
- このような新しい共同研究形態を可能にしたのは、核融合コミュニティーの信頼を基礎に核融合研が透明性の高い予算管理、双方向型共同研究委員会の運営を行ってきたからであり、核融合研が双方向型共同研究推進に果たしてきた役割は極めて高いと判断される。
- 全国の各大学から核融合研への研究者出向き型実績をもとに、近年にスタートした核融合研から4大学センターへの研究者派遣型をベースとする双方向型共同研究においても、公募案内を従来型と同時に行い、当該関連機関以外の研究者への周知も徹底し、採択決定も核融合研の共同研究委員会で行うなどによって、双方向型共同研究の推進者として十分に評価できる役割を果たしていると言える。
- 発足時の双方向予算に比べて、この中期計画期間に一定の増額を得たことはこの仕組みの評価にもつながっており、核融合研の努力を高く評価する。次期中期計画期間においてこの仕組みがさらに発展するためにも核融合研と各法人の連携・協力・相互理解が必要である。
- 核融合研および各センターの活動報告や、研究テーマ数、論文数、交換人員数、大学院生の学位などの各種のデータをみると明らかに核融合研は双方向型共同研究の推進者としての役割を果たしているし、制度が始まって以来、その役割は定着しつつある。
- ITER に集約されるもう一方の方向の研究と相補的な役割を果たしつつ、本来の目的である核融合炉の実現を目指したものにしなければならない。そこでは集約型と相補的であることを明確にし、資源を有効に生かしつつ多彩な、また斬新なアイデアを引き出すような方法論の確立が望まれる。

## 2. 双方向型共同研究に関わる評価レポート

### [2] 制度について

#### (1) 核融合研における双方向型共同研究委員会を中心とした推進体制は適切か。

双方向型共同研究は、核融合研を中核機関とした体制で運営され、一般共同研究、LHD 計画共同研究と役割が異なる共同研究であることから、運営会議の下に双方向型共同研究委員会を設置し、各センターの重要課題の設定等双方向型共同研究に関する諸課題を進める体制は適切である。

その他委員からの具体的意見

- ・ 純粋なプラズマ物理研究・高温プラズマ核融合研究・炉工学関連研究などの裾野拡大意義が大きい“一般共同研究”、核融合研最主力装置中心の“LHD 計画共同研究”、そしてこれらとは人と道具の逆の流れをもって核融合研共同研究の三位一体的総合活性化に貢献している双方向型共同研究を、運営会議の下に当委員会を設置して進める体制は十分に適切と言える。
- ・ 所外委員による委員長の選出など透明性の確保に務めている点は特に共同研究機関として重要であり、適切に運営されていると判断する。  
双方向型共同研究委員会は他の核融合研主導の共同研究委員会と異なり、WG の報告にある大学機関からの新しい芽の発掘や育成に関しての役割を果たす事が重要であるが、それを強く意識した運営が為されている点は評価できる。  
4センター以外の提案については積極的に取り上げるべきであるが、各大学法人での支援状況や位置づけ、研究課題の全国組織化の可能性等々についても議論すべきであろう。
- ・ 核融合研が大学および各センターと協力して、核融合炉実現に向けた ITER に代表される「集約型」の研究と相補的な役割を担うべきと解釈すれば、3つのカテゴリーを維持し、双方向型共同研究をその一つとし、委員会を設置することは、合理的かつ適切であると考ええる。
- ・ 双方向型共同研究委員会は、コミュニティ全体のニーズを反映させ、これを集約的に運営することが必要であり、この体制は適切である。

#### (2) 双方向型共同研究委員会委員の決め方は適切か、また、委員会は適切に機能しているか。

双方向型共同研究が、核融合研以外の4つのセンターの施設における共同研究に関する研究委員会であることから、他の2つの委員会より外部委員の比率が高いこと、双方向型共同研究を行っていない「核融合プラズマに関する学理及びその応用の研究」に参与している大学のセンター長が委員となっていることは、委員構成として適切であると思われる。核融合ネットワークというコミュニティの代表が委員となっていることも、双方向型共同研究がコミュニティの制度として機能する上で適切である。

九大の TRIAM-1 計画の終了と、新たなプラズマ境界力学実験装置として QUEST を双方向共同研究の枠組の中で立ち上げたことは、委員会が適切に機能していることの重要な側面と言える。双方向型共同研究に参加している各センターにおいて、双方向型共同研究の成果があがっていることも、委員会による研究の方向性や課題審査が適切であったことを示している。

その他委員からの具体的意見

- ・ 双方向型共同研究委員会は一般共同研究、LHD 計画共同研究に比して、扱う予算規模も大きく、核融合研究全体への影響が非常に大きい。本委員会委員構成は調査審議の方向性

## 2. 双方向型共同研究に関わる評価レポート

に重大に影響を与えるので、さらに透明性の高い選出方法を模索する必要がある。特に調査審議の重点項目である、現在対象となっている4センター以外から提案された新規研究課題に対する検討を実質的に行い、その実施に関するガイドラインを決定できるように委員会構成及び機能を検討する必要がある。

- ・年間を通じての開催など、形骸化しないで運営されている。
- ・委員の決め方と委員会機能の適切さについては、現在有する資料のみから評価することは容易ではなく、特に良いとか悪いとは言えない。4大学センター関連以外の機関からの委員の選出法が争点と言えようか。

### (3) 核融合研究を進める学術コミュニティの意見を集約・反映出来る場となっているか。

双方向型共同研究委員会には、双方向型共同研究に参加している4つのセンター長及び核融合研究を行っている国立大学のセンター長に加えて、核融合ネットワークから核融合科学と核融合炉工学の委員会代表が加わっており、コミュニティとして集約した意見を反映する仕組みとなっているといえる。また、双方向型共同研究委員会が、学会などにおいて「双方向型共同研究に関するシンポジウム」を開催するなど、共同研究に参加している研究者を含めコミュニティの意見を直接聴衆する場を設定しており、この委員会はコミュニティの意見を反映する場となっている。

#### その他委員からの具体的意見

- ・核融合の理学分野（核融合科学分野）では、関連する大学の研究者を全国規模で包含し、中核としての核融合研の共同研究委員会を中心に研究者コミュニティの意見集約の体制が整っている。また、核融合の工学分野の研究者の参加が少ない。
- ・①4つの学術研究課題の分担に関して、その進捗状況や新展開をチェック&レビューし、学会へフィードバックするための指導性があればよい。
- ・②新しい芽に関しては 課題提案を委員会内部で議論するだけでなく、各大学法人での位置づけ（インフラや組織人員）、学会レベルでの全国展開や支援の議論に関してオープンに議論できる場を学会に設けるなどの努力が必要ではないか？
- ・現在の双方向型共同研究委員会委員には、核融合ネットワーク運営の主要メンバーが加わっており、学術コミュニティの意見を集約することが可能である。しかし、一部 LHD 計画共同研究委員会で行われているような核融合ネットワークなどのシステムとの連携などは行われていない。今後さらに学術コミュニティの意見を反映させることができる仕組みを組み込んでいく必要がある。
- ・一般共同研究及び LHD 計画共同研究を通しての学術コミュニティの意見は、非常に幅広く集約・反映されていると言うことができる。双方向型共同研究を通してのそれは、4大学センターを中心とする制度創出趣旨から考えて、学術コミュニティ中の特定部分に限られるのはある意味では当然の結果と言えようか。

## 2. 双方向型共同研究に関わる評価レポート

### [3] 研究課題の立て方、公募から審査、採択までのプロセスについて

(1) 双方向型共同研究は、研究課題が公募により提案され、委員会で審査後、採択される仕組みとなっているが、この制度は適切か。また、審査方法は、公平性と透明性を確保するため、最善のものとなるように改善していきたいとしているが、現在の審査方法はこの方向に合致していると言えるか。

平成20年度公募分から、発足当初からの「各研究センターがその実施の可能性を含めて申請課題を審査し、双方向型共同研究委員会が追認する」という審査体制を、「双方向型共同研究委員会が審査し、評価点を含め当該研究センターに申請書を送付し、センターで課題の採択可否案と予算配分案を作成し、最終的に双方向型共同研究委員会で議論し、決定する」仕組みに変更したことは、公平性と透明性を確保する上で、重要な前進であり、適切な改善方向である。

また、双方向型共同研究の課題採択等運営の透明性を確保するためには、各センターでの審査委員会においても外部委員を含む体制とすることが不可欠である、筑波大以外の3つのセンターでは既に確立しているが、体制の整備を進めている筑波大のセンターについても早急に整備されることが望ましい。

#### その他委員からの具体的意見

- ・委員会の審議状況など、公募から採択までのプロセスが、ホームページ上で充分公開されていないので、改善が必要である。
- ・採択後の学会発表、論文発表の集約など“採択”後学会への貢献が行われていくことをチェックする必要がある。科研費並みとは言わないまでもある種の権威付けにもなることが、逆に高い成果につながることもあり、審査の厳正さの学会認知・評価ともなる。
- ・双方向の公募課題採択に関しては各センターの分担課題研究の枠にとらわれる必要もないし、受入可能な研究課題であれば、地域のハブとしての役割を果たすことも必要であろう。各法人も法人独自の共同研究の枠組み（京大 センター共同研究、阪大 全国共同利用施設）を活用しているようなので、審査に当たっては各法人の枠も利用しながら柔軟に対応すればよい。
- ・審査、採択にいたる詳細な過程は入手しうる資料では明確に見えないが（非専門家であるためかもしれないが）、実験グループまたは指導者の **feasibility** に関する審査はどのようになされているのであろうか。テーマの学術的意義に関する審査と同時に、この点についても厳正な審査を行うことは、制度のレベルを保つ上で極めて重要と考える。
- ・一方外部から見ると、「各センターの分担課題に関するとなる共同研究」と「自由な共同研究」の区別が難しく、制度が分かり難くなっている。今後「分担課題に関するとなる共同研究」を行う実施母体が満たすべき条件がガイドラインとして整備され、新たに「分担課題に関するとなる共同研究」新規研究課題の審査が可能となれば、本制度がより分かりやすくなると考えられる。
- ・現在各センターには外部委員が参加した委員会が既設もしくは準備されているので、この委員会を双方向型共同研究委員会の下部委員会としてより公式な権限を与え、各センターへの「自由な共同研究」提案の審査を一括して行い、その審査結果と「ベースとなる共同研究」を一括して、各センターの提案として双方向型共同研究委員会として議論することも考えられる。
- ・研究課題の立て方において、双機関間の分担課題となるものを中心とすることは当然ながら重要でこれで宜しいと思う。一方、双方向型共同研究においても例えば将来のシーズとなる萌芽的のような周辺課題までを意識的に取り込むかどうかについての議論はどこまで成されているのかは不明である。

## 2. 双方向型共同研究に関わる評価レポート

- 各センターともパッシブな会議体で課題を審査するだけでなく、斬新なアイデアに基づく課題を発掘するようなことも行ったらいかがであろうか。

## 2. 双方向型共同研究に関わる評価レポート

### [4] 受入・実施体制について

(1) 各センターはそれぞれの持つ限られた資源や所属大学の事情の下で、双方向型共同研究に充てる資源配分を公平性と透明性を確保して決定するシステムなど、研究支援体制、研究環境の整備に工夫を凝らしているか。

各センターとも、限られた状況の中で、双方向型共同研究を実施するための研究支援体制や環境整備に努めている。各センターの状況の理解を含め、双方向型共同研究を公平性と透明性を確保して実施していくためには、課題選定の委員会のみならず、実際の実験時間の配分や予算配分についても外部委員を含む委員会で審議する体制が不可欠である。各センター毎に現状は異なるが、体制整備に向けて取組を進めることが望ましい。

研究環境の整備という点では、共同研究者間の情報共有も重要である。九大の QUEST 研究で構築した核融合研のデータ処理システムを利用して共同研究者への情報共有も、有効な方法である。

また、双方向型共同研究に関する情報を公開することも公正性と透明性を確保する上で重要なことであり、ホームページの充実などの取組も必要である。

#### その他委員からの具体的意見

- 各センターの学内外の評価の報告を聞く限りでは、各法人が各センターに特別な措置を行っているようには感じられなかった。今後は各法人の執行部との連携も強化し、研究環境（筑波大学のような学内宿泊施設、九大の場合は技官の柔軟な配置等々）の整備にも継続的な努力が必要である。
- 考えるべき項目を列挙すると、
  - ① 宿舎、食事といった生活に関わる事項、
  - ② オフィス、実験準備、インターネット等、研究環境、
  - ③ 実験技術補助等、実験研究そのものに関わる支援体制、
  - ④ 安全などがあるが、各センターとも対応しているように見える。①～③に関しては各センターの事情もあろうが、④の安全については何らかの満たすべき基準は明確になっているのであろうか。特に出張先のセンターと出身大学（研究所）それぞれの安全管理体制間の連絡・整合性はとられているのであろうか。
- 各センターとも限られた資源の中で研究支援体制、研究環境を整えるための継続的な取り組みがなされており評価できる。研究支援体制として、人的なサポートが最も重要であると考えられるが、双方向型共同研究の量的拡大が各センターの担当研究者の多忙化をもたらし、センター固有の研究活動に支障を与えることを懸念する。また、安全の面への配慮も重要であり、各センターへの安全査察の実施も今後必要であると考えられる。可能であれば、双方向型共同研究実施（研究支援、安全、データ管理）のための専従の研究員（ポスドク）の配置が行われることが望ましい。
- 共同研究者等への情報提供として、ホームページの活用が望まれる。
- 共同研究資源や時間の管理の具体的な方法については、各センターの創意工夫にまかせるべきであろう。
- 共同研究のセンターでの審査という過程では、センター世話人を通じて共同研究者のやりたいことが十分に伝わる必要がある。審査の公平性と透明性はなかなかデリケートな問題も含み公開の場での意見集約が“顔をつきあわせて”行う共同研究では円満な運営につながる。

## 2. 双方向型共同研究に関わる評価レポート

### (2) 共同研究者の意見が反映される仕組みは用意されているか

共同研究者の意見反映に関しては九大を先頭にある種のルール作りが行われているようであるが、足並みをいち早くそろえ、センターで共通したルールへと発展させ、共同研究者に対する公平性を担保することが重要である。

共同研究者への周知については、各センターとも開示されている情報の範囲、周知の方法が明確ではなく、双方向型共同研究委員会で各センターで開示すべき情報について議論し、それに沿って開示をする必要があると考えられる。

#### その他委員からの具体的意見

- (a) 九大センター：プラズマ・核融合学会年会のインフォーマルミーティング及び過半数外部研究者による QUEST 実験推進会議でのオープンな議論は高く評価できる。
- (b) 阪大センター：検討会委員会での評価を経てから双方向型委員会に提出などのシステムの改善を行っている。マシンタイムの調整は良くある形式で成されている。
- (c) 京大センター：外部委員が大半を占めるヘリオトロン J 双方向型共同研究委員会を設置し、共同研究計画の審議を行い外部に開かれた形で意思決定する点は高く評価できる。
- (d) 筑波大センター：通常通りのセンター内共同研究検討会で予算査定、マシンタイムなどの決定を行ってきたが、透明性を高めるべく外部委員を入れた新しい委員会を準備中である。
- 九大、京大などではセンター主催の研究会での研究並びに意見発表、学会 informal 集会における意見発表など公開の場での意見反映などを意識した取り組みを行っており他のセンターもそうした取り組みを進めるべきであろう。
- 各センターとも共同研究者の意見を反映するための取り組みが行われ、その仕組みが考えられているが、その取り組みの程度に差異がある。九州大学で行われている学会のインフォーマルミーティングを利用した取り組みは、多くの現在また将来の共同研究者の意見を取り入れる事が可能であり、高く評価できる。少しでも興味がある研究者が双方向型共同研究実施状況を知り、意見を述べられる様な機会を作る努力を期待したい。
- 既に実施されている可能性もあるが、実験報告に併せて共同研究に関する要望等を収集し対応するのも一つの方法である。
- (a) 九大センター：プラズマ・核融合学会年会のインフォーマルミーティング及び過半数外部研究者による QUEST 実験推進会議でのオープンな議論は高く評価できる。
- (b) 阪大センター：高速点火検討会、大型装置運用計画室で意見反映を実行している。
- (c) 京大センター：ヘリオトロン実験会議 (JOB) での議論を通して意見反映を実行している。
- (d) 筑波大センター：外部委員を入れたセンター共同研究委員会を準備している。

## 2. 双方向型共同研究に関わる評価レポート

### [5] 研究成果について

- (1) 各センターにおける研究成果の水準は双方向型共同研究を始めたことで高まったか。または新しい研究方向への展開がなされたか。

双方向型共同研究の開始により、外部の研究者との交流が活性化し、研究課題数や論文数等研究成果の量的拡大が進んでおり、研究成果の水準は向上している。各センターとも重要課題に対する取組を通じて新たな研究方向への展開がなされていると言える。特に、**TRIAM-1M** の運用を停止し、**QUEST** 建設に取りかかり、更に大きな目標に向けた展開を実現しつつある九州大学の例は、双方向型共同研究により、新たな方向を生み出した **Good Model** である。

#### その他委員からの具体的意見

- ・大阪大学では、核融合科学研究所レーザー連携部門との密接な連携により、高速点火用の固体重水素ターゲットの開発、電子スペクトロメーターの開発など、新しい展開を行っている。京都大学では、ヘリオトロンJ双方向型共同研究に関わる学外研究者の数が大幅に増加しており、海外との協力も強化されている。筑波大学では、核融合科学研究所との共同研究による1MWジャイロトロンの開発が順調に進んでおり、新しい研究方向への展開が進んでいる。
- ・(a) 九大センター：**TRIAM-1M** から **QUEST** への装置概念更新と新建設が成され、新しい方向への研究展開をしつつあり、これからが双方向型の実験成果が期待される状況である
- (b) 阪大センター：少なくとも、慣性核融合と磁場閉じ込め核融合研究者間の交流が双方向型共同研究制度が開設されたことにより初めて実際的になり、これによる新しい研究方向の芽が生み出される土壌ができたと言える。
- (c) 京大センター：磁場分布制御技術に関連する輸送・安定性の研究は核融合研にとっても現在注力している課題であるので、本センターの研究成果水準は双方向型共同研究開始により高まったものと判断できる。
- (d) 筑波大センター：九大も京大も核融合研同様の環状系の磁場閉じ込め装置であるが、本センターのみは開放端系であるので、双方向型共同研究開始前は孤立感が否めない状況であった。しかし、開始後は要素還元型の研究課題としての認知度が核融合コミュニティに浸透したことが刺激となって、本センターにおける研究成果の水準は徐々に高まってきているものと期待している。
- ・各センターの分担課題に関して何を学術成果とするのか その中でどの部分を双方向で達成していくのか という“目標設定”が十分ではないように思われる。次期中期計画を練り上げる際は明確な目標設定が求められるであろうし、**WG** の報告書に沿った進展を評価する上でも“目に見える目標と達成度”が重要である。
- ・資源が限られている現状では双方向型共同研究の量的拡大は限界があると考えられる。よって、より質の高い研究の推進に重点をシフトし、研究成果の水準を高めていく努力が必要であり、双方向型共同研究の評価も質的向上を評価できるものにすべきと考える。

## 2. 双方向型共同研究に関わる評価レポート

(2) 双方向型共同研究は、将来の核融合研究に必要とされる重要課題を4つのセンターと核融合研で分担して進めることにより、その課題解決に向けた成果を上げたか。すなわち WG 報告書に示された重点化・効率化へ貢献したか。

従来、各センターの目的に沿って研究を展開していた4つのセンターが、重点化された LHD の目標である「環状プラズマの総合的理解」に関連した分担課題に基づき双方向型共同研究を開始したことに伴い、4つのセンターともそれ以前に比べて研究課題や参加研究者数及び研究成果の点で向上しており、各センターが分担した課題解決に向けて成果をあげているといえる。

その他委員からの具体的意見

- ・九大に限って言えば、これまで行ってきた核融合炉の定常化に関する理工学研究課題をさらに粒子排気装置と能動壁温制御など新しい機能を付加して展開を図っており、インフラの整備・活用や人材の活用などの寄与は評価できる。他のセンターについても、新しい展開を図っており、今後の発展が期待できる。
- ・ワーキング・グループ報告の重点化項目の推進に対して、双方向型共同研究は、資金や人的資源の有効利用に寄与しており、効率化への貢献は大きい。一方、重点化自体はワーキング・グループによる答申であり、双方向型共同研究が直接貢献するものではないが、双方向型共同研究における、適切な学術および要素還元研究課題の設定により、重点化研究にも貢献していると考えられる。
- ・既存装置の整理・統合の観点からは、核融合研自体は CHS 装置を完了し LHD の一層の活用に踏み切り、九大センターは TRIAM-1M を完了し QUEST を立ち上げ新たな課題に挑んでいる姿勢・状況は、効率化として良く衆目を集めている。
- ・阪大センターの重点化の寄与は顕著には明確ではないが、インフラ的には周辺技術からアプローチしている姿勢が、ソフト的には超高密度プラズマ物性を対象にして歩み寄りを試している姿勢が伺えるので、今後の成果・寄与が期待される。
- ・筑波大センターの重点化・効率化への寄与は地味であるが、直線型開放系装置を用いて要素還元的に環状プラズマの総合的理解に関する学術体系化に寄与することが期待される。

## 2. 双方向型共同研究に関わる評価レポート

### [6] その他

#### (1) 核融合研究のさらなる進展に向けた（研究体制面、研究領域面で）新しい芽が出ているか。

双方向型共同研究を開始したことにより、広範なネットワークが構築され、研究課題や参加研究者の増加する等、新たな研究の萌芽を促す体制が構築されつつある。特に、双方向型共同研究の枠組みの中で、「長時間維持球状トカマク装置 QUEST」実現させたことは、研究体制面、研究領域の両面で新しい側面である。

#### その他委員からの具体的意見

- ・九大センターの QUEST による全日本型の新研究領域の創出は特筆すべきであろう。また、今後とも本双方向型共同研究を実質的に強力に推進することにより、例えば阪大センター・慣性核融合と核融合研・磁場閉じ込め核融合の相互乗り入れにより、全く新しい計測技術の開拓や、超高密度プラズマ物理の未開拓領域の発掘などが期待される。さらに同様に、筑波大センターの直線型装置における電位閉じ込め物理と、核融合研の環状系装置における電場の物理の融合により、さらに普遍化した新しいプラズマ物理領域の形成が期待される。
- ・今後も核融合研究全体に資する学術的、また要素還元的な重要な研究課題について双方向型共同研究委員会で議論され、QUEST 計画に続く新たな取り組みがなされるよう期待する。
- ・核融合研究の更なる進展ということに関しては若手研究者の育成と研究の場の確保が必須である。全国的にも定員削減で新たな人員の確保が厳しい中で、この分野で優秀な人材を確保するには、双方向はもとよりコミュニティーあげて知恵を絞り、仕組みを練り上げることが必要である。例えば核融合研－センター間では一定期間（例えば2年程度）助教を移動するなど思い切った措置を図り、人が動きやすい環境整備が必要であろう。こうした人材交流からあらたな研究グループが生まれることも想定できる。
- ・今後の各センターの双方向から前述の重厚多層な協力体制を担保する全国組織が生まれることが望まれる。
- ・九州大学のような大規模な例に留まらず、新たな芽が出ていることを期待させる。
- ・双方向型共同研究の実施を通じて、非常に透明性の高い研究課題設定や予算配分を行う仕組み、また共同研究推進のための受け入れ体制などが真剣に考えられ、整備されてきていることが、研究体制面での大きな進展であると考えられる。

## 2. 双方向型共同研究に関わる評価レポート

### (2) その他のコメント

- 研究の重要性に鑑み、広く一般社会への情報発信も必要である。特に産学連携の観点から、電力会社の経営者、技術者、研究者向けの特別講演会など企画すべきである。現状では核融合研究が主にアカデミアに支えられていることは仕方がないが、研究の重要性を認知させ、さらには積極的な支援、参加へとつなげていく努力を継続的に行うべきである。
- 繰り返しになるが、最後にもう一度強調しておきたいこと： 研究課題審査に当たっては、研究遂行の **Feasibility** に対する評価（研究チームの能力、研究手段の準備状況など）も重視すべきではないでしょうか。
- 今回、委員として己に対する課題となったこと： 双方向型共同研究が「学術」から「開発」への階層構造において果たすべき役割をさらに理解したい。
- 昨今の状況は化石燃料の将来に大きな警鐘を鳴らしている。人類が核融合エネルギーをエネルギー問題の切り札とするまでには、ITER による集約的研究と並行に、人材を育成し、斬新なアイデアを促すことも重要で、双方向型共同研究の役割は重要である。エネルギー源としての核融合炉の実現のためには、研究者の世代に跨るような長期的な研究が必要であり、そのためには長期的に人材を供給することが不可欠である。その必要条件として、双方向型共同研究を位置づけることができる。ITER を経て、商業発電核融合炉実現を目指した、超長期的展望についての検討も必要となろう。
- 外部評価としては量的な評価が最も簡単であるが、量的な競争は研究者の疲弊を招く事を懸念する。双方向型共同研究としては量的な広がりには既に十分であると思われるので、今後は多少の絞り込みを考えた、質的な研究水準の向上を図るべきと思われる。またそれを評価できる体制作りが必要である。
- また安全に関して、単に各センター個々の取り組みではなく、査察を含めた全体的な取り組みを行うことが必要ではないかと考える。
- 共同研究の成果が明示できる謝辞（年度付き共同研究番号等々）付き論文に対しては各双方向共同研究費とは別枠で別刷料や投稿料の支援をするなど何らかの特典を付与して奨励することも大切。多くの場合論文は共同研究費が終了した後に書かれており、そのような場合にもこのシステムが支援できれば共通の財産となりうる。特に権威のある国際学会への発表の支援は重要である。
- 公表された論文によっては双方向型共同研究の成果であることを明示していないものもあり、共同研究者に共同研究の成果であることを明確にするよう、重ねて周知徹底する必要がある。
- 双方向型共同研究としての課題採択の際に、論文や会議での発表に際しては、双方向型共同研究として実施した旨明記することを引き続き徹底する必要があると思われる。

### 3 まとめ

ITER 建設という事態を踏まえた「核融合研究の重点化・効率化」方針と国立大学の法人化という状況を打開する方策として、関係者による厳しい議論を経て作られた「双方向型共同研究」であったが、4年間の活動実績から「双方向型共同研究」制度が、大学における核融合研究を活性化すると共に、4つのセンターの研究そのものの活性化をもたらしたことを認識した。特に、各センターがそれまでの独自研究中心から、「分担課題」に基づく研究への転換に留まらず、双方向型共同研究の枠組みの中で、九州大学の「TRIAM-1M」をシャットダウンし、新たに国内外の球状トーラスの研究者全体の装置として「QUEST」を建設したことに感銘を受けた。また、従来は研究中心であった各センターにおいて双方向型共同研究の開始に伴い、人材育成への関心が高まり、大学院生をはじめとする若手研究者が増えたことも重要な成果であると認識した。将来の後継者育成はどの分野でも重要な課題であるが、4つのセンターの装置により若手研究者が経験を積むことは非常に大切なことであり、引き続き取組を強化することを期待する。

4つのセンターとも、限られた状況の下で、双方向型共同研究を進めるために努力をしていることは理解されたが、センター内での研究と異なり、広く開かれた共同研究を展開していくためには、審査や実施体制等についての公平性・透明性を一層拡大することが必要である。この点で、平成20年度から「双方向型共同研究」の課題審査を「双方向型共同研究委員会」が実質的にも中心となる体制を関係者が合意して実施することになったのは、大きな前進である。新しい制度でも、双方向型共同研究委員会では、課題の採択可否案と予算配分案を作成し、それを基に各センターで審査をする仕組みになっている。その意味で、引き続き各センターでの課題審査や実施のために委員会に外部委員を加え、透明性の拡大に努める必要があると思われる。

各センターにおいて双方向型共同研究に関する情報の公開を始め、共同研究者の間での情報の共有を進めることは、双方向型共同研究をより発展させる上で重要な課題である。今回の評価開始直前に、双方向型共同研究の参加センターの一つである筑波大学プラズマ研究センターにおいて「論文における不適切なデータ解析」が大学の調査で認定され、論文の取り下げが勧告されるという事態が発生した。このような問題においては、個人の責任が重要であることは言うまでもないが、実験データを含む情報の公開も今回の様な事態の発生を防止する上で必要なことであり、その意味からも情報公開を一層強めることが求められる。

最後に、2度の追加資料を含め双方向型共同研究に関する資料を用意し、丁寧な説明をしていただいた核融合研と4つのセンター長の皆さんに委員会として感謝の意を表したい。評価委員という立場で説明を受けたことではあるが、他分野の研究者の委員にとって、本評価委員会で説明を受けた内容は、それぞれの研究分野の今後の取り組みにおいて参考になることであった。

平成20年5月30日

双方向型共同研究外部評価委員会委員

平山 英夫  
藤井 理行  
小寺山 亘  
唐牛 宏  
西 信之  
畠山 力三  
大野 哲靖  
吉岡 正和



# 添付資料



## 核融合科学研究所双方向型共同研究外部評価委員会要項

平成20年2月29日  
双方向型共同研究委員会決定

- 第1 核融合科学研究所の双方向型共同研究の実績に関し評価を行うため、核融合科学研究所運営会議双方向型共同研究委員会（以下「双方向型委員会」という。）に双方向型共同研究外部評価委員会（以下「外部評価委員会」という。）を設置する。
- 第2 外部評価委員会は、10名以内の委員をもって組織する。  
2 委員は、核融合科学研究所の研究等に関し識見を有する者で構成し、双方向型委員会の議を経て、所長が委嘱する。
- 第3 第2で定める委員の任期は、平成21年3月31日までとする。  
2 委員に欠員が生じたときは、その都度補充する。
- 第4 外部評価委員会に委員長を置く。  
2 委員長は、委員のうち、双方向型委員会で選出する。  
3 委員長は、委員会を招集し、その議長となる。
- 第5 外部評価委員会は、必要に応じて、次に掲げるものから意見を聴くことができる。  
(1) 核融合科学研究所運営会議共同研究委員会委員  
(2) 核融合ネットワーク  
(3) その他必要と認める者
- 第6 外部評価委員会は、評価結果を双方向型委員会に報告するものとする。
- 第7 外部評価委員会の事務は、管理部研究推進課において処理する。
- 第8 この要項に定めるもののほか、評価の実施に関し必要な事項は、別に双方向型委員会  
が定める。

### 附 則

- 1 この要項は、平成20年2月29日から施行する。

核融合科学研究所  
双方向型共同研究外部評価委員会委員名簿

	氏名	所属・職名
委員長	平山 英夫	高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設長
	藤井 理行	情報・システム研究機構 国立極地研究所長
	小寺山 亘	九州大学理事・副学長
	唐牛 宏	自然科学研究機構 国立天文台 研究連携主幹
	西 信之	自然科学研究機構 分子科学研究所 物質分子科学研究領域主幹
	畠山 力三	東北大学大学院工学研究科 教授
	吉岡 正和	高エネルギー加速器研究機構 教授
	大野 哲靖	名古屋大学大学院工学研究科 教授

核融合科学研究所  
双方向型共同研究外部評価委員会日程

**第1回核融合科学研究所双方向型共同研究外部評価委員会**

日 時 平成20年4月3日(木) 13時40分～18時00分

場 所 核融合科学研究所 管理・福利棟4階 第3会議室

出席者 平山 英夫 委員長、藤井 理行、小寺山 亘、唐牛 宏、畠山 力三、吉岡 正和、  
大野 哲靖の各委員

**第2回核融合科学研究所双方向型共同研究外部評価委員会**

日 時 平成20年5月24日(土) 13時00分～16時00分

場 所 安保ホール 101号室

出席者 平山 英夫 委員長、小寺山 亘、唐牛 宏、西 信之、畠山 力三、吉岡 正和、  
大野 哲靖の各委員



# 双方向型共同研究成果報告書

平成20年5月

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

運営会議 共同研究委員会  
双方向型共同研究専門部会



## 目 次

I. はじめに	1
II. 双方向型共同研究の創設と目的	5
II-1 大学における核融合研究を巡る状況	5
II-2 目的と意義	6
II-3 仕組みとその特徴	8
II-3-1 大学共同利用機関の役割	10
II-3-2 大学附置研究センターとの双方向性	12
II-3-3 双方向型共同研究委員会	13
II-3-4 参加機関における実施体制	18
II-3-5 予算	26
III. 双方向型共同研究の遂行と成果	28
III-1 核融合研究の重点化と要素還元研究	28
III-2 重要な研究課題の集約と分担	29
III-3 双方向型共同研究参加機関の成果	32
III-3-1 筑波大学プラズマ研究センター	32
III-3-2 京都大学エネルギー理工学研究所 附属エネルギー複合機構研究センター	38
III-3-3 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター	45
III-3-4 九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センター	52
III-3-5 核融合科学研究所	61
III-4 教育および人材育成	68
III-5 成果の公表	75
III-6 我が国の核融合研究進展・活性化への寄与	81
III-7 他の学術分野への影響	89
IV. 双方向型共同研究の課題と展望	92
V. おわりに	94

添付資料一覧



## I. はじめに

平成16年より、大学と核融合科学研究所（以下、「核融合研」という。）は、法人化され新たなスタートを切った。核融合研は、他の4つの研究所とともに大学共同利用機関法人自然科学研究機構の一員となり、これまでもまして共同利用・共同研究推進の役割と責任が明確になった。また、中期目標・中期計画の策定とその実行を義務づけられた。大学、特に、大学の附置研究所、センターなどにも、法人化は大きな影響を与えている。大学は、個々の法人として、独立した運営が期待されることとなり、その結果、例えば、それまで核融合コミュニティの要請・要求を文部科学省が取りまとめ、附置研究所、センターなどで国の施策として実行されていた体制から、法人が自己の附置研究所、センターの研究方針・運営を全面的に決定できる体制となった。これにより、たとえ核融合コミュニティの要請・要求があっても、各法人がこれを受け入れなければ、実施できないことになり、日本全体として核融合コミュニティの要請・要求を施策として実行することが難しく、これらが法人の論理に埋没してしまう事態が懸念されるようになった。

法人化の直前には、核融合コミュニティの総意として、これまで長年にわたり日本の核融合研究を支えてきた大学と核融合研等の複数の実験計画・実験装置を整理・統合し、重点化・効率化する施策が実施されている。この施策は、平成15年1月に出された、科学技術・学術審議会学術分科会基本問題特別委員会核融合研究ワーキング・グループ（WG）の報告書、「今後の我が国の核融合研究の在り方について」にまとめられている。具体的には、大型ヘリカル装置（LHD）<sup>\*)</sup> 計画、レーザー高速点火<sup>\*)</sup> 計画、トカマク国内重点化装置<sup>\*)</sup> 計画、核融合材料試験装置<sup>\*)</sup> 計画の4つが重点化され、重点化されなかった計画は然るべき時期に完了することが求められた。このため、核融合研究を進展させるには、重点化された計画を中心に共同利用・共同研究をさらに推進させる必要性が生じることとなった。特に、大学等にある装置、人的資源、研究環境を利用して、共同研究の機会を増やすことが核融合研究の活性化に効果的であると考えられた。さらに、研究課題の選択と実施は、大学と核融合研の自主性・自律性にに基づき各組織の明確な責任において行われるが、大学が別個に課題を決めて研究を進めるのではなく、将来我が国の核融合研究に必要とされる学術的重要課題を核融合研が大学と協議しながら集約後、これを大学の大学共同利用機関・大学附置研究所・センターと分担、連携して進めることが必要とされた。今後の大学等における核融合研究においては、多様な要素が複雑に統合された核融合エネルギー炉開発研究での研究成果を要素還元し学術として体系化・普遍化することが重要である。

日本の大学、核融合研における核融合研究は、上記のような状況に直面したが、化石燃料の枯渇、二酸化炭素による環境破壊等の問題を克服し、今後、1万年以上この

人類の文明を継続させるためには、核融合エネルギーを是非とも実現させる必要があり、大学と核融合研には、これまで以上に核融合研究を活性化させることが期待された。このような状況の中で、核融合研は、従来の共同利用・共同研究の運営体制、研究経費の配分方法等を見直し、画期的な制度設計に基づく双方向型共同研究体制を考案した。この双方向型共同研究は、文部科学省、大学のご協力を得て、法人化された平成16年度から開始された。双方向型共同研究が従来の共同利用・共同研究と異なる点は、大学等にある装置、人的資源、研究環境を利用して研究の機会を増やす必要があることから、大学共同利用機関における共同利用・共同研究とは研究者の逆の動き、即ち、核融合研の研究者が大学等へ出向いて共同研究を実施することである。この双方向型共同研究において核融合研と双方向で行う共同研究には、筑波大学プラズマ研究センター、京都大学エネルギー理工学研究所エネルギー複合機構研究センター、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心、および九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センターが参加している。また、参画した研究センターに全国共同利用機関の機能を持たせたことにより、全国の大学の研究者、大学院生等が研究センターの双方向型共同研究に加わることができるようになったことも、全国の核融合研究をさらに活性化する上で重要な役割を果たすこととなった。

さらに、双方向型共同研究が従来の共同利用・共同研究と異なる点は、研究経費の取り扱いである。双方向型共同研究の研究経費は、発足に際して参画した研究センターに措置されていた核融合研究予算の約2分の1を核融合研に移管し、法人化に伴う双方向型共同研究発足後は、核融合研の運営費交付金として予算を執行している。従って、双方向型共同研究予算は、核融合研から特別研究経費として、所謂、概算要求を行い、参画している研究センターはそれぞれの大学から個別に概算要求を行わない仕組みになっている。また、核融合研と各大学との間で共同研究契約を締結し、核融合研の運営費交付金を参画している研究センターに移管している。各研究センターへの移管額は、活動状況、研究計画等に配慮して双方向型共同委員会が案を作成し、核融合研の運営会議で決定されている。双方向型共同研究の予算は、平成18年度から約5千万円増額され、平成19年度も同額であったが、20年度は2千万円減額されている。

核融合研に求められている、上記の「将来の核融合研究に必要とされる重要課題の集約」機能は、実際には双方向型共同研究委員会で果たされている。双方向型共同研究委員会は、核融合研の研究者、参画している研究センターのセンター長、核融合コミュニティの代表で構成されており、将来の核融合研究に必要とされる重要課題を集約するための条件・環境が整っている。双方向型共同研究委員会では、「将来の核融合研究に必要とされる重要課題」として、LHDの目標の一つにもなっている「環状プラズマ<sup>\*</sup>)の総合的理解」に向けた研究を上げている。これを深めることを当面の目標として、これまでの研究内容、研究設備、研究実績等に考慮し、即ち、これまでの

研究との整合性にも配慮し、核融合研と各研究センターで分担、連携する分担課題を次のようにした。即ち、核融合研は「環状プラズマの総合的理解（詳細は61ページに記載）」、筑波大学プラズマ研究センターは「電位によるプラズマ閉じ込め向上の物理研究（32ページ）」、京都大学エネルギー理工学研究所エネルギー複合機構研究センターは「磁場分布制御技術を用いたプラズマ流制御による輸送・安定性改善研究（38ページ）」、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターは「レーザーによる高速点火研究（45ページ）」、九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センターは「電磁波を用いたプラズマ電流駆動による定常運転の研究（52ページ）」が主要な分担課題に決定された。

筑波大学プラズマ研究センターの分担課題は、LHDの重要課題である「高イオン温度プラズマの実現のため、電場の閉じ込めへの影響を研究し、活用する」ことに、九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センターの分担課題は、「長時間のプラズマ生成実験を行い、安定な連続運転を実証する」と「プラズマと磁場との圧力比( $\beta$ 値<sup>\*</sup>)5%以上の実現と関連する物理研究を行う」ことに寄与するものである。また、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの分担課題は、最近LHDで精力的に研究が進められている「超高密度プラズマの物理」解明に、京都大学エネルギー理工学研究所エネルギー複合機構研究センターの分担課題は、LHDでは実現できないより一般的なヘリカル磁場配位で研究を進めることにより、環状プラズマの総合的理解に直接寄与するものである。このように、各研究センターの分担課題は、LHDの目標の一つである環状プラズマの総合的理解を深めるものとなっている。

双方向型共同研究の開始後、核融合研と各研究センターは、Ⅲ-3節で述べるように多くの学術的研究成果を上げてきている。筑波大学プラズマ研究センターでは、電界のシアーにより不安定を制御し、プラズマの閉じ込めを改善することに成功している。また、京都大学エネルギー理工学研究所エネルギー複合機構研究センターでは、閉じ込め改善モードとヘリカル磁場配位の構造との関係を解明する研究が進展している。このような研究成果は、狙い通り、LHDの目標の一つである環状プラズマの総合的理解を深めるものとなっている。また、これらの学術研究の成果は、将来、核融合炉を実現するために役立てられるのは無論のこととして、一般に、既存の大型核融合実験装置やITER<sup>\*</sup>等の新装置で必要に応じて活用されることになる。これにより、さらなる問題点の洗い出しなどが可能となり、核融合エネルギー研究の発展が益々望めることとなる。

さらに、双方向型共同研究は、研究の機会が増加したことにより、核融合研と研究センター以外の大学等の研究を発展させることにも寄与している。即ち、大学等での研究成果を研究センターのより大きな装置を用いて行うことにより研究の展開が可能になったこと、大学等にはないプラズマを研究することによって得られた知見を大

学等の研究に活用することが可能になったこと等により、大学等の研究も大いに活性化されている。また、双方向型共同研究は、若手の育成にも大きく貢献している。大学院生、若手研究者は、他の機関、他の装置で共同研究を行うことにより、また、他の機関からの一流の研究者と共同研究を行うことによって、より多くのことを学ぶ、また経験する機会が増え、大きく成長することができる環境を得ている。このようなことから、双方向型共同研究に参画している研究センターによっては、大学院生の数が20%以上増えるという状況も生まれている。

双方向型共同研究の今後の発展を端的に予測するものとして、九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センターから出された、従来の *TRIAM-1M*<sup>\*</sup>) 計画の終了と、球状トーラス (*ST*)<sup>\*</sup>) 型の定常実験装置である「*QUEST*」を用いる研究計画の提案を双方向型共同研究で実現させたことが上げられる。共同研究委員会の専門部会である双方向型共同研究委員会では、*TRIAM-1M* 計画の終了と *QUEST* の建設を認める手続きを行うとともに、*QUEST* の実験推進体制について九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センターの提案を受け、次のようにすることを承認した。*QUEST* の実験は、研究センターの下に *QUEST* 実験推進会議と高温センター実験会議の2つの組織を置いて進める。*QUEST* 実験推進会議の議長は九州大学以外の研究者が務め、実験をコーディネートする、また、高温センター実験会議の議長は九州大学の研究者が務めるが、九州大学以外からも委員が加わり、実験に係わる運用を行う。双方向型共同研究委員会では、この実験体制を支援するとともに、日本のST研究の活性化を図るため、双方向型共同研究委員会のもとに双方向型共同研究推進専門部会 (ST) を設置した。双方向型共同研究推進専門部会 (ST) は、*QUEST* 実験推進会議と連携し、*QUEST* 実験を成功させる役割を担っている。また、現在は、この専門部会の部会長が *QUEST* 実験推進会議の議長を兼ねている。これらのことから、*QUEST* は、双方向型共同研究の下、全国の研究者に真に開かれた共同研究用装置となり、全国の英知を集めて研究の大幅な進展が望めることとなった。

双方向型共同研究は、今後広く普及すると考えられるネットワーク型共同研究の一つとして、先陣を切って実施されており、その成果に核融合以外の分野からも強い関心が持たれている。また、双方向型共同研究推進専門部会 (ST) のように、双方向型共同研究というネットワーク型共同研究のもとで別のネットワーク型共同研究が生まれるなど、ネットワーク型共同研究の言わば多層化が進展しており、双方向型共同研究は益々進化すると考えられている。本報告書では、双方向型共同研究が、真に我が国の核融合研究を発展・強化するものとなっているか、制度設計や研究成果の観点から自己評価するとともに、まだ成長途中にあるこの制度の今後への展望を図るものである。また、本報告書をもとに外部評価を受け、さらなる改革を進める所存である。

## II. 双方向型共同研究の創設と目的

### II-1 大学における核融合研究を巡る状況

大学および核融合研における核融合研究は、より優れた核融合炉を実現するという観点から、視野の広い学術研究を進めてきた。具体的には、種々の閉じ込め概念の原理実証、関連する核融合炉実現に向けた学術研究および人材育成のため、所謂、多岐路線と呼ばれる、各々が異なる方式の核融合実験装置を用いて研究を進める方策を採ってきた。

多岐路線は30年ほど続き、多くの成果を上げることができた。多岐路線の中から、例えば、大型ヘリカル装置（LHD）計画のような、より核融合炉に近いプラズマ領域で学術研究を進展させることのできる研究計画が誕生し、実施されている。このLHD計画等に象徴されるように、多岐路線は転換期を迎え、現在は核融合研究の重点化・効率化の方策が採られている。即ち、大学および核融合研におけるこれまでの研究実績と知的基盤とを踏まえて、我が国の核融合研究を今後さらに発展・強化させるため、これまで長年にわたり核融合研究を支えてきた大学および核融合研の複数の実験装置を整理・統合して重点化・効率化する方策が、核融合コミュニティで合意され、現在、実施に移されている。具体的には、ヘリカル(LHD)、トカマク(JT-60Uおよびそれに続くJT60-SA)、レーザー（激光XII号及びそれに続く高速点火レーザー装置）および炉工学が重点化の4つの柱となっている。

さらに、重点化・効率化を浸透させ、且つ、核融合研究を全国的に活性化するための施策として、共同利用・共同研究を強化する必要があるとされた。また、新たな可能性を目指した研究機会を生み出すためにも、共同利用・共同研究の一層の活性化が

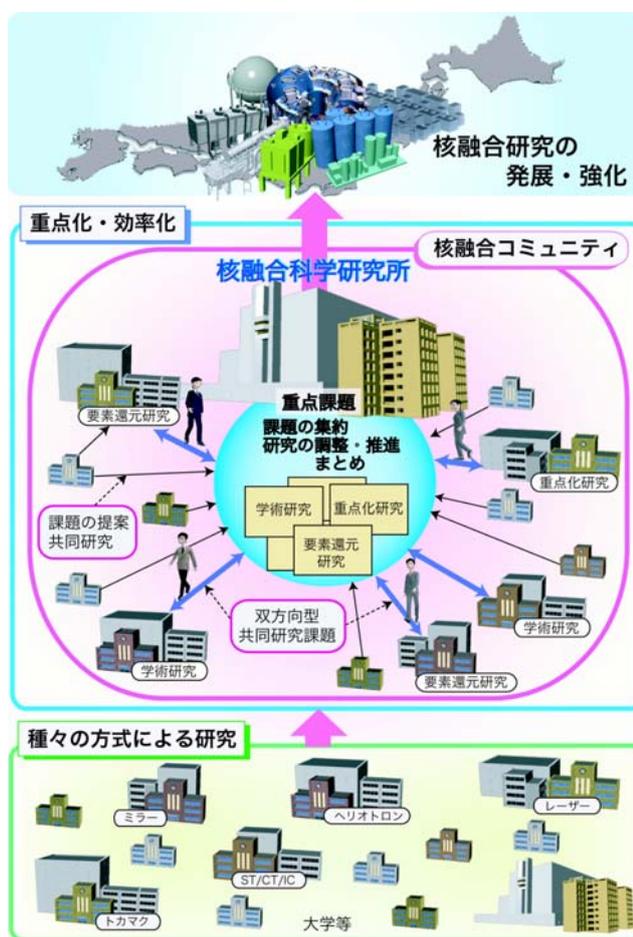


図 II-2-1 核融合研究の進展

求められた。特に、大学共同利用機関として、核融合研にあっては、我が国の核融合分野における学術研究に資する役割の強化が一層求められている状況に鑑み、大学共同利用機関として大学との連携の強化等が必要であり、運営体制や研究の対象範囲等の見直しを行い、共同利用・共同研究の一層の活性化を可能とするため、制度設計の充実に必要が認識された。

時を同じくして国立大学および大学共同利用機関の法人化が行われ、大学および核融合研は個々の法人化として中期目標・中期計画の策定とその実行を義務づけられた。これにより、核融合研は大学共同利用機関として、共同利用・共同研究を介して大学における核融合研究の活性化に、より明確な責任を持つとともに、各大学においても大型設備と多数の人員を有する附置研究所・センターは、その存在意義を明確に示すことがこれまで以上に求められることになった。

## II-2 目的と意義

前節に述べた大学における核融合研究を巡る状況の中で、核融合研究を全国的に発展させるためには、先ず、核融合研を含め、各大学等の研究をさらに活性化させることである。このための方策として、双方向型共同研究が開始された。即ち、大学等にある装置、人的資源、研究環境を利用して、研究の機会を増やすことが研究の活性化の施策になるものと考えられたことから、大学共同利用機関における共同利用・共同研究とは研究者の逆の動き、即ち、核融合研の研究者が大学等へ出向いて共同研究を実施することが両者の研究資源の相乗的な活用のために必要であった。また、研究の学術的相乗効果により、核融合研における共同研究も活性化されると考えられた。さらに、双方向型共同研究に参加する大学等が、全国共同利用機関の機能を有するようになることも、全国の核融合研究をさらに活性化する上で重要であると考えられたため、双方向型共同研究で実際に実現されている。双方向型共同研究は、前節で述べられた共同利用・共同研究の一層の活性化の必要性に具体的に答えたものといえる。

双方向型共同研究を開始するにあたって、これからの核融合研究をさらに発展させるには、研究者の動きに加えて、将来の核融合エネルギーの実現に必要な物理的、技術的課題を整理・集約し、学術的基盤を構成する大学等がこれらの研究課題を分担して進める必要があると結論付けられた。即ち、個々に研究の目標を定めるのではなく、核融合研が共同利用機関の特徴を生かして共同研究体制を強化し、核融合研究に必要とされる重要課題を集約後、これを自主性・自律性に基つき大学等と分担、連携して進めることが必要とされた。繰り返し述べると、重要課題の集約は核融合研を中心に行うが、研究の実施に際しては、大学と核融合研の自主性・自律性を重視し、各組織が明確な責任を持って進めることとした。これは、前節の大学における核融合研究を巡る状況で述べた多岐路線からの脱却を図り、重点化・効率化を推進することに他なら

ない。これにより、共同研究の枠組みの中で大学等に必要な研究者を派遣することが可能になる等、全体としてバランス良く研究が進展する仕組みを構築することが可能となった。このような議論に基づいて、平成16年度から新たに双方向型共同研究の枠組みが構築され、学術的要素課題を互いに分担する新しい共同研究体制がスタートした。

先にも述べたように、核融合研究WGグループの報告書では、大型装置を減らし重点化・効率化する一方で、核融合研究を活性化するため、あるいは研究レベルを維持するため、大学等にある装置、人的資源、研究環境を利用して核融合研究を推進することが謳われている。このために、共同利用・共同研究の機会を増し、共同利用・共同研究を活性化することが主張されており、特に、双方向性の実施が、重点化・効率化を成功させる鍵になるとされている。従って、現在展開している双方向型共同研究により、核融合研究の活性化が図られれば、核融合研究WGグループの求めている重点化・効率化にも寄与することとなる。

核融合研究WGグループの報告書で求められている重点化・効率化への寄与に関しては、双方向型共同研究は、学術研究上、直接的な貢献ができる状況にある。双方向型共同研究では、「将来の核融合研究に必要とされる重要課題」として、LHDの目標の一つにもなっている「環状プラズマ<sup>\*)</sup>の総合的理解」に向けた研究を取り上げている。これを深めることを当面の目標として、これまでの研究内容、研究設備、研究実績等に考慮し、即ち、これまでの研究との整合性にも配慮し、核融合研と各研究センターで分担、連携する分担課題を決定している。従って、双方向型共同研究の分担課題を進展させることは、学術研究として、重点化・効率化へ寄与することに他ならない。双方向型共同研究の研究課題については、後で詳しく述べる。

核融合研は大学の共同利用機関として「核融合プラズマに関する学理及びその応用の研究」を推進することを目的に設立され、全国の大学の研究者の積極的参加を得て研究活動が進められてきた。核融合研における共同研究は、双方向型共同研究が加わったことにより、双方向型共同研究、LHD計画共同研究、一般共同研究の3つのカテゴリーで構成されることになり、より自由に、また、より活発に共同研究を推進する体制が構築された。一般共同研究は、大学共同利用機関における通常の共同利用・共同研究であり、核融合研設立時から開始された最も歴史のあるもので、大学共同利用機関法人としての根幹をなすものである。この共同研究は、大学等の共同研究者に核融合研に来て頂き、核融合研の装置、予算を使って、共同研究を行って頂く制度であり、他にはない我が国独自のものである。また、LHD計画共同研究は、大学等で育まれている各種の研究、萌芽的研究、技術等をLHD実験に適用・集約し、LHD実験の画期的進展、実験及び装置運転の効率化等を図ることを最終目的にしている。このため、LHD計画共同研究は、LHD実験に適用・集約するまでに必要な事前の研究を、先ず大学等で行うための共同研究であり、平成8年度から実施している。従

って、LHD計画共同研究の終了後、一般共同研究に移って、LHD計画共同研究の成果を基にLHDで実験を行う、あるいはLHDに適用することが原則である。

双方向型共同研究は、核融合研を含め、各大学等の研究をさらに活性化させるために考え出されたものである。これにより、大学および核融合研の複数の実験装置を整理・統合して重点化・効率化する方策が実施された結果、実験装置数の減少により研究が縮小することも補えると予想された。実際、補う以上に、全国の核融合研究を活性化することに成功している。このため、この研究制度は核融合研究の分野のみならず、他の多くの分野で取り入れられ、研究を活性化する可能性がある。特に、今後、人口の減少に伴う大学の研究者、装置の減少を補う、所謂、右肩下がりの状況に適した制度として、将来の大学において研究を現在のような高レベルのまま維持できる可能性を秘めており、我が国の将来を占う上で、双方向型共同研究の成功は意義深いものとなっている。

### II-3 仕組みとその特徴

双方向型共同研究は、先にも述べたように、核融合研と大型実験装置を持つ大学共同利用研究所・大学附置研究所・研究センターが双方向で行う共同研究、これらの大学共同利用研究所・大学附置研究所・研究センター間で各々行う共同研究、および各大学等の研究者がこれらの大学共同利用研究所・大学附置研究所・研究センターに出向いて行う共同研究からなっており、全国規模で複数の大学共同利用研究所・大学附置研究所・研究センターが参画するとともに全国の大学からも多数の共同研究者が参加する先進的な大学間連携の共同研究制度となっている。双方向型共同研究において核融合研と双方向で行う共同研究には、筑波大学プラズマ研究センター、京都大学エネルギー理工学研究所エネルギー複合機構研究センター、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心、および九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センターが参加している。

共同研究件数・共同研究者数

年度	16年度	17年度	18年度	19年度
件数	43件	52件	53件	59件
人数	延べ495人	延べ625人	延べ671人	延べ777人



図Ⅱ－3－1 双方向型共同研究の実施図

双方向型共同研究の経費は、法人化に伴う双方向型共同研究の発足に際して、筑波大学プラズマ研究センター、京都大学エネルギー工学研究所エネルギー複合機構研究センター、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター、九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センターに措置されていた核融合研究予算の約2分の1を核融合研に移管し、法人化に伴う双方向型共同研究発足後は、核融合研の運営費交付金として予算を執行している。具体的には、核融合研と各大学との間で共同研究契約を締結し、核融合研の運営費交付金を大学共同利用研究所・大学附置研究所・研究センターに移管している。大学共同利用研究所・大学附置研究所・研究センターへの移管額は、後で述べる双方向型共同研究委員会が案を作成し、核融合研の運営会議で決定されている。

双方向型共同研究の仕組みを理解する上で重要な点は、双方向型共同研究を創設することを各大学と核融合研の中期目標・中期計画に記載したことである。これは、各大学が、大学共同利用研究所・大学附置研究所・研究センターの研究活動を公式に認めたものであり、双方向型共同研究に参画した大学共同利用研究所・大学附置研究所・研究センターの法人化後の存在意義が、明確に示されたことを意味している。

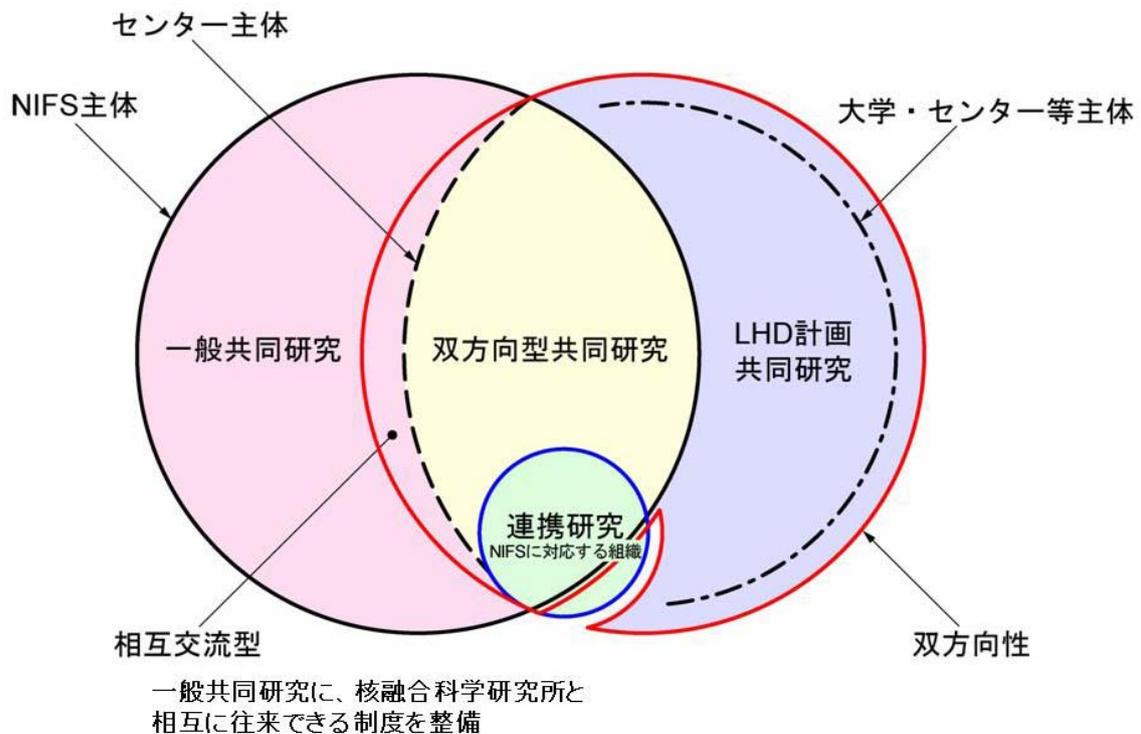
双方向型共同研究は、基本的に、核融合研を中心に4つの研究センターがネットワークを組み、それに大学等の研究者が参画するという、ネットワーク型共同研究に該当している。さらに、この双方向型共同研究に参画している九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センターを中心に、球状トカマク（S T）を研究している大学がネットワークを形成し、双方向型共同研究委員会の下に置かれた双方向型共同研究推進専門部会（S T）がこのネットワークを運営するという、ネットワークの多層化が双方向型共同研究では実現している。現在は、S T研究のみこのようなネットワークが形成されているが、他の研究テーマについても同様のネットワークがいくつか形成される見込みである。

### II-3-1 大学共同利用機関の役割

日本の大学におけるプラズマ・核融合研究は、個々の大学では持ち得ない大型設備を大学群全体で保有し、これを用いて共同利用・共同研究を進めるという世界的に類を見ない独創的なシステムを昭和30年代に構築することによって、質的に高い学術レベルを全国の大学研究者が共有する仕組みを作り出してきた。大型設備はコミュニティの共通財産であるという考えの下、中核機関として名古屋大学プラズマ研究所を設立し、名古屋大学プラズマ研究所が装置の維持管理を行い、大学研究者を中心とするコミュニティが共同研究委員会を組織して共同利用・共同研究の遂行に責任を持つ、という仕組みであった。

その後、核融合研究の進展は著しく、各大学における設備の充実も進められ、先に述べた多岐路線と呼ばれる研究体制が構築されるに至った。1980年代になり、多岐路線の中から、日本独自のアイデアであるヘリオトロン磁場配位<sup>\*</sup>による閉じ込めの研究をさらに発展させ、核融合炉に外挿可能なプラズマを対象にした研究を進めたいという大学関係者の熱意が実り、日本の大学における新たな中枢研究機関として、名古屋大学プラズマ研究所を廃止し、核融合研が平成元年に発足した。核融合研は、それまで培われた共同利用・共同研究の経験を生かしながら、全国の大学研究者と協力して、世界を先導する大型プロジェクト研究を遂行する役割を担っている。昭和30年代に始められた共同利用・共同研究の仕組みは、「一般共同研究」として核融合研に受け継ぐことにより、質的に高い学術レベルを全国の大学研究者が共有する仕組みは維持され、その役割は不変である。

一般共同研究は、個々の大学では持ち得ない大型設備を大学群全体で共有するという発想から始まっているため、基本的に大学研究者が核融合研に来て研究を行うことを想定したシステムとなっている。しかし、現在は大学にも特長を持った装置が作られており、一方、核融合・プラズマの研究者が核融合研に多く在籍していることから、核融合研の研究者が大学に出向いて共同研究を行うことが、大学における核融合・プラズマ研究のさらなる進展に貢献すると考えられるようになった。このため、平成15年から一般共同研究の枠組みの中に新しく「相互交流型共同研究」を設け、人材の交流を主とした仕組みとしてスタートしている。また、平成8年に発足したLHD計画共同研究は、LHD実験に適用・集約するまでに必要な事前の研究を先ず大学等で行うための共同研究であることから、核融合研から研究者が大学等に出向いて共同研究を行っている。



図Ⅱ－3－2 共同研究体制と双方向性

これらの双方向性を持った共同研究と双方向型共同研究の違いは、双方向型共同研究が大学と核融合研の自主性・自律性に基づき各組織の明確な責任においてなされているが、研究目標は個々に定めるのではなく、今後我が国の核融合研究に必要とされる重要課題を大学共同利用機関である核融合研が大学と協議しながら集約後、これを各参加機関と分担、連携して進める方式を採用していることである。さらに、双方向

型共同研究が、核融合研と各大学との間で共同研究契約を締結し、核融合研の運営費交付金を参加機関に移管することによって実施する、大規模な共同研究であることである。これにより、核融合研は、従来の大学共同利用機関の役割に加えて、双方向型共同研究に大型装置を持つ全ての研究センターが参画していることから、これらの研究センターとともに、予算を含め、日本の大学全体の核融合研究の課題決定とその遂行に直接責任を持つこととなった。

### II-3-2 大学附置研究センターとの双方向性

双方向型共同研究は、前述のように、大学等にある装置、人的資源、研究環境を利用して、研究の機会を増やし、研究の活性化を図ることを先ず第一に開始された。このため、核融合研における共同利用・共同研究とは逆の研究者の動き、即ち、核融合研の研究者が大学等へ出向いて共同研究を実施することが必要とされた。双方向型共同研究は、これに加えて、双方向型共同研究に参画している研究センター間で行う共同研究と、全国共同利用機関でない研究センターも双方向型共同研究に参画することにより、全国共同利用機関と同等の機能を有するようになったことから、大学等の研究者がこれらの研究センターに出向いて行う共同研究からなっている。

双方向型共同研究の研究課題は、核融合研、研究センター、あるいは大学等の研究者が、共同研究を実施する研究センターや核融合研を指定して核融合研に共同研究の申し込みを行い、次に述べる核融合研の双方向型共同研究委員会の審査を経て、核融合研の運営委員会で最終的に採択された後、実施されている。核融合研の研究者が、多数、各研究センターの共同研究に加わっており、双方向型共同研究の趣旨に沿ったものとなっている。研究センターから核融合研への研究者の動きは、元々、一般共同研究で行われているため、両者の研究者の動きを合わせて双方向性が実現している。双方向型共同研究の中で、お互いに分担している重要課題を解決するため、研究者が行き来することにより双方向性を確保することも可能であるが、その必要性は今のところないと認識されている。核融合研には我が国における核融合・プラズマ分野の研究者の多くが在職し、各研究センターが必要とする多様な専門家が揃っていることなどから、双方型共同研究により各研究センターにおける核融合研究が促進されている。

ここで、核融合研を中心に重要課題が集約され、各研究センターがこれを分担する仕組みとなっているにも拘わらず、他の研究課題と差異なく、各研究センターが核融合研に双方向型共同研究の申し込みを行い、審査・採択の手続きを経て共同研究が実施されるのは、透明性と公平性を確保するためである。審査の結果、不採択となれば、研究センターのみならず核融合研の責任が問われることになる。

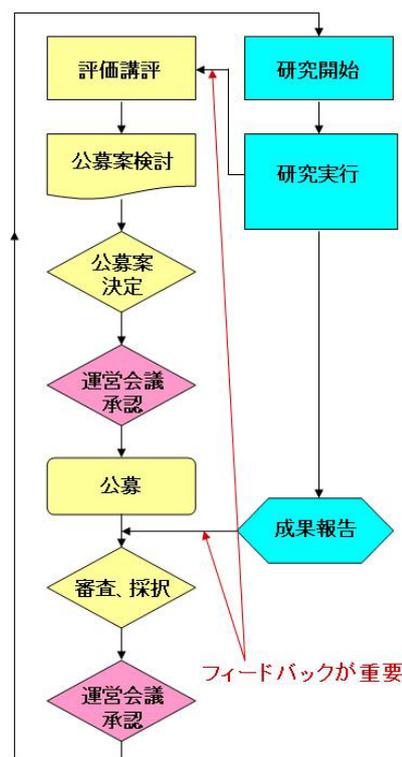
また、双方向型共同研究により、全国の大学の優秀な研究者が各研究センターの共同研究に参加することが可能になったことから、研究センターの研究が促進されると

ともに、全国の大学の研究者が研究センターの質の高い学術レベルを共有することにより、センター以外の大学の研究も進展されることとなった。このように、双方向型共同研究の導入によって、我が国の大学等の核融合・プラズマ研究は、これまで以上に活性化されつつあるといえる。

### II-3-3 双方向型共同研究委員会

上記のような双方向型共同研究の企画・運営を担うのが核融合研究所に置かれた双方向型共同研究委員会である。

大学共同利用機関である核融合研における共同利用・共同研究の運用は、核融合科学研究所運営会議共同研究委員会規則(以下「委員会規則」)に基づく核融合科学研究所運営会議共同研究委員会(以下「共同研究委員会」)によって行われている。即ち、核融合科学研究所運営会議(以下「運営会議」)のもとに共同研究委員会が設けられており、そのもとに一般共同研究委員会、LHD計画共同研究委員会、双方向型共同研究委員会の3つの委員会が作られている。これらの委員会は、必要に応じて開催され、研究課題の公募や採択の決定などを行っている。研究課題の採択等の最終的な決定は運営会議で行われており、共同研究委員会の任務は、核融合研において実施する共同研究の企画及び運営に関する事項を調査審議、立案することとなっている。



図II-3-3 共同研究の流れ

研究課題の審査・採択は、双方向型共同研究発足当初、共同研究を実施する研究センターがその実施可能性を含めて申請書を基に審査し、実際には、双方向型共同研究委員会がそれを追認する形で行われていた。しかし、平成19年度に実施した平成20年度公募分からは、透明性と公平性をより高めるため、以下の手順を踏むこととした。

- (1) 応募のあった共同研究課題について、継続の場合、前年度の研究成果報告書と申請書を、新規の場合、申請書を基に、双方向型共同研究委員会委員が4段階の点数で評価する
- (2) 共同研究課題に(1)の各委員の評価を加算した合計点を付け、実施を希望している研究センターへ共同研究の応募申請書を送る
- (3) 各研究センターは合計点を基に、その実施可能性を含めて各課題の採択可否

案と予算配分案を作る

- (4) 合計点、研究センターの案を参考に、双方向型共同研究委員会で議論し、採択案、予算配分案を決定する。

共同研究委員会は、委員会規則に基づき、次に掲げる委員をもって組織されている。

- (1) 核融合研究所内及び所外の運営会議委員各 8 名以上
  - (2) 核融合科学又はこれに関連する分野の研究に従事する者 3 6 名以内
- (1) の委員は運営会議で選出され、(2) の委員は運営会議の議を経て所長が委嘱

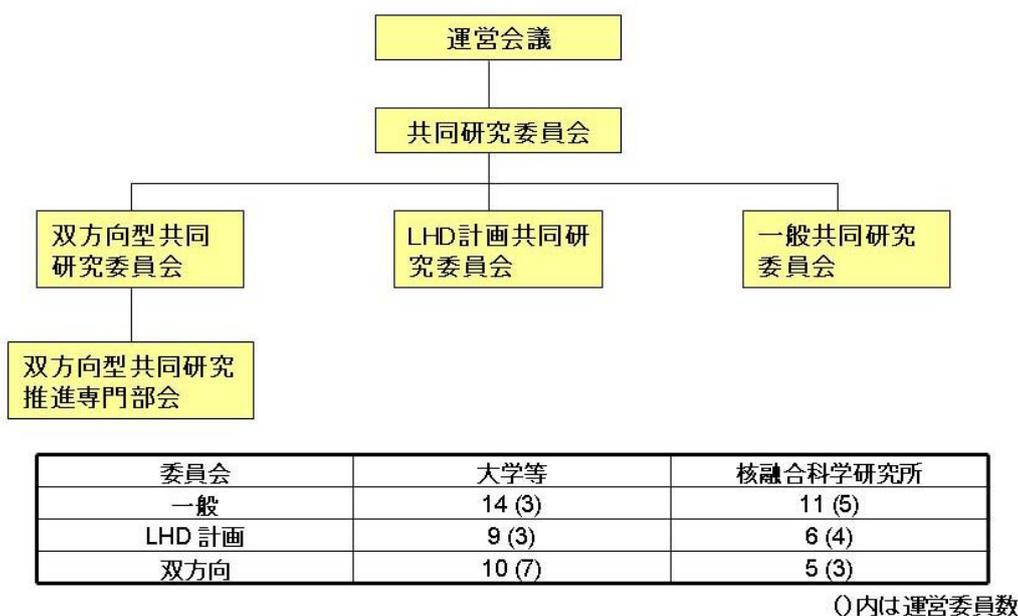


図 II - 3 - 4 共同研究委員会

している。委員の任期は 2 年で再任が認められている。

双方向型共同研究委員会に関しては以下の人数が決められている。

- 所外運営委員 7 名      所内運営委員 3 名
- 所外委員 3 名      所内委員 2 名

双方向型共同研究委員会の役割をふまえ、所外運営委員を含む所外委員には、下記センターのセンター長が含まれている。

- ・ 東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センター
- ・ 筑波大学プラズマ研究センター
- ・ 東京大学高温プラズマ研究センター
- ・ 富山大学水素同位体科学研究センター
- ・ 京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター
- ・ 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター
- ・ 九州大学応用力学研究所附属高温プラズマ力学研究センター

すなわち、上記センターのうち、核融合研と双方向型共同研究を行っていないセンターのセンター長は、「核融合プラズマに関する学理及びその応用の研究」に参与していることが委員会に加わって頂く条件となっている。また、核融合コミュニティの意見を双方向型共同研究委員会に反映させるため、次の段落で説明する核融合ネットワークの、プラズマ科学の一部を含む核融合科学と核融合炉工学の委員会の代表者にも委員として加わって頂いている。委員長には所外の運営会議委員にご就任頂き、審議の透明性を確保しながら、将来計画の議論や各々研究課題の採択等を行っている。

核融合ネットワークは、核融合研究を進めるにあたって、大型装置による重点研究の調整・推進の必要性があること、また、先導的・基盤的研究の育成の必要性があることなどから、コミュニティの意見を集約する場として、文部省科学研究費補助金総合研究（A）平成6－7年「核融合学の高度化とネットワーク化に関する総合的研究」（代表：飯吉厚夫）で行われた議論を元に平成8年に発足した。主な機能は、研究情報の提供と研究の企画の2つに大別され、以下の6項目を活動の主な目的としている。

(1) 研究情報交換の活性化・効率化

→ ITERに関する議論、SINET3を活用した実時間共同実験の実現

(2) 共同研究の活性化

→ 核融合科学研究所・LHD計画共同研究、双方向型共同研究の展開

(3) 研究拠点の充実・整備

→ 九大・TRIAM計画の転換の議論

(4) 国際協力の有機的推進

→ 日米共同プロジェクト、ITER/BA, IFMIF/EVEDAへの取り組み

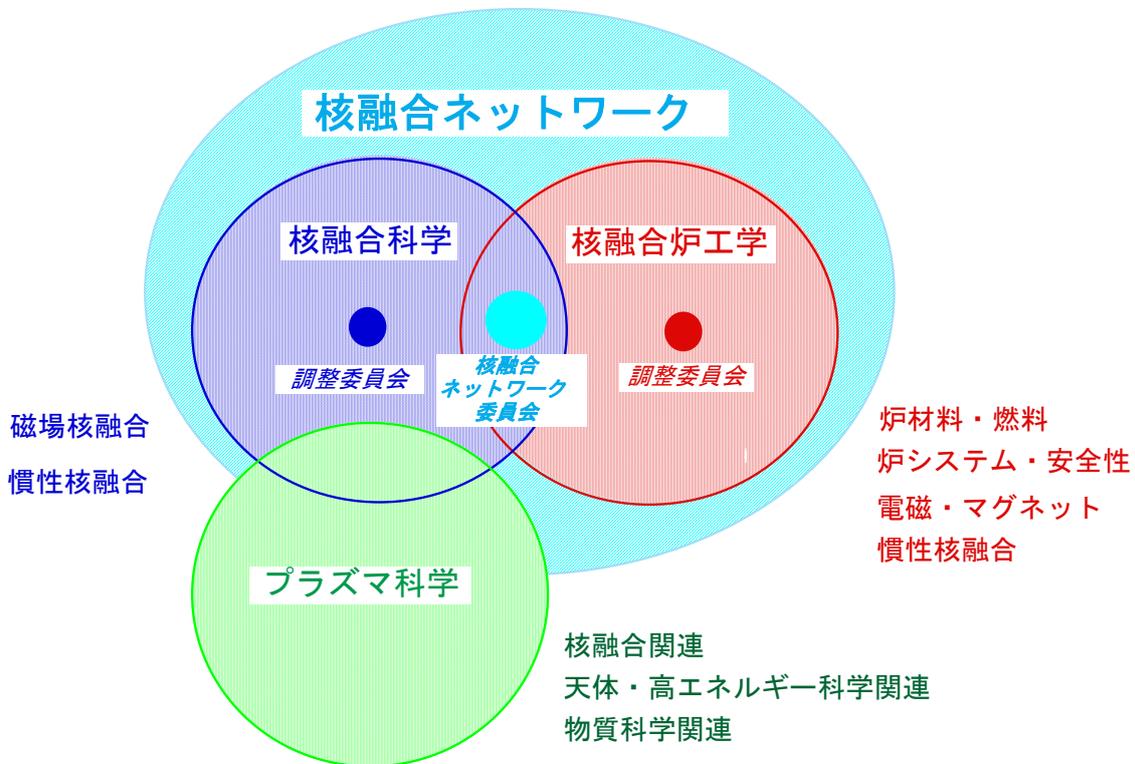
(5) 独創的基礎研究の促進

→ 科研費特定領域「燃焼プラズマ計測」の応募と実施

(6) 若手教育の推進

核融合ネットワークは、図Ⅱ－3－5に示したように、核融合科学と核融合炉工学の2つのグループに大別されており、核融合科学には、基礎プラズマやエッチングなどの応用プラズマの研究者のグループであるプラズマ科学の一部が含まれている。また、核融合科学と核融合炉工学には、核融合研究に関連する全ての分野が小グループにまとめられて含まれている。核融合ネットワークは、大学等の助教以上のスタッフと日本原子力開発機構の研究者で構成されており、メンバーは現在約500名である。核融合に関係する日本の研究者のほぼ全員がメンバーになっている。核融合ネットワークは、核融合科学と核融合炉工学にそれぞれ設置された委員会を中心に、自主・自律した形で運用されている。

# 核融合ネットワーク



核融合関連ネットワークの構成図

図Ⅱ-3-5

双方向型共同研究委員会は、日本の大学全体の核融合研究の方向性・将来計画を議論する場として位置づけられており、研究課題が、

- 特に4センターの研究課題が双方向型共同研究の方針に合致しているか、
  - 今後、我が国の核融合研究をさらに発展させるため、どのような方向、内容であれば良いか、
  - 現4センター以外の機関から提案された新規研究課題を核融合研とセンター間の双方向型共同研究と同等の条件で採択するにはどのようなガイドラインが必要か、あるいは、どのような条件をクリアしていれば良いか
  - 必要な予算は大枠としてどのような配分であれば良いか、また、双方向型共同研究の概算要求案を如何にするか
- 等について、年間を通して議論を行っている。

双方向型共同研究委員会の開催回数は  
平成16年度 2回

平成17年度 7回

平成18年度 9回

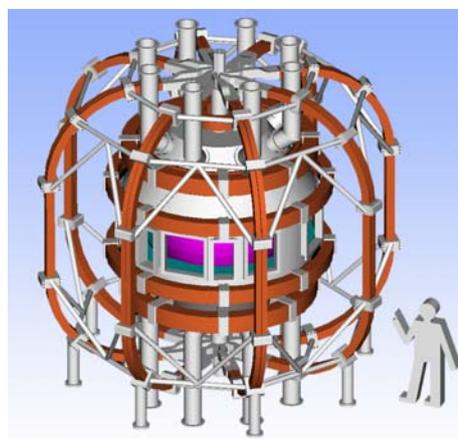
平成19年度 9回

となっている。

双方向型共同研究委員会は、自らの役割も含め、常に、見直し、新規性、透明性の確保等に努めている。例えば、平成18年11月のプラズマ・核融合学会では、双方向型共同研究委員会が「双方向型共同研究の成果と今後の展望」と題した特別企画を開催し、核融合コミュニティの意見、要望等を直接取り込み、双方向型共同研究に反映させる試みを行っている。また、前にも述べたように、核融合ネットワーク等を通して、核融合コミュニティの意見、要望を常に取り込める体制をとっている。

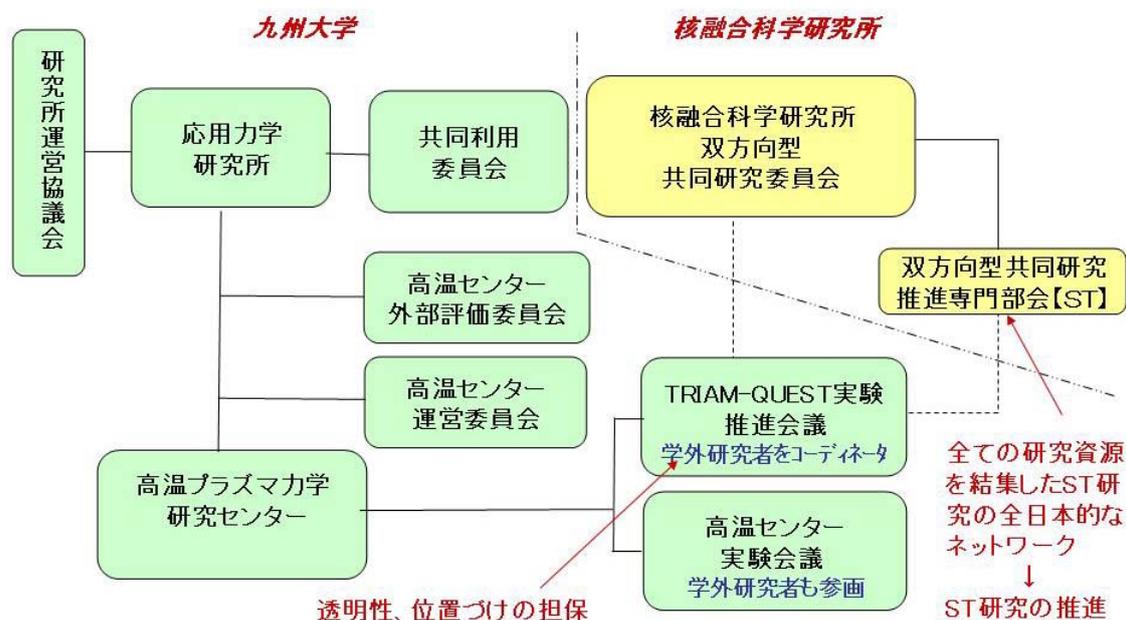
双方向型共同研究委員会の卓越した企画力を端的に表しているものとして、九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センターから出された、従来の TRIAM-1M 計画の終了と、球状トーラス (ST) 型の定常実験装置である「プラズマ境界力学実験装置」を用いる研究計画の提案を審議・検討し、TRIAM-1M 計画の終了を承認するとともに、プラズマ境界力学実験装置計画を実現させたことが上げられる。

まず、双方向型共同研究委員会のもとに九大プラズマ境界力学実験装置検討会を設置し、研究計画の審議・検討を行った。検討会の委員は、双方向型共同研究委員会の委員、ST研究に関連した実験及び理論・シミュレーション研究者、定常化研究及び核融合実験装置設計等に関わる研究者で構成され、STの提唱者である米国オークリッジ国立研究所の Martin Peng 博士にも加わって頂いた。また、オブザーバーも含めると、検討会には日本のST研究グループを代表する研究者全員が参加している。検討会では、様々な角度から、学術的・技術的価値、双方向型共同研究の方針との整合性、全国共同利用の可能性等について審議・検討を行った。検討会は、4回開催され、議事録を核融合研のホームページで公開することにより、検討会に加わった者以外の意見も広く求めるとともに、学会、核融合ネットワーク、九州大学応用力学研究所研究会等で全国の研究者と議論を重ねた結果、核融合コミュニティとして、プラズマ境界力学実験装置計画を推進すべきという結論に達し、研究計画をより価値のある緻密なものに昇華させて報告書を双方向型共同研究委員会に提出した。これを受け、双方向型共同研究委員会、共同研究委員会、運営会議、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で研究計画が承認され、実施に移されている。研究計画の実施後、「プ



図II-3-6 九大 QUEST 装置

ラズマ境界力学実験装置」は「QUEST」と命名されている。



図Ⅱ-3-7 QUESTの実験体制

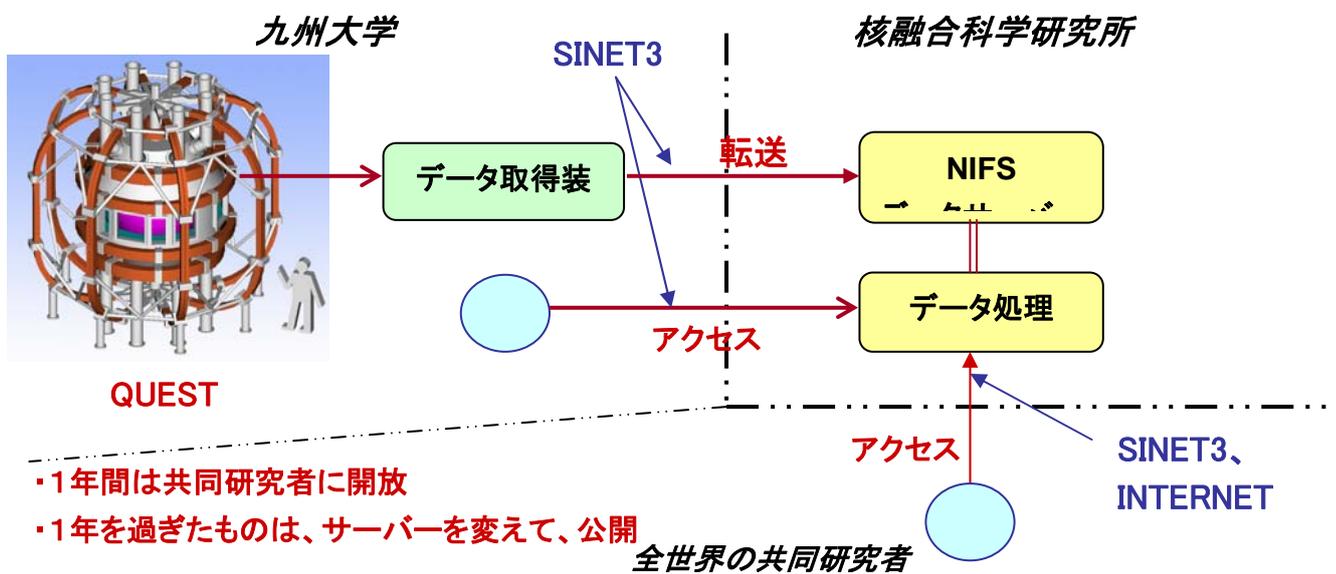
双方向型共同研究委員会では、QUEST 装置建設の進捗状況の確認を随時行うとともに、実験推進体制について九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センターと協議の上、同意している。QUEST の実験は、研究センターの下に QUEST 実験推進会議と高温センター実験会議の2つの組織を置いて進めることとした。QUEST 実験推進会議の議長は九州大学以外の研究者が務め、実験をコーディネートする、また、高温センター実験会議の議長は九州大学の研究者が務めるが、九州大学以外からも委員が加わり、実験に係わる運用を行うという役割分担が決定された。双方向型共同研究委員会では、この実験体制を支援するとともに、日本のST研究の活性化を図るため、双方向型共同研究委員会のもとに双方向型共同研究推進専門部会（ST）を設置した。双方向型共同研究推進専門部会（ST）は、QUEST 実験推進会議と連携して、QUEST 実験を成功させる役割を担っている。また、現在は、この専門部会の部会長が QUEST 実験推進会議の議長を兼ねている。これらのことから、QUEST は、双方向型共同研究の下、全国の研究者に真に開かれた共同研究用装置となり、全国の英知を集めて研究の大幅な進展が望めることとなった。

#### Ⅱ-3-4 参加機関における実施体制

双方向型共同研究を実施するに当たって、共同研究者への研究費配分、マシンタイム配分、研究環境などは、センター、大学の事情により、異なっている。それでも、

共同研究者に満足感を持って共同研究に参加してもらうためには、研究費配分、マシンタイム配分、共同研究者への周知などが、公平性と透明性を持って、また、迅速になされる必要がある。九州大学の場合、上述のように、マシンタイム、研究費などを決める、あるいは案を作成する会議と装置の維持運転をする会議を作り（「QUEST実験推進会議」ならびに「高温センター実験会議」）、両会議とも外部委員を入れ、前者の議長には、外部の先生を起用するなど、透明で公平な研究支援体制の構築に努めている。また、大阪大学、京都大学でも双方向型共同研究を推進するため、外部委員の加わった委員会を設置している（「高速点火研究及び関連するレーザープラズマ研究に関する検討委員会」および「ヘリオトロンJ双方向型共同研究委員会」）。大阪大学では、九州大学同様、この委員会の委員長に外部の先生を起用している。双方向型共同研究では、研究センター、大学の事情にもよるが、研究支援体制構築の一環として、このような体制を各研究センターに整え、公平性と透明性の確保と迅速な周知に努めることを奨励している。

さらに、九州大学では、研究環境を整えるため、また、研究センターのソフト作成の労力削減のため、図Ⅱ-3-8に示されているような、研究センターで取得したデータを核融合研に転送し、データ閲覧・解析は、核融合研にアクセスし、核融合研のソフトを使って行うことを計画している。これにより、共同研究者がデータにアクセスする環境が飛躍的に整えられるとともに、共同研究者へのデータ公開が公平に行われ、透明性も確保されると考えられる。京都大学も、共同研究者が外部からデータにアクセスできるシステムが既に整えられている。このような研究環境の整備も、双方向型共同研究を推進するためには、必要であると思われる。



図Ⅱ-3-8 データ処理システム

以下、重複するところもあるが、各研究センターの双方向型共同研究の実施体制について述べる。

## 筑波大学プラズマ研究センター

### (1) 研究課題審査のプロセス

筑波大学プラズマ研究センターにおける共同研究テーマの柱は、当センターの特長であり、核融合実用の為に必要不可欠である「電位／電場によるプラズマ閉じ込め向上の物理研究」である。また、これに関連して本装置形式の独自性を広く活用した研究も挙げられる。上記方針に基づいて、予めセンターにおいて作成した募集案を元に、核融合科学研究所において公募案内が取り纏められている。

応募された共同研究課題は、センター内委員による課題実施の妥当性について審査される。打診のあった段階から、各課題において担当しているセンター内世話人を通じて検討が行われ、最終的には、核融合科学研究所における双方向型共同研究委員会の審査を受ける。

### (2) 受入・実施体制について

採択された共同研究課題のうち、実験に関するものは、センターでの実験スケジュールとの整合性を取る必要がある。主たる実験装置である「ガンマ10」では、例年5月から7月までの比較的長期の実験シリーズ、8月下旬から10月の全学停電まで、停電後プラズマ・核融合学会まで、の2度の比較的短期（1ヶ月前後）の実験シリーズに加えて、状況に応じて12月と1月に1ヶ月以内の短い実験シリーズが行われている。具体的な実験スケジュールについては、各課題において担当しているセンター内世話人と個々の共同研究者が連絡を取り合って、実際の実験執行にあたっての実現性とその範囲、具体的なスケジュール等を決定している。センターでは、実験予定を議論するミーティングが毎週1度開かれており、共同研究に関する実験予定はこの場において調整される。また、実験期間中を問わず、随時に共同研究者からの実験提案や希望を受け付けている。

共同研究の実験データへのアクセスについては、VPN<sup>\*</sup>)を利用した大学間リアルタイムデータ参照システムを構築し、センター外との情報共有並びに、通信による詳細かつ臨機応変な実験パラメータや実験方針の指示・伝達が実現されている。これは、特定の大学間でのデータセキュリティの観点での認定作業が予め必要となるが、近い将来実験データのアクセスに関してもっと簡便な手法の確立を進めている。

プラズマ研究センターの実験室には、高電圧・大電力の電源機器が設置されており、ガンマ10装置には、これらからの直流高電圧や大電力の高周波、マイクロ波が印加される。また、プラズマ生成時には、少量のX線が放出されるため、放射線発生装置には該当しないものの、それに準ずる管理体制が取られている。このような環境下において、学外の研究者が安全かつ効率的に研究に従事してもらうためには、しかるべき安全教育を事前に行っておくことが肝要である。双方向型共同研究においても、その開始当初より、外部共同研究者に対する安全教育が実施されており、スムーズなガンマ10実験への参加が可能な体制が整えられている。

学外の共同研究者が、実際の実験テーマの提案者となった場合は、センター内の研究者の場合と同様に、現場の実験を主導するが、その場合センター世話人を通じて、センター内研究者が担当するショットリーダー（S L）と連携し、実験を遂行することになる。また、センター主導の実験テーマであっても、主実験に差し支えないとセンター研究者が担当する実験リーダー（E L）により判断されれば、合流して実験が可能となるよう配慮されている。以上の体制を活用することにより、共同研究者の意見を反映した実験が可能となっている。

## 京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター

### (1) 研究課題の立て方、公募から審査、採点までのプロセスについて

京都大学エネルギー理工学研究所の受け持つテーマは「先進磁場分布制御によるプラズマ輸送・安定性改善の研究」である。主たる実験装置である「ヘリオトロンJ」を用いて行われる。研究課題の公募は、センターによる募集要項案をもとに、核融合研が行い、センターにおいて実施の可能性等の審査、採点を行っている。募集要項に掲げる課題については、毎年度見直しを行い、継続および新規に設定すべきものを決定している。また、申請された課題の審査は、最終的に核融合研の双方向型共同研究委員会で審査されるため、センターの主要テーマに対する相互的チェックが可能となっている。これらのプロセスは円滑に運用されており、十分機能していると考えられる。

平成 19 年度までは、京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター内で公募課題選択を行ってきたが、この決定プロセスを、より開かれたものにするため、平成 18 年 8 月に京大におけるヘリオトロン J 双方向型共同研究委員会準備会を開催し、委員構成、公募方法および今後のヘリオトロン J 双方向型共同研究の中・長期計画について審議した。これに基づき、平成 19 年度からヘリオトロン J 双方向型共同研究委員会の活動が開始され、平成 19 年 6 月に第 1 回委員会を開催、11 名の委員（外部から 8 名）により平成 19 年度実験計画などの審議を行い、外部に開かれた形での意思決定を行っている。

平成 20 年度の双方向型共同研究からは、課題申請を含めてヘリオトロン J 双方向型共同研究の計画全てにわたって、同委員会で審議され運用されることとなる。現在の委員構成は次のとおりである。

佐野史道、水内亨、岡田浩之、北島純男（東北大）、中嶋洋輔（筑波大）、武藤敬（NIFS）、岡村昇一（NIFS）、岸本泰明（京大エネ科）、政宗貞男（京都工繊大）、福田武司（阪大）、西野信博（広島大）

### (2) 受入・実施体制について

申請課題のうち実験課題については、共同研究スケジュールおよび実験時間等をセンターにおける実験計画をもとに整合させる必要があり、個々の研究者と連絡を取り合い、計画の実現性、可能性などを検討、実施計画を決定してきた。ヘリオトロンJの実験期間は通常半年以上設けられており、実験参加については比較的自由に設定することが可能である。個々の研究計画の準備・実施においても、センター側の環境・条件を明示し、実現に向けた具体的な方策の検討を行い、実行に対して支援している。年間実験スケジュールは年度初めに作成しているが、平成19年度からはこれをWeb上に掲載し、変更があった場合逐次改訂するようにした。これにより、実験参加者がいつでも最新の実験スケジュールを参照できるようになった。

共同研究者の実験データへのアクセスに関しては、平成17年度からは、ほぼ全ての実験データについて、所外からでも *ssh*<sup>\*</sup> 経由した *X Window*<sup>\*</sup> で参照可能である。また、データファイル名と計測器についても同様に参照可能である。したがって、所外からでも実験参加可能なインフラは整備済みである。

双方向型共同研究開始の時点より、共同研究者に対し安全教育および実験データ処理に関する講習を実施し、実験研究参加を安全かつ迅速・円滑にすべく支援体制を整えている。実験準備、実験装置の設置に関しても、受入の世話人を中心に、必要な場合には、技術スタッフおよび学生による共同作業体制を組んでいる。安全教育並びにデータ取り扱い講習修了者は、ヘリオトロンJデータ処理システムに組み込まれたデータビューアによってほぼ全ての実験データを見ることが可能である。FORTRAN、C言語に対するデータ取得ライブラリ、バイナリーデータのアスキー化プログラム等、実験支援ソフトウェアも開発済みであり、数値データ取得も簡便となっており、容易に実験参加することができる。

外部共同研究者が実験テーマの提案者になった場合は、所内の研究者の場合と同様に、所内世話人と共に実験を主導することになっている。研究者からのフィードバックは実験参加時に随時行うことができる。それ以外の場合は所内世話人を通じて常にフィードバックを受け付けるよう留意している。このうち、共同研究全体に関するものについて今後は京大内に設置されたヘリオトロンJ双方向型共同研究委員会で審議することとしている。これら全てを利用することで共同研究者の意見は十分に反映されていると考えられる。

## 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

レーザーエネルギー学研究センターの慣性核融合<sup>\*</sup>の研究は核融合科学研究所の双方向共同研究を通して行われている。同様に他大学との慣性核融合に関する共同研

究も核融合科学研究所を通して行われる。年度ごとに公募案が検討され、提出された共同研究提案はレーザーエネルギー学研究センターで採点評価され、核融合科学研究所の双方向型共同研究委員会で審議の後、採択される。他大学との共同研究経費にはレーザーエネルギー学研究センターに配分される双方向経費の約10%が用いられている。研究結果は翌年度の5月頃、レーザー研シンポジウムで発表される。

採択課題を実施するにあたっては、共同研究に提供されるレーザーの使用時間の調整が必要であり、双方向、国内外の一般共同研究とともにセンターの大型装置運営会議で議論され、年間実施計画が作られる。

双方向に絡む研究はセンター内では核融合研究部門が担当している。核融合の研究の中で独立性の高い要素研究、即ち、レーザー技術や計測技術の応用研究、炉用レーザーも含むレーザー開発は残りの4部門で分担している。核融合研究部門は三間教授率いる高密度プラズマ研究領域（教授1，准教授1）、疇地教授が率いる爆縮プラズマ加熱研究領域（教授1，准教授2）、乗松教授が率いる核融合燃料研究領域（教授1，准教授1，助教2）、核融合科学研究所からの三戸客員教授が率いるレーザー核融合炉工学研究領域で構成されている。さらにパワーフォトニクス部門、高エネルギー密度科学研究部門、光・量子放射学研究部門、レーザーテラヘルツ研究部門、核融合研究部門は要素化された物理過程の解明、技術開発をすすめている。

双方向型共同研究開始に対応し、核融合科学研究所との連絡を密にするため、当初は連携推進室がパイプ役を務めたが、2005年には双方向担当者を指名し、核融合科学研究所との対応、双方向型共同研究の活性化に努めた。

2004年にはヘリカルプラズマの局所電界をレーザーで制御する可能性について核融合科学研究所で定期的に会合がもたれた。2005年からは *FIREX*<sup>\*</sup> プロジェクトに用いるターゲットを共同で開発するため、*FIREX* ターゲット開発会議が研究の進展に応じて1～2ヶ月ごとに開催されている。

2007年には「高速点火研究及び関連するレーザープラズマ研究に関する検討委員会」が核融合科学研究所連携研究推進センター学術連携推進室レーザー連携研究部門との共催で設置され、*FIREX* 計画の進展に核融合ソサエティの意見が反映される体制を整えた。また、本委員会では高速点火に関する双方向共同研究の評価を行い、核融合科学研究所で行われる双方向型共同研究委員会に計画の妥当性を提言することになった。

## 九州大学応用力学研究所附属高温プラズマ力学研究センター

### (A) 新センターの設立

九州大学応用力学研究所炉心理工学研究センターは2006年度に10年の時限を迎えるにあたって、中期目標・中期計画に基づく新センター（高温プラズマ力学研究センター：2007年度より）の設置に関して、学内外の評価や核融合コミュニティにお

ける役割評価、双方向型共同研究の立ち上げと役割等に関して、各種委員会等において審議を進めてきた。最終的に、2005-06年度の学内将来計画委員会ならびに研究所運営協議会において審議され、新センター設置計画が承認されるに至った。

さらに、こうした公式の委員会・審査会と並行して、研究会形式での幅広い意見交換と資料集の配布、またプラズマ・核融合学会でのインフォーマルミーティングを開催し、計画の最適化を進めるとともに、研究推進方策の適切化および透明性確保を図ってきた。

## (B) 実施体制

九州大学応用力学研究所は、1997年度より全国共同利用施設として共同研究を推進してきたが、2004年度以降、新たに双方向型の共同研究拠点として核融合分野におけるプラットフォームの確立を目指した活動を行ってきた。

特に新しい共同研究の研究拠点として機能するために、所内の委員会の他に外部委員が参画可能な委員会（次章 III-3-4(2)-3 に示すような枠組み）を設置し、外部に開かれた運営を行っている。

新センターの研究企画・遂行は以下のような運営体制で実施する（III-3-4(2)-3 図7「九大双方向型共同研究推進組織図」参照）。また、管理・運営は「センター運営委員会」、並びに教授会・所員会の審議、運営協議会の議論を経て、センター長が責任を持つ。

### (1) 高温プラズマの定常化に関する学術研究を推進するための研究運営

センターの中期目標・計画に関わる学術研究の遂行はプラズマ・材料力学部門と連携し、センター長が責任をもつ。センターの研究推進・成果等に関する評価は外部評価委員会にて実施する。

### (2) 全国共同利用に関わる課題の遂行

「共同利用委員会」、「センター運営委員会」、「センター実験会議」およびセンター長が共同して行う。また QUEST 装置に関連するものに関しては「QUEST 実験推進会議」と相談の上実施する。

### (3) QUEST に関する研究運営

QUEST プロジェクトにかかわる研究企画は「QUEST 実験推進会議」で行い、実験遂行に関する運営は「高温センター実験会議」およびセンター長が行う。

## \* QUEST 実験推進会議

QUEST 実験推進会議は、全国の ST、PWI<sup>\*</sup>）、加熱電流駆動、計測、材料、理論の研究分野の研究者の協力の下に、センター内も含めて委員会を構成する。主として実験をコーディネートする。2006年に添付の委員で発足した。基本的には年数回会合を持つ。

また九大双方型共同研究の外部代表者申請の審査も併せて行う。2006年以降この委員会で審査を行っている。審査は書類審査にとどまらず、事前に研究集会を設け提案者からの申請内容についての発表も行い、相互的な判断が下せるようにしている。

この研究企画立案、共同研究申請の審査を通じて全国の利用者の意見を幅広く吸い上げ、反映する仕組みが構築されている。

委員構成は以下の通り。

高瀬（東大：コーディネーター）、安藤（東北大）、大野（名大）、岸本、前川（京大）、長山、廣岡（NIFS）、御手洗（東海大）、朝倉（JAEA）、吉田、佐藤、凶子（幹事）、花田、中村、坂本、出射（九大）

### \*\* 高温センター実験会議

高温センター実験会議は、センター構成員ならびに全国の関連研究者の協力の下に構成されており、主として双方向型共同研究の実験（装置建設、運転保守等）に関わる運用を行う。TV会議を利用して毎月定例で実施している。

委員構成は以下の通り。

吉田、徳永、佐藤、凶子、花田、中村、坂本、出射、長谷川（九大）

高瀬（東大）、前川、岸本（京大）、御手洗（東海大）

#### (C) 双方向型共同研究推進のためのプラットフォーム

九州大学では、TRIAM-1M、CPD、QUEST装置を利用した高温プラズマの定常化に関わる双方向型共同研究推進のためのプラットフォーム作りを目指して、以下のような運営に心がけてきた。

- ① 研究集会を開催し、予算を含めた提案、内容の発表、結果の報告を実施
- ② 研究集会において最終的な運転計画等を決定し、公平なマシンタイムの確保を行う
- ③ 議論に応じて予算の集中投資を行い、研究の速やかな立ち上げによる迅速な成果の達成。

2004年以降今日までに7回の研究集会を行い、プログラムの中に以下に示すような研究成果の交流や提案に関する項目を設け、全参加者の議論を経て決定する方式を進めてきた。

第17回	共同研究に関する議論	(座長 東井 NIFS)
	共同研究の成果と計画	(座長 櫻井 JAEA)
第18回	TRIAM-1M 前期実験について	(座長 高村 名大)
	TRIAM-1M 後期実験について	(座長 西野 広大)
	小型実験装置について	(座長 安積 JAEA)
	プラズマ境界力学実験装置について	(座長 松川 JAEA)

第 19 回	TRIAM-1M 実験成果報告と計画について	(座長 小森 NIFS)
	小型実験装置について	(座長 福田 阪大)
	プラズマ境界力学実験装置の設計・検討について	(座長 松川 JAEA)
第 20 回	TRIAM-1M 実験について	(座長 福田 阪大)
	小型実験装置(CPD)について	(座長 高瀬 東大)
	TRIAM-1M 実験について II	(座長 凶子 九大)
	プラズマ境界力学実験装置、球状トカマク装置について	(座長 佐藤 九大)
第 21 回	炉心理工学研究センターにおける取り組み I	(座長 榊田 産総研)
	炉心理工学研究センターにおける取り組み II	(座長 高瀬 東大)
第 22 回	九州大学における共同研究と今後の展開 I	(座長 福田 阪大)
	九州大学における共同研究と今後の展開 II	(座長 長山 NIFS)

### II-3-5 予算

双方向型共同研究の経費は、前述のように、法人化に伴う双方向型共同研究の発足に際して、参画した研究センターに措置されていた核融合研究予算の約 2 分の 1 を核融合研に移管し、法人化に伴う双方向型共同研究発足後は、核融合研の運営費交付金として予算を執行している。従って、双方向型共同研究予算は、核融合研から特別研究経費として、所謂、概算要求を行い、参画している研究センターはそれぞれの大学から個別に概算要求を行わない仕組みになっている。双方向型共同研究の予算は、平成 18 年度から約 5 千万円増額され、平成 20 年度分も文科省から財務省へ約 1.5 億円の増で要求が出されている。

参画している研究センターへの双方向型共同研究経費の移管額は、「しっかりスタートする」ことを目指して、当初の 2 年間は発足時に参画した研究センターから核融合研に移管したものと同額としていたが、3 年目の平成 18 年からは、当初の移管額にとらわれず、「確実に進化する」ことを目指して、戦略的かつ計画的に双方向型共同研究を推進できるよう決定している。参画している研究センターへの移管額は、双方向型共同研究委員会が案を作成し、核融合研の運営会議で決定されている。また、平成 18 年度からは、双方向型共同研究委員会のもとに設置された双方向型共同研究推進専門部会（S T）に対しても予算措置がなされている。この予算は、S T 研究に関連したネットワーク型共同研究に必要な旅費であり、今後、S T 研究以外の分野でも双方向型共同研究委員会が承認した場合には、同様の予算措置を行って、双方向型共同研究のもとで行われるネットワーク型共同研究を支援する予定である。

大学等の研究者が双方向型共同研究に参画している研究機関に出向いて行う共同

研究への予算配分は、各参画機関に移管された研究経費に計上される。従って、この予算配分案は、各参画機関で先ず原案を作成し、双方向型共同研究委員会で審議・再検討後、やはり運営会議で決定している。各参画機関で原案を作成する方法は、各参画機関に任されているが、九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センター等では、QUEST 実験推進会議で決定する方法を取っており、透明性の確保に努めている。このような方式が、全ての参画機関で取り入れられることが望まれている。

表Ⅱ－３－３ 予算配分

千円

	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度
全体	623,849	623,849	673,675	673,575
筑波大学	150,282	150,282	105,427	150,282
京都大学	150,096	150,096	105,297	105,787
大阪大学	93,820	93,820	93,300	93,790
九州大学	229,651	229,651	368,951	323,016
専門部会			700	700

### Ⅲ. 双方向型共同研究の遂行と成果

#### Ⅲ－１ 核融合研究の重点化と要素還元研究

平成15年1月に核融合WGグループによって示された日本の核融合研究の階層的なグランドデザインは、研究資源の集中を図ることの有効性と同時に、萌芽的な研究や学際的な研究を活性化するための施策の必要性を明らかにし、多元的な研究の展開を可能とすることを示している。

核融合研究の対象となる高温プラズマだけでなく、これをとりまく極限環境（極低温、高熱負荷、高放射線など）も非線形性と開放系の端的な例であり、精緻かつ膨大なデータの蓄積に基づいた経験則とともに、基礎基盤学術としての体系化が、核融合実証炉に向けた予測には欠かすことができない。そこでは、複合複雑系たる対象を、操作可能あるいは解くことが出来る問題へと還元し、基本的かつ明快な理解を築くことが第一義的に必要である。

核融合研究では大型実験装置を用いた高温プラズマの生成が必須であるため、このような大型プロジェクトを重点化し、研究資源を集中することによって効率化を図ることが必然的に求められる。一方、このようなプロジェクト研究は基礎基盤学術から孤立した形で進められることは適切ではない。大型プロジェクト研究からは新たな発見や克服すべき課題が現れることは当然であり、それらが基礎基盤学術における研究の新たな動機として散種され、要素還元的なアプローチにより得られた理解や問題の解決が、逆に大型プロジェクト研究へブレークスルーをもたらすことがあることは歴史の示すところである。即ち、学術研究を通じて双方向的なネットワークを形成することがプロジェクト研究の進展と基礎学術の発展の効率化につながる。

最先端の科学の理解と極限技術を駆使した大型の実験装置を活用した実験研究によって実証・検証を重ねることにより、当初の計画にはなかった新たな発見が、計画で見込んでいた成果と相互に干渉し、進歩がもたらされる。そこでは、学術的な合理性（物理モデル）の確立、研究領域の拡大、物理モデルの汎化の流れが生じ、あたかも螺旋階段を上がるような発展が続けられてきた。このような流れを阻害させないためには、自由な発想に基づく研究の多様性を高める必要がある。

双方向型共同研究ではLHDをハブとしつつ、4研究センターの活動をネットワーク化し、さらに大学からの幅広い参画を可能とし、おのおのの得意とするところを活かして抽出された要素研究に当たることを骨子としている。これらの要素還元的な研究の成果がネットワークを通じて統合され、その総合的な検証として、例えばLHDの性能向上や新たな企画の提案につながることを期待される。

### Ⅲ－２ 重要な研究課題の集約と分担

双方向型共同研究で実施する個々の研究は、先にも述べたように、核融合研と大学等の自主性・自律性に基づき各組織の明確な責任において進める必要がある。しかし、双方向型共同研究に参画している研究センターが個々に研究の目標を定めるのではなく、大学共同利用機関として核融合研が各研究センターとともに、核融合コミュニティと相談して将来の核融合研究に必要とされる重要課題を集約し、これを各研究センターと分担、連携して進めることが求められた。特に、今後の大学等における核融合研究においては、多様な要素が複雑に統合された核融合炉開発研究での研究成果を要素還元し学術として体系化・普遍化することが重要である。

核融合研に求められている、上記の「将来の核融合研究に必要とされる重要課題の集約」機能は、実際には双方向型共同研究委員会で果たされている。双方向型共同研究委員会は、核融合研の研究者、参画している研究センターのセンター長、核融合コミュニティの代表で構成されており、将来の核融合研究に必要とされる重要課題を集約するための条件・環境が整っている。

双方向型共同研究では、上述のように、将来の核融合炉心プラズマあるいは核融合炉システムなどに必要とされる要素還元研究、学術研究、重点化研究などを行う方向に学術研究を進展させる必要がある。また、これまでの研究内容、研究設備、研究実績等を考慮して、即ち、これまでの研究との整合性にも配慮して、研究課題を決定し、核融合研と各研究センターで分担、連携する必要がある。このようなことから、双方向型共同研究委員会で集約した重要課題を基に、核融合研、各研究センターは、双方向型共同研究におけるそれぞれの分担課題を下記のように決定した。

核融合科学研究所

「環状プラズマの総合的理解」

筑波大学プラズマ研究センター

「電位によるプラズマ閉じ込め向上の物理研究」

京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター

「磁場分布制御技術を用いたプラズマ流制御による輸送・安定性改善研究」

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

「レーザーによる高速点火研究」

九州大学応用力学研究所附属高温プラズマ力学研究センター

「電磁波を用いたプラズマ電流駆動による定常運転の研究」

これらの分担課題の学術的価値については、後で述べる。

各センターの分担課題は、全て核融合研の研究者の研究課題に関係しており、核融

合研から各センターに必要とする多様な専門家を派遣することができるため、全体としてバランス良く研究を進展させることが可能で、双方向型共同研究として実りある成果が期待できた。また、各研究センターの研究設備を効率的に活用することが可能な学術研究の課題となっており、最近の重点化・効率化及びこれにともなう共同利用・共同研究の強化という施策に合致するものである。さらに、分担課題遂行に必要な人材の交流の相乗効果等により、新たな可能性を目指した学術研究の創生、不断の人材育成などを活性化させることも可能と思われた。

双方向型共同委員会では、将来の核融合炉心プラズマに必要とされる研究課題として、「環状プラズマの総合的理解」に向けた研究を選択した。この研究課題は、核融合研の大型ヘリカル装置（LHD）の課題にもなっている。以下、「環状プラズマの総合的理解」という研究課題の意味と学術的価値について、先ずLHDを例に説明し、次に各研究センターの上記分担課題の学術的価値に言及する。

LHDに代表されるヘリカル方式は閉じ込め磁場を外部コイルで形成するものであり、定常運転に優れた方式である。さらに同じ環状プラズマとしてその類似と異同を同時に有するトカマクと比較して、大きなプラズマ電流がないことから生じる利点、すなわちディスラプションがないこと、高密度運転に適していること、熱や力の負担が軽減されることなど、核融合エネルギー炉に優れた要件を備えている。そこで、LHD実験において、以下に述べる学術的重点研究課題を研究し、必要とされる開発を展開することによって、ヘリカル方式の定常核融合エネルギー炉への展望を明らかにしようとしている。

- (1) 高い核融合三重積（密度×イオン温度×閉じ込め時間）を実現し、核融合エネルギー炉に必要なプラズマ閉じ込めの広範な研究を行う。
- (2) 高イオン温度プラズマの実現のため、電場の閉じ込めへの影響を研究し、活用する。
- (3) 長時間のプラズマ生成実験を行い、安定な連続運転を実証する。
- (4) プラズマと磁場との圧力比（ $\beta$  値）5%以上の実現と関連する物理研究を行う。
- (5) ダイバータを設置して、無電流プラズマの長パルス実験を行い、定常運転に必要な基礎資料を得る。
- (6) プラズマ閉じ込めに対する燃料元素の同位体効果の解明を行う。
- (7) 高エネルギー粒子のヘリカル磁場中での振舞いを研究し、炉心プラズマの $\alpha$ 粒子を対象としたシミュレーション実験を行う。

さらに、最近のローカルアイランドダイバータ<sup>\*)</sup>などを用いた超高密度プラズマの生成実験の進展により、比較的溫度が低い超高密度プラズマを用いた核融合エネルギー炉へのシナリオ・核融合エネルギー炉が提案され、研究が進展している。筑波大学プラズマ研究センターの分担課題は、上記（2）に、九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センターは（4）と（5）の高 $\beta$ と定常実験に関連している。また、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの分担課題は、超高密度プラズマの物理

解明に、京都大学エネルギー理工学研究所エネルギー複合機構研究センターは、LHDでは実現できないより一般的なヘリカル磁場配位で研究を進め、環状プラズマの総合的理解に直接寄与するものである。このように、各研究センターの分担課題は、環状プラズマの総合的理解を深めることができるとして決定された。

これらの学術研究の成果は、将来、核融合炉を実現するために役立てられるのは無論のこととして、一般に、既存の大型核融合実験装置やITER等の新装置で必要に応じて活用されることになる。これにより、さらなる問題点の洗い出しなどが可能となり、核融合エネルギー研究の発展が益々望めることとなる。

### Ⅲ－３ 双方向型共同研究参加機関の成果

#### Ⅲ－３－１ 筑波大学プラズマ研究センター

##### (1) センターの概要、研究目的と意義・位置づけ

筑波大学プラズマ研究センターは、世界最大のタンデム（複合）ミラー閉じ込め装置「ガンマ10」（全長27m）を基幹装置として、一貫してミラー型の研究を行い、核融合プラズマ研究を推進している。特に、双方向型共同研究開始後は、視点を新たにして、国際熱核融合実験炉 ITER を含む磁場閉じ込め装置に普遍的な核融合科学に貢献すべく、プラズマ電位による閉じ込め改善の物理を核とした研究とそれを通じた人材育成を最大の使命としている。

ミラー型磁場閉じ込めの原理を以下に述べる。図1のような2個の円形コイルを並べたもので、これに同じ方向の電流を流すと、コイルの近くでは磁場は強く、コイル間では弱くなる磁場形状を作ることができる。これを単純ミラー磁場と呼ぶ。プラズマ中の荷電粒子は磁力線に巻きつきながら運動し、この巻きつき方が強い粒子（「磁気能率が大きい」という）は磁場の強いところから弱いところへ向かう力を受ける。このため荷電粒子は図のように磁場が強く磁力線が密集している所に、まるで鏡（ミラー）があるかのように跳ね返されるので、粒子は閉じ込められる。しかし、中には磁力線の軸に沿った方向の粒子速度が速く、磁力線への巻きつき方が弱い粒子もあり、このような粒子はプラズマの端部（図1のZ軸の両端）から逃げ出してしまう（端損失）。このプラズマの端損失を抑制すべく提案されたのが「タンデムミラー」である。この方式は、主閉じ込め部となる中央ミラー磁場の両端にさらに別のミラー磁場をそれぞれ接続した複数のミラー磁場を用いるものである（この両端のミラー磁場部をプラグ・バリア部と呼ぶ）。このプラグ・バリア部において磁場だけではなく、中央ミラー部より高い正の電位を形成し、電位／電場の「壁」を作って端損失する前に粒子を反射し「栓」（プラグ）をするミラー装置の最も進んだ方式であり、実際に端損失粒子閉じ込め性能が飛躍的に改善された。このように複数のミラー磁場を用いることからタンデムミラー装置と呼ぶ。図2は、ガンマ10装置を斜め上から見た写真である。

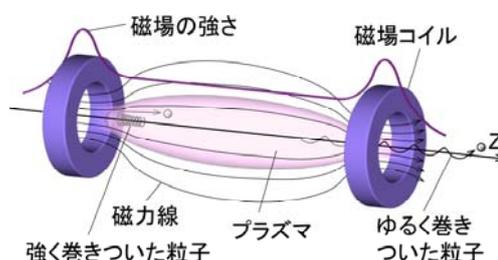


図1 単純ミラー磁場の模式図

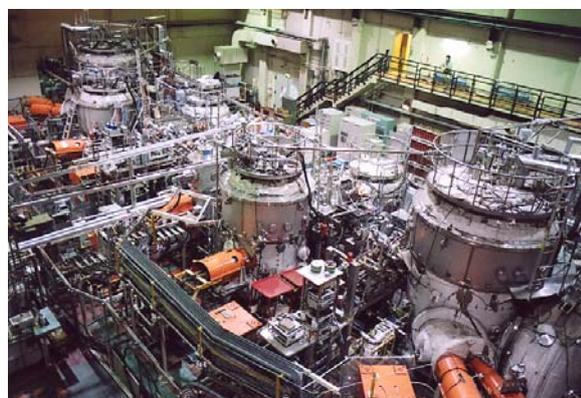


図2 筑波大学プラズマ研究センターの GAMMA10 タンデムミラー装置

トーラスプラズマの閉じ込めの改善をもたらし、ITERを含めた核融合実用への大きな飛躍へのキーポイントの一つに、「プラズマ中に生成されるプラズマの層流の制御による高閉じ込めモード(Hモード<sup>\*)</sup>)の生成や、内部/周辺部熱輸送障壁(ITB/ETB<sup>\*)</sup>)の形成」が挙げられる。この物理機構を究明し、外部から能動的に制御する方向を見出すことは、将来の制御核融合の実用化・高効率化のための、必要不可欠な研究課題とすることができる。双方向型共同研究の開始に伴い、Ⅲ-1、Ⅲ-2に述べられた理念の下に、核融合科学研究所と各大学センターが分担、連携して、核融合研究を展開する「要素還元研究」に対し、筑波大学では視点を新たにし、研究の柱として、既存のハードウェア・研究資源・研究実績を最も高効率に有効利用・発展展開でき、ITERを含む核融合分野全体の将来に普遍的に貢献できるテーマとして、上記の研究課題に取り組む方針を打ち出した。

即ち、ガンマ10装置を用い、「プラズマ物理学、特に電位/電場によるプラズマ閉じ込めの向上並びにプラズマの高性能化に係る教育・研究」等を行うこと、これは、筑波大学の中期目標・中期計画、また新しい国立大学法人筑波大学規則・規定に則した研究の柱である。

双方向型共同研究の開始後の法人化第一期計画で、Hモードや、ITB等の研究に貢献し世界の第一線に寄与できる研究成果を創出した。第二期では、これを能動制御することを念頭に、「メガワット級マイクロ波発振器ジャイロトロン<sup>\*)</sup>による、電位/電場の制御とその普遍化」(即ち、トーラス装置を含めてITB等の外部制御の適用・応用の研究)を進めるため、既存資源を高効率に有効利用し、この研究の鍵となる大電力ジャイロトロン等の開発を進めてきた[1]。

このジャイロトロンは、ミラープラズマ装置の開放磁場端部を持つ特長を活用し、電子サイクロトロン(EC)共鳴<sup>\*)</sup>により加速し加熱した電子流を端部に少量逃がすことで、プラズマ中に残る正電荷のイオンによる正電位 $\Phi$ を容易に生成・制御するための強力なツールである。この電位制御ツールを駆使し、トーラス系プラズマでは端部がないために積極的な制御の研究ができない点を双方向的に補い普遍化して、要素還元研究を行う構想を立てた。

この双方向的観点から強化された要素還元研究は、径方向電場や複雑な効果が絡むトーラスプラズマのHモードやITB生成に対して、幾何学配位が異なる、トーラス配位とミラー配位での結果を比較検討することにより、径方向電場<sup>\*)</sup>シア<sup>\*)</sup>が本質的にどのような役割を担っているかの学術究明を可能とする。これは、ITER等での今後のITB/ETB制御などによる閉じ込め改善を外部から能動的に制御する道を拓く可能性があり、大変重要な位置づけを持つものと考えられる。

以上のように、双方向型共同研究の開始後は、視点を新たに、核融合科学研究所、各センター及び全国の大学と協力して、双方向に共同研究を積極的に活用し、「ミラーにしかできないこと、ミラーならば他形式プラズマ装置にも普遍的な物理機構解明を含めてできること。要素還元研究を物理究明と装置開発の両面で着実に実施し、プラズマソサイティの共有財産となりうること。」を目標として、こうしたミラー装

置独自の特長を活かしつつ、効率的に、ITERを含め広く核融合研究の進展・活性化、普遍的に世界に役立つ研究を、センターの既存資源の有効活用を図りながら高効率に着実に推進している。

## (2) 主要成果

要素還元研究の主課題である「電位／電場によるプラズマ閉じ込めの向上の物理」を中心とする具体的な成果について、これまでに得られた主な結果を列挙して示す。

(a) まず、ガンマ10実験の主題である電位による閉じ込め改善を目的とする電位形成実験において、プラグ部に印加された電子サイクロトロン加熱<sup>\*</sup> (P-ECH)により、軸方向閉じ込めを向上する電位が増大する。双方向型共同研究開始前に比べ、ジャイロトロンの開発成果によるP-ECHパワーの増力に伴い、2倍以上のプラグ電位の増大を達成している。また、このP-ECHの印加によりセントラル部中心の電位も上昇する。電位上昇により径方向に電場が形成される条件下で、プラズマの騒乱を示すプラズマ密度揺動や電位揺動が急激に減少することが明らかとなった。図3に高周波で生成された標的プラズマにプラグ電位形成のためのP-ECH印加時に、ビームプローブで測定されたプラズマ中心での電位上昇と径方向で平均した電位揺動強度が減少することが示されている。図4は、計測された電位の径方向分布をガウス型分布でフィッティングし、その2階微分である電場勾配の径方向分布に直したものである。ECH印加初期の弱い勾配とECH印加中に中心付近で強い電場勾配が形成されることが示されている。

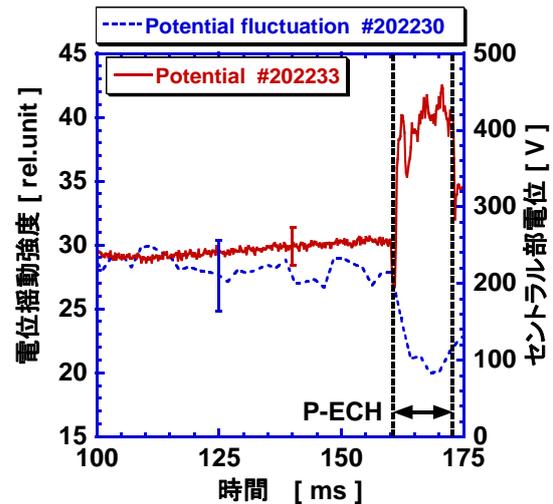


図3 ビームプローブで観測されたP-ECH印加によるセントラル部中心の電位上昇(実線)と揺動強度(破線)の減少

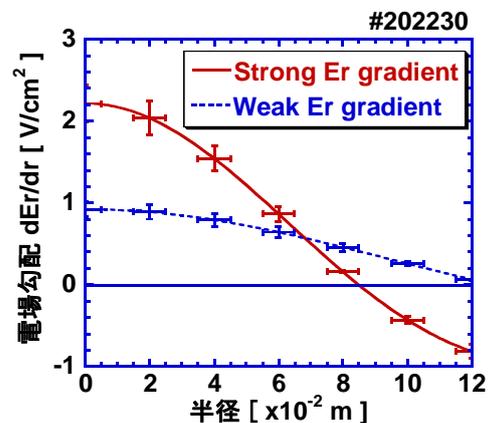


図4 ビームプローブによる電位分布から導出した電場勾配の径方向分布: ECH印加初期の弱い電場勾配(破線)と印加中の強い電場勾配(実線)形成が示されている。

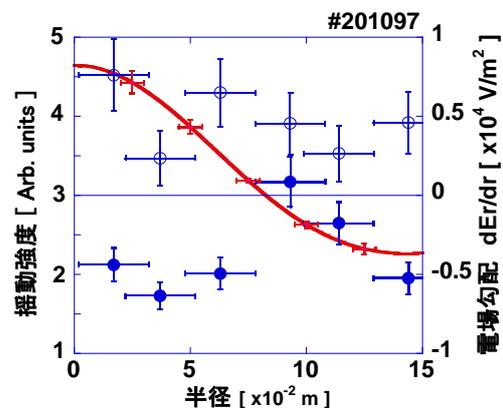


図5 多チャンネルマイクロ波干渉計で計測された線密度揺動強度の径方向分布(黒丸: ECHあり、白丸: ECHなし)とビームプローブ計測から導出された電場勾配(実線)

(b) ECH印加による揺動強度の減少は、これまでに報告されてきた[2]。今回、プラズマ中心の電位、及び、その径方向分布を直接計測可能であるビームプローブ法を用いて、電位の径方向分布を計測し、電位の勾配である電場との関係、また、電場の勾配との関係を解析した。図5に多チャンネル型のマイクロ波干渉計を用いて同時計測した線密度揺動強度の径方向分布を示した。黒丸は、ECH印加時に中心付近で強い電場勾配が形成される場合、白丸は、電場勾配がほとんどない場合を示している。電場勾配形成時に揺動強度が抑制されること、また、勾配の強い中心付近では揺動強度が弱く、勾配の弱い周辺部（半径10cm付近）で強くなっていることがわかる。ECH印加により、電場勾配が中心部で大きくなること、また、周辺部の揺動強度が大きい場所では電場勾配が小さくなっていることが示されている[3]。

ビームプローブでは、電位の揺動と密度の揺動の空間分布を計測できる。電位揺動と密度揺動から、方位角方向に発生する電場とガンマ10磁場とのE×Bドリフトによる径方向への粒子束を評価することができる。図6に電位揺動と密度揺動から計算した径方向粒子束と反磁性量を示した。プラズマのエネルギー量の指標である反磁性量が時間的に増減するショットにおいて、径方向粒子束の増大に伴い、反磁性量が減少していることが示されている。揺動の抑制がプラズマ閉じ込め向上に重要な役割を果たすことが良くわかる結果である。

(c) 大電力ジャイロトロン運転が始まり、P-ECHパワーの増大とともにイオン閉じ込め電位の増大が観測されている。また、セントラル部へのECH印加も始まり、電子加熱の結果、イオン-電子間のエネルギー輸送が減少し、イオン温度が顕著に上昇することが観測されている。図7は、プラズマ線密度とプラズマ蓄積エネルギーに相当する反磁性量の時間発展を示している。セントラルECH印加による明らかな反磁性量の上昇が示されている。この反磁性量の上昇は、電子温度の上昇では説明できず、イオンの蓄積エネルギー

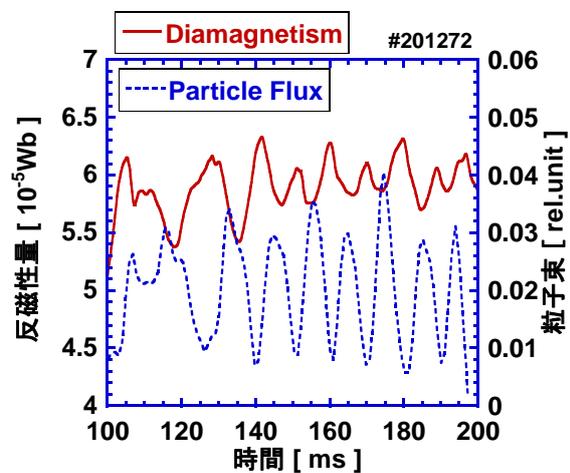


図6 電位揺動と密度揺動から計算した径方向粒子束（破線）と反磁性量（実線）の時間変化：反磁性量の減少と粒子束の増大が対応していることがわかる。

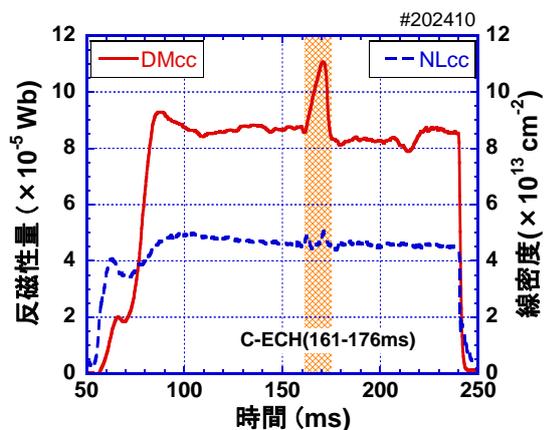


図7 反磁性量（実線）と線密度（破線）の時間変化：セントラル部 C-ECH 印加による反磁性量の上昇がわかる

の増大を示している。荷電交換中性粒子検出器によるイオンエネルギー分布計測と反磁性量、及び、線密度を用いて解析したイオン温度の径方向分布からも、イオン温度の上昇が確認された。

(d) 上記のパラメータ改善を契機・基盤に、開放磁場端部を持つミラー特有の利点である、ミラー端部を利用した直接発電の研究が、双方向型共同研究課題の柱の1つとして、神戸大学のグループ等と実施し、この共同研究が急進展し、ミラー端部から取り出した分離イオンによる直接エネルギー変換効率60% (図8) を得るとともに、この変換で得られた電気エネルギーでネオンランプを点灯させることに成功した[4]。尚、この研究成果は、将来のLHD等の環状系への適用も視野に入れており、その共同研究が開始されている。

(e) 電位生成の密度依存性、新たな高効率ミラー閉じ込め安定配位としてのダイバータ配位についても、共同研究を基盤に、着実に研究が進展している。また、東北大学や広島大学のグループとの共同研究によるプラズマ回転計測やプラズマの高速カメラによる観測は、ITB/TTB等の輸送障壁による閉じ込め改善の物理の解明研究に大きく貢献している。これらは双方向型共同研究により可能になったものであり、今後の更なる連携、協力の足場が着実に築かれ始めている。

(f) センターの要素還元研究の技術的なキーツールであるジャイロトロン開発に於いても、双方向型共同研究の発足以来急進展し、従来の200kW級から500kW級のジャイロトロン開発に成功し [1]、さらに、最近では、核融合科学研究所と当センターの共同研究として、1MW級のジャイロトロンの開発を実施し、短パルスでの1MW発振に成功し、既にLHDのECH実験に供している。この成果は筑波大のみならず、要素還元研究として核融合科学研究所及び他のセンターの今後の双方向型共同研究の活性化にもつながる成果である[5]。

各共同研究の詳細は添付資料3に示されている。また、同資料のリストに示すように既に多数の論文が出版されている。以上の成果全般に関しては、平成18年4月にセンターとして独自に外部評価を受け、上記の点に対する、高い評価を得た[6]。

以上のように、核融合研究に広く貢献できる、双方向型共同研究の当センターの要素還元研究課題として、新たな研究展開への普遍性の高い研究内容として、端部を持つミラー配位の特長を有効に活かした、電場シアフローやITBの物理機構の研究と、そのITERを含むトーラス装置への普遍化・応用研究・将来の外部制御への準備研究、

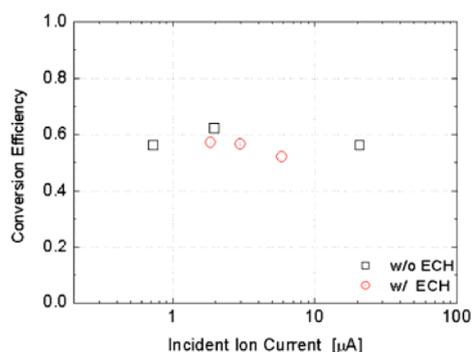


図8 ガンマ10プラズマからのイオン端損失電流に対する直接発電効率の関係を示す。端部から流出する高エネルギーのイオンの運動エネルギーが効率よく電気エネルギーに変換されている。

更に広く斯界に貢献する大電力ジャイロトロンの開発、それを基盤から支える人材育成・輩出の実績を、双方向型共同研究を大きな柱として、積み上げ、核融合研究の進展と活性化に大きく貢献できた。今後これらを更に発展・展開し、特にITBや電場シアフローの外部能動制御を重点究明することを期し、今後も一步一步着実に研究を推し進めて行きたい。

#### 〔参考文献〕

- [1] T. Imai et al., Plenary Invited Talk in the 6th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (Tsukuba, 2006)..
- [2] A. Mase et al., Phys. Rev. Lett. **64** (1990) 2281.
- [3] Y. Miyata et al., Plasma Fusion Research, Vol.2 (2007) S1101.
- [4] Y. Yasaka et al., Nuclea 電磁波 usion, **48** (2008) 035015.
- [5] R. Minami et al., US-EU-JPN Workshop on 電磁波 heating technology 2007, 10-12 September, 2007, Heidelberg, Germany.
- [6] 「筑波大学プラズマ研究センター外部評価報告書」のダウンロードはセンターのホームページ<http://www.prc.tsukuba.ac.jp/j/modules/tinycontent/index.php?id=28> より可。

### Ⅲ－３－２ 京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター

京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センターはエネルギー理工学研究所のプロジェクト的な性格の共同研究を機動的かつ横断的に遂行できるよう平成 8 年に設置されたもので、既存の大型研究設備を充実・発展させるとともに、研究所が設定した「重点研究課題」に関わる共同研究を推進してきた。現在「プラズマエネルギーに関する学理・技術の新領域開拓」および光エネルギー応用も含む「エネルギー指向型先進的ナノバイオ機能材料創出」を重要課題と位置付けている。ヘリオトロン J 装置を用いた研究は前者の主要課題の 1 つである。

#### 1. 緒言

ヘリオトロン J 装置 (図 1 参照) は、京大グループから提案された「ヘリカル軸ヘリオトロン配位」の実験的最適化を目指して設計・製作されたプラズマ閉じ込め実験装置である。磁場に垂直方向の拡散を低減する手法の一つ「準等磁場配位」\*) 概念を取り入れ、真空磁気面\*) により構成される閉じ込め領域全体に磁気井戸をもち、無電流運転\*) を基本とする新概念の立体磁気軸系ヘリカル装置である。ここで提案しているヘリカル軸ヘリオトロン配位は、従来のヘリカル・ヘリオトロン配位では容易に両立できなかった良好な粒子閉じ込めと *MHD* 安定性\*) を高次に両立させることを目指しているため、提案する先進磁場配位の性能についてプラズマ実験を通じて検証し最適化していくためには、磁場分布制御の自由度の大きさが不可欠である。このため各磁場コイルに独立した電源を持たせ、要求される大きな自由度を確保している。先進磁場分布の詳細な制御により、閉じ込め改善を実現する優れた閉じ込め磁場構造の探求へ向けて、トーラスプラズマ物理のより総合的な理解が進展・深化し、より高性能な核融合炉への展望が開けることを期待している。とくに本双方向型共同研究では、将来の核融合炉心プラズマの高性能化に必要とされる要素還元研究及び学術研究として、先進磁場配位における磁場分布制御技術をもちいた先導的なプラズマの輸送・安定性の改善研究 (およびそれに関連する実験的・理論的研究) を、ヘリオトロン J 装置を活用して広範に展開した。

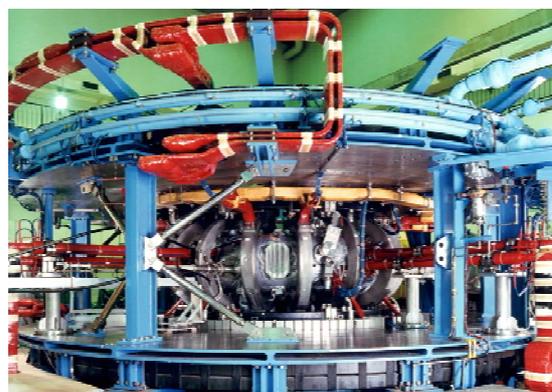


図 1 京都大学エネルギー理工学研究所のヘリオトロン J 装置

平成 12 年度のプラズマ実験開始以来、加熱機器ならびに計測機器の整備を進め、当初の 53GHz の電子サイクロトロン加熱 (ECH) システムに加え、平成 13 年度に

70GHz ECH システム、平成 14 年度の中性粒子ビーム入射 (NBI) 加熱<sup>\*</sup>) 装置 (BL-2) に続き、平成 15 年度にイオンサイクロトロン周波数帯 (IC 電磁波) 加熱<sup>\*</sup>) (#1)、平成 16 年に 2 基目の NBI (BL-1)、平成 17 年度に 2 基目の IC 電磁波 (#2) と整備を進めた。これまでに、低衝突領域の高温プラズマ生成 (中心電子温度  $\sim 1$  keV 程度)、良好なエネルギー閉じ込め (ヘリカル系装置の閉じ込めスケーリング則である ISS95 則<sup>\*</sup>) の 1.5–2 倍) の実証など、高温プラズマ閉じ込め装置としてのポテンシャルの高さが実証されつつある。また閉じ込め状態の自発的遷移現象<sup>\*</sup>)、高密度 ECH プラズマでの低周波揺動、ダイバータプラズマの非対称性などの発見と、それらの機構解明を目指した実験の他、第 2 高調波<sup>\*</sup>) ECH によるプラズマ発生・加熱機構に関する物理実験、磁場分布制御によるブーツストラップ電流<sup>\*</sup>) 制御や電子サイクロトロン電流駆動 (ECCD) <sup>\*</sup>)、中性粒子ビーム電流駆動 (NBCD) <sup>\*</sup>) などによるトロイダル電流<sup>\*</sup>) 制御実験などを推進してきた。得られた知見をベースに、平成 16 年度からトロイダルプラズマ物理のより総合的な理解を目指す「双方向型共同研究装置」として、先進磁場分布制御による①輸送および高エネルギー粒子閉じ込め、② MHD 平衡<sup>\*</sup>)・安定性の研究、③熱・粒子排出制御<sup>\*</sup>) の研究を中心課題とした研究へと展開し、順調に成果を挙げてきた。とくに双方向型共同研究によって、エネルギー複合機構研究センターのみではマンパワーの上からも困難であったプラズマ計測装置の開発研究、理論解析研究をはじめとする新たな実験計画が提案され、新しい研究領域で着実に成果が上がりつつある。最近の成果としては、高速カメラによる周辺領域揺動のフィラメント構造<sup>\*</sup>)、IC 電磁波加熱印加時の揺動抑制などが発見され、NBI プラズマの閉じ込め改善モードである「H-mode」遷移時の磁場配位とトロイダル電流との関係などの双方向型共同研究も順調に進展している。理論解析からは実効磁場リップル<sup>\*</sup>) 率と閉じ込め性能の比較、ヘリオトロン J での有理面近傍の回転変換<sup>\*</sup>) をもった磁場配位に対して微小なトロイダル電流による磁気面構造の変化などに関する実験的・理論的知見が蓄積されつつある。

## 2. 双方向型共同研究で達成された主な成果

### 2-1 ECH プラズマのスケーリング [1]

低密度 70GHz、第 2 高調波 ECH 加熱プラズマの通常閉じ込めモードである「L-mode」のエネルギー閉じ込め時間は概略 ISS95 比例則のオーダーと一致し、かつ低密度無衝突領域<sup>\*</sup>) における中心電子温度 ( $T_e$ ) は密度( $n_e$ )に反比例して上昇し、飽和傾向は観測されていない。電子輸送 (磁力線に垂直方向) は異常輸送<sup>\*</sup>) に支配されているが、ヘリカル系に特徴的な無衝突領域での新古典輸送<sup>\*</sup>) 悪化は見出されていない。磁力線に平行方向の輸送現象である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示した。とくにバンピー磁場<sup>\*</sup>) 制御で自発電流<sup>\*</sup>) の向きを正負 (零を含めて) に制御できることを実証した。磁場のトロイダル成分<sup>\*</sup>)、ヘリカル成分<sup>\*</sup>) に加えて、トロイダル方向の磁場リップルであるバンピー成分の寄与

の重要性を明らかにした。また ECH の斜入射による電流駆動(ECCD)を実証した。ECCD の電流値は予測より 1 オーダー程度小さく、今後、捕捉粒子<sup>31)</sup>の寄与に関する詳細な検討を要する。また低密度領域で、ブートストラップ電流と逆方向の大きな電流駆動を確認した。

## 2-2 H-mode 研究 [2]

ヘリオトロン  $E^*$ ) では実現できなかった H-mode の発現をヘリオトロン J で実証した。ECH プラズマでのプラズマパラメータの時間変化を図 2 に示す。この図では I の時間帯で L-mode から H-mode に代わり再び L-mode に戻る短時間の遷移が繰り返され、II の時間帯で完全に H-mode に遷移している。結果として H-mode 発現後プラズマエネルギーが上昇し、大幅な閉じ込め改善が達成されている。H-mode 発現領域は真空磁気面の周辺回転変換角に依存し、主たる低次の有理面よりわずかに離れた回転変換角において、比較的高い閉じ込め改善度が得られている。ECH+NBI プラズマにおいて、H-mode 遷移前後の閉じ込め改善度と主要な低次有理面を図 3 に示す。また高い閉じ込め改善時に最外殻磁気面<sup>\*</sup>) 近傍で負の径電場 ( $E_r < 0$ ) 形成を確認した。

## 2-3 H-mode のバンピー磁場依存性 [3]

真空磁気面の周辺回転変換角をほぼ一定とした条件でバンピー磁場を制御し、ECH プラズマの L-mode, H-mode プラズマのエネルギー閉じ込め時間が、バンピー磁場制御による実効ヘリカルリップル率の低下で改善することを見出した。

## 2-4 高速イオン閉じ込めのバンピー磁場依存性 [4]

少数イオン加熱モード<sup>\*</sup>) の IC 電磁波実験

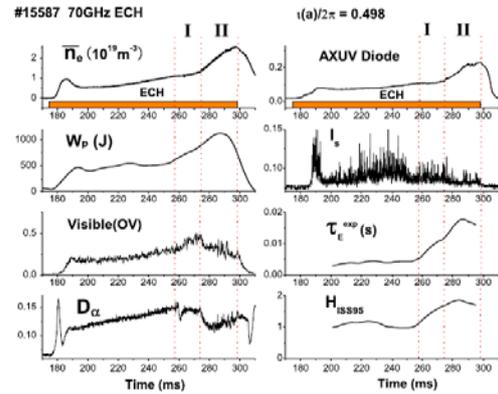


図 2 70GHz ECH プラズマの H-mode 遷移時のプラズマパラメータの時間変化

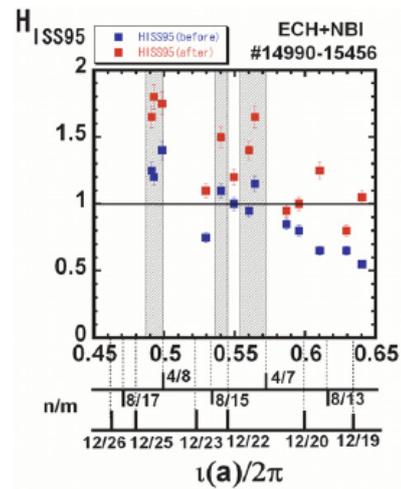


図 3 遷移前 (青) 後 (赤) の閉じ込め改善度。閉じ込め改善が 1.3 を超える領域を灰色で表示している。

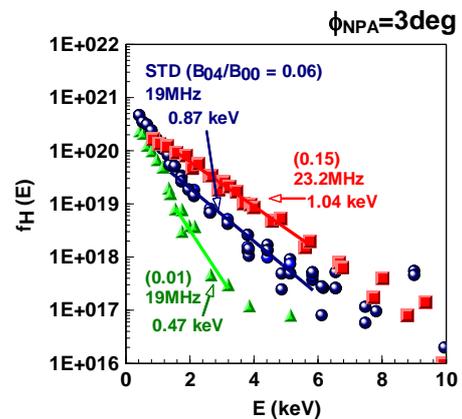


図 4 IC 電磁波少数イオン加熱実験での少数イオン (水素) のエネルギースペクトルのバンピー磁場依存性

で、多数イオン（バルクイオン<sup>\*</sup>）加熱を確認するとともに、高エネルギー粒子生成・閉じ込めがバンピー磁場の増加で改善することを見出した。同様の傾向が、NBI 実験での高エネルギー粒子束の NBI 切断後の減衰率からも確認される。高バンピー、中バンピー、低バンピー配位に対する実験で得られた少数イオンのエネルギースペクトルを図4に示す。バルクイオンの加熱に関しても高バンピー配位で高イオン温度が得られている。モンテカルロ計算<sup>\*</sup>によっても高バンピー配位の優位性は認められたが、実験データを十分説明するには至っていない。高周波エネルギーの吸収分布の検討を行うための数値解析が進行中である。

### 2-5 周辺磁場構造の変化 [5]

ダイバータープローブ<sup>\*</sup>や高速ビデオカメラ等を用いて、ヘリオトロン J プラズマにおけるダイバータープラズマ位置の自発的移動が確認された（図5）。移動距離は、非誘導トロイダル電流<sup>\*</sup> 3 kA 以下、プラズマエネルギー 3 kJ 以下の条件で、数センチ程度である。移動距離はプラズマ電流と強い相関があり、周辺磁場構造の変化であると考えられる。プラズマ平衡計算コード *HINT2*<sup>\*</sup>での計算によって、トロイダル電流の値のみならずその分布も周辺磁気面に対し影響があることが分かった。

### 2-6 電子バーンシュタイン波<sup>\*</sup>加熱 [6]

ECH のカットオフ<sup>\*</sup>の問題を克服し、より高い密度領域への侵入を可能とする手段の一つとして電磁波から静電波<sup>\*</sup>へのモード変換<sup>\*</sup>が考えられる。この電子バーンシュタイン波（EBW）加熱のうち、遅波異常波-バーンシュタイン波（X-B）モード変換<sup>\*</sup>を利用した加熱を 275 kW の入射パワーで *CHS* 装置<sup>\*</sup>にて行った。ビーム入射は *CHS* プラズマの縦長断面<sup>\*</sup>で上側ポート<sup>\*</sup>から行き、大半半径方向<sup>\*</sup>外側即ちヘリカルコイル近傍の強磁場側<sup>\*</sup>にミラーを配置し、入射ビームを反射することで強磁場入射条件を満たし、プラズマ上側の高域混成共鳴<sup>\*</sup>層でモード変換を起こし、プラズマ中心部へとビームを導いた。NBI ター

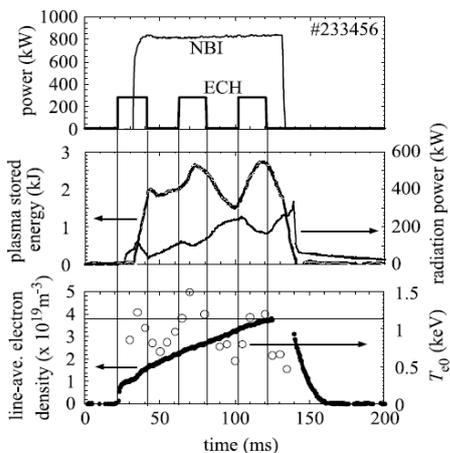


図6 遅波 X-B モード変換を用いた ECH 加熱時のプラズマパラメータの時間変化

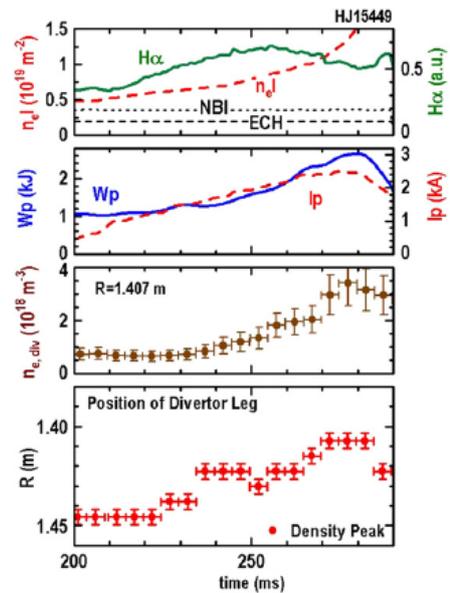
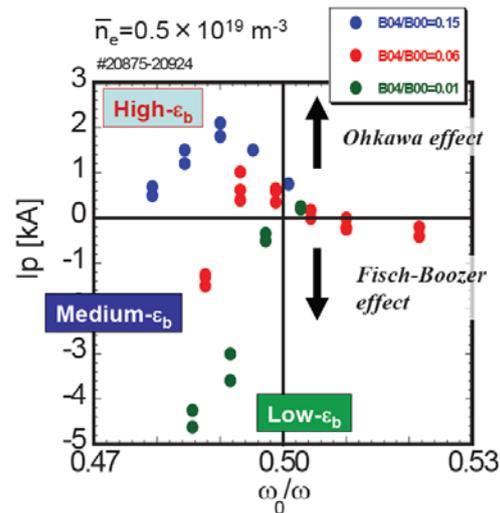


図5 プラズマパラメータとダイバーターとプローブパネル交差点（最下段）の時間変化

ダットプラズマ<sup>\*)</sup>にこのような条件で ECH ビームを入射したところ、プラズマエネルギーの上昇を確認した(図6)。また、トムソン散乱<sup>\*)</sup>の結果も中心部での電子温度上昇が確認された。サイクロトロン共鳴層とビームの交差する箇所は大半径方向外側プラズマ端付近にしか存在せず、プラズマ中心での温度上昇が確認されたことから、加熱機構は電子バーンシュタイン波へのモード変換後の波の吸収と考えられるとの結論を得た。



## 2-7 非誘導トロイダル電流の研究 [7]

図7 トロイダル電流の磁場強度およびバンピネス依存性

ヘリオトロン J 装置においてはブートストラップ電流、ECCD、NBCD の 3 種類の非誘導トロイダル電流駆動機構がある。これらの電流成分について閉じ込め磁場方向を変える(正・反転)ことによって分離し、それぞれ評価を行った。磁場のバンピネス(バンピー磁場成分の大きさ)を変化させた場合のブートストラップ電流と ECCD 電流とを第 2 高調波加熱の ECH プラズマに対し詳細に調べた結果、バンピネスおよび加熱位置によってトロイダル電流の符号逆転が観測された(図7)。これは、それぞれ逆方向に電流を駆動する *Fisch-Boozer* 効果<sup>\*)</sup> と *Ohkawa* 効果<sup>\*)</sup> の 2 つの電流駆動機構に対し、バンピネスあるいは加熱位置を変化させるとその割合が変わることを示している。電子密度は  $0.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  であり、ブートストラップ電流の影響は小さいと考えられ、電流変化は主に ECCD によるものである。高バンピネスの場合は ECH ビーム入射断面のプラズマ中心が磁場の極小部分に相当し、低バンピネスの場合は極大部分に相当する。

## 2-8 ECH/ECCD 低密度プラズマでの高エネルギーイオンテール<sup>\*)</sup> [8]

ECH/ECCD プラズマにおいて、ある条件下でバルクのイオン温度の数倍のエネルギーを持つイオンテールが観測される発生メカニズムについては、電子サイクロトロン波の低域混成波<sup>\*)</sup>へのモード変換や電子の非等方マックスウェル分布<sup>\*)</sup>の影響等が提案されているが、いまだ明らかになっていない。ヘリオトロン J でも  $1.0 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  より低い密度範囲で高速イオンテールが計測され、電子密度が低下するにつれ高エネルギー粒子束が増加することが分かっている。とくに低密度で、テール発生と同時に観測されると思われるプラズマポテンシャル揺動(重金属イオンビームプローブ計測)および 50~300kHz の磁場揺動が注目されている。

## 3. 結言

平成 19 年度からは新たにヘリオトロン J におけるプラズマ流研究、平衡・安定性研究、低磁場プラズマと静電プローブ測定による径電場研究、非中性プラズマ<sup>\*)</sup> 研究なども開始され、さらに広い研究領域が開かれようとしている。双方向共同型研究によって広範なプラズマ核融合研究者 (5 研究機関、50 名) との共同研究が行われ、新たな方向からのプラズマ研究が可能になった。今後、プラズマ輸送・安定性改善の研究の観点から、理論解析とも強くリンクした実験を推進する計画である。本双方向型共同研究の展開のなかで分かってきたことは、新古典輸送のみならず遷移現象を含めた異常輸送物理の解明の重要さの再認識である。粒子およびエネルギー閉じ込め改善を伴う自発的遷移が発見されてはいるが、この機構解明は端緒にすぎたばかりである。ベータ値あるいは非誘導トロイダル電流などによる磁気面構造変化との関連が議論されているが、未だ結論には至っていない。今後は 3 次元形状を踏まえた分布計測等も活用し、乱流場<sup>\*)</sup> の高精度・高次相関解析等を推進して、その詳細を明らかにする必要がある。低シア<sup>\*)</sup> のヘリカル装置での実験研究は国内ではヘリオトロン J 装置以外では不可能である。とくに、閉じ込め磁場形成に誘導電流を使わないため、トロイダル電流の閉じ込めに及ぼす影響、非誘導トロイダル電流の研究に対して大きな利点を有している。

一方、ヘリオトロン J 実験 (閉じ込め磁場最適化研究) を基礎とするヘリカル型核融合炉を展望するとき、これまでの双方向型共同研究の成果を基盤として京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センターが、今後担うべき重要な研究の方向性として、「普遍的な物理としての乱流・帯状流<sup>\*)</sup> 共存系のプラズマ物理の機構解明と関連する異常輸送物理研究」が挙げられる。立体磁気軸ヘリカル系の独自の磁場構造を活用することによって、低シア、磁気井戸、誘導電流無しのパラメータ領域において、広範囲の立体磁気軸ヘリカル系磁場配位に対して当該研究の推進方策を検討している。特に、電位 (または径電場) 形成の計測研究を基盤とするプラズマ構造形成・異常輸送物理研究の実施は、トーラス閉じ込め磁場最適化研究に対して、立体磁気軸ヘリカル系からの新たな知見を創出できるだけでなく、トカマク及び平面磁気軸ヘリカル系の研究に対しても相補的・補完的な役割を果たすことができる。立体磁気軸ヘリカル系で得られる新しい知見を取り込むことによって、トーラスプラズマにおける異常輸送物理の学術的体系化・普遍化の更なる発展が見込める。また、より一般的な 3 次元磁場構造におけるプラズマ構造形成・異常輸送物理の問題を解決する知見をも獲得できる可能性があり、それによって将来の核融合炉高性能化の研究に寄与できる。更に、磁場閉じ込めプラズマにおける当該研究の総合的な発展・集大成化に寄与できると考えられる。核融合科学研究所をはじめとする全国の実績のある研究機関との双方向型共同研究を通じてこれらの課題を遂行することにより、プラズマ閉じ込め物理の学術領域の拡大と、閉じ込め改善を実現する優れた磁場構造の探求に寄与できる可能性がある。京都大学における先進磁場配位研究の実績、ならびにソフト、ハード面にわたる研究資産を活かし、全日本的なトーラス磁場閉じ込め物理解明

の研究体制の構築と、上述のような研究の新展開を図ることによって、双方向型共同研究全体の発展に寄与していきたいと考えている。

[参考文献]

- [1] T. Obiki, Nucl. Fusion **44**, 47 (2004).
- [2] F. Sano, Nucl. Fusion **45**, 1557 (2005).
- [3] F. Sano, Fusion Energy 2006, IAEA-CN-149/EX/5-5Ra, IAEA, 2007.
- [4] H. Okada, et al., Nucl. Fusion **47**, 1346 (2007).
- [5] T. Mizuuchi et al., Nucl. Fusion **47**, 395(2007).
- [6] Y. Yoshimura et al., Plasma and Fusion Res. **1**, 053 (2006).
- [7] G. Motojima, et al., Nucl. Fusion **47**, 1045 (2007).
- [8] S. Kobayashi, ISHW 2007, Toki, Japan, P2-072.

1 緒言

レーザー核融合<sup>\*)</sup>は磁場核融合とは全く異なった原理に基づくもので、核融合発電所を考えると構成装置の独立性が高いため設計の自由度が高く、現存する材料でほぼ設計できる。また、レーザーショットの繰り返しを変えることにより自由に出力を調整できるので、磁場核融合で発電量の基幹部分を、レーザー核融合で日中のピーク需要に対応するのに適している。また、**高速点火方式<sup>\*)</sup>**を採用すると、比較的小規模の施設で研究開発を進めることができる特徴がある。[1]

わが国のレーザー核融合研究は、**激光 XII 号**による実験を中心に、様々なレーザー技術や照射技術の向上を図りながら、核融合点火に必要な 1 億度の温度[2]および固体密度の 600 倍の圧縮による高密度プラズマの実現を達成した[3]。これらのレーザー核融合の基本概念の実証に基づき、世界のレーザー核融合研究は、点火・燃焼段階に展開し、**米国・仏国**においてはそれぞれ **NIF<sup>\*)</sup>** 計画・**LMJ<sup>\*)</sup>** 計画が開始され 2010～2013 年の点火を目指している。

一方、1980 年代後半に発見された極短パルス超高強度レーザー技術の進展を背景に、高利得を目指した高速点火方式の研究が実験・理論の両面から開始された。この間、高強度レーザーによる高速電子発生や相対論的レーザー光伝播・自己収束等の実験とシミュレーションに基づく基礎研究が進展し、これらの知見をもとに、超高強度レーザーによる爆縮コアの追加加熱に成功し、核融合中性子の発生数は追加加熱をしない場合に比べて 1000 倍に上昇した。固体密度の 600 倍の高密度圧縮と 1 千万度への追加加熱が実現されたので、研究開発の次のマイルストーンは核融合点火・燃焼を実現することである。(図 1 左) [4]このための計画は高速点火実証計画 **FIREX (Fast Ignition Realization Experiment)** と名付けられている。

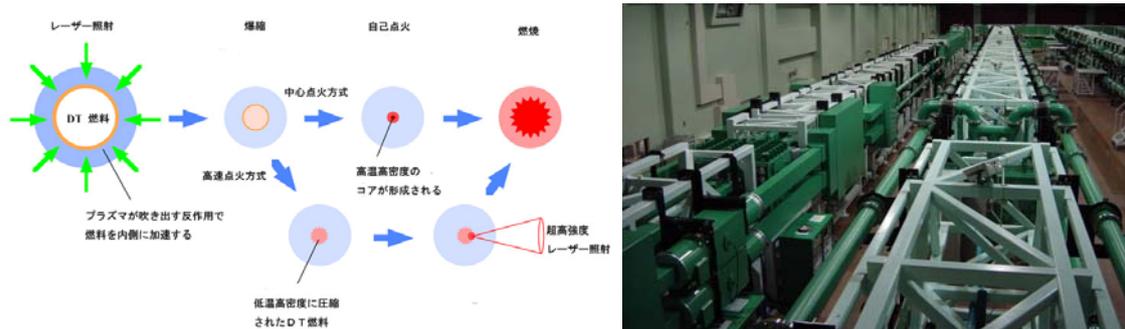


図 1. レーザー核融合方式 (左) と競争的資金の活用により建設の進む追加加熱レーザーと激光 XII 号レーザー (右)

手順を踏んだ研究開発がすすめられるように **FIREX** 計画は二段階に分けられており、第 1 期では加熱用のレーザー (10kJ/10ps) を建設し、(図 1) これにより燃料を 5 千万度から 1 億度の核融合点火温度へ加熱することが目標である。この段階では、

燃料の物理的大きさがアルファ粒子の飛程\*<sup>1</sup>)より小さいので核融合点火が起きることはないが、点火・燃焼に必要な効率の高い加熱の可否が明らかになる。引き続き第2期では圧縮用レーザーと加熱用レーザーをいずれも50kJに増力し、アルファ粒子の飛程より大きな燃料プラズマを生成して核融合点火・燃焼を実証することにより、レーザー核融合炉で必要となる高いエネルギー利得の実現の見通しを得ることが目的である。

レーザーエネルギー学研究センターでは双方向型共同研究の枠組みの中で高速点火方式の原理実証を目標とした FIREX を精力的に進めるとともに、関連技術の学術への応用、産業への普及に努めている。

双方向型共同研究では核融合科学研究所三戸グループと極低温ターゲットの開発、同じく坂上グループとはシミュレーション技術の開発、尾崎グループとは計測器の開発などを行っている。また、九州大学大学院工学研究院中尾グループはシミュレーションコード開発とターゲット設計、同総合理工学大学院深田グループはLiPb中のトリチウム関連研究を進めている。ターゲットの投入、追尾の研究は広島大学大学院工学研究科遠藤グループ、岐阜大学工学部吉田グループと共同研究が進めている。京都大学大学院工学研究科功刀グループとは液体壁の安定性についての研究、東京工業大学糟谷グループとは固体壁のアブレーション\*<sup>2</sup>)の研究、立命館大学情報理工学部陳グループとはX線画像計測技術の開発などの共同研究を進めている。

## 2. ターゲット開発

FIREX プロジェクト用のレーザー光ガイドコーン\*<sup>3</sup>)付き極低温燃料ターゲットの開発を核融合科学研究所と共同で進めている。本ターゲットは、図2の様に、超短パルス加熱レーザー光を導入するためのガイドコーンを持った低密度のフォームシェル\*<sup>4</sup>)に、重水素・三重水素ガスを細管を通して充填し、冷却し、固体燃料層を構成する。レーザーエネルギー学研究センターでは燃料容器並びに評価方法の開発を実施、核融合科学研究所では極低温での燃料充填制御技術並びに装置の開発を行った。

燃料容器の開発に関しては、以下の低密度のフォーム素材の開発を進めるとともに、比較的高密度(100mg/cm<sup>3</sup>程度)のフォーム素材を用いたシェルの開発を行った。新しい手法を考案することによって、従来の方法では製作できなかった、小型で壁厚の薄い電磁波-PP (Resorcinol/formalin - phloroglucinolcarboxylic acid / formaldehyde) 素材の製作に成功し、球殻化も可能となった。[5]燃料容器の評価方法については、拡散光による光学観測系とHe-Neレーザーによる干渉光学系を設置、光線追跡による位相合成ソフトが開発され、中心部近傍の充填量の評価が行われた。[6、7]

核融合科学研究所に於いては、専用の冷却試験装置が開発され、ポリスチレン・シェル並びに電磁波(Resorcinol/formaldehyde)フォームシェルを用いた液体水素充填固化試験が実施された。細管を通して燃料を充填固化する手法の是非が調べられ、

ガス導入、液化までの過程は十分制御可能であることが分かった。固化後、燃料を低温で保持することによって重水素固体層の均一性が改善されることが示された。図3では、固化直後に観測されている燃料内部の欠陥部が（上部）一様化されるのわかる（下部）。また、干渉像においても、中央部分に観測される干渉縞が明瞭になっている。3次元の熱解析コードによってターゲット内部の温度分布が調べられ、この固体水素層の一様化は水素のオルソ-パラ<sup>\*)</sup>変換熱によると解釈できることが示された。

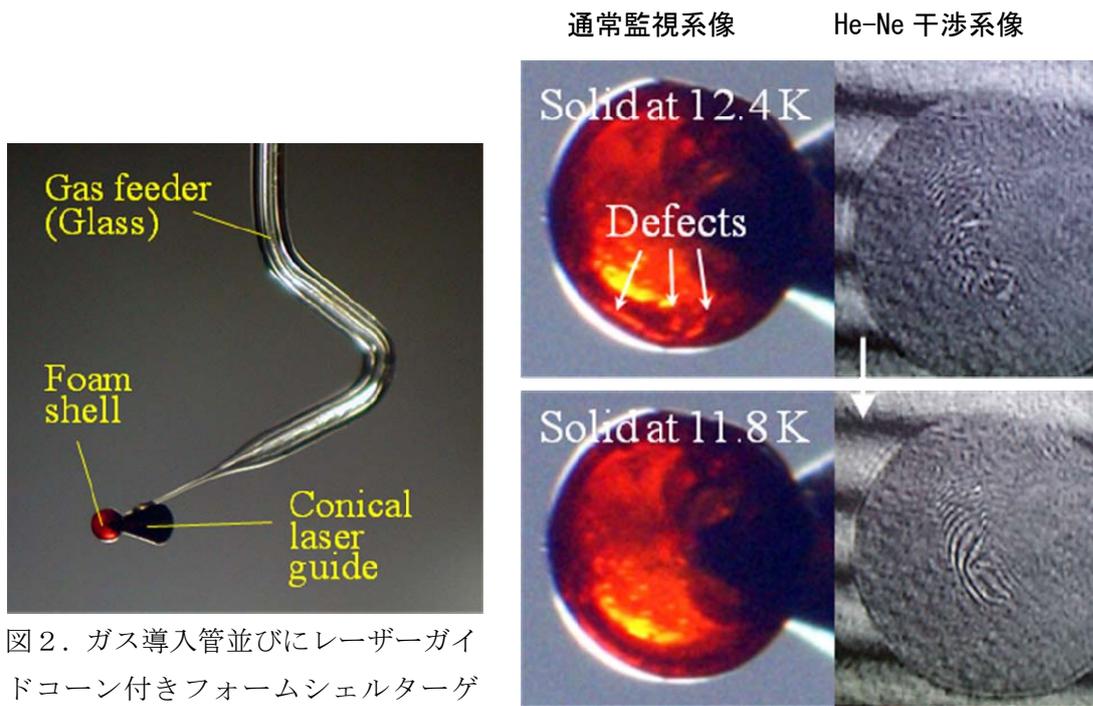


図2. ガス導入管並びにレーザーガイドコーン付きフォームシェルターゲット

図3. 固化試験結果

### 3. プラズマ計測

プラズマ計測関係では核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部の磯部研究グループや尾崎研究グループと中性子検出用のダイヤモンドディテクターの研究が共同で進められている。

大阪大学・レーザーエネルギー学研究中心におけるレーザー核融合実験では、多チャンネルの高速プラスチックシンチレータ（BC408 シンチレータ）アレイ型システム：MANDALA を用いて核融合中性子の飛行時間からイオン温度の評価を行っている。ペタワット加熱レーザー<sup>\*)</sup>を使った高速点火核融合実験では大量のガンマ線が発生し、これが中性子の検出を妨げることがある。ダイヤモンド検出器は、時間応答性に優れていることに加えて、検出部厚が薄いこと、比較的小さい実効原子番号を持つこと等の理由から、上記の環境下で中性子とガンマ線を弁別出来る可能性があると考えられる。実際、米国・ロチェスター大学の OMEGA レーザー核融合装置では、中

中性子飛行時間法への CVD ダイヤモンドの適用性を調べる実験が始まっている。本研究では、大型ヘリカル装置 (LHD) において高速中性粒子分析器として実績のある天然ダイヤモンド検出器を大阪大学のレーザー核融合実験に適用し、まずは中性子とガンマ線が弁別して測定出来るか否かを調べることを目的とし、開発が進められている。

超短パルス超高強度レーザーを照射したターゲットにおける高速電子の発生とターゲット内部での輸送に関する実験を行い、レーザー強度の上昇に伴い高速電子流がマージすることが確認された。これは以前に行われた空間分解能の低い測定結果と同様の傾向を示し、より微細な空間構造としても同様の現象が起こっていることが解った。[8]

続いて球状のフォームシェルに金属コーンと燃料ガス導入管を設けたターゲットに液体重水素を充填し、激光 XII 号レーザー照射で爆縮、PW レーザー照射で加熱する高速点火統合実験を開始した。激光 XII 号第 1 チャンバーにてクライオターゲット装置を稼働し、激光 XII 号レーザー (波長:  $0.53 \mu\text{m}$ 、出力:  $5\text{kJ}/1.6\text{ns}$ 、9 ビーム) および PW レーザー (波長:  $1.053 \mu\text{m}$ 、出力:  $300\text{J}/1\text{ps}$ 、1 ビーム) を同期運転し、ターゲットショットに成功した。実験データは予備的な段階ではあるが、爆縮加熱ダイナミクスの解明などが進んだ。

高速点火の可能性を拓げるために、「衝撃点火<sup>\*</sup>」[9]と呼ばれる新しい点火方式を提案した。これはレーザーで超高速に加速された燃料を、予め爆縮した燃料に衝突させるもので、中心点火と同様の予測性を持ちながら、小規模な点火を実現する可能性がある。米国ネーバルリサーチ研究所等との国際共同研究において、中性子発生数が衝撃点火を行わない場合に比べて 2 桁上昇した。[10]

#### 4. 高速点火核融合の計算機シミュレーションによる研究

高速点火核融合には爆縮から加熱・燃焼まで、時空間スケールや支配する物理が大きく変化することが知られており、すべてのプロセスを一貫して記述するシミュレーション解析が重要となる。そのため阪大レーザー研、核融合研、九大、摂南大が協力して、高速点火核融合のための多階層連結シミュレーションシステム FI<sup>3</sup> (Fast Ignition Integrated Interconnecting system)を開発した。FI<sup>3</sup>では、高密度爆縮を解析する爆縮コード (輻射流体力学コード: PINOCO)、相対論レーザープラズマ相互作用を解析するコード (PIC<sup>\*</sup>) コード: FISCOF1D および 2D)、および高速電子輸送を解析するコード (相対論フォッカー・プランクコード: FIBMET) の 3 つのコードがそれぞれ独立して実行し、その間を通信プロトコルによってデータ授受することによって連結されている。(図 4) このシステムを用いて、高速点火核融合の爆縮レーザーの照射初期から、高密度圧縮コアを加熱するすべてのプロセスを実行する多階層シミュレーションを世界で初めて実現した。

FI<sup>3</sup>を構成するコードで個々のプロセスにおける物理的な理解も進んだ。PIC コード FISCOF1 によるシミュレーションによってスケール長依存性、および FISCOF2D によ

って固体表面に斜めに照射された超高強度レーザーによって固体表面に沿って加速される電子の運動メカニズムが明らかになった。その結果、高速点火ターゲットに装着される金コーンの開き角やプリパルスによって高速電子のエネルギースペクトルが大きく変化することが明らかになってきた。これは高速電子の制御につながると考える。[1 1]

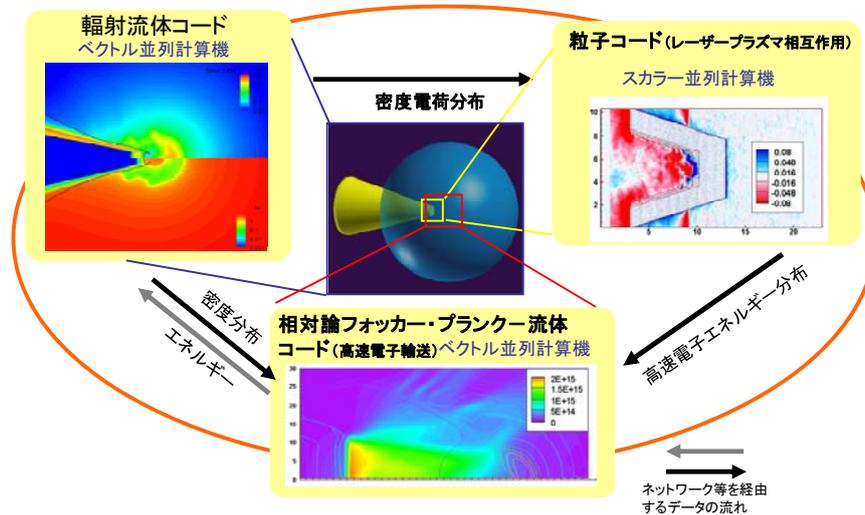


図4 FI<sup>3</sup>の概要図。矢印は3つのコード間のデータの流れを示す。これまでに黒線部分が完成し、灰色部分のデータの流れについて検討が行われている。

統合爆縮（輻射流体）コード PINOCO で高密度爆縮に関する大規模輻射流体シミュレーションを実施し、金コーン表面に CH のコーティングを施すことによって輻射による金のアブレーションの影響を抑え、爆縮性能が向上することが示されるなど、FIREX 計画における金コーン付ターゲット設計の指針が示された。上記二つのコードの結果を考慮して高速電子輸送計算コード FIBMET を結合した FI<sup>3</sup> のシミュレーションで、より現実的な実験条件に近づけた統合シミュレーションも実施して高速点火の加熱メカニズムの物理機構の解明を進めている。特に、高強度レーザー照射のプリパルスによって発生するプリプラズマを輻射流体コードで解き、そこで得られた分布を FISCOF コードの境界、初期条件とし、加熱計算をする FIBMET コードまでを統合したシミュレーションを行った。輻射流体解析で見られた2つのスケール長を持つ密度分布では、加熱に適した高速電子が発生していることが分かった。これより一般的な加熱効率がよいターゲット、照射レーザーのパルス波形などの設計をするための解析手法が確立した。

## 5. 炉工学

レーザーエネルギー学研究センターでは I F E フォーラムと共催で磁場核融合 炉工学関係者、産業界の専門家も含めてレーザー核融合炉設計委員会（2004年3月～

2005年9月)を組織し、高速点火方式によるレーザー核融合発電所<sup>\*)</sup>の概念設計をおこなった。その結果、冷却Yb:YAGセラミックレーザーを用いることにより、冷却に必要な電力を入れてもプラントを運転するのに必要な繰り返しと効率が、圧縮レーザー、追加熱レーザーとも余裕を持って達成できることが分かった。炉はカスケード型の液体壁を持つモジュラータイプのもので、炉1基当たりのショット繰り返しを4Hzにすることにより、建設コストを抑え、レーザーの性能をフルに利用するプラントを構成できることが分かった。1.1MJの爆縮レーザー32ビームと100kJの加熱レーザー1ビームにより、200MJの核融合出力を生成する。核融合燃焼を行う炉チェンバーは、4Hzでパルス燃焼を繰り返し、1基当たり800MWの核融合出力、300MWeの電気出力を生み出す。レーザー自体は16Hzの運転も可能なので、一つのレーザーで4基の炉を駆動するモジュラー方式を採用し、プラント全体で1200MWeの電気出力をもたらす。図5は高速点火方式に基づく電気出力1200MWeのKOYO-Fである。[12]

炉設計委員会終了後は委員会活動中で明らかになった要素技術の実験的検証が進められ、九州大学大学院中島グループによる磁場を用いたビームポート保護に関する研究、京都大学大学院工学研究科功刀グループのカスケード型液体壁の安定性に関する実験、シミュレーションの研究へと展開し、炉設計の信頼性を高める努力を続けている。

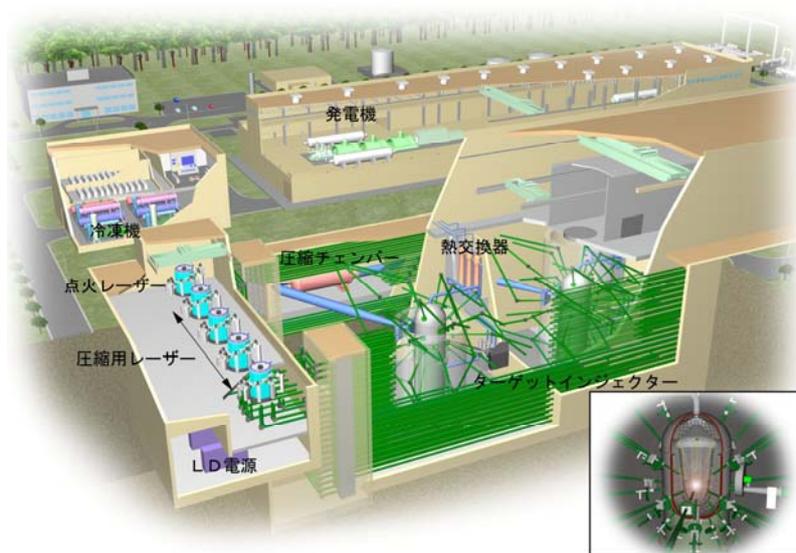


図5. 高速点火方式によるレーザー核融合発電所 KOYO-F

## 6. 今後の計画

平成19年度に建設を完了し、20年度後期から FIREX 第1期の実験を開始する。レーザー波面制御とビーム間の波面合成を逐次導入することにより、集光性能を向上させ、平成22年度前後に所定の点火温度を達成する計画である。目標達成後は、タ

ターゲットをクライオ DT 燃料に変更し、核融合利得 $\sim 0.1$ のサブイグニッションを目指す。図6には、FIREX 全体の計画と米国 NIF と仏 LMJ での点火実験開始時期を示す。FIREX-I による高速点火原理実証と NIF/LMJ による点火実証は FIREX-II 開始の科学的基礎となるであろう。

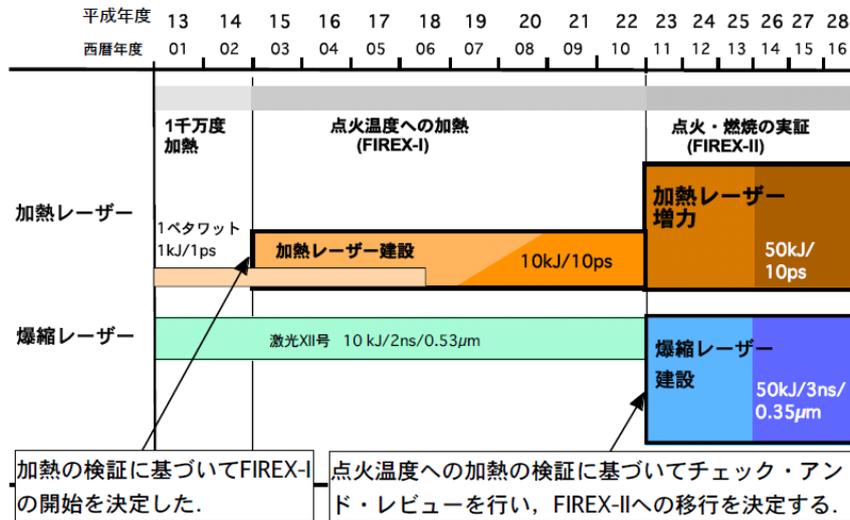


図6. FIREX 年次計画

[参考文献]

- [ 1 ] T. Yamanaka, Kansei Kakuyugou Kenkyuu (1983)
- [ 2 ] C. Yamanaka, et al., Nuclea 電磁波 usion, 27 19-30 (1987).
- [ 3 ] S. Nakai, et al., 13th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclea 電磁波 usion Research, Washington, DC, USA, 1-6 Oct. 1990 [IAEA-CN-53/B-1-3]
- [ 4 ] R. Kodama, et al., Nature, Vol. 418, No. 6901, pp. 933-934, 29 Aug. 2002
- [ 5 ] K. Nagai, et al., Nucl. Fusion 45 1277-1283 (2005)
- [ 6 ] A. Iwamoto, et. al., Fusion Sci. Technol., 51 (4), 753-757, (2007).
- [ 7 ] T. Fujimura, et, al., Fusion Sci. Technol., 51 (4), 677-681, (2007).
- [ 8 ] T. X. Huang, et al., Review of Scientific Instruments vol. 77, 026105 (2006).
- [ 9 ] M. Murakami, Nucl. Fusion 46 99-103, (2006).
- [10] S Yu Gus'kov, et al., Plasma Phys. Control. Fusion, 49 1689-1706 (2007).
- [11] T. Nakamura, et al., Phys. Plasmas 14, 103105, (2007).
- [12] T. Norimatsu, et al., Fusion Science and Technology, 52 893-900 (2007).

### Ⅲ－３－４ 九州大学応用力学研究所附属高温プラズマ力学研究センター

#### (1) 共同研究成果まとめ

九州大学応用力学研究所は、強磁場プラズマ・材料実験施設の時代（1987.5～1997.3）を経て、平成9年度より炉心理工学研究センター（1997.4～2007.3）平成19年度より高温プラズマ力学研究センターとして、主要な課題「高温プラズマの長時間・定常維持とその理工学」につき研究を進めてきた。

主な実験装置としては、超伝導強トロイダル磁場実験装置 TRIAM-1M（トカマク）、小型PWI 実験装置 CPD（球状トカマク）、新装置であるプラズマ境界力学実験装置 QUEST（球状トカマク：計画）を活用し、以下のような双方向型共同研究の成果を上げてきた。特に、この中において、平成17年度までに TRIAM-1M の研究計画を終了し、センターの次期計画として、先進的な磁気閉じ込め配位としての球状トカマク（ST=Spherical Tokamak：大半径と小半径の比が2程度以下の球状の形をしたトカマク）の長時間維持研究を構想し、新装置『長時間維持球状トカマク装置 QUEST』の建設を提案してきた。

核融合科学研究所では、全国のプラズマ・核融合分野の研究活動の一層の活発化を図るため、平成16年度より、「双方向型共同研究」を開始したが、この中において、九大の新装置の提案を審議するために、双方向型共同研究委員会のもとに「九州大学プラズマ境界力学実験装置検討会」を設置し、全国的規模での活発な検討・議論を推し進めてきた。

その結果、九大提案の新 ST 装置「プラズマ境界力学実験装置」は、学術審議会のもとに核融合研究ワーキンググループ（WG\*）の報告書（平成15年1月8日）の提言の中の「斬新な研究の展開の提案」に対応するものであり、さらに、今後のわが国の球状トカマク研究の総合的推進にとっても重要であって、『提案として妥当である』と結論づけられた。また、大学における既存の ST 装置を用いた研究活動との連携協力のもとに、全日本的な新しい ST 研究体制を構築しつつ推進すること、またこれらは、核融合科学研究所を中心とした双方向型共同研究の枠組みのもとに密接な連携を図りつつ推進し、わが国の大学・国公立研究機関等における核融合研究の学術基盤の長期的構築に寄与すべきこととされた。

九大高温プラズマ力学研究センターにおける双方向型共同研究での研究成果は、以下のようにまとめられる。

- (1) TRIAM-1M 研究計画を終了し、新計画「長時間球状トカマク研究」を提案し新しい展開を図ったこと。これに際し、双方向型共同研究委員会の下に検討会を設けていただき、全国的規模での議論を通して、計画の最適化が得られたこと。
- (2) 上記(1)のための予備研究として、東京大学の装置 TST-2 を九大に移送

- (3) 加えて、上記(1)のための準備研究として、小型PWI実験装置CPDを建設し、多くの共同研究を遂行し成果を挙げたこと。
- (4) 双方向型共同研究の枠組みにより、平成17-19年度の3か年計画にて、新計画「長時間球状トカマク研究」(QUEST)の装置建設に至ったこと。

以下に、各項目の成果の概略を述べる。

## (2) 共同研究各項目の成果概要

### (2) - 1 TRIAM-1Mによる成果

超伝導強トロイダル磁場実験装置 TRIAM-1M を用いて、高周波による電流の維持制御による超長時間プラズマの生成を目指し、プラズマ・壁相互作用の解明・制御の研究を進めてきた。これらのために開発してきた技術課題・項目としては、

- (1) オーミックプラズマ<sup>\*</sup>) 生成から電流駆動へつなげるための単一極性ループ電圧<sup>\*</sup>) 印加法の開発
- (2) 長時間磁気コイル制御のための極低ドリフト積分回路の開発
- (3) 超長時間制御のためのホール素子<sup>\*</sup>) 回路の導入
- (4) プラズマ映像処理回路を用いたプラズマ位置制御システムの開発
- (5) 密度一定制御のための周辺ガス圧一定制御に代わる  $H\alpha$ <sup>\*</sup>) 一定制御法の開発
- (6) 高熱除去能力リミター<sup>\*</sup>) (可動リミター) の導入

などである。これまで、主として(1)~(4)により3時間放電を達成してきたが、さらに、熱除去能力の高い可動リミターの活用等により、平成15年11月8日、これまでの記録を大幅に越える5時間16分の超長時間プラズマの維持に成功した。これまでの放電波形との比較も含め、図1(右上)にそれらをまとめて示した。このことは、「定常化研究」の『Day-long 実験』としても、1つの重要なステップとなったと考えている。

これらの実験の中で、超長時間プラズマの計測・解析が進展しプラズマ壁相互作用に関する多くの新しい知見が得られた。粒子バランスの研究からは、

- (1) 粒子供給・排気の実験より求められた所謂「動的粒子吸蔵量」が、プローブとして導入された壁材料の分析から求められた実際の吸蔵量(所謂「静的吸蔵量」とほぼ等しいという結果が得られたこと
- (2) 3時間を越える超長時間放電では、粒子供給を停止しても壁からの粒子供給と壁への粒子付着がバランスした形で、実質上リサイクリング<sup>\*</sup>) 率がほぼ1の状態が維持されることが頻発すること(図1)
- (3) これらプラズマ壁相互作用においては、カーボン系装置で認識されてきた壁材料物質と水素粒子の共堆積効果が、TRIAM-1Mのような金属系装置においても極めて大きな役割を担うこと

などの知見が得られた。

さらに不純物粒子の挙動に関する研究からは、1回の超長時間放電における現象は、多くの中長時間放電の繰り返しでは再現できないこと（それぞれの減衰時定数が大きく異なる）、またその原因の1つとして、放電の待ち時間の間での粒子の挙動が影響していることなどを見出した。

### Recent Results

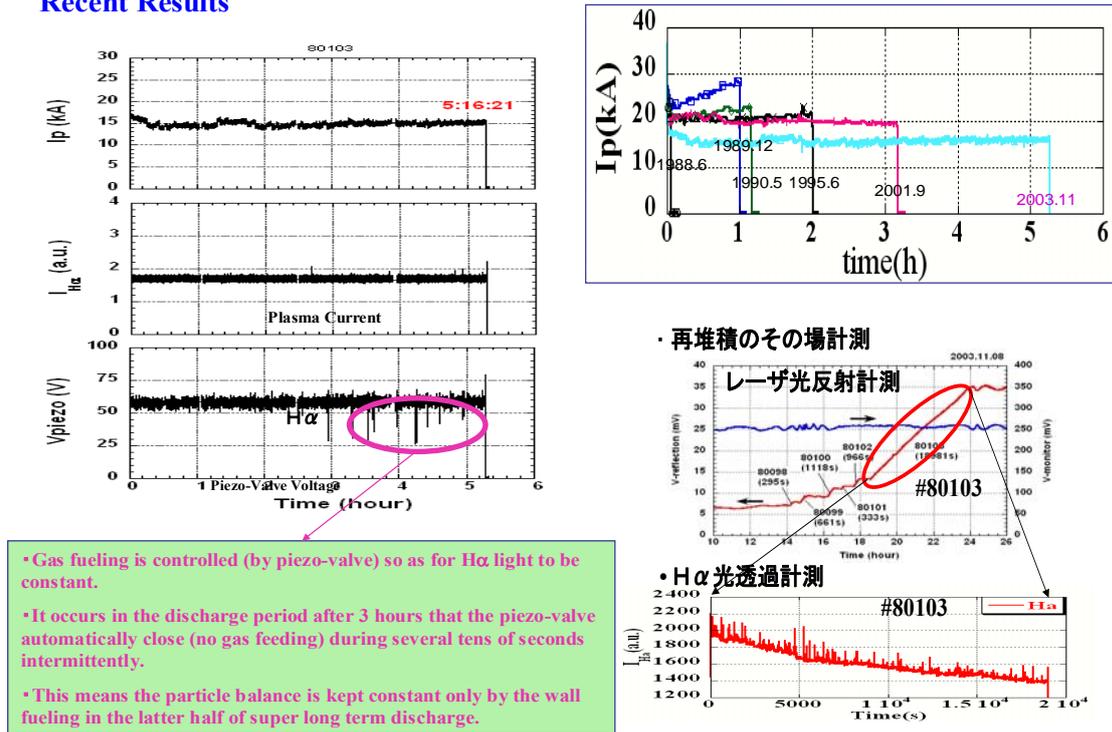


図1 超長時間維持プラズマにおける研究成果

[右上] 典型的な長時間放電波形の発展

[左および右下] 3時間を越える超長時間放電における、粒子供給停止状況での自動的プラズマ維持（壁からの粒子放出による、実質上リサイクリング率 $\sim 1$ の状態の維持）

以上の研究は「定常トカマク運転の実証において特長的な成果をあげた」と評価され、これらの研究成果を基盤として、球状トカマクの長時間維持研究計画へと研究課題としてのつながりを持ち、展開を図れることとなった。

## (2) - 2 TST-2 および CPD による共同研究成果

### A. TST-2 および CPD による共同研究の遂行

平成15年度には東京大学の球状トカマク装置 TST-2 を、九大に一時的に移して実験するという共同研究を企画し、平成16年度まで実験を行なった（図2）。平成16年度には小型 PW I 実験装置を建設し、平成17年度に実験を開始した（図3）。

特に、東京大学との共同研究は、大学にとっての大型装置 TST-2 を実際に移設し、実質的共同研究を遂行したもので、球状トカマクにおける電子バーンシュタイン波 (EBW) による加熱・電流立ち上げなどに関して大きな成果が得られた。

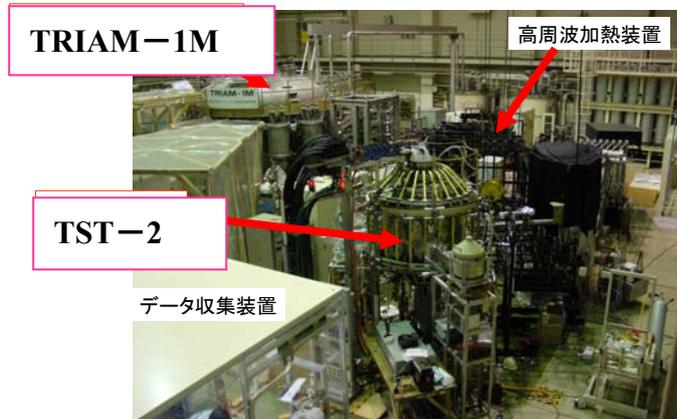


図2 TRIAM-1M の隣で実験を進めた  
東大の球状トカマク装置 TST-2

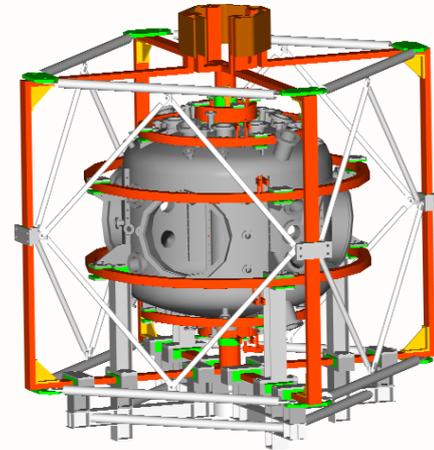


図3 小型 PWI 実験装置 : CPD

## B. 高周波によるプラズマ電流の駆動

### 1) 電子サイクロトロン加熱・電流駆動

TRIAM-1M における低域混成波 (LHW) による電流駆動は 2003 年 5 時間 16 分の成果をあげたが、その後の共同研究においては LHCD プラズマをターゲットにした電子サイクロトロン波による電流駆動との相乗効果に関する研究を進めた。共同研究のテーマとしては ITER、LHD でも利用可能な遠隔制御 steering アンテナ設計・試作・実験を行った (核融合研との共同研究)。斜め入射の X, 0 モードの入射加熱・電流駆動の実験を行い共著論文としてその成果を発表した。

### 2) 低域混成波電流駆動プラズマと電子サイクロトロン波入射の相乗効果

京都大学との双方向型共同研究として、順・逆方向の LHW と Counter-ECCD の実験を行った。以前京都大学の小型トカマク装置 WT-3 で実験されたテーマであるが電流のランプアップ中に実験が終了しており、定常運転が可能な TRIAM において定常状態にまで発達した電流分布を実現し、その下でのシナジー効果<sup>\*)</sup>の研究を行い成果を発表した。

### 3) 電子バーンシュタイン波加熱・電流駆動

双方向共同研究の準備として 2003 年、東京大学との共同研究を実施した。TST-2 装置の移設と TRIAM の 8.2GHz システムを用いた EBW 加熱・電流駆動の実験を行い、世界で初めての X-B モード変換による加熱の観測、X-B 条件下での電流駆動 (~4kA) を実現した。リミッターを移動させながら XB 条件の最適化、即ち密度勾配の急峻化 (<10 mm) を実現し、XB 変換を実現した。

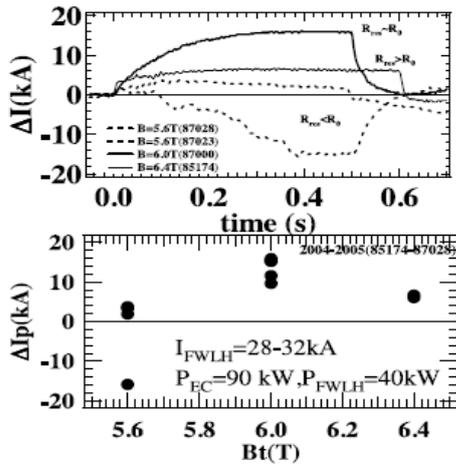


Fig. 9. The  $\Delta I$  for three resonance positions (inboard off-axis, on-axis, and outboard off-axis).  $B_t$  is evaluated at  $R = 0.8$  m.

図4 3つの共鳴点 (Inboard off-axis, On-axis, Outboard off-axis) に対する電流変化

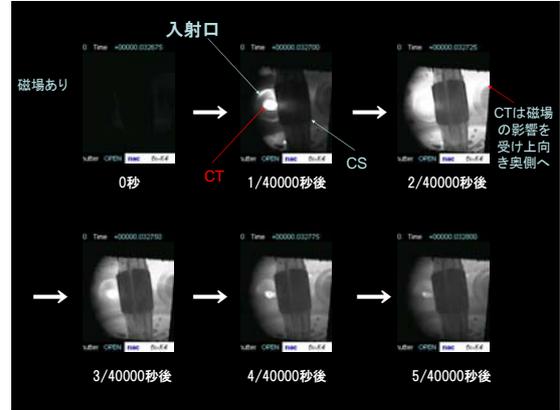


図5 CPD装置内に入射されたCTの高速カメラ画像

この分野の研究は引き続き2005年より共同研究装置CPDにおいて、電流駆動実験として取り組まれ、NIFSとの共同研究として、光線追跡コードの整備、最適入射モード・偏波面の評価を行い、それに基づき、アンテナ設計・製作・実験へと共同研究を進めている。京都大学LATE<sup>\*</sup>装置での電流駆動実験との比較を行うための共同研究では、2.45GHz, 5GHz, 8.2GHzと幅広い周波数帯での電流駆動を比較している。現在継続中であるが、電流のジャンプ現象を観測し、この現象がLATEだけでなく普遍的な現象であることが明らかになった。CPDではジャンプが起きるための条件を調べ、磁場配位、入射パワーの閾値、壁排気条件の確立などについて明らかにすることができた。

### C. リサイクリングのトーラス構造解析とリサイクリングの能動制御

#### 1) DEGASコードを用いたリサイクリングのトーラス構造の解明

TRIAMの定常運転が前兆無く停止する理由の一つはポロイダルD型リミターからの熱負荷除去の不十分さであった。そこで前述の冷却性能に優れたレールリミターを用いてプラズマとの接触を局在化し熱負荷を減らすことによって5時間の運転が可能となった。一方低密度のために水素ガスのトロイダル、ポロイダル方向の進入長(電離長さ)にはトーラス内部の対向材<sup>\*</sup>構造物の配置によるリサイクリングの構造を持つことが観測された。この構造の解析を行うために筑波大学との共同研究によりDEGASコードを円柱メッシュモデルに拡張し、TRIAM-1Mの局所リミターの効果を数値的に解析し、密度に依存したPFC構造が周辺リサイクリングに重要な寄与をすることを明らかにした。

## 2) 移動表面对向材を利用したリサイクリングの能動制御

リサイクリングの制御は定常トカマク運転を達成するために必須の課題である。TRIAM の実験では放電中に低密度でありながら壁飽和が起きそれによって密度制御が不可能になる場合が見受けられ、定常密度制御の最大の問題の一つであると成果を発表した(NF 2002 Sakamoto)。この密度制御の重要な試みとして、東京大学、京都大学、核融合研、筑波大学との共同研究として、リサイクリングの影響や構造に関する実験をすすめた。

この研究をさらに発展させた研究を進めて、NIFS との共同研究として水素吸蔵が可能なLi蒸着回転リミッターを装着しリサイクリングの能動制御の実験を実施し、高周波プラズマですらリミッター表面でのリサイクリングが減少することなど、駆動電流値の増加につながる様子を確認した。

## D. ST へのコンパクトトーラス\*) プラズマの入射

兵庫県立大学との共同研究として CT 入射装置を日本原子力研究所から九大に移設し CPD への入射実験が可能なように整備を進めた。この目的は、ST の立ち上げ、燃料供給に加えて、CPD 磁場配位と CT プラズマの相互作用に関する基礎的な研究も含んでいる。広島大学との共同研究で、CT の入射の様子を高速カメラでとらえ、磁場印加で軌道が変化する様子を調べた。

## E. 新計測法の導入

### 1) Zeeman 効果を利用した周辺中性粒子の流れ計測

東京大学との共同研究では TRIAM-1M の強磁場と定常プラズマという特質を利用した精度の高い偏光分光に取り組み、中性粒子の流れ 視線方向の流れの推定に成功した。

### 2) 水素分子スペクトル解析に基づく振動温度変化と対向材表面温度の推移

東京大学との共同研究で背面照射型 CCD\*) を新たに導入し、波長分解能に優れた分光器システムを構築した。これを利用して、水素分子のファルカー帯の計測を行い、リサイクリング過程に重要な役割を果たす水素分子の発光位置同定、並びにエネルギー分布の計測を行った。

分子スペクトル強度の時間変化を PWI による局所温度の増大と関連させて研究を進め、局所温度がある閾値( $T_{\text{threshold}} \sim 0.7 T_m$ )を超えると材料原子中に捕獲されていた水素原子・分子の爆発的な放出が起きることを見いだした。

### 3) 高速カメラを利用した定常プラズマのダスト撮影と定量分析

定常プラズマでは表面温度がそれほど上昇しなくても(900K<<融点) ,時間が進むと表面からダスト\*) が放出される様子が観測される。このダストの性質を調べるために広島大学との共同研究を進め高速カメラによりダストの挙動、発光よりのダストの大きさ推定などの研究を行った。その結果ダストは 10-50m/s と非常に早いスピードで進むがその方向は任意であることを観測した。またその個数に関

しては放電時間が長くなるに伴い個数がほぼ線形に増大することを明らかにした。トーラス内部のダストを収集し、組成がほとんど Mo であり、その大きさが 1-10 $\mu\text{m}$  2種類の形状はフレーク型と球状であること確認した。

4) 異方性プローブを用いた周辺イオン温度の計測

TRIAM の定常プラズマでは低密度低パワー LHCD で観測された HIT (high ion temperature) モード、高密度高パワー LHCD で観測された ECD (Enhanced Current Drive) モードなどプラズマ内部のイオン温度の上昇が観測されている。日本原子力研究所、理研、横浜国大、上越教育大との共同研究では SOL におけるイオン温度を磁力線方向の長さが異なる異方性プローブによって測定した。

5) シート状リチウムビームによる 2次元プラズマ密度分布

周辺プラズマの密度分布の 2次元像を得るために核融合科学研究所と共同研究を行い、シート状リチウムビーム入射システムを導入し、電子サイクロトロン波 (8.2GHz) により初期プラズマ生成が共鳴層局在して起き、その後高周波パワーの増大にともない球状トカマクへと発展する様子の可視化に成功した。

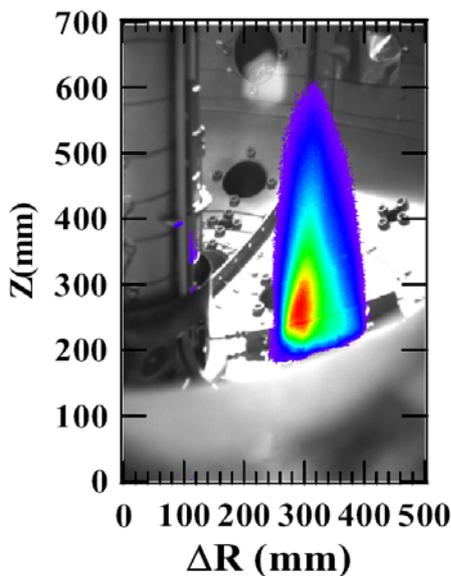


図6 リチウムビーム入射による 2次元電子密度計測

Period	1st	2nd (CW)	2nd (Pulsed)	Future
Major R (m)	0.68			0.64
Minor a (m)	0.40			0.36
Aspect Ratio	1.70			1.78
Radius of V.V.(m)	1.4			
Height of V.V.(m)	2.8			
$B_T$ (T)	0.25	0.25	0.5	0.25
$I_p$ (MA)	~0.02	0.1	0.3	0.5
$P_{in}$ (MW)	0.45	1	3	3
□	1.6	1.6	1.6	2.5
□	0.4	0.4	0.4	0.7

表1 “長時間球状トカマク装置 QUEST” の主要パラメーター

2) - 3 長時間維持球状トカマク QUEST 計画の推進

九大応用力学研究所高温プラズマ力学研究センターでは、センターの次期計画として、先進的磁気閉じ込め配位としての球状トカマク (ST) の長時間維持研究を構想し、新装置 『長時間球状トカマク装置 QUEST (プラズマ境界力学実験装置)』 の建設を提案し、種々の段階の議論を経て認められ建設されるに至った。主要な研究課題は

- i) 高ベータ定常化へ向けた学術基盤研究として、トカマクよりも高いベータ値が達成可能な ST でのプラズマ生成、および定常電流駆動に関する研究

- ii) ST の特徴的磁場配位に適合するダイバータの開発研究、およびダイバータ配位による長時間運転での粒子・熱負荷制御法の確立
- iii) 定常運転の学術基盤研究として、ST の長時間運転でのリサイクリング制御、および先進的壁制御とプラズマ性能の総合的研究

であり、また具体的目標は、

- ① 低磁場・高密度（高誘電率）を特徴とする球状トカマクにおける高周波電流駆動、特に入射サイクロトロン波から低次の電子バーンシュタイン波動へのモード変換、励起と伝播、プラズマ加熱と電流駆動に関する基礎研究を行い、QUEST 装置における 100kA 規模の電流駆動を実現すること。
- ② 高温下で温度制御されたタングステン対向材と能動的粒子排気が可能である磁場配位（ダイバータ）が可能な QUEST 装置において、炉に近い条件下（壁温 300～500 度）で、装置サイズ規模からナノスケールの材料欠陥を含むマルチスケールでのプラズマ壁相互作用と定常密度制御に関する研究を推進すること。

こうした研究課題の遂行を経て、九大での中期計画で謳うように「プラズマ物理学を基礎とした高温プラズマの定常化の物理・工学研究」へと普遍化・展開を図る。

長時間維持球状トカマク“QUEST”計画の、装置主要パラメーターを表 1 に、計画の概略スケジュールを表 2 に示した。

Issue	FY (Heisei) FY	First Period					Second Period					after
		17 2005	18 2006	19 2007	20 2008	21 2009	22 2010	23 2011	24 2012	25 2013	26 2014	
Device Const.												
High $\beta$							Aiming at 10%					(20%)
Plasma Start-Up						RF	RF+NBI					CT
Current Drive						RF	RF(8.2GHz)+NBI					16GHz
PWI						W	W, High Temp. Wall					Heat load cont.
Divertor						Open		Closed				Closed(Adv.)
Fuelling						CT Injection					Rep. Pellet	

表 2 “長時間球状トカマク装置 QUEST” 計画の概略スケジュール

なお、本計画は、今後のわが国の球状トカマク研究の総合的推進にとっても重要であり、また、大学における既存のST装置を用いた研究活動との連携協力のもとに推進することが望まれていることから、図 7 のような組織、特に「QUEST実験推進会議」ならびに「高温センター実験会議」を、九大高温プラズマ力学研究センターとして提案し、双方向型共同研究委員会等で認めていただき推進するに至っている。

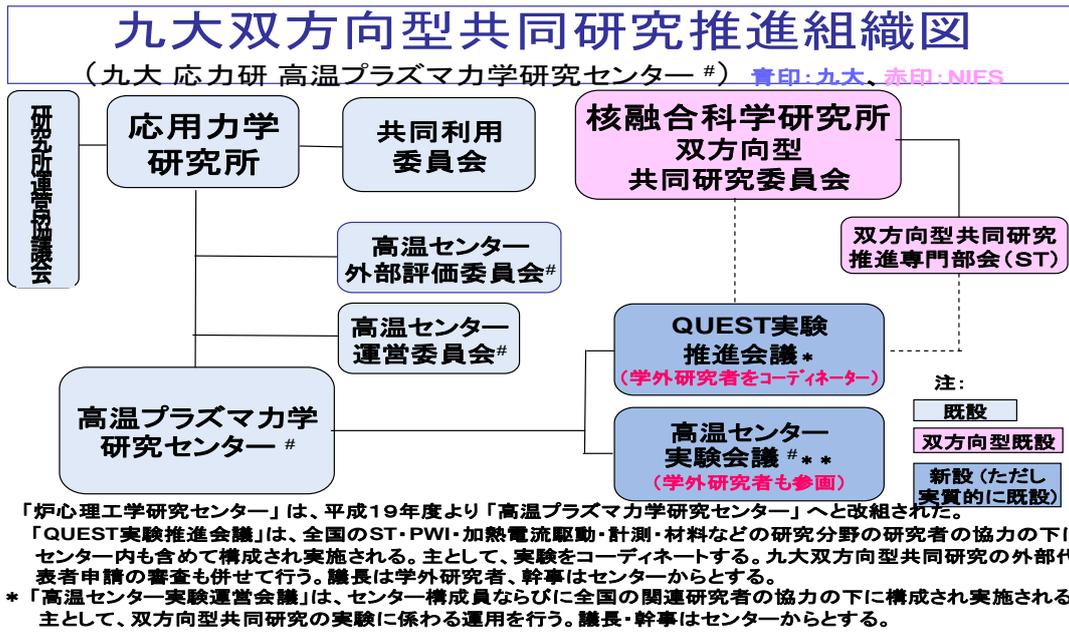


図7 高温プラズマ工学研究センターにおける“QUEST”推進の組織図  
(青系統が九大応力研、赤系統が核融合科学研究所)

### 参考文献

- [1] K. Hanada et al., Journal of Nuclear Materials, 363-365, 1425-1428, 2007
- [2] M. Sakamoto et al., Journal of Nuclear Materials, 363-365, 233-237, 2007
- [3] K. Sasaki et al., Journal of Nuclear Materials, 363-365, 238-241, 2007
- [4] M. Ogawa et al., Journal of Nuclear Materials, 1364-1368, 2007
- [5] M. Sakamoto et al., Proc. 5th IAEA Technical Meeting on Steady State Operation of Magnetic Fusion Devices
- [6] K. Hanada et al., Fusion Engineering and Design, Volume 81, Issue 19, September 2006, 2257-2265, 2007
- [7] S. Shiraiwa et al., Physical Review Letters, 0031-9007/06/96(18)/185003(4), (2006)
- [9] M. Sakamoto et al., Nucl. Fusion, Vol. 44(7), P693-698, July, 2004
- [10] H. Zushi et al., Proc. 20th IAEA Fusion Energy Conf., IAEA-CN-116-OV5-2 (2004) .
- [11] M. Sakamoto et al., Proc. 20th IAEA Fusion Energy Conf., IAEA-OV-EX/P5-30 (2004)
- [12] H. Zushi et al., Nucl. Fusion, Vol. 45, No. 10 (October 2005) S142-S156
- [13] K. Hanada et al., Proc. International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Device, Hefei Anhui, China(2006)
- [14] H. Idei et al., Nuclear Fusion, Vol. 46, No 5 pp.489-499, (2006)
- [15] K. N. Sato et al., Proc. 21th IAEA Fusion Energy Conf., Chengdu, IAEA-OV-5 (2006)
- [16] M. Sakamoto et al., Proc. 21th IAEA Fusion Energy Conf., Chengdu, 2006, EX/P4-25.
- [17] M. Hasegawa et al., J. of Plasma and Fusion Research, Vol. 80, P. 53 (2004)
- [18] K. Hanada et al., Nucl. Fusion, Vol. 44, No. 2, pp. 357-361, 2004

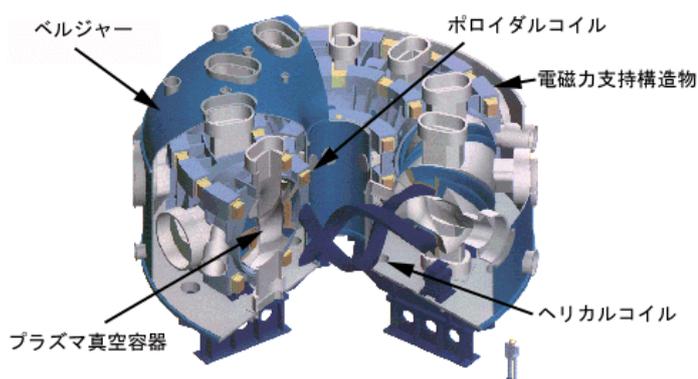
### Ⅲ-3-5 核融合科学研究所

核融合研には約130名の研究者が在籍し、プラズマ実験、理論、加熱・計測技術、超電導技術、数値シミュレーション等、幅広い専門領域をカバーしている。その中心は大型ヘリカル研究部であり約90名の研究者を擁している。日本の核融合研究者の多くが核融合研に在籍すると言っても過言ではない。双方向型共同研究はこれらの人的資源を持つ核融合研を中心としたネットワーク型共同研究として構成されている。

核融合研では、重点化装置の一つである大型ヘリカル装置（LHD）を用いて、「環状プラズマの総合的理解」を掲げて研究を進めており、双方向型共同研究の中心となっている。この4年間に加熱、計測機器の充実をはかりながら実験・理論研究を進め、核融合炉に外挿可能な高性能プラズマ生成を目指してきた。

LHDは2本のコイルをお互いに絡むように捻りながらドーナツ状に配置したヘリカルコイルによって作られる磁場を基にプラズマを閉じ込める装置であり、日本独自のアイデアに基づくものである。装置のサイズは高さ9m、直径13.5m、重さ約1500トンに及ぶものであり、工学的には全ての磁場コイルを超伝導化した核融合研究装置として世界最大のものである。平成10年から実験を開始し、周辺設備を増強しながらプラズマ性能を着実に上げてきている。

この間のもっとも大きな機器整備は低エネルギーNB I（40keV、6MW）の導入である。LHDは平成10年の実験



図Ⅲ-3-5-1 LHDの概念図

開始から180keVの高エネルギーNB Iを接線入射することにより、高い加熱効率で実験を進めることが出来て来たが、ビームエネルギーが高いが故に電子加熱となり、イオン温度を高めることが原理的に難しかった。しかしながらLHDが多くの成果を出す中で、イオンの閉じ込め性能を評価することの必要性が問われるようになってきた。イオン加熱効率を上げるためにはビームエネルギーを下げれば良いが、高速イオンの良好な閉じ込めを保證するため接線入射を選択すると、プラズマサイズがビームの吸収長に比べて大きくなり中心加熱が出来なくなるという問題があった。

これを解決したのが、LHDでもっとも大きな成果といえる磁気軸シフト<sup>\*)</sup>による粒子閉じこめとMHD安定性が両立する磁場配位の発見である。ヘリカル装置ではヘリカル磁場コイルに起因する閉じ込め磁場強度の空間的な脈動により、磁力線に垂直に加速された高エネルギー粒子の閉じ込めが難しいと言われてきたが、磁場構造の選択によってはトカマクと遜色ない粒子閉じ込めが実現できる。ただしその配位は理論

的にMHD不安定になってしまう、というのがこれまでの解析結果であった。

しかしながらLHDの実験で、そのような配位でも不安定性は見られず、むしろプラズマの閉じ込め性能が高いことが明らかになった。実際、磁力線に垂直方向に高いエネルギーを持つ粒子の閉じ込めも良いことがイオンサイクロトロン共鳴加熱の実験で明らかになった。

この実験成果を基に、LHDでは新たに低エネルギーNB Iを磁力線に垂直方向に入射することを選択した。垂直入射の選択により低エネルギーでもプラズマ中心の加熱が可能となる。大型ヘリカル研究部では平成16年度に機器導入の検討を始め、正味半年間の機器設計の後、平成17年度には3MW、平成18年度には6MWの40keV垂直入射NB I加熱を実現させた。これは大型ヘリカル研究部に、NB Iを自主開発してきたNB Iグループが存在することが大きい。また、低エネルギーNB Iの導入により荷電交換分光法を用いたイオン温度や電場、プラズマ回転の詳細な空間分布が得られるようにもなった。

こうした加熱・計測機器の充実の結果、前述した学術的重点研究課題に於いて大きな進展があった。

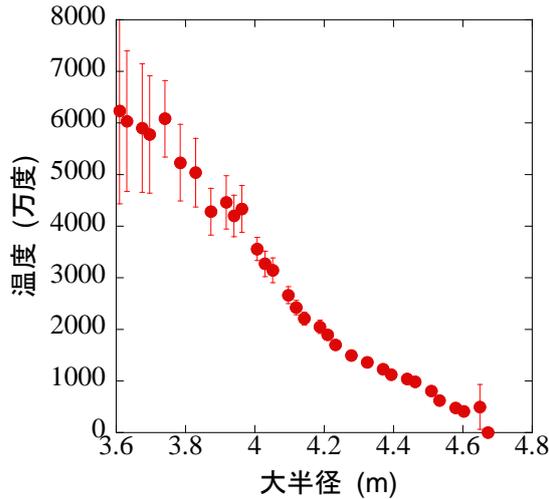
- (1) 高い核融合三重積（密度×イオン温度×閉じ込め時間）の実現に関しては、革新的な排気法であるローカルアイランドダイバータ（LID）を利用した周辺プラズマ制御研究が進展し、超高密度プラズマの生成に成功している。中心プラズマ密度はこの4年間の間に $5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ から $100 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ へと実に20倍もの進展を見せた。これはペレットによる粒子補給法<sup>\*)</sup>とプラズマ周辺制御との組み合わせにより実現したものである。核融合三重積もこの超高密度プラズマ実現とともに更新し、LHDの当初目標の9割に達している。
- (2) 高イオン温度プラズマの実現は、この期間の加熱整備の第一目標であったが、これまでの水素プラズマでは実現できなかった5keVを超えるイオン温度を目標に近い密度で得られた。また、詳細なイオン温度空間分布が観測できるようになり、イオンに対しても閉じ込めが改善される内部熱拡散障壁が初めて観測され、プラズマ内の電場との関係等、今後の研究進展が期待できる。
- (3) 長時間のプラズマ生成に関しては、プラズマを高周波で生成・加熱するイオンサイクロトロン加熱法を主に用いて、約500kWの加熱入力パワーで、プラズマの温度が1keV、密度が $4 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ の高温プラズマを54分28秒に亘り連続して保持することに成功した。この時プラズマに入力したエネルギー値としては核融合研究にとって新しい領域となる1.6ギガジュールを達成した。またECHの単独加熱による定常加熱実験では、約110kWで1時間5秒の放電に成功した。この長時間運転には、プラズマと壁との相互作用の研究や固体表面に関わる物理研究から加熱や除熱に関わる工学研究に至る学術研究の積み重ねが活かされている。
- (4) プラズマと磁場との圧力比（ $\beta$ 値）を上げる研究については、目標値である

5%の体積平均ベータ値を磁場強度 0.425T で達成した。この研究ではベータ上昇に伴う磁気軸の外側への移動（シャフラノフシフト）を押さえる磁場配位を選び、上述の垂直入射NB I の加熱効率を保持することで実現できた。このような高いベータ値を実現してもプラズマはMHD的に安定であったことは大きな成果の一つである。

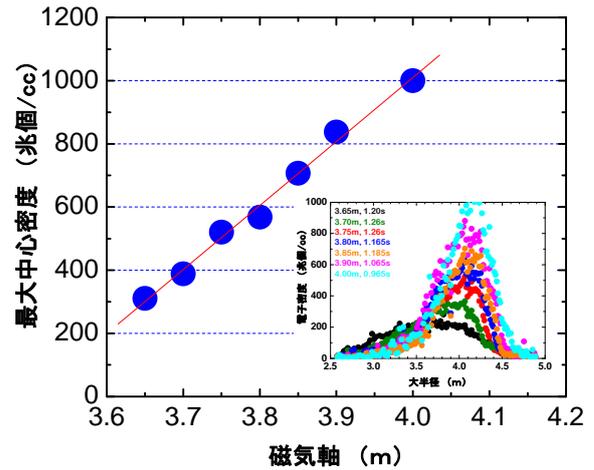
その他、高密度プラズマを実現する粒子拡散障壁<sup>\*</sup>の発見、高イオン温度に伴う不純物ホール<sup>\*</sup>の発見、非局所輸送現象<sup>\*</sup>の発見、電子熱拡散障壁の形成と電場の関係の解明、など環状プラズマの総合的理解に向けて興味ある学術研究が進行している。また、大型装置の工学的研究として、超伝導コイルのサブクール<sup>\*</sup>化、負イオン方式NB I<sup>\*</sup>技術の確立、定常加熱技術の進展（IC電磁波、ECH）、トムソン散乱計測の高精度化、密度揺動計測の進展、イオン温度・速度空間分布計測の高精度化など、加熱・計測技術の進展も大きな成果である。これらの成果により、新たな運転シナリオを持つ、経済的にも魅力的な核融合炉を実現することに展望が開けたといえる。

表3-5-1 LHDにおけるプラズマパラメータの進展

	達成値		目標値
	2003	2007	
核融合三重積	$2.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ keVs}$	$4.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ keVs}$	$5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ keVs}$
電子密度 $n_e$ 中心電子密度	$2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$	$1 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$	$1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$
電子温度 $T_e$ 中心電子温度 達成時の密度	10 keV $0.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$	10 keV $0.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$	10 keV $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
イオン温度 $T_i$ 中心電子温度 達成時の密度(ガス種)	10 keV $0.35 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ (Ar)}$	5.2 keV $1.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ (H)}$	10 keV $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
プラズマ蓄積エネルギー	1.36 MJ	1.44 MJ	
ベータ値 体積平均ベータ値 達成時の磁場強度	4.1 % 0.45 T	5.0 % 0.425 T	> 5 % 1-2 T
定常運転 パルス幅	756 sec	31min.45sec. (680 kW) 54min.28sec. (490 kW)	1 hr. (3 MW)



図Ⅲ. 3. 5-1  
水素プラズマで得られたイオン温度の空間分布。横軸はLHD装置中心からの距離（大半径）で3.6mがプラズマ中心軸に対応する。中心温度は6000万度に達している。平均電子密度は12兆個/ccである。



図Ⅲ. 3. 5-2  
内部拡散障壁を伴う高密度プラズマに於ける中心密度の磁気軸位置依存性。外側に寄せるほど高い中心密度が得られている。

以上の成果は多くの共同研究者の参加にも支えられたものであるが、このように大型ヘリカル研究部には様々な専門性を持つ研究者が多数在籍しているので、これらが大学やセンターに出向き、そこでの研究に実際に参加することで自身の持つ最先端の知識や技術を提供することは大学側にとって大きなメリットがある。また、核融合研の研究者にとってもLHDとは異なる装置での研究に参加することにより、新たな知見を得てそれをLHD研究に反映させることが出来る。

双方型共同研究の枠組みの下、各センターはセンターにある中型装置を核にした実験・理論共同研究を核融合研の共同研究と同様な形式で毎年公募しているが、核融合研の研究者はそれに応募する形で共同研究を行っている。表Ⅲ-3-5-2には、これらの内、特に核融合研の研究者が参加してこの4年間に実施した研究課題をまとめた。

表Ⅲ3-5-2 核融合研所員が関わった双方向型共同研究課題

年度	研究課題	実施先
平成 16	電位生成・電位閉じ込めの物理機構・比例則の究明、及びそれに伴う径方向電場シアの効果の研究	筑波大学
	大電力プラグ ECRH に伴うサイクロトロン波の伝搬・放射と揺動励起	
	コアプラズマの径方向電位分布制御によるバウンスイオンの径方向輸送の研究	
平成 16	ヘリオトロン J 装置における IC 電磁波加熱実験	京都大学
	Heliotron J におけるバンピネス制御が粒子閉じ込めに与える影響	
	ヘリオトロン J における改善閉じ込めに対する磁場構造の効果についての理	

	論解析とその実験的検証	
	ヘリオトロンJを使ったヘリカル系におけるプラズマ電流の駆動機構の解明	
	SX-CCDカメラを使った制動放射絶対強度測定	
	レーザー核融合実験におけるダイヤモンド検出器を用いた中性子測定	大阪大学
	慣性核融合炉壁のアブレーション模擬実験と炉壁寿命評価モデリング	
	トリアムに於ける定常プラズマ-壁相互作用の実験と粒子バランスのモデリング	九州大学
	TRIAM-1Mにおける硬X線の二次元像計測	
平成 17	プラズマの可視化技術の開発と電位閉込め機構の研究	筑波大学
	核融合プラズマにおける放射スペクトル強度の研究	
	IC電磁波によるタンデムミラープラズマの揺動および径方向輸送制御に関する研究	
	ヘリオトロンJを使ったヘリカル系におけるプラズマ電流の駆動機構の解明	京都大学
	ヘリオトロンJ装置におけるIC電磁波加熱実験	
	ヘリオトロンJにおける閉じ込め並びに電子テイル形成に関するバンピー成分の役割	
	ヘリオトロンJにおける改善閉じ込めに対する磁場構造の効果についての理論解析とその実験的検証	大阪大学
	慣性核融合炉壁のアブレーション模擬実験と炉壁寿命評価モデリング	
	レーザー核融合実験における飛行時間中性子測定へのダイヤモンド検出器の適用	
	トリアムに於ける定常プラズマ-壁相互作用の実験と粒子バランスのモデリング	九州大学
	定常運転小型球形トカマク中に於ける移動表面式プラズマ対向機器による壁リサイクリングの能動的制御 廣	
	トカマクプラズマの電流クエンチフェイズでの電子サイクロトロン波印加による高効率逃走電子電流生成	
	プラズマ境界力学実験装置における長時間プラズマ維持制御へ向けた定常NBI検討	
小型PWI実験装置におけるリチウムビームプローブを用いた周辺プラズマ計測		
平成 18	GAMMA 10における直接エネルギー変換の基礎研究	筑波大学
	X線計測による電子分布関数・空間構造解析システムの研究	
	大電力プラグECRHに伴うサイクロトロン波の伝搬・放射と揺動励起	
	Heliotron J装置におけるX線波高分析を通じた低衝突度電子に関する閉じ込め研究	京都大学
	ヘリオトロンJにおける改善閉じ込めに対する磁場構造の効果についての理論解析とその実験的検証	
	ヘリカルプラズマにおける新古典電流に対する径電場・配位制御の効果	
	ヘリオトロンJを使ったヘリカル系におけるプラズマ電流の駆動機構の解明	
	CHSとHeliotron-Jにおける2.45GHzマイクロ波によるオーバードレンスプラズマの生成と閉じ込めに関する比較研究	
	ヘリオトロンJ装置におけるIC電磁波加熱実験	大阪大学
	レーザー核融合実験における小型半導体検出器によるガンマ線・中性子線測定	
	慣性核融合炉壁のアブレーション模擬実験と炉壁寿命評価モデリング	
	小型PWI実験装置におけるリチウムビームプローブを用いた周辺プラズマ計測	九州大学
	プラズマ境界力学実験装置における定常NBIの検討	
定常運転小型球形トカマク中に於ける移動表面式プラズマ対向機器による壁リサイクリングの能動的制御		
全日本ST研究計画の策定	核融合研	
平成 19	ミラー磁場中のトロイダル磁場配位の形成	筑波大学
	ガンマ10における高効率電子加熱用伝送系の開発	
	電位生成・電位閉じ込めの物理機構・比例則の究明、及びそれに伴う径方向電場シアアの効果の研究	

弱い相対論的電子の分布関数および空間構造評価システムの研究	
GAMMA 10 センtral周辺部におけるプラズマ回転計測	
Heliotron J 装置における X 線波高分析を通じた低衝突度電子に関する閉じ込め研究	京都大学
ヘリオトロン J におけるプラズマ閉じ込め性能の閉じ込め磁場配位からの理論考察	
ヘリカルプラズマにおける新古典電流に対する径電場・配位制御の効果	
トロイダル電流が MHD 平衡に与える影響の理論的考察とその実験的検証	
ヘリオトロン J 装置における IC 電磁波加熱実験	
フィルターと AXUV ダイオードアレイを用いた Heliotron J プラズマのエネルギー閉じ込めにおける炭素不純物の影響に関する実験的研究	
方向性プローブによるプラズマ流計測と揺動の相関	
ヘリオトロン配位における MHD 平衡・安定性に関する研究	
補助コイルを用いた磁場配位最適化設計	
レーザー核融合実験における小型半導体検出器によるガンマ線・中性子線測定	
慣性核融合炉壁のアブレーション模擬実験と炉壁寿命評価モデリング	
2次元リチウムビームプローブを用いた CPD の周辺プラズマ揺動計測	九州大学
プラズマ境界力学実験装置 (QUEST) における定常 NBI の検討	
定常運転小型球形トカマク中に於ける移動表面式プラズマ対向機器による壁リサイクリングの能動的制御	
CPD 実験を用いた SNET ベースの遠隔・定常データ収集法の開発	
全日本 ST 研究計画の策定	核融合研

LHD から双方向型共同研究により各センターに研究者が出かけることで得られる意義は以下の通りである。

筑波大学プラズマ研究センターは、直線型のプラズマ閉じ込め装置ガンマ 10 を有している。装置形式を超えて核融合研究に広く貢献できる、新たな普遍性の高い研究内容・取り組みとして、端部を持つミラー配位の特長を活かし、径電場シアフローや内部エネルギー輸送障壁 (ITB) の物理機構の研究を推進し、LHD と装置形式を超えた ITB 等の外部制御の研究を双方向型共同研究で進めている。更に筑波大学ではその蓄積された知見を活かして LHD 用の長パルスジャイロトロンの開発が行われ、本年度核融合研に納入された。開発の段階で核融合研の ECH 加熱の専門家が筑波大学に出かけている。このジャイロトロンは現在行われている第 11 サイクル実験でプラズマ加熱に用いられ、その優れた性能が確かめられつつある。

京都大学エネルギー理工学研究所エネルギー複合機構研究センターは磁場配位の自由度が高い小型ヘリカル装置ヘリオトロン J を有している。LHD と同じヘリカル型の装置であることもあり、その特徴を活かした LHD と相補的な実験が可能であるため、LHD と共通な問題意識で共同研究が進められている。ヘリカルプラズマの閉じ込め改善の探求や加熱電流駆動法の研究など大型ヘリカル装置との比較を意識した研究課題数が多く実施されてきた。ヘリカルプラズマで重要な働きをする電場の効果についても研究が進んでいる。また、LHD の持つ計測技術の応用やヘリカルプラズマを対象とした理論共同研究も進められている。

大阪大学レーザーエネルギー学研究中心ではレーザー慣性核融合の研究を行っている。磁場閉じ込め方式である大型ヘリカル装置とは原理的に異なる方式であり、対象とするプラズマのパラメータも異なる。従ってその研究手法にも異なるものが多いが、計測に関しては共通する分野もあり、プラズマの発する強い輻射や中性子測定のための計測器開発に関する共同研究が進められている。これらはLHDに於いては今後計画されている重水素実験にも応用できる計測法である。また、大型ヘリカル装置を制作するために培ってきた超伝導技術と付帯する極低温取り扱い技術を応用して、高速点火レーザー核融合に必至な標的燃料球（クライオターゲット）の開発も共同で行われている。一方、レーザー核融合では極めて密度の高い爆縮プラズマの振る舞いを調べるため大規模な数値シミュレーションを必要としており、核融合研のシミュレーション科学研究部からも参加して数値シミュレーションの手法開発を進めている。

九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究中心には定常トカマク装置TRIAM-1Mがあり、同じく定常運転を指向するLHDとプラズマ-壁相互作用に関する共同研究が進められた。LHDで開発された計測機器の適用も試みており、硬X線2次元計測をトリアムで、またリチウムビームプローブによる周辺プラズマ計測を小型装置のCPDで行っている。TRIAM-1Mがシャットダウンした後、新しい球状トカマク装置QUESTの建設が双方向型共同研究の枠組みの下で進められているが、その実験計画の策定が全国の大学研究者が参加して進められている。その過程においても核融合研の持つ加熱・計測技術の活用が期待されている。一例として定常NBIBeamの入射検討がLHDの研究者により進められている。

### Ⅲ－４ 教育および人材育成

#### 筑波大学プラズマ研究センター

##### (1) 筑波大学プラズマ研究センターの教育の理念と教育システムの特徴

将来のプラズマ核融合研究の基盤を支える人材の教育・育成・輩出を推進し、多数の優れた学生を研究機関や関連先端企業に送り出すべく、教育・研究実施体制の整備・充実を図ることを、センターの学生教育の基本方針・基本理念と位置づけている。特に研究現場での活気溢れる学生教育・研究指導を行い、それに基づく広範な視野と能力の向上を図る。以上に伴い、学生の多数の学位論文・学術論文・国際会議や学会での発表等の創出と、先端知識と哲理を備えた学生の社会への輩出を推進する。

センターの学生の主要な所属母体である、大学院数理物質科学研究科物理学専攻並びに物理学系では、前進の東京教育大学の朝永振一郎元学長の時代より、所属学生の人数制限の無い自由な体制と教員の集団指導体制をとっており、多くの優れた学生を迎えるために、常に緊張感を持った教育・研究体制とその成果が要求されている。

これらの理念と特徴的な集団指導体制の下に、大学としては、最大級の実験装置ガンマ10を用い、学生と教員が一体となり実施する先端的研究によるセンターの人材育成は、核融合分野の若手研究者の育成に、高い評価を得ており、今後、ITER時代に要求される人材育成の機関としての機能を十二分に果たしえるものと期待できる。

##### (2) 双方向型共同研究が果たす人材育成への意義・効果

一方、発足した**双方向型共同研究**により、上記の教育理念を実現するために、研究センターのみに留まらず、**他所の研究環境を広く併せて経験した広範な視野を持つ学生が育成**できること、またセンターに居ながらにして**外部の学生と交流**できることにより、これまでにはない大変有用・重要な広範な経験ができるメリットは計り知れない。これは、学生の資質の向上や、今後の大型装置等を用いた共同研究の機会の増加に対応した、経験や視野を20歳台に経験できることを意味し、双方向型の特長的役割と考えられ、正に時代の要求に則した、画期的システムとすることが出来よう。

同時に、外部からのプラズマ研究を目指す学生がセンターの上記の人材育成の特長を経験する機会を得る事が可能になったことによる効果も双方向型共同研究の大きなメリットである。従って、双方向型共同研究・先端的研究は、将来のプラズマ核融合研究の基盤を支える広い視点を持つ人材の育成・輩出の一層の充実に大いに寄与すると思料される。

学生の交流実績を以下の表に整理する。双方向型共同研究における毎年の出張活動実績は百数十人日に及び、その内学生の占める割合は年々増加する傾向にあり、平成

18年度では、半数近い学生が占めていることが判る。このことからも双方向型共同研究が、人材の育成に大きく貢献していると言える。この資料を見ると、初めは教員主導であるものの、慣れてくると、むしろ院生が大いに双方向型共同研究を利用し、双方向が人材育成に果たす効果が顕著に見られる。

表1 双方向型共同研究（筑波大学）における出張活動一覧

年 度	出張活動（人日） — 教員 —	出張活動（人日） — 院生 —	総 計
H 1 6	103	35	138
H 1 7	81	53	134
H 1 8	74	62	136

### （3）筑波大学の人材育成に係る関連資料

センターに所属し論文を書く学生数の、最近4年間の年平均は41名である。この内、学部相当の4年次学生を約12名受け入れ大学院に向けての教育を行っている。この間、大学やJAEA等の研究機関の研究者として6名が、その他電気・通信・情報関係を主とする関連産業分野及び教育分野に60名の学生を育成・輩出（今年度は見込みを含む）し、また企業の技術作業員としてプラズマ関連の研究所・大学で作業をする者も多数に及ぶ。また、別途示すように、センターの所属学生の第一著者論文数は最近3年間で101件、共著論文が249件、国際会議・学会での発表が152件に及ぶ。今後もkeVオーダーのプラズマを用いた現場教育を通じて、研究者・技術者育成と彼らを通じた核融合の社会的理解の拡がりも念頭に置き、大学の果たすべき役割を引き続き着実に推進したい。

### 京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター

本双方向型共同研究は、これを活用した京都大学におけるプラズマ教育の一環として、工学部電気電子工学科の特別研究、大学院エネルギー科学研究科の修士・博士課程研究、エネルギー理工学研究所の研究者（PD等）のプラズマエネルギー研究等に対する寄与が非常に大きい。とくに研究科のみでは実施できない大型装置を活用した最先端研究現場でのプラズマ教育は、将来、日本がITER等の国際共同実験研究を企画・立案・実施していく際に、これを主体的に遂行できる能力をもつ優秀な人材を育成していく観点から、極めて重要な意義を有する。エネルギー理工学研究所は、このような観点から、文部科学省の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」事業を実施し、このなかでも将来のプラズマ核融合研究を支える人材の教育に努めてきた。

双方向型共同研究を活用した他大学・大学院の教育及び研究者（PD等）育成の観点も重要である（図参照）。しかも、実際の実験現場で、他大学・大学院の学生との相互交流が京都大学の教育研究の活性化に大いに役立っている点も見逃せない。平成19年度からは東北大、京都工繊大の学生を含めた実験グループが本格的にヘリオトロンJ実験に参加しており、さらなる発展を期待している。

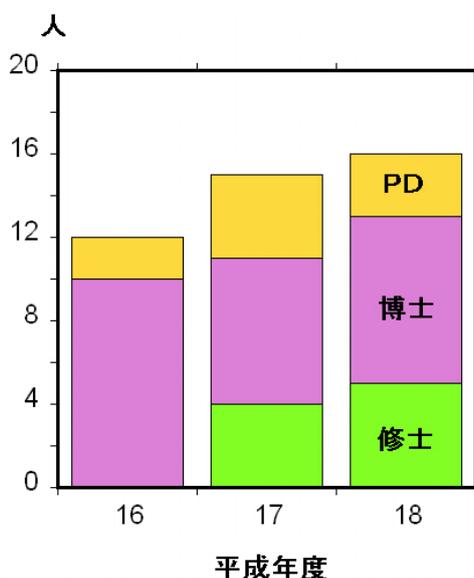


図1 ヘリオトロンJ双方向型共同研究活動における他大学・大学院学生及びPDの参加数の推移

京大宇治キャンパスでは毎年10月にオープンキャンパスを開催しており、その際ヘリオトロンJをオープンラボとして公開しており、毎年100名以上の参加がある。また、高校生を中心にした見学・授業依頼が年に2-3件程度あり、これらを通じて社会へのプラズマ・核融合の教育・啓蒙活動を行っている。また、エネルギー複合機構研究センターが所属する京都大学エネルギー理工学研究所では例年5月頃公開講演会を主催しており、その際にもプラズマ・核融合関係の講演は常に行われており、こちらも100名を超える参加者がある。

## 大阪大学レーザーエネルギー学研究中心

### 1) 双方向共同研究の教育への影響

双方向共同研究が可能になり、核融合科学研究所と本センター、及び本センターと同じく慣性核融合関係の共同研究を実施する他大学との研究者、及び所属する学生の交流が容易になった。それぞれの研究拠点での研究資産が有効に活用が可能できるようになり、新たな実験計画が生まれた。表1に他大学に在籍したまま、センターで研究活動をした修士、及び博士課程の学生の推移を示す。

### 2) 当センターでの学生及び若手研究者の教育

レーザーエネルギー学研究中心では各研究室の特長を生かして学部の協力講座となることで、大阪大学大学院工学研究科環境エネルギー学専攻、電気電子情報工学専攻、精密科学・応用物理学専攻、電子情報工学科、応用自然科学科、同理学研究科物理学専攻、宇宙地球科学専攻、基礎工学研究科システム創成専攻より学部生の卒業研究、博士課程前期、後期の学生を受け入れている。

センターに配属された学生に対しては研修合宿に参加させ、共通知識を学習させるとともに、レーザー研各部門における研究指導を行っている。文部科学省EUV光源開発プロジェクトや学術創成プロジェクト、JAXAの太陽光励起レーザー開発のプロジェクトなどに参加させ、研究の機会を与えている。研究の成果は内外の学会で発表させるとともに、(表2)積極的に論文を書くように指導している。年間10件程度行われる外国人客員教授による英語のコロキウムに広い知見を持たせるために参加させているとともに、国際会議に年間10名程度参加させ、英語での発表を経験させている。

一方、理学部、工学部全体で年間約60件の講義を分担し、カリキュラムの多様化と、最先端の研究情報提供に貢献している。また、専門的共通教育としての基礎セミナーの分担や、学部3年量子エレクトロニクス受講生の見学受け入れなどを行っている。また、年間10件程度大学院入試問題の作成などの運営に協力している。

表1 年度ごとの特認研究員、博士課程在籍者数

			H16年度	H17年度	H18年度	H19年度	合計
特任研究員			12	19	27	32	90
学生	大阪大学	博士後期(D)	27	32	29	26	114
		博士前期(M)	33	58	61	60	212
	他大学	博士後期(D)	0	0	4	5	9
		博士前期(M)	1	4	3	4	12
合計			73	113	124	127	437

表2 学生の学会発表

	国内学会	国際会議
平成17年度	68	23
平成18年度	86	19

若手研究者の教育に関してはレーザーエネルギー学研究センターの5部門のミッションに参加させるばかりではなく、文部科学省リーディングプロジェクト極端紫外(EUV)光源開発プロジェクト研究、特別教育研究経費研究推進事業「ペタワットレーザー駆動単色量子ビームの科学」科研費学術創成研究プロジェクト、JST 権利化試験プロジェクト「広帯域光増幅器の開発」、JAXAの太陽光励起レーザー開発プロジェクトなどの外部資金を確保し、博士号取得者に研究の機会を提供している。

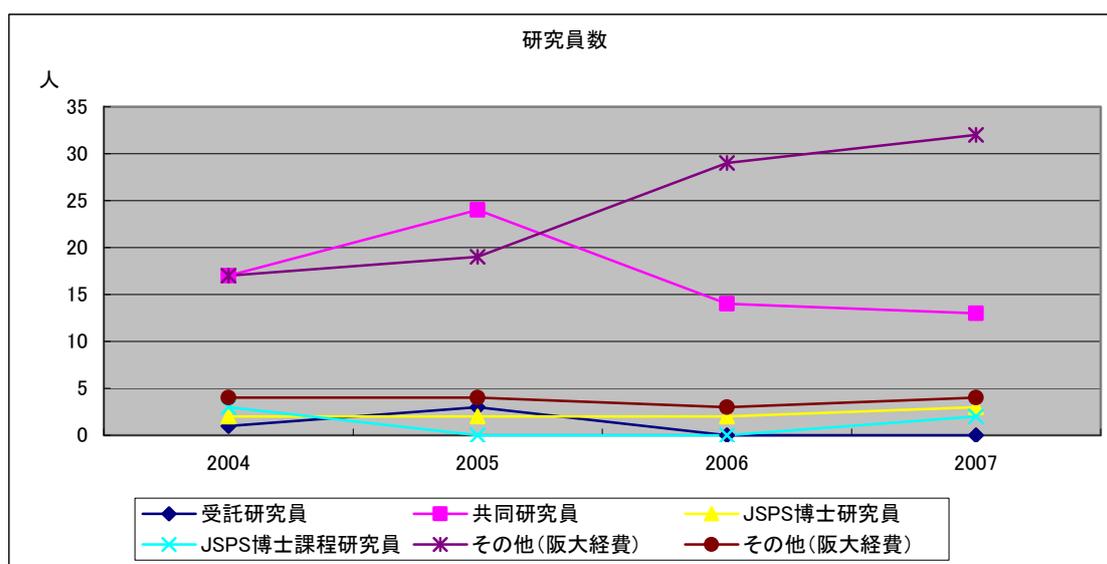


図1 若手研究員の推移

外国人客員教授による年間10件程度の講義、及び来訪者による年間20～30件のコロキウムなどに参加させ、広い学術基盤を取得させるようにしている。また、国際会議、ワークショップなどの運営にも参加させ、研究者として当該部門の発展に貢献できる素養を積ませている。

### 九州大学応用力学研究所附属高温プラズマ工学研究センター

高温プラズマ工学研究センターは、大学院教育に積極的に参加している。同センターの教員は総合理工学府先端エネルギー理工学専攻に協力講座として参加しており、「高エネルギープラズマ工学」、「核融合プラズマ理工学」、「炉心制御学」研究室として大学院生を受け入れ教育・研究を行っている。

双方向型共同研究に関係した大学院教育実績としては、TRIAM,CPD 装置を用いた研究者同士の共同研究の成果に加えて、九大および他大学の院生の教育にも大きな成果を上げることができた。東大、九大の博士課程4名が共同研究の成果をもとに博士論文を取得し、九大2名、筑波大学1名の博士課程計3名が共同研究の成果を論文発表し、現在博士論文としてまとめている最中である。

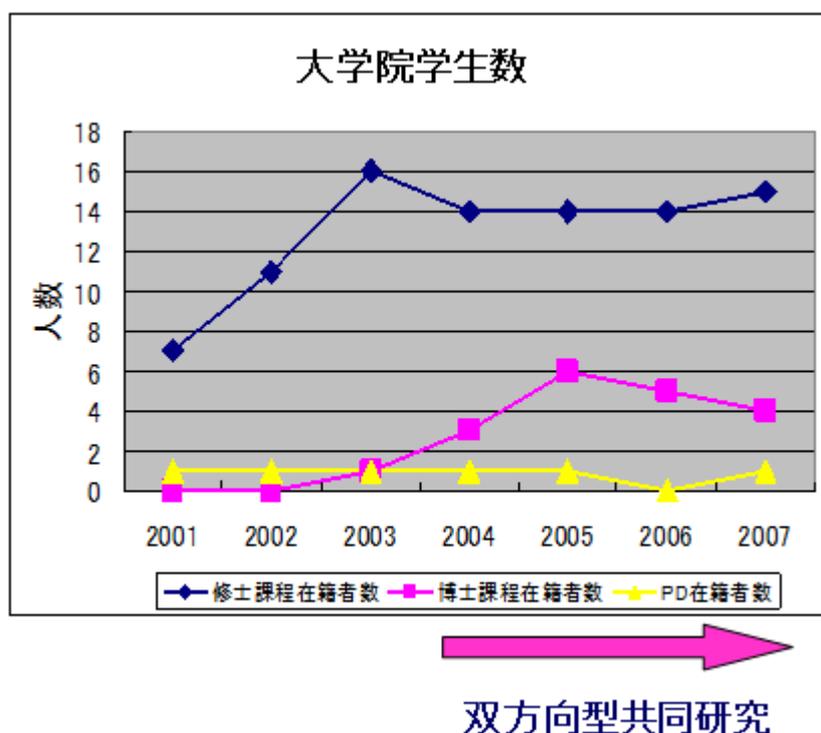


図1 大学院生数の推移

九大の修士学生のここ10年間の修了者および論文題目のリストを、参考までに以下に示す。この修了者数の推移を見ると、双方向型共同研究開始前が平均3.5名程度に対し、開始後は7.5名であり、他の要因もあり得るが、明らかに活発化していることがわかる。この他、東大、京大、核融合研、広島大、兵庫県立大等との共同研究によりこれまで多くの学生が修士号を取得してきた。

表1 修士論文数の推移

修了年	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19
人数	6	1	6	1	2	5	7	9	5	9



**双方向型共同研究**

さらに、院生にとっても共同研究者との交流により新しい刺激を受けて研究に取り組むなど責任ある積極的な対応が見られ、院生生活の充実につながっていると考えている。

### Ⅲ－５ 成果の公表

#### 双方向型共同研究委員会（核融合科学研究所）としての成果公表

共同研究として採択された個別の課題については、年度の終わりに成果報告書の提出を義務付けている。成果報告書は次年度の課題採択の審査にも活かされる（継続課題の場合）。また、共同研究が全体としてどのような活動をしているかを把握するため、共同研究委員会は毎年度の終わり（1月）に成果報告会を開催し、当該年度の個別課題の成果発表をしていただいている。双方向型共同研究については4つのセンターにおいて採択された課題について報告をいただいている。これら成果報告会の資料は冊子としてまとめ、関係機関等に配布している。

また、コミュニティに対してより広く成果を周知するために、学会の場を利用した成果報告も行っている。平成18年11月のプラズマ・核融合学会では、双方向型共同研究委員会が「双方向型共同研究の成果と今後の展望」と題した特別企画を開催し、核融合コミュニティの意見、要望等を直接取り込み、双方向型共同研究に反映させる試みを行った。

双方型共同研究の研究目標は、今後我が国の核融合研究に必要とされる重要課題として、双方向型共同研究の中核である核融合研が核融合コミュニティと協議しながら集約、決定し、これを各センターと分担、連携して進める方式が採用されていることから、双方向型共同研究として採択されている研究課題は、核融合研及び各センター自身の主要課題、重要課題となっている。従って個々の機関においてもその成果は独自に評価を受けている。核融合研においては、平成17年度の外部評価の対象に国内共同研究が選ばれ実施され、その評価結果は公表されている。九州大学や筑波大学においても学内措置として設置された研究センターの評価として外部評価が実施されている。

#### 筑波大学プラズマ研究センター

成果の公表については、本報告書に示した一連の成果を、国際学術誌、並びに種々の国際会議等での基調講演、招待講演、レビュー講演等として報告する機会を得るなど、双方向型共同研究から発した論文は113編（うち外部の研究者が第一著者論文46編）、学会等発表数274件（同122件）に達し、着実に共同研究の成果が進展している。また、これまでの成果に対して平成18年度の外部評価で高い評価を得た。これについては、センターのホームページに公開している。

また、筑波大学において行っているタンデムミラー型プラズマ閉じ込め方式の分野では最大の国際会議の一つである開放磁場系プラズマ国際会議が、平成16年度と平成

18年度に開催された。前者は、第5回会議として、ロシア連邦共和国ノボシビルスク市のブドカー原子物理学研究所において開催されたが、平成18年度には、プラズマ研究センターがホスト研究機関となり、筑波大学及びプラズマ・核融合学会の後援のもとで開催した。会議は、冒頭、国際原子力機関（IAEA）のClark博士・Dolan博士を議長に、学長の挨拶に始まり、米国・ロシア・韓国・ドイツ・イタリア・スウェーデン等、関連11カ国から百数十名の参加者の熱心な発表と討論が展開された。特に、最近急進する本学のプラズマ加熱／電位閉じ込めの成果、国際熱核融合実験炉ITERを含む各種核融合プラズマ装置性能向上の鍵を握る成果、更に大電力ジャイロトロン開発成果等が本学から発表され、熱気溢れる会議となった。

また、平成19年には、国際原子力エネルギー機構（IAEA）の主催する第11回Hモードの物理と輸送障壁に関する技術会議（11th IAEA Technical Meeting on H-mode physics and Transport Barriers）を日本原子力開発研究機構と共催で、つくば市の国際会議場において開催した。本技術会議では、日本を含む10ヶ国から、国内参加者68名海外参加者37名の合計105名からなる参加者の熱心な発表と議論が行われた。

これらの他に、平成16年度には、プラズマ閉じ込め装置における高周波の物理に関する日米ワークショップが開催され、国内外の大学・研究機関から多数の研究者が参加し、3日間にわたって活発な研究討論が行われた。また、平成17年度には、プラズマ研究センター主催によるロシア、韓国及び国内他大学からの研究者を含めたダイバータ安定化に関する国際シンポジウムを開催し、この分野についての非常に活発な議論がなされた。さらに、平成18年度には当センターがホストとしてプラズマ・核融合学会の第23回年会を筑波大学で行い、双方向型共同研究の成果が多数報告されると共に、本学の企画による双方向型共同研究に関するシンポジウムも実施され、双方向型共同研究の学界への理解を得るとともに、活発な討議がなされた。

## 京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター

ヘリオトロン J 双方向型共同研究の成果は毎年開かれる核融合科学研究所共同研究成果報告会で報告され、報告書にもまとめられている。また、これまでヘリオトロン J 双方向型共同研究が達成してきた成果は、第20回 IAEA 核融合エネルギー国際会議（Vilamoura, Portugal, 2004）、第15回国際ステラレータ会議（ISC-15, Madrid, Spain, 2005）、第21回 IAEA 核融合エネルギー国際会議（成都、中国、2006）、第23回プラズマ核融合学会（筑波大学、茨城県つくば市、2006）、第16回国際ステラレータ会議（ISHW-16, Toki, Japan, 2007）等の国際会議や学会・研究集会等において、継続的に招待講演および口頭発表として報告され、高い評価を得てきた。さらにこの間、ヨーロッパ・プラズマ物理学会年次大会（EPS）、土岐国際プラズマ・核融合会議、プラズマ・核融合学会年会、核融合連合講演会、日本物理学会年会等においても逐次報告され、広く学界に認知されている。

一方、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。これは、平成 16 年度より開始されたヘリオトロン J 双方向型共同研究に先立って、平成 15 年度より、核融合研の CHS グループと既に開始していた双方向の共同研究（相互交流型）を基盤として開催されたもので、その成果が公表された。これを受けて、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。これはヘリオトロン J 双方向型共同研究活動の全面的な支援により開催され、その成果が公表されたものである。そこでは、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、本双方向型共同研究活動が提示する研究の方向性及び本活動を基盤とする国際共同研究拠点ネットワーク形成の求心力・存在感を高めることができた。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が展開されてきたが、この活動が、現在、自然科学研究機構が行っている国際連携事業の枠組みでの国際連携交流活動（平成 16－19 年度）へと発展している。このような活動のなかで、ヘリオトロン J 双方向型共同研究の成果は公表され、高い評価を得てきたと言える。今後、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とその成果の公表・発信を一段と活発に推進していく考えである。

## 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

研究成果の公表は内外の学会発表、学術雑誌、新聞、アニュアルレポートなどの定期刊行物を通しておこなわれている。一般の人を対象としたものでは公開シンポジウム、公開講座、見学の受け入れ、オープンハウスなどを通して広く、研究施設、研究成果を公開している。

国内学会発表では物理学会、プラズマ核融合学会、原子力学会、レーザー学会等を中心に平成 18 年度、職員 155 件、学生 95 件の発表を行っている。国際会議発表では同じく平成 18 年度、職員 151 件、学生 34 件の発表を行った。Physical Review Letter, Physics of Plasma, Physical Review 等、内外の査読付き学術雑誌での論文発表は 181 件になる。

平成 18 年には一般の人を対象とした 43 件の出張講演を行い、最先端の核融合とその応用技術の講演を行った。国際会議での講演は 22 件に上る。見学では平成 18 年に

例を取ると 2500 人(内外国人 140 人)を受け入れている。これらの中には中高生 1300 人も含まれ、エネルギー問題の重要性を訴えている。

平成 16, 17 年に IFE フォーラム、レーザー研共催で行われたレーザー核融合炉設計委員会では概念設計炉 KOYO-F が最新のデータを元に検討された。この設計で示された姿は将来のレーザー核融合の進むべき道を諮詢している。これらの結果はプラズマ核融合学会、レーザー学会、原子力学会、連合講演会などで企画セッションが組み立てられ、詳細が報告された。

平成 19 年 9 月には IFSA2007(Inertial Fusion Science and Application 2007)を主催し、世界 19 カ国から 500 人の参加があり、レーザー研の最新の研究結果が示された。また、期間中産学連携シンポジウムが開かれ、一般の参加者も得て、核融合関連技術の産業への応用が議論された。

## 九州大学応用力学研究所附属高温プラズマ力学研究センター

共同研究成果の公表・施設設備の見学は学術発信だけに偏ることなく、コミュニティや共同研究者から集約した意見のフィードバックにもつとめ、常に共同研究のあり方の改善を目指す活動を展開すると同時に国際共同研究のネットワーク構築にもむけても努力を行ってきた。さらにその社会的責任をはたすために九大内外の新入学生・院生あるいは広く社会にむけた情報発信を意識した活動を展開している。その活動は大別すると以下のカテゴリーに分類できる。

- 1) 共同研究の学術成果の発信（学術誌へ投稿、国際会議、国内学会等で発表）
- 2) 共同研究の研究計画・予算実行計画などを決定していくために TRIAM /QUEST 研究会において発表・議論する情報フィードバック、
- 3) 共同研究の研究企画や新規の研究提案等集約するために学会(プラズマ核融合学会)の informal meeting を利用した意見集約
- 4) 国際研究集会の開催  
センターの共同研究の成果としてセンターが積極的に国際会議国際研究集会を開催し、国際的な研究交流や新たな国際共同研究のネットワーク構築
- 5) 一般・大学生を対象とした“オープンキャンパス”や公開講座RIAM Forumを利用した研究概要紹介のための見学会

### 1) 学術成果の発信

共同研究の成果に関しては九州大学での双方向共同研究は TRIAM-1M、CPD、QUEST 装置を利用した高温プラズマの定常化を課題として以下の学術成果を上げてきた。

共同研究者第 1	著者論文数	(投稿中論文 1)	20 編/71 編	( 27 %)
	国際会議論文数		0 編	( 0 %)

共同研究者共著論文数	(投稿中論文 3)	15 編/71 編	( 21 %)
国際会議論文数		27 編/81 編	( 33 %)

共同研究者が第1著者である論文は27%であり、TRIAM, CPD を用いた研究が全国の研究者に活用されていることを示している。今後この比率をさらに高めることができるように以下の取り組みを行っている。

## 2) TRIAM / QUEST 研究会を通じた共同研究者との交流の場

研究成果の発信の場としてのプラットフォーム (TRIAM-1M、CPD、QUEST 装置) の整備は全国の共同研究者の意見をいかにフィードバックするかにかかっている。前述したようにそのために年1, 2回共同研究者のための研究集会を開催し、研究費、研究計画、マシンタイム、機器の整備計画等々に関して透明性と公平性に務めてきた。2004年以降今日まで7回の研究集会を行い、共同研究者を含めて外部研究者135名の参加と議論の下で研究運営が為されている。

## 3) 学会(プラズマ核融合学会)からの意見集約

TRIAM-1M装置を用いてトカマクの定常化への原理実証を行った成果をさらに経済性の高い球状トカマクの定常化へと研究発展させるという提案は前述のように全国の研究者の意見を集約する形で審議・検討された。センターとしては、委員会形式に加えてさらに広く意見集約を図ることを目的として学会開催期間中に2004年以降毎年インフォーマル会議を開催してきた。全国共同利用研究所である九大応用力学研究所にとっては当然であり、また双方向型共同研究において“プラズマの定常化”に関する課題を担当するに当たっては学会コミュニティーからの意見の反映が必須であるからである。夜間の会議にもかかわらず毎回30名程度の研究者に参加いただき忌憚無いご意見を賜っている。

## 4) 国際共同研究ネットワーク構築

センターは中国科学院、西南物理研究所、インドプラズマ物理研究所、ロシアクルチャトフ研究所核融合研究所等と学術交流協定を締結し研究者交流を行ってきた。当センターで共同研究を行った若手の研究者は現在中国の両研究所の中心として活躍している。最近では日中拠点大学協定における研究交流なども貢献している。また教育面では総理工外国人特別博士コースへの院生 (H15 1名、H16 2名、H20 3名) 受け入れ等を積極的に行い、アジア地域における研究・教育の国際化に務めている。

センターは定常化研究の牽引的な研究を進めており、1999年に第2回トカマクの定常運転に関わるIAEA 専門家研究集会を開催し、さらに2007年度には第13回国際球状トカマク国際会議、合同で日米球状トカマク国際会議を主催し、九大双方向型共同研究から多数の発表を行うなど国際貢献と・交流に貢献した。IEA の枠組みの下で世界のST 研究グループが相互に国際共同研究をおこなうことがこの会議で始めて呼びかけられ国際共同研究のネットワーク構築へ向けてスタートが切られたことは特筆

すべきことである。

#### 5) 社会への発信

双方向型共同研究が開始されて以来、例年5月に開催されるオープンキャンパスに当センターの施設見学に訪れた見学者数は H19年度 129人、H18年度 141人、H17年度 136人、H16年度194人と遷移している。TRIAM-1M終了後主要装置がないQUEST装置建設期にもかかわらず多数の来訪者が“核融合って何ですか？ プラズマってどんなものですか？”と社会的あるいは科学的関心や興味をもって来訪される。こうした質問には教員と院生がペアーを組んで丁寧に対応しているが、基礎的な質問に対してうまく答えることのできなかつた院生が発奮する機会にもなっている。RIAM-Forumは応用力学研究所の研究活動を紹介する公開発表会であり、プラズマ分野では共同研究者にその成果を紹介してもらっている。

### Ⅲ－6 我が国の核融合研究進展・活性化への寄与

平成 16 年の国立大学法人化により、全国共同利用に必要な経費は国立大学特別会計から特別教育研究経費等の運営費交付金によって各法人が措置することとなった。したがって、全国共同利用研究拠点といえども、各法人の経営方針に基づいて資源配分等がなされる対象となり、研究者コミュニティの要請・要求が法人の論理に埋没してしまう事態が懸念されるようになった。全国共同利用拠点の活性化は第一義的にその研究者コミュニティの力によるものであるが、研究者コミュニティと共同利用拠点を運営する法人との間の調整を促す制度設計が求められるところとなっている。

核融合研では、このような法人化に伴う環境の変化、時代が要請するネットワーク型共同研究拠点のあり方と、核融合研究自体の大きなパラダイムシフトに対応し、さらに主体的な研究のあり方の流れを大学共同利用機関の責任として作るため、この双方向型共同研究を発足させた。これによって、核融合研と大学の 4 研究センターが強い連携関係を持つと同時に、核融合コミュニティの要請として、各法人では困難な新たな企画を合意に基づいて立ち上げることができるようになった。九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センターにおける TRIAM-QUEST プラズマ装置の建設はその端的な例である。さらに、双方向型共同研究の仕組みを理解する上で重要な点は、双方向型共同研究を創設することを各大学と核融合研の中期目標・中期計画に記載したことである。これは、各大学が、研究センターの研究活動を公式に認めたものであり、双方向型共同研究に参画した研究センターの法人化後の存在意義が、明確に示されたことを意味している。双方向型共同研究は、まさに先に述べた、研究者コミュニティ、研究センター及び研究センターを運営する法人との間を調整する、法人化後の核融合研究を進展させるためには必要不可欠な制度といえる。

双方向型共同研究に参画している研究拠点では各々の自主性によりそれぞれの研究目的を目指して研究を推進することには変わりはないが、全国共同利用によるそれぞれの研究資源の相乗的活用を図り、我が国の核融合研究全体の進展に資することが求められる。双方向型共同研究では研究者交流を促進し、大学からの参画を広く促すことによって人材育成にも寄与するところが大きい。従来の固定的な組織のとらわれない流動性をかもし出す双方向型共同研究は今後の核融合研究の活性化に大きな貢献するものと期待される。

#### 筑波大学プラズマ研究センター

筑波大学プラズマ研究センターは双方向型共同研究を大いに活用し、その理念の下に、日本の核融合研究を大きく進展させることを目指した要素還元型研究として、「電位／電場によるプラズマ閉じ込めの向上の物理」を分担した。トーラスプラズマの閉

じ込めの改善をもたらし、国際熱核融合実験炉 **ITER** を含めた核融合実用への大きな飛躍へのキーポイントの一つとなる「プラズマ中に生成されるプラズマの層流の制御による高閉じ込めモード(Hモード)の生成や、内部/周辺部熱輸送障壁(ITB/ETB)の形成」物理機構を究明、さらには、その外部能動制御方法を見出すことにつながる重要なテーマである。

Ⅲ-3-1の成果に述べられたように、この課題に対して、これは、ガンマ10タンデムミラー装置の特長を生かすと共に、研究の鍵となるジャイロトロンを開発し、その電位制御ツールとしての機能を駆使し、世界最大のイオンの閉じ込め電位 3kV の生成、 $E \times B$  シアーフローを能動的に制御することに成功した。また、トーラス配位とミラー配位での結果を比較検討することにより、径方向電場シアーが本質的にどのような役割を担っているかの学術究明に大きく貢献し、閉じ込めの物理の研究の進展、さらには、電位の物理の重要性を広くしらしめたことにより、このプラズマ電位/電場の物理の活性化に大きく貢献した。

また、プラズマ電位/電場の物理のみならず、それによってもたらされたタンデムミラープラズマの特長を進展させることにより、ミラープラズマ研究の活性化にも貢献した。さらに、ジャイロトロンの開発研究は、全ての磁場閉じ込め装置に重要なプラズマ加熱・制御ツールであり、核融合科学研究所との共同研究による 1MW ジャイロトロンの開発の順調な立ち上がりも含めて、筑波大や核融合科学研究所のみならず、各所の核融合研究の活性化に大いに寄与するものである。

一方、将来のミラー炉のみならず磁場核融合炉全体の効率を上げる可能性を持つ直接発電についても、双方向型共同研究によって高効率での発電の検証を成功させ、LHD や大型のトカマクでの実験に向けた基盤を築いたと言える。

## 京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター

エネルギー複合機構研究センターにおけるヘリオトロン J 実験は、立体磁気軸ヘリカル系における準等磁場 (quasi-isodynamic) 配位を指導原理とする閉じ込め改善の実現と磁場最適化のための物理原理の探索の実験的・理論的研究を目的として、大学におけるプラズマの基礎研究として、また核融合研究に密接に係わる領域についてはプラズマの応用研究 (核融合科学研究所との双方向型共同研究) として、研究・教育活動が推進されてきた。特に双方向型共同研究については、我が国の核融合研究の進展・活性化への寄与としてだけでなく、世界のヘリカル系研究の枠組みにおける国際貢献として、その独自性だけでなく、先導的役割をも果たすものとなっている。図 5.1 に次世代ヘリカル系の研究動向とコイル方式・磁場構造におけるヘリオトロン J の位置付け (寄与) を示す。

プラズマ装置 名称 研究所	H-1NF オーストラリア国立大学	TJ-II スペイン CIEMAT研究所	HSX 米国 ウィスコンシン大学	Heliotron J 日本 京都大学	NCSX 米国 プリンストン大学	QPS 米国 オークリッジ国立研究所	W-7X ドイツ マックスプランク研究所
スケジュール	1993年～	1997年～	1998年～	2000年～	2007年～	2008年～	2009年～
コイル形式	M=3 ヘリアック (CR+1+1NF+12+ TFC)	M=4 ヘリアック (CR+1+1NF+1+TFC)	M=4 ヘリアス (モジュラーコイル)	M=4, L=1+1ヘリカル軸 ヘリトロロン	M=2 準軸対称系 (QI) (モジュラーコイル)	M=2 準ポロイダル 対称系(QPS) (モジュラーコイル)	M=5 (修正)ヘリアス (超伝導モジュラーコイル)
大半径 (m)	1.0	1.5	1.2	1.2	1.4	0.95-1.0	6.5
小半径 (m)	0.22	0.1-0.25	0.15	0.18	0.32	0.3-0.4	0.65
体積 (m <sup>3</sup> )	0.96	1.43	0.44	0.82	3	2-3	54
閉じ込め磁場 (T)	1.0	1.0	1.37	1.5	1.2-1.7	1.0	3.0
パルス幅 (s)	1.0	0.5	0.6	0.5	1.2	1.5	10.0
アスペクト比	4.5	6-15	8	7	4.4	2.7	10
加熱装置	ECH: 0.2 MW	ECH: 0.6 MW NBI: 4 MW	ECH: 0.2 MW	ECH: 0.4 MW NBI: 1.5 MW ICRF: 2.0 MW	RF: 6 MW NBI: 6 MW	ECH/EW: 1 MW ICRF: 1 MW	ECH+NBI 20-30 MW
特徴	高周波加熱、磁シフト、 ビーム加熱、大半径自立 体積加熱可能。	超伝導閉じ込め、 シフト、磁気外挿(4-6%)、 ビーム加熱等の制御が 可能。特に、高ベータ実験 を目標。	ヘリカル対称性の確保に よる閉じ込めの上昇。	高周波加熱配位制御 によるヘリカル軸ヘリトロ ロンの最適化を達成。	準軸対称系(QA)、 高周波加熱(400kHz)による 閉じ込め性能の最適化 確保。 α>~4%	準ポロイダル対称系 (QPS)の閉じ込め性能 の確保確保。 α>~2%	ヘリアス配位の改良型、 自立電流の伝達ヘリアス 配位の最適化を達成す る超伝導大半径装置。
装置図							

コイル方式 磁場構造	モジュラー コイル	連続巻きヘリカル コイル
準等磁場配位	W-7X	Heliotron J
準ヘリカル対称配位	HSX	
準ポロイダル対称配位	QPS	
準軸対称配位	NCSX	
ヘリアック配位	TJ-II H-1NF	

図 5.1 次世代ヘリカル系の研究動向とコイル方式・磁場構造におけるヘリオトロン J の位置付け (寄与)

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 (quasi-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で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、当初 2007 年の実験開始を目指して建設が進められたが、現在 4 年程度の遅れが出ている。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) の設計および建設準備を進めている。ドイツのマックス・プランク研究所では超伝導大型装置 W-7X 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 装置は当初の 2009 年頃の実験開始が、これも 4 年程度の遅れが見込まれており、2013 年頃の実験開始予定であるので、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が可能なデータベースを整備したいと考えている。

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、ロシアー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、ヘリオトロン J 実験グループは、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 装置の実験なら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おり、相補的な研究を進めることにより、ヘリカル系プラズマ閉じ込め、ひいてはトラス系プラズマ閉じ込めに関する総合的理解が深まるものと期待している。

核融合炉実現に向けたプラズマ性能向上のための課題として、(i) 定常運転、(ii) 高信頼性、(iii) 閉じ込め改善、(iv) 高出力密度化、(v) 低い再循環入力等が挙げら

れるが、とくに閉じ込め改善については、閉じ込め改善を実現する優れた磁場構造の探求に向けて、ヘリオトロン J 実験の寄与として

- ① 回転変換：連続巻きヘリカルコイルによる主成分生成と電流駆動による制御性
- ② 準等磁場配位：新古典輸送の低減 ( $\epsilon_{\text{eff}}$  制御・バンピー磁場制御)・高エネルギー粒子閉じこめ制御
- ③ 異常輸送の低減 (磁気井戸・磁気シア・ $\epsilon_{\text{eff}}$  制御)
- ④ 磁気井戸：MHD 安定性の向上・高ベータ化
- ⑤ ダイバータ基礎研究 (ヘリカルダイバータ・磁気島ダイバータ)

などの研究項目が挙げられる。

今後、ヘリオトロン J 装置への HIBP 装置等の新規計測装置が充実し、コア部及び周辺部におけるプラズマ計測が充実すれば、ヘリオトロン J 装置の磁場配位選択の柔軟性を活用し、特にプラズマ構造形成・異常輸送物理について、その磁場構造パラメータ (磁気シア、磁気井戸、実効リップル率、有理面、磁気島等) 依存性の理解が深まり、併せて、異常輸送物理の内部構造 (乱流・帯状流共存系のエネルギー分配則など) を解明する重要な実験的知見が蓄積され、多様な閉じ込め改善モードの発現や制御に関する磁場構造パラメータの役割が解明されていくものと思われる。トカマク、CHS/LHD、ミラー等との比較・連携研究などを通じて、閉じ込め改善の多様性を組織的に理解するための手がかりとなる物理原理の探索が飛躍的に促進されるとともに、閉じ込め改善の原理的な理解の進展により、 $E \times B$  シアフローや帯状流 (ZF/GAM) を基盤とする核融合プラズマの閉じ込め予測精度の向上が図られるとともに、磁場構造最適化のための実験的知見が深められる。更に、原型炉設計活動における閉じ込め磁場最適化 (および ITER の閉じ込め性能の向上等) の研究に活かされると期待して

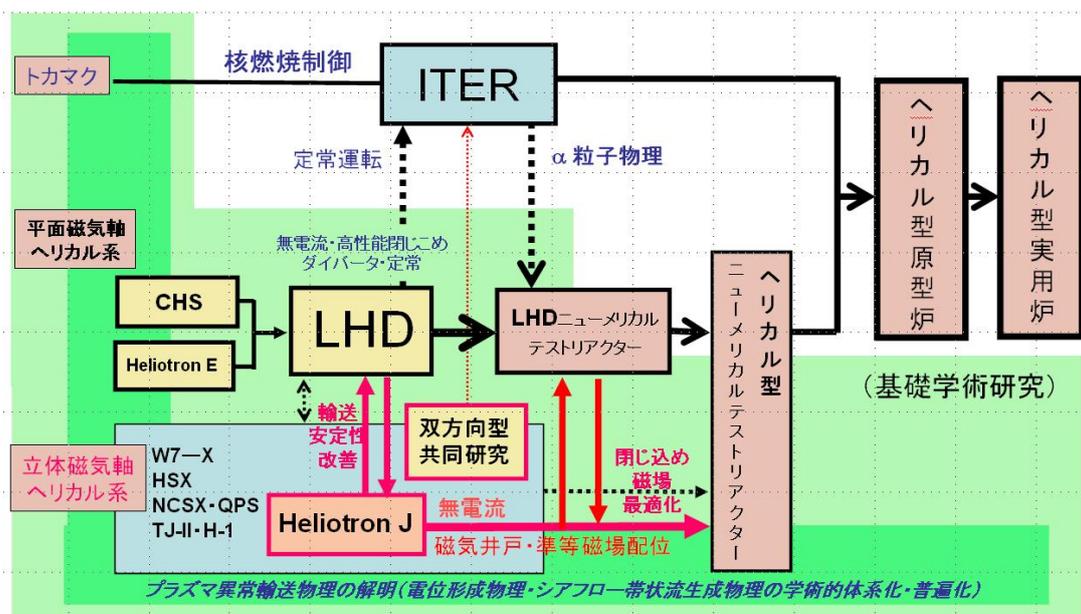


図 5.2 ヘリオトロン J 実験 (閉じ込め磁場最適化研究) を基礎とするヘリカル型核融合炉への展望

いる。図 5.2 に、我が国の核融合研究進展・活性化への寄与の一環として、ヘリオトロン J 実験（閉じ込め磁場最適化研究）を基礎とするヘリカル型核融合炉への展望及びヘリオトロン J 実験の役割・位置付けを示す。

ヘリオトロン J 双方向型共同研究の研究組織の現状としては、全国の約 60 名の研究者（博士後期課程以上）に参画いただいている。平成 16 年度の双方向型共同研究の開始は、エネルギー複合機構研究センターにおける核融合研究進展・活性化へ大きな効果を挙げた。センターはこれまでも、センター独自での公募型共同研究を推進してきたが、双方向型共同研究の開始にともない、（公募）採択課題件数、研究者数とも、ほぼ倍増する結果となった（図 5.3 参照）。全国的な規模での双方向型共同研究が、特に旅費等の補助の増額で可能になったことは喜ばしいが、受け入れ体制の整備を一層充実する必要に迫られている。

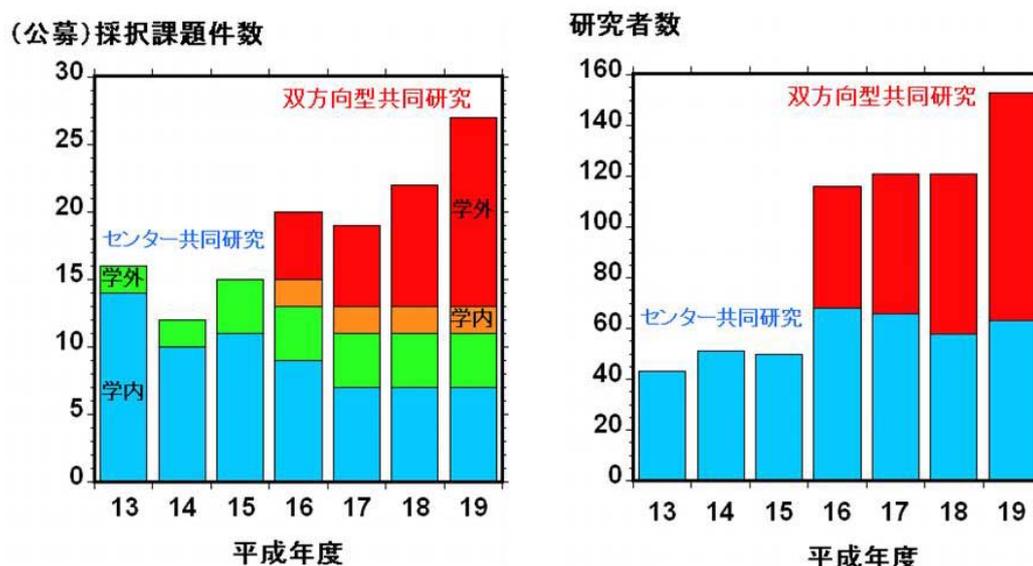


図 5.3 平成 16 年度の双方向型共同研究の開始に伴う  
センターの共同研究における（公募）採択課題件数及び研究者数の推移

またヘリオトロン J 双方向型共同研究を基盤とし、これと連携して、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国際共同研究を個別の研究課題を通じて実施している。これらは我が国の核融合研究進展・活性化へ大きな寄与を果たしている。また平成 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。また中国政府派遣研究員の受け入れなどで以前から交流のあった中国西南物理研究所の 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、同研究所の HL-2A グループとの共同研究の一層の強化を図っている。

## 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

### 磁場と慣性（レーザー）の相補的役割

レーザー核融合は、負荷変動に対する出力調整が容易である事から、磁場核融合と異なる発電市場に対応する先進的核融合エネルギーの可能性を拓くものである。磁場核融合が基幹電力を担い、レーザー核融合がピーク電力を担うという、包括的な役割を社会に提供することは、核融合の社会的受容性に少なくない貢献をすると考えられる。

また核融合の研究開発途上においては、レーザー核融合は磁場方式と質的に異なる原理に基づいていること、および高速点火では比較的小規模の開発が可能であることが大きな特徴である。このようなレーザー核融合研究は、核融合炉形式の選択肢を格段に広げ、強靱な研究開発戦略の一翼を担う。

### レーザー核融合炉設計・炉工学

レーザーエネルギー学研究センターは I F E フォーラムと共催で磁場核融合 炉工学関係者、産業界の専門家も含めてレーザー核融合炉設計委員会(2004年 3月～2005年 9月)を組織し、高速点火方式によるレーザー核融合発電所の概念設計をおこなった。その結果、開発課題は残るものの、現有の材料、技術の延長上にレーザー核融合発電所の姿を描くことができた。この委員会を通して明らかになった課題はその後、九州大学大学院中島グループによる磁場を用いたビームポート保護に関する研究、京都大学大学院工学研究科功刀グループのカスケード型液体壁の安定性に関する実験、シミュレーションの研究へと展開している。

### 磁場・慣性の連携

核融合研レーザー連携部門との連携、および特定領域科研「燃焼プラズマ計測」を通じた協力により、研究の進展に寄与した。具体的な連携内容を以下に記す。

1. 特定領域科研：高強度レーザーへ位相共役鏡技術を導入することにより、原子力機構における先進トムソン散乱システムの開発に寄与。
2. 特定領域科研：ITERにおける損失 $\alpha$ 粒子計測のための YAG : Ce 焼結体セラミックシンチレーターを核融合研に提供。
3. レーザー連携：核融合研の有する低温技術を応用し、高速点火用の固体重水素ターゲットを開発した。
4. レーザー連携：加熱のエネルギー担体である高速電子の特性を調べるために、電子スペクトロメーターの開発を行い、高速点火実験に導入の予定である。またダイヤモンド中性子検出器をレーザー核融合実験に適用。
5. レーザー連携：高速点火核融合のための多階層連結シミュレーションシステム FI3 (Fast Ignition Integrated Interconnecting system)を開発した。

## 産業連携

リーディングプロジェクト「極端紫外（EUV）光源開発等の先進半導体製造技術の実用化」（平成15年度～平成19年度）により、輻射流体物理と高効率、高繰り返しレーザー技術を確立した。また「先端研究施設共用型イノベーション創出プログラム」（平成19年度～23年度）に基づき、産業界への大型レーザー施設共用を開始した。これらの成果は、長期にわたる核融合研究の社会的受容性の向上に貢献するものである。

## 九州大学応用力学研究所附属高温プラズマ力学研究センター

### (A) 双方向型共同研究推進のためのプラットフォーム

九州大学応用力学研究所は、1997年度より全国共同利用施設として共同研究を推進してきたが、2004年度以降、新たに双方向型の拠点として、TRIAM-1M、CPD、QUEST装置を利用した高温プラズマの定常化に関わる共同研究推進のためのプラットフォーム作りを目指してきた。

コミュニティにおける研究の具体的役割としては、

#### (1) 高温プラズマの定常化に関する学術研究の推進

- 1) プラズマ・壁相互作用に関するマルチスケールの現象の相互関係を学術的に研究し、ITER、JT-60SA、LHD等の大型装置の研究に貢献するとともに、材料科学やプラズマ科学の分野にも波及できる普遍的な知見を得ることを目指す。
- 2) 球状トカマクにおいて高周波等を用いた電流駆動を実現し定常球状トカマク運転の原理実証、並びに波動とプラズマの相互作用に関する普遍的な知見取得を目指す。

#### (2) 全国共同利用施設としての特色ある大型設備の整備と共同研究の充実化

- 1) 新設中の温度制御された第1壁とダイバーター排気を特徴とする実験装置(QUEST)、炉工や電流立ち上げに関する斬新なアイデアの適応が可能な小型PWI実験装置(CPD)、定常高周波発生装置、不純物制御観測装置等により「国際競争力のある他機関にはない特色ある大型設備を運用することで研究COEを形成する」ことを目指す。
- 2) 高温プラズマの定常化研究課題等に対して研究集会を適宜開催し、「研究課題の抽出や課題の達成に向けての研究者の組織化に積極的な役割を果たす」ことを目指す。
- 3) 全国共同利用として萌芽的共同研究を実施し、「全国共同利用という広い研究協力体制の中から、常に次世代の研究プロジェクトの芽を模索する」ことを目指す。

また、その運営に関しては、以下のような点に心がけてきた。

- 4) 研究集会を開催し、予算を含めた提案、内容の発表、結果の報告を実施。
- 5) 研究集会において最終的な運転計画等を決定し、公平なマシンタイムの確保を行う。
- 6) 議論に応じて予算の集中投資を行い、研究の速やかな立ち上げによる迅速な成果の達成。

これらにより、わが国のこの分野の研究進展。活性化へ大いに寄与してきた。

#### (B) 全日本的な新しい ST 研究体制の構築

平成16年度より、核融合科学研究所の双方向型共同研究が開始されたが、この中において、九大が新装置の提案をしたことにより、双方向型共同研究委員会のもとに「九大装置検討会」が設置され、全国的規模での活発な検討・議論が進められてきた。その結果、九大に新装置を建設するだけではなく、大学における既存の ST 装置を用いた研究活動との連携協力のもとに、全日本的な新しい ST 研究体制を構築しつつ推進すること、またこれらは、核融合科学研を中心とした双方向型共同研究の枠組みのもとに密接な連携を図りつつ推進し、わが国の大学・国公立研究機関等における核融合研究の学術基盤の長期的構築に寄与すべきこととされ、極めて活発な研究活動開始の契機となった。

さらにこれらの予備研究として、東京大学の装置 TST-2 を九大に移送し九大の電磁波源との組み合わせにより、大型の共同研究を遂行することができた。

#### (C) 透明性の高い運営システムの構築

ところで、九大の新装置による計画は、今後のわが国の球状トカマク研究の総合的推進にとっても重要であることから、その装置建設や実験遂行についての運営も、他の大学の研究者が容易に参画できることが望まれてきており、できる限り透明性の高い適切な運営組織（システム）を構築し推進を開始した。このことは、全国のこの分野の研究者や組織の活性化にとって極めて有意義であり、その貢献度は大きいと考えられる（III-3-4（2）-3における図7参照）。

### Ⅲ-7 他の学術分野への影響

核融合研究の特徴は広範な基礎学術と先端工学技術からなる典型的な総合科学であることにある。プラズマ物理学、物質科学、超伝導工学、原子力工学などの上に立脚するとともに、新たな課題や成果が散種されることにより、これらの分野の牽引役となっている。長期にわたる核融合研究にあつては、学術分野として孤立することなく、むしろ他の学術分野との相互作用が欠かせない。Ⅲ-1 で述べた双方向性を持った学術研究のネットワークの有効性は、核融合研究の分野を閉じるものではなく、むしろ、核融合研究からの発信および他の学術分野からの知の流入を促すものである。

双方向型共同研究は核融合研及び大学の4研究センターの活動が軸となって発足しており、おのおの特長を有する主要実験装置を有している。これらを横断するプラズマ分光や物質材料に関する研究が既に、装置に固有なものから、学術として汎化されたものとするアプローチとして実施されている。各センターの特長を生かした他分野との交流・連携の例を以下に示す。

筑波大学プラズマ研究センターでは、つくば市の高エネルギー物理学研究機構や産業総合研究所の放射光を用い、計測器開発・較正研究が進展している。特に、半導体を用いたX線計測や粒子計測は、他分野への応用が期待されている。また、ジャイロトロン開発では、ジャイロトロンとしては比較的周波数の低い特長を生かしたダイヤモンド合成やプラズマプロセッシングなどへの応用が可能である。最近基礎研究が進展し、注目を集め始めているマイクロ波プラズマ推進へのガンマ10用ジャイロトロンの周波数の特長を生かした展開も期待される。ビームプローブの技術は、その精細なビーム制御技術から、医療分野や、精密加工にも展開の可能性をもつものと期待されている。

京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センターで行っている先進ヘリカルシステムにおけるプラズマ閉じ込め改善研究において、特に周辺プラズマ揺動に見られる間歇的バーストを伴う乱流的揺動、あるいはプラズマ中のシア流れを介在とする乱流状態の自発的構造変化、電場に関連した分岐現象、そして新規な波動加熱手法における電磁波・静電波の伝播・吸収等は、天文・宇宙物理分野・低温プラズマ分野・プラズマ基礎や一般流体物理分野はもとより、応用数学分野など、多くの分野で実験的・理論的に大きな興味もたれている現象であり、これら広い分野への横断的な広がりが見込める研究課題である。そのため、関連した分野間連携及び新分野創成に向けた学際的な取り組みを検討・推進することは非常に有意義である。このような視点から、エネルギー複合機構研究センターでは、平成17年度より自然科学研究機構「分野間連携による学際的・国際的研究拠点形成」事業に参画し、他の学術分野との交流及び連携を深めつつ、関連する分担共同研究課題を遂行しつつある。

大阪大学レーザーエネルギー学研究センターで研究しているレーザー核融合プラズマに代表されるレーザー照射により生成したプラズマはエネルギー密度が高く、レーザー核融合研究で培った流体物理、輻射輸送物理の知見や、計算機シミュレーション、プラズマ診断技術などをもとに、様々な学術研究や応用研究への可能性を拓いてきた。また、レーザー核融合用ドライバーの研究開発から、パワーフォトニクスにおける様々な新しい技術や概念が生まれ、レーザー・光工学分野の展開に大きく影響を及ぼしている。具体的には以下のような事例がある。

### (1) 高エネルギー密度科学分野

- ①実験宇宙物理学：レーザープラズマは、宇宙で観測される様々な高温流体やプラズマ物理の集団現象を実験室で研究する道具となりうる。これまでに、木星内部を想定した高圧条件下の縮退水素の物性、地球内部に近い状態の鉄の物性や、無衝突衝撃波、光電離プラズマなどに関する研究が新たに展開してきた。
- ②状態方程式研究：核融合燃料の高密度物性研究から、金属炭素、金属水素、様々な結晶体物質などの状態方程式研究が展開した。
- ③相対論的プラズマ物理：超高強度レーザーを用いたクーロン爆発や GeV イオンの発生理論などの研究分野が展開している。

### (2) 光量子放射学分野

- ①極端紫外光源開発：レーザーにより生成したプラズマからの EUV 光発生は次世代半導体製作のための高品質高効率リソグラフィ光源として期待され、経済産業省と連携したリーディングプロジェクトとして先進半導体製造技術の実用化の開発研究が推進されてきた。スズやキセノンからの EUV 放射機構に関する実験・理論・シミュレーションを連動させた研究により、13-14nm で高効率 EUV 発生条件が明らかになるとともに、パンチアウトターゲットなどのデブリ制御手法の提案・実証がなされ、開発に大きく寄与している。
- ②粒子加速研究：レーザー照射キャピラリーによる 800MeV 電子加速が実現し、テーブルトップレーザー加速器の可能性を拓いている。

### (3) 高出力レーザー工学分野

- ①新型レーザー分野：核融合ドライバーを目指した冷却型 Yb:YAG レーザーが提案され、研究開発が進んでいる。また、Bi ドープファイバーレーザーなど、新しいレーザーの出現、研究展開に影響を及ぼしている。
- ②高出力高繰り返しレーザー分野：5kJ/5kW の Nd:YAG レーザー、10J/10Hz の LD 励起固体レーザーなど、レーザー装置としての動作領域の拡大が進んでいる。

- ③レーザー材料分野：セラミックス YAG や Bi シリカガラスなど、新しいレーザー材料が開発されている。
- ④光学素子分野：大型高耐力回折格子、TGG セラミックス（ファラデー回転素子）などの新しい光学素子開発が進んでいる。

九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センターでは、これまで超伝導トロイダル磁場発生コイルを持つトカマク実験装置 TRIAM-1M によりプラズマの長時間放電・維持に世界的な成果を上げてきた。この超伝導コイルシステムを長期間にわたって安定的に制御運転を行ってきたことは、核融合の他の装置のみならず超伝導を用いた他の多くの分野に対して影響を与えてきた。

長時間プラズマの研究においてはプラズマの電流駆動が非常に重要な要素であり、九大ではその制御技術の開発に力を注いできたが、これらの技術は他の分野の高周波技術としても有効なものであった。

トカマクの長時間維持制御については、上記の高周波による電流駆動と同時に、プラズマの位置制御も極めて大切な要素である。高速応答で精度のよい位置制御をしかも長時間にわたって行うことは、位置の検出を磁気的なセンサーによっていることから制御回路のドリフト問題の克服が必須の重要課題であり、開発されてきた制御技術は、多くの他の分野へ影響を与えてきた。

TRIAM-1M を用いた双方向型共同研究においては、特に長時間プラズマの研究において多くの貴重な成果を上げてきたが、その中の 1 つに、近年明らかになってきた「トカマクプラズマ中でのダストの振舞い」がある。これらの研究は、他の分野、例えば携帯電話の基盤回路に必要なシリコンの生成プロセスにおいて問題となっているダスト問題への対応に対する知見も提供してきた。

さらに、長時間プラズマ研究の主要な課題であるプラズマ壁相互作用の研究からは、各種金属や物性研究の分野に対して研究動機を発信することにより、極めて大きな影響を与えてきた。

また、双方向型共同研究により非常に多くの計測関係の共同研究が遂行されてきたが、レーザーやマイクロ波計測技術は他分野にも寄与するものである。

以上、それぞれのセンターにおける例を述べたが、今後、これらの成果が核融合分野以外でさらに発展していくことが望まれる。

双方向型共同研究を施策として捉えた場合、学術研究のネットワークの活性化という点で他分野に先駆けて行われている新しい共同研究の仕組みであり、優れた成功事例として認知されつつある。天文学や分子科学においても、集中と選択という命題と学術の多様性の確保を両立させる運営方法として同様の試みが始まっている。

#### IV. 双方向型共同研究の課題と展望

双方向型共同研究は、法人化後の平成16年度から開始されたが、既に我が国の核融合研究の推進に大きな変化をもたらしている。大学の研究センターと核融合研が双方向で行う共同研究では、各センターと核融合研の間で研究者が自由に行き来できる仕組みにしたこと、核融合研には我が国における核融合・プラズマ分野の研究者の多くが在職し、各センターが必要とする多才な人材が揃っていること等から、双方型共同研究は、各センターにおける核融合研究の進展に大きく貢献している。各研究センターで核融合研究に従事している研究者数は10人程度以下であるが、核融合研でLHDに直接従事している研究者は約100名、研究所全体では約145名を擁しており、核融合研から各センターに出向いて共同研究を進める効果は、マンパワーの点だけでも非常に大きいといえる。

また、大学共同利用研究機関でない研究センターも、双方向型共同研究により、これと同等の機能を有することになったことから、全国の優秀な研究者が各研究センターの共同研究に参加し、センターの研究を促進するとともに、センターの活動が全国の大学に伝えられることにより、研究センター以外の大学の研究も活性化されている。特に、ST研究では、双方向型共同研究のもとでネットワーク型共同研究が始められるなど、制度的にも大きな進展が見られている。

共同利用・共同研究では、双方向型共同研究も含め、最近、種々の改革が行われた。共同研究委員会のもとに設けられた一般共同研究、LHD計画共同研究、双方向型共同研究の各々の委員会の幹事長（委員長）には外部委員にご就任頂くこと、共同研究委員会の構成に必要な委員は核融合ネットワークの意見を尊重して核融合研所長が運営会議に推薦すること、核融合ネットワークの推薦にあたって2期以上勤められた委員は原則半数改選するものとし、地域性や各分野における継続性に配慮すること等が、共同研究委員長から提案され、共同研究委員会の同意を得て実施されている。また、LHD計画共同研究は平成17年度から、双方向型共同研究、一般共同研究と同時に、また、同じ様式で公募する方式に改め、それまでの核融合ネットワークを通して募集する方式を止めている。これらの変革により共同研究委員会の活動の透明性が、さらに増したと考えられる。このように共同利用・共同研究は、共同研究者の声を吸い上げ、共同委員会委員あるいは共同研究委員会委員長の発議で改革案の検討を行い、共同研究委員会、また、必要に応じて運営会議の同意を得て、これを実現するという自浄能力を有している。

双方向型共同研究をさらに発展させるには、即ち、今後、我が国の大学と核融合研における核融合研究をさらに発展させるためには、核融合研究はどのような方向、内容であれば良いかを調査審議し、その実現に向けて大学の研究センター等の研究内容

を変えて行かなければ、また、斬新で将来性のある研究を立ち上げなければならない。双方型共同研究委員会では、この問題に対処するため、年間を通して議論を行っている。

双方向型共同研究委員会では、現在参画している研究センター以外から将来の核融合研究の進展に必要な重要課題が提案されることも視野に入れ議論を進めている。例えば、研究センター以外から、より重要な課題が提案された場合には、研究センターの研究課題としてその提案を採択することが考えられる。この場合、提案者が研究センターに移る、あるいは客員となるといった流動化が必要である。また、研究センターを新たに大学に設立することは難しいことから、新規の重要課題を掲げて、複数の大学の研究者が参加するヴァーチャル研究センターを設立し、双方向型共同研究に加わることも考えられる。この場合には、双方向型共同研究の設立時のように、各参加大学から運営費交付金を双方向型共同研究経費に移すこと、中核となる大学等に必要な設備を整備することなどが必要条件になるものと思われる。何れにせよ、双方向型共同研究委員会は柔軟に対応できる体質であり、自浄能力を有していることから、核融合研究の進展のため最良の選択を行える。

## V. おわりに

本報告書は、核融合分野における双方向型共同研究の現状をまとめたものである。本報告書をもとに行われる外部評価結果を受け、核融合研は、共同研究委員会、運営会議、参画している4つの研究センター等の同意を得て、必要であれば、双方向型共同研究の運営体制等のさらなる改革を進める所存である。

## 添付資料

- 資料1. 「今後の我が国の核融合研究の在り方について」(WG報告書)
- 資料2. 核融合科学研究所運営会議共同研究委員会規則
- 資料3. 双方向型共同研究開始前後の各センターの予算額の推移
- 資料4. 双方向型共同研究開始に伴う各センターに於ける共同研究形態の変化
- 資料5. 成果詳細(論文リスト、学会発表リスト、大学院教育、成果公表、等)
- 資料6. 用語集
- 資料7. 追加資料
  - 1. 双方向型共同研究における研究者の流れについて
    - ・各センターでの受け入れ状況
    - ・核融合研からセンターへの流れ
  - 2. 九大Q U E S T装置建設における双方向型の寄与について
  - 3. 双方向型共同研究の人材育成への貢献について
    - ア) 大学院生・ポスドク数
    - イ) 修士・博士論文数
    - ウ) 大学院生の発表論文、国内外学会発表数
    - エ) 双方向型による他大学学生教育への貢献
  - 4. 受入・実施体制について
    - ア) センターにおける共同研究への資源・時間配分について
    - イ) センターの研究支援体制・研究環境
    - ウ) 共同研究者の意見が反映される仕組み
  - 5. ワーキング・グループ報告の「重点化」と双方向型共同研究の関係について
  - 6. ワーキング・グループ報告の趣旨に沿い終了した装置について
  - 7. 双方向型共同研究課題の公募から採択までのプロセスについて

## 資料 1

「今後の我が国の核融合研究の在り方について」(WG報告書)

# 今後の我が国の核融合研究の在り方について（報告）

平成15年1月8日

科学技術・学術審議会 学術分科会

基本問題特別委員会 核融合研究ワーキング・グループ

## 目 次

はじめに

1. 審議の経過
2. 核融合研究の重点化とグランドデザイン
  - (1) 重点化の必要性について
  - (2) 核融合研究の新しいグランドデザインについて
3. 核融合研究計画の重点化の方策
  - (1) 既存の核融合研究計画の評価
  - (2) 重点化計画の策定
  - (3) 重点化のための具体的計画
    - ①トカマク国内重点化装置計画
    - ②核融合材料試験装置計画
    - ③レーザー高速点火計画
    - ④大型ヘリカル装置（LHD）計画
  - (4) 重点化計画の優先度について
  - (5) 既存装置の整理・統合について
4. 共同利用・共同研究の強化の方策
  - (1) 大学共同利用機関としての核融合科学研究所の在り方
  - (2) 法人化後の大学の役割
  - (3) 日本原子力研究所及び新法人の役割と共同研究の強化
  - (4) 共同利用・共同研究促進について
5. 重点化後の人材育成の在り方
6. まとめ

## はじめに

21世紀以降のエネルギー源は、我が国の安全及び経済に深く関わるとともに、地球規模の環境保全からの要請を満たすことが求められる。当面は化石燃料に依存することが可能であるが、長期的には核分裂、核融合、風力・太陽光発電等の再生可能エネルギー等の中から国策に基づき選択されるものと予想される。核融合エネルギーについては、安全性・環境適合性・資源量等の観点で優れた特性を潜在的に有しており、世界の主要国で活発な研究開発が行われてきた。我が国では、この核融合研究の重要な目標である科学的実証を目指して種々の方式による研究が大学、核融合科学研究所、日本原子力研究所等で進められ、既に多くの成果を挙げている。当該分野の研究が欧州、米国とともに世界のトップレベルにあることに加えて、プラズマ物理学、プラズマ応用学、計算機シミュレーション科学、宇宙・天体プラズマ学、超伝導工学、材料工学等の複数の領域で多彩な学術的成果を生み出す等、今後も我が国の科学技術と学術に大きく貢献することが可能な分野である。

一方、国際プロジェクトとして進められている国際熱核融合実験炉（以下、「ITER」という。）計画については、建設に向けた政府間協議が始まり、核融合エネルギーの実現を目指す核融合炉開発としての大きな一歩を踏み出そうとしている。今後、長期に渡って物理と工学の統合を必要とする核融合研究を着実に進めるためには、その進行を制限する項目と課題（クリティカルパス）を定め、開発研究を進める必要がある。同時に、物理と工学の体系化とスモールサイエンス等へのスピノフ（波及効果）が期待できる当該分野の学術研究としての重要性に鑑み、学際化の研究手法等を取り入れつつ、学術研究基盤の維持・整備と人材育成にあたらなければならない。我が国においては、前者は、日本原子力研究所が、後者は、大学、大学共同利用機関がその中核として研究の推進にあたってきた経緯にある。このように学術研究から開発型の研究にまたがる広い研究領域を包括する当該分野においては、研究の裾野の拡がりや考慮するとともに、学術発信を常に行い、先端科学技術としての当該分野を国策として牽引することが重要である。

核融合研究ワーキング・グループ（以下、「WG」という。）では、我が国の核融合研究をさらに発展・強化させるべく、当該分野を構成するプラズマ物理学と炉工学研究分野を概括する審議を行い、これまで長年にわたり核融合研究を支えてきた複数の実験装置を整理・統合しつつ、炉工学分野と併せて重点化・効率化するための方策を検討した。重点化にあたっては、共同利用・共同研究をさらに強化することに加え、新たな可能性を目指した研究の創生、不断の人材育成等を活性化させること等が重要であり、その方策の検討が必要となる。このため、WGにおいては、次の4つを主要な点として、今後の我が国の核融合研究の在り方を審議した。

1. 研究評価による研究者コミュニティの意見集約に基づき、重点化・効率化のための具体的な計画を提言する。
2. 大学、核融合科学研究所、日本原子力研究所等の各研究機関の法人としての自律性と自主性を尊重し、計画の実行にあたっての諸条件の整備に努め、為しうることの検討結果を提言に活かすこと。
3. 新しい国内の研究体制の推進と研究計画の策定にあたっては、研究者コミュニティの総意の下に、重点化すべき研究計画を定めるとともに、その中核となる国内装置については、共同研究重点化装置と位置づけ、国際協力による大型装置での研究と併せて、実施しようとする機関と研究者コミュニティによる共同（利用）研究を一層推進すること。
4. 平成14年5月29日開催の総合科学技術会議で決定され、平成14年5月31日に閣議了解された「ITER計画について」の中で、「国内の核融合研究については、重点化、効率化を図りつつ、ITER計画と有機的に連携する体制を構築すること。この際、核融合研究開発を支える人材の育成、各種プラズマ閉じ込め方式の研究や中性子による放射化の少ない材料等の開発等に配慮すること。」が、留意事項として指摘されていること。

## 1. 審議の経過

今後の我が国の核融合研究の在り方について審議するため、学術分科会・基本問題特別委員会の下にWGが設置され、当該研究分野を代表する研究者により研究の重点化・効率化についての審議が集中的に行われた。

WGの委員名簿及び審議の経過は、別紙のとおりである(資料1、2)。WGでは、第10回(3月25日)に議論の整理、第12回(平成14年7月29日)に論点整理を行い、第18回(平成15年1月8日)に本報告書を取りまとめた。

## 2. 核融合研究の重点化とグランドデザイン

WGでは、我が国の核融合研究を長期的に俯瞰しつつ、重点化すべき研究計画と国内共同利用・共同研究体制についての意見が取りまとめた。

### (1) 重点化の必要性について

ITER計画によって、核融合エネルギーの実現を目指す研究に大きな一步を踏み出すにあたっては、研究基盤の充実とさらなる研究の発展を可能にするために国内の核融合研究について、今後の研究の重点を明確にする必要がある。研究の重点化にあたって考慮すべき点は以下の4点に集約される。

1. ITERへの寄与の明確化と国際的競争力の強化
2. 核融合炉の可能性を広げる研究の充実

3. 学術的な普遍化を目指す研究の充実

4. 人材育成（学生教育並びに若手研究者の研鑽）の充実

この観点に立って当該分野の研究を迅速かつ効果的・効率的に進めるために

a. 既存装置の整理・統合と、研究者コミュニティに開かれた新たな研究の展開を可能にする共同研究重点化装置の導入

b. 共同利用・共同研究と連携協力研究の促進

c. 新たな可能性への挑戦を目指した研究の創生

に重点を置くことが必要である。

## **（２） 核融合研究の新しいグランドデザインについて**

核融合炉の実現を目指す研究においては、ITER に代表される「開発研究」と、それを支える「学術研究とそれに基づく人材育成体制」とを包含する総合的研究の推進が重要とされる。前者は、特定の技術開発目標を一定期間に達成するための目的直結型の研究開発であるのに対して、後者、特にこれを担う大学等の学術研究は、研究者の自由な発想に基づいている。

従って、核融合エネルギーの実現を目指す核融合研究を

・ ITERとの有機的連携を図りつつ推進すべき核融合炉を目指した開発研究

・ 学理の探求に基づく当該研究分野の学問的体系化を目指す学術研究

という2つの側面を併せ持つ総合的な研究として捉え、国の定める核融合研究開発基本計画と整合性を取りつつ展開することが必要である。ここに、核融合炉の実現を目指す研究を、開発研究と学術研究の間で構成される階層構造として捉えたグランドデザインを図1に示す。この図は、核融合研究は異なる階層間の連携を図りつつ、体系的・組織的に推進する必要があることを端的に示しており、ITERを含む核融合炉の実用化に向けて、各階層からの寄与、特に共同研究重点化装置による研究を積極的に進めていくことが重要である。

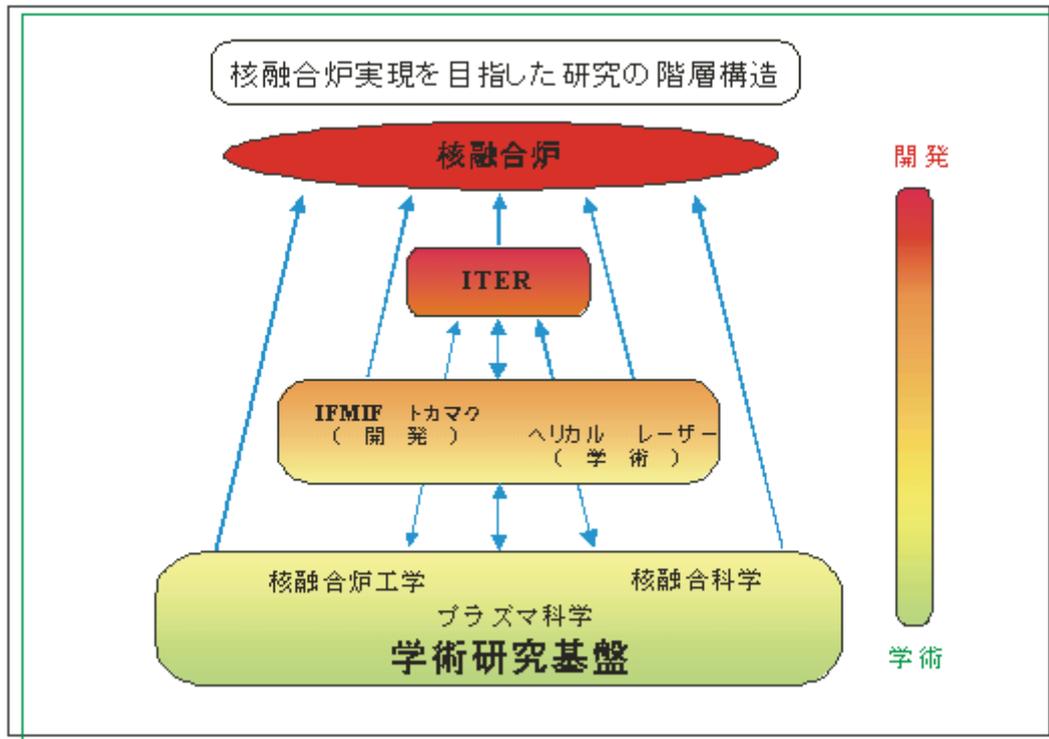


図1 核融合研究の階層構造

### 3. 核融合研究計画の重点化の方策

#### (1) 既存の核融合研究計画の評価

研究の現状を評価し、今後の計画を審議するためには、設置形態に応じた評価基準による科学技術・学術的な評価が必要であり、この評価は、外部に対する発信の機能も併せ持っている。WGでは、新しい核融合研究路線の展開を図るため、既存の研究計画について研究者コミュニティによる核融合研究の意義・位置づけの審議を実施し、固有の装置にとらわれることなく、分野横断的な学問的評価を行った。

図2に現在の我が国の主たる研究の拠点を示す。資料3に示したとおり、複数の既存の実験装置（コンピュータを含む）についての評価結果を“成果と評価”として資料4に示す。ここでは個々の実験装置を縦糸と位置づけ、研究分野を横糸とする2元的な評価を行っている。いずれの計画についても、これまでの研究に対して高い評価が与えられているが、その完成度とこれからの研究計画についてはさまざまな角度からの意見が出された。WGではこれらを総合して、各研究計画・対象装置ごとに研究実績と今後の計画について、グランドデザインの中での位置づけを行い、その結果を“今後の展開”として資料4にまとめた。



図2 我が国の核融合研究拠点

## (2) 重点化計画の策定

既存の研究計画の評価結果を受けて、WGでは、今後10年から20年にわたる我が国の核融合研究を推進するための重点化すべき計画の策定に向けて、複数の提案について審議を行った。その結果を資料5に示す。重点化計画の審議にあたっては、ITERが建設されることを前提として国内研究基盤の整備・推進を図ること、及び、今後30年程度で核融合原型炉を実現するための課題の解決に必要な研究計画を策定することの2点を条件とした。その結果、重点化すべき課題は、トカマク、炉工学、レーザー分野に絞り込まれ、これに既存の研究計画の研究評価の結果からヘリカル(LHD)を加えて、4つの重点化の柱が策定された。

## (3) 重点化のための具体的計画

### ①トカマク国内重点化装置計画

核融合エネルギーの早期実現に向けて、トカマク方式の改良（高ベータ定常運転の実現による経済性向上等）を我が国独自に進めるとともに、ITER計画での主導権の確保と、数百名規模での人材養成によるITER計画との有機的連携を図るために、国内のトカマク装置を重点化することが必要である。本装置は、臨界プラズマクラスのプラズマ性能をもった超伝導装置とし、プラズマアスペクト比、断面形状制御性、帰

還制御性において、機動性と自由度を最大限確保できるものとし、原型炉で必要な高ベータ ( $\beta N=3.5-5.5$ ) 非誘導電流駆動プラズマを、100 秒程度以上保持することを目指すものである。計画の実施にあたっては、設置主体である日本原子力研究所／新法人と研究者コミュニティが研究計画を共同企画・立案しつつ実施することが重要であり、JT-60 をトカマク国内共同研究の中核的役割を担う装置として位置づけて、トカマク国内重点化装置の建設開始まで運転を継続し共同研究を推進するとともに、ITER の動向を踏まえつつトカマク国内重点化装置への転換を図る必要がある。

## ②核融合材料試験装置計画

同じく核融合エネルギーの早期実現に必要な材料・ブランケット開発は、プラズマ閉じ込め方式の如何にかかわらず必須の課題である。特に、今後、実用化までの核融合炉用の第一壁候補構造材料の開発及びその材料が核融合炉環境下で中性子照射に耐えることを確認し、その特性データを取得するためには、IEA（国際エネルギー機関）の国際協力による核融合材料照射試験装置（IFMIF）計画が不可欠である。この計画は、効率的な材料開発に必要とされる学術研究にも大きな貢献が期待される。従って、IFMIF の重要システム要素について工学的な実証を行い、建設に必要な工学設計を完成することを目的とする工学実証・工学設計活動（EVEDA）に速やかに着手する必要がある。計画の実施にあたっては、日本原子力研究所／新法人と核融合科学研究所・大学が連携協力しつつ実施することが重要である。

## ③レーザー高速点火計画

レーザー高速点火計画 FIREX は、最先端のレーザー技術と極限状態の科学を応用して、磁場核融合方式と質的に異なる方式により、核融合エネルギー実現の可能性を切り拓くものである。我が国独自の高速点火方式レーザー核融合の原理実証を目的とする FIREX 第1期計画は、世界最高出力の超高強度レーザーにより核融合点火温度（0.5? 1 億度）への加熱を行うものである。この計画は、核融合炉の可能性を拓くばかりでなく、我が国の学術基盤の強化とレーザー技術に関する知的財産権の確保に貢献するものである。さらには、その成果により、点火・燃焼の実現を目指す第2期計画に発展させるか否かの判断を行うことも可能となる。FIREX 計画を研究者コミュニティ全体の計画とするために、大学共同利用機関との連携等の方策を検討することが望ましい。

## ④大型ヘリカル装置（LHD）計画

上記の3つの重点化計画を推進する場合、大学共同利用機関である核融合科学研究所において推進されているLHD計画が、当該分野の学術研究の発展に果たす重要な役割にも注目しなければならない。LHDは、我が国で発案されたヘリオトロン磁場配位を採用することにより、無電流環状プラズマによる核融合炉を目指して造られた磁場閉じ込め装置である。LHDを共同研究重点化装置として活用することによって、今後

も、炉心プラズマに外挿できるパラメータ下における環状プラズマの総合的理解、ITERへの寄与、新しい閉じ込め配位研究のための装置との連携等を目標に、LHDを用いた学術研究を継続して進めることが必要である。LHDの研究目的を資料6に示す。

今後も長期にわたる核融合研究を推進するためには、学術研究から開発型の研究にまたがる広い研究領域を包括する必要がある。そのためには、我が国の核融合研究の裾野の広がりを見守りつつ、学術発信を続け先端技術を牽引することが重要である。その実現のためには、上記の3つの重点化計画と、現有の研究資源であるLHDでの研究を共同利用・共同研究のための重点化計画として位置づけ、活用することが重要である。

#### (4) 重点化計画の優先度について

以上の審議結果を踏まえ、WGは、既存のLHDを除く重点化すべき上記3つの研究の柱に対して、次のとおりの方策を提言する。

- ① 核融合エネルギーの早期実現を目指し原型炉に向けた重要な課題の解決を図る上で、ITER計画との連携を図りつつ、無衝突プラズマ領域における高ベータ定常運転の研究を推進するため、国内のトカマク重点化装置を優先する必要がある。
- ② 材料・ブランケット開発は、プラズマ閉じ込め方式によらず必須の課題であり、その中核であるIFMIF計画は核融合開発研究に不可欠である。従って、その工学実証・工学設計活動（EVEDA）に速やかに着手する必要がある。そのために、国内実施体制を急いで確立する必要がある。
- ③ 我が国独自の計画として高速点火方式レーザー核融合の原理実証計画第1期を開始することは、磁場核融合と異なる原理に基づく核融合炉の可能性を拓げるばかりでなく、我が国の学術基盤の強化と知的財産権の確保のために必要である。

#### (5) 既存装置の整理・統合について

以上のとおり、重点化のための審議結果と既存装置についての評価結果を踏まえ、これらについての今後の在り方をまとめると、以下のとおりである。

- ① 重点化計画の基盤となるJT-60とGEKKO-XIIに関しては、次期計画の開始時まで運転を続け、装置建設に合わせて計画を完了させる必要があること。
- ② LHDについては、現有資源として高性能プラズマの生成による環状プラズマの普遍的性質の探求を進めITERを含む環状プラズマへの学問的寄与を明確にするという所期の目的達成のために研究を継続する必要があること。
- ③ 重点化の柱となるJT-60、GEKKO-XII、LHD以外の装置に関しては、然る

べき時期に計画を完了すること。ただし、斬新な研究の展開による装置の運転延長の提案は、新たな可能性を目指した研究の候補になり得る。

- ④ 4つの重点化計画での共同利用・共同研究を活性化するとともに、独創的なアイデアによる新たな可能性への挑戦への機会を生み出せるような仕組み・研究体制の構築、そしてこれらを可能とする新たな措置が必要であること。

#### 4. 共同利用・共同研究の強化の方策

我が国の核融合研究が新しい段階に入り、国内の共同研究重点化装置及び国際協力によるITERや核融合材料試験装置による研究への展開が行われようとしている現在、これらを軸とする研究はもちろんのこと、新たな可能性を目指した研究機会を生み出すためにも共同利用・共同研究の一層の活性化が必要となる。従って、研究者コミュニティの総力を上げた共同利用・共同研究を実りあるものにするためには、これを担保する共同利用・共同研究促進措置が必要となる。具体的には、共同研究費の拡充をはじめとして、宿舎、旅費等の充実を図る等の方策の検討が必要である。

以下に、これらの受け皿となる核融合科学研究所、大学、日本原子力研究所の果たすべき役割と、その促進のための方策を述べる。

##### (1) 大学共同利用機関としての核融合科学研究所の在り方

核融合科学研究所においては、核融合プラズマの学理とその応用の研究との創設の理念に基づき、我が国独自の方式である大型ヘリカル実験計画と理論シミュレーション研究を推進してきた。我が国の核融合分野における学術研究に資する役割の強化が一層求められている現状に鑑み、大学共同利用研究の中核機関として大学との強い連携・双方向性の強化等が必要であり、運営体制や研究の対象範囲等の見直しを行い、研究計画の一層の活性化を可能とする制度設計の充実を図る必要がある。

LHDの一層の活用のためには、LHDの研究計画を立案するシステムの工夫、共同研究委員会の機能改革等、共同研究の推進機能を強化する方策を検討することが必要である。また、炉心プラズマに外挿可能な無電流プラズマ装置としての特徴を生かした環状プラズマの閉じ込め改善、定常プラズマ実験等の分野で、トカマク計画との連携を強める必要がある。

提案されている高速点火(FIREX)計画を中心とするレーザー核融合研究の分野では、大阪大学等との連携を図り、関連する共同研究を積極的に推進することが必要である。さらに、大学の先駆的・萌芽的研究とも密接に連携・協力し、核融合のための学術基盤研究の拠点として、また新たな可能性への挑戦の場の一つとしての役割を担

うことが期待される。

加えて、炉工学研究の包括的・総合的な推進が今後益々重要となるため、特に、核融合材料試験装置での国際的な共同研究を初めとして、ブランケット工学、超伝導コイル技術、安全性研究、核融合炉設計等の炉工学に関連した幅広い分野における大学の炉工学研究を、大学共同利用機関として取りまとめていく役割が期待される。

## (2) 法人化後の大学の役割

大学における研究は、学術基盤に貢献することを目的に計画が進められてきており、数千名規模の研究者コミュニティを支えるための不断の人材育成において中心的な役割を果たしている。従って、今後の核融合研究の展開を図るためには、大学における研究の展望が的確に把握され、振興策を提示していくことの必要性が確認されている。しかしながら、個々の計画についての今後の方策の策定についての議論は、個々の大学の自律性と自主性を尊重し、特に法人化後の各機関における研究の方針によるところが大きいこととの認識が必要である。

大学においては、学術研究の推進と学生の教育が2つの大きな柱と位置づけられており、トカマク、ヘリカル、レーザー、炉工学等と広範囲な研究の体系化と連携が必要な核融合研究分野においては、大学共同利用機関である核融合科学研究所との連携や日本原子力研究所との共同企画・共同研究を強め、大学の学術研究の基盤を維持しつつ、学生への研究指導を行う必要がある。さらに、これらの研究基盤を有効に活用するためには、双方向性を持つ共同利用・共同研究の積極的な推進が必要である。

大学における研究としては、学内協力の推進等自主的に競争力を高める施策も実施し、研究拠点としての学術的評価を高めることが双方向性ある共同研究の受け皿となるためにも必須である。人材養成の上でも、世界的な研究ビジョンを持った新たなリーダーの育成を学生教育に並行して重視すべきである。

そのため、核融合科学研究所や日本原子力研究所等とのより強い連携を図る等、大学における先駆的・独創的研究の積極的な支援の方策を共同利用・共同研究をベースとして進めることが必要である。

## (3) 日本原子力研究所及び新法人の役割と共同研究の強化

日本原子力研究所については、国からの付託によるITERを中心とするトカマク型核融合システムの開発研究を推進する役割が求められており、核燃料サイクル開発機構との統合による新法人においても、ITER計画、トカマク炉心プラズマ開発、炉工学開発を我が国の中核的な機関として推進し、核融合開発研究に必要な人材育成を進

めることが必要である。

現在、日本原子力研究所では、トカマク(JT-60)等による研究を大学、核融合科学研究所の研究者等との共同企画・共同研究に供する努力がなされている。この一環としてJT-60では、一部の研究テーマのリーダーを大学等の研究者とし、日本原子力研究所と大学等が一体となって研究を実施する試みがなされており成果が上がっている。今後、ITERを中心として長期的な人材の育成が必須となる状況を踏まえ、これを発展させた共同研究の運営体制を構築することは、我が国の核融合開発研究に不可欠である。このため、JT-60をトカマク国内共同研究の中核として位置づけ共同研究を推進するとともに、ITERの動向を踏まえつつ、トカマク国内重点化装置への転換を図る必要がある。

また、炉工学分野では、核融合材料照射試験装置計画を大学等との連携の下で推進する役割、ブランケット、超伝導、加熱・電流駆動を含む所要の開発研究を、我が国の中核機関として推進する役割が求められる。

平成17年度に予定される独立行政法人化後も、新法人に期待される核融合開発研究の中核機関として果たすべき役割は、より一層強く求められる。従って、トカマク国内重点化装置への転換の前後に関わらず、新法人に課せられる開発研究の目標の達成と継続的な人材の育成をより効果的に進めるために共同企画・共同研究の運用体制を早期に確立することが強く望まれる。

#### (4) 共同利用・共同研究促進について

すでに述べたように、これまで長年にわたりプラズマ研究を担ってきた多数の実験装置を整理、重点化・効率化し、トカマク、ヘリカル、レーザー、炉工学の大型装置による展開、さらには新たな可能性への挑戦を図っていく中で、共同利用・共同研究の推進が極めて重要である。以下に具体的な2つの点を示す。

##### ① 双方向的共同研究の促進

各機関にある装置が整理、重点化される中で、大学や研究機関にある装置や研究環境を利用して、双方向的に共同研究を可能にすることが研究機会を増やすための重要な施策になるものと考えられる。従来の共同研究は、大学の研究者が大学共同利用機関を研究の現場として共同研究を行うことが想定されていたが、今後の核融合研究の発展のためには、その逆の研究者の動き、すなわち、共同利用研究機関の研究者が大学(講座、センター、研究所等)、研究機関等へ出向いて共同研究を実施することが両者の研究資源の相乗的な活用のために必要になる。そのため、双方向性のある共同研究を制度

的に定める等新たな方策が必要になる。

なお、具体的な課題として、大学での先駆的実験への他機関からの参加、LHD 計画共同研究のようなシステム（大学—大学間の研究者派遣のサポート）、必要な研究経費等の拡充、日本原子力研究所等の研究機関への研究参加機会及び共同研究費の充実、等が挙げられる。

## ② 連携研究の実施

これら共同研究の中でも特に、相当規模の人的資源、物的資源、知的資源を互いに有効利用する等の連携研究の方策については、特別な措置が必要になることが想定されるため、これを具体的に検討していくことが、共同研究の推進のために特に有意義であると考えられる。

## 5. 重点化後の人材育成の在り方

実現まで長期の間を要する核融合研究において、ITER計画のような国際的大型プロジェクトを成功させ、かつ我が国が主導的役割を担うためには、高度な専門教育に基づいた不断の人材育成が必須である。重点化後の人材育成においては、共同利用・共同研究の効率的な活用を踏まえ、研究及び教育が最適化されるような適正な競争的環境の設定、研究及び研究者の積極的な交流・流動化を可能とする組織・制度設計が必要となる。

人材育成にとって、優秀な若手研究者が最先端の研究の場に身を置けるような環境整備が肝要である。具体的には、国際的レベルの大型実験装置への直接的関与、及び大学等の得意とする機動的な小規模装置での萌芽的・独創的研究への参加等を挙げることができる。人材育成においては、このような多様かつ魅力ある研究の機会を多くの研究者に提供することが重要である。

大学以外の研究機関において行われている高度専門性養成への努力に鑑みると、大学と研究機関の連携・協力の下での人材育成の枠組みの検討が必要である。学生教育を行う上で、他の大学法人等へ学生が長期滞在することも今後増えることも予想され、対応する制度設計が必要となる。学生教育の観点からも相応しい、旅費の仕組み、受け入れ機関の身分等の整備、受入先でのリサーチアシスタント等の大学院生の経費の新設、学生宿泊施設の整備等を早急に検討し、遅滞なく実現することが期待される。従って、人材育成においても、共同利用・共同研究促進措置や、新たな可能性への挑戦への措置を十分に活用することが肝要である。

## 6. まとめ

WGでは、核融合研究を進めるための学術・開発両面からの貢献の必要性に基づき、従来の複数の方式による炉開発路線から、重点化・効率化された路線への転換（パラダイムシフト）を進めるための検討を行い、報告書を取りまとめた。本報告書では、今後の我が国の核融合研究についてのグランドデザインを定めるとともに、これまで長期にわたり核融合研究を担ってきた多数の実験装置を整理し重点化・効率化を図ること、共同利用・共同研究を強化推進することを提言し、併せて新たな可能性を目指した研究、不断の人材育成等を可能とする方策が必要なことを述べている。

ITER計画によって核燃焼プラズマを用いた研究機会が約10年後に実現することに鑑み、30年程度を目途に核融合炉を早期に実現すること、並びにさらに優れた核融合炉の可能性を追求するためには、その進行を制限する項目と課題（クリティカルパス）を定め、核融合研究を進める必要がある。従って、WGでは、研究者コミュニティによる既存の研究計画と提案された重点化すべき計画についての評価を行い、今後重点化すべき課題を、トカマク（トカマク国内重点化装置計画）、炉工学（核融合材料試験装置計画）、レーザー（レーザー高速点火計画）の3つに絞り込み、これに既存のヘリカル（LHD）を加えて4つの重点化の柱を策定した。

WGでは、研究計画の中核となる国内装置（JT-60及びそれに続くトカマク国内重点化装置、LHD、GEKKO-XII及びそれに続くレーザー高速点火装置）を共同研究重点化装置として位置づけ、国際協力による炉工学分野の核融合材料試験装置（IFMIF）と併せて、共同利用・共同研究を積極的に促進することを提案するものである。その際、重点化計画の基盤となるJT-60とGEKKO-XIIに関しては、次期装置建設に合わせて計画を完了させる必要がある。また、重点化の柱となる共同研究重点化装置以外の既存装置については、然るべき時期に計画を完了することが必要になると判断した。ただし、斬新な研究への展開による装置の運転延長の提案は、新たな可能性を目指した研究の候補として、次の展開につながり得るものである。

一方、大型の装置への重点化と併せて、萌芽的・独創的なアイデアを積極的に伸ばす方策と人材育成の方策を確保することは、大変重要な課題である。我が国の学術研究の振興のためには、研究者が新たな可能性を目指した研究の機会を得てこそ独自性の高い研究を展開し、優秀な人材を育てることのできる環境が整うものである。従って、重点化後の当該分野の研究の推進のため、研究者コミュニティへの責任を負う大学共同利用機関等の共同利用・共同研究に関わる機能を活用して、新たな可能性に挑戦できる措置の実現が是非とも必要である。

本報告書が提言する今後の核融合研究の重点化と共同利用・共同研究の推進のためには、国の施策に反映されるべき具体的な課題の解決が必要である。そのため、今後も、研究者コミュニティ内の継続的な意思疎通を図り、併せて行政との接点を維持す

ることを目的として、本WGのような審議の場が継続的に設置されることが望まれる。

## 資料 2

核融合科学研究所運営会議共同研究委員会規則

核融合科学研究所運営会議共同研究委員会規則

制 定 平成16年 7月13日 規則第22号  
最終改正 平成18年12月22日

(趣旨)

第1条 大学共同利用機関法人自然科学研究機構運営会議規程(平成16年自機規程第17号)第9条第2項の規定に基づく核融合科学研究所運営会議(以下「運営会議」という。)に置く核融合科学研究所運営会議共同研究委員会(以下「委員会」という。)の組織運営に関しては、この規則の定めるところによる。

(任務)

第2条 委員会は、核融合科学研究所(以下「研究所」という。)において実施する共同研究の計画及び運営に関する事項を調査審議する。

(組織)

第3条 委員会は、次に掲げる委員をもって組織する。

- (1) 研究所内及び研究所外の運営会議委員各8名
  - (2) 核融合科学又はこれに関連する分野の研究に従事する者36名以内
- 2 前項第1号の委員は、運営会議で選出する。
- 3 第1項第2号の委員は、運営会議の議を経て、所長が委嘱する。

(任期)

第4条 前条第1項の委員の任期は、2年とし、再任を妨げない。

2 前項の委員に欠員が生じたときは、その都度補充する。この場合における委員の任期は、前任者の残任期間とする。

(委員長)

第5条 委員会に委員長を置く。

- 2 委員長は、第3条第1項第1号の研究所内の運営会議委員のうちから運営会議で選出する。
- 3 委員長は、委員会を招集し、その議長となる。ただし、委員長に事故があるときは、あらかじめ委員長が指名した者が議長となる。

(専門委員会)

第6条 委員会に、その審議すべき事項を分担させるため、次の専門委員会を置く。

- (1) 核融合研究共同研究委員会
  - (2) LHD計画共同研究委員会
  - (3) 双方向型共同研究委員会
- 2 専門委員会の委員は、第3条第1項に定める委員の中から運営会議で選出する。
- 3 専門委員会に、幹事長及び幹事を置く。
- 4 専門委員会は、必要に応じ開催する。

(定足数及び議決数)

第7条 会議は、委員の過半数の出席がなければ、議事を開き議決することができない。

2 議事は、出席委員の過半数をもって決し、可否同数のときは、議長の決するところによる。

(意見の聴取)

第8条 委員会は、必要に応じて、委員以外の者の出席を求め、その意見を聴くことができる。

(庶務)

第9条 委員会の庶務は、管理部研究推進課において処理する。

附 則

1 この規則は、平成16年4月1日から施行する。

2 この規則の施行後最初に選出及び委嘱される第3条第1項の委員の任期は、第4条第1項の規定にかかわらず、平成17年3月31日までとする。

附 則

この規則は、平成18年12月22日から施行し、平成18年10月1日から適用する。

## 資料 3

双方向型共同研究開始前後の各センターの予算額の推移

## 双方向型共同研究開始前後の各センターの予算額の推移

### 筑波大学プラズマ研究センター予算の推移（括弧内は双方向型からの予算、内数）

平成 14 年度	303,019,000	
平成 15 年度	304,024,000	
平成 16 年度	288,222,000	(150,282,000)
平成 17 年度	297,207,000	(150,282,000)
平成 18 年度	228,626,000	(105,427,000)
平成 19 年度	282,062,000	(150,282,000)
平成 20 年度	271,081,000	(140,000,000)

### 京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター

（括弧内は双方向型からの予算、内数）

平成 13 年度	505,342,000	[附属施設経費]
平成 14 年度	421,612,000	
平成 15 年度	420,709,000	
平成 16 年度	412,568,000	[附属施設経費] (150,096,000)
平成 17 年度	394,918,000	(150,096,000)
平成 18 年度	342,774,000	(105,297,000)
平成 19 年度	343,264,000	(105,787,000)
平成 20 年度	未定	(166,000,000)

### 大阪大学レーザーエネルギー学研究中心

平成 16 年に統合したテラヘルツ分を除く運営交付金と双方向型からの予算。科研等の競争的資金は含まれていない。（括弧内は双方向型からの予算、内数）

平成 15 年度	757,664,000	
平成 16 年度	778,819,000	(93,820,000 )
平成 17 年度	777,793,000	(93,820,000 )
平成 18 年度	999,160,000	(93,300,000 )
平成 19 年度	1,103,188,000	(93,790,000 )
平成 20 年度	1,132,062,000	(93,000,000 )

#### 4. 九州大学応用力学研究所附属高温プラズマ力学研究センター

(括弧内は双方向型からの予算、内数)

平成 13 年度	
平成 14 年度	
平成 15 年度	391,256,000
平成 16 年度	394,053,000 (229,651,000 )
平成 17 年度	395,408,000 (229,651,000 )
平成 18 年度	530,081,000 (368,951,000 )
平成 19 年度	482,535,000 (323,016,000 )
平成 20 年度	未定 (253,775,000 )

#### 双方向型共同研究予算配分 (本文中のものを再掲)

	平成 1 6 年度	平成 1 7 年度	平成 1 8 年度	平成 1 9 年度
全体	623,849,000	623,849,000	673,675,000	673,575,000
筑波大学	150,282,000	150,282,000	105,427,000	150,282,000
京都大学	150,096,000	150,096,000	105,297,000	105,787,000
大阪大学	93,820,000	93,820,000	93,300,000	93,790,000
九州大学	229,651,000	229,651,000	368,951,000	323,016,000
専門部会			700,000	700,000

## 資料 4

双方向型共同研究開始に伴う各センターに於ける共同研究形態の変化

## 双方向型共同研究開始に伴う各センターに於ける共同研究形態の変化

### 1. 筑波大学プラズマ研究センター

	双方向型共同研究開始前	双方向型共同研究開始後
形態	研究者個人の努力で、両者の興味が合ったテーマで個別に行ってきた。	<p>大学の中期目標・中期計画に位置づけられ、全国共同利用センターとして、組織的に、共同研究を実施し、学外の参加者は共同研究員として学長により発令される。センターの中期計画、中期目標にあり、かつ、双方向型共同研究の要素還元型研究の研究テーマに沿った内容を中心に、幅広く共同研究課題を募集している。主たる研究テーマは、当センターの特長であり、核融合実用の為に必要不可欠である「電位／電場によるプラズマ閉じ込め向上の物理研究」であるが、これに関連して本装置形式の独自性を広く活用した研究も挙げられる。</p> <p>上記方針に基づいて、公募案内が作成される。応募された課題は、以下に示す審査過程を経て採択され、世話人と連携を取って実行に移される。</p>
運営状況	研究者が個人レベルで直接連絡を取り合っていた。	<p>採択された共同研究課題のうち、実験に関するものは、センターでの実験スケジュールとの整合性が取られる。ガンマ10では、例年5月から7月までの比較的長期の実験シリーズ、8月下旬から9月の全学停電まで、停電後プラズマ・核融合学会まで、の2度の比較的短期（1ヶ月前後）の実験シリーズに加えて、状況に応じて12月と1月に1ヶ月以内の短い実験シリーズが行われている。</p> <p>具体的な実験スケジュールについては、各課題において担当しているセンター内世話人と個々の共同研究者が連絡を取り合っており、実際の実験執行にあたっての実現性とその範囲、具体的なスケジュール等を決定している。センターでは、実験予定を議論するミーティングが毎週1度開かれており、共同研究に関する実験予定はこの場において調整される。また、実験期間中を問わず、随時に共同研究者からの実験提案や希望を受け付けている。</p>

<p>募集と 審査</p>	<p>特に募集は行っていなかった。センターの研究者の個人の判断で行われていた。</p>	<p>センターにおける共同研究テーマの柱は、当センターの特長であり、核融合実用の為に必要不可欠である「電位／電場によるプラズマ閉じ込め向上の物理研究」である。また、これに関連して本装置形式の独自性を活用した研究も挙げられる。上記方針に基づいて、予めセンターにおいて作成した募集案を元に、核融合科学研究所において公募案内が取り纏められ、核融合科学研究所の他の共同研究と同時に公募を行っている。</p> <p>応募された共同研究課題は、センター内委員による課題実施の妥当性について審査され、打診のあった段階から、各課題において担当しているセンター内世話人を通じて検討が行われる。最終的には、核融合科学研究所における双方向型共同研究委員会で審査される。</p>
<p>実績</p>	<p>個別の研究者の成果報告に反映されていた。</p>	<p>センター内の共同研究者の成果報告ばかりでなく、中期計画に基づくセンター全体の大きなテーマに沿った成果が数多く挙げられるようになった。</p> <p>平成16年度から19年度まで毎年14件採択されており、例年70名程度の学外の研究者が参加している。これまでに113編の論文（うち、筑波大以外の第1著者46編）および国際会議棟の発表者は274件（同122件）が発表されている。年間の総発表件数は150～200件／年と開始前の約120件／年の約5割増となった。</p> <p>特に、センターにおける中期計画中期目標の基盤である電位形成・制御に拘わる成果および、直接発電の実証に係る著しい成果が得られている。</p>
<p>学内評価</p>	<p>教員の個人レベルでの論文等の成果を見ているのみで、センターとしての成果については、それ程大きく取り挙げられていなかった。</p>	<p>中期計画に基づいた成果として大きく学内での評価が高まったと見られる。特に平成18年度に行われた筑波大における初めての外部評価を踏まえ、年度ごとの、中期目標・計画の見直しで、双方向型共同研究の進展が評価され、双方向型共同研究を「さらに」拡大し、との表現が加わった。また、筑波大と自然科学研究機構との核融合研究協力協定締結も双方向型共同研究の進展の成果として好評価を受けている。</p>

## 2. 京都大学京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター

	双方向型共同研究開始前	双方向型共同研究開始後
形態	<p>ヘリオトロンJ共同研究は、エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センターにおける基幹装置プロジェクト(高度エネルギー機能変換実験装置プラズマ実験装置部プロジェクト)として平成8年の新研究所発足と同時に立ち上がったものである。本共同研究は研究所における3つの大部門(エネルギー生成研究部門、エネルギー機能変換研究部門、エネルギー利用過程研究部門)の部門間共同研究として出発しており、新規基幹装置による磁場核融合のための先進的磁場閉じ込め配位の探求を行うため、所内だけでなく所外の研究者、特に京都大学大学院エネルギー科学研究科及び核融合科学研究所(とくにH15以降CHS/LHDグループ)の研究者との密接な協力関係のもとに共同研究グループが形成された。</p>	<p>エネルギー複合機構研究センターの改組後の重点研究課題である「プラズマエネルギーに関する学理・技術の新領域開拓」をミッションとするセンター共同研究をヘリオトロンJ装置を活用して実施するとともに、将来の核融合炉心プラズマの高性能化に必要とされる要素還元研究として、先進的磁場配位における磁場分布制御技術をもちいたプラズマの輸送・安定性改善の研究を核融合科学研究所との双方向型共同研究(H16以降)において推進している。センター及び双方向型共同研究の募集要項に掲げる研究課題は、毎年度見直しを行い、継続および新規に設定すべきものを決定している。学外からの共同研究課題、共同研究者が増大し、これらの共同研究の量的拡大が、研究内容の質的向上へ転換できる共同研究の形態の実現を期待している。</p>
運営状況	<p>センターにおける基幹装置プロジェクト(ヘリオトロンJ, DuET/MUSTER, KU-FEL等)及び公募型共同研究については、研究所において全体計画及び経費配分が決定される。この決定に基づき、ヘリオトロンJ共同研究の運転経費(光熱水料、保守点検費等)は基幹装置プロジェクト経費で充当され、個々のテーマ研究は主にセンター公募型共同研究の採択課題経費で遂行されてきた。ヘリオトロンJ共同研究の運営に関する具体的な計画の立案・遂行と、結果の解析・評価の検討は、共同研究者全員が参画するヘリオトロンJ実験会議(JOB)において行われてきた。</p> <p>またセンターの運営に関する重要事項についてセンター長の諮問に応ずる運営協議会(所内6-7名、所外4-5名)がおかれ、センター活動の活性化のための協議を、少なくとも年1回以上行っている。</p>	<p>ヘリオトロンJ共同研究の運営に関する具体的な計画の立案・遂行と、結果の解析・評価の検討は、共同研究者全員が参画するヘリオトロンJ実験会議(JOB)において行われている。特に、双方向型共同研究については、所外の委員(8名)を含むヘリオトロンJ双方向型共同研究委員会(11名)の活動と整合を取りつつ、全体の共同研究の運営を行っている。双方向型共同研究については、共同研究スケジュールおよび実験時間等をセンターにおける実験計画と整合させる必要がある、個々の共同研究者と連絡を取り合い、計画の実現性、可能性の探索などを検討、具体的な実施計画を決定している。実験参加は比較的自由に設定することが可能である。年間実験スケジュールは年度初めに作成しているが、平成19年度からはこれをWeb上に掲載し、変更があった場合逐次改訂するようにした。外部の共同研究者がいつでも最新の実験スケジュールを参照できるようになった。</p>

<p>募集と 審査</p>	<p>公募型共同研究は、研究所が設定した重点課題：(1) プラズマエネルギー複合領域研究、(2) バイオエネルギー複合領域研究、(3) 光エネルギー複合領域研究について、センターにより、毎年、所内外から公募が行われ、センター研究計画委員会（所内 13-15 名）が、基盤共同研究、奨励共同研究、企画調査共同研究等のカテゴリごとに審査し、課題採択を行って、全体計画とその経費配分を決定する。</p>	<p>双方向型共同研究の募集及び審査は核融合研の双方向型共同研究委員会で行われる。センターでの共同研究の受け入れ可能性を事前に審査するとともに、受け入れ決定プロセスの透明性・公平性を高めるため、平成 19 年度からセンターにおけるヘリオトロン J 双方向型共同研究委員会の活動が開始され、6 月に第 1 回委員会を開催、11 名の委員（外部から 8 名）により平成 19 年度共同研究計画の在り方について審議を行い、外部により開かれた形での意思決定を行うようにした。平成 20 年度の双方向型共同研究からは、課題申請を含めて、ヘリオトロン J 双方向型共同研究の計画全般に渡って、同委員会で検討され、運用されることとなる。</p>
<p>実績</p>	<p>ヘリオトロン J に関わるセンター公募型共同研究は、センター研究計画委員会の審査によって、センターの全採択課題件数（約 50 件）のうち 10-15 件が採択されていた。また、参加研究者数は例年、約 40 名程度であった。</p> <p>センター共同研究の実績については、センター共同研究成果報告会及びセンター運営協議会において、外部からのご意見、ご評価もいただき、それを次年度の全体計画に反映させている。</p>	<p>ヘリオトロン J に関わるセンター共同研究 10-15 件に加えて、双方向型共同研究 10 数件の課題の採択によって、合計約 25 件程度の公募課題採択へと倍増している。また、参加研究者数も 100 名以上に倍増している。共同研究活動が大いに活性化した。実績については核融合研の双方向型共同研究成果報告会で報告・討論している。</p> <p>ヘリオトロン J の共同研究計画について核融合所の双方向型共同委員会でも相互的にチェックされ、さらに広い全国的なコミュニティの意見が反映されるようになった。</p>
<p>学内評価</p>	<p>京都大学中期計画（H16. 6. 3）における「全国共同研究、学内共同研究等に関する具体的方策」の項において、「研究分野の特性に応じて大学共同利用機関法人との連携を強化することとし、<u>プラズマエネルギー研究については核融合科学研究所との間で双方向の共同研究等を推進する</u>」と記載された。</p>	<p>(a) H18. 4. 1 に実施されたセンター改組に関わる学内の審議において、審議を担当した京都大学本部企画委員会の報告書「エネルギー複合機構研究センターの在り方（研究体制の改組・再編）について」において、「エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センターは、プラズマエネルギー、バイオエネルギー、光エネルギーの<u>3つの重点研究領域で多くの優れた研究成果を上げてきており、直近の外部評価においても高い評価を得ている</u>」と記載された。</p> <p>(b) H19. 11 に実施した京都大学エネルギー理工学研究所外部評価（重点複合領域研究）報告書において「世界的規模のヘリカル系研究ネットワークの主要拠点として、また<u>双方向型共同研究を推進している拠点の1つとして活躍されていることは高く評価できる</u>」と記載された。</p>

### 3. 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

	双方向型共同研究開始前	双方向型共同研究開始後
形態	本センターの研究者及びセンター外の研究者が行う共同研究であって、センターの大型装置を用いるA、各個装置を用いるB、研究会形式のB、研究経費を伴わないSの区分で構成。	左記区分のA、及びBで核融合関連研究を双方向型共同研究として独立したカテゴリとした。さらに平成18年度からの本センターの全国共同利用施設化に伴い、グループ形成を新設し、新しい研究領域の立ち上げを支援するようにした。
運営状況	センターで行う共同研究のための研究費の支援、センター外の共同研究者がセンターに来る旅費の支援を行った。結果はレーザー研シンポジウムで発表される。	研究費の支援は以前と同等であり、双方向型共同研究ではセンター内外の研究者の相互研究交流のための旅費、及び、核融合科学研究所に赴く旅費を支援している。グループ形成では実情に合わせた開催地までの旅費を支援している。双方向の研究結果は核融合科学研究所での報告会で行われる。
募集と審査	募集はレーザー研ホームページでの公募案内、書類の送付で行われる。審査はセンター内の複数の研究者による新規性、重要性、核融合への貢献の見地で審査する。	従来型はレーザー研の共同研究審査会において提案の新規性、重要性、高エネルギー密度科学への貢献について審議され、採択、配分額が決定される。双方向型は核融合科学研究所双方向型共同研究委員会に置いて審議され、採否と予算額が決定される。
実績	平成14年、15年の例では年間160～170人日の研究交流があった。	双方向開始後の平成16年度以降は、本センターの全国共同利用施設化に向けた取り組みもあり、年間250～350人日の研究交流がある。
学内評価		大阪大学の中期計画では広い裾野を維持するために、学外の先端的研究機関との交流を活発に保ちつつ、研究に密着した教育体制や教育研究プログラムを確立する一環として、双方向型共同研究は今後進めるべきものと位置づけられている。

#### 4. 九州大学応用力学研究所附属高温プラズマ力学研究センター

	双方向型共同研究開始前	双方向型共同研究開始後
形態	九大応用力学研究所としての共同研究（全国共同利用）のみであり、かつ予算的にも非常に限られたものであった	一定規模の予算措置が可能な双方向型共同研究がスタートしたことにより、実質的な全国大学および研究所との共同研究が開始された。両者の共同研究の仕分け（住み分け）としては、九大応用力学研究所の共同研究（全国共同利用）は「萌芽的課題」に焦点を当て、双方向型共同研究はセンターの目指すプロジェクト的共同研究に焦点を絞ったものになっている。
運営状況	九大応用力学研究所の共同利用委員会および同専門部会（最終的には運営協議会）による運営を進めている。	双方向型共同研究に関しては、九大の双方向型共同研究を議論する組織「QUEST 実験推進会議」を置き学外者をコーディネーター（幹事はセンター）にお願いして各年度の共同研究予算の配分案決定を含めて委ねる方式を採ってきた。また、この方式は九大が提案し、双方向型共同研究委員会で了解を得て推進してきた。 さらに、装置の建設・保守などに関わる月1回の検討会議も、九大以外のメンバーに参加いただいて推進している。
募集と審査	九大応用力学研究所としての共同研究公募を行ってきた。	九大応用力学研究所としての共同研究公募を行うと同時に、核融合科学研究所を軸とした双方向型共同研究の公募を行ってきた（並行的公募、審査等）。
実績	年間10数件の応募と採択、また1件あたりの予算規模は概略18万円の実績である。	九大応力研の共同研究（年間10数件の応募と採択）に加えて、双方向型共同研究では年間10数件、平均予算概略140万円の採択）である。
学内評価	中期計画に記載され実施してきている。	それぞれ、中期計画に記載され実施してきている。

## 資料 5

成果詳細（論文リスト、学会発表リスト、大学院教育、成果公表、等）

委員会では以下の目次に従い、具体的なリストが提出されたが、ここでは目次と掲載数のみ纏めて記載する。

## 目次

- 1 筑波大学プラズマ研究センター
  - 論文リスト 189編 (他大学著者を含む)
  - 学会等における発表リスト 国際224編、 国内307編
  - 博士・修士論文リスト 博士 6編、 修士 33編
  - 新聞・雑誌等での紹介記事 「エネルギー通信」など3編
  - 成果の詳細
  
- 2 京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター
  - 論文リスト 31編
  - 学会等における発表リスト 国際45編、 国内101編
  - 博士・修士論文リスト 博士 4編、 修士 40編
  - 新聞・雑誌等での紹介記事 読売新聞 1編
  - 成果の詳細
  
- 3 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター
  - 論文リスト 202編 (他大学著者を含む)
  - 学会等における発表リスト 国際154編、 国内75編
  - 博士・修士論文リスト 博士39編、 修士100編
  - 新聞・雑誌等での紹介記事
  - 成果の詳細
  
- 4 九州大学応用力学研究所附属高温プラズマ力学研究センター
  - 論文リスト 34編
  - 学会等における発表リスト 国際26編
  - 博士・修士論文リスト 博士4編、 修士13編
  - 新聞・雑誌等での紹介記事
  - 成果の詳細
  
- 5 核融合科学研究所
  - 論文リスト LHD関係946編中評価の高いものを記載
  - 学会等における発表リスト 基調・レビュー・招待講演52編を記載
  - 博士・修士論文リスト 総合研究大学院大学は博士のみ25編
  - 新聞・雑誌等での紹介記事 読売新聞、朝日新聞など16編
  - 成果の詳細

## 資料 6

### 用語集

## 用語集

### I. はじめに

#### ○ 大型ヘリカル装置 (LHD)

岐阜県土岐市にある核融合科学研究所の主装置であり、2本のコイルをペアにしてひねりながらドーナツ状に配置し、コイルに電流を流して作られる磁場によりプラズマを閉じ込める方式（ヘリオトロン方式）の装置である。全てのコイルが超伝導線で作られているものとして世界最大の装置である。

#### ○ 高速点火(Fast Ignition)

レーザー核融合点火方式の一つ。燃料を比較的低温、高密度に圧縮し、超高強度レーザーで点火燃焼させる方法。従来の中心点火方式に比べて1/10程度のレーザーエネルギーで点火燃焼を実現できる可能性がある。

#### ○ トカマク国内重点化装置

ドーナツ状に作った閉じた磁力線内にプラズマを置き、その中に電流を流すことでプラズマ自身を閉じ込める磁場構造を作るのがトカマク方式であるが、その重点化された装置とされた茨城県那珂町にある日本原子力研究開発機構が擁するJT-60SAのこと。現在あるJT-60Uを改造・超伝導化して作り上げる。

#### ○ 核融合材料試験装置

核融合で発生する14MeV中性子による材料疲労を試験するための設備。現状では14MeVの強力な中性子源はないので、この中性子源を新たに作る事が中心となる。

#### ○ 環状（トロイダル）プラズマ

ヘリカル方式やトカマク方式はドーナツ状になった磁場内にプラズマを閉じ込めるため、これらを総称して環状（トロイダル）プラズマと呼ぶ。方式が違って環状であることから由来する共通する物理がある。

#### ○ ベータ ( $\beta$ ) 値

プラズマの圧力とそれを閉じ込める磁場の圧力との比。核融合を起こすプラズマの圧力は数気圧なのでなるべく低い圧力の磁場で閉じ込めることが出来れば磁場発生に要する投資は少なく経済的な炉が実現する。普通%で表され、核融合炉が経済的に成り立つには5%以上が必要とされている。

#### ○ ITER（国際熱核融合炉）International Thermonuclear Energy Reactor

国際協力の下、核融合反応をプラズマの研究を行うための計画。フランスのカダラッシュにトカマク型の装置を建設する。現在は欧州、日本、ロシア、米国、中国、韓国、インドの7極が参加している。

#### ○ TRIAM-1M

九州大学応用力学研究所の中型超伝導トカマク装置。トカマクの定常運転のパイオニアとして数々の運転記録を樹立した。

### ○球状トーラス (Spherical Torus)

ドーナツ状のトカマクのドーナツの半径とドーナツの断面の半径との比(アスペクト比)が小さく、球状に近くなったもの。ベータ値の高い運転が出来ると期待されている。

## II. 双方向型共同研究の創設と目的

### ○ヘリオトロン磁場配位

京都大学の故宇尾光治博士によって提唱された核融合プラズマ磁場閉じ込め方式。螺旋状の周回コイルに電流を流して閉じ込め磁場を作るヘリカル方式の一つ。

### ○VPN (Virtual Private Network)

公衆回線を使ったLANへの接続サービス。所外からのアクセス時に利用する。

### ○ssh (Secure SHell)

主にUNIXコンピュータで利用される、ネットワークを介して別のコンピュータにログインしたり、遠隔地のマシンでコマンドを実行したり、他のマシンへファイルを移動したりするためプログラム。

### ○X Window

UNIX系OSで利用されるグラフィカルユーザインターフェース(GUI)環境。

### ○慣性核融合

核融合を起こすにはプラズマの温度、密度、閉じ込め時間がある値以上にしなくてはならないが、この内、密度と閉じ込め時間はその積が重要である。慣性核融合は個体密度の千倍以上の濃いプラズマを瞬時(ナノ秒程度)に作り、加熱することで拡散する間を与えず核融合を起こす方式である。レーザービームや重イオンビームでターゲットを圧縮加熱する。

### ○FIREXプロジェクト

Fast Ignition Realization Experimentの略で、阪大レーザー研で進められている高速点火原理実証実験プロジェクト。その第1期では爆縮プラズマの追加熱レーザー照射による点火温度までの加熱を目標としている。

### ○PWI (Plasma Wall Interaction) プラズマ・壁相互作用

プラズマを構成する粒子やプラズマから発生する放射などは最終的にプラズマを囲む容器壁に当たることになり、そこで壁を構成する材料と様々な物理・化学的な相互作用を起こす。それらを総称する言葉。

## III. 双方型共同研究の遂行と成果

○ ローカルアイランドダイバータ(Local Island Divertor LID)

ドーナツ状のプラズマのドーナツに沿った方向(トーラス方向)に周期的な強弱を伴う磁場を重畳することにより、磁力線構造に磁気島と呼ばれる周期的な閉曲面構造を作り出し、そこに集まる粒子を強制排気する装置。

Ⅲ－３－１ 筑波大学

○ Hモード(H-mode)

加熱入力があるしきい値を越えた時、プラズマ表面付近で急激に温度・密度が高い分布に遷移し、エネルギー閉じ込め時間が改善する閉じ込め状態。これに対して改善前の状態をLモード(L-mode)と呼ぶ。

○ 内部/周辺部熱輸送障壁(ITB/ETB)

プラズマ内部または周辺部に現れる温度・密度が急激に変化する層状の領域のことで、磁力線に直角方向のエネルギー輸送が大きく妨げられプラズマ内部の閉じ込めが著しく改善される。

○ ジャイロトロン

中空状の相対論的電子ビームが電子銃から引き出され、磁気圧縮をうけて共振器に入り電磁場のエネルギーに変換され、ミリ波を発振させる電子管のこと。

○ 電子サイクロトロン共鳴

電子が磁場中で行う旋回運動を電子サイクロトロン運動と呼び、その旋回振動数を電子サイクロトロン振動数と呼ぶ。プラズマ中の波動の周波数がこの振動数と一致すると電子が共鳴的に加速または減速を受ける。

○ 径方向電場

プラズマ中のイオンと電子の数が不均衡となり、準中性が破れるとそこに電場が発生する。磁力線方向を軸とする円筒プラズマにおいて、不均衡の結果半径方向に発生する電場を径方向電場と呼ぶ。

○ シア

空間的な変化率のこと。プラズマ中では電場が自律的に構造を持ち、その変化率がプラズマの輸送に関わる性質を決めることがある。

○ ECH

電子サイクロトロン加熱( Electron Cyclotron Heating )で、波動の周波数が電子のサイクロトロン振動数と等しくなるサイクロトロン共鳴を利用して電子を加熱する。

Ⅲ－３－２ 京都大学

- 準等磁場配位  
ヘリカル系のプラズマ磁場閉じ込め方式の閉じ込め改善のための設計法の一つで、磁場の強弱に起因するプラズマ粒子の磁気面から離れてゆく運動を低減するために求められた磁場配位。
- 真空磁気面  
磁力線が位相幾何学的に閉じた面を作ると荷電粒子は磁力線に巻き付くのでその面上に滞在することになる。この面を磁気面と呼ぶ。互いに交わることのない積層の磁気面群を作ってプラズマを閉じ込めるのが磁場閉じ込め方式の原理である。この面はプラズマの存在によって変形を受けるが、プラズマの無い状態の磁気面を真空磁気面と呼ぶ。
- 無電流運転  
トカマクと異なりヘリカル装置ではプラズマを閉じ込めるためにプラズマ中に電流を積極的に流す必要がない。このことを強調した表現。
- MHD 安定性  
電磁流体力学から導き出されるプラズマ中の揺動などが成長するいわゆる不安定性が起きない状態のこと。
- NBI  
プラズマに高エネルギーの中性粒子ビームを入射して行うプラズマ加熱法である。NBIは中性粒子ビーム入射の略称。
- IC 電磁波  
イオンサイクロトロン周波数帯の電磁波を用いて行うプラズマ加熱法である。IC電磁波はイオンサイクロトロン周波数帯の略称。
- ISS95 則  
1995年に提案されたヘリカル系装置のエネルギー閉じ込め時間の経験則。電子密度、加熱パワー、装置サイズなどを経験則に代入するとプラズマのエネルギー閉じ込め時間を知ることができる。
- 自発的遷移現象  
プラズマが外部からの制御ではなく、自発的に1つの状態から他の状態に遷移すること。ここではプラズマの閉じ込めが遷移を伴って改善される現象をいう。
- 第2高調波  
基本波の2倍の周波数の波。
- ブートストラップ電流  
トーラスプラズマにおいて、定常的な径方向拡散はトロイダル方向の電流を伴う事が知られている。これらはプラズマ圧力の径方向勾配に比例する。この電流をブートストラップ電流という。
- ECCD (Electron Cyclotron Current Drive)  
電子サイクロトロン加熱を用いた電流駆動の略称。
- NBCD (Neutral Beam Current Drive)

中性粒子ビームによる電流駆動の略称。

- トロイダル電流  
トーラス方向に流れるプラズマ中の電流のこと。
- MHD 平衡  
電磁流体力学のもとで成立するプラズマの平衡のこと。
- 熱・粒子排出制御  
プラズマから外に出てくる熱および粒子を制御すること。
- フィラメント構造  
プラズマを閉じ込める磁力線はドーナツ面をひねりながら巡っている。従って空間的に局所的な現象が起こるとそれは磁力線方向に伝搬するので全体的に見るとひねられた紐状に見えることがある。この状態をフィラメントと呼んでいる。
- 実効磁場リップル  
トーラスプラズマの閉じ込め磁場は磁力線に沿って様々な要因で強度の強弱が存在する。プラズマの閉じ込めに関与するこれら磁力線に沿った磁場強度の変動の目安を実効磁場リップルと呼ぶ。
- 回轉變換  
トーラスプラズマの閉じ込め磁場はトーラス方向に追跡すると磁気面にそって捩じれている。このねじれのことを回轉變換と呼ぶ。
- 無衝突領域  
プラズマ粒子間のクーロン衝突がほとんど起きない温度・密度領域。
- 異常輸送  
プラズマの輸送現象で新古典輸送では説明できない部分のこと。
- 新古典輸送  
プラズマ粒子が磁力線に巻きつく運動（ラーマ運動）とクーロン衝突過程のみからなる拡散過程を古典輸送という。それに磁場に捕捉される粒子の運動も加味した輸送理論のこと。
- バンピー磁場  
磁場強度のトーラス方向の変動成分のこと。
- 自発電流  
外部回路によって誘起されたものではなくプラズマの中で自発的に発生する電流のこと。
- トロイダル成分  
トーラスにソレノイドコイルを巻きつけた場合にトーラス外側では磁場強度が弱く、内側では磁場強度が強くなる。このトーラス形状に起因する磁場強度の変動成分。
- ヘリカル成分  
ヘリカル系の磁場閉じ込め装置ではヘリカルコイルに近い部分で磁場強度が強く、遠い部分では弱くなる。このようなヘリカルコイルの巻き線則から決まる磁

場強度の変動成分。

○ 捕捉粒子

プラズマ粒子のうち磁場に垂直方向の速度成分が大きい粒子は、磁場強度の強い部分で反射され、磁場の弱い部分から抜けることができなくなる。この状態を「捕捉」といい、捕捉された状態の粒子を捕捉粒子と呼ぶ。

○ ヘリオトロン E

京都大学ヘリオトロン核融合研究センターに設置されたトーラスの大半径2.2m、小半径0.2m、磁場強度2 Tのヘリカル系プラズマ閉じ込め装置。ヘリオトロン磁場の原理検証実験が1980-90年代に行われた。

○ 最外殻磁気面

入れ子状のプラズマ閉じ込めのための磁気面のうち最も外側にある磁気面のこと。

○ 少数イオンモード

IC 電磁波加熱で利用される加熱モードで、プラズマイオンに他種のイオンを少量加えることによって加熱効率を上げることができる。その加熱モードの名称。

○ バルクイオン

少数イオンモードの場合の少数でない方のイオンのこと。

○ モンテカルロ計算

確率論を用いて物理現象を模擬する数値計算手法。

○ ダイバータープローブ

プラズマの最外殻磁気面の外側にある磁力線を工夫して、集中的に特定の真空容器壁面と交差するようにしたものがダイバーターである。そのような磁力線の近辺に設置した静電プローブのことを言う。

○ 非誘導トロイダル電流

外部コイルを用いて誘起されたもの（例えばトカマクのトロイダル電流）以外のトロイダル電流をいう。

○ HINT2

MHD 理論から平衡状態のプラズマを計算するコードの一つ。

○ 電子バーンシュタイン波 (E BW)

プラズマ中に励起される波のうち電子サイクロトロン波から派生する静電波。

○ カットオフ

プラズマ中で波が反射される場所で起こる現象。ここでは波の位相速度が無限大になる。

○ 静電波

波の波数ベクトルと電場の方向が一致した縦波のこと。

○ モード変換

ここではプラズマ中のある特徴を有する波が、他の波に変換されること。

○ 遅波 X-Bモード変換

プラズマ中の波にはいろいろな特徴を有するものがある。遅波は速波と対照されるもので位相速度が小さいものをいう。異常 (X) 波はプラズマ中の波動で磁場に影響されるもので、そうではない正常 (O) 波と対照的に定義されたものである。Bは電子バーンシュタイン波のことであり、遅波かつX波である波がバーンシュタイン波に変換されること。

- CHS装置  
核融合科学研究所で研究されたヘリカル系装置で大半径 1 m、プラズマ半径 0.2 m、磁場強度 2 Tのヘリカル型プラズマ閉じ込め装置。
- 縦長断面  
CHSやLHDではプラズマの断面形状が楕円であり、それがドーナツ状にひねられている。楕円断面形状が鉛直方向に長軸をもつプラズマのポロイダル断面（トラス中心軸を含む鉛直断面）を指す。
- ポート  
計測器、加熱装置を設置するためプラズマ閉じ込め装置の放電管に開けた穴のこと。
- 大半径方向  
トラスの回転対称軸を中心にして外側に向かう方向のこと。
- 強磁場側  
磁場の強さはプラズマ断面上で一定ではない。プラズマ断面で磁場の相対的に強い側。
- 高域混成共鳴(Upper Hybrid Resonance)  
異常 (X) 波の2つの共鳴のうち、周波数が高いほうの共鳴。低い方は低域混成共鳴(Lower Hybrid Resonance)と呼ばれる。
- ターゲットプラズマ  
追加熱を行うための種になるプラズマのこと。
- トムソン散乱  
電子の弾性散乱でコヒーレントでないものをいう。入射したレーザー光の反射から電子温度や密度の情報を得ることができる。
- Fisch-Boozer 効果  
ECHによる電流駆動でドップラーシフトした共鳴条件で決まるトロイダル方向に電流が駆動される効果。
- Ohkawa 効果  
電子が捕捉されることにより、Fisch-Boozer 効果とは逆方向に電流が駆動される効果。
- イオンテール  
熱平衡のマックスウェル分布から外れて、高エネルギー領域に存在するイオン分布のこと。
- 低域混成波

低域混成共鳴領域の波。

- 非等方マックスウェル分布  
速度分布が等方的でないマックスウェル分布。例えば、磁場方向とそれに垂直な方向の実効温度が異なる場合などはこれに対応する。
- 非中性プラズマ  
通常の電氣的に中性なプラズマでなく、例えば、電子プラズマのように電氣的に中性でないプラズマのこと。
- 乱流場  
プラズマが乱流的になっている場のこと。
- 低シア  
回転変換の径方向の変化率のことを磁気シアといい、その磁気シアが低い状態をいう。
- 帯状流  
流れが帯状に変化している状態を指す。例えば、木星表面に見える模様は大気が帯状流になっているため現れるものである。プラズマ中に流れの向きの異なる帯状流が重ね合わさって存在すると乱流の相関を分断し異常輸送が収まることが理論的・実験的に示された。

### III-3-3 大阪大学

- レーザー核融合  
核融合発電を実現しようとする一つの方式。重水素、三重水素混合燃料球にレーザーを照射し、高温高密度に圧縮し、点火燃焼に導く。核融合発電を実現するためには加熱に用いたレーザーエネルギーの100倍の核融合エネルギーを取り出す必要があり、この高利得への研究が当面の課題である。
- 高速点火(Fast Ignition)  
レーザー核融合点火方式の一つ。燃料を比較的低温、高密度に圧縮し、超高強度レーザーで点火燃焼させる方法。従来の中心点火方式に比べて1/10程度のレーザーエネルギーで点火燃焼を実現できる可能性がある。
- NIF  
National Ignition Facility の略。米国ローレンスリバモア研究所に建設されているレーザー核融合実験施設。198本のレーザービームから1.8MJのレーザーが取り出され、2010年代の前半には点火燃焼が実現される物と期待されている。
- LMJ  
Laser Mega Joule の略。フランスで建設されているレーザー核融合実験施設で、米国のNIFと同等の能力がある。およそ5年の遅れで点火燃焼を目指している。

- 飛程  
粒子が物質中を飛び、ほぼ停止するまでの距離。核融合で点火、燃焼が実現されるためには一つの核融合反応で生成した $\alpha$ 粒子がプラズマ中で衝突を繰り返して周囲のプラズマと同等の速度にまでエネルギーを放出し、その分プラズマを加熱しなければならない。
- アブレーション  
固体や液体の表面に強力なレーザーを照射したとき、表面が加熱され、プラズマが形成され蒸発してはぎ取られていく現象を言う。
- ガイドコーン  
高速点火方式に用いられるターゲットの一つ。先端が蓋をされたメガホンのような形状で、重金属で作られる。球形の燃料ターゲットに挿入された状態でレーザー照射され、爆縮コアはコーンの先端に作られる。重金属でできているため、爆縮過程でも形状を崩さず、加熱レーザーを爆縮コアに導く。
- フォームシェル  
高密度爆縮を実現するため、燃料層は中空球状に作られる。重力の影響や、コーンの影響が無く均一な厚さを持つ球状の燃料層を作るため、低密度のフォームに液体燃料を含浸させ、さらに中心部の蒸気圧を下げるために冷却して固化し、固体燃料として爆縮実験に供される。
- オルソーパラ  
分子を構成している2個の原子の軌道上にある電子のスピン状態が反並行か、平衡かの状態。
- ペタワットレーザー  
出力がP（ペタ）W、 $10^{15}$ ワットクラスのレーザー。高速点火の追加熱レーザーや、電子、イオンの加速、 $\gamma$ 線クラスの超硬X線の発生の実験などに用いられている。
- 衝撃点火  
高速点火方式の一つ。爆縮したコアに $1000\text{km/s}$ の速度でDTプラズマを衝突させると点火させることができる。燃料球殻の一部を切り離し、流体力学的不安定性を抑制する構造にすることにより、通常の爆縮レーザーのみで点火燃焼を実現できる可能性がある。追加熱レーザーを必要としないところに最大の特徴がある。
- PIC  
Particles in cellの略で、空間中に設定された小さな枠（cell）の中の粒子の動きをその場と粒子間の相互作用でもって計算する手法。
- レーザー核融合発電所  
平成16年に大学、産業界の専門家の協力を得てレーザー研及びIFEフォーラム共催で委員会を組織し検討された高速点火方式による出力 $1200\text{MW}$ のレーザー核融合発電所光陽（KOYO-F）の概念設計。出力 $1.2\text{MJ}\times 16\text{Hz}$ の冷却Yb:YAGセラミックレーザーと4基のモジュラー炉で構成されている。

### III-3-4 九州大学

- オーミックプラズマ  
プラズマに電流を流すとプラズマの持つ電気抵抗により発熱するが、その熱により維持されたプラズマのこと。
- ループ電圧  
トカマクではプラズマにトロイダル方向に電流を流す必要があるが、その電流を流すために必要な、トロイダル方向を一周する電圧。ドーナツ状のプラズマをトランスの二次巻線と考え、これに交差する一次巻線に電流を流して発生させた誘導電圧である。
- ホール素子  
ホール効果（電流に垂直に磁場を掛けると両者に垂直な方向に電圧が発生する効果）を利用して磁場を測定する半導体素子。
- H $\alpha$   
水素原子の発光線スペクトルの内、最も波長の長いもの。すなわち低温で光っていることからプラズマ周辺にある水素原子の量を推定するメジャーとしてしばしば用いられる。
- リミター  
ダイバータを持たないトカマク装置に於いてプラズマが真空容器壁に直接当たらないよう、壁に局所的な突起部分を設けプラズマと強制的に接触するようにしたもの。
- リサイクリング  
プラズマ中の粒子（主として水素原子）が、磁気容器から出て真空容器内壁などに付着し、また一定時間の後に壁から放出されて再度プラズマ内に戻ってくること。多くの粒子はこれを繰り返す。
- シナジー効果  
2つの効果を同時に重ね合わせることで新しい効果を得ること。相乗効果。
- 対向材  
真空容器壁などプラズマに面する部分に使われている材料の意味。ステンレスやカーボンなどが使われている。
- LATE  
京大で進められている球状トカマク装置の名称。MAST : Culham Laboratory (英国カラム研究所) で進められている球状トカマク装置の名称。高ベータの実験データを報告している。
- コンパクトトーラス (CT)  
プラズマ中にループ状の電流を発生させ、その電流の作る磁場によりプラズマ

自身が閉じ込められているような自己形成トーラス配位のプラズマ。

○ CCD

CCD (Charge Coupled Device Image Sensor) は固体撮像素子のひとつで、ビデオカメラ、デジタルカメラなどに広く使用されている半導体素子である。プラズマの分光測定 of 撮像用として使われる。

○ ダスト

固体微粒子。最近プラズマの周辺には壁などの構造材料の微粒子（直径がミクロン程度）が大きな負電荷を持って存在していることがわかってきた。普通のプラズマとは異なった振る舞いを示し、関心が高まっている。

### III-3-5 核融合科学研究所

○ 磁気軸シフト

プラズマを閉じ込めるため磁気面は位相幾何学的に同芯筒状になっているがその中心を磁気軸と呼ぶ。磁気軸の位置は磁場を作る外部コイルの調整である程度制御できる。磁気軸位置を移動させることを磁気軸シフトと呼んでいる。

○ ペレット入射粒子補給法

水素を凍らせた粒（ペレット）をプラズマ内に高速で打ち込むことにより、水素をプラズマ内部で昇華・電離させプラズマ密度補給する方法。通常はガス状の水素をプラズマ周辺で電離させプラズマ内部に取り込むが、この方法では直接プラズマ内に粒子補給を行うことができる。

○ 拡散障壁

空間の一部にプラズマの粒子やエネルギー（温度）が磁場を横切って拡散していく過程を抑える効果が現れること。

○ 不純物ホール

プラズマは一般に温度の高い領域に質量の大きな成分（不純物）が集まる傾向があるが、それとは逆にイオン温度の高いプラズマ中心から不純物（ここでは炭素イオン）がはき出されてしまう現象。

○ 非局所輸送現象

たとえばプラズマの外側にある擾乱を与えると、普通の拡散では空間的に連続変化しながらプラズマ中心に伝搬するが、そうではなく外側に与えた擾乱で中心の性質が拡散では説明できない変化をすることがあり、それを非局所輸送現象と呼んでいる。

○ サブクール（過冷却）

LHDのヘリカルコイルは超伝導であり液体ヘリウムで冷却している。液体ヘリウムの大気圧下での温度は4.2 Kであるが、それよりも低い温度に保つことを言う。

○ 負イオン方式NB I

プラズマ加熱用中性粒子ビームは、イオンビームを生成し中性化することで中性粒子ビーム（原子ビーム）としている。水素は普通正イオンとなるがエネルギーが高くなると中性化効率が極端に悪くなる。そこで中性化効率の高い水素負イオンを用い、高効率の高エネルギーNB Iを実現したもの。

## 資料 7

本資料は第 1 回外部評価委員会におけるヒアリング後、委員会より提出  
または回答を求められたもので、以下の 7 項目からなる。

1. 双方向型共同研究における研究者の流れについて
  - ・各センターでの受け入れ状況
  - ・核融合研からセンターへの流れ
2. 九大 Q U E S T 装置建設における双方向型の寄与について
3. 双方向型共同研究の人材育成への貢献について
  - ア) 大学院生・ポスドク数
  - イ) 修士・博士論文数
  - ウ) 大学院生の発表論文、国内外学会発表数
  - エ) 双方向型による他大学学生教育への貢献
4. 受入・実施体制について
  - ア) センターにおける共同研究への資源・時間配分について
  - イ) センターの研究支援体制・研究環境
  - ウ) 共同研究者の意見が反映される仕組み
5. ワーキング・グループ報告の「重点化」と双方向型共同研究の関係について
6. ワーキング・グループ報告の趣旨に沿い終了した装置について
7. 双方向型共同研究課題の公募から採択までのプロセスについて

1. 双方向型共同研究における研究者の流れについて

- ・各センターでの受け入れ
- ・核融合研からセンターへの流れ

【九州大学応用力学研究所附属高温プラズマ力学研究センター】

表・図1 九州大学の共同研究者移動件数

	応研共同利用	応研共同利用 (NIFS)	双方向型 準備研究	双方向型	双方向型 (NIFS)
H14年度	53	9	0		
H15年度	85	0	75		
H16年度	49	8	0	83	17
H17年度	44	2	0	86	7
H18年度	40	2	0	116	26
H19年度	20	3	0	114	18

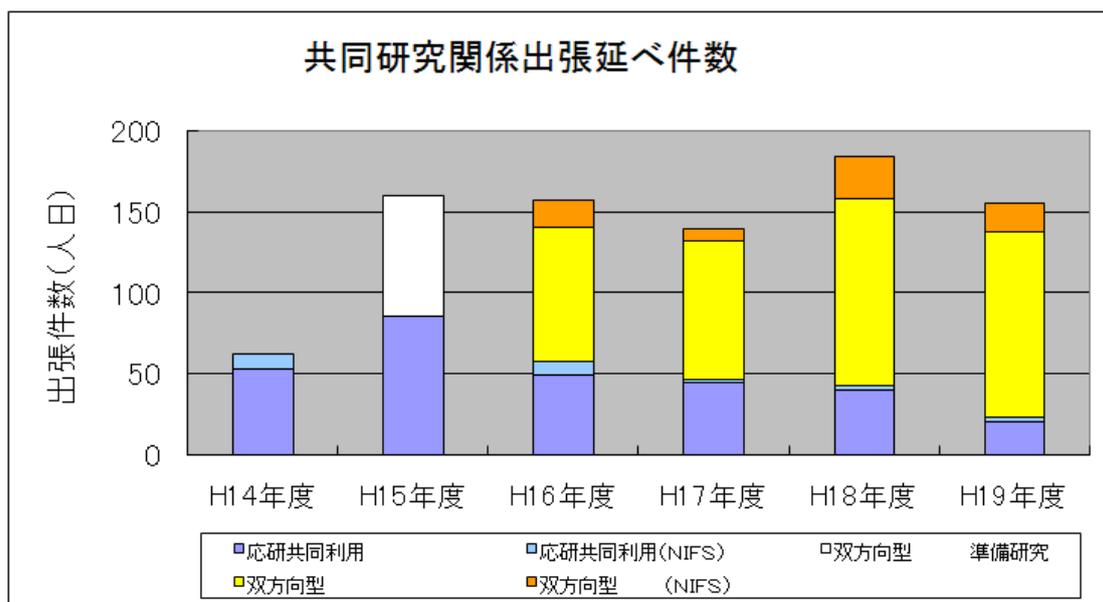
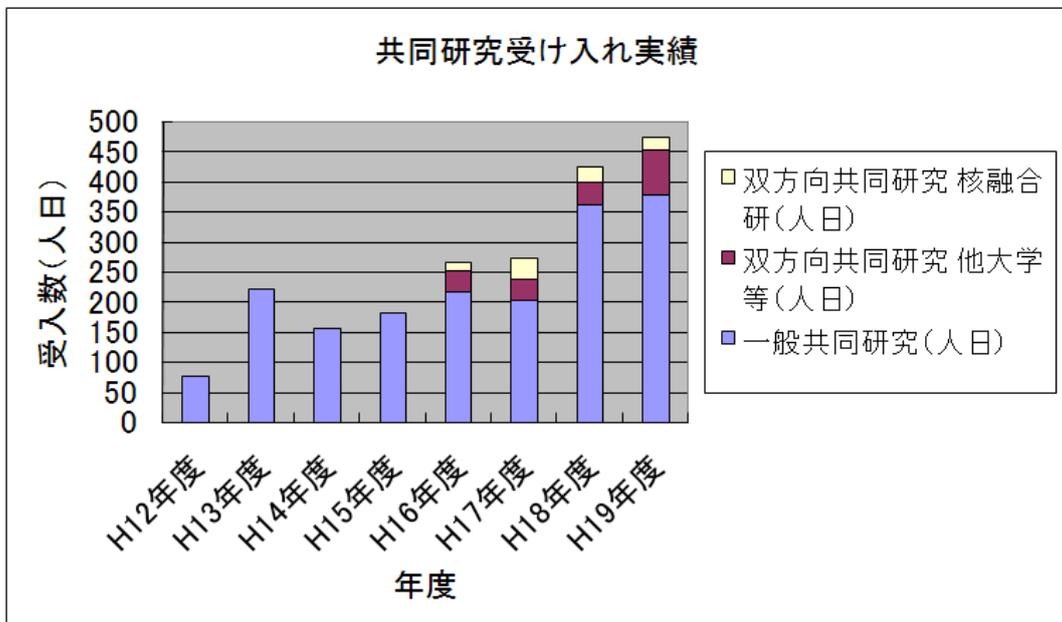


表2 九州大学の共同研究者滞在のべ日数

	応研共同利用研究費	双方向型共同研究費	
		双方向所内	双方向所外
H14	27人/62日 (9)		
H15	20人/160日 (0)		
H16	37人/57日 (8)	49人/100日 (17)	
H17	20人/46日 (2)	35人/60日 (7)	17人/33日 (0)
H18	25人/42日 (2)	62人/100日 (24)	18人/42日 (2)
H19	12人/23日 (3)	28人/69日 (7)	26人/63日 (11)

【大阪大学レーザーエネルギー学研究センター】

	一般共同研究 (人日)	双方向共同研究	
		他大学等(人日)	核融合研(人日)
H12年度	75		
H13年度	220		
H14年度	156		
H15年度	182		
H16年度	217	35	14
H17年度	201	37	35
H18年度	362	37	26
H19年度	377	76	20



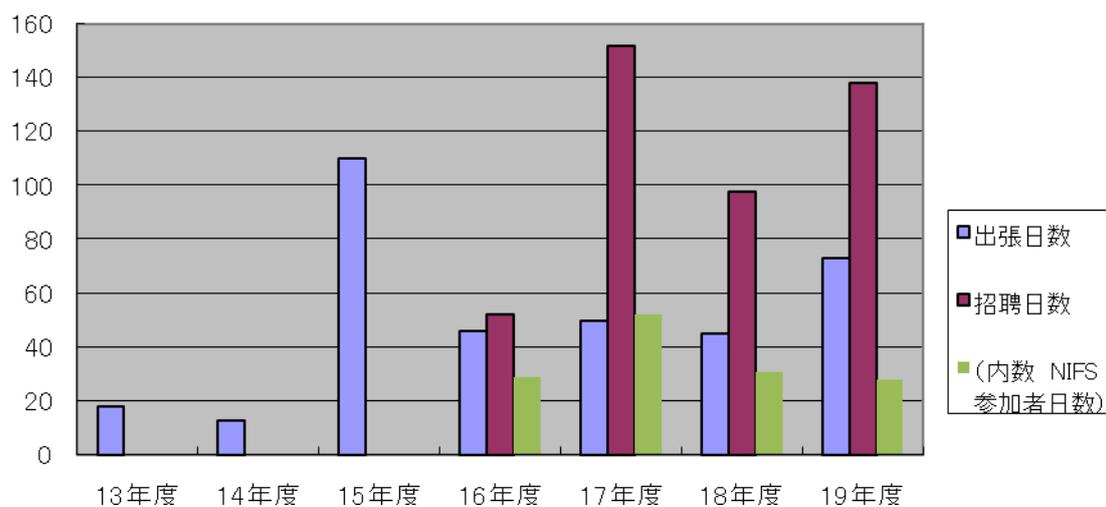
【京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター】

	13年度	14年度	15年度	16年度	17年度	18年度	19年度
出張日数	18	13	110	46	50	45	73
招聘日数	0	0	0	52	152	98	138
NIFS参加者日数(内数)	0	0	0	29	52	31	28

\* 13から15年度の出張者数はNIFS負担経費による出張日数

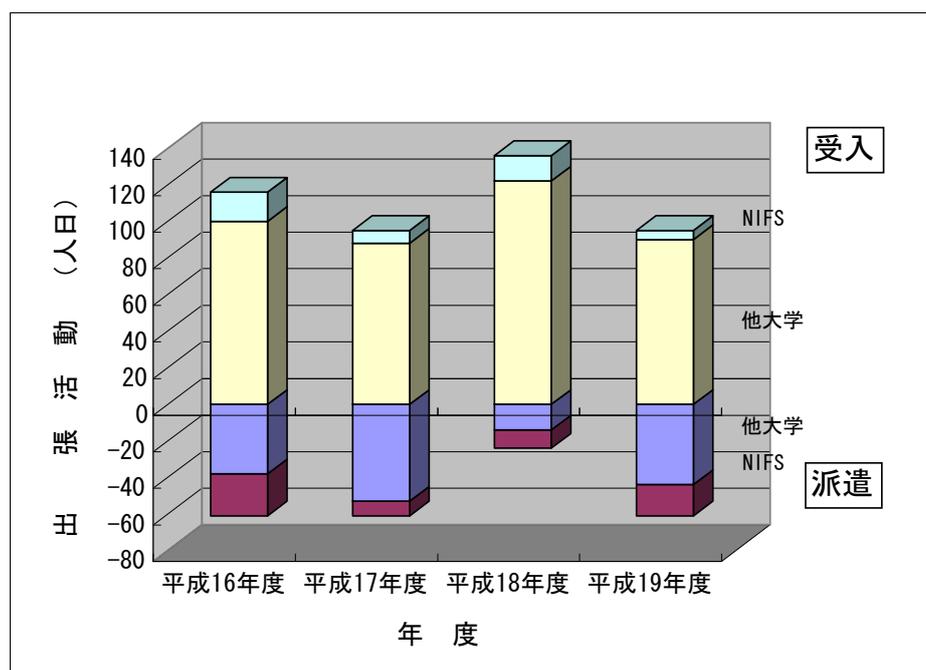
人F

双方向型共同研究費出張日数



【筑波大学プラズマ研究センター】

	筑波大学 → 他研究所・大学			他研究所・大学 → 筑波大学			総計
		対 NIFS	合計		対 NIFS	合計	
平成 16 年度	38	23	61	100	16	116	177
平成 17 年度	53	8	61	88	7	95	156
平成 18 年度	14	10	24	122	14	136	160
平成 19 年度	44	17	61	90	5	95	156



## 2. 九大QUEST装置建設における双方向型の寄与について

九州大学応用力学研究所炉心理工学研究センター（当時）ではワーキング・グループ報告の趣旨に沿い、双方向型共同研究の下、新たな展開を模索した。

平成16年度にはトリアム1M装置に続く新たな計画を「九州大学プラズマ境界力学実験装置」と仮称し、その検討を双方向型共同研究委員会の下に検討委員会を設け、委員を大学のみならず国内研究機関や国外からも委嘱し、幅広い観点から精力的に検討した。

その開催履歴は以下の通りである。

第1回：平成16年9月16日（木） 10：30～

出席者 委員 12名、その他7名の計19名

委員： 岸本泰（京大）、小川（東大）、吉田直（九大）、朝倉（原研）、松川誠（原研）、高瀬（東大）、前川（京大）、佐藤浩（九大）、冨子（九大）、小森（NIFS）、林隆也（NIFS）、長山（NIFS）文部科学省：山口（核融合開発室：専門官）、吉田善（東大：科学官）、山田弘（NIFS、調査官）

オブザーバー：小野靖（東大）、花田（九大）、本島（NIFS）、須藤（NIFS）

第2回：平成16年10月6日（水） 13：40～

出席者 委員 12名、その他5名の計17名

委員： 岸本泰（京大）、小川（東大）、佐藤浩（九大）、冨子（九大）、高瀬（東大）、前川（京大）、松川誠（原研）、吉田直（九大）、小森（NIFS）、林隆也（NIFS）、長山（NIFS）、Martin Peng（ORNL）文部科学省：山田弘（NIFS、調査官）

オブザーバー：小野靖（東大）、永田（兵庫県立大）、花田（九大）、岡村（NIFS）

第3回：平成16年12月20日（月） 13：40～

出席者 委員 12名、その他4名の計16名

委員： 岸本泰（京大）、小川（東大）、佐藤浩（九大）、冨子（九大）、高瀬（東大）、前川（京大）、朝倉（原研）、松川誠（原研）、吉田直（九大）、小森（NIFS）、林隆也（NIFS）、長山（NIFS）、

オブザーバー：小野靖（東大）、永田（兵庫県立大）、花田（九大）、石田（新潟大）

第4回：平成17年1月21日（月） 13：40～

出席者 委員 10名、その他2名の計12名

委員： 岸本泰（京大）、吉田直（九大）、高瀬（東大）、松川誠（原研）、佐藤浩

(九大)、図子(九大)、朝倉(原研)、前川(京大)、小森(NIFS)、  
長山(NIFS)、  
オブザーバー：小野靖(東大)、花田(九大)

委員の構成については、以下のとおりである。

核融合科学研究所運営会議共同研究委員会 双方向型共同研究委員会 九州大学プラズマ境界力学実験装置検討会委員名簿	
[所 外]	
朝倉 伸幸	日本原子力研究所那珂研究所・主任研究員
△小川 雄一	東京大学高温プラズマ研究センター・センター長 ○
□岸本 泰明	京都大学大学院エネルギー科学研究科・教授
佐藤 浩之助	九州大学応用力学研究所炉心理工学プラズマセンター・センター長
図子 秀樹	九州大学応用力学研究所炉心理工学プラズマセンター・教授
高瀬 雄一	東京大学大学院新領域創成科学研究科・教授
前川 孝	京都大学大学院エネルギー科学研究科・教授
松川 誠	日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部 JT-60 第一試験室・室長代理
吉田 直亮	九州大学応用力学研究所・教授 **○
M. Peng	ORNL
[所 内]	
小森 彰夫	大型ヘリカル研究部・研究総主幹 *◎○
長山 好夫	大型ヘリカル研究部・教授
林 隆也	大型ヘリカル研究部・研究主幹
(五十音順)	
□印は座長	
△印は副座長	
◎印は運営会議共同研究委員会委員長	
○印は運営会議選出委員	
**印は双方向型共同研究委員会幹事長	
*印は双方向型共同研究委員会幹事	

この検討会の結果、新装置の方式を球状トカマク (ST) とすると共に、新装置を双方向型共同研究の下で全日本の研究者が利用する方向が打ち出された。それを受けて平成17年度には双方向型共同研究委員会の下に「全日本ST研究計画運営会議」を設け、研究計画と装置の具体的な仕様を検討した。

第1回：平成17年4月21日（木） 13：00～ 京都大学

出席者 16名

委員：岸本泰（京大）、高瀬（東大）、Martin Peng（ORNL）、小野靖（東大）、朝倉（原研）、松川誠（原研）、西尾敏（原研）、花田（九大）、石田（新潟大）、西野（広島大）、永田（兵庫県立大）、佐藤浩（九大）、田中（仁）小森（NIFS）、山田弘司（NIFS）、長山（NIFS）

第2回：平成17年8月5日（金） 15：00～ 東京大学

出席者 11名

委員：朝倉（原研）、岸本泰（京大）、佐藤浩（九大）、岡子（九大）、高瀬（東大）、高橋（日大）、西尾敏（原研）、平野（産総研）、御手洗（九州東海大）、長山（NIFS）

第3回：平成17年12月7日（水） 13：00～ 核融合研

出席者 12名

委員：朝倉（原研）、小野靖（東大）、佐藤浩（九大）、岡子（九大）、高瀬（東大）、西尾敏（原研）、西野（広島大）、前川孝（京大）、Martin Peng（ORNL）、小森（NIFS）、長山（NIFS）、水口（NIFS、林隆也代理）

委員の構成は、以下のとおりである。

<b>リーダー：</b> 高瀬（東大）	<b>計測、加熱、実験企画等：</b> 長山（NIFS） 岡子（九大） 西野（広島大） 御手洗（九州東海大） 平野（産総研） 朝倉（原研）
<b>実験装置責任者：</b> 小野（東大） 前川（京大） 永田（兵庫県立大） 佐藤（九大） 高橋（日大）	<b>炉設計：</b> 西尾（原研）
<b>理論・シミュレーション</b> 岸本（京大） 林（NIFS） 石田（新潟大）	<b>アドバイザー：</b> 小森（NIFS） 双方向型共同研の立場 Peng（ORNL） 世界的ST研究の立場

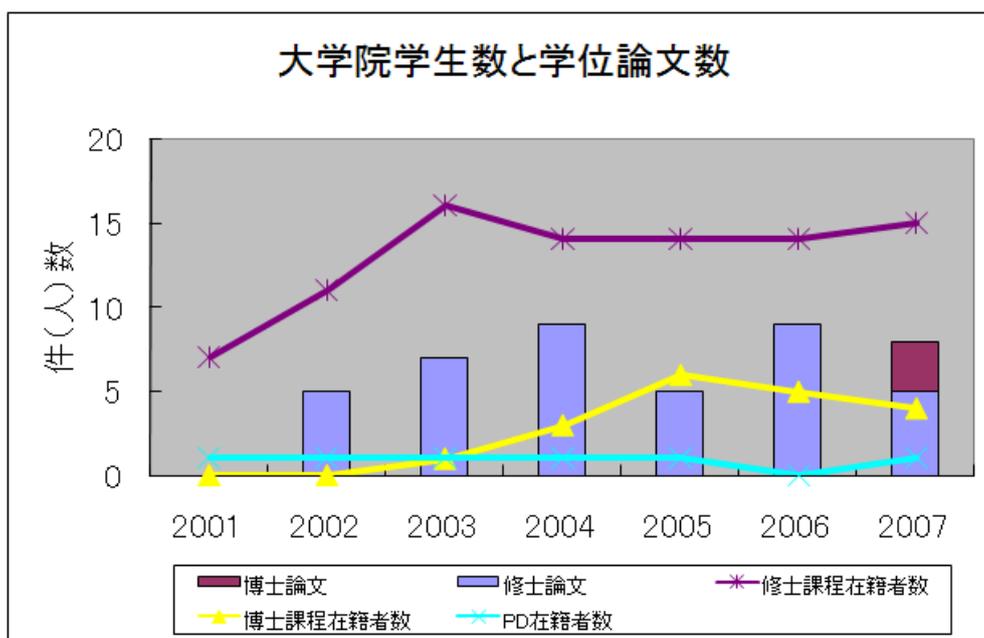
3. 双方向型共同研究の人材育成への貢献について

【九州大学応用力学研究所附属高温プラズマ工学研究センター】

ア) 大学院生・ポストドク数

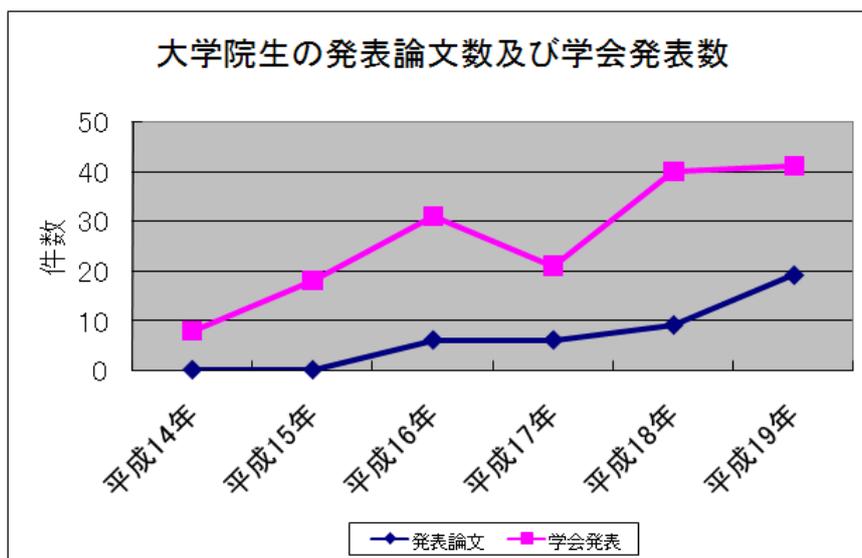
イ) 修士・博士論文数

	博士論文	修士論文	修士課程在籍者数	博士課程在籍者数	PD 在籍者数
2001			7	0	1
2002		5	11	0	1
2003		7	16	1	1
2004		9	14	3	1
2005		5	14	6	1
2006		9	14	5	0
2007	3	5	15	4	1



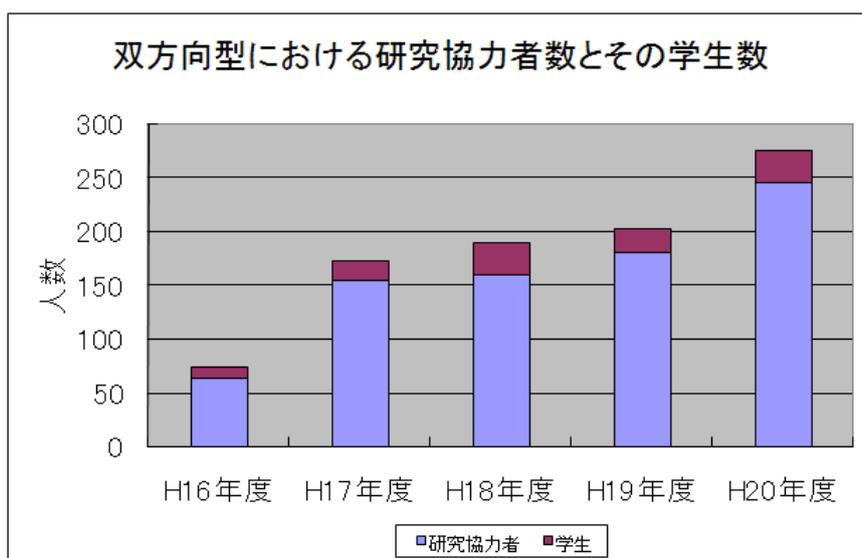
ウ) 大学院生の発表論文、国内外学会発表数

	発表論文	学会発表
平成 14 年	0	8
平成 15 年	0	18
平成 16 年	6	31
平成 17 年	6	21
平成 18 年	9	40
平成 19 年	19	41



エ) 双方向型による他大学学生教育への貢献

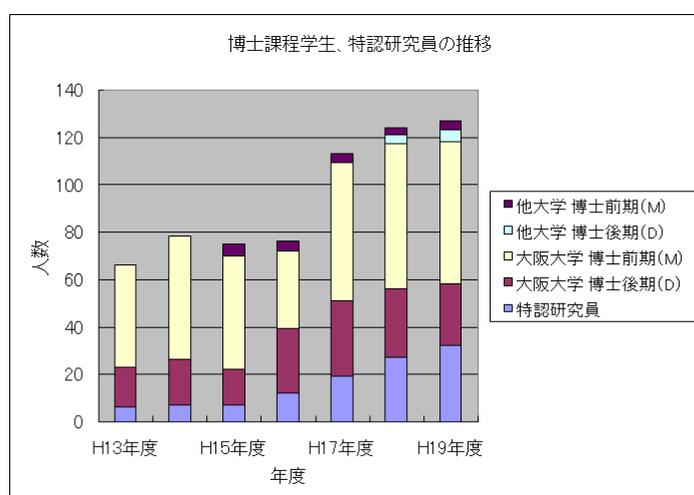
	研究協力者	学生
H16 年度	63	11
H17 年度	154	18
H18 年度	159	30
H19 年度	180	22
H20 年度	245	30



## 【大阪大学レーザーエネルギー学研究中心】

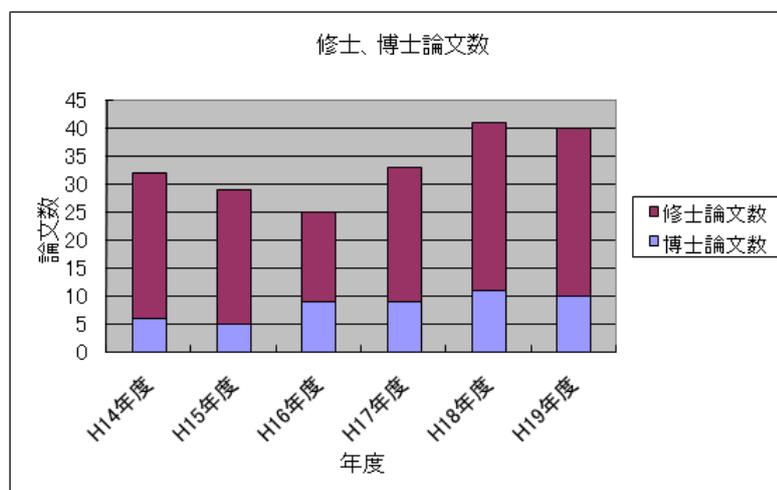
### ア) 大学院生・ポスドク数

			H13年度	H14年度	H15年度	H16年度	H17年度	H18年度	H19年度	合計
特認研究員			6	7	7	12	19	27	32	90
学生	大阪大学	博士後期(D)	17	19	15	27	32	29	26	114
		博士前期(M)	43	52	48	33	58	61	60	212
	他大学	博士後期(D)				0	0	4	5	9
		博士前期(M)			5	4	4	3	4	15
合計			66	78	75	76	113	124	127	440



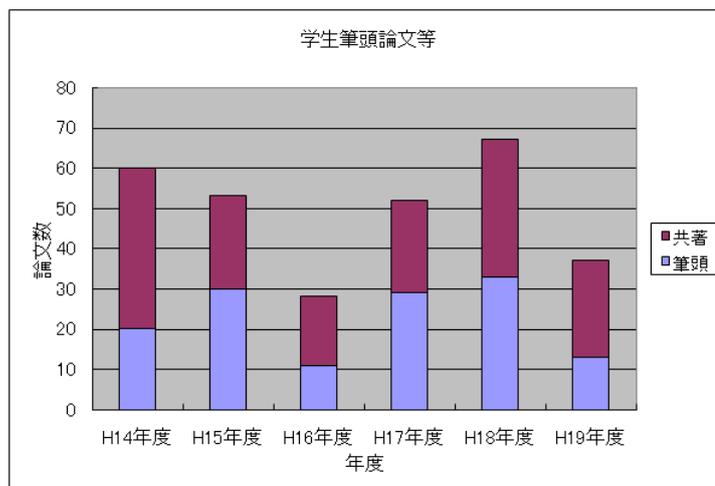
### イ) 修士・博士論文数

	H14年度	H15年度	H16年度	H17年度	H18年度	H19年度
博士論文数	6	5	9	9	11	10
修士論文数	26	24	16	24	30	30

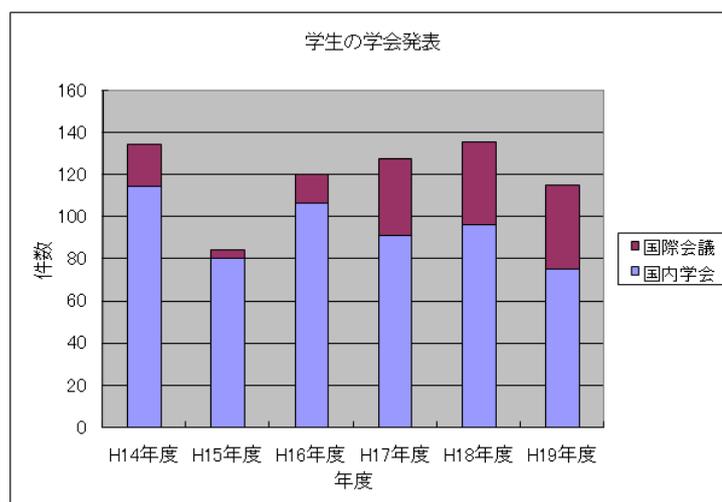


ウ) 大学院生の発表論文、国内外学会発表数

	筆頭	共著
H14 年度	20	40
H15 年度	30	23
H16 年度	11	17
H17 年度	29	23
H18 年度	33	34
H19 年度	13	24



	国内学会	国際会議
H14 年度	114	20
H15 年度	80	4
H16 年度	106	14
H17 年度	91	36
H18 年度	96	39
H19 年度	75	40



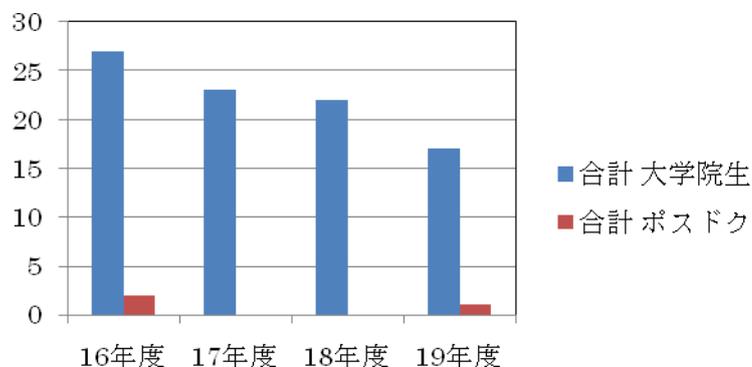
エ) 双方向型による他大学学生教育への貢献

年度	学生所属大学	テーマ等
H19	東京大学	爆縮過程のシミュレーション研究指導
	琉球大学	X線画像処理に関する研究指導
	総研大	統合コードの開発に関する研究指導
H18	東京大学	爆縮過程のシミュレーション研究指導
	琉球大学	X線画像処理に関する研究指導
H16	琉球大学	X線画像処理に関する研究指導（新規学生）
H15	琉球大学	X線画像処理に関する研究指導 1名博士号を取得

【京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター】

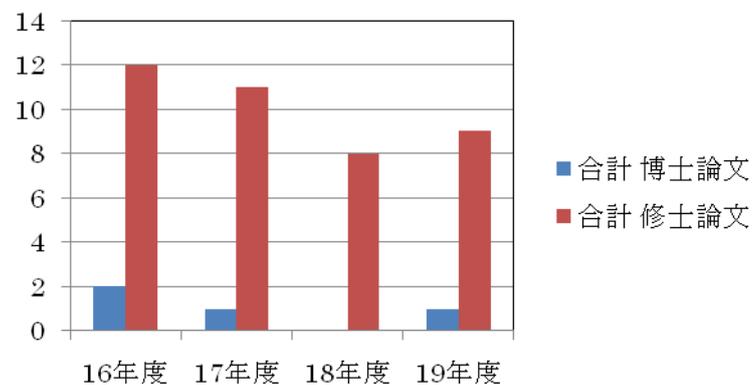
ア) 大学院生・ポスドク数の推移

	大学院生	ポスドク
16年度	27	2
17年度	23	0
18年度	22	0
19年度	17	1



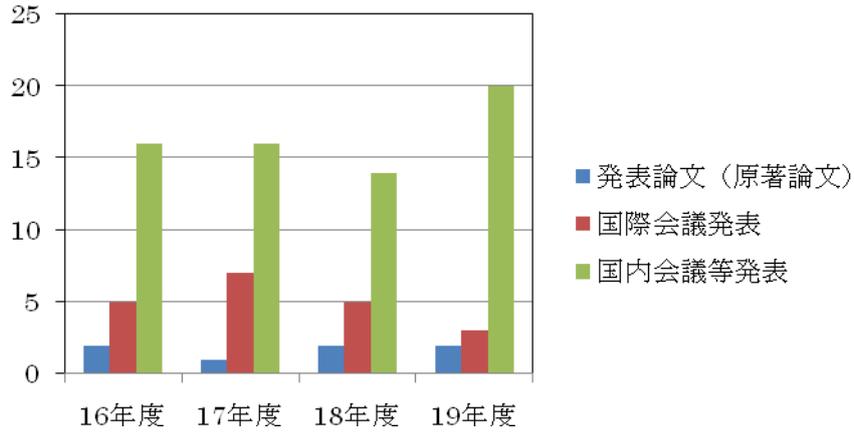
イ) 修士・博士論文数の推移

	博士論文	修士論文
16年度	2	12
17年度	1	11
18年度	0	8
19年度	1	9



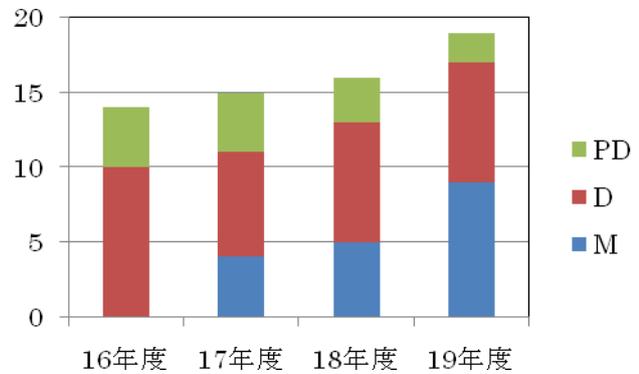
ウ) 大学院生の発表論文、国内外学会発表数の推移

	16年度	17年度	18年度	19年度
発表論文(原著論文)	2	1	2	2
国際会議発表	5	7	5	3
国内会議等発表	16	16	14	20



エ) 双方向による他大学学生教育への貢献

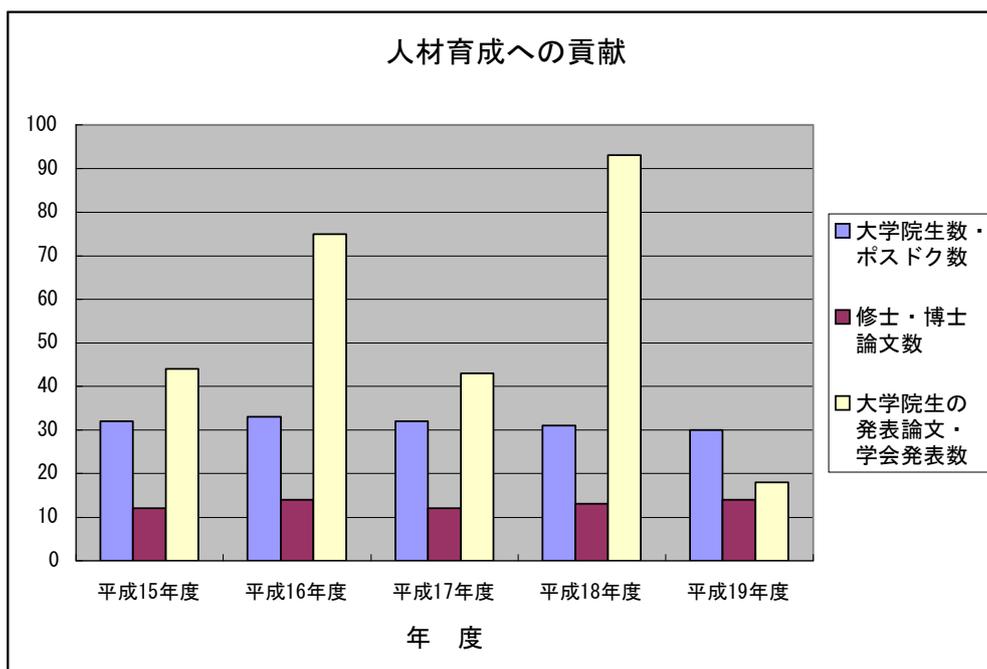
	M	D	PD
16年度	0	10	4
17年度	4	7	4
18年度	5	8	3
19年度	9	8	2



【筑波大学プラズマ研究センター】

- (ア) 大学院生・ポスドク数
- (イ) 修士・博士論文数
- (ウ) 大学院生の発表論文、学会発表数

	大学院生数・ポスドク数	修士・博士論文数	大学院生の発表論文・学会発表数
平成15年度	32	12	44
平成16年度	33	14	75
平成17年度	32	12	43
平成18年度	31	13	93
平成19年度	30	14	18



エ) 双方向型共同研究による他大学学生教育への貢献

表2 筑波大学 PRC の双方向型共同研究における過去4年間の他大学学生の受入述べ人数

	双方向型共同研究で受け入れた学生延べ数 (人・日)
平成15年度	0
平成16年度	35
平成17年度	53
平成18年度	62
平成19年度	57

表3 筑波大学 PRC の双方向型共同研究における過去4年間の他大学学生の学会発表件数及び論文発表件数

	論文発表件数	学会発表件数
平成16年度	6	47
平成17年度	9	46
平成18年度	19	44
平成19年度	25	38

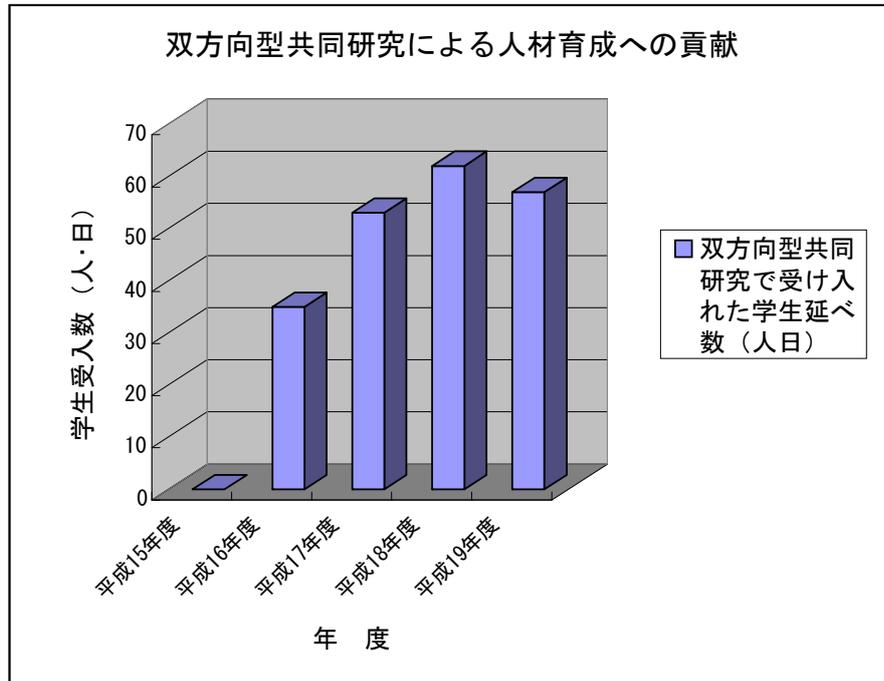


図3 筑波大学 PRC の双方向型共同研究における過去4年間の他大学学生の受入述べ人数の推移 (人日)

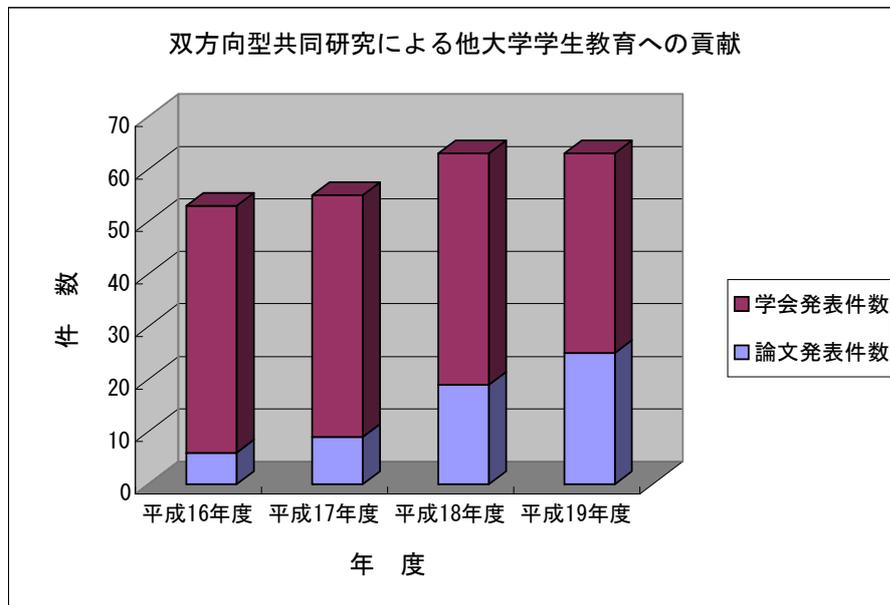


図4 筑波大学 PRC の双方向型共同研究における過去4年間の他大学学生の学会発表件数及び論文発表件数の推移

#### 4. 受入・実施体制について

##### 【九州大学応用力学研究所附属高温プラズマ力学研究センター】

(ア) 共同研究に割く資源や時間は適切に管理されているか。共同研究者に明らかになる形で運営されているか。

九大応力研高温プラズマ力学研究センターでは、

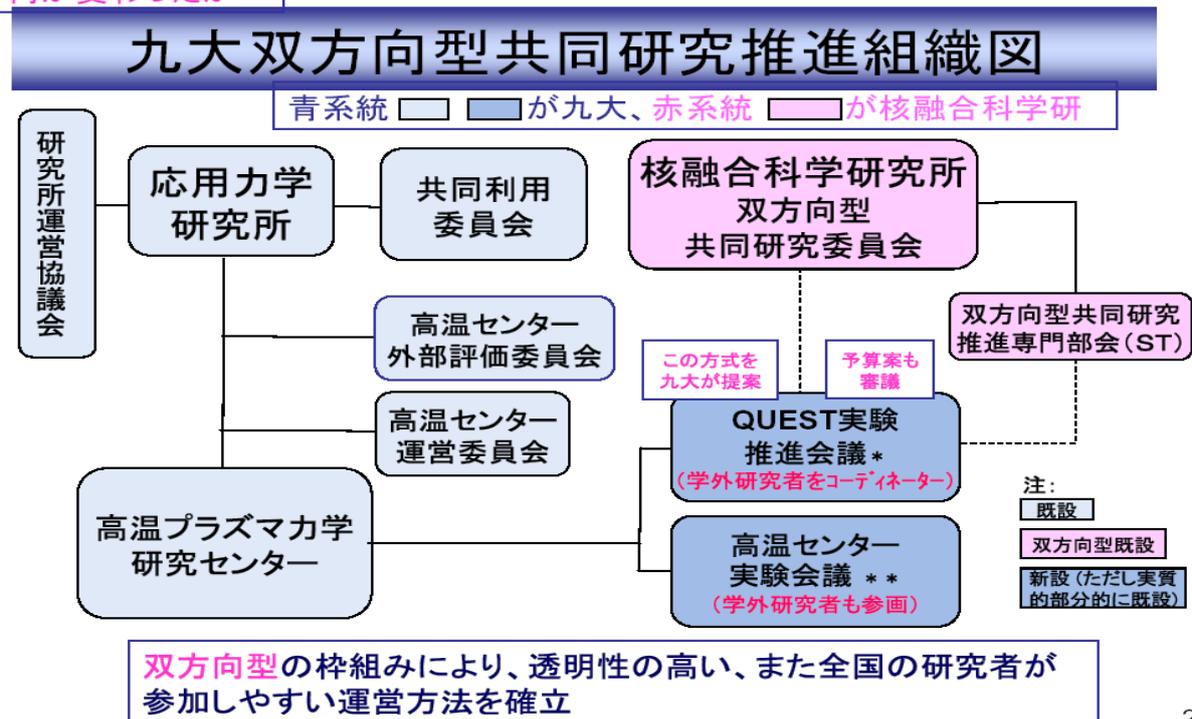
- 1) QUEST 研究会 [以前は TRIAM 研究会]  
(センター主催、年に1-3回)
- 2) プラズマ・核融合学会年会におけるインフォーマルミーティング  
(平成16-19年度、毎年実施)

などの場を活用して、研究課題の内容、実験のマシナタイム、実施にあたっての予算規模、必要事項、などに関して、オープンな議論を進めてきた。このことにより、関心を持った研究者が非常に容易に共同研究に参加できるベースを作ってきた。特に、学会年会は通常11月末~12月初に開催されるため、そのインフォーマルミーティングでこれらを議論することにより、次年度の研究課題申請に対して共通認識と評価を共有できる場となり、極めて有効に機能してきたと考えている。

さらに、双方向型共同研究(九大分)については、

- A) QUEST 実験推進会議
- B) 高温センター実験会議

何が変わったか



の二つの会議(上図参照)を持ち、A)では、研究の大きな方向や研究課題の適否についての議論を進めると同時に、毎年の共同研究申請の予算についても査定を行ってきた。また、この運営については、会議メンバーの過半数を外部の研究者にお願いしコーディネーターも外部にお願いするシステムを九大が提案し進めてきた。このことにより、非常にオープンな公平な議論が行え、また研究者が共同研究に参画しやすい環境を提供してきている。さらに、B)については、装置の建設・運転・維持などの事柄を検討するためにあり性格上九大が責任を持って進めるが、ここにも外部の研究者に加わってもらって推進している。

なお、A)については年3~4回、B)については毎月1回開催し、議論を深めている。

(イ) 研究支援体制や研究環境は整っているか

それぞれの研究課題についてセンター教員1人が世話人となり支援協力するが、研究技術上の支援は技術職員3人が、またその他の事務手続き上の支援は事務補佐員が支援を行っている。研究環境は、予算の許す範囲で整えている。

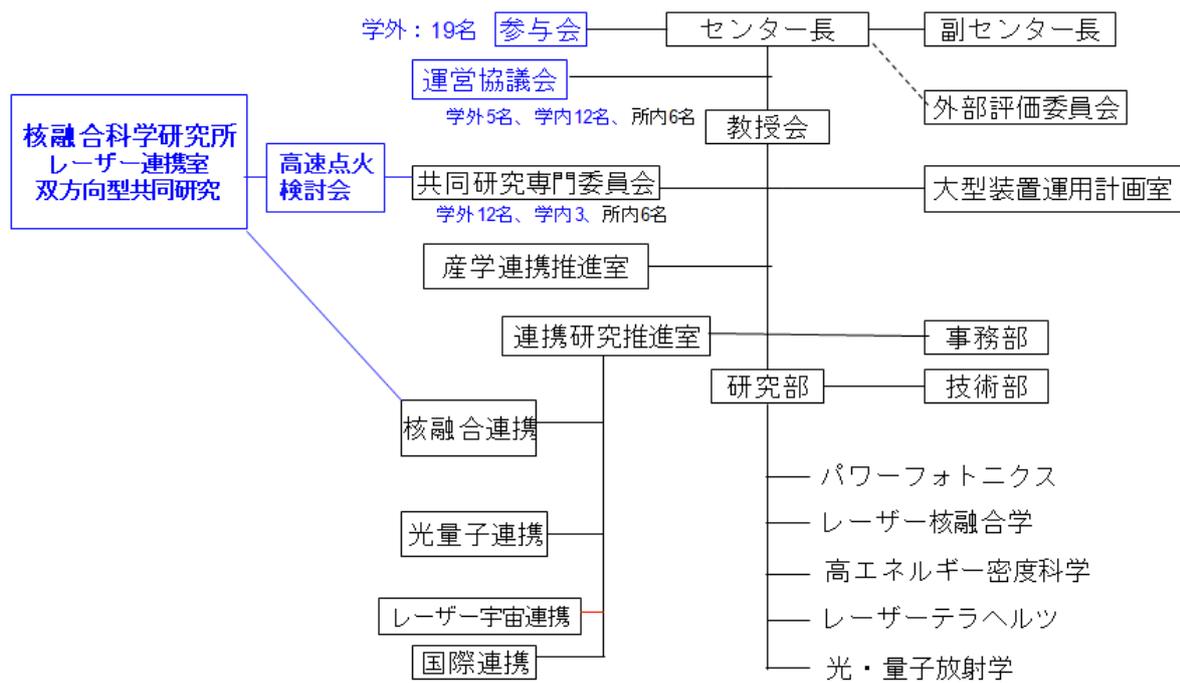
(ウ) 共同研究者の意見が反映される仕組みは用意されているか

この項目は、上記第1項にかなり重複する内容なので上記に含めさせていただいた。

**【大阪大学レーザーエネルギー学研究センター】**

(ア) 共同研究に割く資源や時間は適切に管理されているか。共同研究者に明らかになる形で運営されているか。

双方向共同研究テーマ採択に各分野の専門家の意見を反映するため、「高速点火研究(FIREX-I)及び関連するレーザープラズマ研究に関する検討会委員」(委員長東大小川雄一先生)を設置し、採点を行った後、双方向型委員会に提出するシステムを作った。



マシンタイムの調整は大型装置運用計画室で協議の上決定されている。

激光XII号実験における双方向（核融合）関連シリーズ（赤字）を下表に示す。

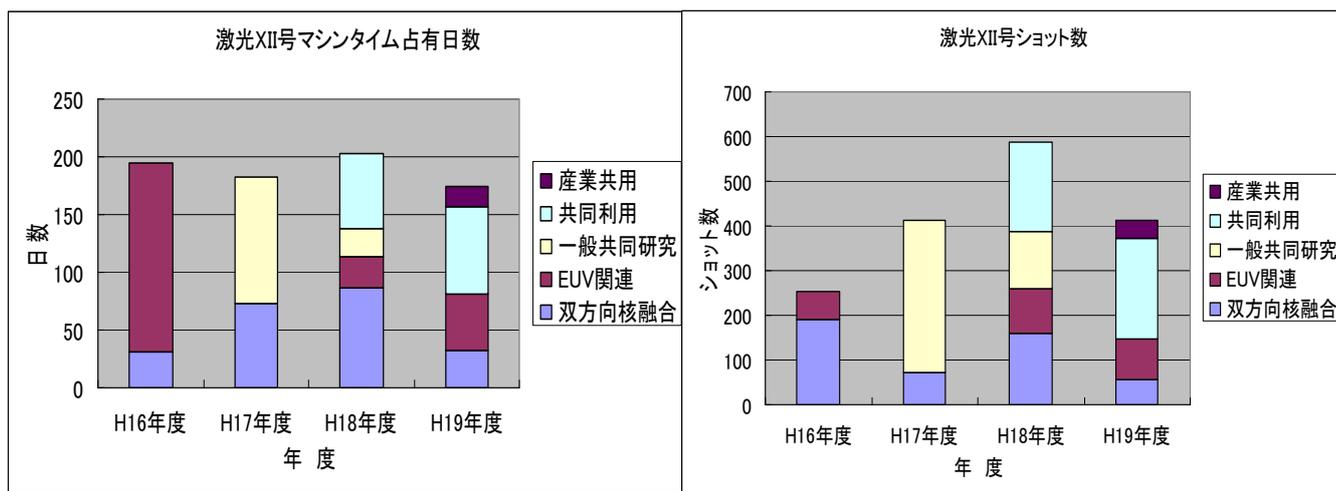
平成18年以降、全国共同利用研究所化（水色強調）で減っているように見えるが、2部制の採用により、全体のショット数は1.5倍になり、必要数は確保している。

年度	シリーズ名	期間	主任	テーマ
H15年度	IZ-01	4/22-5/30	西村 博明	EUV放射とオパシティー実験
	IZ-02	6/16-08/20	田中 和夫	PW基礎実験
	IZ-03	8/21-10/15	疇地 宏	RT抑制・高密度圧縮の解明・EOS
	IZ-04	10/20-11/14	西村 博明	レーザープラズマ極端紫外線(EUV)放射・吸収絶対スペクトル計測
	IZ-05	11/17-12/19	田中 和夫	爆縮実験・高効率加熱実験
H16年度	FA-01	5/17-7/30	白神 宏之	平板クライオ実験
	FA-02	8/18-9/30	西村 博明	レーザープラズマ極端紫外線(EUV)吸収絶対スペクトル計測
	FA-03	10/04-1/15	白神 宏之	クライオ・加熱・PW基礎
	FA-04	2/23-4/15	白神 宏之	平板クライオ実験
H17年度	FB-01	4/18-6/24	重森 啓介	高エネルギー密度科学
	FB-02	6/27-10/07	疇地 宏	平板クライオ加熱・爆縮
	FB-03	10/11-11/16	近藤 公伯	レーザー航跡場加速/集光プロトンビームと高密度プラズマ相互作用
	FB-04	2/06-5/12	重森 啓介	高エネルギー密度科学
H18年度	FC-01	5/17-06/30	白神 宏之	平板クライオ実験
	FC-02	7/18-10/13	疇地 宏	クライオ高速点火統合実験
	FC-03	10/18-11/11	西村 博明	EUV放射プラズマのオパシティー計測と光電離プラズマ診断
	FC-04	11/13-03/02	重森 啓介	共同利用シリーズ
	FC-05	3/12-3/23	西村 博明	LFEXレーザーを用いたEUV発生実験
H19年度	FD-01	5/21-6/29	坂和 洋一	EUV&共同利用実験
	FD-02	7/11-9/07	白神 宏之	高速点火統合実験のための爆縮ダイナミクス
	FD-03	9/18-11/09	重森 啓介	共同利用実験シリーズ、一部所内提案含む
	FD-04	11/14-12/18	重森 啓介	共同利用シリーズ
	FD-05	2/06-02/29	西村 博明	LFEXレーザーを用いたEUV関連実験
	FD-06	3/03-03/31	疇地 宏	産業共用実験シリーズ

(イ) 研究支援体制や研究環境は整っているか

平成18年度には二部制の採用によりショット数増加。(平成19年度はLFEXレーザー建設のため、一次的にショット数は低下している)

一つの実験シリーズが長いいため、年度ごとのばらつきが多いが、双方向共同研究には必要なマシンタイムを投入している。



(ウ) 共同研究者の意見が反映される仕組みは用意されているか

(ア) で示す高速点火検討会、大型装置運用計画室が意見を反映する場となっている。

**【京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター】**

(ア) 各センターにおける共同研究に割く資源や時間等は適切に管理されているか、また共同研究者に明らかになる形で運営されているか。

平成19年度までは、京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター内で公募課題選択を行ってきたが、この決定プロセスを、より開かれたものにするため、平成18年8月に京大におけるヘリオトロンJ双方向型共同研究委員会準備会を開催し、委員構成、公募方法および今後のヘリオトロンJ双方向型共同研究の中・長期計画について審議した。これに基づき、平成19年度からヘリオトロンJ双方向型共同研究委員会の活動が開始され、平成19年6月に第1回委員会を開催、11名の委員(外部から8名)により平成19年度実験計画などの審議を行い、外部に開かれた形での意思決定を行っている。

平成20年度の双方向型共同研究からは、課題申請を含めてヘリオトロンJ双

方向型共同研究の計画全てにわたって、同委員会で審議され運用されることとなる。

(イ) 各センターにおける研究支援体制や研究環境は整っているか

申請課題のうち実験課題については、共同研究スケジュールおよび実験時間等をセンターにおける実験計画をもとに整合させる必要があり、個々の研究者と連絡を取り合い、計画の実現性、可能性などを検討、実施計画を決定してきた。ヘリオトロン J の実験期間は通常半年以上設けられており、実験参加については比較的自由に設定することが可能である。個々の研究計画の準備・実施においても、センター側の環境・条件を明示し、実現に向けた具体的な方策の検討を行い、実行に関しては技術職員、学生を含めた共同作業体制を組んで支援している。平成 19 年度は強磁場共同実験については個々の課題を通常実験スケジュールに取り入れることによって、低磁場共同実験については 3 月の 4 週間を占有した形で行った。安全教育並びにデータ取り扱いについても講習を行っており、安全かつ容易に実験参加することができる体制を整えている。

(ウ) 共同研究者の意見が反映される仕組みは用意されているか

外部共同研究者が実験テーマの提案者になった場合は、所内の研究者の場合と同様に、所内世話人と共に実験を主導することになっている。研究者からのフィードバックはヘリオトロン実験会議 (JOB) での議論をとおして行うことができる。それ以外でも所内世話人を通じて常にフィードバックを受け付けるよう留意している。このうち、共同研究全体に対する実験時間の割り振りについては、共同研究者の申請に基づいて京大内に設置された前述のヘリオトロン双方向型共同研究委員会で外部委員を含めて審議することとしている。

### 【筑波大学プラズマ研究センター】

(ア) 各センターにおける共同研究に割く資源や時間等は適切に管理されているか。  
また、共同研究者に明らかになる形で運営されているか

- (1) 共同研究予算は、双方向型共同研究委員会からの意見を考慮し、センター内の共同研究検討会にて査定している。実際の執行に当たってはセンターの世話人が適切に使用されているかを管理している。
- (2) 実験機器の使用、及び、マシンタイムについては、予め、年間計画の概要について、世話人を通じて連絡し、共同研究者の要望を集約し、共同研究

専用の実験時間を含めて、実験ミーティングにおいて議論し、全体的な整合性をとり、全員に共同実験のスケジュールを周知させている。

(3) さらに、共同研究の透明性を高めるために、共同研究検討会に外部委員を入れた、センター共同研究委員会を準備中である。

(イ) 各センターにおける研究支援体制や研究環境は整っているか。

(1) 双方向型共同研究事務を主として担当する事務職員をセンター内に配置し、支援体制を強化した。

(2) 安全に関するガイドブックを作成するとともに、安全教育体制を強化した。

(3) 共同研究者用の臨時の居室を整備し、無線 LAN を導入したインターネット環境を構築した。

(4) 共同研究者が大学の宿泊施設を利用できるよう体制を整えた。

(ウ) 共同研究者の意見が反映される仕組みは用意されているか。

(1) 毎週 1 回開かれるセンターの実験ミーティングにおいて、世話人を通して共同研究者の意見を反映する体制を取っている。

(2) 1 番目の観点でも記述したが、共同研究者の意見がより反映されやすいように、外部委員を入れたセンター共同研究委員会を準備中である。

## 5. ワーキング・グループ報告の「重点化」と双方向型共同研究の関係について

### [ご質問]

平成 15 年に出されたワーキング・グループ報告の「重点化」と双方向型共同研究の関係あるいは、重点化の中での双方向型共同研究の位置づけが判りにくい。

(レーザー研以外の 3 センターの研究の位置づけは、LHD 計画の目標の一部である「環状プラズマの総合的理解」の思われる (3-4 頁) が、この中に「レーザーによる高速点火研究」も書かれており、位置づけが判りにくい。)

### [回答]

双方向型共同研究は重点化された装置の研究を効率的に進めるため、現在ある大学の研究センターのインフラや人的資源を核融合研との双方向性の枠組みの中で活用し、もって核融合研究全体の発展に寄与しようというもので、ワーキング・グループ報告の趣旨に添ったものです。

ご質問の大阪大学の場合は重点化されている「レーザーによる高速点火研究」に対しては核融合研の超伝導開発グループや計測グループが寄与していると同時に、大阪大学は「超高密度プラズマの物理解明」という視点から多階層シミュレーションなどを通じて重点化されている LHD の「環状プラズマの総合的理解」に寄与しているという、まさに双方向的な協力関係にあります。(報告書 28 ページや III-3-3 に記載)

## 6. ワーキング・グループ報告の趣旨に沿い終了した装置について

### [ご質問]

「大学および核融合研の複数の実験装置を整理・統合して・・・結果、実験装置の減少により・・・」とあるが、具体的にどの程度の実験装置が減少したのかという資料が必要と思われる。

### [回答]

ワーキング・グループ報告の趣旨に添い、中規模の装置に位置づけられる以下の装置がシャットダウンしています。

- CHS装置（核融合研）
- TRIAM-1M装置（九州大学）
- JFT-2M装置（原子力研究開発機構）
- TPE-RX装置（産総研）

ワーキング・グループ報告は日本の核融合研究のあり方について答申されたものですから、その対象は大学のみにとどまるものではありません。

## 7. 双方向型共同研究課題の公募から採択までのプロセスについて

### [ご質問]

核融合研を中心に重要課題が集約され、各研究センターがこれを分担する仕組みになっているにも拘わらず、各研究センターが核融合研に改めて双方向型共同研究の申し込みを行い、審査・採択の手続きを経るというプロセスが判りにくい。

### [回答]

双方向型共同研究の課題採択プロセスは以下の通りです。

1. 双方向型共同研究の中核となる4研究センターの分担課題は、その進捗状況、計画などを双方向型共同研究委員会で議論しています。
2. 双方向型共同研究には、(1) この分担課題と(2) 大学等の研究者がセンターで実施する自由な共同研究テーマがあります。(1)は主にセンターと核融合研で行う共同研究で「ベースとなる共同研究」と呼んでおり、核融合研以外の大学等の研究者も参加しています。これら(1)(2)とも、核融合研が公募します。
3. 透明性、公平性の確保などの観点から、(1)の場合でも、センターに分担課題を応募課題として、双方向型共同研究の公募に、応募して頂いております。応募してきた研究課題について、双方向型共同研究委員会では、応募書類、前年度の成果報告書などに基づき、(1)(2)にかかわらず全て評価し、その結果に基づいて採択しております。
4. 但し、(2)については、双方向型共同研究委員会の評価を添えて各センターに送り、実施できるものであるか否かを含め、センターのご意見を伺った上で、双方向型共同研究委員会で採択の可否を決定しています。
5. センターから応募した(1)の評価が低く、採択されない場合には、その研究センターで行う(2)の共同研究は全て採択されないこととなります。このようなことは実際には想定していませんが、他の共同研究と同様に評価を受けて、評価を(1)の研究にも反映させていく必要があると考えています。
6. 最終的な採択は、核融合研・運営会議の承認事項となります。
7. 採択後、ベースとなる共同研究について、核融合研と研究センターの所属する大学との間で共同研究契約を結び、研究経費が核融合研から各センターに移算されます。