

核融合を発展させる学術研究のあり方（アピール）

2007年6月8日

社団法人 プラズマ・核融合学会

目次

序文

1．核融合研究の現状と課題

- 1.1) 新たな時代を迎える核融合研究
- 1.2) わが国の核融合研究の推進体制
- 1.3) 核融合を発展させる学術とは
- 1.4) 開発と学術を繋ぐ知の循環と学際性

2．核融合を発展させる学術研究のあり方

- 2.1) これからの学術的課題
- 2.2) 総合される知と還元される知
- 2.3) 精密科学を目指して

3．学会としての取り組みと提言

- 3.1) 存在感のある分野となるために
- 3.2) 国際化 とくに ITER および Broader Approach を支える研究体制
- 3.3) 学際化 とくに分野間交流、成果の発信など
- 3.4) 社会的理解を得るために
- 3.5) 人材育成

4．まとめ

付録

序文

核融合研究が「ITER時代」を迎えようとしている今、この分野における「学術研究」の意味と役割について、私たちは新しい認識を持ち始めている。ITER（国際熱核融合実験炉計画：International Thermonuclear Experimental Reactor）は、一つの実験プロジェクトという範囲を超えて、次のような時代背景を生み出そうとしているからである。

（１）ITERとBA（幅広いアプローチ：Broader Approach）を中核とした核融合研究の推進によって、核融合エネルギー実用化へ向けた一つの具体的シナリオが提示されようとしている。

（２）ITERとBAによって具体化された路線とスケジュールに沿った「開発」を可能とするために、学界が総力をあげて協力することが求められている。

一方で、この巨大実験プロジェクトは「学術研究」の全体を包摂するものではない。学術は、常に多様化し進化し浸透する運動性こそを本質とするからである。核融合エネルギーの実現という未踏の領域へ挑戦する研究は、こうした学術の土壌から芽吹き成長してきた。エネルギー開発という側面において核融合研究が新しい段階に入ろうとしている現在、学術研究はどのように進化し、さらにどういった新しい領域へ浸透できるのか？ ITERのようなプロジェクトの前線から、どのような新しいテーマが散種されようとしているのか？ このような問いを立て、私たちの分野の現状と未来を言葉にして記述したもの、これが本提言である。

本提言は、(1)学会員および学界に対して、核融合の学術に関する認識を促すためのアピール（第1,2章）、(2)学会員および社会に対して、学術振興のために学会が行う活動方針の言明（第3章）、(3)行政機関などに対して、学術振興のために必要で有効な政策の提言（第3章）、という3つの要素を含んでいる。これらは、いわば理念の次元での考察をまとめたものである。学会の活動としては、より具体的な次元でこの分野に関連するテーマを俯瞰し、幾つもの軸に展開する研究の様々な可能性を示すことが重要である。そのための継続的な学会活動に対し、この分野の中および外からの関心を喚起することができれば、この提言の目的が果たされたといえよう。

1. 核融合研究の現状と課題

1.1) 新たな時代を迎える核融合研究

世界の核融合コミュニティは、核融合エネルギー実用化への具体的シナリオを、社会へむけて提示した。すなわち、ITER を中核とした核融合エネルギー実現への路線（ロードマップ）である。学界は総力をあげて、その妥当性を学術的に裏付けてゆく義務を社会に対して負ったといえる。

核融合炉心プラズマおよびエネルギープラントを構成する諸機器は、極めて複雑な連関をもつ巨大な非線形システムである。そこで起こる様々な現象の科学的理由がわからない限り、再現性、信頼性、発展性が不確定であり、開発に巨額の資金を投じるには大きなリスクが生じる。核融合エネルギー開発は、太陽中心核の10倍という超高温の世界で起こる様々な未知の現象を、実験的・理論的に解明してゆくという学術研究によって切り拓かれてきた科学技術プロジェクトであり、まだいくつもの超えるべきハードル（学術的課題）がある。安定的長時間運転、ディスラプション抑制、高ベータ化、様々な工学的最適化と制御性の確保などである。核融合研究は、開発目標へ向けた知の総合と、未解決問題を科学的・技術的課題へ還元し学術の地平へ散種してゆくことの双方向性、すなわち「知の循環」を必要としている。

1.2) わが国の核融合研究の推進体制

1955年、第1回原子力平和利用国際会議において、核融合エネルギーは軍事研究のベールから解き放たれ、平和利用を目的とした国際的な情報公開が図られた。わが国では、湯川秀樹博士に代表される先駆者たちが、その重要性を早くに認識し、1957年には核融合反応懇談会が開催され、翌年には核融合懇談会が発足した。同時に研究連絡誌「核融合研究」が創刊されている。さらに、組織的な制度設計を進め、それを全国共同利用機関である名古屋大学プラズマ研究所として年月を置かず体現させた。前者の「核融合懇談会」は社団法人プラズマ・核融合学会へ、「プラズマ研究所」は大学共同利用機関である核融合科学研究所（NIFS）へと、創設の理念の根本は変えずして、継承、発展している。こうして、わが国のプラズマ・核融合研究は盤石な学術基盤を築くことができた。

核融合研究の本質は最先端の物理の理解と科学技術の高度な統合であり、そのためには幅広い学術基盤を構築しつつ、目的を一にした研究者のネットワークを構成することが必要である。このために設立された核融合研究ネットワーク*（補足1）の役割は、今後さらに大きくなるものと期待される。

核融合研究が目指す超高温プラズマの制御には、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が必要であり、これ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って、計画された着実な進歩と計画にはなかった新たな発見が相互に干渉し、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が、一方では、核融合炉実現に近づくための大型化した実験研究を行うための研究資源の集中化と組織化が必要である。わが国では、研究を階層的に整理したグランドデザインを提示して、多元的な研究の展開を可能にしようとしている。すなわち、科学技術・学術審議会・学術分科会・基本問題検討委員会・核融合研究ワーキンググループの報告書では、ITERにおける核燃焼実験の必要性に加えて、トカマク国内重点化装置（JT-60U およびその後継）、核融合材料試験装置（IFMIF/EVEDA）、レーザー高速点火（FIREX）と大型ヘリカル装置（LHD）を重点化装置として位置づけて、研究資源の集中をはかることの有効性と、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ている。

平成 17 年 10 月 14 日に閣議決定された「原子力政策大綱」は、核融合をとりあげて、今後 10 年間程度を見込んだ国の安全保障の根幹となるエネルギー政策のなかで「革新的な技術概念に基づく技術システムの実現可能性を探索する研究開発」と位置づけている。ここでは、核融合研究は基礎研究に軸足をおき長期的な取り組みを進める段階にあると判断されている。この考え方に基づいて、原子力委員会核融合専門部会報告書「今後の核融合研究開発の推進方策について」（平成 17 年 10 月 26 日）にあるように、核融合エネルギーの早期実現の観点から、ITER を中核としたトカマク方式の核融合研究開発において、次の段階を見通した開発戦略を、ITER と連携する国内計画および国際協力計画を構築しつつ進めることが述べられている。これに合わせて、核融合研究開発では、学術研究による新たな知の発見が開発研究の加速につながるという相乗効果が顕著であることから、今後の研究開発の進展には学術研究の成果を重視することが必要不可欠であることが指摘されている。

1.3) 核融合を発展させる学術とは

「学術」という言葉が意味する内容は、純粋な真理の探求から人間生活および社会と結びついた価値の創造あるいはその批判にいたるまで、極めて大きな広がりをもつ。私たちは「核融合」というキーワードを媒介項にして、宇宙のプロセスに関する諸科学を究極的なエネルギー源を求める技術開発に結びつける、新たな科学・技術の地平を作り出した。さまざまな科学的知見と高度な技術を総合する核融合エネルギー開発は、この学術の地平に根を張って成長し実を結ぼうとしている。もちろん、それは孤立した一本の樹の生長ではなく、深く豊かな森が形成されるプロセスである。核融合を発展させる学術とは、この知の大地と森に他ならない。

核融合エネルギーの実用化という開発研究の目的と、純粋な真理の探究という科学の目的は、本来異なる方向性をもつ。学術の地平は、こうした異なる方向性によって展開される高次元の空間であり、そこに繁茂する多様性こそが学術の進化の証である。ここにいう学術の多様性とは、単に様々な実験方式の多数性を意味するものではない。固有の実験体系を超越した、一般化可能な知を媒介とする重層的な「ネットワーク」を指すのである。

開発の最前線をリードする巨大プロジェクトも、まだ生まれたばかりの新しいアイデアの芽も、このネットワークを通じて知の循環を生み出し、学術の森を生き続けさせるであろう。さらに、ネットワークは私たちの分野を他の近隣分野へと繋ぐ広がりを作り出すであろう。

1.4) 開発と学術を繋ぐ知の循環の必要性

開発は先端を切り開く役割を担い、学術は一般化を通じて知を伝播・継承する役割をもつ。真に独創的な技術の開発は高度な学術の基礎の上で初めて可能であり、他方、学術は具体的な目的意識をもったフロンティアの開拓によって新しい版図を獲得する。開発と学術の融合によって、新たな価値と知が創造されるのである。核融合研究においては、その時間的プロセスにおいても、基礎学術研究の段階と開発研究の段階が強く融合していることが重要な特徴である。他の多くの分野における技術開発では、学術研究から開発研究そして製品化というプロセスは、それぞれの担い手が大学などの基礎研究機関から企業などの開発研究部門そして製造部門へと移行する。これに対して、核融合研究の現段階では、学術研究と開発研究の協働が重要である。

では「これからの核融合研究」という位相において、この両者はどのような結合を作るだろうか。核融合研究の最前線に位置づけられる ITER は今後約 30 年にわたる巨大なプロジェクトであり、これには否応なく多くの研究資源が集中される。しかし、この計画は決して自動的に進行するプログラムではなく、成果は予断を許さない。いわば「後方」からの不断の支援があってはじめて遂行可能な長期的プロジェクトである。当然のことながら、前線での収穫が後方へ還元されることが支援を成り立たせる条件である。すなわち、ITER というプロジェクトからのアウトプットは、前線を次の局面（実証炉の段階）へ進めるために必須であると同時に、学術や技術として一般化され他の分野や新しい科学技術の領域へ散種されなくてはならない。

このようなプロジェクトと学術基盤、前線と後方という関係は、これまで私たちの分野が構築してきた体制とは異なる位相を定めようとしている。すなわち、独立ないくつもの可能性を追求する競争から、むしろ差異を包摂する一般的な原理の探求を目指す、体系的な研究体制への転移である。後者を可能とするのは、精密で一般化された概念を媒介として行われる「コミュニケーション」である。これからの核融合研究は「戦略」から「コミュニケーション」の時代へ転移するといつてよかろう。私たち「コミュニティー」は、この秩序の転移を十分に我がものとするために、新しい時代を自ら設計しなくてはならない。その具体像を 2 章で論じる。

2. 核融合を進展させる学術研究のあり方

2.1) これからの学術的課題

第1章で述べたように、核融合研究は新しい時代に入ろうとしている。この段階において、これからの学術的課題を俯瞰しておくことは、私たちの学問的アイデンティティを明確にする意味においても、また核融合エネルギー実用化へのロードマップを明示するためにも有用であろう。もちろん、ここで記述できるのは一般化（抽象化）された形でのテーマであって、個々の実験条件や理論的前提に依存する実体的な課題ではない。後者は、それぞれの研究者の創意に属するものだからである。

(a) 核燃焼プラズマの段階へ

ITER が目指す核燃焼プラズマは、科学として未体験の領域への挑戦である。これまでの基礎研究によって蓄積された膨大なデータベースに基づく予測や、高度な理論モデル、複雑な現象を統合する大規模数値シミュレーションなどにより、ITER において核燃焼が実現することには確信を持てる一方、核燃焼によって発生するエネルギーで自律的に超高温状態を保持しなくてはならない核燃焼プラズマの物理には、未知の要素が多く残されている。

核燃焼プラズマは、電子の運動に係わる微視的なスケールから、炉心プラズマの全体が揺動する巨視的なスケールまで、多階層にわたる物理現象が複雑に連関する非線形システムである。たとえば、炉心プラズマで発生する核融合エネルギーは、様々なスケールで起こるプラズマの集団運動を通じて、最終的には壁・ダイバータへと輸送される。この間には数億度から数万度までの温度差があり、炉心部の完全電離プラズマを支配する無衝突集団現象から境界領域の低温プラズマを支配する原子・分子過程、放射過程を含む弱電離プラズマ現象までが、一つの自律的システムを構成するのである。このような非平衡・非線形系の複雑現象は、まさに現代物理の中核をなす難問であり、核燃焼プラズマを精密に理解し安定に制御しようとするという私たちの目標は、こうした基礎学術研究に極めて強い目的意識と動機を与えるであろう。

核燃焼の現象が直接研究できる実験装置は ITER であるが、核融合エネルギーの実用化に向けた研究開発は ITER プロジェクトのみをもって十分なものではない。とくに、炉心プラズマの高ベータ化、定常化およびプラズマ - 壁相互作用に係わる困難の克服がプラズマ関連の緊急的課題であり、これらの研究開発には ITER を補完するプロジェクトが必要とされる。BA の枠で進められる JT-60SA 計画や、その他の重点化計画である LHD 計画、レーザー核融合、炉工学研究がその役割を担っている。さらに、大規模な数値シミュレーションを含むモデル化の研究によって、実験装置固有の特性を超えた一般的な理解の基礎を築くことが必要である。このような複層的研究が有機的な結合をもって推進されるために、知の循環を媒介する国際的・学際的なネットワークが構築されなくてはならない。このために本学会および核融合研究ネットワーク*（補足1）が果たすべき役割は重い。

(b) 新たな可能性の追求

科学者・技術者は、未知の可能性を発見しようとする革新的発想によって動機付けられ

るものである。新しい発見は、必ずしも大型化・長期化したプロジェクト研究の枠組みを必要としない。このことにこそ、多様な研究環境に生きる研究者たちの希望があり、優秀な学生を引き付ける魅力がある。新たな可能性の探求を鼓舞する文化がなくては、この分野は「学」として存続できない。

新たな可能性は、核融合エネルギーの開発という一方向に収斂してしまうのではなく、むしろ多様化する運動性を保持し、異なる分野の科学や技術、さらには全く新しい知の地平へ散種する力をもつことで、より大きな意味を獲得する。この点において大学など学術研究教育機関が大きな役割を果たす必要がある。

(c) 「核融合工学」の確立に向けて

核燃焼プラズマの研究が開始される ITER 時代は、核融合研究が原子力技術開発として本格的な段階に進むことを意味している。これまでの核融合研究は、炉心プラズマに関する主に物理学的な研究と、「炉工学」という総称で括られる様々な工学的研究が、一定の距離をもって平行して進められてきた。しかし、核融合エネルギー開発が、実験炉、実証炉へと進む中で、いわゆる「核融合工学」が、上記の二者の融合体として確立しなくてはならない。

核融合炉の材料は、高温・高熱流束、重照射、腐食環境などの複合化された厳しい環境で所定の性能を達成する必要がある。BA の枠組みで推進される IFMIF-EVEDA 活動は、これまでに基礎研究で培われた知識ベースを IFMIF の高度利用に向けて集約するプロセスであると同時に、さらに実証炉に向けた信頼性・一般性のある材料挙動モデルを構築する学術研究の場でもある。ここでも、核融合炉の具体化に向けた知の総合化と、より広い工学知という地平への展開という双方性において大学など学術研究教育機関が果たす役割は大きい。たとえば、核融合炉ブランケットは、材料科学のみでなく、トリチウム増殖・循環、熱・構造、中性子工学、など多彩な工学分野を繋ぐ開発テーマである。同様に、プラズマ加熱機器、制御機器、計装といった核融合炉の各コンポーネントそれぞれが、先端的極限技術として高い工学的目標を提示するテーマである。安全性、とりわけトリチウムや放射化の問題は、社会が核融合炉をエネルギープラントとして受け入れる必要条件の一つとして、真摯な研究が行われなくてはならない。

炉心プラズマを含む全てのコンポーネントが、一つの自己無同着な総合システムに構成されて核融合炉が成立する。「核融合工学」は、この総合システムの設計、運転、安全性、経済および社会適応に関する学として体系化されなくてはならない。

2.2) 総合される知と還元される知

核融合エネルギー開発は、広範な基礎科学とさまざまな基盤技術を総合するプロジェクトであり、それぞれの分野で展開される高度で精密な研究とプロジェクトの前線が不断のコミュニケーションをもつ必要がある。このコミュニケーションは、プロジェクトが各分野から最新の成果を拝借して総合する一方的な関係ではなく、プロジェクトの現場で生ま

れる具体的な問題群を一般化可能な諸課題に還元し、各専門分野を刺激する逆方向の運動性をもつことで双方向的となりえる。ITERなどの巨大プロジェクトへ向けた知の集結と、それを支える学術の広大な大地への新たな知の散種、この二つの方向性をもつ知の循環があって初めて、核融合研究の「コミュニティ」が成立するのである。このような知の循環系がどのようなものであるのかを、具体的な例で考えてみよう。

炉心プラズマの高性能化は、核融合エネルギー実用化の可否を決する最も重要な課題であり、このためには高ベータ化、定常化、高閉じ込め（輸送）特性化などの課題がある。例えば高ベータ化のためには、プラズマの平衡や安定性に関する精密な設計計算が必要である。これまでの研究で、静止平衡に関する2次元平衡計算や電磁流体力学（MHD）安定性の解析はほぼ完成された水準に至っており、実際に炉心プラズマ設計に使えるベンチマークされた解析コードが整備されている。これらの基礎となっているのは、いずれも数理物理学の理論として一時代を画した高度なものであり、ここに応用の前線と科学の本流との緊密な連携の成果を見ることができる。しかし、2次元静止平衡とその安定性だけでは、これからの高性能核融合炉心を考える理論としては不十分である。例えば、流れの効果で安定性や閉じ込め特性が大きく変化することが示されており、これを高性能化に利用しようという研究が盛んになっている。流れをもつ平衡の理論は極めて根本的な困難が残されており、また流れの効果を考慮すると、安定性理論は数学的に未知の領域となる。また、ヘリカル系の3次元性についても、とくに高ベータ領域で摂動的アプローチの限界が見えつつある。3次元平衡の問題は最も難しい偏微分方程式理論の一つであり、厳密な理論も近似法も全く未解明である。これらは、いずれも数理物理学の一級の未解決問題であり、まさにプロジェクト研究の前線から基礎学術への強い要請となっている。

プロジェクト研究の最前線を規定する課題を、科学の一般的問題に還元することができれば、プロジェクト研究という「縦系」と学術研究という「横系」の交叉が生み出される。横系は、核融合研究を他の科学・技術の諸分野と繋いで広い知のネットワークを形成する。上記の例でも、炉心プラズマの高性能化という課題は、流れの効果についての物理や数理という横系によって、流体力学や宇宙・天体現象の物理、非線形数理の諸分野と接続され、知の交流から新しい展開が期待できる。レーザー核融合の研究でも、高エネルギー密度領域という一つの特徴的な物質パラメタ領域に科学・技術の関心を誘導し、素過程の丹念な研究から未知のマクロ現象の発見、プラズマ宇宙物理への応用まで、多様な研究を包摂する新領域が生まれようとしている。

総合と還元の関係は、工学の領域ではより日常的である。開発目標の特殊性と要素技術の一般性によって縦系・横系を構成するのが工学だからである。例えば、低放射化材料の開発では、低放射化元素のみを用いて新材料を開発する挑戦が続けられている。そこでは、元素の物性についての高度な科学知を駆使して材料設計が行われる。物質科学は、還元と総合が最も成功した象徴的分野といえるだろう。他にも、高出力発振器や強磁場超伝導などに代表される極限技術の開発は、基盤的な技術の発展を先導すると同時に、新しい技術

応用（宇宙推進や電力機器）の芽を生もうとしている。極限的な非線形・複雑系ともいえる核融合プラズマの数値シミュレーション技術は、プラズマの半導体製造プロセスの解明にも応用されつつある。プラズマ計測技術も同様である。プラズマと材料の相互作用は、表面科学へまた放射過程を含めて原子・分子科学での新たな発見をもたらしつつある。複雑で巨大な核融合炉の制御技術は、制御工学やシステム工学に新たな展開をもたらすであろう。たとえば、ディスラプションの回避は、複雑非線形システムの高度な予測制御の典型であり、学習制御やカオス工学の分野に強い刺激を与えるはずである。核燃焼によって自律する核融合炉の各コンポーネントは、あたかも生命を支える諸機関と同じように、非線形多層組織体を構成している。このような自律系の安定性と制御に関する理工学は、極めて高度な科学技術の新領域として注目されるであろう。

還元され一般化された知によって科学・技術のネットワークを築いてゆくことは、大学をはじめとする基礎研究・教育機関の役目であり、核融合研究の先端が切り開く新たな版図を学術の地平にプロットしてゆくための広い視野と深い学識を、私たちのコミュニティが培ってゆかなくてはならない。

2.3) 精密科学を目指して

学術は、一般化された知を継承することで進化し、地平を拡大する。時代と領域を超えて伝播することができるのは、精密な論理に支えられた知のみである。科学の論理的精度を高めるためには、多角的な視線からの検証が必要である。学問の本性ともいえる批判的気質が、目的論的な排他性にとって代わられることが仮にあるとするならば、その分野はやがて欺瞞に満たされ、衰退が避けられないであろう。学術は多様性の森で行われる淘汰によって自らを高めるのであり、その進化のプロセスに予定調和はありえないのである。とりわけ巨大で長期的なプロジェクトを推進しようとするとき、研究者コミュニティは規定された路線上の惰性を常に警戒しなくてはならない。

あらゆる学問が、そしてしばしば技術さえもがそうであるように、私たちは何が「最適な選択」であるかを知らない。しかし、常に仮の選択を行うことで前進する。仮の選択は、そこで立てる仮説についての検証作業を未来に求める。論理的精度を高め、選択の合理性を証明してゆくこと、これが科学の発展であり、科学の所産は選択したそのものではなく精密化された一般知なのである。

核融合研究は、その大規模性のために、実験・開発段階において厳しい選択と集中を求められている。私たちは、プロジェクトの選択を、学術の淘汰と錯覚してはならない。例えば、ITER というプロジェクトにおいて選択された一つの装置設計は、そこに立てられた多くの仮説の検証を宿題として提示している。その検証プロセスこそが科学の淘汰プロセスであり、ITER を取り囲む多様な関連研究の中から真に精密な知を生み出してゆくことが求められているのである。

例えば、ITER の基本的なパラメタは膨大な実験データに基づく経験則（スケーリング則）

によって仮定されている。その蓋然性に疑う余地は少ないが、プラズマの閉じ込め特性を決定する輸送現象が一般的に理解されているわけではない。そのために、経験則の適用範囲は極めて狭い範囲に限られており、炉心形状を変えたり、磁場配位を変えたりしたときに、プラズマの閉じ込め特性がどう変化するかを予測することは難しい。プラズマの閉じ込め特性を決定する輸送現象は、プラズマ中で起こる様々なスケールの乱流によって支配されている。乱流は無制限自由度の非線形現象であるから、そのマクロな特性（例えば「閉じ込め時間」として評価される全体的なエネルギーのバランス関係）に影響を与えるパラメータは、原理的には無限にある。いわゆるスケーリング則とは、マクロな諸量（閉じ込め時間、装置のサイズ、磁場の平均強度、プラズマの平均温度や平均密度など）の間の関係を経験的に表現したものであるが、それはメソやミクロの階層にある無限の自由度を切断し、マクロ階層だけで閉じた表現をとる。しかし、マクロな諸量の間には、メソやミクロな階層の「構造」が影響を与える。このために、スケーリング則による閉じ込め特性の表現と理解には本質的な不可能性があるのである。例えば、輸送障壁といわれるプラズマ内部の構造が自発的に形成され、熱・粒子輸送が劇的に軽減する分岐現象が起こることが分かってきた。この輸送障壁は、ITERの基本設計に仮定されているが、そのメカニズムが完全に理解できたわけではない。輸送障壁の形成は、核融合炉心プラズマ設計という研究開発の根幹に大きなインパクトを与えると同時に、乱流の非線形効果、マルチスケールの構造形成といった、科学の大きな文脈の中で重要な位置づけをもつ研究課題でもある。

この例のように、研究プロジェクトの成否を決定付ける重要課題が、科学の広い地平で展開する学術研究と交叉するところに精密科学の課題が生まれる。ITERなど大型の開発プロジェクト自体が科学的な精度を高めるべきであることは言うまでもない。さらに、これに関連する多様な学術研究の視点が有機的な連携をもつよう、コミュニティーの連絡をより一層密にする必要がある。

3. 学会としての取り組みと提言

3.1) 存在感のある学術分野となるために

今後長期間にわたって核融合エネルギーの開発を推進するためには、他分野の支援を得ること、優秀な人材を引き付け育てること、社会の理解を得ることなどが必要である。これらは、プラズマ・核融合の研究が学術の世界において独自の存在感をもつということに他ならない。第2章で述べたように、学術としての存在感は、科学として普遍的なテーマを他分野と共有し、高いレベルの研究成果をあげ、それらを広く発信することによって得ることができる。本学会は、私たちの分野の存在感を高めるために学会が果たすべき役割と取り組むべき課題について、会員と不断の対話を続けてゆく。

学会は、研究者の集まりとして、その集団的なアイデンティティを体現するものである。プラズマ・核融合学会は、「プラズマ」という学際的なキーワードと「核融合」とい

う固有の目的を表すキーワードを掲げている。この両者を、いわば横糸と縦糸として交叉させる学術活動を支援し発展させることこそ、本学会の使命である。本学会の学術的アイデンティティーを明確にし、どのようなテーマを媒介として他分野と結合が作られ、どのような成果で他分野を牽引する力を持つのか、これらを俯瞰する「地図」を学会が中心となって提示する努力を行っていききたい。

本学会は、プラズマというキーワードを媒介項として、他の学会に所属する研究者と活発な情報交換や研究交流の機会を企画してきた。核融合エネルギー連合講演会、プラズマ科学シンポジウム、専門講習会などである。今後も、こうした活動を活発化させ、学際性とともに国際性も高めてゆく努力を継続する。2006年に創刊した電子ジャーナル Plasma and Fusion Research は、本学会の会員に限らず世界に開かれた情報発信のメディアであり、国際的エディトリアルボードを組織して全世界のプラズマ関係研究者に快適なコミュニケーションの場を提供することを目指している。

「プラズマ」に係わる新規の分野を開拓・育成することも、学会の重要な任務である。専門委員会活動はその趣旨で立案された仕組みである。多くの研究者が本格的に取り組むべき研究課題や、成長が期待される新領域などを見定めるために、会員が知恵を出し合い、研究者のネットワークを形成してゆく活動を支援することが目的である。

3.2) 国際化 とくに ITER および Broader Approach を支える研究体制

核融合エネルギー開発は、その黎明期から今日に至るまで一貫して、国際的に開かれた研究の舞台で進められてきた。その背景には、科学を全ての人類の福祉に役立てようという科学者の崇高な精神と国際社会の期待がある。今後も一層の努力によって、この分野の国際性を堅持してゆかなくてはならない。同時に、国際的な協力と競争について明確な戦略をもち、私たちが成すべき貢献と得るべき成果を確実なものとする努力が必要である。本学会は、わが国の研究者が国際的な舞台で活躍し、学術的なリーダーシップを取れるよう、国としての環境づくりと必要な施策について提案を行ってゆく。

今後ますます国際化する核融合研究の進め方について、1)連携の強化、2)リーダーシップの発揮、という二つの側面から考える必要がある。学術的連携については、本学会は海外の学会（米国物理学会や欧州物理学会のプラズマ物理部門など）、国際的連合会議（アジアプラズマ核融合協会（APFA）、アジア・太平洋物理連合など）や国際会議（プラズマ物理会議（ICPP））と様々な協力を通じて、国際的舞台上でわが国の研究者が活躍することを支援してきた。今後も、とくにアジア諸国との連携を強めるなどの努力を行う。

リーダーシップの発揮、すなわち国際的存在感という観点は、前節で述べた学際的存在感と通底する課題を提示している。ただし、核融合研究はエネルギー開発という経済的価値に係わる国家戦略と結びついていることから、純粋な科学の研究とは異なる位相で、国際的な協力と競争を考える必要がある。とくに、ITER や BA などのように、地域間の協定に基づいて推進されるプロジェクト研究において、わが国がリーダーシップを取れるか否か

は国益に係わる問題であるから、国の施策のありかたについて、専門家集団が学術的見地から十分な提言を行う必要がある。本学会は、核融合関係の研究者のほとんど全てが所属する国内唯一の学会として、様々な機会に具体的な提言を行うべく、会員の意見を集約するプロセスを整備する。

ここでは、直近の課題として、ITER および BA を推進するための国の体制について、具体的な提言を行う。

1) 情報共有の場の整備： ITER および BA の課題を学術的に整理し、その解決に向けて多くの研究者が協力・競争する環境をつくる必要がある。学会は、このために研究集会などの機会を用意したり、会誌や専門誌（Plasma and Fusion Research 誌）に特集記事を企画したりすることが可能である。こうした情報交換の場は、国際的な広がりをもつ必要がある。とくに、わが国に立地される BA は、国際的な研究拠点として確固たる地位を確立することが期待されるが、その基盤となる研究者のネットワークについては、改善すべき課題がある。欧州には EPS、米国・カナダでは APS が国際的な活動しているのに対して、アジアには十分な国際的学会が存在しない。現在活動している学術協定 APFA（アジアプラズマ核融合協会：Asia Plasma and Fusion Association）、日中拠点大学交流、日韓拠点大学交流、炉工学関係日中ワークショップ、原子力機構における日中・日韓交流、APPTC（Asia Pacific Plasma Theory Conference）、アジアにおける物理学分野協力（AAPPS：アジア太平洋物理学連合）などを基礎として、アジア圏のネットワーク作りが急務である。国際トカマク物理活動（ITPA）*（捕捉²）においてわが国からの積極的な寄与を行うことは、国際的存在感を高めると共に、開発研究における課題を学術の地平に普遍化するための機会ともなる。今後この活動を発展させるために支援が必要である。

2) 国際共同利用・共同研究の強化： わが国が、この国際プロジェクトにおいて存在感を持ち、リーダーシップを発揮するためには、日本原子力機構と大学、NIFS が協力して研究に参加する体制を整備することが急務である。大学および NIFS の研究者が参加するためには、予算措置を伴う参加支援体制が必要である。予算の中には、研究者派遣のための経費、大学における関連学術共同研究経費、PD など研究員雇用経費が確保される必要がある。

3) ITER および BA の活動・成果に関する評価・提言： ITER および BA の活動内容および研究成果について、わが国独自の客観的評価を行う体制が必要である。長期にわたる国際プロジェクトにおいて、研究の前線で活躍する研究者とプロジェクトを支える学術基盤が、明確なモチベーションと高いモラルを維持するためには、多角的な視点からの評価・提言によって問題点を即座に解決してゆくことが必要である。本学会は、プラズマ・核融合分野の専門家集団として積極的にピアレビューを行っていく。こうしたボランティアな学術活動に基づく評価・提言をプロジェクトの推進体に反映する仕組みを整備する必要がある。

3.3) 学際化 とくに分野間交流、成果の発信など

核融合研究が開発研究に軸足を移すにしたがって、学術諸分野との交流が希薄になってきたことは否めない。核融合研究が、未だ多くの科学的な未解決問題を残し、核燃焼プラズマという未知の領域へ踏み込もうとしている段階であることを考えると、この分野が「学際性」を失って孤立することは、まさに致命的である。核融合は、様々な科学や要素技術を総合し、同時にそれらの前線を切り拓くことによってはじめて前進できるからである。第2章で述べたように、核融合エネルギー開発の前線で問題となっている課題を、学術の一般的な課題に還元する努力と、この分野の研究の精度を高め、時代と領域を超える力をもつことが求められる。これは、人材育成の課題とも通底する極めて本質的な問題であり、学界をあげて取り組む必要がある。

学際性を失うことは学術経営の観点からも致命的な失策となる。実際、ITER プロジェクトを推進し、さらに実証炉の段階へ進むためには、様々な学術分野のエンドースメントが必要である。そのためには、核融合研究の内容についての専門的知識が、学術の一般概念に還元され、科学技術の大きな文脈の中で確固たる位置づけをもたなくてはならない。これを失ったとき、核融合研究は他分野にとって、研究予算の獲得合戦における一つのライバルとしてしか意味をもたなくなる。私たちは、研究の内容を十分に語り、その圧倒的な迫力を明示する必要がある。同時に、純粹に理性的な批判は進んで受け入れ、いつでも仮説を修正する柔軟さをもたなくてはならない。科学の高いモラルによって学際的な存在感を勝ちとる努力が必要なのである。

核融合研究を、単にエネルギー開発のチャレンジの一つに留めるのではなく、学際的な研究領域として他分野の関心を引き込むためには、研究課題の平明な表象化（シンボル化）が必要であろう。例えば、核燃焼プラズマを「自律系」として捉え、その非線形ダイナミクスの安定性や多様性、多階層性を、生態系や生命現象にも通底する問題として分析しようという試みは、非線形科学のリーダーとしてプラズマ物理学が取り組むべき課題であろう。また、「高エネルギー密度」というキーワードによって、慣性核融合の研究分野の厚みを増そうという試みは、核融合研究の学際性を高めるために大いに有効であろう。核融合炉材料研究やプラズマ - 表面相互作用の研究には、物質科学や表面科学を牽引する役割を期待したい。

3.4) 社会的理解を得るために

核融合研究は、全ての人類の福祉に貢献する明確な目的をもった壮大な計画的研究である。その理念は、単なる知識欲や学問的審美主義を超えたものとして、社会から高い評価と強い期待を得てきた。一方で、核融合エネルギー実用化への科学技術的ハードルは、当初の予測よりはるかに高いものであったという事実は否めない。およそ50年の基礎研究および技術開発を経ても、未だに実用化の具体的な目途が立たないことに社会から批判や失望の表明がある。核融合研究者は、このことを真摯に受けとめ、研究開発の現状と課題を

明確にし、長期的なビジョンを提示して研究を進める必要がある。

核融合研究が社会から信頼を得るためには、高温プラズマの科学・技術をより身近なものにする努力が欠かせない。このために学会や大学などで行われる啓発活動がより活発かつ裾野の広いものになる必要がある。本学会は、これまで行ってきた公開講演会の実施や解説的書籍の発刊などによるこの活動を一層活発なものとするために、今後も会員のボランティア的支援を得てゆく努力を続ける。同時に、ITER や BA など、国策として進められているプロジェクトからの積極的な支援を期待する。

核融合に限らず、いかなる大型プロジェクト（ビッグサイエンス）も、それが予算規模という数値によって抽象化されるとき、あらゆるレベルで容易に非難と中傷の対象となる。研究の具体的な内容、現場の研究者・技術者の苦闘、コミュニティ内の真摯で厳しい議論、これらを顕在化させる努力によって、研究の多様な価値を社会に認めてもらう努力が必要である。一研究機関や一プロジェクトの広報活動を越えたコミュニティの力が求められている。

3.5) 人材育成

核融合という長期的なチャレンジを成功に導くためには、優秀な人材の育成と知の継承が最も重要な課題であることは議論を待たない。個々の教育機関の枠を超えた次元で、本学会も人材育成に真剣に取り組んできた。例えば、「プラズマ若手夏の学校」は、40年近く続いているボランティアベースの教育活動であり、当該分野の研究者のほとんど全員が、その恩恵を受けて育ったとって過言ではなかろう。専門家集団の知恵を結集した教科書の出版も重要な寄与であった。さらにはプラズマ・核融合に関する用語集あるいはハンドブックの編纂の計画もある。

人材育成をコミュニティの課題として捉えるとき、次の諸観点からの検討が必要である。まず、核融合研究の分野へ進学する優秀な学生を確保する必要がある。このためには、大学生や高校生を動機付ける適切な啓発活動（大学生初学年向けスクーリングや、SSH 活動と結びついた「高校生シンポジウム」など）が欠かせない。最も深層の次元では、前節で述べた社会的理解を得る努力が必要である。同時に、この分野の研究の「面白さ」を伝えることも大事である。大学生や高校生に対して核融合研究を紹介する機会は、必ずしも多くない。例えば、BA がわが国に立地され、国際的な研究拠点が形成されようとしている今、その近未来像を早急に提示し、社会の関心を引き付ける必要があるだろう。一方で、核融合の長期性・巨大性を一面的に喧伝することの負の側面にも十分配慮する必要がある。2.1-b 項で述べたように、真に優秀な研究者は、新たな可能性の探求、知の革命を夢見ている。核融合研究が、まだダイナミックな知の変革を予感させる学術分野であることを伝えなくてはならない。

次に、大学院生や若手研究者の育成について、個々の研究・教育機関の枠を超えた協力が必要である。前記のような全国的なスクールの開催をはじめ、様々な研究交流の機会を

設けることが有効であろう。そのための新たな制度と支援体制を導入することを国に対して積極的に提案する必要がある。若手研究者が、国際会議で発表したり、ITPA などの国際的研究活動に参加したりするなどの機会を与えることは、国際的に活躍できる研究者の育成には必須である。

この分野全体の長期的なビジョンに基づき、合理的な人材育成の計画を立てることは、文部科学行政の重要な役割である。優秀な研究者が、この分野で活躍できるためのキャリアパスが確保できなくては、上記のような人材育成の努力も出口を想定できない。とくに適切な規模の PD ポストを確保する必要がある。さらに、若手研究者が PD 以降のキャリアを順調に進めるように、分野全体の活力と人材供給のバランスを分析し、適正な学術経営が設計される必要がある。

人材育成は、決して分野の中に閉じた課題ではない。学際的な人材交流は、分野に新たな知を導入し、アカデミックな活力を高める。他分野から積極的な人材の流入を促すためには、核融合研究が直面している課題が普遍的な学術の問題群に還元され、知の交流が作り出されている必要がある。この点において、学会や大学の果たすべき役割は大きい。人材の学際的交流は、個々の研究者レベルにとどまらず、分野間の集団的交流の次元でも重要である。例えば、2.1-c 項で述べたように、核融合工学が総合工学として編成されるためには、原子力工学などの諸分野と集団的な協力によって版図を拡大する必要がある。

付録

1) 核融合研究ネットワーク

核融合研究ネットワークは、主として炉心プラズマに関連する核融合科学ネットワークと、各種炉工学を繋げる核融合炉工学ネットワークで構成されている。前者の核融合科学ネットワークはさらに基幹核融合科学、核融合制御科学、先進核融合科学、理論・計算機核融合科学そして核融合基礎科学からなる 5 個のサブジェクト・グループより成り立っている。閉じ込め方式毎に縦割りで分類された古い体制を学術的課題の下に、方式を横断して整理一新されているのが特徴である。核融合基礎科学グループは、プラズマ科学ネットワークという茫洋とした海と重なり合っている。すなわち、基礎プラズマ、プラズマ応用、宇宙プラズマを包含する広大なプラズマ科学の学術的基盤を意識しつつ、活動を展開していると言える。一方、核融合炉工学ネットワークにおいては、炉材料・燃料、電磁・マグネット、炉システム・安全性、慣性核融合という 4 つの作業グループの下に活発な活動を展開している。

核融合研究ネットワークの活動内容は、核融合研究に関わる単なる情報交換に留まらず、学術行政や ITER 誘致など、国の方針策定に関わるボトムアップの議論、学術審議会への提言、国内外共同研究の環境整備、特定領域研究などの大型科学研究費補助金獲得のための調整・支援など、核融合コミュニティにとって極めて重要な機能を果たしてきている。

2) 国際トカマク物理活動

ITER のためのトカマク物理研究における最大の国際活動。IAEA 国際核融合研究委員会の支持の下、日、米、欧、露、中、韓の 6 極が参加。調整委員会の下に、7 つの専門分野を所掌するトピカルグループがある。各グループ毎に、該当専門分野の緊急課題、中期課題、長期課題を決定し、国際データベースの構築、国際装置間比較実験(2006 年は総計 67 件)モデリングの開発、などを行い、ITER の物理タスクの解決や ITER への提言を行っている。各極から 3~5 名の委員。委員の総数は 220 名(日 40、米 40、欧 32、露 28、中 37、韓 31、ITER 12)。日本の委員 40 名は、原子力機構 16 名、核融合研 8 名、大学 16 名で構成される。現在、ITER 機構との関係が見直されつつあり、一定の独立性を保ちつつ、機構との密接な関係を持つ方向で議論されている。

7 つの専門家会合それぞれで各極の寄与がその国の存在感を高めると共に、具体的な実験提案において力を持つと考えられ、積極的な参画が期待されている。しかし、活動がボランティア的に位置づけされている点が問題点と認識されている。開発における課題を学術の場に普遍化するコミュニケーションの場としての意義も大きい。

資料 1

プラズマ・核融合学会学術検討ワーキンググループ委員名簿

	岡村昇一	核融合科学研究所教授，プラズマ・核融合学会常務理事
	尾崎 章	(株)東芝電力システム社部長，プラズマ・核融合学会理事
	鎌田 裕	日本原子力研究開発機構主任研究員
	児玉了祐	大阪大学教授
主査	高村秀一	名古屋大学教授，プラズマ・核融合学会会長
	田中和夫	大阪大学教授，プラズマ・核融合学会理事
	田中 知	東京大学教授
	藤原正巳	核融合科学研究所名誉教授，プラズマ・核融合学会副会長
	松田慎三郎	日本原子力研究開発機構執役
	室賀健夫	核融合科学研究所教授
	本島 修	核融合科学研究所所長
	森 雅博	日本原子力研究開発機構主任研究員， プラズマ・核融合学会理事
	山田弘司	核融合科学研究所教授
	山中龍彦	大阪大学名誉教授，プラズマ・核融合学会副会長
幹事	吉田善章	東京大学教授，プラズマ・核融合学会理事

(役職は 2006 年 1 月当時)

資料 2

プラズマ・核融合学会学術検討ワーキンググループおよび学会における審議経緯

1. WG の設置

プラズマ・核融合学会は、わが国の核融合コミュニティーを代表する立場から、今後の学術研究のあり方について提言をまとめるために、学術検討ワーキンググループを会長のもとに設置し、提言を起草するための作業を行うこととした。

2. WG の開催

2006年1月27日	第1回 WG	提言の目的、主題について討議
2006年3月14日	第2回 WG	提言の構成、執筆分担について討議
2006年4月21日	第3回 WG	提言の構成、内容について討議
2006年6月16日	第4回 WG	提言素案について検討

3. プラズマ・核融合学会理事会における審議および年会における討論

2005年11月28日	112 理事会	学術検討ワーキンググループの設置を決定
2005年11月29日	年会	関連報告会において提言の計画、WG 設置を報告
2006年1月12日	113 理事会	構成メンバーの決定（追加補充も今後有り）
2006年11月27日	119 理事会	提言の WG 素案について討議
2006年11月28日	年会	企画シンポジウムを開催し討議
2007年3月13日	121 理事会	提言最終案について討議
2007年6月8日	123 理事会	提言の取りまとめ