



サロン

核融合科学の新しいパラダイムに向けて —核融合科学研究所の改革

Towards a New Paradigm of Fusion Science —Evaluation of NIFS

吉田 善章

YOSHIDA Zensho

核融合科学研究所

(原稿受付：2024年6月5日)

核融合科学は新たな段階を迎えようとしている。学術研究および人材育成という長期的な取り組みを必要とする事業を担う核融合科学研究所（NIFS）は、明確な展望をもって、時代の変化を先導する役割を果たさなくてはならない。大学・アカデミアで展開する多様性、その一方で国の戦略として推進すべき大型研究プロジェクト、この両者の整合性をとることが大学共同利用機関の使命である。そのために研究所は、学際的かつ国際的な幅広いコミュニケーションを通じて「何を研究すべきか」を常に問い直し、研究計画を合意し実施するシステムとして機能しなくてはならない。ここでは、核融合研究の現状と課題を分析しつつ、NIFSが進めている改革の意味と方向性について説明し、広く注目と参画を喚起したい。

1. 核融合研究の現状と課題

1.1 核融合研究の激動期

社会の持続可能な発展に関する全世界的な議論（SDGs）のなかで、「グリーンエネルギー」の新しく強力な候補としてフュージョンエネルギー（核融合反応によって生まれるエネルギーの応用）への期待が高まっている。国は『フュージョンエネルギー・イノベーション戦略』をまとめ、研究開発を加速するための施策を示した[1]。ポイントは、フュージョンエネルギーを「産業」の文脈に位置づけながら研究開発の在り方を考えるべき段階に來たことである。こうした動きを後押ししている社会的要因として、グリーントランスフォーメーション（GX）の担い手となる技術の価値が高まっていること、ウクライナでの戦争などによって、エネルギーやサプライチェーンの安定性に関する懸念が高まっていること等があげられる。他方、技術開発の担い手側からは、全米アカデミーズ（National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine）が2021年にアピール『Bringing Fusion to the U.S. Grid』を発出したこと[2]、ローレンス・リバモア国立研究所 LLNL の NIF（National Ignition Facility）によるレーザー核融合燃焼が伝えられたこと[3]などがあって、核融合炉実現が近いという印象が社会に広まっている。とりわけ米国や英国などでは、公的研究資金をはるかに超えるベンチャーキャピタルが核融合分野に流入し（図1）、多数のスタートアップ企業が新たなステークホルダーとして参加し始めた。核融合分野は「激動」ともい

える様相を呈している。

しかしこれは、シンギュラリティーといえるようなイノベーションが起きたからではなく、フュージョンエネルギーの実用化（社会実装）への期待が高まっているなか、ハイリスク・ハイリターンを狙うベンチャーキャピタルが投資対象としてフュージョンエネルギー分野のスタートアップ企業を選択しているからである。このことを慎重に解釈すると、フュージョンエネルギーの開発は、その極めて高いメリット（経済的リターン）に比例して、極めて高い科学技術的不確実性（投資リスク）を未だ残しているという意味が浮かび上がる。核融合分野の専門家は、科学技術的な不確実性、つまり「わかっていること」

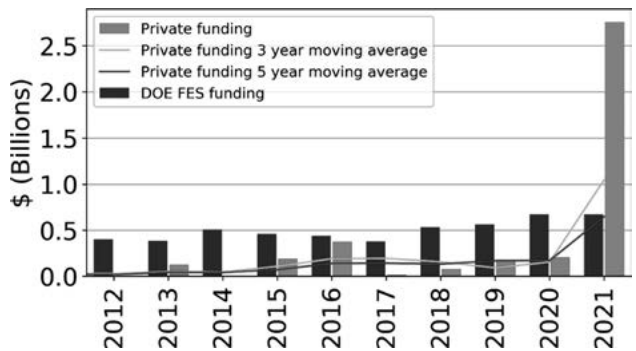


図1 米国における核融合研究費の推移。

出典：<https://science.osti.gov/-/media/fes/pdf/fes-presentations/2022/Wurzel---PPP-Lightning-round-talk.pdf>

と「未だわからないこと」の境界について、社会の正確な理解を促す責任がある¹。

私たちが経験している「激動期」においてこそ、学術の真価が問われる。科学が社会の信頼の拠り所にならなくてはならない。経験則の限界を理解し、知の技法の矩を守らなくてはならない。不確実性の霧のなかで「夢」と現実の乖離が増幅されることを防がなくてはならない。予測精度が高い科学知を構築し、イノベーションの指導原理を提供するという積極的な役割を果たさなくてはならない。

1.2 学術研究の危機

核融合研究を巡って、社会現象としての「激動」と並行して、わが国の学術界においても、2020年は大きな転換点となった。2022年度で終了するLHDフロンティア事業²の後継としてNIFSが提案した計画³がロードマップ2020[3]に採択されず、核融合科学分野の大型プロジェクトを大規模学術フロンティア促進事業（以下「フロンティア事業」という）の枠組みによって推進することが当面不可能になった。ロードマップ2020は、日本学術会議のマスタープラン2020[4]の審査結果を参照しつつ、文部科学省の研究環境基盤部会・学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会（以下「大プロ作業部会」という）が策定したものである。これに採択されなかったということは、端的に言えば、学術界はNIFSが提案したアカデミックプランの優先度を不十分と判断したということである。核融合研究は、学術研究の一分野として、その在り方を抜本的に見直すべき時期を迎えているのである。この危機をどのような「進化」に結びつけることができるのか、上記のような社会の期待に応えられる「再生」は可能か、今の時代を生きる当事者の知性が試されている。

このような問題意識にたつて、NIFSでは2021年度から2年ほどをかけて、広い学術界と議論を重ね、アカデミックプランの刷新に取り組んだ[5]。その内容は第2節以降で述べることとし、ここではこの危機的状況がどうして起きたのか、歴史に基づいた原因の分析に紙面を割きたい。

1.3 歴史からの教訓

核融合研究の黎明期（1950年代）において、わが国では「湯川委員会」が「高温プラズマの諸性質について一層理解を深めることの必要性」を強調している⁴。そのな

かで、多様な案から可能性を探索する基礎重視の研究（A計画）と、諸外国とのパラメータ競争を重んじる研究（B計画）が並走する体制を提案している。現代の観点からは、A計画が学術研究、B計画が開発研究に対応するように思えるが、当時は未だ学術と開発という明確な概念があったようではない。ただ、核融合の基礎研究の重要性、および天体物理学や工学諸分野との学際性の観点から、A計画を実施するための共同研究機関として「プラズマ研究所」を設立することを、当時の文部省へ提言するよう、1959年の日本学術会議総会で決定している。他方、B計画に関する具体的な検討の受皿として、同じく1959年に、日本原子力研究所に核融合研究委員会が置かれている。A計画の趣旨は大学およびその共同利用機関であるプラズマ研究所に、B計画の趣旨は日本原子力研究所によって引き受けられたと考えてよい。

核融合研究の大学共同利用研究所として、1961年に、名古屋大学・プラズマ研究所が設立された。1989年に、プラズマ研究所と京都大学・ヘリオトロン核融合研究センターおよび広島大学・核融合理論研究センターを母体として発足したNIFSは、1998年に、中核装置として大型ヘリカル装置（LHD）を建設した。ヘリカル型が選択された主な理由は、世界の大規模実験装置がトカマク型に偏るなかで、磁場閉じ込めプラズマの一般的な理解を得るためには、磁場構造の多様性に関する研究が重要であるという点にあるが、さらに、同種装置のなかで世界トップの座を占めるという研究戦略もあった[6]。現在でも、2015年に実験を始めたW-7X（ドイツ）と双壁の位置にある。さらに、プラズマ内部の構造を透視する診断能力において、トカマクも含めて、LHDは世界最高レベルの時空間分解能をもっている。このLHDをはじめ、NIFSで行われてきた研究は「核融合科学の総合的研究」（文部科学省令）を目的として着実に進められてきた。

しかし、この20年あまりの間に、ヘリカル型核融合炉の開発という目的が、本来の学術研究よりも前面に出ることが多くなってきた。その背景には、NIFSの選んだ核融合科学の「パラダイム」すなわち「主題設定の枠組み」が、装置比較を中心的テーマとして構築されてきたことがある⁵。パラメータ競争はわかりやすい課題設定であるが、学問としての目標としては浅薄にして偏狭であると言わ

1 Budil Kimberly (Director of LLNL) は STS forum 2023 のセッション「fusion energy」において、NIF の成果にふれて「It is important to be realistic and manage people's expectations」と発言し、膨張し浮遊する期待への警戒感を表明している。

2 文部科学省の大規模学術フロンティア推進事業として2013年度から10年間の計画で実施されたLHDを用いたプロジェクト「超高性能プラズマの定常運転の実証」。

3 「定常高温核融合プラズマを実現する粒子・エネルギー循環の学理」として2023年度から始まる6年の計画であり、その内3年間重水素実験を行うとしたもの。

4 原子力委員会核融合専門部会（部会長：湯川秀樹）は、1959年、『核融合反応の研究の進め方について』を答申している。そこに「今後の研究方針」として、柔軟性をもった研究体制として、二つの計画を並列して実施することを提案している。すなわち(A)基礎研究に重点を置き、新しい着想の育成と具体化をはかると共に、新しい研究分野に働く研究者を育成すること、および(B)諸外国である程度成功の可能性の示された実験装置、またはその改良型を建設し、その建設過程において得られる経験と、作られた高温プラズマの利用によって、速やかにわが国の研究水準の向上をはかること、という二つである。

5 主力装置が研究所の「フラッグシップ（旗艦）」ということはあっても、それがアイデンティティーであるというのは明らかに異常である。NIFSは2010年に、研究組織を「ヘリカル研究部」の一つに改組し、自ら「ヘリカル」をアイデンティティーとする全体主義の道を選択した。その結果、原型炉としてトカマク型が選択される現状において、「ヘリカル研究所」であるNIFSは「学理を失った」とまで批判される事態を招いた。

ざるを得ない。こうしたなかで、開発と学術の関係性は、核融合炉開発の主要と代替案の関係性に置き換わることになり、開発研究機関は主要の研究、学術研究機関は代替案の研究という認識をも生むこととなった。代替案のリリーフとしての価値は、主要との相対性においてしか評価されない。ITERを見ても、各国の原型炉計画を見ても、トカマク型を選択している世界の趨勢のもとで、マスタープラン2020およびロードマップ2020に提案されたNIFSの計画は「ヘリカル型核融合炉」に向けた「開発志向」の研究計画と判断され⁶、その意義に否定的な判断が下された。学術の大型プロジェクトとしての価値は評価されなかったのである。

このように歴史を紐解くと、NIFSが陥ったアイデンティティーの危機は、学術（A計画）と開発（B計画）という二元論を敢えて縮退させ、核融合エネルギー実現に向けた装置方式の競争という一次元的な軸上で、「代替方式」という二番手の位置を選択したことに起源することが分かる。上記のように、NIFSがヘリカル型の実験装置LHDを選択した当初の理由は全く異なる次元のものであったにも拘わらず、「トカマク対ヘリカルの競争」というストーリーから抜け出せず、パラメータ競争の構図のなかでしかアイデンティティーを示せなくなっていたと言わざるを得ない。

1.4 学術研究の本来的な役割

独創的なアイデアや先進性を重んじる学術研究が、「代替案alternative」を生み出すことをめざすということは、その「本分」であることに間違いはない。しかし、核融合エネルギー開発の現実において、「alternative」が具体的に何を意味するのかを的確に理解する必要がある。

多くの技術分野では、複数の試作機を比較検討しつつ、最終案へ収斂させる戦略がとられる。核融合エネルギー開発においても、これまでそのようなイメージがあった。しかし、現段階において、主要（トカマク型）と代替案（他の閉じ込め方式）の成熟度には大きな差が生じており、複数案の同期をとることは困難になっている。しかし、

主要の「一本槍路線」には多くの不確実性が残されている。一つの試作機の規模を考えると、不確実性のなかでも「デファクトスタンダード」に研究資源を集中することが求められるが、その開発の過程で生じる困難を個別的な課題に還元し、「パーツ」あるいは「遺伝子」のレベルでalternativeに置き換え解決する能力をもつ必要がある。学術研究は、炉形式という「総体」あるいは「パッケージ」のalternativeを用意するのではなく、「遺伝子」のalternativeを生み出すことで開発研究と協働するという体制こそが有効に機能する。ここでは、いろいろな対象において発現し得る情報という意味で、「遺伝子」という隠喩を用いた。科学的技法によって緒現象の原因を突き止め、さまざまな対象で応用できる方法や概念として一般化する、これこそが学術研究の営みである。

2. 学術研究の高度化へ向けたパラダイム転換

2.1 装置間の競争から一般性の探求へ

新しい時代というものに意味を与えるのは「パラダイム」の転換である。いうまでもなく「パラダイム転換」は「方向転換」という意味ではない。主題の立て方を変えということである。価値観の転換、意味体系の転換だといっても良い。個々の研究者にとっては、「頭を切り替える」ということだから、容易なことではない。方向転換よりも難しいかもしれない。同じ価値観を保って別の方向を探る方が、しばしば簡単である。しかし、実践的なレベルで考えてみると、パラダイム転換のために、身につけた研究の技法を捨てる必要はないし、これまでの業績が無駄になるということでもない。核融合科学をより高いレベルの学術に位置づけるために、研究の意味づけを刷新するという知的なプロセスが求められるのである。

これまでのパラダイムは、装置方式間の性能比較であり、基本的に「パラメータ競争」であった。試作機を作って比べてみるという素朴な科学である（図2）。性能アップのための「対症療法」の積み上げである。核融合研究は、まずどういう装置を作れば高温プラズマを発生し閉じ込

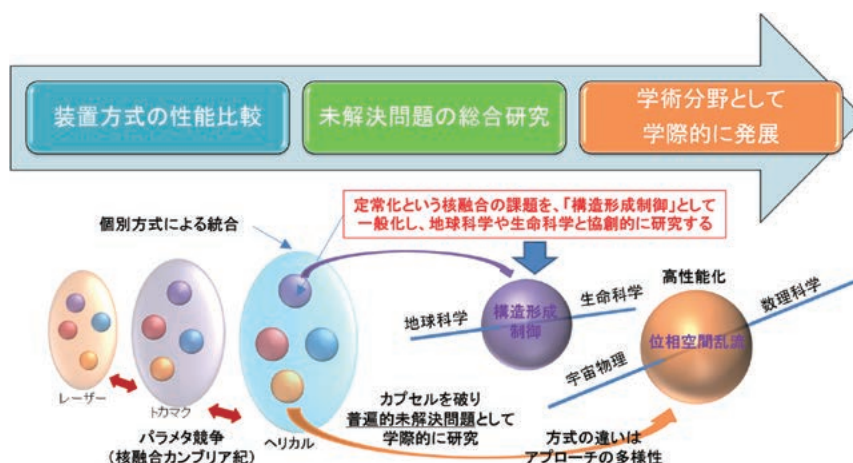


図2 パラダイム転換。これまで核融合研究パラダイムは装置方式間の性能を競うパラメータ競争であった。新しいパラダイムは、あらゆる装置方式に共通する（さらに自然界のプラズマにも通底する）基本的なメカニズム（決定的な遺伝子）の解明をめざす。

6 NIFSが提案した計画自体は、核融合炉システムにおける物質・エネルギー循環の科学的な研究を主題とするものであったが、審査会における論点は「トカマク対ヘリカル」の議論に集中する事態を招き、学術研究としての意義がハイライトされることはなかった。

めることができるのかという問いから始まったのであるから、黎明期においては装置作り自体が原理の探求という意味もあった。しかし、それを続けるままでは開発研究と本質的な違いはない。

これに対し、新しいパラダイムは、核融合システムという概念を分節化⁷、いろいろな方式にわたって共通性があるテーマを定式化⁸、一般性という観点から研究する、そのテーマの一覧表である。個別の方式において生じる課題（例えば閉じ込め性能が良くならないとか、突発的な不安定性が起こるとか）を、個別方式を超えた一般原理に基づいて解決できるようにするための知の枠組みである。

もちろん、一般性を求める研究が今までなかったというのではない。しかし、個別の研究をどういう「文脈」に位置づけるのか、分野あるいは組織がめざしている方向をどう説明するのかというメタな枠組みを、ここでは議論している。例えば、研究所のアイデンティティーをどう表現するのか？ どのような目的を掲げて大型研究プロジェクトの計画書を作成するのか？ というマクロ階層の問題である。

2.2 学際化

学術研究の新しい時代は、既成の分野を超えた人の動きによって創られる。かつて核融合研究の黎明期には、原子核、原子・分子、天体、宇宙、流体や波動、分光などの物理学を研究してきた人たちが、加速器、発振器、パルス・パワー電源、真空、原子力材料、低温・超伝導などの技術を研究してきた人たちが、核融合という新世界に期待して集まり、新たな挑戦が始まった。どのようにすれば安定的・持続的な熱核融合反応を起こし、そのエネルギーを利用できるのか、この課題をそれぞれの専門性のパースペクティブでテーマ化し、研究が始まったのである。これから起こる時代の転換においても、分野を超えて多くの研究者や技術者を核融合の研究に迎え入れる必要がある。今後一層強力に核融合研究を進めるためには、今の小さな「核融合コミュニティ」を格段に大きくする必要がある。敷かれたレールの上を連続的に進むのではない「不連続性」こそが転換点であり、跳躍は異分野が交差することで生じるインパクトによって起こるのだが、逆に見れば、時代の転換点が異分野交流のモメントとなるのである。

核融合研究のパラダイムが「一般性をもつ学術的な課題群」の一覧表であるならば、核融合科学は広く学術界と対話可能になる（ここで「学術」とは、純粋科学だけでなく技術も広く含む）。核融合科学を現代の科学・技術の文脈で分節化・定式化するならば、自然に学際化が起こるはずである。具体的な実践の対象が「フュージョン

エネルギー開発」であるとき、私たちはそのプロジェクトをどのような領野に位置づけ、どのような学問で引き受けるのか、そのビジョンには、他のさまざまな科学・技術分野（天文学、宇宙物理、流体物理、原子物理、超伝導工学、極限材料科学など）と交流する幾筋もの街道が現れる。街道を通して人流が起こる。

核融合科学の未来を拓く人材は、広く「学際社会」へ開かれた頭脳循環のなかでこそ育つ。そのために、核融合科学を学術的に表現する言葉＝ロゴスが必要である。核融合科学の新しいパラダイムは、道具のバラエティーではなく、学際的な言語の一覧表でなくてはならない。

2.3 学術と開発が協働する体制

核融合技術が成熟した未来の理想像からバックキャスト（逆算）して、現在の状況とこれから進むべき道を考えることも大事である。そういう観点から、核融合科学の実験や理論、シミュレーションとは何かを問い直してみたい。

これまで核融合研究で提案されてきたさまざまなプラズマ実験装置（トカマクとかヘリカルとか）が、そのままの姿を保って「成長」し、それらに相似形の核融合炉が実用機として建設されるという前提で考えるのは、技術というものを知らない人の幻想である。技術の進化は、生物の進化と同じで、いろいろな機種は環境（社会のニーズや資源・サプライチェーンなど）の変化に適応しつつ、多様に変化しながら生存競争を生き抜こうとする。そうした進化の歴史のなかで、受け継がれつつも変化し、組み合わせることで多様性を生み出すもの、すなわち「遺伝子」に相当するものが「科学知」である。実験装置やシミュレータは、そうした遺伝子を育む揺籃である。未来の技術はさまざまな遺伝子を組み合わせることで形を成す。核融合技術が本当に成熟した時代を迎えることができるならば、多様なニーズや運用条件に応じて、メーカーが市場で競いつつ、多様な炉システムが設計・建設されるという状況になるであろう。

例えば、航空技術を考えてみても、航空機の理想形というようなものがあるわけではなく、大型機、小型機、高速機など、多様な目的に適合する多様な航空機が作られる。こうしたイノベーションを可能とし、全ての機種に潜在するのは、流体力学や構造力学の科学知である。では、現代の流体力学や構造力学は、どこで進化を続けているのだろうか？ それは開発現場の試作機ではなく、高度に分節化され定式化された学術研究の空間、すなわち精密な実験装置や、シミュレータの中である。そして、流体力学も構造力学も、それらが扱う対象は、個別的な航空機を超越し、さまざまな自然現象や他分野の科学技術にも適用される一般性が高い学術として進化を続ける。

7 「分節化」という言葉は、もともと言語学の用語であり、音あるいは文字という記号の並びから「意味」の単位を取り出すことをいう。これを一般化して、対象から「意味」を生じさせる知の働きを表す概念として広く用いられる。対象をバラバラに分解してしまうという意味ではない。

8 ここで「定式化」とは、「数式で表す」という狭い意味ではなく、対象をどのような科学的パースペクティブで認識し、記述し、分析するのか、何に注目して研究するのか、つまり対象をどのような論理空間に位置づけ、どのような装置や道具概念を用いて操作するのかについて客観的に共有できる形にすることである。

そうした学際的な進化を遂げた「遺伝子」たちが、航空技術に還元されて破壊的イノベーションを生むようになるのである。

核融合技術は今、航空技術でいえば「ライト兄弟」のあたりにいる（ITERはライトフライヤー号に相当するだろう）。実際に実用化される核融合炉は、ITERとはずいぶん様子が違ったものになると思っていた方がよい。私たちは、学術の明確な（clear and distinct）分節化・定式化で世界に先駆け、未来の核融合炉の姿を決める決定的な「遺伝子」を生み出すこと、拡散させることに確たる戦略をもって臨むべきである。

3. NIFSの果たすべき役割

核融合研究を取り巻く世界の動向（第1節）と学術研究の本来在るべき理想像（第2節）について考えてきた。本節では、これらを踏まえ、NIFSが果たすべき役割について述べる。一言でいえば、共同利用機関としてのNIFSには、幅広いスペクトルをもつ挑戦的研究のニーズを受け止めつつ、世界をリードできる大型研究プロジェクトを実施することで求心力を生み出すという、間口の広さとピークの高さを併せ持つことが求められている。このこと自体は自明だともいえるが、これを実現するための具体的な体制、運営あるいは施策の在り方について、2021年度から3年をかけて、広い学術界に呼びかけながら行ってきた議論の経緯を踏まえつつ、要点をまとめる。

3.1 在り方ワーキンググループからの提言

NIFSは、共同利用機関の先導的モデルを形成するために、広い学術界からの委員で構成された「在り方ワーキンググループ」を設置し、三つの提言を得た[7]。

(A) 2021年9月に『今後の核融合科学研究所の在り方に関する検討ワーキンググループ』が設置され、運営会議から6人（内3人は所内から選出）、学識経験者5人の合計11人のメンバーで、NIFSの改革について審議が行われた。ワーキンググループからは、①核融合科学の総合的な研究のために、NIFSがより学際的な視点から基礎研究を多角的に展開することの必要性、②自由な発想に基づく独創的な研究が行われるべく、10人程度のメンバーで構成される研究グループを形成し、かつ固定化しない開かれた組織として活動する体制が必要であること、③これまで蓄積された研究資産を有効に活用し、世界トップレベルの研究が実施できる高度な学術研究基盤が必要であること等が提言『今後の核融合科学研究所の在り方』として示された。これを骨太の方針としてNIFSの改革を進めることを運営会議で決定した。第4節で述べる「ユニット体制」は、本提言で指摘された重要事項を実現できる、新たな組織体制である。

(B) 2022年9月に『今後の共同研究の在り方に関する検討ワーキンググループ』が設置され、運営会議から10人（内4人は所内から選出）、学識経験者4人の合計14人のメンバーで、NIFSにおいて実施される共同研究の改革について審議が行われた。ワーキンググループは、研究所のユニット体制への改革（第4節参照）を評価しつつ、

①所内外を繋ぐシステムであるユニット体制を活かした共同研究の在り方を検討すること、②世界トップレベルの研究施設を整備し、高水準の研究環境を共同研究者に供する必要性、③所外の施設を利用する共同研究を進展させるべく、所外装置共同利用の在り方が、コミュニティに開かれた場で、長期的ビジョンと学術戦略をもって議論され、研究力強化のため新陳代謝を促すことが必要であること（現行の「双方向型共同研究」の改革）、④核融合科学の中長期的な学術戦略に照らした総合的な議論に基づき、高い見識から共同研究を企画、評価、活性化する役割を担えるよう、共同研究委員会の位置づけと機能を強化すべきこと、⑤コミュニティが核融合科学の共同研究について、広く、世代を越えて議論することによって、相互理解と合意形成を行う仕組みづくりと運営が必要であること等が『今後の共同研究の在り方についての提言』として示された。これを骨太の方針として共同研究の在り方の改革を進めることを運営会議で決定した。

(C) 2022年6月に『今後の大型研究施設計画の在り方に関する検討ワーキンググループ』が設置され、運営会議から7人（内3人は所内から選出）、学識経験者4人の合計11人のメンバーで、NIFSの大型研究施設計画の在り方について審議が行われた。ワーキンググループからは、①ビッグサイエンス分野共通の課題として新規大型プロジェクトの実現が経済的に難しくなるなか、分野の持続可能な発展のモデルとなるような将来計画の立案がNIFSに期待されること、②そうした観点から、ユニット体制（第4節参照）がパラダイム転換の母体となることへの期待、③核融合科学の学際的展開という価値をもち、持続可能なものであるためには、施設を大型化すること以外に、斬新な視点から「未踏の研究対象」を分節化し定式化する必要があること、そのためにユニット体制が十分機能する必要があること、④大型研究施設計画の策定においては、合意形成プロセスが重要であり、そのために共同研究員会が十分に機能する必要があること、⑤LHDプロジェクトのレガシーが十分生かされるべきこと、⑥学際化やセレンディピティの観点からも、オープンサイエンスを推進すべきこと、⑦大規模プロジェクトを支える貢献について十分な評価がなされる職制や運用体制が必要であること等が『今後の大型研究施設計画の在り方についての提言』として示された。これを骨太の方針としてNIFSの大型施設計画の立案と実施を行うことを運営会議で決定した。

3.2 第3期におけるNIFSの研究成果に関する総合的な外部評価

NIFSの抜本的な改組（第4節参照）に先立ち、第3期に「プロジェクト制」のもとで行われた研究についての総合的な外部評価を行った。運営会議のもとに設置された外部評価委員会は、委員28人（専門委員を含む）のうち、海外の委員7人、また分野外の委員7人（数理学2人、宇宙物理学2人、流体物理学1人、素粒子物理学1人、超伝導工学1人）という国際的かつ学際的な委員会であった。LHDプロジェクトに関しては、イオン温度1.2

億度の達成など、プラズマパラメータの顕著な進歩があったこと、卓越した物理学上の成果(プラズマ乱流の研究等)があがったこと等が高く評価された。一方、今後の改革の観点として、①研究成果の「学術的意義」をアピールすることに一層努力し、広い学術界と協力する体制の構築が必要、②核融合炉への外挿可能性を総合的観点から明確にするために、根底にある物理的機構の解明により注力すべき、③乱流や輸送に関する研究成果についてアピールが不十分、④フロンティア事業として実施されたLHD計画の終了後は、より根本的で広い核融合科学の振興をめざすことを期待、⑤これまでの研究実績と現有施設は、核融合科学および関連科学研究の進展を牽引する大きな力の源であり、当該分野の世界的中枢研究所として、国内外の研究者と協力し、核融合科学のより先進的な学術研究を実施する必要、⑥さらにLHDの利用可能性の最大化と海外の実験プロジェクトとの協力を通じ、核融合科学の未解決問題に取り組み、核融合エネルギー実現に貢献すること等が指摘された。

3.3 日本学術会議・プラズマサイエンス小委員会での議論

日本学術会議にプラズマサイエンス小委員会を設置し(2021年5月)核融合科学を含む広い学際的分野としてのプラズマサイエンスの長期ビジョンを学問論として議論した。小委員会の設置目的は「プラズマサイエンスは、宇宙・天体物理、核融合科学、およびプラズマ応用技術の幅広い分野で研究され、近年大きく発展している。その多様な進化を幅広い学術の観点から俯瞰し、分野間の連携を深めると同時に、創発的なイノベーションにつながる研究テーマを明示することで、プラズマサイエンスのアイデンティティーをより魅力的なものに刷新したい。プラズマサイエンスに関わる学術分野は、長期的なビジョンをもって学際的に展開をはかる必要がある。今後30年を見据え、人類の未来に資する科学技術としてプラズマサイエンスを発展させるための学術研究基盤の在り方を議論する目的で、本小委員会を設置する。」とした。小委員会はプラズマ物理分野7人、天体物理分野1人、素粒子物理分野1人、流体物理分野2人、地球惑星科学分野1人、数理科学分野2人、総合工学分野6人の委員で構成された極めて学際性が高い組織であり、吉田が委員長をつとめた。核融合科学分野の学際化によって、広い分野との頭脳循環を通じて人材育成を行う必要性が指摘されている。

小委員会の議論をまとめて、見解『プラズマサイエンス—その学際的展開と豊かな未来社会のために』が2023年9月に発出された[8]。そこでは、これからのプラズマサイエンスの主要なテーマが「10の課題」として整理されている。それらはNIFSのユニット(第4節参照)が掲げるプラズマ物理関係の研究テーマと整合するものである。

見解に示された構想のなかで「核融合科学」が担当すべき「中長期研究戦略」を抽出したものと、NIFSはビジョン『プラズマ物理の学際的展開—集団現象の理解に向けて』をまとめ、学術会議の「未来の学術振興構

想」に掲載した。さらに、その構想の主要部を具体的なプロジェクトとしてロードマップ2023に掲載した(第4.5項参照)。

3.4 ユニットの構築

現代の科学技術フロンティアの水準で「核融合」を分節化・定式化し、これからの核融合科学をリードする研究テーマ(「ユニットテーマ」と呼ぶ)とすべく、広く学術分野の研究者に呼びかけて、集中的な議論を行った。2021年5月から合計40回の「ユニット構築会議」をオンラインで開催し、毎回100~200人が参加した。毎回の議論の内容については、議事録をNIFSのホームページにおいて公開している[9]。情報はNIFS共同研究者メーリングリスト、核融合ネットワークメーリングリスト、プラズマ・核融合学会メーリングリストを通じて約1600人へ配信された。

ユニットテーマ構築の議論を若手研究者たち(30代、40代)がリードしたことは、特筆すべき点である。最初の段階で、合計30個のユニットテーマが所内外のグループ(それぞれは、所内外のメンバーで構成された共同作業チーム)から提案された。このうち18件が若手研究者による提案であった。また、3件は他分野の研究者からの提案であった。それぞれの提案書に対して4人のレビュアー(核融合科学分野に限らず、地球科学、流体物理、数理科学など、広い分野の専門家にお願いした)を割当て、書面評価を行い、所長のコメントを付して、提案グループにフィードバックした。各提案グループは、それぞれの検討会をオンラインでオープンに行い、その合計は120回を超える。提案ごとの検討会にも、提案者に限らず他分野からも多くの研究者が参加して、多角的な視点から議論が行われた。

第二段階として、30個の提案から概ね10個のユニットテーマを編成する作業を行った。公聴会を経て、最終的に11個のユニットテーマが策定された。

ユニット構築の最終段階として、それぞれのユニットテーマに対して、「ユニット」を組織するプロセスに入った。各ユニットは、所員および所外のメンバーからなる学際的なチームである。それぞれのアカデミックプラン、学術経営の方針、さらに所内メンバーの個人調書を記述した計画書が策定された。運営会議のもとに「ユニット等評価委員会」を設置し、ユニット計画書の審査を実施し、ヒアリングを経て、ユニット設置の可否を判断した。ユニット等評価委員会の委員は、所外から8人の学識経験者に委嘱し、3人の所員が幹事として参加した。また1人の専門委員を委嘱した。評価結果は、9個のユニットについて計画を可とし、2個については、設置の在り方について、研究所に工夫を求めるものであった(5個のユニットのリーダーが若手研究者であり、とくに2個は30代である)。この結論が2022年7月29日、運営会議(臨時)に報告され、審議・決定された。コメントが付いたもののうち1件については、特別な運営のもとでユニットとして設置することとした。自然科学研究機構の手続きを経て、全10個のユニットを2023年度に発足させた[9]。

ユニットテーマは「分野名」ではなく、コンテンポラリーな研究テーマを具体的に表現するものである。理想は、掲げられたテーマが、それぞれのユニットの活動によって、10年後の学术界に新しい概念あるいはディシプリンとして輝くことである。この高い理想をもって、広く学术界に呼びかけた議論を1年間かけて行ったのである。

このプロセスは、ボトムアップとピアレビューの精神に貫かれたことに大きな意義がある。与えられた宿題に答えるのではなく、探求すべき課題を自ら設定することこそ、学究が知恵を絞るべきことだからである。

4. 新しいNIFSの在り方

4.1 楕円の展開

核融合科学は極めて多くの難題を束にした総合的な研究分野である。学術研究機関であるNIFSは、さまざまな科学と技術を束ねる役割よりも、むしろ束を開いて、核融合エネルギーというチャレンジを幾つものテーマに分節化し、それぞれの問題を一般化することで他分野と通じ合う街道を幾筋も通していく、このような役割を担うべきである。街道を切り開く仕事を担うのが学際的研究チーム「ユニット」である。

ユニットは10年の年限を定めた共同研究の実施主体である。それぞれのユニットが掲げる旗印「ユニットテーマ」は、今後10年の未来を見据えて、自ら定義する学術的テーマを表現するものである。それらは、広い学術の地平に新しい展開をもたらすことをめざす。

ユニットはいろいろな専門性をもつ研究者によって構成される高度な機能体Gesellschaftである。分業するのではなく、協力して研究を行う組織、互いを理解しあうことで能力を高めていくチームである。ユニットはNIFSを組織するメゾ階層の単位であるが、「ユニットとNIFS」の関係は「研究者とユニット」の関係と次のような相似性をもつ。学術研究という場で個々の研究者・技術者がどのように個性を発揮すべきかを考えるとき、「楕円ellipse」というモチーフが参考になる（図3）。楕円とは、二つの焦点をもつ曲線のことであり、これを惑星軌道にあてはめると、一つの焦点に太陽がある（実焦点real focus）。もう一つの焦点には具体的な「物」は置かれていないが、

これを架空の拠り所（虚焦点virtual focus）として軌道は引き延ばされる。このモデルをユニットにあてはめると、一つの焦点は「ユニットテーマ」、もう一つの焦点は個々の研究者・技術者の心にある「個々のテーマ」という拠り所である。これが多方面に広がっていることでユニットの内容は豊かになる。この関係をNIFS全体に相似的にあてはめると、一つの焦点が「核融合科学」というNIFSの看板であり、その内容を分節化し多方面に展開させるのが「ユニットテーマ」である。核融合科学が展開してゆく方向を指し示すユニットテーマの集合が、これからのNIFSのアイデンティティーになる。研究の道具をアイデンティティーとする時代から、研究のダイナミズム＝楕円軌道をアイデンティティーにする時代へと転換したのである。

4.2 ユニットの生成的（generative）な働き

ユニットは一つのプロジェクトの下部組織（分掌部門）ではない。逆に、幾つかのユニットの連合体として「プロジェクト」が構成される。単語と文章さらに文脈の関係のように、ユニットたちのさまざまな組合せによってプロジェクトの「文意」が構築され、その真の意味は、文明のさまざまな文脈のなかに位置づけられることで定まってくる。

図4にユニットの生成的（generative）な機能を示す。さまざまな専門性をもつ個々の研究者が、現代的な研究テーマのもとに集合して「ユニット」が構成される。そうしたユニットたちを編成して「プロジェクト」が組織される。ユニットという「中間項」がなければ、いろいろな専門分野の研究者が、直接的に先端的大型プロジェクトに参画することは難しい。例えば、数学の専門家にとって「核融合プラズマの高性能化」「プラズマにおける安定構造の自己組織化」といわれても、それに数学がどう貢献できるのか、何をどう研究するのか、理解できていない（つまり、数学の文脈で定式化されていない）。しかし、メタ階層ユニットに参加して議論するうちに、それが位相空間の葉層構造に関わる問題だということまで理解が進んでいけば、核融合プラズマの高性能化に関わるプロジェクトに、ユニットの一員として参画できる。このように、ユニットは「ミクロ→マクロ」の方向へ研究者を

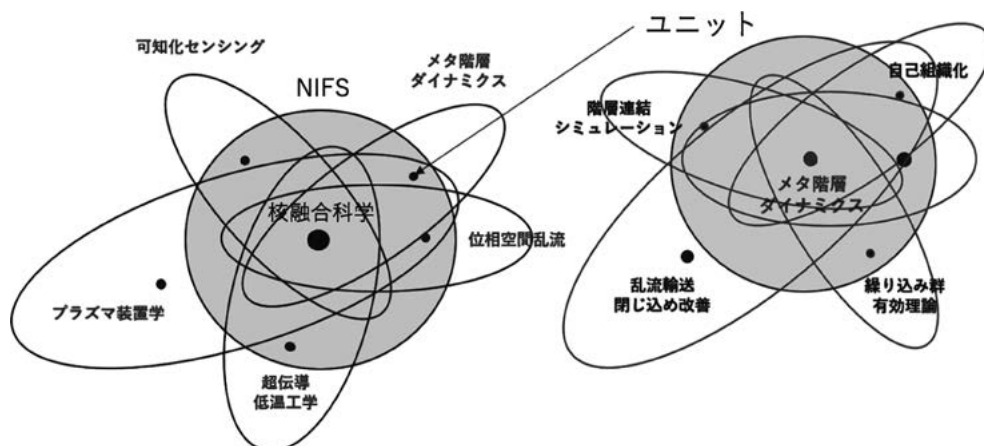


図3 学術の楕円的な展開：共通性と個性の統合。

誘導する（図4で左から右へ向かう）ことで、プロジェクトというマクロ構造を生成する機能を果たすのである。既にあるプロジェクトを分業体制に分解する（図4で右から左へ向かう）ための部門ではない。

4.3 運営組織

NIFSの研究部をユニット体制へ移行させるのと並行して、共同利用機関としてさまざまな共同研究や機関連携を実施するための運営組織についても2023年度に抜本的な改革を行った（図5）。旧組織は、研究部として「ヘリカル研究部」一つを置き、ヘリカル研究を三つのプロジェクトで構成し、その研究内容を分掌する研究部を置いていたので、研究単位と共同利用施設の運用が一体化していた。しかし、新体制では（論理的に）まず研究テーマの単位ユニットがあり、ユニット連合によってプロジェクトが組織されるという「ダイナミック」な運営がなされなくてはならない（図4）。プロジェクトが企画・設計・建設・運用する研究施設（ハードウェア）は、それに参画する研究者が共同で（さらに技術部と連携して）運営する必要がある。そのため、NIFSが有する研究施設（LHD、プラズマシミュレータ、工学系実験施設など）を「プラットフォーム」として整理し、その運営を担う機関として「プラットフォーム企画室」を設置した。

さらに、所外との学際的連携を企画しサポートする組織として「核融合科学学際連携センター」を設置した。

ここに「学際的連携」は、①他の先端的学術分野のプロジェクト、②核融合炉開発に関わるプロジェクト（ITERやJT-60SAなど）、③産業界の先端技術開発プロジェクト、の三つの方面に展開する連携を意味する。それぞれに部門を置き、URAや実務家教員のサポートを得て、学際化を推進する活動をしている。NIFSが、核融合科学を構成する幅広いスペクトルをもつ先端的な科学技術の開発拠点として発展するよう、さまざまな高度研究施設の充実に努めながら、ネットワーキングのイニシアティブをとる役割を担っている。

4.4 共同研究体制

共同利用機関として、幅広い共同研究の推進は核心的な使命である。NIFSが有する研究施設を用いる共同研究（一般共同研究）に加え、全国研究者が国内の大学や研究機関（とくに量子科学技術研究開発機構：QST）が有する研究施設や装置を利用する共同研究をサポートする（旅費や測定器開発など）システムを整備した。後者は、これまで「双方向型共同研究」という名目のもとで実施されてきた事業を包摂し、より広く研究者コミュニティのニーズを取り入れて「進化」させることをめざす新しいフレームワークである。『今後の共同研究の在り方に関する検討ワーキンググループ』（第3節参照）の提言を受け、運営会議の下に置かれた共同研究委員会に「共同研究運営委員会」を置き（NIFSの共同研究に参画している大学

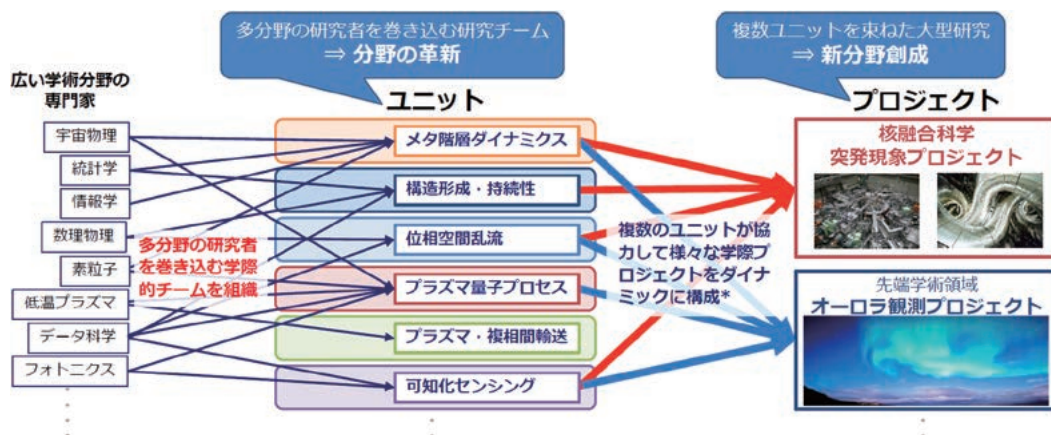


図4 ユニットはプロジェクトの分掌部門ではなく、個々の専門家（ミクロ）とプロジェクト（マクロ）を繋ぐ中間項として、プロジェクトを生成する働きをする。

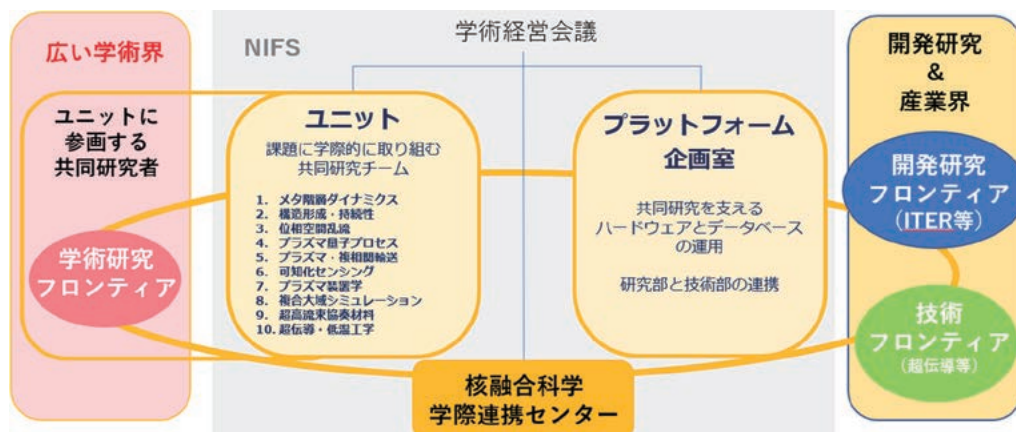


図5 NIFSの新しい組織体制。

等の研究者から立候補し選挙で選ばれる委員を含む）、共同研究経費の配分の在り方も含めて未来設計を行えるシステムが2023年度からスタートした。

さらに、海外の研究機関との連携も、今後一層重要になる。日米、日中などの国際協定のもとで実施されている共同研究については、NIFSが連携協定の締結、課題選定から成果報告・評価までを取りまとめる役割を担っており、その経費は国際連携を一括して基盤運営費の中に予算化されているが⁹、縦割りの運営され、毎年1%の減額が続いている。国際連携事業についても、運営の在り方のみならず将来に向けた予算獲得について、コミュニティをあげた未来型の議論を行うべきであることから、2024年度には（共同研究運営委員会と同様に）コミュニティから選出された委員を含む「国際連携研究運営委員会」を設置した。

これら三つのカテゴリーに整理した共同研究の全体像を図6に示す。

4.5 post-LHDに向けて

新しい核融合科学のパラダイムのもとで、大型実験プロジェクトの位置づけも大きく変わった。LHDからpost-LHDの時代へ転換する過程には、LHDフロンティア事業の総括（期末評価）、LHD学術研究基盤事業、そしてロードマップへの復帰という三つのステップがあり、大プロジェクトにおいてヒアリングが実施された（時系列としては、基盤事業、ロードマップ2023、フロンティア事業の期末評価の順で審査が行われた）。これらにおいて一貫して、核融合科学の学際化に向けたパラダイム転換を推進するというNIFSの基本方針を前面に打ち出した。

(A) LHDフロンティア事業の総括（期末評価）：LHDは、1998年に建設されて以来、四半世紀あまりにわたって世界最大の超伝導ヘリカル型プラズマ実験装置として、数々の実験を実施し、多くの研究成果をあげてきた。2013年からはフロンティア事業の支援を受けて、重水素プラズマの同位体効果を主要なテーマとした国際共同研究を実施してきた。しかし、第1節で述べたように、LHDの後継計画はロードマップ2020に採択されず、NIFSで大型実

験プロジェクトをどのように実施できるか、先が見通せない状況になった。

2021年度から始まったNIFSの抜本的な改革（第3節参照）は、この危機を単にLHDプロジェクト継続可能性の問題としてとらえるのではなく、核融合科学の在るべき姿を問い直す学問論として検討し、広い学際的視点からパラダイム転換を行おうとするものであった。そのなかで、NIFSの未来を支える礎となったのは、独自に開発してきた多種多様なプラズマ計測器群（荷電交換分光計測、レーザートムソン散乱計等）および大きなエネルギー量をもつプラズマを能動的に変化させ、その応答を研究するための強力な粒子ビームや電磁波の入射装置などの技術である。LHDは、超高温プラズマの内部で起こるさまざまな複雑現象を透視し分析する能力において、世界第一級の時空間分解性能を達成している。さらに、世界トップレベルのシミュレーション技術との連携によって、核融合プラズマ中で起こる複雑現象に関する総合的な理解に向けた挑戦を可能とする高い研究技術を有している。こうした潜在能力を、適切な目標設定のもとで生かすことで、核融合科学の学術的な意義を学際的に広く発信すれば、この難局を乗り越えることができるはずである。LHDフロンティア事業の総括となるべき2021～2022年度の実験では「LHDの研究成果を遺伝子として広く拡散させる」をスローガンとして、学際的テーマの研究に注力した。

こうした真摯な取り組みによって、LHDにおける学術研究の意義が正しく評価されるようになった。フロンティア事業の中間評価（2018年）で留意事項として指摘された「環状プラズマの理解を深めるためにも、学術的な観点を抽出し、LHD研究からトカマク研究への寄与も果たすべきである」というコメントにも対応するため、独自に開発してきた多種多様なプラズマ計測器群（荷電交換分光計測、レーザートムソン散乱計等）を活かした実験に注力することで研究成果をあげ、最終的にフロンティア事業の期末評価（2024年2月）では高い評価を得た[10]。

(B) LHD学術研究基盤事業：フロンティア事業終了後の2023年度からの研究についてさまざまな可能性が検討

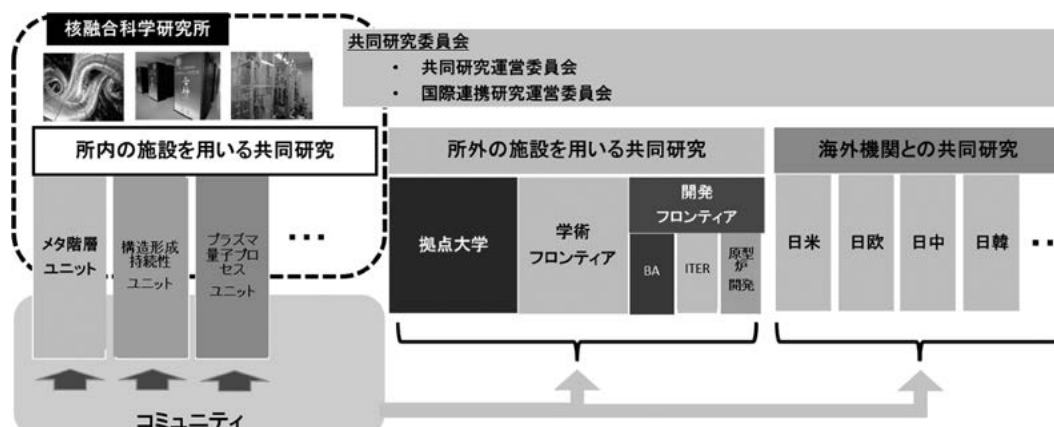


図6 総合的な共同研究の体制。NIFSが所内に有する研究施設を用いる共同研究に加え、国内の他機関の施設等を用いる共同研究、さらに海外の研究機関と連携する共同研究を総合的に推進するため、共同研究委員会に「共同研究運営委員会」「国際連携研究運営委員会」を設置。

9 日米協力事業の旅費分についてはJSPSから予算を支弁されている。

された。フロンティア事業のルールとして、ロードマップに記載されていない計画をフロンティア事業として予算要求することは許されない。次のロードマップ策定は2023年であることから、フロンティア事業の枠組みで2023年度予算の要求を行うことは原理的に不可能であった。そこで、2022年度から新たに始まった「学術研究基盤事業」に採択されることをめざした。この事業の先行例は「研究データの活用・流通・管理を促進する次世代学術研究プラットフォーム (SINET)」および「南極地域観測事業」の2件であり、いずれも特定分野に限らない、広い分野の研究者が利用する研究プラットフォームであることが特徴である。LHDを用いて学際的な共同研究を展開するというNIFSの改革理念は、こうした学術研究基盤事業の趣旨に合うものであることが「大プロ作業部会」において評価され、2023年度から3年間、LHDを学術研究基盤として運用することが認められた(図7)。

これは、単に予算化の枠組みが変わったということではない。LHDは、2013年度から10年間実施した大規模学術フロンティア促進事業「超高性能プラズマの定常運転の実証」のミッションを全面的に刷新し、新しいパラダイムのもとで研究計画を策定し、予算化に成功したのである。狭い意味での「核融合コミュニティ」を超えて幅広く研究テーマを募り、分野の枠を超えた学際的な共同研究を実施することを目標に掲げたこの学術研究基盤事業は、LHD運用の最後のフェイズであり、post-LHDの時代への過渡期として位置づけられる。

(C) ロードマップ2023：LHD学術研究基盤事業が終了する2025年度以降「シームレス」に最先端の実験研究が実施できるよう、核融合プラズマ実験を再度ロードマッ

プに掲載する必要があった。ロードマップ2023に提案した計画は、前提案(ロードマップ2020に不採択)の修正版ではなく、分野を超えた学際的な議論を通じて(第3節参照)、目標設定を全面的に見直し、核融合科学のパラダイム転換を推進するためのものである。科学目標を「ミクロ集団現象の解明」という現代プラズマ物理学の中心的課題に置き、高度な計測技術、プラズマ操作技術、シミュレーション技術を連携させた世界トップレベルの学際的・国際的共同研究を実施することを計画している(図8)。これは、前記のLHD学術研究基盤事業から連続的に発展するものであり、プロジェクトを実施する研究組織は、ユニットの連合を柱とする。

この計画がロードマップ2023(図9)[11]に掲載されたことは、核融合科学分野が優先度の高いビッグサイエンスであることを学術界が認めたということである。核融合科学の大型実験計画がロードマップに載っていないという危機的状況が3年間(ロードマップ改定の1周期)で解消できたことは、コミュニティを超えた多くの分野の研究者からNIFS改革に向けられた応援と協力(第3節参照)の賜物である。ロードマップ掲載は、フロンティア事業として予算化するための必要条件であって十分条件ではない。現行のLHD学術研究基盤事業で十分な成果をあげ、NIFSにおける大型実験プロジェクトの重要性を強くアピールして、2026年度以降の予算獲得に向けて全力をあげる必要がある。

5. 核融合分野のこれから

NIFSは、ビッグサイエンス分野の共同利用機関として、大学等では実施できない大規模なプロジェクトを推



図7 文部科学省が推進中の「学術研究の大型プロジェクト」の一覧(2023年度現在)。LHDは「学術研究基盤事業」の一つとして、2023年度～2025年度実験を実施する計画(https://www.mext.go.jp/a_menu/kyoten/20230727-mxt_kouhou02-1.pdf)。

超高温プラズマの「マイクロ集団現象」と核融合科学

自然科学研究機構
核融合科学研究所

フュージョンエネルギー実用化に向けた最大の課題は、核融合システムのコンパクト化である。炉心を小さくすると、プラズマ中の温度勾配が大きくなり、複雑な揺らぎが発生して、閉じ込めの劣化や、突発的な不安定性が起こる。核融合炉のみならず宇宙・天体にも共通する、プラズマに独特な揺らぎの発生原因とその影響を解明するために、超高温プラズマのマイクロな状態を高精度で制御・操作し、世界最高の分解能で計測する実験システムを構築する。計測と理論・シミュレーションを連携し、核融合イノベーションを駆動する指導原理を提示する。

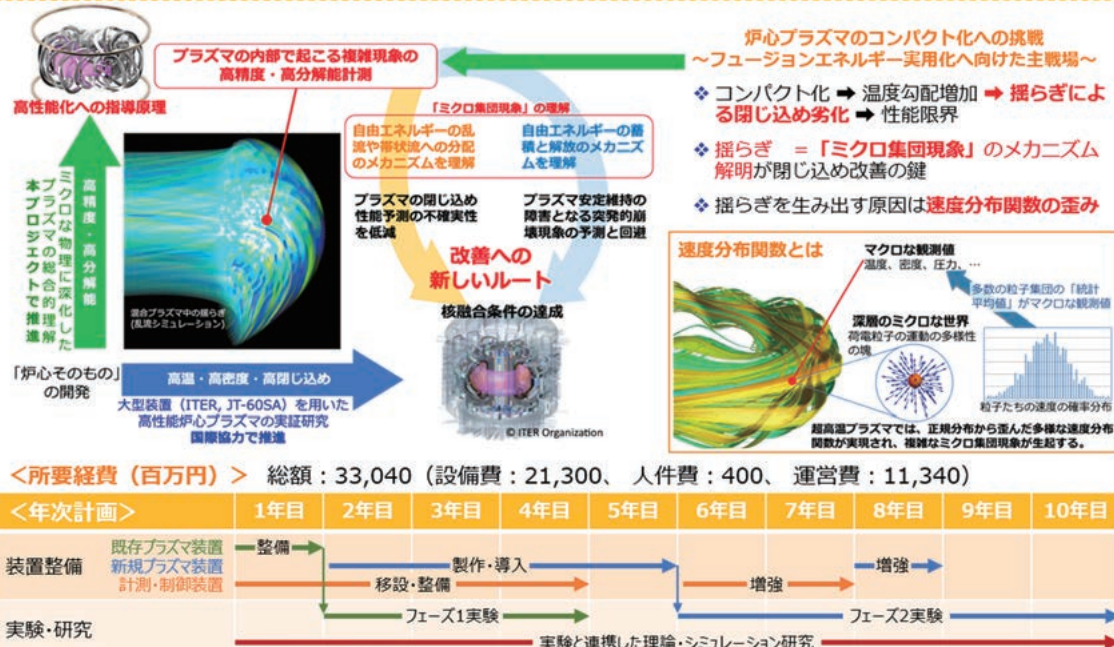


図8 ロードマップ2023に掲載された『超高温プラズマの「マイクロ集団現象」と核融合科学』の概要。核融合炉の成立条件をめざす開発研究と直交する学術研究の軸として、プラズマ現象の原理理解をめざした高精度の物理研究を学際的に展開する (https://www.mext.go.jp/content/20231222-mxt_gakkikan-000033259_1.pdf)。



図9 ロードマップ2023に掲載された大型プロジェクトの一覧表。NIFSが実施主体として提案した『超高温プラズマの「マイクロ集団現象」と核融合科学』が採択された。

進する任務を担っている。一方、全てのビッグサイエンスが抱える問題として、研究規模が「恐竜化」して行く一本道をどうやって脱却するかを考えなくてはならない。NIFSがとった学際化の戦略（第2節参照）は、その先駆的な試みだといえる。パラダイム転換の方向は定まったが、実際に成果をあげていく着実な歩みはこれからである。ユニットが、さまざまな分野へ浸透していく根茎 rhizome としてダイナミックな機能を発揮することで、NIFSは学際的なスペクトルの広い研究所として発展することが可能となる。

政府の『フュージョンエネルギー・イノベーション戦略』を受けた新しい動きの一つとして、フュージョンエネルギーの実用化がムーンショット目標の10番目に指定された[12]。ムーンショット目標とは、実現すれば未来社会に極めて大きなインパクトをもつ技術への挑戦を内閣府が選定したものである。フュージョンエネルギーのさまざまな応用技術を2050年までに社会実装することを作業仮説とし、鍵となる課題に対してこれから5年、さらに10年で達成すべき目標を設定して研究開発を実施する。多様なターゲットからのバックキャストイングによって学際的な協働を喚起し、技術の選択肢を広げようという戦略である。この事業を通じて学際化が後押しされ、核融合科学の重力圏が拡大することを期待する。

参考文献

- [1] 内閣府が2023年4月に策定した『フュージョンエネルギー・イノベーション戦略』<https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/index.html>
- [2] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine が2021年に発出したアピール『Bringing Fusion to the U.S. Grid』
<https://nap.nationalacademies.org/catalog/25991/bringing-fusion-to-the-us-grid>
- [3] ロードマップ2020 https://www.mext.go.jp/content/20200930-mxt_gakkikan1388523_1.pdf
- [4] マスタープラン2020 https://www.mext.go.jp/content/20200930-mxt_gakkikan1388523_1.pdf
- [5] 吉田善章：新しい時代の核融合科学研究所，プラズマ核融合学会誌 **98**, 368 (2022) (サロン)。
- [6] 飯吉厚夫：核融合科学研究所（仮称）設立と大型ヘリカル装置計画，日本物理学会誌 **44**, 309 (1989)。
- [7] 核融合科学研究所運営会議で議決された「在り方 WG」の提言：<https://www.nifs.ac.jp/about/unei.html>
- [8] 日本学術会議・プラズマサイエンス小委員会：見解『プラズマサイエンス —その学際的展開と豊かな未来社会のために』（2023年）：<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-25-k230926-14.pdf>
- [9] 核融合科学研究所のユニット体制：<https://www.col.nifs.ac.jp/Unit/UnitTheme.html>，ユニット構築会議の記録：<https://www.nifs.ac.jp/info/Unit.html>
- [10] LHD フロンティア事業の期末評価『大型研究計画に関する評価について（報告）「超高性能プラズマの定常運転の実証」について』：https://www.mext.go.jp/content/20240314-mxt_gakkikan-000034919_1.pdf
- [11] 学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想—ロードマップ2023：https://www.mext.go.jp/content/20231222-mxt_gakkikan-000033259_1.pdf
- [12] ムーンショット目標10『2050年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、資源制約から解放された活力ある社会を実現』<https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/target.html>