

# 2023 年度成果に対するユニット等評価委員会 報告書

2024 年 7 月 25 日

## 1. はじめに

核融合科学研究所（以下、「研究所」という）におけるユニット体制が整備され、2023 年度から 10 のユニットが活動を開始した。1 年を経て 2024 年 5 月 8、9 日に成果報告会が行われたことを機にユニット等評価委員会において行った評価を本報告書にとりまとめた。「評価」において避けるべきは評価する側からもされる側からも一過性の年次行事に矮小化してしまうことであり、やって忘れることに陥れば意味を失う。評価については本ユニット等評価委員会によるものにとどまらず、昨年度実施された外部評価委員会の評価および不断の自らの評価とともに、計画見直し、資源配分、運営などの活動サイクルと一体化し、ユニット活動の軸と位置付けるべきではないだろうか。評価報告書という性格上「当為」の指摘が主となっているが、これらを指示や強制と受け取るのではなく、改善の機会として本報告書が活用され、今後のユニット活動の発展の一助となることを期待したい。

## 2. 全体評価

### 2.1 所見

#### 1) 発足前の期待に照らして好ましい点

- 大半のユニットは、開発中心から学術中心の研究パラダイムに転換するということの意義は理解が進んだと思われる（※）。
- 核融合研究の学際化の方針に従ってボトムアップ的な提案を元に構築された 10 のユニットは、それぞれに強みを持った構成になってきている。設定されたアカデミックプランなどがユニットメンバーに概ね浸透・共有され、いずれのユニットも研究組織体制を整えて活動をスタートできていると判断できる。
- 他分野との連携を通して核融合研究の裾野を広げるとの趣旨から、人事においても他分野から若手研究者の採用も実現している。他分野の研究者を含めたセミナーの企画・実施も評価できる。

#### 2) 発足前の期待に照らして良いとは言えない点

- これまで独立して研究を進めてきたグループの統合により構築されたユニットでは、旧来のグループに閉じた研究所内部あるいは元々関係を持っていた外部研究者に限られた連携協力を留まり、外部に開かれたユニットとしての強みが十分に発揮できていない場合がある。
- 前出の所見（※）の一方、ヘリカル研究部一本体制に長年あった研究者が学術と学際化を中心に据えた「パラダイム」<sup>1</sup>へと転換することは、この 1、2 年でできるほど容易なこ

---

<sup>1</sup> 帰属する専門家グループが判断を下すための共有する信念、価値、テクニックなどの集合体。  
T. S. クーンによる。

とではないことが再認識された。新たな相手との交流によってもたらされる学際化を進めるためには、まず、自らの研究の客観的価値を語りうるか否かが問われるべきである。この点について、個々人がそれぞれに感じる学際化に対する心理的抵抗があるとすれば、その原因は何なのかという真摯な問いとともに、ユニットとして向き合うことがまだ不足している場合が見受けられる。

- この3年間の改革および世代交代によって、新しいパラダイムに基づいて採用した外部からの研究者が少なからず増え、研究者の入れ替わりがそれなりに進んだと言える。これによって期待された人心一新の活気が今回の報告会では、望ましいようには感じ取れなかった。ユニット構築時において、内部の研究者との議論において感じた全体の高揚感から判断すると、現状において今回の改革に大きな期待を持って挑もうとしてきた内部の研究者達の向上心をさらに育むことが課題と感じられる。
- ユニット毎に個性、特徴があって当然であるが、運営として芳しくない点が、ユニット毎に認められる。例えば、セミナーや戦略会議の開催頻度に大きな差があり、学際・国際連携など外部連携を含め、研究展開の方向性の共有や取組についてはユニット毎に課題がある。ユニット名称と活動内容・方向性の一致に改善の余地がある場合がある。
- ユニット制は個々のユニットが高い専門性のもとに個々の学理を追求するとともに、それら相互の連携を通して新たな分野の開拓やプロジェクトの推進をもたらすことを意図しているが、ユニット間の交流・連携が必ずしも活発でないように感じられる。

## 2.2 留意点

- すでにユニットとしての研究体制は整えられてきているので、今後は学術化や学際化を心の中に納めて、本来の研究に没頭し、節々で立ち止まり、今の取組から科学知として何が得られるか、あるいは、科学知に至るにはまだ何が欠けているかを反芻していくというもう少し肩の力を抜く方向で進めるのが良いのではないか。学際化を目指し、新しく発足したプロジェクトはそれらが軌道に乗り成果が出るまで時間がかかるのは当然であり、腰を落ち着け、課題が発生すれば関係ユニットのメンバー、状況によってはユニット等評価委員会メンバーを巻き込んで前向きな議論を尽くして進めることが重要である。
- 人事は改革を進める要諦であり、果敢に進めるべきである。研究所外からの新たな人材登用が図られたことは評価でき、活躍を大いに期待するところである。これらの外部人材にはユニットの構想時から参画してきた者もいる一方、この改革時の集中的で真摯な議論を知らない者もいる。プラズマ性能向上と核融合炉開発中心のパラダイムを脱却する研究所の改革に共鳴し、ユニット構想時から貢献している所内研究者を励まし、勇気付ける環境づくりが合わせて必要である。
- ユニットにおける人事が進み、分野外の若手研究者を含め他分野からの参加者も増えてきたことは望ましい一方、意欲ある若手研究者が世代を超えて在来との研究者と積極的に交流し、その環境の中で「核融合科学」を学びつつ新しい分野に挑戦する環境が醸成しているか、逆に、分野の異なる若手研究者の研究を経験ある研究者が受け止め、適切に

フィードバックにかけながら課題設定をする環境を醸成しているかなどを意識しつつ、自由に考え、語りあう場としてユニットの機能が継続されるよう留意することが必要である。

- 各ユニットのメンバー自身の研究が進展することは重要である一方、外部からの視点で見れば、この問題だったらこのユニットを訪ねて相談すると良い議論や解決が図られるという分かりやすい評価が定まることが、ユニットに対する信用度・信頼度を大きく高めることに繋がる。そこには必然的に、学生も含め人が集まる活気ある場が築かれ、ステータスの高い研究集団として認識されるというイメージを持ってユニット構成員が研究活動を展開しているか、共同研究、外部研究者との関係や連携の在り方が問われる。
- 組織改革が進められて時間が余り経過していないこともあり、課題が多々あることは自然である。成果報告会報告書の「8. 思うようにいかない点、その原因分析と解決思案について」の記載には見解の相違があるものもあるが、ユニット長のリーダーシップと異分野連携については特に留意すべきである。ユニット内調整や報告書作成に時間が取られ本来の研究をする時間が取られてしまうことは懸念点でもある。各々のアカデミックプランを通して異分野連携の場を形成し、それをより広いコミュニティの形成につなげるための課題の指摘も重要である<sup>2</sup>。
- 所内メンバーが少数で所外メンバーが大部分というユニットは帰属意識や目標達成に向けた行動が弱くなりがちであり、改善のためにはユニット再編も今後検討すべき点となる。自助努力を促し、解決できない場合は研究所としての判断が必要となろう。
- 異分野の専門家によるユニット主催のセミナーは有効であるが、メンバー各人が意識的に外部の研究会や他分野の研究室等に顔を出して個人レベルのネットワークを拡げること学際化の糸口として重要である。
- 評価に対する対応への負担を改善してほしいとの求めが表明された。求めは尊重し、合理的な仕組みの改善は図られるべきである。一方、「評価」を本質的に意義あるものとする基本的な考え方は「1. はじめに」に記したとおりである。
- ユニットあるいは個々人が自己の研究の客観的価値をより広い分野で語りうることは、学際化という展開における誉となるだけでなく、自己の研究に自信をもたらしことになる。それはこれまで身をおいてきた分野において競争力を高めることにも繋がることである。学際化を産業応用あるいは国際化と読み替えても然りである。

## 2.3 全体に関わる提案・助言

- ユニットを中核とした新しい研究所体制が構築され、ユニット毎に差異はあれど、10のユニットの活動が緒に就いた。今後は、先行して成果をもたらすユニットに導かれ、ユ

---

<sup>2</sup> 成果報告会報告書の項目8「思うようにいかない点・・・」では、「以前からの共同研究のメンバーが限られそれ以外では議論の場ができない」、「他分野の研究者との相互理解の有効な方法を教示いただきたい」、「異分野との研究展開が限定的」、「これまで知らなかったメンバーとの研究連携は数居が高い」、「ユニット内の横のつながりが現状では希薄、戦略会議の議論が活発化していない、幅広い分野の研究者が結集したユニット体制の強みが有効に機能していない」などの記載がある。

ユニットの多様性とともによりユニット間の連携によって世界トップレベルの核融合科学における学術拠点としての役割を担い、成果をもたらしていただきたい。このためには、社会一般に広く学術の存在価値を認識してもらえるような画期的成果を生み出していける真の核融合科学研究者が求められる。形式的な研究業績のみならず、改革の意欲と潜在能力を見抜く人材登用には、研究所のあり方をよく理解し、真に研究所の将来に貢献できる人物を判断する必要がある。このために、今後の人事構想における公募や人事委員会の在り方の検討はもちろんのこと、人物を判断できる研究所に関連する有識者から候補者を推薦できる方法も検討すべきではないか。

- 脚注 2.に記したような、異分野連携についてユニットからの指摘課題を外部の視座から見ると、ユニットに対する信用度・信頼度にかかわる問題であり、研究所内部から見れば、プロジェクト志向とは別の軸で自由に考え自由に議論できる環境に長期間置かれていなかったことも要因であろう。ユニット体制によって抜本的な改革が期待される一方、斬新な人事で他分野から参入した、ユニット発足時の議論を知らない若手研究者にとって、自由に議論する場がなければ同様の状況が繰り返され、孤立を招く可能性もあることが懸念される。ユニット運営に当たってこの点を配慮されたい。この配慮は若手からシニアの全ての研究者にとっても極めて重要である。
- 今後ユニットの信用度・信頼度などのステータス向上には、外部の研究者がユニットを自らの研究資源と捉え、自身が抱える課題を解決するために関連ユニットを積極的に利用できるものとする事は、大学共同利用機関である研究所の役割として意義深い。ユニット構成員が自身の研究だけでなく、大学共同利用機関の一員として責任を負っていると考えていただきたい<sup>3</sup>。
- AI・データ科学に対するキャッチアップ・連携体制を、ユニット制を越えた取組として整えていくことを検討されたい。
- 研究プラットフォームの整備など、ユニットが協働してあたべき研究所全体の将来計画は、各ユニットの目的と方法論に合うべきものであると同時に、各ユニット自らが果たすべき役割なくして成立しない。研究面のみならず、プロジェクトに必要とされる資金獲得への自助努力と研究所全体としての組織的取組を結びつけた戦略・戦術を求めたい。
- 活動的なユニットは研究業績とともに、人事や予算面など正のフィードバックがかかり成長が促されよう。一方、逆の場合も懸念される。研究所として、ユニット活動を適切な指標を用いてモニタリングすることによって問題を先取りし、研究計画の見直しを含めた指導や措置を講じる機能・体制が必要ではないか。特に議論が活発でないユニットについては、ユニット長や戦略会議議長の責任の一部をメンバーに分散して、複数のメンバーがリーダーシップを発揮できる環境作りも有効と思われる。

---

<sup>3</sup> 日米協力の理論分野ではテキサス大学 IFS がその役割を果たしてきた。多くの日本人若手研究者が IFS に滞在して共同研究を行い、課題を解決することで成長した経緯がある。本ユニットにもそのような状況を大いに期待したい。

- 各ユニットの問題点は、成果報告会報告書の「8. 思うようにいかない点、その原因分析と解決思案について」に当事者意識として集約されている。重要な指摘が含まれており、これらの解決に向けてユニットにおける自助努力とともに学術経営委員会における取組が求められる。
- ユニット活動の国際展開は課題である。ユニットには国際会議、ワークショップや共同研究、そして外国人メンバーの拡充について戦略的取組を求めるとともに、研究所として、その発展状況をモニターしていただきたい。
- 特に可知化センシングユニット、プラズマ装置学ユニット、超伝導・低温工学ユニットに対して示した提案・助言については、その検討と対応について次年度にご報告いただきたい。また、発足が留保されている「核融合炉システムの安全性」を中核テーマとしたユニット構想についても進捗があればお聞かせ願いたい。また、ユニット活動を支える技術部との関係、特に貢献や相乗効果への期待についてもご説明いただきたい。

### 3. ユニット毎の評価

#### 3.1 メタ階層ダイナミクスユニット

##### 3.1.1 所見

##### 1) 発足前の評価に照らした総評

- 本ユニットの特徴は、若手理論研究者を中心として電子とイオンという時空スケールの桁違いに異なる作用力間の相互作用、さらにはそれを取り巻く巨大な環境（磁場）構造とも絡み合って展開する非平衡開放系の動的な普遍性を解き明かすことを目指す重要なユニットと理解する。
- 本ユニットの名称について、発足時に多くの議論がなされ、「階層性」を超えるとは何かという言葉の解釈に議論が集中していた感があったが、現在は、「核融合科学を俯瞰した高次視点からの理解」あるいは「階層構造の問題として、俯瞰した視点から共通課題として捉え直す」とかなり理解が進んだと言える。
- これらの議論を通して、ミクロ・マクロ過程が混在した非平衡開放系としての核融合プラズマに関わる(1)乱流輸送特性、(2)電磁場や原子/分子過程に関わる非平衡特性、(3)周辺プラズマと物質との相互作用特性、の具体的な3課題への取組を基本に、(4)これらを司る素過程を整理・統合（俯瞰）することによって（階層概念にこだわることなく）、一般性・普遍性のある新しいプラズマの観方を提示することが本ユニットの戦略として位置付けられた。結果的に目的・目標が具体的になったことは喜ばしい。
- この間、外部メンバーも参加して定期的にコミュニケーションを図り、議論を行う環境を整備するとともに、劇的変容などの視点から階層間のシミュレーション手法を検討したり、物理学会での企画セッションを発足したりするなどの取組を積極的に進めており、発足1年目の努力は全体的に高く評価できる。

##### 2) 優れている点や他のユニットが好例として参考にできる点

- 核融合科学の中心課題として、1)の総評に記載した通り、プラズマ特有の電子とイオンの粒子集団間の相互作用、さらにはそれを取り巻く閉じ込め磁場環境との相互作用という巨大システムとその構成要素とのダイナミックで複雑なプロセスに横たわる物理原理を明らかにするという高邁な目標に向かうユニットである。
- 前述の考えに基づき、メンバーの専門分野を中心に据えて(1)-(3)の課題設定を行うとともに、これらに対して他分野の知見を取り入れて物理複合性とマルチスケール性で支配される閉じ込めプラズマの特性を俯瞰的に観る課題(4)を設定した論理構成は優れている。これらをユニットの研究者で共有するとともに、お互いのコミュニケーションと外部研究者との交流を広く進め、ユニットの目指す目標を達成しようとする努力は大いに評価に値する。
- また(1)-(3)の課題は他ユニットと共通した内容も多く、構造形成・持続性ユニット、位相空間乱流ユニット、プラズマ・複相関輸送ユニットなどと折り合いがよい。このため、これらと密接に連携することでより有効に目的・目標が達成されと考えられる。ユニット間連携の中核となり、ユニット制全体を支えて活性化する役割を積極的に担うことが期待される。

### 3) 改善すべき点や不足点

- ユニットの目指す目標に対する全体の理解はある程度進み、その構成員の専門分野から見て、分類した4つの戦略課題も妥当と判断できる。しかし、その戦術としては、「階層性を発掘するため」、あるいは「階層性発掘の努力」といったことが強調されているところを見ると、本来目指すべき目標を見失っていると感じられる。階層性を見出すことがあたかもユニットの目標であるかの如き錯覚に陥っている感が見受けられる。「俯瞰した高次視点から共通課題として捉え直す」という高尚な理念を掲げていた真意を今後さらに深く理解すべきである。事実、特筆された成果としてあげられているものでも、学術界に核融合科学研究所ありと広く認識させるユニットに成長するという意気込みを看取させるに至っていない。
- 2)に記載したように4つの課題設定はユニットの論理構成として優れているものの、本ユニットの目的ともいえる課題(4)に対してどのようなアプローチを構築し、今後の取組を検討しているのか、何より主要メンバーがそのイメージをどのように共有しているか、本報告会ではこれらに関する言及が少なかった。具体的には、「特筆された成果と見込み」として3課題の成果が紹介されているが、個々の成果としての報告に留まり、それらを課題(4)の観点からどのように俯瞰していくかなどの言及がないことから、本ユニットの目的・目標が共有されているのか分かりにくい印象があった。

#### 3.1.2 留意点

- 核融合科学の課題として、核融合実験装置においても地球を取り巻く自然界においても挑戦課題は既に十分存在していることを再認識すべきであろう。階層性に関連する課題を核融合科学分野外に求める前に、既に存在している実験室ならびに自然界の磁化プラ

ズマに見られる異常（突発）現象を主題として、階層構造に内在する異常ダイナミック過程の学術原理を見出すことに注力すべきではないか。

- 前述と関係して、課題(1)-(3)に関する研究は全世界の核融合・プラズマ研究者が（それが学術的であっても開発的であっても）概ね共有するとともに競争をしている分野である。従って、個々の成果は他ユニットを含め競争力の高い国内外の研究者・研究機関で議論されるべきものである。

### 3.1.3 提案・助言

- (1)磁場閉じ込めプラズマ実験装置で見出されている乱流異常輸送とそれを堰き止める異常障壁形成過程を俯瞰する一般原理の解明、(2)地球を取り巻く自然界の異常現象を支配する一般原理の解明を二つの焦点として研究を進めることを勧めたい。まずそれを解明する方法論の開発こそ第一歩と考える。これらの二つの焦点を中心に研究を進め、その展開に基づいて他分野の階層問題との相違点の議論を進め、共通原理を探る方向へ歩を進めていくのが正攻法ではないだろうか。他分野との真剣な協働はその基盤を固めてから始めても良いのではないか。
- 前述と関係して、(1)-(3)の個人研究は進めつつ、それらを統合的に俯瞰することで一般性・普遍性のある新しいプラズマ物理の観方を提示することは容易ではなく時間も要する。そのために、戦略会議などでは異なった分野の研究者が成果を報告し合うだけでなく、その解決のために何を課題と設定すればいいのかなどを外部のメンバーも含めて根気強く検討することが求められる。

## 3.2 構造形成・持続性ユニット

### 3.2.1 所見

#### 1) 発足前の評価に照らした総評

- 本ユニットは自己組織化による構造形成を伴った高性能プラズマを定常的に維持する方法論を様々なトラス系装置による実験データベースと理論・シミュレーションに基づいて開拓するとともに、その背景の物理メカニズムの探求を通して磁場閉じ込め核融合炉の学理を構築するユニットである。メタ階層ダイナミクスユニットや位相空間乱流ユニットがミクロからマクロへと積み上げていくアプローチに対して、マクロな熱力学の観点から核融合炉としての検証や妥当性（V&V）を議論するスタイルは開発研究に近い要素も含み、QST や大学などの多くの研究者が参加しやすい。今後のロードマップの具現化に関わる研究所の次期装置の在り方を検討する重要な場となるとともに、中核的役割を担うことが期待される。
- 各ユニットに対し分節化・定式化・学際化というキャッチフレーズが示されているためか、定常核融合炉を実現するための構造形成原理を解明するという本来の目標に、ことさら自然界の様々な散逸系における構造形成との共通性を強調しているように見受けられた。しかし、アカデミックプランにおいては、そのことには全く触れられていない。諸所においてエントロピー生成率という概念を出すことによって普遍性を強調している

ように思われるが、この概念と磁場閉じ込め実験における構造形成の具体的関係は示されていない。従って、むしろこのユニットは純粋に磁場閉じ込め高温プラズマ実験を通しての自己構造形成を追求するユニットとしての学術的価値を標榜し、そこに集中することを勧めたい。一般化や学際化については他のユニット（可知化センシング、位相空間乱流、メタ階層ダイナミクス等）とのコミュニケーションを取り、協働による取組をはかるべきではないか。

## 2) 優れている点や他のユニットが好例として参考にできる点

- これまでの LHD の実験を含む多様な装置のデータベースに基づく関連理論モデルやシミュレーションコード開発、将来の新装置に求められる高度計測機器の整備、高性能閉じ込めや定常性の根拠を与える可能性のある CFQS の建設の進展、ロードマップ 2023 年計画を想定した複数のトポロジーの検証に対応できるヘリカル系の設計の進展など、発足 1 年目として順調なスタートであると評価できる。
- 特に新装置構想は、複数の磁場のトポロジーとその中でのミクロからマクロまでの位相空間を含む多様な物理過程検証のプラットフォームとして研究所の中核装置としての役割を担う可能性があることから重要性は高い。
- 新しい実験装置を基盤として、高温プラズマの構造形成とその持続をはかるための物理過程を解明するに足るデータを獲得することができるという特別かつ重要な立ち位置をこのユニットは有している。メタ階層ダイナミクスユニットや位相空間乱流ユニット等とも深く連携し、核融合科学の特徴である外部エネルギー入力に晒された磁場で閉じ込められたプラズマ空間（開放システム）における突発的な形状変換を伴う自己構造形成の普遍的な原理探求のデータを生産できるユニットである。

## 3) 改善すべき点や不足点

- 上述の新装置（ヘリカル系）の設計活動は、研究所の歴史を考えれば高い競争力を持つことから当然と言えるが、ヘリカル系の専門家が主体であるとともに、外部からの参加者も限定された大学・研究機関の研究者に留まっている印象がある。これまでヘリカル系研究に長期間注力した研究所であるが故に、その強みを生かすことは大きなメリットである一方、研究所が大学共同利用機関であることを考えると、より広いトポロジーの装置まで対象を広げ、それらの関係者も参加した環境で新装置を検討するプロセスを経ることが期待される。
- 自らが単独で自然界・実験室内の開放システムにおけるエネルギー伝達・変換の普遍的な原理を打ち立てるという大きな理想を持つことによって、かえってユニット全体の注力が散漫となり、虻蜂取らずとなる恐れがある。本来の磁場に閉じ込められたプラズマの自己構造形成の原理を明らかにできる実験データを十分な精度で取り出せる新実験装置の設計にまずは集中すべきではないか。

### 3.2.2 留意点



- 本ユニットの目標として、「自己組織化による構造形成に伴うプラズマの定常維持」に関する課題を、エントロピー生成率などを指標として最適配位を評価するアプローチは評価できる一方、扱う問題の大きさに比べると構想が限定的な印象を受ける。成果報告会報告書「8. 思うようにいかないこと・・・」において「異なる分野への研究展開が限定的・・・」との考えが述べられているが、その意義は重要であるものの、ユニットの役割や資源配分や核融合炉の学術基盤の構築という大きな使命を考えれば、むしろメタ階層ダイナミクスユニット等との連携を強め、それらのユニットとの連携を通して対応するなどのアプローチが適切と思われる。そのような役割分担を考慮した人事等に配慮することも必要と思われる。
- ユニットの研究者がそれぞれの課題を発展させることは必要条件ではあるが、各研究者はこのユニットの目標、即ち外部からの強力なエネルギー入射を受ける磁場閉じ込めプラズマ空間でそのエネルギーがプラズマのエネルギーへと変換されマイクロ・マクロな不安定波動を生じ、磁場構造をも変形し、増大する高エネルギー粒子の中心部から周辺への異常輸送拡散を発生させ、それを抑える防御壁が自己形成され、その結果、定常構造の形成とその維持が実現する。その一連の学術原理を見いだすという一点（大志）を常にユニットメンバー間で共有し、情報交換していく体制を忘れてはいけない。

### 3.2.3 提案・助言

- 本ユニットの課題「自己組織化による構造形成に伴うプラズマの定常維持」は今の磁場方式のアプローチの主流になっている内容であり、その観点に立って世界の核融合研究がしのぎを削っていると言える。一方、本ユニットの参加者はヘリカル系の専門家が主体であるとともに、外部参加者も限定された大学・研究機関の研究者である印象がある。異なったトポロジーの研究者が相互のメリットやデメリットを共有しつつ、議論に参加できる環境を構築する方策が望まれる。
- ロードマップ 2023 のプロジェクトを具現化するに当たって、世界の他の実験装置では得ることができない精密な情報を取得できる計測機器を備えた装置設計をすることを忘れてはいけない。新装置（CHD-U）設計の中核となることが期待される本ユニットには、磁場構造に対する新しい構想は、世界にはない計測装置群を強みとすること、既存設備の最大限の利用を図ることを俯瞰するためのものと考えられたい。本ユニットの目的は、核融合科学の学術的に最も重要な未解決問題である構造形成とその維持を可能にする原理を見いだすことであることを肝に銘じてほしい。
- ユニットはあと 8 年ほどで目標に照らして目にみえる成果を出すことが必須である。新装置の具現化には相当の年月を要する。従って、既存の国内外の装置による共同研究は本ユニットにとって必須である。それらの共同研究においては、本ユニットの目的である構造形成とその持続性の原理究明に集中し、新装置に求められる計測装置の開発に資することが望まれる。

## 3.3 位相空間乱流ユニット

### 3.3.1 所見

#### 1) 発足前の評価に照らした総評

- 核融合プラズマ研究は 60 年の時を経て燃焼プラズマの実現に至りつつあるが、この長期に及ぶ時間はプラズマが実空間を超えて位相空間の科学であったことによると言っても過言ではない。この間、多くの理論・シミュレーションにも支えられ、多くの放電を通じたマクロな流体的物理量からスケーリング則の構築を通してプラズマの応答を発見法的に見出し、それによってプラズマを制御するに至った。しかし速度空間および位相空間の構造を対象とした実験的傍証は未だ数少ない。その観点から、散逸の微小な超高温のプラズマの安定性や、これまでは閉じ込め性能が低いと考えられていた運動論に基づく多様な閉じ込め方式への展開（挑戦の流れ）にも整合している。
- ユニット発足時の様々な議論がさらに整理されるとともに、外国の装置を用いた位相空間ホールや磁気リコネクションに関わる基礎実験、さらにはオーロラなどの自然プラズマを対象とした計測に向けた取り組みが進展していることも高く評価できる。
- このユニットは、その研究対象がプラズマ物理学の誕生当時の古くて新しいプラズマの分布関数と波動の問題である。この最初の課題は **bump-on-tail** 問題として電子の速度分布がマックスウエル分布に高速の電子ビームが加わった時、その非平衡部分がプラズマ波動を励起し、その波が **tail** の分布を平坦化し、有限振幅のプラズマ波動と共存した平衡状態に落ち着くというものである（準線型理論）。この分布関数とプラズマの波動との問題は、分布関数を計測することが不可能という当時の常識から、主に理論あるいはシミュレーションによる研究がなされていた。現在では、実験研究もシミュレーション研究もはるかに向上し、粒子の非平衡分布度が強大になり、電子に基づく波動、イオンの非平衡分布に基づく波動、さらには磁場構造の 3 次元性に起因するイオン（電子）と磁場の複雑な相互作用に基づく諸々の力がフィードバックし合い、これらの時空の絡み合いがシステム内のエネルギー（粒子）の伝達・変換にある規則的な振る舞いをする事が明かされている。このような状況下で、バーチャル世界ではなく現実世界の粒子分布の計測を可能にする計測法が本ユニットの研究者を中心に開発され、その本格的な計測研究が始まることに対する期待は大きい。

#### 2) 優れている点や他のユニットが好例として参考にできる点

- ITER や原型炉などの燃焼プラズマのみならず、レーザー方式を含めたより強い非線形性や熱的な概念を上回る非平衡性の自由度に着目したイノベーティブな核融合炉概念の創出も期待されている。そのためには位相空間までさかのぼった原理の検証と妥当性の確認が求められる。例えば、流体的な平衡だけでなく、位相空間の渦を伴った BGK 的な運動論的平衡のもとに形成される閉じ込め装置などはそれにあたり、計測を通じた原理の検証と妥当性の確認（V&V）は不可欠な要素であろう。また、それを可能にする高度な計測機器の開発は多くの理工学分野や情報学分野にも影響を与える要素となる。本ユニットの取組は核燃焼プラズマの精密な予測とともに、より高効率でコンパクトな核融合が求められる社会的な要請とも整合する。

- 本ユニットは、現実の磁場閉じ込め実験装置における粒子の分布関数を時空間で実測する計測方式を開発し、実験において位相（マイクロ）空間分布の情報取得を行おうとする画期的なユニットである。本ユニットの研究において、これまでバーチャル技術（シミュレーション）に依存していたものが、現実世界におけるマイクロ構造とマクロ現象との絡み合う情報を引き出す実験システムを完成させ、マイクロな乱流状態と現象（マクロ）界における異常輸送問題への解決の道筋を整えうる重要なユニットと評価できる。シミュレーションの世界では、マイクロとマクロの10の30乗や40乗という途方もないスケールの差をどう回避するかという困難なアルゴリズムの壁が存在しているのに対し、現実の時空間ポイントにおいては、マイクロ（粒子）情報を同時に得られるという大きな利点が存在する。言い換えると、異常輸送というマクロな現象とそれを引き起こしているマイクロ状態を同時に見るができるという画期的なユニットである。勿論、そのマイクロデータはシミュレーションに比べ情報量が小さく粗視化されているという欠点はあるが、マイクロ情報とマクロ情報をそのまま観測できることは画期的である。

### 3) 改善すべき点や不足点

- 現実の複雑なコイルで囲まれるであろう新実験装置（CHD-U）において、任意空間ポイントの情報を得られる計測システムを設置できるかどうかという懸念がある。物理設計、装置設計、既存設備の最大限の活用と計測からの要求を合わせて、設計を彫琢する必要がある。このためには構造形成・持続性ユニットなどとの密接な協働が必要である。
- 運動論的な平衡状態に、強い非線形や非平衡性が印加されたとき、それらが乱流状態に移行するか、よりコヒーレンス性の強い構造形成に移行するかは自明ではなく、同等に重要であるとの認識に立てば、ユニット名は位相空間の取り得るクラス（可能性）を狭めている印象を受ける。

#### 3.3.2 留意点

- プラズマ波動の成長・減衰やプラズマエコーの計測など、位相空間に関する研究はプラズマ物理の当初から行われてきた経緯があるが、いずれも熱的プラズマをベースとして、それに対して微小な摂動量を扱う課題となることから計測は容易でない。また、計測機開発に時間を要するため、位相空間における様々な傍証的な結果が得られたとしても、既知の物理過程を検証したり説明したりする学術研究のフェーズが一定期間続き、閉じ込め性能の向上といったアクティブな開発的要素を含む要請に積極的に応じたりフィードバックをかけるまでには時間を要すると思われる。これらは当然のこととして着実に進めていただきたい。
- 新実験装置が本ユニットの主要設備となると予想するが、研究所は学術研究所であり、装置を作ることだけが目的ではなく、あくまでその装置からどれだけ必要なデータを獲得できるかが鍵となる。その点を是非とも装置を設計・具現化する上で考慮していただきたい。

### 3.3.3 提案・助言

- 日本では JT-60SA が稼働する。CHS の再利用や、国内外における他の実験装置での共同研究もあわせて、エネルギー密度が高く非線形性・非平衡性の強いプラズマを研究する上で、各々の実験装置のメリットを生かし、新実験装置をより価値あるものとする戦略をもっていただきたい。構造形成・持続性ユニットおよび可知化センシングユニットなどと連携して、基礎研究で得た結果を核融合プラズマ研究に直結する実験装置 (CHD-U) にも導入する、そのための計測機器開発を平行して計画的に行うなど、活動の枠組みを広げて本ユニットの活動を大きく展開させることを期待する。

## 3.4 プラズマ量子プロセスユニット

### 3.4.1 所見

#### 1) 発足前の評価に照らした総評

- 多価高 Z イオンの原子物理学を核とし、ミューオン科学など新規軸を包含した研究展開を指向しており、原子分子関連研究を核として基礎研究から学際的な研究にも貢献が期待される。特に核融合プラズマ内の重元素不純物の影響や炉材料にいたる幅広い分野で今後も原子分子研究の成果が活かされることが期待できる。
- レーザー核融合研究という当初の印象は払拭され、ユニット名にふさわしい研究に絞られている印象を持った。
- 新しい人材の参画によりユニットの研究の幅が大きく広がっている。多様な研究を研究所の共同研究として進める計画を持っている点は評価できる。この研究分野の広がりやユニット全体の研究の発展に繋がるように、うまくユニットの活動を展開していただきたい。
- 一方で、高度化、学際化、国際連携に関して具体的な成果が生まれているとは言い難い。今後、関連コミュニティとの情報交換をさらに活発化して、幅広い学術研究を推進することを期待したい。

#### 2) 優れている点や他のユニットが好例として参考にできる点

- 学際的、国際的な共同研究体制の構築が進められ、既に多価イオンの準安定励起状態を利用したレーザー誘起蛍光法や高繰返しレーザートムソン散乱計測、重元素多価イオンの分光測定など成果も出ている。
- 原子分子過程は幅広い分野と関連があるため、学際化しやすい位置にあると思われる。そうした長所を有効に使って欲しい。
- 量子プロセスがプラズマ物性をどのように規定し、その効果がプラズマ現象にどのように発現するかを明らかにすることは大切なテーマであると思う。QCD の磁気リコネクション過程やクオークの再結合過程など、新しい概念が生まれることは興味深い。
- ユニットの特徴を生かした学際的な研究で成果が上がっている点は評価できる。セミナーの企画や他分野交流の場を持つことに積極的である点も今後新しい展開に繋がることが期待できる。

### 3) 改善すべき点や不足点

- 元々独立した研究グループが統合されてユニットを形成していることから、ユニット内での連携活動が少ない。
- 学際性を拡大するために、それぞれの関連領域との情報交換や議論をもっと積極的に行うべきである。レーザーと磁気閉じ込め装置によって、地球磁気圏や太陽でのリコネクション研究に寄与するとの構想が示されているが、単に形態学的な議論ではなく、物理としてどのような類似性と相違性があるのか、それを前提としてどのような学際的貢献ができるのかについての検討が欠けていると感じる。
- MHD 中間衝撃波の実験に関する計画が示されている。中間衝撃波では磁場と速度は不連続である一方、プラズマ密度は連続であろう。そうした現象をどのように計測するのか、また、2つの圧縮性の衝撃波とどのように区別するのかについて、より具体的な検討がまだなされていないのではないかと感じる。
- 分野外との交流は積極的な反面、ユニット内部での交流は限定的に思える。ユニットとしての活動が各人の研究に役立つようにコミュニケーションすることにも知恵を絞ってほしい。
- お互いに関心した研究テーマを無理に繋いで活動するというより、お互いの情報共有や新分野への展開を図る際に連携が自然と形成されていくのが望ましい。

#### 3.4.2 留意点

- 研究所内外でのユニット活動を担う研究者同士の結びつきがまだ弱いので、意見交換会の開催など積極的な働きかけを期待したい。
- 関連コミュニティとの議論を積極的に行っていただきたい。また、他分野の研究者との連携では、研究の主導権が先方にあると、その場だけの請け合い仕事に矮小化してしまう懸念がある。互いに尊重できる研究の主体性を持つての連携が望ましい。
- QCD の磁場のリコネクションへの取組を検討中とのことである。古典プラズマにおける磁気コネクションは無衝突プラズマにおけるマイクロ異常散逸に伴って発生する磁場のトポロジー変換や磁気エネルギーの爆発現象と深い関係があるが、QCD における磁場のリコネクションとは量子の世界において一体どのような物理的効果が期待できるのか、興味をもって特筆しておく。

#### 3.4.3 提案・助言

- 今後、国際的競争力のある多くのデータベースを持つ強みを活かした活動を期待したい。数値モデルなどの開発・提案を進めるなど、他分野にもインパクトを与える研究をしてほしい。
- ユニット内、研究所内に留まらず、従来の分野を超えた幅広い情報交換を積極的に行うことによって真に学際的なユニットとして成長していただきたい。

### 3.5 プラズマ・複相関輸送ユニット

### 3.5.1 所見

#### 1) 発足前の評価に照らした総評

- ユニット活動は「周辺プラズマ、粒子制御」、「プラズマ・壁相互作用、炉工学」、「弱電離プラズマ・光・物質相互作用」の3つのカテゴリーでユニット活動を展開している。ユニットの掲げる研究対象に対して、学際的な研究も含めて多くの研究が進められており、研究のアクティビティーは高いと感じる。
- 本ユニットでは、磁場閉じ込め装置の周辺プラズマと真空容器壁の相互作用システムを研究対象とし、プラズマと固体・液体・気体が接する系における熱・粒子・運動量の輸送現象を理解し、制御することを主とした目的として活動を進めている。核融合の重要課題（非接触、粒子循環、極限材料）に対する研究所の強み（原子分子データ、MD等）を活かした研究分野であり、学際的な広がりにも期待できる。
- 今後、これらの研究を通して得られる知見や技術を他の関連分野に展開し、新しい領域の発展に寄与することを期待する。一方で、総花的に研究を進めることで研究の質が低下しないように気を付ける必要があろう。
- 複合的なプラズマの実験・シミュレーション研究を多様なシステムについて研究しようとしていることは評価できる。一方で、それらの異なるシステムの研究が核融合科学とどのような相乗効果を生みつつあるのかについては不明確であった。

#### 2) 優れている点や他のユニットが好例として参考にできる点

- 3つのカテゴリーそれぞれで、実験とシミュレーション研究を進めており、各分野で特徴ある研究が展開できている。また天文学など他のいろいろな研究機関、研究者との共同研究が行われるなど、学際的な研究の広がりもあり今後の活動が期待できる。
- 熱的不安定性など、核融合と天体（星間ガス、太陽大気など）に共通したいくつかの現象に注目して、普遍的な理解を得ようとしている点は評価できる。
- 核融合炉の開発に必然となる中性子照射による対抗壁の材料の素過程の知見や周辺プラズマの輸送を制御する方式を導き出すための中性粒子・気体・固体との相互作用に関わる素過程の知見を見出すというテーマは大いに推奨される。
- 超高流束協奏材料ユニット、プラズマ量子プロセスユニット、プラズマ装置学ユニットなど、他のユニットとの研究交流によりさらに新しい研究が展開されることを期待する。

#### 3) 改善すべき点や不足点

- 「周辺プラズマ、粒子制御」、「プラズマ・壁相互作用、炉工学」では研究分野の重なりも多いと思うが、相乗的な効果が出ているかまではまだ判断できない。またデタッチメントプラズマ研究は「周辺プラズマ、粒子制御」と「弱電離プラズマ・光・物質相互作用」の分野が関連するところでもあるが、相補的な研究はこれからであろう。決定的な課題の一つである中性子照射影響についてのアカデミックプランが明らかでない。
- それぞれのプラズマシステムの理解において何が課題であり、なぜ、その解明が困難なのか、という問いに対する分析が不足しているのではないかと感じる。

- ユニットテーマは複相間輸送現象の体系化、モデル化であるので、個別の成果がその中でどのような位置付けにあるのかを明示し、全体の進展としてわかりやすくする必要がある。
- 他の関連分野の発展への寄与として、「弱電離プラズマ・光・物質相互作用」にいくつかの成果が述べられている。それぞれの成果はそれ自体として確かに評価できるものの、これらの研究の目標と本来の周辺プラズマの複相間輸送を解明する目標とが深く関連しているとは考えにくい。バラバラという感が強い。
- このユニットの本来の目標達成には大きな実験装置(例えば、JT-60SA や ITER)を必要とするが、所内の装置は実験装置直線型プラズマ装置 (HYPER-I) のみであり、その装置を積極的に利用して本来の研究目標に貢献する研究者が足りていないと報告された。所内外の装置や研究環境をどのように利用して必要とされる実験データを取得しようとしているのか、共同研究としてどのように活性化を図っていくかの戦略が曖昧である。

### 3.5.2 留意点

- 直線型プラズマ装置のテーマでは、超高流束協奏材料ユニットとの重なりが感じられる。同様の研究対象であっても、異なった捉え方はより包括的な理解を促すであろう。それぞれの特徴を活かせるよう 2 ユニットが協働し、コミュニティとの議論を通じて、世界の最先端の研究機関に伍して研究を進められる新たな実験環境（装置）を立ち上げることに取り組むべきではないか。
- 現有の直線装置の利用拡大が上手く進んでいない点については、継続して情報発信やセミナー等での働きかけが必要である。基礎実験装置であることの機動性を活かして、研究の進展に応じて実験装置を大型装置では不可能な短いターンアラウンドで改良・改造し、新しいテーマに挑戦できるような長期的な研究プランを提示する必要もある。
- 所内外の装置、直線型プラズマ装置 HYPER-I や TPD-II、また名大の NAGDIS などとの共同研究を進め、高密度粒子流/高負荷熱流に関連した研究展開や、カテゴリー間の研究交流を進めることを期待したい。これを促すために各装置の担当者には、ユニットの枠を超えて協力者を募る努力が必要であろう。
- 核融合と天体プラズマにおける課題と目標の類似性と差異をしっかりと理解した上で、研究計画を作る必要がある。
- このユニットの多様な研究の共通点を探すと、分子動力学シミュレーション手法であるとも考えられる。他のユニットとの連携も視野に入れて、このような横串を刺す形での、核融合科学の学術的発展に貢献する確かな道筋に繋がる研究展開を期待する。

### 3.5.3 提案・助言

- 周辺プラズマ、プラズマ・壁研究分野などに関して世界の研究グループに伍する研究展開を期待する。核融合科学研究においては先端研究結果に基づく提言を出すなど、よりアピール力を強化することや、他分野との連携、応用研究への展開も期待したい。

- プラズマと材料の相互作用は、プラズマ照射と高エネルギーイオンビーム照射（中性子照射の模擬）などの複雑環境において、その場・実時間での観察手法を用いて、非平衡で動的な現象の解明が重要となってきた。中性子照射影響を含めて、世界トップレベルの研究とはいかなるもので、何で最先端を目指すのか、本ユニットが超高流束協奏材料ユニットと協力し、コミュニティとの議論の母体となしてほしい。そのうえで、研究所においてしかるべき装置を整備して、研究を進めることが望ましい。
- プラズマの熱的不安定性は太陽大気中の温度遷移層やスピキュール境界でも起きていると考えられており、そこでのエネルギー輸送の理解はコロナ加熱問題の解決にとって重要である。太陽物理コミュニティとの密な情報交換を積極的に行っていただきたい。

### 3.6 可知化センシングユニット

#### 3.6.1 所見

##### 1) 発足前の評価に照らした総評

- 先進プラズマ計測・解析技術の展開とデータサイエンスとの連携によって複雑なデータから核融合科学の未解決問題に挑むことを指向したユニットである。研究所の強みである多様な時空間スケールのプラズマ現象の先進計測技術と膨大なデータを処理・解析する方法論をさらに展開し、今後さらに必要とされる核融合プラズマでの複雑な現象の理解と予測、制御を可能とする技術開発を進めることが期待される。
- 高速トムソン散乱計測の高度化やイメージングボロメータ計測、大気中トリチウム捕集システム構築などで一定の成果を出しており、核融合科学のみならず、新材料合成、フォトリソグラフィデバイスなど、幅広い分野における先端研究の話題についてのセミナーを他ユニットと連携して開催している点など、ユニットの主旨に沿った活動を展開している。
- ユニットとしての連携に努力しており、具体的な成果をすでに生み出していることは評価できる。今後、得られたデータや制御手法を「知識」として理解するレベルまで高める努力を期待したい。
- 一方で、本ユニットには研究の目指すベクトルが異なる「センシング」と「可知化」という二つのグループが混在している。前者のセンシングは研究対象（未知の対象）の状態を直接探索（データ取得）する研究であり、解明したい特定対象の未知の特性（物理プロセス）を探し出すことである。一方、後者の「可知化」は既知データを「可視化」する研究であり、既已取得した静的なデータの中に隠された物理的特徴・法則性を取り出すことである。元々並列して考えるテーマが内在することもあるが、異なった分野の融合・連携による新概念や新分野の創出を含め、所内外から多様な分野のメンバーが結集している利点が生かし切れていない感がある。

##### 2) 優れている点や他のユニットが好例として参考にできる点

- 先進プラズマ計測技術の開発や展開はこれまで研究所が持つ強みの一つであり、膨大なデータを解析するデータサイエンスとの融合は必須である。それぞれで研究展開が進め



られている点は評価できる。今後核融合分野だけではなく、幅広い関連研究との連携を期待したい。

- 所内・所外共に日本を代表する多くのメンバーが集合しており、内包する専門分野・研究領域は多岐に渡る。これまでの実績をベースに、個々の研究課題については重要な成果を挙げているとともに、体制構築に向けた尽力がなされている。
- 乱流計測とシミュレーションの比較検討から GK モデルの課題を明らかにできたことは今後に繋がる成果である。
- オープンサイエンスへの活動は評価できる。実際にどう活用していくかのチュートリアル的な活動も今後は大事である。
- 様々な視点を持った研究者が集まるユニット内のコミュニケーションを活性化する為の活動に努力されていることは評価できる。特に、これまで必ずしも実績を持っていない高強度レーザープラズマ分野の計測に関わる方を含め、若手研究者も多く参加しており、多数の受賞も得ていることも評価できる。

### 3) 改善すべき点や不足点

- 個々の成果は優れたものがあり、特に本ユニットで行われる計測技術は他のユニットで活用される場合も多い。一方、プラズマ・複相間輸送ユニットやメタ階層ダイナミクスユニットとの連携などを含め、ユニット間での相乗的、統括的プロジェクト活動がまだ出来ていない感がある。
- レーザーを用いた計測によるプラズマの状態を探るセンシンググループと実験研究やシミュレーション研究で取得された多様なデータを対象としてその中に潜む科学知を見出す方法論を開発する可知化グループは、そもそも独立した研究グループであるため、それらがユニットとしてどのようにシナジー効果を生み出していく取組は道半ばであり、まだ不十分である。
- 得てして、二つの優れたグループを一つの枠内に入れた際に、声の小さなグループは徐々に活動力が落ちる傾向がある。その兆候がこのユニットに出ていないか、ユニット長をはじめ、構成員全員の努力も必要であろう。

#### 3.6.2 留意点

- AI・データ解析などの手法開発は、ユニット毎ではなく研究所の中で関連した研究者が情報交換できる場を設けるなど、日進月歩で進められる世界の技術潮流にキャッチアップできる対応が必要であろう。
- 「可知化」のためには、得られたデータをデータのままでなく、知識として普遍化する必要がある。そうした取り組みにも期待したい。例えば、auto encoder で放射崩壊の前兆を捉えたことは制御のためには優れた成果であるが、さらにそのメカニズムを理解するレベルにまで到達することで「可知化」が実現できるのであろう。そうした発展を期待する。

- 各研究者がユニット内の活動だけでなく、親和性のあるユニット、あるいは外部協力者との自由な交流活動を促進することで、それぞれの目指す研究テーマの自由で新しい研究展開が期待できる。
- ユニット発足時からレーザー分野の優秀な若手研究者が採用されているが、磁場分野の研究者との交流は希薄な印象を受けるとともに、意思疎通が容易な限られた研究者との議論に留まっている様にも見受けられる。幅広い交流活動を展開することを望む。
- 同様に、外部研究者との関係を如何に築いていくかが、技術面を含めてポイントであると思われる。異なった分野間に融合的な特性を持つ具体的な課題設定を協力して行うとともに、それを解決に導くプロジェクトを設定して取り組むなどの試みなどが考えられる。

### 3.6.3 提案・助言

- ユニット内での議論や研究者同士の交流活動の活性化を期待する。それぞれ研究テーマが大きく異なるメンバーでの情報交流は、深掘りされた研究内容の紹介だけではお互いの良さを理解出来ない。研究者同士のアイスブレイク的な活動から始めるなど、ユニット長や若手メンバーを中心とした活動など、より積極的なユニット内活動を期待する。
- 必要であれば「センシング」グループと「可知化」グループとの分離や、研究対象に応じたグループ分離なども想定されるが、計測技術とデータサイエンスの統合という目標は多様なプラズマ現象の総理解を図るには不可欠な視点であることを念頭に、継続的な議論と取り組みを積極的に行いながらユニット内での連携を進め、優れた成果の創出につなげることを期待する。次年度の成果報告会においては、「センシング」「可知化」が同じユニットにある価値を示していただきたい。
- ロードマップ 2023 のプロジェクトを具現化する新実験装置（CHD）設計では、構造形成・持続性ユニットおよび位相空間乱流ユニットと共に本ユニットがプロジェクトの中核となることを期待する。

## 3.7 プラズマ装置学ユニット

### 3.7.1 所見

#### 1) 発足前の評価に照らした総評

- ユニット活動の方向性は、「多様なエネルギーレベルを有した荷電粒子群の集団的特性を理解し、その特性を利用して荷電粒子群を制御し応用すること」であり、中性粒子ビーム、反物質プラズマ、ミューオン触媒核融合、宇宙推進と、それぞれ学術的な価値の高い研究項目を内包している一方で、各研究の独立性が高い事が特徴でもあり、そのためユニット全体を包括する学理が曖昧となっている。
- このユニットが目指している学術テーマは何か、学術として目指す具体的目標は何かを定義することが難しいユニットでもあるため、ユニットとしての共通課題が見いだせておらず、組織としてのユニットのメリットを活かせていないように思える。

- 各研究項目でそれぞれの特徴ある装置開発とその実験研究の成果が上がっている点は評価できる。所内メンバーの減少により新しいメンバーの獲得が急務である。

## 2) 優れている点や他のユニットが好例として参考にできる点

- 大型プロジェクト研究ではなく、また大学レベルの萌芽的基礎研究でもなく、基礎研究から大型プロジェクトを繋ぐ学術研究を展開している点に特徴がある。外部研究者を含め、個々の研究レベルは高く、外部資金の獲得割合も高い。
- 研究所が国内外のプラズマ関連研究をしている研究機関と共同研究することは大学共同利用機関の役割である。相応の規模である所外の活動を巻き込む役割を本ユニットは果たしている。
- 一般的には各研究者が目指す研究テーマを束ねたユニットが一丸となって研究を進めることは大切であるが、その上でも所外との個々の研究協力は欠かせない。本ユニットの特徴が外部連携にあるとすれば、その評価については他のユニットとは違った視点も用いるべきであろう。
- 本ユニットは一つの研究テーマによる結びつきではなく、どのようなプラズマ装置が学術あるいは社会（技術）において有用な役割を果たしうるかということを世の中に知らしめる役割を担ったユニットとも言える。核融合科学という幅の広い学術の研究所として、このような役割を持つユニットが存在していることは評価して良いと考える。

## 3) 改善すべき点や不足点など

- このユニットで追求する学理や、核融合科学研究所が進めるユニットとして担うべき役割や意義は何か、そして10年を見据えたユニット活動から期待できる果実は何か、ユニット開始当初から課題となっていた点についてはまだ明確ではない。
- 外部連携研究者を含め、個々の研究活動では優れた成果が上がっているが、所外のユニット構成メンバー同士の連携についてはまだ希薄である。ユニット内連携で新しい研究が展開するなど、ユニットに参加していることのメリットが明確になるように知恵を絞って活動してほしい。また、そのような活動をアピールすることが新しいメンバーの獲得にも繋がると期待する。
- このユニットは他のユニットに比べ、研究所と外部との研究連携をより進めている点で特徴がある。ただ現時点では、ユニットに所属する所内の研究者が一人であり、ほとんどが所外メンバーから構成されていることから、組織的なユニット運営が難しく、研究者同士の交流や連携がうまく動いている感は少ない。
- 所内メンバーが1名となり、ユニットとしての組織的な運用が困難になりつつあるため、組織的なサポートが必要である。

### 3.7.2 留意点

- 研究所の役割である共同研究の一つの形態としてこのユニット活動をどのように位置付けるかは難しい。他の9つのユニットの共同研究への取組とは違った視座で、日本の独

創性を持つ中心的研究者がその具体的な研究テーマとは別の分類で結びつきを持つことも研究所のコミュニティを広げる上では大切であると考えれば、必要なユニットと考えることができる。

- 逆にそうした環境を全国の研究者が互いに協力する契機とすることで、新しいアイデアを生み出す仕組みを構築してはどうだろうか。

### 3.7.3 提案・助言

- 外部研究者と連携しながら、こういった形で本ユニットの各テーマ研究を進めていくのか、ユニット長の舵取りが重要である。積極的に新しいユニットメンバーの獲得に努力するなど、所内人事も含め、ユニット維持のためには人数増を図る必要がある。
- 現在のユニットテーマ以外の研究でも、本ユニットの理念に沿った研究であれば積極的に勧誘すべきである。今後も引き続きユニット活動の状況をみながら強化すべき項目の提案や、ユニットの位置付けなどを再検討することも進めてほしい。
- 所内構成員が少ない点については、ユニット間クロスアポイントメントのような形で兼任制度を設けても良いのではないか。このユニットに関わる責任を負った方（責任が100%でなくても）を増やして、多面的な活動を抱える本ユニット活動をまとめていく方策も検討していただきたい。
- 次年度の成果報告会においては、本ユニットの脆弱な体制が改善され、運営および活動が研究所の在り方に沿って適切なものとなっていることを確認したい。

## 3.8 複合大域シミュレーションユニット

### 3.8.1 所見

#### 1) 発足前の評価に照らした総評

- 本ユニットは、トーラス系の磁場方式の核融合プラズマにおける空間スケールの大きく異なる物理過程を統合的に解いて燃焼プラズマの全体特性を解明する方法論を開拓することを目的としている。イオン系に対してジャイロ運動論効果を取り入れた MHD ハイブリッドのアプローチと微視的な階層をモデル化することで巨視的階層に組み込んだ流体モデルで再現するアプローチをベースに開発を進めている。
- 本ユニットには、(1)ジャイロ運動論方程式を基盤としたシミュレーションコード(MEGAコード)を基盤として、磁場閉じ込めプラズマの大域的振る舞いの解明に挑戦するグループと、(2)例えば、流体乱流における高帯域波長スケールにおける慣性小領域のようなエネルギーカスケード領域を解析的モデルで近似し、特徴的スケール領域間を連結し、計算領域を遡減するアルゴリズムを開発し、大域シミュレーションを可能にするグループで構成されている。
- 磁気流体ハイブリッドシミュレーションコード(MEGA)を中心に炉心プラズマの階層間相互作用に迫る研究が進んでいることは将来的に期待できる成果であり、高く評価できる。一方、乱流諸現象における散逸階層・微視的階層のモデル化の新たな方法論につ

いては、基本的な戦略と核融合研究との将来的な関係について良く理解することができなかった。

- ユニット発足前の議論から、この 2 つの数値シミュレーション研究を統合するには無理があることから、弱く連携しながら複線的にコード開発を行い、もとより電子系まで含めたすべての階層を自己無撞着に解くことは不可能であることから、将来的には同一の現象に対して異なった視点からシミュレーションを行うことで全体像の把握を目指すとの考えに落ち着いている。発足 1 年目はこの方針に沿って、モデル開発が双方で進展し、特筆する成果が複数挙がっていることは評価できる。また、複合大域シミュレーションに関する学際研究ネットワークの形成が図られるなど、特に(2)については異分野との連携も軌道に乗っている。
- 問題はこの二つの方法で、核融合科学の未解決問題である、特徴的な時空スケールが極端に離れた現象が相互に関連しながら、時には蟻の一穴的な爆発現象を伴う開放・超非平衡現象を全て網羅できるとは考えられないことである。

## 2) 優れている点や他のユニットが好例として参考にできる点

- 発足 1 年目において、双方のアプローチの活動が積極的に行われ、(1)のアプローチでは MEGA コードにイオン系ジャイロ運動論モデルが導入され、ITG モード乱流が可能になり、熱イオンの運動論効果が MHD モードに与える影響などの議論がされるに至り、(2)のアプローチでは、流体モデルにより微視的乱流の特徴抽出や、MHD 熱対流や中性流体におけるカスケード過程の詳細解析などが進展している。両者ともにアクティビティが高く評価できる。
- この 1 年でジャイロ運動論近似に基づく MEGA コードをジャイロ運動論—ポアソン方程式系に拡張し、ハイブリッドシミュレーションの適用可能性を拡大させたことは今後の発展に期待できる成果であり、高く評価したい。このコードは核融合炉開発を目指すシミュレーション研究にとっては十分効果のあるコードであることは確かである。
- これらの状況を分析すると、総評の通り、両アプローチの統合を目標として陽に掲げる必要は必ずしもなく、双方のアプローチを通して多様な分野と核融合科学との連携が複数のパスを通して強化され、学際性のレベルが一層向上することが望まれる。特に(2)のアプローチは量子乱流などの物性論分野や気象現象を含めたエネルギー循環分野、磁場を通したレーザープラズマ研究分野など、核融合の学際化に大きな貢献を果たしている。
- 流体不安定による長波長不安定波動からエネルギーが短波長へとカスケードするプロセスにおいて、非常に小さなスケールに規則的な渦現象が発生することが大規模流体シミュレーションによって明らかにされている。このようなプロセスに対し、慣性領域を解析的モデル化し、長波長不安定領域と微小渦構造の出現する領域を解析的モデルで連結し、全領域を近似的に包含するシミュレーションアルゴリズムを開発する研究は、流体的乱流の高精度構造解明に一定の貢献をすることは確かであろう。

## 3) 改善すべき点や不足点

- これらの2つの大域シミュレーションへの挑戦はそれぞれ異なる分野に大きな貢献をすることは間違いがないが、これらは限定的・特殊な条件のもとでのみ有効なアルゴリズムである。自然界プラズマにおいて度々見られる爆発現象は往々にして、電子スケールと爆発を起こすシステムのスケール差は4次元時空間においては10の30乗、あるいは40乗にもなり、いかなるコンピュータでも一挙に解くことは不可能である。しかし、これを可能にする一般的なマクロ-マイクロ連結階層(MMI)アルゴリズムが考案され、その具体的成功例もいくつか発表されている。新MEGAコードはイオンのジャイロ効果を繰り込んでいるが、電子の純粋な運動効果は表現できない。この電子の効果とMHD効果を同時に扱うことは先に述べたように不可能に近い。従って、例えばMMIアルゴリズムのような別次元のアイデアが要求される。
- 乱流の散逸階層モデルの方法論研究や木星深部におけるねじれアルヴェン波の研究は優れた研究ではあるが、それが複合大域シミュレーションの将来計画のなかでどのように位置付けられ、今後発展させようとしているのかが不明であった。

### 3.8.2 留意点

- (2)のアプローチに対して、学際性の観点から高く評価したが、(1)がITERやJT-60SA、さらには原型炉に対して直接的な貢献がなされ、これらのプロジェクトをリードするイメージが具体的に描ける一方、(2)のアプローチに対しては、現状のアクティビティがどのようにジャイロ運動論モデル等では困難な課題に適用され、どのように核融合科学研究をリードしていくかのイメージが見えにくい印象がある。これらのスコープを今後明確にすることが必要である。
- 複合大域シミュレーションと名付ける以上、特定の課題に適用できる高度なコード開発と同時に、MMI、あるいはそれを超えるような一般化され普遍的でスマートなアルゴリズムの開発を行う研究者も本ユニットにおいて育成していただきたい。
- MEGAを宇宙物理的問題にも応用する検討を始めていることは大変興味深い。太陽高エネルギー粒子の加速伝播など、応用できる問題は多いと考えられるので、関連コミュニティとの連携を進めて、価値と評判を高めることを求めたい。

### 3.8.3 提案・助言

- 上記した懸念はあるものの、双方のアプローチが共に優れている一方、(2)のアプローチに対して多様な分野との連携が学際的な観点から進めば、十分に役割を果たすものと考えられ、核融合科学への直接的な貢献は必ずしも強く要請する必要はないと思われる。ただ、その場合も主にマルチスケールの数値手法の開発など、協働作業がやり易い具体的課題を設定して取り組む方法を検討することを提案したい。
- 本ユニット制においては、核融合プログラムへの直接的な貢献とともに、核融合研究の学際化という大きな目標のもと、多くの他分野の研究者が核融合研究に科学・技術的観点から関心を持ち、核融合研究の裾野を広げることを目標にしている。ともすればこれらの活動は個々独立に行われ、さらなる発展が停滞することも予想される。そのため、

(2)のアプローチの研究者が、各ユニットの他分野との学際研究推進の連携役となり、定期的に関連意見交換会を行うなどの活動も期待したい。

- 現在進めている個々の研究は高いレベルにあるが、さらにその先にある「複合大域シミュレーション」とはどのようなものであるべきなのかをユニットの研究者を中心に検討し、野心的な未来像を描いて、新たなシミュレーション研究を切り拓いていただきたい。

### 3.9 超高流束協奏材料ユニット

#### 3.9.1 所見

##### 1) 発足前の評価に照らした総評

- 材料のミクロな散逸構造とそれによって発現する物性のダイナミクスの解明や超高流束に曝されている材料の寿命を延長させる自己修復機能の探求などを目指して研究を進めている。この目標は明確であり今後の発展が期待できる。

##### 2) 優れている点や他のユニットが好例として参考にできる点

- 本ユニットでは研究者の連携協力体制ができており、ユニットの全体構想について有意義な議論ができています。
- 材料のミクロな特性研究に留まらず、劣化や寿命などマクロな特性やシステムを見据えた研究の方向は学際的目標として望ましいものである。材料に対し高エネルギー・粒子束流を照射してその材料の構造変化の物理的・化学的变化に見られる法則性を見出し、長寿命材料の創製と寿命予測理論を確立しようとする研究の方向性は高く評価できる。

##### 3) 改善すべき点や不足点

- 個々の研究成果を総括的にまとめて学際的な目標につなげていく道筋がはっきりしていない。ただ、これは今後の研究の進展に伴って改善されることを期待する。

#### 3.9.2 留意点

- 同じ材料に対する異なったアプローチが統合され、材料科学において新しいパラダイムを本ユニットが創造することを期待したい。そのためには材料科学における研究の深化とともに、他ユニットで進められているマルチスケールに対する方法論や AI・機械学習の応用などについて学び合う場を研究所が潜在的に有していることを活動に活かすべきである。
- これまで研究所が注力してきた V 合金は、Li 増殖との相性がよい有望な先進材料である。この材料の開発では世界的に見ても研究所は優位であり、さらに発展・深化させることが重要である。また、研究計画における制約の改善をはかるため、必要な研究環境（照射設備、試験材料の製作、分析・測定機器など）の整備に努めるべきである。

#### 3.9.3 提案・助言

- 先進炉ブランケットの検討を進められたい。また、寿命予測理論が確立できるように頑張ってもらいたい。強い束縛力で引き付けられ、自由度の少ない粒子集団（金属など）が自己組織化を起こす現象は興味深い。無機質な材料の結合力が外圧に対してそのまま破壊に至るのではなく、新しい安定な構造へと動的に変化するだけのレジリエンス機能が存在するかどうか、存在するとすればどのような結合構造において、どのようなプロセスを通じて新しい安定な構造へと自己組織化することが可能なのかについての新たな研究成果を期待したい。
- 高エネルギー・粒子束流を照射する実験プラットフォームはビームだけでなく、プラズマ環境の相互作用を合わせた、より複雑な環境下の研究を可能とするものであるべきであろう。中性子照射の模擬となる高エネルギーイオンビーム照射とプラズマ照射を同時に行い、その場・実時間での観察手法を用いた非平衡で動的な現象の解明が重要となってきた。世界トップレベルの研究とはいかなるもので、何で最先端を目指すのか、本ユニットがプラズマ・複相関輸送ユニットと協力し、コミュニティとの議論の母体となってもらいたい。そのうえで、研究所においてしかるべき装置を整備して、研究を進めることが望ましい。

### 3.10 超伝導・低温工学ユニット

#### 3.10.1 所見

##### 1) 発足前の評価に照らした総評

- 超伝導・低温工学は研究所の伝統的研究の一つである。LHD計画の終了後も、その学術的遺産をさまざまな社会応用として発展させていく使命は今後も当然有しており、その方向で本ユニットは進んでいる。ただ、全体的に、特に超伝導導体の開発において、最終的な目標やそれに到達するための課題がやや不明確であり、これらを今後明確化して研究開発を進める必要がある。

##### 2) 優れている点や他のユニットが好例として参考にできる点

- 本ユニットの戦略会議は外部性が高く、この分野を網羅できる構成となっている点は好ましい。また、超伝導マグネット棟に設置されている低温関係等の優れた設備を有していること、これまでの研究成果を基盤に高温超伝導線材の開発や低温工学としての水素エネルギー利用などの社会応用への貢献ができる研究開発力を有していることは評価できる。

##### 3) 改善すべき点や不足点

- 本ユニットにおける研究の進むべき方向、特に具体的な目標の設定が不十分である。

#### 3.10.2 留意点

- 超伝導・低温工学分野において特色ある新しい独自の領域を見出すことが重要であり、その中で大きな目標を掲げてそれを達成するための課題を明確化し、その課題解決に向



けての適切なアプローチを示すことが必要である。このことが大きな外部資金の獲得にも繋がると考える。また、液体水素の利用において安全性については十二分に留意すべきである。

### 3.10.3 提案・助言

- 次年度の成果報告会において、本ユニットの具体的な目標設定と、それを達成するための課題と取組を明らかにした上で、ユニットメンバーが共通の認識をもって貢献していることを示してほしい。

以上

## 付録

ユニット等評価委員会は研究所運営会議の下、研究所において検討又は設置されているユニット及び学術研究プラットフォームの提案、活動等に対する評価を行うものとされ、人事提案等に係る研究所からの諮問に対して答申を行うことが役割である。さらに常設の委員会として第三者の外部評価組織という立場のみならず、ユニット活動に寄り添い、ユニットの活性化を支援することが期待されていると理解している。この観点から、ユニット等評価委員会の在り方と今後の取組について自らの考える留意点を記しておく。研究所運営への参考となれば幸いである。

- 委員会委員が日常的に各ユニットのメンバーと、専門的な議論を含め意見交換をする場を積極的に持つことにより、より正確な情報を得る機会を意識的に作るなどの取組を持つことが良いのではないか。そのために、ユニットの活動を随時、委員に周知することへの配慮を引き続きお願いしたい。
- 年に一度ではあるが、全体発表会や評価会を開催するのは有意義である。各ユニット活動の状況を整理、概観するには有用である。
- これまでは、ユニット編成という難しい具体的作業があり、委員会を3グループに分けて議論する体制をとっていたが、現時点では各ユニットの役割もそれなりに固まってきており、必ずしも学術的見地から細分化しなくても良い状況になってきたと思う。10名程度の小さな委員会であり、平等に評価する体制で良いのではないか。各委員のユニットに対する理解度には強弱があるが、すべてのユニットに対し、各委員が個別的意見と大所高所からの意見を言える形にした方が良いと考える。
- ユニットの評価には、ユニット単位としての評価とともに、個々の研究者の適正なユニットへの異動等に関しても何らかの助言を言える評価委員会にすることを提案したい。
- 委員会の役割は、ユニットに寄り添う意識でユニットの活動を客観的に評価・助言することを基本とし、それ以上の支援はユニットからの求めがあればボランティアベースで対応する程度で良いのではないか。ユニット評価委員の活躍した時代背景は現役世代のそれとは隔たりがあり、若手の立場で考えてみると、評価委員がユニットに深入りすることは必ずしも歓迎されないのではないかという思いがある。
- ユニット体制が整備され、活動を開始したことから、全体的、包括的な評価は一旦置いて、各ユニットの現場により近い次元での評価・支援に重きを置いていくのが良いのではないか。

以上

核融合科学研究所運営会議ユニット等評価委員会名簿

(五十音順)

安藤 晃	東北大学特任教授（副委員長）
上田 良夫	追手門学院大学教授
岸本 泰明	京都大学名誉教授、京都大学エネルギー理工学研究所特任教授
草野 完也	名古屋大学宇宙地球環境研究所教授
坂本 隆一	核融合科学研究所研究部長、プラットフォーム企画室長
佐藤 哲也	核融合科学研究所名誉教授、総合研究大学院大学名誉教授、 兵庫県立大学名誉教授
高部 英明	大阪大学名誉教授
藤堂 泰	核融合科学研究所副所長
飛田 健次	東北大学大学院工学系研究科教授
永岡 賢一	核融合科学研究所研究教育改善室長
山田 弘司	東京大学大学院新領域創成科学研究科教授（委員長）