

2024 年度成果に対するユニット等評価委員会 報告書

2025 年 8 月 26 日

1. はじめに

核融合科学研究所（以下、「研究所」という）のユニット体制は 2023 年度に開始され、現在 10 のユニットが日々研究活動を行っている。2025 年 5 月 28、29 日に成果報告会が開催され、2024 年度の各ユニットでの活動報告が行われるとともに、ユニット等評価委員会（以下、本委員会という）において各ユニットの活動状況についての評価を実施した。その結果を本報告書にとりまとめ報告する。

本委員会の役割はユニット活動の批判や指示を行うことではなく、各ユニットが目標とする活動方針に則った活動が潤滑に実施され、研究所が包括的に核融合科学及び関連分野の研究活動の発展に寄与出来るよう支援を行うことである。本報告書での指摘事項を参考に、ユニット自身の振り返りとともに、研究所の活動方針や資源配分、運営などの活動サイクルと一体化し、活動計画の検討をユニットメンバーの全員が一体となって議論し、活動の軸を認識しながら研究の高度化に取り組んでいただきたい。評価報告書という性格上様々な指摘が記載されているが、これらを指示や強制と受け取るのではなく、現状を改善する機会として活用され、今後のユニット活動の発展の一助となることを期待する。

2. 全体評価

2.1 所見(各ユニット評価意見を俯瞰した総評)

- ユニット発足から 2 年が経ち、各ユニットが目標としている観点に対応した活動が実施され、所属している各研究者がそれぞれに興味のある個別課題に対して研究を進めていると思われる。報告会で報告された成果以外にも多くの研究が進められており、今後の展開に期待できる。
- 各ユニットの特徴ある研究、学術的に価値のある研究が実施されている点は評価できる。また関連する分野の研究者が有機的に協働することで、多くのユニットにおいて核融合研究や他分野への発展的な研究課題において価値のある研究が進められている。

2.2 留意点

- 近年の核融合研究への期待を受け、研究所としての活動の活性化や広報活動の強化を進め、海外との連携研究の強化や外部資金の獲得などをさらに進めていただきたい。

- ユニット活動において、構成員間の情報交流や研究協力が進められているか、組織的な活動として所内だけでなく対外的なアウトプットを出しているかなどは継続的にチェックが必要である。
- 前回の報告書でも指摘があったが、ユニット活動を支える技術部との関係、特に技術部からの貢献や研究者との連携による相乗効果について、今後の報告を期待する。
- 2年が経ち、現状を総括しながら様々な議論で設定されたユニット名について再検討することも視野に入れてはどうか。参加メンバーの研究内容を包括的にまとめる名称として設定したが、かえってユニットの特徴を曖昧にし、外部からわかりにくくなっていないか検討し、より現実在即した、外部からもわかりやすい名称に修正をしていくことも検討点の一つである。また、必要に応じてユニットの分離、再編も視野に入れた議論も有用である。

2.3 全体に関わる提言・助言

- 個々の研究を追い求めるだけでなく、ユニット全体、研究所全体のビジョンを体現する研究もさらに進めていただきたい。LHD 計画が終了する時期を迎え、研究所としての方向性だけでなく、各ユニットが世界で勝負できる研究を進められているか、そのための戦略が立てられているか、ユニットが目指す方向が核融合科学の学術研究に寄与するものとなっているか、あるいは核融合技術が他の分野の学術発展に大きく寄与するものであるかを自問しながら今後の研究方向を検討してほしい。
- 各ユニットの努力に期待するだけでなく、研究所としても資金面、運営面、人材確保の観点から積極的に研究活動を支援する方向性を示していただきたい。研究所が所員のよりどころとして有機的に活動を推進する体制が出来ることを期待する。
- ユニットの運営が一部のメンバーに依存する態勢になっていないか、名前だけの所属になっているメンバーはいないかについても適宜心がけ、ユニット内での円滑な組織運営を心がけてほしい。ユニット内での研究者同士の連携にも心がけた運営を期待する。必要に応じて他のユニットへの移籍なども含め、各研究者の研究活動のさらなる展開を図ることも有用である。
- 研究所として進めてきた採用人事やクロスアポイントメントなどがどのように研究力強化に繋がったかの評価も今後は必要である。
- MS10（ムーンショット）プロジェクトやスタートアップ企業などと連携し、あるいは主役として核融合研究の新しい展開を進めていくことを期待する。
- ユニット活動の成果報告会では、各ユニットの全体の活動状況や代表的な活動内容の報告が中心であった。今後、ユニットに所属する所員と評価者との意見交換の場を設けるなど、評価意見をユニット活動に活かす一助となる方策も有用である。

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

- ユニット発足時には“メタ階層”という考え方の適正性が議論になったが、閉じ込めプラズマが突発性や劇的変容など複雑で予測困難な挙動を示すことから、それらの学理を開拓する意味を含めてユニット名として定義し、発足することになった。具体的には核融合実現の観点から不可欠な各階層の素過程や階層間の相互作用が本質的役割を果たすと考えられる3課題と、それらの研究で得た知見を俯瞰・統合することによって一般性・普遍性のある新しいプラズマ探究の方法論を提示する4課題をアカデミックプランとして整理することでこの考え方が定着しつつある。
- メンバー間で議論を重ねた結論として、本ユニットの目指す方向性として、物理過程と幾何学構造が複雑に絡んだ核融合課題をメタ的に俯瞰した視点から共通課題として取り組むことに収斂したことは大いに評価できる。
- 実際は各研究者がそれぞれに興味のある個別課題に対して研究を進めていると感じられる。
- メタ階層とは何かという表現上の問いから、これからは階層という概念を一つの指標として各研究者がそれぞれに解釈し、課題の解明に向けて邁進することがこのユニットの総合力をより発揮できる。

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

- メンバー個人は研究者としての力を備えており、個人あるいは複数人が共通の課題を追求するという形で進めていくことによって、十分学術的成果を挙げられる資質がある。
- 各々の課題の理解・解明と、メタ階層として一般化・普遍化を図るとの高い理想がこれまでにユニークでインパクトのある成果を挙げている要因と評価できる。また、それらを俯瞰・統合する活動に向けて、物理学会での関連セッションの企画を含めて積極的にプラットフォームを形成し、多様な議論を展開する環境を作ったことは喜ばしく、今後に期待するところが大きい。

3) 改善すべき点や不足点

- “メタ階層ダイナミクス”というユニット名が各メンバーの研究の自由な発展を阻害しているのではないかと危惧する側面がある。“メタ”という得体の知れなさが各メンバーの頭の中にちらつき、自由な発想の妨げに繋がらないか懸念される。メンバーがそこに向かおうとする意欲を促進する働きかけも必要である。

- ユニット報告書の「4. ユニットの研究目的と目標」に関して、“メタ階層”を強く意識するが故に記述が概念的であり、プロジェクトを含む具体的な課題解決を最優先と考える研究者にとっては何が問題で何を解決しようとしているのか、「…核融合を俯瞰した高次視点からの理解が求められる」、「メタ的に俯瞰した視点から共通課題として捉え直すことで…」など、問いかけが概念的であることを含め、容易に理解できない印象を受ける。

3.1.2 留意点

- 階層間にまたがる共通認識としてメタ階層という言葉が学術の分節として売り出そうとする気負いが少し感じられる。学術概念としては逆に学問の発展を狭くするのではないかという恐れを感じる。“メタ階層”を“非平衡開放系”と置き換えて研究を推進してはどうか。あまりメタという言葉にこだわらず、各メンバーがそれぞれの考えや能力に基づいて研究することが肝要である。
- 個々の研究をメタの観点から俯瞰・統合する課題は容易に答えが得られものではなく、個々の成果を積極的に持ち寄り、他分野を含む多様な研究者と根気よく定常的に交流を維持しつつ議論できるか、そのようなマインドがユニットの研究者に醸成されているかが重要であると考えられる。これは核融合科学の学際化を図る研究所の課題でもあることから、ユニット間の交流を図る役割を本ユニットが積極的に担っていただきたい。

3.1.3 提案・助言

- 各々の課題の理解・解明を進め、分野研究として成果を上げていくだけでなく、それらをメタ階層という観点から一般化・普遍化することを期待したい。他のユニットの研究成果などに対しても積極的に関与し、それらをメタの観点から観たときの意義や重要性を問いかけるプラットフォームとして本ユニットを位置付けていただきたい。また、そのような考えのもとにユニットメンバーが取り組んでいるかの評価も必要である。

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閉じ込め状態にある高性能プラズマを定常的に維持する学理を開拓するとともに、その知見に基づいて大型ヘリカル装置（LHD）の後継となる具体的な新装置を開発することを目的としている。また、そのための物理過程を検証・解明する統合コードを開発するとしている。これまでの2年間の研究の結実として、本研究所と中国成都交通大学との共同プロジェ

クトとして進められ、建設中であった CFQS-T(第 1 フェーズ)のプラズマ点火を成功に導くとともに実験フェーズに入ったこと、研究所の新装置案として CHD-U の基本設計をしたことが挙げられ、ユニット活動が軌道に乗りつつある点は高く評価できる。特に上述の二つの装置は今後の研究所の主要なプラットフォームとなり得ることから重要であり、多くのユニットメンバーがこれらの活動に注力した賜物といえる。

- 本ユニットは、プラズマが自発的構造形成をすることを対称性やエントロピーを再検討し、普遍的な原理を理解するという大きな目標を立てている。この目標は研究所の主要課題であるが、現実のメンバー構成あるいはこれまでの研究活動を見てもその目標に向かうだけの陣容としては不足する点もある。
- CFQS-T の着火や CHD-U の設計に対する知見は評価できるが、ここからは構造形成に対する原理への知見は限定的である。巨視的プラズマ構造の平衡性やダイナミックな安定性の理論およびシミュレーションの開発を行い、「プラズマ全体の時間発展の様相を解明する」とユニット報告書に書かれているが、2 年間の研究からこれに関連する成果はみられず、今後の見通しも不明確である。
- この 2 年間は CFQS-T の着火および CHD-U の設計研究に注力したことから、CFQS-T のモジュラーコイルの高精度の設計評価や CHD の複数のトポロジーのもとでの閉じ込め性能の評価などの研究は進展したものの、本ユニットの主要課題である構造形成に基づく高性能プラズマを実現する方法論の開拓に関しては停滞している印象を受ける。一方、これらの研究を CFQS-T と CHD-U と平行して進めるには本ユニットのメンバーや所外メンバーの人数をより充実させたり、役割を見直したりするなどの取り組みも求められる。
- ユニットのテーマから判断すると、例えば研究所のポスト LHD 装置のプラズマ構造がどうあるべきかの検討を中心テーマとし、位相空間乱流ユニットや複合大域シミュレーションユニット、あるいは外部の研究者との協力を一層強くして新しい研究所の主実験計画を成功させることを目標にしてはどうか。

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

- CFQS-T や CHD-U の設計等に貢献した経験を有している。
- 位相空間乱流ユニット、複合大域シミュレーションユニット、メタ階層ダイナミクスユニットなどの研究者や外部の関連研究者との協働体制を構築するノウハウを有している。
- 2 年間の成果として、研究所の重要な研究プラットフォームである CHD-U の設計活動が挙げられる。本装置はヘリカルとトカマクの双方の特性を併せ持つ準軸対称のステラレータであることから、国内外の多くのトカマク研究者も積極的に参加する

核融合コミュニティの主力装置として期待される。装置設計という具体的な活動を通してユニット間及び所外に連携の枠を広げていったことも評価できる。

- CHD-U の設計には研究所をあげての関与が必要である。この装置の設計にはこのユニットが中心となり、他のユニットの研究者と一体となって真剣に設計され、実験が実行されなければならない。そのためのソフト面での支援者はある程度ユニット内に存在している必要があり、本ユニットにはその人材が存在している。
- CFQS-T は装置建設を終えて実験フェーズに入り、磁気島形成実験や関連解析を日本と中国でスタートしたことや、新たに CFQS-U をプラットフォームとして JSPS の 2 国間協定事業を同時期にスタートしたことは大きな意義がある。

3) 改善すべき点や不足点

- CFQS-T や CHD-U の製作・設計に注力したこともあり、本ユニットの主要目的である構造形成を伴った高性能プラズマ維持の方法論の開拓については、ユニット成果報告会での報告が 3 件（装置建設・設計の 2 件、ASTI によるプラズマ実時間制御）と限定されていたことから、この 2 年間、関連研究がどのように取り組まれて、どのように深化しているかが見えにくい。特に CHD-U の設計において、構造形成を伴った高性能プラズマ維持がどのように評価され取り込まれたのかが分かりにくい。
- 研究所の主実験装置となるべき計画の予算要求は今年度から提出されると聞いているが、CHD-U の設計にむけて学術的な検討が十分行われることが重要である。ユニット制が確立している現在においては、その設計には研究所をあげての関与が必要であり、この装置の設計にはこのユニットが中心となり、他のユニットの研究者と一体となって真剣に設計され、実験が実行されなければならないのではないかな。
- 総評で述べたように、核融合プラズマの心臓部の構造及びその持続性を実現する学術基盤を構築するという大目標を、このユニットが 10 年間で達成するということをあえて宣言するのではなく、ポスト LHD 実験装置を念頭に最適な設計をすることを目的に掲げて活動することを薦めたい。
- シミュレーション研究の寄与がかなり強調されているが、それを行なっている本格的なシミュレーション研究者はこのユニットに存在していない。統合コードだけでは自発的な構造形成に関する知見は十分ではないことから、他ユニットを含めた連携も重要である。

3.2.2 留意点

- CHD-U は、「準軸対称磁場配位」と「準等力学的磁場配位」を切り替える装置として位置付けられ、前者は 1990 年代に本研究所の CHS の後継として設計された CHS-qa として、後者は米国ウィスコンシン大学等においての QPS 概念として、それぞれ設計された装置と同様のトポロジーを有する。その後、CHS-qa の概念は、本研

研究所と中国成都交通大学との共同プロジェクトとして引き継がれ、中国に CFQS-T が建設され実験がスタートするとともに、強い磁場強度を有する CFQS-U の設計・建設活動も進められている。後者は、トカマクの主要課題であるバルーニングモードの安定化が期待されることから、これを建設して実験を開始する意味は大きい。

一方、現在研究所で設計が進められている CHD-U と上記の CFQS-T が同サイズである場合は、同タイプの磁場配位を有することになることから、両者の研究課題と役割分担を設定しておく必要があるだろう。ヘリカル系は、複数の磁場配位（トポロジー）を選択できる自由度がある一方、最適な配位を決めることは容易でないことから、LHD や WS-7X、また国内外のヘリカル研究を総合的に解析しつつ適正な判断を与えるデータベースの構築とシミュレーションによる予測研究が不可欠である。国内外の多くの研究者が参入・議論する枠組みを作り検討を深める取り組みを期待したい。

- 本ユニットが中心となり、第 1 フェーズの CFQS-T の建設と CHD-U も設計活動が進展したのは喜ばしい。短所も指摘されるが、これを機会に当ユニットのアカデミックプランの見直しを行うとともに、ヘリカルやトカマクといったトポロジーの違いを乗り越えて、両者を融合するプラットフォームの役割を積極的に果たしていただきたい。
- CHD-U は研究所および日本の核融合コミュニティの LHD の後継となる重要なプラットフォームになることから、全ユニットが参加する上位のプロジェクトとして位置付けることも検討する必要がある。

3.2.3 提案・助言

- 本ユニットの発足後に達成した CFQS-T の建設と CHD-U の設計活動に関して、両装置は今後の研究所及びヘリカル系を中心とした日本のコミュニティの中核をなす装置であるとともに、研究所の基本方針を実現するプラットフォームとなる。その観点から、5 項目からなるアカデミックプランに対しての成果を個別に記載するだけでなく、これら二つの装置がトカマクを含めた多様なトポロジーの磁場閉じ込め装置とどのような関係にあり、どのように環状系の閉じ込めプラズマ全体の理解に貢献するかの議論をコミュニティと協働して行うとともに、より多くの専門家を本プロジェクトに引き込む運営を期待する。
- 既に周知の通り、ELM 問題一つとってもトカマクが核融合炉の最終系として機能するかは必ずしも自明でなく、また一方でヘリカルに関わる課題も多く残されている状況で、これまでともすれば別々の皿の上で議論されていたトカマクとヘリカルの研究を融合して最適な磁場閉じ込め装置と、その背景にあるメカニズムを明らかにするプラットフォームの役割を果たしていただきたい。

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

- これまで理論・シミュレーションにおいて評価・予測されてきたプラズマの位相空間における様々な線形・非線形現象は数多いが、核融合プラズマを対象に実験でそれらの詳細を計測・同定した例は稀有である。本ユニットは、各種計測系の開発を含めてこれらの計測を実現するとともに、理論・シミュレーションと比較・検討することを目指したものであり、高度なアカデミックプランと評価できる。
- 本ユニットは発足当初から目的が明確であり、その実行体制も信頼できるものであった。手元に実験装置がないために閉じ込めプラズマ中の位相空間乱流を制御しながら計測するということはまだ実現していないが、スウェーデンのオーロラ観測チームとの協働でのスペクトル観測に加わるなど、外部機関との共同実験に参加し実績を着々と積んでいる。
- これまでデータの取得が不可能であった位相空間のデータ取得、特にその空間依存性のデータ取得はプラズマの乱流輸送を解明する上の画期的な試みであり、その成功が大いに待たれる。
- この 2 年間に於いて、位相空間計測の鍵となる計測装置開発を進展させるとともに、それらを組み合わせることによってマイクロプロセスの全貌を明らかにするセンサーフュージョンは優れた概念であり、新しいクラスの核融合科学構築の可能性を感じさせるものである。
- 空間及び時間軸における乱れの測定はマイクロプラズマの機構解明のみならず、マクロ場とマイクロ場のダイナミックな関係性の解明にとっても欠かすことのできない情報提供であり、シミュレーションによるマクロとマイクロの協働の機構解明の研究にとってもその成果が待ち遠しい。
- 核融合プラズマのマクロスコピックな特性への位相空間のミクロスコピックなダイナミックスの寄与を明らかにするとのアカデミックプランは基礎研究を開発研究につなげる観点からも重要な視点である。それに呼応して LHD で現出する幾つかの過程を同定する研究（プラズマの自発的入出力や短時間加熱による熱・乱流伝播）などはプロジェクト研究の観点からも高く評価できるとともに、挑戦性も感じられる。
- 今後複合大域シミュレーションユニットとの強い連携が望まれる。

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

- これまでほとんど試みられていないプラズマ乱流の位相空間で直接データを知る計測は世界的に見ても画期的な研究である。

- この2年間に於いて、3次元位相空間・非線形ガウス過程トモグラフィやハイパースペクトルカメラ、高速荷電交換分光計測機などの開発が進むとともに、大きな時間差なく LHD をはじめとした大型核融合装置に適用されている。新たにスタートしたオーロラ観測プロジェクトにおいては、オーロラの 2 次元分光画像の取得にも成功するとともに核融合プラズマに止まらない広い分野で成果を挙げている。

3) 改善すべき点や不足点

- 現状では本ユニットが縦横無尽に測定データを取得できる実験装置が現存しない点は残念である。

3.3.2 留意点

- 現在研究所ではポスト LHD 計画において、CHD-U の概算要求が計画されている。是非とも、位相空間乱流と起因する輸送現象を解明するのに十分なデータが得られるように、本ユニットと綿密な連携のもとに次期装置の設計がなされることを要望したい。
- 現在研究所は LHD に続く次期装置として構造形成・持続性ユニットを中心に CFQS-T を完成させて実験を開始していることや、学術会議のマスタープランとして CHD-U の設計研究が精力的に進められ、提案のレベルに達している状況がある。また、メタ階層ダイナミクスユニットや複合大域シミュレーションユニットでも位相空間に関わる多様な研究が進展している。本ユニットはこれらの関連ユニットとのメンバーの往来や交換を含めた連携を積極的に進めることで相乗効果が発揮されることを期待する。

3.3.3 提案・助言

- 研究所からの概算要求においては、位相空間乱流を十二分に観測できる装置を検討されることを提案する。
- これまでのマクロな物理量からミクロな物理量をベースにマクロな現象を理解・解析する自由度を持ったことは核融合研究に新たな展開をもたらすことが期待される。ITER に代表される燃焼プラズマが原型炉に直結することは自明ではなく、装置サイズ一つをとっていても解明すべき多くの課題が残されている。装置の小型化が期待されるが、必然的にエネルギー密度が向上することから非線形や非平衡性が強くなることは避けることができないが、そのような系がより乱流化するか、より（線形構造と異なる）コヒーレントな状態になるかは小型核融合炉の成立性の観点から重要課題である。当然、後者が期待されるが、その観点から位相空間“乱流”という用語には未だ違和感があるものの、そのような視点をイメージしながら更なる発展を期待する。

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

- ユニットの特徴として、原子分子素過程に関連した基礎研究から核融合や宇宙プラズマの理解に資するデータ解析など幅広い研究展開がなされている。多価イオン分光や原子分子過程、モデリングなど実験研究と理論研究を進めながら他分野の研究グループと連携し、学際的共同研究を進めている点は評価できる。
- プラズマの量子データなどデータベース共同利用の窓口を勤めていた。その役割を継続しつつも、新展開を図ろうとしている。発足前は「サービス部門」の色彩が強かったが、ユニットとなって新人も増え、学際的展開など研究者が独自の展開を図る集団になりつつある。
- 原子分子の計算能力が必要な宇宙物理課題で重要な役割を果たしている。これは研究所の研究活動として有用であり、同時に学際化の典型例となっている。
- EBIT による独自の高分解能分光データを取得したことや、中性子星合体のシグナルの解読に原子分子データベースを通して貢献したことは高く評価できる。また、ユニットのセミナーを企画し、構成員の交流に努力していることも評価できる。ただし、ユニットとしての様々な戦略の有機的な連携が不明瞭であるため、個別研究の集合に止まっている感がある。
- 研究目標として「核融合科学における課題の解決」が掲げられているが、この「課題」とは何であってその課題をどのように、どれほど、いつまでに解決しようとしているかの具体的な戦略と目指している出口が描かれていない。また、ムーショット目標 10（以下、「MS10」という）プロジェクト「超次元状態エンジニアリングによる未来予測型デジタルシステム」がスタートしたことは喜ばしいが、このプロジェクトとユニットの他の研究の相互関係や連携についても明確な構想がまだ不明瞭である。このような視点での研究展開を期待する。
- 様々な優れた研究領域とその応用分野へのネットワークを構築する努力は行われているので、それらを活かした有機的な全体計画を構成員との議論を通して策定し、ユニット活動を前進させて欲しい。

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

- 他分野も注目する原子分子過程に関わるデータ群の整備と関連研究は研究所の誇る高い成果物の一つである。世界的にもユニークな原子・分子データセンターの役割を果たしている。データも天文学分野に公開されるなど、今後利用者が国際的に増える可能性がある。今後も多価イオン分光やデータのオープン化などを積極的に進めていただきたい。

- EBIT の新装置を建設中であり、成果が期待できる。しかし、EBIT は長年にわたり世界各所で利用されてきていることから、新装置が目指す研究課題を明確にするとともに理論グループとの連携も実施してほしい。

3) 改善すべき点や不足点

- ユニット活動には、原子分子の理論、特に LHD でのタングステンの UTA などの研究や、ブラックホール同士の合体による重元素の生成の観測と原子物理の連携、EBIT 装置による詳細な原子データの研究や MS10 のハブとしての活動など多彩である。前者は理論・実験と連携しているようだが、後者とは連携していない。ユニット内での連携を促進することで新たな研究展開を図ることも有用であろう。定期的なミーティングなど連携を促進する積極的な企画や、共同で予算申請を行うなどの工夫も有用である。
- 原子分子データに関して、外部で原子分子に疎い人も勉強しながら利用できる機会も設けるなど多様なセンター活動を期待する。また、MS10（星グループ）での AI やデータ学習などの手法と連携しながら、データセンターの機能拡張を図ることも有用である。
- 新しく加わったメンバーの研究課題が、プラズマ量子プロセスユニットの研究目標とどう関わるのか、さらに議論をすすめ研究の展開を期待する。

3.4.2 留意点

- 多分野との連携を広く進めている点は高く評価するが、お互いに WINWIN の関係になっているかが不明である。単に研究データを利用されているだけに終わっていないか、研究所が主体となる研究として進めていくことを期待する。
- 本ユニットの構成員が MS10 のプログラママネージャーに採用され、多数の研究を束ねるリーダーとなった。主な研究内容は核融合の統合コード構築や、人工知能を利用したコード公開と自動化などであるが、MS10 に採択されたプラットフォームを活用した新しい研究展開をどのようにユニットとして企画していくか検討が必要である。例えばこのユニットの主要課題である原子分子データを一つのテーマとして MS10 プロジェクトに取り入れ、外部利用者に利用しやすいデータセンター化を目指してはどうか。さらに関連する他のユニットとの連携についてもユニット活動の一つのプロジェクトとして構築していただきたい。

3.4.3 提案・助言

- ユニットが有する原子分子関連データの有効活用を検討してほしい。他分野からの要望を受けた連携による学際化だけでなく、ユニットからの連携提案や、国際連携の可能性を検討する中でデータの高度化を図っていく戦略を立て、そのために

必要な大型予算申請などのユニットとしての総合力を活かした活動に繋げてほしい。

- 原子分子関係研究を引き継ぐ若手育成にも尽力いただきたい。
- 学際化で大切な点是他分野との連携が他分野を助けるだけに止まらず、他分野を研究所の学術に引き込むことである。研究所発祥の新学術が生まれ、それが他分野からの参加者を魅了することが重要である。天体合体の核合成が天文学に止まらずに新しい学術分野、若手研究者や学生を惹きつける課題を提示することを期待したい。
- 「多価イオン学術分野」のような大きな集団を作れないだろうか。
- 原子分子データ利用やデータ生成に AI や機械学習を利用して外部利用者を増やす努力をしてほしい。MS10 プロジェクトと連携して、外部の AI などの専門家の助言を聞いて協力するなどを検討してほしい。

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

- 本ユニットではプラズマ中心部から壁周辺機器に至る熱・粒子・運動量の輸送現象を主テーマとした研究を展開している。そのためユニットメンバーの研究テーマも多岐にわたり、個々の研究の進展とともにユニット内での研究連携も大きな課題でもある。
- 大変挑戦的な課題であり、核融合実現には不可欠な研究をユニットとして、実験・シミュレーションの両グループが連携して取り組んでいる。発足前はバラバラの研究集団のように思えたが、炉心から壁との相互作用、炉壁内の材料まで物理を統合して理解し、予測しようという野心的なユニットへ成長しつつあるように思える。
- 「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つのカテゴリーでの研究展開がそれぞれ図られている。
- 「プラズマ壁相互作用」は、核融合炉においてプラズマ制御と炉壁材料・機器開発の両面に関わる重要な問題であり他分野との関係も深い領域であることから、ユニットとしてまとめ、実験と理論・シミュレーションや炉心プラズマ物理領域と対向機器工学領域が連携して研究活動することの意義が大きい。
- 本ユニットでは、日本における関連分野の研究者がユニット構成メンバーとして、あるいは共同研究の研究協力者として参画しており、今後の研究の発展が期待できる。
- 一年単位での統合・連携に関する評価ができる報告ではなかったことは課題であるが、長い目で成果を期待したい。核融合の課題から宇宙や生命の起源など、外部と

の連携で学際的展開は年ごとに着実に進展しているように思える。長期と短期を意識して研究展開が図られている。

- フュージョンエネルギー・ナノプラットフォームや、リニアプラズマプラットフォームなどと連携しながら新しい学際的展開が図られている点は評価できる。日本を代表とするプラットフォームの整備が進み、世界でもトップクラスの研究成果が期待できる研究環境が実現しつつあることは大変に望ましい。

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

- ユニットの定義は2つになりそうだ。①「学術的に共通の手法や基盤を持つが、研究課題は個々に異なる集団。ユニット内での議論や情報共有が構成員の課題推進に有益な情報となり、新展開や困難な課題の解決糸口となる。だから多数の研究者が同じユニットにすることが必須である」。もう一つは、②「大きな課題を分担しあって研究し、随時連携しながら最終目標を目指す。ユニットの研究者はプロジェクトの構成員であり、議論しながらそれぞれの研究課題の修正も行なっていく。それを取りまとめるリーダーがいる」。このユニットはまさに②の形である。核融合には不可欠な難題を実験とシミュレーションで挑戦している。世界的にも珍しいユニットではないだろうか。研究所が誇る研究ユニットだと思う。
- 周辺プラズマ、粒子制御やプラズマ・壁相互作用など、ユニットメンバーそれぞれが特徴ある研究を展開しており評価できる。今後、ユニットメンバー同士での連携を強めた研究展開を期待したい。
- もともとこの分野は研究者間の連携が比較的取れている分野と認識しているが、その基盤を存分に生かし、日本の関連研究者がユニット構成メンバーや共同研究者として多く参画している。さらに今後も新たな研究者の参画や若い研究者の育成や参画が期待できる。その意味でこの分野の日本を代表とする研究グループに育ちつつあることは高く評価できる。
- 光渦を用いた計測手法など周辺プラズマ理解だけでなく基礎課程の研究にも有用であり、今後の研究発展に期待する。
- 第一壁研究は炉工学分野でも最重要項目の一つであり、継続した研究展開を期待したい。
- フュージョンエネルギー・ナノプラットフォームや、リニアプラズマプラットフォームなどユニークな取り組みと連携したユニット活動を進めている点は評価できる。

3) 改善すべき点や不足点

- 今回の報告会では、実験系とシミュレーション系の個別の成果が報告されていたが、個々の成果がどのように連携し、ユニットの統合的な成果としてどのように位置付

けられているのかが明確ではない。個々の話題提供ではなく、ユニット全体として、どのような研究進展が一年であったかの報告を期待する。

- フュージョンエネルギー・ナノプラットフォームに関連して、核融合炉の壁材料の表面構造の分析から多くの成果が認められるが、その成果が十分に学術として成長していないような印象を受ける。他分野への展開を含め、もっと広い分野における一般的な成果につなげてほしい。
- リニアプラズマプラットフォームは非常に魅力的な枠組みであるが、ユニット活動にどう連携していくのか、どのような魅力的な課題があるのかをもっと深く掘り下げて検討する必要がある。
- LHD 停止後の炉材料研究をどのように展開するか、また構築予定のナノプラットフォームを利用したユニット活動をどのように行うかについて明確にして欲しい。
- 研究所や国内だけでなく国際的共同研究体制を構築する必要がある。

3.5.2 留意点

- 研究所を拠点としたナノプラットフォーム構築計画では、材料評価や PWI 研究の世界的な拠点になりうるか期待するとともに、戦略的な枠組みや研究者組織の構築が必要である。関連企業との連携を含め、QST や他機関との連携も視野に研究所としての戦略をよく検討していただきたい。
- 全国的な直線型装置をまとめ、非接触プラズマ研究などを進めるリニアプラズマプラットフォームには期待する点が多いが、本ユニットだけでなく、プラズマ装置学など他のユニットも含めた包括的な連携活動を期待したい。
- 報告会では、実験研究に関する課題のダイアグラムの説明の後、「ナノ」に関する報告があったが、全体のダイアグラムの中で目標とする研究をどの程度進展させたか評価できなかった。ユニットの目標に対しどの程度進展があったのかの具体的な自己評価を行いながら説明して頂きたい。シミュレーションのグループについても、個別の研究報告がなされたが、全体目標への課題がどこまで明らかとなったかは明示されず、今後は、ダイアグラム等を示した上でどこに成果や新展開があってどのような連携が行われたのかを報告してほしい。
- 研究所において、特に装置のケアを行った上で研究を推進することが出来る研究者が不足している。今後研究を活性化させるためには装置をケアしながら研究を進めることができる研究者を増やすことが必要である。
- 超高流束協奏材料ユニットと共同で提案している SPICE 装置は大変に魅力的な装置であり、この装置を完成させるべく予算獲得を優先度の高い課題として認識すべきである。

- 多くの興味ある研究成果が報告されたが、それらが世界の研究の舞台でどのような位置付けにあるのか、あるいはどのような評価を得ているのかを十分に理解して研究を進めてほしい。

3.5.3 提案・助言

- LHD 運転停止後の研究展開について、個人ごとの研究計画だけでなくユニット全体の戦略を立ててほしい。特にナノプラットフォームに関連し、国内連携研究やPWI研究などユニットテーマにおける国際共同研究体制について戦略的に進めてほしい。
- ユニット内またはユニット間の連携を進めながら大型予算獲得へ挑戦していただきたい。それだけの研究資産と人材がある。
- 評価委員会への報告では、「学際化」の試みに関する個別の報告に重きが置かれていた。ユニット設立の際に「学際化」を強調したことも理由であろうが、「学際化」はユニットの機能のスピンオフであり、ユニット内での情報共有などから「思いがけない学際化」が見出せると考えられる。今後、ユニットの中でどのような連携や情報共有が行われ、ユニット全体の目標とするダイアグラムのどこにどの程度の進展が見られたか、またその結果として、どのように新たな学際的テーマが浮上したかなどの報告も知りたい。
- 研究成果を報告する際に、客観的にその価値を評価できるよう、定性的な表現だけではなく、たとえば全体のダイアグラムに点数をつけて一年間の成果とするなど工夫してはどうか。
- 物理統合型のコードを組織的に開発している研究課題については、どこの部分の精度が一番悪いかを明らかにするのも必要で、他のユニットや評価委員に協力を依頼するなども有用である。
- ナノプラットフォームに関連した研究において、プラズマが照射された材料表面のナノスケールの構造の理解から、非平衡状態の科学あるいは自己組織化といった様々な研究対象を含む大きな分野に対して、どのような一般性を持つ知見が得られたのかについてもう少し他分野の研究者にもわかるように示すことが望ましい。プラズマ壁表面相互作用が核融合分野という枠に止まらず、そこを超えた一般性を持つ学問領域に昇華することを望む。
- 核融合エネルギーの実用化（核融合炉の実現）という工学的な観点から、ナノプラットフォームを利用した本ユニットの研究がどのように貢献できるのか、また他分野への展開もふくめ新たな研究者や技術者を巻き込んだ核融合分野以外への展開についても視野に入れながら、さらに検討を進めて欲しい。
- リニアプラズマプラットフォームに関するユニットとしての研究は、現在のところイオン温度の違いによる分子活性化再結合（MAR）の話題が最重要課題と見受ける

が、これ以外にもイオン温度の違いあるいは複数の線形プラズマ装置の特徴を生かしたユニークなテーマなどで世界をリードできるような研究課題の探索に努めてほしい。

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

- ユニットの特徴として革新的な計測・解析・表現方法を用いながら高い空間・時間分解能を有した計測機開発とデータ解析手法の開発などを進めていき、データ内部に潜む複雑な構造や相関関係を明らかにしていくことを目的とした研究を展開している。
- 本ユニットは多数の研究者がユニットの構成メンバーとなり、先進プラズマ計測、解析チームとともに、データ科学を専門とする研究者が集い、様々なプラズマ現象の理解に資する計測・データ解析を進めるなど、計測学から未知の物理解明を目指すユニークな集団が構築されており評価できる。
- 「測定可能領域を拡大すると共に、取得されたデータの情報量を最大限に抽出する」というユニットの狙いは今後の核融合研究のために極めて重要であると同時に大きな挑戦的課題でもある。本ユニットがその困難な課題に果敢に取り組まれていることを評価する。
- 個人の活動は素晴らしいものがある。今回の報告内容は専門家として高く評価できる。
- イメージングボロメーター計測と機械学習の連携によるプラズマの放射崩壊の予測研究はこのユニットの方向性と一致した優れた成果である。なお、このユニットの狙いは非常に遠大であるため、複合大域シミュレーションユニットなど他のユニットとの連携を積極的に取り入れて研究を展開されることが望ましい。

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

- 先進プラズマ計測関係では、光位相を用いた揺動計測やレーザートムソン計測の高性能化、超高速バーストイメージングなど過渡的なプラズマ現象を高精度で計測する手法開発など着実な進展が見られる。
- 核融合データのオープンサイエンス化に向けた取り組みは昨今のデータ科学分野の重要性にも合致し、プラズマ・核融合クラウドの構築とともに、プラズマ核融合研究の新展開につながることを期待できる。
- ユニットグループを中心に大型予算への申請につなげようとしている点は評価できる。

- このユニットの特徴は学術的に共通の手法や基盤を持つが研究課題は個々に異なる集団であることである。従って、ユニット内での議論や情報共有が構成員の課題推進に有益な情報となり、新展開や困難な課題の解決糸口となるといった点で多数の研究者が同じユニットにいることが必須である。
- 計測技術から可視化、オープンサイエンスと幅広く計測学の向上を展開している。
- 次期主力装置 CHD-U の計測装置などの準備を推進している。
- 若手のフットワークが軽く、外部の研究者と協力して装置を利用し、成果を上げている。

3) 改善すべき点や不足点

- 数多くの研究が関連するため、ユニットメンバーの数が多い。他のユニット同様、構成員間の連携や、全体と各構成員の役割の関係も含め内部の研究者間の連携を促進すると共に、ユニット全体での業績（研究費獲得や対外発表など）の数を増やしてほしい。
- 「計測」と「データ科学」の融合については継続して取り組んでいただきたい。
- 個々の成果の報告について、それが世界的に見てどこまで新しくユニークな成果で有益性があるかについて、当該分野の専門家以外にも理解しやすい報告の工夫を期待する。
- ユニット全体としてどこまで進展があったか、その中でどのようなサブグループが成果を上げたか、ユニットであることが個人の成果にどのようにつながったかなどに関する報告も期待する。

3.6.2 留意点

- CHD 計画における計測、データ関連機器の整備など他のユニットともよく連携して進めていただきたい。
- レーザー科学分野における知見との連携も進めてほしい。
- 個々の研究成果の詳細ではなく、その成果に至るまでにユニット内での連携がどのようにプラスに影響してきたかを報告してほしい。

3.6.3 提案・助言

- 様々な関連研究の分野で開発されている計測手法を有機的に結びつけて、さらに高いレベルでの計測技術を極めていただきたい。
- データ科学分野においてもプラズマ・核融合関係のデータ利用について新しい展開が拓かれることを期待する。また研究所がその分野のトップリーダーとなってほしい。

- 相互連携の度合いについてさらに深めていただきたい。個々の研究者の成果だけでなく、ユニットとしたメリットを出していく工夫をして欲しい。優れた研究者群として、予算獲得を目指したユニット内連携、ユニット間連携をさらに深めてほしい。

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

- 本ユニットの基本理念として「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」とあり、また研究目的を「・・・最先端の計測・制御技術の更なる高度化および新たな計測・制御技術の創出、・・・自然科学の深化に質的变化をもたらす手法及び自然科学の新展開を追求する手法の探究・・・」としている。プラズマを荷電粒子群の集合体として捉えながらビーム技術、ミュオンや新方式の閉じ込め研究など幅広い研究が共同研究者によって展開されている。
- 発足当初から所内の構成員が少なく、小人数規模のユニットとして外部研究者との連携を進めている。少人数のため活動の幅が制限される懸念がある一方で、従来の研究所では連携できなかった研究分野への展開を図るところにこのユニットの一つの価値がある。
- 装置学の方針として、個々のグループが新たな装置とそれによる学術を独立して深く推進し発展させることとしている。個々の活動は着実に進展しているように思われる一方で、構成メンバーは共同研究者が多く、どのように組織的に連携していくかが課題である。また、本ユニットの理念をより幅広く活用するため、他のユニットとの連携や新しい共同研究者との連携も視野に入れて活動の幅を広げていくことや、研究所の現有装置への性能向上などにユニットとして貢献できるような展開を期待する。
- 装置学は個々の装置に特有の課題に特化する要素が強いため、様々な装置を包含したユニット活動を有機的に行うことは容易ではないであろうと推測する。ただし、一つのユニットで様々な分野のプラズマ関連装置の研究を進化させることは新たな装置を開発することができる人材育成にとって有用である。その意味で幅広いユニットメンバー間の連携や情報交換がどのように機能したのか、それによってどのような新しい展開が生まれたのかについて整理し、新しい戦略を立てる必要がある。装置を開発できる人材の育成は将来の核融合実現にとって死活的に重要であるので、このユニットの活動がその一助となることを期待する。

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

- 負イオン NBI 技術やミュオン、ダイポール磁場閉じ込め、電気推進など多面的な基礎・応用展開が図られている。
- 各テーマが大きな研究計画となっており、外部資金獲得に意欲的に取り組んでいる。
- 本ユニットの4つのテーマ(NBI の高度化および加速器用負イオン源、ダイポール磁場装置による学際化、ミュオン科学と核融合科学の融合、電気推進機の高度化および産業応用)は、他のユニットでは開発されていない新しい装置による新展開が期待される研究テーマである。研究所の将来の研究課題の可能性も含めて支援していくべきである。
- プラズマ装置は全国の大学などに大小含めて多数あるが、そのようなグループもユニットに参加するための具体例としてこのユニットを評価し、今後の発展に期待したい。

3) 改善すべき点や不足点

- 研究テーマ間の連携がどのように図られているのかが外部からはわかりにくい。
- 共同研究における研究所の役割についてより明確化していくことや、互いに WINWIN となる形を模索してほしい。
- 評価委員は当該分野の専門家ばかりではなく、個々の成果の報告だけではそれが世界的に見てどこまで新しくユニークな成果で有益性があるかなどを評価することができないので、評価委員に向けた報告の工夫をしてほしい。

3.7.2 留意点

- 各研究テーマ間の連携やつながりなどをより密にしていく点は以前のユニット評価でも指摘されていたが、あまり改善されていない懸念がある。
- 研究所内のメンバーが少ない点は引き続き課題点である。

3.7.3 提案・助言

- 他のユニットとの連携について改めて検討してほしい。外部から採用する手もあるが、研究所内部でのメンバーの再構築も含めて検討していただきたい。
- 現在の共同研究者に加え、新しい分野の研究者を引き入れた研究展開を期待する。
- 現有装置の発展だけでなく、「装置学」としての学術の集大成を平行して推進してほしい。次世代への義務があると思う。

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

- 複合大域シミュレーションユニットにおける複合と大域という言葉は、それぞれ複合は閉じ込められたプラズマ領域と閉じ込めている周辺媒質領域(壁領域と壁とプラズマの中間領域)とを包括するという意味であり、大域は閉じ込められたプラズマというマクロスケール場とその場を構成するプラズマ電子・イオンのスケールという極微のミクロ場を含む全体の巨大なスケールを包括するという意味であると解釈する。本ユニットは、この二つの異なった大きな領域を矛盾なく取り扱うシミュレーション手法を開発し、それを用いて具体的な問題を解明するというシミュレーション科学の集大成を行うことを目指している。その意味で研究所のシミュレーションの歴史を担うユニットと考えて良い。
- 現実には、トロイダル磁場閉じ込め装置を仮定したプラズマに高速イオン流を打ち込んだ時のジャイロ効果を解析的に繰り込むグループ(以下、MEGA グループとする)と、流体乱流における微視的乱流散逸プロセスをモデル化することによってマクロな乱流散逸構造を解明するグループ(以下、乱流グループとする)から構成されている。後者の乱流グループは乱流を起こすマクロ領域と短波長領域の散逸領域を扱うという意味で大きなスケール領域の帯域シミュレーションと理解できる。複合シミュレーションに関しては将来の課題と考えているものと思われる。
- 本ユニットは、プラズマの最小スケール(粒子性)の効果を取り入れつつ、プラズマの大域性(真空容器まで含めた全領域)まで考慮したシミュレーションを行うことで核融合実現の鍵となる重要過程(プラズマの安定性を司る崩壊現象や性能・効率を司る輸送現象)の解明と制御手法の開拓を目標に、それらを(1)運動論モデルと(2)流体モデルの二つのアプローチで取り組むとともに、両者が連携して一般性・普遍性のある核融合科学の展開を目指すものと理解される。ここで、(1)はMEGAコードに集約する一極集中型、(2)は対象毎にコード開発を行う多極分散型として展開し、共に保存性に重視しつつ大域コードに微視的スケールの過程を取り入れる方程式系の構築や数値アルゴリズムの開発を行うとともに、特に後者は散逸階層としての微視スケールのモデル化に注力している。ここ数年間の活動を通して、両者共に特色ある研究を行うとともにインパクトのある成果を出していると判断・評価できる。また、前者は大型予算(科研費)を獲得するとともに、高速イオンに関わるMHDと乱流と相互作用など、LHDやASDEXなどを対象とした研究、後者は学際ネットワークの形成事業などを獲得するとともに、比較的多くの外部研究者との連携を通して分子動力学や格子QEDなどのユニークな研究が進展していることは高く評価できる。

- ユニット全体として活発な研究を行っており、優れた成果を生み出していると評価できる。特に MEGA 及び新 MEGA の研究は国際的にも高く評価されており、今後の核融合研究に極めて重要な貢献をすることが期待できる。

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

- 主要な 2 つのグループ (MEGA グループと乱流グループ) は共に解析的あるいは統計的手法を導入してマイクロ場の振る舞いをモデル化し、マクロ場の方程式に付加する形でスマートに大域シミュレーションとして統合する試みは大いに評価できる。
- 運動論アプローチと流体アプローチは共にそれぞれのコードの強みを生かしたダイナミックな研究が進展しており成果が挙がっている。

3) 改善すべき点や不足点

- 短所には当たらないが、運動論アプローチは MEGA コードを用いて宇宙プラズマに関する応用研究も展開しているが、対象は異なっても核融合プラズマと同様に微小散逸のプラズマに関する研究として位置付けられて一貫性を感じる。一方、流体アプローチは扱う対象が分子動力学、光子 QED、惑星ダイナモ、固体粒子乱流など散逸の大きい流体現象という点では共通性があるものの、対象の一貫性は薄く課題間の共通性が必ずしも感じられない印象がある。
- 2 つのグループ (MEGA グループと乱流グループ) とも現在は解析的近似手法あるいは統計的手法を導入するモデル化処理法であり、テクニカルにそしてスマートに処理する従来の理論解析的手法の延長と言える。確かにスマートではあるが自然界に生起する出来事の本質を知りたいという自然科学者の本能とはまだ開きがある。
- 混合シミュレーションはプラズマ・複相間輸送ユニットの研究テーマに近いので、いずれこのユニットとの協働を目指してほしい。
- 乱流グループの研究戦略の見通しがあまり明確ではない。様々な計算手法を開発することは重要であるが、プロジェクトの出口戦略を明確化してある程度具体的な研究のロードマップを策定するべきである。その際、MEGA グループと乱流グループの有機的な連携の在り方もより明確にする必要がある。

3.8.2 留意点

- 本ユニットにおける二つの課題は、共にユニークな研究を展開して数値アルゴリズムや解析手法等については連携を図っているものの扱う対象は異なっている。他分野への貢献に関しては扱う対象が多様であることから独立に活動を展開して問題ないが、核融合研究については安定性や性能・効率に関して異なったアプローチに依存することなく同一の結果を得る必要がある。この観点から、運動論と流体の異なったアプローチでユニットを組んでいる利点を生かし、磁場閉じ込め核融合プラ

ズマを対象に特定の現象あるいは課題を設定し、それを両者のアプローチで解析して同一の結果が得られるどうか、ベンチマークを通して両者のモデル化の精度や特性を同定するプロジェクトを提案したい。

3.8.3 提案・助言

- スマートな数学的モデル化の導入によってシミュレーションの技術的困難さを回避する時代を超え、シミュレーション科学は自然を忠実にありのまま理解する段階にまで高まっている。例えば、研究所のシミュレーション研究の歴史はマクロ・ミクロ連結階層アルゴリズムを開発するまでに発展していることを物語っている。
- 流体乱流シミュレーションにおいても大スケール領域にまたがるシミュレーションを行うことによって、微小なスケールに構造が現れることが明らかになってきたのではないかと。このことはコンピュータという機械の能力を最大限活用し、できる限りありのままの姿を追求することによって真実に掘り当たるという王道を教えてくれている。この態度こそがシミュレーション研究者が進むべき姿であるということ忘れてはいけない。まだまだシミュレーション科学は進化の途上である。自然のあるがままの姿の情報をもっともっと引き出す努力をすることがシミュレーション研究者に課せられた使命であり、部分的に理論化（要素に還元）するのではなく全体像を得ることが大切である。
- シミュレーション科学を追求しようとする研究者はスマートさや定式化にこだわるのではなく、純粹に自然(実験室)のありのままの姿を知ろうとすることである。スマートさや定式化は後からついてくるものである。

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

- これまでに構築された国内連携の基盤を活かしながら、ユニットとしての活動が足並みを揃えて展開されつつある点は評価できる。過酷環境における材料科学の新展開を見据え、核融合・原子力分野に止まらず計算科学、宇宙・航空、化学プラント等の関連分野から研究者の参画を促している点も注目される。
- 核融合材料に関連する金属・合金やセラミクスなど多くの材料を包含し、さらに耐熱材料、構造材料、機能材料など広い分野にわたって国内の研究を束ねるグループを構成していることは高く評価できる。さらに核融合のみならず、原子力分野や化学プラント分野にも展開しうる学際性も有しており、今後の活動に大いに期待が持てる。

- 材料研究を行うにあたり、高度な分析装置を有することは必須であり、既存の TEM をベースとした複合装置の整備や高度な分析が可能な XPS やナノインデンターなどの導入が迅速に行われることを期待する。
- 多重イオンビーム照射プラットフォーム計画については、次世代の国内研究インフラとしての整備に向け、検討を一層深化させるとともにその具体的な計画について早期に関係者間での合意形成が図られることを期待する。
- マテリアルズインフォマティクスは、核融合炉複雑環境における現象の解明や新材料の開発を促進するために必須であり、この分野が専門の研究者との協力を進めていることは評価できる。今後さらにこの分野が進展することを期待する。

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

- 多重イオンビーム照射、高度材料分析、照射材料インフォマティクス (MI) を軸とするユニットの研究方針は方向性が明快であり、この枠組みに沿って構成員の研究領域や役割分担が的確に整理されている点は評価できる。
- 国内から関連分野の研究者が多数参画しており、日本の研究を主導できる体制を構築している点は高く評価できる。
- ユニットの活動はまだ初期段階にあるものの、荷重状態での照射実験や MI に基づく新材料の探索・創成といった革新的な手法が構想されており、今後の研究展開に期待される。
- 材料研究の高度化に必要な新たな装置群 (多重イオン照射プラットフォームなど) の導入を目指しており、その機能において合理性および整合性を備えており、技術的な実現性も高いと評価できる。世界的に見てもユニークな研究拠点となりうる可能性を秘めている。

3) 改善すべき点や不足点

- 提案されている多重イオンビーム照射プラットフォームは、既存設備との差別化や学術的に新たな地平を切り拓く要素あるいは飛躍的發展性についてのより明確な位置づけが示されれば、提案全体としての説得力と魅力が一層高まる。
- マテリアルズインフォマティクスを含めた理論・シミュレーションをベースとした研究人材がまだ少ないと思われる。核融合材料分野のみならず他の関連分野の研究者の参画を促して、さらに研究を発展させることを期待する。
- 非平衡状態下での準安定相や自己組織化について、広い分野にまたがって現象を記述できる理論的な基盤を構築できることが望ましいが、現状ではまだ不十分である。もちろん簡単なことではないがこのような研究の可能性も探してほしい。

3.9.2 留意点

- 計画されている様々な研究設備の導入のためには大きな外部資金を得ることが不可欠であり、アカデミアだけでなく産業界も巻き込んで必要な資金の獲得に努めることが望ましい。
- 大学で核融合炉材料研究を担っている研究者が減少傾向にあり、それに伴ってこの分野の研究を志す学生数も減少している。ユニット活動として、この分野の研究の魅力を伝えるとともに専門的な知識の講義を行うなど、研究環境を支える人材育成の一助となる事も期待する。

3.9.3 提案・助言

- 本ユニットは、明確な研究方針のもとで革新的な取組を構想しており、今後の発展が期待される。多重イオンビーム照射プラットフォームは技術的合理性に優れ、次世代の研究基盤として有望であることから、学術的意義や差別化の明確化を通じて、早期の予算化・実現に向けた取り組みが一層進むことを期待したい。
- 核融合炉材料研究の研究者数は日本においては減少傾向にあり、それと相まって研究成果も減少傾向にあるので、本ユニットが中心となって日本の研究者を束ね、さらに関連分野の研究者の参画も促すことで研究レベルの向上、論文等の発表数の増加、他分野におけるインパクトのある成果の創出を期待する。
- 既存材料にも既にこうした特性が見られる現状を踏まえると、「安定」で「耐える」材料から「準安定」をとらえ「適応する」材料へのパラダイムシフトと位置づける表現はやや強調しすぎとの印象を与える可能性がある。本ユニットがパラダイムシフトに至りうる研究課題を掲げている点は理解できるため、非連続的な概念転換としての説得力がより伝わるような説明の工夫が望まれる。

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

- 本ユニットのメンバーの多くは線材・コイル製作技術・低温技術などを含むシステム工学に取り組み、LHD プロジェクトを技術的側面から支えてきた。また、高温超伝導といった先進的な技術開発においてもその専門性を生かし確かな存在感を示してきた。
- LHD 計画終了後の研究目標を「高温超伝導を中心とした大型マグネットの研究開発」としたことはこれまでの研究所における技術的蓄積を踏まえた妥当な方針と評価できる。一方で、昨年度も指摘した具体的な長期目標設定やそのための課題の明確化は不十分であり、研究者ごとの研究テーマはまとまりを欠いているように思われる。外部資金を得られるかどうか研究目標の明確化にとって重要であることは理

解できるが、そのためにも長期的なビジョンをある程度絞って課題を明確化し、ユニットメンバーがそれを共有しながら個々の研究が相互に関連するような方向に進むことが望ましい。

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

- メンバーの多くは熟練した研究者で構成されており、超伝導コイルが直面するさまざまな技術課題に対して具体的な解決策を見据えた実践的な研究を推進している点が特筆される。また、所内の設備運用上の制約が多い中であっても JAXA との協力により液体水素を用いた実験を実現しており、これは柔軟な対応力と外部機関との協働の成果として評価したい。
- 超伝導研究関連の優れた装置群を有し、先端的な研究開発を行う環境が整っている点は評価できる。

3) 改善すべき点や不足点

- 超伝導・低温工学の分野は、すでに大学、研究機関、企業によって広範な応用展開が進められており、コミュニティの規模も大きい。このような背景のもと、研究所が主導して分野横断的な連携（学際化）を進めることは現実的に困難な面もあると考えられる。今後の評価にあたっては当該分野における学際化の意義や可能性及びそれを推進する上での課題について、ユニットの見解や方針を明らかにすることが望まれる。
- それぞれの研究者の研究の関連性や目指す方向が明確ではなく、ユニットとしての一体感がやや不足している。

3.10.2 留意点

- メンバーの年齢層が高くなりつつあることを踏まえると、将来的な人員構成を見据えた人材確保の方針を明確にするとともに、ユニットとしての中期的な研究目標や方向性についても改めて戦略的に検討することが求められる。
- 競争的資金や企業との共同研究・委託研究等の外部資金の獲得が研究を充実させるために必要であり、そのためにはユニットとしての活動だけでなく研究所のバックアップも重要である。

3.10.3 提案・助言

- 本ユニットは、LHD で培った高度な技術力を活かし、高温超伝導を中心とする大型マグネットの研究開発を進めようとしている一方で、学際化の難しさやメンバーの年齢構成といった課題も見られる。今後は研究課題の重点化や人材確保の方針を明確にし、ユニットの中長期的な方向性を再整理することが望まれる。

- 今回のユニット報告会では、個々の研究者の研究テーマをいくつかのカテゴリーにまとめてユニットの方向性として可視化するという、いわばボトムアップの視点からユニットの活動が説明されていたが、ユニットとして関連するテーマ（目標）を選択して今後進むべき方向性やそれを実現するための課題を整理し、その中で現在のユニットにおける個々の研究がどのような位置付けにあるかを示してはどうか。こうすることにより個々の研究の新規性や重要性あるいはそれぞれの研究の関連性やユニットの進むべき方向性が明確になると思われる。
- 超伝導工学や低温工学は様々な分野で研究開発が進められておりコミュニティの規模も大きいので、研究所のユニットがそれを先導するような立場に立つことは簡単ではない。このような状況を鑑みると、ユニットとしてこのコミュニティの中で存在感を示せるようなビジョンを持つことがまず重要であり、そのビジョンに沿った研究成果を積み重ねることで存在感が高まることを期待したい。

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 東北大学高等大学院機構 特任教授 (副委員長)

上田 良夫 追手門学院大学理工学部 教授

岸本 泰明 京都大学 名誉教授

草野 完也 名古屋大学宇宙地球環境研究所 特任教授

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 東京大学大学院新領域創成科学研究科 特任教授

永岡 賢一 核融合科学研究所 教授