

ユニットテーマ構想個別会合（提案 No.23）議事録

日時：2021年6月17日（木）10:00～12:10

参加者（五十音順）：伊藤篤史、岩本晃史、江原真司（東北大）、大谷寛明、大野哲靖（名大）、小野寺優太、河村学思、釘持尚輝、後藤拓也、小林達哉、坂上仁志、相良明男、佐竹真介、重森啓介（大阪大）、田辺克明（京都大）、田村仁、仲田資季、成嶋吉朗、濱口真司、濱地志憲、宮澤順一、横山雅之（計22名）

●ユニット構想案についての説明（後藤拓也）

- ・ 後藤から先週の議論内容の概要を紹介、またユニット構想提案書のフォーマットに沿って、3通りの案を提示。
- ・ 議論の結果（詳細な質疑は後述）、研究テーマとしてカーボンニュートラル、あるいはSDGsをキーワードとして核融合研の工学技術を継承・発展させ、他分野にも通ずるゲームチェンジャーとなり得る革新的技術を生み出すとともに、代替・先進方式の核融合炉設計の基盤を確立する、という方向性が見出された。
- ・ システムコード等に代表されるモデリングについても、単なる道具立てではなく、根底にある物理の本質を表現したものであり、核融合分野で行われている、モデリングを通じて物理を理解しつつそれを組み合わせた複雑工学システム的设计を行う、というやり方自体が核融合発の学術として主張できるのでは、という議論も行われた。
- ・ これらの議論を受け、ユニット構想提案書のより具体的な内容を次回以降議論する。

<質疑詳細>

（宮澤）具体案が提示されて議論しやすくなったが、今回の提案は少し具体的過ぎる印象。もう少し多くの人の研究が乗る内容にすべきでは。例えば社会科学ベースの提案では液体金属や高温超伝導の研究が乗れるイメージが湧かない。もう少し根本の部分を主張し方向性の提示くらいに留める、例えば核融合技術のスピンオフを10年後までに提示することを目標とし、方向性としてはカーボンニュートラルへの貢献を打ち出すというのはどうか？

（後藤）例示した3案でもそういった研究は含められると考えているが、参画を考えていただくに当たり、予算獲得も含めユニットに積極に関われるか、また成果をアピールできる場であるかどうかのイメージは重要と感じたので、その方向での具体化も考えたい。スピンオフを前面に押し出すという意味では、安原さんの提案とのマージもあり得るかもしれない。

（宮澤）安原さんの提案とは重なる部分は多いが、カーボンニュートラルを明確に打ち出すユニットがあって良いと思う。

※ここで具体的にスピンオフをテーマとした案を追加で提示。研究手法としてシステム設

計、液体金属・溶融塩の応用、超伝導技術の応用、新材料開発を例示

(宮澤) 研究テーマとしては核融合炉で必要となるもの全てが対象になり得るが、他のユニットでカバーできるものもあるので、システム設計を主軸とするのが良いのでは。他の方もどういう要素があれば参加しやすいかを考えていただけると良い。

(田村) 性能評価やリスク評価に健全性評価が入ってくると考えられるので、私に関わるとするとそこがイメージしやすい。

(横山) 前回の個別会合で提示された案に比べ、ユニットとして求められる要素を重視したように見受けられるが、後藤さん個人のやりたい研究との整合性は問題ないか？

(後藤) 私のやりたいことを一番打ち出したのは社会科学ベースの提案だが、こういった形になってもシステム設計として貢献することはできると思う。今回の提案を基にした議論を受け、最終的にシステム設計が主でない形にまとまるのが全体にとってベストということになればそれはそれで望ましいと考えている。その場合に誰が主導するかはその時の議論になると考えている。

(横山) カーボンニュートラルは大事なキーワードであり、今後それに取り組まない活動は考えづらいし、予算獲得においてもマジックワードになると思うので、ぜひ含めていただくと良いのではと思う。

(大野) カーボンニュートラルのキーワードは非常に良いと思うが、核融合研究のカーボンニュートラルへの最大の貢献は核融合炉の実現であり、核融合技術のスピンオフが期待されているわけではないと思う。工学は具体的な目標設定があり、革新技術であれ既存技術の組み合わせであれその目標を実現するシナリオがあって初めて説得力を生むように思う。量研が既存技術に基づき進めている開発研究に対し、核融合研の工学研究には革新的な技術をどのように設計に織り込むのか、という観点があってほしい。核融合を実現するための学術を謳うユニットが1つあっても良いと思う。

(後藤) 超伝導技術の SMES 応用、溶融塩技術の蓄熱利用など、スピンオフ技術として直接カーボンニュートラルへの貢献を主張できる面はあるとは思う。一方、先進ブランケットや先進ダイバータ等、アクションプランで量研以外での推進が期待され、かつ大学の研究室レベルでは実施が難しい項目に関する研究、また共同研究で進められてきた、先進燃料炉やそれに必要な直接発電の研究も重要だと考えており、それらを研究テーマとして掲げられるユニットがあるのは望ましい。そのためにもどのようなコア研究テーマが相応しいかを考えたい。

(大野) 難しさは十分に理解しているが、工学研究は重要ではあるが学術的意義を謳いにくい、という状況を打破しないといけないのでは。工学は最終的な目標の下に研究を進め人類のために貢献するわけであって、それを正面切って謳うべきでは。革新的なものをいくつも育てることで、そのうちのひとつでも成功すれば最終目標の実現を大きく加速できたり新たな展開に至ることを主張する、あるいはシステムにそういった革新的なものを組み込ん

だ場合のインパクトを評価するなどして、一般の人にもその価値を理解してもらえるようにできないか。核融合は純粋物理学などとは違った視点を持ってくる必要があると思う。工学は性能という評価軸があるので、そこも加味した内容があると良いのでは。ぜひ良い解を見つけていただきたい。

(後藤) 解を見つけるのが難しいとって簡単にあきらめてはいけないし、工学研究を進められている先生方には同じような思いを抱いている方も多いと思うので、うまく解を見出せられるのであれば、先進核融合工学のようなものを謳ったユニットの提案も考えたい。ぜひインプットをいただきたい。

(宮澤) 核融合をキーワードとして主張しすぎると色々な制約を与えてしまう面もあるので、スピノフを謳いつつ、核融合技術も養成するという提案を考えた面もある。

(大野) 核融合研には大学共同利用機関として全国の大学の核融合研究者の意見を集約する役割が期待され、また核融合研が核融合研究の COE として存在すること自体が大学の核融合研究の意義付けになっている側面もある。学術として先鋭化する必要はあるが、核融合という大目標があって認められている学術もあるように思う。核融合を実現するためにこういった学術をやる、という形もあって良いのでは。それが実現できればゲームチェンジャーになる、と皆が納得できるような革新的なものがあれば良いように思う。

(宮澤) ここまでの議論を受けると、ユニット名やテーマとしてスピノフを主張するよりは、カーボンニュートラルを主張するほうが良いように感じた。

また、具体的なターゲットについては付け焼刃に考えても説得力が出ないので、何を軸に置くかはここから数年かけて様々な研究を進める中で探すということが良いのではないか。政策等を通じて社会に実装されていけば十分な成果になると思う。そのターゲットの実現が核融合の実現の加速にもつながるものであれば、多くの人々が参画できるように思う。

(大野) ユニットが多数提案され、連携の可能性などが模索されているようだが、あまり多くの意見を取り入れすぎると魅力が薄れてしまうこともある。核融合研のミッションとして考えていただいたものもあって良いのでは。

カーボンニュートラルについては、例えば脱炭素のために期待されている電炉製鉄において、大電力を取り扱うプラズマ技術が必要であり、ここは人材育成を含めて核融合の特徴が生かせるように思う。

(宮澤) まさにその通りで、スピノフにおいては後追いでは意味がなく、核融合で培った技術からゲームチェンジャーを生み出すことが重要である。

(後藤) 今の議論に関しては、カーボンニュートラルだけでなく、SDGs 全体への貢献を打ち出しても良いように感じた。

(宮澤) あまり広げ過ぎると曖昧になってしまうので、SDGs を掲げるにしてもカーボンニュートラルなどの具体的なトピックに絞り、その上で具体的なターゲットは最初に示さず、それを数年で提案していく、というスタートにできれば、色々なアイデアを盛り込めて良いのでは。

(仲田) カーボンニュートラル、SDGs とともに良いアイデアであり、(それらを前面に出して) ユニット名に核融合を明示しないのはそれで良いと思う。集中から展開を図る上で、核融合を目指して集中的にやってきたことで見出された難問を分節化し、それを核融合のためだけではなく SDGs など他の問題に通ずるものとして定式化すれば、核融合の遺伝子を持ったままそれらの問題にも取り組めると考えている。核融合研という名前は変わらず、核融合に関する研究を除外するわけでもないの、ユニットの名称や目標に核融合が直接入らなくてもその意義付けははっきりすると思う。革新的な技術やシステムを追究するという考え方は専門外から見ても非常に面白そうで、かつ新しいものを感じられる。開発研究で求められている課題の解決を担うのは開発研究を行っている機関であるべきで、核融合研ではその先の革新的な部分を問題設定にすることで、開発研究自体にもフィードバックがなされるのではと思う。

(大野) 今の仲田さんのご発言が核融合研全体の認識であれば非常に良いことだと思う。そのような考え方が浸透してテーマが設定されることを期待している。

(仲田) 準備室の一員としてそういった意識共有にも努めたい。

なお、核融合を前面に出さない方向性から議論が始まってしまっている面はあるが、核融合研がモデルチェンジするからこそ、これまで続けられてきた炉設計活動は重要と考えている。炉設計は工学的な知見を積み重ねて実証されるべきものではあるが、計算機上でできることも多い。総合的に炉設計を行える人材・ツール・知見が揃っているの、例えば宇宙空間で作ることを考えるなど、それをもっと広げて展開していくことも面白いのではないか。

(後藤) ユニットの名称などは別として、革新的なアイデアを取り込めるユニットであれば、炉設計についても全くの新概念の提案も含め、多くの方に参画いただけるように思う。

(伊藤) 素粒子分野では宇宙空間や月面に測定器を設置する計画もあると聞いている。

(宮澤) 核融合で ${}^7\text{Be}$ を作ってニュートリノを発生させれば、素粒子分野との共同研究もあり得るか？

(伊藤) ミューニュートリノが出せるのであれば非常に興味深い。

(後藤) ここまでの流れをまとめると、核融合発の革新的技術を扱うユニットができれば、先進・代替方式の核融合研究を進めつつ他分野への展開も図れる、ということで、その方向性でユニット構想提案書の内容をもう少し膨らませていくということになるかと思う。

ここまで議論した内容は Fusion2030 の炉工 WG の報告書にある要望とも整合していると思うが、これについてもきちんと含められるようにしたい。また功刀先生より、相良先生が進めてこられた「物理で繋ぐ工学」の流れを維持していただきたいというご意見もいただいております、これも含め、本日の議論で出たキーワードが込められる内容にもしたい。私のほうでこれらを反映した草案をできるだけ早めに作成し、それに対するコメントをいただいた上で、次回の会合で議論できればと思う。

(大野) 少し話は変わるが、以前筑波大今井先生から、自励発振で本来位相が揃わないジャイロトロンの位相を合わせる技術があれば、複数のジャイロロンからレーザーのような

イメージでの高収束・高出力の出射が可能で、核融合にとっても大きな意味を持つと同時にロケット推進など他の工学分野にもインパクトが高いと聞いた。そのような、核融合研が持っている工学技術を先鋭化することでスピノフを含めた展開を図る提案はなされているのか？

(伊藤) 大変良いご提案だと思う。現在その方向での具体的な提案はないのでは。核融合研にあるそれぞれの装置を意識した提案自体はあるが、なかなかユニットまで発展させるのが難しい印象もある。

(後藤) こういったものが大事だ、ということについてはぜひインプットいただきたい。またユニット自体が固まっていないのでどのユニットがそういった提案を受けられるかも分からないが、予算や人員をセットにしたパッケージをいくつか用意しておくことは有益であり、核融合工学研究プロジェクトで整備した設備に関しては長坂さん提案のユニットと共同で準備を進めている。

(伊藤) 大野先生のご質問は既存の装置の活用だけではなく、そういった技術を高めて技術革新を行うことを志向したユニットがあるか、ということではないか？

(大野) そうである。加速器のようにその機器が開発されることによって新しい学術が開けるような装置をイメージしている。このユニットで引き受けてほしいということではなく、核融合研の工学基盤など基幹技術を発展させると新しい学術分野のツールとして展開できるような提案があるのか、実現できるとゲームチェンジャーになるような技術を謳った提案があるのかを質問させていただいた。

(鈎持:チャットでのコメント) ジャイロトロンのご提案については西浦さんの提案ユニットで包括できるので、私からインプットさせていただく。

(宮澤) こういった提案の受け皿があるかどうか、核融合研側としてきちんとフォローしておく必要があるのでは。

(後藤) 個人的には他のユニットでは意識されていないと思われる総合工学実験棟の装置についてはイメージしていたが、各ユニットの自発的な動きだけでは漏れがあるかもしれないので、それをきちんとフォローできる仕組みが必要かもしれない。核融合研にある基盤技術を発展させて新しい学術を生む、ということについては、安原さん、高田さん、柳先生などのユニットと合同会合の場を持つことを検討したい。

(宮澤) このユニットのテーマとしてそういった基盤技術の発展による新学術創成を押し出して行けば良いのでは。

(成嶋) ここまで議論は理念が先行しており、現場の意見、特に地道な小規模実験におけるノウハウなど、論文化はされないが重要な要素が反映されていないように思う。技術部の方からの意見が出ていないのもそういった議論の方向性が影響しているのでは。ぜひ全所的な議論となるようお願いしたい。

(後藤) 私自身も小規模な基礎実験を行っているのでその重要性は認識しているし、それがないと大きなプロジェクトも進んでいかないと思っているが、非常に重要なインプット

をいただいたと思う。ユニット構想提案書にどう織り込むかはこれから検討するが、その書きぶりが見た人に与える影響は大きいことを実感したので、チームとして協働することが明確に打ち出せるようにしたい。

(宮澤) 技術継承や若手教育を明示すれば、そういった要素も見えてくるのでは。

(相良:チャットでのコメント) 功刀先生は原子力学会の連載講座のことを言っているのかと思う。特に最後の12章のまとめをご覧いただきたい。

(宮澤) こういったモデリングの学術的な評価が低いことが問題だと感じる。

(後藤) 統合的工学モデリングは個人的には非常に重要だと思っており、統合モデリングによって得られた結果をフィードバックしてシステムを最適化できるところまで行けば十分に新しいと思う。データマイニングや機械学習の研究者の方の協力を得てそこを発展させられると良いと思う。

(伊藤) モデリングは物理ではないと捉えている人もいる。そもそもモデリングはプラズマ・核融合分野特有の用語のように思う。モデリングは結果への合わせ込みであり、根拠に欠けるという印象を他分野に持たれがちである印象。

(宮澤) そこを打破するものがあるといいのでは。

(後藤) 単なる合わせ込みではなく、本質を抽出しているからこそその簡易化であり、それを組み合わせることで大規模なシステムの設計ができると思っている。

(伊藤) 簡易モデルという言葉は物理学の研究者にも受け入れられやすい。

(後藤) システムコードに興味はあるが、自身の研究がどこにどう貢献できるのか分からないという意見もいただいた。こういったパラメータの組み合わせで記述されるモデルがあればシステムコードに組み込める、という情報が共有されれば、議論が進むと感じている。

(伊藤) システムコード入門書を書けばよいのでは？工学装置にしろ、計算ツールにしろ、使い方の継承だけではいつか途絶えてしまうので、作り方の継承が必要。革新的技術開発を進めることと、既存の良い装置をいかに使うか、ということのベクトルの違いはそこにあると思う。使い方では興味がなくとも、作り方が分かれば、より良いものを創ろうという意欲にもつながる。

(宮澤) LHDのような洗練されたシステムも地道な現場作業の結果生まれたものだが、現在は多くの方がユーザー化してしまって装置が作れなくなってしまっている。

(河村) モデリングは工学的な応用面を考えて部品を組み合わせる目的のコードを作って予測に使っていくものだと考えている。要素還元的な研究を行うシミュレーションとはそこが違うと思っている。モデリングは工学としても市民権を得た活動をしていかないといけないと感じている。

自分のやっている研究を工学研究に生かしたくてもどこに貢献すればいいのかが分からない。例えばシステムコードがモジュール化され、自分の研究に関連する部分は自分で書き換えられるような開かれた枠組みができればシミュレーション研究者も含めて多くの人の興味を引くのでは。炉設計は一部の人しか結果を総合的に評価できない状況になっているよ

うに思うので、粗くてもいいので見える化ができれば、多くの人が主体的に関わったり、自身の研究がプラント性能にどういった影響を及ぼすのかも理解できる。これだけ複雑なシステムを比較的オープンな状況で議論できているのは核融合の特徴で、ある種の社会実験にもなると思う。極端な例えだが、スマホアプリのようなものになるのが理想。

(宮澤) オープンソースとして全員でシステムコードを作るというのは大変面白い発想だと思う。モデリングの新しい像を提案するイメージと思うが、モデリングやモデラーの市民権を核融合界から訴えかけていくことができれば、10年後に花開くのでは。

(河村) 他分野ではモデリングとシミュレーションの定義も曖昧。作っていくところに重きを置いた数値コードということにより広い意味の主張ができると感じている。

(宮澤) いろいろな人が参加できるプラットフォームを作るというのは新しいように思うが、伊藤さんのユニット提案がそれに当たるのか？

(伊藤) 私が提案したマイスターールのほうは論文に書けない部分を残すのが目的。

(後藤) モデリングの部分は山口さんの提案とも重なる部分があるので、ぜひ合同で議論してみたい。コア研究テーマに明示するかどうかは別として、システム設計の手法としてオープンソース化はぜひ組み入れたい。使い方は学問にならないが作り方は学問になるので、そこはぜひ主張したい。

(宮澤) 本質を抽出する、ということではモデリングをきちんと定義づけることも大事では。

(伊藤) 有限個しか入れない中で、どの効果を入れるのか、というところを今までは職人芸的に選んでいたと思うが、そこをきちんとやらないと変なモデルを作ってしまう。数式になれば次数などの区別があるが、そうでないエフェクティブなところをマイニングしたい。

(相良:チャットでのコメント) 説明できないところをあぶり出していく手順そのものがモデリングである。

(後藤) これだけ議論が盛り上がるということはそれだけ学術として面白いということがあるので、この要素を具体的な研究手法に含めようと思う。

(河村) モデリングは道具という側面も強い。モデリングだけを前面に出すと道具立ての話になってしまうので、モデリングを使って何をするのか、モデリングを作る中でどういった理解が進むのか、というところをセットで提案しないといけないと思う。

(後藤) 道具は使いようであるし、道具がなければ作業もできない。モデリングによって核融合炉のような複雑なシステムの設計が進むことを示せば、同様の複雑なシステムに一般化され還元できると思う。核融合発の学術として十分に主張できると思う。

(宮澤) モデリングを取り入れた物理の理解を謳えば良いのでは。

(後藤) 物理の理解と工学的なものづくり両方と考えている。

(伊藤) 物理を理解して重要な効果が分かったからモデル化ができる場合と、モデル化がうまく行ったため重要な効果が分かって物理の理解が進む場合があると思う。モデルを作る部分と使う部分でモデルの果たす役割は違っており、色々な形があることを一度整理して示して、一つに絞らないほうが良いのでは。

(後藤) 絞る考えはなく、モデリングが方向性を含めて非常に強力なツールであることをアピールできている。

(宮澤) モデリングは近似式の集合体という見方が定着しているが、そうでないところを示せると良い。

(伊藤) 私がやっていた Fuzz のシミュレーションでは様々な効果を試したが、そのうち実験結果を再現できるものがひとつしかなかったため、それが最も効果的に働いたのだろうという主張になっている。シミュレーションでは必ずしも第一原理ではなく、計算でイタレーションする「ミクロな過程自体がモデル(仮定、近似)」ということもある。その場合にはイタレーション後である計算結果が現象を再現できるか否かで、ミクロな過程の効果や審議を議論することができるだろう。色々な例がそこに当てはまっていけば、全体としていい姿になるのでは。モデリング 2.0 とでも呼べるかもしれない。

(宮澤) そこがきちんと定義づけられれば新しい学術になるのでは。どの効果が重要なのかについては、機械学習などに探させる手もあるかもしれない。

(後藤) ここまでの議論は複雑なものを理解してそれに基づいてものを作る、という点は共通していて、それがここまで高度に組み合わさっているのが核融合の特徴なので、核融合発の学術として主張していけると感じた。

本日の議論を受けてユニット構想案のより具体的な内容を私のほうでまとめ、できるだけ早期に公開して皆様からインプットをいただき、それを受けて次回以降の会合で議論を進めたい。