

## ユニットテーマ構想合同会合（提案 No.8, 23, 27, 36）議事録

日時：2021年6月30日（水）13:30～15:00

参加者（五十音順）：家田章正（名古屋大）、居田克巳、市口勝治、伊藤篤史、今川信作、上原日和、大谷寛明、神尾修治、河瀬広樹、河村学思、菊池和平（統計数理研）、岸本泰明（京大）、釘持尚輝、後藤拓也、小林策治、小林達哉、相良明男、清水昭博、庄司主、關良輔、高田卓、高橋裕己、高山定次、武村勇輝、田中宏彦（名大）、田辺克明（京大）、田村直樹、田村仁、力石浩孝、辻村亨、永岡賢一、成嶋吉朗、奴賀秀男、能登裕之、濱地志憲、菱沼良光、福本直之（兵庫県立大）、藤原大、宮澤順一、向井清史、本島巖、八木重郎（京大）、安原亮、矢内亮馬、山口裕之、横山雅之、吉川正志（筑波大）、吉田善章、吉村泰夫（計49名）

### <概要>

- ・ 核融合研の持つ技術を基に、それを発展させることで他分野に通用する技術になるとともに、核融合研究も進展するようなアイデアがないかを議論した。以下、議論で出た意見やアイデアを列記する。
  - 超伝導コイルを自作できることは特徴である。既存装置を自作した超伝導コイルで改造するということも考えられる。
  - 核融合技術の応用可能性として、大体積の高真空の形成が挙げられる。
  - 位相制御をキーワードとして、社会実装に寄与し得るとともに、核融合研究にも革新をもたらすアイデアが提示された。
  - 挑戦的なことをする上では既存の小型装置の活用が望まれる。新技術によるこれまでにない加熱・制御・計測等の手法の導入が新しい物理研究を生む可能性がある。また斬新なアイデアを導入するためには、新たなメンバーの参入が必要。
  - 核融合研にある装置・機器を外部の研究者も含めて誰が見ても分かる形にリストアップしたものがあれば、それらの有効活用につながるのでは。
  - 工学技術だけでなく、シミュレーション技法でも他分野にインパクトを与え得るものがあるのでは。また、工学・技術に関するシミュレーショングループを形成するというのも面白いと思う。
  - 想定されていた議論とは逆の方向だが、総合工学である核融合において、他分野での特殊技術が活用できる可能性もある。他分野の方に核融合に興味を持っていたく入り口にもなる。情報交換のためにも技術見本市や技術説明会などに積極的に参加すべきでは。

### <質疑詳細>

（高田）高温超伝導の小型マグネットの応用として、別会合で超伝導コイルを用いた TPD-II の改造案が提示されていたが、所内のチームで超伝導コイルを製作して改造を行うとい

うような話に可能性はあるか？

(濱地) 実際にそういうこと(超伝導関連の研究者をチームに引き入れて装置を改造する)という話は出ている。既存の別装置のマグネットを転用することも考えられるが、高温超伝導マグネットを自作できる組織はなかなか存在しないので、そこを生かすことは十分考えられる。

(後藤) まさに今の話のような、今核融合研にある装置や基幹技術を組み合わせてできるアイデアがあればぜひ挙げていただきたい。

(伊藤) 生理研にある7テスラのMRIを見学したことがあるが、そこでMRIをリードしているフランスではもともと核融合向けの高温超伝導マグネットを製作していたチームが活躍していると聞いた。所内でコイル製作が可能であれば、需要はあるのでは。

(高田) MRIは要求磁場精度が非常に厳しくハードルが高いが、もう少し要求精度が低いものであれば対応できるかもしれない。

(藤原) 高温超伝導関係で日本が今後取得できる特許はあるのか？

(高田) クエンチ保護がきちんとできるマグネットが製作可能であれば世界的にもインパクトは高い。個人的には磁場という意味ではレーザー磁場生成や、レーザーによる粒子加速も面白いと思っているが知識がないので、どなたか知っていたら教えていただきたい。

(安原) レーザー加速の分野は外部資金によって活発な研究がなされている。この分野に参入するとすれば何か新しいアイデアが必要。

(高田) 核融合が必要としている要請が他と違えば後発でもオリジナリティを出せないか？

(安原) その意味ではレーザー核融合はレーザー加速のメカニズムをそのまま使おうとしているので、研究要素も技術的な面白さも多くあると思う。

(後藤) 核融合研からいきなり一般的な学術として新しいものを打ち出すのは簡単ではないと思われるので、核融合でしか注目されていなかったパラメータ領域から広く応用できるアイデアが出れば議論が広がるように思う。

(安原) 核融合研の技術にリンクするキーワードとして、位相制御が挙げられるのではと思っている。分かりやすいのは電磁波の位相制御による高性能化だが、それに留まらず低温冷却システムや超伝導でも位相制御による高効率化、高性能化は考えられるし、材料にかんしても結晶は空間的な位相構造を持っているので、プラズマ壁相互作用や材料の腐食においても、位相制御という観点からの制御が可能ではないかと思う。これらは半導体製造装置の高寿命化や画期的な半導体プロセス、情報の多重化による新情報通信技術、自動運転用センサー、大電力マイクロ波・ミリ波技術の省エネ化、低温システムの省電力化、バッテリー電極の長寿命化などの形で社会実装に寄与し得る。一方、小出力素子のスタック化やアレイ化でプロファイルを自在に制御した加熱、メタマテリアル構造などによって局所的に強磁場を発生させることによる新たな核融合装置の考案など、核融合研究にも革新をもたらす可能性もあるのではと考えている。レーザー材料では、プリンタで光学結晶を成長させること

で透明なセラミック材料を作る試みがなされており、核融合研と土岐市の共同研究ではレーザーによって黄色顔料を発光させて陶器に絵付けをすることにも成功している。

(後藤) イメージが具体化するお話をいただけたと思う。直近でできる提案としては今核融合研にある資産を使うことがメリットになるので、普段使われている装置や技術の応用に関するアイデアもぜひいただきたい。

(高田) 具体的なアイデアではないが、核融合研ではこれまで LHD 運転が最重要ミッションであり。新しい技術になかなか手が出せなかった面もあるように思う。新しい技術を模索する活動があっても良いのでは。それに対し例えば炉設計研究者がその技術の波及可能性を指摘するなど、新技術というインプットに対し、核融合としてのアウトプットを考えるような研究も面白いのではと思う。

(後藤) 核融合研の基盤を使うという意味でその視点は重要だと思う。出口のアイデアはなかなか出ないかもしれないが、核融合が抱えている課題やそれを解決するために生み出されてきた技術に着目し、それを発展させることで他分野に通用する技術になりかつ核融合炉設計の魅力も高めるような提案になることが理想である。その意味では核融合の課題やそのための技術もきちんと網羅したい。

(伊藤) プラットフォームのところでも議論しようと思っているが、核融合分野のシミュレーションコードにも、核融合に特化された技法がたくさんある。これまで他の分野への波及効果についてはあまり考えられてこなかったが、他分野へインパクトを与え得ると考えている。課題 No.7 の提案 (PIC シミュレーション技法による他分野の研究の牽引) が一つの例と思われるし、うまくやればスパコンだけでなく核融合研が開発してきたアプリが共用プラットフォームになり得ると思う。

ちなみに材料の位相というのがよくイメージできていない。電子物性やスピントロニクスの話は分かるが、それとは違ったイメージか？

(安原) 単純に空間的に結晶構造があることが位相が揃っていることに当たると思う。TEM などで見るとその構造が回折像として出てくる。位相が崩れてガラス質になると回折パターンがぼやけてくる。そういったことをイメージしている。

(伊藤) 材料分野の研究者の興味は引かないかもしれない。ガラスと結晶の間に粒界があり、粒界を制御するのがマクロ物性の材料分野の研究の主流であると思う。ミクロ物性であればそういった切り口もあるかもしれないが。

(安原) 光学材料分野では等方的な材料を用いて結晶粒界での散乱を抑えて透明化ができるようになってきている。セラミックだが結晶方位が揃った材料をどのように作るかが盛んに研究されている。時間をかけると不揃いな結晶方位が大きく成長してしまうので、短時間で昇温・冷却することで粒成長を抑え、不揃いではあるが散乱を抑えた材料を作る、あるいは外部磁場・電場等を用いて向きの揃った結晶粒界を作るなどの試みがなされている。そういったことをイメージしている。

(伊藤) 研究としては分かるが、核融合研が持っていたツールではないように思う。

(後藤) 持っているツールであればスタートダッシュにはつながるが、そこに限らず議論をして良いと思っている。

(小林達) 柔軟な加熱制御は物理研究にも役立つと感じた。特に今後ある程度物理実験に特化したプラズマ研究ができるようになったときに、今まで使われていなかった制御ノブや革新的技術が使えると面白い研究ができるように思う。物理研究グループがそういった技術開発メンバーからアドバイスやインプットを受けることや、同じユニットメンバーとしてそういった斬新なアイデアを継続的に行うような連携があると良いと思う。

(後藤) 今のような、こういう装置や技術があると研究が進む、という観点からの提案もぜひいただきたい。

(横山) これを機に工学や技術に関するシミュレーショングループを形成するというのも面白いのではと思う。技術開発においてモデリングやシミュレーションが必要な場面が提示されれば、シミュレーション研究者も興味を持つのではと思う。大谷さんの指導のもと遺伝的アルゴリズムで超伝導コイルの設計を最適化する研究が博士研究として行われているが、そういう実例を取っ掛かりに連携ができると面白いと思う。

(大谷) 工学とシミュレーションに加え、データ科学の話も入っており、3分野が関わった面白い研究になっていると思う。

(後藤) 核融合分野の研究者にとっては、核融合技術はある意味当たり前になっていてその可能性に気づきにくいかもしれない。他分野との共同研究を進められている方で、他分野の方からのご指摘で核融合の特徴に気付いた例などもあれば挙げてほしい。

(伊藤) 本日は核融合の持つ特殊技術が他分野にインパクトを与えられるかということについての議論だと思っているが、逆に他分野で非常に進んでいる技術を応用することで核融合研究が進展することもあり得ると思う。そういった技術についてはこれまでアンテナを十分に伸ばしていなかったり、リスクを取ることができなくて採用できていなかったかもしれない。その方向の可能性については本日は議論しないのか？

(後藤) そちらの方向の議論もあってももちろん構わないが、本日の議論を今後のユニット構想に役立ててもらいたいという動機からすると、核融合ならではのところからスタートしたほうが議論の方向性が見えやすいと考えていた。もちろん外から入ってきた技術によって核融合研のユニットとしての研究が発展するアイデアがあれば良いことである。

(伊藤) 技術の波及先を探す上では、様々な情報交換の場が必要である。技術の見本市のようなものが他分野と合同でできれば、相手側からのインプットもあり、そのインプットがあるからこそアウトプットも出てくるのではと思う。

(後藤) 核融合は様々な条件が複合しているので総合的には非常に難しいことをやっているし、ひとつひとつの現象に注目すれば核融合より遥かに厳しい条件のものは存在するので、そういったところからのインプットは十分考えられる。

(伊藤) 我々は核融合技術の特徴を認識はできているが、他分野でのニーズを見付けられずにいるのだと思う。他分野でも同じ状況は考えられ、むしろ総合工学で色々な技術が必要な

核融合こそ、そういった他分野にある特殊技術を活用できる可能性がある。それが実現すれば相手の分野から感謝してもらえるし、核融合へ興味を持つ入口にもなると思う。

(高田) そういった話であれば、挑戦的なところに色々取り組む小型装置が活用できるのではと思う。実際の装置があれば切っ掛けもあり、またそこに新しい技術を受け入れたり、そこで培ったものをアウトプットしたりもしやすい。かと言って資金を集めて機器を揃えたら良いという話でもないので、現有の TPD-II や HYPER-I を改造して少しトリッキーな仕掛けをしたら面白いことができる、というような話があればと思うが、どうか？

(永岡) HYPER-I の改造計画について主担当の吉村信次さんがどこまで検討されているかは把握していないが、数年前に定磁場の領域の体積を大きくすることと、プラズマ源となる ECR のポイントを増やして装置の両サイドに設置し、ミラー比の極端に大きなミラー装置のような磁場構造とすることで、磁場を生成するようなプラズマの乱流状態を実現する実験が可能になるのでは、というような議論があったことは記憶している。

(後藤) コイルを改造するようなイメージか？

(永岡) 真空容器の改造も必要である。

(後藤) 高田さんがイメージしていたのは何か新しいアタッチメントを取り付けるような話だと理解している。

(高田) そうである。新しい計測器を付けるとか、マグネットを1つだけ新しいタイプに置き換えるようなことをイメージしていた。

(小林達) 学生時代に直線型装置を使っていたが、同じ研究グループで装置を使っていると、なかなか変わったことはできないと感じた。米国では斬新なアイデアの実験が色々行われていたが、それは外部から共同研究で入ってきたメンバーによるものが多かったように思う。外部から全く違ったアイデアを持った人が入ってくると、今まで思い付かなかったことや、思い付いても踏み切れなかった実験ができるようになると感じている。今回のユニット構築はその意味で良い機会だと思っている。

(後藤) ユニット構築という面でこのような議論ができるのは非常に良いことである。一方、本日は核融合の技術や特徴からスタートした議論をしたいと考えていた。なかなか具体的なアイデアは出ないと思うので、まずは核融合の特徴的な技術として、これまでに提示された以外のキーワードがあればぜひ挙げていただきたい。

(力石) 電気やコイルの分野から見ると、低温の電気絶縁が挙げられる。LHD 建設時は絶縁の専門家との共同研究も行われていた。電力システムの観点からは、核融合、特にヘリカル核融合炉用の電源は、低電圧、大電流、低速という、世の中の潮流とは逆の設計になっており、他分野にはない魅力をアピールできないかと考えている。

(後藤) 今すぐ応用先が見付からなくても、核融合に独特な部分は核融合研や核融合コミュニティに知見が集中しており、研究における金脈になるかもしれないので、ぜひそういった例も挙げていただきたい。

(力石) FFHR の設計では、発電システムにおける温度差が既存の他の電源に比べて小さ

く、そこで高効率な発電をしようとしているので、廃熱利用など小温度差の熱利用研究分野との共同研究も考えられるのでは。

(藤原) 溶接技術や大型容器の製作技術、高真空技術なども核融合の基盤技術として挙げられるのでは。

(高田) 大体積の真空応用が何かないか？

(藤原) 航空機の FRP 製翼の製造や、宇宙推進機の推進力計測技術などに応用ができるかもしれない。

(高田) 大体積の高真空を作るのはなかなか難しく、それができれば宇宙用推進機の模擬などもできるように思う。

(藤原) 人造ダイヤモンドなどの材料製造においても、大体積で行うことで何か革新があるのであれば面白いのでは。

(後藤) 大体積の高真空を、計測用の多数のポートを備えた真空容器で実現しているのは核融合の特徴かもしれない。

(藤原) NBI 入射を宇宙往還機の大気圏突入時の耐久試験に使うなども考えられるかもしれない。核融合研が保有している装置・設備の一覧があれば、お互いに機器を融通するなどしてより柔軟な研究が進められるように思うが、そういったものはあるのか？

(濱地) 共同研究用の貸し出し機器リストはあるのでは。

(藤原) すぐに使える装置だけでなく、すぐに使う予定のない真空容器や電源など、転用可能な機器についても情報が共有されていると良いと感じている。

(濱地) フォーマット自体はあるので、そこに載せることはできるのでは。

(後藤) どのような機器も資産として登録はされているはずなので、情報はどこかにあると思うが、外部の方も含め全員が使いやすい形で整備されると良いと思う。

(横山：チャットでのコメント) JST の新技術説明会などで NIFS の技術力を広く紹介するのはどうか？

(力石：チャットでのコメント) イノベーションジャパンもあるのでは。高山定次さんのマイクロ波製鉄などを出展したことがある。

(安原) イノベーションジャパンは JST の主催で、ほぼ毎年出展している。産学連携での共同研究につながった例もある。

(力石) イノベーションジャパンは核融合研からだけでなく、他の機関からの出展も一覧できるので、他分野の研究動向を知ることでもできる。

(向井) 話が少し戻るが、核融合研所有設備に関しては、安全衛生推進部の新規実験安全審査室の web ページに申請済みの機器については情報が得られる。

(後藤) 本日は議論をうまく引き出せなかった面もあり反省しているが、10 年で社会実装まで至らなくても、革新技術に関する基礎研究をこの 10 年で終わることができれば次への展開につながる。核融合炉のような数十年先の最終目標や、10 年での社会実装という近い目標だけでなく、その間にあるものにも着目できればと思う。

(横山) 先ほどコメントした新技術説明会などは現在オンラインである意味参加しやすくなっているので、参加して核融合研全体として工学や技術を世に問うことをぜひ積極的に検討していただきたい。そうすれば、他分野とのつながりもできるし、アイデアも自ずと湧いてくるように思う。

(安原) 工学に限らず、シミュレーションもそういった展示会でアピールできるのでは。

(横山) 確かに工学に限らない技術全般の展示会であるので、ぜひ幅広く宣伝ができると良いと思う。ぜひ一緒に検討させていただきたい。

(高田) 技術紹介でのコミュニケーションはその場では盛り上がるが、実際に共同研究に発展するにはなかなかハードルが高く、どちらかのメンバーが相手先に飛び込んでやるくらいの姿勢が必要。その場合は今の状況を考えると核融合研側が飛び込んで行く必要があるように感じる。

(横山) 結局は人どうしのつながりではあるので、良い人を見つけてしっかりと関係を築くことが重要と思う。

(後藤) アイデアを得るだけでも意味はあると思う。一方共同研究にまで発展するには、イメージのレベルの話だけでは難しい。その意味で我々自身が自分たちの技術について背景にある物理も含めて定量的に把握しておくことが重要と思う。

(宮澤) 各自が持っている技術からの発展のアイデアを出し合う回だったと認識しているが、それではなかなかまとまらないし、話も小さくなってしまいうように思う。逆のアプローチで、10年後の具体的なターゲットを定めて、それを貢献するために各自が持っている技術がどう使えるかを議論するほうが現実的と思う。10年研究を続けるためには目的は他力本願ではなく、自分たちで探すべきでは。

(後藤) 次回このような会合を開く場合には、そういったアプローチもぜひ考えたい。ぜひ皆様引き続きご議論をお願いしたい。