



サロン

## プラズマ・核融合サイエンスチャートを通じた学際交流 -第39回年会シンポジウムの報告-

### Interdisciplinary Communication through the Plasma Fusion Science Chart —Report of a 39th JSPF Annual Meeting Symposium—

森 芳孝, 仲田資季<sup>1)</sup>, 金子俊郎<sup>2)</sup>, 鈴木 建<sup>3)</sup>,  
雨宮高久<sup>4)</sup>, 菊地和平<sup>5)</sup>, 横山雅之<sup>1)</sup>, 笠田竜太<sup>6)</sup>

MORI Yoshitaka, NAKATA Motoki<sup>1)</sup>, KANEKO Toshiro<sup>2)</sup>, SUZUKI Takeru<sup>3)</sup>,  
AMAMIYA Takahisa<sup>4)</sup>, KIKUCHI Kazuhei<sup>5)</sup>, YOKOYAMA Masayuki<sup>1)</sup> and KASADA Ryuta<sup>6)</sup>

光産業創成大学院大学, <sup>1)</sup>核融合科学研究所, <sup>2)</sup>東北大学大学院工学研究科,

<sup>3)</sup>東京大学大学院総合文化研究科, <sup>4)</sup>日本大学理工学部, <sup>5)</sup>統計数理研究所統計思考院\*, <sup>6)</sup>東北大学金属材料研究所

(原稿受付: 2023年2月27日)

理工系専門家を対象としたプラズマ・核融合分野の説明資料としてプラズマ・核融合サイエンスチャートをまとめる作業が, Fusion2030研究会ならびにプラズマ・核融合学会専門委員会で進められている. サイエンスチャートの内容を踏まえ, 2022年11月に富山で開催された第39回年会にて, プラズマ応用, 天文, 統計数理, 科学史等関連分野の研究者を交えたシンポジウムが開催された. 総合討論では, 分野間の接点や将来連携などについて, 会場からリアルタイムに寄せられるコメントも踏まえながら議論が交わされた. 本稿では, シンポジウムの様子を記す.

#### Keywords:

Fusion2030, plasma fusion science chart, interdisciplinary communication

## 1. シンポジウムの趣旨

2020年度に開始された核融合科学研究所共同研究「2030年代を見据えたプラズマ・核融合科学の学術課題検討会(通称 Fusion2030研究会[1])」では, ボトムアップで, 将来計画・研究展望・ビジョンについて, 自由に意見を交わす方針を掲げている. 研究会の成果物として, プラズマ・核融合サイエンスチャート(以下, サイエンスチャート)を作成することが計画された. 2021年度からは, プラズマ・核融合学会専門委員会「プラズマ・核融合サイエンスチャートの作成」と連携し, 分野の共有説明資料の視点からサイエンスチャート作成の作業が進められている.

Fusion2030研究会は, 活動3年目を迎えた. 初年度(2020年度)に, 3つのステップ: 情報把握, 将来テーマ議論, ドキュメント(サイエンスチャート)まとめを設けて, 学術テーマの議論を行った. 次年度(2021年度)は, 2020年度活動のまとめと核融合科学研究所で開始されたユニット構築の議論[2]を見守った. 本年度(2022年度)は, 専門委員会と連携してサイエンスチャートの取りまとめを本格化し, 8月の全体会合(六ヶ所におけるハイブリッド開催)にて, 研究会の関係者と情報共有を行った.

サイエンスチャートの内容を踏まえ, 2022年11月に富山開催の第39回年会において, シンポジウム「サイエン

スチャートを通じた学際交流」を企画した. サイエンスチャートの内容を関連分野の研究者と共有し, プラズマ応用, 天文, 統計数理, 科学史等関連分野の研究者と分野間の接点と将来の連携等について議論することが目的である. 総合討論では, リアルタイムコメントアプリを活用して, 会場から随時寄せられるコメントも踏まえながら議論が交わされた. 本稿では, シンポジウムについて, 総合討論の様子を中心に記す.

## 2. サイエンスチャートの構成

シンポジウムでは, 趣旨説明に引き続き, 森・光産業創成大からサイエンスチャートの概要が紹介された.

サイエンスチャートは, 分野外向けへの発信を意識している. 対象を理工系専門家とし, 学術(知の蓄積)に重点をおいた学会発信の分野説明資料を想定している. 構成案は以下のとおりである.

1. 前書き
2. アイデンティティ
3. 歴史と広がり
  - 3-1. プラズマ科学
  - 3-2. プラズマ応用
  - 3-3. 核融合プラズマ

corresponding author's e-mail: ymori@gpi.ac.jp

- 3-4. 慣性核融合
- 3-5. 核融合関連材料：構造材、対向材、超伝導素材、レーザー材料
- 3-6. 炉工学エンジニアリングマップ
- 4. 課題と謎への挑戦-核融合プラズマ52の学術課題集概要-

アウトプット形態は、インフォグラフィックスと呼ばれる一枚のイラストに、イラストの解説文を添える。

サイエンスチャート第2章には、アイデンティの章を設けた。その意図は、関連分野の研究者から、「あなたたちの分野の研究動機は何ですか？何に惹かれているのですか？」と聞かれた際の回答の一例を示すためである。図1にアイデンティティのインフォグラフィックス案を示す。学会の4領域（基礎・核融合・応用（反応性プラズマ）・炉工学）の分類を反映した構成であり、以下に示すプラズマ・核融合学ワンメッセージを表している。

「宇宙に普遍的に存在する、素過程と集団現象が融合したプラズマを探究し、そこに潜む機能やエネルギーの創成と制御を通して新たな理工医農学などの開拓に挑戦する学問。」

サイエンスチャートの作成状況は、Fusion2030研究会webページに掲載されている[1]。

第4章には、課題と謎への挑戦として、核融合プラズマ52の学術課題集の概要を掲載する。学術課題集は、Fusion2030研究会に設置された核融合プラズマワーキングの活動成果としてまとめられたものである。サイエンスと技術という学術の視点から眺めたときの核融合プラズマの課題とその魅力、難しさ、未解明な謎、将来の課題、新展開などに焦点を置き、52の記事がまとめられている[3]。

シンポジウムでは、ワーキング取りまとめ者の仲田・核融合研よりその概要が紹介された。学術の役割として、「体系化」、「多様な選択枝や新概念の土壌」、「開発の加速」、「社会への発信」が示された。さらに、一つの目標にむかって科学技術を収斂させる開発研究と、科学技術の裾野を広げる学術研究の役割の位置付けが示された。

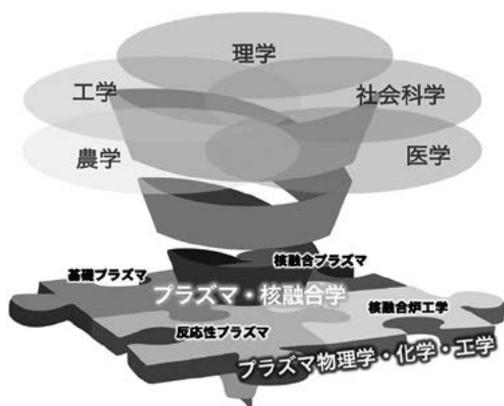


図1 アイデンティのインフォグラフィックス案。

### 3. 総合討論の様子

総合討論では、関連分野の研究者とパネルディスカッション形式で、会場からリアルタイムに寄せられるコメントを踏まえながら議論を交わした。関連分野から、金子・東北大（プラズマ応用）、菊地・統数研（統計数理）、鈴木・東大（天文）、雨宮・日大（科学史）が登壇した。前半は登壇者の自己紹介と専門分野紹介、後半は図2に示す構想をふまえ、分野間の接点及び将来の連携等について議論した。尚、後半はリアルタイムコメントアプリ「スグキク」を活用し、会場から質疑を集計してアイスブレイクをした後、議論へのコメントを伺いながらパネラーと意見を交わした。

以下、関連分野毎に、パネラーからの紹介内容、会場から寄せられたコメント、及び議論を記す。

#### 応用プラズマ（金子・東北大）

サイエンスチャートに掲載される3.2「応用プラズマ」の歴史と広がりについて、2010年3月に応用物理学会でまとめられたプラズマ応用物理分野の発展史マップとその後の進展が示された。応用物理分野では、1920年代に萌芽したプラズマ基礎物理の上に、化学工学、量子化学、分光學、半導体工学、電気化学、生物学、医学の領域が融合しながら、工業用光源、半導体成膜、エッチング技術が育ち、環境・医療・バイオ分野へ拡大している。これらの発展と拡大は、主に反応性プラズマによりもたらされたものである。そこで、今回は、反応性プラズマに注目した。反応性プラズマの発展史マップとして、2010年作成のマップに、AI、量子力学や植物学の知見が加わり、太陽電池、二次電池、メタマテリアル、脱炭素技術、持続可能農業技術の開発が開く構想としたことが紹介された。

会場からは、「反応性プラズマは、反応後の物質の理解が難しい印象を持つ。」というコメントが寄せられた。さらに、最後のスライドで示された半導体製造の事例：学術論文数が飽和しつつある頃に市場が立ち上がるという説明に対して、学際研究から産業に結びつくまで10から20年かかるという話が心に響いたという感想が寄せられた。

#### 天文（鈴木・東大）

専門の太陽・天体物理学のトピックスとして、太陽大

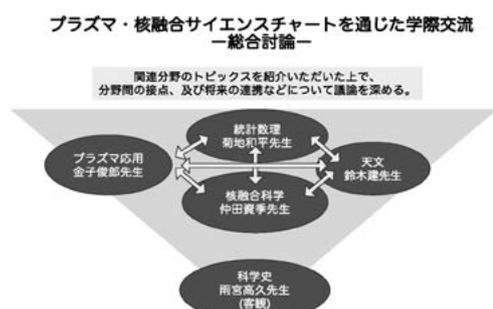


図2 総合討論の構想。

気の観測と数値実験の状況が紹介された。特に、プラズマ密度が16桁変化する太陽表面から惑星間空間までを解いた最初の数字実験として太陽風を吹かせるシミュレーション結果が示された。

会場からは、以下のコメントが寄せられた。

- 核融合プラズマと宇宙プラズマのアナロジーに興味がある。
- 核融合プラズマの炉心、周辺と太陽表面、磁気圏における共通点に興味がある。

これらも踏まえつつ、壇上で以下の議論が交わされた。

- 天文分野、特に太陽観測は乱流場のデータとしては極めて高い解像度のデータが得られるので、実験室プラズマの乱流計測原理を検証したりするのに役立つ。
- 同時に、実験室プラズマで計測された乱流や輸送現象に関する諸量や理論モデルなどが、天体物理の現象の解析にも適用できる可能性が高い。
- 天文と実験室プラズマの連携の歴史は長い。最近では、本学会においてオーガナイズドセッションが設定されている。さらに、物理学会領域2、地球電磁気・地球惑星系学会、天文学会の3学会合同プラズマ宇宙物理学3学会合同セッションが定期的に開催されており、核融合プラズマの研究成果も多数発表されている。

さらに、プラズマ科学に関連するコメントとして「中学高校教科書にでてくるファラデーやキルヒホフのような人物が、どうプラズマ科学に貢献したかプロモートすることも重要。」が寄せられた。

### 統計数理 (菊地・統数研)

代理登壇者の横山・核融合研より、菊地氏の研究略歴が紹介された。研究テーマを貫く共通性は自己相似であり、それは地球科学、株価の値動き、芸術など多様な分野・現象に現れるものである。中でも、地震発生前に地質学や重力データ等を用いることで地震活動度を推定する問題に関する研究内容が紹介された。地震の大きさと頻度に現れるべき則に関して、両者のログ-ログプロットにおける傾き (b値と呼ぶ) を、断層での重力異常値データに対してDMA (Detrending Moving Average) 解析を行うことで求める手法が述べられ、この手法がプラズマ乱流データ解析にも適用されている (稲垣氏・京大) ことから、複雑現象に関するデータ解析において、解析手法をベースとして両分野が連携できるであろうという展望が述べられた。そのような学際連携の基盤となるべく、情報・システム研究機構の第4期戦略的研究プロジェクト「プラズマ物理と相補的なプラズマデータに対する統計数理モデリング」の代表を務めて、核融合・統計数理間の交流や研究課題の共有を図っていることも紹介された。

会場からは、「地震が発生するメカニズムの理解や予測方法は、プラズマのディスラプション予測などへも適用できないだろうか。」というコメントが寄せられた。菊地氏からの回答を聴くことはできないが (謝辞参照)、緊急地震速報の仕組みは大いにアナロジーがあるはずで、学際交流を具体的に進めることで研究進展が見込めると考

えられる。菊地氏との議論を踏まえた核融合分野と統計数理分野の連携展望に関しては、文献[4]を参照されたい。

### 科学史 (雨宮・日大)

研究テーマであるプラズマ・核融合研究開発の歴史の紹介がなされた。まず、サイエンスチャート作成作業として、磁場閉じ込め研究の変遷に関与されていることが紹介された。引き続き、研究開発史に関する先行研究の動機が、3つの視点: 科学史 (歴史的資料の収集)、科学と社会 (巨大科学への批判)、当事者 (実体験経験の記録) に分類されることが紹介された。さらに、歴史に対する正確な認識を持つために、アーカイブスの重要性が指摘された。日本では2005年に設立された核融合科学研究所・核融合アーカイブ室の存在が研究開発史の調査分析の助けになっていることに触れ、核融合アーカイブス維持継続の重要性と、アーカイブスに基づくプラズマ・核融合研究開発史の体系的な研究・分析の必要性が強調された。

まとめとして、日本における初期の核融合研究体制の構築過程に着目するとシンポジウムのテーマである「分野間の接点と将来の連携」は探りやすいのではないだろうかという提起がなされた。核融合分野誕生の中核機関は、核融合懇談会 (現在のプラズマ・核融合学会) であり、素粒子・原子核、宇宙・天文、電気工学、超高温、溶接、加速器、非専門家 (新聞記者・政治家・行政機関) など多様な分野から人が参集した。プラズマ・核融合は設立当時から多分野融合であったという事実が、シンポジウム総合討論のテーマである分野間の接点と将来の連携の足掛かりになるという指摘である。

科学史の視点は聴衆者の興味を惹いたようであり、会場から以下のようなコメントが寄せられた。

- 研究者テーマや成果の関連時系列に加えて、研究者コミュニティも含めて「歴史」としてまとめる必要性をさらに知りたい。
- 科学史研究の面白さと意義は?
- 紹介されたトカマクからコンパクトトーラスに至る核融合プラズマの歴史に加えて、それ以外についても研究の歴史的な背景や変遷が研究成果とともにまとまっていると、今後の研究フェーズや他分野への応用を考える際の材料となるのでありがたい。
- 物理の教科書は敷居が高いが、「物理の歴史」の本なら読むという層もいるかもしれない。
- 科学史の観点から考えたことがなかったので興味深く聞かせていただいた。

### 核融合炉の開発について

今回のシンポジウムは、学術 (知の拡大と体系化) に重点を置いた。一方、会場からは、サイエンスチャートに掲載される核融合プラズマや核融合炉工学、核融合関連材料と関連して、核融合炉の開発に関するコメントも寄せられた。

- 核融合政策を管轄する省庁の再編が必要。経産省も加えなければ、次世代の発電手段と認知されず、企業もビ

ジネスにつながらないから参入しづらいと捉えている。

- 原型炉の設置場所を決定するためには、主体が国か研究者かわからないが、関係者への説明と説得が必須。
- 原子力発電のプロパガンダの反省を踏まえて、核融合炉では、適切な対話が求められる。
- 「核」という文字に拒否反応を示す人は多い。原子力発電に対して核融合発電の優位性や安全性を啓発していくことが重要。

#### 会場の反応

以下、会場と壇上間の双方向議論を活性化するために実施した質疑の結果を紹介する。「スグキク」アプリへの参加人数は100名を超えた。会場内のサイエンスチャート活動の認知度は6割であった。Fusion2030研究会メーリングリスト登録数が380名超であることから、もう少し認知度が高いのではないかと予想していた。認知度が6割にとどまった理由の一つに、核融合研究開発機関や企業関係者などへの周知の課題があげられる。参加者の研究分野エフォートは、核融合プラズマが大半であった。これは、プラズマ・核融合学会の特徴の一つでもあり、会場からの回答内容に影響を与えていると思われる。

総合討論では、シンポジウムの感想を受け付けた。忌憚のない意見は応援メッセージとともに、次回以降の運営の励みとなる。以下、内容を紹介する。

#### [内容について]

- 双方向的で楽しい会であった。
- 52の課題の学術課題集について、一般向け、特に学生等が視野に入っているという説明であった。対象にリーチしたかというポイントが大事と思われるため、追跡調査を期待したい。

#### [運営について]

- 面白かったが、やはり、テクニカルで専門用語が多い話になると聴衆はついてこない感がある。好奇心そそられるような話の展開をされたいと努力されているのは伝わった一方で、なかなか難しい試みであると思う。そういう面では、若い方に頼ってみてはどうかと思う。最近はユーモアある方が多い。
- 目的は様々だが、コミュニティ外の人（一般市民も含む）にきちんと説明ができることが大事なのだと改めて感じた。話ができれば自然と接点はでき、いろいろな方向に発展していくと思う。説明が難しいという自縄自縛を解くことが大事。みなさんの議論したい方向と今回のテーマとが必ずしも合致してなくて、消化不良に感じた方もいるかもしれないが、活動は大変大事で意義のあるものだと思う。
- 「学際交流」という割に活動者がいつものメンバーとなっていると感じる。中核となる 仕組みは必要として、理工学以外、例えば、社会科学、経営学などの方もパネラーや議論者として参画されると面白いと思う。また、今後、どのような領域の方がこの議論に参加し、どのような議論が展開されれば面白そうなど、ご意見あれば伺いたい。

- 他学会年次大会でも、今回のようなシンポジウムを企画してほしい。

#### 4. シンポジウムを振り返って

サイエンスチャートの活動を踏まえた所感を記す。学生さんから寄せられた下記コメントは、サイエンスチャート活動の励みとなった。

- 核融合プラズマの研究を続けて核融合炉の実現に貢献していきたい。一方で、宇宙物理と学際研究にも興味がある。各分野と核融合分野とで連携することで、どんな未来が期待できるのか、夢をふくらませたい。もっとよく聞いてみたい。

このコメントは、プラズマ・核融合分野の特徴をよくあらわしている。プラズマ・核融合分野は、究極のエネルギー源やプラズマプロセス等によるものづくりをめざし人類に貢献したいという使命感と、乱流や材料など基礎科学の駆動力である知りたいという好奇心：なぜ乱流がおこるのか？なぜものは壊れるのか？の両方を満たせる領域といえよう。

使命感と好奇心の両者は、程度の差はあるものの、一個人の中に内在している感情である。それを認識することが、他分野との交流のスタートラインではないだろうか。一方、一定規模以上の科学技術を推進するためには、社会的な組織化が必要である。組織は、組織のミッションないし役割（開発機関、学術教育機関など）を定めて、ミッション達成のために視野を収斂させる。所属する組織のミッションや役割を踏まえた上で、人には使命感と好奇心の両者が混在することに目を向け、できる範囲で両者の活動が交差させることが、個人と組織のしなやかさを生むのではないだろうか。そのしなやかさが、未来を切り開く活力となると思う。

最後に、シンポジウムのテーマである学際について触れる。プラズマ・核融合分野の黎明期は、多様なバックグラウンドを有する専門家が参集した学際的領域であった。誕生から70年を経過したプラズマ・核融合分野において、今後、学際をどのように位置付けていくか。学際は多人数が集まれば生まれるというものでもなく、一人の中に学際性を持つ人が何人出現するかであろう。そのような人が、学際の結び付きを作っていくとおもわれる。すなわち、学際は、学際性を内包する研究者同士が接点を求め合った時に生まれるものではなからうか。サイエンスチャートの活動が、一人の中に学際性を持つ人が現れてくる土壌となるよう、活動のラストスパートを切りたい。

#### 謝 辞

シンポジウムを採択いただいた第39回年会プログラム委員会に謝意を表します。また、シンポジウムの記録の投稿を促していただいた学会事務局北澤由美子さんに謝意いたします。最後に、シンポジウム後に急逝された菊地和平さんに心よりの哀悼の意を表します。当シンポジ

ウムへの積極的な関与に感謝し、著者に加えております。

### 参考文献

- [ 1 ] Fusion2030研究会 URL: <https://www-col.nifs.ac.jp/info/Fusion2030/>
- [ 2 ] ユニット活動 NIFS web ページ : <https://www-col.nifs.ac.jp/Unit/>
- [ 3 ] 学術課題集-核融合プラズマのサイエンスとその拡がり- : [https://www.nifs.ac.jp/research/Fusion2030/FPWG/fpwg\\_SciChallenges.html](https://www.nifs.ac.jp/research/Fusion2030/FPWG/fpwg_SciChallenges.html)
- [ 4 ] 横山雅之 : プラズマ・核融合学会誌 **99**, 3 (2023).