

見解

プラズマサイエンス—その学際的发展と
豊かな未来社会のために—



令和5年（2023年）9月26日

日本学術会議

物理学委員会

物性物理学・一般物理学分科会

この見解は、日本学術会議物理学委員会物性物理学・一般物理学分科会プラズマサイエンス小委員会での審議結果を踏まえ、物理学委員会物性物理学・一般物理学分科会において取りまとめ公表するものである。

日本学術会議 物理学委員会 物性物理学・一般物理学分科会			
委員長	森 初果	(第三部会員)	東京大学副学長、東京大学物性研究所教授
副委員長	常行 真司	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
幹事	板倉 明子	(連携会員)	国立研究開発法人物質・材料研究機構マテリアル基盤研究センター先端解析分野実働環境電子顕微鏡開発グループ NIMS 特別研究員
幹事	藤澤 彰英	(連携会員)	九州大学応用力学研究所教授
	伊藤 公平	(第三部会員)	慶應義塾長
	川村 光	(第三部会員)	神戸大学客員教授
	腰原 伸也	(第三部会員)	東京工業大学理学院教授
	疇地 宏	(連携会員)	大阪大学名誉教授
	家 泰弘	(連携会員)	中部大学総長
	石坂 香子	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター教授
	伊藤 公孝	(連携会員)	中部大学総長補佐・顧問・客員教授、核融合科学研究所フェロー・名誉教授
	植田 憲一	(連携会員)	電気通信大学特任教授
	香取 浩子	(連携会員)	東京農工大学大学院工学研究院教授
	金田 行雄	(連携会員)	名古屋大学特任教授
	川上 則雄	(連携会員)	京都大学名誉教授
	倉本 義夫	(連携会員)	東北大学名誉教授
	河野 公俊	(連携会員)	国立陽明交通大學教授 (National Yang Ming Chiao Tung University (NYCU), Professor)
	兒玉 了祐	(連携会員)	大阪大学レーザー科学研究所長
	五神 真	(連携会員)	国立研究開発法人理化学研究所理事長
	笹尾真実子	(連携会員)	東北大学名誉教授
	白濱 圭也	(連携会員)	慶應義塾大学理工学部物理学科教授
	新永 浩子	(連携会員)	鹿児島大学理工学域理学系理工学研究科 (理学系) 理学専攻物理・宇宙プログラム准教授
	高須 昌子	(連携会員)	東京薬科大学生命科学部教授
高安美佐子	(連携会員)	東京工業大学情報理工学院情報工学系知能情報コース教授	
瀧川 仁	(連携会員)	東京大学名誉教授	
田島 節子	(連携会員)	大阪大学名誉教授	
寺崎 一郎	(連携会員)	名古屋大学理学研究科教授	
所 裕子	(連携会員)	筑波大学大学院数理物質科学研究科教授	
鳥養 映子	(連携会員)	山梨大学名誉教授	
西野 吉則	(連携会員)	北海道大学電子科学研究所教授	
根本 香絵	(連携会員)	沖縄科学技術大学院大学量子情報科学・技術ユニット教授、大学共同利用機関法人情報・システム研究機構国立情報学研究所特任教授	
細越 裕子	(連携会員)	大阪公立大学理学研究科物理学専攻教授	

松尾由賀利	(連携会員)	法政大学理工学部教授
三間 圀興	(連携会員)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構敦賀総合研究開発センター客員研究員、大阪大学招聘教授、名誉教授
村尾 美緒	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科物理学専攻教授
吉田 善章	(連携会員)	大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所所長
笠 潤平	(連携会員)	香川大学教育学部教授
和田 元	(連携会員)	同志社大学理工学部教授

日本学術会議 物理学委員会 物性物理学・一般物理学分科会

プラズマサイエンス小委員会

委員長	吉田 善章	(連携会員)	大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所所長
副委員長	小澤 徹	(第三部会員)	早稲田大学理工学術院先進理工学部応用物理学科教授
幹事	藤澤 彰英	(連携会員)	九州大学応用力学研究所教授
幹事	坂本 隆一		大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所教授
	疇地 宏	(連携会員)	大阪大学名誉教授
	伊藤 公孝	(連携会員)	中部大学総長補佐・顧問・客員教授、核融合科学研究所フェロー・名誉教授
	犬竹 正明	(連携会員)	東北大学名誉教授
	木村 芳文	(連携会員)	名古屋大学大学院多元数理科学研究科特任教授
	兒玉 了祐	(連携会員)	大阪大学レーザー科学研究所長
	笹尾真実子	(連携会員)	東北大学名誉教授
	常田 佐久	(連携会員)	大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台台長
	福本 康秀	(連携会員)	九州大学マス・フォア・インダストリ研究所教授
	堀 勝	(連携会員)	名古屋大学低温プラズマ科学研究センター特任教授、名誉教授
	三間 圀興	(連携会員)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構敦賀総合研究開発センター客員研究員、大阪大学招聘教授、名誉教授
	山崎 泰規	(連携会員)	国立研究開発法人理化学研究所客員主管研究員
	和田 元	(連携会員)	同志社大学理工学部教授
	岩田 夏弥		大阪大学高等共創研究院准教授
	陰山 聡		神戸大学大学院システム情報学研究科教授
	金子 俊郎		東北大学大学院工学研究科教授
	坂上 貴之		京都大学理学研究科教授

本見解の作成にあたり、以下の職員が事務を担当した。

事務	松室 寛治	参事官 (審議第二担当) (令和4年7月まで)
	佐々木 亨	参事官 (審議第二担当) (令和4年8月から)

高橋 直也	参事官（審議第二担当）付参事官補佐（令和5年3月まで）
柳原 情子	参事官（審議第二担当）付参事官補佐（令和5年4月から）
大澤 祐騎	参事官（審議第二担当）付審議専門職付（令和4年3月まで）
稲元 祥吾	参事官（審議第二担当）付審議専門職付（令和4年4月から）
近藤 慈恩	参事官（審議第二担当）付審議専門職付（令和5年2月から）

要 旨

1 背景と目的

プラズマは、宇宙の普遍的な物質状態であるとともに、現代文明を支える色々な基幹技術に応用されている。ラングミュアにより命名されて以来、プラズマが持つ新奇な特性は、様々な目的から熱心に研究されてきた。プラズマに現れる多様な現象は、自然の深い原理に気付く鍵となり、それらの探求から一般物理学の概念や方法が数多く開発されてきた。また、プラズマ現象を記述する方程式の研究から多くの数学理論が発見されたことは、プラズマが知の泉であることを証明している。

一言でプラズマと言っても、その状態を特徴付ける温度や密度などのパラメタが取り得る値は 10 桁以上にも及ぶ膨大な広がりを持つ。私たちは、パラメタの値の領域に応じて特徴的な研究目的を見出し、革新技术の開発で世界と切磋琢磨してきた。例えば、超高温プラズマの領域では、核融合炉開発という目的の下で、磁場閉じ込めプラズマや、高強度レーザーによる高エネルギー密度プラズマの研究が展開され、日本は欧米と並んで最先端を切り開いてきた。低温プラズマの領域では、非平衡場において起こる多様な化学反応が関心の的である。半導体製造の鍵となるイオンエッチングは、日本で生み出された技術である。宇宙には、銀河、天体、磁気圏、電離層など様々な領域に幅広いパラメタのプラズマがあり、これらに生起する現象は、時には核融合プラズマあるいは反応性プラズマと共通性を持つ。

今後さらにプラズマサイエンスを大きく発展させ、私たちが世界をリードする成果を生み出すためには、その広大な分野全体を俯瞰する視点と、最先端研究を連携させる知の循環が必要な時代となっている。

本見解の目的は、プラズマサイエンスの多様な進化を幅広い学術の観点から俯瞰し、創発的なイノベーションに繋がる研究テーマを提示することで、この分野の将来像を具体化するとともに、一般物理学としての学際的な展開を促進する施策を提案することである。また、国際的な頭脳循環を生む学際連携のプラットフォームとなり得る学術研究基盤を我が国に構築することの重要性を指摘する。

2 見解の内容

本見解では、はじめにプラズマサイエンス研究の歴史と現状を簡潔にまとめた。プラズマの研究により、一般物理学の視点からはどのような自然の原理が解明されるのか、また、宇宙及び実験室でのプラズマ研究の具体的なテーマは何かについて整理した。実験室プラズマについては、核融合炉の実現を目指した高温プラズマ研究、ハイパワーレーザーによって生成された高エネルギー密度プラズマ、また極限的な機能を目指す反応性プラズマについて記述した。

プラズマサイエンスの各分野では、パラメタ（密度や温度）において 10 桁以上も異なる対象を扱っている。しかし、パラメタの違いを超えて、プラズマサイエンス全体に共通の研究テーマが見出される。本見解では、それら共通の研究テーマを 10 の具体的な課題

(八つの学術課題と技術革新としての二つの課題) としてまとめ、プラズマサイエンスが10年以内での解決を目指して今取り組むべき短期的課題と、今後30年程度の長期的な目標となる課題を提案した。課題のキーワードを列記すれば、遠非平衡系^{*1}、階層性、乱流と揺らぎ、突発性と崩壊現象、自律性とリズム、速度空間に展開する現象、反応場、界面と構造、核融合炉の実現、非平衡プラズマ技術^{*8}である。これらのキーワードには、プラズマに留まらない広い学際性が認められる。実際、プラズマサイエンスは多岐にわたる分野と関わり、波及効果を与えてきた総合科学である。本見解では、数学、複雑系科学、素粒子物理学、天体物理学、地球惑星科学、生物物理学、量子ビーム科学、材料科学・デバイス科学、触媒化学、計算・データ科学、医療科学、植物科学を代表的分野として、これらとプラズマサイエンスの学際的關係を論じた。

次に、本見解ではプラズマサイエンスの今後の発展について論じた。プラズマサイエンスの発展と幅広い学際化に向けて、分野全体を俯瞰する視点から課題を共有し、分野を横断する頭脳循環が起こる強力な学際連携ネットワークの構築が重要であることを提案した。特に、核融合分野においては、開発研究と学術研究の関係を正しく整理し、開発研究と互恵的な学術研究の在り方を明示することが重要である。開発の前線からのニーズと学術の多様な挑戦から生み出されるシーズが会う、より開かれた人と知の循環を実現するための拠点を構築する必要がある。

より良い社会の実現に向けて、プラズマサイエンスが果たすべき役割を述べた。プラズマサイエンスは、現代文明の基幹としての役割を果たしてきた。今後も、エネルギー、環境、パンデミックなど広く社会問題に寄与することが可能である。カーボンニュートラルの鍵を握る革新的技術として、核融合エネルギーの早期実用化への期待が世界的に高まっている。プラズマによる次世代半導体デバイスの加工技術の革新は、情報機器の性能向上に必須であることからDX^{*10}の鍵を握る。反応場としての様々な応用は、環境浄化をはじめパンデミックの抑制などにも貢献できるであろう。

最後に、基本的な学理として、多数の要素が結合した系の集団現象を理解し、制御可能性を探るというプラズマサイエンスの問題認識は、複雑さと多様性が増大する現実世界に向き合おうとする現代の諸科学と方向性をともにする。複雑さと多様性が増大する社会の未来を担う学問として、学際的かつ長期的なビジョンに基づいた多面的な展開がプラズマサイエンスの喫緊の課題である。

目 次

1	はじめに	1
2	プラズマサイエンス概説	2
(1)	一般物理学としてのプラズマ	2
(2)	宇宙のプラズマ	3
(3)	実験室のプラズマ	4
3	プラズマサイエンスの10の課題	6
(1)	プラズマサイエンスの八つの学術課題	6
①	遠非平衡系 ^{※1} システムとしてのプラズマ	6
②	階層性と階層結合の理解	6
③	プラズマの揺らぎと乱流	7
④	プラズマの突発性と崩壊現象	8
⑤	プラズマの自律性とリズム現象	8
⑥	速度空間観測法の開拓	8
⑦	反応（生成消滅の）場としてのプラズマ	9
⑧	プラズマの界面構造と機能	9
(2)	プラズマサイエンスの二つの革新的技術課題	10
①	核融合炉の実現	10
②	非平衡プラズマの活用と技術革新	11
4	プラズマサイエンスの学際性	12
5	プラズマサイエンスのさらなる発展のために	18
(1)	プラズマサイエンスの発展とより高度な学際化に向けて	18
(2)	より良い社会の実現に向けて	19
(3)	将来を担う人材育成を目指して	20
6	おわりに	22
	<用語の説明>	23
	<参考文献>	25
	<参考資料> 審議経過	27

1 はじめに

現代文明を特徴付ける主要な要素に、科学・技術があることは広く受け入れられているであろう。日本学術会議では、2010年に10～20年先の学術に対する長期展望をし[1]、その中で、理学・工学作業分科会においては、地球や資源等の有限性という制約の下で持続可能な社会を目指すためには、科学・技術が不可欠である認識の下に提言を取りまとめた[2]。続いて、2011年には理学・工学分野における科学・夢ロードマップを策定した[3]。同時代に、プラズマ・核融合分野では核融合実験炉 ITER^{*11}の建設が決定され、分野における学術研究の展望をまとめている[4]。それから10年以上が経った現在、最先端の核融合実験では熱核融合反応による顕著な出力が確認されるようになり、ITERの建設も大詰めを迎えている。プラズマ応用分野では、様々な他分野との連携研究によって革新的な産業技術が生み出されている。このように、大きく進展しつつあるプラズマサイエンスを幅広く発展させ、私たちが世界をリードするためには、その広大な分野全体を俯瞰する視点と、異分野との融合によって新しい学術を生み出す戦略が必要である。

本見解の目的は、プラズマサイエンスの多様な進化を幅広い学術の観点から俯瞰し、分野間の連携を深めると同時に、創発的なイノベーションに繋がる研究テーマを提示することで、この分野の将来像を具体化するとともに、自然界の様々な現象を理解し、説明するための一般原理を構築する一般物理学としての学際的な展開を促進する施策を提案することである。また、国際的な頭脳循環を生む学際連携のプラットフォームとなり得る学術研究基盤を我が国に構築することの重要性を指摘する。なお、本見解で展望するプラズマサイエンスの中から、ある領域に特化した提言や見解なども様々な場で発出されることもあり得るが、本見解はプラズマサイエンス全体に俯瞰的な学問論を提示することを目的としていることを付言しておく。

2 プラズマサイエンス概説

物質の温度が高くなると、電子が原子核から離れて、電子と正イオンに分かれることを電離現象といい、電離によって生じた電子と正イオンを含む気体をプラズマと呼んでいる。プラズマ中の電子とイオンは、自由に動き回りながらも、クーロン力によって相互に関係し合うために、中性気体には見られない多様な現象が発現する。プラズマは、ラングミュアによって名付けられ、デバイ遮蔽やプラズマ振動などの特徴的な性質が特定された。近年では、科学技術の発展により、電子のみ、あるいはイオンのみの系、さらには陽電子や反陽子などの反物質を含む系や、クォークとグルオンの集団にも物理学の関心が及び、プラズマと呼ばれる対象は広がっている。プラズマサイエンスは、そうした「プラズマを扱う物理学を中心とした一連の科学分野の総体」を指すこととする。本章では、自然界と実験室におけるプラズマ研究を広く学術的見地から概観する。

(1) 一般物理学としてのプラズマ

物理学は、現実世界の現象を数学的に定式化することによって、対象の個別性を超越する一般的な法則を明らかにし、様々な科学の「パラダイム」を作る役割を担ってきた。例えば、惑星の運動に関する研究から生まれたニュートンの「運動方程式」は、あらゆる動的現象（生態系、経済、感染症流行などの変動）を微分方程式で記述するという普遍的な方法論となった。振り子の観測から生まれた調和振動の概念は、量子力学の不確定性原理、場の理論で現れる消滅・生成演算子の働きに振り子のイメージを与えている。また、連続体における応力の概念は、電磁力を表現するものとして場の概念を産み、電磁場のエネルギー運動量テンソルに弾性体のイメージを与えている。気体分子の運動論から生まれた「エントロピー」は、多数の要素で構成されるマクロ系に実現する状態の蓋然性をはかる確率論的な量であり、統計物理学の基本概念としてのみならず、情報、生命、環境など様々なマクロ系の記述に応用されている。

このように、弾性体、流体などの物体さらにはその集合体である天体などに現れる様々な現象の研究から発見された基本的な概念や法則は、具体的な対象物を超越して、自然界のみならず人工物や社会などにも応用される一般的な知となった。そのような普遍的な知の創造を担う科学として「一般物理学」が果たすべき役割は今後も一層重要である。一般物理学の具体的なテーマを提供する研究対象として、プラズマは極めて高いポテンシャルを持っている。宇宙の普遍的な物質状態であるプラズマはまさに現象の宝庫である。プラズマを構成する粒子の運動は、断熱不変量（スケール階層性）やカオスといった力学の基本概念の研究に対して多くの貢献をしてきた。場の理論の対象としても、プラズマに生起する多様な波動現象の研究を通じて、多くの重要な発見が生まれている。非線形性が生み出す秩序を表現するソリトンに関しては、我が国の研究者の貢献が大きい。谷内俊彌によって導入された逡減摂動法[5]、代数的秩序を解明する糸口を与えた広田良吾の直接法による解の構成[6]、佐藤幹夫たち京都学派によって開拓された擬微分作用素による対称性の理論[7]はいずれも革命的である。ソリトンは、分散効果と非線形効果のバランスによって生み出されるパルス状の波であり、

プラズマ中に励起されるイオン音波において、プラズマの電位を計測することで、その動態を精密に観測することができる。池地弘行たちによるプラズマ実験は、複数のソリトンが衝突するとき粒子的な振る舞いをすることを実験的に示し、理論の実証に多くの貢献をした。

実空間（配位空間）だけでなく速度空間における構造が重要となるのもプラズマの特徴である。速度空間で起こる位相混合（ランダウ（Landau）減衰）は散逸によらない減衰のメカニズムとして、プラズマ波の研究によって発見された[8]。乱流は流体力学における中心テーマであるが、プラズマにおける乱流は、粒子運動が重要となるマイクロなスケールと流体としての振る舞いが重要なマクロスケールにおける二つの階層が不可分であることが、問題をより難しく、また興味深いものになっている。プラズマ分野では、乱流によるエネルギー輸送の解明と制御について特に熱心な研究が進められ、非平衡系の構造形成とダイナミクスの物理学としても普遍的な学術課題である。実験物理学の観点からは、荷電粒子多体系であるプラズマは、荷電粒子と電磁場（光を含む）との相互作用を計測や制御に利用できることが大きな利点であり、レーザーやマイクロ波、分光、イメージングなどの技術革新と歩みをともした発展が期待できる。

(2) 宇宙のプラズマ

未知の物質であるダークマターを除けば、この宇宙に存在する物質のほとんどはプラズマ状態である。地球上で自然状態のプラズマを見る機会は少ないが、地球全体は部分電離状態のプラズマ層（電離層）に覆われている。そして、電離層のさらに上空はほぼすべてプラズマ状態である。我々が、光あるいは電磁波によって観測できる多くの天体现象はプラズマ現象であり、宇宙を理解するためにはプラズマの理解が礎となる必要がある。まず、我々に多大な恩恵をもたらしている太陽自体が巨大なプラズマの塊である。そこで起こる突発的なフレアなどのエネルギー解放現象は、まさにプラズマ現象であり、「ようこう」や「ひので」などの観測衛星によってその理解が深まってきている。また、地球は太陽から吹き出す太陽風プラズマに常にさらされており、オーロラの原因となっている。オーロラは、地球磁気圏の中で起こるプラズマ現象として研究されてきた。太陽系、恒星間空間、さらには銀河間空間もプラズマで満たされている。さらに、ブラックホールや中性子星などの周りの重力場によって引き起こされる宇宙ジェットなどの高エネルギー天体现象にもプラズマが関わっている。ジェットに粒子を供給する降着円盤の中では、プラズマ乱流によって生じる角運動量の引き抜きが粒子の降着を引き起こしている。また、宇宙ジェットや超新星爆発に伴って生じるプラズマ中の無衝突衝撃波は、粒子を高速にまで加速し、超高エネルギーの宇宙線が生まれる原因だと考えられている。原始星の周りにも双極分子流や光学的ジェットの噴出などのプラズマ現象が観測される。パルサー（中性子星）の磁気圏の構造も電子陽電子対の生成過程を含むプラズマが関わる興味深い課題である。中性子星の連星が融合して起こるキロノバという爆発は、重元素が合成される場として注目を集めている。その観測データを解釈するためにも、非平衡プラズマ中の原子物理の

知見が必要となる。我々に身近な自然から原始星やブラックホールまで、宇宙にはプラズマとプラズマが関与する現象が満ちている。

(3) 実験室のプラズマ

実験室では、様々なプラズマが生成され、研究されてきた。超高温プラズマを必要とする核融合エネルギー開発と、低温の反応性プラズマを用いる半導体などの加工技術が、プラズマ研究に強いインセンティブを与えている。核融合を目指したプラズマ研究は、磁場によってプラズマを閉じ込める磁場閉じ込め核融合研究と、ハイパワーレーザーを用いた慣性核融合研究に大別され、それぞれがカッティングエッジとなって科学・技術の最先端を切り開いている。

磁場閉じ込め核融合研究は、様々な磁場配位を用いた装置の性能比較を行う研究を経て、ITER によって核燃焼を実証する段階に近づいている。この分野で発見されたプラズマの興味深い性質の例として、乱流状態に関する分岐現象がある。プラズマ乱流は、高温のプラズマ中心部から高流束でエネルギーを失わせる原因となるが、プラズマへの加熱入力などがある閾値を超えると、乱流が抑制されてエネルギー閉じ込めが劇的に改善するHモードと呼ばれる状態へ遷移することが実験的に発見された[9]。プラズマ境界近傍における乱流の構造変化について、実験に加えて、理論・シミュレーション研究が多角的に行われてきた。磁場閉じ込めプラズマは常に乱流状態にあるが、様々なスケールの渦運動に帯状流（乱流の非線形現象によって自己発生する大きなスケールの流れであり、例えば、木星などの大気中にも見られる現象）などのマクロな流れが非線形に結合する多様な流れの階層構造があることが明らかになっている。また、ITER による核燃焼プラズマ実験が行われる時代を迎えると、核融合反応で生成される α 粒子（高エネルギーのヘリウム原子核）の影響が重要な研究テーマになってくる。既に、高エネルギーの α 粒子が原因となる不安定性などについて多くの理論研究があり、ビーム入射による模擬実験も行われているが、本格的な実験が始まると、核燃焼プラズマの自律性が興味深い研究課題となる。

慣性核融合に端を発するレーザープラズマの研究では、高エネルギー密度科学としての研究が世界的に進展している[10]。生成される高温・高密度のプラズマは、星の内部などで見られる特異な原子分子構造や放射・粒子輸送特性を示し、新しい物質材料や光学デバイス、光量子ビーム源など、イノベーションの源泉としても注目されている。また、多様な非線形現象が生み出される相対論的高強度レーザー生成プラズマの研究も発展している[11]。この領域では、強い非平衡性を持つレーザー生成プラズマは強電磁場を伴う自律構造を形成し、その内部で高エネルギー粒子加速や高輝度X線・ γ 線放射が起こる。その過程の解明には、素過程から運動論的相互作用、流体運動まで多階層の理解が不可欠である。また、固体からプラズマへと高速遷移する過程にある複雑状態は重相状態（あるいはwarm dense matter）と呼ばれ、この状態を介する相転移や破壊現象は惑星科学からレーザー加工まで幅広い分野に関係する。そのほか、高エネルギー密度プラズマでは放射による輸送がその構造形成やダイナミクスに重要

な役割を果たす。高エネルギー密度プラズマは、ブラックホールや大質量星周囲の流体に関わる放射流体力学 (radiation hydrodynamics) の実験室での研究対象である。

多彩な化学反応を引き起こす反応性プラズマは、多岐にわたる領域に応用されてきた。日本の細川直吉たちがもたらした反応性イオンエッチングの発明 (1974 年) が半導体製造に与えた影響は特筆すべきであろう [12]。その後、1980 年にはプラズマ重合やプラズマ化学気相堆積を用いたプラズマプロセスが始まり、その後、従来のウェットプロセスに代わり、ドライプロセスとしてプラズマプロセスが情報通信デバイス半導体製造の主流となっている。現在では、大規模集積回路は数 nm サイズの揺らぎを制御して作られ、膨大な時間、資源、労力、コストをかけており、この問題を解決しナノスケールの制御を実現するためには、反応性プラズマの速度空間 (velocity space) をも考慮した揺らぎを制御する、新しいパラダイムが必要となってきた。2000 年代になると、電位形成、フロー速度シア (せん断を生じる流れ速度の勾配)、電子温度勾配などの自律形成の物理が研究され、プラズマと固体・液体との界面での化学反応場を利用してナノ粒子、ナノカーボン、ナノバイオ複合物質などの新機能性物質を生成する材料科学の研究などに重要な役割を果たしている。一方、2000 年代後半から、反応性プラズマは医療、農業、生命科学という多様な方向に向かって発展を始め、生体とのプラズマ界面 (あるいはシース^{※3}領域) もラジカルやイオンが液体や生物に入ったときの現象として、普遍的に非平衡界面反応場の問題として捉えることができる。

3 プラズマサイエンスの10の課題

プラズマサイエンスの未来像は、2011年の「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ」（日本学術会議 第三部）にも記述されている[3]。ここでは、プラズマサイエンスが持つ「自然観の構築」と「技術革新」の二つの側面に触れている。前者として、プラズマが持つ非平衡状態にある物理的対象のダイナミクスの学理の探究、後者として、非平衡系が持つ技術革新に言及されている。その後10年が過ぎ、実現されたもの、将来に委ねられているものがあるが、ここでは、現時点におけるプラズマサイエンスが切り拓く自然認識に関わる八つの学術課題と技術革新としての二つの課題としてまとめ、それぞれ簡単に記述する。

(1) プラズマサイエンスの八つの学術課題

プラズマサイエンスは、純粋な学術的動機のみならず、多様な革新的技術応用を目的として発展してきた。その中で生まれてきた問題は、プラズマ研究領域に共通するのみならず、学際的かつ普遍的な学術的テーマに分節化される。ここでは、それらのテーマを八つの学術課題として示す。

① 遠非平衡系^{*1}システムとしてのプラズマ

平衡の熱統計力学は、永久機関の成否、熱機関の効率の問題に始まり、黒体放射、固体比熱の問題解決を経て確固たる体系が既に完成しているが、自然界にある対象は、時間的スケールにもよるが基本的に開放系である。それらが如何に発展していくのか、それを明らかにする普遍的な物理学的な方法はまだ存在していない。最小エントロピー生成の原理など、非平衡系を記述する一般原理が提案されているが、依然として非平衡系システムはそれぞれの対象に応じ各論的に議論されている。一方、自然界、実験室に見られるプラズマは、本質的に強い非平衡系（遠非平衡系）として存在しており、さらに電磁場を生み出す荷電粒子の集合体である。その構造やダイナミクスを決定する基本定数（拡散係数、粘性、伝導率など）も自律的に決定され、位相（速度）空間の非平衡性もその構造形成と機能発現に関与するより根源的な長期研究課題であり、それぞれのプラズマの研究は、非平衡系の一般原理の探究に寄与する短期的課題である。さらに、究極の物質の探究と相補的に、ダイナミックに多様な形態に変容し発展してゆくプラズマの研究は「流転する自然」を理解するパラダイムの創成に結び付いた新しい物理学の挑戦的な長期的課題であろう。

② 階層性と階層結合の理解

プラズマは様々な特徴的スケールを持つ。空間的には、デバイ長、電子及びイオンそれぞれのジャイロ半径や慣性長（スキン長）、様々な波の波長、温度や密度、あるいは磁場が変化する空間スケールなど、時間的にはプラズマ周波数、サイクロトロン周波数、粒子衝突周波数、様々な波の周波数、閉じ込め時間、プラズマ自体の存続時間などの時間スケールなどである。例えば ITER のような高温プラズマではマイクロ

な電子ラーマ運動の時空間スケール ($10 \mu\text{m}$, 10^{-11} s) から、マクロなプラズマ自体の大きさや閉じ込め時間 (1 m , 1 s) にわたる。「階層性」とは、それぞれの時空間スケールごとに支配的な物理メカニズムが異なり、そのために異なる運動様式が現れることを言う。さらに、あるスケールで起こる運動にほかのスケールで起きている運動が影響を与える「階層結合」が起こり、現象を複雑にする。ポンドロモーティブ力^{*9}やパラメトリック励起^{*6}などの非線形効果がよく知られた例である。大きなスケールの集団運動を「流れ」と考えると、非一様な流れの中で起こる小さなスケールの運動（揺らぎ）には、エネルギーや運動量の保存が破られるような効果が現れ、数学的にも興味深い。近年の磁場閉じ込めプラズマ研究では、ミクロスケールの乱流がより大きなスケールの揺らぎと結び付き、マルチスケールの構造を維持していることが明らかになっており、広いダイナミックレンジ（電子スケールから装置スケールに至る。先の例の ITER では空間スケールが 10^5 に及ぶ）を持つ計測法の開発によって階層性の全貌が明らかにされる必要がある。レーザープラズマの分野でも、エネルギーがプラズマ内に侵入する際、電離フロントや熱や衝撃波、磁場が形成され、集団的、統計的、準流体的な多階層的相互作用が起こる。理論では、高次元の非線形力学系を研究する方法論として、階層性を位相空間の葉層構造として定式化する方法や、不変量に注目してトポロジーを特徴付ける方法が開発されつつある。今後の進展によって数理科学に大きな寄与が期待される。

計算機シミュレーションでは、ジャイロ運動論シミュレーションなどの手法により、ミクロスケールでのダイナミクスを計算することで、乱流輸送などのマクロスケール現象の一部を再現することが可能となりつつある。ミクロスケールシミュレーションとマクロスケールシミュレーションを連結して計算する階層連結シミュレーション手法の一層の進化によって、階層性の理解が急速に進むことが期待される。

③ プラズマの揺らぎと乱流

遠非平衡状態にあるプラズマでは、揺らぎの大きさが定常値と同程度になることもあり、揺らぎがその構造形成と機能に果たす役割は極めて大きい[13]。例えば、磁場閉じ込めプラズマでは、粒子、運動量、エネルギーの輸送は揺らぎ、さらには揺らぎが強非線形的に結び付きランダム化した乱流によって決定されることが研究の黎明期より知られている。乱流の第一原理的な取り扱いが難しいため、磁場閉じ込めプラズマの閉じ込めなどの性質は経験則によって予測されているのが現状である。プラズマの乱流では、アイソトープ効果（イオンの質量効果が電子とイオンが結合した乱流の特性に影響すること）、非局所輸送、パワーデグラデーション^{*5}など、通常の流体の乱流には無い多数の問題が残されている。プラズマ乱流が核融合炉心の閉じ込め特性に与える影響を理解することは、核融合炉開発のための鍵となることから、短期的に解決すべき喫緊の課題である。また、プラズマ応用の分野でも、揺らぎの制御はサブナノメータの高度なプラズマプロセスを達成するための鍵である。例えば、界面での揺らぎパターンを液相に転写し、ナノ粒子合成位置を制御することが試行されてい

るが、ここでは、プラズマ界面の揺らぎ、電場による粒子の制御が重要な課題となっている。上記のようなプラズマ応用技術のイノベーションにとって、プラズマと物質とのナノ界面での揺らぎの制御は、短期的に解決すべき課題の一つである。他方、非線形物理学の大きな問題として、プラズマ乱流における構造形成や機能発現機構などの普遍的な理解を確立することは、長期的かつ学際的に取り組むべき課題であろう。

④ プラズマの突発性と崩壊現象

非線形性の強い系は決定論的方程式で記述されていても未来は予言できない。例えば、導体に電圧を印加して電流を流すときのように、定常的にエネルギーの散逸がある非平衡な定常状態を記述するような線形応答は、久保公式によって定式化されているが、非線形性の強いプラズマ状態において外力と応答の関係は一意的に決定することができない。そのため、非線形システムとしてのプラズマ応答は、普遍性のある長期的課題であろう[14]。例えば、強いレーザーとプラズマの相互作用は非線形応答の典型である。また、磁場閉じ込めプラズマでは、Hモード遷移などの突発現象、ディスプレイ^{*4}などの崩壊現象が見られ、突発現象や崩壊現象の予測、蓋然的なプラズマの振る舞いの定式化は、地震などの予測などにも関連した長期的課題である。一方、最近では、機械学習によって複雑な非線形応答を推定する理解無しの科学が進んでいる。また、速度空間も含む構造把握が求められる上、極端環境の中にある高温プラズマなどでは、計測プロセスも含めた実験の全体を計算機の中に再現し、そのデジタルコピーを通じて現実世界を相補的に理解するアプローチである統合診断 (Synthetic Diagnostics) という機械学習との親和性が高い方法が取られ始めている。プラズマの突発性や崩壊現象の機械学習によるブラックボックス的理解を第一原理的理解とどのように結び付けるかは、短期的課題であろう。

⑤ プラズマの自律性とリズム現象

磁場閉じ込めの研究から、ホメオスタシス (生体恒常性) がプラズマの構造に備わっていることが明らかになっている。例えば、環状磁場に閉じ込められた高温プラズマは、装置によらず温度や密度の分布が同型であることが研究当初より認められ、その分布の同型性とホメオスタシスが確認されている。また、プラズマが持つ非線形性や非平衡性は、自律的な擬似周期的振動現象 (例えば、磁場で閉じ込められているプラズマのエネルギーや粒子が間欠的に吐き出される現象) の起源となっている。それぞれのモードや擬似周期的振動現象などの起源を説明することは、短期的課題であろう。一方、ホメオスタシスやリズムは生命現象に備わる特徴の一つである。プラズマの恒常性や自律的振動現象を、荷電粒子から構成される最も基本的な階層に現れる生命的現象として、上位の階層にある生命における恒常性やリズム現象へ知見を与えることも可能であろう。

⑥ 速度空間観測法の開拓

プラズマが通常の中性流体と異なる点の一つに、速度空間の構造がその性質に大きく影響することが挙げられる。ランダウ減衰が最も知られた例であるが、現在では、速度空間の歪みがプラズマの流れを生み出すことも理論的に示唆されているほか、高エネルギー粒子の存在が不安定性を励起し自律的な振動を生み出すことも実験において観測されている。この速度空間の果たす役割を実験的に知るための観測手段として、プラズマの局所的な発光のドップラー効果を用いているが、不安定性及びその結果生じる揺らぎや乱流に果たす役割を十分な精度、時空間分解能で観測する手段は将来に委ねられている。その計測技術の開発は、プラズマの研究が一般物理学に果たす上で短期的課題であろう。分光計測の進歩などによる速度空間の直接観測など、実験技術の革新は、非平衡系のエントロピー原理に実験的に迫る研究の入り口に到達したと言える。非平衡プラズマの構造形成原理をエントロピーの実測に基づいて定式化することは、長期的課題でもあろう。

⑦ 反応（生成消滅の）場としてのプラズマ

プラズマは、反応場としても捉えることができる。プラズマ中では、電離、再結合、化学反応や核反応を通してその構成粒子の生成消滅を伴っている。この非線形過程が、プラズマの構造形成や機能発現をより複雑なものにする。低温プラズマでは、反応性が高い短寿命の活性種（ラジカル）が低温大気圧下で利用可能となり、医療科学、植物科学、生命科学分野との融合が急速に発展している。この分野では、プラズマが生成条件・外部環境等に依存するため、気相中及び液相バルク域の中で生成される多種の活性種の機能の理解と制御が重要である。また、近年、先進レーザーは加工に用いられているが、この点でも、レーザーとプラズマ、材料の複雑な反応など、それぞれの反応場としてのプラズマの理解は短期的課題であろう。一方、核反応が生じている燃焼プラズマは、物理の新領域である。現在は外部加熱によって維持されるプラズマは、核融合反応が生むエネルギーによって維持されるようになる。また、生成された α 粒子は大きな軌道を描きプラズマの外に逃げ出すならば極めて大きな電場が生成される可能性がある。電場が構造形成に多大な影響を及ぼすことは、現代の常識である。燃焼プラズマは全く新しい研究対象であり、エネルギー生成を伴う燃焼プラズマの統合的な理解は長期的課題であろう。

⑧ プラズマの界面構造と機能

プラズマの界面は構造を持っている。固体は、自身の境界が明確である。容器に封じ込められている場合、通常の液体や気体は均一であり、境界を明瞭に定義することができる。しかし、プラズマでは、オーロラなどの自然界のプラズマから容易にイメージされるように、境界が明確ではない場合も多い。プラズマ容器に封じ込められている場合でさえ、シース^{※3}と呼ばれる界面が存在し構造を持つ。磁場に閉じ込められている場合もプラズマと真空容器との界面（Scrape-off-layer）が存在している。この界面は、真空容器の壁と相互作用し、壁の状態がバルクのプラズマの性質にも大

大きく影響することが経験的に知られている。磁場閉じ込めプラズマが自発的に形成する輸送障壁も界面として捉えることができる。また、レーザーとプラズマの相互作用の場合も界面として存在するプラズマとレーザー相互作用がプラズマのその後の発展に多大な影響を与える。また、反応性プラズマにおいては、プラズマと固体との界面を精密に制御するALD（原子層堆積）・ALE（原子層エッチング）技術の確立が、次世代半導体プラズマプロセスにおける短期的課題である。一方、プラズマと液体との界面は、対向相の形状が変化するという特徴を持った界面であり、わずかな液体の形状変化が界面反応を大きく変化させ、液相バルク領域の反応生成物に非線形的に影響する。このプロセスの解明が、プラズマ照射液体中の反応生成物を完全に制御するための不可欠の知見となっている。個々のプラズマでの界面形成機構などは短期的課題であり、プラズマの界面の統一的な取り扱いは長期的課題であろう。

(2) プラズマサイエンスの二つの革新的技術課題

プラズマサイエンスのもたらす二つの革新的技術課題について記述する。この二つの技術革新の基礎となる学理は、先に示したプラズマサイエンスの学術課題に還元され、その実現はそれらの知の統合により初めて可能になるものであろう。

① 核融合炉の実現

核融合炉は、プラズマサイエンスが関わる最も挑戦的な革新技術であり、実現すれば人類史上の偉業となるであろう。現在、磁場閉じ込め核融合とレーザーを用いた慣性核融合を中心にその開発研究が進められているが、ほかにもミュオン触媒核融合などの可能性も研究されている。磁場閉じ込め核融合の研究では、欧州の Joint European Torus (JET) で 1997 年に DT 燃焼実験が行われ、パルス的には $Q^{*12}=0.67$ が得られている。また、おおよそ 5 秒間にわたり 4.5 MW の核融合出力を維持し、22 MJ の核融合エネルギーを発生した。2021 年には、2 回目の DT 実験キャンペーンを行い、59 MJ の核融合エネルギーを発生している [15]。核融合炉の科学的・技術的実現性の実証、 $Q=10$ の達成を目標とした ITER の建設が国際協力で行われており、現在 80% 程度の建設工程が完了している。さらに、その支援と補完のため、日欧共同で JT-60SA プロジェクトも実施されている。慣性核融合の分野では、米国ローレンスリバモア国立研究所の国立点火施設 National Ignition Facility (NIF) におけるレーザー核融合実験で、2021 年に入力エネルギー 1.9 MJ の 70% に達する 1.35 MJ の核融合エネルギー出力が得られている [16]。さらに、2022 年には、レーザー入力 2.05 MJ の 1.5 倍の核融合エネルギー出力 3.15 MJ を得ており、レーザー核融合によりエネルギーを得ることを実証できた意義は大きい。核融合炉の実現までには、幾つもの未解決な問題が残されており、それらを克服するためには、他分野と連携できる一般的な問題として定式化し（必ずしも数式で表現するという意味ではなく、客観的に内容が共有できる一般性のある表現にするという意味）、学際的なネットワークを構築する戦略が必要である。例えば、炉心プラズマが一挙に崩壊する「ディスラプション」と呼

ばれる突発的不安定性が核融合炉の定常運転を妨げる障害となっているが、これは、太陽表面で起こる「フレア」という爆発現象と共通性を持つ。その基本的なメカニズムは磁力線の繋ぎ変えだと考えられているが、これはさらに流体中の渦の構造変化と共通性を持つ。このように、基本原理に注目することで、現象論的な研究課題は一般性を持つ学際的なテーマとして定式化される。このような分野を超えた連携によるシナジー効果によって、核融合炉の実現性を高める学術的な貢献が可能になるであろう。

② 非平衡プラズマの活用と技術革新

非平衡プラズマの活用は未開の領域である。レーザープラズマでは、平衡過程では達し得ない 1000 万気圧ほどの極限的高圧状態の実現によるスーパーダイヤモンドなどの新物質の創成が可能である。既に、金属シリコン創成とその取り出しに成功する等の成果を挙げており、金属水素などの実現もターゲットである。また、大電流アーク等でも実現が可能な重相状態（固体、液体、気体、プラズマが入り交じった、あるいは層状に形作られた状態）は粗視化して一つの状態とすると特有の物性を示し、その状態方程式や物性は、惑星内部の物質の状態とも関連した興味深い研究対象である。また、宇宙船が大気圏に再突入するときの機体表面や核融合炉壁の熱負荷下にある状態は重相状態であり、その制御は重要な応用の一つである。一方、プロセスに要する時間が温度で決まってしまう平衡反応に対して、非平衡（プロセス）プラズマの機能は、電子温度を制御することで極めて高い効率が達成できる。効率の良い多重励起型太陽電池に結び付くナノ粒子生成法や、高速かつ省電力の酸窒化物半導体材料の高品質結晶生成などのプラズマプロセスの実現が期待できる。プラズマを利用してナノ分野とバイオ分野を融合し、新機能性物質を作ろうという試みが鋭意進められている。ナノ・バイオプラズマ研究は、世界を先導できる次世代科学技術創出に必須な世界最先端の研究領域であり、そのために非平衡プラズマの理解が不可欠である。

4 プラズマサイエンスの学際性

プラズマサイエンスは、多岐にわたる分野と関わり波及効果を与えてきた総合科学である。磁場中でのプラズマの非線形な振る舞い、光とプラズマの非線形相互作用及びプラズマと生命体を含む物質との相互作用など現代科学の最先端を扱う領域である。プラズマサイエンスが注目するのは、多数の要素が協同して起こす集団現象であり、現実世界の在り様を理解するという問題意識を宇宙・天体、大気・海洋、生命、社会などの科学と共有している（図1）。集団現象の物理は確率分布関数を道具概念として構築されるが、それを実験的に計測し理論と検証した例は稀有である。プラズマは、構成要素が荷電粒子であることから、光などの電磁波を用いた分布関数の計測が可能であり、速度空間の非平衡性が引き起こす集団現象の物理に迫ることが可能である。構造や運動の階層性、揺らぎと秩序運動の関係、突発現象の非線形力学的特徴付けなど、集団現象の科学における数学的構造の共通性を介したプラズマサイエンスと他分野との学際的な研究連携によって、基本概念や方法論のイノベーションが生まれるであろう。

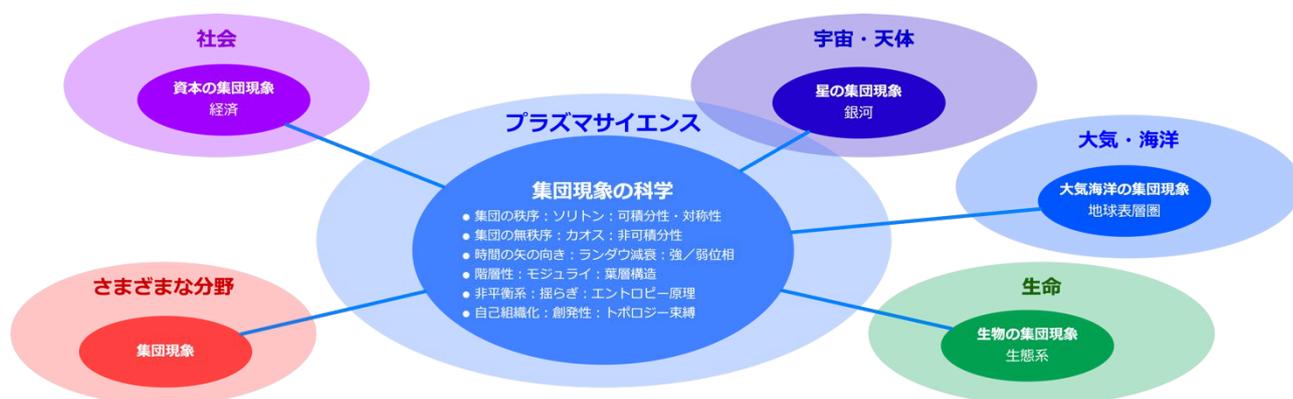


図1 集団現象を共通テーマとする学際的な連携におけるプラズマサイエンスの貢献
(出典) 令和4年検討結果より小委員会で作成

【数学】

プラズマは、流体とともに、非線形の偏微分方程式や積分方程式を基礎方程式としており、無限次元力学系の最大かつ最も難しい応用問題を提供している。例えば、衝撃波や孤立波（ソリトン）の理解はバーガース（Burgers）方程式、コルテベグ・ドゥフリース（Korteweg-de Vries）方程式、カドムツェフ・ペトヴィアシュヴィリ（Kadomtsev-Petviashvili）方程式をモデルとして深化した。円環上や全空間におけるザハロフ（Zakharov）方程式の数学解析の方法論がプラズマの基礎理論に導入され、フーリエ解析、調和解析という分野に大革命を起こしたことがジャン・ブルガン（Jean Bourgain）のフィールズ賞[17]に結び付いた。さらに、速度空間において精密にした方法論の構築はテレンス・タオ（Terence Tao）のフィールズ賞受賞理由となっている。プラズマサイエンスの課題を解決する上で数学との連携が欠かせないものとして、プラズマの崩壊現象の数学的解明がある。そのモデル方程式としてザハロフ方程式を使う試みがある。しかし、その

本質的理解は難しく、崩壊現象の数学的解明には到達していない。そのほか、プラズマ運動の無限次元力学系としての理解は数学的にも極めて興味深い。ランダウ減衰は、ヴラゾフ (Vlasov) 方程式が時間反転対称性を持つにもかかわらず、その初期値問題の解には「減衰」という時間の矢の向きの非対称性が生じるという、集団現象の深い原理を示す現象である。これが関数空間の無限次元性に起因する「位相混合」によって起こることを、非線形理論の枠組みで明確にしたセドリック・ヴィラーニ (Cédric Villani) の研究もフィールズ賞を受けている。プラズマ物理の特徴の一つとして、スケール階層性がある。スケールの選び方により、数学的に全く異なる偏微分方程式系がモデル方程式として登場するのである。これは、特異摂動項のためである。複雑で興味深い課題がプラズマの数学的理解の全体像の中にひしめいており、難問の宝庫であるプラズマサイエンスは数学的イノベーションの豊饒な母胎となっている。

プラズマの非線形ダイナミクスを記述する非線形方程式は、特別な条件の場合を除いて、一般的に解を求めることはできない。これは解が無いという意味ではなく、解の振る舞いが複雑であり、数学的な秩序を見つけないという意味である。そのような対象に対しても、数学は理論的なアプローチの仕方を見出そうとする。方程式の構造から、その解が持つべき対称性や自己相似性などの幾何学的構造を導出することができると、プラズマの安定性やスケーリング則、あるいは特異性や統計性などの予測と制御について知見を得ることができる。そのために開発される群論、数値解析、漸近解析、表現論などにおける先端的な理論は、プラズマに限らない、様々な対象に応用できる可能性がある。数学による課題の抽象化はプラズマサイエンスと他分野を学際的につなぐ重要な架け橋となっている。

【複雑系科学】

気象学の簡略化モデルとして提案されたローレンツ (Lorenz) 方程式は、カオス理論の原動力となり、その研究を通じて、比較的単純な方程式から複雑で予測が難しい変動が生み出される (逆に見れば、複雑な現象の根底には単純な法則があるかもしれない) という「複雑性」に関するパラダイム転換が起こった[18]。複雑系の科学が喚起しているのは、「非線形」という、数学にとっては深い森とも言うべき未開拓領域への挑戦である。プラズマにおける、多数の粒子間の相互作用からなる集団現象が示す多様な構造形成は、量子のスケールから宇宙のスケールまで広く見られる普遍的な非線形現象である。さらに視野を広げると、個人と社会の関わりにも共通項が見出せ、秩序、自己組織化、カオスなどは広く社会科学や経済学などの分野にも通底する。プラズマ物理学では、制御された実験を通して現象を理解し、理論の検証を行うことが可能である。社会現象のように実験が難しい現象を理解する上で、またその予測を行う上で、プラズマサイエンスとの学際的な交流が新たな視点をもたらすと期待される。

【素粒子物理学】

自然の基本的構造を探求する素粒子物理学の分野においては、主にエネルギーを上げることで極微世界の理解を深化させてきた。一方、CPT 対称性など自然の基本的対称性や、反物質-物質間の重力相互作用、物質/反物質と暗黒物質の相互作用等の研究では、高エネルギー物理学とは相補的な、低エネルギー超高精度研究が進展している。その際、観測粒子の温度は測定精度に直接影響するため、粒子をどこまで、かつ、迅速に冷却できるかが大きな課題となっている。既に単一の陽子や反陽子を、レーザー冷却されたイオンからなる非中性プラズマで冷却する研究が進行中である。今後、極低温化や多粒子系の効率的冷却、反水素等の中性反物質の極低温大量生成へと発展させるためには、プラズマ分野との緊密な連携が不可欠となっている。

【天体物理】

天体物理はプラズマ、特に核融合と昔から密接に連携してきた。太陽物理に関わりダイナモ、フレア、コロナ加熱、より一般的に乱流、ショック、リコネクション、高エネルギー天体（降着円盤、宇宙ジェット）などの共通の現象がある。また、計測においては、プラズマ分野で開発されたゼーマン効果や量子力学的ハンレ（Hanle）効果^{*7}を使った計測を用い、天体における新しい磁場計測法が生まれている。そのほか、プラズマサイエンスの分野で系統的に蓄積された吸収係数や断面積のデータなどの様々な原子分子データ、例えば、特に鉄の 10 から 26 階電離までのデータが日本の太陽研究の基礎データとして役立っているほか、プラズマ分野で開発されたコードが、中性子星合体のプロセスによる金などの超重元素の生成過程の解明に役立っている。また、レーザー生成プラズマ中で放射されるガンマ線により対生成が十分に起これば、宇宙のコンパクト天体周辺などに見られる電子-陽電子プラズマを作り出すことが期待できる[19]。また、今後核融合燃焼プラズマが実現すれば、その物理過程は核燃焼を伴う天体の理解に多大な貢献をもたらすであろう。

【地球惑星科学】

惑星は、様々な形でプラズマと密接に関係している[20]。地球の中心部分（コア）に存在する液体金属は、流体スケールでのプラズマと同じ方程式（MHD 方程式）に従い、MHD ダイナモによりコアで生成された地球磁場は、太陽風プラズマや宇宙線の直撃から地球の大気を守っている。双極子型の地球磁場は太陽風によって大きく変形され、彗星型のプラズマ構造（地球磁気圏）を地球周囲に形成している。そして、その地球磁気圏から電離層に流れ込むプラズマ粒子は、美しいオーロラを生み出す。地球以外の惑星も固有の磁場と磁気圏を持つ。地球惑星磁気圏は、磁気リコネクション、ショック、乱流などプラズマ現象の宝庫であり、探査機によってこれら重要なプラズマ現象を「その場（in-situ）」で観測できることから重要な関連分野である。

【生物物理学】

生命をどのように表現するかは、シュレディンガーの教科書[21]以来の物理学としての問題でもある。分子構造が複雑になり、それらがネットワークを形成されていく過程において、生物的機能がどの辺りからどのように発現するのかは、物理学と生物学に跨る根源的な問いである。この問いに対して、荷電粒子多体系であるプラズマはより基本的な概念を提供することが可能であろう。また、複雑な有機分子が宇宙空間で発見されており、生命の起源に繋がる可能性が指摘されている[22]。そのような有機分子の生成に及ぼすプラズマ中の電磁場や集団現象の影響を実験的に検証する、実験室宇宙生命科学の萌芽とも呼ぶべき独創的な実験も開始されており、生命の起源（生命のホモキラリティ）に迫ることも可能であろう。そのほか、脳の意識（記憶や思考）は、プラズマが構造を作り機能を発生するのと類似性がある*。

【量子ビーム科学】

高エネルギー密度プラズマ生成に使われるレーザーは、光をフェムト秒からピコ秒のパルスに圧縮することで、光のエネルギー密度（光圧）が100万気圧から1兆気圧に及ぶ高強度化が実現し、真空偏極など量子電磁力学（Quantum Electrodynamics (QED)）現象が重要な領域に近づいている。レーザー生成プラズマからは、MeV-GeV エネルギーの電子・イオンビームが発生し、センチメートル以下の加速長で量子ビームを生成する小型加速器としての研究が進んでいる[23]。プラズマが発生する高輝度短パルスX線は、プラズマのバックライト計測に応用され、100ピコ秒以下のスケールの高速現象の解明に貢献している。さらに、プラズマが発生する γ 線を利用すれば、高次のQED過程（複数回の仮想粒子対生成・対消滅を介する過程）の実験検証が可能となり、標準模型の検証や素粒子物理の新たな発展に繋がることが期待される。また、磁場閉じ込め核融合の分野でも、中性高エネルギー粒子ビーム入射装置（Neutral Beam Injection）やジャイロトロンなどの高強度マイクロ波装置のほか、量子ビームを用いたプラズマ加熱装置も開発されてきた。量子ビーム科学とプラズマサイエンスは不可分な連携によって発展してきた分野である。

【材料科学・デバイス科学】

核融合プラズマの研究においては、プラズマと材料の相互作用が重要な課題になる。プラズマ対向材料は、プラズマからの高い粒子束や熱流束によって、照射損傷と高熱負荷を受ける。さらに、核融合反応によって発生する高エネルギー中性子による重照射は、過酷な照射損傷のみならず、核変換に伴う放射化やヘリウム生成によって、材料特性の大きな変化を引き起こす。これらの過酷環境下で使用可能な材料は、それ自体で安定な従来の固体材料の概念だけでは不十分であり、非平衡環境下における材料中のミクロな散逸構造

* 脳を多数の細胞からなる系の集団現象とみなすと、プラズマとの共通点が見つかる。脳の記憶機能を非線形力学系で見られるアトラクター状態と結び付ける考えもあり、脳には分岐現象、引き込み現象、カオスの振る舞いとしてみなせる活動も見ることができる（「脳と物理学」 武田暁 裳華房 1999年）。脳の多様な活動の理解にプラズマの方法論が有効に適用できる可能性がある。

形成による適応も考慮した材料開発が必要である。核融合プラズマは、新しい材料科学を先導できる機会を与える。レーザープラズマにおいても、新物質の創成に寄与し材料科学の新分野を開くことが期待され、非平衡プラズマ中で制御・生成される特異的な前駆体・活性種を活用した、新規物質創製、高機能性材料の合成に寄与することができる。また、近未来のフレキシブルデバイスやウェアラブルデバイス製造のための微細加工には、プラズマが欠かせないツールとなる。さらには、革新的省電力のスピン트로ニクス融合半導体集積回路の実現のために、高度に制御された次世代プラズマプロセスの創出が求められている。

【触媒化学】

プラズマと化学との関わりは古い。特に、触媒化学の領域にはプラズマの反応場の問題として強く連携することが期待できる[24]。例えば、低温プラズマと触媒の複合プロセスは、それぞれ単独のプロセスとは異なる新しい低温化学反応場として学術的にも産業応用からも注目を集めている。プラズマ触媒を用いた化学プロセスの研究は、対象ガス、触媒の組合せが多岐に及んでおり、様々なシナジー効果が報告されている。既に実用化されている室内及び大気汚染物質の除去に加え、最近では燃料改質、CO₂の資源化、アンモニア合成などへの応用が検討されている。しかし、シナジー効果の本質については学問的な検証がまだ不十分であり、プラズマ触媒複合プロセスは、化学と密接に関連した分野横断的な異分野融合研究領域である。

【計算科学・データ科学】

プラズマの計算機シミュレーション研究者は、これまで常に最先端のスーパーコンピュータシステムを使いこなしてきた。プラズマのシミュレーションは、スーパーコンピュータの演算性能が向上するとともに、シミュレーション手法の革新を続けてきたことも大きな特徴である。PIC (Particle-in-cell) 法やヴラゾフ法、ジャイロ流体シミュレーション、ジャイロ運動論シミュレーション、階層連結手法などはプラズマシミュレーションのために開発された独自の計算手法であり、現在では他分野にも波及している。将来のスーパーコンピュータシステムの開発にあたっては、パワーユーザの一翼として、物質科学や天文学、生命科学などの他分野と連携しつつ、科学研究にとって高速で使いやすいシステムの方向性を積極的に提言する役割が期待される。また、機械学習も含めた広い意味でのデータ科学の活用は、プラズマサイエンスにおいて（他分野と同様に）今後ますます重要となるであろう。速度空間も含めた言わばメゾ次元空間での構造が本質的なプラズマの特徴から、プラズマサイエンスはこれまで様々な計算・解析手法を開拓してきた。極めて高い次元のデータを低い次元で表現することがデータ科学の一つの目標とすれば、プラズマサイエンスの視点と方法論がデータ科学に独自の貢献をもたらすことが期待できる。さらには、機械学習・強化学習を行う AI (人工知能) のプラズマサイエンス及び関連分野への適用だけでなく、今世界的に集中的に開発が進められている量子コンピュータ技術と如何にプラズマサイエンスが関わっていくかは重要な課題である。

【医療科学】

プラズマの医療への応用としては、生体へのプラズマの照射が 1990 年代に盛んに試みられ、1995 年にはアルゴンプラズマ照射による血液凝固装置が開発され、ドイツの ERBE GmbH により販売されている。プラズマ照射が単に血液を凝固させるだけではなく、創傷の治癒を促進したり、がん細胞を死滅させたりする効果があることが 2000 年代に明らかになってきており、プラズマの応用分野が医療科学にまで展開されるようになってきている [25]。具体的には、低温プラズマが生体に及ぼす複雑な影響を系統立てて解明することを目的として「プラズマバイオコンソーシアム」が設立され、低温プラズマによる創傷治癒、止血、遺伝子導入、がん治療などについて、その分子機構の解明を目指した研究が展開された。一方で、生体側でも細胞、組織、器官、個体など様々な階層を持ち、低温プラズマの影響も階層に分けて考えることにより、複雑な生体システムにおいてどのような作用をもたらすのかについて詳細な研究が推進された。さらには、細胞内にも外界の刺激を受け取った後に、シグナル伝達ネットワーク、遺伝子発現ネットワーク、代謝ネットワークを介して、生理学的応答を示すため、低温プラズマに対する細胞応答を解析し、その機構を洞察し、反応モデルを構築することが推進されている。

【植物科学】

プラズマは、農業や水産分野においても活用が試みられている。例として、植物の品種改良における電気泳動や細胞融合、プラズマ照射による遺伝子 (DNA) の注入、植物種子の発芽制御、植物の病害抵抗性強化、担子菌 (きのこ類) での子実体形成促進、液肥や固定培地の雑菌不活性化、消毒液や農薬の静電散布、長期保存、有用成分の抽出などが挙げられる。これらの応用は、電場による植物細胞へのクーロン力や帯電、また反応性プラズマに含まれる化学的活性種の植物細胞との反応などを基礎としている [26]。高電圧やプラズマを用いた具体的な農業応用を理解するための基礎的知見を示すことを目的として、プラズマバイオコンソーシアムにおいて、従来の静電気などの農業応用の紹介や、植物細胞の電気特性、反応性プラズマで生成されるイオンや活性種の種類や密度、イオンや活性種の細胞や細菌との相互作用について詳細に調べる研究が進められている。

5 プラズマサイエンスのさらなる発展のために

(1) プラズマサイエンスの発展とより高度な学際化に向けて

プラズマサイエンスの各領域において、様々な挑戦が展開され、世界をリードする独自の発展を遂げて現在に至っている。そうした中で、3章に述べたように、プラズマサイエンスの各分野に共通する未解決の課題が見出され、これらの解決が今後の発展の鍵を握っていることが明らかになってきた。共通課題について協働的かつ互恵的に取り組むためには、分野全体を俯瞰する視点から課題を共有し、分野を横断する頭脳循環が起こる強力な学際連携ネットワークの構築が必要である。また、そのためには、自発的な活動をサポートする事務局機能を担う組織を置く必要がある。

学際連携は、分野間で共通に有用なデータを生むと同時に、共通の方法論（計測方法、解析方法、シミュレーションのアルゴリズムやアーキテクチャの開発など）に取り組むことで大きなシナジー効果が生まれる。既存の共同利用研究機関に、新たに「オープンラボ」のような協働の空間を作り、クロスアポイントメントや国内留学などの制度を整備することによって、若手研究者が分野を超えて共同研究に取り組むことを支援する必要がある。技術職員の分野交流も重要であり、共同利用研究機関が合同で「学際工房」を運営し、新技術の開発に挑戦する場を作ることを提案する。

ネットワーク構築と同時に、それぞれの領域で研究方法や技術の開発が活発に行われ、プラズマサイエンス全体のレベルアップに寄与する必要がある。遠非平衡システムであるプラズマに多大な影響を持つ揺らぎや乱流の計測には、プラズマに擾乱を与えない非接触計測法の高度化が求められる。例えば、プラズマの特徴である広大域にわたる階層的揺らぎを理解するためには（実験室プラズマの空間スケールは mm 以下から数十mに至り、また、時間スケールも数ナノ秒から数時間と大きな広がりを持つ）、局所的な計測のみでは不十分であり、プラズマ全体を計測できる技術の開発が必要である。また、速度空間の計測に関しても、揺らぎや乱流との関わりを議論するためには、高い時空間分解能が必要である。近未来に実現する核燃焼プラズマでは強い放射線下で使える新しい計測法の開発が必要である。反応性プラズマの領域では1分子原子モニタリング技術の開発が期待されている。実験物理学として蓋然性が高いデータを得るためには、プラズマ生成技術の進歩も必要である。高エネルギー密度プラズマにおいては、近年のレーザー技術発展により1 Hz（従来の出力エネルギー10 kJ程度のパルスレーザーは 10^{-4} Hz 程度）を超える繰り返し実験が可能になってきている。統計性を上げることで多階層物理や突発性の解明を迅速に進めることができる。また、データサイエンスの導入により突発現象の予測や目的に応じたレーザー波形制御が可能になると期待できる。

核融合分野においては、核融合炉実証の最終段階（原型炉^{※2}の開発段階）に向かい、開発研究と学術研究の関係を正しく整理し、開発研究と互恵的な学術研究のあり方を明示することが重要である。開発の前線からのニーズと学術の多様な挑戦から生み出されるシーズが会う、より開かれた人と知の循環を実現しなくてはならない。我が国が核融合技術の中核的な位置を占めるために必要なのは、このような人と知の循環

の拠点である。核融合研究の黎明期から高い国際的プレゼンスを持ってきた我が国の核融合学術研究を礎とし、さらに核融合科学の学際化によって、大きな広がりを持つ拠点を構築すべきである。我が国独自の中核的な施設の共同利用、国際協力体制の活用、さらに長年の研究で蓄積されてきた国際的な既存データのオープンサイエンス化などによって、世界に先駆けた学際連携ネットワークの構築を急ぐべきである。

(2) より良い社会の実現に向けて

これまで述べてきたようにプラズマサイエンスは現代文明の基幹としての役割を果たしてきた。今後もエネルギー、環境、パンデミックなど広く社会問題に寄与することが可能である。

120以上の国と地域が目標として掲げる「2050年カーボンニュートラル」の達成が世界的な課題となっている中で、核融合エネルギーに期待が集まっている。その実現のためには、プラズマの振る舞いに関する科学的理解が必要である。半世紀を超える核融合研究の歴史を振り返ると、核融合炉は比較的容易に実現するという、当初の楽観的な予測は裏切られたと言わざるをえない。プラズマ中に生起する複雑な集団現象を理解し制御することの難しさを知らなかったことが最大の原因である。しかし、学術研究の立場から見ると、核融合エネルギー開発という大型プロジェクトは、様々な分野の研究者を巻き込む頭脳循環を起し、多くの新しい現象の発見を生み、非平衡・非線形の物理及び数理の発展にとって極めて多産な研究の場となった。今後も、デファクトスタンダードの開発路線上にはない、大胆な発想に基づく挑戦的な研究が行われるためには、学際的な研究基盤を支援する科学技術政策[27]の戦略が必要である。また、技術戦略の観点からも、核融合技術の社会実装という目標設定は、同時に様々な要素技術分野にイノベーションを起こす契機と捉える必要がある。多岐にわたる要素技術を束ねる核融合技術は、多様なステークホルダーを持つ。そのインセンティブを開拓する戦略的な取り組みが必要である。このような観点を盛り込み、我が国においては、内閣府から「核融合戦略」の政府指針が示されようとしている。

地球温暖化を含む環境問題については、プラズマを用いた脱炭素技術（二酸化炭素固定、二酸化炭素を排出しないアンモニア合成等）、窒素ニュートラル（高効率窒素固定等）が行われている。プラズマの環境への応用は古く1960年代に遡る。例として、シーメンスがオゾンの発生器とした誘電体バリア放電を用いて、人体に有害な SO_x や NO_x などの除去にも利用されている。窒素汚染については、空気中の窒素を人間が使える何らかの形に変える窒素固定が世界的にも、特に欧州では研究が進められている。環境浄化については、水中のアーク放電プラズマにおいて生成されるヒドロキシラジカル等の科学的活性種を利用した水質浄化が、環境負荷の少ないこと、（光触媒との相乗作用を用いる）難分解性の有機化合物の分解が期待できることから、近年になって盛んに行われ実用化が強く望まれている。

パンデミックに関しても、プラズマによるウイルス・菌制御（化学薬品を使わない不活化・殺菌等）が役立つであろう。大気圧コロナ放電がウイルスなどの殺菌・滅菌

に初めて使われ、その後、プラズマの大気圧化や滅菌メカニズムの解明に関する研究が最近になって活発化している。反応性プラズマの社会貢献の可能性は豊かであり、応用物理学会のアカデミックロードマップにおいては、「分子デバイス」、「有機・バイオ自己組織化生産装置」、「プラズマナノバイオ技術」、「脱 CO₂ 非平衡工業プロセス」といったところが示されている。プラズマサイエンスは、エネルギー及び環境問題に加えて、医学や薬品開発、革新的省電力化を実現するスピントロニクス融合半導体集積回路開発、宇宙プラズマエンジン開発など広く社会貢献が期待される先端学術領域である。多岐にわたるプラズマサイエンスに共通する技術革新性を効率的に役立てるために、国内においては産学連携ネットワークの形成も重要であろう。

(3) 将来を担う人材育成を目指して

現代の科学技術分野は高度に専門化が進み、学術の全体像を俯瞰することが難しくなっている。他方で、異分野融合による破壊的イノベーションを生み出せるかが人類社会の発展の鍵であるとして、学際化の重要性が強く認識されている。具体策として、例えば京都大学では理学研究科付属のサイエンス連携探索センター（SACRA）が設置され、数理を基盤として、数学、物理学、化学、生命科学、地球物理学を横断する融合研究を推進し、理学教育プログラム MACS による学際融合を進め、狙ってもできない新たな学問分野の自発的創出を狙っている。

一般物理学も、数理と同じように、本来学際的な一般性を追求する学問であり、プラズマサイエンスの研究が学際的な協働の場を作り出すことで、俯瞰的視野を持つ人材の育成に貢献することができる。例えば、遠非平衡系あるいは非線形系としてのプラズマの振る舞いは、より複雑な系を包括し扱わんとする現代科学の諸分野と関心を共有するテーマを多く含み分野横断型（数学、物理、化学、生物など）の教育にも優れた題材を提供できる。

このようなプラズマサイエンスの学際性を活かすことは、プラズマサイエンス自身の発展のためにも喫緊の課題となっている。特に核融合の分野では、国際協力で建設が進められている ITER や、具体的な目標を定めて開発のロードマップを示した核融合原型炉開発によって核融合エネルギーの実現がより現実味を帯び、核融合研究は核融合プラズマそのものを統合的に実証するフェーズに入ったため、大学の研究室規模の装置では核融合炉そのものの研究を行うことが難しくなっている。核融合エネルギー実現に向けた開発研究が新しいフェーズに入った一方で、多くの未解決問題が残されており、それらを乗り越えるために多様な選択肢を提供する学術研究の役割はむしろ大きくなっている。さらに、優秀な人材の育成と知の継承が学術研究の重要な役割であることは言うまでもない。選択と集中を進める開発研究に対して、学術研究は学際化により研究分野を超えた知識や人材の水平展開を進め、新しい人材と新しい知の流入を促す役割を担う。そのような観点から、核融合科学技術委員会（科学技術・学術審議会、研究計画・評価分科会）では、人材育成・確保に関する提言[28]を出して、1) 学術研究の推進のための基礎研究環境の維持・充実、2) 開発研究と連携した知の循

環システムの構築、3) 子どもを含む広い世代に対するアウトリーチ、の必要性を示し、喫緊及び長期的に取り組むべき具体策を示した。その実現が強く求められる。

また、優秀な人材の育成・確保の観点からは、多様な研究者の参画が必須であり、女性研究者の参加が大いに期待されている。プラズマ・核融合学会では 2014 年に男女共同参画委員会を立ち上げ、男女共同参画の推進や女性研究者が増えるために必要な学会としての取り組みを議論してきた。具体的なアクションプランを策定し、着実に実施する必要がある。

6 おわりに

本見解では、プラズマサイエンスの発展の足跡を辿り、プラズマの研究がもたらした学術的知見と革新的技術について振り返った。プラズマサイエンスの未来を方向付けるために10の短期的・長期的な課題を提示し、今後の方策に対する指針を示した。

プラズマは、本質的に遠非平衡状態にあり変化してやまないシステムである。荷電粒子（あるいは素粒子）の集団が相互作用し合いながら運動し変容していく「集団現象」の宝庫である。自然を理解するためのパラダイムとなる自律性、階層性、界面、生成消滅、乱流などの概念の実態に迫ることができる研究対象である。プラズマサイエンスは、自然のリアルな在り様を理解しようとする現代科学の最先端分野の一つである。同時に、プラズマの応用は、半導体技術をはじめとして、現代文明の礎を築く役割を果たしている。近い将来には核融合炉の実現を通してエネルギー問題の解決に貢献し、また材料科学、生命科学、医学、農学、環境、宇宙などへの応用は持続可能な発展目標に寄与することが期待される。

学術としても技術としても大きな潜在的可能性を持つプラズマの研究には、力学、電磁気学、統計力学、量子力学といったあらゆる物理学が動員される。さらに、その基礎には数学の諸理論、データ科学、計算科学、また、応用と展開のためには天文学、化学、生物学、農学、医学、材料科学、社会学などとの連携が必要である。現代の科学は、それぞれの専門分野ごとに高度な専門化が進んでいるが、未来の革新的な発展のためには広い学際的知識が必要とされる。プラズマを題材とすることで、幅広い基礎学理を俯瞰的かつ統合的に学ぶことができる。プラズマは若手研究者の教養を培うために優れた教材となるであろう。早い就学段階の生徒にもプラズマに触れる機会を与えることは、科学の幅広さを伝える上で有効な方策であり、将来の日本の学術発展に結びつくものであろう。

多数の要素が結合した系の集団現象として世界を理解し、制御の可能性を考えると、プラズマサイエンスの問題意識は、複雑さと多様性に向き合おうとする現代の諸学と方向を同じとする。我が国が、学術において、世界を先導する役割を果たすためには、学際的かつ長期的なビジョンに基づいた多面的な振興は重要な戦略である。自然認識及び技術革新の基盤でもあり広い学際性を有するプラズマサイエンス分野も早急にその振興に取り組むべきである。

<用語の説明>

- ※1 遠非平衡系：極限的高温高压状態にある磁場閉じ込めプラズマ、極限的強度のレーザーで生成されるプラズマなど、平衡とは全く異なる極限的な状態を指す。例えば、磁場閉じ込め乱流プラズマの密度揺らぎはその周辺においては時間平均値と同程度の大きさとなることが知られており、密度の平方根の逆数で決まる平衡状態での揺らぎに対し 10^{10} 以上にある。
- ※2 原型炉：核融合エネルギーの実用化に向けて、技術的実証と経済的実現性を示すことを目標とし、今世紀中葉の建設を目指した開発計画が原型炉設計合同特別チームにおいて策定されている。（文部科学省「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」（2017年）
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gi_jyutu/gi_jyutu2/074/houkoku/1400117.htm)
- ※3 シース：プラズマが壁と接触する場所に生成される電荷非中性の層のこと。電子の熱速度がイオンのそれよりも速いことに起因して生じる。
- ※4 ディスラプション：炉心プラズマが一挙に崩壊する突発的な不安定性のこと。核融合炉の定常運転を妨げる障害となっており、その解明と回避技術の確立が重要な課題となっている。
- ※5 パワーデグラデーション：磁場閉じ込めプラズマにおいて、プラズマ加熱入力を大きくすると閉じ込め特性が劣化する現象。
- ※6 パラメトリック励起：系の固有振動数と外部変調による非線型結合によって起こる振動現象。
- ※7 ハンレ効果：磁場中の原子や分子の発光の偏光度が磁場の大きさと向きに依存する現象。
- ※8 非平衡プラズマ技術：非平衡状態にあるプラズマを利用した技術。例えば、制御核融合技術もその一つである。また、特定のエネルギーに偏った分布を持つプラズマを利用し対象素材を破壊することなく実施する効率的プラズマプロセス技術や、超高強度レーザー光制御によって生成された極限的高エネルギー密度状態を利用した新機能性物質生成技術などが挙げられる。
- ※9 ポンデロモーティブ力：荷電粒子が不均一な振動電磁場から受ける非線形な力のこと。
- ※10 DX（デジタルトランスフォーメーション）：デジタル技術によって、人々の生活をより良いものと変革すること。（経済産業省「産業界のデジタルトランスフォーメーション（DX）」
https://www.meti.go.jp/policy/it_policy/dx/dx.html)
- ※11 ITER：核融合エネルギーが科学技術的に成立することを実証することを目的として、日本・欧州・米国・ロシア・韓国・中国・インドの7極によって進めら

れている国際プロジェクトのこと。2025年の運転開始を目指し、フランスで装置の建設が進められている。（「ITER」 <https://www.iter.org>）

- ※12 Q（エネルギー増倍率）：核融合反応を起こす高温プラズマを維持するために投入した外部加熱入力に対する核融合出力の比率のこと。核融合炉が成立するためには、核融合反応で生成される高エネルギーの荷電粒子によってプラズマが加熱され、外部加熱入力ができるだけ少ない状態で高温プラズマが維持されることが必要である。

<参考文献>

- [1] 日本学術会議、「日本の展望—学術からの提言 2010」、2010年4月5日。
(<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-tsoukai.pdf>)
- [2] 日本学術会議日本の展望委員会理工・工学作業分科会、提言「日本の展望—理学・工学からの提言」、2010年4月5日。
(<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-tsoukai-3.pdf>)
- [3] 日本学術会議、「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ」、2011年8月24日。(<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/kohyo-21-h132.html>)
- [4] プラズマ・核融合学会、「核融合を発展させる学術研究のあり方」、2007年6月8日。(<http://www.jspf.or.jp/appeal2006/>)
- [5] Tosiya Taniuti et al., "Reductive Perturbation Method in Nonlinear Wave Propagation. I", J. Phys. Soc. Jpn. 24 (1968) 941-946.
- [6] Ryogo Hirota, "Exact Solution of the Korteweg-de Vries Equation for Multiple Collisions of Solitons", Phys. Rev. Lett. 27 (1971) 1192-1194.
- [7] 三輪哲二, 神保道夫, 伊達悦朗, 「ソリトンの数理」, 岩波書店 (2007).
- [8] L. Landau, "On the Vibrations of the Electronic Plasma", Journal of Physics 10 (1946) 25-34.
- [9] F. Wagner et al., "Regime of Improved Confinement and High Beta in Neutral-Beam-Heated Divertor Discharges of the ASDEX Tokamak", Phys. Rev. Lett. 49 (1982) 1408-1412.
- [10] 日本学術会議総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会、報告「大型レーザーによるエネルギー密度科学の新展開」、2016年8月24日。
(<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-h160824.pdf>)
- [11] G. Mourou et al., "Optics in the relativistic regime", Reviews of Modern Physics 78 (2006) 309-371.
- [12] N. Hosokawa et al., "RF Sputter-Etching by Fluoro-Chloro-Hydrocarbon Gases", Japanese Journal of Applied Physics 13 (1974) 435-438.
- [13] 伊藤早苗, ほか, 「乱流プラズマの動的応答と動的輸送の統合研究」, プラズマ・核融合学会誌 Vol. 90, No. 12 (2014) 793-820.
- [14] K. Ida, "Bifurcation phenomena in magnetically confined toroidal plasmas", Advances in Physics:X 5 (2020) 1801354.
- [15] E. Gibney, "Nuclear-fusion reactor smashes energy record", Nature 602 (2022) 371. (<https://doi.org/10.1038/d41586-022-00391-1>)
- [16] D. Clery, "Laser-powered fusion effort nears 'ignition' ", Science 373, 6557 (2021) 841.

- [17] International Mathematical Union, 2023 年. (<https://www.mathunion.org/imu-awards/fields-medal>)
- [18] E.N. Lorenz, "Deterministic Nonperiodic Flow", *Journal of the Atmospheric Sciences* 20 (1963) 130-141.
- [19] G. Sarri et al., "Generation of neutral and high-density electron-positron pair plasmas in the laboratory", *Nature Communications* 6 (2015) 6747.
- [20] 地球電磁気・地球惑星圏学会、「地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来 (2023 年)」 (<https://www.sgepss.org/about/vision.html>)
- [21] E. Schrödinger, "WHAT IS LIFE, The Physical Aspect of the Living Cell", Cambridge University Press (1944).
岡小天・鎮目恭夫 訳「生命とは何か 物理的に見た生細胞」, 岩波文庫 (2008).
- [22] K. Kvenvolden et al., "Evidence for Extraterrestrial Amino-acids and Hydrocarbons in the Murchison Meteorite" *Nature* 228 (1970) 923-926.
- [23] E. Esarey et al., "Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators", *Review of Modern Physics* 81 (2009) 1229-1285.
- [24] A. Bogaerts et al., "The 2020 plasma catalysis roadmap", *Journal of Physics D: Applied Physics* 53 (2020) 443001.
- [25] Editors-in-Chief: S. Toyokuni, Y. Ikehara, F. Kikkawa, M. Hori, "Plasma Medical Science", Academic Press (2018).
- [26] Y.W. Gao et al., "Review on formation of cold plasma activated water (PAW) and the applications in food and agriculture", *Food Research International* 157 (2022) 111246.
- [27] 日本学術会議物理学委員会物性物理学・一般物理学分科会、提言「物性物理学・一般物理学分野における学術研究の発展のために」、2017 年 9 月 8 日。
(<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-t249-5.pdf>)
- [28] 核融合科学技術委員会 (科学技術・学術審議会、研究計画・評価分科会)、
「核融合エネルギー開発の推進に向けた人材の育成・確保について」、平成 30 年 3 月 28 日
(https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/houkoku/1407701.htm)

<参考資料>審議経過

令和3年

- 5月8日 プラズマサイエンス小委員会（準備会合）
活動方針について
- 7月2日 プラズマサイエンス小委員会（第1回）
役員を選出、今後の進め方について
- 8月25日 プラズマサイエンス小委員会（第2回）
各分野の現状と課題について
- 10月27日 プラズマサイエンス小委員会（第3回）
意思の表出について

令和4年

- 1月4日 物性物理学・一般物理学分科会（第2回）
プラズマサイエンス小委員会の活動状況について
- 2月7日 プラズマサイエンス小委員会（第4回）
見解の骨子案について
- 4月26日 プラズマサイエンス小委員会（第5回）
見解案について
- 7月11日 プラズマサイエンス小委員会（第6回）
見解案について
- 10月4日 物性物理学・一般物理学分科会（第3回）
見解案について
- 10月31日 プラズマサイエンス小委員会（第7回）
見解案について

令和5年

- 3月22日～3月30日 物性物理学・一般物理学分科会（第4回）（メール審議）
見解案「プラズマサイエンス ―その学際的发展と豊かな未来社会のために―」について承認
- 9月20日 科学的助言等対応委員会承認
見解「プラズマサイエンス―その学際的发展と豊かな未来社会のために―」