

## プロジェクトレビュー

## 総説 プラズマ・核融合サイエンスチャート

## Plasma Fusion Science Chart

## 1. 前書き

## 1. Preface

森 芳孝, 横山雅之<sup>1)</sup>, 仲田資季<sup>1)</sup>, 佐々木徹<sup>2)</sup>, 後藤拓也<sup>1)</sup>, 金子俊郎<sup>3)</sup>, 永岡賢一<sup>1)</sup>, 門信一郎<sup>4)</sup>, 浅井朋彦<sup>5)</sup>, 雨宮高久<sup>5)</sup>, 笠田竜太<sup>6)</sup>, 伊藤 悟<sup>3)</sup>, 上原日和<sup>1)</sup>, 安原 亮<sup>1)</sup>  
MORI Yoshitaka, YOKOYAMA Masayuki<sup>1)</sup>, NAKATA Motoki<sup>1)</sup>, SASAKI Toru<sup>2)</sup>, GOTO Takuya<sup>1)</sup>,  
KANEKO Toshiro<sup>3)</sup>, NAGAOKA Kenichi<sup>1)</sup>, KADO Shinichiro<sup>4)</sup>, ASAI Tomohiko<sup>5)</sup>, AMAMIYA Takahisa<sup>5)</sup>,  
KASADA Ryuta<sup>6)</sup>, ITO Satoshi<sup>3)</sup>, UEHARA Hiyori<sup>1)</sup> and YASUHARA Ryo<sup>1)</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>長岡技術科学大学, <sup>3)</sup>東北大学,

<sup>4)</sup>京都大学エネルギー理工学研究所, <sup>5)</sup>日本大学, <sup>6)</sup>東北大学金属材料研究所

(原稿受付日: 2023年11月2日)

我々を取り巻くさまざまな物質や構造の起源は、138億年前の超高温超高密度のプラズマ状態であるとされています。プラズマ状態とは、物質を構成する電子やイオンが電離した状態を指します。

私たちが研究するプラズマ・核融合は、一つ一つの荷電粒子が織りなす素過程と、それらが織りなす集団現象が絡み合うプラズマを対象として、そこに潜む様々な機能やエネルギーの創成と制御を探究する学問です。核融合エネルギーの実現など社会貢献をめざす使命感と自然の摂理を追究しようとする好奇心を併せ持つ学問分野です。

プラズマ研究には200年にもわたる歴史があります。18世紀に誕生した真空技術と電気技術の融合により、人工的にプラズマ放電状態を作ることができるようになりました。人工放電は、電子の発見、分光学の誕生、照明、溶接技術、レーザーの実現や高度化などを促しました。そして、現在、プラズマの理解の深化とプラズマの機能性と制御性を高める研究が進められています。プラズマプロセス、プラズマ推進、核融合エネルギーなどそれぞれの先端研究へと発展しています。

プラズマの機能性と制御性を高めるためには、技術を鍛える必要がありました。プラズマ加熱装置、プラズマ診断装置、超伝導技術、核融合炉材料開発など、多様な技術が開花し、さらに極みをめざした研究が行われています。

プラズマに関する研究には長い歴史がありますが、いまだに未知未踏領域や多くの謎が残されています。例えば、核融合については核融合反応が持続するプラズマの持続的制御、プラズマプロセスについては背後に潜む基礎原理の解明などです。

このサイエンスチャートは、対象を理工学系の専門家に定め、学術が担う知の拡大と体系化に重点をおいたプラズマ・核融合分野の説明資料として企画されました。分野のアイデンティティ、歴史と広がり、そして課題と謎への挑戦をまとめています。プラズマ・核融合に関わる問題を、多彩な学問領域に展開し、プラズマや関連材料が織りなす複雑現象を理解・制御することを通じて、あまねく自然や社会の理解につなげようとするものです。関連分野間の相互理解の増進と協働につながることを期待しています。

本稿は、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」、及び核融合科学研究所一般共同研究「2030年代以降を見据えたプラズマ・核融合科学の学術課題検討会、プラズマ・核融合分野の将来構想に向けた学際交流」(通称 Fusion2030 研究会)の活動成果をまとめたものです。サイエンスチャートの作成については、小木智子さんに清書いただきました。謝意を表します。

The Graduate School for the Creation of New Photonics Industries, Hamamatsu, SHIZUOKA 431-1202, Japan

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

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」委員名簿

森 芳孝	光産業創成大学院大学	比村 治彦	京都工芸繊維大学
佐々木 徹	長岡技術科学大学	佐野 孝好	大阪大学レーザー科学研究所
浅井 朋彦	日本大学	稲垣 滋	京都大学エネルギー理工学研究所
横山 雅之	核融合科学研究所	江角 直道	筑波大学プラズマ研究センター
笠田 竜太	東北大学金属材料研究所	江尻 晶	東京大学
仲田 資季	核融合科学研究所	安原 亮	核融合科学研究所
後藤 拓也	核融合科学研究所	上原 日和	核融合科学研究所
永岡 賢一	核融合科学研究所	伊藤 悟	東北大学
金子 俊郎	東北大学	江原 真司	東北大学
門 信一郎	京都大学エネルギー理工学研究所	長坂 琢也	核融合科学研究所
田中 康規	金沢大学	田中 照也	核融合科学研究所
野崎 智洋	東京工業大学	徳澤 季彦	核融合科学研究所
		坂本 隆一	核融合科学研究所
		山田 弘司	東京大学



## プロジェクトレビュー 総説 プラズマ・核融合サイエンスチャート

### 2. プラズマ・核融合学のアイデンティティ

#### 2. Identity

仲田資季, 佐々木徹<sup>1)</sup>, 後藤拓也, 金子俊郎<sup>2)</sup>, 永岡賢一  
 NAKATA Motoki, SASAKI Toru<sup>1)</sup>, GOTO Takuya, KANEKO Toshiro<sup>2)</sup> and NAGAOKA Kenichi  
 核融合科学研究所, <sup>1)</sup>長岡技術科学大学, <sup>2)</sup>東北大学  
 (原稿受付日: 2023年11月2日)

プラズマ・核融合学は外の分野から見て、「面白そうだけれど複雑で難しい」、「興味はあるけれど一緒に何ができるかがわからない」といった印象を持たれているかもしれません。また、プラズマ・核融合学が非常に広範な理学・工学の学問領域を包含していることから、分野内の研究者でもプラズマ・核融合学の研究動機を端的にわかりやすく説明することが難しいという認識がプラズマ・核融合学会専門委員会で共有されました。

科学と技術のイノベーションの源泉は、生物の進化と同様に技術や学問体系の融合とその分化が重要であり、その発展はその新陳代謝で決まると言ってもよいでしょう。このため、プラズマ・核融合学の基盤、学問体系としての広がり、社会還元などについて整理することが重要であると考え、図1のようなインフォグラフィックス案を作成しました。プラズマ・核融合学の主要な基盤である3つの学問体系（プラズマ物理学・プラズマ化学・

プラズマ工学)の上に、プラズマ・核融合学会の4領域(基礎・核融合・応用(反応性プラズマ)・核融合炉工学)のつながりをパズルのピースで表し、それぞれの学問のつながりを表現しようという意図です。また、中心に配置されたスパイラルは、プラズマ・核融合学の4要素の融合が他の学問領域に波及することをイメージしています。また、このインフォグラフィックスの中に含まれるプラズマ・核融合学のアイデンティティを表現するために、「プラズマ・核融合学とは?」の問いに答える形で、以下のようなワンメッセージを提案しています。

「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、多様な学問分野の深化と新たな融合分野の開拓に挑戦する学問」



図1 プラズマ・核融合学のアイデンティティを表現するインフォグラフィックス。



## プロジェクトレビュー 総説 プラズマ・核融合サイエンスチャート

## 3. 歴史と広がり

## 3. History and Diversity

## 3.1 プラズマ科学

## 3.1 Plasma Science

門 信一郎, 永岡賢一<sup>1)</sup>KADO Shinichiro and NAGAOKA Kenichi<sup>1)</sup>京都大学エネルギー理工学研究所, <sup>1)</sup>核融合科学研究所

(原稿受付日: 2023年11月2日)

## Keywords:

naming of plasma, plasma physics, spectroscopy, space plasma, gaseous discharge, nuclear fusion

後に「プラズマ現象」と認知されることになる、オーロラや雷は、太古より人類の好奇心を掻き立ててきました。真空技術や高電圧技術の発明によって、地上の実験室における放電実験が盛んになり、分光器が開発されると、発光の類似性から、それらの関連性に目が向いたのは自然な流れだったのかもしれませんが。

固体・液体・気体とは異なる、何か別の物質状態なのではないか？ 本稿では、果たして人類が現在の「プラズマ」の認識にどのように到達し、そこからどのような科学の分野に分岐し、お互いに関連しつつ発展してきたのか、文中太字の用語や出来事を中心にチャート(図1)に示しました。

## 3.1.1 プラズマ前夜

## [オーロラと放電現象]

1752年にフランクリンが、雷が電気によるものであることを示したことは有名ですが、実は、後にオーロラも電気(ただし大気中)であることを示唆しています(1779)。その少し前には、ド・メランが太陽黒点との関連性を見出し、太陽大気によるとの説を出しています。

やがて1838年にファラデーが気体放電によってオーロラに似た光を発光させると、そちらの研究が盛んになりました。

オーロラの発光が物質固有の色であろう、と言ったのは、ブンゼンとキルヒホフが行った炎色反応の分光実験(1860)を知ったオングストロームです。彼はオーロラの代表的な色である緑のスペクトルを観測し、この波長を5567という数字で表しました(1867)。オングストロームという単位の起源です。後のより精密な観測により

*Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Uji, KYOTO 611-0011, Japan*

557.7 nmと求められたこのオーロラグリーンは、実験室での再現が極めて困難で、地球にない元素説、クリプトン説(1915)まで出ました。しかし後に量子論によって酸素の禁制遷移であることにたどり着きました(マクレンナン(McLennan), 1928)。

オーロラ粒子と地磁気との関連は、正電荷の太陽大気説(ベクレル(1879))、太陽からくる陰極線説(ゴールドシュタイン(1881))、ビルケランドが行った電子ビームを球形磁石テレラ(Terrela)に当てるオーロラ模擬(テレラ実験(1896))が有名です。この論争はやがて、電子/イオンで空間電荷が中和される「プラズマ的」な解釈へと進んでいきます(チャップマン(1918))。

そのころ、大西洋横断無線通信に成功したマルコーニ(1901)は電波が上空で曲がることを突き止め、1902年ケネリー(米)とヘビサイド(英)は上空に電波を反射する電離層が存在すると予言しました(1924年アップルトン(英)により実証)。まさに太陽と地球電磁気圏がつながろうとしていたと言えます[1]。

## [分光学から量子物理学へ]

1814年、フラウンホーファーは三角プリズムを望遠鏡の対物レンズの前に配置し、精密な角度調整によって太陽光のスペクトルを観測し、574本ものつとびの黒い暗線(吸収線)を発見しました。さらにシリウス星に現れる暗線と比較し、地球ではなく太陽由来のものであることも示しました。その暗線が地上の気体放電で観測される輝線と同じ波長に現れることがわかるにつれ、太陽に存在する元素の同定、および、輝線/暗線の波長の規則性に感心が高まりました。当時の物理学者たちは、調和振

*corresponding author's e-mail: kado@iae.kyoto-u.ac.jp*

動子の高調波からその規則性を導出しようと試行錯誤しましたが、高等女学校の数学教師バルマーは、物理学を考えずにパズルとして、有名な「バルマーの公式」を見出しました(1885)。その年に生まれたボーアは28歳の時にその公式を見るやいなや「すべてが明らかになった!」とまたたくまに3篇の論文を発表し(1913)、原子モデル(前期量子論)を構築しました。水素原子以外には適用できない、などの難点はあったものの、この基本的な考え方が、その後の量子物理学の礎となっています。

分光診断は、いまなおプラズマ中の元素分析や価数、励起源であるプラズマの密度や温度等を調べる有用な手法となっています。

### [地上のプラズマ]

ボルタ電池(1800)と真空技術の発明で、ペトロフ(1802)、デービー(1800-1807頃)が独立にアーク放電によるランプを発明しました(光がアーク状になることから1821年に命名)。電磁誘導の法則を導き、発電機を発明(1831)したファラデーは、本格的な気体放電(グロー放電)を確立(1835頃)します。さらに、真空技術の進歩とともに、ガイスラー管(1850)が発明され、クルックス、ヒットルフ、クルックスらにより陰極線(電子ビーム)の研究が盛んに行われました[2]。

クルックスは、ファラデーの講演録「物質は、固体・液体・気体・ラジアント(radiant matter, 「放射する物質/物体」の意)からなる」を引用し、このラジアントの研究を精力的に行い、その過程でエックス線を発生する(...と後にわかる)クルックス管(1872)を発明し、内部に置いた羽根車を回したり、周囲の写真乾板を露光させたりしています。まさに電子の発見(1897)、エックス線の発見(1895)一歩手前までできていたと言えます。

プラズマ状態は、このグロー放電や低圧アーク放電の内部に電極を挿入し、電流電圧特性を調べることで、その物性が次々と明らかになってきました。1928年6月21日(プラズマ記念日)にこれを「プラズマ」と名付け論文に記したラングミュアの功績です。その頃までにプラズマ振動(ラングミュア振動)・デバイ遮蔽・シースなど、荷電粒子の集合としてのプラズマ物理学における基本的な概念が出来上がってきたと言えます。

高温のプラズマによる核融合エネルギーの開発が進むにつれ、弱電離を扱う放電物理と完全電離を扱うプラズマ物理は乖離していきました。しかし近年、磁場閉じ込め装置において、ダイバータ・境界層プラズマと言われる、容器壁近くの電離度が低いプラズマの役割が重要視されています。特に高温の炉心プラズマとの界面の現象には、未解明の物理過程が数多く残っています。

## 3.1.2 プラズマを使いこなす

### [光源としてのプラズマ]

プラズマからの発光の利用は、前述のアークランプ(開放型)に始まりますが、放電管が最初に光源として利用されたのはムーアランプ(1894)です。その後、ネオン

管(1910)や蛍光灯(1938)、最近ではプラズマディスプレイパネル(1992)などに応用されてきました[3]。

アインシュタインが1917年に光の共鳴吸収・誘導放出の原理を導くと、それから40年の時を経て、反転分布と共振器を利用したメーザー(マイクロ波, 1954)やレーザー(可視光, 1960)として実を結びました。

レーザー媒質として固体を使った「固体レーザー」は高パワー化に適し、慣性核融合やプラズマ計測にも利用されています(3.7 レーザー材料)。

### [荷電粒子源としてのプラズマ]

デービーやファラデー以降、様々な放電方式が発明され、幅広い分野の科学技術や産業に応用されてきました[2]。特に反応性ガスを用い、プラズマによって反応性を高める分野を「プラズマ化学」と称しています。「無声放電」を利用したオゾナイザ(シーメンス; 1857)はその走りと言えます。

放電を開始する「火花電圧」を与える最適な条件が「ガス圧とギャップ長の積の関数で与えられ、最小値をもつ」という実験則「パッシェンの法則」は、その後の放電物理・高電圧工学の礎となります。後に分光学でも名を残すパッシェンの博士学位論文(1888年当時23才、指導教授はベルリン物理学研究所のクント)における発見でした(1889年に論文発表)。

その頃以降、アーク放電による「熱プラズマ」を利用した溶接(ドメリスタン/ドベナール; 1880)などの放電加工や金属の精錬[4]、さらに高周波誘導放電(ICP)を利用した発光分析(1960年代)等の放電技術が進展します。イオン衝撃によるスパッタリングを利用した成膜は、「蛍光灯の寿命を決めていた悪者スパッタリング現象を逆手にとった返し技か!」と感心したものでした(筆者談)。

酸素プラズマによるフォトレジストのアッシング(1966)、ハロゲンガスによるシリコンウエアからSiF<sub>4</sub>として削っていくドライエッチング(1971)などの半導体ドライプロセスは、今日の情報化社会の原動力になったと言っても過言ではないでしょう[5]。これらの詳細は「3.2 プラズマ応用」の節に譲ります。

気体放電の技術は、容器内に生成したプラズマからビーム状のイオンを引き出す「イオン源」にも応用されました。磁場閉じ込めプラズマに外部からイオンビームを打ち込んで衝突加熱ができれば高温化に有効なのですが、磁場が邪魔をして中まで入りません。まるで地球を太陽風から守る地磁気のようなのです。これを回避するには中性の原子ビームが必要です。ところが中性では加速ができません。そこでイオンの状態で加速をし、入射前に中性化する必要があります。この中性粒子ビーム生成には、正イオンだけでなく、ビームの高エネルギー化に不可欠な、水素の負イオン(H<sup>-</sup>)を作る技術も進んでいます。電子親和力で電子を得ている負イオンを中性化するには、ガスとの衝突を利用する方式が現在の主流ですが、変換効率がさらに高いレーザー光をビーム側面から照射し、H<sup>-</sup>から電子を1つはぎ取る「光脱離反応」の利用が検討さ

れています。

イオンビームの反作用をロケット推進に利用しているのが、「はやぶさ (2005)」で注目されたイオンエンジン・電気推進機です (1906年発案)。直流放電やマイクロ波放電で重たい希ガスであるキセノンをプラズマ化します。推進力が小さくてよいかわりに長期間の推進 (比推力) が必要な宇宙空間に適しています。

プラズマといえば真空のイメージが強いですが、1990-2000年代にかけて急速に用途が拡大した、**大気圧で生成されるプラズマ**や、供給ガスの流れを利用したジェットは、**医療や農業**の分野で近年ますます注目されています。

### 3.1.3 プラズマ物理学の発展

#### [磁気流体力学]

1942年にアルベン (Alfvén, 和文表記はアルヴェーン, アルフベンとも) は電磁気学におけるマクスウェル方程式を流体力学に組み入れ、「**磁気流体力学**」の基盤を構築しました。1970年にノーベル物理学賞を受賞しています。

特に磁力線のプラズマへの凍結 (frozen-in),  $\beta$  値, アルベン波など, その後の宇宙プラズマや核融合プラズマなど, 完全電離状態を扱うプラズマ物理学において不可欠な学術基盤となっています。

#### [プラズマ中の波動現象・粒子とのエネルギー交換]

プラズマは、密度や温度の不均一性などを自由エネルギーとして波動を励起し、線形的に成長した波動が非線形結合をし、乱流状態へと遷移していく特徴もっています。

他の物理学では見られない、プラズマ特有の現象として「**ランダウ減衰 (1946)**」が有名です。プラズマ中の波動の位相速度とプラズマ粒子の運動速度がほぼ等しいとき、共鳴的にお互いのエネルギーを交換し合います。粒子が波に乗って加速されるサーフィンのようです。このとき波は減衰していきます。逆に粒子が波を励起することもあります (ランダウ励起...ではなく、逆ランダウ減衰と言います)。同様の原理は、磁場中のプラズマでは粒子の旋回運動 (サイクロトロン運動) に対しても生じます。プラズマ中に旋回運動と同じ周波数の電磁波を外部から入射することで、プラズマを共鳴的に波動加熱することができるわけです (電子レンジに似ていますが、電子レンジの原理は、共鳴しない誘電加熱という摩擦熱の一種です)。電子加熱のための高パワーのマイクロ波源「**ジャイロトロン**」にはサイクロトロン共鳴を利用したレーザー技術が活かされています。

プラズマ中の波動の中にも、水の波のように形を変えずに伝搬する「**ソリトン**」が存在します。イギリスの運河で1834年に造船技師のラッセルがふと気づいた逸話は有名ですが、その60年後、1895年にコルトヴェーグとドフリースが数式化 (**K-dV方程式**) に成功します。1966年に鷲見・谷内によってこのK-dV方程式がプラズマ中の静電波 (縦波) であるイオン音波に適用されました。1970年、

池地らは波動励起実験に適したダブルプラズマ装置を用い、プラズマ中のソリトンを実験的に発見しました。

#### [宇宙のプラズマ物理学]

宇宙空間 (の既知の物質) はプラズマに満ちています。太陽系の質量の99.87%を占める太陽から放出される太陽風、希薄な星間ガスはもちろん、中性の星間ダストや分子雲なども、プラズマや光と相互作用しています。

天文学では、星形成は重要な課題であり、「原始惑星系円盤でどのように角運動量を捨てて、質量降着を効率よく行うか?」という問題が重要課題となりました。磁気回転不安定性 (MRI) により効率よく角運動量を輸送することやジェット形成の研究がプラズマ物理の成果として進展しています。

宇宙の高エネルギー粒子の生成メカニズムも大きな課題でしたが、**無衝突衝撃波 (1948)** による**統計フェルミ加速 (1949)** をベースとした粒子加速メカニズムなどプラズマ物理によりその素過程の研究が進展しています。

#### [太陽のプラズマ物理学]

太陽プラズマは、温度6000度の弱電離である光球の上層に1万度の彩層さらに上層は完全電離した100万度のコロナが存在します。

1869年の日食時にヤングとハークネスが太陽コロナを分光診断した際、地上の実験で同定されていない530.3 nmの緑の謎の輝線を発見しました。オーロラグリーンの時と同様、ヘリウムに続く新元素発見かと騒がれたようです。しかし1941年グロトリアンとエドレンにより鉄の13価の輝線、こちらも**禁制遷移**であることが示され、1943年 (戦時中につき邦文) に宮本正太郎によって、現代の分光解析同様の電離平衡計算と輝線強度比により、100-200万度もの高温であることが証明されました (1949年に英文で公表) [6]。

この太陽コロナが「異常なまでに」高温であることは、「**彩層・コロナ加熱問題**」として長年の謎になっていて、各層の界面における太陽の磁力線や波動現象とプラズマ粒子との相互作用 (エネルギー交換) が関連していると推測されています。

#### [磁気圏のプラズマ物理学]

地球は磁場 (双極子型という) をもつ惑星であり、太陽からくるプラズマの風 (磁力線もプラズマに凍結して運ばれる) と重なって、磁気圏を形成しています。太陽風の圧力 (動圧) に押され、変形された地球の磁場は、太陽の反対側でつなぎかえ (**磁気リコネクション (1956)**) を引き起こし、「**プラズマシート**」と言われる構造を形成し、オーロラ粒子の起源となっています。この磁気リコネクションは、磁力線が向かい合って**行き交おう**としていた場所において普遍的に起こりうる物理現象です。

太陽からのプラズマ粒子の盾となっている「**ヴァン・アレン帯 (1957)**」は、同時に、磁気ミラー効果により電子や陽子を蓄積する領域となっており、別名「**放射線帯**」

とも言われています。この領域は、太陽からの高エネルギー粒子（放射線）を遮蔽して、地球の生命を被ばくから守る役割を担っていますが、宇宙船や人工衛星が通過する際に、電子機器を誤動作させる要因として、その領域の生成・消滅要因に対する研究が重要視されています。

20世紀後半から宇宙利用が盛んになり、磁気嵐による通信遮断、地球規模の環電流による送電網の損傷、高エネルギー粒子による被ばくなど、地球近傍の環境変動が大きな問題となりました。日本では世界に先駆けて、このような環境変動の予測研究が1998年から開始されました。磁気リコネクションに起因する、太陽磁場のエネルギー開放に伴って放出される**コロナガス大規模噴出現象**の後には、地球磁気圏を通して電離層に至るまでのプラズマが大きく変動します。太陽表面近傍の高温プラズマから、太陽風、磁気圏プラズマ、電離圏と部分電離プラズマまでを接続する物理メカニズムの理解が進み、現在では国際宇宙ステーション（ISS）の運用にも「**宇宙天気予報**」が活用されています[7]。

#### [未知の天体现象へ]

ブラックホールと恒星の連星系では、プラズマがブラックホールに吸い込まれる際に降着円盤（回転するプラズマの流れ）を形成し、エックス線で明るく輝きます。ここでは、プラズマ乱流のカスケード（散逸）による加熱が大きな役割を担っていると考えられており、イベントホライズンテレスコープ（EHT）による観測と、磁気流体力学的シミュレーションの比較が注目されています[8]。

重力波検出で話題となった中性子星の合体（2017）は、金やレアアースが元素合成されるときに、放射崩壊に伴う電磁波（可視光・赤外線）を放出します。これを「**キロノバ**」と言います。

**銀河団**の元素組成やダイナミクス、さらには観測できない**ダークマター**の存在分布の推定にいたるまで、銀河団ガス（プラズマ）や星間物質（プラズマ）の発するエックス線を様々な手法で観測し、理論モデルと比較することは、**宇宙の大規模構造の解明**にとって決定的な知見を与えるとみなされています[9]。

このような天体の未知の現象の解明には、重力波・ニュートリノ・重元素の原子過程（プラズマ分光）を多角的に観測・解析し、比較検討していくことが有用となります。

### 3.1.4 プラズマと核融合史

#### [星の核融合]

質量がエネルギー（と等価）であることは、アインシュタインの**特殊相対性理論**（1905）からの一つの帰結です。1911年、ラザフォードは**原子核**を有する原子モデルを示唆し、1919年には $\alpha$ 線源を窒素ガス中に置き、「人為的」な核変換による酸素と陽子を初めて確認しました。加速された粒子（プロトン）を標的（リチウム）に衝突させてヘリウム2個を生成する初の「人工的」な**核融合反応**は、コッククロフトとウォルトンによって達成されます

（1932）。

**太陽から放出される熱の源**は、化学反応では何桁も足りず、星の収縮による重力エネルギー全体でもごく一部しか説明できず、長い間謎でした。エディントンは1920年に水素4個分とヘリウム1個に質量差があることに着目し、**熱核融合反応**をその可能性として提案します。その後、**重水素**（1931）や**中性子**（1932）が発見され、量子論の発達も相まって、1938年にワイツゼッカーが、1939年により完全な形でベータが**星の核融合反応過程**を証明する論文を独立に発表します[10]。1938年は、奇しくも核分裂（fission）という用語が生まれた年でもあります。さらに不幸なことに、この技術は1952年のビキニ島での水素爆弾の実験に繋がってしまいました。このように、新しく誕生した「**原子核物理学**」という学問分野は、星と地上の研究が互いに影響を受けつつ、真理の探究と社会的責任とのせめぎ合いの中で培われてきたように感じています。

#### [磁場閉じ込め核融合]

1934年ベネットは、電流と磁場による自己収縮現象を理論的に示しました。1939年にトンクスによって「**ピンチ効果**」と名付けられます。しかし当時はあまり注目されることはありませんでした。ところが、エネルギー需給の問題がペイリー（Paley, 1951）やパトナム（Putnam, 1953）によって指摘され、後者では核エネルギー（核分裂と核融合の両方！）が資源量として定量的に挙げられ、人々の知るところとなり[11]、この頃から制御下での核融合エネルギーの開発が本格スタートすると、ピンチ効果が日の目を見ることになります。

イギリスでは1946年、当時学生だったカズンズ（Cousins）とウェア（Ware）の課題としてピンチの実験が始まりました。それがトーンマン（Thonemann）の目に止まります。優れた研究の傍らスパイ活動もしていた理論物理学者フックスによる（旧）ソ連への情報漏洩が発覚し、1951年に機密研究と位置づけられるなか、**ピンチプラズマの不安定性**（ロープの結び目のように振れるキンク不安定性や磁力線の筒に凸凹ができるソーセージ不安定性）が知られるようになり、様々な装置が提案されます。導体壁と軸方向磁場で不安定性を克服すべく、1957年から運用されたトロイダルピンチゼータ（ZETA）は、中性子の発生を確認したものの、それは熱核融合によるものではありませんでした[10]。振り返れば失敗続きのような実験でしたが、プラズマの安定性や計測法についての大きな進歩に寄与しました。レーザートムソン**散乱法**もその1つで、ZETAの電子温度は数10~100万度程度であったことが明らかになります。

アメリカの計画は「**シャーウッド計画**」としてステラレータ（マッターホルン計画）、Zピンチ、磁気ミラーの研究が秘密裏に行われていました（1951-1959）。それらは、原子力平和利用会議（ジュネーブ会議）の第1回（1955年7月）から第2回（1958年9月）にかけ、次第に機密が解除され、公開されるにいたりました。核融合炉を成

立させるためのプラズマの条件（温度・密度・閉じ込め時間）を求めたローソン条件（1955）もまた、1957年に公表されています。

時は同じく1950年頃、ソ連ではピンチ不安定性の安定化のためにドーナツ型の軸方向磁場を強くしたトカマク型がサハロフとタムにより提案されます。1968年にT-3トカマクで高温プラズマの生成が報告されると、翌年、イギリスの計測チーム（カラム研究所の5人衆：Culham Five）が、最先端のレーザートムソン散乱法を引っさげて現地に向かい、1000万度の達成を証明しました。これを契機に世界中でトカマク方式の一大旋風が起ります[12]。アメリカでは1969年にModel-CステラレータからSTトカマク装置に改造される事態に至ります。

我が国では、天体物理学の研究者たちが核融合にいち早く着目し、京都大学基礎物理研究所の理論研究会で1956年4月に討論されています。続き加速器や放電物理の研究者たちが有志で定期研究会を開催するようになり、先進国に比べ小規模な大学規模の実験を始めることになります。1956年に大阪大学で国内初の直線ピンチ実験が行われ、1957年に電気試験所で環状型とシラー型、日本大学で誘導ピンチ（シートピンチ）、名古屋大学でトロイダルピンチ方式の名大トーラス（1958年実験開始）のプロジェクトが始まります[13]。京都大学では1958年にヘリコン計画と命名されるプロジェクトが立ち上がり、1959年よりヘリオトロンAによる実験がスタートし、現在のLHDやヘリオトロンJへとつながっています[14]。

より規模の大きい研究のための体制づくりが喫緊の課題であるとも認識され、1958年2月に湯川秀樹を会長とする核融合懇談会（その後1983年にプラズマ・核融合学会に発展）が任意団体として発足しました。1956年総理府に置かれた原子力委員会は核融合懇談会の意向をうけ、1958年4月11日に核融合専門部会を発足します。萌芽的な研究をめざすA計画、および諸外国並の中型装置建設をめざすB計画が議論され、いわゆるA-B計画論争となります（文献[15]の2章に詳しい）。やがて、(旧)科学技術庁管轄で日本原子力研究所核融合研究部門（後に量研機構へ）と、(旧)文部省管轄で名古屋大学にプラズマ研究所（後に核融合科学研究所へ）が設立されるなど、大規模研究に立ち向かうべく開発研究・学術研究の体制が整っていきます[16]。

1980年代には「3大トカマクの時代」に象徴される核融合3重積（密度×閉じ込め時間×温度）の飛躍的な記録更新が続き、1991年には重水素（D）と三重水素（T）を用いたDT実験による核融合反応がイギリスのJET装置で実証されました。1996年には、日本のJT-60U装置で、DD実験ではありましたが、仮にDT燃料を用いた場合に、加熱パワーを超える核融合出力が得られる**臨界プラズマ条件**（ブレイクイーブン）を達成しています。その後は米ソの冷戦終結の象徴ともいえる「レーガン・ゴルバチョフ会談(1985)」で、国際協力による核融合開発が提唱され、ITER計画へと繋がっています（3.3 核融合プラズマ）。

### [慣性核融合]

レーザー発振が初めて成功を取めた、1960年頃というのは、磁場閉じ込め核融合にとって「煉獄の苦しみ(1961)；アルチモビッチ」の発言で知られる、困難を極めた時期でした。1963年にはバソフとプロホロフによりレーザー核融合の原理が提案されていますが、水爆研究の知見を使っていたため機密研究が続けられ、1972年ようやく原理が公表されます。

慣性核融合では、氷状態の初期燃料から点火燃焼を伴う高密度高温状態を形成するための駆動源（ドライバー）として、パルスパワー（ピンチを含む）、イオンビーム、レーザーを用いる各方式が提案されています。

2022年にアメリカの国立点火施設NIFで、ブレイクイーブンと呼ばれる、投入レーザーエネルギーを超える核融合出力が達成され、エネルギー源としての開発が活性化しつつあります（磁場核融合とは原理や加熱の仕組みが異なり、それぞれブレイクイーブンの定義がなされるため、単純比較はできません）。

一方、極めて高いパワー密度をもつレーザーや大電流パルスパワー放電の特性を活かし、衝撃波、さらには爆風波とも言われる宇宙プラズマの超高流速、それに伴う渦構造を生成するなど、天体現象や極限的な物質状態を実験室に再現し、開拓する試みが精力的に行われています（3.4 慣性核融合・高エネルギー密度科学）。

### [プラズマ不安定性との格闘]

プラズマを閉じ込めるには、プラズマ自身もつ圧力（密度×温度）を、磁気圧（磁場の大きさの2乗に比例）で保持するため、炉工学の見地からは強磁場を生成する電磁石（3.6 超伝導材料）、プラズマの立場からは、低い磁場で高い圧力を実現する閉じ込め研究が目的とされてきました。

磁場核融合では、圧力と磁気圧のせめぎ合いによる不安定性や、ドリフト波不安定性等に起因する微視的な乱流が、粒子衝突から予測される拡散より100倍以上速く散逸してしまう「異常輸送」が研究者を苦しめてきました。

さらに、プラズマ内に電流を流す、ピンチ方式やトカマク方式では、電流に起因する様々な不安定性が伴います。

今日では、様々な「閉じ込め改善モード」が発見され、核融合に必要な炉心プラズマ条件が達成されるに至っています。

慣性核融合でも、レーザー照射でプラズマ化（アブレーション）され、加熱膨張する層と慣性力で取り残された層の間で圧力のせめぎ合いが生じ、高温プラズマが外部に押し出されてしまう、「交換型不安定性」が大きな障害であると1970年代前半には認識されていました（1974年IAEA会議で報告[17]）。これは流体物理学において定式化したレイリー（1883）、原爆実験で確認したテイラー（1950）の名より、「レイリー・テイラー不安定性」として知られています。

### [炉材料]

1960年代に、磁場閉じ込めの主流が単パルスのピンチ方式から金属リミターを有するトカマク方式に移行していくと、すぐに、プラズマ・壁相互作用の問題点が重要視されるようになりました(3.5 構造材料・プラズマ対向材料)。MoやNbなどの当時のプラズマ対向壁(第一壁という)の中性子、水素イオン、 $\alpha$ 粒子(ヘリウム原子核)のスパッタリング率が調べられ、幾度となく、核融合炉不成立の瀬戸際に立たされることとなります[18]。特に1974年にスパッタリングによる不純物混入による放射損失や不安定性が提起されると、極めて悲観的な空気が流れることになりました(その頃の情報をもとにしたと思われる、核融合不成立の根拠とする意見もいまだしばしば耳にします(筆者談))。

その後、1980年代に入ると、不純物対策として**ダイバータ配位**、炉心プラズマ性能として**Hモード**、熱流低減として、**ダイバータデタッチメント**が成功を収めていくこととなります。

### 3.1.5 新しいプラズマの概念へ

気体からプラズマを生成する場合、「温度を上げていくと…」という説明がよくはなされますが、圧力は密度と温度の積なので、プラズマの圧力を維持するために、実験室のプラズマは気体に比べると希薄な密度になっています。プラズマはイオンと電子が同じ数存在する“準中性”で、イオンの出す電気力線は隣のイオンに到達する前に電子に遮蔽されてしまいます。これを**デバイ遮蔽**といいます(1923年に強電解質溶液において見出された物理過程)。そのおかげで、熱運動速度(温度)を上げてクローロン反発力を受けることなく、イオン単独の集合に比べてはるかに高密度化しやすいのです。「プラズマ状態のおかげで磁場閉じ込め核融合の条件が達成可能なのだ!」とも言えます。

ところが、例えば恒星や巨大惑星(木星や土星)の内部、白色矮星などのように、クローロン力による位置エネルギーが、熱運動のエネルギーと同程度かそれ以上になると、「**準中性のままクローロン相互作用をするプラズマ**」になります。こうなると、金属や流体のように粒子間の結合の強い特徴を示すようになります。これを「**強結合プラズマ**」といいます。この特殊な状況は、イオンの価数の2乗に比例して起こりやすくなるため、プラズマ中の帯電したダストなどもその条件を満たすことが指摘されています。

電気的に中性ではなく、単一電荷の集団でも、磁場や電場、流れ場などの効果で閉じ込めることが可能です。高密度化が難しい反面、プラスとマイナスの再結合によって気体に戻る過程がないため、長時間存在することができます。純電子プラズマ、**ペニングイオントラップ**(1953)などもこの「**非中性プラズマ**」の一種です。

プラズマは「物質第4の状態」ですが、学問の発展と

ともに、その定義や概念は拡大しています。他の3つの物質状態同様、極限環境においては、状態間の区別がつかなくなっていく、とも言えるでしょう。現代の理論物理、実験・観察、シミュレーション、データ科学などを駆使することで、この先どのようなプラズマの世界が見えてくるのか、私たちもとても楽しみにしています。

### 参考文献

- [1] 小口 高:オーロラの物理学入門, 名古屋大学太陽地球環境研究所編集, 名古屋大学リポジトリ. [<https://doi.org/10.18999/28598>]
- [2] 板谷良平:20世紀におけるプラズマ物理の歴史と将来展望, 応用物理 **69**, 971 (2000). [<https://doi.org/10.11470/oubutsu1932.69.971>]
- [3] プラズマ・核融合学会:プラズマエネルギーのすべて(日本実業出版社, 2007).
- [4] 岡田 実・荒田吉明:プラズマ工学(日刊工業新聞社, 1965).
- [5] 明石和夫:プラズマプロセッシングの発展史概要-萌芽期・成長初期に重点を置いて-, 表面技術 **61**, 120 (2010). [<https://doi.org/10.4139/sfj.61.120>]
- [6] 京都大学大学院理学研究科附属天文台:花山天文台80年のあゆみ1章, 6章参照, 京都大学リポジトリ「紅」. [<http://hdl.handle.net/2433/240967>]
- [7] 亘 慎一 他:小特集 宇宙天気予報, プラズマ・核融合学会誌 **82**, 737 (2006).
- [8] 国立天文台水沢 VLBI 観測所:ホームページ [<https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/>].
- [9] 大橋隆哉:高温プラズマのX線観測で宇宙の大規模構造の形成を探る, プラズマ・核融合学会誌 **90**, 183 (2014).
- [10] 寿岳潤 他(2章宇宙論の基礎), 西田 稔(3章核融合):熱核反応・天体物理(共立出版, 1961). [国会図書館 <https://dl.ndl.go.jp/pid/2465737/1/3>]
- [11] P.C. パトナム(吉崎英男 訳):エネルギー問題の将来, 第8章 原子燃料の役割(商工会館出版部, 1955). [国会図書館 <https://dl.ndl.go.jp/pid/2472914/1/117>]
- [12] 飯吉厚夫 他:核融合研究50年の進展を振り返って, プラズマ・核融合学会誌 **85**, 487 (2009).
- [13] 山本賢三:核融合に関する技術討議会, 3章 国内の状況, 電気学会雑誌 **80**, 1304 (1960). [<https://doi.org/10.11526/ieejjournal1888.80.1304>]
- [14] 宇尾光治:核融合とヘリオトロン, 創造の世界(19)(小学館, 1975). [国会図書館 <https://dl.ndl.go.jp/pid/1737895/1/4>];「ヘリオトロン磁場による高温プラズマの閉じ込め」科学朝日20(2)(朝日新聞社, 1960). [同 <https://dl.ndl.go.jp/pid/2335214/1/8>].
- [15] 雨宮高久:核融合研究黎明期の歴史—日本人研究者の動向を中心として—博士学位論文(2016, 日本大学)日本大学リポジトリ. [<https://repository.nihon-u.ac.jp/xmlui/handle/11263/1130>]
- [16] 山本賢三:核融合の40年(ERC出版, 1998).
- [17] 吉川允二他:第5回 IAEA プラズマ物理学および制御核融合会議の概要, 日本原子力学会誌 **17**, 101 (1975). [<https://doi.org/10.3327/jaesj.17.101>].
- [18] 宮原 昭・壁谷善三郎:核融合装置におけるプラズマ壁相互作用の諸問題, 表面科学 **21**, 2 (1981). [<https://doi.org/10.1380/jsssj.2.2>]





## プロジェクトレビュー 総説 プラズマ・核融合サイエンスチャート

### 3. 歴史と広がり

#### 3. History and Diversity

##### 3.2 プラズマ応用

#### 3.2 Plasma Application

金子俊郎

KANEKO Toshiro

東北大学

(原稿受付日：2023年11月2日)

#### Keywords:

plasma, fusion, science chart, history, diversity, plasma application

史上初のプラズマ応用技術は、1857年にSiemensが発表したオゾナイザが最初であるとされています。Faradayが発生させた電離気体は減圧気体の放電によるものでしたが、Siemensが発生させたものは大気圧放電によるもので、誘電体バリア放電と呼ばれている放電方式です。プラズマの産業応用は、この史上初のオゾナイザをはじめとして、数多くの例があります。

応用物理学会では2010年にアカデミックロードマップを発刊し[1]、プラズマエレクトロニクス分科会(PE分科会)のロードマップも記載されています。本節では、PE分科会のアカデミックロードマップに記載の発展史を参考として、その後今日までの発展を追加し、それぞれの応用分野の歴史的な流れを樹形図としてプラズマ応用サイエンスチャートに示しました(図1)。

以下では、プラズマ応用サイエンスチャートに記載されている、「光源プラズマ」、「成膜プロセスプラズマ」、「微細加工プロセスプラズマ」、「プラズマ環境応用」、「プラズマ医療応用」、「プラズマ農業応用」等の歴史について述べるとともに、これらのプラズマ応用を推進する上で重要である「プラズマ診断」、「プラズマモデル化・シミュレーション技術」を取り上げ、その歴史について述べます。また、近年の環境、医療、農業応用に関連して研究・開発が進んでいる「気液界面プラズマ」の歴史についても紹介します。

##### 3.2.1 光源プラズマの歴史

放電を用いた光源応用の歴史は非常に古く、1808年にDavyがVoltaの電池を2000個接続した炭素アーク灯を実現しています。また、Davyは、水銀蒸気による放電現象

によって紫外線が発生することも発見しています。1859年にBecquerelによって行われたガイスラー管の蛍光体発光が、放電を用いて蛍光体を発光させた初めての例と言われています。ガイスラー管が直流高電圧で放電するのに対し、Teslaは、1893年に高周波電源を用いてガラス管内のガスを発光させています。1894年には、Mooreが窒素と二酸化炭素を封入したピンク色に発光する放電灯を発明しており、1900年には、Hewittが低圧水銀灯を発明しています。実用化されることになった蛍光灯は、ドイツのGermer等によって1926年に発明されたものであり、この蛍光灯の基本構成は、蛍光体が現在の蛍光灯のように放電管の内壁に塗布されています。ネオンサインの点灯は、1910年にClaudeによってフランスにて行われ、その後の光源応用は、Reilingのメタルハライドランプ、Schmidtの高圧ナトリウムランプ、等を経て、高輝度放電ランプ(HIDランプ)の実用化へとつながっています。また、低圧水銀灯をベースにした蛍光灯は、青野正明、神野雅文等による低環境負荷をめざした無水銀蛍光ランプへとつながっています[2]。

同様の放電光源の中でも、コヒーレントな発光をするものとして、気体放電レーザーが挙げられます。最初のレーザーは、1954年にTownes等によって発表されたマイクロ波のレーザー(=メーザー)です。光の波長域での初めての発振は、Maimanによるルビーレーザーであり、これはルビー結晶を用いた非気体の固体放電レーザーです。最初の気体放電レーザーは、1960年にJavan等によって発表された赤色のHe-Neレーザーです。その後、半導体レーザーの発振が相次いで報告されますが、1964年には、He-Neレーザーに次ぐ気体放電レーザーである青色の

Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai, MIYAGI 980-8579, Japan

author's e-mail: kaneko@tohoku.ac.jp

Arイオンレーザーの発振がGordon等によって報告されました。同じ年に、強力なパワーを誇る赤外域のCO<sub>2</sub>レーザーがPatelによって発明されました。1970年には、紫外域のエキシマレーザーが登場しています。これらのレーザーでの短パルス放電技術と光源の概念が合流し、木下博雄らが提案した超微細加工のための極紫外(EUV)光源やバリア放電ランプが研究開発されました[3]。

放電を用いた光源の中で、広く用いられたのがプラズマディスプレイパネル(PDP)です。最初のPDPは、1964年に米国イリノイ大学のBitzerとSlottowによって発表されました。その後、米国のベル研究所、IBM、日本のNHK、三菱電機、富士通が高解像度化やカラー化の開発により、超大型のカラーPDPが実用化されました。

プラズマディスプレイ技術とともに、大気圧を含む高気圧領域で生成される $\mu\text{m}$ ~ $\text{mm}$ スケールのマイクロプラズマの研究が急速に発展しました[4]。この期間に、小型プラズマ放電装置が開発され、微小なスケールでプラズマを生成し制御する能力が向上しました。マイクロプラズマは、分析化学、質量分析、プラズマ診断、バイオメディカル応用などのさまざまな分野で利用されています。

これらのサイズが小さく形状が制御された「マイクロプラズマ」をアレイ状の集合体として、電磁波の分散関係を考慮して設計・配置することで、メタマテリアルとして機能させることができます。ここで、プラズマは、外部生成電力の調整で時間的に存在およびパラメータが可変であり、特に比誘電率が負の媒質として働く点が特徴的です。具体例として、酒井道らは、マイクロ波帯からテラヘルツ帯において生成できる、動的なフォトニックバンドギャップ材料および負の屈折率媒質を実現しています[5]。

### 3.2.2 成膜プロセスプラズマの歴史

現在の産業を支える重要な技術のひとつとして、成膜に関するプラズマ応用があります。プラズマを用いた成膜の歴史は古く、1852年にスパッタリング現象を発見したGroveであり、Groveはスパッタリングによる飛散物が放電管内部に付着していること発見し、その後の1877年に、Wrightによってこのスパッタリング現象が薄膜の作製に応用されました。プラズマ支援の物理気相堆積法であるスパッタリングに対して、プラズマ支援の化学気相堆積法(CVD: Chemical Vapor Deposition)は、1953年にSchmellenmeierによって実施されています。ガスとしてはアセチレンが利用され、成膜されたものは黒色の薄膜であり、ダイヤモンドライクカーボンの先駆けとも言えます。

太陽電池や薄膜トランジスタにつながる水素化アモルファスシリコン薄膜の最初の成膜は、1969年にChittickによって報告されています。Chittickは、シラン(SiH<sub>4</sub>)プラズマを用いたCVDによる成膜を行うことによって、光導電性が硫化カドミウム(CdS)よりも高く、導電率の温度依存性が半導体的な薄膜を得ました[6]。これに対し、1975年のSpearとComberは、シランに対してリン添加と

ボロン添加の両方を試み、p型、n型に価電子制御することを可能にしました。その直後には、Spear等によるpn接合の形成とCarlson等による太陽電池の形成も報告されています。

2000年代には、畠山力三らによって、メタンやアセチレン等を原料ガスとしたプラズマCVDを用いることで、カーボンナノチューブを基板に垂直配向合成させる手法やカーボンナノチューブ内に異種原子・分子を導入する技術が開発されました[7]。また、平松美根男らによって、数層から数十層の多層グラフェンが基板にほぼ垂直に成長するカーボンナノウォールを種々のプラズマCVDを用いて合成する手法が報告されています[8]。

近年では、原子を一層ずつ堆積させる原子層堆積法(ALD: Atomic layer deposition)が盛んに研究されています。ALDは複数の気相原料(前駆体)を交互に基板表面に堆積させることで膜を生成する方法です。CVDとは異なり、異なる種類の前駆体が同時に反応領域に入ることではなく、それぞれ独立のステップとして導入・排出されます。そのため、各ステップにおいて、前駆体分子は基板表面で吸着可能なサイトが表面になくなった時点で反応が終了するため、ステップ数をコントロールすることで任意の構造・サイズの基板に対して高精度かつ均一に成膜することができるのが特長です。

ALDの歴史は古く、1960年代にレニングラード工科大学(現在のサンクトペテルブルク工科大学)のAleskovskiiとKoltsovによって分子堆積(ML: Molecular Layering)として、1970年代にフィンランドのInstrumentarium社において原子層エピタキシとして、それぞれ別々に開発されました。Instrumentarium社の技術は、1980年に国際会議において初めて発表され、その後、1990年代にフィンランドのMicrochemistry社が半導体向けアプリケーションに適したALD装置の開発を進め、2000年代にはフィンランドに蓄積されたALDのノウハウから幾つかのメーカーが誕生し、その後、ALD装置メーカーの数は急激に増加し、半導体向け成膜はALD技術の産業アプリケーションのブレイクスルーとなりました。

一方で、太陽電池等の高性能化をめざすうえで、プラズマによるシリコン薄膜等の形成時に発生する不純物の問題が顕在化してきました。シラン系プラズマでは、プラズマ中の微粒子の発生が太陽電池の変換効率等の薄膜の性能低下を招くという問題があり、渡辺征夫、白谷正治によってMie散乱を用いた詳細な調査が行われ、パルス変調や水素希釈がその微粒子の成長を抑制する手段であることが明らかにされました[9]。

これらの微粒子を積極的に合成する研究も進められています。光触媒、次世代電池あるいは革新電池等々に使用される微粒子として、直径100 nm以下の機能性ナノ粒子を大量に生成する技術が、制御型高気圧熱プラズマを用いて開発され[10]、その複雑なプロセスの数値モデリングによる予測も行われています[11]。

こうした微粒子を含むプラズマに関しては、新たな研

究分野として発展し、その中でも、プラズマ中に浮遊する微粒子が結晶構造のように配列するクーロン結晶は、1986年にIkeziによって理論的に予測され、日本の林康明と橘邦英[12]、台湾のChu等[13]、ドイツのThomas等[14]によって1994年に実験的にそれぞれ独立に実証されました。

### 3.2.3 微細加工プロセスプラズマの歴史

集積回路の製造工程において必要不可欠なのが微細加工プロセスであり、プラズマでしかできないことのひとつです。従来の化学反応にプラズマ中の荷電粒子の物理作用を重畳させることによって、超微細な異方性エッチングや選択エッチングを実現し、ナノレベルのトップダウン加工が可能となりました。

ガスプラズマを用いた世界初のエッチングは、1966年にIrvingによって提案されていますが、これは酸素ガスプラズマを用いたアッシングでした。これに対して、1973年に阿部東彦によって提案されたガスプラズマエッチングは、その後の微細加工の原点となる半導体プロセスエッチングの先駆けといえます[15]。

シリコン基板上の集積回路形成に必要となるSi上のSiO<sub>2</sub>の選択エッチングは、1975年にHeineckeによって初めて実現されました[16]。プラズマを用いたエッチングでは、ラジカルとイオンが寄与しますが、その役割を明らかにしたのが、CoburnとWintersです。ラジカルによる等方的な化学エッチングが異方性のイオン衝撃によって支援されるというメカニズムで説明できることを実験的に示しました[17]。

その後、低圧状況でのプラズマ生成の必要性から、低圧で放電開始が可能で、高密度プラズマが得られる各種の方式が提案されることになり、マイクロ波、マグネトロン、電子サイクロトロン共鳴、ヘリコン波、表面波、磁気中性線放電、誘導結合型プラズマ等の研究開発が活発化しました。

エッチングプロセスでは、プラズマに曝されるデバイスに対するダメージも解決すべき重要な課題となっています。イオン衝撃等の物理的なダメージは、当初より考慮されていましたが、デバイスの微細化によって、その問題が顕在化しました。こうしたプラズマエッチングにおけるダメージを引き起こす原因として、Sawinらによって電荷蓄積効果が初めて議論されました[18]。その解決法のひとつとして、寒川誠二らによって時間変調プラズマが提案されました[19]。現在も、微細化に伴って考慮しなければならないダメージの種類は増えており、その解決法が精力的に検討されています。

現在、半導体チップの演算性能向上と消費電力削減のため、2 nmプロセスの半導体製造技術が求められている中で、プラズマエッチング業界では、原子を一層ずつエッチングする原子層エッチング (ALE: Atomic Layer Etching) の研究開発が盛んに進められています。ALEの歴史は古く、1987年に米海軍のYorderが、ダイヤモンドの“Atomic Layer Etching”の米国特許を出願してお

り、これが世界初のALEの発明であると言われています。Yoderは、ラジカルとして窒素酸化物をダイヤモンドの表面に吸着させ、そこに希ガスと水素の混合プラズマから発生するイオンをパルスとして照射し、ラジカル吸着→パージ (排気) →イオン照射→パージ (排気) を1サイクルとして、ダイヤモンドの原子を一層ずつエッチングする手法を発見しました。日本では、1990年に堀池靖浩らが「デジタルエッチング」と称して、原子を一層ずつエッチングする手法を発表し[20]、日本では1990年代中旬にデジタルエッチング、ALEに関連する論文が増えています。その後、2013年にLam ResearchのGottchoがAmerican Vacuum Society (AVS) で学会発表を行い、Kanarikが論文発表[21]したことがトリガーとなって、2014年以降の現在に至る爆発的なALEの研究開発が起きたことが論文数などから明らかになっています。

### 3.2.4 プラズマの環境応用の歴史

プラズマの環境応用の一つは、Siemensの大気圧誘導体バリア放電を用いたガス処理です。Siemensの時代には、オゾンの発生器としての位置づけでありましたが、その他にも、人体に有害な窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) や硫黄酸化物 (SO<sub>x</sub>) も除害可能であり、それぞれ、玉置喜平次ら[22]と水野彰ら[23]によって報告されています。

また、大気圧の放電が可能であることから、液体の浄化などへの適用も試みられるようになりました。液体に直流的な通電をするとアーク放電に移行するため、多くの場合には、高圧パルス電圧の印加によって放電を得ています。水中での高電圧パルス放電については、1987年にClements, 佐藤正之, Davisが、その目視観察結果と発光スペクトル、並びに酸素ガス注入によるオゾン生成に関して初めて報告しました[24]。

2010年代中頃からは、地球温暖化防止のための温室効果ガスの削減や窒素肥料としての硝酸や、新エネルギーとしても注目されているアンモニアを空気中の窒素から合成する窒素固定等に関連して、プラズマを活用することで、化学反応を促進し、触媒活性を向上させる「プラズマ触媒」の研究が世界中で行われています[25]。

プラズマ触媒の一つの重要な応用分野として「ガス改質」があり、野崎智洋らによって研究が進められています[26]。ガス改質は、さまざまな原料ガス (メタン、二酸化炭素、等) から水素や合成ガス (水素と一酸化炭素の混合物) を生成するプロセスであり、エネルギー変換、水素製造、化学プロセスなどの分野で重要です。プラズマ触媒は、ガス改質プロセスの効率を向上させ、高い反応速度と選択的な反応を実現するために使用されています。

### 3.2.5 プラズマの医療応用の歴史

低温プラズマの医療応用として、殺菌・滅菌に応用しようとした例として、1964年のMenashiによる大気圧コロナ放電によるものがあります。その後、1987年に過酸化水素ガスのRF放電プラズマを用いた手法がJacobsと

Linによって発明され、研究開発が進められました[27]。これは、医療機関における院内感染等を抑止するために、熱に弱くオートクレーブなどを利用できない医療部材をプラズマによって滅菌する装置です。

一方で、北野勝久らは、低周波大気圧マイクロプラズマジェットを用いて、プラズマを照射した水（プラズマ処理水）による殺菌の研究を突き詰め、極めて高い殺菌力が酸性条件のみで得られることを発見して「低pH法」と命名し、この殺菌因子が過硝酸という化学物質であることを明らかにしています[28]。

2000年代になると、プラズマ医療科学として、生体へのプラズマの照射も盛んに試みられるようになってきました。大気圧低温プラズマは、創傷治療においても有望な選択肢として研究されており、プラズマを傷口に照射することで、傷の治癒が促進されることが実証され[29]、ドイツではプラズマ治療機器が実用化されています。また、2010年代には、プラズマはがん治療に有望な手法として研究が進んでおり、特に大気圧低温プラズマを用いたがん細胞の選択的自死（アポトーシス）や腫瘍の縮小などの研究が進められており、外科手術や放射線療法に代替手法として期待されています。特に、2013年には、堀勝らによって、プラズマを照射した細胞培養液をがん細胞や組織に注入することで、がんを正常細胞に対して高選択比で死滅させることができることが見いだされました[30]。この培養液は、プラズマ活性化培養液（PAM：Plasma Activated Medium）と命名され、国際用語になっています。

一方で、2000年代中頃には、ドレクセル大学のFridmanら[31]、産業技術総合研究所の池原譲ら[32]の取り組みにより、低温プラズマを利用した血液凝固促進法の研究が進められました。低温プラズマが生成する高い反応性を有する活性種や電荷が凝固プロセスに影響を与えることが理解され、プラズマ照射部の温度を体温レベルに保ちながら短時間で血液が凝固するため、画期的な止血方法として低侵襲手術の実現に寄与できることが報告されています。

また、低温プラズマを用いた遺伝子導入技術の開発も進められています。2002年に藤沢薬品工業（現アステラス製薬）の佐藤晋らによって知財化された後、同社の小川恭弘らにより論文として報告されましたが[33]、細胞生存率が低く、ダメージの少ないプラズマ遺伝子導入方法が求められるようになりました。その後、神野雅文ら[34]や金子俊郎ら[35]のグループによって、種々のプラズマ装置を用いて、低侵襲で高効率のプラズマ遺伝子導入手法が開発され、また導入機序の解明も進められており、遺伝子治療の分野でのプラズマ応用が期待されています。

### 3.2.6 プラズマの農業応用の歴史

プラズマの農業への応用も盛んになっています。低温プラズマを用いた病害の管理技術が研究されており、2010年代から、残留性の少ない植物病原菌の殺菌法として多

くの論文が発表され[36]、さらに、安藤杉尋、高橋英樹らのグループによって、プラズマで合成した反応性の高い五酸化二窒素等の活性窒素種により植物の病害抵抗性（植物免疫）が強化されることが報告され[37]、化学農薬の使用を減少させる可能性が示されています。

また、低温プラズマを用いた種子処理技術が開発され、古閑一憲、白谷正治らによって種子の発芽率向上や植物の成長促進が報告され、収穫量の増加や栽培期間の短縮等が期待されています[38]。一方で、プラズマ処理により、空気から窒素肥料成分を生成できることが明らかとなり、従来の大量のエネルギー消費とCO<sub>2</sub>排出を伴うハーバー・ボッシュ法に代わる、新たな窒素固定法として世界中で研究が活発化しています。

また、プラズマ技術は、食品の殺菌や保存にも利用され、食品の品質を向上させる役割を果たしており、高木浩一らによって、食品の長期保存や品質の保持に対するプラズマの応用が研究されています[39]。

### 3.2.7 プラズマ診断の歴史

プラズマプロセス診断については、発光分光、吸収分光、レーザー分光、質量分析等、様々な手法があります。ここでは、これまでに述べたプラズマ応用分野に関して、放電やプロセスのメカニズム解明に関係した例を取り上げます。

薄膜堆積の分野では、特にシランプラズマを用いた水素化アモルファスシリコンの成膜前駆体の特定のために、様々な手法が試みられてきました。1980年には、Turban等によって質量分析が試みられ、最も密度の多いイオンがSiH<sub>3</sub><sup>+</sup>であることが明らかになりました。その密度は電子密度とほぼ同じであり、電荷中性が主にこのイオンによって成り立っていることが明らかにされました。松田彰久らは、質量分析のイオン化をON/OFFすることによって、中性ラジカルの密度がイオンよりも4桁から5桁多いことを明らかにしました[40]。成膜速度を説明するために必要な前駆体の密度が中性ラジカルの密度に近いことから、成膜前駆体は中性ラジカルであると推測されるようになりました。基底状態の中性ラジカルの光学的測定のためには、外部からの励起が必要であり、レーザー誘起蛍光法（LIF：Laser-Induced Fluorescence）によるSiとSiHの計測が1984年にSchmitt等によって試みられました。SiH<sub>4</sub>を分解して生成される残りの中性ラジカルはSiH<sub>2</sub>とSiH<sub>3</sub>であり、SiH<sub>3</sub>については、1988年後藤俊夫、廣田栄治等によって赤外レーザー吸収分光法が適用され、その密度が、成膜速度を説明できるオーダーであり、成膜速度との相関もよいことが明らかにされています[41]。

エッチングプラズマについては、これまでにSiH<sub>4</sub>プラズマの診断で発展したレーザー吸収分光法が適用されました。特に、フッ化炭素系プラズマについては、後藤俊夫、堀勝等によって精力的にラジカル密度が計測され、それまでCF<sub>x</sub>ラジカルが成膜の前駆体であるとされていた仮定が、条件によっては全く成り立たないことや壁からの

生成がある、ということを見出しています[42]。また、菅井秀郎、豊田浩孝は、質量分析器のイオン化エネルギーを精密に変化する出現質量分析法を開発し、困難であった中性ラジカルの計測を可能にしました[43]。

一方で、近年の大気圧低温プラズマにおける医療・農業応用研究を推進するには、大気圧プラズマ中ならびにプラズマを液体に接触させた際に形成される界面（プラズマ気液界面）領域での、気相・液相の各相あるいは界面における粒子の（電子、イオン、活性種等）の輸送や反応過程を解明するための診断技術が必要とされています。そのために、「レーザー誘起蛍光法による大気圧プラズマ中のラジカル計測」、「レーザートムソン散乱による大気圧プラズマの電子密度・電子温度計測」、「質量分析法による大気圧プラズマ中のイオン計測」、「電子スピン共鳴法によるプラズマ照射液体中ラジカル測定」等の診断技術が発展してきています。

### 3.2.8 プラズマのモデル化・シミュレーションの歴史

放電プラズマのシミュレーションは、最初は、1970～1980年代におけるハイパワーの気体放電レーザーの開発のために行われました。その最初の試みは、Johnsonによって行われたKrFレーザーのモデル化とシミュレーションです。レーザーのモデル化・シミュレーションでは、対象とする原子の種類は少ないが、同じ原子であっても異なるエネルギー準位にあるものは区別して扱うため、考慮したエネルギー準位の数だけ異なる化学種を扱っていることとなります。これは、異なる化学種を多数扱わなくてはならないプロセスプラズマのモデル化とシミュレーションをしていることと同じでした。同様のモデル化・シミュレーションを行っていたKushnerは、これをエッチングプロセスプラズマに適用しました。モデル化手法についても改良がなされ、実用周波数である13.56 MHzに対応させた緩和流体モデルが真壁利明等によって開発されました[44]。

誘電体バリア放電形式で大気圧において放電させると、一般には、ストリーマ放電と呼ばれる縞状の放電となりますが、岡崎幸子等は、1988年にヘリウムガスを用いる場合には、グロー状の均一な放電となることを初めて見出しており、現在の大気圧プラズマ研究と応用の定礎となっています[45]。この大気圧グロー放電に関する計算機シミュレーションに着目すると、1990年代後半から2000年代後半の約10年の間で、様々なモデル（流体モデル（局所電界近似や擬似熱平衡近似）、粒子モデル（PIC/MCC法）、これらを組み合わせたハイブリッドモデル）によるシミュレーションが、Massinesら、Tochikuboら、Rajaら、Golubovskiiら、Kongらの研究グループによって、精力的に進められました。彼らのグループは、印加電圧（直流、交流、パルス）、駆動周波数（低周波～高周波（RF））、原料ガス、誘電体電極の有無など様々な条件における大気圧グロー放電の基礎的特性に関して数多く報告を行っています[46]。

その他にも、ストリーマ放電、誘電体バリア放電のシミュレーション、さらには、プラズマと気体（大気圧プラズマジェット）、液体（プラズマ処理水、プラズマ活性培養液）、固体（表面改質、プラズマ触媒作用）との相互作用に関するモデリング・シミュレーションが行われており、現在でも日々進展しています。

### 3.2.9 気液界面プラズマの歴史

気液界面プラズマとは、プラズマ（気相）と液体（液相）とを組み合わせた放電形態のことを指し、気相中で生成したプラズマを液体に接触させる方法と液相中で直接プラズマを生成する方法があります。どちらの手法でもプラズマと液体が接触した境界、すなわち「プラズマ気液界面」が存在し、バルクの液相領域とは異なった性質を示すため、様々な反応場としての活用が期待され、多くの研究が行われており、いくつかのレビュー論文にまとめられています[47]。ここでは、その中から幾つかの例を紹介します。

液体を電極として用いた放電は、1887年のGupkinらによる液体を電極とした大気圧放電実験をはじめとして、Hicklingら、Satoら、Lockらによって種々の放電形態のプラズマが生成されています。気液界面プラズマは様々な分野に応用されており、酸化処理・分解などの化学分野における応用から、バクテリア分解などによる排水処理等の環境改善、液体中の微量物質分析等に使われ、さらにはがん治療や遺伝子導入等の医療分野にまで及んでいます。また、ナノ材料合成への応用も盛んに行われており、化合物含有溶液に対してプラズマによる水素還元やグロー放電による電子還元作用を用いて気液界面領域に金属ナノ粒子を合成する手法等が報告されています。

一方で、液相中でアーク放電プラズマやグロー放電プラズマを発生させ、様々な表面処理や材料合成に応用する研究も数多くなされています。このうち、液相中で生成するグロー放電プラズマはソリューションプラズマとも呼ばれており[48]、液相中の非平衡プラズマであることから、同じ液相中プラズマの液相中アーク放電プラズマに比べて溶液温度の上昇が抑えられるという特徴があります。このような特徴を生かし、金ナノ粒子を始めとした金属・半導体ナノ粒子の合成や天然高分子の低分子化、ナノカーボン材料の合成等の様々な分野への応用が行われています。

プラズマが液体と接触する界面では、プラズマを生成するガスや液体の種類によって、多種多様な活性種や前駆体が生成され、それらが上述した生体作用や材料合成に大きく寄与しています。活性種の中でも寿命が短い（1秒以下）短寿命活性種は、その反応性の高さから生体・植物への作用効果が高いと考えられており、プラズマが照射された液体の界面での短寿命活性種の時空間計測が重要となっています。金子俊郎らは、直径0.1 mm程度の細い高速液柱流を使って、プラズマを照射した際に生成される短寿命ラジカルの時間発展をサブミリ秒のオーダーで計測することに成功しています[49]。

### 3.2.10 プラズマ応用のまとめ

以上のように、プラズマ応用のサイエンスチャートとして、プラズマ応用に関するいくつかの分野についてその歴史を含めて紹介しましたが、プラズマ応用の分野は非常に幅広く、本章で全てを紹介できてはいないことをご了解いただきたいと思います。

現在、応用物理学会プラズマエレクトロニクス分科会では、アカデミックロードマップの改定が進められていますし、また、日本学術会議「未来の学術振興構想」において、堀勝らが申請した「低温プラズマの学術とイノベーション推進のための研究戦略」が採択されています。

図1の樹形図が、さらに発展して大樹となっていくことを期待しています。

#### 参考文献

- [1] [https://www.jsap.or.jp/archives/jsap75/academic\\_roadmap.html](https://www.jsap.or.jp/archives/jsap75/academic_roadmap.html)
- [2] M. Jinno *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **38**, 4608 (1999).
- [3] H. Kinoshita *et al.*, Vac. Sci. Technol. B **7**, 1648 (1989).
- [4] K. Tachibana, IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering **1**, 145 (2006).
- [5] O. Sakai and K. Tachibana, Plasma Sources Sci. Technol. **21**, 013001 (2012).
- [6] R.C. Chittick *et al.*, Electrochem. Soc. **116**, 77 (1969).
- [7] R. Hatakeyama *et al.*, Plasma Chem. Plasma Process. **34**, 377 (2014).
- [8] M. Hiramatsu *et al.*, Appl. Phys. Lett. **84**, 4708 (2004).
- [9] M. Shiratani *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **39**, 287 (2000).
- [10] Y. Tanaka *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **59**, SHHE07 (2020).
- [11] M. Shigeta, IEEE Trans. Electr. Electron. Eng. **14**, 16 (2019).
- [12] Y. Hayashi and K. Tachibana, Jpn. J. Appl. Phys. **33**, L804 (1994).
- [13] J.H. Chu and L.I. Phys. Rev. Lett. **72**, 4009 (1994).
- [14] H. Thomas *et al.*, Phys. Rev. Lett. **73**, 652 (1994).
- [15] H. Abe *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **12**, 154 (1973).
- [16] R.A.H. Heinecke, Solid State Electron. **18**, 1146 (1975).
- [17] J.W. Coburn and H.F. Winters, J. Appl. Phys. **50**, 3189 (1979).
- [18] J.C. Arnold and H.H. Sawin, J. Appl. Phys. **70**, 5314 (1991).
- [19] T. Mieno and S. Samukawa, Jpn. J. Appl. Phys. **34**, L1079 (1995).
- [20] H. Sakaue *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **29**, 2648 (1990).
- [21] K.J. Kanarik *et al.*, Solid State Technol. **56**, 14 (2013).
- [22] K. Tamaki *et al.*, Nippon Kagaku Kaishi **2**, 1582 (1979).
- [23] A. Mizuno *et al.*, IEEE Trans. Ind. Appl. **22**, 516 (1986).
- [24] J.S. Clements *et al.*, IEEE Trans. Ind. Appl. **23**, 224 (1987).
- [25] A. Bogaerts *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **53**, 443001 (2020).
- [26] T. Nozaki *et al.*, Energy Fuels **21**, 2525 (2007).
- [27] P.T. Jacobs and S.M. Lin, in *Irradiation of Polymers*, ed. R.L. Clough and S.W. Shalaby (American Chemical Society, 1996), Chapter 17, pp.216-239.
- [28] S. Ikawa *et al.*, Plasma Process. Polym. **7**, 33 (2010).
- [29] S. Arndt *et al.*, PLoS One **8**, e79325 (2013).
- [30] F. Utsumi *et al.*, PLoS One **8**, e81576 (2013).
- [31] G. Fridman *et al.*, Plasma Chem. Plasma Process. **26**, 425 (2006).
- [32] S. Ikehara *et al.*, Plasma Process. Polym. **12**, 1348 (2015).
- [33] Y. Ogawa *et al.*, Biotechnol. Bioeng. **92**, 865 (2005).
- [34] M. Jinno *et al.*, Arch. Biochem. Biophys. **605**, 59 (2016).
- [35] T. Kaneko *et al.*, J. Clin. Biochem. Nutr. **60**, 3 (2017).
- [36] B. Adhikari *et al.*, Front. Plant Sci. **11**, 77 (2020).
- [37] D. Tsukidate *et al.*, PLoS One **17**, e0269863 (2022).
- [38] K. Koga *et al.*, Appl. Phys. Express **9**, 016201 (2016).
- [39] K. Takaki *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. **43**, 3476 (2015).
- [40] A. Matsuda and K. Tanaka, Thin Solid Films **92**, 171 (1982).
- [41] N. Itabashi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **27**, L1565 (1988).
- [42] K. Takahashi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **32**, L694 (1993).
- [43] H. Sugai and H. Toyoda, J. Vac. Sci. Technol. **A10**, 1193 (1992).
- [44] T. Makabe *et al.*, Phys. Rev. A **45**, 2520 (1992).
- [45] S. Kanazawa *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **21**, 838 (1988).
- [46] F. Tochikubo *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **38**, 5244 (1999).
- [47] P.J. Bruggeman *et al.*, Plasma Sources Sci. Technol. **25**, 053002 (2016).
- [48] N. Saito *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 0102A4 (2018).
- [49] K. Takeda *et al.*, Appl. Phys. Express **14**, 056001 (2021).

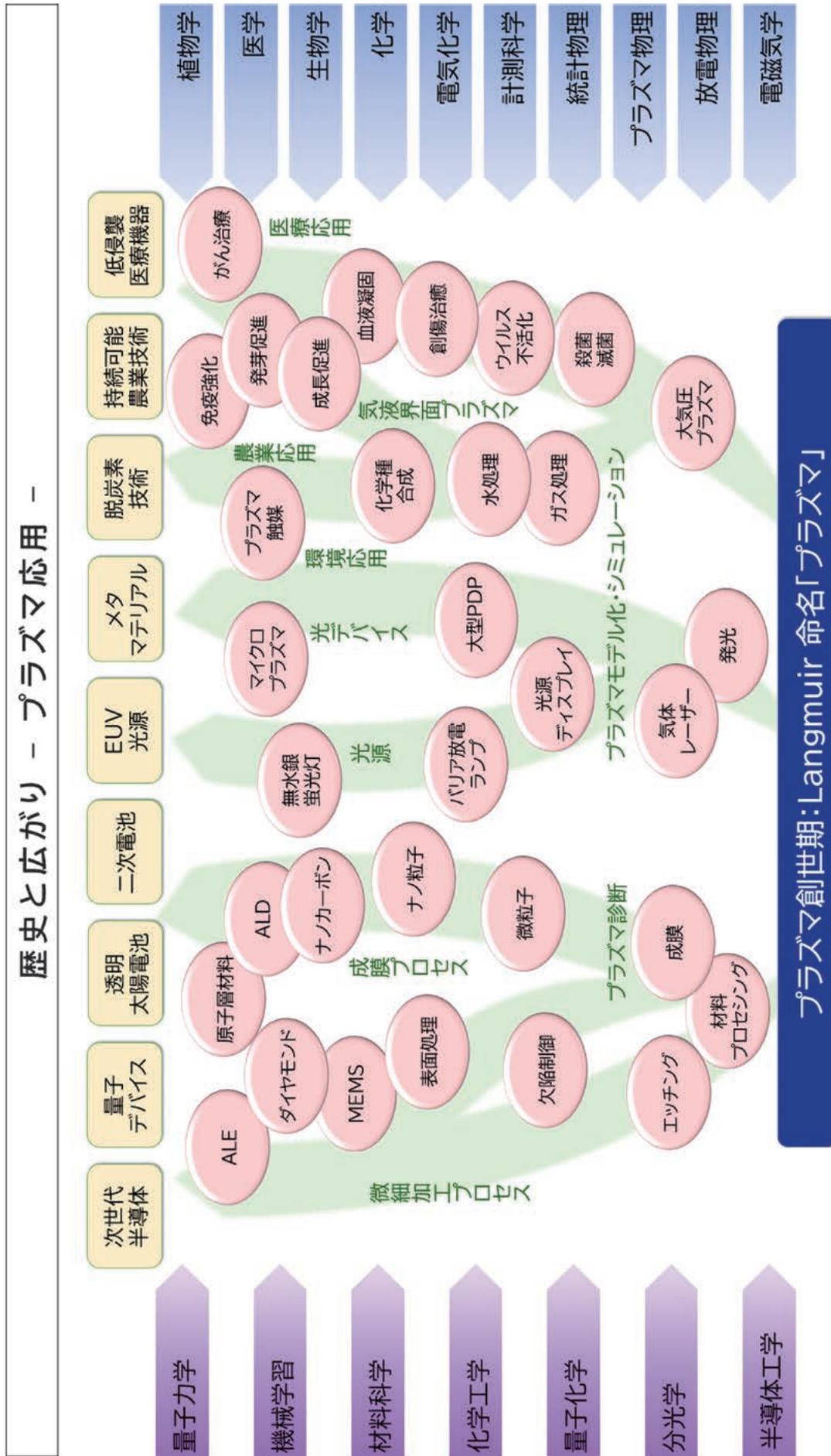


図1 プラズマ応用サイエンスチャート。



## プロジェクトレビュー 総説 プラズマ・核融合サイエンスチャート

### 3. 歴史と広がり

#### 3. History and Diversity

##### 3.3 核融合プラズマ

##### 3.3 Fusion Plasma

浅井朋彦, 雨宮高久

ASAI Tomohiko and AMEMIYA Takahisa

日本大学

(原稿受付日: 2023年11月2日)

#### Keywords:

plasma, fusion, science chart, history, diversity, fusion plasma

磁場閉じ込め核融合プラズマの歴史は、これまで「装置」の変遷や同方式内の開発史としてまとめられたものが一般的となっています。ここでは、学術的なつながりに主眼を置き、研究の流れやそれらの関連性についてインフォグラフィックスとして整理することを試みました。

少々粗い分類ですが、現在の核融合プラズマ研究に繋がった実験研究は、大きく2つの源流を持つように思われます。一つは、放電現象などから始まった、プラズマを閉じ込めて制御しようという流れです。核融合研究の黎明期には、単純ミラーや単純トーラスを経て、閉じ込め性能や不安定性の制御などを目的とした様々な装置が考案され、実験が行われました。ステラレータ/ヘリオトロンに続きトカマクが開発され、閉じ込め性能が格段に向上すると、閉じ込め性能を劣化させる不安定性の発見・理解とそれらの制御という研究サイクルによって、プラズマ性能が着実に向上してきました。やがてプラズマ性能が装置スケールに依存するようになると、研究コミュニティや歴史も、「方式」に紐づけられて整理されるようになりました。

もう一方は、アルヴェーン (H. Alfvén) などの実験に端を発する、天体プラズマで生じる現象を実験により理解しようという流れです。電磁流体力学的 (MHD) 緩和状態としても知られるスフェロマックは、1960年頃にアルヴェーン等が同軸ガンにより磁化プラズマリングの生成を行ったことが起源とされています。緩和に伴う不安定性は学術的な興味の対象でもあり、プラズマとしてのあるがままの状態を利用し、高効率な核融合方式をめざす研究が比較的小型の装置により数多く行われてきたことも特徴です。外部磁場コイルによる制御を行わないこ

とからベータ値が高く、イオンが局所性を持たないことから、二流体緩和など新たな学術課題も生まれています。1990年代後半以降、北米を中心に核融合開発を行うスタートアップ企業が創立されていますが、これらの多くが関連する方式を採用していることも興味深い傾向です。

高い閉じ込め効率とプラズマの制御性の両立をめざす球状トカマクや、トカマクにおける内部輸送障壁 (ITB) やヘリカルにおける帯状流の形成など、プラズマの自己調整機能を利用することで高性能なプラズマが得られることが見出されたように、上記の2つの「流れ」の境界で新たな発見が得られています。

#### 3.3.1 研究のはじまりから「装置」が主役になるまで

核融合プラズマ分野の歴史において、その黎明期では実験装置は学術的な課題を解決するための手段の一つであり、様々な装置が考案、建設されました。ここでは装置が大型化し、歴史が閉じ込め方式に紐付けされるものになる以前の歴史について概観してみたいと思います[1-3]。

1920年、英国の天文学者であるエディントン (A.S. Eddington) は、星の進化を説明する際に、アストン (F.W. Aston) の軽元素の同位体発見に基づき、水素とヘリウムによる恒星での核融合反応の可能性を指摘しました。この指摘は、原子核の融合反応によって莫大なエネルギーが発生するという「核融合」エネルギーの存在を初めて論じた研究と位置づけられています。その後、1928年にガモフ (G. Gamow) がアルファ崩壊に量子論を適用して、2つの原子核間の強い相互作用がクーロン力を打破する確率を推定し、アトキンソン (R.d'E. Atkinson) と

Department of Physics, College of Science and Technology, Nihon University, TOKYO 101-8308, Japan

corresponding author's e-mail: asai.tomohiko@nihon-u.ac.jp

ハウターマン (F.G. Houtermans) は1929年に太陽のエネルギーが水素からヘリウムへの融合反応の結果であるとして、定量的に天体の核融合を説明することを試みました。さらに1938年、ベーテ (H. Bethe) やワイゼッカー (C. Weizsäcker) によって、太陽の核融合反応サイクル (CNOサイクル) が発表されています。

このような理論的な研究に加えて、1932年にはコッククロフト (J.D. Cockcroft) とウォールトン (E. Walton) が電圧増倍整流装置 (加速器) を用いて、リチウムに陽子を照射してヘリウムを生成する反応に成功しています。なお、物質の第四状態を「プラズマ」と初めて称したのは、ラングミュア (I. Langmuir) の1928年のプロシーディングであったようです。

このような純粋な学問としての核融合反応に関する研究が進められた反面、戦争の影響もあって、核融合反応の兵器利用がアメリカやソ連、イギリスなどを中心に進められることになり、核分裂反応と同様、核融合反応の研究も各国で機密事項として取り扱われました。しかし、エネルギー利用をめざした研究の多くは軍事研究とは別に進められ、各国で実験装置が建造されました。イギリスのトラス型ピンチ装置ZETA、ソ連のミラー装置OGRA、アメリカのステラレータ-ヘリオトロン型装置Model C Stellaratorはその代表例です。

1955年8月、スイスのジュネーブで開催された第1回原子力平和利用国際会議において、議長であったバーバ (H.J. Bhabha) が、今後20年以内に核融合エネルギーの解放と制御が可能になる、と発言したことをきっかけに、核融合という原子核反応が広く認知されることになりました。また、磁場閉じ込めの観点からすると、1955年10月のNICB (National Industrial Conference Board) 第4次年会において、スマイス (H.D. Smyth) が電磁場によるプラズマ閉じ込めの方法について言及して以降、テラー (E. Teller) やクルチャトフ (I.V. Kurchatov)、ポスト (R.F. Post) らによって、磁場閉じ込めに関する講演記録や論文が発表されていきました。それまで、多くの研究者 (正確には、各国の機密研究に参画していない研究者) たちが「加速器を用いた衝突による核融合反応」を前提としていたため、磁場閉じ込めの方法の開示は大きなインパクトがあったと推察されます。

1958年9月に行われた第2回原子力平和利用国際会議では核融合のセッションが設けられ、各国が一斉に研究結果を開示しました。ところが、研究成果から判明したのは、ボーム拡散や各種不安定性の影響で、閉じ込めが上手くいかないという状況でした。

不安定性に関する研究は古くから行われており、例えば1949年にはボーム (D. Bohm) らによってボーム拡散が、1954年にはクルスカ (M.D. Kurksal) とシュヴァルツシルト (M. Schwarzschild) によって、MHD不安定性 (フルート不安定性) に関する理論研究の成果が報告されています。また、1956年に刊行されたスピッツァー (L. Spitzer) 著「完全電離ガスの物理 (“Physics of Fully Ionized Gases”)」では古典拡散について詳述されたほか、

1957年にはローゼンブルース (M.N. Rosenbluth) とロングマイヤー (C.L. Longmire) がMHD不安定性の安定化条件を論文として発表しています。ところが、この当時は理論と実験の対応が悪く、巨視的なMHD不安定性に対しても、安定化の方法が模索されている段階でした。

その後、極小磁場 (min.B) 配位と平均極小磁場 (Average min.B) 配位が提案され、実験による実証が試みられました。極小磁場配位の実験的実証としては、ソ連のヨッフエ (M.S. Ioffe) らによって行われた複合磁場によるミラー装置での実験が挙げられ、同成果は1961年9月に開催された国際原子力機関 (IAEA) 主催の第1回プラズマ物理と制御核融合に関する国際会議 (The International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, 現在のFusion Energy Conferenceの前身、以下IAEA会議) でPost deadline paperとして発表されました。一方、平均極小磁場配位の効果を実証した最初期の成果としては、General Atomics (GA) に所属していた日本人研究者である大河千弘らが、1965年9月の第2回IAEA会議で発表した内部導体系装置 (Toroidal Octupole) による水素プラズマの閉じ込め実験を挙げるすることができます。

このほか、1965年までに行われた研究により、ロス・コーン不安定性やドリフト不安定性といった速度空間不安定性の重要性が認識されたほか、第2回IAEA会議で報告されたマルムベルグ (J.H. Malmberg) らによるランダウ減衰の実験的検証が高い評価を得るなど、この頃までにプラズマ物理学の分野が大きく進展したと言えます。

これらの研究に対して、ソ連で開発されたトカマクは、第2回IAEA会議の段階で全貌が公開されましたが、欧米諸国の研究者はその成果に疑いを持っていました。1968年8月、ソ連のノボシビルスクで開催された第3回IAEA会議で、ソ連のアカデミシャンであるアルティモビッチ (L.A. Artsimovich) らは、トカマク装置T-3が「ボーム時間の30倍」という、当時としては各段に長い閉じ込め時間と、1 keVの電子温度を実現したと発表しました。会議後、イギリスのカラム研究所のグループがレーザー散乱を用いたT-3の電子温度測定を行い、第3回IAEA会議での発表が正確であったことを提示したことで、世界各国の研究機関が競ってトカマク装置を建造することになりました。

1970年代に入ると、磁場閉じ込め研究の歴史は「装置」との紐づけが強くなっていったと言えます。現に、本学会誌第84巻特集号に掲載された「フローチャートにみる核融合の50年」においても、1970年以降になると、研究機関での装置の完成やその成果がまとめられています [4]。当然ながら、そこには実験装置の大型化や研究の組織化が関係していると考えられます。

### 3.3.2 核融合プラズマインフォグラフィックス

これらの背景を踏まえ、核融合プラズマ分野の歴史について学術的トピックスに着目したフローチャートとそれらの相関をまとめたサイエンスチャートインフォグラ

フィックスを作成しました。フローチャートは、前節で解説したようなこの領域の歴史的経緯を学術的な発見に着目して網羅的に辿ったもので、3枚のチャートで構成されています(図1)。

サイエンスチャートインフォグラフィックス(図2)は、学術的な興味や課題に着目し、それらの関係を一目で確認できるようにまとめたものです。冒頭で解説した「2つの源流」を起点とし、学術課題や閉じ込め方式の関連性をできるだけシンプルにまとめました。直感的なイメージを与えるため、厳密には1つの軸には乗りませんが、ベータ値の高低、動的/静的、自己組織化傾向の高低で、2つの系譜を対比させました。

トカマクやヘリカルにつながる流れは、不安定性を伴う緩和や配位の制御を困難にする自己組織化と言ったプロセスの発生を、強い外部磁場により(言い換えるとベータ値を犠牲にして)抑制しているとも言えます。他方、FRC(Field-Reversed Configuration)やSpheromak/RFP(Reversed Field Pinch)などの方式は、プラズマがあるがままの状態に置くことで高効率な閉じ込めを得ようとする方式であるとして対比すると、その概念の違いがわかりやすいように思います。

トラスにおいて最も高いベータ値を持つFRCや無力配位とも呼ばれるSpheromakは緩和状態にあり、ロバスト安定性を持つとも言われています[5]。有限な抵抗を持つプラズマでは、電流分布の制御などがなければプラズマは緩和し続け、その際に生じる不安定性は閉じ込め性能を劣化させます。これを避けるため、例えばSpheromak同様にテイラー緩和状態にあるRFPでは、Pulsed Poloidal

Current Drive[6]のような緩和を抑制する試みがなされていたことも興味深い点です。一方、トカマクやヘリカルにおいては、Hモードへの遷移やITBの形成など、プラズマの自己調整機能により高閉じ込め状態が得られています。俯瞰すると、2つの「源流」からの流れが交わる領域に高性能な磁場閉じ込めプラズマがあるかもしれません。このような横断的な研究展開が、近い将来、核融合によるエネルギー生産の実現をもたらしてくれるものと期待しています。

また、このインフォグラフィックスについては、プラズマ・核融合学会内の異なる分野の研究者が、一般の方向けの講義などでも容易に使えるようにとの意図に基づいて、簡単な解説(図2上)とより広い学問領域との関係(図2下)を加えた2つのバージョンを作成しました。

### 参考文献

- [1] 広重 徹: 自然 **13**, 3 (1958).
- [2] 宮本健郎: プラズマ物理・核融合(財団法人東京大学出版会, 東京, 2004) p. 257.
- [3] C.M. Braams and P.E. Stott, *Nuclear Fusion Half a Century of magnetic Confinement Fusion Research* (IoP, 2002).
- [4] 松岡啓介: プラズマ・核融合学会誌**84**特集号, 92 (2008). [https://www.jspf.or.jp/Journal/PDF\\_JSPF/jspf2008\\_10b/jspf2008\\_10b-92.pdf](https://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2008_10b/jspf2008_10b-92.pdf)
- [5] E. Kawamori and Y. Ono, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 85003 (2005).
- [6] Y. Yagi, *Nucl. Fusion* **45**, 138 (2005).

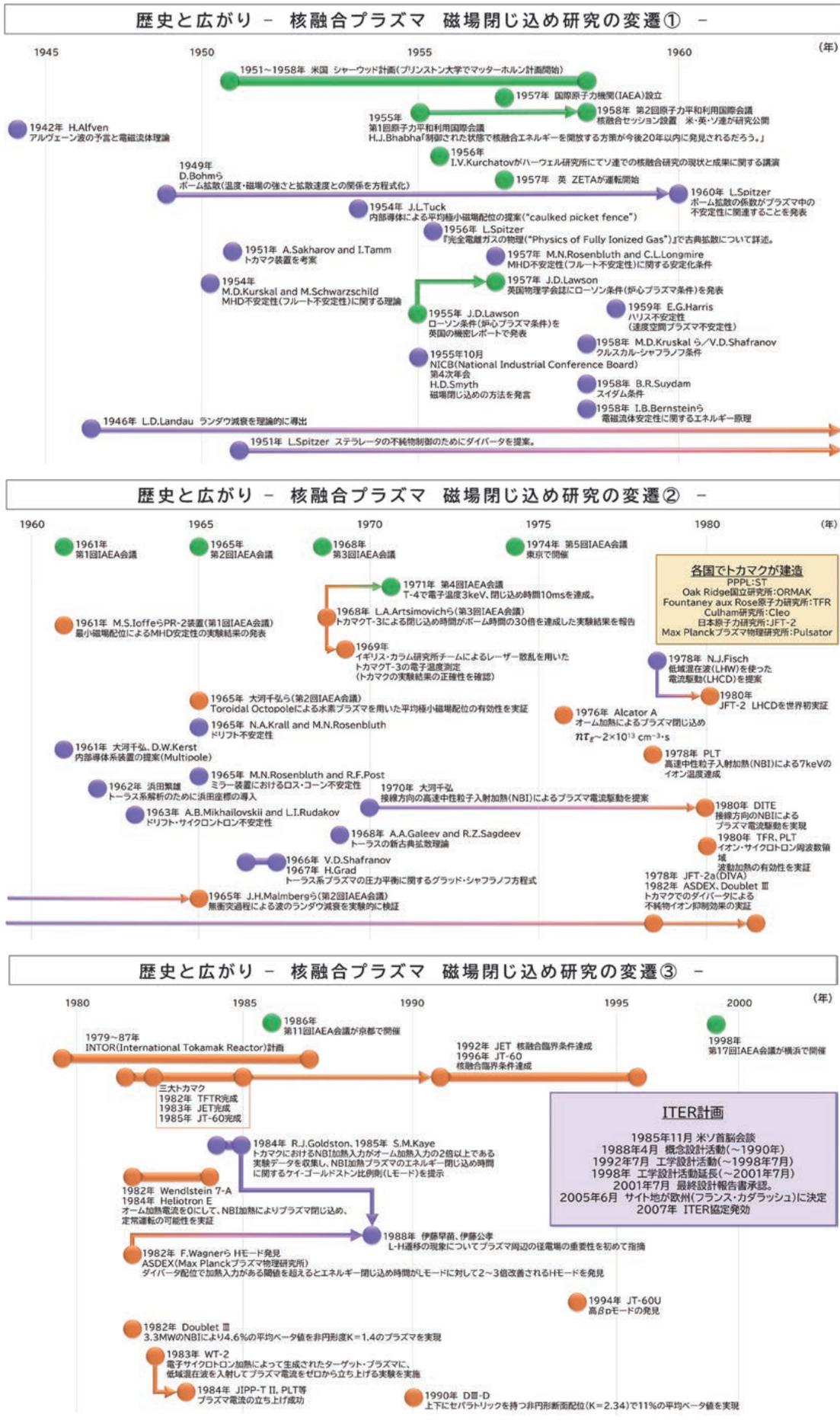
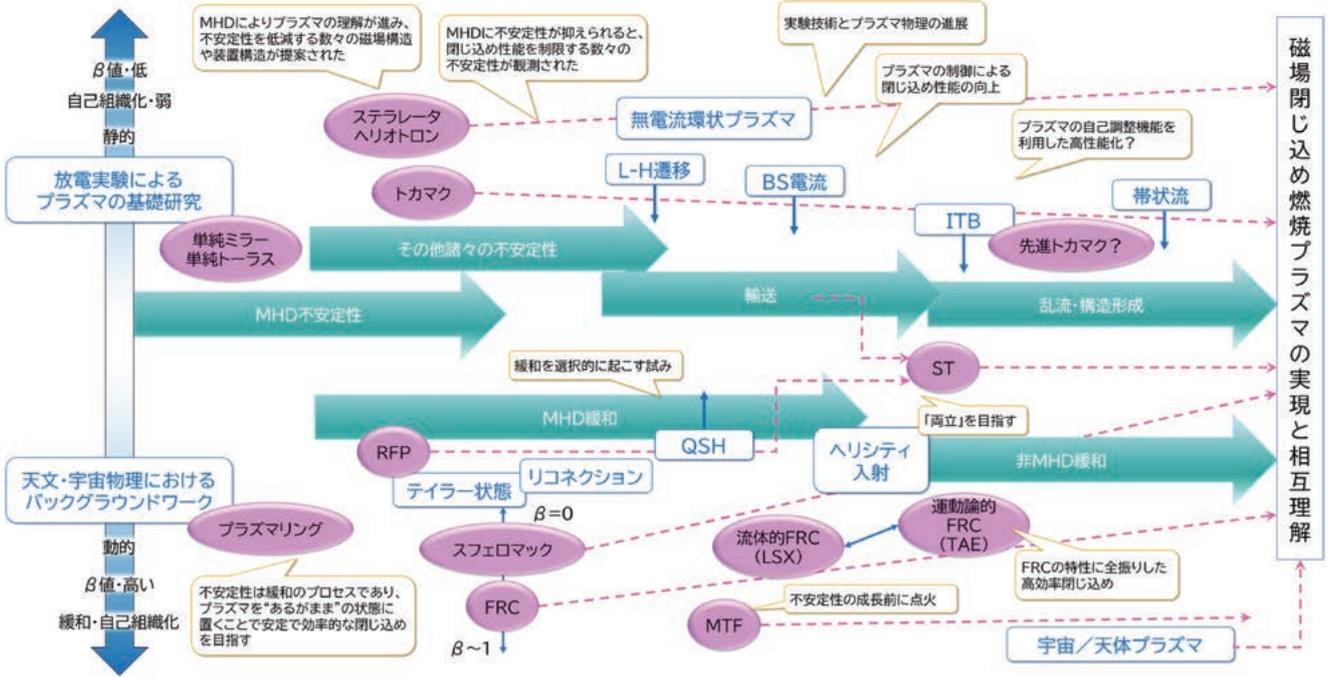


図1 磁場閉じ込め核融合プラズマの変遷フローチャート.

歴史と広がり - 核融合プラズマ 核融合プラズマサイエンスチャート -



歴史と広がり - 核融合プラズマ 核融合プラズマサイエンスチャート -

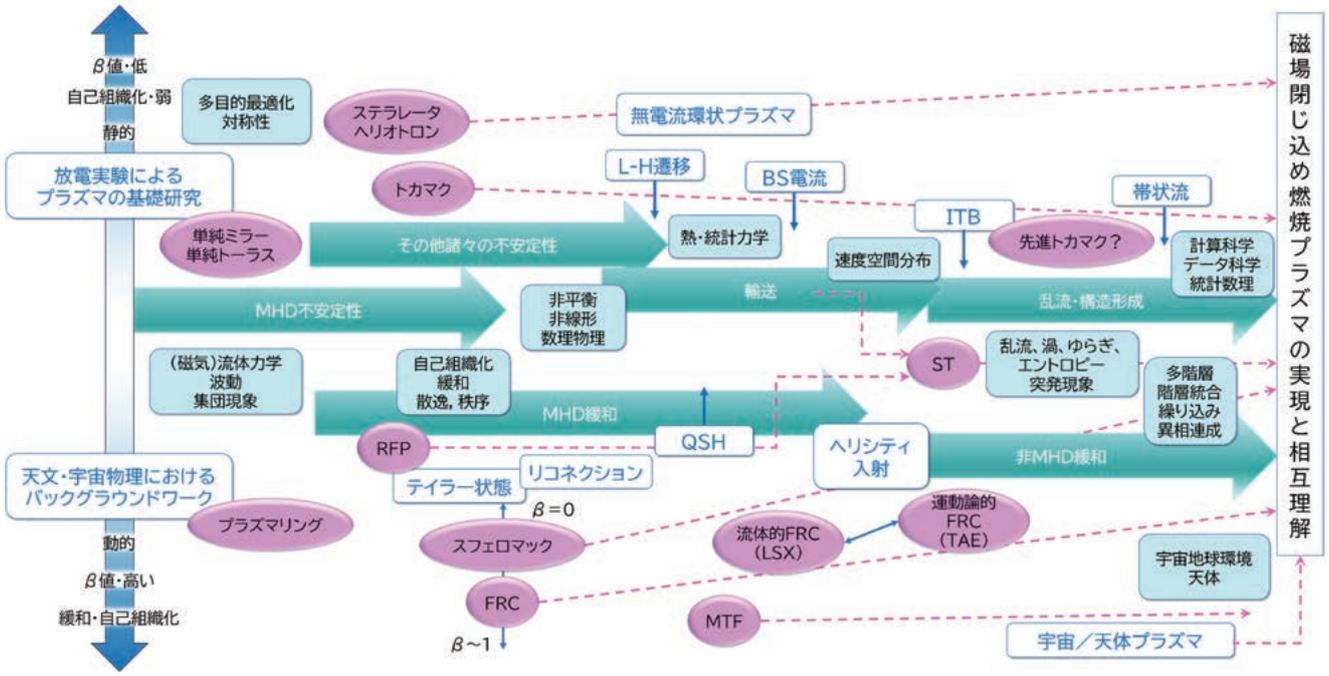


図2 核融合プラズマサイエンスチャート：(上) 解説付き，(下) 学問分野との関係性。



## プロジェクトレビュー 総説 プラズマ・核融合サイエンスチャート

### 3. 歴史と広がり

#### 3. History and Diversity

#### 3.4 慣性核融合・高エネルギー密度科学

#### 3.4 Inertial Fusion and High Energy Density Science

森 芳孝, 佐々木 徹<sup>1)</sup>

MORI Yoshitaka and SASAKI Toru<sup>1)</sup>

光産業創成大学院大学, <sup>1)</sup>長岡技術科学大学

(原稿受付日: 2023年11月2日)

##### Keywords:

plasma, fusion, science chart, history, diversity, inertial fusion, high energy density science

慣性核融合は、核燃焼の点火条件を達成するために、短時間に非常に大きなパワーを燃料に注入します。パワー注入の有力な候補として、ハイパワーレーザー及びパルスパワー、そしてパルスパワー技術を用いた大電流荷電粒子ビームが挙げられます。年代に応じて、慣性閉じ込め研究がどのように発展し関連分野に広がる様子をチャート(図1)に示しました。

##### 3.4.1 ハイパワーレーザー

###### [慣性核融合]

慣性核融合は、核融合燃料である水素同位体を固体密度の1000倍以上に圧縮し、その一部を温度1億度以上に高温化して点火し、燃料を燃焼させます。1972年に爆縮によるレーザー核融合の概念が公表[1]されると、ハイパワーレーザーの大エネルギー化と高度化が促進されました。1980年代に10キロジュール級のレーザーが日米欧に建設され、1990年代までに点火温度1億度の高温状態と固体密度1000倍の高密度状態が個別に達成されました。その後、両者を同時達成するために、米仏でメガジュール級レーザーの建設が開始されました。2009年に米国で国立点火施設NIFが実験を開始すると、慣性核融合の点火燃焼に関する研究が本格化しました。爆縮燃料の中心部に形成される高温の点火部とそれを囲む高密度の主燃料部の同時実現にむけて、照射一様性と流体不安定性の制御に関する知見が深まり、2021年8月に主燃料部が燃え広がる自己点火が確認され、核融合反応によって生まれるアルファ粒子による自己加熱が実証されました。翌年2022年12月には、2メガジュールの投入レーザーエネルギーに対して、3メガジュールの核融合出力が確認されました。この結果より、投入エネルギーに対する核融合

出力エネルギーの比で表される核融合利得は1を超え、科学的ブレークイーブンとなる核融合発電に向けたマイルストーンとなりました。一方、レーザー核融合発電の実現には、さらなる研究開発が必要です。核融合利得を100以上に高めること、核融合エネルギーを回収して電気に変換すること、繰り返し10 Hz程度のレーザーを用いて反応を繰り返すことが求められます。国内では、繰り返しハイパワーレーザーを活用した研究開発が開始されています[2]。

###### [高エネルギー密度科学]

慣性核融合研究を通じて実現された高密度圧縮・高温プラズマ状態は、圧力にして100万気圧を超えます。このような超高压状態は、自然界では惑星・恒星内部でのみ成立する状態です。実験室でその状態を実現したことにより、2000年代に入り、「高エネルギー密度科学」と呼ばれる分野の創成につながりました[3]。高エネルギー密度状態における物性や放射流体のダイナミクスを研究対象として、流体シミュレーションを活用しながら、物質の状態を表す状態方程式や物体が光や電磁波を遮蔽する度合いを示すオパシティの理解が進みました。オパシティの理解は、光源や輻射応用の基盤となり、次世代半導体製造技術として実装をめざすEUV(極端紫外線)光源の開発を支えています。さらに、高エネルギー密度科学の知見は、「実験室宇宙物理」(地上の実験室で宇宙物理学に関わる現象を模擬する研究)を支えており、天文分野との連携により、高エネルギー宇宙線、惑星磁気圏、太陽風、宇宙プラズマ等の理解が深まっています。

###### チャープパルス増幅技術

慣性核融合や高エネルギー密度科学の発展には、レー

The Graduate School for the Creation of New Photonics Industries, Hamamatsu, SHIZUOKA 431-1202, Japan

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

ザー技術のブレークスルーも後押しとなりました。2018年ノーベル物理学賞の対象となったチャープパルス増幅技術の発明により、パルス幅が従来のナノ秒と比べて、ピコ秒からフェムト秒に迫る短いパルスの発生が可能となりました。瞬間パワーがペタワットに迫る高強度レーザーを用いることで、より短時間により高い圧力が達成可能となりました。その結果、2000年頃からレーザーの光圧力でプラズマ中に1 cmあたりギガボルトに迫る高い加速勾配を発生させることが可能となり、加速器科学と連携しながらレーザーを用いた加速器の実現をめざす研究開発が進められています。さらに、核融合に関連して、1990年代後半から高速点火方式とよばれる先進的な点火方式の実験が開始されました。高強度レーザーを物質へ照射することで発生する高速電子を活用し、瞬間的に爆縮燃料を加熱する原理実証がなされ、より少ないレーザーエネルギーで爆縮燃料を効率的に加熱する研究が進められています。

### レーザープロセス

ハイパワーレーザーは、局所的にエネルギーを注入することができることから、レーザー発明時より、レーザー溶接、レーザー加工などへ適用されてきました。その後、ファイバーレーザー技術等の進展により、社会への実装が深まりました。ハイパワーレーザーによるレーザー加工は、レーザープロセス技術として、2020年頃に実用化されたEUV光源も含めて産業を支えており、光源/輻射応用への展開が始まっています。

### 3.4.2 パルスパワー技術

#### [パルスパワー技術の変遷]

パルスパワー技術は、長い時間をかけて電磁エネルギーを蓄積し、瞬時にエネルギーを放出するものです。パルスパワー技術開発の初期には、大容量のエネルギー蓄積素子、高電圧・大電流のスイッチング素子としてギャップスイッチ、パルス整形線路などが用いられていました。1980年頃には、単発で発生電力が大きいパルス電源の開発が数多く進められており、これらをパルス軽イオンビーム源やパルス電子ビーム源とした核融合研究や高強度マイクロ波源などの開発が進められていました。これらの研究の流れは、欧米の単発パルスパワー発生器によく見られ、Sandia National Lab.のZ-machineなどがその例です[4]。

これらの技術開発の中で、半導体技術の進歩により、高速で大電力を扱えるパワー半導体スイッチ（固体スイッチ）が出現したことで、パルスパワー技術の利用方法に大きな転換点が生まれました。従来は、ギャップスイッチによるパルスの単発制御が主流でしたが、パワー半導体スイッチの出現により、スイッチの保守が容易となり、長寿命で繰り返し性を有し、高い平均パワーを出力できるパルス電源の開発が可能になりました。また、これに合わせて磁気スイッチに適した特性を持つ磁性体の開発によりパルスパワー技術が産業へ供されるようになってきました。現在は、高速制御が可能な比較的小出力のパルス

電源を並列動作させることで大電流化を図る技術や低エネルギーの多段パルスを磁気結合により直列接続することで高電圧を制御性よく発生させるLinear Transformer Driver (LTD)の開発が進められています[5]。

このように発展してきたパルスパワー技術は、レーザーや加速器を始めとする高エネルギー応用分野だけでなく、パルスエネルギー注入やそのプラズマを利用した材料創成、殺菌・滅菌あるいは治療を目的とした生物応用・医療応用、オゾン生成とこれを利用した環境分野などに幅広く活用されています。

#### [重イオンビーム慣性核融合と大電流加速器技術の進展]

重イオンビーム慣性核融合は、慣性核融合のエネルギードライバーに重イオンビームを用いたもので、GeV-kA-10ns級の大電流ビームをハンドリングする技術が必要になります。従来の加速器技術で最も重要な要素として荷電粒子を加速するための電圧制御が必要でした。これを制御するためにサイクロトロンやクライストロンなどの大電力真空管を利用したスイッチングによる制御が行われていました。特に重イオンビーム慣性核融合のシナリオにおいて、極めてエネルギーの高いイオンビームをどのように加速し、燃料標的まで輸送するか、が大きな課題としてあり、各国で検討が進められていました[6]。

一方、2000年代に入ると、パワー半導体の技術を応用した誘導加速シンクロトロンが開発、実証されました[7]。パルスパワー技術開発と同様にパワー半導体を用いることで、加速器の保守性と寿命を高めるとともに、半導体のスイッチングによりビームの閉じ込めと加速を自在に制御できるようになりました。これは、従来の加速器技術の延長線上にはなく、小型加速器で大きなビームエネルギーが得られる技術の一つとして位置づけられ、現在も日本版重イオンビーム慣性核融合のシナリオの重要技術の一つとして検討されています[8]。

また、大電流イオンビームに必要なイオン源開発においても、レーザーを利用した大電流イオン源が開発されました。レーザーイオン源から供給されるプラズマを加速器に直接入射し、イオン加速することで高い電流密度のイオンビームを得ることに成功しており、重イオンビーム慣性核融合用イオン源としてだけではなく、医療用イオン源、中性子源としての可能性も実証されています。

### 参考文献

- [1] J. Nuckolls *et al.*, *Nature* **239**, 139 (1972).
- [2] 森 芳孝 他: プラズマ・核融合学会誌 **97**, 352 (2021).
- [3] レーザー核融合とレーザープラズマ応用の発展: プラズマ・核融合学会誌**81**増刊号 (2005).
- [4] D.A. Yager-Elorriaga *et al.*, *Nucl. Fusion* **62**, 042015 (2022).
- [5] 江 偉華 他: プラズマ・核融合学会誌 **94**, 192 (2018).
- [6] 川田重夫 他: プラズマ・核融合学会 **89**, 89 (2018).
- [7] T. Iwashita *et al.*, *Phys. Rev. ST-AB* **14**, 071301 (2011).
- [8] K. Takayama *et al.*, *Phys. Lett. A* **384**, 126692 (2020).





## プロジェクトレビュー 総説 プラズマ・核融合サイエンスチャート

### 3. 歴史と広がり

#### 3. History and Diversity

##### 3.5 構造材料・プラズマ対向材料

#### 3.5 Structural Materials and Plasma Facing Materials

笠田 竜太

KASADA Ryuta

東北大学金属材料研究所

(原稿受付日：2023年11月2日)

#### Keywords:

plasma, fusion, science chart, history, diversity, structural materials, plasma facing materials

核融合炉の炉心に近い位置に置かれる機器は、DTおよびDD核融合反応から生じる高エネルギーかつ高フラックスの中性子の照射を受けるため、使用される材料の内部に照射損傷が生じます。照射損傷によって生じる材料特性の変化は照射効果と呼ばれ、材料強度特性の劣化、更には機器の構造健全性の低下に繋がる懸念されます。照射損傷および照射効果は、商用軽水炉等の核分裂炉の構造材料の経年劣化に関連して重要な研究対象となっており、材料工学分野において原子力材料工学の領域を特徴づけるテーマであると言えます。また、照射損傷の基礎については、物性物理学分野における格子欠陥に関わる学術領域としても位置づけられています。一方、磁場閉じ込め方式核融合炉において特有の高温・高密度プラズマに対向する材料は、特に第一壁材料あるいはより明確にプラズマ対向材料と呼ばれ、プラズマからのイオン照射による特異な材料表面性状の変化が見られる場合があります。このような現象を司るプラズマ-壁相互作用については、プラズマ・核融合に固有の研究領域として位置づけられるとともに、イオン注入法を活用する半導体製造プロセス等を取り扱う応用物理学分野とも関連しています。

図1に示す構造材料・プラズマ対向材料サイエンスチャートでは、核融合炉材料開発の文脈においてはブランケット工学とダイバータ工学と関連づけて上記の核融合炉構造材料とプラズマ対向材料の固有の材料名が時系列的に示されています。それぞれの材料は、必ずしもそれらの初出の順番には並んでいませんが、トピックスとして注目されたタイミングを凡そ示すように努力しています。併せて、原子力材料工学を含む材料工学の文脈に

おける主要な研究課題についても時系列的に示されています。このサイエンスチャートを踏まえつつ、3.5.1節では、核融合材料開発の文脈において、代表的な構造材料とプラズマ対向材料の研究開発の流れを概説します。ここでは、閲覧可能な報告書を参照しました。次の3.5.2節では、材料工学の文脈において当該分野を特徴づける照射損傷・照射効果研究を中心としたトピックスについて示します。ここでは、日本の研究者の貢献が大きいことを示す高引用数の論文を中心に参照しました。最後に3.5.3節では、今後の研究課題と展望について論じます。

##### 3.5.1 核融合材料開発の文脈

原子力委員会は1975年に「核融合研究開発の推進について」と「第二段階核融合研究開発基本計画」を策定し、この第二段階を原子力特別研究開発計画と格付けして推進することを示しました。その後、原子力委員会の下に設置された核融合会議では、材料分科会(1977-78)、核融合材料照射研究分科会(1983-84)において材料照射研究および施設に関する方策が検討されており、これらが研究体制の整備に繋がったと考えられます[1]。1980年には、文部省科学研究費補助金エネルギー特別研究(核融合)(以下、特研)が開始され、当初の全5班のうち第1班「炉材料及びプラズマ-壁相互作用」の中で、重照射効果、プラズマ-壁相互作用、中性子工学、接合工学がサブ班として活動し、現在に連なる多くの核融合材料工学分野の研究テーマのインキュベーターとして機能したことが示唆されます。1984年には、現在も続く核融合炉材料国際会議(ICFRM)が東京で初めて開催されており、我が国が核融合炉材料開発に関して当時からイニシアティ

*Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai, MIYAGI 980-8577, Japan*

*author's e-mail: ryuta.kasada.e7@tohoku.ac.jp*

ブをとっていたことを示しています。

#### [構造材料]

先述した特研では、核融合炉構造材料として、第1種「SUS316, 同改良鋼 (JPCA)」、第2種「Fe-Ni-Cr系耐熱合金」、第3種「フェライト/マルテンサイト鋼」、第4種「高融点合金 (V合金, Mo合金等)」、第5種「その他 (長範囲規則合金, Al合金, 非金属材料等)」の順に候補材として挙げられました。JPCAは米国のPCA (Primary Candidate Alloy) を参照して作られた316系のオーステナイト鋼であり、ボイド・スウェリングの抑制を指向してTi添加が施されています[2]。その後ITERの設計要求がボイド・スウェリングを問題としない程度の中性子照射量や使用温度に収まったこともあり、ITERの主要構造材料は産業基盤が確立しているSUS316系材料とされたものと考えられます (ただし、比較的低温の照射による延性喪失や照射クリープの問題には注意する必要があります)。中性子工学分野での検討が進むと、重照射環境において構造材料の放射化が問題になり得ることから、「低放射化材料」の概念が1983年頃に米国において提示されました。火力発電用に開発され高速炉用としても研究されていたHT-9のようなフェライト系耐熱鋼を元に低放射化元素に置き換えられたFe-9Cr-2WVTa-Cを基本組成とする低放射化フェライト鋼と同等の考え方から、日本では当時の原研を中心としたF82H[2]と、大学を中心としたJLF-1等の多様な低放射化フェライト鋼の研究開発が進められました。また、SUS316に代表されるオーステナイト・ステンレス鋼のNiをMnに置き換えて低放射化性能を高めたFe-Cr-Mnを基本組成とする低放射化オーステナイト鋼の研究も行われました[2]が、高温強度、耐食性、崩壊熱等の課題があり研究は下火となりました。

1992年に開始した第三段階核融合研究開発基本計画 (原子力委員会) では、「高いフルエンスの中性子照射に耐える構造材料、ブランケット材料、計測・制御機器及び低放射化材料の開発を進めるとともに、中性子照射による材料特性等のデータの蓄積を行う」ことが実施内容として明記されて以降、原研、大学における候補材料の開発研究は一定の範囲に集約化が進められました。2000年の原子力委員会第136回核融合会議では、「中期的展望に立った核融合炉第一壁構造材料の開発の進め方について」が計画推進小委員会より示され、この中で第一壁構造材料の要件から、低放射化フェライト鋼、低放射化バナジウム合金、SiC/SiC複合材料が主たる候補材として提示されました。その後、2005年に示された原子力委員会核融合専門部会「今後の核融合研究開発の推進方策について」において主要候補材料として示された低放射化フェライト鋼については、F82HをITER-TBMおよびDEMO炉以降の構造材料として規格化すべくデータベースの拡充がQSTを中心に進められており、世界をリードする材料として国際的にも認知されています。低放射化フェライト鋼は、元となったフェライト系耐熱鋼よりも優れた耐照射脆化特性を有していることも明らかになりつつありま

す。バナジウム合金については、1960~70年代の高速増殖炉燃料被覆管材料として開発された知見が生かされており、東北大学等で核融合炉液体リチウムブランケットを主眼とした基礎研究が進められました。2000年代にはNIFS-HEAT-2と呼ばれる166kg級インゴットが得られるようになるなど、NIFSが中心となって研究が進められてきました[3]。SiC材料の核融合炉への適用性については1970年代には検討されていましたが、米国や日本を中心に研究開発が本格化したのは1990年代に入ってからでした。また、SiC/SiC複合材料に使用されるSiC繊維の製造法の基本プロセスは、東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センター (以下、大洗センター) における研究成果[4]を元として、日本のメーカーが実用化に成功しています。複合材料化については1990年代より核融合炉を含む原子力用途も包含して京都大学等で精力的に進められました[5]。他にも高温ガス炉燃料[6]、近年では軽水炉の事故耐性燃料用材料[7]としても、SiC材料が着目されています。また、この間にSiC/SiC複合材料が航空機材料として実用化されたことは材料工学分野においてもゲームチェンジングと言える特筆すべき成果です。この頃から開発された他の重要な材料として、酸化物分散強化 (ODS) 合金が挙げられます。1960年代に発明されたODS合金はメカニカルアロイング法によって製造された最初の合金であり、一部は航空機エンジン用等で実用化されました。原子力用途としての開発の進展には時間が掛かりましたが、高速増殖炉用燃料被覆管材料として旧核燃料サイクル開発機構が中心となって加工プロセスと合金開発を進めたODSフェライト鋼が優れた材料特性を提示したことを契機として[8]、ナノ酸化物粒子形成挙動に対する世界的な関心が高まりました。その後、京都大学を中心に次世代原子炉や核融合炉材料として、北海道大学を中心に事故耐性燃料被覆管としての開発が行われる中でナノ酸化物粒子の微細分散を可能とする合金設計指針が明らかとなり[9, 10]、実用化に向けた検討が産業界とともに進められています。また、ダイバータのヒートシンク用途に向けたODS銅合金[11]やブランケット構造材料として低放射化ODSオーステナイト鋼[12]の検討も進められています。

材料工学分野において近年注目されている高エントロピー合金は優れた耐照射性を期待できることが示されつつあり[13]、今後の進展が期待されます。また、積層造形技術についても原子力あるいは核融合炉材料に適用しようとする動きは海外では活発に見られるものの[14]、日本国内での当該技術への投資は不足していると感じられます。

以上のように、核融合炉構造材料の研究開発の発端は材料工学分野あるいは原子力材料工学分野での実績を応用あるいは改良する形で進められたものが多い点が特徴です。そのためか1980年代の特研の採択者には冶金系出身の研究者が多く見られます。その後、研究の系譜は核融合炉材料研究で学位を取得した世代に受け継がれ、現在も続く照射効果研究や耐照射性材料の開発に繋がって

います。

### [プラズマ対向材料]

1980年代の大型トカマク装置のプラズマ閉じ込め性能の向上には、ベリリウム、ホウ素、炭素のようないわゆる低Z材をプラズマ対向材料に採用したことも貢献したと考えられます[15]。しかし、原型炉以降では中性子照射の影響、スパッタリングによる摩耗、三重水素のリテンション等が問題となるため、低Z材料の利用は極めて難しいと認識されています[16]。当初のITER計画では、まずは耐熱衝撃特性に優れた炭素材料を用いて、DT運転開始前に高Z材であるタングステン材料に交換する二段構えの計画となっていました。ITERが建設段階に入ると当初から後者を使用するという決定が為されました[17, 18]。この決定はプラズマ対向材料の研究のトレンドを大きく変化させる契機となりました。タングステン材料は、少なくとも照射を受けない環境では三重水素のリテンションが低いことや、低Z材よりもスパッタリングしにくい点が利点とされています[19]。タングステンをプラズマ対向材料として使用する場合には他の材料に対する接合・被覆技術開発が必須であり、ダイバータヒートシンクの銅合金とのロウ付けや、鉄鋼材料への爆接、溶射、固相接合など様々な手法の適用性が評価されています[20]。また、強度特性や微細組織への照射影響に関する知見については、我が国において大学の研究者がJOYO, JMTR, 日米科学技術協力事業を通じたHFIR等の利用を通して地道に蓄積してきた点が高く評価されています[21]。タングステンは、金属ではあるものの脆性的な材料として知られており、高靱性を狙った材料開発も進められています[22]。脆性材料であるタングステンに対して三重水素の環境放出に対する安全バウンダリーとしての役割を担わせることには高いハードルがあり、ある程度のき裂を許容できるアーマー材としての利用に限定せざるを得ないと考えられます。この場合においても、アーマー材としての熱機械的特性に及ぼす照射影響を解明し、機器としての構造健全性を保持するための基準を明らかにする必要があります。このための合理的な設計基準を構築することは、チャレンジングな工学課題であると言えます[23]。

プラズマ対向材料としての機能性の観点からは、プラズマ・壁相互作用の理解が重要であり、初期にはプラズマ閉じ込めに悪影響を及ぼさない壁機能の維持にとって重要となるスパッタリングやプリスタリングに関しての研究が進みました。近年、日本において高温壁条件を模擬したタングステン等の材料表面にファズと呼ばれる特異なメソスケール構造形成の発見があり、マルチスケールシミュレーションによる機構解明が進んでいます[24, 25]。これらのプラズマ対向材料の研究は、核融合炉設計におけるプラズマ要件と切り離せないことに加え、プラズマ装置固有の実験環境の影響を踏まえたグローバルな理解が必要であり、JT-60SAやITER等の大型装置を用いた研究の進展が望まれます。

## 3.5.2 材料工学の文脈

### [照射損傷・照射効果]

原子力材料工学あるいは核融合炉材料工学を特徴づける根幹は、高エネルギー粒子線照射によって物質あるいは材料中に生じる照射損傷と、その結果として材料特性に変化を与える照射効果です。自然界においても、放射性元素を含む天然鉱物に見られるメタミクト現象が照射誘起非晶質化を要因とすることが知られています。しかし、照射損傷と照射効果の研究が重要視されるようになったのは、原子炉の発明以降と言ってよいでしょう。

照射損傷は入射粒子が固体中原子に衝突することによって運動エネルギーを付与し、構造の乱れを起こしながらエネルギーを散逸していく過程において生じます。その際、原子に付与されるエネルギーが十分に高ければ原子のはじき出しが生じて、空孔と自己格子間原子のペアであるフレンケル対が形成されます。導入された点欠陥は、拡散を通して点欠陥同士で合体あるいは消滅していきます。照射欠陥の生成は入射粒子の運動エネルギーや損傷速度に対する非線形性が極めて強い現象です。高エネルギーの中性子やイオンを照射するとカスケード損傷と呼ばれる空間的スケールの大きな連鎖的な損傷も起こります。核反応断面積が非連続的なエネルギー依存性を示す核変換現象によって生じた異種原子と点欠陥の相互作用も考慮する必要があります。

照射損傷によって生じた点欠陥が消滅・合体を通して二次欠陥を形成していく時間発展過程あるいは照射量依存性については、点欠陥反応速度論等を基に説明されます。この際、自己格子間原子と空孔の形成エネルギーや移動エネルギー、他の欠陥との相互作用、欠陥クラスターの安定形状等の違いがバイアスの要因となり、微細組織の変化として顕微的に観察されるスナップショットの違いを生み出します。結果として、電気抵抗率や機械的強度特性等の材料特性に及ぼす照射効果の照射量依存性、温度依存性、損傷速度依存性を複雑なものにします。

ところで構造材料の劣化とは、構造材料自身の有する機械的特性と、構造材料の置かれる環境、そして作用する応力によって決まる現象として知られています。ここで環境とは、一般的には他の物質（気体、液体、固体）との材料表面を介した相互作用を与えるものであり、その相互作用の機構や程度は温度や圧力に依存します。環境には電磁場を含めることもあります。一般的には電磁力として材料に働く応力として位置づけることとなります。核融合炉構造材料の使用環境でもある高エネルギー粒子線の照射環境については、他の環境と材料の相互作用とはやや異なる点があります。高エネルギー粒子線の照射は材料表面に対してのみならず材料内部から生じる場合があることに加えて、その相互作用も表面のみならず材料内部の原子に対して直接的に大きなエネルギーを付与することができる点が異なるのです。その結果として、一般的な構造材料の破壊靱性の低下（脆化）が高温の影響（熱時効）による微細組織変化や表面からの環境影響による損傷（水素の侵入、酸化など）によって引き

起こされるのに対して、照射による破壊靱性の低下（照射脆化）は、材料内部に生じる照射欠陥の形成等による内部組織変化によって機械的性質が変化することによって引き起こされます。

商用軽水炉における中性子照射を受ける構造材料である原子炉圧力容器鋼は核燃料物質等の環境放出を防ぐための重要な安全バウンダリーとなっており、照射脆化機構の解明と理解の進展が重要な研究課題として認識されています。核融合炉構造材料と比べると中性子のエネルギーおよび照射量が低く、使用温度も比較的低温であるため、照射脆化現象を除いては照射効果が安全性や機能性に直接影響を及ぼすとは考えられていません。しかし、比較的高温において重照射を受ける高速炉材料においてボイド・スウェリング現象が発見されると[26]、核融合炉材料開発にも大きな影響を与えました。ボイド・スウェリング現象を理解するための転位バイアス[27]や生成バイアス[28]のモデルが提示されるとともに、ボイド・スウェリングを抑制するための第二相分散などの影響や、ボイド・スウェリングを促進する核変換ヘリウムの影響について多くの研究が為されました。

核融合炉材料の照射効果に関する研究は、重照射実験を可能とする核融合中性子源が存在しないこともあり、素過程からボトムアップ的に積み上げて理解しようとする方針が取られました。格子欠陥に関わる固体物理分野の研究者を中心にして基礎固めから入ったという見方もできます。格子欠陥は半導体の機能を発現する上で必須ですし、金属の強度特性の理解には格子欠陥の理論が重要であると認識されていました。1960-70年代には、金属中の点欠陥に関する研究が盛んであり、急冷や照射によって導入された空孔や格子間原子の移動、合体、消滅過程とそれらに対する不純物原子の影響に関する研究が世界的にも多く報告され、特に空孔の移動開始温度については激論が交わされていました。こういった格子欠陥分野の潮流の中で日本の研究者が得意としたのは、国内メーカーが開発した超高圧電子顕微鏡を駆使して照射損傷の素過程を理解しようとする研究でした。超高圧電子顕微鏡はMeV級電子ビームによって照射欠陥を導入しつつ照射損傷組織発達のその場観察が可能になります。点欠陥反応速度論をベースに、純金属や単純な合金における点欠陥の形成エネルギーや移動エネルギーを評価する基礎研究が行われました[29]。

計算機シミュレーションによって、カスケード損傷を模擬する研究も広く行われ、高エネルギーのカスケード損傷がサブカスケードに分岐すること[30]、カスケード損傷から点欠陥集合体が直接形成すること、次元運動によって点欠陥シンクに向かって高速移動し消滅することが示され[31]、その場観察実験によって確認されました[32, 33]。

照射損傷の素過程の理解を進める一方で、照射脆化を始めとする構造材料の機械的性質に及ぼす照射効果を明らかにしようとする研究も進められました。こちらは前節で述べた冶金系研究者が主導して自らの開発した材料

の評価を進める中で調べられることが多かったようです。材料試験炉等の研究用原子炉を用いた中性子照射実験が行われ、温度制御照射法[34]、照射下引上げ法[35, 36]の開発等で東北大学金属材料研究所大洗センターの共同利用が活用され現在も続いています。また、日米科学技術協力事業において米国の核融合中性子源RTNS-IIやFFTF/MOTA、HFIR等の研究用原子炉を用いた国際共同研究が照射効果の解明のみならず、米国派遣を通しての人材育成においても多大な貢献をしています[37]。また、特に米国炉の利用においては、核変換ヘリウム原子を照射下で材料中に生成するために、予め鉄鋼材料中に同位体濃縮したニッケルやホウ素を添加する同位体調整法[38]、照射中の材料に三重水素を吸収させるダイナミックトリチウムトリック法[39]、試料外部からヘリウム注入速度を核融合中性子環境に合わせるように注入するISHI (In Situ Helium Injection) 法[40]などが開発されました。

これらの照射研究において用いられる強度試験片は、通常のJIS, ASTM, ISO等の規格に定められている少なくともセンチメートルサイズの比較的大きな試験片よりも小型な試験片を必要とします。原子炉内（あるいは後述する強力中性子源）の中性子照射場の線量率の均一性や照射温度の均一性、照射後試験における放射化物の使用上の制約などから、より微小なミリメートルサイズの強度試験片を活用する微小試験片技術 (Small Specimen Testing Technology; SSTT) が推進され[41]、他分野への波及効果も見られます。

金属材料の機械的性質の理解には、格子欠陥分野で発展した転位論が不可欠です。転位の概念は、流体力学においてその名を知られるG.I. Taylorや、Orowan, Polanyiによって1934年に導入されました。その後、固体物理分野の著名な研究者達 (MottやShockleyなどのノーベル物理学賞受賞者も含まれる) によって急速に理論的枠組みが構築されました。一方、転位論を実際の材料の強化機構の解明に用いるには限界があることも認識されています。核融合炉構造材料等の機械的性質に及ぼす照射効果の理解においても、転位論に関する研究者が多く貢献し、照射欠陥による強度特性の変化のモデルの根本は転位論となっています。また、転位が電子顕微鏡によって直接観察されることも相まって、照射下での微細組織発達の理解も著しく進展しました。しかし、転位論はマクロな強度特性を微視的な原子列の乱れである転位という概念で説明しようとしています。マクロな塑性変形とミクロな微細組織の間を繋ぐメソスケールの塑性現象をうまく説明できていません。例えば、照射材においてしばしば見られる転位チャネリングの形成と延性低下の関係については更なる研究が求められます[42]。

核融合中性子照射環境における重照射と核変換ガス原子の影響を模擬するために、イオン加速器を用いた照射場の活用が進められました。HIT(東大)、TIARA(QST)、DuET(京大) [43]等では複数の重イオン加速器を用いて照射損傷とヘリウムイオンを同時に導入し、核融合中性子条件を模擬した上で照射効果を理解しようとする研

究が行われています。また、北大、東大、島根大等におけるイオン加速器と電子顕微鏡を接続した研究設備などを活用した照射損傷過程のその場観察による研究も行われています[44]。これらの研究手法は海外でも重要性が認められており、欧米では加速器施設の新設と更新も続けられています。イオン照射を受けた材料中の損傷領域は重イオンビームで数 $\mu\text{m}$ 、軽イオンビームで数 $10\mu\text{m}$ 程度に留まるため、超微小試験技術 (Ultra-Small Testing Technology; USTT) の活用が進められています。ナノインデンテーション法や集束イオンビーム加工観察装置を用いた微細加工試料を用いた試験法によって、これまで見ることができていなかった局所領域の変形挙動に及ぼす照射影響の解明も進みつつあります[45]。

イオン加速器や原子炉によって核融合中性子照射環境を模擬することには限界があることは広く認識されています。加速器型強力中性子源の実現が必要とされています。1980年代に米国中心で検討が始まったFMIT、1990年代前半に原研中心に検討されたESNITを受け継いで、1995年からOECD-IEAの枠組みで日欧米露が参加してIFMIF計画が進められました。その後、日欧協力によるIFMIF-EVEDAの中で要素技術研究開発が進められました[46]。これらの知見は、現在我が国で独自に検討が進められているA-FNS計画や欧州のIFMIF-DONES計画に活かされています[47]。

### 3.5.3 今後の課題と展望

上述したように、固体材料の照射効果の理解に向けた研究は、照射損傷によって形成する点欠陥反応の素過程から積み上げて、微細組織と材料特性の関係に基づきマクロな現象の時間発展を理解しようとするボトムアップ的な方法論を展開してきました。例えばカスケード損傷の構造の理解など、ある特定のスケール内における事象については計算機性能の向上とともに理解が進んでいると言えます。しかし、照射損傷の素過程の実時間スケールは極めて短く、実験的に測定可能な事象やパラメータはごく僅かです。また、その場実験によって直接的に観察可能な事象は、実材料と実環境よりも遥かに単純化された条件のみが対象となっています。材料劣化という観点では、実時間は長ければ数十年というスケールになるため、模擬実験環境との間にある損傷速度効果は無視し得ないという大きな課題もあります。このような実験的な観察・観測の難しさについては、マルチスケールモデリングと呼ばれる異なる計算科学的手法の組み合わせによって補完しようという努力もなされてきましたが、現実の材料特性変化を予測できる範囲と信頼性は限られているのが実情です。さらに言えば、このようなボトムアップ的な方法論で積み上げた場合、不確かさも大きく積み上がるため、安全性を確保することが最も重要な機能である構造材料の劣化の実用的な予測に用いるためには、ビッグデータからの内挿に頼らざるを得ません。商用軽水炉における核燃料物質を内包する原子炉压力容器鋼の照射脆化と、核融合炉における三重水素や放射化ダスト

のような放射性物質を内包するブランケット構造材料の照射脆化では、公衆リスクに与える影響が異なることが想定されるため、構造健全性と劣化予測に求められる信頼性の程度や方法論そのものも異なるかもしれません。確実に言えることは、核融合炉構造材料においては核融合炉の実現無くして照射効果のビッグデータを用意することが困難であるということです。核融合炉構造材料の照射効果研究は、強力中性子源と代替照射手段を組み合わせる包括的かつ合理的な方法論を確立する必要があると言えます。このために現在主流となっているマルチスケールモデリングの方法論において、モデルの中心となっている高エネルギー粒子線照射下での微細組織発達モデルについても課題があります。従来のモデルでは、照射欠陥集合体の均一核形成のみを想定している例が多く、転位や粒界、析出物界面での不均一核形成を考慮した例は限定的です。実用材料における微細組織と照射による変化は空間的に不均一であることは明白ですが、このようなメソスケールでの照射損傷組織の空間分布の定量的理解は未だ困難です。近年の微細組織観察技術の発展とマテリアルズインフォマティクスを組み合わせることによって効率的に照射損傷組織の定量評価を行うことが期待されます。一方、核融合炉環境でも想定される高流束照射下では、純金属のような単純な材料系においてさえ照射欠陥集合体形成の空間的・時間的「ゆらぎ」が存在していることは早くから示唆されています。核融合炉構造材料のように重照射を受ける材料は、非定常あるいは定常下の照射欠陥の流れの中の開放系であり、結果として残存する照射欠陥集合体のメソスケールでの空間的配置と時間的配置は、照射や材料に内在する様々なゆらぎに強く影響される可能性もあります。実際に、ポイド格子や転位ループラフトのような規則的なメソスケール構造が現れることは古くから知られているものの、その形成要因が明らかになったとは言えません。また、このような規則構造が得られ得ることは、高流束照射場の新たな活用法や物性の理解に貢献できる可能性も秘めています。加速器を用いたイオン照射法は、照射場制御技術や照射後試験法において我が国が得意とする領域であり、核融合炉構造材料の研究開発のみならず、材料工学分野においても新たな展開が期待できます。

核融合炉材料の実用化に向けた大きな課題となりうる疲労や高温クリープ挙動のような複雑な機械的性質に及ぼす照射効果についてのデータベースは不足しています。更に、軽水炉内構造物に関して報告されている照射と腐食環境の重畳によって引き起こされる照射誘起応力腐食割れ (IASCC) についても、ブランケット等で使用する材料と冷却材の組み合わせによっては課題となる可能性があります。核融合炉構造材料に想定される様々な経年劣化事象や突発事象について、データベースの取得を進めるとともに、合理的な構造設計に貢献できるように学術的理解を一層深化させる必要があります。

## 参考文献

- [1] 山本賢三:核融合の40年—日本が進めた巨大科学, ERC 出版 (1998).
- [2] M. Tamura *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **141-143**, 1067 (1986).
- [3] T. Muroga *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **307-311**, 547 (2002).
- [4] S. Yajima *et al.*, *Nature* **261**, 683 (1976).
- [5] Y. Katoh *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **61-62**, 723 (2002).
- [6] L.L. Snead *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **371**, 329 (2007).
- [7] R. Usukawa *et al.*, *Ceramics Inter.* **49**, 10946 (2023).
- [8] S. Ukai *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **307-311**, 749 (2002).
- [9] A. Kimura *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **417**, 176 (2011).
- [10] P. Dou *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **444**, 441 (2014).
- [11] S.M.S. Aghamiri *et al.*, *Nucl. Mater. Energy* **15**, 17 (2018).
- [12] H. Wang *et al.*, *Corr. Sci.* **209**, 110818 (2022).
- [13] Y. Zong *et al.*, *Nucl. Mater. Energy* **31**, 101158 (2022).
- [14] T. Koyanagi *et al.* *J. Nucl. Mater.* **543**, 152577 (2021).
- [15] A. Miyahara *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **155-157**, 49 (1988).
- [16] T. Tanabe *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **196-198**, 11 (1992).
- [17] Y. Kamada, *J. Plasma Fusion Res.* **91**, 181 (2015).
- [18] T. Hirai *et al.*, *Nucl. Mater. Energy* **9**, 616 (2016).
- [19] Y. Ueda *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **89**, 901 (2014).
- [20] T. Hirose *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **81**, 645 (2006).
- [21] A. Hasewaga *et al.* *J. Nucl. Mater.* **471**, 175 (2016).
- [22] H. Kurishita *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **367-370**, 1453 (2007).
- [23] Y. Ueda *et al.*, *Nucl. Fusion* **57**, 092006 (2017).
- [24] S. Takamura *et al.*, *Plasma Fus. Res.* **1**, 51 (2006).
- [25] S. Kajita *et al.*, *J. App. Phys.* **132**, 181101 (2022).
- [26] C. Cawthorne and E. Fulton, *Nature* **216**, 575–576 (1967).
- [27] G.W. Greenwood *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **4**, 305 (1959).
- [28] C.H. Woo and B.N. Singh, *Phil. Mag.* **A65**, 889 (1992).
- [29] M. Kiritani *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **69-70**, 277 (1978).
- [30] R.E. Stoller and L.R. Greenwood, *J. Nucl. Mater.* **271-272**, 57 (1999).
- [31] N. Soneda and T. D. De la Rubia, *Philos. Mag.* **A81**, 331 (2001).
- [32] Y. Matsukawa and S.J. Zinkle, *Science* **318**, 959 (2007).
- [33] K. Arakawa *et al.*, *Science* **318**, 956 (2007).
- [34] M. Kiritani *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **174**, 327 (1990).
- [35] M. Narui *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **258-263**, 372 (1998).
- [36] B. Rossaert *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **565**, 153742 (2022).
- [37] T. Muroga *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **560**, 153494 (2022).
- [38] N. Hashimoto *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **307-311**, 222 (2002).
- [39] H. Matsui *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **233-237**, 92 (1996).
- [40] T. Yamamoto *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **367-370**, 399 (2007).
- [41] E. Wakai *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **417**, 1325 (2011).
- [42] K. Farrell *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **335**, 471 (2004).
- [43] K. Yabuuchi *et al.*, *J. Plasma Fusion Res.* **97**, 403 (2021).
- [44] S. Ishino, *J. Nucl. Mater.* **251**, 225 (1997).
- [45] R. Kasada *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **86**, 2658 (2011).
- [46] J. Knaster *et al.*, *Nucl. Mater. Energy* **9**, 46 (2016).
- [47] T. Muroga *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **535**, 152186 (2020).

歴史と広がり - 構造材料・プラズマ対向材料 -

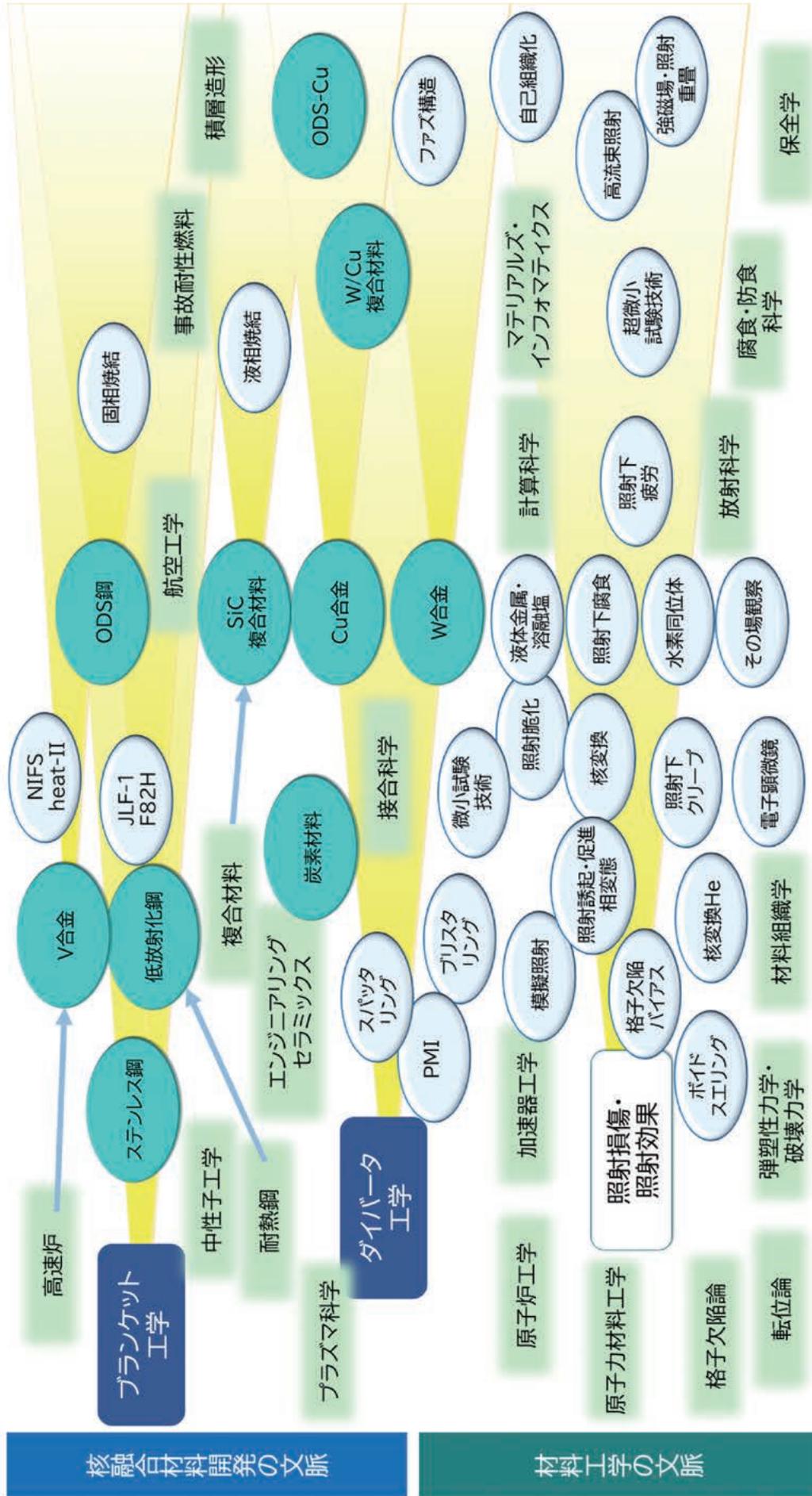


図1 構造材料・プラズマ対向材料サイエンスチャート。



## プロジェクトレビュー 総説 プラズマ・核融合サイエンスチャート

## 3. 歴史と広がり

## 3. History and Diversity

## 3.6 超伝導材料

## 3.6 Superconducting Materials

伊藤 悟

ITO Satoshi

東北大学

(原稿受付日：2023年11月2日)

## Keywords:

plasma, fusion, science chart, history, diversity, superconducting materials

超伝導マグネットは、発電所成立要件として磁場閉じ込め核融合炉に必須のものです。超伝導マグネットに直接関係する低温工学や応用超伝導の研究分野の研究者・技術者の多くは低温工学・超電導学会、応用物理学会、電気学会などに所属しており、応用物理学会のアカデミックロードマップ[1]の「超伝導技術」、文部科学省 科学技術週間 一家に1枚[2]の「磁場と超伝導」(低温工学・超電導学会協力)など、超伝導を中心としたインフォグラフィックスは既にまとめられています。超伝導材料は現代社会を支える基盤材料の1つであり、プラズマ・核融合分野は、超伝導技術の応用先の1つに過ぎません。しかしながら、黎明期における超伝導線材開発はプラズマ物理研究・核融合炉開発を目的に行われ、大量の超伝導線材の提供、およびその仕様を満たすための線材開発が、超伝導技術を発展させていきました。図1に示す「核融合関連材料、超伝導材料」のインフォグラフィックスでは、1900年代初頭の超伝導体の発見から現在に至る線材開発の流れとプラズマ・核融合分野との関係性や、そこからの各波及効果の可視化を試みました。

超伝導体の歴史は、1911年にオランダのヘイケ・カメリング・オンネスが、水銀の電気抵抗が4.2 Kで消失することを発見したことに始まります。その後、物理研究として、1930年代～1950年代にかけてマイスナー効果(完全反磁性)、ロンドン方程式(マイスナー効果に対して現象論的な解釈を与える方程式)、第二種超伝導体(下部臨界磁場と上部臨界磁場の2つの臨界磁場を持つ超伝導体で、後に述べる実用的な超伝導体は全てこれに相当する)、GL理論(超伝導を説明する現象論で第一種超伝導体、第二種超伝導体の区別を与えることができる理論)、BCS理論

(超伝導現象を微視的に説明する理論)が発見・提唱され、超伝導現象が解明されていきました。超伝導体の線材化研究や超伝導コイル応用研究が動き始めたのは1950～60年代の話です[3]。この頃、Nb-Ti, Nb<sub>3</sub>Sn, Nb<sub>3</sub>Alなど、現在の低温超伝導体(Low-temperature superconductor: LTS)に分類されるものが発見され、線材化研究・開発が進められました(Nb-Tiは合金の超伝導体、Nb<sub>3</sub>Sn, Nb<sub>3</sub>AlはA15型と呼ばれる金属間化合物の超伝導体です)。我が国の線材化研究で特筆すべきことは1965年の太刀川恭治らによるNb<sub>3</sub>Snのプロング法の発明[4]です。超伝導体の原材料で構成される線材をコイル化してから熱処理をして超伝導体にするワインドアンドリアクト法を採用することで、脆い金属間化合物であるNb<sub>3</sub>Snでも、超伝導コイルを作ることができるようになりました。

1980年代に入ると核融合炉開発を目的にした超伝導コイルの国際R&D(LCT計画)が開始されました[5]。そして我が国のプラズマ・核融合分野の研究にも超伝導コイルが実装されるようになります。まず世界初のNb<sub>3</sub>Sn超伝導総合装置として、九州大学のTRIAM-1Mが整備されました[6]。1990年代に入ると、全コイルを超伝導化(Nb-Tiを採用)したLHDが核融合科学研究所に建設されました。LHDの垂直磁場コイルには、1980年代からR&Dが始まったケーブルインコンジット導体(Cable-In-Conduit Conductor: CICC)が採用されています。並行して、ITER工学設計活動においてCSモデルコイルにNb<sub>3</sub>SnのCICCが採用され、その後、CICCはITERやJT-60SAにも適用されるなど、世界の核融合実験装置用導体の標準仕様になっています[7]。海外でも超伝導コイルを用いたプラズマ物理・核融合実験装置(T-15, Tore-

Department of Quantum Science and Energy Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai, MIYAGI 980-8579, Japan

author's e-mail: satoshi.ito.e3@tohoku.ac.jp

Supra, EAST, KSTAR, SST-1, W7-Xなど)が多く整備され、また、原型炉建設に向け、現在も線材の高強度化、高臨界電流密度化(高 $J_c$ 化)の研究が進められています。

一方、超伝導体の発見はまだまだ続きます。1986年にはドイツのヨハネス・ゲオルク・ベドノルツとカール・アレクサンダー・ミュラーにより、銅酸化物超伝導体が発見されました[8]。その後、臨界温度(超伝導状態から常伝導状態に転移する温度)が液体窒素温度(77 K)を超える銅酸化物超伝導体が次々と発見され、これらは高温超伝導体(High-temperature superconductor: HTS)と呼ばれるようになりました。HTSのうち線材化がなされているのは、Y-123, Bi-2212, Bi-2223といった材料です。中でもBi系銅酸化物超伝導体(Bi-2212, Bi-2223)は、我が国において、前田弘らが発見したものです[9]。HTS線材はLTS線材に比べるとまだまだ実績が不足してはいますが、EAST, W7-X, JT-60SA, ITERの電流リードに既に採用されており、プラズマ・核融合分野にも既に貢献している素材です。我が国では、東京大学のプラズマ実験装置Mini-RT, RT-1にHTSコイルが初めて採用されました。各国における核融合原型炉設計においてもHTSコイルオプションが検討され、2010年代になってから、各国で設立された核融合スタートアップでは、特にY-123系HTSを用いた超伝導コイルを採用した設計が積極的に取り入れられています[7]。

2000年代に入ると、LTSとHTSの中間の臨界温度を有する新しい超伝導体が我が国で発見されました。秋光純らによる $MgB_2$ の発見[10]、細野秀雄らによるFe系超伝導体の発見[11]です。いずれも現在、線材化研究・開発が世界規模で進められている材料です。これらの材料はHTSと同様に、液体水素で冷却することで超伝導コイル

や超伝導ケーブルとして利用することもでき、今後の水素社会に向けて重要な素材となるでしょう。核融合炉と水素社会の連携は、現在積極的に検討されており、これらの超伝導材料もプラズマ・核融合分野に多く提供されることになる可能性があります。

プラズマの磁場閉じ込め用の超伝導コイルにとどまらず、超伝導技術がプラズマ・核融合研究にブレイクスルーをもたらす可能性はまだまだあるかもしれません。その可能性を追求することは、低温工学・応用超伝導分野での超伝導材料開発を促進させ、それは超伝導材料を利用する多くの応用を生み出し、大きな波及効果をもたらすことでしょう。

### 参考文献

- [1] 応用物理学会アカデミックロードマップ: [https://www.jsap.or.jp/archives/jsap75/academic\\_roadmap.html](https://www.jsap.or.jp/archives/jsap75/academic_roadmap.html) (2022年7月29日閲覧)。
- [2] 文部科学省 科学技術週間 一家に1枚: <https://www.mext.go.jp/stw/series.html> (2022年7月29日閲覧)。
- [3] 太刀川恭治: 低温工学 **44**, 456 (2009)。
- [4] 太刀川恭治, 福田佐登志: 日本金属学会誌 **29**, 1125 (1965)。
- [5] 島本 進, 安河内昂: 低温工学 **19**, 73 (1984)。
- [6] 伊藤智之 他: 日立評論 **66**, 41 (1984)。
- [7] 柳 長門, 伊藤 悟, 寺崎義朗: 低温工学 **54**, 10 (2019)。
- [8] J.G. Bednorz and K.A. Müller, Z. Phys. B - Condensed Matter. **64**, 189 (1986)。
- [9] H. Maeda *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **27**, L209 (1988)。
- [10] J. Nagamatsu *et al.*, Nature **410**, 63 (2001)。
- [11] Y. Kamihara *et al.*, J. Am. Chem. Soc. **130**, 3296 (2008)。

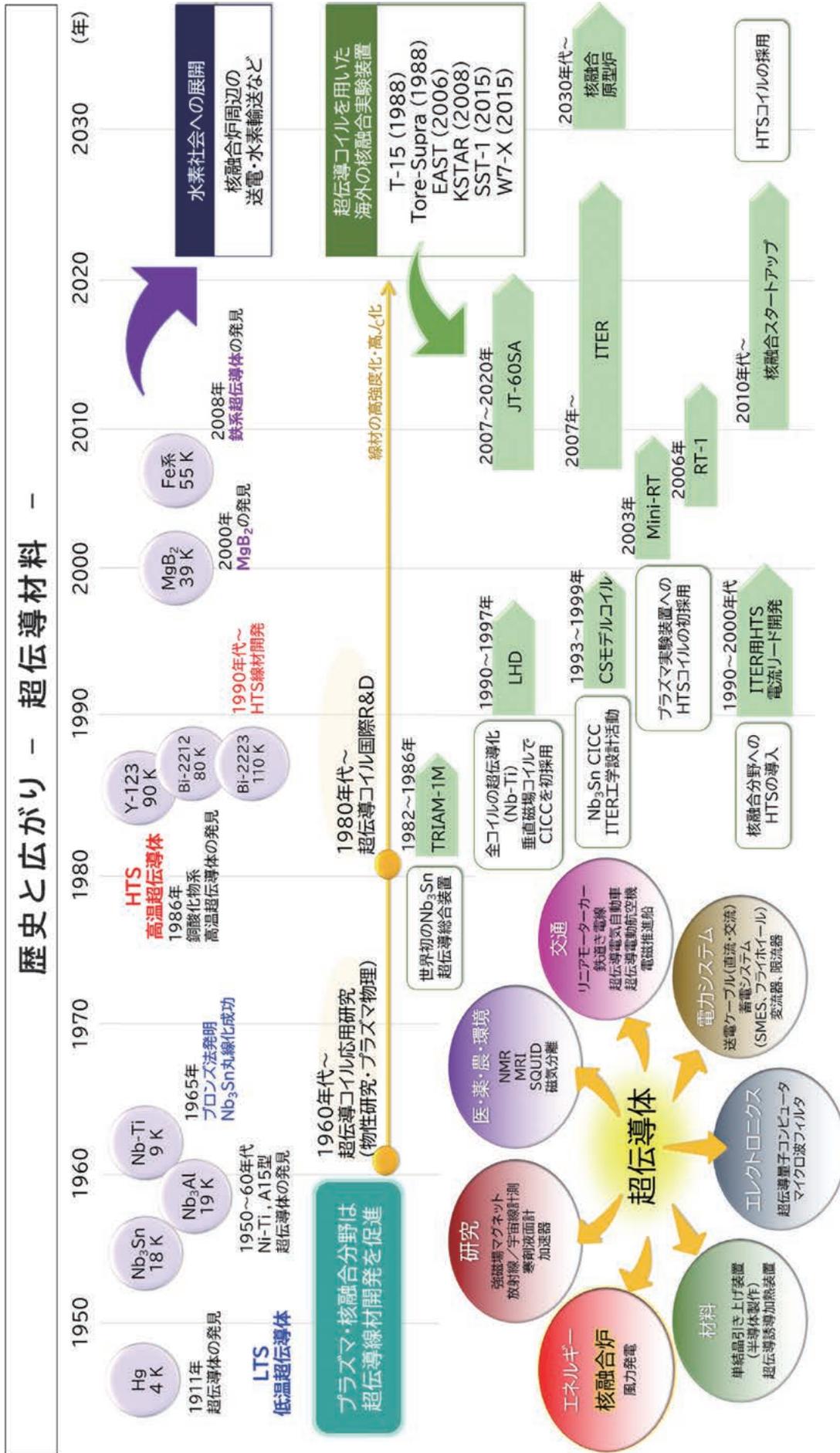


図1 超伝導材料サイエンスチャート。



## プロジェクトレビュー 総説 プラズマ・核融合サイエンスチャート

## 3. 歴史と広がり

## 3. History and Diversity

## 3.7 レーザー材料

## 3.7 Laser Materials

上原日和, 安原 亮

UEHARA Hiyori and YASUHARA Ryo

核融合科学研究所

(原稿受付日: 2023年11月2日)

## Keywords:

plasma, fusion, science chart, history, diversity, laser materials

メイマンが1960年5月に、ルビーレーザーの発振に成功して以来、多くの分野でレーザー光源の利用が進んでいます。核融合分野も同様に、計測、プラズマ駆動、材料加工と幅広い用途でレーザーが活躍しています。レーザー光源の特性は、エネルギーを与えて基底状態の粒子より励起状態の粒子が多くなる反転分布を形成するレーザー材料（媒質）の性質に強く依存します。ここでは、特に核融合分野と関連が深いレーザー材料をマップとしてまとめました。

## 3.7.1 レーザー材料マップの説明

レーザー材料の歴史は、そのままレーザー光源開発の歴史でもあります。よく知られているように、1960年のメイマンのルビーレーザー発振は学術的な評価は十分ではなかったものの（フィジカルレビュー誌から拒絶され、Natureから報告）、科学界に与えた影響は絶大で、その後のレーザー開発競争のきっかけとなりました。図1のマップは、横軸を年代にし、主要なレーザー材料を、報告された年とともに表示しています。読者の理解を助けるために、レーザー材料をおおよそ3つの形態、固体、ガス、半導体に分類して帯状に表示しています（図の上から下の順）。半導体は固体材料ではありますが、特性上の違いから別に分類しました。最下部の帯には、関連する主要なレーザー光学技術の開発項目と開発年を示しました。

図1を見ると1960年のレーザー最初の発振の直後に、核融合研究にとって非常に重要なNd添加ガラスレーザーも含めて、多くのレーザーが実現していることがわかります。当時の激しい開発競争について、例えば日本のレーザー

National Institute for Fusion Science, Toki, GIFU 509-5292, Japan

研究の第一人者である霜田先生の文献[1]を参考にしてください。レーザー黎明期の迫力ある研究競争の一端を感じていただけたと思います。核融合研究者にもなじみの深いQスイッチ発振、モードロック、チャープパルス増幅（CPA）といった技術も20世紀中には出そろっています。俯瞰してみると、レーザーの発展は、新しいレーザー材料と光学技術が続々と生まれてくることで、大きく展開してきていることがわかります。

## 3.7.2 固体レーザー材料

固体レーザー材料は、初めてのレーザー発振媒質がルビー（少量のCrが添加された $Al_2O_3$ ）であったこともあり、活発に材料探索が行われました。核融合分野では、ネオジウム添加ヤグ（Nd:YAG）結晶、ネオジウム添加ガラス（Nd:glass）材料、そして近年ではイッテルビウム添加ヤグセラミック（Yb:YAG ceramics）材料が重要な材料として挙げられます。Nd:YAG結晶は最も一般的に利用されている固体レーザー材料です。核融合分野ではプラズマ電子温度・密度計測用の光源、チタンサファイアレーザーの励起光源、材料加工用光源など広範な領域で使用されています。YAG結晶の持つ良好な熱特性や、Ndをレーザー活性元素としたときのレーザー分光特性の良さなどが評価されて今日の普及に至っています。Nd:glassレーザー媒質は、大阪大学の激光や米国NIF（National Ignition Facility）のレーザー媒質に採用されているレーザー核融合ドライバーのスタンダードです。レーザー発振のしやすさを表す誘導放出断面積の大きさ（小さすぎるとうまくレーザー動作が行われない、大きすぎると寄生発振という望ましくない動作が起こる）、非線形光学効

corresponding author's e-mail: uehara.hiyori@nifs.ac.jp

果の起こりにくさを示す非線形屈折率などがレーザー核融合実験に適しています。ただし、ガラス材料であるために熱特性に課題があります。Yb:YAGセラミック材料は、近年急速に研究が進展したレーザー材料の一つです。日本の研究者たちがセラミック材料中の散乱源を低減する技術開発に成功し、高品質なYAGセラミック材料が実現しました。単結晶成長は、育成条件が十分に最適化されていない場合、結晶中に歪や不純物、不均一性などが発生して大型化が難しいという問題があります。セラミックは小さな結晶粒の集合体であるために本質的に結晶成長に伴う歪を回避することができ、大型バルク材料が得やすいという特徴があります。世界各国でYAGセラミックにYbを添加したレーザー出力100 J級のレーザー装置開発が行われています。

### 3.7.3 その他の材料

続いて、図の上から2番目のガスレーザーの帯に目を移します。固体レーザーでは発振の難しい紫外～可視や、赤外波長域のレーザーが揃っています。ここに記載したガスレーザーは、利得媒質にガス分子（原子）を用いた放電励起や電子ビーム励起のものが主となっています。分子の密度が低い場合、大出力は得にくいですが、放電手法やガス圧などを最適化することで高出力化も可能です。ガスレーザーのスペクトル線幅は一般的な固体レーザーよりもはるかに狭く、可干渉性に優れているのが特徴です。ルビーレーザーの実証と同年に開発されたHe-Neレーザーは、低出力ながら波長安定性や視認性が高く、コヒーレンスに優れているため、干渉計測、レーザー測長、光計測システムにおけるアライメント用マーカースとして重宝されています。ArFやKrFに代表される励起二量体（excimer）を媒質とするエキシマレーザーは、波長150 nm～350 nmの深紫外領域において高効率なパルス発振動作が可能です。特にKrFエキシマレーザーを用いた慣性核融合炉用ドライバーの開発が1980年代より進められており、それに伴って高出力化・高繰り返し化など様々な技術が生まれました[2]。一方、CO<sub>2</sub>レーザーの炉用ドライバー開発も1970～1980年代に行われており[3]、現在では、CO<sub>2</sub>レーザーをプローブとしたレーザー干渉計測が磁場閉じ込めプラズマ装置などに適用されています。

半導体レーザーは、1962年に低温下でGaAsのpn接合を用いて近赤外レーザーのパルス動作が観測されたのが最初の発振実証です。その後、1970年に室温連続発振が実証され、1979年に面発光レーザーが、1994年に量子カスケードレーザーが誕生しており、半導体レーザーの発振波長は現在、紫外から中赤外域までをほぼ連続的に網

羅されています。近年の半導体技術の進歩に加え、アレイ化・スタック化技術によってキロワットを超える半導体レーザーが上市されるようになりました。それに伴い、従来のフラッシュランプ励起に代わって半導体レーザーを励起源としたNd:YAGレーザーやYb:YAGレーザーが普及しており、次世代の核融合炉用ドライバーとしてさらなる高出力化の研究が国内外で盛んに進められています。

### 3.7.4 光学材料

図中に記載したレーザー利得媒質のほか、様々な光学材料の誕生や品質向上が、これまでレーザー装置の発展を支えてきました。特に、リン酸二水素カリウム（KDP）、リン酸二重水素カリウム（DKDP）、ホウ酸バリウム（BBO）、ホウ酸リチウム（LBO）、ニオブ酸リチウム（LN）、チタン酸リン酸カリウム（KTP）などに代表される非線形光学結晶は、高調波発生などの波長変換に用いられるほか、光パラメトリックチャープパルス増幅（OPCPA）などの次世代の高出力化技術に欠かせない材料です。そのほかにも、多段増幅機構を有するレーザーには光アイソレーターの導入が不可欠ですが、大出力レーザーシステムにも適用可能な高品質かつ大口径な磁気光学材料が開発されています。

より詳しいレーザー開発の歴史や、レーザー動作原理、レーザー装置構成については、本誌講座「固体レーザーの基礎」にて詳細に纏めてられています[4]。ぜひご覧ください。

### 3.7.5 まとめ

本節では、核融合研究に関連するレーザー材料について紹介しました。本文中にも紹介しましたが、レーザー材料のイノベーションが、レーザー光源のイノベーションとリンクして、レーザーの高性能化が行われてきました。磁場閉じ込め方式も含めた核融合研究全体でレーザーは重要な要素技術となっています。レーザー材料研究がさらに進展して、核融合分野に大きなインパクトを与える新材料の出現を大いに期待するところです。

### 参考文献

- [1] 霜田光一：「レーザーがもたらしたもの」応用物理 **79**, 487 (2010).
- [2] レーザー学会：レーザーハンドブック第2版 I編（オーム社，2005）.
- [3] 山中千代衛：レーザー研究 **38**, 29 (2010).
- [4] 上原日和：プラズマ・核融合学会誌 **97**, 289 (2021).

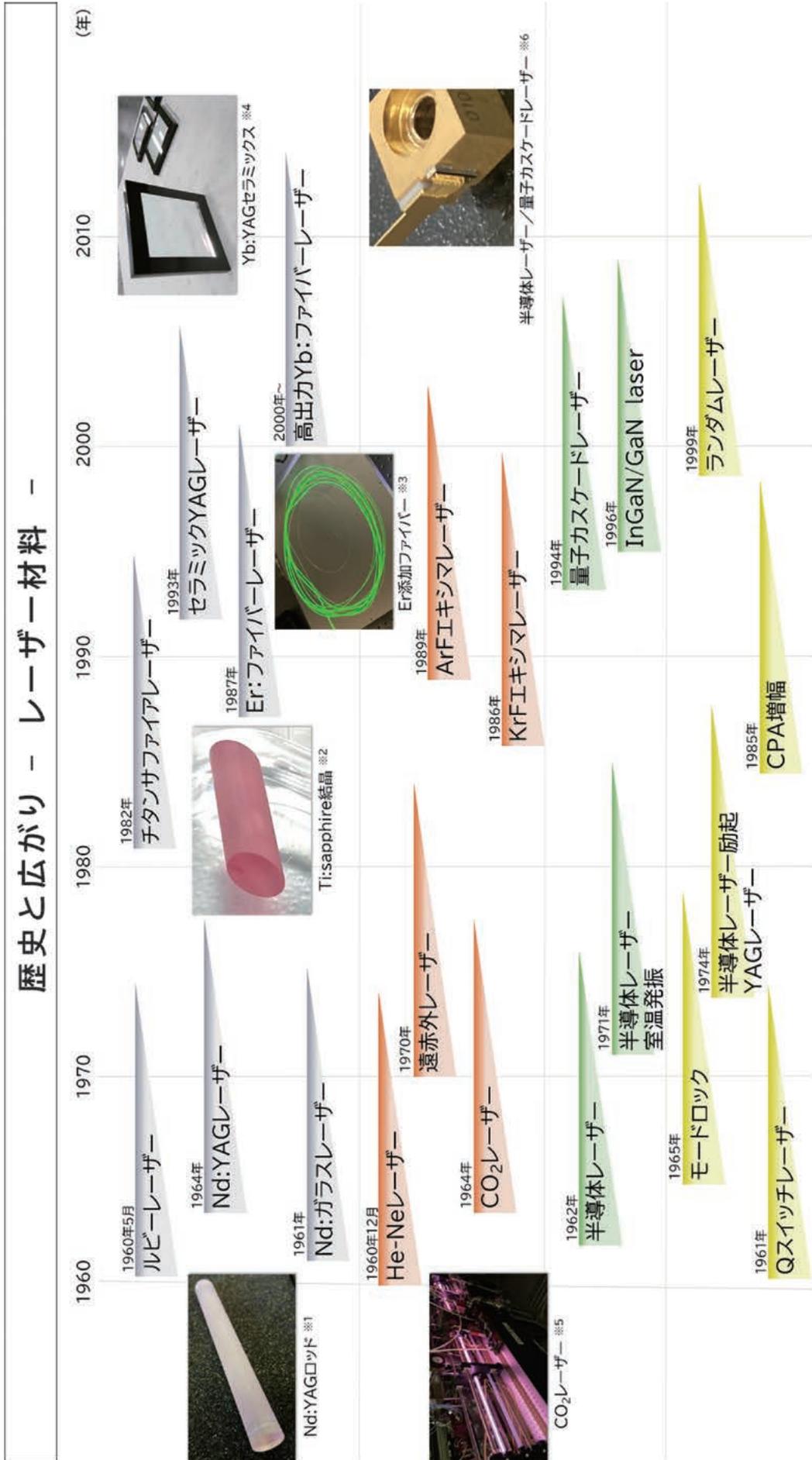


図1 レーザー材料マップ。  
 ※1~3, 5, 6 核融合研 上原日和 撮影、 ※4 阪大レーザー研 萩野純平氏 提供



## プロジェクトレビュー 総説 プラズマ・核融合サイエンスチャート

### 3. 歴史と広がり

#### 3. History and Diversity

#### 3.8 炉工学エンジニアリングマップ

#### 3.8 Fusion Reactor Engineering Map

後藤 拓也\*

GOTO Takuya

核融合科学研究所

(原稿受付日：2023年11月2日)

#### Keywords:

plasma, fusion, science chart, history, diversity, fusion reactor engineering

前節までにまとめられた各分野のサイエンスチャートインフォグラフィックスは、各分野における研究や発見の歴史とその展開を時系列にフローチャート形式で図示したものです。一方、核融合炉工学は解像度の異なる多数の項目を含んでおり、さらに核融合炉という明確な目的・対象に動機付けられて発展してきたため、その歴史と展開の全容を1枚のインフォグラフィックスにわかりやすくまとめることは難しいと判断しました。そこで核融合炉工学のインフォグラフィックスについては時系列フローチャートではなく、研究の広がりをイメージできるものとしてまとめることとし、それを炉工学エンジニアリングマップと命名しました。ここではマップの着想に至った経緯と、その位置付けについて解説します。

#### 3.8.1 炉工学エンジニアリングマップの着想の経緯

核融合炉工学は、プラズマ・核融合学を構成する4分野の中では少し特殊な立ち位置にあります。核融合炉工学は、核融合炉やその構成システムという明確な対象において、核融合炉設計を通じて顕在化された各構成要素の設計仕様に対し、その設計課題を解決することを目的として展開してきました。このため他のインフォグラフィックスと異なり、学術テーマの時系列発展で分野全体をわかりやすく表現することは困難であるという問題に直面しました。歴史という観点では、学術テーマではなく、核融合炉設計や核融合研究用の機器・装置の歴史、あるいは研究者の系譜などの形でまとめるという発想もありました。他方で、核融合炉設計や核融合炉工学研究はその時々提案された核融合炉の実現に向けた課題解決、誤

\*現在の所属：Helical Fusion Co., Ltd., TOKYO 104-0061, Japan

解を恐れずに言えば理想追求に基づいており、必ずしも時系列で一方向に進展した形や、多方面に広がってきた形で描き表されるものではありません。核融合研究装置そのものの歴史は時系列で記述できるものの、既存の核融合研究装置だけではブランケット等まだ実装されていない技術がカバーできませんし、研究者の系譜は資料としては価値があり興味深いものの、やはりそれだけで核融合炉工学研究の歴史と広がりを描き表すことは難しいとの結論に至りました（なお核融合炉設計の歴史についてはウイスコンシン大学・Fusion Technology Instituteのサイト[1]や論文[2]に興味深い図が掲載されているので、関心のある方はそれらをご参照ください）。

そこで、核融合炉工学のインフォグラフィックスについては、歴史ではなく研究の広がりをイメージできる形でまとめることにしました。この場合も描画のやり方には色々なものが考えられますが、明確な目的研究である核融合炉工学の性質を考慮すると、やはり核融合炉の構成システムとそれに関連する研究課題を表現することが最も分かりやすいと考え、その基本方針に沿って原案を作成し、専門委員会の議論を経て改善を加えていきました。最終的にまとめられた炉工学エンジニアリングマップを図1に示します。

#### 3.8.2 炉工学エンジニアリングマップの概要と位置付け

前述の通り、核融合炉工学は開発途上にある核融合炉の成立性の実証と炉を構成する要素技術の課題解決を目指した学問領域となります。その研究対象は、核融合炉の環境や条件、時には特定の核融合炉の設計に特化したも

author's e-mail: takuya.goto@helicalfusion.com

のになっています。核融合炉の環境・条件は、他に類を見ない特殊・複合・極限的なものであり、それ故核融合炉の課題は核融合炉工学研究者が解決するほかないというある種の自己暗示があったように思います。そのため、プラズマ・核融合学の4分野の中でも、核融合炉工学は特に他分野との関わりが控えめであった側面があるように感じられ、核融合炉工学分野外との共同研究も、どちらかという特定の課題解決に貢献する、というスタンスのものが多かったのではないかと思います。一方で、課題解決のための目的研究ではあっても、その背景にはメカニズムの解明などのための視点は必ず存在し、そこまで解像度を高めれば必ずと他の分野との接点が見えてくるはずで、そこで、炉工学エンジニアリングマップは、まずは核融合炉の構成システムをリストアップし、それらのシステムへの要求とその要求に関連した研究課題、そしてその研究課題の背景にある学問分野を順につなげていく描像としました。また、核融合炉の構成システムは、いずれも必要不可欠であり且つ、互いに独立ではなく強く関連し合っているため、構成システムは関連性の強いものほど距離が近くなるように円形にマッピングし、上述した要求・研究課題・関連学問分野はその周りに同心円状に配置することとしました。

当初案では、核融合炉工学の究極目的は、統合システムへの要求としての核融合炉の高性能化・高効率化であると捉え、その1つの焦点を中心としたインフォグラフィックスを提案していました。この「核融合炉の高性能化・高効率化」は、核融合炉の社会実装が実現した後にも、より良い核融合炉、すなわちより高い性能指標を求め、時には新奇の発想も取り入れて広がり続けるテーマです。一方で、核融合炉工学の目的には、社会受容性の向上やシステム安全の確保など、実用化に向けて一定の方向性に収斂しつつ発展し続けていく要素も含まれるのではないか、という認識が専門委員会での議論を通じて共有さ

れていきました。そこで、インフォグラフィックスを2つの焦点を持った形に描き直しました。最終的に提案したインフォグラフィックスでは、広がり続けるテーマである高効率化・高性能化を右に、収斂していくテーマである社会受容性・システム安全を左に配置しています。これにより、各システムに特化した基礎・汎用の理学・工学から、情報学、社会科学にわたる広範な分野と関連している核融合炉工学の特性を端的に表現したマッピングが完成しました。特に、社会経済学、科学技術社会論といった社会科学分野との関連はプラズマ・核融合学の4分野の中でも特徴的な部分であると言えます。

炉工学エンジニアリングマップは、関連学問分野の研究者の方にとっては自身の研究分野と核融合炉工学の接点を見出すことや核融合炉システムとの距離感を把握するためのツールとして、核融合炉工学の各分野の研究者にとっては自身の研究の核融合炉システムとしての立ち位置や関連学問分野との関係性を把握するツールとして、双方向性を持って有効に活用いただけると期待しています。また関連学問分野との連携の強化としては、関連学問分野の知見を核融合炉の課題解決に応用するというマップ上で内側向きの動きだけではなく、核融合炉の特殊性を関連学問分野の発展や新たな研究シーズの開拓につなげるような、外側向きの動きもより活発にしていくことが望まれます。

核融合炉は未だ開発途上であり、炉工学エンジニアリングマップも今回提案したものが最終形ではないと考えています。ぜひ読者の皆様からもさらなる発展に向けたご提案・ご提言をいただければ幸いです。

#### 参考文献

- [1] <https://fti.neep.wisc.edu/fti.neep.wisc.edu/studies.html>
- [2] L.A. El-Guebaly, *Energies* **3**, 1067 (2010).

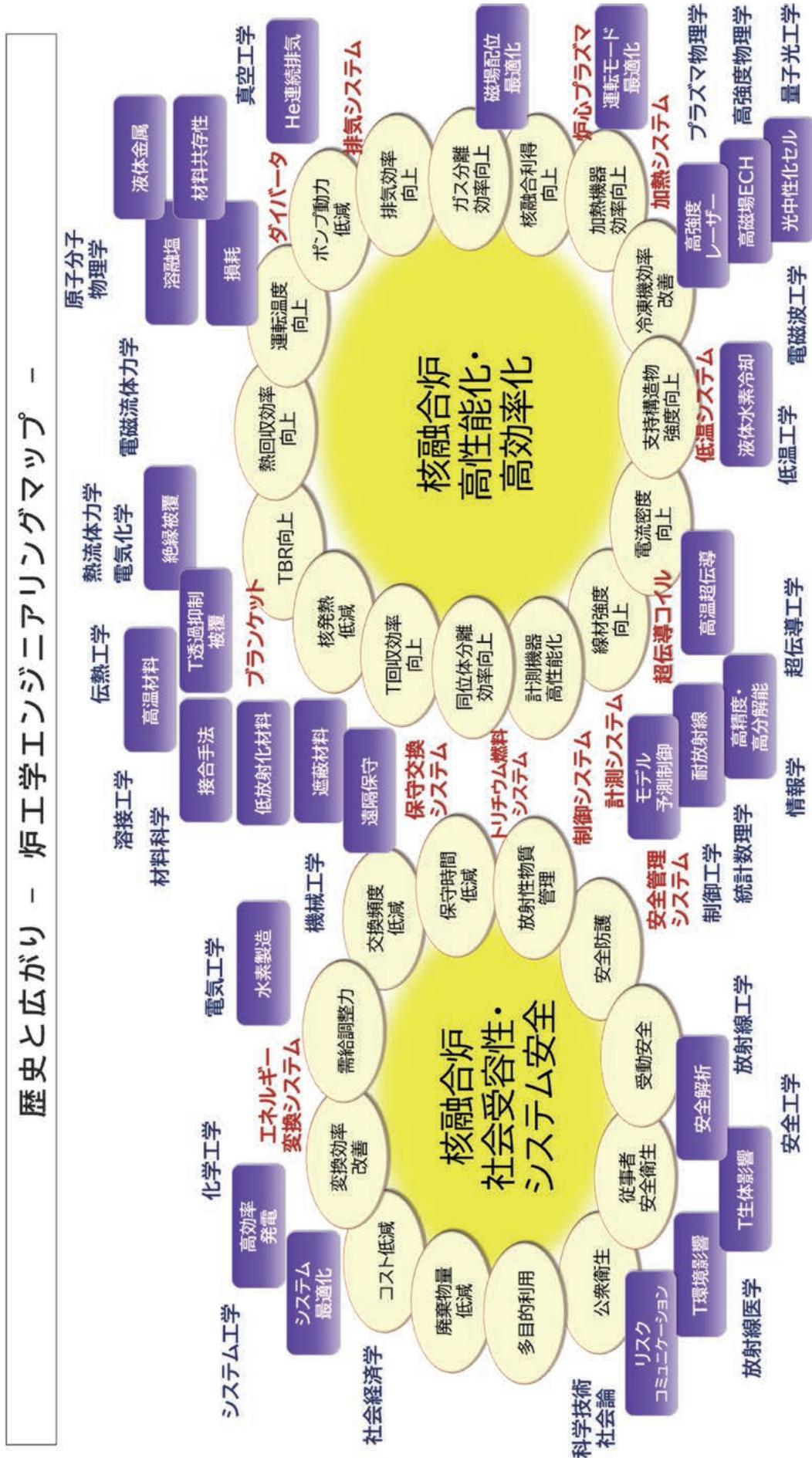


図1 炉工学エンジニアリングマップ。



# プロジェクトレビュー 総説 プラズマ・核融合サイエンスチャート

## 4. 核融合プラズマのサイエンスその広がり

### 4. Fusion Plasma Science and Diversity

仲田資季, 森 芳孝<sup>1)</sup>  
 NAKATA Motoki and MORI Yoshitaka<sup>1)</sup>  
 核融合科学研究所,<sup>1)</sup>光産業創成大学院大学  
 (原稿受付日: 2023年11月2日)

**Keywords:**

plasma, fusion, science chart, history, diversity

新たなエネルギー源の実現という目的を持って創始された核融合プラズマの研究は、その挑戦の過程で新たな知見や技術を積み重ねてきました。目的研究「エネルギー源の実現」という幹から多くの枝葉を伸ばして「プラズマ物理・核融合科学」という広大な学術領域を形成する進化を遂げています。

「核融合炉の実現」に加えて、「難問から諸科学・社会へ拡大する研究」を含んだ色彩豊かな核融合プラズマのサイエンスとその広がりを感じ取っていただくために、2021年8月に、核融合プラズマに関する学術課題集を取りまとめました[1]。学術課題集では、核融合プラズマの学術(サイエンスと技術)課題の魅力・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の記事をまとめています。それぞれの記事は、図1に示す6つのカテゴリーに分類されています。

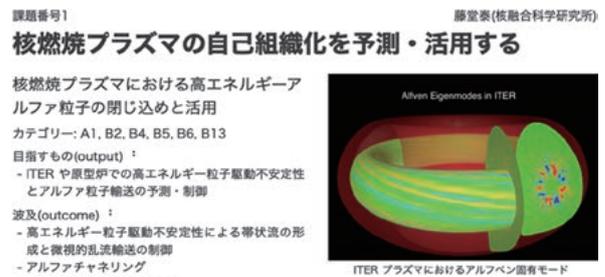
それぞれの記事は、分量をA4 1ページにとどめ、分野外・分野内他領域へ向けた説明を心がけました。記事の様式については「The Science of EST -Scientific challenges

to be addressed by the European Solar Telescope-」[2]や「日本物理学会創立70周年記念企画・物理学70の不思議」[3]を参考にしました。記事は、見出し(分野外・分野内他領域向け)、サブタイトル(分野内向け)、カテゴリー、めざすもの(output)、波及(outcome)、リード文、専門的な内容も含む概略文、参考文献で構成されます。図2に、記事の例を示します。

専門家が関連研究を概観する場合には「リード文」「概略文」に加えて、「カテゴリー」や「めざすもの(output)・波及(outcome)」で分類・整理し直してみることも有益でしょう。一方、専門外の研究者が全体像の概観を把握しようとする場合には、「見出し」と「リード文」に特化して読み進めることを推奨します。学生さんに向けた参



図1 学術課題集のカテゴリー。



国際協力により建設中のITERにおいて、人類ははじめて核燃焼プラズマの実現に挑戦する。これまでの核融合プラズマ実験では外部からのプラズマ加熱によってエネルギーを入力していたが、核燃焼プラズマでは内部での核融合反応が主要なエネルギー源となる。その予測と制御においては、プラズマの自発的な構造形成(自己組織化)を考慮することがますます重要になるであろう。核融合反応から発生し、核融合エネルギーをプラズマに与える(=加熱する)役割を担うのは高エネルギーアルファ粒子であり、その輸送と閉じ込めは重要な研究課題である。

核燃焼プラズマでは、核融合反応から発生する高エネルギーアルファ粒子が燃料プラズマを加熱することによって、核融合反応に必要な高温状態が自律的に維持される。このため高エネルギーアルファ粒子の良好な閉じ込めが核燃焼プラズマの実現には必須の条件である。しかし、高エネルギーアルファ粒子が不安定化させるアルファ固有モードなどの電磁流体力学振動との相互作用によって、高エネルギーアルファ粒子の輸送と損失が引き起こされる可能性がある。その予測と制御は重要な研究課題である[1]。また、高エネルギー粒子駆動不安定性は、非線形効果によって形成される帯状流を媒介として微視的乱流輸送に影響を与え、さらにはランダム減衰によって燃料イオンを加熱する(=アルファチャネリング)。このような高エネルギーアルファ粒子に起因した自己組織化の性質を理解することで、核燃焼プラズマの性能を向上できると期待される。また、電磁流体力学は無衝突プラズマに対して未完全の学問体系であるが、プラズマ粒子と電磁流体力学振動の運動論的相互作用の研究は無衝突プラズマを対象とした運動論的電磁流体力学の確立につながるであろう。

[1] 小特集「アルヴェン固有モード研究の最新事情」, 藤堂泰, プラズマ・核融合学会誌 Vol. 83, p. 865(2007)

図2 記事の例。

考資料としては、興味に応じて目次の大区分（“躍動する高温プラズマの世界”など）を活用することで最新の研究動向や挑戦的な課題を把握することができます。この学術課題集が、様々な用途や場面で柔軟に活用されることを期待しています。

記事は、核融合科学研究所のホームページに掲載されています（図3 QRコード）。

以下に、この学術課題集の全貌をまとめましたので、ご参照ください。

## 学術課題リスト

### 躍動する高温プラズマの世界

1. 核燃焼プラズマの自己組織化を予測・活用する
2. 自発形成する断熱層でより熱いプラズマを閉じ込める
3. 微細渦が自発的に励起されるプラズマ乱流のマルチスケール相互作用
4. 非平衡システムに現れる非局所性の起源は？
5. 異なる物質はプラズマ中でどう混ざる？
6. プラズマが不純物を自ら吐き出す条件を探る
7. 高エネルギー粒子の損失を止めろ！
8. 突発的な崩壊現象やその予兆を解き明かせ
9. 巨視的不安定性をいかにして抑えるか
10. 流れを伴う動的な力学平衡状態 —MHD理論を超えて
11. 磁場が描く層・分岐・カオスの起源は？
12. 磁場とプラズマの圧力がつり合う磁場配位とは？
13. 磁化プラズマの巨視的構造形成の謎に迫る
14. プラズマに潜む隠れた対称性をデザインする
15. 乱れと磁場の幾何学で紐解く構造形成と機能創発
16. 波でプラズマを自在に操れるか？
17. 核融合点火をめざした爆縮・加熱高効率化の挑戦
18. 多階層複雑系を要素統合で記述する
19. 統合コードでレーザー核融合の点火・燃焼を予測する
20. 乱流の理解は深化する
21. 高エネルギー粒子を計測する！
22. 先進的中性子計測機で核融合プラズマを診る
23. 核融合研究から芽吹く新たなインフォマティクス

### 相互作用するプラズマと物質

24. 壁と磁場の形状で熱と粒子を制御する
25. 磁場を乱して、壁を守る
26. 気体を使って高温プラズマを手なづける！
27. プラズマと物質が触れ合うことにより起こる現象を

理解・制御する

28. 核融合プラズマと壁の間で数百MWの熱を散らす

### プラズマを生み出し加熱する

29. 波で核融合炉心プラズマを生成できるか？
30. 負イオンの物理が拓く高効率粒子ビーム技術
31. 繰り返しのできる高エネルギーレーザーの実現
32. 核融合プラズマを荷電粒子で高効率に加熱する
33. 非線形場が結ぶ大強度ビーム物理と非中性プラズマ物理の共通性

### “燃える”プラズマ

34. “燃料”を制すれば、核融合プラズマを制する
35. 核融合プラズマにおける粒子閉じ込めと粒子供給のパラドックス
36. 慣性核融合発電炉で用いられる核融合燃料ペレット
37. エネルギー付与過程に対応した標的構造のバリエーション
38. 磁場閉じ込めプラズマとの相互作用による固体物質の均質化過程
39. 高速飛行の高密度プラズマ塊で粒子やエネルギーを運ぶ

### 核融合炉への道

40. トカマクプラズマの電流分布の最適解は何か？
41. 突発する大熱負荷への備え
42. ヘリウム粒子の一生を追え！
43. 狭い隙間から診てプラズマを制御する
44. 核融合プラズマの自動運転
45. 低アスペクト比化トラスの pros and cons
46. 非平衡状態を利用してトカマク型炉心プラズマを手軽に生成したい！
47. 開いた磁場による閉じ込め（開放系配位）で核融合炉は可能か？
48. マイルド核融合プラズマコンセプト？
49. 探究！次世代高効率核融合発電方式

### 核融合から新たなテクノロジーへ

50. ミュオン触媒核融合研究の新展開
51. 核融合炉が拓く応用技術
52. 核融合中性子を使った未来の癌治療

### 課題の類別（各記事に関連するカテゴリ記号を記載）

#### カテゴリ A（研究の指向性）

- A1. 大型ミッション研究の加速
- A2. 新概念・新手法・新展開の構築
- A3. 連携研究（炉工学・プラズマ科学・異分野科学・産業等）

#### カテゴリ B（研究の対象）

- B1. 磁場構造・平衡
- B2. MHD現象



図3 学術課題集 QRコード：(左)PDF版 (右)URL.

- B3. 輸送・閉じ込め現象
- B4. 乱流現象・非線形波動現象
- B5. 緩和現象・自己組織化/構造形成
- B6. 核燃焼過程
- B7. 周辺プラズマ・ダイバータ
- B8. プラズマ相互作用
- B9. 原子分子過程・輻射輸送
- B10. プラズマ計測・診断
- B11. プラズマ加熱・アクチュエータ
- B12. プラズマ制御
- B13. 数値計算手法・データ解析手法
- B14. 爆縮・高エネルギー密度状態
- B15. 核融合プラズマ応用

### 参考文献

- [1] 学術課題集 核融合プラズマのサイエンスとその拡がり (核融合科学研究所ホームページに掲載).
- [2] The Science of EST -Scientific challenges to be addressed by the European Solar Telescope-]: <https://est-east.eu/the-science-of-est>
- [3] 日本物理学会創立70周年記念企画・物理学70の不思議」日本物理学会誌 72 付録 (2017).

**執筆担当者** (所属は、2021年8月時点のもの)

Fusion2030 研究会

Fusion Plasma Working Group (FPWG) 構成メンバー

取り纏め 仲田資季 (核融合科学研究所)

### 幹事

釧持尚輝 (核融合科学研究所)

辻井直人 (東京大学)

浅井朋彦 (日本大学)

有川安信 (大阪大学レーザー科学研究所)

### ワーキングメンバー

横山雅之 (核融合科学研究所)

坂本隆一 (核融合科学研究所)

本島 巖 (核融合科学研究所)

徳沢季彦 (核融合科学研究所)

藤原 大 (核融合科学研究所)

佐藤雅彦 (核融合科学研究所)

井 通暁 (東京大学)

井戸 毅 (九州大学応用力学研究所)

藤田隆明 (名古屋大学)

田中宏彦 (名古屋大学)

星野一生 (慶應義塾大学)

江角直道 (筑波大学プラズマ研究センター)

高橋俊樹 (群馬大学)

福本直之 (兵庫県立大学)

長友英夫 (大阪大学レーザー科学研究所)

城崎知至 (広島大学)

菊池崇志 (長岡技術科学大学)

佐々木徹 (長岡技術科学大学)

### 協力著者

藤堂 泰 (核融合科学研究所)

佐竹真介 (核融合科学研究所)

鈴木康浩 (核融合科学研究所)

田村直樹 (核融合科学研究所)

松岡清吉 (核融合科学研究所)

小林 真 (核融合科学研究所)

松山顕之 (量子科学技術研究開発機構)

前山伸也 (名古屋大学)

岡田信二 (中部大学)

木野康志 (東北大学)

神吉隆司 (海上保安大学校)

藤田慶二 (総合研究大学院大学)