

## プラズマ科学ロードマップ 2050 各領域の詳細

(2024年12月15日)

応用物理学会 プラズマエレクトロニクス分科会 プラズマ科学ロードマップ 2050 委員会

### (1) 生成・計測・制御

これまでのプラズマ生成装置は、汎用の RF 電源やマイクロ波電源を利用することが多く、半導体プロセス向けには減圧環境を適用し、加工対象材料の大型化に適応できる方式や、微細加工に適切なパラメータを有するプラズマ源が多用されてきた。医療応用でも、大気圧で動作する条件の下、できるだけ低温のプラズマ源が開発中である。さまざまな産業応用では、減圧プラズマ源の場合コストパフォーマンスを優先したプラズマ機器設計が基本で、動作圧力は数 100 mPa～数 100 Pa におよび、容量結合プラズマ(CCP)、誘導結合プラズマ(ICP)、表面波プラズマ(SWP)、電子サイクロトロン共鳴(ECR)プラズマなどがプラズマ源である。ただし、これらのプラズマ源はある程度の電子温度・密度の制御は可能であるが、プロセスの要求に必ずしも対応し切れてはいない。加工対象に最適化されたプラズマ源・機器が構成され、改良においても現状を漸進的に改善すべく、基板ステージに異なる周波数の RF バイアスを印加するなど、根本的な再設計を行う様な開発ではなく、現状の機器の利用方法改善という観点からの進展が多かった様に見受けられる。今後は、任意のプラズマパラメータを実現できる、究極のプラズマ源の研究開発が必要と考えられる。

一方、これまでの計測・制御技術においては、プラズマの各種のパラメータ計測手法について、学術機関で基礎的な立場から開発されてきたが、半導体製造現場の量産機に適用されることは少なく、例えばエッチング終点検出など、応用範囲が限られていた様に見受けられる。基礎研究成果の実機応用への難しさはさまざまに存在し、プラズマへの擾乱が避け難い旧来型のプローブ計測や各種の光学窓を必要とする受動・能動分光計測にも当てはまる。いわんや制御の分野においては、技術者の経験・知識に基づいて機器が操作されることが多く、重要な開発事項であるラジカルの長寿命化や各種粒子温度・密度制御にしても、直接に対象物理量を計測するのではなく、プラズマ条件の目安として放電電力・ガス圧などの装置運転パラメータを制御してなされることが多く、経験に依存する要素が大きかったと考えられる。上記の様なプラズマ生成・計測・制御の産業応用のトレンドは、半導体生成分野にとどまらず、例えば医療応用のために近年盛んに研究開発の続けられる大気圧非平衡プラズマにおいても類似の傾向があるものと思われる。

今後のプラズマ源としては、半導体プロセス分野においては、基板寸法の大型化や加工精

度の超微細化ももちろんであるが、多品種少量生産や化合物半導体基板への対応もあり、ユーザーの多様な希望に合わせた柔軟な装置開発が挙げられる。また、未来のプラズマ源は、電気回路と真空装置などの単独プラズマ源として存在する様なものではなく、常に計測制御装置によってインテリジェンス化されて、研究開発の現場で利用されると考えられる。また、異なる方向性として、今後ますます半導体加工の微細化が進むことにより、物理的な限界～1原子精度での加工制御～を超過することさえ、求められる可能性が非常に高い。すなわち、物理学的な意味での限界に挑戦する様な学問・学術が必要とされる日が将来訪れるものと思われる。

具体的に開発されるべきシーズの例として、フレキシブルデバイスや、触覚センサ、車載ライダー受信部などのニーズに対しては、ほぼ室温レベルの低温処理プロセスの実現という現在のシーズ研究をより一層推進すべきである。半導体製造分野の後工程へのプラズマプロセス応用も期待されているが、そのために基板処理の低温化が必須であり、より低温で処理対象を加工できるような、低イオンエネルギー・低ガス温度の減圧プラズマ源の開発についても、一層の強力な展開が望まれている。

プラズマプロセスのインテリジェンス化のために、さまざまなプロセス計測制御技術の研究開発と実機適用が必要となると考えられる。2008年版のアカデミックロードマップ検討時にも示された通り、これら将来のプラズマ計測装置は、簡易であるとともに、プロセスをその場で判断しフィードバックをおこなう必要があるため、高感度かつ短時間での計測が求められる。非侵襲な計測方法の高度化も、半導体製造の現場に受け入れられるために重要である。加えて、さまざまな粒子密度などの物理量計測が求められるため、ひとつの計測装置で多くの対象を同時計測できる技術も必要である。すなわち、簡便・安価な装置によるリアルタイム計測制御を、高度で洗練された機械学習・人工知能・AI・データサイエンスなど、数理情報工学の手法で解決すること、それらの関連学問の研究、並びに学術的成果を現場に応用するための方法論の開発が重要で、この点での進歩が望まれている。たとえば、AIに学習をさせるためのデータ取得方法の体系化や、そもそも機械学習に頼らないキラー情報を見出す取り組み、すなわち「機械学習学」の分野の進展も重要になると思われる。もちろん、ビッグデータを用いる教師あり機械学習を本格的に取り入れるなら、プラズマ計測においては、今とは比較にならないほどの大量のデータ取得を目的とした手法開発が必要で、この点での研究開発がつよく要求されると考えられる。プラズマ源の設計・製造においても、AI・情報科学的な手法により、多様な現場ユーザーの要求に、機動的に対応することが求められるので、機械学習手法の分野でも研究開発が一層必要となると考えられる。さらに、プラズマ生成場とプラズマ反応場の切り分けによる現象の理解促進、プロセスの簡素化につながる視点も重要である。

以上、ここまではプラズマ機器により生成される半導体製品・医療応用や、プラズマそのものの計測制御に対し記述したが、半導体や種々の加工対象などの「製造装置」としての機器の計測制御も、同様に極めて重要である。量産機の機差の検出、メンテナンス時期の検出、現場のオペレーターやユーザーさらには開発担当にも負荷をかけることなく、もちろんグリーントランスファー(GX)に合致した、省エネルギー化と環境への負荷を低減できるプロセスが望まれている。

産業現場のニーズはもちろんの事、新たな産業を生み出すための基礎科学の進展の重要性も言うまでもない。幅広い学術基盤を形成することで産業も発展するからである。たとえば既に議論されている 2 nm プロセス・beyond 2 nm プロセス技術開発などは、直接にそれらプロセスを可能とはしないかもしれない。しかし基礎重視の観点から、技術を醸成し世界における我が国の産業のシェアを確保するため、2050 年までのロードマップには、開発を通じた技術向上を目指すべく 2 nm・beyond 2 nm プロセスが盛り込まれることも、妥当と考えられる。さらにその様な未来プロセスを支えるためには、従来の常識を超越する様な科学・学術が必要である。すなわち、物理学的限界への挑戦が必要で、たとえば、デバイ長にかかわらず寸法や形状を自在に制御できるプラズマ源の開発、分子サイズロボットによる完全非侵襲プラズマ計測や、電子温度・密度の任意の制御、電子エネルギー分布関数の任意制御、それによるプラズマ反応の自在な制御、ナチュラルアナログとしてのプラズマ実験を利用し、機器設計へ応用することなどが追求されるべきテーマと考えられる。

なお、近い将来のプロセス計測技術はリアルタイムモニタリング・リアルタイムプロセス制御であるが、2050 年となれば、リアルタイムを超えた予測制御が必要となるはずである。各種の機械学習や、AI(人工知能)、Digital Twin (仮想空間上装置)などの情報科学的手法、クラウドプラズマプロセスなど顧客先装置の遠隔操作、さらには量子コンピューティング技術を取り込んだ「予測制御」が期待され、その方向への基礎研究・技術開発が必要と考えられる。「次に何を研究開発すべきか」まで「予測」できる様な情報科学的手法と、半導体生産現場他のプラズマ技術応用分野、プラズマ基礎科学の協働研究展開が必要である。その先に、次世代機器開発の提案までも行う装置の開発等により、人間を装置がガイドしてくれるような未来社会の実現が望まれている。

なお、こうした未来志向のロードマップ作成においては、「総合知」の概念の必要性についても言及しておきたい。近年、大気圧非平衡プラズマの科学技術開発と、その医科歯科応用が盛んに展開されているが、そこには、プラズマ科学技術による人々の幸福感の直接の増進を目指したい、という哲学が込められているはずである。そのような哲学的・人文社会学的考察も怠らぬ様、将来を展望したい。

## (2) モデリング・シミュレーション

モデリング・シミュレーションの研究・開発の最終製品としては、対話型ソフトウェア、基礎データのオープンデータベース、オープンソースのシミュレーションソフトウェアが想定される。これらの現段階での例として、プラズマプロセス用の CAE 導入などが挙げられ、その具体的な性能については、2020 年代から 2050 年代までの間にさらに向上すると予測される。本稿では、2050 年代までに想定される要請事項や、その実現のために想定されるアプローチを述べる。

### (2-1) 基礎データ収集への新たな情報科学の活用

本ロードマップで予測されているように、プラズマ科学を基盤とする未来技術は多岐にわたる。こうした未来技術の開発においては、新規なガスを用いた未解明のプラズマの利用が想定され、かつ、待ったなしの地球温暖化などの問題に対応するためには、短期開発が要求される。その際、そのガスのプラズマ特性に関する基礎データ収集が極めて重要であるが、現状の実験のみによる基礎データ取得はかなりの時間を要する。

これに対し、PINN (Physics-Informed Neural Networks) やサロゲートモデルなどを援用した機械学習による内挿・外挿などの予測・推定の手法を援用することにより、実験による基礎データ収集だけでは不可能な短期開発が可能となると期待される。こうしたアプローチにおいては、量子コンピュータの活用が可能であり、計算の高速化などが図られるものと期待される。

### (2-2) モデルの標準化

計算機の計算能力の向上によって、プラズマを用いたプロセス全体の CAE が現実のものとなってきた。しかし、そこで用いられているモデルの妥当性については、まだ十分に検証されていないものが多い。特に、放電現象特有の確率的要素（初期電子など）を含めたモデルはほとんどない。今後は、Validation & Verification を経て、対象とする問題毎に適したモデルが確立される（標準化される）と期待される。また、今後発展することが期待される機械学習や量子コンピュータを用いた計算においても、同様の標準化を想定した開発がなされると推測される。

### (2-3) マルチスケール化とマルチフェーズ化

プラズマプロセスには、ナノ秒から秒、ナノメートルからメートルに至る時間・空間的にマルチスケールの現象が混在している。これまでは個々のスケールの範囲内のモデル化・シ

ミュレーションが行われてきた。しかし、これらをシームレスに扱うモデルはまだ標準化されていない。

一方、材料プロセスにおいては、時間・空間スケールの異なる固体・液体・気体との界面（マルチフェーズ界面）が重要である。そのため、分子スケール（分子動力学）・メゾスケール（流体や確率統計）・マクロスケール（連続体）をシームレスに扱うマルチスケール化や、固体・液体・気体をシームレスに扱うマルチフェーズ化が推進されることで、これまで未知であった各スケールやフェーズ間の相互作用が解明されると期待される。

また、上記に関連して量子コンピュータの発展に伴い、量子化学計算の発展が見込まれる。現在の量子化学計算は、基底状態を対象とし、原子のダイナミクスだけを解く。一方、プラズマと接する界面では、電子励起状態や振動励起状態の原子・分子が表面に接近した際の状況を詳しく知る必要がある。これを計算によって解明するためには、電子のダイナミクスについても同時に解くことは、現状のノイマン型計算機では非現実的であるが、量子コンピュータであれば現実的な時間内に解ける可能性がある。こうした計算により、これまで見ていなかったプラズマならではの界面現象が明らかになると期待される。

### （3）成膜・材料合成

プラズマを用いた成膜・材料合成のロードマップは、目的とする材料毎に異なっており、多岐にわたる。しかし、2050年代にあるべき姿（ゴール）は共通しており、カーボンニュートラル・環境無負荷・高性能というキーワードで表すことができる。各材料の成膜・材料合成の研究・開発においては、このゴールに到達するための個別の施策が検討・想定されている。ここでは、材料の中でも代表的なシリコン半導体系、カーボン・有機材料系、これら以外の無機材料系に分けて2050年までのロードマップを検討した。また、現在から2050年代に至るまでの共通動向について検討した。

#### （3-1）シリコン半導体系

シリコン半導体系では、2020～2030年代において三次元配線ナノデバイスや低次元半導体（ナノシート／ナノワイヤ）の実現が、2040～2050年代において量子コンピュータ用半導体の高速生成や光電融合LSIデバイスの実現が見込まれている。

#### （3-2）カーボン系

2050年代までに大きな進展が期待されるプラズマ成膜のカーボン系材料としては、DLC、ダイヤモンド、原子層材料、カーボンナノチューブが挙げられる。

DLC については、2020 年代においては、生体適合膜などのパッシブな材料として医療応用されている。今後は、生体に対して能動的な作用を及ぼすアクティブ材料となることが期待される。その更なる発展形である 2050 年代の姿として、有機無機バイオハイブリッド生体内組織代替 DLC (=人工臓器) が想定されている。

ダイヤモンドについては、現在、単結晶ウェハサイズのインチ化が進められている。2030 年代にはそれを利用した耐環境デバイスへの応用、2040 年代には高周波デバイスへの応用、2050 年代にはダイヤモンドの高い Figure-of-Merit を利用したパワーデバイスや、ダイヤモンドの NV センターを量子ビットとして利用した量子デバイスへの応用が見込まれている。

原子層材料については、単結晶ウェハのサイズが現時点で数 cm であるものが、2040～2050 年代において 30 cm になることが見込まれている。また、その積層角についても、現時点で 10 度レベルの制御であるものが、2040～2050 年代において 0.1 度レベルの制御になることが見込まれている。

### (3-3) 無機材料系

無機材料系は多岐にわたるが、2050 年代の実用化が見込まれているものとして、二次電池用ナノ材料の量産、レアアースフリー強磁性材料、二元系合金ナノ材料、機能性デバイス用酸化物、次世代パワー半導体用酸化物、革新的太陽電池、高出力／超寿命二次電池材料、環境無負荷デバイスが期待されている。

その中で、2050 年代の SDGs 達成に大きく関与すると想定される触媒・電池系の材料については、複合アニオンと多元素カチオン酸化物の大量生産技術が 2030 年～2040 年代に確立され、2050 年代にはそれらが二次電池や触媒に応用されることが見込まれている。

### (3-4) 共通する研究・開発項目

目的とする物質合成の手段としてのプラズマへの要求事項として、合成された物質の原子配列に関する制御スケールが、2020 年代において 10-1 nm であったものが、1-0.1 nm へ、さらには、1 原子・1 分子の制御へと変遷することが想定される。その実現方法については、自己組織化反応を見出し、それを積極的に利用する方向へシフトすることが想定されている。そうした新規な反応を見出す手段としては、機械学習やマテリアルインフォマティクスの活用、さらにはその加速のための量子コンピュータや AI の活用が見込まれている。

また、SDGs と整合するために、以上のような性能向上に資する技術の研究・開発に加えて、成膜・合成の際の実効的な CO<sub>2</sub> 排出量削減やフッ素レスプロセスなどの低環境負荷化が重要視されている。

#### (4) 加工

30年後、2050年代までに必要とされる研究・開発事項を、適用する「①デバイス(製品・応用)」、それをシーズなどからエンジニアリングにより実現する「②プロセス・装置技術(生産・応用技術)」、さらに技術の科学的基盤となる「③基礎研究(シーズ等)」について検討し、予測を示した。①ではロジック、メモリとセンサなどのデバイスの進展を指標として示した。また、②、③においては、環境対応技術をGX(グリーントランスフォーメーション)、ICTによる研究開発の加速をDX(デジタルトランスフォーメーション)として提示している。さらに、③においては、計測・評価技術を基盤技術として加えた。以上により、製品、生産技術、基礎研究の年代ごとの変化と③から②を経て、①が実現される流れが理解できるようにした。

ロジックでは、GAAの横方向高精度加工でDry化が必須になり、それを積層したCFET構造ではさらに横方向加工が重要になる。2030年代では新材料や新構造の採用が見込まれ、プラズマ装置を詳細に制御することで高い精度で低損傷な加工や、量産での高い再現性のプロセス技術が必要になる。メモリでは、Planer型は限界を迎え、NAND等は3D構造化が進む。DRAMはPlaner構造が2025年以降に限界を迎え、以降は3Dなど新構造に移行する。2種以上の多層積層膜の超高アスペクト加工やラジカル種を制御した高精度な等方性加工が求められる。また、新規デバイスでは難エッチング材料加工の要求が高まり、Fe, Co, Ni, Pt等の金属材料の使用が検討されている。したがって、様々な材料に対するプロセス構築が求められ、表面反応の基礎データの蓄積と新規各種エネルギービームを活用した1原子/分子制御技術、さらにはプラズマ誘起ダメージ(PID)の回復や原子レベルの再配置技術が求められる。

これらの加工制御には高度で定量的なモニター技術とAIを駆使した予測型の装置制御がより重要になる。一方で半導体製造では消費電力低減が課題であり、プラズマエッチングにおいても環境配慮が重要である。低消費電力化に加え、低GWPガスや、PFAS(Per- and Polyfluoroalkyl Substances、主に冷媒)の代替材料の探索が求められる。

以上のプラズマ加工技術に必要な基盤技術は、プラズマおよび表面反応に対し高精度で逐次的な制御やGWPも考慮したガス種を選択、原子レベルの保護膜形成技術が必要になる。装置の高精度な自動制御という側面では、AIや深層学習などのアルゴリズムに加え、定量的なラジカル種、イオン、装置状態などのモニター技術およびそれを支えるシミュレーション技術が必要となる。それらを統合したプロセスインフォーマティクスがプラズマエッ

チング分野に適用される。

## (6) バイオ

2000年代に先駆的な取り組みが始まり、2010年代に本格的なプラズマバイオ研究が進んできたプラズマバイオ研究の発展の背景には、大気圧プラズマ源の発達にドライブされた世界的なプラズマバイオ研究人口の増加が理由として挙げられる。2010年代までに静電気技術を利用したセルソーターや空気清浄器などが実用化されていたが、大気圧低温プラズマ源の登場でプラズマの持つ多様な反応性を活用した生化学反応の制御が可能になったことで、電磁気や放電プラズマの技術のバイオへの基礎となる研究が醸成された。これらの応用は、医療・健康や食品・農業などの分野において、化学薬品を使わずに、電力の供給によるプラズマ生成によって殺菌や滅菌の目的で一つの分野を確立している。さらに、同年代において、特に欧米での創傷治癒への臨床応用研究の発展も進み、術中の漏出血液の止血技術などの研究から、プラズマ照射後の細胞の賦活化、細胞再生の促進や選択的な自死(アポトーシス)の誘導などの現象が見出されることとなった。前述した動物細胞へのプラズマ照射効果のみならず、プラズマ照射した植物が、成長促進を示すことも見つかリ、生物の活性化という側面もクローズアップされてきている。これらの背景から、2020年代のプラズマバイオの分野では、生物細胞の生死の運命を決定付けるプラズマ作用の解明という観点で、細胞死滅と活性化の両面の研究が盛んに進んでいる状況にある。

プラズマ照射に対する生体応答、細胞活性制御が示された現在のプラズマバイオにおける議論の焦点のひとつは、プラズマが生物にどのように作用し、なぜ生物的反応が得られるのか、という点にある。この問いに対して、メカニズムの解明から答えようと基礎的な研究に多くの研究者が取り組んでいる。大気圧プラズマを生成することを例にとっても、装置の構成は研究者ごとに多彩であり、プラズマ化するガスの組成も多様で、実施場所や時間により圧力や温度も異なった実験系で研究されている。そのため、プラズマのバイオ作用を考える上で、第一に「プラズマの生成」を計測・診断し、電磁氣的生体刺激(EMS)のパルス電界や導電率・誘電率の影響を解明されなければならない。第二に「生物学的アウトプット」の観察・定量的な検出がなされ、観察可能な形態的にも生理的にも見られる形質を検出し、プラズマが影響することで出現する固有の表現型を見出していく必要がある。さらに、遺伝子発現レベル、タンパク質の構造と機能レベル、生命活動によって生じる代謝物のレベルで、対象の分子を網羅的に解析し、対象の総体の中から特異的な変化を見出していく必要がある。特に、プラズマでは短寿命なフリーラジカルとなる化学活性種が生成し、タンパク質変性や細胞代謝への影響が注目されている。第三に「ドーズ量・導入量制御」の分析と解析が

新たに確立することで、生物固体のどの部位に、器官や組織の特定の細胞に、どのようにプラズマの電磁気的な物理作用や、フリーラジカルなどの化学物質の化学的な作用が及ぶのか、明らかにされなければならない。個々の単一の細胞レベルでは、イオン濃度や膜電位の変動、タンパク質の活性機能などのモニターが可能である。最新の生化学分析手法を使った、血液循環や細胞内代謝などをはじめ、生物のシステムとしての働きを基盤に据えた、プラズマのバイオ作用の基礎的研究が、この分野の発展にとって最重要である。さらに拡張的に、タンパク質ではアミノ酸や細胞代謝物では糖や炭水化物、その元には無機イオンの溶解した水といった、多種多様な無機物から有機物までの材料面からプラズマがもたらす材料変性を観察するバイオマテリアルとしての科学と技術の側面は欠かせない。プラズマのもつ電荷の作用で、プラズマと溶液との相互作用における電界や電荷移動、荷電と電解の関与については未解明のままである。その解明が望まれる。

プラズマバイオの分野を発展するために鍵となる技術の開発要素として、プラズマの制御、そのモデリング・計算手法、生物実験方法、計測に大別される技術が整備される必要がある。この分野に留まらず、プラズマの特性を決定付ける素反応・基礎的な反応のレート方程式などは、多くの部分が既に調べられている。しかしながら、それが複雑に絡み合った現実の環境で、対象とする電磁気的物理作用や化学種濃度などを方程式から解くことはできていない。新しい数理モデルに基づく、プラズマ特性のリアルタイム制御など、挑戦的な技術開発への取り組みは強化されなければならない。このことは、モデリングや計算科学の側面でも、現在可能となっている規模が空間スケールにも時間スケールにも分子レベルであり、細胞、そして組織、器官のレベルには達していない。2020年代の到達点として、粒子法に基づく分子動力学がようやく実現レベルに達したと言えるところである。今後の10年から30年の期間で、量子コンピュータの出現などへの期待も込めて、モデリングスケールの桁違いの発展が望まれる。この実現のためには、プラズマ固有の課題を理解し、かつバイオ分野についても明るい科学者の育成が欠かせず、基礎となる複数の学問分野を融合する教育が推し進められることも期待される。一方で、プラズマバイオ分野での生物実験技術も発展しており、プラズマを使った遺伝子や分子導入は、生物分野の遺伝子編集を下支えする重要技術に発展しつつある。遺伝学的な研究が進み、プラズマ特性と生物の形質との相関のデータベース構築が進むことは論を待たない。現在の計測技術レベルでは細胞群のマクロな分析にとどまっているが、将来30年間ではマイクロ機械電気システム(MEMS)の活用などで、1細胞の計測・イメージングから1細胞への処理へと微細化が進み、細胞のラジカルなど、スピンの制御に至ると考えられる。

プラズマバイオ分野のアウトプットとして、SDGsの達成ならびに、新産業の創出が期待されている。農業では、植物の栽培や水産業の飼育などで、生体の活性化に期待が寄せられ

ている。2040年代には、宇宙や深海、地中などへの進出が見込まれており、そのような極限環境での農業に、プラズマバイオの技術が利活用される場面は多く見出されている。さらに、食品や肥料、飼料への応用として、消毒・殺菌・殺虫などの鮮度維持や廃棄物削減といった面では、今までにも増して、極めて重要である。世界的な自然環境保全の観点から無農薬な農法が支持されており、省電力かつ自然への滞留の少ないプラズマバイオ技術の潜在能力と将来性は計りしれない。2040年代を目途に、プラズマバイオ技術は機能性作物の生産にも現実化し、空気窒素から肥料や二酸化炭素から燃料を生産するなど、資源循環・資源還元型のシステムの中核を担う技術となっていくことが可能である。プラズマを利用した細胞の活性化の技術は、将来的には健康・再生医療への貢献に結びついており、プラズマバイオ技術を基盤とする創薬や医薬品が製品化され実用化される日も近いに違いない。プラズマを使った分子導入は、デザインされた細胞（デザイナー細胞）を人工的に実現する上で重要な基礎技術として位置づけられている。また、がん治療や創傷治癒、認知症治療、免疫治療、感染症対策へのプラズマバイオ技術の応用への期待も膨らむ。既に創傷治癒や術中止血の医療機器開発では、各国で認定が進み、前臨床から臨床段階に進んできている。これに続く形で、安全性検証（医薬品医療機器 PMDA 認証）に進んで行くと共に、高価な医薬品開発に頼らない、治療コストを下げる技術として、低温プラズマバイオ技術が患者個人に適した個別化（テーラーメイド）医療の中心的な存在を占めることが望まれる。

## （6）新分野

今後30年間に人類が解決すべき重要な課題として、これまでのプラズマ科学のロードマップ上には表れていなかった「省資源・低炭素社会」と「宇宙・推進」という二つの領域を設け、それらを今回のロードマップにおいて新分野とした。

### （6-1）省資源・低炭素社会

低炭素社会実現のためには、人類の活動（＝エネルギー変換）の際に、地球上のCO<sub>2</sub>を実効的に増やさない（または減らす）技術が必須である。そうした技術の中で、プラズマ科学の顕著な寄与が期待される代表例として、バッテリー材料の合成とPower-to-Xが挙げられる。

バッテリー材料に関しては、高価で希少や貴金属を用いない触媒材料の実現が期待される。2020年代においては、S-C系リチウムイオンバッテリーが製品としてのターゲットであるが、そこで培われた学理や技術は、2050年までの間の実用化が見込まれているS-Si系

リチウムイオンバッテリー、F系・Zn系の各新型バッテリー、Li-Airバッテリーにおいて活用されると期待される。

Power-to-Xとは、再生可能エネルギー電力（Power）で物質（X）の合成を行うことを指す。熱ではなく電力によって化学反応を駆動するプラズマプロセスは、この方針に極めてよく適合する。具体的には、水素とCO<sub>2</sub>からCH<sub>4</sub>を合成するメタネーションが2020年代後半に、空気中の窒素を起源とする硝酸やアンモニアの合成や、SAF（Sustainable Aviation Fuel：持続可能航空燃料）の合成が2050年代に実現されることが期待される。

これらの技術の発展には、プロセスのスケールアップと反応制御技術の確立が必須となる。前者は、その時代の最先端技術を動員した技術開発によって達成可能である。一方、後者は基礎研究を必要とする。具体的には、学理深化が発展途上にあるプラズマと液体の界面反応の制御、触媒合成における添加原子の結合状態の制御などが挙げられる。2020年代の基礎研究においては、それまでに構築されたプラズマ診断技術（気相・気液界面・気固界面）を適用することで研究が推進されている。2020年代後半から2030年代以降については、これらに加えて、データサイエンスに基づく新規触媒材料や新規反応経路の探索によって、基礎研究が加速すると期待される。

## （6-2）宇宙・推進

現在はやぶさ2で大きな成果を上げているように、イオンエンジン開発によって、電気推進機を主エンジンとする惑星探査や、ホールスラスタを搭載した衛星の利用が進み、宇宙輸送技術は宇宙開発・宇宙利用産業を支える基幹技術として認知されている。また現在、CubeSatと呼ばれる小型衛星の開発が進み、低コストでの衛星打ち上げが可能となりつつあり、その推進系としての電気推進開発が活発化している状況にある。将来的には、スペースデブリ除去衛星の軌道遷移や宇宙空間への大型建造物建設の大量物資輸送を低コストで行うためには、大電力の電気推進機の持続的な開発と宇宙実証が求められる。

電気推進機では、電磁界を用いて荷電粒子を加速または加熱し推力を得ることから、その要素デバイスに関する開発が重要となる。具体的な重要課題は、プラズマ生成法・制御法、プラズマ源・イオン源、中和器として使用する電子源の開発であり、今後開発が進む推進方式に適合した技術と設計則を確立する。

こうした電気推進機開発には、その基盤となる基礎研究の推進が肝要となる。例えば、プラズマ中に誘起される乱流輸送現象は、これらのデバイス性能を決定づける重要ファクターの一つでもあり、その学術的な理解と体系化、ならびに制御法の開拓が必要である。また、

推進機の性能評価やプラズマダイナミクスの理解のためには、推進方式の特徴に合わせた計測技術の使用・開発が必要である。こうした基礎研究の推進のためには、これまでのプラズマプロセスおよび核融合プラズマの研究で培われてきた技術を柔軟に導入するとともに、粒子のエネルギー分布関数や微小推力の高精度計測を可能とする技術開発が必要である。なお、従来の電気推進機では、推進剤にキセノンを使用するケースが多いが、その供給量・コスト等の問題点があり、代替推進剤の適用が必要となるケースが今後増加すると予想される。そこで、推進剤として Ar, ヨウ素, 水, 大気等を活用した推進機の開発も必要となり、原子分子過程を考慮したモデリング・シミュレーション・室内実験が必要である。

これらの基礎研究を踏まえて、広範な電力帯を包括可能となるように、各種電気推進機の開発と宇宙実証を 2050 年までに逐次行うことが期待される。まずは、低コストで打ち上げが可能な小型スラスタの開発が主流となり、その後大電力ホールスラスタやヘリコンスラスタ等の、大電力作動が可能な方式の開発と宇宙実証が進むと期待される。この広範な電力帯を包括した宇宙輸送技術の開拓により、近年構築が進む衛星コンステレーションやオール電化衛星の実現、その後のスペースデブリ除去法開発や、大型建造物建設のための低コスト物資輸送が可能となり、プラズマ科学・技術を基盤とした宇宙工学を構築する。