

プラズマ科学の統合



福田 武司*

Integration of Plasma Science

Key Words : Plasma Processing, Nuclear Fusion, Intelligent Control, Tokamak

1. はじめに

最近、とみに「プラズマ」と云う言葉をしばしば耳にする。電気製品の大型量販店では大画面のプラズマテレビが数多く展示され、「プラズマイオン大清快?」と表示されたエアコンまで登場している。元来、プラズマは「完全電離気体」を意味するものであるが、宇宙の99%がプラズマで構成されていることから、いわば万物の根元である。1927年に英国のラングミュアが放電管の形状に従って形を変えるこの物質に生物学で「原形質」を意味する「プラズマ」と同じ名称を与えた。

プラズマ科学の分野では、数10キロ電子ボルト(1電子ボルトは絶対温度で約11,600度に相当)に達する高温プラズマを対象とした核融合の研究が精力的に展開されており、次期計画として国際熱核融合実験炉の建設が国際協力の下で開始されようとしている。一方、その対極として数電子ボルトから10電子ボルト程の低温領域で、電離度の低い反応性プラズマを用いた機能材料の開発が主に産業応用を目的として活発に(上述の電気店の例)進められている。

プラズマ物理学の歴史から見て、20世紀の半ば以降プラズマ応用研究と核融合プラズマ研究は、互いに関与し合って発展してきたことが明らかである。実際、プラズマの温度に拘わらず、高温の核融合プ

ラズマも低温の反応性プラズマも基礎方程式は共通であり、荷電粒子の振る舞いがハミルトニアンで記述されることからボルツマン方程式が用いられる。高温プラズマでは、電磁力を考慮した記述に一部が置き換わり、フォッカープランク方程式を用いた評価が必要な衝突項が無視されたヴラソフ方程式とマクスウェル方程式が組み合わされるだけ(実際には非線形であることが若干厄介)である。

しかしながら残念なことに、これらの研究領域は近年互いに連携することなく、別個に取り扱われてきた。事実、プラズマプロセスの研究では、材料の表面改質や成膜等に主眼が置かれており、極端な場合にはプラズマ自体が道具として見做され、プラズマの特性を詳しく調べたり、制御する試みが多くの場合見られなかった。反面、核融合プラズマの研究においても、高熱負荷が問題になる第一壁のみを材料研究の対象とすることが多く、産業応用の研究とは分離した形で進められて来た。核融合が、これまで唯一実用に供されたのが水素爆弾であったことから、核融合研究が開始されて50年近く経った1991年に世界で初めて臨界プラズマ条件(外部入力に核融合反応出力に等しくなる条件)が英国で達成された時も、現地のテレグラフ紙には「まだクリスマスツリーのキャンドルも灯しておらず、南太平洋の小さな島を吹き飛ばしただけ…」と揶揄するコラムが掲載された。

大阪大学を卒業後、日本原子力研究所で平成15年の春まで約20年にわたって核融合研究に従事してきた著者は、大阪大学におけるプラズマ研究の新しい核を創造するため、低温の反応性プラズマに核融合研究における「閉じ込めの概念」を導入(制御性の向上に直結)することによってプラズマ科学を統合し、プラズマ物理量を複合制御する知的プロセスを実現するプロセス用トカマクの開発を進めている。トカ



* Takeshi FUKUDA
1956年12月生
1983年大阪大学・大学院工学研究科・
原子力工学専攻前期課程修了
現在、大阪大学・大学院工学研究科・
附属原子分子イオン制御理工学センター
プラズマ粒子制御研究部門、教授、
工学博士、プラズマ理工学
TEL 06-6879-4080
FAX 06-6879-7916
E-Mail fukuda@ppl.eng.osaka-u.
ac.jp

マクは、ロシアで開発されたドーナツ形状の磁気閉じ込め装置であり、優れた核融合性能と高い制御性を発揮することから国際熱核融合実験炉にも採用されている。本研究は、いわば核融合研究の即効型社会的貢献を実現するものであるが、反応性プラズマの密度や温度を実時間で制御して材料プロセスに反映する知的システムを構築することにより、成膜や解離等のプロセス効率向上が見込まれる。また、一部の変数を制御する実験の結果からモデル化を進めることにより、対象となるプロセスの物理機構と化学過程の解明やプロセスの微細化に貢献する発展性が期待される。以下、本稿ではプロセス用トカマク開発の概要と現状について述べる。

2. 次世代型知的プラズマプロセス源の開発

(1) 連続運転方式球状プロセストカマクの開発

近年の核融合研究では、球体に近い炉心形状を持ち、高いプラズマ圧力で優れた経済効率を実現する低アスペクト比(ドーナツの大半径とリング部分の断面半径の比)トカマクが注目されている。一方、トカマクでは変圧器の原理を用いてプラズマ内部に電流を駆動することにより、閉じ込め磁場の一部を形成することから、原理的に定常運転が不可能であると考えられていたが、急峻な圧力勾配で自発的に電流が駆動される機構や高周波を用いる方法等、非誘導電流駆動の研究が過去十年足らずの間に飛躍的な進展を果たし、現在ではこれが克服されている。その分流としてドーナツの主軸方向に交番電界を誘起する交流運転方式が英国とカナダ、日本(日本原子力研究所のJT-60装置)で実証された。

大阪大学では、メタンガスからの水素脱離に関する研究で、急速に変化する交番電界に着目したインバータプラズマプロセス装置を開発し、プロセスの高効率に成功(±500Vの電圧を10kHzで印加することにより、1時間あたり1ミクロンの厚みで成膜)している。また、産業技術総合研究所と連携し、中心エネルギーが10から200電子ボルトの極低エネルギーイオンビームを用いて、化学蒸着に比べて約半分の基板温度でシリコンカーバイドをヘテロエピタキシャル成長させることに成功する等の顕著な成果を挙げている。

本研究では、これらの要素を組み合わせ、小型(装置サイズは国際熱核融合実験炉の約100分の1)

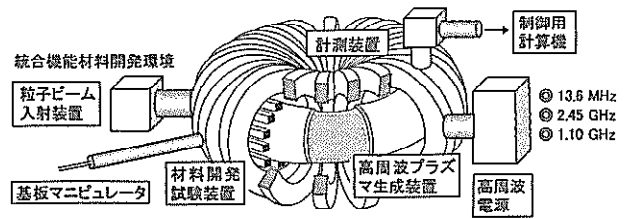


図. 超小型球状トカマクを用いた次世代型知的プロセスプラズマ源の概要図

の球状トカマクを交番電界で連続運転する方式を考案し、材料プロセスに適用することにした。その概要を図に示す。球体形状を採用したのは、点プロセス源として材料研究に供しやすく、圧力制御に係わる広いダイナミックレンジが得られることからである。また、自発的な電流に頼る連続運転は、プラズマ温度が低くて粒子の衝突周波数が高いプロセス用プラズマでは困難であること、高周波を用いた電流駆動は材料プロセスの観点で、物理機構や化学過程の解析に関し、印加電界との切り分けが難しくなることから、大阪大学における上述の実験結果を踏まえて交番電界を誘起する交流運転方式を採用した。

現在、年度末の完成を目指して装置の製作を進めているが、高周波を用いた(概ね印加周波数の2乗に反比例してプラズマ温度が低下し、ラジカル組成が変わる)誘導結合型プラズマや表面波プラズマ等、従来手法と比較することによって知的プロセスの高効率性を実証するとともに、次世代型半導体の開発に直結するダイヤモンド薄膜(バンドギャップが広くシリコンに比べて約5倍の高温動作が可能)作製やメタンガスからの水素脱離に応用し、産業利用の道筋を確立する。また、電子温度と電子の速度分布関数の制御を目的とした電子サイクロトロン波共鳴加熱装置や極低エネルギーイオンビームを組み合わせた統合的な機能材料開発環境の構築を進める予定である。

(2) プロセストカマクの知的化研究

知的化の第一段階における基本的な手法は、JT-60装置で実績を積んだ[参考文献:T. Fukuda and the JT-60 Team, Fusion Eng. Des. 46(1999)337-346]各々の物理関係式を線形化し、以下のような応答行列(行列式の次元数は実験結果に基づいて適宜見直し)を用いて結合する多変数入力、多変数出

力制御である。ここで、 X_{1-3} は各々プロセスプラズマの平均的な(マクスウェル分布を仮定した)温度と密度、基板温度等であり、 Y_{1-3} は膜厚や解離の効率等、プラズマプロセスの結果に関連する物理量である。

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}$$

実際には、プラズマの密度や温度が作動ガスの注入量や真空度、加熱入力に依存するので、制御の要素毎に応答行列を評価し、それらの積を用いることになる。一方、例えばプロセスの効率が平均的な温度だけでは決定されないことは良く知られており、線形的な手法のみでは可制御領域が極めて限定される危惧がある。従って、知的化の第二段階として、生産の現場に適用され得るロバストな制御を実現するには、プロセス制御に係わる実験結果(プラズマ諸量の計測が前提!)を蓄積してデータベースを構築し、データベースの統計的処理あるいは物理的解析

による制御アルゴリズムの最適化を図る必要がある。分子動力学法を用いたシミュレーションの研究等では、原子間力のポテンシャルを記述する関数のデータベース構築に関する活動が進められているが、プラズマプロセスに関する実験データベースは従来より存在せず、ややもすれば個々の研究成果が現象論的に報告されることがしばしばである。本研究では、知的制御装置の開発を目的とした材料プロセスの国際実験データベース構築につながる基盤創成を目指す。

3. おわりに

1960年-70年代における核融合研究の進展によってプラズマ物理学は気体放電「現象」の一部分から脱却し、学問領域として確立した。産業応用が急がれる余り、独自?の指針で進められているかのように見えるプラズマ応用研究に再びプラズマ物理学(核融合研究)の知見と成果を投入し、新しい展開を図る必要があるとの考えに基づき、知的プラズマプロセスの概念を提案した。本研究が、プラズマ科学の統合に役立つことを切に希望するものである。

