Recent history and prospects of Plasma Research

プラズマ研究の現状と将来

Akira TONEGAWA

Department of Physics, School of Science, Tokai University, 1117 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, 259-1292 Japan

TEL: x81-463-58-1211(EX.3710) FAX: x81-463-50-2013 e-mail: tone@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

(Received 15, December 2008 Accepted 23, March 2009)

The history and prospects of plasma research in Japan are reviewed from the viewpoint of various research fields such as based on the nuclear fusion, plasma processing and space plasma. The previous and recent researches of plasma in Tokai University are also presented. Furthermore, many fundamentals are and/or applied researches of a sheet plasma which is a special type of strongly magnetized highly ionized slab plasma.

Keywords : History and Prospects, Plasma Research, Plasma group in Tokai University

I. INTRODUCTION

平成 20 年度は、プラズマ・核融合学会の前進である核融合懇談会（初代会長：湯川秀樹先生）の発足から 50 周年を迎え、また、プラズマ・核融合学会自身が設立されてから 25 周年にあたる。発足から 50 周年を迎えた現在のプラズマ研究は、主に 3 つの領域で研究が展開されている。第 1 の領域は、国際協力の ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) のような未来のエネルギー源としての核融合、第 2 は、超 LSI 製造やフラットパネル等への先端技術としての応用を目的としたプラズマプロセス、そして第 3 の領域は、太陽フレアや宇宙ジェット等の自然のプラズマである。これらは全体としてプラズマ科学として体系化されつつある。このような状況は、核融合の研究が中心であった 20 年前と比較すると、予想をはるかに超えた展開になっている。

ここでは、プラズマ研究の牽引役となった核融合研究の歴史をプラズマ核融合学会誌 Vo.1.84(2008 年)の特集号を基に紹介する。¹⁾ 同時に、現在のプラズマ研究の状況と将来の展望、更には東海大学のプラズマ研究グループの歴史と研究内容について記載する。

II. HISTORY OF FUSION RESEARCH IN JAPAN

1955 年 8 月、「第 1 回原子力平和利用国際会議」がス

イスのジュネーブで開催され、インドのバーバー博士が、「20 年以内に制御された形で核融合エネルギーを開放する方策が見つけだされるであろう」と予言し、熱核融合の平和利用という課題を指摘した。3 年後の 1958 年、第 2 回ジュネーブ会議には、日本から湯川秀樹先生と数名の研究者が出席し、また同年、湯川秀樹先生が中心となってプラズマ・核融合学会の前進である核融合反応懇談会を設立された。これが日本における核融合研究の出发点になったと言われている。この核融合反応懇談会の参加研究者は、原子力委員の石川一郎先生、藤岡由夫先生、有沢広巳先生、湯川秀樹先生、さらには駒形作次先生（原子力研究所（原研）の理事長：現在の原子力開発機構）、嵯峨根遼吉先生、伏見康治先生（プラズマ研究所初代所長）、中村誠太郎先生等、数名のメンバーから構成されていた。その後、1961 年、名古屋大学の附置研究所として、プラズマ研究所（現在の核融合科学研究所 (National Institute of Fusion Science: nifs) の前進）が設立され、日本における核融合の研究が本格的にスタートした。1970 年代には、トカマク装置やヘリカル装置等、本格的な大型磁場核融合装置が建設された。同時に新しいプラズマ現象が発見され、不安定性やボーム拡散等により核融合プラズマの閉じ込めに苦慮した時代でもあった。他方、同年に原研で JT-60 の建設が始まり、1971 年には、レーザー核融合による中性子の発生に成功し、日本の研

究が世界の水準に並んだ時代であった。1980年代には、核融合科学研究所(nifs)の設立、ITERの政府間協定の開始され、1990年代は、JT-60の高性能化やnifsのLHD完成がなされた。

2000年になると、省庁統合により文部科学省が発足し、科学技術・学術審査会は、「今後の我が国の核融合研究のあり方について」で、JT-60, LHD, レーザー, 材料照射を4本柱とする研究方針を定めた。また、2005年フランスにはカデラッシュにITERの建設サイトが決定し、2018年のファーストプラズマの点火を目標に、EU、日本、ロシア、米国、中国、韓国、インドによる国際協力が本格的にスタートした。また、核融合炉の実証には、反応によって発生する14MeV中性子や高温プラズマに耐えられる材料開発等の炉工学の研究が重要視され、2007年にはITERのブロードアプローチとしてIFNIF(International Fusion Materials Irradiation Facility)が開始された。更に、2008年にはJT-60がシャットダウンし、7年後の2015年を目標に、超伝導トカマクのJT-60SAとして再スタートすることが決定した。一方、LHDの研究では、高 β 化、長時間運転等の成果があり、今後、閉ダイバータ等の設置、重水素実験により高性能化を図る予定になっている。

III. RECENT RESEARCH IN PLASMA

核融合分野以外の最近のプラズマ研究は、半導体製造装置やフラットパネル等のプロセスプラズマ分野、太陽フレアや宇宙ジェット等の自然のプラズマの分野が広

がっている。

プラズマプロセス分野の研究は、約50年前から半導体製造過程にプラズマを用いたドライプロセスが利用されて以来、小型コンピュータの普及や真空装置の高性能化と低価格化により急速に広がっていった。そのため、大学レベルの研究室でも小型の高真空装置を用いたプラズマ発生装置を設置し、プラズマの基礎研究が比較的容易に実施できるようになった。また、プラズマ生成に、直流放電以外の高周波放電、マイクロ波放電などが利用され、小型で低価格な電源も開発され、多くの研究者がプラズマを容易に利用することが可能になった。現在では、ボタンを押すだけで簡単にプラズマを生成することができる時代になっている。これらの技術は、その後、半導体製造以外である液晶、プラズマディスプレイ、太陽電池パネル等の表面改質や新素材生成へと応用が広がり、現在では医療やナノテクまで及んでいる。これらのプロセス分野のプラズマは、高温・高密度の核融合プラズマとは異なり、励起した中性粒子が混在した低温・低密度の非平衡プラズマであり、使用するガスも水素やヘリウム等の希ガスからフッ化物や塩化物等の反応性ガスへ広がっており、プラズマ化学の分野へと広がっている。

一方、自然のプラズマの分野では、1980年代になり、人工衛星が各国で打ち上げられ、宇宙科学研究所の「ようこう」やNASAの「ハッブル望遠鏡」等、宇宙からの観測が活発になってきた。これらの観測データの一部は、インターネット等の普及により情報開示されたため、多

Fig.1 Classification of plasma research

くの研究者によるデータ解析が可能になり、自然でのプラズマ現象の解明が急速に進んだ。また、核融合研究で発達したシミュレーション技術は、自然のプラズマの現象解明にも利用され、同時に、宇宙で発生している磁気リコネクション現象や超新星爆発現象を、小型の核融合装置やレーザー爆縮により模擬することが可能になり、天体物理の研究者とプラズマの研究者の交流が益々、盛んに行われている。

この様に発展している現在のプラズマの分野は、自然のプラズマや人口のプラズマに関する知識体系と、天体・宇宙空間の解明と目的のプラズマの生成と制御等の関連分野に関する知識体系に分類され、それらが技術的に結合して新境界領域として広がっており、プラズマ科学として体系化されつつある。このような分類法は、故高山一男先生（元プラズマ研究所所長、東海大学名誉教授）によって1983年に提唱されている（Fig. 1 参照）。

IV. Prospects of plasma Research

前章で記載した様に、プラズマ研究は急激に他の分野との交流を深めプラズマ科学として体系化されている。Fig.2 にプラズマ科学とプラズマ物理学との関係の例を示す。この図からプラズマ科学は、電磁流体力学、運動論、更には、原子・分子過程等の基礎的な学問に基づき、理論・実験・シミュレーションの手法により、核融合プラズマを初めとする天体・宇宙プラズマ、プロセスプラズマ等の多くの研究分野と関連していることがわかる。最近では、液体や固体表面でのプラズマ化学が関与する低温・低密度のプラズマ、又は固体と光の相互作用が関与する超短パルスレーザーや強高度レーザーを用いた高密度エネルギー科学、大規模なシミュレーションによる

Fig.2 Relationship of the Plasma Physics and PlasmaScience.

Fig.3 Relationship of the high temperature plasma and low temperature plasma

複雑系等も新しい分野として広がっている。特に、プラズマと液体との相互作用は、バイオテクノロジーに関係する現象として、今後、基礎研究のみならず産業界への応用も期待されている。

一方、核融合炉を実現するため、核融合プラズマの研究は高温・高密度のプラズマ制御の研究のみならず、定常に核融合プラズマを発生させ、炉心内からエネルギーを抽出する技術開発が不可欠となる。そのため、炉心プラズマと比較して低温状態の周辺プラズマの研究が必要となり、プラズマや壁との相互作用の基礎研究が重要となってきた（Fig.3 参照：高山一男先生提唱）。

V. Recent History and Prospects of plasma Research in Tokai University Plasma Group

現在の東海大学プラズマ研究グループは、プラズマ研究所の所長を退官された高山一男先生が、1980年、東海大学の開発技術研究所（現在の総合科学技術研究所）の教授に就任され、東海大学の教員を中心としたプラズマ研究グループ（砂子克彦先生、宮下保先生、矢部栄二先生、理学部物理学科の学生）を設立したことによりスタートした。1986年にはプラズマ実験棟が建設され、東海大学独自のシートプラズマや半導体用イオン源の開発を行ない、プラズマプロセス分野を中心とした研究を進めていた。シートプラズマとは、プラズマが厚さがイオンのラーモア半径の2倍程度まで圧縮した磁化プラズマで、一種の極限状態の構造を有した境界プラズマである。本

学で開発したシートプラズマは、高山先生がプラズマ研究所で開発した TPD (Test Produced Directed current device) プラズマ源をベースとした定常の板状プラズマである。

1987 年には、篠原元雄先生、谷川隆夫先生、南里憲三先生、河村和孝先生がメンバーとして加わり、研究グループとして活発な研究活動がなされた。この間、イオンの旋回中心がプラズマ中心軸上にある極細のストリングプラズマや、小型 TPD プラズマ源によるプラズマ陰極を有する長寿命イオン源の開発等が行われた。その後、1992 年には、小型シートプラズマ源を備えたオーロラプラズマ生成診断装置が F 棟 1 階プラズマ第 2 実験室に設置され、また、学内レーザー研究グループとの研究交流もあり、各先生方の独自の研究が展開されていった。

Fig.4 Schematic diagram of TPD-SheetIV and photograph of the recombining plasma.

1998 年には、核融合科学研究所との LHD 計画共同研究 (研究代表: 河村和孝先生、1998-2003 年) や TPD 共同研究がスタートし、本学プラズマ研究グループの研究課題はプラズマプロセス分野から核融合分野へと大きく転換された。この間、渋谷猛久先生 (現東海大学工学部教授) が新たにメンバーに加わった。それ以降、3 回にわたる LHD 計画共同研究の実施や東海大学内の 17 号館研究プロジェクトの推進により、核融合分野とプラズマプロセス分野を軸とした研究を展開してきた。2002 年度には、オーロラプラズマ生成診断装置の大電流化を行い、放電電流 100A の水素のシートプラズマを生成し、核融合ダイバータの模擬可能な高熱流シートプラズマ発生装置 (TPD-SheetIV) の開発に成功した。

Fig. 4 に TPD-SheetIV の装置概念図と核融合ダイバータ部を模擬した再結合プラズマの写真を示す。現在では、TPD-SheetIV を用いた核融合周辺プラズマの基礎研究とシートプラズマを用いた応用研究等を実施している。具体的な研究課題は以下のである。

- (1) シートプラズマを用いた核融合ダイバータ模擬と再結合プラズマの基礎研究
- (2) シートプラズマを用いたイオンサイクロトロン共鳴加熱とその応用研究
- (3) 質量分析器や分光等のプラズマ診断の開発研究

V. CONCLUSION

核融合研究を中心として発展してきたプラズマの研究分野は、今後、ITER 等の大型装置を中心とした国際的な核融合研究、新しいプラズマ現象に関する基礎研究と先端技術に関連する応用研究、更には、天体・宇宙やバイオテクノロジー等への異種分野との境界領域研究へと多様化・拡大していくと考えられる。また、本学のプラズマ研究グループでは、シートプラズマによる核融合周辺プラズマの基礎研究とその応用研究を推進し、特色あるプラズマ研究を遂行する。

ACKNOWLEDGEMENTS

本内容は、故高山一男先生を初め、多くの東海大学プラズマ研究グループの先生方と卒業生の皆様の研究活動に基づいたものであり、本投稿にあたり心から感謝いたします。

REFERENCES

- ¹ S.Matuda, and S.Takamura, Journal of Plasma and Fusion Research, Vo.I.84,(2008),pp.1-100.