

小特集

トレーサー内蔵ペレット(TESPEL)による 磁場閉じ込め高温プラズマ研究の進展

**Progress of Research on Magnetically Confined High Temperature
Plasma with a Tracer-Encapsulated Pellet (TESPEL)**

1. はじめに

1. Introduction

須藤 滋^{1,2)}

SUDO Shigeru

¹⁾核融合科学研究所, ²⁾総合研究大学院大学物理科学研究所

(原稿受付: 2014年12月19日)

トレーサー内蔵固体ペレット (Tracer-Encapsulated Solid Pellet: TESPEL) は当初、トレーサー粒子をプラズマ中に局所的に注入し、これを追跡することで不純物輸送を精度よく計測することを目的として開発した。その開発の経緯の概要と TESPEL の特徴をここにまとめた。プラズマにできるだけ不純物を持ち込まないため、外層部が固体水素でその内部にトレーサーを封入する構造を考え、これをトレーサー内蔵極低温ペレット Tracer-Encapsulated Cryogenic Pellet (TECPPEL) と名付け、こちらの生成・射出装置が先に完成し、射出実験にも成功した。しかし、プラズマへの入射実験を機動的に行うには、もう少し簡易バージョンの方が実用的であると考え、常温で扱える TESPEL を開発し、その扱いやすさから実際に LHD 実験で頻繁に使われるようになった。さらに、この TESPEL が不純物輸送研究だけでなく、熱の非局所輸送やペレット荷電交換計測による高エネルギーイオン計測、また各種イオンの分光計測など多岐に渡って役立つようになっている。

Keywords:

TESPEL, LHD, impurity transport, tracer, plasma diagnostics

磁場閉じ込め核融合炉方式では ITER に代表される燃焼プラズマ実験へ向けて、ますます粒子・熱の輸送研究の重要性が高まってきている。しかし、多くの研究者が取り組んでいるにも関わらず、プロセスの複雑さや詳細な計測の困難さなどのために、その輸送特性の系統的な解明が十分に進んでいるとはいはず、飛躍的な進展が期待されている。

そこで、我々はプラズマにおける粒子の輸送を高い精度で計測するために、プラズマ中に元々存在しない粒子を局所的に注入して、しかも元のプラズマにあまり擾乱を与えない程度の少量のトレーサーを用いることを考えた。まず、できるだけトレーサー以外の不純物を持ち込まないために、外層部は水素ガスを極低温で凍らせて固体化し、内部にリチウムなどをトレーサー粒子として封入する方法を検討した。その原点は大学院生時代に東京大学の関口忠先

生、佐藤浩之助先生のもとで、名古屋大学プラズマ研究所における共同研究でペレットにレーザーを当ててできたプラズマをカスプ磁場中に閉じ込める計画に参加させていたいたしたことであり、極低温水素ペレットを間近にしてきた。そして、その後、ミュンヘンのリングベルク城のワークショップでお会いした宇尾光治先生に京都大学に呼んでいただき、ヘリオトロン E 実験でトムソン散乱計測のお世話をすることになり、もう一つ担当テーマをもつということで、飯吉厚夫先生からお勧めいただいて、粒子補給法としての固体水素ペレット生成・射出装置の開発を開始した。大学院生時代に協力してもらっていた東理社の後藤修一氏や京都大学ヘリオトロン核融合研究センター技官の馬場智澄氏等と苦労しながら 1 号機を作り上げ、これを用いてヘリオトロン E 装置においてペレット入射実験を実施し

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

author's e-mail: sudo.shigeru@toki-fs.jp

た[1]。これはプラズマ中への固体水素ペレット入射実験としては日本初であり、その後、この経験をもとに神戸製鋼の菅野正大氏等の技術陣と協力して6連発固体水素ペレット生成・射出装置を完成した。この装置を用いて、1988年にヘリオトロンE装置において固体水素ペレット6連発入射に成功した。(参考文献[2]のFig. 17参照)このような背景のもとに、不純物粒子輸送計測のためのペレットとして、図1に示すように内部にトレーサー粒子を装填したものを新たに開発することにした(伊藤氏等が先にMultiple-Shell Pelletの概念を発表[3])。この時に、先に述べたようにプラズマにできるだけ不純物を持ち込まないため、外層部が固体水素でその内部にトレーサーを封入する構造を考えた。この固体水素である外層部の大きさや計測に十分なトレーサー粒子量としてどの程度が適切であるかなどの検討を行い、論文にまとめたのが1993年であった[4]。但し、そのころはまだ2層(あるいは複層)構造ペレットと呼んでいた。その名称も含めTESPEL開発において海外の研究者との交流が欠かせないものであったので以下に簡単に紹介しておきたい。

米国サンディエゴのラホーヤ(La Jolla)で1985年に第1回目の国際ペレットワークショップ(International Pellet Fueling Workshop)が開催され、先駆者である米国オーネックリッジ国立研究所のS. Milora氏を始め世界中の該分野の研究者が集結したワークショップで、大いに刺激を受け、非常に有益であった。特に、S. Milora氏と意気投合し、長年の良き知人関係となっている。ペレット射出速度計算コードを供与いただき、これは後日ペレット高速化のための2段ガスガン開発に大いに役立ち、サポーなしでの固体水素ペレットの速度の世界記録3.2 km/sを樹立することにつながった[5]。また、昨年(2014年)3月に亡くなられた永見正幸さん(当時日本原子力研究所)ともこのワークショップで初めて知り合い、トカマクにおけるペレットに関する研究の現状をご教示いただいた。温和な中にも、非常に洞察力のある優秀な研究者であった。ここにご冥福をお祈りしたい。また、米国イリノイ大学のK. Kim先生ともこのワークショップで知り合い、ラホーヤの海岸を歩きながらペレットに関わる諸課題を楽しく議論したことを今でも覚えている。上記2層(複層)構造ペレットを現在の通称のトレーサー内蔵極低温ペレットTracer-Encapsulated Cryogenic Pellet(TECPEL)に改名することに協力いただいたのがこのKim先生である[6]。その後も国際ペレット

ワークショップは何度も開催されたが、特に1992年にローマの郊外Frascatiにて"Workshop on Pellet Injector"に参加して、ロシア・サンクトペテルブルク工科大学のB. Kuteev氏およびI. Vinyar氏と知り合った。特に、I. Vinyar氏の固体水素連続押し出しペレット生成装置の報告と動画によるプレゼンには大変感銘を受けた。以来このお二人とは共同研究を現在に至るまで続けており、また長年の友人関係もある。B. Kuteev氏とは主にペレット入射に関わるプラズマとの相互作用を中心とした物理的な面での共同研究を、I. Vinyar氏とは極低温固体ペレット生成・射出装置やTECPELのバージョンアップ装置などを始めとしてペレット関連技術開発の共同研究を長きにわたって行ってきている。

1993年の論文のアイデアに基づき、日本酸素株(現大陽日酸株式会社)の伊東元氏ら技術陣と共同研究を実施し、トレーサー内蔵極低温ペレットTECPEL生成装置第1号機が完成した。これは、まず通常の固体水素(かなり柔らかい)を生成し、これにトレーサーを押し込む方式で、ステンレスの押し込み棒を引き抜いた後、その穴は固体水素で塞がるのである。この装置でTECPELの生成・射出に成功したのが1997年であった[6]。2方向から高速のフラッシュ光で飛翔中のTECPELの撮影を行い、外層と中のトレーサーの影(水素固体は透明なので)がはっきり捉えられていて、3次元の再構成画像も得られた。このように順調に原理検証実験が行えたのだが、実際の物理実験を行うにあたっては、液体ヘリウムを使い、予冷にも時間がかかるなど手間が大変なので、簡易型で常温で扱えるように、外層部を炭素と水素で構成されるポリスチレンに置き換えるバージョンを考えた。ちょうどそれは当時大阪大学レーザー核融合研究センター(現大阪大学レーザーエネルギー学研究センター)の実験で使われていたターゲットとしてのペレットが材料になると想え、乗松孝好教授に協力を依頼したところ、快諾をいただき、当時大学院生であったK. V. Khlopenkov君が乗松先生の研究室に通ってポリスチレン球の取り扱い技術について伝授していただいた。直径1 mm弱の微小ポリスチレン球に250 μm程度の直径のミニドリルで穴を開け、その中にトレーサー粒子を封入して、最後に250 μm程度の直径の小ポリスチレン球で穴を塞ぐ作業を日本人顔負けの器用さでKhlopenkov君が見事に行い、作業工程が確立したのを受けて、TECPELの成功から1年後にこのバージョンを実際に製作し、射出実験にも成功した。そして、TECPELと区別するためにトレーサー内蔵固体ペレットTracer-Encapsulated Solid Pellet(TESPEL)と命名した[7]。このTESPELを用いた入射実験が、CHS実験の責任者であった松岡啓介教授のご協力もあり、1998年に初めてCHS装置において行われた[8, 9]。CHS装置で実験を行っている時期に、総合研究大学院大学の大学院生の田村直樹君がこの実験に参加してきた。彼とともにCHSでTESPEL入射実験の経験を十分に積んで、いよいよ2000年からLHDにおいてTESPEL実験を開始した[10]。それ以来、不純物輸送のみならず、多くのテーマにおいて成果を挙げることができたので、ここにそれらをまとめること

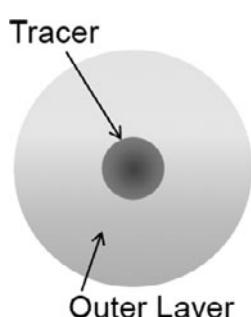


図1 トレーサー内蔵ペレットの構造概念図。

とした。

まず、TESPEL の特徴は(1)トレーサーをプラズマ中にパルス的に直接局所的に注入できること、(2)プラズマ中に注入したトレーサー粒子量が正確にわかること、(3)トレーサー粒子は固体であれば目的に応じて比較的自由に選べること、(4)ペレットの大きさやシェル構造などを自由に選ぶことができ、目的に応じて TESPEL の侵入深さを調整できること、が挙げられる。これらを活用していろいろなテーマの研究が進展してきた。以下、第 2 章ではまず、トレーサー内蔵ペレットの製法をまとめて報告する。トレーサー内蔵固体ペレット TESPEL の製法や浜松ホトニクスの技術者等による高分子材料を用いた TESPEL 構成材の開発について紹介する。また、トレーサー内蔵極低温ペレット TECPEL の 1 号機から進化した装置開発に協力してもらった Vinyar 氏とともに TECPEL の開発に関しても紹介する。第 3 章では TESPEL を用いた不純物輸送研究の進展について概要を述べる。また、第 4 章では、不純物輸送研究以外の TESPEL を用いたプラズマ物理研究の展開について概要を紹介する。テーマとしては TESPEL を用いた過渡的かつ非局所的熱輸送を中心とする研究、TESPEL 溶発雲を利用した所謂ペレット荷電交換法による高エネルギー粒子計測に基づく研究、新型分光システムによる TESPEL 溶発雲の 2 次元計測と溶発雲形成機構の研究、TESPEL を利用した各種イオンからの発光の分光計測とそれに基づくイオン（特に W など重イオン）における遷移過程研究を取り上げた。最後の「まとめと今後の展望」については、私事ながら 2015（平成 27）年 3 月末日をもつ

て核融合科学研究所を退職するので、TESPEL/TECPEL による研究を次の若い世代にバトンタッチするという意味からも、今後の牽引役を担う田村直樹君に執筆してもらうこととした。

謝 辞

本研究は、国内外の多くの研究者との共同研究や助言・ご指導をいただいた結果として花開いたものであり、また今後の発展もまだまだ大いに期待され、個別にここにお名前を挙げることはできないが、関係する先輩方、同僚の方々、学生諸君、核融合科学研究所技術部の方々、メーカーの方々、皆様に感謝申し上げたい。今回このような特集記事を企画くださったプラズマ・核融合学会編集委員会の皆様にも感謝申し上げる。

参 考 文 献

- [1] S. Sudo *et al.*, Nucl. Fusion **25**, 94 (1985).
- [2] T. Obiki *et al.*, Fusion Technol. **17**, 101 (1990).
- [3] S.-I. Itoh and K. Itoh, Jpn. J. Appl. Phys. **26**, L1338 (1987).
- [4] 須藤 滋：プラズマ・核融合学会誌 **69**, 1349 (1993).
- [5] S. Sudo *et al.*, Fusion Technol. **20**, 387 (1991).
- [6] S. Sudo *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **68**, 2717 (1997).
- [7] K.V. Khlopenkov and S. Sudo Rev. Sci. Instrum. **69**, 3194 (1998).
- [8] S. Sudo *et al.*, 17th IAEA Fusion Energy Conference IAEA-CN-69/EXP1/18 (1998).
- [9] K.V. Khlopenkov and S. Sudo Plasma Phys. Control. Fusion **43**, 1547 (2001).
- [10] N. Tamura *et al.*, Plasma Fusion Res. SERIES **4**, 442 (2001).