

小特集

先進燃料核融合研究の現状と展開

Advanced-Fuel Fusion Research -Current Status and Development-

1. 相補的燃料サイクル実現に向けた先進燃料核融合研究のすゝめ

1. Encouragement of Advanced-Fuel Fusion Research for the Realization of Complementary-Fuel Cycles

高橋 俊樹, 浅井 朋彦¹⁾, 水口 直紀²⁾TAKAHASHI Toshiki, ASAI Tomohiko¹⁾ and MIZUGUCHI Naoki²⁾群馬大学, ¹⁾ 日本大学, ²⁾ 核融合科学研究所

(原稿受付: 2021年11月18日)

国際熱核融合実験炉 ITER の建設が進んでいる。ITER 計画は、重水素 (D) と三重水素 (T) のプラズマを閉じ込め加熱し、D-T 燃料による燃焼を実証し、これまでに開発された種々の技術要素が首尾よく機能するかを確認しつつ、予見できなかった課題を抽出する意義がある。この D-T プラズマでは、D と T が燃料として供給され、プラズマを構成する主成分となり、D-T 反応が主たる反応となる。しかし、同時に D-D 反応や T-T 反応も一定の確率で生じ、さらには、D-D 反応で生ずるヘリウム 3 (^3He) によって D- ^3He 反応も起こる (詳しくは、2 章を参照)。

核融合研究者にとっては常識的なことをあえて冒頭に書いたのには理由がある。

本小特集で取り扱う「先進燃料核融合」とは、D-D 反応や D- ^3He 反応等、D-T 核融合以外を主たる反応となるようにプラズマ温度や燃料供給を制御した核融合のことを言う。しかしながら、冒頭で述べたように、D-T 核融合炉の燃焼プラズマでは、先進燃料核融合炉と同様の反応も必ず生じ、また逆に、D-D 炉や D- ^3He 炉でも D-T 反応は起こる。T や ^3He は天然にはほとんど存在せず安定な燃料供給源が必要となるため、D-T 炉や先進燃料炉で生成されたものを効率良く循環できるとよい。核融合燃料の安定的供給のもとで人類に電力を供給し続ける未来を想定すると、第一世代である D-T 炉の研究完了をもって次世代の先進燃料炉開発を開始するというロードマップでは間に合わない。また、D-T 炉かそれとも先進燃料炉かという二者択一的エネルギー施策では堅固な燃料サイクルを構築できず、むしろ共存し補完しあう関係をめざすべきである。ただし、一部

の民間企業が実現を謳う陽子-ボロン11 ($p\text{-}^{11}\text{B}$) 反応は、D-T, D-D, D- ^3He とは全く別の燃料サイクルとなる。つまりは、中性子を全く発生しない核融合炉としての理想を追求している。

先進燃料炉と聞いて懐かしく感じる学会員諸氏もいると思うが、若手研究者にはあまりなじみのない話かも知れない。そこで、先進燃料核融合研究の歴史を振り返ってみる。

先進燃料 (Advanced fuel) による核融合の研究は、1970 年代後半に見られはじめた。1971年に高エネルギービームイオンを入射し非Maxwell速度分布を持つプラズマ閉じ込め装置 Migma[1]が提唱され、1970年代後半になると先進燃料核融合の可能性についても検討が進められた[2, 3]。Miley による燃料サイクルの研究もこの頃である[4]。しかし、先進燃料核融合の研究が、活況を帯びてきたのはそれからしばらく後の1980年代後半から1990年代である。D- ^3He 燃料を用いた概念設計としては、トカマク炉ではWisconsin大学のApollo[5-8]やCalifornia大学Los Angeles校のARIES-III[9, 10]、ミラー炉ではSantarius[11, 12]やGolovin[13, 14]の提案などがある。そして本小特集では、この時期の国内研究例として磁場反転配位 (FRC) 炉 ARTEMIS[15]を5章に示している。核融合研究の本格的開始が1955年の原子力平和利用ジュネーブ会議の時期であるとするれば、1990年代はそれから約40年を経過したことになる。40年という年月は、日本では1人の研究者の研究人生に相当する期間である。自然と、その研究者で構成される核融合研究コミュニティからは、過去の研究を振り返り課題を整理した上で次世代に引き継ぐべき計画が次々に世に

出されることになる。この時代の先進燃料核融合の論文には、当時40年間の核融合研究で残されていた課題、つまり、14 MeV 中性子に由来する技術課題、トリチウムの安全性、燃料サイクルにおけるトリチウム増殖の問題、熱機関を介する発電方式のための低経済性、などを根本から解決する代替的 (alternative) 方式であるとの主張が記された。次世代燃料という意味で advanced fuel と表現し、D-T に代わる燃料として alternative fuel とも呼ばれた。このような歴史的背景があり、D-T 炉と先進燃料炉は相容れない方式のように捉えられたかもしれない。

核融合発電によって安定して電力供給がなされる世界を思い描けば、D-T 炉と先進燃料炉の両者が補完しあう燃料サイクルを構築することが魅力的に見えてくる。全く別のサイクルとなるが $p\text{-}^{11}\text{B}$ を加えて選択肢を増やしておくことも、未来に向けて必要なことである。この観点から、先進燃料の研究は相補的燃料サイクル (complementary-fuel cycles) の研究として捉えることはできないだろうか。

現在、核融合研究を取り巻く環境は厳しい。1990年代のように核融合を指向したプラズマ実験を継続的に実施できる研究機関は少なくなっている。一方で、地球温暖化は年々進み、気象災害が激甚化することで、全世界的に脱炭素社会の構築を急ぐべしとする機運は高まっている。当然、エネルギー政策も強く関連しているが、我が国においても2021年に誕生した岸田内閣は、成長戦略の一つの柱として核融合を含むクリーンエネルギー技術の開発を掲げている。このような社会的要請にスピード感をもって対応し開発を進める民間企業が近年登場している[16]。先進燃料をターゲットとしている企業もいくつかある。

米国 TAE Technologies 社はその一つである。設立当初の社名である「Tri-Alpha Energy」は、 $p\text{-}^{11}\text{B}$ 反応により生成される3つの α 粒子に由来する。詳しくは、本誌の小特集記事[16]にあるので、興味のある方は参照されたい。現在までに、プラズマ温度3 keV を超える FRC を 30 ms 程度維持することに成功している[17]。

HB11は2019年にオーストラリアに設立された比較的新しい企業である。社名が示す通り $p\text{-}^{11}\text{B}$ 燃料を使用し、 p をレーザー加速し ^{11}B のターゲットに入射する方式による核融合炉の実現をめざしている。慣性 (レーザー方式) 核融合による $p\text{-}^{11}\text{B}$ 炉の実現可能性については、本小特集第4章 (城崎) を参考にされたい。

この小特集は、2001 (平成13) 年に故・渡辺二太教授が立ち上げた核融合科学研究所の共同研究「LHD型磁場配位を用いたICRF支援プロトン・ボロン核融合炉の理論研究」に始まり、その後継の共同研究いわゆる「先進燃料核融合研究会」で得られた成果を取りまとめたものである。研究会は、自由な発想でアイデアを出し合い討議することを旨としている。当然、研究者間の意見の相違は存在するが、ここでは、執筆者の主義信条を優先させ、あえて主張の統一をはかっていないことをお伝えしておく。執筆者による主張の違いの発見も、読者諸氏の楽しみとなれば幸いである。相補的な燃料サイクルにより安定で堅固なエネルギー供給体制を構築するためには、数多くの若手研究者の

研究参加が望まれる。本小特集を契機に斬新な発想を吹き込んでもらうことが一番の狙いである。

本小特集の構成は以下の通りである。第2章は松浦が執筆し、先進燃料の基礎を説明する。この章を読めばD-T炉と先進燃料炉の相補的役割がよく理解できる。第3章と第4章でそれぞれ磁気閉じ込めと慣性閉じ込めの先進燃料核融合の可能性について検討結果を紹介する。御手洗による第3章には、松浦の先進燃料プラズマに対する運動論的研究成果を考慮することにより $\text{D}\text{-}^3\text{He}$ 球状トカマク炉の自己点火が可能になったとする経緯が記されている。御手洗自身が共著者として本誌小特集記事[18]に執筆した2004年当時の発展を読み取ることができ、新たに取りまとめる本小特集の意義を実感できる。城崎による第4章には、慣性核融合における先進燃料利用の難しさが記されているが、同時に $p\text{-}^{11}\text{B}$ の点火・燃焼という先進燃料研究の未来課題が提起される。第5章には高ベータ直線型炉心プラズマによる研究例として、百田が $\text{D}\text{-}^3\text{He}$ /FRC 概念設計炉 ARTEMIS を紹介する。また、直線開放端プラズマの弱みでもある閉じ込めを改善すべく連結非断熱トラップ方式を新たに提案する。直線型の魅力を引き出すのが ARTEMIS で採用された直接エネルギー変換器である。この実験研究を進めてきた竹野が第6章にその歴史や成果をまとめる。具体的な実験課題についてもいくつか示されているので、是非とも若手研究者にチャレンジしてもらいたい。第7章には、炉工学を専門とする後藤、柳、相良から「先進燃料核融合研究」に対する見解を述べ、本小特集を総括する。

最後に、本小特集を取りまとめるにあたり、核融合科学研究所共同研究「先進燃料核融合研究の現状と今後の検討課題」(NIFS21KKGA025) を活用した。1年に1度ではあるが、国内の研究者が研究成果を研究会方式で議論し、意見を交換することで個別研究をより深めることができた。ここに感謝申し上げる。

参考文献

- [1] B.C. Maglić *et al.*, Phys. Rev. Lett. **27**, 909 (1971).
- [2] M. Marzarakis *et al.*, Bull. Am. Phys. Soc. **21**, 73 (1976).
- [3] J.E. Golden *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. **27**, 1018 (1977).
- [4] G.H. Miley, Bull. Am. Phys. Soc. **22**, 85 (1977).
- [5] G.L. Kulcinski *et al.*, Fusion Technol. **15**, 1233 (1989).
- [6] G.L. Kulcinski *et al.*, Fusion Technol. **19**, 791 (1991).
- [7] G.L. Kulcinski *et al.*, Fusion Technol. **21**, 1779 (1992).
- [8] G.L. Kulcinski *et al.*, Fusion Technol. **21**, 2292 (1992).
- [9] E.A. Mogahed *et al.*, Fusion Technol. **21**, 1739 (1992).
- [10] D-K. Sze, Fusion Technol. **26**, 1061 (1994).
- [11] J.F. Santarius, Nucl. Fusion **27**, 167 (1987).
- [12] R.F. Post and J.F. Santarius, Fusion Technol. **22**, 13 (1992).
- [13] I.N. Golovin *et al.*, Fusion Technol. **27**, 397 (1995).
- [14] I.N. Golovin *et al.*, Fusion Technol. **27**, 402 (1995).
- [15] H. Momota *et al.*, Fusion Technol. **21**, 2307 (1992).
- [16] 浅井朋彦 他：プラズマ・核融合学会誌 **93**, 18 (2017).
- [17] H. Gota *et al.*, Nucl. Fusion **61**, 106039 (2021).
- [18] 長山好夫, 富田幸博, 御手洗修：プラズマ・核融合学会誌 **80**, 962 (2004).