

## 小特集

## 企業による核融合研究の最近の動向

## Current Trends of Nuclear Fusion Research by Companies

## 1. はじめに

## 1. Introduction

浅井朋彦

ASAI Tomohiko

日本大学理工学部

(原稿受付：2016年10月27日)

近年、米国を中心に民間企業による核融合開発への参入が相次いで発表されている。ロシア・サンクトペテルブルグにおいて開催された第25回IAEA核融合エネルギー会議の会期中に行われたロッキード・マーティン (LM) 社の小型核融合炉開発に関する報道は、ご記憶の方も多いのではないかと思う[1]。近年活発化している民間企業による核融合開発は、Nature誌をはじめ、国内外の一般誌や学術誌においても取り上げられるなど、世界的にも注目を集めている[2]。これらの企業における核融合開発は、炉概念から、資金源や共同研究などの研究組織、さらには研究・開発に対する哲学などにおいて、実に多様であり、また、近年の核融合研究とは大きく異なるものも多い。

トカマクを中心として進んできた磁場閉じ込め核融合研究は、半導体開発における「ムーアの法則」と同様に、指数関数的にその性能を向上させてきた。しかしITERの建

設の遅れもあり、その性能向上のペースは停滞していると見えなくもない。ファーストプラズマが2025年になると発表されたITERに対し、多くの民間企業による核融合開発プロジェクトでは、その目標時期を2020年代前半に設定しているものが多く、火力発電や分裂炉による原子力発電に代わる新たなエネルギーの早期実現への、社会からの要望の現れであるとも言える。事実、これらの企業には、米・Amazon.com社や米・マイクロソフト社、ゴールドマンサックス社の創業者など、民間からの多額の出資を受けているものも少なくない。

近年、核融合開発への参入を発表し、実際に実験を開始しているおもな企業を表1にリストした。本小特集では、これらの企業の中でも比較的規模が大きく、一方でコンセプトや成り立ちがそれぞれ異なるアメリカ、イギリス、カナダそして日本の4つの企業について取り上げた。

表1 民間企業による核融合研究

社名	拠点	開発開始年	炉方式	資金源/連携先
Energy Matter Conversion Corp.	米国	1985	三軸カスプ型	米海軍
Fusion Power Corp.	米国	2009	重イオン加速器	-
General Fusion Inc.	カナダ	2002	衝撃波 MTF	カナダ政府, 民間
Helion Energy	米国	2009	FRC 衝突合体(パルス)	NASA, DoE, DoD, 民間/ワシントン大
Lawrenceville Plasma Physics Inc.	米国	2005	Plasma Focus	民間, クラウドファンディング
Lockheed Martin Corp.	米国	2013	Mirror-Cusp 複合	-
MSNW LLC.	米国	1994	FRC (Liner Compression)	NASA, DoE など
Tokamak Energy Ltd.	英国	2009	球状トカマク	英政府, 民間など/カラム研究所, インペリアル・カレッジ・ロンドンなど
Tri Alpha Energy Inc.	米国	1998	FRC 衝突合体(定常)	民間/UCI, UCLA, PPPL, 日本大学など
浜松ホトニクス(株)	日本	2015	レーザー	自社資金/大阪大学, 光産創大, トヨタなど

民間による核融合開発が加速される一方で、これらの核融合開発については、一般誌やインターネット上にゴシップ記事も少なからず飛び交っている。企業側の「ステルス主義」も原因の一つであるが、例えば Nature 誌[2], Science 誌[3,4]などにおいて注目を集めた記事の多くは、研究者によって執筆されたものではなく、エネルギー生産を目的とした核融合炉と中性子源開発の区別がいないなどの基本的な誤解を始めとする、専門知識の不足による記事の誤りも散見され、ゴシップめいた噂話の一因となっているようにも思われる。このような状況の中、核融合分野の専門誌である本学会誌において、当該企業に所属する研究者によりその研究概要を解説することでこの分野への理解を深め、今後の核融合開発の発展につなげることが本小特集の主たる目的である。

まず、本章に続く第2章では、本特集を企画する契機となった北米における核融合研究の置かれている状況や、「核融合ベンチャー」が成立する歴史的、社会的背景について、元日本原子力研究開発機構 関西光科学研究所長で、現在カリフォルニア大学アーヴァイン校教授兼トライアルファエナジー (TAE) 社 CSO の田島俊樹氏に、特に日本との比較の観点から執筆をお願いした。

続く第3章では、米・カリフォルニア州アーヴァイン近郊を拠点とする TAE 社において開発が進められる磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration: FRC) の衝突合体による核融合炉について紹介する。FRC は、トーラス型磁場閉じ込め方式において、極限的に高いベータ値 ( $\sim 100\%$ ) を実現する方式であり、それ自体は核融合研究の歴史において、比較的早い時期から研究されてきた[5]。TAE 社の C-2/C-2U 装置では、この FRC を、500 km/s を超える相対速度で衝突・合体させ、さらに 10 MW の NBI システムによって高エネルギーイオン成分を形成することで得られる "Advanced Beam-Driven FRC" により、5 ms を超える配位持続時間を実現している[6]。C-2U 装置における最近の実験では、プラズマの閉じ込めについても、これまでの FRC のスケーリングよりも 1 桁以上高いという革新的成果を得ている。この装置はわずか14ヶ月の運転で当初の目標を予定どおり達成して解体され、現在は新たな装置の建設が行われている。新装置の建設期間はわずか1年半であり、民間における核融合開発のペースの速さが伺える。

この他、本小特集では取り上げていないが、FRC を応用した核融合炉方式として、Helion Energy (HE) 社が、FRC の移送速度を利用してプラズマを圧縮加熱するパルス高密度 (Pulsed High Density: PHD) 核融合炉方式の開発を進めている [7]。HE 社は、研究資金を民間に限定することにより政府の政策による影響を排除した TAE 社とは異なり、エネルギー省や NASA などによる支援を受け開発を進めている。Inductive Plasma Accelerator (IPA) と名付けられた同社の装置では、TAE と同様に、相対速度にして 400–600 km/s の FRC の衝突合体により、運動エネルギーをイオンの熱エネルギーに変換することで高温の FRC を得る。TAE と大きく違うのが、FRC を衝突と同時に急速に径方向圧縮し、パルスの核融合反応を得ようとしている点

であり、またプラズマ消失時の磁束の変化や粒子の拡散による誘導電流を用いたエネルギー変換法も提案されている [8]。FRC を用いたこれらの方式では、多くの核融合開発において対象とされる D-T 核融合ではなく、水素とホウ素による p-<sup>11</sup>B や重水素とヘリウムの同位体による D-<sup>3</sup>He 核融合反応などをめざしている点も特徴の一つである。これらの方式は中性子排出が小さく、また、核融合出力を荷電粒子により得られるため、熱交換器や蒸気タービンを用いない直接エネルギー変換法 [9] が利用できるといった利点もある。

第4章では、球状トカマク (ST) による小型核融合炉開発をめざすトカマクエナジー (TE) 社 (イギリス) の核融合開発について紹介する。TE 社の核融合開発は、1997年に核融合出力 16 MW を達成した大型のトカマク装置である JET [10] を有するカラム研究所を母体とし、基本的にはトカマク方式による磁場閉じ込め核融合研究の延長上にある。2015年には高温超伝導コイルを用いた小型の ST 装置 (ST25) [11] により、放電を29時間維持することに成功している。

第5章では、日本では馴染みの薄い磁化標的核融合 (Magnetized Target Fusion: MTF) による核融合炉開発を進めるジェネラルフュージョン (GF) 社 (カナダ) のプロジェクトについて解説する。MTF は、ロスアラモス国立研究所などにおいても研究が進められている方式であり [12]、磁場閉じ込めと慣性核融合の間である  $10^{26} \text{ m}^{-3}$  程度の磁化したプラズマを爆縮することで核融合反応を得る手法である。慣性核融合と同様にパル的に核融合条件を満たすことを狙うものであり、GF 社では液体リチウムを添加した溶融鉛中に磁化プラズマを入射し中心で合体させると同時に、多数のピストンで溶融鉛中に衝撃波を発生させ、磁化プラズマごと圧縮するという独自の方式を採用している [13]。前述の PHD やこの MTF 方式は、実現すればトカマクなどによる定常炉と共存する負荷追従型発電としての役割も期待される。

表1に示した民間における核融合炉開発において、唯一、レーザーによる慣性核融合をめざす浜松ホトニクス社について第6章で取り上げる。同社は、これまで大阪大学レーザーエネルギー学研究中心で行われている慣性核融合開発をはじめ、計測などの分野においても核融合開発に貢献してきたが、2010年に自社資金による独自の核融合開発の開始を発表した。実用化の目標時期は公表されていないが、半導体励起固体レーザーを用いた高繰り返しレーザー核融合ドライバーの開発などにおいて着実に成果を上げている [14]。

本小特集記事で取り上げた以外にも、民間による核融合開発は米国を中心に活発化しており、そのコンセプトは、過去に研究された方式のリバイバルとも言えるものから、SF の設定のような斬新なアイデアまで実に多様である。また、研究組織のみならず、投資家との関わりといった点においても、これまでの学術研究には見られない新たな文化を築いており興味深い。これらを踏まえ、本小特集の最後に、京都大学大学院エネルギー科学研究科教授の岸本泰

明氏に、民間における核融合研究の可能性や日本の核融合コミュニティとの関わりなどについて、客観的視点からまとめていただいた。

これらのいわゆる「核融合ベンチャー」による研究・開発は、一括りに「眉唾」扱いされることも少なくない。このような状況において、冒頭に紹介したLM社の核融合開発参入についての報道は、民間における核融合研究へ社会の注目を集めたと同時に、研究者が原理やその実現可能性を検証する気運を高めたようにも思われる。LM社の開発内容については読者諸氏も大変興味のあるところだと思われるが、今回は同社の開発スケジュール等の都合で執筆が叶わなかった。しかし、2016年8月にカリフォルニア州アーヴァインにおいて開催された日米コンパクトトラスワークショップでは、LM社をはじめ、GF社、TAE社、また本特集では取り上げなかったがEnergy Matter Conversion Corp (EMC2)社などの核融合開発を行う企業からも多数の研究者が参加し、開発の進捗についての報告やディスカッションが行われた[15]。

また、民間における核融合開発への投資が加速する背景には、D-T核融合実験の開始のスケジュールが2035年12月と発表されたITERプロジェクトの遅れの影響もあるものと思われる。国内では、核融合開発を専門とするベン

チャー企業の成りは容易ではないと思われるが、本小特集記事が、日本国内の核融合コミュニティに新たな研究文化を取り込み、核融合開発の広がりや加速の一助となることを期待している。

### 参考文献

- [ 1 ] "Skunk Works Reveals Compact Fusion Reactor Details", *Aviation Week & Space Technology*, Oct 15 (2014).
- [ 2 ] M.M. Waldrop, *Nature* **511**, 398 (2014).
- [ 3 ] D. Clery, *Science* **345**, 370 (2014).
- [ 4 ] D. Clery, *Science* **349**, 912 (2015).
- [ 5 ] 浅井朋彦 他：プラズマ・核融合学会誌 **84**, 498 (2008).
- [ 6 ] M.W. Binderbauer *et al.*, *AIP Conf. Proc.* **1721**, 030003 (2016).
- [ 7 ] John Slough *et al.*, *Nucl. Fusion* **51**, 053008 (2011).
- [ 8 ] G. Votroubek, Private Communication.
- [ 9 ] Y. Yasaka *et al.*, *Nucl. Fusion* **48**, 035015 (2008).
- [ 10 ] P. Puglia *et al.*, *Nucl. Fusion* **56**, 112020 (2016).
- [ 11 ] A. Sykes, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **42**, 482 (2014).
- [ 12 ] T. Intrator *et al.*, *Phys. Plasmas* **11**, 2580 (2004).
- [ 13 ] V. Sponitsky *et al.*, *Computers & Fluids* **89**, 1 (2014).
- [ 14 ] Y. Mori *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 055001 (2016).
- [ 15 ] <http://www.physics.uci.edu/US-JAPAN-CT2016/>