

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思えなくもない。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-¹¹B や重水素とヘリウムの同位体による D-³He 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} 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

チャー企業の成立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. Saponitsky *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/>



小特集 企業による核融合研究の最近の動向

2. 北米における起業精神と核融合開発

2. Entrepreneurial Spirits and Fusion Research in North America

田島 俊樹

TAJIMA Toshiki

カリフォルニア大学アーバイン校ノーマン・ロストカーカ主席教授, TAE 科学担当役員

(原稿受付: 2016年10月27日)

故 Rostoker 先生は、国家資金に依拠せず私的ファンドで、現行とは違う新たな核融合研究方法論を開闢した。それには (1) end in mind と考え、点火条件が難しくなっても中性子非発生燃料を軸に据え、核融合炉の技術的困難の大幅な減容を図る。これは、(2) 'time is money' なので、炉技術開発時間を短縮することが、最も時間やコストの圧縮になるからである。それを実践するには、(3) 'fail fast' と心し、最もリスクの高い課題から取り組む。これらの考え方はビジョンが壮大で人類社会のためだと共感をいただけ、(4) social impact 投資をしようという方々も出てくるのではないか。また、研究の雪崩的展開を誘引するためにも、(5) low-lying fruits を早々に刈り取りながら、本丸の核融合炉へと迅速に進んでいく。これが起業精神に立脚した核融合開発の哲学の概要である。

Keywords:

end-in-mind, 'time is money', 'fail fast', social impact, low-lying fruits

2.1 なぜ核融合研究には時間が掛かるのか？

「核融合の完成は何時でしょうか？」とよく聞かれる。よく冗談っぽく言われるのは「その問いが発せられてから30年後」。1940年代、当時の最優秀な人材が核融合に集結しており、その時はもうすぐかと思われていたこともあり、核融合研究は当時極秘裏に進められていた。そうはいかないことがわかり、秘密が解け公開の研究となる。核融合の存在証明自体は、星や水爆で実証済みだが、その制御が問題であった。

難しい要因、領域進展に時間がかかる背景は何か？

- ① 「プラズマ」は無形性を意味する血液プラズマから命名されたように、我々の相手のプラズマ性とは、無形性であり、不安定な物質である特徴である。
- ② プラズマという遠距離まで相互作用が到達する多体系では、学問研究が分析的（演繹的）よりも、統合的（帰納的）サイエンスとしての様相を濃く持つ。これは、研究すればするほど原理の数が減り簡素化していく素粒子研究のような領域と対照的に、プラズマ科学は多様性・複雑性を生ずる学問である。
- ③ 現在のプラズマ核融合研究体制が、その学問の構造に良くマッチしているのか？
- ④ アカデミック研究の一つの特徴は、(a) より易しい問題から始める；(b) 自己の比較的狭い専門領域を早くに確立し、その分野を掘り下げその道の権威となる。つまり「極める」「磨く」といった方法論；(c) この方法論、運営でより影響力のある研究領域が特化して深く掘り下げら

れる。例えば、プラズマの一つの不安定性を見つける→そのより詳細な研究→非線形領域の研究→各論へ、等々。行けども行けども課題が限りなく出てくるので、一生涯の研究分野となりうる。

2.2 別個の方法論は存在するのか？

もし既存の方法論では、核融合を比較的短期に実現することが容易でないとするなら、何か別のアプローチはないのか？ そういう問題意識で注目されるのは、北米における企業精神に則った核融合研究の出没である。この研究とはどういうものなのか？ そのベースにある社会活動や考え方とは何か？ 研究存続が予定契約されていない私的資金で長大な開発はできるのか？ それを可能せしむる条件は何なのか？ こうした方法論に関する疑問があるであろう。ここではその一般論に触れることは避け、筆者の一体験と巡り合った哲学を通じてその一端を語ってみたい。

私は、2002年-2011年と米国を離れ、日本、欧州と渡った。戻ってみると、米国における国家研究投資による推進の様子がこの間に様変わりしていたと感じた。欧州やアジアで私が主に仕事をしてきた高強度場レーザー科学では、当初世界をリードしていた米国は、欧州に全く後塵を浴びる有様。アジアにさえ負けている。最近では、国家資金による核融合でさえ、欧州・アジアに後塵を拝しかかっているように見える。2.1で述べた一般論に加えて、最近の米国における連邦研究資金のあり方が、この問題に拍車を掛けているようだ。

Norman Rostoker Chair Professor, University of California at Irvine, Chief Science Officer, Tri Alpha Energy

author's email: tajima@trialphaenergy.com

しかしもしかすると、今米国は私的資金での核融合開発の端緒に新しい曙光を見つけたのかもしれない。それはなぜか？

連邦政府の研究資金繰りが苦しくなっているからという理由は、恐らく一端でしかないように思える。新しい研究・開発の方法論が編み出されてきたことが、より積極的な理由ではないか？ この点に付いて少し論を深めてみよう。

私は、1973年 Norman Rostoker 先生の学生としてこの地アーバインで歩み始めた。今でも忘れはしない1973年9月に空港に着いたところ、南加の眩しい陽光を背景に濃いサングラスを掛けハワイアンTシャツを纏ってサンダルを突っかけた男の人が私を出迎えてくださった。日本ではギャングみたいな格好のとか表現されかねない風貌である。それはとにかく、日本からのぼっと出の無名の学生を大先生が空港で出迎えてくださるなんて前代未聞のことである。私はこの方の人格にいたく感服した。空港からの車の中からは冗談がやたらと出てくる、そうした情の深いユーモラスで形式張らない先生である。後年であるが、Dawson, Rosenbluth の両巨匠からも教授を受ける幸運にも巡り合った。Rostoker からは、会ったすぐその年に「もうプラズマの理論は構築され終わったよ。これからは、それを使った応用（社会インパクトとここでは言うて良いかもしれない）だよ。」と申し渡された。東大で一丸先生からプラズマの理論をやるのなら Rostoker が一番と背を押していただいてやってきてこの言葉だったので、暫くショックで私は動けない位くらいだったものだ。教授は傲慢さは微塵もなく悪戯っぽくなつてこく話しているのである。こうした薫陶を彼から受け今日の私はある。

欧州から米国に2011年に戻り、TAEの研究担当重役をお引き受けすることにした。その前からも Rostoker や TAE の哲学には1973年以来ずっと連続的に私は浸され洗礼されてきた。

2.3 Rostoker の哲学

Rostoker が長年の労苦の末編み出し TAE が集積して来た哲学の一端をここで紐解いてみよう。彼は、数学力がとんでもなく突出した物理学者で、それでいて出自は実験地球物理屋である（詳しくは2014年に亡くなった彼を記念した本[1]をご参考に。その数学力を発揮し固体物理の古典的基本手法「汎関数バンド理論」（共著者3名の頭文字を取ってKKR理論）を彼はプラズマへ転向する前に書き上げていた。KなるKohn先生はこうした仕事でノーベル賞を授与された）Rostoker は、私が彼と知り合ってからはずっと孤高で直言の一匹狼のイバラの道を強靱な精神力とユーモアで持ち堪え歩んできた。自分の哲学と学風を周りのそれと違っていても恐れず通したからである。長い間国家資金は、彼の名声をしてでも渺々たるもの。1998年には、ついに国の資金を諦め私的資金に切り替え、TAE 会社を立ち上げた。

私的資金であるから上記した「一つの専門に特化して掘り下げそれで有名になってから」などという悠長なことは

言っておれない。また、連邦政府資金での上述した研究体制や成果のペースについての反省に立った別個の方法論を編み出さねばならない。これらを私なりにごく手短かに略記してみよう：

① 狭い分野の研究に特化して長く長く研究を続けようとするのではなく、我々はfail fast（「早く失敗せよ」）と言うのである。これは、Google などシリコンバレーでの合い言葉でもある。つまり、研究は最も不確かな危険の高いテーマから始めよ。もし最もリスクの高い問題で当該研究が頓挫すれば、その先の投資の無駄が最小化されるから。アカデミックなpublish or perish（「出版せねばくび」）ではなく、文字通りtime is money（「時は金なり」）である。この精神での運営のため、事業が死なないように死にものぐるいで働き知恵を出す。最も高いリスクの第一関門がクリアされれば、リスクが次に高いテーマへと移って行く。Rostoker 先生の研究歴はとても長く、4~50のPhD学生を出しておられるので、その全容をここで紹介はできない（文献[1]をご参照）。ただ、ここで述べる4つの要素などを満足できる概念として、彼の一生の結晶である加速器と磁気閉じ込めの概念の融合とそのためにも最も自然な配位として、プラズマの内部に磁場の無いところも存在するような「磁気反転配位」（FRC）の選択にたどり着いたのである（この配位については、浅井、郷田両氏の論文を参照）。FRCプラズマは磁場が弱いので「甲羅がない幼児」のように最初はふわふわして潰れやすく、甲羅のある昆虫のような強い磁場を持つ配位と異なり、その生成時最も脆弱である。このFRCでは、加速器が繰り出すビームが恰も自転車の輪が回転をすればするほど安定化するように、初期運転のマスターから始まり、不安定性の制御、輸送の改善などへと徐々によりリスクの低い達成課題へと続けていくのである。

② 核融合プラズマ科学はどちらかと言えば統合的・帰納的学問なので、「入り口から入って奥を極める」というのではなく、end in mind（「出口から遡れ」）と考える。この方が学問体系の構造と方法論のそりが良さそうだ。入口から入り奥を極めようとするると至る所で道が分岐し複雑化していくので、まず出口を見極めそのゴールに到達する戦略を考えるというアプローチである。例えば、核融合炉を考える。TAE（など）極一部を除き、ほとんどの研究所では融合温度の最も低いD-T燃料に限られている。Rostoker 先生はend in mindで、D-T反応が多量の高エネルギーの中性子発生を伴い、燃料点火の物理条件は容易でも、核融合炉の技術の困難が重積することを見抜き、物理的に敷居の高い高温の燃料 $p\text{-}^{11}\text{B}$ （反応物は電荷のあるアルファ粒子のみ）を選んだ。物理の敷居を取って高くしても、その後に来る技術面の困難が著しく軽減するという戦略は①のfail fastの哲学とも噛み合う。

③ 私的資金研究では、究極的に投資に見合う利潤を挙げる事業でなければならない。そのためには重箱の隅を突くような研究はさっと通り過ぎ、本質解決に突進する体質を身につけねばならない。こういうと、研究は秘密秘密で生き馬の目を抜くような研究態度と思われるかもしれない

い。最近、日本のテレビを見ていると「金融工学者の挫折と挑戦」と言ったようなテーマでの番組（皆様も見られたかもしれない）があり興味深く拝見した。リーマン・ショックの反省から主人公のジョン・ソー博士は、マネーゲームで金儲けをしようとするマネー資本主義から脱皮し social impact（社会貢献事業）に金融工学で資金を回し社会の活性化を図ることで利潤を挙げるという戦略を紹介していた。マネー資本主義と対局的な social impact は、慈善事業とは違い利潤を追求しながら、いっぽうでは社会的貢献を目的とする点については慈善事業と共通する点を持つので、その二極の間に位置する戦略と考えられる。我々は、投資者に当研究が単なる金儲けの道ではなく、人類存亡を問う気候変動への答えを早期に出す手段として提案し、気候変動研究者・投資家など社会への積極貢献を重視する活動なども展開する。これは、社会からの自発的支援こそが我々の起業の支えの原動力の一つであると信じるからだ。こうした点について読者の皆様とも対話をしていきたい。

④ fail fast と正反対に見えるようだが、我々は low lying fruits（「易しく手に入る果実」）をもめざす。これには、我々が開発した技術が核融合炉より前に利用できるような医療技術などが例に当たる。この考え方は、③ の社会貢献重視の考え方と軌を一にする。「果実」が早く社会的に実現されることは、我々の技術力への信頼を増し、「果実」取りが寄り道になるのではなく逆に核融合炉への道がより現実化しそれを支援・加速する力にも転化できるであろう。この考え方は、従来の核融合研究にあまり適用されてこら

れなかったのではないかと。

各企業は自らのレゾナードルと創意で立業しているのでその哲学が皆同じとは思っていない。色々な創意あるトライが試され fail fast で篩に掛けられ、その中からある活動が浮かび上がってくるのかもしれない。ただ我々は、そうした活動の精神の芯として、企業哲学は我々に取って個別の企業技術よりも重要だと思っている。最後に、繰り返すことになるが、我々は、上記の研究活動とそれを支える企業活動を通じて、現在の人類が抱える環境問題、エネルギー問題、気候変動、「南北」問題、などの社会的課題へのささやかではあるが真剣な貢献とコミュニケーションの惹起へ向けて、路傍の石になる覚悟である。皆様方からのご連絡、コメントやご協力を得ながら、こうした社会活動に尽力したい所存である。是非、積極的な意見交換、研究交流、社会交流などをお願いしたい。先達や同僚からいただいた啓示、教授、共同作業に深く感謝するとともに、これらかも受けるかもしれない激励、協同、社会的・研究上の連携にも予め謝意を捧げたい。

参考文献

- [1] T. Tajima, and M. Binderbauer, eds. Physics of Plasma-Driven Accelerator and Accelerator-Driven Fusion: Proceedings of Norman Rostoker Memorial Symposium (AIP, NY, 2016). <http://scitation.aip.org/content/aip/proceeding/aipcp/1721>



小特集 企業による核融合研究の最近の動向

3. トライアルファエナジー社による核融合研究

3. Nuclear Fusion Research by Tri Alpha Energy

郷田 博 司¹⁾, BINDERBAUER Michl W.
GOTA Hiroshi¹⁾ and BINDERBAUER Michl W.

(原稿受付：2016年10月27日)

トライアルファエナジー (TAE) では、2つの磁場反転配位 (FRC) プラズマの衝突・合体と中性粒子ビーム入射 (NBI) によって高温プラズマを得る手法で、平均ベータ値が1に近い磁場閉じ込め核融合方式をめざした実験・研究を行っている。最終的には先進燃料 $p\text{-}^{11}\text{B}$ を用いた中性子排出のない核融合炉の開発・運転を目標としている。最近 C-2/C-2U 実験で得られた、総出力 ~ 10 MW の NBI システムによって形成・保持される FRC プラズマの性能は、平衡配位持続時間が ~ 5 ミリ秒 (寿命 ~ 10 ミリ秒) に伸長し、粒子・エネルギー閉じ込め特性が飛躍的に向上するなど革新的成果がいくつも挙げられ、今後の更なる向上も期待できる。

Keywords:

field-reversed configuration, FRC, compact toroid, neutral beam injection, plasma sustainment, aneutronic fusion, advanced fuel

3.1 TAE の企業・研究背景

アメリカ・南カリフォルニアに拠点を置くトライアルファエナジー (Tri Alpha Energy, 以下 TAE) は、商用核融合炉の開発・定常運転をめざす民間企業として1998年に設立され、現在は世界最大規模の私的資金の投入実績と実験装置を有する企業として活動している[1]。この会社設立には、カリフォルニア大学アーヴァイン校 (UCI) の故 Norman Rostoker 教授、フロリダ大学 (UF) の Henk Monkhorst 教授、そして本稿の共著者である Michl Binderbauer 博士等が携わり、今でも会社設立時の企業概念や産学提携の体制を維持している。TAE のめざす磁場閉じ込め核融合炉は、磁場反転配位 (FRC: Field-Reversed Configuration) [2, 3] を炉心プラズマとし中性粒子ビーム入射 (NBI) によって電子加熱さらには電流駆動により配位を保持し、水素 (p) とホウ素 (^{11}B) の核融合反応により発生する 8.7 MeV のエネルギーを抽出することである。また、その $p\text{-}^{11}\text{B}$ 核融合反応により3つのアルファ粒子 (^4He) も発生することに由来して Tri Alpha Energy と社名が付けられた。

核融合炉開発・定常運転に向け他機関・装置にて主に使用が検討されている D-T 燃料ではなく、TAE では先進燃料である $p\text{-}^{11}\text{B}$ (または $\text{D}\text{-}^3\text{He}$ も可) を採用するのは核融合主反応によって人体にも悪影響を及ぼす中性子が発生しない安全で究極の核融合炉をめざすからである。これは技術的な面でも利点が多く、中性子発生懸念が要らない (少ない) ために炉設計・開発・運転を容易にしてくれる。ただ、核融合反応・燃焼させるための条件は D-T や D-D 反応のそれよりも難しく、その条件をどう達成させ尚且つ定常運転を実現させるかは今後の課題である。

FRC という磁場閉じ込め概念や特性、それを核融合炉心 Tri Alpha Energy, Inc., CA 92688, USA

プラズマとして採用する魅力・利点などについては、これまで本学会誌での特集記事[4, 5]や他学術誌のレビュー記事[2, 3]で紹介されたり、炉心概念設計 "ARTEMIS" [6] として発表されたりもしている。FRC は自己トロイダル電流により形成されるポロイダル磁場のみで配位が成り立ち、そのプラズマ圧と外部の磁気圧比で示されるベータ値は100%に近い平衡状態を持ち合わせていることから、コンパクトで高効率の核融合炉心プラズマとしての魅力に長けている。また、その閉じた磁力線構造は FRC (セパトロリクス) 外部の開いた磁力線とは独立に存在するため、容易に軸方向への FRC 移送が可能となり、また装置両端のダイバータを用いて直接エネルギー変換も実現可能であると考えられるなど、多くの特長や核融合炉心プラズマとしての魅力がある。TAE ではこれら多くの魅力を本質的に兼ね備えた FRC プラズマを用いて、NBI により生成される大きな Larmor 半径・周回軌道を持つ高速イオンでプラズマを保持さらには加熱し、そして最終的には先進燃料を用いて核融合反応・燃焼まで達成しようというのが狙いである。

FRC は磁場閉じ込め概念の世界的主流であるトカマク型やヘリカル型と比べると研究規模は小さいものの、日米両国では TAE も含めて今でも FRC の実験的・理論的研究が盛んに行われており、核融合炉心プラズマへの応用をめざして日々進展しているのが現状である。近年では、TAE での C-2/C-2U 装置による実験結果により、これまで FRC 研究で懸念・議論されてきたプラズマ不安定性の抑制や粒子・エネルギー閉じ込め特性の改善など飛躍的進歩を顕著に表し[7-11]、さらには NBI の出力を上げることにより FRC プラズマの平衡配位持続時間は5ミリ秒 (プラズマ寿命は10ミリ秒) を超えるまで伸長された[12]。我々はこの

corresponding author's e-mail: hgota@trialphaenergy.com

ようなFRCプラズマ特性の向上した状態をHigh-Performance FRC (HPF)と呼び[10],そして最大10 MWを超える高出力NBIによる高速イオンでそのHPFプラズマ状態を保持できるようになったことからAdvanced Beam-Driven FRCとも呼んでいる[12].

本章では、これらC-2/C-2U装置による実験結果を得られるまでの過程や肝要な技術等をレビューする形で、主要な研究成果とともに次節で紹介する。

3.2 C-2/C-2U 実験概要・研究成果

TAEにおけるFRCに特化した研究背景や意義について前節で簡単に記したが、(前身であるA, B, C-1装置による研究概要は省略し)C-2実験が本格的に始まったのは2008年からである。実験開始当初はFRCプラズマの生成法や運転最適化に力を入れ、ある程度FRCの配位持続時間が伸びたところで、電磁流体力学(MHD)的不安定性の抑制やNBIによるプラズマ加熱・配位維持をめざした実験へと移っていった。このC-2実験でFRCプラズマ特性の向上が確認され、高出力NBIシステムによりさらなる向上や配位維持が見込める目処が立ったため、最大出力10 MWを超えるNBIシステムを新設し2015年からC-2U実験が始まった。その最新、大型FRC実験装置C-2Uの概略図とFRCを含む磁力線図を図1に示す。また、C-2/C-2U実験においてHPFプラズマを生成するために鍵となる主要技術は大きく分けて4事項(①FRC Dynamic Formation, ②Wall Conditioning, ③Edge/Boundary Control, ④NBI Injection)あり、それら技術の概要や主要結果について実験装置概要とともに次に記す。

3.2.1 C-2/C-2U 実験装置

大型FRC実験装置C-2U(図1)がC-2装置から主に改良された点として、①NBI装置の高出力・入射角度・ビームエネルギーの最適化、②不安定性制御用プラズマガンならびにダイバータ内電極の最適化、③プラズマ磁場分布の最適化などが挙げられる。

C-2/C-2U装置での共通事項を以下に記す。全長約20 mの装置の中央にFRC閉じ込め部(金属容器)、その両側にFRC生成部(石英管)とダイバータ(金属容器)がそれぞれ対称に設置されている。FRCプラズマの配位持続時間に比べて十分に時間スケールが長い準定常コイル(図1, DC

Magnets)は装置全域にわたり配置されており、FRC閉じ込め部での軸方向磁場(B_z)は平均で0.1 T程度、そしてFRCの閉じ込めに必要な磁場のミラー比は3-3.5程度である。また、両端のダイバータ領域には2 T程度の強磁場ミラープラグが設置されており、開いた磁力線プラズマの閉じ込めやプラズマガンを運転する際に重要な役割を果たしている。

3.2.2 高性能FRC(HPF)生成への主要技術

C-2/C-2U実験においてHPFプラズマを生成するための主要技術4項目についてそれぞれ説明していきたい。

①FRC Dynamic Formation:FRCプラズマ生成時に重要な点として、NBIが有効に効くターゲットプラズマの生成が挙げられる。そのために我々が用いている手法は、2つの生成領域(Field-Reversed Theta Pinch法を採用)で作ったFRCプラズマを装置中央閉じ込め部に250 km/s程度の速度でそれぞれ移送し、衝突・合体させることによりNBIに適したターゲットプラズマの生成に成功した。その衝突・合体直後のFRCプラズマパラメータとして、プラズマ半径 $r_{pl} \sim 0.35$ m, 長さ $l_s \sim 2-3$ m, 捕捉磁束 $\phi_p \sim 5-7$ mWb, 電子温度 $T_e \sim 100-150$ eV, イオン温度 $T_i \sim 500-800$ eV, 電子密度 $n_e \sim 2-3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ である。この衝突・合体直後のFRCプラズマに不安定性制御用プラズマガンの運転やNBIを実施しない場合、FRCの配位持続時間・寿命はトロイダルモード $n=2$ 回転不安定性の発生・成長によって決まり、ほとんどのFRCは1ミリ秒という短い時間で崩壊してしまう。

②Wall Conditioning:FRCプラズマへのNBI効果・効率を上げるため、金属でできた閉じ込め容器(図1, Confinement Chamber)内壁の適切な処理が必要となる。FRCへ入射されたビームがセパトトリクス外部の中性粒子・ガスにより荷電交換損失が生じるため、その損失量の低減なおかつ真空度の向上や不純物の低減のために真空容器内壁にチタンコーティングを定期的に行っている。また金属容器であるダイバータ内壁にも同様にコーティングを行うことにより、装置全体の更なる真空度の向上や不純物の低下に繋がった。これらコーティング技術により、FRC外部の中性粒子密度が大幅に低減され、NBI高効率化によりFRCプラズマ性能を上げることに成功した。

③Edge/Boundary Control:これまでのFRC実験的研究において最も懸念されてきたMHD的不安定性は、既述の $n=2$ モード回転不安定性である。このFRC配位崩壊に繋がる不安定性抑制のため、C-2装置においても初めは4重極アンテナを閉じ込め領域に設置してプラズマの安定化を図ってきた。ただ、この多重極磁場印加によりFRCプラズマの安定化はある程度成されたのだが、逆に回転方向の磁場不様性によってNBIの効果が大幅に低減されてしまった。そのため、新たに導入されたのが同軸プラズマガンを用いたプラズマ安定化へ向けた取り組みであり、ダイバータ内の装置軸に設置(図1, Plasma Gun)することにより開いた磁力線を通してFRCプラズマの安定化を図った。これはプラズマガンにより発生する内向きの径方向電場($-E_r$)と軸方向磁場(B_z)の掛け合わせ($E \times B$)により生成されるFRC外部のシアフローの向きが、FRCプラズマの

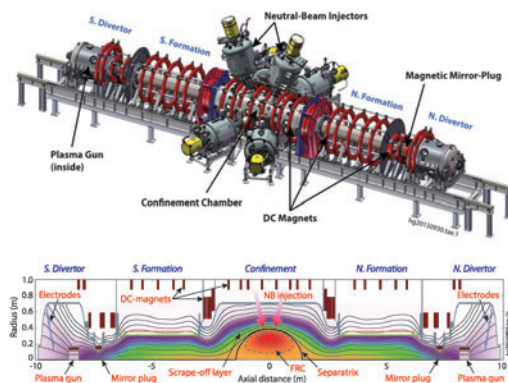


図1 上:C-2U実験装置図,下:C-2U装置断面のFRCプラズマと密度分布・磁力線図。

回転方向（イオンの反磁性方向）と逆になるため $n=2$ モード回転不安定性の発生を抑制できる。また、プラズマガン表面への開いた磁力線の短絡・凍り付きにより、FRCが径方向へシフトする巨視的 $n=1$ モード不安定性の低減にも繋がった。これら2つの巨視的不安定性をプラズマガンによって安定化できたことから、C-2/C-2U装置においてFRCプラズマへのビーム入射効果をより一層高めることに成功し、ビームイオンのプラズマ安定化効果（有限Larmor半径効果）との相乗効果により更なるFRCの安定化・長寿命化に繋がった。

④ NB Injection：上述した技術①～③が全て、FRCプラズマへの効果的なNBIを実施・実現するための技術だご理解いただけたであろうか。既に記述した通り、ビームイオンによりFRCプラズマを保持することが本C-2/C-2U実験での目的であり、その実現に向けてTAEでは実験的・理論的に研究を進めてきた。C-2装置では、ビームエネルギー (E_{Beam}) 20 keV・最大ビーム総出力 (P_{Beam}) ~ 4 MW程度のNBをFRCプラズマ電流と同方向かつ接線方向へ（装置軸に対して）垂直 (90°) に入射した。このC-2実験やシミュレーションの結果からC-2U実験で用いるNBI装置の最適条件を検討そして導き出し、C-2Uでは $E_{Beam} \sim 15$ keV と $P_{Beam} \sim 10+$ MWを持つNBI装置を新たに開発し図1に示すような入射角度（装置軸に対し $65^\circ - 75^\circ$ で可変）を持たせて設置した。このとき、FRC閉じ込め部の外部磁場分布の最適化や金属容器の磁場浸み込み時間の制御も併せて行ったことにより、FRCプラズマの形状やビームイオンの密度分布の制御を容易にすることが可能となった。

3.2.3 プラズマ閉じ込め特性の向上と配位維持

C-2/C-2U実験においてFRCプラズマの閉じ込め特性の向上は、前項でまとめた主要技術の運転最適化や相乗効果により成し遂げられた。なかでも、プラズマガンとNBIによってFRCプラズマの安定化さらには配位維持への効果は顕著に現れ、外部磁場分布（図1, Confinement/Formation/Mirror-plug sections）の制御と併せることにより開いた磁力線領域（Scrape-off layer (SOL)/Jet region）のプラズマ特性向上にも繋がった。図2にC-2実験で得られたFRCプラズマの粒子閉じ込め特性 (τ_N) を、これまでの他FRC実験装置から得られたスケーリング則[13]と比較しながら示す。このC-2実験結果は様々な実験条件のもとで得られたものだが、プラズマガンやNBを用いた不安定性抑制を行っていない実験初期の場合（図中、No Gun/NB）、比較的スケーリング則に近い結果となっている。しかし、その後のプラズマガンとNBを用いた実験結果はこれまでのスケーリング則から大幅に外れ、FRCプラズマの閉じ込め特性が著しく向上しているのが見てとれる。C-2実験において最もプラズマ性能の良かったHPF14プラズマでは、粒子閉じ込め時間が2ミリ秒を超えるショットも観測された。

このような閉じ込め性能の良いHPFプラズマをドップラー後方散乱（DBS）反射率計によって揺動観測を行うと、FRC（セパトリクス）外の開いた磁力線領域では揺らぎが観られるが、反対にFRC内部では比較的静かで安定した状態であることがわかった[14]。プラズマガンや

NBIによるプラズマ制御を行わない場合に比べると、HPF状態では飛躍的に揺動が抑えられている。揺らぎの大きさは粒子・エネルギーの輸送機構と密接な関係にあるため、この揺動観測の結果からもFRCプラズマの閉じ込め特性の向上が裏付けられる。

ここで図3にプラズマ性能向上の例として、C-2実験で得られた2放電条件（No Gun/NB, HPF14プラズマ）、さらにはC-2U実験から観測されたNBI出力の異なる2条件 ($P_{Beam} \sim 5$ MW, 10 MW) での規格化プラズマ半径と電子温度（C-2/C-2Uで1条件ずつ比較）の時間変化を示す。前項にて解説したHPFプラズマ生成のための主要技術や図2・図3からもわかる通り、C-2/C-2U実験においてプラズマガンとNBIがFRCのプラズマ性能へ与える影響・効果はとても顕著に現れている。図3のFRCプラズマ半径・配位持続時間を見て比べても、C-2からC-2Uへ装置改良後に $P_{Beam} \sim 5$ MWとNBI出力を抑えたショットでもC-2 HPF14のプラズマ性能を上回っている。これは先に記したNBI装置の改良や運転最適化による効果であり、さらにはC-2UにてNBI出力を最大 ($P_{Beam} \sim 10$ MW) に上げたショットではプラズマ半径のフラットトップ・平衡配位持続時間が5ミリ秒を超え、且つプラズマの寿命は10ミリ秒を超えるまで伸長された。また、電子温度の時間変化からもFRCプラズマ性能の向上が確認でき、C-2Uでは平均 ~ 120 eV程度の状態が比較的長い時間（5ミリ秒程度まで）

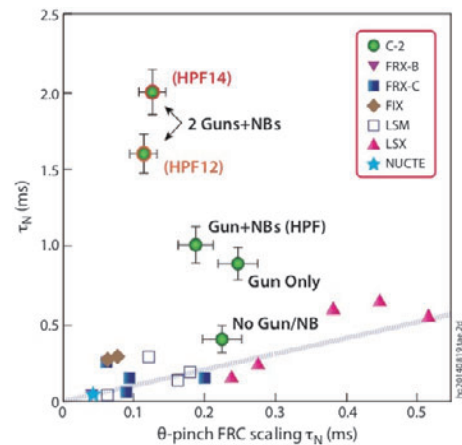


図2 C-2実験で得られたFRCの粒子閉じ込め時間 τ_N とその他FRC装置によって得られたスケーリング則[13]との比較。C-2データ(●)は、各条件での10ショット以上の平均値。

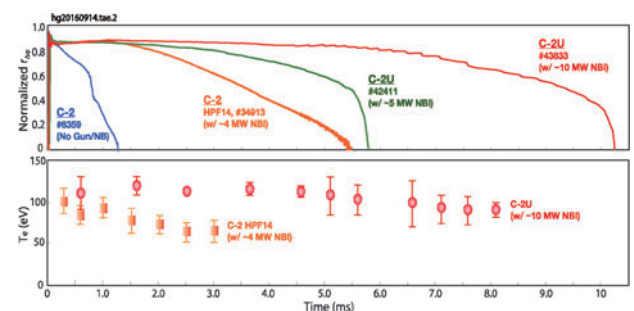


図3 C-2/C-2U実験により得られたプラズマパラメータの時間変化：(上)規格化されたプラズマ半径、(下)装置中央で計測されたトムソン散乱による電子温度。

維持できていることがわかる。電子温度径方向分布を見ると、FRC（セパトリティクス）内部から外の開いた磁力線領域・SOL までの広い範囲にわたって高い温度が保たれていることもわかった。これは高エネルギーのビームイオンが（開いた磁力線領域も含めて）FRC 内部を大きな半径で軌道周回しているためだと考えられ、閉じ込め特性の向上した FRC や SOL 領域のプラズマへの加熱効果が上がっていることも高温の径方向分布を保つ一因となっている。

C-2/C-2U 実験における FRC プラズマの閉じ込め特性を検討する際、プラズマ全体における熱エネルギー変化量を 0 次元モデル (0-D Power Balance Analysis) を用いて議論することができる [15, 16]。このとき電子とイオンを別々に取り扱い、それぞれのチャンネルへの入力量 (Input/Heating) と出力量 (Output/Loss) のバランスを保つように計算し、電子とイオンの熱エネルギー (E_{th}) 閉じ込め特性を $\tau_{E,e}$ と $\tau_{E,i}$ として検討・見積もる。ここで図 4 に、C-2 実験・解析から得られた電子エネルギーの閉じ込め時間 $\tau_{E,e}$ と電子温度 T_e の関係性を示すと、電子温度の上昇とともに閉じ込め特性が向上しているのが見てとれる [10]。また最近の C-2U 実験・解析の結果からもその関係性が保たれていることが確認できた。これは我々 TAE での FRC 実験・研究を進める上で非常に重要な結果であり、このスケーリング則を基に今後の実験装置の開発や将来的な FRC 型核融合炉のデザイン設計に役立てることができると考えている。

3.3 今後の課題・展望

TAE による NBI を用いた C-2/C-2U 実験で、これまでの他 FRC 実験研究では成し得なかった FRC プラズマ性能を達成出来たことの意義は非常に大きい。FRC プラズマの閉じ込め特性の向上や配位持続時間・寿命の伸長など、飛躍的にプラズマ性能を向上させることに成功した結果、これまでの FRC 研究で効果的に実験的検証・議論ができていなかった物理機構（例えば、FRC 平衡状態、粒子・エネルギー輸送等）の解明に取り組むことが可能となった。また、FRC プラズマのさらなる性能向上をめざし、追加熱・粒子供給・電流駆動等についても実験的検証が始まっている。本実験研究で得られた、FRC プラズマの閉じ込め特性（電子エネルギー閉じ込め時間）が電子温度の約 1.8 乗と比例関係にあるという結果（図 4）は、核融合研究において議論されるローソン条件（密度・閉じ込め時間・温度の三重積）の観点から見てもとても魅力的である。この新しい T_e スケーリング則に沿って、今後はどのようにプラズマ性能をより向上させられるかが大きな鍵となる。

C-2/C-2U 実験では準定常磁場コイルを除き、プラズマガンや NBI 装置も含めて主となるシステムは全てパルス放電となっている。そのため、C-2U 実験で得られた FRC プラズマ性能（高閉じ込め、平衡配位持続時間 $\sim 5+$ ミリ秒、寿命 $\sim 10+$ ミリ秒）は、装置の蓄積エネルギーによって制限されているのが現状である。したがって、TAE における次の実験装置 C-2W（図 5）では、各主要システムの蓄積エネルギーを増やすことによってパルス放電時間を

~ 30 ミリ秒まで延ばす計画でいる。また、さらなる FRC プラズマの性能向上（高閉じ込め・長寿命・高温化）をめざし、① NBI 装置のさらなる高出力化やエネルギー最適化、② 内部ダイバータ設置による開いた磁力線領域のプラズマ性能向上、③ 外部磁場コイルの電流ランプアップ、④ FRC プラズマのフィードバック制御用コイルの設置など、数多くの改良点・新規点を兼ね備えた次期装置の設計となっている。この C-2W 実験は 2017 年度中に開始される予定であり、その実験結果・成果報告が大いに期待される。このような早い周期で実験・装置改良を繰り返し行えるのは TAE そして企業研究の強みであり、これからも核融合研究の発展・進展に貢献していきたい。

参考文献

- [1] Details in TAE website at <http://www.trialphaenergy.com/>
- [2] M. Tuszewski, Nucl. Fusion **28**, 2033 (1988).
- [3] L.C. Steinhauer, Phys. Plasmas **18**, 070501 (2011).
- [4] 神前康次 他：プラズマ・核融合学会誌 **71**, 469 (1995).
- [5] 浅井朋彦 他：プラズマ・核融合学会誌 **84**, 498 (2008).
- [6] H. Momota *et al.*, Fusion Technol. **21**, 2307 (1992).
- [7] M.W. Binderbauer *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 045003 (2010).
- [8] M. Tuszewski *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 255008 (2012).
- [9] H.Y. Guo *et al.*, Nature Communications **6**, 6897 (2015).
- [10] M.W. Binderbauer *et al.*, Phys. Plasmas **22**, 056110 (2015).
- [11] H. Gota *et al.*, Fusion Sci. Technol. **68**, 44 (2015).
- [12] M.W. Binderbauer *et al.*, AIP Conference Proceedings **1721**, 030003 (2016).
- [13] A.L. Hoffman and J.T. Slough, Nucl. Fusion **33**, 27 (1993).
- [14] L. Schmitz *et al.*, Nature Communications **7**, 13860 (2016).
- [15] D.J. Rej and M. Tuszewski, Phys. Fluids **27**, 1514 (1984).
- [16] E. Trask *et al.*, Bull. Am. Phys. Soc., UP8.00018 (2014).

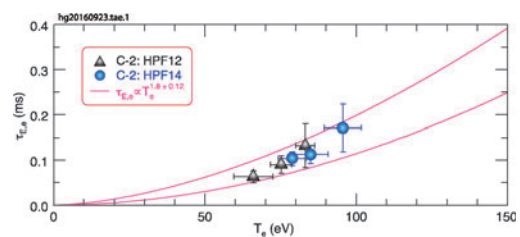


図 4 C-2 実験 (HPF12/HPF14) により得られた電子エネルギー閉じ込め時間と電子温度の相関 (スケーリング則)。

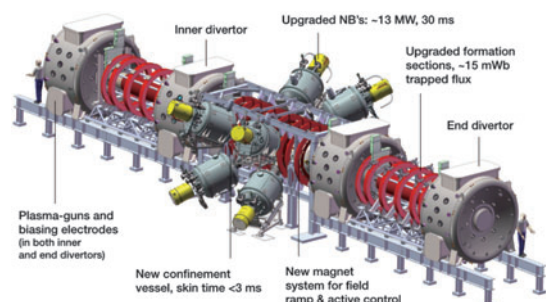


図 5 TAE における次期実験装置、C-2W 概略図。



小特集 企業による核融合研究の最近の動向

4. トカマクエナジー社における核融合研究

4. Nuclear Fusion Research at Tokamak Energy Ltd.

WINDRIDGE Melanie J., GRYAZNEVICH Mikhail and KINGHAM David

(原稿受付：2016年9月15日)

核融合研究は、社会的に必ず大きなインパクトもたらすクリーンで安全なエネルギー源であり、過去数十年研究が進行してきた。国際熱核融合実験炉ITERのような巨大国際研究プロジェクトを政府資金が支える一方で、多くの企業が核融合エネルギーを追究し、開発と商業化を加速しようとしている。トカマクエナジー (TE) 社はそうした企業の1つである。TE社のアプローチは核融合研究の主流に近い立場で、トカマク炉設計に経済的な発展形である球状トカマクを高温超伝導マグネットとともに研究対象としている。理論予測ではITERやDEMOからトカマク炉の規模をコンパクト化できるといわれている。核融合エネルギー増倍率の炉サイズへの依存性は弱く、モデル研究によれば、中性子遮蔽を最適化して(1 mでなく)35 cmとしても、センターコイルを熱および放射による損傷から守れることがわかってきた。プリンストン大学プラズマ物理研究所と協力してパイロットプラントの設計を行ってきた。本章ではTE社の概要と計画、そして進展について述べ、工学的チャレンジとして一連の核融合炉開発の課題に取り組み、個別解を考えていきたいと考えている。

Keywords:

fusion, energy, tokamak, spherical, high temperature superconductor

4.1 はじめに

核融合エネルギーの必要性は、プラズマ物理学界ではよく理解されている。核融合研究者は、温室効果がなく、長期隔離が必要な放射性廃棄物もないクリーンで環境に優しいエネルギーを将来に向けて開発しようとしている。商業核融合炉が実現すれば、現在のエネルギーを取り巻く状況は大きく変わり、社会へのインパクトは絶大である。

核融合研究は数十年にわたって行われてきたが、それは極めて挑戦的なテーマと言える。第1に核融合反応が起きる極限的なプラズマ状態の実現が必要で、第2に商業発電所に求められる数十年の運転のため、極限条件にも耐え、かつ経済的な核融合炉をデザインすることが求められるからである。燃料を加熱して閉じ込めるために核融合出力が入力を越えるブレイク・イーブン、地上で核融合反応が実現できる段階に入ったのは確かである[1]。この条件達成のため、核融合コミュニティが結束すれば、商業核融合発電プラントを設計する工学的チャレンジへとつながっていくはずである。

現在、核融合分野に進出する私企業は増加している。これは無限のエネルギーという魅力的なゴールと地上で太陽・星を実現する知的チャレンジに触発されたためである。トカマクエナジー (Tokamak Energy, 以下 TE) 社は、世界で核融合を立ち上げようとする多くの企業の1つであり、同様の企業にはカナダのゼネラルフュージョン社、米国のトライアルファエナジー社がある。これらの企業は各々異なったやり方で核融合の実現、即ちプラズマを加熱し、閉じ込め、核融合反応を起こすベストのやり方をめざ

しているが、この大きな問題への取り組み方には類似点も多い。新規事業をするには問題を細分化して小さなチャレンジの積み重ねに変え、進展を促進するとともに通常フェーズでの投資を呼び込んでいる。これらは、新しい技術と革新的な工学を呼び込むことにつながっている。

さて、TE社は核融合エネルギー実現の主流となっているアプローチの加速をめざす企業である。その活動、進展、計画について少し細かく見てみよう。TE社は核融合プログラムに成長した数十年の研究に立脚し、既に確立されたトカマクという概念を用い、新しい技術によってそれを更新し続けている。

4.2 トカマクエナジー社の戦略

基本となるアプローチは、開花しつつある2つの技術、すなわち「球状」トカマクと高温超伝導 (HTS) を開拓して、よりコンパクトな核融合炉を作る可能性を開くことである。

球状トカマクはドーナツをギュッと圧縮したコンパクトな形状をしている (ドーナツというより芯を抜いたリングに似ている)。図1を見ていただきたい。通常の形状のトカマクより、コイルに近い磁場を有効利用できる。

TE社の設立者であるアラン・サイクスとミカエル・グリアズネビッチの2人は、1990年代に英国で球状トカマク概念を開拓した。その当時、球状トカマクのアイデアは理論的な面白さは認められていたものの、世界記録レベルのプラズマベータ値を達成したにもかかわらず[2]、炉の中心部分にスペースが足りないことから、核融合発電プラ

Tokamak Energy Ltd., Oxfordshire OX14 4SA, UK

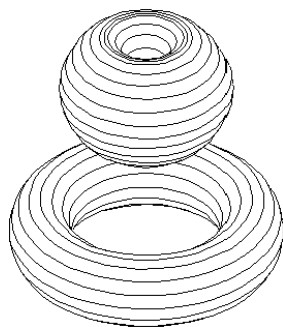


図1 球状トカマクの概形(上)と通常のトカマクの概形(下). イメージ作成: The Associated Plasma Laboratory (LAP), National Space Research Institute (INPE), São José dos Campos, Brazil.

ントの競争相手とは見なされていなかった。その意味は、十分な厚さの遮蔽で中性子照射からコイル中心部を守りながら、核融合に必要な高磁場を発生するのは難しかった[3]。しかし、高温超伝導が状況を変えた。

超伝導は、特定の物質を概ね 4 K (−269.15°C) 位まで十分に冷やすと電気抵抗が零になる特性である。高温超伝導体は 77 K (−196.15°C) [4]位で動作し、冷凍機に必要とされるエネルギーを大幅に減らすことができる。

超伝導体はトカマクのマグネットを製作する上での生命線といえ、換言すれば、高温超伝導 HTS がトカマク炉への展望を大きく向上した。冷却エネルギーを節減すると同時に、高温超伝導はトカマクのスペースの節減、つまり炉サイズのコンパクト化に大きく貢献している。

トカマクのマグネットは銅または超伝導物質の巻線コイルできている。図2は高温超伝導物質のテープの写真で、等量の電流を流すことができる銅ケーブルと一緒に写っている。同強度の磁場を発生するのに高温超伝導物質できたマグネットは銅マグネットの占める体積を大幅に低減し、熱を出さずに連続使用も可能である。超伝導物質自身の電流密度は 10^6 Amm^{-2} を越えることもできるが、我々が最終的に高温超伝導マグネットで実現が求められる工学的電流密度は 100 Amm^{-2} 程度である。

よく使われる低温超伝導 LTS と比較すると、高温超伝導体テープは高い温度で大幅に高い磁場を出すことができる。TE社は、(通常超伝導物質に必要とされる 4 K ではな

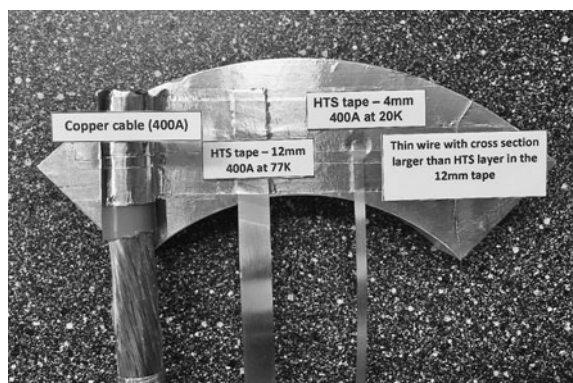


図2 高温超伝導 YBCO テープの写真。同一電流を流すことができる銅ケーブルと並べて写す。

く) 高温超伝導マグネットを 20–30 K まで冷却して、高温超伝導体ならではの高い電流密度を最大限活用している。

これら 2 つの技術、球状トカマクと高温超伝導は早期に核融合を実現するための鍵となる。

TE社は、核融合エネルギー開発のチャレンジを、一連のいくつかの工学的チャレンジに分割している。即ち、

1. 全てのコイルが高温超伝導コイルできたとカマク装置を建設 (2015年にトカマク ST25HTS を建設する。図3参照)。
2. コンパクトなトカマクで核融合反応温度に到達。2017年に1億度の達成を狙う；これは1億度へのチャレンジ。我々はR&Dを通じて、こうした皆が熱望するテーマの物理と工学に向き合って、核融合エネルギーの興奮や科学的経歴の中で国民、実際には学生を魅了したいと考えている。
3. 核融合炉ブレイク・イーブンの達成；核融合反応を最低限、持続するため、炉への入力エネルギーを出力エネルギーが十分上まわる。これは核融合にとってライト兄弟の成功に相当し、2020年に達成したいと考えている。
4. 初めての核融合発電を実現する。
5. 信頼性が高く、経済的な核融合発電プラントの建設に進む；必要とされる数十年の運転寿命を持つ核融合炉を中心にこれほど工学的に厳しい環境を作り出す工学的な実現性を考えれば、それ自体が大きなチャレンジと言える。

こうした開発の道筋として、TE社は、2つのトカマクを建設し、運転してきた。2015年7月には、まず高温超伝導体のトカマクへの適合性を実証した。我々のチームは高温超伝導マグネットを持つ小型トカマクを世界記録となる長時間運転し、24時間以上の連続運転の後、運転停止した。

次のステップはコンパクトトカマクで核融合反応温度に到達することである。そのためには、磁場の大幅増大が必要とされ、やや大型の装置が必要となった。ST40装置を現在建設中で、2017年はじめに運転開始となる予定である。



図3 29時間実証運転達成時の ST25HTS.

4.3 実績と技術の詳細

TE社のコンサルタントやスタッフの最近の業績は我々のアプローチの正しさを示しており、国際熱核融合実験炉ITERやDEMOの規模からトカマク炉をコンパクトにすることは可能であるとの自信も得られた。

アラン・コスレーらの炉設計研究[5]によれば、適切なグリーンワールド密度限界以下でトロヨンのベータ限界（例えば0.8-0.9）以下の適切な範囲で定常運転すれば、核融合エネルギー増倍率と三重積は、主として核融合出力の絶対値とエネルギー閉じ込めに依存する。三重積は、図4に示すように核融合炉のサイズにのみ弱く依存する。さらに、ITERの設計に使われたスケージング則はアップデートが必要である。特にベータ値によらないスケージング則は最近の実験を説明できることが大切である。

コスレーによる後続論文では[6]、トカマクが上手くプラズマを閉じ込めるパラメータ領域を決める「運転限界」を確立して、核融合三重積、 $nT\tau_E$ (n , T , τ_E はそれぞれイオン密度、イオン温度、エネルギー閉じ込め時間) についてさらなる検証を進めている。解析的な検証によれば、三重積を大きくしようと炉の規模を大きくしても、運転限界に抵触してメリットが得られないことがわかってきた。したがって、今日まで世界的に炉の規模を大きくしようとしてきたものの、トカマクの核融合増倍率は炉の規模に対してほとんど依存しない。

トカマク炉の規模をコンパクト化するもう一つの問題は、遮蔽物質を配置するスペースがないことである。核融合発電プラントでは、多量の高エネルギー中性子が発生し、中心コイル部を熱負荷や放射損傷から守るために効率的な中性子遮蔽が必要であるが、これは容易ではない。外側に照射される14 MeVの核融合生成中性子は次々に高エネルギーガンマ線を発生するので、重い元素を使ってそれを弱める必要がある。高速中性子はこれらの重い元素によって跳ね返され、さらに軽い元素で減速し、エネルギーを低下する必要がある。

コリン・ウィンザーらの研究[7]によれば、冷却水のないタングステンカーバイト層を包含する遮蔽は図5(a)に書かれているように、よい遮蔽性能を示している。

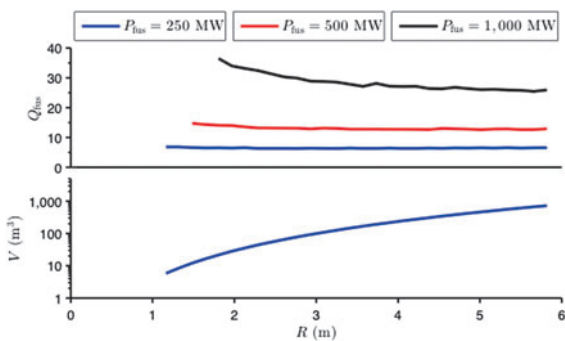


図4 核融合エネルギー増倍率 Q_{fus} は炉の大きさ R に弱い依存性しかないものの、炉の出力は大きく依存する[5]。ここで用いたアスペクト比(A)は3.2である。他のアスペクト比でも、数値の違いこそあれ、定性的には同じ結果となるであろう。

図5(b)のグラフは、水冷層が薄すぎると熱負荷が増え、高速中性子の減速が難しくなることを示している。もし水冷層が厚すぎると、ガンマ線遮蔽が不十分になる。コアに近い部分の水冷層がプラズマに近い部分よりも厚ければ、性能は向上する。コアに使いタングステンカーバイトを低速中性子吸収するタングステン化合物に置き換えても性能は向上する。中性子遮蔽を最適化すると、シールド厚みは1 mというより、35 cmで十分と言える。

コスレーの核融合発電所の設計[5]によれば、トカマク炉として可能な最適なサイズは大半径1.35 m程度である。この炉は約36 kWの核融合反応熱を超伝導コイルに与えることになる。除熱するには2 MW程度の冷却機が必要で、175 MWの核融合出力の望ましくない使い道と言える。パイロットプラントの設計は米国プリンストン大学プラズマ物理研究所と協力して行っており、一部はメナードの論文として最近発表されている[8]。

4.4 ST40 実験

ST40 実験装置(図6参照)は、大半径40 cmで3 Tという、規模の割には極めて高い磁場を持つトカマクであり、大半径が7-8倍大きいJET装置に比肩する。ST40装置はコンパクトなサイズで高磁場を実現できることを実証するために設計され、8-10 keV(約1億度で核融合反応温度に到達)を達成することを狙っている。2 MAのプラズマ電流が期待される球状トカマクの合体によるスタートアップと加熱技術を検証し、2 MWの中性粒子ビーム加熱も用いる。研究によって高磁場球状トカマクへの閉じ込めがどんなものか真相が明らかになり、将来の炉設計の最適化が可能になるはずである。

ST40装置は比較的短いパルス(数秒)で運転する予定で、センターコイルに遮蔽が必要になるような高レベルの中性子は生じない。コイルは銅製で、液体窒素で冷却してその抵抗を下げる予定である。このコイルによって最大3 Tの磁場に到達でき、センターコイルが過熱しすぎる前に数秒間の運転期間が利用できる。

ST40装置のコンパクトさによって興味深い機械的、工学的なチャレンジが可能になる。大電流やそれによる磁場は大きな電磁力を生み、機械構造体によって安全に保持す

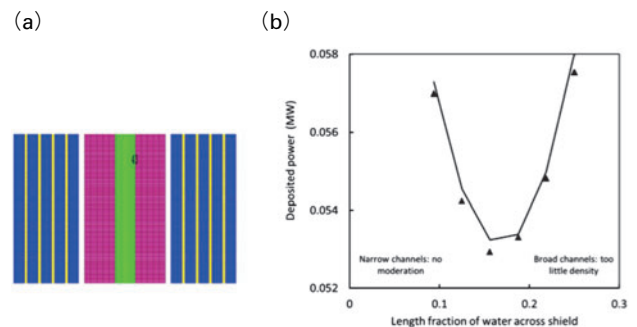


図5 (a)トカマクパイロットプラントのセンターコイルの断面：中心からタイロッド(緑)、次に高温超伝導合金(紫)、除熱のための空間(白)、遮蔽物質層(青)水冷層(黄)。(b)熱負荷の冷却層の厚み依存性。

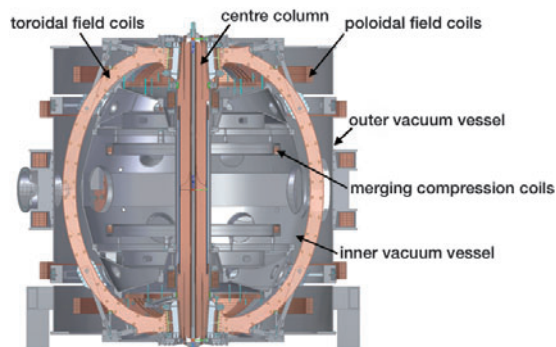


図6 ST40 トカマク装置の工学設計図。

る必要がある。この構造体を最小規模にするには、増大する電磁圧力を保持するには強靱な物質が必要とされる。炉をコンパクトにすることは、エネルギー密度を高めることを意味するので、いきすぎた温度や熱圧力を回避するため、冷却には特に注意を払う必要がある。

ST40 装置を建設、運転しながら、トカマクエネジー社は、綿密な高温超伝導マグネットの開発プログラムを進めている。小さなスケールのマグネットテスト装置を使って、ケーブルやジョイント、クエンチ防止のための高温超伝導技術開発を行っている。ST40 装置から学んだことは将来の高温超伝導を用いたトカマク装置に応用され、エネルギーブレイク・イーブンを越えて、トカマクの商業炉時代へ進む助けとなるものと思われる。

4.5 結論

急速に変化する世界にあって、核融合エネルギーは重要

であり、実用化は迅速なほどよい。トカマクは性能が保証されたコンセプトであり、過去のデータは球状トカマクが効率の面で最適な選択肢であることを示唆している。超伝導は核融合炉の定常運転に不可欠であり、高温超伝導がその性能でも、求められる冷却性能でも最も優れている。トカマクエネジー社の研究により、コンパクトな核融合炉が実現可能であることがわかってきた。新装置 ST40 の運転により、我々のこの分野に関する知識は増え、重要な工学的成果やノウハウが得られる。

今は、これまでの知識に基づいて核融合エネルギー開発を進め、新たな発展をとげてステップアップする時期である。問題は沢山の工学的チャレンジに小分けして取り組むことができ、これにより開発機運を維持し、漸進的な進歩を実現して資金援助を集めることができる。核融合コミュニティは、工業生産を容易にし、商業化のプロセスをスムーズにするモジュール的な解を得よう努めるべきである。
(翻訳：東京大学小野靖研究室)

参考文献

- [1] M. Keilhacker, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **357**, 415 (1999).
- [2] M. Gryaznevich *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 3972 (1998).
- [3] Alan Sykes *et al.*, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **42**, 3 (2014).
- [4] David A. Cardwell, *Handbook of Superconducting Materials*, CRC Press (2003), ISBN 9780750308984.
- [5] A.E. Costley *et al.*, *Nucl. Fusion* **55**, 033001 (2015).
- [6] A.E. Costley, *Nucl. Fusion* **56**, 066003 (2016).
- [7] C.G. Windsor *et al.*, *Nucl. Fusion* **55**, 023014 (2015).
- [8] J.E. Menard, T. Brown *et al.*, *Nucl. Fusion* **56**, 106023 (2016).

小特集 企業による核融合研究の最近の動向

5. ジェネラルフュージョン社における衝撃波磁化標的核融合開発

5. General Fusion Development Program for Acoustic Magnetized Target Fusion

LABERGE Michel

(原稿受付：2016年9月15日)

General Fusion (GF) 社は、衝撃波磁化標的核融合 (MTF) により核融合炉開発を進めているカナダ企業である。圧縮空気ピストンで音響圧力波を発生させて、液体金属中に生成したスフェロマックを圧縮し、核融合条件の達成をめざしている。本章では、GF 社によって開発された装置・技術や現在の取り組み状況を中心に解説する。

Keywords:

magnetized target fusion, conductive liner, compact torus injection, plasma compression

5.1 はじめに

ジェネラルフュージョン (General Fusion, 以下 GF) 社は、磁化標的核融合 (MTF: Magnetized Target Fusion) により温暖化ガスや放射性廃棄物のない発電方法の開発を行うカナダの民間企業である。2002年に設立され、これまでにベンチャーキャピタルやカナダ政府、民間企業などから、1億ドルの投資を得ている。

MTF は、磁場閉じ込め核融合と慣性核融合の中間に位置する。コンパクトトロイド (CT) プラズマによる標的を繰り返し生成し、導体ライナーの慣性により核融合条件まで圧縮するパルス方式である。MTF によりローソン条件 [1] を満たすためには、慣性核融合よりは低い 10^{26} ions/cm³ のピーク密度と MCF より短いおよそ 100 μ 秒の閉じ込め時間が必要とされる。この閉じ込め時間は、標的プラズマ中の不安定性の成長時間よりも短く、また圧縮装置に要求される電力も低減される。

MTF の研究は、1970年代に米国・Naval Research Laboratory が LINUS program においてその先駆的研究を開始したことに端を発する [2, 3]。液体金属ライナーは、従来の核融合研究において、排熱やトリチウム増殖、構造部材の中性子束 (からの保護) のために提案された。LINUS プロジェクトでは、CT プラズマ標的を生成し、これを液体金属中に形成された円筒状の真空の空洞に入射することが計画された。この空洞は、液体金属を回転させることで中央に生じる渦により形成される。プラズマ標的は、高速で駆動するヘリウム隔離弁により空間を圧潰することで圧縮される。この液体ライナーは、本質的に圧縮過程を繰り返し可能にするが、1970年代の技術では、熱的な寿命 (thermal lifetime) の間にライナーをプラズマの圧縮に十分な速度まで加速することができなかった。

5.2 General Fusion 社の衝撃波磁化標的核融合 (MTF)

GF 社のコンセプト [4, 5] は、LINUS のアイデアを元にしたものであるが、ミリ秒以上の時間で液体金属ライナーの圧力を上昇させ CT プラズマを圧縮するのではなく、音響圧力波により 200 μ 秒以下で圧縮する。これを実現する可能性のある装置構成の一例を図 1 に示す。これは、リチウムと鉛の共融液体合金 (Pb-16Li) で満たされた球状の容器、球状容器の一方または両方の極に設置されたプラズマ入射装置、そして、容器表面に径方向に配置された圧縮空気ピストンによって構成される。球殻内の液体金属は、中心軸上に、球状容器の両極まで伸びる空洞を伴う渦を形成するために回転している。ピストンは球状容器に衝撃を与え、中心に向かって収束する音響圧力波を形成する。重水素と三重水素により形成された CT プラズマは、球状に収束する圧力波が渦の境界面に達する直前に、渦の中心に向かって入射される。液体金属は、その導電性により、プラズマ中の磁場が漏れ出すのを防ぐ磁束保持容器としてはたらく。圧力波が空洞を圧潰すると、プラズマ標的は圧縮加熱され、核融合条件に達する。D-T 核融合反応は、3.5 MeV のアルファ粒子 (20%) と 14.1 MeV の中性子 (80%) としてエネルギーを解放する。このエネルギーは、液体金属ライナーに熱として吸収される。

圧縮空気ピストンは、圧縮された空気または蒸気により加速される。各ピストンは、高速駆動ブレーキ付きのサーボコントロールシステムを有し、ピストン毎の駆動タイミングを制御している。このようなサーボは LINUS が検討された 1970年代には存在しなかった。この圧縮空気ピストンを MTF ドライバーの動力源として用いることには 2つの利点がある。第一に、100 MJ に達する圧縮空気の蓄積エネルギーは、1 ジュールあたり 20円以下という低コストを容易

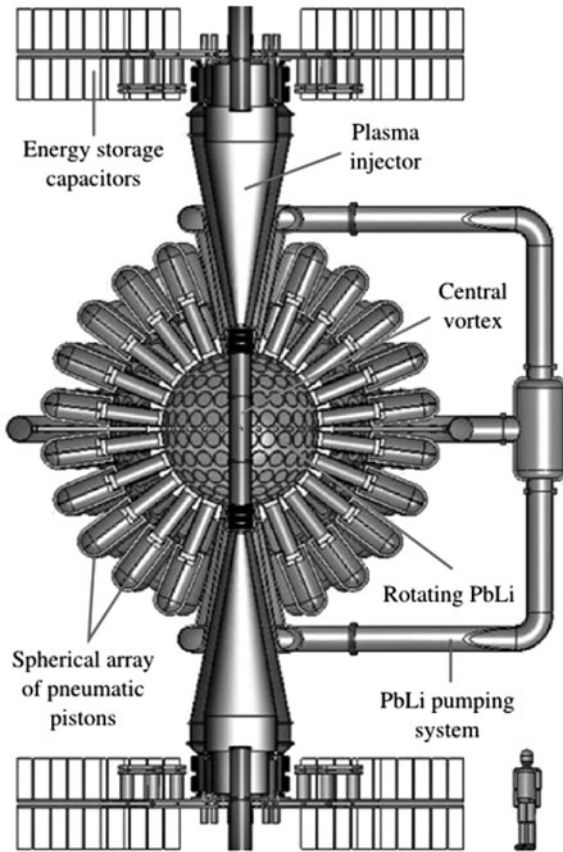


図1 MTFシステムのご概念図。

に実現する。これに対して、プラズマ生成に使用される高電圧キャパシタでは、1ジュールあたりのコストが200円を超える。第2に、炉の熱交換システムにおける動作ガス（蒸気、二酸化炭素、及びヘリウム）は、直接ピストン群の駆動に使用でき、電力を介したエネルギー変換による損失を削減できる。

ピストンの衝撃は、液体金属中を伝播する50–100 MJの音響パルスを生成する。秒速100 mで作動する鋼鉄製のピストンは、インパクト時に2 GPaの圧力を発生する。ピストンから液体金属へのパルス伝達効果は、音響インピーダンス比に依存する。鋼鉄と溶融鉛は同程度のインピーダンスを持つため、90%以上のエネルギーが鉛に伝達される。

個々のピストンで生成された圧力波は、球の中心へ伝播する1つの圧力波に集束する。球状に集束することで、圧力強度は半径に反比例して増大する ($P \propto 1/r$)。直径3 mの球において、パルスは700 μ 秒間で集束し、10 GPa以上に達する。CTプラズマを取り巻く磁束保持渦は100 μ 秒で圧潰し、CTを径方向に約1/10に圧縮する。これは、ピークにおいて10 TWの加熱に相当し、プラズマに10 MJのエネルギーを注入する。圧縮が断熱的だとすると、プラズマの密度は 10^{26} ions/ m^3 、温度は10 keVに上昇し、磁場強度は数百 Tに達する。

プラズマが最大に圧縮されている滞留時間はおおよそ10 μ 秒である。この間、プラズマの熱エネルギー閉じ込め時間は約10 μ 秒であり、アルファ加熱はおおよそ2.8 TW、ほぼ制動放射による熱損失は1.58 TWとなる。アルファ粒子

の熱化時間は1 μ 秒で、滞留時間よりは十分に短く、アルファ加熱に代わり圧縮加熱により点火が実現する。核融合燃焼は、圧力波が反射して減圧され燃料が薄まるまで継続する。

D-T核融合反応によって生じた中性子はプラズマを透過し、液体金属ライナーで減速される。中性子はそのエネルギーをライナーに伝達し、リチウムと反応してトリチウムを生成する。トリチウム増殖率はMCNPシミュレーション[6]によると1.5であり、連続運転に必要な燃料を供給できる。このトリチウム増殖は、発熱反応である $6\text{Li} \rightarrow \text{T} + \text{He}$ により追加熱を生じる。

液体金属を再生可能な第一壁として使用することは、炉設計において多くの利点がある。非常に大きな熱負荷を吸収でき、また、中性子やガンマ線曝露から炉の構造物を遮蔽するブランケットとして機能する。鉛は鋼鉄と音響インピーダンスがよく一致し、大きな質量はCTの圧縮に必要な慣性を与える。Liは中性子を抑制、吸収しトリチウムを増殖するのに必要である。液体金属ライナーは発電のために熱をタービンへ伝達するためにも用いられる。熱交換システムを通過後、冷却された液体金属は容器に戻され、球の軸上に円筒渦を形成するため接線方向に入射される。

流体力学的不安定性は、CTの対称的な圧縮を妨げかねない。これらの不安定性には、初期渦の境界面に生じる波によって発生するRichtmyer-Meshkov (R-M) と Rayleigh-Taylor (R-T) 不安定性が含まれる[7]。この境界面は、プラズマ圧力が最大圧縮に近い状態で壁を減速しない限り、R-Tに対して安定である。7.5 μ 秒の減速期間の間、R-T不安定性は15倍に増幅する[8]。したがって、初期の壁表面の変調は1%以内である必要がある。

商業応用においては、このプロセスが1 Hzで繰り返される必要がある。このサイズの核融合炉を1 Hzで繰り返し運転することで100 MWの出力を得ることができる。

5.3 研究開発プログラム

この概念設計は、未開発の技術に強く依拠している。したがってGF社は、このMTFアプローチの実現可能性を証明するため、集中的な研究プログラムを遂行している。商業化が検討される前に、GF社の概念炉の主要なシステム開発が行われなければならない。これには、音響ドライバーシステム、プラズマ入射装置、そしてプラズマ圧縮システムが含まれる。この開発の主要な目標は以下の通りである：

1. 基盤となるシステムの開発を推進するため、構成システムをリアクターサイズで建設、試験；
2. MTF圧縮過程での磁化プラズマの振る舞いを検証するための実験的なCT圧縮；
3. さらなるシステムの最適化のため、実験に適合したシミュレーションモデルやツールの開発

プラズマ入射装置は、プラズマ標的を生成し、熱エネルギー閉じ込め時間である100 μ 秒以上の間、密度 10^{23} / m^3 、温度100 eVのプラズマを閉じ込める必要がある。音響ドライバーは、インパクト時刻を ± 10 μ 秒以内に制御しながら

ら、ピストンを50–100 m/sに加速でき、さらに繰り返される衝撃ストレスに耐えなければならない。最も重要なのは、プラズマが金属壁とともに 10^{26} m^{-3} の密度、10 keVの温度まで、対称性を破る不安定性を生じずに圧縮できることを実証することである。

これらの開発事項は、コンピュータシミュレーションにより支援される。MTFは一般的なプラズマ物理学の理論により記述されるが、現行の計算モデルはMCFやICFを想定している。MTFは複合的であり、両者のシミュレーションの特徴を必要とする。したがって、物理的な正確さを再現するツールを製作するため、ソフトウェアの開発も進められている。

5.4 音響ドライバーシステム

概念炉における圧力波は、球状容器に径方向に配置された圧搾ピストン群により形成される。各ピストンは、円筒内腔を加速され端部に取り付けられた浮遊鉄床に衝撃を加えるハンマーピストンにより構成される(図2)。鉄床は球状容器壁内で、ハンマーと液体金属に挟まれており、その内壁は液体金属に接している。

ハンマーピストンと鉄床は円筒状で硬化した工具鋼で作られている。鉄床のインパクトの際に、わずかに液体金属側へ変位し元の位置に戻る。ハンマーピストンの加速のため、ハンマーと鉄床の間の空隙は真空排気され、圧縮空気がピストンハンマーの背後から入射される。光学エンコーダがハンマーピストンの位置を測定するために用いられる。この位置情報は、サーボ制御システムへ送られ、ピエゾ駆動摩擦ブレーキがインパクトタイミングを $10 \mu\text{s}$ 以内の精度で制御する。

このドライバーの、熱エネルギーからピストンの運動エネルギーへの変換効率はおおよそ33%である。良質な鋼鉄は3 GPaに達する圧力下でも使用でき、したがって、1つのピストンが50–100 MJのエネルギーを供給できる。これらのデバイスの信頼性を実証するため、GF社では多くのフルスケールのピストンを製作しテストした。試験は温度がいかに上昇するか、液体金属との接触、鉄床表面でのキャビテーションがピストンの耐久性に与える影響を測定するために続けられた。

5.4.1 小型球殻(Mini-Sphere)

Mini-Sphereは、直径1 mの溶融鉛で満たされた球殻であり(図3)、液体金属渦圧縮システムの縮小試作機である[9]。これは、球殻の様々な部材の構造を検証し、複数のピストンが稼働した際の装置の機械的健全性を評価すると

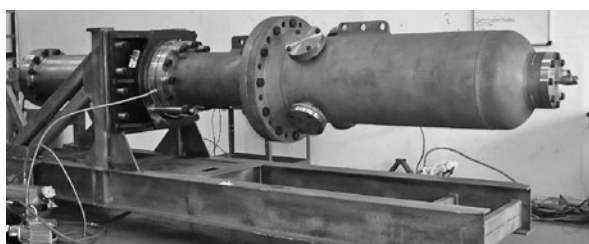


図2 単一ピストンの写真。

ともに、渦の物理過程とピストンの同期を試験するために製作された。

鉛ポンプ・貯蔵システムは15トン溶融鉛を貯蔵でき、100 kg/sの質量流量を保持できる25 kWのMHDポンプを有する。液体鉛は球殻の内部へ排出され、直径およそ78 mmの円筒状の渦を球の中心に形成する。

7つのピストンが2つのリング状にアレンジされ、合計14のピストンが球殻を囲んでいる。ハンマーピストンの同期された鉄床への衝撃は、液体鉛を進行する音響波を形成し、渦を圧潰する。渦の内壁は様々な運転条件において、対称的に圧潰していることが観測された。

5.5 プラズマ入射装置系

GF社におけるプラズマ入射装置開発プログラムでは、実験用の小型装置とリアクタ用の大型装置の開発が平行に進められている。いずれの入射装置も、同軸ヘリシティ入射(CHI)[10]により液体金属渦へ入射されるCTを生成する。MTFにおけるプラズマ標的は、圧縮時に磁場コイルのようなプラズマ中心を貫く支持構造を持たないため、自己組織化磁場閉じ込めプラズマである必要があり[11]、spheromakかFRCが使用可能である。コンパクトトーラスの厳密な定義からは外れるが、CTの軸上に液状の導電体軸を持つことができる球状トカマクも対象となりうる。

5.5.1 大型入射装置

GF社において開発されている大型の入射装置[9, 12, 13]は、RACE[14]やCTIX[15]、MARAUDER[16]のような2段式の装置である。それらは、コンパクトトーラスを同軸ヘリシティ入射によって生成し、テーパのついた円錐部を通過して加速されることで密度と磁場強度が増大する(図4)。各入射装置は、全長5–8 m、高アスペクト比($R/r=4.4$)スフェロマックが最小の $\lambda=9 \text{ m}^{-1}$ で生成される拡張部で直径2 mである。加速部は、射出口で約0.4 mまで絞られる。

CTを生成するため、一組の直流ソレノイドが電極間に径方向磁場(stuffing flux)を形成する。重水素またはヘリウムのパフが、50個の円環状に配置された高速駆動ガスバルブによって生成領域に噴射される。0.5 MJのキャパシタ

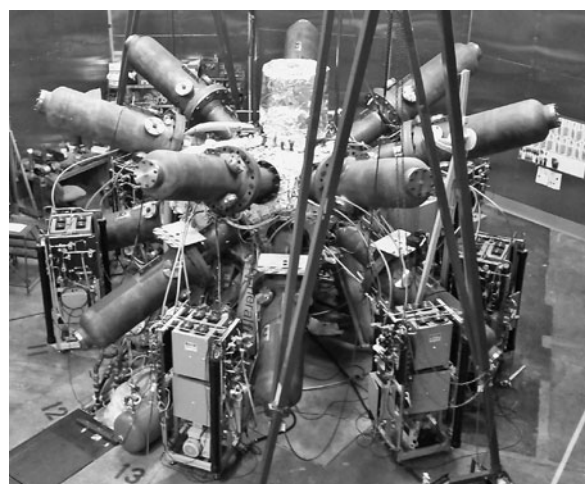


図3 小型球殻(Mini-Sphere)。

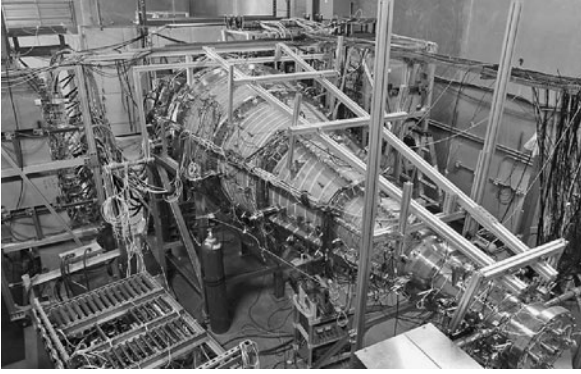


図4 大型プラズマ入射装置の写真。

バンク (23 modules at 22 kV) が、ガスを電離するために電極間で放電される。プラズマ中を流れる電流がトロイダル磁場を形成し、磁気圧の勾配がプラズマを軸方向に加速するローレンツ力 ($F_z = j_R B_\phi$) を生じる。プラズマが前方に進むと生成磁場と作用し、プラズマが拘束されなくなるまで、磁力線をひずませ引き伸ばす。ダイナモを無視すると、生成されたCTは、電流によるトロイダル磁場を持ち、stuffing flux との相互作用によりポロイダル磁場を生じる。生成後のプラズマパラメータは、容器壁のゲッターリングなしで、大半径が $R=1\text{ m}$ 、密度 $n=10^{21}\text{ m}^{-3}$ 、ポロイダル磁場 $B_{\text{pol}}=0.4\text{ T}$ 、また 温度 $T_e = T_i = 60\text{ eV}$ である。

2段目の1.13 MJ キャパシタバンク (24 modules at 44 kV) は、CTを円錐ガンへ加速するために用いられる。CTは秒速100 kmで移送され、径方向に約1/5まで圧縮され、密度、温度、磁場強度を増大する。これは、プラズマが完全電離し、線スペクトル放射が最小である状態を維持する。加速後、CTは密度 $n=10^{23}\text{ m}^{-3}$ 、温度 $T_e = T_i = 200\text{ eV}$ 、熱閉じ込め時間 $100\text{ }\mu\text{s}$ 、磁束密度 $B=5\text{ T}$ 、大半径0.2 mとなる。

過去にCTを端部のテーパ領域まで加速する実験を行なったが、トロイダル押圧磁場はCT構造内に拡散し、磁気面を壊して閉じ込め性能を劣化させた。現在設計中の第3世代の入射装置は、ガンのテーパ比にキャパシタバンクからの電流が釣り合うようにデザインされている。

プラズマ入射装置は、ミルノフプローブ、駆動回路のロゴスキーコイル、 $1.4\text{ J} \cdot 532\text{ nm}$ レーザーによる単点トムソン散乱、 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ ダイオードレーザーによるファイバー干渉計、イオンドップラー分光、真空紫外分光器、可視およびX線ダイオード、中性子シンチレータ、リチウム-ニオブ酸ポロメータなどの多数の計測器が取り付けられている。さらにファイバーバンドル経由でプラズマ像を直接観測するため高速度カメラ (Phantom V711) も用いられている。

グランドループを避けるため、通信規格のプラスチックファイバーが、実験用の制御信号やトリガ信号と同様に、計測データ信号をスクリーン室へ伝送するのに使用されている。計測信号はGF社でデザインされた光学入力デジタルボードに入力される。1ショットあたり100 MBのデータが生成される。

5.5.2 小型入射装置

小型の入射装置であるMRT (Magnetized Ring Test) とSPECTOR (SPhErical Compact TORoid) は、圧縮過程におけるプラズマ安定性を、移設可能な設備内で明らかにする目的で開発された[17]。HIT[18]、NSTX[19]、SSPX[20]、そしてHIST[21]と同様に、これらの装置では、CTは磁束保持容器内で直接生成される。重水素ガスは底部に取り付けられた8つの圧電パフバルブによって装置内に入射される。20 kVにまで帯電した3000 μF のキャパシタバンクの放電とともにプラズマが生成され、磁束保持容器内にトロイダル磁場が入射される。初期封入磁束は10–30 mWbである。CHIが一旦終了すると、プラズマ内の磁場は素早く再結合しCTを形成する。

固体アルミニウム容器がCTの真空容器と磁束保持容器として用いられる。MRTでは、磁束保持容器は0.15 m径の円筒で、CTの大半径は0.105 mである。一方SPECTORは、0.19 m径の球形でCT大半径は0.12 mである(図5参照)。両者の大半径は同程度であるが、プラズマ体積はSPECTORの方が3倍大きくなる。いずれも、プラズマが断熱圧縮されれば、核融合反応を起こすには十分な大きさであるが、正味のエネルギー利得を得るには不十分である。

小型の入射装置内のCT密度は $5 \times 10^{20} - 10^{21}\text{ m}^{-3}$ である。MRTでは、電子温度が100–200 eVであり、熱的な寿

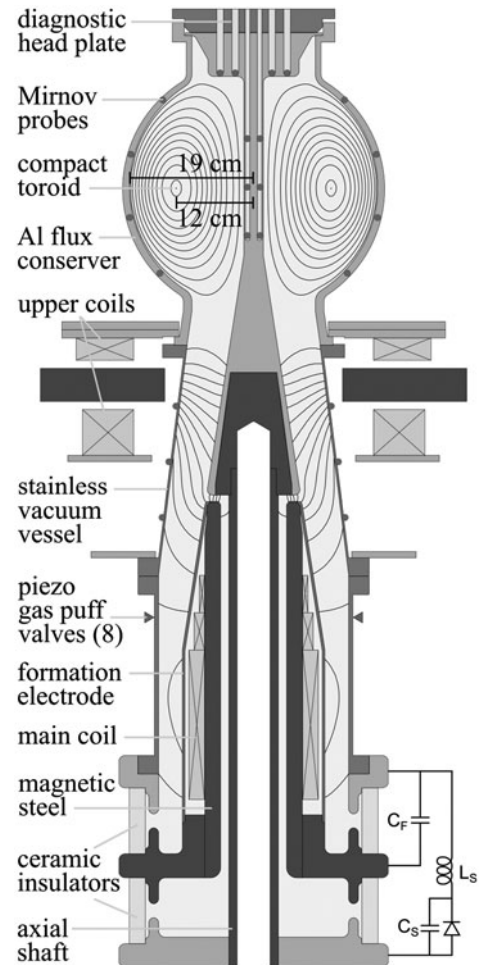


図5 SPECTOR プラズマ入射装置図。

命は 50μ 秒、磁場の寿命は 500μ 秒である。また一方、SPECTOR の場合、電子温度は $300-400$ eV、熱的寿命は 100μ 秒、磁場の寿命は $1,200 \mu$ 秒である。温度は小型プラズマ装置としては高く、リチウムゲッターリングを含む壁コンディショニングが奏功していると考えている。

MRT 装置は、ミルノフプローブ、ロゴスキーコイル、単点トムソン散乱、光ファイバーで構成された干渉計、イオンドップラー分光装置、VUV 分光計、可視および X 線光ダイオード、中性子シンチレータ、リチウムニオブ酸ポロメータなど、プラズマ入射装置として一般的な計測系を備えている。さらに、我々は CCD カメラを開発した。これは、P46 蛍光体を塗布しさらに 15 eV 以上をカットするため 50 nm のアルミニウムを上塗りした窓へ、X 線を 1 mm 径のピンホールから取り入れ、撮像できるものである。

SPECTOR 装置では多くの新たな計測法が開発された。トムソン散乱系を 6 点アレイへと改良した。また、CT のトロイダル磁場によるファラデー回転を計測するため 4 弦偏光計を使用している。

5.6 プラズマ圧縮システム

急激な収縮場における CT の振る舞いは、MTF が核融合条件まで達成できるかを定める上で、問題となる。磁気エネルギーや熱エネルギーが保存しながらプラズマは断熱圧縮するのか、また不安定性によってエネルギー損失が起こるのか、わかっていない。プラズマの振る舞いを調べるため、GF 社は液体金属の取り扱いを避けることができる爆発駆動プラズマ圧縮システムを開発した。

これら PCS (Plasma Compression -Small) 試験用 CT プラズマを生成するため小型プラズマ入射装置が利用される。無圧縮ショットと同じように、CT は固体アルミニウム磁束保持容器内で生成される。ただしこの実験においては、磁束保持容器には爆発物が巻き付けられ、 1.5 km/s の速度で駆動することになる。爆発物は外壁に設置され、中心軸に向かって外壁を押し縮める。これによって熱的な寿命より早く、圧力衝撃波の伝達時間と同程度と見積もられる 100μ 秒間でプラズマが圧縮される。磁束保持容器の軌跡は、実験およびシミュレーションによって求められ、爆発ガスの混入ならびにそれに伴う急激な温度低下を阻止するようにしている。中心シャフトの形状は、CT がシャフトと移動壁との間で、最大限に押しつぶされるように決められる。プラズマ計測系は実験終了時まで破壊されないように注意深く設計されている。このようにして CT の安定性と圧縮加熱を調べている。

PCS システムはプラズマ入射装置、そのキャパシタバンク、さらには計測系で構成される。これらの全ては、輸送と設置を容易にするため標準サイズの船積みコンテナ内にまとめられている。PCS 試験は爆発圧縮試験のために人里離れた実験室外の区域で行われる。磁束保持容器とそれに取り付けられた計測系を除き、プラズマ入射装置などそれ以外の全ての部分は、強化容器の爆破遮蔽体の中で十分に保護され、ほぼ全てが数多くの圧縮試験に再利用可能である。

執筆時の現在、14 回の圧縮実験がこれまでになされている。全ての爆発実験で、磁束保持容器が内部シャフトに衝突するまでの実験データを取得している。これらの実験結果により、プラズマベータの上昇、移動壁との様々な相互作用、圧縮中の外部磁場制御、などの効果を定量化できる。商用炉の設計に爆発物を利用できないのは明らかであるが、圧縮過程における磁化プラズマの振る舞いを確認するには比較的迅速で手頃な方法と言える。継続的に行われる我々の実験は、設計や技術の改良をもたらすこの素早い展開からの恩恵を受けている。

5.7 数値シミュレーション

GF 社での研究は、多くのシミュレーションとシミュレーションチームによって開発されたモデルの支援を受けている。CT 生成、加速、および圧縮の電磁流体力学 (MHD) シミュレーションは主として VAC (Versatile Advection Code: フリーの MHD コード) [22] を用いて行っている。VAC は保存型の衝撃波捕獲コードで 2 次元および 3 次元の一般座標系において単一流体 MHD 方程式系を解くことができる。我々が加えた主たる修正は、外部回路との連成解析、マルチブロック構造格子、磁場に平行な非等方熱伝導、そして移動メッシュ、などである。

我々が精力的に利用している他の MHD コードは NIMROD (Non-Ideal Mhd with Rotation-Open Discussion) [23] である。NIMROD は、ポロイダル二次元平面におけるスペクトル有限要素離散化法、トロイダル方向の有限フーリエ展開、さらに陰的時間離散化法、などを用いて拡張 MHD 方程式を解く。また、二流体効果、運動論効果、ホール項のような様々な拡張物理を盛り込んでいる。NIMROD は、線形化された方程式系や、我々は現在、生成・発展シミュレーションや線形安定解析に NIMROD を用いている。移動メッシュ機能については現在開発中である。

MHD シミュレーションは、Corsica [24] や DCON [25] など複数の平衡・安定性ソルバーの支援を受けている。これらは、2 次元 Grad-Shafranov 方程式を解き、与えられた真空容器構造、外部印加磁場、電流、および圧力分布と矛盾のない理想 MHD 平衡を得る。MHD シミュレーションの初期条件は Grad-Shafranov ソルバーを用いてしばしば作られる。MHD 結果の安定性は理想および抵抗性安定性ソルバーで二重チェックされる。

プラズマシミュレーションに加えて、音波や圧縮のモデル化のため流体力学シミュレーションも行う。LS-DYNA はマルチフィジックス (複数の理論枠組み) や、爆発物と構造物の相互作用が含まれる動的有限要素コードである。電磁気的影響や爆発的加速の影響の下、真空容器壁の軌跡をモデル化するのに用いられる。最後に OpenFOAM® (Open-source Field Operation And Manipulation) は、流体力学ソルバーのライブラリーである。渦圧縮の流体力学と同様にピストンの構造力学をモデル化するために利用される。

5.8 実証炉をめざして

GF 社は実証炉をめざして研究を進めている。実物大の

サブシステムが開発・製造されれば、実証炉は建設されるであろう。実証炉は単パルス装置であり、純重水素燃料を用いることで一日数回運転することができる。試験期間終了に向かって、点火を実証するために燃料は D-T へと切り替えられる。実証炉の主目的は、運転領域の最適化と単パルスでのエネルギーバランスの計測である。信頼性確立の後、次期炉ではプラントシステムのバランスや送電網への電力供給を含む研究が行われる。

(翻訳：浅井朋彦)

参考文献

- [1] J.D. Lawson, "Some Criteria for a Power Producing Thermonuclear Reactor", Proc. Physical Society Section B, **70**, No. 1 (1957).
- [2] D. Dudzick, "Nucleonic aspects of the LINUS imploding blanket", *ANS Meeting on the Technology of Controlled Thermonuclear Fusion*, 9 May 1978.
- [3] R.L. Miller and R.A. Krakowski, "Assessment of the slowly-imploding liner (LINUS) fusion reactor concept", *4th ANS Topical Meeting on the Technology of Controlled Nuclear Fusion*, 14-17 October 1980.
- [4] M. Laberge, *J. Fusion Energy* **27**, 65 (2008).
- [5] M. Laberge, *J. Fusion Energy* **28**, 179 (2008).
- [6] X-5 Monte Carlo Team, "MCNP - Version 5, Vol. I: Overview and Theory", LA-UR-03-1987 (2003).
- [7] V. Suponitsky *et al.*, *Comp. Fluids* **89**, 1 (2014).
- [8] K. Fowler, LLNL Report UCRL-ID-135551 (1999).
- [9] M. Laberge *et al.*, *IEEE 25th Symposium on Fusion Engineering (SOFE)*, 2013.
- [10] M. Ono *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **44** 393 (1980).
- [11] P. M. Bellan, *Spheromaks: A practical Application of MHD Dynamos and Plasma Self-Organization* (Imperial College Press, 2000).
- [12] S. Howard *et al.*, *J. Fusion Energy* **28**, 156 (2008).
- [13] M. Delage *et al.*, *33rd Annual Conference of the Canadian Nuclear Society Proceedings*, 2012.
- [14] J.H. Hammer *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2843 (1988).
- [15] D.Q. Hwang *et al.*, *J. Fusion Energy* **26**, 81 (2007).
- [16] J.H. Degnan *et al.*, *Phys. Fluids* **B5**, 2938 (1993).
- [17] A. Froese and *et al.*, "Spheromak Compression Experiments at General Fusion", *19th Pacific Basin Nuclear Conference Proceedings*, pp. PBNC2014-234, 2014.
- [18] B.A. Nelson *et al.*, *Phys. Plasmas* **2**, 2337 (1995).
- [19] R. Raman *et al.*, *Nucl. Fusion* **41**, 1081 (2001).
- [20] E.B. Hooper *et al.*, *Nucl. Fusion* **47**, 1064 (2007).
- [21] M. Nagata *et al.*, *Phys. Plasmas* **10**, 2932 (2003).
- [22] G. Tóth, *Astrophys. Lett. Commun.* **34**, 471 (1996).
- [23] C.R. Sovinec *et al.*, *J. Comp. Phys.* **195**, 355 (2004).
- [24] J.A. Crotinger *et al.*, LLNL Report UCRL-ID-126284 (1997).
- [25] A.H. Glasser *et al.*, *Phys. Fluids* **18**, 875 (1975).

小特集 企業による核融合研究の最近の動向

6. 高繰り返しレーザー核融合実証に向けた研究開発

6. R & D Toward Highly Repetitive Laser Fusion Demonstration

佐藤 伸弘, 松門 宏治, 渡利 威士, 関根 尊史, 竹内 康樹, 川嶋 利幸

SATO H Nakahiro, MATSUKADO Koji, WATARI Takeshi, SEKINE Takashi,

TAKEUCHI Yasuki and KAWASHIMA Toshiyuki

浜松ホトニクス株式会社中央研究所産業開発研究センター大出力レーザー開発グループ

(原稿受付: 2016年10月17日)

レーザー核融合研究を行うためのレーザー、ターゲット、計測などの要素技術を統合・実用化して当社独自の連続中性子発生法の研究や光産業創成大学院大学、トヨタ自動車株式会社らと共同でレーザー核融合に関する研究を行っている。本章では、半導体レーザー技術による高繰り返し超高強度レーザーによる連続中性子生成の実証研究を紹介し、学術研究分野のみならず、エネルギー分野や多くの産業分野への応用について展望する。

Keywords:

laser fusion, neutron generation, ultra-intense laser, diode pumped solid state laser, target fabrication, target injection

6.1 はじめに

核融合は、環境負荷が少ない永遠のエネルギー源として世界中で期待されているが、道半ばの研究段階である。核融合の方式は、大別して、磁場閉じ込め方式と慣性閉じ込め方式があり、慣性閉じ込め方式であるレーザー核融合の実証研究を行っている代表的な研究機関は、米ではNIF (National Ignition Facility)とロチェスター大学、仏ではLMJ (Laser Mega Joule)、日本では大阪大学が挙げられる。

直接照射による慣性閉じ込め方式の研究を行っている大阪大学では、1990年頃、大出力レーザー装置GX IIを用いて照射したプラズマコアにおいて、温度1億度[1]、固体密度の600倍[2]を達成し、世界のレーザー核融合研究を牽引してきた。2009年には超高強度レーザー装置(LFEX) 1ビームが完成、2014年に4ビームまで拡張されて、高速点火方式の実証研究の新たな進展が期待される[3]。間接照射による慣性閉じ込め方式の研究を行っているNIFでは、2013年に核融合中性子のエネルギーがターゲット投入エネルギーより大きいという観測結果が得られ(科学的ブレイクイーブンと呼ばれる)[4]、発電に向けた原理実証が大きく進展した。

図1にレーザー核融合発電におけるエネルギーサイクルを示す。レーザー装置に電気が入力されると超高強度のレーザー光がターゲット(燃料ペレット)に入射し、多くの核融合中性子が生成される。そして、この中性子エネルギーが変換された電気出力の一部をレーザー核融合発電装置の運用のための電気として再利用する。この電気出力から電気入力を差し引いた余剰の電力を人々の活動のために使うことができるがゆえに、レーザー技術やターゲット技術

の改善が、エネルギー損失を少なくして、レーザー核融合発電を実証へと導くことになる。

浜松ホトニクスは、1997年より半導体レーザー(laser diode, LD)モジュールを用いた大出力レーザー装置を大阪大学等と共同して開発し[5, 6]、2007年から光産業創成大学院大学、トヨタ自動車らと共同で小型高繰り返しレーザー核融合の実証研究を行ってきた[7-9]。現在は、前述の研究機関に加えて、産業への技術展開を含めた共同研究へと進展している[10]。レーザー核融合発電の実用化に向けて、高繰り返しレーザー装置やインジェクション装置などを開発して、連続して飛翔するターゲットから、D-D核融合中性子を生成することに成功した[11, 12]。

本章では、高出力LDによる超高強度レーザー、燃料ペレット周りの高精度ターゲット、核融合プラズマが生成する高エネルギー粒子の計測技術の開発について現状を述べ、これらを統合したレーザー核融合中性子の連続生成の実証について紹介し、今後の産業応用等について展望する。

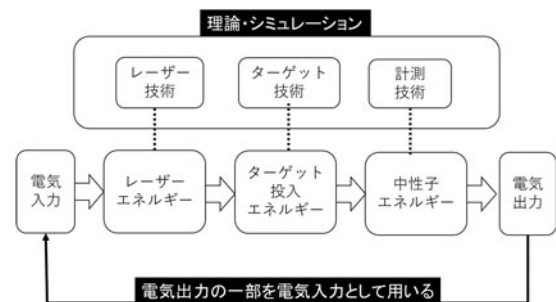


図1 レーザー核融合発電におけるエネルギーサイクル。

Central Research Laboratory, HAMAMATSU PHOTONICS K.K., Hamamatsu, Shizuoka 431-1202, Japan

corresponding author's e-mail: naka@crl.hpk.co.jp

6.2 レーザー核融合に必須の要素技術開発

6.2.1 大出力レーザー技術

NIF, 大阪大学などのレーザー核融合研究機関においては, 数10kJ から 2 MJ のエネルギー規模のランプ光源の大型レーザー装置が構築され, 一日数ショットの核融合実証研究が行われてきている[4, 13]. 一方で, 昨今の半導体レーザー (以下, LD) の性能は著しく向上しており, 高ビーム品質, 長寿命といった課題も解決されつつある. アレイ化して配列することにより連続で300 Wを超える発振出力を達成しているが, 核融合発電のためのレーザー装置として用いるには, 更なるエネルギー増強が必須である. 電気・光変換効率に関しては70%を超えてきたので, ランプ光源のレーザー装置に比べて熱負荷が1/10以下に軽減され, 繰り返し周波数が著しく向上している. 我々はこの特長を生かして高繰り返しレーザーによる実証実験を行っている.

繰り返し中性子発生実証のためのレーザー装置として, LD光源を用いたガラススラブレザー KURE-I (図2) とチタンサファイア発振器を搭載した超高強度フェムト秒レーザー MATSU-I (図3) を, 図4のように組み合わせ, 全固体の超高強度レーザーシステムを構成した. KURE-I は基本波長 1053 nm において, パルスエネルギー 21.3 J, パ



図2 LD 励起ガラススラブレザー (KURE-1).



図3 超高強度フェムト秒レーザー (MATSU-1).

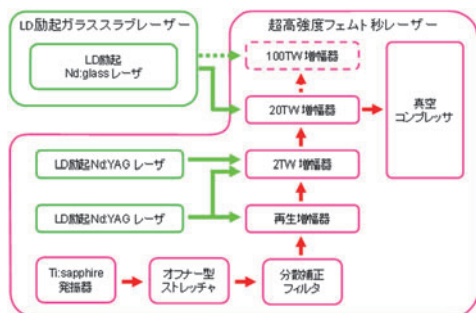


図4 20TW レーザー構成.

ルス幅 8.9 ns, パルス繰り返し周波数 10 Hz の性能を達成しており, CLBO 結晶 ($\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$) を用いて 2 倍波に変換することで, パルスエネルギー 12 J を得た[14]. この KURE-I を励起光源として用い, チャープパルス増幅[15-18]の導入によりパルス幅を 60 fs 以下に圧縮することで 20 TW のピーク出力を達成し, さらに 100 TW へと増強を計画している[19]. レーザー核融合研究のためにはエネルギー増強の必要はあるが, 2008年の導入から, 安定に稼働している.

6.2.2 核融合燃料・ターゲット技術

多くのレーザー光が同時に集光する位置で高温かつ高密度の爆縮コアを形成するために, 高精度をめざした製作技術とレーザー集光点にコントロールするインジェクション技術が密接に関わりながら, 開発を進めていく必要がある. ターゲット開発は各々の研究機関で行われているが, 研究理論に基づいたターゲットの全ての構成部品を研究機関で製作することは難しく, 現状では General Atomics 社により供給されていることが多い[20].

レーザー核融合用ターゲットの燃料容器には, 真球性が高く均一の壁厚を有する球形カプセルが要求されている. レーザーエネルギーや照射条件で球の直径と壁厚は研究機関ごとに独自の寸法で, 素材は高分子やガラスなど多岐にわたり, 高効率の爆縮を達成するために多層構造が要求されている. 現状, コーティングにより多層構造が可能な GDP (Glow Discharge Polymer) カプセルが多く用いられているが, 我々はエマルション法による高分子カプセルの製作技術[21, 22]を改善し, 高精度化では直径の標準偏差は直径に対して, 最近では 0.1% 程度, 量産性では 1 分当たり 40~50 個の製作が達成され, 多層カプセルの要求に対しては, 技術開発している段階である[23, 24]. また, 核融合科学研究所の須藤滋教授からトレーサー内蔵ペレットの製作を依頼があり, レーザー核融合のターゲット製作技術が磁場核融合のペレットとしても利用されている[25].

繰り返し中性子発生実証のためのターゲットとして, 図5の SEM 写真に示す直径が約 280 nm の重水素化ポリスチレン中実球を用いた. 固体粒子の球直径は 100~700 nm の範囲で製作可能で, 図5から粒度分布の拡がりは極めて小さいことがわかる. この固体粒子群に 20 TW のレーザーを照射して, クーロン爆発により高エネルギーの重水素イオンが発生し, このイオンを重水素化合物が含まれた構造体で受けることで D-D のビーム核融合反応による中性子が生成される. 重水素イオンの最大エネルギーはターゲット粒子の直径に依存しているため, PIC シミュレーションを

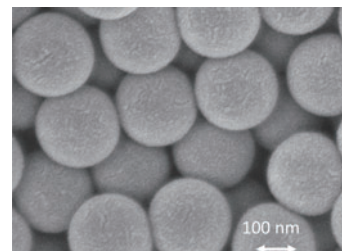


図5 重水素化ポリスチレン固体粒子ターゲット.

用いて、我々のレーザー強度において最高効率の中性子生成が達成できる粒子直径を試算した。図6に示すように、粒子直径300 nmでエネルギー2 MeV以上の重水素イオンが最も多く生成されるという結果が得られ、この直径で固体粒子を製作した。このターゲットはレーザーの入射タイミングに合わせ、ガス流と一緒にチャンバー内に噴射される。

6.2.3 光・高エネルギー粒子計測技術

レーザー核融合研究の進展のためには、動作検証や校正実験を日常的に行うことで、疑念がなく正確な事実を測ることができる信頼性の高い計測により、理論(推測)と現象(事実)の整合性をとることが重要である。核融合プラズマ中には多くのイオンや電子が存在し、また、大量の中性子や γ 線が生成されるので、これらの時空間的な分布や変動を測って現象をとらえるために、多くの研究機関では研究目的に合わせて計測器類を核融合反応容器の周りに配置している。

繰り返し中性子発生実証においては、生成される高エネルギーイオンや中性子を測定するために、図7のように計測システムなどを設置している。イオン計測用途には、10個のシンチレーション検出器と磁石で構成するMT-KADシステム(Multi-channel TOF system with Kinetic energy Analyzing Device)[26]をレーザー照射位置から1.8 m離れた位置に設置した。この計測システムは、磁石による磁場のイオン軌道によるイオンの比電荷の同定、レーザー照射時刻とイオン検出時刻のTime-Of-Flightによるイオンエネルギースペクトルを同時に観測することができる。中性子計測用途には、 γ 線信号とD-D反応による2.45 MeVの中性子信号をTime-Of-Flightにより弁別するために、当社製の2インチ光電子増倍管とプラスチックシンチレータで構成された高い時間応答性能の中性子検出器を設置している。

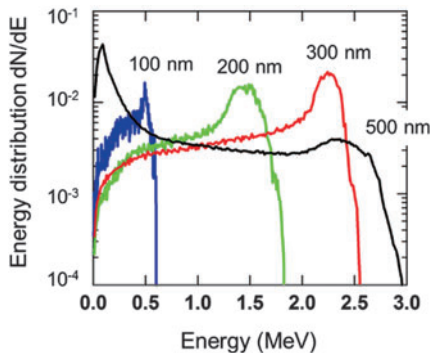


図6 PICシミュレーション結果.

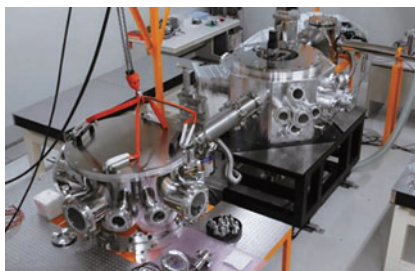


図7 核融合反応容器と計測器.

また、必要に応じてストリークカメラやX線カメラの設置も検討している。

6.3 レーザー核融合中性子の連続発生の実証

2000年頃には、多くの研究者が重水素あるいは重水素化メタンのガスクラスターに超高強度レーザーを照射して、D-D核融合による中性子生成の研究がなされてきた[27,28]が、我々は前節のように種々の要素技術開発を行い、図6の結果に基づいて、直径280 nmの重水素化ポリスチレン固体粒子を噴射して、 $2 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ の集光強度でレーザー照射し、連続で繰り返しの中性子生成実証を試みた。この時の固体粒子の数密度は 10^9 cm^{-3} 程度であった。イオン計測において、図8に示すように最大で1.5 MeV程度の重水素イオンが観測され、高強度レーザー照射による固体粒子のクーロン爆発が起きていることが確認されたので、次のステップとして、レーザー集光位置を含む噴射ノズル近傍を、重水素化ポリスチレンでコーティングした筒状の構造物で覆った。この覆いに生成された高エネルギー重水素イオンが衝突することで、D-D中性子の生成効率が飛躍的に高まる。図9に1回のレーザー照射で得られた中性子検出器の時間波形を示す。 γ 線信号は照射直後に大きくなって減衰し、D-D中性子のエネルギー2.45 MeVに相当する時刻に中性子信号は観測され、Time-of-flightによる信号弁別ができています。我々は、1 Hzで連続100回のレーザー照射を行い、中性子発生数を実測した。図10に示した結果によれば、平均で 4.5×10^4 個、最大 10^5 個の中性子を98%の頻度で観測した[29]。2%の頻度で中子が観測されなかったのは統計上の問題である。レーザー

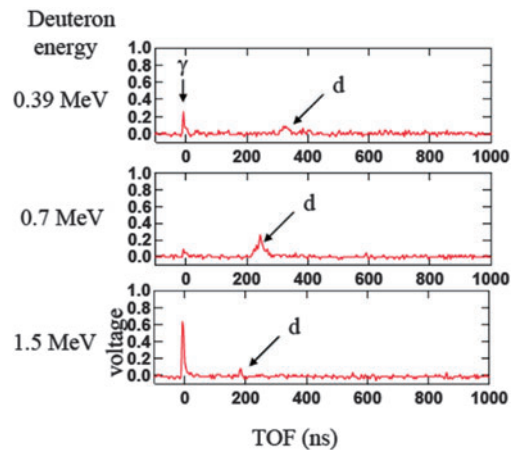


図8 重水素イオンの計測結果.

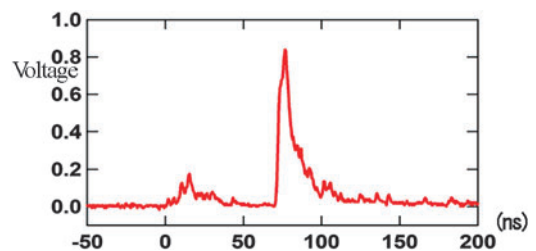


図9 X線信号と中性子信号の弁別.

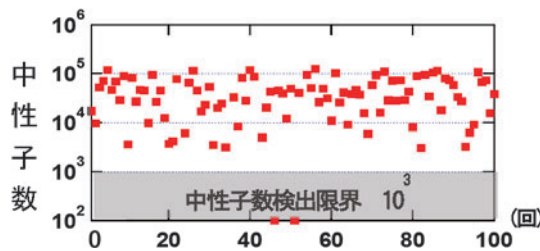


図10 100回連続の中性子生成結果.

集光点付近には、固体粒子ターゲットが必ず存在する本方式を採用すれば、原理的には100%の中性子生成が約束されており、中性子源として実用化には、レーザー集光強度の増強と固体粒子数密度の向上が課題である。また、ターゲットの化学組成を選択すれば、任意のエネルギーを持つイオン源への展開も見込まれる。

6.4 まとめ

永遠のエネルギー源をめざしたレーザー核融合の研究を行う過程で開発した大出力レーザー、核融合燃料・ターゲット、光・高エネルギー粒子計測の要素技術を生かして、高強度レーザーによる中性子源実現のための一歩が示された。LDの進歩により、レーザー装置に関する多くの課題を一挙に解決し、粒子加速や超高温・高圧場の物理研究分野での利用だけでなく、さらなるエネルギー増強でレーザー核融合用途へと進展していくであろう。ターゲット技術は高効率化をめざした理論を具現化するために不可欠の技術で、レーザーの照射条件と密接に連携して製作していく必要がある。

未踏の研究の先に、計測、加工等への産業利用が進み、核融合研究がエネルギー開発だけでなく、安心して豊かな暮らしに役立つことをめざしていきたい。

謝辞

本章をまとめるにあたり、筆者らグループの幡野佑真氏、吉村涼氏、秋山直樹氏らの協力、西原功修氏、高木勝氏の多くの助言に感謝する。レーザー核融合の共同研究に携わっている光産業創成大学院大学 北川米喜特任教授、森芳孝准教授、トヨタ自動車株式会社 米田修氏、トヨタテクニカルディベロップメント 西村靖彦氏他、共同研究者の方々に深謝する。核融合科学研究所 須藤滋 元教授（現在は中部大学教授）、田村直樹助教のレーザー内蔵ペレットに関する多くの助言に謝意を表す。また、本研究

のために大出力レーザー施設を利用させていただき、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心の方々に謝意を表す。

参考文献

- [1] C.Yamanaka *et al.*, *Nature* **319**, 757 (1986).
- [2] H. Azechi *et al.*, *Laser Part. Beams* **9**, 193 (1991).
- [3] H. Azechi, Sci. Council of Japan, Int. Workshop on Status and Prospect of High energy density Sci. by Giant Laser, (2014).
- [4] O. A. Hurricane *et al.*, *Nature* **506**, 343 (2014).
- [5] T. Kawashima *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, 6415 (2011).
- [6] R. Yasuhara *et al.*, *Opt. Lett.* **33**, 1711 (2008).
- [7] Y. Kitagawa *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 195002 (2015).
- [8] Y. Mori *et al.*, *to be published in Phys. Rev. Lett.* (2017).
- [9] 北川米喜 他：プラズマ・核融合学会誌 **91**, 537 (2015).
- [10] Y. Nishimura *et al.*, *J. Phys. D.* **48**, 325305 (2015).
- [11] O. Komeda *et al.*, *Sci. Report* **3**, 2561 (2013).
- [12] O. Komeda *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **8**, 1205020 (2013).
- [13] H. Shiraga *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **53**, 124029 (2011).
- [14] T. Sekine *et al.*, *Opt. Express*, **21**, 7, 8392-8400 (2013).
- [15] D. Strickland and G. Mourou, *Opt. Comm.* **55**, 447 (1985).
- [16] M. Aoyama *et al.*, *Opt. Lett.* **28**, 17, 1594 (2003).
- [17] H. Kiriyama *et al.*, *Appl. Opt.* **49**, 11 (2010).
- [18] H. Kiriyama *et al.*, *IEEE J. Sel. Tops. in Quantum Electronics*, **21**, 1, Jan./Feb., 1601117 (2015).
- [19] T. Kawashima, Sci. Council of Japan, Int. Workshop on Status and Prospect of High energy density Sci. by Giant Laser (2014).
- [20] General Atomics, Inertial Fusion Technologies 2016, http://www.ga.com/websites/ga/docs/energy/2016_IFT_Catalog-062016.pdf (2016).
- [21] M. Takagi *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol.* **A9**, 2145 (1991).
- [22] M. Takagi *et al.*, *Fusion Technol.* **41**, 278 (2002).
- [21] N. Satoh *et al.*, "Progress of Target Development in Hamamatsu Photonics K.K.", 5th Target Fabrication Workshop (2014).
- [22] 佐藤伸弘 他：国際出願番号 PCT/JP2015/064096, 国際出願番号 PCT/JP2015/064057.
- [23] 須藤 滋 他：プラズマ・核融合学会誌 (小特集), **91**, 251 (2015).
- [24] K. Matsukado *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **81**, 023304 (2010).
- [25] T. Ditmire *et al.*, *Nature* **398**, 489 (1999).
- [26] K. Madison *et al.*, *Phys. Rev. A* **70**, 053201 (2004).
- [27] T. Watari *et al.*, *J. Phys.: Conference Series* **688**, 012125 (2016).



小特集 企業による核融合研究の最近の動向

7. まとめと議論

7. Summary and Discussion

岸本 泰明

KISHIMOTO Yasuaki

京都大学大学院エネルギー科学研究科

(原稿受付：2016年12月8日)

エネルギーはそれを取り出す手段に依存しないが、地上に生命を育んだ太陽のエネルギー源が核融合であったことは感慨深い。これが本小特集のテーマである企業を含め、多くの研究者が核融合に引き付けられる魅力である一方、宇宙レベルで起きる現象なので困難なことは織り込み済みである。この「困難さ」は核融合が確固とした形のないプラズマを媒質に使うことによるが、この性質は核融合の内在的な安全性の起源でもあり、困難であればあるほど、それは安全により多くを投資しているとも言える。

2016年10月に京都で開催された第26回IAEA主催核融合エネルギー会議での参加者は1200名に達し、発展途上にある国も含めた多くの国々で核融合に対する期待は高い[1]。核融合は、時間はかかったとしても、それが実現したときのインパクトを考えると当事者であるべきとの考えによるのかもしれない。核融合研究は1958年の第2回原子力平和利用会議（ジュネーブ）で公開となり、50年を上回る時を経て、磁場方式では国際熱核融合実験炉（ITER）[2]がフランスに建設中であり、慣性（レーザー）方式では米国国立点火施設（NIF）[3]が点火燃焼をめざした研究を進めている。しかし、その会議の基調講演でITER機構長のベルナル・ビゴ氏が「装置が完成して水素プラズマができるのは2025年、重水素・三重水素燃料による燃焼プラズマが実現できるのは2035年ぐらい」と述べるなど、道のりは容易ではないことを改めて認識することになった。そのITERも本格的に電力を生成する装置ではない。社会に電力を供給する核融合炉の実現にはさらに歳月を要するとすれば研究期間は1世紀近くなる。まさに世代を越えたプロジェクトである。もちろん、研究を着実に進め、次世代にバトンを渡すのは使命であるが、一秒でも早く核融合エネルギーを見る方法はないかと考えるのは筆者だけであろうか。本小特集[4]2章で論じられた「別個の方法論は存在するか？」と考えるのは自然の流れと思える。

核融合の実現を阻んでいる要因の一つに異常輸送がある[5]。プラズマの閉じ込め時間がその温度に反比例（ $\tau \propto 1/T$ ）するというものである。温度を上げて核融合を起こすのが目的なのに、それに真向から対峙する関係であ

る。無形性であるプラズマを安定に保持するのは至難の業である（2章参照）。21世紀現在、異常輸送に対する理解は格段に進んだが、研究がスタートした当時それがあったわけではない。Richard Post氏が「20世紀の物理学（22章）」の中で「20世紀のプラズマ物理の歴史は、（中略）地球においてプラズマ現象が持つ隠れた重要性や、宇宙におけるはっきりした重要性について、ほとんど認識のない状況のもとで始まった」[6]と述べているように、核融合は「プラズマ物理学」という学術の構築と同時進行で進めないといけなかった開発研究故であったと言えよう。

1960年代から今日までの50年間、核融合研究は基礎を重視して、大学・国公立研究機関を中心に主に国の科学技術予算や原子力予算のもとで進められてきた。これに対して、近年、“別個の方法論”として、企業による核融合研究が活発になっている。筆者は、これらの詳細な経緯や目的について理解しないまま今日に至っていた。その中で、2016年8月に米国アーバインで開催された日米コンパクトトラス（CT）ワークショップ[7]に参加する機会を得て、1章表1に示されている企業の研究活動について知るとともに、アーバインに拠点を置くTri Alpha Energy（TAE）[8]を見学させていただく機会を得た。予算の大半を個人や民間の投資者でまかない、多くのスタッフが磁場反転配位（FRC）の開発研究にまい進する姿があった。企業でなければ見慣れた光景であるが、厳密なマーケティングの下での開発→製品化→生産・販売の流れで成り立っていると思っていた企業でなぜリターンが容易に見通せない核融合開発が成立するのか、それを支える投資者はどう考えているのか、それらを知りたいと思ったのがこの小特集に参加させていただいたきっかけでもある。それらはすでに1・2章で丁寧に説明されているので、それらと重複する点は多々あることはお許しいただき、各章の報告からみた筆者の理解や感想を述べさせていただくこととする。

核融合の当面の目標は、方式を問わず、原子核同士が融合反応を起こす数千万度から1億度（重水素D・三重水素Tを燃料にする場合）にプラズマを加熱するとともに、出力エネルギーが投入エネルギーを上回る（エネルギー増倍

率 $Q > 1$) 密度 n と閉じ込め時間 τ を達成することである。これを満たすパラメータ領域として磁場方式 ($\tau \sim 1$ 秒, $n \sim 10^{14}$ 個/cm³) と慣性方式 ($\tau \sim 10^{-9}$ 秒, $n \sim 10^{25}$ /cm³) があり, これらは両極に位置する。それらの中間領域もあるが, そこでは両者の閉じ込め概念が混在するため複雑になり, 未知に等しい領域である。General Fusion 社 (5 章) をはじめ, 幾つかの企業がこの領域をターゲットにしている点は興味深い (1 章表 1 参照)。

大学・国公立研究機関は, これら代表的な二つのパラメータ領域を中心に, トカマク方式や定常運転をめざしたヘリカル方式, レーザー方式を中心に多様な磁場配位や爆縮方法を探求した基礎研究を行ってきた。研究が進展して先の見通しが立ったり, それに伴って装置が大型化したりするなどの場合は, 関連コミュニティでの意見集約や関連機関・省庁との調整を図りながら次の段階をめざす。場合によっては, それらをより効率的に扱うことのできる別研究機関にバトンを渡すこともある。例えば, 京都大学では, ヘリオトロン E 装置などの研究に基づいて成果を挙げ, その流れを汲んだ研究は核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) で展開し, 自身はヘリカル磁場配位最適化に向けたヘリオトロン J の研究をスタートした [9, 10]。ITER 計画のスタートは磁場閉じ込めの総合的な理解が進展したことによるが, 各々の機関は, それを成功に導くため積極的に支援する研究を展開したり, 異なった着想に基づいて新たな計画を立てたりすることになる [11]。

これに対して, 企業の核融合研究は, 上述の大学・国公立研究機関とは異なった目的や役割, 時間スケールで独特な研究活動を展開している。大学・国公立研究機関にとれば研究のバトンを渡す相手が増えたとも言えるが, それはブーメランのように自身の研究の在り方にも跳ねかえる。それを考えることも本小特集の目的の一つであろう。一言で企業と言っても, 資金の出所によって研究の在り方や進め方も異なる。同じ企業でも, それが個人や民間の投資者に限られているものもあれば, 大半が政府予算であったり, 大学・国公立研究機関からの委託であったりする場合もある (1 章表 1 参照)。いずれも, 研究の在り方や進め方は投資者の考え方に影響されるが, 逆に出資先を限ることで研究の自由度や流動性を高めるといったこともあるかも知れない。

筆者は企業論理を正確には理解していないが, 大まかに二つのポイントがあるように思う。一つは, リスクは多少高くても核融合炉が早く実現できる可能性があったり, 社会的に受け入れ易かったりする閉じ込め方式やパラメータ領域に挑戦しようとするもの, もう一つは, それまで困難とされていた課題に対して新技術を積極的に開発したり導入したりすることでブレークスルーを図ろうとするもの。前者は**概念のイノベーション**, 後者は**技術のイノベーション**といったところであるが, この二つをテコに, 大学・国公立研究機関のそれらとは異なった考え方で迅速さで顧客の投資意欲を引き出すのではないか。この観点から, 2 章で論じられた social impact (社会貢献事業) の考えはなるほどとうなずいた。企業なので投資に見合う利潤を追求す

るであろうが, それだけなら敢えて核融合を選ぶ必要はない。早く核融合を実現して安全・安心な未来を作ってほしいと願う投資者もあれば, 企業が持つ得意技術を時間はかかっても未来を変える研究 (夢) に役立ててほしいと願う投資者もいよう。そのときは高邁な夢ほど投資意欲が湧くかも知れないし, 利潤を越えた社会的貢献の要素を内包していることも大切なポイントになろう (2 章参照)。それら投資者の意向や考えによっても追求するイノベーションの内容や質も変わってくるので, それを見極めながら研究を進めることが求められよう。このような視点に立って, 本小特集で取り上げられた各企業のイノベーションの内容や成果, めざすところなどを拝読させていただいた。

2・3 章は, Tri Alpha Energy (TAE) 社の行っている磁場反転配位 (FRC) による核融合研究についての報告である。FRC は, エネルギーの閉じ込めに優れたトラス配位と熱の取り出しに優れたミラー配位を合体させた高ベータ装置であること, しかし, プラズマ生成直後, 回転や振動をとともう不安定性が発生してそれを安定に維持することは容易でないこと程度の知識しか持ち合わせていなかった。それを TAE 社は大きな装置 (C-2/C-2U) を建設して研究しているという。中性子を発生しない究極の核融合である p-B (プロトン・ボウ素) 反応実現の可能性があったり, エネルギー取り出しや熱負荷が軽減される可能性があったりと果実は大きい, その分ハードルも高い。なぜ今 FRC と思ったが, NBI の導入により上述の不安定性を克服し, さらに 10 m 秒までプラズマを維持している (3 章図 4 参照)。さらに, 電子のエネルギー閉じ込め時間が電子温度の上昇とともに伸長して異常輸送特性が消失している点も興味深い (3 章図 2・図 4 参照)。

2 章で田島氏は, 生成直後の FRC は「甲羅がない幼児」のように脆弱であるが, それに中性粒子ビーム (NB) を入射することで, 幼児が成人へと成長するように, より安定した FRC へと発展していくとしている。異常輸送はプラズマ中に発生する乱流に起因するが, そのように発展した FRC ではそれが抑制される可能性がある。これらは「概念のイノベーション」と云うにふさわしく, FRC が他の閉じ込め方式と異なった進化を遂げる可能性を予見させる。非局所性や大域性が現象を支配する運動論プラズマとなるので, 理論家に対しても重要な話題を提供する。

4 章は Tokamak Energy (TE) 社の球状トラス (ST) による核融合研究の報告である。ST は, 「ドーナツをギュと圧縮したもの」なので, トカマク研究者はなじみ深く, MAST (カラム研究所) や NSTX (PPPL) の 2 大装置を中心に世界的に多くの機関で研究が進められている。ST は, トカマクの基本概念に従いつつ, しかし, 温度の上昇とともに閉じ込めが向上するなど (FRC に類似), トカマクとは異なった輸送や閉じ込め特性を示すことがわかっている。TE 社は, これらの特性を「概念のイノベーション」として炉設計に積極的に導入するとともに, コンパクトであるが故に困難であった中心コイルの中性子遮蔽問題を近年の高温超伝導 (HTS) に関する「技術のイノベーション」によって克服できるとして早期の小型の核融合炉の実

現を目指している。例えば、主半径 $R \sim 1.35$ m 程度でも相応のエネルギー増倍率を持った数 100 MW クラスのコンパクトな核融合炉の設計が可能であるとしている。このサイズは他の ST 炉設計と比べても小さく、実現できれば核融合の選択肢が増すことになる。しかし、これらの根拠となるスケリング則が核融合炉にそのまま外挿できるかどうかは単純ではなく、トカマクを含めた多くの実験や理論・シミュレーションによる研究の深化が不可欠である。

日本でも特色ある ST 研究を行っている大学が一定の役割分担のもと連携して進む方向を定める全日本 ST 組織があり、成果を挙げている [12]。TE 社は、国費とともに寄付や民間投資の両者で成り立っていることからわかるように、大学・国公立研究機関と密接に連携しながら、しかし小回りの利くパイロット的な役割を積極的に果たしつつ ST 炉としての出口を見極めようとしているように見える。

5 章は、General Fusion (GF) 社の衝撃波磁化標的核融合 (MTF) と呼ばれる、液体金属中に生成したフェロマック (CT) を空気ピストンによる音響圧力波で圧縮することによって核融合を実現する研究報告である。この方法は磁場核融合と慣性核融合の中間領域 ($\tau \sim 10 \mu$ 秒, $n \sim 10^{20} / \text{cm}^3$) の高温プラズマの生成をめざしているが、CT の体積圧縮率が 10^3 倍程度もあることを考えるとレーザー核融合のスキームに近い。しかし、CT のサイズは大きいため、投入エネルギーは 10 MJ と NIF の 5 倍にも相当する。CT の圧縮過程でプラズマ温度を 1 億度以上まで上昇させる必要がある。レーザー核融合は圧縮時に対称性を保ちながら密度と温度を同時に上げる必要があるが、それが予測以上に容易でないことが最近の NIF の実験からわかってきている。数テスラの磁場の圧力に抗して CT 点火に向けて数 100 テスラまで安定に圧縮できるのか、閉じ込め方法が混在した未知の領域のチャレンジングな挑戦である。

MTF は CT の圧縮という磁場核融合と慣性核融合が合体した「概念のイノベーション」と、圧縮用の空気ピストン、ブランケット用の液体金属渦生成容器、プラズマインジェクターなどの「技術のイノベーション」の双方を必要とするが、それ故、多様な分野の研究者を引き付けるプラットフォームに発展する可能性がある。この MTF にはカナダ政府からの出資が含まれる。カナダは一時 ITER 誘致に興味を示したものの、核融合研究はそれほど盛んでない。この中で政府が異なったアプローチの核融合を支援している点は興味深い。

6 章は、浜松ホトニクスを中心とした企業や大学との連合体で進めているレーザー核融合とそれによる中性子源の開発に関する報告である。レーザーと関わらない産業はないくらい広く社会に浸透しているレーザー技術の一つとしてレーザー核融合を位置付け、エネルギー生産という“究極目標”と社会への波及という“経過目標”をセットにして開発を進めていると言えよう。波及の一つに核融合で生成される中性子利用がある。中性子の利用分野は広く、最近では BNCT と呼ばれるホウ素と中性子の大きな反応断面積を利用したがん治療なども期待されている。この BNCT の治療は中性子を利用できる原子力施設に限られている

が、これがレーザーを利用してコンパクトにできるようになれば核融合の重要な貢献になる。

エネルギー生産をめざしたレーザー核融合では、NIF の中心点火方式や大阪大学の高速度点火方式など、多様なスキームが考案されている。これらの研究で使用しているレーザーは電気から光への変換効率が 1% 程度のフラッシュランプ励起のガラスレーザーであるが、これがすぐ将来の核融合炉に展開できるわけではない。また、核融合炉では、レーザー照射を毎秒 10 回程度繰り返す必要がある。これらに焦点を当て、高い変換効率とともに除熱まで含めた高パワーで高繰り返し半導体レーザーの開発とターゲットを連続で供給できるシステムの開発を進め、「技術のイノベーション」の観点からレーザー核融合を牽引しようとしている。大きな企業の長期的戦略の一つとして位置付けられており、核融合に特化した前述 3 社の企業とは質を異にするとと思われる。

これら企業の核融合開発研究には幾つの特徴がある。一つは、段階的な目標を設定して、装置の建設から実験の終了までの期間が比較的短く、目標を達成すると早い段階で次の計画に移行している点である。TAE 社では、C-2 の実験開始が 2008 年であり、NBI による配位維持と性能向上を確認し、「Advanced beam driven FRC」の概念を検証すると、2015 年には NBI を 10 MW に増強して C-2U の実験に移っている。また、設定した課題に対して性能を確認するとわずか 1.5 年で実験を終了している。現在、30 m 秒の放電時間をめざした C-2W の建設を進めており、2017 年中には実験を開始するという。会社の創設が 1998 年であり、C-2 に先だって、A, B, C-1 装置などをもとに C-2 を建設していることから、想像以上の迅速さである。また、TE 社は会社の創設が 2009 年であり、2015 年には高温超伝導を用いた小型 ST で 29 時間放電を実現している。現在、3 T の強磁場装置である ST40 を建設中であり、2017 年には 1 億度の達成、2020 年にはブレイクイーンを狙うという。ST40 は 2 MW 級 NBI による数秒の常伝導パルス装置であり、高温超伝導路線と異なるように思えるが、常伝導装置で高磁場に起因する工学特性を解明し、その間、並行して高温超伝導磁石の開発を進め、両者の研究のもとにブレイクイーンを狙う装置を早期に建設する戦略であろう。

1 章表 1 の例を含め、いずれの企業も大学・国公立研究機関とは異なった役割と時間スケールで研究を進めている。純粋な科学研究の立場に立てば、プロジェクトとしての目標達成（プラズマの持続時間や閉じ込め時間、三重積など）とともに、精緻な分布計測など、その装置で展開可能な多様な基礎研究をできるだけ多く行い、論文として後世に財産を残すことは重要である。しかし、投資者は必ずしも論文を書くことだけを求めているわけではなく、ある間隔で（場合によっては毎年）成果を求めるであろう。また、目標が達成されなかった場合でも、目標の立て直しや軌道修正、必要な時間などをきちんと説明してもらえば投資者は究極目標実現の夢を捨てることなく投資を続けようと思うかもしれない。また、そこに一定の緊張感が生まれ、社会の期待や要請をより反映した研究のペースや健全性が

保たれるのかもしれない。これらは、2章の end in mind (出口から遡れ) や fail fast (早く失敗せよ) に通じるようなところがあるように思う。

核融合の実現は冒頭で述べたように容易ではない。核融合の歴史は、小型装置から大型装置へ、低い加熱パワーから高い加熱パワーへ、プラズマ性能の向上をめざした歴史であり、その間、様々な困難に直面してきた。それは、プラズマが“非線形性”の強い媒質であり、プラズマ性能の向上に対してその性質は必ずしも連続的でなく、自然が味方してくれる場合もあれば、対峙する場合もあり、単純に予測できない場合が多々あることによる。新しい概念と技術による企業の核融合研究も今後同様な困難に直面することがあるかも知れない。しかし、隠されたパラメータを見つけ出してプラズマの対峙する性質を味方に変えるなど、プラズマに関する理解が格段に進んだ今日、そのアドバンテージを最大限利用し、これまでと異なった進化のもと、核融合の実現が早まれば喜ばしい。

もとより、企業と大学・国公立研究機関の異なった研究のスタイルは優劣を付けられるものでなく、どちらも重要である。逆に、核融合研究が長期化する状況を見ると、大学・国公立研究機関と企業という考えの異なる二つの基軸と文化を持つことによって核融合を支援いただける顧客や国民の層を増やし、両者が密接な情報交換と交流を行いつつ、一定の緊張感のもと切磋琢磨することで、幅を持った核融合研究開発が進展することが期待される。Rostoker 先生をはじめ、核融合研究の時代の流れを見越して個別の

方法論を展開してきた先人に敬意を表する次第である。今回の小特集が契機となり、日本でも、そのような企業を立ち上げる機運が出てくることを期待したい。

参考文献

- [1] <http://www.fec2016.jp/>
- [2] <http://www.fusion.qst.go.jp/ITER/index.php>
- [3] <https://lasers.llnl.gov/about>
- [4] 浅井朋彦 編：プラズマ・核融合学会誌 93, 18 (2017). 本小特集.
- [5] 岸本泰明：「異常輸送」プラズマ・核融合学会誌 76, 1280 (2000).
- [6] L.B. Brown 他：「20世紀の物理学 (Twentieth Century Physics)」 「20世紀の物理学」編集委員会編 (アメリカ物理学会とイギリス物理学会との共同出版) (2004年9月, 丸善).
- [7] <http://www.physics.uci.edu/US-JAPAN-CT2016/>
- [8] <http://trialphaenergy.com/>
- [9] <http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/>
- [10] <http://www.nifs.ac.jp/index.html>
- [11] 「核融合エネルギーの技術的実現性・計画の広がり」と裾野としての基礎研究に関する報告書」原子力委員会 核融合会議開発戦略分科会 (2000年5月).
(<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/senmon/old/kakuyugo/siryo/siryo136/siryo2.htm>)
- [12] Y. Takase *et al.*, Overview of Spherical Tokamak Research in Japan, IAEA Fusion Energy Conference (Kyoto 2016).

小特集執筆者紹介



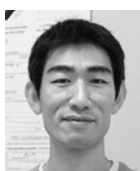
あさ いとも ひこ
浅井 朋彦

日本大学理工学部物理学科准教授。2002年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了，博士（工学）。サスカチュアン大学研究員，産業技術総合研究所研究員，日本大学理工学部助手，講師を経て2013年より現職。専門はコンパクトトラスを中心とした高ベータプラズマとその応用に関する実験研究。趣味はバイクと剣道。



た じま とし き
田 島 俊 樹

カリフォルニア大学アーバイン校，ノーマン・ロス・トーカー・チェア教授。トライ・アルファ・エナジー社，科学担当重役。専門分野は，プラズマ物理，高強度場科学，計算物理。諏訪賞（2006），仁科記念賞（2006），Blaise Pascal Chair（2010），フェルミ賞（2015）等を受ける。ロシア科学院正メンバー。



ごう た ひろ し
郷 田 博 司

米国カリフォルニア州に位置する民間企業Tri Alpha Energy, Inc.にて2007年よりLead Scientistとして実験的研究に従事。日本大学大学院・博士後期課程修了（理学博士）後，米国ワシントン大学（UW）そしてカリフォルニア大学アーヴァイン校（UCI）での研究を経て現職に至る。主な研究分野は，磁場反転配位（FRC）プラズマの生成・閉じ込め特性の最適化に向けた装置運転，プラズマ計測・診断，データ解析等の多岐にわたり実験に携わっている。最近，運動不足解消のためサッカーをまた始めたが，体がついていかずに衰えを感じる今日この頃……。



さ とう なか ひろ
佐 藤 伸 弘

浜松ホトニクス株式会社中央研究所産業開発研究センター大出力レーザー開発グループグループ長代理。1986年慶應義塾大学大学院 工学研究科 修士課程修了。同年に浜松ホトニクス株式会社。2007年，産業開発研究所の開所に伴い，レーザー核融合研究に従事し始めた。弊社の技術開発が世界の核融合研究を押し進めるのが夢で，レーザー，ターゲット，計測器と分野にこだわらずに，研究用途で実用できるように願いをこめて開発している。プラズマ・核融合学会，日本原子力学会会員。



かわ しま とし ゆき
川 嶋 利 幸

浜松ホトニクス株式会社 中央研究所産業開発研究センター 副センター長。博士（工学）。電気通信大学レーザー新世代研究センター客員教授，大阪大学工学研究科客員教授。夢はレーザー核融合発電の実現。そのためにはパワーレーザーの大出力化，高効率化，低コスト化が何よりも重要と考え，大出力レーザーの実用化と産業利用の開発に注力している。



きし もと やす あき
岸 本 泰 明

京都大学大学院エネルギー科学研究科教授。1981年広島大学修士課程修了，1984年大阪大学博士課程修了，日本原子力研究所・那珂研究所（現量子科学技術研究開発機構）を経て，2004年より現職。トカマクを中心としたプラズマの乱流輸送やレーザーと物質との相互作用に関する理論・シミュレーション研究などに従事。