

核融合ベンチャーの 勝算

恐れ知らずの一部の物理学者が億万長者などから支援を受けて
核融合発電をより早くより低コストで実現する道を模索している

W. W. ギブズ (SCIENTIFIC AMERICAN 編集部)

私はトライアルファ・エナジー社の核融合実験炉の制御室で「プラズマ銃」「ショット制御」のラベルが貼られたコンピューター画面の前に座り、実験準備が進むなか少し不安を感じていた。この装置は、恒星や水爆で起こる反応を制御してエネルギーを生み出す発電プラントの初期プロトタイプだ。

頭上のモニターには、カリフォルニア州アーバイン近郊にあるこの何の変哲もない倉庫の中で作業員たちが大きな炉を離れて扉に向かって歩いていく様子が映っている。炉の中心にあるピカピカの円筒形の真空容器はスクールバス2台分ほどの長さで、24個のリング状の電磁石に囲まれている。それぞれの電磁石は私の身長よりも高く、私の脚と同じくらいの太さがある。容器内の温度は私の命令ひとつで約1000万℃まで上昇する。ただし一瞬の間だけだ。

オペレーターが「ボタンをクリックせよ」と指示する。私は言われた通りにした。

隣の建物にある4基の巨大フライ

ホイール（送電網から電力が供給されて今朝から回っていた）が20メガワットの電力を放出する。この電流によってリング状の電磁石が働き、ごついコンデンサー群が充電されて大電流を流す準備を整える。2分以内に制御画面のすべての計測器が「準備中」から「準備完了」に切り替わった。

オペレーターがマイクに身を寄せ、「トリガー」の音がスピーカーから流れた。警報灯が点滅し始める。私はカーソルを「トリガー」ボタンに移動してクリックする。コンデンサー群はため込んだ電気を1マイクロ秒で放出した。水素イオンの雲が真空容器の両端で形成され、加速しながら中心に向かう。そして時速100万km近くで正面衝突し、巨大な中空の葉巻タバコのような回転する高温プラズマになる。

劇的に聞こえるが、制御室では閃光も見えなければ轟音も聞こえない。核融合炉室でレンチをコンクリートの床に落としたような「カチン」という小さな音がするのみだ。プラズマの塊は一瞬で拡散し、炉の数十個のセンサー



ジェネラル・フュージョン社の核融合炉
巨大なピストン群がアンビルに衝突すると、反応容器に衝撃波が生じる。将来の装置では、この衝撃波によって炉心の燃料が核融合を起こす。

から送られてくる大量のデータをコンピュータが処理し始める。警報灯は消え、作業員は各自の仕事に戻る。

もう一度核融合を起こそう。同社のように1日に100回も実験していれば、もう1回くらい大したことではない。

この実験炉C-2Uではわずか2年間に5万回の実験が行われ、私が2016年2月に訪問した時にはすでに、次の段階に進むのに必要なデータを集めていた。同年4月、同社の最高技術責任者で、屈強で激しやすい物理学者ビンダーバウアー（Michl Binderbauer）は、C-2Uを解体し、利用可能な部品を使ってより進んだ炉C-2Wを2017年半ばまでに完成させるよう部下に命じた。

プロトタイプを短期間に作って必要十分なテストを行い改良型に作り変えるというトライアルファ社の手法は、核融合研究の従来の規範とまるで異なる。過去何十年もの間、核融合反応が起こるはずなのになかなか起こらない高温・高圧プラズマの不可解な振る舞いを解明するため、巨大な装置が作られてきた。連続起業家のウィーン人を父に持つビンダーバウアーは、投資家の期待と技術者の発想、高エネルギー物理学の記念碑ではなく実用的な発電プラントを建設するという確固たる目

標に突き動かされている新タイプの核融合技術者の典型だ。

カナダのバンクーバー郊外にあるジェネラル・フュージョン社など複数の新興企業も、複雑な物理現象を詳細に解明しなくても商用核融合炉を建造できると主張している。核融合発電の燃料は海水や一般的な鉱物に由来し、ほぼ無尽蔵で炭素を含まない。このため温室効果ガスをほとんど生じない。また、放射線被曝のリスクや核兵器転用の恐れも事実上なく、都市の電力を24時間365日賄えるだろう。新参の開拓者がやらなければならないことは、人類がこれまで取り組んだなかで最も難しい物理学と工学の問題のいくつかを解決することだけだ。

現在、彼ら現実主義者が注目されている。学术界が事実上行き詰まってしまったためだ。巨大な核融合炉は核融合科学の謎をいくつか解明してきたものの、今世紀半ばまでに電力を送電網に供給できる見込みはない。

一例が米国立ローレンス・リバモア研究所の国立点火施設（NIF）だ。40億ドルをかけた装置が小さな燃料容器に1兆ワットのレーザーパルスを浴びせて加熱する。「NIFは年間に数百回しか実験していない」とビンダーバウアーはオーストリアなまりで言う。発

電プラントでは1日に何万回も点火する必要があるだろう。NIFは兵器研究（同施設の本来の目的）に関しては有用な成果を得ているものの、レーザー照射に費やした電力を賄うためだけでも、発電量を約3万倍に増やさなければならない。商用発電にはさらにその何倍も必要だ。同研究所は2年前、試作発電プラントの設計から手を引いた。

もう1つの残念な例が国際熱核融合実験炉ITER（イーター）だ。10階建てビル相当の大きさのこの核融合炉は、数カ国の共同事業体によってフランスに建設されている。約1億5000万℃で燃えるプラズマを巨大な超電導磁石を使って1回当たり数分間制御しようとしている。仮に成功しても、ITERは発電しない。

2006年にITERに着手した政治家は、110億ドルの費用で2016年中に完成すると予想していた。2016年5月時点で費用は200億ドルに膨れ上がり、米国は約50億ドルを負担することになっている。完全操業は早くても2035年だ。たまりかねた米上院は、資金提供の打ち切りを90対8で可決した。だがその後、米エネルギー省（DOE）による働きかけによって、（この記事の執筆時点では）米下院は少なくとも2017年までは資金提供を継続する構えだ。

巨大プロジェクトが遅々として進まないことから、ビンダーバウアーらは新たな観点から核融合発電に挑む小型装置に望みを託している。結果を出すには、微量の燃料を圧縮して密度と温度を十分に高めるとともに十分な時間閉じ込め、原子核を融合させなければならない。核融合が起こると、原子核の質量のごく一部が膨大なエネルギーに変換される。NIFとITERは理にかなった設計としては対極的で、プラズマ密度とエネルギー閉じ込め時間（熱がプラズマ内にどれくらいとどまるかを示す尺度）に大きな差がある。新参

組のほとんどは、これまであまり探究されてこなかった両者の中間にスイートスポットを探している。

同様に重要なのは、新興企業の装置は比較的短期間に成功か失敗かが判明することだ。「ITERの1/100以下のコストで容易かつ短期間に建設でき、研究を素早く進められる」と、米国立ロスアラモス研究所の核融合物理学者スー（Scott Hsu）は言う。彼は新興企業のハイパーVテクノロジーズ社と共同研究している（同社の装置は数百のプラズマ銃でアルゴンのプラズマを球形核融合炉の中心に一斉に撃ち込み、水素燃料を圧縮する）。これらの場合、致命的な欠陥があれば、数十億ドルと何十年もの時間を費やす前に、それが明らかになるだろう。

この点が投資家に気に入られている。ジェネラル・フュージョン社の1億ドルの資金は、アマゾン・ドット・コム（の創業者ベゾス（Jeff Bezos））やカナダ政府、マレーシアの政府系投資ファンドなどが出している。トライアルファ社はゴールドマン・サックスや、マイクロソフトの共同創業者アレン（Paul Allen）などから数億ドルを集めたという。フットワークの軽いもう1つのグループである米国立サンディア研究所は、ベンチャー投資家のように大穴を狙うDOEエネルギー高等研究計画局（ARPA-E）などから支援を受けている。

核融合への投資はハイリスク・ハイリターンの賭けだ。実際、核融合研究の歴史は『『良い考えだが、そんなふうにはいかない』と自然に教えられる』連続だったと、サンディア研プロジェクトで首席理論研究員を務めるスラツ（Stephen A. Slutz）は言う。

プラズマを手なずける

荒れ狂うプラズマの安定化という難題は、核融合そのものの性質から生じる。2個の原子核（電子を剥ぎ取られ

た原子）が融合するのは、原子核の間の強い核力（引力）がその陽子間に働く電氣的斥力よりも大きくなるように原子核どうしをしばらくの間、十分に近づけた場合のみだ。この状況を実現できれば、2個の原子核は融合してより重い元素の原子核となるが、その質量は元の2個の原子核の質量の合計よりも小さい。失われた質量は膨大なエネルギーに変換され、光子や高速の中性子などがこのエネルギーを担う。一方、通常の原子炉はウランなどの原子核の（融合ではなく）分裂によってエネルギーを取り出す。

核融合の確率を上げるには、プラズマ中のイオンを互いに高速で接近させなければならない。ただし、速すぎてもいけない。これは通常、プラズマの温度が1億℃以上であることを意味する。超高温プラズマを真空容器内の比較的狭い空間に押し込み、反応が起こるまで保持しておく必要がある。経験則として、プラズマ密度とエネルギー閉じ込め時間の積は約 10^{14} 秒/cm³よりも大きくなければならない。この条件を満たす限り、核融合は密度と閉じ込め時間、温度の様々な組み合わせで起こりうる。

「トカマク型」核融合炉のITERは、中性子が多い水素の同位体（重水素と三重水素）のわずか約0.5gのプラズマを、小さな軒家ほどの大きさの真空容器内に浮かせて使う。ITERの目標は、低密度のプラズマをその都度、数秒間閉じ込めることだ。

一方、NIFは冷却した固体の重水素と三重水素を詰めた容器に最大500兆ワットのレーザーを192方向から照射する。レーザーパルスを生成・発射する光学機器と電子機器が、広さがサッカー競技場3面分で高さが30mの建物を埋め尽くしている。自己点火状態（核融合を起こしている燃料から十分なエネルギーが放出され、外部からの介入なしに反応が持続する状態）を実



CHRIS MUELLER

恐れ知らずの物理学者 ジェネラル・フュージョン社の創業者で主任研究員のラバージは、未検証の物理学の究明に役立つ検査装置を見せながら言う。「悪い驚きが待っている可能性はある。そして良い驚きも」。

現するため、NIFは超高密度のプラズマを目指している。プラズマを慣性のみで閉じ込めるため、閉じ込め時間が1ナノ秒とごく短いからだ。

ARPA-Eのプログラムディレクターであるマクグラス（Patrick McGrath）は、ITERとNIFの間のあまり研究されていない領域に大きなチャンスがあるかもしれないと言う。つまり、ほとんどのプラズマ密度とほとんどのエネルギー閉じ込め時間だ。

だが、そのようなプラズマに必然的に現れる乱流と不安定性を手なずけた核融合炉はまだ存在しない。核融合を起こしている高温プラズマを制御するのは、ろうそくの炎に触れることなく絞ろうとするようなものだが、プラズマ内のイオンによって複雑で破壊的な電流と磁場が生じるため、ずっと難しい。「ろうそくに火を灯しても、その炎が自身を吹き消してしまう」とDOEプリンストンプラズマ物理学研究所の核融合科学者ブレナン（Dylan Brennan）は言う。

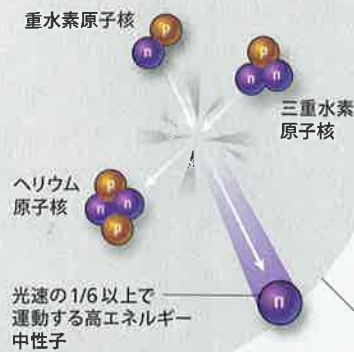
新興ベンチャー企業の参入

トライアルファ社はプラズマの安定的な保持に関して新興ベンチャー企業

KEY CONCEPTS

より現実的な道を模索

- フランスのITERや米国のNIFのような大規模核融合プロジェクトには数十億ドル以上が注ぎ込まれてきたが、生み出されるエネルギーは商用発電はおろか、自身の持続的運転に必要な量にも届かない。
- 現在、より小型で単純な核融合炉を民間ベンチャー企業などが模索している。予備的な実験から、核融合発電へのより現実的で安価な道が存在するとの期待が高まってきた。
- だが前途は多難だ。例えば超高温プラズマ内の乱流によって核融合反応がすぐに止まるといった科学的難題を解決しなければならない。加えて、核融合を一時的に起こすだけの実験炉から継続的かつ確実な運転が求められる発電プラントへの移行には、厄介な技術的課題も待ち受けている。



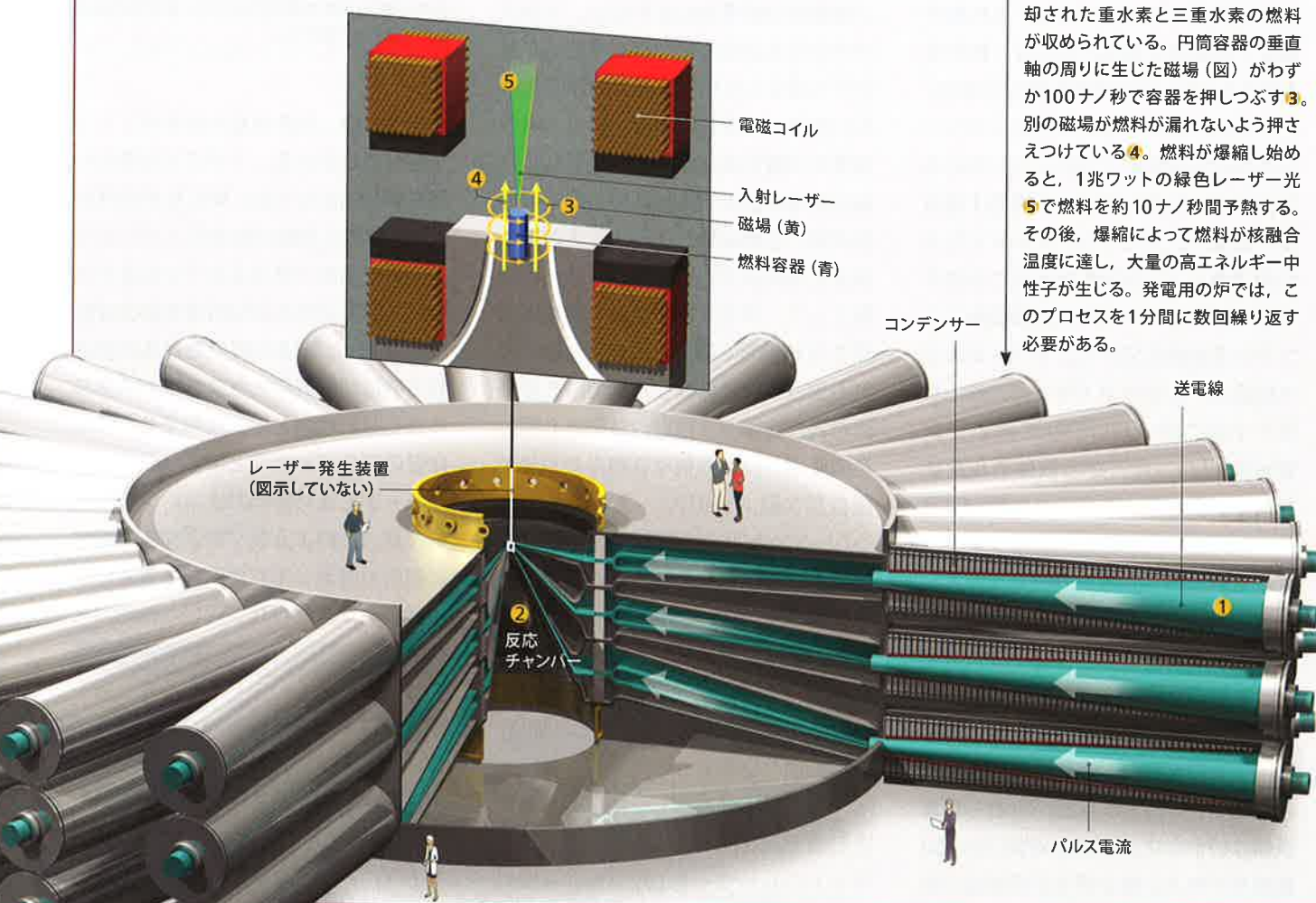
新方式の核融合炉

いくつかの恐れ知らずの研究チームが微量の物質を膨大なエネルギーに変換する核融合炉のプロトタイプを開発中だ。米国立サンディア研究所（下）と新興企業のジェネラル・フュージョン社（右下）は、高温プラズマを作り出して高エネルギー中性子を発生させ、電力に変換しようとしている。トライアルファ・エナジー社（右上）は主にX線を生成して電力に変換する計画だ。図は現在の試作装置ではなく、商用炉の規模を想定して描いている。

物質をエネルギーに 2個のイオン（重水素や三重水素など）が適切な高速度で衝突すると、融合して重い元素（ヘリウムなど）の原子核となるが、その質量は2個のイオンの質量の合計よりも小さい。核融合によって失われた質量がエネルギーに変換され、このエネルギーは光子や高速の粒子（中性子など）に担われる。

サンディア研究所： 燃料をワンツーパンチ

コンデンサー群と送電線からなる90本の“スポーク”①が、揃ったパルス電流（6500万アンペア）を反応チャンバー②に流し、金属製の円筒容器（青）の周りに強力な磁場を発生させる。円筒容器は鉛筆についている消しゴムほどの大きさで、冷却された重水素と三重水素の燃料が収められている。円筒容器の垂直軸の周りに生じた磁場（図）がわずかに100ナノ秒で容器を押つぶす③。別の磁場が燃料が漏れないよう押さえつけている④。燃料が爆縮し始めると、1兆ワットの緑色レーザー光⑤で燃料を約10ナノ秒間予熱する。その後、爆縮によって燃料が核融合温度に達し、大量の高エネルギー中性子が生じる。発電用の炉では、このプロセスを1分間に数回繰り返す必要がある。

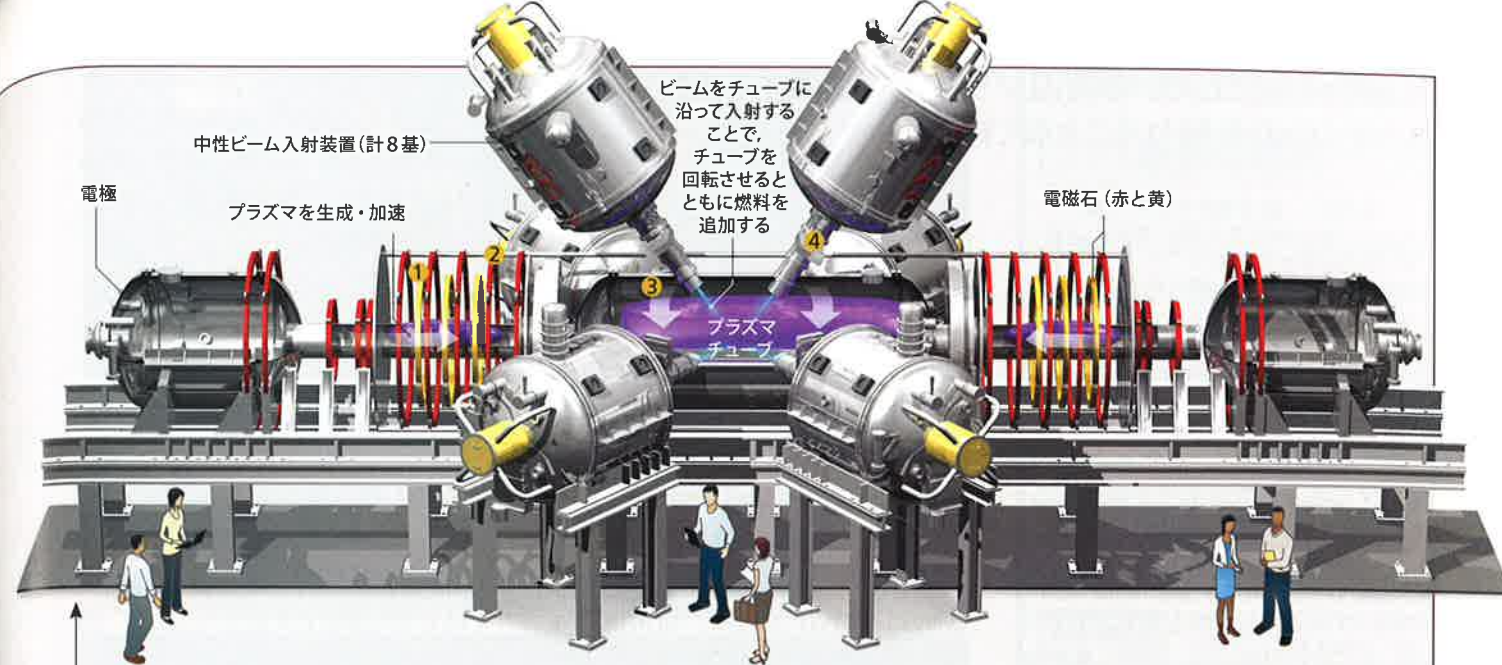


の中で最も進んでいる。「ここにあるものはすべて過去1年以内に作られた」と、ピンダーパワーはNIFやITERに比べればちっぽけな長さ23mのC-2Uの横を歩きながら誇ら

しげに説明した。C-2Uは稼働からわずか3カ月後に、回転する水素プラズマ塊を1日に100個も生成していた。その密度は同社の設計目標である1cm³当たりイオン10¹⁴個の約半分。プラズマ塊は安定かつ高温の状態を5

ミリ秒間維持した。

何日間あるいは何週間も所定の場所で静かに回り続けるプラズマという同社の理想には程遠い。だがこの実験は外部電源に制限されていた。自身にも送電網にも電力を供給する実用規模の

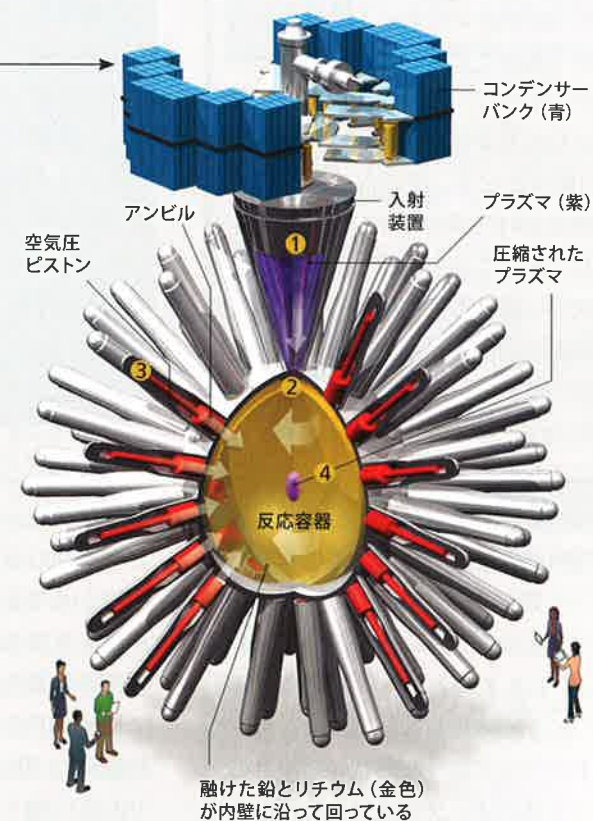


トライアルファ社： プラズマを回転させ続ける

瞬間的な高電力によって炉心の両側にある黄色の電磁石が働き①、気体燃料がホウ素イオンと陽子のプラズマになる。赤色の電磁石がプラズマを適切な場所に保持する間、別の強磁場がプラズマを1マイクロ秒間たいて内部に強力な電流を発生させる②。この円電流によって生じたベークル状の磁場が型枠のように働き、プラズマをリング状にまとめる。別のパルス電流が黄色の電磁石に流れると、リング状のプラズマが加速しながら中心に向かい、時速約100万kmで衝突する。この衝突でさらに高温で大きな管状のプラズマ（プラズマチューブ）が形成される③。この燃料で核融合を起こすには温度を35億℃に高める必要がある。プラズマチューブを軸の周りで回転させ続けるために、8基の入射装置を使って中性原子ビームをチューブの外側に注入する④。入射装置からフレッシュな燃料を追加し続けるとともにプラズマを安定した状態に維持できると、プラズマは数時間あるいは数日間核融合を続け、高エネルギーのヘリウム原子核とX線を生み出す。

ジェネラル・フュージョン社： プラズマにショックを与える

入射装置はコンデンサーに蓄えられた電気を使って重水素と三重水素のプラズマ（煙の輪のような形状）を漏斗の方向に放つ①。プラズマは圧縮されて反応容器に入る②。約200個の大型空気圧ピストンが時速200kmでアンビルに同時に衝突し③、強力な衝撃波を生み出す。衝撃波は反応容器の内壁に沿って回る融けた鉛とリチウムの渦を通して④。衝撃波が中心に集まると、渦が爆縮してプラズマを圧縮する。プラズマは約1億5000万℃、500万気圧以上になり、核融合が起こる条件がほんの一瞬実現される。核融合で生じた中性子と熱は液体金属によって捕捉される。プロセス全体が1秒間に1回繰り返され、高エネルギー中性子が大量に発生する。



核融合炉で「うまくいかないと決まったわけではない」とピンダーパワーは主張する。改良版のC-2Wにはプラズマ塊のふらつきを防ぐデジタルフィードバック機能が追加される予定だ。トライアルファ社と利害関係のない

スーは、同社の研究は「著しい進展を成し遂げ、安定性の問題を基本的に解決した」と言う。だが、発電には核融合炉を連続稼働させる必要があるため、燃料を安定的に供給しながら、はるかに高温でさらに長時間の閉じ込めを実

証することが不可欠だ。

一方、ジェネラル・フュージョン社の核融合炉はパルス的に稼働する。バンクーバー郊外の倉庫内に組み立てられた鋼鉄製の球形反応容器は直径1mで、太さ約30cmのピストンがウニの

核融合を起こしている高温プラズマを制御するのは ろうそくの炎を触れることなく絞ろうとするようなものだ

トゲのように立っている。それぞれのピストンの長さは、同社の創業者であり主任研究員でもある長身で赤ひげのラバージ (Michel Laberge) の背丈ほどだ。

彼はこのスチームパンクふうの炉をフランス系カナダなまりで説明する。「圧縮ガスによってピストンは時速200kmに加速され、アンビルに衝突する。ゴン!」と、手を打ち合わせて叫んだ。反応容器の中心でちょうど崩壊する衝撃波を発生させるため、「すべてのピストンを5マイクロ秒以内の誤差で衝突させなければならない」。

炉のすべての要素が統合された暁には、ピストンを心拍のように1秒間に1回衝突させる。そのたびに反応容器に噴射されたプラズマの煙の輪が圧縮され、短いながらも激しい核融合反応が次々に起こる。このようなパルスの核融合のほうが乱流の管理が容易になるとラバージは言う。小さなドーナツ形のプラズマを1ミリ秒かそこら保持するだけですむからだ。

ラバージによれば、爆縮を起こす適切な密度と必要な温度、磁場強度を持つプラズマをすでに生成できているという。だがプラズマの持続時間はわずか20マイクロ秒で(目標の1/50)、すぐに不安定化してしまう。トランペットのベルのような形状の新設計のノズルを使えば、プラズマ自身が作り出す磁場が適度にねじれ、核融合を起こすのに十分な時間、燃料をまとめておけるだろうとラバージは自信を見せる。

それでもなお、「ジェネラル・フュージョン社の方法は絶対にうまくいかないと業界人の多くが言っている」と同社に協力しているブレナンは言う。批判者は、専門家を長年苦しめてきたプラズマの問題を新興ベンチャー企業

の小さなチームが克服できるとは思っていない。「だが、彼らが克服できないという科学的な理由はあるか?」とブレナンは問う。「ない」。

一方、ニューメキシコ州のサンディア研究所はMagLIFという方式を使った実験で新興ベンチャー企業がまだ成しえていないことに成功している。かなりの核融合を起こすことだ。MagLIFはNIFと同様、高密度のイオン(1cm³当たり約10²⁴個)とわずかなナノ秒レベルの短いエネルギー閉じ込め時間を狙っている。だが、サンディア研究所の装置は差し渡し34mで、NIFよりもはるかに小さく安価だ。理由は、鉛筆についている消しゴムほどの大きさの円筒容器に閉じ込められた燃料を、ワンツーパーチで加熱して圧縮するからだ。

MagLIFを支える「Zマシン」は1900万アンペアのパルス電流を流して強い磁場を生じ、この力で円筒容器を押しつぶす。爆縮し始めた燃料に1兆ワットのレーザーを短時間照射し、燃料をイオン化する。Zマシンが発生させた別の磁場が、プラズマが容器の両端から噴出するのを防ぐ。しかし、崩壊する容器は不安定になり、燃料が側面から漏れ出す恐れがある。

MagLIFの1回のショットで起こる核融合は2013年後半の実験開始から100倍に増えた。「MagLIFはすでにとてもうまくいっている」とスーは言う。プロジェクトリーダーのシナーズ (Daniel Sinars) は、2016年後半に予定している実験ではさらに良い結果が期待できると言う。

順当にいけば、パルス電流を2500万アンペアに引き上げる予定だ。これによって核融合反応が10¹⁶回起こるはずで、核融合を起こす過程で燃料が

吸収したエネルギーを十分に相殺できる。2014年のNIFの成果に相当するものを数分の1のコストで実現できるのだ。「非常にエキサイティングなものになるだろう」とシナーズは言う。

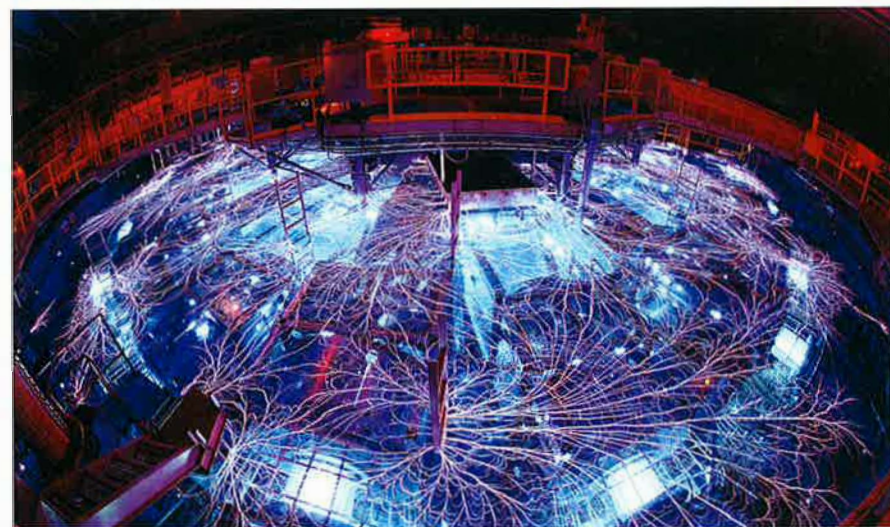
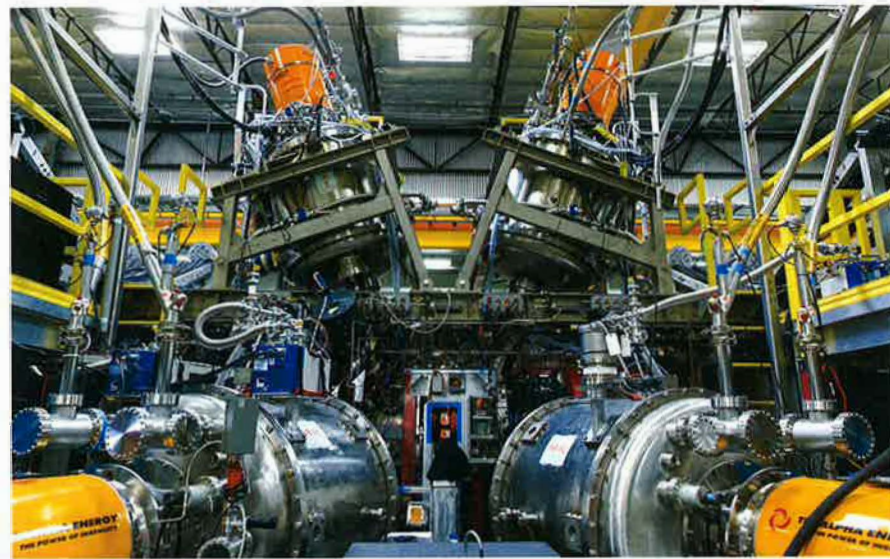
サンディア研究所はすでにZマシンの改良計画を立てている。パルス電流を6500万アンペアに引き上げ、従来の重水素燃料に三重水素を加えることで、新型のZ800は1回のショットで最大10万倍のエネルギーを生み出せるだろう。この改良で自己点火、つまり持続的な核融合をITERよりも10年以上早く実現できるだろうか? 同研究所の研究者はできるとみている。

サンディア研究所は国立の研究所なので、大幅な改良には米議会の承認が必要だが、議会はこのところ予算削減モードだ。だが、開発競争がその雰囲気を変えるかもしれない。スラッツによれば、中国はすでにZマシンの小型版を建設してサンディア研究所の公表済みの実験を再現しており、ロシアも同様の5000万アンペアの装置の建設を計画している。

温度を上げる

これらの核融合計画のいずれかが必要なイオン密度と閉じ込め時間を達成できたとしても、点火に必要な第3の条件を満たす必要がある。極めて高いプラズマ温度の実現だ。この達成は難しい。核融合反応が始まってすぐに、発光や電子の相互作用など多くの要因によってプラズマ温度が下がり、反応が止まってしまうからだ。

例えばサンディア研究所のシナーズとスラッツは、レーザーでモデル予測ほど燃料が加熱されないのはなぜなのか困惑している。燃料容器の口を覆う狭い窓がレーザーを散乱しているのかもしれないが、そもそもレーザーが目的にそぐわないのかもしれない。商用炉では「別の加熱方法を採用したいところだ」とシナーズも認める。開発チ



入射装置とZマシン 上はトライアルファ社の入射装置(4基写っている)。発射された原子ビームが、核融合が起こっている高温プラズマを炉心内で回転させ、安定した状態に保つ。下はサンディア研究所のZマシン。Zマシンが供給する短パルス大電流によって強力な磁場が発生し、核融合燃料を圧縮する。

ームはレーザー加熱の改良を試みているが、だめだった場合も、少なくとも早い段階でそうと判明するだろう。

トライアルファ社は競合他社よりもずっと高い温度を実現する必要がある。陽子とホウ素11の混合燃料を使用しており、核融合が起こる温度が35億℃と、重水素・三重水素(DT)燃料の場合の20倍以上だからだ。

高温のプラズマほど閉じ込めが難しくなる傾向にある。しかしビンダーバウアーは同社のエネルギー閉じ込めが温度の上昇とともに改善する可能性に賭けている。まだ実験段階だが、新型のC-2Wでもプラズマを必要な温度

の1%までしか加熱できず、30ミリ秒しか保持できないだろう。ビンダーバウアーは物理学の賭けに負ける可能性を認めつつ言う。「この条件領域に関しては実測データがまだない。検証する必要がある」。

ジェネラル・フュージョン社も未検証の物理学に取り組みねばならない。特にプラズマから熱が逃げる速さだ。「これは第一原理からは計算できないので、悪い驚きが待っている可能性はある。そして良い驚きも」とラバージは言う。「熱損失が予想よりも悪いなら、装置を大型化すればよい。だが、ITERなみに大きくなると問題だ」。

地形の辞典

■日本地形学連合 編 1月刊行
B5判 1032頁 定価(本体26000円+税) (160635)
収録項目8600余。50音順掲載。充実した英語索引により英和辞典としても活用可。[項目例]「一枚岩」「空谷」「陥没地形」「岩脈」「地形」「津波による地形変化」「日本地形学連合」など。

自然地理学事典

■小池一之 ほか編 1月刊行
B5判 488頁 定価(本体18000円+税) (163537)
200余の中項目で自然地理学の全体像を総合・学際的に集成。[構成]自然地理学一般/気候/水文/地形/土壌/植生/自然災害/環境汚染/気候と環境地理/地域の環境(大生態系の環境)

世界自然環境大百科 8 ステップ・プレリー・タイガ

■大澤雅彦 監訳 2月刊行
A4変型判 480頁 定価(本体28000円+税) (185188)
カラフルな図・写真と共に世界の生態を見る。[シリーズ既刊一覧] ①生きている星・地球、②サバンナ、③亜熱帯・暖温帯多雨林、④温帯落葉樹林、⑤北極・南極・高山・孤立系、⑥海洋と海岸

2017年の新刊より

ベラン世界地理大系 9 西部・中部アフリカ
■末松 壽・野澤秀樹 編訳
B4変型判 280頁
定価(本体16000円+税) (167399)

アレルギーのはなし

■秋山一男・大田健・近藤直実 編
A5判 168頁
定価(本体2800円+税) (301144)

食と味覚の 食行動の科学 —「食べる」を読みとく—
人間科学 ■今田純雄・和田有史 編
A5判 212頁
定価(本体4200円+税) (160710)

実践ベイズモデリング

■豊田秀樹 編著
A5判 224頁
定価(本体3200円+税) (122206)

〒162-8707 東京都新宿区新小川町6-29
TEL (03) 3260-7631 FAX (03) 3260-0180
http://www.asakura.co.jp
(ISBN) は 978-4-254- を省略 価格表示は税抜本体

<資料請求番号77>

実験炉から発電プラントへ

いずれかの核融合炉が自己点火を達成した日にはシャンパンが抜かれるだろう。そして、実験炉を電力と利益を生み出す発電プラントに変えるための長く困難な技術的仕事が始まる。2040年までに70%増加すると予想される世界の電力供給の一端を核融合が担うには、他のクリーンエネルギーとコスト面で競わなければならない。

ITERのような巨大なトカマク装置は決して成功しないだろうと、マサチューセッツ工科大学プラズマ科学・核融合センターの所長ホワイト(Dennis Whyte)は言う。これらの装置は発電した電力の大半を自らの稼働のために消費してしまうからだ。新興ベンチャー企業は工学に力を入れてきたが、それでも実用上の多くの課題に直面するだろう。

例えばサンディア研究所のMagLIFは当面、ショットのたびに炉の一部が破壊される。DT核融合では、生成エネルギーの大半を担う高速中性子が鋼鉄製の部品を傷つけ、しだいに放射性物質に変える。DT燃料を用いる核融合発電プラントは高速中性子を捕捉し、その熱でタービンを回して発電する一方で、副次的影響を最小限に抑える必要がある。同研究所は損傷防止策をまだ検討していないほか、ショットの回数を1週間に数回から1分間に数回に増やす方法についても大雑把で未検証の考えしかない。

ハイパーV社やカリフォルニア州タスティンの小企業マグネト・イナーシャル・フュージョン・テクノロジーズは、ARPA-Eからの資金を使ってこうした問題の解決を目指しているが、研究は進んでいない。

トライアルファ社が陽子とホウ素の核融合を追求しているのは、まさに高温高速中性子に伴う問題を回避するためだ。この燃料による核融合では3個のヘリウム原子核(α 粒子、同社の社名は3

個の α 粒子にちなむ)とX線が発生し、中性子はほとんど生じない。問題は、生成エネルギーの80%をX線が担っている点だ。

炉を太陽電池で内張りすれば、原理的にはX線光子を電気に変換できるとビンダーバウアーは言う。だが、そんな技術はまだ存在しない。このため同社は炉の内壁に沿って冷却液を流してX線の熱を回収する方法を探っている。

ジェネラル・フュージョン社は、中性子の問題や、三重水素が弱い放射性を持ち極めて希少かつ高価であるという事実をよそに、DT燃料に固執している。ラバージは融けた鉛とリチウムを反応容器の内壁に沿って回転させ、中性子のエネルギーを捕捉する計画だ。中性子はまた、一部のリチウム原子をヘリウムと三重水素に分裂させる。この三重水素は燃料として利用可能だ。

机上では見事な解決策だが、このようなシステムはまだ作られた試しがない。生じる三重水素の量はまだ不確かだとスーは言う。またラバージは、ピストンが生み出す衝撃波が鉛とリチウムの混合物を通過する際に混合物の一部が飛び散ってプラズマに混入し、核融合を止めてしまう可能性を懸念している。「火に水をかけるようなものだ」と同氏は認める。

踏み固められていない道

ITERとNIFの期待はずれの進捗状況を考慮すれば、「築き上げてきたすべての科学を糾合し、別の選択肢に目

を向けてもよい頃だ」とホワイトは言う。選択肢には、小型のトカマク装置やトカマク型をねじった形状のステラレーターも含まれる。「超小型のトカマクやジェネラル・フュージョン社の方式、小型ステラレーター、トライアルファ社の炉などの競争をぜひ見てみたい。どれが一番うまくいくだろう」。

現在、米国内の競争は投資家の厚志に依存している。核融合への代替ルートに対する米国政府の予算は年々減っているとスーは言う。彼とプリンストン大学プラズマ物理学研究所の所長ブラガー(Stewart Prager)は、革新的な核融合構想を探究するための研究費の増額を米議会に求めた。実現すれば、野心的な新興ベンチャー企業が新たに参入する可能性がある。革新的なコンセプトのいずれかが成功すれば「核融合エネルギーを数十億ドルで20年以内に開発できるだろう」とスーは言う。

そうかもしれないし、そうでないかもしれない。ビンダーバウアーは「未知の物理現象が命取りとなる可能性は大いにある」と指摘する。

だが、得られるかもしれないリターンを考えてみよう。気まぐれな風や雲に遮られる日光に左右されず、既存の電力網を大きく変更する必要もない新エネルギー源だ。また、核兵器転用の恐れがなく、メルtdownや放射性物質汚染の心配もない。発電が軌道に乗れば、他のクリーンエネルギーと比べて高価ということもないだろう。

もう少しチャレンジする価値はあるのではないかと(翻訳協力:長尾 武彦)

原題名 The Fusion Underground (SCIENTIFIC AMERICAN November 2016)

もっと知るには…

PLASMA PHYSICS: THE FUSION UPSTARTS. M. Mitchell Waldrop in *Nature*, Vol. 511, pages 398–400; July 24, 2014.

SCALING MAGNETIZED LINER INERTIAL FUSION ON Z AND FUTURE PULSED-POWER ACCELERATORS. S. A. Slutz et al. in *Physics of Plasmas*, Vol. 23, No. 2, Article No. 022702; February 2016.

「核融合炉は本当に可能か?」, M. モイヤー, 日経サイエンス2010年6月号。
競合核融合炉の設計がScientificAmerican.com/nov2016/gibbsに。