

太陽をまねる発電—フュージョン・エネルギーの開発最前線

Fusion energy development – Power generation imitating Sun

杉本 誠
SUGIMOTO Makoto

太陽では、水素と水素 (H) から重水素 (D)、ヘリウム (He) を作るという陽子・陽子 (pp) チェーンとよばれる反応により46億年にわたり水素のフュージョン反応を継続している。地上では、重水素 (D) と三重水素 (T) のフュージョン反応でのエネルギーの取り出しを目指して、研究開発が鋭意推進されている。本稿では太陽と地上の水素のフュージョン反応、そして水素のフュージョン・エネルギーを利用した発電の実現に向けた実験炉イーターの建設の進展を解説するとともに、この進展により近年の民間参入を促進していることを示した。

For 4.6 billion years, the Sun has been carrying out hydrogen fusion reactions through the pp chain to produce deuterium (D) and helium (He) from light hydrogen and light hydrogen (H). On the ground, the research and development of the reactions of deuterium (D) and tritium (T) have been progressed intensively. This paper describes the fusion reactions on the Sun and on the ground, and the progress in the construction of the ITER experimental reactor to realize hydrogen fusion power generation. It also shows how the progress made on ITER in recent years has encouraged the private sector to get involved.

キーワード：太陽、地上の太陽、水素、フュージョン、持続可能性、環境保護、SDGs

1 はじめに

太陽は永遠の輝きを放っている。その太陽の恵みを私達は古くから受けている。地球上に生命があり、人類が誕生し繁栄していることそのものが太陽の恩恵といえる。その太陽の輝き、そのエネルギーは何であるのか？ これは20世紀に入る前からの大きな謎であった。当時地球の年齢はどう考えても数十億年と考えられていたが、石炭を燃やしても、重力エネルギーを使ったとしても、とても太陽の寿命はそれには見合わない。これは大きな謎であった。そしてこの謎は、1920年代に解決された。水素の原子核4個は、ヘリウム原子核よりわずかに質量が大きいこと (0.7%) が見出されたことに始まる。アインシュタインが唱えた質量とエネルギーの等価則によりエネルギーが発生し、それが太陽のエネルギー源と考えられるようになった。

そして次に、その太陽の輝きを地上で再現できないか？ そのエネルギーを利用できないか？ と考えるのは人の性といえる。世界各国で独自にその研究が始まった。そして1953年の米国アイ

ゼンハワー大統領の「Atoms for pieces」演説を契機として、太陽をまねるエネルギーの取り出し・発電を行う研究がよりオープンな形で加速し、現在に至っている。

本稿では、フュージョン・エネルギーの研究開発の状況を以下の構成で概説する。1 太陽で起こっているフュージョン、2 地上で起こすフュージョン、3 実験炉イーター、4 フュージョン・スタートアップの勃興。

2 太陽で起こっているフュージョン¹⁾

太陽は身近な存在である。太陽は、我々の住む地球のように岩石や土でできた星ではない、プラズマでできた星である (図1)。まずそのサイズを地球と比べると、重量で約30万倍、体積で約100万倍と文字通り桁違いに大きい。その巨大さから重力も大きく (約 2.4×10^{11} 気圧)、中心部 (太陽半径の約20%) は、温度1600万度、密度160 g/cm³と評価されている。

太陽の中心部では陽子・陽子チェーンと呼ばれる水素のフュージョン反応が起きている (図2)。これが太陽の輝きの源である。この反応

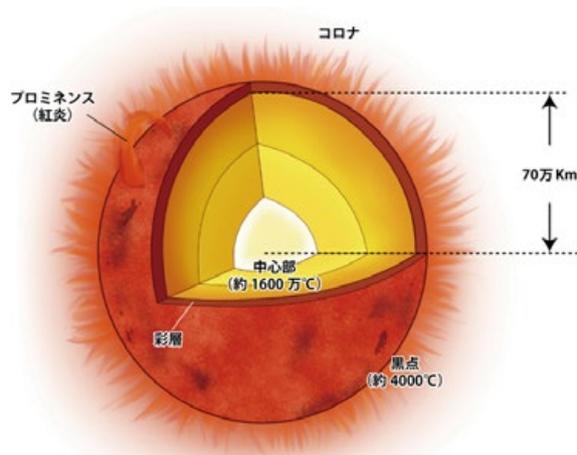
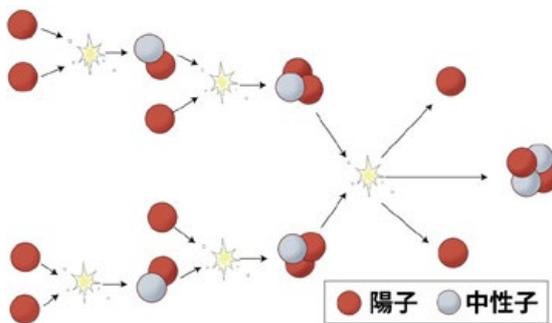
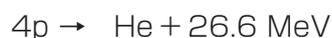


図1 太陽の構造

図2 太陽で発生しているフュージョン：
陽子・陽子 (pp) チェーン

は3つの段階からなる。まず、2つの陽子 (p, 水素から電子がはずれたプラズマ) が融合して重水素 (D) になる。次に、Dとpが融合して、ヘリウム3 (通常のヘリウムの中性子が一つ少ない同位体) になる。そして、2つのヘリウム3が融合して、ヘリウム (He) となる。この際、反応の前で質量欠損が起きており、それに見合うエネルギーが放出されている。なお、反応後の陽子は次の反応に利用される。これらの反応をまとめると、以下のように表せる。

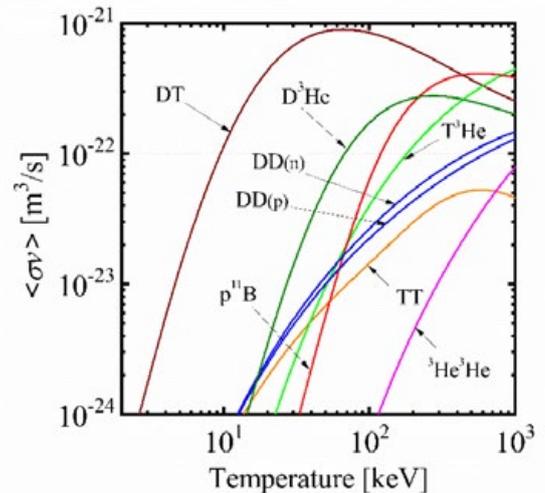
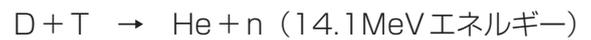
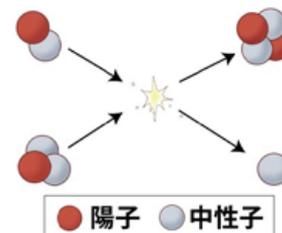


3 地上で起こすフュージョン

陽子は正の電荷を持つ。このため通常、陽子同士は衝突しない。しかし、太陽のように大きな重力があったり、温度が高かったりすると、正の電荷をもつ陽子同士を衝突させ、フュージョン反応させることができる。地上では、太陽のような大きな重力を発生させることが難しいので、温度を上げることで陽子同士を衝突させる。

さて、地上ではどんな燃料を使って、陽子を衝

突させるのがよいのか？ できるだけ低い温度 (そうはいっても十分高いが) で衝突させ、反応を起させることが有利である。反応の起きやすい燃料を使うこととなるが、いくつかの反応の例を図3に示す。DT (重水素・三重水素) 反応が、他の燃料より低い10 keV (約1億度) で反応することがわかる。DT反応 (図4) は以下のように表せる。

図3 核融合反応断面積²⁾
(九州大学松浦秀明氏のご厚意による)図4 地上で起こすフュージョン：
重水素・三重水素 (DT) の反応

ではどのようにして燃料の温度を上げるのか？ ドーナツ形状の磁場を作り、その中に燃料を入れ、かつ燃料自身をドーナツの円管方向に駆動させ (電流を流す)、自身で加熱するとともに、さらに外部から加熱する。この方法はトカマク型と呼ばれ、最も実用に近いと考えられている。トカマク型はこれまで世界各国で研究開発が行われ、現在でも実験炉イーター (ITER) を始め、世界各国の独自開発の中心装置として位置づけられている。

地上で起こすフュージョンから、発電するしくみを図5に示す。燃料であるDTをドーナツ状に閉じ込め、温度を上げ燃焼させる。燃料の外側に

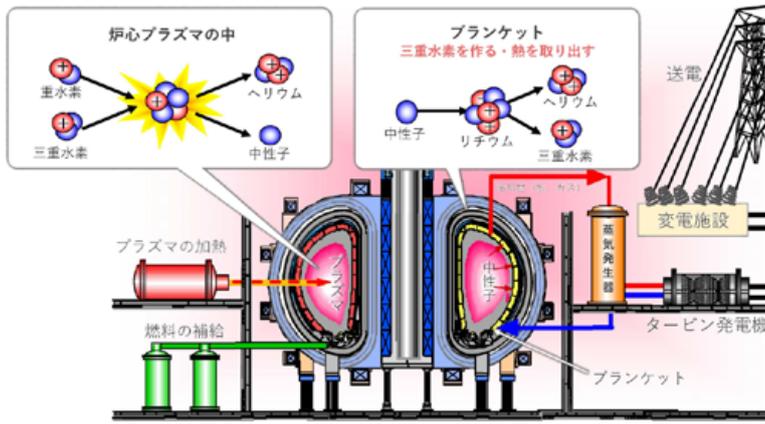


図5 フュージョンによる発電のしくみ

はブランケットと呼ばれる機器を置き、発生した中性子の運動エネルギーを熱に変換し、その熱で蒸気を作り発電する。同時にブランケット内で、反応から出た中性子を使って、燃料である三重水素 (T) を生産する。

フュージョンの安全上の特徴として、①燃焼により発生するのはヘリウムと中性子だけであること、②燃料供給がなくなればその反応が直ちに停止することが挙げられる。

4 実験炉イーター (ITER)

1985年の米ソ首脳 (レーガン・ゴルバチョフ) 会談を契機に、日・米・欧・ソ (当時) が参加し、当時の3大トカマクの成果を反映し、より大きなトカマクであるイーターの共同設計が始まった。イーターは大きく分けて3つの期間に分けられる。①概念設計段階 (1988-1990年)、②工学設計段階 (1992-2001年)、③建設段階 (2006年以降)。現在イーターは③の段階にあり、2007年にイーター建設・運転のための国際条約が発効し、その建設が進んでいる。

イーターは、世界の人口の半数以上かつ国内総生産の3/4以上を占める国々が協力して、フュージョン・エネルギーの実現の科学的・技術的実証を行うことを目的に、500 MW-400秒、エネルギー増倍率 (フュージョンパワー/入力パワー) = 10のDT燃焼を主たる目標としている。人類史上初めて、地上で実燃料を使って長時間の燃焼を行う。

イーターの国際協力の特徴として物納 (In-kind) の機器調達がある。これはイーターの

機器を、加盟国が国内で調達し、それをサイトに物納するしくみである。日本は、ホストである欧州について分担する機器が多く、かつ先端機器 (超伝導コイル、プラズマ加熱装置、遠隔ロボット等) を担っており、主導的な役割を果たしている。

イーターの近況を図6に示す。欧州が分担するサイト・建屋整備や日本を含む加盟国からの機器の搬入も進み、運転開始まで残り約3割のところまで進展している。これはイーターに必要な技術基盤が整ったことを意味する。



図6 イーター建設サイト (2023年4月) イーター機構提供

日本は、世界最大のニオブ・スズ (Nb_3Sn) 製の超伝導コイル (図7) を世界に先駆けて完成させ、サイトに搬入し、その技術力を世界に示した。このイーター用のニオブ・スズ超伝導導体は、②の工学設計段階から着手し、約30年の開発期間を要した。2000年にはイーター実機と同じサイズのモジュールの超伝導コイルを、実機と同じ条件で運転できることを実証し、イーター

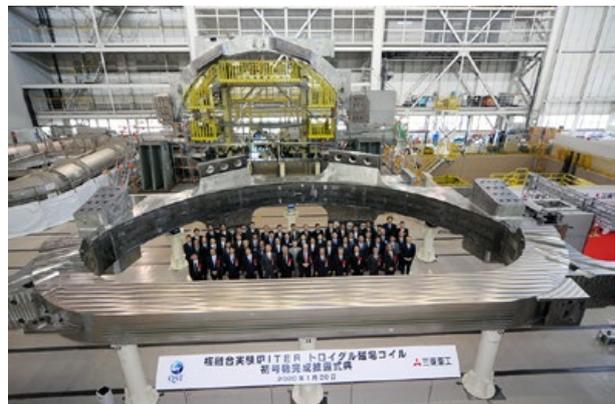


図7 イーター超伝導コイル初号機の完成 (2020年1月)

建設への技術的な裏付けとなった。またそれ以降、超伝導コイルがフュージョン装置に適用されることが当たり前になった。

そもそも地上のフュージョンでは、燃料を閉込めるための磁場は電磁石で発生させる。当初はこの電磁石には銅製のもが使われていた。装置が大型化し、運転時間が長くなると、銅製コイルではそのエネルギー損失が無視できなくなる。正味のエネルギーを得るためには超伝導コイルが不可欠である。このための超伝導技術はフュージョンによる発電には必須のものであり、その開発は世界中で進められている。また超伝導技術だけでなく、フュージョン発電には多くの炉工学技術（加熱工学、ロボット技術等）の開発が必要で、その裾野は広い。繰り返しになるが、これらの工学技術はイーター建設により大きく進展した。

5 フュージョン・スタートアップの勃興

イーターの建設進捗とそのスピノフを受けて、フュージョン開発への投資が増え、民間のフュージョン・スタートアップが設立されている。2021年時点でフュージョン実現を目指すスタートアップは25社、投資額は5千億円を超え³⁾、更に拡大中である。その多くは、早期の発電、送電グリッドへの接続を謳っている。他方、彼らの目標に対し“voodoo science（疑似科学）”という批判もある⁴⁾が、フュージョン・エネルギー実現への挑戦者が増えることを歓迎したい。J.Parisi博士らによれば⁵⁾、スタートアップが手掛ける装置は、1960年代のトカマク装置（ソ連T3、日JFT等）に相当する（図8）と考えられる。また燃料をDTではなく、水素・ホウ素（ $p^{11}B$ ）や水素・ヘリウム（ D^3He ）を使う装置もある。これらの燃焼のためにはDT燃料より更に一桁高い温度が必要である（図3再引用）。

我が国では、研究開発の進展と世界の開発環境の変化を受けて、2023年4月にフュージョンエネルギー・イノベーション戦略を策定した⁶⁾。これまでのイーターから原型炉への開発アプローチに加え、一層の産業育成を図り、早期のフュージョン発電の実現を目指すものである。新たに多

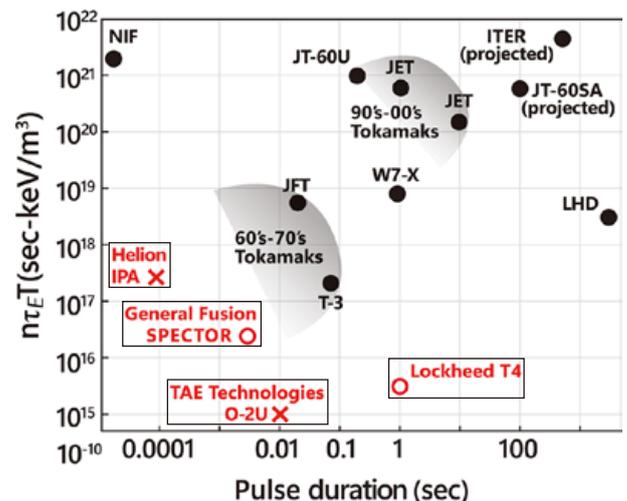


図8 これまでの装置（黒文字）とスタートアップ（囲み文字）のプラズマ閉込め指標（○印はDT/DD燃料、×印はそれ以外の燃料示す）J.Parisi博士（PPPL）のご厚意による。

くの挑戦者の参画を得て、太陽をまねたフュージョン発電をできるだけ早く地上で実現したい。皆様のご理解とご支援を何卒お願いします。

謝辞

九州大学松浦秀明氏、プリンストン・プラズマ物理研究所Jason PARISI氏に図をご提供いただきました。ここに記して感謝いたします。

<参考文献>

- 1) クリストファー・クーパー：太陽大図鑑，緑書房，2015
- 2) 松浦秀明：プラズマ・核融合学会誌，Vol.98（2022），No.2，pp.65-71
- 3) 武田秀太郎他：原子力学会誌，Vol.64（2022），No.10，pp.553-556
- 4) D.L.Jassby：APS Newsletter，April 2019，pp.13-16
- 5) J.Parisi and J.Ball：The future of fusion energy，World Scientific，2019，pp.277-309
- 6) 内閣府HP，<https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/index>

杉本 誠（すぎもと まこと）
技術士（機械／原子力・放射線部門）

量子科学技術研究開発機構
イーター日本国内機関長
日本技術士会原子力・放射線部会S幹事
工学博士
e-mail：sugimoto.makoto@qst.go.jp

