

【解説】

核融合炉とトリチウム

～ 新エネルギーの利用に向けて ～

工藤博司

東北大学大学名誉教授

〒110-0015 東京都台東区東上野 6-7-2 放射線教育フォーラム

E-mail: forum@ref.or.jp

(2023年1月16日受理)

要旨

核融合炉は太陽と同じように水素の仲間 (同位体) の原子核同士の融合反応を地上に再現することから“地上の太陽”と呼ばれ、発生する大きなエネルギーを発電などに利用する二酸化炭素を出さないクリーンエネルギー源としてその実現が待たれる。ただ、水素 (H) が“燃えている”太陽と違い、重力が太陽に比べてはるかに小さい地上では重水素 (^2H , D) とトリチウム (^3H , T) を燃料として用いる。重水素は海水中に無尽蔵に存在するがトリチウムは自然界にはごくわずかしか存在しないので、燃料として利用するためには人為的につくって供給しなければならない。トリチウムは放射性核種であり、その利用にあたっては社会的に受容されるためにも取り扱いの安全確保は欠かせない。本稿では、新たなエネルギー利用の到来に備えて核融合炉開発の概要を紹介するとともに、トリチウムとは何かを知るための基礎知識を提供する。

1. はじめに

昨年 (2022年) 12月13日、米国エネルギー省が「実験で核融合を起こすために投入した分を上回るエネルギーを取り出せた」と発表した。¹⁾ 得られたエネルギーは、やかん数杯分の湯を沸かす程度であり実用化にはまだ多くの課題が残されているが、エネルギー収支がプラスに転じたことを「歴史に残る画期的成果」と発表した。

わが国でも最近、核融合炉の開発に再び目が向けられている。昨年8月、岸田首相が原子力発電所の新增設や建て替え (リプレース) について検討するよう指示したことを受けて、経済産業省の原子力小委員会 (山口彰委員長) は再稼働への総力結集、既設原発の最大限の活用、次世代革新炉の開発・建設、使用済み核燃料の処分などバックエンドプロセスの加速の4点を検討対象に挙げた。次世代革新炉には革新軽水炉、小型 (軽水) モジュール炉、高速炉、高温ガス炉に加え核融合炉が含まれる。核融合発電はまだ研究段階にあり実用化は2050年代以降とみられるが、核融合炉が検討対象とされたことに注目したい。

核融合炉は他の四つの原子力エネルギーの利用とは根本的に異なる。後者はいずれもウランやプルトニウムなどの重い元素の核分裂反応を用いる“原子炉”であるが、核融合炉は軽い元素 (主に水素同位体) の核融合反応を利用する。核融合炉では太陽と同じ原子核反応を地上で再現することから“地上の太陽”と呼ばれ究極のエネルギー源と期待されている。理論上は1グラムの燃料から石油8トン分のエネルギーが得られる。

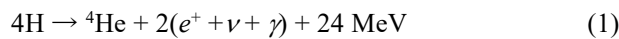
わが国の核融合研究はプラズマ科学を中心に1970年代初頭から積極的に続けられており、1985年に大型トカマク装置 JT-60 を完成させ、プラズマ閉じ込めの研究で世界をリードしてき

た。現在、2025年の運転開始を目指して35カ国の協力で南フランスのサンポール・レ・デュランスに建設中の国際熱核融合実験炉 ITER (イーターと発音、International Thermonuclear Experimental Reactor) でも主要国の一つとして計画完遂に向けて中心的役割を演じている。

最初に実現する核融合炉は、燃料として重水素 (D) とトリチウム (T) を使用する D-T 炉になると考えられる。重水素は海水中に無尽蔵に存在するが、トリチウムは天然にごくわずかしき存在しない。そのため、トリチウムを燃料として使うためには人為的に作る必要がある。筆者はかつて核融合炉燃料トリチウムの大量製造技術開発に携わったことがあり、²⁾ 本稿では核融合炉との関連でトリチウムの物理学的・化学的性質、存在、製造、安全取り扱いなどについて解説する。「トリチウムとは何か」を知ることは、福島第一原子力発電所で発生する ALPS 処理水の海洋放出の環境影響の理解にもつながる

2. 核融合反応

太陽は“燃えている”と言っても化学的な燃焼ではない。太陽の中心部での核融合反応によって大量のエネルギーが発生し、表面 (光球) から光として放出されている。太陽の核融合反応は陽子 (水素 H の原子核 : p) 同士の融合反応であり、ひとことでは次式のように4個の水素が融合して1個のヘリウム (${}^4\text{He}$) ができる反応である。



(ここで e^+ は陽電子、 γ はガンマ線、 ν はニュートリノ)

この反応は巨大な重力がかかる太陽では 1700 度 (中心部の温度) で進行するが、太陽に比べて重力が遥かに小さい地球上では 10 億度近くの超高温でなければ起きない。

地球上で実現可能な核融合反応として次のようなものがある。

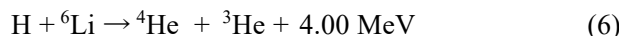
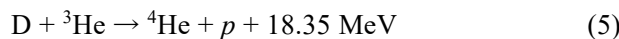
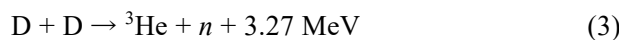


図 1 はこれらの反応確率 (縦軸: 反応断面積、 σ_v) を反応エネルギー (横軸: 電子ボルト [eV] および温度 [K]) に対してして図示したものであるが、この中で最も低いエネルギー領域 (数億度) で起きるのは反応 (2)、すなわち重水素 (D) とトリチウム (T) が融合して 17.6 MeV のエネルギーを出す D-T 反応である (中性子 n に 14.1 MeV、 ${}^4\text{He}$ に 3.5 MeV が与えられる)。この反応では、燃料として放射性のトリチウムを使う必要があるので取り扱いには注意を要する。反応 (2) から (4) は放射性燃料を使わないが、より高いエネルギー領域 (5 億度以上) での反応であり、まずは D-T 核融合炉の実現に向けて研究が進められている。

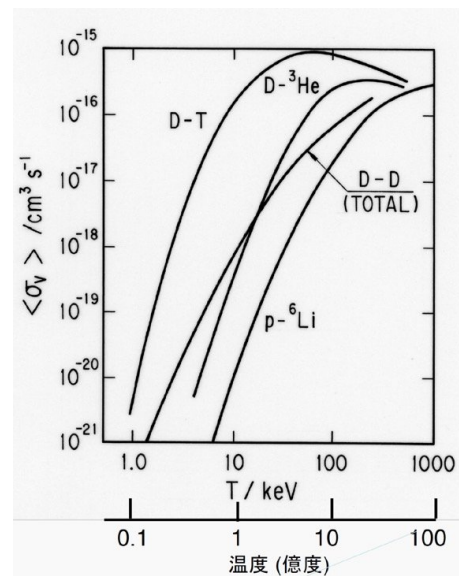


図 1 種々の核融合反応の確率 (反応断面積)

3. 核融合炉開発

原子核を融合させるためには、原子核同士を 100 fm

(10^{-13} m) ほどに接近させなければならない(ちなみに水素分子 H_2 の H-H 間距離は 74 pm [7.4×10^{-11} m])。陽電荷 (+1) をもつ陽子同士が接近するためには大きな電氣的反発(クーロン障壁)を乗り越えなければならない。

この障壁を乗り越えて核融合反応を誘起するた

めには原子核同士を高いエネルギーで衝突させる。トリチウムに重陽子 (d) を衝突させて反応 (2) の D-T 核融合を誘起して早い中性子 (14 MeV) を発生する加速器(コックロフト-ウォルトン加速器)は既に実用化されているが、エネルギー発生を目的とする“炉”には向かない。D-T 核融合炉としては重水素 (D) とトリチウム (T) のプラズマ(イオンと電子がバラバラに存在する状態)を数億度に保持して反応 (2) を誘起させる熱核融合炉の実現が有力視されており、大別すると次の二つの方式がある。強力な磁場でプラズマを閉じ込める方式と気体燃料を封じた小球にレーザー光を照射して爆縮により高温のプラズマをつくる慣性核融合である。

ミュオン触媒核融合も研究されているが、³⁾ 基礎研究の域にとどまるので本稿は触れない。

3.1 磁場閉じ込め方式

世界各国でプラズマ閉じ込め実験が進められている。磁場閉じ込め方式の中にはプラズマをドーナツ状の真空容器に閉じ込めるトカマク型や非軸対称性の空間に閉じ込めるヘリカル型などいくつかの形式が研究されている。世界的には JT-60 (日本)、JET (EU)、TFTR (米国) のようなトカマク型実験装置を中心に進められ、JT-60 では 2006 年に重水素イオン温度 5.2 億度、電子温度 3 億度のプラズマを 30 秒間閉じ込めることに成功した。⁴⁾ その技術は ITER の設計に活かされている。JET では 1997 年に世界で初めてトリチウムを装填した実験が行われ、核融合反応による 22 MJ のエネルギー発生を確認し、2021 年には 59 MJ のエネルギー発生に成功した。⁵⁾ そのトリチウム取扱技術は ITER の実験にも役立てられる。

国際熱核融合実験炉 ITER はトカマク型実験炉である(図 3)。⁶⁾ 1985 年 11 月のジュネーブでの米ソ首脳会談(レーガンとゴルバチョフ)をきっかけとして開始された国際共同研究であり、米国、ロシア、EU、日本が分担して 1992 年に開始した工学設計活動(Engineering Design Activities; EDA)に始まり、2001 年 7 月に建設に必要な技術的準備が完了した。

その後、韓国、中国、インドが加わり、2005 年 6 月に南フランスのサンポール・レ・デュランスに実験炉の建設が決まった。現在 35 カ国の協力で D と T のプラズマを 1.5 億度に保ち核融合反応で発生するエネルギーを取り出すことを目指して建設が進め

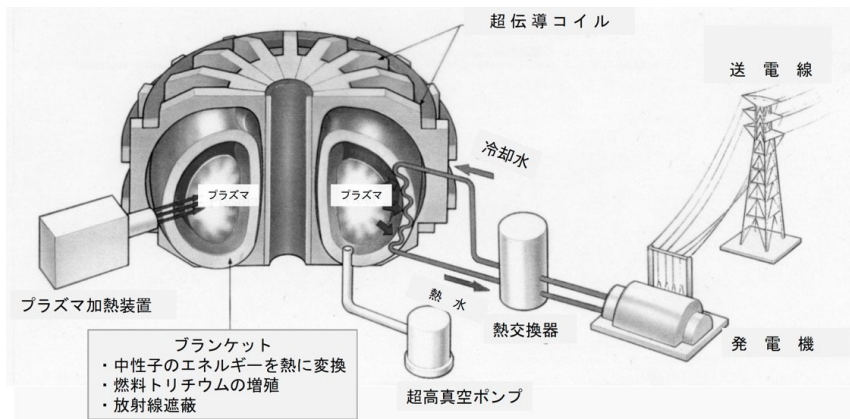


図 2 トカマク型核融合炉による発電の概念図

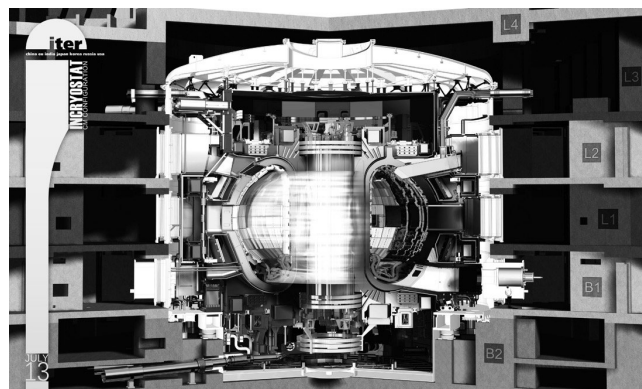


図3 建設中の国際熱核融合実験炉 (ITER) の内部 (iter.orgより)

られている(運転開始目標は2025年)。

ヘリカル型の装置を用いるプラズマ閉じ込めの研究も各国で進められている。わが国では岐阜県土岐市にある自然科学研究機構核融合科学研究所で大型ヘリカル装置(Large Helical Device; LHD)を用いる研究が進行中であり、⁷⁾大学共同利用研究機関として大学院学生の教育にも使われている。

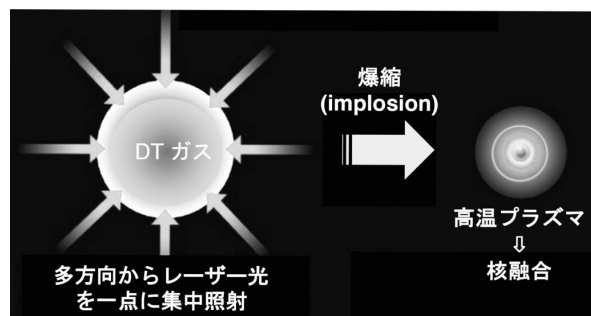


図4 レーザー核融合の概念図

3.2 慣性閉じ込め方式

この方式にもいくつかの型があるが、その中心はレーザー光の照射による爆縮を利用して高温のプラズマをつくるものである(図4)。代表的な例は米国のローレンス・リバモア国立研究所(Lawrence Livermore National Laboratory; LLNL)の国立点火施設(National Ignition Facility; NIF)であり、本稿の冒頭で紹介した米国エネルギー省の発表はこの実験装置によって得られた成果である。¹⁾この実験装置で

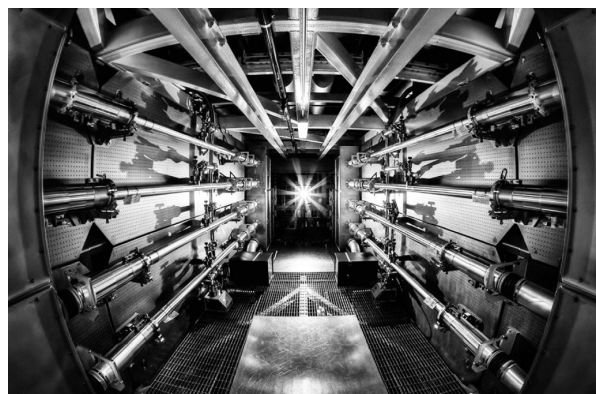


図5 米国の国立点火施設(NIF)の内部：中央奥のカプセルに192本のレーザー光を集中照射して核融合反応を誘起

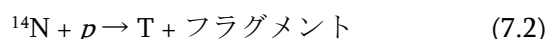
ではDTの水(膜厚約60 μm)でつくった直径2mmの球状カプセルに燃料DTガスを装填し、192本のレーザー光線を同時に照射する。エネルギーが一点に集中することによってカプセル内で爆縮(implosion)が起こり、燃料ガスが瞬時に圧縮されて高温のプラズマが発生し、熱核融合反応が起きる(図5)。⁸⁻¹¹⁾昨年12月の実験では、2.05MJのエネルギーを供給して、3.15MJの出力が得られた。

3.3 核融合炉の燃料 — 重水素とトリチウム

世界で最初に実現する核融合炉は重水素(D)とトリチウム(T)を燃料とするDT核融合炉と想定されているが、その燃料はどのように確保するのだろうか。重水素は天然存在比が0.0115%と小さいものの、海水中に無尽蔵に存在するといっておく、その濃縮技術は既に確立されている。一方、トリチウムは天然にわずかに存在するがその原子数は水素(H、軽水素ともいう)の10の18乗分の1[1×10^{-18} :これを1TU(トリチウム・ユニット)という]程度であり、燃料として使うためには人為的につくって供給する必要がある。ただし、核融合炉ではトリチウムの再生産(増殖)が可能で、最初に必要量を装填すれば(初装荷)、稼働後は炉自身がトリチウムを製造し続けることになり(図6)、理論的には燃料として補給するのは重水素だけでよいことになる。

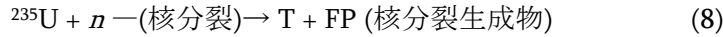
3.3.1 トリチウム生成反応

天然に存在するトリチウムは、大気上層で宇宙線[高エネルギー中性子(n)、陽子(p)、重陽子(d)など]と空気中の窒素や重水素との下記核反応によって生成する。



生成したトリチウム (T) は大気中の水蒸気分子 (H₂O) の H との交換反応によりトリチウム水 (HTO) となり、降雨によって地表に降下する。その自然界での存在比は元々 4 TU (トリチウム・ユニット) ほどだったが、1950 年代の大気中核実験のため一時最大 250 TU まで増加した。1963 年に締結された部分的核実験禁止条約 (Partial Test Ban Treaty; PTBT) で大気中核実験が禁止されて以来その量は減少し、今では 5~10 TU になっている。

なお現在でも、原子力事象にともなって反応 (8) や (9) によってトリチウムが発生し、世界中の原子力施設 (各地の原子力発電所と英・仏の核燃料再処理施設) から放出されており、その総量は 1 年あたり 0.01 TU と見積もられる。¹²⁾



反応 (8) はウラン (²³⁵U) の三体核分裂であり、軽水炉 (BWR、PWR) ではこの反応により燃料棒の中にトリチウムが生成する。重水 (D₂O) を減速材と冷却水の両方に使う重水炉 (カナダ製 CANDU 炉など) では、反応 (8) に加えて反応 (9) によって冷却水中にも多量のトリチウムが発生する。その他にトリチウムを生成する反応として次のようなものがある。



意図的に大量のトリチウムを製造する際には反応 (10) を用いる。実験室で使う微量のトリチウムの製造には反応 (12) もよく使われる。ヘリウム-3 (³He) ガスを石英アンブルに充填し、研究用原子炉で熱中性子を照射すると容易に得られるが、大量製造には向かない。ちなみに、物理実験などで使う市販の ³He は、大量に製造した T の壊変生成物として得られる (地球上の ³He の存在比は 0.0001% 程度と非常に小さいが、月には大量に存在することが知られている)。なお、反応 (8)、(9)、(10) および (12) はエネルギーが低い熱中性子 (0.025 eV) によって誘起され、反応 (11) はエネルギーが高い中性子 (速中性子) によって起きる。

DT 核融合炉では運転開始時に 5~10 kg のトリチウム (放射能に換算すると数エクサ・ベクレル [EBq=10¹⁸ Bq]) を装填するが、運転開始後はトリチウムを増殖し続けるというシステムを基本とする。ITER のようなトカマク型の炉では、真空容器 (トーラス) の外周に配置されるブラケットがその役割を担う (図 2)。ブラケット内にリチウム含有物質 (天然同位体比 : ⁶Li, 7.6%: ⁷Li, 92.4%) を充填しておくこと、図 6 に示すように、DT 反応によって生成する速中性子 n (14 MeV) がまず ⁷Li との反応 (11) によって T とアルファ粒子 α (⁴He) ならびに中性子 n' (入射した中性子とエネルギーが異なるので n' と記す) を生成する。

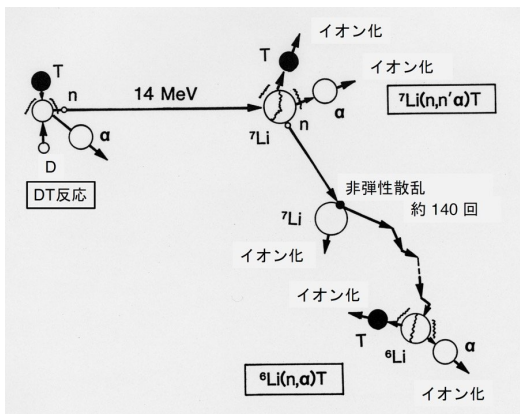


図 6 核融合炉ブラケットでのトリチウム増殖

この n' はブラケット内に存在する ⁷Li と 140 回ほど衝突を繰り返すうちにエネルギーを失って熱中性子になるので、今度は ⁶Li との反応 (10) によってさらにもう 1 個の T を生ずる。理論上は、DT 反応によって T を 1 個消費しても反応 (11) によって 1 個、続いて反応 (10) によってもう 1 個と計 2 個の T が生成するので、DT 反応の度に T が増えていくことになる。実際の核融合炉では複雑な条件が絡み合うため増殖率を 1 以上に保つことは必ずしも容易ではなく、工学上のさまざまな工夫が必要になる。