

調査レポート

核融合を理解する ～地上に「太陽」をつくる技術～

社会インフラチーム 主任コンサルタント
今野 彰

脱炭素社会や新たなエネルギー資源開発の実現という社会的背景により、核融合エネルギーが注目されている。核融合と聞くと、そもそも核融合とは何だろう、既にある原子力発電所とは同じなのか、あるいはどう違うのか、核融合とその発電は実現可能なのだろうか、など多くの疑問が浮かぶだろう。そこで本稿では核融合の原理から最近の研究開発動向まで網羅的に取り上げることで、核融合への理解を深めることを目的とする。

1 はじめに

地球を燦々と照らし、我々に様々な恩恵をもたらす太陽。その太陽の主なエネルギー源は核融合とされている。太陽の明るさと、その輝き続けている時間を考えると、太陽が燃え続けるのに必要なエネルギーには化学反応や重力といったエネルギーでは到底及ばず、太陽の主成分である水素が核融合反応を起こすことによって、数十億年という長い年月にわたって太陽として維持し続けているだろうと考えられるようになった。このことを最初に示唆したのが天文学者 A. Eddington で、1920 年のことであった¹⁾。

それからおよそ 100 年経った今、この核融合を地球上で実現しようという動きが加速し始めている。2021 年 4 月、政府は 2030 年度の新たな温室効果ガス排出削減目標として「2013 年度比 46% 減」を打ち出し、「さらに 50% の高みを目指して挑戦を続ける」と表明²⁾、2050 年には温室効果ガスの排出量を実質ゼロにすることを目指すという目標を掲げた。このような「2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会」の実現に向けて、「経済と環境の好循環」を作り上げる産業政策である「グリーン成長戦略」を示した³⁾。その戦略では、エネルギー関連産業、輸送・製造関連産業、家庭・オフィス関連産業から成長が期待される産業を 14 分野選定し、エネルギー関連産業からは具体的に、洋上風力産業と燃料アンモニア産業、水素産業、原子力産業が列举されている。原子力産業において

は、「国内での着実な再稼働の進展とともに、海外（米・英・加等）で進む次世代革新炉開発に、高い製造能力を持つ日本企業も連携して参画し、多様な原子力技術のイノベーションを加速化」させるとし、その「次世代革新炉」として、「小型炉(SMR)」、「高温ガス炉」、そして「核融合」に焦点が当てられている。

令和 3 年版科学技術・イノベーション白書⁴⁾によると、核融合エネルギーは燃料として水素を利用するため、「燃料資源が豊富であること、発電過程で温室効果ガスを発生しないこと、少量の燃料から大規模な発電が可能であること」という特長を持ち、「エネルギー問題と環境問題を根本的に解決し、カーボンニュートラル社会において重要な将来の基幹的エネルギー源として期待されている」としている。

そこで本稿では、このような社会的背景により近年注目されている「核融合」について、その基本的な原理から、核融合の実現に向けての進捗状況まで網羅的に紹介する。核融合について説明する際は適宜、既存の原子力発電との関係性にも触れるため、何が核融合による発電と同じで、何が異なるのかにも着目していただきたい。本稿により、なぜ核融合エネルギーが「エネルギー問題と環境問題を根本的に解決し、カーボンニュートラル社会において重要な将来の基幹的エネルギー源として期待されている」のか、その理解が深まることとなるだろう。（なお、本稿は 2022 年 12 月末時点での情報に基づいている。）

2 核融合とは何か

ここでは核融合の基礎について示す。そもそも核融合とは、軽い原子核同士が「融合」し重い原子核に変わることである。このとき融合前の軽い原子核の総質量と、融合後の重い原子核の質量を比べると、後者の方がわずかに軽い。この質量の違いがエネルギーとして現れるのが核融合エネルギーである。

$$E = mc^2 \quad (1)$$

という式を見たことがある方もいるだろうが、これは物理学者 A. Einstein によって見出されたもので、質量 m とエネルギー E が等価であることを表す（なお c は光の速度を表す）。式(1)から、核融合によりわずかに変化した質量が莫大なエネルギーに変換されることとなる。融合されてできた核エネルギーを利用して発電するのが核融合発電である。

核エネルギーを利用した発電と言えば原子力発電が想起されるが、原子力発電の方は重い原子核が軽い原子核に「分裂」する核分裂によって生じるエネルギーを利用したもので、全く異なるプロセスであることに注意する（ただし、核分裂によって得られるエネルギーは、核分裂の前後での質量の変化によるものであり、すなわち式(1)に従うため、この点は核融合と同じである）。つまり核分裂に基づく発電は現状実用化されていて、核融合を利用した発電は未だ実現されていないということになる。

地上で核融合を実現する場合、反応に必要な温度・圧力条件が低く、反応確率が高く、また発生するエネルギーも大きい「重水素と三重水素からヘリウムと中性子が生成される反応」が最も実現可能性が高いとされている⁵⁾。この反応は D-T 反応と呼ばれていて、D-T 反応は以下の反応式で表される。



ここで、 ${}^2_1\text{H}$ が重水素、 ${}^3_1\text{H}$ が三重水素、 ${}^4_2\text{He}$ がヘリウム、 n が中性子を表し、「MeV」（メガ電子ボルト、「メブ」と発音される）がエネルギーの単位を意味する。重水素と三重水素については後で詳述するが、水素を表す元素記号Hとヘリウムの元素記号Heの左上と左下に数字が付いている。左上の数字が質量数と呼ばれるもので、原子核を構成する粒子（陽子と中性子）の総数を表す。左下の数字が陽子の数で、これが原

子番号を表すことになる（つまり左上の数字と左下の数字の差が原子核を構成する中性子の数となる）。D-T 反応を模式的に表したのが図 1 である。陽子と中性子で構成された原子核が核融合反応に関わることとなり、これらの原子核は電氣的にプラスである。

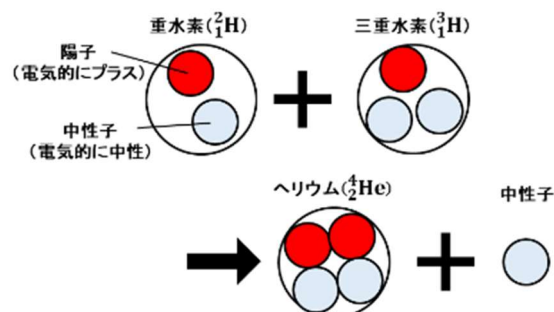


図 1 D-T 反応の模式図

D-T 反応で発生するエネルギーの 8 割は中性子をもって飛び出すため、核融合炉（核融合反応を行う炉のこと）では、ブランケットと呼ばれる特殊な壁で中性子を捕らえて熱に変換させる⁶⁾。この熱で冷却水を数百度まで加熱させ、高温高压の水蒸気で発電タービンを回転させることで電気を得ることができる。なお、核のエネルギーで冷却水を加熱させて発電タービンを回転させるという部分は、核分裂による原子力発電と同じプロセスである。

核融合で得られるエネルギー量は「核融合燃料 1 グラムから石油 8 トン分」とされる⁷⁾。参考として、現状の原子力発電、すなわち核分裂反応で用いられるウラン燃料 1 グラムからは石油 1.8 トン分のエネルギー量が得られるとされる。このことから核融合反応の方がエネルギー効率の観点で有利である。

D-T 反応のもとの 1 つである重水素（デュテリウムともいう、単に「D」と表されることもある）は、水素の安定同位体のうち、原子核が陽子 1 つと中性子 1 つから構成されるものをいう。なお通常の文脈での「水素」は原子核が陽子 1 つのみ（原子記号で表すと ${}^1_1\text{H}$ ）であり、これは「軽水素」と呼んで区別されることがある。重水素は海水から抽出可能であり、海水 1 トンあたり 33 グラム含まれる。もう 1 つの三重水素（トリチウムともいう、単に「T」と表されることもある）は原子核が陽子 1 つと中性子 2 つから構成されるものをいい、不安定であるため天然には微量しか存在しない。そのため三重水素は人工的に生成する必要がある。リチウムに中性子を当て、三重水素とヘリウムに分裂させるという方法がとられる

(リチウム自体も海水から抽出可能で、海水 1 トンあたり 0.2 グラム含まれる)。なお、先述した核融合炉の壁であるブランケット内部に、リチウムとベリリウムを格納しておけば、そこに D-T 反応で生成された中性子が入射すると三重水素の生成も可能となる(ここでのベリリウムは中性子の増倍及び遮蔽の役割を担う)。重水素を大量生成する方法は確立されていて、世界にはすでに多くの製造プラントが存在している⁸⁾。重水素は、海水から交換反応によって、軽水素でできた水分子(「軽水」という)と重水素からできた水分子(「重水」という)を抽出・分離させ、濃縮された重水を電気分解することで得ることができる。リチウムを抽出する方法としては、リチウムだけを選択的に吸着する結晶を利用したイオンふるい結晶法や、イオン伝導体(リチウムを選択的に分離する膜のようなもの)を用いたイオン伝導体リチウム分離法がある⁹⁾。なお核融合燃料の生成に必要なエネルギーは、核融合によって生じるエネルギーと比べるとはるかに小さいため、この燃料の製造方法は非効率というわけではない。

ここで核融合によるエネルギー生成のメリットとデメリットを整理する。メリットは 3 つあり、1 つは上述の通り、重水素も、三重水素の生成のためのリチウムも基本的には海水から抽出され、また地球上には海水が 1.4×10^{18} トン存在するため、燃料が枯渇することが実質的にないという点である。2 つ目は核融合反応の過程で温室効果ガスが発生する余地が無い(炭素が関係しない)ため、カーボンニュートラルに貢献できることである。3 つ目は、核分裂反応とは異なり、核融合反応で生成される粒子(D-T 反応ではヘリウムと中性子)は次の核融合反応に直接的には係わらないため、連鎖反応が起こらず、反応の暴走や爆発の危険が無いことである。仮に機器や核融合炉が故障した場合でも、核融合反応が抑制・停止される方向に働くため安全に発電が停止されることとなり、この点も原子力発電と異なる。

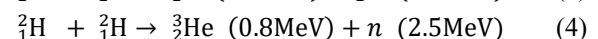
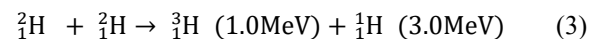
核融合のデメリットも 3 つ挙げられる。1 つが、三重水素は放射性物質であるため適切な管理が必要なことである。ただし、核分裂の方に関係するセシウム 137 といった他の放射性物質と比べると、その放射線影響は小さく、また外部被ばくは無く、体内に取り込まれたとしても蓄積されることも無いとされる。2 つ目が、核融合では高レベルの放射性廃棄物が生成されることは殆ど無いが、核融合反応で飛び出す中性子によって周囲の機器が放射化、劣化するた

め、その処分方法を検討する必要があることである。3 つ目はそもそも核融合反応を生成、維持することが難しく、D-T 反応の場合、1 億度という超高温のプラズマ状態を持続させる必要がある。上記 3 つのデメリットのうち前の 2 つは我々の生活と密に関係するため、核融合発電の実現においてはこれらに関するリスクのコミュニケーションが重要と考えられる。

以上が核融合の原理に関する説明であるが、ここでいくつか補足を入れることとする。

核エネルギーというと、核兵器を想起する方もいるだろう。先ほど、核分裂による発電は実用化済みで、核融合による発電は未だ実現されていないことに触れたが、核兵器の方では核分裂と核融合のいずれの方法でも、実現済みである。核分裂を利用したのが「原子爆弾」で、核融合を利用したのが「水素爆弾」である。ただし水素爆弾の方は、核融合を駆動させるためのエネルギーとして核分裂のエネルギーが利用されているため、実質的に核融合のみを利用した核兵器は存在しない。仮に核融合のみによる核兵器が技術的に実現可能と示せたとしても、それは核拡散防止条約や包括的核実験禁止条約の観点から、実際に製造されることは無いだろうし、そうならないことを願うばかりである。

また地上での核融合の実現で最も有力なものが D-T 反応であるが、他にも D-D 反応：



(ここで ${}^3_2\text{He}$ はヘリウム 3 という) や D- ${}^3\text{He}$ 反応：



も候補として挙げられている。D-D 反応や D- ${}^3\text{He}$ 反応は、D-T 反応と比べると技術的難易度が高い(プラズマ温度を更に高温の 10 億度程度にする必要がある⁵⁾)とされているが、その困難を乗り越えられれば利点がある。D-D 反応では、放射性物質であり、人工的に生成する必要のある三重水素が不要で、重水素のみから発電が可能という利点がある。D- ${}^3\text{He}$ 反応では、中性子が発生しないため扱いやすく、放射性物質が生成されない特長がある。なおヘリウム 3 はヘリウム (${}^4_2\text{He}$) の同位体で非放射性物質である。ただヘリウム 3 は地球上には存在しないため、現状 D- ${}^3\text{He}$ 反応の実現は難しいが、月面にはヘリウム 3 が資源と

して存在していることが知られている。将来の宇宙開発により月面のヘリウム 3 が核融合に活用されることも可能になると考えられている。ちなみに、本稿の冒頭で太陽における核融合反応に関して言及したが、太陽での核融合反応は「陽子-陽子連鎖反応」と呼ばれる、また別の反応が生じている。

3 核融合発電の方法

核融合のデメリットで触れたが、核融合を持続的に引き起こすには燃料を数億度以上の高温、高密度のプラズマ状態にし、その状態を長時間保持させる（閉じ込める）必要がある。なぜなら、燃料である重水素と三重水素をイオン化させて原子核をむき出し状態にし、その上で電氣的にプラスである原子核同士を、電氣的な反発力に逆らって、高速で衝突させ続けなければ核融合エネルギーを取り出せないためである。高速で運動する粒子を炉内に閉じ込めるための方法の一つとして「トカマク方式」がある（図 2）。

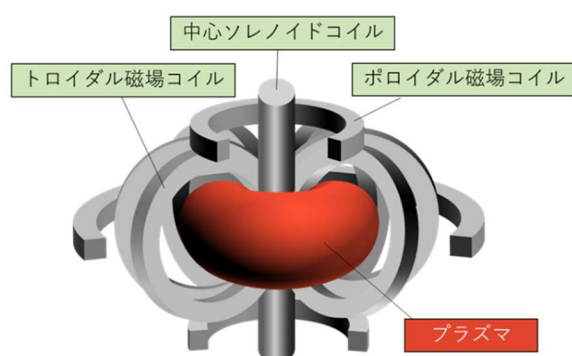


図 2 トカマク方式の模式図

トカマク方式とは磁場を利用して、超高温のプラズマをドーナツ状にし、それを真空状態にある核融合炉内の中空領域に浮かせた状態で保持することである。プラズマ状態にある原子核と電子はそれぞれ

電氣的にプラスとマイナスの粒子であるため、そこに磁力線（磁場）が存在するとそれに巻き付くように粒子が運動する。そこで磁力線を端が存在しないドーナツ型にすれば、粒子は磁力線に沿って回転し続ける。しかし、磁力線を単純なドーナツ型にすると、ドーナツの上部と下部に異なる電荷の粒子が集まり、それにより電場が生じて粒子が外部に逃げてしまう。そのため磁力線を単純なドーナツ状ではなく、ドーナツに沿って磁場を螺旋状にひねった状態にすれば電場は発生せず、その中にプラズマを閉じ込めることができる⁹⁾。このような磁場を作るために、「中心ソレノイドコイル」と「トロイダル磁場コイル」、「ポロイダル磁場コイル」という 3 つの異なるコイルを使用する。なお、磁場によってプラズマは壁から浮いた状態で保持され、またプラズマの粒子密度は低いため、プラズマ温度が数億度程度でも壁面では高々1千度程度で、壁面の耐熱性という観点では問題は無い（このことは 100 度の熱湯には触れられないが、100 度のサウナには入れることと原理は同じである）。

核融合発電の方法には他にも「ヘリカル方式」というのがある。ヘリカル方式では、トカマク方式と同様に、ドーナツ状のねじれた磁場でプラズマを閉じ込めるが、その磁場を作るために、ヘリカルコイルというねじれたコイルを使用する。装置構造は複雑になるが、ねじれた磁場を維持しやすく定常運転が見込めるという特長をもつ。トカマク方式とヘリカル方式を比較した表を表 1 に示す。

また、磁場ではなくレーザーを使用した「慣性閉じ込め方式」という、トカマク方式やヘリカル方式とは異なるアプローチで核融合を起こさせる方法もある（図 3）。慣性閉じ込め方式では、重水素と三重水素の混合水素ガスを重水素と三重水素の固体で覆った中空状態のペレット（直径数百ミクロン）を用意する。その表面部分に強力なレーザーを瞬間的に照射する

表 1 トカマク方式とヘリカル方式の比較表¹⁰⁾

	トカマク方式	ヘリカル方式
方法の概要	コイルで磁場を螺旋状にひねることでプラズマを閉じ込める	
長所	コイル形状が単純なため炉の設計製造コストが抑えられる	閉じ込めのための磁場が安定になるため、長期運転が見込める
短所	プラズマ中に大きな電磁的な不安定性が生じると、炉内の装置の損傷に繋がり得る	コイル形状が複雑になり、高度なコイル製造技術が必要となる。閉じ込め性能もトカマク式より劣る
代表的な計画	ITER(国際計画)	LHD(核融合科学研究所)

と、ペレット内向き方向に超高压の力が働き（これを爆縮という）、ペレット内部が圧縮される。すると中心部分の混合水素ガスが数億度程度の超高温になり、核融合反応が起こる。この時発生するヘリウム原子核（アルファ粒子ともいう）が周りの重水素と三重水素の固体を加熱し、核融合が連鎖的に発生するようになる。これを「中心点火方式」というが、一度爆縮された状態でさらに高強度・極短パルスレーザーを照射させることで高エネルギー電子を生成させ、これにより中心部を加熱させ核融合に至らせる「高速点火方式」というものもある。

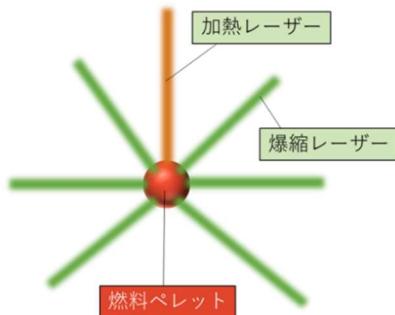


図3 慣性閉じ込め方式の模式図

核融合の方式として3つ紹介したが、現状ではトカマク方式の研究開発が最も推し進められていて、ヘリカル方式はトカマク方式に次いで性能を実証している。慣性閉じ込め方式に関しては、しばらくデータや知見を蓄積している段階にあったが、2022年12月13日、米国エネルギー省はローレンス・リバモア国立研究所において、慣性閉じ込め方式による核融合に成功したと発表した¹¹⁾。この実験では、2.05 MJ（メガジュール）の入力エネルギーに対して、核融合によるエネルギー出力量が3.15 MJと上回ったことを実証している。

トカマク方式による核融合の実現を目指している、最も代表的なプロジェクトがITER（イーター：国際熱核融合実験炉）計画である。ITER計画は、日本、欧州、米、露、中、韓、印が参画する大型国際プロジェクトである。ITER計画における核融合炉内の大きさは高さ約7m、外径約16mで、炉の本体はカダラッシ

ュ（仏サン＝ポール＝レ＝デュランス市にある研究機関）にて建設中であり、2025年度運転開始を目標としている¹²⁾。ここで、「運転開始」とはプラズマ状態を生成すること（プラズマ点火）を指し、実際に発電を行うのではないことに注意されたい。ITER計画では、50万kWの核融合出力を長時間に渡って実現し、核融合エネルギーが科学・技術的に実現可能であることの「実証」を目標としているため、発電自体は行わない¹³⁾。この成果を基に、核融合発電を実証するための原型炉（発電実証プラント）への移行判断を2030年代に、さらに実用化への実証を2050年までに行うこととしていて、ITER計画はいわば核融合発電の第一ステップと言える。2050年に向けた核融合発電のロードマップを図4に示す。日本の役割として、核融合炉の主要な装置・機器（超伝導中心ソレノイド、超伝導トロイダル磁場コイルなど）の開発、および「幅広いアプローチ（BA）活動」と呼ばれる、ITER計画を補完・支援及び原型炉に向けた研究開発を行い、核融合エネルギーの早期実用化を目指す日欧共同プロジェクトを実施している。このBA活動では、茨城県那珂市にある核融合実験装置JT-60SAを用いた、ITER計画の目標より高い圧力のプラズマ状態の長時間維持に向けた研究開発や、青森県六ヶ所村にある国際核融合エネルギー研究センターでの原型炉の設計・研究開発を実施していて、この活動により小型核融合炉での高出力のエネルギーが可能となる。

4 核融合の実現に向けて

3章で示したように、トカマク方式による核融合の実現を目指すITER計画では国内外の多くの研究機関が参画しているが、その一方で核融合発電を実現する（あるいはその装置を開発する）新興企業も増えつつある。その代表例として、General FusionやTAE Technologies、Commonwealth Fusion Systemsがある。これらのベンチャー企業は、General FusionにはAmazon.comの創業者であるJeff Bezos氏、TAE TechnologiesにはGoogle社、Commonwealth Fusion SystemsにはBill Gates氏が出資していることで有



図4 2050年に向けた核融合発電のロードマップ³⁾

名である。このように実業家や投資家の間でも核融合ベンチャーに注目が集まっている。その他の国内外の核融合スタートアップを表 2 に整理している。日本国内においても核融合ベンチャーが勃興しつつあることが分かるが、総資金調達額でみると諸外国のベンチャーと比べて桁で違うことが伺える。

これらのベンチャー企業では、最も早くても 2025 年に発電開始を謳っているところもある。2025 年と言えば、ITER 計画の運転開始（ファーストプラズマと呼ぶこともある）の時期でもある。近いうちに、新たな「太陽」が我々に恩恵をもたらすことに期待したい。

表 2 国内外の核融合スタートアップ（各社公表資料より作成）

企業名	設立国	設立年	総資金調達額 (百万米ドル)	概要
General Fusion	カナダ	2002	322	磁化標的核融合方式（磁場閉じ込めと慣性閉じ込めのハイブリッド方式）による発電を2025年に実現予定
TAE Technologies	アメリカ	1998	1200	逆転磁場配位型（磁場閉じ込めの一つ）による発電を目指し、2020年代後半に原型炉が完成予定
Commonwealth Fusion Systems	アメリカ	2018	2000	トカマク方式による発電実証試験を実施中
Tokamak Energy	イギリス	2009	123	球状トカマク方式による発電を2030年前半に目指す
京都フュージョン アリング	日本	2019	13	核融合炉に関する装置（特に核融合炉の加熱装置や熱の取出し装置）の研究開発・設計・製造、あるいは装置・コンポーネントの輸出を実施する。京都大学発のスタートアップとして設立
EX-Fusion	日本	2021	1	フルスタックのレーザー核融合商用炉の実現を目指している。大阪大学レーザー科学研究所、及び光産業創成大学院大学の研究者により設立
Helical Fusion	日本	2021	0.5	フルスタックの磁場閉じ込め方式で商用核融合炉の開発を目指している。らせん構造のコイルで磁場を形作る「ヘリカル方式」を採用

※2022年9月現在。日本、イギリス企業の総資金調達額はそれぞれ1ドル140円、1ドル1ポンドで換算

引用文献

- 1) A. S. Eddington: The Internal Constitution of the Stars, *The Scientific Monthly*, Vol. 11, No. 4 (Oct., 1920), pp. 297-303
- 2) 環境省「地球温暖化対策計画（令和3年10月22日閣議決定）」
<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/211022.html>
- 3) 内閣官房「成長戦略会議（第6回）配付資料」
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/seicho/seichosenryaku/ukaigi/dai6/index.html>
- 4) 文部科学省「令和3年版 科学技術・イノベーション白書 Society 5.0 の実現に向けて」
https://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpaa2021011421221_00023.html
- 5) 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 先進プラズマ研究開発「よくある質問」
<https://www.qst.go.jp/site/jt60/5248.html>
- 6) 文部科学省「核融合研究」
https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/iter/019.htm
- 7) 内閣府「核融合とは何か」
<https://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihu13/siryo5-2.pdf>
- 8) 岡野 邦彦, 栗原 研一, 飛田 健次:「連載講座 よくわかる核融合炉のしくみ 第12回 核融合炉実現に向けて―核融合研究開発の将来像」, 日本原子力学会誌, Vol. 48, No. 1 (2006)
- 9) 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 量子エネルギー部門「核融合発電 第08回 リチウム、海水・電池から回収」
<https://www.qst.go.jp/site/fusion/nks-rensai-08.html>
- 10) 九州大学田中謙治研究室「大型ヘリカル装置」
<https://www.aees.kyushu-u.ac.jp/kenji%20tanaka/lhd.html>
- 11) Department of Energy “DOE National Laboratory Makes History by Achieving Fusion Ignition”
<https://www.energy.gov/articles/doe-national-laboratory-makes-history-achieving-fusion-ignition>
- 12) 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 量子エネルギー部門「ITER（イーター）計画」
https://www.fusion.qst.go.jp/ITER/iter/page1_1.html
- 13) 文部科学省「ITER計画」
https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/iter/021/005.htm