

高校生のページ**未来のエネルギー源「核融合炉」を現実のものに**

エネルギー理工学研究所 エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野
長 崎 百 伸

1. 核融合反応とは

2つの原子核が十分近づくと、原子核の間に働く引力（核力）が静電的な反発力（クーロン力）に打ち勝って1つに融合し、新しい原子核が生まれることがあります。これを核融合反応と呼びます。例えば、太陽の中心部では水素原子4個が融合してヘリウム原子1個が作られる核融合反応が起こっています。ヘリウム原子1個の質量は、水素原子4個分の質量より0.7%ほど軽く、この失われた質量がエネルギーに変換されて、太陽の輝きを46億年も長い間保ち続けているのです。核融合にはこれ以外にも多くの反応がありますが、低いエネルギーで反応し反応率も高いものとして、重水素Dと三重水素Tの核融合反応があります。重水素Dと三重水素Tの原子核を融合させると、ヘリウム（アルファ粒子）Heと中性子nが生成されます。



このとき、反応前の重水素と三重水素の重さの合計より、反応後にできたヘリウムと中性子の重さの合計の方が軽くなり、この軽くなった分のエネルギー17.6 MeVが粒子の運動エネルギーの形で放出されます。この核融合反応から得られるエネルギーは膨大で、例えば、1グラムの重水素-三重水素燃料からタンクローリー1台分の石油約8トンに相当するエネルギーを得ることができます。

核融合発電は、ウランを用いた核分裂反応の発電に比べて幾つかの長所を有しています。海水に含まれる水素のうち0.015%は重水素ですから、重水素については無尽蔵と考えていいでしょうし、三重水素を生成するために必要なリチウムLiは地上に豊富に存在するだけでなく、海水中からも得ることができます。炉心に蓄えられているエネルギーはわずかで、温度が上がるにつれてエネルギーの逃げ方が速くなるため、核暴走といった危険な現象が発生しません。また、核分裂炉のように高レベル長寿命の放射性廃棄物が生成されることはありません（ただし、高エネルギーの中性子は炉壁を通り抜けて周囲の炉構造材を放射化するので、この誘導放射能を抑えるためには炉材料を適切に選ぶ必要があります）。このように、核融合発電炉は大変優れたエネルギー源なのですが、残念ながら核融合反応を用いた発電炉によるエネルギー供給はまだ実現されていません。この理由の一つには、プラズマの「閉じ込め」があります。プラズマは固体、液体、気体に次ぐ物質の第4の状態、核融合炉におけるプラズマはすべての原子や分子が電子とイオンに分かれています。これまでの実験で、装置サイズが大きくなればプラズマの閉じ込めが良くなり、核融合反応が起こりやすくなることわかってきており、核融合エネルギーを得るためには大型装置が必要となります。

2. 国際熱核融合実験炉 ITER

核融合反応を起こすためには、重水素・三重水素の2つの原子核同士を毎秒1,000キロメートル以上のスピードで衝突させる必要があります。核融合反応を維持するためには、核融合反応の結果出てくるパワーがプラズマ自身を加熱し、1億度以上に保たなければなりません。そのためには、重水素、三重

水素の原子核を高い密度で長時間一定の空間に閉じ込めておく必要があります。恒星・太陽は自分自身の重力によって超高温プラズマを閉じ込めることができますが、地球は重力が弱いため、残念ながら重力を用いてプラズマの閉じ込めることができません。地球上で核融合反応を維持しエネルギーを生成する核融合炉の方式として、現在、研究が進められている主な方式は、磁場を用いた磁場閉じ込め核融合とレーザーを用いた慣性核融合の2種類があります。

磁場閉じ込め方式の中で最も研究開発が進んでいる方式はトカマク型と呼ばれており、原理実証(科学的実証)が終了して工学的実証段階に入っています。現在、このトカマク型を採用したITER(イーター)計画が国際協力により推進されています。ITERは国際熱核融合実験炉(International Thermonuclear Experimental Reactor)のことで、ラテン語で「道」や「旅」という意味があり、核融合実用化への道という願いが込められています。ITER計画では、核融合発電が科学技術的に成立することを実証するため、重水素と三重水素を用いて大出力長時間の燃焼を行います。ITERの主目標は、自己点火及び長時間燃焼の実証、そして、核融合炉工学技術の実証です。エネルギー増倍率 Q (核融合反応を起こすために入力したパワーと核融合反応で発生したパワーの比率)が10以上、定常状態では5を目指しています。これまでの幾つかの実験装置では臨界条件 $Q=1$ を達成していますが、ITERでは出力が入力を上回り、アルファ粒子がプラズマを加熱する燃焼プラズマが作られることとなります。こうした状態は、今までの実験では達成されていないためチャレンジングですが、これまでに観測されていない新しい発見が見出される可能性もあります。現在、フランスのカダラッシュにおいて建設が進められており2020年にファーストプラズマ、2027年に重水素・三重水素を用いた核燃焼プラズマ実験を行なうことを目指し、日本・欧州連合(EU)・ロシア・米国・韓国・中国・インドの七極により進められています。詳細は、<http://www.iter.org/>(英語ページ)、<http://www.naka.jaea.go.jp/ITER/>(日本語ページ)を参照してください。多くの国々の国際協力でこれほど大きな計画が進められたことはなく、解決すべき課題があるものの、実験開始に向けて着実に準備が進められています。

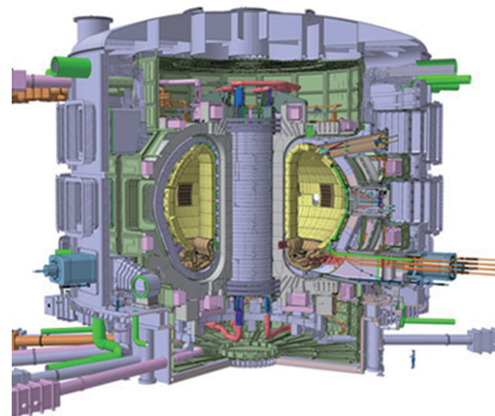


図1 国際熱核融合実験炉 ITER の概要図。<http://www.naka.jaea.go.jp/ITER/iter/index.htm> より

3. ヘリカル系閉じ込め核融合

磁場閉じ込め核融合の方式には、トカマク以外にヘリカル系と呼ばれる閉じ込め方式があります。ヘリカル系はプラズマを閉じ込めるための磁場を外部コイルによって形成しており、トカマクのようにプラズマ電流を必要としないため定常運転が原理的に可能な方式であり、破壊不安定性と呼ばれる放電が止まる不安定性が発生することはありません。ヘリカル方式には、ヘリオトロン(Heliotron)とステラレータ(Stellarator)という概念があります。ヘリオトロンはギリシャ語のヘリオス(太陽)、ステラレータは英語のステラ(星の)にちなんで名付けられました。

ヘリカル系閉じ込め磁場構造は外部コイル系によってのみ磁場を形成するので、プラズマ電流を必要とするトカマクに比べて、磁場配位設計の自由度が極めて高いことが特徴です。先進ヘリカル磁場配位として提案されているものとしては、準ヘリカル対称、準ポロイダル対称、準トロイダル対称、準等磁場配位があります。ここで、すべての配位概念に「準」が付いているのは、ヘリカル系トラスでは数学的に厳密な対称性が存在しないためです。図2に示すように、ヘリカル系核融合研究は日本だけでなく世界的に研究が行われており、W7-X装置(ドイツ・マックスプランク研究所)、TJ-II装置(スペイン・

CIEMAT 研究所)、HSX 装置 (米国・ウィスコンシン大学)、H-1 (豪・オーストラリア国立大学) などの装置があります。それぞれが特徴をもった装置で、ヘリカル系の多様性を示すとともにヘリカル系システムの可能性の高さを示しています。


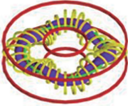


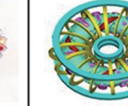

| Plasma Device (Laboratory) | H-1 (ANU) | TJ-II (CIEMAT) | LHD (NIFS) | HSX (U. Wisconsin) | Heliotron J (Kyoto Univ.) | W7-X (MPI) |
|----------------------------|--|--|--|--|--|--|
| Schedule | 1993~ | 1997~ | 1998~ | 1999~ | 1999~ | 2014~ |
| Coil System | M=3 HFC+CR+TFC | M=4 HFC+CR+TFC | M=10 HFC+PFC | M=4 Modular Coil | M=4 HFC+TFC+PFC | M=5 SC Modular Coil |
| Major Radius | 1.0 m | 1.5 m | 3.9 m | 1.2 m | 1.2 m | 6.5 m |
| Minor Radius | 0.22 m | 0.1-0.25 m | 0.6-0.65 m | 0.15 m | 0.18 m | 0.65 m |
| Plasma Volume | 0.96 m ³ | 1.43 m ³ | 30 m ³ | 0.44 m ³ | 0.82 m ³ | 54 m ³ |
| Magnetic Field | 1.0 T | 1.5 T | 3 T | 1.37 T | 1.5 T | 3.0 T |
| Pulse Length | 1 sec | 0.5 sec | CW | 0.2 sec | 0.5 sec | > 10 sec |
| Heating System | ECH (0.2MW) Helicon (~ 0.5MW) | ECH (0.6MW) NBI (4MW) | ECH (3MW) ICH (3MW) NBI (32MW) | ECH (0.2MW) | ECH (0.5MW) NBI (1.5MW) ICH (2.5MW) | ECH, ICH NBI (20-30MW) |
| Features | Flexible configuration, High beta | High rotational transform, Low shear | Moderate shear | Quasi-helical symmetry | Local quasi-isodynamicity | Quasi-isodynamicity |
| Schematic View |  |  |  |  |  |  |

図2 世界のヘリカル系装置

ヘリオトロンは京都大学核融合共同研究グループが世界で最初に提唱した概念です。連続巻ヘリカルコイルを用いたヘリカル・ヘリオトロン磁場の装置 Heliotron D を用いて実験を開始、その後、Heliotron E によって無電流プラズマの生成・加熱に成功し、ヘリカル系が核融合炉の方式として有望であることを示しました。この結果をもとに、超電導コイルを用いた大型ヘリカル装置 LHD (Large helical Device) が岐阜県・土岐市に建設され、現在、実験が行われています。高いベータ (プラズマの圧力と磁気圧力の比) プラズマの生成、高密度プラズマの維持、内部輸送障壁の形成などの成果をあげています。

エネルギー理工学研究所では、これまでのヘリカル系システムをより発展させ、準等磁場配位という概念を追求するために、Heliotron J という装置を発案・建設し、1999 年より宇治キャンパスにて実験を行なっています。図3は Heliotron J を横から見た写真で、主要なパラメタは主半径 1.2m、プラズマ小半径約 0.2m、磁場強度 1.5T です。図4に示すように、閉じ込め磁場を形成するコイルは、立体磁気軸ヘリカルコイル、2種類のトロイダルコイル、内側と外側の垂直磁場コイルから構成されており、それぞれが独立して制御できることから、多彩な閉じ込め磁場配位を形成することができる特徴を有しています。LHD のような平面磁気軸配位と比べ、磁気流体 (MHD) 安定性と高エネルギー粒子閉じ込めの良好性を同時に兼ね添えています。電子温度 1 keV (約 1000 万度)、イオン温度 0.3 keV (約 300 万度)、電子密度 $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ のプラズマパラメタを達成し、これまでの成果として、核融合閉じ込めプラズマの性能を評価する重要な指標の一つであるエネルギー閉じ込め時間が中型装置としての予測値を超える良好な閉じ込めを実証するとともに、H-mode と呼ばれる閉じ込め改善モードへの自発的遷移現象を観測しました。また、プラズマの生成・維持にオーミック電流を必要としないという長所を活かして、プラズマ中に発生する非誘導電流を打ち消す手法を開発しました。

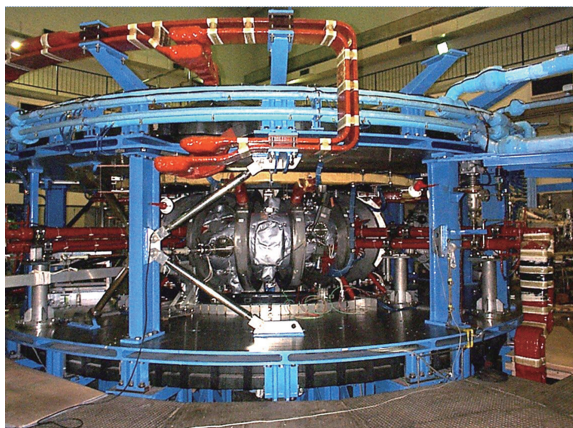


図3 Heliotron J 写真

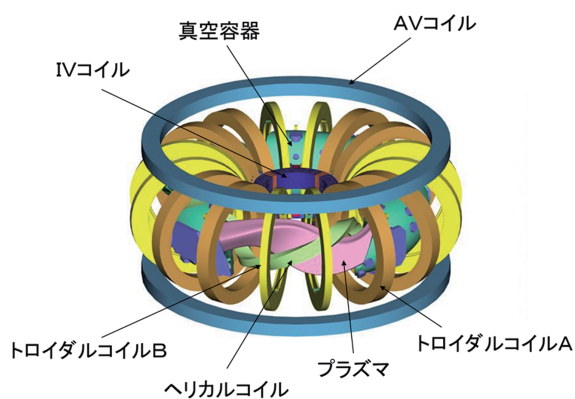


図4 Heliotron J 概要図

4. 加熱・電流駆動システム

プラズマの温度や密度は加熱入力パワーと損失パワーの収支で決まります。アルファ粒子加熱パワーだけで損失パワーと釣り合うときを自己点火と呼んでいます。核融合炉の真空容器内には初期状態としては何もないわけですから、プラズマを生成した場合には低温からスタートし、核融合反応率が高くなってアルファ粒子加熱が効く温度領域まで加熱する必要があります。加熱手法には、大きく分けて、オーミック加熱、中性粒子ビーム加熱 (Neutral Beam Injection, NBI)、波動加熱 (Wave Heating) の3種類があります。

オーミック加熱の原理は、電熱器のヒーターに電流を流すと電流によって加熱される原理と同じで、プラズマ中に電場を加えて電子を加速すると電子の運動エネルギーが増え、イオンと衝突することによってプラズマの温度が上がります。核融合プラズマの抵抗は銅やアルミのような金属と同程度の抵抗率であり、電流が流れやすいのが特徴です。NBI加熱は、プラズマのもつ平均的なエネルギーよりも高いエネルギーをもつイオンビームを核融合プラズマ中に打ち込んで、イオンの運動エネルギーをプラズマに与えて温度を上げる手法です。例えるなら、冷たい水に熱湯を注ぎ水の温度を上げることに似ています。入射された中性粒子はプラズマのイオンや電子と衝突し、再びイオンと電子に分離され加熱されます。

波動を用いた加熱では、波動を外部から励起することでプラズマを加熱します。主要な加熱方法は周波数によって分類されており、アルフベン共鳴加熱、イオンサイクロトロン共鳴加熱 (ICRH)、低域混成波共鳴加熱、そして、電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECRH) があります。プラズマの近くにアンテナを置いて波をプラズマ中に入射すると励起された波がプラズマ中を伝播し、条件を満たす領域に到達すると共鳴現象が起こって粒子を加速し、波動エネルギーが粒子へと移り粒子の運動エネルギーが増えます。

Heliotron J 装置には、NBI (30 kV, 2 MW)、ICRH (20MHz, 2.5 MW)、ECRH (70 GHz, 0.5 MW) があり、プラズマの生成・加熱に用いられています。このうち、ECRHはオーミック加熱なしのプラズマの生成に使われており、密度 $0.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ で1000万度 (1 keV) の電子温度を得ています。この温度は太陽の中心温度 (1500万度) に近いものです。ECRHでは、電子加熱を行なうためにマイクロ波領域の波を用いますが、図5に示すようなジャイロトロンと呼ばれる発振装置を用いてマイクロ波を発生させます。我々の生活で使われる電子レンジもマイクロ波 (2.45 GHz) を用いますが、大体1 kWですので、Heliotron J で用いているジャイロトロンのパワーはその500倍にもなります。

ジャイロトロンからの発振パワーが大きいため、通常利用される矩形導波管を用いると導波管内に励起される電場が大きくなりアーキングの問題が発生します。この問題を解決するため、Heliotron J では

導波管口径を大きくして電場を小さくするとともに、導波管内部を櫛状（コルゲーション）にすることで伝送損失を抑制しています。これまで、コルゲート導波管を用いた伝送により 92 % という高効率で伝送することに成功し、信頼度が高く安定したマイクロ波伝送を可能としました。また、偏波を制御する偏波器（図 6）、伝送されているマイクロ波の状況をモニターするパワーモニターシステム（図 7）、プラズマ中に入射するマイクロ波の入射を制御する入射システムなどを開発しました。最近の実験結果では、プラズマに斜め入射することで非誘導電流駆動（Electron Cyclotron Current Drive, ECCD）を行い、プラズマ中に自発的に流れる電流を抑制したり、また、プラズマの閉じ込めを劣化させる電磁流体不安定性を抑制することに成功しています。

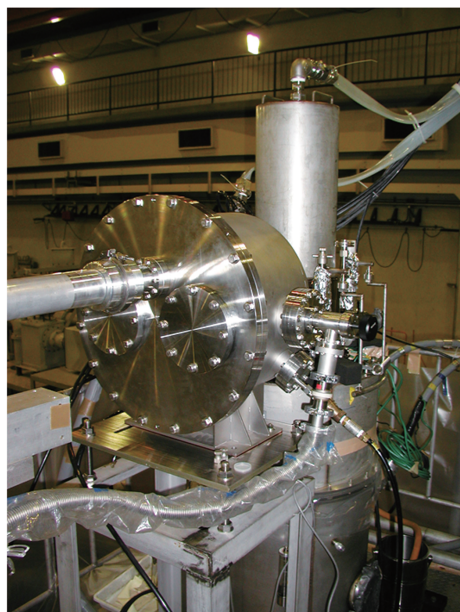


図 5 70 GHz 0.5 MW ジャイロトロン

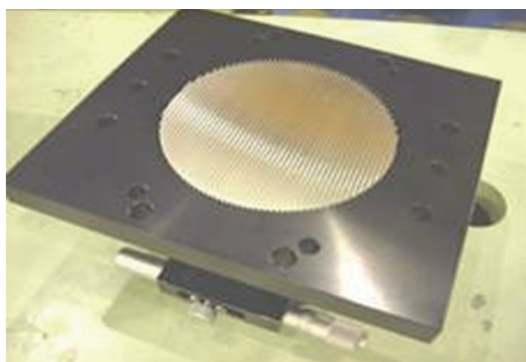


図 6 グレーティング偏波器

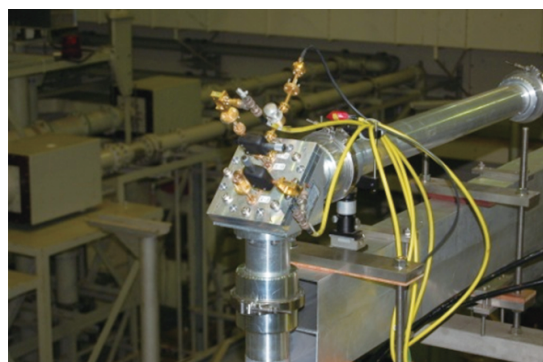


図 7 パワーモニター

5. まとめ

これまで「夢のエネルギー」と考えられてきた核融合エネルギーですが、ITER という熱核融合実験炉の建設に見られるように、現実味を帯びて議論されるようになってきました。発電炉に向けてはまだ解決すべき課題が多く残されているものの、将来の見通しが得られつつあります。エネルギー理工学研究所では、核融合炉の実現に向けた開発、核融合プラズマの物理理解を深めるため、理論と実験の両側面から研究を進めています。核融合反応や核融合発電炉について一般向けの本が出版されており、ご興味のある方は参考文献 [1][2][3] をぜひご一読ください。

参考文献

1. 井上信幸、芳野隆治、「トコトンやさしい核融合エネルギーの本」、日刊工業新聞社、2005 年
2. G. McCracken, P. Stott, 「フュージョンー宇宙のエネルギーー」、シュプリンガーフェアラーク東京、2005 年
3. プラズマ・核融合学会、「プラズマエネルギーのすべて」、日本実業出版社、2007 年