

第 1 章

核融合エネルギー

1.1 原子の構造と同位体

核融合反応のような核反応を考える時、原子の構造を把握しておく必要がある。図 1-1 に原子の構造を示す。原子は、陽子と中性子から成る原子核とその周りにある電子とで構成されている。正の電荷を持つ陽子と負の電荷を持つ電子の数は同じである。現在、確認されている原子の種類は 118 個で、そのうち自然界にある原子の種類は 92 個である。原子は陽子の数に合わせて原子番号が付けられており、図 1-1 (a) に示すように、水素の原子番号は 1、ヘリウムは 2、リチウムは 3 と続いていく。

質量数は原子核を構成する陽子と中性子の個数の合計である。原子番号は同じであるが質量数が異なる原子は中性子の数が異なり同位体と言う。図 1-1 (b) に、水素の同位体を示す。重水素には陽子が 1 個で中性子が 1 個あり質量数は 2 である。三重水素は陽子が 1 個で中性子が 2 個あるので質量数は 3 である。図 1-1 (a) に示すヘリウムは質量数が 4 のヘリウム 4 であるが、同位体として質量数が 3 のヘリウム 3 がある。図 1-1 (a) に示すリチウムは質量数が 6 のリチウム 6 であるが、質量数が 7 の同位体リチウム 7 がある。また、原子炉（軽水炉）で用いるウランの原子番号は 92 で、同位体にはウラン 234、ウラン 235、ウラン 238 等がある。

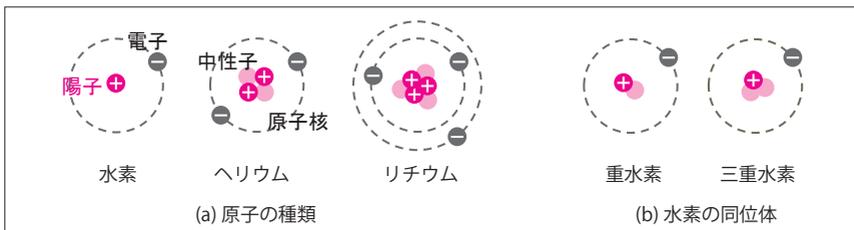


図 1-1 原子の構造

1.2 物質の状態変化

図 1-2 に示すように、一般的に、物質に与える熱量（エネルギー）が大きくなるにつれて、物質の温度は高くなる。固体と液体が共存している状態の時、エネルギーは固体から液体に状態を変える融解熱（水の場合、1g 当たりの熱量 80cal/g であり、水分子 1 個当たり 2.39×10^{-21} cal）に使われ、物質に与えるエネルギーを増やしても物質の温度は上がらない。同様に、液体と気体が共存している状態の時、エネルギーは液体から気体に状態を変える気化熱（水の場合、1g 当たり 539cal/g、水分子 1 個当たり 1.61×10^{-20} cal）に使われ、物質に与えるエネルギーを増やしても、物質の温度は上がらない。液体状態の時には、物質を構成する原子や分子は自由に動き回れるようになるが、原子や分子の平均的な距離は固体の時と大きな違いは無く、お互いに強く引き合っている。液体から気体になるにはその結合を完全に引き離すのでより多くのエネルギーが要る。

物質の温度とは物質を構成する原子や分子の運動エネルギーに対応する。物質を構成する原子や分子は個々に勝手な動きをしているが、物質の温度が高くなると、それらの粒子の運動エネルギーは更に大きくなる。この運動を**熱運動**と言う。ほとんどの物質は温度を上げていくと、固体、液体、気体へと状態変化（相変化）が起きる。これは、温度の上昇により、物質を構成している原子や分子の熱運動が活発になることによる。

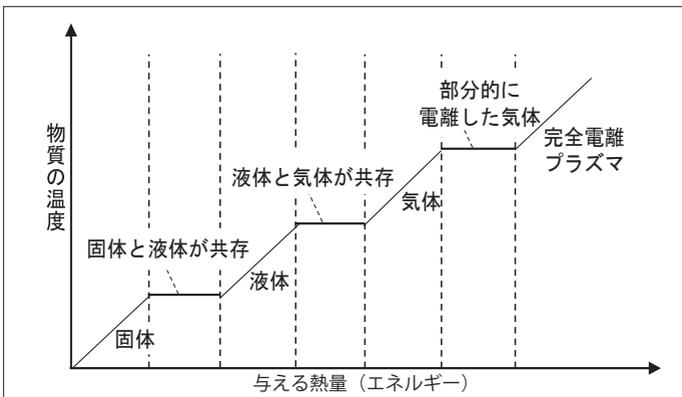


図 1-2 物質に与える熱量（エネルギー）と物質の温度の関係

気体の温度を上げると、気体分子は原子に分かれる（**解離**）。更に温度を上げていくと、原子同士が強く衝突するようになり、原子核の周りを回っていた電子がはぎとられて、原子核と電子がバラバラになり、正の電気を帯びたイオン（原子核）と、負の電荷を持つ電子に分かれる。電子は原子核から受けていた**静電気力**（**クーロン力**）を振り切って自由に運動するようになる。つまり、**電離**する。電離に必要なエネルギーを**電離エネルギー**と言う。1個の水素の電離エネルギーは 13.6eV ($=2.18 \times 10^{-18}\text{J} = 5.18 \times 10^{-19}\text{cal}$) であり、水が水蒸気になる1分子当たりの気化熱より大きい。核反応ではエネルギーの単位として電子ボルト eV を用いることが多く、 $1\text{eV} = 1.60 \times 10^{-19}\text{J}$ であり、また $1\text{cal} = 4.20\text{J}$ である。この電離した気体が**プラズマ**である。

電離の度合い（**電離度**）に応じて、弱電離、強電離と呼ばれる。気体が全て電離すると**完全電離**したプラズマになる。プラズマは固体、液体、気体とは異なる特有の性質を持ち、物質の第4の状態と呼ばれている。完全電離したプラズマに更にエネルギーを与えると、プラズマとなった物質の温度は更に上がる。

1.3 核融合反応とは

1.3.1 核融合反応と核分裂反応

核融合反応は、水素のような質量の小さい原子と他の質量の小さい原子が衝突して融合し、元の原子より質量の大きい原子ができる核反応である。**図 1-3** に核融合反応のイメージを示す。**図 1-3** では、重水素と三重水素が衝突して核融合反応を起こして、ヘリウム4（アルファ粒子）と中性子を発生するイメージを示している。物質を高温にして核融合反応を起こす場合には、その物質は電離してプラズマになっているので、重水素と三重水素はイオンになっている。重水素イオンと三

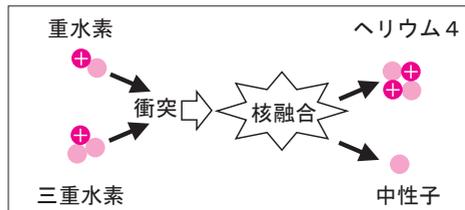


図 1-3 核融合反応のイメージ

重水素イオンが衝突してヘリウム4と中性子を発生するが、そのヘリウム4もイオンになっている。正確にはそう示す必要があるが、ここでは図1-3のように簡略化して示している。

核分裂反応は、ウランやプルトニウムのような質量の大きい原子に中性子や陽子等が衝突して、同程度の質量を持つ2つの原子と2～3個の中性子や、ベータ線(4.7.1項参照)、ガンマ線を発生する核反応である。図1-4に核分裂反応のイメージを示す。図1-4では、ウラン235の原子に中性子が衝突して、2個の核分裂生成物と2

個の中性子を発生する場合を示している。この反応では、ウラン235の原子は電離してプラズマになっていないので、ウラン235には92個の電子が原子核の周り

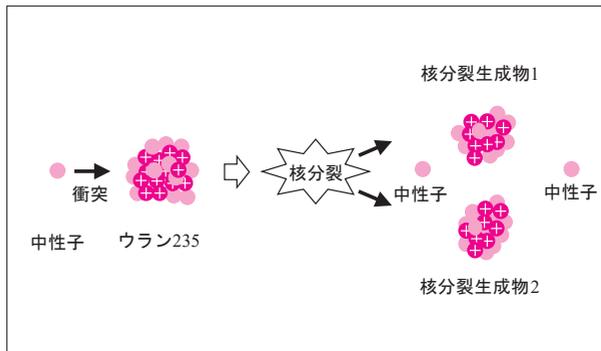


図1-4 核分裂反応のイメージ

を回っているが、図1-4では簡略化して示している。ウラン235の原子核には陽子92個と中性子143個がある。生成された核分裂生成物1と核分裂生成物2の原子核の陽子数の合計は、核分裂反応前の陽子の数と同じで92個である。生成された核分裂生成物1と核分裂生成物2の原子核の中性子数の合計は、核分裂反応前の中性子数の合計144個から、核分裂反応で発生した中性子数2個を差し引いた142個になるが、ここでは陽子と中性子の数については簡略化して図示している。

1.3.2 質量欠損

質量とエネルギーの等価性とは、根本的に質量とエネルギーは同じ価値を持つということ、アインシュタインの公式から、 $E=mc^2$ と表される。ここで、Eは

エネルギー、 m は質量、 c は光の速度である。上記の核融合反応において、核反応前の総質量に比べると、核反応後の総質量は減少している。この質量の減少分 Δm を質量欠損と言い、この減った質量が全てエネルギーに変化して、 Δmc^2 に相当するエネルギー E が発生するということである。実際には、アルファ粒子と中性子の持つ運動エネルギーとして発生する。

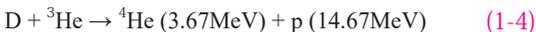
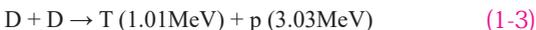
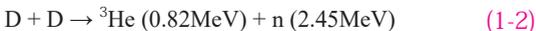
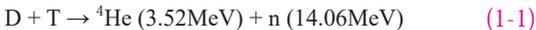
上記の核分裂反応においても質量欠損があり、それに相当するエネルギーを発生する。原子力とは、原子核の変換や核反応に伴って放出されるエネルギーのことで、核エネルギーとも言う。核エネルギーには、核融合エネルギーと核分裂エネルギー、そして原子核が崩壊する時に出す崩壊エネルギーがある。

1.3.3 主な核融合反応

原子力と言えば、既に開発され実用化されていることもあり、核分裂反応を用いる原子炉や核分裂反応を用いて発電する原子力発電を指すのが通例である。核分裂反応を用いる原子炉には、軽水炉や高速増殖炉が含まれる。

核融合炉は核融合反応を用いる炉であり、現在開発中である。核融合炉は核エネルギーを取り扱う点では、軽水炉や高速増殖炉と同じ範疇になるが、それらとは核エネルギー利用の原理や炉構造が全く異なる別ものである。ここでは、その核融合について示す。

主な核融合反応には、



等がある。これらは核反応であり反応前後で核種が異なる点が化学反応とは違う。

Dは重水素、Tは三重水素あるいはトリチウム、 ^4He はヘリウム4（単にヘリウム、アルファ粒子とも呼ぶ）、 ^3He はヘリウム3、 ^{11}B はボロン11、 n は中性子、 p は陽子である。各核反応で示している数値はその核種が持つ運動エネルギーである。例えば、DT核融合反応では17.6MeV (= 3.52 + 14.06)のエネルギーが発生することになる。

1.4 核融合反応を起こすには

1.4.1 核力

自然界には重力、電磁気力、弱い力、強い力の4つの力がある。重力はすべての物質に働く引力である(万有引力)。電磁気力は電気や磁気に関係する力で、クーロン力と電磁力(ローレンツ力)がある。弱い力は弱い相互作用、弱い核力とも呼ばれ、強い力は強い相互作用、強い核力とも言われる。弱い核力は原子核がベータ線を出して崩壊する等の原子核崩壊を引き起こす力、つまり原子の種類を変えることのできる力である。弱い核力は陽子の半径0.88fm($1\text{f} = 10^{-15}$ 、f:フェムト)よりも短い距離の間でのみ働き、電磁気力よりもはるかに小さい。

原子核を構成している陽子と中性子を核子と言う。強い核力はこの核子間に働き、原子核内の核子、つまり陽子や中性子が結合しているのはこの強い核力による。強い核力の及ぼす範囲は1fmオーダーと非常に短く、2つの核子が近い距離にある時だけに作用する。核子間が1fmオーダー離れている時は引力だが、核子間が0.4fm～0.5fmと重なり合うように近いと強い斥力として働き、重なり度合いが大きい程斥力は強くなる。この引力と斥力のバランスにより、原子核は潰れずに自ら安定に存在できている。強い核力は電磁気力に比べて100倍程度大きく、原子核に別の原子核が接近した時、各原子核内の陽子間に働く電気的な斥力によってそれらを結合させることができる。

DT核融合反応のイメージ図を図1-5に示す。横軸はDイオンとTイオン間の核子間距離である。縦軸はポテンシャルエネルギーである(3.5.1項参照)。図

1-5 は、核子間距離が大きい時は核子間にはクーロン力による斥力が働くが、核子間距離が小さくなると強い核力が大きくなりある距離 r_0 以下からは強い核力による引力がクーロン力による斥力より優勢になり核子間には引力が働くようになることを示している。

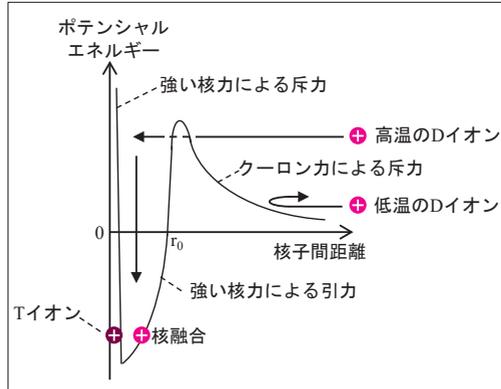


図 1-5 DT 核融合反応のイメージ図

小さいエネルギー、すなわ

ち、低温の D イオンを T イオンに接近させると、それらはプラスの電荷を持つのでクーロン力による斥力が働いて跳ね返される。1 億度程度の高温の D イオンを T イオンに勢いよく接近させると、クーロン力による斥力に打ち勝って斥力の山を乗り越えて(トンネル効果)、D イオンと T イオンの核子間距離がある距離 (3 fm 程度) 以下になると強い核力による引力が支配的に働いて D イオンと T イオンは結合 (融合) する。これが核融合である。

ウラン 235 のように核子数が 235 と大きい原子核においても、原子核の中では核子同士には強い核力による引力が働き、原子核は安定状態にある。原子核では正の電荷を持つ陽子の数が増えると陽子同士にはクーロン力による斥力による影響が大きくなるので、原子核が安定状態であるためにより多くの中性子を必要としている。例えば、重水素の場合陽子数 1 個に対して中性子数は 1 個であるが、ウラン 235 の場合は陽子数 92 個に対して中性子数は 143 個となっている。

原子核内の陽子数と中性子数のアンバランスは、原子核が不安定になる要因の一つである。このような原子核は、陽子数や中性子数のバランスが良くなるようにより安定な原子核に変化する。ウラン 235 に中性子を衝突させて起こす核分裂は、原子核内の陽子数と中性子数のアンバランスを作り、不安定な原子核がより安定な原子核に変化する原子核の崩壊現象である。

1.4.2 熱運動

核融合反応を起こすには、強い核力の及ぼす範囲まで原子核同士を近づける必要がある。そして、クーロン力による斥力に打ち勝ってぶつかり合うようにするには原子核に大きい速度を与える必要がある。

(1-1) 式の DT 核融合反応を起こすには、加速器で加速した D 粒子を固体や気体の標的 T に当てる方法が考えられる。しかし、D 粒子の加速を止めると核融合反応が止まり、また加速器では加速できる粒子数にも限りがあるので、大量の核融合反応を継続して起こすとは期待できない。

そこで、D 粒子と T 粒子の熱運動を盛んにして、それらの粒子が強く衝突して強い核力が働いて核融合反応が起こるところまで、DT 粒子の温度を上げることが考えられる。核融合では 1 億度程度の高温が必要である。絶対温度（単位：K、ケルビン）と電子ボルトとの間には $1\text{eV}=1.16 \times 10^4 \text{ K}$ の関係があるので、1 億度は 10keV ($1\text{k}=10^3$) 程度に相当する。水素の電離エネルギーは 13.6eV なので、1 億度の気体はプラズマになっている。

核融合炉では、1 億度のプラズマを一定の空間に閉じ込め、熱運動によりイオン間で衝突させて核融合反応を起こすことを考える。このように、核融合炉では、高温にして熱運動を利用するので核融合反応を**熱核融合反応**と呼び、また、発電炉としてある空間内で反応が除々に起こるよう 1 億度に制御することから、この反応を**制御熱核融合反応**と呼ぶ。

(1-1) 式の DT 核融合反応を起こすにはプラズマ温度を 1 億度にする必要がある。(1-2) と (1-3) 式の DD 核融合反応や、(1-4) や (1-5) 式の核反応ではそれ以上にプラズマ温度を高温にする必要がある。核融合開発では、核融合炉は用いる核融合反応の種類で大別して、第一世代の DT 炉、第二世代の DD 炉、第三世代の D^3He (ディー - ヘリウム 3) 炉、 p^{11}B (プロトン - ボロン) 炉等に分類されている。まずは、核融合反応が比較的得られやすい DT 核融合反応を用いる核融合炉から開発を進めている。

1.5 プラズマの閉じ込め

1.5.1 気体の閉じ込め

気体を閉じ込める場合、気体を容器に入れる。気体を容器に入れて閉じ込める時のイメージを図 1-6 に示す。気体を容器に入れると、気体を構成している原子や分子は、図 1-6 に示すように、熱運動で容器内を自由に飛び回る。気体の原子や分子は中性粒子であり、中性粒子同士の衝突は剛体球間の衝突として取り扱える。気体の原子や分子は容器壁と衝突すると跳ね返されるが、跳ね返されても原子や分子の構造に変化は無い。従って、気体を容器に入れて閉じ込めておくことができる。気体の温度、密度を T (K)、 n (個/ m^3) とすると、気体の圧力は $p = nkT$ と表せる。圧力の単位は Pa(パスカル)、温度の単位が K の時は、 k はボルツマン定数で 1.38×10^{23} J/K である。

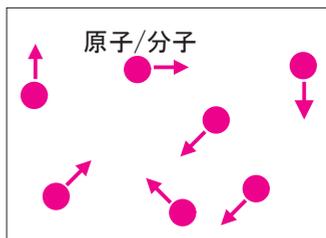


図 1-6 気体を容器に入れて閉じ込める時のイメージ

1.5.2 プラズマの作り方

核融合では、1 億度のプラズマで核融合反応を起こすことを考える。しかし、いきなり、1 億度のプラズマを作ることはできないので、低温のプラズマを作ることを考える。まず、普通の気体（例えば水素の気体）を容器に閉じ込める。この気体をプラズマにするためには、気体の原子や分子を電離して、荷電粒子を作る必要がある。この気体の原子や分子に結合している電子を引き離すには、電離エネルギーより大きいエネルギーを、原子核に結合している電子に与える必要がある。

プラズマを作る代表的な方法として、図 1-7 に電気放電を示す。気体を入れた容器の両端に電極を設置して、その電極に電圧をかけて、気体中に電場を発生させる。普通の気体は絶縁体で電気を通さない中性の気体であるが、気体の中には

宇宙線や紫外線等により、気体の原子や分子が電離して自由電子となった電子が極少し含まれている。この自由電子は電場で加速されて運動エネルギーを増し、気体中の他の原子や分子と衝突して、その原子や分子の電離を起こし新たな自由電子を発生させる。

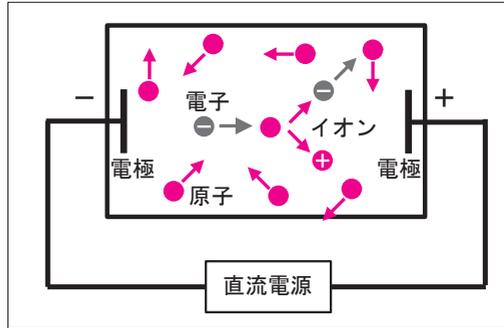


図 1-7 電気放電

新たに発生した自由電子が、更に別の原子や分子と衝突して、電離を起こし自由電子を発生させるかどうかは、電場の強さと気体の密度の兼ね合いで決まる。電場が強い気体の密度が低い時、電場で加速された電子は自由電子を次々と発生させ、自由電子となった新たな電子も自由電子を次々と発生させる電子雪崩れを起こし、電離が気体全体に及んで、プラズマを作ることができる。この現象を絶縁破壊と言う。このようにして、電気放電でプラズマを作ることができる。

プラズマを作る別の方法としては、高エネルギーの電子やイオンを気体に注入して、結合電子を弾き飛ばす方法や、高周波(3.11節参照)を気体に入射して原子や分子を振動させる方法がある。

1.5.3 プラズマの閉じ込め方式

こうして生成されたプラズマを容器に入れて閉じ込める時のイメージを図 1-8 に示す。プラズマはイオンと電子から成る電離気体であり、イオンや電子をプラズマ粒子と言う。それを容器に閉じ込めると、熱運動で容器内を自由に飛び回る。容器内を自由に飛び回るが、容器壁に当たったイオンは電荷を失い中性粒子になって容器内に戻る、つまり、イオンではなくなる。電子が容器壁に当たると容器壁に吸い込まれて、吸い込まれた電子はイオンが失った電荷と結合する、またはアースされて地面に流れていく。こうして、プラズマ粒子はなくなっていく。また、

1 億度のプラズマ粒子が容器壁に当たると壁を損傷して容器壁の健全性を維持できなくなることが懸念される。容器壁を健全に保ち、プラズマをプラズマの状態で維持するには、プラズマが容器に直接触れないように

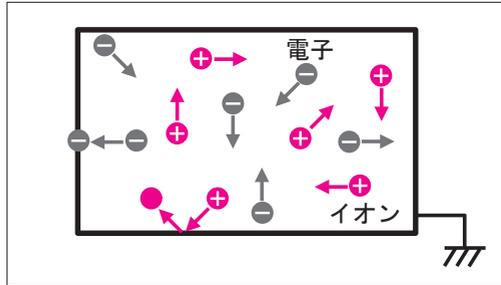


図 1-8 プラズマを容器に入れて閉じ込める時のイメージ

する工夫が必要になる。荷電粒子は磁力線に巻き付いて回転しながら磁力線に沿って移動する（3.3.2 項参照）ので、プラズマに磁場をかけて、プラズマ粒子を磁力線に巻き付けて、容器壁に触れないように、プラズマを空中に浮かせることが考えられる。別の方法として、生成したプラズマが四方八方に拡散してしまう前に核融合反応を起こして、その後プラズマが拡散して容器壁に触れても、核融合反応は既に起きているのでその核融合エネルギーを取り出して利用するという方法が考えられる。前者を**磁場閉じ込め方式**と言い、後者は**慣性閉じ込め方式**と言う。このプラズマの閉じ込め法について 1.6 節と 1.7 節で述べる。

1.6 磁場閉じ込め方式

1.6.1 直線系（開放端系）

磁場閉じ込め方式には**直線系（開放端系）**と**環状系（トーラス系）**がある。開放端系の中で最も簡単なものは単純ミラー型である。これは図 1-9 に示すように、2 つの円形コイルで構成され、2 つのコイルには同方向に電流を流す。このシステムで発生するミラー磁場では両端で磁場が強くなるので荷電粒子は**ミラー効果（磁気ミラー）**により跳ね返されるためプラズマ粒子を閉じ込めることができる。しかし、プラズマ粒子の持つエネルギーが高くなると両端からすり抜ける粒子がある。両端が**開放端**であり、磁力線に沿ってプラズマが出ていく**端損失**が

ある。端損失を抑制してプラズマの閉じ込め性能が向上するように、単純ミラー型の両端に更に磁気ミラーを接続したのがタンデムミラー型である。

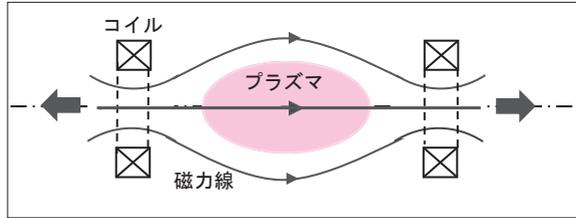


図 1-9 単純ミラー型

タンデムは縦に並べると言う意味である。この装置としては、GAMMA-10(筑波大学)がある。

1.6.2 環状系（トーラス系）

開放端系には端損失があるので、両端をつないで端損失を無くしたのが図 1-10 に示すトーラス形状（ドーナツ型）である。トーラスの軸方向をトロイダル方向、円周方向をポロイダル方向と言う。トロイダル方向の磁場をトロイダル磁場、ポロイダル方向の磁場をポロイダル磁場と言う。

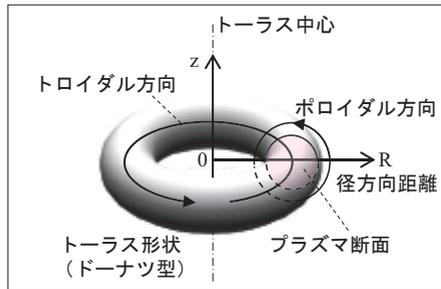


図 1-10 トーラス形状

図 1-11 に、トロイダル磁場の径方向距離 R 依存性を示す。両端をつないだことにより、トロイダル磁場はトーラス中心側で大きく径方向距離 R と共に外側に行く程小さくなる。

磁場の大きさが変化する時起こる荷電分離を図 1-12 に示す。磁場の大きさが変化するとイオンと電子の移動方向が逆になり(図 3-6 参照)、イオンと電子は図 1-12 に示すように移動する。その結果、イオンはプラスの z 方向に、電子はマイナスの z 方向に移動して、荷電分離が起き

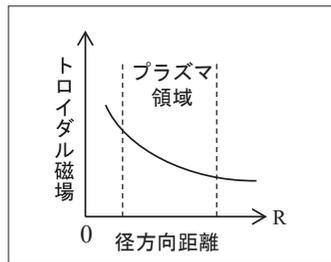


図 1-11 トロイダル磁場の径方向距離 R 依存性

る。荷電分離が起きると電場Eが発生する。電場Eが発生すると、イオンと電子は $E \times B$ ドリフトで右方向に移動する (図 3-7 参照)。

イオンは電子と共に右方向に移動しプラズマ領域外へ逃げる。これを防ぐためには、荷電分離したイオンと電子をポロイダル方向に回転してイオンと電子を混ぜて荷電分離しないようにする必要があります。トーラスの上部と下部の空間

電荷を短絡させるために、トーラスの上部と下部を結び付ける磁場が必要になる。すなわち、ポロイダル方向の磁場、すなわち、ポロイダル磁場が必要になる。

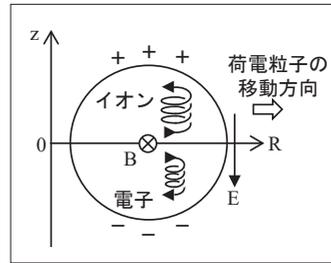


図 1-12 荷電分離

1.6.3 トカマク型閉じ込め

ポロイダル磁場を発生するにはいくつかの方法がある。その一つに **トカマク型** がある。トカマクは、図 1-13 に示すように、プラズマ中にプラズマ電流をトロイダル方向に流してこのプラズマ電流が作るポロイダル磁場を用いて荷電分離を無くする。トロイダル磁場コイルで作ったトロイダル磁場とポロイダル磁場との組み合わせでらせん形状の磁場 (磁力線のひねり) を作る。磁力線はトーラスを何回も回転してトーラス形状の面を形成する。これを **磁気面** と言う。これでトーラスの上部と下部の磁力線が結び付くので、イオンと電子が $E \times B$ ドリフトでトーラスの外側方向に移動するのが防げ、プラズマを閉じ込めることができる。尚、トーラスの半径をプラズマ主半径 (単に、主半径)、トーラス断面の半径をプラズマ副半径 (単に、副半径) と言う。トカマク型装置には **JT-60** (日本原子力研究所)、**TFTR** (米国)、**JET** (欧州共同体、1993年から欧州連合)、**ITER** (国際協定で設立された国

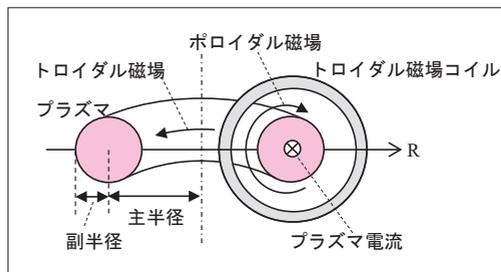


図 1-13 トカマク型

際機関 ITER 機構) 等がある。

1.6.4 ヘリカル型閉じ込め

プラズマ中にプラズマ電流を流さないで、磁力線のひねりを、コイル自身を捻ることによって達成する方式を総称して**ヘリカル型** (あるいは、**ステラレータ型**) と言う。その一つに、トーラスにらせん状に巻いたヘリカルコイルでポロイダル磁場を作る方法がある。**ステラレータ**は、トロイダル磁場コイルと、ポロイダル磁場を作る互いに電流の向きが反対のヘリカルコイルの対を用いる。電流の向きが同じヘリカルコイルを用いるのが**ヘリオトロン / トルサトロン**である。このヘリカルコイルではトーラス方向の電流成分も発生できるので、トロイダル磁場コイルを無くすることができる。この種のヘリカル型装置には**LHD** (核融合科学研究所) がある。また、トロイダル磁場コイル自体を捻ることで磁力線のひねりを作り出すヘリカル型装置にはベンデルシュタインセブンエックス **Wendelstein 7-X** (ドイツ)、トロイダル磁場コイルの磁気軸がらせん状になるようにトロイダル磁場コイルを配置して、トロイダル磁場とポロイダル磁場を作り出す装置に**立体磁気軸ヘリアック** (東北大学) がある。

1.7 慣性閉じ込め方式

慣性とは、物体は外部から力を受けてない時、初めに静止していればそのまま静止を続け、初めにある速度を持っていればその速度を保持して等速度運動を続けるという性質である。慣性閉じ込めは、プラズマが膨張して散逸する前の静止している間に核融合反応を起こす方式で、この名前がつけられている。

1.7.1 慣性核融合の原理

図 1-14 に慣性核融合の原理を示す。図 1-14 (a) に示すように、ターゲットとなる直径数 mm の球殻状の小球 (**ペレット**と呼ぶ) は多重層構造になっている。

中空部には D-T の混合気体があり、固体 D-T 燃料部は D-T 混合気体を冷凍固化したものである。燃料ペレットは四方八方から均等に圧縮されるように球形にする。

- (1) まず、ペレット最外殻の**アブレータ層**は、レーザー光や荷電粒子ビームの**エネルギードライバー**によるエネルギー注入で、プラズマ化して外側に向かって噴射する。
- (2) その結果、**図 1-14(b)** に示すように、**プッシャー層**はアブレータ層の噴射の反作用で内側に押され、その内側にある D-T の核融合燃料物質を圧縮する(**爆縮**)。
- (3) 爆縮により、D-T 混合気体は高温のプラズマ (**ホットスパーク**) になり、固体 D-T 燃料は固体密度の 1000 倍程度に達する超高密度プラズマとなる。
- (4) 中心のホットスパークは核融合の点火条件を満たすと核融合反応を起こし(**点火**)、この核融合反応により放出されたアルファ粒子が周りの主燃料である固体 D-T 燃料を加熱し、主燃料で核融合反応が起き、核融合エネルギーが放出される。

(1) から (4) の過程を毎秒 10 回程度繰り返すことにより、発電に必要なエネルギーを発生させる。以下では、エネルギードライバーの種類、照射方法、点火方法について述べる。

1.7.2 エネルギードライバー

エネルギードライバーにはレーザーと荷電粒子ビームがある。レーザーには半導体レーザーや、エキシマレーザーの一つである KrF レーザー等がある。ペレッ

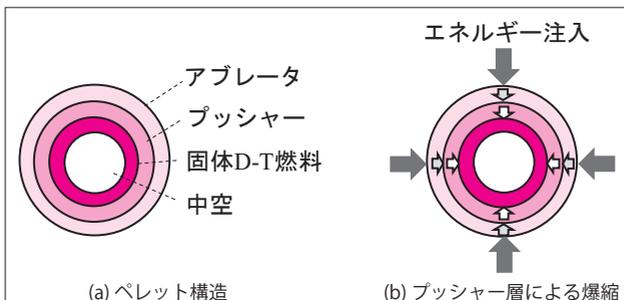


図 1-14 慣性核融合の原理

トの構造や慣性閉じ込め時間との関係でエネルギードライバーへの要求条件は変わるが、パルス幅は 10ns ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ 、n：ナノ、s：秒) 程度、パルス波形は立ち上がりの早い矩形に近いもの、高密度プラズマへのエネルギー吸収効率が高いものでプレヒート等の現象を避けるために、レーザーでは波長の選択が重要になる。

荷電粒子ビームには相対論的電子ビーム (REB)、軽イオンビーム、重イオンビームがある。REB は電気出力からビームパワーへの変換効率が高い。軽イオンビームは重水素イオンを用いることにより REB よりビーム伝播は容易になる。重イオンビームはウランのような重い原子のイオンを加速して、注入運動量の増大化等を目指す。

1.7.3 照射方法

エネルギードライバーの照射方法には、燃料ペレットを直接照射する**直接照射方式**と、エネルギードライバーのビームを金等の重金属の空洞内で X 線に変換してその X 線を空洞内に設置した燃料ペレットに照射する**間接照射方式**とがある。直接照射方式は間接照射方式に比べてエネルギードライバーのエネルギーから核融合プラズマへのエネルギー変換効率が高い。間接照射方式は直接照射方式に比べてエネルギードライバーの燃料ペレットへの照射一様性が高い長所がある。

1.7.4 点火方法

核融合点火の方法としては、爆縮したプラズマの中心で自然に発生する高温プラズマ (ホットスパーク) を用いて核融合反応を起こす**中心点火法**と、ホットスパークを利用しないで爆縮で得た低温の超高密度プラズマに超短パルス高強度レーザーで追加熱して核融合を起こす**高速点火法**とがある。

1.7.5 慣性核融合の各種方式

慣性核融合では、エネルギードライバーの種類、エネルギードライバーの燃料

ペレットへの照射方法、核融合反応の点火方法を組み合わせて核融合を起こすことになり、色々な方式が考えられている。

エネルギードライバーとしてレーザーを用いる慣性核融合（レーザー核融合）での代表的な方式には、直接照射方式 + 中心点火法、間接照射方式 + 中心点火法、直接照射方式 + 高速点火法がある。エネルギードライバーとして重イオンビームを用いる慣性核融合（重イオンビーム核融合）では、重イオンビームはペレット表面から侵入する深さ（飛程）が長いので間接照射方式が採用される。

慣性核融合では、アブレータ層で発生した低密度プラズマが高密度燃料を加速するため、エネルギードライバー照射の不均一性やペレット表面に非一様性があると、爆縮する時に**流体不安定性**（軽い流体が重い流体を支える時境界面が不安定になる現象）が成長し、また、それに伴い、爆縮時のプラズマ圧力の低下が起こる。慣性核融合ではこれを解決することが課題である。高速点火法は、爆縮に伴う困難さを軽減するために開発されている方法である。レーザー慣性核融合装置としては、**激光 XII 号**（大阪大学）、国立点火施設 **NIF**（米国）、**LMJ**（フランス）等がある。

以上のように、プラズマ閉じ込め方式には色々な方式がある。発電プラントには定常で安定に電力を供給することが求められる。大型プラントはそれ自体が複雑なシステムになるので、構成はできるだけ簡素にして構造は製造・保守のし易いものであることが望まれる。核融合炉ではそれに応えられるプラズマ閉じ込め方式を選択することになる。以下の章では、それを満たすシステムの一つと考えられるトカマク型核融合炉について示す。

第2章

核融合プラントの基礎

2.1 プラズマ断面形状

トカマクでは、**図 2-1** に示すように、プラズマを閉じ込めるために、外部コイルで作る**トロイダル磁場**と、プラズマ中に電流を流してその電流が作る**ポロイダル磁場**とを用いる。これらの磁場の合成でできるらせん状の磁力線で**トーラス**形状を作る。

プラズマ中には、荷電粒子である、重水素イオン（D イオン）、三重水素イオン（T イオン）、ヘリウムイオン（He イオン）、電子や、電荷を持たない中性子等が存在する。荷電粒子は磁力線に巻き付きながら移動するので、これらのプラズマ粒子は磁力線が作るトーラス形状のカゴに閉じ込められることになる。プラズマ断面形状は閉じ込め性能向上の点から、楕円形あるいは D 型形状にする。この領域を**炉心プラズマ**と言う。

DT 核融合反応を起こすために、炉心プラズマを**プラズマ加熱 / 電流駆動装置**で加熱する。そして、プラズマの外側に**ブランケット**と**ダイバータ**を設け、プラズマから放射される粒子や熱を受け止める。そのパワーフローを次に示す。

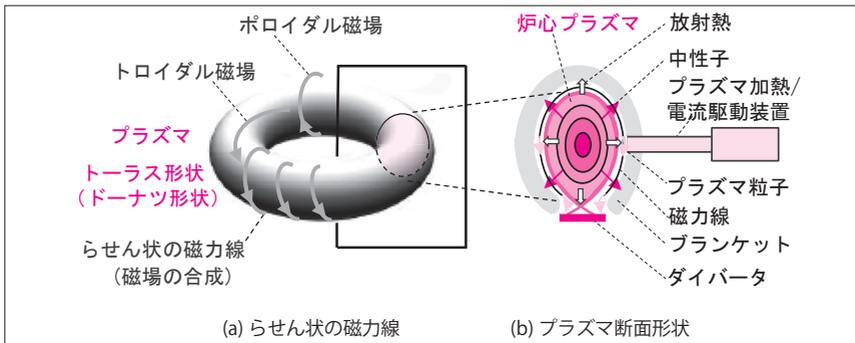


図 2-1 トカマクのプラズマ閉じ込め

2.2 核融合炉内のパワーフロー

図 2-2 に炉心プラズマからの**パワーフロー**を示す。DT 核融合反応で中性子と

アルファ粒子（ヘリウム）が生成される。炉心プラズマで得られた核融合出力は中性子とアルファ粒子が持つパワーである。中性子は磁力線に巻き付くことなく四方八方へ飛び散る。この中性子の持つパワーを最初に受け止めるところに**第一壁**を設ける。第一壁はブランケットのプラズマ側表面に設置する。炉心プラズマの周辺には炉心プラズマの温度密度より低いプラズマがあり、**スクレイプオフプラズマ**、あるいは、**スクレイプオフ層**と言う。第一壁はスクレイプオフ層の外側に炉心プラズマを覆うように設置する。

アルファ粒子は荷電粒子であり、炉心プラズマ内で磁力線に巻き付きながら運動し、炉心プラズマのDTプラズマ粒子にパワーを与えてプラズマ粒子を加熱し、それに伴い、アルファ粒子は自身が持つパワーを失っていく。アルファ粒子からパワーを与えられたプラズマ粒子は加熱され熱運動が盛んになり核融合反応を起こす。また、アルファ粒子から与えられたプラズマ粒子が持つパワーの一部は**放射熱**として四方八方に飛散して第一壁へ行く。核融合反応を起こさなかったプラズマ粒子やパワーを失ったアルファ粒子は、磁力線に巻き付きながら、炉心プラズマの中心部から周辺へと動き、炉心プラズマ領域からスクレイプオフ層へと移って行く。

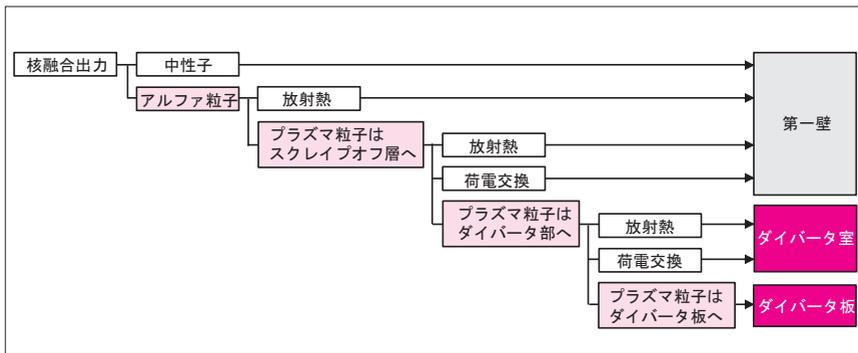


図 2-2 炉心プラズマからのパワーフロー

プラズマ粒子は、スクレイプオフ層を通り**ダイバータ**まで輸送される途中で、一部は放射熱として第一壁にパワーを与える。また、プラズマ粒子の一部はスク

レイプオフ層にいる中性粒子と衝突して荷電交換をして中性粒子となり、磁力線に巻き付きながら運動するのを止めて四方八方に飛散して、そのパワーを第一壁に与える。残りのプラズマ粒子は磁力線に巻き付きながら磁力線に沿ってダイバータ部へと進む。

ダイバータで磁力線が当たる壁をダイバータ板という。ダイバータ板周辺にできるプラズマをダイバータプラズマといい、その囲まれた領域をダイバータ室という。ダイバータ室では、磁力線に巻き付きながら磁力線に沿って進んできたプラズマ粒子が持つパワーの一部は放射熱や荷電交換で、ダイバータ室全体へ飛散される。残りのパワーを持つプラズマ粒子は磁力線に沿ってダイバータ板に到達してそこで中性化し、中性粒子としてダイバータ室に放出される。放出された中性粒子はイオン化して再び磁力線に沿ってダイバータ板に向かう。このリサイクリングで、ダイバータ室の密度は上昇しある値のところで圧力平衡が保たれる。ダイバータ板はこの圧力平衡にあるプラズマに曝されその熱負荷を受ける。中性子や放射熱、プラズマ粒子が最初に当たる第一壁やダイバータ板をプラズマ対向壁と言う。

2.3 核融合プラントのパワーフロー

図 2-3 に核融合プラントのパワーフローを示す。プラズマ内で発生した核融合エネルギーは中性子とアルファ粒子が持つ運動エネルギーでその大きさは 4 : 1 の割合である。

ブランケットとダイバータでは、運動エネルギーを熱エネルギーに変換すると共に、中性子はそれぞれの構成材料と衝突し核発熱を発生する。運動エネルギーから熱エネ

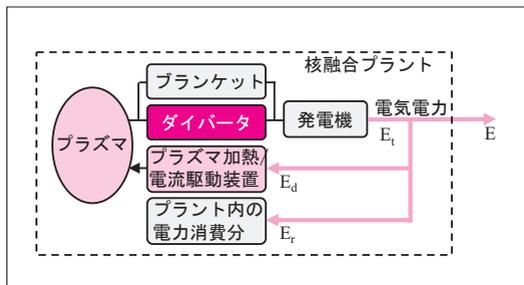


図 2-3 核融合プラントのパワーフロー