

核融合入門

^{1 2} (*印の項目は (やや) 詳しい内容. **印の項目はより詳細な内容.)

1 序—自然界と社会における核融合の過去, 現在, 未来

- 太陽のエネルギー源は何か:

19世紀まで、石炭などの化石燃料であると考えられたが、太陽から、毎時、宇宙空間に放出されるエネルギー量からすぐ枯渇するはず、と考えられた。

1939年、ベーテの研究³などにより、星(恒星)のエネルギー源は核融合反応であることがわかった。太陽は毎秒 4×10^{26} J のエネルギーを放出している (=毎秒約460万トンの質量が消滅して、エネルギーに転換されている)。現在の太陽は約50億歳で、太陽は今後も約50億年間、エネルギーを生成する。太陽内部から表面に出るまでの間に、ガンマ線などが物質に吸収され、エネルギーのより低い(波長の長い)電磁波に転換され、表面では可視光が最大の強度になり、紫外線は相対的に弱い強度となる。

- 核融合兵器としての水爆と核兵器の拡散:

第二次世界大戦末期のマンハッタン計画後、アメリカ合衆国でエドワード・テラー、スタニスワフ・ウラムらによって開発が進められ、1952年11月1日、エニウエトク環礁で人類初の水爆実験、アイビー作戦(Operation Ivy)が実施された。この作戦で米国はマイク(Mike)というコードネームで呼ばれる水爆の爆発実験に成功した。マイクの核出力は10.4メガトン(Mt)であったが、常温常圧(例えば25℃, 1気圧)では気体である重水素や三重水素を零下200度以下に冷却液化しなければならなかったため、そうした大規模な装置類の付属により、マイクの重量は65トンに及び、実用兵器には程遠いものであった。ところが、翌1953年、ソヴィエト連邦(当時)が重水素などの熱核材料をリチウムと化合させて重水素化リチウム(固体)として用いた水爆の実験に成功した(実際には水爆ではなかったといわれている)。この型では大掛かりな付属装置が不要なため水爆を小型軽量化できた。その後米国も熱核材料をリチウムで固体化した水爆を完成。1954年、キャッスル作戦(Operation

¹ファイル名=nuclear-fusion-text20200213.tex

²作成者:岡本良治(九州工業大学名誉教授)。このノートは、大学の工学部3, 4年生対象の講義「原子力概論」用に作成した資料です。筆者が理解し、かつ納得した事項の覚え書きでもありません。興味関心をもつ人に対して、できるだけ自足的に理解でき、独立した立場から客観的な判断材料になれば幸甚です。誤り、説明の分かりにくい点をお気づきの場合、本ファイル名(特に、作業年月日を示す数値の部分)と該当箇所を特定して、okamoto.ryoji.munakata.at.gmail.com (.at_を@に修正後)に電子メールで御連絡願えれば幸甚です。

³Hans Albrecht Bethe(1906-2005).Phys. Rev.: 55 (1939) 434-456. 「原子核反応理論への貢献、特に星の内部におけるエネルギー生成に関する発見」により、1967年度のノーベル物理学賞受賞。

Castle) が実施された。作戦の一つ、ブラボー (Bravo) 実験の成功により大幅な小型化に成功した。

さらに米ソ両国で核実験が続けられ 1955 年から 1956 年には爆撃機にも搭載可能になり核兵器における威力対重量比が格段に増大する結果となった。いわゆるメガトン級核兵器の登場である。中華人民共和国は 1967 年 6 月 17 日に 3.3 メガトン (Mt) の最初の水爆実験に成功している。1976 年 11 月 17 日には 4 メガトン (Mt) の実験に成功している。この後中国では重水生産工場の運転が開始されている。

2016 年 1 月 6 日には、朝鮮民主主義人民共和国が 4 回目の核実験で水素爆弾の実験に初めて成功したことを発表した。しかし、この主張には疑問が出されている。後述のように、核融合物質の添加により核分裂連鎖反応の高速化・効率化など、強化された核分裂兵器である可能性が高いと思われる。

- 核融合発電の夢と現段階:

核融合の研究は 1955 年頃より、各国が着目し、学術的立場と研究開発的立場の両面から進められてきた。この間に新しい基礎的な学問分野であるプラズマ物理学が体系化され、それにより核融合の実現可能正も判断できるようになった。多くの科学者の予測に基づいて、西暦 2000 年前後に実用規模級の核融合発電所が試験的に建設される可能性が論じられていた [1]。

しかし、「日米欧などがフランスに建設中の「国際熱核融合実験炉 (ITER) 計画」について、作業の遅れに伴って建設費が約 52 億ユーロ (6 千億円) 増えることで合意したことが 18 日、分かった。日本の追加負担は 600 億円になる見通しだ。太陽で起きる核融合反応を地上で再現し膨大なエネルギーを取り出す巨大プロジェクトの難しさが改めて浮き彫りになった」 [2]。

- 「常温核融合研究」騒動と関連するかもしれない最近の動向

1989 年、Fleischmann と Pons ら、及び Jones らによって「パラジウム、チタン等の固体中に大量の重水素を吸蔵する電極を用いた電解法によって、DD 核融合反応が起こる」という“常温核融合反応”の可能性が指摘され、新しいエネルギー生産技術の出現として大きな反響を呼んだ。以後、上記電解法 (湿式法) による反応追試実験が広範に進められ、又乾式法でもこの反応が起こり得ることが指摘されてきたが、いずれの実験においてもデータに再現性がなく、2019 年現在でも反応を確認するに至っていない。但し、過剰発熱と言われるものは核融合反応ではなく、従って、エネルギー発生機構の可能性については、ほぼ否定されており、核融合反応が固体中でこれまでと異なるメカニズムで起るかどうかが、という観点で各種実験が一部で継続して行われている [12]。

- 地球上の再生可能エネルギーの源は何か:

2011年の福島第一原発事故の後、脱原発の世論が高まる中、原子力発電（核分裂エネルギーによる発電）に対して、「核と人類は共存できない」という主張が、自然エネルギー（再生可能エネルギー）による代替が叫ばれるようになっていく。「核」の範囲が、核兵器、原子力発電だけではなく、あらゆる原子核現象を含むことが含意されているとすれば、その意見は自然科学的には正しくないと思われる。

古代より、人類の諸民族は生命の維持には太陽の恵みが必要不可欠であると考えてきた。太陽が放射し続ける膨大なエネルギーのごくごく一部が地球表面に降り注ぎ、その一部が地球流体エネルギーとなる。風力エネルギーはそのほんのわずかな「お裾分け」であり、化石エネルギーは太陽エネルギーの、ある意味での「缶詰」である。

「お裾分け」の意味は次のとおりである。風車は風を後ろに逃がすことによって、風のエネルギーの一部を取り出す装置。風車は最初から風のエネルギーの「一部」をお裾分けしてもらうことしか考えない。また、後ろに逃がした風は決して無駄になって捨てるエネルギーではない。そもそも風は地球上至るところに吹いており、地球環境にとってなくてはならないものの1つである。風がなければ大気は循環せず、(地球は)死の星になってしまう。もともと地球上を循環している流体(大気と海水)のエネルギーの流れのほんの一部をお裾分けしてもらい、人類が利用するエネルギーに変換する、それこそが「再生可能エネルギー」という名の由来である [3]。自然界の核エネルギーの、間接的で、温和で、おすそ分け的な利用としての再生可能エネルギー、それに対して、核エネルギーの直接的で激しい利用としての核兵器、原発と考えるべきであろう [4]。

2 原子核の結合エネルギーと核融合の反応熱

核子あたりの原子核結合エネルギーの質量数依存性の図に示されているように、軽い核が融合すると、結合エネルギーの余剰が生じる。重い核が分裂すると、結合エネルギーの余剰が生じる。この事実を代表的な核融合である DT 反応について考える。 ${}^2_1\text{D}$ (または ${}^2_1\text{H}$)は重陽子または重水素の原子核である。 ${}^3_1\text{T}$ (または ${}^3_1\text{H}$)は三重陽子または三重水素の原子核である。 ${}^4_2\text{He}$ はヘリウム4の原子核である。 n は中性子である。この反応式は



と書かれる。しかし、しばしば次のようにも書かれる。



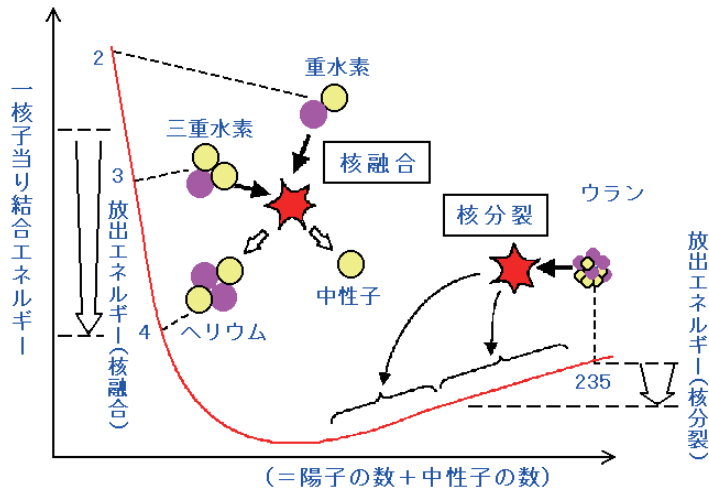


図 1: 核子あたりの原子核結合エネルギーの質量数依存性

左辺の Q は反応熱または Q 値 (Q value) と呼ばれている, エネルギーの次元を持つ物理量である.

まず原子核反応の前後では相対論的なエネルギーの和が保存される. 反応前に静止している場合を考えると, 系の質量エネルギーの和が保存される. すなわち, それぞれの核子または原子核の運動エネルギーを K_i , ($i = D, T, He, n$) とすると

$$(K_D + M_D c^2) + (K_T + M_T c^2) = (K_{He} + M_{He} c^2) + (K_n + M_n c^2) \quad (2.3)$$

が成り立つ. ここで, 通常, 反応の前の核子または原子核は基底状態にあり, ${}^2_1\text{H}$ には励起状態はなく, この反応では n の励起状態を考慮する必要はないという事実を考慮した. この式 (2.3) を書き直すと

$$[K_{He} + K_n] - [K_D + K_T] = [M_D + M_T]c^2 - [M_{He} + M_n]c^2 \quad (2.4)$$

となる. ここで, 式 (2.4) の左辺は運動エネルギーの反応の前後における変化, すなわち, 終わりの値から初めの値を引いた量を意味する.

反応前の質量エネルギーから反応後の質量エネルギーを差し引いた量をこの反応の Q 値といい, 次のように定義される.

$$Q \equiv [M_D + M_T]c^2 - [M_{He} + M_n]c^2. \quad (2.5)$$

定義 (2.5) を用いると, 式 (2.4) は

$$[K_{He} + K_n] - [K_D + K_T] = Q \quad (2.6)$$

と書き直せる. ここで, 式 (2.6) は拡張されたエネルギー保存則を表す関係式であり, 右辺の Q は式 (2.5) で定義された物理量であることに注意しよう.

式(2.5)の物理的な意味を考えるために、静止質量エネルギーを結合エネルギー E_B を用いて表すことにする。陽子 p の質量を M_p として、重陽子の結合エネルギーについて

$$\begin{aligned} E_B({}^2_1\text{D}) &= [M_p + M_n - M({}^2_1\text{D})] \times c^2 \\ \rightarrow M({}^2_1\text{D}) \times c^2 &= [M_p + M_n] \times c^2 - E_B({}^2_1\text{D}) \end{aligned} \quad (2.7)$$

が成り立つ。三重陽子についても同様に考えて、Q 値の定義式(2.5)に代入すると

$$Q = E_B({}^4_2\text{He}) - E_B({}^2_1\text{D}) - E_B({}^3_1\text{T}) \quad (2.8)$$

となる。すなわち、図1に示されるように、核融合反応の Q 値は系の結合エネルギーの和の、関連する反応の前後における変化になる。

これらの原子核の質量の値

$$\begin{aligned} M_D &= M({}^2_1\text{D}) = 2.01410 \text{ amu}, \\ M_T &= M({}^3_1\text{T}) = 3.01605 \text{ amu}, \\ M_{\text{He}} &= M({}^4_2\text{He}) = 4.00260 \text{ amu}, \\ M_n &= 1.00867 \text{ amu}, \quad 1 \text{ amu} \equiv 931.49432 \text{ MeV}/c^2 \end{aligned}$$

を用いると、 $Q \approx 17.6 \text{ MeV}$ と求まる。

一般に、原子核 A, B, C, D の間に核融合反応



が生じた場合、Q 値は

$$Q = [M(A) + M(B) - M(C) - M(D)] c^2 \quad (2.10)$$

$$= E_B(C) + E_B(D) - E_B(A) - E_B(B), \quad (2.11)$$

$$E_B(i) \equiv [Z_i M_p + N_i M_n - M(i)] \times c^2, \quad (i = A, B, C, D). \quad (2.12)$$

と書ける。拡張されたエネルギー保存則のひとつの表現(2.6)より、 $Q > 0$ であれば、反応により正味の運動エネルギー増加があるので、この反応は発熱反応である。逆に、 $Q < 0$ であれば、吸熱反応である。

荷電粒子間のクーロン・エネルギー障壁を乗り越えて、反応前の2粒子の運動エネルギーが十分小さく、反応のQ値に比べて無視出来る場合、反応の前後の運動量の和が近似的に保存される。この状況において、拡張されたエネルギー保存則を意味する式(2.6)は

$$K_C + K_D = Q \quad (2.13)$$

となる． C, D の速度をそれぞれ V_C, V_D と記せば，核融合反応の前後における運動量の和の保存則は

$$0 = M_C V_C + M_D V_D \rightarrow V_D = -\frac{M_C}{M_D} V_C \quad (2.14)$$

と書ける． $K_C = M_C V_C^2/2$, $K_D = M_D V_D^2/2$ であることと式 (2.13) と (2.14) を用いれば

$$Q = \left(1 + \frac{M_C}{M_D}\right) K_C = \left(1 + \frac{M_D}{M_C}\right) K_D \quad (2.15)$$

が求まる．式 (2.15) から計算に便利な関係式

$$K_C = \left(\frac{M_D}{M_C + M_D}\right) Q, \quad (2.16)$$

$$K_D = \left(\frac{M_C}{M_C + M_D}\right) Q \quad (2.17)$$

が得られる．式 (2.16) と (2.17) より，反応熱である Q 値は反応後の 2 つの粒子の運動エネルギーとして，それぞれの質量の逆比で分け与えられることが分かる．

3 人工系における核融合反応

3.1 核融合反応の利点と課題

核融合反応の代表的な利点は

- 単位質量あたりのエネルギー発生量は核分裂の約 4 倍である，
- 燃料資源（重水、Li）は普遍的に分布している

などである [5]．しかし，その克服すべき基本的な課題は

- 自立的連鎖反応の実現の困難さ
- 超高エネルギーの中性子の発生による放射線損傷の深刻さ、材料の放射化（二次的放射線の発生），

がある [5]．

プラズマ物理学の宮本健郎によれば，「高温プラズマの不安定性をいかに抑制するか，放射，対流，熱伝導によるエネルギー損失をいかに小さくするかが，核融合をめざすプラズマ物理の最も重要な課題である．数々のプラズマ閉じ込め装置，加熱法などが考案され，試みられてきた。」 [6]

3.2 想定される核融合反応

核融合連鎖反応の成立条件と反応率（核融合反応の断面積の大きさ）などを考慮して、これまで考えられているのは重水素 (D) と三重水素 (T) を用いた核融合反応である。まず、重水素 (D) 間の核融合反応、DD 反応は



これらの2種の核融合反応は、同じ相対運動エネルギーに対して、ほぼ同じ確率（反応の断面積）で起こる。DD 核融合反応の結果生じる三重水素 (${}^3_1\text{T}$) や ${}^3_2\text{He}$ も次の核融合反応を起こす。



反応 (3.2) と (3.4) は反応生成物が荷電粒子のみで、中性子が含まれないので、周辺の構造材等を放射化することはない点が優れている。しかし、 ${}^3_2\text{He}$ と ${}^3_1\text{T}$ は自然にはない元素である。同じ相対運動エネルギーに対して、DD 反応は DT 反応に比べて2桁以上も小さいほぼ同じ確率（反応の断面積）でしか起こらない。それで、DT 反応が相対的に可能性が高く、 ${}^3_1\text{T}$ を反応過程の中で生成するような次の複数の反応が組み合わせられた。



ちなみに、天然のリチウムの同位体存在比は ${}^7\text{Li}$ が 92.5%、 ${}^6\text{Li}$ が 7.5% である。

3.3 核融合反応の種類

- (a) 高温核融合:熱核融合反応ともいう。この実現のためには、ローソン条件が必要；高温，原子核数密度，閉じ込め時間，一億度の（重水素＋三重水素）の混合プラズマを原子核数密度 100 兆個（1 立方センチあたり）約 1 秒間閉じ込める必要がある。
- (b) 低温核融合:ミューオン触媒核融合反応ともいう。[11] このためには、例えばマイナス 272 度という条件を実現しなければならない。現在のデータと理論上の評価に基づく限りでは、入力エネルギーを超えるエネルギー出力が得られる条件は達成されておらず、ミューオン触媒核融合は純核融合炉としては成り立ち得ないと考えられている [13].

3.4 核融合反応は非常に起こりにくい

一般的にいえば、次のような理由から核融合反応は非常に起こりにくい。

1. 核分裂に比べて、核融合は反応の断面積がかなり小さい。

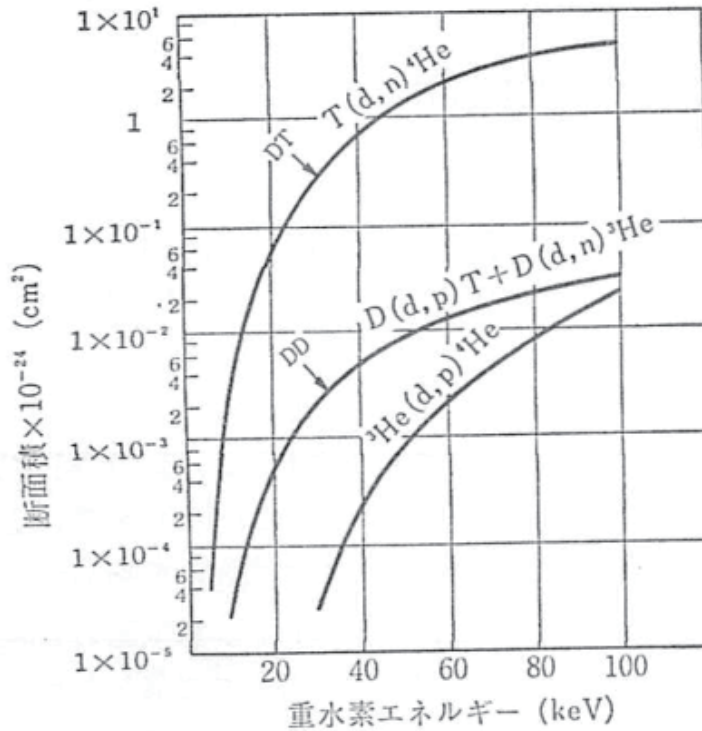


図 2: 核融合反応の断面積のエネルギー依存性. 断面積の単位はバーン (barn= 10^{-24}cm^2).

同じ核反応によるエネルギーであるのに、核融合が核分裂に比べて実用化が大幅に遅れているのは、反応を起こし、そしてそれを持続することが一層難しいからである。核分裂は電荷をもたない中性子と電荷をもつウラン原子核などの反応であるから、電気的反発力は働かないので、低速(超低エネルギー)の中性子によって標的核に衝突させることができる。これに対して、核融合では正の荷電粒子同士の反応であるから、電気的反発力に打ち勝つため大きな運動エネルギーをもたねばならない。このため、核融合の断面積は、相対運動エネルギーが keV の領域になって初めて急速に増加し、DT 反応では 100 keV あたりで最高値に達する。しかし、熱中性子による核分裂の断面積が 500 barn 以上であることに比べて、高々、数 barn にすぎない。図 2 に、3 種類の核融合反応に対する断面積のエネルギー依存性を示す。この図 2 より、DT 反応が相対的に容易であることが分かる。

2. 核融合が実現するには正電荷をもつ原子核同士が原子核の大きさ程度に接近する必要がある。古典物理学的には荷電粒子は電氣的斥力エネルギー（クーロン障壁）の以上の運動エネルギーを持たなければ接近することができない。このために外部から入射粒子を加熱などにより加速する必要がある。このクーロン障壁は温度に換算すると、 10^9K (10 億度 K) を越える。この意味で核融合は熱核融合 (thermal nuclear fusion) と呼ばれることがある。
3. 核融合は持続することがかなり困難である。

太陽など恒星では、膨大な質量が集まり、その重力による収縮で大きな熱が発生して超高温となる。(量子力学的にはクーロン障壁より低いエネルギーでもトンネル効果により核融合反応が起こる。ただ、反応率が低い.)

粒子加速器で加速した原子核を標的核に打ち込んで核融合を起こすことも可能であるが、入力エネルギー以上の出力エネルギーを得ることは難しい。しかし、原子を加熱し十分高温にすると、物質は電子とプラスイオン(原子核)が分離したプラズマ(plasma)状態となる。超高温プラズマ状態の内部では原子核同士が衝突して、核融合反応を起こすようになり、これを熱核融合反応(thermonuclear reaction)という。

エネルギー利用のための核融合反応は、正しくは制御熱核融合反応(controlled thermonuclear reaction)である。制御という意味は、水爆のように瞬時に大量の核融合反応を起こさせるのではなく、反応が徐々に、かつ限られた空間内で起こるように人為的に制御されることで、これによってはじめてエネルギーとしての平和利用が可能になる。

3.5 制御された熱核融合連鎖反応の成立条件

核融合が連鎖的に成立するためには次のような要因を考慮する必要がある。

1. 原子核同士が原子核の大きさ程度以内に接近するための超高密度
2. 核融合反応が完了するための閉じ込め時間
3. 荷電粒子の加速度運動による電磁放射(制動放射)のためエネルギー損失

これらのことを考慮すると、自立的な核融合反応の実現のための条件は

- (a) 次の式で表されるローソン条件(臨界プラズマ条件)を満たすこと：

$$n\tau > 10^{20} \text{ s/m}^3. \quad (3.7)$$

ここで、 n はプラズマ粒子の数密度(単位体積あたりの粒子数)、 τ は閉じ込め時間である。

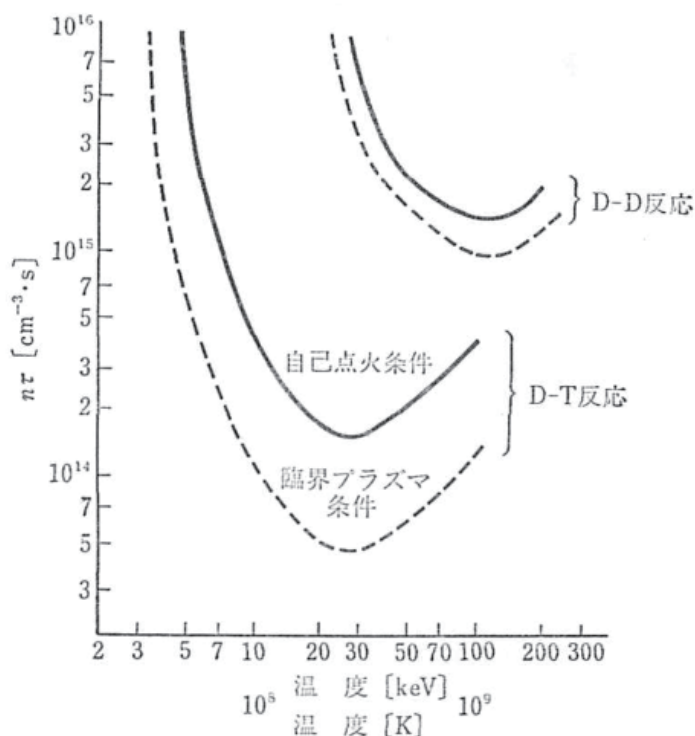


図 3: 核融合反応の臨界プラズマ条件と自己点火条件.

(b) 加熱と放熱がつりあう温度 (自己点火温度) を達成すること;

エネルギー生産のための核融合装置 (核融合炉) の中心部に, D,T など核融合燃料を注入し, 加熱して超高温のプラズマを作ると, 電離された粒子は相互にクーロン斥力をうけ, 急速に拡散する. 拡散した粒子は核融合炉の容器壁に衝突するが, 高エネルギーのプラズマ粒子の衝突に耐えられる材料はないので, 壁は破損してしまう.

これらの困難を避けるためには, 高温プラズマを容器壁から離して, 容器の中央部の空間に保持する (=閉じ込める) 必要がある. 長時間定常的に高温プラズマを閉じ込められれば最も良いが, ある短時間閉じ込めることができ, このような反応を規則的に繰り返すことによっても核融合炉とすることができよう.

エネルギー生産を可能にするため, 中心部の超高温プラズマ (=炉心プラズマ) が持たねばならぬ条件は, 炉心プラズマ内の核融合反応による発生エネルギーとプラズマからの損失エネルギーとの兼ねあいの計算から導くことができる. DT 反応の場合, 炉心プラズマ維持のため, 炉に注入すべき入力と等しい出力が得られる状態, つまり零出力核融合炉が成立するためには, 粒子数密度 n と閉じ込め時間 τ の積 $n\tau$ とプラズマ温度 T との間に, 図 3 に破線で示された関係が必要である. この関係を 臨界プラズマ条件 (critical plasma condition) と呼ぶ. 特に, 電気変換率 $\eta = 1/3$ の時, ローソン条件 (Lawson condition) と言う.

DT反応の場合、式(3.3)に示したように、中性子と α 粒子との運動エネルギーとしてエネルギーが放出される。後述する磁気閉じ込め方式の核融合炉では、 α 粒子は荷電粒子だから磁界により補足され、プラズマ内に留まる。 α 粒子のエネルギーは約3.5 MeVで、このエネルギーによってプラズマの温度が維持されるとすれば、炉外からのエネルギー供給は不要になる。この条件を自己点火条件と言い、図3の実線で示した。”この条件が実現すれば、中性子の運動エネルギーは電気エネルギーなどに変換して利用できる”ことになる(←この点、追加説明必要!)。同じ図3にDD反応の臨界プラズマ条件と自己点火条件が示してあり、DT反応に比べて、DD反応は一段と厳しい条件であることが分かる。

これまでに研究されている閉じ込め方式には、磁気閉じ込めと慣性閉じ込めがある。

- 磁気閉じ込め方式は荷電粒子を保持するために、電磁場、特に磁場によって閉じ込めるものである。
- 慣性閉じ込め方式は重水素のような燃料を注入した小片(ペレット, pellet)に大出力のレーザー光線や高エネルギー粒子ビームを照射し、一瞬のうちに、超高温と超高密度のプラズマを発生させ、プラズマが拡散するまでの極く短時間の間に核融合反応をおこさせようとするものである。

核融合炉の(理学的な意味での)実現に成功しても、信頼性、安全性、経済性、運転の容易さなどで、原子力発電その他のエネルギー生産装置と競争しうるために、再び長年月の工学的な研究開発実証の努力が必要となるであろう。

4 *宇宙における元素合成

4.1 すべての元素は天体の核反応で作られる!

ビッグバンで水素(H)、ヘリウム(He)、リチウム(Li)という軽い元素が合成された。その後、恒星の誕生と成長とともに鉄(Fe)までの元素が作られた。鉄の原子核はもっとも安定である(質量数あたりの結合エネルギー最大)から、鉄よりも重い元素は出来ない。

鉄よりも重いウラン(U)までの元素が作られる仕組みについて、従来は「恒星の一生の最終段階である超新星爆発により、それまでに作られた鉄までの元素が宇宙空間に撒き散らされるとともに、鉄よりも重いウラン(U)までの元素が作られる」とされてきた。しかし、2017年、中性子星の連星が合体する際に鉄よりも重いウラン(U)までの元素が作られること[14]が判明した。

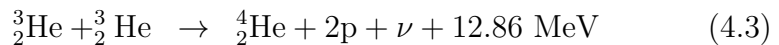
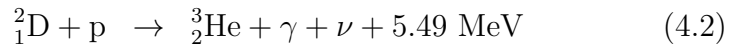
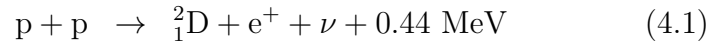
このように撒き散らされた星のかけらのごく一部が人間を含む生物や地球を形成している。

4.2 *恒星の内部で起こっている核融合反応

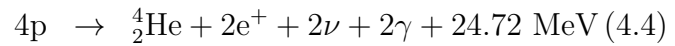
以下において、 e^+ は陽電子、 ν はニュートリノ、 γ は光子 (ガンマ線) を表す。

1. 水素燃焼反応

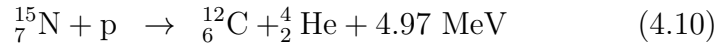
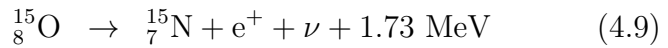
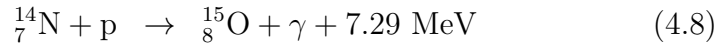
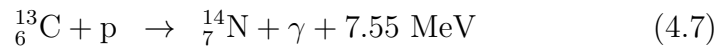
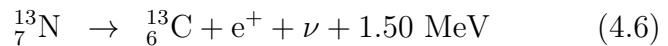
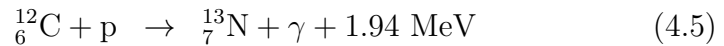
(a) P-P 連鎖反応 (質量が太陽の2倍以下、絶対温度 $T \leq 2 \times 10^7 \text{K}$ (2千万度 K) の恒星)



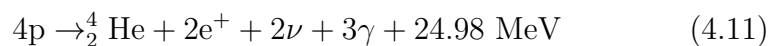
まとめると



(b) CNO 循環反応 (質量が太陽の2倍以上、絶対温度 $T \geq 2 \times 10^7 \text{K}$ の恒星)



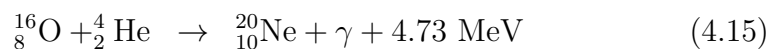
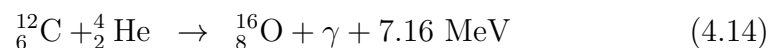
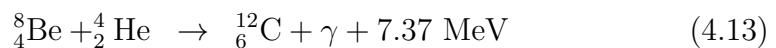
結局、 ${}^{12}\text{C}$ は触媒的な働きをして元にもどるので、正味の反応は



となる。

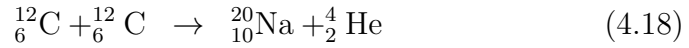
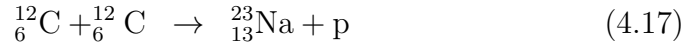
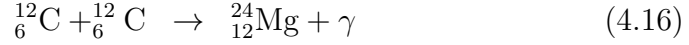
2. ヘリウム燃焼反応

水素の原子核である陽子が燃え尽きると、重力収縮が起こって中心温度が 10^8K (1億度 K) に達し、 ${}^4_2\text{He}$ が燃え出す。



3. 炭素燃焼反応

${}^4_2\text{He}$ が燃え尽きると、さらに ${}^{12}_6\text{C}$ 同士が燃える。



4. 酸素燃焼反応



5. 珪素燃焼反応



4.3 恒星の寿命はなぜ永いか

核融合反応がおこるために越えるべきクーロン障壁は温度に換算すると、 10^9K を越えると前述したので、水素燃焼反応のひとつである P-P 連鎖反応が絶対温度が 1 千万度 (10^7K) 程度で核融合が起こるとはとても考えられないかもしれない。しかし、次の二つの効果でも可能である。

(a) 速度分布における高エネルギー粒子の存在:

陽子は恒星の内部では気体分子運動論におけるマックスウエル分布にしたがって運動している。平均温度が 1 千万度 (10^7K) 程度であっても、温度換算で数十億度 (10^9K) 程度に相当する運動エネルギーをもつものも少しは存在する。

(b) 量子力学におけるトンネル効果:

さらに、量子力学におけるトンネル効果により、クーロン障壁以下の運動エネルギーでも陽子と陽子は小さな確率ではあるが、反応できる。

以上の二つの効果により、核融合反応の断面積と粒子数密度のエネルギー依存性の曲線における、いわゆるガモフのピークができ、クーロン障壁以下の温度をもつ恒星の内部では核融合反応はゆっくり、百万年から百億年 ($10^6 - 10^{10}$ 年) という気の遠くなるような時間をかけて進行する。

4.4 鉄より重い元素の合成

恒星の中の熱平衡状態では、核融合反応によっては鉄より重い元素は合成できない。理由は質量数あたりの結合エネルギーが鉄で最大であるからである。（実は質量数あたりの結合エネルギーが最大である原子核は鉄ではないことが近年わかった。）

高温では鉄は光分解反応を起こし、むしろ軽い元素になってしまう。そこで重要になってくるのがクーロン障壁に関係なく核反応を進行できる中性子捕獲反応である。これにはゆっくり進行するS過程（slow process）と爆発的に進行するR過程（rapid process）がある。

4.5 S過程 (slow process)

：恒星の核融合反応による生成物は、陽子やヘリウムの反応により中性子を発生させることがある。この中性子が鉄の原子核に吸収されて、質量数のひとつ大きい原子核をつくる、この原子核は中性子過剰のために、不安定で、ベータ崩壊により原子番号がまたひとつ大きい元素になる。この反応は極めてゆっくり進行する。

4.5.1 R過程 (rapid process)

S過程だけでは現存する重い元素のすべてをつくれない。そこで考えられたのが、中性子を捕獲して、質量数が $A \rightarrow A + 1$ の原子核になったとき、ベータ崩壊する前にまた中性子を吸収し、 $A + 2$ となり、次々と重い質量数の不安定核を作って最後にベータ崩壊する。これらの過程は正に猛烈な連鎖反応である。

4.5.2 重力波の生成の本命としての連星中性子星の合体の衝撃

従来、R過程は長い間、恒星の最終段階としての超新星爆発において起こると推定されてきた。しかし、ところが、通常の超新星爆発ではR過程が実現しにくいことが明らかになってきた。そして、2017年、連星中性子星の合体で飛散した星のかけらで、金や白金、ウラン、希土類元素（レアアース）などが作られているという証拠が得られた。[14]

4.6 あらゆるエネルギーの根源としての重力エネルギー

太陽のエネルギーの発生源は核融合エネルギーである。核エネルギーは化学エネルギーに比べて数十万倍の大きさであり、この大きな核エネルギーによって太陽は50億年間も生命の源になった光のエネルギーを放出し続けることができる。

質量数あたりの結合エネルギーは鉄が最大となっている。このため、恒星の中心部での核融合反応によって水素から始まって鉄までの元素が生成される。

太陽の4倍程度以上の質量の星は、核融合反応が鉄の生成を終えると、自らの重力エネルギーによってさらに収縮する段階に進む。(これまでは、重力と核融合反応で生成されるエネルギーとがつりあっていた)この段階では、電子のエネルギーは原子核内の陽子と反応して中性子を生成。星の中心部は中性子となる。このとき、中心部は急激に重力落下し、その際膨大なエネルギーが発生し、星の中心部を取りまく物質を吹き飛ばす。これが超新星爆発 (supernova) である。この爆発の際に、鉄よりも重い、ウランにまでいたる重元素が生成され、宇宙に放出される [8, 10]。この意味で、地球上の人類も「星のかげら」と言うことができる [8, 9]。このような超新星爆発は近年では 1987 年に観測された。

太陽の8倍以上の質量の星は、超新星爆発後、中性子星やブラックホールとなる。

星の活動の形態は、原始星 (核融合反応の始まる前)、活動期、爆発と変わってゆき、次の世代の星が生成される。太陽は、2代目以降の星。(太陽系のメンバーの地球にはウランなどの重元素があるから)

このような、星の世代の交代をつくりだす原動力は、重力エネルギーである。

実際、私たちが利用する化石エネルギー、水力や太陽光から得られた電気エネルギー、原子力発電のエネルギーなど、種々のエネルギーは重力エネルギーが姿を変えたものといえる。

4.7 核融合反応の核兵器への応用：水爆と強化型原爆

歴史的には水素爆弾 (水爆,Hydorgen bomb, H-bomb) として知られる核融合兵器には、三重水素が自然にはない元素であるために、反応過程の中で生成するように次の複数の反応が組み合わせられた。



米国や旧ソ連では、1960年代以降に、北朝鮮では2016年に、核分裂兵器に核融合物質を添加することにより、核分裂連鎖反応の高速化、効率化が実現され、核兵器の小型化、威力の可変性が可能になっている。(ブースター原理、booster principle) [15, 16, 17]

A 基礎物理学ノート

A.1 気体分子の速度分布則

A.2 原子核同士の中のクーロン障壁

2つの反応粒子がそれぞれ電荷 Z_1e, Z_2e をもち、無限遠の位置から距離 R の位置に電気力に抗して接近させるために必要なエネルギーをクーロン障壁 (Coulomb barrier) という。ここで、クーロン障壁を B と記す。電気定数 (真空の誘電率) を ϵ_0 とすれば

$$\begin{aligned} B &\equiv - \int_{\infty}^R \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{Z_1eZ_2e}{r^2} dr \\ &= \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{Z_1Z_2e^2}{R}. \end{aligned} \quad (\text{A.30})$$

DD 反応の場合 ; $Z_1 = Z_2 = 1$ で、 $R = 5 \times 10^{-15}$ m とすれば

$$\begin{aligned} B_{DD} &\approx \frac{(9 \times 10^{10} \text{JmC}^{-2}) \times (1.6 \times 10^{-19} \text{C})^2}{5 \times 10^{-15} \text{ m}} \\ &= 4.65 \times 10^{-14} \text{ J} = 0.29 \text{ MeV}. \end{aligned} \quad (\text{A.31})$$

A.3 重力による自己エネルギー

B プラズマ物理学入門ノート

B.1 プラズマの熱平衡分布

B.2 衝突断面積, 平均自由行程, 衝突頻度 (反応率)

B.3 核反応断面積, 反応率のエネルギー依存性

B.4 核融合達成の条件

B.4.1 プラズマの閉じ込め時間の概算

B.4.2 核融合反応によるプラズマの加熱

B.4.3 制動放射によるエネルギー散逸

荷電粒子 (電荷 q) が加速度 a を受けて運動しているとき、電磁波の形態でエネルギーを放出する。この現象を制動放射 (または制動輻射, Braking radiation,

Bremsstrahlung) という。その放射する強度 (短時間あたりのエネルギー, intensity) I は

$$I = \frac{q^2 a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \quad (\text{B.32})$$

で与えられる。

B.4.4 自己点火温度

B.4.5 ローソンの条件

参考文献

- [1] 矢本賢三, 石森富太郎共編「原子力工学概論」培風館, 1976年.
- [2] 日本経済新聞「国際核融合炉、建設費6000億円増で合意 日本負担は600億円増」2016年11月18日. http://www.nikkei.com/article/DGXLASGG18H0N_Y6A111C1EAF000/
- [3] 安田 陽「日本の知らない風力発電の実力」オーム社 2013年. P.50
- [4] 戸田 清「核発電を問う—3・11後の平和学」法律文化社, 2012年. p.24, 110, pp.92-104, p.113.
- [5] 井上堅司, 森 茂「核融合」(原子力基礎講座8) 原子力文化振興財団 1977年.
- [6] 宮本健郎「核融合をめざしたプラズマの研究」日本物理学会誌, 第51巻, 8号 (1996), http://www.jps.or.jp/books/50thkinen/50th_08/001.html
- [7] S. ワインバーグ「宇宙創成はじめの3分間」ちくま学芸文庫, 2008年.
- [8] マーカス・チャウン「僕らは星のかげら 原子をつくった魔法の炉を探して」無名社, 2000年, ソフトバンク文庫, 2005年.
この本の最初のページに次のような, 現代科学の到達点に基づいているだけでなく, 深みと壮大さを兼ね備えた文章が記されている:
「私たちが吸う息には, 星の内部奥深くの灼熱の炉で作りだされた原子が含まれている。摘む花のひとつひとつには, 太陽の十億倍も明るい閃光を発し, 星が爆発したときに宇宙に放り出された原子が含まれている。読む本の一冊一冊には, 星から星へと吹く風に運ばれ, 想像を絶する空間と時間の隔たりを乗り越えて地球にやってきた原子が含まれている。」
- [9] ニール・シュービン「あなたのなかの宇宙:生物の体に記された宇宙全史」早川書房, 2014年.

- [10] 宮本英昭, 横山広美, 橘 省吾「鉄学 137 億年の宇宙誌」岩波書店, 2009 年.
- [11] ATOMICA「ミューオン触媒核融合の原理と現状」http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=07-05-06-04
- [12] ATOMICA「常温核融合研究騒動」http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=07-05-06-02
- [13] ATOMICA「低温核融合はエネルギー生産プロセスとなりうるか」 http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=07-05-06-05
- [14] 中島林彦「貴金属の起源をとらえた」, 日経サイエンス, 2018 年 1 月号, pp.40-45.
- [15] 岡本良治「北朝鮮の核兵器開発はどこまで進んだか」『日本の科学者』 vol.52, No.11 (2017 年 11 月号), 24.
- [16] 岡本良治, 北朝鮮核開発の到達点の科学的・技術的分析ノートブースター型核分裂兵器の小型化・標準化・規格化一, <http://rokamoto.sakura.ne.jp/fukushima/North-Korea-nuclear-weapon-analysis-note-1.pdf>
- [17] Hans M. Kristensen, *The Flawed Push For New Nuclear Weapons Capabilities*, Jun.29, 2017 in Nuclear Weapons, United States, <https://fas.org/blogs/security/2017/06/new-nukes/>