

第 130 回 CIS パートナー会議事録(一般様用)

開催日時 2023 年 2 月 26 日(日) 13 時~15 時

講師 久米 健次 様

テーマ 核融合の状況？



T

会議風景

T= 30:15



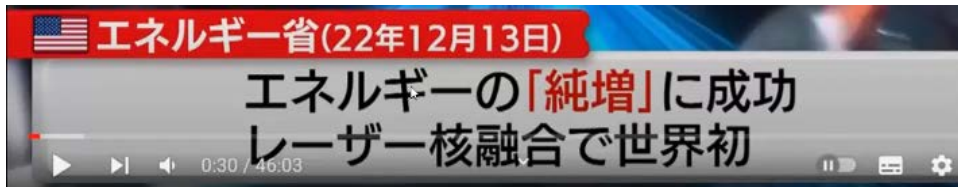
# 人工の太陽

2023.2.26



## 1) 核融合の話

昨年暮れ、ローレンスリバモア研究所で核融合の実験で「歴史に残る画期的な成果」をあげたニュースが飛び込んできた。 T=34:45



### 1-1) 核融合の状況(現状)

レーザー核融合では、これまで

入力エネルギー > 出力エネルギー

「核融合点火」

入力エネルギー ≤ 出力エネルギー

一部の専門家は、現在実験している核融合炉で核融合点火を達成できるのか、懐疑的であった。。  
(今回の報道は、ほんの少しながら入力より大きい出力が得られたという)

NIF (National Ignition Facility) では 2021 年 8 月、  
1.9 メガジュールのレーザー駆動で 1.3 メガジュールのエネルギーを生成。 NIF は LLNL 内の組織

核融合点火にあと一息というところにまでこぎ着けた。  
LLNL では、2022 年 12 月 5 日に核融合点火を達成。  
レーザー核融合で実際にエネルギーを生み出せることを示した。

NIF では約 2 メガジュールのエネルギーでレーザー装置を駆動して核融合反応を開始させ、約 3 メガジュールの出力を生み出した。

横道: 1メガジュールとはどれ位の大きさか見てみよう。  
1メガジュールとはどのくらいの熱量か?  
1cal=4.2J  
1kcal=4.2kJ  
1MJ=1000kJ=238kcal  
1Lの水の温度を1°C上げる=1kcal  
1MJ=およそ、風呂の水(約 200L)を 1°C上げるくらい

## ローレンスリバモア国立研究所(2005) LLNL=Lawrence Livermore National Laboratory



今回の実験を公表した LLNL

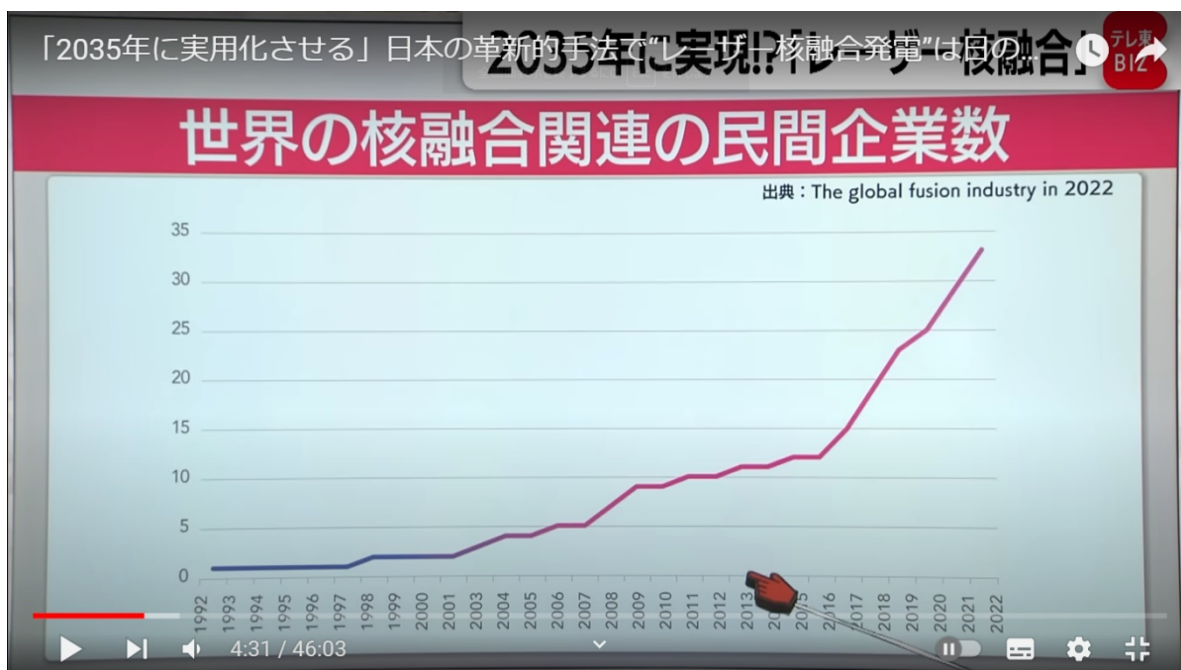
1-2) 2035 年核融合を根差す日本企業の話



Youtube より転載

目標は、「10 数年で核融合を実現する」と言う。

1-3) 世界の核融合関連の民間企業数



長期間の開発 ⇒ 当面の飯はどうして食うのだろうか？ という疑問が残る。  
⇒ (のちの話で、レーザーを研究をすることで生きてゆくことが分かった)

#### 1-4) 「2035 年委実用化させる」核融合の的



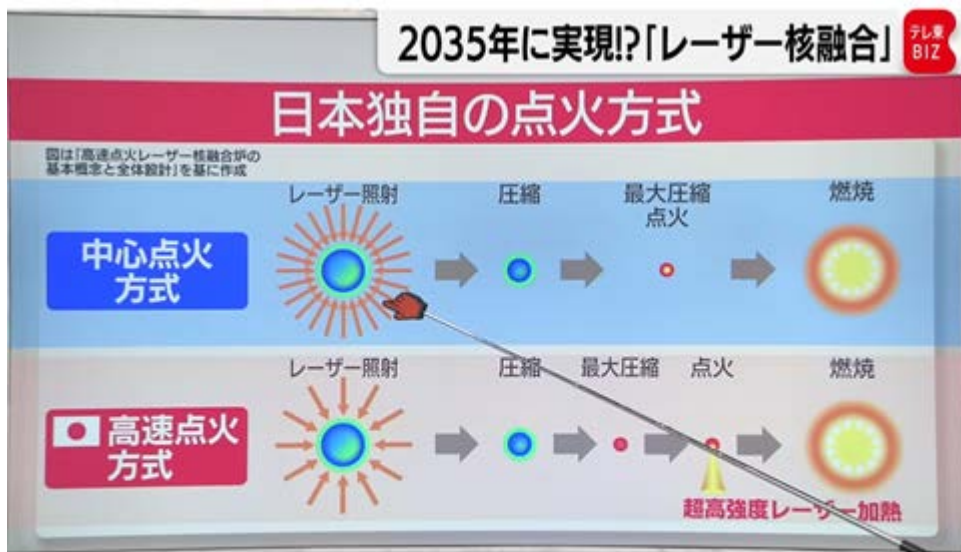
指先に見える、1mm ぐらいの小さな球状の中に重水素や三重水素を閉じ込め、周囲からレーザー照射して核融合させる。

#### 1-5) レーザー核融合の燃料球



今回のアメリカ LLNL の実験も同様な方法が取られた。

### 1-6) 圧縮と加熱のレーザーを分ける…2段階方式



「2035年に実用化させる」日本の革新的手法で“レーザー核融合発電”は日の目を見るか？【橋本幸治の理系通信】(2023年1月31日)  
圧縮と加熱のレーザーを分ける…2段階方式

LLNL 中心点火方式

日本 二段階方式 レーザー照射である程度加熱した上で、再度超高强度レーザー照射する。

高速点火方式 メリットは、

⇒ 流体不安定性が多少あっても許容できる

高頻度、高パワーレーザー研究 ⇔ 阪大、浜松フォトニクス

一つ一つの燃料となる小さな球を高速で次から次へと核融合をさせることで、エネルギーを得る。

### 1-7) 最終目的について

核融合研究の目指すところ

⇒ 核融合を使った定常的な発電

徐々に研究は進んでいる。

熱核融合国際共同研究(ITER)

仮に可能としても、まだ相当の年数がかかるのではないかと(個人的な感想)

ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)は、21世紀最大の科学および技術的課題の一つである、熱核融合エネルギーの実用化に向けた国際共同研究プロジェクトです。

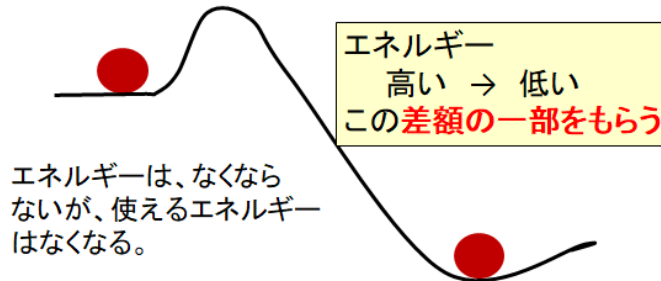
ITERは、欧州連合、アメリカ、日本、中国、ロシア、インド、韓国の7カ国が共同で建設・運営を行い、フランス南部のカダラッシュ・サン・テニスに建設される予定です。ITERは、プラズマ物理学や材料科学、制御技術などの分野での新しい技術開発を促進することを目的としています。 ChatGPT

## 2) エネルギーを考える

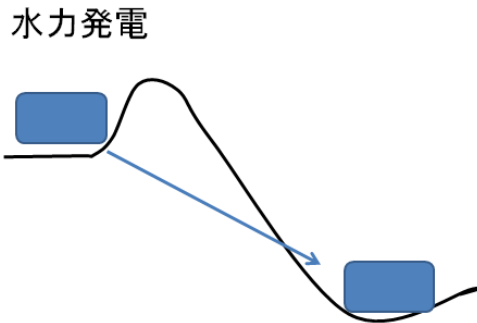
### 2-1) エネルギーを利用するとは。

基本的に、次のようになっている

(水力、火力、原子力、太陽光、風力..)



### 水力発電



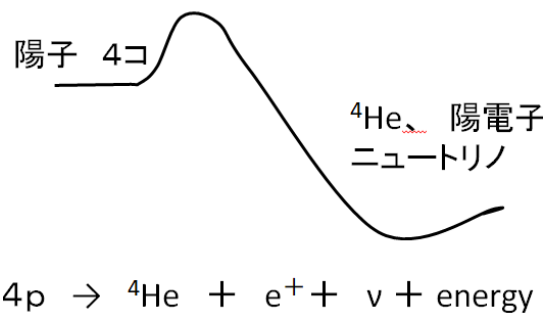
### 火力発電

火力発電：化学的燃焼



### 太陽内の核融合

太陽内の核融合



陽子(p)がアルファ粒子(He)と陽電子(e<sup>+</sup>)、ニュートリノ(ν)およびエネルギーを放出して核反応を起こすことを示しています。これは、プロトンとアルファ粒子が相互作用してヘリウム原子核を形成するプロセスであり、陽電子とニュートリノは反応の中間生成物であり、エネルギーは反応から放出される放射性崩壊の結果です。この反応は、太陽や他の恒星の核融合反応で起こる重要な反応の1つです。

ChatGPT

### 3) 核融合でエネルギーが取り出せるのは？

核融合でエネルギーがとりだせるのは Einstein の $mc^2$ のため…のような説明がよくある。間違いではないが、普通の燃焼でもこの関係はなりたっている。通常はこの値が小さいので気がつかなかっただけ。 T=51:03

よって、核反応で莫大なエネルギーがとりだせるのは $mc^2$ のためではなく、核力が電気力に比べて桁違いに強いから。

核力はそんなに強い力なのに日常生活では何の影響もないのは何故か

- 力の到達距離が短い  
せいぜい数fm(10-13cm)

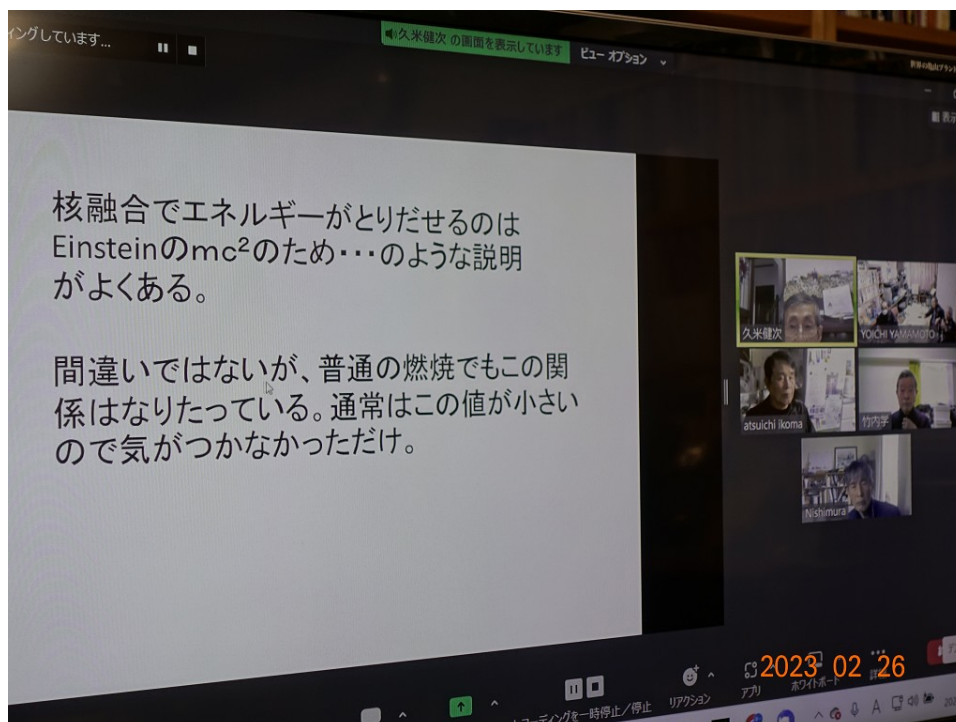
#### ChatGPT:

核力は非常に強い力ですが、その影響は非常に短い距離でしか発揮されません。核力は原子核内部に存在する強い相互作用力であり、原子核内の陽子と中性子を結びつけています。しかし、この力は非常に短い距離でしか働かないため、原子核から外れた陽子や中性子とはほとんど相互作用しません。

さらに、日常生活で私たちが扱う物質は、原子や分子から構成されています。これらの構成要素は、核力よりもはるかに弱い電磁力や重力に支配されています。したがって、私たちが日常生活で経験する物理現象は、電磁力や重力によって支配されるものがほとんどであり、核力の影響は非常に小さいです。

ただし、核力が支配的な現象は存在します。例えば、原子力発電所や原子爆弾など、核分裂や核融合に関する技術や装置を扱う場合は、核力の影響が重要な役割を果たします。

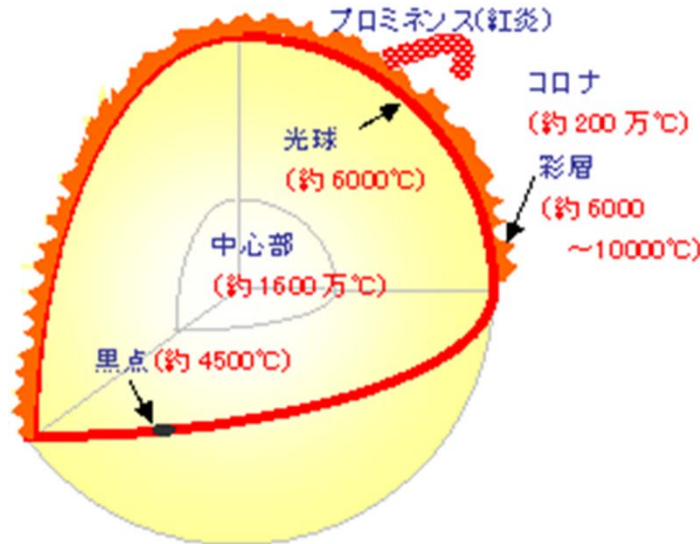
場の理論風に言えば、電気力は光子 ( $m=0$ )、核力は中間子 ( $m\sim 140\text{MeV}$ ) で媒介されている。





4) 太陽

T=53:19



太陽の半径=約 70 万 km

半径 10 万キロメートルの中心核密度が 156 g/cm<sup>3</sup>(水の 156 倍)。

太陽全体の 2 %ほどの体積中に約 50 %の質量が詰まった状態になっている。

2500 億気圧、温度が 1500 万 K

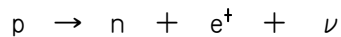
太陽が発する光のエネルギーは、この中心核でつくられる。ここで熱核融合反応が起こり、水素がヘリウムに変換される。

4つのp(陽子)が

<sup>4</sup>Heと陽電子2個とニュートリノになる

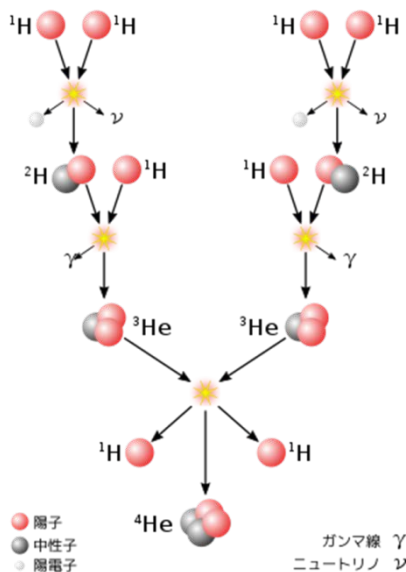
陽電子は電子と対消滅して  $\gamma$  線になる

陽子が中性子に変化しないとイケない。



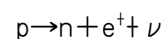
この反応が非常にゆっくりおこるので(弱い相互作用)、太陽は爆発せず、じわじわと燃えている。

T=56:39



ChatGPT: この式は、ベータプラス崩壊または陽電子放出を表しています。原子核内の陽子(p)が中性子(n)に変換され、陽電子(e<sup>+</sup>)とニュートリノ( $\nu$ )が放出される、放射性崩壊過程の一種です。この過程では、原子核の原子番号が1減少するため、陽子が中性子に変換されるためです。また、全原子核の陽子と中性子の数は一定のままであるため、質量数は変化しません。放出された陽電子は、質量は電子と同じですが、正の電荷を持ち、すぐに電子と相互作用し、相互消滅して2つのガンマ線を放出します。

Pp1 分岐 86%



の反応でpは電荷を e<sup>+</sup> で吐き出す。

4-1) 原子核が融合すると何故エネルギーが発生するか？

現行の原子力発電は、ウランなどの原子核分裂

軽い原子核はくっつくとエネルギーが出る  
 重い原子核は分裂するとエネルギーが出る

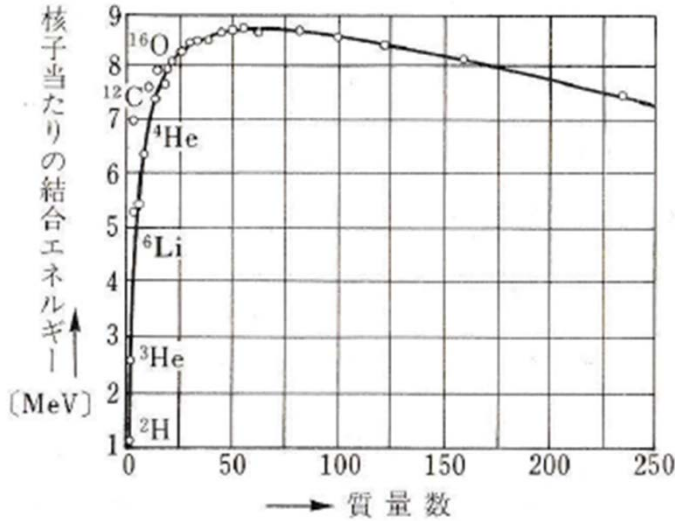
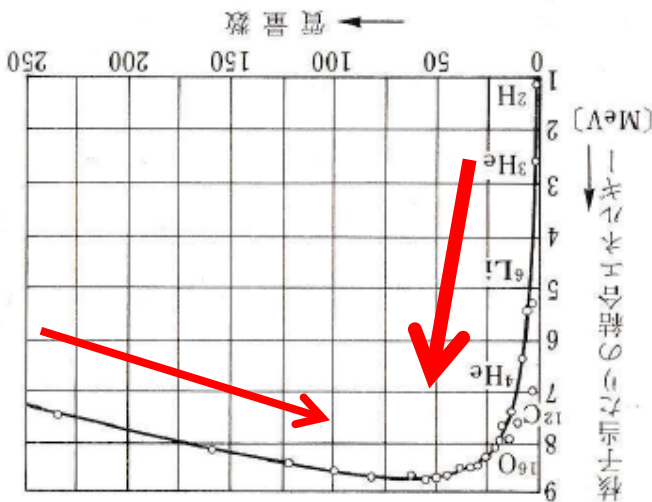


図 1・13 核子 1 個当たりの結合エネルギー

図を逆にした方がわかりやすい

図 1・13 核子 1 個当たりの結合エネルギー



ChatGPT: 核子 1 個当たりの結合エネルギーは、核子を束縛して核を形成する際に放出されるエネルギーのことを指します。このエネルギーは、核の安定性に関連しており、核子同士の間働く強い核力に由来します。

核子 1 個当たりの平均結合エネルギーは、核の種類やサイズによって異なりますが、おおそ 8MeV 程度とされています。ただし、これは平均値であり、実際には核種や核構造によってかなり異なることがあります。また、核子 1 個当たりの結合エネルギーは、核融合反応によってエネルギーを生み出す際にも重要な役割を果たしています。核融合反応では、軽い原子核が合体してより重い原子核を形成することで、エネルギーが放出されます。この際、原子核が形成される過程で核子 1 個当たりの結合エネルギーが放出されるため、核融合反応は非常に高いエネルギー密度を持つ反応であり、太陽や恒星のエネルギー源となっています。

4-2) 核融合反応は簡単に起こせるか？

クーロン斥力で反発する。

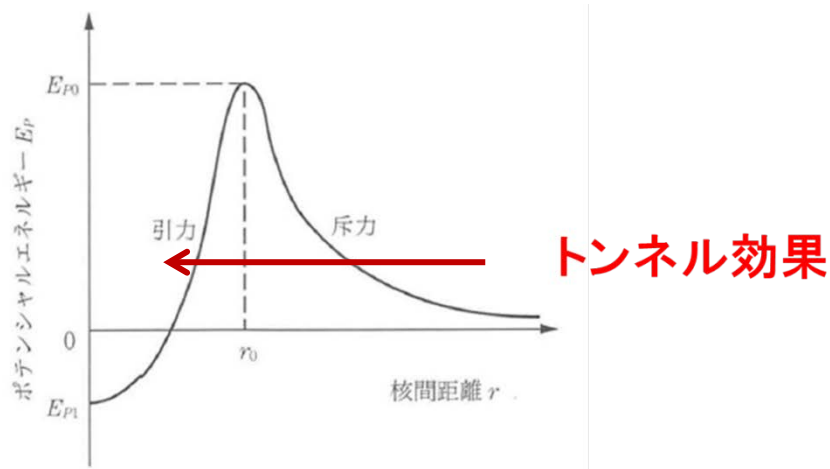


図 44・1 核間距離とポテンシャルエネルギー

原子核同士はくっつけようとしてもクーロンの反撥力でくっつかない。

それでも、無理やり原子核同士を近づけると核力(強い引力)が働いて、軽い核同士はガチャンとくっついてエネルギーが出る。

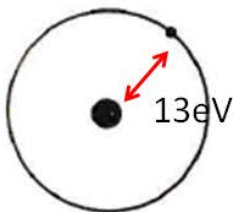
(実際はガチャンとポテンシャルの山を越えるのではなく、トンネル効果でくっつく)

「エネルギーが出る」といっても、結局は生成した原子核の運動エネルギーや内部励起エネルギー。

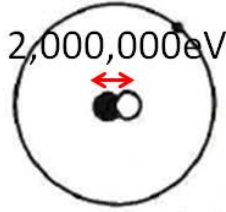
4-3) 核力は電気力に比べて圧倒的に強い！

電気力(13eV)

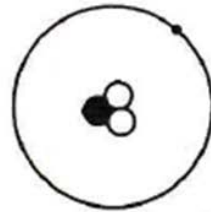
核力(2MeV) !!



水 素  ${}^1_1\text{H}$



重水素  ${}^2_1\text{H}({}^2_1\text{D})$



三重水素  ${}^3_1\text{H}({}^3_1\text{T})$

- 電 子  $\beta$
- 陽 子 p
- 中 性 子 n

横道: 1eV は何度? ⇒ 1eV は 1万°C ぐらいになる。

$k_B = 8.617 \times 10^{-5}$  ボルツマン定数

エネルギー ~  $k_B T$

1eV = 1.16 万度

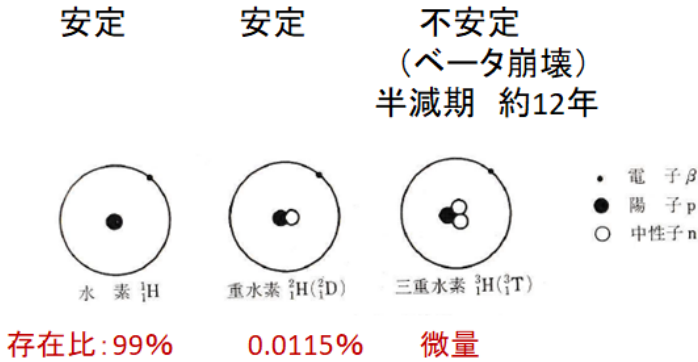
1keV = 1000 万度 ~ 太陽の核

10keV = 1億度 ~ 地上での核融合

1MeV = 100 億度

4-4) 燃料は何にするか？

重水素と三重水素をくっつける



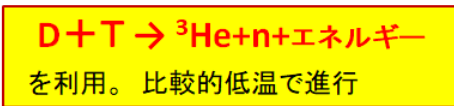
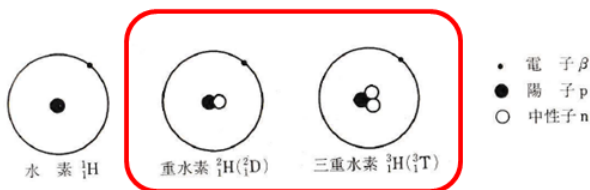
水素の同位体

三重水素

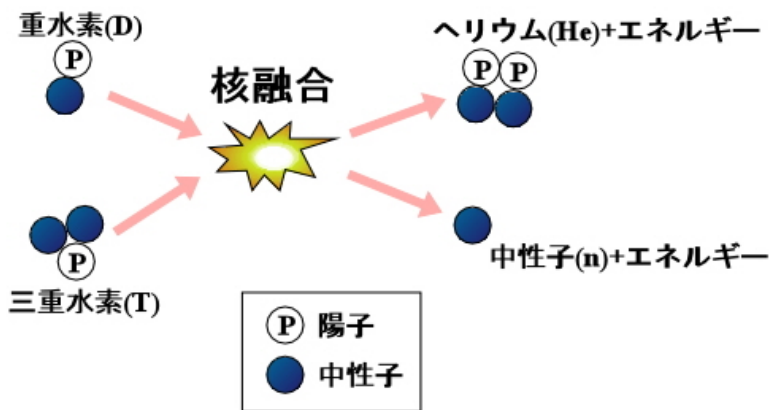
トリチウム β崩壊する(電子を放出する)。

4-5) 核融合、なるべく低温でやりたい。

地上での核融合反応は、なるべく低温でやりたい。太陽とはやや違う反応



核融合は、重水素と三重水素の結合のみが研究されている。比較的温度が低くて起こるから。



トリチウムは、水素の同位体の1つであり、原子核に1つの陽子と2つの中性子を持っています。通常の水素原子に比べて、トリチウムは質量数が3になるため、 ${}^3\text{H}$ またはTと表記されます。

トリチウムは放射性同位体であり、放射性崩壊を起こしてヘリウム3となります。半減期は約12.3年であり、放射線を放出するため、核種識別や放射性同位体のトレーサーとして広く利用されています。

また、トリチウムは核融合燃料としても研究されており、トリチウムを用いた核融合反応では、軽い水素原子が重い水素原子に融合することで、ヘリウム原子と中性子を生成し、エネルギーを放出します。このエネルギー源は非常に効率的であり、地球上のエネルギー問題を解決するために、核融合炉の研究が進められています。

三重水素の調達:

三重水素は、水素原子核が3つ結合した物質であり、化学式はT<sub>2</sub>または3Hと表されます。三重水素は非常に希少な同位体であり、天然に存在しないため、一般的には人工的に生成されます。

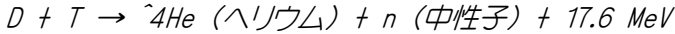
三重水素を作る最も一般的な方法は、二重水素を高速中性子で照射して生成する方法です。この過程で、二重水素の原子核に中性子が衝突し、三重水素と中性子が生成されます。

この過程には、核分裂反応を起こす核反応炉や加速器が必要であり、高度な技術と専門知識が必要となります。そのため、三重水素の準備は、一般的な研究室ではできないことが多い。ChatGPT

4-6) DとTの反応

DとTの反応は、二つの水素同位体である重水素(D)と三重水素(T)の核融合反応です。この反応は、非常に高いエネルギーを放出することができ、将来の核融合エネルギーの可能性を示唆しています。

DとTの反応は、以下の反応式で表されます。



この反応では、DとTが合体してヘリウム原子核と中性子が生成されます。また、反応によって 17.6 MeV のエネルギーが放出されます。

DとTの反応は、現在のところ、核融合エネルギー研究の中で最も有望な反応の一つです。この反応は、比較的低い温度と圧力で起こるため、制御が容易で、環境にも優しいとされています。しかし、この反応を制御可能なレベルで実現するためには、高温・高圧の状態を実現する必要があり、技術的な課題が多く残されています。 ChatGPT

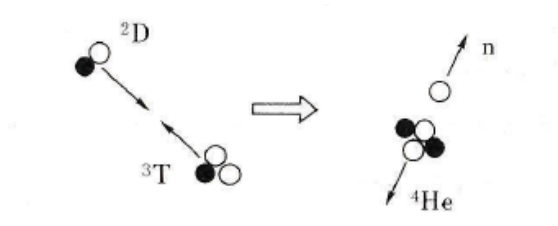
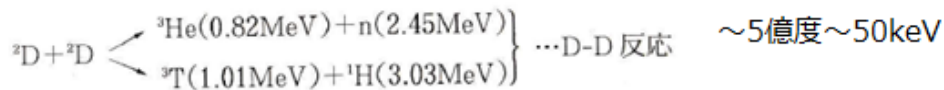


図 4・1 D-T 反応

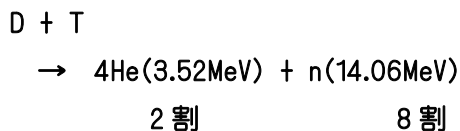


加速器実験では簡単に反応を起こせる。

継続的に核融合を継続するには、高温高密度状態が必要。

結局のところ、子の反応は次のようになる。:

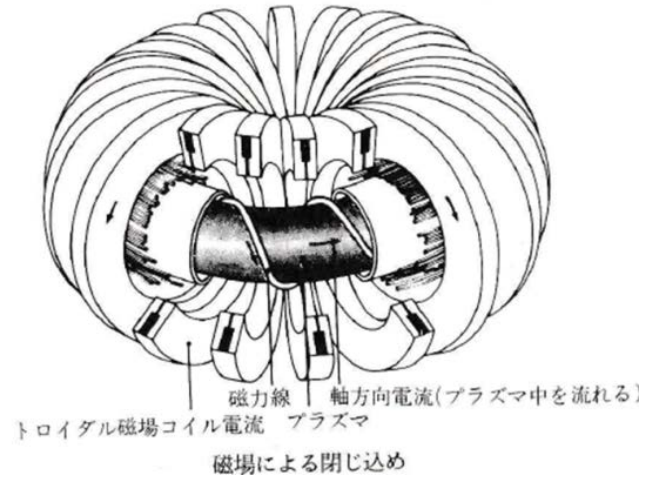
◎核融合で利用する核反応



4-7) どうやって地上で核融合を実現するか

2方式...いずれも数億度のプラズマ生成  
 利用する核反応や熱の取り出しはほぼ同じ。

- 磁場によるプラズマ閉じ込め方式  
 ヘリカル型、トカマク型 ⇒
- レーザー核融合(慣性核融合:爆縮)



日本、アメリカ、中国、韓国 等 共同研究

磁場閉じ込め方式

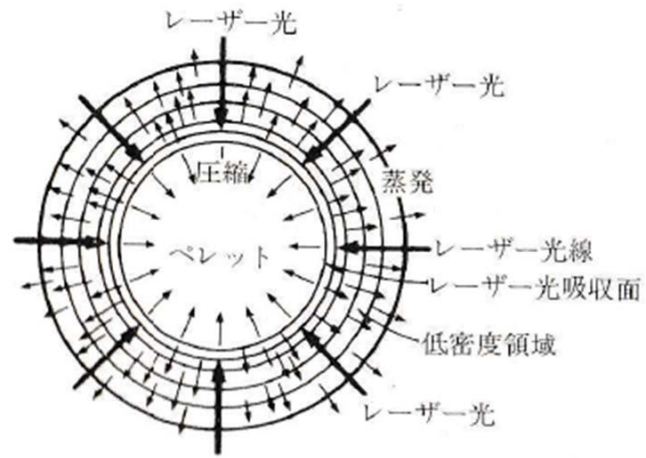
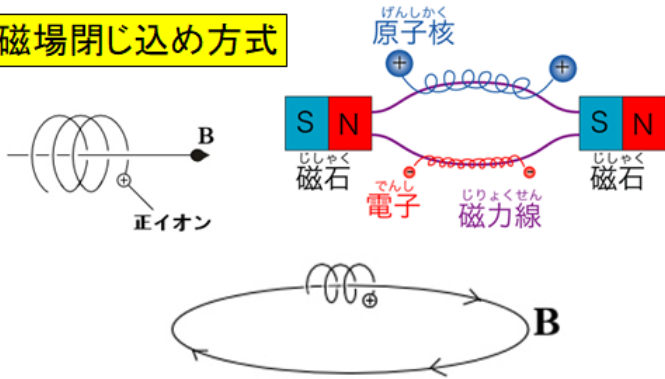
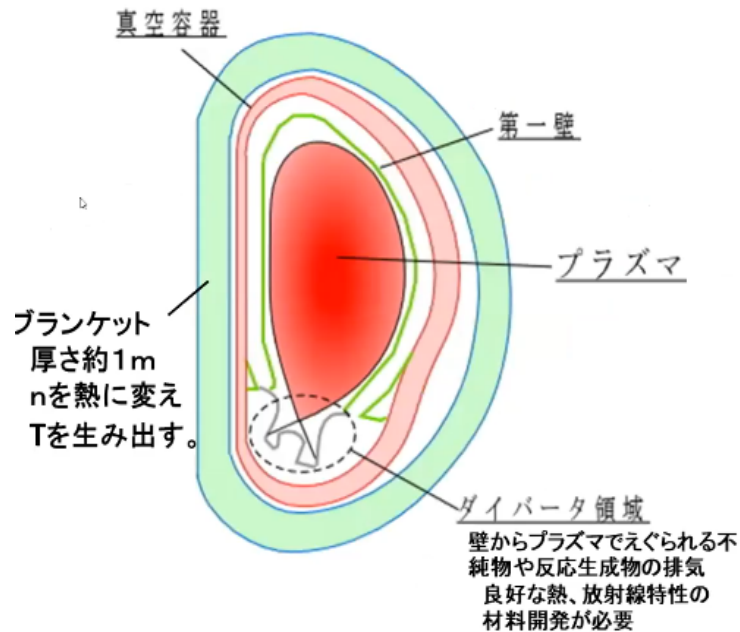


図 4・3 レーザーによる慣性閉じ込め

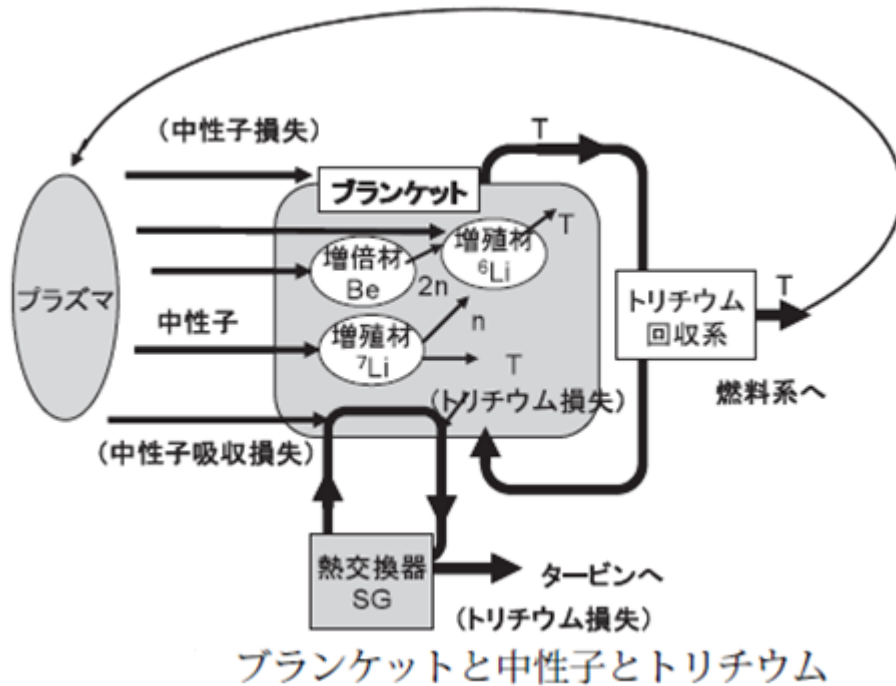


断面図⇒



4-8) まとめ

基本構造はこの図にすべて含まれる



プラズマから外に出てくるヘリウムイオンは電荷をもつのでプラズマの中で周辺を加熱する。中性子は中性(電荷が無い)なので外部に出てくる。そして、内部のブランケットに衝突し熱になる。この熱を熱交換機を通して取り出し、高圧蒸気を作り発電用タービンを回し発電する。

この一連の動作で、トリチウムは無くなってくる、これを補うためにリチウムを増殖材としていれておく。このリチウムと中性子が衝突して、三重水素ができる。即ち、燃料はこの中で作られる。従って、外部から投入するのは、重水素とリチウムとベリリウムだけでよい。

ブランケットは、高熱と中性子の衝突により消耗し 4 年程度で交換が必要。 結構大変！！

第 1 表 ブランケット材料の組合せ

	近未来	先進
増殖材	Li <sub>2</sub> O, Li <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub> , Li <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> , Li <sub>2</sub> ZrO <sub>3</sub> LiPb	Li <sub>2</sub> O, Li <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub> , Li, FLiBe, LiPb, LiSn
増倍材	Be, Be <sub>12</sub> Ti, (LiPb), (FLiBe)	Be, Be <sub>12</sub> Ti, (LiPb), (FLiBe)
熱媒体	圧力水, He	超臨界水, He, LiPb, Li
構造材	低放射化フェライト 銅	ODS 銅, バナジウム合金 SiC・SiC 複合材

\* 動作開始の手順

◎どうやって加熱するか？

大電流を流す(～1keV 程度まで)

プラズマに数 MA 以上の大電流を流す

発生する磁場は閉じ込めにも利用

発生するジュール熱で加熱

追加熱

数十 MW の大パワー粒子ビームを入射

D イオンを加速後(～40A)ガスセルを通して

中性化し、プラズマに入射

(～ぬるま湯に熱湯をそそぐ)

高周波加熱

(～電子レンジによる加熱)

◎定常運転は、

・外部から中性粒子入射

(Neutral Beam Injection)

1MV 級、アンペア級の加速器必要

・高周波加熱

(Radio Frequency)

◎反応で生じた $4\text{He}$  や  $n$  の運動エネルギーを

どうやって熱に変えるか？

ブランケットで

放射化をなるべくしない材料

◎核融合反応の燃料がない。

D は海水中の重水から取り出せるが、

T (トリチウム) がない。

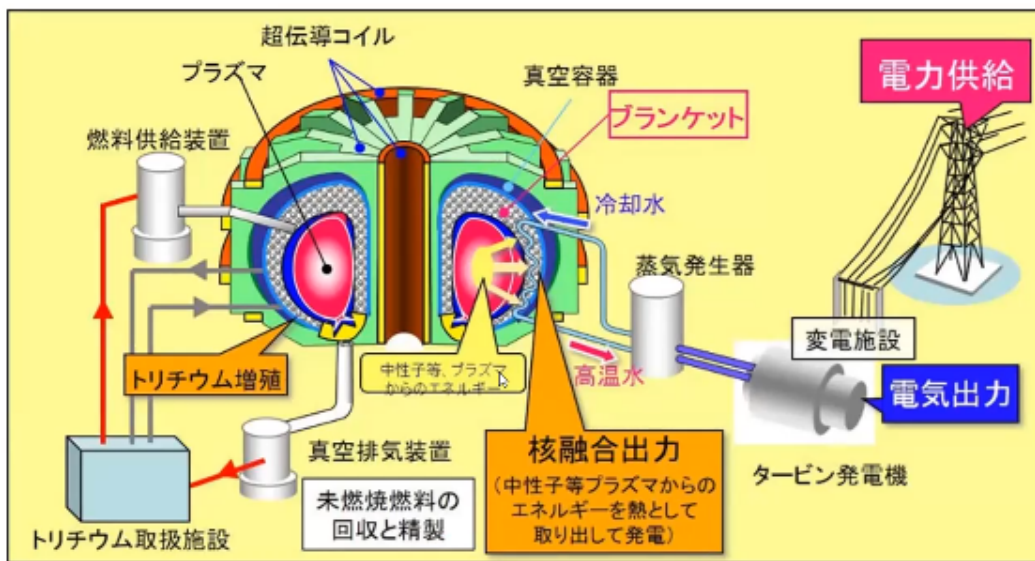
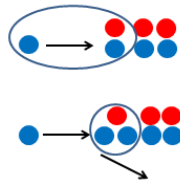
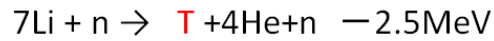
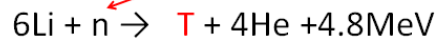
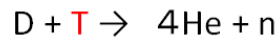
核融合反応をやりつつ T を作り出す。

$\text{D} + \text{T} \rightarrow 4\text{He} + n (14\text{MeV})$

の中性をリチウムにぶつけて作る。



◎ ブランケット内でのトリチウム(T)の生成



六ヶ所核融合研究所HPより

核融合炉システム研究開発部  
核融合炉材料研究開発部  
ブランケット研究開発部

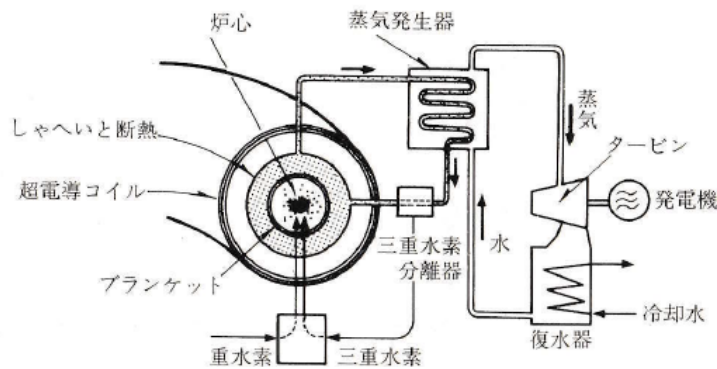


図 4・4 核融合発電炉のシステム



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

ITER は新エネルギー開発の超大型国際プロジェクト。

「ITER (イーター)」は、平和目的のための核融合エネルギーが科学技術的に成立することを実証する為に、人類初の核融合実験炉を実現しようとする超大型国際プロジェクトです。「ITER」はラテン語で道という意味を持ち、核融合実用化への道・地球のための国際協力への道という願いが込められています。

ITER 計画は、2025 年の運転開始を目指し(2016 年 6 月 ITER 理事会で決定)、日本・欧州・米国・ロシア・韓国・中国・インドの 7 極により進められています。



5) サツマイモ苗、サンスベリア、サボテン(玉翁)



昨年栽培したサツマイモのツルを越冬させ夕状況。



昨年栽培したサツマイモのツルを越冬させタ状況。



以上

HP <http://www.cis-laboratories.co.jp/index.html>

2023-3-3 文責 山本洋一