

レポート
核融合への手引き (1)
目次 と はじめに
SCE・Net 郷 茂夫

R-80
発行日：
2022 年
8 月 11 日

(上枠のイラストは、熱核融合反応の瞬間とのことですが、何なのでしょう?)

「脱炭素」旗印の下、核融合の話がしばしば話題にのぼっています。核融合発電の実現に向けて、世界の多くの研究開発機関が精力を注いでいますが、窓 R-77 の報告のとおり、まだ課題は多く核融合発電の実現には今後も相当時間がかかると思います。公共用核融合発電は、おそらく 2060~2070 年代でしょう。

ところで、核融合の反応技術、装置は複雑で理解するのも大変です。そこで、本レポート「**核融合への手引き**」は、20 部くらいの分割レポートより成りますが、核融合というものを大まかにでも知りたいと思われる方々を対象に、原理と装置を解剖しながら核融合全体の理解を深めることへの橋渡しを試みるものです。

著者は、核融合の専門家でもなく、また難しい内容を正確に理解しているわけでもありませんが、少しでも読者の方々への助力になればと思って投稿致しました。多分内容にはいろいろ間違いがあるだろうと思っていますのでどうぞ御遠慮なくご指摘下さい。

言うまでもないことですが、核融合の参考書や文献サイトは沢山ありますので、専門コースをご希望の方はそちらで本式に勉強してください。

<分割レポート目次 (案) >

以下がとりあえずの分割レポート目次です。表題は一応の案で今後変更はあり得ます。また、大体この順番に出稿してゆくつもりです。

- その(1) : **目次とはじめに** (出稿済み)
- その(2) : **まず核融合反応式から** (出稿済み)
- その(3) : **電磁気学を思い出しましょう** (出稿済み)
- その(4) : **むずかしいプラズマ入門**
- その(5) : **超高温プラズマの特異性、異常性について**
- その(6) : **ITER 設計前提データと若干の計算**
- その(7) : **トカマク反応器の構造を大まかに**
- その(8) : **D-T 核融合が起こる基礎条件—三重積**
- その(9) : **D-T 核融合炉のエネルギー出力密度**
- その(10) : **プラズマ加熱方法と装置**

- その(11) : 3つの超電導コイル
- その(12) : プラズマ閉じ込めの理屈
- その(13) : 原料と物質バランス
- その(14) : 重水素, トリチウムの循環使用
- その(15) : ブランケット
- その(16) : ダイバータ
- その(17) : エネルギー・熱バランスと発電
- その(18) : 装置材料の難しさと選定
- その(19) : トカマクの今後の開発手順と運転法
- その(20) : 核融合の安全性
- その(21) : 核融合の特長
- その(22) : 核融合は何が難しいのか? 化学工学の挑戦が必要では?
- その(XX) : 訂正と追補

<この手引きで取り上げる核融合の方式・装置の前提>

このテーマで解説する核融合は、世界にはいろいろなタイプの核融合技術がありますが、今日本が主体的に貢献している「ITER イーター／トカマク式核融合試験装置」です。データも多いので取り扱いやすいと思います。ITERは今フランスで建設中ですが、その計画諸元(組織, 分担, 機器供給, ITER設計値など)は「窓レポートR-74 3-1節」に記していますので参照ください。

<使用する略号(全編を通じて)>

- 本文中(全分割レポートを通じて)で使用する略号(これは筆者が作成したものです); 本文では、長たらしい用語の簡略化, 明確化のために、以下の略号を使います。
核分裂原子炉: **i 炉** (fission による), それによる発電=今の原発: **i 原発**,
核融合原子炉: **u 炉** (fusion による), それによる発電: **u 原発**.
u 原発で、実際の発電出力までを含む初期のu炉施設: **核融合原型炉** ;
正式英語は「Fusion DEMO Reactor」→ 略号として、**u DEMO** とします。
- 原子核記号の左肩の「質量数」は正しくは小文字上付き表記ですが、小さくて見えにくくなることと原稿上の修正が面倒ですので、小文字上付きにはしません。おかしいとは思いますがご了解ください。以下の通りの表記でゆきます。
核子: 陽子, 中性子は通常通りで表示します: 陽子 **p**, 中性子 **n**,
水素同位体の原子核の表示;
水素(軽水素ともいう): **H** or **h**, 重水素(重陽子ともいう): **2H** or **D** or **d**,
三重水素(普通はトリチウムという): **3H** or **T** or **t** と表示します。
ヘリウム同位体の原子核の表示: **4He** (普通のヘリウム原子核), **3He** と表示します。

1. はじめに

一般人にとって、核融合のメカニズムは核分裂（今の i 原発）に比べてかなり難しいと思います。難しいというのは、その技術的メカニズム自体が難しいこと、そしてその理解も難しいことです。核融合も核分裂も核反応によるエネルギーの放出原理自体は核子の組み合わせ変化による質量欠損に対応する結合エネルギーの解放であり類似な核反応形式に分類できると思いますが、その核反応が起こる環境条件が両者ではまるで違います。

まず原料の姿が異次元です。核分裂の原料は常温固形ペレットでジルコニウム製チューブに収められ、核分裂圧力容器内に並べられており、チューブに収める前は肉眼で見ることができます。一方、核融合の原料は重水素、トリチウムという最も軽い元素の気体を反応容器に封入し、原子個数（個/m³）で数えれば極低密度（常温の圧力で言えばほぼ真空状態）で、超高温プラズマという特殊な世界で仕事が行われます。反応容器の蓋を開けようものならあっという間にプラズマは消えてしまいます。

温度条件を見ても、核分裂反応はマイナス温度でも起こりますし、通常は常温から反応スタートします。核分裂で温度は上がりますが、反応器炉心の温度の基本は 300℃以下です。400℃を超えるとチューブが変形するなどリスクがあります。一方、核融合の反応温度はプラズマ状態で 1 億度以上です。ざっと 5 ケタも違うのです（「温度」の定義については、粒子の速度であることをその(4)で解説しますが、感覚的には、単に熱源の温度だけではなく、それに接する受熱側の物体の熱容量の大きさも関係します。90℃の熱湯は無理だが、90℃のスチーム風呂には平気で身体を置けるといようなことです）。核融合の温度要件はこの広い太陽系宇宙でも最も高い温度の部類に属します。そういう超高温を達成するのも大変ですし、それを維持することがまた大変です。しかし、なぜこんな高温が必要なのでしょう？

核融合理解の最大の難所は「超高温プラズマ」です。普通のプラズマは私たちの周りに結構あります。ネオンサイン、稲妻、オーロラ、プラズマディスプレイ、プラズマ溶射などありますが、地球上に住む私たちにとっては、プラズマは気液固超臨界以外の「特殊物質」です。特に核融合トカマクやヘリカルで扱う「超高温プラズマ」はプラズマの中でもまた例外的に扱われ、その挙動は未だ十分には解明されていないと専門家でさえ言います³⁾。

プラズマは宇宙の物質の **99 % 以上** を占めている普遍的物質¹⁾ ということですから、宇宙におけるプラズマの存在領域を見ておきましょう。物質の状態図（プラズマ・パラメータと呼ぶ；温度と密度で物質の存在位置を示した地図）を図 1-1、図 1-2（宇宙のプラズマと私たちの周囲に出てくるプラズマを一緒に図示）に示しました。両図の横軸は密度：個/m³；電子やプラズマ密度は真空から恒星中心の超高密度までを示します。縦軸は温度 eV 単位；温度へ換算すると、10⁴ eV=10 keV =約 1 億度 K です。このようにプラズマの存在領域は無限に広く、しかも驚くべきことに、プラズマという物質は「この全領域で共通的な性質を示す」¹⁾ のです。私たちの身の回りの安定した原子の世界（原子核と電子がしっかり対になっている）はこの宇宙ではむしろ「非常に特殊な小領域」²⁾ だということです。

このようにいろいろな不可思議現象が詰まった核融合「能源玉手箱（いわばエネルギーび

つくり箱)」をこれから開けてみましょう。この手引きを通して見ていただければ、そういうことかとある程度は合点がいくのではないのでしょうか。

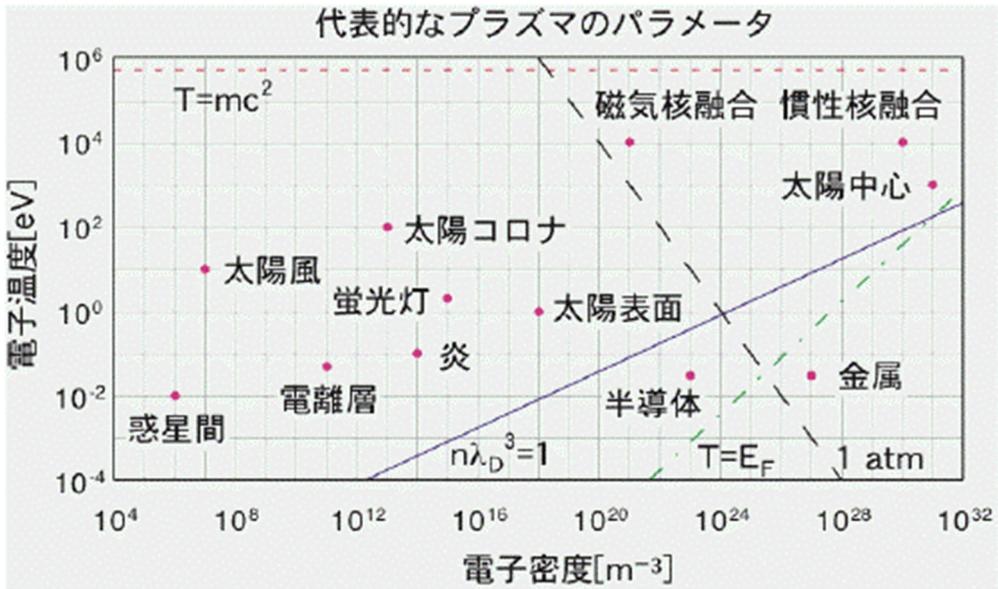


図 1-1. 代表的なプラズマの電子密度と電子温度

出典：[プラズマとは? \(kyoto-u.ac.jp\)](http://kyoto-u.ac.jp), 「広いパラメータ領域」より

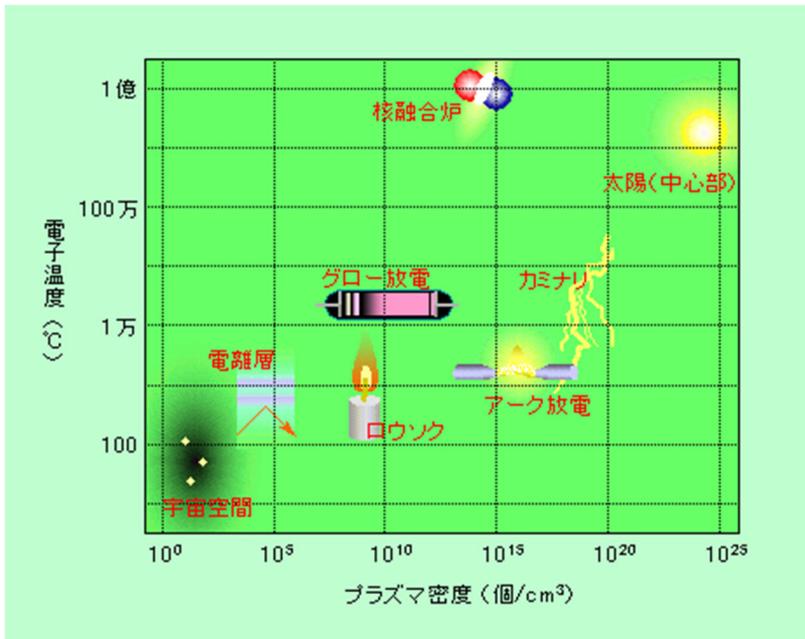


図 1-2 広範囲に広がるプラズマの密度と温度

出典：[雑科学ノート - プラズマの話 - \(hr-inoue.net\)](http://hr-inoue.net), プラズマの温度より図 5,

文献

- 1) [プラズマとは? \(kyoto-u.ac.jp\)](http://kyoto-u.ac.jp), 「プラズマとは」より, 京都大学の講義参考資料
- 2) [雑科学ノート - プラズマの話 - \(hr-inoue.net\)](http://hr-inoue.net), プラズマの話, 個人的サイト
- 3) 窓レポート, R-66, 第 2 部, [r-66_rev.pdf \(sce-net.jp\)](http://sce-net.jp)

その(1) 以上