



レポート  
**核融合への手引き (7)**  
**むずかしいプラズマの菜**  
SCE・Net 郷 茂夫

R-9 1  
発行日：  
2023 年  
1 月 2 2 日

(左上枠のイラストは、地上高く電離層に現れるオーロラです。千変万化するフォルムで美しい光を放つ自然のプラズマです。)

(見出し番号は、前回その(6)「荷電粒子の磁場閉じ込め原理と運動方程式」の続きです。)

(略号、原子核の表示方法は、その(1)の<使用する略号>に定めたとおりでゆきます。)

(電磁気学、力学のベクトルの物理記号の表示方法；その(3)で定めた字体を使用します。)

今回の分割レポートその(7)からは、いよいよ**プラズマの話**に入ります。核融合の反応場は「閉じ込められた空間の中に浮いた超高温プラズマ」ですから、プラズマとは何かを少しは知らねばならないと思いますので、プラズマ理解のための基礎的知識についてです。次回のレポート(8)では、超高温プラズマの特異性や異常性など、少し高度なレベルの領域に入ります。そして直接のテーマである「核融合反応器のプラズマ」の概要はその(10)で行います。

「核融合の超高温プラズマ」は、核融合発電技術の将来の実現のためにも、また核融合というものの理解のためにも、**核融合技術の中心にある最大の難所**です。ここがリーズナブリーに理解できたら、核融合の7, 8割は分かったと言えるのではないのでしょうか。

あまり適当な例えではないと思いますが、化学工学的常識との比較で言いますと、化学反応器の中に多種の原料物質・生成物(液体, 気体)が混合されており、組成的にも温度的にも反応率的にも不均一の場合には攪拌機や混合器を設置して混ぜれば均一の混合物が得られるというのを私どもは当然の前提として考えます。

しかし、密度、温度、組成等の勾配がある超高温プラズマ反応器では、攪拌機のような異物を挿入すること自体ができませんし、磁場や電場を操作して、又は高速中性粒子流等を吹込んで部分的にプラズマの流れを乱すことはできてもプラズマ内が均一になることはありません。ヘタをすると原料物質であるはずの超高温プラズマは器壁側に拡散してあっという間に消失してしまいます。超高温プラズマは、化学工学的常識から見ると、そんな特異現象、異常現象の集積した物質です。

プラズマの正確な理解のためにはむずかしいプラズマ物理の知識が相当必要ですが、筆者にはプラズマの深い知識はありませんので、大雑把な表現に終始せざるを得ませんがご容赦ください。

プラズマ物理の参考書、参照サイトは沢山ありますので、正確な専門的知識を望まれる方におかれましてはそちらを使って本式にプラズマ物理を勉強して下さい。次回レポート(8)も現在の超高温プラズマの研究対象である特異現象に触れますので、入門書のひとつではあります。

## 8. プラズマの一般的知識

### 8-1 プラズマの定義と存在形態, 範囲

<p>プラズマの概念<sup>2)</sup></p>	<p>プラズマは荷電粒子群と電磁場が相互作用する複合系である。粒子の運動は電磁場を変化させ、電磁場の変化は粒子の運動にフィードバックされる。プラズマは固体、液体、気体のいずれとも異なる特有の性質を持つため、物質の第4の状態ともいわれる。</p>
<p>プラズマの定義<sup>1), 2), 3), 4)</sup></p> <p>ここでの「イオン」の意味<sup>10), 13)</sup></p>	<p>物質の温度を上げていくと、物質のもとになる原子の構成要素の中心の原子核（化学的用語で言えば「イオン」）と電子が電離し、自由に動き回る状態となる。これをプラズマと言う。</p> <p>プラズマの話の中で使う「イオン」とは、中性原子から電子をはぎ取った裸のプラス荷電の原子核粒子を言う。図8-1に普通のヘリウム原子（安定状態）と電子をはぎ取ったヘリウム原子核と電子の集団図を示す。後者がプラズマで、不安定状態にある。</p> <p>従って、化学で普通に言うイオンとは意味が違う。</p> <div data-bbox="430 840 1340 1310" style="text-align: center;"> </div> <p>図8-1 原子の安定状態と不安定状態（これがプラズマの実体である）          出典：<a href="http://fuji.co.jp">【プラズマとは？】プラズマ装置メーカーが分かりやすく解説します (fuji.co.jp)</a></p>
<p>狭義のプラズマは、プラズマの3要件を満たす<sup>2), 13)</sup></p>	<p>※ 以下は何のことかまるでわからないと思うが、核融合トカマク・プラズマはすべての要件をパスしているので、説明は省略する（筆者も勉強しておらずわからない）。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. その物質系の大きさ <math>L</math> がデバイの長さ <math>\lambda_D</math> より十分大きくなければならない。すなわち <math>L \gg \lambda_D</math></li> <li>2. 考えている現象の時間スケール <math>t</math> がプラズマ振動の周期よりも長くなければならない。すなわち <math>t \geq 1/\omega_{pe}</math></li> <li>3. 半径が <math>\lambda_D</math> の球の中の粒子数 <math>\Lambda</math> が充分大きくなければならない。すなわち <math>\Lambda \gg 1</math>。 <math>\Lambda</math> をプラズマ・パラメタという</li> </ol>
<p>広義のプラズマ<sup>2), 13)</sup></p>	<p>広義のプラズマは、上記のプラズマの3要件の一部を満たさず、非中性プラズマ、強結合プラズマなどを含んでいる。</p>

<p>一般に知られたプラズマの例<sup>1)</sup>、<sup>2)</sup>、<sup>3)</sup>、<sup>4)</sup>、<sup>5)</sup>、<sup>6)</sup></p>	<p>◆ 自然界のプラズマ： 地球周辺：電離層、自然現象にも多く見られる（雷、稲妻、オーロラなど＝表紙にイラストを添付した）。 宇宙：太陽風、星間ガスなどはプラズマ状態であり、宇宙の質量の99%以上はプラズマ状態である。ヴァナレン帯、彗星の尾、星間物質、など。</p> <p>◆ 人工的なプラズマ：人工的には、蛍光灯、ネオンサイン、ロウソクの炎などの身近なものから、モノづくりに応用されるプラズマ技術がいろいろある。レーザーやマイクロ波の照射により気体を電離させることで生成され、プラズマプロセス（表面処理、プラズマを用いた微細加工や機能性薄膜の創成、溶射など）や原子核融合など、多様な工学的応用がなされている。プラズマ加速（電子ビームをプラズマに入射し、プラズマ中の急峻な構造によって生成される電場を用いて荷電粒子を加速する方法）など。</p>
<p>温度と密度（単位体積中の個数）のパラメータ図<sup>1)</sup></p>	<p>レポートその(1) 1. (図 1-1, 図 1-2 参照) で、物質の存在を「温度と密度」の領域地図で示した。この図からプラズマの密度と温度パラメータの領域は非常に広いことがわかる。また、密度に至っては 25 桁の差があるにもかかわらず、プラズマとして数多くの共通な性質をもっているのは驚異的であると言われる。</p> <p>上図から、核融合は太陽系宇宙で最も高い温度領域の実現を目指しているといえる。</p>

## 8-2 D-T 反応における高温プラズマ中の粒子の種類

<p>D-T 反応における高温プラズマ中の荷電粒子、中性粒子の種類</p>	<p>現在世界の核融合技術開発機関が扱っている D-T 反応系を例にとり、その高温プラズマ中にどんな種類の粒子が存在するかをしてみる。</p> <p>◆ プラス（イオン）：<math>^2\text{H}</math> (D) , <math>^3\text{H}</math> (T) , <math>^4\text{He}</math> の原子核 &lt;注意&gt; 化学で使うイオンとは、中性原子から数個の電子が電離したり、逆に外部から数個の電子を取り込んで、プラスまたはマイナス状態の「原子」を言うが、プラズマで言うイオンとは、すべての電子がはぎ取られた「原子核」を言う。</p> <p>◆ 中性：中性子 (n) , その他の中性原子（原料ガスや加熱用中性原子も反応器へチャージ直後は中性状態である、ただその後は変化する）</p> <p>◆ マイナス：電子 (e ; 電子は加熱源として重要である)</p> <p>その他の不純物で、中性部分または電離している部分の両方がある。原料や循環系からの不純物、水、微量空気、ブランケットや器壁からの混入する不純物など。</p>
---------------------------------------	---

## 8-3 微粒子の世界の「温度」とは（直接温度計で測るわけではありません。）

ここはプラズマの温度と理解してください。

<p>(プラズマの) 温度とは<sup>14)</sup>、<sup>15)</sup>、<sup>15)</sup></p>	<p>プラズマ中の電子とイオンは、熱的に無秩序な速度で運動しており、それぞれが熱平衡状態にある場合には、その速度分布関数は、Maxwell 分布となる。従って、それぞれの温度を定義することができる。</p> <p>電子温度を <math>T_e</math>、イオン温度を <math>T_i</math> とすると、以下のように表される。</p>
---	--

粒子の運動  
速度と  
温度との関  
係の目安  
14), 15)

$$1/2 m_e \langle v_e^2 \rangle = 3/2 k_B T_e, \quad (\text{式 8-1})$$

$$1/2 M_i \langle v_i^2 \rangle = 3/2 k_B T_i \quad (\text{式 8-2})$$

ここで,  $m_e$ ,  $\langle v_e^2 \rangle$  は, 電子の質量と二乗平均速度,  $M_i$ ,  $\langle v_i^2 \rangle$  は, イオンの質量と二乗平均速度である.  $k_B$  は Boltzmann 定数である. これらの温度は, プラズマの諸量を表す際に頻繁に現れるパラメータであり, プラズマの密度とともにプラズマを特徴付ける最も重要なパラメータの一つとなっている.

粒子をもっと広く見ても同様だが, 小さい粒子群のエネルギーや熱速度  $v_t$  (速度分布=運動エネルギー分布の広がりを表す量) はボルツマン分布に従い, 以下の式で表現され,

$v_t$  がわかれば, 粒子集団の絶対温度 (いわば平均温度) によって代表することが可能である.

$$v_t = (3k_B T / m)^{1/2} \quad (\text{※} 3k_B T / m \text{ の平方根}) \quad (\text{式 8-3})$$

ここで,  $v_t$  は, 全分子の速さの二乗の平均のルート (rms=root mean square)

$k_B$ ,  $T$  はそれぞれボルツマン定数と絶対温度,

ボルツマン定数 =  $1.361 \times 10^{-23}$  [JK<sup>-1</sup>]

$m$  は粒子質量 (電子又はイオン).

都合の良いことに, 温度  $T$  は常にボルツマン定数  $k_B$  との積  $k_B T$  の形で現れ, これはエネルギーの次元を持っていて,  $(3/2)k_B T$  は 1 粒子当たりの運動エネルギーを表す. すなわち, 以下である.

$$(1/2) m v_t^2 = (3/2) k_B T \quad (\text{式 8-4})$$

そこで絶対温度の代わりにその運動エネルギーを温度として用いると, その値は構成粒子の運動エネルギーと直接結びついて非常に便利で, プラズマ物理ではもっぱらこの温度を用いる. 単位として **eV** と書いて, 電子ボルト (electron volt) と呼ぶ. 絶対温度との間には  $1 \text{ eV} \simeq$  (対応のこと)  $1.16 \times 10^4 \text{ K}$  の関係があり, 1 eV はおよそ 1 万度 (K) と考えてよい.

ちなみに, 核融合炉 (DT 反応) の  $T_e$  (電子温度) :  $10^4 \text{ eV}$ ,  $T_i$  (イオン温度) :  $10^4 \text{ eV}$  くらいである. ということは,  $10^8 \text{ 度 K} = \text{約 } 1 \text{ 億度のレベル}$ ということ, 1 億度の桁の有効数字には少し誤差があるが.

(注) さて, (式 8-4) に  $1 \text{ eV} (= 1.602 \times 10^{-19} \text{ J})$  と  $k_B$  の値を入れて  $T$  を求めると,  $T = 1.602 \times 10^{-19} / 1.5 \times 1.361 \times 10^{-23} = 7850 \text{ K}$  となる.

ただ, 熱運動速度はその定義によって温度との関係に計算上の幅がある.

以下, Wikipedia より多くを引用する ;

集合体としての無数の微粒子の**熱運動速度** (thermal velocity, thermal speed) は温度によって間接的に測ることができる. この物理量はマクスウェル・ボルツマン分布におけるピーク幅を測ったものである. 熱運動速度はあくまで「代表的な」速度であるから, さまざまな定義が存在し, 実際に用いられている.

● 一次元において,  $v_{th}$  を各単一次元 (各方向) に沿った粒子速度の二乗平均平方根により定義すると, 次のように書ける.

$$v_{th} = (k_B * T / m)^{1/2} \quad \text{ルートの意味}$$

● 一次元において,  $v_{th}$  を各単一次元 (各方向) に沿った粒子速度の大きさの平均と定義することもでき, 次のように書ける.

$$v_{th} = (2 k_B * T / m)^{1/2} \quad \text{ルートの意味}$$

	<p>● 三次元において、<math>v_{th}</math> を粒子の速さの<b>最頻値</b>と定義すると以下のように書ける。</p> $v_{th} = (2 k_B * T / m)^{(1/2)} \quad \text{ルートの意味}$ <p>● <math>v_{th}</math> を三つの方向それぞれの速度すべての二乗平均平方根をとったものと定義すれば以下のように書ける。</p> $v_{th} = (3 k_B * T / m)^{(1/2)} \quad \text{ルートの意味}$ <p>上記のどの定義を採用しても、<math>v_{th}</math> は次の範囲に収まる。</p> $v_{th} = (1.6 \pm 0.2) * (k_B * T / m)^{(1/2)} \quad \text{ルートの意味 (式 8-5)}$ <p>上記 (注) の文献；</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ <a href="#">熱運動速度 - Wikipedia</a></li> <li>◆ <a href="#">Molecular Kinetic Energy from the Boltzmann Distribution (gsu.edu)</a></li> <li>◆ <a href="#">Equipartition of Energy (gsu.edu)</a></li> </ul> <p>上述の注より、<b>熱運動速度の定義をどのように取ろうと、大体同じ値になるということがわかる</b>。従って、(式 8-5)より <math>T</math> を計算すると、  <math>T = 7300 \sim 12000</math> の範囲となる。これは「およそ1万度」と言ってもよいのではないか。</p>
<p>微粒子速度の測定方法<sup>16)</sup></p>	<p>核融合実験炉 ITER の1億度を超えるプラズマを安定に維持するには、内部の磁場構造を正確に把握する必要がある。計測器はプラズマ中には挿入できないので、レーザー（光）を使って非接触で測定する方法が一般的である。</p> <p>良く知られたプラズマ温度計測の原理は、ドップラー効果と光を利用する。ドップラー効果の原理を使えば、移動する物体の速さを測定できる。プラズマ温度計測は、レーザーなどで光を電子に当てて、電子が反射した光を回収し、そこからドップラー効果を使って電子の移動速度を計算し、それを温度表示に換算することができる。</p>

#### 8-4 プラズマの種類（プラズマを区別するための基準項目）

以下にいろいろ複雑なプラズマを区別するための基準を示しますが、下の枠内記述では3つくらいの切り口で区別してみました。重要な基本的基準は1項ですが、素人から見た場合、一見わかりにくいプラズマの形態を認識しやすくするために、2, 3項を加えました。これで形としてのプラズマの種類がわかりやすいでしょう。

実際のプラズマはこれらの切り口、基準の組み合わせで成り立っているということです。各項目においてプラズマの独立的な種類名を言っているのではありません。

下線部分が核融合に関連する切り口、基準なので留意ください。

<p>1. プラズマの<b>特性</b>、<b>存在状態</b>、<b>形態</b>の切り口 2), 10, 11, 13 →ここが基</p>	<p>● <b>電離度</b>：電離度が低い＝弱電離プラズマ or 低温プラズマ／一方、電離度が1となり、イオンと電子だけで構成されるプラズマを<b>完全電離プラズマ</b> or 高温プラズマという。</p> <p>（補）オーロラ、雷などはプラズマ現象の例だが、光を放つ部分の物質がすべてプラズマで構成されているわけではない。電離度の低いプラズマであってもプラズマと呼ぶ。</p> <p>一方、今回テーマの核融合プラズマは、<u>ほぼ完全電離プラズマ</u>である。</p>
---	--

<p>本的基準を表す</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 圧力や粒子密度：大気圧プラズマ／真空プラズマ or <u>低密度プラズマ</u>  (補) 蛍光灯はアルゴンガスと数%の水銀蒸気が封入されており，電離度が低い水銀プラズマだが，蛍光灯内は略大気圧で大気圧プラズマである。  一方，<u>核融合プラズマ</u>は，<u>低密度プラズマ</u>である。</li> <li>● 大域的な磁場の有無：<u>磁化プラズマ</u>／<u>非磁化プラズマ</u>  (補) 磁化プラズマでは，<u>プラズマ粒子は磁力線の周りをサイクロトロン運動し、磁力線に垂直な方向の移動は制限される</u>。このため、<u>磁力線に対して平行方向の温度と、垂直方向の温度は異なることがある</u>，</li> <li>● 電気的中性の有無：電気的に中性なプラズマを<u>中性プラズマ</u>、どちらか一方のみの荷電粒子から構成されたプラズマを非中性プラズマというが，<u>核融合では局所的には中性は崩れている</u>。</li> <li>● <u>平衡プラズマ</u>（電子温度とイオンや原子の温度が熱平衡状態、すなわち同じである状態；熱プラズマが1例）／<u>非平衡プラズマ</u>（→エネルギーの外部からの注入、伝達、外部への排出により構造が維持される非平衡系，核融合はこれに相当する。）</li> </ul>
<p>2. 装置としての容器の有無，容器形状の切り口</p>	<p>プラズマを<u>密閉容器内</u>で発生させるか，開放系（大気オープンや地上空間など）で発生させるかの区別である。密閉容器内と言っても，完全密閉ではないこともあり得る（小さい開口部で大気と均圧になっているような場合）。  <u>容器の形状が，プラズマ発生、維持にかなり大きな影響を持つ</u>；長管，箱，球，<u>トーラス型（ドーナツ形状）</u>などがある。</p>
<p>3. 装置の対向電極の有無の切り口</p>	<p>プラズマの発生は，<u>多くの装置の場合，対向電極間の放電による</u>。  しかし，<u>装置として明確な対抗電極を持たない場合でも，強力な電流やエネルギーを与えられれば，プラズマを生成できる</u>。  <u>核融合のトカマクやヘリカルはその典型例である</u>。その場合，電流の方向は<u>電磁誘導によって決まる</u>。</p>

### 8-5 プラズマの生成と消失

プラズマを得るためには，原料である原子あるいは分子を電離して，正イオンと電子を生成しなければなりません。また，平たく言えば，プラズマは不安定で放っておけばあっという間に消失してしまいます。その生成と消失について，一般プラズマと核融合プラズマについて概要を解説しておきます。

<p>プラズマの生成  (一般)  7), 8), 9)</p>	<p>基本的には，束縛電子にエネルギーを与える方法によって実現される。  プラズマを生成・維持するためには，ガス中で電子をガスの電離電圧以上に電界で加速し，ガスの原子や分子と衝突させて電離を生じさせる（放電させる）とともに拡散などでの荷電粒子の損失を常に補って定常状態を維持することが必要となる。この電界を発生してプラズマを生成・維持する<u>放電方式</u>を，電源（電力）の周波数で分類すると，以下のようなものである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・直流放電 (Direct Current Discharge) (<math>f=0</math> kHz)，</li> <li>・低周波放電 (Low Frequency Discharge) (<math>f \leq 1</math> MHz)，</li> <li>・高周波放電 (Radio Frequency Discharge) (<math>1 \text{ MHz} \leq f \leq 1 \text{ GHz}</math>)</li> <li>□□ マイクロ波放電 (Microwave Discharge) (<math>f \geq 1 \text{ GHz}</math>)。</li> </ul>
--	---

	上記の分類に従って、プラズマの生成・維持は、電源の周波数 $f$ に大きく依存するものである。
核融合のプラズマの生成 7), 8), 9)	<p>核融合において超高温のプラズマ状態が長時間必要である。まず原料ガスをプラズマにするのは、熱電離による気体を超超高温に熱する方法（エネルギー付与）であり以下のようなものである。</p> <p>(1) ドーナツ内にぐるぐる回る「強力なプラズマ電流」を作る。スタートは超電導コイルによる電磁誘導である。しかし、これは長時間は続かず、不思議な「自発電流」がとって代わる。プラズマは荷電粒子で導電体なので、これによって激しく加速され温度は上昇する。</p> <p>(2) 上記の (1) がエネルギー付与の基本だが、損失もありそれでは不足するので外部よりエネルギーを追加供給する。その方法が、大きく2つある。</p> <p>(i) 高速中性粒子を系内に吹き込む。原料粒子に衝突させて電離する。</p> <p>(ii) 高周波電力を系内に投入する。いわば電子レンジである。</p> <p>核融合では最も高い高周波帯を使う。</p> <p>トカマクのエネルギー付与の具体的方法については、後日のレポートでもう少し詳しく述べる。</p>
プラズマの消失（損失ともいう） 7), 8), 12)	<p>プラズマの生成と消滅の過程が荷電粒子の速度分布関数に強く影響するという意味からも、プラズマの消滅過程は重要である。その過程には、大別として以下がある。</p> <p>(1) 損失による再結合: 負の荷電粒子（主に電子 <math>e</math>）と正の荷電粒子（イオン <math>A^+</math>）が衝突して、元の原子や分子に戻る過程を再結合という。この過程には、プラズマの内部で発生する体積再結合（volume recombination）と容器などの固体表面で生ずる表面（または壁）再結合（surface or wall recombination）が存在する。前者は主に高圧の高密度プラズマの中で、後者は主に低圧プラズマで発生する。</p> <p>(2) 粒子移動の半径方向の拡散によるプラズマ損失: 放電電極や真空容器壁に接触して損失する。径方向に拡散して真空容器表面に達した荷電粒子の多くは、壁を第3物体とする表面再結合で中和され失われる。放電電極で失われた電荷は電源を含む外部回路を通して循環する。</p> <p>(3) 上記以外に、プラズマ中に起こる各種の不安定性に伴ってプラズマが半径方向に運動する、いわゆる異常輸送がプラズマの損失につながる重要な機構である。</p> <p>核融合では、(2), (3) の寄与が大きく対応が必要となる。また、荷電粒子の損失を常に補って定常状態を維持することが必要となる。</p>

核融合プラズマの維持; 超高温プラズマを安定に長時間維持することが、トカマクの主要な課題であり、そこが難しいのです。次回に触れたいと思います。

## 文献

<プラズマの基礎と全般概論－入門者向け>

- 1) [プラズマとは? \(kyoto-u.ac.jp\)](http://kyoto-u.ac.jp) , 京都大学, access since 98/08/2003.
- 2) [プラズマ - Wikipedia](http://ja.wikipedia.org) , プラズマの種類, プラズマ中の物理現象

- 3) [5分でわかるプラズマ！仕組みや種類、発生条件などをわかりやすく解説！ | ホンシエルジュ \(honcierge.jp\)](#)
- 4) [プラズマの種類と特徴：プラズマ処理の基礎知識 1 - ものづくり&まちづくり BtoB 情報サイト「Tech Note」 \(ipros.jp\)](#) [プラズマの種類と特徴：プラズマ処理の基礎知識 1](#)
- 5) [【プラズマとは？】プラズマ装置メーカーが分かりやすく解説します \(fuji.co.jp\)](#)

<プラズマの事例，事例は 1)から 4)の文献にも記載あり>

- 6) [プラズマ物理 - 代表的なプラズマの例 - わかりやすく解説 Weblio 辞書](#)

<プロセスプラズマの解説，特にプラズマの生成と消滅>

- 7) [pdf \(jst.go.jp\)](#) ，プロセスプラズマの基礎，・荷電粒子の消滅（損失）過程
- 8) [プラズマの生成 \(osakafu-u.ac.jp\)](#) [プラズマの生成](#)
- 9) [プラズマの発生方法：プラズマ処理の基礎知識 2 - ものづくり&まちづくり BtoB 情報サイト「Tech Note」 \(ipros.jp\)](#) [プラズマの発生方法：プラズマ処理の基礎知識 2](#)

<プラズマ全般解説，プラズマ物理－高レベル者向け>

- 10) [プラズマ物理学 \(physics.thick.jp\)](#) ，プラズマ物理学，プラズマであるための条件
- 11) [Plasma Physics \(u-tokyo.ac.jp\)](#) ，プラズマ物理学，単一荷電粒子の運動，流体としてのプラズマ
- 12) [psec-all.pdf \(u-tokyo.ac.jp\)](#) ，プラズマ物理学講義レジュメ
- 13) [プラズマ物理 - Wikipedia](#) ，プラズマ物理

<プラズマ物性論－温度や測定法>

- 14) [Ch02.pdf \(t-shirafuji.jp\)](#) ，第 2 章 プラズマの特性物理量
- 15) [温度 T と分子の速度 u の関係とは? - Shinshu Univ., Physical Chemistry Lab., Adsorption Group \(shinshu-u.ac.jp\)](#) ，温度 T と分子の速度 u の関係とは?-
- 16) [高い温度はこう測定する | Ekuipp \(エクイップ\) Magazine \(ekuippmagazine.com\)](#)
- 17) [熱運動速度 - Wikipedia](#)

その(7) 以上