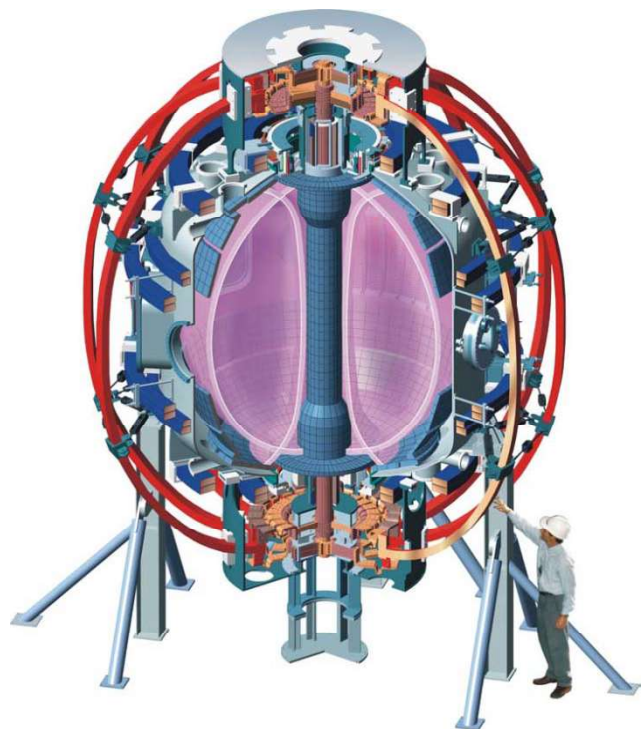


エネルギー機能材料学特論

第一回目



プラズマ実験装置NSTX(Princeton)

担当: 西野信博

A3-525号室

nishino@hiroshima-u.ac.jp

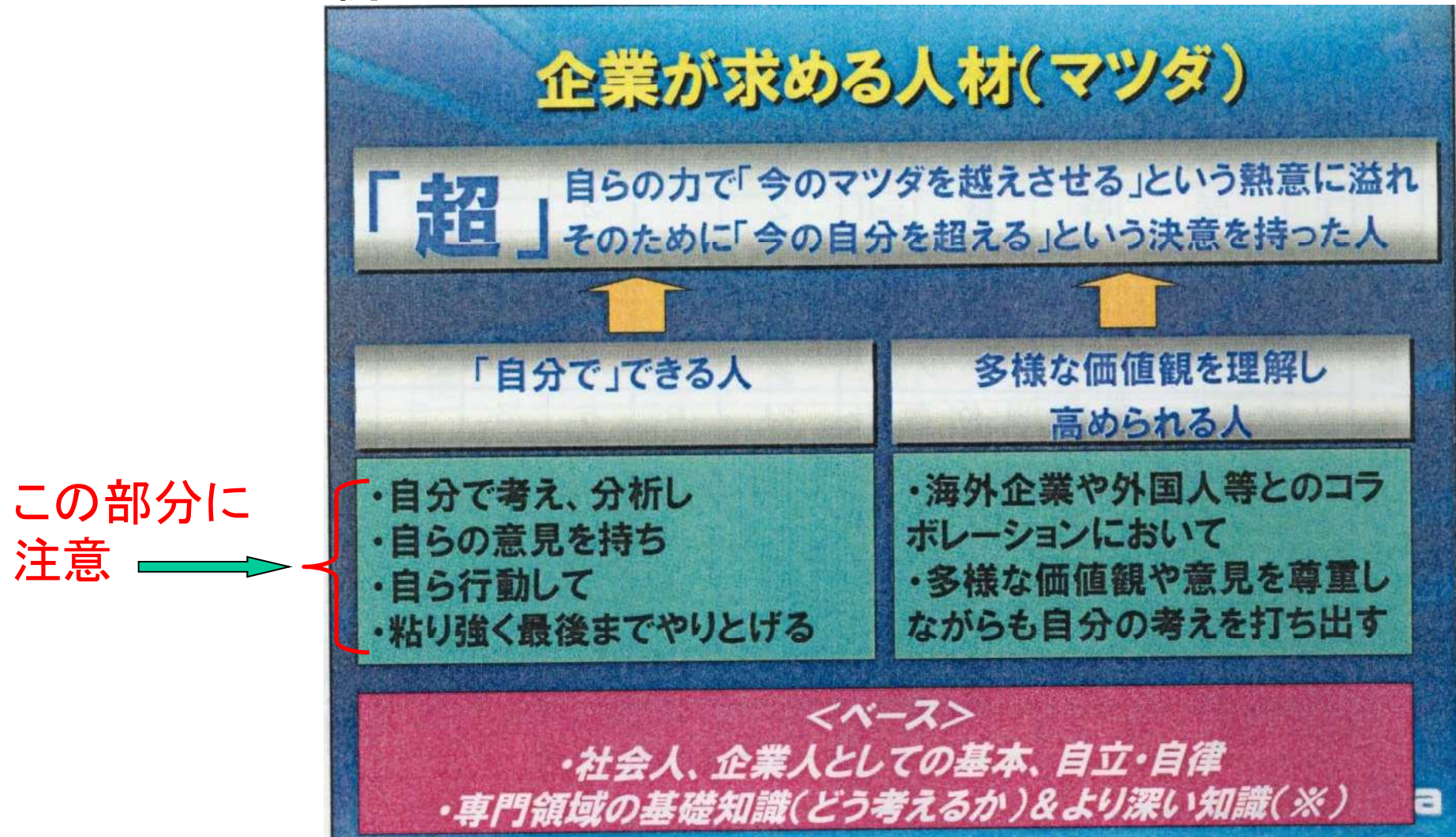
<http://home.hiroshima-u.ac.jp/nishino/>

目 次

- 企業や研究室が求める人材とは？
- 授業方法の紹介
- 講義

企業や研究室が求める人材とは？

・ マツダの例



続き

• 中国電力の例

中国・四国工学教育協会 3部会意見交換資料(2006.9.27)

企業が求める人材(中国電力)

～競争に勝ち抜き、事業の持続的発展を遂げていくために～

行動指針

私たちは...

旺盛なチャレンジ精神をもち、未来に向かって柔軟な思考で創造する、
輝きあるヒューマングループをめざします。

■ スピーディーに	■ 従来のやり方にこだわらないで
■ 自主と責任で	■ プロ意識を持って
■ 良識をもって	...

基礎学力・専門能力に加え、

人物像

- ・ 自ら考え、行動することができる方 ←
- ・ 粘り強くチャレンジを続けることができる方
- ・ 良識を持ち、責任ある行動のとれる方

マツダと同じ

授業について

- 本授業ではテキストを特に採用していない。学生は個人個人で好みの参考書を選ぶこと。
- 授業回数は15回以内を予定
- 成績はレポートなどで行う
- 時間の流れ(90分)
 - プロジェクターでの講義
 - 約80分
 - レポート
 - 説明に10分程度使用

授業の内容

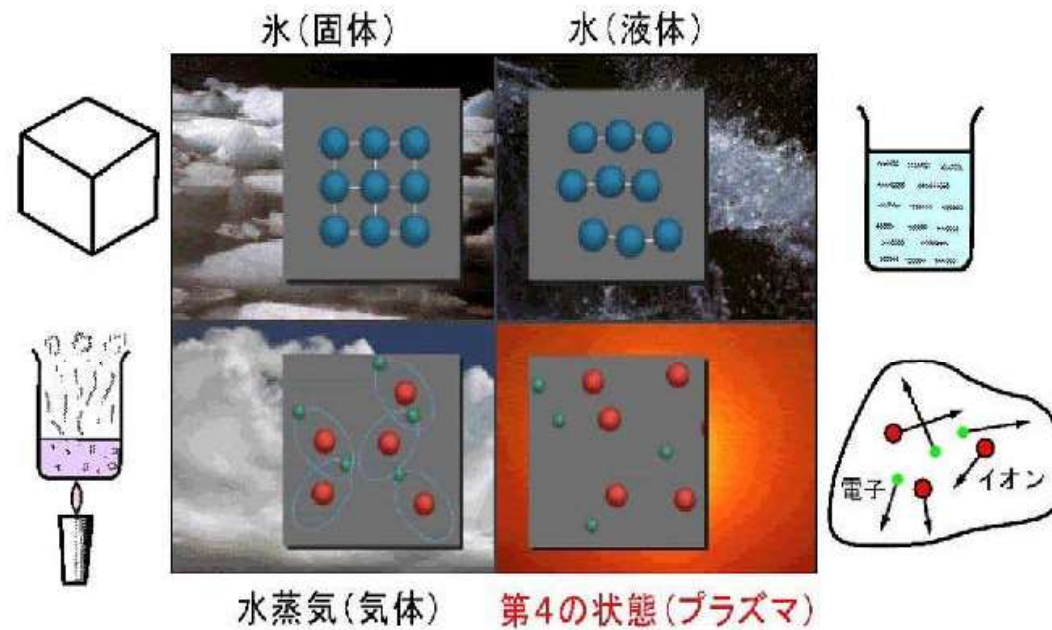
- プラズマ(Plasma)を記述する力学に関する基礎知識 **プラズマの性質**
 - 単粒子運動
 - 集団運動
 - 流体モデル
 - 運動論的(分布関数)モデル
- プラズマ中での代表的な原子・分子反応 **プラズマ生成・維持**
 - 素過程(elementary process ここでは, atomic/molecular process)
 - 断面積(cross-section)
- プラズマと固体の相互作用(Plasma-Solid interaction) **プラズマ応用**
 - 粒子との相互作用
 - 熱, 光, 電磁場など
- その他(必要に応じて電磁気学の復習等)

プラズマに関する質問

- ・ プラズマTVで有名なプラズマだが、さて、どのようなものをプラズマとよぶのであろうか？
 - 問題1 物質の3態とはなんだったか？
 - ・ プラズマとは物質の第4の状態とも言われる。
 - 問題2 電離とはどのような状態を言うのか？
 - 問題3 解離とはどのような状態を言うのか？
 - ・ プラズマは電離に密接に関係している
 - 問題4 プラズマを見たことがある人は？
 - プラズマからの音を聞いたことは？
 - ・ プラズマは通常明るい
 - ・ プラズマから可聴音(20–20000Hz)が出ることもある。

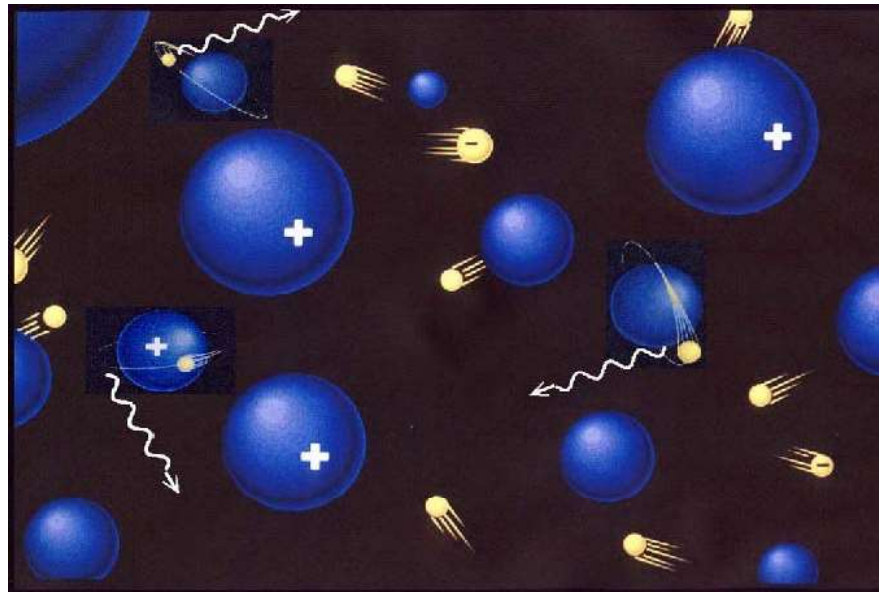
答え

- ・ 問題1 物質の3態とはなんだったか？
 - － 固体, 液体, 気体



答え

- ・ **問題2 電離とはどのような状態を言うのか？**
 - － 原子が、電子とイオンに分かれた状態



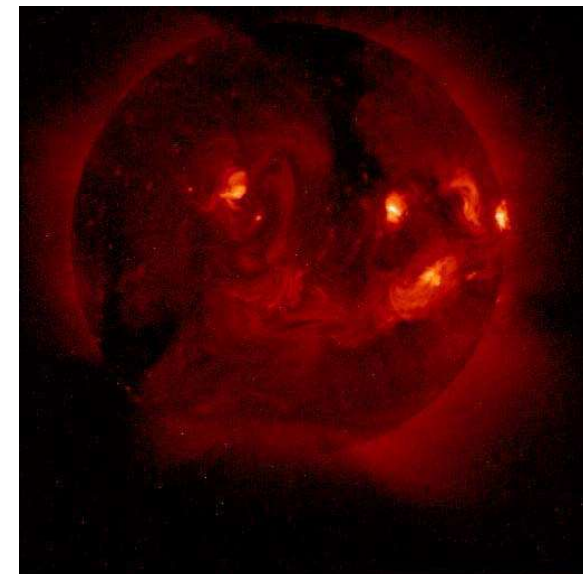
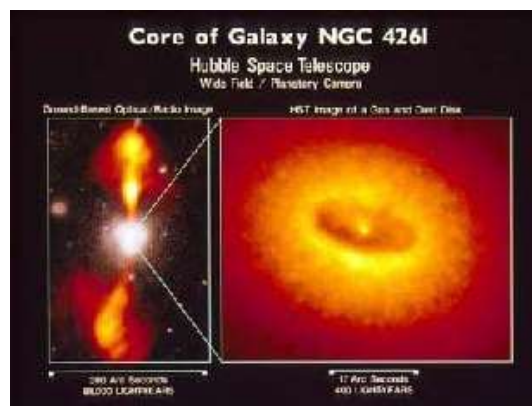
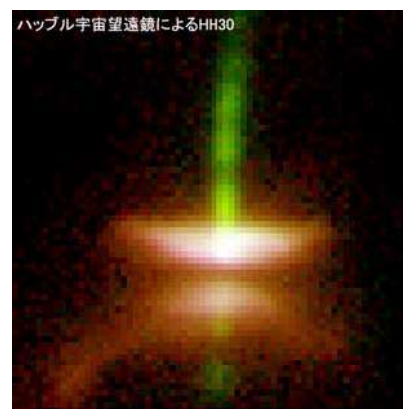
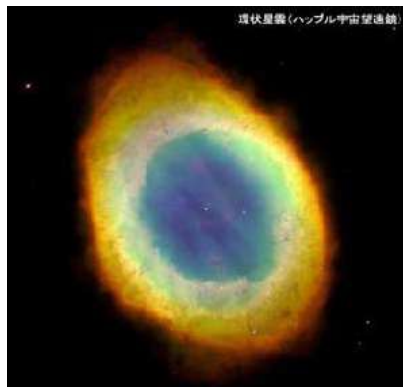
- ・ **問題3 解離とはどのような状態を言うのか？**
 - － 分子が、原子に分かれた状態

答え

- ・ 問題4 プラズマを見たことがある人は？
 - － プラズマTVの光はプラズマからの光です。但し、プラズマの光をRGBのフィルム(蛍光体層)で変換する方法が一般的で、直接プラズマの光を見るわけではないようです。
 - － 雷も一種のプラズマ状態です。
 - － オーロラ, 太陽などもプラズマ状態です。

目で見るプラズマ

- 宇宙では
- 「プラズマ・核融合学会編プラズマエネルギーのすべて(日本実業出版社刊)」より



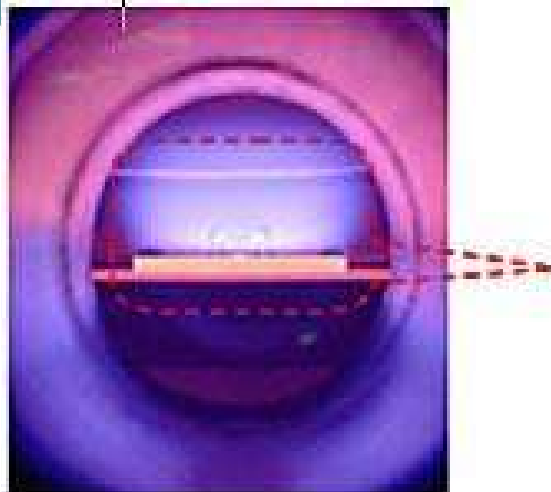
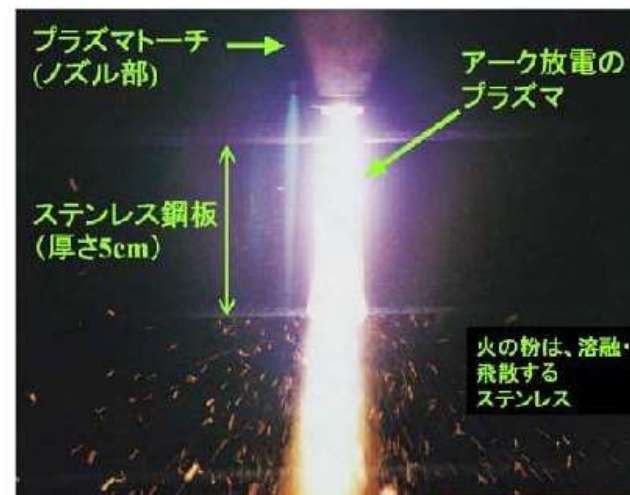
目で見るプラズマ

- 地球から(Web オーロラ写真館より)



目で見るプラズマ

- 応用例
- 「プラズマ・核融合学会編プラズマエネルギーのすべて(日本実業出版社刊)」より



プラズマの定義

- 電離気体のことを広い意味でプラズマという。
 - 但し, 通常は後述する条件がある。
 - プラズマという用語は, 米国の物理化学者Langmuirが命名した
 - ちなみに, 生物学, 医学, 生理学でもプラズマという言葉があるが, 全く意味が異なるので注意すること。
 - 宇宙の99%以上はプラズマ状態であり, これが自然な姿。
 - 地球などはむしろ例外
- 通常, 電子とイオンに分かれる。イオンは正電荷を帯びることが多い。電氣的には凡そ中性(準中性という)である。
 - イオンや電子の密度の僅かな差がで大きな電場が発生し, その電場を打ち消すようにイオン・電子が運動する状態。

プラズマの生成法と特徴

- 気体にエネルギーを与えると、気体を構成する原子・分子の運動が激しくなる。その結果、それらの一部または多くが電子とイオンに分かれる。
- すなわち、温度上昇につれて
- 気体の分子→原子に解離→電子・イオンに電離
- となる。よって、
- **普通よりエネルギーが高い状態**である。
 - 核融合分野においてプラズマ物理がきわめて発展した。
 - 1990年代頃から化学反応などに利用され始め、固体表面などの改良・改質、合成反応、半導体産業などへの利用されている。
 - 2000年代頃から医学応用が盛んになり始める。

プラズマの大別

- プラズマ中で電離している粒子数が多い場合、**強電離プラズマ**と言い、逆に、中性粒子数が多く、電離している粒子数が少ない場合は**弱電離プラズマ**という。
- すべての粒子が電離していると**完全電離プラズマ**、その他の状態では**不完全電離プラズマ**という。
- また、**低温プラズマ**は比較的溫度が低いプラズマで、**高温プラズマ**は比較的溫度が高いプラズマのこと。
- 但し、溫度が低い、高いは、**主観による場合も多い**。

- プラズマの性質は、電離度、溫度により異なる場合が多い。通常電離度が大きい場合、溫度が高く、電離度が小さい場合は、溫度が低い。
- 従って、低温弱電離プラズマ、高温強電離プラズマとなる場合が多い。

電離度

- プラズマ中で、イオンの割合を示す量を電離度という。
- ガスが電離する前の原子密度を n_0 とし、イオン密度 n_i 、中性粒子密度 n_n とすると、

$$n_0 = n_i + n_n$$

- すると、電離度 η を以下で定義する。

$$\eta = \frac{n_i}{n_i + n_n}$$

- 明らかに、完全電離プラズマは100%、中性ガスは0%となる。

プラズマの性質

- 以下, 簡単に, 一価のイオンと電子からなるプラズマを考える。
- 荷電粒子同士は, クーロン相互作用のため, 同電荷同士は反発し, 異電荷同士は引き合う。
- そのエネルギーは $e^2 / (4\pi\epsilon_0 l)$ で与えられる。
- ここに, e は素電荷(>0), ϵ_0 は真空の誘電率, l (エル)は荷電粒子間の距離である。
- クーロン力のエネルギーより, 熱運動エネルギー T [eV]が大きいと電離状態を維持できないので, 一般的に,

$$T \gg e^2 / (4\pi\epsilon_0 l)$$

- が成立する。



つづき

- すると、距離 l は密度 n の $-1/3$ 乗であるから、 $nl^3 = 1 \rightarrow l = n^{-1/3}$
- よって、先ほどの熱運動エネルギーの条件は

$$T \gg e^2 / (4\pi\epsilon_0 l) \rightarrow \frac{T}{e^2 / (4\pi\epsilon_0 l)} \gg 1 \rightarrow \frac{(4\pi\epsilon_0)T}{e^2 n} n^{2/3} \gg 1$$

- 今、 $\lambda_D = \left[\epsilon_0 T / (e^2 n) \right]^{1/2}$ と置くと、 λ_D は長さの単位で、
- 数係数を除いて、上の条件は、 $\lambda_D^3 n \gg 1$ となる。
- この λ_D を **デバイ長** という。
- つまり、**一辺がデバイ長の立方体内には多くの荷電粒子が存在することになる。**
- ➡ **プラズマの条件**

デバイ遮蔽

- この荷電粒子は、その周辺に電位をつくる。
- 例えば、一個の正イオンがその中心から r の距離に作る電位は $\Phi = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 r}$
- イオンの周辺にある電子は、運動しているにかかわらずこの電位のために平均的にはイオンの周辺に集まりやすくなる。逆に、イオンは遠ざかろうとする。
- すなわち、正イオンの作る電位は小さくなる。実際のプラズマ中での電位は

$$\phi = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 r} \exp\left[-\frac{r}{\lambda_D}\right]$$

- この現象を**デバイ遮蔽**と呼ぶ→デバイ長は、電荷が周囲に作る電位を他の荷電粒子が遮蔽する特徴的な距離となる。

レポート・演習

- プラズマに関して、現在知っていることを書きなさい。
- A4で1ページ以上
- また、本講義で取り上げてほしいプラズマ関連の話題が、もしあれば、書いてください。

シース

- 遮蔽効果は、プラズマ中に挿入した電極（あるいは、固体）の電位にも現れる。その結果、電極（固体）周辺に薄い電荷層が形成される。これをシースという。
- プラズマが接する固体表面にもシースが形成される。
- シースの厚さはデバイ長の数十から数百倍である。
 - シース（鞘）という言葉は、プラズマ中に探針（針状の電極）を入れた時に、その周辺が暗くなったことから名づけられた。
 - シース内ではプラズマ条件を満たさない。
つまり、準中性ではなく、一般的には、電子が先に逃げるからイオンの密度の方が多くなる。
 - 電荷層は、性質の異なるプラズマ間でも形成される。
この場合、二つのプラズマ間で電位差が発生し、電荷層は正と負の電荷層が隣り合う電荷二重層となる。

プラズマ振動

- 荷電粒子の運動によって、一般的にプラズマ中では空間的に常に中性状態とはならない。
- 今、イオンが静止しており、電子が一方向に一様に移動している状態を考える。すると、移動方向のプラズマ端には電子が多くなり、逆側はイオンが多くなる。この両端の電位が作る電場は電子に移動方向と逆方向の力を与え、電子は引き戻される。
- しかし、慣性のため、電子は戻りすぎて、逆方向に移動する。すると、最初と全く逆の状態となり、電子はまたもとの方向に移動することになる。このように、電子が振動する現象を**プラズマ振動**という。

続き

- プラズマ中にできる電場Eは電子に復元力を与える。
- 復元力の大きさは、 eE であり、
- 電場Eは $\nabla \cdot D = \rho$, $D = \epsilon_0 E$
- より、

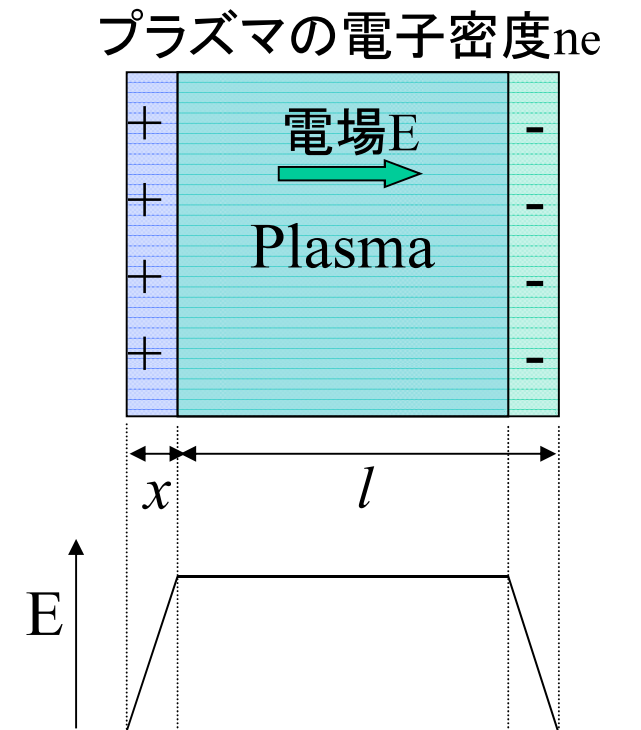
$$E = \frac{\rho}{\epsilon_0} = \frac{en_e}{\epsilon_0} x$$

- よって、電子の運動方程式は、

$$m_e \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0} x$$

- これは、単振子の式であるから、その振動数は、

$$\omega_{pe} = \left(\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e} \right)^{1/2}$$



続き

- 一般に、温度は有限であるので、プラズマ振動は粗密波(密度が変動する波)として伝わることになる。
- 電子の場合と同じく、イオンも振動する波を持つ。電子と同様に、

$$\omega_{pi} = \left(\frac{e^2 n_i}{\epsilon_0 m_i} \right)^{1/2}$$

- これは、イオンプラズマ振動というが、めったに現れない。
- 電磁波がプラズマ中に入る場合、電子の運動によって阻止される。この周波数の上限がプラズマ振動数で、これより振動数が小さい波はプラズマ中で減衰する。

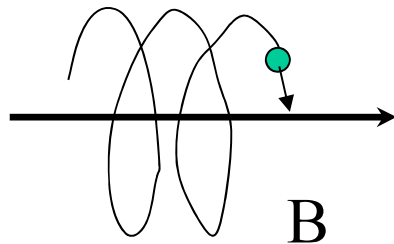
磁界中の荷電粒子の運動

- 磁界は、荷電粒子の運動に影響を与える。
- よく知られているのは、ローレンツ力である。
→ $F = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$
- 荷電粒子の電荷 q 、速度 $\mathbf{v}$ 、磁場 $\mathbf{B}$ として、速度 $\mathbf{v}$ と磁場 $\mathbf{B}$ の外積で与えられる。
- その特徴は、荷電粒子の速度方向と磁場の方向と垂直であること。
- → 常に向心力で、磁場は仕事をしない。
- 荷電粒子は、磁場 $\mathbf{B}$ に対して一般に角度を持って運動しているので、磁場方向には力がかからず、磁場と垂直方向に力がかかる。

サイクロロン運動

- 荷電粒子は、磁場に垂直方向には円運動をする。その半径と周期を調べる。
- 磁場の垂直方向の速度 $v_{\perp}$ とすると, $m \frac{d^2 x}{dt^2} = q \mathbf{v}_{\perp} \times \mathbf{B}$
- これは回転運動の式だから,
- 半径は $R = \frac{mv_{\perp}}{qB}$ 周波数は $\omega_c = \frac{qB}{m}$

螺旋運動



回転の中心点を旋回中心という。

ドリフト

- 荷電粒子の旋回中心の運動を考える。
- 多くの粒子は磁力線に巻きつきながら螺旋運動をしている。
- 一般的な電磁力は、電場と磁場による力の和であるから、

$$F = q(\mathbf{E} + \mathbf{v}_{\perp} \times \mathbf{B})$$

- もし、荷電粒子の旋回中心の移動速度に比べて、旋回自体が早い場合、すなわち、旋回中心は旋回時間に対して平均をとると加速度運動をしない場合、下記のように近似できる。

$$0 = \mathbf{E} \times \mathbf{B} + \mathbf{v}_{\perp} \times \mathbf{B} \times \mathbf{B}$$

- これを解いて、 $\mathbf{v}_{\perp} = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}$ これをドリフト運動という。