

常温固体物質のプラズマ化

大原 渡, 畠山 力三

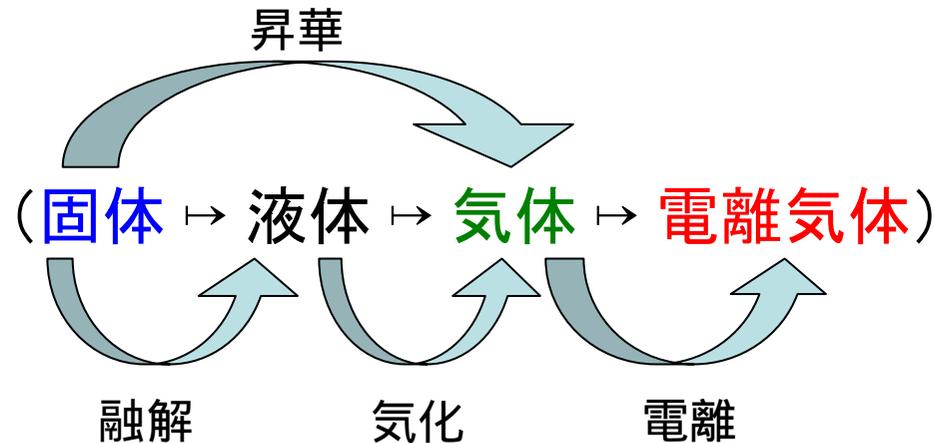
東北大学 大学院工学研究科 電子工学専攻

2003年12月18日 於 核融合科学研究所

- 熱接触電離によるアルカリ, アルカリ塩プラズマ生成

Introduction

プラズマ(電離気体) → 常温気体をプラズマ化することが一般的
静電場, 電磁場, レーザー等で電子を
加速させて, 衝突電離によりイオンを生成



地球上では常温固体物質が多数存在する.

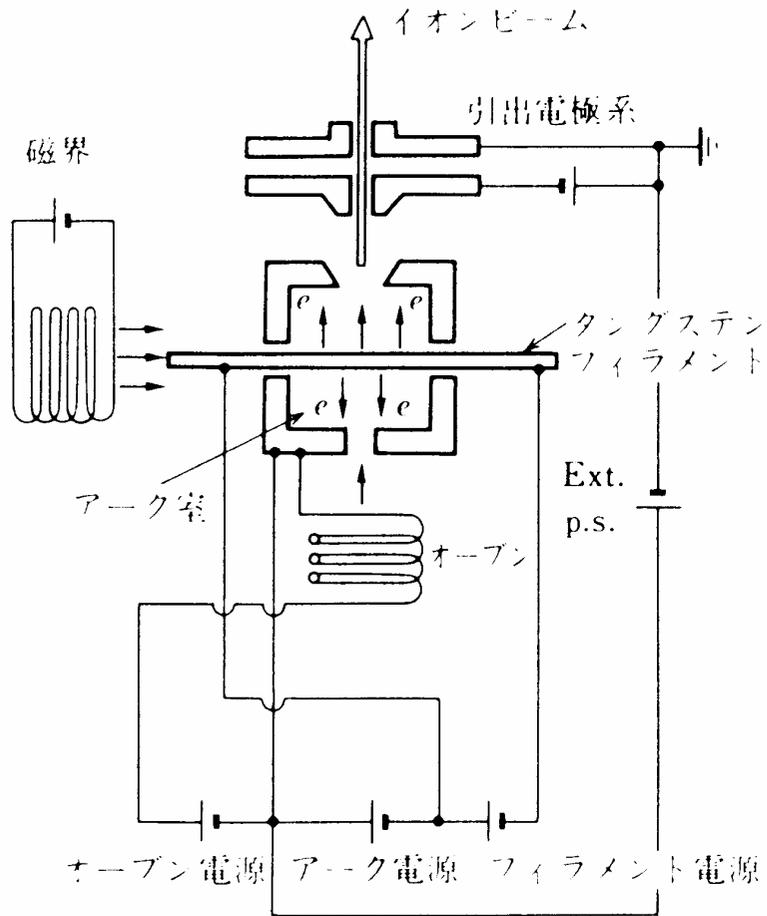
常温固体物質のプラズマ化ができれば, 材料開発等の多彩な応用に活用できる.

Ion Source

固体イオン化技術：

固体を高温化またはスパッタなどにより気化する

↳ 直流・高周波放電によりイオンを生成する



フリーマン形イオン源

イオン種	固体素材
$^{23}\text{Na}^+$	NaCl
$^{24}\text{Mg}^+$	Mg
$^{27}\text{Al}^+$	Al
$^{31}\text{P}^+$	PH_3
$^{64}\text{Zn}^+$	Zn
$^{69}\text{Ga}^+$	Ga
$^{80}\text{Se}^+$	Se
$^{127}\text{I}^+$	KI
$^{132}\text{Te}^+$	Te

イオンビームの特徴

- 物質素材の純化
- エネルギー制御
- スパッタリング, エッチング
- 基板内へ注入

Contact Ionization

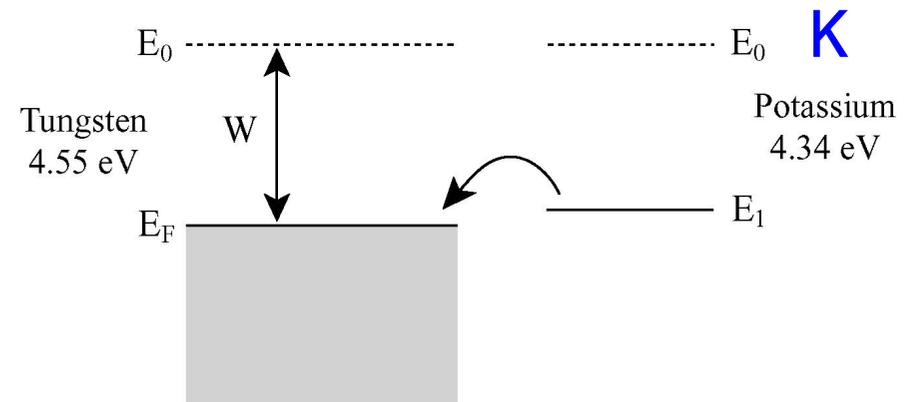
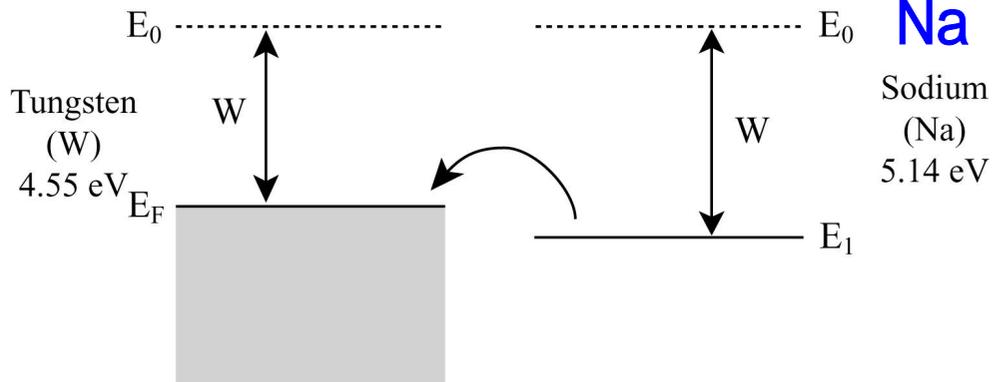
1 (1A)	2 (2A)	3 (3A)	4 (4A)	5 (5A)	6 (6A)	7 (7A)	8 (8)
1 H 1.00794							
3 Li 6.941	4 Be 9.012182						
11 Na 22.989768	12 Mg 24.3050						
19 K 39.0983	20 Ca 40.078	21 Sc 44.955910	22 Ti 47.88	23 V 50.9415	24 Cr 51.9961	25 Mn 54.93805	26 Fe 55.847
37 Rb 85.4678	38 Sr 87.62	39 Y 88.90585	40 Zr 91.224	41 Nb 92.90638	42 Mo 95.94	43 Tc [98]	44 Ru 101.07
55 Cs 132.90543	56 Ba 137.327	57-71 * *	72 Hf 178.49	73 Ta 180.9479	74 W 183.85	75 Re 186.207	76 Os 190.2
87 Fr 223	88 Ra 226	89-103 * *	104 Unp	105 Unq	106 Unh	107 Uns	

Contact-Ionization Probability

	タンタル Ta 4.25 eV	タングステン W 4.55 eV	レニウム Re 4.96 eV	イリジウム Ir 5.27 eV
セシウム Cs 3.89 eV	0.75	0.93	0.99	1.00
カリウム K 4.34 eV	0.24	0.59	0.92	0.98
ナトリウム Na 5.14 eV	5.3×10^{-3}	2.4×10^{-2}	0.17	0.49
リチウム Li 5.36 eV	1.7×10^{-3}	8.0×10^{-3}	6.1×10^{-2}	0.24

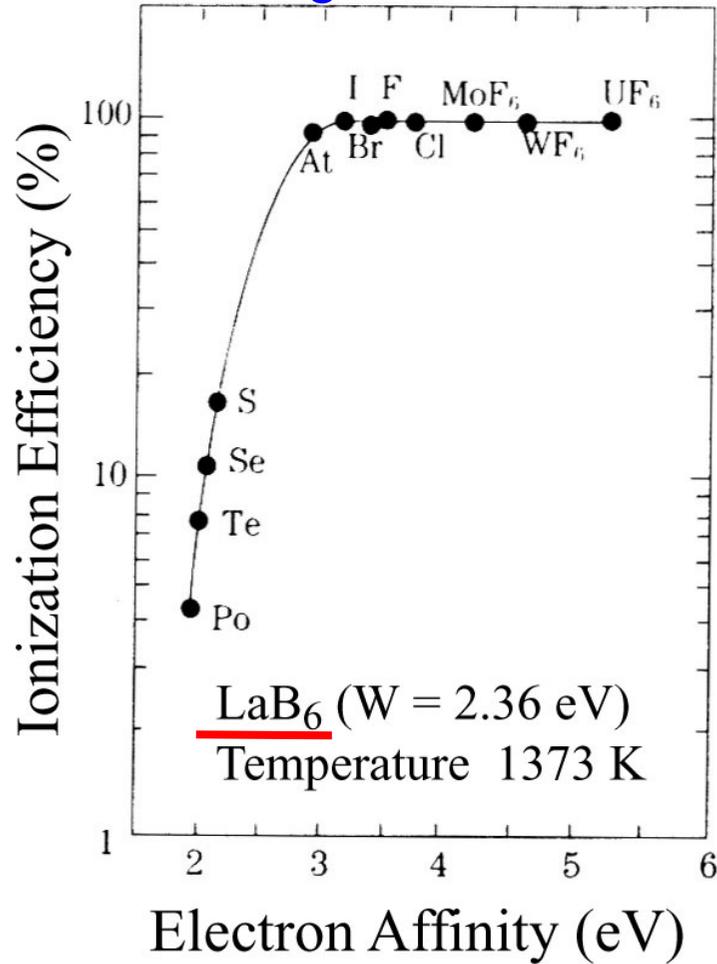
Langmuir-Saha equation

$$\frac{n_+}{n_0 + n_+} \propto \left[1 + 2 \exp \left\{ \frac{e(E - W)}{\kappa T} \right\} \right]^{-1}$$

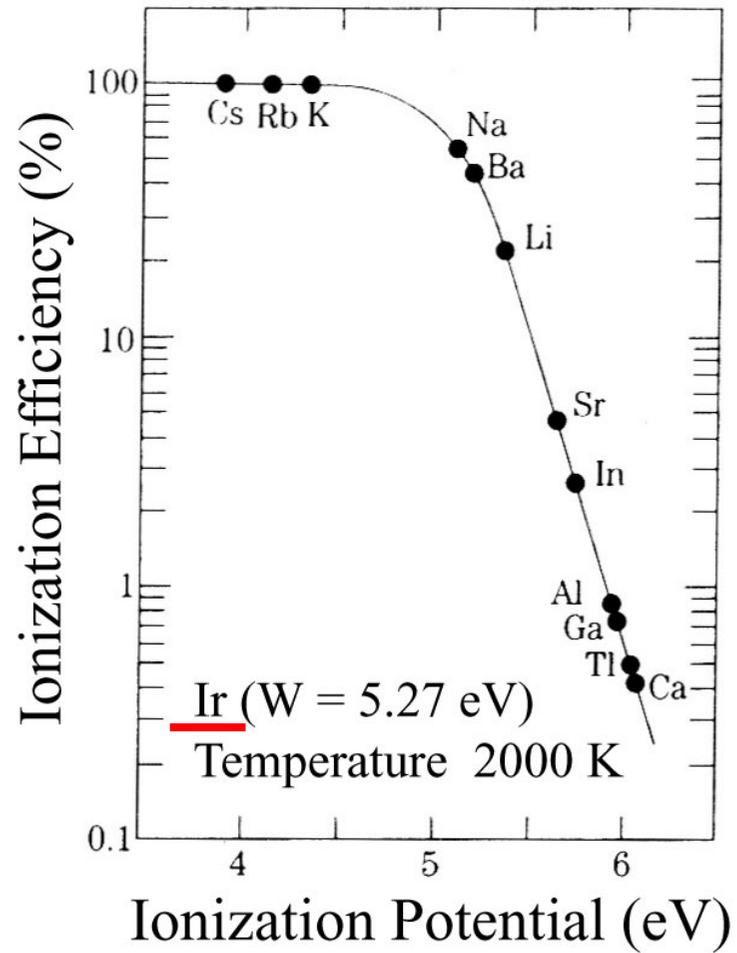


Contact Ionization

Negative Ions

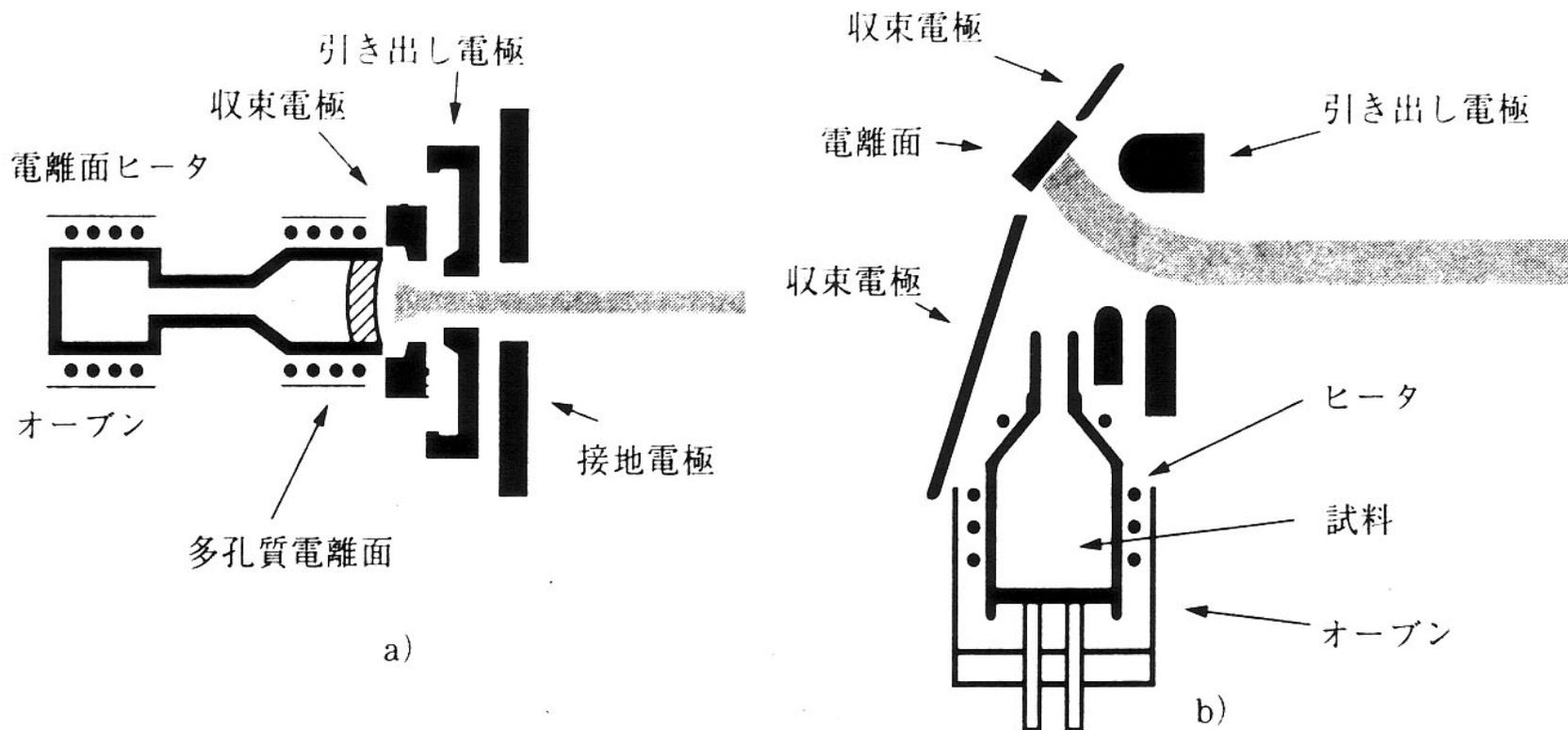


Positive Ions



Ion Sources

Surface-Ionization Type of Ion Sources



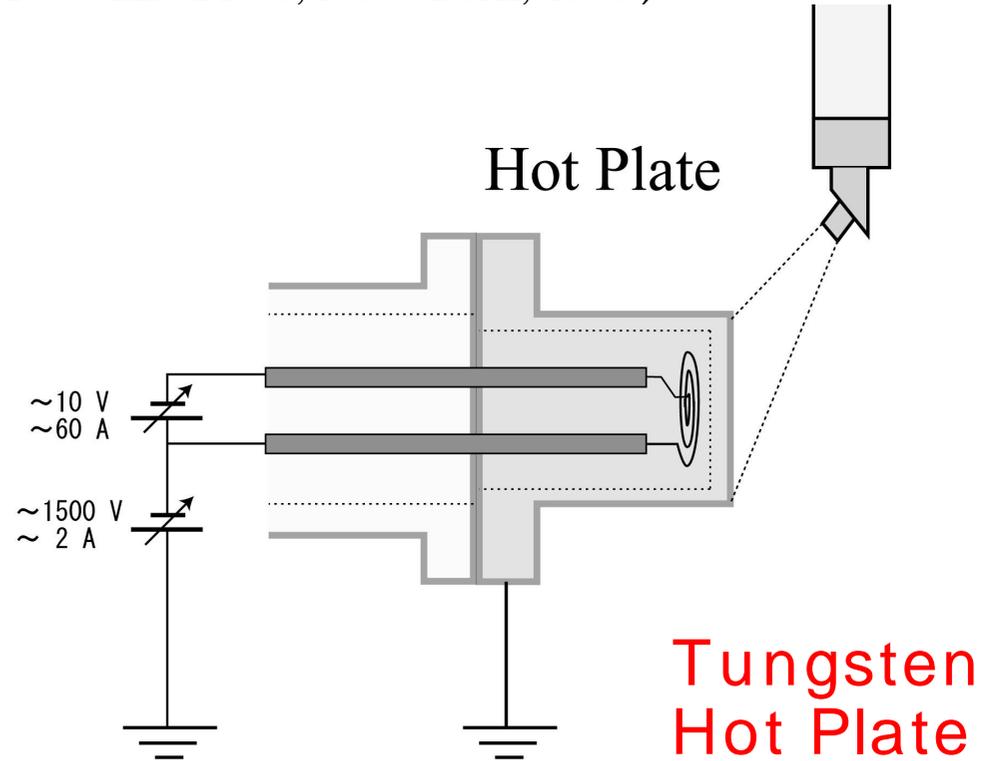
表面電離型イオン源構成図 a) は背面供給型, b) は表面供給型

Q-machine Plasma

R. W. Motley : “*Q machines*” (Academic Press, New York, 1975)

Q-machine Plasma (Quiescent)

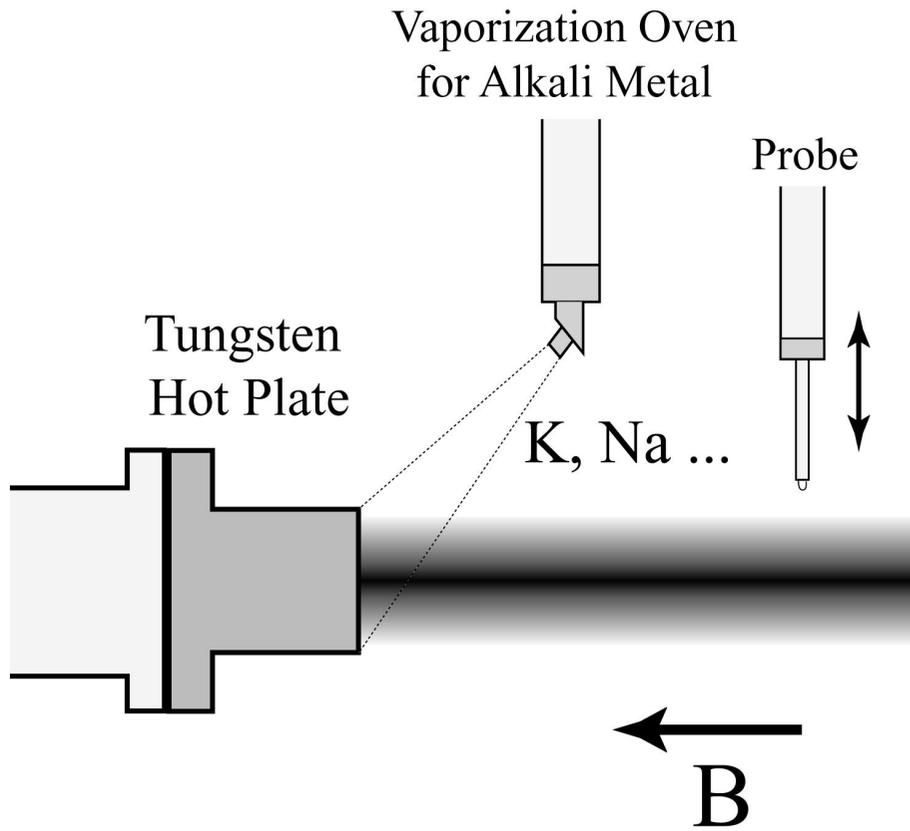
- 1960年代初頭に開発された
- 定常プラズマ
- プラズマ生成は静か
- イオン種はアルカリ(土類)金属
- ほぼ完全電離(99%)プラズマ
- $T_e \doteq T_+ \quad 0.2 \text{ eV}, n=10^8 - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$



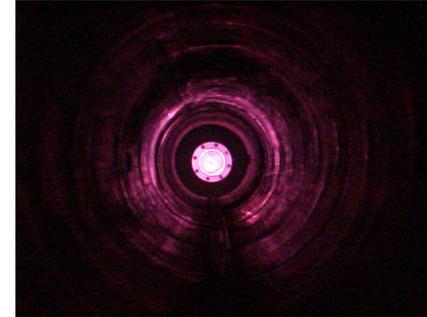
プラズマ・核融合学会誌
小特集 プラズマ物理実験温故知新
「Qマシーンのプラズマ」
畠山力三



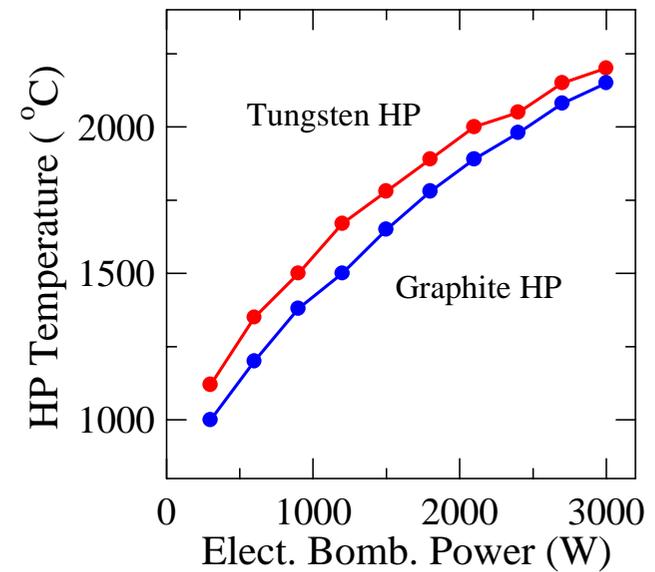
Hot Plate



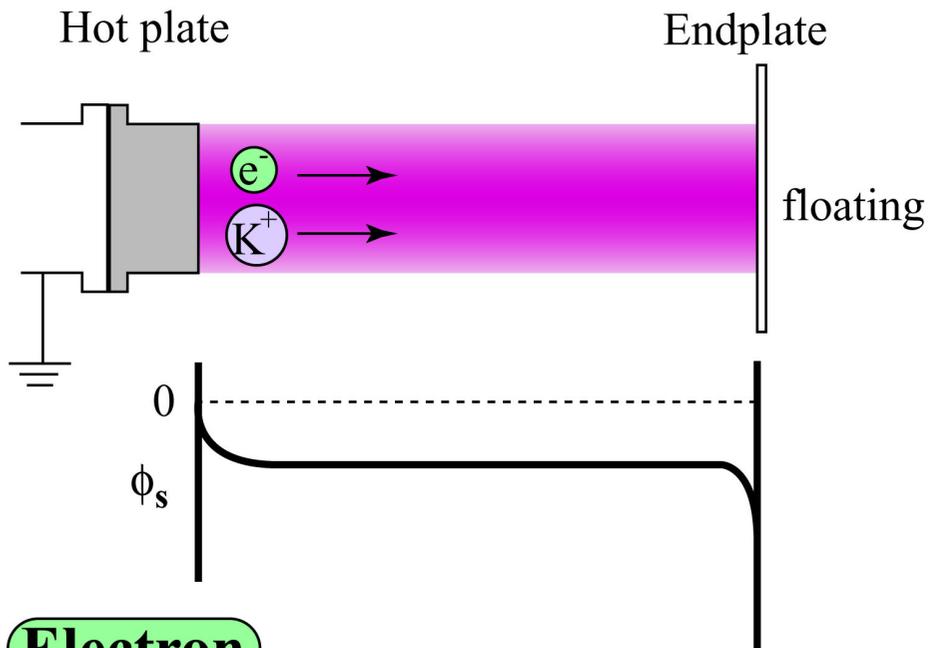
HP Power
600W



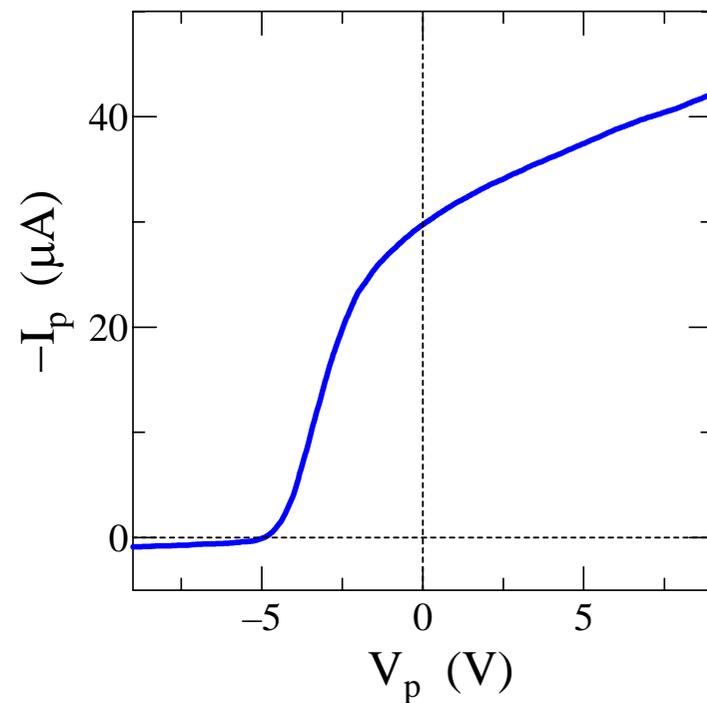
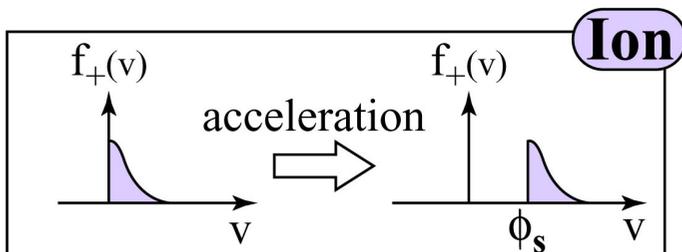
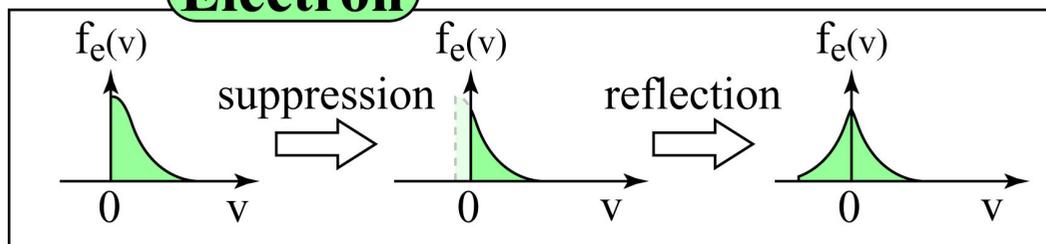
HP Power
3000W



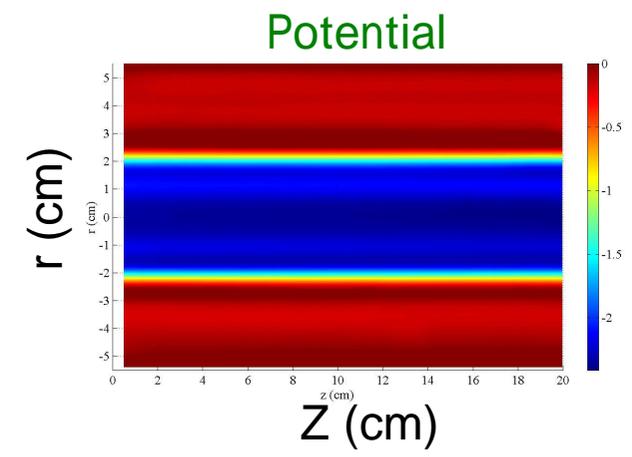
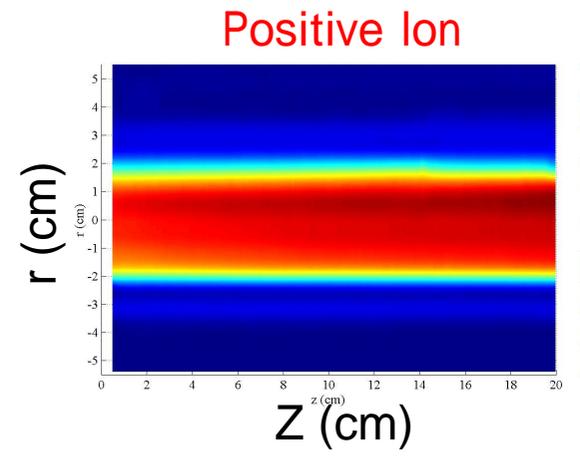
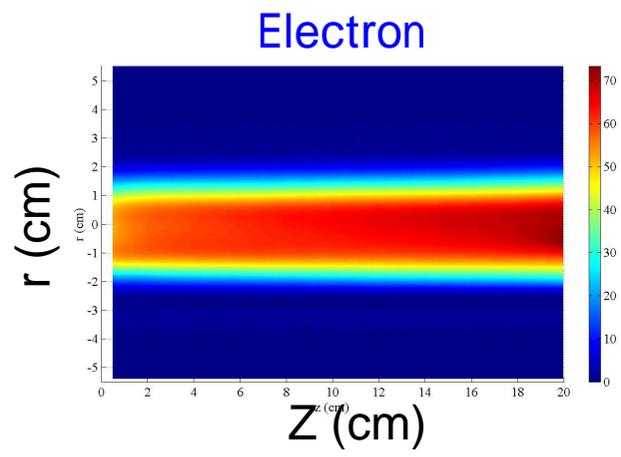
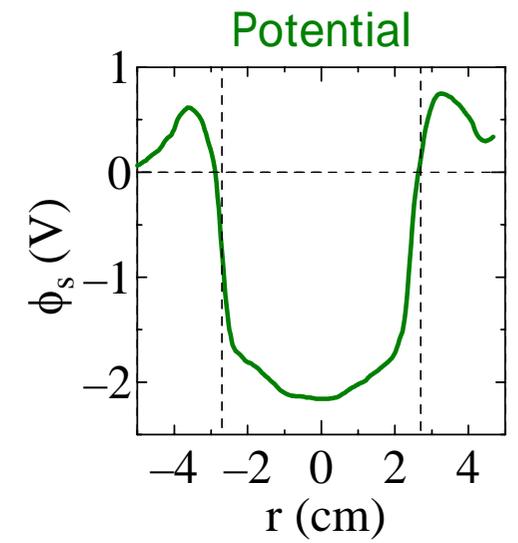
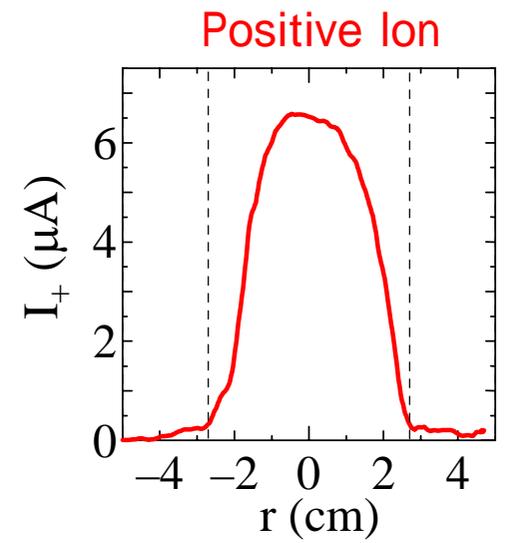
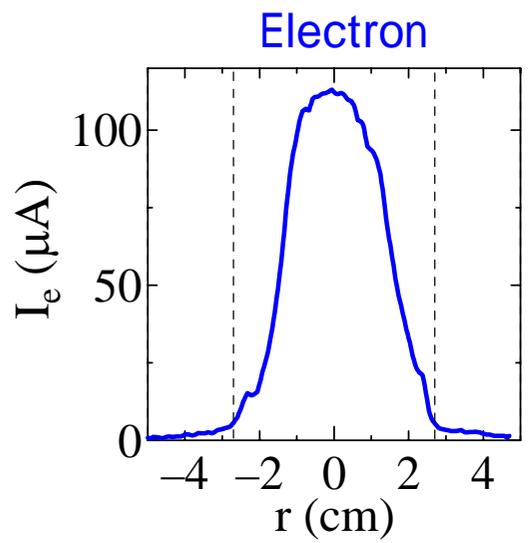
Basic Properties of Q-machine Plasma



Electron

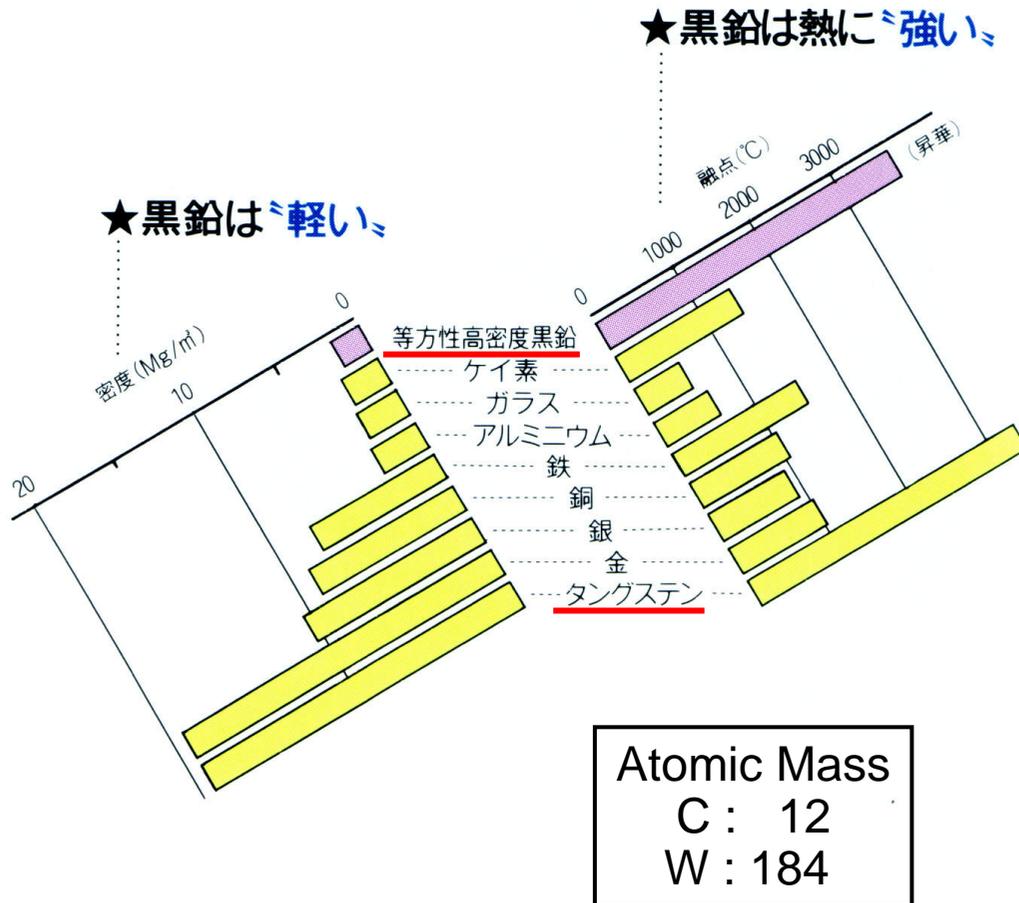


Basic Properties of Q-machine Plasma

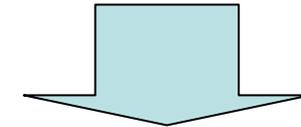


Hot Plates

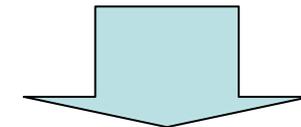
高価なタングステンを使用しないで
熱接触電離プラズマを生成することはできないか？



同時に熱電子放出・接触電離がおこるためには、適切な仕事関数 (4~5 eV) をもつ素材でなくてはならない。



グラファイトの仕事関数を知る必要がある。



炭素素材物質の仕事関数は構造によって大きく異なるため、予測できない。

Hot Plates

Graphite Tungsten

Production Cost
¥30,000

等方性高密度グラファイト
(東洋炭素株式会社)



Production Cost
¥800,000

Side view

Atomic Mass
C : 12
W : 184

Diameter : $\phi 52$



Top view

Weight
115 g

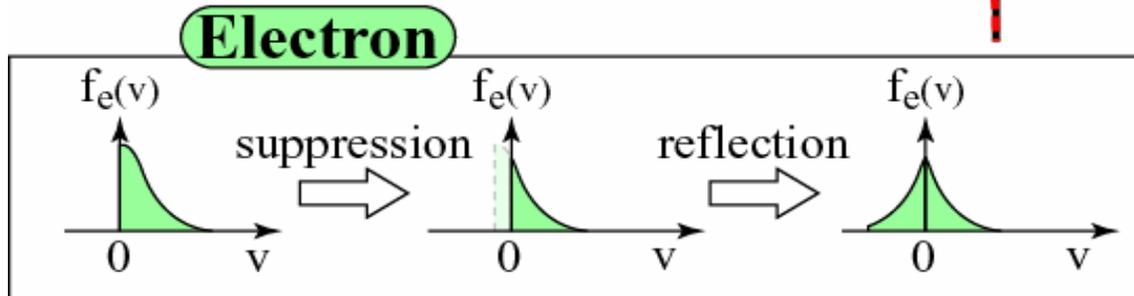
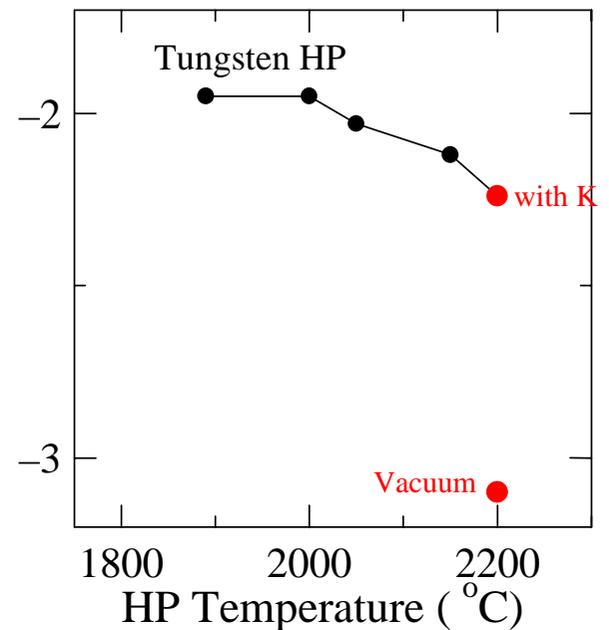
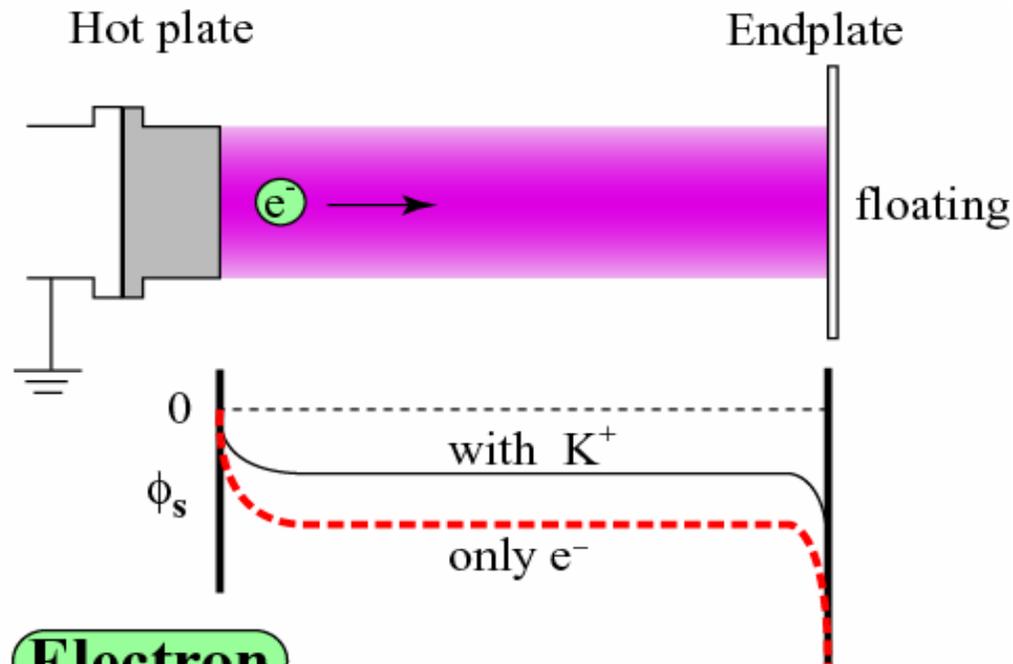
Weight
1,200 g



Bottom view

Work Function of Graphite Hot - Plate

真空中で熱電子のみ放出して，HP温度とEP浮遊電位を計測すれば，HPの仕事関数が導出できる．
 （表面状態は均一と仮定する）



エンドプレートは浮遊電位といっても無限に大きな抵抗を持つ訳ではない。

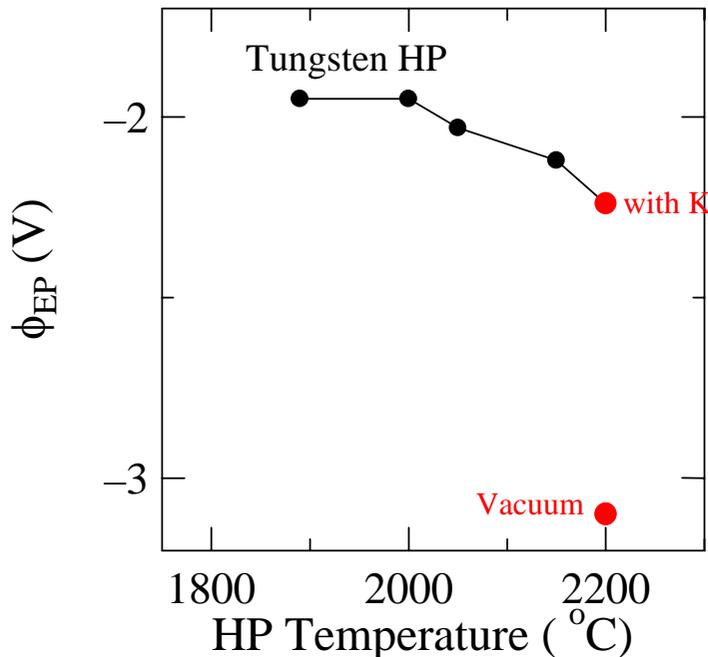
Net Resistance of Endplate

W-HP : $T = 2300$ K

タングステン

$$A = 4\pi m_e k_B^2 / h^3 = 120 \text{ (A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}\text{)}$$

Tungsten : ($W = 4.5$ eV, $A = 74$ A cm⁻²K⁻²) ← 一般的な値



2500Kの場合のW-HPより放出される電子面密度

$$\text{Current Density : } j_e = AT^2 \exp(-W/T) = 5.5 * 10^{-2} \text{ (A cm}^{-2}\text{)}$$

$$\text{Electron Current : } I_e = j_e * \pi r^2 = 1.2 \text{ (A)} \quad \text{Richardson-Dushman equation}$$

エンドプレートに流れ込む電流量

$$\text{Electron Flux to EP : } \Gamma_e = I_e \exp(-e\phi_c/T_e) = 1.1 * 10^{-7} \text{ (A)}$$

エンドプレートの正味の浮遊抵抗

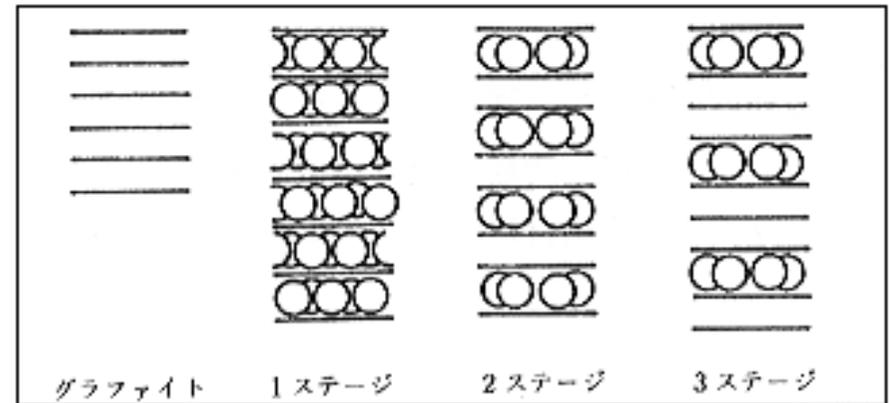
$$\text{Net Resistance of EP : } R = \phi_c / \Gamma_e = 28.1 \text{ (M}\Omega\text{)}$$

$$\text{(計測値 : } \phi_c = 3.2 \text{ V)}$$

Intercalation Graphite

Start Temperature of Chemical Reaction to Graphite

反応物質	反応開始温度	反応生成物
Al	800°C	Al ₄ C ₃
B	1600	B ₄ C
Fe	600~800	Fe ₃ C
Na	400~450	C ₆₄ Na 層間化合物(O ₂ 存在下)
Co	218	CoC, Co ₃ C
Mo	700	Mo ₂ C
Ni	1310	Ni 中への浸炭
Si	1150	SiC
Cu	反応しない	
Mg	〃	
Pb	〃	
Sn	〃	
W	1400	W ₂ C, WC (水素中)
K	300	C ₈ K 他の層間化合物
Li	500	Li ₂ C ₂
Be	900	Be ₂ C (真空あるいはHe中)
B ₂ O ₃	1200	CO+還元金属
V ₂ O ₅	438	〃
Fe ₂ O ₃	485	〃
TiO ₂	930	〃
SiO ₂	1250	SiC
Al ₂ O ₃	1280	Al ₄ C ₃
BeO	960	Be ₂ C
MgO	1350	〃
ZrO ₂	1300	ZrC

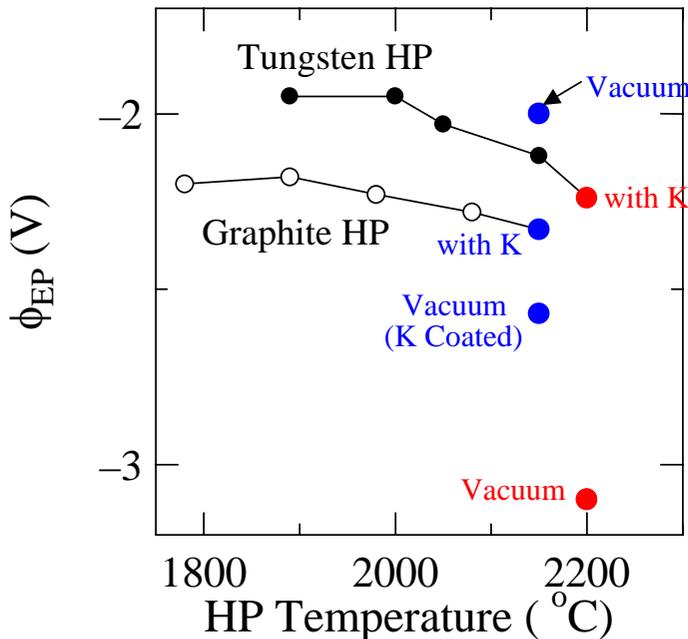


Work function of graphite surface becomes lower.

(文献より引用)

Work Function of Graphite Hot - Plate

C-HP : $T = 2200$ K



グラファイト

仕事関数は逆過程で計算可能

エンドプレートに流れ込む電流量

Electron Flux to EP : $\Gamma_e = \phi_c/R = 9.3 \cdot 10^{-8}$ (A)
 (計測値 : $\phi_c = 2.6$ V)

2150Kの場合のC-HPより放出される電子面密度

Electron Current : $I_e = \Gamma_e / \exp(-e\phi_c/T_e) = 8.3 \cdot 10^{-2}$ (A)
 Current Density : $j_e = I_e / \pi r^2 = 3.9 \cdot 10^{-3}$ (A cm⁻²)

$$[j_e = AT^2 \exp(-W/T)]$$

ϕ_{EP} がより負

- ⇒ 熱電子放出が多い (only e⁻)
- ⇒ Γ_e/Γ_+ 大きい (with K⁺)

$$A = 4\pi m_e e k_B^2 / h^3 = 120 \text{ (A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}\text{)}$$

グラファイトの仕事関数

Richardson Const. : $A = 0.19 \text{ (A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}\text{)}$ 仮定

If A of graphite HP is equal to A of intercalation graphite,

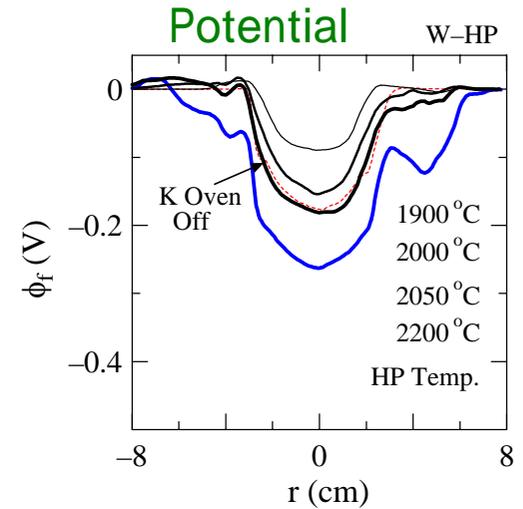
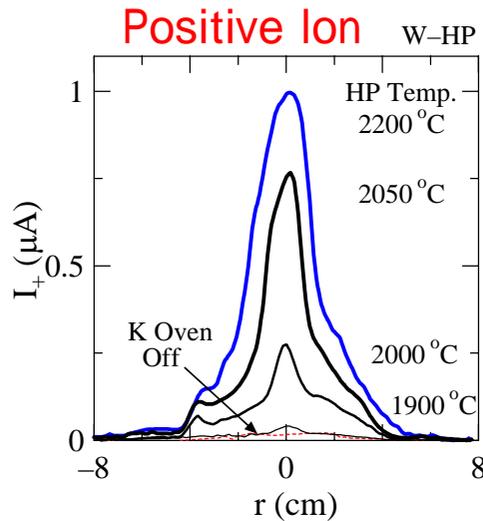
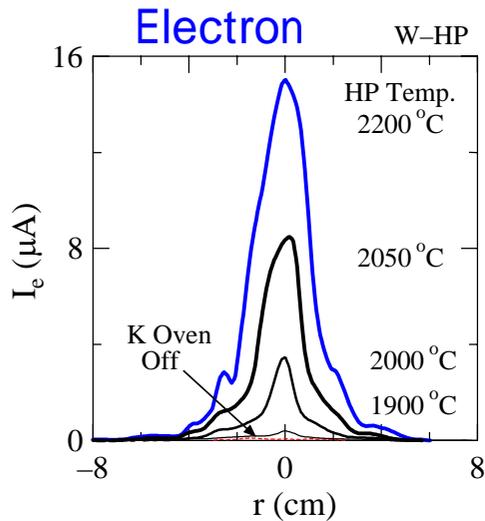
Work Function of intercalation C-HP $W = 3.7 \text{ eV}$.

Tungsten : ($W = 4.5 \text{ eV}$, $A = 74 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$)

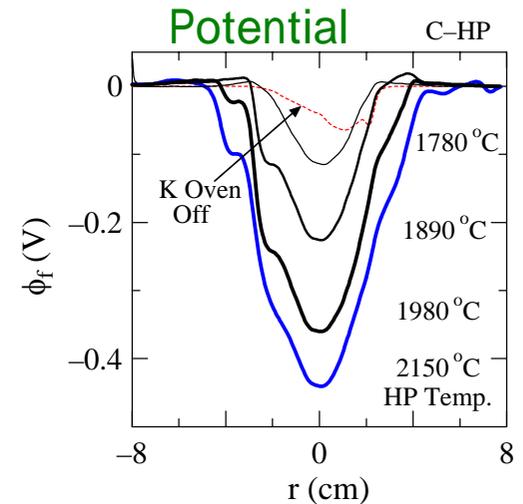
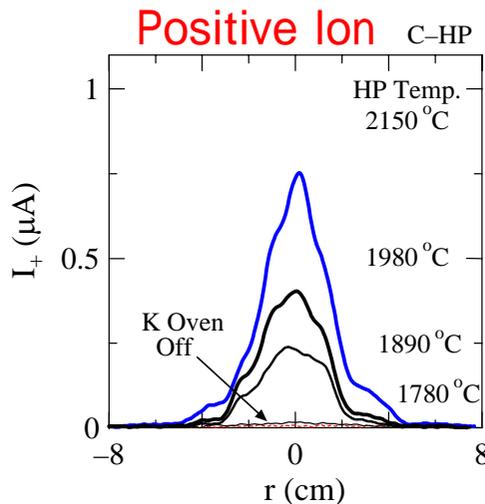
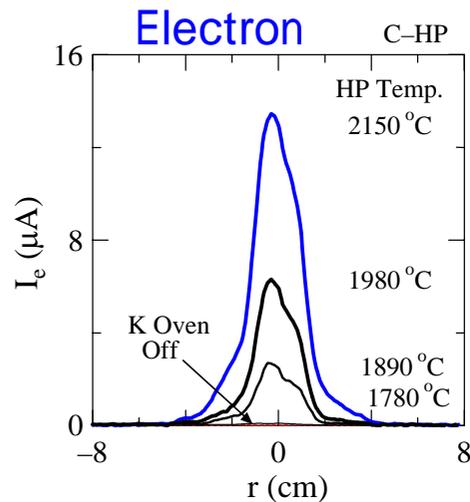
Graphite : ($W = 4.3 \text{ eV}$, $A = 0.19 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$)

Radial Profiles

Tungsten Hot-Plate



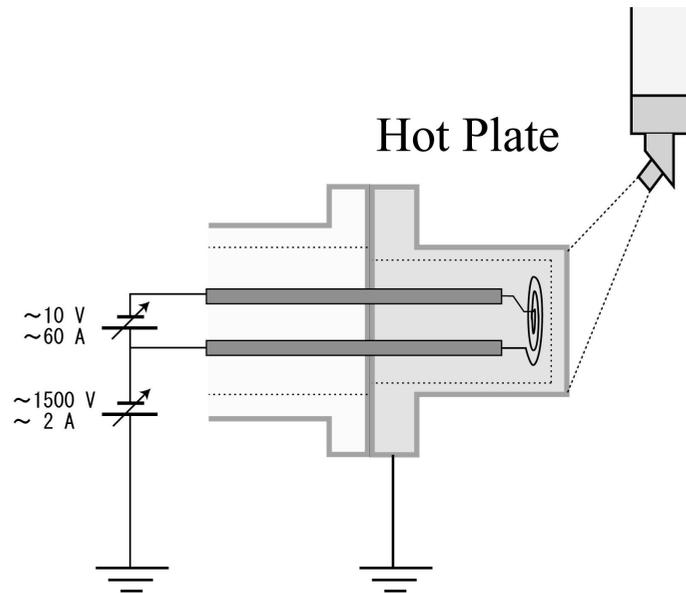
Graphite Hot-Plate



同じHP温度で，8割位の密度のプラズマ生成が可能．

Problems of Graphite Hot - Plate

Now, it is difficult to keep Graphite Hot - Plate on heating for long time (several tens of hours).

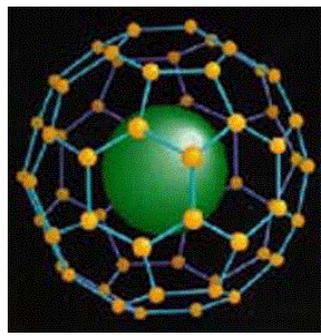


Tungsten-wire heater is easily change the shape because the tungsten wire absorbs carbon powder suspended behind the Hot Plate and embrittlement starts from about 800 .

Used Graphite Hot - Plate

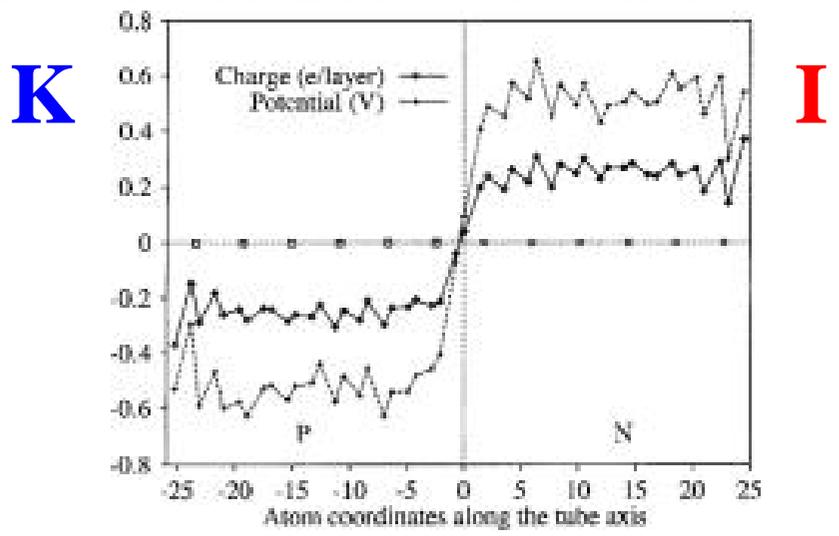
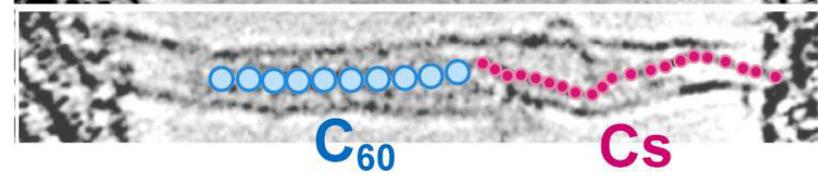
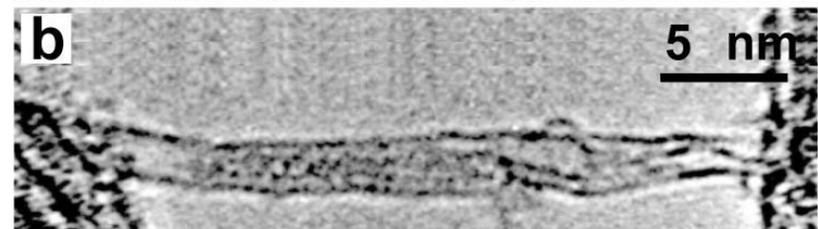
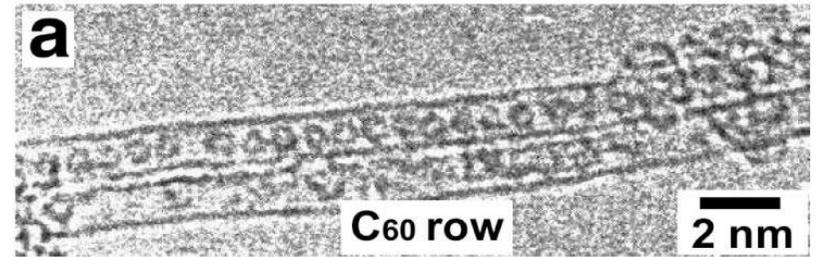
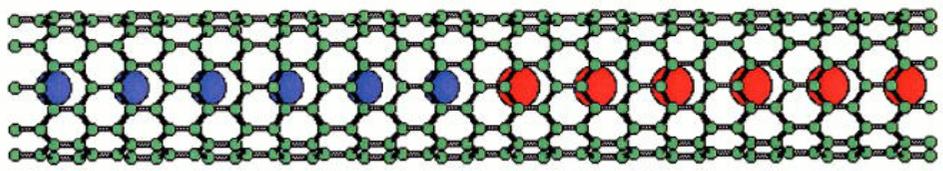
Application for Nanoscale Material

アルカリ金属プラズマ：
Cs, K, Na, Li ...

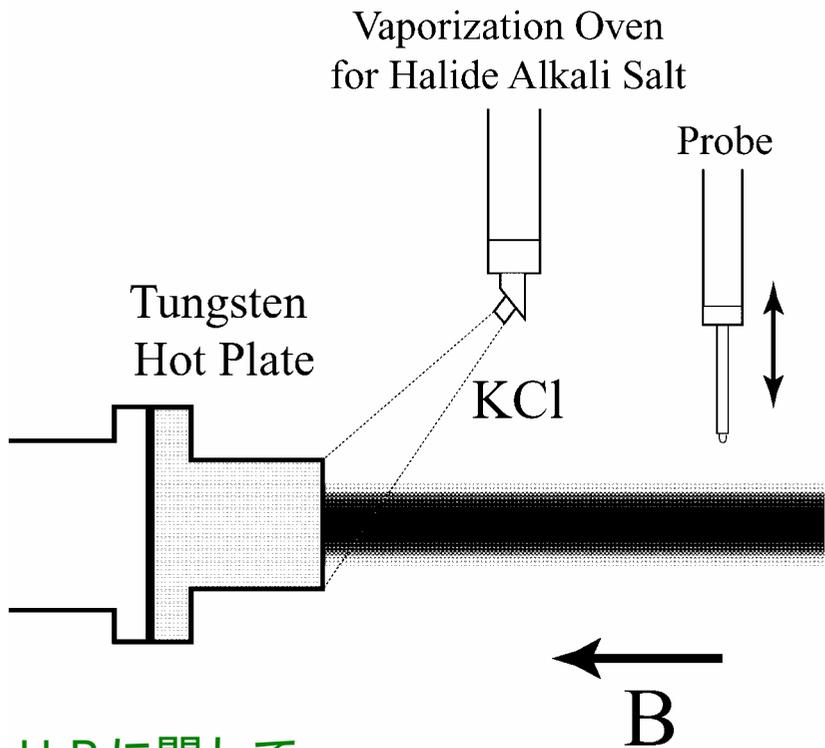


アルカリ金属内包フラーレン
K@C₆₀, Na@C₆₀ ...

アルカリーハロゲンプラズマ：
CsCl, KCl, NaCl, CsI, KI, NaI ...



Alkali - Halogen Plasma Generation

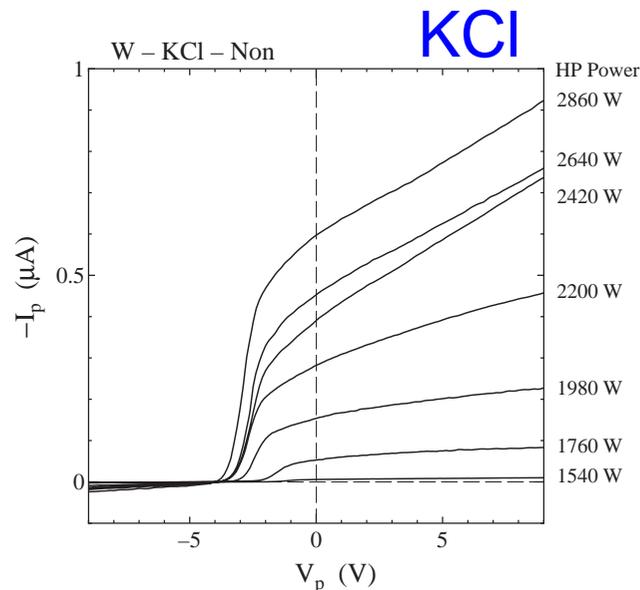
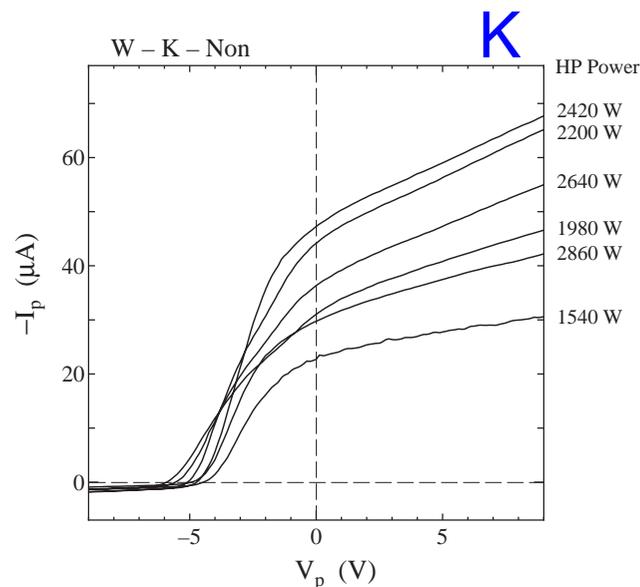


HP に関して

- タングステンはClにより腐食される
- グラファイトはClと反応しない

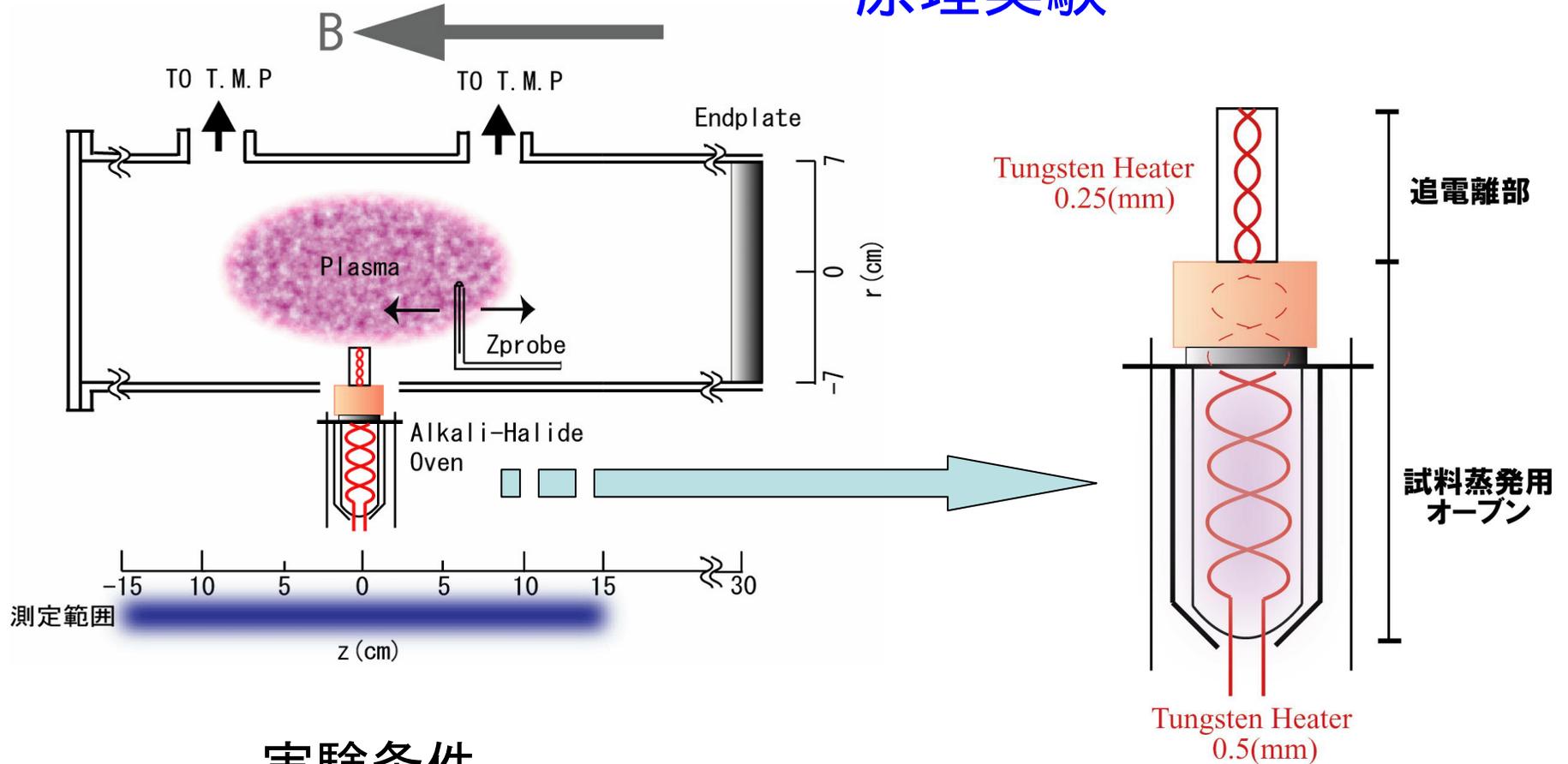
オーブンに関して

KCl : 融点 776°C, 沸点 1500°C
 NaCl: 融点 800°C, 沸点 1413°C
 CsCl: 融点 646°C, 沸点 1290°C



Compact and Effective Alkali-Halogen Plasma Source

原理実験



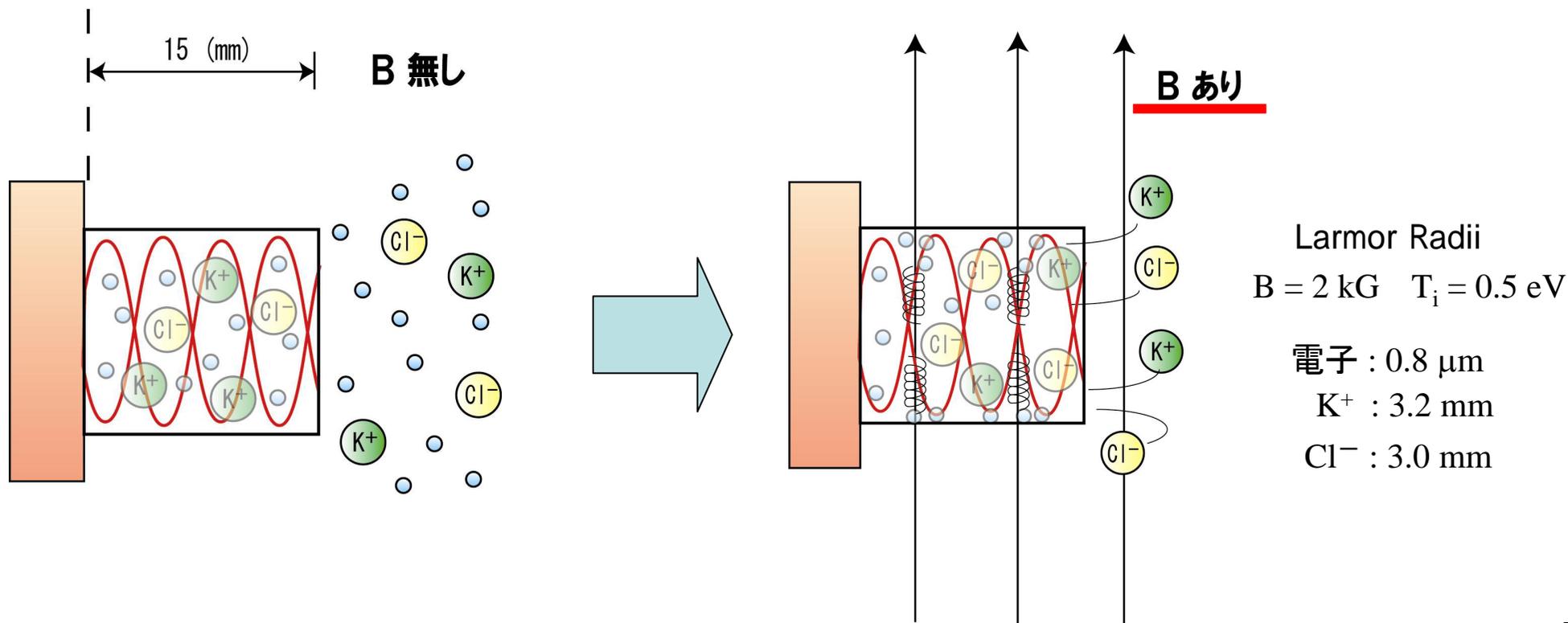
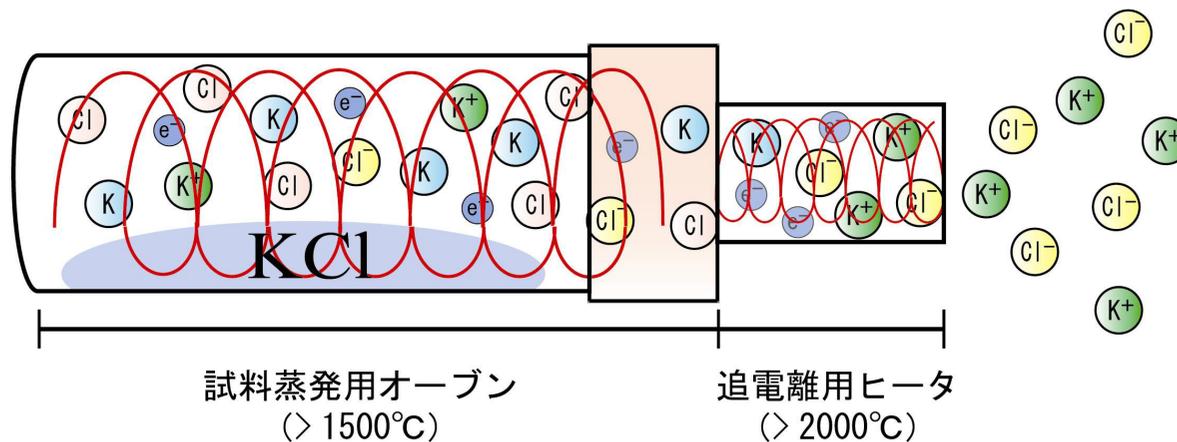
実験条件

背景真空度 p 2×10^{-5} Torr
印加磁場 B $0 \sim 3.5$ kG
イオン試料 KCl, KI, K

オープンヒーター温度 $T_{o,1} > 1500$ °C
(60 W 時・パイロメータで測定)

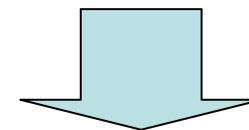
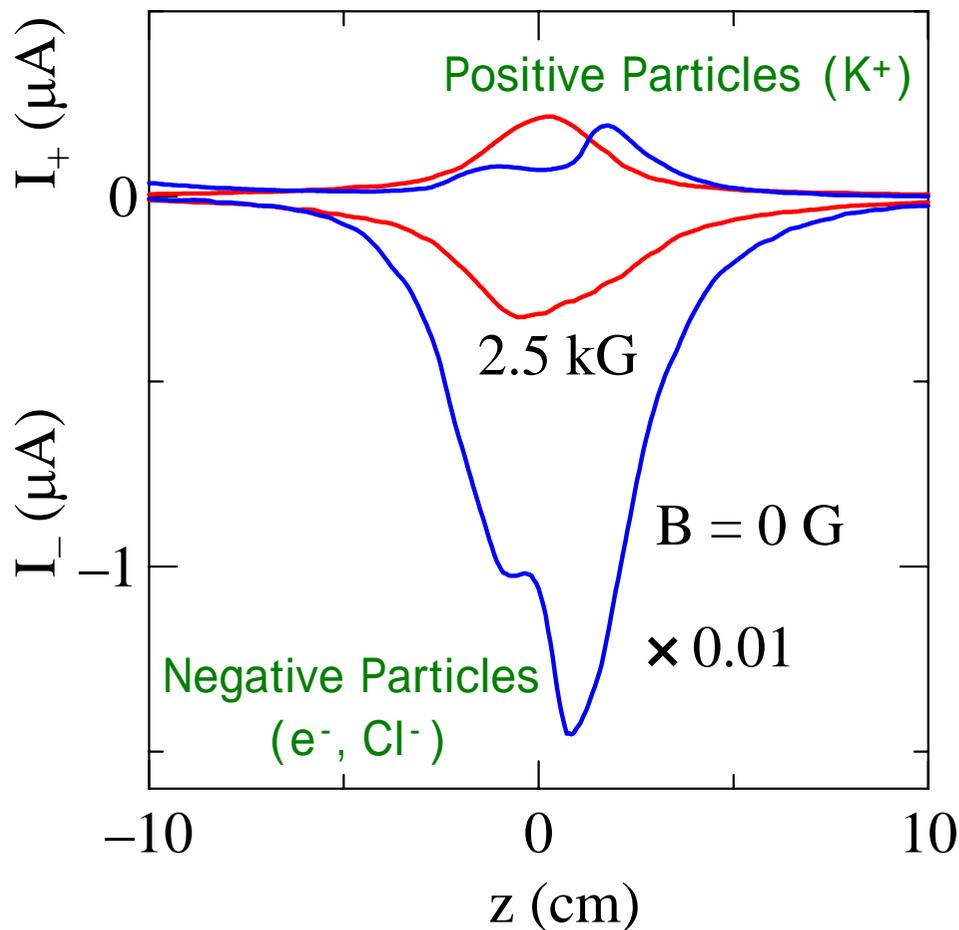
Effective Generation of Alkali-Halogen Plasma

KCl の場合



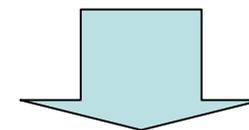
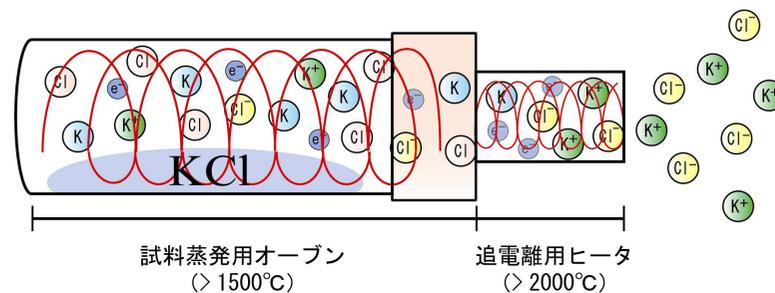
Profiles of Alkali-Halogen Plasma along B field

アルカリ-ハロゲン プラズマ生成は可能



- オープンのサイズの拡大
- アルカリ塩の気化方法

タングステンヒータがハロゲンで腐食
1500°C程度まで加熱する方法



グラファイト円筒を誘導加熱(IH)

Conclusion

常温固体物質（アルカリ金属）を熱接触電離機構を利用することにより，生成時に雑音の少ない低温プラズマを生成することができる．

接触電離・熱電子放出には高価なタングステンが用いられるが，安価なグラファイトを使用しても，おおむね同様の特性のプラズマが得られる．

アルカリ塩をイオン源として，熱接触電離機構を利用すると，アルカリ - ハロゲンプラズマを生成することができる．

- アルカリ塩を気化・解離するには，高温が必要．