

# 水素放電による負イオン生成に関する数値計算 ( II )

## — H<sup>-</sup>生成のプラズマパラメータ依存性 —

福 政 修, 佐 伯 節 夫

( 山口大学工学部電気工学教室 )

( 1986年8月25日受理 )

### Numerical Simulation on Volume Production of Negative Ions in Hydrogen Plasmas ( II )

— Dependence of H<sup>-</sup> Production on Plasma Parameters —

Osamu Fukumasa and Setsuo Saeki

( Received August 25, 1986 )

#### Abstract

Dependence of H<sup>-</sup> production on plasma parameters (i. e. electron density  $n_e$ , electron temperature  $T_e$  and hydrogen gas pressure  $p$ ) is studied by using a set of particle balance equations in a steady state hydrogen plasma. The model includes six species of vibrationally excited hydrogen molecules  $H_2^*$  (vibrational level  $v'' = 5-10$ ) which are important for H<sup>-</sup> production. Particular attention has also been paid to wall effects on H<sup>-</sup> production. So, both the wall recombination coefficient  $\gamma_1$  for H and the wall de-excitation collision parameter  $\gamma_2$  for  $H_2^*(v'')$  are treated as numerical parameters.

With increasing  $T_e$ , H<sup>-</sup> yield decreases. Both  $n_e$  and  $p$  have some optimum values for H<sup>-</sup> production. The most significant point is that ion species ratios depend strongly not only on plasma parameters but also on wall parameters, i. e.  $\gamma_1$  and  $\gamma_2$ . For H<sup>-</sup> production, the optimum condition is that  $\gamma_1 \cong 1$  and  $\gamma_2 \ll 1$ .

#### 1. はじめに

著者等は, NBI 用の水素負イオン源の開発, 特に体積生成型負イオン源の高効率化を目指して, 水素放電プラズマ中のイオン種組成とプラズマパラメータとの関係を理論的に検討している。このシリーズの論文 I<sup>1)</sup>では, 水素プラズマ中の主な反応素過程を考慮した, 正・負両イオンを含めたレート方程式を基礎とする負イオン源のモデルを提案した。そして, 特にH<sup>-</sup>生成機構を中心にして, このモデルによる数値計算の結果を報告した。

ところで, 水素放電により全正イオンに対するH<sup>-</sup>イオンの比率が30%にも達するプラズマ生成の可能な

ことが報告され<sup>2, 3)</sup>, いわゆる体積生成型水素負イオン源の開発が最近特に注目されてきている<sup>4, 5)</sup>。また、この異常に高い $H^-$ イオンの生成機構について理論的研究も数多くなされた<sup>6)</sup>。そして、 $H^-$ 生成には振動準位 $v''$ へ励起された水素分子 $H_2^*(v'')$ と $H_2^*(v'')$ を作るための高速電子 $e_f$  (エネルギー $E_{fe} \gtrsim 30$  eV) とが関与し、 $H_2 + e_f \rightarrow H_2^*(v'') + e_f$ ;  $H_2^*(v'') + e$  (低速のプラズマ電子)  $\rightarrow H^- + H$  の2段階過程が $H^-$ 生成にとって重要な過程とされている。

著者等の用いたモデルにも上記2過程が含まれている。しかし、論文Iでは $H^-$ 生成に及ぼす $H_2^*(v'')$ の効果を説明することを主目的としたため、 $H_2^*(v'')$ としては $v''=1\sim 14$  まである中の或る振動準位のもの1種だけを考慮したモデルであった。数値計算の結果、(1)  $H^-$ 生成には $H_2^*(v'')$ および $e_f$ が必要であり、生成機構としては、 $H_2 + e_f \rightarrow H_2^*(v'') + e_f$ ;  $H_2^*(v'') + e \rightarrow H^- + H$  の2段階過程が主要であることを定量的に示した、(2)  $H^-$ 生成には $v''=5\sim 10$  と比較的高い準位にある $H_2^*(v'')$ が重要であり、 $v''=7$ 付近の $H_2^*(v'')$ が最も効果的である、等の点を明らかにした。

そこで本論文IIでは、 $H_2^*(v'')$ の種類として $H^-$ 生成に重要なものをすべて考慮することとし、前回のモデルを拡張する。そして、この新しいモデルを用いて $H^-$ 生成のプラズマパラメータ依存性について検討するとともに、実験結果<sup>7-11)</sup>との比較も行う。なおプラズマパラメータとしては電子密度 $n_e$ 、電子温度 $T_e$ 、水素ガス圧 $p$ の他に、中性粒子の水素原子 $H$ および $H_2^*(v'')$ と壁との相互作用を表わすパラメータ $r_1$ および $r_2$ も含める。 $r_1$ は $H$ の壁での再結合係数であり、 $r_2$ は $H_2^*(v'')$ の壁との衝突による脱励起係数である。

著者等は容器表面状態がイオン種組成に強く影響することを実験的に見出したが<sup>12)</sup>、この結果をレート方程式の解で説明するためには $r_1$ の値を大きく変化させざるを得なかった<sup>13)</sup>。一方、 $r_1$ や $r_2$ の値は材質の違いにより大きく変化する可能性がある<sup>14, 15)</sup>。本論文では、このような観点から $H^-$ 生成に対する壁の作用を調べ、更に水素プラズマの負イオン源としての最適条件なども検討する。

## 2. 数値計算のモデル

計算に用いたモデルは各種粒子に対するレート方程式(正イオン生成過程、 $H^-$ 生成過程など水素プラズマ中の主な反応素過程を同時に扱うことにより、各粒子種の生成・消滅に関する釣合を考える)に、プラズマの準中性の条件および全粒子数保存の条件の2つの条件式を連立させたものである。ここでは前回のモデル<sup>1)</sup>を拡張して、 $H_2^*(v'')$ としては $H^-$ 生成量に大きく影響する $v''$ が $5\sim 10$ の6種を総て加えたモデルとした。

従って、対象とする粒子は次の14種類となる。中性粒子として $H$ 、基底状態の水素分子 $H_2$ および $v''=5\sim 10$ の6種の $H_2^*(v'')$ を、イオン種として $H^+$ 、 $H_2^+$ 、 $H_3^+$ および $H^-$ を、そして電子として $e$ および $e_f$ をそれぞれ考える。

2.1 水素放電中の諸反応素過程

本モデルで考慮した素過程およびその反応率の記号法を以下に示す。まず最初に正イオンの生成に関する反応過程を(1)~(14)に示す。

反応素過程	反応率	
$H_2 + e \rightarrow H_2^+ + 2e,$	$\alpha_1$	(1)
$H_2 + e \rightarrow 2H + e,$	$\alpha_2$	(2)
$H_2^+ + e \rightarrow H^+ + H + e,$	$\alpha_3$	(3)
$H_2^+ + H_2 \rightarrow H_3^+ + H,$	$\alpha_4$	(4)
$H + e \rightarrow H^+ + 2e,$	$\alpha_5$	(5)
$H_3^+ + e \rightarrow H + H_2,$	$\alpha_6$	(6)
$H_3^+ + e \rightarrow H^+ + 2H + e,$	$\alpha_7$	(7)
$H_2^+ + e \rightarrow 2H,$	$\alpha_9$	(8)
$H_2^+ + H_2 \rightarrow H^+ + H + H_2,$	$\alpha_{10}$	(9)
$H_2 + e_f \rightarrow H_2^+ + e_f + e,$	$\alpha_{f1}$	(10)
$H_2 + e_f \rightarrow 2H + e_f,$	$\alpha_{f2}$	(11)
$H_2^+ + e_f \rightarrow H^+ + H + e_f,$	$\alpha_{f3}$	(12)
$H + e_f \rightarrow H^+ + e_f + e,$	$\alpha_{f5}$	(13)
$H_3^+ + e_f \rightarrow H_2^+ + H + e_f,$	$\alpha_{f8}$	(14)

次に、負イオンの生成・消滅に関する反応過程を(15)~(22)に示す。

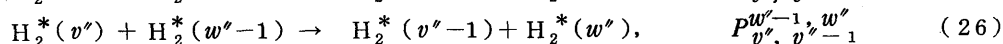
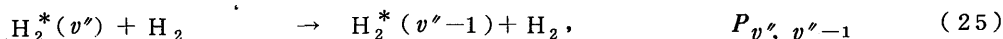
反応素過程	反応率	
$H_2 + e \rightarrow H^- + H,$	$\alpha_{11}$	(15)
$H_2^*(v'') + e \rightarrow H^- + H,$	$\alpha_{12}(v'')$	(16)
$H_2^+ + e \rightarrow H^- + H^+,$	$\alpha_{13}$	(17)
$H^- + e \rightarrow H + 2e,$	$\alpha_{14}$	(18)
$H^- + e_f \rightarrow H + e_f + e,$	$\alpha_{f14}$	(19)
$H^- + H^+ \rightarrow 2H,$	$\alpha_{15}$	(20)
$H^- + H_2^+ \rightarrow H + H_2,$	$\alpha_{16}$	(21)
$H^- + H_3^+ \rightarrow 2H + H_2,$	$\alpha_{17}$	(22)

過程(16)の反応率  $\alpha_{12}(v'')$  には理論値を用いるが、その値は  $v''$  に強く依存する。ここでは、回転励起準位  $J=0$  の  $H_2^*(v'', J=0)$  と  $e$  との解離付着衝突を想定した場合の結果<sup>16)</sup>を採用している。その他の(1)~(22)の反応率についての詳細は論文Iに譲るが、前回と同じ値を用いている。

最後に振動励起分子の生成・消滅に関する反応過程を(23)~(26)に示す。

反応素過程	反応率	
$H_2 + e_f \rightarrow H_2^*(v'') + e_f,$	$\alpha_{f18}(v'') = \sigma(v'') v_f$	(23)
$H_2^+, H_3^+$ の中性粒子への変換に伴う $H_2^*(v'')$ の生成	$p_1$ および $p_2$	(24)

(電荷交換反応  $H_2^+ + H_2 \rightarrow H_2 + H_2^+$ ,  $\alpha_{19} \cong 3 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 / \text{sec}$  も含める)



ここで  $v''$  および  $w''$  は励起分子の振動準位を表す。過程 (23) の反応率  $\alpha_{f18}(v'')$  は衝突断面積  $\sigma(v'')$  の理論値<sup>17)</sup> と  $e_f$  の速度  $v_f$  の積として求めるが、この値も  $\alpha_{12}(v'')$  と同様に  $v''$  に依存する。過程 (24) は  $H_2^+$ ,  $H_3^+$  が例えば (21), (6) の反応過程によりそれぞれ  $H_2$  に変換されるが、そのうち或る確率 ( $H_2^+$  に対しては  $p_1$ ,  $H_3^+$  に対しては  $p_2$  とする) で  $H_2^*(v'')$  の状態を維持するものが存在すると仮定したことに対応している。なお、この過程 (24) により生じた  $H_2^*(v'')$  が各  $v''$  に対してどのように分布するかという点 (粒子間衝突により中性化する場合と壁との衝突で中性化する場合とで同じかという点も含めて) 問題となるが、例えば  $H_2^+$  イオン (運動エネルギーが  $4 \sim 10 \text{ eV}$ ) の壁での中性化に関する計算では約  $1/3$  強の粒子が  $H_2^*(v'')$  として反射され、各  $v''$  に対してはほぼ均等に分布しているとの結果が最近報告されている<sup>32)</sup>。十分ではないがこれらの結果を考慮して、簡単のためここでは  $H_2^+$  や  $H_3^+$  の中性化により生じた  $H_2^*(v'')$  は各  $v''$  に均等に分布しているものと仮定する。従って、本モデルでは  $v'' = 5 \sim 10$  の 6 準位を含めているので、過程 (24) による或る準位  $v''$  に対する  $H_2^*(v'')$  生成の実効的な反応率の表示には係数  $p_1/6$  或いは  $p_2/6$  がかかる。また、 $p_1$  や  $p_2$  の  $H^-$  生成に及ぼす影響については別報にて詳しく述べる予定であるが、 $e_f$  の  $H^-$  生成に及ぼす影響ほど強くない<sup>1)</sup>。過程 (25) と (26) の反応率  $P_{v'', v''-1}$  と  $P_{v'', v''-1}^{w'', w''-1}$  は Capitelli 等の結果<sup>18)</sup> を参照して求めた。

一方、(25) および (26) の逆過程に対応する反応の反応率は詳細約合の考え方より次式で表される。

$$P_{v'', v''-1} = P_{v''-1, v''} \exp [-(E_{v''-1} - E_{v''}) / \kappa T_g] \quad (27)$$

$$P_{v'', v''-1}^{w'', w''-1} = P_{v''-1, v''}^{w'', w''-1} \exp [-(E_{v''-1} + E_{w''} - E_{v''} - E_{w''-1}) / \kappa T_g] \quad (28)$$

ここで  $E_{v''}$ ,  $E_{w''}$  等は各振動準位のエネルギーを表すが、本論文では次のモース (Morse) 型の非調和振動子を用いて計算した。

$$E_{v''} = E_{10} \left[ \left( v'' + \frac{1}{2} \right) - \delta \left( v'' + \frac{1}{2} \right)^2 \right], \quad (29)$$

但し、 $E_{10} = 0.545 \text{ eV}$  で  $\delta = 0.0278$  である。

なお、(1)~(22) の反応過程において、 $e$  はマクスウェル分布しているとして、 $e$  の関与する反応率は分布関数で平均化した値であり、 $T_e$  の関数となる。また、イオン源内のフィラメントから飛び出した電子が  $e_f$  の役割をするが、ここでは反応にかかわる総ての  $e_f$  は同じエネルギーを持つものと仮定した。更に、 $H_2^*(v'')$  の解離、電離衝突等に関しては  $H_2$  と同様に振舞うと仮定して、 $H_2$  に対する反応率をそのまま  $H_2^*(v'')$  に対しても用いている。

反応素過程としては上記以外にも (a)  $H^- + H_2 \rightarrow H + H_2 + e$ , (b)  $H^- + H \rightarrow H_2 + e$ , (c)  $H^- + H \rightarrow 2H + e$ , (d)  $H^- + H \rightarrow H + H^+ + 2e$ , (e)  $H_3^+ + e \rightarrow H_2^+ + H^-$  等の  $H^-$  生成に影響を及ぼす衝突過程

が考えられる<sup>21-23, 26, 33</sup>)。しかし、衝突断面積の値が(データ不足も含めて)不確かであったり、考えている粒子のエネルギー範囲では衝突断面積が小さくあまり影響を及ぼさない等の理由により、次節に示す定式化の段階では(a)~(e)の過程を無視した。ただ、最初の2過程(a), (b)はH<sup>-</sup>生成の $p$ 依存性(特に $p$ の高い領域)や $n_e$ 依存性(特に高密度領域, 或いはHの割合が高い場合)に影響が現れる可能性がある。そこで3章においては、これらの過程を考慮した場合の計算結果についても簡単に述べる。

## 2.2 基礎方程式および数値計算法

過程(1)~(28)と中性粒子に対する壁の作用を考慮して、水素放電中の定常状態におけるH, H<sub>2</sub><sup>\*</sup>( $v''$ ) ( $v''=5\sim 10$ ), H<sup>+</sup>, H<sub>2</sub><sup>+</sup>, H<sub>3</sub><sup>+</sup>, H<sup>-</sup>の各粒子に対する連続の式を立てる。それを(30)~(35)式に示す。

$$\begin{aligned}
 \text{H} : \{ & N_2 + \sum N_2^*(v'') \} (2n_e \alpha_2 + 2n_{fe} \alpha_{f2} + n_2 \alpha_4 + n_2 \alpha_{10}) \\
 & + N_2 n_e \alpha_{11} + \sum n_e N_2^*(v'') \alpha_{12}(v'') + n_2 (n_e \alpha_3 + n_{fe} \alpha_{f3} \\
 & + 2n_e \alpha_9) + n_3 (n_e \alpha_6 + 2n_e \alpha_7 + n_{fe} \alpha_{f8}) \\
 & + n_- (n_e \alpha_{14} + n_{fe} \alpha_{f14}) + n_- (2n_1 \alpha_{15} + n_2 \alpha_{16} + 2n_3 \alpha_{17}) \\
 & - N_1 (n_e \alpha_5 + n_{fe} \alpha_{f5}) - \gamma_1 \frac{N_1}{T_1} = 0, \tag{30}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{H}_2^*(v'') : & N_2 n_{fe} \alpha_{f18}(v'') + \frac{1}{6} \{ p_1 (n_2 n_- \alpha_{16} + N_2 n_2 \alpha_{19} + \frac{n_2}{\tau_2}) \\
 & + p_2 (n_3 n_e \alpha_6 + n_3 n_- \alpha_{17} + \frac{n_3}{\tau_3}) \} + N_2^*(v''+1) \{ N_2 P_{v''+1, v''} \\
 & + \sum_{(w'' \neq v'')} N_2^*(w'') P_{w'', w''-1}^{v''-1, v''} \} + N_2^*(v''-1) \{ N_2 P_{v''-1, v''} \\
 & + \sum_{(w'' \neq v'')} N_2^*(w'') P_{v''-1, v''}^{w'', w''-1} \} - N_2^*(v'') n_e \alpha_{12}(v'') - N_2^*(v'') \{ n_e (\alpha_1 + \alpha_2) \\
 & + n_{fe} (\alpha_{f1} + \alpha_{f2}) + n_2 (\alpha_4 + \alpha_{10}) \} - N_2^*(v'') N_2 (P_{v'', v''-1} + P_{v'', v''+1}) \\
 & - N_2^*(v'') \{ \sum_{(w'' \neq v''-1)} N_2^*(w'') P_{v'', v''-1}^{w'', w''+1} \sum_{(w'' \neq v''+1)} N_2^*(w'') P_{w'', w''-1}^{v'', v''+1} \} \\
 & - \gamma_2 \frac{N_2^*(v'')}{T_2} = 0, \tag{31}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{H}^+ : & N_1 (n_e \alpha_5 + n_{fe} \alpha_{f5}) + \{ N_2 + \sum N_2^*(v'') \} n_2 \alpha_{10} \\
 & + n_2 (n_e \alpha_3 + n_{fe} \alpha_{f3} + n_e \alpha_{13}) + n_3 n_e \alpha_7 \\
 & - n_1 n_- \alpha_{15} - \frac{n_1}{\tau_1} = 0, \tag{32}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{H}_2^+ : & \{ N_2 + \sum N_2^*(v'') \} (n_e \alpha_1 + n_{fe} \alpha_{f1}) + n_3 n_{fe} \alpha_{f8} \\
 & - \{ N_2 + \sum N_2^*(v'') \} n_2 (\alpha_4 + \alpha_{10}) - n_2 (n_e \alpha_3 + n_{fe} \alpha_{f3})
 \end{aligned}$$

$$+ n_e \alpha_9 + n_e \alpha_{13} + n_- \alpha_{16}) - \frac{n_2}{\tau_2} = 0, \quad (33)$$

$$H_3^+ : \{ N_2 + \sum N_2^*(v^v) \} n_2 \alpha_4 - n_3 (n_e \alpha_6 + n_e \alpha_7 + n_{fe} \alpha_{f8} + n_- \alpha_{17}) - \frac{n_3}{\tau_3} = 0, \quad (34)$$

$$H^- : N_2 n_e \alpha_{11} + \sum N_2^*(v^v) n_e \alpha_{12}(v^v) + n_2 n_e \alpha_{13} - n_- (n_e \alpha_{14} + n_{fe} \alpha_{f14} + n_1 \alpha_{15} + n_2 \alpha_{16} + n_3 \alpha_{17}) - \frac{n_-}{\tau_-} = 0. \quad (35)$$

更に準中性の条件と粒子数保存の条件より次の2式が得られる。

$$n_1 + n_2 + n_3 = n_e + n_{fe} + n_-, \quad (36)$$

$$N_1 + 2 \{ N_2 + \sum N_2^*(v^v) \} + n_1 + 2 n_2 + 3 n_3 + n_- = 2 N_0. \quad (37)$$

ここで、 $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_2^*(v^v)$ 、 $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$ 、 $n_-$ 、 $n_e$ 、 $n_{fe}$  は、それぞれ H、 $H_2$ 、 $H_2^*(v^v)$ 、 $H^+$ 、 $H_2^+$ 、 $H_3^+$ 、 $H^-$ 、 $e$ 、 $e_f$  の粒子数密度を表す。また、 $N_0$  は放電前の水素分子  $H_2$  の粒子密度である。その他、イオンの閉じ込め時間、中性粒子の容器内走行時間などに対する定義および記号法は論文 I と同様である。式中の  $\sum$  は  $v^v = 5 \sim 10$  までの総和を表し、 $\sum_{w^v}$  は  $w^v = 5 \sim 10$  (但し  $w^v$  の一部は) までの総和を意味する。(31) 式で係数  $1/6$  がかかっている項が分子イオンの中性化に伴う  $H_2^*(v^v)$  生成を表す。その中で  $p_1 n_2 / \tau_2$  および  $p_2 n_3 / \tau_3$  はそれぞれ  $H_2^+$  および  $H_3^+$  が壁を介した中性化により  $H_2^*(v^v)$  となる過程に対応している。

H および  $H_2^*(v^v)$  と壁との相互作用を検討する目的で、パラメータ  $\gamma_1$  および  $\gamma_2$  を導入している。 $\gamma_1$  は H の壁面での再結合係数であるが、 $\gamma_1 = 1 - f_{out} / f_{in}$  ( $f_{out}$ 、 $f_{in}$  は H の壁からの流出束および壁への流入束) で定義される。壁に衝突した H の一部が H のままで反射される場合 ( $f_{out} \neq 0$ ) には、 $\gamma_1 < 1$  となる。なお、壁に附着した H は壁面で他の H と再結合して  $H_2$  となってプラズマ中に戻るものとする。(30) 式からわかるように、実効的な生存時間は  $T_1 / \gamma_1$  となるので、 $\gamma_1 < 1$  となることは H の閉じ込めが実効的に増すことを意味している。

$H_2^*(v^v)$  に対する  $\gamma_2$  も H に対する  $\gamma_1$  と同様の定義が可能である。 $\gamma_2$  は壁との衝突による  $H_2^*(v^v)$  の脱励起に関係する量であり、 $v^v$  にあるものが他の振動単位或いは  $H_2$  への変化に要する壁との衝突回数の逆数と定義することも可能である(例えば、2 回の衝突で  $v^v$  の準位から他に変化する場合には、 $\gamma_2 = 0.5$  とみなす)。従って、厳密に言えば  $\gamma_2$  の値は  $v^v$  に依存することが予測されるが<sup>19)</sup>、ここではすべての  $H_2^*(v^v)$  に対して  $\gamma_2$  は同じ値を持つと仮定している。

水素プラズマを負イオン源に応用するには、定常状態でのイオン種組成が重要な問題となる。プラズマ中

には多種にわたる中性粒子やイオンが存在しており、これらの粒子間には 2.1 節 で示したような各種衝突過程を通して複雑な相互作用がある。そして、 $n_e$ ,  $T_e$  および  $p$  (或いは  $N_0$ ) の関数として定常水素プラズマ中のイオン種組成が決まると考えられる。(30)~(37)式はこのような場合を想定した連立方程式系となっている。

ところで、この方程式の数値解を求めることにより、H<sup>-</sup>生成のプラズマパラメータ依存性を検討するわけであるが、例えば各種粒子密度の  $n_e$  依存性を求めるときの具体的な計算手順は次のとおりである。水素ガス圧を指定すると  $N_0$  ( $= p / (\kappa T_0)$ ;  $\kappa$ はボルツマン定数,  $T_0$ は室温)が決まる。 $T_e$  および  $E_{fe}$ を指定すれば各反応率が決まる。そこで  $n_e$ を定め(30)~(37)式を連立させて解けば  $N_1, N_2, N_2^*(v''=5\sim 10), n_1, n_2, n_3, n_{-}$  および  $\tau_1$ が求まる。なお、 $n_{fe}$ は  $n_e$  に対する比として、また  $\tau_1$ は  $T_1$ に対する比として最初に与える。

同様に、各粒子密度の  $T_e$  依存性を求める場合には  $n_e, p$ を指定して  $T_e$  を独立変数として扱う。また、 $p$  依存性を求める場合には  $n_e, T_e$ を指定して  $p$  を独立変数として変化させる。

ところで、上記手順の計算は簡略化して考えると次のような意味づけができる。イオン源内プラズマは中性の条件を満たしていなければならず、その条件を満たしているときの諸量のみが意味を持つ。各種イオンは釣合の式より  $n_e, T_e, N_0$ の関数として表されるので(簡単なモデルの場合には具体的に表示できる)、それらの結果を中性条件の式に代入すれば  $n_e, T_e, N_0$ の間の関係式が求まる。即ち、

$$F(n_e, T_e, N_0) = n_i(n_e, T_e, N_0) - n_e - n_{fe} = 0$$

上式で  $T_e, N_0$ を指定すれば  $n_e$  に関する方程式となり、中性条件を満たす  $n_e$ が求まることになる。つまり、上式より3変数  $n_e, T_e, N_0$ のうち2つを指定すると残りの1つが決定されるが、3変数は中性条件を満たすように調整されるかたちになっている。

### 2.3 励起分子種の選択について

水素分子の振動準位は  $v''=1\sim 14$  までの14種があるが、本計算に用いるモデルでは  $H_2^*(v'')$ として  $v''=5\sim 10$ の6種を考慮している。この選択に関しては論文Iの励起準位として1種のみを考慮した計算結果を参考にしているため、その具体例を図1に示す。

この図は、 $n_e$ をパラメータとして、H<sup>-</sup>生成の  $v''$  依存性を示している。縦軸はH<sup>-</sup>比率(全正イオン密

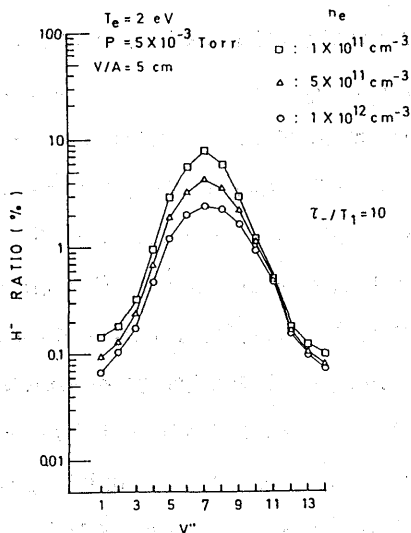


図1. H<sup>-</sup>生成の振動励起準位依存性。励起分子として1種のみを考慮したモデル(論文Iのモデル)を用いた計算結果で、縦軸はH<sup>-</sup>比率、H<sup>-</sup> / (H<sup>+</sup> + H<sub>2</sub><sup>+</sup> + H<sub>3</sub><sup>+</sup>)、横軸は励起準位  $v''$  である。

度に対する $H^-$ 密度の割合)を表し、横軸は励起分子の振動準位を表している。但し、他のパラメータは  $T_e = 2 \text{ eV}$ ,  $p = 5 \times 10^{-3} \text{ Torr}$ , 容器サイズ  $V/A = 5 \text{ cm}$ ,  $E_{fe} = 40 \text{ eV}$ ,  $n_{fe}/n_e = 0.03$ ,  $\tau_1 = 1.0$ ,  $\tau_2 = 0.1$ ,  $p_1 = p_2 = 0.1$  で一定。この図より、 $H^-$ 生成に関し、 $v''$ には最適値が存在することは明らかである。しかも、どの $n_e$ に対する結果を見ても、 $v'' = 5 \sim 10$ までの $H^-$ 生成量の合計は全体( $v'' = 1 \sim 14$ までの総計)の90%以上を占めている。

このような結果とモデルを単純化する狙いと双方を考慮して、 $v'' = 5 \sim 10$ までの6種を $H_2^*(v'')$ として選択した。従って、次章に示すモデル計算の結果は、水素放電による $H^-$ 生成に関する種々の問題点を、定性的並びに定量的にも十分に検討できるものと考えている。

### 3. 計算結果および考察

#### 3.1 $H^-$ 生成のプラズマパラメータ依存性

連立方程式系(30)~(37)を数値計算することにより $H^-$ 生成の $n_e$ ,  $T_e$ ,  $p$ 等のプラズマパラメータに対する依存性を検討する。

最初に、 $H^-$ 生成の $n_e$ 依存性に関する結果を図2, 3に示す。これは、 $T_e = 2 \text{ eV}$ ,  $p = 5 \times 10^{-3} \text{ Torr}$ ,  $V/A = 5 \text{ cm}$ ,  $E_{fe} = 40 \text{ eV}$ ,  $n_{fe}/n_e = 0.03$ ,  $\tau_1 = 1.0$ ,  $\tau_2 = 0.1$ ,  $p_1 = p_2 = 0.1$  で一定として、 $n_e$ を変化させて求めた結果である。

図2(a)には $H^-$ 比率( $H^-$ イオン密度 $n_-$ の全正イオン密度 $n_i$ , 即ち $n_i = n_1 + n_2 + n_3$ , に対する比率)と $n_e$ の関係を示す。また(b)には $n_-$ と $n_i$ の関係を示す。パラメータは $\tau_-/T_1$ である。論文Iでも述べたが、この結果で注目すべき点は、 $n_e$ には $n_-$ を最大にする或る最適値が存在することである。また参考のために、 $n_{fe}/n_e = 0.1$ で $\tau_-/T_1 = 10$ とした時の結果も同時に示したが(破線)、 $H^-$ 比率および $n_-$ とも大幅に増加している。これは $H_2 + e_f \rightarrow H_2^*(v'') + e_f$ により $H_2^*(v'')$ の生成が促進された結果であり<sup>1)</sup>,  $H^-$ 生成には $e_f$ ないし $e_f$ に相当する高速のプラズマ電子(20~30 eV以上)が是非とも必要である。しかし、最近行った検討により、 $H^-$ 生成にとって $e_f$ にも或る最適値の存在することが判明した<sup>20)</sup>。

図3には図2に対応した正イオン種組成比および中性粒子密度の $n_e$ 依存性を示す。ただし、 $H_2^*(v'')$ については、各 $v''$ の密度を示すかわりに全励起分子の $H_2$ に対する比率のみを示している。

図2, 3に示した結果の定性的な傾向は論文Iの結果と殆ど同じである。ただ、大きく変わった点は $H_2^*(v'')$ 密度の増大およびそれに伴う $H^-$ 比率並びに $n_-$ の増大である。Bacal等<sup>7)</sup>は $n_e \lesssim 2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ の範囲で実験を行い、 $n_-$ および $n_-/n_e$ 比率の $n_e$ 依存性を求めている。例えば $p = 3.3 \times 10^{-3} \text{ Torr}$ ,  $n_e \approx 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ で $n_- = (7 \sim 8) \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ および $n_-/n_e \approx 0.16$ となっている。ところで、バケット型イオン源(プラズマ電位が容器壁、即ち陽極、の電位より正となり $H^-$ はプラズマ中に捕捉された状態になっている)を想定すれば、 $\tau_-/T_1$ の値として10~20程度を考えるのは不自然ではない。そこで、図2で $\tau_-/T_1 = 10 \sim 20$ の結果をみると、 $n_e \approx 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 付近で $H^-$ 比率は17~20% ( $n_{fe}/n_e = 0.03$ とし



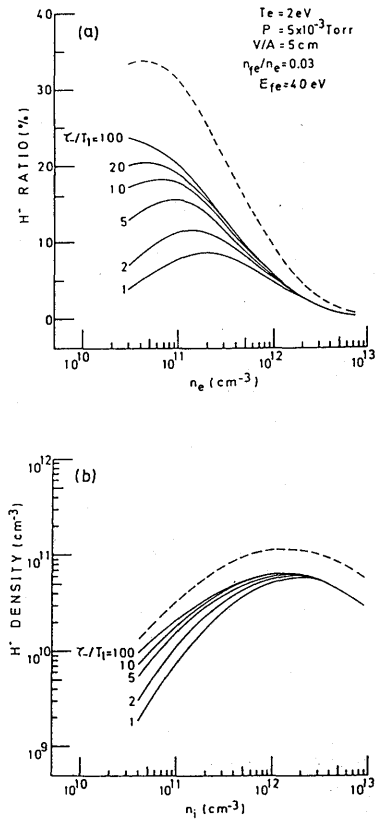


図2. H<sup>-</sup>生成の電子密度依存性; (a) H<sup>-</sup>比率と電子密度  $n_e$  の関係, (b) (a) より求めた H<sup>-</sup>密度と全正イオン密度  $n_i$  の関係。H<sup>-</sup>生成に対する高速電子の影響を示す例として,  $\tau_-/T_1 = 10$  で  $n_{fe}/n_e = 0.1$  とした時の計算結果を破線にて図示する。

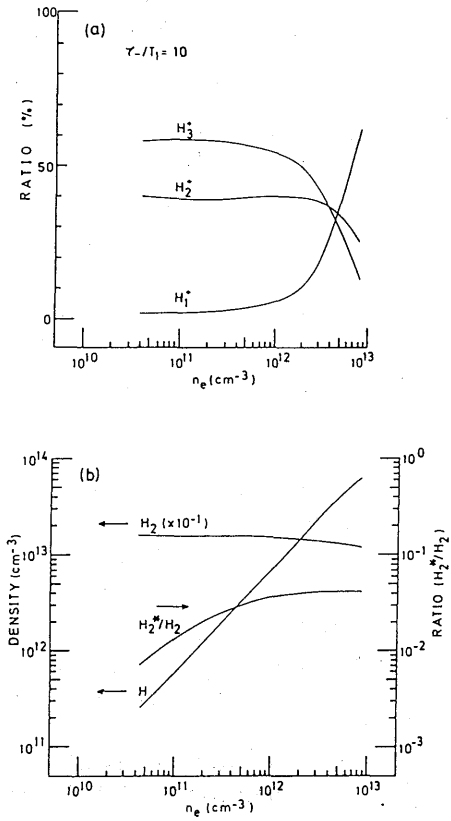


図3. 図2に対応した正イオンおよび中性粒子と  $n_e$  の関係; (a) 正イオン種組成比の  $n_e$  依存性, (b) 中性粒子密度および密度比  $H_2^*/H_2$  の  $n_e$  依存性。これらの結果は  $\tau_-/T_1$  を変えてもその影響を殆ど受けなため, 代表例として  $\tau_-/T_1 = 10$  の結果のみを示す。以下の図にても同様に扱う。

て),  $n_-$  は  $(1.7 \sim 2) \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  となり数量的に実測値と同等の値が得られている。一方, Okumura 等<sup>8)</sup>は H<sup>-</sup>電流引出しの実験を高電子密度プラズマの領域まで行い, プラズマ密度が  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$  付近で H<sup>-</sup>電流が最大となることを示した。

以上述べてきた数値計算の結果と実験結果との比較より, 本モデルの結果は定性的には十分にまた定量的にも実測値と比較しうる値であることを示している。

図4に H<sup>-</sup>生成の  $T_e$  依存性を示す。H<sup>-</sup>比率は  $T_e$  の上昇とともに単調に減少しているが, これは論文 I でも述べたように H<sup>-</sup>生成の主過程である  $H_2^*(v'') + e \rightarrow H^- + H$  の反応率  $\alpha_{12}$  の  $T_e$  依存性に起因している<sup>16)</sup>。更に, H<sup>-</sup>の消滅過程  $H^- + e \rightarrow H + 2e$  の反応率  $\alpha_{14}$  の  $T_e$  依存性も影響している。  $T_e$  の上昇と

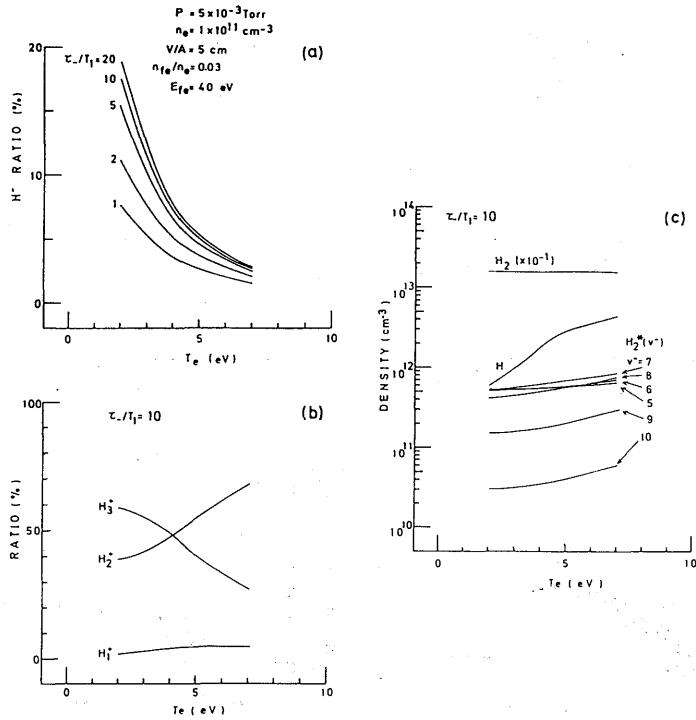


図4. H<sup>-</sup>生成の電子温度依存性: (a) H<sup>-</sup>比率の  $T_e$  依存性, (b) 正イオン種組成比の  $T_e$  依存性, (c) 中性粒子密度の  $T_e$  依存性。

共に H<sup>-</sup> 生成が低下することは実験的にも確かめられている<sup>8)</sup>。また、低密度プラズマでの実験ながら、 $0.5 \leq \kappa T_e \leq 1$  eVあたりが H<sup>-</sup> 生成にとって最適であるとの結果が得られている。但し、この場合  $n_i = (1.5 \sim 3) \times 10^9$  cm<sup>-3</sup> である。

一方、正イオン種組成の変化に注目すると、解離過程 (2)  $H_2 + e \rightarrow 2H + e$  および (3)  $H_2^+ + e \rightarrow H^+ + H + e$  の反応率  $\alpha_2$  および  $\alpha_3$  の  $T_e$  依存性を考慮すると、 $T_e$  の増加に伴って H<sup>+</sup> 比率が高くなることが予想される。しかし、図4 (b) に示されるように H<sup>+</sup> 比率は殆ど増加しない。これは、 $T_e$  の上昇(解離過程の促進)による H<sup>+</sup> の増加は認められるものの、それ以上に H<sub>2</sub><sup>+</sup> 生成が盛んになるためである。 $n_e$  が高くなると  $T_e$  の上昇による H<sup>+</sup> の増加はもう少しはつきりしてきており、図(b)の結果は対象とするプラズマが弱電離プラズマであることに起因している。更に、この計算例では  $e_f$  が含まれており、このために H<sup>+</sup> 比率は全体として大きく低下している。 $e_f$  の存在が H<sup>+</sup> 比率を低下させることは先に報告したが<sup>13)</sup>、イオン種組成に及ぼす  $e_f$  の影響についての詳細は別に述べる<sup>34)</sup>。

図5に H<sup>-</sup> 生成と  $p$  との関係を示す。(a)に H<sup>-</sup> 比率と  $p$ , (b)に正イオン種組成比と  $p$ 、および (c)には各  $\nu''$  にある H<sub>2</sub><sup>\*</sup>( $\nu''$ ) 密度と  $p$  の関係を示している。(b), (c)に示すように  $p$  の増加と共に H<sub>2</sub><sup>\*</sup>( $\nu''$ ) 密度は上昇

するが、このプラズマパラメータ範囲では正イオン種組成は殆ど分子イオンである。このため、正イオンとの再結合によるH<sup>-</sup>の消滅過程で一番反応率の高い過程H<sup>+</sup> + H<sup>-</sup> → 2Hは殆ど影響しない。pの上昇と共にH<sub>2</sub><sup>\*</sup>(v<sup>o</sup>)密度が増加するため、(a)に示すようにH<sup>-</sup>比率はpの上昇と共に増加する。しかしながら、pの上昇によりH<sub>2</sub>密度も増加し、H<sub>2</sub><sup>\*</sup>(v<sup>o</sup>) + H<sub>2</sub> → H<sub>2</sub><sup>\*</sup>(v<sup>o</sup>-1) + H<sub>2</sub>の反応が盛んになる。特にv<sup>o</sup>の高いH<sub>2</sub><sup>\*</sup>(v<sup>o</sup>)密度は比較的低いpでも飽和してきている。従って、この図にはまだ現れないが、pがより高くなるとH<sup>-</sup>比率は飽和する傾向にある。

一方、実験でもある程度pが高くないとH<sup>-</sup>生成量は少ないという結果が得られている。しかし、H<sup>-</sup>生成に関してpには最適値が存在し、pのある値でH<sup>-</sup>比率或いはH<sup>-</sup>電流が最大となる特性を示している<sup>7,8)</sup>。従って、本モデルの計算結果のうちp依存性に関する結果と実測値との間であまり良い一致は得られていない。本モデルでは、H<sup>-</sup> + H<sub>2</sub> → H + H<sub>2</sub> + e の過程を考慮してないが、このことが不一致の原因の1つとして考えられる。この過程の衝突断面積は必ずしも明らかではないが、10<sup>-15</sup> cm<sup>2</sup>程度と評価している例があるので<sup>22, 23)</sup>、この値を用いて計算した結果の1例を図6に示す。明らかにpには最適値が存在し、実験との対比もつけやすい。また、H<sup>-</sup>比率の値そのものを図5の結果と比較すると、pの高い領域での低下が著しい。p ≃ 1 × 10<sup>-3</sup> Torr 以下では過程H<sup>-</sup> + H<sub>2</sub> → H + H<sub>2</sub> + e を考慮した影響は殆ど現れないが、p ≃ 5 × 10<sup>-3</sup> Torr 付近での減少割合は50%程度に達する。従って、p ≳ 10<sup>-2</sup> Torr 等の高圧力下ではH<sup>-</sup>生成の検討を行う場合には、この反応過程をくり込んだモデルを用いることが望ましい。

ところで、先に述べたH<sup>-</sup>生成のn<sub>e</sub>依存性やT<sub>e</sub>依

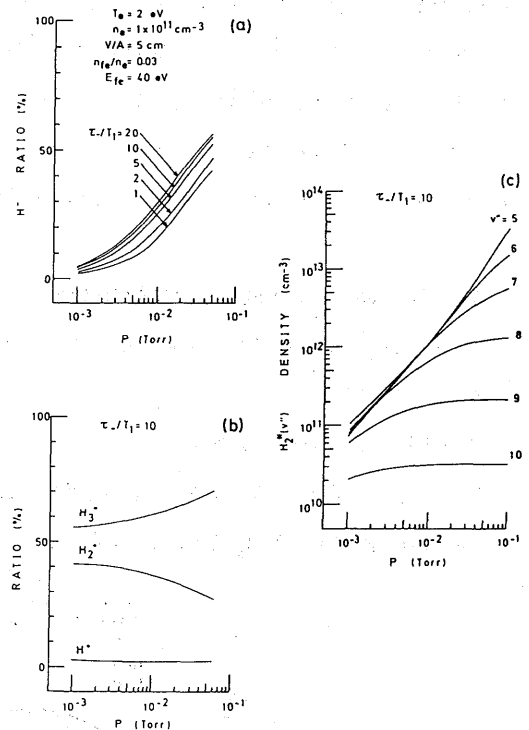


図5. H<sup>-</sup>生成の水素ガス圧依存性；(a) H<sup>-</sup>比率のp依存性、(b) 正イオン種組成比のp依存性、(c) 励起分子密度のp依存性。

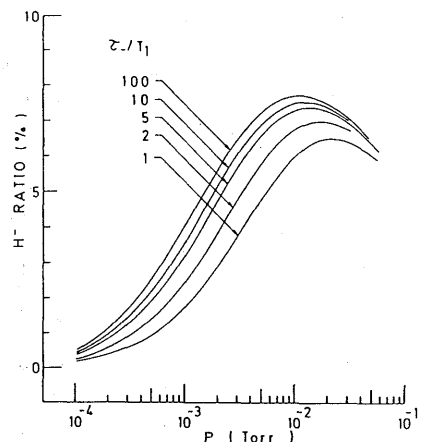


図6. H<sup>-</sup>生成の水素ガス圧依存性。これはH<sub>2</sub><sup>\*</sup>(v<sup>o</sup>)としてv<sup>o</sup> = 4~11までの8種を含め、過程H<sup>-</sup> + H<sub>2</sub> → H + H<sub>2</sub> + eも考慮したモデルによる計算結果である。但し、プラズマパラメータ等の数値条件はすべて図5の場合と同じ。

存性を計算する時には  $p$  の値は固定されており ( $p = 5 \times 10^{-3}$  Torr), それぞれの依存性は  $H^- + H_2 \rightarrow H + H_2 + e$  を含むと含まないとには無関係に同じ傾向を示すものである。現在, イオン源の最適構造の検討も含めて負イオン生成率最適化に関するシミュレーションを行っている。そのモデルは  $H_2^*(v')$  として  $v' = 4 \sim 11$  までの8種を含み, 過程  $H^- + H_2 \rightarrow H + H_2 + e$  も考慮したものとなっている。図6はその計算結果の1例を示したものであるが, 詳細は別報にて述べる。

### 3.2 正・負イオン生成に及ぼす壁の作用

Hおよび  $H_2^*(v')$  と壁との相互作用が正・負イオン生成に及ぼす影響について  $\tau_1$  および  $\tau_2$  を変化させて検討した<sup>20, 24)</sup>。

#### (A) Hと壁との相互作用の影響

図7に  $\tau_1 = 1$  とした時(即ち, 壁に衝突したHはすべてそこで  $H_2$  となりプラズマ中に戻る)の結果を示す。(a)に  $H^-$  密度  $n_-$  と  $n_i$  の関係を, (b)に正イオン種組成比と  $n_e$  の関係を, そして(c)に中性粒子密度

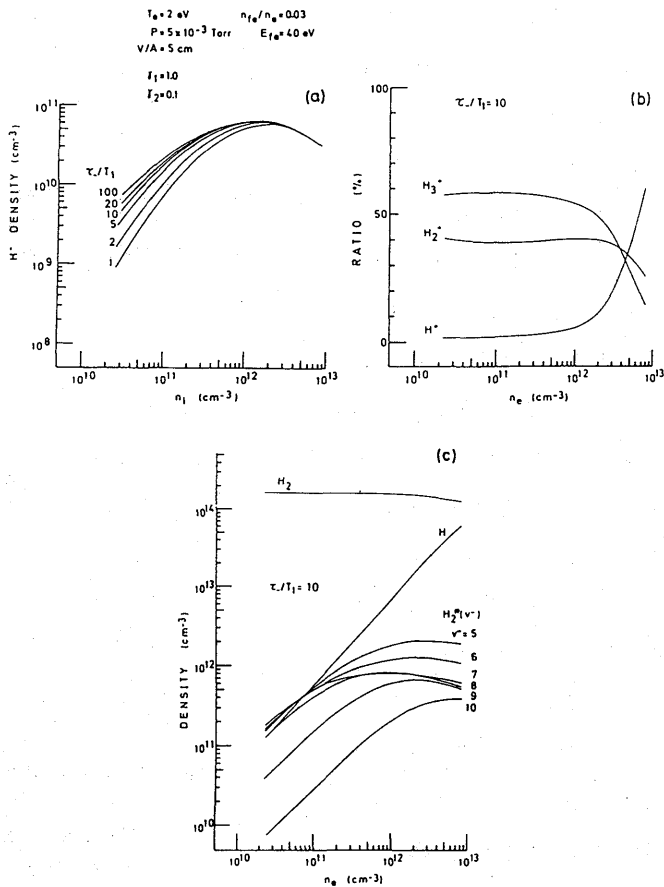


図7.  $H^-$  生成の電子密度依存性。

(H, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub><sup>\*</sup>( $\nu'$ ):  $\nu' = 5 \sim 10$ ) と  $n_e$  の関係を示す。この結果の一部は図2および3と重複するが、話の都合上再度示す。中性粒子の中で、H密度は  $n_e$  の上昇と共に直線的に増加するが、H<sub>2</sub><sup>\*</sup>( $\nu'$ )密度は  $n_e = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  付近で飽和する傾向にある。また正イオン種の中でH<sup>+</sup>は  $n_e = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  以上で急増している。このため、 $n_e$  が上昇すると、H並びにH<sup>+</sup>が増加することによりH<sup>-</sup>のH<sup>+</sup>との再結合消滅過程  $\text{H}^+ + \text{H}^- \rightarrow 2\text{H}$ が増加し、H<sup>-</sup>生成量は飽和する。従って3.1節でも述べたが、(a)に示すように  $n_e$  はH<sup>-</sup>生成に対して最適値を持つ。

Hの壁での再結合係数  $\gamma_1$  がイオン種組成に及ぼす影響を示す例として、図8に  $\gamma_1 = 0.01$  (即ち100回の衝突のうち1回或いは100個のHが壁に衝突したときそのうち1個という割合でHが壁での衝突で失われる)とした場合の図7に対応する結果を示す。 $\gamma_1$  が減少することによってH密度は  $n_e$  の低密度側で2桁程度も上昇し、H<sup>+</sup>も  $n_e = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  付近より急増しはじめる。また、H<sub>2</sub><sup>\*</sup>( $\nu'$ )密度も高密度側で50%程度減少している。これらの結果よりH<sup>-</sup>生成に対する  $n_e$  の最適値は図7に比較して低い値となり、同時に

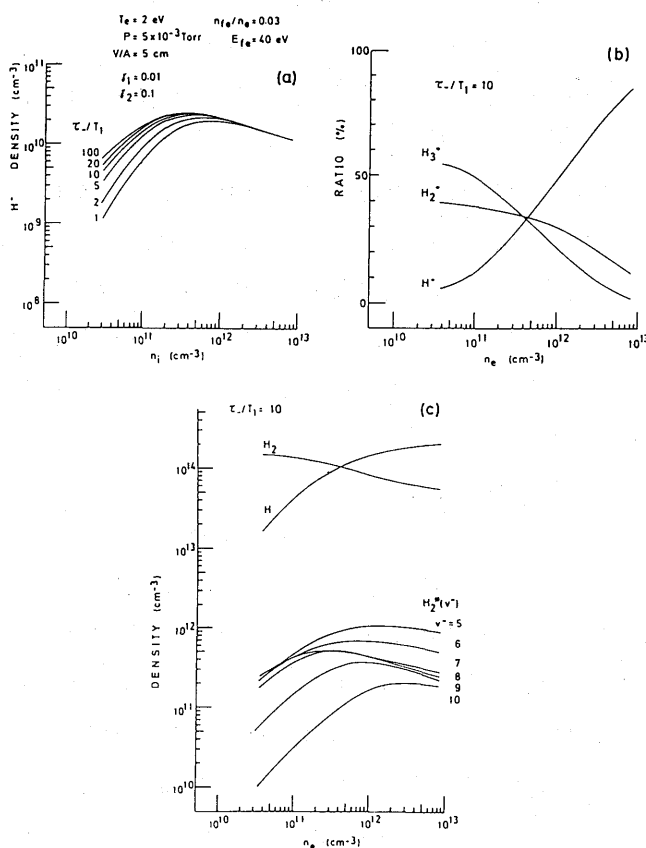


図8. H<sup>-</sup>生成の電子密度依存性。H<sup>-</sup>生成の  $\gamma_1$  依存性を明確にするため、 $\gamma_1 = 0.01$  とした。

$H^-$  密度も減少している。これは、 $\gamma_1$  が減少するとHの壁での損失が減少してH密度が上昇するため電子衝突による $H^+$ の生成が盛んになり $H^+$ が増加する。一方、 $H^+$ が増すと $H^-$ の $H^+$ との反応による消滅過程(20)が増加し、 $H^-$ 生成量は減少する。従って、 $\gamma_1$ が1に近い程 $H^-$ 生成量は増加する。

さて、ここでは $\gamma_1 = 1$ と0.01の時の結果を示しているが、 $\gamma_1$ を1~0.01の範囲で変化させることは、そう非現実的なことではない。実際に $\gamma_1$ の値は容器壁の材質によって大きく変化する。パイレックスや石英等に比較すれば、金属は1に近い。しかし、金属でもその種類により $\gamma_1$ の値は1~0.02の範囲に及ぶという実測例がある<sup>14)</sup>。更に、同じ金属であってもその表面状態(金属中のH密度或いはHの拡散等の特性を含む)によって実効的な $\gamma_1$ がこの程度の大きさで変化すると考えざるをえない実験結果を著者等も見出している<sup>12, 13)</sup>。

計算結果によれば<sup>20)</sup>、 $\gamma_1$ の影響は比較的高密度側( $n_e \gtrsim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ )で顕著である。従って、 $H^-$ 生成の高効率化を考える上で、 $\gamma_1 \simeq 1$ となるような材料を選択することは実用上大変重要である。他方、現在稼動中のNBI用の正イオン源では $H^+$ 100%のプラズマ生成が理想であり<sup>1)</sup>、この場合には $\gamma_1 \ll 1$ の材料が最適となる。また、 $e_f$ の存在は $H^-$ 生成にとって不可欠であるが、逆に $e_f$ の存在はプロトン比を低下させる<sup>13, 25)</sup>。従って、これらの点を考慮すると、水素放電プラズマを負イオン源として最適化する条件と正イオン源として最適化する条件とは互いに相反している。

ところで、本モデルでは考慮していない $H^-$ 消滅過程に $H^- + H \rightarrow H_2 + e$ があり、数eV以下のエネルギーで $10^{-9} \text{ cm}^3/\text{sec}$ 程度の反応率になるとの報告がある<sup>26)</sup>。これは高密度領域のプラズマ( $n_e \gtrsim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ )或いは $\gamma_1$ の値が小さな場合(例えば $\gamma_1 \simeq 0.01$ )等でHの密度が高くなってくると $H^-$ 生成量を決定する上で重要な過程となってくることが予想される。 $\gamma_1 = 1$ として計算した本論文に示す結果には、この過程の影響は殆ど現れないことを確かめているが、過程 $H^- + H_2 \rightarrow H + H_2 + e$ の影響との関連も深いので、詳細については同じく別報にて論じる。

#### (B) $H_2^*(v^*)$ と壁との相互作用の影響

図9(a)には $H^-$ 比率と $n_e$ の関係を、また(b)には $n_-$ と $n_i$ の関係を示す。パラメータは $H_2^*(v^*)$ の壁での衝突係数 $\gamma_2$ である。図10(a),(b)には、各々 $\gamma_2 = 1$ と0.01の時の $H_2^*(v^*)$ 密度と $n_e$ の関係を示す。

$\gamma_2$ の値を小さくすると、 $H_2^*(v^*)$ の実効的な閉じ込め時間(即ち $T_2/\gamma_2$ )が長くなるため、 $H_2^*(v^*)$ 密度は増加することが期待される。図9の結果を見れば明らかなように、 $\gamma_2$ が小さい程 $H^-$ 比率或いは $n_-$ は $n_e$ の全領域にわたって増加している。 $\gamma_2$ の値の $H^-$ 生成に及ぼす影響のもう1つの特徴は、図9並びに10からわかるように、 $\gamma_1$ の影響の現れ方とは対照的に比較的低密度領域でもその効果が現れることである。しかも $v^*$ の低い $H_2^*(v^*)$ に対してその影響が顕著となっている。これは、(i)  $n_e$ が高くなってくると $H_2^*(v^*) + e \rightarrow H^- + H$ 等の壁を介さないプラズマ空間内での反応が優勢となり壁の作用の影響が現れにくくなること、(ii) 過程 $H_2^*(v^*) + H_2 \rightarrow H_2(v^* - 1) + H_2$ の反応率は $v^*$ の高い程大きく、 $v^*$ の高い $H_2^*(v^*)$ 程プラズマ空間内の反応の影響が強くなる、等の理由によるものと考えている。

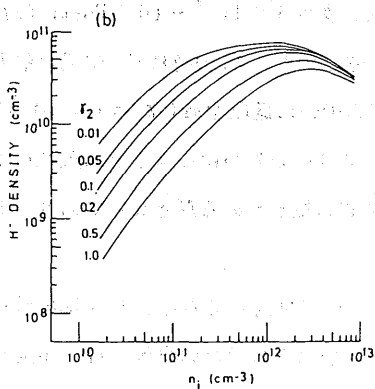
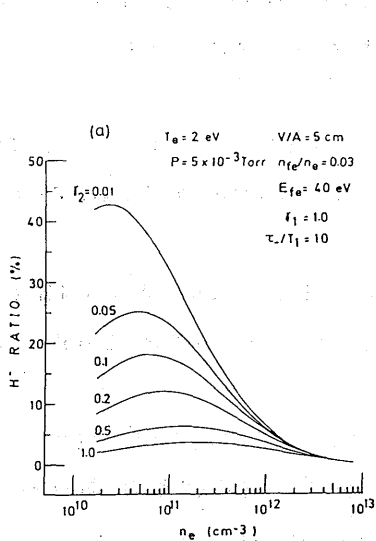


図9. H<sup>-</sup>生成に及ぼす  $\gamma_2$  の影響 ;  
 (a) H<sup>-</sup>比率の  $n_e$  依存性,  
 (b) H<sup>-</sup>密度と  $n_i$  の関係.

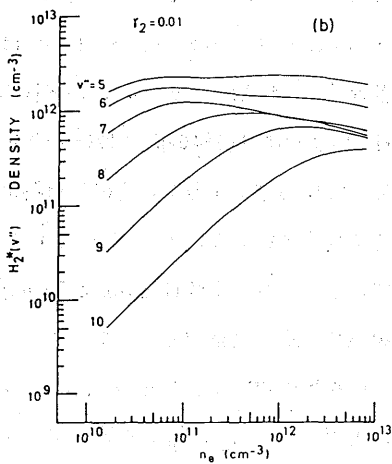
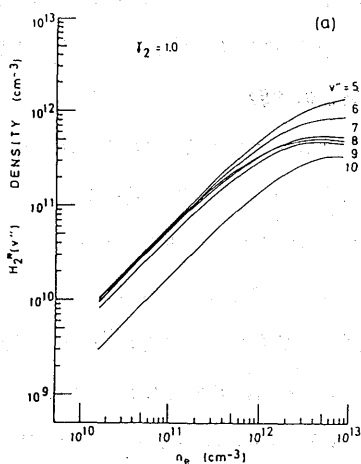


図10. 励起分子密度に及ぼす  $\gamma_2$  の影響。  
 図9に対応して, (a)  $\gamma_2 = 1$  と  
 (b)  $\gamma_2 = 0.01$  の2つの場合につ  
 いて励起分子密度の  $n_e$  依存性  
 を示す。

ところで,  $\gamma_2$  の具体的な値については  $v''=1$  といった低い励起分子を対象にした実測値の例はあり<sup>15)</sup>, 1より非常に小さな値となることが示されている。しかし, H<sup>-</sup>生成にとって必要となる  $H_2^*(v'')$  の準位は  $v''=5\sim 10$  と比較的高いものであり, これらの励起分子についての  $\gamma_2$  に対する実験的な裏付けはまだない。 $v''$  が比較的高いので,  $H_2^*(v'')$  と壁との1回毎の衝突による脱励起確率は大きいことが予想される。だが, 逆にただ1回の衝突で  $v''=5\sim 10$  の  $H_2^*(v'')$  がいきなり  $H_2$  に遷移することも考えにくい。Karo等<sup>19, 27)</sup>

は $H_2^*(v')$ と壁との衝突現象に関するシミュレーションを行い、 $r_2$ の値は $v'$ に依存すること、及び $r_2$ の値が1以下になることを示唆する結果を得ている。そこで、本計算では任意に $r_2$ の値を1~0.01の範囲で変化させ、 $H_2^*(v')$ に対する壁の作用が $H^-$ 生成に及ぼす影響について検討してみた。

### 3.3 実験との比較

今回得られた計算結果のうち、 $H^-$ 生成の $n_e$ 、 $T_e$ 、 $p$ のいわゆるプラズマパラメータに対する依存性の部分については3.1節で述べた。従って、ここでは最近になって行われた $H^-$ 生成に及ぼす壁の作用に関する実験<sup>9-11, 28)</sup>についてコメントしておく。

Graham<sup>9)</sup>は壁の材料としてパイレックス, Stainless Steel (S.S.), Cu, Moの4種類を選び比較的水素ガス圧の高い領域( $p \sim 1 \times 10^{-2}$  Torr)で実験を行った。プローブ法により $H^-$ を検出しているが、材料による $H^-$ 生成の差異は顕著でなかったとしている。

Leung等<sup>10)</sup>はAl, Cu, S.S., Mo, Ta, W, Auの各材料について $H^-$ 生成の変化を調べている。水素ガス圧は $p \sim 1.5 \times 10^{-3}$  Torrと比較的低圧領域であり、 $H^-$ の検出には磁場偏向型の分析器を用いている。この時、 $H^-$ 電流はAlの時最大でS.S.の時には最小となる結果が得られている。

一方、著者等<sup>11, 28)</sup>はAl, Cu, S.S.の3種の材料を用いて、 $p = 5 \times 10^{-4} \sim 10^{-2}$  Torrにわたって実験を行った。 $H^-$ の検出には磁場偏向型の分析器を使用した。全体として、Alの時に $H^-$ 生成が最大となりS.S.の時最小となる結果を得た。更に、材料による $H^-$ 生成の違いは低圧領域( $p \approx 1 \times 10^{-3}$  Torr)では顕著に、逆に高圧領域( $5 \times 10^{-3} < p \lesssim 1 \times 10^{-2}$  Torr)ではその差がはっきりとは現れなくなるという結果も得ている。これは丁度GrahamとLeung等の結果の中間領域をうめる形となっており、定性的には各々の圧力領域で一致した結果となっている。

次にこれら壁材料の違いにより $H^-$ 生成に差が生じる原因について検討してみる。3.1節の計算結果から判断すると、実測された $n_e$ 、 $T_e$ 、 $p$ 等のプラズマパラメータの値はそれぞれの実験で $H^-$ 生成が最大となっている金属の場合に必ずしも最適化された値にはなっていない。例えばLeung等<sup>10)</sup>はCuの方がS.S.より $H^-$ が多くなる理由を、一次電子による壁からの二次電子放出量の違いが $T_e$ の値に影響するためとしている。彼らの実験条件から判断すると(例えば $p \sim 1.5 \times 10^{-3}$  Torr,  $n_e \sim 4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ でS.S.の時 $T_e = 0.55$  eVで、Cuの時 $T_e = 0.45$  eV)、S.S.の場合に $T_e$ が高いことを $H^-$ 生成量低下の原因とするには無理がある。著者等<sup>11)</sup>の場合でもプラズマパラメータの組合せはS.S.の方がAlより適しているにもかかわらず(例えば $p \sim 2 \times 10^{-3}$  Torr,  $T_e \sim 1.8$  eVで、S.S.の時 $n_e = 4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ で、Alの時 $n_e = 2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ )、 $H^-$ 生成はAlの時最大となる。

従って、3.2節の結果を考慮すると、 $H^-$ 生成に差が生じたことは $H$ および $H_2^*(v')$ 等の中性粒子と壁との相互作用の材質による違いという観点も含めて結果を考察する必要があると思う。また、材質による $H^-$ 生成の違いが、低圧側で顕著であり、高圧側になるほど現れにくくなるという性質は、壁の作用の観点から<sup>30)</sup>の検討結果とは矛盾しない。なお、これら壁の作用についての詳細は、実験報告の論文にて述べる予定である。



#### 4. おわりに

水素プラズマ中のイオン種組成とプラズマパラメータとの関係をレート方程式を用いて検討した。特に、H<sup>-</sup>生成に着目した場合に、本研究によって得られた結果を要約すると以下ようになる。

- (1) H<sup>-</sup>生成機構としては、 $H_2 + e_f \rightarrow H_2^*(v'') + e_f$ ;  $H_2^*(v'') + e \rightarrow H^- + H$  の2段階過程が主要であり、高速電子 $e_f$ (30 eV以上)と $v''=5\sim 10$ の比較的高い準位の励起分子 $H_2^*(v'')$ がH<sup>-</sup>生成に必要であることを再確認した。
- (2) 本モデルによる計算でH<sup>-</sup>比率は15~35%程度になり、Bacal等による実側値(10~50%)<sup>7)</sup>と比較しうる数値が得られるようになった。
- (3) H<sup>-</sup>生成に対するプラズマパラメータ依存性には次のような傾向がある。 $n_e$ はH<sup>-</sup>生成に対してある最適値(約 $10^{12} \text{ cm}^{-3}$ )をもつ。 $p$ はある程度までは高い程、H<sup>-</sup>生成量は増える。しかし、 $p$ がより高くなると、H<sup>-</sup>の増え方は鈍くなり飽和する傾向にある。特に $H^- + H_2 \rightarrow H + H_2 + e$ の過程を考慮すると、H<sup>-</sup>生成にとって $p$ にはある最適値が存在するようになる。 $T_e$ の高い程、H<sup>-</sup>生成量は低下する。なお、これら計算結果の傾向は、Bacal等<sup>7)</sup>およびOkumura等<sup>8)</sup>の実験結果とよく一致している。
- (4) 正・負イオン生成に対して、Hおよび $H_2^*(v'')$ と壁との相互作用は大きく影響する。 $r_1$ を小さくするとHが増し、それに伴ってH<sup>+</sup>も増える。従って、プロトン比を高くするためには $r_1$ を小さくする( $r_1 \ll 1$ )。一方、H<sup>+</sup>が増大すると $H^+ + H^- \rightarrow 2H$ の反応が盛んとなり、H<sup>-</sup>は減少する。そこで、H<sup>-</sup>生成効率を良くするためには、 $r_1$ を大きくする必要がある( $r_1 \approx 1$ )。また、 $r_2$ を小さくすると $H_2^*(v'')$ が増し、同時にH<sup>-</sup>も増大する。H<sup>-</sup>生成を高めるには、 $r_2$ の小さな材質がよい( $r_2 \ll 1$ )。
- (5) Hに対する壁の作用( $r_1$ の効果)並びに高速電子の有無によるイオン種組成の変化を考慮すると、水素放電プラズマをNBI用の正イオン源として最適化する条件と負イオン源として最適化する条件は互いに相反している。

今後は、このモデルを更に改良して、H<sup>-</sup>生成の高効率化の検討、 $H_2^*(v'')$ 生成領域とH<sup>-</sup>生成領域とを分離した形のタンデム方式<sup>27, 29)</sup>やシートプラズマ方式<sup>31)</sup>の有効性の検討等を行う予定である。

#### 謝 辞

常日頃御激励いただく京都大学の板谷良平教授に深謝の意を表わす。また、本研究に御協力いただいた磯兼誠司(現中国電力)、上田 貢(現三菱電機)、白竹 茂(大学院生)の各氏に感謝する。本研究の数値計算は山口大学情報処理センターのACOS-850により行った。なお、本研究の一部は文部省科学研究費の援助を受け、名古屋大学プラズマ研究所との共同研究の一環としても行われた。

## 参 考 文 献

- 1) 福政 修, 佐伯節夫: 核融合研究 55 (1986) 189.
- 2) E. Nicolopoulou, M. Bacal and H. J. Doucet: J. Phys. (Paris) 38 (1977) 1399.
- 3) M. Bacal and G. W. Hamilton: Phys. Rev. Lett. 42 (1979) 1538.
- 4) 神保光一: 核融合研究 55 (1986) 311.
- 5) O. Kaneko: Proc. 10th Symp. on ISIA T'86 (1986, Tokyo), p.243.
- 6) J. R. Hiskes and A. M. Karo: Proc. Int'l. Ion Engineering Congress (1983, Kyoto), Vol. 1, p.77.
- 7) M. Bacal, A. M. Bruneteau and M. Nachman: J. Appl. Phys. 55 (1984) 15.
- 8) Y. Okumura, Y. Ohara, H. Horiike and T. Shibata: JAERI-M84-098 (1984).
- 9) W. G. Graham: J. Phys. D: Appl. Phys. 16 (1983) 1907.
- 10) K. N. Leung, K. W. Ehlers and R. V. Pyle: Appl. Phys. Lett. 47 (1985) 227.
- 11) O. Fukumasa, S. Saeki and S. Isokane: Conf. Record of 1986 IEEE Int'l. Conf. on Plasma Science (May 19-21, 1986, Canada), 1Q3;  
O. Fukumasa and S. Saeki: Proc. 10th Symp. on ISIA T'86 (1986, Tokyo), p.187.
- 12) O. Fukumasa, R. Itatani, S. Saeki, K. Osaki and S. Sakiyama: Phys. Lett. 100 A (1984) 186.
- 13) O. Fukumasa, R. Itatani and S. Saeki: J. Phys. D: Appl. Phys. 18 (1985) 2433.
- 14) B. J. Wood and H. Wise: Proc. 2nd Int'l. Symp. on Rarefied Gas Dynamics (Academic Press, 1961), p.51.
- 15) G. Black, H. Wise, S. Schechter and R. L. Sharpless: J. Chem. Phys. 60 (1974) 3526.
- 16) J. M. Wadehra: Appl. Phys. Lett. 35 (1979) 917.
- 17) J. R. Hiskes: J. Appl. Phys. 51 (1980) 4592.
- 18) M. Capitelli, M. Dilonardo and E. Molinari: Chem. Phys. 20 (1977) 417.
- 19) A. M. Karo, J. R. Hiskes and R. J. Hardy: J. Vac. Sci. Technol. A3 (1985) 1222.
- 20) O. Fukumasa and S. Saeki: Conf. Record of 1986 IEEE Int'l. Conf. on Plasma Science (May 19-21, 1986, Canada), 1Q2; Proc. 10th Symp. on ISIA T'86 (1986, Tokyo), p.181.
- 21) M. Bacal, A. M. Bruneteau, W. G. Graham, G. W. Hamilton and M. Nachman: J. Appl. Phys. 52 (1981) 1247.
- 22) J. M. Wadehra: Phys. Rev. A29 (1984) 106.
- 23) K. N. Leung, K. W. Ehlers and R. V. Pyle: Rev. Sci. Instrum. 56 (1985) 364.
- 24) O. Fukumasa and S. Saeki: Proc. 9th Symp. on ISIA T'85 (1985, Tokyo), p.111.
- 25) K. W. Ehlers and K. N. Leung: Rev. Sci. Instrum. 52 (1981) 1452.
- 26) K. Prelec and Th. Sluyters: Rev. Sci. Instrum. 44 (1973) 1451.
- 27) J. R. Hiskes and A. M. Karo: J. Appl. Phys. 56 (1984) 1927.
- 28) 福政 修, 佐伯節夫, 磯兼誠司: プラズマ・核融合学会 第2回秋季講演会予稿集, 7a A6 (1985年10月).
- 29) J. R. Hiskes, A. M. Karo and P. A. Willmann: J. Appl. Phys. 58 (1985) 1759.
- 30) O. Fukumasa and S. Saeki: accepted for publication in J. Phys. D: Appl. Phys..
- 31) J. Uramoto: Research Report of Institute of Plasma Physics, Nagoya University, IPPJ-645 (1983) and IPPJ-666 (1984).
- 32) J. R. Hiskes, A. M. Karo and P. A. Willmann: J. Vac. Sci. Technol. A3 (1985) 1229.
- 33) M. Bacal: Physica Scripta T2 (1982) 467.
- 34) O. Fukumasa and S. Saeki: in preparation.