JFT-2 におけるグロー放電洗浄効果と TDC 効果との比較*

横倉 賢治**・松崎 誼**・谷 孝志**・菊池 一夫**
 梶沢 稔**・長谷川浩一**・岡野 文範**・樫村 隆則**
 鈴木 紀男**・木島 滋**・大塚 英男**

(昭和57年9月8日 受理)

Comparison of Glow Discharge Cleaning with Taylor-type Discharge Cleaning on JFT-2

Kenji YOKOKURA, Yoshimi MATSUZAKI, Takashi TANI,
 Kazuo KIKUCHI, Minoru KAZAWA, Kohichi HASEGAWA,
 Fuminori OKANO, Takanori KASHIMURA, Norio SUZUKI,
 Shigeru KONOSHIMA and Hideo OHTUKA

(Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai, Naka-gun, Ibaraki)

(Received September 8, 1982)

Method of glow discharge cleaning (GDC) was applied to JFT-2 tokamak and the cleaning effect of GDC was compared with that of Taylor-type discharge cleaning (TDC) on the same machine. Results show clearly their individual characteristics to remove light impurities.

Their abilities of surface cleaning were compared each other by observing cleanliness of sample surfaces with a AES and by measuring decay times of produced gas pressures during discharge cleanings with a mass-analyser. It was shown that TDC method is better by several times than GDC method from a mass-analyser measurement. Moreover discharge cleaning time necessary to reduce light impurities in the normal plasma to a certain level was compared by monitoring time evolution of radiation loss power with a bolometer, and the time by TDC was only one fifth of that by GDC. The advantage of TDC may come from the excellently high hydrogen flux which interacts with the limiter and the wall.

1. はじめに

プラズマからの主要なエネルギー損失のひとつとして、真空壁面及びリミターからの不純物混入が要因となる輻射損失がある。不純物の輻射損失は、プラズマ性能に大きく影響するもので、トカマク型核融合装置では、この損失を低減するため多くの研究がなされており、放電洗浄もそのひとつである。原研における JFT-2 トカ

マク型核融合装置では、R. J. Taylor が提案した TDC¹⁾ (Taylor Discharge Cleaning) とグロー放電を利用した GDC (Glow Discharge Cleaning) が用いられている。TDC の洗浄原理は、低電子温度 (≤ 10 eV) の連続的な放電を行い、解離した動作ガス及び低電離プラズマと壁面に吸着した軽元素不純物との化学反応により、生成脱離する気体分子を排除するものである。GDC は、古くから放電洗浄として利用され、多くのトカマク装置においても試験されている²⁻⁴⁾が、真空容器内に陽極を内蔵し、真空容器を陰極として使用するもので真空容器付近

* 昭和56年11月5日 第22回真空に関する連合講演会において講演

** 日本原子力研究所 (茨城県那珂郡東海村白方白根)

は、強い空間電荷電界により加速された高速イオンと中性粒子、電子が存在する。したがって壁面の洗浄は、加速されたイオンによるスパッタリングを伴うことになると共に、適当なガス生成エネルギーが得られない、またエネルギーが高すぎる場合には生成したガスが解離してしまう現象等が懸念される。しかし GDC の利点は、操作の容易性が最も大きなもので、消費電力の経済性や放電洗浄中も人間が装置に近づく等、将来とも有効な手段になると考えられる。

本報告では、GDC 方式をトカマクの放電洗浄としてより効果的な手段とするために、動作ガスの選択と一般的な直流によるグロー放電方式の改良を実施した結果について述べる。また、TDC と GDC の洗浄能力を比較検討し、それぞれの役割を明確に評価する。

2. 真空容器の構成と排気装置

JFT-2 の主要パラメータを **Table 1** に示す。JFT-2 の真空容器⁵⁾は、大半径900 mm、小半径320 mm のトーラス型の容器で、トロイダルコイルの内側に設置されている。真空容器の構造は、14個のリングポートセクションと13個のベローズ (SUS-304 L, $t=1.2$ mm) よりなる金属溶接構造である。真空容器内部には、プラズマ径を規定する3種類のリミターが設置されている。リミター材は、

- (1) SUS-304 L ステンレス鋼
- (2) チタンカーバイトをコーティングしたモリブデン鋼
- (3) 黒鉛

が用いられている。

真空排気装置の概要図を **Fig. 1** に示す。真空容器の

排気は、直結型冷凍機式 18°K クライオ・トラップと2台のターボ分子ポンプより行われる。2台のターボ分子ポンプを使用した場合の有効排気速度は約 1.2×10^3 l/s (N_2) である。**Fig. 2** に、質量数に対する有効排気速度の依存性を示す。定常状態における真空容器内の圧力は、 $1 \sim 2 \times 10^{-8}$ Torr であり、この圧力における主なる残留ガス成分は水素(62%)、水蒸気(18%)、一酸化炭素、窒素(19%)、その他 (CH_4 , CO_2 , $C_nH_m \leq 1\%$) である。

3. GDC

3.1 装置

GDC に使用した装置の構成は次の通りである。陽極は、**Fig. 1** に示すトーラス位置に3箇所設置し、約 30 cm² の球状のチタニウムと $\phi=30$ mm のステンレス筒により構成する。いずれもトーラス中心までの挿入ができ、高温プラズマ生成時にはプラズマ壁外へ引出され

Table 1 Major parameters of JFT-2 tokamak.

○ MAJOR RADIUS	0.9 m
○ MINOR RADIUS	0.32 m
○ TOROIDAL MAGNETIC FIELD	1.6 T
○ PLASMA CURRENT	150 kA
○ VOLUME OF THE VACUUM VESSEL	~3 m ³
○ SURFACE AREA OF THE PLASMA FIRST WALL	~25 m ²
○ SURFACE AREA OF THE VACUUM VESSEL	~50 m ²
○ PUMPING SPEED	1.2 m ³ /s

Fig. 1 Outline of evacuating system.

る。電源は、同軸型高周波放電装置 (13.56 MHz, 5 kW_{max}) と直流電源装置 (0 ~ 1000 V, 10 A) を併用する。同軸型高周波放電装置は、ターゲットにミラー磁場を形成し、真空容器内に予備放電を起こすもので、グロー放電の予備電離の役割を果たすものである。Fig. 3 に GDC 装置の概念図を示す。グロー放電は、同軸型高周波放電の利用により水素圧力 $\geq 5 \times 10^{-4}$ Torr で持続する。一般の直流グロー放電より低圧力で放電が維持できるため、排気ポンプであるターボ分子ポンプの性能を最大限発揮することができる。また、背圧ポンプの劣化等、昼夜連続放電の重なる GDC の場合特に、機器の安全に貢献できると考えられる。

Fig. 2 Mass dependence of effective pumping speed estimated from the pumping time constants for H₂, D₂, He, Ne, N₂, Ar.

3.2 陽極の配置

GDC は、1000 V, 10 A で出力インピーダンス 50 Ω の電源を使用している。グロープラズマの抵抗変化により電圧、電流が変化する。Fig. 4 に $V-I$ 特性を示す。トラス内の 1 箇所 に 30 cm² の球状の陽極を配置した場合の得られた電流量は最大 2.8 A であった。また、プラズマ壁周辺の電子密度は、陽極から 180° 反対側付近になると電子密度は減少し、一様性に欠ける点がある。実験においては、陽極をトラス方向に 3 箇所均一に配置した場合の得られた電流は最大 4 A に上昇し、電子密度分布も改善された。すなわち陽極の配置は、トラス方向にできる限り均一にすることが望ましく、壁面一様に粒子束が当たることが重要であると考えられる。

3.3 反応ガスの選択

GDC を活用する場合の反応ガスの選択は、放電洗浄効果に大きく影響すると考えられる。水素グロー放電の場合、プラズマと陰極 (真空容器壁) 間に発生する電位差が大きいため、放電洗浄に適当でないエネルギー粒子が存在する。したがって、適当なガス生成エネルギーが得られない、あるいは、生成したガスが解離する可能性が生じることが懸念される。

はじめに実施した実験は、水素による GDC 効果を確認するため、アルゴンによる GDC との洗浄効果比較である。洗浄能力は、静電プローブによるプラズマ周辺電子密度、電子温度を同一放電条件のモニターとして、陽極酸化銅サンプルの酸化膜の除去能力*、マスフィルターによる生成ガス量の比較**により評価した。実験結果を

*, ** 測定法については、5.1 サンプルによる清浄度比較、5.2 生成不純物ガスによる比較を参照のこと。

Fig. 3 Schematic view of GDC apparatus.

Table 2 Comparison of GDC in H₂ with that in Ar.

	n_e (cm ⁻³)	T_e (eV)	ION FLUX (μ A/cm ²)	REMOVAL OF OXYGEN SURFACE ON Cu SAMPLE (a.u.)	PRODUCTION RATE H ₂ O CH ₄ (molecules/min)	CO
GDC (H ₂)	1~2×10 ⁸	5	~12	5	4×19 ¹⁶ 3×10 ¹⁷	2×10 ¹⁷
GDC (Ar)	1~2×10 ⁸	5	~12	1	1.5×10 ¹⁶ 1×10 ¹⁷	2×10 ¹⁷

Fig. 4 V - I characteristics

- : with RF pre-ionization, $P_{H_2} \sim 1 \times 10^{-3}$ Torr, 1 anode.
- : without RF pre-ionization, $P_{H_2} \sim 3 \times 10^{-2}$ torr, 1 anode.
- ×: with RF pre-ionization, $P_{H_2} \sim 1 \times 10^{-3}$ Torr, 3 anode.

Table 2 に示す。水素及びアルゴン GDC 共に放電条件は、電子密度 $1 \sim 2 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 、電子温度 $\sim 5 \text{ eV}$ 、イオン粒子束濃度は放電電流値をプラズマ壁表面積で割った値から推定して $\phi \sim 12 \mu\text{A/cm}^2$ であった。各放電洗浄における効果として特徴的な内容を以下に示す。

(1) アルゴンを反応ガスとした場合の金属酸化膜の減

少は、水素の場合と相対比較して 1/5 である。

(2) 不純物ガスの生成では、一酸化炭素が同等量生成されるが、水蒸気及びメタンは水素放電の約 1/3 である。

すなわち、GDC を活用するためには水素ガスを利用した方が効率的である。

次に実施した実験は、主反応ガスを水素にし、添加ガスとしてアルゴンを混入した場合の洗浄効果を調べた。

Fig. 5 の結果は、水素とアルゴンの混合比に対する生成ガス (H₂O, CH₄, CO) の依存性を示したものである。この実験の特徴的結果として、大気開放直後の状態とある程度洗浄にされた真空壁状態 (TDC 5 ~ 7 時間以上) では、混合ガス比に対する生成ガスの放出傾向が異なる結果が得られた。大気開放直後の場合、主気体水素 100% に比較し、数% のアルゴンを混入することによりメタン 3 ~ 4 倍、一酸化炭素 2 ~ 3 倍の上昇が認められる。アルゴンの混入割合が $\sim 10\%$ を起えると逆に減少傾向になる。一方、ある程度洗浄にされた場合には、水素 100% による放電で生成ガスが最大となった。水蒸気の場合、メタン、一酸化炭素の生成と異なり、真空壁の汚染度に因らず、水素 100% の場合に最大生成量が得られた。以上より、比較的汚染度の高い真空容器状態では、アルゴン混入により炭素の除去効果を高めることができる事が判断できる。**Fig. 6** には、放電電流に対する生成ガスであるメタンの依存性を示す。壁が洗浄でない場合は電流に比例して生成量が増大するが、壁が洗浄になるに従い電流に依存しない結果が得られている。

以後の本実験における GDC の運転条件を **Table 3** に示す。

4. TDC

JFT-2 における TDC 電源は、10 kV、200 μ F のコンデンサーとサイリスタスイッチにより構成され、最小繰り返し時間 0.5 sec に一度の割合でプラズマを生成する。プラズマは、トロイダル磁場 2 KG、水素ガス圧力 $\sim 1 \times 10^{-4}$ Torr で容易に生成される。代表的生成プラズマは、プラズマ電流 $\sim 5 \text{ kA}$ 、プラズマ周電圧 10 ~

Fig. 5 Dependence of produced gasses (CH_4 , H_2O , CO) on the mixing rate of Ar in H_2 .

Fig. 6 Produced CH_4 dependence on discharge current.

15 V, プラズマ壁周辺の電子温度 $4 \sim 5 \text{ eV}$, プラズマ周辺の電子密度 $2 \sim 5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ である。

本実験における TDC 運転条件を Table 4 に示す。

5. 各放電洗浄の性能比較

5.1 サンプルによる清浄度比較

放電洗浄効果は、真空壁、リミター等に入射する有効水素粒子束、真空壁温度、生成脱離したガス分子の再分離が問われる電子温度の設定等に依存すると考えられ、真空壁の金属酸化物の状態と種類も、洗浄効果に影響を及ぼすと考えられる。

はじめに、評価の一手段として、サンプルによる表面計測を実施した結果を述べる。金属酸化膜の除去能力は、放電洗浄効果を評価する上で重要な指標となり、この金属酸化膜の除去能力を的確に評価するには、

- (1) サンプル母材に含まれる酸素濃度
- (2) 元素分析時のガス吸着
- (3) プラズマ壁から測定位置への移動中のガス吸着等が重要である。実験において使用した表面計測機器は、オージェ電子分光器 (AES) が主であり、測定室

Table 3 Typical discharge conditions in GDC.

PRESSURE N_2 equiv. (Torr)	GAS Ar/H_2 (%)	ANODE AREA (cm^2)	PRE-IONIZATION RF-13.56 MHz (W)	I_d (A)	V_d (V)	FLOTING POTENTIAL (V)
28×10^{-4}	5/95	30-250 $\times$ 3	100-200	~ 3	~ 370	270

Table 4 Typical discharge conditions in TDC.

I_d (kA)	V_t (V)	B_t (kG)	GAS H_2 (%)	PRESSURE N_2 equiv (Torr)	REPETITION RATE α_t (ms)
~5	10-15	2	100	$\sim 8 \times 10^{-5}$	6/1000

は、プラズマ壁とゲートバルブを介して超高真空に保持されている。放電洗浄により清浄化されたサンプルは、エレベーター機構により測定室へ移動され測定が実施される。実験で使ったサンプルは、無酸素銅を母材とし、表面に陽極酸化膜を形成したものである。銅の酸化物は金属との結合力が弱く、原子状水素の存在により容易に還元され、また、活性の強い金属サンプルを使用した場合と異なり、元素分析時に生じる不当なガス吸着等の測定誤差が生じる確率が少ないためである。JFT-2の真空壁は、ステンレス鋼で構成され、プラズマの近接する壁はチタンコーティング処理が施されている。この場合、銅のような結合力の弱い酸化膜とは異なり、真空壁表面に接する水素濃度と水蒸気濃度の比により、還元方向に進む時と酸化方向に進む時がある。あるいは、還元されることは少ないと言われている。したがって、実際のプラズマ壁と銅サンプルによる洗浄性に違いが生じる訳であるが、相対的な洗浄効果は評価できると考えられる。

陽極酸化銅サンプルをプラズマ壁面位置に固定し、GDC 前後のサンプル表面の清浄度を観測した。AES による測定結果を **Fig. 7** に示す。サンプル表面の酸素原子

割合は、GDC 処理前 9 % に比較し、60 秒処理後は 3 % に減少していることが認められ、また、炭素原子割合は、47 % から 10 % に減少したことが認められた。同サンプルを使った TDC との比較では、TDC が GDC に比較して、放電洗浄処理時間当たり 2 ~ 3 倍効率が良い結果が得られた。

金属酸化物中の酸素、炭素は、解離した水素粒子束の存在により、水素還元ガス分子として生成、排除されることは認識されている¹⁾ が、水素中性粒子束 (H^0) と水素イオン粒子束 (H^+) の洗浄性の貢献度は、まだ明らかでないのが現状である。**Fig. 8** に示した簡単な実験装置を使用して、実質的な洗浄作用の貢献性を測定した。原理は、陽極酸化銅サンプルのひとつにバイアスを印加する。また、もうひとつの陽極酸化銅サンプルは、真空壁同様にアース電位とするもので、前者は中性粒子束、後者はイオン粒子束と中性粒子束の寄与を受けると予想できる。両サンプルを同一プラズマ壁位置に配置して、金属酸化膜の除去割合を比較した結果、両サンプル共、酸化物、炭化物が除去されていることが認められた。実験に使用したサンプル写真を **Fig. 9** に示すが、サンプル A は、アース電位としたもの、サンプル B は、直流 310 V の

Fig. 7 Change of sample surface (oxidized Cu) with and without GDC of 60 sec. Cu sample was set on the same position of the first wall.

Fig. 8 Schematic diagram of experiment to observe the individual effects from H° , H^+ .

パイアス電圧を印加したもの、サンプルCは、放電洗浄を行う前の陽極酸化膜を形成した銅サンプルである。測定は種々の酸化度の違うサンプルで数度 GDC 処理を行ったが、AES等による測定比較の結果、A、B両サンプル共に洗浄能力差として大きな相違がないことが認められた。この結果より、中性粒子束による洗浄作用の貢献性が主であると判断できる。

5.2 生成不純物ガスによる比較

プラズマ中の軽元素不純物は、主に吸着ガスに起因し、壁からの生成脱離は、水素との化学反応や粒子衝撃脱離によって生じる。放電洗浄効果の観察法には、前に述べたサンプルによる表面計測の他に、水素による化学反応生成物である水蒸気あるいはメタン等をマスフィルター(QMA)により観察し、酸化物あるいは炭化物の除去能力を知る手段がある。QMAによる測定では、分析器内フィラメントでの水蒸気の生産があり、放電洗浄による生成ガスの生産が、分析器自体の生産を上回らないと検出できない欠点が生じることを理解しておかなければならない。実験に使用したQMAの各質量数に対する感度係数及び排気ポンプの有効排気速度をTable 5に示す。実験時の排気ポンプは主にAシステムを使用した。

水素ガス放電洗浄(TDC, GDC)により生成される残留不純物ガスの代表的質量スペクトルをFig. 10の(I)と(II)に示す。測定条件は、差動排気の絞り弁を ~ 0.5 l/s (N_2)に固定し、大気開放後約4.5時間GDC処理した場合のスペクトルである。Fig. 10-(I)がGDC処理中のものであり、Fig. 10-(II)は、GDCから15分間でTDCに移行した後のスペクトルである。GDC, TDC両放電洗浄とも、水素による化学反応生成ガスである水蒸気、メタン、炭化水素が主に生産されていることが認められる。GDCに関しては、一酸化炭素の生成が水蒸気の生産を上回っていることが確認できる。また、TDCに関しては、特に水蒸気の生成が大きいことが特徴的であ

Fig. 9 Sample A: earth potential (H° , H^+).
Sample B: DC 310 V biased (H°).
Sample C: before discharge cleaning.

Table 5 Sensitivity coefficient of QMA and effective pumping speed for gases (H_2 , CH_4 , H_2O , Ne, N_2 , Ar, CO_2).

GAS	K (A/Torr $\cdot \eta$)	S_p ($l \cdot sec^{-1}$)	
		A-System	B-System
H_2	1.1×10^{-3}	1.3×10^3	8.2×10^2
CH_4	3.5×10^{-4}	7.0×10^2	9.0×10^2
H_2O	3.3×10^{-4}	6.6×10^2	9.2×10^2
Ne	3.0×10^{-4}	6.2×10^2	9.1×10^2
N_2	2.5×10^{-4}	5.8×10^2	9.1×10^2
Ar	2.0×10^{-4}	3.8×10^2	9.2×10^2
CO_2	1.9×10^{-4}	3.1×10^2	9.3×10^2

る。

放電洗浄時間に対する生成ガス圧力の減少率は、放電条件、真空ポンプの排気速度が一定の場合、壁に吸着していた不純物原子あるいは、ガス分子が除去され減少する割合に依存する。GDCとTDCについて比較した結果をFig. 11の(I)と(II)に示す。Fig. 11の結果の場合、放電洗浄時間： t に対する生成ガス圧力： P の減少率： a は、

$$P(t) \propto t^{-a}$$

により表わすことができる。生成ガス圧力の減少率は、大気開放条件により多少異なるが、明らかにGDCに比較しTDCが大きい。放電洗浄時間に対して、水蒸気 ~ 2 倍、メタン ~ 3 倍の減少率であることが認められる。

5.3 有効水素粒子束からの比較

プラズマ壁表面の受ける水素イオン粒子束濃度は、TDCの場合約 $\phi \sim 100$ mA/cm²、放電周期を考慮した時間平均値は $\phi \sim 600$ μ A/cm²である。また、GDCの場合

Fig. 10 Typical mass spectrum of residual gases for GDC (I) and TDC (II).

Fig. 11 Reduction rate coefficients of H₂O and CH₄ for GDC (I) and TDC (II).

は、グロー放電電流をプラズマ壁全面積で割った値として約 $\phi \sim 12 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ の水素イオン粒子束が壁面に到達していると考えられる。

各放電洗浄 (GDC, TDC) 時に測定した、プラズマ半径に対する電子温度 (T_e) と電子密度 (n_e) の分布を Fig. 12 に示す。電子温度は、各放電洗浄共 $2 \sim 5 \text{ eV}$ であり大きな相違がないのに比較し電子密度は、GDC: $1 \sim 2 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$, TDC: $0.5 \sim 2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ であり $10^3 \sim 10^4$ 倍の差が生じている。また、GDCにおいては、プラズマ壁外であるポート内においても電子温度、電子密度が測定された。特に電極を挿入したポートにおいては、より高い電子密度が確認できた。この現象は、TDCとは大きな相違であり、ペローズ等や高温ピーキングの不可能なプラズマ計測用真空内部品等を数多く持つトカマク装置では、真空容器周辺設備の洗浄効果が得られる可能性があり、大きな長所である。しかし GDC の場合、真空壁 (陰極) における加速電圧の影響が、化学反応を主体とし、生成ガスを排除することを目的とした放電洗浄方式に最適であるかが問題として残る。グロー放電の場合、陰極が洗浄を行なおうとしている真空壁であり、壁表面に大部分の電圧が印加する ($\sim 270 \text{ V}$)。したがって真空壁に極近い位置では、適当な化学反応に有利な生成エネルギーが得られない状態、あるいは、生成されたガスの再分離が問題になると考えられる。TDC の場合は、シースにおけるポテンシャルエネルギーが数

$\text{eV} \sim 10 \text{ eV}$ であり、GDC に比較して化学反応、生成ガスの輸送に都合が良いことが理解できる。Table 6 に電子密度、電子温度、水素イオン粒子束、放電洗浄繰り返し周期、真空壁温度の比較結果を示す。化学反応を利用した放電洗浄として総合的に有利である TDC に比較し GDC は、同様の洗浄効果をあげるためには連続 (定常的) に放電が持続する利点を生かし、時間で反応量をかせぐ結果になると考えられる。

5.4 放電洗浄後の高温プラズマ生成からの比較

放電洗浄前の真空条件及び放電洗浄時間は、GDC の場合、約 20 時間大気開放後、約 45 時間放電洗浄処理を実施した代表例である。また、TDC の場合、約 6 時間大気開放後、約 7.5 時間放電洗浄処理を実施した代表例である。Fig. 13 は、各放電洗浄処理において測定した、放電洗浄時間に対する生成不純物ガス (H_2O , CH_4 , CO) の時間変化である。また、Table 7 には、各放電洗浄 (TDC と GDC) の条件と放電洗浄処理後の代表的プラズマ特性を示す。放電洗浄処理後のプラズマ特性は、いずれもプラズマ電流: 86 kA , プラズマの平均電子密度: $1.3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, プラズマの電子温度: $800 \sim 900 \text{ eV}$ である。また、プラズマにかかる一周電圧は GDC の場合 2.5 V , TDC の場合 2.8 V であり、プラズマからの放射損失は GDC の場合が幾分減少している程度である。多少の相違を無視すれば、両放電洗浄後に得られたプラズマは同程度のものであるから、TDC に比較し GDC は、同程度

Fig. 12-(I) (II) Electron density (n_e) and electron temperature (T_e) profile for GDC and TDC.

Table 6 Characteristic parameters in TDC and GDC.

	LIMITER WALL n_e (cm^{-3})	LIMITER WALL T_e (eV)	ION FLUX ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	REPETITION RATE α_t (ms)	WALL TEMPERATURE ($^{\circ}\text{C}$)
TDC	2×10^{12} 5×10^{11}	5 2	600 (100 mA/cm ²)	6/1000	35~120
GDC	2×10^8 1×10^8	5 5	12	CONTINUOUS	30~80

Table 7 Plasma parameters after 45 h GDC and after 7.5 h TDC.

	I_p (kA)	V_I (Volt)	n_e (cm^{-3})	RADIATION (kW)
GDC ($T_D \sim 45$ h)	86	2.5	1.3×10^{13}	22
TDC ($T_D \sim 7.5$ h)	86	2.8	1.3×10^{13}	28

DISCHARGE CONDITIONS	
GDC	I_D : 2.8~3.2 (A), V_D : 360~380 (V), P_{bn} : 200 (W), P_{rf} : 2×10^{-3} (Torr), n_e : 1×10^8 (cm^{-3}), T_e : 5 (eV)
TDC	I_p : 5 (kA), V_I : 10~15 (V), P_{rf} : 1×10^{-4} (Torr), t : 18 (ms), RATE: 6/1000 (ms), n_e : $1 \sim 2 \times 10^4$ (cm^{-3}), T_e : 2~4 (eV)

の軽元素不純物に減少させるまでに、放電洗浄処理時間にして5~6倍の時間を要すると考えられる。

放電洗浄前の真空条件及び洗浄時間の均一性は、種々の制約により実現できなかった。したがって、詳細については以後の実験機会に明らかにしたい。

6. 残留不純物ガス改善の重要性

放電洗浄を行う最大の目的は、高温プラズマが接する真空壁の軽元素不純物を低減することである。しかし、清浄にされたプラズマ壁を長時間清浄な状態に維持する事もまた重要であり、容器外からの不純物流入やプラズマ壁外から放出される残留不純物の低減化が重要になる。清浄にされた金属表面における酸素、一酸化炭素等の付着確率は、0.1~1であることが知られる^{6,7)}。したがって、ステンレス鋼を主材とし、プラズマ壁にチタンコー

Fig. 13 Time behaviours of produced gases (CH_4 , CO_2 , H_2O) during GDC (I) and TDC (II).

Fig. 14 Time history of contamination of clean surface produced by Ti-coating. O VII line intensity was plotted.

ティングが施されている JFT-2 真空容器の場合、リーク等により容器内に流入した活性気体は、大部分が真空容器壁に吸着、蓄積することになる。Fig. 14 に示した図は、チタンコーティングにより清浄化された壁が時間経過と共に、増加する過程をプラズマ中の代表的軽元素不純物である酸素を例にとり示したものである。プラズマ中の酸素不純物量は、チタンコーティング (100~2000 Å 厚) 直後、チタンコーティング処理前に比較し約 1/15 に減少する。時間経過と共にプラズマ放電時に発生する放出ガス、あるいは真空容器外部からのリーク等により、プラズマ中の酸素不純物は増加する。Fig. 14 の条件は、プラズマ放電数約 130 ショット、定常時の真空容器内の放出ガス量は約 $1 \sim 2 \times 10^{-5}$ Torr·l/s であった。プラズマ中の酸素不純物は、約 100 時間でチタンコーティング処理前の状態に戻ることが認められる。

トカマク装置実験中の比較的清浄な真空壁状態で、即ち Fig. 14 に示したチタンコーティング処理前とほぼ同様の真空壁状態において、TDC 1 時間により減少するプラズマ中の酸素不純物量の測定を行った結果を Fig. 15 に示す。放電洗浄処理前に比較し約 1/1.8 に減少する。また、この減少割合をチタンコーティング処理 (100~2000 Å 厚) の場合と比較すれば約 1/8 程度である。

以上の結果のように真空容器内の残留ガスは、プラズマ中の軽元素不純物と密接な関係を持ち、またプラズマ壁表面再汚染に因果関係を持つものである。すなわち、放電洗浄の重要な役割は、プラズマ壁に付着する軽元素

Fig. 15 Reduction of Oxygen impurity by 1 h TDC under usual wall conditions.

不純物の除去と同時に残留ガスの改善を行う事である。

JFT-2 における放電洗浄処理法は、GDC と TDC 方式に大別され、GDC 処理法は、主に大気開放後の真空容器の残留ガスの改善に利用され、真空容器内全体からの放出ガスを低減する。また、真空壁表面の軽元素不純物

の除去能力を有する。後者の TDC は特にリミター、プラズマ壁表面の軽元素不純物を除去する大きな能力を持つもので、直接プラズマ性能を左右する重要な処理法である。現在第2段処理として TDC を実施する方式が定着しているのが現状である。

7. ま と め

JFT-2 トカマクプラズマ装置を使用して、GDC の手法開発を行い、GDC の洗浄効果と TDC の洗浄効果との比較を行い、それぞれの役割を明確にした。

- (1) GDC の放電パラメーターと放電反応ガスの選択は、プラズマ中の主軽元素不純物である酸素・炭素原子が最大に放出される条件を選択した。グロー放電は、トーラス方向に3箇所設置した陽極により、360~380 V, 2~4 A の電圧、電流で生じる。また、同軸型高周波放電装置と直流電源装置との併用により、水素圧力 $\geq 5 \times 10^{-4}$ Torr より利用できる。
- (2) GDC の動作ガスは、水素ガスの化学反応作用を利用した場合が最も効率が良く、壁の汚染状態によっては、主気体として用いた水素ガスにアルゴンガス ($\leq 5\%$) を混合することにより、生成ガス量の増加が期待できる。
- (3) プラズマ壁上の軽元素不純物を同等まで減少させるまでの洗浄能力は、サンプル表面の清浄度を観測した結果、あるいは、生成ガスの減少率を観測した結果から、TDC*** が GDC**** に比較し2~3倍優れていた。また、放電洗浄後のプラズマ中の軽元素不純物の比較では、TDC が GDC に比較し1/5以下の放電洗浄時間で同等の不純物まで減少できることが明らかになった。
- (4) 各放電洗浄の特徴として TDC の場合、ガス生

成、排除に関する条件に優れ、有効水素粒子束が圧倒的に多い。特に、高温プラズマが直接作用するリミターにおける有効水素粒子束は、GDC に比較し桁違いに大きく作用している。

- (5) したがって、各放電洗浄の役割は、汚染度の大きい真空壁面の場合を第1処理として、GDC とベーキングとの併用により、残留ガスの低減を主目的とし、全容積からの不純物をできるだけ取り除く。そして、第2処理として TDC により、特にリミター、プラズマ第一壁の洗浄を入念に実施することが得策であると考えられる。

謝 辞

本報告をまとめるに際し、有益な助言と援助をしていただいた藤沢登、山本新、平山俊雄、河西敏各研究員の方々に深く感謝する。

終始御指導、御助言いただいた国枝俊介室長、鈴木喜八郎室長代理に厚く御礼を申し上げます。

こうした実験を行えるよう御配慮また、御指導いただいた小幡核融合研究部長、田中次長始め関係諸課室の皆様に厚く御礼申し上げます。

〔文 献〕

- 1) L. Oren and R. J. Taylor: Nucl. Fusion **17** (1977) 1143.
- 2) TFR Group: J. Nucl. Mater. **76 & 77** (1978) 587.
- 3) H. F. Dylla et al.: J. Vacuum Sci. Technol. **17** (1980) 286.
- 4) W. Poschenrieder et al.: J. Nucl. Mater. **93 & 94** (1980) 322.
- 5) 横倉賢治、藤沢登、他: 真空 **23** (1980) 160.
- 6) P. A. Redhead: Trans. Farad. Soc. **57** (1961) 641.
- 7) J. A. Becker: Solid State Physics, **7** (1958) 379.

*** Table 3 の条件においての実験結果

**** Table 4 の条件においての実験結果