

JAERI - M
87-183

JT-60メタングロー放電装置の開発

1987年11月

川崎 幸三・平塚 一・三代 康彦・黒田 猛*
太田 和也・前野 勝樹・大久保 実

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 山田軽印刷所

JT-60 メタングロー放電装置の開発

日本原子力研究所那珂研究所 JT-60 試験部

川崎 幸三・平塚 一・三代 康彦

黒田 猛*・太田 和也・前野 勝樹

大久保 実†

(1987年10月15日受理)

メタングロー放電装置は、放電ガスにメタンと水素の混合ガスを用いたグロー放電によって壁表面のカーボナイズーション及びグラファイト表面の洗浄を目的に昭和62年1月その建設を行なったものである。真空容器第一壁面をグラファイトに交換した後、本装置を用いて壁面清浄化処理の一手段としてグロー放電洗浄を行なった。約22時間の連続放電洗浄に於いても安定にグロー放電洗浄運転を行うことができた。得られたグロー放電洗浄の試験結果は次のようにまとめられる。

- (1) グロー放電洗浄はカーボン系の不純物除去に有効である。特に $M/e = 16, 28$ 不純物原子のマススペクトルは放電洗浄後で顕著に減少していることを確認した。
- (2) $M/e = 16, 28$ は放電電流及び放電圧力の増加に従って効率よく除去される。
- (3) TFTRのグロー放電洗浄と本装置を用いた洗浄効果を $M/e = 16, 28$ について比較すると、放電時間に比例して除去され、その減少勾配はほぼ等しい傾向にある。

那珂研究所：〒311-02 茨城県那珂郡那珂町大字向山801-1

† 動力炉開発・安全性研究管理部

* 外来研究員 住友機械工業(株)

Development of the methan glow discharge system on JT-60

Kozou KAWASAKI, Hajime HIRATSUKA, Yasuhiko MIYO, Takeshi KURODA*
Kazuya OHTA, Masaki MAENO and Minoru OHKUBO⁺

Department of JT-60 Facility
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 15, 1987)

Methan glow discharge system on JT-60 was developed to coat carbon on the surface of the first wall. The objective of this system is to produce the carbon coating on the surface of the first wall and to make the glow discharge for the treatment of the first wall.

This system was completed January 1986, and has been operated twenty-two hours for the conditioning of the first wall after the graphite first wall had attached in the JT-60 vacuum chamber. The glow discharge test result with this system are as follows,

- (1) GDC is usefull to remove the hydro-carbon, especially the reduction of $M/e=16,28$ is observed after GDC operation.
- (2) Reduction of the $M/e=16,28$ is increazing the discharge current and discharge pressure.
- (3) The comparison of the GDC effect of JT-60 with that of TFTR shows that no difference is found in the reduction rate of $M/e=16,28$.

Keywords: Tokamak, Glow Discharge, Plasma, Carbonization, First Wall, Mass Spector Analyzer, High Frequency Power, Mass Number

⁺ Department of Power Reactor Projects

* On leave from Sumitomo Heavy Industry Ltd

目 次

1. はじめに	1
2. 装置の概要及び機能	1
2.1 装置の概要	1
2.2 装置の機能	2
3. 設計	3
3.1 高周波電源	3
3.2 放電コイルの熱負荷	5
3.3 放電コイルの冷却	5
4. グロー放電による壁面洗浄	6
4.1 概要	6
4.2 GDC の運転環境	6
4.3 放電洗浄の結果と検討	7
5. おわりに	8
謝 辞	8
参考文献	9

Contentes

1. Introduction	1
2. Outline and functions of the system	1
2.1 Outline	1
2.2 Functions	2
3. Design	3
3.1 High frequency power unit	3
3.2 Heat load of the discharge coil	5
3.3 Cooling of the discharge coil	5
4. First wall conditioning with glow discharge	6
4.1 Outline	6
4.2 GDC operation conditions	6
4.3 Discharge cleaning results and discussions	7
5. Summary	8
Acknowledgment	8
References	9

1. はじめに

真空容器壁面からプラズマ中に混入した不純物原子による放射損失を低減するため真空容器壁面に炭素膜を生成させ壁表面を低Z化させるカーボナイゼーションが、生成膜の除去方法の開発と共に核融合装置で研究されている⁽¹⁾。カーボナイゼーションは放電ガスにメタンと水素の混合ガスを用い、洗浄すべき面を陰極とし真空容器内に陽極を挿入し適切なガス圧力と両極間に直流電圧を与えてグロー放電を発生させることによって得られる。つまり、グロー放電が発生しプラズマ中の電子がメタン分子を電離させ CH_4 、 CH_3 などのイオンが作られる。イオンは、約300Vの陰極シースで加速され真空容器壁面に衝突し、一部は分解してプラズマ中に戻るが大部分は真空容器表面に残って炭素膜を形成する。又、炭素膜の除去は放電ガスに水素、二酸化炭素、窒素または酸素ガスを用いたグロー放電で除去できる。

グロー放電のガス圧は0.1 Paと高いため、安定なグロー放電を得るには陽極を高周波コイルで形成し例えば13.56 MHzの高周波数百ワットの投入による種プラズマの生成が有効であると言われている。陰極面に達するイオンが陰極シースで加速され高いエネルギーを持つためグロー放電は、金属と結びついた炭素でも壁面から除去できるので真空容器壁面の洗浄装置としても有効である。グロー放電洗浄とテラー放電洗浄の特徴を表1に示す。グロー放電洗浄は磁場を必要としないことから簡便な洗浄手段と言えよう。

臨界プラズマ試験装置(JT-60)の真空容器第一壁部材は、Ti-Cを表面にコーティングしたモリブデンから昭和62年6月よりグラファイトに交換し実験する計画であった。そのため第一壁部材の交換にさきがけ、真空容器壁面をカーボナイゼーションしプラズマの挙動を把握すること、又第一壁部材交換後には真空容器壁面の洗浄装置として第一壁部材表面のカーボン除去に活用することを目標に本装置メタングロー放電装置の開発を行なった。

本報では開発した装置の設計検討結果及び本装置を用いた放電洗浄の効果について述べた。第2章で装置の概要、第3章で設計検討結果を述べ、第4章でグロー放電による第一壁面の洗浄結果をまとめた。

2. 装置の概要及び機能

2.1 装置の概要

トカマク装置で用いているグロー放電洗浄装置の主要な仕様を表2に比較して示す。陽極の最大印加電圧は約1000V、カソードの電流密度は約 $3.0 - 20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ である。陽極にコイルを有し高周波電力を供給できる装置は、約1000Wの高周波(周波数7.3-13.37 MHz)電源を有している。カーボナイゼーションの実験はJET⁽²⁾、TEXTOR及びJIPT-11で行なわれている。

1. はじめに

真空容器壁面からプラズマ中に混入した不純物原子による放射損失を低減するため真空容器壁面に炭素膜を生成させ壁表面を低Z化させるカーボナイゼーションが、生成膜の除去方法の開発と共に核融合装置で研究されている⁽¹⁾。カーボナイゼーションは放電ガスにメタンと水素の混合ガスを用い、洗浄すべき面を陰極とし真空容器内に陽極を挿入し適切なガス圧力と両極間に直流電圧を与えてグロー放電を発生させることによって得られる。つまり、グロー放電が発生しプラズマ中の電子がメタン分子を電離させ CH_4 、 CH_3 などのイオンが作られる。イオンは、約300Vの陰極シースで加速され真空容器壁面に衝突し、一部は分解してプラズマ中に戻るが大部分は真空容器表面に残って炭素膜を形成する。又、炭素膜の除去は放電ガスに水素、二酸化炭素、窒素または酸素ガスを用いたグロー放電で除去できる。

グロー放電のガス圧は0.1 Paと高いため、安定なグロー放電を得るには陽極を高周波コイルで形成し例えば13.56 MHzの高周波数百ワットの投入による種プラズマの生成が有効であると言われている。陰極面に達するイオンが陰極シースで加速され高いエネルギーを持つためグロー放電は、金属と結びついた炭素でも壁面から除去できるので真空容器壁面の洗浄装置としても有効である。グロー放電洗浄とテラー放電洗浄の特徴を表1に示す。グロー放電洗浄は磁場を必要としないことから簡便な洗浄手段と言えよう。

臨界プラズマ試験装置(JT-60)の真空容器第一壁部材は、Ti-Cを表面にコーティングしたモリブデンから昭和62年6月よりグラファイトに交換し実験する計画であった。そのため第一壁部材の交換にさきがけ、真空容器壁面をカーボナイゼーションしプラズマの挙動を把握すること、又第一壁部材交換後には真空容器壁面の洗浄装置として第一壁部材表面のカーボン除去に活用することを目標に本装置メタングロー放電装置の開発を行なった。

本報では開発した装置の設計検討結果及び本装置を用いた放電洗浄の効果について述べた。第2章で装置の概要、第3章で設計検討結果を述べ、第4章でグロー放電による第一壁面の洗浄結果をまとめた。

2. 装置の概要及び機能

2.1 装置の概要

トカマク装置で用いているグロー放電洗浄装置の主要な仕様を表2に比較して示す。陽極の最大印加電圧は約1000V、カソードの電流密度は約 $3.0 - 20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ である。陽極にコイルを有し高周波電力を供給できる装置は、約1000Wの高周波(周波数7.3-13.37 MHz)電源を有している。カーボナイゼーションの実験はJET⁽²⁾、TEXTOR及びJIPT-11で行なわれている。

JETでは放電ガスに CH_4/H_2 の混合ガスを用い、約10-15%の混合ガスでカーボン膜の生成を行なった。TFTRでは陽極に直流電圧のみを印加してグロー放電を作る洗浄装置として活用されている。JT-60では、安定なグロー放電を低い直流電圧で得られるよう陽極にコイルを有し高周波電力を供給する所謂RF assisted Glow Dischargeの方式を採用した。

本装置(メタン放電装置)は、JT-60本体のP-6下側とP-15上側に設置し、放電用コイルの先端を真空容器中心から約450mmの位置まで挿入できるようにした。プラズマ実験時にはプラズマからの熱負荷を避けるためポート内まで引き抜かれる。又JT-60本体を大気にすることなく放電電極の交換を行うことが可能である。

2.2 装置の機能

グロー放電装置は図1に示すように放電装置本体、自動整合回路、高周波電源、直流電源及び制御装置からなる。

(1) 放電装置本体

放電装置本体は図2に示すように放電用コイル、外筒、ベローズ、ガイドローラ、駆動機構から構成される。放電用コイルは、巻数5ターン、内径100mm ϕ のSUS材をTi-Cでコーティングしたものである。放電用コイル以外は同軸導波管とし、その2箇所には真空封じのため絶縁性の同軸フィードスルーを設け、フィードスルーで仕切られた領域を、真空排気する構造とした。外筒は放電コイルを支持するものであり表面を Al_2O_3 の絶縁材でコーティングし電氣的に他と切り放されている。

真空容器の熱変位及び電磁力による変位を吸収するためJT-60本体取合いゲート弁の近くにガイドローラを設けた。真空容器変位は、ガイドローラと外筒の接触位置を支点として内分されるため、外筒の支持部で吸収すべき変位を低減すると共に支持部に複数のウォーム歯車を設けることによって三軸自由な可変構造の支持機構とした。

(2) 高周波電源

本電源は高周波電力を発生し、自動負荷整合回路に送ると共にグロー放電時のプラズマ抵抗とマッチングし効率よく種プラズマを生成させるためのものである。高周波電源回路の選択にあたってはグロー放電時の負荷インピーダンス変化が大きいこと、不整合状態での電源耐力及び信頼性を考え半導体素子を用いた回路より優れている真空管方式の回路を採用した。発振器の発振方式には、自動式と他励式がある。他励式は自動式に比べ周波数安定度が良く、出力制御及び負荷インピーダンス変化に対する出力安定性に優れている。そのためグロー放電時の負荷変化を考慮し他励式の発振器を用いた。

(3) 直流電源

本電源は真空容器を陰極にして容器内に挿入した陽極との間に直流電圧を印加するためのものである。アーク放電への移行を防ぐため放電電流制限抵抗を設けると共に放電電流を一定に電流制御できるようにした。放電電流は制御盤で遠隔設定される。

(4) 制御装置

本装置は運転、監視、保護を行うためのものである。本装置は以下に示すように自動あるいは

手動方式で運転される。

自動運転は、高周波電源、直流電源をシーケンシャルに投入、遮断する自動一括運転を行なう方式である。自動運転中フィードスル温度、放電コイル温度、放電圧力が許容範囲を超えた場合は、自動停止すると共に状態が正常に復帰すれば放電の自動再開が可能である。

手動運転は、高周波電源、直流電源を独立に操作しグロー放電の生成を行う方式である。

グロー放電時の放電圧力は、既設ガス注入装置を用いて本体圧力を一定に制御する。本装置とこれ等既設制御設備間には運転に必要なインターロックを設け、安全に装置の運転操作を行なえるようにした。

3. 設 計

3.1 高周波電源

グロー放電時のインピーダンス変化に追従する自動整合回路の回路定数を算出する。

1) システム構成

自動整合回路を含む高周波電源の系統構成を図3に示す。図に示すように本系統は次のユニットからなる。

高周波電源	出力インピーダンス50Ω
同軸ケーブル	高周波電源と自動整合回路間を結ぶ。特性インピーダンス50Ω
自動整合回路	高周波電源と負荷とのインピーダンスマッチング
同軸管	自動整合回路と放電コイル間を結ぶ。特性インピーダンス50Ω
放電コイル	電極部の放電コイル
グロー放電	放電時のグロー抵抗及び容量

2) 特性計算

等価回路を図4に示す。

整合回路を含めたインピーダンス Z_m は次の式で表わされる。

$$\frac{1}{Z_m} = j\omega C_m + \frac{1}{j(\omega L_t - \frac{1}{\omega C_t}) + Z_a} \quad (1)$$

C_m : マッチング用バリコン

C_t : チューニング用バリコン

L_t : チューニング用コイル

C_p : 直流ブロッキングコンデンサ

Z_a : 同軸管までのインピーダンス

ここで点 a - b から見た同軸管までのインピーダンス Z_a は、同軸管に於いて損失がないと仮定

手動方式で運転される。

自動運転は、高周波電源、直流電源をシーケンシャルに投入、遮断する自動一括運転を行なう方式である。自動運転中フィードスル温度、放電コイル温度、放電圧力が許容範囲を超えた場合は、自動停止すると共に状態が正常に復帰すれば放電の自動再開が可能である。

手動運転は、高周波電源、直流電源を独立に操作しグロー放電の生成を行う方式である。

グロー放電時の放電圧力は、既設ガス注入装置を用いて本体圧力を一定に制御する。本装置とこれ等既設制御設備間には運転に必要なインターロックを設け、安全に装置の運転操作を行なえるようにした。

3. 設 計

3.1 高周波電源

グロー放電時のインピーダンス変化に追従する自動整合回路の回路定数を算出する。

1) システム構成

自動整合回路を含む高周波電源の系統構成を図3に示す。図に示すように本系統は次のユニットからなる。

高周波電源	出力インピーダンス50Ω
同軸ケーブル	高周波電源と自動整合回路間を結ぶ。特性インピーダンス50Ω
自動整合回路	高周波電源と負荷とのインピーダンスマッチング
同軸管	自動整合回路と放電コイル間を結ぶ。特性インピーダンス50Ω
放電コイル	電極部の放電コイル
グロー放電	放電時のグロー抵抗及び容量

2) 特性計算

等価回路を図4に示す。

整合回路を含めたインピーダンス Z_m は次の式で表わされる。

$$\frac{1}{Z_m} = j\omega C_m + \frac{1}{j(\omega L_t - \frac{1}{\omega C_t}) + Z_a} \quad (1)$$

C_m : マッチング用バリコン

C_t : チューニング用バリコン

L_t : チューニング用コイル

C_p : 直流ブロッキングコンデンサ

Z_a : 同軸管までのインピーダンス

ここで点 a - b から見た同軸管までのインピーダンス Z_a は、同軸管に於いて損失がないと仮定

すると次の式で表わされる。

$$Z_a = Z_o \frac{Z_l + j Z_o \tan \beta \ell}{Z_o + j Z_l \tan \beta \ell} \quad (2)$$

$$Z_l = (R_a + R_g) + j \left(\omega L_t - \frac{1}{\omega C_g} \right) \quad (3)$$

ここに

R_a : 放電コイルの抵抗 約 0.273Ω

L_a : 放電コイルのインダクタンス 約 $0.85 \mu\text{H}$

R_g : グロー放電抵抗 約 5.0Ω

C_g : グロー放電シース部の等価静電容量 約 1.0 nF

β : 位相定数

Z : 特性インピーダンス

l : 同軸管の長さ

次に、同軸ケーブルで接続されるマッチングユニット、放電コイルを送端からみた場合、線路の負荷インピーダンス Z_{in} は以下のように表わされる。

$$Z_{in} = Z_o \frac{Z_m + j Z_o \tan \beta \ell}{Z_o + j Z_m \tan \beta \ell} \quad (4)$$

線路長 l を $1/4$ 波長の整数倍に選択すると

$$\tan \beta \ell = \tan \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{4} \cdot 2n \right) = \tan (n\pi) = 0 \quad (5)$$

から $Z_{in} = Z_m$ となる。 Z_{in} が高周波電源出力インピーダンスになるよう同軸ケーブルの長さを決めると負荷整合回路のマッチング用バリコン、チューニング用コイルは次のように求まる。

$$C_m = \frac{1}{\omega Z_o} \sqrt{\frac{Z_o - A}{A}}$$

$$L_t = \frac{1}{\omega} \left(Z_o A \omega C_m + \frac{1}{\omega C_t} - B \right)$$

ここで

$$A = KR Z_o \{ 1 + (\tan \beta \ell)^2 \}^2$$

$$B = K \left\{ \left(\omega L_a - \frac{1}{\omega C_g} \right) \left\{ Z_o - \left(\omega L_a - \frac{1}{\omega C_g} + Z_o \tan \beta \ell \right) \tan \beta \ell \right\} + Z_o^2 \tan \beta \ell \right\}$$

$$R = R_a + R_g$$

$$K = \frac{Z_0}{\left\{ Z_0 - \left(\omega L_a - \frac{1}{\omega C_g} \right) \tan \beta \ell \right\}^2 + \left\{ R \tan \beta \ell \right\}^2}$$

3) 整合範囲

放電等価キャパシタンスをパラメータにして、整合回路で整合できる放電等価抵抗とチューニング用コイルのインダクタンスの関係を図5に示す。放電等価キャパシタンス 1.0 - 1000 μH の範囲に於いて整合のとることができるプラズマ抵抗は 5.0 - 19.0 Ω その時のチューニング用コイルのインダクタンスは 3.0 - 1.5 μH となる。本整合回路の回路定数でグロー放電時に負荷整合できる。

3.2 放電コイルの熱負荷

放電コイルの熱負荷としては、加速した電子の衝突による入熱、ジュール発熱及び真空容器温度による輻射入熱等が考えられる。以下コイルの熱負荷を考察する。

1) 加速した電子の衝突による入熱

グロー放電時の電圧分布は図6に示すようになっているものと考えられる。陰極部に約 300 - 350Vの陰極降下が生じるため、陽極電圧から陰極降下分を差し引いた電圧と放電電流の積がグロー部分の損失エネルギーとなる。グロー放電時の運転条件を表3に示す。TFTRでは、陽極電圧及び放電電流がそれぞれ約390V及び約15Aであり、DIII-D⁽³⁾のそれらは約400V及び約3.5Aである。従って、陽極電圧を約400Vに、陰極降下電圧を約325Vに想定すると約75Vがプラズマ抵抗の発熱に寄与すると考えられる。JT-60用放電コイルの入熱は放電電流4.0Aであることから約300Wになる。

2) ジュール発熱

放電コイルの直流電流に対する導体抵抗及び高周波電流に対する導体抵抗はそれぞれ約0.03 Ω 及び約0.27 Ω である。放電電流(直流分)4.0A及び高周波電力の定在波電流の最大値約4.47A ($I_{\text{rf}} = \sqrt{\text{SWR} \times P / Z_0}$; SWR 定在波比 1.0; Z_0 特性インピーダンス 50.0; P 高周波入力 1000W) からジュール発熱は約7.0Wとなる。

3) 真空容器から輻射入熱

放電コイルの温度が真空容器温度に等しくなったとして黒体の全輻射エネルギーを求める。全輻射エネルギーは、ステファンボルツマン定数及び絶対温度の4乗に比例することから約300Wとなる。なお放電コイルの表面積約1055.6 cm^2 及び真空容器温度を約200 $^{\circ}\text{C}$ とした。

以上のことからコイルの全入熱は約600Wとなる。

3.3 放電コイルの冷却

放電コイルを冷却する冷却媒体としては真空容器内への漏洩による波及効果を考え空気を選択した。コイルへの入熱量を空気で除熱するとして必要とされる空気圧縮器の容量及び放電コイルの表面温度について検討する。

1) 空気圧縮器の容量

冷却空気の温度上昇を約120 degとした時必要な冷却空気量は約0.0047 Nm³/sとなる。冷却空気圧力を2.0 kg/cm²としたときコイル内の冷却空気流速は約11.8 m/sとなる。従って冷却管の内径13.0mm長さ約50mとした時の圧力損失は、約0.22 kg/cm²となる。これより、冷却に必要な空気量は、約0.282 Nm³/minとなり、圧力は、2.0 kg/cm²以上あれば問題ないため、市販の5.5 kW -0.67 Nm³/minの圧縮器を選択した。

2) 放電コイル温度

放電コイルを流れる冷却空気と冷却管表面との熱伝達率を求めると約145.2 W/m degとなる。これより、放電コイル内面と内面を流れる冷却空気との温度差は、放電コイル表面積を約0.086 m²にすると約50.2 deg、放電コイル内外面の温度差は放電コイルの厚さを約1.5 mmにすると約1.2 degとなる。従って、放電コイル温度の最大値は冷却空気の温度上昇を加算した約211.2 degになるものと考えられる。

4. グロー放電による壁面洗浄

4.1 概要

真空容器内の第一壁材をTi-Cコーティング材からグラファイトに交換した。主プラズマ生成に先駆けて実施した真空容器清浄化処理（ベーキング、テラ放電洗浄、グロー放電洗浄）の内本装置を用いて実施したグロー放電洗浄（GDC）について述べる。

4.2 GDCの運転環境

GDC時の運転環境は、真空容器本体、ポート及びゲート弁はベーキング中、本体排気系は主排気運転（TMP 16台正常運転）、ガス注入系からの注入ガスは水素で注入ガス量約0.533-5.33 Pa/m³sである。GDC運転中の不純物測定は残留ガス分析器（RGA）を用いた。RGAの後方は作動排気されるので本体圧力が高くてもガス分析ができる。JT-60排気系は、ターボポンプ（TMP）を多段に用いる主排気系、メカニカルポンプおよびロータリポンプなどから構成される粗引ポンプ系、スパッタポンプで構成する保守排気系からなる。主排気系のTMP動作範囲は約1.33 Pa以下のためこれ以上の圧力領域では、粗引ポンプ系を用いて排気する。主排気系と粗引系の排気速度はそれぞれ約13000 l/sと約240 l/sのためGDCによって壁面から除去された不純物ガスを効率よく排気するため、排気速度の大きい主排気系の動作圧力領域でGDCを行うことが必要であった。本装置の単体試験結果によると、約1.2-1.9 Paの本体圧力でグロー放電を得られることが確認されている。この本体圧力領域は排気ポンプの入口ゲート弁を全閉にし放電ガスを注入することで実現させた。今回のGDC実施にあたっては、排気速度、直流印加電圧などを調節しながら約1.33 Pa以下の本体圧力でグロー放電が得られるよう計画した。なお、運転可

1) 空気圧縮器の容量

冷却空気の温度上昇を約120 degとした時必要な冷却空気量は約0.0047 Nm³/sとなる。冷却空気圧力を2.0 kg/cm²としたときコイル内の冷却空気流速は約11.8 m/sとなる。従って冷却管の内径13.0mm長さ約50mとした時の圧力損失は、約0.22 kg/cm²となる。これより、冷却に必要な空気量は、約0.282 Nm³/minとなり、圧力は、2.0 kg/cm²以上あれば問題ないため、市販の5.5 kW -0.67 Nm³/minの圧縮器を選択した。

2) 放電コイル温度

放電コイルを流れる冷却空気と冷却管表面との熱伝達率を求めると約145.2 W/m degとなる。これより、放電コイル内面と内面を流れる冷却空気との温度差は、放電コイル表面積を約0.086 m²にすると約50.2 deg、放電コイル内外面の温度差は放電コイルの厚さを約1.5 mmにすると約1.2 degとなる。従って、放電コイル温度の最大値は冷却空気の温度上昇を加算した約211.2 degになるものと考えられる。

4. グロー放電による壁面洗浄

4.1 概要

真空容器内の第一壁材をTi-Cコーティング材からグラファイトに交換した。主プラズマ生成に先駆けて実施した真空容器清浄化処理（ベーキング、テラ放電洗浄、グロー放電洗浄）の内本装置を用いて実施したグロー放電洗浄（GDC）について述べる。

4.2 GDCの運転環境

GDC時の運転環境は、真空容器本体、ポート及びゲート弁はベーキング中、本体排気系は主排気運転（TMP 16台正常運転）、ガス注入系からの注入ガスは水素で注入ガス量約0.533-5.33 Pa/m³sである。GDC運転中の不純物測定は残留ガス分析器（RGA）を用いた。RGAの後方は作動排気されるので本体圧力が高くてもガス分析ができる。JT-60排気系は、ターボポンプ（TMP）を多段に用いる主排気系、メカニカルポンプおよびロータリポンプなどから構成される粗引ポンプ系、スパッタポンプで構成する保守排気系からなる。主排気系のTMP動作範囲は約1.33 Pa以下のためこれ以上の圧力領域では、粗引ポンプ系を用いて排気する。主排気系と粗引系の排気速度はそれぞれ約13000 l/sと約240 l/sのためGDCによって壁面から除去された不純物ガスを効率よく排気するため、排気速度の大きい主排気系の動作圧力領域でGDCを行うことが必要であった。本装置の単体試験結果によると、約1.2-1.9 Paの本体圧力でグロー放電を得られることが確認されている。この本体圧力領域は排気ポンプの入口ゲート弁を全閉にし放電ガスを注入することで実現させた。今回のGDC実施にあたっては、排気速度、直流印加電圧などを調節しながら約1.33 Pa以下の本体圧力でグロー放電が得られるよう計画した。なお、運転可

能な時間が実験計画上制限されていたため、GDCについての基礎データの取得を割愛した。

4.3 放電洗浄の結果と検討

1) 放電洗浄の結果

(1) $M/e = 16, 28$ の放電電流依存性

放電電流を変化させてその依存性を調べた。結果を図7に示す。放電電流を5.0 Aから7.5 Aに増加させると $M/e = 16$ で約18%の増加、一方 $M/e = 28$ では約23%の増加を確認できた。放電電流を増加させるほどその傾向は増大するものと推測される。

(2) $M/e = 16, 28$ の放電圧力依存性

放電電流を5.0 Aに保って放電圧力を変化させた。 $M/e = 16, 28$ のRGA電流を図8に示す。放電圧力が高くなるほど $M/e = 16, 28$ の除去が効率よく行なわれる。放電圧力0.2 Paから0.6 Paに高めると $M/e = 16$ で約46%又 $M/e = 28$ で約75%除去率の増加を示す。

(3) GDC運転中のマススペクトル

GDC運転中のマススペクトルを図9に示す。放電圧力は約0.7-0.8 Paに維持した。 $M/e = 16, 28$ は、GDCを行なうことによって約2-3倍除去率が増加するが、 $M/e = 18$ では顕著な変化が見られない。約22時間のGDCをおこなったマススペクトルの変化を図10に示す。炭素系の不純物が除去されていることが分かる。

GDC開始直後グロー放電の維持圧力を確認するため放電圧力を下げたためマススペクトルに見られるよう $M/e = 16, 28$ の除去は低く、放電圧力を高めるに従い増加されていることが分かる。

2) 放電時の陽極電圧及び高周波電源の負荷整合

真空容器内の本体圧力をパラメータにして高周波電力を約300 W、直流電圧600 Vを陽極に印加させ放電の様子を調べた。その結果、本体圧力が約0.6 Pa以上のとき設定電流3.0 Aの放電電流が得られた。この圧力は単体試験の結果に比べ低い領域（主排気系の運転領域）である。これは、従来用いた第一壁材（Ti-CをMoにコーティング）の環境下でのGDC放電においては、壁面が充分清浄をたもっていたためと考えられる。GDC運転を停止して再度GDC放電を得ようとしても容易に放電が得られなかった。しかし、高周波電力の供給を充分行うことで（種プラズマを陽極の周囲に得て）GDCを得ることが出来た。放電電流を変化させた時の陽極電圧は約340 Vであり、その値は一定である。TFTRやDIII-Dとおなじように約340 Vで一定電流を維持できた。放電開始前には、電源の最大値約600 Vを陽極に印加し放電と共に設定した放電電流になるよう制御される。放電コイルには、高周波電力を約300 W入射させた。グロー放電が得られる前の入射電力と反射電力は、夫々約300 Wと240 Wであるが放電後は反射電力が測定されず効率良く入射されている。

3) 検討

- (1) GDCの洗浄効果についてTFTRの結果と比較して図11に示す。放電時間の積算に比例し $M/e = 16, 28$ が減少する。 $M/e = 16, 28$ については、他の装置と同様ほぼ同じ時定数で減少していることが分かる。表3に示されるよう運転時の陰極電流密度 j はJT-60で約

6. $25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ TFTRで約 $7.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ であり、幾分TFTRの陰極電流密度はJT-60より高い。

GDC前後のマススペクトルからわかるようにグロー放電洗浄はカーボン系の不純物除去に有効である。また $M/e=16, 28$ は放電電流及び放電圧力を高めるに従って効率良く除去できる。

- (2) 放電時の陽極電圧は表3に示したように他の装置のそれとほぼ同じ値である。改良すべき点は、放電前に於いて負荷と整合できるよう整合器の回路定数を変更することである。そうすることによって種プラズマを陽極周囲に効率良く生成させ安定したグロー放電が得られると考えられる。

5. おわりに

真空容器壁面のカーボナイゼーション及びグロー放電洗浄を目的に装置の開発を行った。第一壁部材をグラファイトに交換した後の清浄化処理に於いて、グロー放電洗浄による洗浄効果を確認した。開発した装置を用いたグロー放電洗浄の結果は、次のようにまとめられる。

- (1) グロー放電洗浄はカーボン系の不純物除去に有効である。特に $M/e=16, 28$ 不純物原子のマススペクトルは放電洗浄後で顕著に減少していることを確認した。
- (2) $M/e=16, 28$ は放電電流及び放電圧力の増加に従って効率よく除去される。
- (3) TFTR⁽⁴⁾ のグロー放電洗浄と本装置を用いた洗浄効果を $M/e=16, 28$ について比較すると、それは放電時間に比例し、その減少勾配はほぼ同じである。

謝 辞

本装置の開発にあたってご指導戴いたJT-60試験部部長飯島 勉氏、JT-60第二試験室室長太田 充氏に感謝します。装置の設計検討にあたり有益な御教示を戴いた炉心工学研究室副主任研究員阿部 哲也氏をはじめJT-60第二試験室の方々に感謝します。グロー放電の実施にあたっては、実験室細金 延幸氏、JT-60第二試験室新井 貴氏の御協力を戴いた、なお本装置の製作及び据付は(株)東芝によって行なわれた。関係者各位に深く感謝の意を表わします。

6. $25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ TFTRで約 $7.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ であり、幾分TFTRの陰極電流密度はJT-60より高い。

GDC前後のマススペクトルからわかるようにグロー放電洗浄はカーボン系の不純物除去に有効である。また $M/e = 16, 28$ は放電電流及び放電圧力を高めるに従って効率良く除去できる。

- (2) 放電時の陽極電圧は表3に示したように他の装置のそれとほぼ同じ値である。改良すべき点は、放電前に於いて負荷と整合できるよう整合器の回路定数を変更することである。そうすることによって種プラズマを陽極周囲に効率良く生成させ安定したグロー放電が得られると考えられる。

5. おわりに

真空容器壁面のカーボナイゼーション及びグロー放電洗浄を目的に装置の開発を行った。第一壁部材をグラファイトに交換した後の清浄化処理に於いて、グロー放電洗浄による洗浄効果を確認した。開発した装置を用いたグロー放電洗浄の結果は、次のようにまとめられる。

- (1) グロー放電洗浄はカーボン系の不純物除去に有効である。特に $M/e = 16, 28$ 不純物原子のマススペクトルは放電洗浄後で顕著に減少していることを確認した。
- (2) $M/e = 16, 28$ は放電電流及び放電圧力の増加に従って効率よく除去される。
- (3) TFTR⁽⁴⁾ のグロー放電洗浄と本装置を用いた洗浄効果を $M/e = 16, 28$ について比較すると、それは放電時間に比例し、その減少勾配はほぼ同じである。

謝 辞

本装置の開発にあたってご指導戴いたJT-60試験部部長飯島 勉氏、JT-60第二試験室室長太田 充氏に感謝します。装置の設計検討にあたり有益な御教示を戴いた炉心工学研究室副主任研究員阿部 哲也氏をはじめJT-60第二試験室の方々に感謝します。グロー放電の実施にあたっては、実験室細金 延幸氏、JT-60第二試験室新井 貴氏の御協力を戴いた、なお本装置の製作及び据付は(株)東芝によって行なわれた。関係者各位に深く感謝の意を表わします。

6. $25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ TFTRで約 $7.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ であり、幾分TFTRの陰極電流密度はJT-60より高い。

GDC前後のマススペクトルからわかるようにグロー放電洗浄はカーボン系の不純物除去に有効である。また $M/e=16, 28$ は放電電流及び放電圧力を高めるに従って効率良く除去できる。

- (2) 放電時の陽極電圧は表3に示したように他の装置のそれとほぼ同じ値である。改良すべき点は、放電前に於いて負荷と整合できるよう整合器の回路定数を変更することである。そうすることによって種プラズマを陽極周囲に効率良く生成させ安定したグロー放電が得られると考えられる。

5. おわりに

真空容器壁面のカーボナイズーション及びグロー放電洗浄を目的に装置の開発を行った。第一壁部材をグラファイトに交換した後の清浄化処理に於いて、グロー放電洗浄による洗浄効果を確認した。開発した装置を用いたグロー放電洗浄の結果は、次のようにまとめられる。

- (1) グロー放電洗浄はカーボン系の不純物除去に有効である。特に $M/e=16, 28$ 不純物原子のマススペクトルは放電洗浄後で顕著に減少していることを確認した。
- (2) $M/e=16, 28$ は放電電流及び放電圧力の増加に従って効率よく除去される。
- (3) TFTR⁽⁴⁾のグロー放電洗浄と本装置を用いた洗浄効果を $M/e=16, 28$ について比較すると、それは放電時間に比例し、その減少勾配はほぼ同じである。

謝 辞

本装置の開発にあたってご指導戴いたJT-60試験部部長飯島 勉氏、JT-60第二試験室室長太田 充氏に感謝します。装置の設計検討にあたり有益な御教示を戴いた炉心工学研究室副主任 阿部 哲也氏をはじめJT-60第二試験室の方々に感謝します。グロー放電の実施にあたっては、実験室細金 延幸氏、JT-60第二試験室新井 貴氏の御協力を戴いた、なお本装置の製作及び据付は(株)東芝によって行なわれた。関係者各位に深く感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- (1) F. Waelbroeck : Jul -1962, Dezember 1980. ISSN 0368-0885
- (2) K. J. Dietz : Proc. IX IVC-V ICSS, Madrid 1983
- (3) Neil H. Brokes, P. Petersen : J. N. Materials 145 146 (1987)
- (4) H. F. Dylla, W. R. Blanchard : J. N. Materials 128 129 (1984)
- (5) H. F. Dylla : PPPL-2048, January 1984

表1 放電洗浄法の比較

	グロー放電	テララー放電 (TDC)
電界	直流	誘導
磁界		適当
放電電流	$10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	- 50 KA
圧力	$P > 0.1 \text{ Pa}$	$P = 0.01 \text{ Pa}$
除去	C, O	HO, H, O,

表2 装置仕様の比較

	TFTR	JT-60	JET	PDX	DIII-D
直流電圧 (V)	600	600	1000	500	1000
放電電流 (A)	20	4	5	5	3.5
陰極電流密度 ($J \mu\text{A}/\text{cm}^2$)	10	7	20	3	10
高周波電源 (W)	—	1000	600	—	70
周波数 (MHz)	—	13.56	7.3	—	7.5

表3 グロー放電時の諸条件

	DIII-D	TFTR	JT-60
陽極電圧 (V)	400	390	340
放電電流 (A)	3.5	15	10
高周波電力 (W)	75	—	300
放電圧力 (Pa)	0.27	0.66 - 0.8	0.6 - 0.8
陰極電流密度 $J (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	10	7.5	6.25

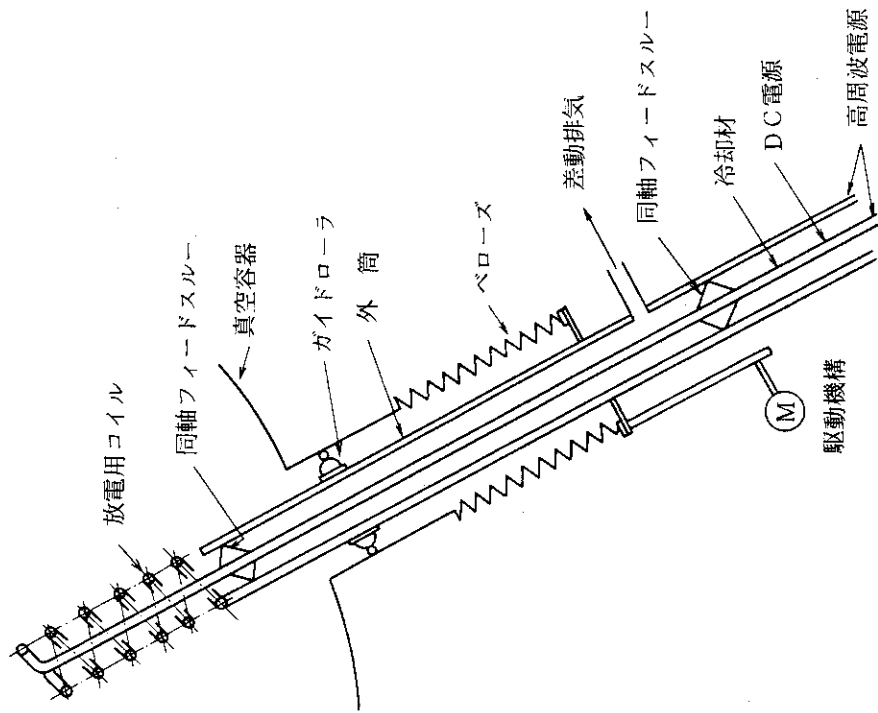


図2 放電装置本体概念図

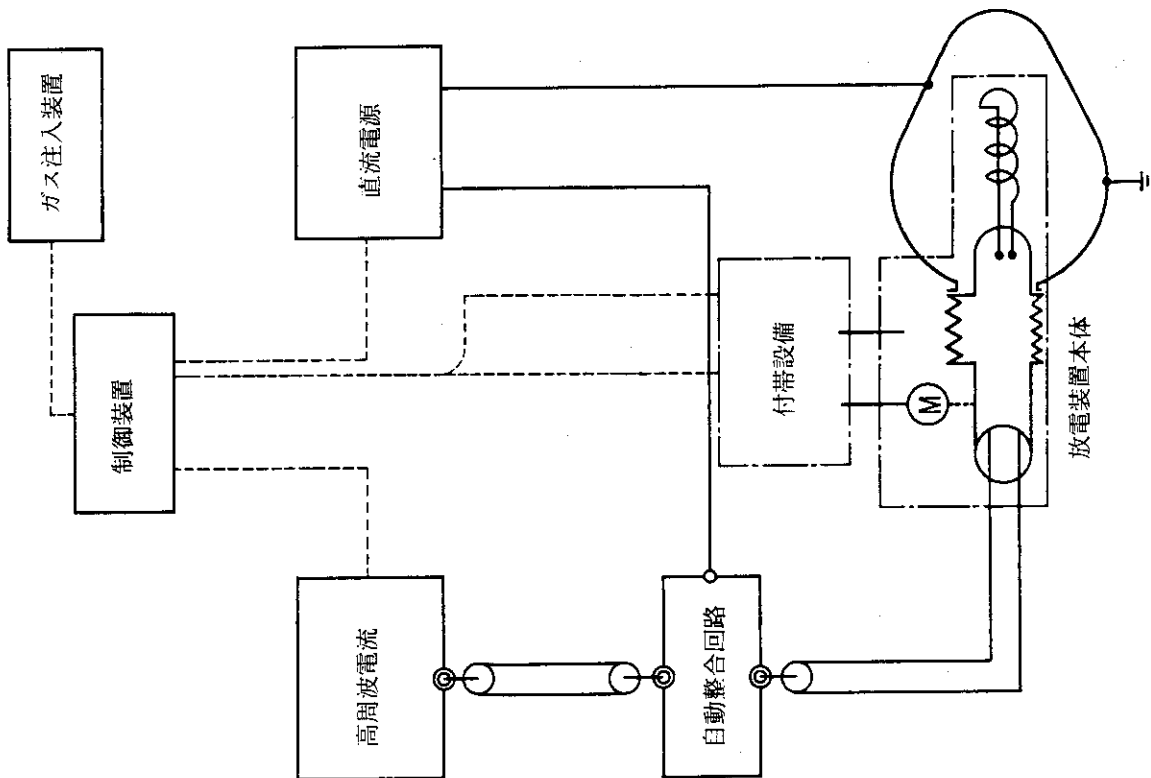


図1 装置の構成

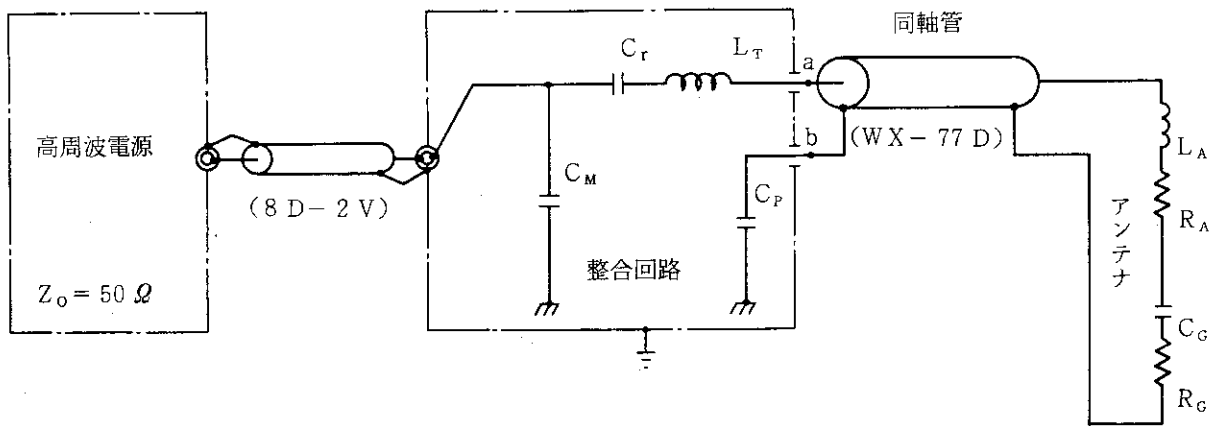


図3 整合回路解析モデル

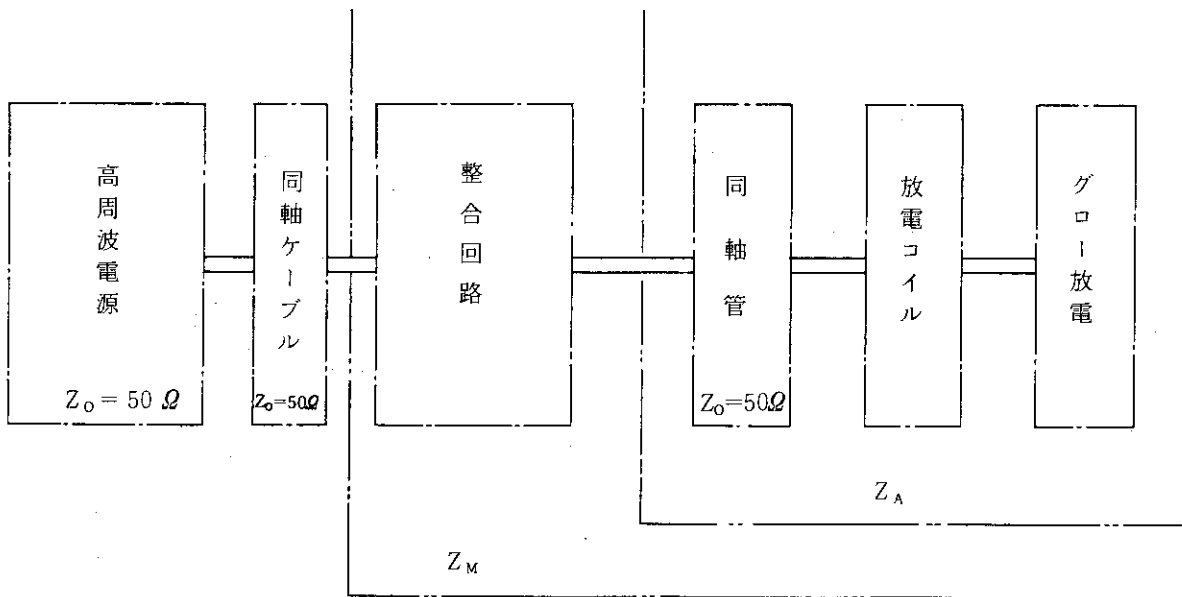


図4 高周波電源系の構成

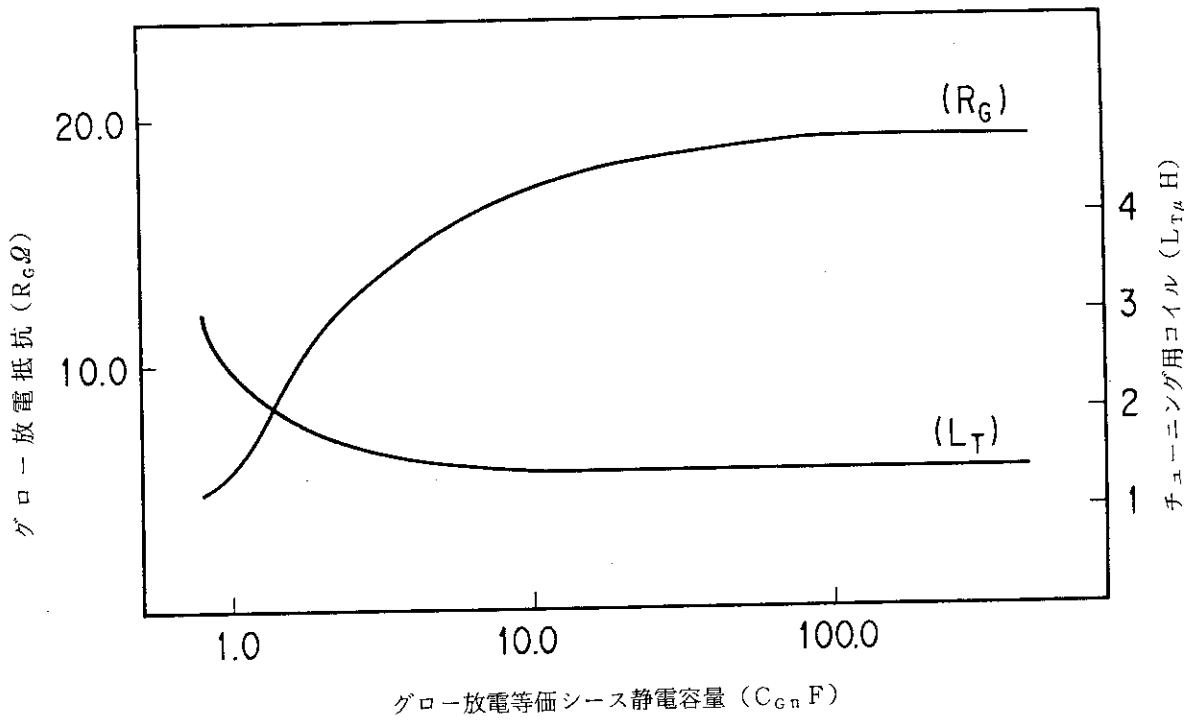


図5 C_G と本整合回路にて整合可能な R_G の最大値との関係

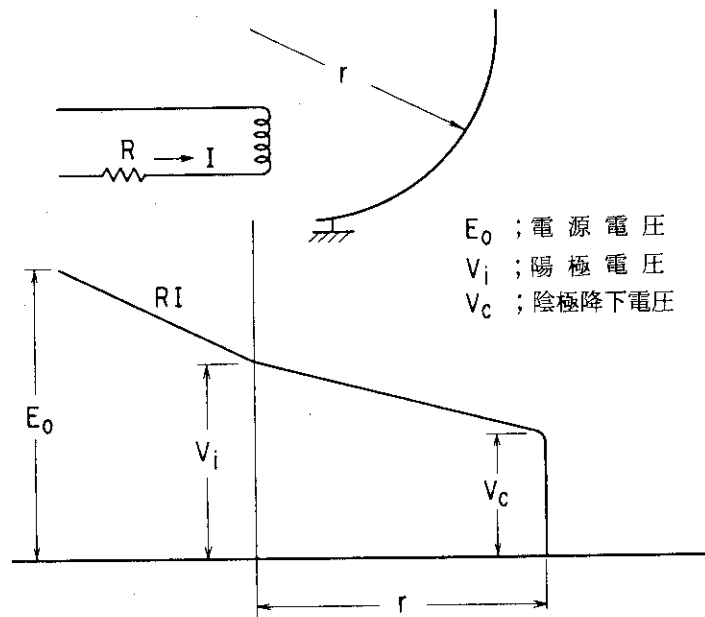


図6 グロー放電時の電圧分布

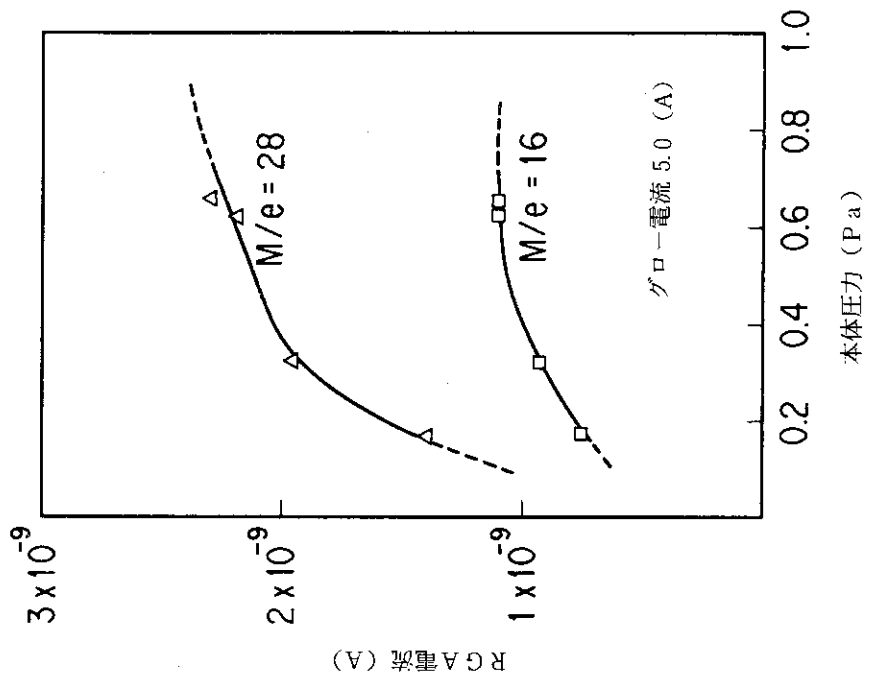


図8 $M/e = 16, 28$ 排気-圧力依存性

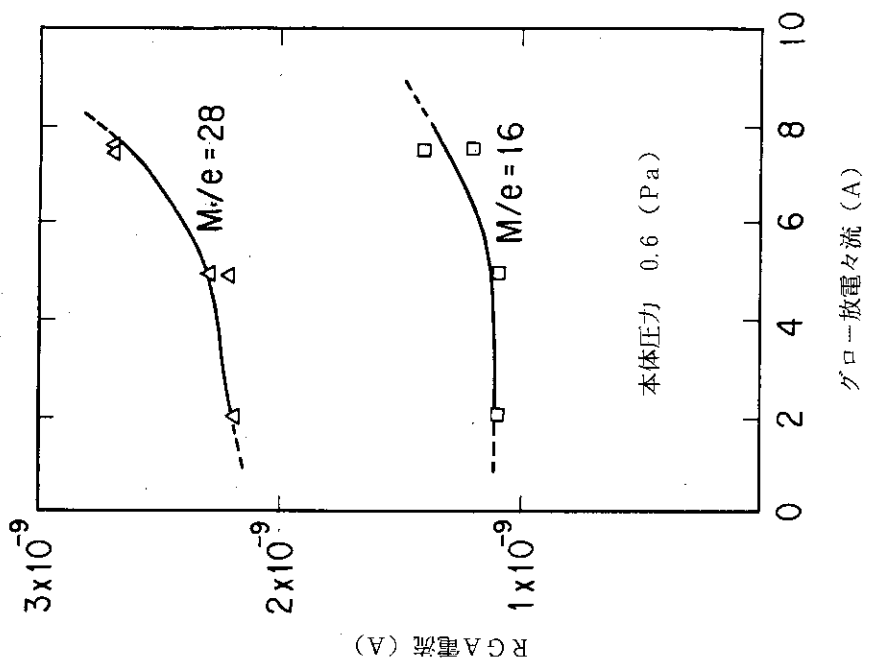


図7 $M/e = 16, 28$ 排気-グロー放電々々依存性

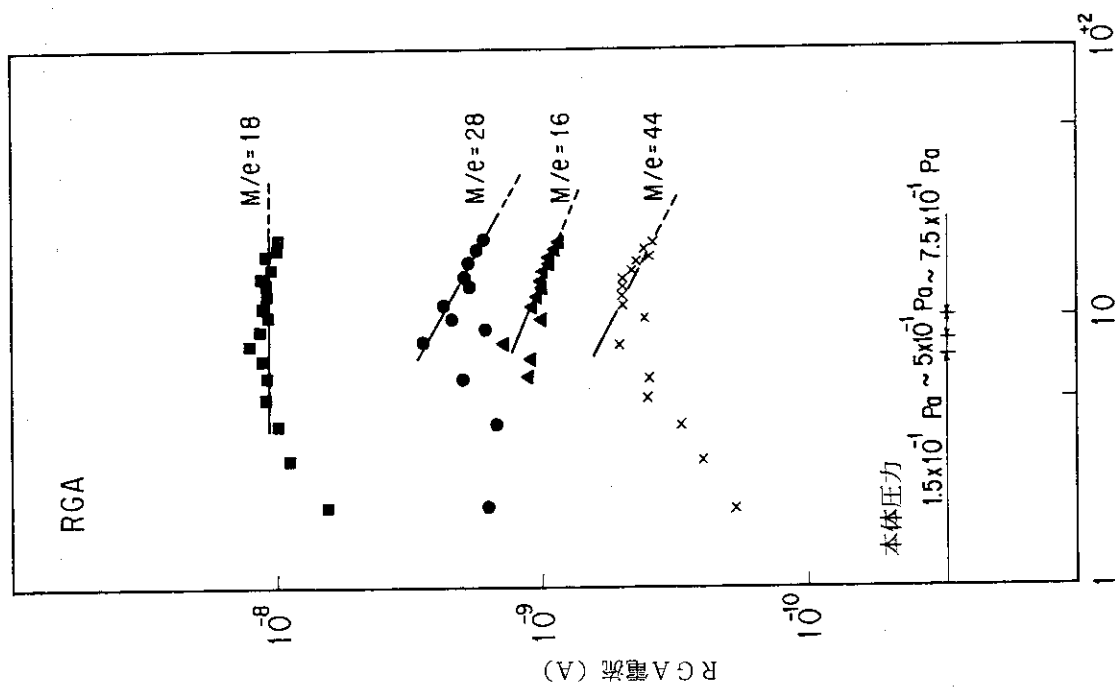


図9 放電中のマススペクトル変化

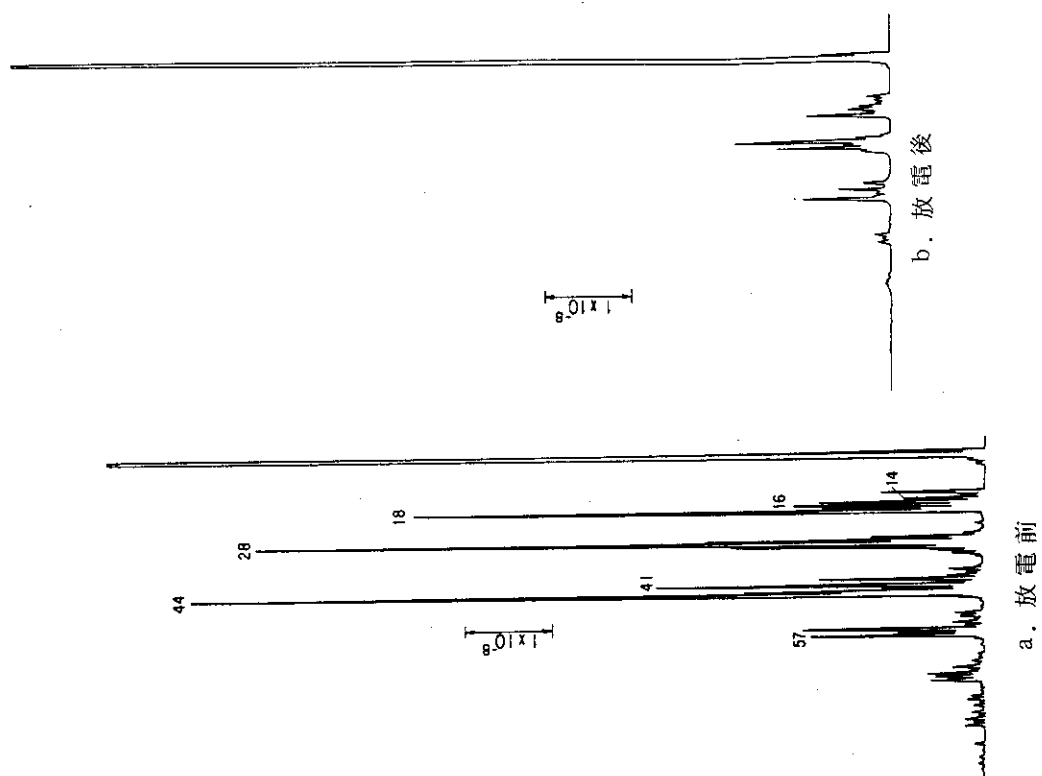


図10 放電前後のマススペクトル

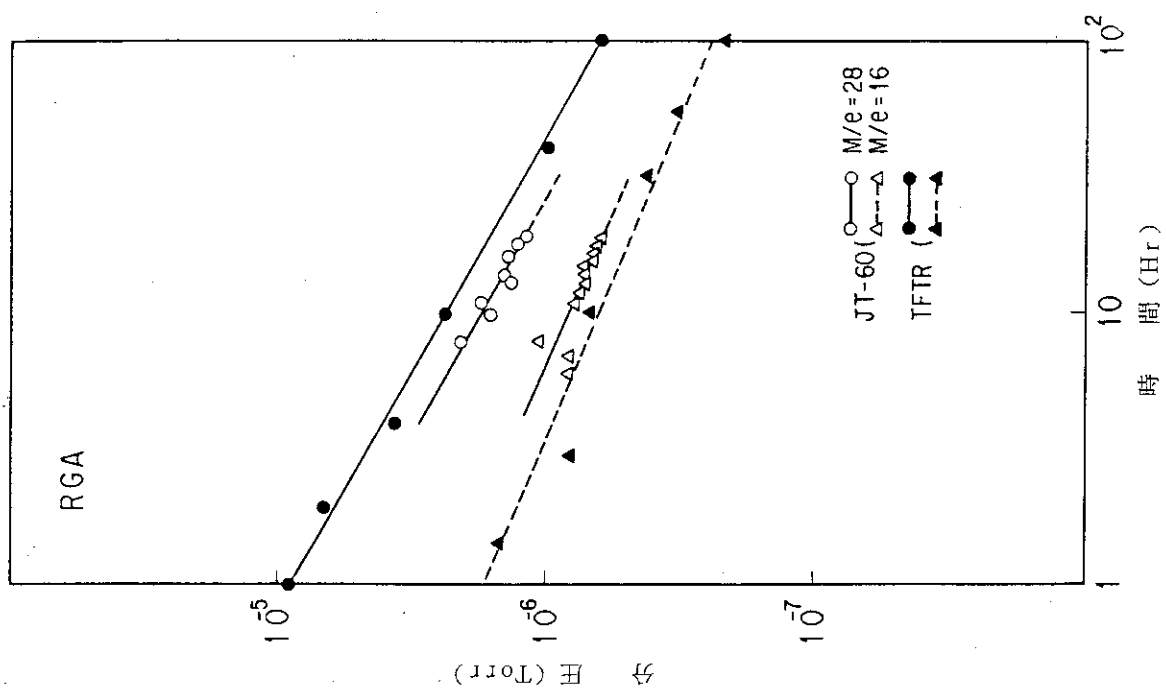


図11 GDCの洗浄効果