



JAES-Technology

2006-016



JP0650375

N-NBI 用イオン源加速部における 絶縁耐力と内部放出ガス特性

Characteristics of Voltage Holding and Outgassing
on the Accelerator of JT-60 N-NBI Ion Source

菊池 勝美 秋野 昇 池田 佳隆 薄井 勝富
梅田 尚孝 大賀 徳道 河合 視己人 藻垣 和彦

Katsumi KIKUCHI, Noboru AKINO, Yoshitaka IKEDA,
Katsutomi USUI, Naotaka UMEDA, Tokumichi OHGA,
Mikito KAWAI and Kazuhiko MOGAKI

核融合研究開発部門
粒子ビーム加熱システム開発グループ

NBI Heating Group
Fusion Research and Development Directorate

March 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAES-Technology

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に刊行している研究開発報告書です。
本レポートの全部または一部を複写・複製・転載する場合は下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

This report was issued subject to the copyright of Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about the copyright and reproduction should be addressed to :

Intellectual Resources Section,
Intellectual Resources Department
2-4, Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, JAPAN
Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

©日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency, 2006

N-NBI 用イオン源加速部における絶縁耐力と内部放出ガス特性

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 トカマクシステム技術開発ユニット

菊池 勝美※・秋野 昇・池田 佳隆・薄井 勝富

梅田 尚孝・大賀 徳道・河合 視己人・藻垣 和彦

(2006年1月27日受理)

500keV 負イオン NBI 加熱装置は 1996 年から JT-60 のプラズマ加熱、電流駆動用に運転してきた。負イオン源は負イオンビームを 500keV まで加速する設計であるが、過去 10 年間の運転では、加速部の絶縁破壊により負イオンビームの加速電圧は 400kV に留まっている。今回、絶縁破壊の解明に向けて、ビーム引出のない場合のイオン源の絶縁耐力を調べた。この結果、絶縁破壊が無い場合でも、高圧印加を行うと $M/e=28$ を主成分とするガス放出があることが明らかとなった。また絶縁破壊時のガス放出も、同様なガス種成分であった。コンディショニングはガス放出を低減し、その結果、絶縁耐力を改善した。一方、イオン源内部では絶縁破壊が無くとも、発光現象が起きる。イオン源の重水素ガス圧を 10^{-4} Pa から 0.5 Pa の範囲で制御したところ、発光強度は加速部のガス圧を上げると減少した。絶縁耐力も同様に、重水素ガス圧を上げると改善したことから、絶縁破壊と発光現象には相関があると考えられる。

本報告は、ビーム引出が無い場合の加速部高圧印加時におけるガス放出と発光現象挙動の初期的な測定結果に関するものである。

那珂核融合研究所（駐在）：〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

※ 原子力エンジニアリング（株）より出向中

Characteristics of Voltage Holding and Outgassing on the Accelerator
of JT-60 N-NBI Ion Source

Katsumi KIKUCHI*, Noboru AKINO, Yoshitaka IKEDA, Katsutomi USUI,
Naotaka UMEDA, Tokumichi OHGA, Mikito KAWAI and Kazuhiko MOGAKI

Division of Tokamak System Technology
Fusion Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Naka-shi, Ibaraki-ken

(Received January 27, 2006)

The 500 keV negative-ion based neutral beam injector (NBI) has been operated to heat plasma and drive plasma current on JT-60U since 1996. The ion source was designed to accelerate the negative ions up to 500 keV. During the last 10 years, the accelerated voltage of the negative ion beam has been limited to ~400 keV by breakdowns in the accelerator. To understand the breakdown phenomena, the characteristics of the voltage holding of the ion source were studied without beam extraction. Outgassing with the main species of $m/e=28$ was observed when high voltage was applied even without breakdowns. It was noticed that the fraction of the main species at breakdown was almost the same as without breakdowns. Conditioning reduced the outgassing and resulted in improvement of the voltage holding capability. Inside the ion source, a brightening was observed even without breakdown. The brightening intensity was suppressed by increasing the D_2 pressure in the accelerator in the range of 10^{-4} Pa to 0.5 Pa. Since the voltage holding was also improved with D_2 pressure, breakdowns seemed to correlate with the brightening phenomena in the accelerator.

This report gives the preliminary results of outgassing and brightening measurements when the high voltage was applied on the accelerator without beam extraction.

Keywords:

JT-60, Negative-ion, Accelerator, Breakdowns, Voltage Holding Capability, Outgassing, Brightening Phenomena, Conditioning

* On loan from Nuclear Engineering Co., Ltd.

目 次

1.はじめに	1
2. N-NBI イオン源及び計測系	1
3. 試験結果	4
3.1 高真空での加速部内部の放出ガスの計測	4
3.2 負イオン源加速部の絶縁耐力の真空度依存	5
3.3 可視カメラによるイオン源電極の発光現象	5
4. 考察	6
4.1 放出ガスの組成成分評価	6
4.2 絶縁耐力の真空度依存	6
5. まとめ	7
謝 辞	7
参考文献	8

Contents

1. Introduction	1
2. N-NBI ion source and diagnostics	1
3. Experimental results	4
3.1 Outgassing from the accelerator in high vacuum pressure	4
3.2 Voltage holding at the accelerator	5
3.3 Brightening in the accelerator by CCT camera	5
4. Discussion	6
4.1 Analysis of outgassing splices	6
4.2 Pressure dependence of voltage holding	6
5. Summary	7
Acknowledgments	7
References	8

1. はじめに

JT-60 トカマクにおいては、高温・高圧力の高性能プラズマを得るには、外部からの効果的な加熱を行うことが不可欠である。JT-60 用負イオン粒子入射装置（以下 N-NBI 装置）は、高性能プラズマでの中心加熱やプラズマ電流駆動を行うために、高エネルギーかつ高パワーの中性粒子ビームを JT-60 プラズマに入射する装置であり、ビームエネルギー500kV、ビームパワー10MW を目標として 1995 年に設置された 1)。

N-NBI 装置用負イオン源は、製作当初から改良・調整や特性試験を行いながら約 10 年間加熱実験に使用してきた。入射パワーも徐々に増大し、最大 5.6MW まで進展してきたが、加速ビームエネルギーは、加速部の絶縁耐力不足のため 400keV 程度に留まっている。さらにビームを引出さない条件（無負荷）でも加速部の絶縁耐力は、473kV 程度であり、加速部の絶縁耐力の向上が N-NBI 装置の大きな課題となっている 2)。図・1 は、2000-2005 年までの、ビーム引出無しとビーム引出有りでの絶縁耐力性能の履歴を示す。負イオン源の真密度は、ビーム引出に必要な 0.3Pa である。負イオン源は、アークチャンバー部のフィラメントやセシウム等の消耗部品の定期的な交換が必要なため、半年または 1 年毎のサイクルで、大気ベントし保守点検を行っているため、保守点検後の耐電圧性能は一旦劣化し、その後コンディショニングにより回復している。2003 年以降に関しては、JT-60 実験スケジュールの変更に伴い、N-NBI 装置の稼働時間が短縮したため、コンディショニング時間が短くなっている。また 2004 年からは高電圧印加よりもビームパルスの伸長化を優先させている。このため 2003 年から 2006 年 1 月までの期間における、加速部の絶縁耐力性能は、ビーム引出無しの場合 420kV 程度であり、ビーム引出の場合は 380kV 付近に留まっている。

負イオン NBI の入射パワーは、加速エネルギーとビーム電流の積で与えられる。一方、加速エネルギーとビーム電流の最適関係は、ビームの収束条件（パービアンス：加速電圧 \propto ビーム電流 $^{3/2}$ ）から決定されるため、入射パワーは加速エネルギーの 5/2 乗に比例する。従って、入射パワーを向上するためには、加速部の絶縁耐力性能の改善が不可欠である。今回、加速部の絶縁破壊の発生メカニズムの解明を目指して、負イオン源（加速部）近傍に残留ガス分析器を設置するとともに負イオン源内部を CCD カメラにより監視し、高電圧印加時や絶縁破壊時の挙動を調査した。2 章に負イオン源及び計測系、3 章に試験結果として、放出ガス特性、耐電圧の真密度依存性、発光現象を述べる。4 章に考察、5 章にまとめを述べる。

2.N-NBI イオン源及び計測系

NBI 用負イオン源は、重水素または水素プラズマを生成、負イオンだけを引出し、高電界にて負イオンビームの加速を行う。負イオン NBI 用イオン源は、図・2 の断面構造図に示すように大別するとセシウム体積生成型のアークチャンバー部、電子を分離し負イオンだけを引出すプラズマグリッド電極 (PLG) と引出電極(EXG)、負イオンを 3 段の加速電極 (A1G,A2G,GRG) にて加速する加速部、各電極の支持枠、電極間絶縁用 FRP 等から構成されている。

イオン源性能は以下のとおりである。

表-1

負イオンアーケンバー部	セシウム添加体積生成型
ビーム種	D ⁻ またはH ⁻
加速部	3段加速等分担印加電圧
ビームエネルギー	500kV
ビーム電流	22A (一台当たり)
ビームパルス	高パワーモード10秒、ロングパルスマード30秒
ビーム発散角	5mrad以下
ビーム焦点	23.66m

負イオン源は、図-4 ビームラインのイオン源タンクに上下に配置され、上部をイオン源 U、下部をイオン源 L と称する。

負イオン源の加速部は、多孔型電極の 5 セグメント構造で、3 段加速電極で構成されている。アーケンバー側から第 1 加速電極 (A1G)、第 2 加速電極 (A2G)、接地電極 (GRG) と称する。図-3 に代表的な加速電極構造図 (A1G) を示す。一つのセグメントには負イオンビームが加速通過する孔は、直径 16mm、9 列 24 行の配列構成で、5 セグメントの総孔面積は 2171cm² となる。各電極の相互間隔は、EXG-A1G 間 75mm、A1G-A2G 間 65mm、A2G-GRG 間は 55mm の絶縁距離を有し、3 段加速の印加電圧は 3 等分に分担された電圧がそれぞれに印加される。加速部の 1 段当たり表面積は 1.7m² で多孔型加速電極 5 セグメントは 0.94m² である。また絶縁体の大気側で沿面放電により絶縁材の損傷を防止するため、絶縁体の大気側にはギャップ放電スイッチを設け、単段あたりの目標電圧 165kV 以上の電圧が絶縁体に印加された場合には、ギャップ放電を起こす保護となっている。

2 基のイオン源のうち、L 側の現在のイオン源は、2003 年にイオン源調整試験後に加速電極のビーム熱負荷軽減の改造を行った。内容は、一番上と一番下の 2 枚のセグメントを真空排気口化し、加速電極間の圧力を下げることで、負イオンビームが電極内部で中性ガスと衝突する中性化損失を低減させるものであり、同イオン源を用いて長パルス運転を実施した。

絶縁支持部は、絶縁管、接続フランジ、電極支持枠からなる。絶縁管は、内径 1800mm、長さ 315mm の絶縁材質 FRP を用いている。電極支持枠と絶縁管との間には、荷電粒子の飛び込みを抑制するためリング状のシールドを設置し、絶縁管表面を直視できない構造としている。

今回、加速電圧印加時の放出ガスの有無さらにはガス種の分析を行うためイオン源出口部に質量分析計を設置した。真空排気系の条件を表-2 に、設置した質量分析計及び従来からの設置している真空計の配置を図-4 に示す。なお通常の運転では大排気速度のクライオポンプ 1200m³/s (イオン源タンク)を用いているが、今回の放出ガス測定においては、検出感度を上げるためにパッケージ型小型クライオポンプ 80m³/s を専用排気として用いた。

表-2

イオン源運転条件	動作ガスの導入無し、加速部のみの電圧印可
真空排気機器	パッケージ型小型クライオ 4台
	ターボ分子ポンプ 2台
	排気速度 イオン源タンク 20000L/sec X4
	イオンダンプタンク 5000L/sec X2
	*残留ガス濃度を上げるために、ビームライン内大排気容量クライオポンプを使用していない。
計測機器	電離真空計 応答時定数 約20msec
	質量分析計 日本真空製 REGA-202R型
	測定点数 14点 走引タイム(サンプリング)約3SEC
	測定質量数 2, 4, 12, 14, 16, 17, 18, 27, 28, 31, 32, 39, 41, 43, 44.
	質量分析計は、イオン源Lの出口部に計測のため設置した。 (なお、分析計ポートは電離真空計と共にしている)
	質量分析計は、PCを用いた日本真空製QCSソフトにてデータ収集
データ収集機器	真空計および加速電圧等は、データストレージ型ディジタルオシロ 及び高速A/D変換器データ収集

イオン源内部圧力分布は、以下に示すように真空計の実測および内部幾何学的構造より求めたコンダクタンスにより評価した。

$$\Delta P = P_{is} - P_{ig} \text{ [Pa]} \quad Q: D2 \text{ ガス導入量 Pam}^3/\text{sec}$$

$$Q = C_{ion} \times \Delta P \quad C_{ion}^{-1} = C_{plg}^{-1} + C_{exg}^{-1} + C_{esg}^{-1} + C_{a1g}^{-1} + C_{a2g}^{-1} + C_{grg}^{-1}$$

表-3 に各電極間のコンダクタンスを示す。

ここで真空排気系は、入射実験に使用するビームライン内部に設置してある大容量クライオポンプとイオン源調整試験に使用したパッケージ型小型クライオポンプの2通りの排気特性に対応したイオン源内部圧力分布を示した。イオン源内部圧力分布を図-5 に示す。イオン源内部では、アーチチェンバーの出口から加速部下流に向かい高真空となる。イオン源 L は、加速電極の5セグメントのうち2セグメントが真空排気口化しているため、イオン源 U よりも加速部内部の真空度を低く保つことができる。

イオン源内部の監視に関しては、中性化セル入口下部に CCD カメラを設置し、高電圧印加時のイオン源 L の GRG 電極を見込む可視画像の観察を行った。なおイオン源 L は一番上と一番下の2枚のセグメントが大きな開口となっており、イオン源内部の発光が漏れてくる構造となっている。

表-3

名 称	略 称	イオン源U	イオン源L	備 考
アークチェンバー圧力	Pis	測定値		
プラズマグリッドコンダクタンス	Cplg	34m ³ /s	23m ³ /s	計算値
引出電極コンダクタンス	Cexg	18m ³ /s	18m ³ /s	計算値
電子抑制電極コンダクタンス	Cesg	46m ³ /s	46m ³ /s	計算値
第1加速電圧コンダクタンス	Calg	35m ³ /s	69m ³ /s	計算値
第2加速電圧コンダクタンス	Ca2g	35m ³ /s	65m ³ /s	計算値
接地電極コンダクタンス	Cgrg	35m ³ /s	50m ³ /s	計算値
イオン源出口圧力	Pig	測定値		

3. 試験結果

3. 1 高真空での加速部内部の放出ガスの計測

真空中に高電圧を印加すると、真空度上昇が発生することは良く知られた現象であることから、JT-60 の負イオン源の高電圧印加時の真空度変化を精度良く調べた。負イオン源は、各電極の他、電極支持枠、電極間絶縁用 FRP 等から構成されており、真空機器の観点からは大気ベント後、これらの構成機器の表面には大量のガス付着がある状態と考えられる。したがって高圧印加開始前に、連続 2 週間以上の真空排気を継続し、ベースの真空度を 10^{-4} Pa の状態で計測を実施した。なおベーリングは行っていない。

図-6、7 に大気ベント後の初期段階における、負イオン源 L の 3 段加速に電圧 150kV~170kV、パルス幅 5 秒間を印加した際の、真空度及び質量分析計計測データの時系列変化データを示す。目標電圧の 495kV に比べ極めて低い印加電圧 (Vacc) において、電圧印加により真空度上昇が観測された。真空度上昇は、同一電圧で繰り返し行うことで放出ガスが急激に減少していくが、印加電圧を 10kV 増加させた直後には再び真空度が大きく上昇し、そしてショット毎に再び放出ガスが減少していくのが分かる。また同期して測定した質量分析から、この放出ガスの主成分は M/e=28 が全体の約半分を占め、その他は M/e =44, 2, 18 であることが分かった。一方、絶縁破壊が発生する場合も真空度上昇が観測されるが、図-8 に示すように、その値は電圧印加時による値に比べて小さい (この図は Vacc265kV 5 秒間の電圧パルスを印加した時の圧力変化)。電圧印加直後から放出ガスにより圧力が上昇し、最後に放電破壊による B.D が発生している。図から電圧印加による放出ガスと B.D 後の放出ガスが加算されてその後の圧力変化に現れているのが分かる。さらに放出ガスの成分比パターンも、絶縁破壊の有無で大きな違いは見られず、ショット毎に M/e=28 を主成分とするガス放出が減少していく (図-9)。一方、印加電圧はコンディショニングの進展に伴い、徐々に高くしていけるが、図-10 に示すように 220kV から 400kV の範囲

で、放出ガスの成分比はほぼ一定であり、全電圧領域において $M/e=28$ が主成分であった。さらに単段で 150kV を印加した場合（3 段では 450kV に相当）の放出ガスの成分分析においても、3 段加速の高電圧印加と同様な結果を示した（図-11）。また、そのガス放出量は 3 段加速の場合の約 1/2～1/3 であることから、ガス放出は 3 段ある加速部の何れの段でも同様に発生しているものと考えられる。

3. 2 負イオン源加速部の絶縁耐力の真空度依存

負イオン源加速部の絶縁耐力性能試験として、負イオン源 L においてビーム引出の無い（無負荷）条件における絶縁破壊開始電圧の真空度依存を調べた。高電圧印加は、一定電圧を 3～5 秒間印加し（印加電圧により印加時間が異なる）、その間、絶縁破壊が発生しなければ、数 kV 電圧を上げるというコンディショニングを行い、連続して 5 回絶縁破壊が発生した場合の印加電圧を絶縁破壊開始電圧として定義した。負イオン源のビーム引出時には、ソースプラズマをアーク放電で生成するため真空度は 0.3Pa とする必要があるが、ここでは、アークチャンバーへの重水素ガスの導入量を制御することで加速部の真空度を 10^{-4} Pa から 2×10^{-1} Pa までの範囲で変化させた。図-12 に加速部の真空度に対する絶縁耐力電圧を示す。□ V_{acc} は 3 段加速全体に電圧印加した場合、その他は、単段毎（上段 (V_{ext} - V_{a1g})、中段 (V_{a1g} - V_{a2g})、下段 (V_{a2g} - V_{rgg})）に電圧印加した場合である。単段の試験時には、測定対象以外の電極は接地電位とした。3 段加速及び単段加速の目標耐電圧は、それぞれ 495kV、165kV である。加速部の真空度は、3 枚の加速電極間の平均真空度とした。図より、この真空度領域で、絶縁耐力電圧は圧力が高いほど絶縁耐力が高くなることが分かる。また $\sim 5 \times 10^{-3}$ Pa より高真空領域になると絶縁耐力電圧は、一定値を示す傾向にある。真空度が 1×10^{-1} Pa を越える真空度では、すべての単段において絶縁耐圧は目標値である 165kV を満足し、それ以上の電圧印加を行うと大気側のギャップ放電スイッチが動作した。一方、3 段加速の場合は、真空度が 2×10^{-1} Pa であっても、絶縁耐圧は 470kV に留まり、目標値である 495kV を達成できなかった。また全真空領域において、絶縁耐圧は単段で達成した値の 3 倍よりも約 20～25kV、絶縁耐力が劣る結果となった。

3. 3 可視カメラによるイオン源電極の発光現象

電圧印加時のイオン源内部の放電現象を調査するために、ITV カメラによるイオン源 L の GRG 電極部の可視画像の観察を行った。この結果、ガス導入を行わない高真空状態 (10^{-4} Pa) で、放電破壊が無い場合であっても、電圧印加時に淡青色の発光が生じていているという初期結果を得た。画像を録画し、時間変化を調べた結果、発光強度は電圧印加直後に最大となり、その後 300ms 程度で弱くなった後は一定強度の発光が持続した。また、発光強度はイオン源の圧力を上げるとともに弱くなる。図-14 に印加電圧が 400kV で、イオン源内の真空度を 5×10^{-5} Pa から 1.2×10^{-1} Pa まで変化させた場合の ITV 画像を示す。この測定を行った時点の耐電圧特性は、 10^{-4} Pa で 410kV、 10^{-1} Pa で 430kV であり、全ての測定ショットでは放電破壊は起きていない。一方、この場合の負イオン源暗電流の時間応答を同図-13 に示す。暗電流の計測に用いている計器時定数が

140msec と遅く、また可視カメラは 30frame/sec 画像で計測系の問題から正確な統時性評価は差し控える。暗電流も発光強度と同様、高電圧印加直後に最大となった後、~300ms 程度で一定値を示す傾向にある。また電圧印加直後のピーク電流は、ガス圧を上げるとともに小さくなっている。発光強度と何らかの相関を示している。なおこの発光測定時には、コンディショニングが進んだ条件で実施しており、真空度の上昇は 10^{-4} Pa のレベルであった。

4. 考察

4. 1 放出ガスの組成成分評価

高電圧印加時の放出ガスの特徴は、絶縁破壊の有無によらず、その主成分が $M/e=28$ であることである。また放出ガスが低減すると絶縁破壊が抑制されることから、放出ガスの発生源が絶縁耐力を制限している鍵として考えられる。今回用いた 4 重極マス分析計においては、同じ質量数においても分子構造が異なる 2 原子分子、多原子分子が捕集されるため、そのガス種解析にはピークパターン相互の解読が必要となる。図-14 に質量数に対応した特徴的な残留ガス成分表を示す³⁾。JT-60 の負イオン源で得られた放出ガス組成成分比は、 $M/e28$ が約 55% であり、 $M/e44$ と 2 が 8~18% を占める。一般的に $M/e28$ は、N₂ 成分と判断しやすいが、 $M/e2,44$ 成分は、分子から脱離した H₂ や C₃H 系のイオン化した炭化水素系であることから、 $M/e28$ はイオン分離した C₂H₄⁺ と推察される。すなわち残留ガスの主成分は、炭化水素系ガスであると思われる。さて負イオン源の主な構成材料は、電極間の絶縁材である FRP を除き金属材料であることから、炭化水素系ガスの放出源としては、イオン源のオーバーホール時に使用したアルコール洗浄剤或は FRP が候補と考えられるが、今回の試験は、大気ベント後、数週間の真空排気を行っており、金属面からのアルコール溶剤が放出した可能性は低いと考えられ、FRP がガス放出源として最も可能性が高いと推察される。

4. 2 絶縁耐力の真空度依存

真空中の放電現象では、絶縁破壊電圧が高真空よりも 10^{-2} Pa 程度の方が高くなり、さらに高真空になると急激に絶縁破壊電圧は低下することが報告⁴⁾されており、今回の JT-60 の負イオン源の絶縁耐力特性も同様な結果を示している。この真空度依存性に関しては、幾つかの説明があるが、まだ一般的に成立する統一的な理論は確立されていない。実際、今回の試験条件での電子の平均自由行程は、重水素の電離断面積⁵⁾を 10^{-15}cm^2 (電子エネルギー～50eV の値: 最大値) とすると、真空度が 0.1Pa の場合でも 170m となり、イオン源の特徴的な長さ(加速電極間: 約 70mm、FRP 長さ: 315mm) を大きく上回り単純なガス放電では説明できない。

しかし、イオン源内部の発光現象と暗電流の相関から、高真空時には高電圧印加のみでイオン源内部の何処かで、強い電子放出が起きていること、ガス圧を上げるとその電子放出が抑制されることを示している。さらに電圧印加直後に発光強度と暗電流がピークとなっている。ビーム引き出さない条件では、熱的な電子放出源が無いことから、加速電圧立ち上がりの過渡的な応答に

より局部的な電界集中が発生し、電界電子放出が生じている可能性がある。いずれにせよ、負イオン源内部の発光現象に関しては、初期的な結果を得たばかりであり、今後、高速の時間応答や分光分析を行い、発光現象原因や場所の同定を図ることで、負イオン源の加速部の絶縁破壊の原因解明を進める必要がある。

5. まとめ

負イオン源の絶縁耐力性能の改善に向け、ビーム引出無しの場合の電圧印加時のガス放出や発光等の挙動を調べ、以下の結果を得た。

- ・ 電圧印加時のイオン源内部からの放出ガスの計測分析を行ったところ、BreakDown の発生がない時でも、コンディショニング途中の電圧上昇に伴い多量の放出ガスが発生する。また、質量分析計による計測の結果、M/e28、44、2 が放出ガスの主成分であり、炭化水素系のガスと推測できる。炭化水素系のガスの発生源として FRP 絶縁管の可能性が高い。
- ・ 単段電圧印加と全段印加時の放出ガスを比較するとマスアナイオノン電流ピーク値 M/e28 が 1/2~1/3 程度であることから、ガス放出は各段で発生していることが解った。また、コンディショニング初期段階 150kV から 400kV までの放出ガス測定を実施したが、ガス成分、成分比率とも全領域でほとんど変化が見られない。
- ・ コンディショニングにおいて、同じ印加電圧で繰り返し行うと放出ガスの発生量が減少し、絶縁破壊が発生しない。
- ・ 絶縁耐力性能は、真空度による強い依存性を示し、高真空 10^{-3} Pa 以下と 10^{-1} Pa の比較では、3 段加速の場合は絶縁耐力で 50~60kV の差があった。
- ・ 絶縁耐力は 3 段加速と単段では、3 段加速の方が低い。
- ・ 電圧印加直時に、イオン源内部で強い発光現象が観測され、その時間応答はイオン源の暗電流と相関傾向にある。
- ・ 発光強度の真空度依存は絶縁耐力と同じ傾向であり、高真空度の場合に強く、低真空度になると抑制される。このことから、発光現象は放電破壊と相関があると考えられる。

今回の結果を基に、イオン源の構成材料からのガス放出成分分析や発光の分光分析を行うことで、それらの発生箇所を同定できる可能性があり、今後、より詳細な計測・解析を進める予定である。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、粒子ビーム加熱システム開発グループの皆様に感謝を申し上げます。なお、本研究遂行にあたり、貴重なご意見・ご指導を頂きました栗山正明トカマク技術開発ユニット長、細金延幸研究主席、山本巧研究主席に感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) M. Kuriyama et al., Fusion Eng. Des., 26, 445 (1995).
- 2) M.Kuriyama et al., Fusion Science and Technology 42, 410(2002).
- 3) 真空ハンドブック、日本真空技術（株）
- 4) 放電ハンドブック、電気学会放電ハンドブック出版員会編、オーム社
- 5) R.K.Janev et al., Elementary processes in hydrogen-helium plasmas, cross sections and reaction rate coefficient, Springer-Verlag, Berlin, 1987

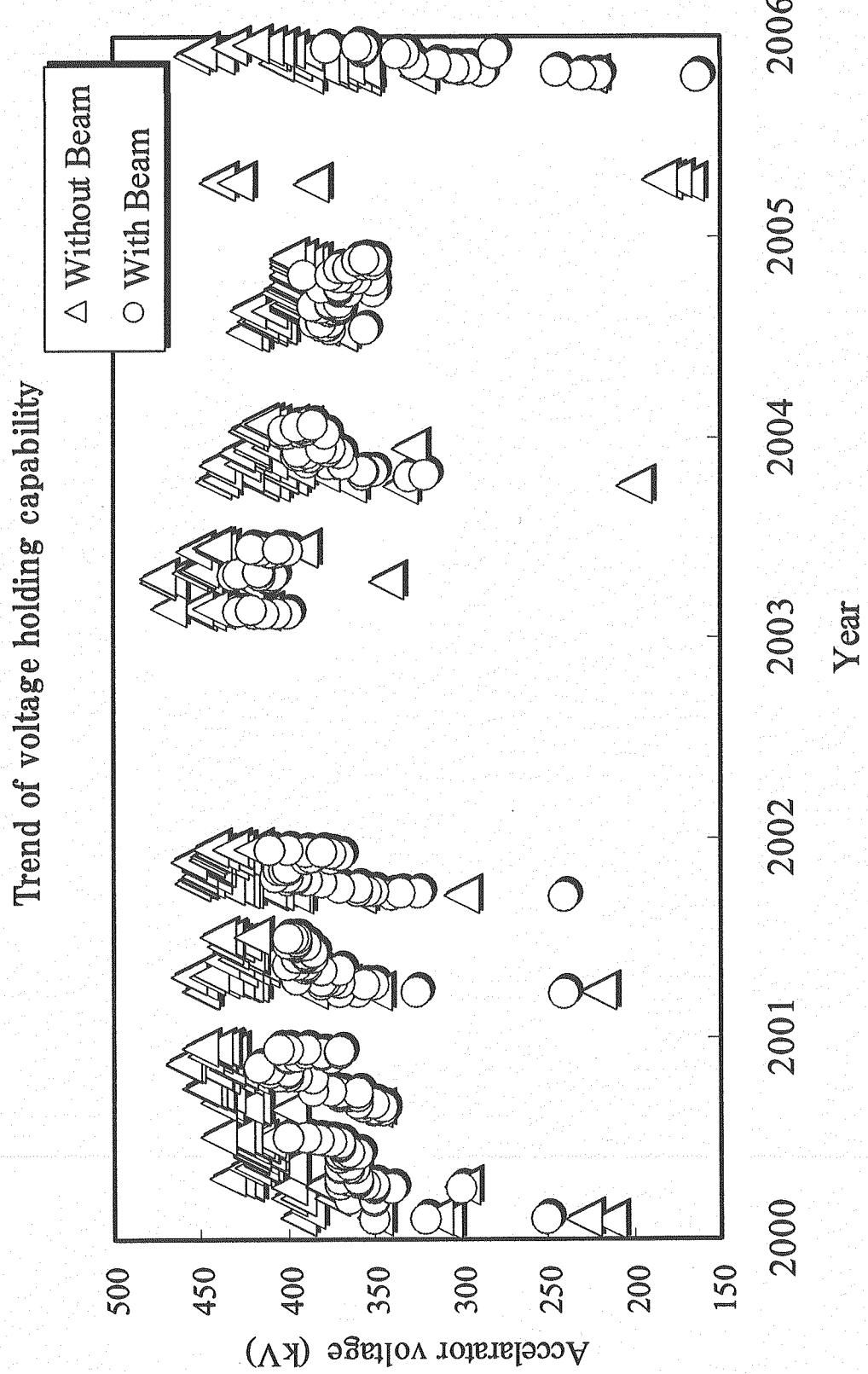


図-1 N-NBI加速部の絶縁耐力履歴

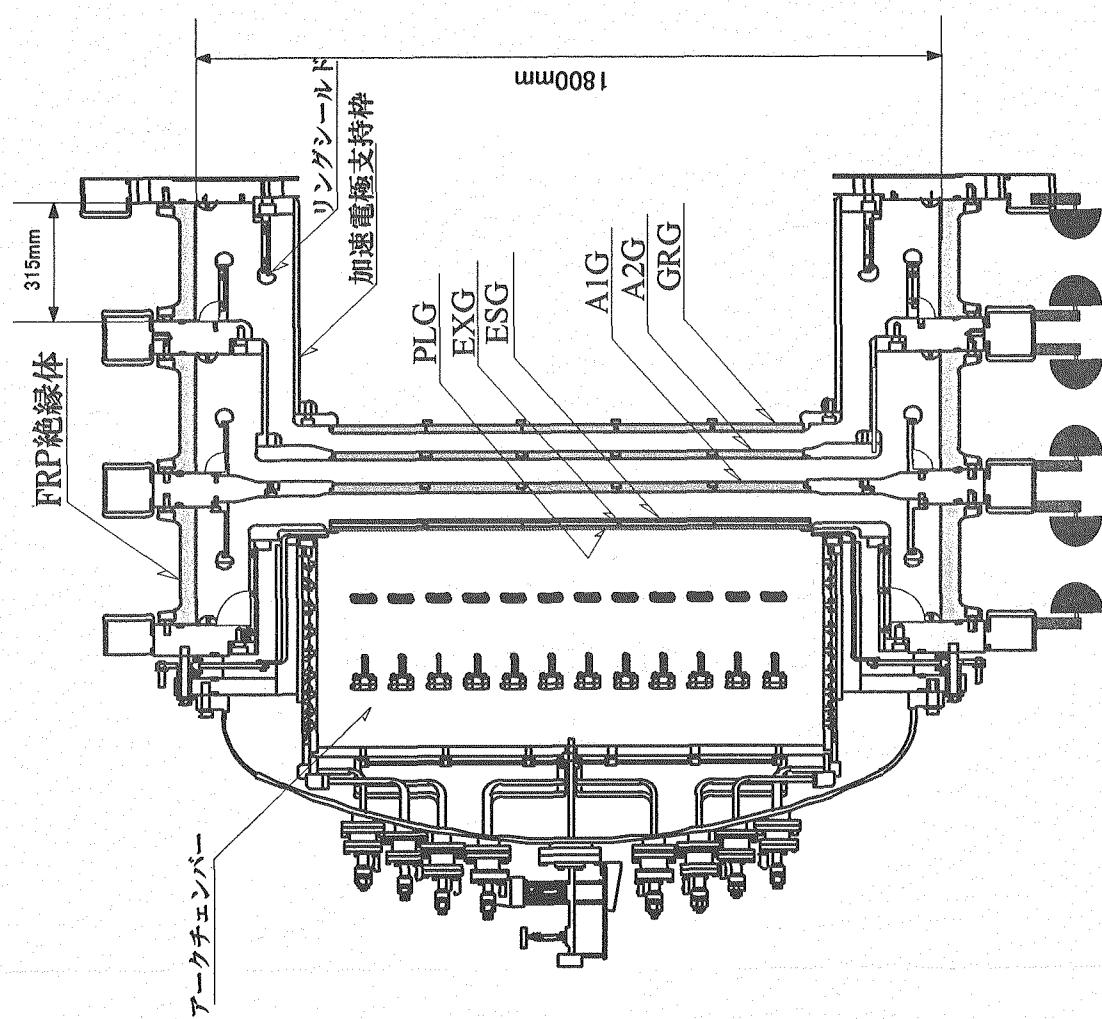


図-2 イオノン源断面図(U図面)

図-3 加速部電極構造図

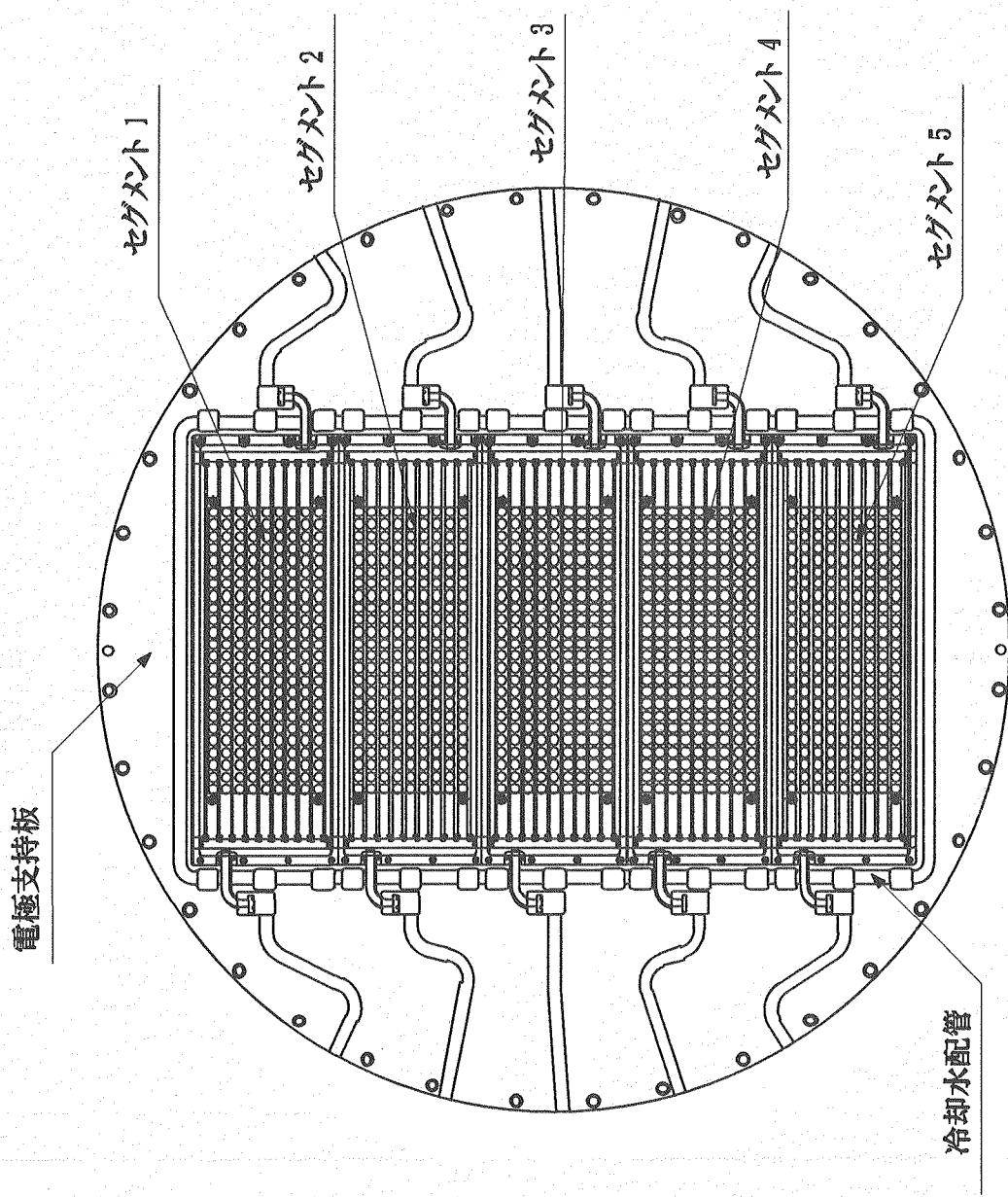
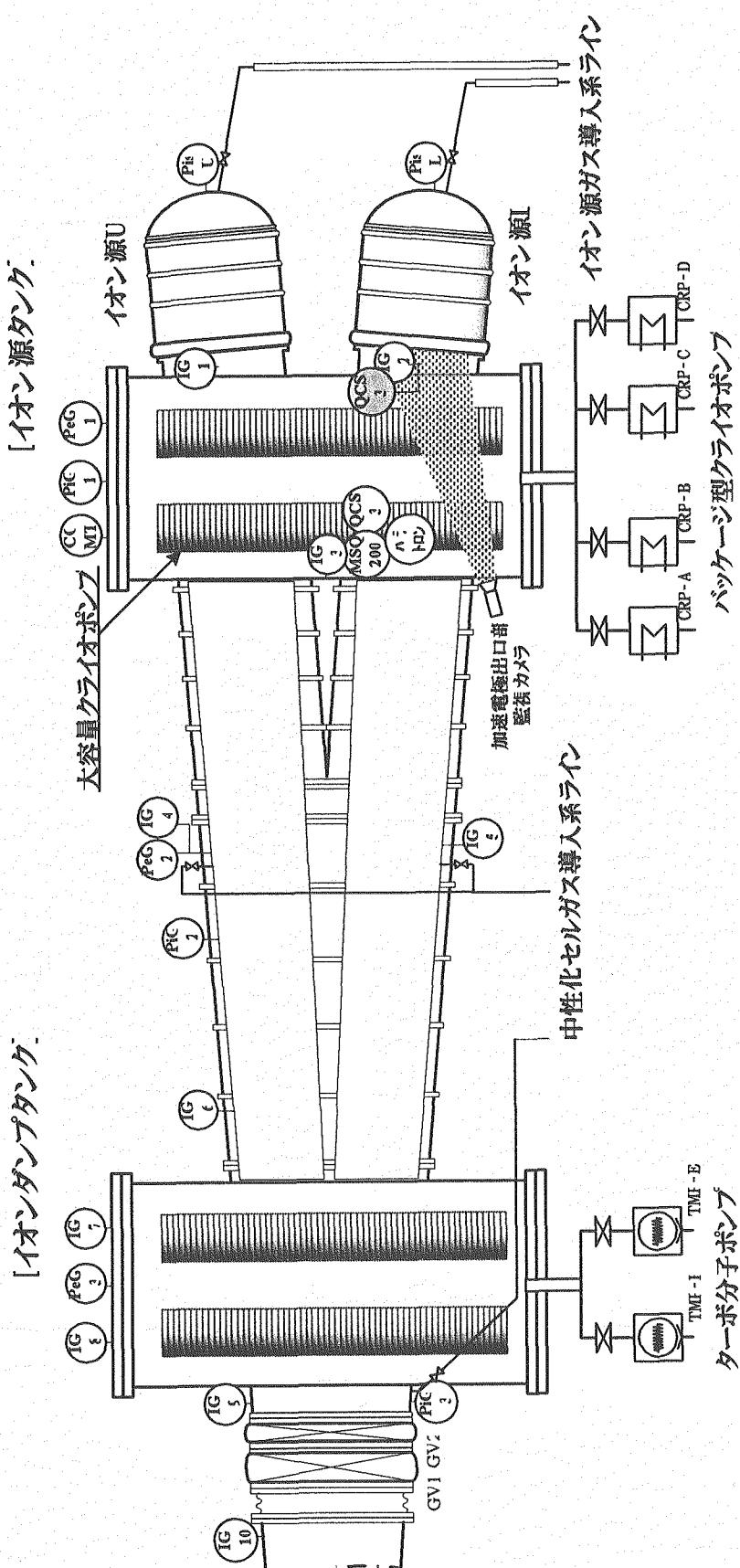


図-4 負イオンNBTビームライシン計測機器配置と排気系統



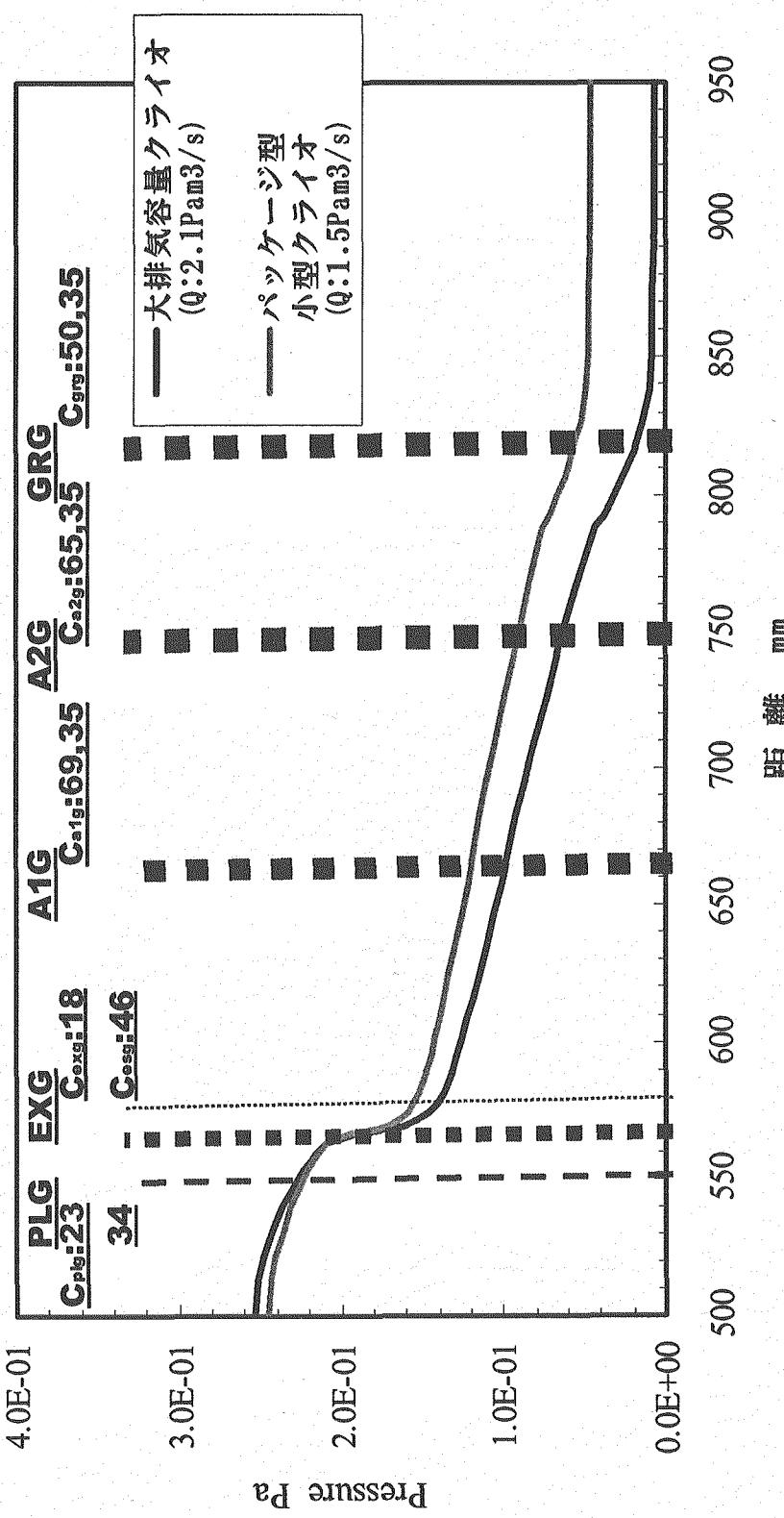


図-5 イオン源内部圧力分布

初期段階での電圧印加に伴う放出ガス

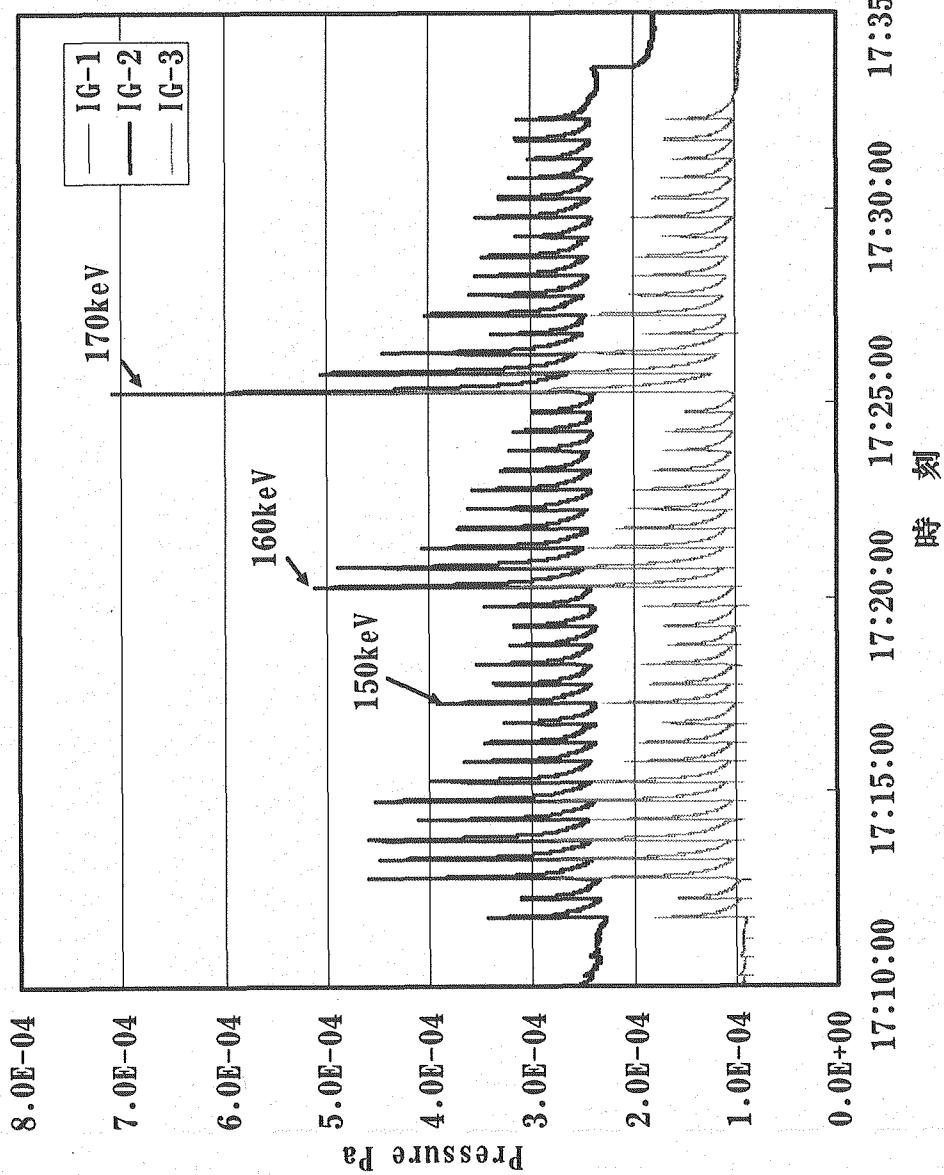


図-6 初期段階での放出ガス(真空計)

電圧印加 (150~170kV) の放出ガス

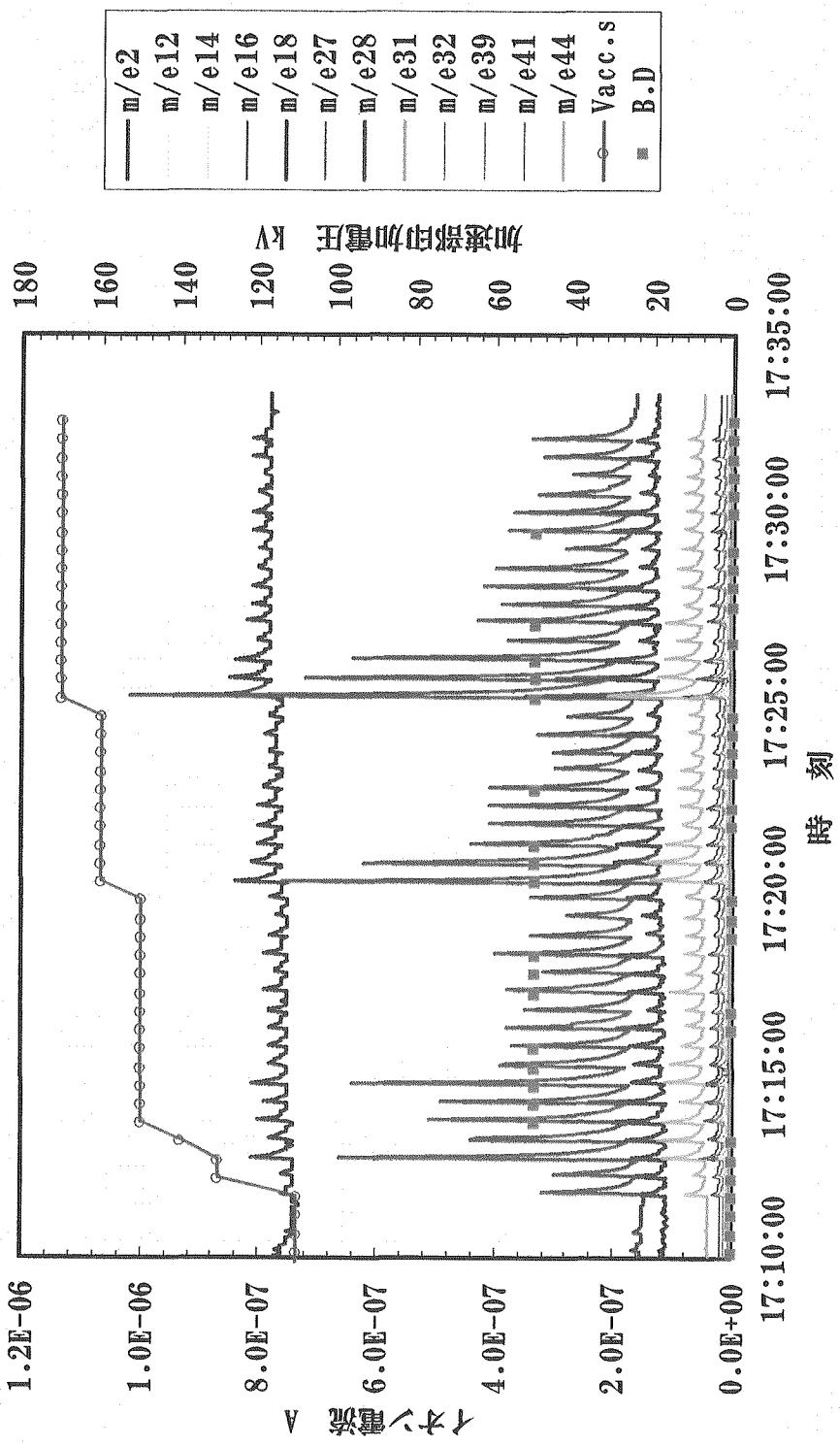


図-7 初期段階での放出ガス(質量分析計)

This is a blank page.

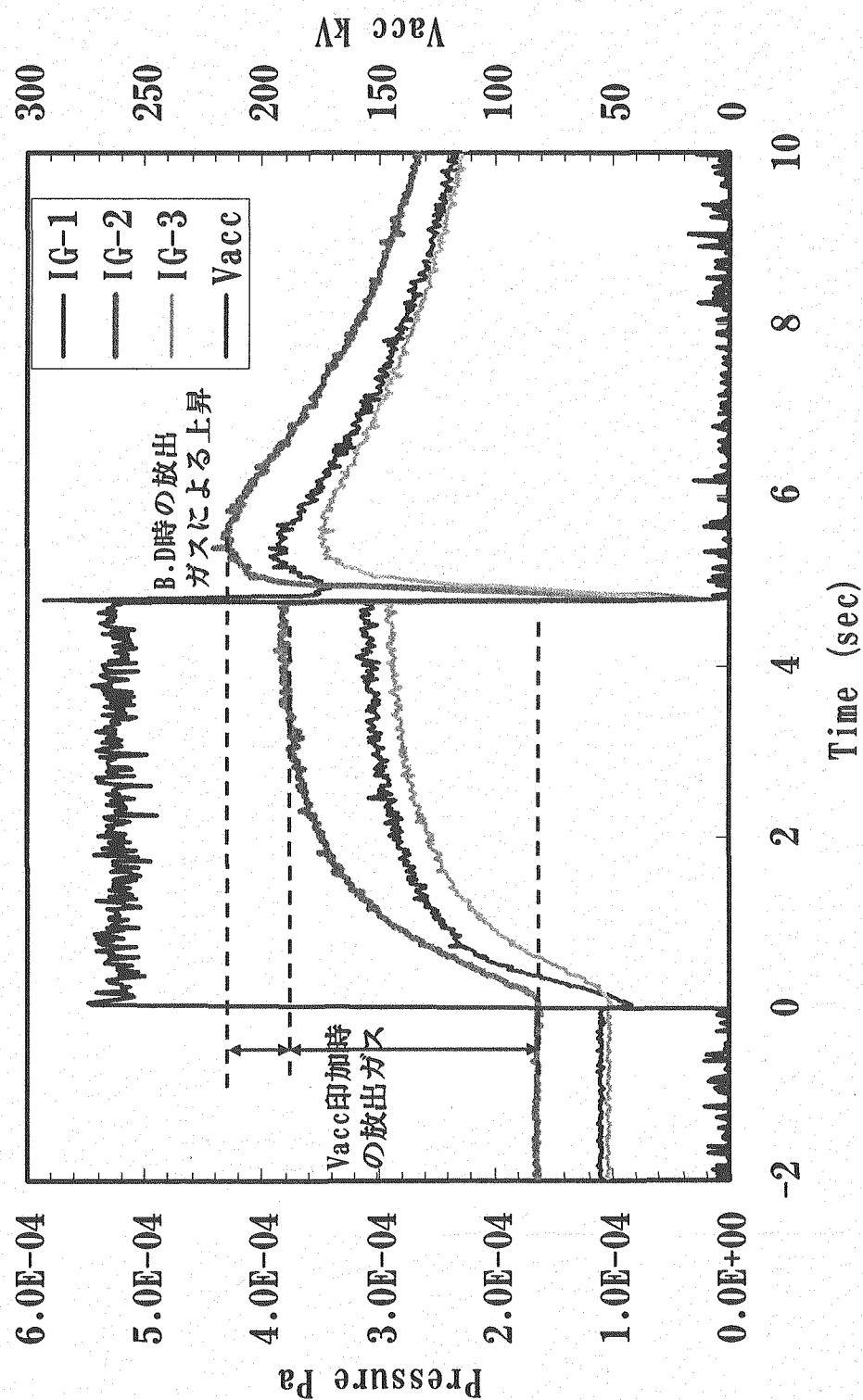
Vac_c:265kVのB.D放出ガス

図-8 電圧印加時の放出ガスとB.D放出ガス

図-8

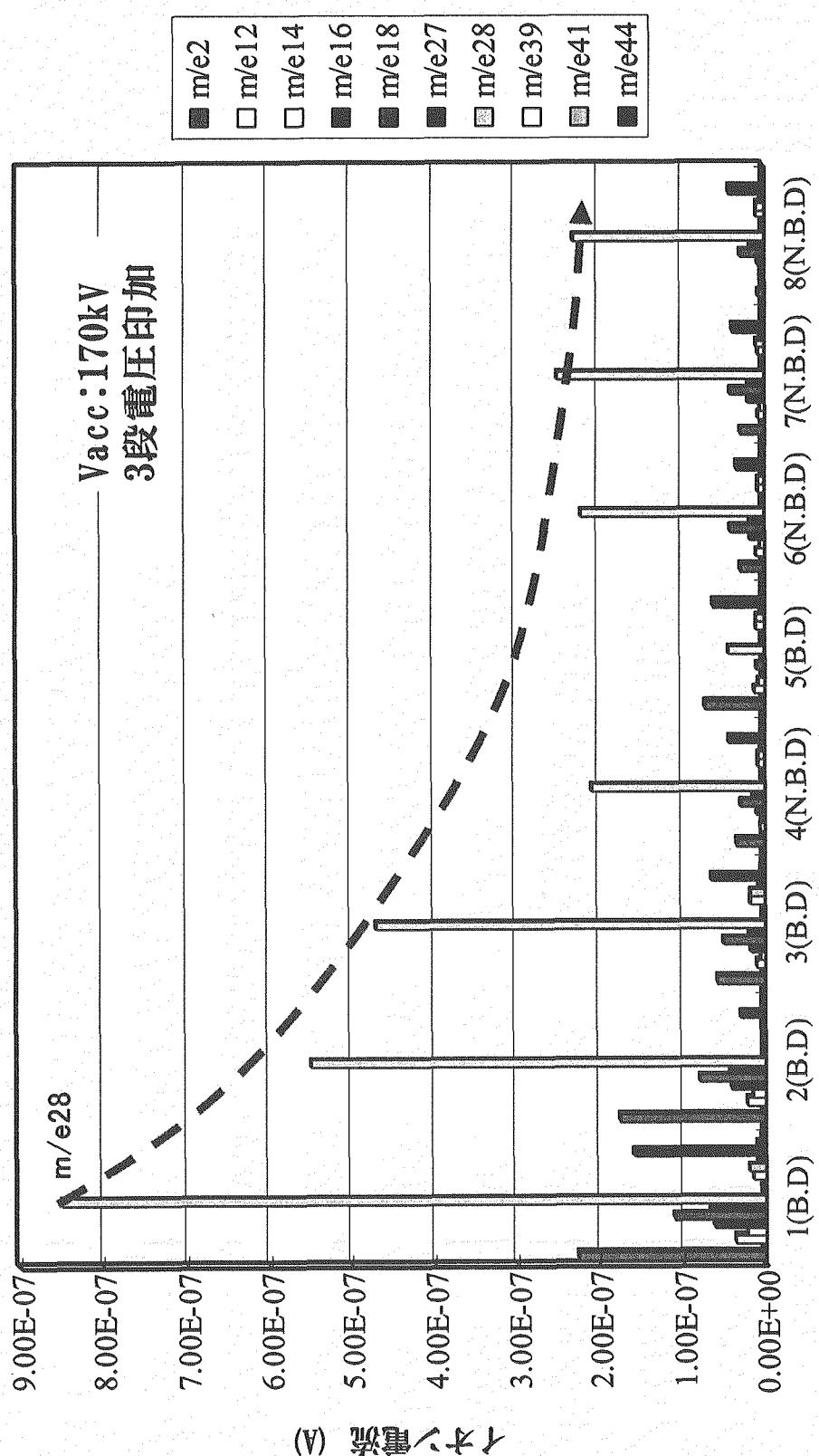


図-9 同印加電圧の繰り返しによるコンデンサイシヨニシング効果

加速電圧による放出ガス成分比

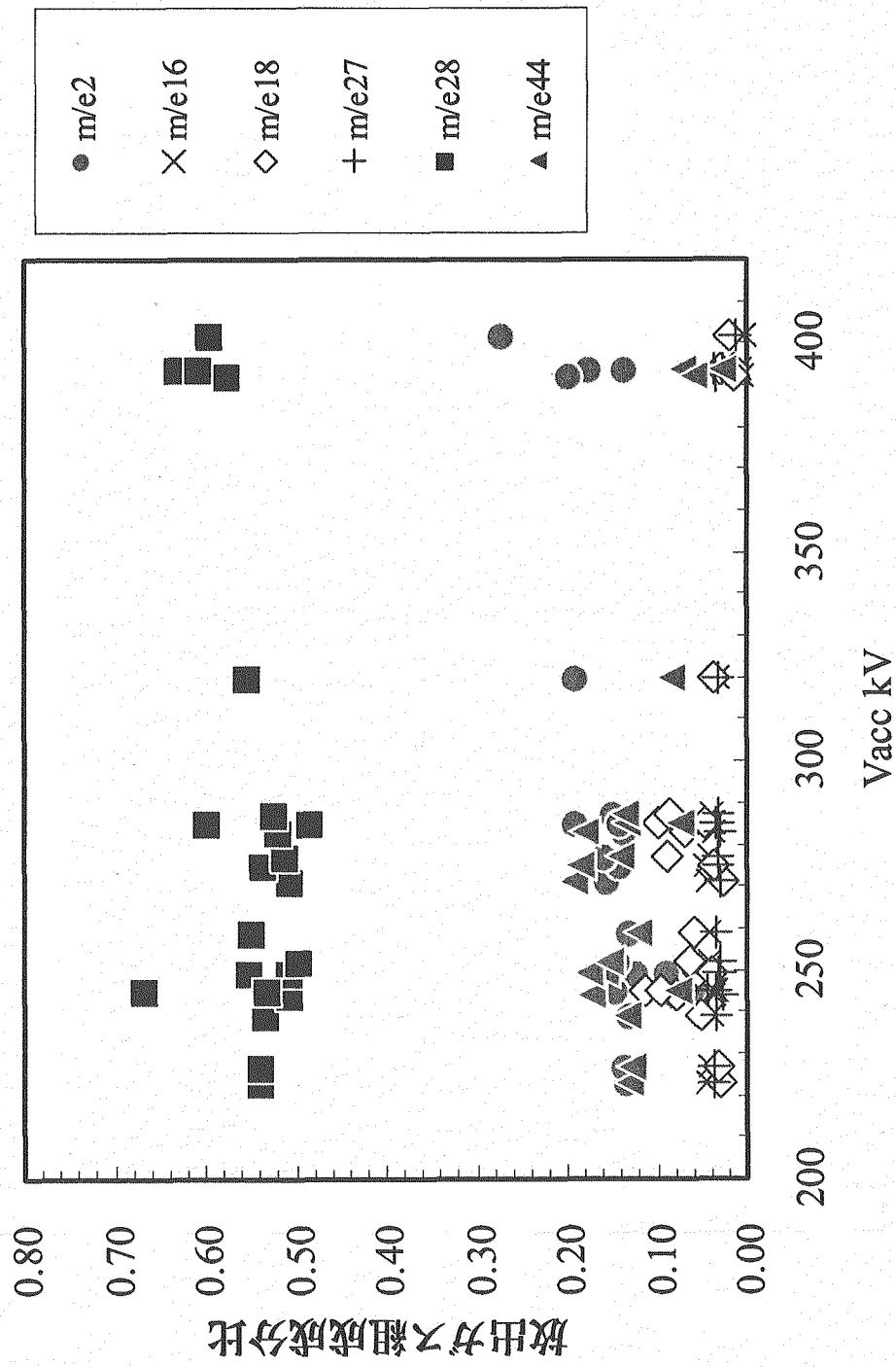
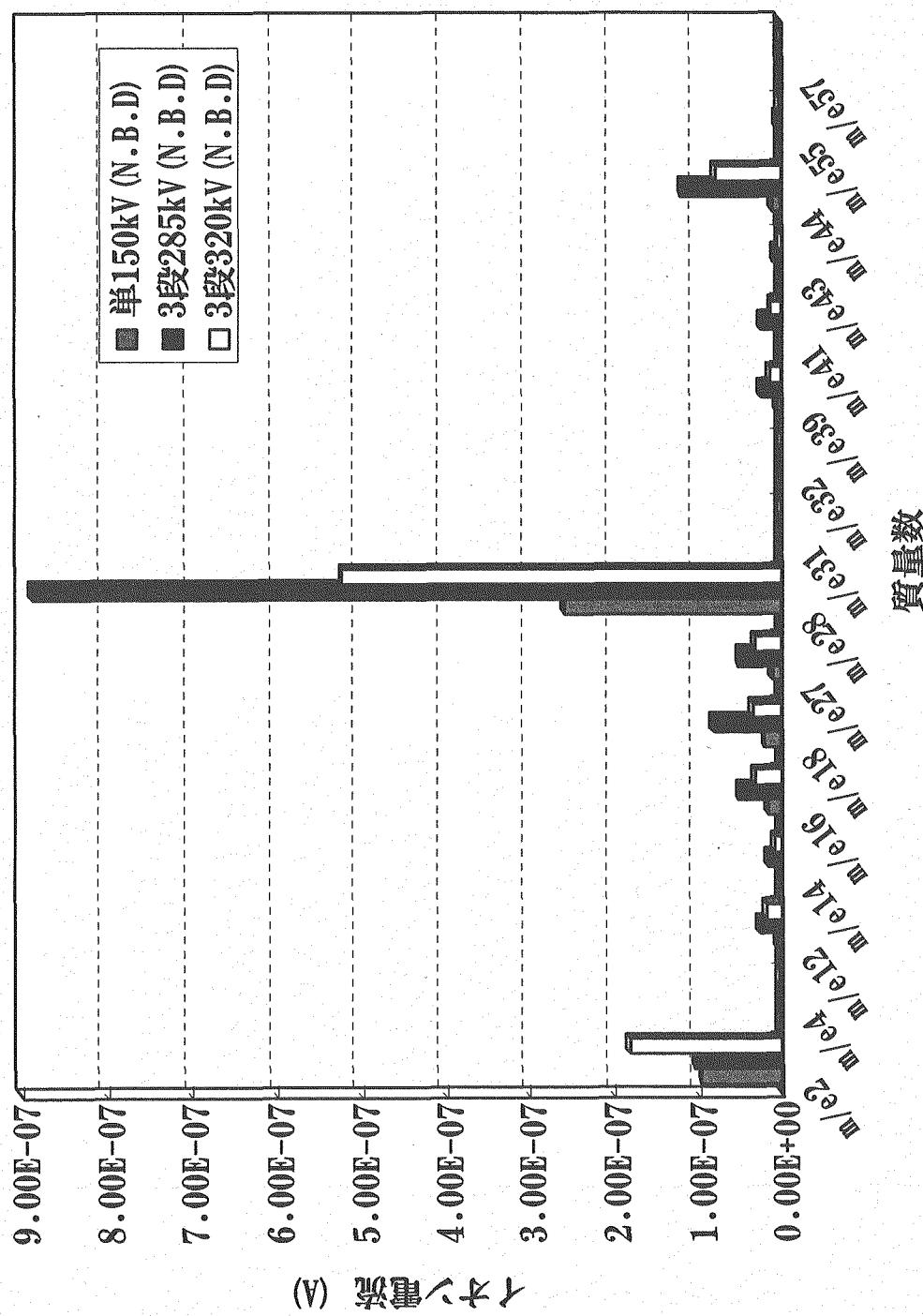


図-10 印加電圧の放出ガス成分比率傾向



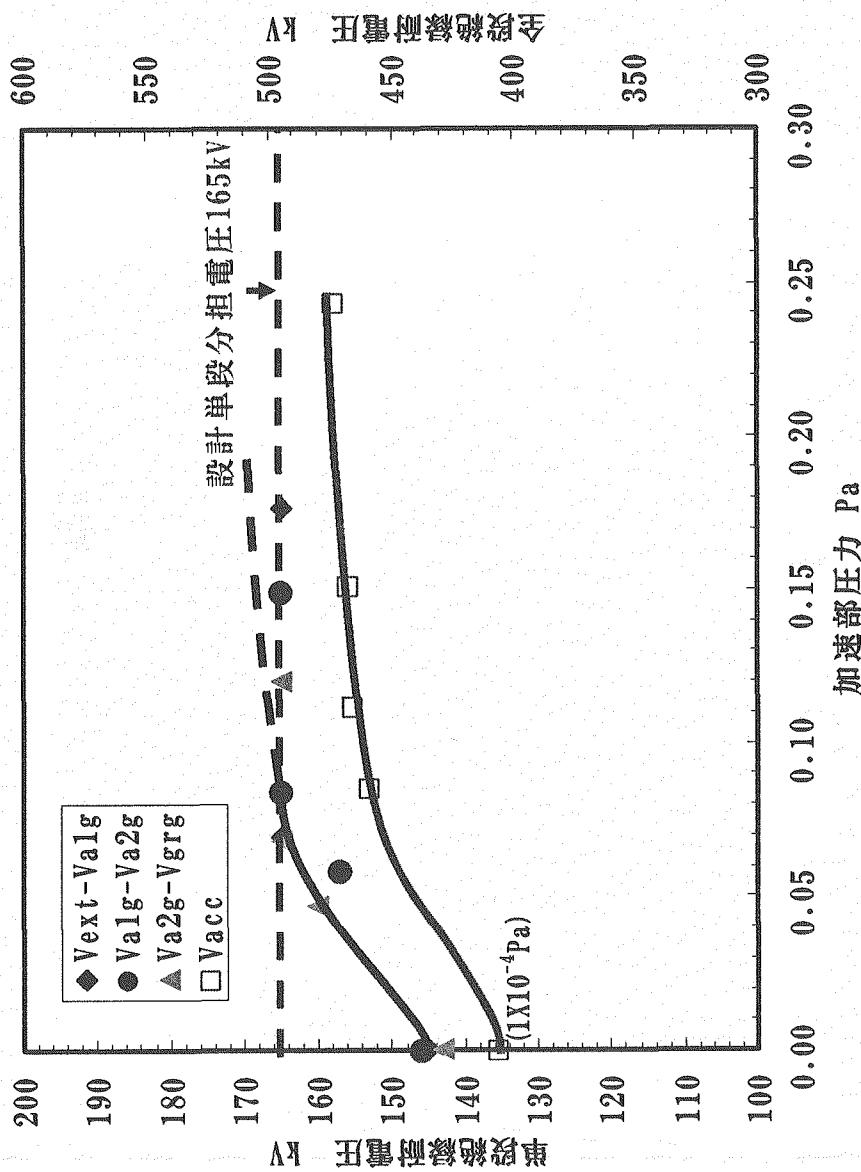
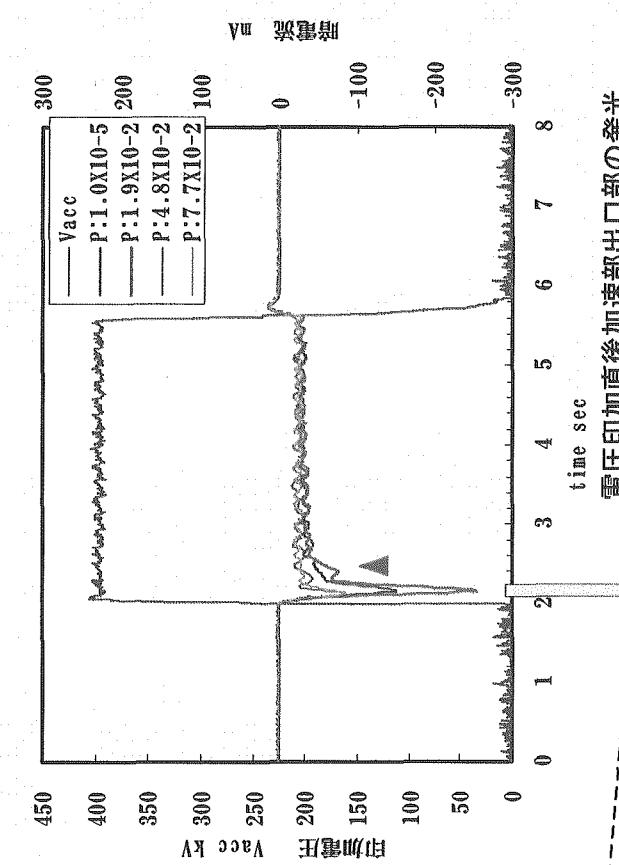
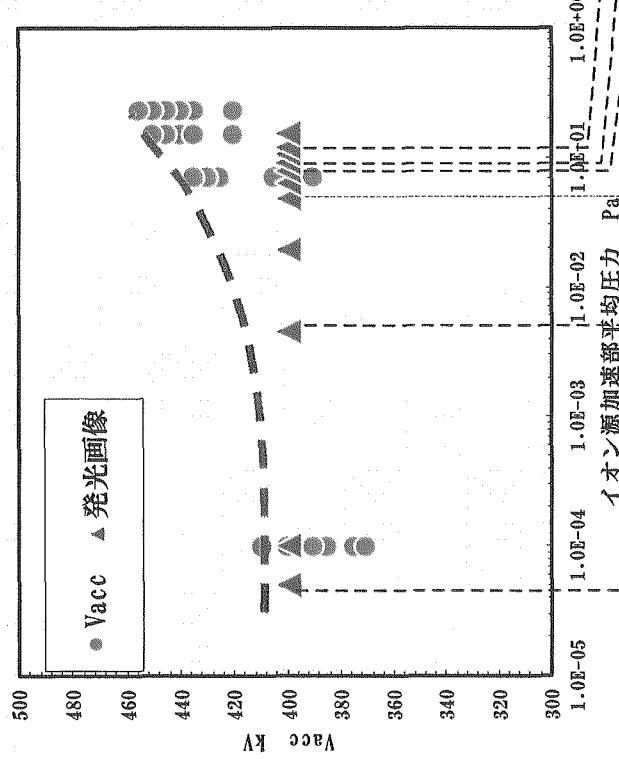


図-12 圧力による絶縁耐力性能

This is a blank page.



電圧印加直後加速部出口部の発光

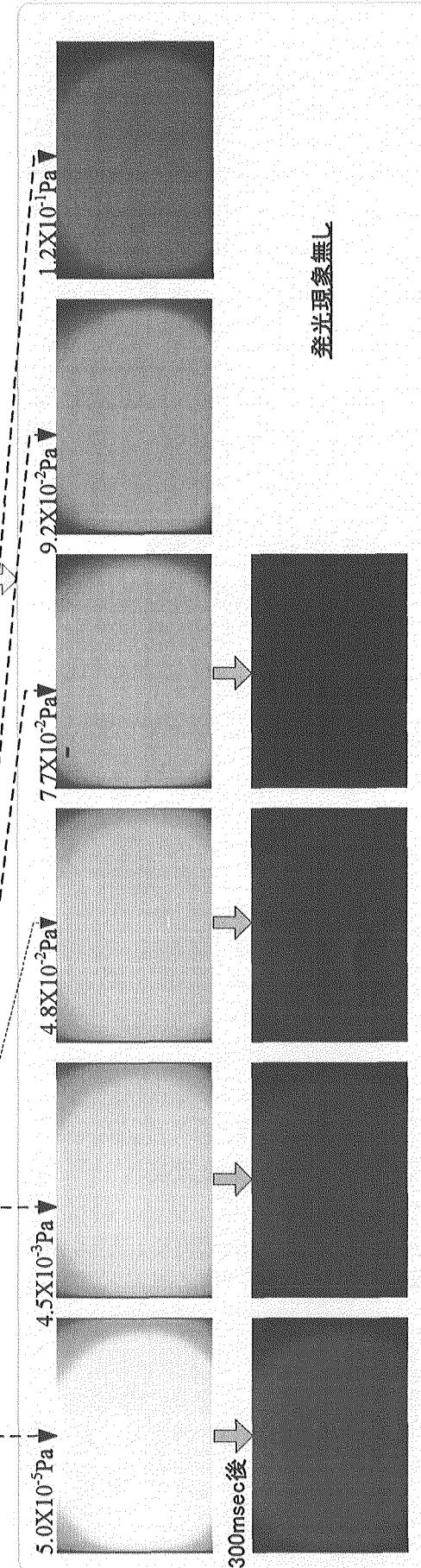


図-13 電圧印加時の発光現象と暗電流(圧力依存)

This is a blank page.

測定マス	質量数	イオン	残留ガス分子	備 考
	1	H ⁺	H ₂ ,水蒸気、炭化水素	
★	2	H ₂ ⁺	H ₂ ,水蒸気、炭化水素	主に種々の分子から脱離したHが再結合
★	12	C ⁺	CO、CO ₂ 、炭化水素	
★	14	N ₂ ⁺⁺ ,CO ⁺⁺ ,CH ₂ ⁺	N ₂ ,CO、炭化水素	
★	16	O ₂ ⁺⁺ ,O ⁺ ,CH ₄ ⁺	CH ₄ ,CO ₂ ,酸素化合物	
★	18	H ₂ O ⁺	H ₂ O	
	22	CO ₂ ⁺⁺	CO ₂	
★	27	C ₂ H ₃ ⁺	炭化水素	
★	28	CO ⁺ ,N ₂ ⁺ ,C ₂ H ₄ ⁺	CO,N ₂ ,炭化水素	炭化水素(28)は炭化水素(27)の5~10倍 CO ₂ (44)が多いとき、CO(28)も多い、
★	32	O ₂ ⁺	O ₂	
★	39	C ₃ H ₃ ⁺	炭化水素	
	40	Ar ⁺ ,C ₃ H ₄ ⁺	炭化水素、Ar	
★	41	C ₃ H ₅ ⁺	炭化水素	C ₃ 系炭化水素は、36~44に出る 39,41,43が特に多い
	42	C ₃ H ₆ ⁺	炭化水素	
★	43	C ₃ H ₇ ⁺	炭化水素	
★	44	CO ₂ ⁺	炭化水素、CO ₂	45,46にC ¹³ 、O ¹⁸ によるCO ₂ ピークが少し出る
★	55	C ₄ H ₇ ⁺	炭化水素	C ₄ 系炭化水素は、55,57が特に多い
★	57	C ₄ H ₇ ⁺	炭化水素	

図-14 成分ガス組成の相關表