



JAEA-Technology

2007-027



JP0750191

JT-60U負イオン源加速部の高電圧印加時の 発光現象と耐電圧特性

Characteristics of Voltage Holding and Light Emission on the Accelerator
of JT-60U N-NBI Ion Source

菊池 勝美 秋野 昇 花田 磨砂也 池田 佳隆
鎌田 正輝 河合 視己人 藻垣 和彦 能登 勝也
薄井 勝富

Katsumi KIKUCHI, Noboru AKINO, Masaya HANADA, Yoshitaka IKEDA
Masaki KAMADA, Mikito KAWAI, Kazuhiko MOGAKI, Katsuya NOTO
and Katsutomi USUI

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 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-
Technology

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 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
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

JT-60U 負イオン源加速部の高電圧印加時の発光現象と耐電圧特性

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^{*1}・秋野 昇・花田 磨砂也・池田 佳隆
鎌田 正輝^{*3}・河合 視己人・藻垣 和彦・能登 勝也^{*2}・薄井 勝富

(2007年 1月 26日受理)

JT-60U 負イオン源の長パルス化及び高出力化を図る上で問題となっている 500keV 加速部の耐電圧性能について調べた。設計加速電圧 500kV に対して、ビーム加速を伴う場合の耐電圧は最大約 400 kV であり、ビーム加速を伴わない（無負荷）場合、最大 455kV であった。この低い耐電圧性能の原因を調べるために、無負荷電圧印加時に、負イオン源の内部（真空側）で発生する光の強度を光電子増倍管で測定した結果、耐電圧と真空側の光強度との間に強い相関関係があることが分かった。つまり、放電破壊することなく長時間安定に維持することができる電圧(<400kV)においては、真空側の光強度はほぼゼロであったが、印加電圧が放電破壊を伴う領域 (>420 kV) まで上げると、真空側において発光が生じた。この時、発光強度は印加電圧とともにほぼ線形に増加した。この傾向は加速部の暗電流においても同様に観察された。さらに、0.1nm の解像度を有する分光器を用いて光の波長を測定した結果、光の波長は 420nm のピークを中心にして、360 nm-500 nm の広い領域に分布した。この際、水素、炭素、酸素等のガス放電で発生する輝線スペクトルは観察されなかった。光強度や暗電流と耐電圧との相関関係及び分光結果から、真空側の発光は、JT-60U 負イオン源の絶縁管として使用している FRP (Fiberglass Reinforced Plastic) への電子衝突が起因（カソードルミネッセンス）していると類推できる。

この結果に加えて、時間応答性の高い高速データ収集系を用いて、イオン源の内部発光及び外部の FRP 沿面放電保護用の球ギャップスイッチ放電光の発生タイミングを詳細に測定した結果、内部で放電破壊が発生すると外部の球ギャップが放電破壊を起こすこと、さらに一度、球ギャップが動作すると高電圧の再印加（数 70ms 後）時に、設定破壊電圧より低い電圧で球ギャップが絶縁破壊を起こし、イオン源の耐電圧を制限してしまうことが分かった。

那珂核融合研究所（駐在）：〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

^{*1}出向職員（原子力エンジニアリング（株））

^{*2}出向職員（日本アドバンスト・テクノロジー（株））

^{*3}博士研究員

Characteristics of Voltage Holding and Light Emission on the Accelerator
of JT-60U N-NBI Ion Source

Katsumi KIKUCHI^{*1}, Noboru AKINO, Masaya HANADA, Yoshitaka IKEDA
Masaki KAMADA^{*3}, Mikito KAWAI, Kazuhiko MOGAKI, Katsuya NOTO^{*2} and Katsutomi USUI

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

(Received January 26,2007)

Voltage holding capability of the 500 kV accelerator in the JT-60 negative ion source that is one of the key issues for high performance of the JT-60 negative-ion-based NBI system was investigated. The achieved voltage holding capabilities with and without the beam acceleration were 400 kV and 455 kV, respectively. To understand a poor voltage holding capability of the negative ion source, correlation between the voltage holding capability and the light emitted inside the ion source was carefully examined. The acceleration voltage was stably applied at < 400kV, where the light intensity was almost zero. Increasing the acceleration voltage beyond 400kV, the voltage holding become very unstable where the light intensity increases in proportion to the acceleration voltage. This tendency was also observed in the dark current of the negative ion source. Namely, the dark current increased with the acceleration voltage. The spectroscopy measurement showed that the light spectrum was a broad wavelength of 360 – 500 nm peaked at 420 nm. There was no line spectrum due to the gas discharge such as hydrogen, oxygen, carbon. From these results, it is seemed that the origin of the light emission is a cathode luminescence from the FRP (Fiberglass Reinforced Plastic) insulator in JT-60 negative ion source due to the electron impact.

Moreover, breakdown phenomena at inside and outside of the ion source were examined by using photo-multipliers with fast data acquisition system. When the breakdown occurred inside the ion source, the breakdowns sequentially occurred at the spark gap switches outside of the ion source, which protect the FRP insulator from the flashover on its surface. Once the spark gap was turned on after the breakdown inside the ion source, the breakdowns at the spark gap occurred at lower voltage than the normal set value when the high voltage was applied again after ~70 ms interval. This result indicates that the voltage holding capability was limited by the spark gap switches in this operational sequence.

Keywords:

JT-60U, Negative-ion, Accelerator, Breakdowns, Voltage Holding Capability, Spectroscopy,
Light Emission, Spark Gaps

^{*1} Research Staff on loan (Nuclear Engineering Co.ltd)

^{*2} Research Staff on loan (Nippon Advanced Technology Co.ltd)

^{*3} Post-Doctoral Fellow

目 次

1.はじめに	1
2. JT-60U用負イオン源	1
3. 計測装置	2
4. 試験結果及び考察	3
4.1 実験条件	3
4.2 加速部内部の発光測定	4
4.3 発光強度のイオン源真空度依存性	4
4.4 発光強度と放出ガスの相関	5
4.5 内部発光の分光測定	5
4.6 ブレークダウン時の電圧・電流・内部発光の時間応答	5
5. まとめ	6
謝 辞	7
参考文献	7

Contents

1. Introduction	1
2. N-NBI ion source for JT-60U	1
3. Diagnostics setup	2
4. Experimental results and discussion	3
4.1 Experimental condition	3
4.2 Measurement of light emission inside ion source	4
4.3 Dependence of light intensity on accelerator pressure	4
4.4 Correlation between light intensity and outgassing	5
4.5 Spectroscopy analysis	5
4.6 Time response of voltage, dark current, light intensity on breakdown	5
5. Summary	6
Acknowledgments	7
References	7

1. はじめに

数 100keV 以上の高エネルギーの中性粒子ビームを効率よくプラズマに入射できる負イオンビームを用いた中性粒子入射 (N-NBI) 装置は、核融合プラズマの加熱及び電流駆動を行う上で不可欠な装置である。JT-60U では、2 台の負イオン源によりビームエネルギー 500keV、ビームパワー 10MW を目標とした N-NBI 加熱装置が導入されている。目標の 10MW 入射を行うためには、イオン源 1 台当たり、500keV、22A の D⁻ビーム電流を生成する必要がある 1, 2)。この大電流高エネルギー D⁻ビームを生成・加速するため、加速部は 450mm(幅) × 1100mm(高さ) という大面積・多孔型の 3 段電極構造を採用している。大口径の 3 段電極間の加速電圧を保つため、電極間には内径 1.8m 長さ 315mm の大型絶縁管を挿入しており、絶縁材としては、大口径セラミック絶縁管の製作が困難なため、FRP(Fiberglass Reinforced Plastic)を採用している。

JT-60U N-NBI は、1995 年に完成してから、約 11 年間プラズマ加熱実験に使用しており、その間、動作条件の調整やイオン源の改造を行い、入射パワー、入射エネルギー及び入射パルス幅等の装置性能は徐々に増大している。最高入射パワーは 5.6MW (D2 ガス) であり、2006 年に入射パルス 320kV、3.2MW の条件で、21 秒間入射することに成功した。しかしながら加速電圧 400kV を超える入射は、イオン源加速部の絶縁破壊のため入射パルスは 1 秒以下に留まっている。さらにビームを引出のない条件 (無負荷運転) でもイオン源の絶縁耐力は 470kV 程度であり、加速部の耐電圧の向上 (目標 500keV) が JT-60U NBI 加熱装置の性能向上に向け最重要課題となっている。このため昨年、無負荷運転時の電圧印加中の放出ガス特性、耐電圧の D2 ガス圧依存性、加速電圧印加中の CCD カメラ観測などを行ったところ、コンディショニング過程にイオン源内部が発光する現象を見出した。しかしながら発光強度や時間応答に関しては十分な情報を得られておらず、放電破壊と発光現象の相関は不明瞭であった。このため今回、発光現象と放電破壊現象との関係を詳細に調査するため、光電子増倍管と分光器を用いて発光現象の高速・定量測定を行った。加えて 3 段加速電極間の FRP 絶縁管の大気側に設置した 3箇所の球ギャップの発光開始時刻の時間差を調べ、3 段電極のどの部分で絶縁破壊が発生したかを調べた。本報告書では、これらの JT-60U 負イオン源加速部の高電圧印加時における発光現象と耐電圧特性を報告する。2 章 JT-60U 負イオン源の説明、3 章で計測装置、4 章で測定結果及び考察、最後の 5 章でまとめについて述べる。

2. JT-60U 用負イオン源

JT60U 負イオン源を図-1 に示す。イオン源は、プラズマ生成部と 3 段電界加速部から構成されている。加速部は、プラズマグリット電極 (PLG)、引出電極 (EXG)、電子抑制電極 (ESG)、第 1 加速電極 (A1G)、第 2 加速電極 (A2G)、接地電極 (GRG) の 6 枚から成る。PLG を除くすべての電極は、無酸素銅で作られ、電極支持枠はアルミニウム合金で作られている。PLG はモリブデン製であり、少量のセシウムが塗布され、同表面で負イオンの表面生成が促進される。各電極は、鉛直方向に 5 セグメントに分割されている。1 つのセグメントは、9 行 24 列のビーム孔があり、ビーム出射孔の合計は 1080 である。PLG と EXG 間には、負イオンを引き出すために、通常 6~8kV の電圧が印加される。加速ギャップ間には同一加速電圧が印加されている。ESG-A1G、A1G-A2G、A2G-GRG

電極間間隔は、それぞれ 75mm, 65mm, 55mm ある。一番短い A2G-GRG 電極間間隔は、真空中での耐電圧試験を元に決定されている³⁾。その他の電極間距離は、負イオンビームの収束性を高めるため設定されている。陰極 3 重点（高電圧、絶縁体、真空）での電界集中を抑制するために、大型の電界緩和リングを設置している⁴⁾。さらに負イオンビームや電子により発生する X 線や紫外線が FRP 絶縁管の表面を直視しないように、FRP 表面はシールドリングによって遮蔽されている。

また加速電極の大気側には球ギャップが設置している。これは負イオン源の 3 段加速電極間のどこかの電極間で放電破壊が発生した際、他の 2 つの電極間に過大な電圧が発生、FRP 絶縁管の沿面放電を起こす危険性があるため、球ギャップ放電で FRP 絶縁管を保護するためである。なお球ギャップは上下イオン源の各電極間に設置しているが、上イオン源の第 2 電極—接地電極間に空間的な制限から球ギャップは取り付けていない。

3. 計測装置

図-2 に N-NBI 装置に設置した光学系機器、真空計測機器、電流計測機器の配置を示す。また計測系一覧を表-1 に示す。

イオン源内部（真空側）の発光を測定するために、監視カメラ用ビューフィングポートの位置に集光レンズ（コリメータ）を取り付け、集光した光を光ファイバー経由で光電子増倍管に送った。また光ファイバーの接続を光電子増倍管から分光器に切り替えることで、分光分析を行った。分光器の構成及び仕様を表-2 に示す。

表-1 計測機器一覧

計測機器	仕 様
イオン源 L 内部発光用 コリメータ	レンズ口径 $\phi 19$ 、F=3.0
イオン源 L 内部発光用 ファイバー	コア径 $200 \mu m$ 、SI 型 ケーブル長 230m
イオン源 L GAP 用 ファイバー	コア径 $50 \mu m$ 、SI 型 ケーブル長 230m
フォトマルチプライヤー	波長感度帯域 300nm～600nm 有効光電面サイズ $\phi 8$ 最大感度波長 10^4 、電流出力タイプ
真空計	アークチャンバー圧力：ピラニ真空計 イオン源出口部：電離真空計
接地電流測定	ロゴスキーコイル、5kA フルスケール DC 光変換器 10MHz
加速電流計	シャント抵抗 (Iacc-UL はホール CT) DC 光変換器 サンプリング 3.3 μsec
暗電流計	500mA MAX、時定数 140msec

表-2 分光器構成と仕様

ポリクロメータ	光学系 口径比 焦点距離 回折格子 光学波長範囲 波長分解(半値幅) 波長正確さ	非対称型変形ツェルニ・ターナマウント $F=4.3$ 250mm 有効断面 52mm×52mm 200 ~ 800nm 0.1nm ±0.3nm
CCD 検出器	Pixels 測定波長幅	1024×256 69nm(一度に測定可能波長幅)

一方、3段加速電極の大気側の球ギャップ放電光の放電箇所を見分けるために、下イオン源外部球ギャップ近くに光ファイバーケーブルを設置し、外部発光を光ファイバー経由で光電子増倍管に送った。光電子増倍管の出力信号は、高速オシロスコープ（サンプリング 150MHz 及び 1MHz）で測定した。

真空度計測に関しては、イオン源アークチャンバー部と GRG 電極より 1.3m 下流に配置したイオン源出口部の真空計を用いて、加速電圧印加時及び放電破壊（ブレークダウン）時の圧力上昇を測定した。ブレークダウンに伴うサージ電流を測定するために、周波数応答 10MHz のロゴスキー・コイルを用いた。

電流及び電圧測定系を図-3 に示す。加速電源は 1 台であり、上下イオン源加速電極に並列に接続されている。電流計測に関しては、イオン源から約 80m の距離の電源室内に設置された、図中の I_{acc} 、 I_{a1g} 、 I_{a2g} の位置で各加速電極電流を、イオン源から数 m の距離に設置された、 I_{accU} 、 I_{accL} の位置で各イオン源の個別電流を測定している。各電極電流 I_{acc} 、 I_{a1g} 、 I_{a2g} のセンサとして、定格電流測定用のシャント抵抗と微小電流測定センサを設置している。各計測点が高電位側に設置したため、光絶縁変換器を使用しており、この周波数特性は 300kHz (=3.3 μs) であり、微小電流測定センサは応答速度が 140ms の特性である。一方、これらの測定系はイオン源からの距離が長く、給電線等の浮遊容量から流れ込む成分や 1 μs 程度以下の高速成分は正確には測定できない。このためイオン源の突入電流を高速で測定するため、今回新たにロゴスキー・コイル U、L をイオン源の接地電極全周に巻き、その信号を 10MHz の DC 光変換機で高速オシロに取り込む計測系を整備した。

4. 試験結果及び考察

4. 1 実験条件

ビーム引出しを行わない無負荷条件において、1 回の印加時間を 3~5 秒、繰り返し時間を 30 秒として高電圧をイオン源加速部に印加した。電圧印加中に絶縁破壊が発生すると、電源設備の過電流保護回路により電圧印加は中断するが、約 70ms 後に再度、高電圧印加を行う。3 回連続で

絶縁破壊が発生しなければ、2~5kV ステップで印加電圧を上げる。このようなコンディショニング過程において、イオン源真空度を変えて、絶縁破壊現象に対する発光現象、電流及び放出ガス等の相関を調べた⁵⁾。なおイオン源は、加速部側から排気速度 $1200\text{m}^3/\text{sec}$ の大容量クライオポンプで排気されている。また、球ギャップ間隔は、500kV の 3 分割である約 170kV (ギャップ間隔 : 73mm) で大気放電を起こすように設定している。

4. 2 加速部内部の発光測定

図-4 に、典型的な内部発光と暗電流の時間変化を示す。測定条件は、加速電圧 $V_{acc}425\text{kV}$ 、電圧印加時間 3 秒、イオン源にガス導入を行わず（加速部圧力 $5\times 10^{-5}\text{Pa}$ ）である。発光強度の時間変化は、電圧印加から約 40msec で発光が始まり、90msec で強度がピークに達し、その後、穏やかに減少し、0.5sec 程度後にはほぼ一定レベルとなった。一方、暗電流計による微弱電流も、電圧印加直後に上昇した後、緩やかに減少し、0.5s 程度後に一定レベルとなった。なお暗電流の立ち上がり時間が発光現象よりも遅く、また振動しているのは電流計測系の応答速度の問題である。発光強度が過渡的な時間特性を示しているのは、印加電圧の時間応答（電源 on から 55ms 後にピーク：図-11 参照）に関係している可能性もあるが、現時点では良く分かっておらず今後の課題である。なお発光強度は、次節以降に記述するように真空度や印加電圧により変化するが、それらの場合の発光強度と暗電流との相関を示したのが図-5 である。暗電流の増加とともに発光強度も強くなり、両者には強い相関があることが分かる。

4. 3 発光強度のイオン源真空度依存性

イオン源真空度を変えた場合の発光強度（電圧印加直後のピーク値）の変化を図-6 に示す。横軸で示す加速部内部圧力は、アーキチャンバー部、イオン源出口部の測定値をもとに、加速電極のコンダクタンスにより算出した加速部平均圧力である⁶⁾。実験では、イオン源の重水素ガス（導入量 $0\sim 4.2\text{Pam}^3/\text{s}$ ）導入し加速部圧力を $5\times 10^{-5}\text{Pa}\sim 0.2\text{Pa}$ まで変えて、各圧力において加速電圧を 380kV から 450kV まで増加させ、その際の発光強度を調べた。（図-6）ガス導入を行わない $5\times 10^{-5}\text{Pa}$ (図中①) では、発光強度（電圧印加直後のピーク値）は印加電圧の増加とともに増加したが、印加電圧を 420kV にした場合、内部発光は電圧印加時間中に徐々に増加し、絶縁破壊を起こした。一方、圧力を上げて $\sim 10^{-2}\text{Pa}$ (図中②) 以上の領域になると、同じ電圧印加条件であれば発光強度は圧力の上昇とともに減少し、最後は検出レベル以下となった。なお電圧が高い場合には、より高い圧力まで発光現象が観測された。最終的には、最大ガス導入時の圧力 0.2Pa で 455kV が安定に電圧を印加できる限界であった。

一方、耐電圧にはコンディショニング効果があることが一般に知られているが、発光強度においてもコンディショニング効果があることが明らかとなった。図-7 は 2 日間の耐電圧試験前後における発光強度の変化を示したものである。ガスの導入を行わないケース $5\times 10^{-5}\text{Pa}$ ($Q=0\text{Pam}^3/\text{s}$) とビーム引出条件での近くの圧力、約 0.11Pa ($2.4\text{Pam}^3/\text{s}$) のどちらにおいても初期発光電圧や耐電圧の改善が見られた。

4. 4 発光強度と放出ガスの相関

加速部に高電圧を印加すると炭化水素系の放出ガス現象が起きることは既に報告しているが[6]、今回、放出ガス量と発光強度との相関を調べたところ、図-8 に示すように放出ガス量は発光強度の増加に伴い、累乗的に増加した。ここで加速部のベース真空中度は約 1×10^{-4} Pa で、印加電圧は 380kV から 410kV まで領域のデータである。放出ガスは下イオン源出口部の電離真空中計で測定し、電圧印加前のベース圧力と電圧印加中の最大値との差 (ΔP) として評価した。図中の破線は排気装置として、ターボ分子ポンプを用いた場合に相当する。

4. 5 内部発光の分光測定

内部発光の要因を調べるために、分光測定を行った。今回使用した分光分析器（CCD 検出器）は、一度に測定できる波長幅は 69nm であるため、同一条件で何度も電圧印加を行い、その間、少しづつ測定波長を変えながら最終的に 300nm から 600nm までスキャンした。また絶縁破壊を避けるため、印加電圧は 420kV（加速部圧力： 1×10^{-5} Pa）とするとともに、電圧印加直後の内部発光現象（ピークは電圧印加開始から 90ms 後：図-4）のみを対象とするため、CCD 露光時刻は電圧印加開始から 200ms 間のみとした。図-9 に測定結果を示す。発光は波長 420nm をピークとした連続スペクトルであることが分かる。一方、水素や炭素の輝線スペクトルは観測されなかった。このような波長領域の連続スペクトルは、アルミナセラミックに電子照射した場合に観測されるカソードルミネッセンスと良く似ている。イオン源にはアルミナセラミックは使用しておらず絶縁管としては FRP を使用しており、また発光現象と強い相関があった放出ガスが FRP の構成物質の炭化水素系であること等から類推すると、発光現象は FRP のカソードルミネッセンスの可能性が高い。このため FRP 単体の電子照射時の発光スペクトル分析を行うとともに検出系感度、分光器分解能を高めた計測を再度行う予定である。

4. 6 ブレークダウン時の電圧・電流・内部発光の時間応答

イオン源で発生する絶縁破壊は、イオン源自体を損傷する危険性があるため、絶縁破壊は瞬時に検知し高電圧電源を遮断する必要がある。このため 3 段加速電極の JT-60U N-BI イオン源では図-10 に示すように、絶縁破壊時の電極間の過電流や電極電圧の急減を検知し、加速電源インバータ GTO を $300 \mu s$ 以下で停止する。また今回の試験では、絶縁破壊が発生した場合、加速電源を約 70ms 中断した後、再投入するとともに 3 回目の絶縁破壊でシーケンスを停止する運転パターンを採用した。一方、3 段加速電極の場合、どこかの電極間で絶縁破壊が発生すると、加速電源が完全に遮断される間、他の加速段に正常電圧以上の電圧が印加してしまう危険性がある。このため、2 章で述べたように、加速電極の大気側に球ギャップを設け、過大な電圧印加が絶縁管等に印加しない保護を行っている。

さて今回の試験を行う中で、印加電圧が 450kV を越える場合に、絶縁破壊が連続的に繰り返す

現象が観測された。その例を図-11に示す。運転条件は、設定印加電圧 465kV、加速部圧力 0.13Pa (アークチャンバー圧力 0.3Pa) である。いずれも電圧立ち上がりに放電破壊が発生した。1回目は電圧印加から 56msec 後 478kV で、2回目は、39msec 後の 425kV で、3回目は 44msec 後の 450kV で放電破壊が発生した。印加電圧は過渡応答のため設定 465kV を瞬間的に超えているが、2, 3 回目においては、より低い加速電圧で放電破壊を起こしている。

1回目と 2, 3回目の絶縁破壊電圧が違うことから、各々の絶縁破壊時の詳細な加速電圧及び電流の時間応答を調べた。図-12(A) 及び(B)に1回目の放電破壊前後及び2回目の放電破壊前後における加速電圧及び電流波形をそれぞれ示す。この例では第1回目の放電破壊時には、放電破壊 200 μ sec 前に加速電流、第1 加速電極電流、第2 加速電流が変化している(図-12(A))。一方、2回目の放電破壊では、電源遮断直前において各部の電流増加は観測されていない。ただし電源遮断後の各過渡応答は1回目と2回目では相違はない。この1回目と2回目の絶縁破壊の差を明確に示したのは、イオン源内部と外部の球ギャップの発光計測である。図-13(A) (B)に、その違いを示す。第1回目の放電破壊では内部発光が見られるとともに、放電破壊時には全ての外部球ギャップの発光が観測された。一方、2回目では内部発光は見られないにもかかわらず放電破壊が発生しており、その際、全ての球ギャップで発光が観測された。この2回目の外部球ギャップの動作時間をより高速(サンプリング 150MHz)で調べたものが図-14である。はじめに上段(引出ー第1段)電極間の外部ギャップが動作し、約 250ns 遅れて中段(第1段ー第2段)ギャップ、そして下段(第2段ー接地)ギャップが動作したことが分かる。このことから、2回目以降の絶縁破壊は、外部球ギャップ自体が動作して絶縁破壊を起こしていると考えられる。30 ケースほど同様の測定を行った結果、60%程度この順番で放電破壊した。残りの約 30%, 中段ギャップ、上段ギャップ、下段ギャップの順番で放電破壊が起きていることが明らかとなった。このように 1) 1回目の球ギャップ放電電圧は高い、2) 1回目、内部放電時に伴い球ギャップは動作している、3) 2回目以降の絶縁破壊は球ギャップの動作が原因、4) その際の動作電圧(約 145kV)は設定電圧(164kV)よりもかなり低い、等が明らかとなった。2回目以降の球ギャップの絶縁耐圧が低下する理由については、1回目の動作直後のギャップ表面の粗れ、オゾンガス等の発生など考えられるが、詳細は今後の課題である。なお図-6における 450kV を越える領域で放電破壊が発生したのは、1回目でも球ギャップの動作が発生していた可能性があり、今後、450kV 以上の加速電圧を3段加速電極に印加する場合には、球ギャップの動作条件の確認や調整が必要であることが分かった。

5. まとめ

JT-60 N-NBI イオン源における真空耐電圧特性試験を行い、イオン源内部の発光現象、暗電流さらにイオン源の大気側電極間の球ギャップの動作時間等を詳細に調べることで、以下の結果を得た。

- ・ 内部発光強度は、電圧印加直後の 90ms 程度で最大値を示し、その後減少し、0.5s 程度以降はほぼ一定となる。
- ・ 暗電流の時間応答も同様な過渡特性を示しており、暗電流の増加とともに発光強度は増加する。

- ・ 発光強度の D_2 圧力依存性は、圧力が約 2×10^{-2} Pa 以上において、発光強度は圧力の上昇に伴い発光強度が低下する依存性を示す。 5×10^{-3} Pa 以下の低圧力領域での発光強度は、ガス圧依存性の傾向を示さない。
- ・ 加速部のコンディショニング効果により、初期発光電圧が上昇し、耐電圧が改善される。
- ・ 放出ガス量は、発光強度の増加に伴い、累乗的に増加する。
- ・ 分光分析の結果、発光は波長 420nm をピークとした連続スペクトルである。
- ・ イオン源内部で絶縁破壊が発生すると、必ず球ギャップが動作する。加速電圧が 450kV 以上の場合は、一度、球ギャップが動作した場合、70ms 程度の休止時間では球ギャップが保護設定電圧よりも低い電圧で動作し、イオン源の耐電圧を決定していることが明らかとなつた。

今回、イオン源の放電破壊現象に対し発光計測を中心に調査を行い、放電破壊の解明にむけて多くの有用な情報を得ることができた。今後の耐電圧性能向上のためには、発光現象がどこで起きているのかを明らかにするとともに、その抑制方法の開発が必要である。さらに 3 段加速電極の場合の絶縁破壊発生時の外部球ギャップの保護設定の在り方などに関しても、引き続き検討が必要と考えられる。

謝 辞

本報告書をまとめにあたり、粒子ビーム加熱システム開発グループの皆様には、試験を通じ貴重なご意見を頂き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細金延幸トカマク技術開発ユニット長、山本巧研究主席、宮 直之研究主席に感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) M. Kuriyama, et.al., Operation of the negative-ion based NBI for JT-60U, Fusion Sci.Techol, Fusion Engineering and Design, Vol. 39-40, pp.115-121, 1998.
- 2) N.Umeda et.al., Improvement of beam performance in the negative-ion-based NBI system for JT-60U, Nucl.Fusion, Vol.43, pp.522-526, 2003.
- 3) K.Watanabe et.al., dc voltage holding experiments of vacuum gap for high-energy ion sources, J.Appl.Phys., Vol.72(9),pp.3949-3956, 1992.
- 4) T.Inoue et.al., Accelerator R&D for JT-60U and ITER NB systems, Fusion Engineering and Design, Vol. 66-68, pp.597-602, 2003
- 5) Hanada et al., Correlation between voltage holding capability and light emission in a 500 keV electrostatic accelerator utilized for fusion application, IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation (accepted)
- 6) K.Kikuchi et al., Characteristics of voltage holding and outgassing on the accelerator of JT-60 N-NBI ion source , JAEA-Technology 2006-016.

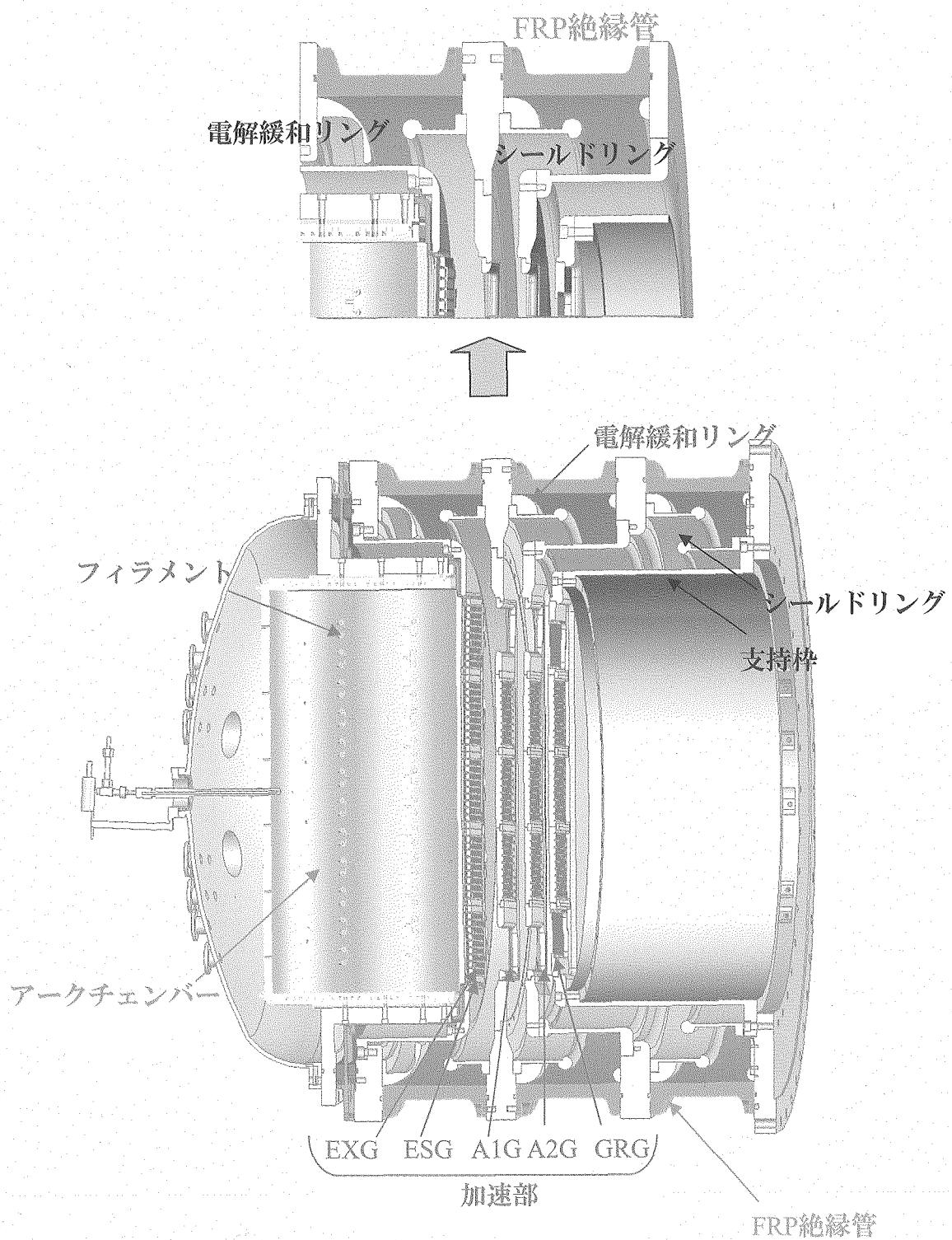


図-1 N-NBIイオン源構造図

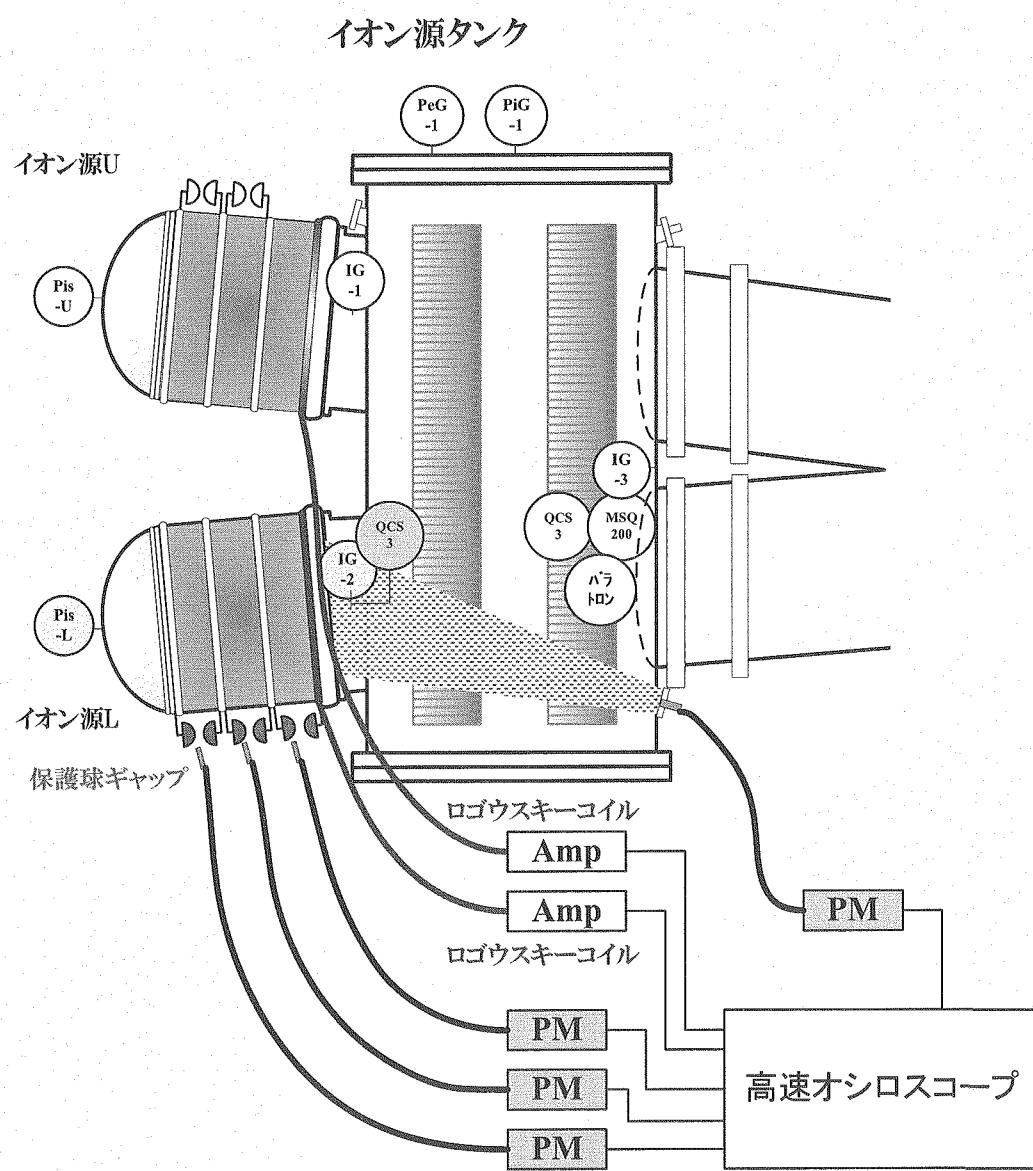


図-2 イオン源計測機器配置

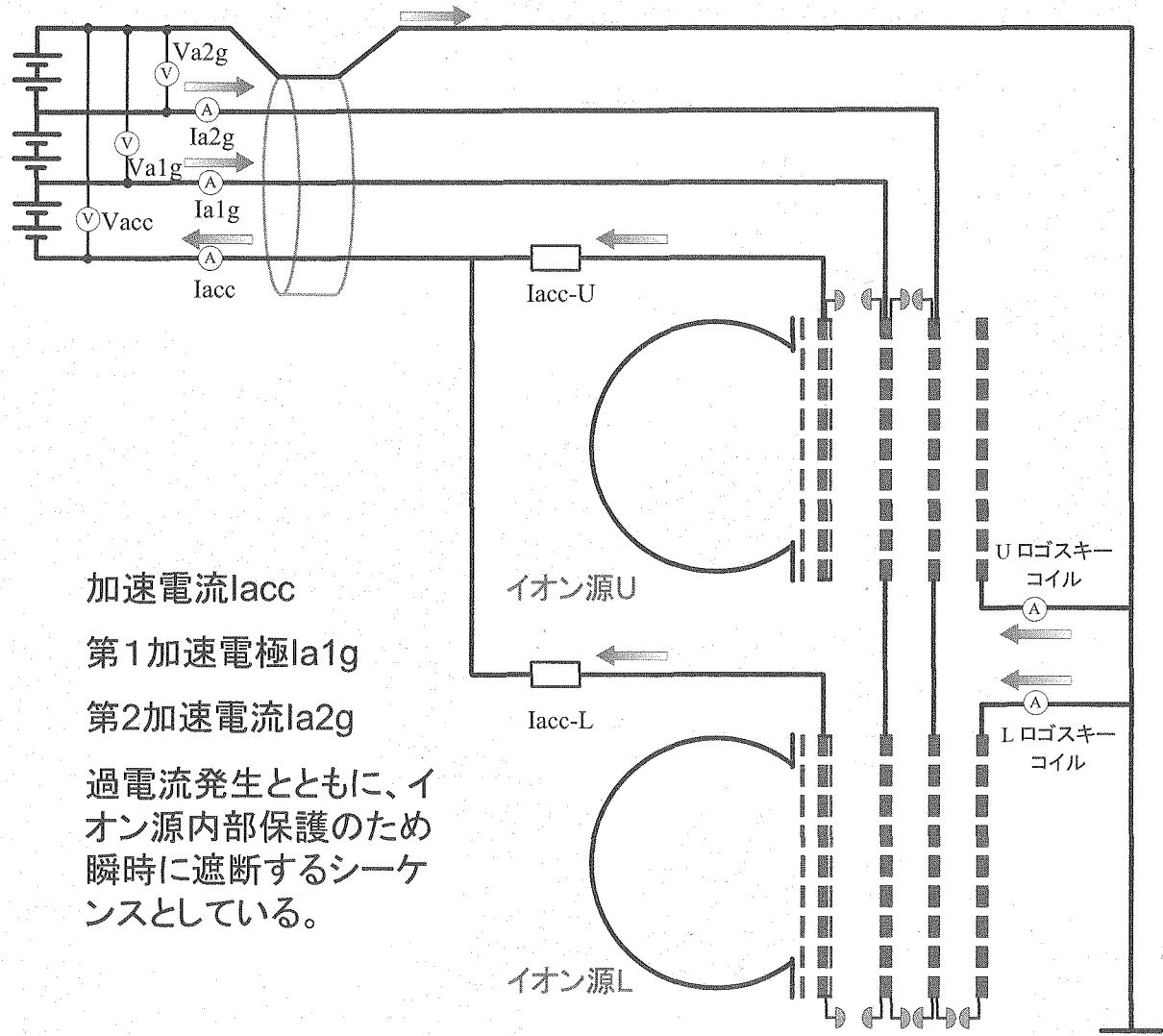


図-3 加速電源概略接続図

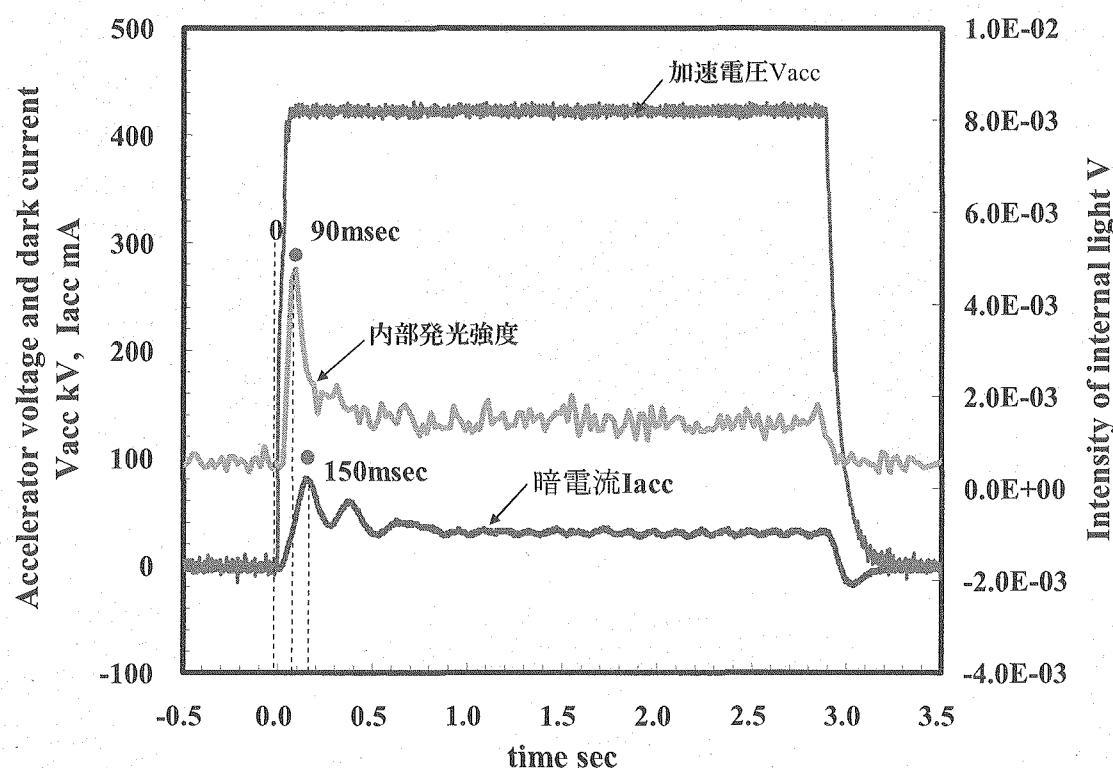


図-4 電圧印加時に伴う内部発光強度の時間応答

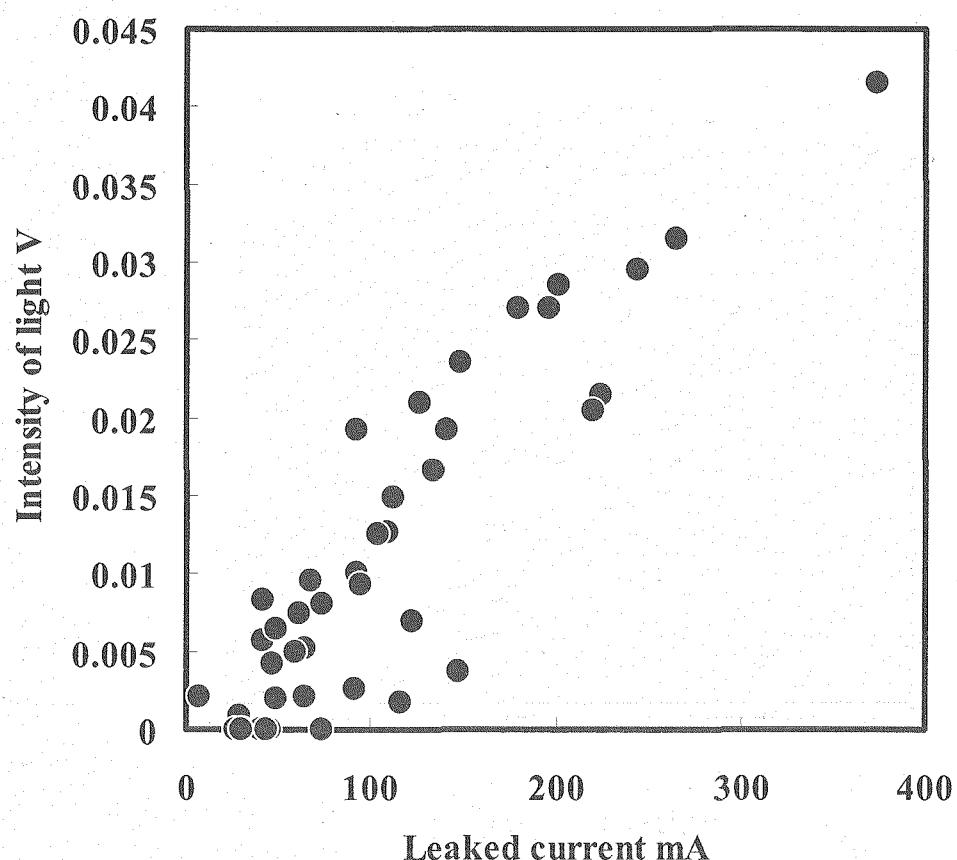


図-5 暗電流と発光強度の相関

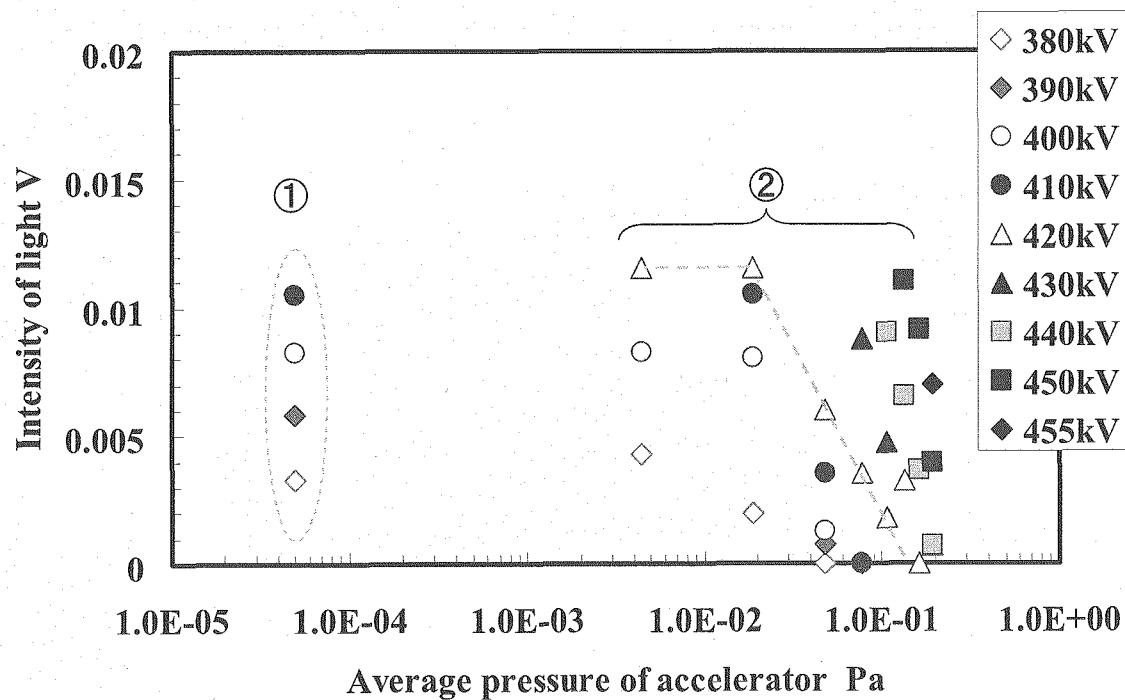


図-6 内部発光強度の圧力依存

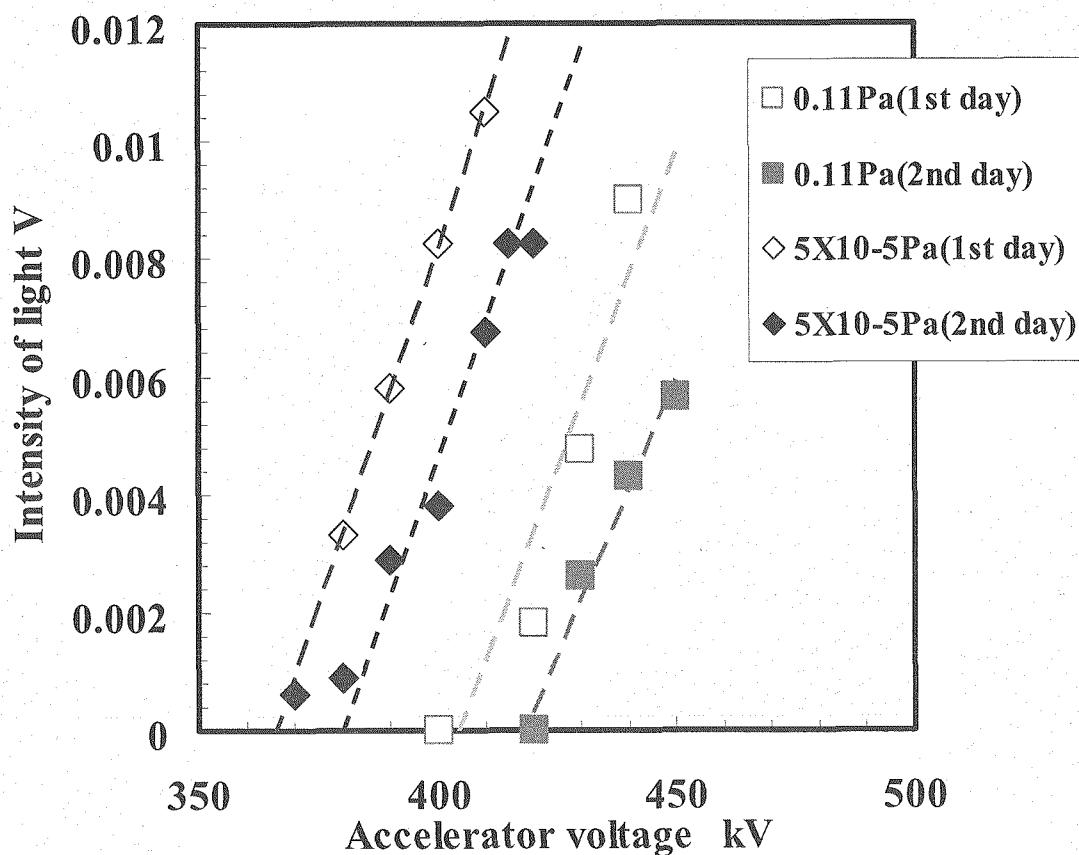


図-7 コンディショニング効果(内部発光強度と耐電圧)

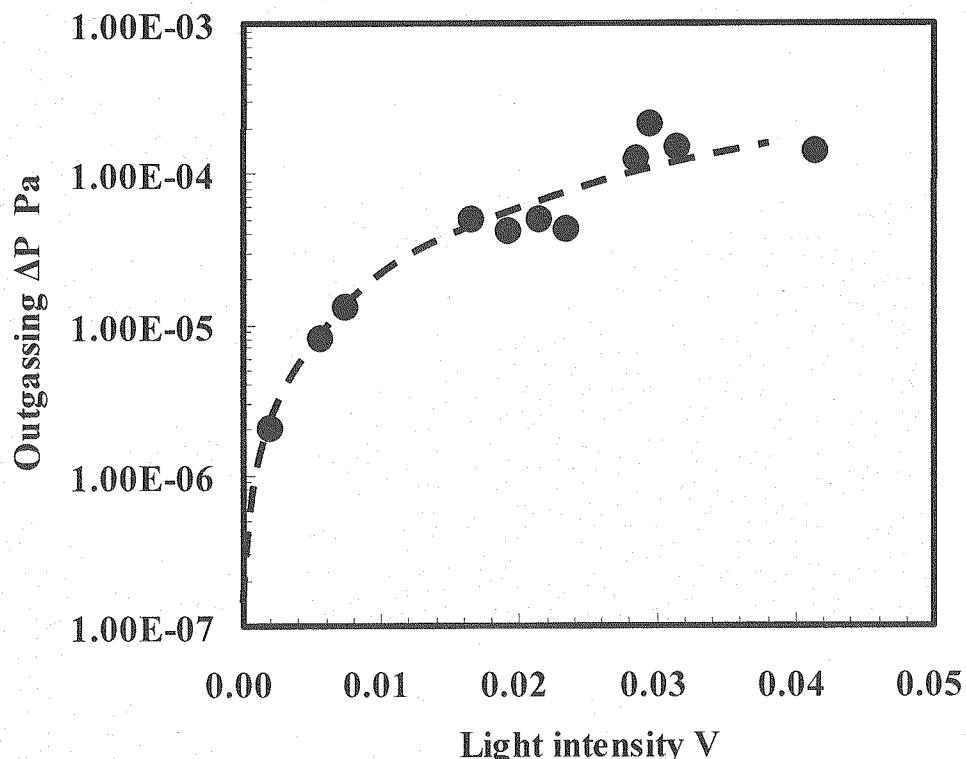


図-8 内部放出ガスと内部発光の関係

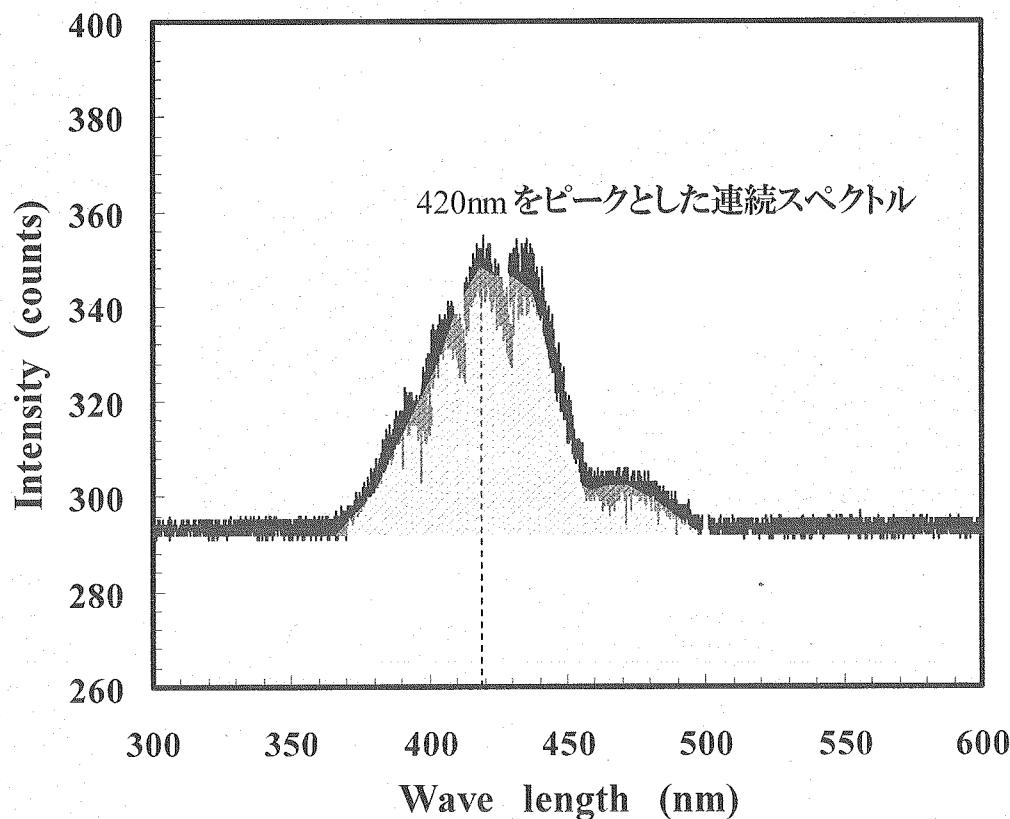


図-9 内部発光の分光分析結果

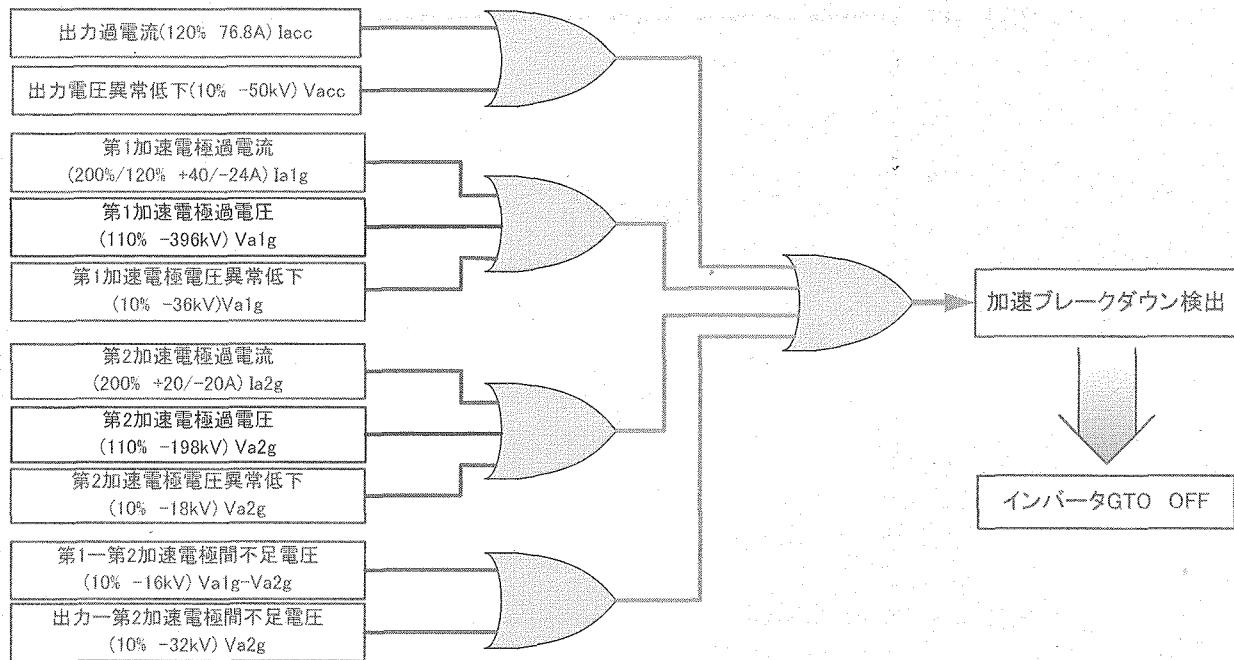


図-10 ブレークダウン検出回路

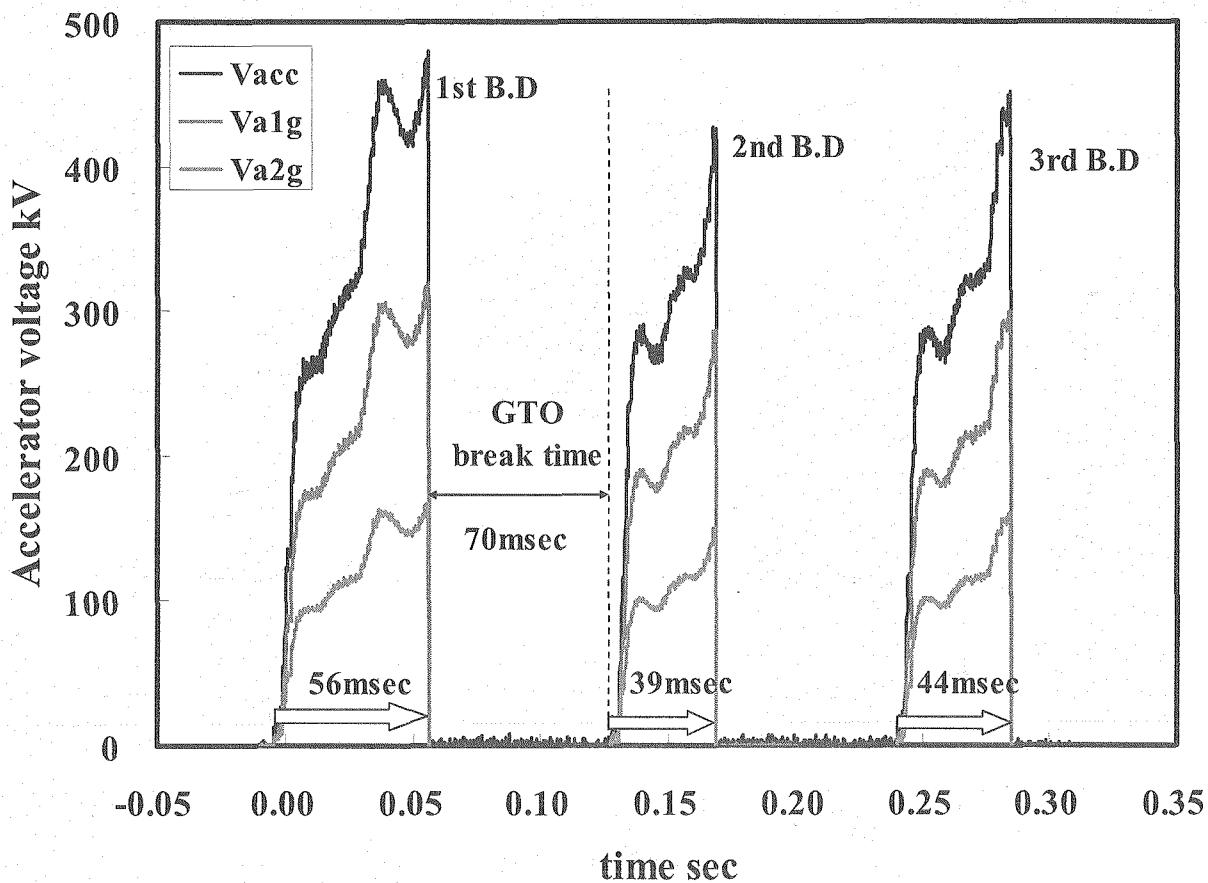
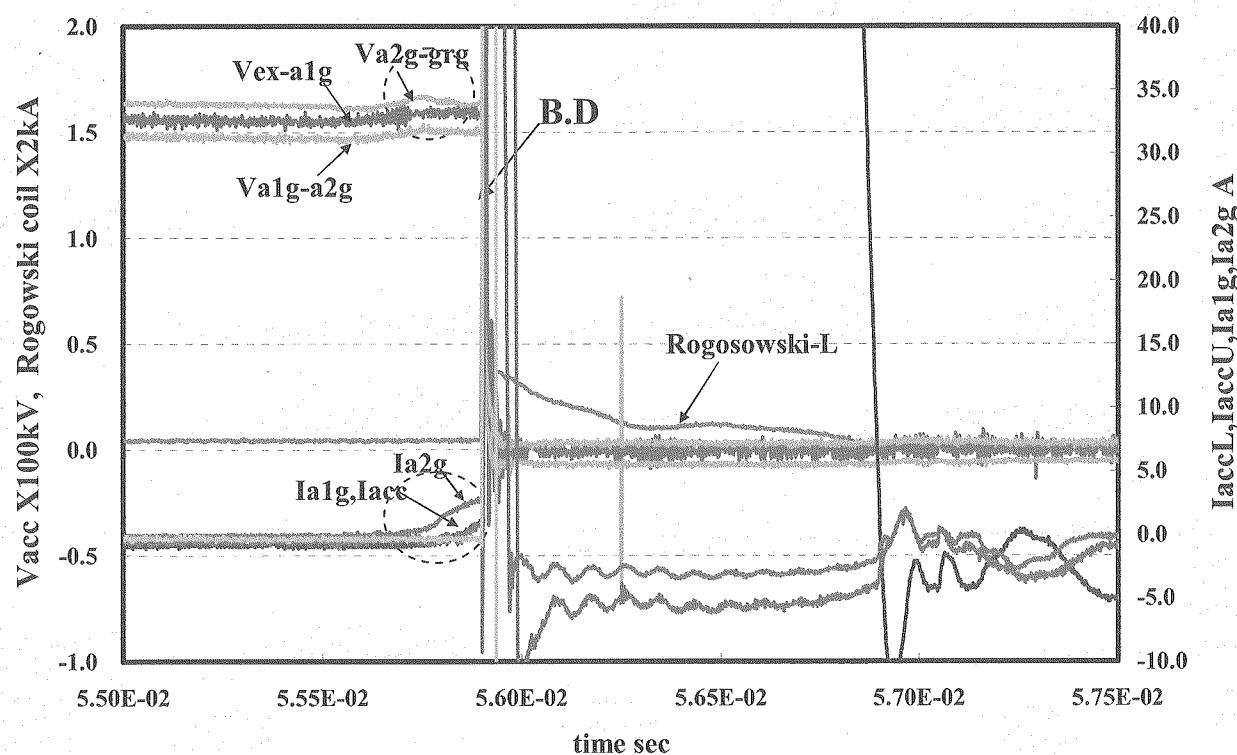


図-11 耐電圧でのブレークダウン傾向

1回目のブレークダウン傾向

(A)



2,3回目のブレークダウン傾向

(B)

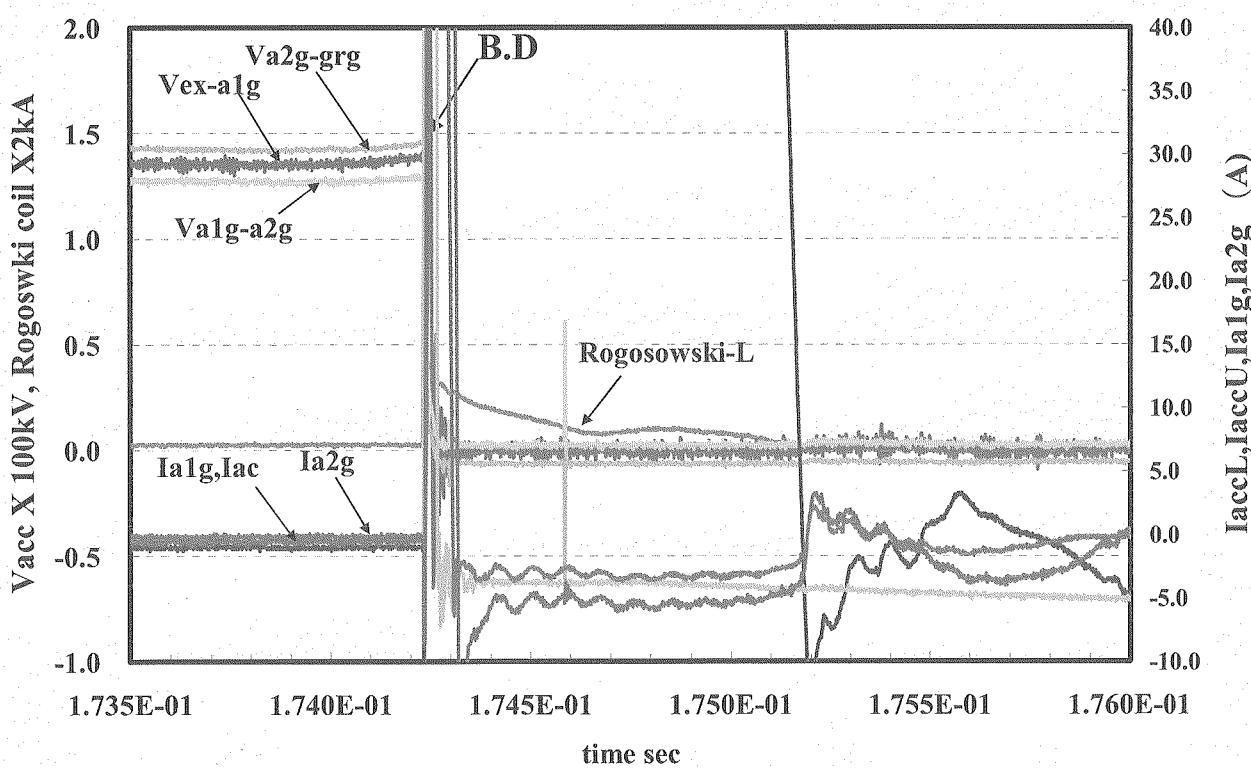


図-12 ブレークダウン時の電圧・電流時間応答

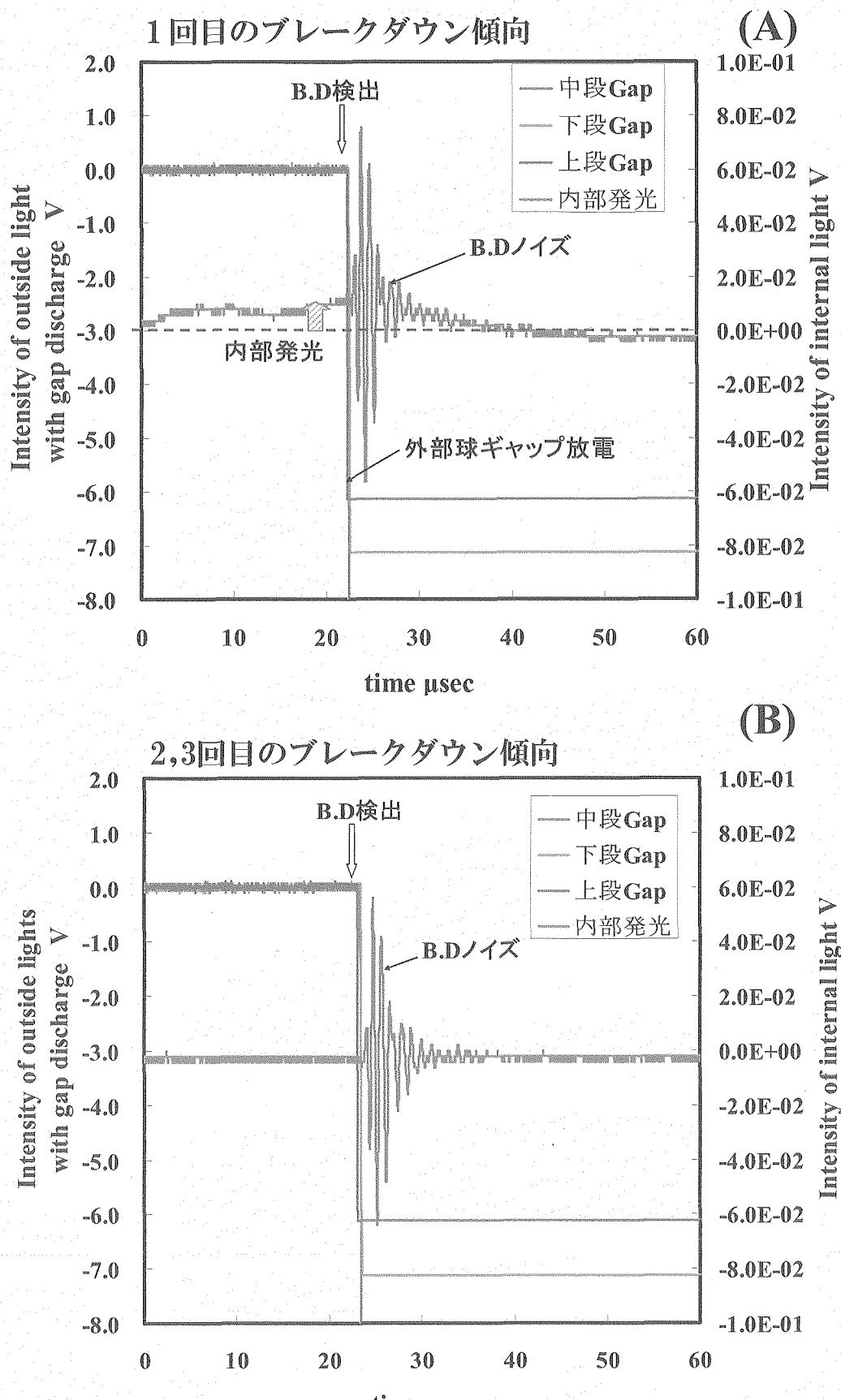


図-13 ブレークダウン時の外部ギャップと内部発光の時間応答

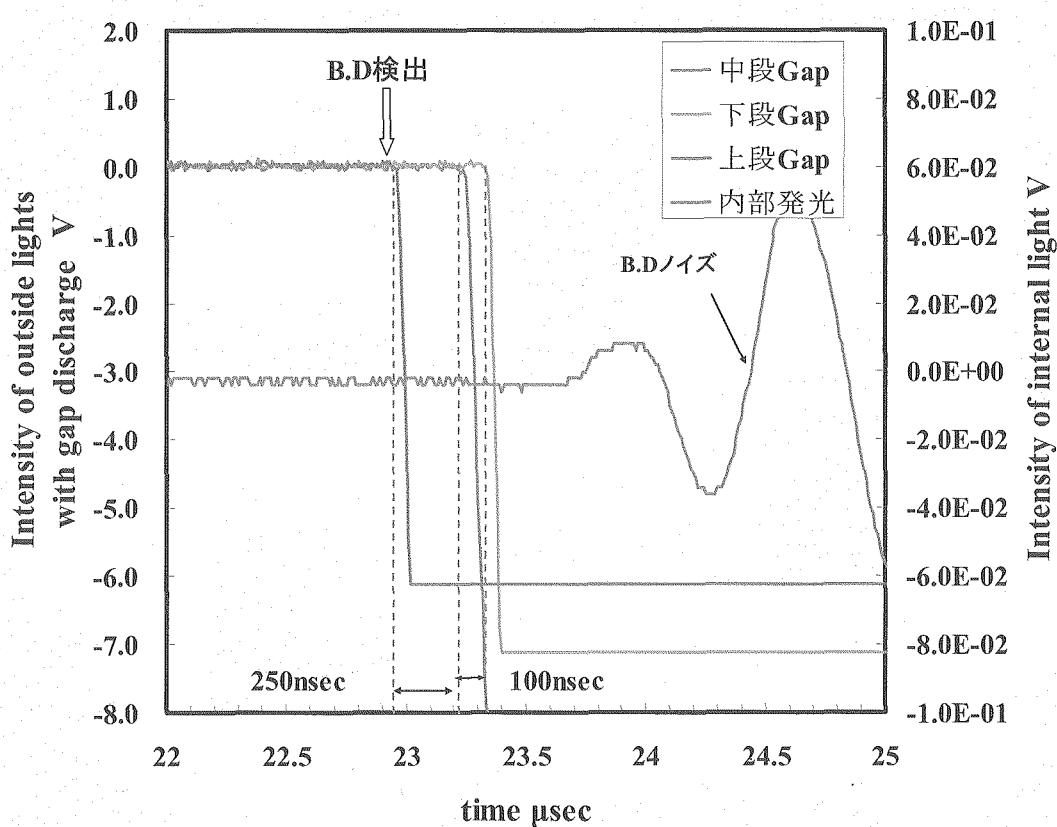


図-14 ブレークダウン時の外部ギャップ動作時間応答

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
立体積	立方メートル	m^3
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	メートル毎秒	m^{-1}
密度(質量密度)	キログラム每立法メートル	kg/m^3
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア每平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア每メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率(数の)	1	1

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アトト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表 3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
圧力	ニュートン	N	$\text{N} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
エネルギー, 仕事, 熱量	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー, 放射束	ユール	J	$\text{N} \cdot \text{m}$
電荷	電気量	C	J/s
電位差(電圧), 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	アンドロード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリイ	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	K
光束度	ルーメン	lm	$\text{cd} \cdot \text{sr}^{(e)}$
(放射性核種の)放射能吸収線量, 質量エネルギー	ベクレル	Bq	$1 \text{ lm} = \text{lm}/\text{m}^2$
セグメント分与, カーマ	レイ	Gy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg
			$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表 4 に示されている。

(b) 実際に、は、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表 4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa · s	$\text{N} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
表面張力	ニュートンメートル	N · m	$\text{N} \cdot \text{m}^2$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
熱流密度, 放射照度	ワット每平方メートル	W/m ²	W/m^2
熱容量, エントロピー	ジュール每ケルビン	J/K	$\text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール每キログラム	J/(kg · K)	$\text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
質量エントロピー	一	J/kg	$\text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
(比エネルギー)	ジュール每キログラム	J/kg	$\text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル每ケルビン	W/(m · K)	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m ³	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$\text{N} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
体積電荷	クーロン每立方メートル	C/m ³	$\text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
電気変位	クーロン每平方メートル	C/m ²	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
誘電率	ファラド每メートル	F/m	$\text{m}^{-3} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$\text{m}^{-3} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^2$
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1}$
モルエントロピー	ジュール每モル每ケルビン	J/(mol · K)	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
モル熱容量	クーロン每キログラム	C/kg	$\text{kg}^{-1} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム	Gy/s	$\text{kg}^{-1} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
吸収線量	グレイ每秒	Gy/s	$\text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	$\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル	W/(m ² · sr)	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
	每ステラジアン		$= \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$

表 6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) \text{ rad}$
リットル	L	$1 \text{ L}=1 \text{ dm}^3=10^{-3} \text{ m}^3$
トン	t	$1 \text{ t}=10^3 \text{ kg}$
ネーベル	Np	$1 \text{ Np}=1$
ベル	B	$1 \text{ B}=(1/2) \ln 10 (\text{Np})$

表 7. 国際単位系と併用されこれに属さないSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1 \text{ eV}=1.60217653(49) \times 10^{-19} \text{ J}$
統一原子質量単位	u	$1 \text{ u}=1.6605402(10) \times 10^{-27} \text{ kg}$
天文単位	ua	$1 \text{ ua}=1.49597870691(30) \times 10^{11} \text{ m}$

表 8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用される他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1 海里=1852m
ノット	ト	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600) m/s
アード	ル	$1 \text{ a}=1 \text{ dam}^2=10^6 \text{ m}^2$
ヘルツ	ハ	$1 \text{ ha}=1 \text{ hm}^2=10^4 \text{ m}^2$
バル	bar	$1 \text{ bar}=0.1 \text{ MPa}=100 \text{ kPa}=1000 \text{ hPa}=10^5 \text{ Pa}$
オングストローム	Å	$1 \text{ Å}=0.1 \text{ nm}=10^{-10} \text{ m}$
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=10^{-28} \text{ m}^2$

表 9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 \text{ erg}=10^{-7} \text{ J}$
ダイニ	dyn	$1 \text{ dyn}=10^{-5} \text{ N}$
ボアズ	P	$1 \text{ P}=1 \text{ dyn} \cdot \text{s} / \text{cm}^2=0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
ストークス	St	$1 \text{ St}=1 \text{ cm}^2/\text{s}=10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
ガウス	G	$1 \text{ G}=10^{-4} \text{ T}$
エルステッド	Oe	$1 \text{ Oe}=(1000/4\pi) \text{ A/m}$
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx}=10^{-8} \text{ Wb}$
スチル	sb	$1 \text{ sb}=1 \text{ cd}/\text{cm}^2=10^4 \text{ cd}/\text{m}^2$
ホル	ph	$1 \text{ ph}=10^4 \text{ lx}$
ガル	Gal	$1 \text{ Gal}=1 \text{ cm/s}=10^{-2} \text{ m/s}^2$

表 10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 \text{ Ci}=3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
レントゲン	R	$1 \text{ R}=2.58 \times 10^{-3} \text{ C/kg}$
ラド	rad	$1 \text{ rad}=1 \text{ cGy}=10^{-2} \text{ Gy}$
レム	rem	$1 \text{ rem}=1 \text{ cSv}=10^{-2} \text{ Sv}$
X線単位	IX unit	$1 \text{ IX unit}=1.002 \times 10^{-5} \text{ nm}$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 \text{ nT}=10^{-9} \text{ T}$
ジャニスキー	Jy	$1 \text{ Jy}=10^{-28} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$
フェルミ	fm	$1 \text{ fermi}=1 \text{ fm}=10^{-15} \text{ m}$
メートル系カラット		$1 \text{ metric carat}=200 \text{ mg}=2 \times 10^{-4} \text{ kg}$
トーラ	Torr	$1 \text{ Torr}=(101.325/760) \text{ Pa}$
標準大気圧	atm	$1 \text{ atm}=101.325 \text{ Pa}$
カリヨン	cal	$1 \text{ cal}=1 \text{ cm}^2/\text{s}=10^{-6} \text{ m}^2$
ミクロ	μ	$1 \mu=1 \text{ μm}=10^{-6} \text{ m}$