JAEA-Technology
2008-042

JT-60U負イオン源における無負荷時の絶縁破壊位置

Breakdown Location without Beam Acceleration in the JT-60U Negative Ion Source

小林 薫　花田 磨砂也　鎌田 正輝　秋野 昇
佐々木 駿一　池田 佳隆

Kaoru KOBAYASHI, Masaya HANADA, Masaki KAMADA, Noboru AKINO
Shunichi SASAKI and Yoshitaka IKEDA

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

July 2008

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

JAEA-Technology

本レポートは独立行政法人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）
より発信されています。

独立行政法人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
〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

JAEA-Technology 2008-042

JT-60U 負イオン源における無負荷時の絶縁破壊位置

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
小林　薫※1・花田　磨砂也・鎌田　正輝※2・秋野　昇・佐々木　駿一・池田　佳隆

（2008 年 4 月 1 日受理）

JT-60U 負イオン源の耐電圧改善化研究の一環として、負イオン源加速器の絶縁破壊位置について実験的に調べた。本加速器の特長は、大面積多孔電極（0.45m×1.1m）を有する３段の静電式加速器であり、絶縁材として内径 1.8m の大型 FRP 絶縁体を用いている点である。試験では、加速段毎に高電圧を印加し、絶縁破壊位置を CCD カメラやアクリル板の電子励起発光から詳細に調べた。各段の耐電圧は、ほぼ同等の 120-130kV であり、設計加速電圧 167kV より低かった。絶縁破壊位置を絞り込むために、加速器から加速電極とその支持枠を取り除き FRP 絶縁体のみにして高電圧を印加した。FRP 絶縁体の耐電圧は、少ないコンディショニング時間で 167kV に到達した。これらの結果から、絶縁破壊位置は主に加速電極か支持枠で発生していることが分かった。さらに絶縁破壊位置が加速電極間か支持枠間かの同定に関しては、CCD カメラやアクリル板で観測された光の位置から、第１及び第２加速ギャップでは、放電破壊位置は加速電極支持枠で発生している可能性が高いことが分かった。一方、第３加速ギャップに関しては、絶縁破壊の多くは、加速電極間で発生することが明らかとなった。本研究により、JT-60U 負イオン源の耐電圧改善に向けて、有意義な実験結果を得た。

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（株式会社　日立製作所）
※２　博士研究員

JAEA-Technology 2008-042

Breakdown Location without Beam Acceleration in the JT-60U Negative Ion Source

Kaoru KOBAYASHI※1, Masaya HANADA, Masaki KAMADA※2, Noboru AKINO
Shunichi SASAKI and Yoshitaka IKEDA

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

(Received April 1, 2008)

Breakdown locations of a JT-60U negative ion source were investigated to improve the voltage holding capability. The accelerator is characterized by three acceleration stages with large grids 0.45 m X 1.1 m and large FRP insulators 1.8 m in inner diameter. High voltages were applied to each acceleration stage independently, and then breakdown locations were examined by CCD cameras. Voltage holding capabilities of each stage were almost the same, ~ 120-130kV, which was lower than the design acceleration voltage of 167kV. Then, in order to identify whether the breakdowns occur in the gaps between grids or on the surface of the FRP insulators, high voltages were also applied to the accelerator with the grids and their support flanges removed. The voltage holding capabilities of three FRP insulators rapidly achieved 167 kV. These results indicate that the breakdowns mainly occur in the gaps between the acceleration grids and/or their support flanges. The detailed breakdown locations were identified from the light emission due to breakdown. In the first and second acceleration gaps, almost no light emission was observed when the breakdown occurred. This suggests that the breakdown might occur in the gaps between the grid support flanges that are situated out of the sight of the CCD cameras. In the third gap, the location of the light indicated that most of the breakdowns occurred in the gap between the grids.

Keywords:
JT-60U, Negative-ion, Accelerator, Breakdown, Voltage Holding Capability, Conditioning, Large FRP

※1 Research Staff on Loan (Hitachi, Ltd.)
※2 Post-Doctoral Fellow

目　　次

1. はじめに …… 1
2. 実験装置 …… 1
　2.1 真空耐電圧試験装置 …… 1
　2.2 負イオン源 …… 2
3. 耐電圧試験の結果 …… 3
　3.1 耐電圧特性 …… 3
　　3.1.1 コンディショニング手順 …… 3
　　3.1.2 各加速段の耐電圧特性 …… 3
　　3.1.3 各加速段の絶縁破壊位置 …… 4
　　3.1.4 脱離ガス …… 6
　3.2 面積効果の検討 …… 6
4. 今後の課題 …… 7
5. まとめ …… 7
謝辞 …… 8
参考文献 …… 8

Contents

1. Introduction 1
2. Experimental setup 1
2.1 High voltage test stand 1
2.2 JT-60U negative ion source 2
3. Experimental results 3
3.1 Characteristics of voltage holding capability 3
3.1.1 Conditioning procedure 3
3.1.2 Voltage holding capability 3
3.1.3 Breakdown location 4
3.1.4 Desorption gas 6
3.2 Area effect 6
4. Future plan 7
5. Summary 7
Acknowledgement 8
Reference 8

１．はじめに

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 台の大型負イオン源を有する N-NBI 装置１基により、500keV、10MW の D^0 ビームをプラズマに入射することが設計された。目標の 10MW を達成するには、中性化セル、イオンダンプ、ドリフト管での損失を考慮すると、イオン源一台当たり、500keV, 22A の D^- ビームを生成する必要がある [1)]。このイオン源では、高エネルギーで大電流の D^- イオンビームを加速するために、大面積多孔電極（0.45m×1.1m）を有する 3 段静電負イオン加速器を用いている。加速電極間の絶縁には、大口径セラミック絶縁管の製作が困難なために、Fiberglass Reinforced Plastic（FRP）絶縁管（内径：1.8m、高さ：0.315m）が採用されている。

JT-60U N-NBI は 1995 年に完成してから約 12 年間プラズマ加熱実験に用いており、その間、運転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パルス幅を向上させてきた。負イオン源の耐電圧に関しても、陰極３重点近傍の電界低減のための大型緩和リング及び紫外線等から FRP 絶縁管の表面を保護するためのスクリーンシールドを装着する等の対策を行った。しかしながら、設計加速電圧 500kV に対して、負イオン加速器の耐電圧は約 400kV に留まっている。この低い耐電圧の原因について調べた結果、十分なコンディショニングを行った後においても、400kV を超える高電圧では、負イオン加速器の内部で、FRP の電子励起発光に起因した発光を観察するとともに、発光強度と耐電圧との間に強い相関があることを明らかにしてきた [2)-4)]。しかし、JT-60U に設置した状態での試験では、実験上の制約のため低耐電圧の原因を FRP 絶縁管と特定するには困難であった。このため今回、実験上の制約が少ないテストスタンドで、負イオン加速器の絶縁破壊位置の同定を行った。実験では、高電圧を各加速段毎に印加し、各々の耐電圧特性を測定し比較した。その際、CCD カメラによる負イオン加速器内部の観察に加え、加速器下流に置いたアクリル板の電子励起発光位置を測定し、絶縁破壊位置を詳細に調べた。加えて、負イオン加速器から電極及び電極支持枠を取り除き、FRP 単体の耐電圧特性を測定し、絶縁破壊位置を同定した。

本論文では、JT-60U 負イオン加速器の絶縁破壊位置について測定した結果について報告する。

２．実験装置

２．１　真空耐電圧試験装置

従来、JT-60U 負イオン源の耐電圧特性は JT-60U 本体に設置した状態で調べられてきたが、負イオン源へのアクセスや測定時間が制限され、十分に耐電圧特性を理解するには至って

いない。さらに、JT-60U に取り付けた状態では、負イオン源の暗電流や真空度等の耐電圧特性を理解する上で重要となる物理量を高速かつ精度良く測定することは困難であった。このため、JT-60U 負イオン源単体の実験を簡便にかつ機動性良く実施するとともに、物理量の高速測定を実現することが強く望まれていた。そこで、JT-60U 負イオン源のみを独立して試験するための試験装置を建設した。図１に真空耐電圧試験装置を示す。真空耐電圧試験装置は、電源、真空排気ポンプ、X 線遮蔽体で構成されている。電源は最大 300kV, 10mA を出力することが可能であり、負イオン源へは 200kΩ の限流抵抗を介して接続した（図２）。真空排気系は負イオン源内部を真空排気するためのものであり、1500 l/s の排気速度を有するターボ分子ポンプを主排気機器とした（図 3）。これにより、負イオン源内部の真空度を約 10^{-3}Pa に保った。X 線遮蔽体として、他の設備で用いていた厚さ 8mm～10mm の鉛板を流用した。この遮蔽体は電圧印加時に負イオン源内部で発生する X 線を遮蔽するものである。絶縁破壊が発生し、その際、電源電流がすべて電子ビームの生成に消費しても遮蔽体境界での実効線量を基準値（1.3 mSv/3 ヶ月）以下にするため、実験では電源の出力電圧をそれぞれ 200kV 以下に制限した。

電源の出力電圧及び電流は高速のオシロスコープ（最大サンプリング周波数 20MHz）を用いて測定した。また、負イオン源の接続フランジ上に設けられた 4 個の観察窓（直径 350mm）それぞれに CCD カメラを配置し、負イオン源内部全体を観察した。さらに、イオンゲージ及び残留ガス分析器を用いて負イオン源内部の真空度及び残留ガスを測定した。

２．２　負イオン源

図 4 に JT-60U 負イオン源の断面構造を示す。負イオン源は負イオン生成部と負イオン加速器に大別される。負イオン生成部は、直径 64cm×長さ 110cm の半円筒形状の大型アークチェンバーである。負イオン加速器は、プラズマグリッド電極（PLG）と引出電極（EXG）で構成された引き出し部と、３枚の加速電極（A1G, A2G, GRG）で構成された負イオン加速部からなる。各加速電極の材料は無酸素銅である。各加速電極の面積は 0.45m×1.1m であり、この領域に 1080 個の電極孔（直径 16mm）が設けられている。各加速電極はアルミ合金製（ANP79）の板（直径：1.53m）に固定され、ステンレス製（SUS316）の円筒枠によって支持されている。各加速ギャップには、最大 167kV の電圧が印加され、3 段合計の加速電圧は 500kV である。各加速ギャップの間隔は、第１加速ギャップ（EXG-A1G）を 75mm、第２加速ギャップ（A1G-A2G）を 65mm、第３加速ギャップ（A2G-GRG）を 55mm に設定している。

各加速ギャップは大型 FRP 絶縁管（内径：1.8m、高さ 0.315m）で絶縁されている。FRP 絶縁管の陰極近傍には、３重点（真空、金属、FRP）での電界集中を抑制するために、アルミ合金製（A5052）の大型電界緩和リングが取り付けられている。また、ビーム加速時に発生する紫外線等から FRP 表面を保護するために、FRP 表面と電極の間にはスクリーンシールドが取り付けられている。各段に 167kV（全体で 500kV）の電圧を印加したときの、電位

分布を図 5 に示す。計算では、Poisson コード[5)]を用い、加速部を２次元 R-Z 形状にモデル化して電位分布を計算した。計算条件は、メッシュ幅 1.0mm、FRP の誘電率 4.1、印加電圧 500kV（3 段合計）である。電位分布は、0-500kV を 25 分割したときの等高線で示した。加速電極間の距離が最も短い第３加速ギャップにおける電界強度は小さな値であり、加速電極間で 3.0kV/mm、支持板間で 3.3kV/mm、支持枠間で 2.6kV/mm である。

実験では、各加速段毎に高電圧を印加して、各加速段の耐電圧を測定した。一例として、第２加速ギャップ（A1G-A2G）に高電圧を印加した場合の模式図を図 6 に示す。負イオン加速器内部を観測するために、負イオン源からプラズマ生成部を取り外し、加速部の上下をビューイングポート付きの真空フランジで閉止した。上部フランジには、中央部に大型ビューイングポート（アクリル製、視野 : 0.692m×0.792m）を、下部フランジには直径 0.35m のビューイングポート（アクリル製、A350） 4 個を設けた。さらに、アクリル板の電子励起発光位置から、絶縁破壊及びその前兆時に発生する放電位置を同定するために、接地電極より下流 5cm の位置に厚さ 1cm の透明アクリル板（1.18m×0.58m）を配置した。アクリル板に加えて、X 線測定器を下部フランジの中心部から下方 25cm の位置に設置した。

各加速段毎の耐電圧測定に加えて、負イオン加速器から加速電極、電極支持板、支持枠、陽極側のスクリーンシールドを取り除き、大型 FRP 単体の耐電圧試験を実施した。この FRP 単体試験と電極等が付いた状態の耐電圧試験を比較することで、絶縁破壊位置の同定を行う。（図 7 参照）。

３．耐電圧試験の結果

３．１　耐電圧特性

３．１．１　コンディショニング手順

本実験で実施した典型的な電圧印加手順について説明する。図 8 に典型的な電圧及び電流波形を示す。電圧は 0kV から徐々に増加させた。図中のＡ点で見られるように、電流が急激に上昇した場合には、電圧の増加を中断し、同じ電圧を維持し、電流の減少を待った。電流がほぼ上昇前の値まで減少した後、再度電圧を増加した。B 点近傍で見られるように、時間をかけても電流が減少しない場合には、~1kV ステップで電圧を増加した。C 点では、非常に短い時間で電流がインターロックレベルである 3.5mA を超え、電源が停止した。電源復旧後、くりかえし同様な手順で、イオン源に電圧を印加し、コンディショニングを進めた。

３．１．２　各加速段の耐電圧特性

図 9 にイオン源の圧力が 10^{-3}Pa 時の各加速ギャップ間の耐電圧特性を示す。絶縁破壊はイオン源内部の真空側で生じており、EXG-A1G, A1G-A2G 間の耐電圧は電圧印加回数とと

もに微増し、各々~120 － 130kV まで到達した。この値は、以前、JT-60U に装着した状態でコンディショニングを十分に実施した（電圧印加回数:2000 回）後に得られた同じ圧力条件での耐電圧（~140kV）[3]より僅かに低い値であり、今後、十分なコンディショニング（電圧印加回数を増加させること）によって以前のレベルまで到達すると予想される。一方、A2G-GRG の耐電圧は、1 日目の電圧印加回数 30 回あたりで一時減少が見られたが、2 日目からは電圧印加回数とともに増加した。約 70 回程度の電圧印加回数で測定を打ち切っているために、耐電圧がどの程度まで増加するか分からないが、前回の実験で得られた実績を考慮すると、他の加速ギャップ同様 140kV まで増加すると予想される。

JT-60U 負イオン源は 3 段全体で 500kV、1 段当たり 167kV の絶縁耐力を有する仕様で設計されている。今回得られた実験結果は設計値の~80%であった。この低い耐電圧特性の原因を調べるために、加速部から電極及び電極支持枠を取り除き、FRP 絶縁管単体での耐電圧試験を行った。図 10 に FRP 単体の耐電圧特性を示す。EXG-A1G 間で用いている FRP 絶縁管の耐電圧は、他の FRP 絶縁管の特性と異なり、電圧印加回数とともに緩やかに上昇した。これは、EXG の電極支持枠を取り除いたことによって、電界分布が大きく乱されたために、放出される電子の軌道が大きく変わり、FRP 絶縁管やアノード上の新たな表面のコンディショニングが必要になったためであると予想される。一方、A1G, A2G, GRG の電極支持枠を取り除いても電界が乱されることは無い。実際、A1G-A2G 及び A2G-GRG 間で用いている FRP 絶縁管の耐電圧は僅か 30 回程度の電圧印加回数で設計値に到達した。これらの絶縁管の耐電圧は、電極及び電極支持枠が装着された時の値より大きな値であった。この結果は、コンディショニング初期ではイオン源の耐電圧が主に電極及び電極支持枠間の耐電圧によって決定されていることを示している。

３．１．３　各加速段の絶縁破壊位置

コンディショニングの初期における電極及び電極支持枠で生じている絶縁破壊の位置を詳細に求めるために、各加速ギャップに電圧を印加した場合の暗電流、X 線強度、ガス圧、加速器内部の発光やアクリル板の電子励起発光位置を測定した。

（１）第１加速ギャップ

第１加速ギャップに電圧を印加した場合の代表的な暗電流、X 線強度、ガス圧及び加速部内部の映像を図 11 に示す。印加電圧を 1kV ステップで増加させると、暗電流、X 線、ガス圧が増加した（A 点）。一方、B 点では、絶縁破壊が発生し暗電流が瞬時に増加しているが、パルス幅が短いため、今回の実験では X 線強度やガス圧の上昇は検出できなかった。そのため、暗電流、X 線強度、ガス圧からは絶縁破壊位置を特定することはできなかった。

そこで、加速部内部の発光位置から絶縁破壊の位置を調べた。さらに、電子がアクリル板に衝突した時に生じる電子励起発光（青白色の可視光：カソードルミネッセンス）位置から絶縁破壊箇所を調べた。EXG-A1G 間に耐電圧の上限に近い高電圧（~120kV）を印加した

場合、アクリル板上に青色斑点を観察した（図 11）が、イオン源は絶縁破壊に至らなかった。この状態から僅かに~1kV 程度電圧を上昇した時に、絶縁破壊は生じており、その時 CCD カメラの映像は変化しなかった。この原因として、CCD カメラの録画速度（67ms/フレーム）が遅いことも考えられるが、後ほど紹介する A2G-GRG 間の絶縁破壊時には、比較的大きな青白色発光が観察されていることを考慮すると、絶縁破壊が電極以外つまり電極支持枠で生じていると推定される。

２）第２加速ギャップ

第２加速ギャップに電圧を印加した場合の代表的な電流、X 線強度、ガス圧の変化、及び加速器内部の発光映像を図 12 に示す。暗電流は t=39 秒のときに電極間での発光を伴って急激に増加した（A 点）。この発光は約１０秒間続いたが暗電流の減少に伴い発光強度も減衰した。暗電流の増加と発光強度が同期していることから、増加した暗電流は電極間で流れていると推定できる。暗電流の急激な増加を伴う電極間の発光は、主に電極の周辺部で見られており（図 13）、コンディショニングの進展とともに減少した。B 点（t=65-88 秒）では、電圧を約 1kV ステップで増加させると、暗電流、X 線強度、ガス圧が増加したが、電極間での発光は見られなかった。一方、絶縁破壊が生じた C 点では、その直前の数フレーム間（133ms）、僅かな白色の点光を観察した。しかし次に示す A2G-GRG 間の絶縁破壊時に見られた青白色発光は観測されておらず、この場合も絶縁破壊は主に電極以外つまり支持枠で生じていると推定できる。

（３）第３加速ギャップ

第３加速ギャップに電圧を印加した場合の代表的な電流、X 線、ガス圧の変化、及び加速器内部の発光映像を図 14 に示す。第１加速ギャップと同様に、印加電圧を 1kV ステップで増加させると、暗電流、X 線、ガス圧が増加した（A 点）。一方、B 点では、絶縁破壊が発生し暗電流が瞬時に増加しているが、パルス幅が短いため、今回の実験では X 線強度やガス圧の上昇は検知しなかった。そのため、暗電流、X 線強度、ガス圧からは絶縁破壊位置を特定することはできなかった。一方、第３加速ギャップの場合、図 14 に示したように、多くの絶縁破壊時に比較的大きな青白色発光を観察した。この大きな青白色発色は大量の電子が発生・加速し、アクリル板に衝突した際に発生した蛍光と考えられる。絶縁破壊時の発光回数は、72 回の電圧印加に対して 51 回（70%）であったことから、第３加速ギャップの絶縁破壊は加速電極間のギャップ放電が主原因であることが分かった。

この青白色発光位置であるが、電圧印加回数が 49 回までの初期のコンディショニングでは、加速電極の下側のみに観測されたが（図 15）、50 回目以降は、加速電極の上側に移動した（図 16）。またそれらの位置は、セグメント間の境界近傍であった。これらの領域では、イオンビームを収束するために、セグメント電極が焦点に向けて傾けて取り付けられており、電界が集中している可能性がある。さらに加速電極間のギャップ間放電は 1 箇所に固

定されているのでなく、コンディショニングとともに移動することは、大面積電極（面積：約 0.5 m^2/段）を有する JT-60U 負イオン源の場合、全ての位置で放電が起きなくなる状態にするためには長いコンディショニング時間が必要であることを示唆するものである。

３．１．４　脱離ガス

高電圧印加時の放出ガスに関しては、H_2O の挙動において、電極及び電極支持枠がある場合と無い場合（FRP 絶縁管単体）とでは大きな差が見られた。電極及び電極支持枠がある場合の放出ガス成分の時間変化を図 17 に示す。残留ガスの主成分は H_2O である。設定電圧到達後（A 点）徐々に印加電圧を上昇してもガス圧は一定であった。この時のベースとなるガス種は、QMS の出力電流より水であった。B 点まで印加電圧を上昇させると、暗電流が増加し、ガス圧も増加した。この時、質量電荷比（m/z）2（H_2）、28（CO）、44（CO_2）が増加し、逆に 18（H_2O）は減少する傾向を示した。その後、ガス圧を増大させた時（C 点、D 点、E 点）においても、同様な傾向が見られた。また、印加電圧を低下した場合、暗電流とともにガス圧も低下し、その際、H_2O は増加し H_2、CO、CO_2 は減少した（F 点）。データの再現性を確認するため、もう一度印加電圧を上昇させた（G 点）。印加電圧を上昇させると、暗電流、ガス圧の増加、H_2、CO、CO_2 の増加と H_2O の減少が見られた。このように残留ガスの主成分である H_2O は暗電流の増加とともに減少することから、H_2O の発生箇所から測定系の途中の位置に、暗電流（電子）が流れる領域があり、H_2O が電子照射により分解しているのではないかと考えられる。

FRP 絶縁管単体を用いた場合の脱離ガスの時間応答を図 18 に示す。残留ガスは電極及び電極支持枠がある場合と同様、H_2O であるが、高電圧印加時に大量の H_2O の増加を観測した。FRP 絶縁管単体の場合は、暗電流の流れる領域は FRP 沿面近傍と考えられる。また電子（暗電流）が FRP 沿面から衝撃・脱離させたガスは、暗電流の流れない領域を通して測定系に辿り着くことが可能である。実際、測定された脱離ガス種は、埼玉大学で実施した FRP に電子ビーム照射時で観測された成分[6)]とほぼ同じで H_2、H_2O 、CO、CO_2 であった。

このように脱離ガスの違いは、暗電流の流れる場所の違いに起因している可能性があり、今後、サンプル等により電子ビームの分解効果も含め詳細に調べる必要がある。

３．２　面積効果の検討

本イオン源は直径 16ｃｍの無酸素銅製の近似ロゴスキー電極を用いた真空耐電圧に関する実験結果をもとに設計された。近似ロゴスキー電極を用いた実験では、電極間の真空耐電圧はギャップの 0.5～0.6 乗に比例して増加した。加速途中の負イオンの中性化損失量を抑制するためには、イオン源をできるだけ小型化する必要があったため、できるだけ短いギャップ長（小型化）で高い耐電圧を得るために、多段方式を採用した。一方、加速段数を増やすと、多孔電極の孔合わせ調整が困難となるために、JT-60U 負イオン源では、加速段数を 3 段とし、1 段当りの耐電圧を 500kV/3=167kV と設計した。近似ロゴスキー電極を

用いた耐電圧特性から、単段当り 167kV の耐電圧を実現するのに必要となる電極間の距離は約 20mm であったが、JT-60U 負イオン源を設計する際には、2 倍以上の設計裕度を採用し、最も短い電極間距離を 55mm とした。実際、近似ロゴスキー電極を用いた 55mm ギャップ長での耐電圧試験では、耐電圧が 250kV から 390kV の範囲にあった。

これに対し今回の試験では、JT-60U 負イオン源の単段あたりの耐電圧が設計値の 75%、約 125kV に留まった。そこで、この相違の原因の一つとして考えられる電極面積の影響について検討した。面積効果に関する研究においては、電極の面積を変化させた時、耐電圧は電極面積の 0.23 乗とともに減少するとの報告がある [7)]。この仮定を用いて計算すると、実機の加速電極間の耐電圧は近似ロゴスキー電極で得られた耐電圧の 34%（第 3 加速ギャップの加速電極、支持板、支持枠の面積合計は 2.2m^2）になると見積もれる。従って、55mm 電極間ギャップ長に対して、実機耐電圧は 85kV（250kV×34%）から 133kV(390kV×34%)の間と想定される。実機の実際の耐電圧は 140kV であり、この評価と概ね一致する。耐電圧に対する面積効果のメカニズムはよく分かっていないが、３．１．３　３）で明らかとなったように大面積電極のコンディショニング過程で色々な所で絶縁破壊が発生する結果と矛盾しない。このことから実機の耐電圧を改善するためには、電極及び電極支持枠を小型化するのが１つの可能性として考えられる。具体的な案の一つとして、現在実機で用いている大型円筒支持枠に代わって，レーストラック形状の支持枠にすることがある。

４．今後の課題

今回の実験において、コンディショニング初期における負イオン源の 3 段静電加速器の耐電圧は、加速電極、及びその支持板や支持枠が決めている可能性が高いことを明らかにした。そのため、加速電極等に着目した耐電圧の向上を検討する必要がある。具体的には、材料（電極：無酸素銅、支持板：アルミ合金、支持枠：ステンレス、配管固定：銀ロー）、電極形状（電極孔等のエッジ部）、表面状態（有機物、酸化皮膜の層）、ギャップ間距離、電極面積の耐電圧に及ぼす影響をサンプルで試験・評価するとともに、それらの結果を踏まえて実機の加速管を改造することが必要である。

５．まとめ

JT-60U N-NBI 負イオン源の３段静電加速部の耐電圧が低い原因が加速電極間等のギャップ間放電か大型 FRP 絶縁管の沿面放電のどちらであるかを明確にする目的で、加速電極及び電極支持枠等のある場合と無い場合（FRP 絶縁管単体）の真空耐電圧試験を実施した。この試験では、負イオン源加速部の各段に電圧を印加して試験を実施した。また加速電極

間で発生した絶縁破壊位置をさらに絞り込むために、接地電極の背後に、接地電極とほぼ同じ大きさを有するアクリル板を設置し、電子がアクリル板に衝突した時に生じる電子励起発光（青白色の可視光：カソードルミネッセンス）から絶縁破壊時の放電箇所を調べた。なお本試験は、試験期間の制限から各段毎のコンディショニング時間は 1-2 日程度しかないため、実機でのコンディショニング期間（数ヶ月）における初期コンディショニングに相当するものと考えられる。以下、得られた知見を記す。

・コンディショニング初期過程においては、加速部の真空耐電圧は 120-130kV 程度であった。一方、FRP 絶縁管単体の耐電圧は短期間のコンディショニングにより 167kV に達したことから絶縁破壊は主に加速電極、支持板、支持枠でギャップ間放電を起こしていると考えられる。

・第１及び第２加速ギャップの絶縁破壊は、CCD カメラの観測結果などから、主に支持板か支持枠で発生していると推察される。一方、第 3 ギャップの絶縁破壊は主に加速電極間で生じた。

・電極間のギャップ放電位置は、一箇所に固定しておらず、コンディショニングの進展とともに移動した。このことは大面積電極におけるコンディショニング時間が長くなることを示唆するものである。

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。また、本研究遂行にあたり、貴重なご意見・ご指導をいただ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) 核融合装置試験部 NBI 装置試験室：“JT-60U 用負イオン源 NBI 装置の設計検討”、JAERI-M 94-072　(1994)
2) 菊池勝美他：“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”, JAEA-Technology 2006-016 (2006)
3) 菊池勝美他：“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”, JAEA-Technology 2007-027 (2007)
4) M. 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, vol. 14, No.3, 572 (2007).

5) J. H. Billen and L. M. Young: “Poisson Superfish”, LA-UR-96-1834 (version 7.17) (2006)

6) 高橋昌宏：私信

7) J. M. Lafferty, ed.: “Vacuum Arcs, Theory and Application”, p43, John Wiley & Sons, New York (1980)

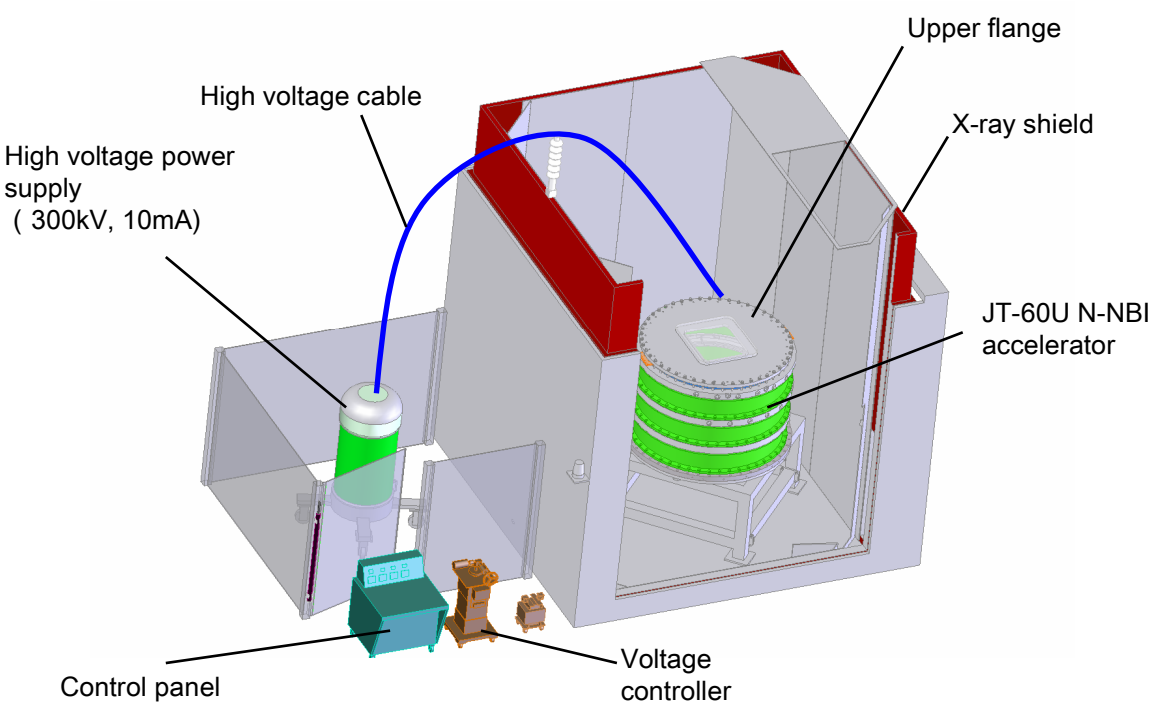


Figure 1 Bird's-eye view of high voltage test stand

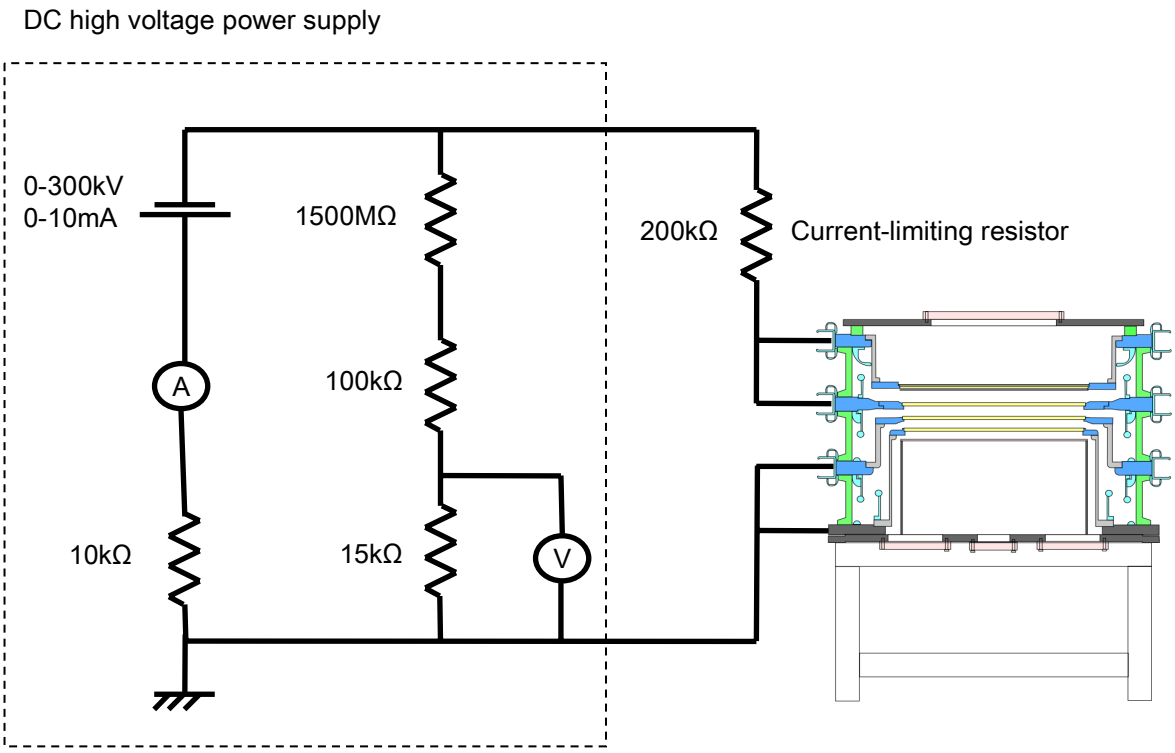


Figure 2 Electrical circuit for high voltage test

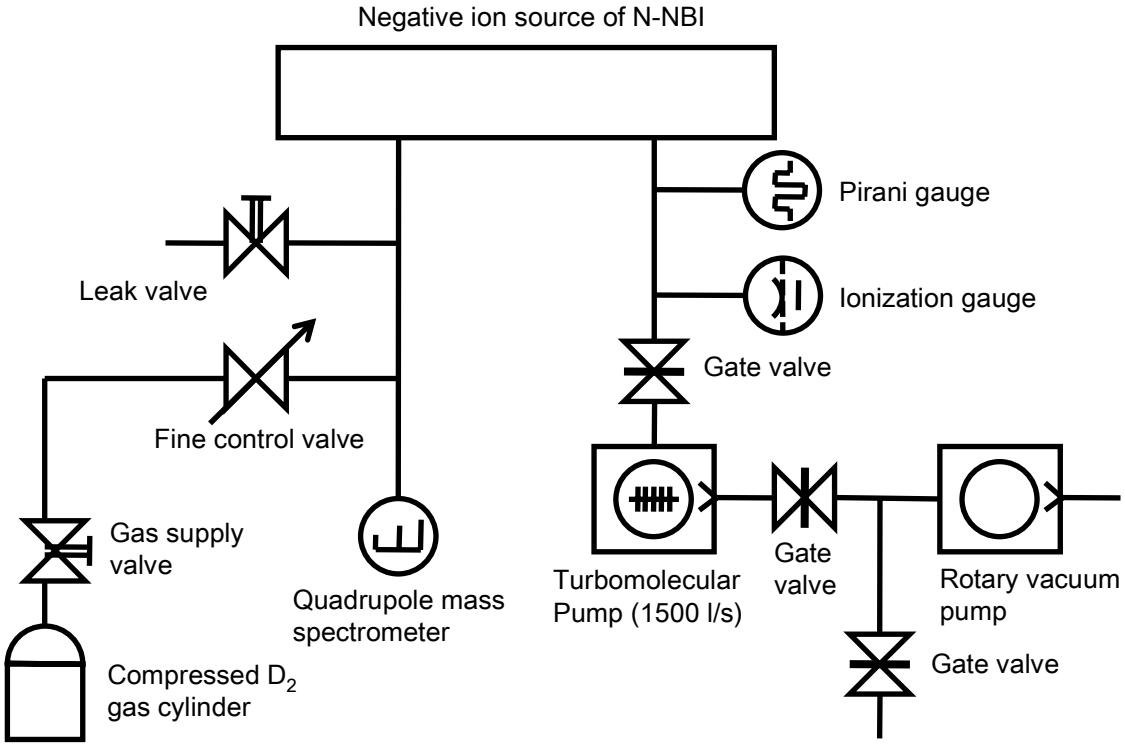


Figure 3 Vacuum system for high voltage test stand

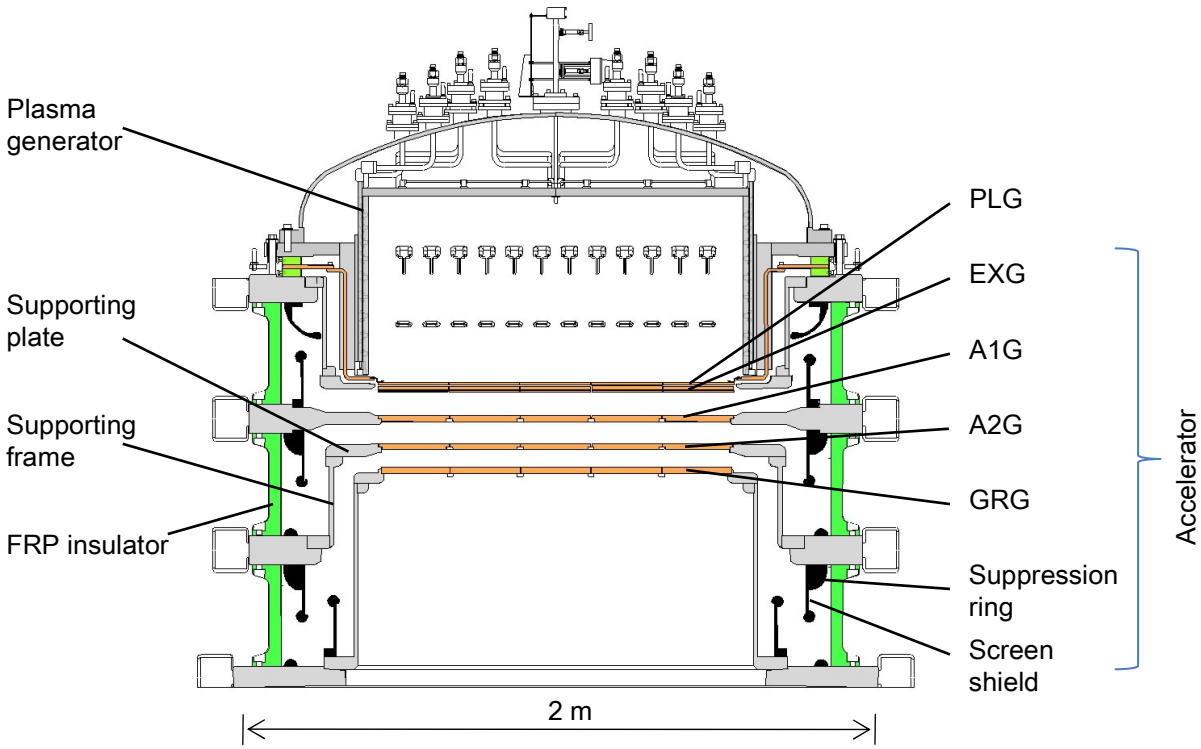


Figure 4 Schematic diagram of the JT-60 negative ion source

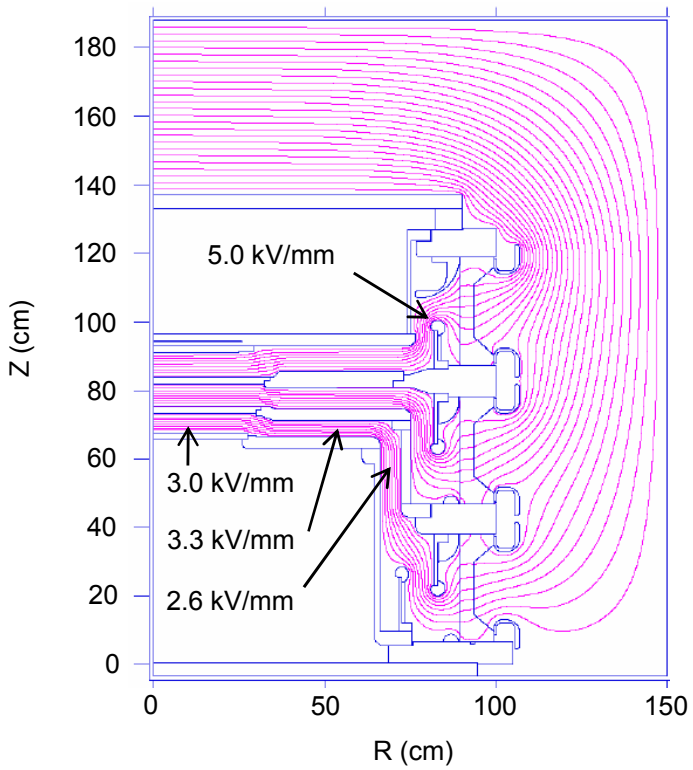


Figure 5 Counter map of qui-potential surfaces at acceleration voltage of 500kV

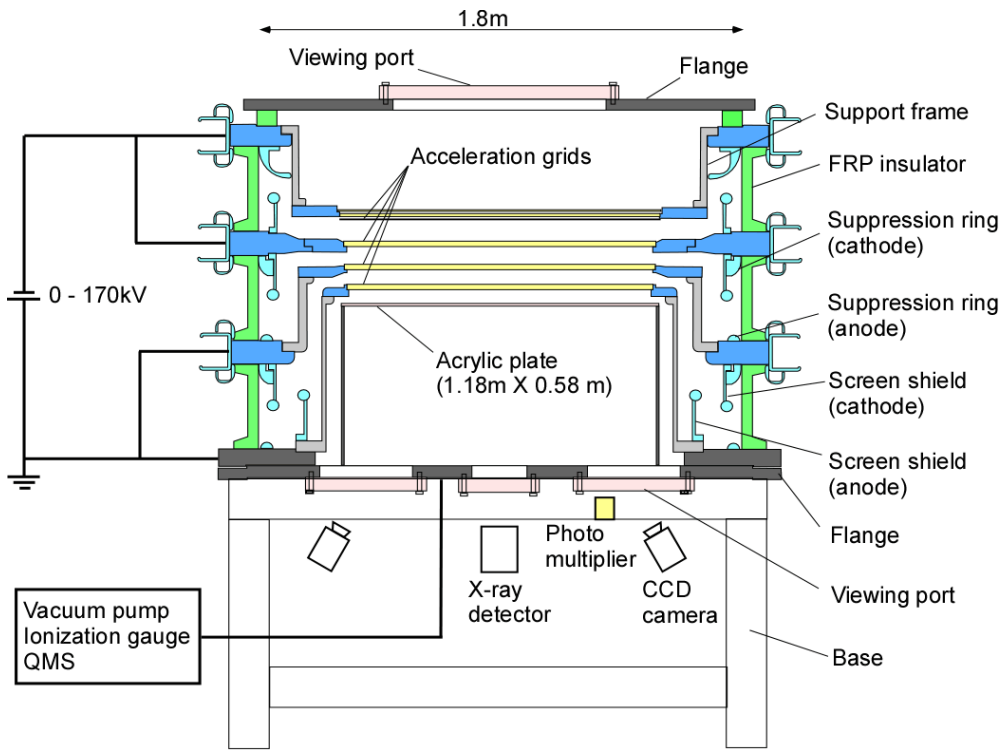


Figure 6 Experimental setup for the accelerator

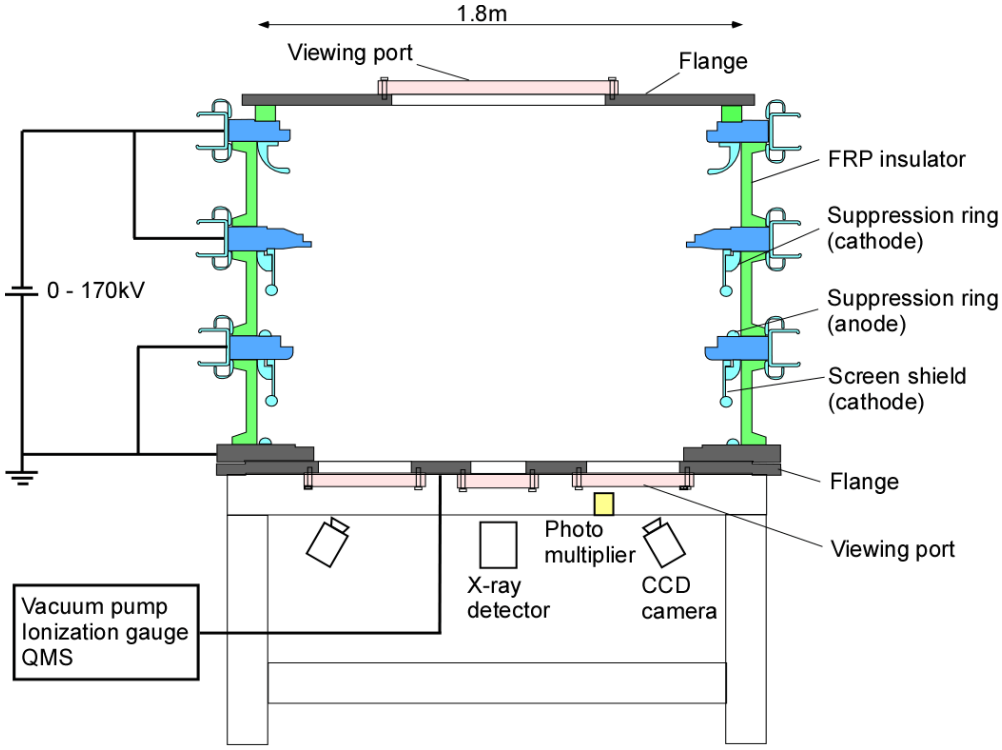


Figure 7 Experimental setup for large FRP insulator

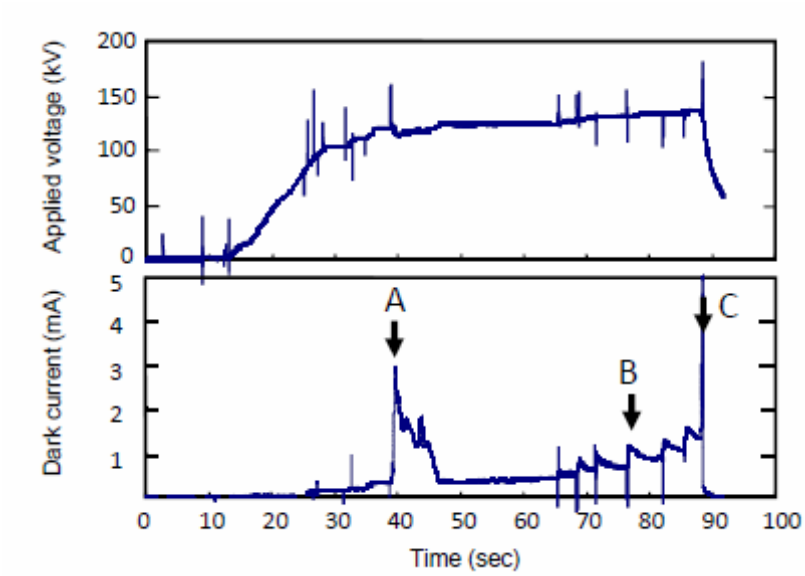


Figure 8 Typical waveforms of voltage and dark current during conditioning

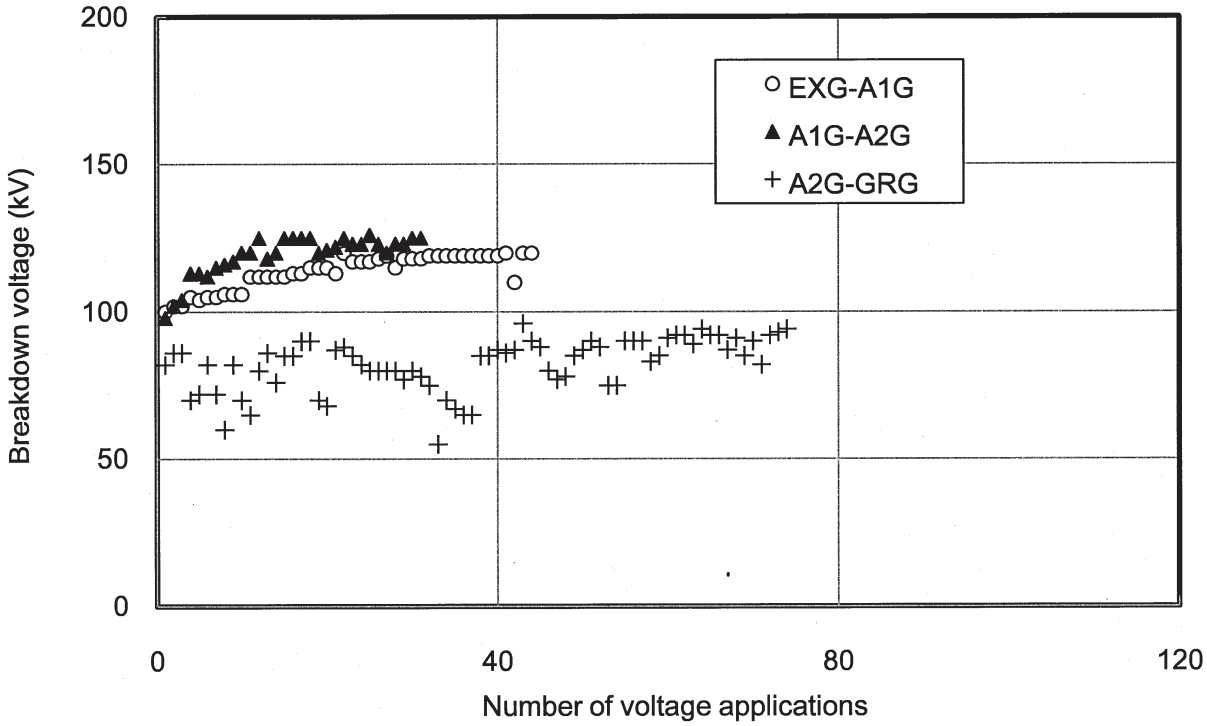
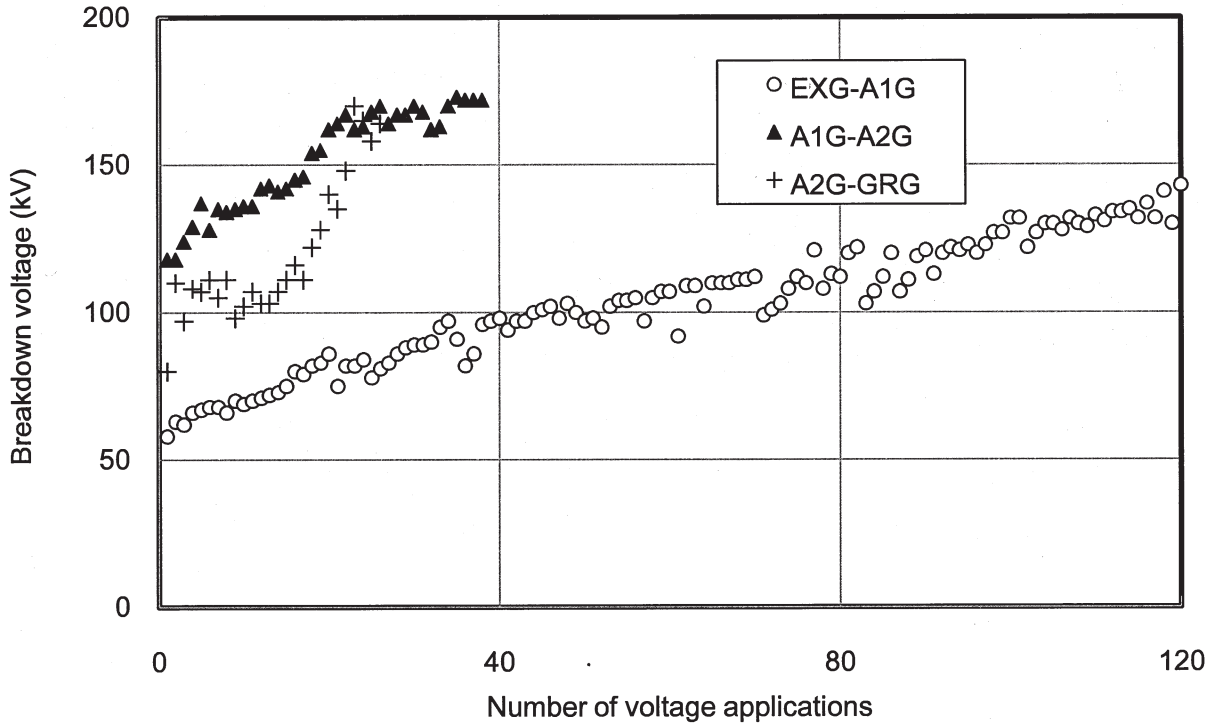


Figure 9 Conditioning progress of accelerator with grid



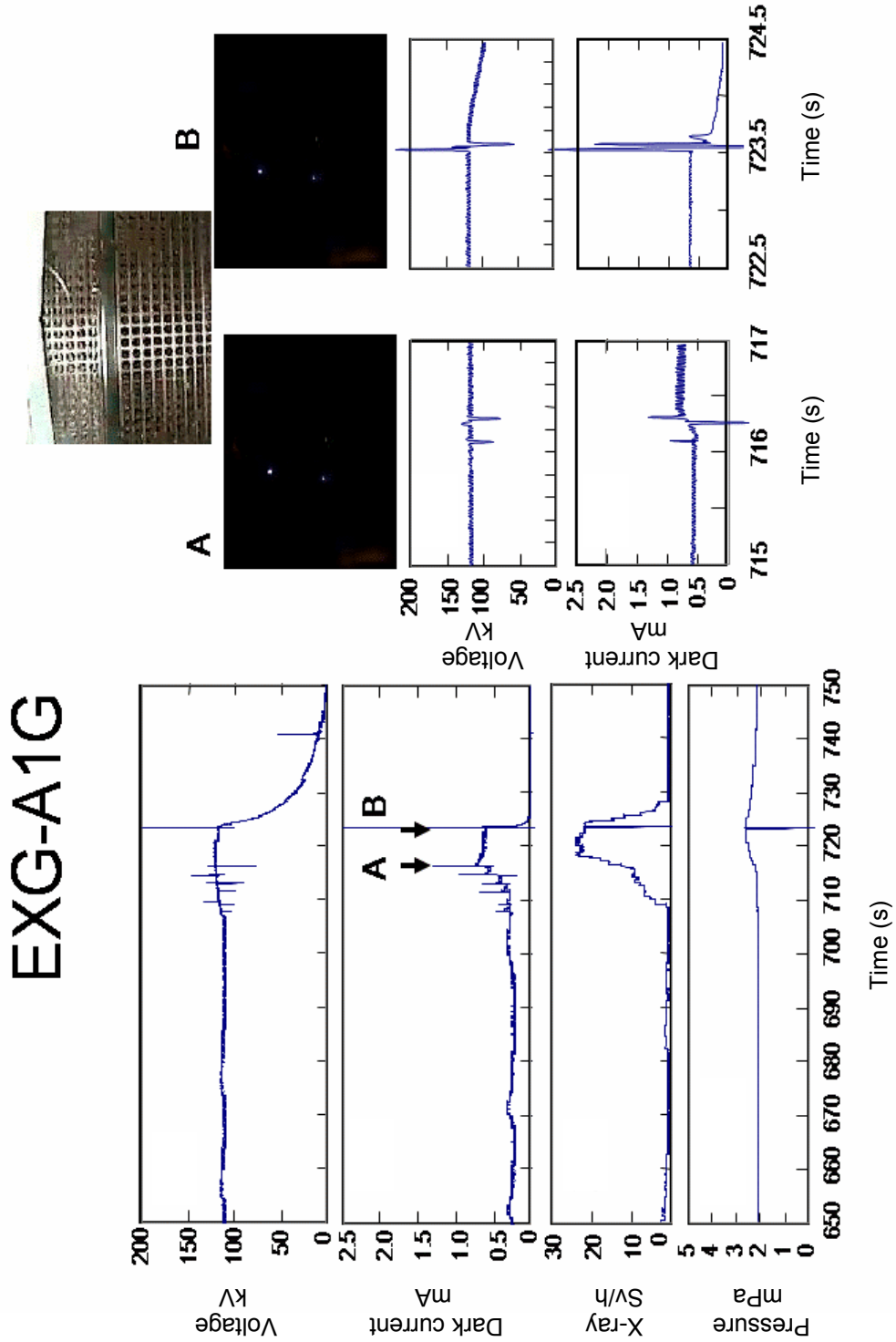


Figure 11 High voltage application in the 1st acceleration gap

This is a blank page.

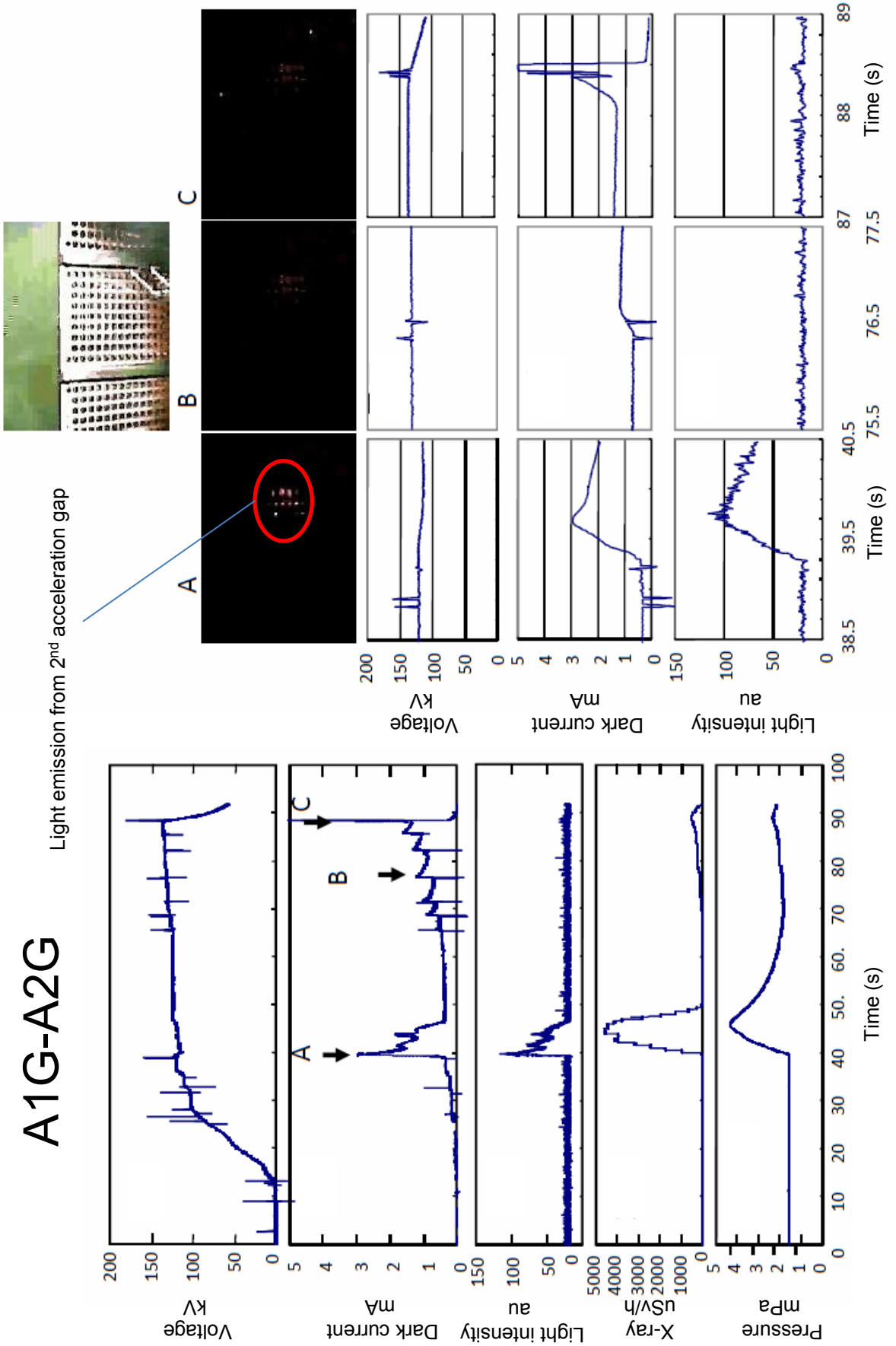


Figure 12 High voltage application in the 2nd acceleration gap

This is a blank page.

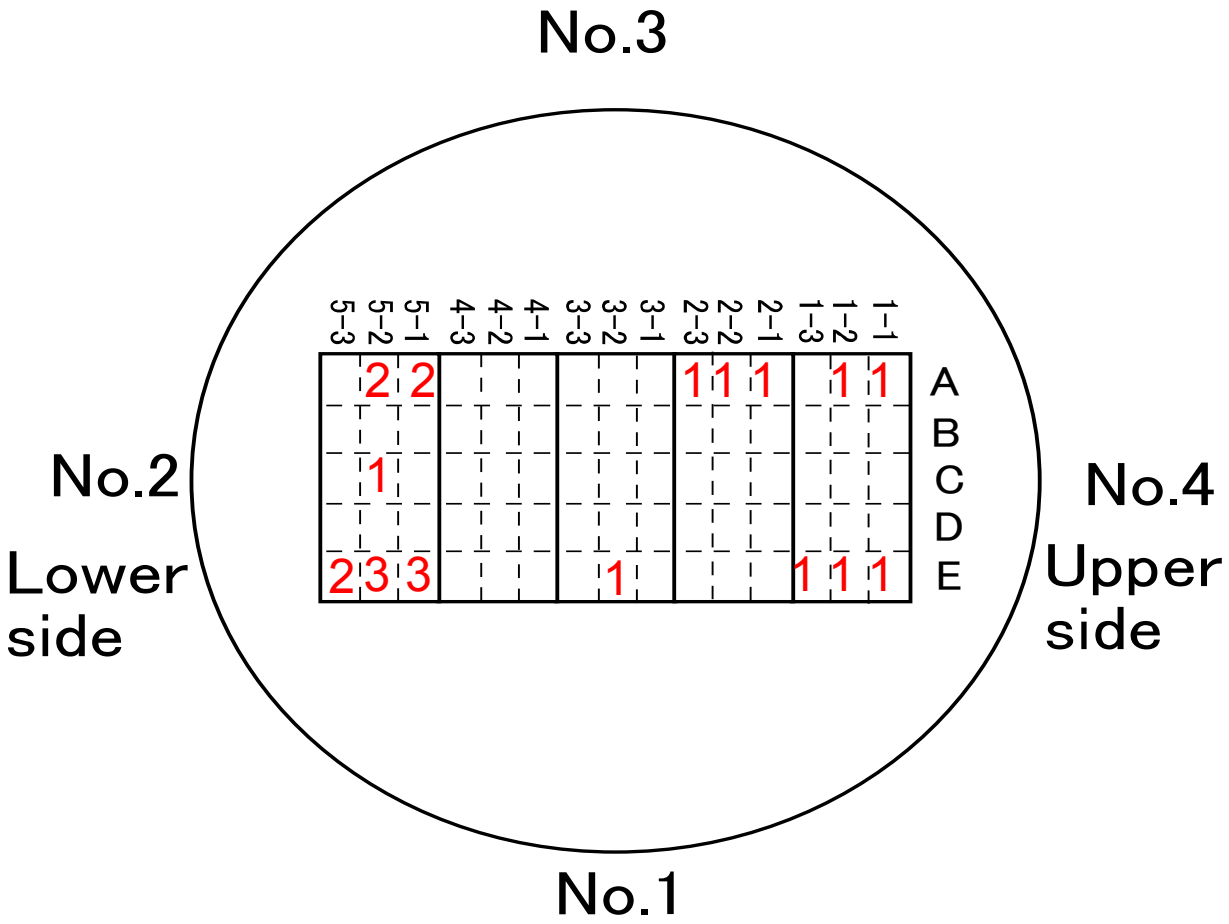


Figure 13 Location of light emission in the 2nd acceleration gap

This is a blank page.

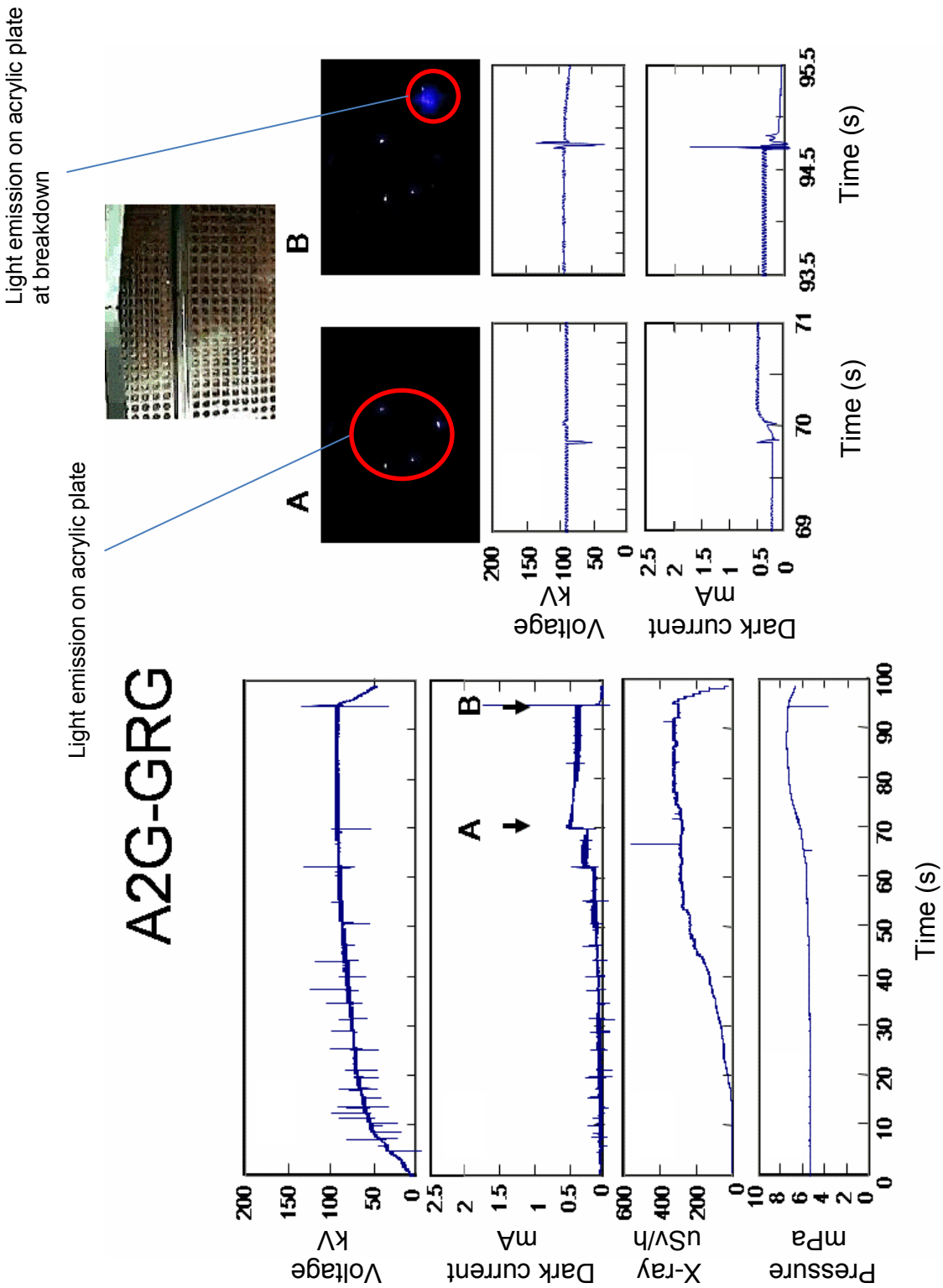


Figure 14 High voltage application in the 3rd acceleration gap

This is a blank page.

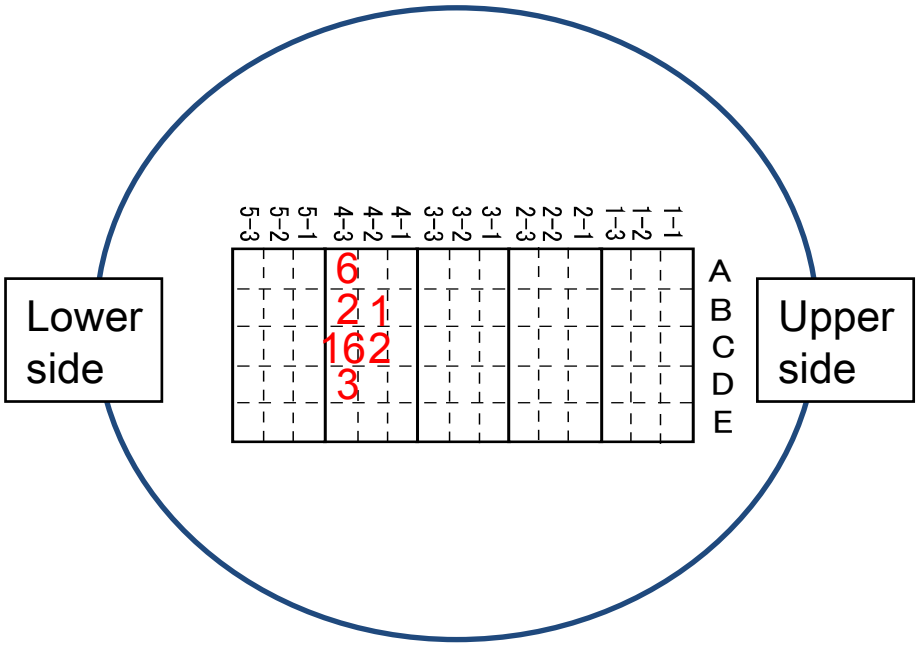


Figure 15 Number of light emissions on the acrylic plate when high voltages were applied in the 3rd acceleration gap

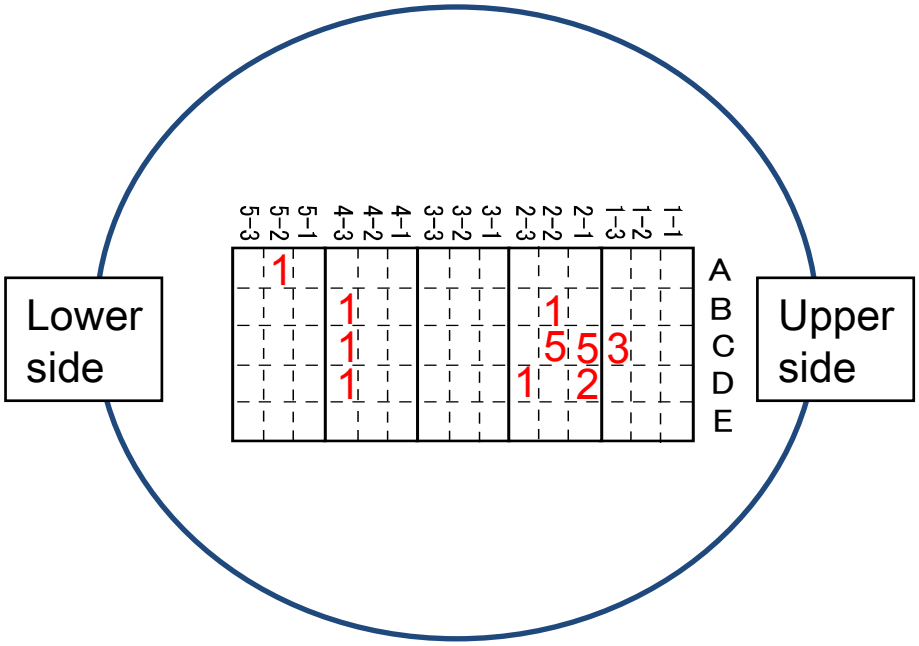


Figure 16 Number of light emissions on the acrylic plate when high voltages were applied in the 3rd acceleration gap

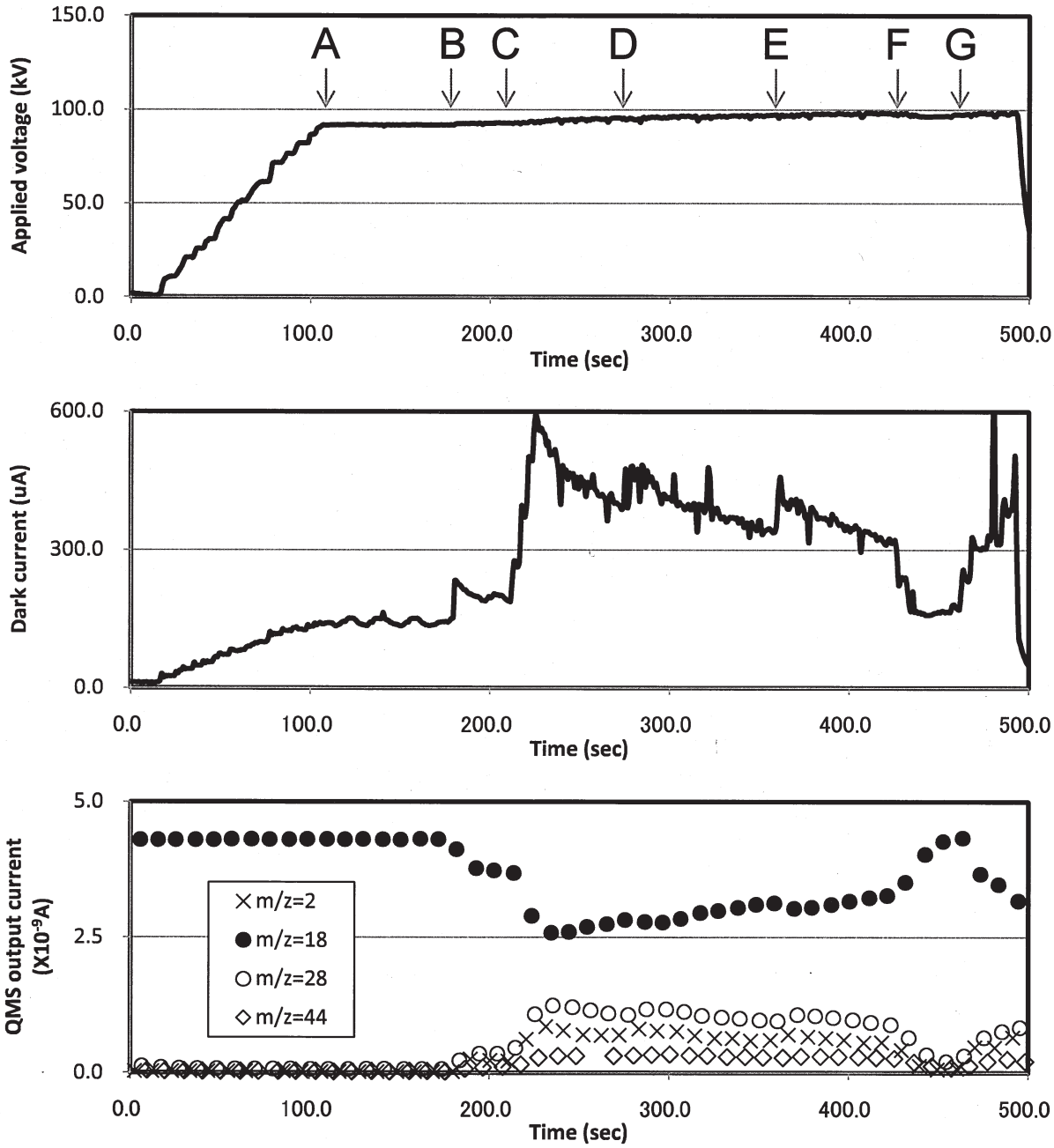


Figure 17 QMS output current when high voltage were applied in the 3rd acceleration gap

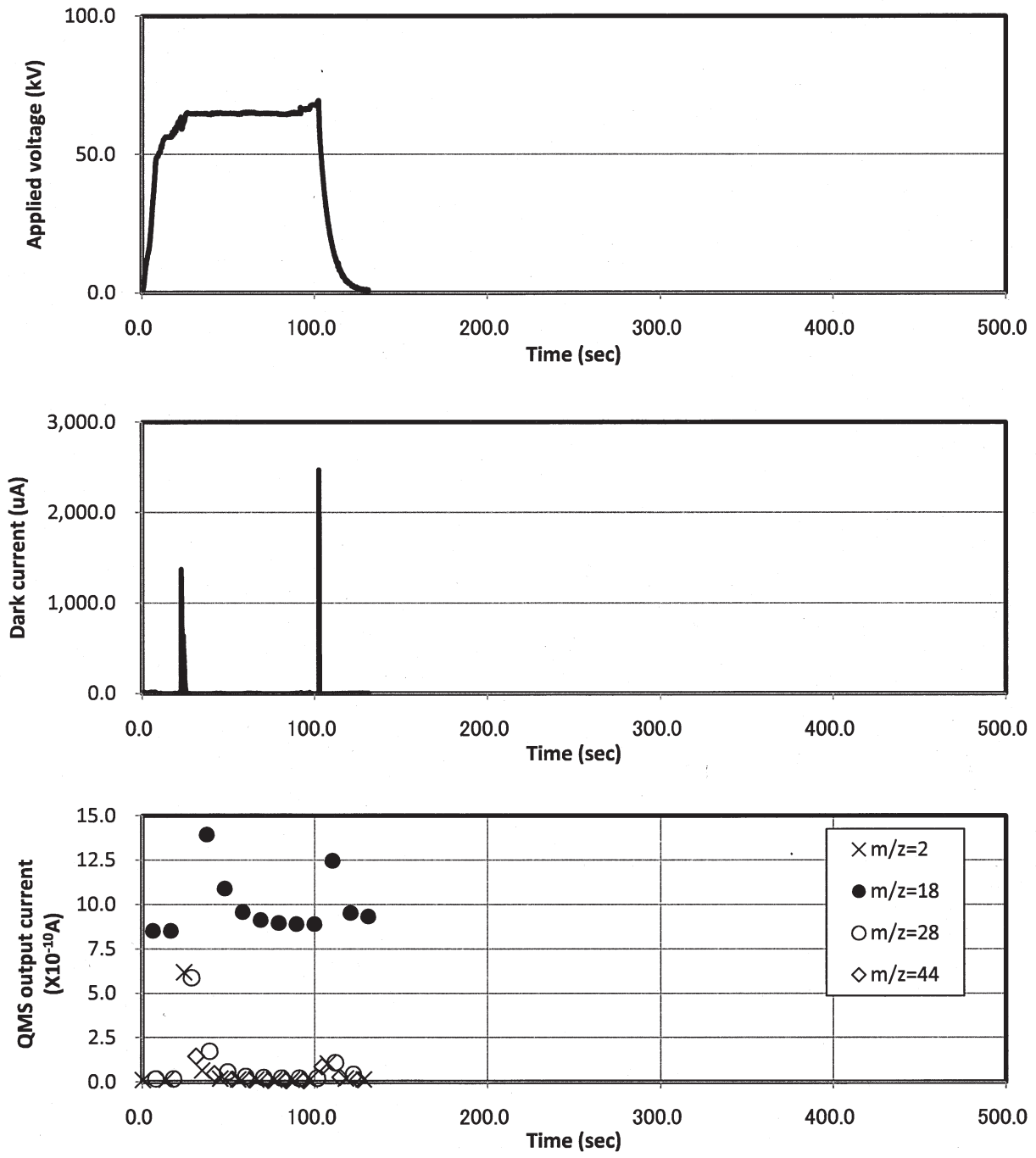


Figure 18 QMS output current, when high voltage were applied in the 1st acceleration gap without grids

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
体積	立法メートル	m^3
速さ，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	毎メートル	m-1
密度（質量密度）	キログラム毎立法メートル	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	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	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	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	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	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン(a)	rad		$m \cdot m^{-1}=1$ (b)
立体角	ステラジアン(a)	sr(c)		$m^2 \cdot m^{-2}=1$ (b)
周波数	ヘルツ	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N・m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s・A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	V・s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度(d)	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd・sr(c)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd=cd$
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd=m^{-2} \cdot cd$
（放射性核種の）放射能	ベクレル	Bq		s^{-1}
吸収線量，質量エネルギー分与，カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
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	シーベルト	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$

(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った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℃のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

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° =(π/180) rad
分	’	1’ =(1/60)° =(π/10800) rad
秒	”	1” =(1/60)’ =(π/648000) rad
リットル	l、L	1l=1 $dm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	1t=10^3 kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表７．国際単位系と併用されこれに属さない単位で 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	1eV=1.60217733(49)×10^{-19}J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10^{-27}kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10^{11}m

表８．国際単位系に属さないが国際単位系と 併用されるその他の単位

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

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	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s^2	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量（比熱容量），質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー（比エネルギー）	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー，モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3}=m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 \cdot sr)$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3}=kg \cdot s^{-3}$

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 erg=10^{-7} J
ダイン	dyn	1 dyn=10^{-5}N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm^2=0.1Pa・s
ストークス	St	1 St =1$cm^2/s=10^{-4}m^2/s$
ガウス	G	1 G ≙10^{-4}T
エルステッド	Oe	1 Oe ≙(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≙10^{-8}Wb
スチルブ	sb	1 sb =1cd/$cm^2=10^4cd/m^2$
ホト	ph	1 ph=10^4lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm/$s^2=10^{-2}m/s^2$

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
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10^{10}Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10^{-4}C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10^{-2}Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10^{-2}Sv
X線単位		1X unit=1.002×10^{-4}nm
ガンマ	γ	1γ=1 nT=10^{-9}T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10^{-26}W・m^{-2}・Hz^{-1}
フェルミ		1 fermi=1 fm=10^{-15}m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10^{-4}kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	
ミクロン	µ	1 µ =1um=10^{-6}m

（第７版，1998年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています