

# 長パルス入射に向けたJT-60正イオンNBI加熱装置の 加速電源ブリーダ抵抗器の検討

Assessment of Water-cooled Bleeder Resistors for Long Pulse Injection  
in Acceleration Power Supply on Positive-ion-based NBI System

能登 勝也 薄井 勝富 河合 視己人 池田 佳隆  
Katsuya NOTO, Katsutomi USUI, Mikito KAWAI 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

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

長パルス入射に向けた JT-60 正イオン NBI 加熱装置の加速電源ブリーダ抵抗器の検討

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

能登 勝也\*・薄井 勝富・河合 視己人・池田 佳隆+

(2008 年 4 月 16 日受理)

超伝導化する JT-60SA では、1 ユニット当たり 85kV、2MW の入射が要求される正イオン NBI 装置（以下 P-NBI 装置）を 12 ユニット用いて、合計 24MW の D<sup>0</sup> ビームを入射することが要求されている。1 ユニット当たりのパワーは現行通りであるが、ビームパルス幅は現行の 30 秒から 100 秒まで大幅に延ばす必要がある。JT-60SA の実現に向けて、P-NBI 装置の主要機器である加速電源の水冷ブリーダ抵抗器の設計及び開発を行った。設計では、既存機器を最大限利用することを考慮し、検討を進めた。その結果、抵抗器を構成している冷却水筒内の抵抗素子のみを交換し、抵抗値を現行より 4 倍増大することによって、100 秒入射できる見通しを得た。さらに、高抵抗ブリーダ抵抗器の問題点であるブリーダ電流不足による加速電源の動作について、実際にビーム加速試験を行い評価した。ビーム電圧、ビーム電流、及び電圧比などを広範囲に変えて評価した結果、中間電極の電流が大きい悪条件下においても、加速電源は安定に動作した。

これらの結果、P-NBI 装置の電源設備の主要機器である水冷ブリーダ抵抗器に関しては、抵抗素子のみの交換で、100 秒化に対応できることが分かった。

---

那珂核融合研究所（駐在）：〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

\* 出向職員（日本アドバンストテクノロジー（株））

+ 経営企画部

Assessment of Water-cooled Bleeder Resistors for Long Pulse Injection in Acceleration Power Supply on  
Positive-ion-based NBI System

Katsuya NOTO<sup>\*</sup>, Katsutomi USUI, Mikito KAWAI and Yoshitaka IKEDA<sup>+</sup>

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

(Received April 16, 2008)

Water-cooled bleeder resistor, utilized in acceleration power supply on the positive-ion-based NBI system, has been designed to realize 100 s injections of intense neutral beams in JT-60 Super Advanced. The design is progressed with minimizing modification of existing electric parts. Existing water-cooled bleeder resistors is composed of three water vessels connected in parallel, in each of which 150 resistors of  $600\ \Omega$  are immersed and connected in series. Although the manufacturing company requires entire replacement of water-cooled bleeder, the careful assessment of thermal load allows only the replacement of the resistors inside the water vessel. The resistance of one resistors is required to be increased from  $600\ \Omega$  to  $2.5\ k\Omega$ . The total resistance of the bleeder is  $\sim 140\ k\Omega$  that includes the resistance of water. In the operation with the bleeder of  $\sim 140\ k\Omega$ , stable production of 85 keV, 55 A D<sup>+</sup> beams, allowing 2 MW of the designed injection power, was confirmed without destabilization of the acceleration power supply. This modification significantly reduces the cost and the manufacturing time.

Keywords : NBI , JT-60 Super Advanced , Water-cooled , Acceleration Power Supply , Bleeder Resistors

---

<sup>\*</sup> Research Staff on Loan ( Nippon Advanced Technology Co.,Ltd )

<sup>+</sup> Policy Planning and Administration Department

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 水冷抵抗器の改造方針 .....	1
3. 試験準備 .....	2
3.1. 予備試験 .....	3
3.2. 水冷抵抗器の設定 .....	3
4. 試験及び考察 .....	4
5. まとめ .....	5
謝辞 .....	5
参考文献 .....	5

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Guideline for modification of breeder resistance .....	1
3. Experimental setup .....	2
3.1 Preliminary test .....	3
3.2 Setup of breeder resistance .....	3
4. Experimental results and discussion .....	4
5. Summary .....	5
Acknowledgments .....	5
References .....	5

This is a blank page.

## 1. はじめに

JT-60 の正イオンビームを用いた中性粒子入射装置（P-NBI 加熱装置）は、10 秒入射を定格として 1986 年から運転が開始された。その後、2003 年から開始した JT-60 長時間放電実験運転に伴い、入射パルスを 30 秒に延伸した。この改造においては、10 秒定格運転時の熱的裕度の検討を基に 30 秒化した。その結果、改造を行った接線入射ユニットにおいて、1 ユニットあたり 2MW 中性ビームを 30 秒間安定に入射することに成功した。さらに、4 基の接線入射ユニットと 7 基の垂直入射ユニット（10 秒入射）の入射タイミングを調整することによって、10MW を越える高パワービームの 30 秒入射を実現し、JT-60 のプラズマ性能の向上に貢献した。

一方、JT-60 を超伝導化改造する JT-60SA 計画では、既存の P-NBI および負イオンビームを用いた NBI（N-NBI 加熱装置）をさらに増力し、ITER のサテライトトカマクとして ITER と同じプラズマ形状で高加熱実験を行い、ITER へ科学的知見を提供するとともに、原型炉に必要な高出力密度連続運転法の開発を行う。この要求を満足するために、P-NBI 加熱装置では、24MW（12 ユニット）、N-NBI 加熱装置では 10MW（1 ユニット）の合計 34MW の高出力ビームを 100 秒間入射することが求められている。この増力計画においては、現行の NBI 加熱装置を最大限有効利用することが要求されている。このため、電源設備に関しては現行機器の熱設計、性能の再評価を踏まえた上で、改造を最小限に抑えることが求められる。

本報告では、JT-60SA 用 NBI 装置の設計・検討の一環として、P-NBI 加熱装置用電源の中でも最大の発熱機器である加速電源用水冷抵抗器を検討した結果を示す。つまり、水冷抵抗器の抵抗値を上げることによって、100 秒間通電した時の発熱量を現状程度に抑えるとともに、安定したビーム加速及び電圧制御が可能であることを示す。この結果は 100 秒化のための水冷抵抗器の改造を大幅に合理化することが可能であることを示すものである。

1 章に引き続き、2 章では、100 秒化に必要な電源設備の仕様を述べる。3 章では、既存設備で除熱可能な発熱量を考慮し選定した水冷抵抗器の抵抗値の検討結果を示す。4 章には、検討結果に基づく予備試験と検証試験の結果について述べる。5 章では、まとめと今後の予定について述べる。

## 2. 水冷抵抗器の改造方針

これまでの運転実績やプラズマ加熱実験からの要求により、30 秒運転時と同様、JT-60SA の P-NBI 加熱装置の 100 秒化改造での入射パワーおよび加速エネルギーの目標値を、2MW/ユニット、加速エネルギー 85keV とした。この運転条件を満たすためには、主に電源機器の容量を増力する必要がある。表-1 に P-NBI 加熱装置の各部電源の 10 秒定格時、30 秒化改造時そして 100 秒化改造に必要な性能を示す。図-1 に P-NBI イオン源用電源回路図を示す。なお各部電源の 100 秒化のための改造検討は、参考文献[4]：JT-60 正イオン NBI 加熱装置電源設備の長パルス化改造検討に報告されている。

電源の容量増加として最大となるのは、85kV、55A の高電圧直流加速電源である。加速電源は、

図-2 に示すように、高出力真空管（以下、RT-A）と水冷抵抗器（以下、WR-A）の分圧で第二正電極電位を得ている。既存の WR-A は、10 秒パルス仕様であり、1 本当たり  $600\Omega / 600W$ （公称値）の抵抗素子を 150 本直列に接続したものを水冷筒に収め、これを 3 台並列に接続して使用している。図-3 に水冷抵抗器構造図、及び図-4 に水冷抵抗器外観及び内部配置の写真を示す。水冷抵抗器の発熱量は、水冷抵抗器の抵抗値 ( $R$ )、印加電圧である第 2 正電極電圧 ( $V_g$ )、パルス幅を ( $t$ ) とすると、消費エネルギー  $(V_g^2/R \cdot t)$  で与えられる。長パルス運転に当たっては、WR-A で消費する全体のエネルギーを 10 秒定格時のエネルギー以下に制限する必要があるが、WR-A の使用限界を実測した結果、全体エネルギーが 10 秒定格時の値を超えて、抵抗素子 1 本当たりの許容最大エネルギーを  $8.3\text{kJ}/\text{本}$  以下に制限すれば、WR-A の使用は可能である。表-2 に加速電源の運転時間と運転条件の関係を示す。

平成 15 年から開始した 30 秒運転では、10 秒定格時の容量 (120kV, 94A) よりかなり低い領域 (85kV, 55A) で加速電源を使用した。この時の電圧比  $\Gamma$  は  $(V_g/V_{acc})_{max}=0.7$  であり、第 2 正電極電圧  $V_g$  は  $V_g.max=60\text{kV}$  であった。この 30 秒運転時の WR-A 全体のエネルギーは  $3720\text{kJ}$  であり、10 秒定格時のエネルギー  $2790\text{kJ}$  より大きいものの、抵抗素子 1 本当たりのエネルギーは  $8.3\text{kJ}$  であった。抵抗素子 1 本当たりのエネルギーが許容値であったため、運転の際には、 $V_g$  の 2 乗を時間積分した値に許容値を設け、許容値を超えた場合には加速電源を遮断できる制御機能を付加した。その結果、入射パワー  $2\text{MW}$ 、30 秒を実現した。

これに対して 100 秒運転の場合には、同表中に示すように、抵抗素子のエネルギーは  $36\text{kJ}/\text{本}$  となり、大幅に許容値を超過する。100 秒化に向けて、現状抵抗値のまま容量のみ増大させると、冷却水筒の超大型化が不可避であり、その結果、既設スペースに収まらない上に大幅なコストアップとなる。そこで、この解決方法として、新たに素子の抵抗値の見直しを行い、発熱量の低減化を図った。現在の WR-A 抵抗値は、NBI 建設時に選定された値のままであり、広範囲なビーム加速運転条件においても十分なブリーダ電流を流し、第 2 正電極電圧を安定化する設計となっている。しかし、運転範囲を入射パワー  $2\text{MW}$  のビーム加速条件 ( $V_{acc}.max=85\text{kV}$ ,  $V_g.max=60\text{kV}$ ) に特定すると、 $V_g$  の安定制御に必要なブリーダ電流の低減化（抵抗値の増大）でき、その結果、水冷抵抗器の消費電力を低減することができる可能性がある。そこで、次章に示すように実際のイオン源用電源設備とイオン源を用いて、WR-A の高抵抗化動作試験を実施し、安定に動作できる運転領域の検証を行うこととした。

### 3. 試験準備

抵抗素子 1 本当たりの許容最大エネルギーは  $8.3\text{kJ}$  であるため、100 秒運転の際の許容電力は  $82.5[\text{W}/\text{本}]$  以下である。したがって、150 本の抵抗器を直列接続した場合の水冷筒 1 台当たりの最大電力は  $82.5\text{W} \times 150$  本であり、電圧比を 0.8 つまり  $V_g=68.8\text{kV}$  と仮定すると、以下の式から

$(68.8\text{kV})^2/R=82.5\text{W} \times 150$  本  $\therefore R \geq 381\text{k}\Omega$  ( $\Gamma=0.8$  の場合。 $\Gamma=0.75$  なら、 $R \geq 336\text{k}\Omega$ )  
水冷筒 1 管当たりの合成抵抗値は  $381\text{k}\Omega$  以上となり、1 本当たりの抵抗値は  $2.6\text{k}\Omega$  以上にする必要がある。水冷筒内の抵抗素子をすべて取り替えるためには、コストと時間がかかる。加えて、

水冷抵抗器を高抵抗化するとイオン源の立上げ時にイオン源側に電流が流れてしまい、第2正電極電圧が不安定になる懸念がある。このため検証試験としては、初めに既存の水冷筒の内部結線の変更のみで対応できる抵抗値で予備試験を実施し、その結果を受けて100秒運転を想定した高抵抗素子での検証試験を実施した。

### 3. 1 予備試験

図-5 上図に、現在使用しているWR-Aの構成を示す。WR-Aは3台の水冷筒で構成されており、現在、これらを並列接続して使用している。水冷筒1台の中には、1本当たり $600\Omega$ の抵抗素子が150本直列に接続されている。1筒当たりの素子の合成抵抗値は $90k\Omega$ である。また、水の抵抗値は、冷却水電導度を $0.12\mu S/cm (=8.3M\Omega \cdot cm)$ と仮定すると、 $647k\Omega$ である。抵抗値を増大するために、1筒のみに抵抗素子を装着し、他の水冷筒からは素子をすべて取り除いた。これらの水冷筒を3台並列接続し、ビーム加速運転を行い、イオン源が正常動作するかを調べた。試験は#12を用いて実施した。その結果を表-3のNo.9~16に示す。表中のWR-A( $k\Omega$ )の合成抵抗値の計算値は素子の上記した素子の合成抵抗値と冷却水抵抗値を並列接続した時の合成値である。実測値は、測定した $V_g$ を $I_{WR-A}$ で除した値である。計算値 $64k\Omega$ に対して、実測値は $50k\Omega$ と低く、両者には大きな隔たりがあったものの、ビーム加速運転上、特に問題となるような現象は発生しないことを確認した。

実測した抵抗値と計算値との差については、十分に理解していないが、以下のことが推定される。計算に用いた冷却水電導度は数日間イオン交換樹脂に冷却水を通水することによって構成される値であるが、今回の試験では、冷却装置を起動した後数時間で測定を実施しており、実際の水の冷却水電導度は計算で用いた冷却水電導度値と異なっていると推察される。このために、実測した抵抗値と計算値との間に大きな差が生じたと考えられる。今後、冷却水電導度を実測する予定である。

### 3. 2 水冷抵抗器の設定

WR-Aの抵抗値を従来の $30k\Omega$ から $50k\Omega$ に増加しても、ビーム加速上問題が無かつたことを受けて、抵抗値をさらに大きくした。このために、3筒のうちの1筒の抵抗素子を従来より高い抵抗素子に交換し、残り2筒については、水冷タンク内の抵抗素子を全て撤去し、冷却水のみの抵抗器（水抵抗器）とした。図-5に変更前後の回路構成図を示す。抵抗器を変更するC筒については、内部の150本の抵抗器全てを変更し、一筒当たりの合成抵抗値の目安である $381k\Omega$ を実現する。すなわち $380k\Omega/150\text{本}=2.54k\Omega$ から、市販の抵抗器として $2.5k\Omega$ を選択し交換を実施した。図-6に更新後の水冷抵抗器C筒内部及び新規抵抗素子の詳細図を示す。

3筒からなる水冷抵抗器の合成抵抗値は、

$$((647k/3) \times 375k)/((647k/3) + 375k) = 137k\Omega$$

である。 $V_{acc}=85kV$ 、 $\Gamma=0.8$ の場合、 $I_{WR-A}=0.5A$ 程度となる。

単体抵抗器の電力は $375k/150\text{本} \times (68kV/375k)^2 = 81[W/\text{本}]$ になり、ほぼ100秒に対する許容電

力以下となる。なお水抵抗器を使用する場合、冷却水の電導度の変化が直接、合成抵抗値に影響するが、例えば冷却水の電導度が  $0.1\sim0.25 \mu S/cm$  と広範囲に変化したと仮定しても、合成抵抗値の変化は  $81\sim156 k\Omega$  程度で、 $140\sim150 k\Omega$  での実運転試験で問題なければ、電導度が  $0.1 \mu S/cm$  を極端に下回らない限り問題ないと思われる。実際、今回の検証試験では、冷却水電導度が  $0.15 \mu S/cm$ (RV 系)であり、水冷抵抗器全体としての合成抵抗値は  $151 k\Omega$  (実測値) であった。

#### 4. 試験及び考察

第2正電極電圧の不安定が起因する異常動作の1つは、一段加速モードの発生である。一段加速モードは、イオンビームが第2正電極にあたり第2正電極電流（以下、 $I_g$ ）が負方向に WR-A を介して流れる現象で、この場合、 $V_g = (I_{WR-A} - (-I_g)) \times R_{WR-A} \approx V_{acc}$  となる。したがって、水冷抵抗器の値を変えた場合に  $I_g$  負成分大、かつ  $V_g$  上昇傾向が観測されなければ一段加速モードは発生していないと判断できる。検証試験としては、通常の安定した領域でのビーム引出し運転 ( $V_{acc}=55\sim85 kV$ 、 $I_{acc}=22\sim45 A$ 、 $\Gamma=0.75, 0.8$ ) と、一段加速モードが発生しやすくなると思われるビーム発散の大きい条件(例えば、 $V_{acc}=30.5 kV$ 、 $I_{acc}=6 A$ 、 $\Gamma=0.67$  や  $V_{acc}=75 kV$ 、 $\Gamma=0.75$  の条件で  $I_{acc}$  を最適値 ( $I_{opt}$ ) からずらした領域-40%～+20%) で、 $I_g$ 、 $V_g$  等の各部電流・電圧の時間応答を調べるとともに、真空管 RT-A のコントロールグリッド電圧（以下、VRT-CG）の変化等において異常発生の有無を調べた。表-3に高抵抗化前（定格時）、事前確認試験も含めた試験条件及び結果を示す。高抵抗化前後の波形比較の代表例を図-7、8に示す。

高抵抗化後の波形で特徴的なことは、 $I_g$ 、 $V_g$  等の波形が振動的という点である。この振動波形については、今回の試験は実際の入射実験時と異なり単一系統から受電したので、受電系統の違いによる影響の可能性も考えられた。しかし、図-9に示すように、振動波形は常に高抵抗化後に発生していることから、抵抗値増大の影響によるものと判断した。これについては、立上げ時における、 $I_g$  の過渡的なピーク値が高抵抗化後に大きくなっていないこと、 $I_g$  の負成分が発生していないこと、さらにこの振動がイオン源の運転に支障を与えたことから、特に問題ないと判断している。

ビーム発散の悪い不安定領域の条件下でも ( $V_{acc}=30.5 kV$ 、 $I_{acc}=6 A$ 、 $\Gamma=0.67$  や  $V_{acc}=75 kV$ 、 $\Gamma=0.75$  の条件で  $I_{acc}$  を最適値 ( $I_{opt}$ ) からずらした領域-40%～+20%) 電源には特に異常等もなく動作できることを確認した。ビーム発散の大きい不安定領域での波形を図-10に示す。いずれの波形においても、 $I_g$  波形等に一段モードの非候もなく、特に問題となる異常現象は発生していない。

図-11に、水冷抵抗器の抵抗値増大時の電流及び RT-A コントロールグリッド電圧 VRT-CG の変化の関係を示す。VRT-CGについては、事前試験結果をもとに予想した直線と実測値はほぼ一致しており、抵抗値を増大しても負バイアスが深く（大きく）なる量はわずかであり、制御範囲 (-200 kV～-300 kV) にあることを確認した。また、 $I_{WR-A}$  の実測値は計算値とほぼ一致しており、これは試験で用いたブリーダ抵抗器の抵抗値が目標となる値に設定されていることを示している。今回の試験結果から、水冷抵抗器の抵抗値を  $29 k\Omega$  から  $140 k\Omega$  に増大させ、ブリーダ電流が 2A

程度から 0.5A 程度に減少しても安定なビーム加速が可能なことを実証でき、水冷抵抗器の大容量化の改造なしに 100 秒化改造が可能であることを明らかにすることことができた。

## 5. まとめ

本報告では、P-NBI 加熱装置の 100 秒運転改造に向けて、その最大発熱機器である水冷抵抗器の低損失化方法を提案するとともに、実際のイオン源で検証試験を実施した。すなわち、抵抗値を既存の  $30\text{k}\Omega$  から  $150\text{k}\Omega$  に変更することで、100 秒運転での水冷抵抗器の総発熱量を既存の 30 秒運転と同程度に低減できることを明らかとした。また、水冷抵抗器の高抵抗化は、既存の 3 筒からなる水冷抵抗器において、2 筒を内部の抵抗素子を撤去した水抵抗器、残りの 1 筒を内部の 150 本の抵抗素子を高抵抗値に差換える変更で実現した。この結果、大容量の水冷抵抗器の導入と冷却設備の強化が不可欠と考えられていた 100 秒化改造に対して、大幅な合理化が可能であることを示した。

今後、JT-60SA に向けた P-NBI 加熱装置の 100 秒化改造として、本検討案に基づき水冷抵抗器の改造を進めるとともに、模擬負荷を用いて加速電源の 100 秒間通電試験を実施し、電源設備の性能確認を行う予定である。

## 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に感謝を申し上げます。

## 参考文献

- [1] 栗山正明 他、JT-60 粒子加熱装置の設計及び技術開発、JAERI-M 87-169
- [2] 大賀徳道 他、接線入射 NBI 装置の建設、JAERI-Tech 95-044
- [3] 河合視己人 他、JT-60NBI 用正イオン源のパワー増大、JAERI-Tech 98-042
- [4] 薄井勝富 他、JT-60 正イオン NBI 加熱装置電源設備の長パルス化改造検討、  
JAEA-Technology 2007-024

表-1 P-NBI 装置長バルス運転時の目標性能

	10 秒時定格	30 秒化改造	100 秒化検討
Pinj×ユニット数	2.8MW×11units	2.0MW×5units	2.0MW×12units
Duty Cycle	1/30	1/30	1/30
加速電源	120kV,94A,10s	85kV,55A,30s	85kV,55A,100s
減速電源	-2kV,20A,10s	-2kV,3A,30s	-2kV,3A,100s
アーク電源	120V,1200A,11s	70V,700A,31s	70V,700A,101s
フィラメント電源	15V,300A×8,16s	13V,210A×8,36s	12V,220A×8,106s
偏向磁石電源	90V,2300A,13s	70V,1900A,33s	80V,1900A,103s
打消コイル電源	160V,1200A,13s	50V,500A,33s	50V,500A,103s

表-2 既設加速電源の運転時間と運転条件の比較

運転時間	Vacc,max	Vg,max	R·I <sup>2</sup> ·t (450 本)	評価	改造内容
10 秒定格運転	120kV	90kV( $\Gamma=0.75$ )	2790kJ(6.2kJ/本)	—	—
30 秒運転	85kV	60kV( $\Gamma=0.7$ )	3720kJ(8.3kJ/本)	制限付で運転可	I <sup>2</sup> t 設定変更
100 秒運転	85kV	68kV( $\Gamma=0.8$ )	16.4MJ(36kJ/本)	運転不可	新規更新要

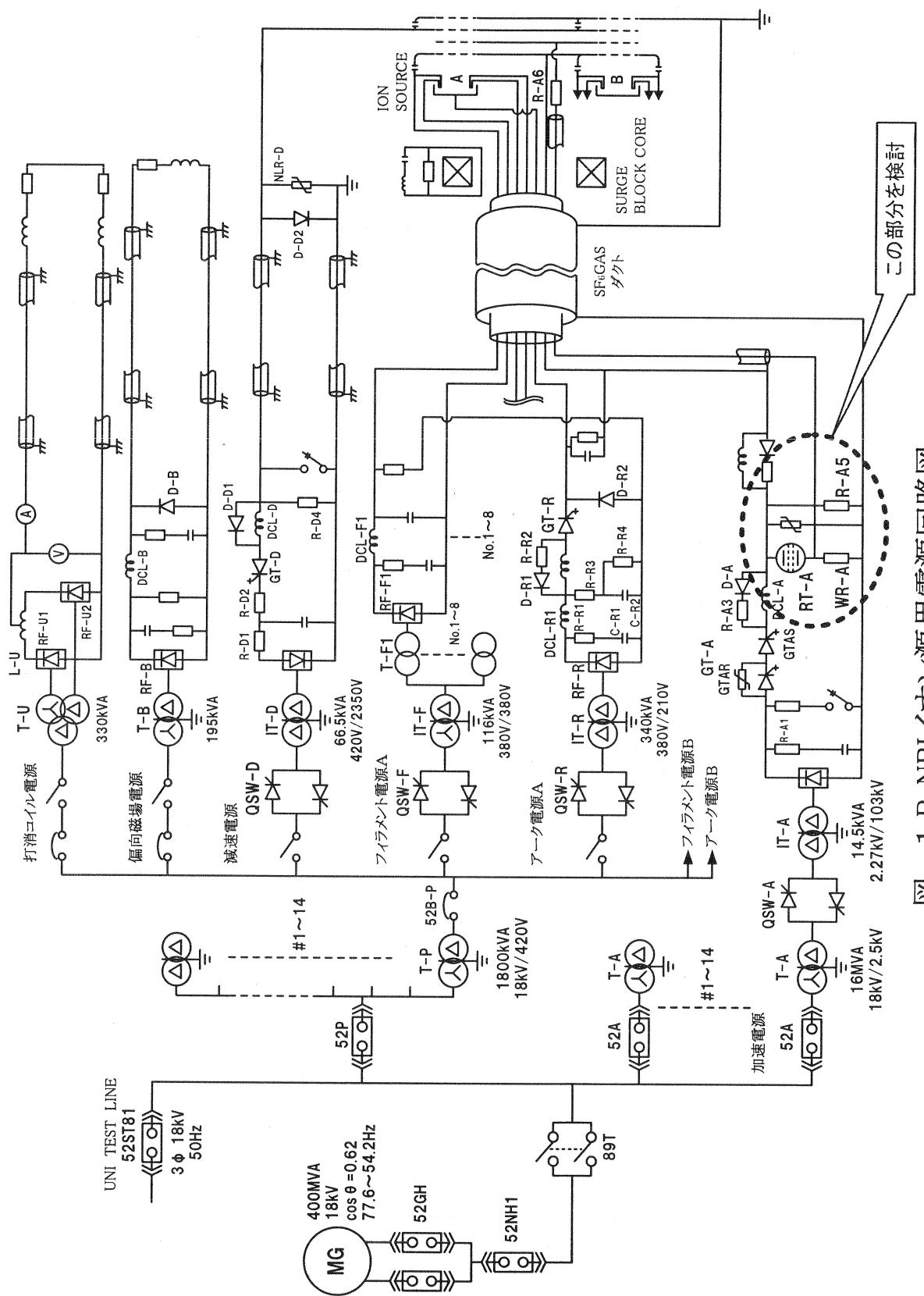
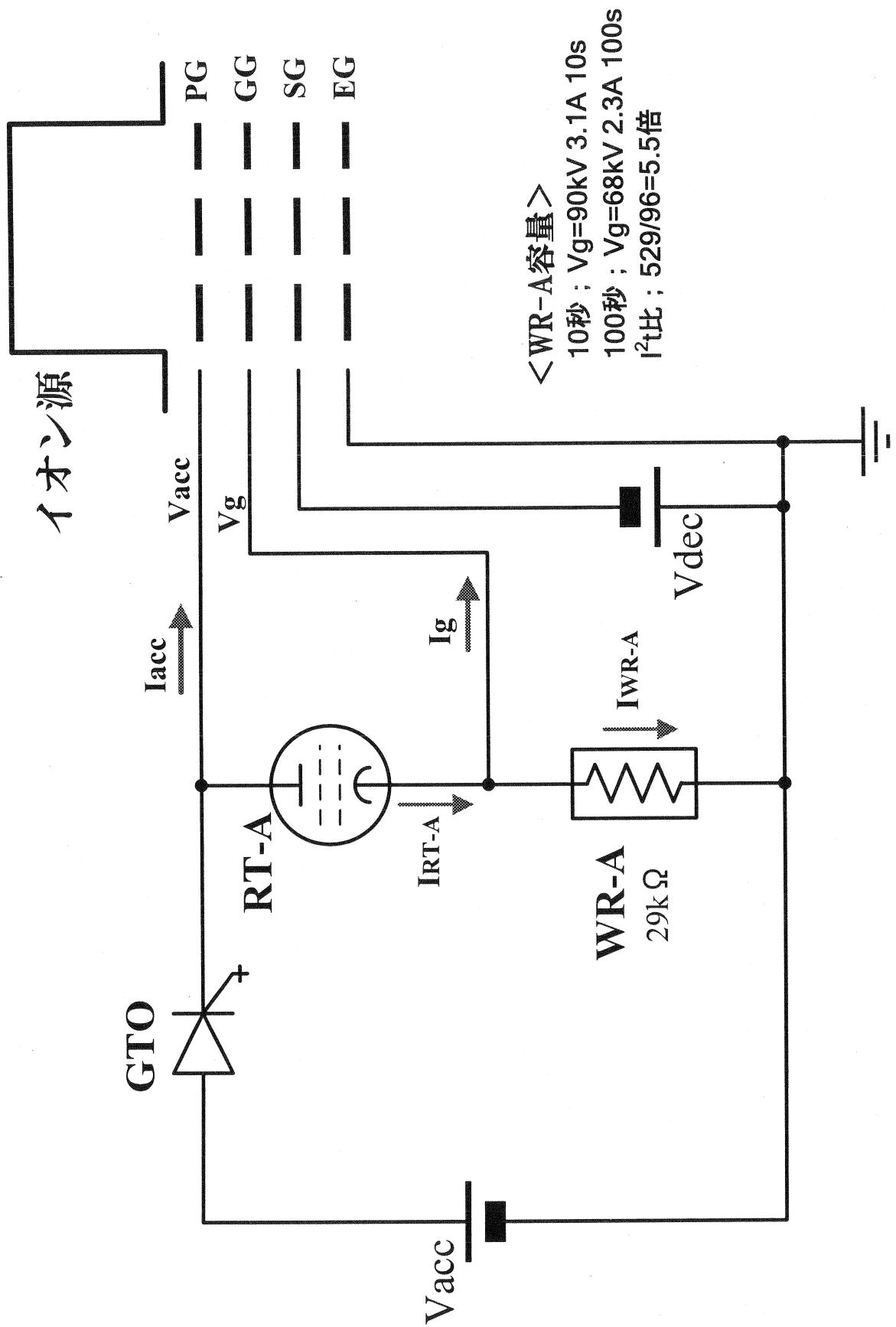


図-1 P-NBIイオン源用電源回路図



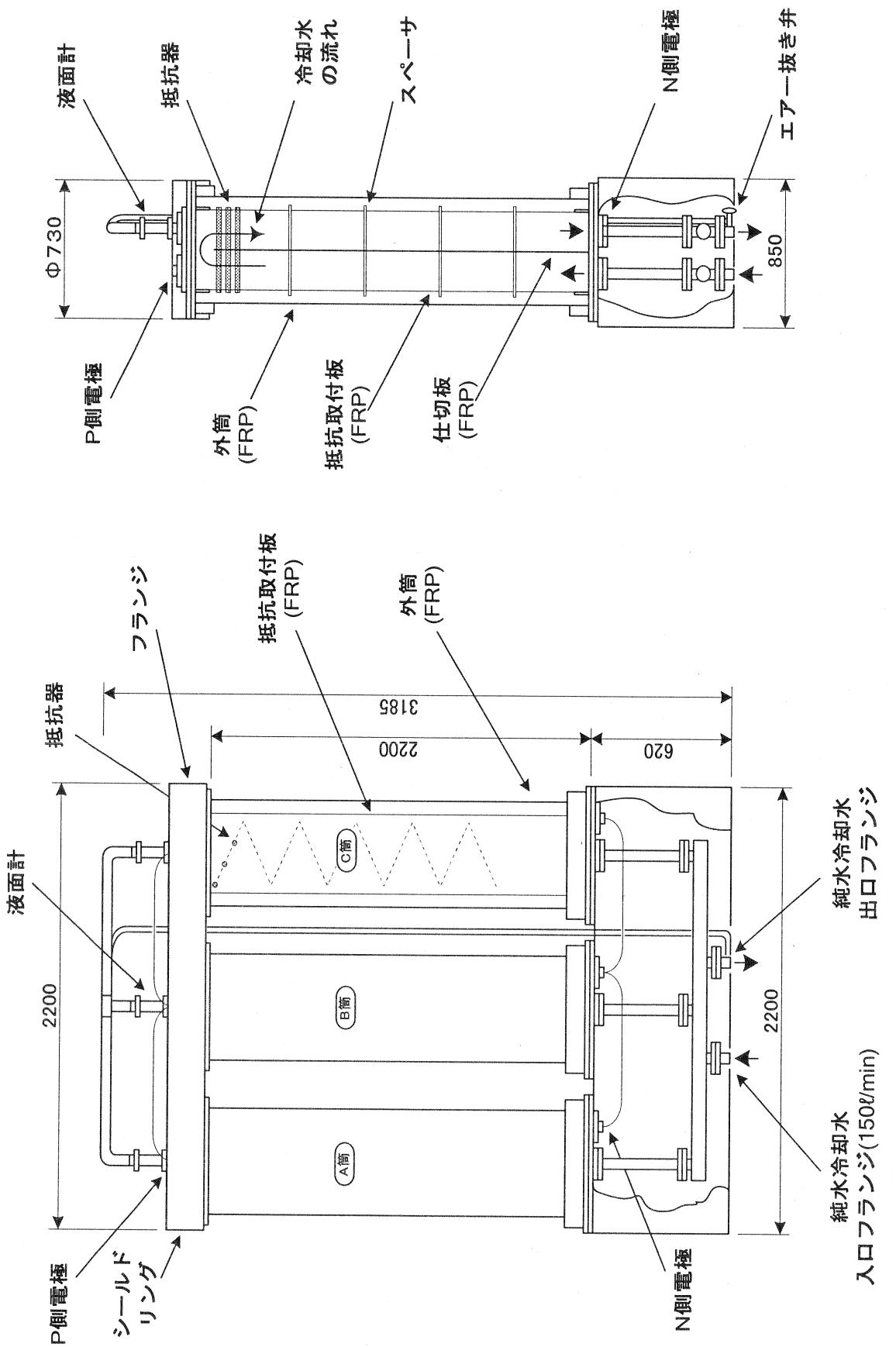
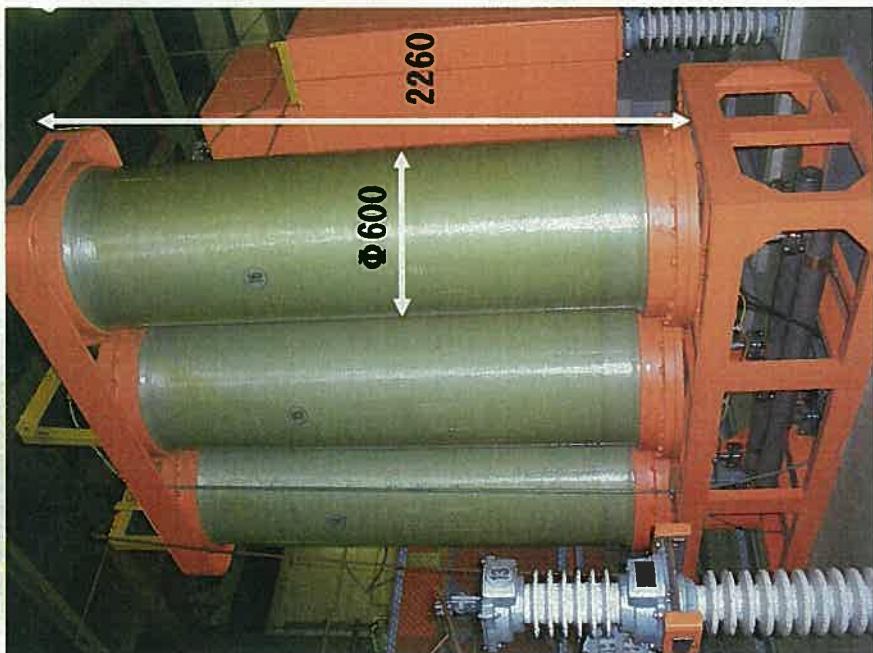


図-3 水冷抵抗器構造図

This is a blank page.

水冷抵抗器外観



<水冷抵抗器全体定格>

90kV-10s(Duty1/30) 270W  
30kΩ(氣中) 29kΩ(水中)  
150S-3P(450本)

水冷抵抗器内部配置



<抵抗素子>  
ER25ASH  
600Ω-600W

図-4 水冷抵抗器外観及び内部配置

This is a blank page.

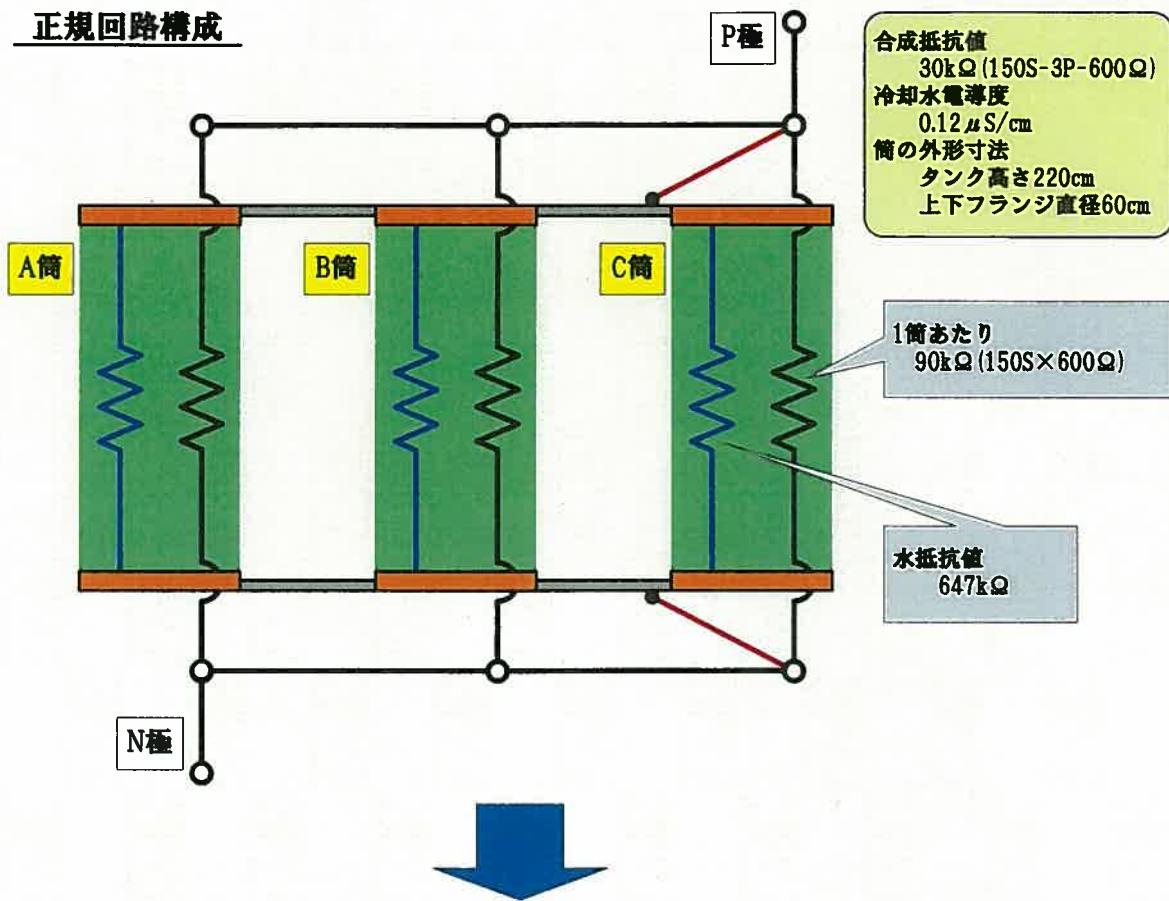
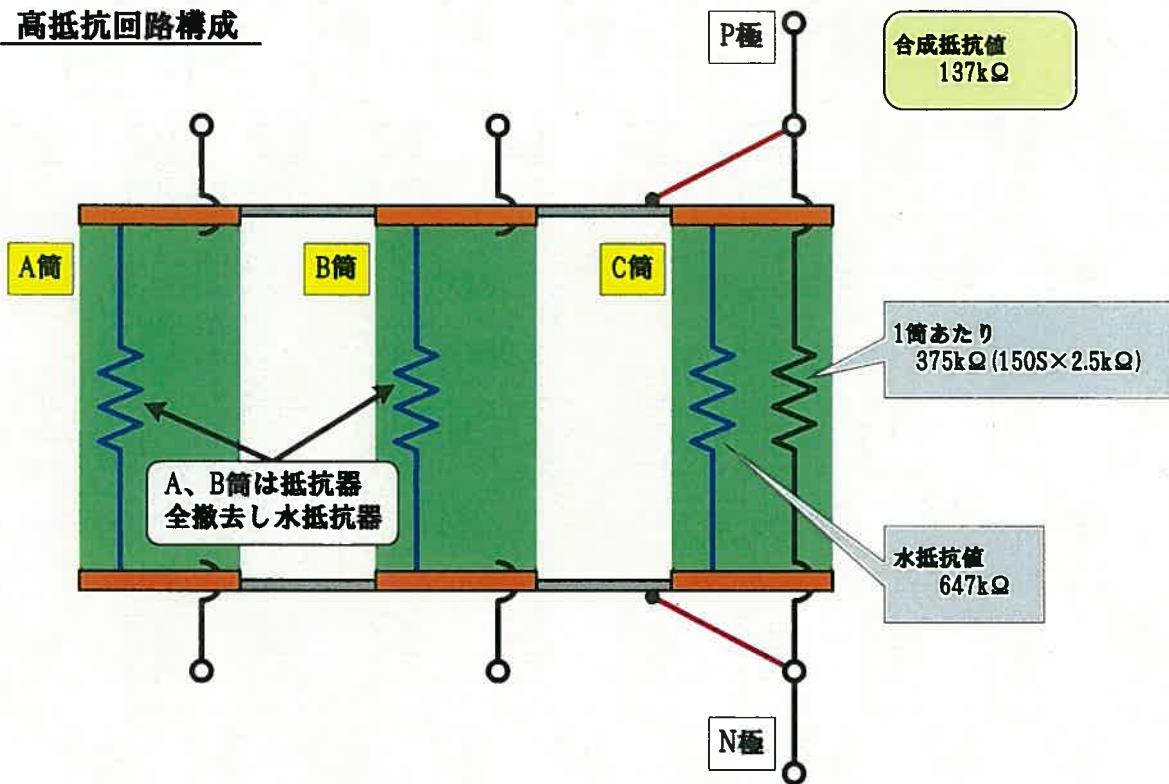
正規回路構成高抵抗回路構成

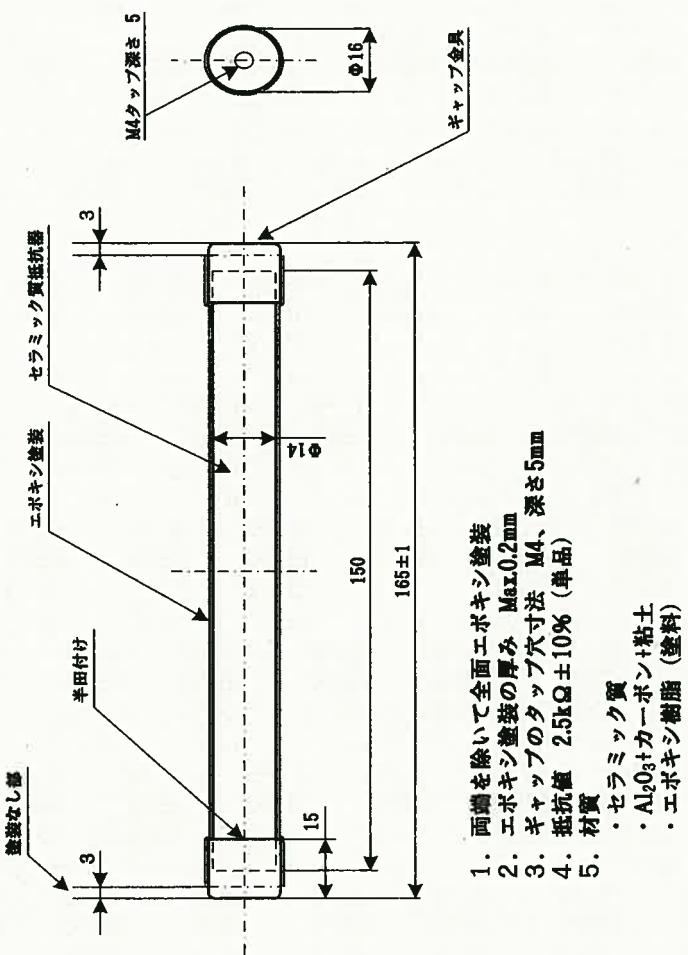
図-5 更新後の回路構成図

This is a blank page.

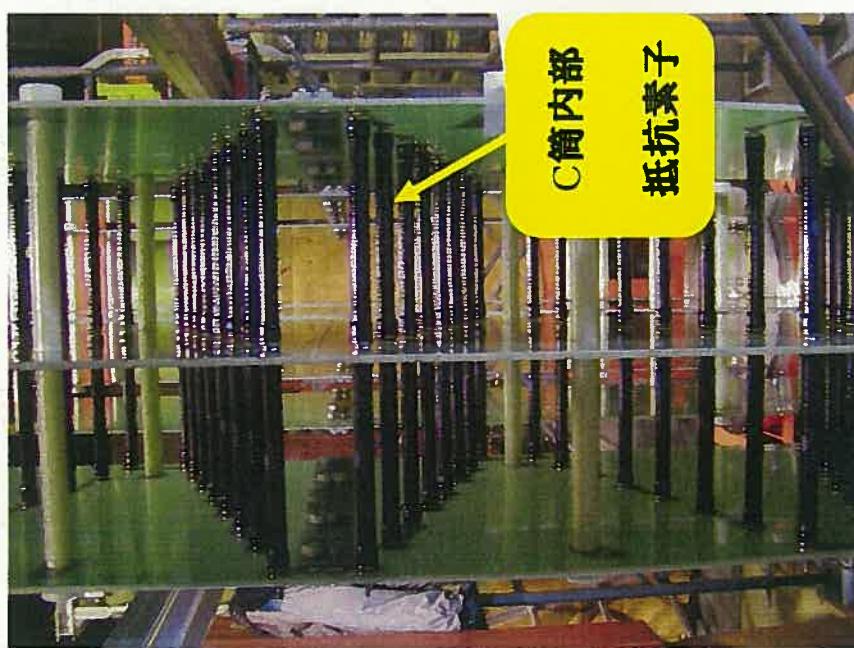
表-3 試験条件及び結果

No.	WR-A の全體抵抗値(kΩ)		Vac. s (kV)	Γ.s	Vg(kV)		IRT-A(A) 設定	IRT-A(A) 実測	Ig(A) 実測	IWR-A(A) 実測計算値	VRT-CG(V) 実測	備考
	目標値	計算値			Vg	kV						
1			34	55	0.75	41	44	1.5	0.2	1.3	-256	
2			33		0.8	44	46	1.5	0.1	1.4	-240	
3			33	65	0.75	49	50	1.7	0.2	1.5	-260	高抵抗化前 (MG系)
4	30	26	34		0.8	52	54	1.7	0.1	1.6	-248	
5			32	75	0.75	56	58	2.0	0.2	1.8	-260	
6			33		0.8	60	62	2.0	0.1	1.9	-248	
7			31		0.75	64	65	2.3	0.2	2.1	-264	
8			32		0.8	68	70	2.3	0.1	2.2	-256	
9			52	55	0.75	41	44	1.0	0.15	0.85	-264	
10			51		0.8	44	46	1.0	0.1	0.9	-256	
11			45	65	0.75	49	50	1.3	0.2	1.1	-264	事前確認試験 H16.6 (MG系)
12		90	45		0.8	52	54	1.3	0.1	1.2	-270	
13			45	75	0.75	56	58	1.5	0.2	1.3	-272	
14			44		0.8	60	62	1.5	0.1	1.4	-270	
15			50		0.75	64	65	1.5	0.2	1.3	-272	
16			49		0.8	68	68	1.5	0.1	1.4	-260	
17			135		0.75	41	42	0.36	0.05	0.31	-288	
18			147	55	0.8	44	44	0.32	0.02	0.30	-280	
19			145	75	0.75	56	58	0.44	0.04	0.40	-300	
20	375	137	163		0.8	60	62	0.4	0.02	0.38	-288	実機確認試験 H19.12 (T-MG系)
21			147	85	0.75	64	66	0.48	0.03	0.45	-304	
22			163		0.8	68	70	0.44	0.01	0.43	-288	
23			133		0.67	20	20	0.16	0.01	0.15	-280	
24			162		0.67	20	21	0.22	0.09	0.13	-280	

This is a blank page.



### 抵抗素子の詳細



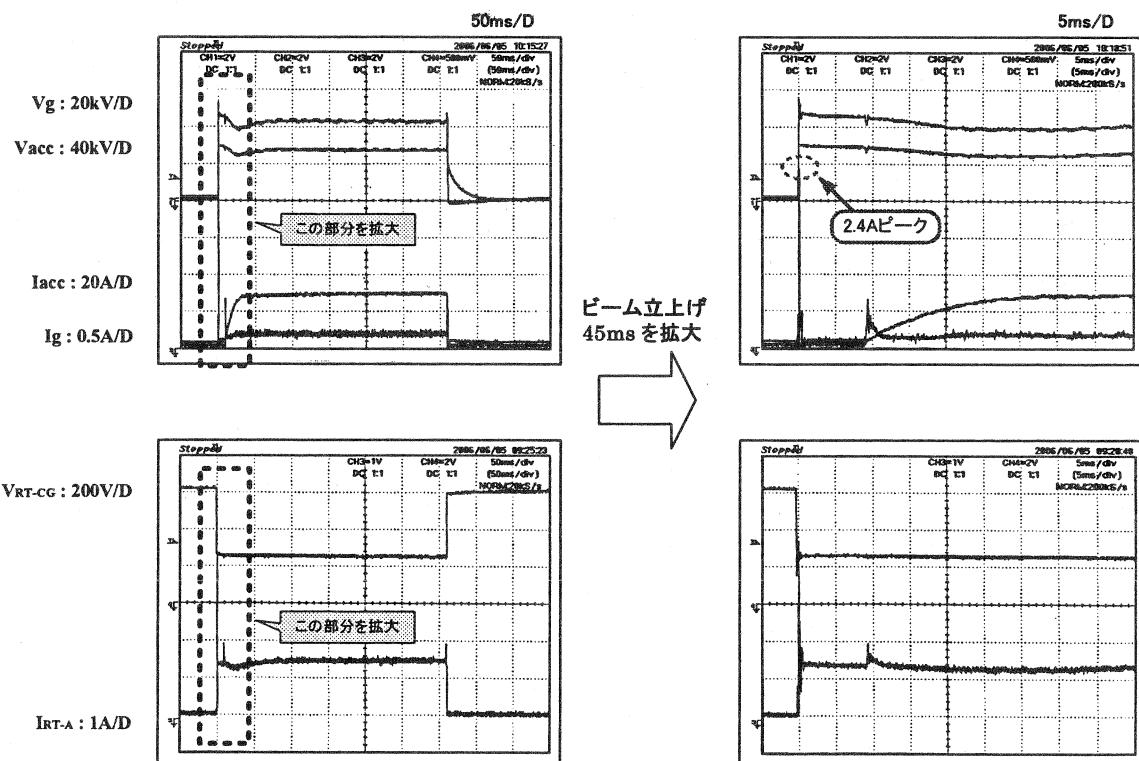
抵抗値： $375\text{k}\Omega$  ( $2.5\text{k}\Omega \times 150$ 本)

図-6 新規水冷抵抗器の内部及び抵抗素子の詳細図

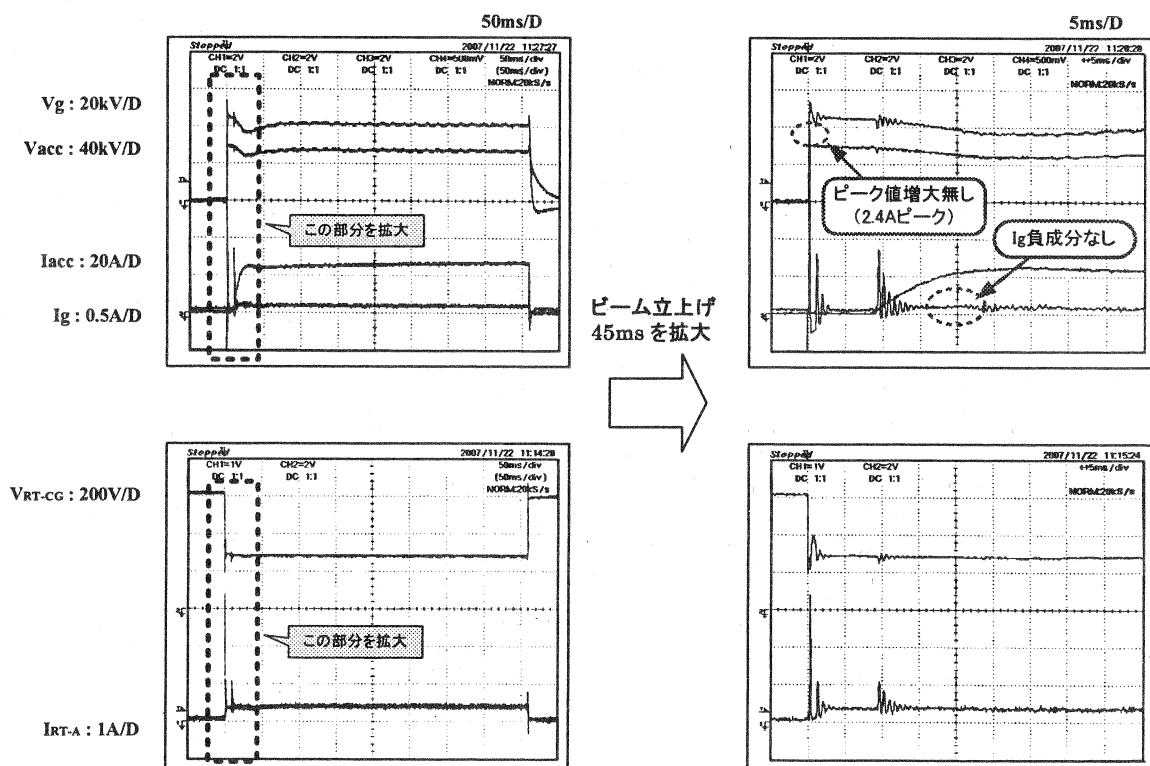
This is a blank page.

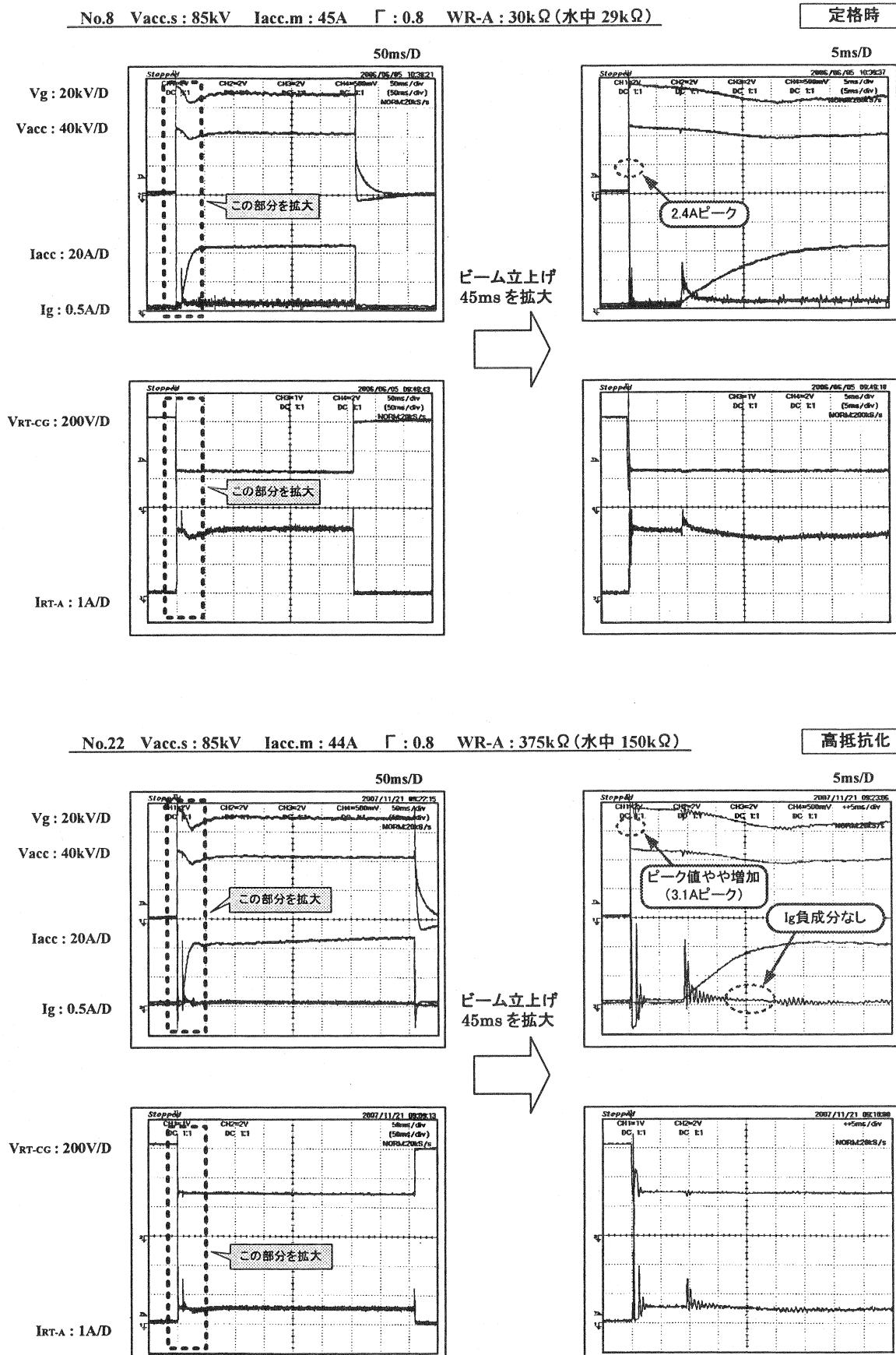
No.1 Vacc.s : 55kV Iacc.m : 28A  $\Gamma$  : 0.75 WR-A : 30k $\Omega$  (水中 29k $\Omega$ )

定格時

No.17 Vacc.s : 55kV Iacc.m : 26A  $\Gamma$  : 0.75 WR-A : 375k $\Omega$  (水中 150k $\Omega$ )

高抵抗化

図-7 安定領域での高抵抗化前後の波形比較(Vacc.s:55kV、 $\Gamma$ :0.75)

図-8 定格領域でのと高抵抗化前後の波形比較(Vacc.s:85kV、 $\Gamma$ :0.8)

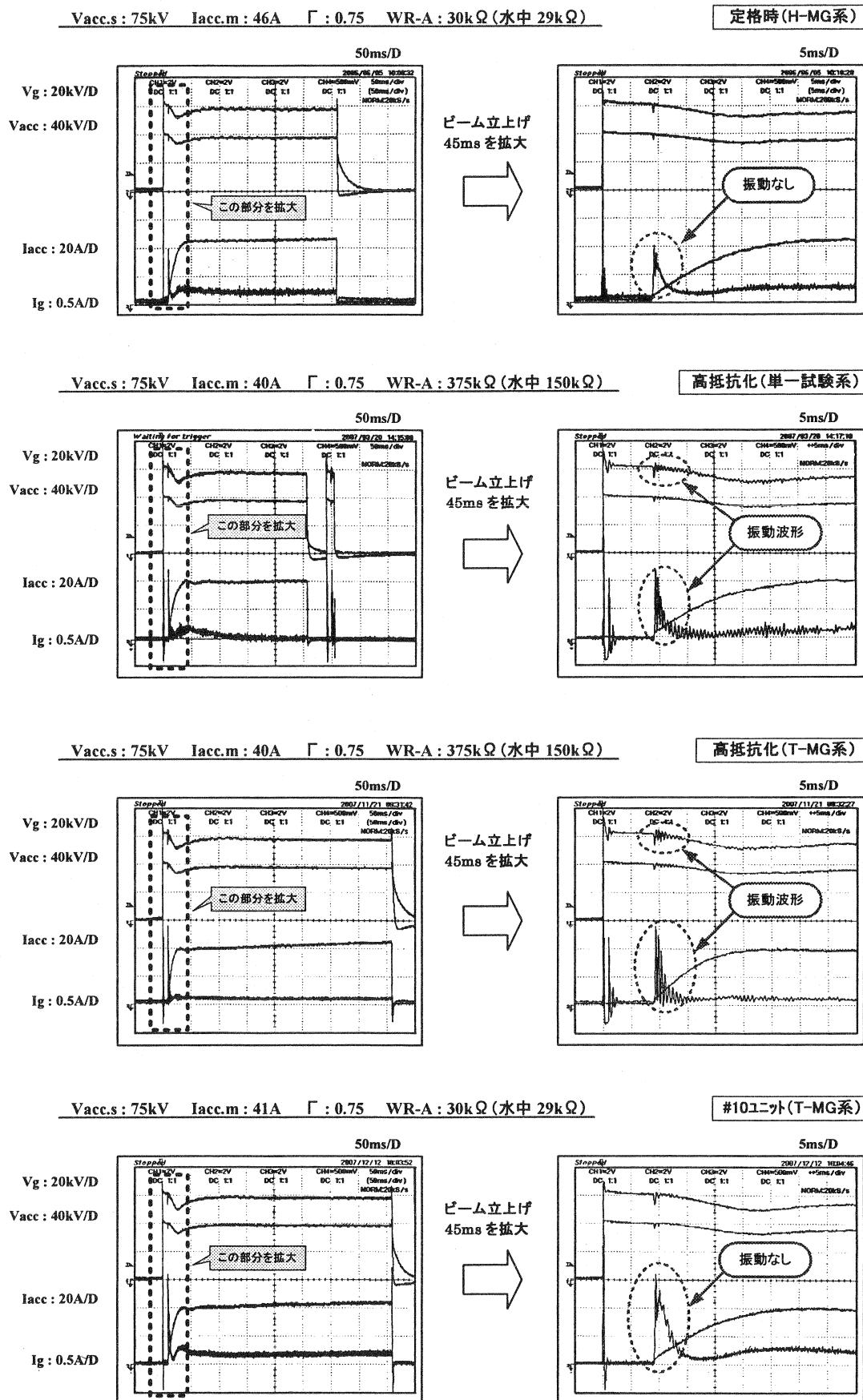
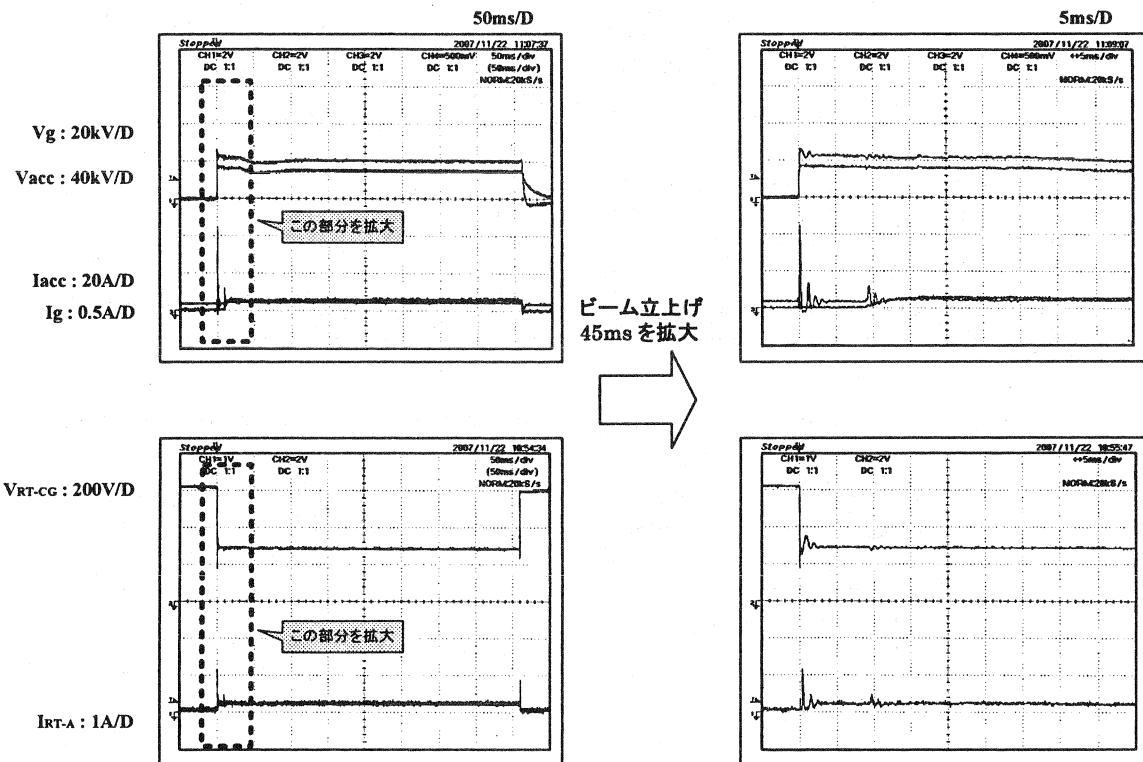


図-9 定格領域での高抵抗化前後及び他ユニットとの振動波形の比較

Vacc.s : 30.5kV Iacc.m : 6A  $\Gamma$  : 0.67 WR-A : 375k $\Omega$  (水中 150k $\Omega$ )

イオン源1台

Vacc.s : 75kV Iacc.m : 48A  $\Gamma$  : 0.75 WR-A : 375k $\Omega$  (水中 150k $\Omega$ )

Iopt : +20%

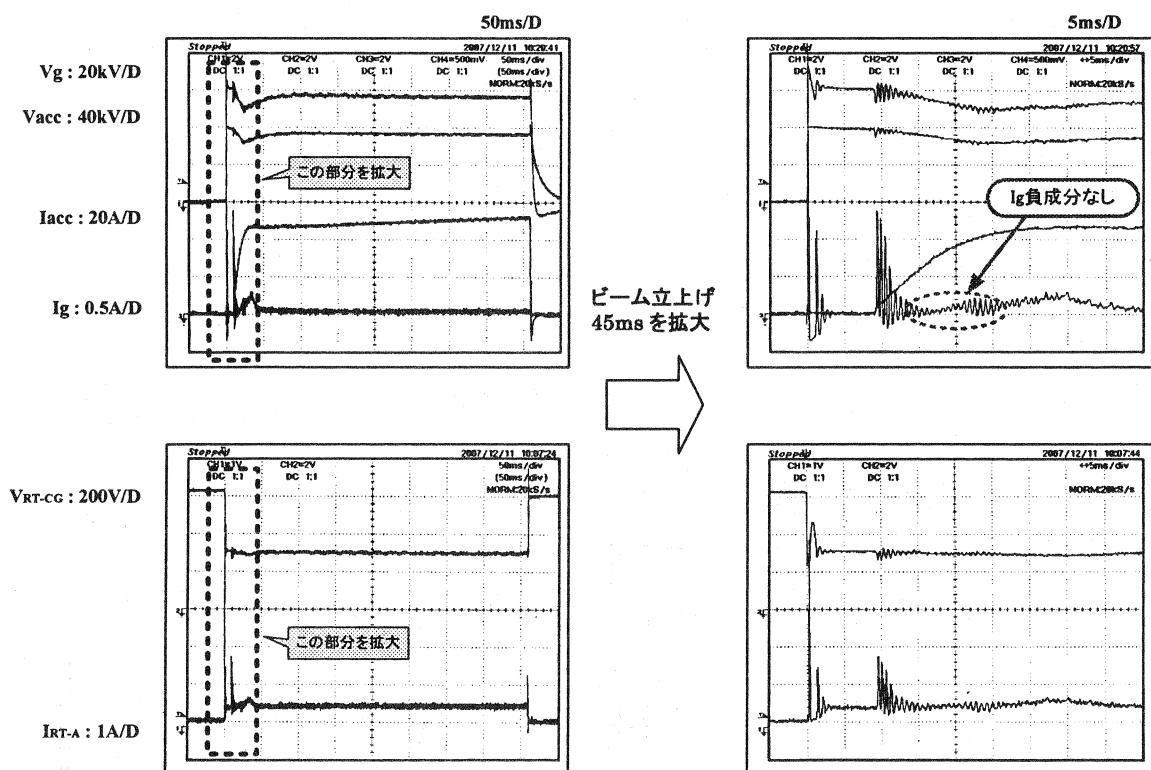
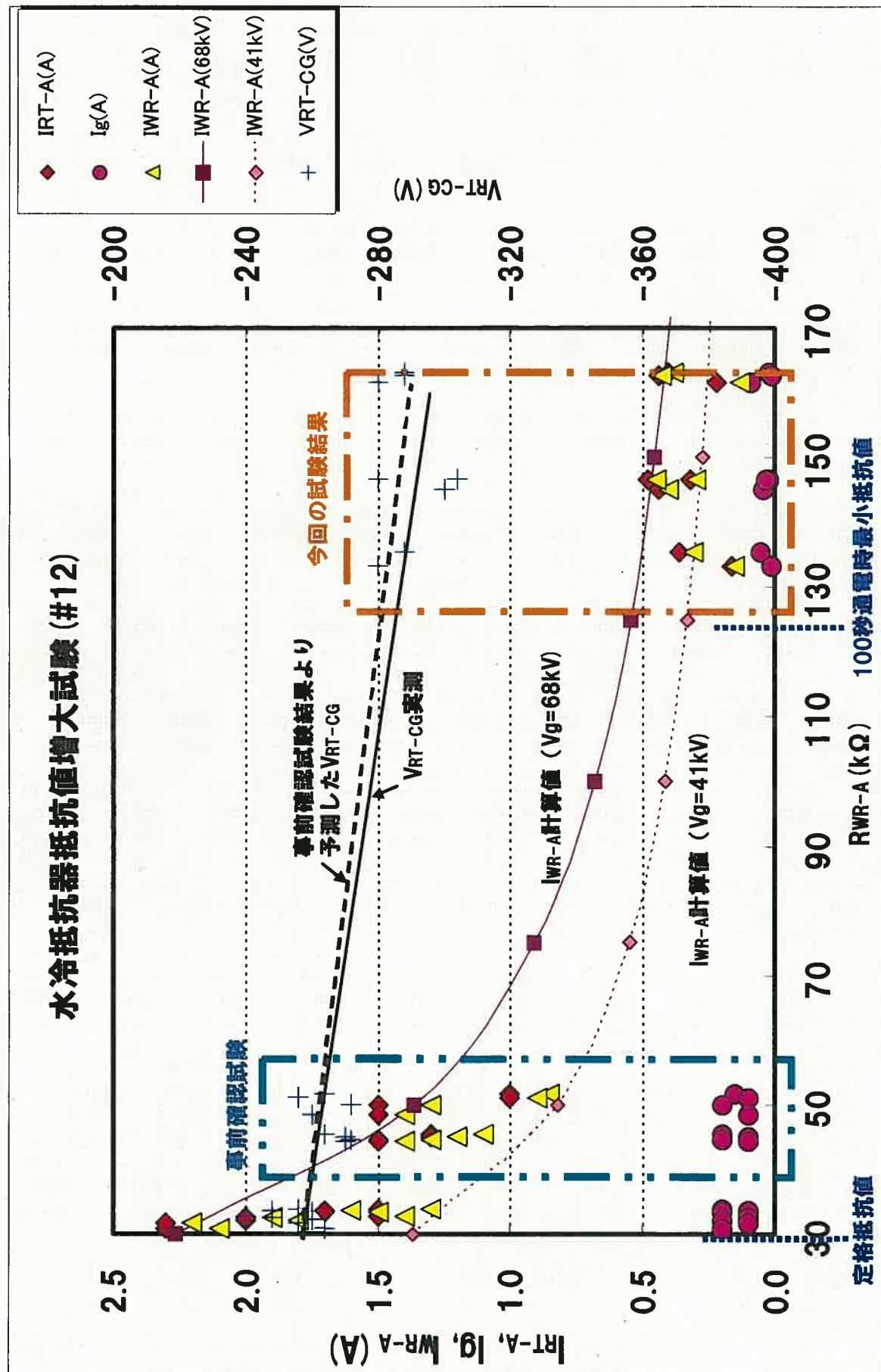


図-10 ビーム発散の大きい不安定領域での波形(低Vacc、Iacc 及び Iaccを振った時)

図-11 水冷抵抗器の抵抗値増大時の電流、 $VRT\text{-}CG$ との関係

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
物質の量	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 <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	メートル	m <sup>-1</sup>
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	kg/m <sup>3</sup>
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
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 <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率	(数の)1	1

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 <sup>(a)</sup>	rad	$m \cdot m^{-1}=1^{(b)}$
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	$m^2 \cdot m^{-2}=1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	$s^{-1}$
圧力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
工作效率、放熱束	ジュール	J	$N \cdot m$
電荷、電気量	ワット	W	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
電位差(電圧)、起電力	クーロン	C	$J/s$
静電容量	アンドラード	F	$s \cdot A$
電気抵抗	オーム	Ω	$W/A$
コンダクタンス	シemens	S	$C/V$
磁束密度	テスラ	T	$V/A$
インダクタンス	ヘンリイ	H	$V \cdot s$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>	°C	$Wb/m^2$
光束	ルーメン	lm	$Wb/A$
(放射性核種)の放射能吸収線量、質量エネルギー一分与、カーマ	ベクレル	Bq	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
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	グレイ	Gy	$kg \cdot s^{-2}$

- (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が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	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
表面張力	ニュートンメートル	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
角速度	ニュートン每メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角加速度	ラジアン每秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}=s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ラジアン每平方秒	rad/s <sup>2</sup>	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}=s^{-2}$
熱容量、エンタルピー	ワット每平方メートル	W/m <sup>2</sup>	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エンタルピー(比熱容量)	ジュール每ケルビン	J/K	$kg \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール每キログラム	J/(kg · K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エントロピー	每ケルビン		
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール每キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル每ケルビン	W/(m · K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m <sup>3</sup>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン每立方メートル	C/m <sup>3</sup>	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン每平方メートル	C/m <sup>2</sup>	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	フアラド每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	ジュール每モル每ケルビン	J/(mol · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム		
吸収線量率	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> · sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表 5. SI 接頭語

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

表 6. 國際単位系と併用されるが國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	$1L=1 \text{ dm}^3=10^{-3} \text{ m}^3$
トン	t	$1t=10^3 \text{ kg}$
ネーベル	Np	$1Np=1$
ベル	B	$1B=(1/2) \ln 10 (Np)$

表 7. 國際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される數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數値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} \text{ J}$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} \text{ kg}$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} \text{ m}$

表 8. 國際単位系に属さないが國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數値
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	$1a=1 \text{ dam}^2=10^2 \text{ m}^2$
ヘクタール	ha	$1ha=1 \text{ hm}^2=10^4 \text{ m}^2$
バル	bar	$1 \text{ bar}=0.1 \text{ MPa}=100 \text{ hPa}=10^5 \text{ Pa}$
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數値
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	$1 \text{ P}=1 \text{ dyn} \cdot s/cm^2=0.1 \text{ Pa} \cdot s$
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	$1 \text{ G}=\Delta 10^{-4} \text{ T}$
エルステッド	Oe	$1 \text{ Oe}=\Delta(1000/4\pi) \text{ A/m}$
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx}=\Delta 10^{-8} \text{ Wb}$
スチール	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	$1 \text{ Gal}=1 \text{ cm}/\text{s}^2=10^{-2} \text{ m}/\text{s}^2$

表10. 國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數値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-3} \text{ C/kg}$
ラド	rad	$1 rad=1 \text{ CiGy}=10^{-2} \text{ Gy}$
レム	rem	$1 rem=1 \text{ cSv}=10^{-2} \text{ Sv}$
X線単位		$1X \text{ unit}=1.002 \times 10^{-4} \text{ nm}$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 \text{ nT}=10^{-9} \text{ T}$
ジアンスキー	Jy	$1 Jy=10^{-26} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi=1 \text{ fm}=10^{-15} \text{ m}$
メートル系カラット		$1 \text{ metric carat}=200 \text{ mg}=2 \times 10^{-4} \text{ kg}$
トル	Torr	$1 \text{ Torr}=(101.325/760) \text{ Pa}$
標準大気圧	atm	$1 \text{ atm}=101.325 \text{ Pa}$
カラリ	cal	
ミクロ	μ	$1 \mu=1 \text{ um}=10^{-6} \text{ m}$

