過渡電圧制御機能付き GTO スイッチを用いた 中性粒子ビーム入射装置加速電源の開発

正員 松岡 守 (原研) 非会員 斎藤 房 男 (東芝)
 非会員 松田 慎三郎 (原研) 正員 比嘉 修 (東芝)
 正員 水野 誠 (原研) 正員 渡辺 幸夫 (東芝)
 正員 渡辺 和弘 (原研) 正員 内藤 正次 (東芝)

Development of Acceleration Power Supplies of a Neutral Beam Injection System Using GTO Switches with Transient-Voltage Regulation Capability

Mamoru Matsuoka, Member, Shinzaburou Matsuda, Non-member, Makoto Mizuno, Member, Kazuhiro Watanabe, Member (Japan Atomic Energy Research Institute), Fusao Saitoh, Non-member, Osamu Higa, Member, Yukio Watanabe, Member, Masaji Naitoh, Member (Toshiba Corp.)

Gate turn-off thyristors (GTO) were used for control of transients in the accelerator power supplies of the JT-60 neutral beam injection system. The GTO switches were designed to clip the initial voltage overshoot which was produced at the previous turn-off. Greater than 20-kV initial voltage overshoot was expected in the JT-60 neutral beam injection system. Such a high voltage overshoot would reduce the maximum operating voltage. The output voltage was controlled by using nonlinear resistors connected in parallel with the GTO elements. Using this design, the output voltage was regulated to within 1.2 kV.

キーワード: GTO, NBI, JT-60, 直流スイッチ, 加速電源

1. ま え が き

トカマクプラズマを加熱するための中性粒子ビーム入射装置 (NBI) のビームエネルギーとパワーは、プラズマ内への十分な浸透距離を確保する必要から、トカマク装置の大型化に伴って増大してきている。三大トカマク (TFTR, JET, JT-60) の例では、いずれも 100 keV, 10~30 MW レベルの中性粒子ビームがプラズマに入射されてきている^{(1)~(3)}。このような大型 NBI の信頼性を決める一つの重要な要素として、加速電源内の高電圧、大電流の高速直流スイッチがある。この直流スイッチは、イオン源の加速電極で時折生ずる放電破壊時に数十マイクロ秒内で高速に電源出力を遮断し、続流電流により電極が損傷するのを防ぐ役目をもっている。従来はこの直流スイッチとして高

出力ビーム四極真空管が使われてきた。そしてビームエネルギー、パワーの増大に伴い必要とされる、より高電圧、大電流の容量の真空管が開発されてきた^{(4)~(6)}。しかしながら大容量化と共に、強い寄生振動の発生、大きな陽極損失に伴う真空管自身の熱的機械的問題、陰極-陽極間に時折生ずるフラッシュオーバーなどの問題が厳しいものとなり、100 kV, 100 A 程度以上の直流電力を真空管でスイッチングするのはかなり困難な状況である。

寄生振動は真空管の中の電子ビームの不安定性により起こされるもので、NBI で使用される大型真空管の場合、経験的には周波数が 1 GHz 程度の強い振動が励起される。大出力化に伴い寄生振動もより強いものが発生し得るが、そうすると周辺の低電圧の回路、例えば真空管の制御回路自身の誤動作をまねく。

また、大きな陽極損失は熱的あるいは機械的な問題(疲労など)を起こし、真空管の寿命を短くする。更に、フラッシュオーバーが生じた場合に真空管の恒久的な損傷を防ぐために、通常真空管の入力電圧を短絡するクローバスイッチが必要とされる。

JT-60 NBI においても当初は真空管を使用することを予定していた。しかしながら、JT-60 NBI 原型ユニット⁽⁷⁾における実証試験の結果、上記のような問題がかなり重大であることが明らかとなった。真空管を従来どおり使用しつつ、以上の問題が最小となるように改善していくことも可能とは考えられたが、その代わりに著者らは JT-60 NBI 用に多数個の半導体素子を直列接続した新たなスイッチを開発することとした。

半導体素子としては高電圧大容量のものが必要で、候補として通常のサイリスタ、およびゲートターンオフサイリスタ (GTO) が考えられる。アメリカ・パークレーのグループはイオン源のテストスタンドの加速電源にサイリスタを採用した⁽⁸⁾。この例では通常のサイリスタの使用例のとおり、2 個のサイリスタスイッチを組合せて用いている。すなわち一つはオン用、他方はオフ用に逆方向の電流を発生させるためのものである。サイリスタの代わりに GTO を用いれば、素子単位の容量はサイリスタよりは小さくなるが、オフ用のスイッチが不要でシステムを簡素化できる。このような GTO スwitchの加速電源への応用は、名古屋大学プラズマ研究所 (現在の核融合科学研究所) のグループが初めてイオン源テストスタンドに採用した⁽⁹⁾。また、これとは独立に、日立製作所は一つのオン、またはオフ信号を与えることによりすべての GTO が制御されるマスタースレーブ回路を採用した GTO スwitchを開発した⁽¹⁰⁾。著者らも後者 2 例と同様にシステム構成を簡素化できることからサイリスタではなく、GTO を採用することとした。

サイリスタ、あるいは GTO といった半導体スイッチを用いた場合の共通の問題として、素子自体にビーム四極真空管のような電圧制御機能がないことがある。文献(8)~(10)の例ではいずれも電圧制御機能なしの単なるスイッチとして利用している。しかしながら、NBI の加速電源においては後述のように高速スイッチの入力側の電圧に過電圧が生じるので、電圧制御機能がないとその過電圧分だけ NBI の最高性能を低下させることになる。そこで著者らは GTO で構成したスイッチ (GTO スwitch) の回路構成を工夫して電圧制御機能をもたせるようにした。

NBI の加速電源の高速スイッチを真空管から GTO

スイッチに置き換える場合、幾つかの特性の差異に注意を要する。一つはその遮断特性である。大電流の GTO はゲート信号を入れても遮断を完了するまでに 20 マイクロ秒程度を要する。これは真空管にはないもので、この分だけ遮断に時間を要することになる。また後に詳述する電圧制御機能も四極真空管が本来もっているものとは当然機構も特性も異なるので、これが NBI の加速電源にとっていかなる影響をもつか検討を要する。更に、本質的な問題として立上げ特性の相違がある。加速電源の負荷となるイオン源の加速電流はプラズマ源に投入するアーク放電パワーにほぼ比例し、加速電圧にはほとんどよらない。つまり、加速電源に対してイオン源は定電流特性を有する。そしてイオンビームの引出し開始時、加速電圧とアーク放電パワーの両方の立上げ速度を微妙に調整しないと、ビーム立上げ途中で加速電極間で放電破壊が生じて立上げられないとされてきた。GTO スwitchに置き換える場合、立上げ特性のこのような微妙な調整は不可能であるので、新たな対応が必要である。加えて、高エネルギーの NBI に GTO スwitchを用いる場合、GTO の応用としては例が少ない多数直列接続となり、しかも負荷であるイオン源における放電破壊に伴う大きなサージノイズのある下での使用となる。従って、定電圧制御機能の回路工夫を加えた GTO スwitch自身の信頼性の確認も重要である。そこで、この GTO スwitchはまず、JT-60 NBI 原型ユニットにおいて従来の真空管を置き換えて確認試験を行い、その結果を基に JT-60 NBI 実機 14 ユニットに採用した。

本論文では、新規に考案したこの電圧制御機能付き GTO スwitchの構成を示し、かつ加速電源の高速スイッチとして使用する場合の上記の懸案項目について確認した結果を報告する。第 2 章にはまず加速電源を中心として電源とイオン源全体の概略を示し、次いで電圧制御機能付きスイッチの構成を記した。第 3 章には試験結果、第 4 章に考察を示し、最後にまとめを記した。

2. JT-60 NBI 原型ユニットと電圧制御機能付き GTO スwitchの構成

〈2・1〉 JT-60 NBI 原型ユニット 図 1 に JT-60 NBI 原型ユニット (以下、原型ユニットと略記) の構成を加速電源を中心として示した。また、表 1 には加速電源の基本性能を示した。原型ユニットには 2 段加速イオン源が 2 台取付けられており、合せて最大 100 keV, 80 A, 10 秒のイオンビームを引出すことができる。2 台のイオン源は、共通の加速電源、および

図 1 JT-60 NBI 原型ユニットのイオン源と電源の構成

Fig. 1. The ion sources and their power supply of the prototype injector unit for JT-60.

表 1 JT-60 NBI 原型ユニット加速電源の基本性能
Table 1. Specifications of the accelerator power supply of the prototype injector unit for JT-60.

電極 (記号)	電圧 (kV)	電流 (A)
第一正電極 V_{acc}/I_{acc}	20-100	0-94
第二正電極 V_g/I_g	20-90*	± 2

* 分圧用の真空管の制約から V_g は $10 \text{ kV} \leq V_{acc} - V_g \leq 30 \text{ kV}$ の範囲でのみ設定可能。

減速電源に並列に接続されている。一方、プラズマ源用のフィラメント、アーク電源はイオン源ごとに個別の電源がある。以上の構成は JT-60 NBI 実機の 1 ユニットとほぼ同じである。なお、原型ユニットの詳細については文献(7)に記述されている。以下には、GTO スイッチの加速電源への適用性を検討するうえで必要な部分について説明を加えた。

原型ユニットでは、全加速電圧である第一正電極電圧 V_{acc} と二段加速の中間電圧である第二正電極電圧 V_g は共に一つの加速電源から供給する。 V_g は V_{acc} を高速スイッチ用とは別の四極真空管 RT と抵抗 $29 \text{ k}\Omega$ とにより分圧して得ている。分圧用の RT もスイッチとしての機能も受け持っているが、電圧が $10 \sim 30 \text{ kV}$ と低く、電流が数 A と少ないことから前述のような問題は生じていない。加速電圧の粗調整は、ビームショットとビームショットの間に負荷時タップ切換器付き変圧器 LRT により行う。更に細かい調整は、ビームショット中に交流側のサイリスタスイッチ QSWA の位相制御により行う。この制御の時定数は約 100 ms である。絶縁変圧器 ITA で発生した高電圧は整流器 RECA で整流し、平滑コンデンサ $30 \mu\text{F}$ を経て GTO スイッチに供給される。真空管使用当時

GTO スイッチの入力側に取付けられていた、イグナイトロンを直列接続したクローバスイッチ CWS は、GTO スイッチへの置き換えと共に取外した。GTO スイッチとその下流の 0.3 H のインダクタンスについては次節で詳述する。フェライト製のサージブロッコア SB は加速電極における放電破壊時、電源の対地漂遊容量に蓄えられたエネルギーが電極に流入して電極を損傷させるのを軽減するためのものである。バイパスダイオード D は放電破壊時直後出力側の電圧が逆転して GTO スイッチの両端に過大電圧がかかるのを防ぐためのものである。D に直列に接続した 25Ω の抵抗は出力回路の漂遊のインダクタンスと容量の系が臨界減衰の状態となるようにして加速電極に吸収されるサージエネルギーが最小となるようにしたものである⁽¹¹⁾。図中円内の記号 'V' と 'A' はそれぞれその横の括弧内に示した量を計測する分圧器と電流計である。

〈2・2〉 電圧制御機能付き GTO スイッチ GTO スイッチの入力電圧 V_{in} には、イオン源の加速電極で時折生ずる放電破壊時に過電圧が発生する。これは一つには、放電破壊発生時 GTO スイッチにより直流出力が高速に遮断される一方で、交流側のサイリスタスイッチはすぐには切れずにコンデンサの充電が進むことによる。また、高速スイッチよりも上流の回路のインダクタンスに蓄えられたエネルギーが放出されることによっても充電される。NBI では時折生ずる放電破壊は容認し、これを異常事態とはとらえずに、高速に遮断した後数十ミリ秒以下の短い時間において再運転するようにして、実質的に運転が継続できるようにしている。従って、高速スイッチに定電圧制御機能がない場合は V_{in} の過電圧がそのまま加速電極に印加され

図 2 過電圧に関しての加速電源の等価回路
Fig.2. An equivalent circuit of the acceleration power supply for overshoot.

ることになり、更なる放電破壊をまねくことになる。これを避けるには通常の運転電圧を下げればよいが、これは NBI の最高性能を下げることになる。従って、GTO スイッチには電圧制御機能もあることが望ましい。

V_{in} の過電圧に関して、加速電源の等価回路は図 2 のように書ける。図中 E は受電電圧、 L は変圧器 (LRT, ITA) の漏洩インピーダンスである。受電電圧は QSWA により遮断されるが、GTO スイッチが遮断してから QSWA が遮断するまでの時間は GTO スイッチが遮断する時刻の交流側の位相による。また、GTO スイッチの遮断と同時に受電電圧の変動があればこれも過電圧に影響する。結局、高速遮断した後の GTO スイッチの入力電圧の過電圧は、その瞬間における交流側の電圧変動、交流の位相、および変圧器の漏洩インピーダンスによって決まる。そこで、交流電圧が瞬時に 5% 上昇、QSWA の位相制御角が最小の 10 度で運転、GTO スイッチによる遮断は QSWA の転流の直後、初期条件 $V_{in}=115\text{ kV}$ 、 $I_{GTO}=86\text{ A}$ という最も厳しい条件で図 2 の等価回路を元に過電圧を求めると、22.4 kV となる。このような最悪の組合せはまず起こらないと考えられるが、GTO スイッチの電圧制御の幅は、この場合でも対応できるように決めた。

開発した電圧制御機能付き GTO スイッチは機能的に二つの部分に分けられる。一つは電圧機能を受け持たない、純粋なスイッチとして働く部分 GTAS、もう一つは電圧制御機能を受け持つ GTAR である。GTAS と GTAR の GTO の直列接続数はそれぞれ 96 個と 24 個で、電圧について約 2.5 の裕度をもたせている。使用した GTO はすべて同一で、その性能仕様を表 2 に示した。

GTO スイッチの下流の 0.3 H のインダクタンスは、電極で放電破壊が生じた後 GTO スイッチが遮断するまでの電源からの続流の増加を制限するためのものである。真空管と異なり、GTO スイッチには定電

表 2 使用した GTO の性能仕様
Table 2. Specifications of the GTO elements.

型式	SG 600 EX 21 (東芝)
最大電圧	2,500 V
定格電流	420 A (rms)
ターンオフ電流	600 A
サージオン電流	6,000 A
ターンオフ時間	20 μs

流特性がないため、真空管から GTO スイッチに置き換えるときに同時に挿入した。ここで GTO スイッチが遮断する直前の電流を 100 A、放電破壊の検出の遅れも含めて遮断するまでの時間を 100 μs と仮定すると、実際のターンオフ電流は概略次式で与えられる。

$$100\text{ A} + \frac{100\text{ kV} \times 100\text{ μs}}{0.3\text{ H}} = 133\text{ A} \quad \cdots (1)$$

この値は GTO の仕様で定められているターンオフ電流 600 A に比べ十分小さい。

しかし、逆にこのインダクタンスはビームの立上げ波形にも影響を及ぼすことに注意する必要がある。前述のように、イオン源は加速電源から見ると定電流特性をもった負荷で、加速電流はイオン飽和電流によって決まる。プラズマ生成を放電容器一杯に拡散する直流のアーク放電による場合、イオン飽和電流はほぼ投入するアークパワーに比例する。従ってビームの立上げ特性は、加速電源とアーク電源との立上げ時定数の大小関係による。例えば加速電源のほうがアーク電源より時定数が長い場合は、加速電圧はビームの立上げ時に大きく低下することになる。二段加速イオン源の場合、こうした加速電圧の大きな低下は V_g の不安定性を引起こすことが知られている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。この現象は突然 V_g がほぼ V_{acc} まで持ち上がってしまうというものである。図 1 に示したように原型ユニットの電源では、アーク電源にも GTO スイッチを採用している。そして、アーク電流の立上げ速度はアーク電源の直流出力側に入れた 1 mH のインダクタンスで制限している。従って、それぞれの立上げ時定数は次式で概算できる。

加速電源：

$$\tau_{acc} \approx \frac{0.3\text{ H} \times 100\text{ A}}{100\text{ kV}} = 0.3\text{ ms} \quad \cdots (2)$$

アーク電源：

$$\tau_{arc} \approx \frac{10^{-3}\text{ H} \times 700\text{ A}}{70\text{ V}} = 10\text{ ms} \quad \cdots (3)$$

ここで、アーク電流は原型ユニットの代表的な運転値として 700 A/イオン源とした。以上のように、加速電源の時定数はアーク電源に比べて十分短く、電圧不安定の観点からは問題ないように選んだ。

図 3 GTAR の制御
Fig. 3. Control for the GTAR.

GTAR による出力電圧制御の機構の概念図を図 3 に示す。GTAR 内の GTO にはそれぞれに非線形抵抗 (NR1~NR24) が並列に接続されている。この非線形抵抗はその両端の電圧を 1.2 kV に制限するもので、GTAR 内のすべての GTO (GTO1~GTO24) がオフの場合に 28.8 kV の電圧降下を生じさせることができる。従って、入力側の過電圧の大小に応じてオンする GTO の数を制御することにより、0~28.8 kV の範囲で 1.2 kV ステップで出力電圧を制御することができる。この制御には次のようなオープンループ制御を採用した。入力電圧のモニタ値 V_{in} と加速電圧の設定値 $V_{acc.s}$ の差分を減算器 B-A で得てこれをサンプルアンドホールド回路 S/H でサンプル化し、AD 変換器 AD でディジタル化する。プログラマブル ROM である PROM はこの値を基にオンすべき GTO の数量を決め、その信号は異なる電位にあるそれぞれの GTO のゲート回路に光ファイバで伝送するというものである。

以上の手法によれば、真空管の場合と同じく出力電圧を出している間、常に電圧制御を行うことも原理的に可能であるが、その場合非線形抵抗の消費電力が大きくなる。前述のように、NBI の加速電源では出力再開時の過電圧だけを抑えればば用が足りることから、ここでは 1 回当たりの電流時間積が 0.75 アンペア秒の小さな容量の非線形抵抗を使用し、通電(再)開始直後だけに電圧制御機能が動作するようにした。非線形抵抗の保護のために、PROM は通電開始後電流時間積の制限値を超えない一定時間後に無条件にすべての GTO をオンさせる機能ももっている。更に PROM は個々の非線形抵抗に電圧がかかる頻度がある程度均等化するために、オンする GTO を GTO1 側からとする場合と、GTO24 側からとする場合とを交互に切替える機能も有している。

図 4 GTAR 内の 1 ステージの回路構成
Fig. 4. Circuit diagram of one of the stages in the GTAR.

GTO スイッチは構造的には 6 個の GTO ごとにまとめたステージから構成してある。図 4 は GTAR の 1 ステージの回路構成である。GTAS のステージも非線形抵抗 NR#1~NR#6 がないことを除き同じ構成である。ゲート回路の電源は、専用の絶縁変圧器で加速電圧の高電位に持ち上げた後、各ステージごとの 7.2 kV の絶縁変圧器 ITS を介してすべてのステージを接続することにより供給している。個々のステージ内ではこの電源をインバータ INV、各 GTO ごとの絶縁変圧器 ITG #1~ITG #6 を介して各ゲート回路に分配している。個々のゲート回路はそれぞれに専用の光ファイバにより PROM から信号を受取る。GTO の故障は、非通電時の 6 個の GTO の中間電位の変動を検出することによりモニタしている。GTAR の 1 ステージの大きさは幅 96 cm、高さ 32 cm、奥行き 64 cm である。GTAS のステージは、非線形抵抗がないことから高さが 26 cm と低くなっている以外は同じである。GTO スイッチ全体の大きさはがいしの脚を除いて幅 2.6 m、高さ 2.63 m、奥行き 1.7 m、重量は約 3 トンである。これは真空管を用いていた場合の盤のスケールより大きいが、クローバスイッチがないことを考慮すると総合的には同等か、むしろコンパクトになったといえる。

3. 試験結果

図 5 は 1 台のイオン源から 80 keV、5~25 A、35 ms の短パルスビームを引出したときの波形である。図中 V_{in} は GTO スイッチの入力電圧、 V_s と I_s は減速電極の電圧電流、他の記号は表 1 と同じである。加減速電圧、アーク放電はそれぞれ時刻 a 、 c でオンされ、いずれも時刻 d でオフされる。時刻 a で I_{acc} 、 I_g 、

図 5 1 イオン源から 80 keV, 5~25 A, 35 ms のビームを引出したときの各部電圧電流波形
Fig. 5. Waveforms when a beam of 80 keV, 5 to 25 A, 35 ms was extracted from an ion source.

I_s に見られるスパイクは回路の漂遊容量の充電電流である。時刻 c から d へのゆっくりとした I_{acc} の増加はアーク電源に入っている 1 mH のインダクタンスによる。また I_{acc} 中の振動はアーク電源のリプルである。

ビームを立上げる前の V_{in} が V_{acc} の設定値よりも約 4 kV 高いことから、時刻 a から GTAR の電圧制御が働いている (V_{in} と V_{acc} の差が電圧制御分)。時刻 a から c に向けて V_{in} が次第に減少するのは V_g を得るための分圧回路に電流が流れることによる。時刻 b で GTAR 内の GTO が更に 1 個点弧することから、 V_{acc} は 1.2 kV 持ち上がり、設定電圧付近に維持されている。時刻 c 以降は I_{acc} が流れることから V_{in} の減少が速くなっている。そして時刻 c から約 10 ms 後に V_{in} は V_{acc} と同一電圧になっている。つまり、すべての GTO がこの時刻で点弧している。その後の V_{in} および V_{acc} のゆっくりとした増加は QSWA の位相制御による出力電圧一定制御によるものである。

図 6 は 2 台のイオン源から 90 keV, 60 A, 0.5 秒のビームを引出している間に放電破壊が生じたときの波形である。この図の時間スケールでは時刻 e で放電破壊が生じたのとほぼ同時に V_{acc} , V_g , V_s の電源出力が遮断されている。このとき V_{in} は約 8 kV 過電圧

図 6 2 イオン源から 90 keV, 60 A, 0.5 s のビームを引出し中、放電破壊が生じたときの応答波形

Fig. 6. Response for a source breakdown when 90 keV, 60 A, 0.5 s beams were extracted from two sources.

図 7 放電破壊が生じたときの加速電流の詳細波形

Fig. 7. Waveform of I_{acc} at breakdown viewed in a short time scale.

となっている。その後、出力電圧はすぐに再印加されるが、アーク放電はこれらの電圧が十分確立した後の時刻 f に再オンされる。GTAR は最初のビーム立上げ時と同様に再立上げ時にも動作し、 V_{acc} を一定に維持しているのがわかる。

図 7 は放電破壊時の I_{acc} の様子を時間軸を拡大してみたものである。 V_{acc} , V_g , V_s は時刻 a で印加され、アーク放電は時刻 c から始まるが、後者とほぼ同時に放電破壊が生じている。時刻 c 直後の I_{acc} の急速な増加は、加速電源の 0.3 H のインダクタンスより下流の漂遊容量からの放電電流である。その後いったん減って後再び増加する電流が、GTO スイッチと

0.3 H のインダクタンスを経て流れる加速電源からの続流である。この続流は放電破壊から約 60 μ s 後の時刻 g に GTO スイッチによって遮断されている。真空管が使用されていたときは、遮断までに要する時間が 30 μ s 程度でかつ真空管の定電流特性により続流電流の増加はなかった。従って、GTO スイッチに置き換えたことにより、より大きなエネルギーが続流によりイオン源に入るようになったことになる。遮断までに要する時間の内訳についての測定は行っていないが、GTO 素子自体の遮断に要する時間は電流が少ないことから表 2 の仕様値より短く、10~20 μ s 程度、残りは PROM と各 GTO 素子のゲート回路内の信号伝達の遅れによるものと考えられる。なお、図 7 に見られる電流の急激な増加は図 6 の放電破壊時も存在するはずであるが、図 6 の長い時間スケールでは測定上の制約から波形としては見えていない。

図 5 において時刻 c で V_{acc} , V_g , V_s は短い時間低下している。図 8 はこれを時間軸について拡大したものである。 I_{acc} は初め約 100 μ s の短時間で 7 A まで立上がり、その後少し減った後この時間スケールでは非常にゆっくりと増加してゆく。〈2・2〉節に示したように、アーク電流と加速電源の相互の立上げ時定数を考慮して両者に挿入したインダクタンスの値を決めているのにこのように最初の短時間で I_{acc} が増加するのは、アーク放電開始直後の過渡時はアークパワーに加

速電流とが比例関係からずれることによるものと考えられる。 V_{acc} の短時間の電圧低下はこの電流上昇に伴う 0.3 H のインダクタンスによる電圧分担で説明できる。すなわち、

$$\Delta V_{acc} = 0.3 \text{ H} \times \frac{7 \text{ A}}{100 \mu\text{s}} = 21 \text{ kV} \dots\dots (4)$$

これは図 8 の V_{acc} の電圧低下の量に近い。

I_g の二つのピークは、分圧に用いている真空管の制御がビーム立上げ時に少し振動気味で V_g が変化することによる。また、イオン源の出口側のビームにより生成されたプラズマからの逆流電子を抑えることを目的とする V_s が低下すると、逆流電子が通過するようになり、放電破壊をまねく。原型ユニットにおける運転経験では、 V_{acc} が設定電圧の半分以下にならないこと、および -0.3 kV よりも負の V_s が維持されればイオン源は安定に運転することができた。図 5 および図 8 は 1 台のイオン源が運転された場合のものであって、2 台のイオン源を同時に運転するとこの安定範囲を超えて電圧が低下した。この問題を避けるために、2 台のイオン源を同時に運転するときは、アーク放電の開始時刻を相互に 120 μ s の短い時間ずらすようにして電圧低下が時間的に二分されるようにした。その結果標準定格の $I_{acc} = 80 \text{ A}$ でも安定に立上げることができている。

4. 考 察

〈4・1〉 遮断特性 試験結果によれば加速電極の放電破壊から GTO スイッチが遮断するまでに要する時間は真空管使用時に比較して約 30 μ s 余分にかかっている。従って、この続流分だけ電極の放電破壊部分へ余分にエネルギーが注入されることになるので、加速電極の耐電圧の劣化が懸念された。しかしながら、実際にはイオン源の耐電圧特性は置き換えの前後でほとんど変わらなかった。これは GTO スイッチを介して流れる続流電流が、イオン源を流れるサージ電流全体に比べて十分小さいことによると考えられる。図 7 の I_{acc} は測定点が電源室でイオン源から約 10 m 離れたところであるので、この間の漂遊容量からのサージ電流が含まれておらず、イオン源に実際に流れるサージ電流より小さくなっている。数値計算によれば放電破壊時にイオン源に流れるサージ電流は最大 2 kA、流入サージェネルギーは 1 J 以下と見積もられている⁽¹¹⁾。

数千ショットビームを引出した後イオン源を分解し、加速電極の表面を目視チェックした。放電破壊痕は約 4 mm 直径のくすんだ円で、正電極側にのみ見られた。この状況も真空管を用いていたときと変わらない。

図 8 アーク放電開始時の電圧ドロップ
Fig. 8. Voltage drops when the arc discharge started.

以上のように、加速電極の耐電圧特性は従来と変わったようには見えず、遮断に要する時間が長くなったことは全く問題がないようである。加速電極の放電破壊時に許容されるサージ量については明確なデータが少ない。これまで高速スイッチとして使われてきた大型真空管では、フラッシュオーバー時に許容される真空管への許容エネルギーは3 J程度以下とカタログに規定されている。また文献(14)では、加速電源の出力にコンデンサを取付けることによって許容サージ量の評価を行っている。その結果として、サージエネルギーが10 J以上でかつピーク電流が600 A以上のとき加速電極の耐電圧が劣化するとしている。概念的には加速電極に許容されるサージ量は電界強度（イオン源の場合、10 kV/mm程度）、加速電圧、電極間の真空度により変わり得ると考えられるが、いずれにしても数Jかつ数百A以上で問題となると推定される。GTOスイッチに交換した結果、延びた遮断時間30 μ s内に加速電極に流入する余剰電流は100 A程度、放電破壊のアーク電圧を100 Vと仮定すると余剰流入エネルギーは0.3 J程度と見積もられる。これは上述の許容サージ量に対し、十分小さく、従って加速電極の耐電圧特性に影響を及ぼさなかったものと考えられる。

〈4・2〉 電圧制御機能 NBIの場合、加速電源の出力電圧を一定にする必要性には幾つかの理由がある。一つは加熱すべきプラズマへの浸透距離が適当である必要があることである。この理由による必要精度は厳しいものではなく、例えば $\pm 10\%$ 程度の精度で十分と考えられる。また、ビームの発散を小さく保つためにイオンビームのパービアンズ（加速電流を加速電圧の $3/2$ 乗で除した値）を一定に保つ必要がある。イオンビームを引出す穴の形状がスリット状の場合、パービアンズが最適値からわずかもずれると放電破壊をまねくことが知られているが⁽¹⁵⁾、その一方でJT-60 NBIのイオン源のように円孔の場合はこの制限は緩く、 $\pm 20\%$ 程度ずらした運転も容易である。また、ビームの発散も10%程度の悪化を容認すれば $\pm 10\%$ 程度ずれてもよい。

結局、NBIにとってもっとも厳しい電圧制御の条件は最高性能を低下させないために過電圧をクリップすることにある。イオン源はいったん耐電圧処理が終了すると、長時間運転を休まない限りその達成電圧には再現性がある。例えば、1~2%電圧を達成電圧より上げるとほぼ確実に放電破壊が生ずるという状況になる。このように耐電圧処理の達成電圧の再現性が厳密であることから、過電圧がイオン源にかかる場合はその過電圧分だけイオン源の運転可能ビームエネルギー

の上限が減ずることになる。従って、過電圧の許容値はビームエネルギーの1~2%程度以下であることが望ましい。ただし、これは過電圧側に対してだけであり、不足電圧側に対しては10%程度あっても差し支えない。

今回製作したGTOスイッチの電圧制御ステップは1.2 Vステップであるので、(再)立上げ直後目標電圧を中心として ± 1.2 kV以下の範囲で出力電圧一定制御ができる。その後GTOスイッチのこの制御が終了した後は、図5の波形に見られるように加速電源電圧のリプルがそのまま出力電圧に現れる。これは真空管使用時はなかったものである。原型ユニットの場合リプルの幅もGTOスイッチの制御精度と同程度であるので、結局GTOスイッチに電圧制御機能を負荷したことにより最大20 kV（全加速電圧に対し20%程度）程度ある過電圧を1.2 kV程度（同1.2%程度）まで抑えられたことになる。これは上記の目標を満たしている。図5に見られるQSWAの位相制御に伴う出力電圧のゆっくりとした電圧変動、および図8に見られる電圧ドロップは、秒オーダーのビーム入射からすれば全く問題とはならない。

〈4・3〉 立上げ特性 前章の波形の例のように、原型ユニットにおいては加減速電圧印加後アーク放電を立上げている。つまり、ビームはパービアンズ0のビーム発散の大きい状態から定常状態のビーム発散の小さい（最適の）パービアンズへと、ビーム立上げの短い時間内で移行する。従来はビームの立上げ時においても最適なパービアンズであるようにアーク放電と加速電圧を同時に立上げるのが、放電破壊を少なくするうえで有効であると考えられてきた。原型ユニットにおいても、直流スイッチとして真空管を用いていた当初はこのパービアンズ一定の立上げ方式を採用していた。しかしながらその場合、加速電圧、電流の運転条件を変えるたびにアーク放電と加速電圧の相互の波形を微妙に調整しないと、立上げ途中に放電破壊あるいは V_0 の不安定が生じて立上げがうまくいかなかった。そこで相互のタイミングをずらせて、加速電圧を確立する前にアーク放電を所定値に確立しておく立上げ法（定アーク立上げ法）、および加速電圧を所定値に確立した後にアーク放電を確立させる方法（定加速電圧立上げ法、前章の波形がその例）が本当に適用不能かGTOスイッチへの置き換えに先立って試験した。なお、これらの立上げ方法はいずれもイオン源が一段加速の場合は立上げ可能であったものである。

その結果、定アーク立上げ法では第二正電極不安定が必ず生じて運転不能であった。定加速電圧立上げ法

の場合は従来のパービアンズ一定の立上げ方式から移行して数十ショットの間はビーム立上げ時に放電破壊が生じたものの、次第にその頻度が減り、最終的にはビームの定常引き出し時とあまり変わらなくなった⁽¹⁸⁾。当初放電破壊が生じやすいのは、パービアンズが最適からずれてビーム発散の大きい状態で、かなりの割合のイオンビームが加速電極に当たることによる。その後、徐々にビームの定常引き出し時とあまり変わらなくなっていくのは、多くのイオンビームが当たることから、ビームを引出しながらの耐電圧処理がよく進み、最終的には立上げ途中より加速電圧の高い定常時と放電破壊の起こる確率があまり変わらなくなる、ということであると考えられる。このイオン源の特性の発見はGTOスイッチの採用上重要で、もしパービアンズ一定の立上げ方式でなければならなかったとするとGTOスイッチでは立上げ波形を調節できないので、加速電源にGTOスイッチを採用すると同時にアーク電源のGTOスイッチをトランジスタに変えるなどの対策が必要であったと考えられる。

〈4・4〉 信頼性 GTOスイッチは、もともと加速電源の大容量化に伴う直流スイッチの信頼性の低下を補うために開発したものであるが、開発時点ではGTOスイッチの信頼性自体も明確ではなかった。出力電圧に比べてかなり小さな定格電圧のGTOを直列接続して構成しているため、過渡的にでも各GTOの電圧の分担にアンバランスが生じるとGTOの恒久的な破壊を引起すことになる。図1には示していないが、各GTOには通常行われているように電圧のアンバランスを抑えるための抵抗とコンデンサが並列接続してある。にもかかわらず原型ユニットにおいて数度にわたりGTOの故障を経験した。そして、そのたびに改良を施してきた。その主な改良点の一つは、0.3 Hのインダクタンスの挿入箇所をGTOスイッチの入力側から図1のように出力側に移動したことである。この目的は加速電極での放電破壊時のサージのGTOスイッチへの流入を緩和することにある。また、配線のインダクタンスが最小となるようにゲート回路の配線を改善した。こうした改善の結果信頼性は飛躍的に向上した。JT-60 NBIの全14ユニットに使用されているGTOは1,680個にも上るが、これまでの4年間にわたる通常の運転状態で壊れたGTOは2個である。故障の原因は明らかではないが、加速電圧を上げた場合より加速電流を増やしたときに壊れる傾向がみられることから、配線のインダクタンスの低減にまだ改善の余地があるものと推定される。

5. ま と め

本論文を要約すると次のようである。

(1) JT-60 NBIの加速電源の直流スイッチとして、100 kV、約100 Aの電圧制御機能付きGTOスイッチを開発した。これは大容量化と共に開発が困難となってきた真空管にとって代わるものである。また、電圧制御機能はイオン源に過電圧がかかるのを防ぐためのものである。信頼性、電圧制御性ともほぼ満足できる結果を得た。

(2) 電流遮断に要する時間は加速電極における放電破壊から60 μ sであり、これは真空管を用いた場合の20~30 μ sより長い。加速電極の耐電圧特性および電極面の目視結果は真空管を用いていた場合と変わらなかった。これは0.3 Hの大きなインダクタンスで統流電流の増大を抑えており、漂遊容量からのサージェネルギーに比して統流電流分の寄与が相対的に小さいことによる。

(3) ビームの立上げ法は、加速電圧を確立した後にはイオン源のアーク放電を開始させる方式をとった。このようなパービアンズを一定にしない立上げ方式は、電極の穴が円形の場合にのみ可能なものとされている。従って、立上げ波形の微妙な調節を行うのが困難なGTOスイッチは、JT-60 NBIで採用しているような多数の円孔を開けたイオン源に合致した直流スイッチである。

本GTOの開発にあたっては日本原子力研究所のNBI装置試験室およびNBI加熱研究室のメンバーとの議論、およびメンバーによる運転の支援に負うところが大きかった。ここに謝意を表す。また、國枝NBI装置試験室室長、栗山同室長代理には終始御支援いただいた。ここに併せて謝意を表す。

(平成3年10月14日受付、同4年2月5日再受付)

文 献

- (1) M. D. Williams & The PPPL Neutral Beam Group: "Status of the TFTR Neutral Beam Heating System", Proc. of the Eleventh Symposium on Fusion Engineering (Austin), Vol. 2, 777 (1985)
- (2) G. Duesing, H. Altmann, H. Falter, A. Goede, R. Haange, R. S. Hemsworth, P. Kupschus, D. Stork & E. Thompson: "Neutral Beam Injection System", *Fusion Technology* 11, 163 (1987)
- (3) S. Matsuda, M. Akiba, M. Araki, M. Dairaku, N. Ebisawa, H. Horiike, T. Itoh, T. Kanai, M. Kawai, M. Komata, M. Kuriyama, S. Kitamura, M. Matsuoka, K. Mizuhashi, T. Ohga, H. Ohhara, Y. Ohuchi, Y. Ohara, Y. Okumura, K. Shibamura, T. Shibata, H. Shirakata, T. Sugawara, S. Tanaka & K. Watanabe: "The JT-60 Neutral Beam Injection System", *Fusion Eng. Design* 5, 85 (1987)
- (4) アメリカ RCA 製 S 9400D (TFTR NBI で使用)

- (5) スイス BBC 製 Type CQK 200-4 (JET NBI で使用)
- (6) アメリカバリアン製 X-2062K
- (7) M. Akiba, M. Araki, M. Dairaku, H. Horiike, T. Itoh, M. Kawai, M. Kuriyama, S. Kitamura, S. Matsuda, M. Matsuoka, K. Mizuhashi, Y. Ohara, T. Ohga, Y. Ohuchi, Y. Okumura, M. Komata, K. Shibamura, T. Shibata, H. Shirakata, S. Tanaka, K. Watanabe & R. P. Wells: "JT-60 Neutral Beam Intection System", Proc. of the 10th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research (Philadelphia), Vol. 2, 2031 (1983)
- (8) J. V. Frank, A. A. Arthur, L. A. Brusse & W. Low: "An SCR Series Switch and Impulse Crowbar at the Lawrence Berkeley Laboratory for CTR Neutral Beam Source Development", Proc. of the 7th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research (Knoxville), Vol. 2, 1576 (1977)
- (9) O. Kaneko, T. Kuroda, Y. Oka & K. Sakurai: "5 MW Neutral Beam Test Stand in IPP-Nagoya", Proc. of the 10th Symposium on Fusion Enbineering (Philadelphia), Vol. 2, 1502 (1983)
- (10) 橋本・山下・上出・岡・佐藤・西村:「半導体素子による中性粒子入射装置用加速電源の開発」, 昭58電気学会全大, No. 50
- (11) M. Matsuoka, S. Matsuda, H. Nagamura & K. Watanabe: "A New Method of Protecting Ion Source Accelerators against Deterioration due to Source Breakdown", *IEEE Trans. Plasma Sci.* PS-12, 231 (1984)
- (12) R. Becherer, M. Desmons, M. Fumelli, P. Rainbault & F. P. G. Valckx: "High Energy, High Current Neutral Beam Injector Operation with Single Stage and Two-Stage Multiaperture Extraction Systems", *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* 203, 389 (1982)
- (13) 松岡:「2段加速イオン源の中間電極電圧安定性の静的な解析」, 電学論B, 111, 807 (平3-7)
- (14) H. W. Owren, W. R. Baker, K. H. Berkner, D. B. Hopkins & D. J. Massoletti: "The Effect of Capacitive Stored Energy on Neutral Beam Accelerator Performance", Proc. of the 12th Symposium on Fusion Technology (Jülich), Vol. 1, 455(1982)
- (15) W. S. Cooper: "A Comparison of Representative 75-120 keV Four-Grid Accelerator Designs," Lawrence Berkeley Laboratory Report, LBL-12673 (1981)
- (16) M. Matsuoka, M. Akiba, M. Kawai, S. Kitamura, S. Matsuda, N. Nagamura, Y. Ohara, T. Ohga & K. Watanabe: "The JT-60 NBI Power Supply System", Proc. of the 13th Symposium on Fusion Technology (Varese), Vol. 2, 911 (1984)

松岡 守 (正員)

昭和30年生。52年三重大学工学部電気工学科卒業。54年名古屋大学工学研究科修士課程修了。同年日本原子力研究所入所。中性粒子入射装置の開発に従事。日本物理学会, プラズマ・核融合学会会員。

松田 慎三郎 (非会員)

昭和20年生。44年京都大学工学研究科修士課程修了。同年日本原子力研究所入所。核融合実験炉の開発に従事。日本原子力学会, プラズマ・核融合学会会員。

水野 誠 (正員)

昭和31年生。56年名古屋大学工学研究科修士課程修了。同年日本原子力研究所入所。核融合装置用電源および中性粒子入射装置の開発に従事。日本物理学会, プラズマ・核融合学会会員。

渡辺 和弘 (正員)

昭和32年生。57年茨城大学工学研究科修士課程修了。同年日本原子力研究所入所。中性粒子入射装置の開発に従事。プラズマ・核融合学会会員。

斎藤 房男 (非会員)

昭和29年生。54年東北大学原子核工学科卒業。同年東京芝浦電気(株)[現, (株)東芝]入社。核融合装置のシステム設計に従事。プラズマ・核融合学会会員。

比嘉 修 (正員)

昭和20年生。43年九州大学電気工学科卒業。同年東京芝浦電気(株)[現, (株)東芝]入社。府中工場においてパワーエレクトロニクスの開発・設計に従事。

渡辺 幸夫 (正員)

昭和24年生。47年東京理科大学電気工学科卒業。49年東京芝浦電気(株)[現, (株)東芝]入社。府中工場において, 主として, 核融合装置用電源の開発・設計に従事。

内藤 正次 (正員)

昭和27年生。45年福岡県立戸畑工業高校電気科卒業。同年東京芝浦電気(株)[現, (株)東芝]入社。府中工場において, 主として, 核融合装置用電源の開発・設計に従事。