

5MV タンデム加速器加速高電圧の回復

RECOVERY OF ACCELERATION HIGH TENSION OF 5MV TANDEM ACCELERATOR

羽鳥聡[#], 清水雅也, 湊上隆太, 菊地亮平, 小田部圭佑, 古川靖士,
羽田祐基, 栗田哲郎, 廣戸慎, 淀瀬雅夫, 北上悟, 山田裕章
Satoshi Hatori [#], Masaya Shimizu, Ryuta Fuchikami, Ryohei Kikuchi, Keisuke Otabe, Seiji Furukawa,
Yuuki Haneda, Tetsuro Kurita, Makoto Hiroto, Masao Yodose, Satoru Kitajo, Hiroaki Yamada
The Wakasa Wan Energy Research Center

Abstract

The accelerator system at The Wakasa Wan Energy Research Center consists of a Cockcroft-Walton rectifier type 200 kV ion implanter, a Schenkel rectifier type 5 MV tandem accelerator, a 200 MeV proton synchrotron, of which injector is the tandem accelerator, and 5 and 3 beam lines dedicated to the tandem accelerator and the synchrotron, respectively. The tandem accelerator is used for all experiments except for the use of the ion implanter, therefore, we have focused on the stable and continuous generation of the acceleration high voltage in the operation and maintenance of the tandem accelerator. Although the acceleration tubes and insulation column sustaining the tubes and the high voltage terminal has withstand voltage of more than 5 MV, the apparent power of the RF driver for the generation of acceleration high tension has often reached rating of 60 kVA and caused trip of RF driver following the error of the grid driver of the oscillation tube. The system of the oscillator and Schenkel rectifier forms a kind of DC-DC converter using a triode as a switching device, where the DC bias is ineffectual power for the generation of the acceleration voltage. In order to generate only RF component, we introduced new RF driver adopting half bridge converter using transistors as switching devices. By using new driver, it takes only 18 kW RF power to generate the acceleration voltage of 5 MV. In this report, we will present maintenance of the withstand voltage performance of the acceleration tubes and supporting insulators and insulation structure and performance of new RF driver.

1. はじめに

若狭湾エネルギー研究センター(WERC)加速器施設は 200 kV イオン注入装置、高周波整流型の 5 MV タンデム加速器とそのビームライン、及びタンデム加速器を入射器とする 200 MeV 陽子シンクロトロンとそのビームラインからなる。Figure 1 に WERC の加速器およびビームラインの概略を示す[1]。

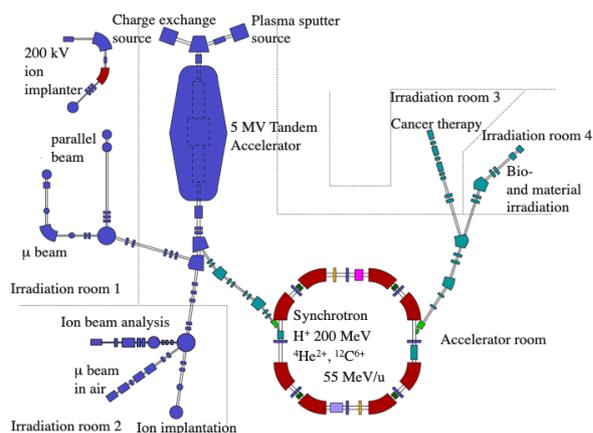


Figure 1: Schematic layout of the accelerator system at WERC.

[#] hatori@werc.or.jp

タンデム加速器はイオン注入装置利用実験を除けば、全ての加速器利用実験に用いられる加速器で、その加速高電圧の維持には特に注意を払ってきた。今や、加速管、加速管や加速高電圧ターミナルを支える絶縁コラムの耐電圧性能は 5MV 発生に十分耐えるものとなっているが、加速高電圧発生用の高周波 (RF) 発振器の必要出力が定格 60kVA に達するようになり、発振管グリッドドライブ異常を起こしトリップするようになっていた。

発振器はタンデム高電圧発生用の多段倍電圧整流回路 (シェンケル回路) も含めた系では、三極管をスイッチング素子とした一種のフォワード型 DC-DC コンバーターを形成しているが、DC バイアス分が無駄な電力となっている。高電圧発生用の RF のみを発生させるようにハーフブリッジ型とし、トランジスターをスイッチング素子とした新たな RF 発振器を導入した。18 kW 程度の RF 出力で 5 MV を発生することが可能となった。

本稿では加速管や絶縁構造物の耐電圧性能維持の取り組み、導入した加速高電圧発生用高周波発振器の性能、5 MV 発生状況について述べる。

2. タンデム加速器

Figure 2 にタンデム加速器の全景、Table 1 に主要諸元をまとめる。

2.1 加速高電圧

RF を多段倍電圧整流回路 (シェンケル回路) で整流、RF 電極-整流器両端電極 (シールド電極) 間の浮遊容量を蓄電し、高圧ターミナルは最高 5 MV まで印加される。



Figure 2: Tandem accelerator.

Table 1: Specification of the Tandem Accelerator

Generation of HV	58-stage Schenkel rectifier
Max terminal voltage	5 MV
Max conveyer current	1 mA
Voltage ripple	2 kV@5 MV
Insulation column	UNILATE®
Insulation gas	SF ₆ 0.6 MPa gauge
Accelerator tube	glass(borosilicate)-metal (titanium) organic bonding
Charge exchange	Ar gas stripper recirculation and concentration by 4 TMP's (50 L/s/pump)

RF 発生は DC バス電圧をスイッチングし、RF コイルおよび RF 電極-加速器タンク間の静電容量で形成される共振回路にエネルギーを伝達することで行う。2023 年 1 月まではスイッチング素子に三極管を用いていたため、共振回路へのエネルギー伝達は RF トランスを介して行っていた。すなわち、三極管と DC バス電圧間に RF トランス1次コイルを接続し、2次コイルが共振回路の RF コイルを担っていた。

2023 年 3 月に MOS-FET をスイッチング素子とするハーフブリッジ方式の RF 発振器を導入した。出力はトランスを介さず直接 RF コイルに伝えるようにした。

2.2 加速管

高圧ターミナルを挟むように負イオンを加速する低エネルギー加速管、正イオンを加速する高エネルギー加速管が配される。低・高エネルギー加速管とも 2 本ずつの加速管で構成される。加速管は管内の電界強度を一定にするため、1インチ間隔に1加速管当たり 80 枚の電極をもち、分割抵抗によりターミナル電圧を分割した電位に固定される。電極間はボロシリケートガラスで絶縁されている。また絶縁体や分割抵抗保護のため保護ギャップ電極がとりつけられる。

2.3 絶縁コラム

高圧ターミナル及び加速管はユニレート®製絶縁コラ

ムにより加速器タンク内で支持される。ユニレート®はユニチカ(株)により開発された板材料で、PET 樹脂を主原料にガラス繊維、無機フィラーを充填複合し、押出成形後、加熱積層プレスを行うことで成形される[2]。低エネルギー側の絶縁コラム表面は電位固定用の電極と分割抵抗が接続される。高エネルギー側の絶縁コラム表面にはシェンケル回路が配され、絶縁コラムはダイオードスタックにより電位固定される。素子取り付け用の電極には素子や絶縁コラムを保護するために保護ギャップ電極が取り付けられる。

絶縁コラムの素子取り付け用電極にはコラムを円筒状に覆うようにシールド電極がとりつけられる。高エネルギー側のシールド電極は RF 電極と同軸円筒コンデンサを形成する。

加速器タンク内には絶縁ガスとして六フッ化硫黄 SF₆ が 0.6 MPa-gauge 充填される。

3. 絶縁構造物の耐高電圧性能向上

3.1 加速管内壁コンディショニング

加速管の外壁は絶縁ガスに覆われているが、内壁側は真空 (~10⁻⁶ Pa) であり加速管の耐電圧性能は内壁の状態により決まる。加速管に電圧を印加し、徐々に電圧を上昇させると内壁で小放電(キックと呼ぶ)が始まるようになる。キックが収まった後、また電圧をあげると、キックが発生する。このようにキックを起こすように電圧をすこずつあげていくことをコンディショニングと呼んでいる。

真空中でコンディショニングを続ける電圧は 3.8 MV である。ビームを加速するときは、荷電変換用の Ar ガスをターミナルのストリッパに導入するが、加速管内も Ar ガス雰囲気となる(5 MV 印加時、高エネルギー加速管大地側端で ~10⁻⁴ Pa)。Ar ガス雰囲気下では放電が抑えられ、耐圧は 1.4 倍、すなわち 5.3 MV 程度になる。しかし、Ar ガス導入により、コンディショニングは終了し、真空での耐圧は時間とともに下がる。したがって、実験利用が終わると、再び真空下でのコンディショニングを行うようにしている。コンディショニングの概念を Fig. 3 に示す。

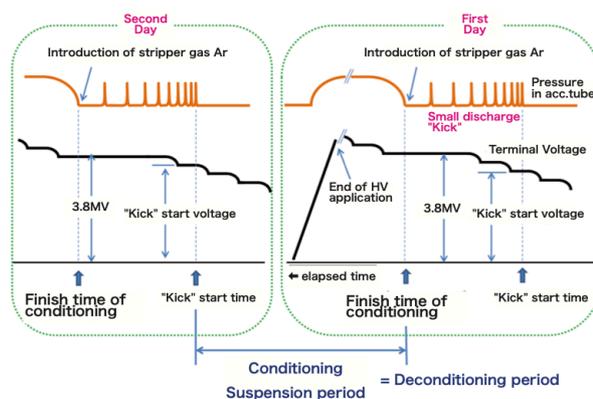


Figure 3: Concept of conditioning of the inner wall of accelerator tube.

3.2 絶縁構造物の放電

加速管以外の絶縁構造物は材質に樹脂が用いられていて表面や内部で放電が起こると放電経路に沿って炭素が遊離し導通を持つようになる (Fig. 4)。



Figure 4: Examples of discharge mark. Upper picture shows the discharge in the insulator and the lower the creep discharge on the surface of the insulator. Both the discharge cases caused burnout of the diode stacks.

特に高エネルギー側絶縁コラムはシェンケル回路により電位固定されていて倍電圧回路をショートするように放電経路ができるとダイオードスタックには直接 RF が印加されるようになりスタック中の限流抵抗やダイオードが RF 共振回路の共振特性を悪化させるダンピング抵抗として働き、源流抵抗やダイオードの焼損にいたることもある (Fig. 5)。

3.3 絶縁構造物上の電位分布の一様化

絶縁コラムの板材 UNILATE®は層構造をもっているもので、いずれ剥離を起こしてしまう。前節のコラム内部の放電は剥離性の損傷部分で起こったものである。超音波探傷により剥離部分を特定し、切除することで対応していたが、2010 年度に絶縁コラムを全て交換した。

絶縁コラムの沿面で起こる放電は電位分布が一様でないことが原因であることが多い。絶縁物表面には電位固定用の電極が設置してあり分割抵抗 (低エネルギー側コラム) もしくはシェンケル回路ダイオードスタック (高エネルギー側コラム) が接続されターミナル電位を分割した

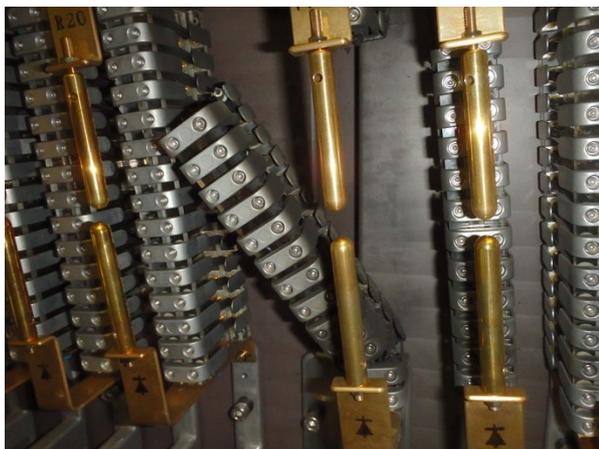
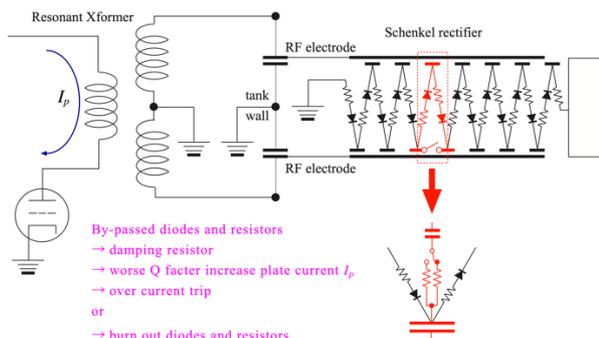


Figure 5: Discharge on the surface of Schenkel column (high energy side column). Such discharge by-passes some rectifier circuits, which act as damping resistors for the resonance circuit of RF coil and RF electrodes (top). Q-factor decreases and resonance current increases. Finally, over current error is activated and trip the RF driver. Sometimes before trip of RF driver, the shorten circuits are burned out (middle and bottom).

電位が与えられる。低エネルギー側コラム分割抵抗、ダイオードスタック内限流抵抗、さらに加速管分割抵抗、これらの抵抗値は平均値と標準偏差が管理される。抵抗値のばらつきを抑えるようにすることで絶縁構造物上の電位分布の一様化をはかる。

ダイオードスタック 1 台あたりの抵抗値は平均値に対する標準偏差の割合は 0.9% 内に管理されている。また、ダイオードスタック内にはアクリル絶縁体上に 14 個のダ

イオードと 14 個の限流抵抗が配されている。スタック内での放電を防ぐ意味で、抵抗値の平均値に対する標準偏差の割合は 0.3%程度に管理されている。

低エネルギーコラムの分割抵抗は 2 つの抵抗体に分離される。毎年の点検では全ての分割抵抗は分離され抵抗値を測定する。抵抗値の高いものと低いものを組み合わせることにより、平均値に対する標準偏差の割合は 0.1%以内に抑えられている。

加速管分割抵抗は抵抗体および加速管電極への取り付け方法を 2022 年に変更したが、抵抗値の平均値に対する標準偏差の割合は 0.4%である。

各素子は乱数が振られ、取り付け場所を点検ごとに変更し絶縁体へのストレスも平均化するようにしている。

また、絶縁ガスは循環冷却するようになっている。絶縁構造物や素子の温度を均一にし、温度の違いによる抵抗値のばらつきが生じないようにしている。

3.4 不平等電界の緩和

各素子や絶縁体の過電圧印加からの保護のため、隣り合う素子取り付け用電極間に半休状の保護ギャップ電極が対向するように設置してある。電極表面の放電痕や傷などは不平等電界を生み、放電の端緒となりうるので、研磨により除去するようにしている。

3.5 効果

素子の均一化による絶縁構造物上の電位分布の均一化の取り組みは 2016 年度の点検から行っている。絶縁構造物上の放電痕は見られなくなり、5 MV の昇圧も 2016 年度には可能となった。

4. RF 発振器更新

4.1 旧発振器

Figure 6 に 2023 年 1 月まで用いていた発振器のブロックダイアグラムを示す。RF 共振トランス、シェンケル回路まで含めると三極管をスイッチング素子とするフォワード型 DC-DC コンバーターである。スイッチング周波数は図中の原発振器 RTO (抵抗同調発振器) の外付け可変抵抗器で決まる。RF トランス 1 次コイルには 2 次コイルの共振電流に誘起される電圧が発生するがこの周波数にロックするように可変抵抗器をモーター駆動で調整する。ターミナル電圧はスイッチングのデューティ比を調整することで決定する。

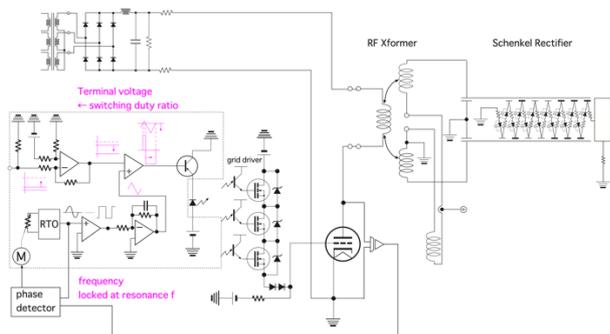


Figure 6: Former RF driver and Schenkel rectifier.

Figure 7 は 2023 年 1 月 4 日最後の運転で 5 MV 発生を行うことができたときの、三極管プレート電圧、RFトランス1次コイル両端電圧およびプレート電流を示している。

プレート電流はデューティ比に応じたパルス状であり、1次コイル両端にはトランス2次側の並列共振回路に流れる共振電流にカップルした RF 電圧が発生する。プレート電流のパルス幅に起因する高周波成分が重畳している。コイル電圧・電流から皮相電力は定格の 60 kVA に達していることがわかる。

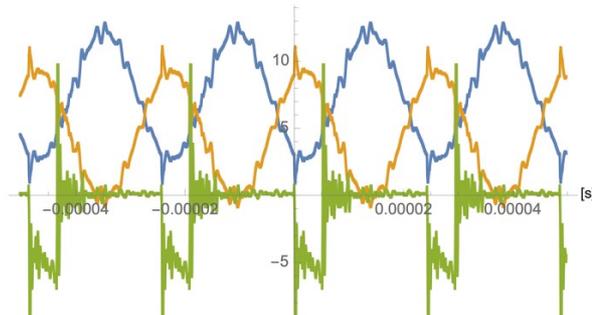


Figure 7: Current through the primary coil of RF transformer, the voltage of plate of the triode and the voltage between both ends of the primary coil at the generation of terminal voltage of 5 MV. The primary current is displayed in green, the plate voltage in blue and the coil voltage in orange. The units of current and voltage are 0.25 A and kV, respectively. Coil voltage and current is 5.62 kVrms and 10.68 Arms, therefore, the apparent power amounts to 60.0 kVA.

この時は 5 MV まで昇圧する時ができたが、最近では三極管グリッド電圧の異常によるトリップが 5 MV 未満で多発するようになっていた。絶縁構造物上のリーク経路は見つかっていない。トランス 2 次コイルを流れる共振電流や共振回路の Q 値は変化なく、トランスのエネルギー伝達効率も変わっていない。三極管カソードのエミッションが減少し、プレート電圧が増加、バイアス電圧が足りなくなり1次コイル両端に正弦波の一部しか誘起されなくなっていると考えられる。

また、共振電流を三極管のスイッチングデューティ比で制御しているので、寄生共振により特定の加速高電圧でハンチングが発生しやすい。Figure 7 でもプレート電圧に通電時間に対応した周期の高調波が重畳していることがわかる。

4.2 新発振器

Figure 8 に新しく導入した発振器のブロックダイアグラムを示す。MOS-FET をスイッチング素子とするハーフブリッジ DC-DC コンバーターである。スイッチングデューティはほぼ 50%に固定しているため、高調波の重畳が少ない。出力波形に DC バイアス電圧成分がないので、共振回路への高周波電力投入にトランスを用いる必要がない。従来の RF トランスは 1 次コイルを廃し、2 次コイルに 1 次コイルの電流導入端子を通じて高周波電力を投入するようにした。以後、かつての 2 次コイルは RF コイルと呼ばれている。共振電流の制御は DC バス電圧の増減で行なっている。

旧発振器では共振電流の制御、すなわち、加速電圧の制御は、加速電圧の計測のみで行なっていたが、新

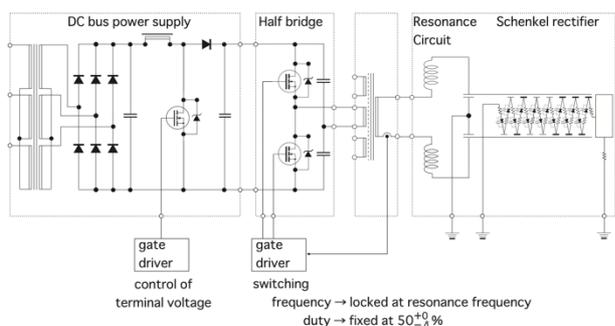


Figure 8: New RF driver and Schenkel rectifier.

発振器では加速電圧計測モード (TV モード) に加え、共振電流を一定に保つような制御、共振電流計測モード (Irf モード) がある。定期点検で加速管内や絶縁構造物を大気に開放したあとなど、放電が起きやすい、すなわち、インピーダンスが下がりがちなときには、昇圧テストは Irf モードで行うと良い。

新発振器を用いて 5 MV 発生に成功している。Figure 9 に新旧発振器を用いて 5 MV 発生したときの共振電流 (旧発振器の場合は RF トランス 2 次コイル電流、新発振器の場合は、RF コイル電流) の比較を示す。

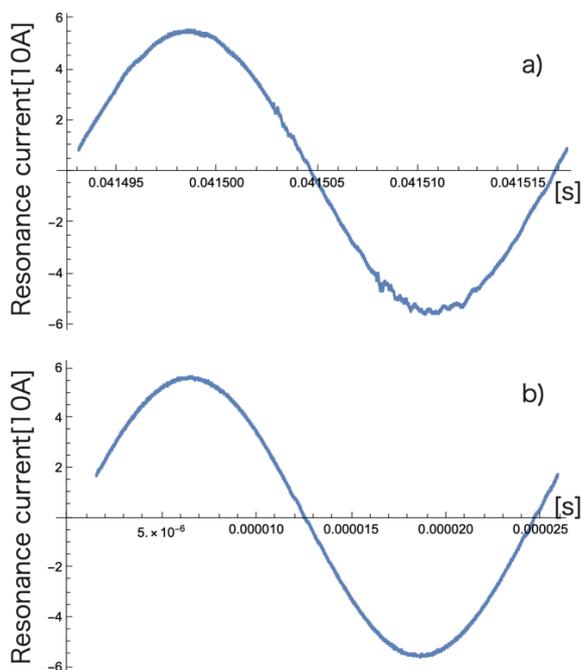


Figure 9: Comparison between resonance currents of old (a) and new (b) RF driver at generation of 5 MV.

旧発振器では三極管のスイッチングノイズが共振電流波形にもみとれるが (Fig. 9 a)、新発振器でえられる共振電流波形に重畳するスイッチングノイズはほとんど押さえ込まれている。三極管にはプレート・カソード間にスナバーは入っていないが、MOS-FET のソース・ドレイン間には TVS が挿入され、このこともスイッチングノイズ低減に貢献している。

定期点検時に RF コイルのインダクタンス、共振回路の損失測定 (オーミックな抵抗値の測定) を行い、それぞれ

21.83 mH、9.57 Ω であった。また、Fig. 9 b) から共振周波数 41.056 kHz、電流実効値 39.37 Arms をえる。これらより、共振回路の Q-factor は 588.4 であり、有効電力は 14.83 kW である。このとき、DC バス電源からの供給電力は 17.66 kW であった。電力変換効率 は 84% である。旧発振器は DC バイアス分が無駄な電力であり、電力変換効率は 25% であったので、発振器更新により消費電力を抑えることができた。

5. まとめ

加速管内壁の恒常的なコンディショニングにより、加速管内壁の耐高電圧性能は常に高い状態に維持され、Ar ストリッパガス導入により 5.3 MV 程度の耐圧をもつと考えている。絶縁構造物は樹脂製なので放電を起こさないようにしなければならない。絶縁構造物上の電位分布の均一性を実現することが重要である。電位固定用の分割抵抗の抵抗値のばらつきの管理により放電を抑えることができています。また、絶縁構造物や素子の温度も均一にすることが重要で、絶縁ガスは循環冷却を行なっている。このように加速器タンク内の加速器構成物の耐電圧性能は向上してきているが、発振器の発振管の経年劣化のため発振器のトリップにより高電圧発生が困難になってきていた。発振器をブリッジ方式のものに更新し、安定に 5 MV の電圧が発生できるようになってきた。また、高電圧の制御方法を変えたことにより高周波に重畳するノイズを低減できた。必要な高周波成分だけを発生することが可能になり、エネルギー効率も向上した。

参考文献

- [1] S. Hatori *et al.*, "Developments and applications of accelerator system at the Wakasa Wan Energy Research Center", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 241 (2005) 862-869.
- [2] <http://www.unitika.co.jp/plastics/products/unilate/>