

プログラマブル多出力高電圧電源の基盤技術開発－全体像と回路開発－

○豊田 朋範^{A)}、 庄司 愛子^{B)}、 松尾 純一^{A)}、 木村 和典^{A)}、 千葉 寿^{B)}

^{A)}分子科学研究所 技術推進部、 ^{B)}岩手大学技術部 理工学系技術部

1. 概要

飛行時間(TOF: Time of Flight)型質量分析器の検出器である MCP(Micro Channel Plate)や、近年の放射線計測に用いられる GEM(Gas Electron Multiplier)などで、時系列に印加電圧を調整したり極性を変更したりすることが求められている。

我々は最大±5kV 程度の出力を複数備え、出力電圧を独立に設定・制御可能な多出力高電圧電源の開発を進めた。本稿では、装置の全体像と D/A コンバータを用いた高電圧モジュール制御を通信に報告する。なお、本稿は 2026 年 2 月上旬時点の進捗状況を基に執筆したため、内容に進展や拡張、変更がある場合がある。

2. 装置開発の技術的動機

図 1 のような TOF 型質量分析器において、イオン化されて電荷量 q を有する質量 m の原子や分子は、加速電圧 V に応じて運動エネルギー $E=qV=1/2(mv^2)$ を得て、フライトチューブ内を速度 v で等速飛行する。この時、飛行時間 t は m/q の平方根に比例するため、飛行時間差からイオンの質量電荷比が求められる。

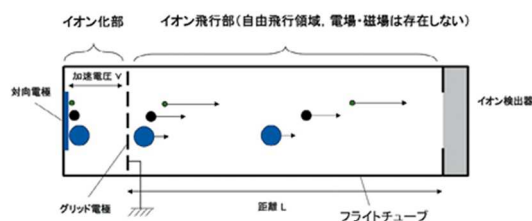


図 1 TOF 型質量分析器のイメージ図^[1]

図中の「イオン検出器」が MCP である

TOF 型質量分析器では、イオン検出器の検出面積が広いほうが高効率であるため、一般に図 2 のような構造を持つ MCP(Micro Channel Plate)検出器が用いられる。MCP にイオンが入射されると、チャンネルの内壁にイオンが衝突し、二次電子が壁面から放出される。入射面から検出面側へ電子を加速するような電場勾配を生成する高電圧を印加すると、放出された二次電子のチャンネル内壁での衝突電離が繰り返し引き起こされる。このアバランシェ効果により電子が増幅される MCP は、印加する高電圧の極性

を適時切り替えることにより、イオン検出以外にも、例えば、電離作用を持つ電磁波や電子或いは中性励起種の二次元イメージングなどにも用いられている。

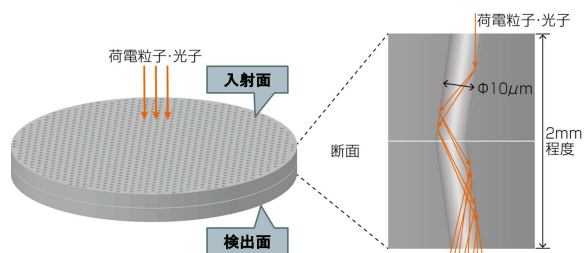


図 2 MCP(Micro Channel Plate)の仕組み^[2]

MCP を検出器として用いる実験においては、測定対象に応じて極性を含めて MCP に印加する電圧を調節する必要がある。このため、様々な高電圧電源装置もしくはモジュールが利用されているが、1) 複数の出力を有する、2) 1 つのコネクタから両極性を出力できる、3) パソコンなどで出力電圧の遷移をプログラミングする—という 3 項目を含有する電源装置は、単体としては存在しない。現在は、印加電圧を都度手で調整し、極性を変更する場合は電源装置を入れ替えて接続し直すのが一般的であり、時系列で印加電圧を調整することは非常に困難である。

MCP 以外の検出器でも、高電圧を印加する信号増幅器では電圧の自動制御が強く求められている。その例として、近年広く放射線計測に用いられている、1997 年に CERN 研究所で開発された GEM(Gas Electron Multiplier)検出器が挙げられる。GEM は、多孔の絶縁体フィルムを電極に挟んだ極薄シート状の信号増幅器であり、GEM を多段用いた二次元検出器として利用されている。放電による検出器の損傷を避けるため、各電極の電圧を数 V 単位で段階的に上げ、全電圧比を維持する必要がある。この操作も MCP と同様に手動で行われており、時間と労力を要するのみならず、誤操作のリスクがある。

そこで我々は、これらの問題を解決するため、最大±5kV 程度の出力を 2 つ以上備え、それらの出力電圧を時系列でチャンネルごとに独立に設定・制御可能なプログラマブル多出力高電圧電源(図 3)の開発に着手した。本装置の開発により、高電圧を印加する検出器を用いた実験において、誤操作や誤接続

とそれによる検出器の損傷のリスクを低減し、実験現場への技術的貢献が可能である。

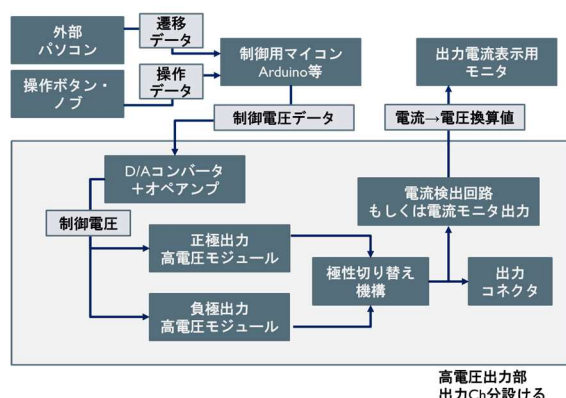


図3 共同開発中のプログラマブル多出力高電圧電源のブロック図 (Ver. 1.0)

3. D/A コンバータを用いた高電圧モジュール制御

高電圧モジュールの出力制御では、外部可変抵抗を接続して制御する方法と、外部から DC 電圧を入力して制御する方法の何れかが使用できる。「プログラマブル」を謳う本装置では後者を選択した。後述する実証試験で使用した HPMR-1.5N(松定プレジジョン)は、外部制御電圧として 0-5V を入力すると、入力に正比例する出力電圧を得られる(図 4)。

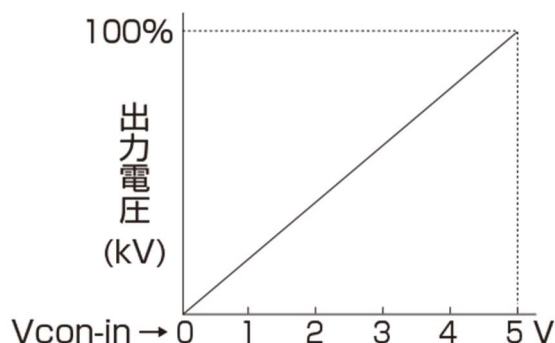


図4 高電圧モジュールの理想的な入出力特性の例^[3]

制御電圧の生成には、16bit SPI 制御 D/A コンバータ AD5683RARMZ (Analog Devices) と出力バッファ用オペアンプ AD8638ARZ (Analog Devices) を集約した D/A コンバータモジュールを使用した(図 5)。本モジュールは、筆者らが分子科学研究所クリーンルームにおける FFU (Fan Filter Unit) の風量制御に用いたものであり、Pmod (Peripheral Module) インターフェース Type2 に準拠している^{[4][5]}。

D/A コンバータモジュールを用いた高電圧モジュール HPMR-1.5N (松定プレジジョン) 制御の実証試験を行なった。結果を図 6 に示す。良好な直線性を得

られることが確認され、高電圧モジュールの制御電圧として利用できると判断した。

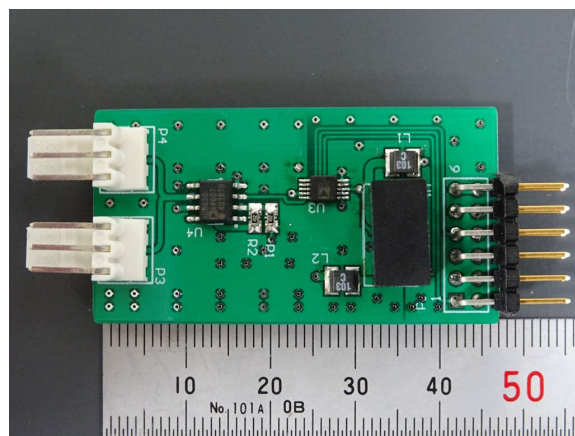


図5 D/A コンバータモジュールの全体像^[5]

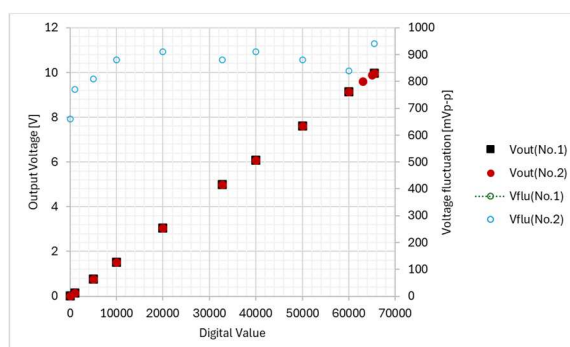


図6 Arduino で HPMR-1.5N を制御した際の D/A 値—出力電圧特性

右軸の Voltage fluctuation は、Arduino から D/A コンバータモジュールに D/A 値を送信した際に出力電圧に重畳するノイズの振幅である(図 7)。



図7 SPI 通信のクロック波形(黄色)と出力に重畳する Voltage fluctuation (青色)

Voltage fluctuation が発生するのは SPI 通信で 16bit データを送信する時間、およそ $70\text{ns} \times 16 = 1.12\text{ }\mu\text{s}$ であり、一定電圧を持続する出力の時間に対して十分無視できる。

4. ICCF26 での試作機展示と討論を経て

実証試験の成果を基に、LAN を用いた遠隔制御を

見据えて制御用マイコンを Arduino から Raspberry Pi に変更し、制御電圧をフロントパネルのノブとボタンで設定して液晶画面に表示する試作機を製作した。2025 年 5 月 26-30 日に岩手県盛岡市で開催された The 26th International Conference on Condensed Matter Nuclear Science (ICCF26) に試作

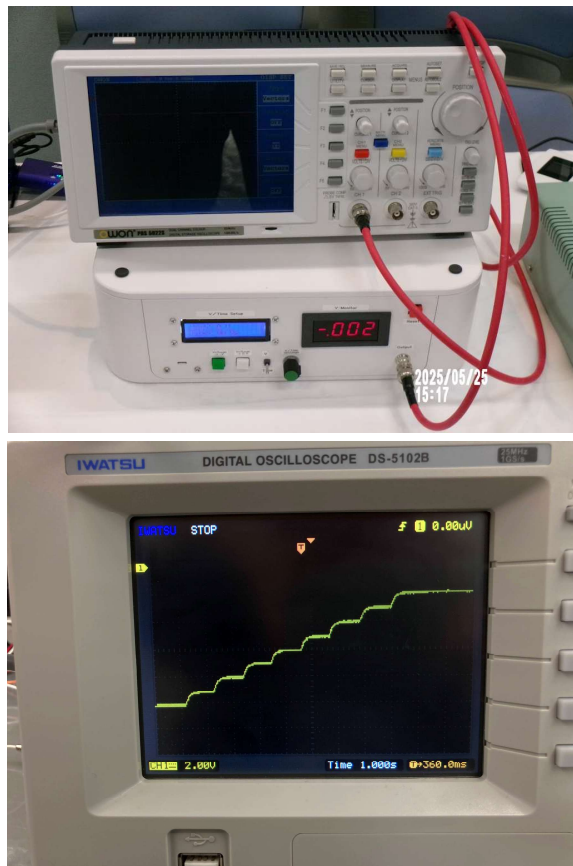


図 8 ICCF26 に出展した試作機(上)と出力電圧の遷移の様子(下)

機を出展し(図 8)、ICCF26 の参加者と討論した。

ICCF26 の参加者は核融合など数十万 V の高電圧を対象とするため、最高出力電圧数 kV の本装置は実験に使用できないものの、「実験現場に必要な機能を集約する」開発コンセプトと本装置の方向性は一様に強い賛同を得た。

出展と並行して、本開発のアドバイザーである古舘守通氏と藤崎聡美氏(いずれも岩手大学理工学系技術部)を交えて本装置について断続的に討論した。その結果、1) 複数の出力が不要な場合もあるため 1 台あたりの出力数は 1 つとしてカスケード接続で出力数を増やす方式に改める 2) 出来るだけ実験装置に近い場所に配置できるよう小型化を重視する一の 2 項目を加えることにした。改訂した本装置のブロック図を図 9 に示す。

この改訂を受けて、高電圧モジュールをオンボードタイプとし、電圧モニタ出力に加えて電流モニタ

出力も搭載した製品を再選定した。また、電圧モニタ／電流モニタを効率的に Raspberry Pi に取り込めるように、18bit I²C 制御 A/D コンバータ MCP3424-E/SL(Microchip)を採用し、回路とプリント基板を大

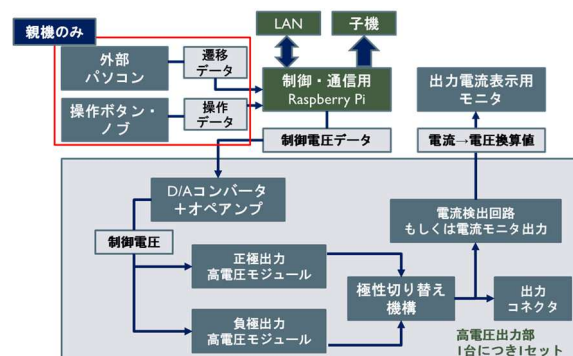


図 9 共同開発中のプログラマブル多出力高電圧電源のブロック図(Ver. 1.1)

幅に改訂した。

設計・製作したプリント基板を図 10 に示す。正負両極の高電圧モジュール HUR6-6P/HUR6-6N(いずれも松定プレジジョン)を各 1 台搭載し、高電圧制御という特質を考慮して十分な電氣的絶縁を行ないつつプリント基板を出来るだけ小型化できるよう配置配線を最適化した。

本稿執筆時点で、図 10 のプリント基板について、正負両極の入出力特性の概要を測定し、良好な直線性を示すことを確認した(図 11)。また、Raspberry Pi の I²C 通信を有効にして、SPI 通信で出力電圧を制御しつつ I²C 通信で電圧／電流モニタ出力を読み取り、いずれも良好な直線性を示すことを確認した。引き続き、詳細な入出力特性の測定と評価、読み取った電圧／電流モニタ出力から出力電圧／電流を算出するプログラムの開発、最大±6kV 耐圧を有する極性切り替え機構の開発、図 10 のプリント基板や図 5 の D/A コンバータモジュール、駆動用スイッチング電源を収納した EIA 規格 1U ラックケースの機構設計などを進めている。



図 10 共同開発中のプログラマブル多出力高電圧電源のプリント基板

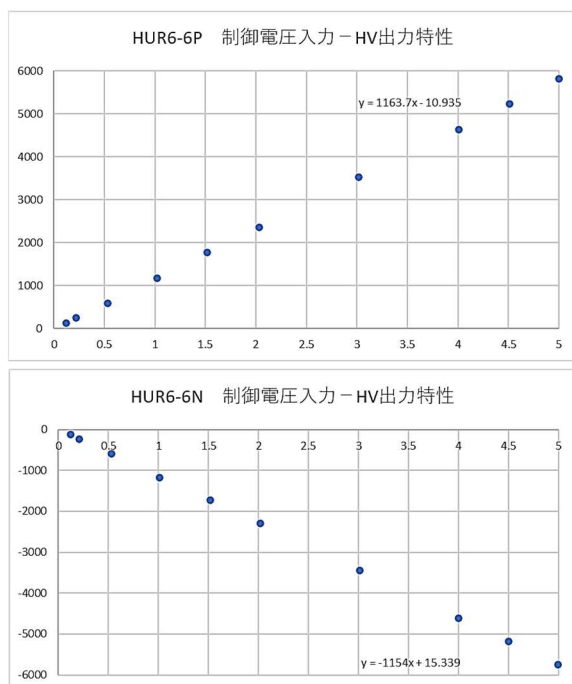


図 11 図 10 のプリント基板における
D/A 値－出力電圧特性の概要
(上：HUR6-6P／下：HUR6-6N)

5. まとめ並びに今後の展望－「組織や機関を超えた連携」の実効性－

D/A コンバータモジュールで生成した制御電圧を高電圧モジュールに入力することで、最大±5kV のデジタル制御を行ない、良好な直線性を示すことを確認した。将来の LAN を用いた遠隔制御を視野に入れ、Raspberry Pi で制御した。

極性切り替え機構との融合により、測定対象によって MCP などに印加する電圧の極性を切り替えつつ時系列で印加電圧を遷移できる柔軟な装置を構築できる見通しである。

近年、「組織や機関を超えた連携」が提唱されている。分子科学研究所では 1900 年代後半から受入技術研修制度を実施している。また筆者らは 2012 年から共同開発を進めて、特許 4 件の出願・査定^[6]を得た。特に、うち 3 件の特許に基づく汎用警報通知システムである WAN-WAN(Wireless Alert Network for Wide Area Notification)については、全国の大学・研究機関の協力の下、実証試験を行ない、市場展開を含めた展開を調査検討している。

本装置の開発は、受入技術研修制度と OPEN MIX LAB 事業という 2 つの制度と、10 年を超える共同開発で培われた分子科学研究所と岩手大学の関係性を融合して進められたものであると同時に、中堅・若手技術職員の交流と育成を図る目的も含まれている。

博士号取得者やそれを目指す技術職員が増加する中、「実験・研究／教育現場の課題を技術で解決する」ことは、技術職員の在り方の 1 つであると共に、博士号取得など技術職員のキャリアアップにおける基本的かつ重要な視点であると考ええる。各機関の技術職員組織の運営側がこの視点に立脚し、「組織や機関を超えた連携」をより実効性あるものにすることを期待する。

6. 謝辞

本装置の開発は 2025 年度自然科学研究機構 OPEN MIX LAB 事業(課題番号 OML052502)並びに 2016-2025 年度分子科学研究所所長奨励研究費の助成を受けたものである。

本装置の開発と OPEN MIX LAB 応募においては、山本浩史 分子科学研究所教授、繁政英治 分子科学研究所技術推進部長、古舘守通 技術専門員、藤崎聡美 第三技術室長／技術専門員、紺野亮 技術職員(以上、岩手大学理工学系技術部)に多大なご支援ご協力をいただいた。各位に深い感謝の意を表する。

参考・引用文献・特許情報

- [1] 一般社団法人 日本分析機器工業会.
- [2] 松定プレジジョン
- [3] 松定プレジジョン
- [4] DIGILENT、「Digilent Reference / Pmods」、https://digilent.com/reference/pmod/start?srsId=AfmBOoo2atb7sIeQh3zOFR9rGlx0ml_OFzt6Suxi3CyBPU07c12ocuIq (2025 年 2 月 14 日データ取得)
- [5] 豊田朋範他、「マイコン開発における Pmod インターフェースの採用と活用事例」、第 30 回静岡大学技術報告会報告集 静岡大学学術リポジトリ、p11-16、(2024 年).
- [6] 千葉寿、豊田朋範、古舘守通、藤崎聡美：特許第 7341426 号、特許第 7170260 号、特許第 6954530 号、特許 7090242 号