

EPICS 制御イオンポンプ電源の開発と進捗

DEVELOPMENT AND PROGRESS OF EPICS CONTROL ION PUMP POWER SUPPLY

路川徹也^{#, A)}, 山本将博^{B)}, 内山隆司^{B)}

Tetsuya Michikawa^{#, A)}, Masahiro Yamamoto^{B)}, Takashi Uchiyama^{B)}

^{A)} East Japan Institute of Technology Co., Ltd

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK

Abstract

Ion pumps are utilized extensively in large accelerators, such as storage rings, where ultra-high vacuum conditions are essential. However, due to the continuous application of high voltage by the power supply, frequent failures arise from issues like substrate moisture absorption, insulation failure due to dust infiltration from external sources, and corrosion. Especially in the case of equipment that has been in operation for many years, the frequency of failures increases, demanding significant costs, manpower, and time for repairs and maintenance. Additionally, external equipment control often relies on serial communication standards such as RS232C or RS485, necessitating a distinct control system. To address these challenges, we have implemented a hardware configuration designed for straightforward repair or replacement, even in the event of a breakdown. Moreover, we have integrated a single-board computer within the device, enabling remote control via Ethernet. This innovation allows for control via a web interface and EPICS, enhancing the ease of integration.

1. はじめに

蓄積リングなど大型で超高真空が必要とされる加速器では多数のイオンポンプが使用されているが、その電源は常時高圧をかけ続けるため、基板への吸湿、外部からの粉塵等による絶縁不良や腐食等で度々故障が発生する。

特に長年運用を続けてきた機器の場合、故障頻度が増え、その修理や保守には少なくないコストと時間を要するため、予備を常時十分保持しておくのが理想だが、そのためには金銭的な負担が増大する問題がある。

また、市販のイオンポンプ電源の多くは外部から制御するためのインターフェイスとして RS232C や RS485 等のシリアル制御が用いられることが多く、別途制御システムが必要なことが少なくない。

昨年に引き続き、これらの問題を緩和するため、壊れても修理や交換が容易なハードウェア構成にし、機器内にシングルボードコンピュータ(以下 SBC)を内蔵することで、Ethernet を使ったリモート制御を可能にしたシステムの量産試作機の開発を行った。

2. 量産試作機の開発目標

本開発の目標は、前回の試作機での実験結果から以下のようなものにした。

- 高圧電源モジュールは(株)東和計測の AKT シリーズ [1]1 mA の小出力電源を使用。
- 筐体辺りのチャンネル数を 4 チャンネルに増加。
- 19 インチラック仕様でサイズを高さ 3U に小型化。
- リモート制御を基本とし、出力電圧表示のみ追加。ローカル制御ボタンは付けない。
- 故障したチャンネルのみ交換可能。交換の際には全停止で活線挿抜はしない。

[#]hig-mchi@post.kek.co.jp

試作機の詳細に関しては、前回の発表[2]を参照。

下記の Fig. 1 に量産試作機の機能ブロック図を示す。

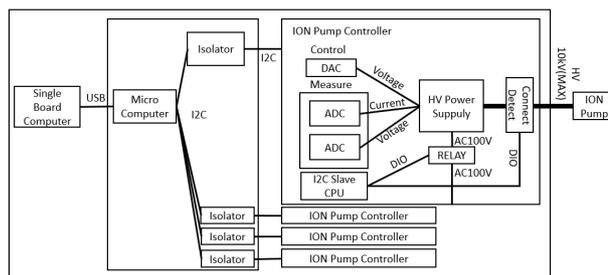


Figure 1: Mass production prototype, block diagram.

3. 試作機からの主な変更点

3.1 ハードウェア

今回作成した量産試作機は、昨年製作及び実働試験を行った試作機を元に多チャンネル化と小型化を行い、筐体辺りのチャンネル数を 2 から 4 に増やし、筐体の高さは 5U から 3U に小型化した。

小型化に伴い回路構成は大幅に変更することになったが、ADC/DAC 等の主要部品、アナログ回路の変更はない。また、シングルボードコンピュータも Nano Pi NEO から変更はしていない。

前回の試作機では、チャンネル毎にマイコンを搭載し、制御回路とアナログ回路が一体化していたが、量産試作機では制御回路とアナログ回路をそれぞれ制御基板とアナログ回路基板に分離し、アナログ回路基板をチャンネル毎にすることで、故障時の交換部品が少なくなるようにした。アナログ回路基板には高電圧電源モジュールも搭載するようにし、交換時の作業性向上も図った。

各アナログ回路基板の制御は全て I2C で行い、チャンネルの切り替えは I2C マルチプレクサを使うことで同一の

基板でも I2C アドレスを変更することなく使用できるようにした。

また、アナログ回路基板の AC リレー制御等の I/O 制御は、別途小型マイコン(ATTiny202)を搭載し I2C スレーブデバイスとして使用することで解決した。

その他、量産試作機を製作する上で追加した機能としては、

- 出力電圧表示用液晶パネルの追加
 - 出力コネクタ接続検出機能追加
 - 放熱用冷却ダクトの追加
- がある。

3.2 ソフトウェア

ソフトウェアは、多チャンネル化のためにマイコンのファームウェアと EPICS[3] IOC、WebIF それぞれ変更する必要があった。

マイコンのファームウェアは 4 チャンネル化に伴うチャンネル切り替え処理とデータ領域の追加、制御コマンドの変更、液晶パネルを追加したことによる表示処理の追加が主な変更となる。

EPICS IOC は、追加されたチャンネル分のレコード追加とファームウェアのコマンドが変更されたことによる処理の変更を行った。

WebIF は表示するチャンネルを増やすだけで対処できた。

3.3 試作機と量産試作機との機能差

試作機と量産試作機の機能差を以下の Table 1 に示す。

Table 1: Functional Differences Between Prototype and Mass Production Prototype

	試作機	試作量産機
チャンネル数	2	4
筐体サイズ	19inch ラック 5U	19inch ラック 3U
SBC	Nano Pi NEO	←
マイコン	ATMega328P x2	ATMega1284P x1
サブマイコン	なし	ATTiny202
フロントパネル	LED 表示	LCD 表示 LED 表示
冷却機構	自然空冷	冷却ファンによる 強制冷却
コネクタ 接続検出	なし	あり

4. 量産試作機

量産試作機は 2 台製作し、1 号機を運用して発生した問題点を 2 号機で修正する方法を取った。2 号機での実運用に問題が無ければ、1 号機も 2 号機と同様の改修を行う。

4.1 試験環境

製作後は一度テスト環境にて動作試験を行い、問題ないことを確認してから実運用試験を行った。

テスト環境は、イオンポンプが 1 台のみなので 1 チャンネル毎に接続して試験を行い、約 25°C に保たれた部屋で実施している。

実運用環境は、cERL 診断部のイオンポンプ 4 台を同時接続して、ERL 開発棟実験ホール内環境での実施となる。

4.2 1 号機

1 号機は当初、出力コネクタ接続検出回路と冷却ダクトを設置しない状態でテスト環境での試験を開始した。

量産試作機 1 号機の内部写真を Fig.2 に示す。写真は、冷却ダクトと出力コネクタ接続検出回路実装後のものである。



Figure 2: Inside the 1st mass production prototype.

4.3 高電圧電源モジュール温度対策

1 チャンネルのみで動作試験を行ったところ、高電圧電源モジュール表面において出力電圧 1 kV 辺り約 3°C の温度上昇がみられた。これは、試作機での測定値よりはるかに大きく、筐体内の機器密度が上がり、筐体の大きさも小さくなったために、筐体からの放熱が十分にされなくなっていることが原因と考えられる。筐体上部の蓋を開けても 1°C 程度しか温度の低下がなかったことから、自然放熱では温度を下げられないことが判明した。

通常、筐体内の温度を下げるには、筐体内にファンを設置して外気を取り込む方法が取られる。しかし、防塵の観点から筐体内に直接外気を取り込むのは好ましくない。そこで、筐体内に中空角型アルミダクトを設置し、ダクトに熱源である高電圧電源モジュールを接触させて放熱させる間接冷却を用いることにした。

冷却ダクトは筐体内部を横断するように設置することで 1 本の冷却ダクトで全チャンネルの高電圧電源モジュールに接触することが可能となるように設計した。冷却ファンは筐体の都合上 40 mm 角を使用し、冷却ダクトは 20x40 mm 2 mm 厚の中空角アルミパイプを使用した。筐体側面には吸排気用の穴を開け、ファンでの吸排気を行うように加工した。冷却ダクトの固定には 3D プリンタで出力したブロックを筐体側面内部に設置している。電源と冷却ダクト間は、放熱用シリコンシートを挟むことで密

着させている。

比較実験のために、冷却ダクトを設置せずにファンだけで冷却したデータも取得した。

下記に 7.5 kV 出力時の電源温度を Table 2 に示す。

Table 2: Power Supply Temperature at 7.5 kV Output of CH1

冷却方法	電源温度
冷却なし(密閉)	47°C
冷却なし(上蓋開放)	46°C
冷却ファンのみ	39°C
冷却ダクト+ファン	32°C

Table 2 に示すように冷却にはファンだけでなく冷却ダクトを設置したほうがより効果的なことがわかる。これによって防塵対策をしつつ、高電圧電源モジュールの温度を下げる事ができた。

4.4 問題点

このように高電圧電源モジュールの温度を下げることはできたが、7.5 kV 出力を 4 台同時運転で行くと、外気温に対して 30°Cの上昇となり、高電圧電源モジュールに接着している 60°C切断/50°C復帰のサーモスタット(八光電機 TH56060)が動作する温度に容易に達してしまうことになる。

また、冷却ダクトと電源の隙間は、電源の重量による筐体内底板の歪みや電源自体の機械的な高さ誤差を放熱用シリコンシートによって吸収する形になっている。これによりシリコンシートを複数枚重ねている箇所があり、熱伝導が悪化していると考えられる。

これらの問題点を踏まえて、2 号機を製作する際には、

- 冷却ダクトの大型化
- 冷却ダクトと電源を密着させるための底板の補強と押さえの追加を行うことにした。

4.5 出力コネクタ接続検出回路

もう一つの課題として、イオンポンプとのケーブルが接続していない状態でも出力可能となる問題があった。

メーカー製イオンポンプ電源は、高電圧を不用意に出力させないようにする安全装置として、コネクタ接続チェック機能が装備されていることが多いが、以前作成した試験機には実装していなかった。量産試作機でも当初は実装していなかったが、必要性が高いと判断し 1 号機テスト環境での動作試験中に追加した。

今回実装した検出回路は、高電圧コネクタジャックを 3D プリンタで作成した絶縁スペーサーで筐体から絶縁し、プラグ挿入時にコネクタシェルが GND 接地されると出力リレーが操作可能になるように回路を作成した。また、電圧出力時にプラグが抜去されると自動的にリレー OFF と出力電圧が 0 V に設定されるようにしてある。

但し、高電圧コネクタジャックのシェル GND 側に配線するためのラグ板が既製品にないため、銅箔板を自身で加工した部品を別途製作して使用している。量産の際には、この部品も別途特注する必要がある。

4.6 1号機での実運用試験

2号機製作のデータ取得のために、1号機での実運用試験を cERL 診断部で約 1.5 ヶ月実施した。

設置当初は 4CH の配線ミスによって 4CH が使用不可となり、3 チャンネルでの運用開始となったが、後日修正を行い最終的には 4 チャンネル全て動作するようになった。

設置後に使用可能な全チャンネルを 7.5 kV に設定して運転したところ、そのうち 1 チャンネルでサーモスタットが動作する温度に達したようで、30 分程度出力電圧が 0 V になる状態が発生した。その後、電源の出力が 1 チャンネル減ったことで温度が低下し、サーモスタットが復帰した段階で出力が再開されている。

その履歴を Fig. 3 に示す。

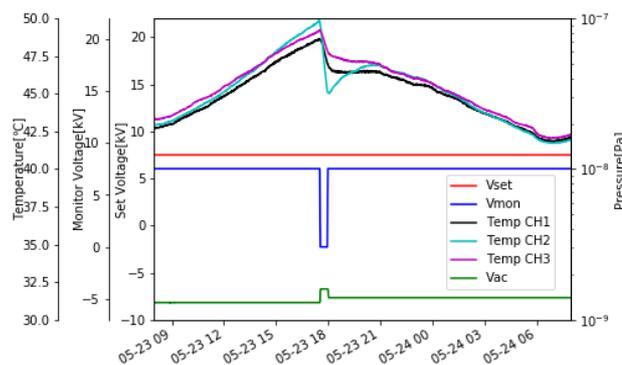


Figure 3: 1st mass production prototype thermostat operation history (2024/5/23~2024/5/24).

電源の設置場所は ERL 開発棟ホール内で、温度管理されておらず、気温が屋外と大差のない場所のため、外気温による影響が大きい。実運用試験中、気温が高い日が多くあったが、出力電圧を 5 kV に落とすことでサーモスタットが動作しないように対策していた。それでも、高電圧電源モジュール温度が 49°C になることがあったため、サーキュレーターで外部から強制冷却し、全体的に約 4°C 温度を下げる事ができた。

サーキュレーター設置後は、安定して連続運転が続けられている。

実運用試験中の CH1 の履歴を Fig. 4 に示す。

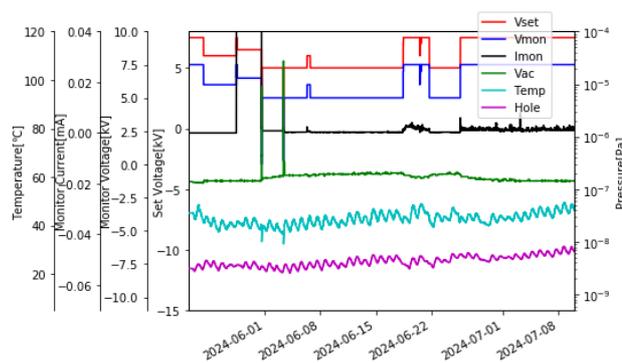


Figure 4: 1st mass production prototype Continuous operation history (2024/5/23~2025/7/10).

4.7 2号機

1号機の冷却機構では不十分と考え、2号機では以下のような変更を加えた。

- 冷却ダクトを 20x40 mm から 30x20 mm 3 本 (30x60 mm) に変更。
- 風量増加のためにファンを 2 つに増強。
- 筐体底板裏側に 10x12 mm コの字型アルミアングルを 2 本配置し、冷却ダクトから吊り上げることで、冷却ダクトと高電圧電源モジュールとの隙間を均一にし、放熱用シリコンシートの使用量を少なくする。

これによって、テスト環境では 1 チャンネル辺り 1.5°C の温度低下がみられた。

テスト環境での動作確認が終了後、実運用環境に移行して運用試験を開始した。

2号機の実運用試験中の CH1 の履歴を Fig. 5 に示す。

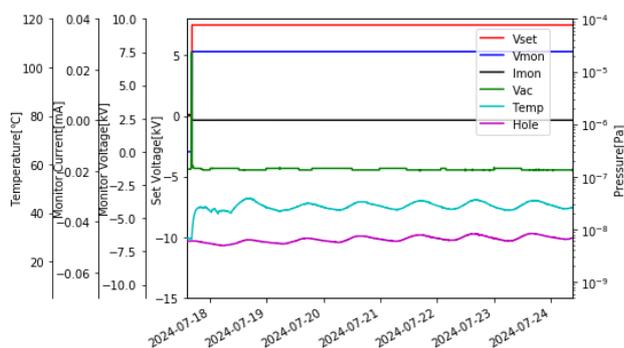


Figure 5: 2nd mass production prototype Continuous operation history (2024/7/17~2025/7/24).

1号機では、出力電圧を 7.5 kV と 5 kV に分けて設定していたが、2号機では全チャンネルの出力電圧を 7.5 kV にしている。2号機へ変更した結果、外気温差と出力電圧の関係は 16°C/25 kV から 13°C/30 kV へと大きな改善がみられた。

以下に量産試作機 2号機の内部写真 Fig. 6 と外装写真 Fig. 7 に示す。



Figure 6: Inside the 2nd mass production prototype.



Figure 7: Outside the 2nd mass production prototype.

通常イオンポンプ電源の設置場所は空調管理された部屋である場合がほとんどなので、本実験の様に機器温度に神経質になる必要はない。

5. 今後の計画

5.1 量産機の製造

更なる長期運転で問題がないことが確認できれば、量産機の製作を行う予定となっている。

製造は年間 2~3 台程度を予定しており、外注するほどの量ではないと想定している。

今後、量産機製作時に発生する作業として、

- 量産用基板の作成
 - 製造仕様書の作成
 - 基板動作テスト環境の構築
 - ソフトウェアインストール環境の構築
- 等が考えられる。

5.2 大電流出力機の製作

現在製作している小電流出力イオンポンプ電源は常時可動することを前提とした装置だが、低真空や立ち上げ時、実験等で使用する要望が出てきたため、1チャンネルで大電流出力可能な機器を設計中である。

高電圧電源モジュールは同一メーカーの電流が 15 mA 出力可能なものを使用し、制御回路等はほぼ同じものを使用するが、基板は専用のものを製作する。

この電源は量産機とは異なり、ネットワーク接続が無くても単体動作する必要があるため、制御パネルからの各種設定が可能となるように設計している。また、量産機と同様にネットワークからも設定/モニターも可能となる。

大電流出力イオンポンプ電源の完成予想図を Fig. 8 に示す。

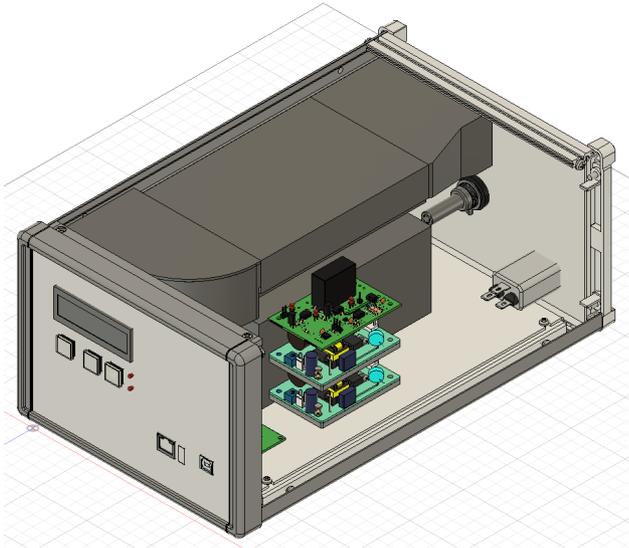


Figure 8: High current output ion pump power supply concept diagram.

6. まとめ

4 チャンネル同時使用可能な量産試作機を製作し、実運用上も特に問題なく運用可能なことが確認できた。また、今回製作した回路を発展させ大電流版等のバージョンも予定している。

今後は量産に向けて開発を続けていく予定である。

参考文献

- [1] 株式会社計測 AKT シリーズ,
<http://www.touwakeisoku.co.jp/kt.html>
- [2] Michikawa, T., Yamamoto, M., Uchiyama T. Development of Epics Control Ion Pump Power Supply Proc. Ann. Mtg Part. Accel. Soc. Jpn. 2023, 567 (2023).
- [3] Experimental Physics and Industrial Control System,
<http://www.aps.anl.gov/epics/>