

イオン注入機の故障と対応策

伊藤 暢晃

ナノマテリアルテクノロジーセンター

概要

本学にはクリーンルーム内にイオン注入機があり、基本的には全ての運用を私が行っている。2014年度はこの装置で異常が発生したが、再現性が悪くて業者に来てもらって見ていただいても対策が打てず、異常が起きた際は現場で手探り状態の対応をすることになった。最終的な原因は今でも掴めず、メーカー側も原因を推定しながら決定打がない状態である。つまりこの報告は結論のないものではあるが、ここまでの苦闘の歴史を纏めることにした。

1 装置概要

右の図1に本学イオン注入機の概略図を示す。左下に表記した赤黄色がフィラメントで、この付近でガス源、粉末源、スパッタ源のいずれかの方式で発生させたプラズマを加速させ、緑色で表記したイオンビームにする。イオンビームはイオン源部分で第一段の加速を受け(①と表記)、扇形の質量分析マグネットを通る。ここで必要な元素のみを取り出すように磁場を調整し、第二段の加速器(②と表記)へ送る。合計2段の加速を受けたイオンビームは青色で表記されたターゲットに当たり、イオン注入が行われる。

加速が2段階に分かれているのは、質量分析のためである。基本的に1段目の加速を30kVに固定して、2段目の加速で必要なエネルギーまで再加速させるようにしている。こうしておけば現実の質量分析マグネットの値(1段目の加速量によって変動する)が安定し、一貫性のある元素選択ができるからである。

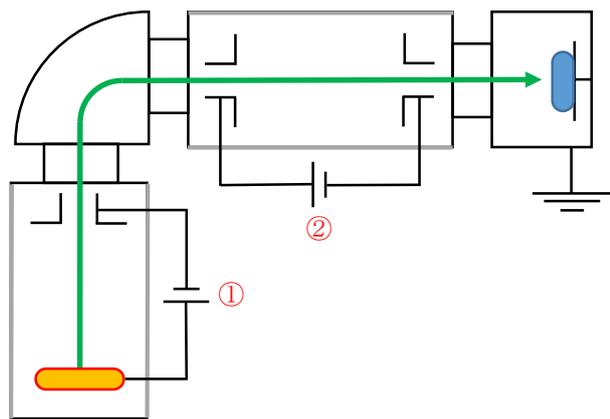


図1. イオン注入機の概略図。赤黄はフィラメント、緑はビームライン、青はターゲットを示す。①と②は2段ある加速器部分を示す。間にある扇形は質量分析マグネットで、必要なイオン種のみを取り出すためにある。ターゲットはアースされており、イオン源側が高電圧電位になる仕組み。(絶縁の仕組みやマグネットの一部は省略。)



図2. イオン注入機の全体写真(ターゲット側から) 左側の黒い部分が操作盤、右の銀色の部分がターゲットチェンバー、下の白い台の中に真空ポンプ、コンパートメントの奥にイオン源と加速器がある。この写真の構図を図1で表すと、右側から左を向いている形になる。

2 故障の発生

故障は2014年6月13日（金）という、ホラー映画に出てきそうな縁起の悪い日に起こった。この日は通常のイオン注入として30keVの注入（1段目で30keV、2段目は電源投入のみで加速させず）を行い、次に50keVの注入（1段目は30keV、2段目が20keVで合計50keV）を行う予定だった。

ところが50keVに昇圧させようと、図2の左側と図3で示す操作盤で指示を出してもエネルギー表示が変化せず、かといってインターロックは何も異常を出していないまま、何も出来なくなった。

操作盤の異常（PCで言うフリーズ）を疑って操作盤をリセットしたが状況は変わらず、最後は電源ブレーカを入れ直して最初からやり直しても同じだった。打つ手が無いので装置メーカーに相談したところ、以下のような指示が下りてきた。

- 操作盤の異常か、実際に昇圧している電源箱の異常なのかを分けるため、電源箱まで行って手動で昇圧ツマミを操作すること。
- ただし、昇圧させすぎると壊れるので、細心の注意を払ってごく僅かに動かすこと。

電源箱があるのはイオン注入機の筐体の中で、図1で表すと、高電圧がかかるイオンビームライン(②と表記)のすぐ下である。イオン源付近はドアにインターロックが装着されており、開けるだけで高電圧が掛からなくなる仕組みなのだが、この場所は幸いにもインターロックが装備されておらず、手を入れることが出来た。そして2番目の「ごく僅かに」という指示に従って1/10回転ほど回したところ、電圧計に変化は見られなかった。これを根拠として電源箱の異常が疑われ、電源箱の下請けメーカーに送ることになった。

3 下請けメーカーへの搬送と検査結果。

電源箱は最大170kVを発揮する直流電源であり、素人がおそれと検査できる種類のものではない。よって電源箱はイオン注入機のメーカーへ納品した下請けメーカーで検査してもらう以外に打つ手はなかった。しかし、この箱の中にはトランスが入っているためとても重く、推定80kgくらいあった。幸いにもキャスターが装着されていたが、ちょっとした段差（図4の下側に写っている装置内の敷居など）でも難儀した。特に設置場所の都合からガスと冷却水の配管を飛び越える必要があり、非常に苦労した。

更に困ったのは下請けメーカーへ送る方法である。一般的に使われる宅配便は全て重量制限を越えていたため断られ、メーカーが推奨するような木箱も本学では手に入らなかった。最終的には日本通運の引越し便とし



図3. 操作盤のエネルギー表示部。下の「エネルギー設定」に数字を入れると自動でエネルギー値が上がって行くはずだった。写真では30keV以下に出来ないため、0keV設定でも30keVとなっている。



図4. 電源箱。2つ見えるメータは電圧と電流。手動で回したツマミは中央左に見える黒色の四角の中にある銀色のもの。

てケージに入れて送ってもらった。

下請けメーカーに送られてからも、期待していたほど直ぐには検査をしてもらえなかった。メーカーの担当者が言うには「170kVを検査できる施設は限られており、それが現在は生産ラインの方に回っている。ラインが止まるまで検査は出来ない」ということだった。このため一ヶ月以上待たされて、本学内では「別の電源箱を購入すべき」などの意見が噴出してきた。最終的に折衷案として「代役の電源箱を送ってもらい、同時に本学の電源箱を検査してもらう。本学の電源箱が壊れていて修理不能の場合はそのまま代役を購入する。本学の電源箱が軽微な故障で済むならば再び電源箱を入れ替える」というプランを提案し、実行寸前まで行ったところで検査結果が出た。

検査結果は「異常なし」だった。また同下請けメーカーが心配していた冷却ファンやコンデンサの劣化も、設置場所がクリーンルーム内ということもあって酷くはない状態だった。結果的に検査だけを受けた本学の電源箱は、木箱に詰められて帰ってきた。



図 5. ケージに入れられて「引越し便」として運ばれる電源箱の姿。

4 イオン注入機メーカーのサービスマンによる検査

戻ってきた電源箱を再びイオン注入機に取り付け、テストを行った。すると奇妙なことに問題なく動いた。しかし一度だけ新たな問題が発生した。昇圧自体は行われるのだが、昇圧中にエラーコードを出して止まってしまうのだ。この結果は本学上層の先生方をかなり疑心暗鬼にさせてしまったため、イオン注入機メーカーのサービスマンを呼んで、本格的な検査をしていただくことになった。

検査は8月22日に行われた。日程はサービスマンの都合によるものだったが、不幸なことに私は先に予定されていた研修と重なってしまい、不在となった。代役として堀田准教授に不具合事象を伝えて対応していただくことになった。また他の大小様々な不具合も纏めて見ていただくことにした。

検査結果は以下の通り。

- ① 加速電源で電圧がかからなくなる → 再現性がなく発生しなかった。
- ② 加速はするが、インターロックが働いて昇圧できなくなることがある → 加速エネルギーを確認するため、内部で信号を二重化してその差を検知している。この差が±5%を超えるとインターロックが働く。今回電源箱を送った際に調整ゲインが変わってしまったようで、それが理由と思われる。先の電圧がかからなくなる異常とは別の問題。再調整を行っていただいた（後に再発、詳しくは後述）。
- ③ オシロスコープ（細いイオンビームを面状の試料に均一に当てるため、上下左右に振る走査を行っている。その走査状況の確認用）が時折落ちる。別のオシロスコープに分岐させても同様の結果になる。→ 再現性がなく発生しなかった。
- ④ プラズマ源ガスの流量調整バルブ、イオン源直後のゲートバルブの機能低下 → 確認できた。
- ⑤ ビームを左右に振る調整マグネットが動かない【新規で分かった不具合】

結果として②と⑤が収穫ではあったものの、動くお墨付きを得た以外にはあまり大きな進歩はなかった。しかしいつまでもイオン注入機を止めておくわけにも行かないので、装置の運用再開が宣言された。

5 不具合の再発生と対処法

運用再開の後、月に1回～2回程度の頻度でありながらも、数ヶ月間は不具合なく運転をすることができた。しかし12月の運転時に、再び同様に加速しなくなる症状が発生した。

このときは、事前に考えておいた&数ヶ月間の運転時に状況を確認しながら構想を練っておいた対策法を投入して事なきを得た。

その対策法の説明として、まず操作盤の仕組みを説明する必要がある。運転時に操作を行う操作盤(図3)はあくまでも指令を出しているだけで、実際に高電圧を発生しているのは電源箱(図4)である。つまり電源箱をローカルで動かして高電圧を発生させることにすれば、先のメーカー送りの調査結果でも電源箱に不具合はないはずなので、問題なく使えるはずである。ただし指令系統が異なるので同じ電圧値に調整できるのか、またはその値を客観的に確認できるのかが課題になる。そこで以下のように運用した。

運転再開後の問題なく動いた期間のうちに、電圧調整ツマミ(図4、ポテンショメータが内蔵されており、電圧変化によって遠隔操作でもツマミ自体が回転する)の回転量を読んでおいた。

- i. 加速しない症状(上述の不具合検査①)が発生した場合、第一段の手法として「電圧調整ツマミを手動で少しだけ」動かした。これによりツマミは0位置ではなくなってしまうものの、何らかの接触不良を避けられるらしく、動き出す場合もある。ただし本レポート2ページ目にある6月の不具合時の話で「たくさん動かすと壊れる」とあるように、動かすのはほんの少し(数kV分)だけである。これである程度の場合には動かせるようになったが、今度は操作盤側でエネルギー量異常のエラーコードが働くこと(上述の不具合検査②)もあった。
- ii. どうやっても動き出さない(不具合検査①が上述のiで解消されない)、または上述のエラーコードが働いてしまう(不具合検査②)場合、第二段の手法として完全マニュアル操作を行った。簡単に言えば電源箱をローカルにして、手動でツマミを回すのである。回転量は先に読んでおいた値を使い、またエネルギー表示の値を見て確認を行った。メーカーの方に相談したところ、このエネルギー表示は手動操作でも独立して動いているため、通常のオートマチックと同じように信頼できる値を出すとのことだった。また注入サンプルの方からも、通常の運転と同じ結果になっていることが確認された。さらにこのレポートを書いている時点までに数回この操作を行ったが、手動ツマミの回転量には一貫した値が出てきている。これは結果として操作方法が煩雑になったものの、装置は運用可能な状態を維持していると言えるだろう。

6 まとめ

問題の原因はまだ掴めておらず、異常は時折発生している。しかし上述の対処法もあって運用は切らさずに行うことができるようになった。その後も引き続き、主原因となっているものが分かり次第手を打てるようにと、装置メーカーの方とは連絡を取り合いながら状況を確認している。

本学のイオン注入装置は納入後20年以上が経過しており、最終オーバーホールからも15年近く経っている。その意味ではある程度の不具合発生は仕方ないと理解しているが、今後もできる限りの手を尽くして良好なコンディションを維持していきたいと考えている。