

インバーター制御多段式ルーツ型真空ポンプのノイズ対策

COUNTERMEASURES AGAINST NOISE OF INVERTER-CONTROLLED MULTI-STAGE ROOT PUMPS IN J-PARC LINAC BEAM DUMP

小林史憲^{#, A)}, 神谷潤一郎^{A)}, 守屋克洋^{A)}, 宮尾智章^{B)}, 古徳博文^{C)}, 高野一弘^{C)}
Fuminori Kobayashi^{#, A)}, Junichiro Kamiya^{A)}, Katsuhiko Moriya^{A)}, Tomoaki Miyao^{B)},
Hirofumi Kotoku^{C)}, Kazuhiro Takano^{C)}

^{A)} J-PARC/JAEA

^{B)} KEK

^{C)} ULVAC. TECHNO, LTD.

Abstract

The L3BT beamline at J-PARC LINAC has beam dumps connected via vacuum partition windows to separate the ultra-high vacuum beamline from the low vacuum beam dumps. Roots pumps are used to evacuate each beam dump. The roots pump controllers have been installed away from the pump in the accelerator tunnel to avoid radiation damages. The special controllers, which have no inverter circuit inside, have been used to reduce the electrical noise on the beam loss monitors nearby. However, in this case, several problems have occurred such as the instability of the pumping performance. To solve such problems, the roots pump controller with the inverter circuit must be used after reducing the electrical noise. In this report, some countermeasures to reduce the electrical noise from the inverters were investigated. The noise reduction circuit was successfully optimized to the level where the beam loss monitors work unaffected.

1. はじめに

J-PARC LINAC において 400 MeV まで加速されたビームを RCS(3 GeV rapid cycling synchrotron)まで輸送するビームラインは L3BT(linac to 3 GeV RCS beam transportation line)と呼ばれている[1]。L3BT は LINAC ビームラインに対して 0 度、30 度、90 度、100 度の位置にビームダンプが設置されており、ビーム負荷によってダンプ素材(J-PARCLINAC では黒鉛を使用)からアウトガスが発生する為、 10^{-7} Pa の高真空が要求されるビームラインとは真空仕切り窓を介して接続される。それぞれのビームダンプはビームラインほど高真空を要求しない為、排気系としてルーツポンプが使用されている。LINAC 系統 L3BT セクションのビームラインの真空排気系統位置及び 0 度、30 度ビームダンプ近辺のモニター位置を図 1 に示す。

これらのルーツポンプのコントローラーは放射線の影響による故障を防ぐために、ポンプ本体から 100 m 程度離れた位置に設置されている。これまで、インバーターを使用したルーツポンプコントローラーから発生するノイズにより、ビームモニターの信号が見えなくなる範囲がありビームコミッショニングに支障があった。その為、コントローラーからインバーターを取外した特殊仕様のコントローラーを使用してきた。しかしこの場合、到達真空圧力のばらつきやポンプ性能の劣化による故障等の不具合が発生していた。ルーツポンプコントローラーのインバーターに対し、各種フィルター、ケーブル種を調査し、最適なノイズ対策を実施することで、ビームモニターに影響を与えないレベルまでノイズを低減できたので、ここに報告する。

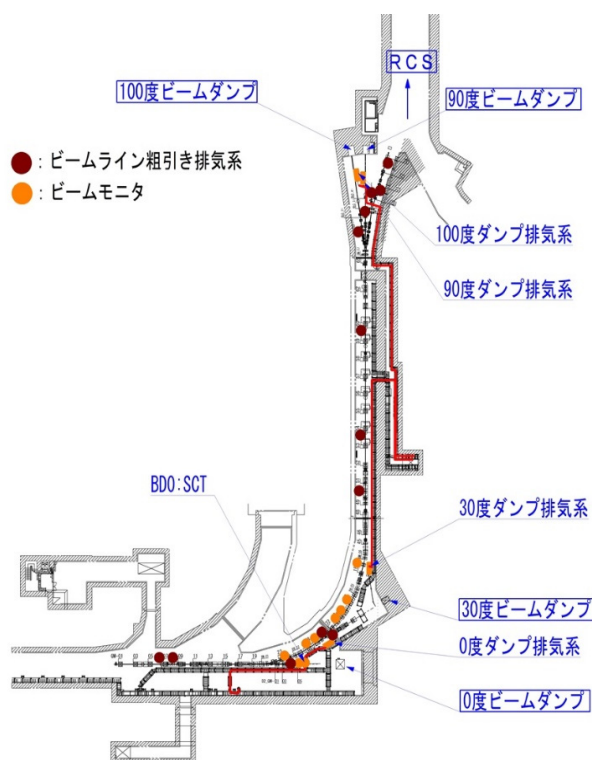


図 1: J-PARC LINAC L3BT 配置図。

2. 多段式ルーツ型真空ポンプ

2.1 ルーツポンプの構造概要

J-PARC LINAC において使用しているルーツポンプは一般には多段ルーツ型真空ドライポンプと称されるものである。ルーツポンプは、ケーシングと 2 つのタイミング

[#] kobayashi.fuminori@jaea.go.jp

ギヤーで連結されたローターから成り、それぞれ非接触で動作する体積移送式のポンプである。真空ポンプの動作は、ローターとケーシングが最小で 0.03 mm の隙間を保ちながらガスを吸気口から排気口に連続移送することで吸気側圧力を低下させるものである。図 2 に製造メーカーの一家であるアルバック機工株式会社のホームページの説明図を示す[2]。

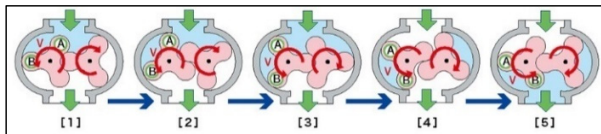


図 2: ルーツポンプの動作原理(引用:アルバック機工株式会社[2])。

2.2 ルーツポンプコントローラー

LINAC 加速器トンネルに設置するポンプは、ポンプに内蔵される制御回路では放射線の影響により誤動作や故障の原因となる可能性があるため、制御回路を 100m 程度離れた放射線の影響のない電源室等へ別置きする長尺ケーブル対応の特殊仕様である。図 3 に L3BT 用第一世代ルーツポンプコントローラーの回路図、図 4 に L3BT 用第二世代ルーツポンプコントローラーの回路図を示す。

第一世代コントローラーは、3 相 AC200V の電力を使用し、インバーターを内蔵した構成となっていたが、電気ノイズが周辺のビームモニタの信号を見えなくしてしまう問題により、インバーターを撤去し電磁開閉器へ変更し現在に至っていた。

第二世代コントローラーの制御回路については、3 相 AC200V の電力を使用し、インバーターを内蔵した構成となっている。

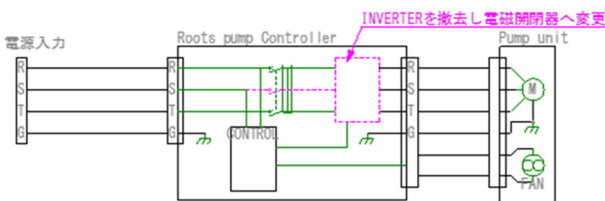


図 3: 第一世代コントローラーの回路図。

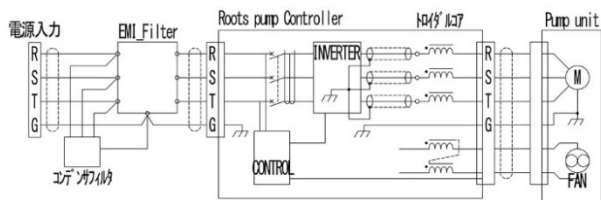


図 4: 第二世代コントローラーの回路図。

図 5 に第二世代コントローラーのルーツポンプ運転時におけるビームモニタの電圧波形とポンプ停止時のバックグラウンドの波形を示す。ポンプ運転時にはインバーターから発生した電気ノイズが顕著に認められる。測定した信号は、図 1 に BD0:SCT として示したビーム電流モニタのものである。

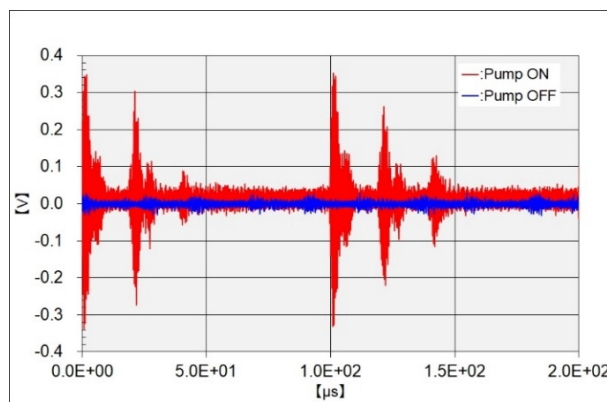


図 5: ビーム電流モニタの電圧波形比較。

2.3 第一世代ルーツポンプでの問題点

表 1 に第一世代ルーツポンプのオフラインでの圧力特性データを示す。ルーツポンプは No.1~7 まで 7 台の測定をおこない、測定結果、インバーターを使用しないコントローラーのルーツポンプは、オフライン試験による圧力性能確認において、起動後 5 分で 60 Pa~640 Pa と個体差が大きく確認されており時間が経過するとともに圧力の上昇が発生した。図 6 に 30 度ビームダンプでのトラブル事例を示す。この例では、ポンプ設置後 230 Pa までしか圧力が下がらずポンプの再交換を行い 50 Pa まで排気したが、時間経過と共に 130 Pa まで上昇し再度交換となった。

表1: 第一世代コントローラーでのルーツポンプのオフライン圧力特性データ

時間	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
0:00							
0:05	640	110	360	136	235	60.7	93.4
0:10	640	142	360	152	242	71.4	99.7
0:15		120		200	255	76.7	103
0:20		129		156	286	80.0	105
0:25				183		88.0	107
0:30				193		80.5	106
0:35						89.6	104
0:40						98.5	

単位: Pa

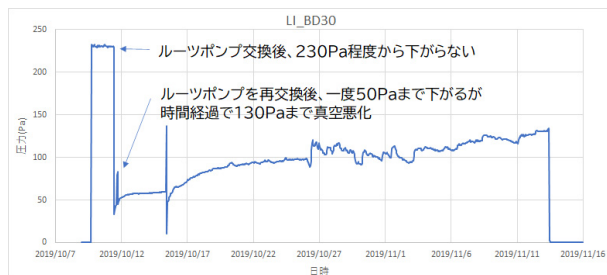


図 6: 30 度ビームダンプでのトラブル事例。

ルーツポンプはケーシングとローターを最小 0.03 mm の隙間で精度よく制御する必要があるため、第一世代のインバーターで制御していないルーツポンプでは、到達

圧力のばらつきやポンプ性能の劣化による故障が発生し、メーカーによるポンプ保守を行っても交換の頻度が高いことが問題となっていた。

3. ノイズ対策実施の効果の確認

3.1 コントローラー入力側への対策と効果の確認

ルーツポンプコントローラーの回路図を見ると、第一世代、第二世代いずれもコントローラー内にフィルター等のノイズ低減フィルターが入っていないことが解る。ノイズの発生源は機器構成からルーツポンプコントローラー内のインバーター制御ユニットと推定していた。第一世代コントローラーはインバーターを電磁開閉器に置き換えることでノイズ対策としていたが、先に述べた問題点が発生していた。第二世代コントローラーではインバーターから発生するノイズについて対策をすることとした。コントローラー内のインバーターから発生したノイズは供給電源側を経由しての同一電源系統に接続された他の機器への混入があることから、初めに入力電源系の調査を実施した。まずは実験室でルーツポンプと第二世代コントローラーを用いて調査を実施し、ノイズ低減手法にめどを立てた。そのうえで加速器運転休止期間中に実際にビームダンプの排気系に接続してビームモニタへの影響調査を実施した。

3.2 実験室での効果の確認

実験室にてルーツポンプ停止時と運転時の電源電圧をオシロスコープにて観測した。図 7 に電圧測定位置を示す。各種フィルターの実験を行うにあたりフィルターを取り付けない状態でのルーツポンプ停止時と運転時の波形を測定した。図 8 に比較した電源電圧データを示す。

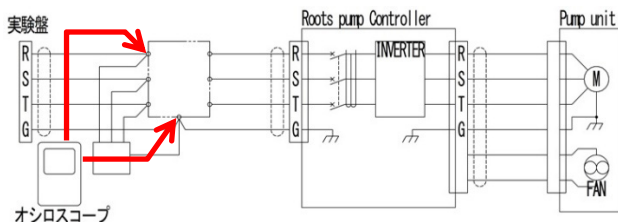


図 7: 電源電圧測定位置。

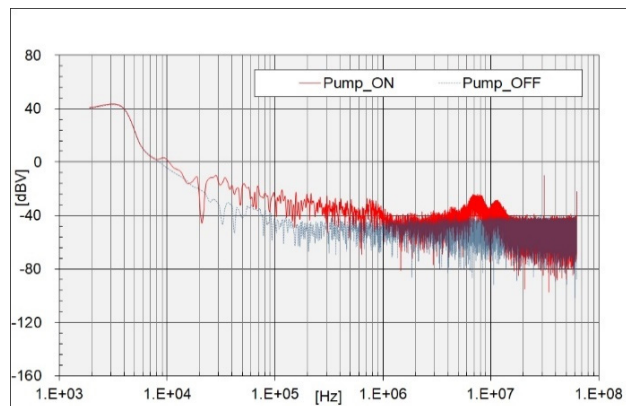


図 8: フィルター無し状態ノイズ比較。

図 8 に示すようにルーツポンプ停止状態に比較し運転時に 7 MHz~15 MHz の範囲で最大 20 dBV のノイズ上

昇が顕著であった。また、同様に 20 kHz から 1 MHz の範囲にでも最大 25 dBV の上昇が観察された。

各種組合せを含め試験した結果、第二世代ポンプコントローラーでは EMI フィルター+コンデンサタイプフィルター(図 9)と RFI フィルター+コンデンサタイプフィルター(図 10)のそれぞれの組合せで良好な結果が得られた。ただし、コンデンサタイプフィルターの取付ける位置は、フィルターの一次側である。

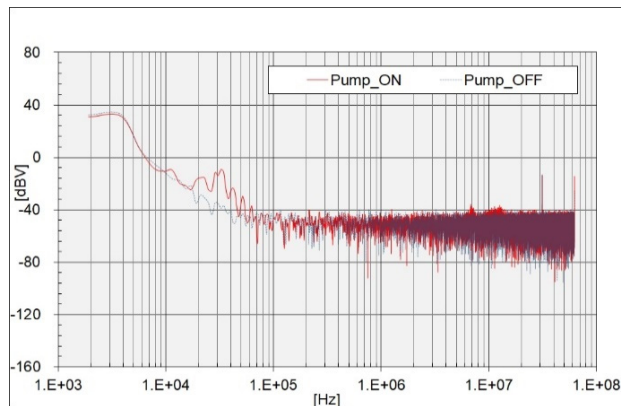


図 9: EMI フィルター+コンデンサタイプフィルターノイズ比較。

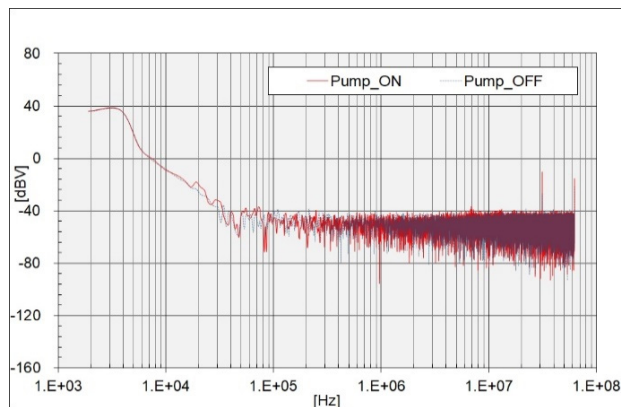


図 10: RFI フィルター+コンデンサタイプフィルターノイズ比較。

3.3 0度ビームダンプでの対策効果の確認

コントローラー供給電源側のノイズ対策の効果確認をインバーター搭載の第二世代コントローラーで 0 度ビームダンプの排気系に接続してビームモニタへの影響調査を実施した。

コントローラー供給電源側にフィルターを組み込んだ際、RFI フィルター+コンデンサタイプフィルター(図 10)の組合せの場合に上位側漏電遮断器が作動した。EMI フィルター+コンデンサタイプフィルター(図 9)の組合せでは漏電遮断器は作動しなかったため、RFI フィルターのリーク電流が大きいようである。このため、以後の試験はすべて EMI フィルター+コンデンサタイプフィルターを採用した。

図 11 にコントローラー供給電源側に EMI フィルター+コンデンサタイプフィルターを挿入した状態でのビームモニタの電圧波形を示す。測定した信号は、図 1 に

BD0:SCTとして示した電流モニターのものである。フィルタを取り付けない状態での測定結果と比較して、ノイズの低減効果は認められたが、ビームモニタに影響を与えないレベルへの低減には至らなかった為、コントローラ出力側の対策も行うこととした。

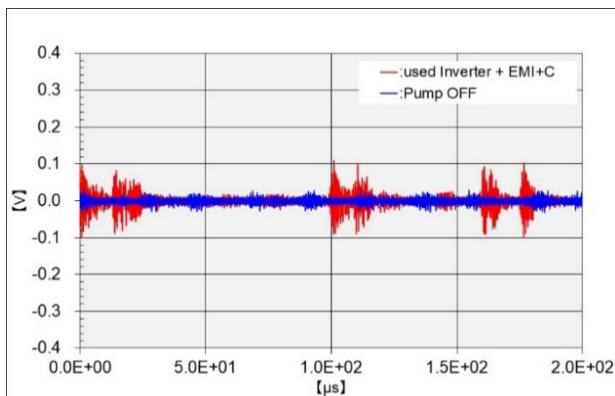


図 11: ビームモニタの電圧波形比較。

3.4 コントローラ出力側の対策

コントローラ出力側への対策は、まず実験室にて予備品のビームモニターセンサー、ビームモニター電源、DC アンプ等を使用し、トンネル内のモニター使用環境を再現し行った。トロイダルコアを用いたローパスフィルタはインバータ出力側の各相に直列に挿入した。実験室での試験状況を図 12 に、試験回路図を図 13 に示す。

ケーブルをコアに通す際に、ターン数の変更やケーブルを重ねて巻いたり、コア数を増やす等様々なパターン

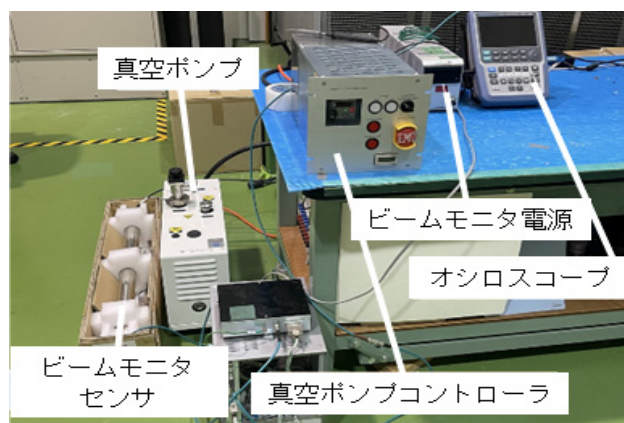


図 12: 実験室での試験状況。

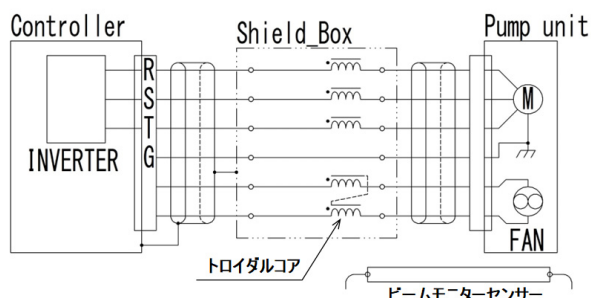


図 13: 実験室での試験回路。

で条件を変え実験を繰り返した。図 14 にトロイダルコアの事前確認データを示す。低周波数から高周波数までの全周波数範囲でのフィルタの効果が確認できた。

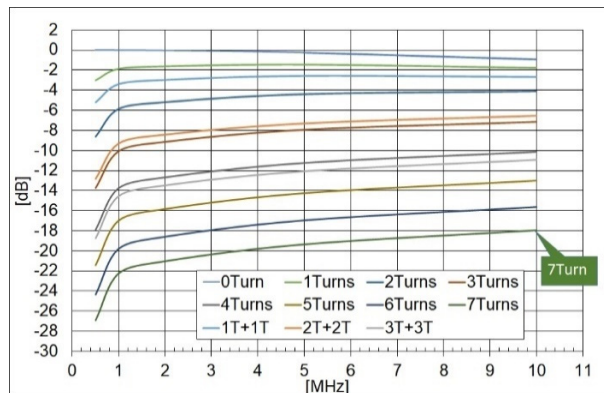


図 14: トロイダルコア通過ゲイン。

良好な結果が期待できそうな 7 ターンのトロイダルコアを各相に直列に挿入した構成でビームラインでの効果の確認行うこととした。

3.5 ビームラインでの対策効果の確認

ルーツポンプ用動力配線ケーブルのシールドケーブル化が完了している 0 度ビームダンプ排気系にフィルタを組込んだルーツポンプを設置し、ビームモニタのノイズ測定を実施した。

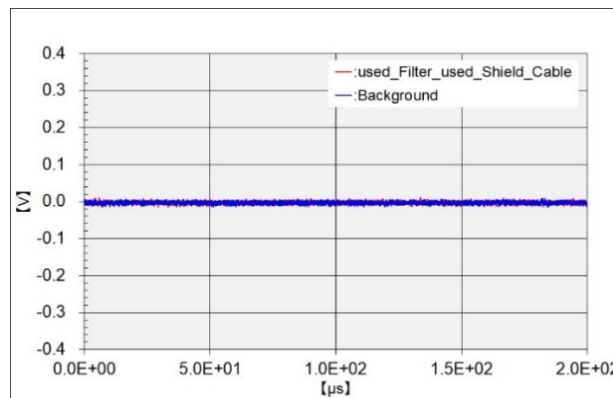


図 15: 加速器でのルーツポンプ運転時のフィルタ効果比較。

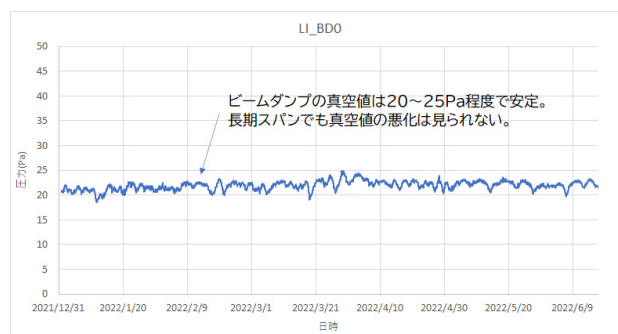


図 16: ルーツポンプ置換後の 0 度ビームダンプ圧力の推移。

測定結果、図 15 に示すようにノイズの影響が小さくなり、ビームモニタの出力がバックグラウンドレベルと差異がなく、対策の効果が確認できた。

また、排気性能が不安定であったインバーターを使用しないビームダンプ用ルーツポンプとの置換えを行った結果、図 16 に示すように真空値は 20~25 Pa で安定し、長期的にも真空度が悪化する事象は認められなくなった。

4. まとめ

J-PARC LINAC L3BT のビームライン真空排気系及びビームダンプ真空排気系には、ルーツポンプが使用されている。標準ルーツポンプはインバーターがルーツポンプコントローラー内に内蔵されており、3 相 AC200 V にてポンプを駆動している。このインバーター由来と考えられるノイズが各ビームラインのセクションに設置されたビームモニタの信号を見えなくしている為、余儀なくインバーターを外し 50 Hz の商用電源での運転を行ってきた。インバーター制御をしていないため、性能が不安定となりメーカーによるポンプ保守を行っても交換の頻度が高いことが問題となっていた。

第二世代のポンプへの交換を進めることとなり、コントローラー入出力両側にノイズ対策を実施しノイズ低減ができた。ノイズ低減対策としては、コントローラー入力側に対しては EMI フィルター及びコンデンサタイプフィルターを追加した。コントローラー出力側対策として、トロイダルコアをフィルターとしてコントローラーに内蔵する形状へ変更しノイズを低減することができた。また、ルーツポンプコントローラーからルーツポンプ間の出力側ケーブルをシールド化することによりノイズが低減された。よって、ビームモニタ波形へのノイズ影響を低減することができた。

参考文献

- [1] JAERI-Tech 99-56, JHF-99-3, and KEK Report, Japan Atomic Energy Research Institute, 1999.
- [2] アルバック機工株式会社, 多段ルーツ型ドライ真空ポンプ排気原理;
https://ulvac-kiko.com/support/vac06_pumping_dry.html