

## Slow Pumping & Venting System の開発

### DEVELOPMENT OF THE SLOW PUMPING & VENTING SYSTEM

阪井寛志<sup>#,A)</sup>, 梅森健成<sup>A)</sup>, 加古永治<sup>A)</sup>, 許斐太郎<sup>A)</sup>, 今田信一<sup>B)</sup>, 山田浩気<sup>B)</sup>,  
Hiroshi Sakai<sup>#,A)</sup>, Kensei Umemori<sup>A)</sup>, Eiji Kako<sup>A)</sup>, Taro Konomi<sup>A)</sup>, Shinichi Imada<sup>B)</sup>, Hiroki Yamada<sup>B)</sup>,  
<sup>A)</sup> KEK, <sup>B)</sup> NAT

#### Abstract

We usually encountered the degradation of the superconducting RF cavities on the cryomodule test even though the performance of these cavities was good on the vertical test. In reality, the degradation of Q-values of two cavities of cERL main-linac were observed after cryomodule assembly in KEK [1]. Some dust and invisible particles might enter the cavity and generate field emission during the assembly work and vacuum work under pumping and/or venting of the cavity. Field emission is the most important cause of this degradation. Slow pumping system allow us not to enter the particulate into the cavity during pumping and/or venting of the cavity. In this paper, we show the development work of this slow pumping & venting system and its performance by using the vacuum particle sensor.

#### 1. はじめに

超伝導空洞において、空洞内の微小な埃や異物の混入は、空洞内面からの電解放出(Field emission)を誘起し、大量の放射線を発生させ、性能劣化を引き起こす原因となる。これらの埃混入を回避するために、これまでに縦測定と呼ばれる空洞単体の性能評価試験では、ISO class 4 以上のクリーン度を持つクリーンルーム内で空洞表面処理及び空洞の組み立て作業を行い、ゴミ混入の回避に対して細心の注意をしており、縦測定で 35 MV/m 以上の高い加速勾配を持つ空洞性能を実現してきた。これらの空洞の性能を、加速器としてビームラインに組込む際は超伝導空洞をクライオモジュールと呼ばれる断熱槽に入れる必要がある。すなわち、縦測定で性能が出た超伝導空洞を加速器建設現場でクライオモジュールに入れるべく再度空洞組立作業を行う必要がある。現在、クライオモジュールでの field emission による性能劣化が世界中の超伝導空洞の性能劣化の問題となっている[2]。これらの改善のために、真空作業として、周りの環境によらず、ゴミの混入を許さない排気システムの確立が必要となる。

本文ではそのような超伝導空洞の性能を最初の縦測定での作業から加速器建設現場などのクライオモジュール組立時の真空作業において、slow な排気と vent を行い、ゴミの混入を回避するためのシステムである slow pumping & venting system について、装置の概要とともにどのようにゴミ混入の回避を実現するのかを述べる。その後、本装置を用いた真空排気時および vent 時のゴミ混入のテストについて紹介する。

#### 2. Slow Pumping & Venting System

図 1 に slow pumping & venting system の概要を示

<sup>#</sup>hiroshi.sakai.phys@kek.jp

す。また、図 2 に slow pumping & venting system の全体の写真を示す。

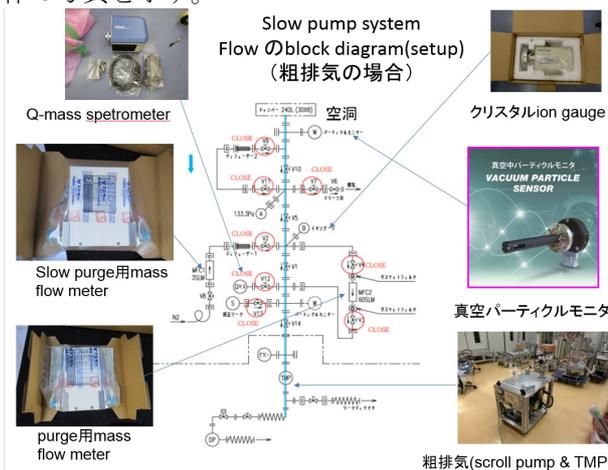


Figure 1: The block diagram of slow pumping & venting system.

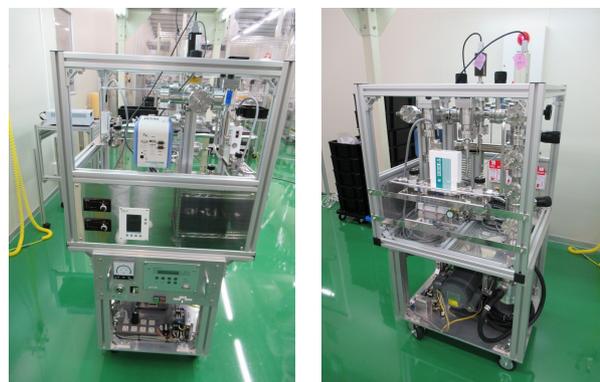


Figure 2: Picture of slow pumping & venting system.

粗排気はスクロールポンプとターボ分子ポンプ (TMP)からなり、これらと空洞までは図 1 の水色のラインに沿って、φ40 の SUS のパイプでつながれており、最終的にはこのラインで高真空を確保する。真空はクリスタル ion gauge で大気圧から、超高真空 ( $10^{-7}$  Pa 程度)まで測定が可能である。また、分圧は

Q-mass spectrometer で読み取る。この system の要の一つは Mass flow controller を含めた slow pump 用のバイパスラインと slow vent 用のラインである。またこの pump と vent の際に空洞内に particle が移動するかどうかを図 1 に示す真空パーティクルモニターで測定する[3]。このモニターは真空中でパーティクルの測定が可能であり、0.3 $\mu\text{m}$ ~3.6 $\mu\text{m}$  の範囲のパーティクルサイズの粒子量の測定を行うことが可能である。

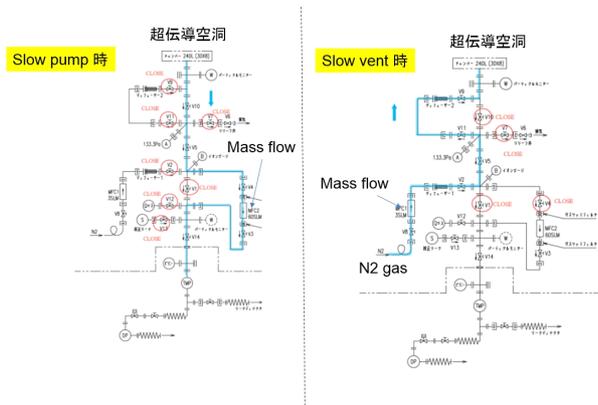


Figure 3: The detailed block diagram under slow pumping (left) & slow venting (right).

図 3 は slow pump 時 (図 3 左) および slow vent 時 (図 3 右) のそれぞれの flow を示している。Slow pump の際は通常の排気のラインの一部を close し、mass flow meter(MFC2)を通るライン(3/8 inch  $\phi$ )にバイパスし、pump 量を mass flow meter でコントロールすることで slow な pump を実現する。slow vent の際も、粗排気ラインの途中を close し、別の mass flow meter (MFC1)を通るライン(1/4 inch  $\phi$ )から窒素を流し、slow vent を実現する。さらにゴミ混入を回避するために、図 3(右)にあるようにもう一度バイパスラインを通し、そこにディフューザーを 2 回通すことで埃混入を回避する。

### 3. Slow Pumping & Venting System を用いたパーティクル測定



Figure 4: Setup of particle measurement with ERL 9cell cavity by using slow pumping & venting system.

Slow pumping & venting system を用いることでゴミの混入がないかを確認するために図 1 の空洞側に実際に図 4 のように ERL の 9cell 空洞 (2号機) を接続し、その空洞の真空引きおよび vent をこの slow pumping & venting system を用いて行った。ERL 用の 9cell 空洞の内容積は大体 300程度である。この空洞に入る前に図 1 に示すように真空パーティクルモニター設けており、slow pump 時及び slow vent 時のパーティクルの動きが測定可能である。

なお、ここで用いている ERL 9cell 空洞はすでに HPR を行い、縦測定を行ったものであり、内面はクリーンな環境を維持している[4]。また空洞と slow pumping & venting system の接続は図 4 に示すように ISO class 4 の clean room 内で行われ、接続の際しても、空洞外面、接続用のベローズの内面、そして、ネジの取り外した際のフランジの穴などすべてに ion gun にて、パーティクルが 0 (0.3 $\mu\text{m}$  レベル)になるまで blow するなど system 内に埃が入らないような作業を行い、接続を行った。測定も ISO class 4 中の clean room 内で行っている。

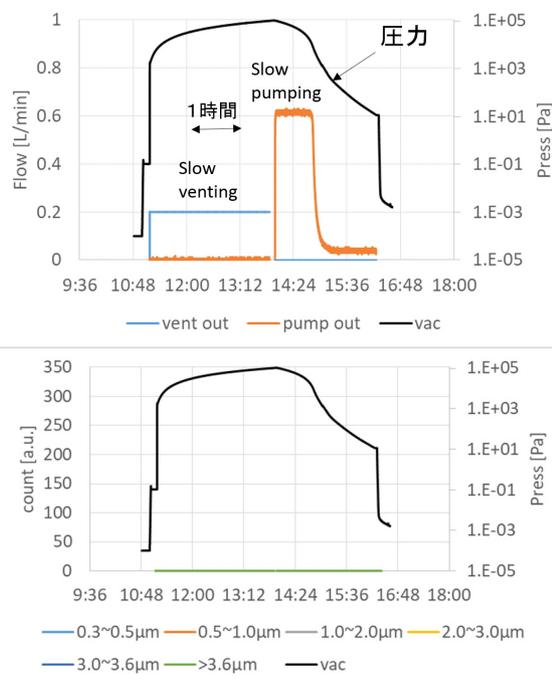


Figure 5: Particle measurement results during slow venting & pumping by using the measurement system as shown in Figure 4. (Top) The flow ratio of mass flow meter during venting (blue line) and pumping (orange line) with measured pressure (black line). (Bottom) The measured particles with 6 particle size region from 0.3  $\mu\text{m}$  to more than 3.6  $\mu\text{m}$  with measured pressure.

図 5 が図 4 に示した slow pumping および venting を行った時に真空中のパーティクル測定の結果である。図 5 (上) では slow pumping & venting system のそれぞれの mass flow meter(MFC2, MFC1)での flow ratio を真空とともに plot したものである。この mass flow で

は 0.2 l/min の slow な venting を実現している (図 5 上青線)。また slow pumping も 0.6 l/min で control されているのがわかる。我々の STF での cryomodule assembly では 0.2 l/min での venting を行っていたために、これと同じ slow な speed を実現している[2]。なお、同 cryomodule assembly では slow pumping の control が残念ながら実現できなかったが、この system では実現可能であることがわかる。図 5(下)は同時刻の slow venting & slow pumping での particle 測定の結果を示している。Slow venting & pumping 中でこの flow ratio では空洞への particle 混入が見られないことがわかった。実際にはこれよりさらに slow な 0.1 l/min までの slow vent は可能であることは確認しており、それでも同じく空洞への particle の混入はみられていない。

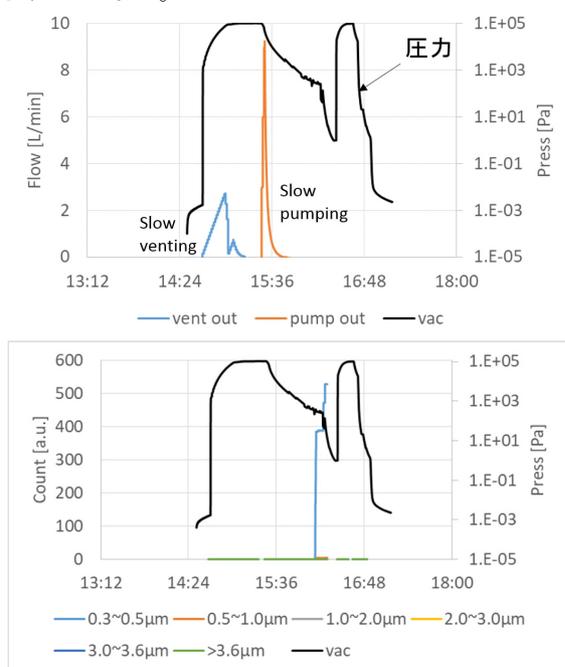


Figure 6: Particle measurement results under controlling slow venting & pumping by using the measurement system as shown in Figure 4. (Top) The flow ratio of mass flow meter during venting (blue line) and pumping (orange line) with measured pressure (black line). (Bottom) The measured particles with 6 particle size region from 0.3 um to more than 3.6 um with measured pressure.

次にもう少し、flow ratio をコントロールしながら、slow venting & pumping を行った。図 6 がその結果である。0.15l/min からスタートし、1分ごとに 0.15l/min の速度で mass flow meter の流量増やして control し、slow vent を行った。大気近くになり、2.7l/min の流量を流していたが、そのときにも空洞への particle の混入はなかった。これにより、20分程度でゴミの混入なく、大気圧に到達可能な運転ができた。次に 3l/min から slow pump を行い、そこから、1分ごとに 3l/min 毎に pumping の流量を増やした。3分程度で流量が少なくなり、あとは流量の少ないまま、slow pumping を行うこととなったが、こ

の時でも、ゴミが空洞へ入ることはなかった。このまま、slow pump を続けて、45分後に約 100Pa 程度になったため、図 3 左に示す slow pump の水色の排気ラインから図 1 の水色の粗排気のラインに切り替えを行った。その切り替えを行ったところ、図 6 の下のグラフに示すように 0.3um の particle のカウントが見られた。バルブの操作中にこの particle が見られた。図 7 にバルブの詳細を示す。V4 をまずは閉め、その後、V1 を open することで、コンダクタンスを稼ぎ、より、高真空に到達することができる。

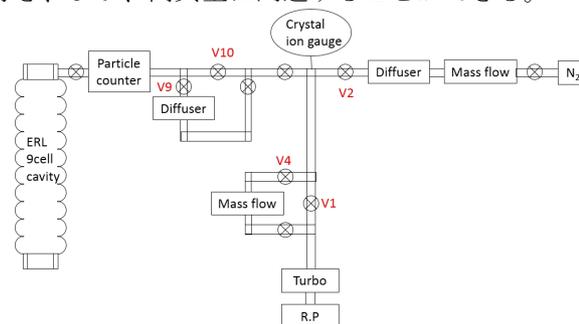


Figure 7: Detailed block diagram of slow pumping & venting system with 9cell cavity and valve assign (red).

Table 1: Particle Measurement Results under V9, V10 Open/Close (in the air)

speed	Valve 条件	開閉時間	Particle 数
slow	V9 close	1 分 24 秒	0
	V10 open	1 分 39 秒	0
	V10 close	2 分 7 秒	0
	V9 open	1 分 35 秒	0
normal	V9 close	7 秒	0
	V10 open	9 秒	10
	V10 close	11 秒	16
	V9 open	8 秒	0
fast	V9 close	3 秒	0
	V10 open	6 秒	142
	V10 close	5 秒	153
	V9 open	5 秒	15

Table 2: Particle Measurement Results under V9, V10 Open/Close (under vacuum condition)

speed	Valve 条件	開閉時間	Particle 数
slow	V10 close	1 分 22 秒	0
	V9 open	2 分 21 秒	0
	V9 close	1 分 18 秒	0
	V10 open	1 分 42 秒	0
normal	V10 close	14 秒	0
	V9 open	14 秒	0
	V9 close	15 秒	0
	V10 open	20 秒	0
fast	V10 close	6 秒	2
	V9 open	8 秒	0
	V9 close	8 秒	0
	V10 open	7 秒	25

そこで、slow pumping 時、および slow venting 時に主に切り替える valve の開閉速度を変えた時に真空パーティクルモニターで count する particle の量を測定した。図 7 の V1、V4(slow pumping 時に切り替え) および V9,V10(slow venting 時に切り替え)の開閉速度を変えて測定を行った。Table 1 および Table 2 が V9,V10 の大気時および真空時のバルブ開閉の速度を変えた際の particle の測定結果である。Particle は 0.3~0.5um の範囲のみ測定された。Table1,2 の Slow の条件では 1 分以上かけてバルブをゆっくり開けた。次に normal の条件は 10 秒程度で開けている。Fast の条件では 5 秒程度でバルブを開けた。大気中では fast の条件で 100 個程度、normal の条件で 10 個程度の particle がカウントされたが、slow の条件では particle はカウントされなかった。真空中では normal、slow の条件に particle はカウントされなかったが、fast の条件には particle がカウントされた。真空中の方が particle がカウントされにくい条件となっているが、どちらも slow の条件では particle がカウントされなかった。

Table 3: Particle Measurement Results under V1 Open/Close (under vacuum condition)

speed	Valve 条件	開閉時間	Particle 数
slow	V1 open	1 分 19 秒	0
	V1 close	1 分 4 秒	0
normal	V1 open	14 秒	0
	V1 close	12 秒	0
fast	V1 open	5 秒	32
	V1 close	6 秒	6

同様に slow pumping 時に切り替える V1 の場合も測定を行った。Table 3 に測定結果を示す。V1 open 前は V4 を close し測定した。Particle は同様に 0.3~0.5um の範囲のみ測定された。また V1 close 後は V4 を open した。slow 時、normal 時はカウントがなかったが、fast 時は最大 32 カウントも見られた。バルブは V4 はニードルバルブであり、この場合の open/close は速度によらず、カウントは 0 であったが、V1,V10 はゲートバルブ、V9 はアングルバルブであり、この場合はどの場合も fast 時では particle がカウントされている。Slow pumping 時にはバルブの開閉も slow で行う必要がわかった。

#### 4. まとめ

Field emission の抑制のため、slow pumping & venting system を開発した。0.1l/min 程度の slow venting が行えることがわかり、この slow な速度では particle がカウントされないことが分かった。またそれより速度が速いが 2l/min 程度の slow pumping & venting 時でも空洞への particle 混入がこの system では見られないことがわかった。問題となるバルブの

切り替えは 1 分程度のゆっくりな開閉速度では particle の動きがないことがわかった。これらの条件をもとに今後実際のモジュールに向けて slow pumping & venting を行い、空洞の性能劣化がおこらないかどうかを確認していく予定である。

#### 謝辞

QST の春日井敦氏には真空パーティクルモニターをお借りしました。感謝いたします。フジキンの佐々木尚美氏、アールデックの飯村和広氏には slow pumping & venting system において、度重なる調整を手伝っていただきありがとうございます。ウィックスの浅田宏之氏、鳥山景示氏、服部泉氏には真空パーティクルモニターの評価の際に事前にお借りいたしました。感謝いたします。

#### References

- [1] H. Sakai *et al.*, “High Power CW Tests of cERL Main-Linac Cryomodule”, SRF’13, Paris, France, p.855 (2013).
- [2] Y. Yamamoto *et al.*, “High Gradient Cavity Performance in STF-2 Cryomodule for the ILC at KEK”, IPAC’16, Busan, Korea, p.2158 (2016).
- [3] (株)ウィックス; <http://www.wexx.jp/>
- [4] H. Sakai *et al.*, “Precise studies on He-processing and HPR for recovery from field emission by using X-ray mapping system”, SRF’15, Whistler, BC, Canada, p.1019 (2015).

#### Appendix

真空パーティクルモニターの性能を確かめるために図 8 のような setup を最初に組んだ。真空中に引き、そのまま filter を通さず、2 分程度で大気に venting したとき、図 9 に示すように total の particle として、毎秒 50 個以上のカウント(0.25 um 以上)が見られている。特にこの particle のカウントが 4 時間以上も続いていることがわかり、venting 時にゴミが混入し、なおかつそれをずっと巻き上げ続けている様子がここではわかる。

Particle を venting 時に巻き上げないような slow な venting (& pumping)の必要性はここからきている。

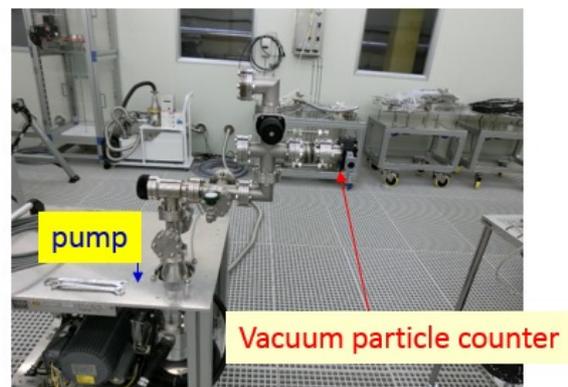


Figure 8: First test of particle vacuum sensor under vacuum condition.

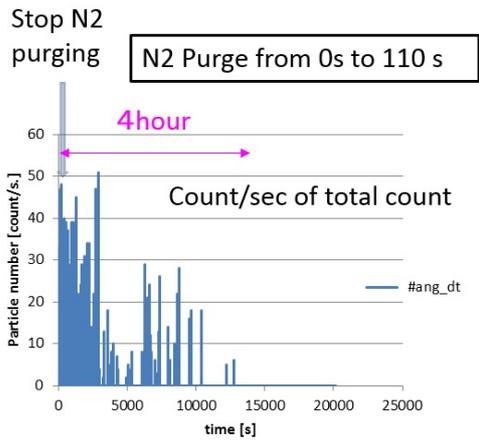


Figure 9: Total particle count during N2 venting at setup as shown in Figure 8.