

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11925

研究課題名（和文）大強度ビームで生成するイオンを利用したポンプ機能を持つ超高真空ダクトの開発

研究課題名（英文）Titanium vacuum chamber with a getter pump function for UHV&XHV

研究代表者

神谷 潤一郎（Kamiya, Junichiro）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARCセンター・研究主幹

研究者番号：20391336

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、チタン製の真空ダクト自身をゲッターポンプ化し、真空システムの省エネ、省スペースを実現するための開発である。実験では、チタン製容器をオリフィスを介してステンレス製容器と接続し、ステンレス製容器のみターボ分子ポンプで排気した。チタン製容器の表面酸化膜を除去した結果、真空ポンプをつけていないチタン製容器のほうがステンレス製容器よりも低い圧力となり、容器自身の超高真空ポンプ化を初めて実証できた。その後、大気暴露を繰り返してもゲッター機能を維持するための表面コーティングを研究し、10回以上大気暴露を実施しても、性能の劣化がない成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

真空容器自身のゲッター化はこれまでCERNのNEGコーティング、KEKのチタン・パラジウムコーティングがあったが、繰り返しの大気暴露による性能劣化や、コーティングの剥離性に問題があった。本成果はそれらの課題を克服できており、真空がボトルネックとなる加速器性能の向上に貢献できる。また、繰り返しの大気暴露でもポンプ性能が劣化しないという成果は、真空システムの省エネ、省スペースに直結でき、脱酸素社会へ貢献できる技術である。また、ゲッター化により真空容器内の反応性ガスを低減できることから、今後需要が増加するECMOや自動運転装置等に必須であるMEMSへの適用が可能な将来性のある性能である。

研究成果の概要（英文）：This research relates to the energy saving and space-saving of the vacuum system by converting the titanium vacuum duct itself into a UHV & XHV getter pump.

In the experiment, the titanium chamber was connected to the stainless steel chamber through an orifice, and only the chamber of stainless steel was evacuated by a turbo molecular pump. As a result of removing the surface oxide film of the titanium chamber, the pressure of the titanium chamber without evacuating by the vacuum pump became much lower than that of the stainless steel chamber. That result represents the success of demonstrating the vacuum chamber itself as an ultra-high vacuum pump for the first time. Furthermore, we researched the surface coating to maintain the getter function even after repeated atmospheric exposure. The result shows no performance deterioration even after 10 times atmospheric exposures.

研究分野：真空科学

キーワード：ゲッターポンプ チタン NEGコーティング スパッタリング 超高真空 極高真空

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノ物理学、中性子利用、核変換技術開発等の次世代科学研究基盤において、加速器ビーム出力をマルチ MW 級へ大強度化することが必要となりつつある。ビームの大強度化のボトルネックとなっている大きなファクターが、ビームが真空ダクト内の残留気体と衝突し、散乱することによるビームロスである(図 1 上図)。今後 1MW を超えるビーム出力を実現する段階では、ビームロスを防ぐために、ビームライン全域を超高真空化することが必須課題である。しかし、通常真空ポンプは間隔をあけて配置されるため、ポンプとポンプの間の圧力は高くなる。近年、欧州原子核研究機構(CERN)は、気体分子を吸着するゲッター機能のある金属を、ステンレスもしくは銅製真空ダクトの表面にコーティングして、真空ダクト自体を真空ポンプとする技術を開発し、大型ハドロンコライダー(LHC)に導入し大きな注目を集めた[1,2]。この手法により真空ダクトを連続的なポンプとすることができるため、ビームラインを一様に超高真空にすることが可能である。この手法は、1 μm 程度のゲッター材料をステンレス等でできた通常の真空容器にコーティングをする。表面が気体分子に覆われてゲッター機能がなくなった際は、ベーキングによって表面の気体元素とゲッター材料の化合物(酸化物、窒化物等)を内部に拡散させることで、ゲッター機能を持つ表面を再度露出させる。しかし 1 μm 程度の薄いコーティングであるため、再ゲッター化を繰り返し行うと内部の化合物の割合が増え、ゲッター機能が早急に劣化することが難点であった。

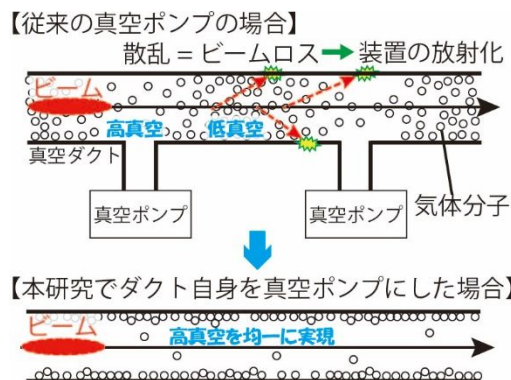


図 1 従来真空ポンプと本研究開発の比較

真空ポンプは間隔をあけて配置されるため、ポンプとポンプの間の圧力は高くなる。近年、欧州原子核研究機構(CERN)は、気体分子を吸着するゲッター機能のある金属を、ステンレスもしくは銅製真空ダクトの表面にコーティングして、真空ダクト自体を真空ポンプとする技術を開発し、大型ハドロンコライダー(LHC)に導入し大きな注目を集めた[1,2]。この手法により真空ダクトを連続的なポンプとすることができるため、ビームラインを一様に超高真空にすることが可能である。この手法は、1 μm 程度のゲッター材料をステンレス等でできた通常の真空容器にコーティングをする。表面が気体分子に覆われてゲッター機能がなくなった際は、ベーキングによって表面の気体元素とゲッター材料の化合物(酸化物、窒化物等)を内部に拡散させることで、ゲッター機能を持つ表面を再度露出させる。しかし 1 μm 程度の薄いコーティングであるため、再ゲッター化を繰り返し行うと内部の化合物の割合が増え、ゲッター機能が早急に劣化することが難点であった。

2. 研究の目的

本研究は、真空容器自身に超高真空ゲッターポンプとしての機能を持たせる手法の開発を目的とする。この目的は、超高真空材料かつゲッター材料であるチタンを真空容器材料として用い、表面にピュアなチタンを露出させることで達成される。さらに、繰り返しの再ゲッター化でもポンプとしての性能が劣化しない手法を実証する。これにより加速器ビームラインを一様に超高真空にすることが可能となる(図 1 下図)。

3. 研究の方法

研究計画段階では、加速器ビームラインにインストールしたチタン製ビームパイプについて、ビームラインにガスを導入して、大強度ビームにより生成したイオンを表面に衝突させて酸化膜を除去し、チタンそのものを表面にあらわにすることで、ダクト自身を真空ポンプとして機能させることを考案した。しかしながら、ビーム散乱による放射化や、ガス導入ラインを既存加速器に敷設することの困難性から方針を改定した。即ち、ビームラインにインストール前のオフラインでスパッタリングにより表面酸化膜を除去するのである。この無垢のチタン表面に低温ゲッター化材をコーティングすれば、薄いコーティングの下に母材のゲッター化したチタンが存在するため、繰り返しの再ゲッター化でもポンプとしての性能が劣化しないと考えた。

4. 研究成果

(1) チタン製真空容器自身のゲッターポンプ化の実証

実験では、チタン製真空容器をオリフィスを介してステンレス製真空容器と接続し、ステンレス製真空容器のみターボ分子ポンプで真空排気した(図 2)。通常は当然、真空ポンプを取り付けたステンレス製真空容器の圧力が低いが、アルゴンスパッタリングによりチタン製真空容器の表面酸化膜を除去した。これにより真空ポンプを付けていないチタン製真空容器のほうがステンレス真空容器よりも低い圧力を得ることができ、真空容器自身の超高真空ポンプ化を実証した。

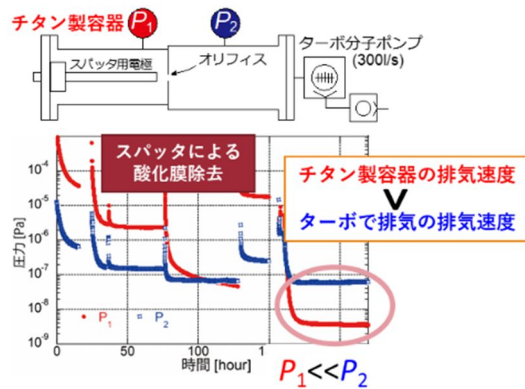


図 2 チタン製真空容器のゲッターポンプ化の装置系と結果

(2) 低温ゲッター化材コーティングによるポンプ性能維持の実証

チタン製真空容器をゲッター化しても、電極を取り外すために大気暴露をすると、もとの“普通”の真空容器に戻ってしまう。そこで、無垢のチタン表面を低温ゲッター化材で保護コーティングすれば、大気暴露を繰り返しても通常のベークでゲッター機能を取り戻せると考えた。低温ゲッター化材で電極を作成し、まず、電極をプラス極にして真空容器側をスパッタして酸化膜を除去、その後、電極をマイナス極にして電極材をスパッタして容器表面をコーティングする“Hybrid Sputtering”という新しい手法を考案した。結果、図 3 に示すように 10 回以上大気暴露を実施しても、性能の劣化は全く見られなかった。またこの手法によるコーティングは非常に密着性が高く剥離等は皆無であった。

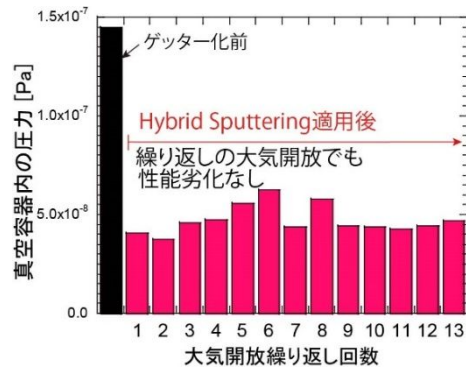


図 3 大気開放と再ゲッター化を繰り返した後の容器内圧力

(3) 反応性ガスの低減

首尾よくゲッター化と繰返しの性能維持が確認できたので、どのような気体に対して効果があるのかを調べた。図 4 に示すように、真空容器内の水素を 1/10 に、水、一酸化炭素、二酸化炭素を 1/50 に低減可能であった。反応性ガスの低減は、今後需要が拡大するであろうエクモや自動運転装置等に必須である

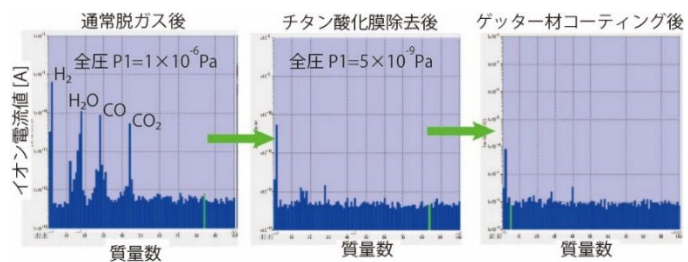


図 4 本開発品による反応性ガスの低減

Micro Electro Mechanical Systems(MEMS)への適用が可能な将来性のある性能であると考えている。

引用文献

- [1] C. Benvenuti *et al.*, Vacuum properties of TiZrV non-evaporable getter films, Vacuum (2001) 57.
- [2] P. Chiggiato and P. C. Pinto, Ti-Zr-V non-evaporable getter films: From development to large scale production for the Large Hadron Collider, Thin Solid Films (2006) 382.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 神谷 潤一郎、引地 裕輔、和田 薫	4. 巻 PASJ2019
2. 論文標題 低放射化材料であるチタン製の真空チェンバーを真空ポンプとして用いる手法の開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1189-1192
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 J. Kamiya, K. Okabe, M. Kinsho, K. Moriya, I. Yamada, N. Ogiwara, Y. Hikichi, K. Wada	4. 巻 1350
2. 論文標題 Evaluation of 2-D transverse beam profile monitor using gas sheet at J-PARC LINAC	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12149
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1350/1/012149	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 J. Kamiya, K. Takano, H. Hiromu, K. Wada	4. 巻 -
2. 論文標題 Some methods of making titanium vacuum chamber act as getter pump for UHV/XHV	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 12th International Particle Accelerator Conference	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 神谷 潤一郎、引地 裕輔、和田 薫
2. 発表標題 低放射化材料であるチタン製の真空チェンバーを真空ポンプとして用いる手法の開発
3. 学会等名 日本加速器学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神谷 潤一郎、引地 裕輔、和田 薫
2. 発表標題 低放射化材料であるチタン製の真空チェンバーを真空ポンプとして用いる手法の開発
3. 学会等名 表面真空学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Kamiya, K. Okabe, M. Kinsho, K. Moriya, I. Yamada, N. Ogiwara, Y. Hikichi, K. Wada
2. 発表標題 Evaluation of 2-D transverse beam profile monitor using gas sheet at J-PARC LINAC
3. 学会等名 10th International Particle Accelerator Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神谷 潤一郎
2. 発表標題 大強度陽子加速器における真空の挑戦 -J-PARCの真空技術-
3. 学会等名 真空展2020(オンライン) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 J. Kamiya, K. Takano, H. Hiromu, K. Wada
2. 発表標題 Some methods of making titanium vacuum chamber act as getter pump for UHV/XHV
3. 学会等名 12th International Particle Accelerator Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 真空ポンプ	発明者 神谷 潤一郎	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、F04B 37/04	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------