



季刊誌

NO.19

# J-PARC

JAPAN PROTON ACCELERATOR RESEARCH COMPLEX 2024

特集

## 加速器を支える真空技術

インタビュー

- |               |              |
|---------------|--------------|
| リニアックにおける真空装置 | 小林 史憲        |
| RCSにおける真空装置   | 神谷 潤一郎 山田 逸平 |
| MRにおける真空装置    | 魚田 雅彦        |
| 将来展開 ガスシートモニタ | 山田 逸平        |
| 真空トランスファーケース  | 神谷 潤一郎       |



# 真空ってなに？

今回のテーマは「加速器を支える真空技術」です。加速器と真空にはどんな関係があるのでしょうか？そのお話を始める前に、そもそも真空とは何なのかを考えてみましょう。

真空とは、大気圧より低い圧力の空間の状態と定義<sup>(注1)</sup>されています。圧力の低さの程度に応じて、図のような呼び名で分類されています。

注1：JIS（Japanese Industrial Standards：日本産業規格）による定義



## なぜ加速器を真空にする必要があるのでしょうか？

J-PARC 加速器のビームライン<sup>(注2)</sup> 内部は、圧力が1×10<sup>-6</sup>Pa<sup>(注3)</sup> 未満の超高真空、すなわち国際宇宙ステーション（ISS）が運用されている宇宙空間と同じくらいの真空状態に保たれています。これは1000億分の1気圧未満という超稀薄な状態ですが、それでも実は1cmの中に約2億個の気体分子が残っています。その残留気体分子は陽子に比べて大きくて重いという特徴があります。さらに、状況にもよりますが、壁には1cmあたり1×10<sup>15</sup>個、すなわち1000兆個にもおよぶ分子が吸着しています。そのような状況で気体分子が陽子ビームによってイオン化されると、ビームが作る電場で加速されてビームダクトの壁を叩くため、壁から気体分子が叩き出され、ビームダクト内の圧力が雪崩的に上昇することがあります。

また、ビームライン上の気体分子にビームが衝突して、ビームの軌道が曲げられるなどの散乱が発生します。その結果ビームダクトから飛び出して失われてしまうビームロスの発生等によってビーム強度が下がってしまいます。

これを防ぐには、ビームが存在する空間の圧力を下げなくてはなりません。そのために、加速器内の圧力は真空に保たれているのです。

注2：陽子ビームが飛行する部分全て。

注3：圧力の単位は Pa バスカルで、N/m<sup>2</sup>とも表せ、単位面積の面を押す気体分子のトータル力です。

## 大強度陽子加速器施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) の3つの加速器群

J-PARC はほぼ光速<sup>(注4)</sup> まで加速した世界屈指の大強度陽子ビームから、中性子、ミュオン、ニュートリノなど多彩な二次粒子ビームを作り出し、物質生命科学、素粒子・原子核物理、原子力などの研究を進める最先端の研究施設です。“大強度”の陽子ビームを多数の研究施設に送り出すことが、J-PARC の大きな特徴です。

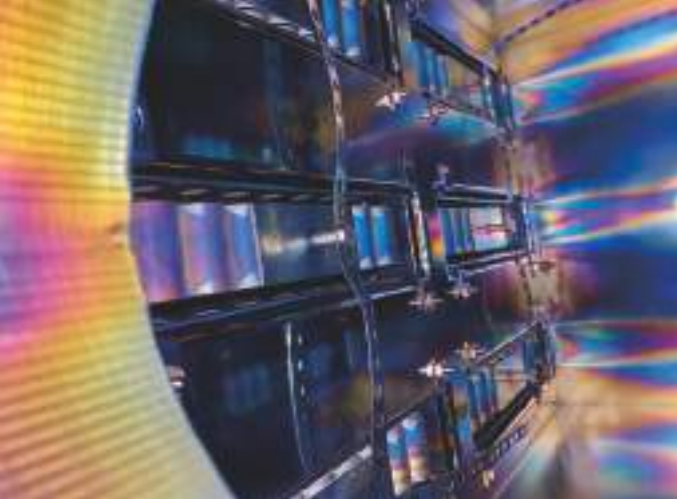
J-PARC には直線型加速器 リニアック (Linear Accelerator)、3GeV シンクロトロン RCS (Rapid-Cycling Synchrotron)、30GeV シンクロトロン MR (Main Ring) の3つの加速器があります。

注4：真空中における光速（光が伝播する速さ）は、秒速約30万kmで、俗に「1秒間に地球を7周半回ることができる速さ」と言われています。



Japan Proton  
Accelerator Research Complex





イオンポンプ内部（長期間使用後）



S-DTL 空洞内部

## Linear Accelerator

真空装置  
リニアックにおける

J-PARC 加速器群の最初にある加速器は、直線状に加速空洞を多数並べ、粒子（負水素イオン）を直線的に加速していく直線型加速器リニアックです。多くの粒子（大電流）の加速に適しています。最終的な運動エネルギーは400MeV、速度にして光速の71%まで加速して後ろの加速器に渡します。後段のRCSやMRでは加速する粒子の数を増やすことはできないので、ここでどれだけたくさんの粒子を加速できるかが重要です。

ビームが通過する加速空洞や真空ダクト内には、残留ガスが存在します。加速するビームが負水素イオン（ $H^-$ ）の場合は、残留ガスとの相互作用により容易に電荷を持たない水素原子（ $H^0$ ）になります。 $H^0$ がビームダクト等の加速機器に衝突すると機器の残留放射線量が高くなり、加速器のメンテナンスに大きな支障を与えます。そのためリニアックでは $10^{-6}$ Pa以下を真空圧力の目標としています。また、加速空洞内に残留ガスが存在すると、運転中に放電が頻発し、安定運転が損なわれることになるため、この観点からも空洞は可能な限り低圧力で、かつクリーンな真空が求められます。

日本原子力研究開発機構  
J-PARCセンター 加速器ディビジョン

小林 史憲



日本原子力研究開発機構  
J-PARCセンター 加速器ディビジョン

神谷 潤一郎



日本原子力研究開発機構  
J-PARCセンター 加速器ディビジョン

山田 逸平

## Rapid-Cycling Synchrotron

リニアックで加速された負水素イオンは、RCSのビーム入射部で電子を2個剥ぎ取られ陽子になります。RCSではこの陽子をビームダクトの中で1万回以上回しながら運動エネルギーを3GeV、速さにして光速の97%まで加速し、物質・生命科学実験施設（MLF）と次の加速器MRに輸送します。

RCSは、40ミリ秒に1回という速い繰り返しで、入射、加速、出射を行います。変動する磁場が電磁誘導で乱されることを防ぐために、四極電磁石及び偏向電磁石には、電気を通さない材料であるアルミナセラミックス製のダクトが開発され、使用されています。それらのダクト間をつないでいるのは、低放射化材料であるチタン製のダクト及びペローズです。

また、RCSのビームラインのダクト及びペローズは大強度ビームをロスしないよう大口径であるという特徴があります。このような大口径のアルミナセラミックス製及びチタン製のダクト・ペローズはJ-PARCが世界に先駆けて開発したものです。アルミナセラミックス製ダクトは、窒化チタンコーティングを内面に施しています。窒化チタンコーティングは水蒸気の吸着を抑制し、放出ガスを低減する効果もあるので、超高真空達成にも役立ちます。また、真空内壁からの放出ガスの量を低減させるため、チタン製ダクト及びペローズとも真空内面は研磨により表面を滑らかにし、さらに、高真空中で熱処理を行い、超高真空で最終的な残留ガスとなる材料内の水素を減らしています。超高真空の達成には、どのような真空ポンプをどう配置するのかということも重要ですが、真空材料からの放出ガスをいかにして減らすか、ということが非常に重要になります。

ビーム入射部用  
大型チタン製  
真空容器



RCSにおける  
真空装置

アルミナ  
セラミックス製  
ダクト







電磁石の中央を貫通する超高真空ビームパイプは1000本以上がフランジ接続されており、総延長は1567.5mに及びます。

ビームダクト内部を覗いて陽子ビームの気持ちを想像しましょう。ペローズはくし状のフィンガーコンタクトが、ポンプの排気口は打ち抜き板が巧妙に隠しており、内壁は段差なく繋がっています。ビームは滑らかに飛行し、奥のコリメータ（L字型の金属）で余分なみ出しが削られシュツとなるのです。



MRでは、1サイクル（運転周期）の間に、RCSから3GeV陽子ビーム8バンチ（塊）を受け取り（入射）、30GeV（光速の99.95%）へ0.65秒で加速し、実験施設へ出射します。1サイクルは現在は1.36秒～4.24秒で、RCSの40ミリ秒に比べると磁場の時間変化が小さいことから電磁石の中を貫通する真空ダクトには金属を用いることが可能です。

このため、MRでのビーム周回のためのドーナツリング（周長1567.5m）のうち、各種電磁石用、加速空洞用、ビームモニター用など500本以上の真空ダクトはステンレス製です。間を繋ぐ400台以上のペローズダクトには主に優れた機械特性からチタンを採用し、高い放射化が不可避のビーム整形用コリメータ部とその下流部は残留放射能の低さからやはりチタンが用いられています。

真空ダクトの中を飛行する陽子ビームは常に周囲の真空壁との間に電磁場が形成されるため、ビームから壁までの距離が急激に変化する段差を可能な限り減らすようなさまざまな工夫が施されています。

主排気装置は、残留放射能環境下でのメンテナンス作業時間の短縮の観点から、メンテナンスフリーのイオンポンプのみが使われています。真空ダクトやチェンバーは製造時にベーキング処理を施し、内部にインストールされる部品の材質を十分に吟味した結果、現在の真空の到達圧は最も高い一部の場所で $10^{-6}$ Pa台、多くの場所で $10^{-8}$ Pa台です。

## Main Ring

テーパフランジをクランプチェーンで締結します、とドヤ顔で説明する僕



高エネルギー加速器研究機構  
J-PARCセンター 加速器ディビジョン

魚田 雅彦

# MRにおける真空装置

## 将来展開

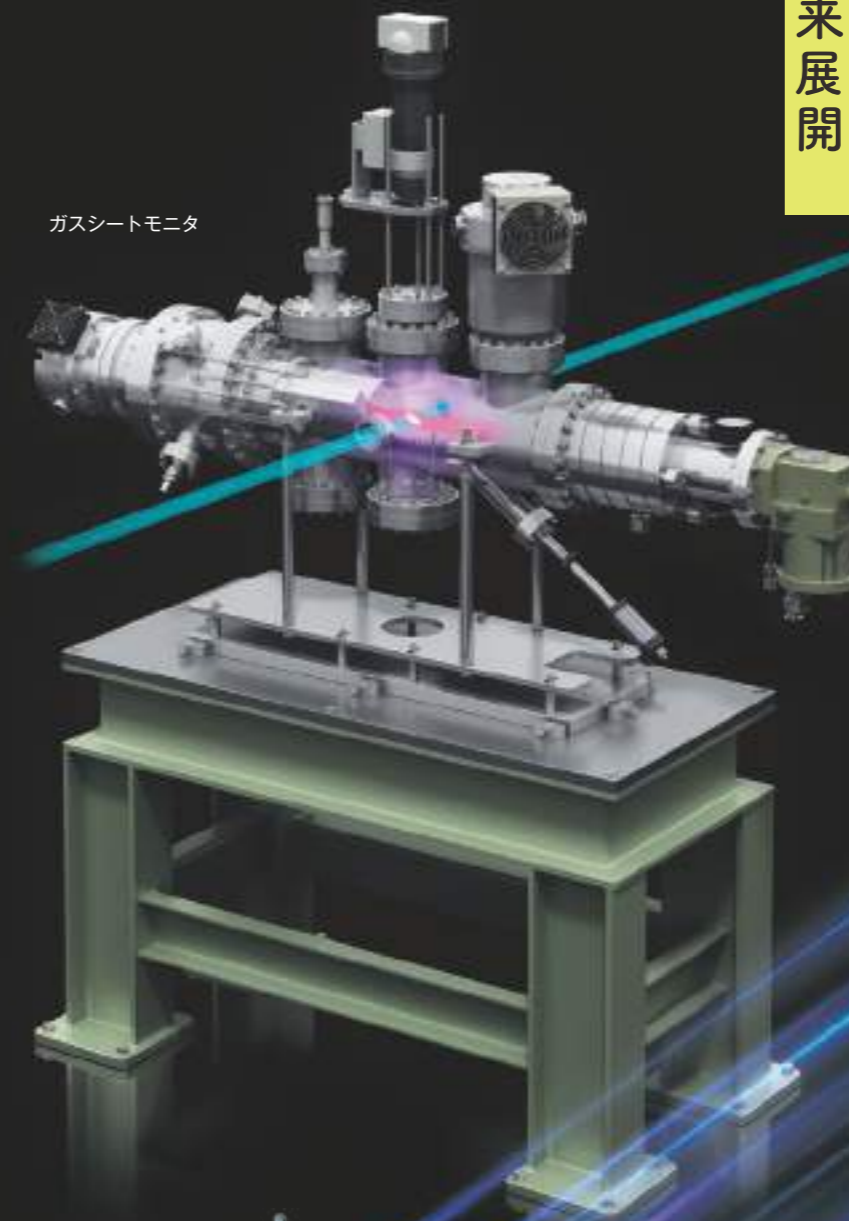
# 新装置開発、産業応用など

## ガスシートモニター

J-PARCでは、大強度のビームを高品質な状態で安定に供給するために、加速器を超高真空状態に保つと同時に、ビームを“計測”し、制御する必要があります。

ビームがガス粒子付近を通過する時、ガスからどのように光が生じるかを計測すればビームの形状がわかります。J-PARCでは、真空技術に応用し、周辺の超高真空に大きな影響を与えずに局所的にガスを導入し光量アップを図るとともに、ガス流をシート状にしてビームの断面形状を計測するガスシートモニターを開発しました。

ガスシートモニターが実用化されれば、ビームをリアルタイムで診断することができ、加速器の安定化や大強度化に貢献できます。特に、ビームの安定性が重要な医療機器の加速器では、さらなる高精度化が期待されます。また、核融合や半導体産業などのビームを扱う装置にも応用できるなど、幅広い可能性を秘めています。



ガスシートモニター

## 真空トランスファーケース

ビームダクトやペローズに低放射化材料であるため使われているチタンは、気体を吸着・吸収する性能（ゲッター性能）も持っていますが、通常、チタン表面は酸化膜に覆われているため、ゲッター性能はありません。しかし、表面を覆う酸化膜を除去し、その上にNEG（Non-evaporable getter）というゲッター性能を持つ合金をコーティングして保護するという表面改質手法を発明したことにより、真空容器の内壁自体を超高真空ゲッターポンプとして機能させることができました。

この技術に応用し、無電源で超軽量かつコンパクトな真空トランスファーケースを開発しました。このトランスファーケースにより高真空中で試料の輸送が可能となり、半導体などの新材料開発分野での利用が期待されます。また、電力不要で高真空を維持できる超高真空ゲッターポンプ技術のさらなる応用は、カーボンニュートラルな持続可能社会に大きく貢献するものと考えられます。



容器内面が超高真空を保つゲッターポンプとして機能!

真空ポンプ 電源 バッテリー 従来品

超軽量!  
コンパクト!  
電源不要!



真空トランスファーケース



表紙：MRのビームポートライソンの途中の真空タクト1本を扱った時に（遊びの）レーザーポインターの微弱な光で内部観察しました。内面は平滑化処理により鏡になっており、光は何度も反射し、途中の歪みや構造を向かへ模様として浮かび上がらせ、35m先の10cm型ビームポートアルモニタ（縦向き）の機軸まで照らしています。



真空グループの集合写真

ご意見、ご感想をお待ちしております。 ✉ [web-staff@j-parc.jp](mailto:web-staff@j-parc.jp)

< 編集後記 >

本号ではJ-PARCの大強度加速器を「巨大な真空装置」という視点で掘り下げてみました。J-PARCの真空技術を応用し、生まれた技術は加速器だけでなく、医療機器や新材料開発など、幅広い分野での応用が期待されています。これからも、J-PARCの研究現場と読者の皆さまのかけはしになるような季刊誌を目指していきたいと思ひます。