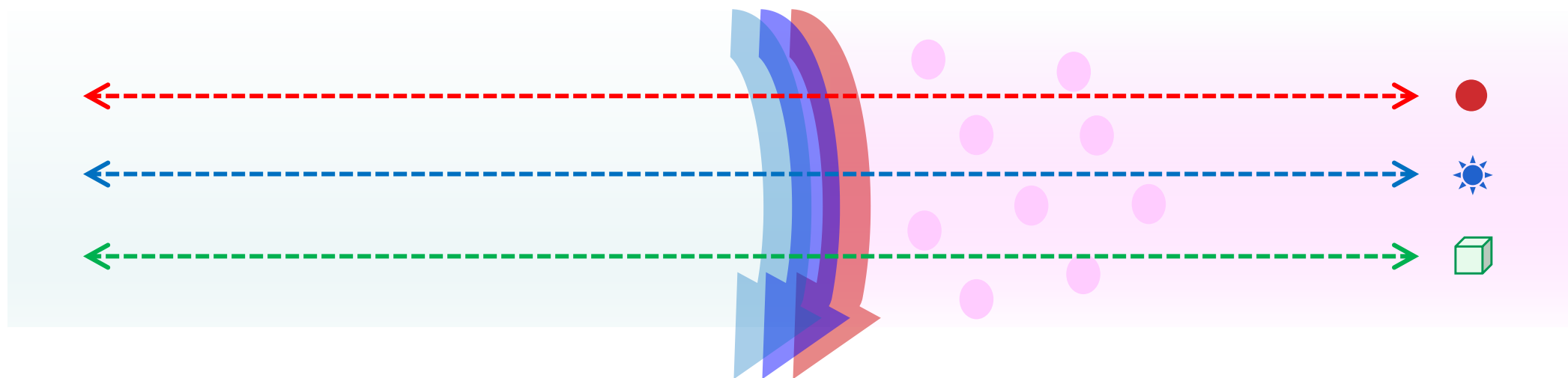


旋回ガスジェットで 真空とガスを隔てる透明窓技術



理化学研究所 仁科加速器科学研究センター
加速器基盤研究部 次世代加速器システム開発チーム
チームリーダー 今尾 浩士

2026年6月16日

新技術の概要

真空中に“局所ガス空間”を作るための新しい開口型シール技術

1 何ができるか

固体膜を使わず、
開口を残したまま
真空とガスを隔てる

2 なぜ必要か

真空装置内で
必要な場所だけ
ガスを使いたい

3 従来の課題

- ・固体窓は不透明
- ・差動排気は大型
- ・従来ガスジェット窓は
圧力比に限界

4 新技術

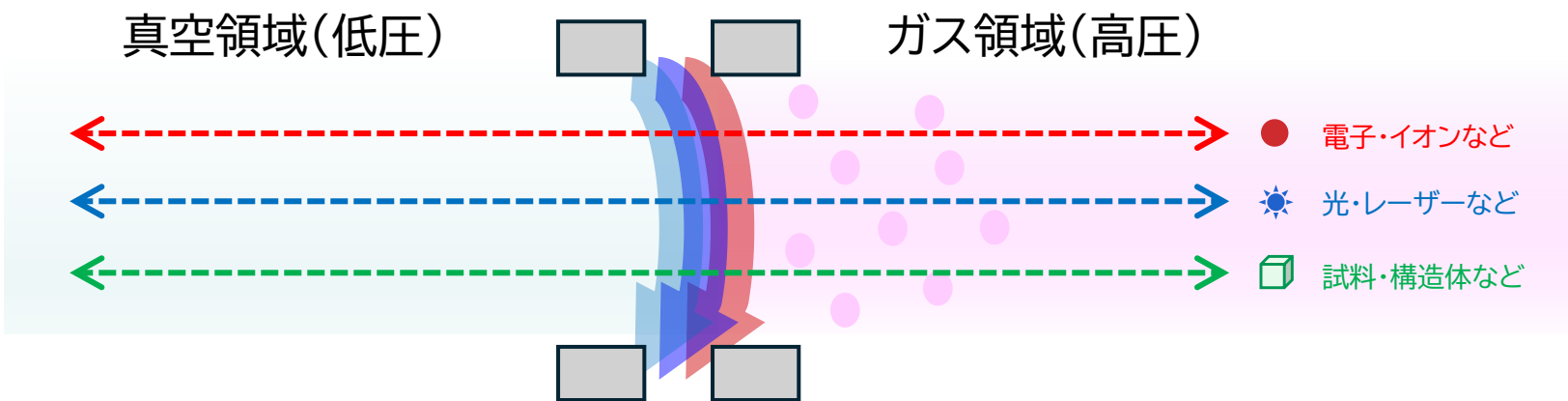
旋回する(自由渦型)
空力窓の境界条件を
制御して多段化する
→高圧力比化する

5 実証結果

Φ15 mm 開口で
圧力比
約5→最大4500

6 展開先

加速器・半導体製造
・表面処理・真空搬送
など



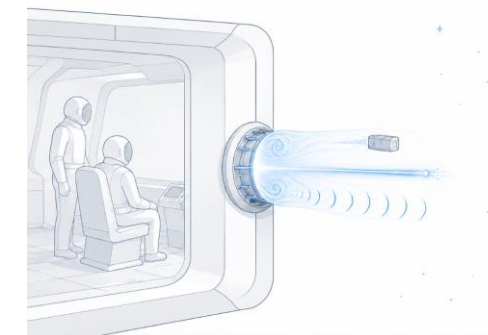
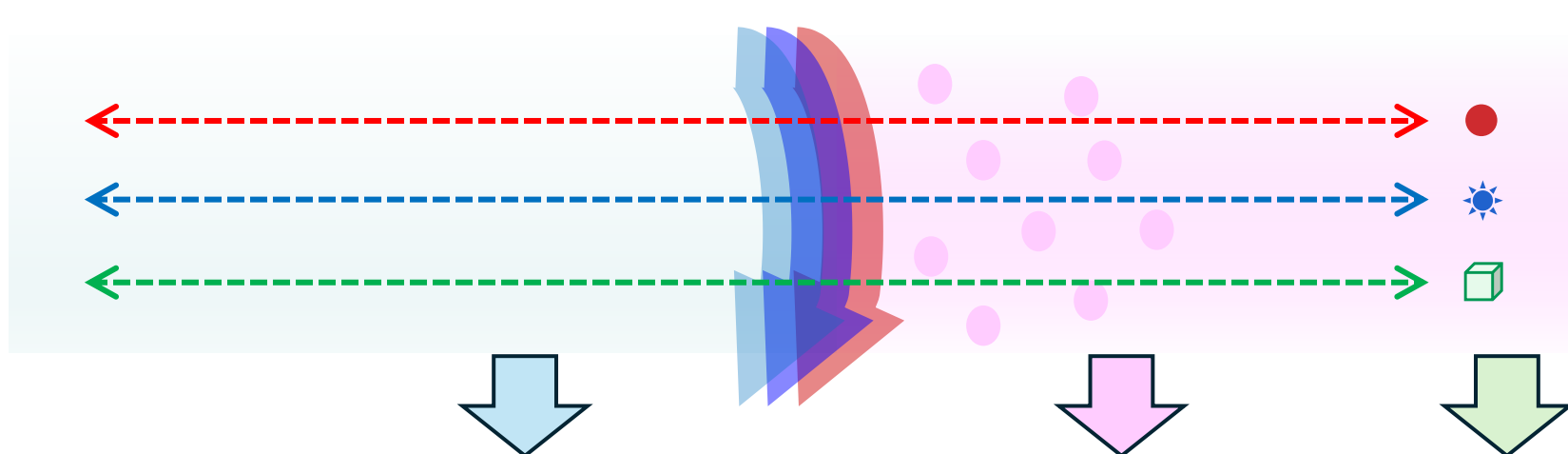
想定する主な用途

-  **加速器・ビーム用途**
ガストリップパー／ガスターゲット
-  **半導体製造**
局所プロセスガスの供給
-  **分析・計測**
大気圧側と真空側の接続
-  **表面処理・成膜**
真空中の反応ガス領域
-  **真空搬送・封止**
連続的な真空・不活性ガス内処理

加速器で生まれた技術を、産業用の真空インターフェースへ展開する。

本技術が解く問題

真空中に“固体窓なしで”ガスを配置して利用したい



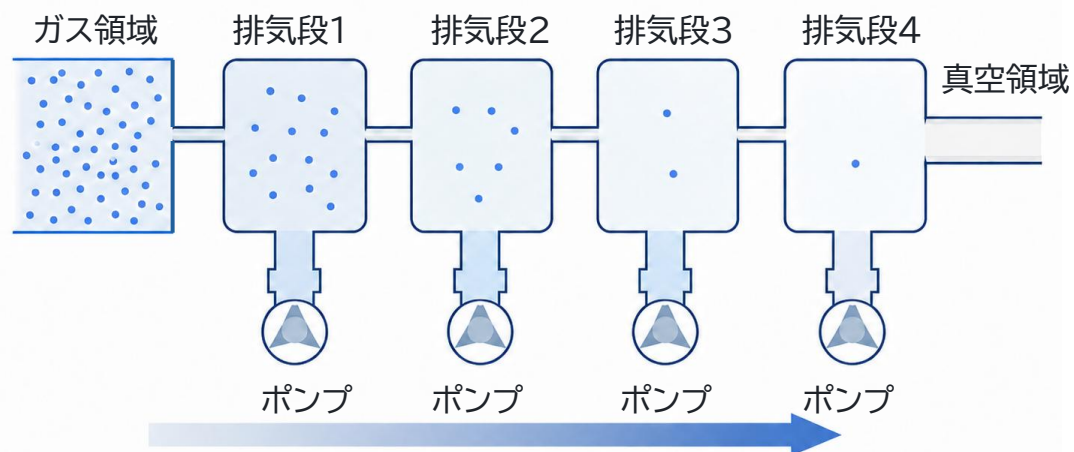
通過を妨げずに、ガス側と真空側を隔てる

用途	真空側	ガス側	通したいもの
加速器・ビーム利用	加速器ビームライン	ガスストリッパー／ガスターゲット	イオンビーム・陽子線・電子線
半導体・表面処理	真空プロセスチャンバー	局所反応ガス領域	基板・プラズマ・光・電子
分析・計測	分析装置の真空部	試料近傍のガス雰囲気	電子線・X線・レーザー・試料
質量分析・分子導入	質量分析器の高真空部	大気圧／中間圧イオン源	イオン・分子・液滴・エアロゾル
真空搬送	真空搬送ライン・周辺真空室	搬送用ガス雰囲気・局所ガス室	小型試料・チップ・搬送体
宇宙探査	宇宙空間	宇宙船内の空気	光・粒子・小型物体・ロボットアーム

従来方法とその限界

固体窓なしでガスと真空を隔てる従来方法には **差動排気法** と **空力窓** などがある。
いずれも有効だが、大開口・高圧力比・小型化では限界が見える。

差動排気法

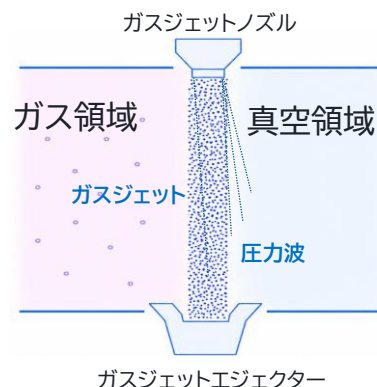


漏れるガスを大型ポンプで段階的に排気する。

- ・装置が大規模化しやすい
- ・開口・ガス圧でポンプ負荷が急増
- ・ガス消費量・回収系の問題

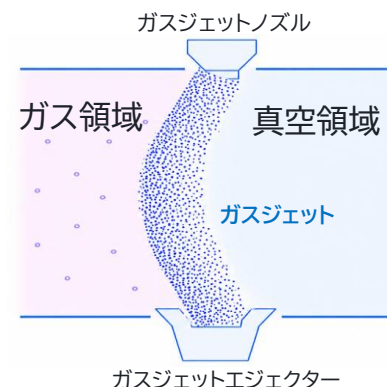
空力窓(ガスジェット窓)

一様流型空力窓



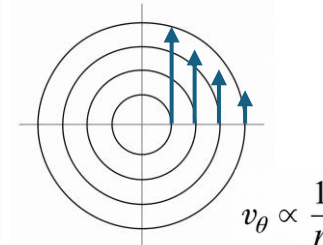
圧力を伴う
膨張型/圧縮型/衝撃波
-膨張型など

自由渦型空力窓



渦型にして速度差をつける
ポンプなしで差圧形成

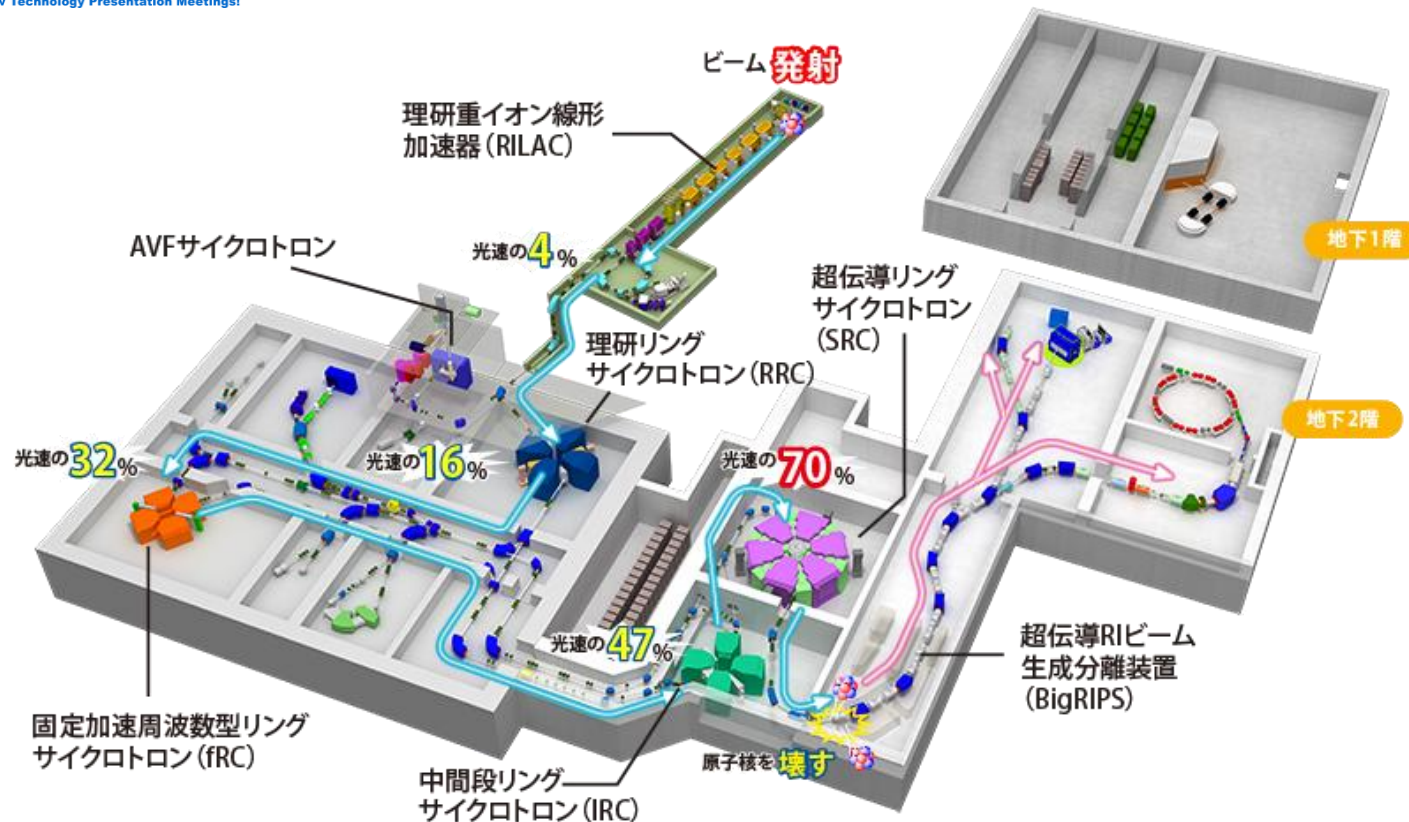
自由渦



- ・圧力比は数倍～50倍程度に限界がある
- ・低圧駆動に不向き
- ・ガス消費量・回収系の問題

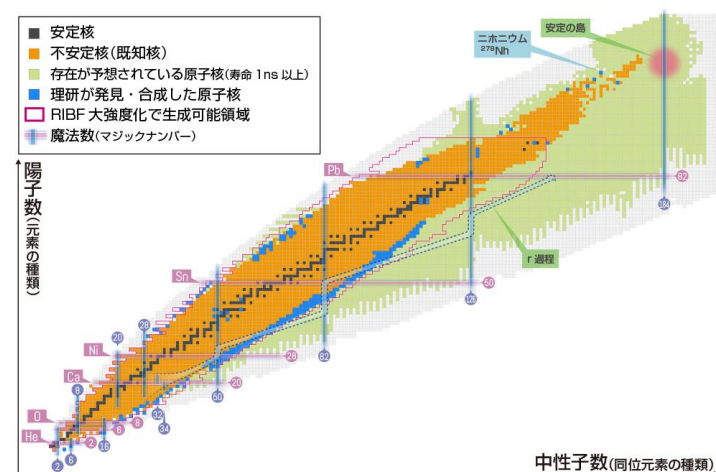
我々がガストリッパーという装置で開発・運用経験を持つ技術

研究背景(RIBF施設とストリッパー)

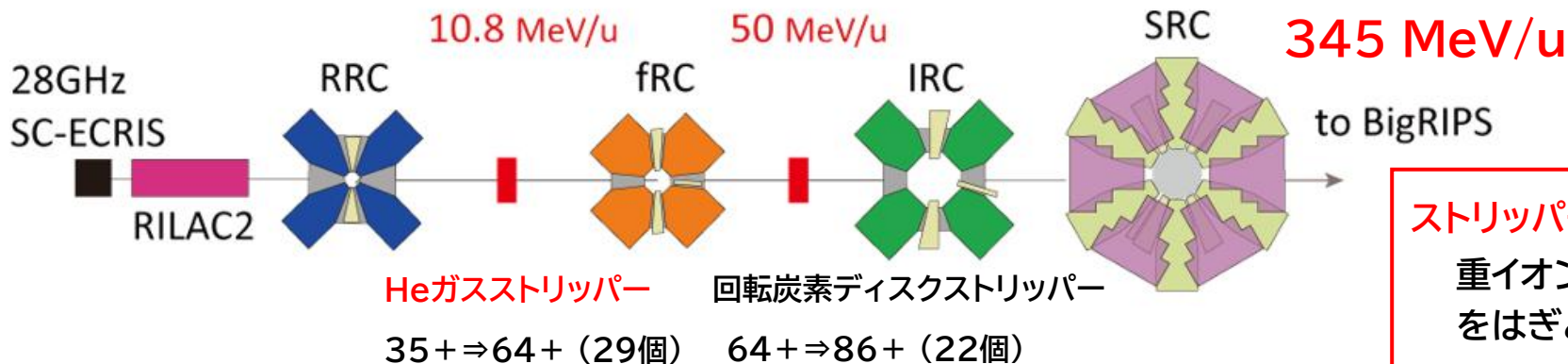


RIBFの加速器

たくさんのサイクロトロンを用いて水素からウランまで全元素を**光速の約70%**まで加速し、RIビームを大量につくる

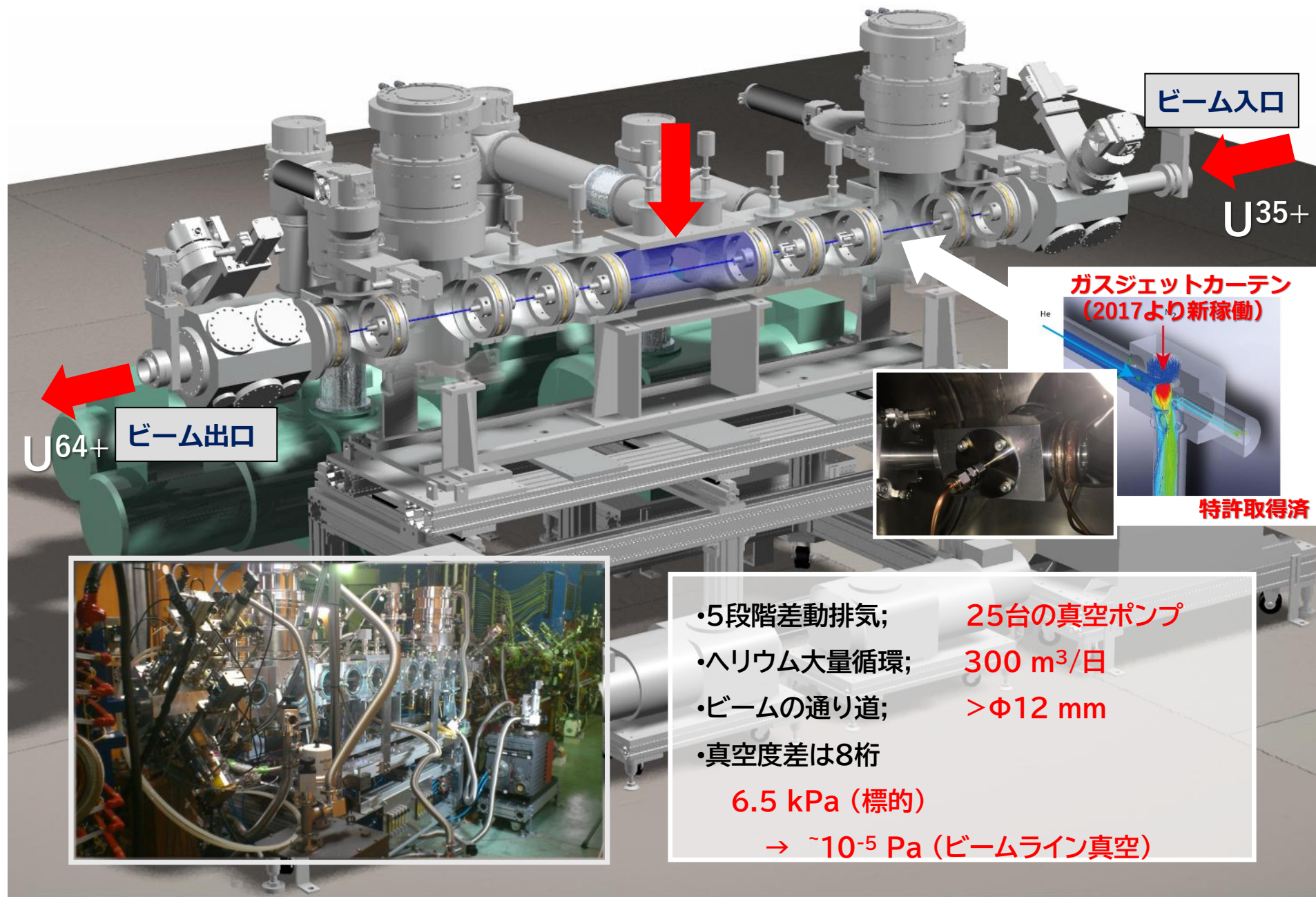


ウラン加速スキーム

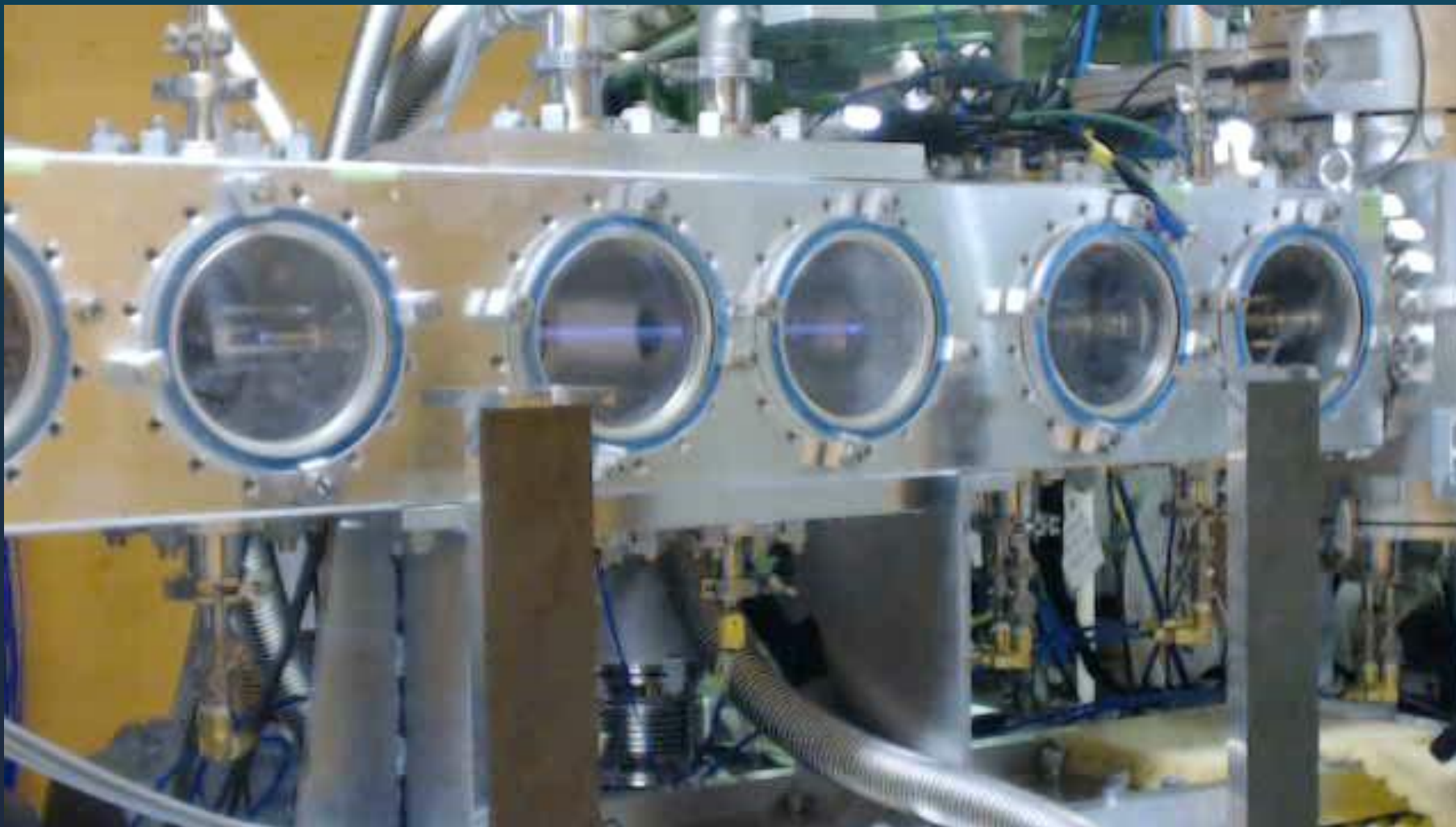


ストリッパー: 重イオン加速器特有の装置
重イオンビームを物質にぶつけて電子をはぎとり、電荷を上げる

研究背景(Heガスストリッパー)



研究背景(ウランビーム)



研究背景(Heガス循環系)

N₂ ジェットカーテン

He封止とガス置換

出典: <https://pubs.aip.org/aip/rsi/issue/97/3>

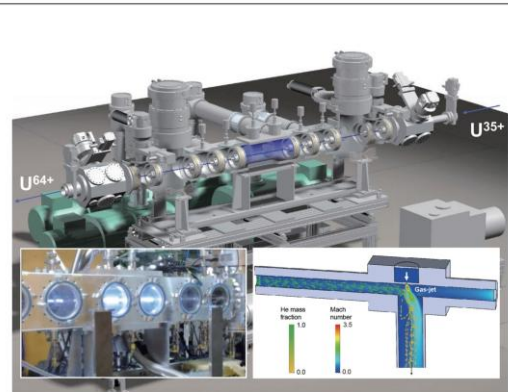
Review of Scientific Instruments

AIP Publishing

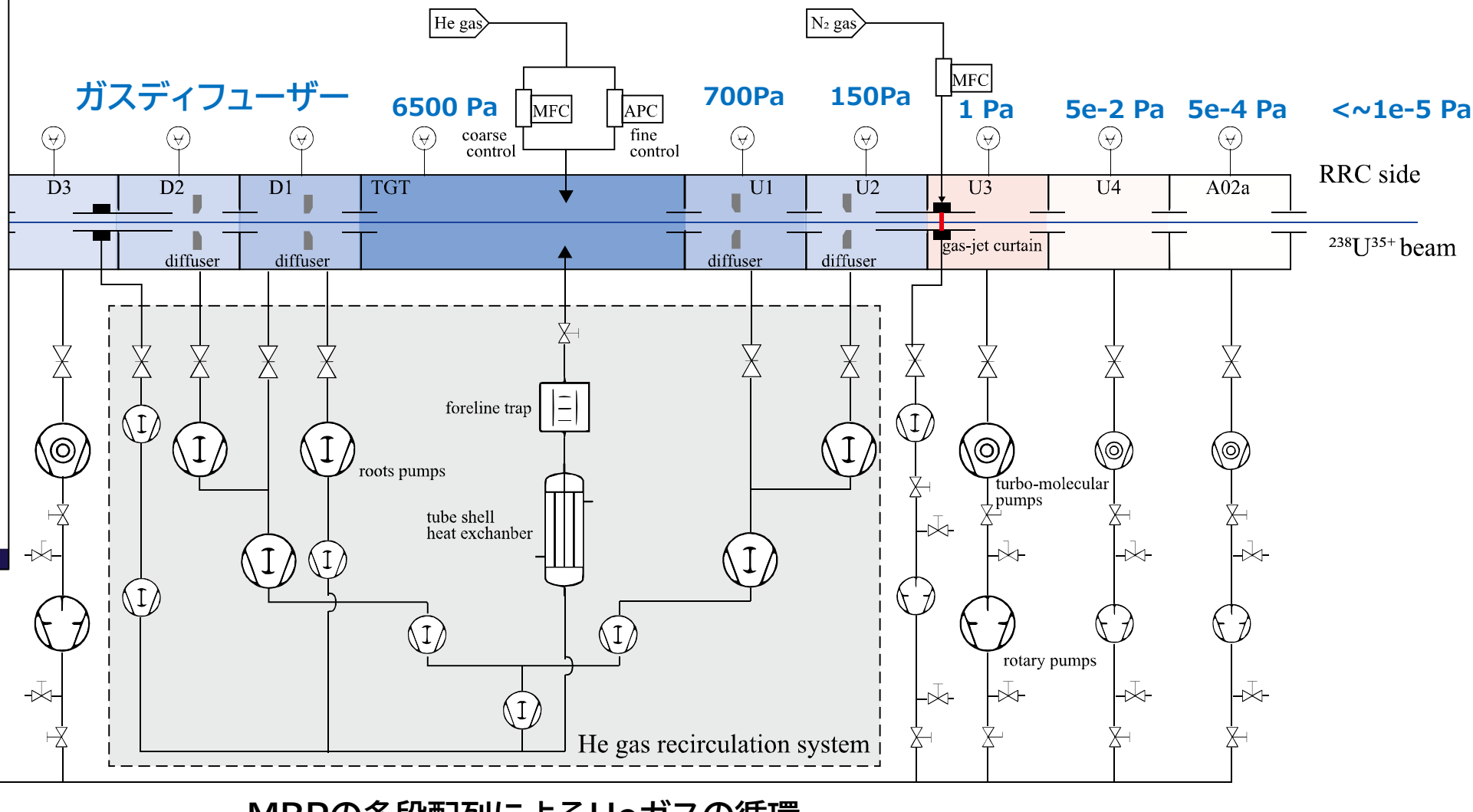
Vol. 97, Iss. 3, Mar. 2026

Design and operation of a helium gas stripper for high-intensity uranium beams at the RIKEN radioactive isotope beam factory

Hiroshi Imao, Hiroki Okuno, Hiroo Hasebe, Yasuto Miyake, Ryo Koyama, and Osamu Kamigaito



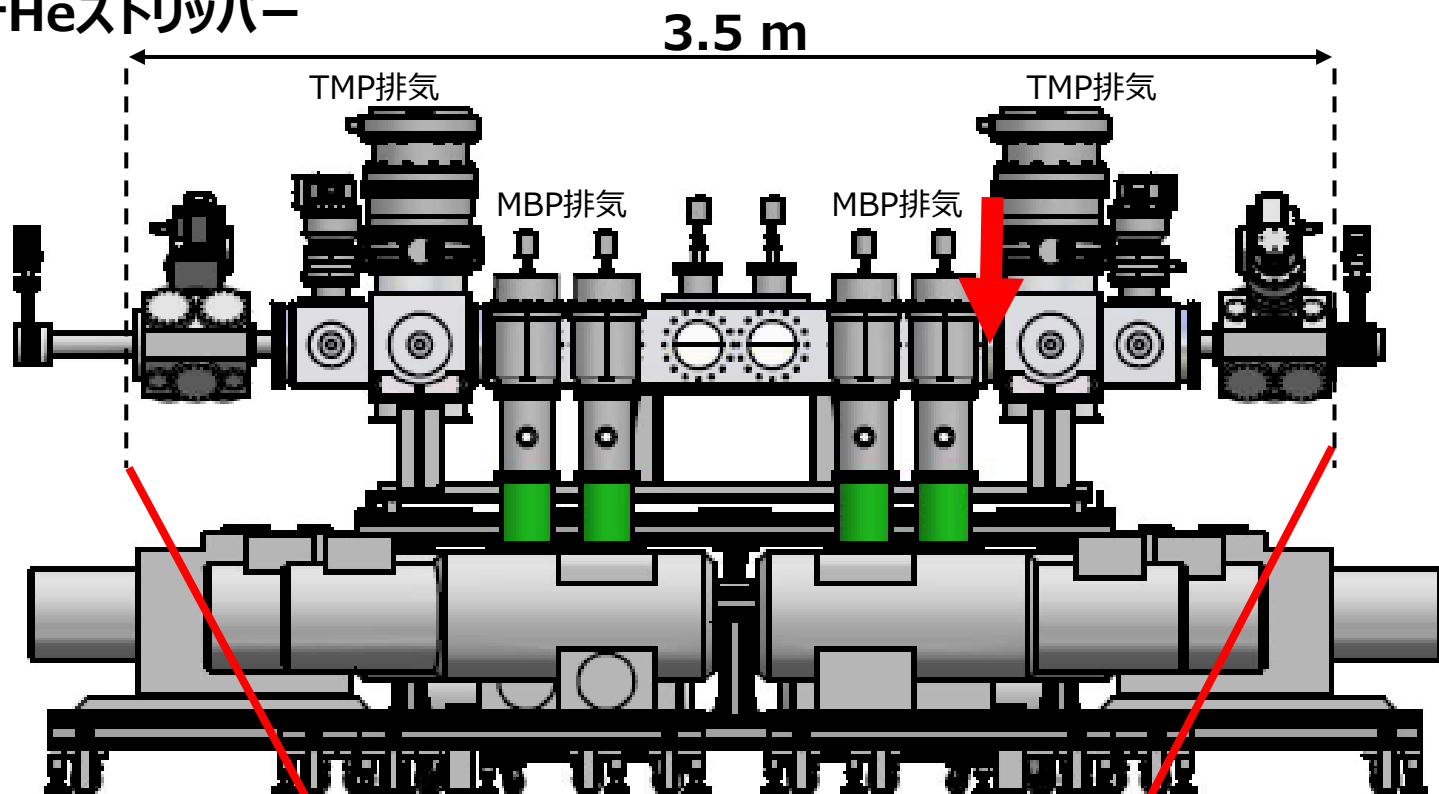
Available Online: pubs.aip.org/aip/rsi



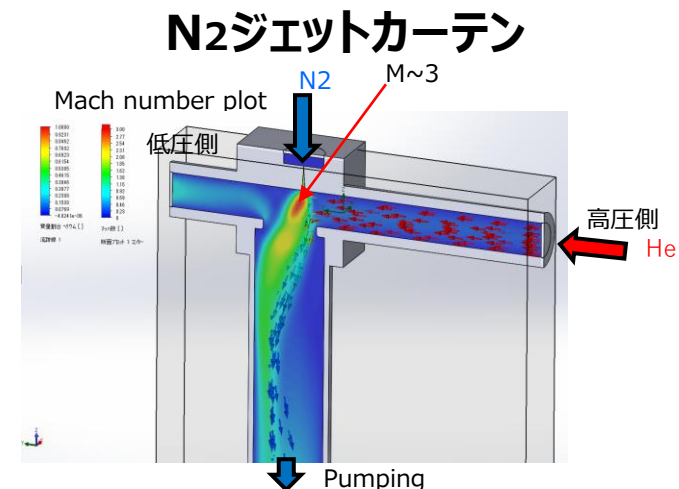
MBPの多段配列によるHeガスの循環
(~380 SLM)

研究背景(高性能化の必要性)

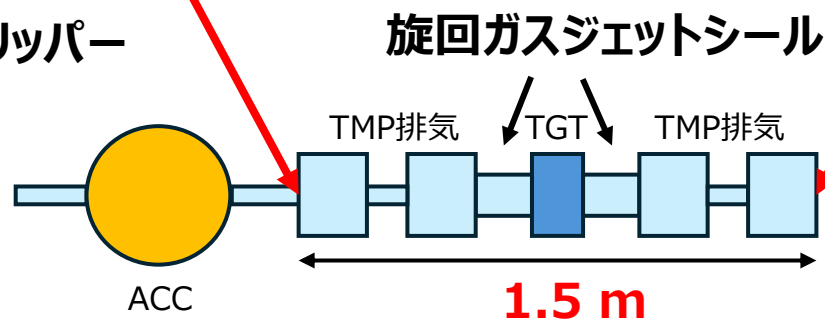
現行Heストリッパー



5段階差動排気
Φ12 mm



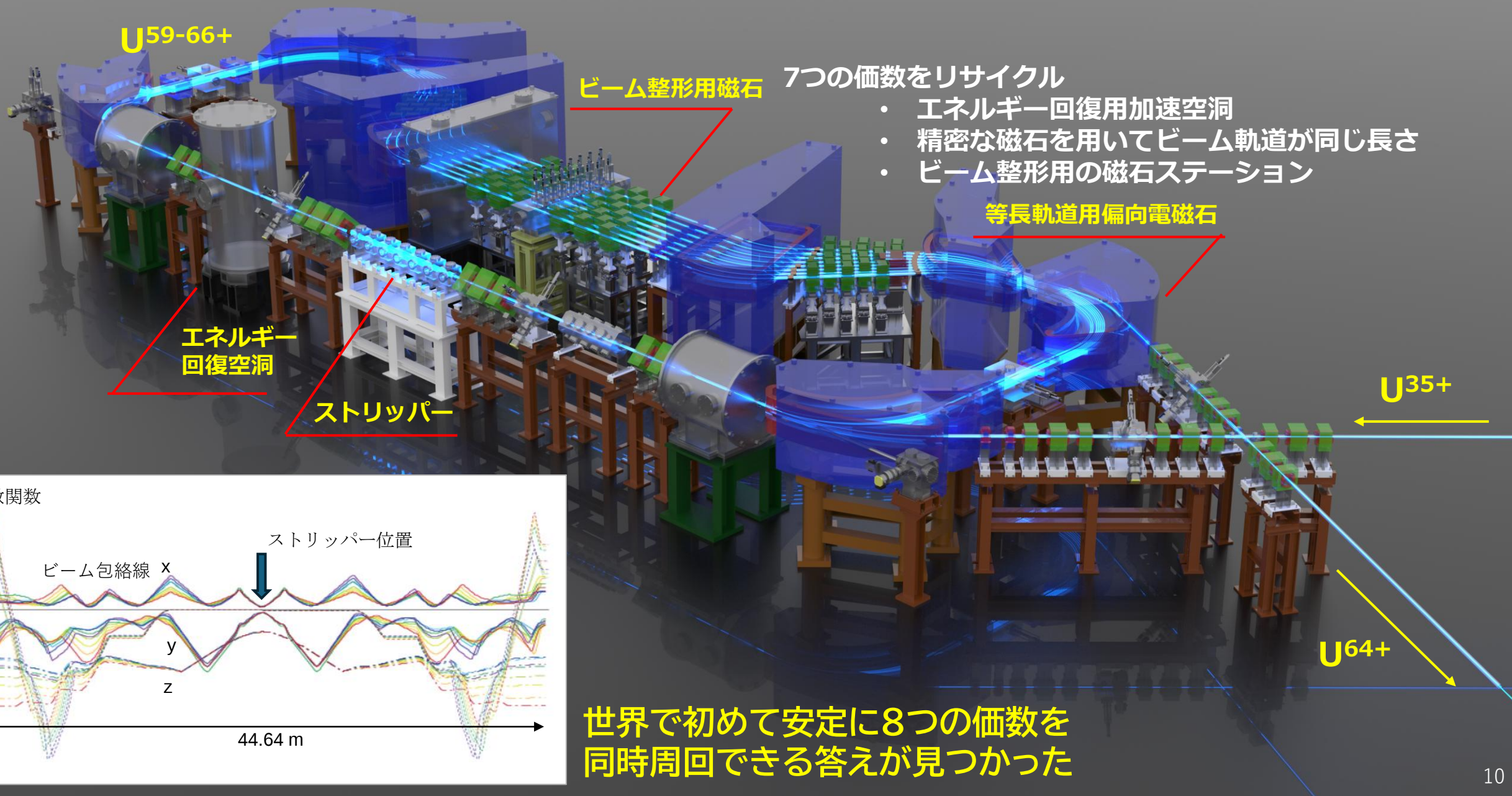
新型Heストリッパー



2段階差動排気
Φ15 mm

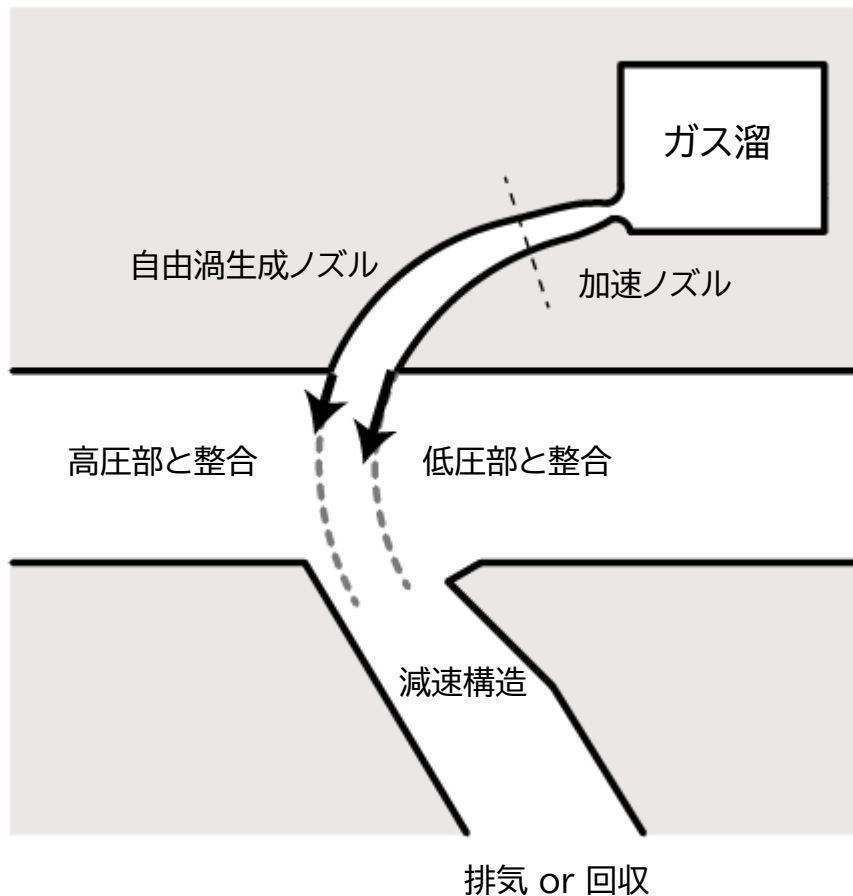


研究背景(荷電変換リング、CSR)



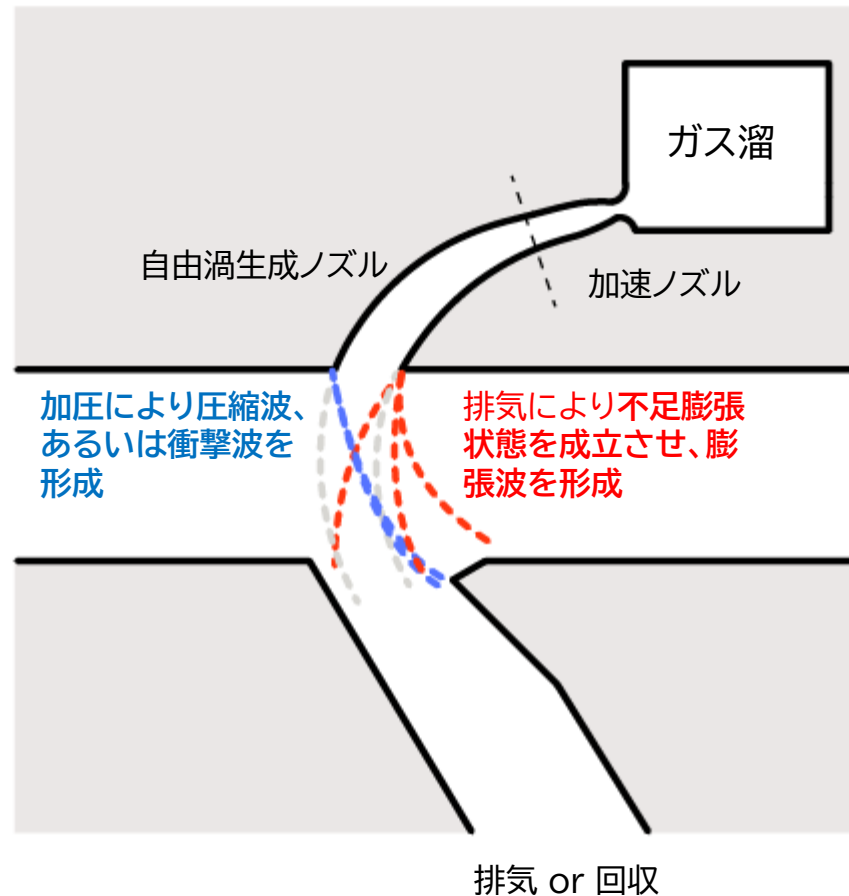
新技術の特徴・従来技術との比較

従来の自由渦型ガスジェット



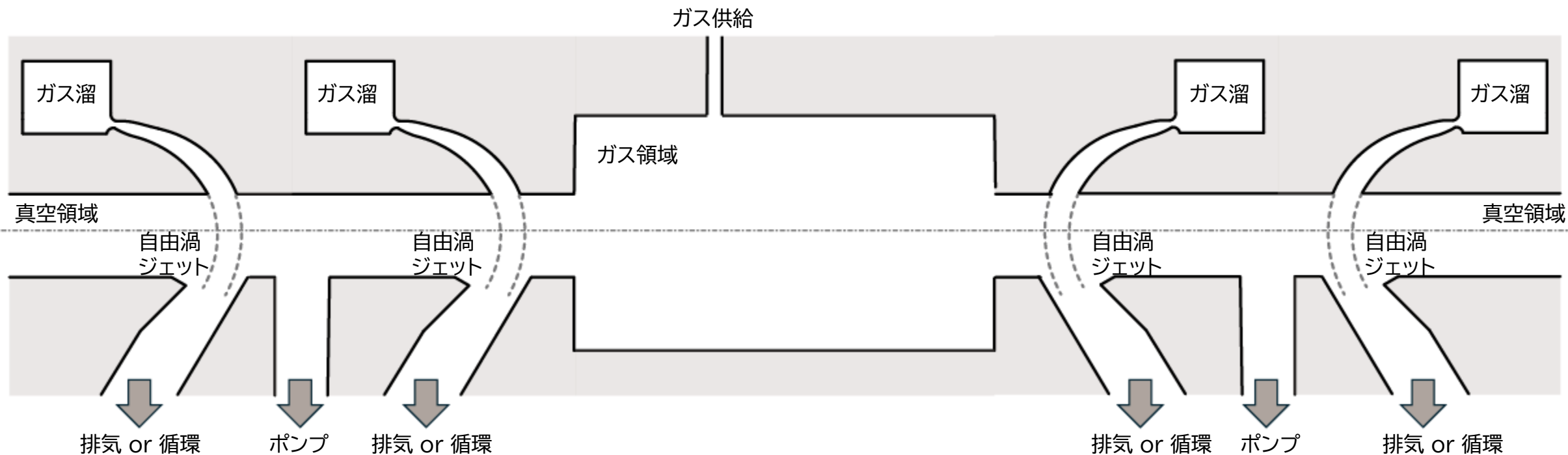
低圧駆動時の実流では境界層形成により流れが理想状態から乖離し、圧力比が上がらない → 圧力比～5程度

新しい自由渦型ガスジェット



整合条件を意図的に乱す
自由渦流れに起因する半径方向圧力差と、
圧力波形成による圧力差の合成

新しい自由渦型ジェットによる ガストリッパ構成例

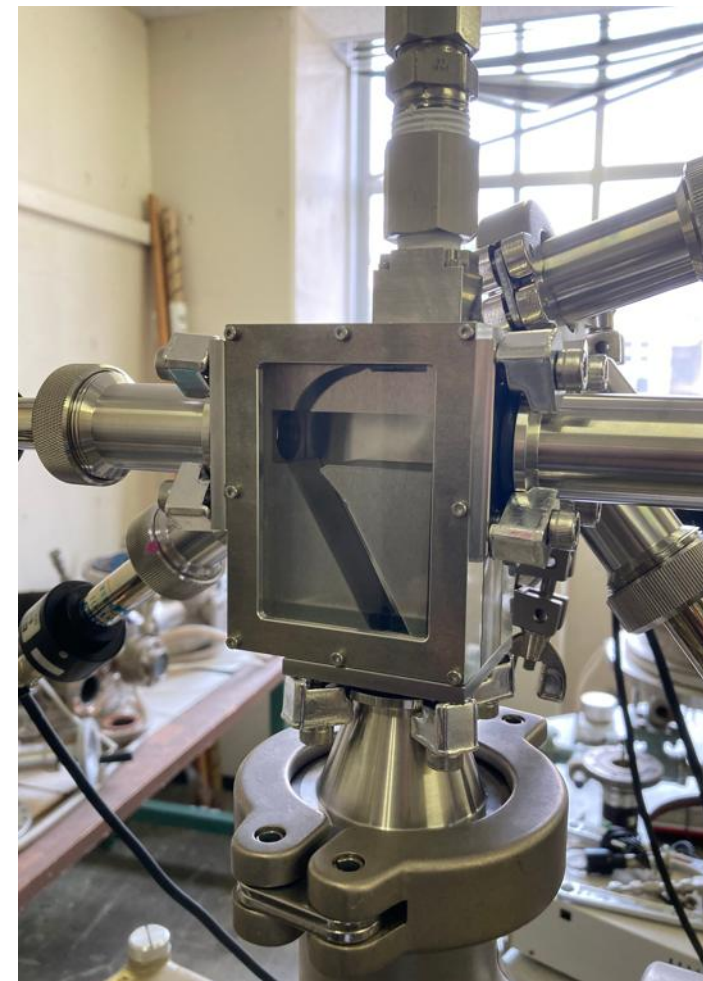
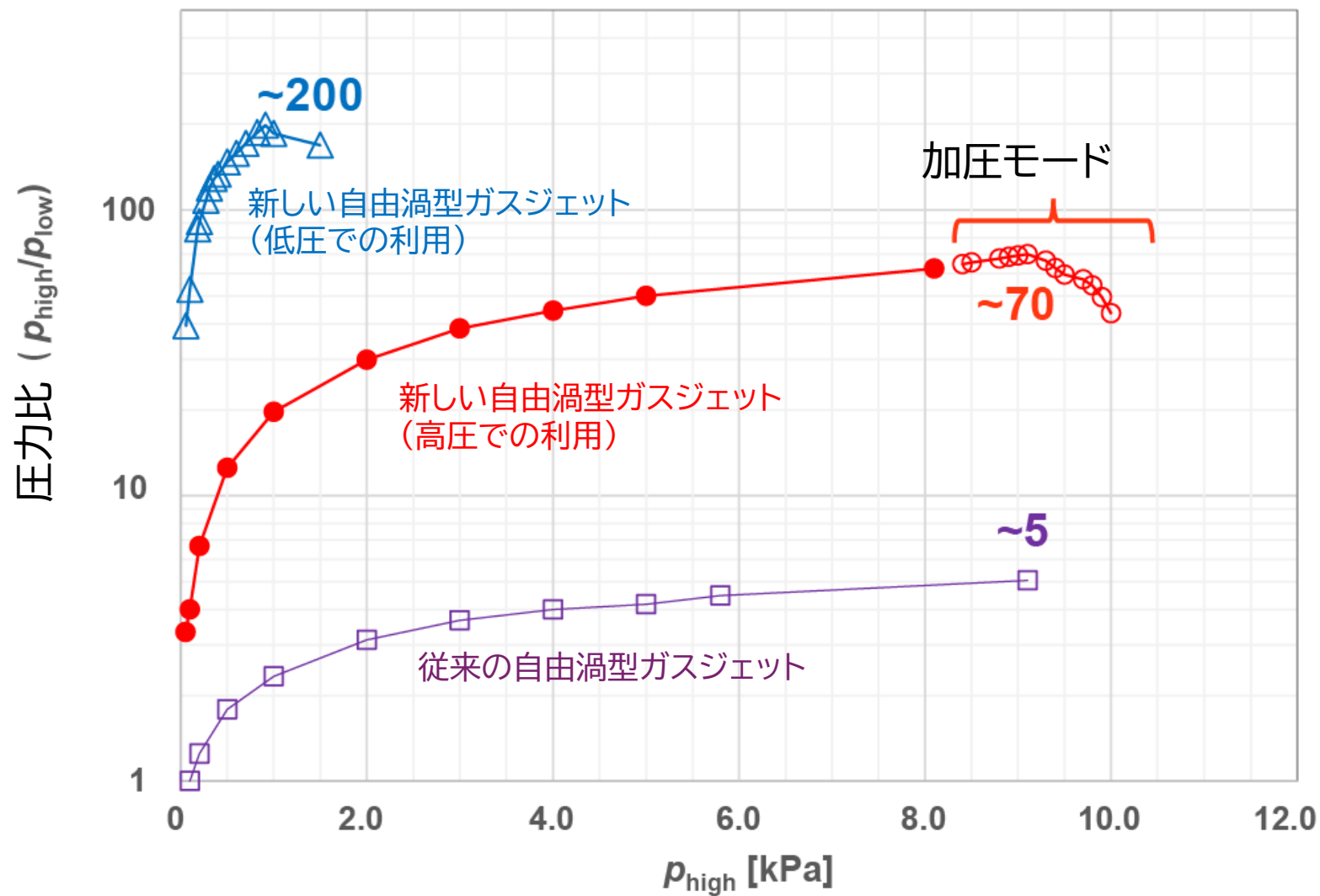


本構成は、差動排気、一様流型ジェットによる圧力波形成、自由渦型ジェットを組み合わせた複合構成である。従来技術の要素を統合することで、設計自由度を高め、より高性能な開口型シールを実現する。

- 差動排気の負担をジェット側で低減できる
- 圧力波形成により、流れ場を有利に制御できる
- 自由渦型ジェットにより、高い圧力遮断性能が期待できる
- 段ごとの機能分担により、設計最適化の自由度が高い

実験的に得られた結果の比較

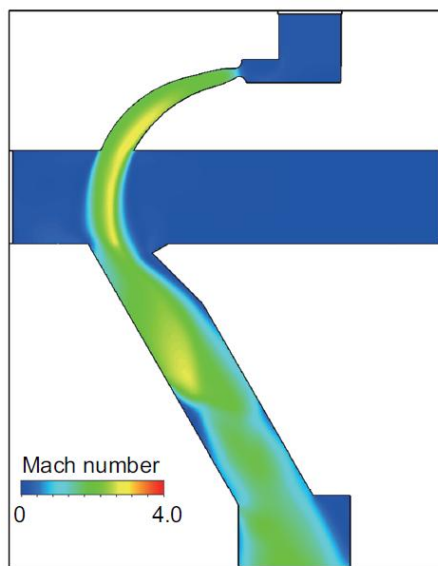
圧力比の高圧側圧力依存性



流体計算と実測による裏付け

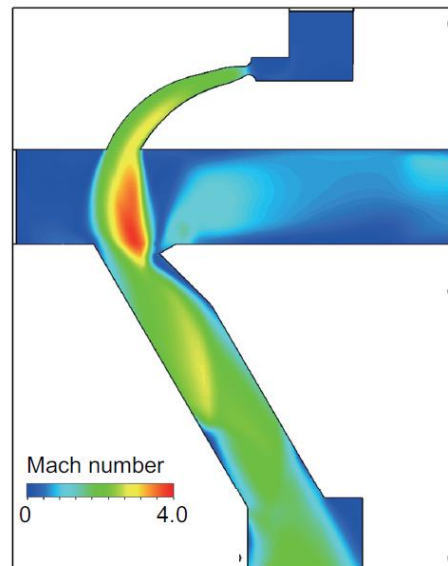
マッハ数の計算

従来の自由渦型ガスジェット



整合状態に近い自由渦流れ

新しい自由渦型ガスジェット



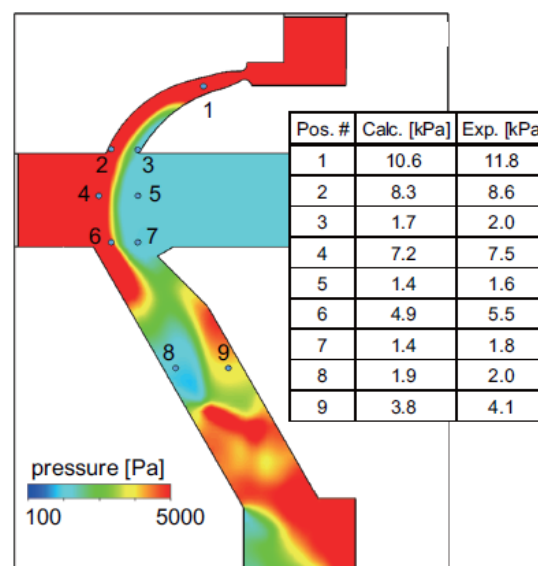
排気により高速領域が形成

CFD(SOLIDWORKS Flow Simulation)により、排気を導入した場合に自由渦ジェット近傍で高マッハ数領域が形成されることを確認。

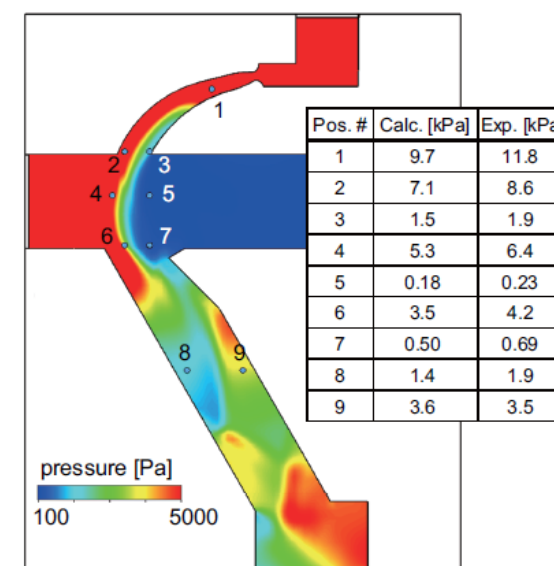
これは、排気条件が流れ場を大きく変化させ、圧力隔離性能を高め得ることを示す。

圧力分布の計算と実測

従来の自由渦型ガスジェット



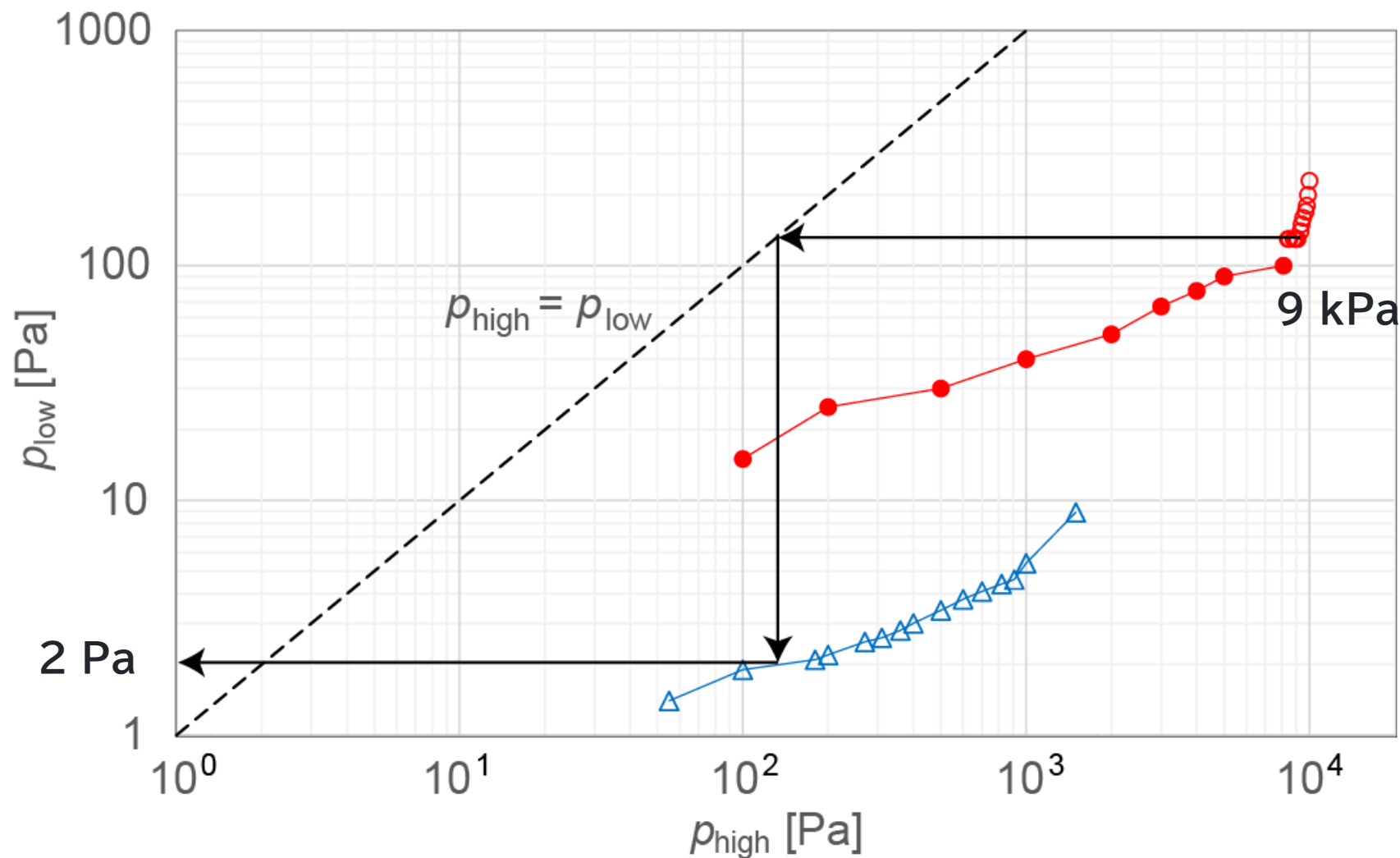
新しい自由渦型ガスジェット



圧力分布は、CFD計算と細孔を用いた圧力測定で概ね一致。内部流れ場と圧力分布を、CFDで妥当に再現できている。

新しい自由渦型ジェットの流れ場を、流体力学的に裏付けた。

多段階利用における高圧力比化



2段階で圧力比～4500が実現可能
更なる多段化も考えられる

想定される用途：口径・圧力領域から見た展開先

用途ごとに必要な開口径と圧力差は大きく異なる。
まずは「cm級開口・中間圧～低圧ガス・差動排気併用」が現実的な導入領域。

口径
φ0.1 mm ～ 100 mm超

ガス側圧力
Pa ～ 大気圧

真空側要求
低真空 ～ 高真空

設計の焦点
排気系規模・ガス消費量

用途	通したいもの	目安口径	ガス側圧力	真空側の目安	位置づけ
加速器 ビーム利用	イオン・陽子・電子	φ10-30 mm	1-10 kPa	10 ⁻⁴ -1 Pa級	研究・実証
質量分析 分子導入	イオン・分子 液滴・エアロゾル	φ0.1-2 mm	大気圧～kPa	10 ⁻³ -10 Pa	小口径： 既存技術との比較
分析・計測 環境セル	電子線・X線 レーザー・試料	φ1-10 mm	10 ² -10 ⁵ Pa	10 ⁻³ -1 Pa	窓なし観察・ 反応場形成
半導体 表面処理	基板・プラズマ 光・電子	φ10-100 mm	1-10 ³ Pa	10 ⁻³ -10 Pa	局所ガス プロセス
真空搬送 非接触シール	小型試料 チップ・搬送体	φ10-100+ mm	10 ² -10 ⁵ Pa	10 ⁻² -10 Pa	大口径化と 省ガス化が鍵
極端な 概念例	光・粒子 小型物体	φ10-100+ mm	10 ⁵ Pa	宇宙空間	長期構想： 技術思想の例示

注：数値は初期検討用の目安。実際の成立性はガス種、開口形状、許容漏れ量、排気・循環系との組合せで決まる。

実用化に向けた課題

1 基本素子最適化

- ・ノズル形状最適化
- ・ディフューザー形状最適化

2 条件展開

- ・多ガス種への対応
- ・ガス循環系開発
- ・長時間安定性

3 スケールアップ

- ・大口径化
- ・多段化
- ・コンパクト化

4 システム化

- ・圧力の自動制御
- ・排気・循環系の一体化
- ・安全インターロック用途別モジュール化

最終的な到達点

高圧力比

大開口

省ガス化

小型モジュール化

単一用途の専用品ではなく、用途に応じて構成を組み替えられる開口型真空シール技術へ展開する

期待する企業・パートナー

真空装置・ポンプ・精密加工・制御メーカー
半導体、分析、表面処理、ビーム利用、宇宙利用などの用途企業

企業にとってのメリット

既存装置への新しい非接触シール機能の追加
局所ガス環境を利用した新プロセス・差別化技術の創出

共同開発により、研究成果を用途別の実用モジュールへ展開する

社会実装への道筋

用途ごとの要求を起点に、要素最適化から多段モジュール化・実証へ段階的に進める

用途要求の整理

単段素子の最適化

多段・循環系の統合

用途別実証・標準化

時期	取り組む課題・明らかにしたい原理等	社会実装への取り組み
現在 基盤確立	・自由渦型ジェットの高圧力比化を実証 ・CFDと圧力測定により流れ場を裏付け ・空気・15 mm級開口で原理検証	・論文発表・特許化 ・用途候補と要求仕様の整理 ・企業連携先の探索
短期 1～2年	・用途別にノズル形状を最適化 ・ディフューザー／排気条件を最適化 ・空気以外のガス種に対応	・単段デモ機の共同評価 ・半導体、分析、ビーム用途の要求確認 ・共同研究／試作開発
中期 2～3年	・大口径化と多段化を実施 ・ガス循環・回収系を統合 ・長時間安定性、安全インターロックを評価 ・研究用途での実装(2030年:荷電変換リングCSR)	・用途別プロトタイプを装置へ組み込み ・実環境での運転データ取得 ・評価サンプル／実証サービスの開始
長期 5年程度	・コンパクトなモジュール構成を確立 ・保守性、製造性、コストを最適化 ・標準仕様と適用範囲を明確化	・製品化・ライセンス化 ・装置メーカーとの共同事業化 ・産業用開口型シールとして展開

社会実装の鍵:用途ごとに「口径・圧力比・ガス種・流量・回収性」を同時最適化すること

企業への貢献、PRポイント

用途に応じた装置構成の検討から試作・実証まで、企業と共同で展開できます。

応用のヒント

真空装置に“開いた機能ポート”を作ると、次のような用途が考えられます。

1 撃ち込む

レーザー・粒子線を導入

加工、照射、ビーム分析
窓材による減衰・散乱・熱負荷を回避

2 見る

真空外から観察・計測

カメラ、顕微鏡、光学センサーで内部を見る
窓材による減衰を回避

3 操作する

小型アームなどで操作

小型アーム、プローブ、ノズルなどを差し込む
真空を開けずに位置調整・接触・微小操作ができる

4 通す

ワークを連続搬送・処理

小型部品、チップ、カプセルなどのインライン処理
真空引き・大気開放を繰り返し返さない

我々が協力できること

企業の用途・制約に合わせ、要素設計からシステム化まで支援します。



用途に応じた構成提案

装置配置・開口・圧力領域の整理



ノズル・ディフューザー設計

ガス種、口径、圧力比に応じた最適化



流体計算・性能評価

CFD、圧力測定、流量評価による裏付け



試作・実験検証

小型実証機から用途別試験まで対応



排気・循環系を含むシステム化

ポンプ、回収、制御、安全系まで含めて検討

企業ニーズ



共同検討



試作・実証

要素技術だけでなく、用途に応じた装置インターフェースとして共同開発できます。

本技術に関する知的財産権

発明の名称 : 差圧室連通装置及び差圧室連通方法
出願番号 : 特願2017-099927
出願人 : 国立研究開発法人理化学研究所
発明者 : 今尾 浩士

発明の名称 : 空力窓生成装置、その動作方法、ガス保持装置、およびガスストリッパー
出願番号 : 特願2026-091241
出願人 : 国立研究開発法人理化学研究所、国立大学法人長岡技術科学大学
発明者 : 今尾 浩士、高橋 一匡

お問い合わせ先

株式会社理研イノベーション
ライセンス部

license-contact@innovation-riken.jp

TEL : 048-235-9308 (代表)