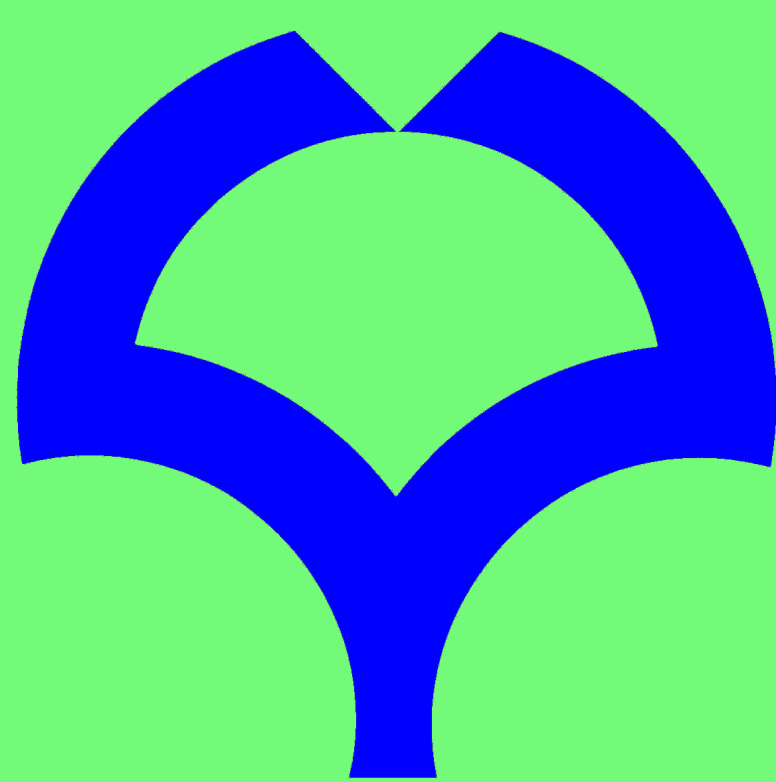




COMET Phase-I 宇宙線試験に向けた CDCガスシステムの取り組み



大阪大学 大学院理学研究科 青木研究室 修士二年
河野 朱慧

COMET Phase I実験 @J-PARC

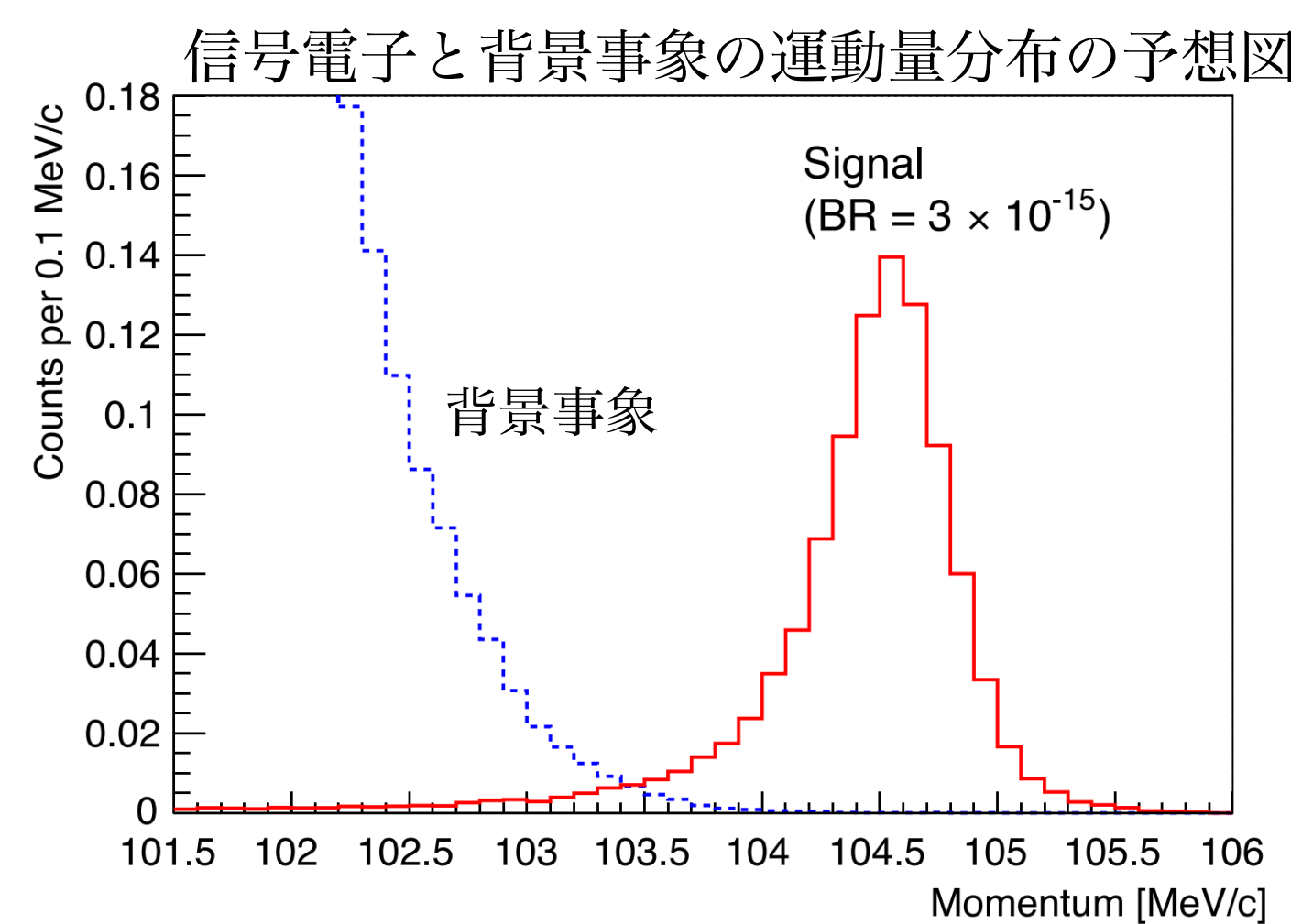
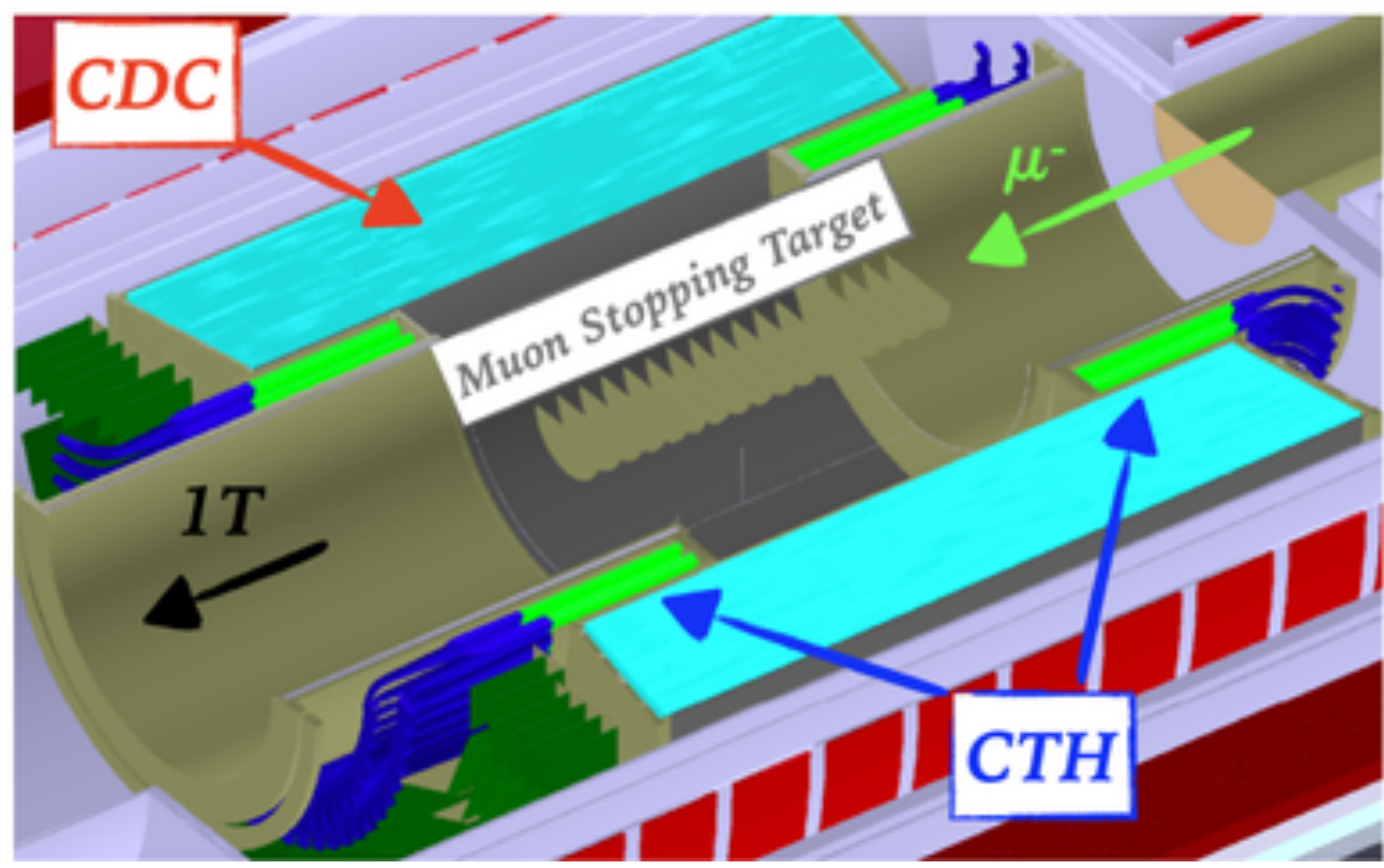
標準模型で禁止されているミュオン-電子転換（ μ - e 転換）を探索する実験。

陽子ビームを炭素標的に当て、 π 粒子を生成。 π 粒子の崩壊で生じた μ 粒子をAl標的に当て、放出された電子の運動量を『Cylindrical Drift Chamber (CDC)』で測定。

探索感度： 10^{-15} （SINDRUM II実験^[1]の100倍）

円筒型ドリフトチェンバー CDC

信号事象である105 MeV/cの電子の運動量を測定するガス検出器。



構造：20層、4,986本のセンスワイヤーで構成する多線式電離箱。2084 L

使用ガス：He : iC_4H_{10} = 90 : 10（混合ガス）

検出原理：入射電子がガス分子を電離し、陽極付近の強電場によってガス増幅を引き起こすことで、微弱な電気信号として検出。

安定性：「飛跡の再構成」「信号電子と背景事象の識別」には、ガス混合比の維持、および不純物の除去によるガス物性（ドリフト速度やゲイン）の安定化が不可欠。

CDC 許容ゲージ圧

内圧に対しては引張膜応力が支配的であり十分な余裕（MPa級）があるため、最も厳しい制約「外圧による殻座屈」を基準とする。

殻座屈の理論式（Donnell型の円筒殻理論）に基づく薄肉円筒の線形座屈圧

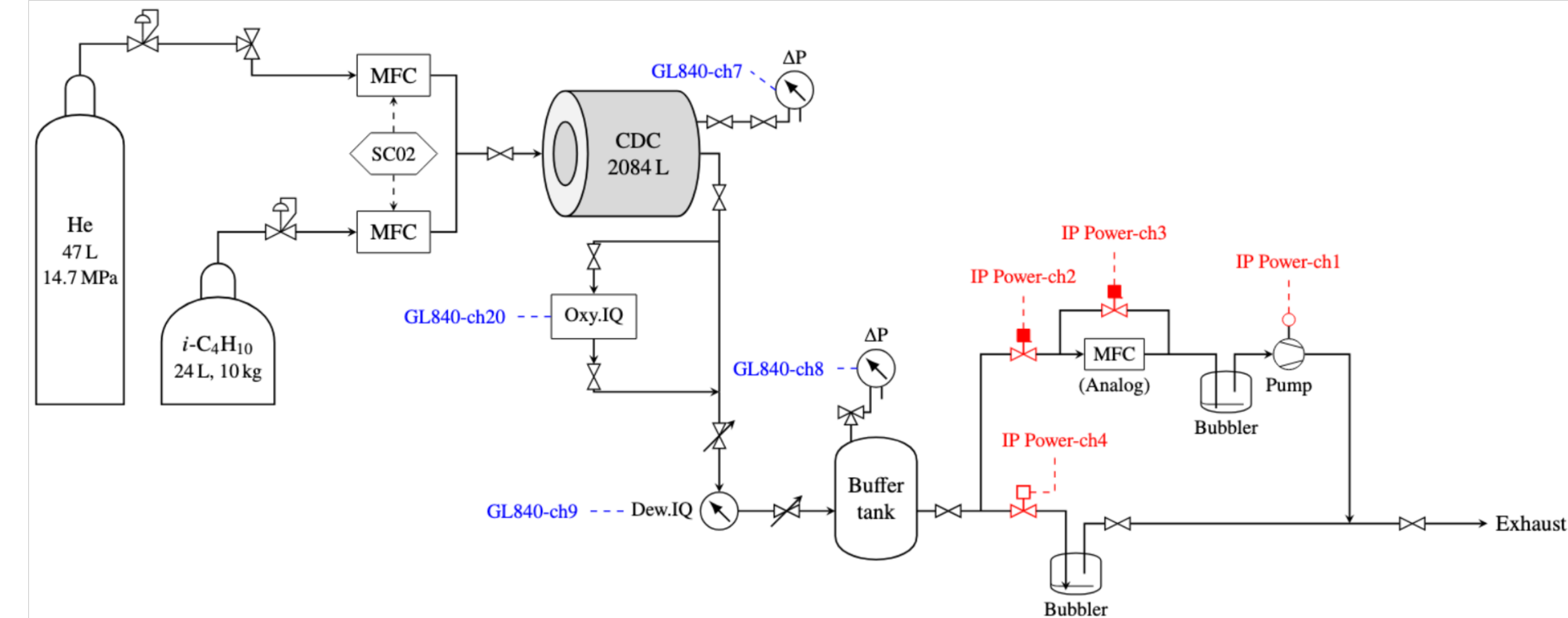
$$p_{cr} \approx 1.21 E_{\theta} \left(\frac{t}{R} \right)^3$$

E_{θ} : フープ方向有効弾性率[GPa] R : 円筒半径[m]
 t : 円筒厚さ[m]

- 内筒: $p_{cr,i} \approx 0.33 - 0.41$ kPa
 - 外筒: $p_{cr,e} \approx 55 - 69$ kPa
- 初期不整より数 kPa オーダーまで低下する可能性アリ
→許容ゲージ圧: $-3000 \sim +300$ Pa

現状のガス供給システム

CDCにHeのみを供給し、一度の通過で全量廃棄する「一方通行」方式。



9月から始まる宇宙線試験のため、1週間でCDC内部を99%以上を混合ガスに置換する「ガスパージシステム」を設計、運用する。

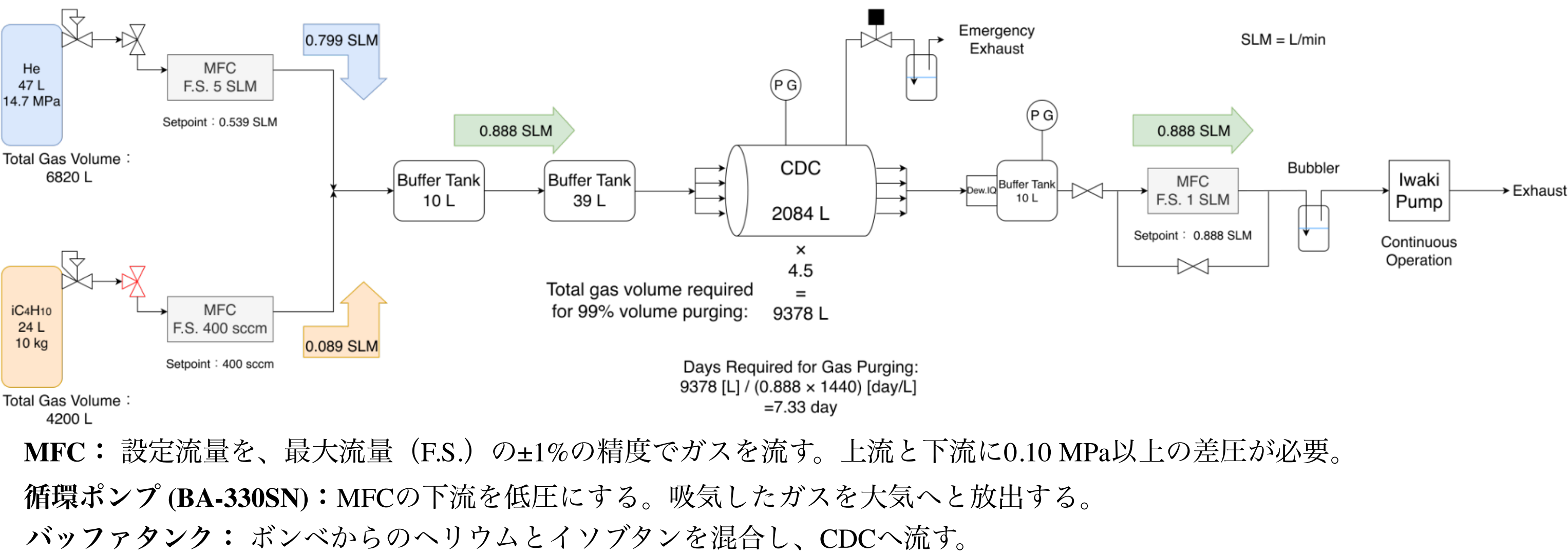
ガスパージシステム

ポンペから供給されるヘリウム・イソブタンガスをマスフローコントローラー(MFC)で、合計流量 0.888 SLM を供給できるよう制御。

→1週間でCDC内部の99%以上を置換

CDCの許容ゲージ圧 +300 Paを超えないよう、緊急排気ライン設置。

→意図したゲージ圧範囲内で排気が行われるか確認



MFC：設定流量を、最大流量（F.S.）の $\pm 1\%$ の精度でガスを流す。上流と下流に0.10 MPa以上の差圧が必要。
循環ポンプ（BA-330SN）：MFCの下流を低圧にする。吸気したガスを大気へと放出する。
バッファタンク：ポンペからのヘリウムとイソブタンを混合し、CDCへ流す。

排気ラインと配管抵抗

配管抵抗：気体が配管を流れることで生じるエネルギー損失。

$$\Delta P = \frac{128 \mu L}{\pi D^4} Q$$

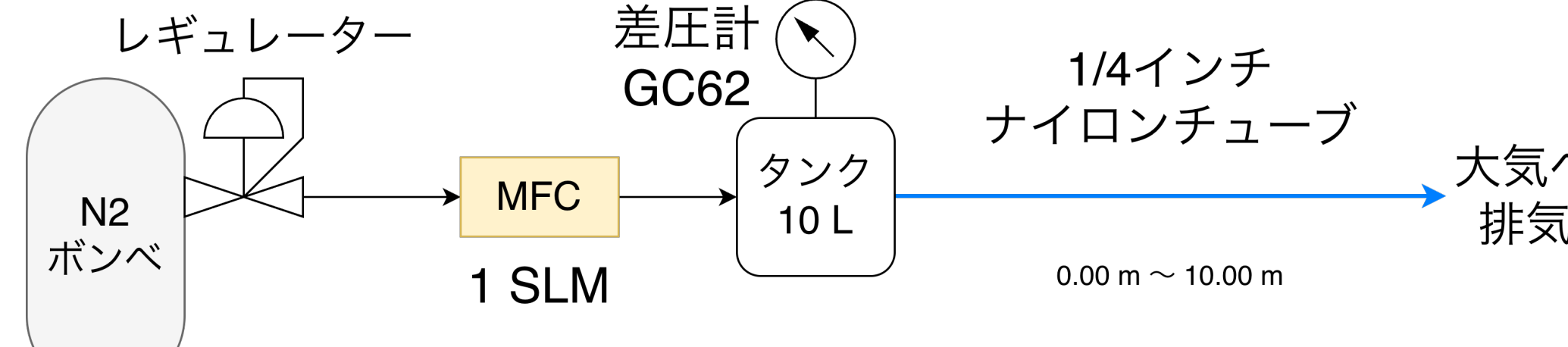
Q : 体積流量[m³/s] μ : 気体の粘度[Pa·s]
 L : 配管長さ[m] D : 配管内径（直径）[m]

ガスパージシステムに使用するナイロンチューブの配管抵抗を測定、一次関数にフィット。

セットアップ

ナイロンチューブ長さ

- ・ 0 m
- ・ 0.5 m
- ・ 1.0 m
- ・ 2.0 m
- ・ 5.0 m
- ・ 10.0 m



目標：各配管長さに対する差圧計の値からフィットした一次関数が、差圧計の誤差 ± 6 Pa以内。

結果

各配管長さのセットアップで、差圧計の値を評価。

横軸：差圧計のゲージ圧 縦軸：配管長さ

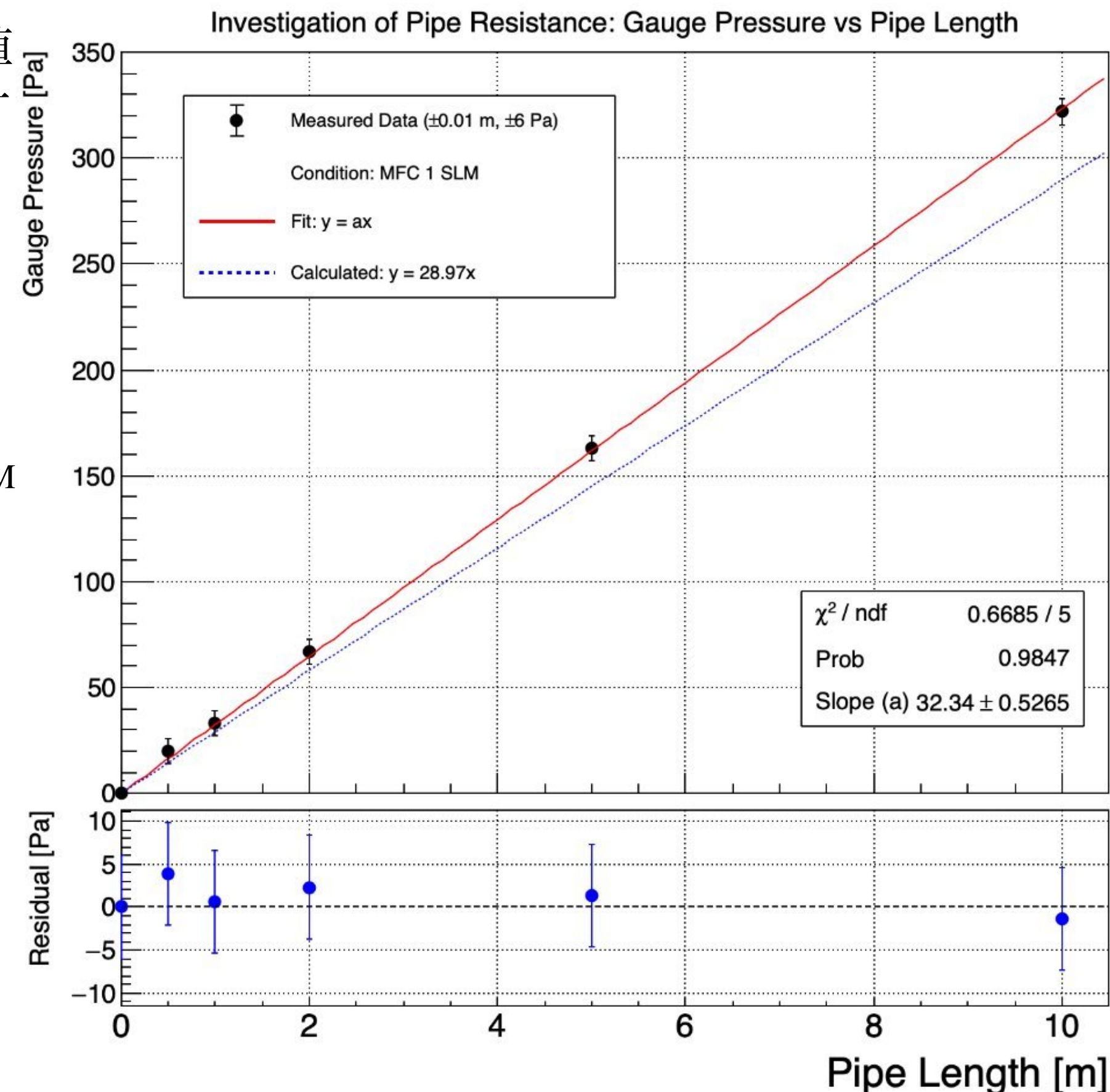
※点線「Calculated」は、20°Cで窒素ガスを1 SLM 流した場合の配管長さ x と配管抵抗 y の関係式
 $y = 28.97x$

フィット関数の値が、全実測値の誤差範囲内。

→ナイロンチューブの配管抵抗

$$P = 32.34L$$

ガスパージシステムの排気ライン設計は上記式を参照。



排気ラインの設置

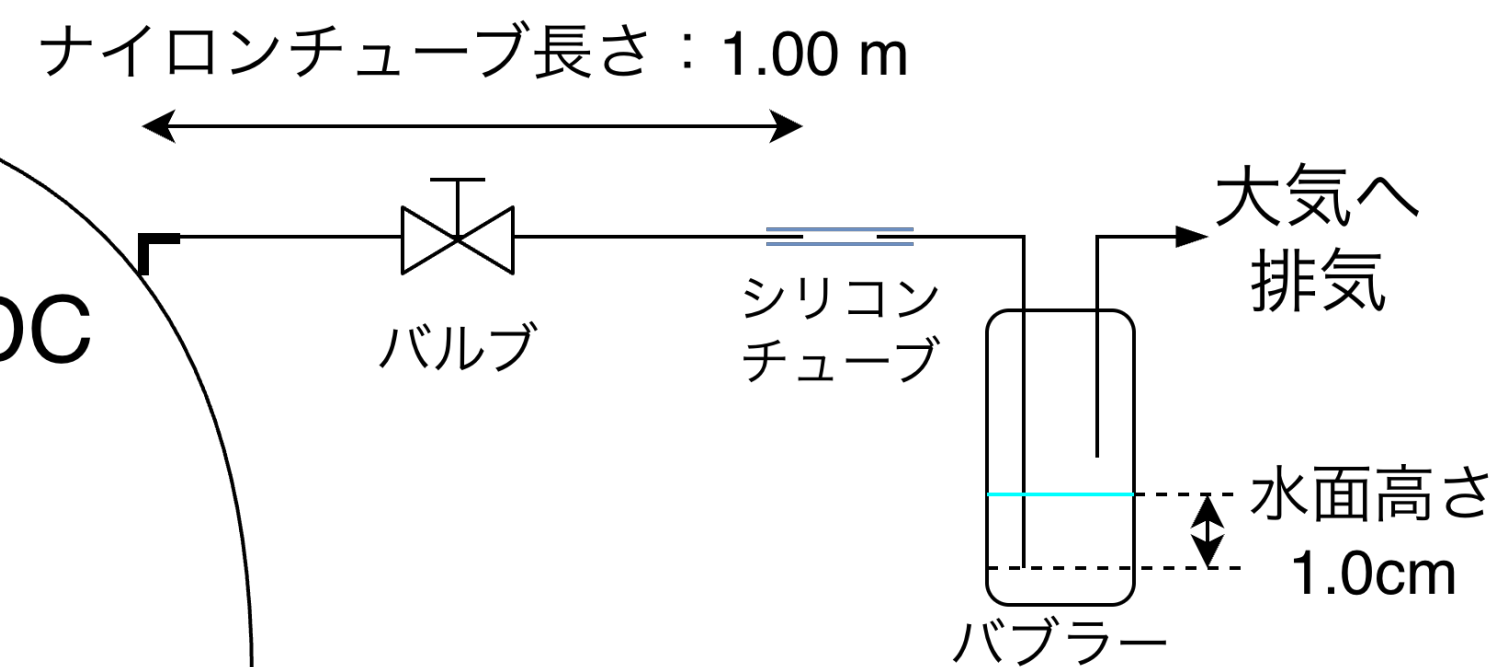
台風の低気圧・停電による温度上昇から生じるCDCゲージ圧の上昇への対策として、バブラーを使用した緊急排気ラインを設置。台風期間のCDCゲージ圧をモニター。

セットアップ

バブラーの排気差圧 ΔP の式

$$\Delta P = \rho h g + \frac{2\gamma}{r} + \frac{128 \mu L}{\pi D^4} Q$$

ρ : バブラー液体の密度[kg/m³] g : 重力加速度[m/s²] r : オリフィス半径[m]
 h : オリフィスからの水面高さ[m] γ : 液体の表面張力[N/m]



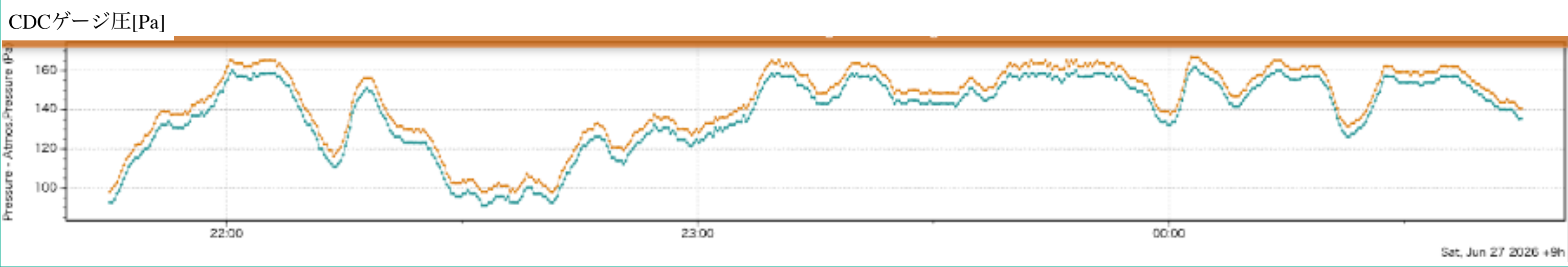
過去測定から、停電時にCDCから最大0.817 SLMが流れる。

$$\Delta P_{max} = 97.58 + 58.24 + 24.93 = 180.75 \text{ [Pa]} \rightarrow \text{CDCゲージ圧が180 Pa以下に収まることを確認する。}$$

結果

CDCゲージ圧の上昇が、155 Paから180 Paの範囲内で頭打ち。

→排気ラインによるゲージ圧制御が可能と確認。



ガス循環システムへの発展

運用コストを1/10倍に削減するため、混合ガスを純化し再利用。

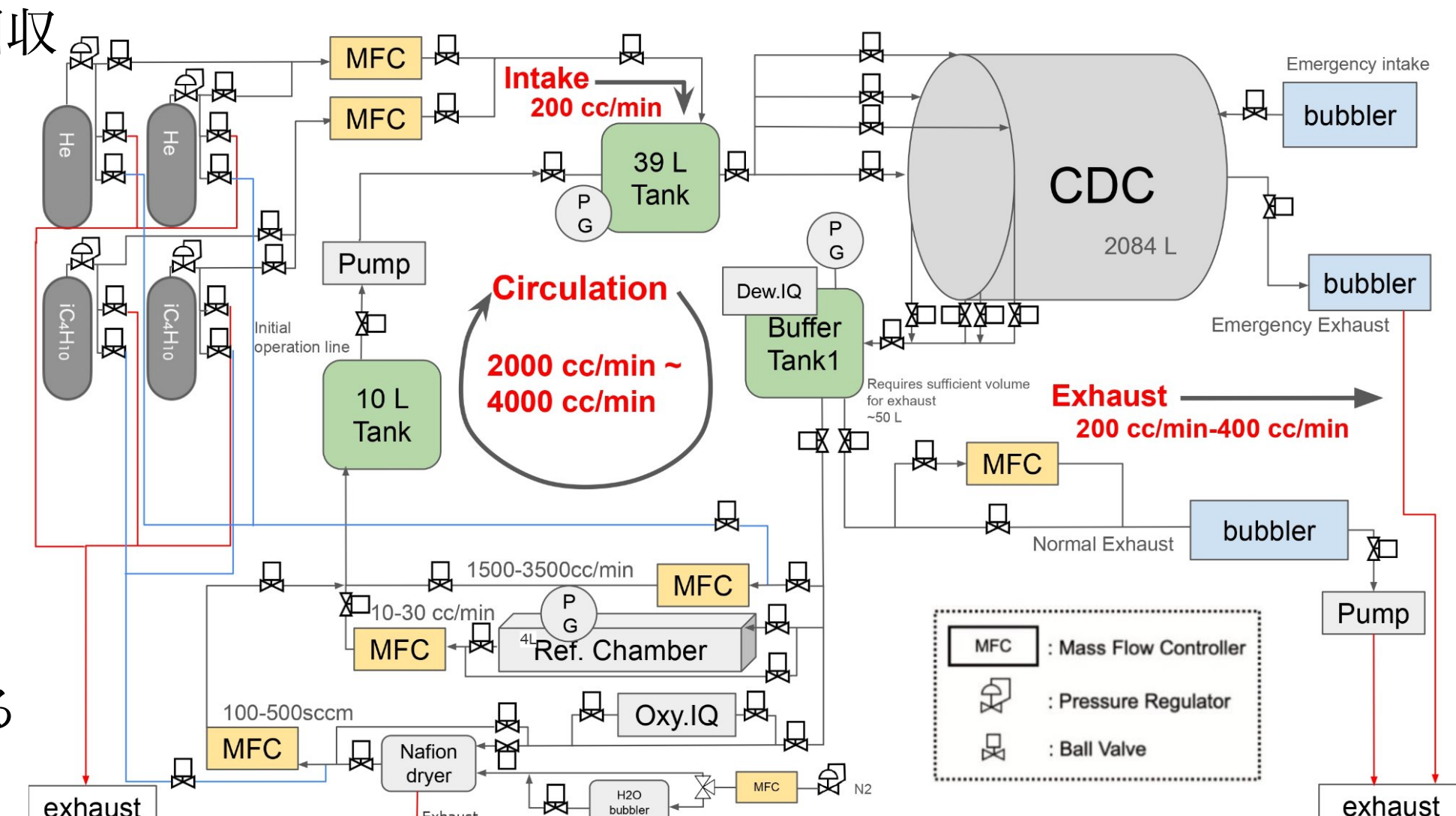
CDCを通過した混合ガスをMFCで回収
流量範囲 2 ~ 4 SLM で循環。

CDC許容ゲージ圧 +300 Paに抑える排気
圧力脈動を抑制するタンク
ガスクオリティモニターを設置。

排気系の配管経路設計

CDCの緊急排気ラインは、配管抵抗を考慮すれば、極力短く・内径を大きくする。

通常排気時はポンプとMFCを使用するため、配管抵抗を意識する必要なし。



まとめ

- ・現在のガス供給システムはHeガスのみを再利用せず運用中。イソブタンも含めた「ガスパージシステム」に改良し、CDC内部を混合ガスに置換する。
- ・CDCは正圧 300 Paまでの耐性なので、配管抵抗を考慮した排気ラインを構築する。
- ・ガスパージシステムで使用するチューブの配管抵抗を測定し、これを考慮した排気ラインを設置。CDCを意図したゲージ圧範囲内に抑制することに成功。
- ・ガスパージシステムを発展させたガス循環システムの配管設計を進行中。