



J-PARCニュートリノビームの大強度化 に向けた非破壊型ビームプロファイ ルモニター用ガスシステムの研究

中村 亜津志

小汐 由介、Megan Friend^A、Mark Hartz^B、
Christophe Bronner^C、坂下 健^A、Son Cao^A

岡大理 KEK素核研^A 東大カブリIPMU(WPI)^B 東大宇宙線研^C

目次

1. T2K実験におけるJ-PARC陽子ビーム
 - ・陽子ビーム増強とビームモニター
 - ・Beam Induced Fluorescence (BIF) モニター

2. テストチェンバーによる真空実験
 - ・平衡状態
 - ・パルスの供給

大強度陽子ビームとビームモニター

<ビームライン上のビームモニター(SSEM)>

<陽子ビームの増強>

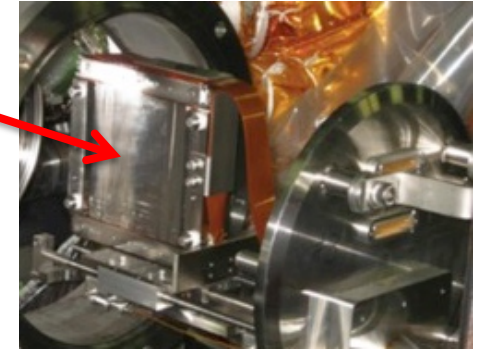
現在:470 kW

→**1.3 MW** まで増強し、 δ_{CP} を高精度で測定

・破壊型ビームモニター(SSEM)では
モニターの寿命低下、損傷の恐れがある

→非破壊型ビームモニター

ここに
ビームが当たる



・ビーム損失の割合: 5×10^{-5} (SSEM1台あたり)

<BIFモニターの模式図>

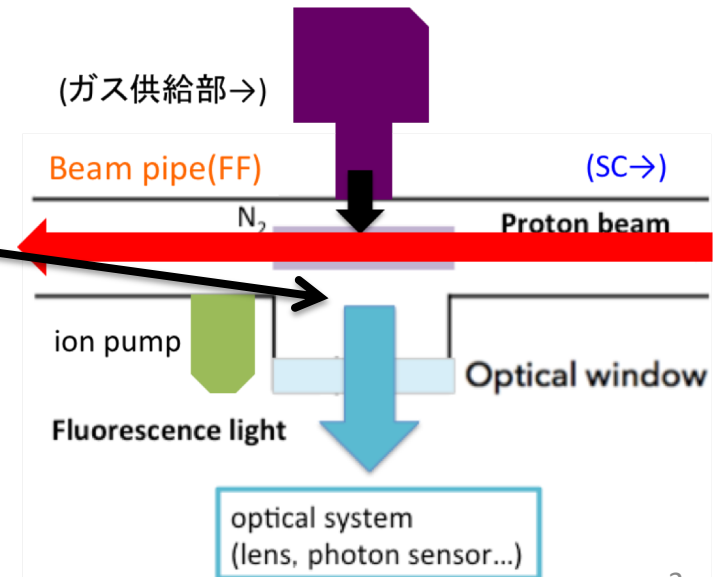
Beam Induced Fluorescence(BIF) monitor

・ビームライン上のガス分子(N_2)と陽子の相互作用から発生する**蛍光**を利用

・設置予定場所の圧力 10^{-6} Paでは光量が不足

→1000光子検出するのに 10^{-2} Paが必要

・ビーム損失の割合: 10^{-9} (10^{-2} Paの場合)



BIFモニターの圧力系

圧力上昇($\rightarrow 10^{-2}$ Pa)に関する問題

- ・他のビームパイプの真空維持、及び真空機器の保護

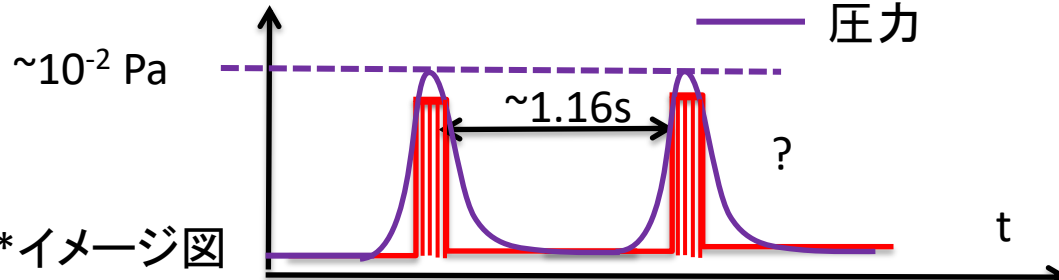
常伝導部分(FF)

... $10^{-6\sim 5}$ Pa

超電導部分(SC)

... 10^{-8} Pa

<パルスの供給>



パルスのガス供給・排気システムの構築

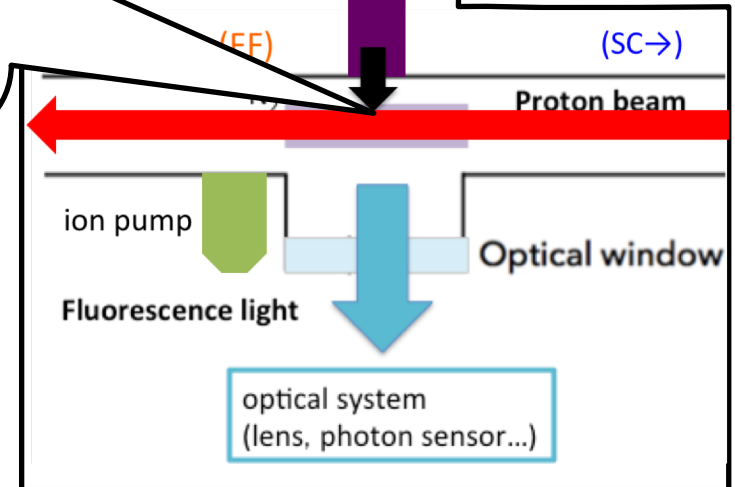
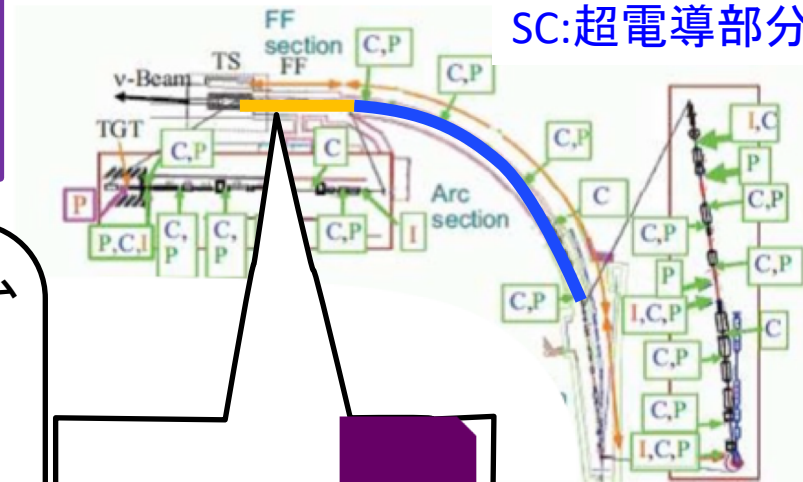
$\rightarrow$ 入れる総ガス量を抑え、他の真空を維持

$\rightarrow$ パルスのガス供給の構築のため、テストチャンバーを用いた排気速度・供給ガス量の測定、及び理解が必要

<一次陽子ビームライン>

FF:最終収束部(常伝導)

SC:超電導部分

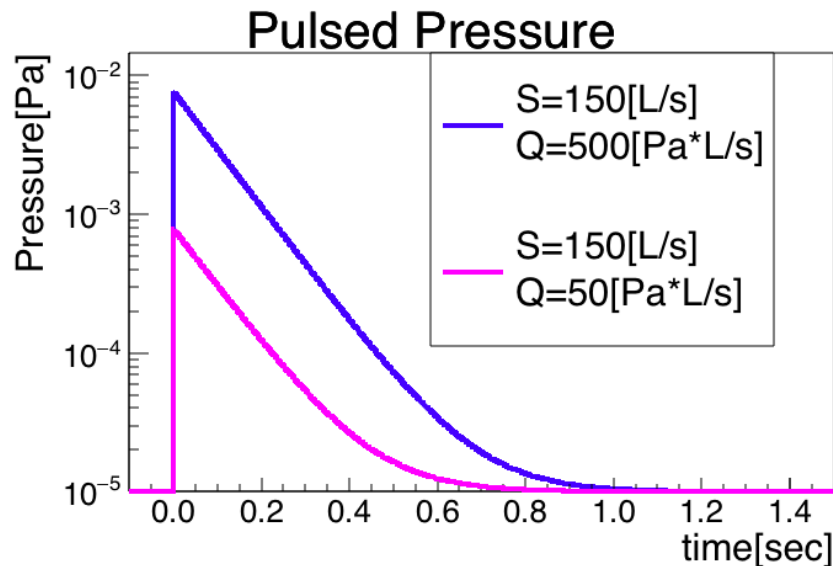


パルスのガス供給時の圧力変化

- ・ごく短い時間(数百 μs)に、一定の流量が流れた時の圧力の時間変化

$$P(t) = \begin{cases} \frac{Q}{S}(1 - e^{-\frac{S}{V}t}) + P_f & (t_{\text{open}} < t \leq t_{\text{close}}) \\ P(t = t_{\text{close}}) e^{-\frac{S}{V}(t - t_{\text{close}})} + P_f & (t_{\text{close}} < t) \end{cases}$$

<圧力変化の例>



P: 圧力[Pa]、 P_f : 最終到達圧力= 10^{-5} [Pa]

Q:(質量)流量=500(high), 50(low)[Pa*L/s]、

t: 時間[s]、

t_{open} : 供給の開始時刻=0 [s]、

t_{close} : 供給の終了時刻

= t_{open} + (供給バルブの開時間) [s]

= t_{open} + (400 μs) [s]

V[L]: チェンバー体積=15.6 [L]

S[L/s]: 排気速度= 150 [L/s]

今日の内容

- ・テストチェンバーを用いた排気速度Sとガス供給量Qの測定
- ・予想圧力変化と測定された圧力パルスと比較

目次

1. T2K実験におけるJ-PARC陽子ビーム

- ・陽子ビーム増強とビームモニター
- ・Beam Induced Fluorescence (BIF) モニター
- ・BIF圧力系

2. テストチェンバーによる真空実験

- ・平衡状態
- ・パルスの供給

テストチェンバー

<供給部>

・パルスバルブ



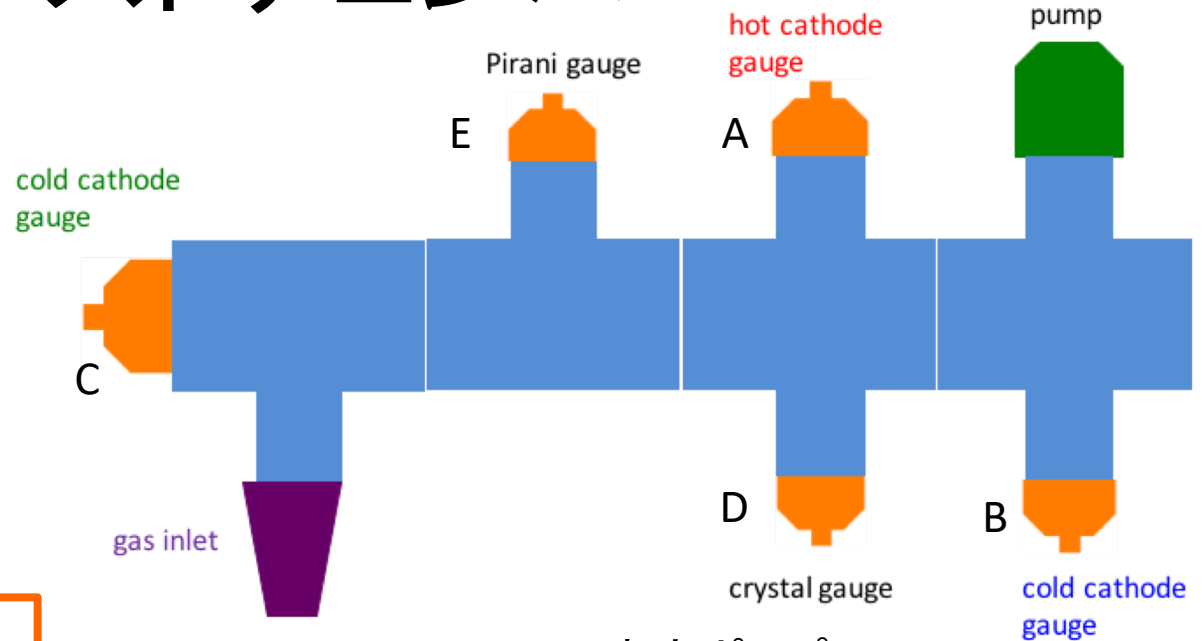
<真空計>

A: 熱陰極電離真空計
($10^{-2} \sim 10^{-7}$ Pa)

B,C: 冷陰極電離真空計
($1 \sim 10^{-6}$ Pa)

D: クリスタルゲージ
($10^5 \sim 10^{-2}$ Pa)

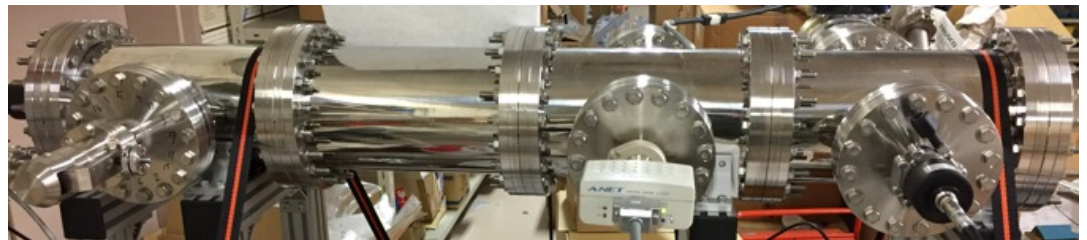
E: ピラニーゲージ
($10^5 \sim 10^{-2}$ Pa)



全長:1020 mm
体積:21.8 [L]

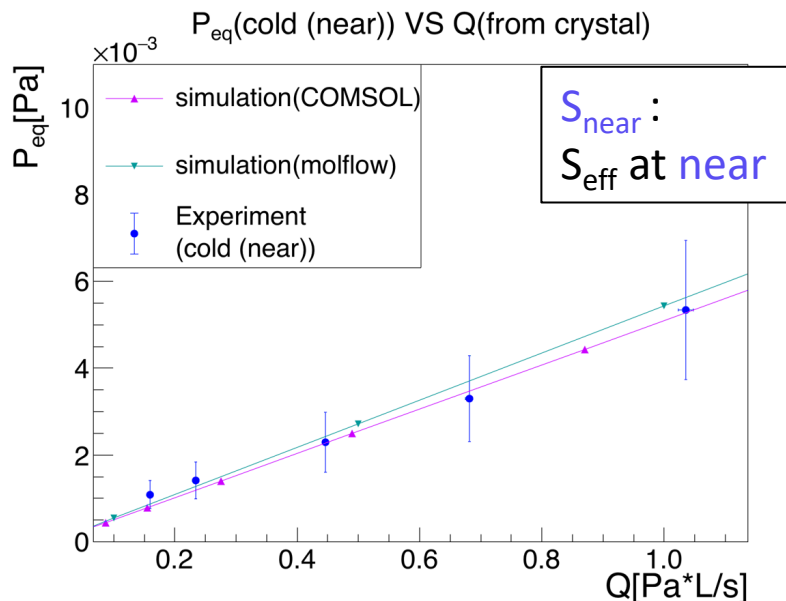
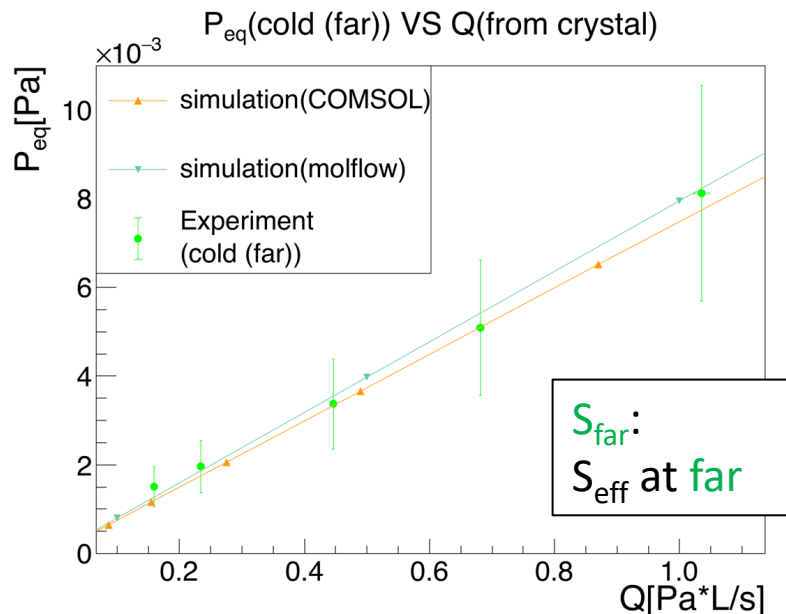
<真空ポンプ>

・ロータリーポンプ
・ターボ分子ポンプ
(排気速度:210L/s)



テストチェンバーの側面図

実効排気速度(S_{eff})の結果



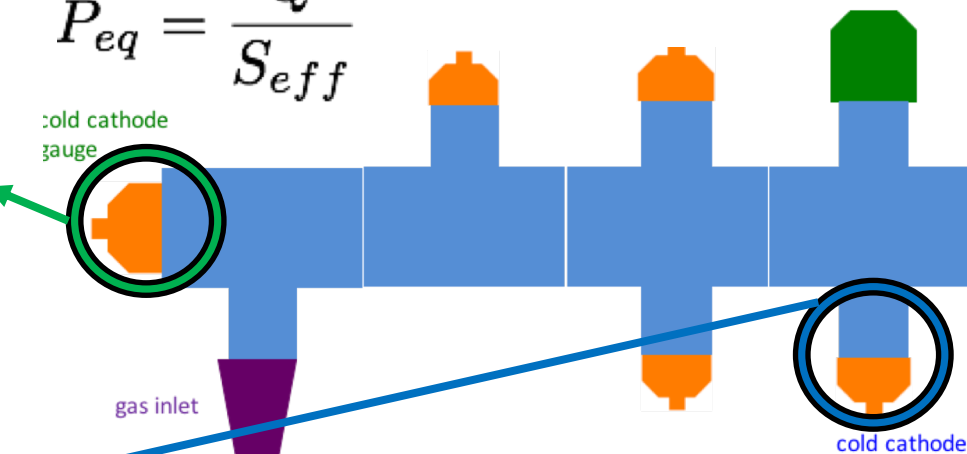
・平衡状態

$$P_{\text{eq}} = \frac{Q}{S_{\text{eff}}}$$

$P_{\text{eq}} [\text{Pa}]$: 平衡圧力

$Q [\text{Pa} \cdot \text{L/s}]$: 流入量(既知)

$S_{\text{eff}} [\text{L/s}]$: 実効排気速度



	$S_{\text{far}} [\text{L/s}]$	$S_{\text{near}} [\text{L/s}]$
COMSOL (シミュレーション)	133	193
Molflow (シミュレーション)	126	183
実験 (30%の不定性)	140 ± 24	222 ± 64

シミュレーションは結果と無矛盾

パルスバルブとパルス流量の測定

パルスバルブの制御

- ・パルス信号でバルブの開閉を制御
- ・バルブの開く時間 (ON TIME)を約100 μ s単位で制御可
- ・ON TIME=300、400、500、600 μ sを使用

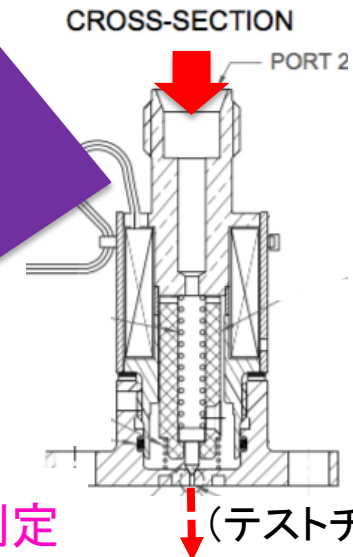
コントローラ



パルスバルブ



<パルスバルブの断面図>



(1) パルス供給時の流量測定(ポンプOFF)

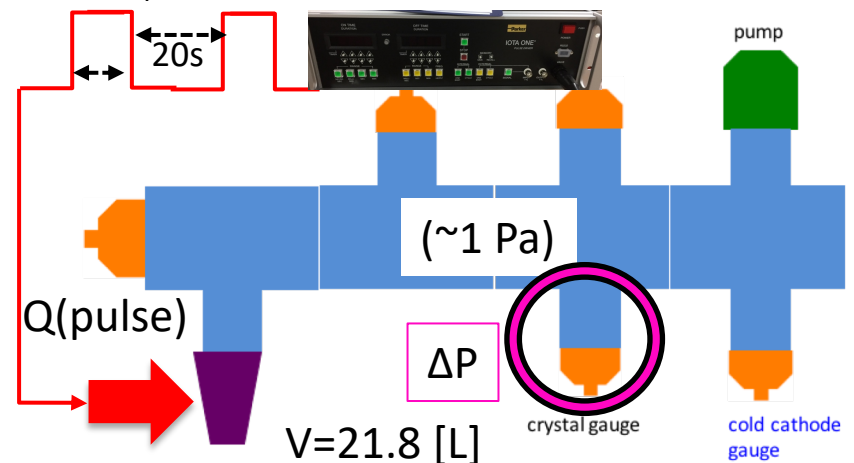
- ・ポンプOFFで1~Pa 下、20秒間隔でバルブを指定時間、10回開いた時の圧力上昇(ΔP)を測定
- ・1パルスあたりの流量を定義

$$Q = V \frac{\Delta P}{\Delta t} = V \frac{\Delta P}{10 \times (ON TIME)}$$

(1)パルス流量測定

3~600 μ s

20s

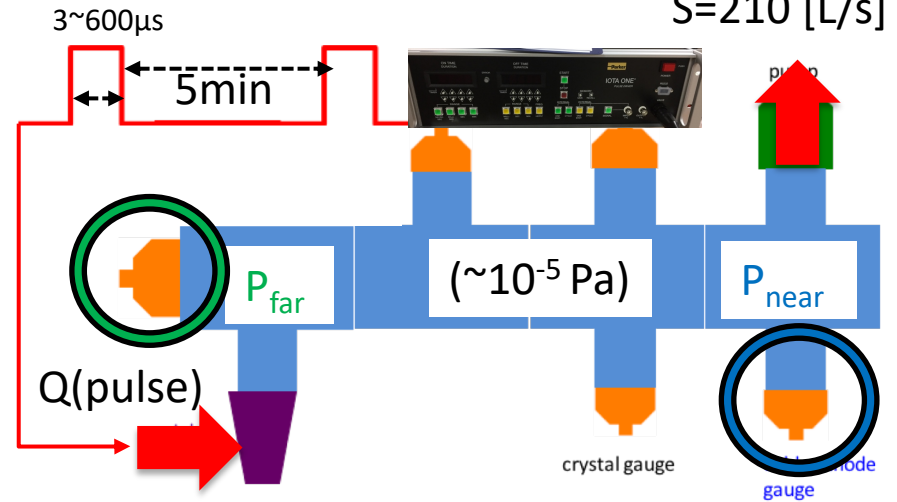


パルスバルブによるパルス供給実験

(2) 圧カパルスの測定(ポンプON)

- ・パルスバルブによるガス供給を行い、圧力変化を測定
- ・高真空(10^{-5} Pa)下、ポンプONで測定
- ・冷陰極電離真空計(P_{far} , P_{near})からの信号をデータロガーで記録
- ・5分ごとにガスを供給

(2) 圧カパルス測定



圧力変化の予想と比較

・1パルスあたりの流量: Q 、排気速度: S_{eff} を使って、テストチェンバーでの圧力変化を予想...実測と比較

各開時間ごとの1パルスあたりの流量: Q

ON TIME[μ s]	300	400	500	600
Q[Pa*L/s]	283	1196	3098	7144

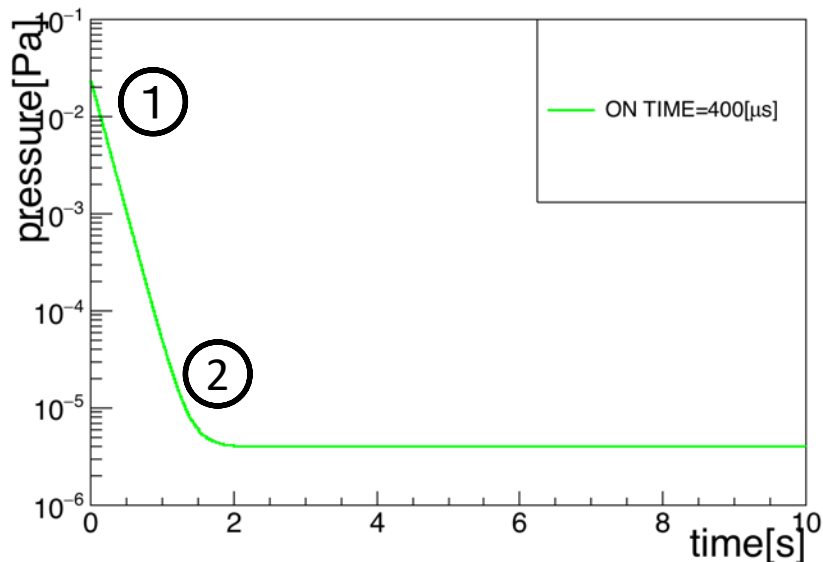
実効排気速度: S_{eff}

(COMSOL)	far	near
S_{eff} [L/s]	128	193

パルス実験結果と予想の比較

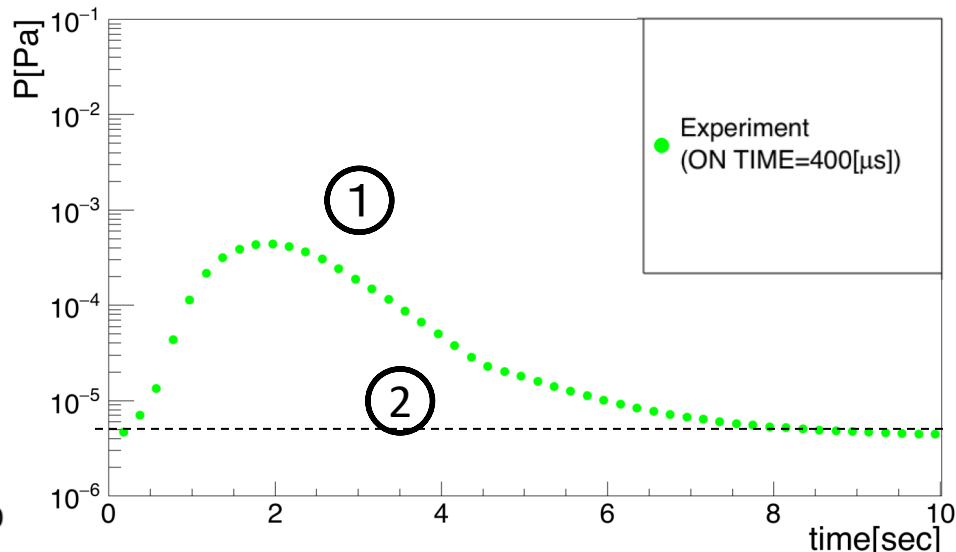
P(t):シミュレーション+パルス流量
からの予想圧力変化(far)

expected pressure pulse(far)



測定結果(点、farでの10パルス分の平均)

P VS time(Prs0)



・測定結果

①ピークが低い
(およそ50分の1)

②パルス幅が広い
...予想: ~2 s で元に戻る
測定: ~8 s かかる

< BIF圧力測定・理解 >

・真空計の応答
(Convolution)

・実際の圧力変化の理解
(拡散の考慮)



・応答関数による圧力
パルスの理解

・圧力変化P(t)の
シミュレーション(計算中)

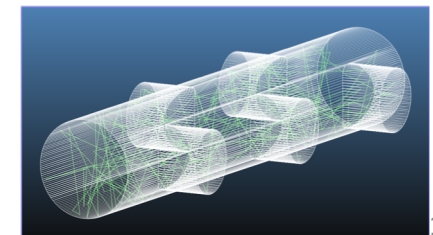
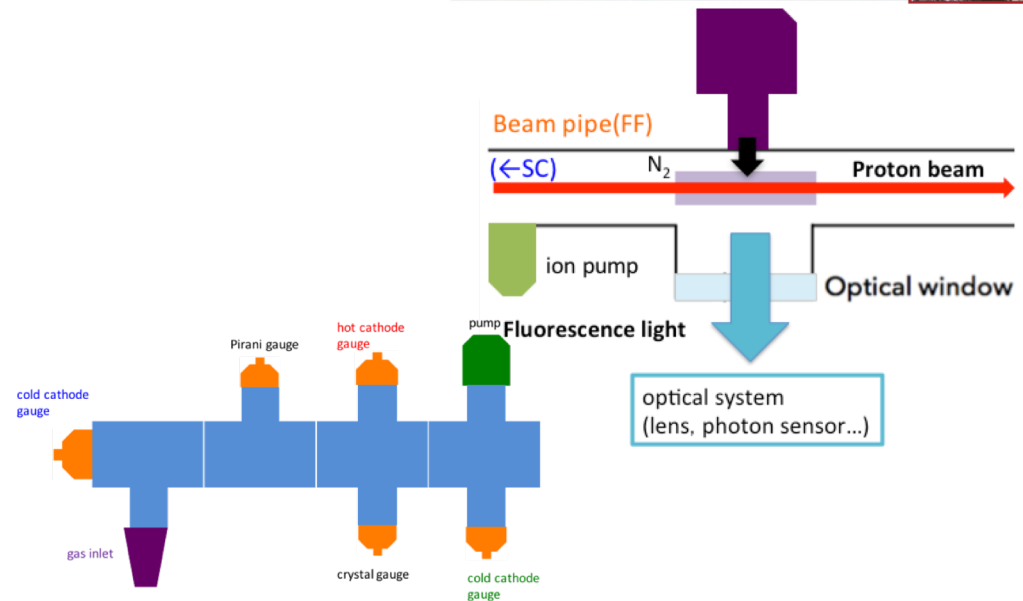
まとめ

- ・非破壊型のBIFモニターは
高強度化した陽子ビームに対応可能
- ・ガスをパルス供給するシステムの研究が進行中

- ・排気速度...平衡状態の実験
 - 実験とシミュレーションは無矛盾
- ・パルス供給...予想と実験が異なる
 - 真空計の応答の考慮
 - 実際の圧力変化(拡散)の理解

<今後の計画>

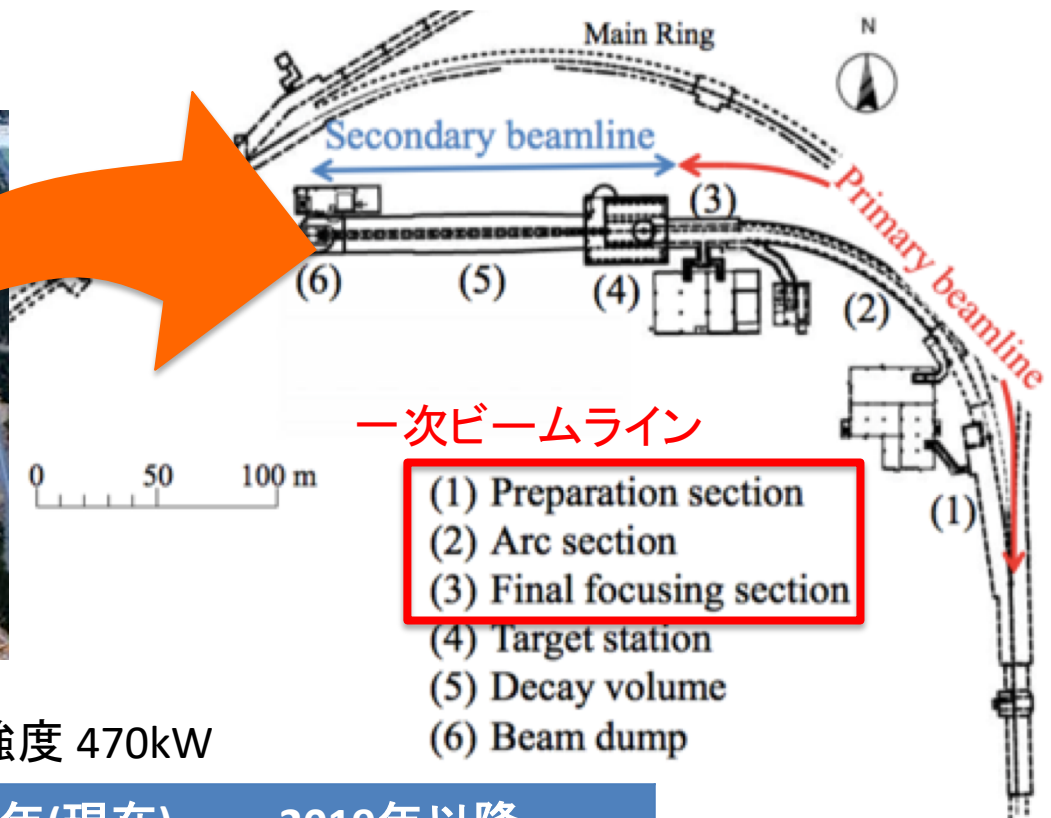
- ・シミュレーションによるパルスの供給時の
圧力シミュレーション
- ・応答関数を用いた測定圧力の解析



Back up

T2K 陽子ビームライン

<J-PARC>



陽子ビーム...エネルギー 30 GeV、強度 470kW

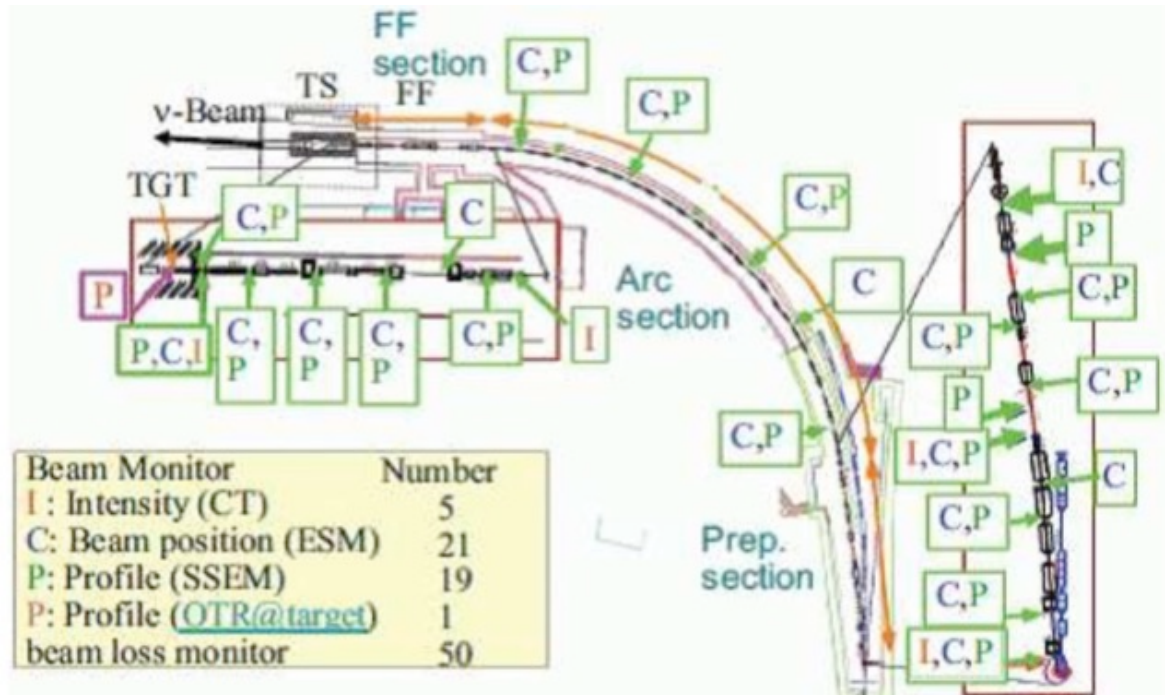
	2017年(現在)	2019年以降
取り出し周期	2.48 s	1.3s →1.16 s
陽子数	2.2×10^{14} 個/spill	3.2×10^{14} 個/spill
ビーム強度	470 kW	750 kW → 1.3 MW

ビームモニター

・陽子ビームの強度、位置、幅を測定する機器

<役割>

- 1.陽子ビームの実測
- 2.陽子ビームの監視



・SSEM(ビームプロファイルモニター)

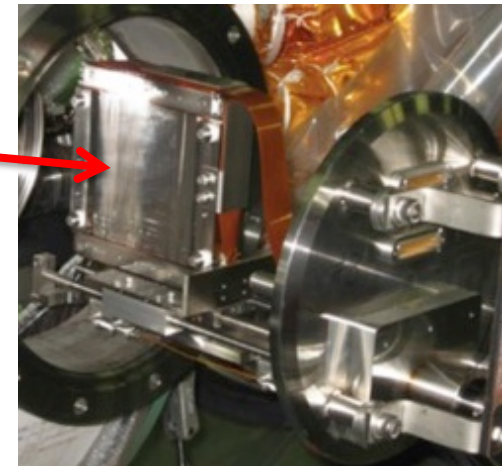
...破壊型

強度の損失が非常に大きい

(割合: 5×10^{-5})

ニュートリノビームライン上のビームモニター

ここに
ビームが当たる



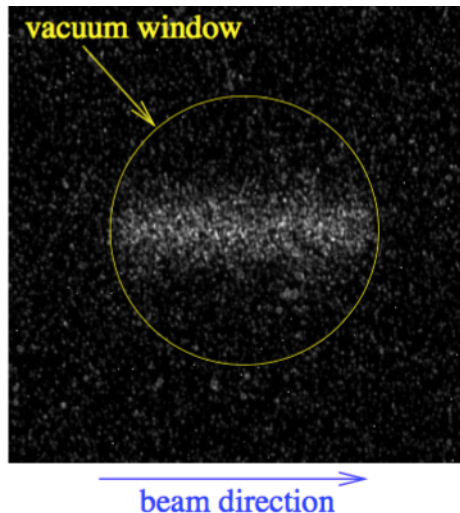
ビーム増強に対応した
非破壊型ビームモニターが必要

SSEM→
(上図中P)

Beam Induced Fluorescence(BIF) モニター

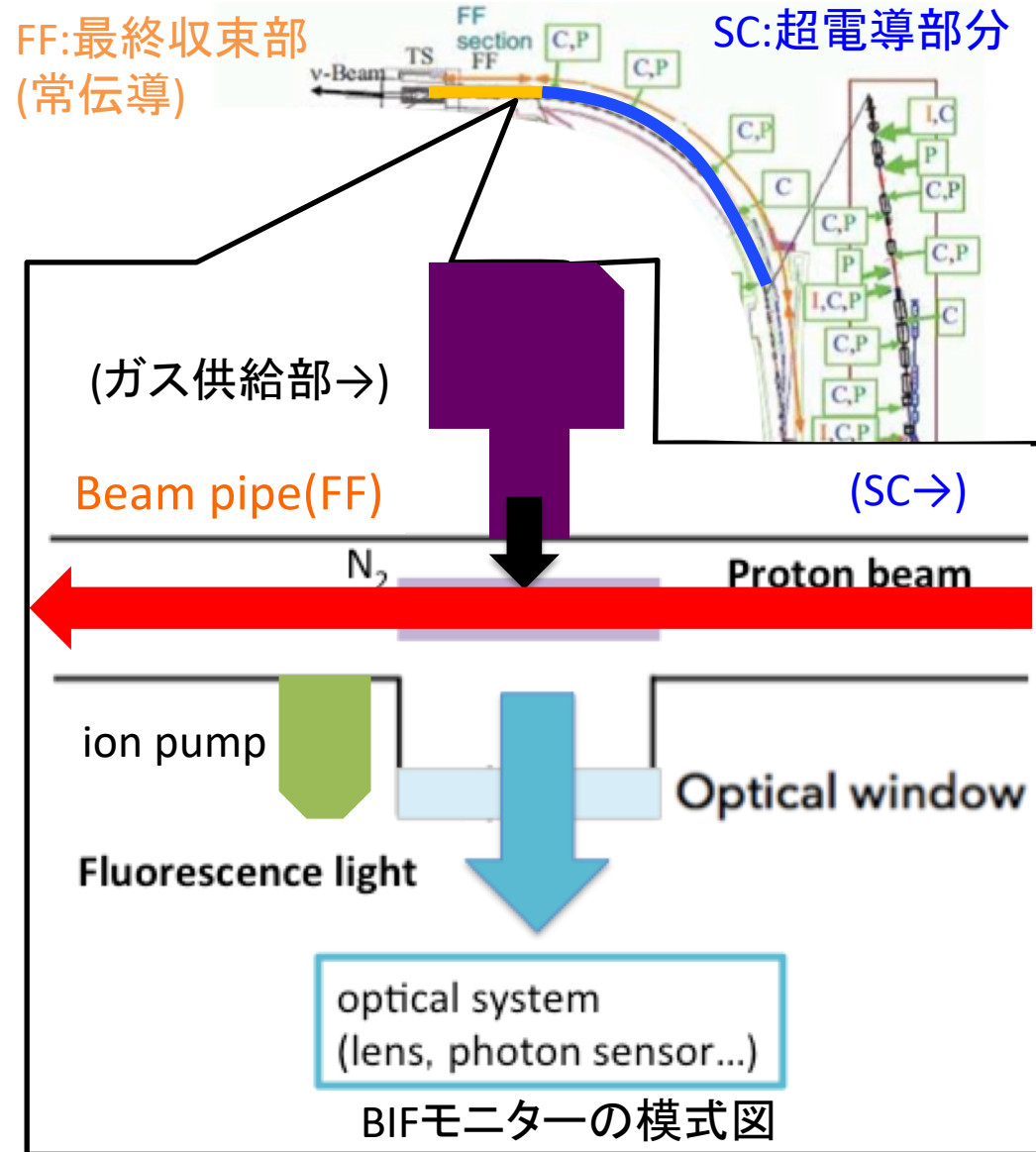
ビーム損失: 10^{-9} (10^{-2} Pa)

- ・ビームライン上のガス分子(N_2)と陽子の相互作用からの**蛍光**を利用した**非破壊型ビームモニター**
- ・1000光子検出... 10^{-3} Pa ($\leftarrow 10^{-6}$ Pa)
→ガスを外部から供給する



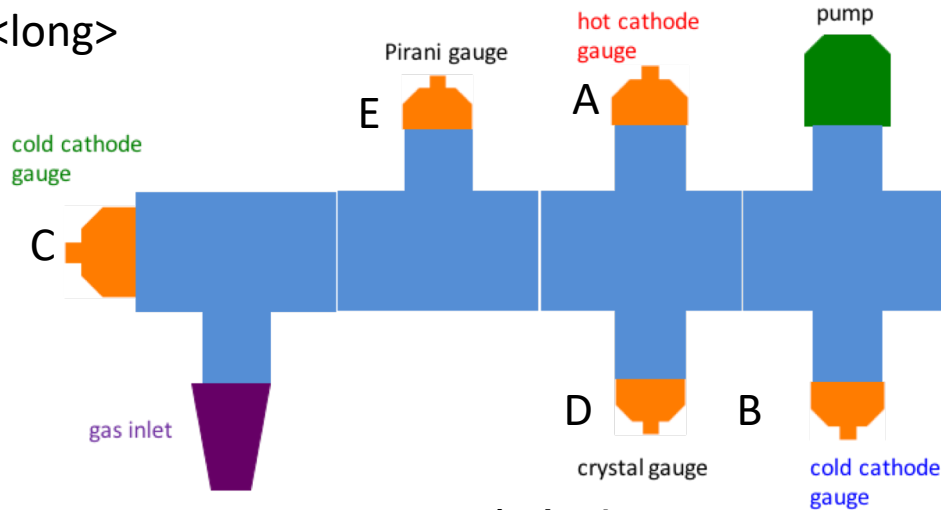
- ・重イオンビーム(200MeV/u、Xe⁴⁸⁺)の
プロフィール例(~0.1 Pa、GSI)

F.Becker *et al.*, “Beam induced fluorescence (BIF) monitor for transverse profile determination of 5 to 750 MeV/u heavy ion beams”より

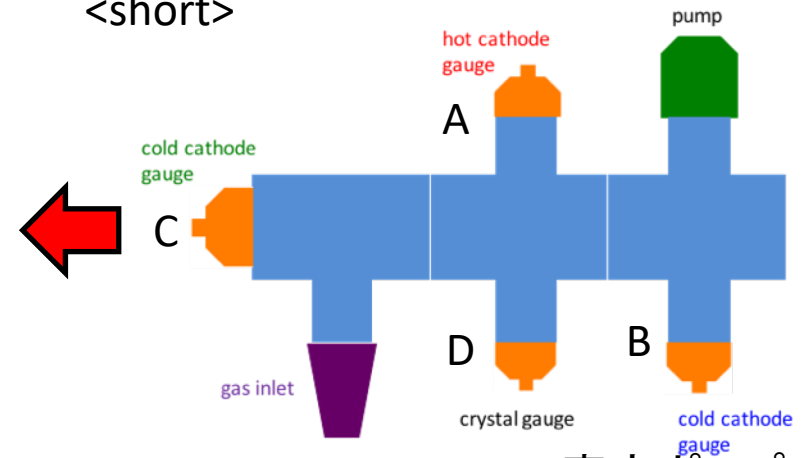


テストチェンバー

<long>



<short>



<真空ポンプ>

<供給部>

・パルスバルブ

<真空計>

A: 熱陰極電離真空計
($10^{-2} \sim 10^{-7}$ Pa)

B,C: 冷陰極電離真空計
($1 \sim 10^{-6}$ Pa)

D: クリスタルゲージ
($10^5 \sim 10^{-2}$ Pa)

E: ピラニーゲージ(long)
($10^5 \sim 10^{-2}$ Pa)

全長: 840 mm

-> 1020 mm

体積

: 15.6 [L] (short)

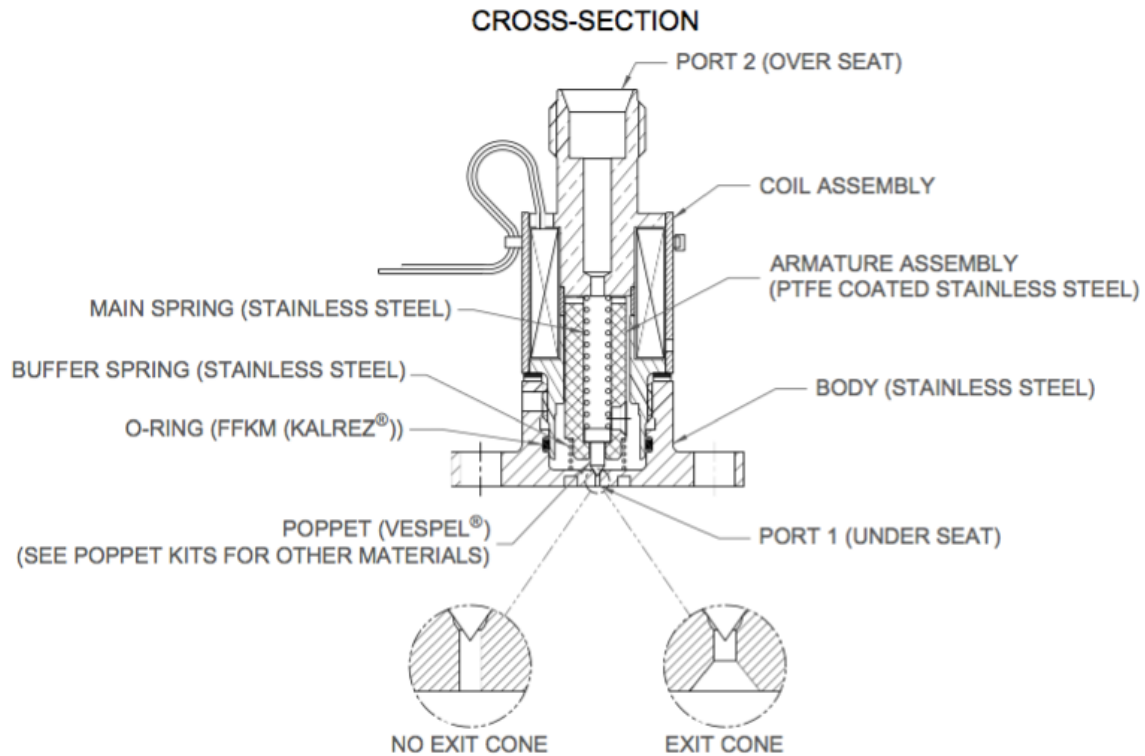
-> 21.8 [L] (long)

・ロータリーポンプ
+
ターボ分子ポンプ
(排気速度: 210 L/s)



Longテストチェンバーの側面図

パルスバルブの断面図



排気速度の実験

$$V \frac{dP}{dt} = -SP + Q$$

(排気方程式)

圧力: P [Pa]、流入量: Q [Pa*L/s]、時間: t [s]、
チェンバー体積: V [L]、排気速度: S [L/s]

・ポンプ停止時($S=0$) ...①

$$Q = V \frac{dP}{dt}$$

:流入量=圧力変化

・定常状態(圧力変化=0)...②

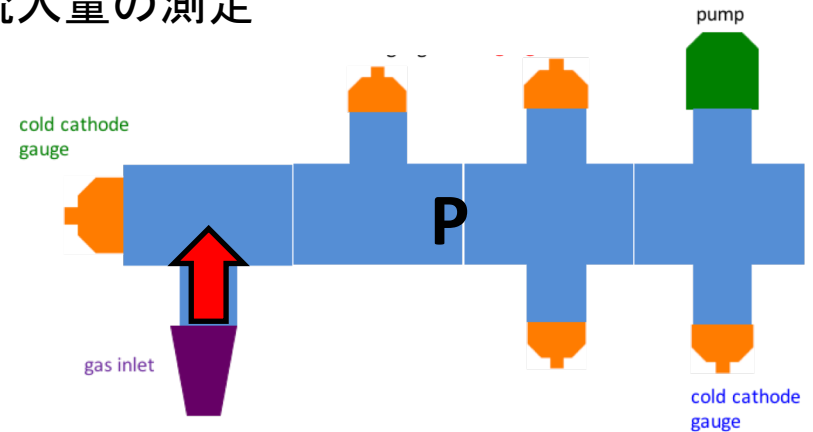
$$P_{eq} = \frac{Q}{S_{eff}}$$

P_{eq} : 平衡圧力

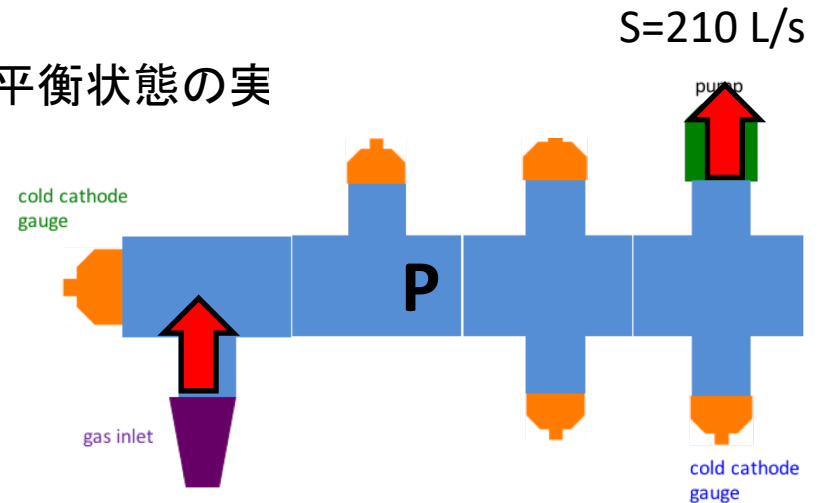
→平衡圧力 P_{eq} と流入量 Q から
排気速度 S がわかる

流入量と平衡圧力の測定

①流入量の測定

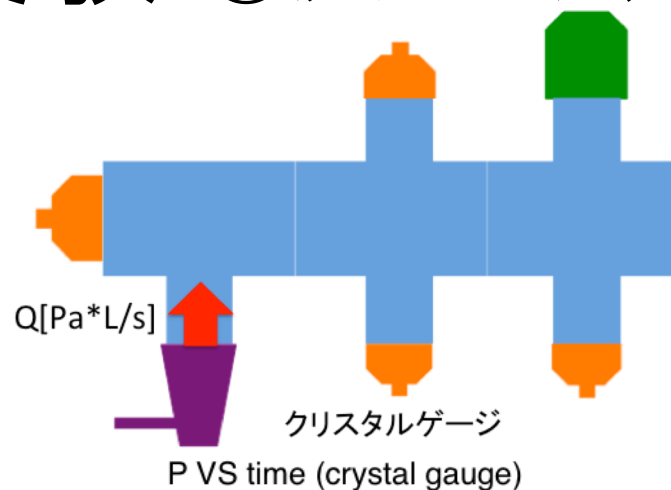


②平衡状態の実

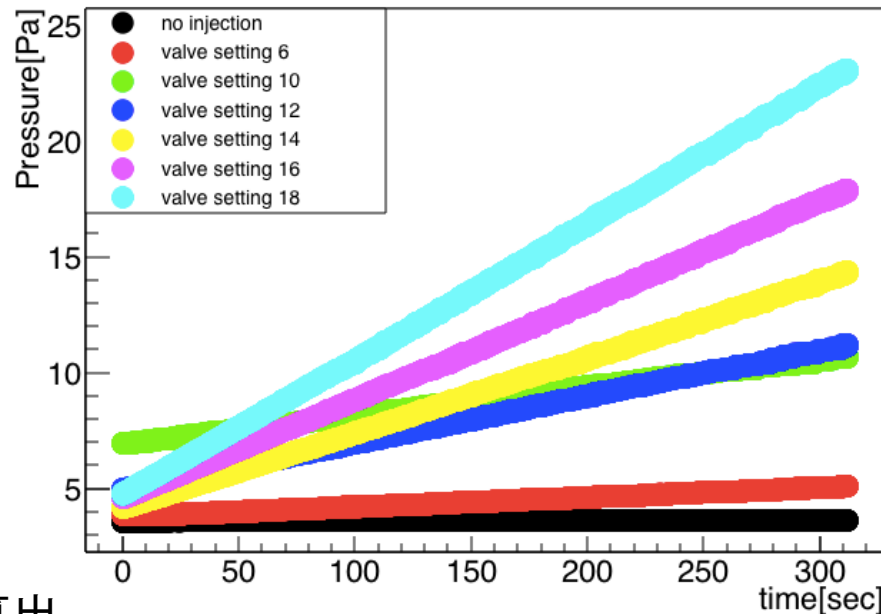


排気速度の実験~①流入量測定~

(1) ~1Paほどまで引いたのち
真空ポンプを停止させる



(2) ノブの回転量を調整後
パルスバルブを開いてN₂供給、
→圧力変化を測定



$$Q = V \frac{dP}{dt} : \text{傾きより流量を算出}$$

圧力の時間変化

真空系のシミュレーション

真空中($<10^{-2}$ Pa)の分子

分子の平均自由行程 λ ~ チェンバーのサイズ(分子流領域)

・分子間の相互作用はほとんどない

...理想気体(Maxwell-Boltzmann 速度分布)

・気体はチェンバー内壁とのみ相互作用

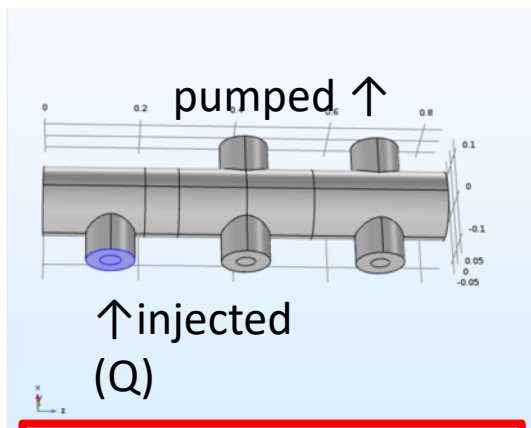
...流れは形状によって決まる(管のコンダクタンス: C_i)

→ 排気速度(S)は測定場所・形状によって変化する(実行排気速度: S_{eff})

$$P_{eq} = \frac{Q}{S} \rightarrow \frac{Q}{S_{eff}}$$

COMSOL

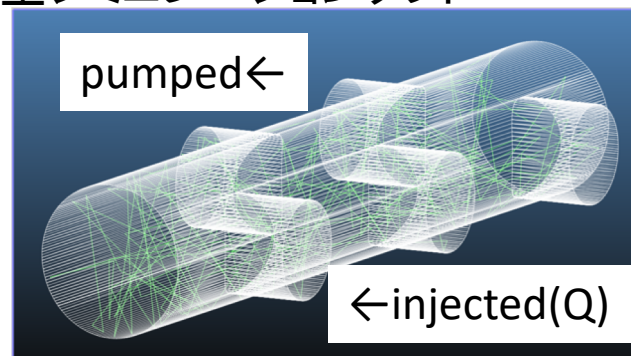
有限要素法を用いた
汎用物理シミュレーション
→ 分子流を代数的に計算可能



・平衡状態のみ計算可

Molflow+

CERNが提供しているMonte Carlo法
による多数のテスト粒子を用いた
真空シミュレーションソフト

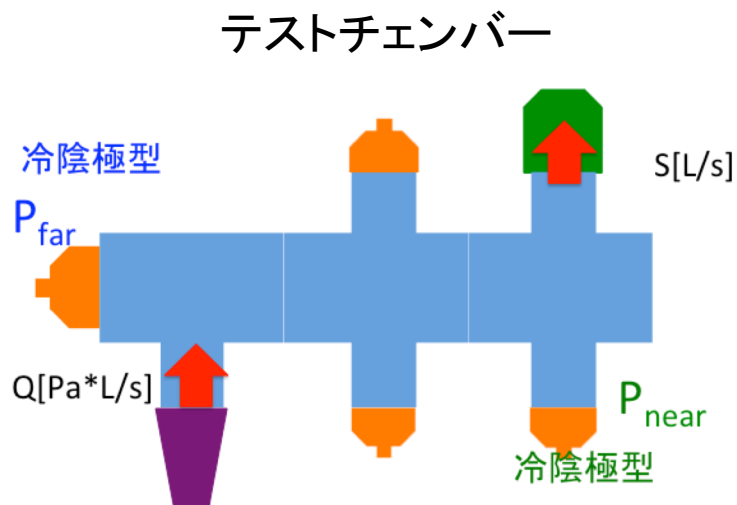


・時間変化(パルスの供給)も扱える

実効排気速度とテストチェンバー

圧力変化しない時(定常状態): $P_{eq} = \frac{Q}{S_{eff}}$

P_{eq} : 平衡圧力
 S_{eff} : 実効排気速度
 Q : 流入量



$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{S} + \sum_i \frac{1}{C_i}$$

S : ターボ分子ポンプの排気速度
 (カタログ値 $S=210[\text{L/s}](\text{N}_2)$)

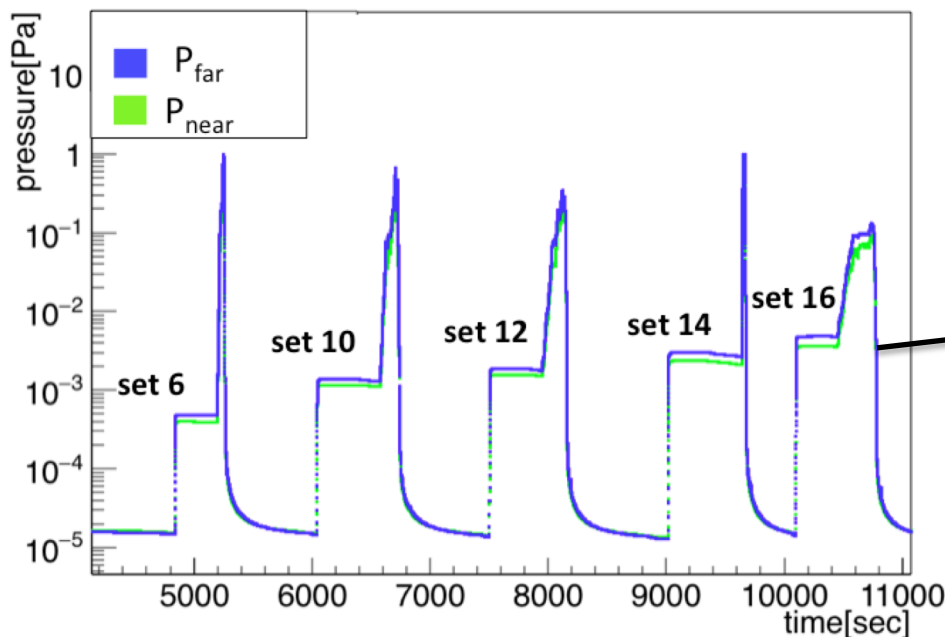
C_i : ポンプから測定場所までの
 配管のコンダクタンス

・複雑な形状のコンダクタンス...シミュレーションが必要

圧力シミュレーションより P_{eq} - Q プロットを作成し比較....COMSOL、Molflow

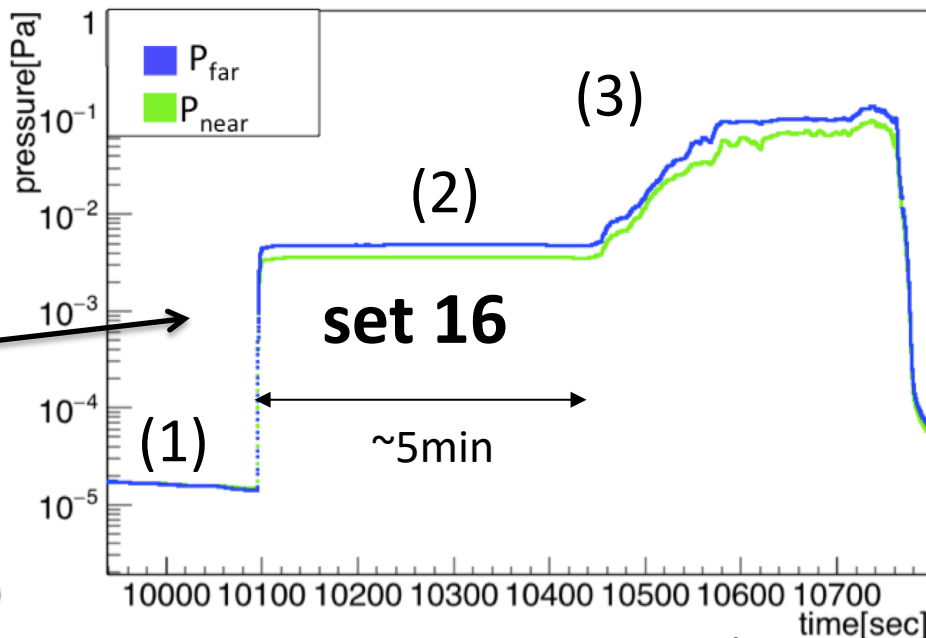
排気速度の実験~②平衡圧測定~

pressure VS time

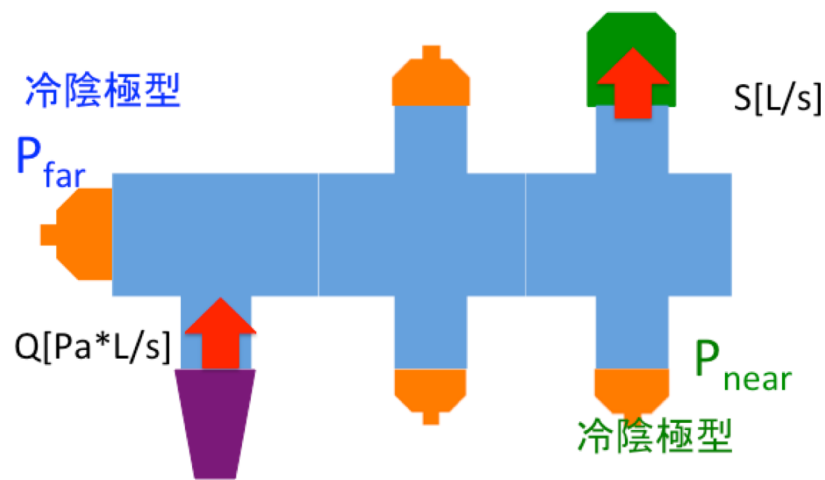


圧力変化のプロット

pressure VS time

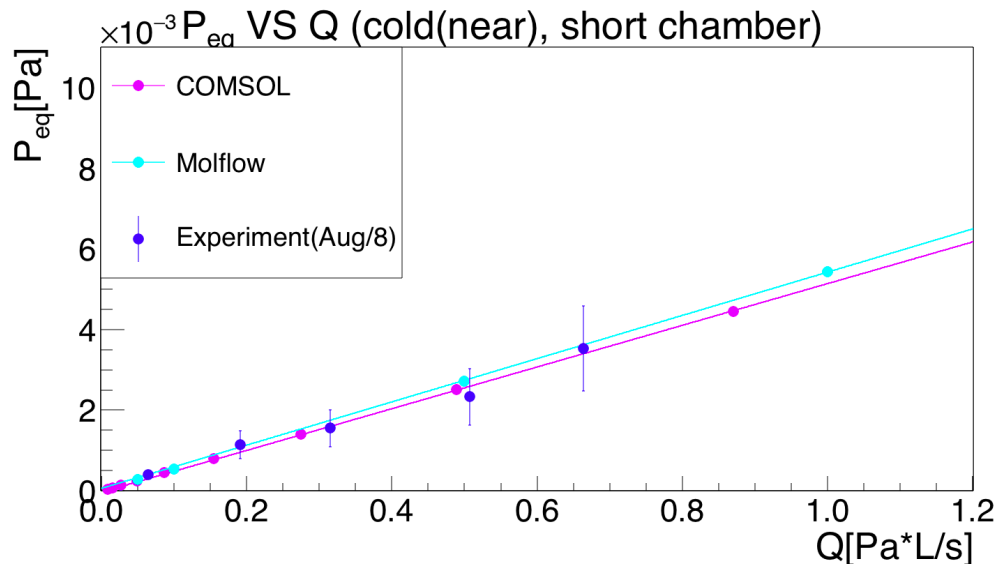
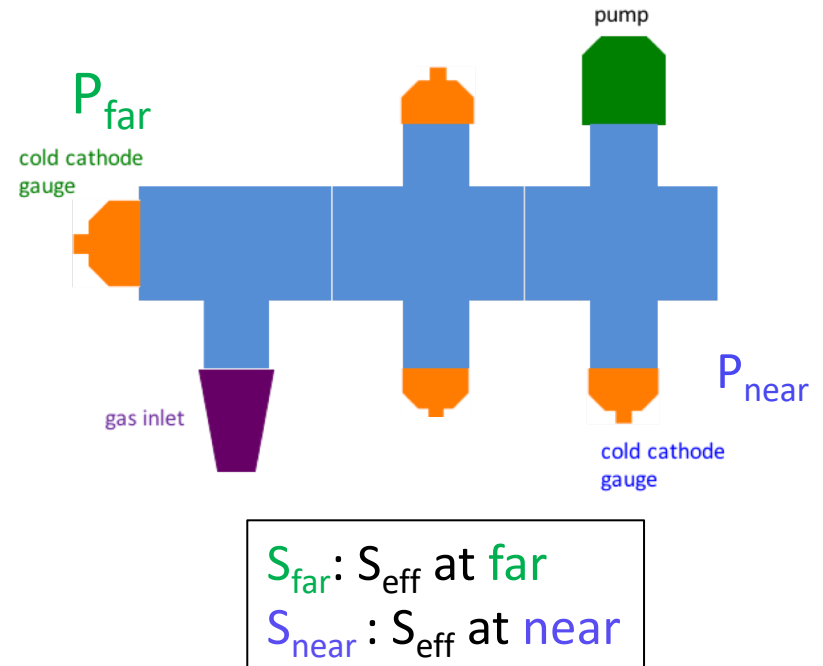
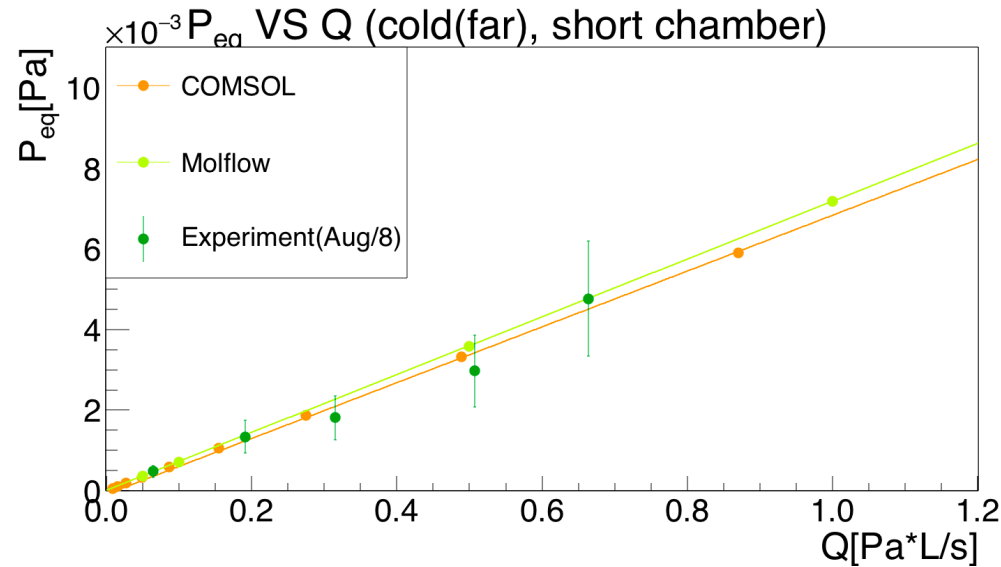


- (1) 10^{-5} Paほどまで分子ポンプで排気
- (2) リークバルブをセットして
パルスバルブを5分間開く
- (3) リークバルブのベントを行う



平衡部分の圧力を測定
→ P_{eq} -Qプロットを作成

実行排気速度の結果 (Short)



COMSOL: S_{far} : ~147[L/s], S_{near} : ~193[L/s]

Molflow: S_{far} : ~139[L/s], S_{near} : ~183[L/s]

実験 (測定圧力に30%の不定性)

: S_{far} : 165 ± 34 [L/s], S_{near} : 207 ± 43 [L/s]

Comparison of Pressure Change between Expectation and Measurement

$$P(t) = \begin{cases} \frac{Q}{S}(1 - e^{-\frac{S}{V}t}) + P_f & (t_{open} < t \leq t_{close}) \\ P(t = t_{close}) e^{-\frac{S}{V}(t - t_{close})} + P_f & (t_{close} < t) \end{cases}$$

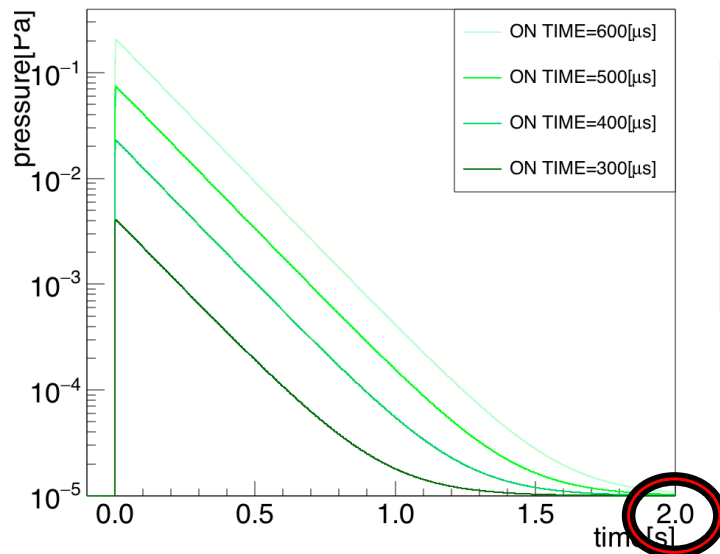
* $t_{close} = t_{open} + \text{ON TIME}$, $P_f = 1e-5$ [Pa], $V = 20.5$ [L] (long chamber)

(COMSOL)	far	near
S[L/s]	128	193

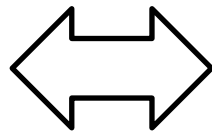
ON TIME[μ s] (exp.)	300	400	500	600
Q[Pa*L/s](0.2 MPa)	283	1196	3098	7144

expectation @ far

expected pressure pulse(far)

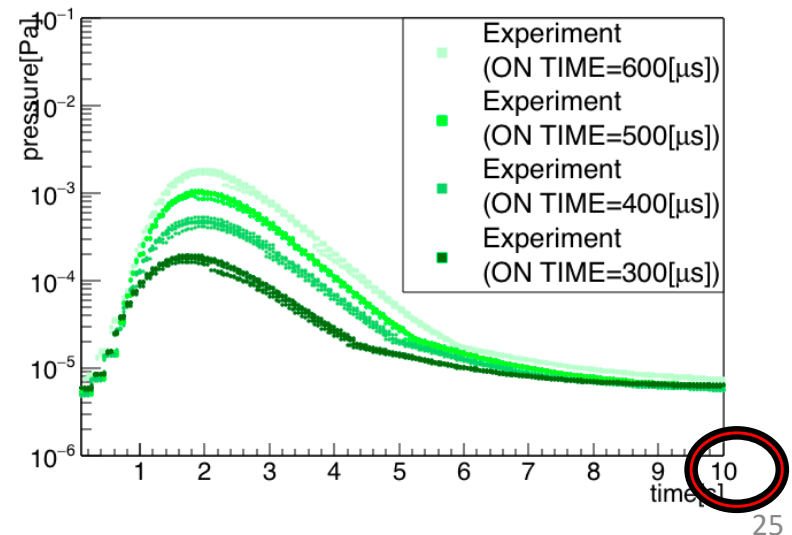


huge
difference
...gauge
response?



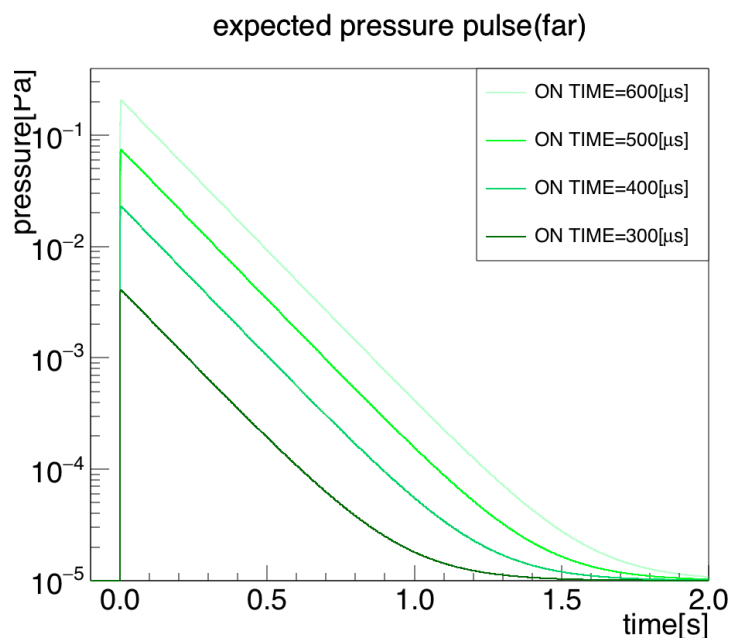
Experimental result @ far

Exp. result(far)

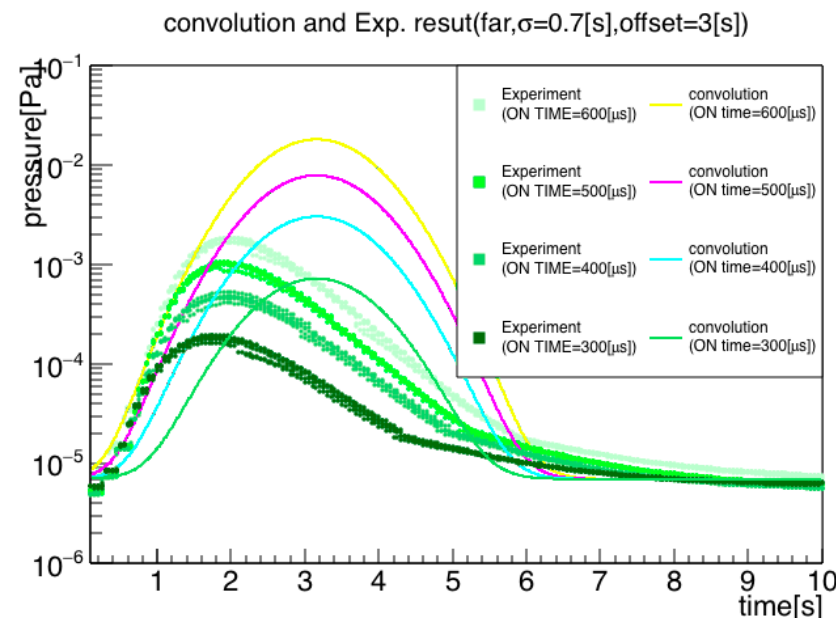


実験結果とConvolutionによる解析

P(t):シミュレーション+パルス流量
からの予想圧力変化



測定結果(far、点)と
Convolution(線、 $\sigma=0.7[s]$ offset=3[s])



Convolution:
$$h(t) = \int P(t)G(t - \tau)d\tau$$

P(t):期待される圧力変化(farの S_{eff} を使用)

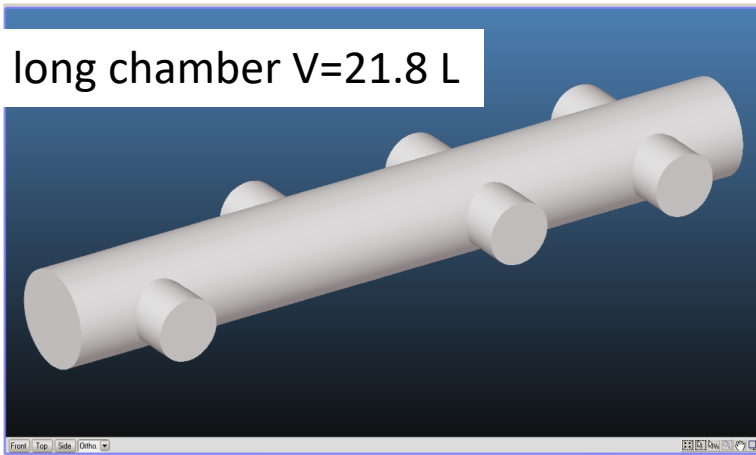
G(t):ゲージの応答関数
(Delayed Gaussianを使用)

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ -\frac{(t + offset)^2}{2\sigma^2} \right\}$$

- ・他のパラメーターや応答関数による圧力パルスの理解
- ・圧力変化P(t)のシミュレーション(計算中)

long Chamber(Pulsed Injection)

*fit with $P = P_0 e^{-\frac{S}{V}t}$ from 0.1 s

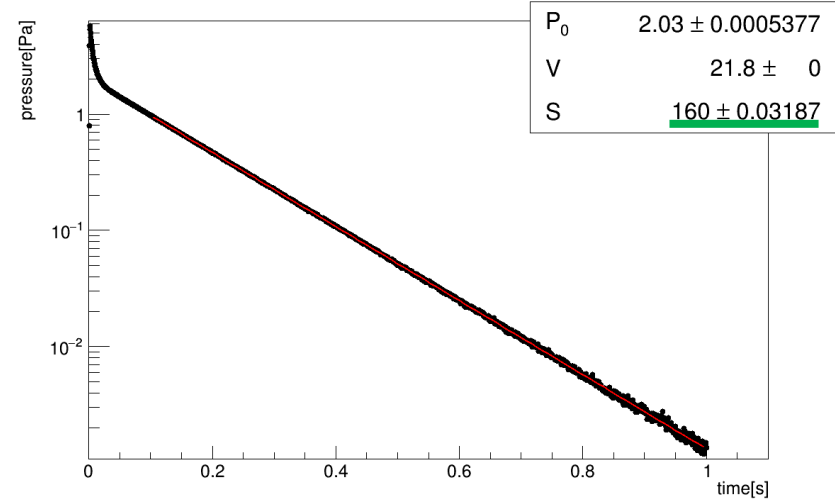


$Q=5000\text{Pa}\cdot\text{L/s}$, $500\mu\text{s}$

almost same S

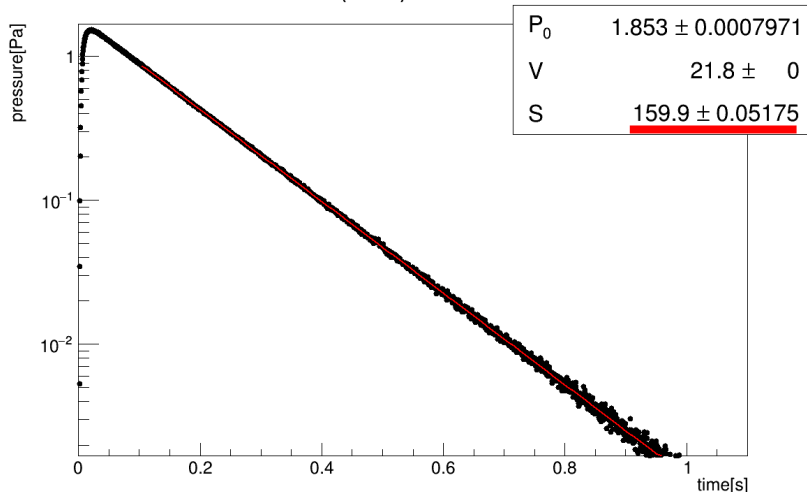
P(Prs1) VS time

@far



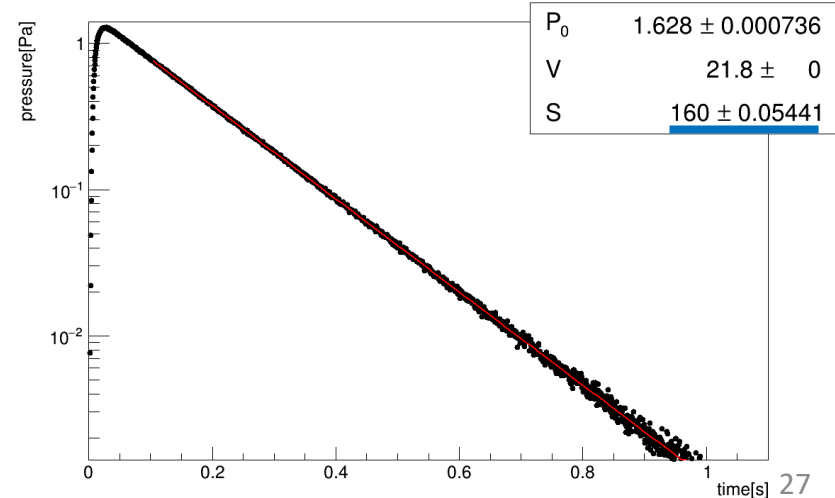
P(Prs2) VS time

@mid



P(Prs3) VS time

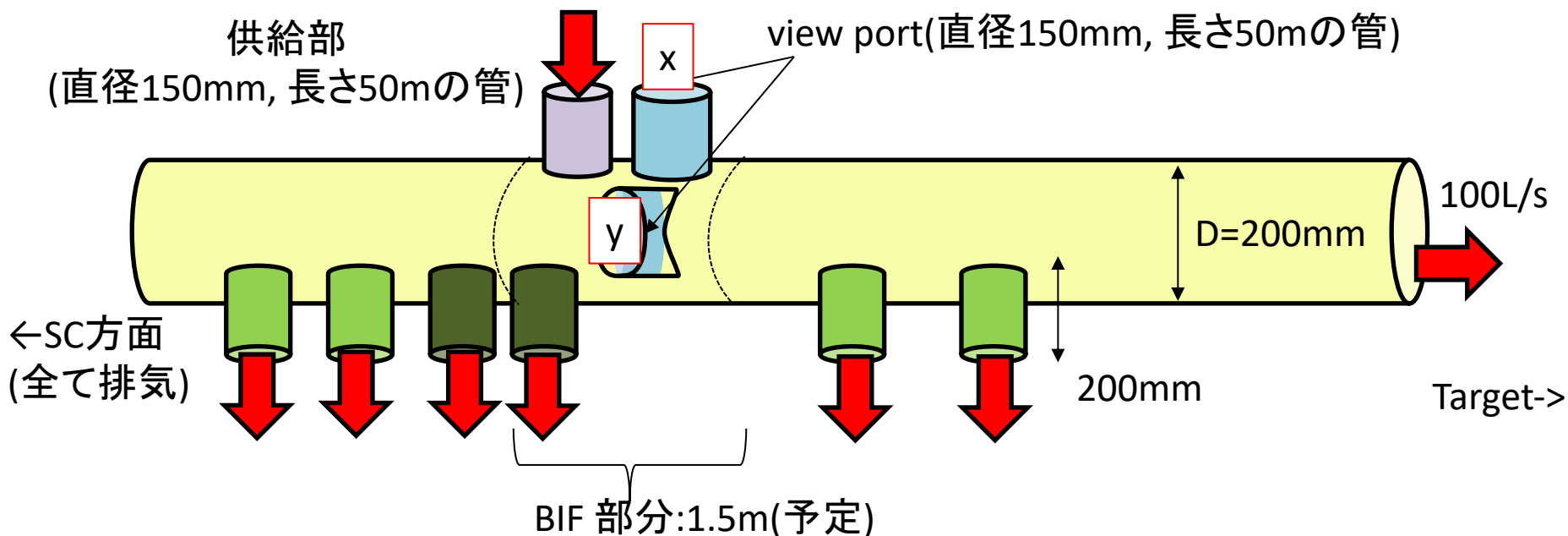
@near



FF 部分のシミュレーション(Molflow+)

・シミュレーション系の全長:36m
SC出口-BIF(view-port):12.5m

・view portの圧力変化
について注目

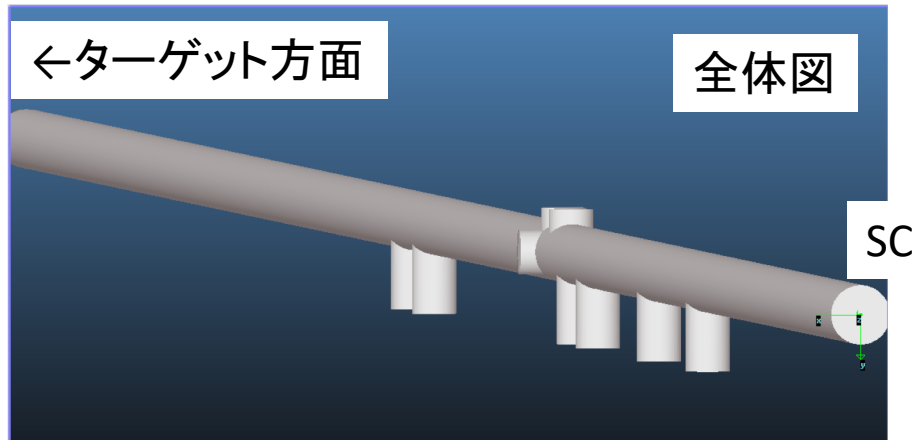


・イオンポンプ:(SC 出口より)6.6m, 8.7m, 18.4m, 19.3m + 11.5m,11.83m (追加)
排気速度 500L/s ...直径 200mm, 長さ 200mm の管によって接続

シミュレーション...・平衡状態

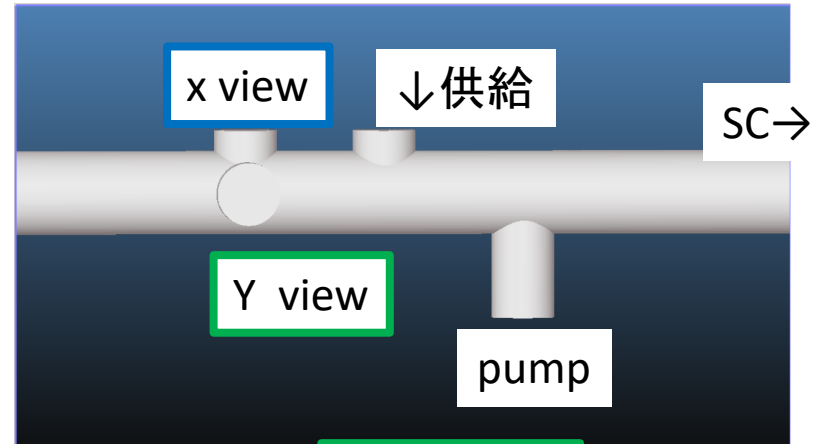
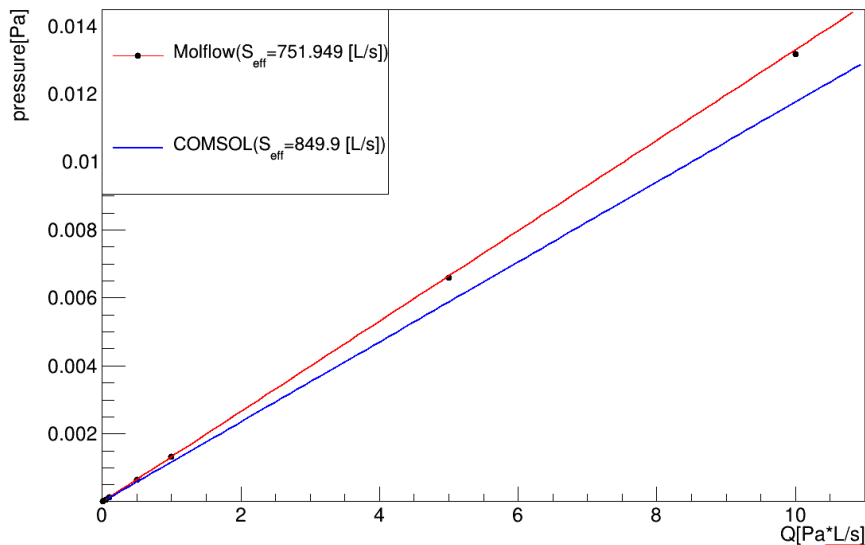
・パル素敵供給 ($Q=10 \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$, 供給時間=1ms, 500 μs , 100 μs)

平衡状態におけるQ-P_{eq} プロット



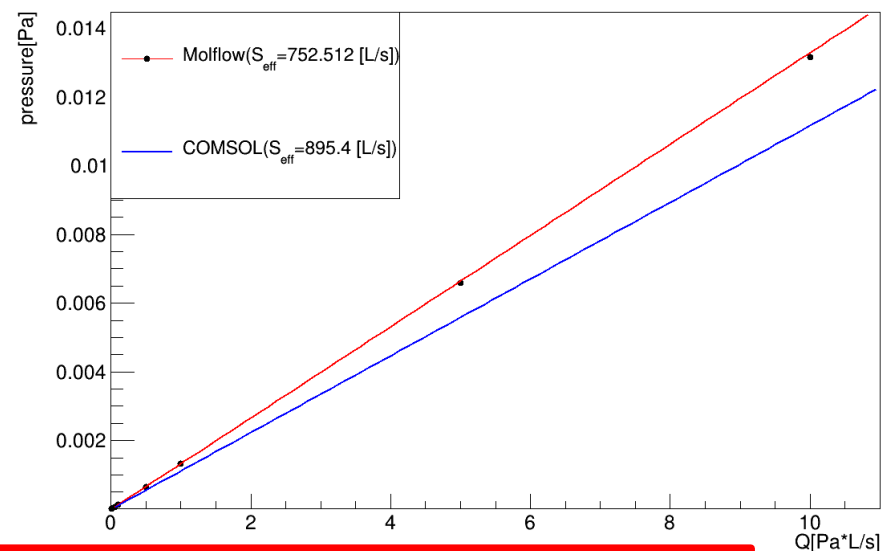
X view Port

P VS Q



Y view Port

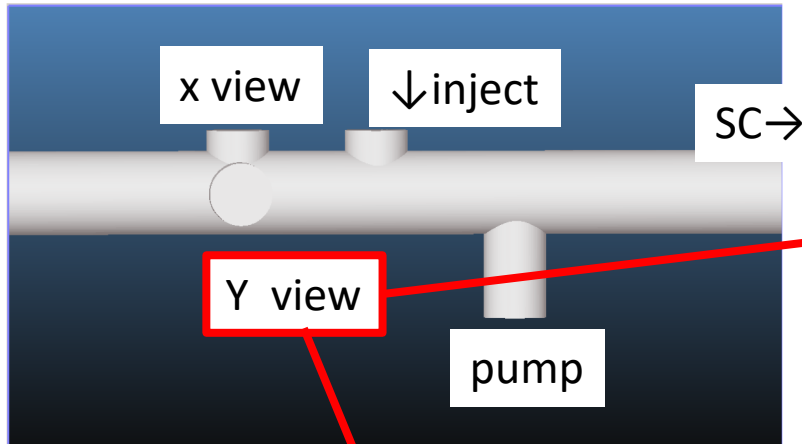
P VS Q



2つのシミュレーションに違いが見られる

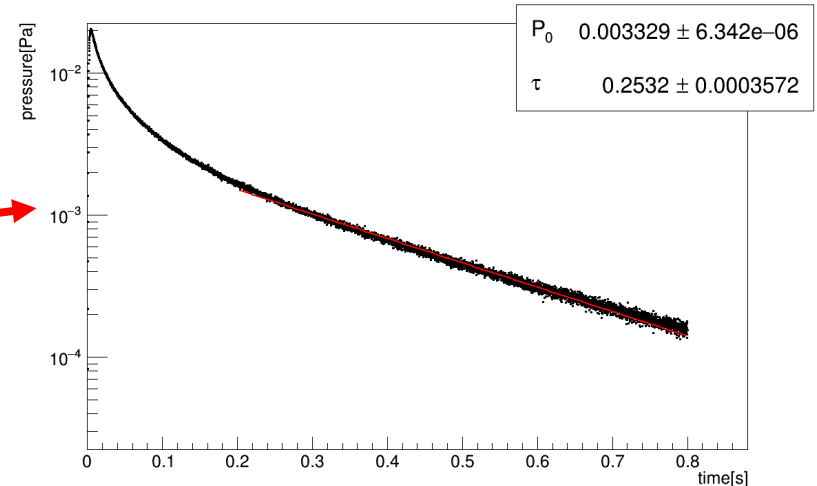
パルスの供給時の圧力変化(FF)

* $Q=10$ [Pa*L/s]、 $P = P_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$ で0.2s からfit



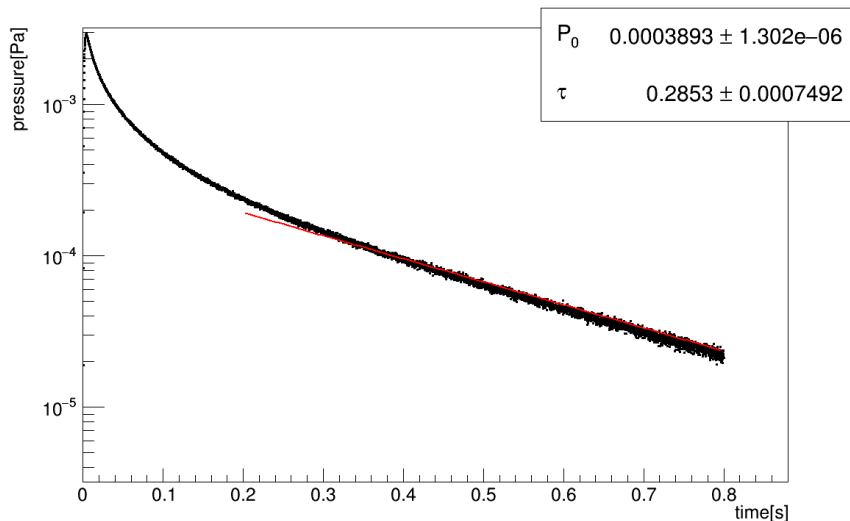
1ms open(=1.15*10⁻¹⁰ kg)

P VS time



500μs open (=5.75*10⁻¹¹ kg)

P VS time



・圧力ピークが鋭い
→時間分解能をあげて詳細を計算中

・後半...指数関数的減少?

$$S = \frac{V}{\tau} \quad \text{より}$$

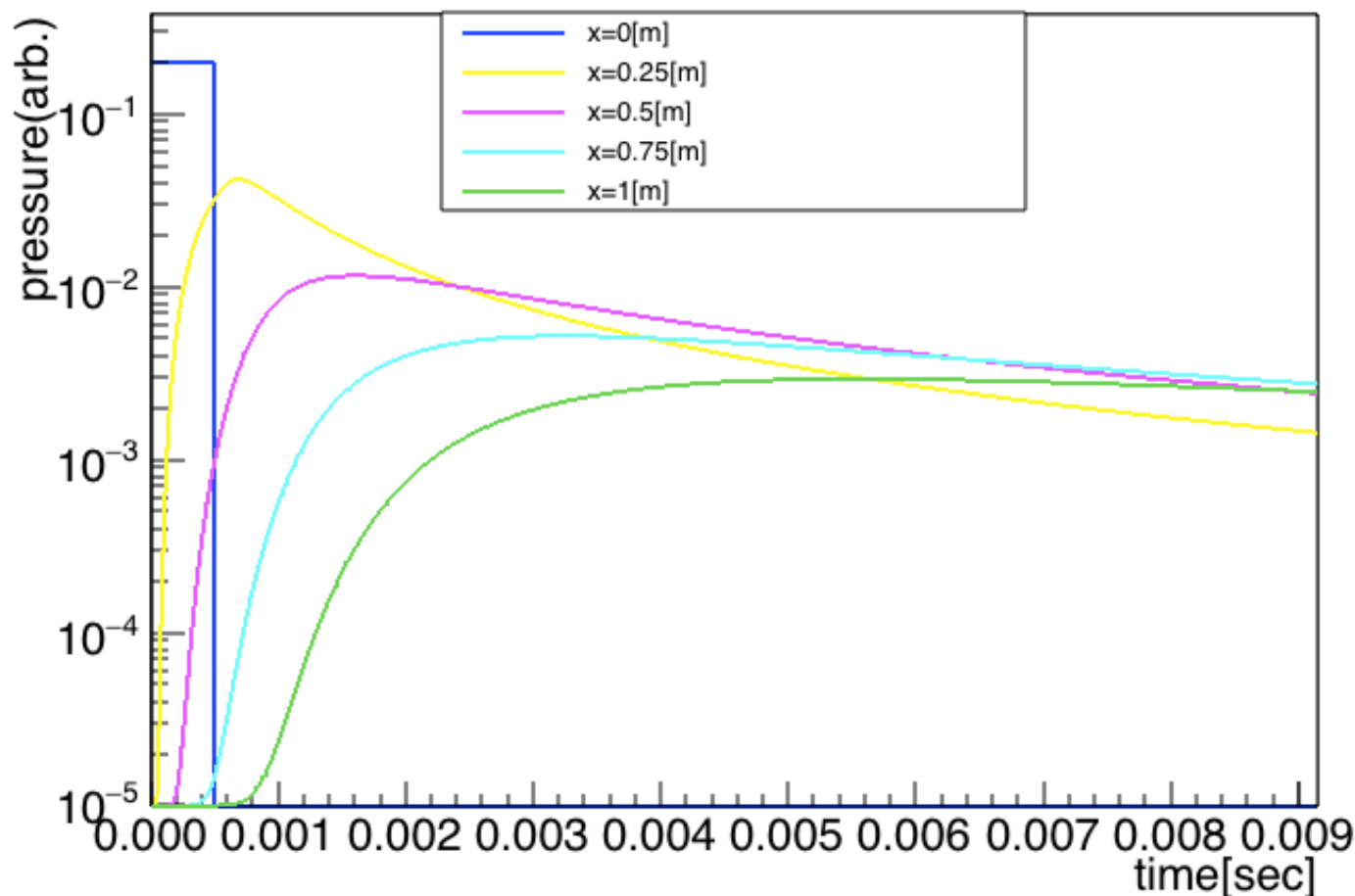
・FF全体: 1156 L
→ $S_{\text{eff}} \sim 4600$ L/s
・BIF部分(1.5 m):
→ $S_{\text{eff}} \sim 190$ L/s

(平衡状態からの予測: ~ 750 L/s)
圧力パルスは平衡の S_{eff} とは異なる?

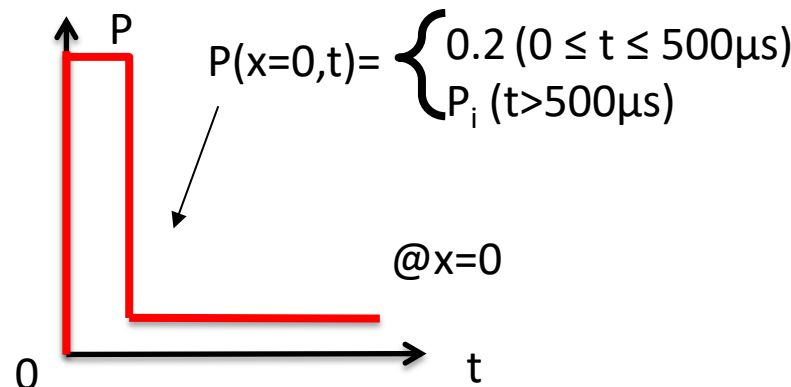
拡散に伴う圧力変化

$$\frac{\partial}{\partial t} P(x, t) = D \frac{\partial^2}{\partial x^2} P(x, t)$$

diffusion of pressure



(b) boundary and initial conditions



$$P(x \neq 0, t=0) = P_i$$

$$P(x \rightarrow \infty, t) = P_i (= 10^{-5})$$

$$D = \frac{\lambda^* \bar{v}}{3}$$

$\bar{v} = 471 \text{ m/s (N}_2, 20^\circ\text{C)}$ 、
 $\lambda^* = 20 \text{ [cm]}$ (diameter of tube)

Summary

- R&D of pulsed injection system is in progress
 - Measurements of the effective pumping speed of test chambers are consistent with simulations (COMSOL, Molflow)
 - Measured pressure change is different compared with the calculation
 - ...understanding gauge response is going on
 - ...one of the causes is pulse flow understanding
- > plan to improve the pulse flow measurement
- > time-dependent simulation with Molflow is under studying

