



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モニターの開発

自然科学研究科 数理物理学専攻
学籍番号 41429218
素粒子物理学研究室
中村亜津志

目次

1. ニュートリノ振動
2. T2K実験における陽子ビーム増強とビームモニター
 - ・Beam Induced Fluorescence (BIF) モニター
3. テストチェンバーによる真空実験
 - ・実効排気速度の決定
 - 連続的な流量の測定
 - ・パルス的なガス供給実験
 - パルス流量の測定
 - 圧力パルスの実測
 - convolutionによる解析

ニュートリノ振動における δ_{CP}

フレーバー固有状態

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix}$$

$$= V_{PMNS}(\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}, \delta_{CP})$$

質量固有状態

$$\begin{bmatrix} \nu_{m1} \\ \nu_{m2} \\ \nu_{m3} \end{bmatrix}$$

V_{PMNS} : ポンテコルボ-牧-中川-坂田行列

・ $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 出現確率

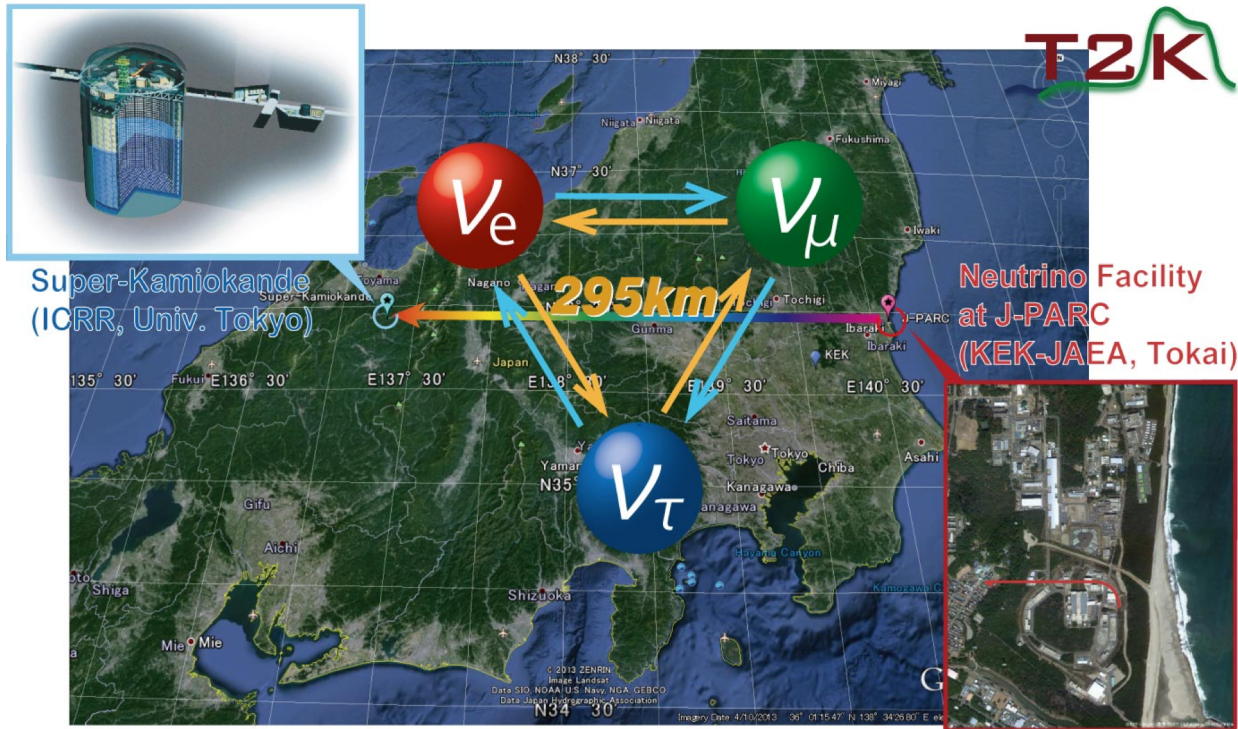
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \simeq \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E_\nu}$$

$$- \frac{\sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23}}{2 \sin \theta_{13}} \sin \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \sin \delta_{CP}$$

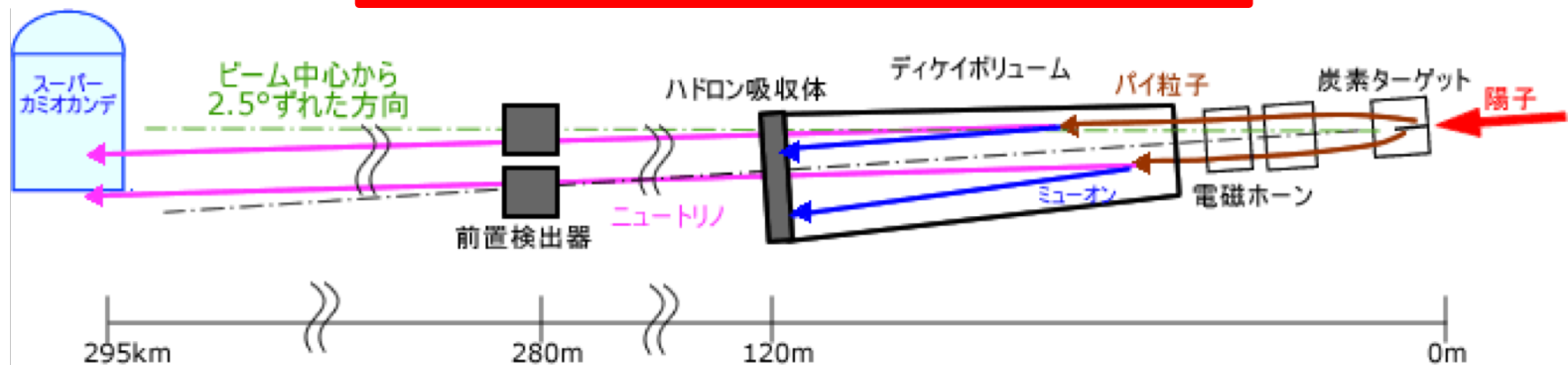
$\nu \rightarrow \bar{\nu}$ で符号が反転

$\nu_\mu \cdot \bar{\nu}_\mu$ における $\nu_e \cdot \bar{\nu}_e$ 出現の違い $\rightarrow \delta_{CP}$ 測定 (T2K 実験)

T2K実験

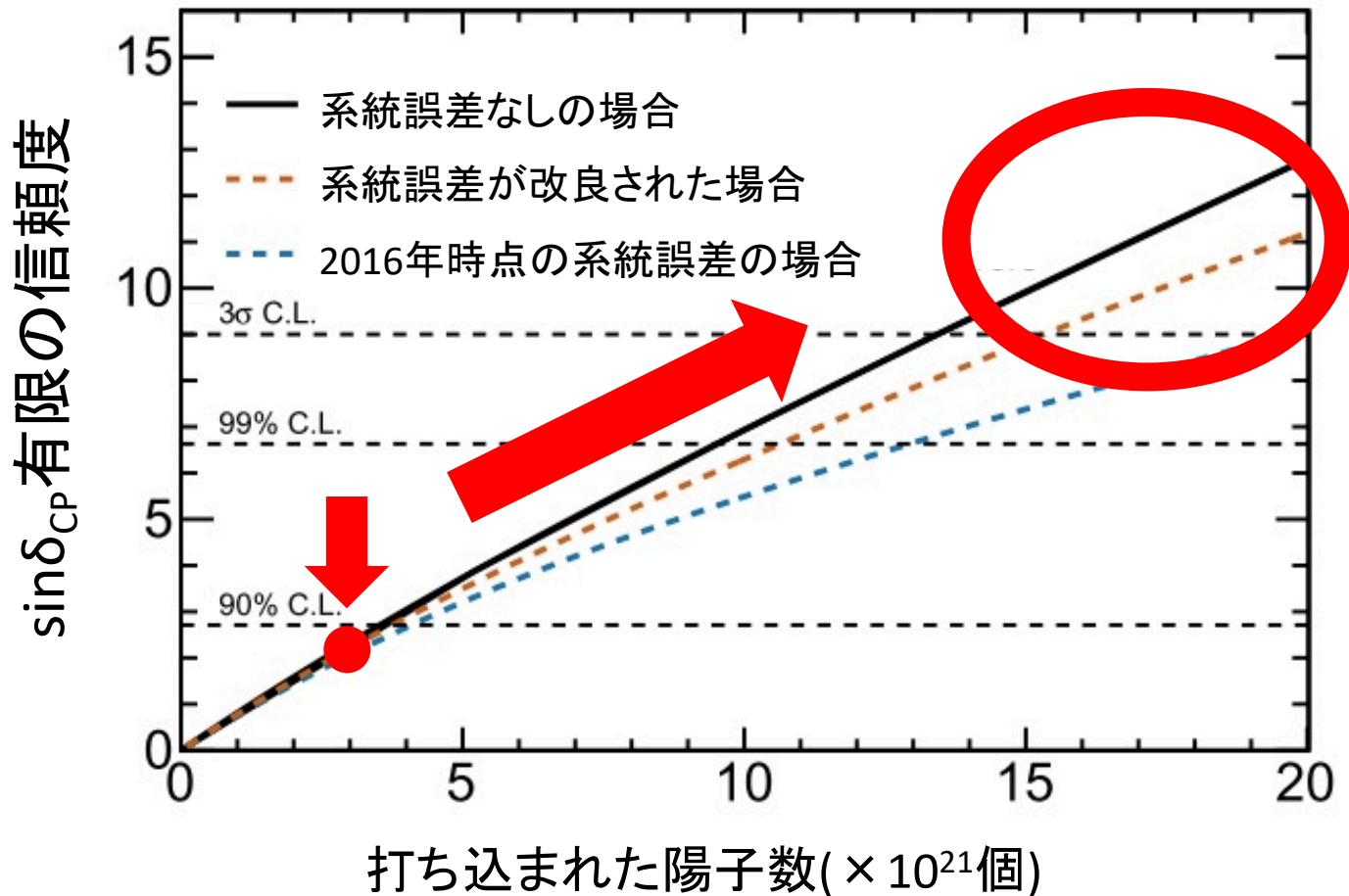


ニュートリノ振動における δ_{CP} の高精度測定



<T2K実験におけるニュートリノビームライン>

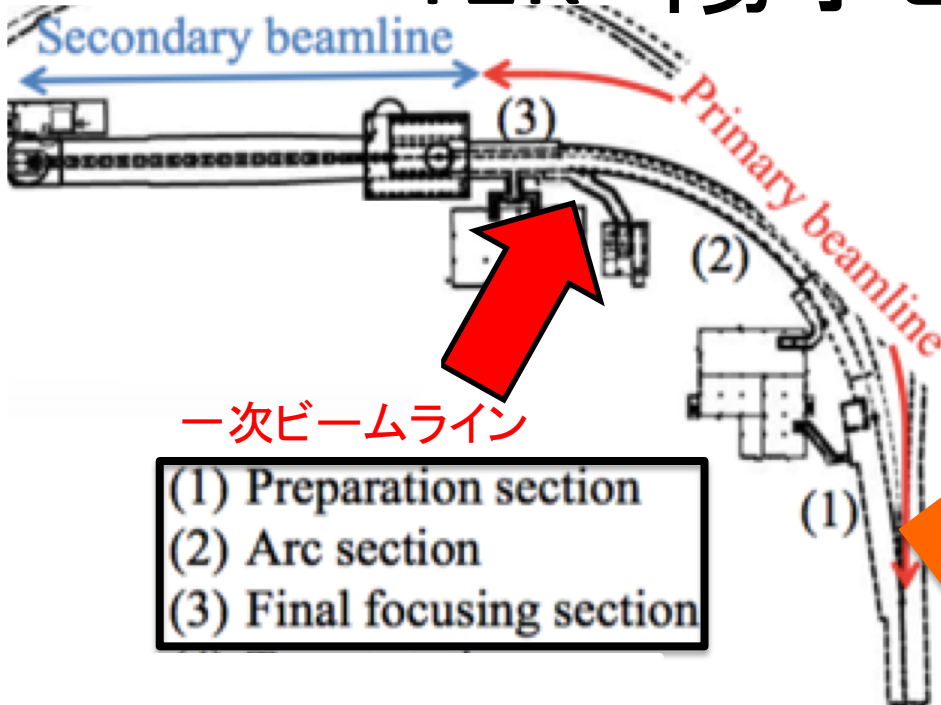
T2K実験の現状と将来



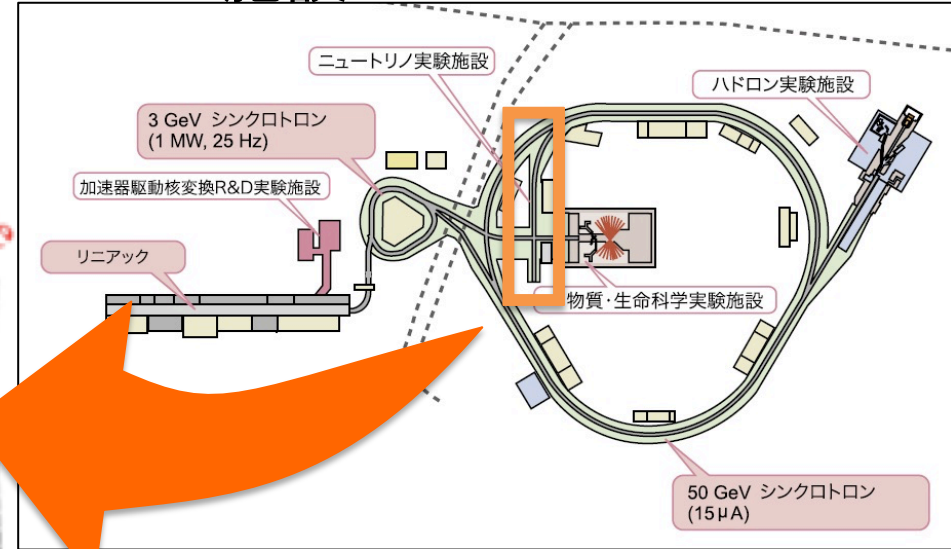
現在(2010年~2018年5月)まで
~ 3×10^{21} 個
→統計誤差が支配的

3 σ C.L.(99.7%以上)を目指す
→陽子ビームの増強(480kW → 1.3 MW)
による統計誤差の削減

T2K 陽子ビームライン



<J-PARC施設>

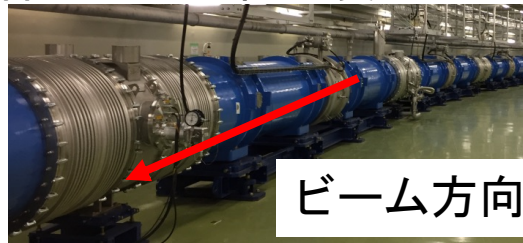


(1)Preparation section

- ・ビームの取り出し口
- ・現在 2.48sごとにMRから陽子を取り出している
- 将来1.13sに短縮

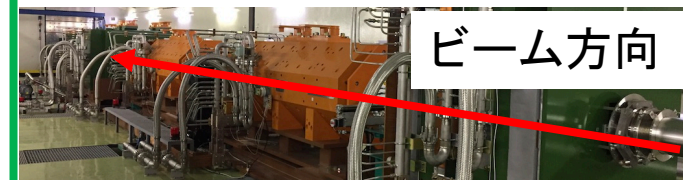
(2)Arc Section(SC section)

- 超伝導磁石(SC)で構成
- 液体Heによる超低温
- 神岡方向に約90度に曲げる



(3)Final Focusing (FF)Section

- 常伝導四重極磁石によるビームの収束
- 炭素標的(二次ビームライン)



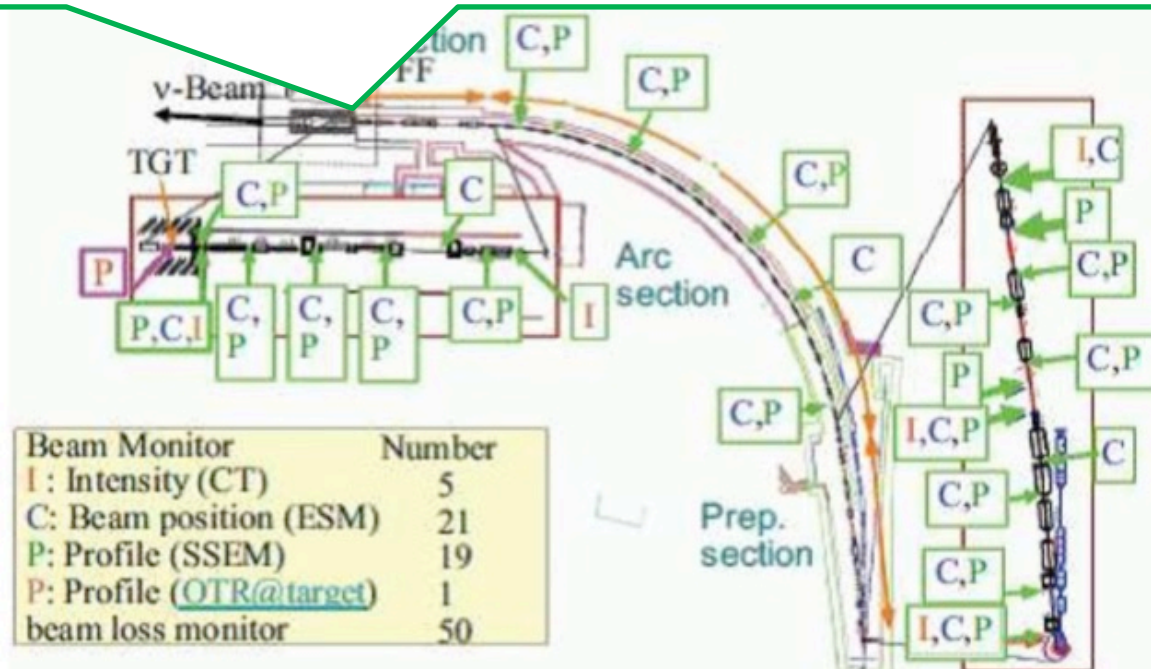
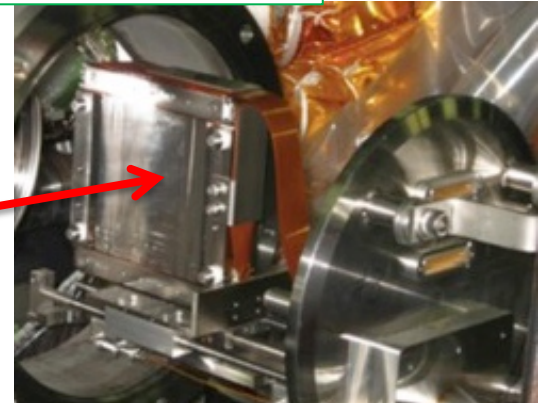
陽子ビームラインのビームモニター

<Beam Profile monitor>(SSEM、図中P)

・陽子ビームの位置、
幅を測定する機器
→陽子ビームの監視

・ビーム強度の損失割合:
 10^{-5} (一台当たり)

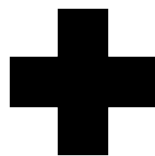
*ここに
ビームが当たる



一次ビームライン上のビームモニター

大強度陽子ビームとビームモニター

大強度陽子ビーム
(~1.3 MW)



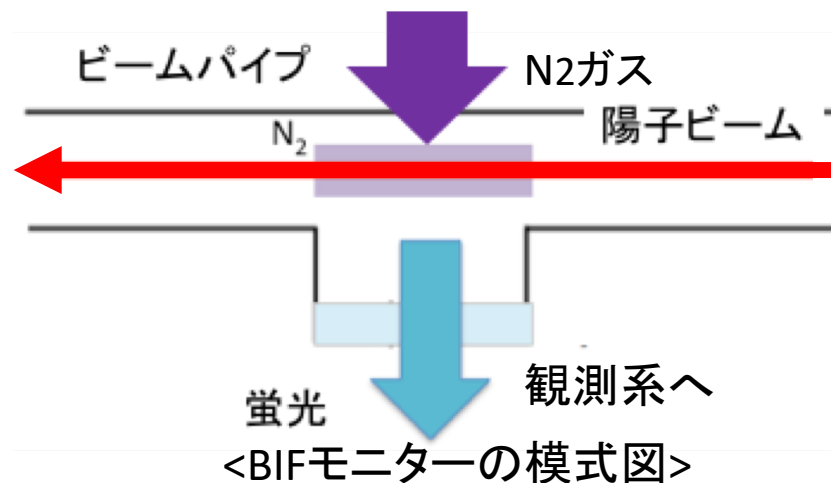
破壊型モニター(SSEM)

寿命の低下、損傷の恐れあり→非破壊型ビームモニターが必要

非破壊型モニター: Beam Induced Fluorescence(BIF) monitor

固体ではなくガス(N₂)を使用

→陽子との相互作用で放出される**蛍光**を観測



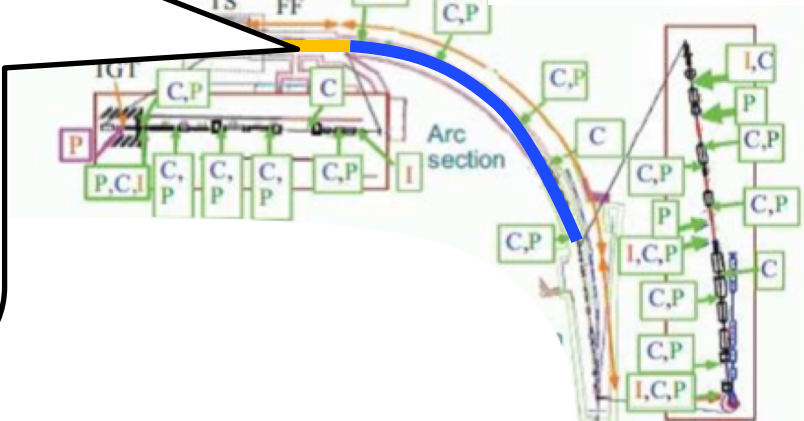
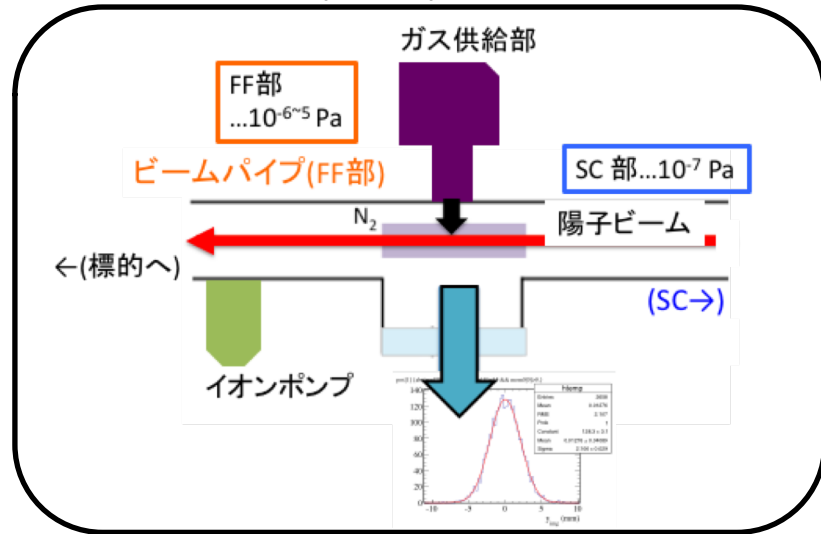
BIFモニターの圧力系の要求

BIF @ J-PARC(予定)

<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



<BIF導入箇所の状況>

<ビームパイプの真空保護>

	圧力(FF部)	予測検出光子数	ビーム損失
現在	10^{-6} Pa (残留ガス)	なし	10^{-5} (SSEM1台由来)
BIFの要求	10^{-2} Pa	1000個	10^{-9} (1m当たり)

・常伝導部分(FF)

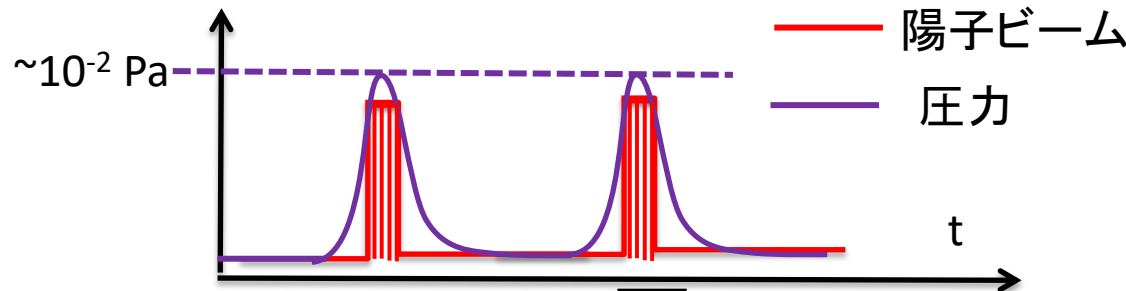
... $10^{-6\sim5}$ Pa

・超伝導部分(SC)

... $10^{-8\sim7}$ Pa

パルスのな供給ガス供給

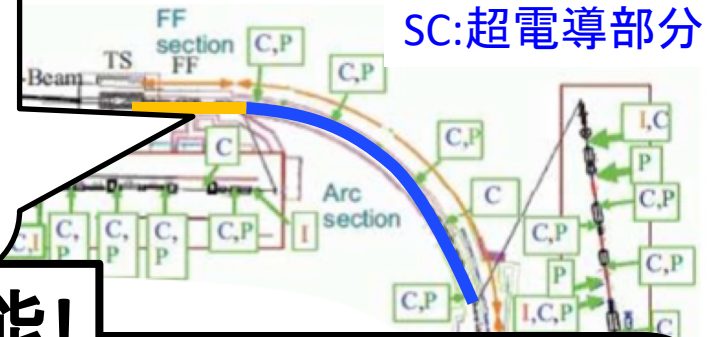
<パルスのなガス供給>



<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



達成可能!

	圧力(FF部)	予測検出 光子数	ビーム損失
現在	10^{-6} Pa (残留ガス)	なし	10^{-5} (SSEM1台由来)
BIFの要求	10^{-2} Pa	1000個	10^{-9} (1m当たり)

・常伝導部分(FF)

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

・超伝導部分(SC)

... $10^{-8} \sim 7$ Pa

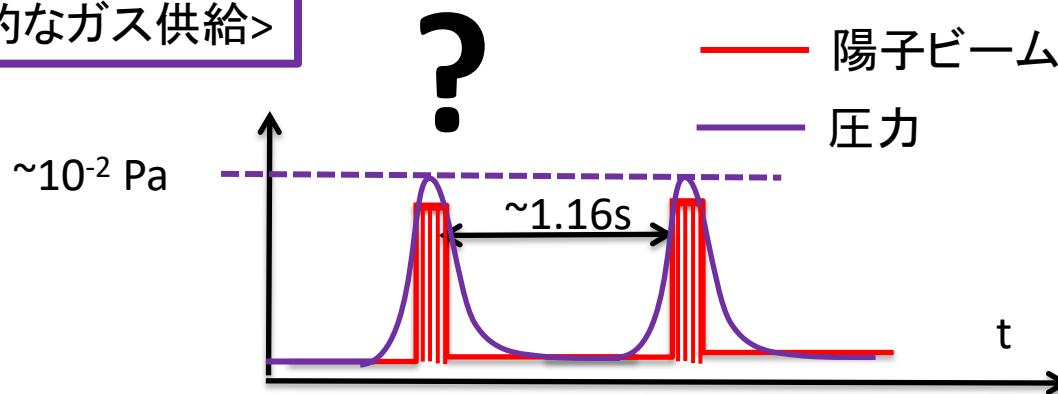
真空系にパルスのなガスを導入



世界で初めての試み

パルスのなガス供給の課題

<パルスのなガス供給>



- ・今までに早い圧力変化を取り扱った例はない
- ・ガスを入れる量とその排気速度で圧力変化を制御可能か？

→テストチェンバーを用いた圧力パルス測定
及び排気速度・供給ガス量の測定

目次

1. ニュートリノ振動
2. T2K実験における陽子ビーム増強とビームモニター
 - Beam Induced Fluorescence (BIF) モニター
3. テストチェンバーによる真空実験
 - 実効排気速度の決定
 - 連続的な流量の測定
 - パルス的なガス供給実験
 - パルス流量の測定
 - 圧力パルスの実測
 - convolutionによる解析

テストチェンバーによる真空実験

平衡状態に関する実験

- ・実効排気速度の決定
 - 連続流れの流量測定
 - 平衡圧力の測定
- ・測定量の誤差評価
 - 流量の誤差評価
 - 測定圧力の誤差評価

圧カシミュレーション

- ・平衡状態に関するシミュレーション
- ・パルス的なガス供給に関するシミュレーション

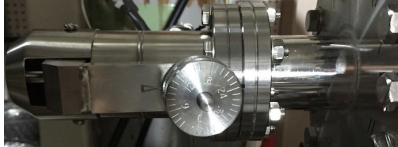
パルス的な供給に関する実験

- ・パルス的なガス供給の実験
 - パルス的な流れの流量測定
 - 圧カパルスの実測
- ・圧カパルスの解析
 - convolutionによる解析
 - パルス的な流れの誤差評価
 - 圧カパルスの相関の調査
 - インレットバルブの依存性

テストチェンバー

<ガス供給部>

- ・バリアブルリークバルブ
→連続的な供給に使用



- ・パルスバルブ
→パルスの供給に使用



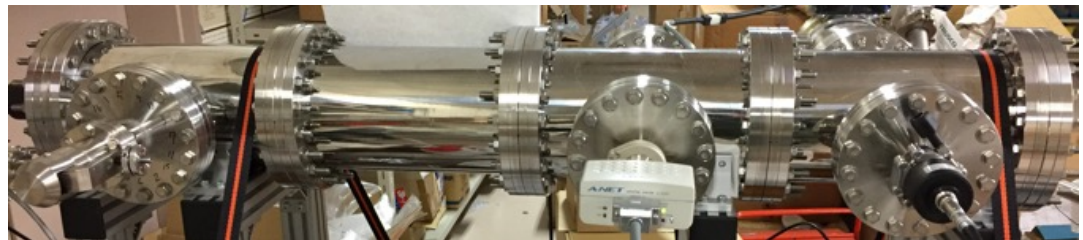
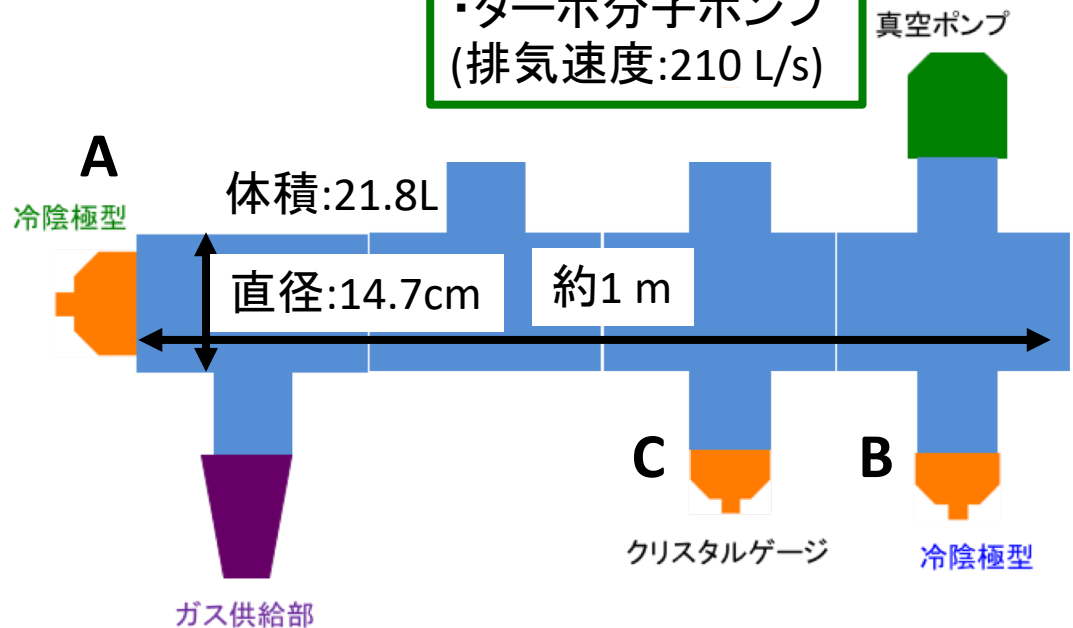
<真空計>

A,B: 冷陰極電離真空計
($10^0 \sim 10^{-6}$ Pa)

C: クリスタルゲージ
($10^5 \sim 10^{-2}$ Pa)

<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: 210 L/s)



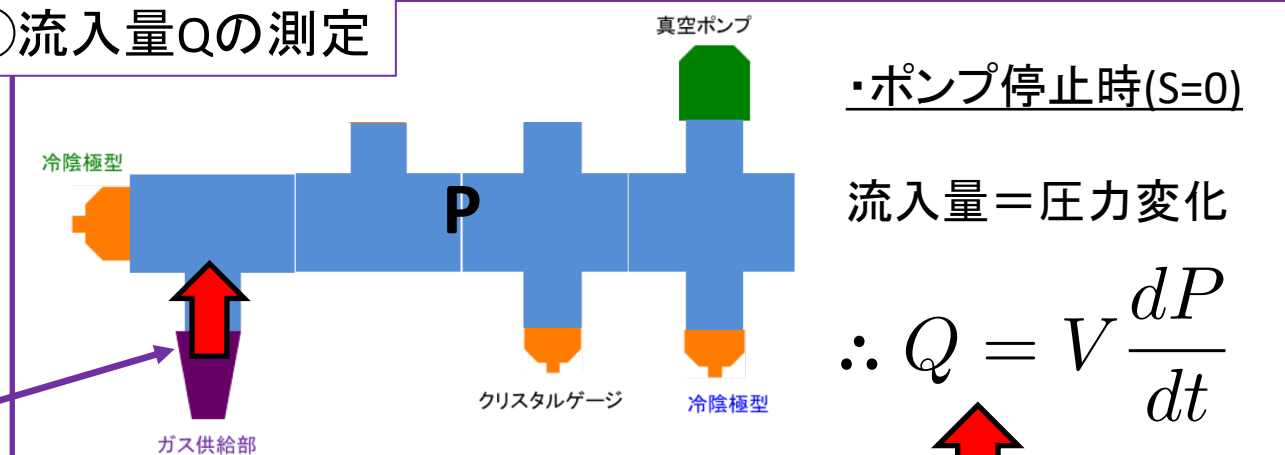
テストチェンバーの側面図

実効排気速度の決定

①流入量Qの測定



導入ガス
...連続流れ
バリアブルリーク
バルブを使用

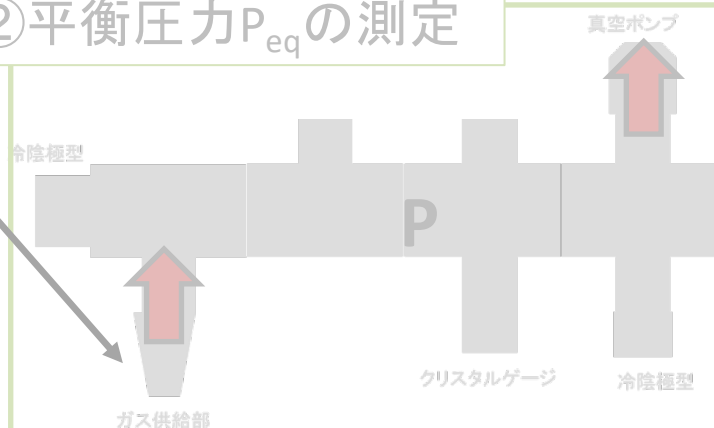


圧力: P [Pa]、流入量: Q [Pa・L/s]、時間: t [s]、チェンバー体積: V [L]、排気速度: S [L/s]

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

(排気方程式)

②平衡圧力 P_{eq} の測定



・定常状態(圧力変化=0)

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

P_{eq} : 平衡圧力 [Pa]

S_{eff} : 実行排気速度 [L/s]

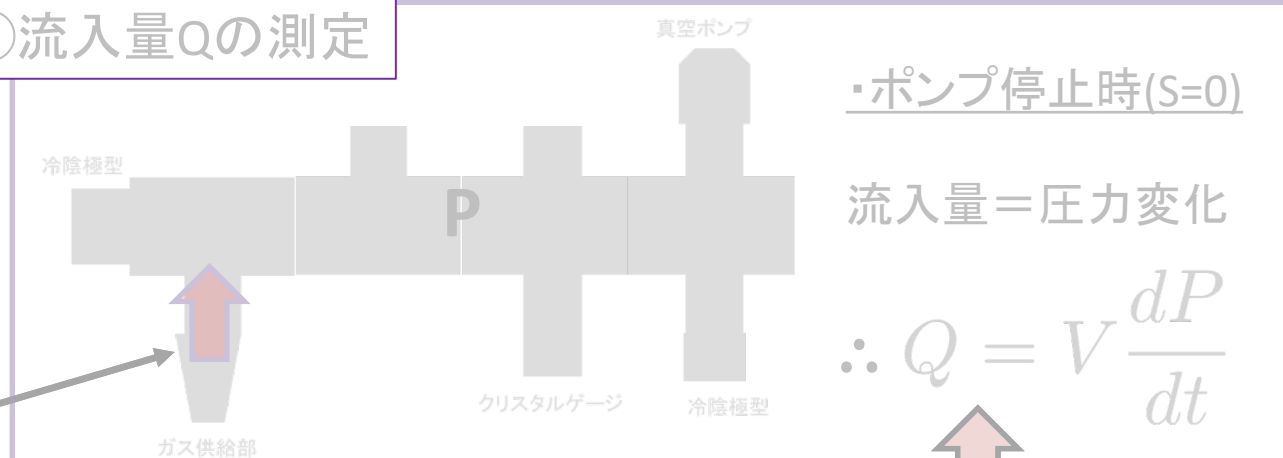
→ 流入量 Q と平衡圧力 P_{eq} から実行排気速度 S_{eff} を決定

実効排気速度の決定

①流入量Qの測定



導入ガス
...連続流れ
バリアブルリーク
バルブを使用

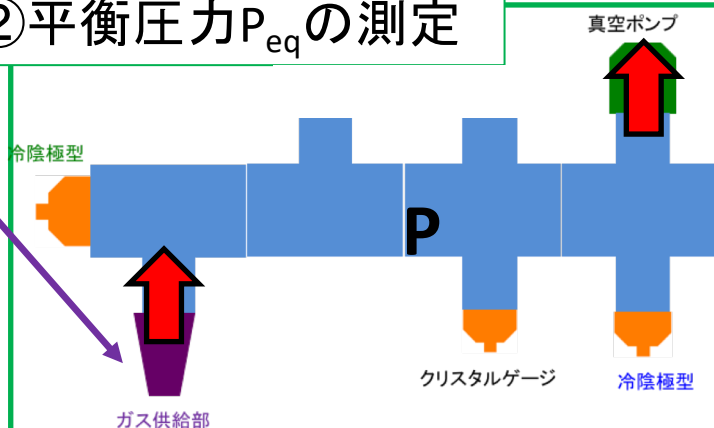


圧力: P [Pa]、流入量: Q [Pa・L/s]、時間: t [s]、チェンバー体積: V [L]、排気速度: S [L/s]

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

(排気方程式)

②平衡圧力 P_{eq} の測定



・定常状態(圧力変化=0)

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

P_{eq} : 平衡圧力 [Pa]

S_{eff} : 実行排気速度 [L/s]

→ 流入量 Q と平衡圧力 P_{eq} から実行排気速度 S_{eff} を決定

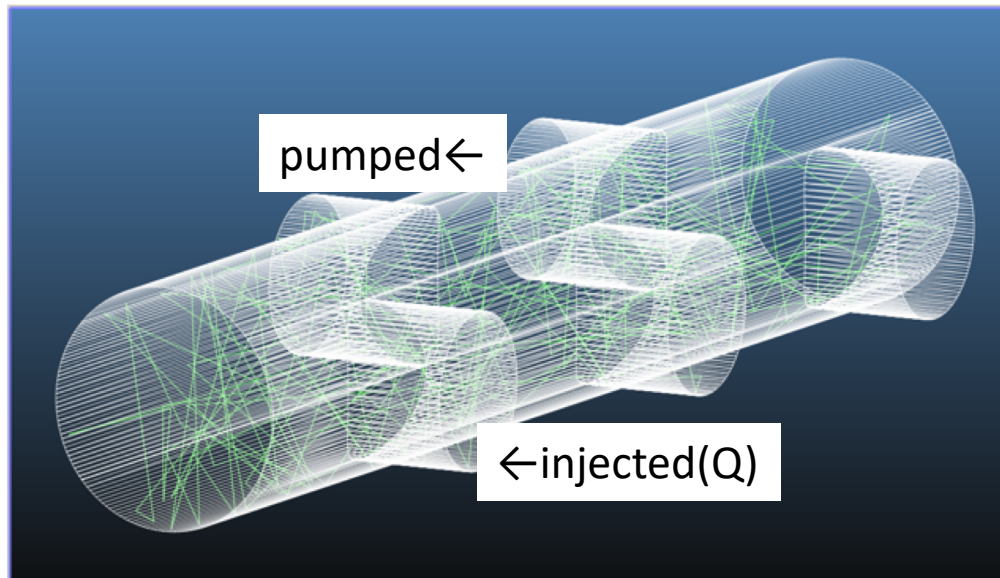
真空系のシミュレーション

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

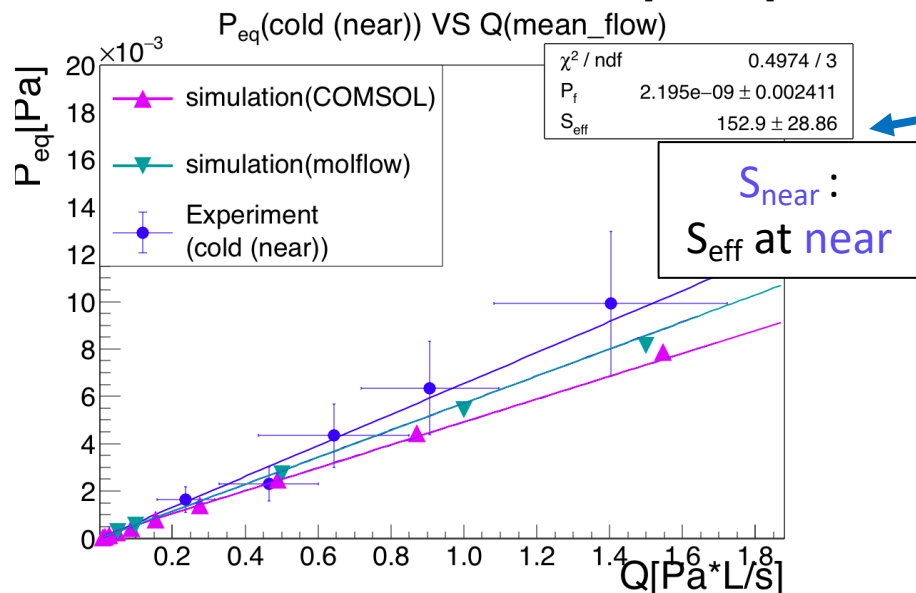
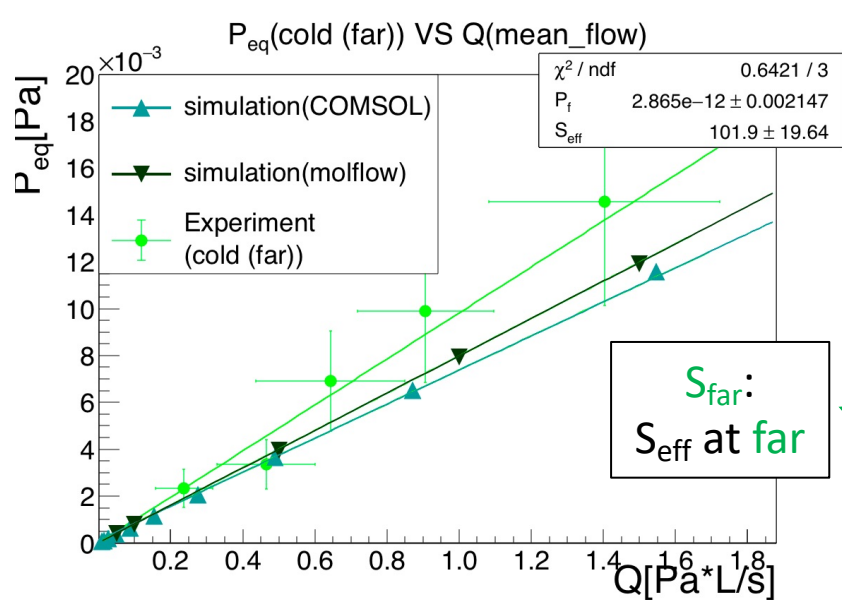
Molflow+

CERNが提供している多数のテスト粒子の運動をシミュレートする
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



シミュレーションの一例

実効排気速度(S_{eff})の結果



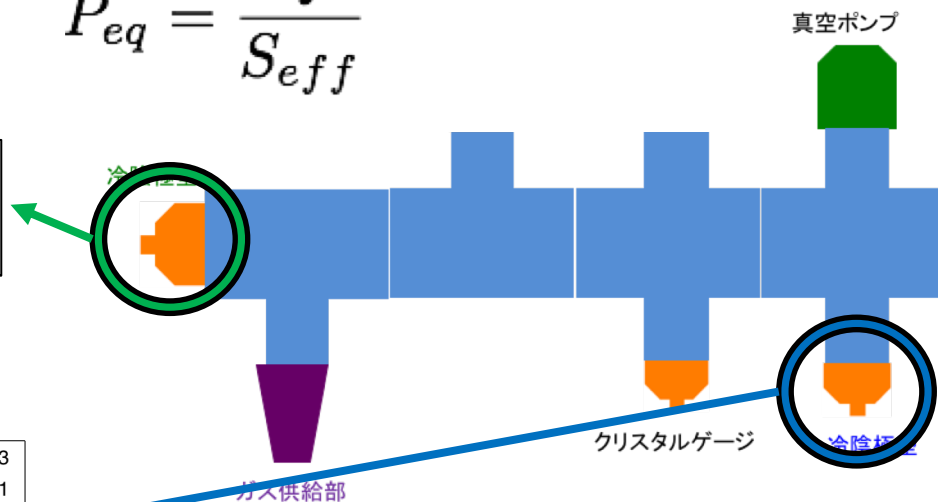
・平衡状態時

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

P_{eq} [Pa]: 平衡圧力

Q [Pa $\cdot$ L/s]: 流入量(既知)

S_{eff} [L/s]: 実効排気速度



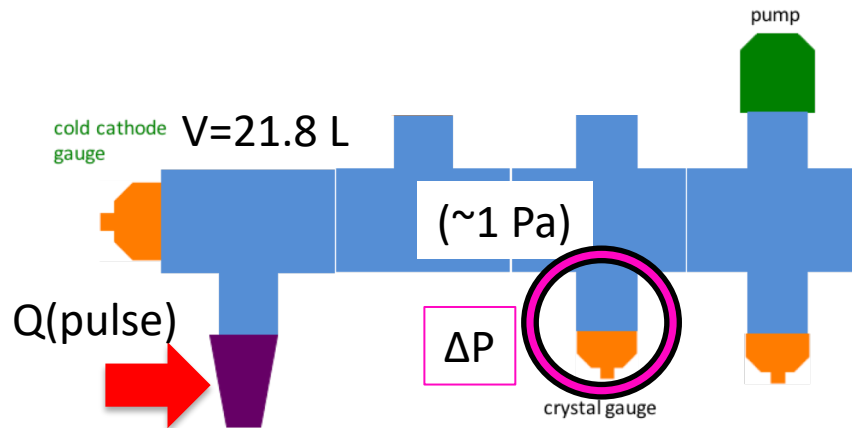
	S_{far} [L/s]	S_{near} [L/s]
COMSOL	133	193
Molflow	~126	~183
Experiment	102 $\pm$ 20	152 $\pm$ 29

実験結果はシミュレーションと無矛盾

パルスのなガス供給の実験



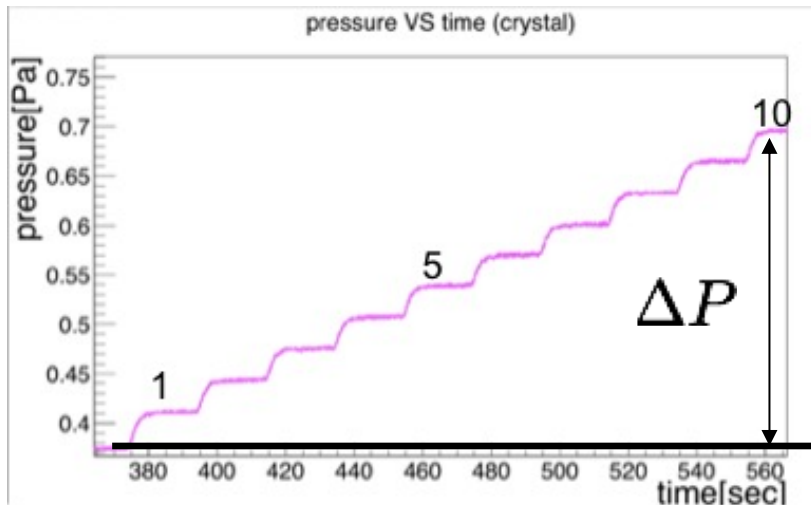
*パルスバルブを使用



(1) パルス供給時の流量測定(ポンプOFF)

- ・ポンプOFFで、圧力上昇(ΔP)と体積Vより流量を定義

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



<パルス流量の結果>

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

圧力変化の予想

- ・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

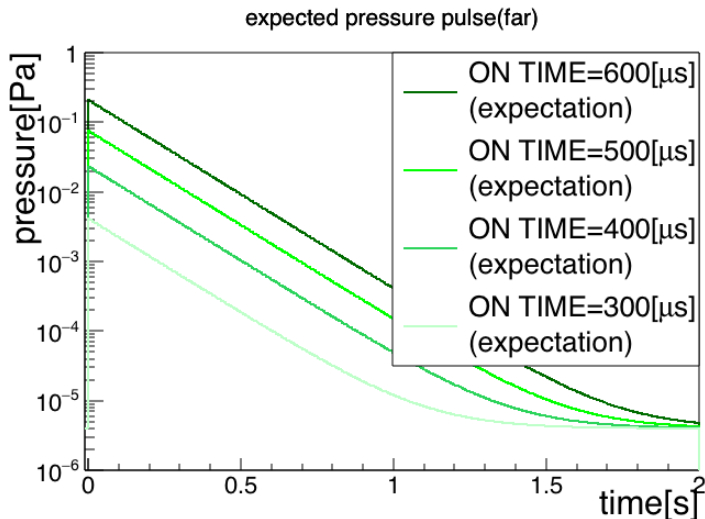
$$P(t) = \begin{cases} \frac{Q}{S}(1 - e^{-\frac{S}{V}t}) + P_f & (t_{\text{open}} < t \leq t_{\text{close}}) \\ P(t = t_{\text{close}}) e^{-\frac{S}{V}(t - t_{\text{close}})} + P_f & (t_{\text{close}} < t) \end{cases}$$

* $t_{\text{close}} = t_{\text{open}} + \text{ON TIME}$ 、 $P_f = 1\text{e-}5$ [Pa]、 $V = 21.8$ [L]

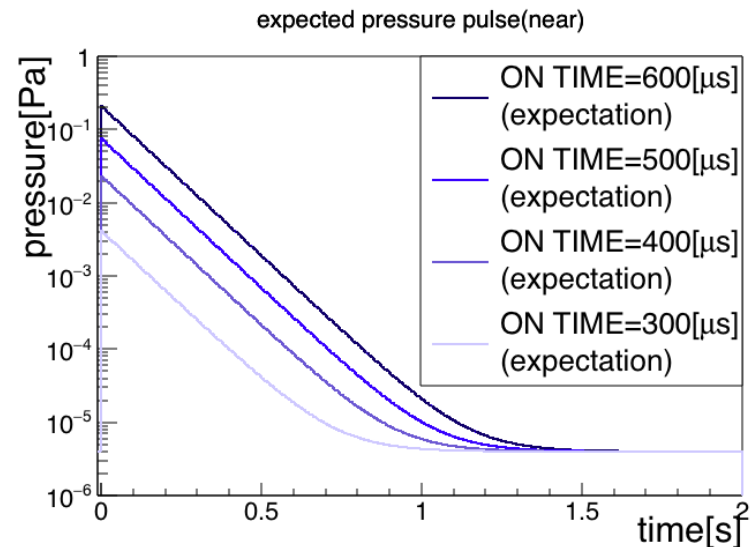
(COMSOL)	far	near
$S_{\text{eff}}[\text{L/s}]$	133	193

ON TIME[μs] (exp.)	300	400	500	600
$Q[\text{Pa} \cdot \text{L/s}] (0.2 \text{ MPa})$	283	1196	3098	7144

予想変化 @ far



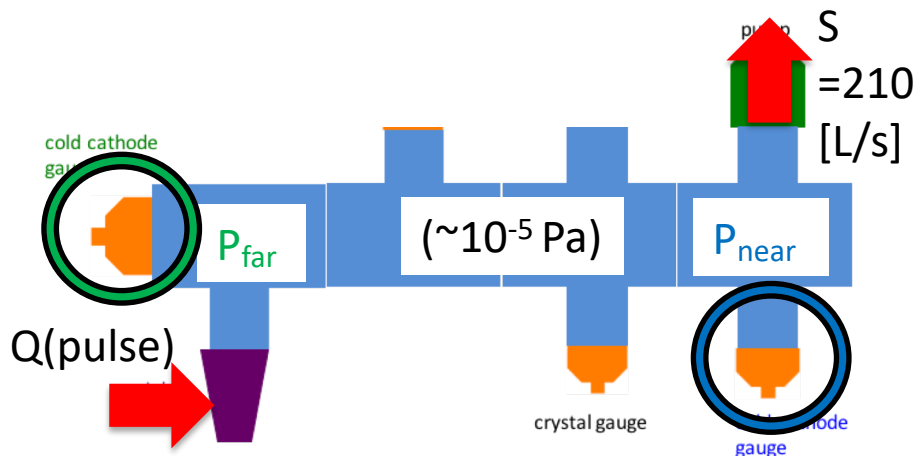
予想変化 @ near



パルスのなガス供給の実験



*パルスバルブを使用



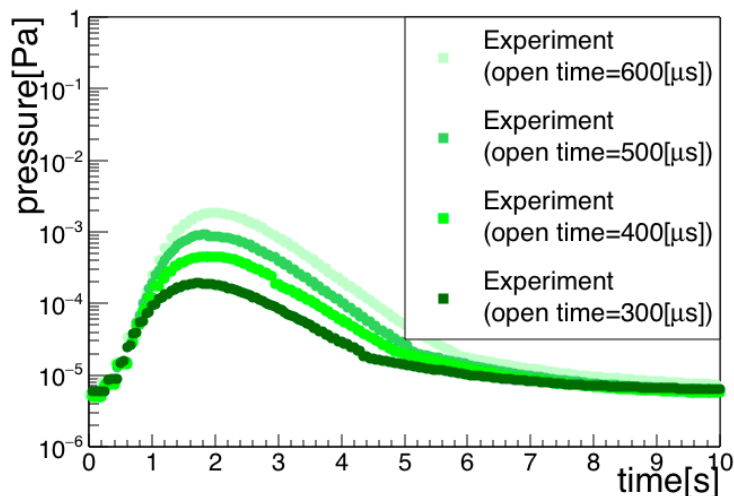
(2) 圧カパルスの測定(ポンプON)

- ・高真空(10^{-5} Pa)下、ポンプONでの圧力変化を測定
- ・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分ごとにパルス供給

<測定結果>

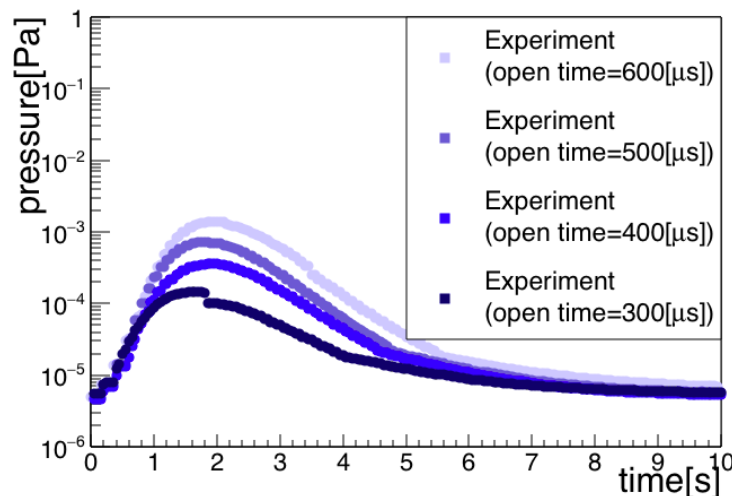
P_{far}

Exp. result(far)



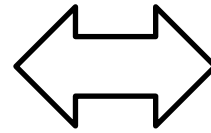
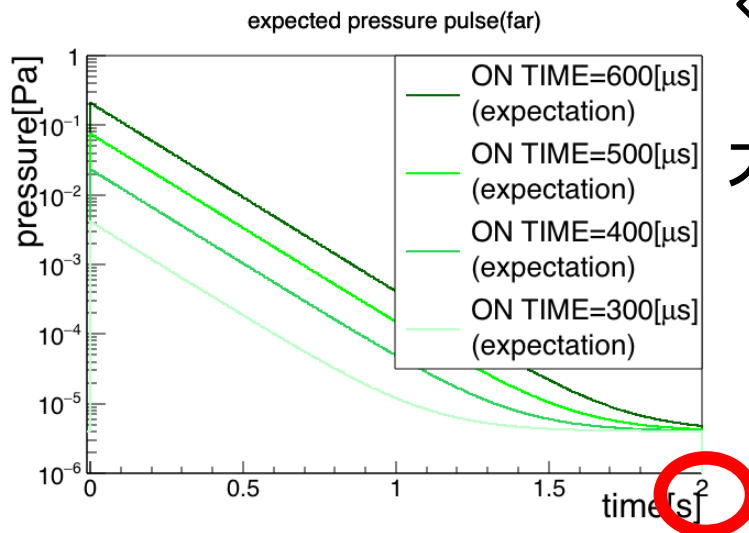
P_{near}

Exp. result(near)



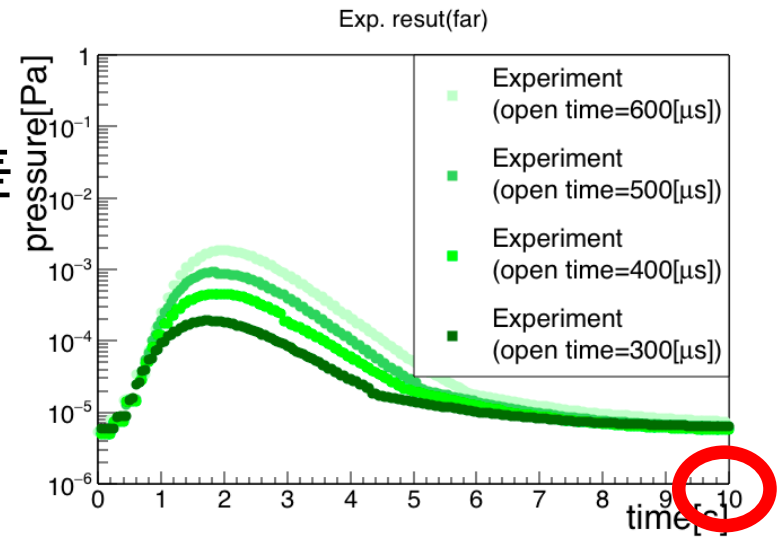
圧力変化の予想と測定結果の比較

予想変化 @ far



大きな差

測定結果@ far



・測定結果

①ピークが低い
(約50倍の差)

②パルス幅が広い

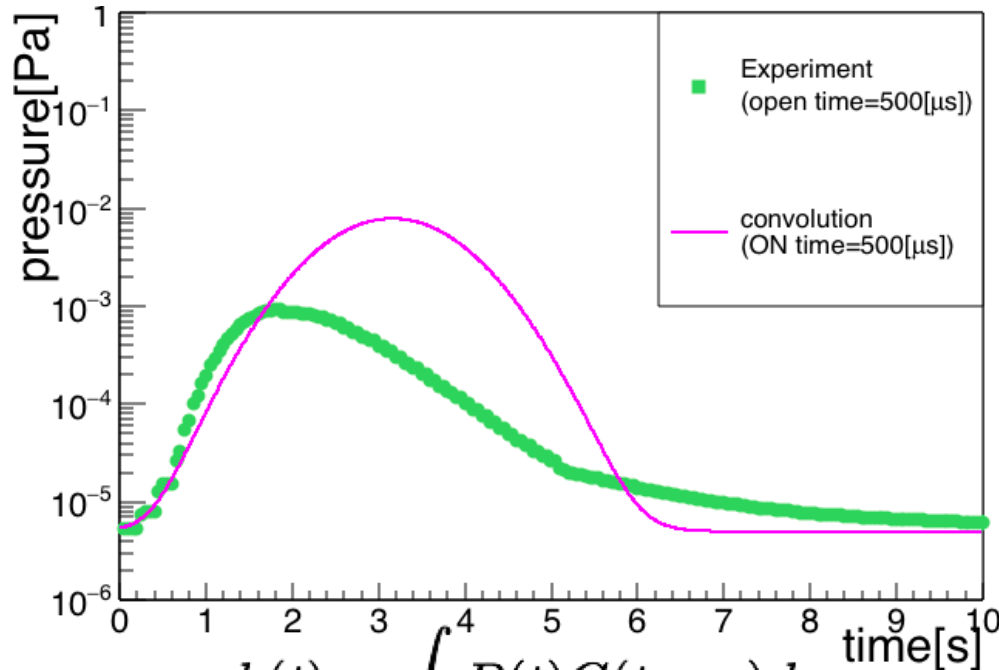
...予想: ~2 s で元に戻る

測定: 7~8 s にかかっている

真空計の応答によるもの?
→convolutionによる解析

Convolutionとの比較

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



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

G(t):ゲージの応答関数
(Delayed Gaussianを使用)

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

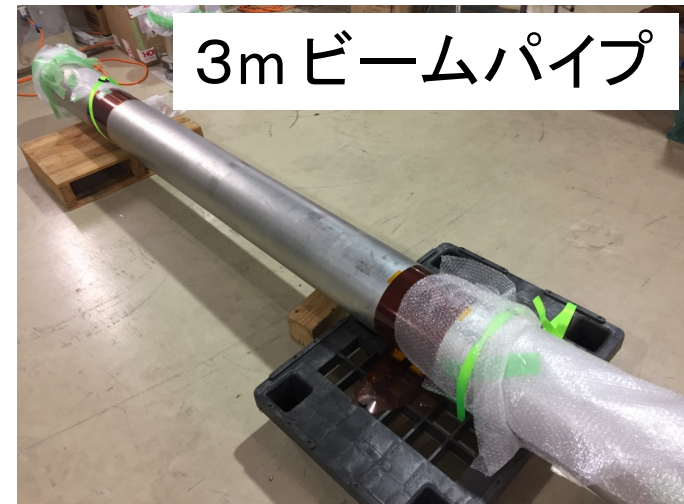
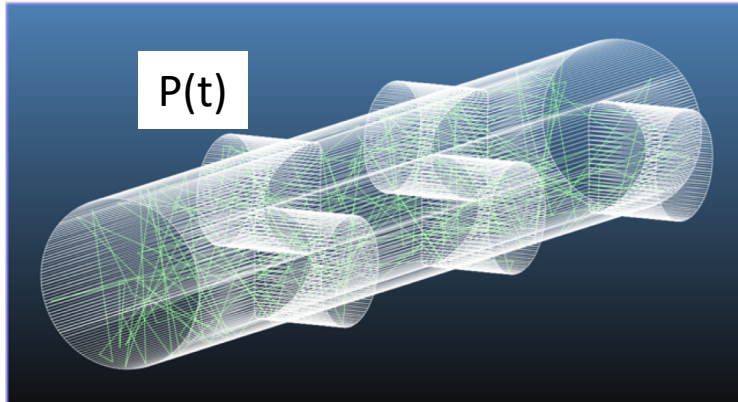
P(t):期待される圧力変化
(farの S_{eff} を使用)

- ・他の応答関数の使用
- ・圧力変化P(t)のシミュレーション

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
 - 実験とシミュレーションは無矛盾
 - パルス供給
 - 真空計の応答の考慮が必要
 - 実際の圧力変化(拡散)の考察

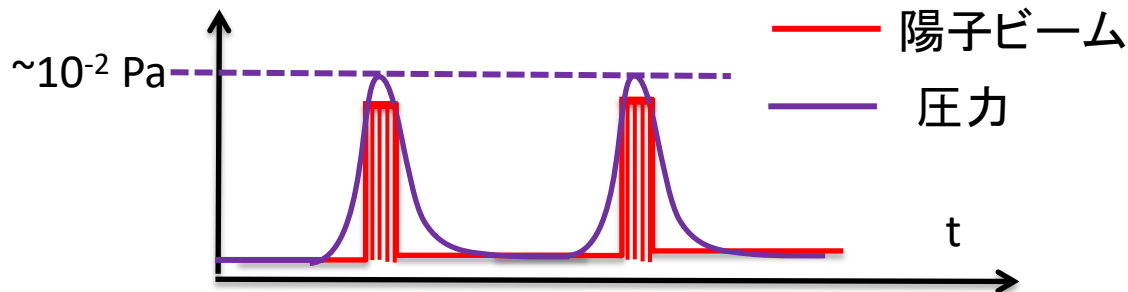
今後の計画



・Molflow による時間シミュレーション

・長い系での実際の圧力変化

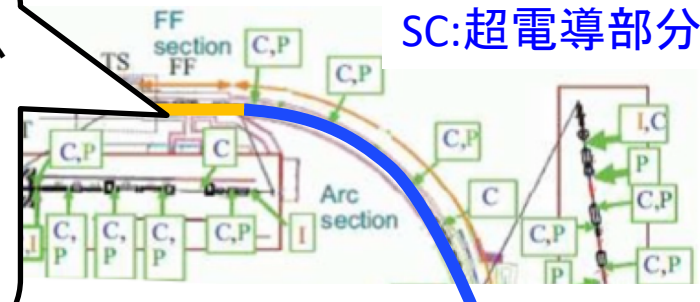
<パルスのなガス供給の理解>



<一次陽子ビームライン>

FF:最終収束部(常伝導)

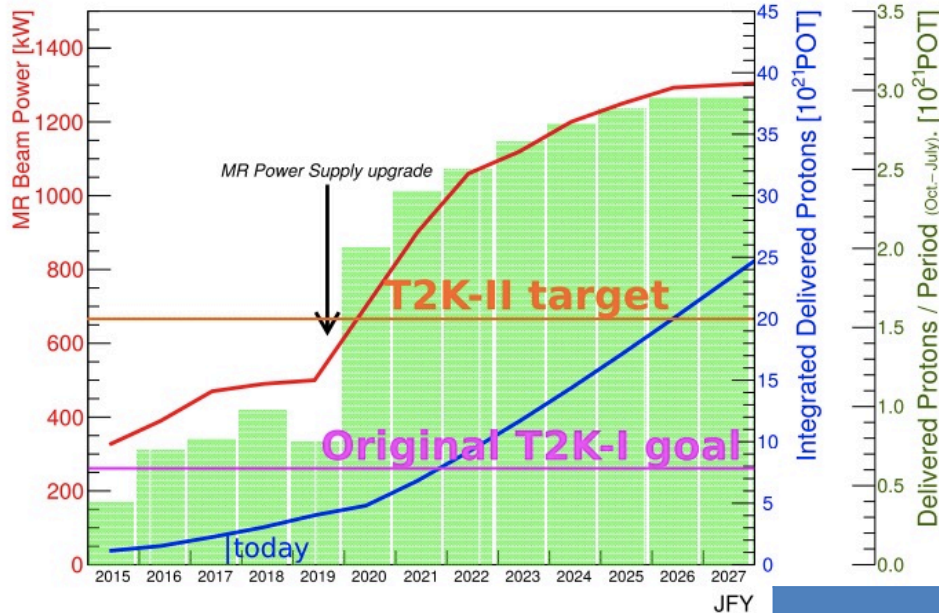
SC:超電導部分



back up

ビーム増強計画

T2K-II Protons-On-Target Request



T2K(初期)の目標
... 7.8×10^{21} POT



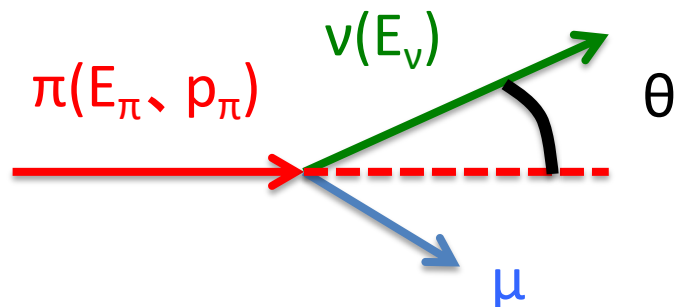
T2K2(proposal)の目標
... 20×10^{21} POT

・ 3σ レベルでの測定を目指す
→陽子ビームの増強による統計誤差の削減

	現在	2020?	2027?
取り出し周期(s)	2.48 s	1.3s	1.16
陽子数(個/spill)	2.2×10^{14}	2.45×10^{14}	3.2×10^{14}
ビーム強度	485 kW	750 kW	1.3 MW

off-axis 法

< π 中間子の2体崩壊>

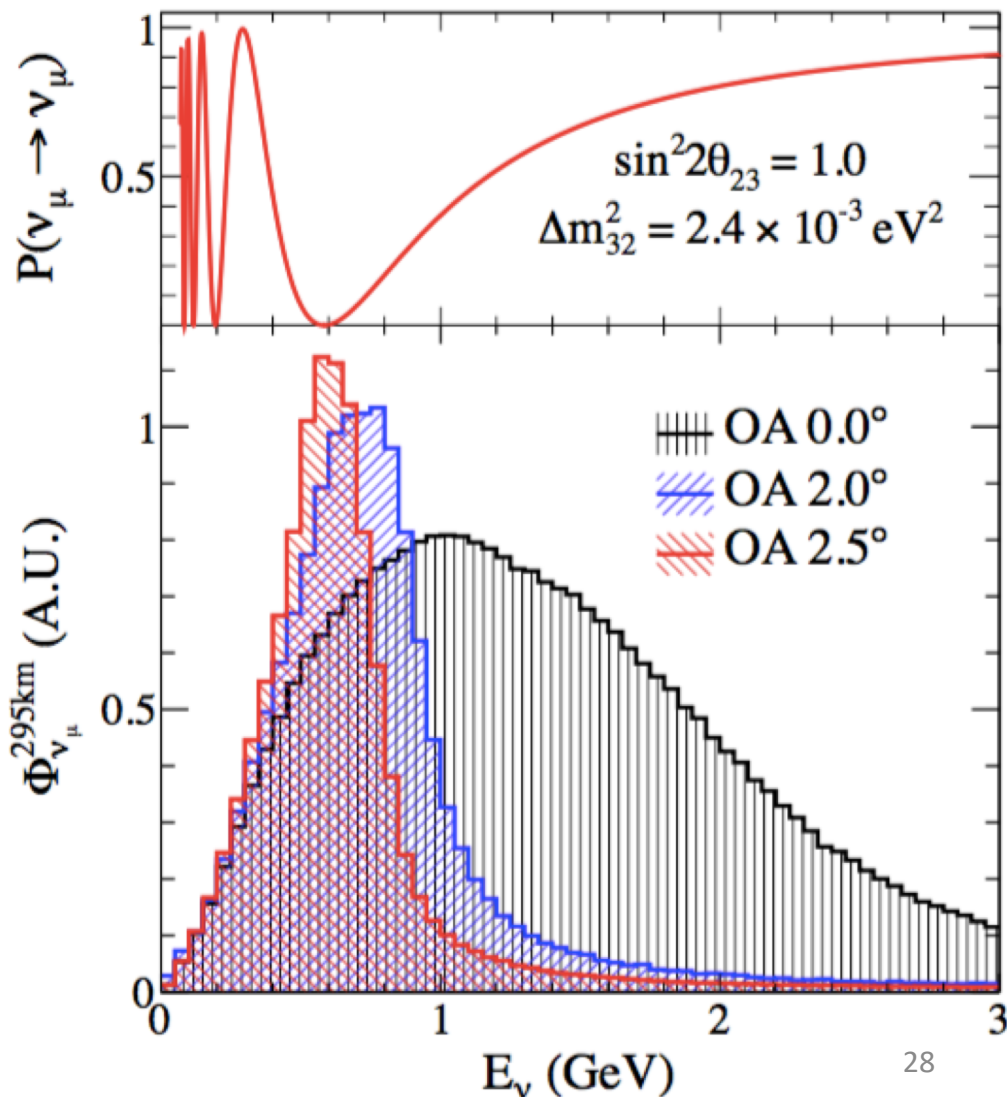


$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos \theta)}$$

ビーム軸から2.5度ずらすと
ニュートリノエネルギーの幅
が狭くなる

→0.6GeV付近の
ニュートリノが多く得られる

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \simeq \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \frac{\Delta m_{23}^2 L}{4E}$$



なぜニュートリノ振動？

2. CP対称性の破れ

宇宙の始め: 粒子と反粒子(電荷のみが反転した粒子)が同数生成
→観測されている宇宙は粒子のみで構成されている

$$\begin{bmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ s \\ b \end{bmatrix}$$

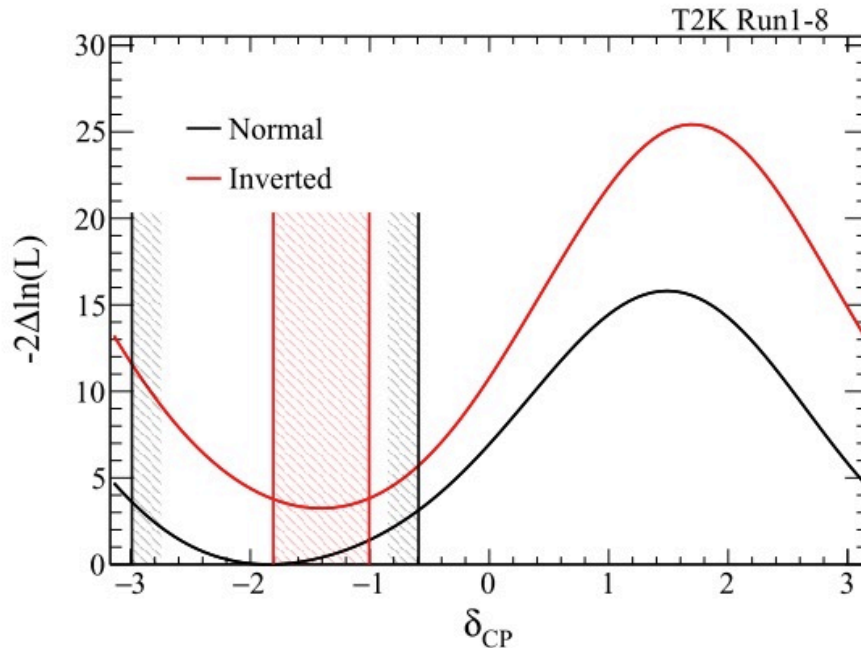
↑Cabibbo-Kobayashi-Maskawa 行列

- ・ 小林・益川理論はクォークのCP対称性の破れを説明する(CKM行列)
→まだ不十分

ニュートリノにもCP対称性の破れが存在すれば、
宇宙の物質と反物質の非対称を説明出来る？

T2K実験の現状と将来

<最新結果(2018年5月)>



斜線区間:90% C.L.で取りうる値
→CP保存($0, \pm\pi$)を90%C.Lで棄却

線の黒、赤
...質量階層が未確定のため、2パターンを列挙(Normal, inverted)

・3 σ レベルでの測定を目指す
→陽子ビームの増強による統計誤差の削減

	現在	2022?	2026?
取り出し周期(s)	2.48 s	1.3s	1.16
陽子数(個/spill)	$2.2 \cdot 10^{14}$	$2.45 \cdot 10^{14}$	$3.2 \cdot 10^{14}$
ビーム強度	485 kW	750 kW	1.3 MW

ニュートリノ質量

太陽ニュートリノ振動より

$$\Delta m_{21}^2 \simeq 7.6 \times 10^{-5} [\text{eV}^2],$$

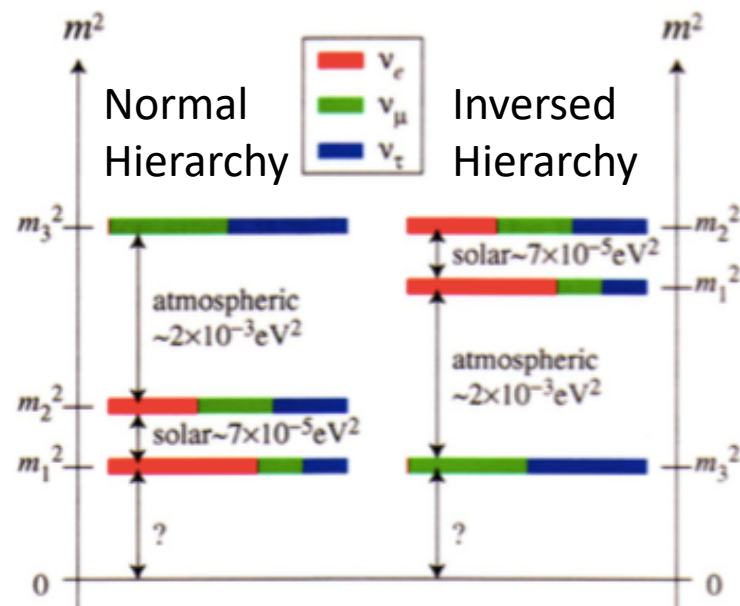
$$\sin^2 \theta_{12} \simeq 0.306$$

大気ニュートリノ振動より

$$|\Delta m_{32}^2| \simeq 2.4 \times 10^{-3} [\text{eV}^2],$$

$$\sin^2 \theta_{23} \simeq 0.5$$

$$\sin^2 2\theta_{13} \sim 0.14 \quad (\text{加速器ニュートリノより})$$



質量階層

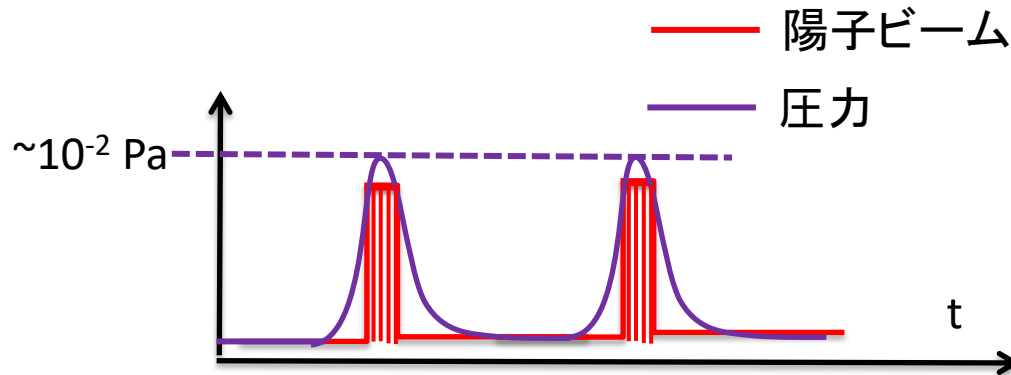
各成分の質量の絶対値は振動実験からは決められない...別の実験が必要

$\left\{ \begin{array}{l} \text{ニュートリノレス二重}\beta\text{崩壊} \\ \beta\text{崩壊の電子のエネルギースペクトル} \end{array} \right.$

・ニュートリノ質量の絶対値
 ...beyond SMのヒント(SMでは0)

パルスのな供給ガス供給

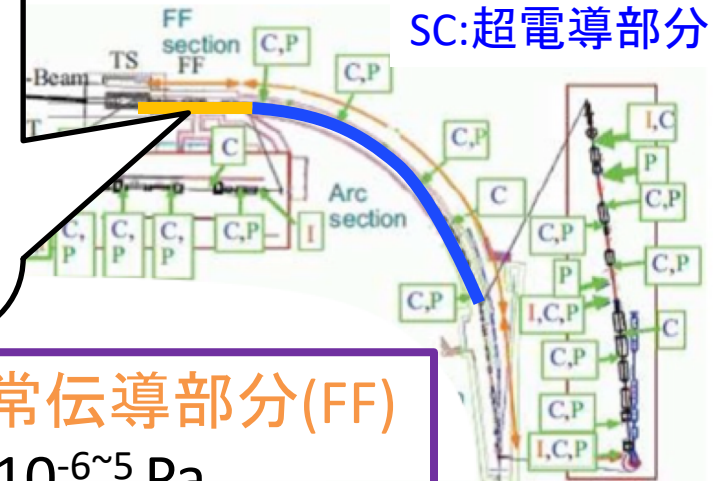
<パルスのなガス供給>



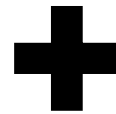
<一次陽子ビームライン>

FF:最終収束部(常伝導)

SC:超電導部分



- ・測定に必要な観測光量の確保(1000光子)
- ・極めて低損失なビームモニター



・常伝導部分(FF)

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

・超伝導部分(SC)

... $10^{-8} \sim 7$ Pa

を実現可能

真空系にパルスのなガスを導入



世界で初めての試み

大強度陽子ビームとビームモニター

- ・大強度陽子ビーム+破壊型モニター
...寿命低下や損傷の恐れ

→非破壊型ビームモニターが必要

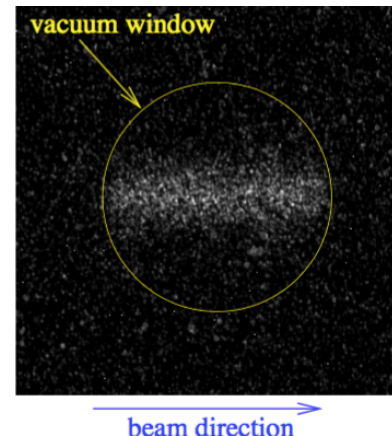
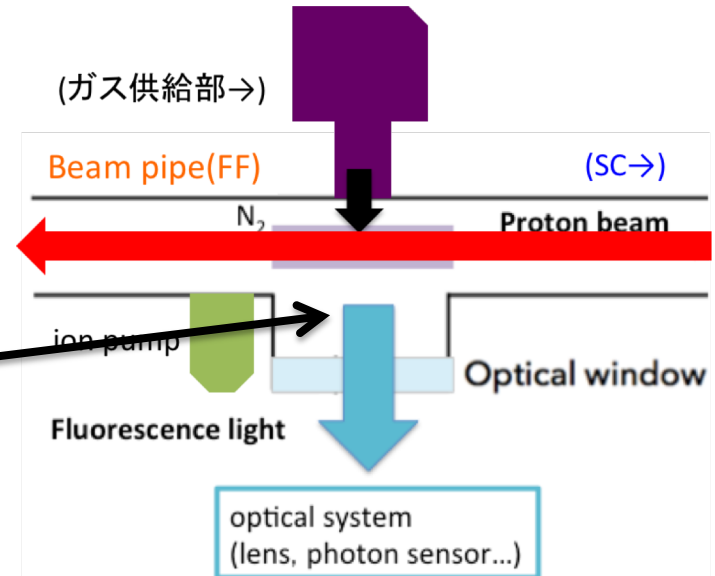
Beam Induced Fluorescence(BIF) monitor

- ・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
- ・ビーム損失の割合: 10^{-9} (10^{-2} Paの場合)
- ・FF部の 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

- ・重イオンビーム(200MeV/u、 Xe^{48+})の→
プロファイル例(~ 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

<BIFモニターの模式図>



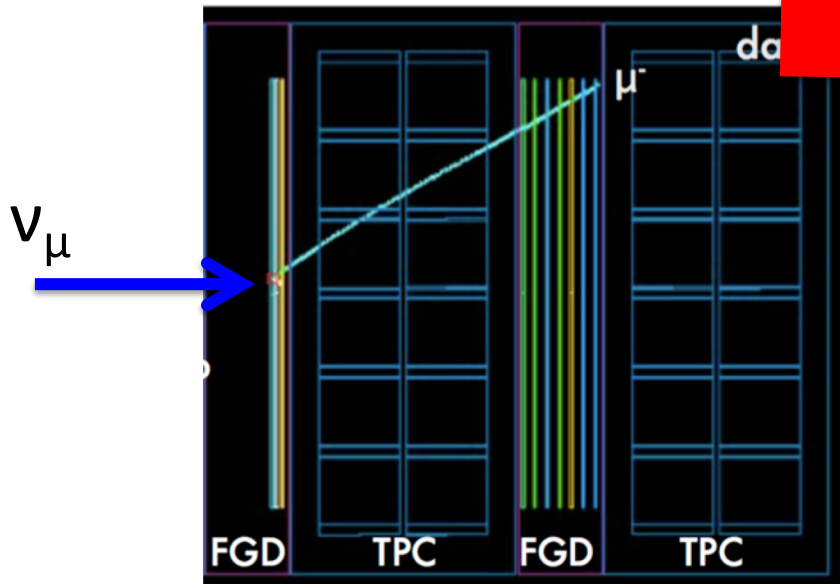
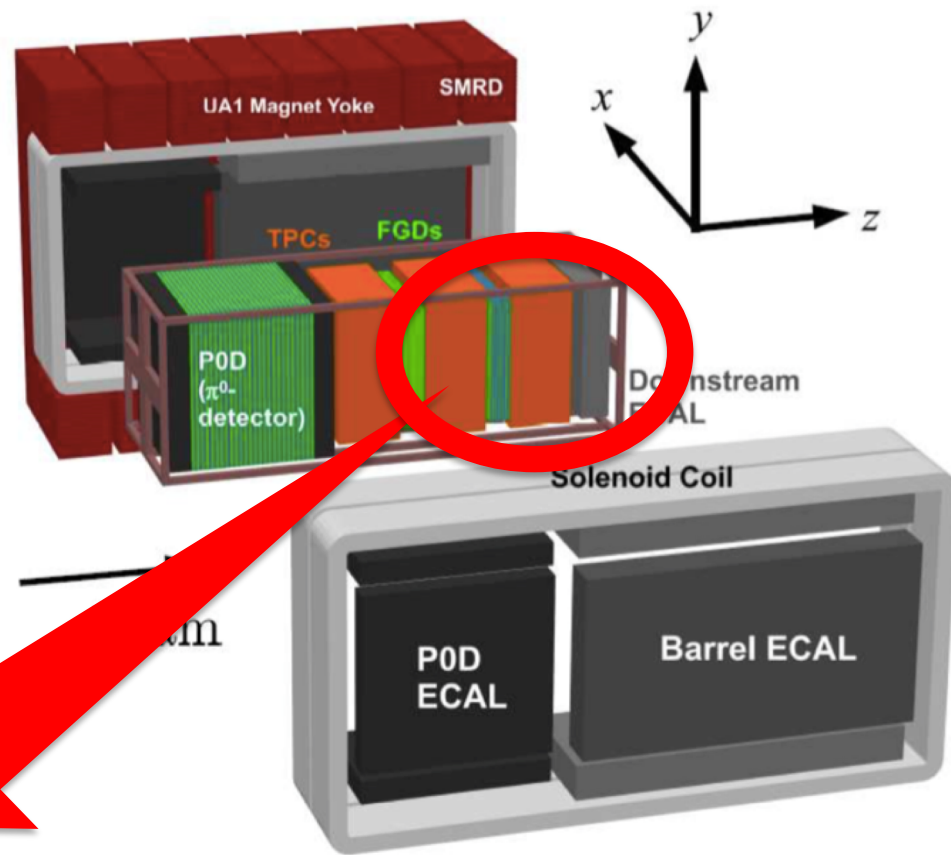
前置検出器

ND280:検出器の複合体

UA1 Magnet: 検出器を覆う電磁石

FGD: 反応点付近の粒子を捉える

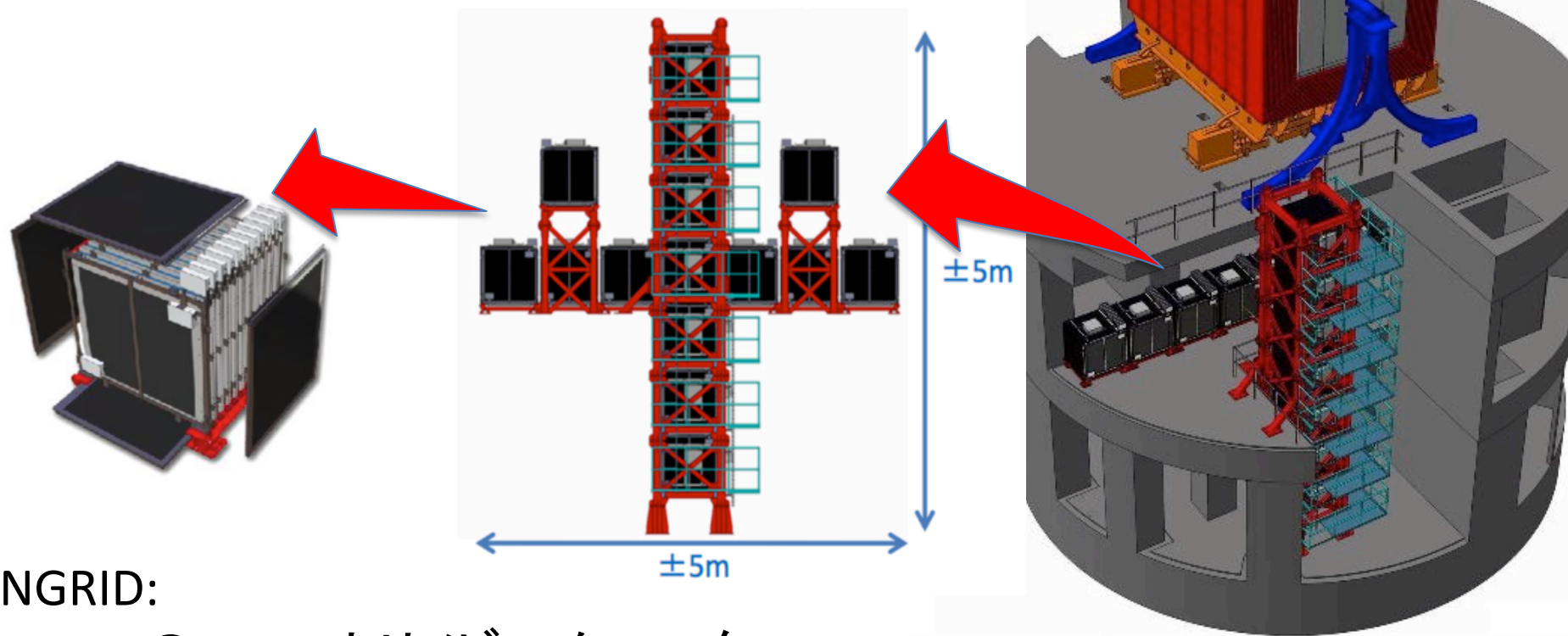
TPC: 荷電粒子の運動量を測定



←ニュートリノ検出の一例

SK方向(off-axis 2.5°)の
ニュートリノビームを測定

前置検出器 INGRID



INGRID:
on-axisのニュートリノビームモニター

シンチレーター (11枚)+Fe板(9枚)を
サンドイッチしたモジュール14個
(+Fe板を抜いたモジュール2個)

on-axis(ビーム軸と平行)の
ニュートリノビームを測定

流量誤差の評価

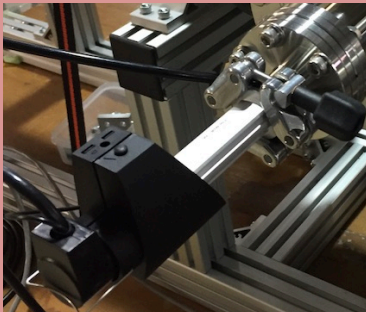
供給部の誤差

- ・手動バルブによる誤差
- ・供給圧の変動

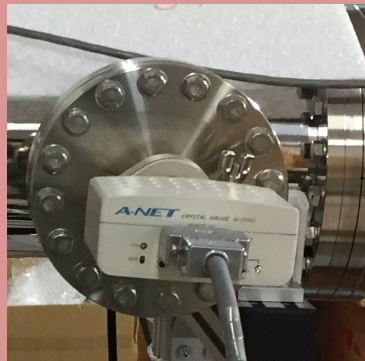


バリアブルリークバルブ
(手動バルブ)

ゲージの種類による差



ピラニーゲージ



クリスタルゲージ

それぞれを系統誤差として
評価

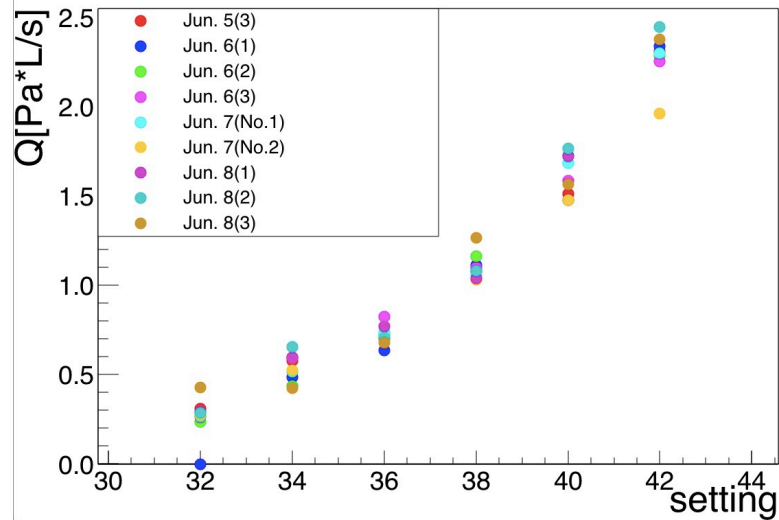


独立な誤差として最終的な
誤差を計算

供給部の誤差

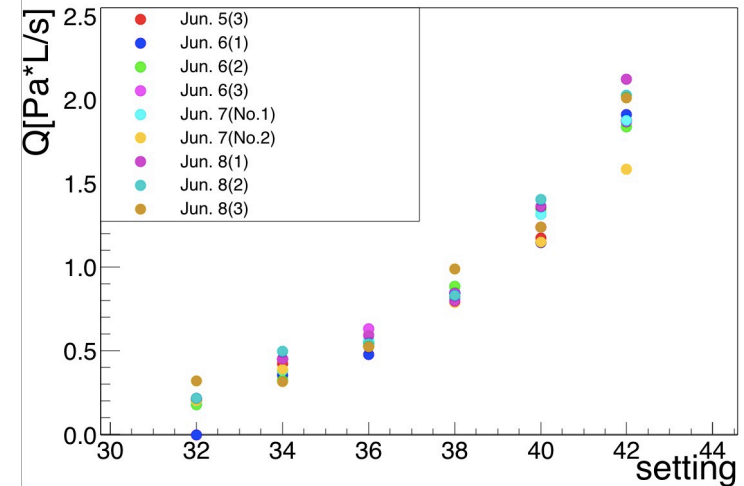
ピラニーゲージ

Q VS valve setting(Pirani)



クリスタルゲージ

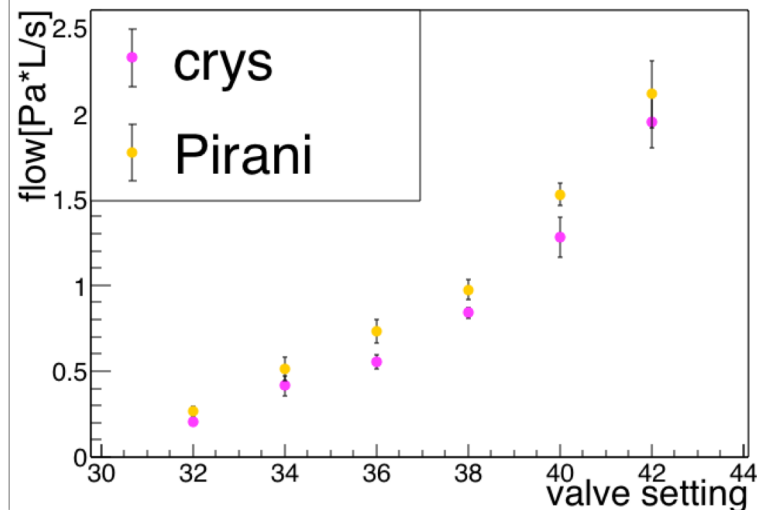
Q VS valve setting(crystal)



- それぞれのゲージの平均と標準偏差を代表値と誤差とした

- 平均値の差をゲージ差に由来する誤差として取り扱った

flow VS valve setting



流量誤差のまとめ

Valve setting	32	34	36	38	40	42
流量(クリスタル)[Pa*L/s]	0.21	0.42	0.55	0.84	1.28	1.95
-供給部の誤差($\sigma_{Crystal}$)	5.3%	13.8%	7.4%	3.7%	9.1%	7.5%
流量(ピラニー)[Pa*L/s]	0.27	0.51	0.73	0.97	1.53	2.11
-供給部の誤差(σ_{Pirani})	10.3%	13.6%	9.7%	6.0%	4.3%	9.2%
流量(中間点)[Pa*L/s]	0.24	0.46	0.64	0.91	1.40	2.03
-供給部の誤差(σ_{valve})	8.9%	13.7%	9.0%	5.1%	6.7%	8.5%
ゲージ差による誤差($\sigma_{diff.}$)	26%	21%	28%	15%	18%	8%
流量の誤差	28%	25%	29%	16%	19%	12%

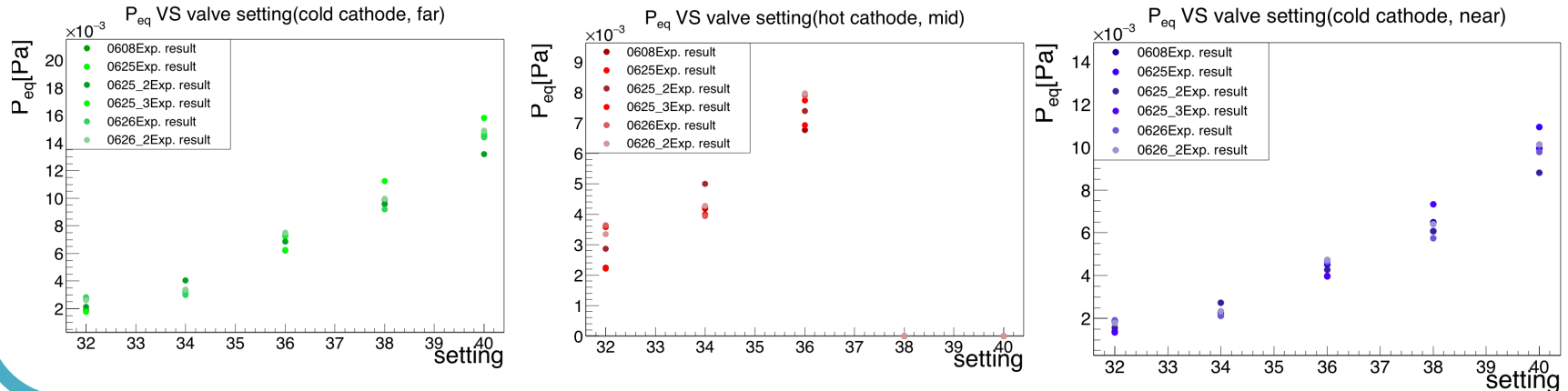
中間点の誤差:
$$\sqrt{\frac{\sigma_{Pirani}^2 + \sigma_{Crystal}^2}{2}}$$

最終的な誤差は20%~30%
ほどになった

最終的な誤差:
$$\sqrt{\sigma_{valve}^2 + \sigma_{diff.}^2}$$

平衡圧力の誤差評価

供給部の誤差 σ_{valve} (測定結果)



圧力ゲージ自身の不定性

σ_{gauge}

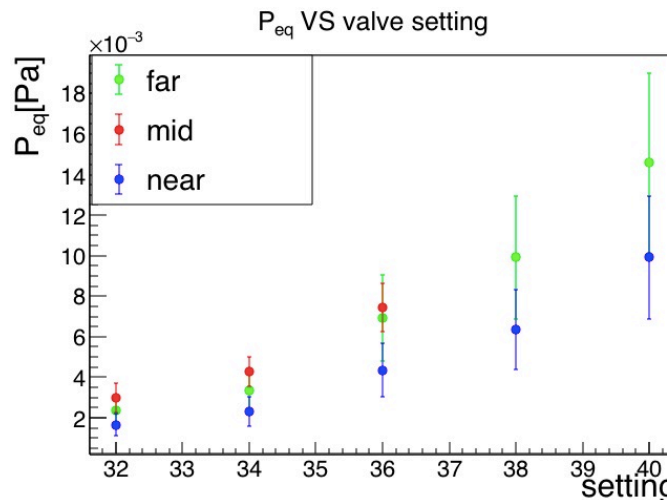
冷陰極電離真空計

...30%

熱陰極電離真空計

...15%

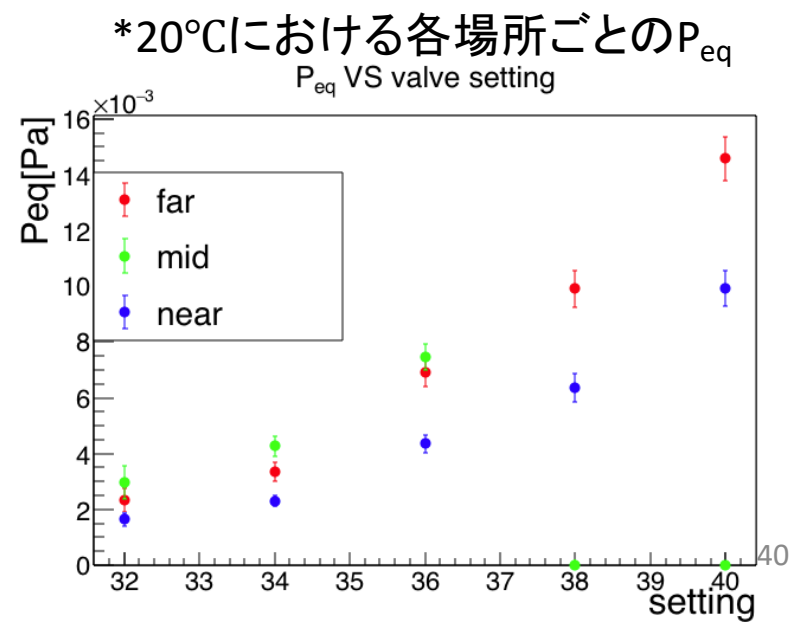
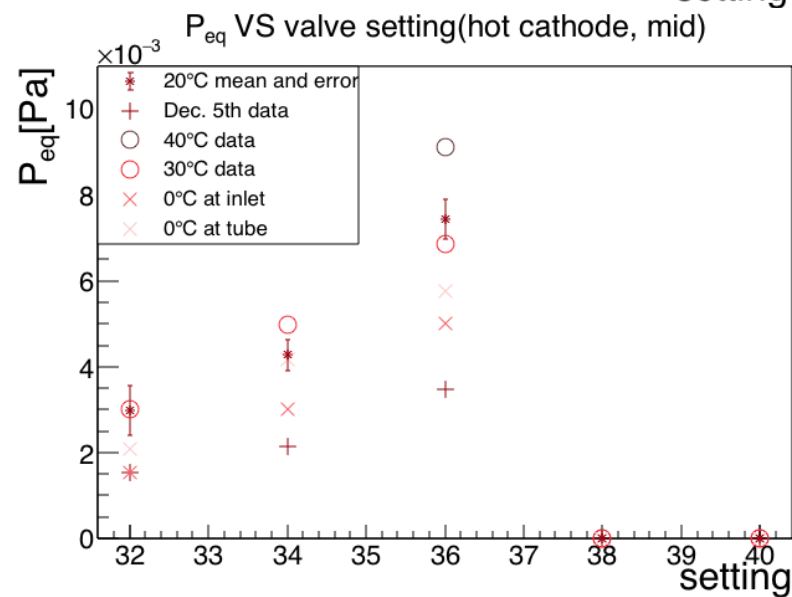
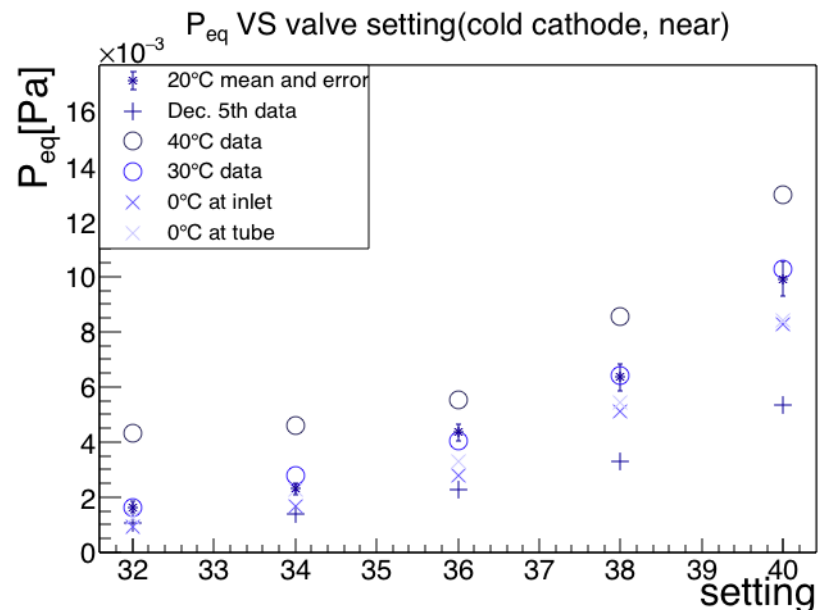
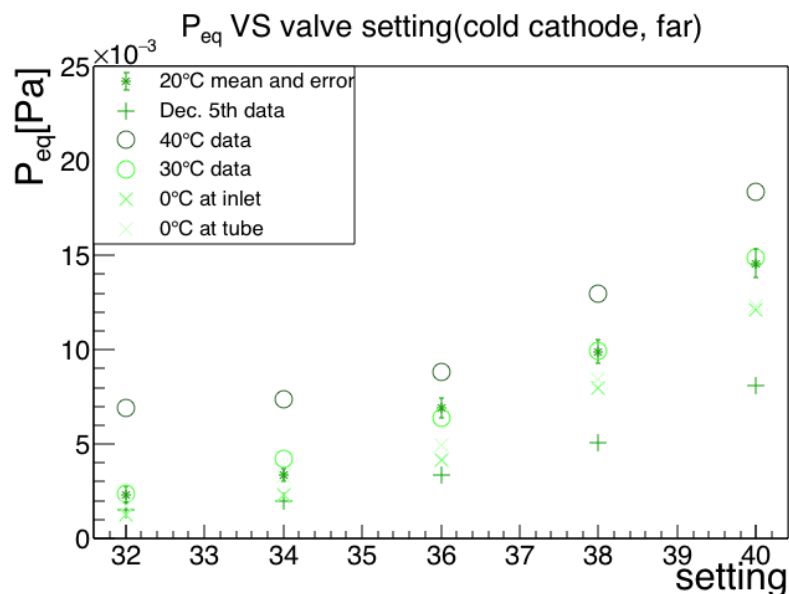
平衡圧力の誤差 σ



$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{valve}}^2 + \sigma_{\text{gauge}}^2}$$

こちら20~30%
...ゲージ不定性が
支配的

P_{eq} の温度変化



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

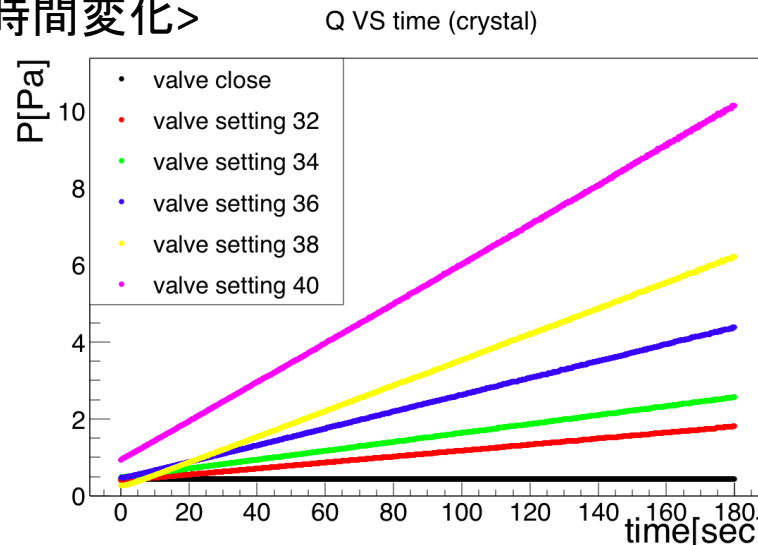


(2) ノブの回転量を調整後
パルスバルブを開いてN₂供給、
→圧力変化を測定

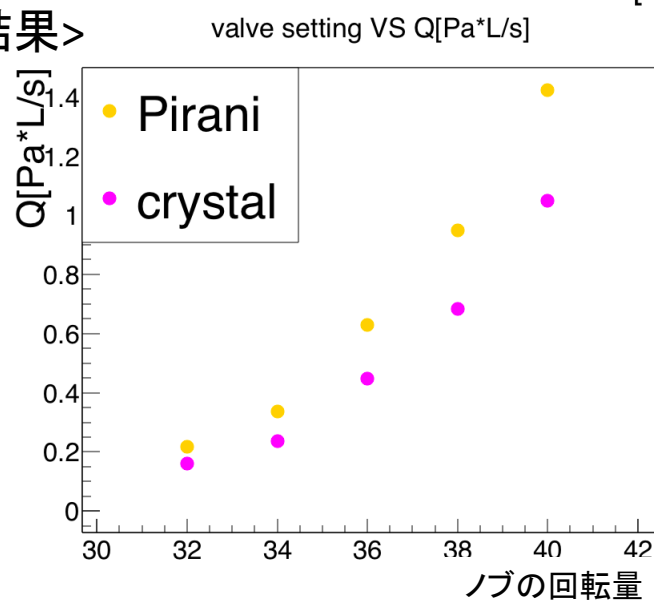
$$Q = V \frac{dP}{dt}$$

: 圧力の時間変化の傾きより流量を算出

<圧力の時間変化>

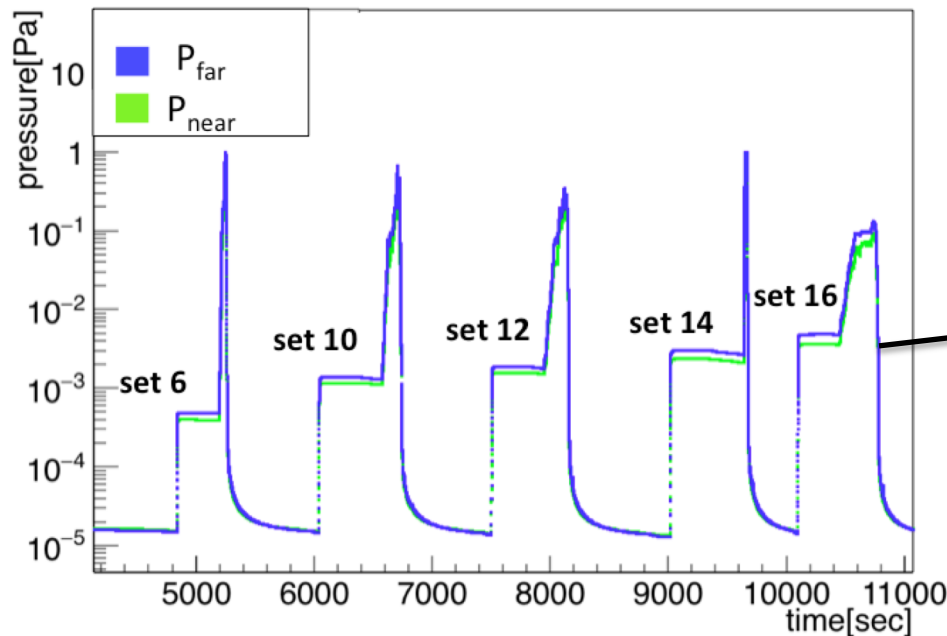


<流量の結果>



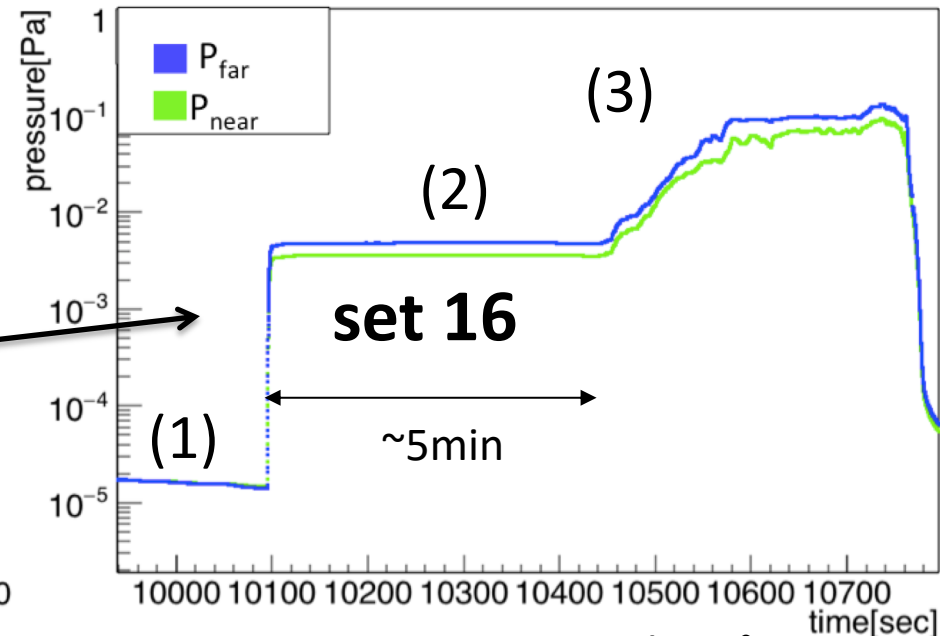
排気速度の実験~②平衡圧測定~

pressure VS time

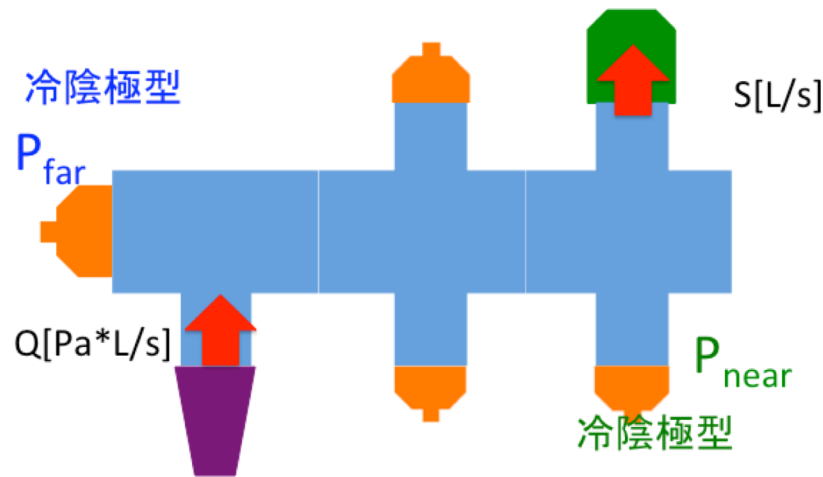


圧力変化のプロット

pressure VS time

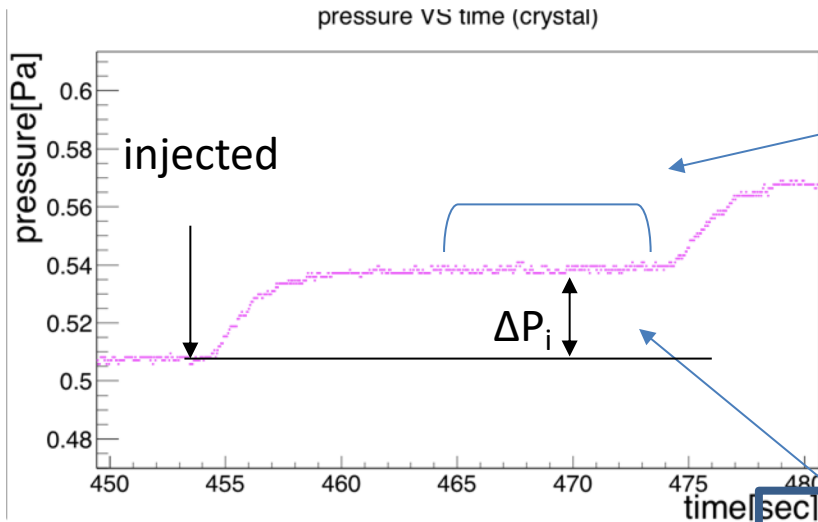


- (1) 10^{-5} Paほどまで分子ポンプで排気
- (2) リークバルブをセットして
パルスバルブを5分間開く
- (3) リークバルブのベントを行う



平衡部分の圧力を測定
→ P_{eq} -Qプロットを作成

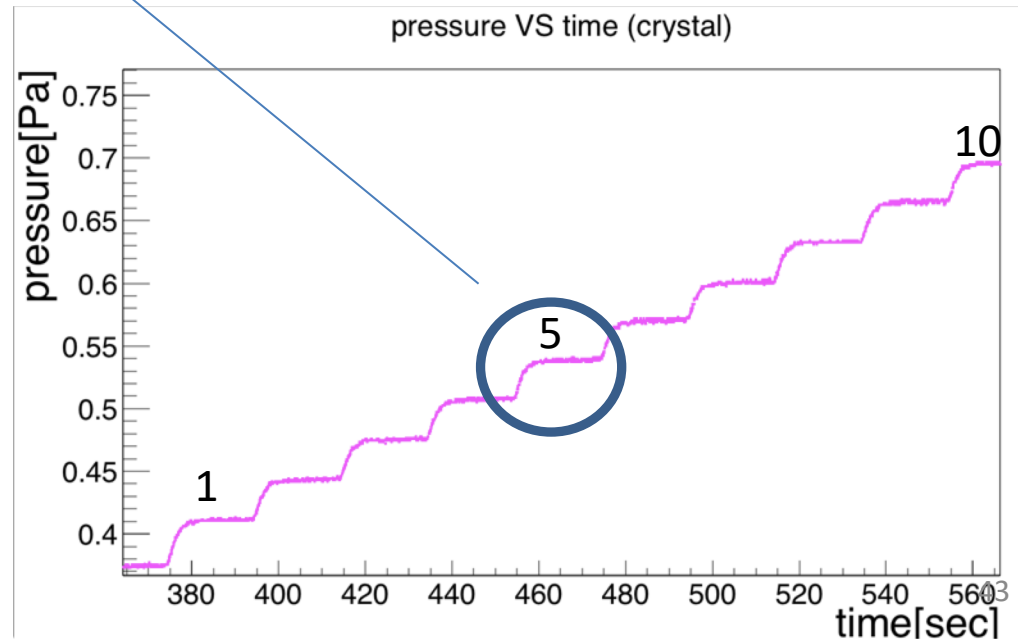
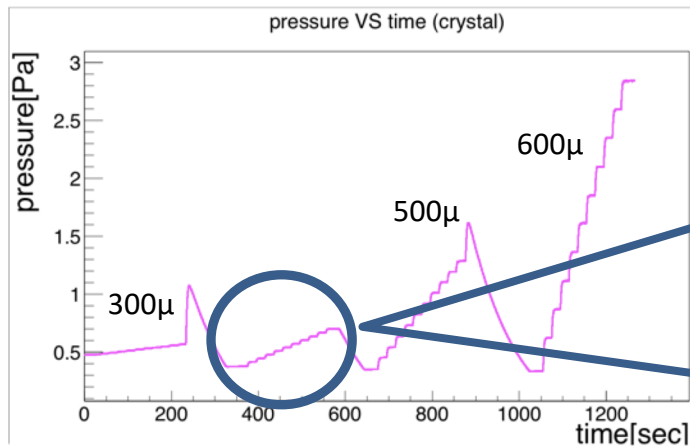
パルス流量の誤差



平坦部分の平均(10 s: 200点)
...i番目のガス導入後の圧力と定義
→ i-1番目の圧力との差 ΔP_i をi番目のガス
導入による圧力上昇と定義

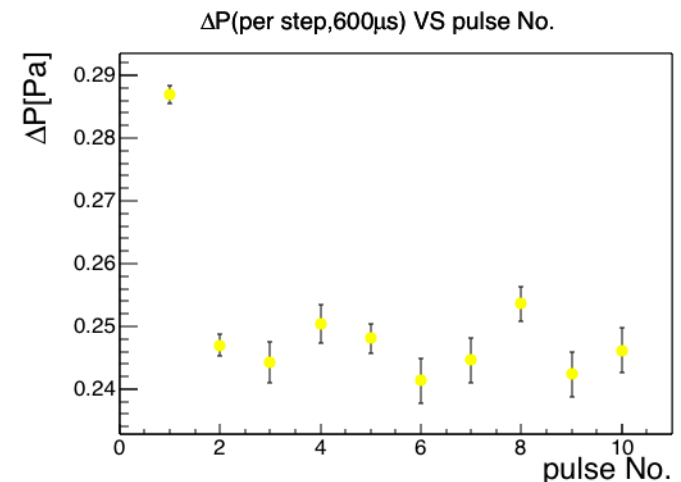
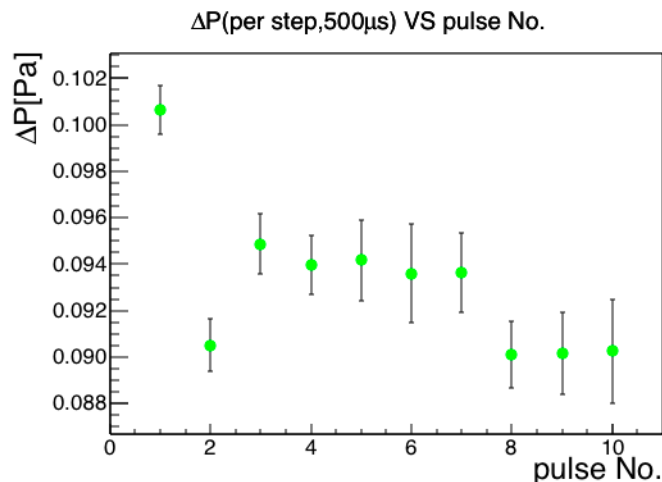
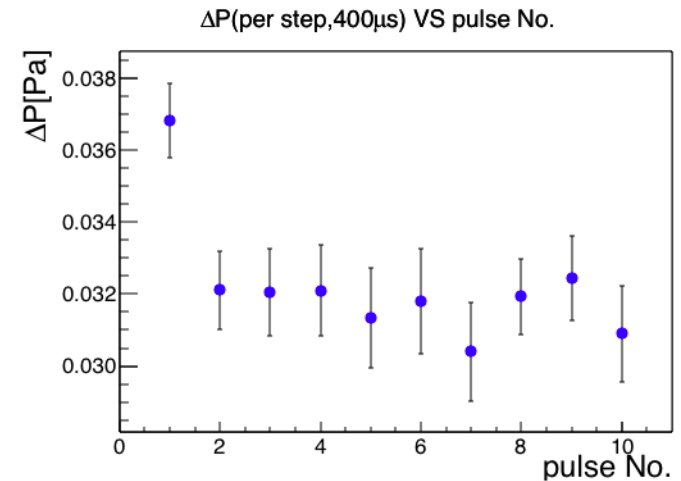
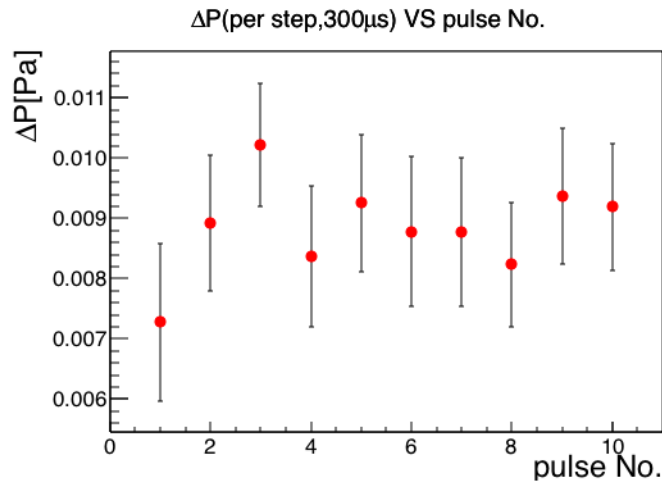
400 μ open data

パルス供給実験中の圧力変化



ΔP の統計誤差

$$\Delta P = \bar{P}_f - \bar{P}_i \quad \sigma_{\Delta P, sts} = \sqrt{\sigma_{f, sts}^2 + \sigma_{i, sts}^2}$$



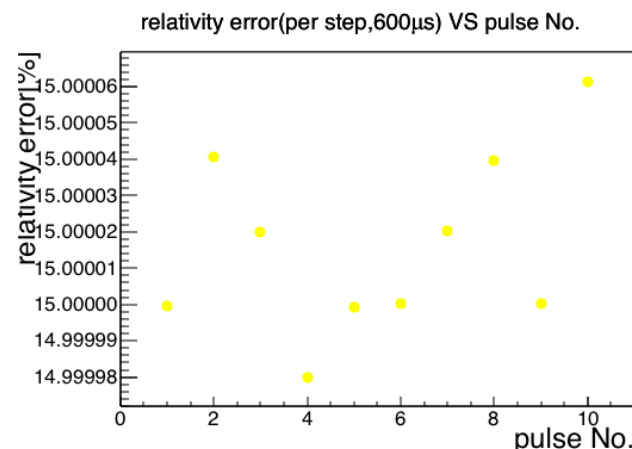
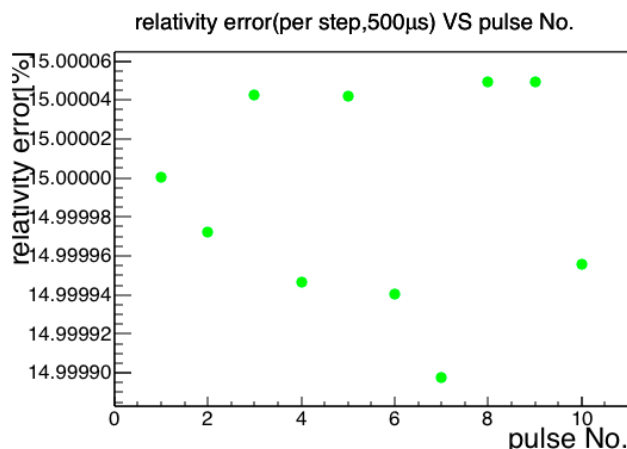
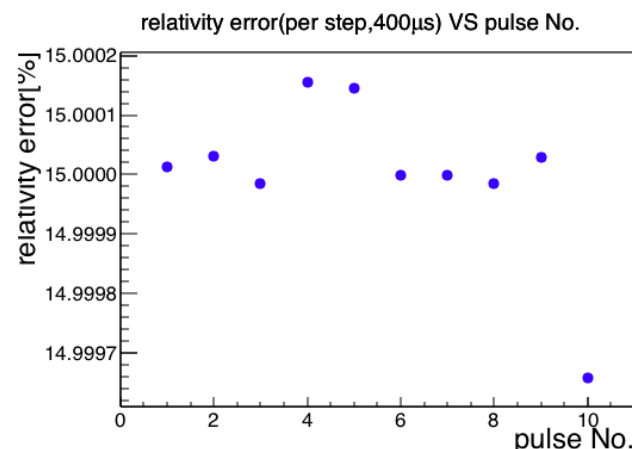
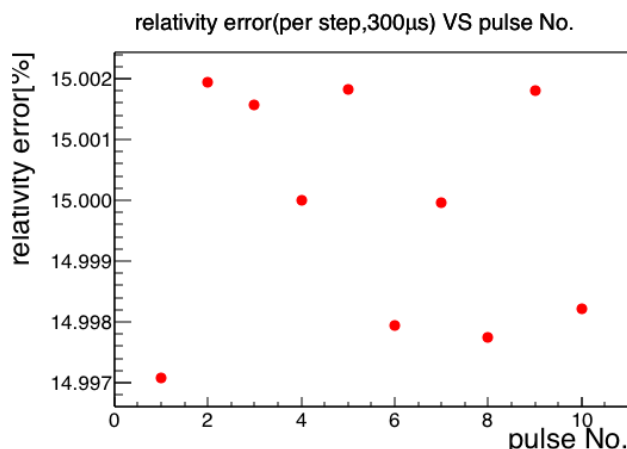
各開時間ごとの ΔP_i と測定に対する統計誤差

ゲージ不定性による誤差

- ・i番目の導入後の平均圧力 P_f の15%を不定性による誤差と定義

$$\sigma_{f(i),sys} = \overline{P_{f(i)}} \times 0.15$$

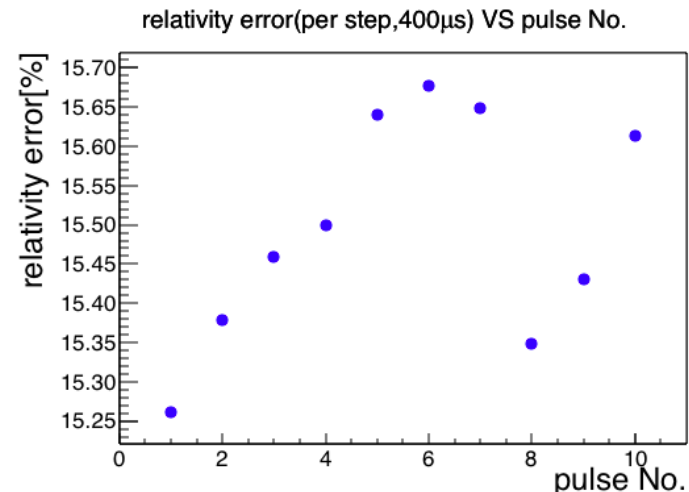
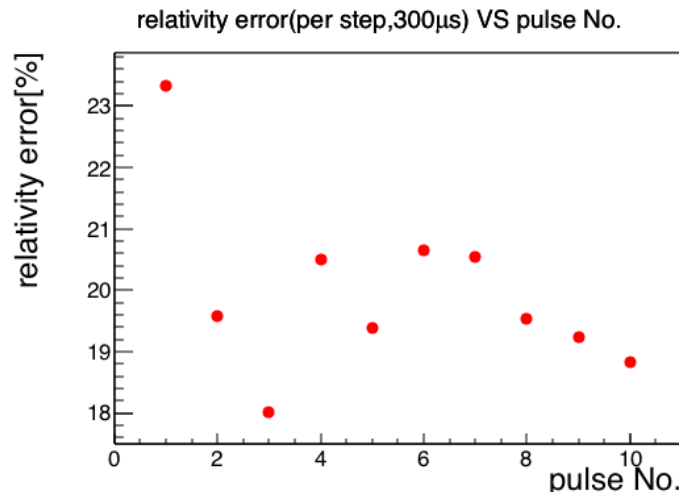
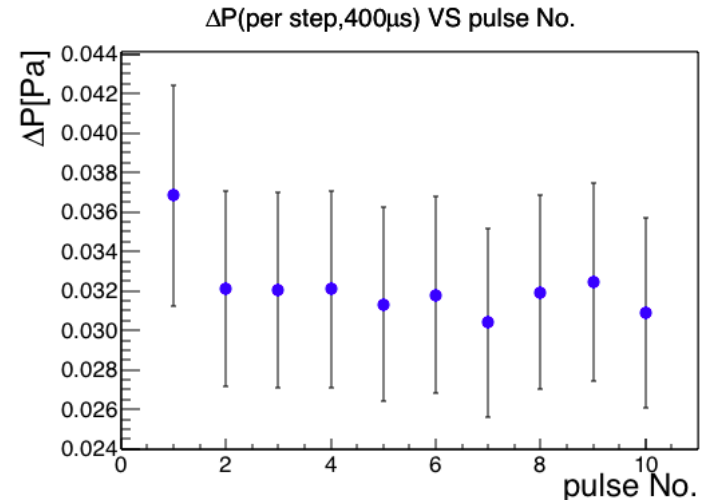
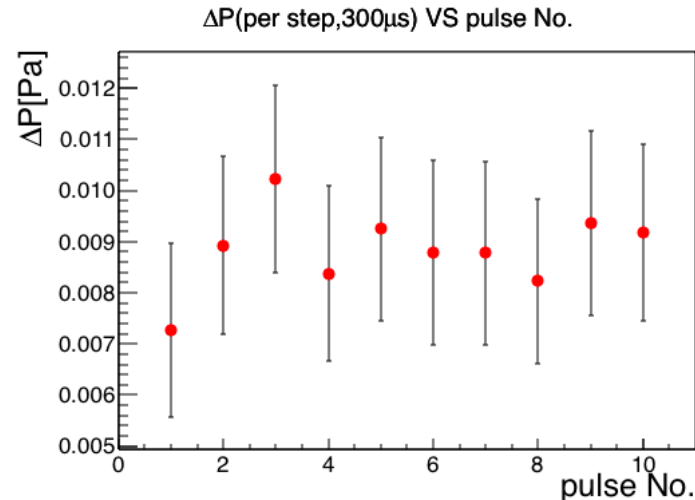
- ・導入前後で相関を1とした $\sigma_{\Delta P,sys} = \sqrt{\sigma_f^2 + \sigma_i^2 - 2\sigma_i\sigma_f}$



最終的な ΔP_i の誤差

$$\Delta P = \bar{P}_f - \bar{P}_i$$

$$\sigma_{\Delta P} = \sqrt{\sigma_{\Delta P, sts}^2 + \sigma_{\Delta P, sys}^2}$$



統計誤差が支配的

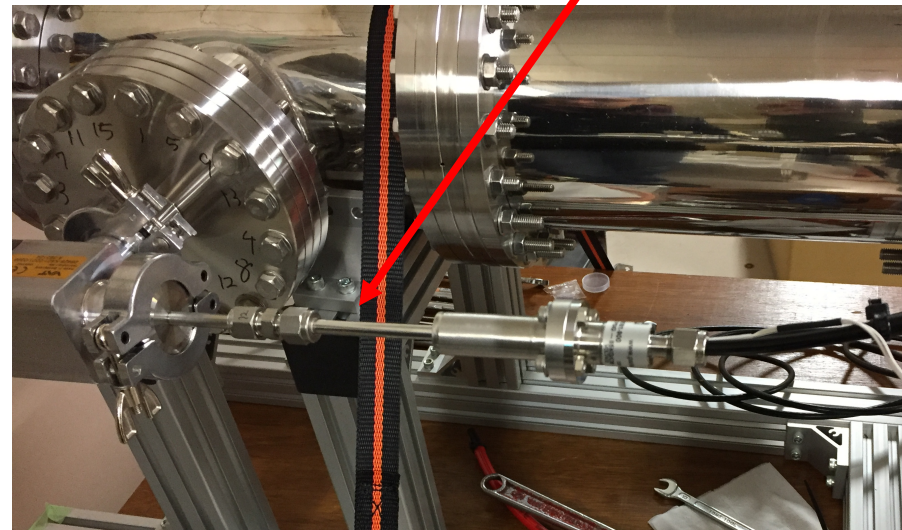
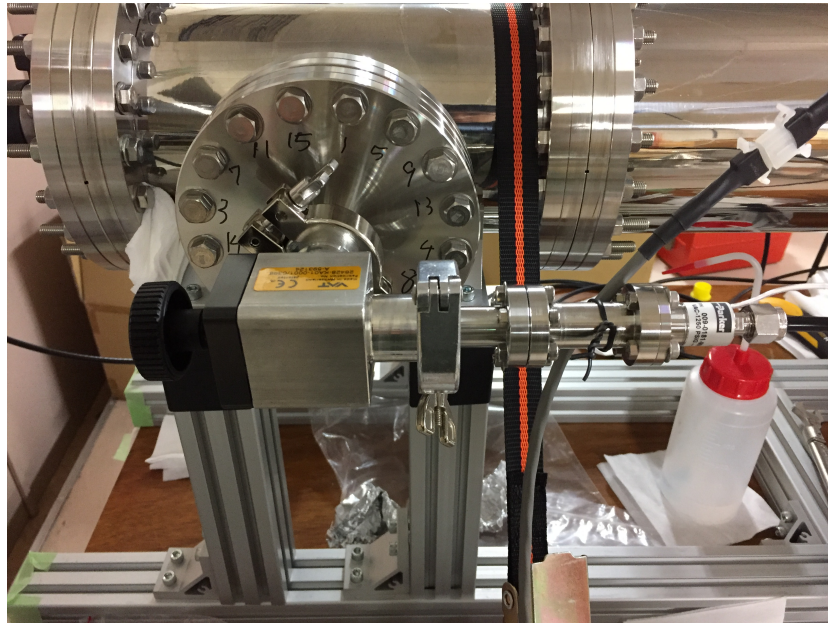
300 μ sの結果は統計誤差も大きくなってる

インレットバルブの変更



▪ simple valve

▪ Simple valve+ metal connection

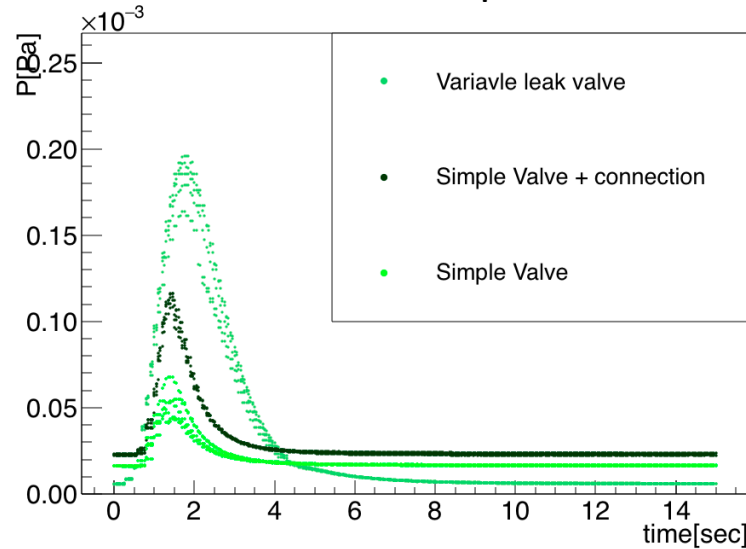


VAT angle valve
コンダクタンス 14L/s (分子流領域)

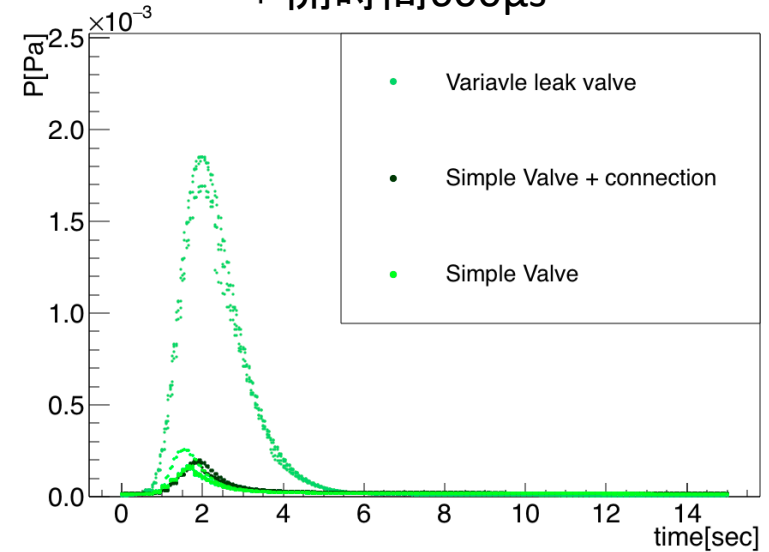
それぞれのインレットバルブの比較

開時間300 μ s

@far

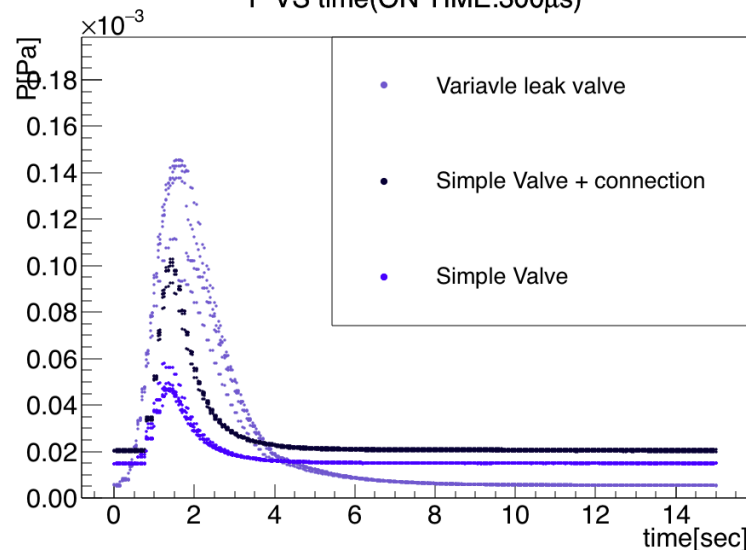


開時間600 μ s

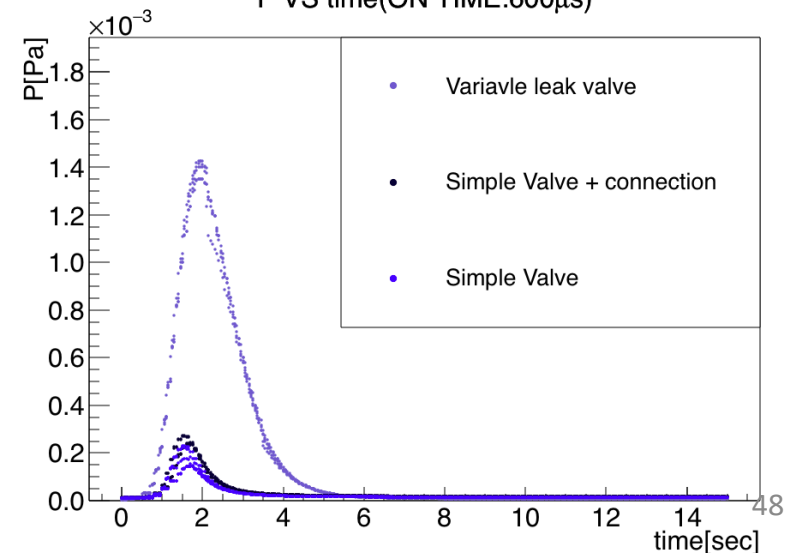


P VS time(ON TIME:300 μ s)

@near



P VS time(ON TIME:600 μ s)



圧力パルスの変動

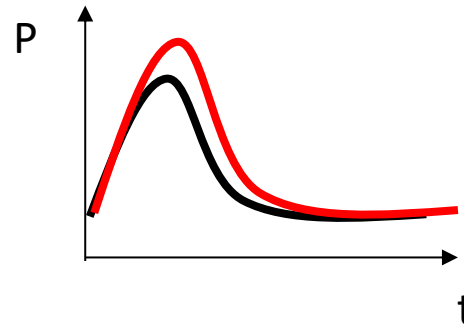


Variable leak

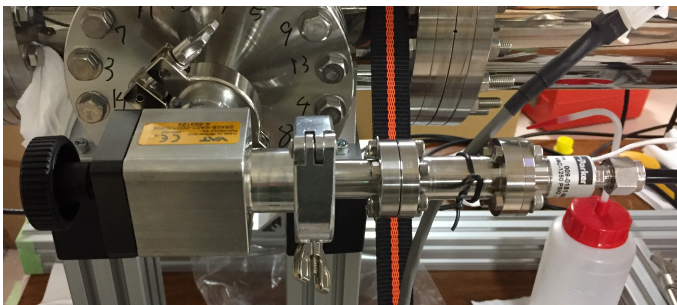
- ・10個の圧力パルス
->平均パルスを計算し、平均との差を
圧力の変動として計算

— mean pulse
— one pulse

圧力変動値



$$= \frac{P(pulse) - P(mean)}{P(mean)}$$

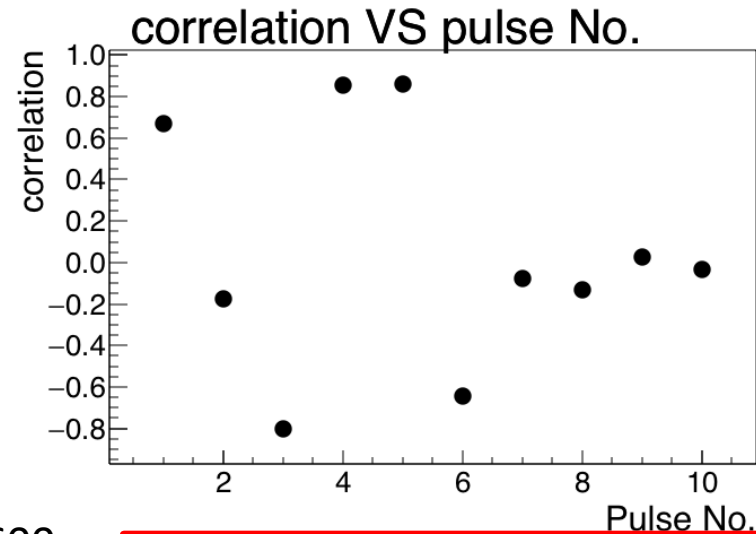
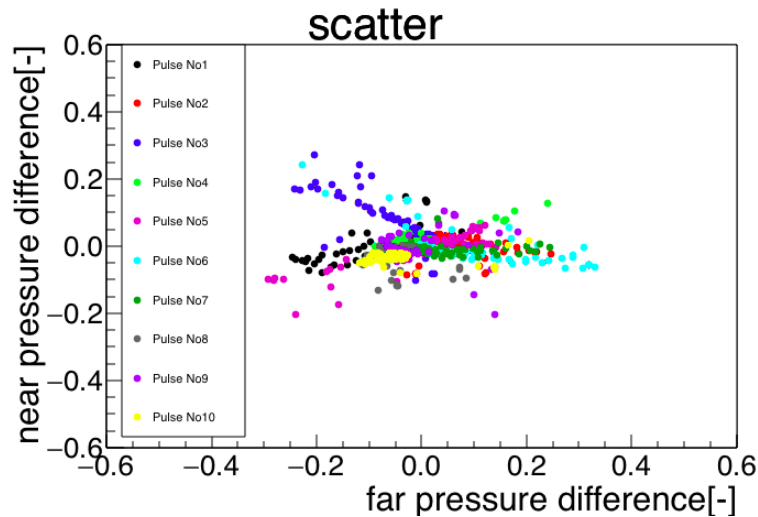


Simple

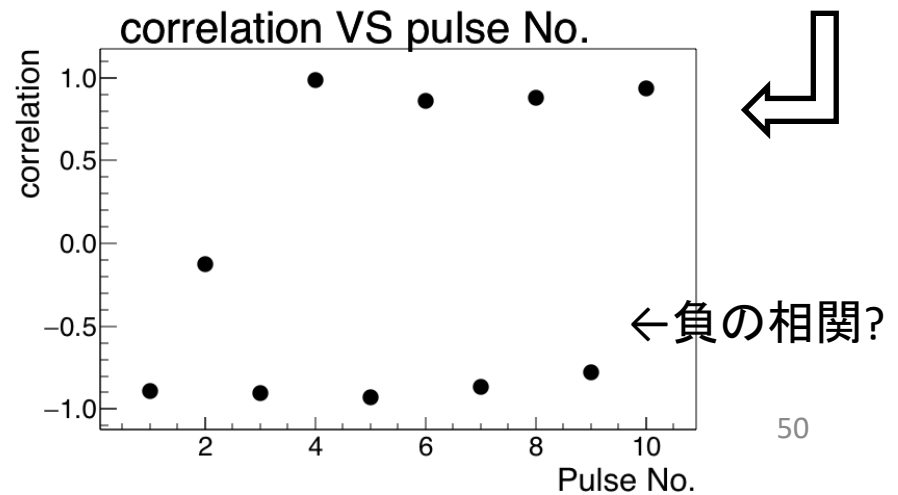
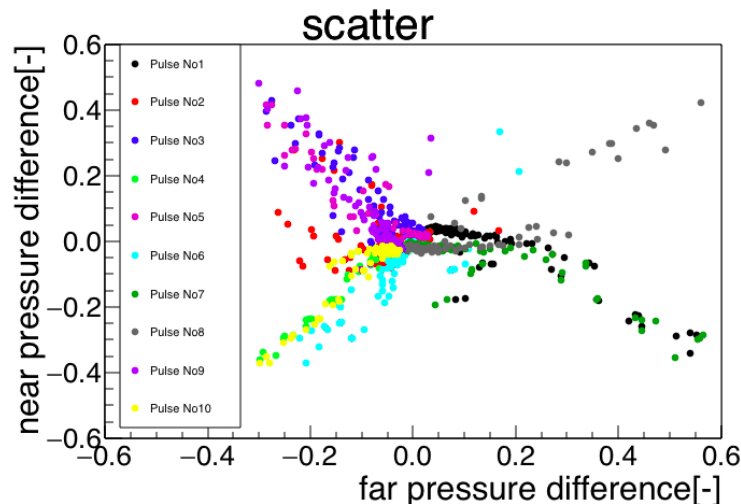
- ・圧力変動(far) VS 圧力変動(near)の相関をとった

farとnearの相関

Simple Valve, 300 μ s



Simple Valve, 600 μ s

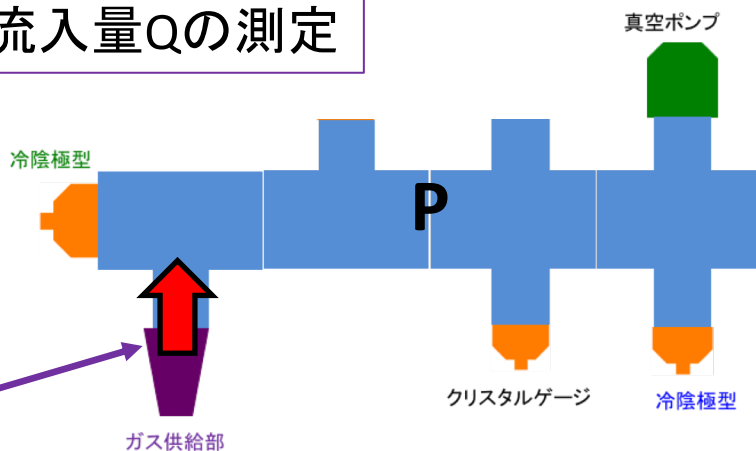


実効排気速度の決定

①流入量Qの測定



導入ガス
...連続流れ
バリアブルリーク
バルブを使用



・ポンプ停止時($S=0$)

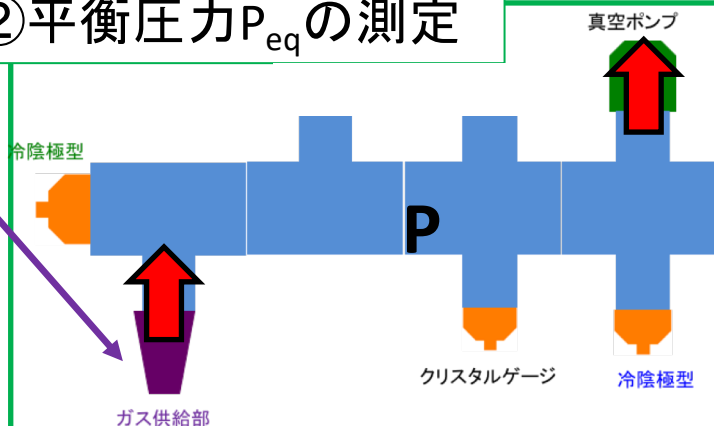
流入量 = 圧力変化

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

圧力: P [Pa]、流入量: Q [$\text{Pa} \cdot \text{L/s}$]、時間: t [s]、チェンバー体積: V [L]、排気速度: S [L/s]

$$V \frac{dP}{dt} = -SP + Q \quad (\text{排気方程式})$$

②平衡圧力 P_{eq} の測定



・定常状態(圧力変化=0)

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

P_{eq} : 平衡圧力 [Pa]

S_{eff} : 実行排気速度 [L/s]

→ 流入量 Q と平衡圧力 P_{eq} から実行排気速度 S_{eff} を決定

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

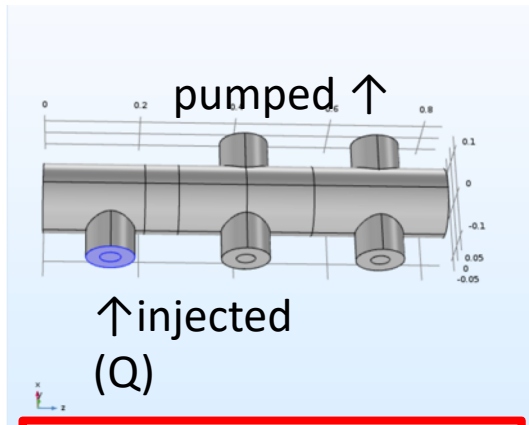
...流れは形状によって決まる(管のコンダクタンス: C_i)

→ 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})

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

COMSOL

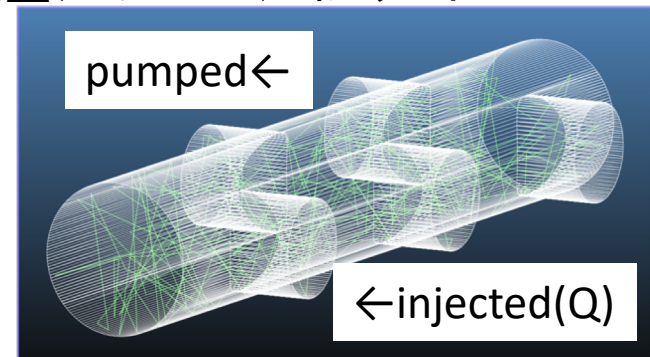
有限要素法を用いた
汎用物理シミュレーション
→ 分子流を代数的に計算可能



・平衡状態のみ計算可

Molflow+

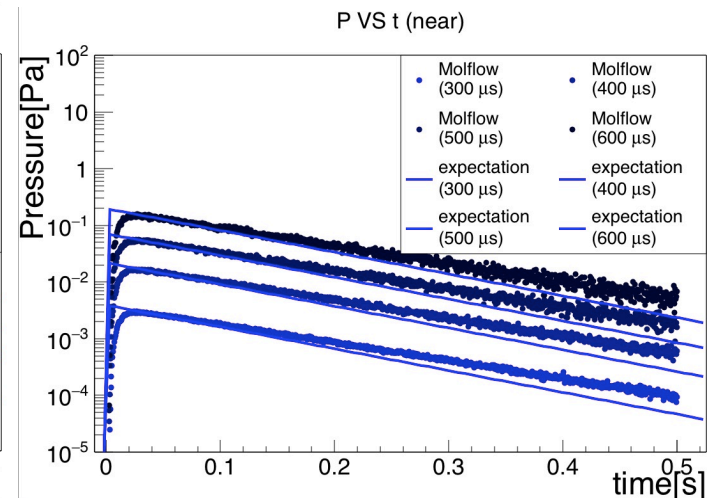
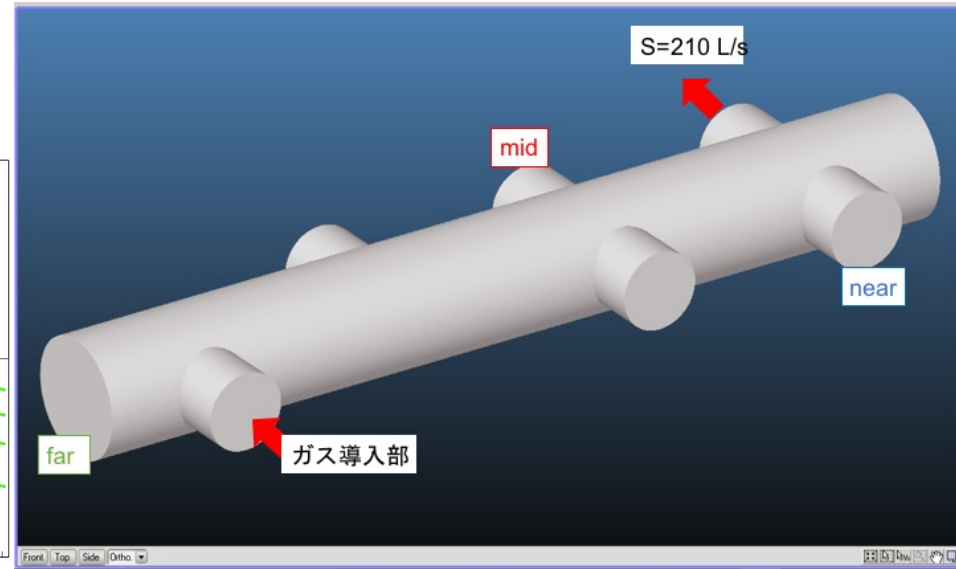
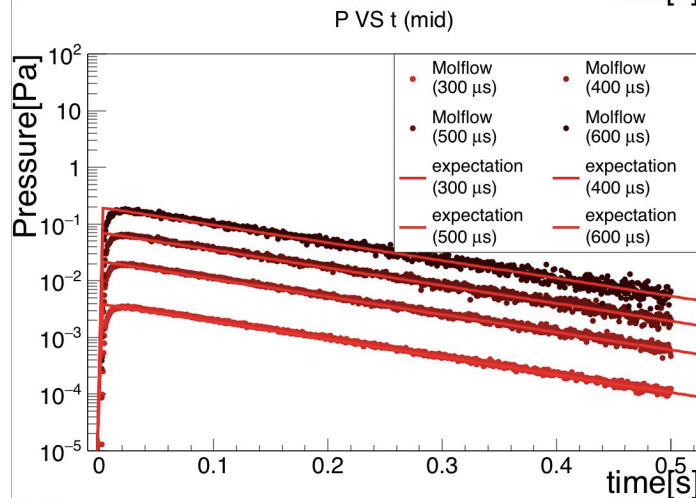
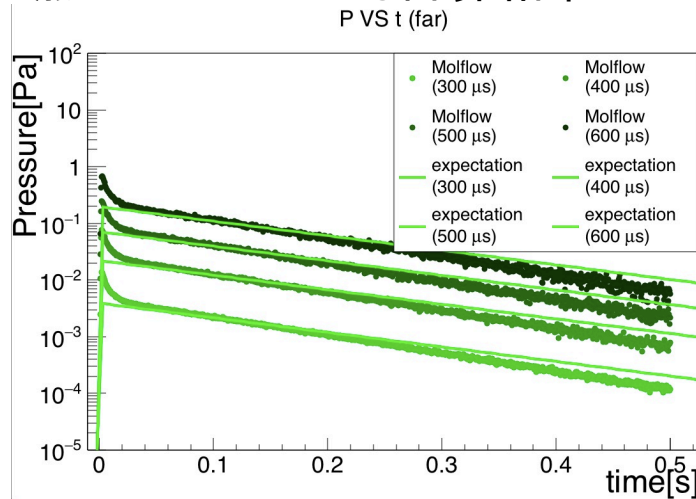
CERNが提供しているMonte Carlo法
による多数のテスト粒子を用いた
真空シミュレーションソフト



・時間変化(パルスの供給)も扱える

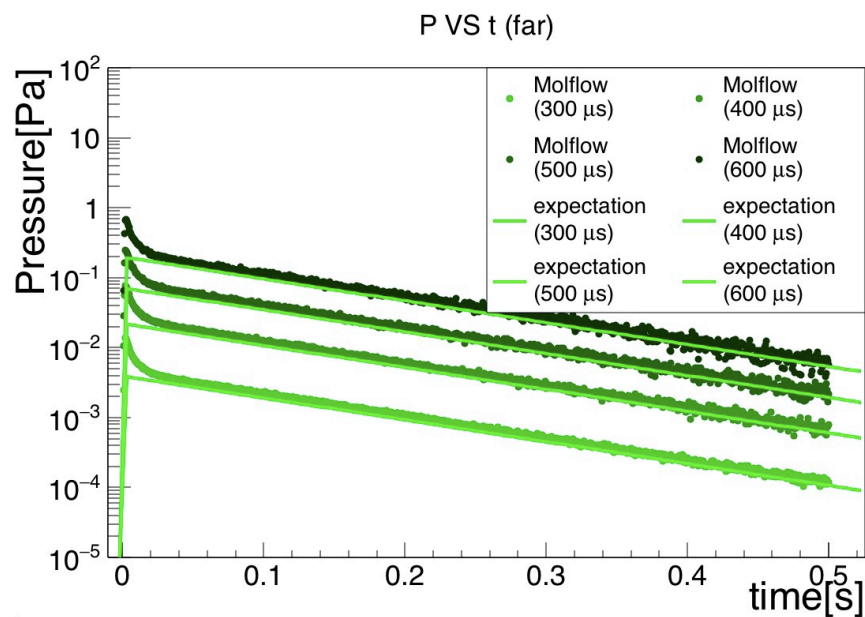
Molflowによるシミュレーション結果

線...排気方程式からの予測
点...Molflowによる計算結果

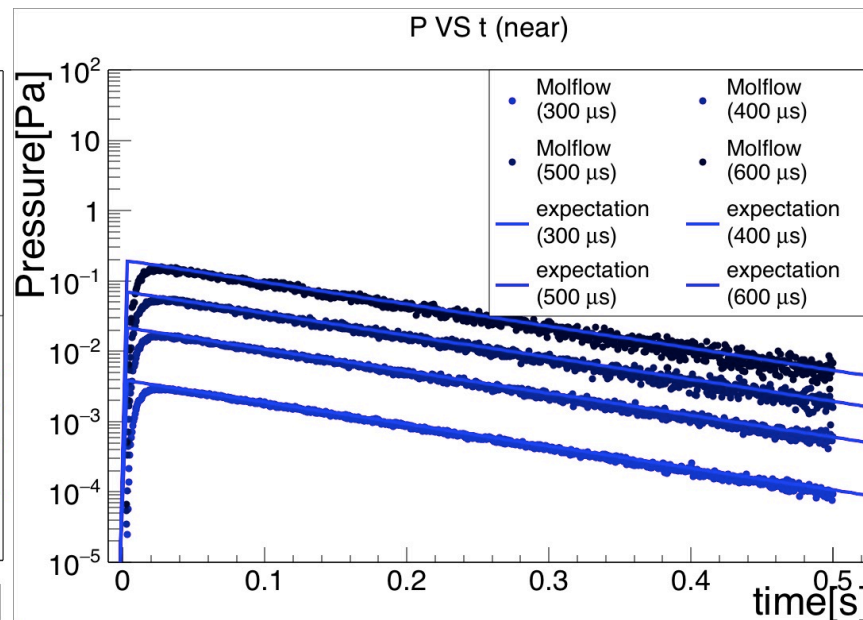


midの圧力減少速度が予測線と一致

予測線の排気速度を全てmid(157 L/s)にした場合



farの結果



nearの結果

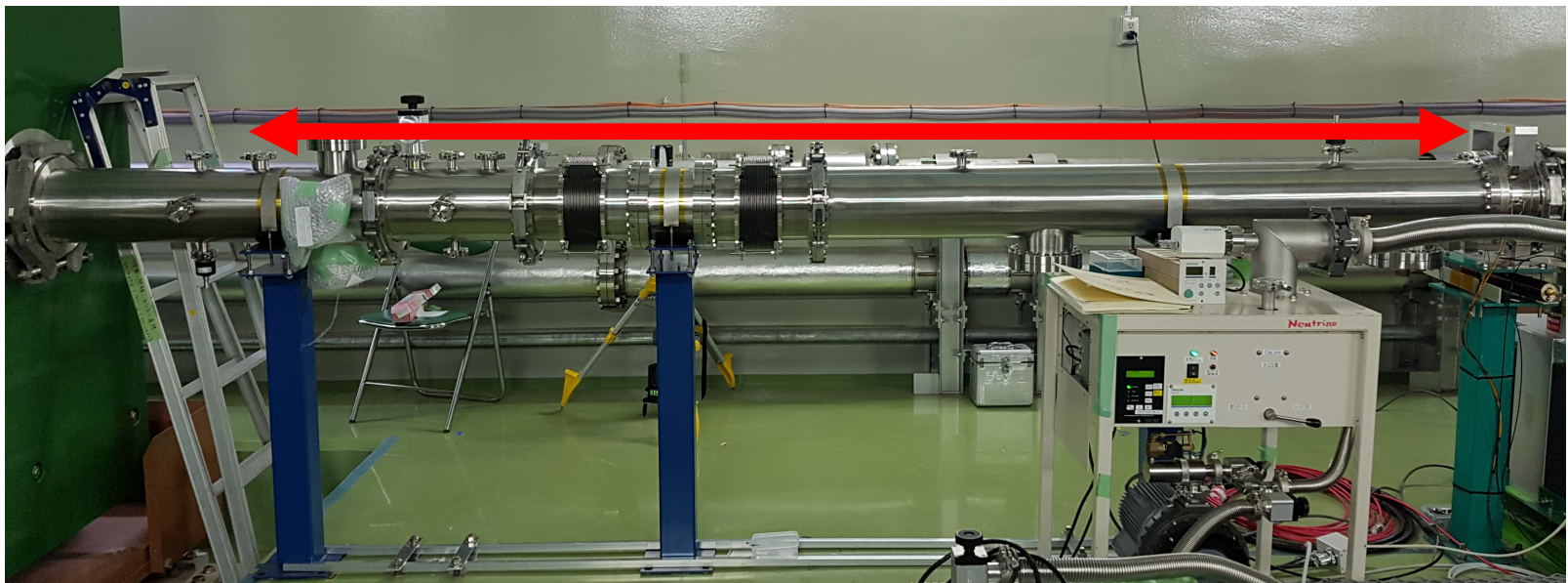
→圧力の減少速度がほぼ一致する

現在のインストール状況

FF:最終収束部(常伝導)

SC:超電導部分

SC出口から12.5m下流



BIFチェンバー

- 光学窓(x、y方向)
- 真空計(冷陰極電離真空計)

*追加の真空ポンプは未設置