

SuperKEKB/Belle II実験の コリメータ部におけるビームロス の音響センサーによる観測

岡田 伊織

奈良女子大学 人間文化総合科学研究科

博士前期課程 数物科学専攻

学籍番号: 23810030

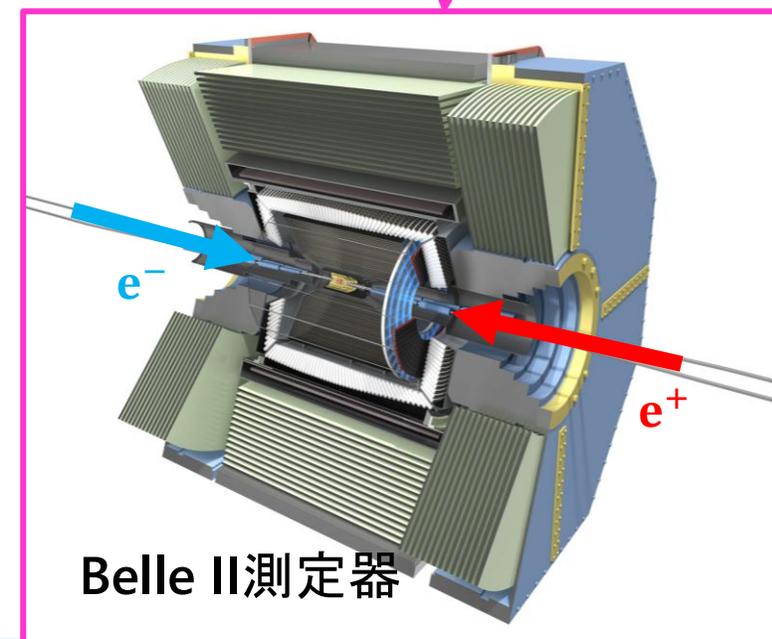
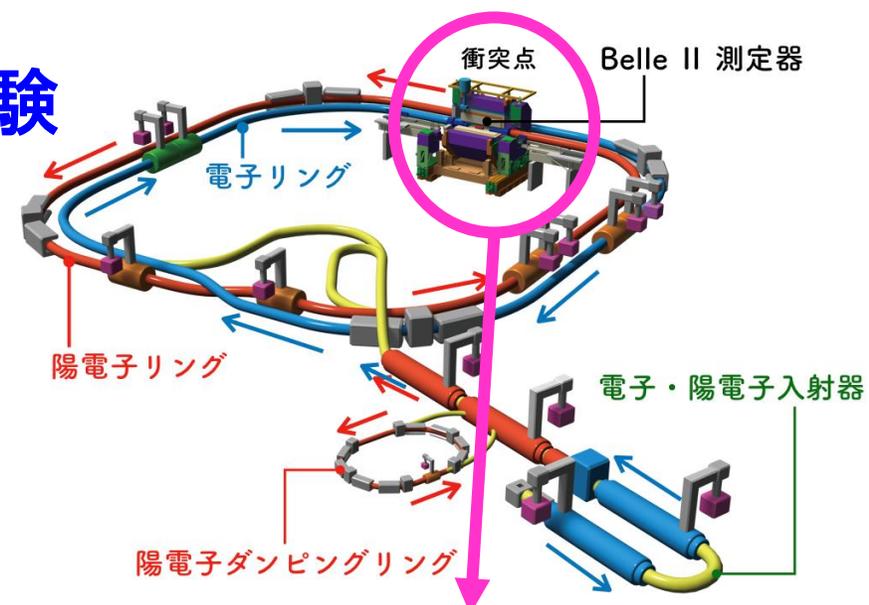
2025/2/18

修士論文審査会

SuperKEKB/Belle II実験

茨城県つくば市で行われている電子陽電子衝突実験

- 2018年から本格的に運転開始
- 電子ビーム (7 GeV)と陽電子ビーム (4 GeV)を衝突
- 重心系エネルギー($\sqrt{s} = 10.58 \text{ GeV}$)
- 大統計データを用いた新物理探索が主目的



$$N = \sigma \int_0^T L dt$$

物理事象数

生成反応断面積

ルミノシティ

→ 高ルミノシティの運転が必須!

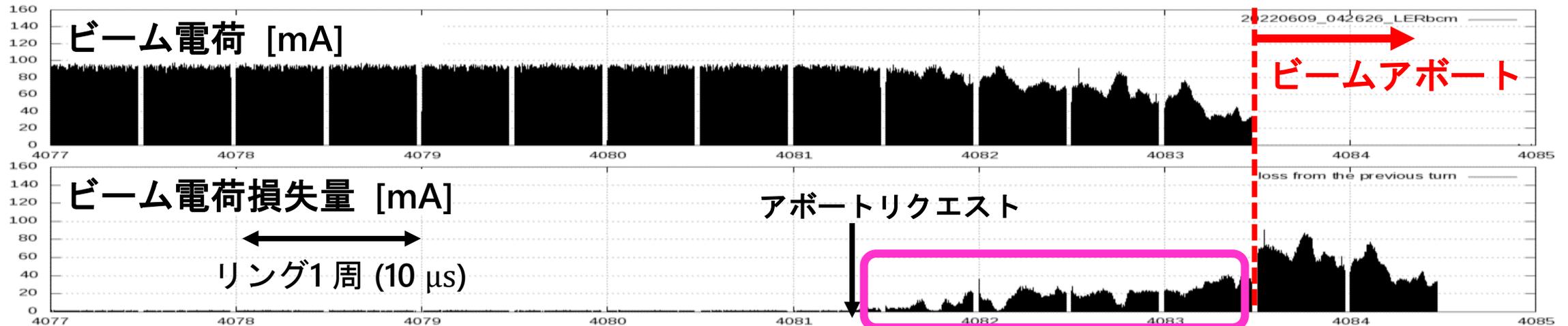
世界最高記録

現在まで: $L_{\text{peak}} = 5.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
(目標値: $L_{\text{peak}} = 6 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

突発ビームロス: Sudden Beam Loss

高ルミノシティに向けたビーム電流増強を阻む最大の原因

- 原因不明で、ビーム電流の数割が1, 2周で損失する現象



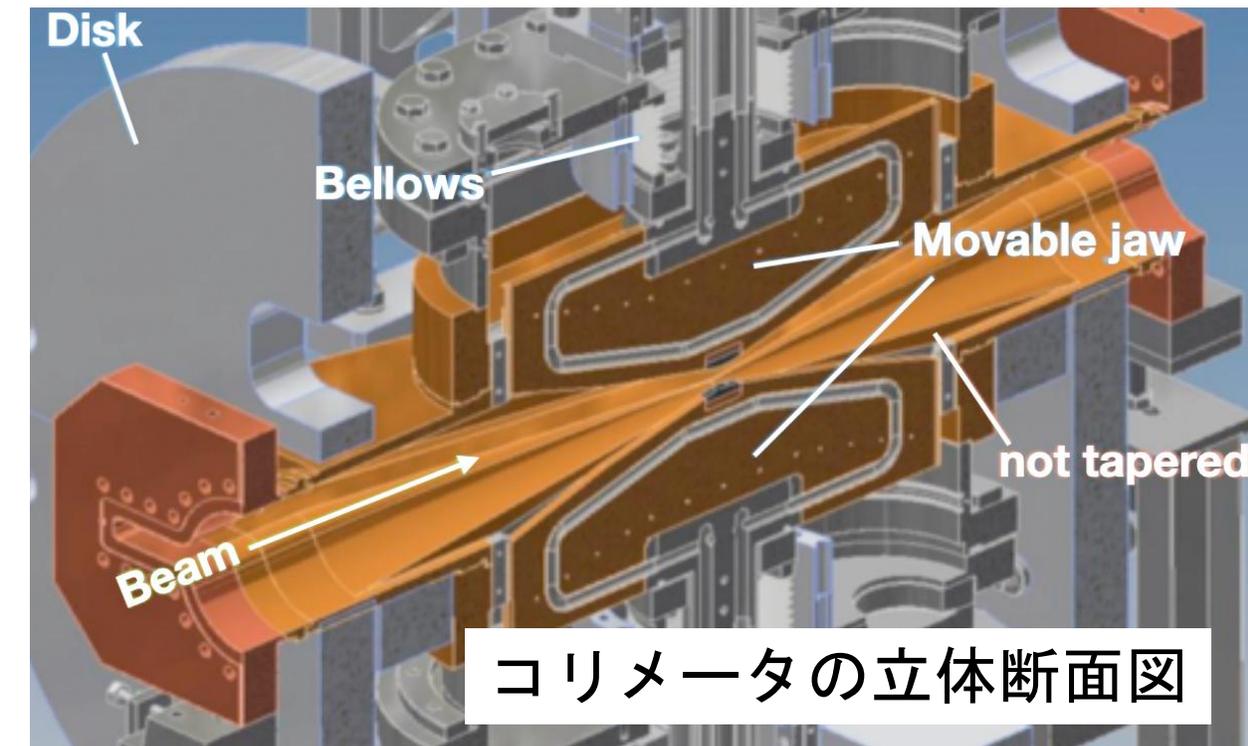
- ビームがアボートされるまでに生じる放射線が加速器を損傷させる
アボート: 異常時には速やかに安全にビームを捨てること
→ 安全にビーム電流を上げられない

更なるルミノシティ向上にむけて、Sudden Beam Lossの原因究明が必須

有力な仮説: コリメータ付近の大真空放電

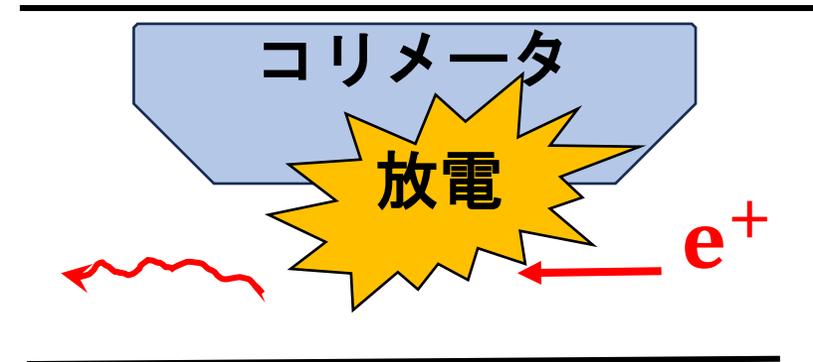
コリメータ: Belle II測定器を守るために、SuperKEKBリング内に設置されている

- ビームと距離が最も近い金属 (Movable jawは銅から成る)



1. コリメータ付近で大真空放電
2. ビームの通路間隔が狭い
→ビームが影響を受け、

Sudden Beam Lossの発生

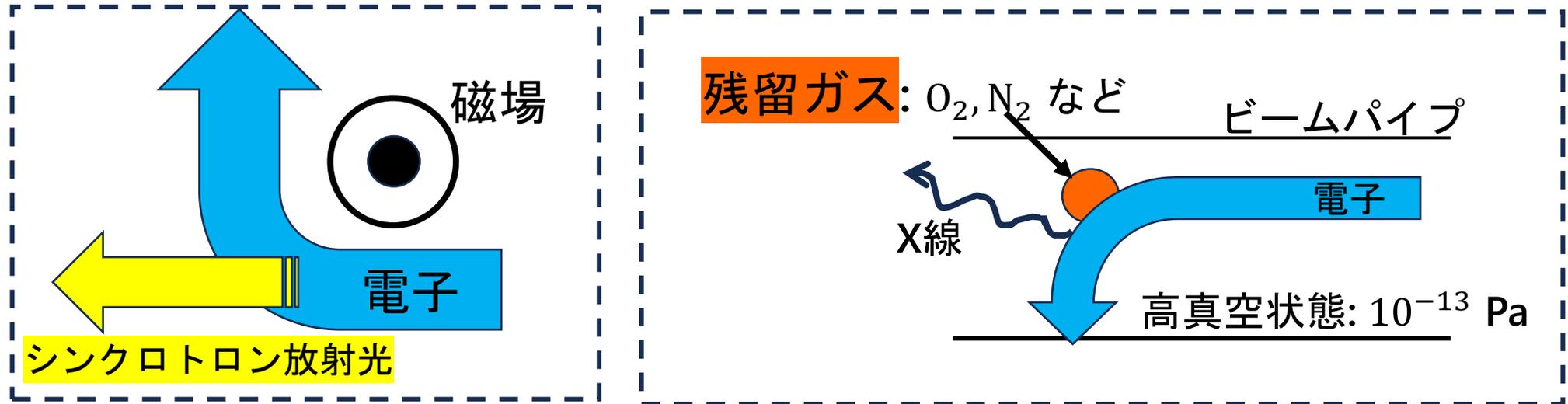


リング内のコリメータ付近で放電が発生しているか確認したい

放電を検知するため

放電とそれ以外の事象を区別する必要がある

- 放電以外の事象: Ex. シンクロトロン放射光、ビームガス散乱



- 可視光~紫外線、X線、 γ 線のような放射光がリング内で発生している

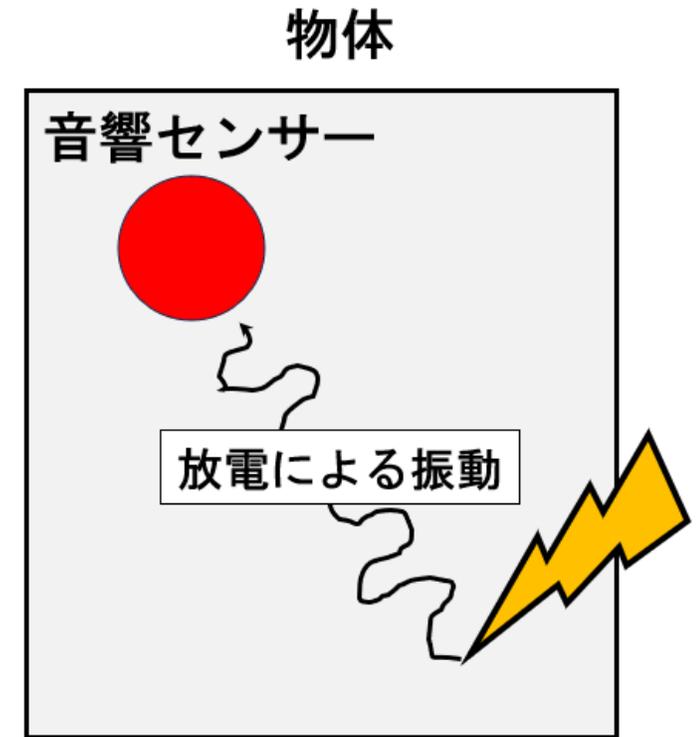
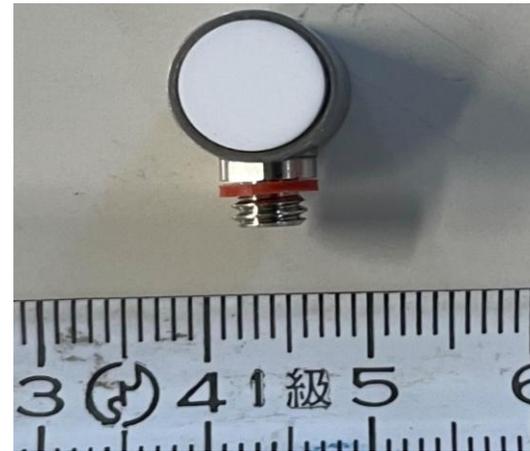
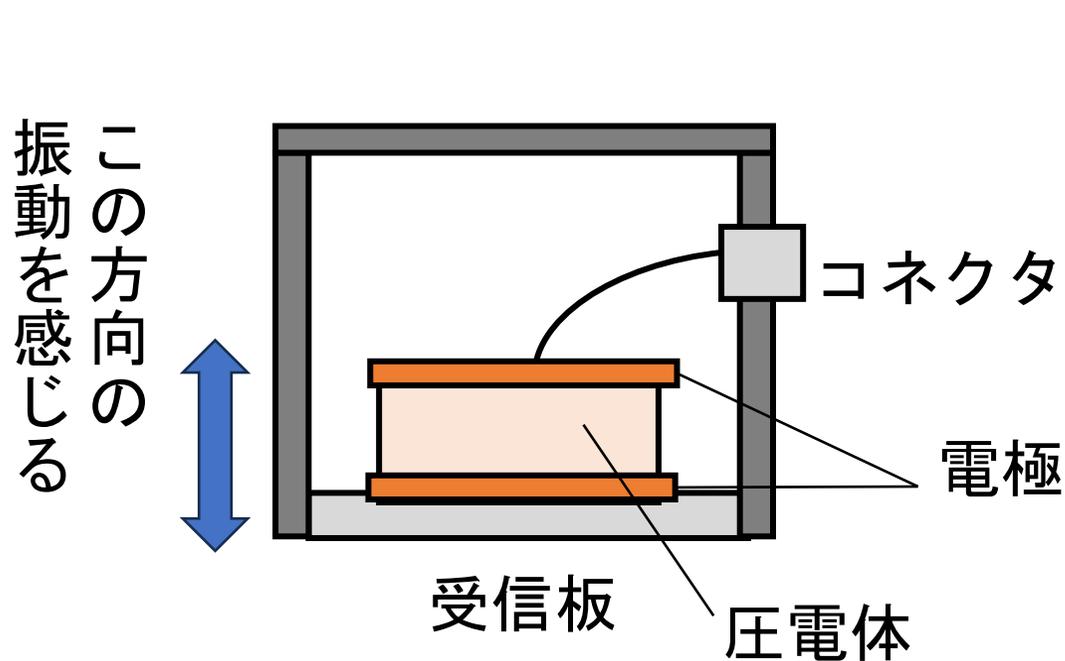
→ 可視光、紫外線、X線、 γ 線を捉えるカメラでは放電と区別できない

目で観測ではなく、耳で観測する

研究目的: 音響センサーを用いた放電の観測

音響センサー: 圧電体に力が加わると電流が生じることを利用したセンサー

- 1 cm角の大きさ、共振型、検知可能帯域は50-2000 kHz

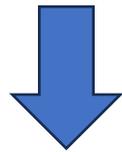


観測方法: 放電により発生する熱衝撃の振動をセンサーで受け取る

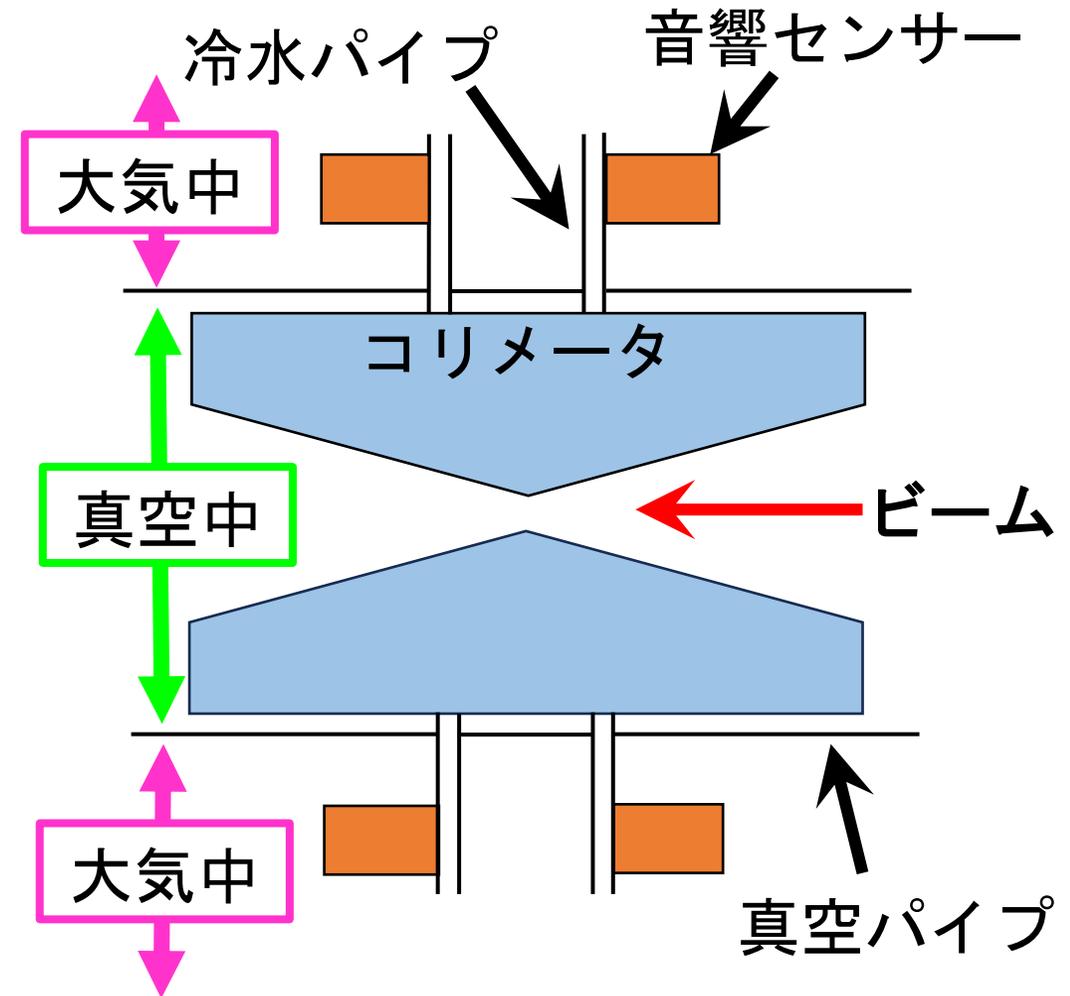
音響センサー設置位置の決定

コリメータ上の放電を捉えるために音響センサーの設置する位置を選定

1. 真空中ではなく大気に触れる側である
 - 音響センサーは真空仕様ではない
2. コリメータと機械的に接合されている
 - コリメータ上での熱衝撃で発生する振動を検知するため



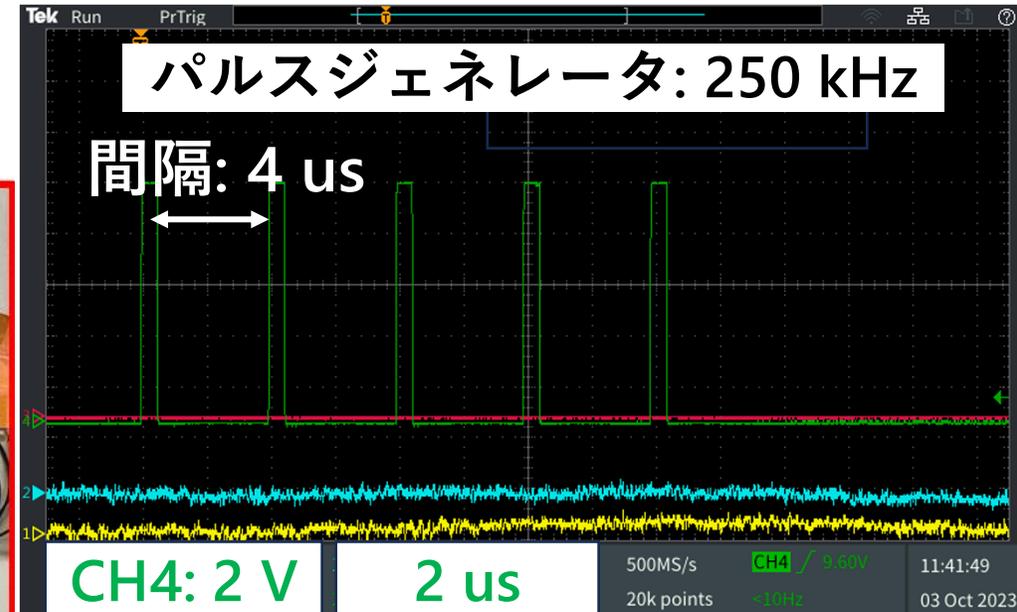
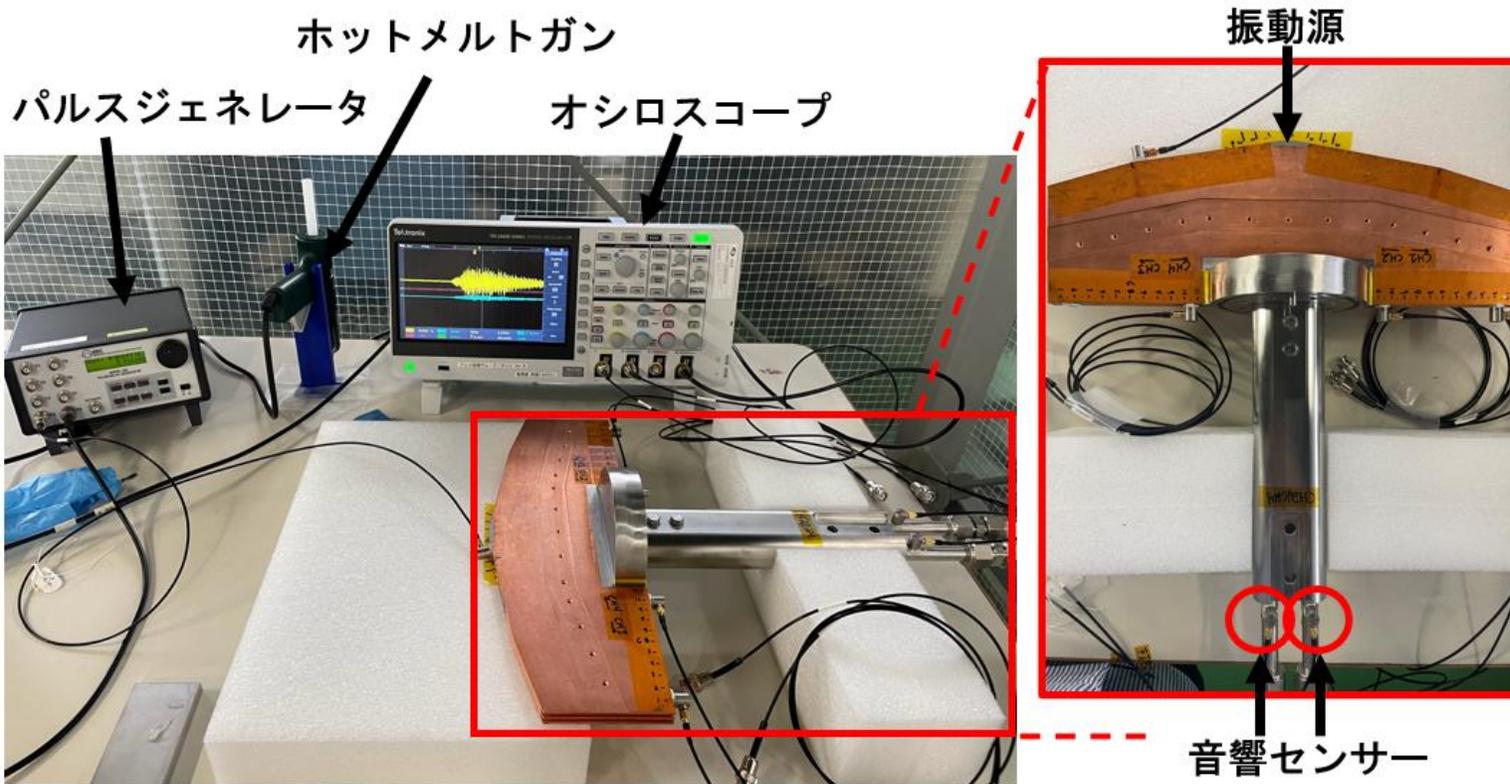
冷水パイプ上に音響センサーを
設置すると決めた



音響センサーで観測される音波の基本特性

コリメータを用いた音響センサーの応答試験

- 放電により生じる音波の周波数は分からない → 音響センサーが幅広く感度があるか確認
- 設置予定の音響センサーについて調査

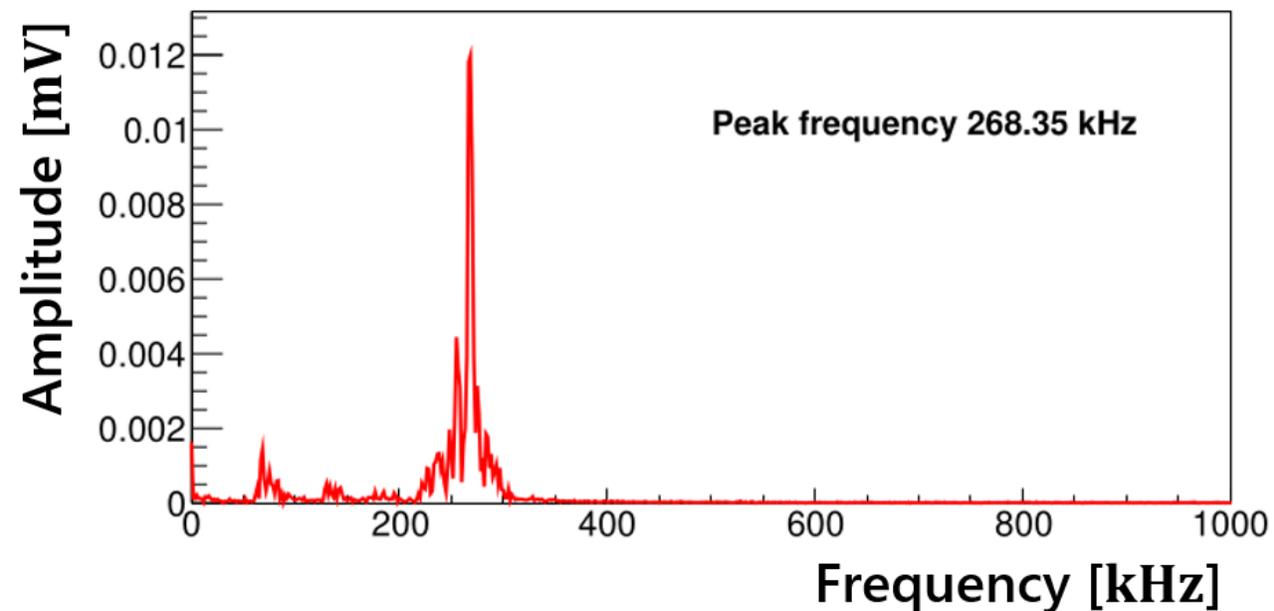
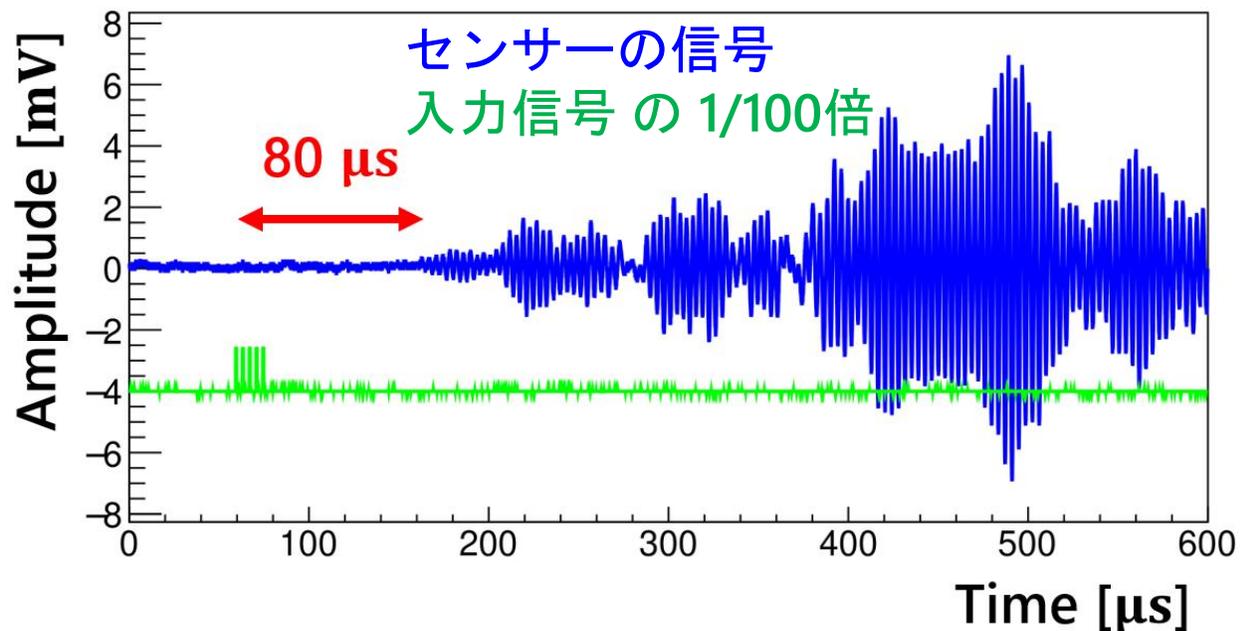


- 振動源: パルスジェネレータで駆動
 - 基本周波数を入力 (間隔の変更)

センサーを設置し信号応答確認

音響センサーの応答信号

基本周波数 250 kHzで観測される音波と高速フーリエ変換 (FFT)



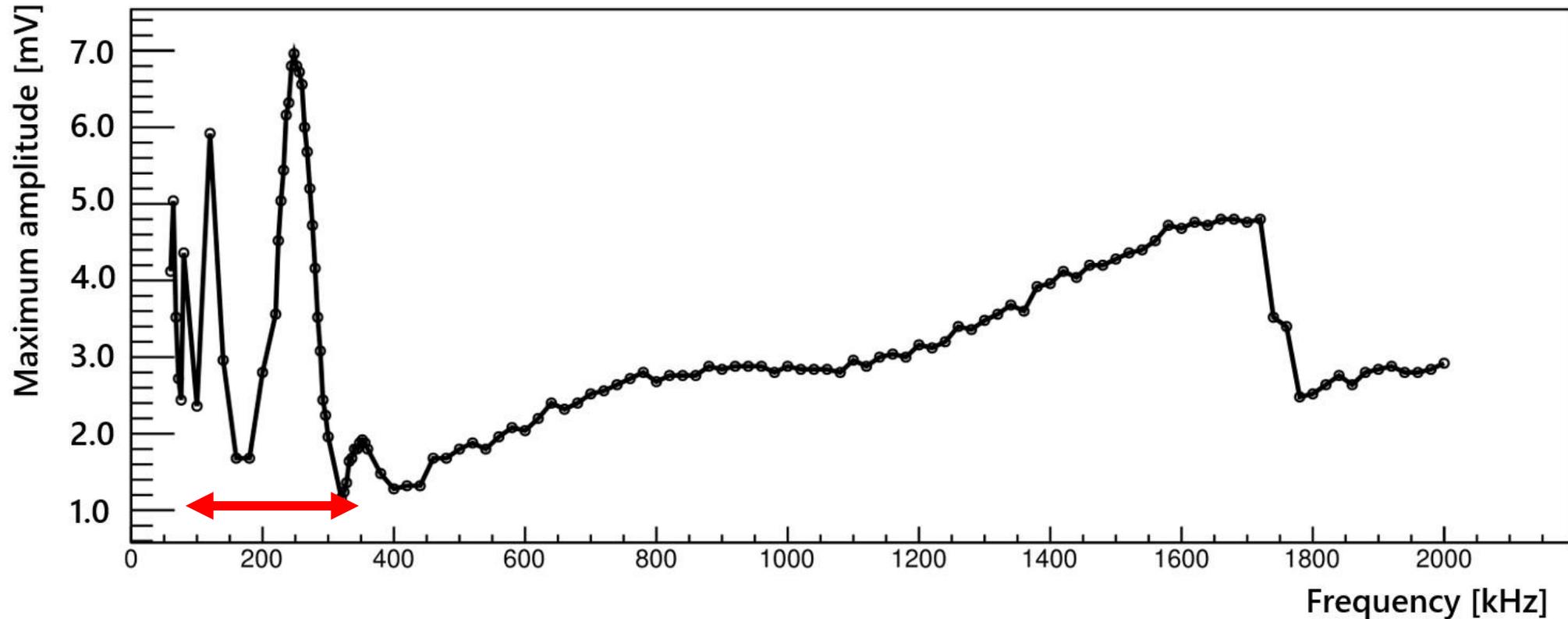
- 音波の大きさ: 0 – 10 mV
- 信号入力後、約80 usで音波が発生
 - 銅金属中の縦波の速度とコリメータの大きさから求める予想と合っている

- 100 kHzから300 kHzに複数のピークをもつ信号である

振動源に入力する周波数を変化させて音波の最大振幅を調べた

周波数に対する電圧の最大振幅

50 – 2000 kHzにわたって音波の最大振幅をプロット



- メーカーの示すものと同様に150 – 300 kHzで感度がもっとも良い

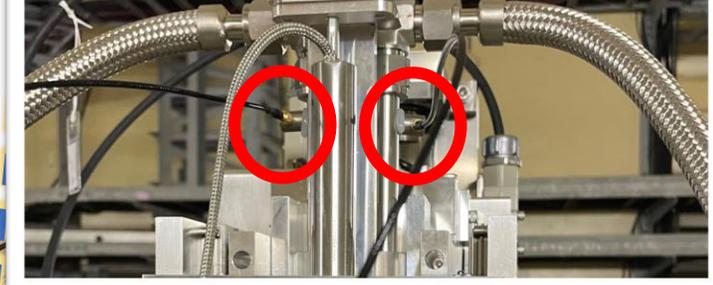
音響センサーは全て同じ特性 (有意な個体差がない) ことを確認した

音響センサー設置位置

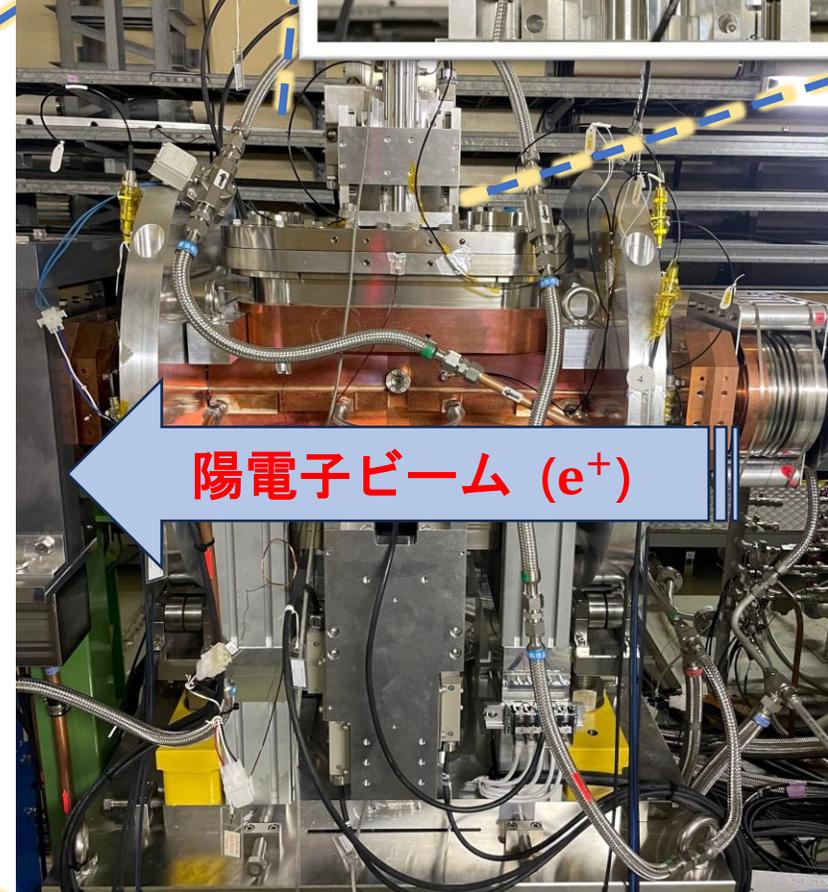
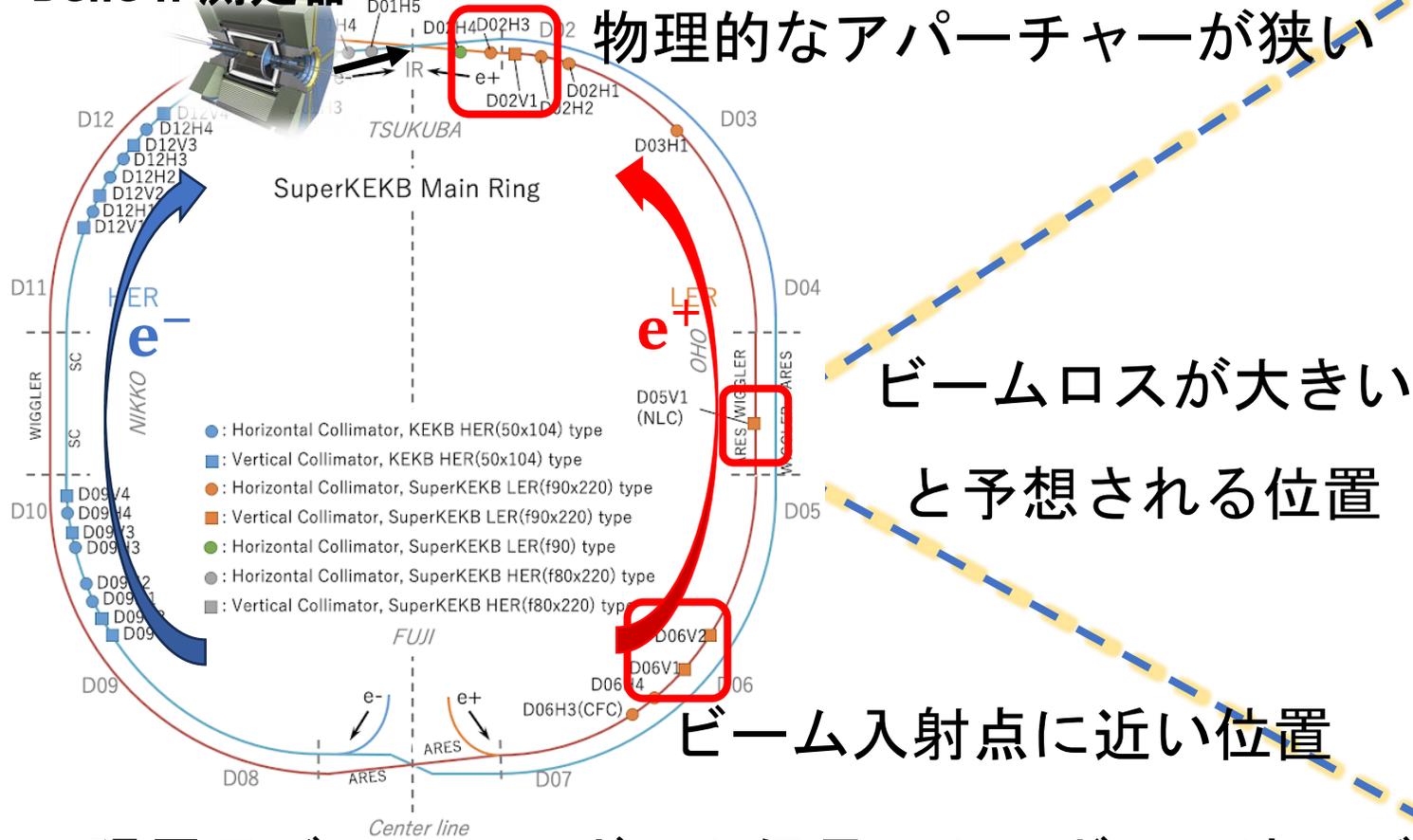
コリメータの冷水パイプ

陽電子リング内のコリメータ4台に音響センサー計12個設置

- 冷水パイプに上下2個ずつ最大4個付けている



Belle II 測定器

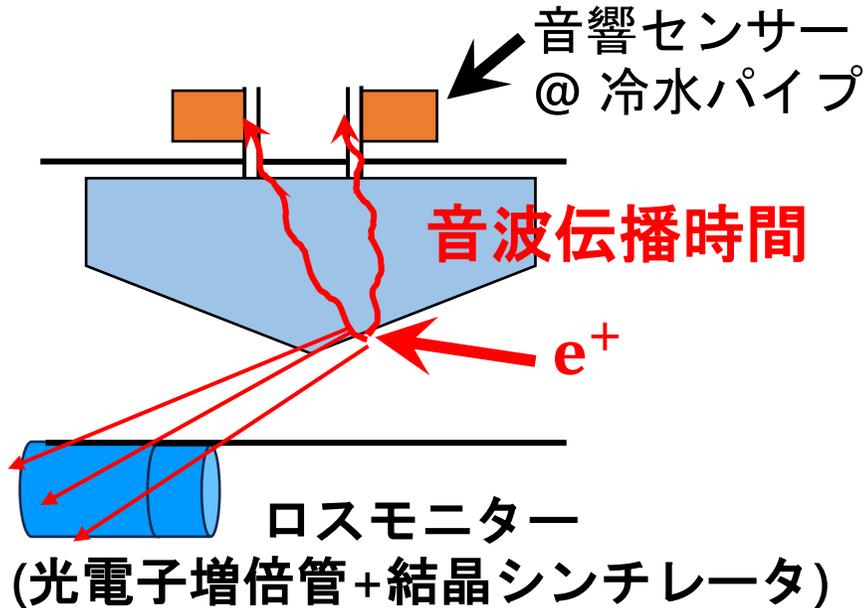


- 陽電子ビームのアポート信号でトリガー、波形データ取得

リング内での音波の観測

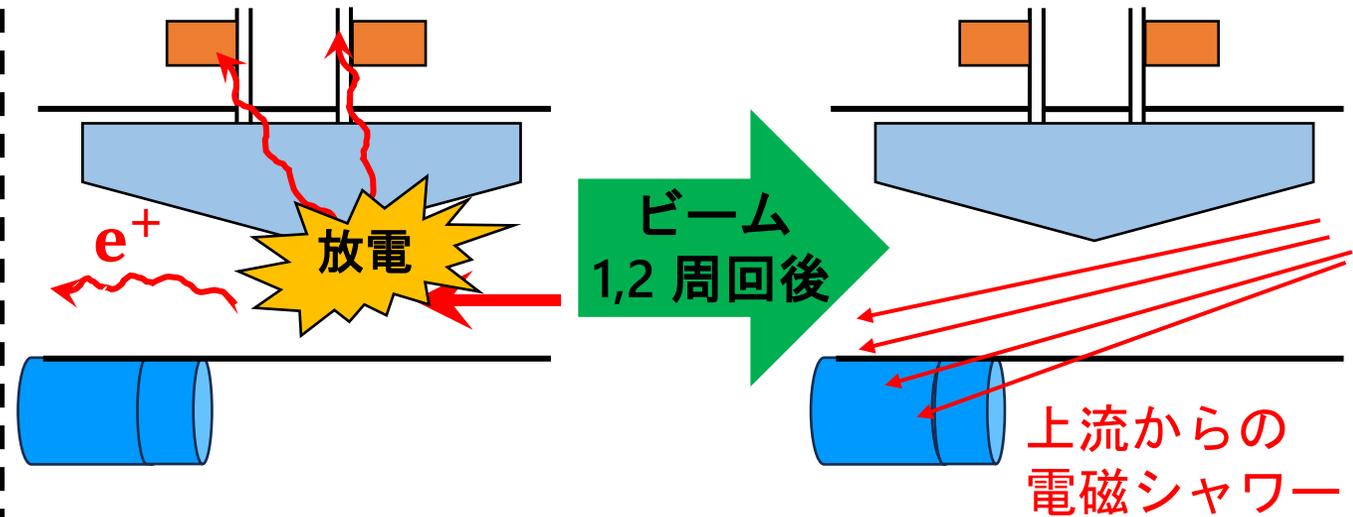
音響センサーで観測できる音波: ビームがコリメータに直接当たる事象 or 放電

① ビームがコリメータに直接当たる事象



音波が発生する時間と
ロスモニターの信号観測時間は同じ

② 放電がコリメータで発生した事象



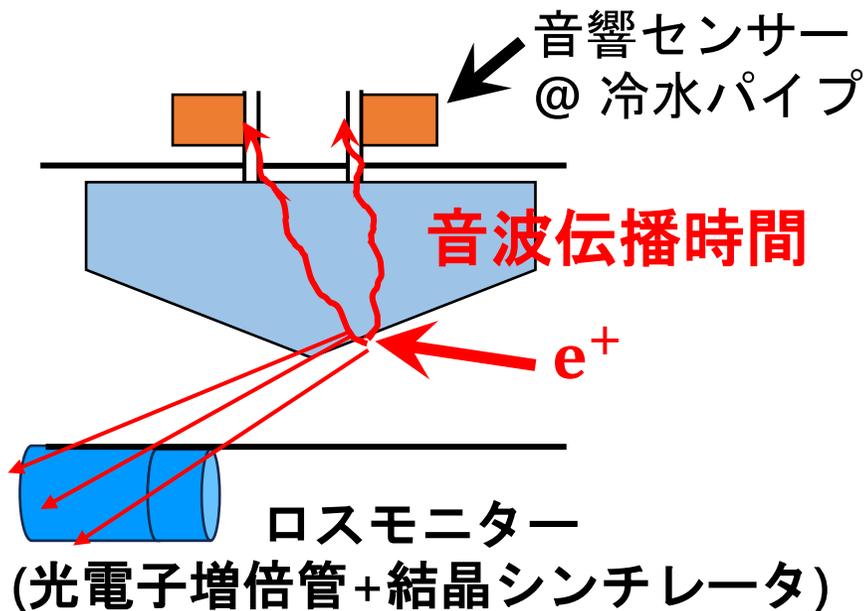
音波が発生する時間は
ロスモニター信号観測よりリング1,2周分は早い

リング1周: $10 \mu\text{s}$

リング内での音波の観測

音響センサーで観測できる音波: ビームがコリメータに直接当たる事象 or 放電

① ビームがコリメータに直接当たる事象



放電が発生するまでその音波の特徴は分からない...



ビームをコリメータに直接当てることはできる!

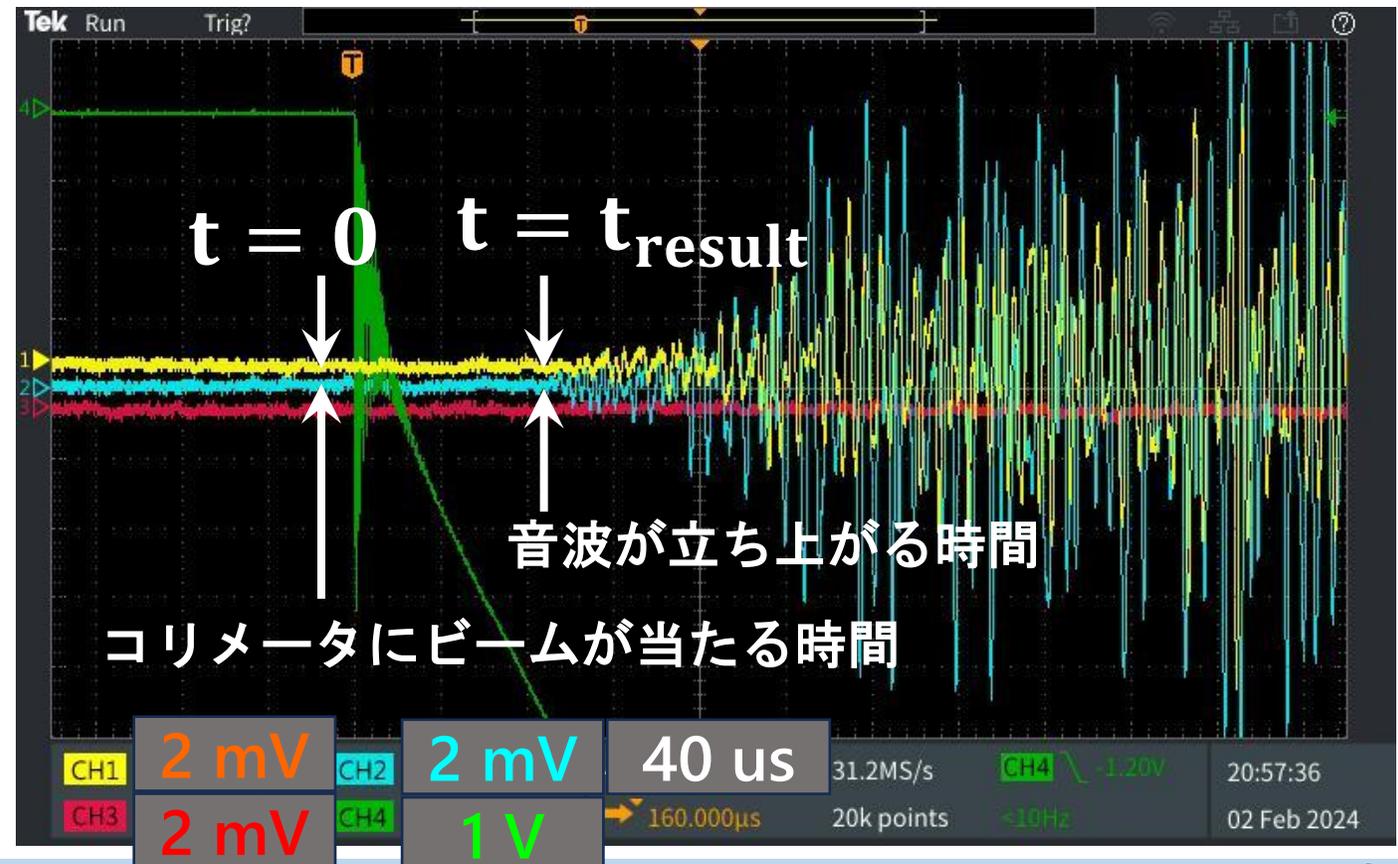
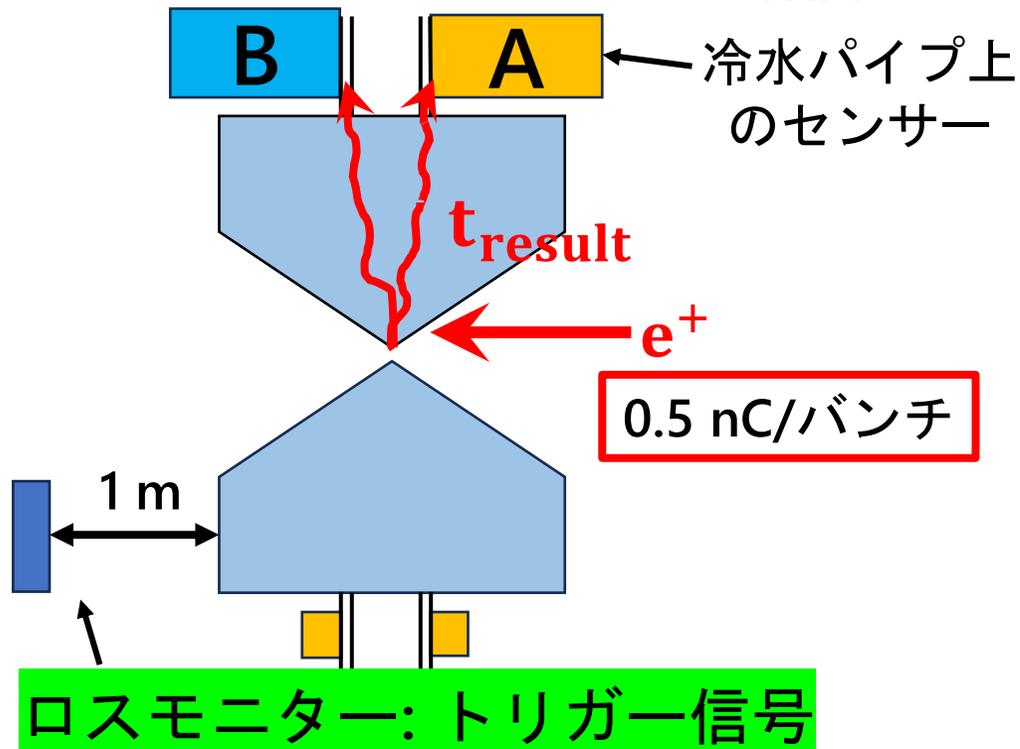


前もって音波伝播時間を算出できる

音波伝播時間を推定するための試験

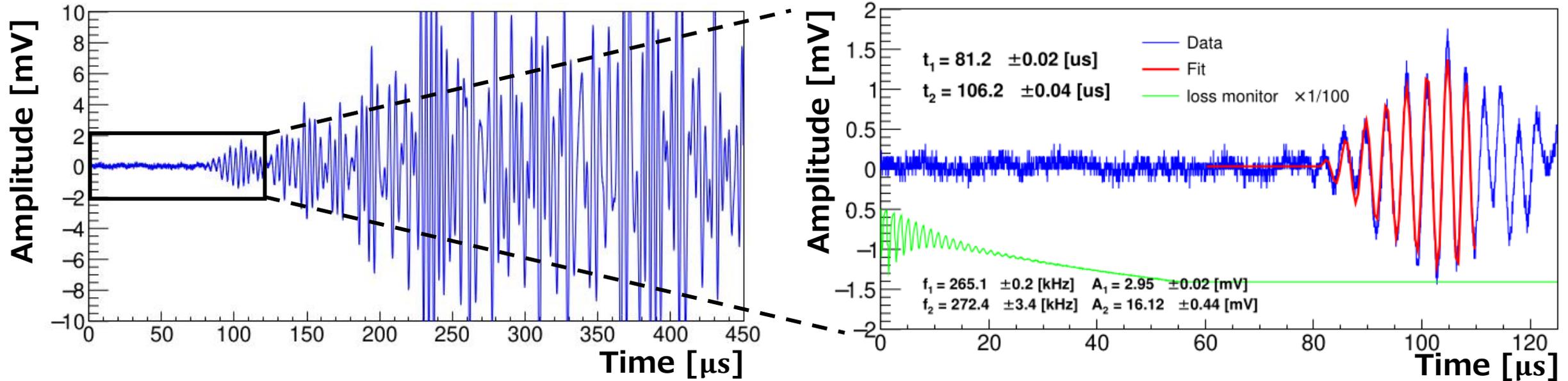
局所的にビーム軌道を曲げ、意図的にコリメータにビームを当てる試験

- 1個の陽電子のバンチ(荷電粒子の塊)をコリメータに当てて音波を記録
 - コリメータにビームが当たる時間 ($t = 0$)
 - 音波伝播時間 ($t = t_{\text{result}}$)



音波が立ち上がる時間の算出方法

センサーAで観測された音波に対して、共振器モデルに基づく関数でフィット



$$f(t) = A_1 \left(1 - e^{-\frac{\omega_1}{2Q_L}(t-t_1)}\right) \sin(\omega_1(t-t_1)) U(t-t_1) + A_2 \left(1 - e^{-\frac{\omega_2}{2Q_L}(t-t_2)}\right) \sin(\omega_2(t-t_2)) U(t-t_2)$$

周波数 f_1 の共振器モデル

周波数 f_2 の共振器モデル

A: 漸近振幅

t_1 : 信号発生時間

ω : 角周波数

Q_L : 負荷Q値 (事前の測定値32.4で固定)

$U(x)$: 単位ステップ関数

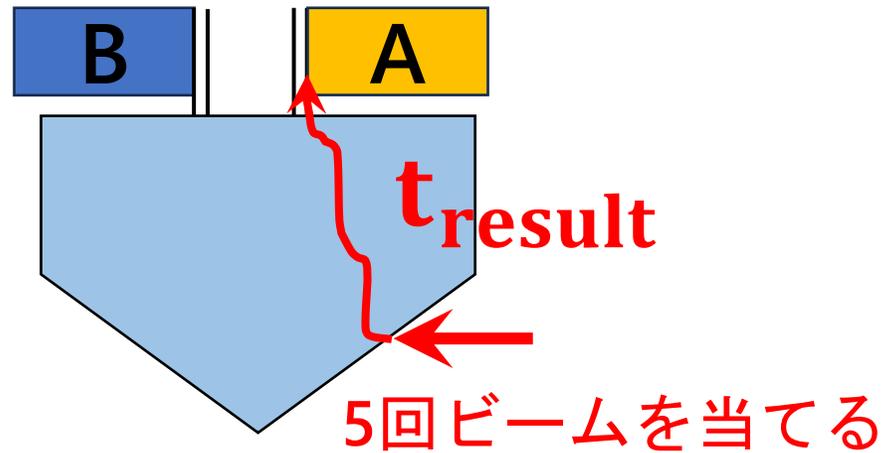
$$U(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq 0) \\ 1 & (x > 0) \end{cases}$$

$$t_{\text{result}} = \min(t_1, t_2)$$

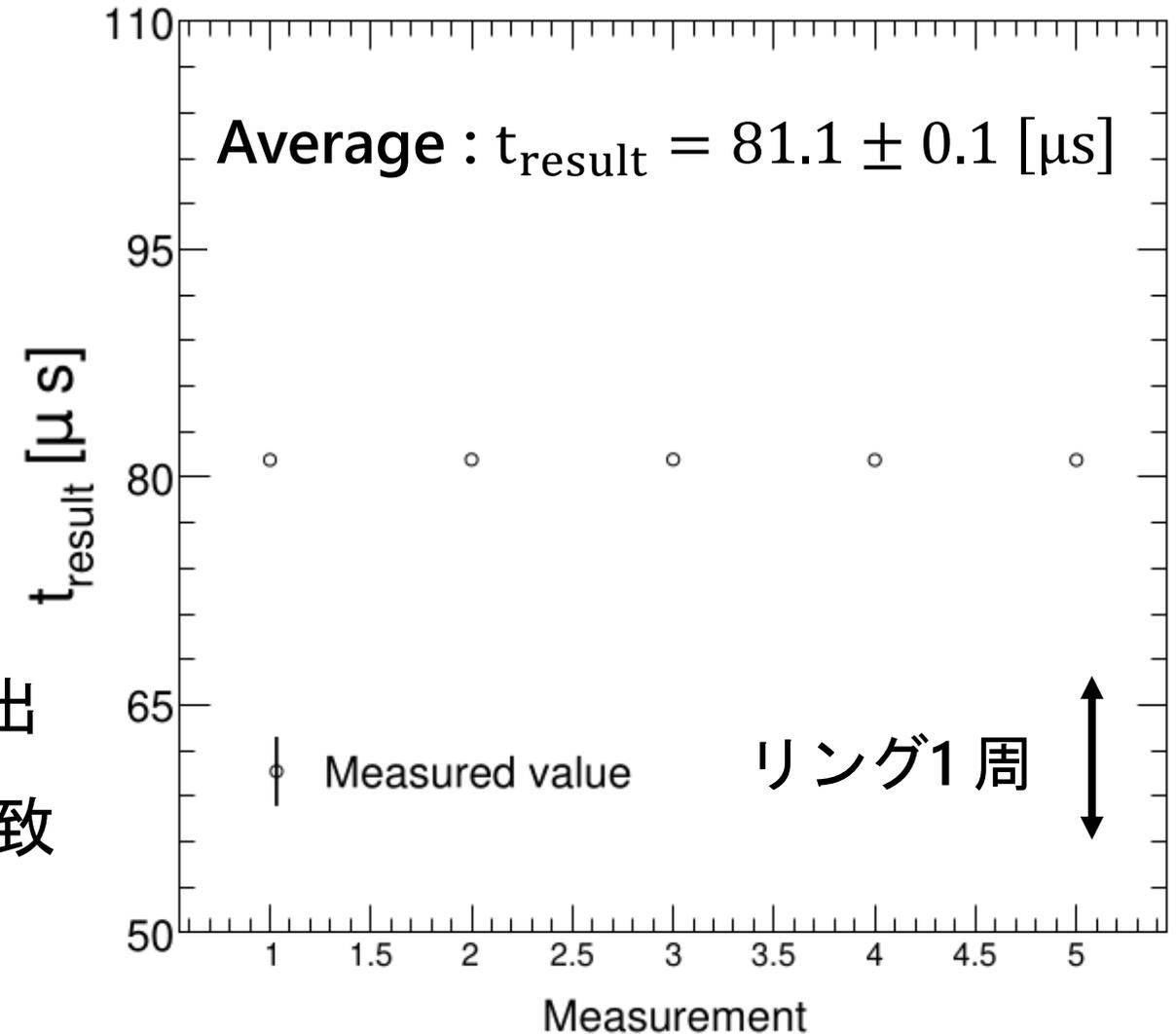
ロスモニターの信号を検出してから音波が観測されるまでの時間, $t_{\text{result}} = 81.2 \pm 0.02 \mu\text{s}$

音波伝播時間の再現性

- 同じ条件で5回測定

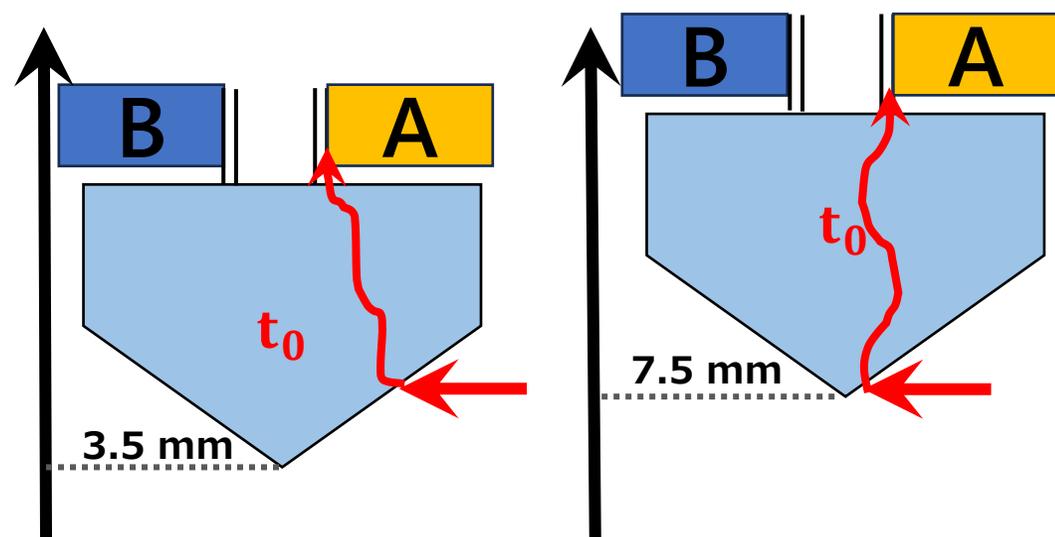


- 全てのコリメータで音波伝播時間を算出
 - 音波の伝播時間は3-4 μs の範囲で一致
 - 何ターン目で音波が発生したか分かる
 - 再現性がある

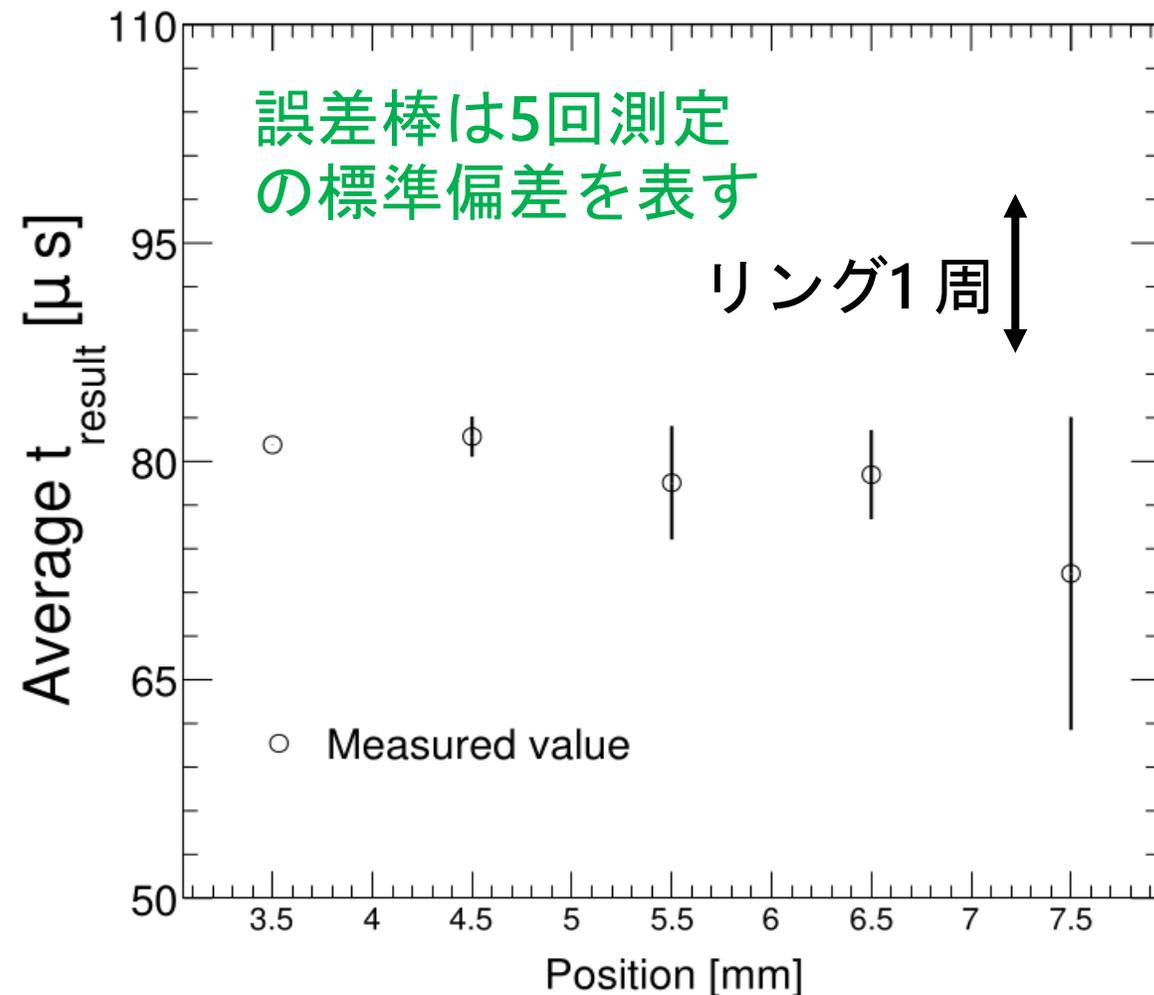


音波伝播時間のバッチの位置依存性

- コリメータ位置を3.5-7.5 mmまで1 mmずつ変化



- 音波伝播時間は10 μs の範囲で一致
- 基準となるセンサー固有の音波伝播時間は3.5-7.5 mmのデータ全部を用いて重み付き平均値と標準偏差で計算した



センサーAの音波伝播時間: 81.1 ± 0.1 [μs]

これまでのまとめ

- 設置した音響センサーの音波伝播時間を算出できた

① ビームがコリメータに直接当たる事象

② 放電がコリメータで発生した事象

音波伝播時間

音波伝播時間よりリング1, 2周分はやい

リング1周: 10 μs

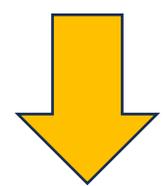
音波伝播時間を基準に放電とそれ以外を区別

実際の運転で音波の立ち上がり時間を算出し放電の有無を調査

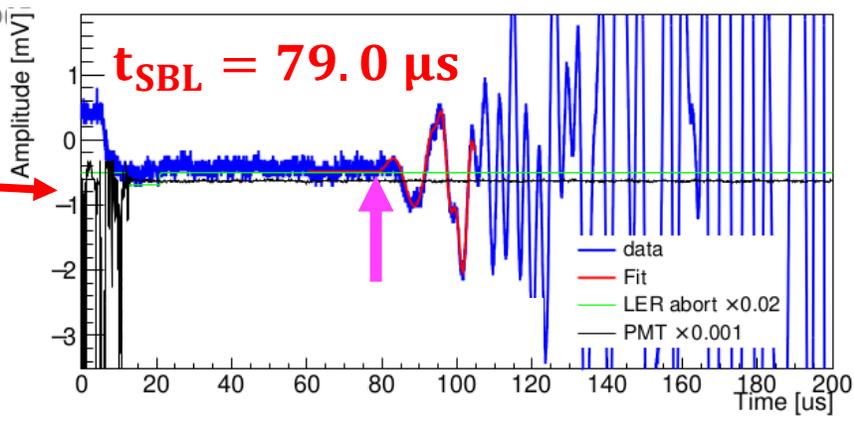
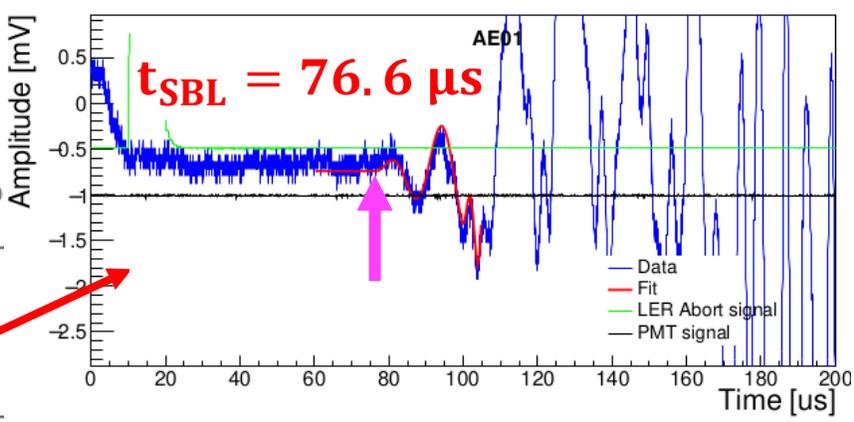
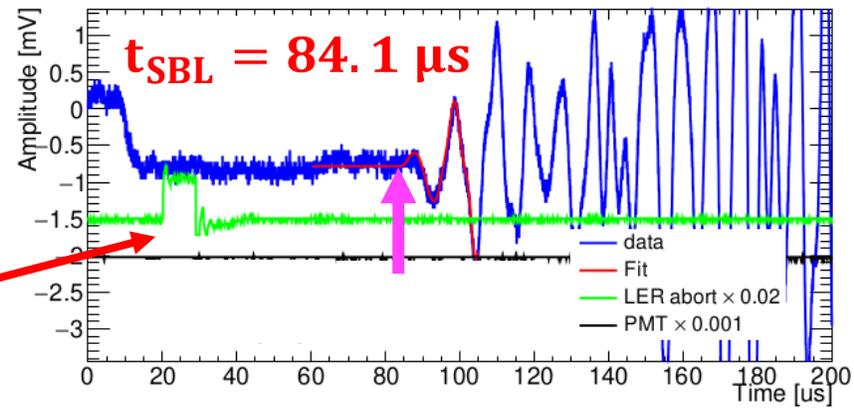
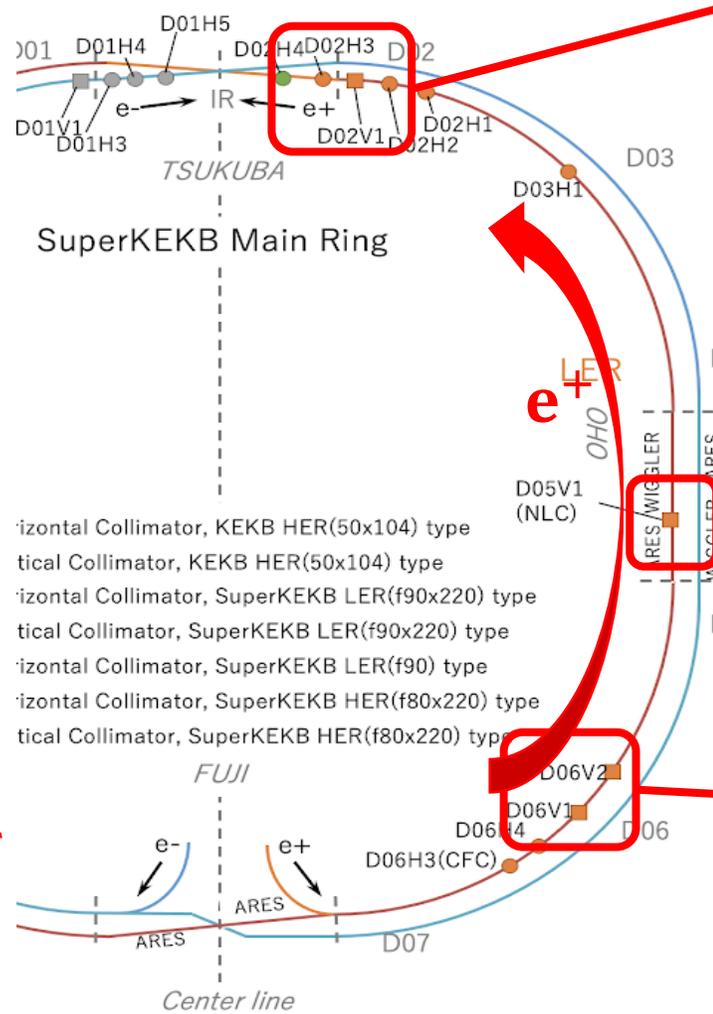
Sudden Beam Lossに伴う音波

2024年1月から7月までに取得した信号: 約150件

- コリメータのどこでロスしても音波が観測される
- 立ち上がり時間 (t_{SBL})の算出
- 音波は放電由来ではない



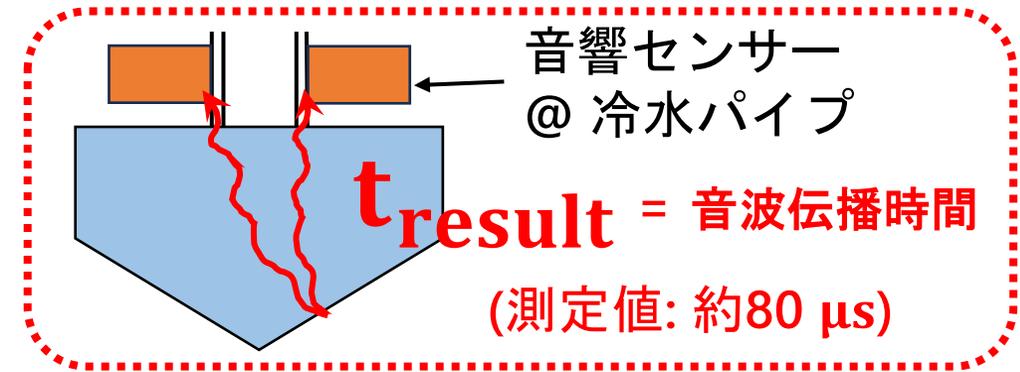
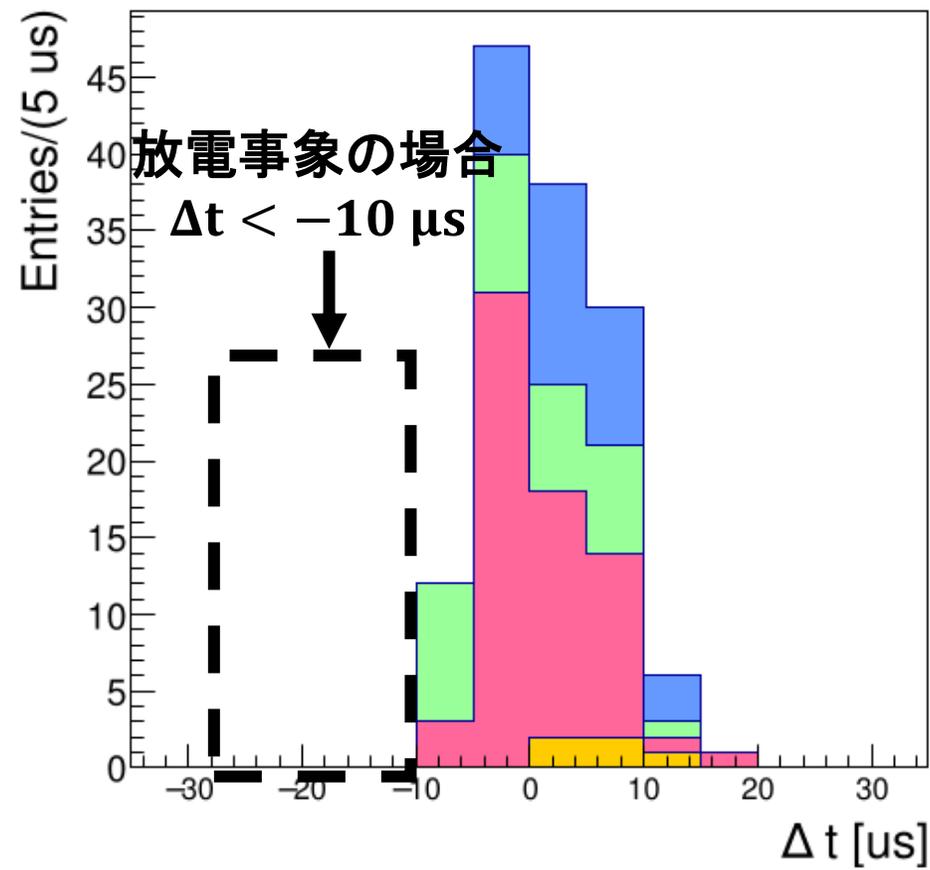
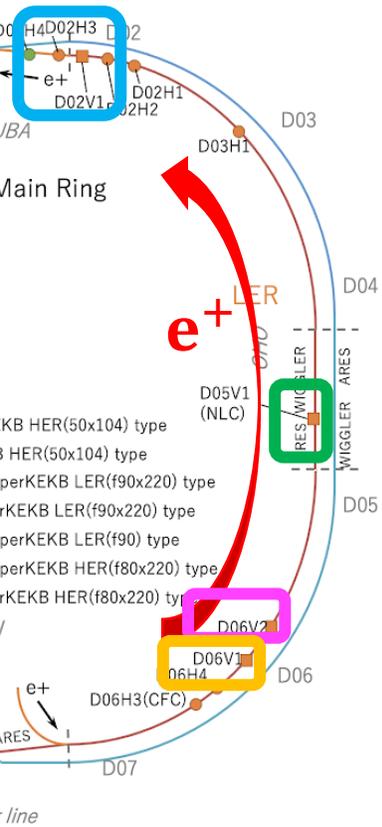
音波伝播時間 (t_{result})と
立ち上がり時間 (t_{SBL})を比較して
放電事象候補を探す



音波伝播時間から放電事象の候補をさがす

約150件のSudden Beam Lossによって発生した音波から放電事象の候補を選別

- 時間差: $\Delta t = t_{\text{SBL}} - t_{\text{result}}$



- コリメータにビームが当たる事象は主に $\Delta t=0$ 付近に分布
- 放電: t_{SBL} は t_{result} より $10 \mu\text{s}$ 以上小さい
- 放電事象候補数: 0個
→ コリメータでの放電は無かった
Sudden Beam Lossは放電起因でない

まとめと今後

- SuperKEKB/Belle II実験は大統計データを用いて新物理探索を行う
 - 高ルミノシティの運転が必須 → 突発的なビームロスの原因究明をする必要がある
- リング内のコリメータ付近で大真空放電の発生が仮説として考えられる
- 音響センサーを用いてリング内の放電事象の有無を検証する測定方法を確立した
- 2024年の運転で発生したSudden Beam Lossに対する音波の観測に成功
- 音波の立ち上がり時間を基準にして解析 → 設置したコリメータで放電事象は無かった
 - Sudden Beam Lossは放電起因でないことが示唆された
- 音響センサーはコリメータにビームが当たることを検知できる初めてモニターである
- ビーム軌道の変化など他のモニター情報との関連も調べる