

ボース・AINシュタイン凝縮を 目指したポジトロニウム冷却 II

周 健治, 山田 恭平, 橋立佳央理, 石田 明, 難波 俊雄^A, 浅井 祥仁,
五神 真, 田島 陽平^B, 蔡 恩美^B, 吉岡 孝高^B,
大島 永康^C, オローク ブライアン^C, 満汐 孝治^C,
伊藤 賢志^C, 熊谷 和博^C, 鈴木 良一^C, 藤野 茂^D,
兵頭 俊夫^E, 望月 出海^E, 和田 健^F

東大理, 東大素セ^A, 東大工^B, 産総研^C, 九大GIC^D, KEK^E, 量研機構^F



京都大学複合原子力科学研究所専門研究会
「陽電子科学とその理工学への応用」 2018/12/06

このトークでは Ps生成材料の開発・KEK SPF-B1での陽電子性質向上 についてお話しします

初の反物質BECとしてPs-BECを実現し、

- 物質・反物質間にはたらく重力効果の精密測定
- 511 keVガンマ線レーザーの開発

を行い、基礎・応用物理両面でのブレークスルーとしたい。

Ps-BEC実現の鍵となるのは、

- ◆ 高密度陽電子源の開発
- ◆ Ps高速冷却手法の開発

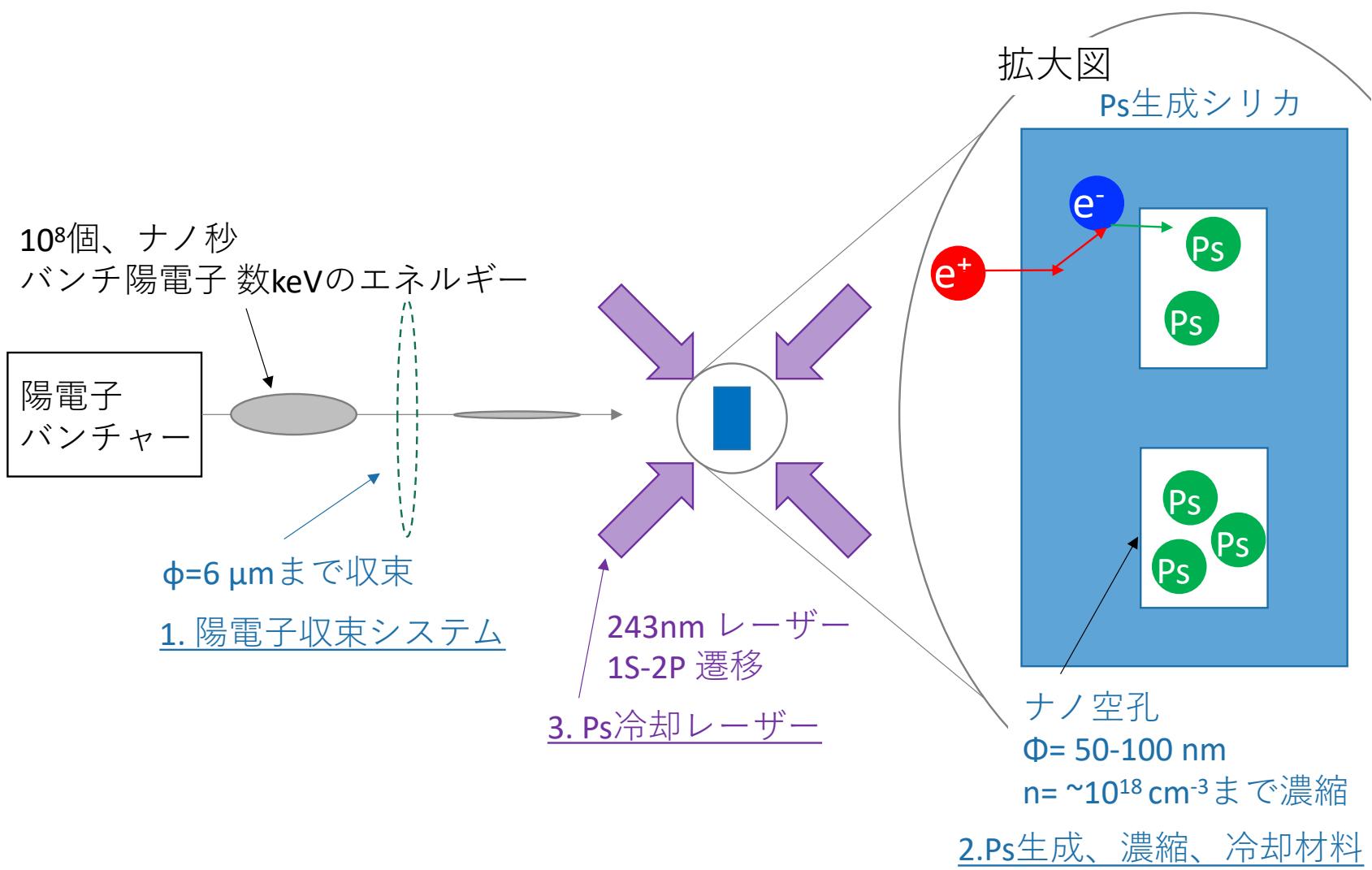
このトークのテーマ1：

高密度陽電子をo-Psに変換、トラップし、冷却する材料（生成・濃縮・冷却材）の開発

このトークのテーマ2：

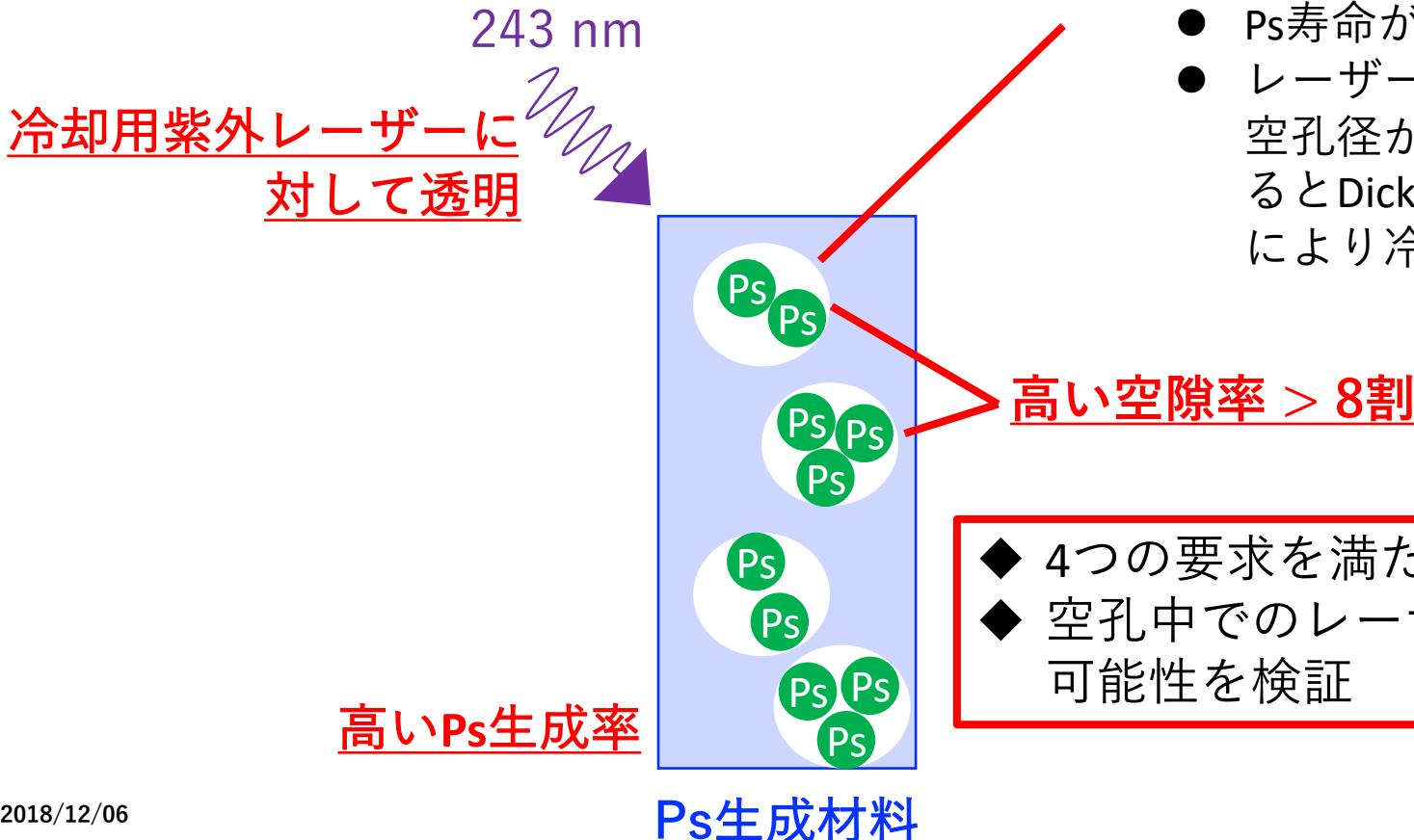
材料、冷却レーザーを使ってレーザー冷却実験に備えた、KEK SPF-B1ビームラインでの陽電子性質向上

Ps生成・濃縮・冷却材料開発



空孔中のPsレーザー冷却には 適切なPs生成材料が必要

熱化とレーザー冷却を組み合わせた
冷却を実現するにはPs生成材料に
4つの機能が必要



空孔径 50 - 100 nm

空孔径大きすぎると...

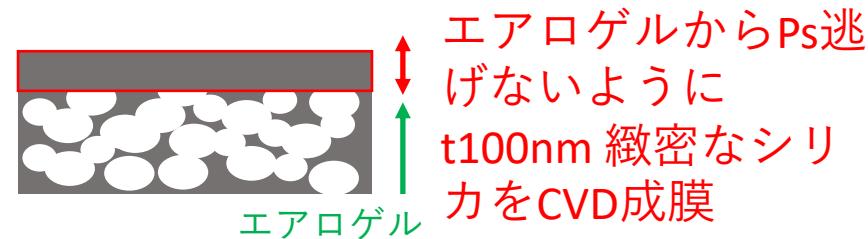
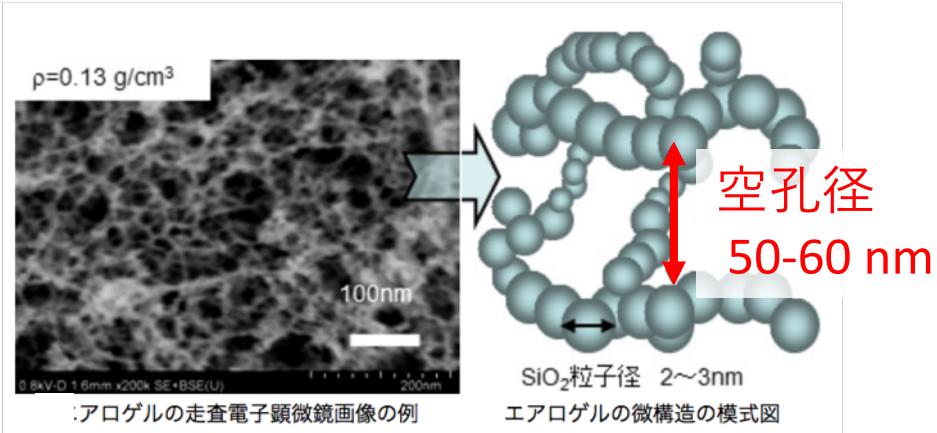
- 热化が遅くなる

空孔径小さすぎると...

- Ps寿命が短くなる
- レーザー波長243 nmより空孔径が小さくなりすぎると Dicke narrowing効果により冷却できなくなる

- ◆ 4つの要求を満たす材料を検討
- ◆ 空孔中のレーザー冷却の可能性を検証

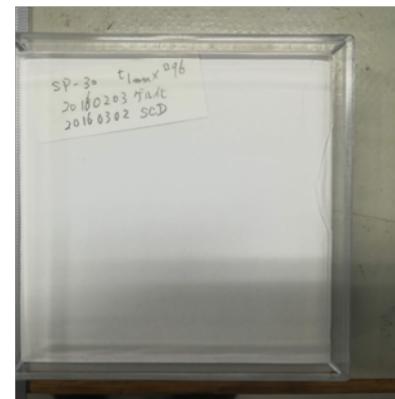
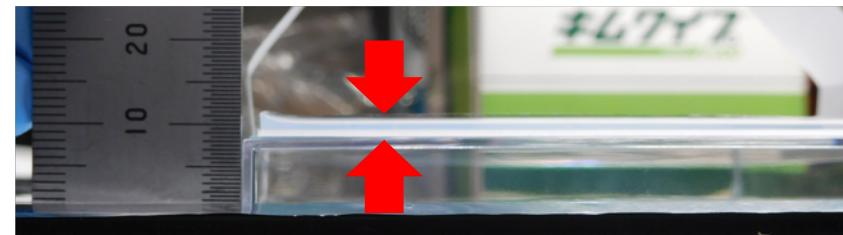
シリカ (SiO_2) を用いたアイデア 薄いエアロゲル



ファインセラミックスセンター (JFCC) 提供

良いところ:

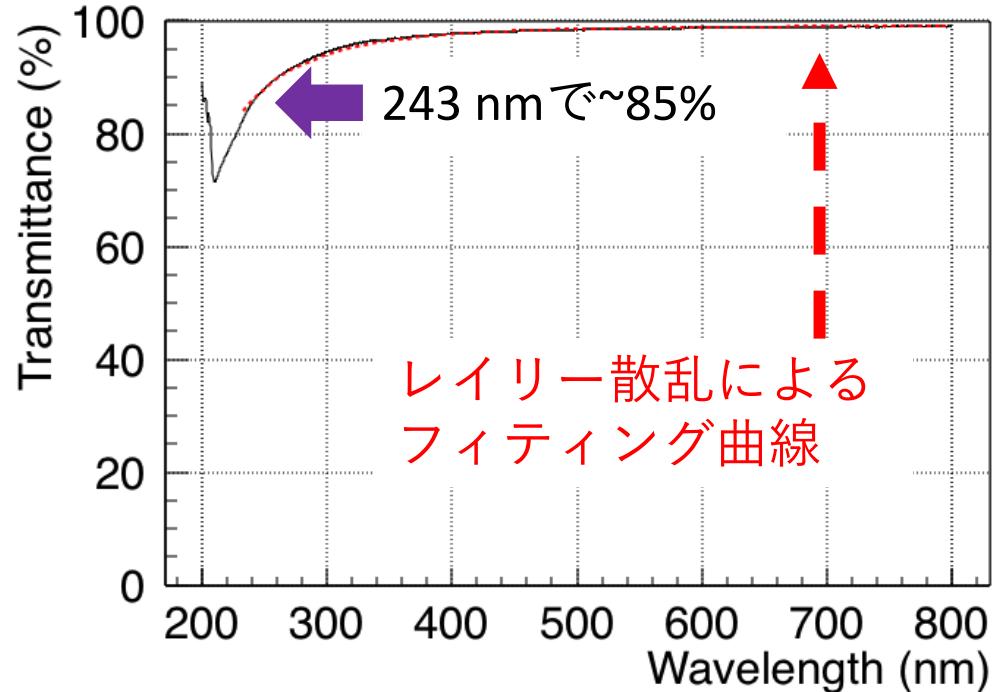
- 高空隙率による高いPs生成率 ~50%
- 薄膜化により高い光透過率



0.5mm厚エアロゲル
JFCC提供

シリカエアロゲルの試験： 紫外光透過率 85%

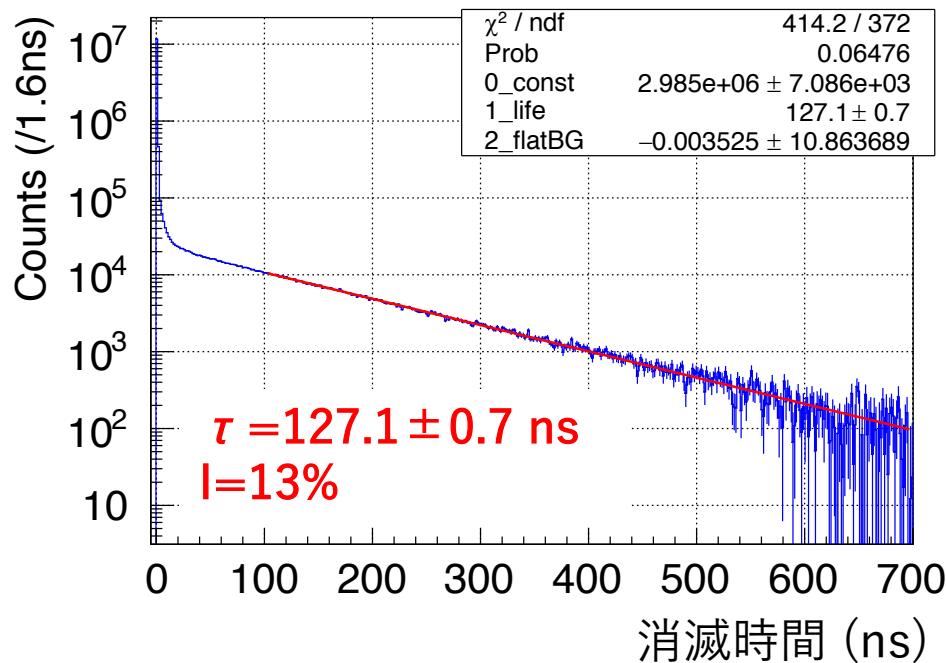
- シリカエアロゲルの微細構造によりレイリー散乱されるため薄膜化が必須
- t0.5mmにより透過率85%
- ◆ レーザー冷却実験に十分な透過率



t0.5mm エアロゲルの平行光線透過率
分光光度計で測定

シリカエアロゲルの試験： o-Ps 生成率 50%

- o-Ps 生成率を測定するために、
Na-22放射性同位体からの陽電子
がシリカエアロゲル中で消滅す
る時間を測定
- 寿命127 nsの成分が得られた。全
体の崩壊のうち13%。
⇒ シリカエアロゲルで停止した
陽電子の50%が o-Ps を形成し
50 nm 空孔中にいる
- ◆ 十分高いPs生成率を確認できた



寿命スペクトル

シリカエアロゲルの試験： *o*-Ps閉じ込めに成功

- 実験では 5 keV のレーザーと同期可能な低速陽電子を用いる
- 低速陽電子はエアロゲル最表面 ($\sim 2 \mu\text{m}$) で停止、エアロゲル中で同程度の距離を拡散するので閉じ込めの膜が必要

閉じ込めの確認実験 セットアップ

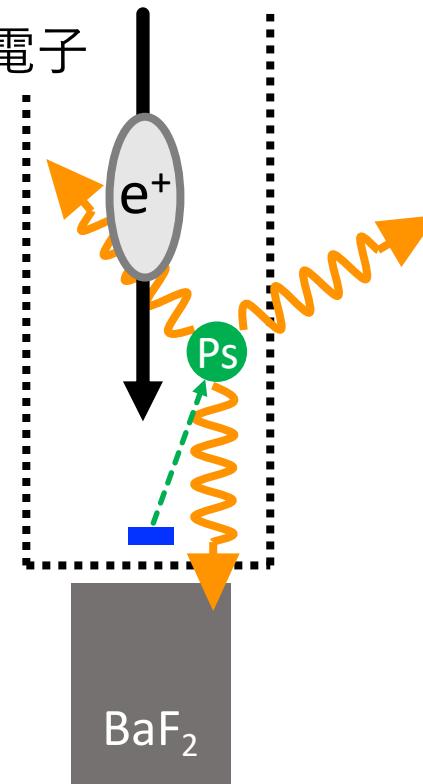
AISTのビームラインにて

もし *o*-Ps が逃げると ...

ガンマ線の検出効率がどんどん小さくなっていく

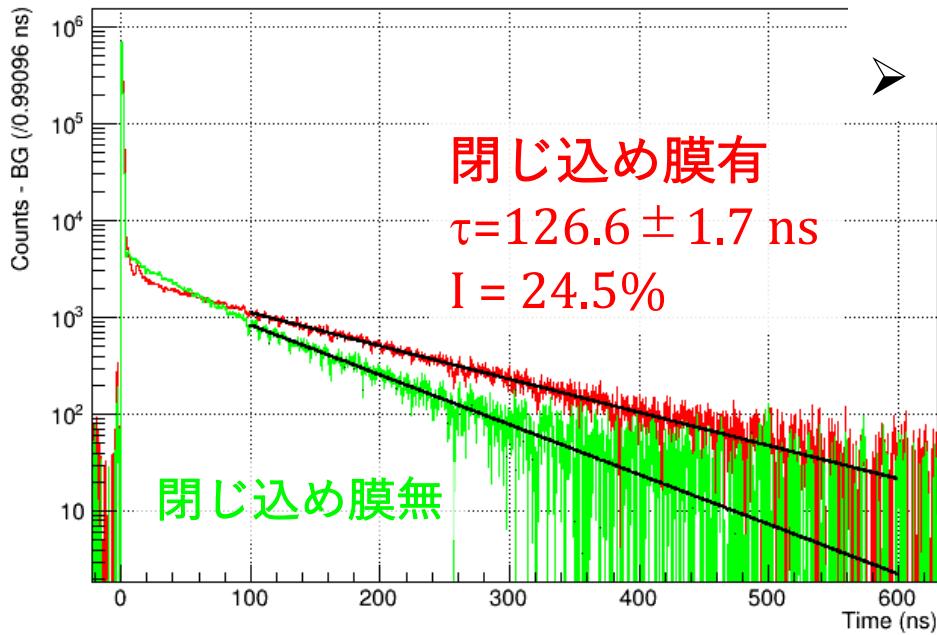
➢ 寿命が短くなったように見える

5 keV 低速陽電子

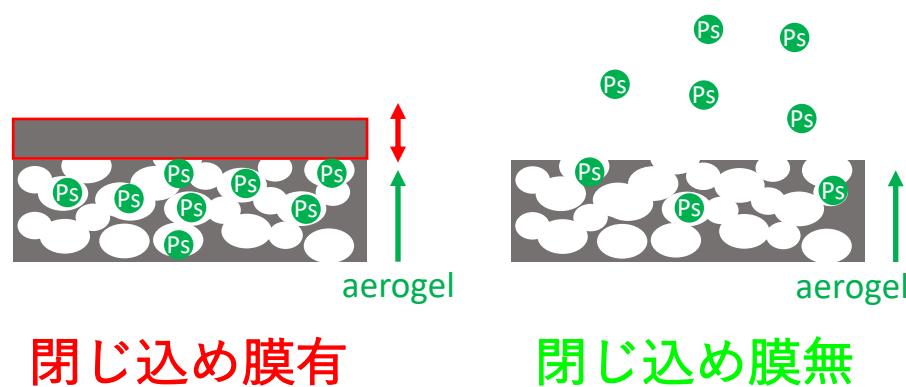


シリカエアロゲルの試験： α -Ps閉じ込めに成功

- 膜によって、バルク中の寿命に戻った
 α -Psの閉じ込めに成功

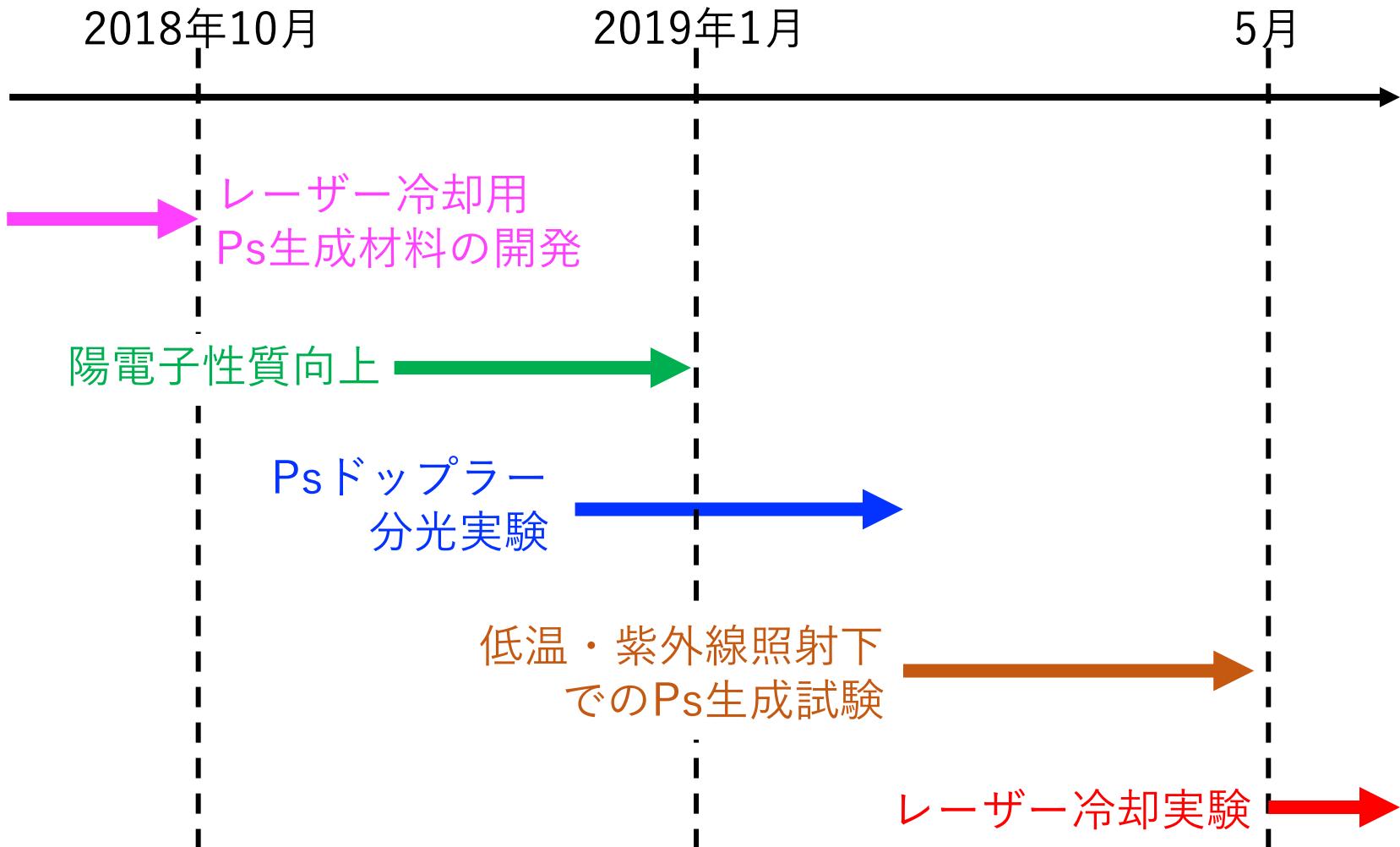


PALS spectra



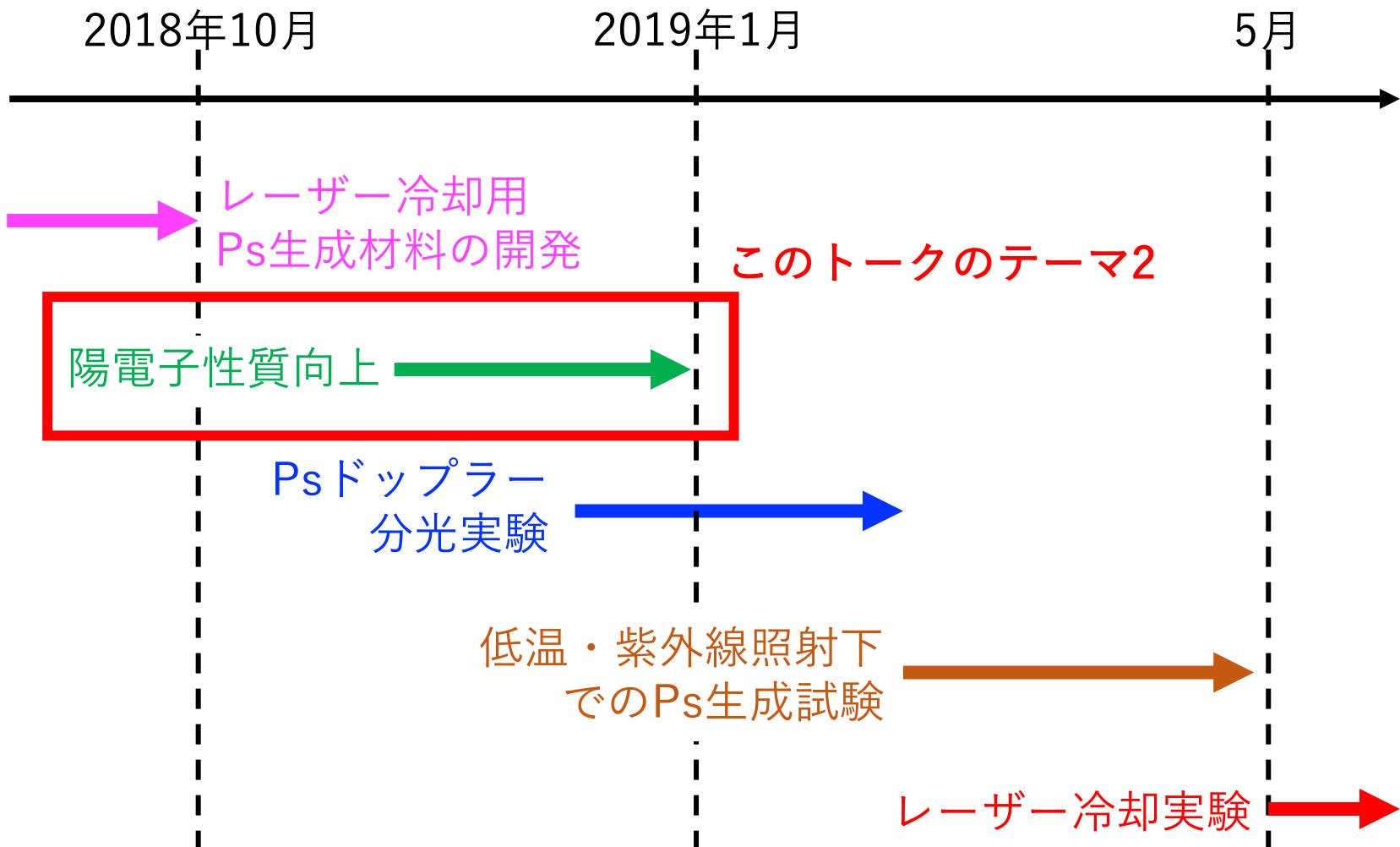
まずはシリカエアロゲルでレーザー冷却実験を行う予定

今後の予定 KEK SPF-B1ビームラインにて



リソグラフィ・インプリントを使ったBEC向けのPs生成材料開発、
陽電子集束装置開発も進め、5年間でBEC実現を目指す

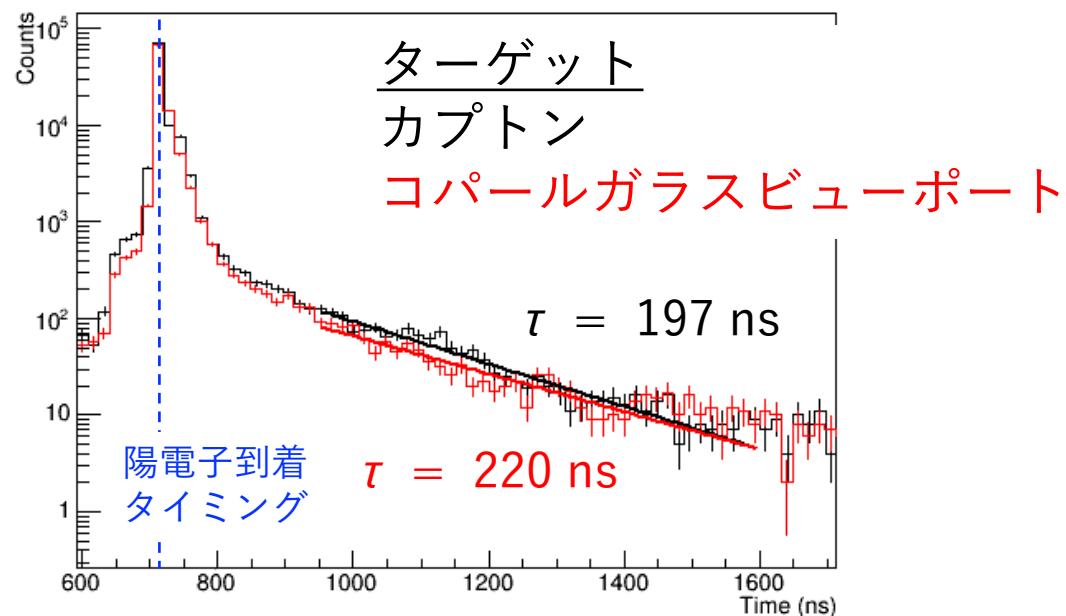
今後の予定 KEK SPF-B1ビームラインにて



リソグラフィ・インプリントを使ったBEC向けのPs生成材料開発、
陽電子集束装置開発も進め、5年間でBEC実現を目指す

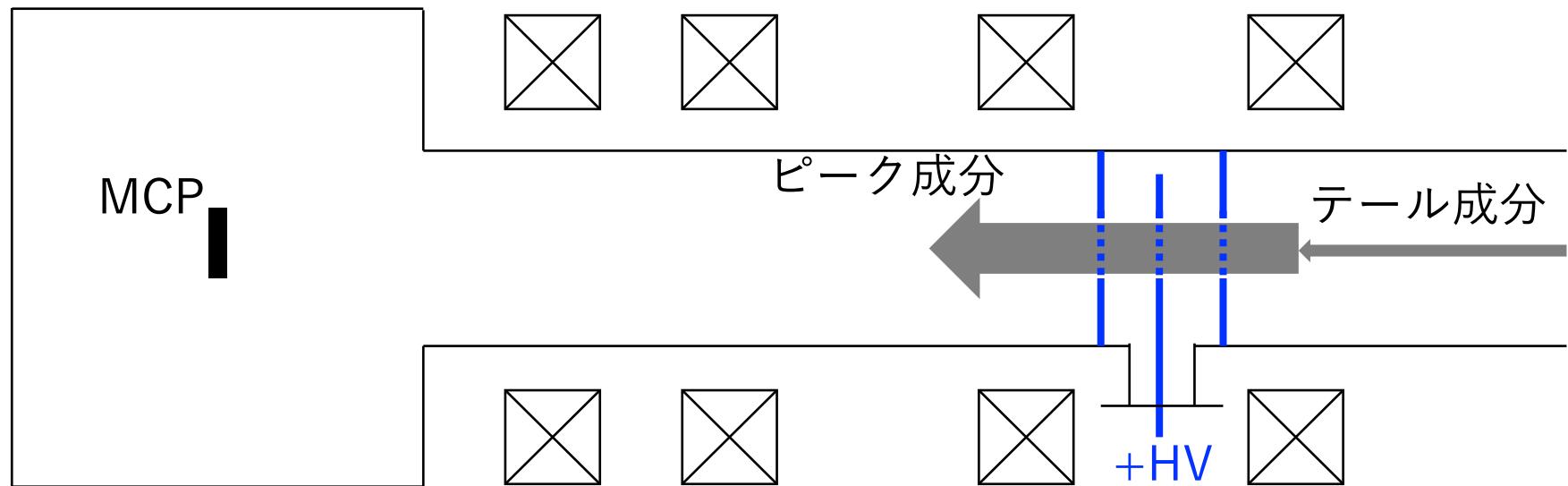
改善項目 1 時間幅が狭い陽電子が必要

- レーザー冷却実験では短パルスモード (16 ns 時間幅、50 Hz繰り返し) の陽電子にパルスレーザーを同期させる
- われわれが実験を行うSPF-B1ラインでは短パルスピークの後に200 ns程度の時定数をもつテール成分があることがわかった
- このテール成分が o-Ps の自己崩壊ガンマ線と区別しづらいバックグラウンドになるので除去する

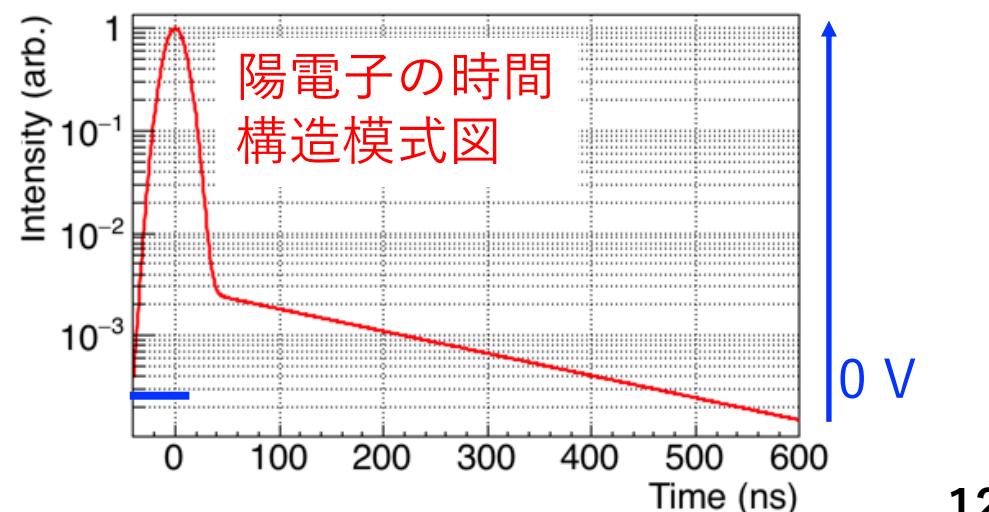


2018年5月のビームタイムで測定した
KEK SPF-B1における陽電子の時間構造
(5 keV, 短パルスモード)

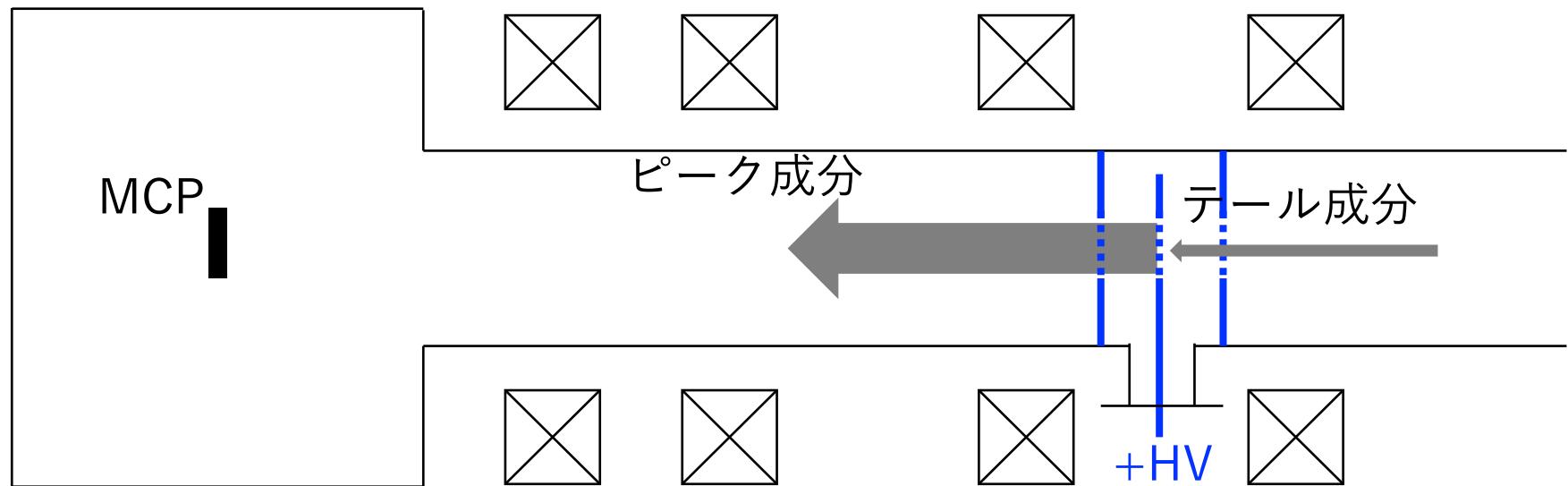
高電圧パルスチョッパーでテール成分をおとす



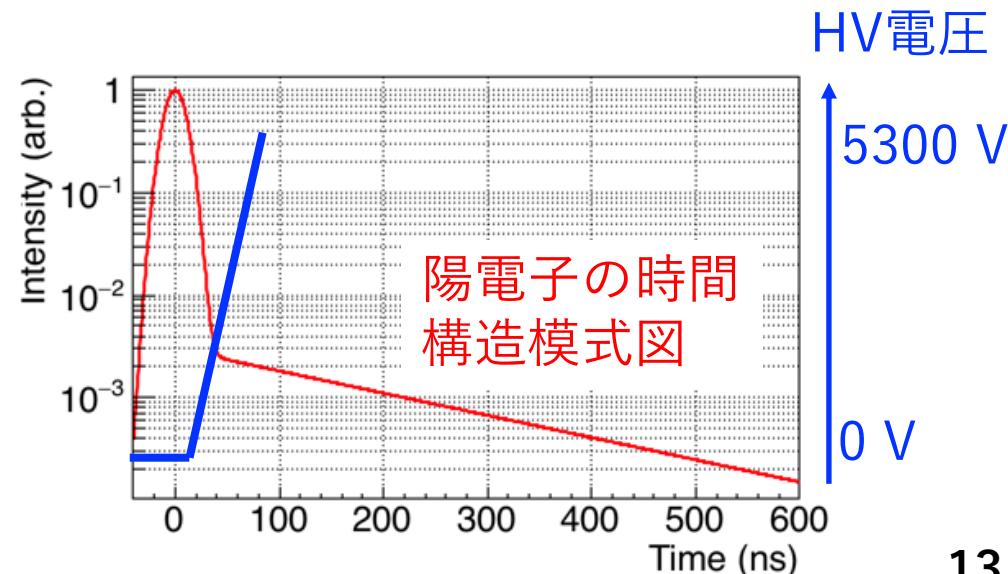
1. ピーク成分を通過させる



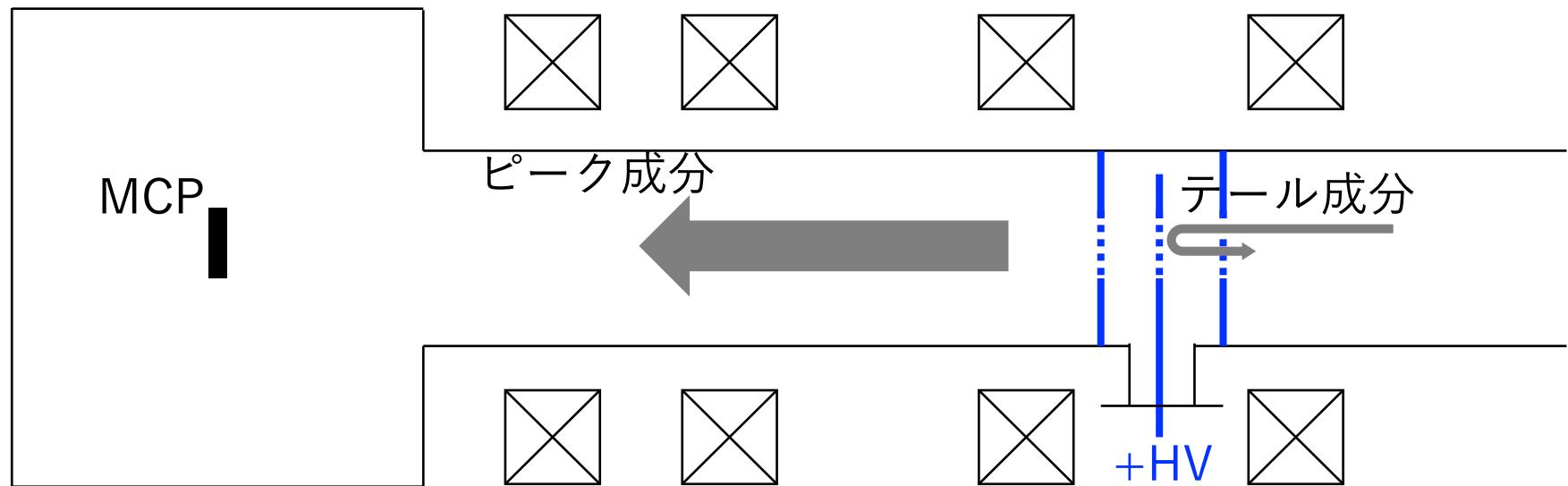
高電圧パルスチョッパーでテール成分をおとす



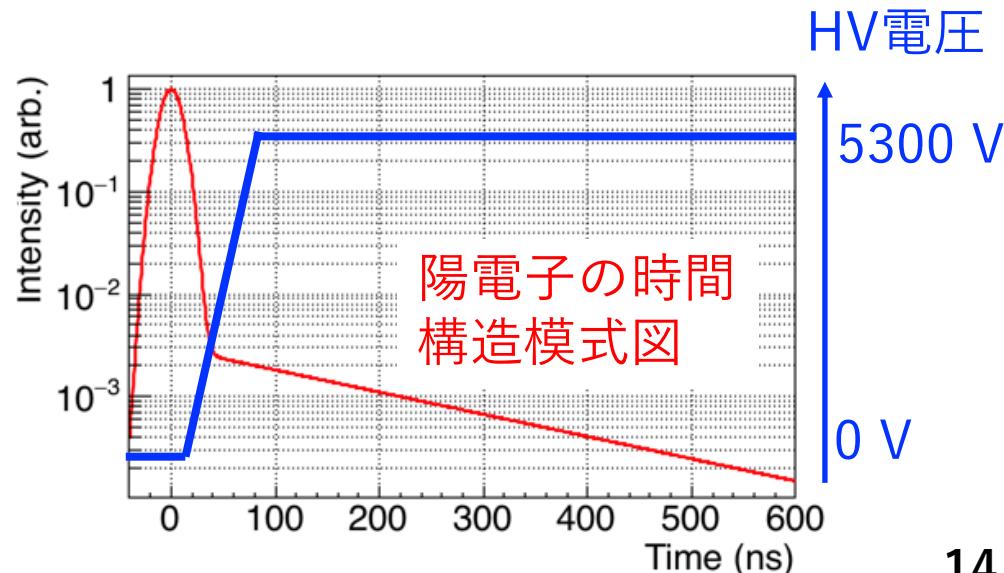
1. ピーク成分を通過させる
2. パルス的に高電圧をかける



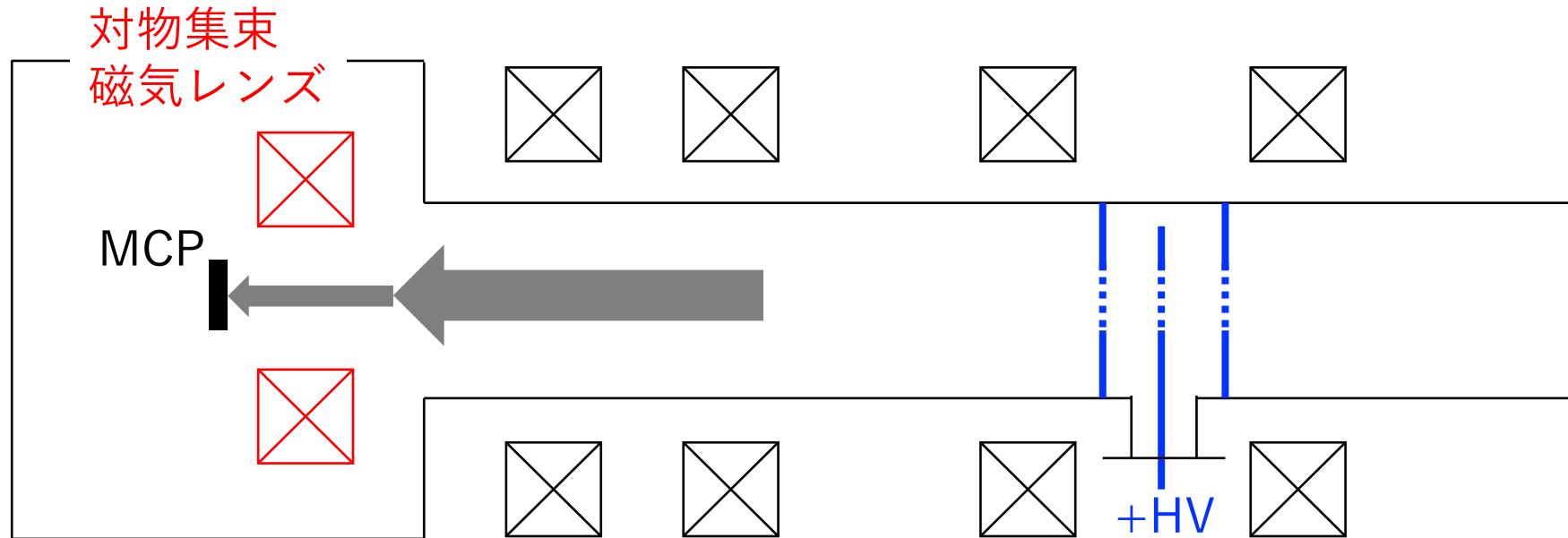
高電圧パルスチョッパーでテール成分をおとす



1. ピーク成分を通過させる
2. パルス的に高電圧をかける
3. テール成分が反射され
ピーク成分のみが得られる



改善項目2 磁気レンズでビーム径を小さく

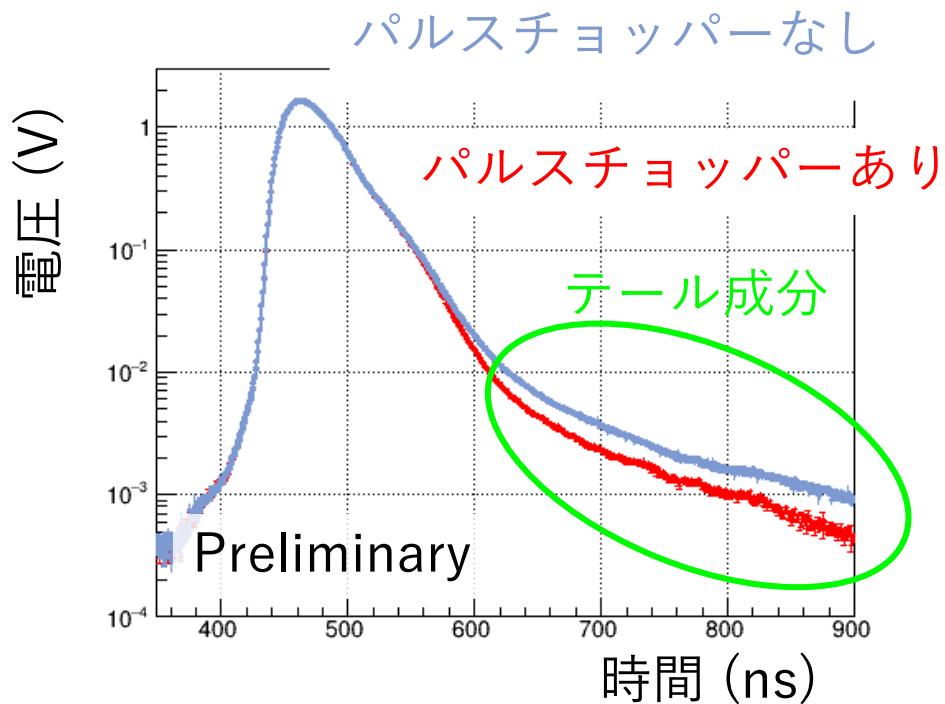


磁気レンズを導入してビーム径を1 mm程度まで集束
レーザーの径と合わせてオーバーラップを良くする

パルスチョッパーの動作確認 テール量の減少に成功

11/26-29のビームタイムでテール
のチョッピングを行った

- パルスチョッパーによってテールの量が1/3に減少
- 残っているテールは、プロンプトの量と同期して量が変わる。時定数、エネルギースペクトルから考えると、MCPからの α -Ps飛び出しの可能性がある。
- 12/12~のビームタイムで検証。このときに磁気レンズの評価も行う。



陽電子消滅ガンマ線を $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレータ+PMTで検出した波形平均

まとめ

- Ps-BECのための熱化とレーザー冷却のハイブリッド冷却を実現するには、紫外光に透明かつ 50 - 100 nm 程度の細孔を多数持ったPs生成材料が必要。薄シリカエアロゲル + CVD成膜により材料を作製した。
- 薄シリカエアロゲル + CVD成膜材料を試験し、紫外光透過率、Ps生成率、閉じ込め・濃縮効果がいずれも要求を満たすことを確認した。まずはこの材料を用いて2019年度よりレーザー冷却実験を進める。
- レーザー冷却実験に備え、KEK SPF-B1ビームラインでの陽電子特性（空間・時間分解能）向上に取り組んでいる。