

飛行時間測定による ポジトロニウム生成用試作ナノ材料の性能評価

東大理, 東大素セ^A, 東大工^B, 産総研^C, KEK物構研^D, 量研高崎^E

石田 明, 難波俊雄^A, 浅井祥仁,

田島陽平^B, 小林拓豊^B, 魚住亮介^B, 周 健治^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, 渡邊亮太^C, 伊藤賢志^C,
兵頭俊夫^D, 望月出海^D, 和田 健^D, 前川雅樹^E



<https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~ishida/work/psbec/>
https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page_id=110

令和4年9月12日

日本物理学会 2022年秋季大会 @東京工業大学

謝辞

以下の研究助成を受けています。(終了済のものも含む)

- JST 創発的研究支援事業 JPMJFR202L  創発的研究支援事業
Creative Oriented Research for Disruptive Science and Technology
- JSPS科研費 JP16H04526, JP17H02820, JP17H06205, JP17J03691, JP18H03855, JP19H01923
- 公益財団法人 松尾学術振興財団
- 公益財団法人 三豊科学技術振興協会
- 公益財団法人 光科学技術研究振興財団
- 公益財団法人 三菱財団
- TIA連携プログラム探索推進事業「かけはし」TK17-046, TK19-016
- 【文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)】
JPMXS0118067246

<https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~ishida/work/psbec/>
https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page_id=110

目次

1. ポジトロニウム (Ps) のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)
 - 反物質の新量子多体系である低温量子凝縮相＝反物質レーザーを実現
2. Ps-BEC 実現スキームと高密度Ps生成材
3. 飛行時間測定による試作ナノ材料の性能評価

ポジトロニウムのボース・アインシュタイン凝縮

Ps-BEC = 反物質レーザーを実現したい

ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

- 集団中のほぼすべての原子が
単一の量子状態になる
- 原子は 高密度 かつ 冷たい

Ps の寿命 142 ns 程度で
超高密度化 +
熱化 & 高速レーザー冷却

通常の物質:

- 超伝導
- 超流動

反物質は？

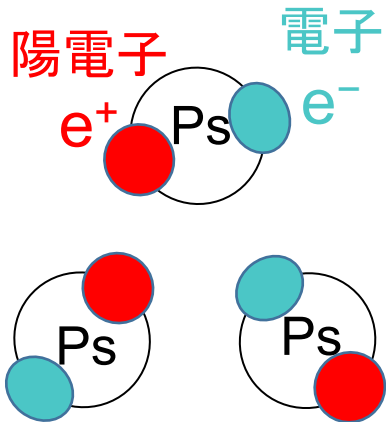


反物質レーザー

Ps-BEC
(量子凝縮体)

10^{18} cm^{-3}

10 K



反物質原子

ポジトロニウム(Ps)
(古典極限系)

10^{15} cm^{-3}

150 K

基礎科学研究や次世代光源への
応用可能性

1. 反物質に働く重力を原子干渉計を用いて測定
2. 511 keV ガンマ線レーザー

BEC: K. Shu *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **49**, 104001 (2016).

熱化: K. Shu *et al.*, Phys. Rev. A **104**, L050801 (2021)

Ps 生成・濃縮・冷却の 3 機能をもつ 高度機能性無機酸化物ナノ反応器を開発し、 高密度 Ps を生成する(3つの手法を紹介)

機能① 陽電子から
高効率で Ps を生成
(generator)
→ 生成率 50 % 以上

機能② Ps を高密度に濃縮 (condenser)
(+ 熱化冷却) → 100 nm 細孔

無機酸化物多孔体中の細孔

高密度偏極陽電子
(e^+) ナノ秒バンチ

$1.5 \times 10^8 e^+$, 5 keV
を多段輝度増強
システムで
 $\phi 6 \mu\text{m}$ に集束

冷えた Ps

冷却用 243 nm
紫外レーザー

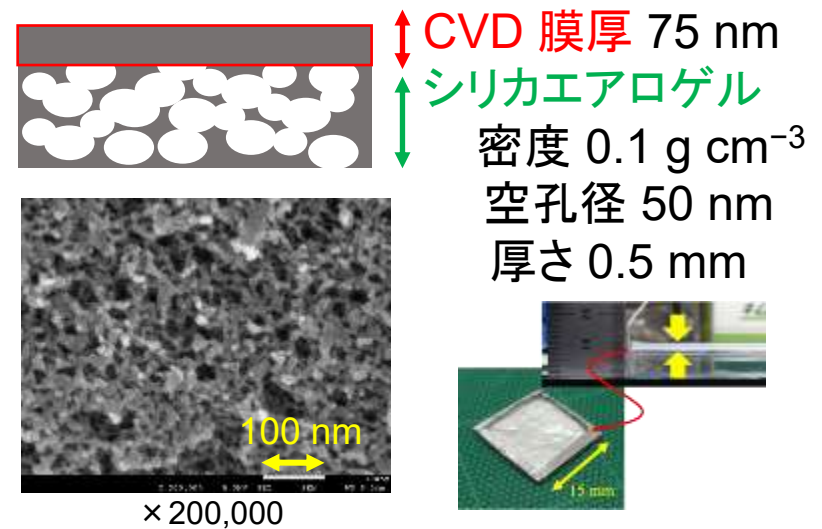
ガンマ線

レーザー冷却
(1S→2P)

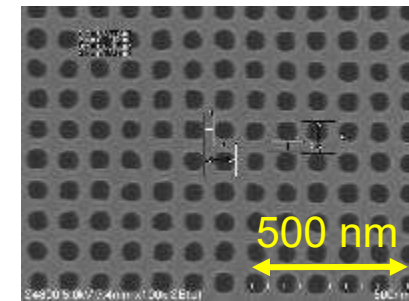
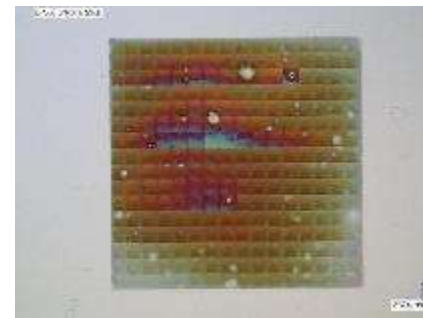
機能③ Ps 冷却 (cooler) (レーザー冷却)
→ 紫外光透過率 80 % 以上

2021 年秋までに紹介した 3 手法のうちの 2 手法と、シリカナノ粒子を用いた手法によって、Ps 生成サンプルを試作した

- ① シリカエアロゲルの表面に緻密なシリカ層をプラズマ CVD で成膜したサンプルをシリカキャビティとして使用 ⇒ 別途行っている Ps レーザー冷却実証実験にも用いる。Ps-TOF によるエネルギー分布と、レーザーによるドップラー分布測定で得られた速度分布を比較したい。



- ② ナノプロセシング技術を駆使した手法 ⇒ 薄い細孔壁を達成するため、電子ビーム描画の条件出しを行っている。



- ③ 規則配列シリカナノ粒子を用いた手法 ⇒ 粒径の揃った球状シリカナノ粒子の間隙を Ps-BEC 実現ナノ反応器として用いる。(次ページ)

③ 規則配列シリカナノ粒子 (SNS) on ガラス基板

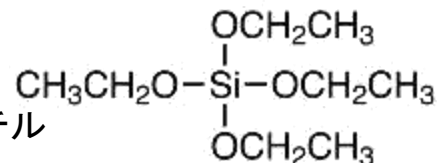
(作製例)

Formation of seeds

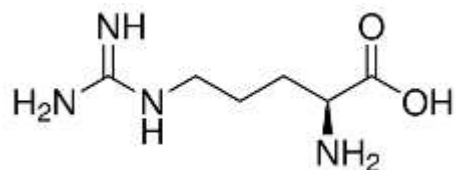
TEOS

テトラエトキシシラン

オルトけい酸テトラエチル



L-アルギニン
(S)-2-アミノ-5-グアニジノペンタン酸



L-Arginine

水

343 K
Stirring, 24 h

Dispersion of silica nanospheres
(SNSs)

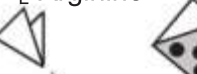


Seeds dispersion

Regrowth of seeds

L-Arginine

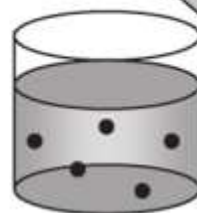
Seeds dispersion



H₂O + EtOH

r.t.

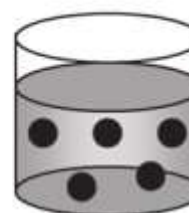
Stirring



TEOS

343 K

Stirring, 24 h

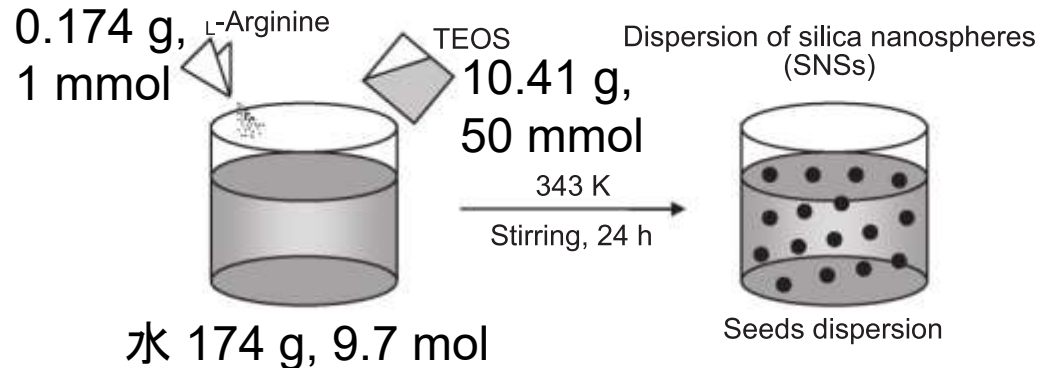


③ 規則配列シリカナノ粒子 (SNS) on ガラス基板

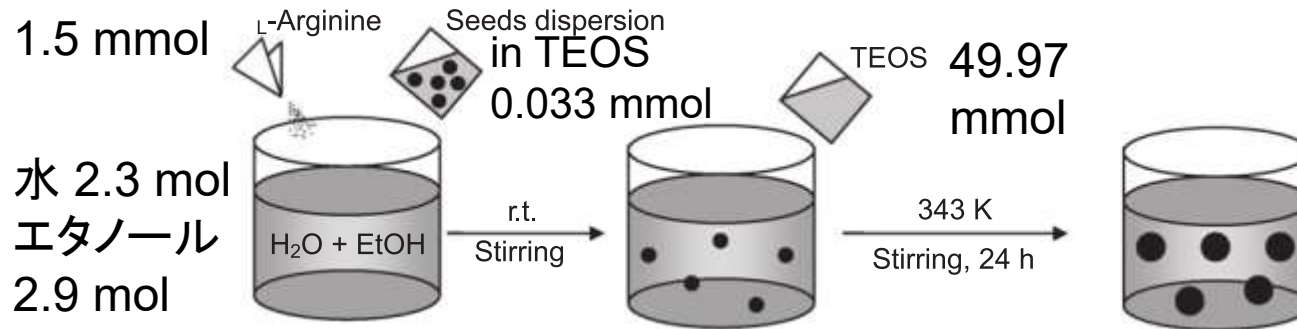
産総研陽電子ビームで試作サンプルでの o-Ps 生成を確認。
KEK-SPF における Ps-TOF 測定データを解析中。

(作製例)

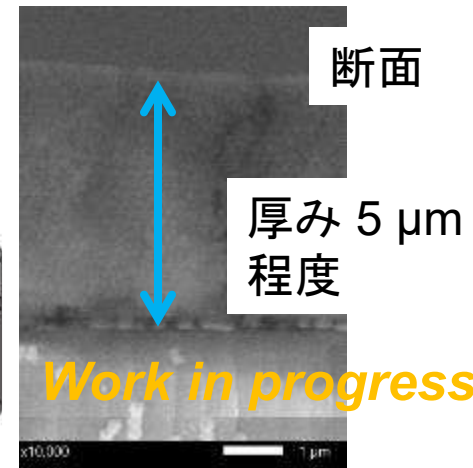
Formation of seeds



Regrowth of seeds



試作材料の SEM 像



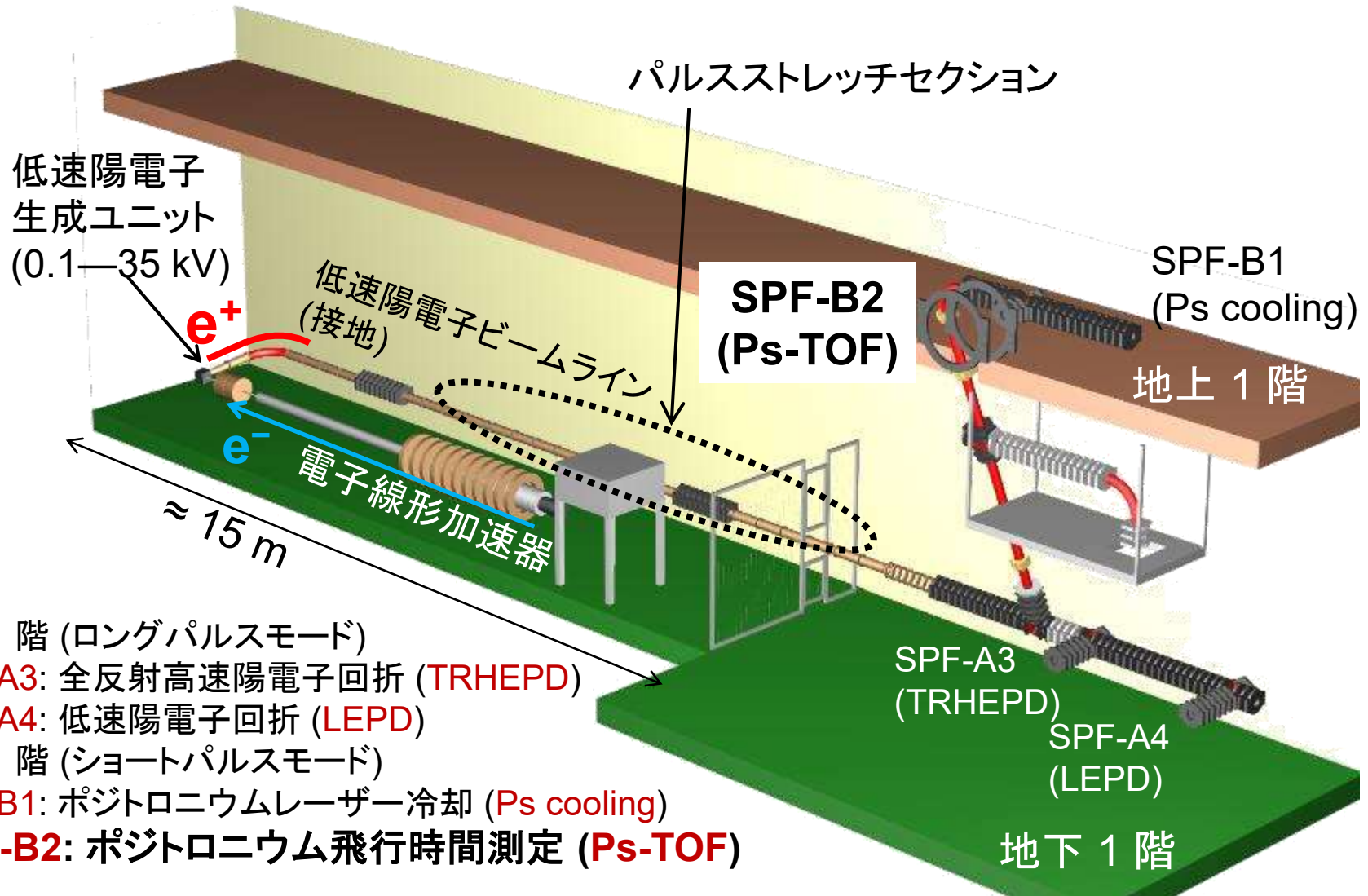
ホウケイ酸ガラス基板 (18 mm × 18 mm, 約0.15 mm厚) に塗布し, 室温で溶媒を蒸発, 873 K のオーブンで焼成 → 粒径 200 nm (空孔径約 50 nm) のシリカナノ粒子

R. Watanabe *et al.*, J. Colloid Interface Sci. **360** (2011) 1.

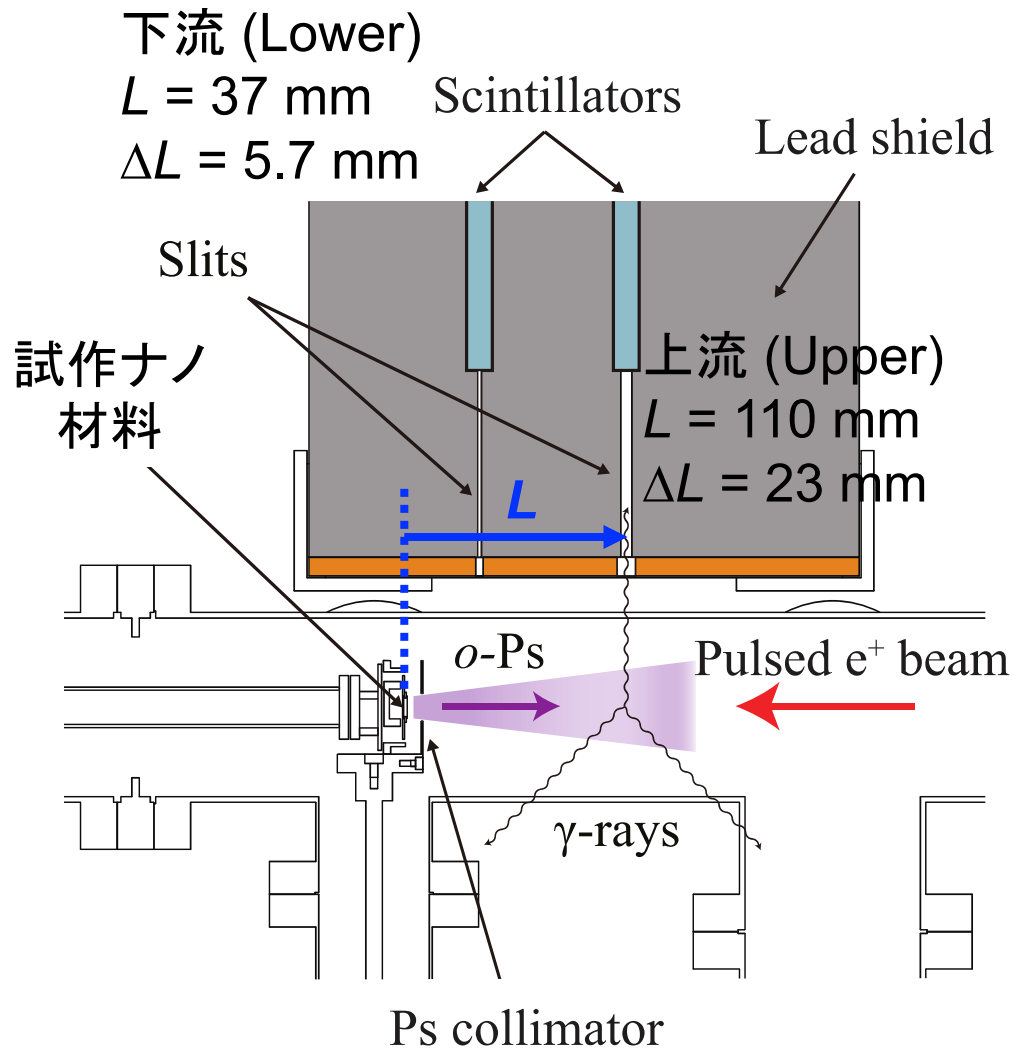
高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

物質構造科学研究所 (IMSS)

低速陽電子実験施設 (SPF)



ポジトロニウム飛行時間測定 (Ps-TOF)



- 陽電子照射 = Ps生成からガンマ線検出までの時間 t を測定。
- 鉛スリットで制御した距離 L (Ps が検出される最短距離で記載) と時間 t から, Ps のエネルギー E が求まる。

$$E = \frac{m_{\text{Ps}} L^2}{2t^2}.$$

(m_{Ps} は Ps 質量 = $2 m_e$)

- 検出器が見込む長さ ΔL を飛行する間に崩壊した Ps だけが検出される。Ps 寿命を τ とすると、以下の効率 ε がかかるので、補正する。

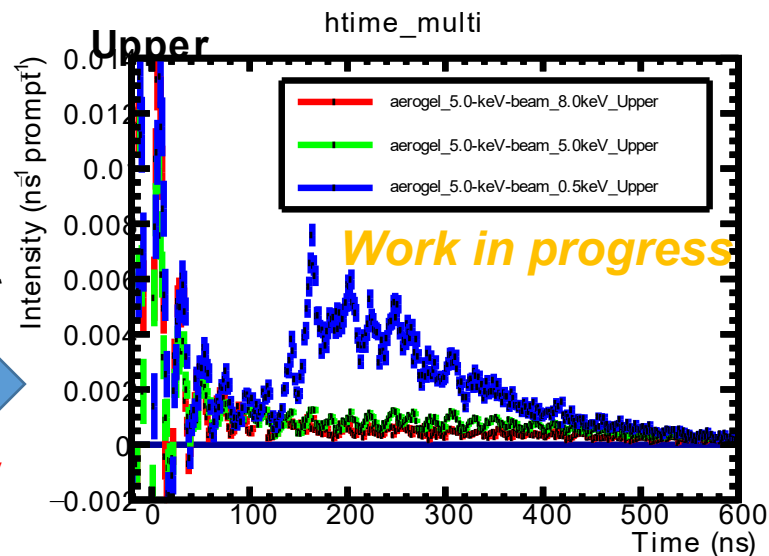
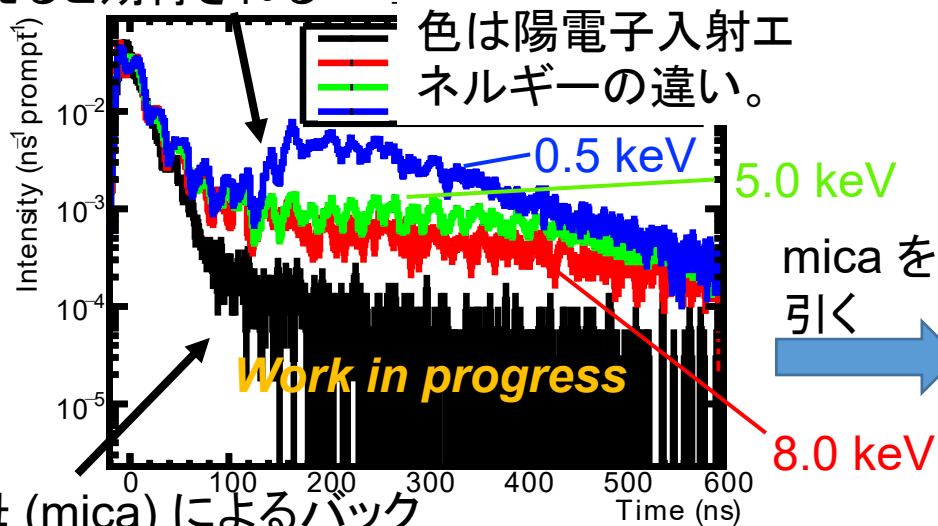
$$\varepsilon = \frac{t \Delta L}{\tau L} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right).$$

S. Iida, K. Wada, I. Mochizuki, T. Tachibana, T. Yamashita, T. Hyodo and Y. Nagashima, J. Phys.: Condens. Matter **28** (2016) 475002.

エッジ：
表面でできた Ps
のエネルギーが見
えると期待される

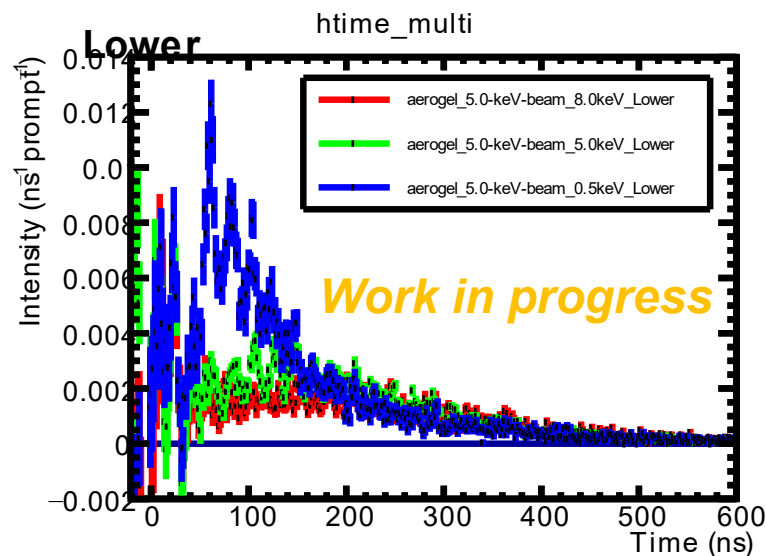
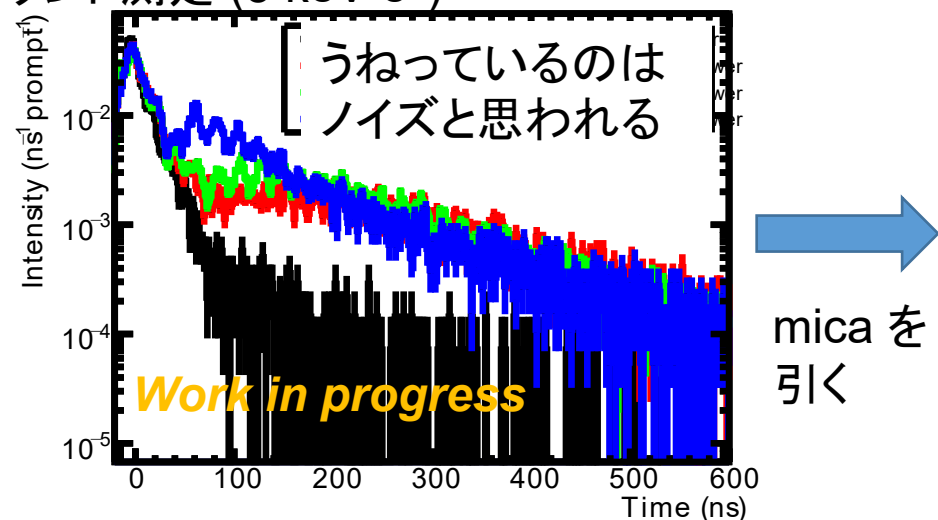
① シリカエアロゲル ガンマ線検出時間スペクトル

上流



雲母 (mica) によるバック
グラウンド測定 (5 keV e⁺)

下流

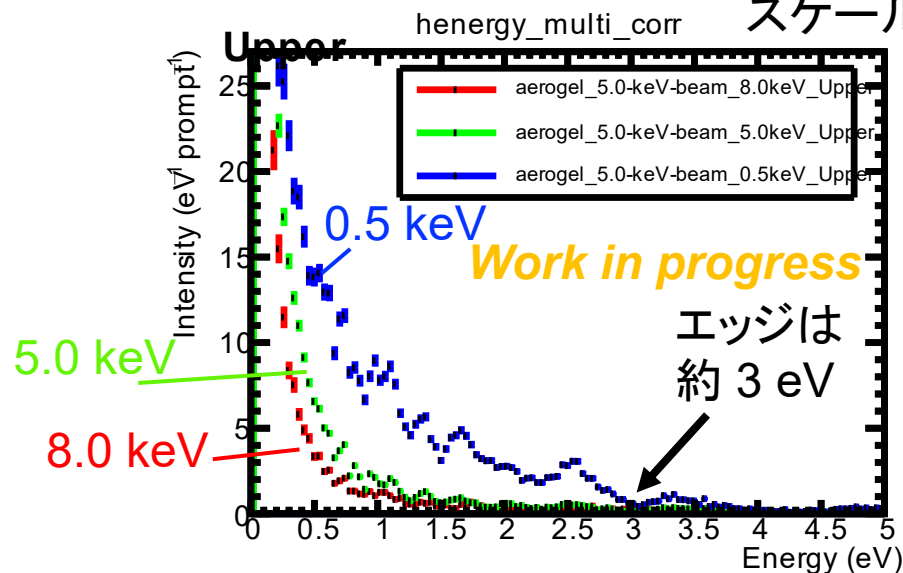
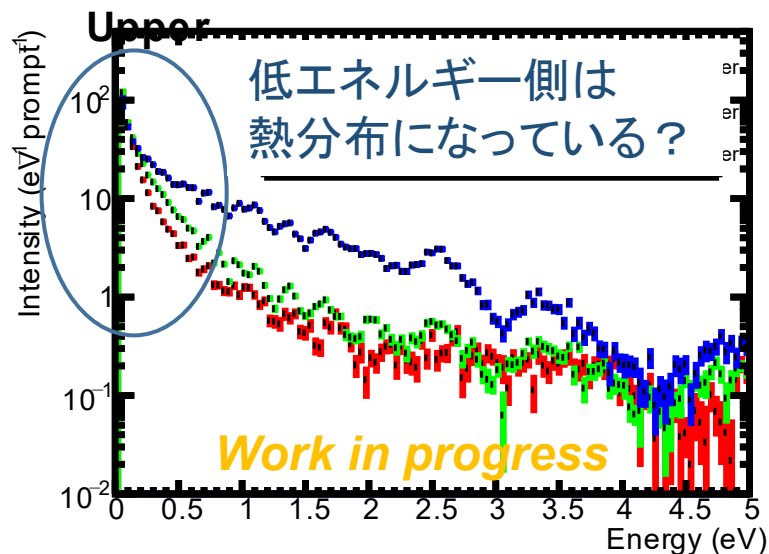


① シリカエアロゲル エネルギースペクトル

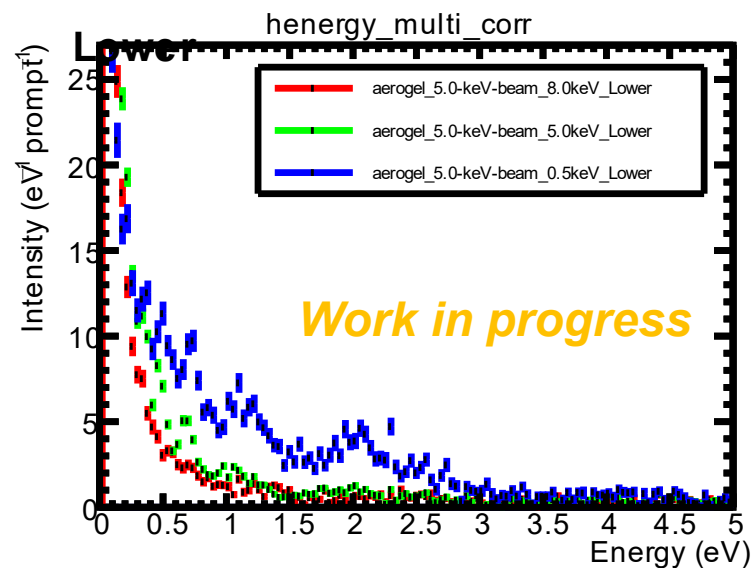
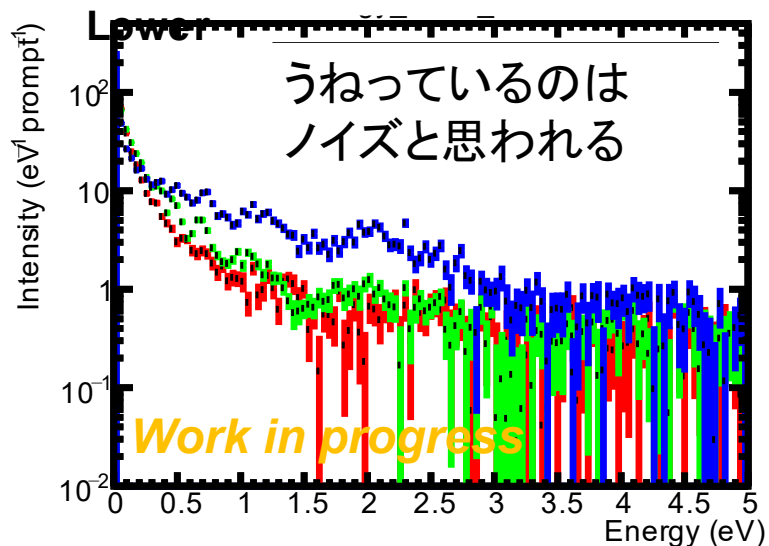
縦軸対数
スケール

縦軸リニア
スケール

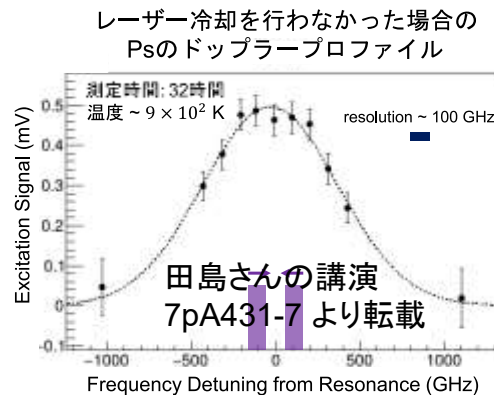
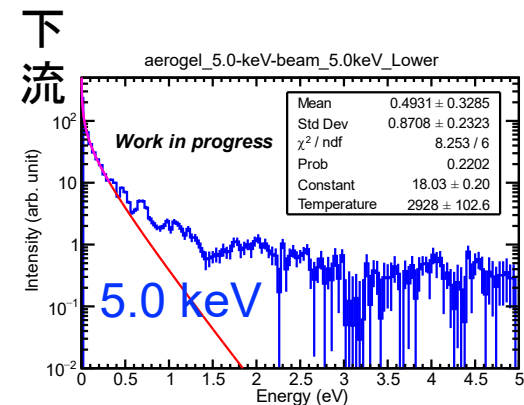
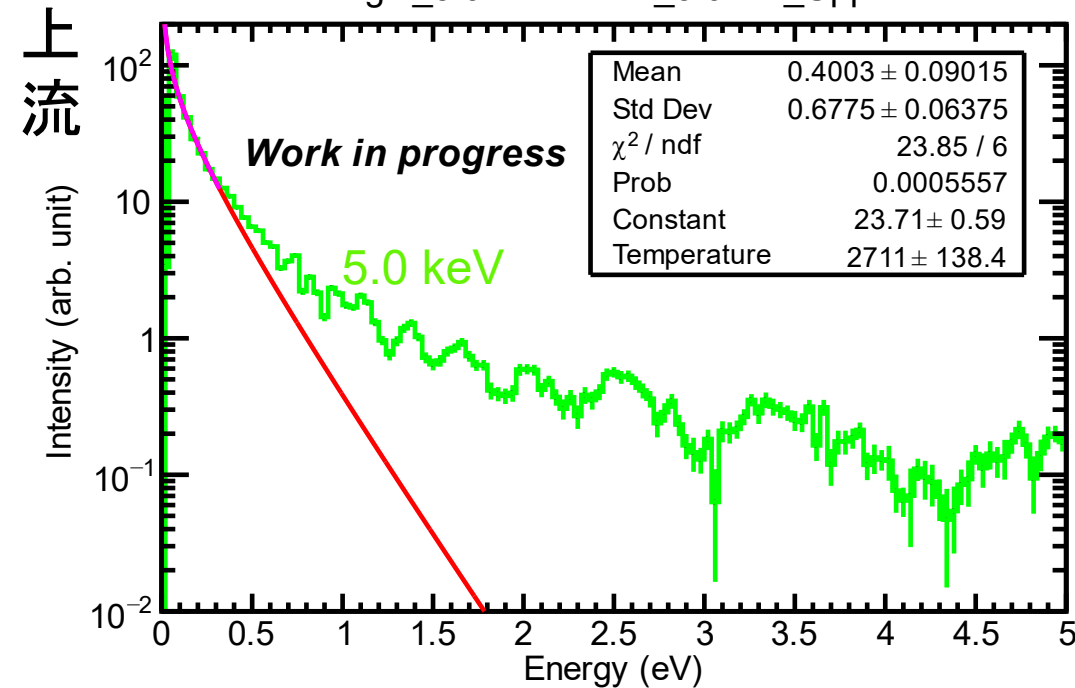
上流



下流



① シリカエアロゲル 低エネルギー側の熱分布フィット(暫定)



- 低エネルギー側が温度 T の Maxwell-Boltzmann 分布になっていると仮定し、以下で暫定フィット。

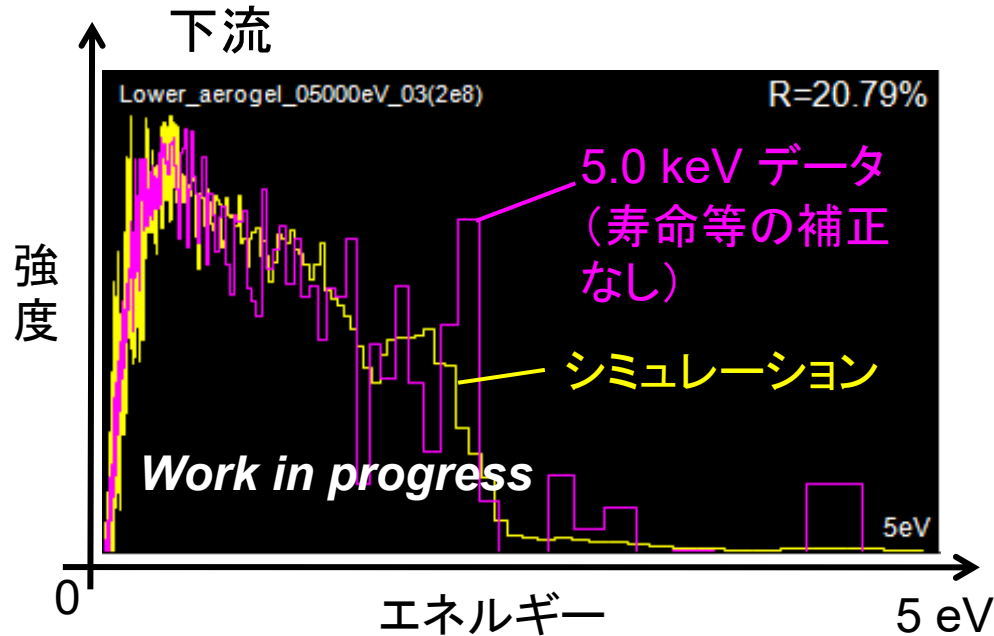
$$f(E) = \frac{\text{const}}{\sqrt{\pi E k_B T}} \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right).$$

(k_B はボルツマン定数)

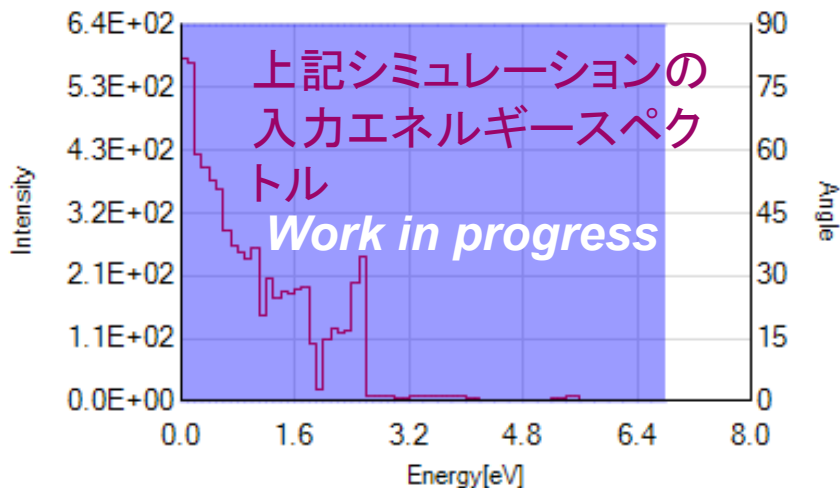
- 0 eV—0.32 eV でフィットした暫定結果は、上下流で一致。
上流: $T = 2710 \pm 140$ K,
下流: $T = 2930 \pm 100$ K.
- サンプル表面と平行な向きにレーザーを照射してドップラー分布を測定した結果は、約 900 K(講演 7pA431-7)。違いの原因は検討中。

① シリカエアロゲル

モンテカルロ・シミュレーションを用いた解析を進行中

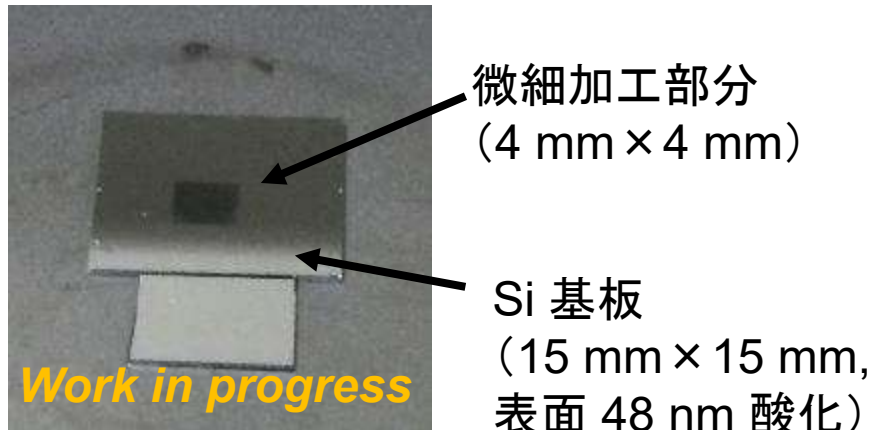
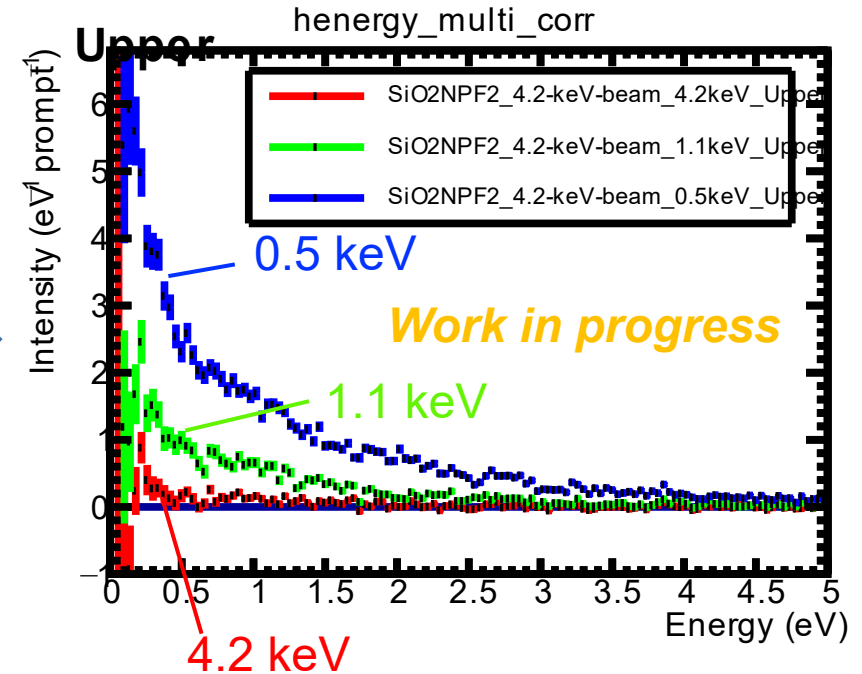
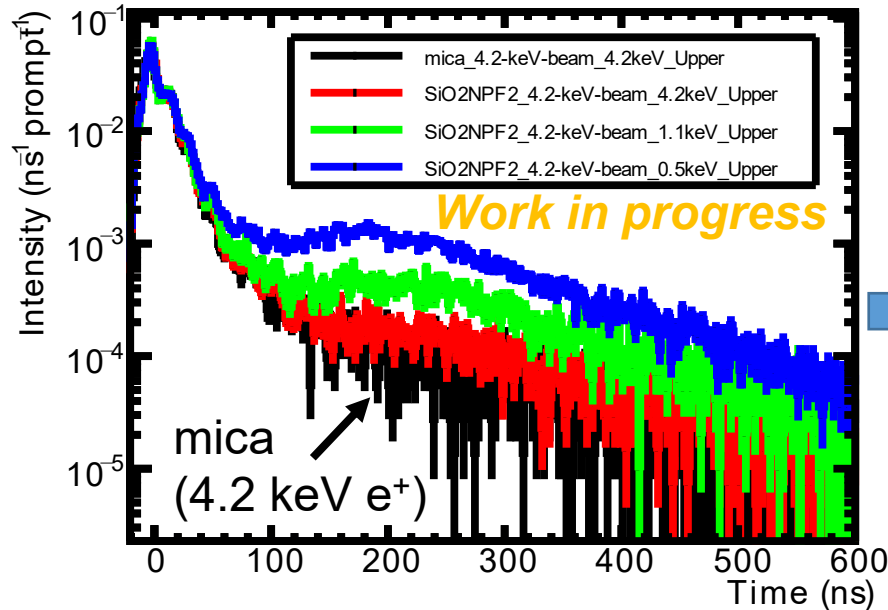


- より正確にエネルギースペクトルを評価するため、モンテカルロ・シミュレーションを用いた解析を進めている。



② ナノプロセッシングを用いた手法 酸化膜で生成された Ps を確認

上流



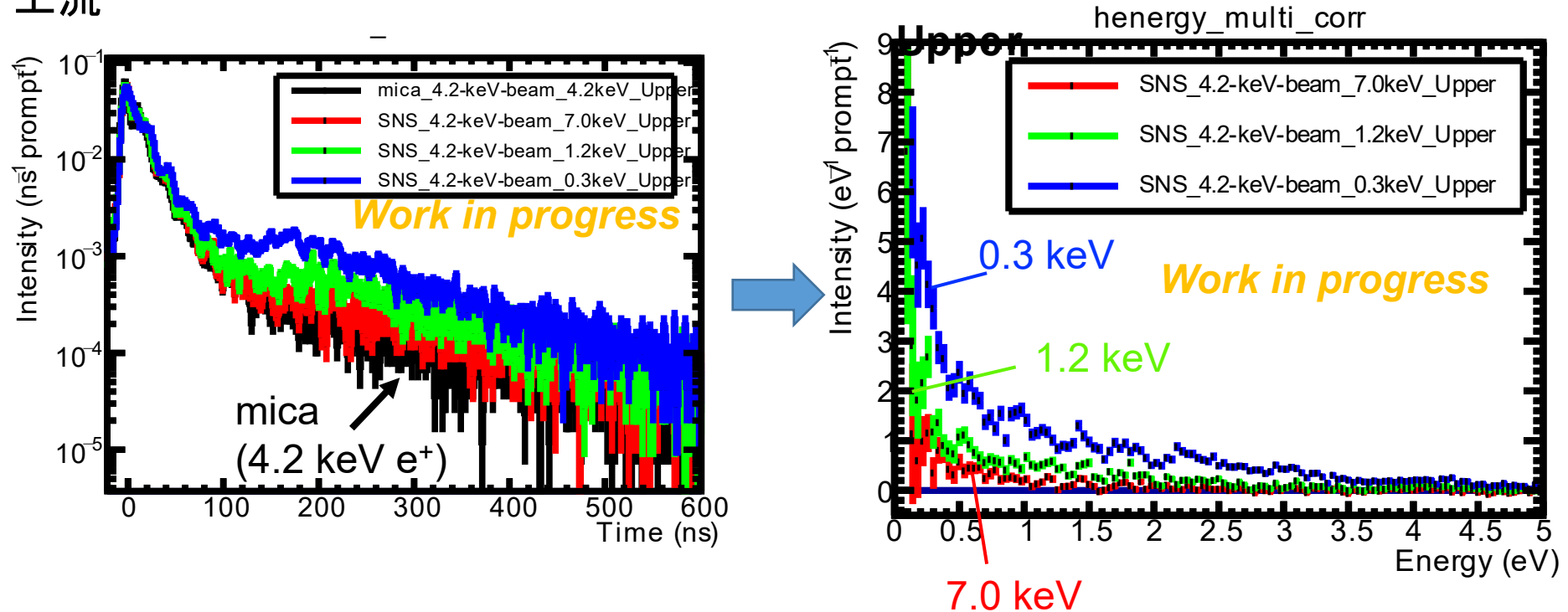
陽電子ビームは微細加工部分を中心に照射。

Si 基板に線幅 30 nm—40 nm, ピッチ 100 nm, 溝深さ 190 nm の格子状構造を作成したのち、表面を酸化したもの。

今後, Ps 生成率の評価を進める。

③ 規則配列シリカナノ粒子 Ps 生成を確認

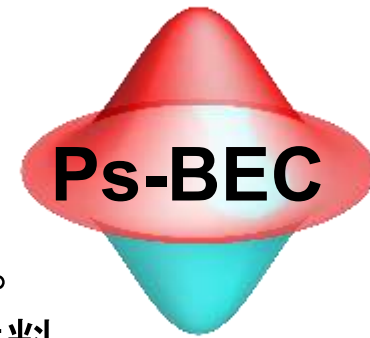
上流



産総研陽電子ビームによる測定でも Ps 生成を確認している。
今後はこれら取得済データおよび今後の測定により、

- Ps 生成率の評価
- 空孔径と Ps 寿命の評価
- Ps 閉じ込め手法を含めた最適な構造の検討を進めていく。

まとめ



1. Ps-BEC を実現して世界初の反物質レーザーを作りたい。
2. ナノ細孔中で Ps をレーザー冷却する Ps-BEC 実現スキーム。
3. 高密度 Ps 生成材について、以下の手法により試作したナノ材料の Ps-TOF 測定を行い、いずれの材料でも Ps 生成を確認した。
 - シリカエアロゲル
 - ナノプロセッシング
 - 規則配列シリカナノ粒子
4. 今後、データのさらなる解析や追加測定により試作ナノ材料の詳細な性能評価を行い、BEC 実現に最適な Ps 生成材を開発する。

関連講演:

9/7(水) 素粒子実験領域: 7pA431-6, 7pA431-7

次の講演(機械学習を用いた検出器信号の解析)

9/14(水) 領域1: 14pW933-2(レーザー冷却)

<https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~ishida/work/psbec/>
https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page_id=110