

# ボース・アインシュタイン凝縮を目指した 高密度ポジトロニウム生成材料の開発

東大理, 東大素セ<sup>A</sup>, 東大工<sup>B</sup>, 産総研<sup>C</sup>, 九大GIC<sup>D</sup>,  
KEK物構研<sup>E</sup>, 原子力機構<sup>F</sup>, 高麗大学<sup>G</sup>

石田 明, 橋立佳央理, 難波俊雄<sup>A</sup>, 浅井祥仁, 五神 真,  
田島陽平<sup>B</sup>, 小林拓豊<sup>B</sup>, 魚住亮介<sup>B</sup>, 周 健治<sup>B</sup>, 蔡 恩美<sup>B,G</sup>, 吉岡孝高<sup>B</sup>,  
大島永康<sup>C</sup>, オロークブライアン<sup>C</sup>, 満汐孝治<sup>C</sup>, 伊藤賢志<sup>C</sup>, 熊谷和博<sup>C</sup>, 鈴木良一<sup>C</sup>,  
藤野 茂<sup>D</sup>, 兵頭俊夫<sup>E</sup>, 望月出海<sup>E</sup>, 和田 健<sup>E</sup>, 甲斐健師<sup>F</sup>



[https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page\\_id=110](https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page_id=110)

令和3年9月21日

日本物理学会2021年秋季大会@オンライン開催

# 8機関、21名で共同研究

- 東大理・素粒子センター

研究総括



石田など

- 東大工 吉岡など

レーザー開発



- 高麗大学 蔡



- 産総研 分析計測標準研究部門

大島など

高輝度陽電子ビーム開発



- 産総研 物質計測標準研究部門 伊藤など

Ps 生成・濃縮・冷却材開発

- 九大工 藤野



- KEK 物構研 和田など

KEK-SPF における実験



- 日本原子力研究開発機構 甲斐

高密度粒子MC



# 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)

- 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

2021年度より、JST 創発的研究支援事業 の支援を受けています。

サンプル作成にあたり、産総研ナノプロセッシング施設 (AIST-NPF) のご協力をいただいております。

[https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page\\_id=110](https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page_id=110)

# 目次

- ポジトロニウム (Ps) のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) の目的:
  - 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
- Ps-BEC 実現スキーム
- Ps 生成・濃縮・冷却材の開発状況
  - シリカエアロゲル
  - ナノインプリント
  - ナノプロセッシング

# 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

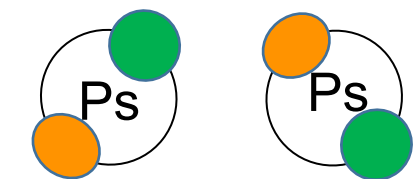
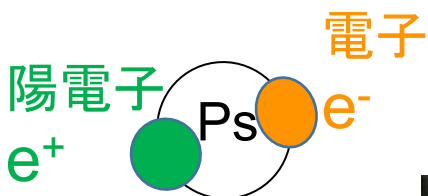
ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

- 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 冷たく かつ 高密度

通常物質 :

- 超伝導
- 超流動

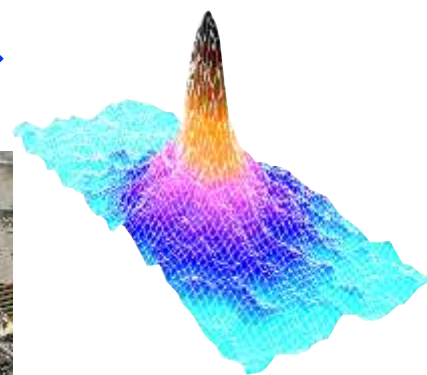
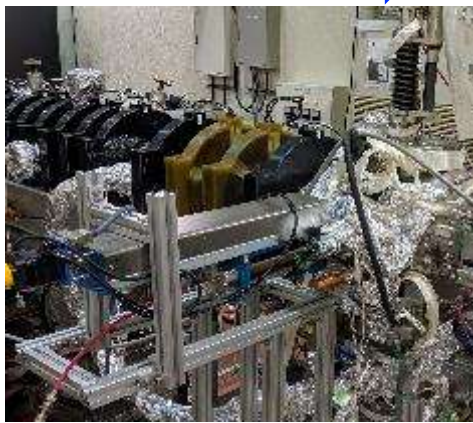
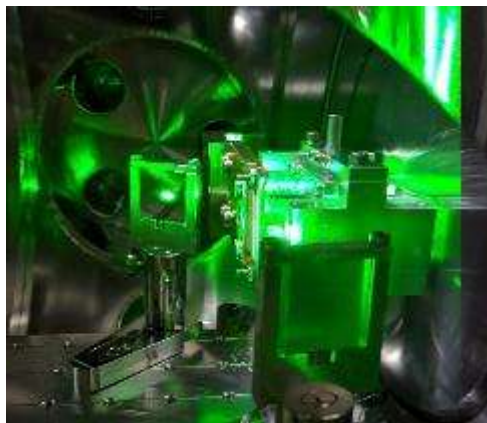
反物質は？



反物質

ポジトロニウム(Ps)  
(古典極限系)

レーザー冷却 + 超高密度化



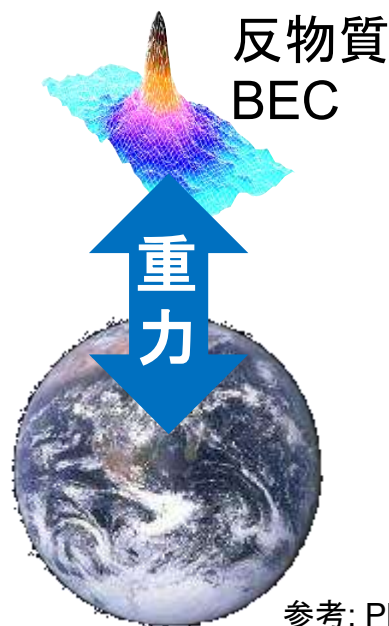
反物質

新量子多体系

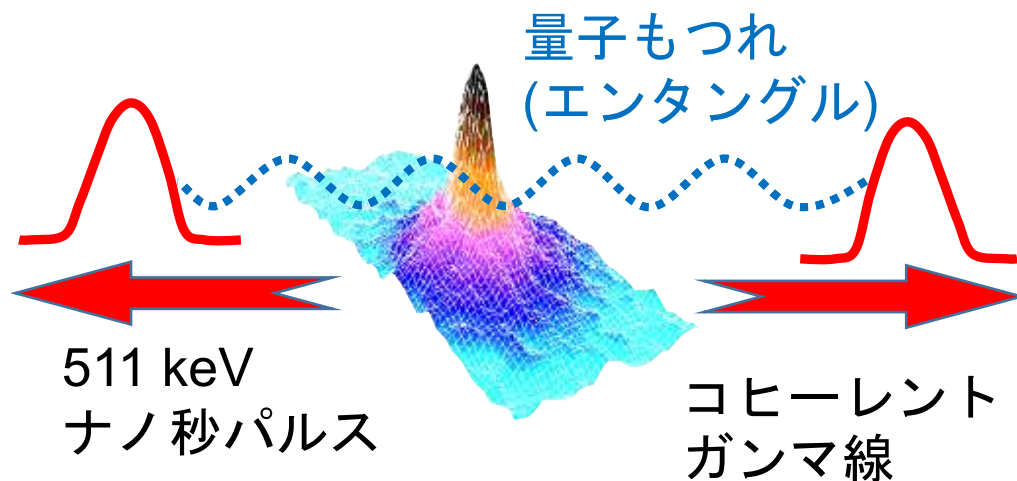
Psのボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

# 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



参考: Phys. Rev. A 92(2015)023820

⇒ 重力という 実験的に未探索の切り口で物質・反物質の未知の非対称性を探り、  
「なぜ、宇宙に物質のみ残ったのか」  
という問いに答える

⇒ 光科学研究、  
光・光衝突型素粒子実験、  
産業・医療応用

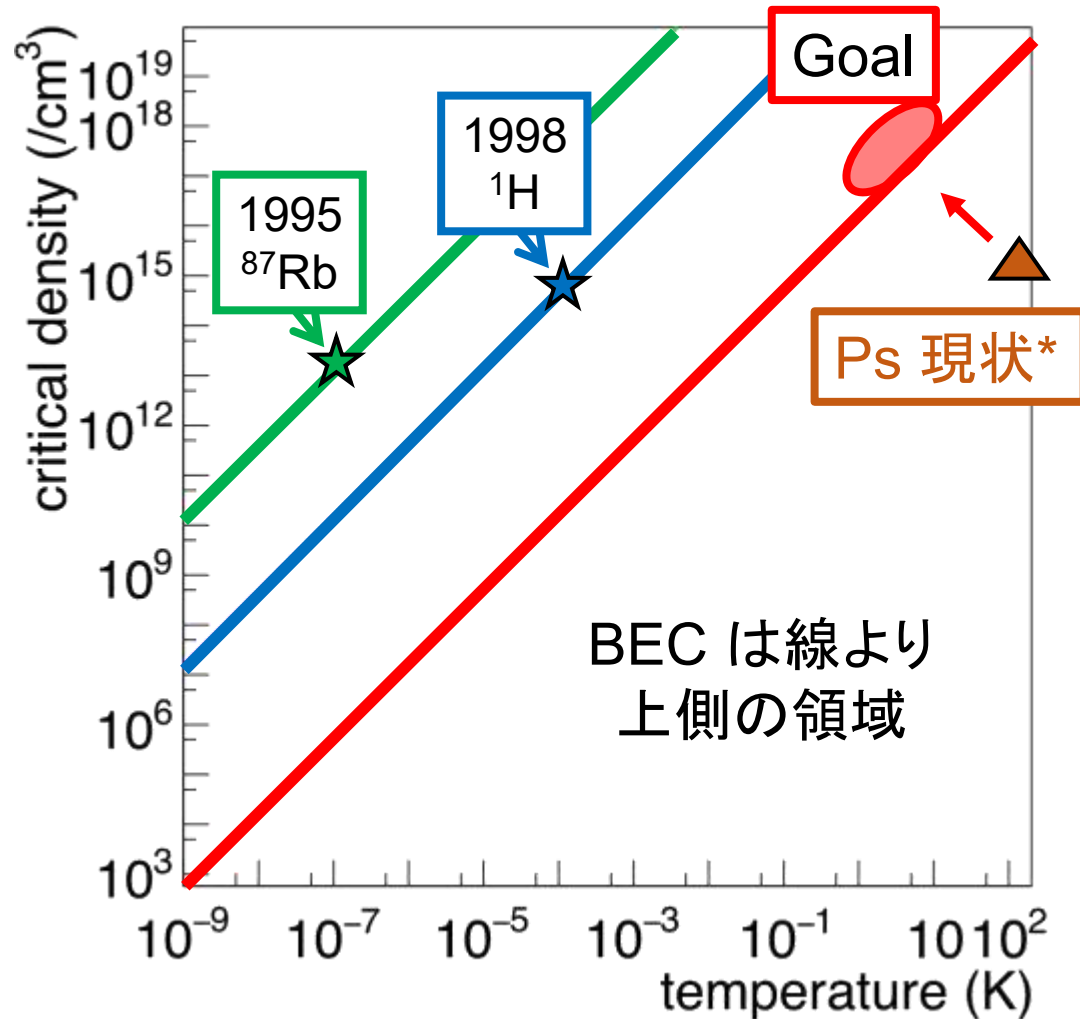
# 2つのチャレンジ: Ps の高密度化と高速冷却

## 最大の問題

Ps は寿命が142 ns と  
短い

## 2つの課題

1. 瞬間的な高密度 Ps の生成  
< 50 ns で  $> 10^{18} \text{ cm}^{-3}$   
(現状:  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ )
2. Ps の高速冷却  
~300 ns で  $< 10 \text{ K}$  に冷却  
(現状: 150 K)



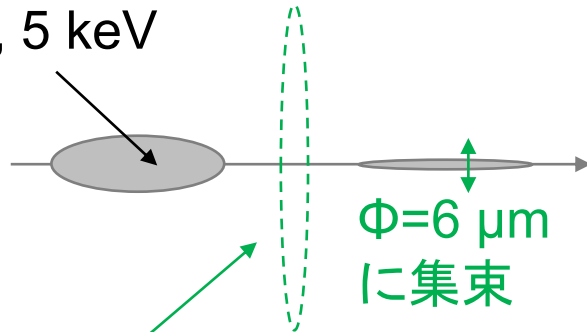
\* : S. Mariuzzi *et al.* Phys. Rev. Lett. **104**(2010)243401,  
D. Cassidy *et al.* physica status solidi **4**(2007)3419.

# Ps-BEC 実現スキーム

## 1. 陽電子集束システム

ナノ秒偏極陽電子バンチ

$1.5 \times 10^8 e^+$ , 5 keV



1. 多段輝度増強システム

高密度陽電子バンチ生成

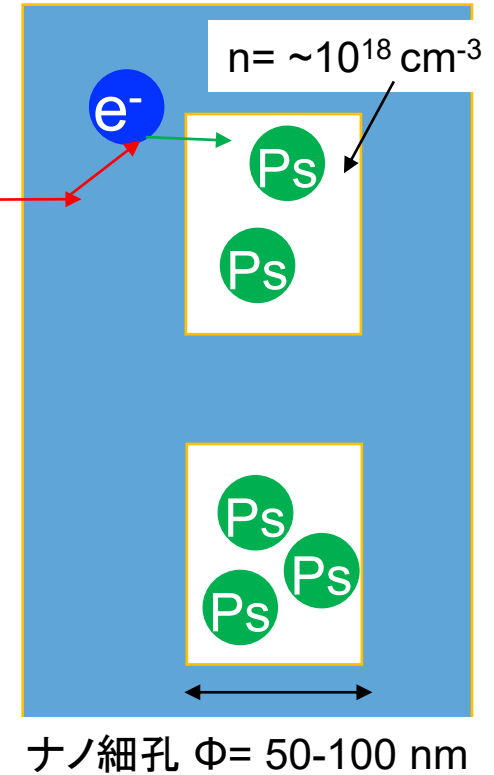


# Ps-BEC 実現スキーム

1. 陽電子集束システム
2. Ps 生成・濃縮・冷却材

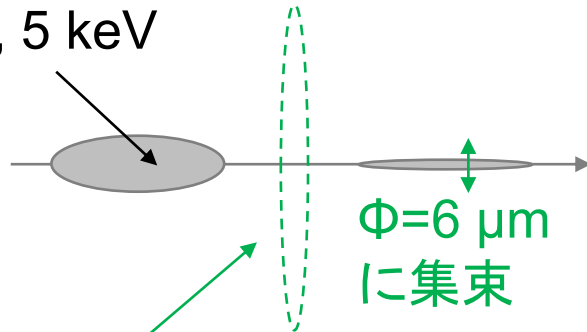
拡大図

冷凍機で 4 K まで冷却



2.  $e^+ \rightarrow \text{Ps}$  生成・濃縮・冷却  
無機酸化物多孔体

ナノ秒偏極陽電子バンチ  
 $1.5 \times 10^8 e^+, 5 \text{ keV}$



$\Phi = 6 \mu\text{m}$   
に集束

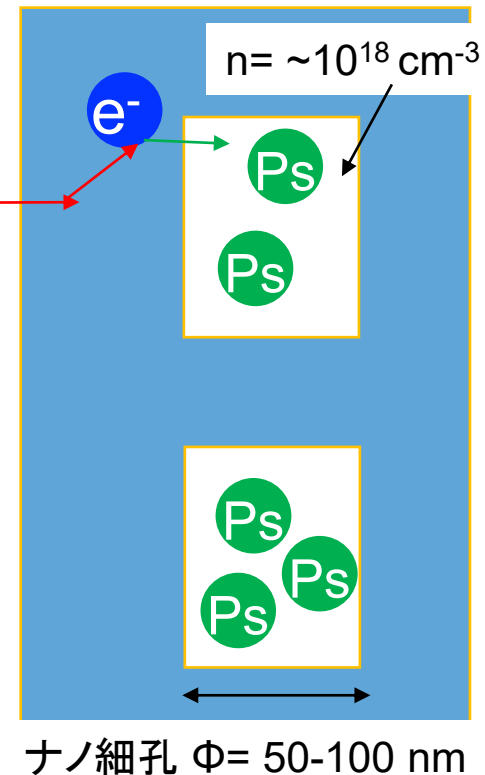
1. 多段輝度増強システム  
高密度陽電子バンチ生成

# Ps-BEC 実現スキーム

1. 陽電子集束システム
2. Ps 生成・濃縮・冷却材
3. Ps レーザー冷却

拡大図

冷凍機で 4 K まで冷却



ナノ秒偏極陽電子バンチ  
1.5x10<sup>8</sup> e<sup>+</sup>, 5 keV

Φ=6 μm  
に集束

1. 多段輝度増強システム  
高密度陽電子バンチ生成

243nm  
紫外レーザー

3. Ps レーザー冷却  
(1S-2P 遷移を使用)

2. e<sup>+</sup> → Ps 生成・濃縮・冷却  
無機酸化物多孔体

A. Ishida *et al.*,  
JJAP Conf. Proc. **7**(2018)011001,  
K. Shu *et al.*,  
J. Phys. B **49**(2016)104001.

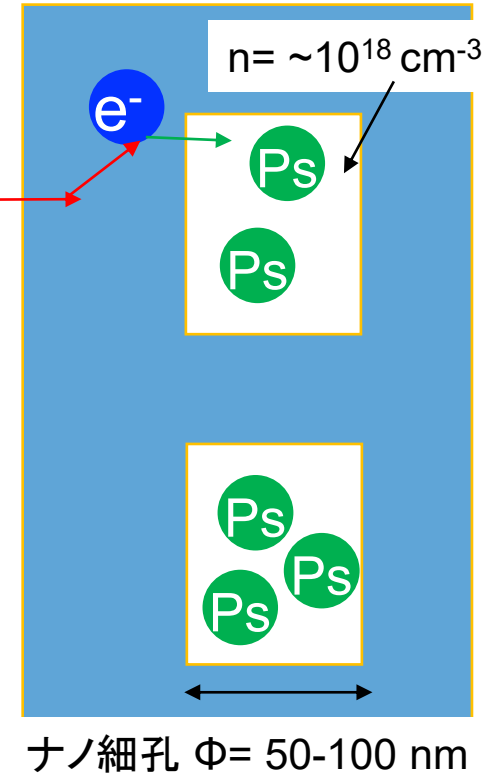
熱化とレーザー冷却を組み合わせるとPsを300 nsで  
Ps-BEC 転移温度を下回る 10 K まで冷却可能(シミュレーション) 21pK2-2

# Ps-BEC 実現スキーム

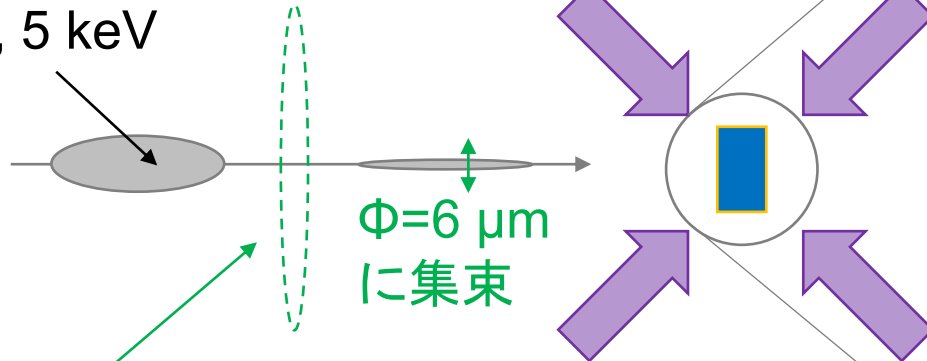
1. 陽電子集束システム ← **2020年秋**
2. Ps 生成・濃縮・冷却材 ← **本日**
3. Ps レーザー冷却 ← **素粒子実験, 17aT2-6**

拡大図

冷凍機で 4 K まで冷却



ナノ秒偏極陽電子バンチ  
 $1.5 \times 10^8 e^+$ , 5 keV



1. 多段輝度増強システム  
 高密度陽電子バンチ生成

3. Ps レーザー冷却  
 (1S-2P 遷移を使用)

2.  $e^+ \rightarrow \text{Ps}$  生成・濃縮・冷却  
 無機酸化物多孔体

A. Ishida *et al.*,  
 JJAP Conf. Proc. **7**(2018)011001,  
 K. Shu *et al.*,  
 J. Phys. B **49**(2016)104001.

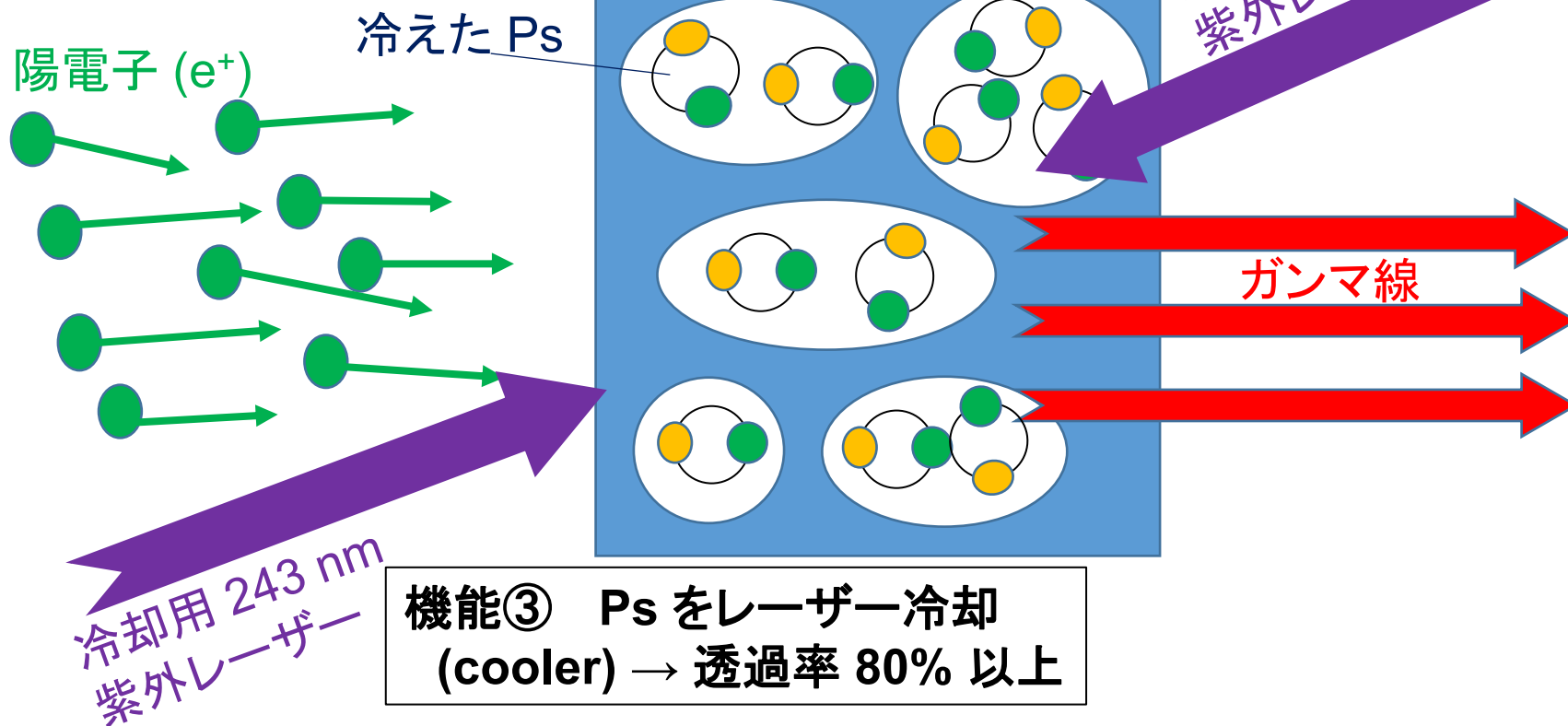
熱化とレーザー冷却を組み合わせるとPsを300 nsで  
Ps-BEC 転移温度を下回る 10 K まで冷却可能(シミュレーション) 21pK2-2

# 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する

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

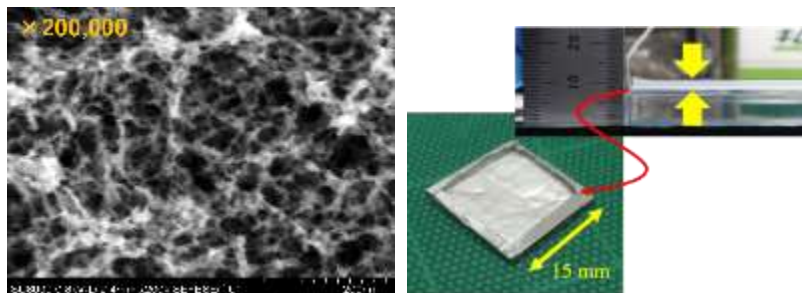
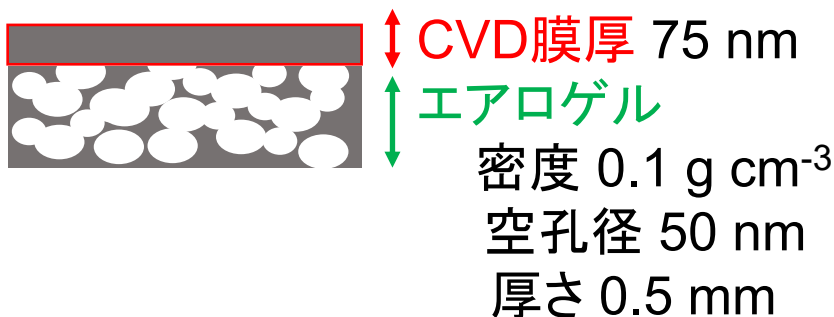
機能② Psを高密度に濃縮  
(condenser) → 100 nm 細孔

無機酸化物多孔体中の細孔



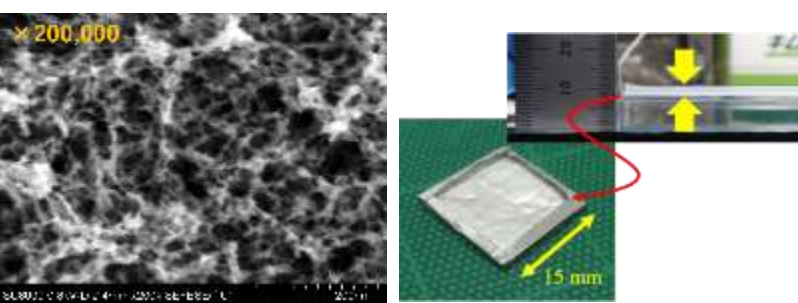
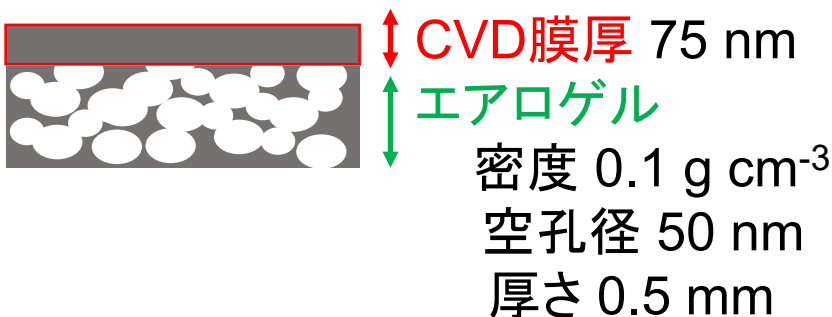
機能③ Ps をレーザー冷却  
(cooler) → 透過率 80% 以上

# 【手法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



- 50 nm の空孔径で期待される寿命 ( $\sim 130 \text{ ns}$ )
- 高い Ps 生成率 ( $\sim 35\%$ )
- 空孔中に閉じ込められた o-Ps が得られた

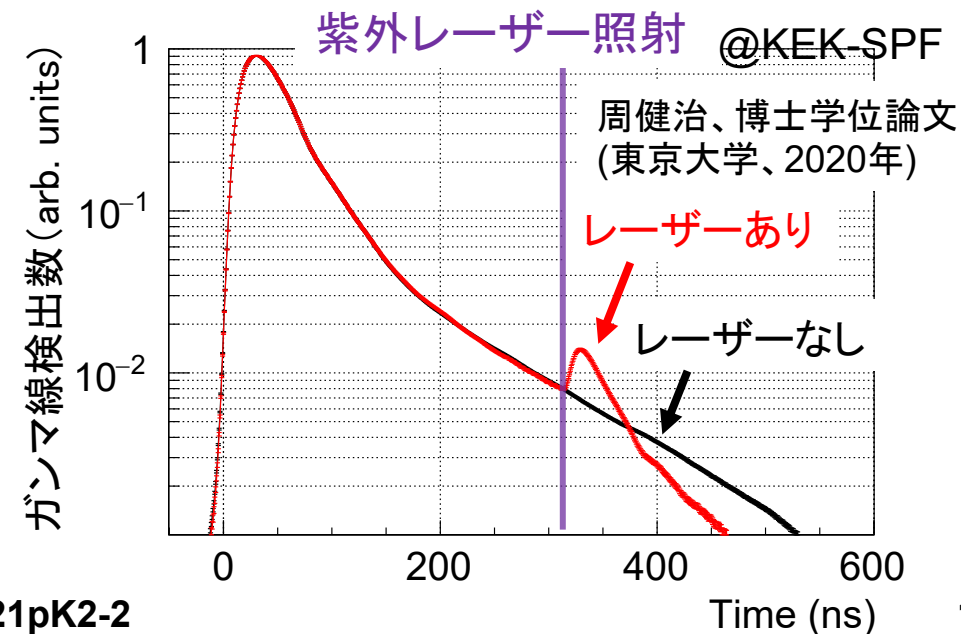
# 【手法①】シリカエアロゲルの表面に緻密なシリカ層を プラズマCVDで成膜したサンプルを シリカキャビティとして使用



- 50 nm の空孔径で期待される寿命 ( $\sim 130 \text{ ns}$ )
- 高い Ps 生成率 ( $\sim 35\%$ )
- 空孔中に閉じ込められた o-Ps が得られた

シリカエアロゲル細孔中では、 $2P$  状態に遷移した Ps が瞬時にガンマ線に消滅！  
→ レーザー冷却 ( $1S \rightarrow 2P \rightarrow 1S$  を繰り返す) が不可能

今のところ原因不明。Ps 運動エネルギー依存性から、レーザー冷却前に熱化で十分 Ps を冷却できれば、レーザー冷却できる可能性 → 今後詳細に調査



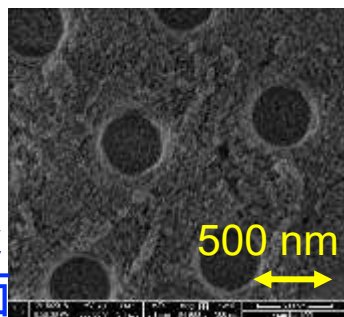
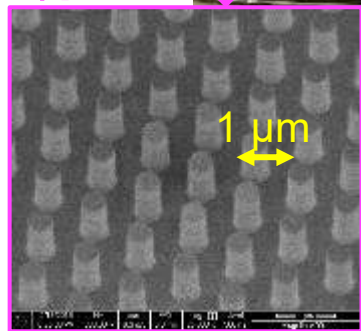
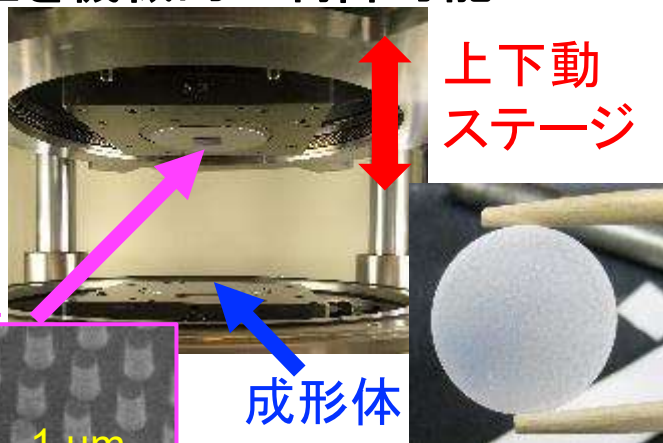
## 【手法②】

ナノインプリントによるトップダウン的開発

⇒表面研磨の条件出しを終え、今後インプリントのテスト

①  $\text{SiO}_2/\text{PVA}$  が重合した柔らかい成形体に柱付金型を押し付けて、穴を転写(インプリント)。

→細孔径を機械的に制御可能



インプリント後の成形体表面



# 【手法②】

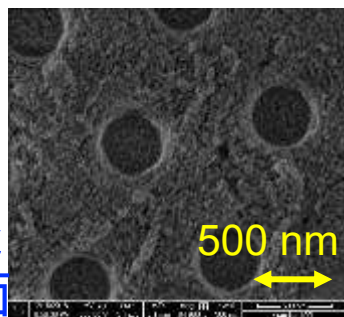
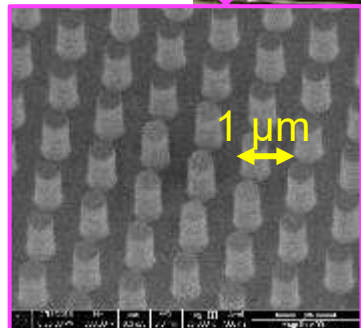
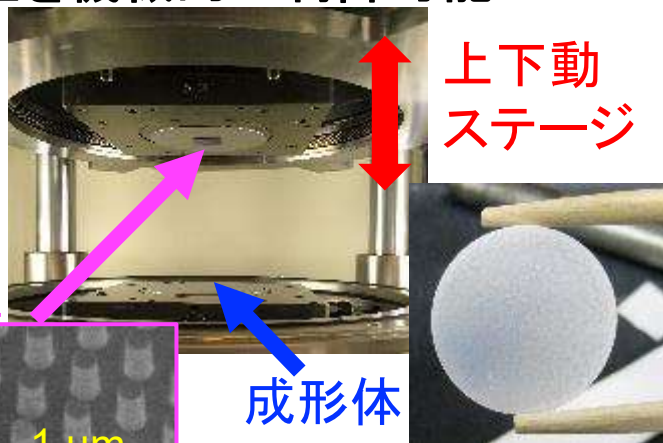
## ナノインプリントによるトップダウン的開発

⇒表面研磨の条件出しを終え、今後インプリントのテスト

① SiO<sub>2</sub>/PVA が重合した柔らかい成形体に柱付金型を押し付けて、穴を転写(インプリント)。

② インプリント後の成形体を焼成。透明なシリカガラスに。

→細孔径を機械的に制御可能



インプリント後の成形体表面



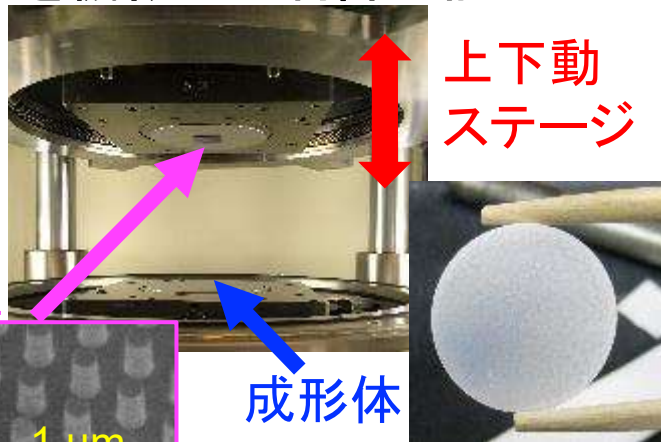
# 【手法②】

## ナノインプリントによるトップダウン的開発

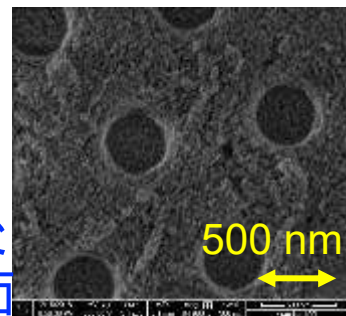
⇒表面研磨の条件出しを終え、今後インプリントのテスト

① SiO<sub>2</sub>/PVA が重合した柔らかい成形体に柱付金型を押し付けて、穴を転写(インプリント)。

→細孔径を機械的に制御可能



1 μm

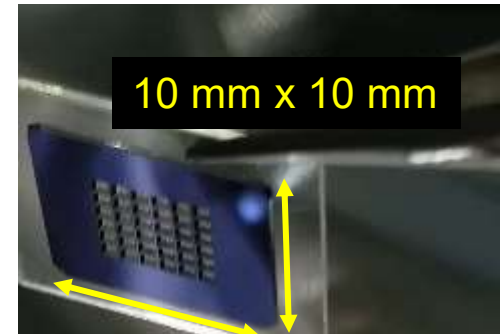


インプリント後の成形体表面

② インプリント後の成形体を焼成。透明なシリカガラスに。



③ SiO<sub>2</sub> 薄膜でフタをしてPs を細孔中に閉じ込め



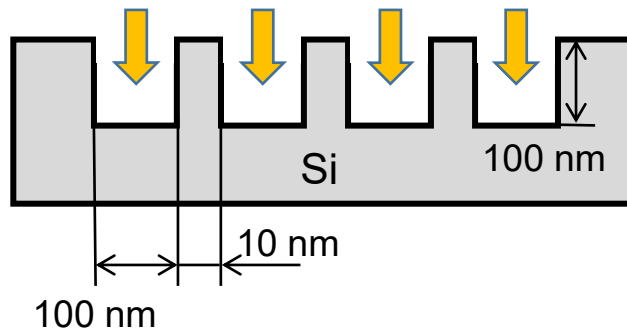
プロトタイプ作成により、成形体の表面研磨が重要であることが判明した。

表面研磨法によって焼成後の透明度が変化したため、焼成試験をしながら表面研磨の条件出しを行った。

### 【手法③】

ナノプロセッシング技術を駆使した手法による開発  
⇒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

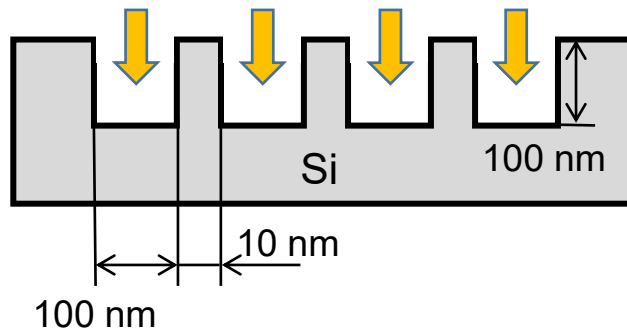
①シリコン基板に電子ビーム描画によって細孔構造を生成



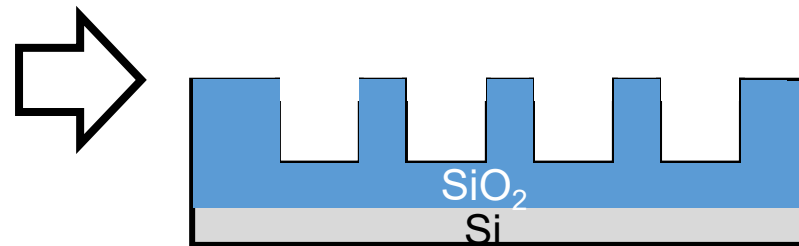
### 【手法③】

ナノプロセッシング技術を駆使した手法による開発  
⇒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

①シリコン基板に電子ビーム描画によって細孔構造を生成



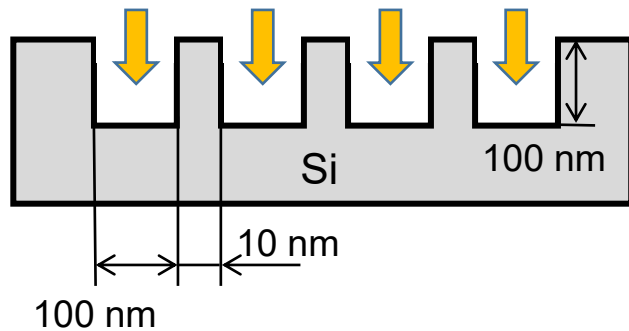
②熱酸化を行いシリカ層を生成



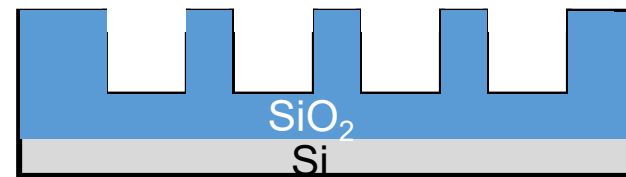
# 【手法③】

ナノプロセッシング技術を駆使した手法による開発  
⇒ 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

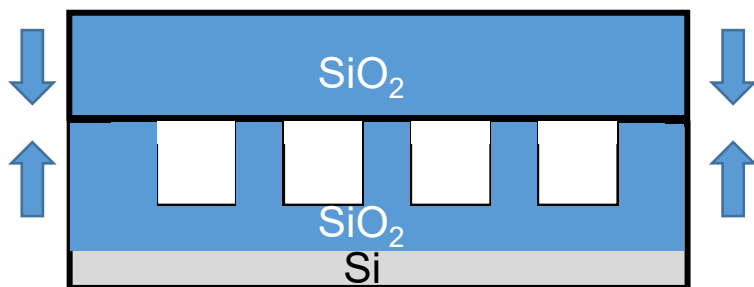
① シリコン基板に電子ビーム描画によって細孔構造を生成



② 熱酸化を行いシリカ層を生成



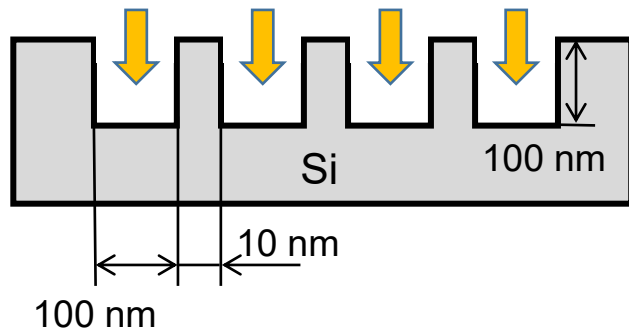
③ シリカ基板と接合



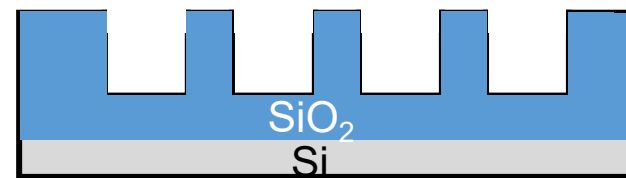
# 【手法③】

ナノプロセス技術を駆使した手法による開発  
⇒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

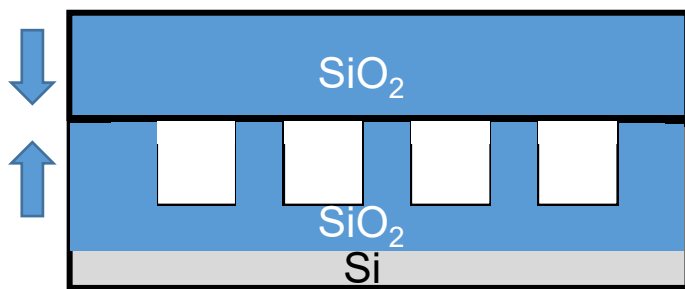
①シリコン基板に電子ビーム描画によって細孔構造を生成



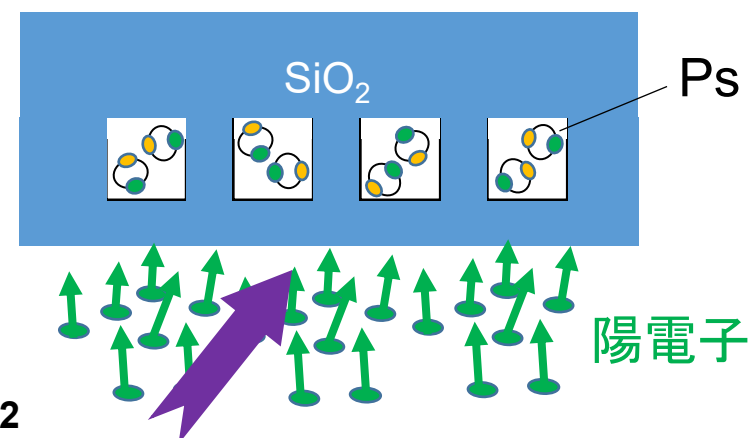
②熱酸化を行いシリカ層を生成



③シリカ基板と接合



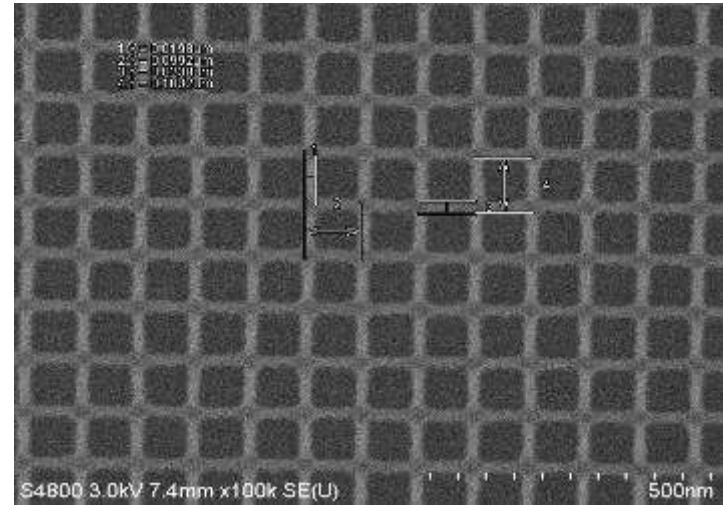
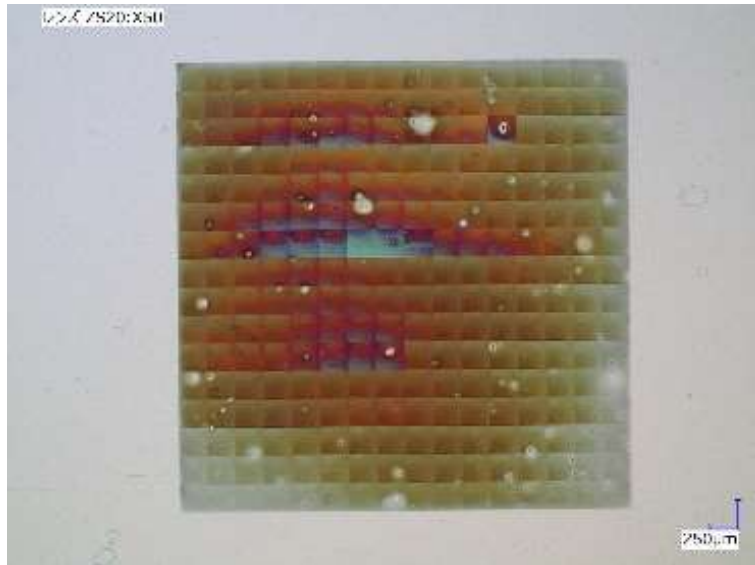
④シリコンを研磨及びエッチングで除去



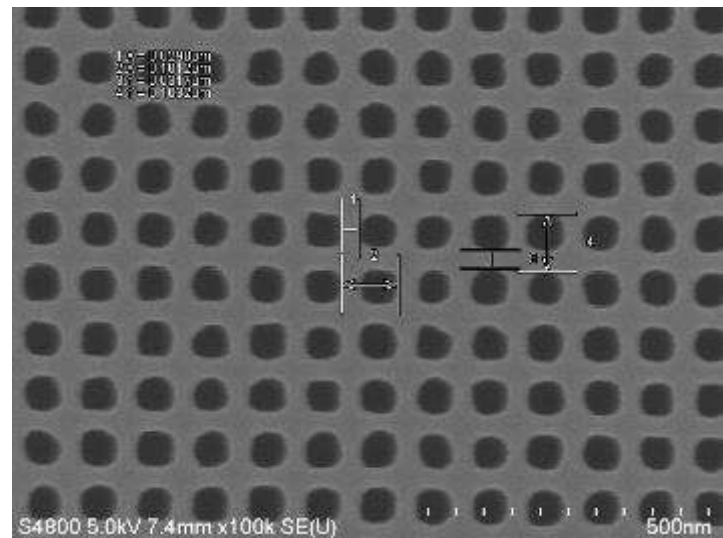
# ナノプロセッシング試作状況

エッチング前 (レジストパターン像)  
線幅 20 nm, ピッチ 100 nm

4 mm□の範囲に格子パターン  
エッチング後、80%以上の範囲  
でパターン形成 (外側でパターンの崩れ) @AIST-NPF



エッチング後 (線幅 30 nm, 溝深さ 190 nm)



表面に 48 nm  $\text{SiO}_2$  膜形成後、  
2021/05 にPs-TOF 測定済  
@KEK-SPF (解析中)

# 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。
  - 反物質系低温量子凝縮相の研究
  - 「なぜ、宇宙に物質のみ残ったのか」を説明
  - ガンマ線レーザーの実現
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. Ps 生成・濃縮・冷却材について、
  - シリカエアロゲル
  - ナノインプリント
  - ナノプロセッシングによる開発を並行して進めている。

[https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page\\_id=110](https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page_id=110)