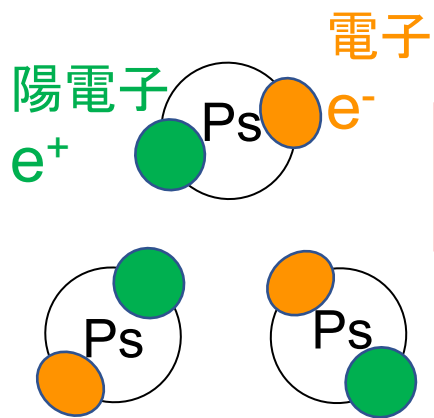


ポジトロニウムのボース・アインシュタイン凝縮 (Ps-BEC)

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

相転移

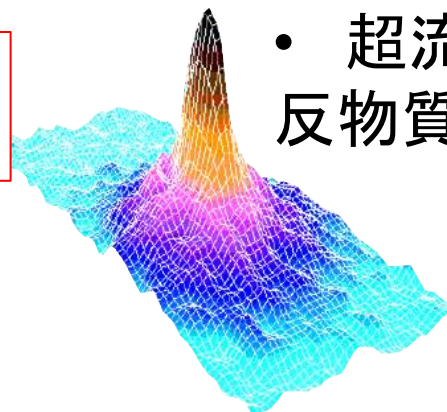


150 K
 10^{15} cm^{-3}

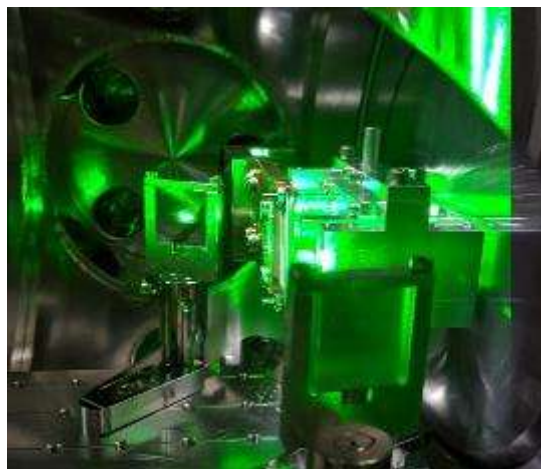
Ps の寿命 142 ns 程度で
熱化 & 高速レーザー冷却
+ 超高密度化

10 K
 10^{18} cm^{-3}

通常の物質：
• 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)



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)

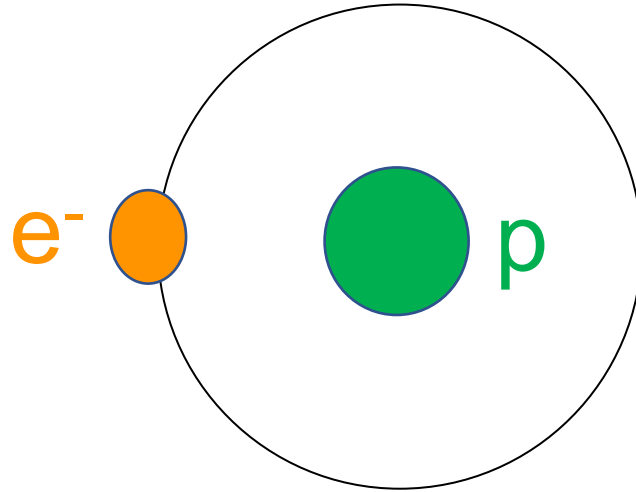
➤ 集団中のほぼすべての
原子が単一の量子状態

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)

令和4年4月19日 石田 明

ポジトロニウム (Ps) は 電子(粒子)と陽電子(反粒子)の束縛系

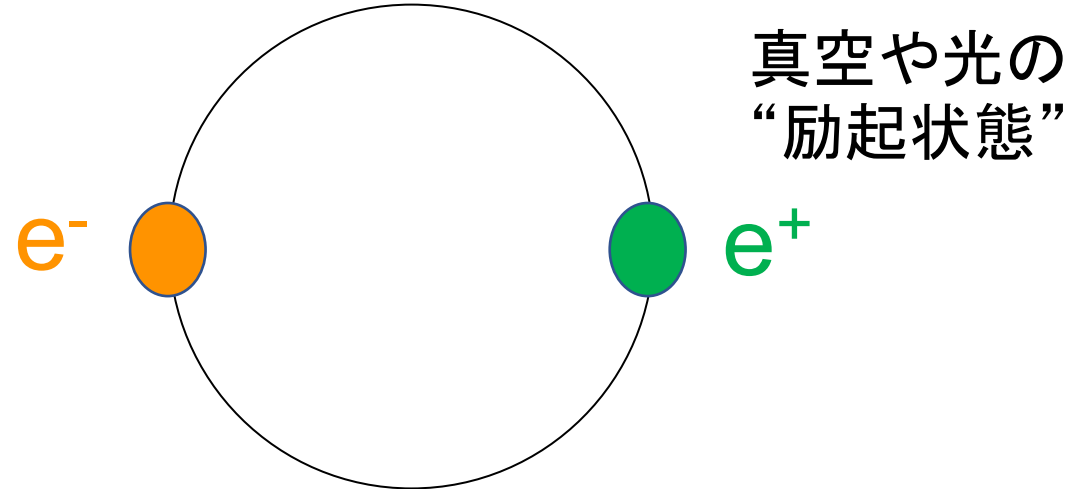
水素原子 (H)



電子と陽子の結合状態

真空中の寿命: 無限

ポジトロニウム (Ps)



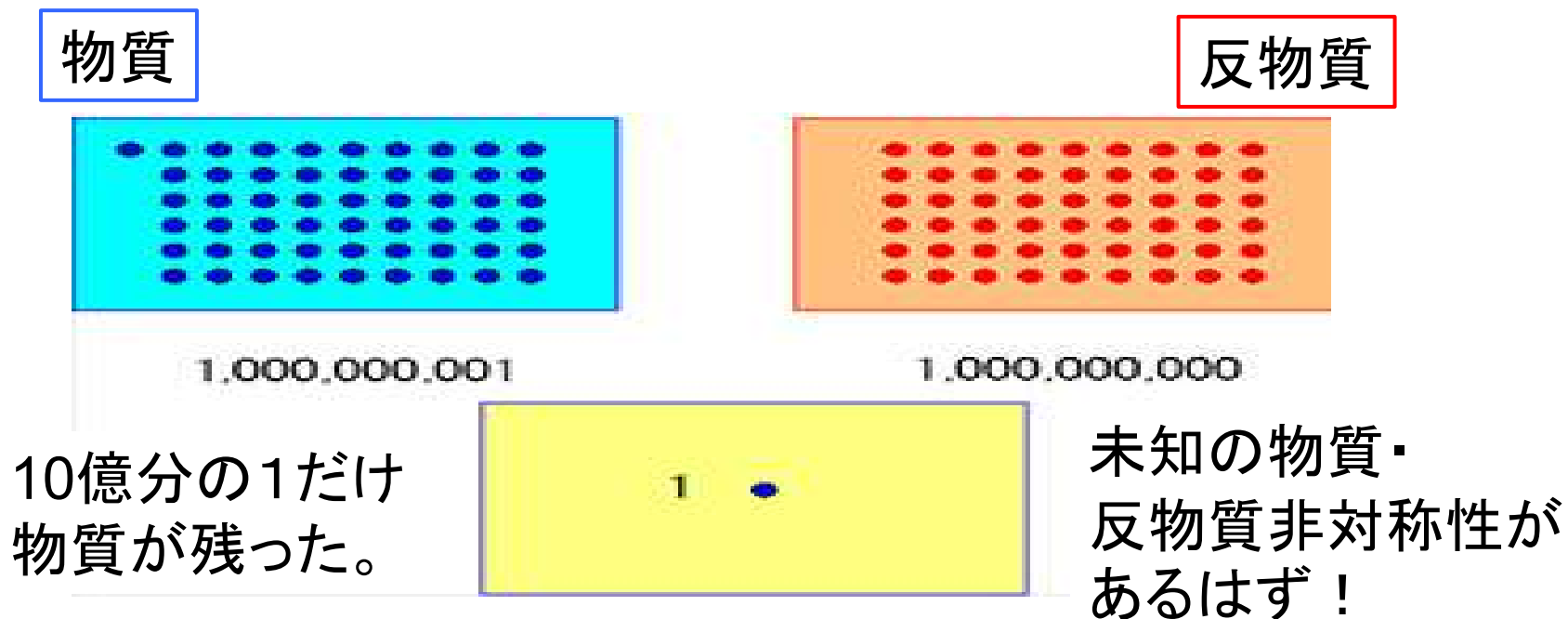
電子と陽電子(電子の反粒子)
の結合状態

真空中の寿命: 142ns
消滅の際 511 keV 以下のガン
マ線を放出する。

反物質を調べて解き明かしたいのは、 消えた反物質の謎

- 物質と反物質は宇宙最初のビッグバンの時に、同じ数だけ作られて、ペアで消えていくはずだが、なぜか物質だけが残っている。

なぜこの宇宙が物質だけで出来ている？
宇宙誕生の謎



ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) って？

ボース粒子が多数存在すると、
相互作用しなくても
純粹にその統計的性質のみによって
大部分が基底状態をとるようになる
(位相空間で凝縮する)相転移現象。
(相転移は連続的 (“3次”))

→ 高密度・低温で起こる

※かなり低温なら 1 粒子でもほとんど
基底状態に落ちることは可能ですが、
BEC のすごいところは高温状態でも
多数のボース粒子が存在すると大部
分が基底状態に落ちるところです。

ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) って？

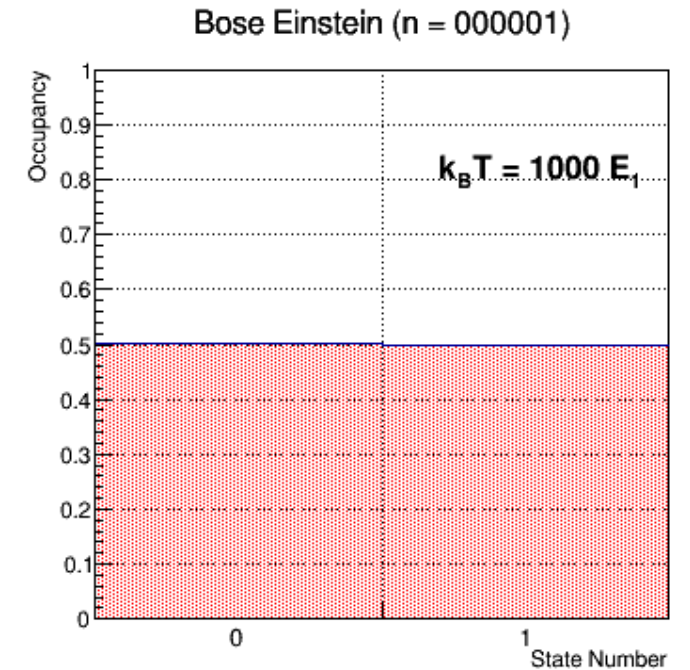
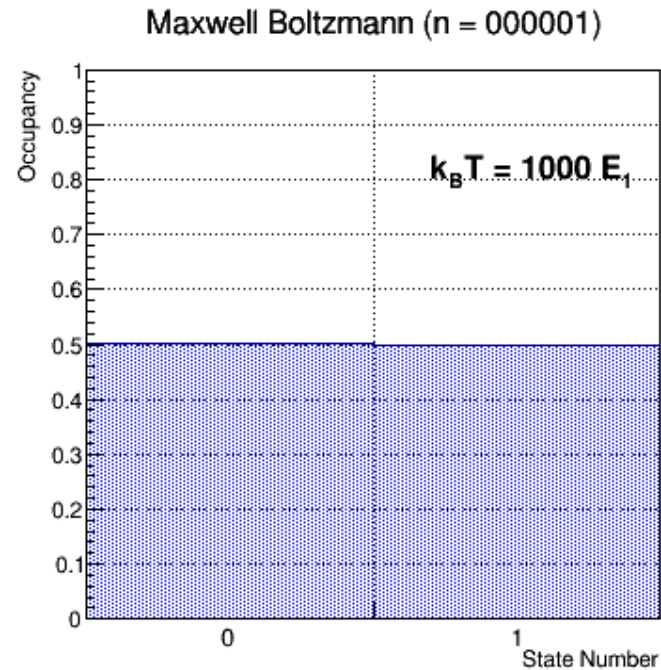
ボース粒子が多数存在すると、
相互作用しなくても
純粹にその統計的性質のみによって
大部分が基底状態をとるようになる
(位相空間で凝縮する)相転移現象。
(相転移は連続的(“3次”))

→ 高密度・低温で起こる

※かなり低温なら1粒子でもほとんど
基底状態に落ちることは可能ですが、
BEC のすごいところは高温状態でも
多数のボース粒子が存在すると大部
分が基底状態に落ちるところです。

【2 準位系の例】

温度 ($k_B T$) がエネルギー準位差 (E_1) の 1000 倍でも、
粒子数 1 万くらいで凝縮する



ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) って？

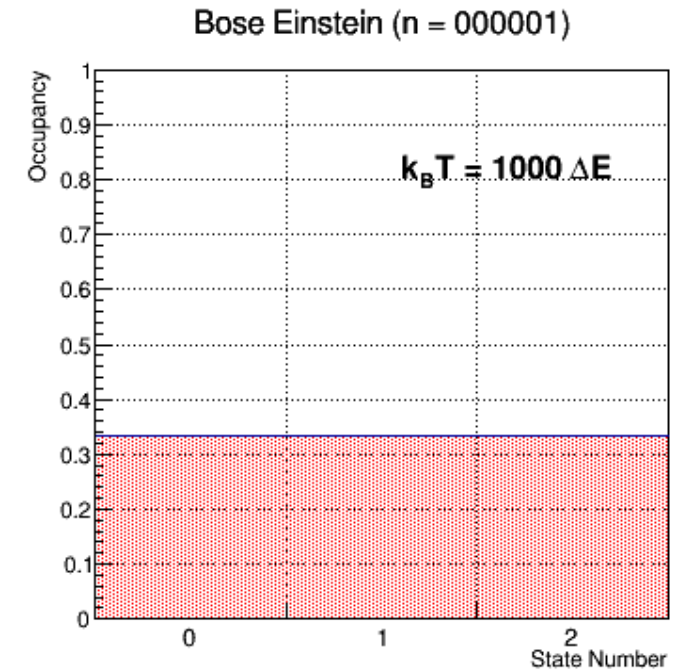
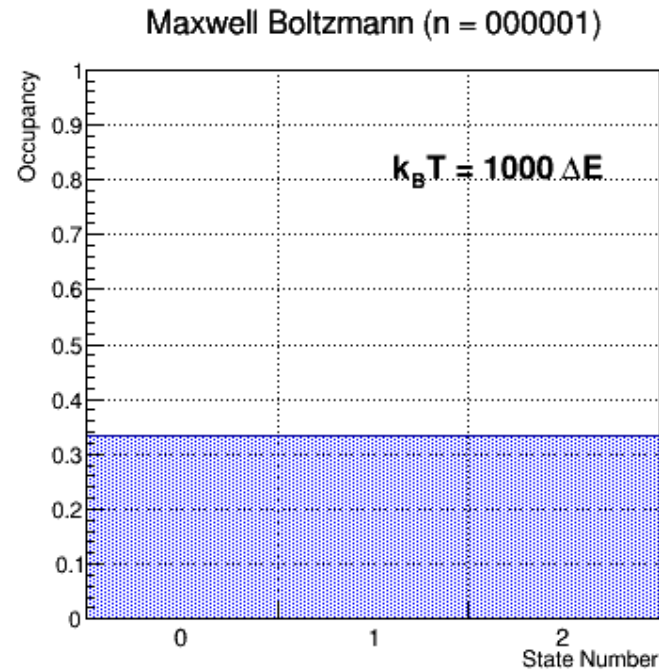
ボース粒子が多数存在すると、
相互作用しなくても
純粹にその統計的性質のみによって
大部分が基底状態をとるようになる
(位相空間で凝縮する)相転移現象。
(相転移は連続的 (“3次”))

→ 高密度・低温で起こる

※かなり低温なら 1 粒子でもほとんど
基底状態に落ちることは可能ですが、
BEC のすごいところは高温状態でも
多数のボース粒子が存在すると大部分
が基底状態に落ちるところです。

【3 準位系の例】

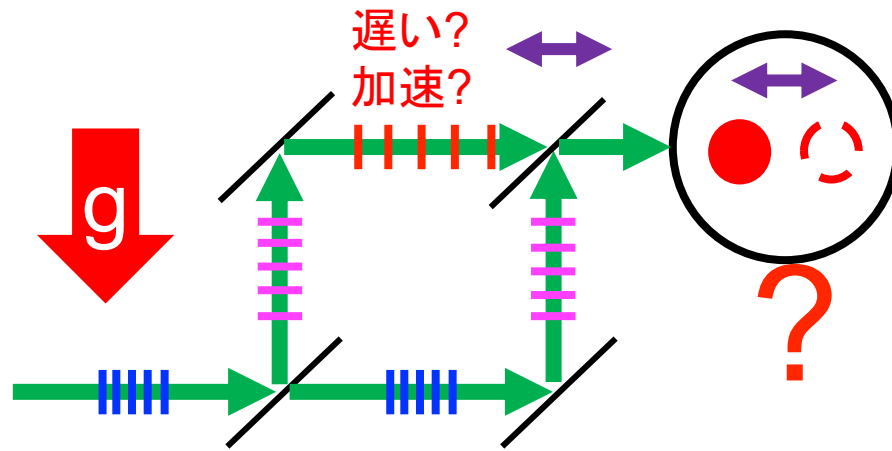
温度 ($k_B T$) がエネルギー準位差 (ΔE) の 1000 倍でも、
粒子数 1 万くらいで凝縮する



Ps-BEC の応用

1. 反物質に働く重力を、原子干渉計を用いて測定する

2つのパスの長さを変化させるとPsの強度が揺らめきうる

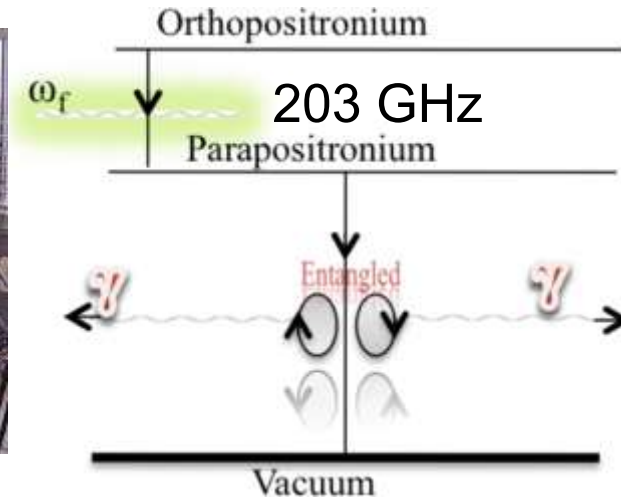


- 異なる経路を通るPsは、重力による減速などを受けて位相が異なりうる。

Phys. stat. sol. 4(2007)3419.

テーマ:
Ps-BECを使った反物質重力
測定干渉計の設計

2. 511 keV ガンマ線レーザー



Phys. Rev. A 92(2015)023820.

- p -Ps BEC は自己増幅でコヒーレントな 511 keV ガンマ線に
⇒ガンマ線・ガンマ線散乱実験、
新たなエネルギー領域の量子光学研究、
高分解能撮像による産業・医療応用

テーマ:
Ps-BECによるガンマ線
レーザーの応用検討

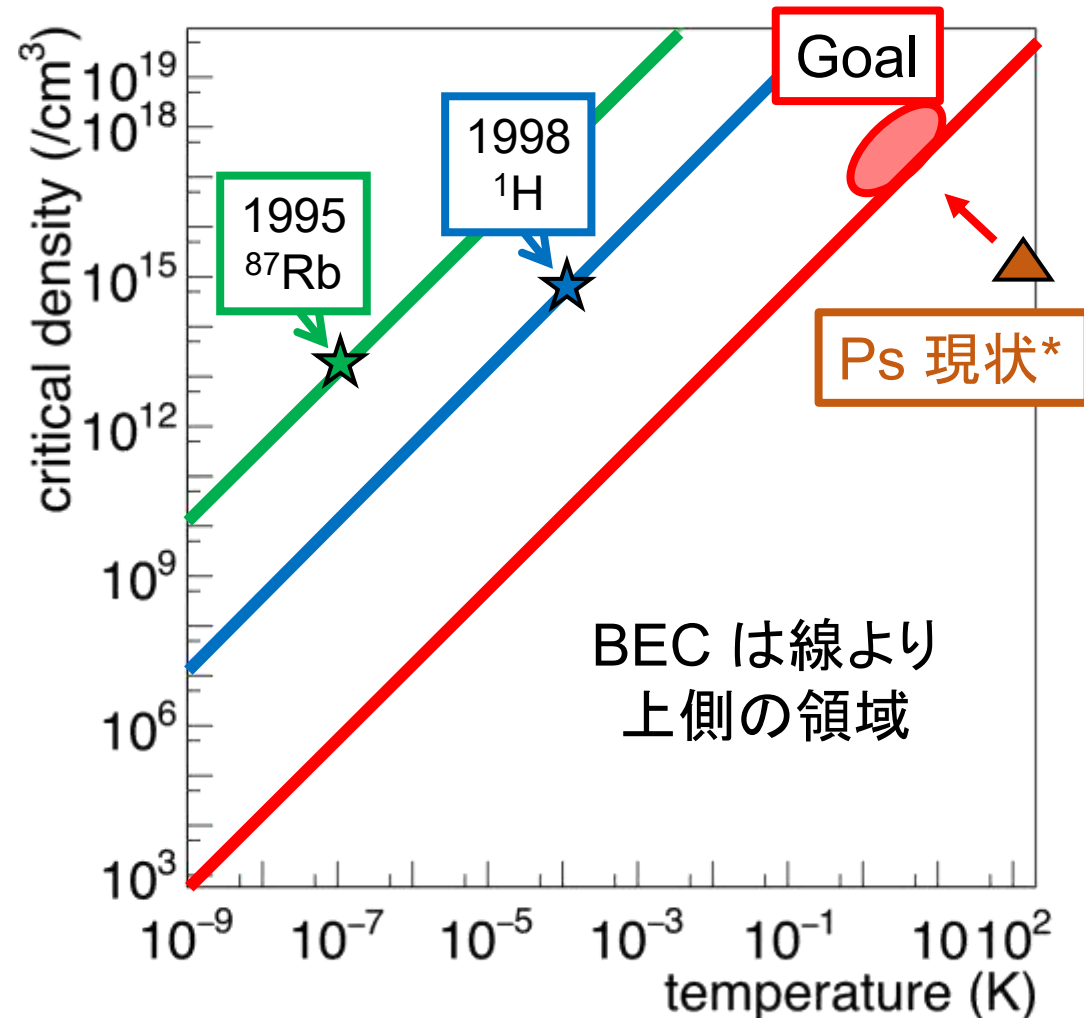
2つのチャレンジ: Psの高密度化と高速冷却

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} cm^{-3}
 (現状: 10^{15} cm^{-3})
2. Ps の高速冷却
 ~300 ns で < 10 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・ガンマ線レーザー実現スキーム

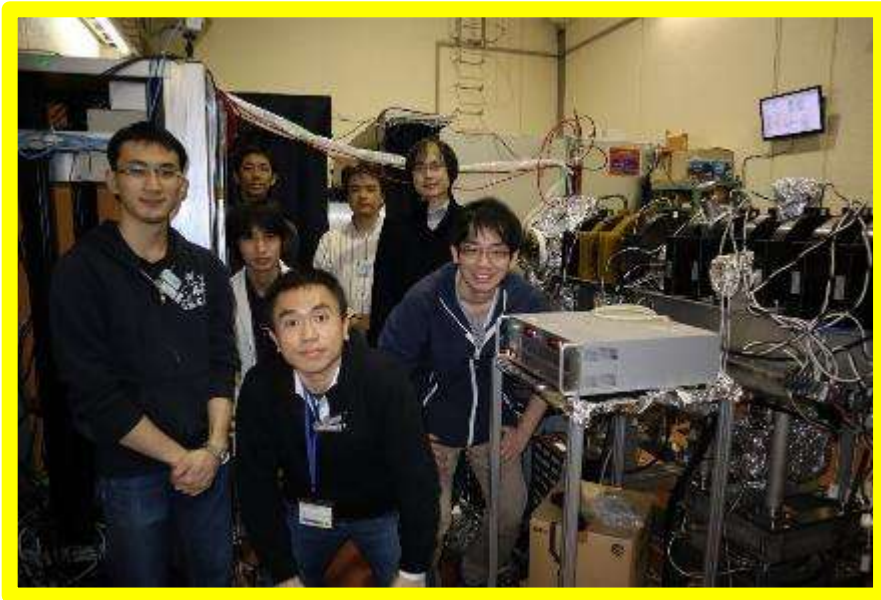
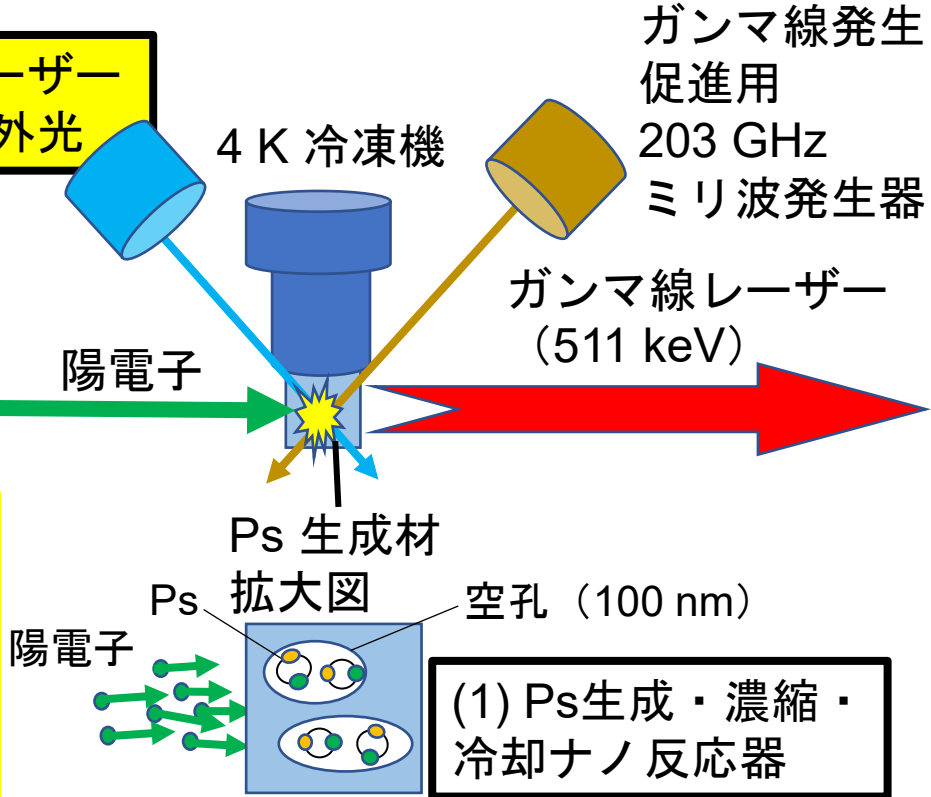
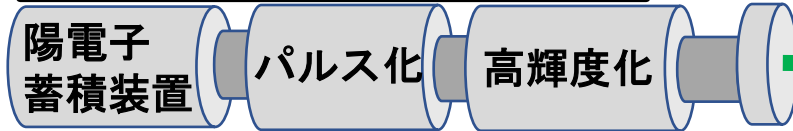
新技術3つを
開発中

(東大・工や九州大、
産総研、KEK、
JAEAと協力して約
20人の共同研究)

- (1) Ps生成・濃縮・冷却ナノ反応器に
- (2) 高密度陽電子ビームを打ち込んで高密度 Ps を生成し、
- (3) レーザー冷却によって Ps-BEC を実現

(3) Ps冷却用レーザー
波長 243 nm 紫外光

(2) 高密度
陽電子ビーム制御システム



←KEK の陽電子ビームラインで
世界初 Ps レーザー冷却実験に挑戦中！

熱化とレーザー冷却を組み合わせることで Ps-BEC を実現可能

1. 熱化

- 200 K 以上で有効
- Ps の初期運動エネルギーは $0.8 \text{ eV} = 6000 \text{ K}$.

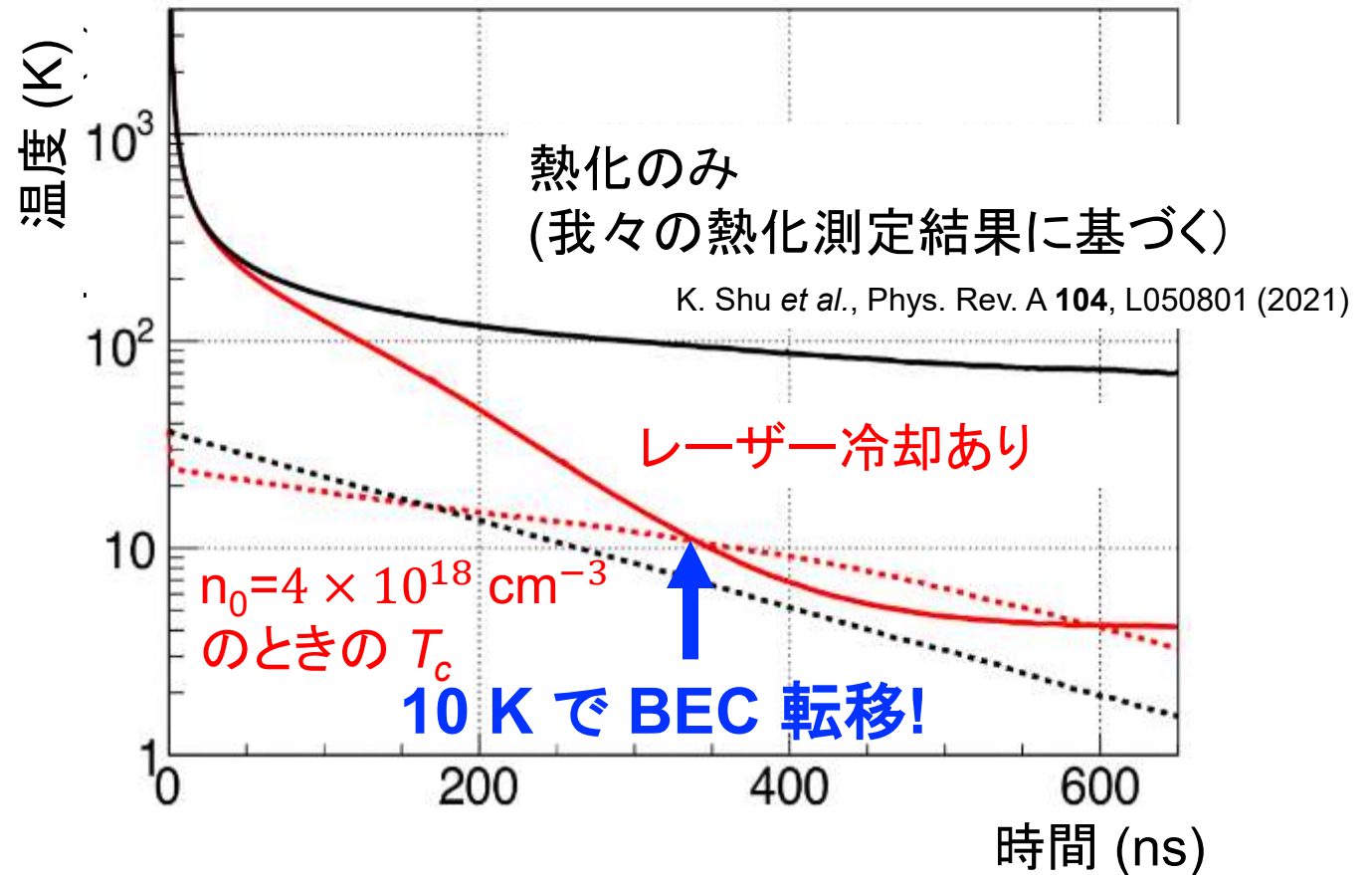
単体で 100 K まで Ps を冷却可能

2. レーザー冷却

- 200 K 以下で有効
- 10 K 以下まで Ps を冷却可能

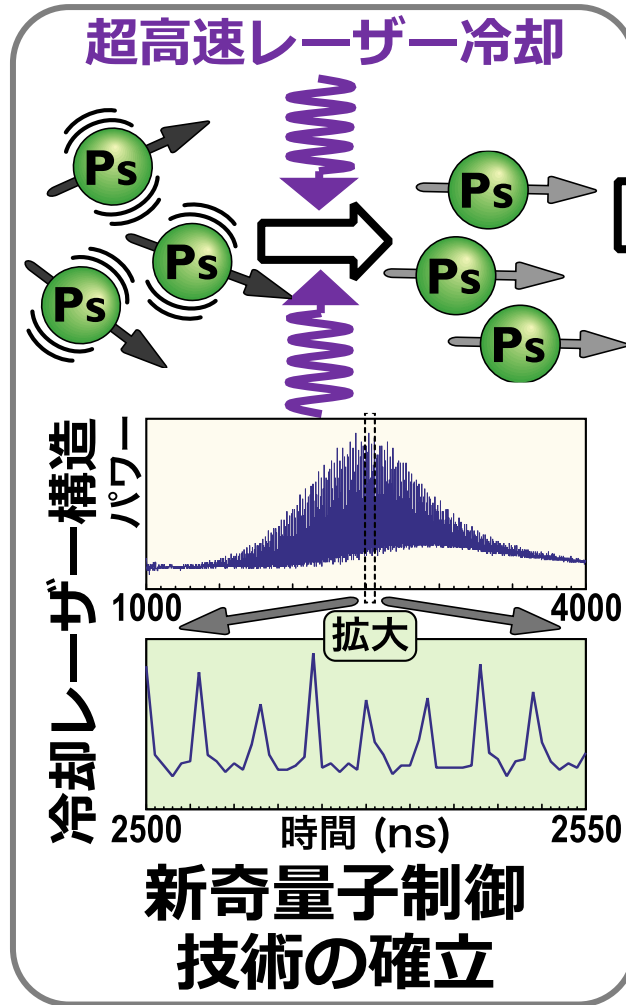
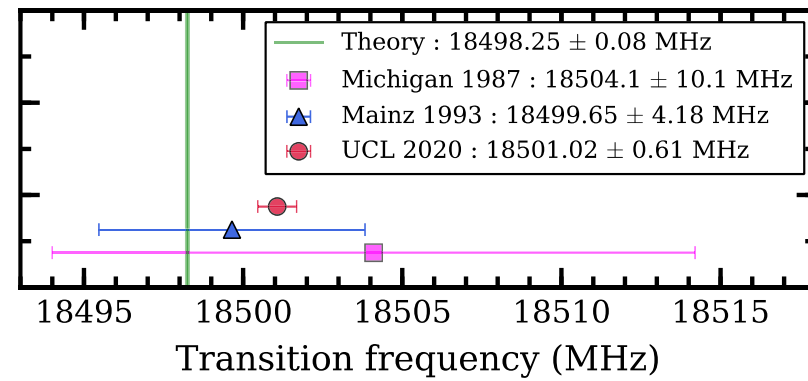
✓ 上記2つの冷却手法を組み合わせることが重要

モンテカルロシミュレーションによるPs温度変化

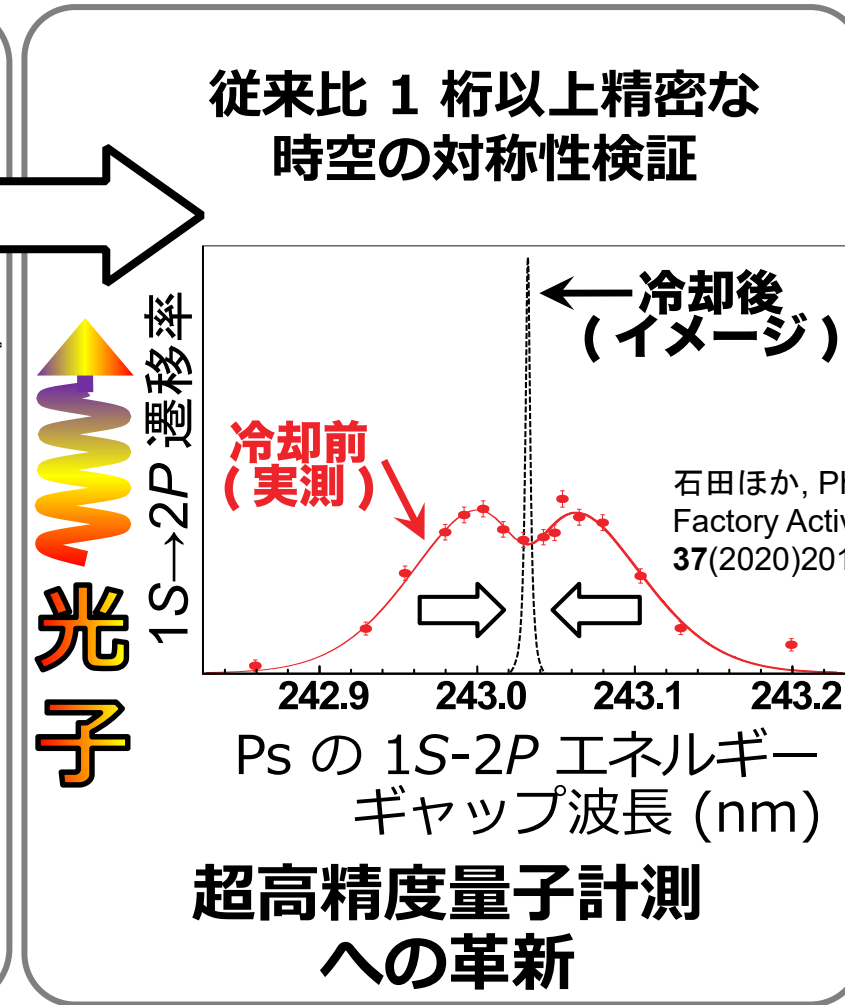


Ps レーザー冷却により、 $2S-2P$ 準位差における素粒子標準理論と測定値間の 4.2σ もの乖離を検証

L. Gurung *et al.*, Phys. Rev. Lett. **125**(2020)073002; Phys. Rev. A **103**(2021)042805.

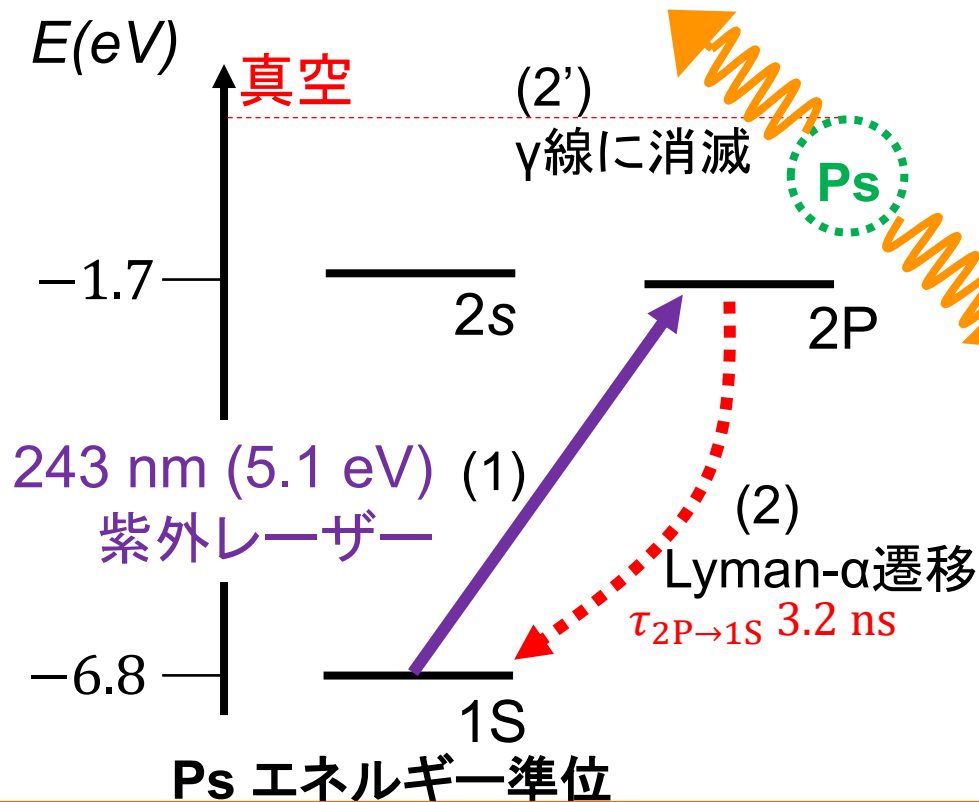


K. Yamada *et al.*, Phys. Rev. Applied **16**(2021)014009.



石田ほか, Photon Factory Activity Report **37**(2020)201.

Psレーザー冷却はチャレンジの宝庫

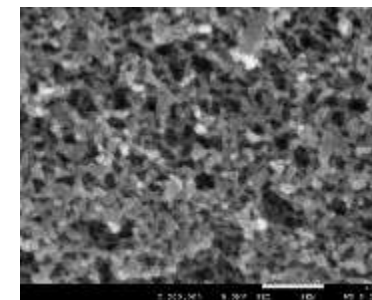


Ps レーザー冷却:

(1)→(2)→(1)→(2)...

サイクルを50回繰り返す

しかし、 $e^+ \rightarrow Ps$ 生成・濃縮・冷却材として有力だったシリカ (SiO_2) エアロゲル細孔中では、(1)→(2') と瞬時に γ 線に消滅してしまった！

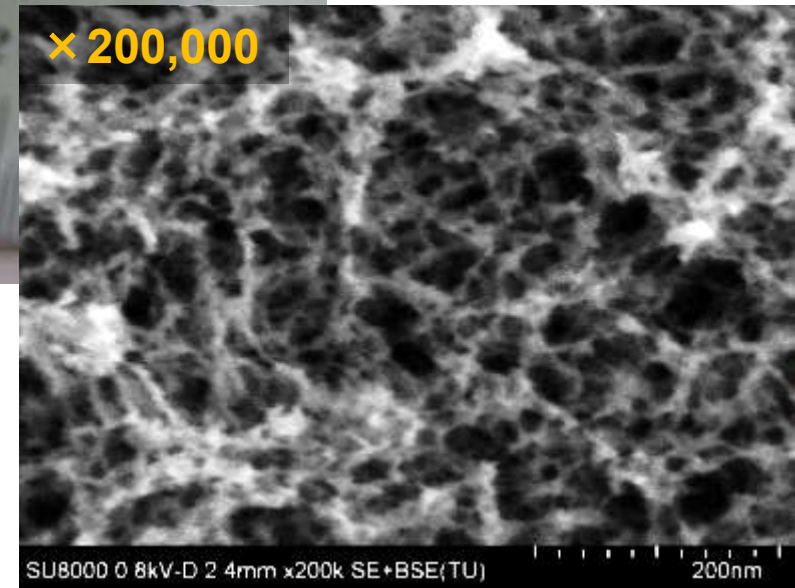
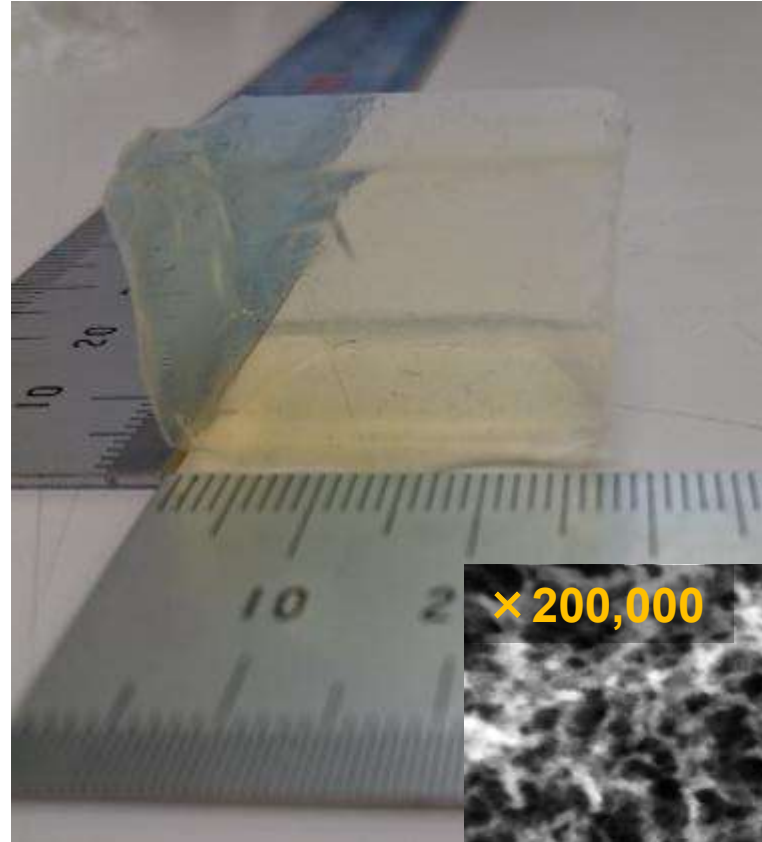


× 200,000

テーマ:

- Ps-BEC実現のためのナノ材料開発 (2PのPsが消滅する機構の解明、消滅しない材料の探索、ナノテク加工を駆使して製作)
- 真空中で世界初のPsレーザー冷却 (シミュレーション、装置設計)
- ナノ細孔中でPsのレーザー冷却はそもそも可能か？ (Dicke narrowing を入れた冷却シミュレーション)

本郷キャンパスで、 放射線源 (^{22}Na などの放射性同位体) を用いた実験



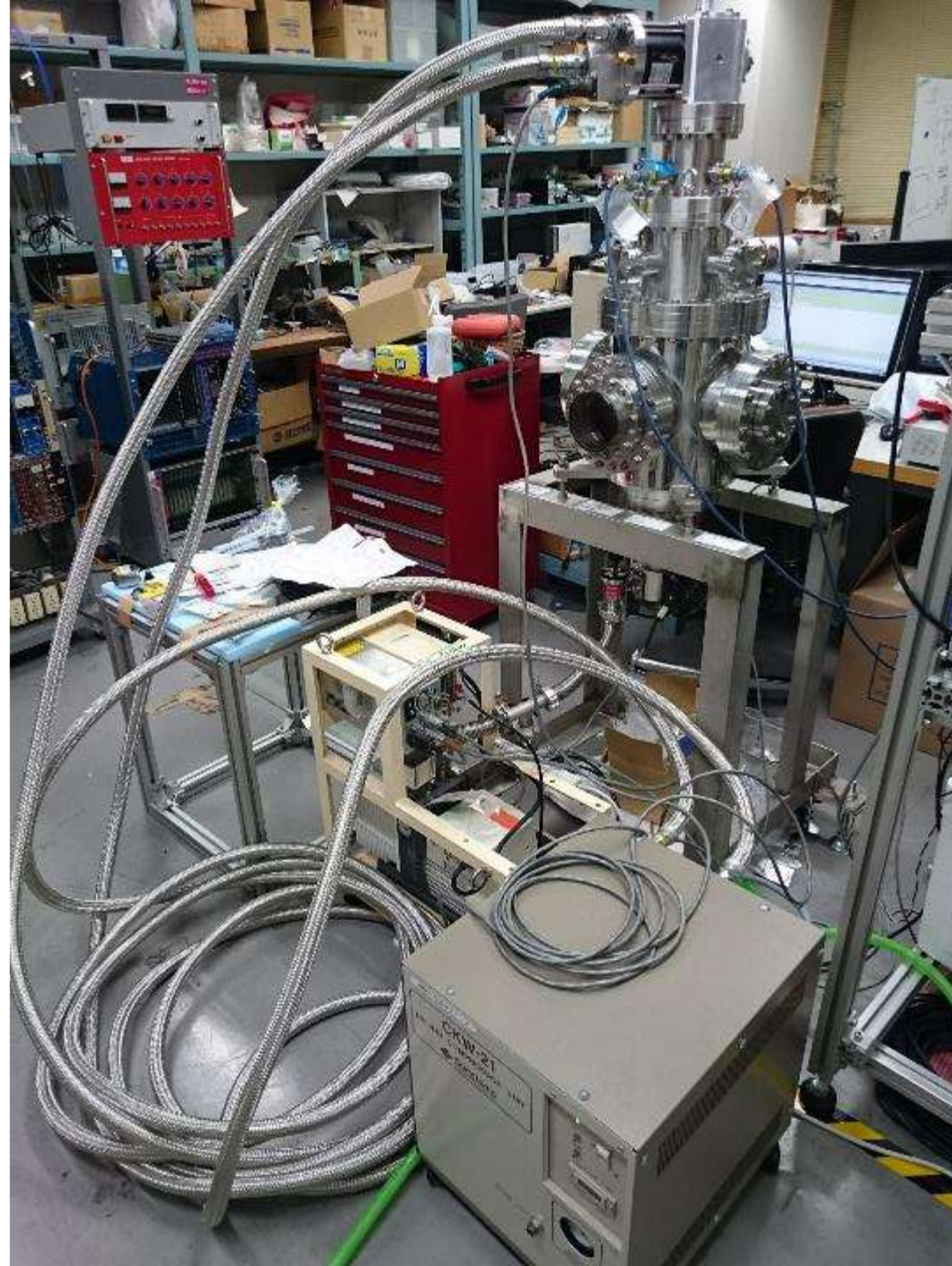


2022/4/19

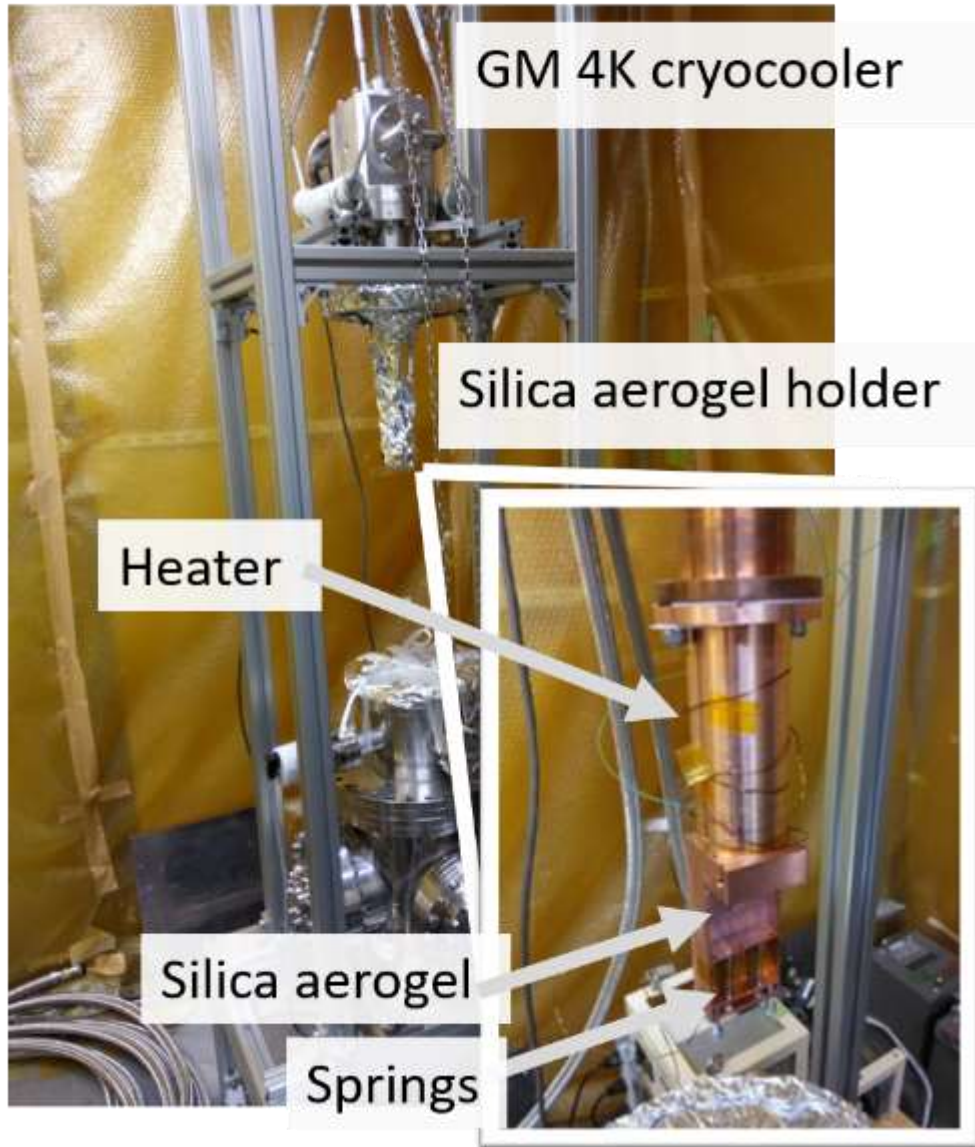
14





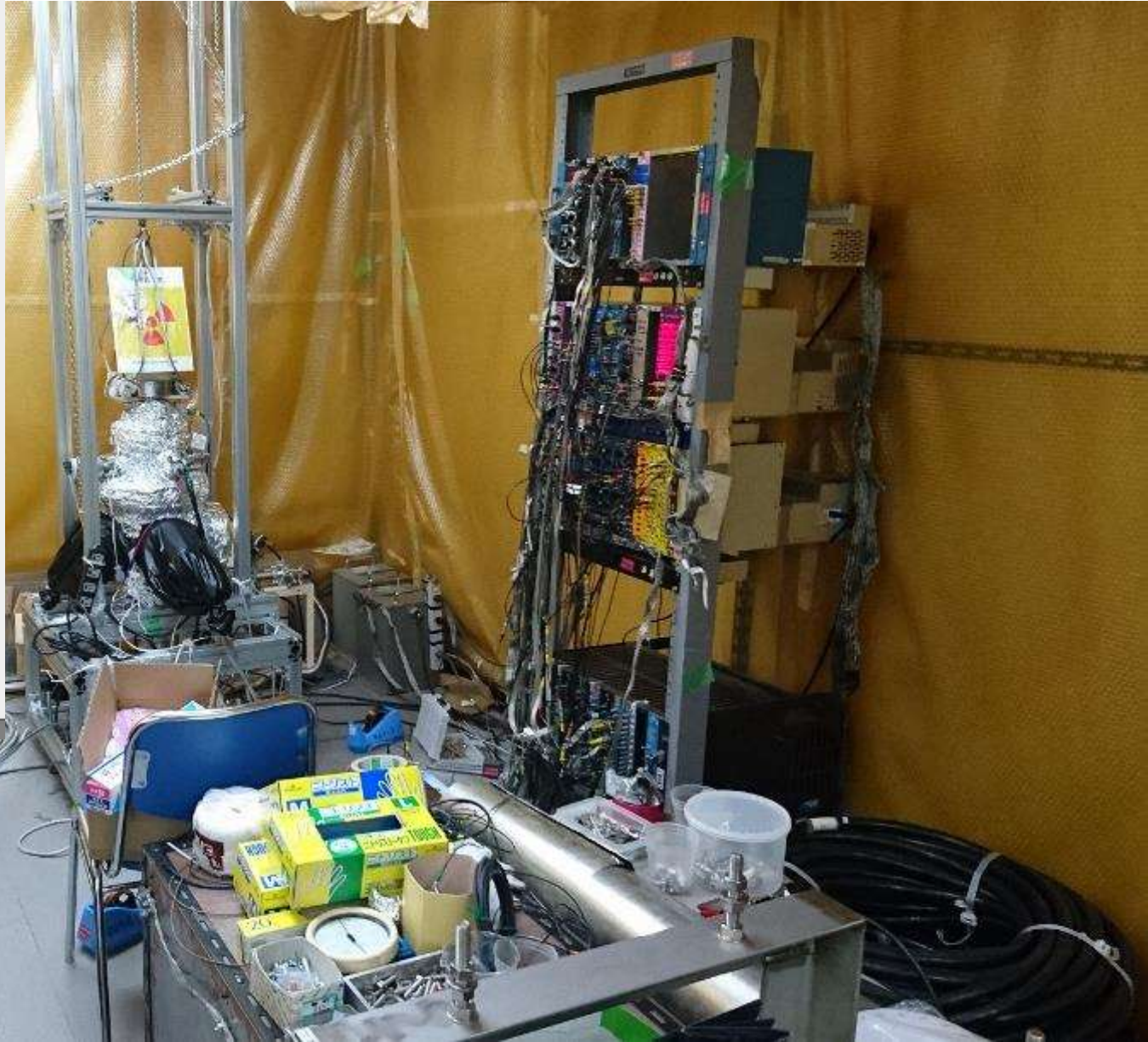
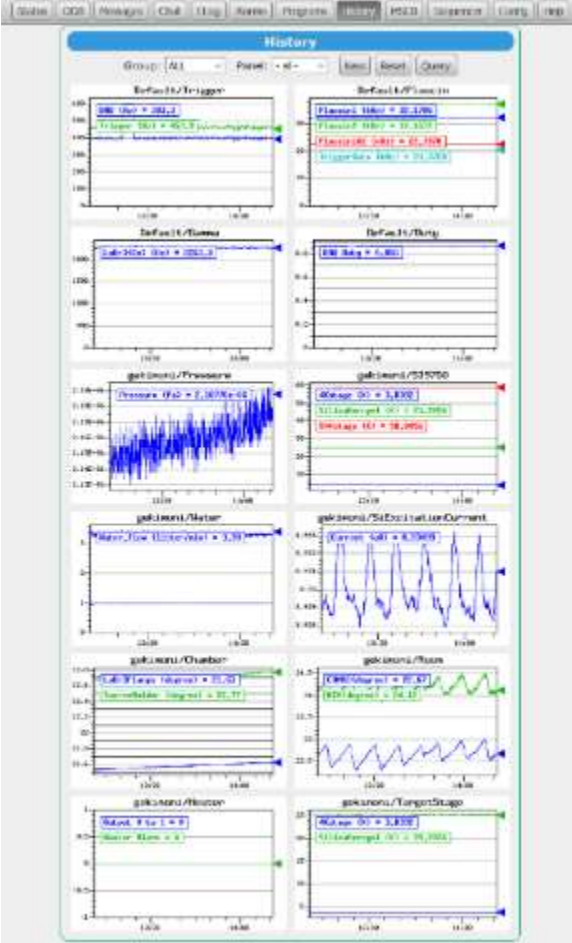


(a)



(b)

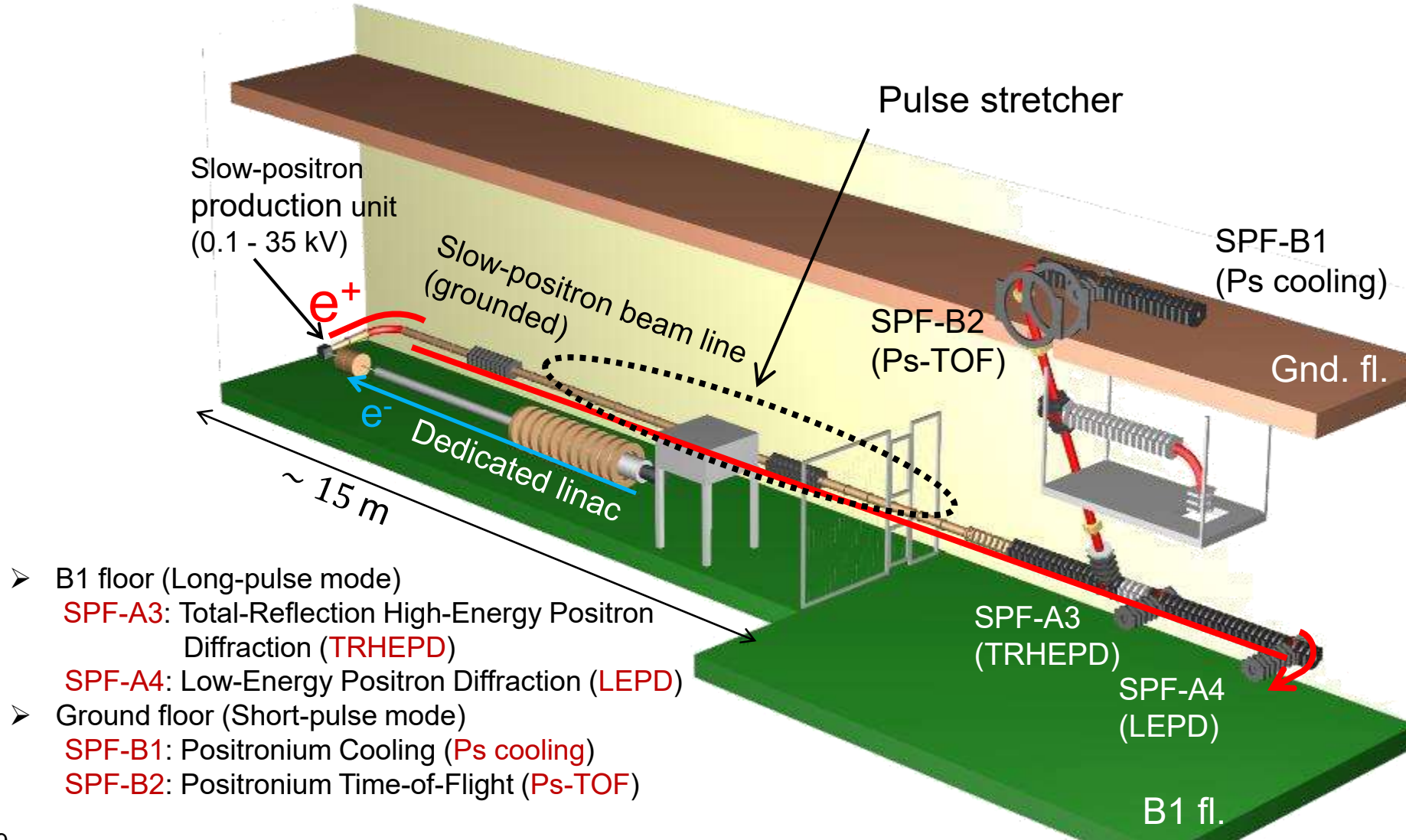


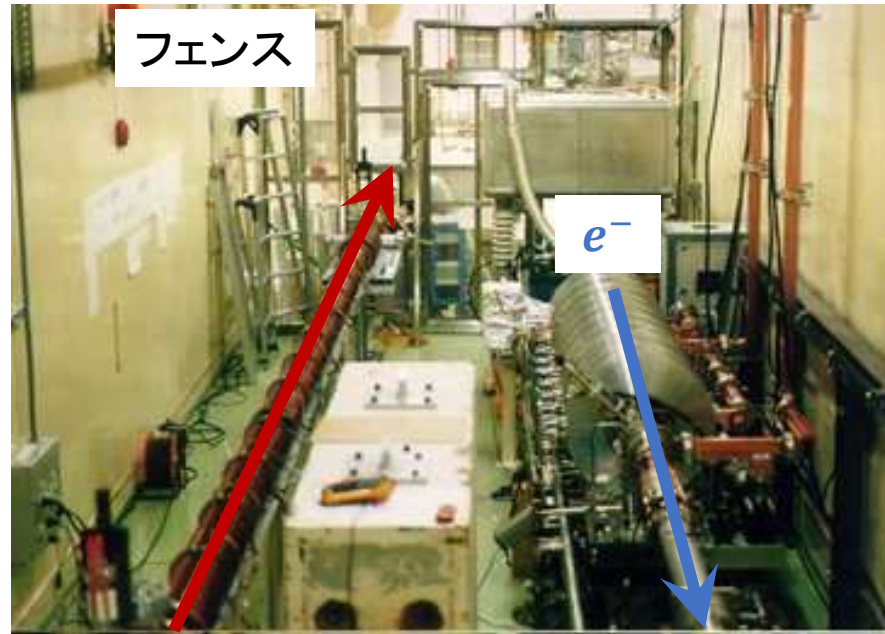


陽電子ビームを使った実験は、茨城県つくば市のKEKと産総研で

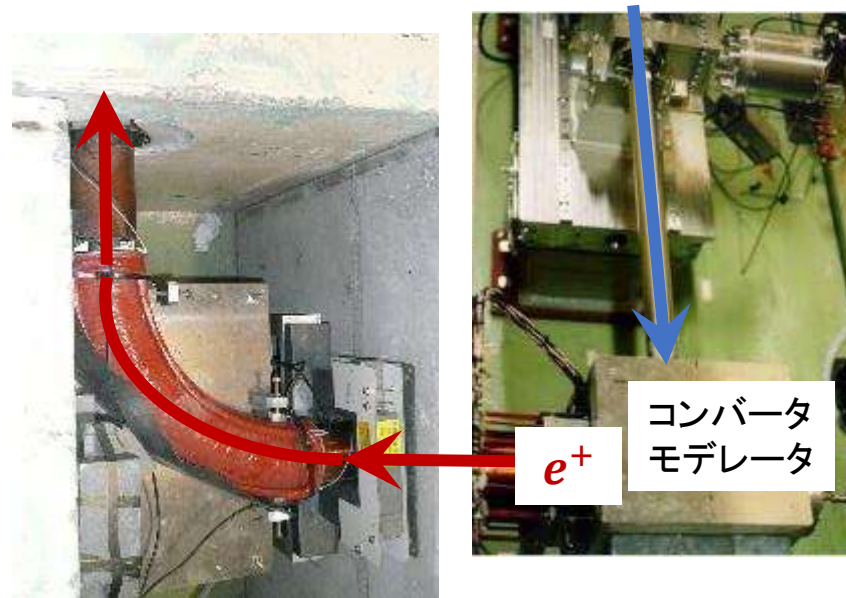


高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 物質構造科学研究所 (IMSS) 低速陽電子実験施設 (SPF)

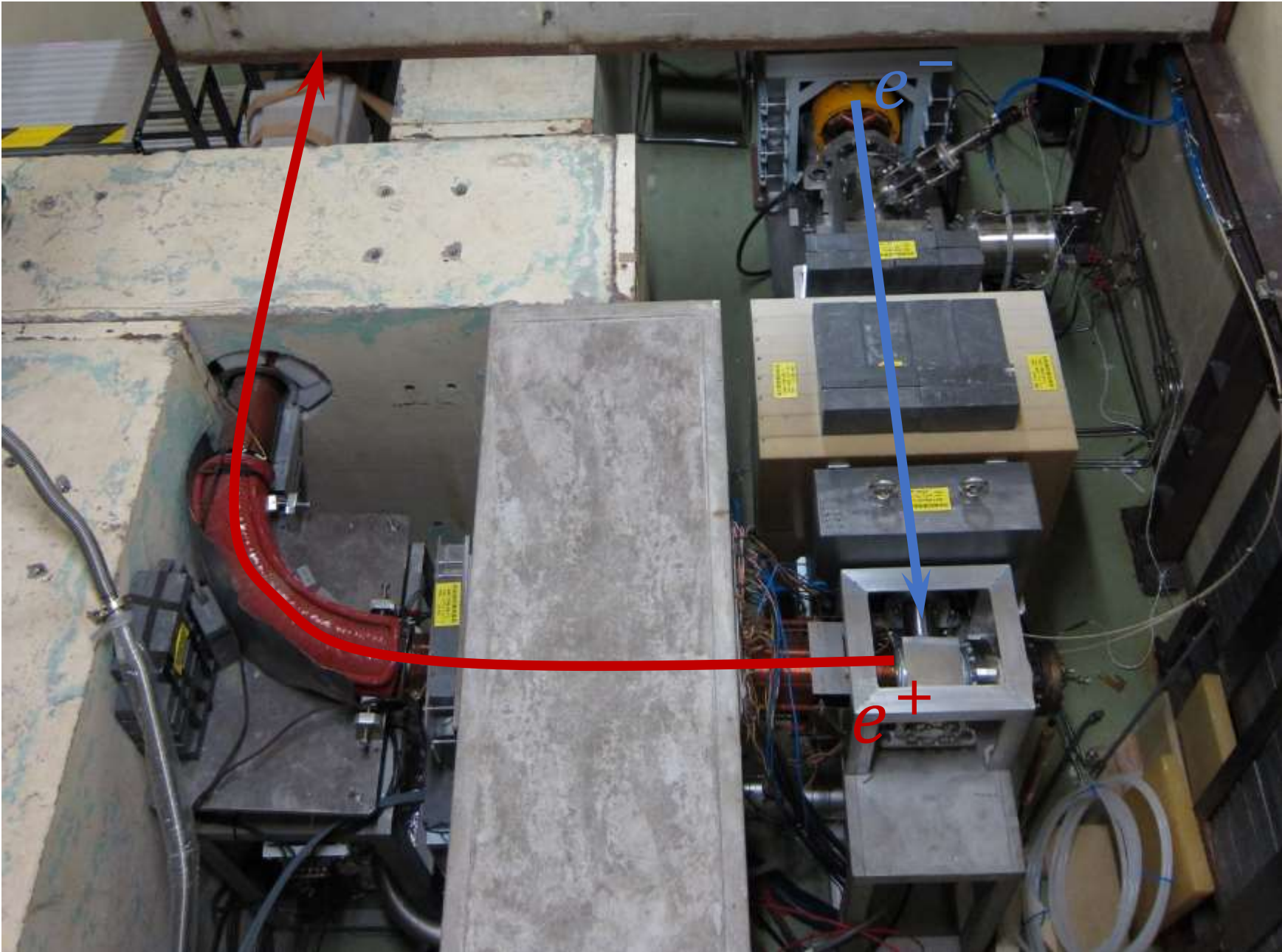




シールド設置前の写真
(撮影日時不明)



低速陽電子ビーム生成ターゲット周辺の写真 (2010)



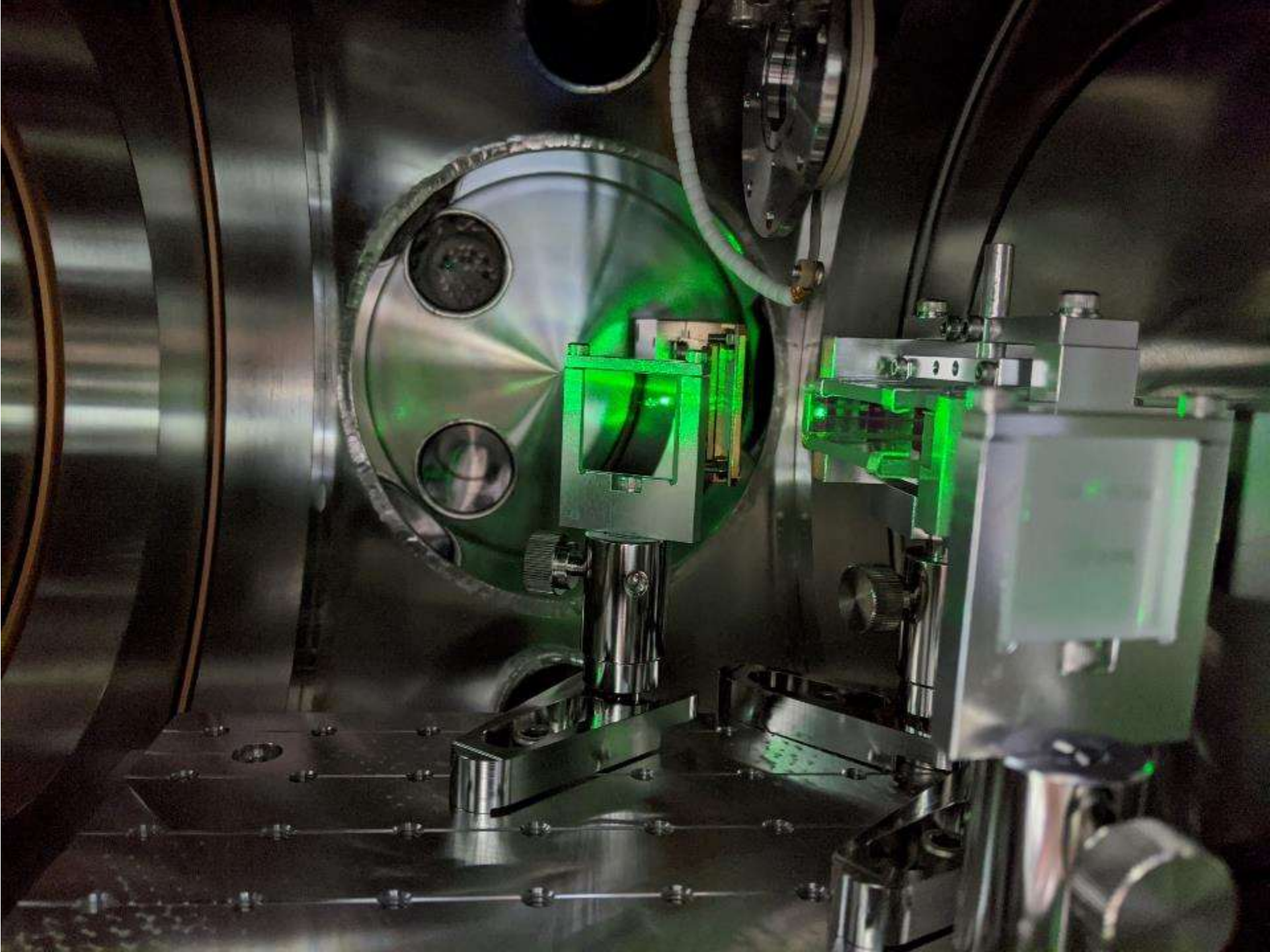


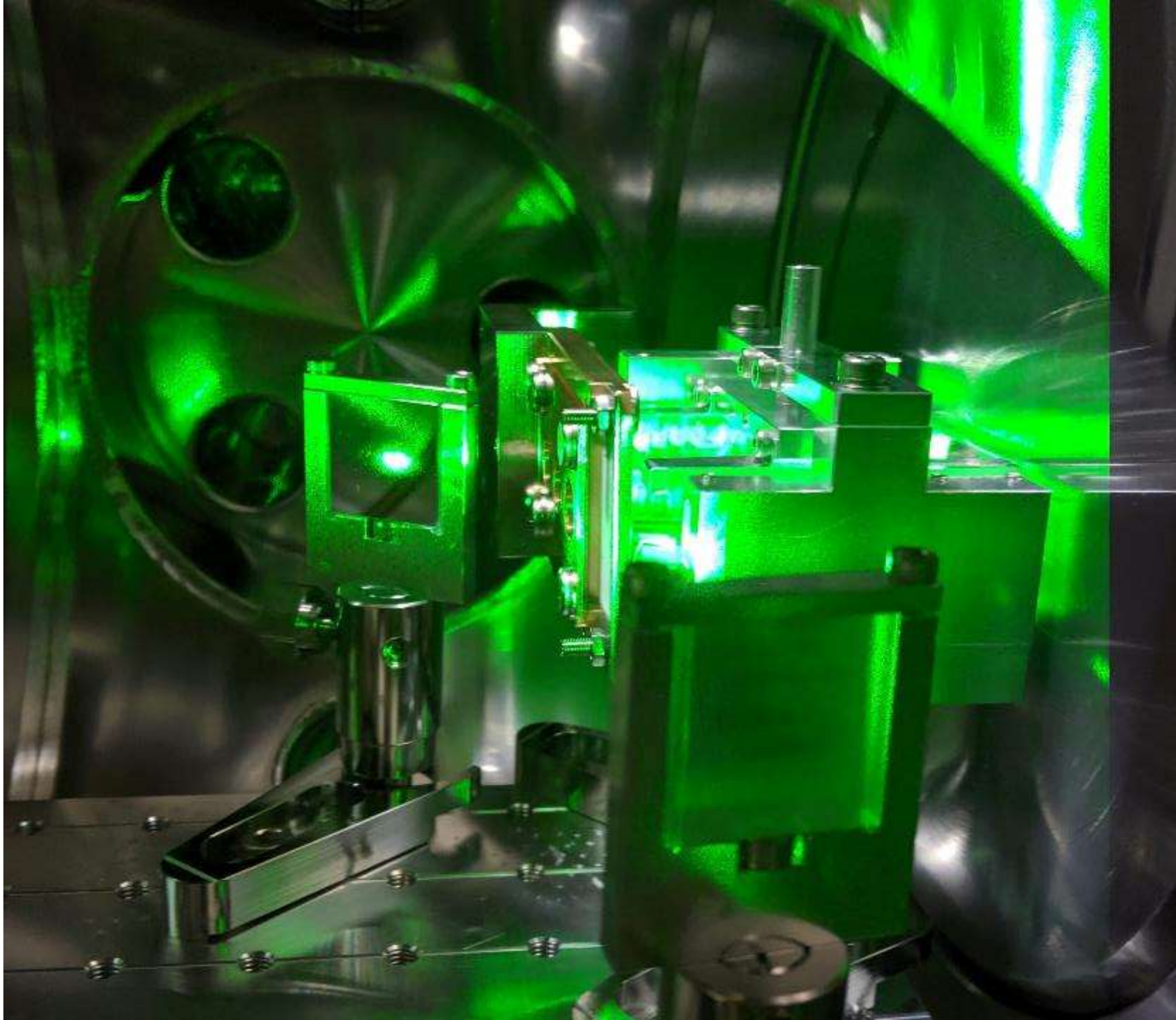
低速陽電子ビーム生成ターゲットの写真

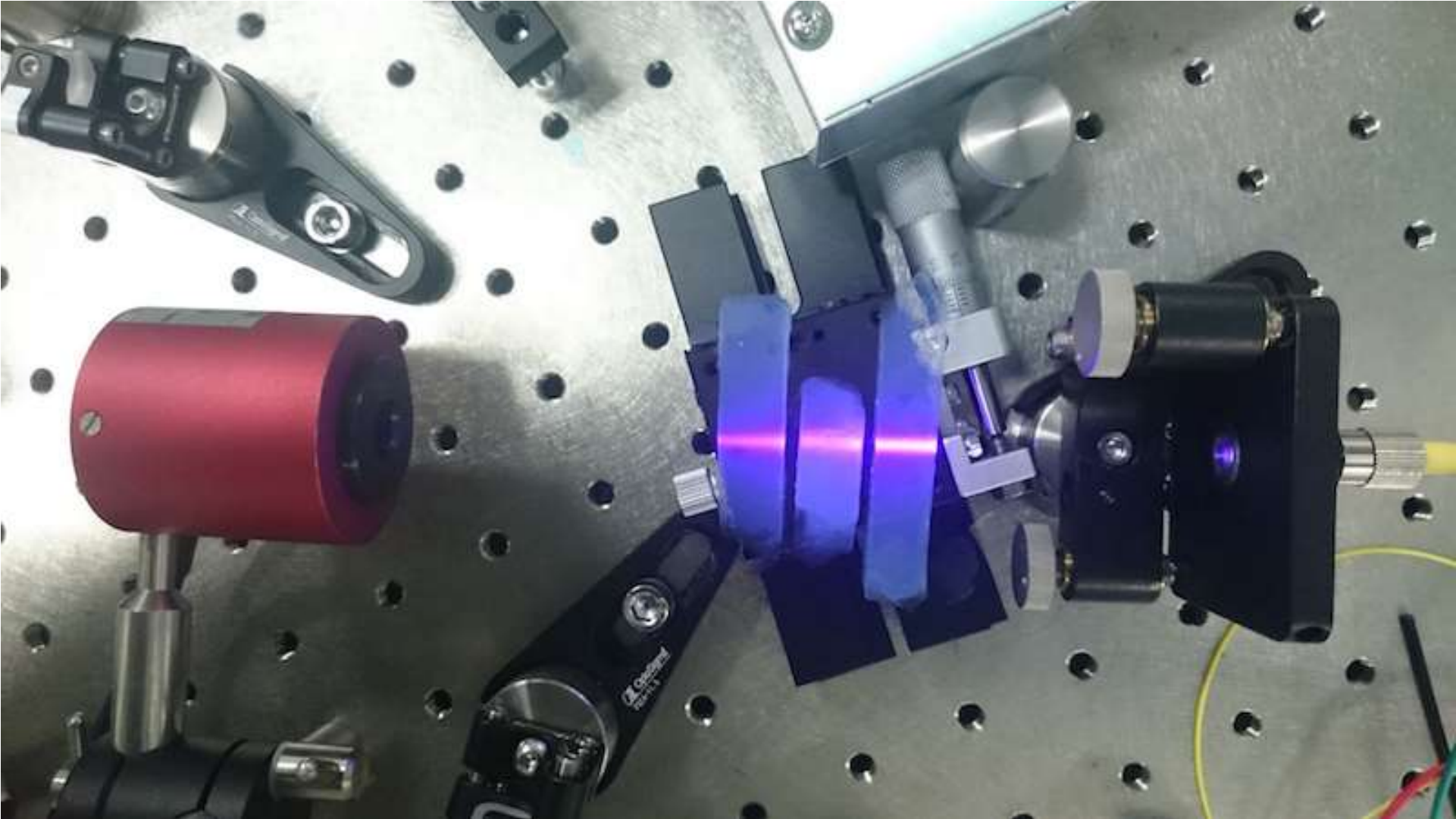


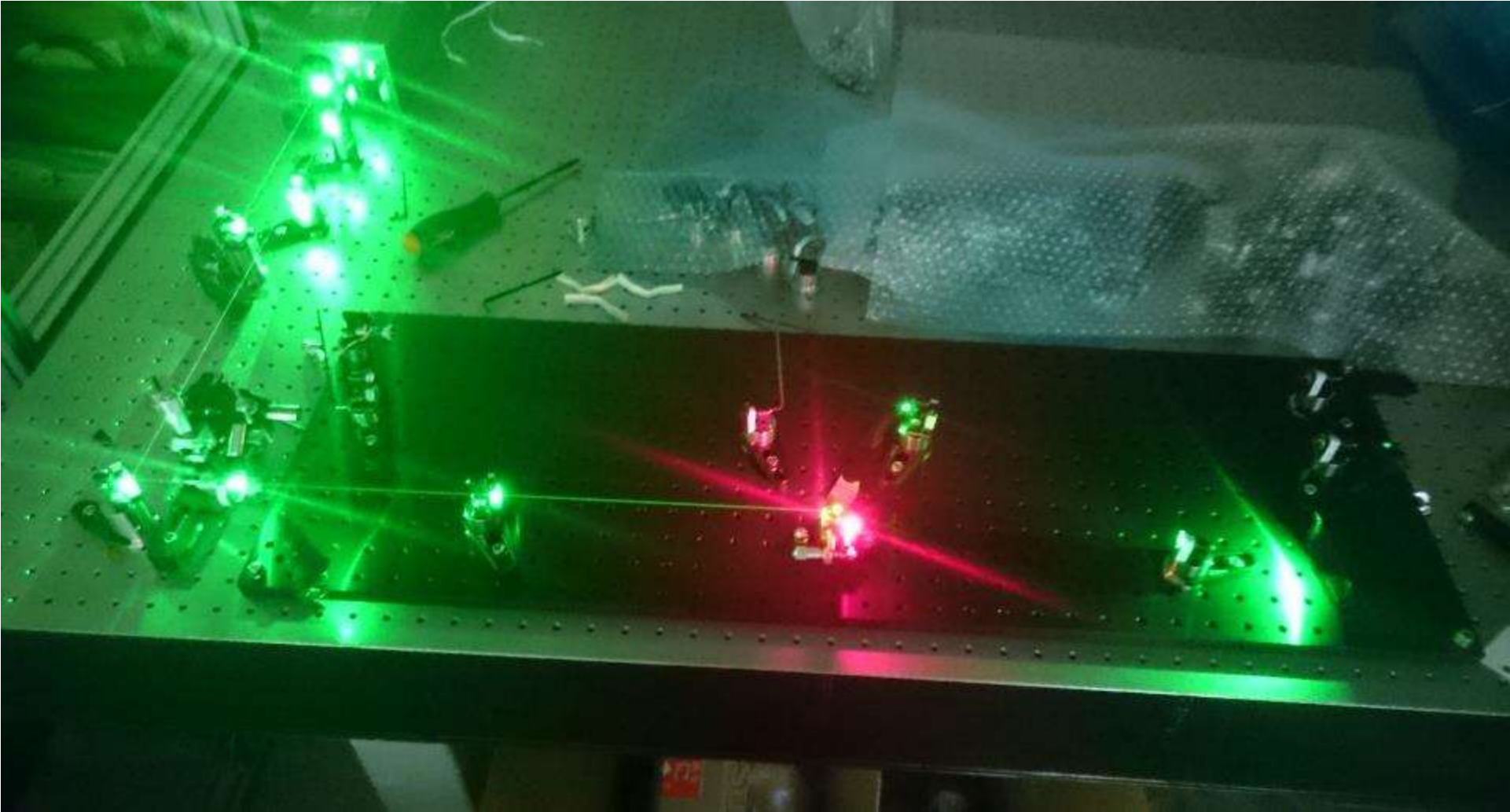


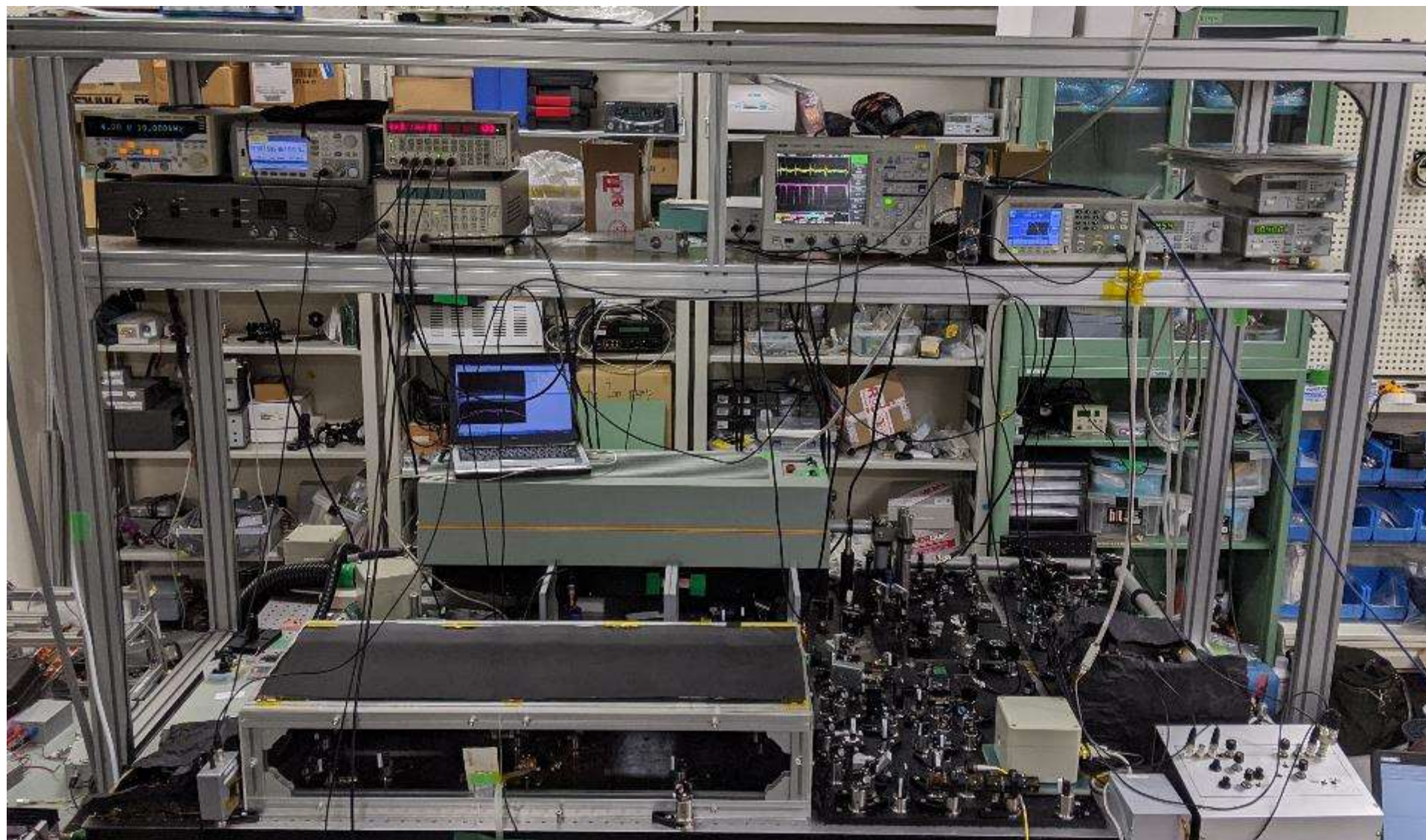














2022/4/19



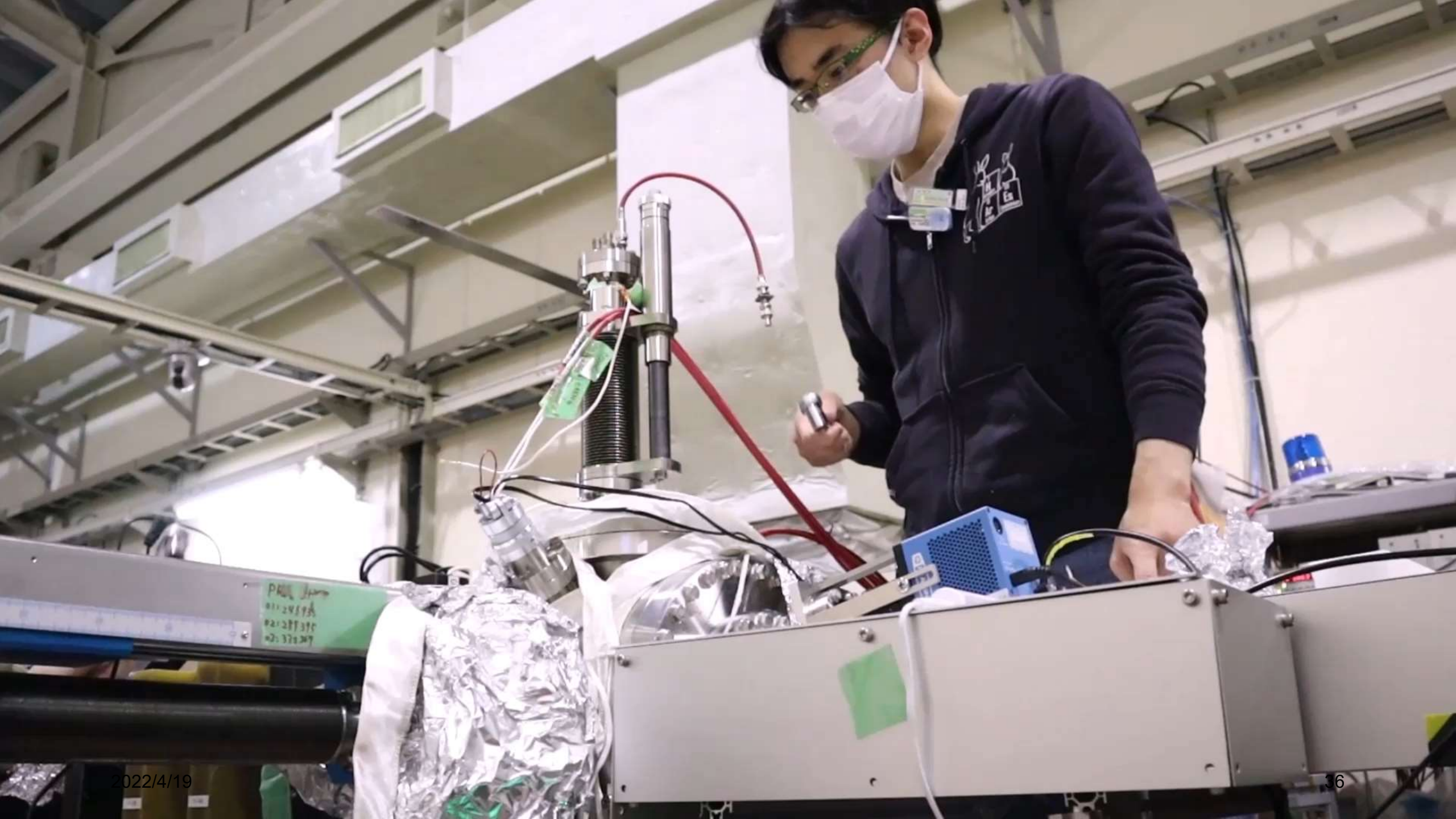
34

KEK-SPF 実験イメージビデオ

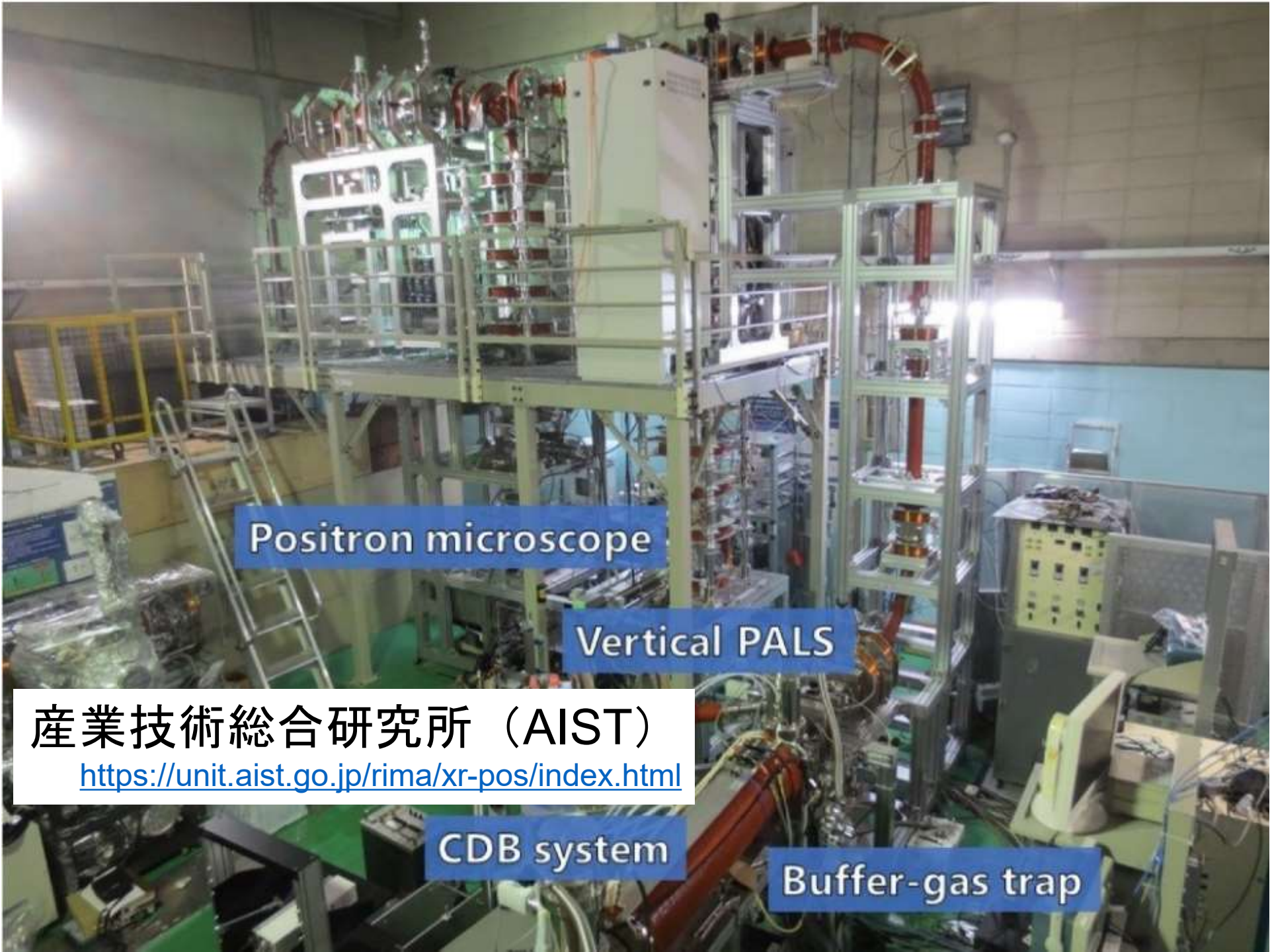
出演：魚住さん、周さん（工学系）

編集：石田

制作・著作 Ps-BEC実現委員会



PROJ. J-1000
01: 2417A
02: 28737C
03: 370247



Positron microscope

Vertical PALS

産業技術総合研究所 (AIST)

<https://unit.aist.go.jp/rima/xr-pos/index.html>

CDB system

Buffer-gas trap



産業技術総合研究所 (AIST)
<https://unit.aist.go.jp/rima/xr-pos/index.html>

2022/4/19



産業技術総合研究所 (AIST)
<https://unit.aist.go.jp/rima/xr-pos/index.html>

38



産業技術総合研究所 (AIST)

<https://unit.aist.go.jp/rima/xr-pos/index.html>