

# 超流動ヘリウムを用いた 超冷中性子源の開発と 最新の実験結果について

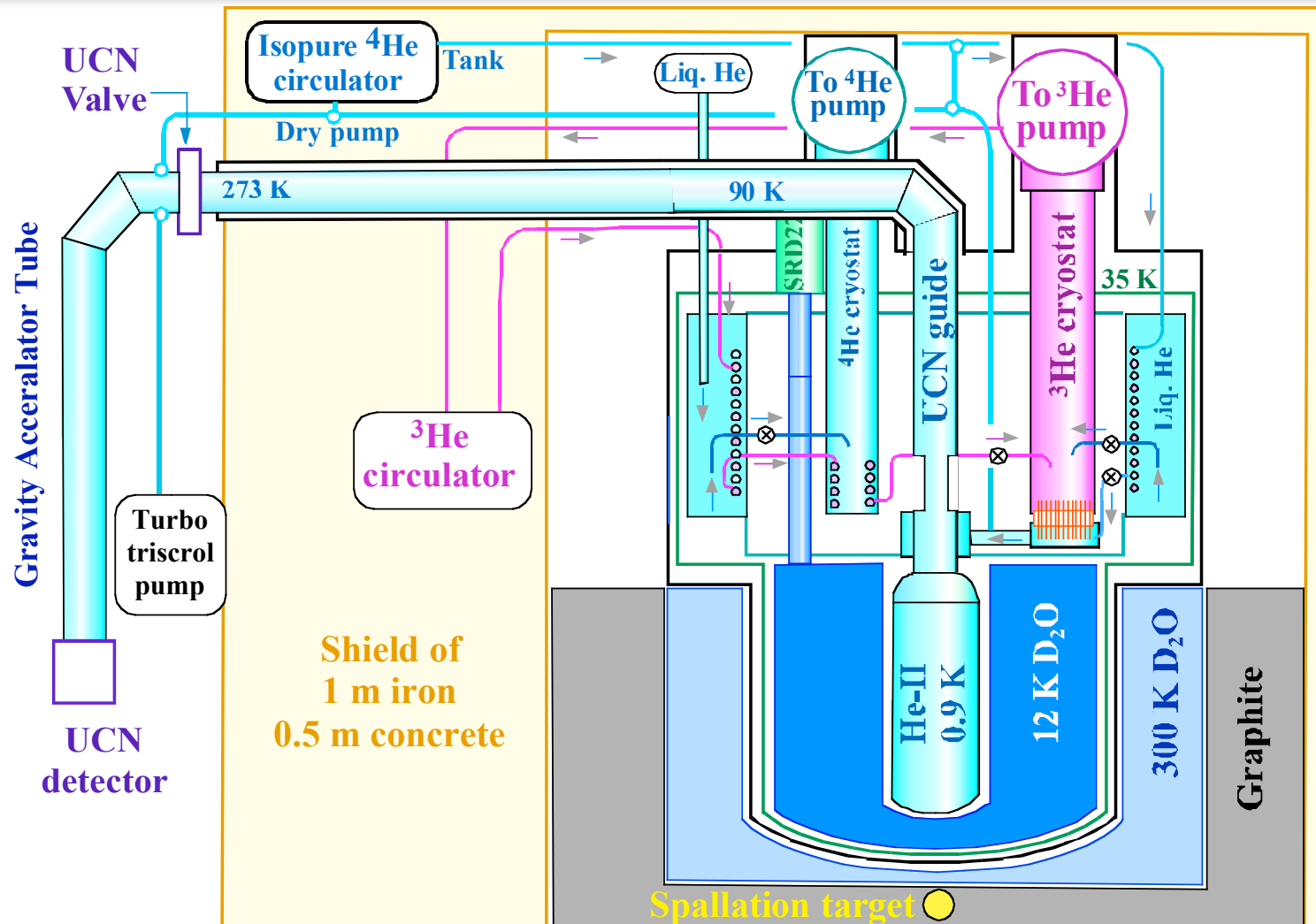
大阪大学 松宮 亮平

増田、渡邊、鄭（KEK）、  
松多（阪大）、畑中（RCNP）

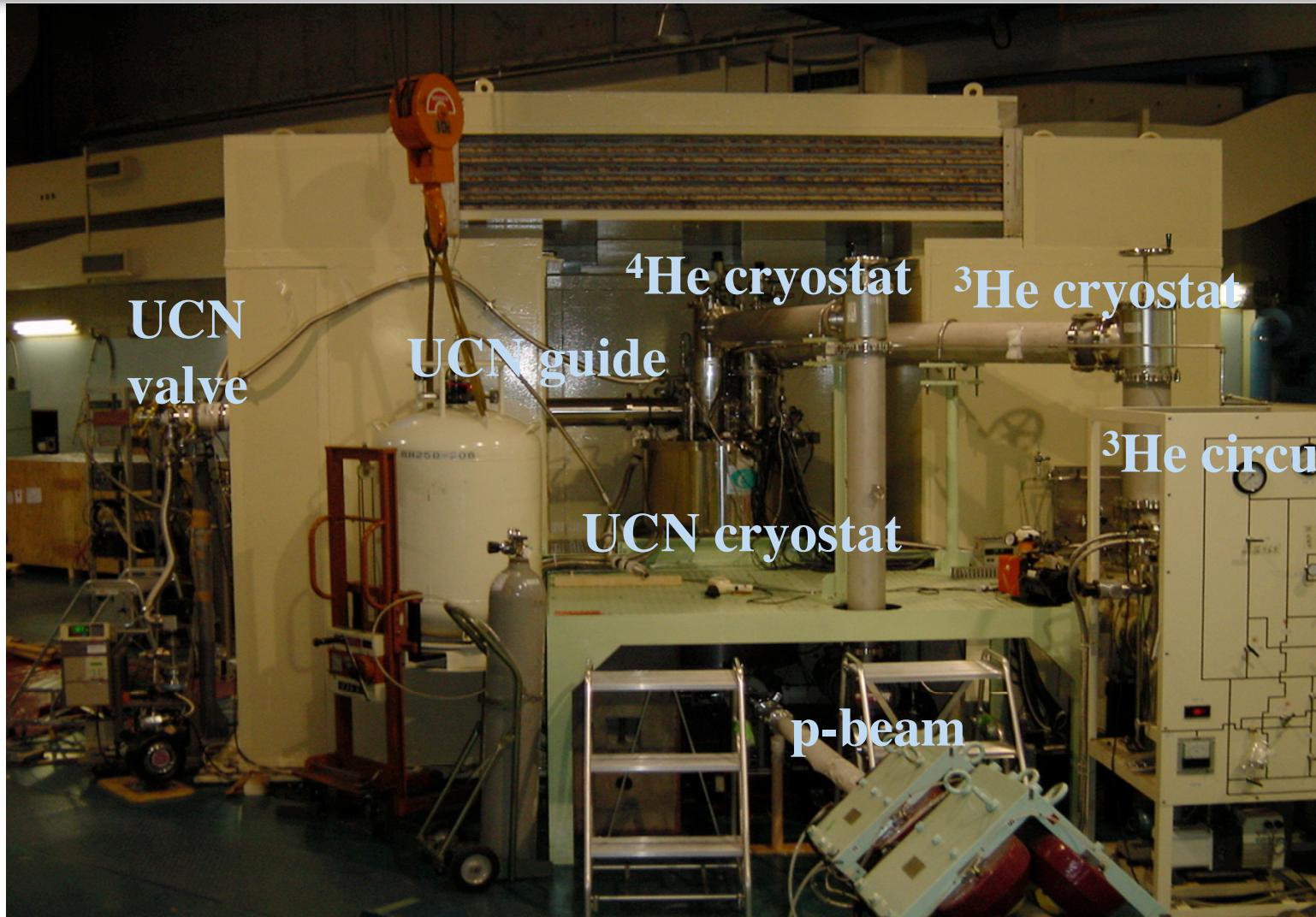
# 目次

- **UCN Cryostat の構造**
- **UCN Detector**
- **UCN生成実験とUCN密度**
- **Storage Time の分析**
  - (1) **DetectorによるUCNの損失**
  - (2) **He-II温度依存性**
  - (3)  **$^3\text{He}$ によるUCNの損失**
- **アルミ膜透過実験**
- **まとめ**

# UCN Cryostatの構造



# UCN Cryostat @ RCNP



UCN  
valve

UCN guide

$^4\text{He}$  cryostat

$^3\text{He}$  cryostat

$^3\text{He}$  circulator

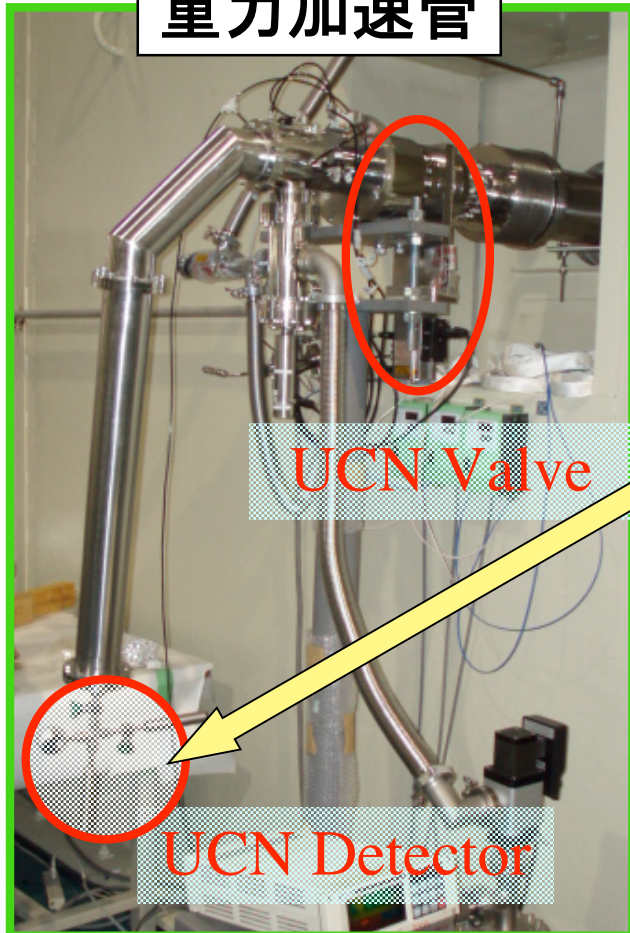
UCN cryostat

p-beam



# UCN Detector

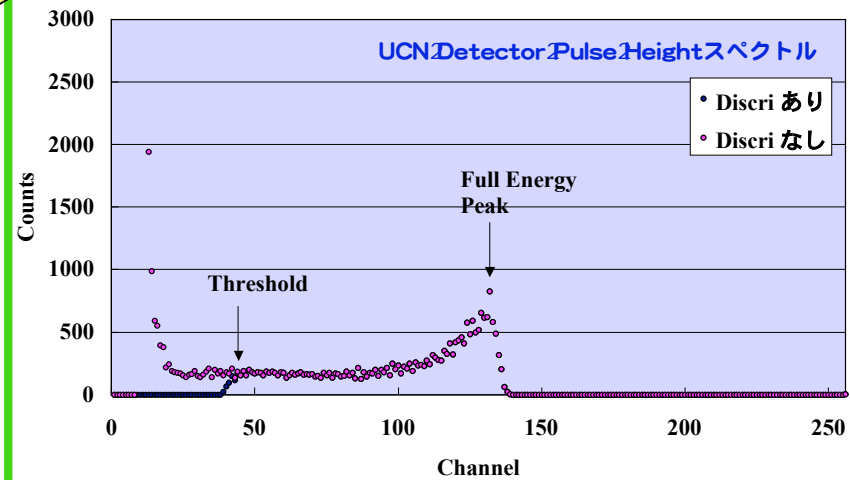
重力加速管



UCN Detector ( $^3\text{He}$  検出器)



$\phi 10\text{mm}$   
annular disk  
(SUS)

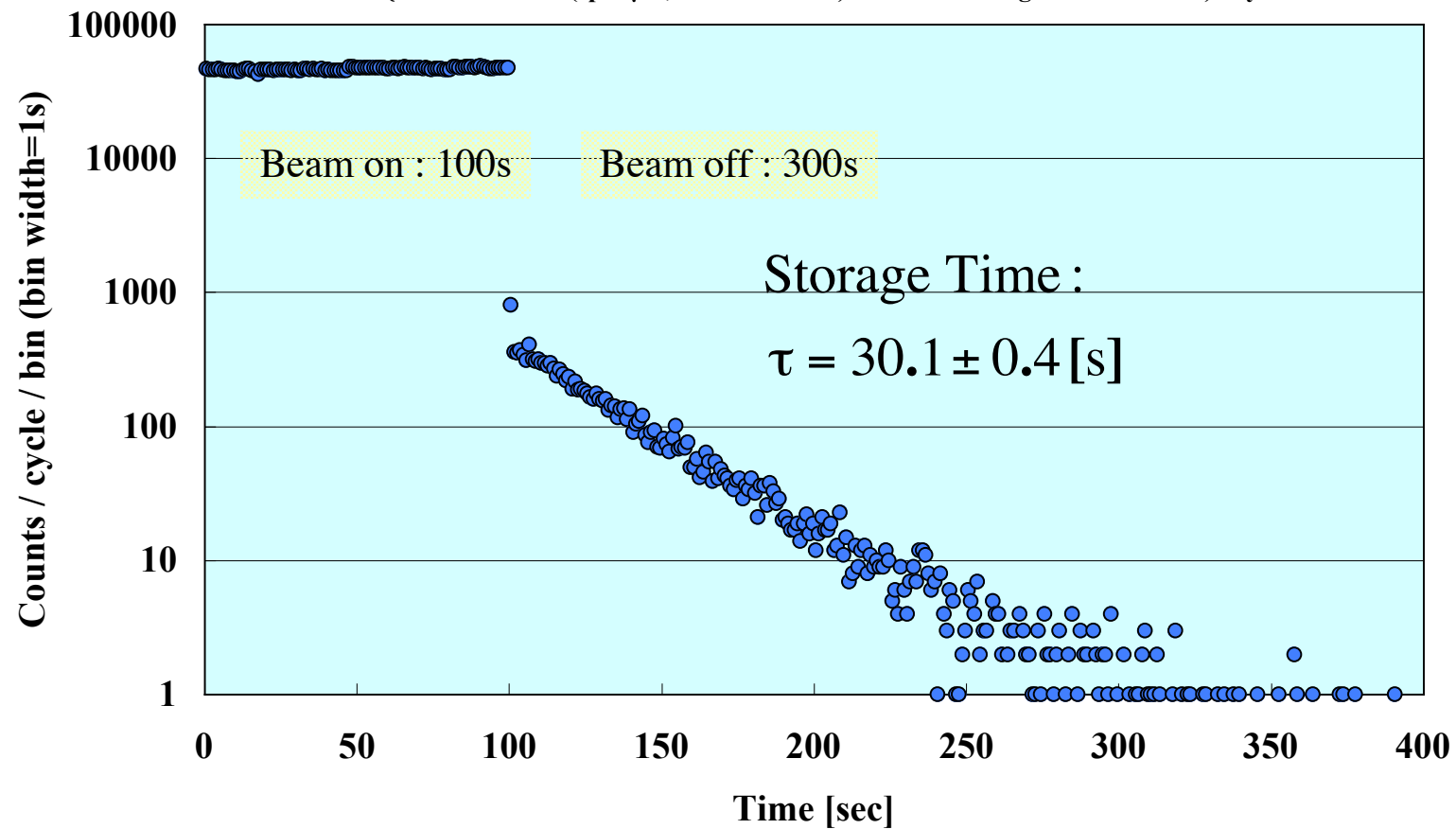


# UCN生成実験

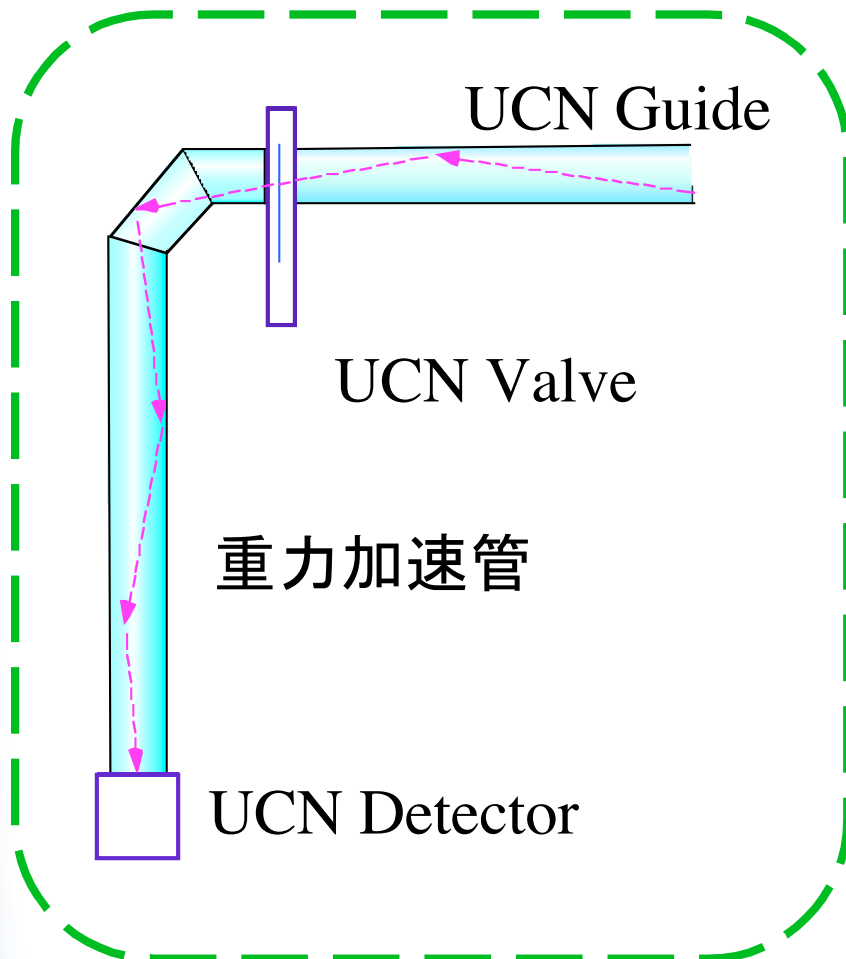
## UCN Time Spectrum / 100s Pulse / Open Mode / $I_p=1\mu\text{A}$

Beam Current Calibration:

UCN Counts \* {C.I. count rate ( $I_p=1\mu\text{A}$ , 513.1 counts/s) / UCN counting C.I. count rate} / cycle



# UCN密度の計算



Guide中のUCN flow rate

$$\frac{1}{4} \cdot \rho_{\text{UCN}} \cdot v_{\text{av}} \cdot S \cdot \varepsilon = 409 \text{ counts/s}$$

UCN 平均速度 :

$$v_{\text{av}} = 3.1 \text{ m/s at } E_c = 90 \text{ neV}$$

$S$  : Annular Disk の穴の面積

$\varepsilon$  : Detector efficiency (0.68)

$$\rho_{\text{UCN}} \sim 10 \text{ cm}^{-3}$$

**World Highest!**

# Storage Timeの分析

**UCN生成数 = UCN生成率 × Storage Time**

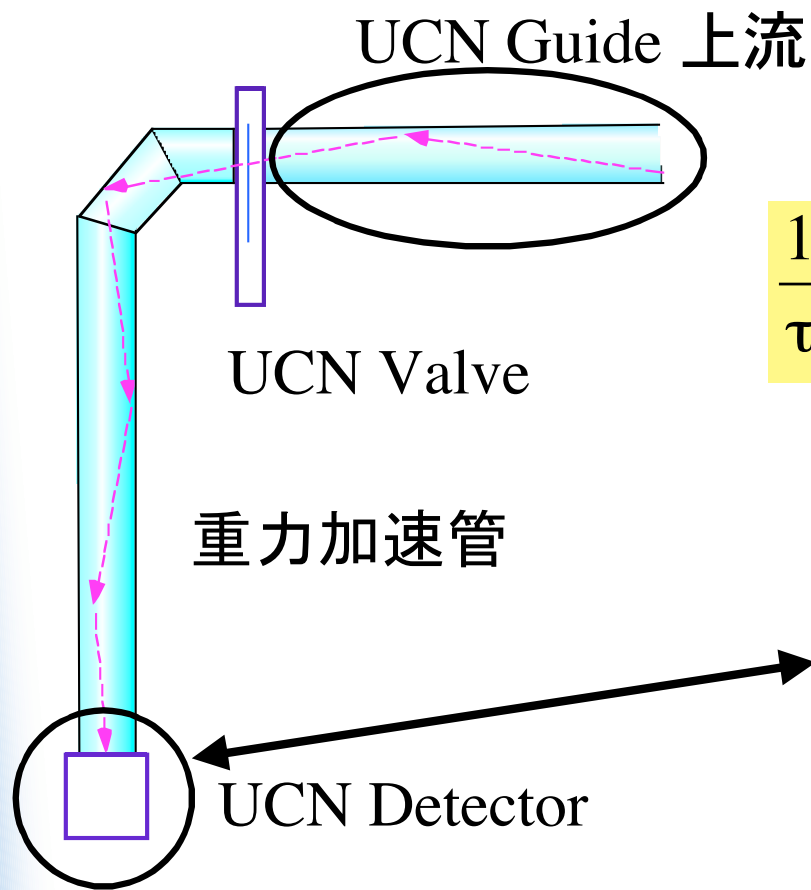
Storage Timeを伸ばすために

その成分を分析する。

## Storage Time を決める現象

- (1) UCN Detector による損失
- (2) He-II中のフォノンによるアップ散乱
- (3)  $^4\text{He}$  gas によるアップ散乱
- (4)  $^3\text{He}$  gas によるUCNの吸収
- (5) Wall Loss

# (1) UCN Detectorによる損失



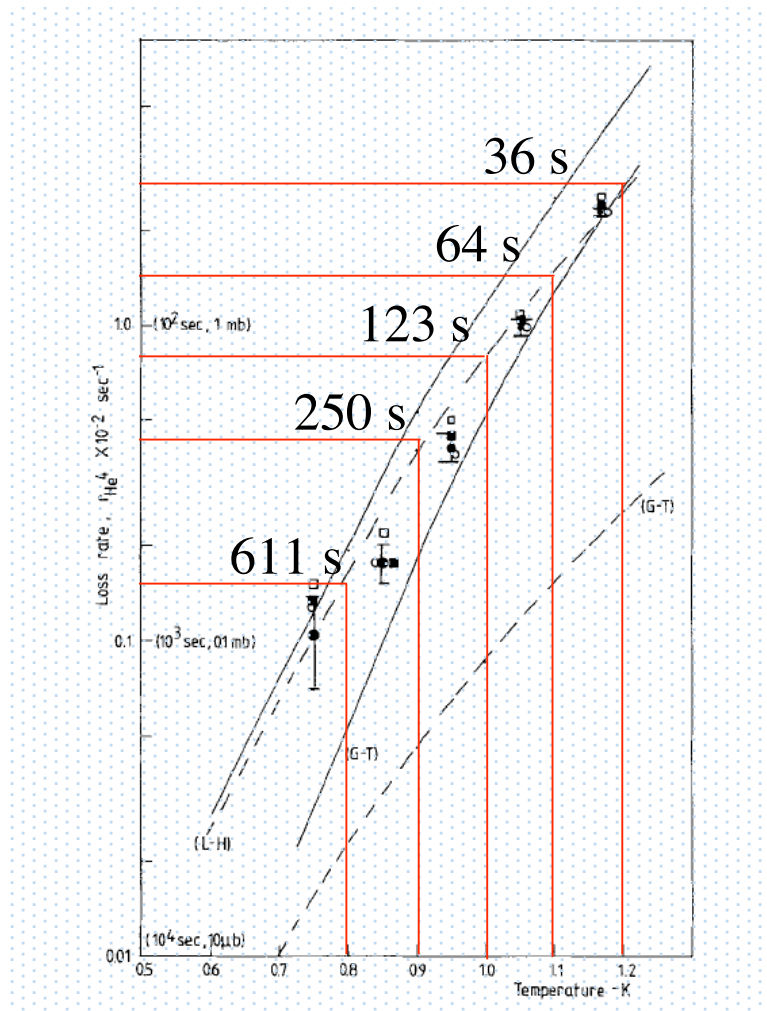
UCN cryostat中のUCN損失率

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{detector}}} + \frac{1}{\tau_{\text{He-II}}} + \frac{1}{\tau_{\text{4He}}} + \frac{1}{\tau_{\text{3He}}} + \frac{1}{\tau_{\text{wall}}}$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Detectorの Storage Time}}$        $\underbrace{\hspace{15em}}_{\text{UCN Guide上流の Storage Time}}$



## (2) He-II中のフォノンによるアップ散乱



phonon up-scattering  
in He-II

$$1/\tau \propto T^7$$

Golub et al. (1983)

$$T_{\text{He-II}} = 0.85 \text{ K}$$

$$1/\tau_{\text{He-II}} = 2.8 \times 10^{-3} \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

$$\tau_{\text{He-II}} \sim 350 \text{ [s]}$$

### (3) $^4\text{He}$ gas によるアップ散乱

$$1/\tau_{\text{He}} = \rho v \sigma_{\text{He}}$$

- $\rho = 4.3 * 10^{17} [\text{cm}^{-3}]$  ( $T_{\text{He-II}} = 0.85 \text{ K}$ )
- $\sigma_{\text{He}} = 0.76 * 10^{-24} [\text{cm}^{-2}]$
- $v_{\text{He}} = 72.6 [\text{m/s}]$  ( $T_{\text{He-II}} = 0.85 \text{ K}$ )

$$1/\tau_{\text{He}} = \rho v \sigma_{\text{He}} = 2.4 * 10^{-3} [\text{s}^{-1}]$$

$$\tau_{\text{He}} \sim 420 [\text{s}]$$

## (4) $^3\text{He}$ gas による吸収

$$1/\tau_{\text{abs}} = \rho \nu \sigma_{\text{abs}}$$

- $\sigma_{\text{abs}} = 5333 * 10^{-24} [\text{cm}^{-2}]$  at  $\nu = 2200 [\text{m/s}]$
- $\sigma_{\text{abs}} \propto 1/\nu$
- $\rho$  : 1.45kg の高純度He gas を液化したので  
$$\rho = (1.45 \text{ kg} / 4 \text{ g}) * 6.02 * 10^{23} * 0.00000137 / V$$
$$= 1.0 * 10^{16} [\text{cm}^{-3}]$$

$$\tau_{\text{abs}} = 0.085 [\text{s}]$$

## (5) Wall Loss

- 壁面での吸収とアップ散乱で決まる。
- 表面に吸着した水素によるアップ散乱の影響が大きい。

$$\frac{1}{\tau_{\text{wall}}} \approx \frac{A}{4V} v \mu$$

$A$  : 容器の全表面積

$V$  : 容器の体積

$v$  : UCNの速さ

$\mu$  : 反射1回あたりの損失率

# Storage Time の分析

## 現在の装置で可能な測定は

### (1) Delay Mode

- UCN Detector による損失の分離

### (2) He-II 温度依存性

### (3) $^3\text{He}$ gas 濃度を変えて測定

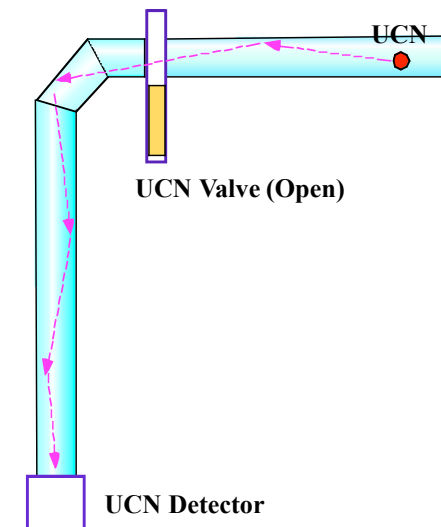
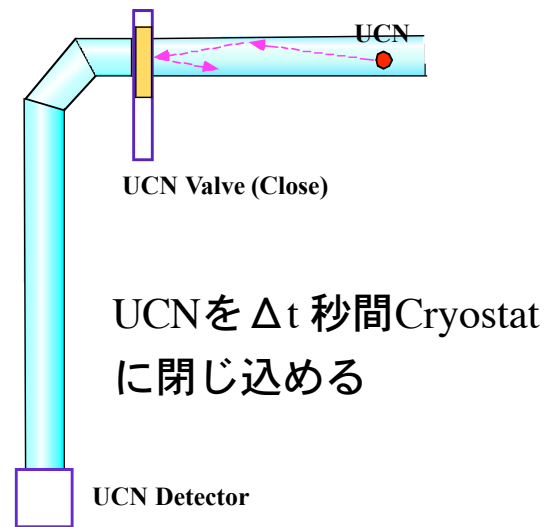
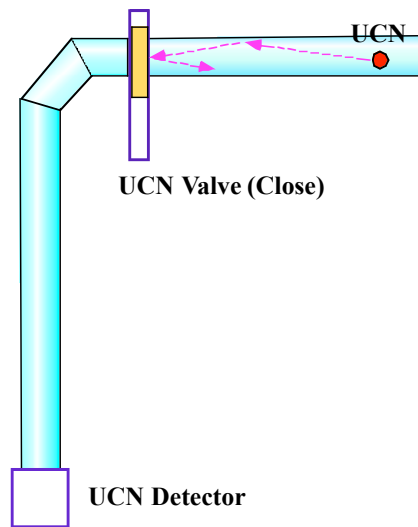


# UCN Valve 操作 : Delay Mode

Beam ON時 :  
UCN Valve Close

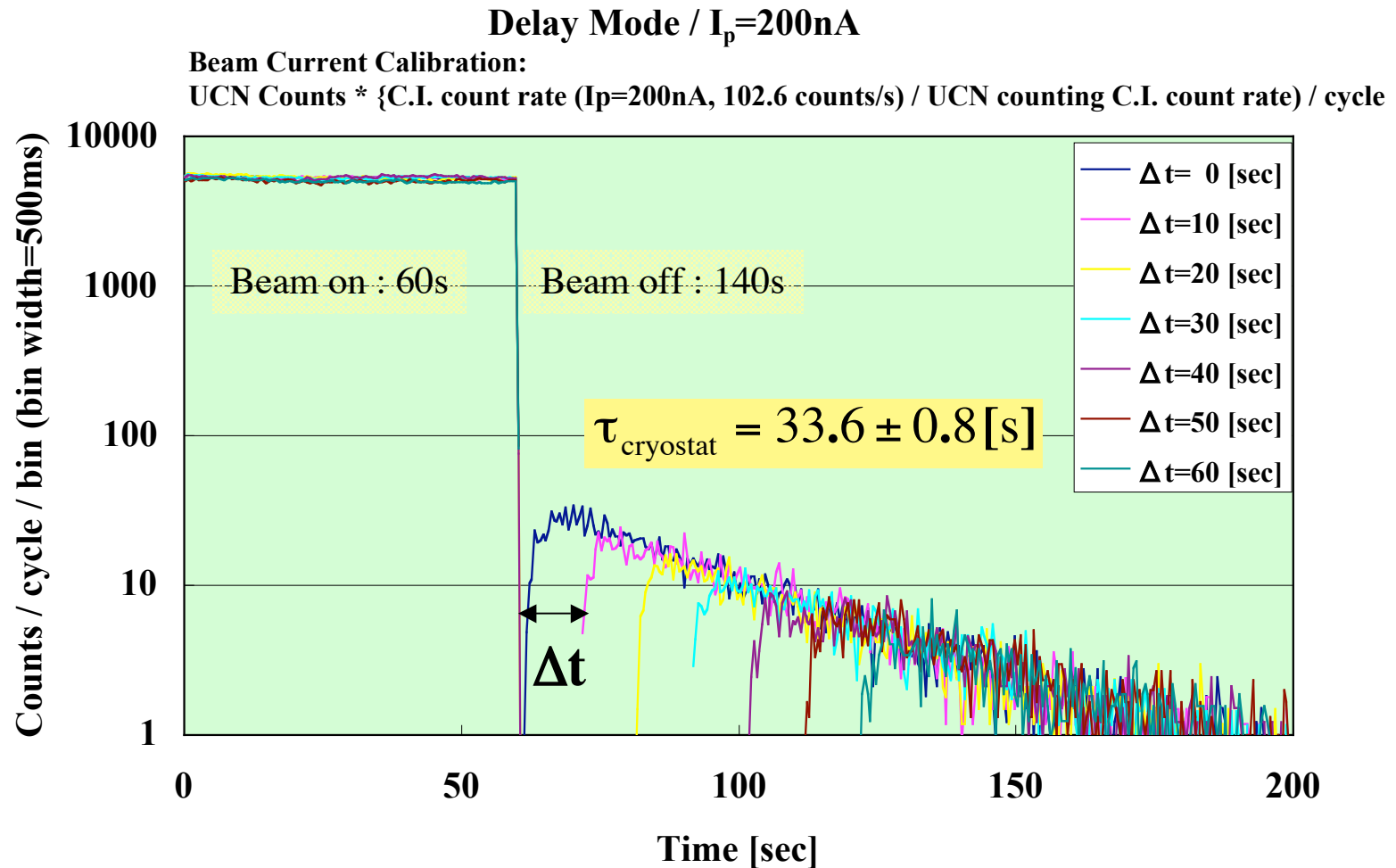
Beam OFF ~  $\Delta t$  秒間 :  
UCN Valve Close

$\Delta t$  秒後以降 :  
UCN Valve Open



UCN Detectorによる損失を取り除き、  
Cryostat内のStorage Timeを測定する。

# (1) Delay Mode



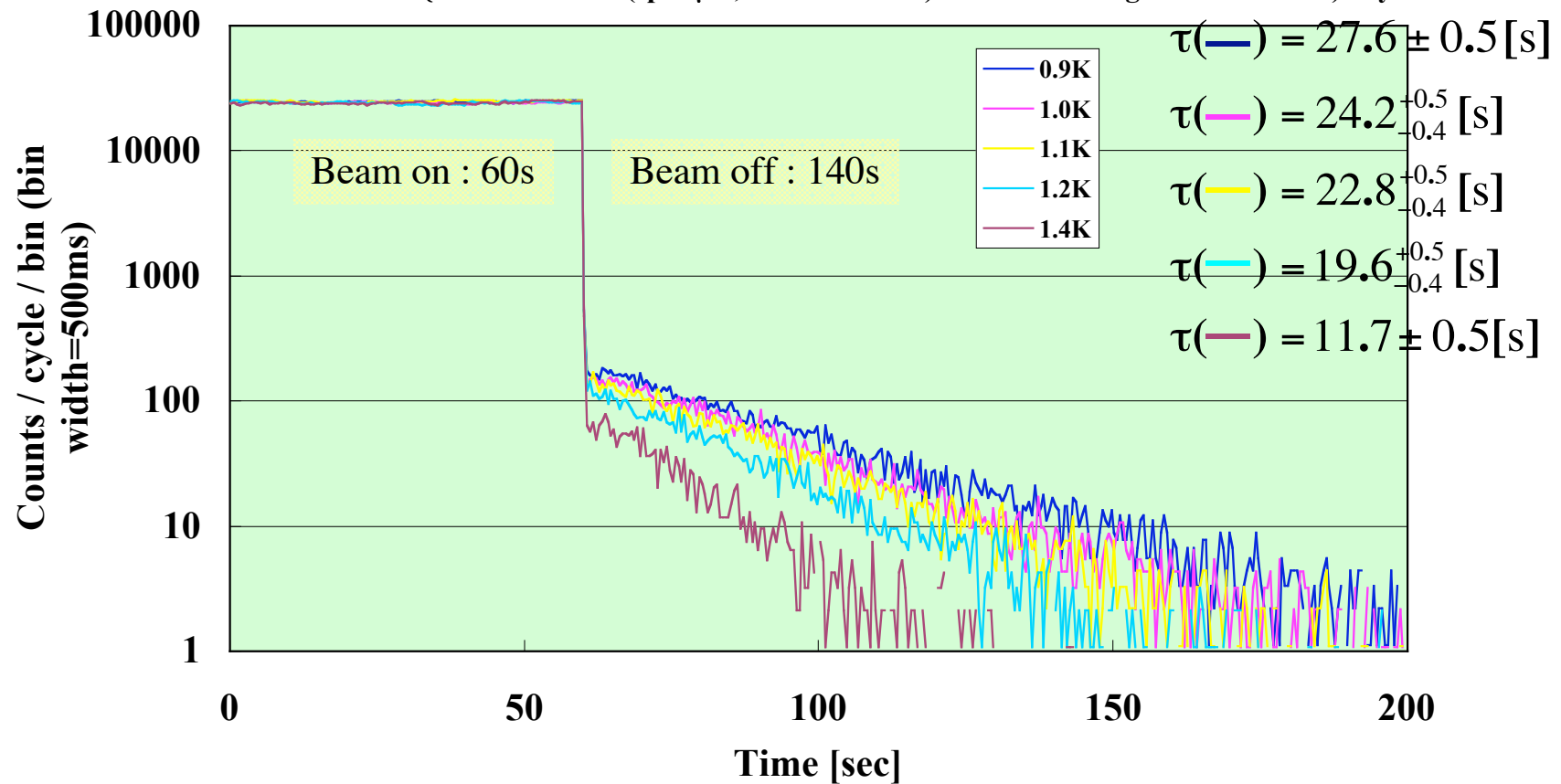


# He-II 温度依存性 (Open Mode)

## He-II Temperature Dependence / Open Mode / $I_p=1\mu\text{A}$

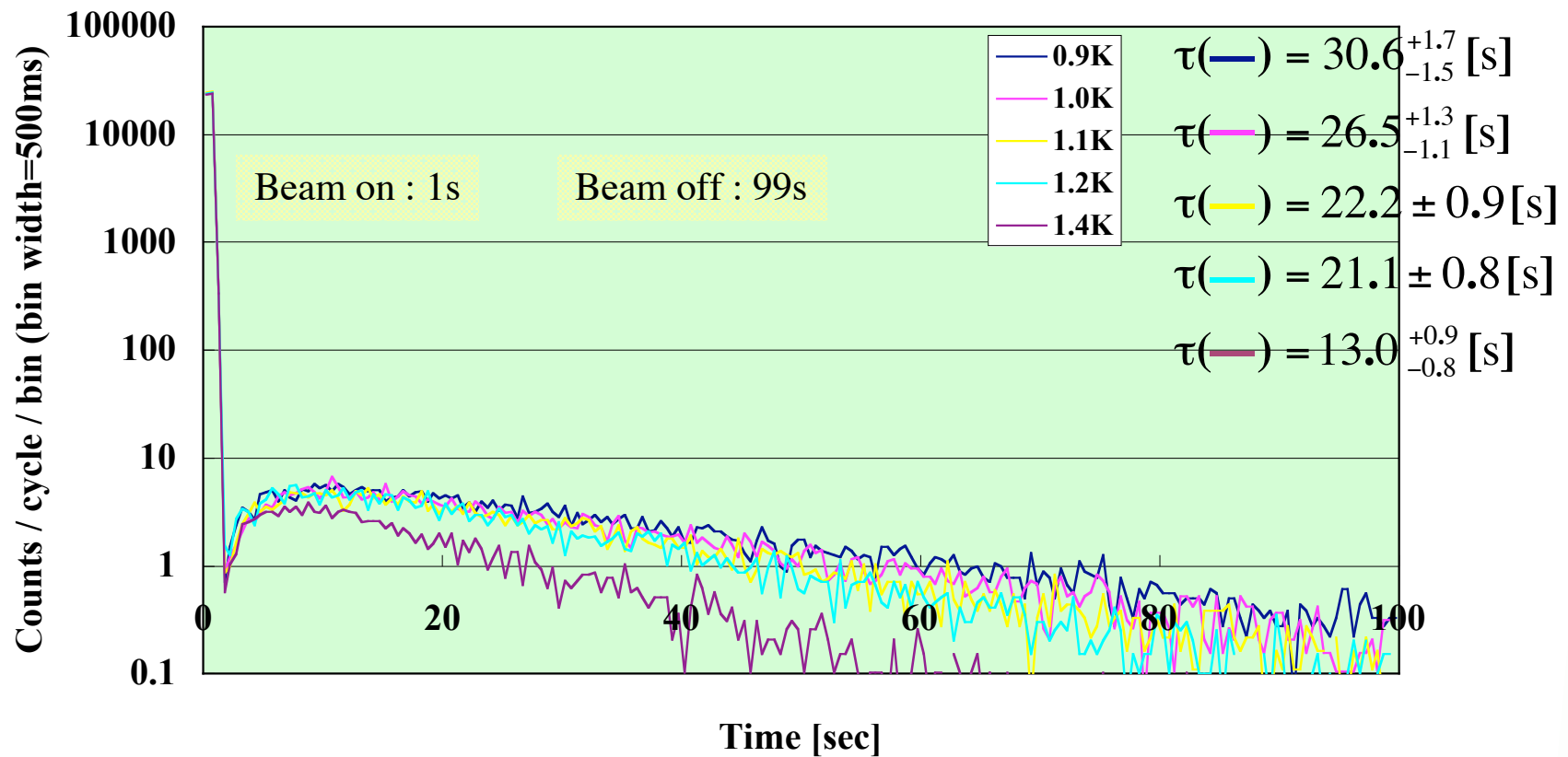
Beam Current Calibration:

UCN Counts \* {C.I. count rate ( $I_p=1\mu\text{A}$ , 513.1 counts/s) / UCN counting C.I. count rate} / cycle



# He-II温度依存性(1s Pulse Mode)

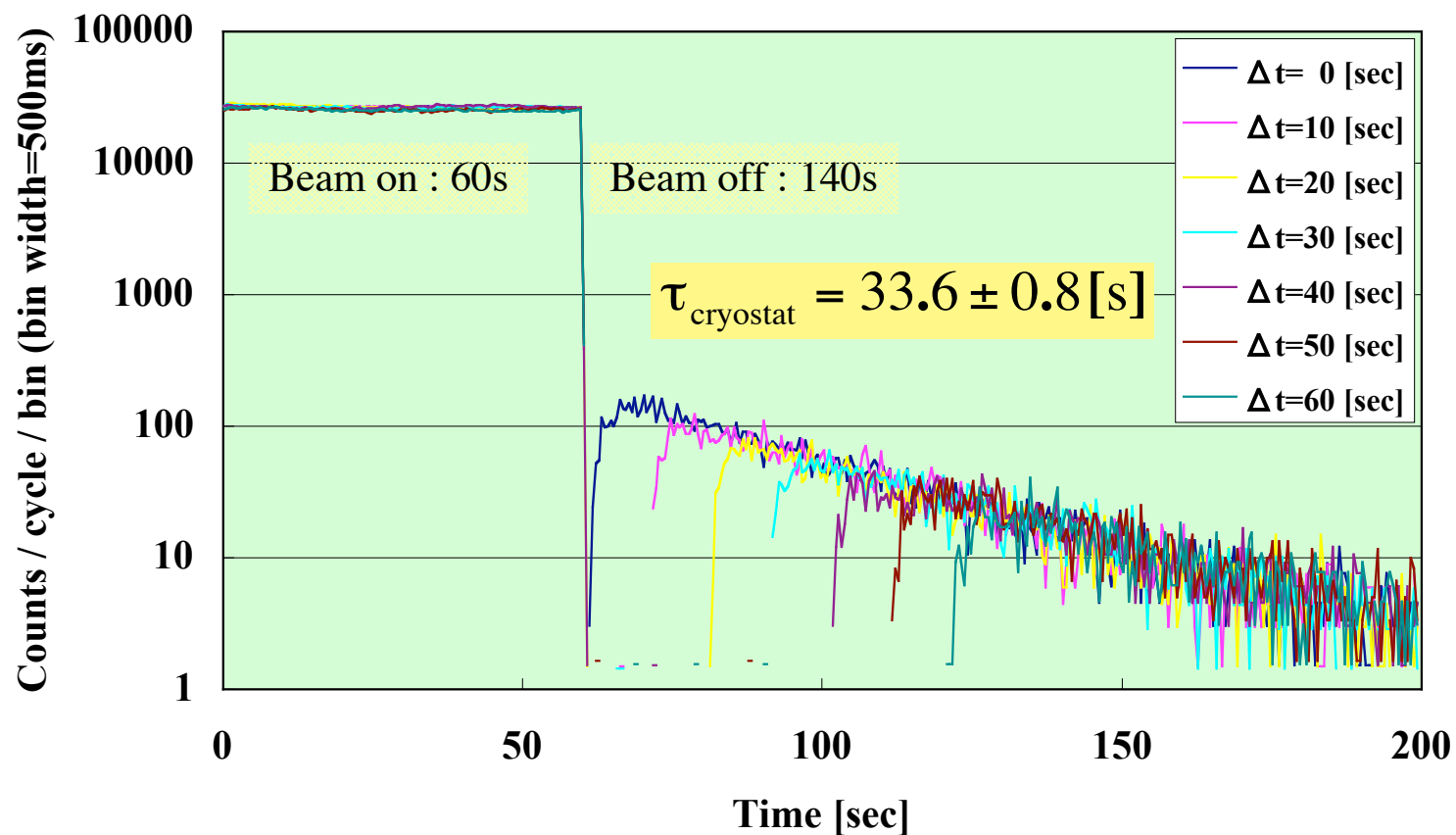
He-II Temperature Dependence / 1s Pulse Mode /  $I_p=1\mu\text{A}$





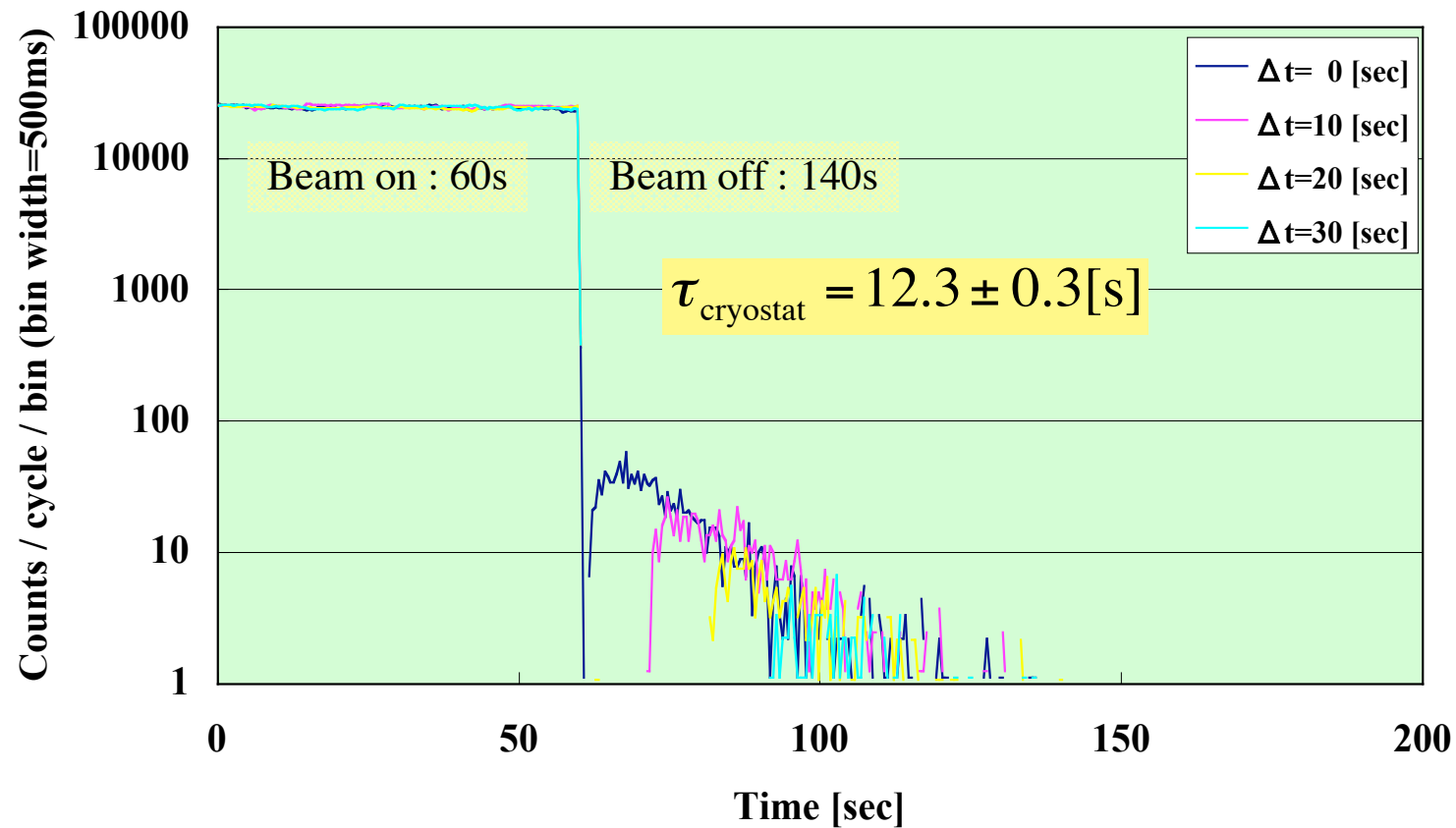
# Delay Mode (He-II温度:0.85K)

Delay Mode / He-II Temperature 0.85K /  $I_p = 1\mu\text{A}$



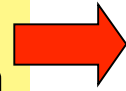
# Delay Mode (He-II 温度: 1.4K)

Delay Mode (He-II Temperature 1.4K) /  $I_p=1\mu\text{A}$

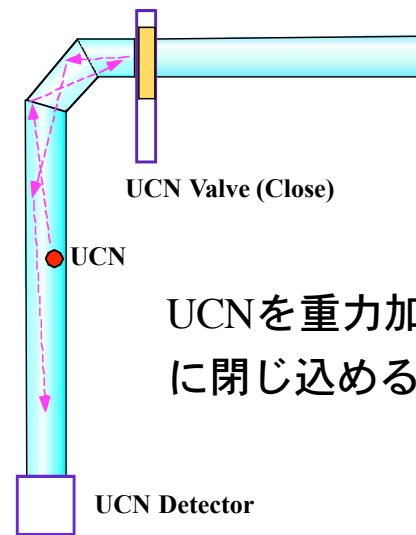
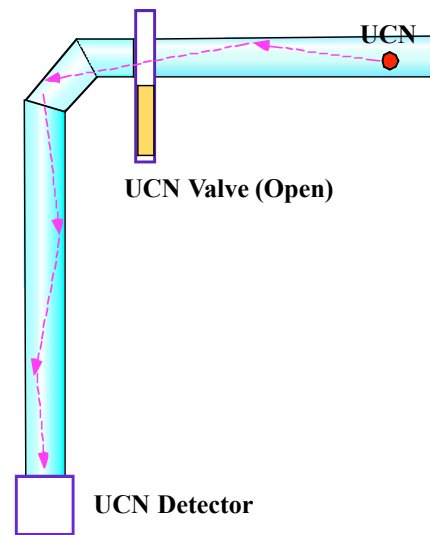


# UCN Valve操作 : Filling Mode

Beam ON時 :  
UCN Valve Open



Beam OFF時 :  
UCN Valve Close

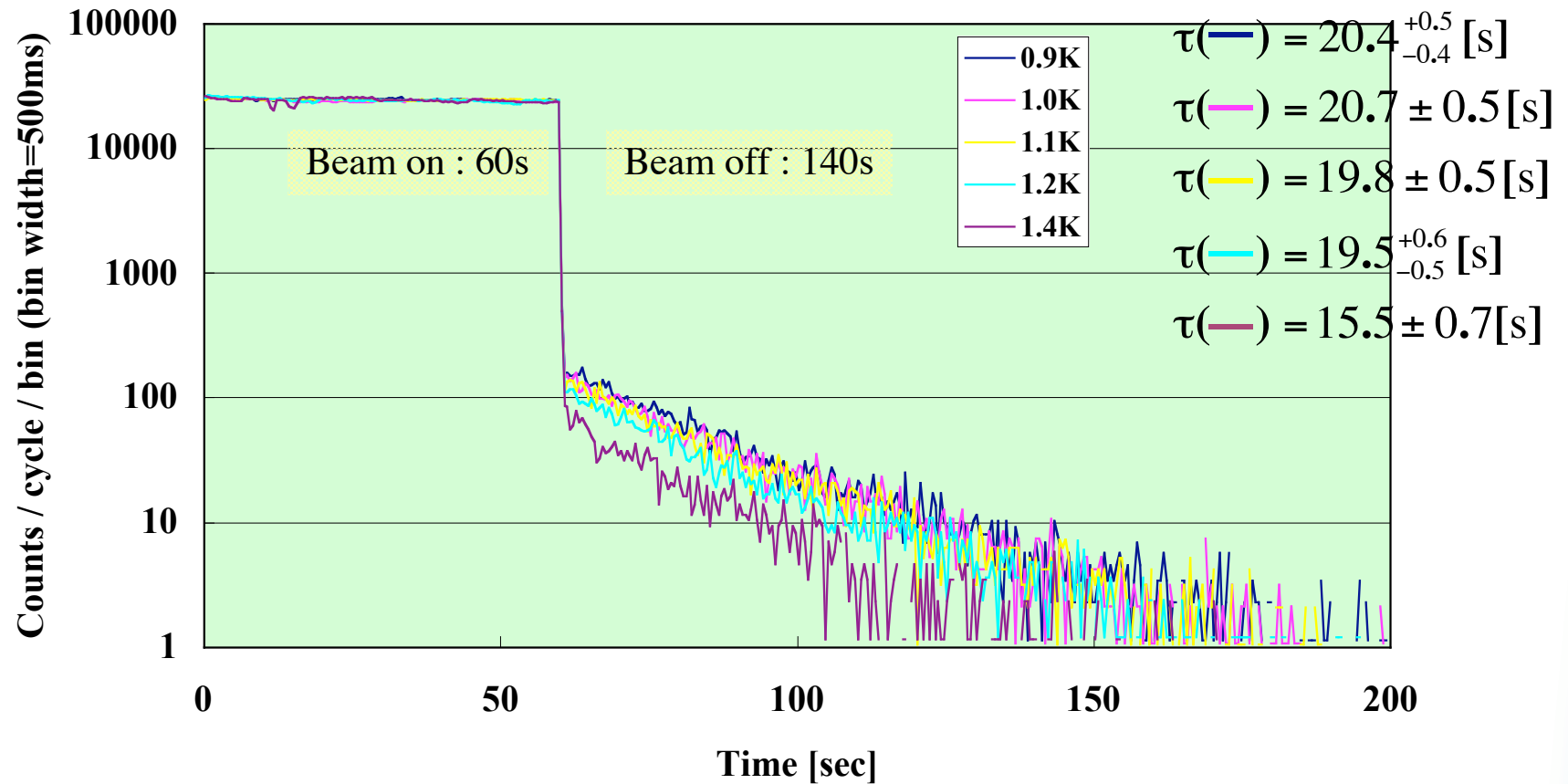


UCNを重力加速管内  
に閉じ込める

He-II Bottle周辺の影響を分離し、  
重力加速管内のStorage Timeを測定する

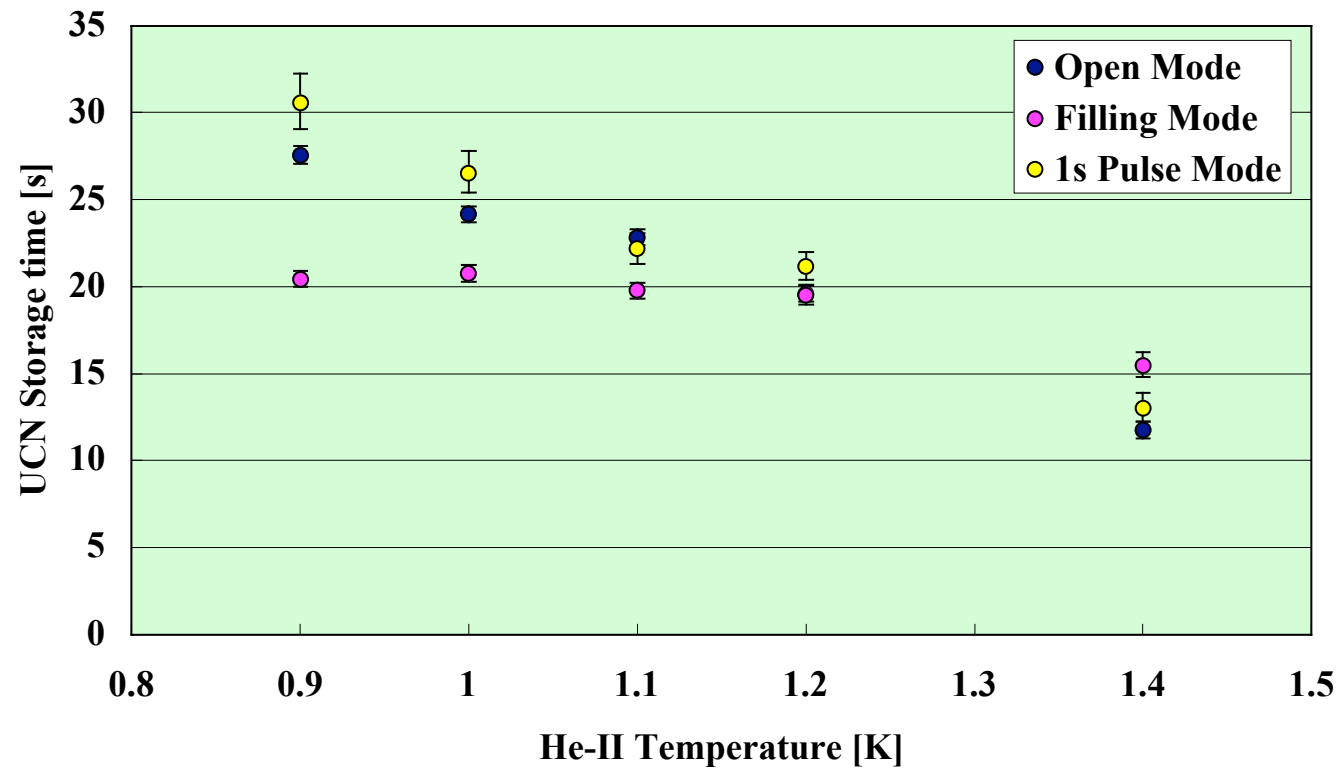
# He-II温度依存性(Filling Mode)

He-II Temperature Dependence / Filling Mode /  $I_p=1\mu A$



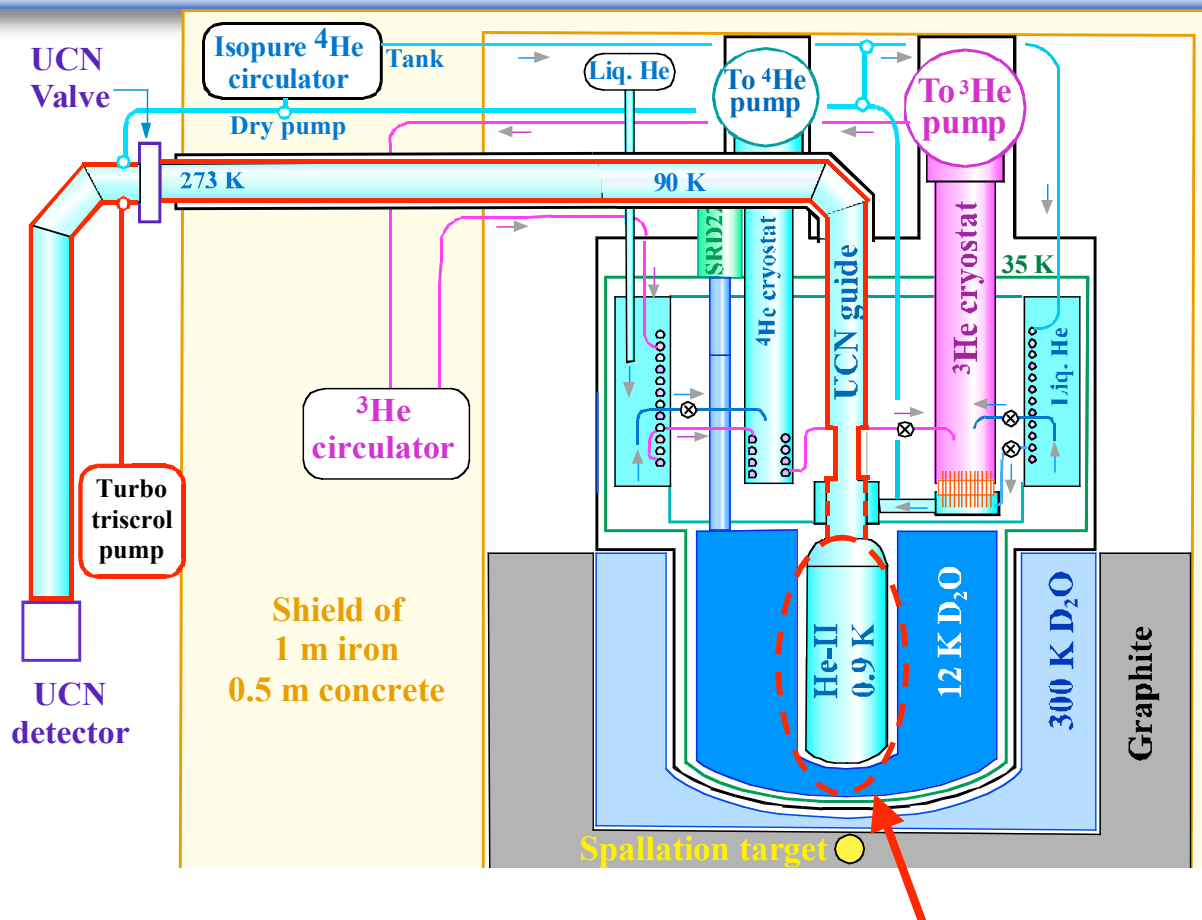
# Storage Time の He-II 温度依存性

He-II Temperature Dependence of UCN Storage Time





# (3) $^3\text{He}$ gas 濃度を変えて測定



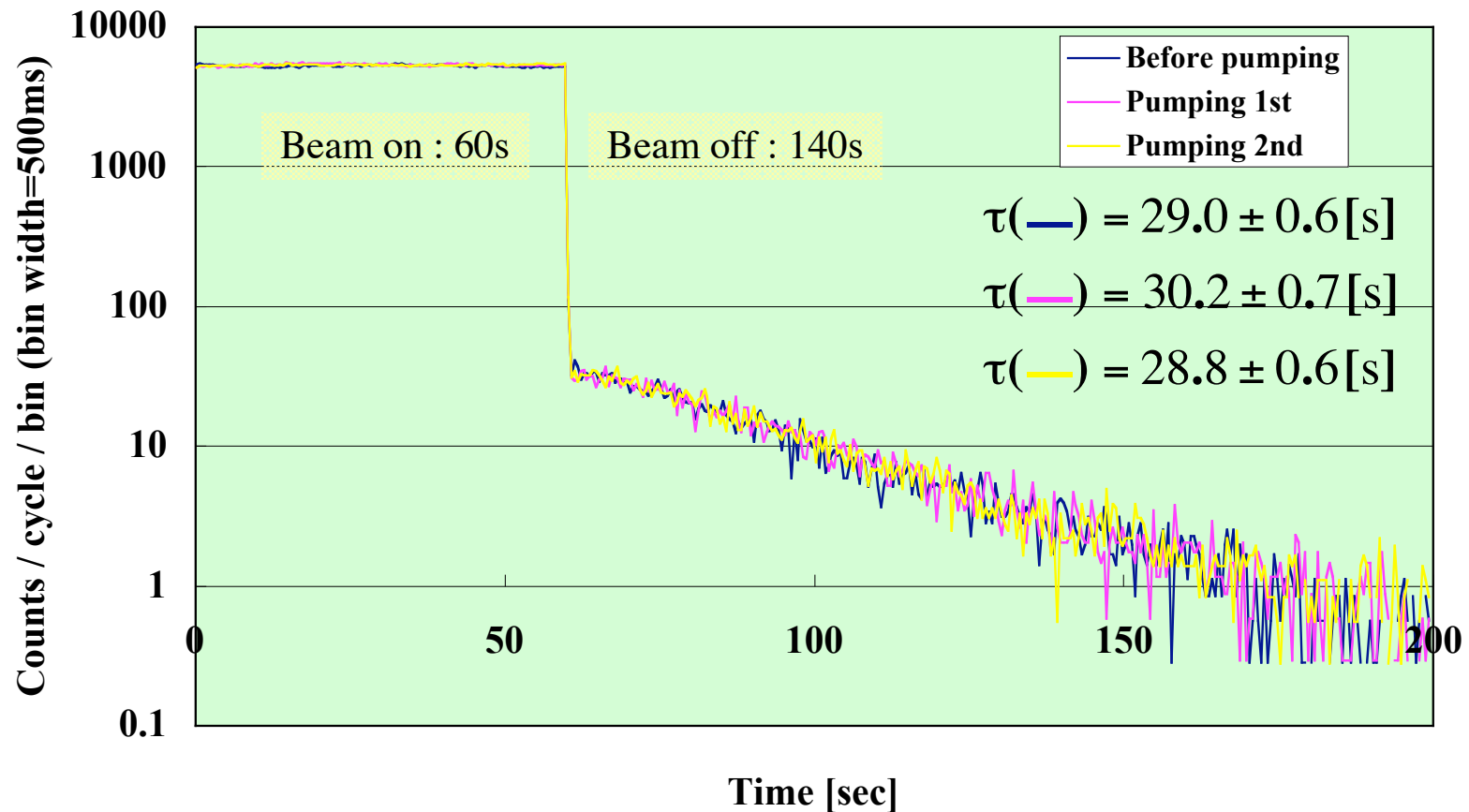
UCN Guideを真空引きして、 $^3\text{He}$ を取り除く

# $^3\text{He}$ 濃度変更 (Open Mode)

$^3\text{He}$  Impurity Dependence / Open Mode /  $I_p=200\text{nA}$

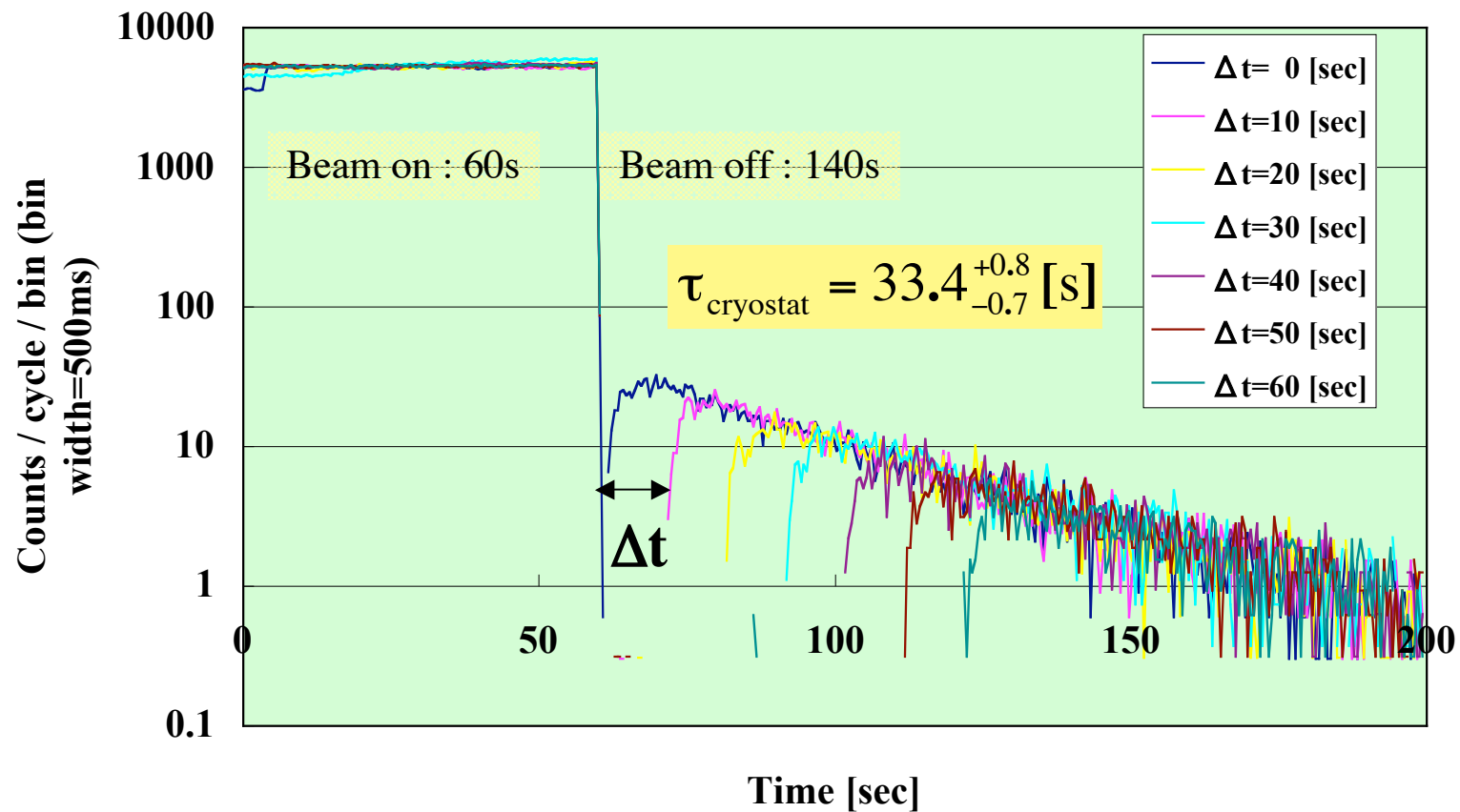
Beam Current Calibration:

UCN Counts \* {C.I. count rate ( $I_p=200\text{nA}$ , 102.6 counts/s) / UCN counting C.I. count rate} / cycle



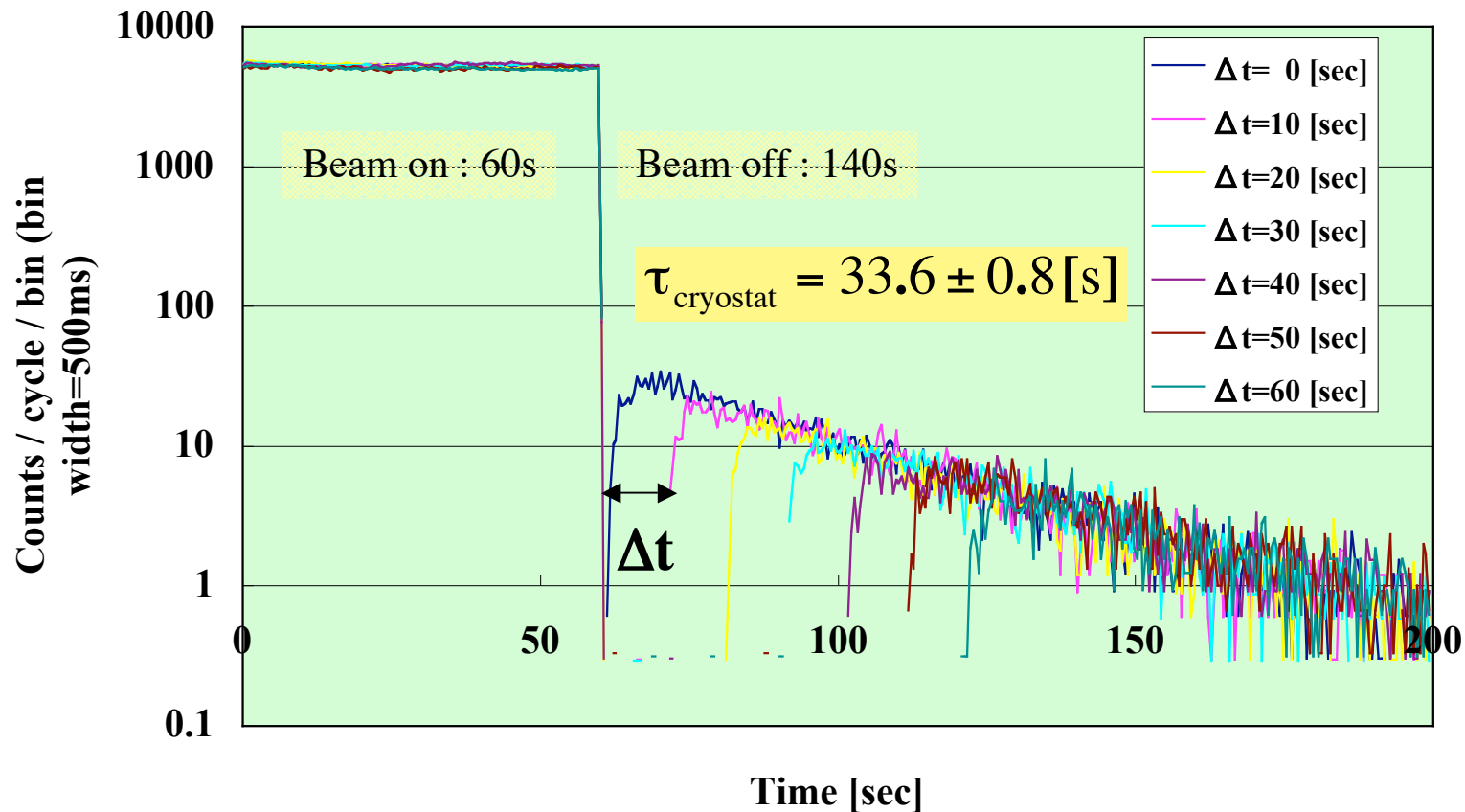
# $^3\text{He}$ 濃度変更(Delay Mode / 真空引き前)

$^3\text{He}$  Impurity Dependence / Delay Mode (Before Pumping) /  $I_p=200\text{nA}$

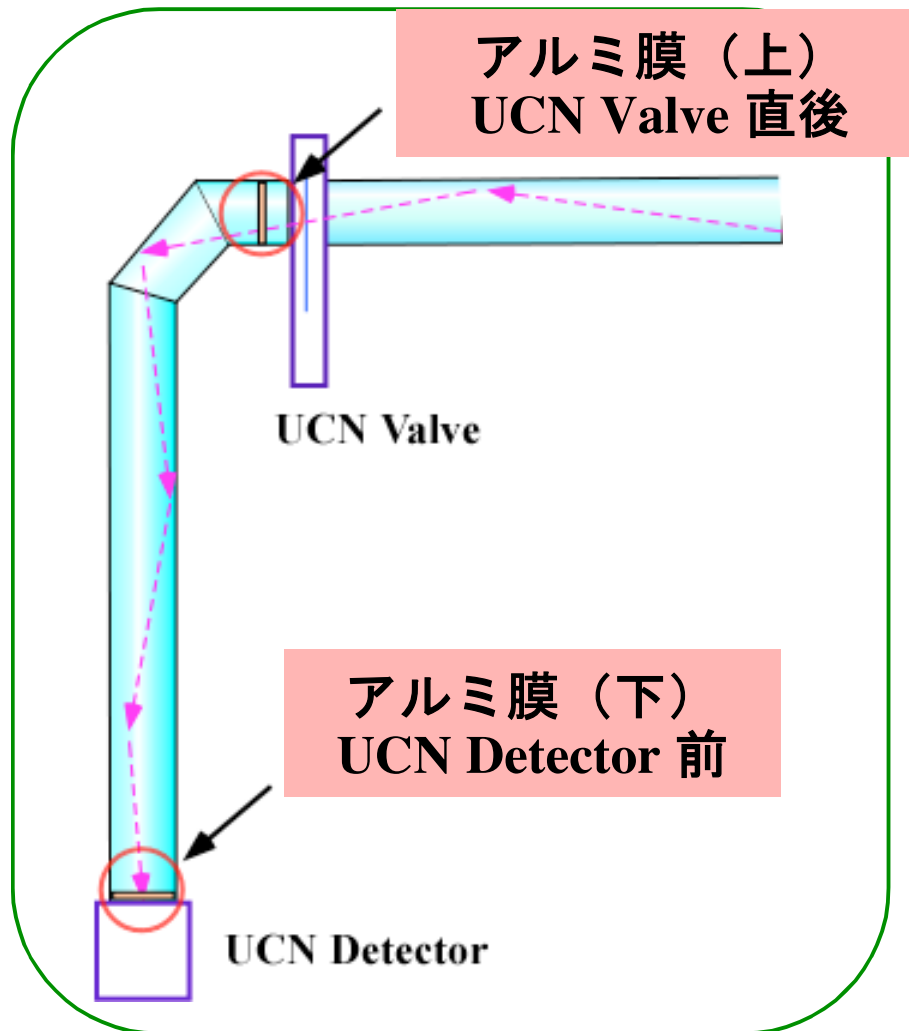


# $^3\text{He}$ 濃度変更(Delay Mode / 真空引き後)

$^3\text{He}$  Impurity Dependence / Delay Mode (After Pumping) /  $I_p=200\text{nA}$



# アルミ膜透過実験



重力加速管内にアルミ膜 (厚さ $100\mu\text{m}$ )を設置し、UCNカウント数の変化を測定する。

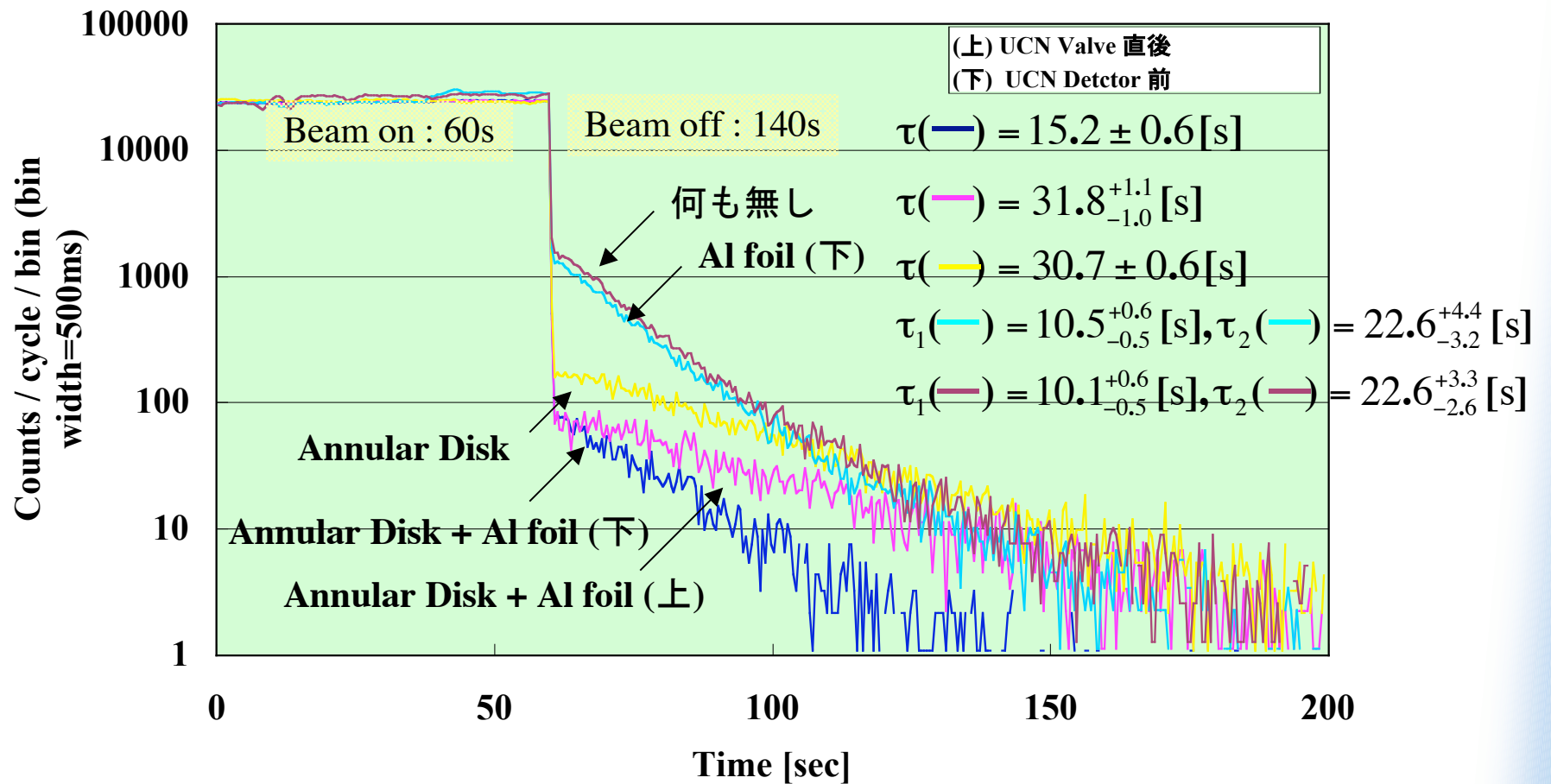
UCN Detector 前 : 上

UCN Valve直後 : 下

と呼ぶ。

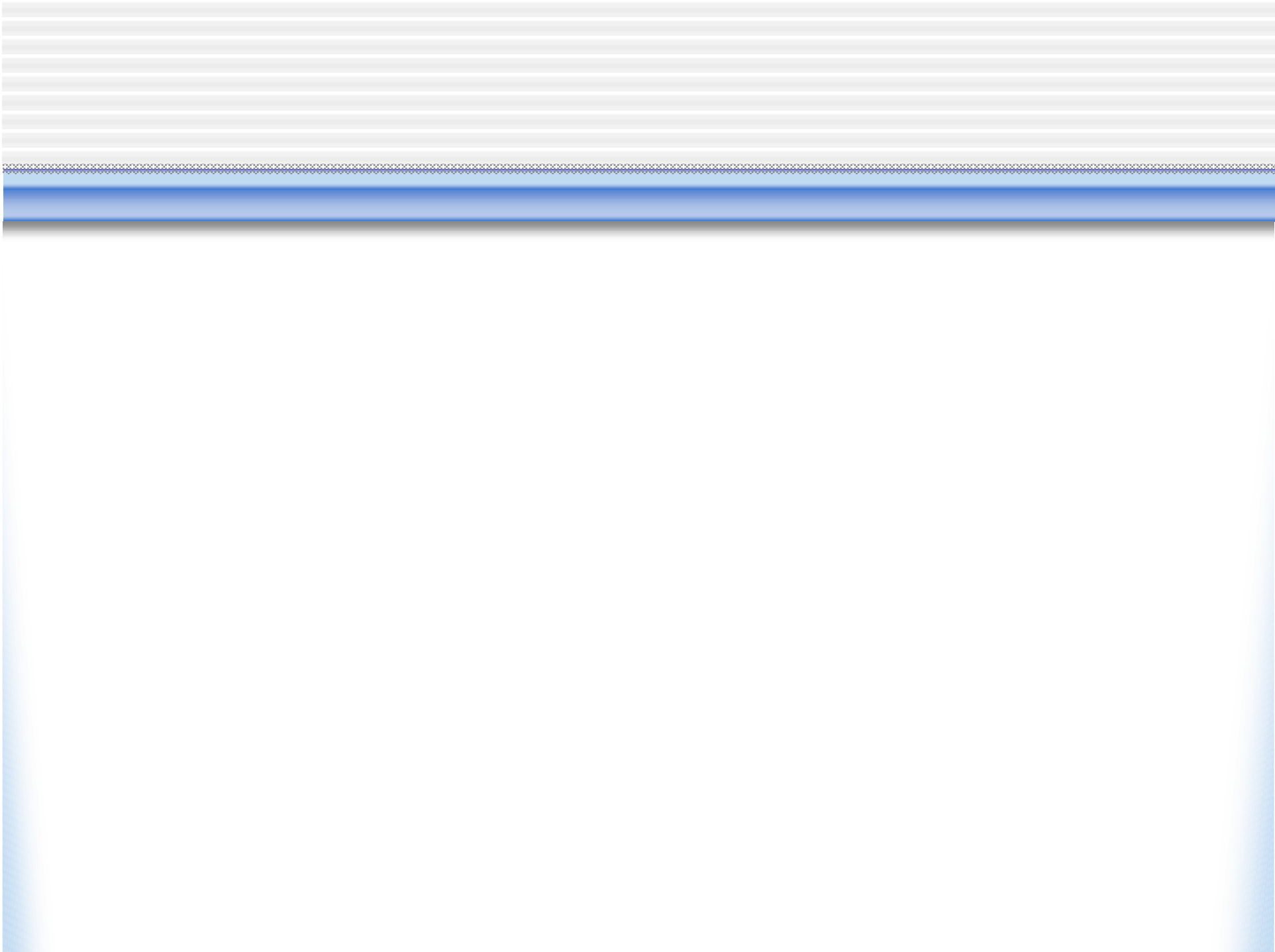
# アルミ膜透過実験 (Open Mode)

Al foil (100 $\mu$ m) Transmission / Open Mode /  $I_p=1\mu$ A



## まとめ

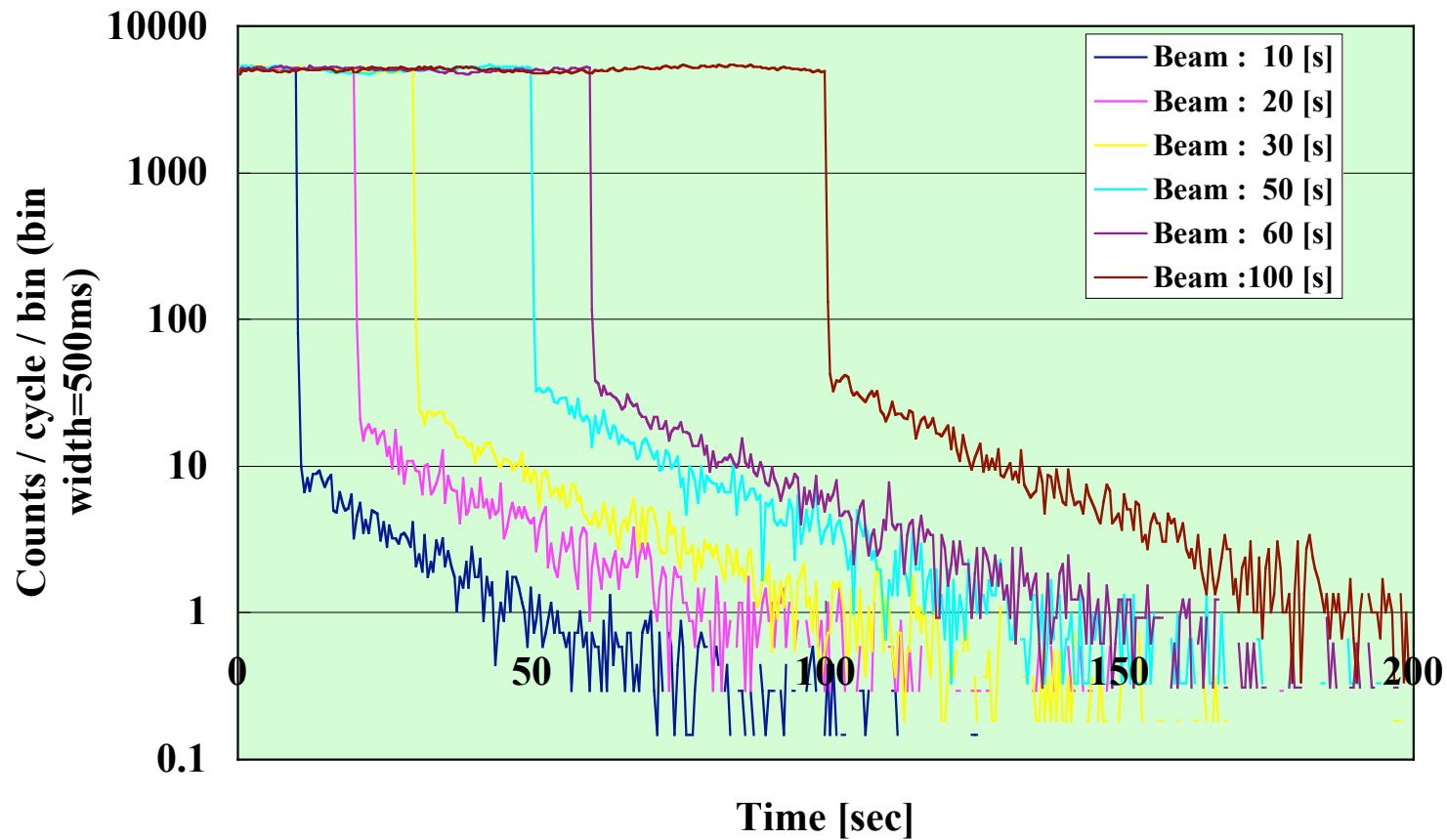
- スパレーション中性子源から得られた中性子にスーパーサーマル法を適用して、UCNを作ることに成功した。
- UCN Guide 末端で  $\rho \sim 10 \text{ cm}^{-3}$  ( $E_c = 90 \text{ neV}$ ) を達成した。
- UCNの損失原因を分析するため、実験条件を変えて Storage Time の変化を測定した。
- 将来は Storage Time の成分をより細かく分析する。また、UCNのエネルギースペクトルを測定する。





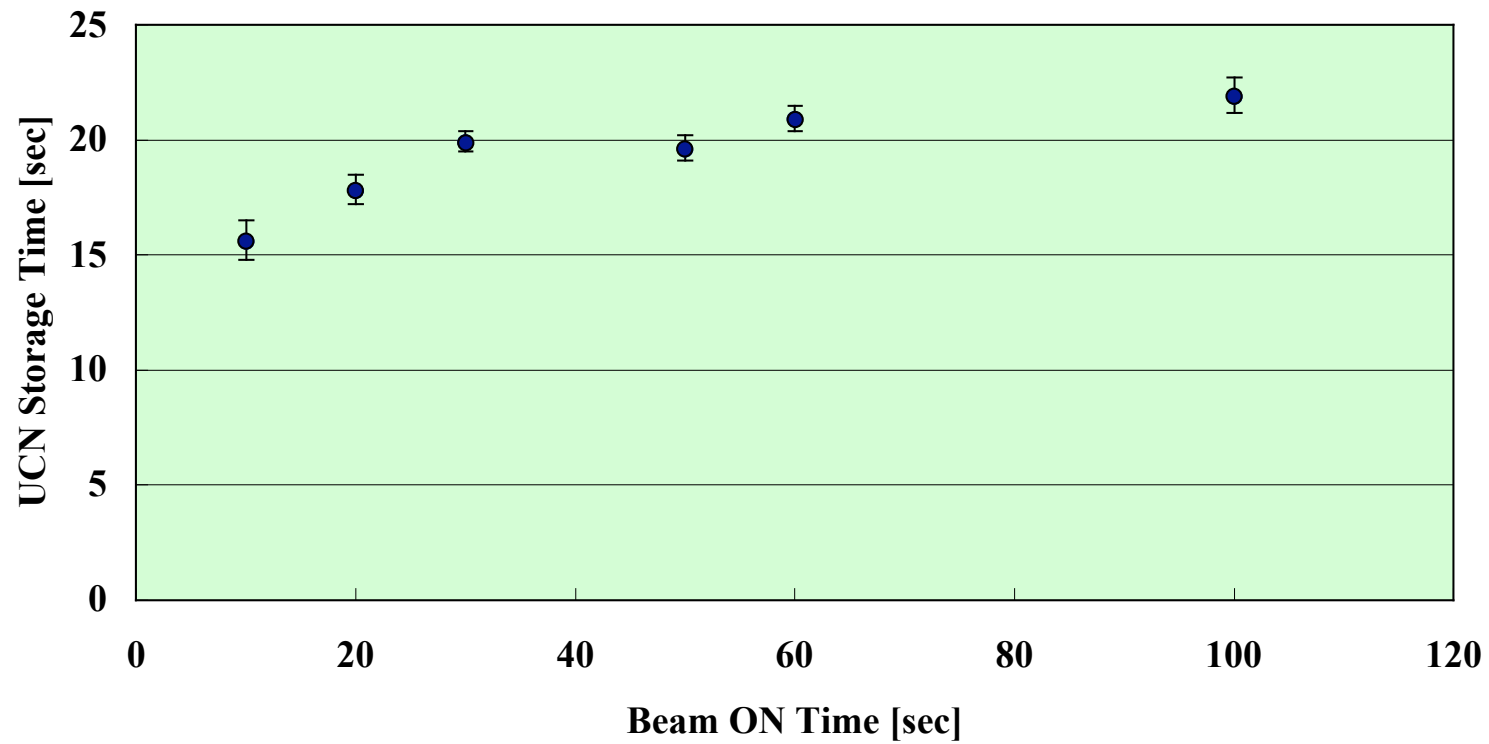
# Filling Mode (真空引き後)

Filling Mode (After Pumping) /  $I_p=200\text{nA}$



# Filling ModeのStorage Timeの ビーム照射時間依存性(真空引き後)

UCN Storage Time in Gravity Acceralator Tube  
(Beam ON Time Dependence of Filling Mode, After pumping)

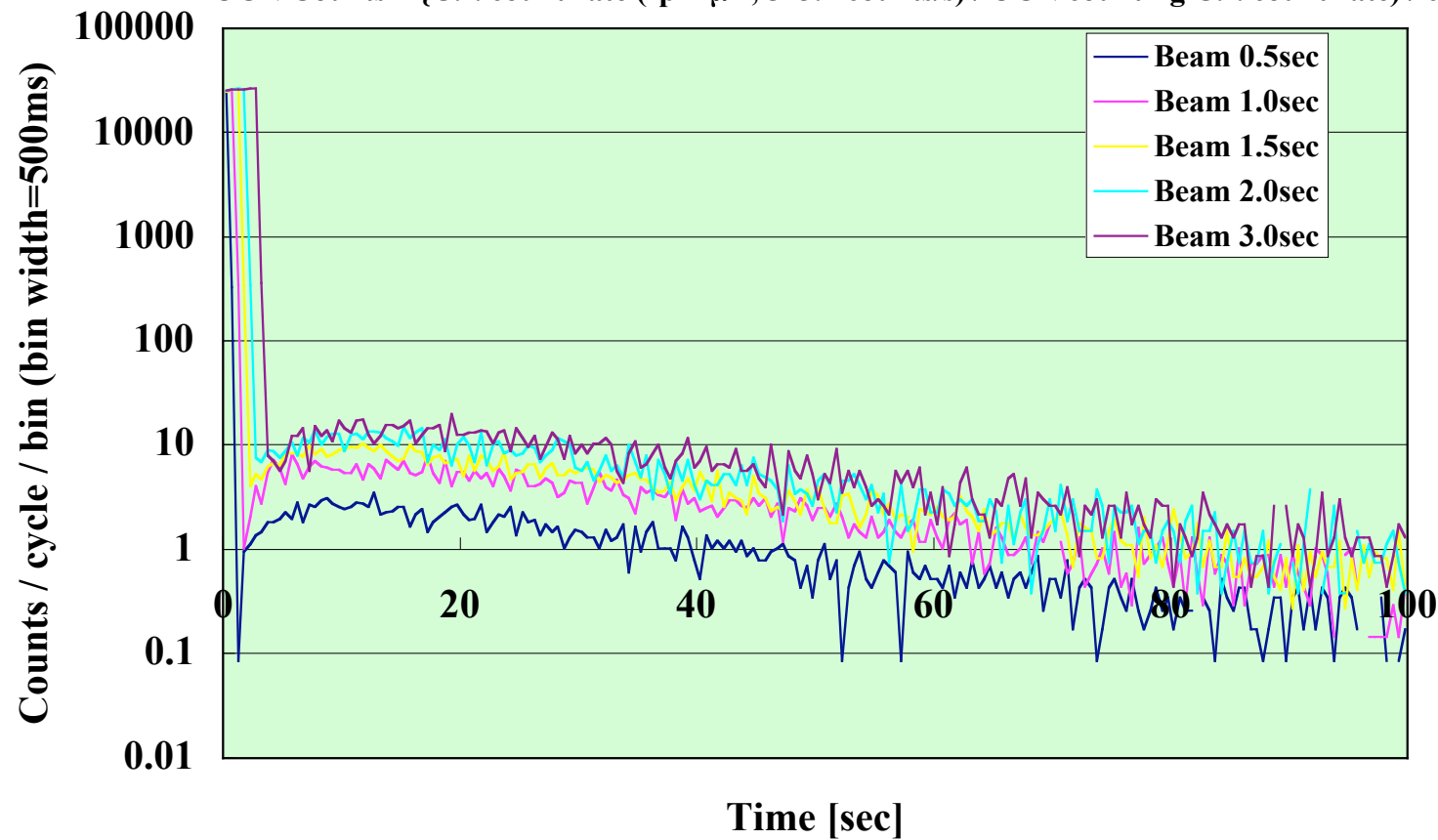


# 1s Pulse Mode (真空引き後)

## Short Pulse Mode (After Pumping) / $I_p=1\mu\text{A}$

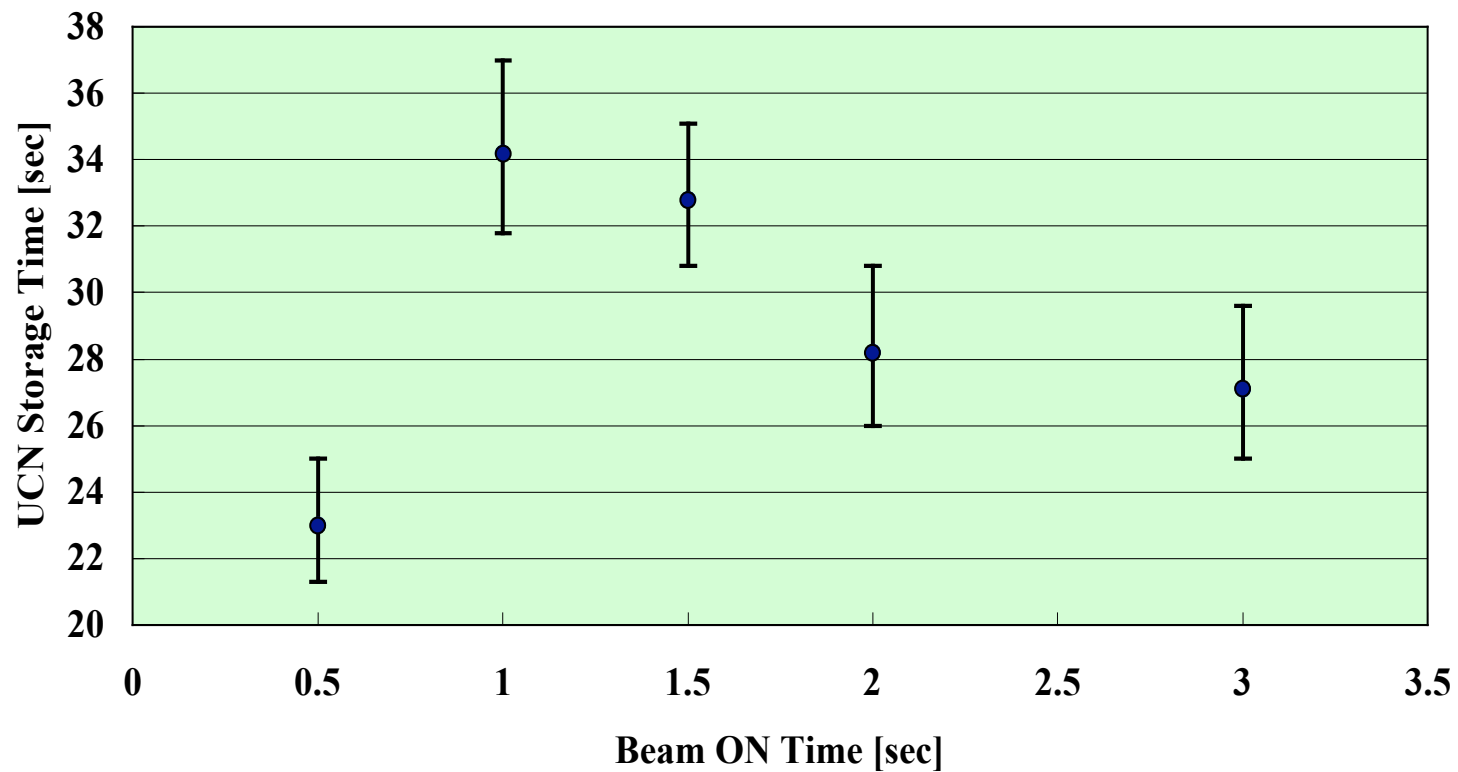
Beam Current Calibration:

UCN Counts \* {C.I. count rate ( $I_p=1\mu\text{A}$ , 513.1 counts/s) / UCN counting C.I. count rate} / cycle



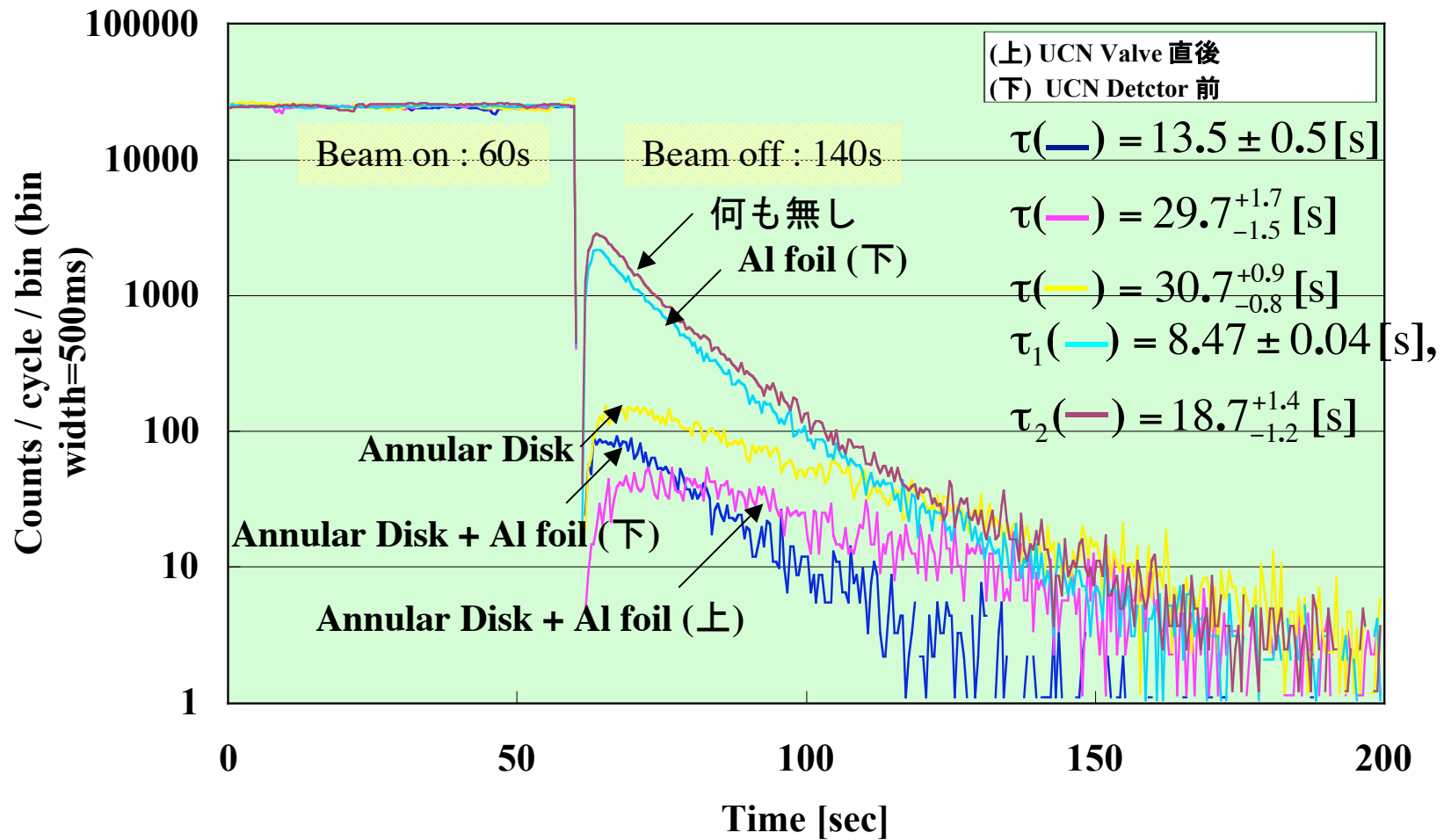
# 1s Pulse ModeのStorage Timeの ビーム照射時間依存性(真空引き後)

UCN Storage Time  
(Beam ON Time Dependence of 1s Pulse Mode after pumping)



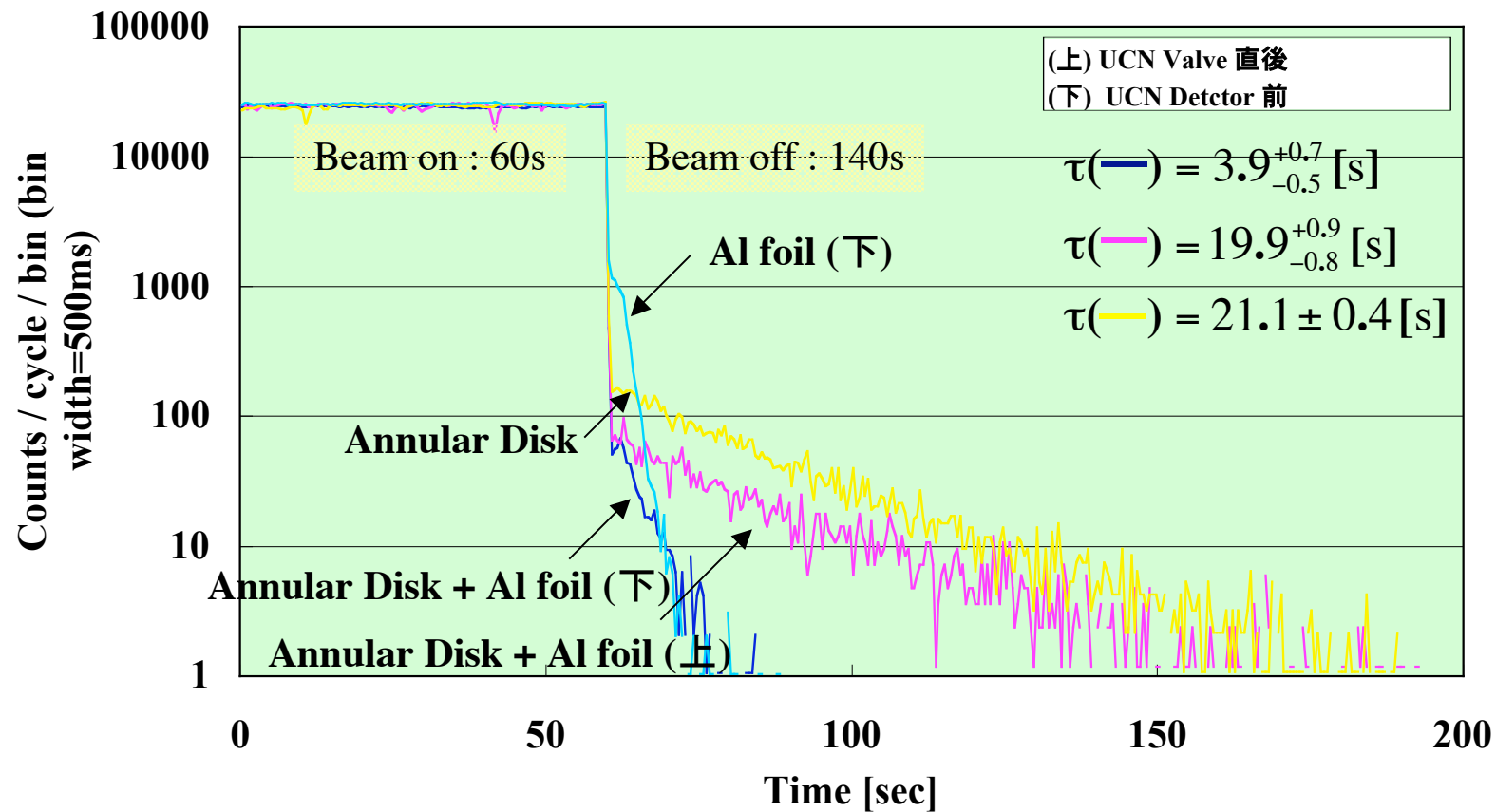
# アルミ膜透過実験 ( $\Delta t=0$ )

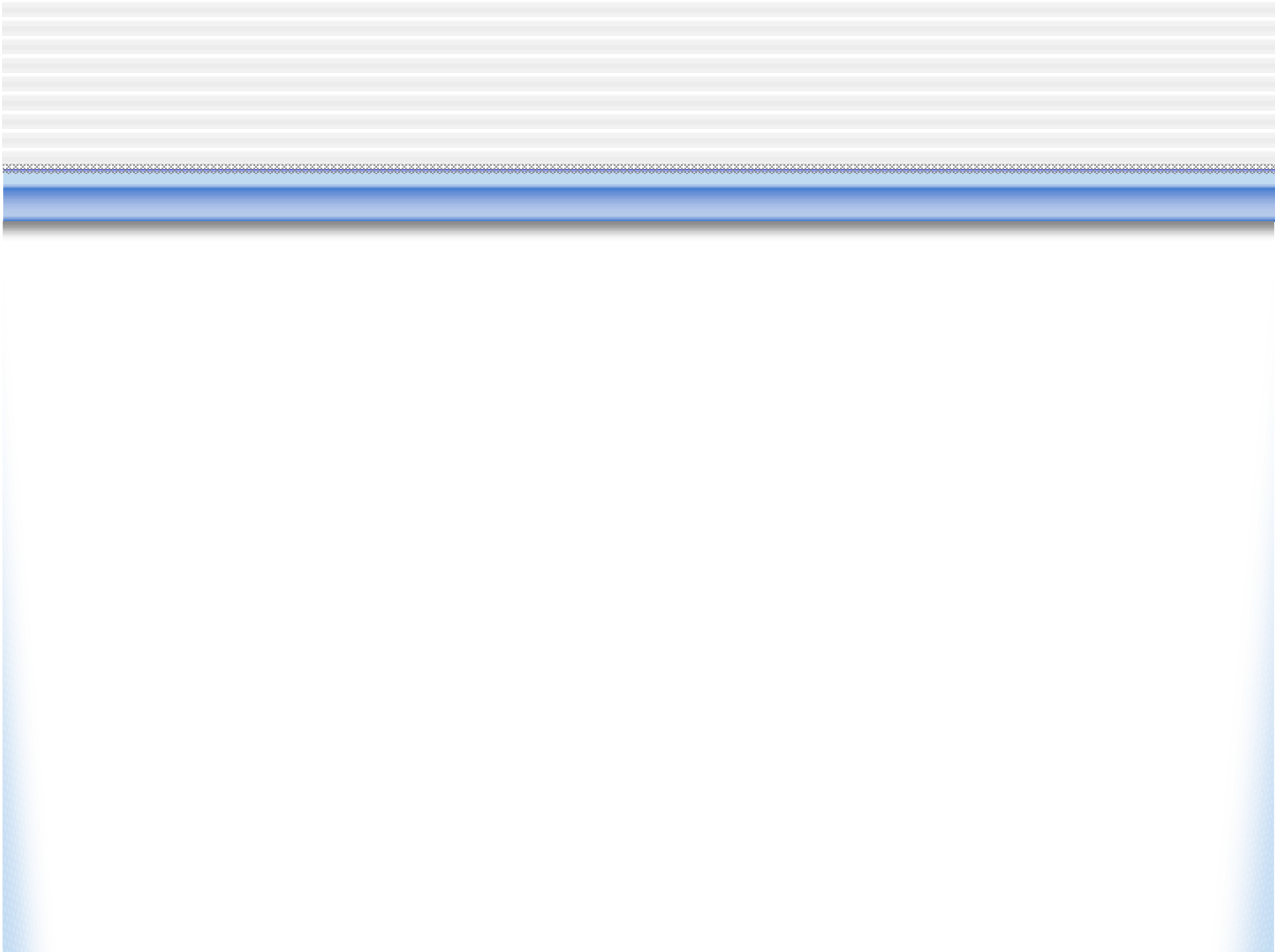
Al foil (100 $\mu$ m) Transmission / Delay Mode ( $\Delta t=0$ ) /  $I_p=1\mu$ A



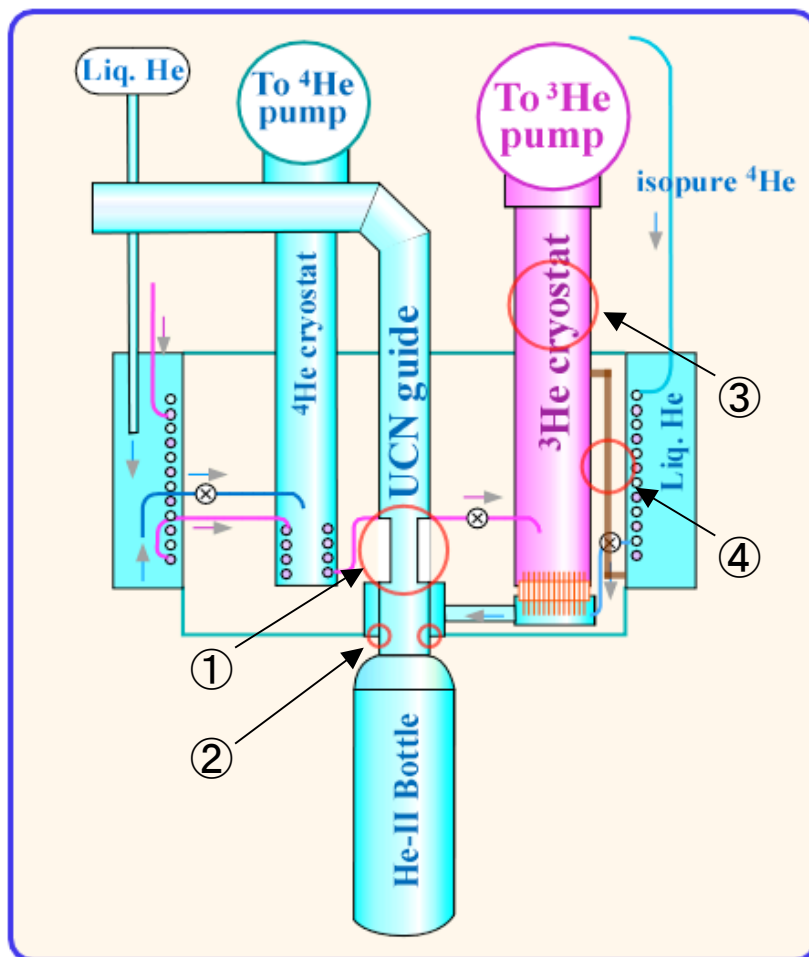
# アルミ膜透過実験 (Filling Mode)

Al foil (100 $\mu$ m) Transmission / Filling Mode /  $I_p=1\mu$ A





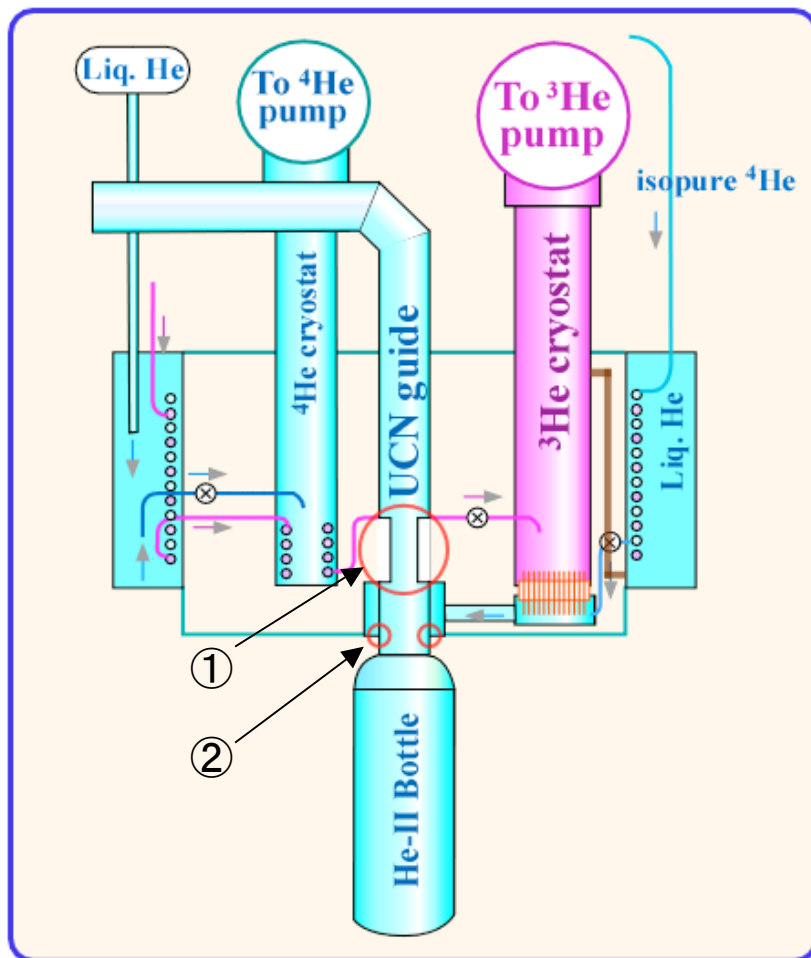
# UCN Cryostatの変更点



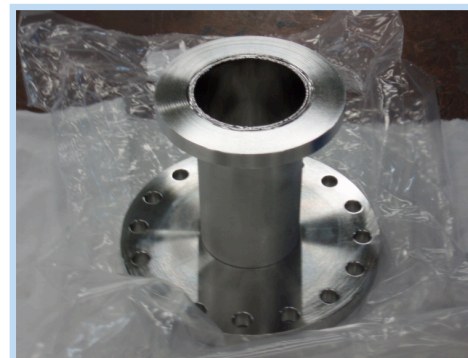
- ① UCN Guide の直径を  $\phi 84.9 \rightarrow \phi 49$  に変更
- ② 穴( $\phi 2.0$ )をスリットに変更  
→He-II冷却効率の改善
- ③ フィン、バッフルを追加
- ④ 銅のサーマルシンクを追加  
→ $^3\text{He}$  cryostat 上部からの熱の流入を抑える



# UCN2Guide2上流部



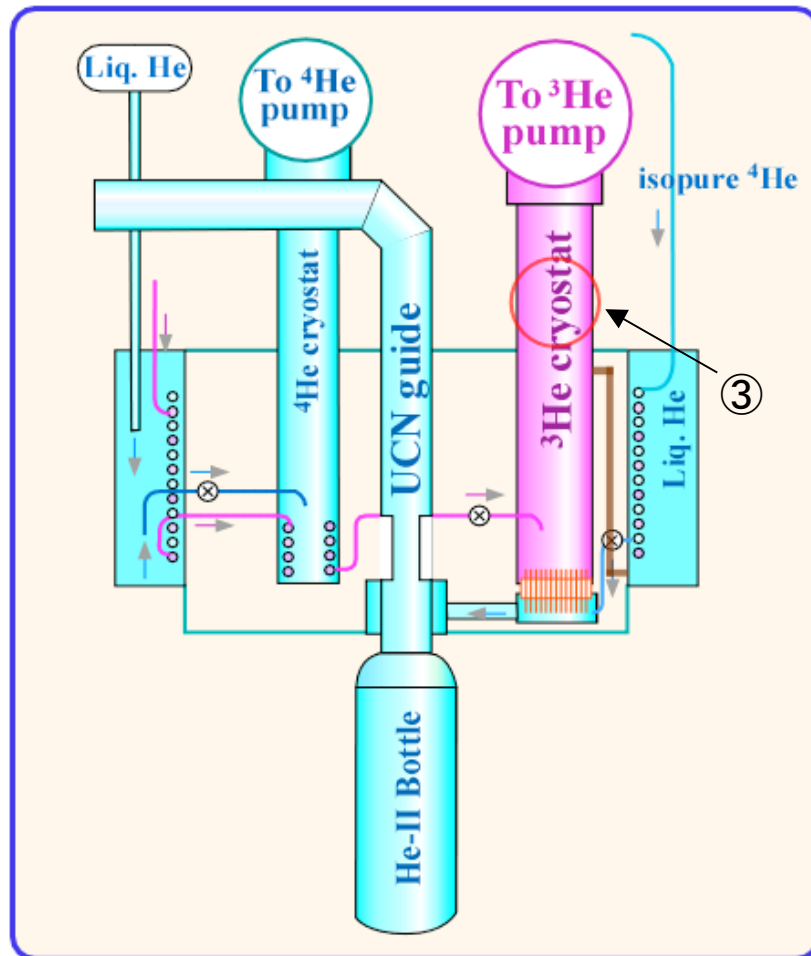
① UCN Guide の直径を変更



② 穴(φ2.0)をスリットに変更



# $^3\text{He}$ potフィンとバッフル



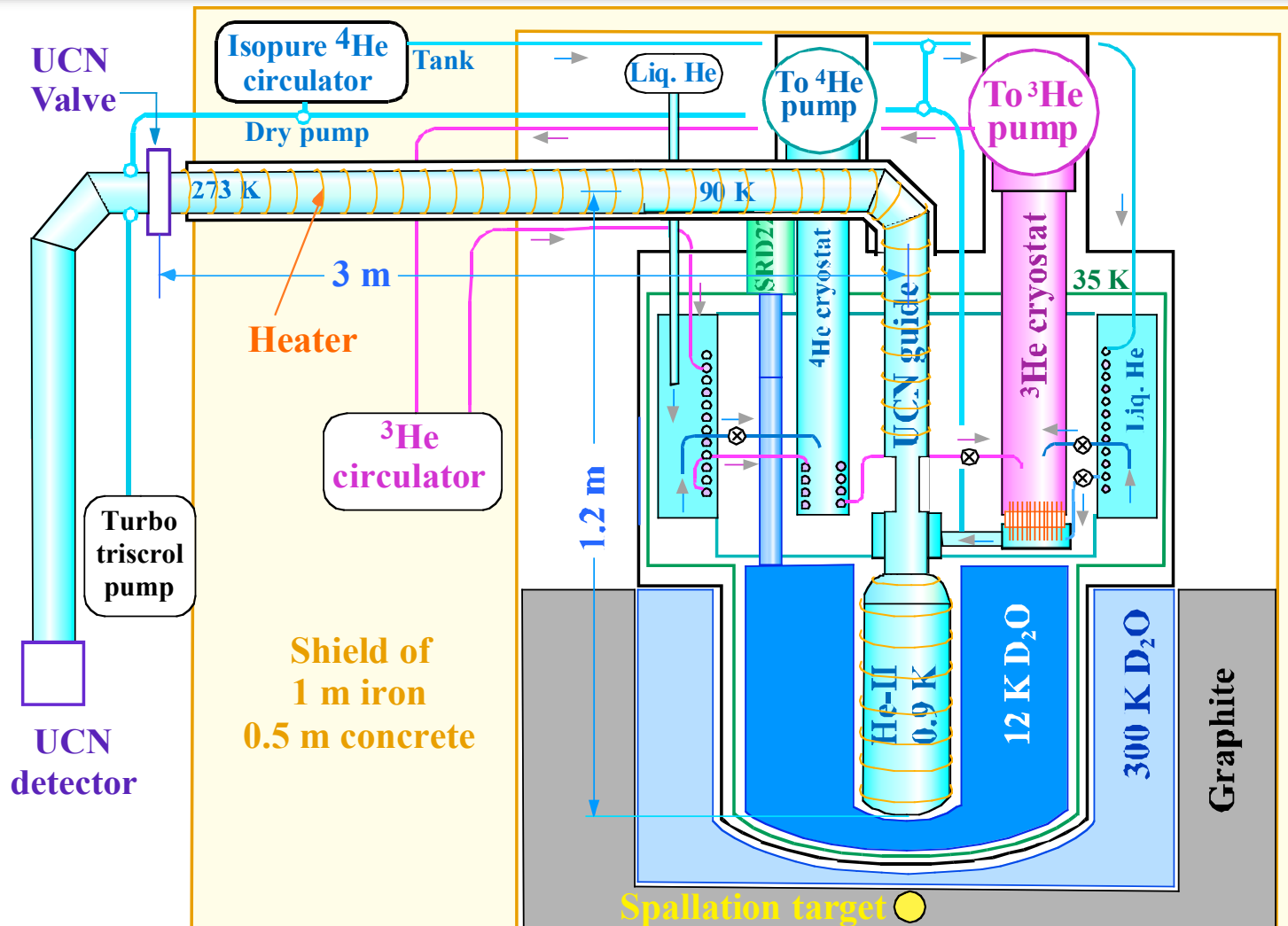
## ③ フィン、バッフルを追加



フィン

バッフル

# UCN Cryostatの構造



# 現在のUCN Cryostat

