

# $\mu$ SRにおける装置開発 @J-PARC

西村 昇一郎 / KEK物構研

2021/10/29

# Outline

## J-PARC大強度ミュオンビーム $\mu$ SR

### 新装置・新測定法・新解析ツール

- Transient  $\mu$ SR
- 5T高磁場分光器

### 既存の問題と将来展望

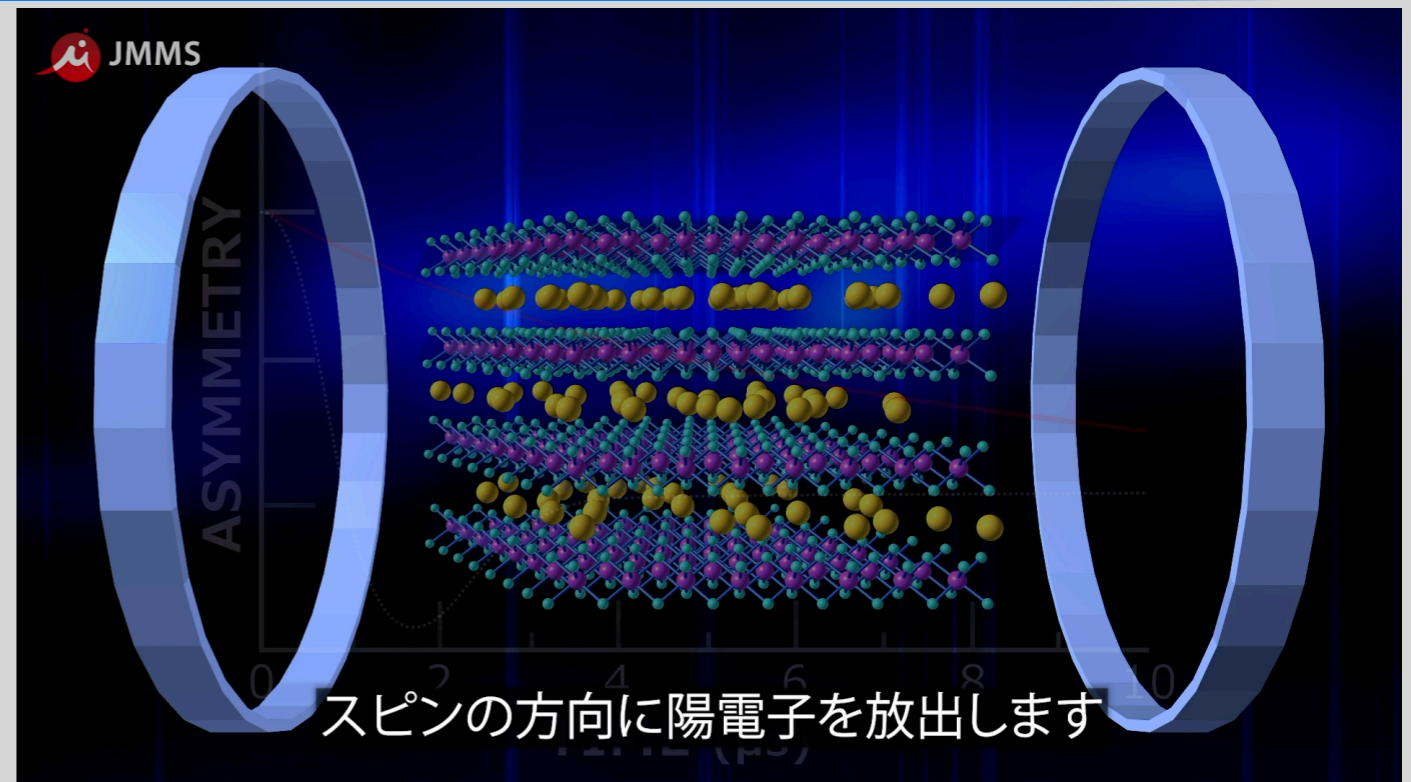
# What is $\mu$ SR



# 様々な $\mu$ SR

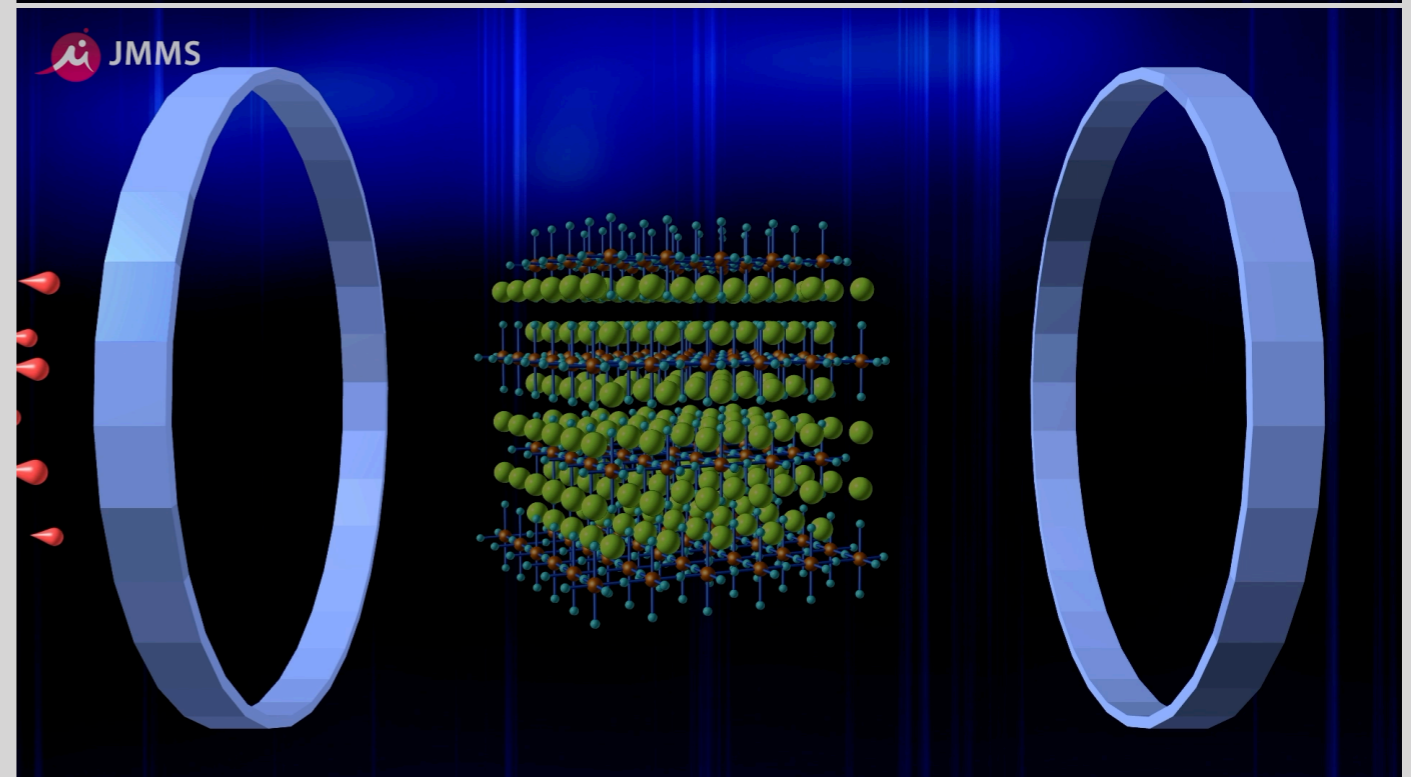
## 動的なランダム磁場

$\text{LiCoO}_2$



## 静的な一様磁場

$\text{La}_2\text{CuO}_4$



# 従来型 $\mu$ SR測定

## 試料環境(温度、磁場)を安定させて測定

- 条件変更(特に温度)に時間がかかる
  - ◆ 条件変更中は測定を行えないため、ビームタイムを浪費
- 測定条件を安定させる必要あり

## 過渡的な現象を $\mu$ SRで測定したい

待機で測定時間を浪費したくない

温度、磁場変更を頻繁に行いたい

過渡的な現象を調べたい

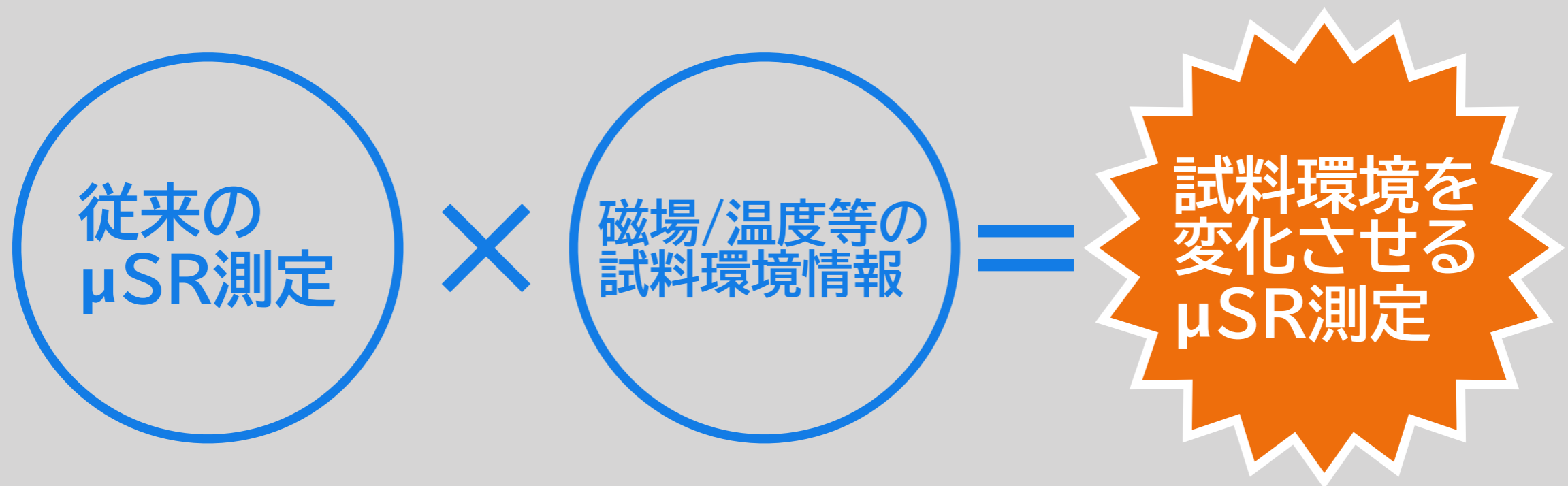


試料環境を変更&モニター  
ずっと測定できれば  
すべて解決

# Transient $\mu$ SR測定法

$\mu$ SR測定情報と試料環境情報を統合して  
過渡的な過程を調べられる新しい $\mu$ SR測定

- 測定中に試料環境を変えても解析できる



ただし、同一条件で高統計を得るには大強度ビームが必要不可欠

J-PARC大強度ミュオンビーム

# J-PARC MLF S-Line

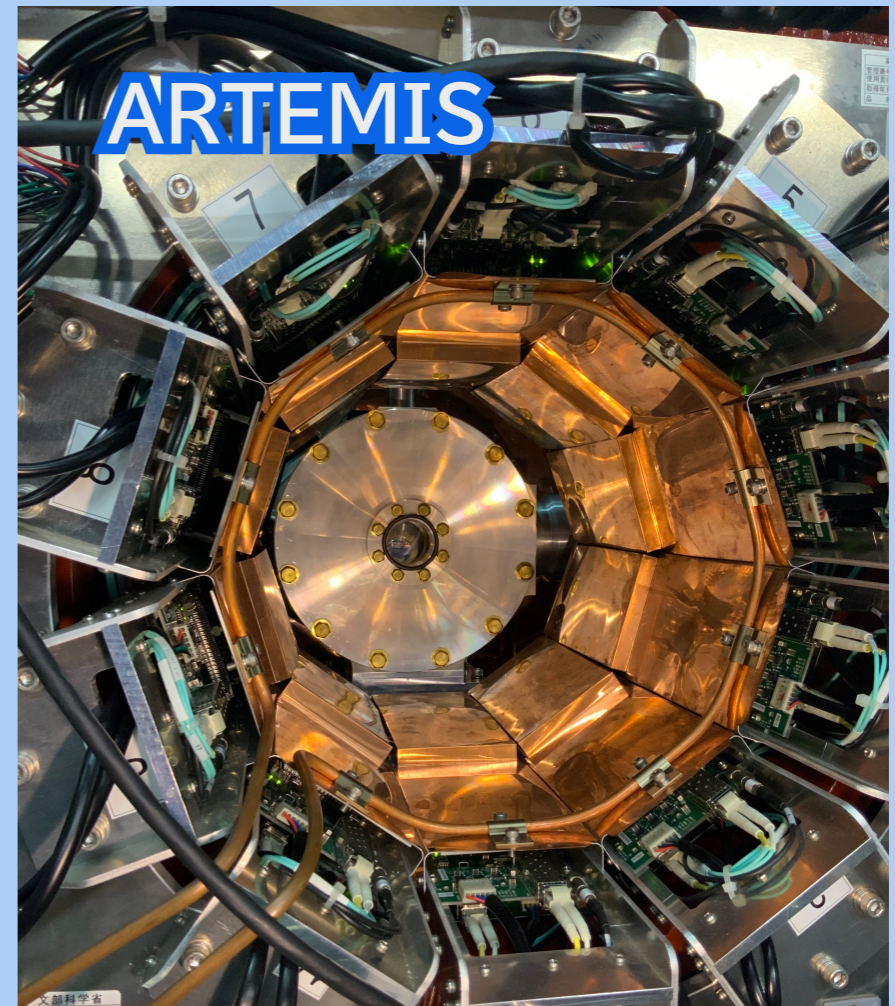
## J-PARC MLF MUUSE

- 世界最高強度の  
パルスミュオンビーム

## 大強度ビーム対応のS1- $\mu$ SR分光器 | ARTEMIS

- KALLIOPE 40基
- 試料環境モニター

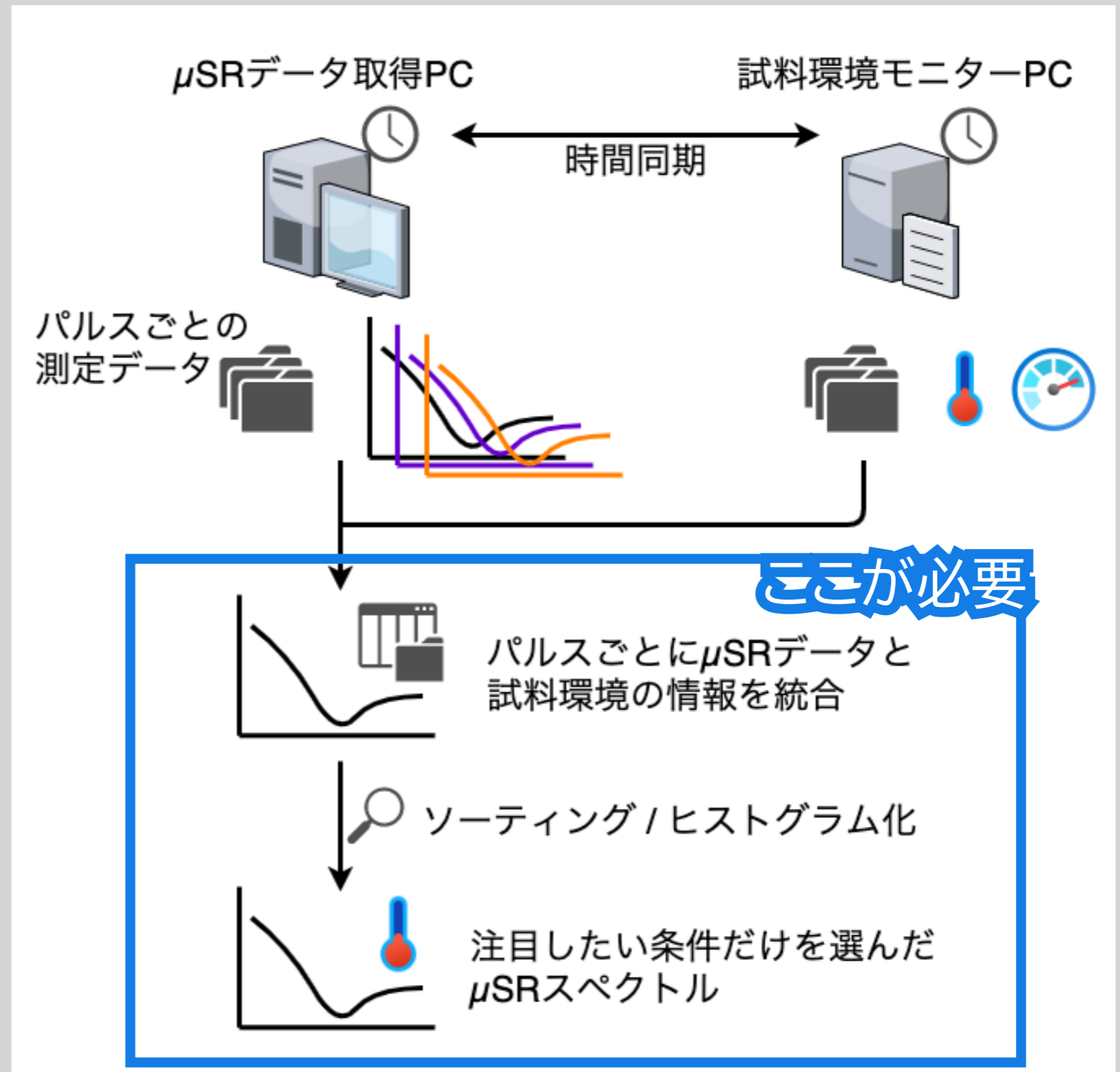
既存の装置を使って  
動的 $\mu$ SRの開発を実施



# Transient $\mu$ SRの開発

## 解析ソフト

- $\mu$ SRデータと試料環境データを統合
- ヒストグラム作成
- 最低ROOTが入っていれば動く
- 全てのユーザーが使える(誰でも)
- ◆ ROOTの使い方を知らない人もボタンのクリックのみで使える

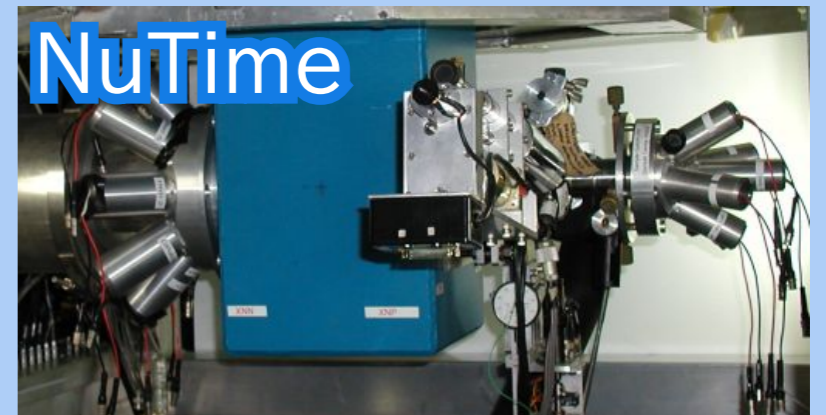
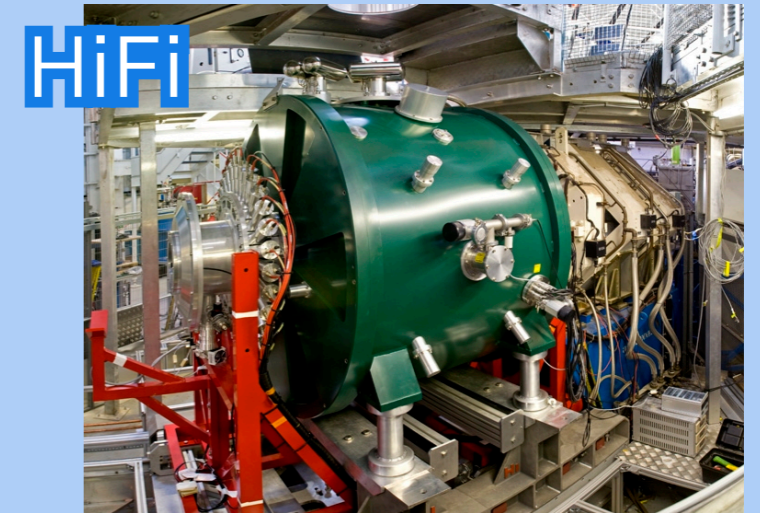




# ツールの紹介

# 世界の高磁場 $\mu$ SR分光器

施設名	分光器名	最大磁場
RAL	HiFi	5 T
PSI	HAL-9500	9.5 T
TRIUMF	HiTime $\rightarrow$ NuTime	7.0 T
J-PARC	???	5 T

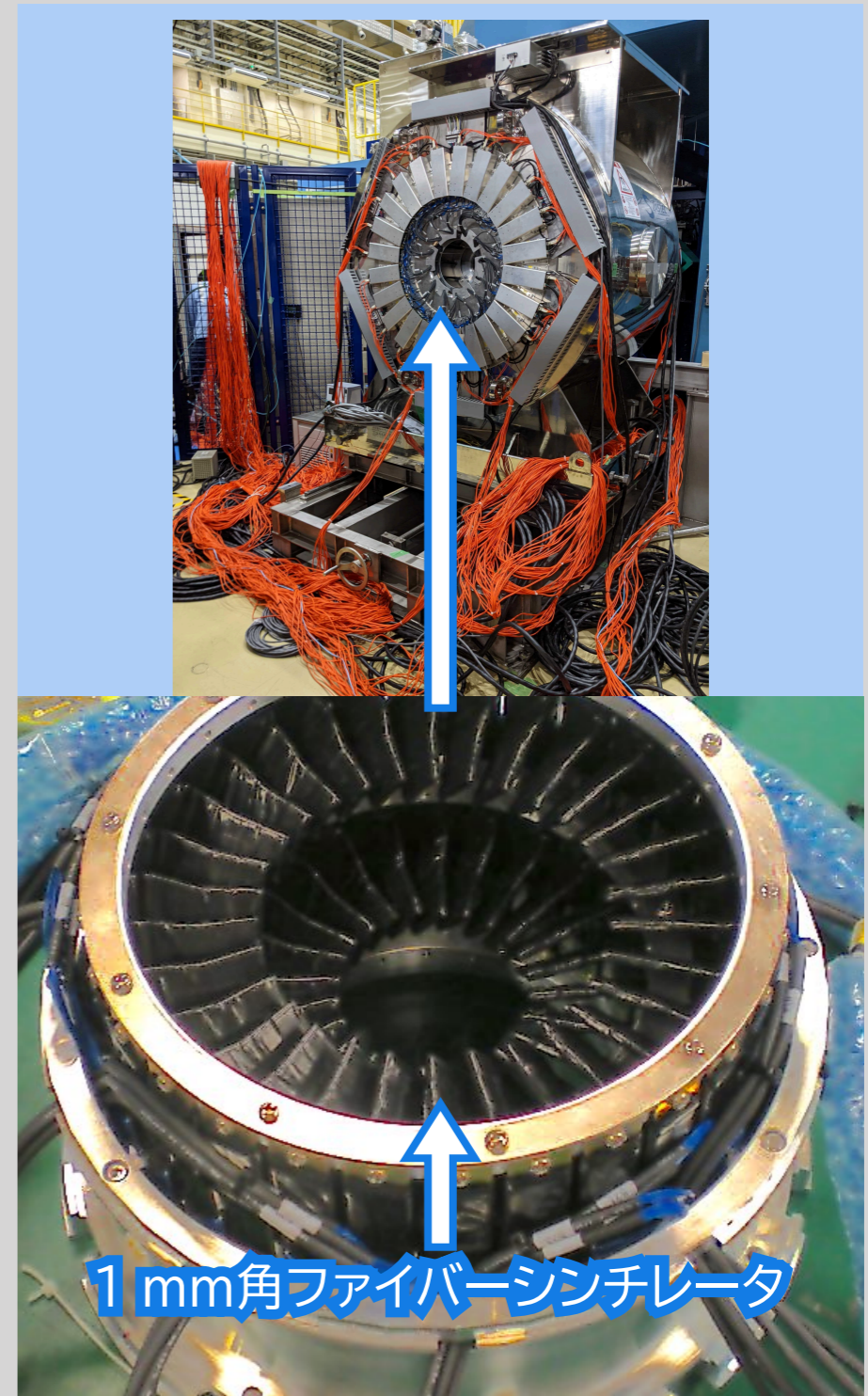


# 5テスラ分光器 ~Cyclops~

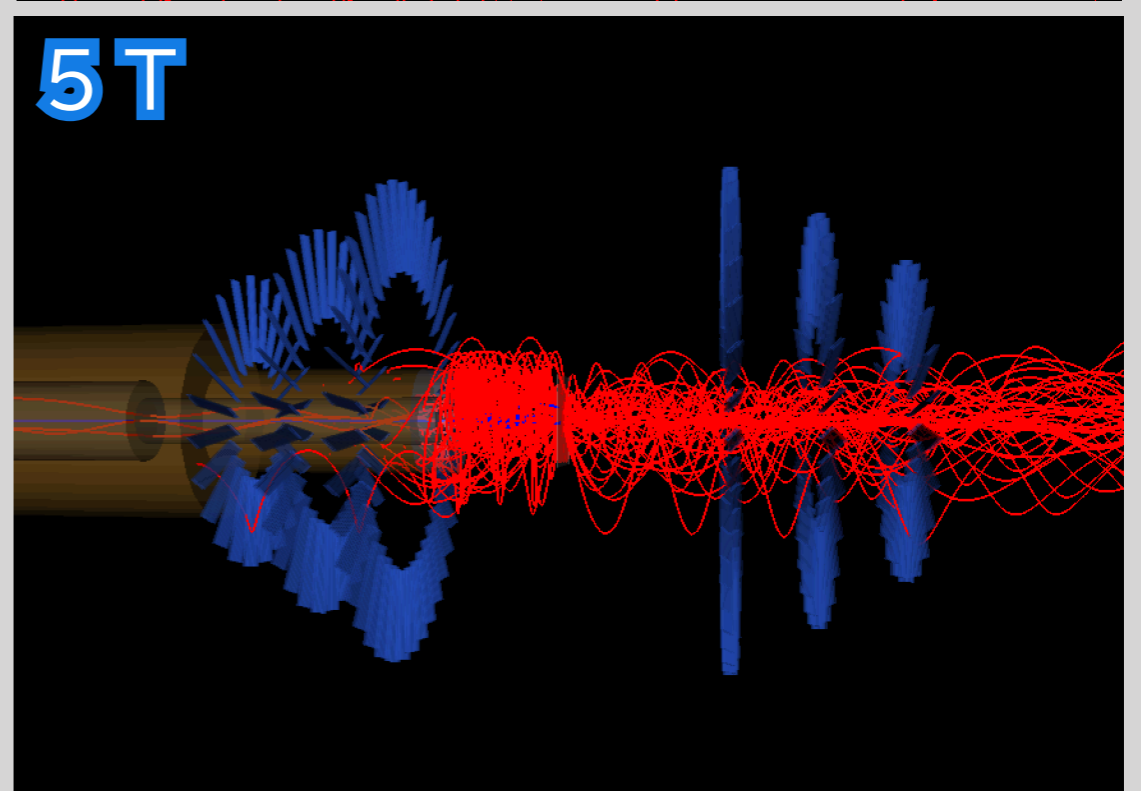
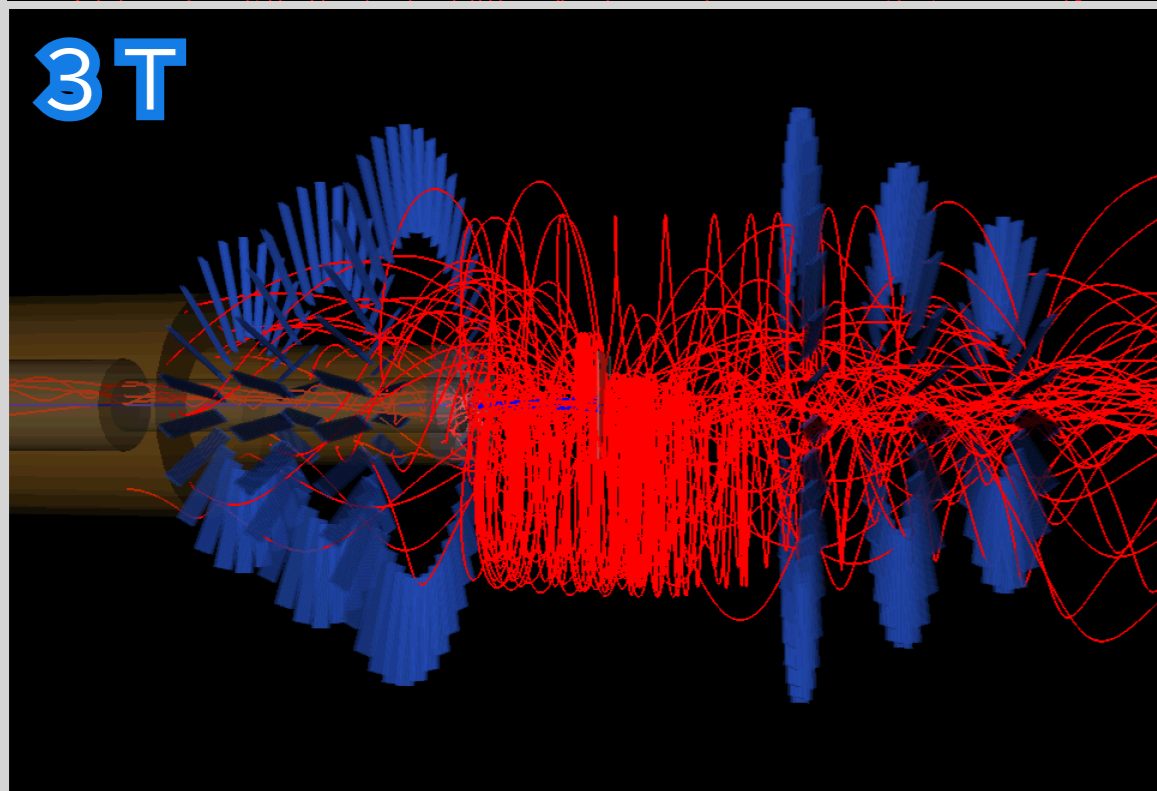
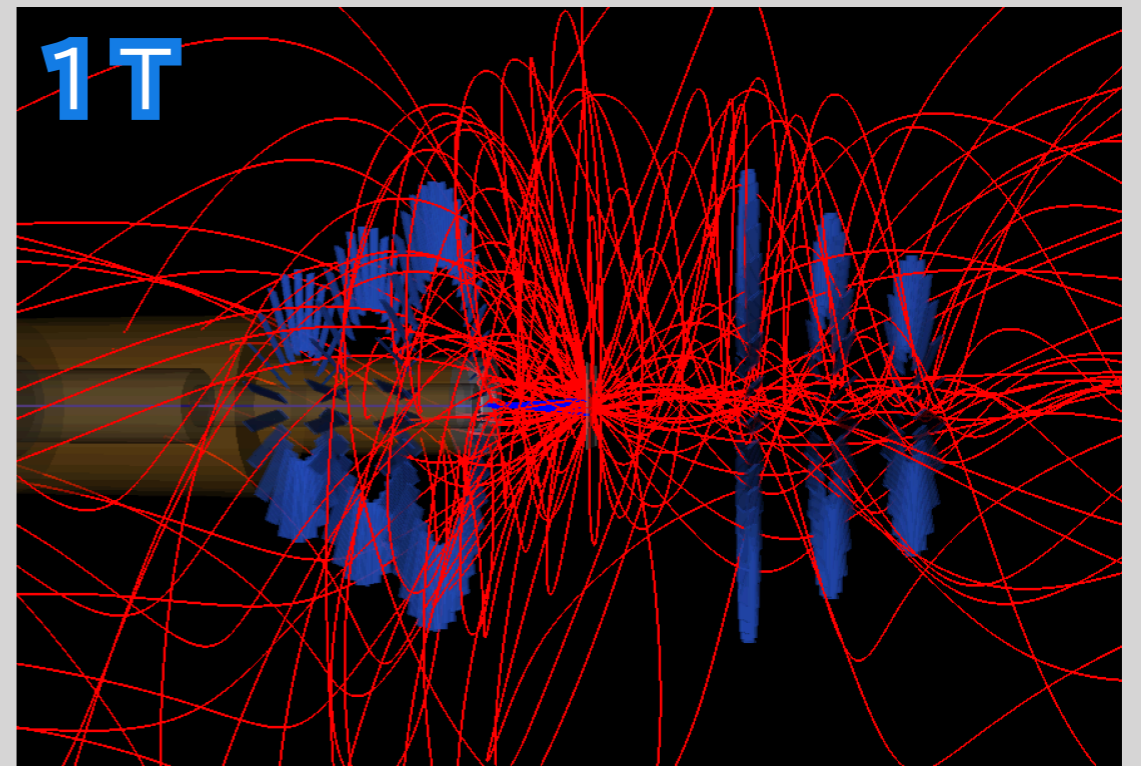
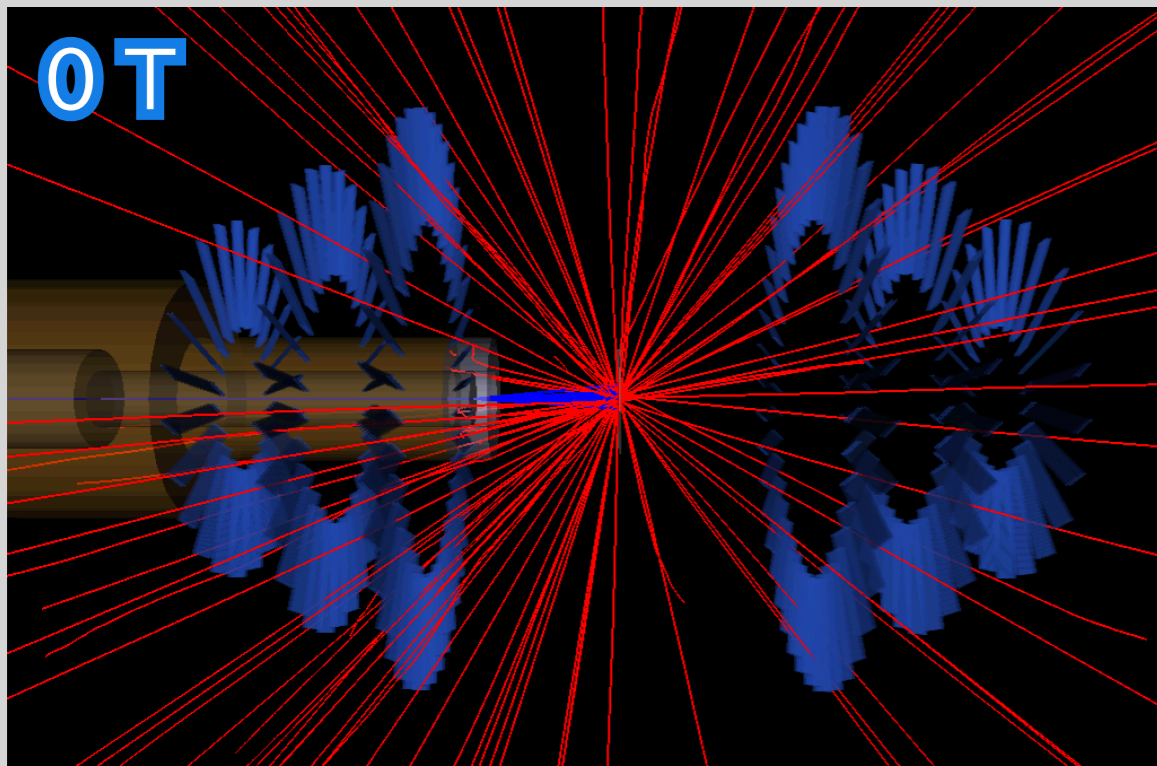
- 平成25年10月  
5T電磁石 納入
- 平成26年10月  
ファイバー検出器完成
- ： ビームラインに設置するための周辺準備
- 令和3年1月 初ビーム試験
- 令和3年4月 励磁&ビーム試験

性能比較	最大磁場	検出器	検出器数
ARTEMIS	0.4 T	10 mm角立方体 シンチレータ テレスコープ	1,280 ch
CYCLOPS	5 T	1 mm角 45 mm長 ファイバーシンチ	3,008 ch

KALLIOPE 40基 → 96基



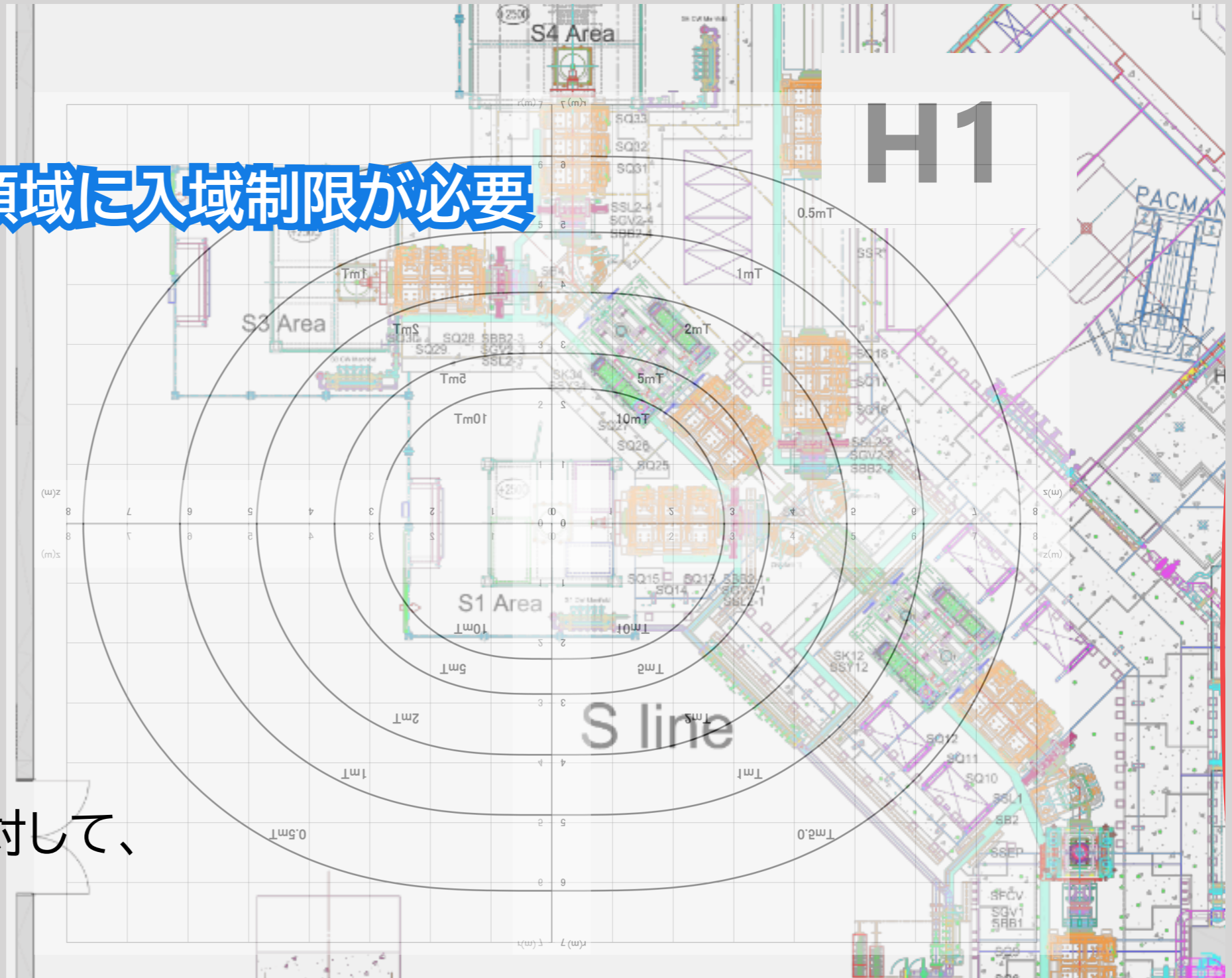
# 磁場による陽電子軌道変化の様子 (シミュレーション)



# 漏れ磁場評価

## 5Gライン

5G以上の磁場領域に入域制限が必要



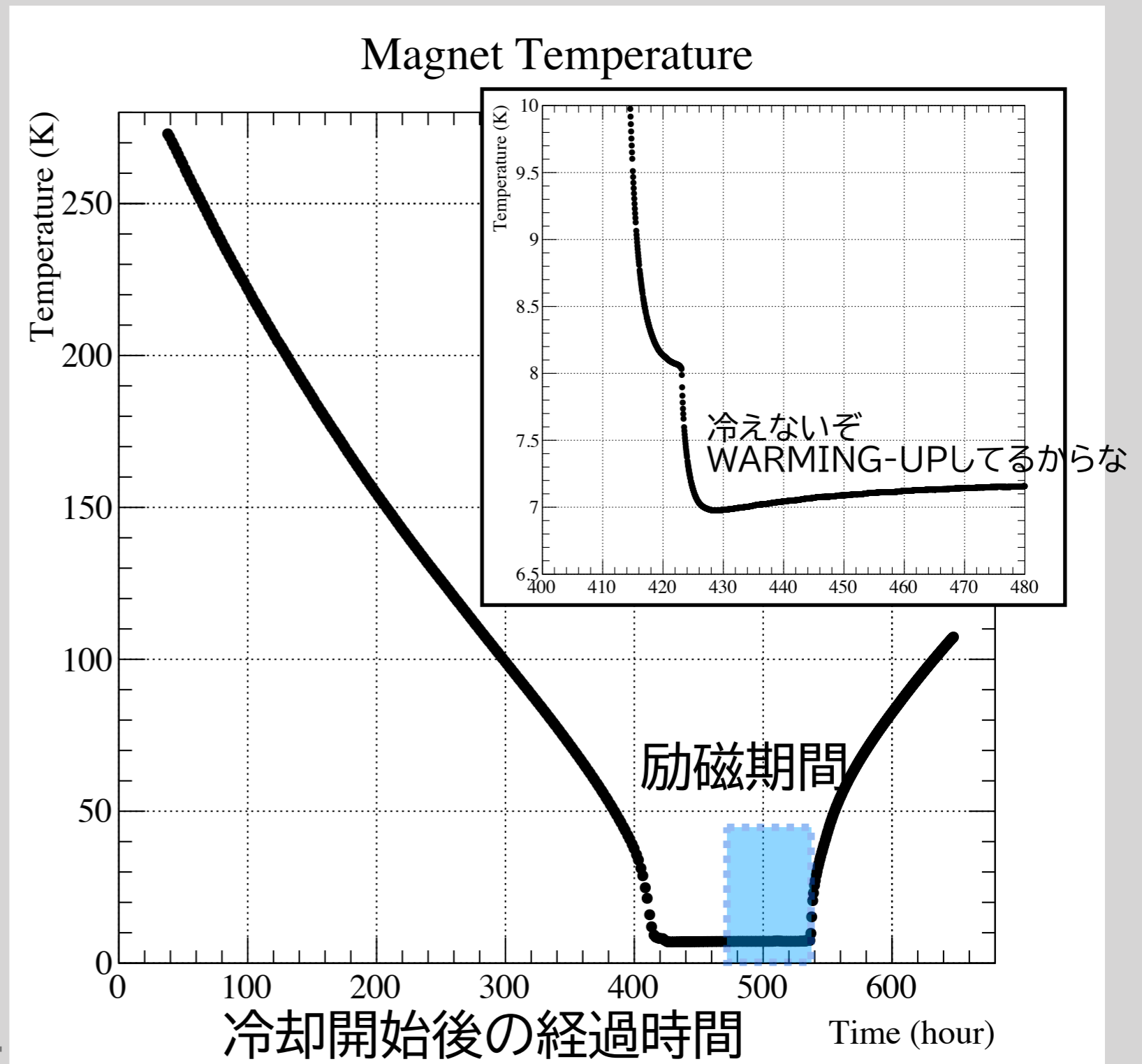
5T( $5 \times 10^4$ G)に対して、  
5Gの計算が必要

# 磁石励磁試験

## 励磁前の冷却

- 室温から完全に冷えるまで18日
- 業者の試験結果
  - ◆ 4.5K程度まで冷えた実績あり
- 2021年の試験
  - ◆ 7Kくらいまでしか冷えない
  - ◆ 転移点は9K付近
  - ◆ 2.2 Tくらい励磁したところでクエンチ
- メンテナンス準備中

業者の連絡が頻繁に途絶える…



# 1陽電子がヒットするファイバー数(ゼロ磁場)

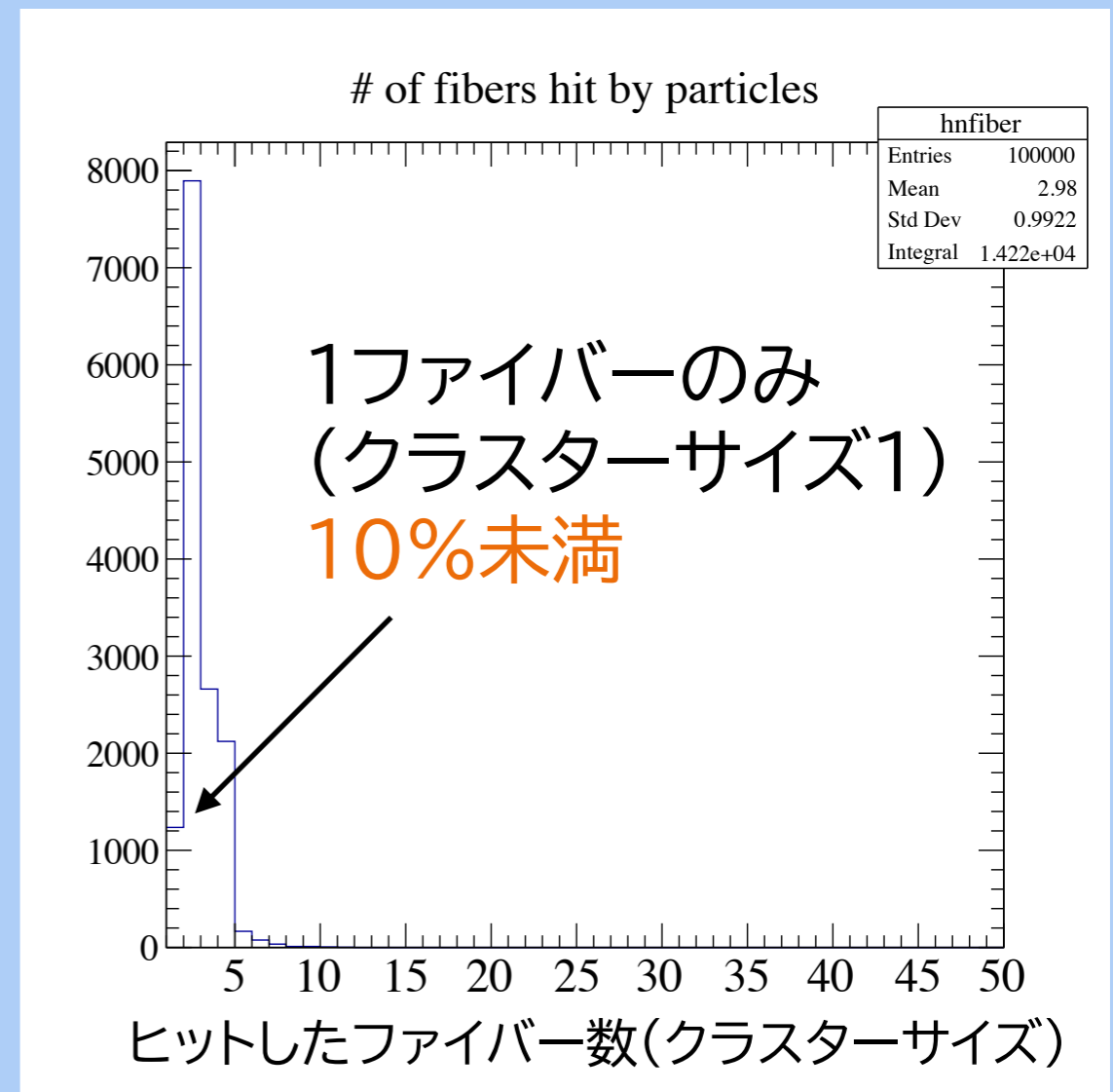
## クラスター解析

- 1崩壊陽電子が隣り合うファイバー複数にヒット
  - ◆ 放置すると1個の陽電子を誤って複数回カウントしてしまう

## クラスターサイズ

- シミュレーションでの計算によるとクラスターサイズ1の場合は陽電子ヒットの10%未満
- クラスター化が絶対必要

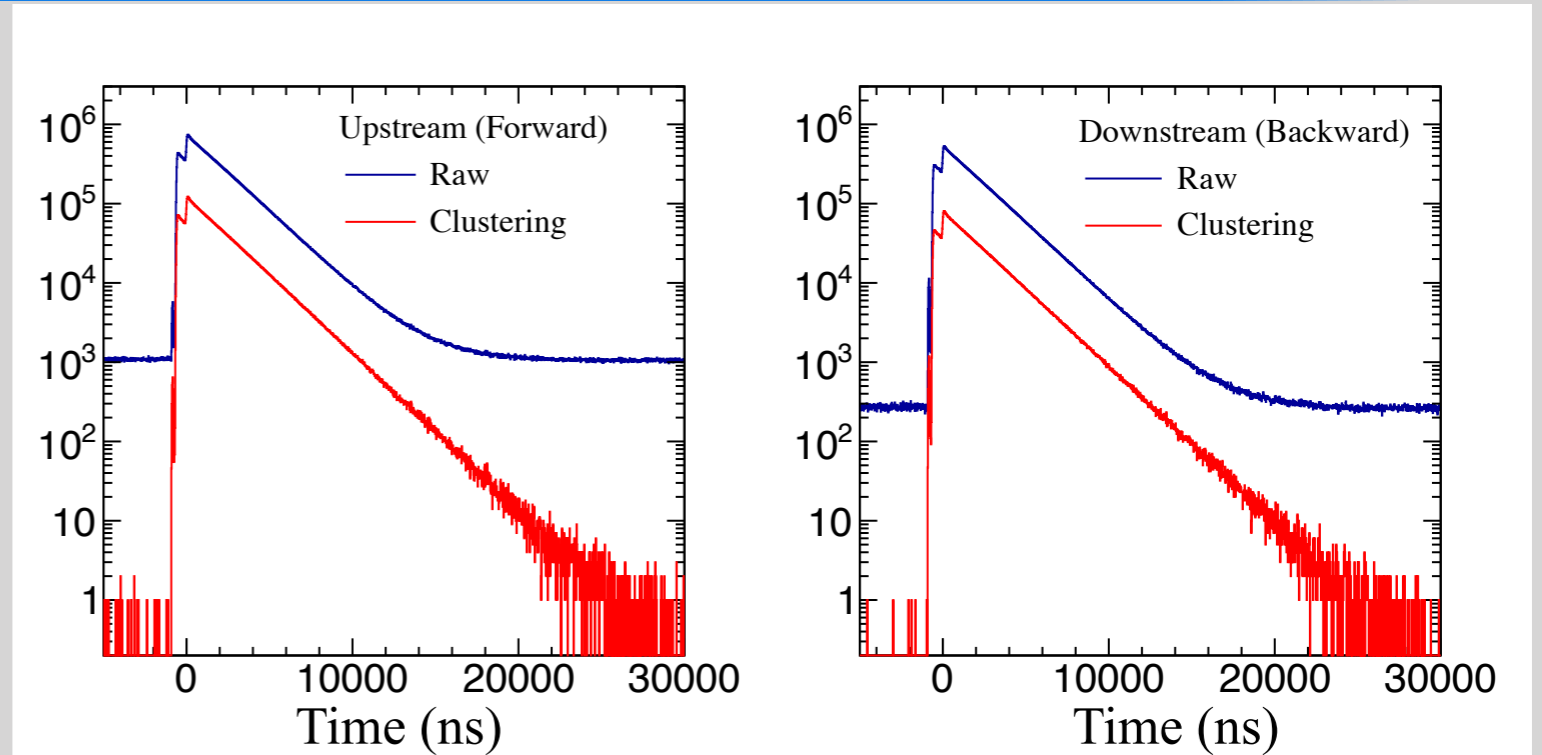
クラスターサイズ1が少ないことを逆手に取ってノイズ除去に利用可能



# クラスター解析

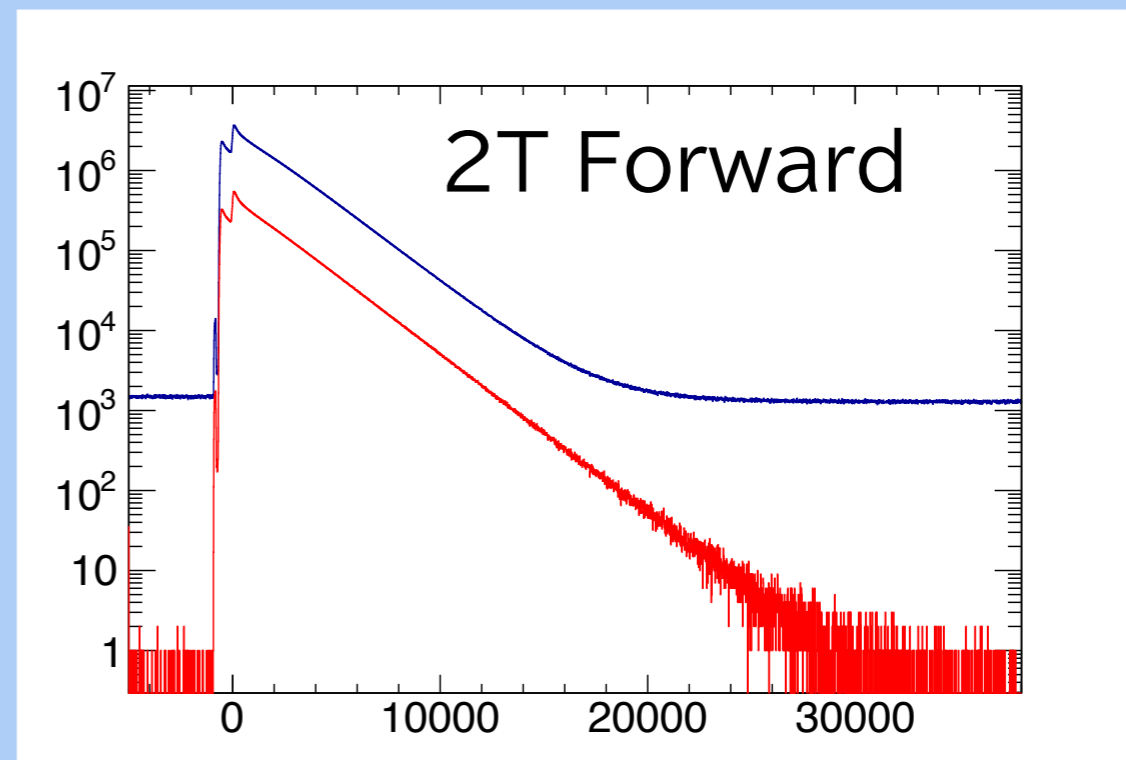
## 崩壊陽電子 時間スペクトル

- クラスター解析で  
S/Nを3桁改善



## 励磁下(2 T) クラスター解析

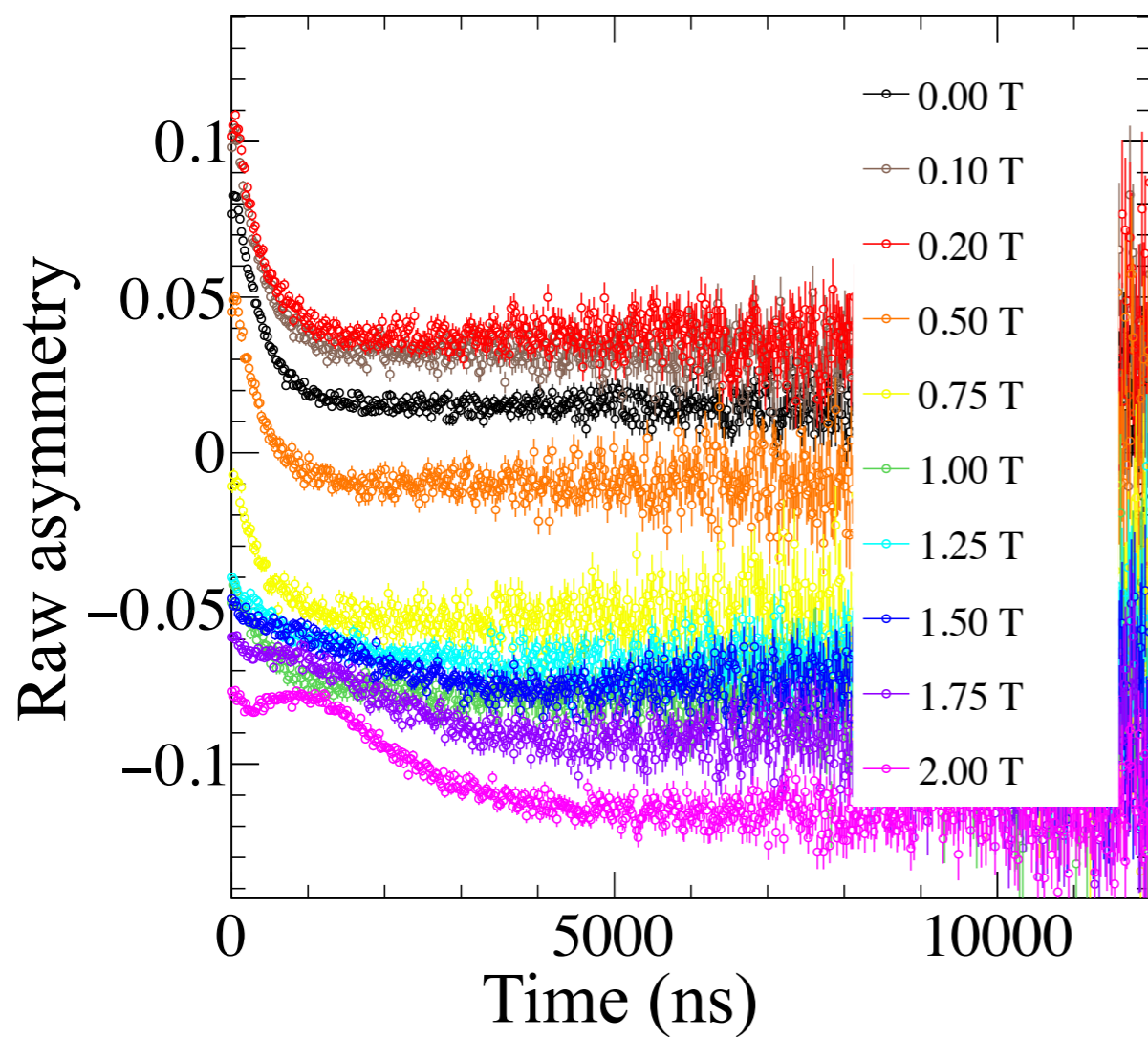
- ゼロ磁場と同じく  
S/N改善可能



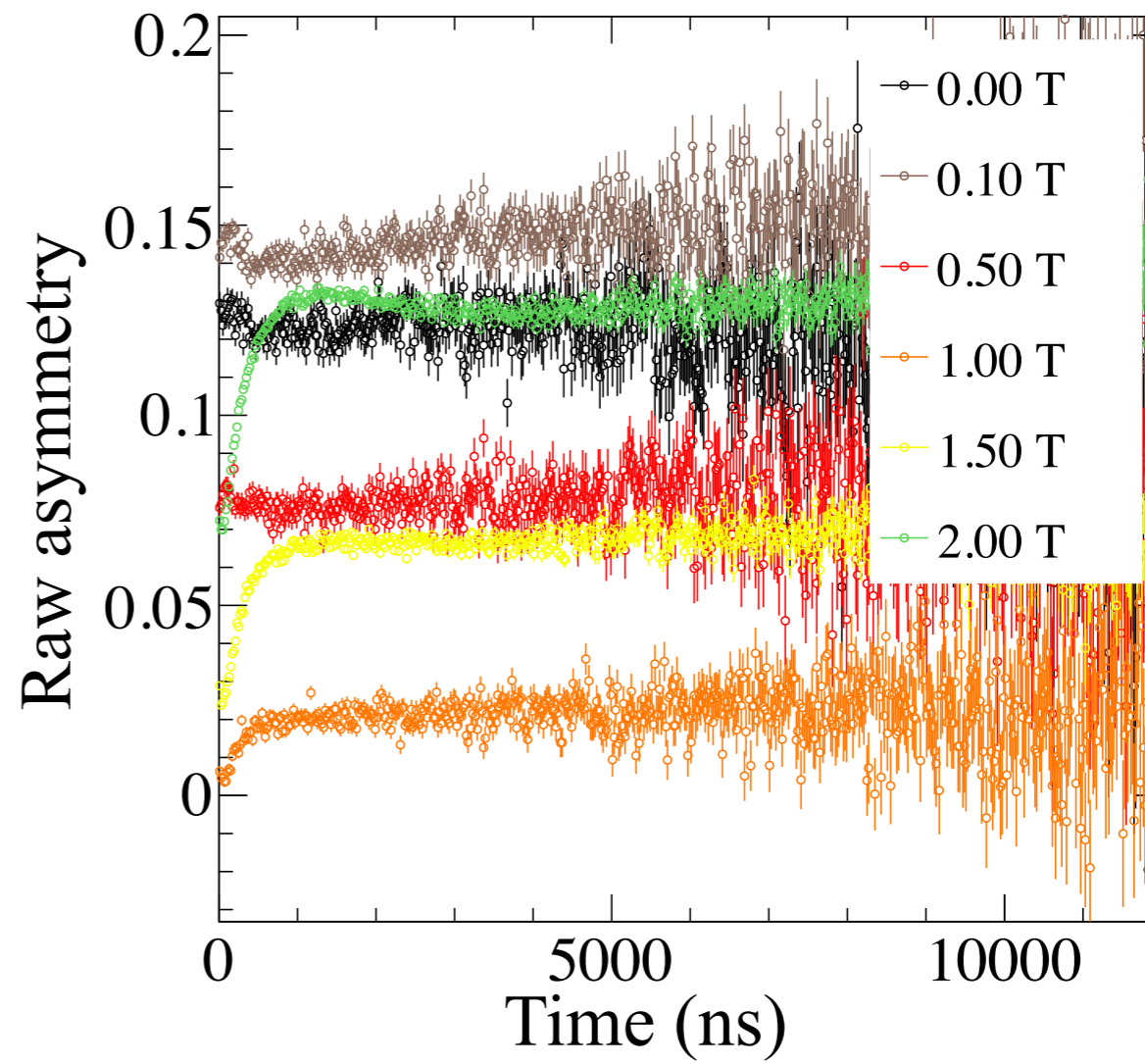


# $\mu$ SRスペクトル

## Ag+Hoスペクトル



## Cuスペクトル



# 現状の課題・解決策

## イベントデータの消失

- 検出器全体で22,000 event/pulse (25 Hz、~5 MB/s)を超えると発生
- DAQソフトウェアで処理落ち

DAQ改良・開発

## さらなる高レート化

- 高磁場による陽電子収束 / ビーム強度の増加

## さらなる高時間分解能

- ミュオンの磁気回転比 | 135.53 MHz/T
- 高磁場下では数ns周期の高速回転
  - ◆ 素核関連のミュオン基礎物理実験にも応用したい(磁気モーメントの精密測定)

信号時間幅の短い  
新型回路・新検出器

# まとめ

## Transient $\mu$ SR測定法

- 従来データに試料環境データを付加
- “誰でも使える”を目指したツール開発

## 5T高磁場分光器(CYCLOPS)

- Clustering応用によるノイズ削減(3桁落ち)
- 実用化に向けて試験中

## 今後の開発

- さらなる大強度に耐えうる検出器/DAQ開発

---

# Backup

# Transient $\mu$ SRで可能になる測定

## 高速環境(温度/磁場)変化スキャン

- LCR測定など

## より精細な転移点の決定

- 温度の決定精度は、もはや温度計が支配的になる

## 応答速度0.1秒～数時間くらいの経時的反応

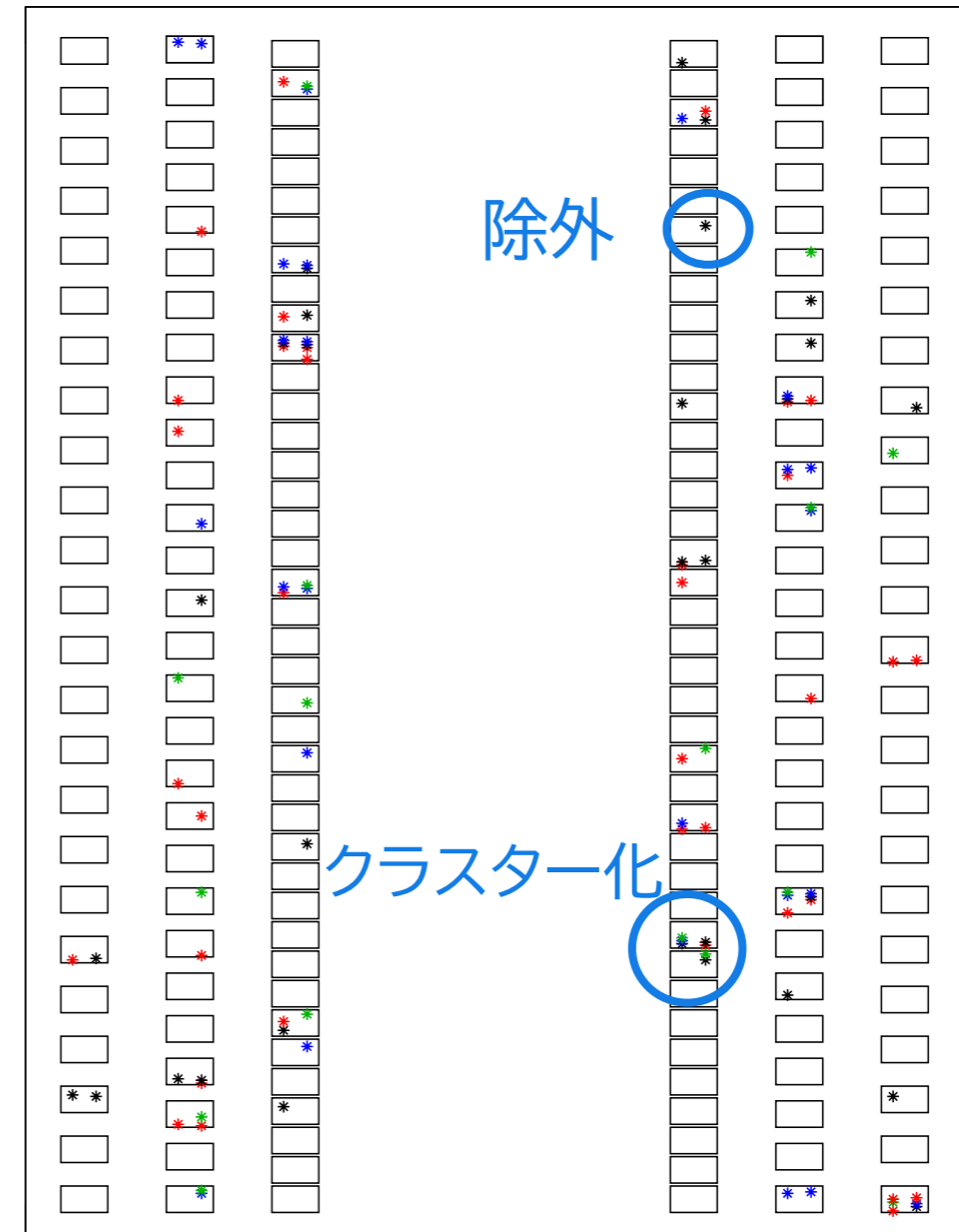
- 光照射
- 加圧/加衝撃
- 電池の充放電

# ビーム試験解析 (Clustering)

## クラスター化条件

- 時間幅 |  $\pm 8$  ns
- 過剰クラスタリングを回避するために最大クラスターサイズを設定
  - ◆ 6ヒットまでクラスター化
- 近接するファイバーにヒットがなければ終了
- ノイズ除去のため  
クラスターサイズ1のヒットは除外

Muon入射後20 ns中の  
検出器ヒットの様子(展開図)



上流  
(Forward)

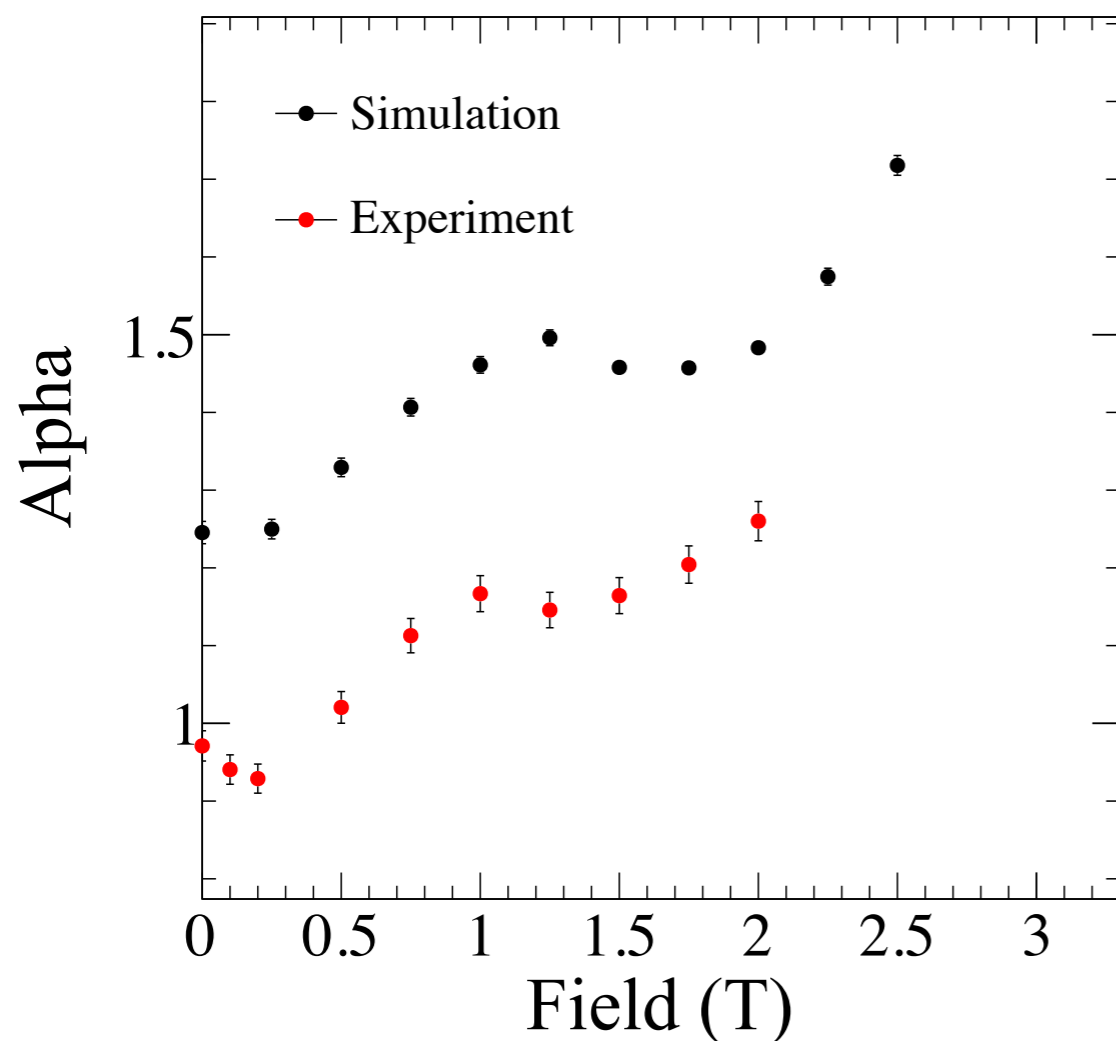
下流  
(Backward)

# $\alpha$ & Full asymmetry

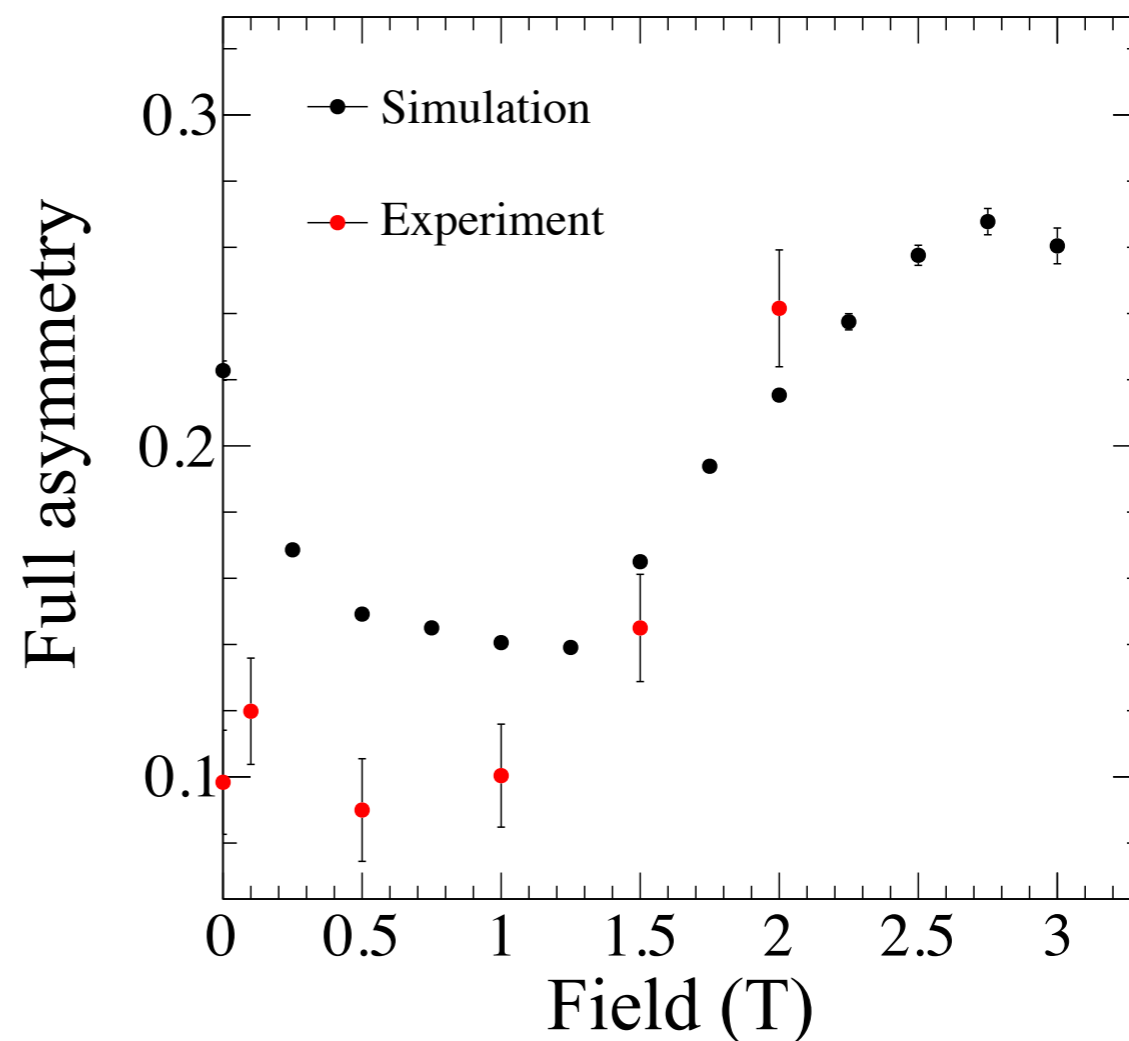
シミュレーションと測定データでおおむね傾向は一致

- 補正係数 $\alpha$ のずれ | 実際の検出器に上下流で検出効率が非対称 ( $F/B=1.25$ )
- Full Asymmetryの低磁場領域での大きな差 | 原因調査中

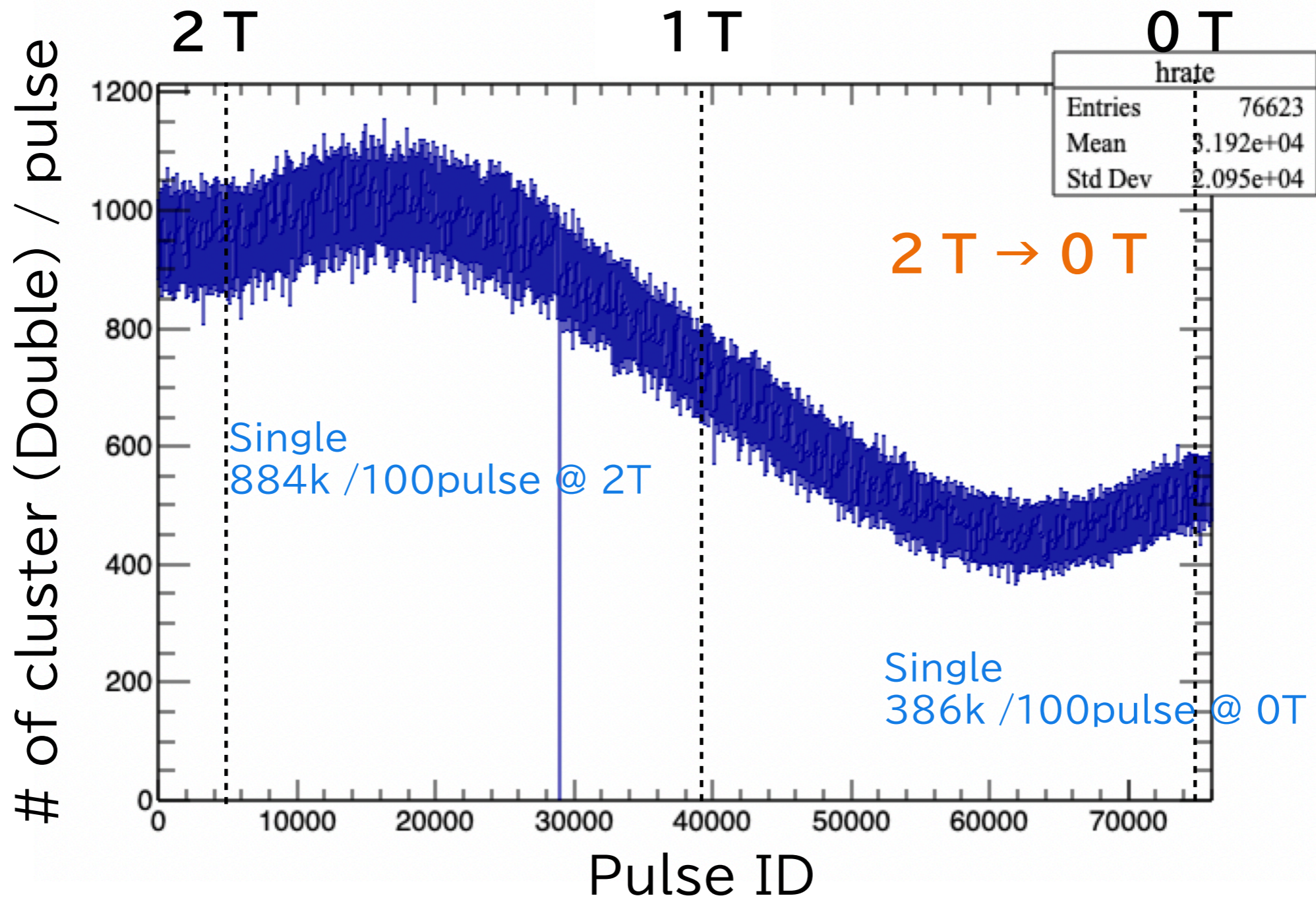
$\alpha$  磁場依存性



Asymmetry 磁場依存性



# ヒットレート (Transient)

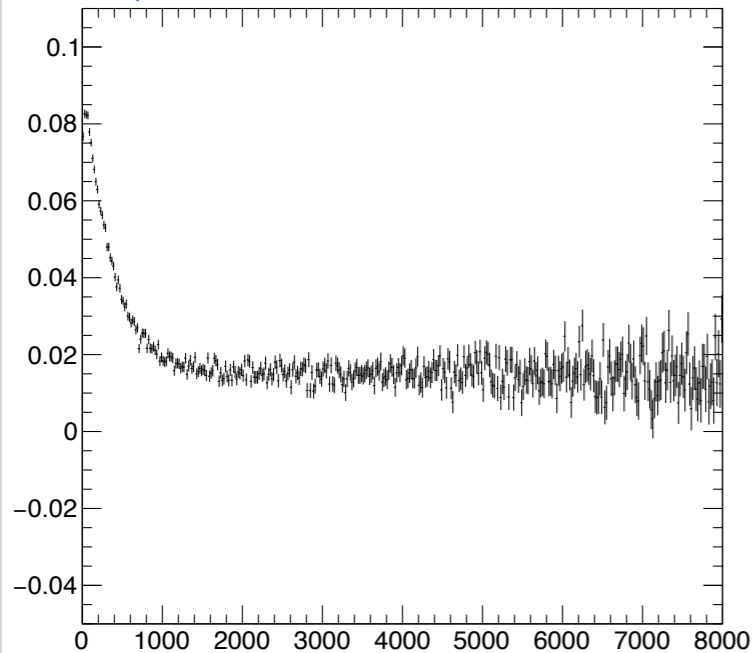


1000 Event/pulse = 90M Event/h

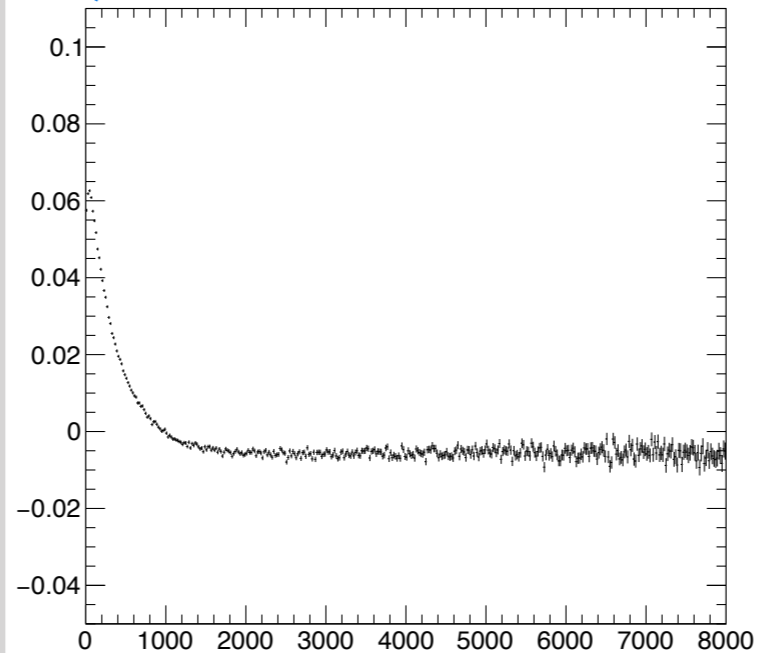


# $\mu$ SRスペクトルの経時変化

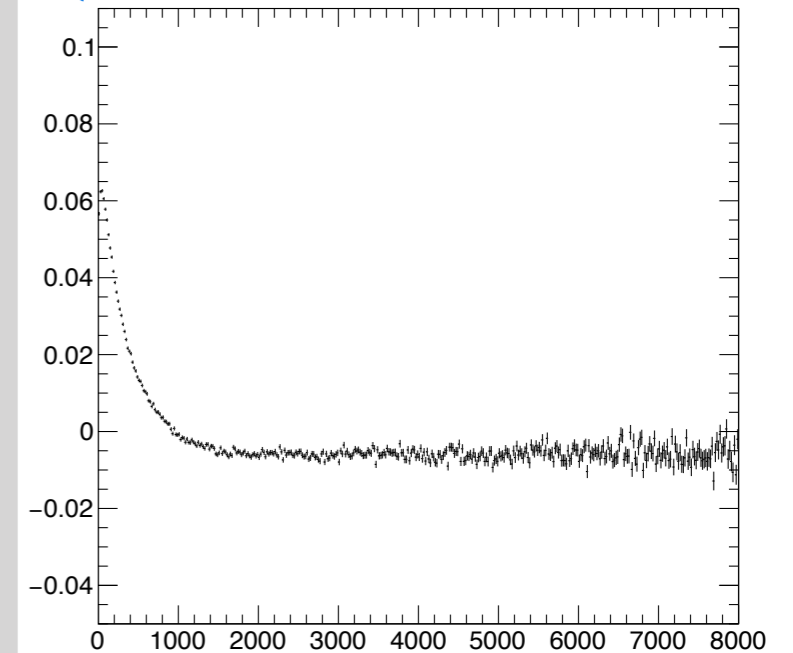
4/11 12:20~14:37



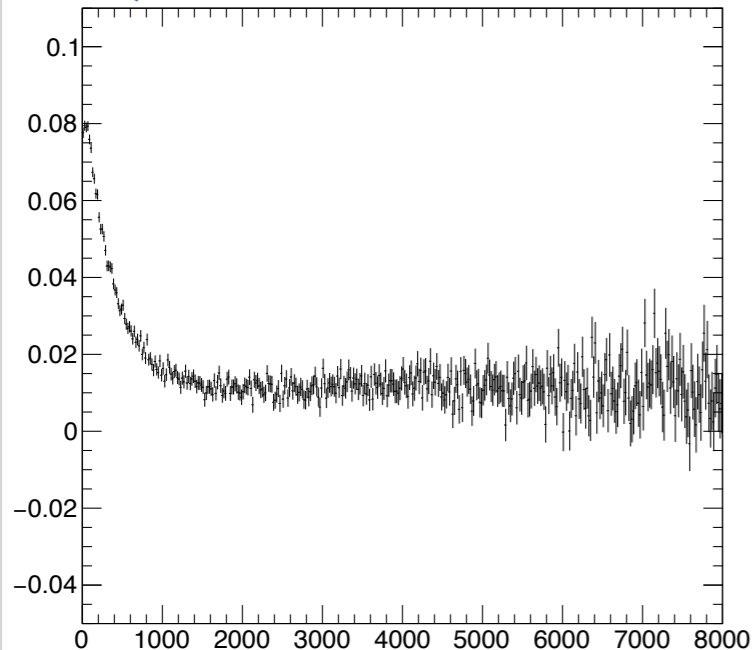
4/11 20:15~翌13:52



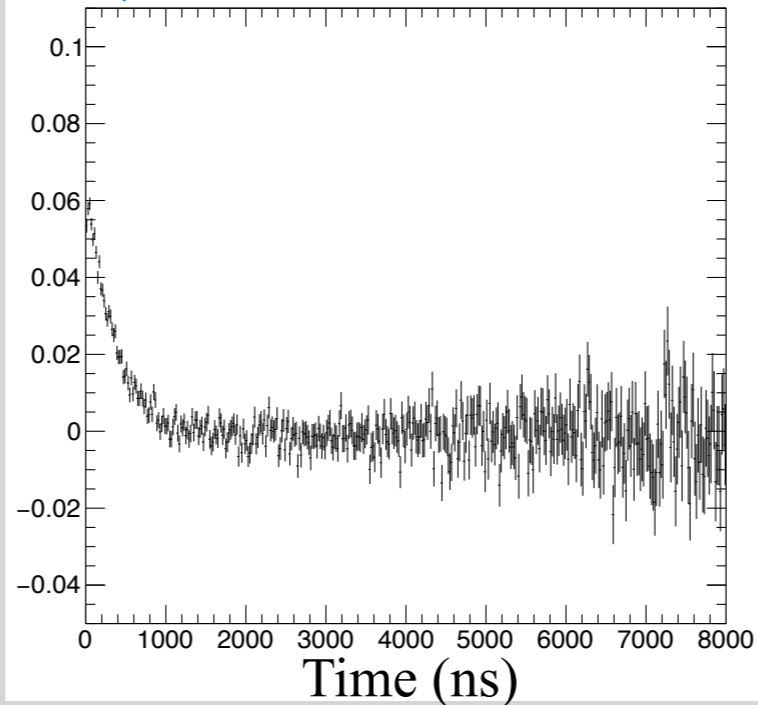
4/12 20:32~翌09:57



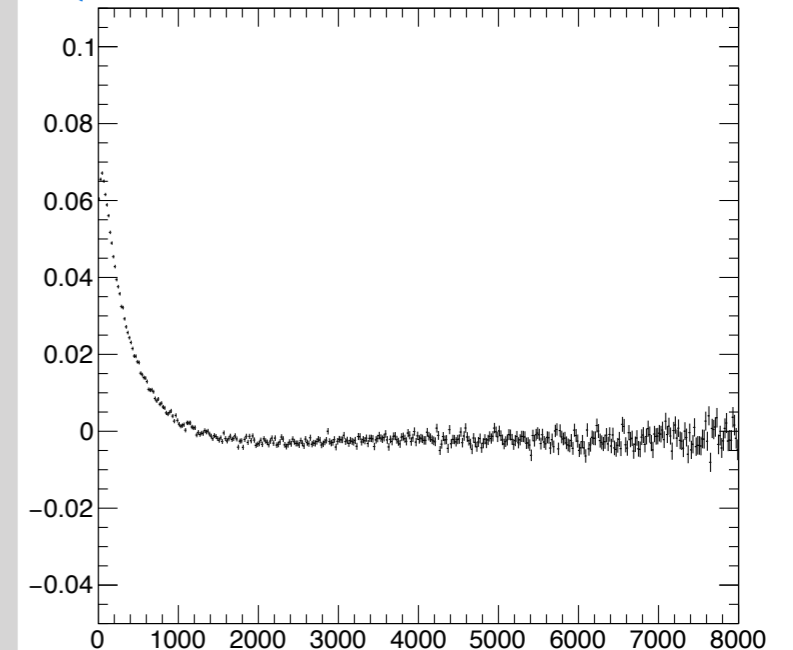
4/13 11:55~13:30



4/13 13:46~14:47



4/13 16:26~翌05:30



# 磁場による検出器性能の変化

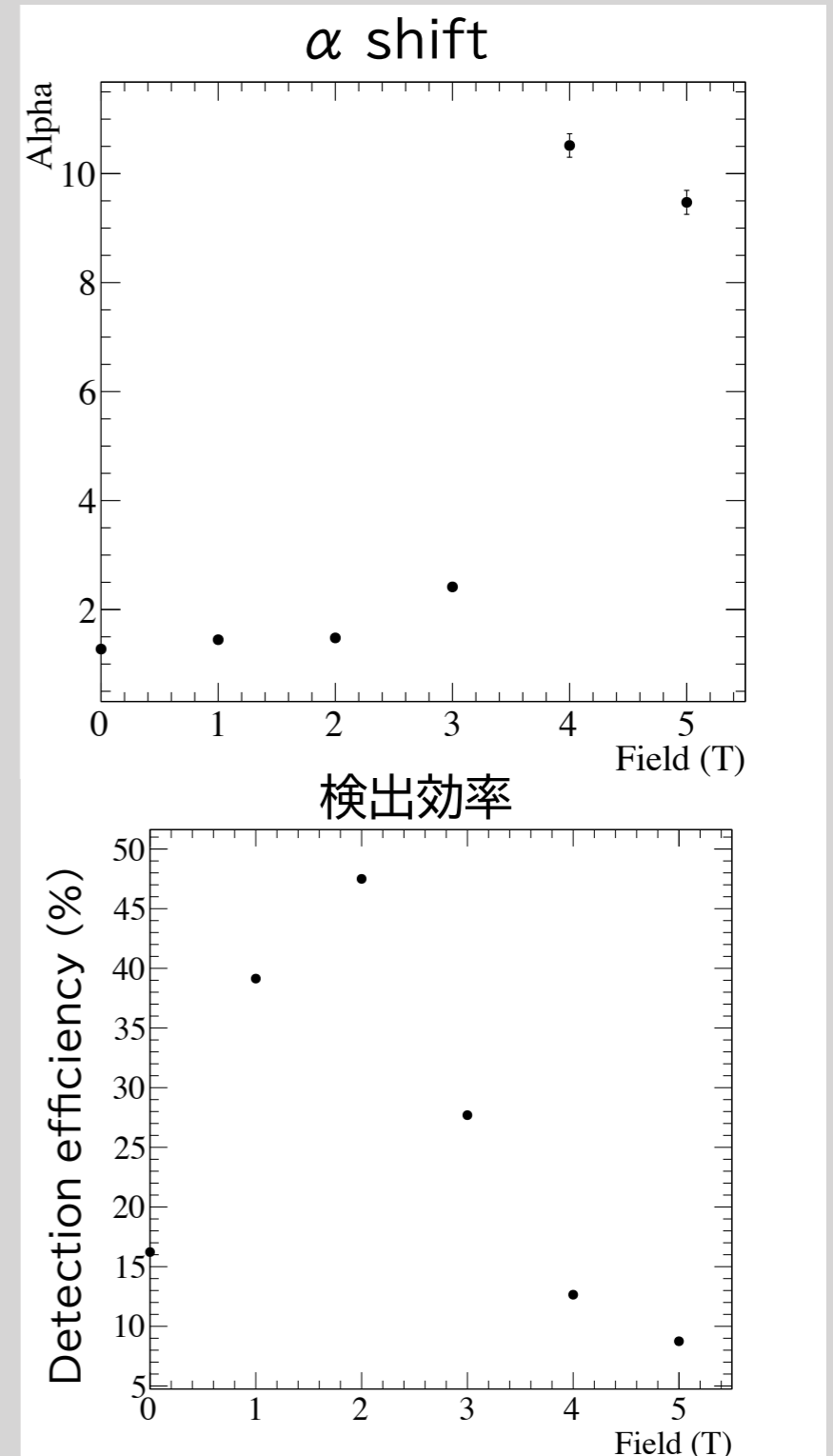
## F/B非対称度 $\alpha$

- 4T以上では陽電子軌道半径が小さく、上流側に飛ぶ陽電子をコリメータが吸収
- 上流側(Forward)の検出数が減少して  $\alpha$  が上昇

## 検出効率

- 2Tまでは磁場の巻き付きにより上昇
- さらに高磁場では軌道半径の減少により外側の検出器にヒットせず
- コリメータに吸収される効果でさらに減少

4T以上の高磁場測定のためには  
コリメータの改造が必要



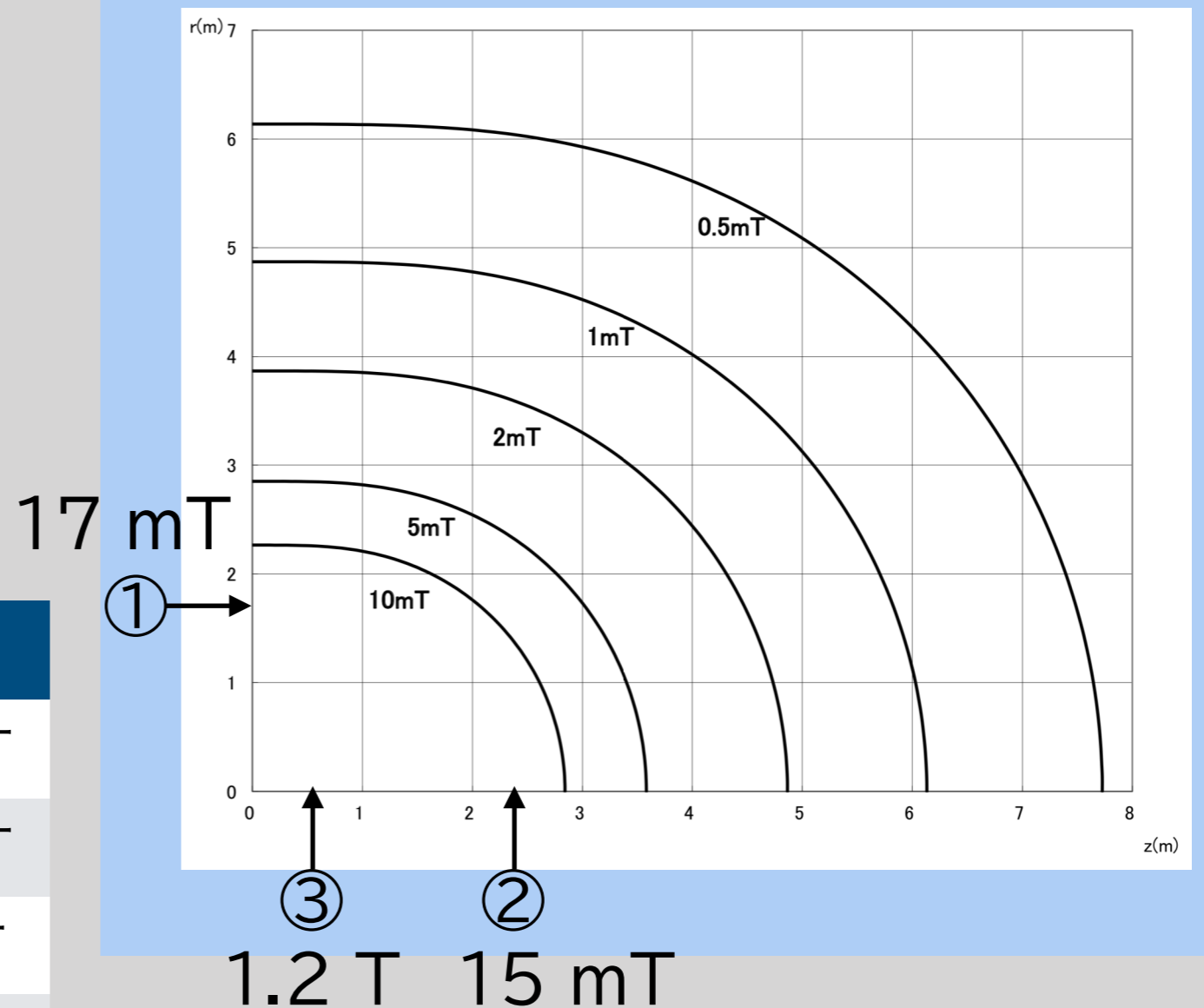
# 漏れ磁場測定

## 測定点 (r, z)

- ① (1.75 m, 0 m)
- ② (0 m, 2.39 m)
- ③ (0 m, 0.52 m)
- ④ Kalliope周辺

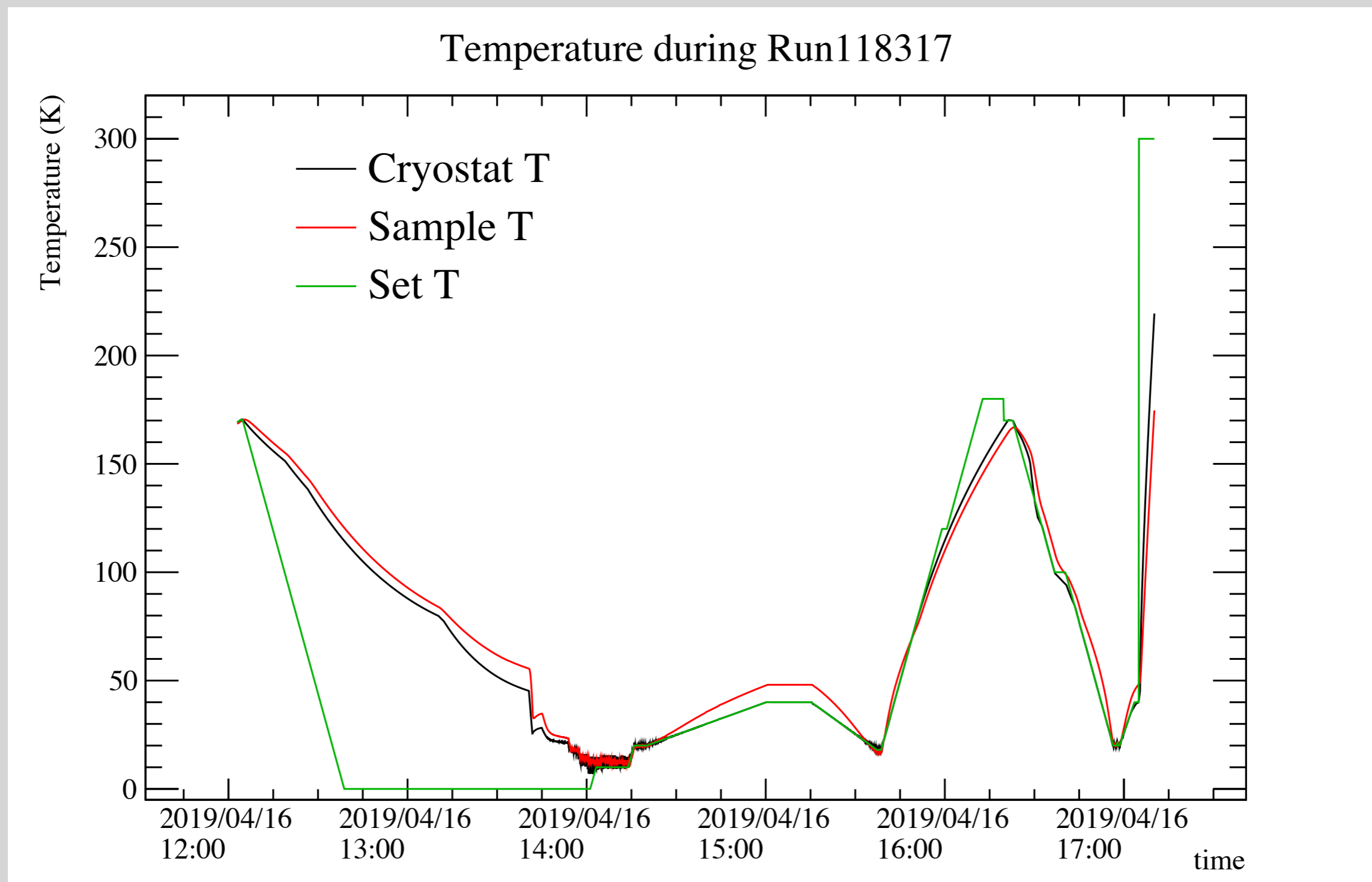
中心磁場	0.5 T	-1 T	2 T
①	1.9 mT	3.3 mT	6.9 mT
②	1.7 mT	3.4 mT	7.2 mT
③	0.11 T	0.22 T	0.44 T
④	0.06 T	0.11 T	0.20 T

## 5T励磁時の漏れ磁場計算



Opera計算値と測定値はおおよそ一致

# Temperature during Run



# 温度/抵抗値測定

- 電磁石電源  
ケーブルの電源  
端子側で測定
  - ◆ 電源から切り離す  
必要あり
  - ◆ 電源の抵抗をみて  
測定できなくなる
  - ◆ 抵抗測定は  
Rangeを固定  
しないとRangeが  
頻繁に切り替り、  
変な値になる
- $T_c \sim 9 \text{ K}$ あたり
  - ◆ 文献値 |  $9.5 \text{ K}$
  - ◆ だいたい一致

