



OKAYAMA  
UNIVERSITY

# スーパーカミオカンデ実験におけるGd溶解前後 のエネルギー再構成の安定性に関する研究

日本物理学会 第76回年次大会 2021年(春季)

講演日: 2021年3月15日

講演番号: 15pW1-5

北川芙西音、中野佑樹<sup>A</sup>、小汐由介

岡山大理, 神戸大理<sup>A</sup>、他 Super-Kamiokande collaboration

# 目次

- スーパーカミオカンデ実験
- 低エネルギー事象のエネルギー再構成
  - PMTの有効ヒット数 $N_{\text{eff}}$
  - 崩壊電子の位置分布
  - 水の透過率測定
  - 透過率の時間変動
- エネルギースケール安定性の評価
- まとめ

# スーパーカミオカンデ実験

## ➤ スーパーカミオカンデ(SK)

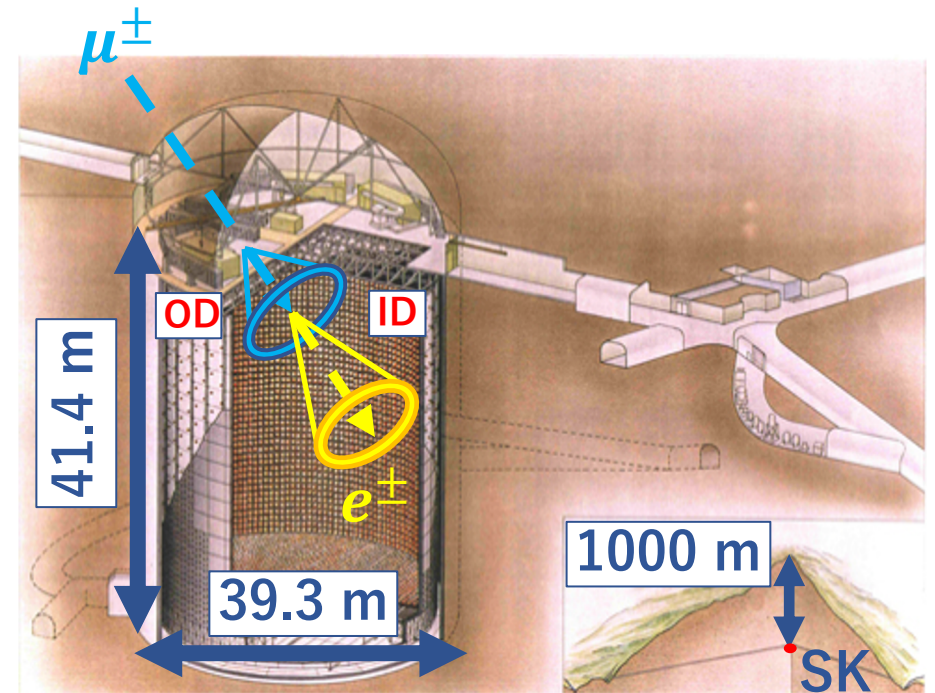
- 地下1000 mに建設された世界最大の地下水チェレンコフ検出器
- 5万トンの超純水が満たされた水タンクに光電子増倍管(PMT)が設置

## ➤ SK-Gd実験

- スーパーカミオカンデの5万トンの超純水に硫酸ガドリニウム( $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ )を溶解する  
→ 0.011%のGdの溶解作業が完了

## ➤ 低エネルギー事象

太陽ニュートリノ、超新星ニュートリノなど  
100 MeV未満の事象

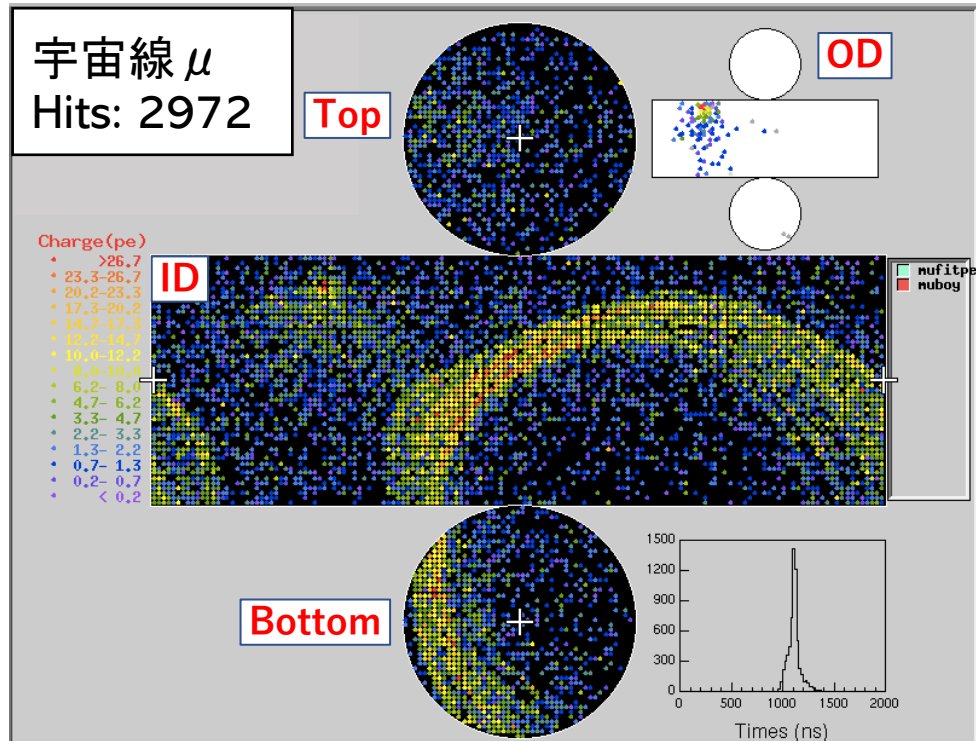


Data	SK4	SK5	SK6
Period	2008.10-2018.3	2019.2-2020.7	2020.7-
Livetime [days]	2970.08	379.17	97.51

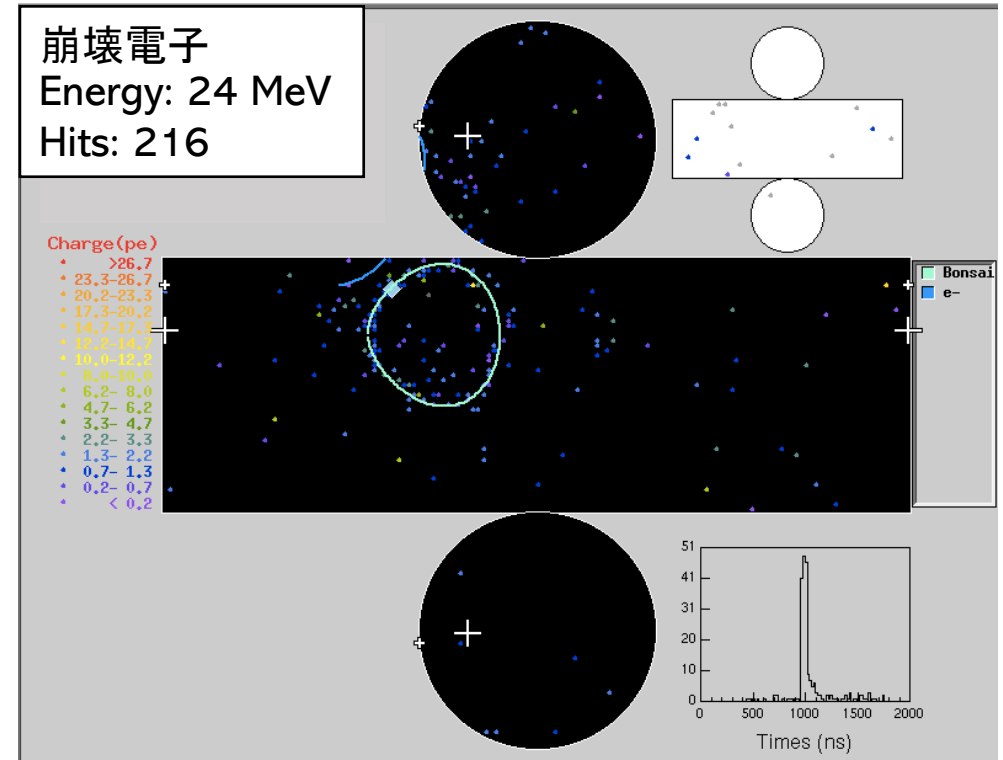
# 低エネルギー事象のエネルギー再構成

- 100 MeV未満の低エネルギー事象ではPMTのヒット数からエネルギー再構成を行う
  - 1PMTあたり観測される光子数が平均~1個と少ない
  - 1光電子あたりの電荷分解能が低い

宇宙線  $\mu$  のイベント



宇宙線  $\mu$  から生じた崩壊電子のイベント



# PMTの有効ヒット数 $N_{\text{eff}}$

- 50 nsecの時間幅に含まれるPMTのヒット数  
→ 実際には、イベントの発生位置や各種PMTの特性に応じた補正が必要

補正後のヒット数

$$N_{\text{eff}} = \sum_i^{N_{50}} \left[ \underbrace{\left( X_i + \frac{\epsilon_{\text{tail}}}{\text{散乱・反射補正}} - \frac{\epsilon_{\text{dark}}}{\text{ダークノイズ補正}} \right)}_{\text{複数光電子補正}} \times \underbrace{\frac{N_{\text{all}}}{N_{\text{alive}}}}_{\text{PMT補正}} \times \underbrace{\frac{1}{S(\theta_i, \phi_i)}}_{\text{光電面の入射角度補正}} \times \underbrace{\exp\left(\frac{r_i}{\lambda_{\text{eff}}(t)}\right)}_{\text{水の透過率補正}} \times \underbrace{\frac{1}{QE_i}}_{\text{量子効率補正}} \right]$$

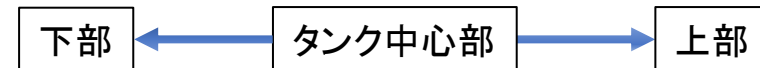
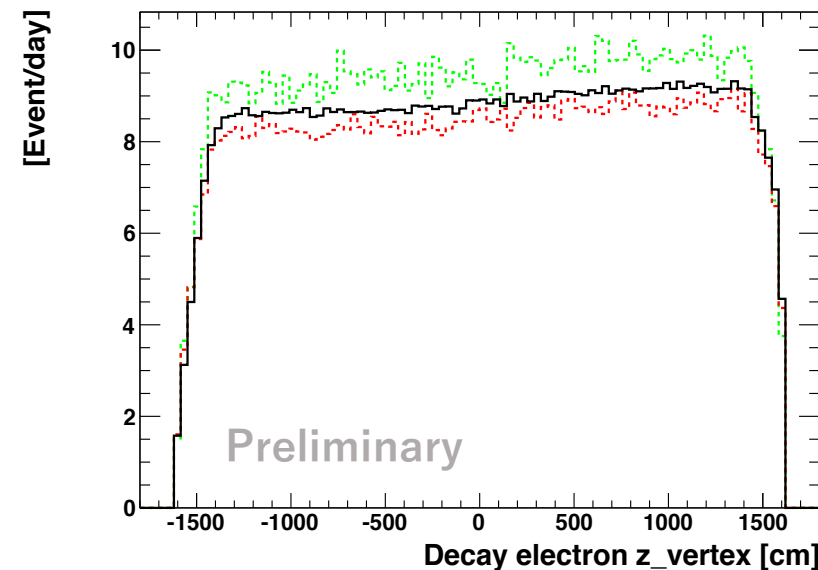
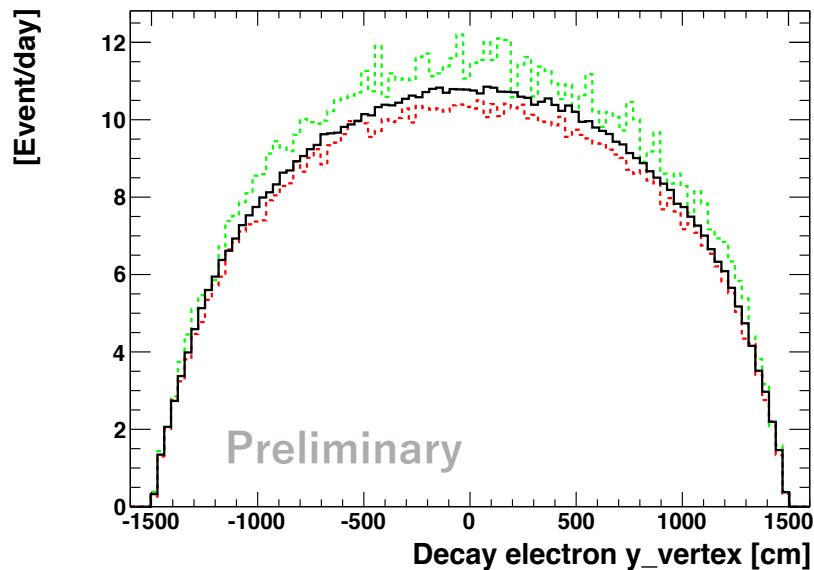
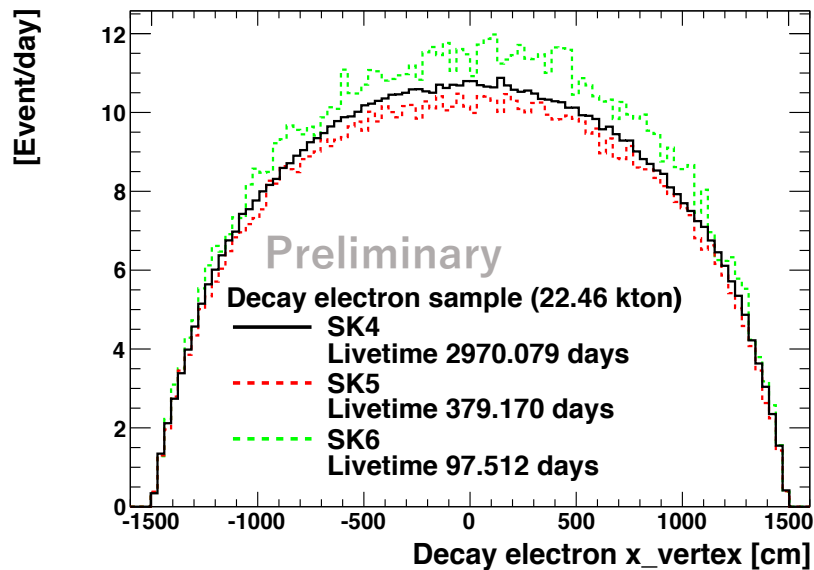
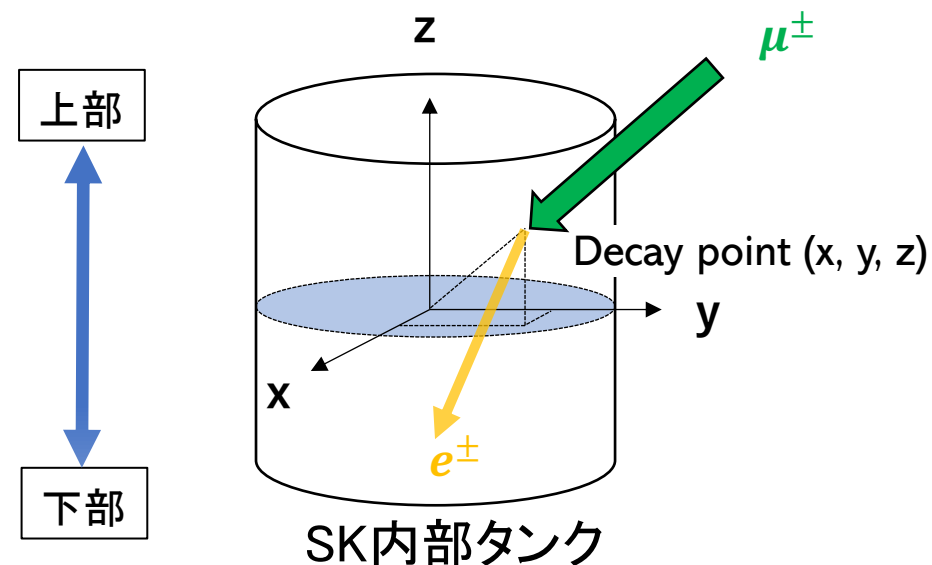
## ➤ Gd導入による透過率への影響

Gd溶解前後で水の透過率が純水の場合と比べて減少することが予想される

- ① 宇宙線 $\mu$ の崩壊電子を用いて透過率の変化をモニターする必要がある
- ② 透過率を考慮し、エネルギースケールの安定性の評価を行う

# SKにおける崩壊電子の分布

- 再構成された崩壊電子の位置(x, y, z)分布
  - タンク内のX-Y平面で一様分布する
  - Z座標の高い位置でイベント数が増加
    - タンク上部で宇宙線  $\mu$  が崩壊
  - SK6でのイベント数の増加
    - トリガー関連の修正



# 水の透過率測定

- 宇宙線  $\mu$  から生じる崩壊電子を用いて透過率測定を行う
  - 崩壊電子は連続的なエネルギースペクトルを持つ
  - 継続的に測定し、**透過率の時間変動**を調べる

## 水中での減衰効果

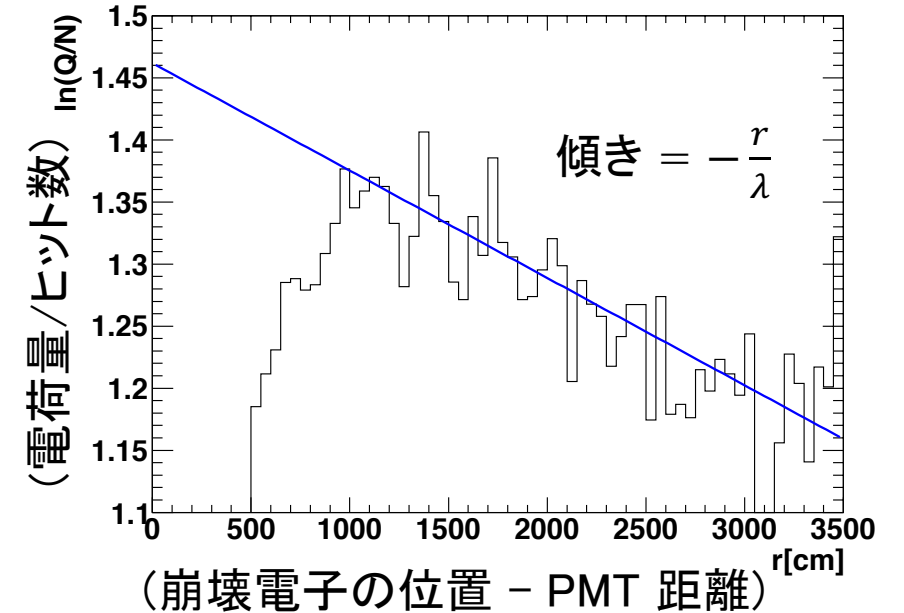
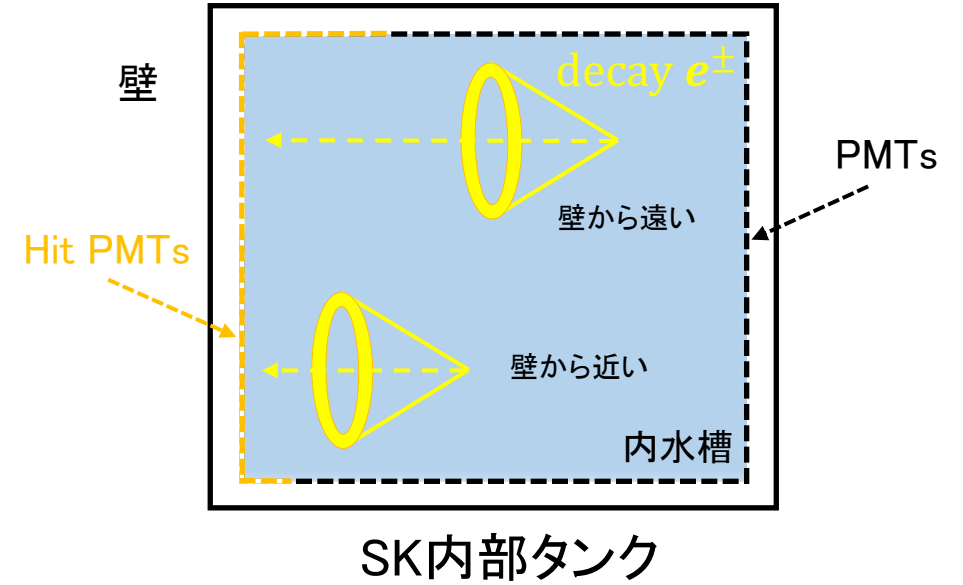
- チェレンコフ光は水中で散乱・吸収を繰り返し減衰する
- 減衰の効果を補正する必要がある

## 透過率の算出方法

- (電荷量/ヒット数) vs. 崩壊電子の位置 - PMTの距離

$$\text{透過率補正} = \exp\left(\frac{r_i}{\lambda(t)}\right)$$

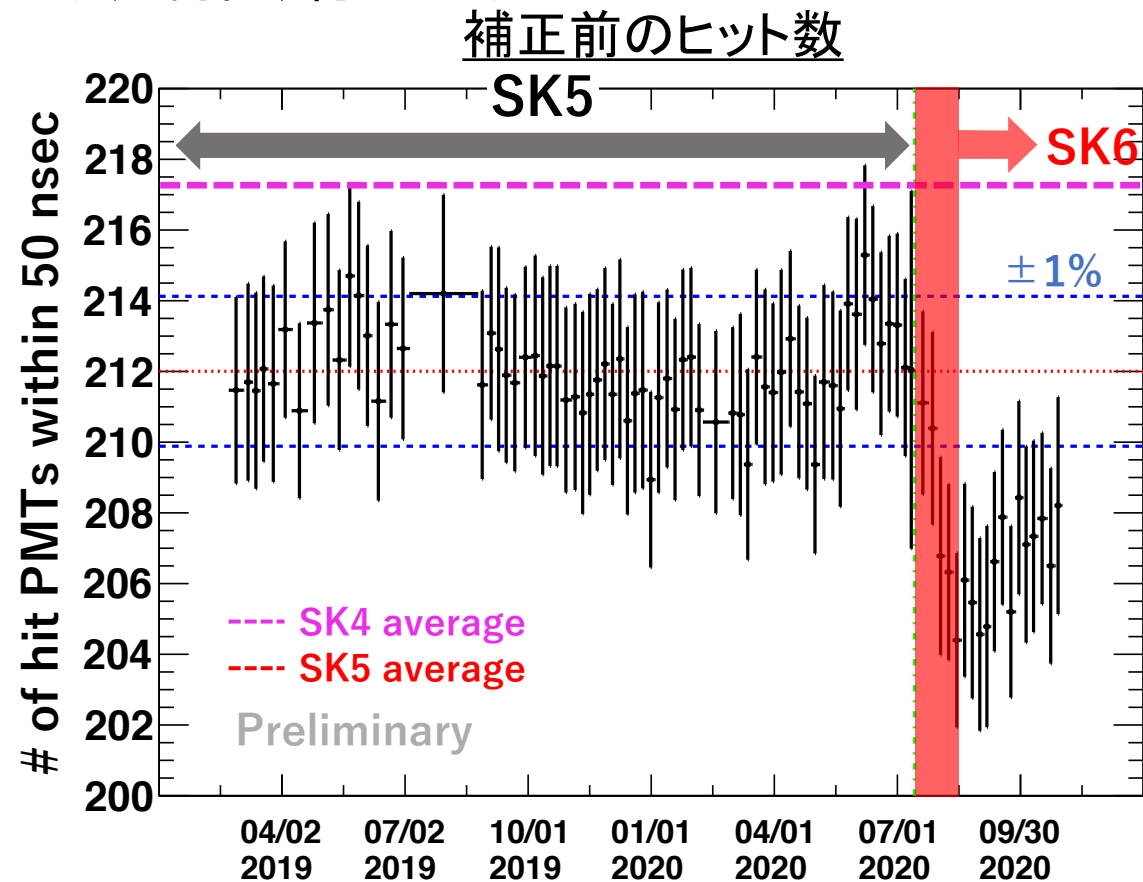
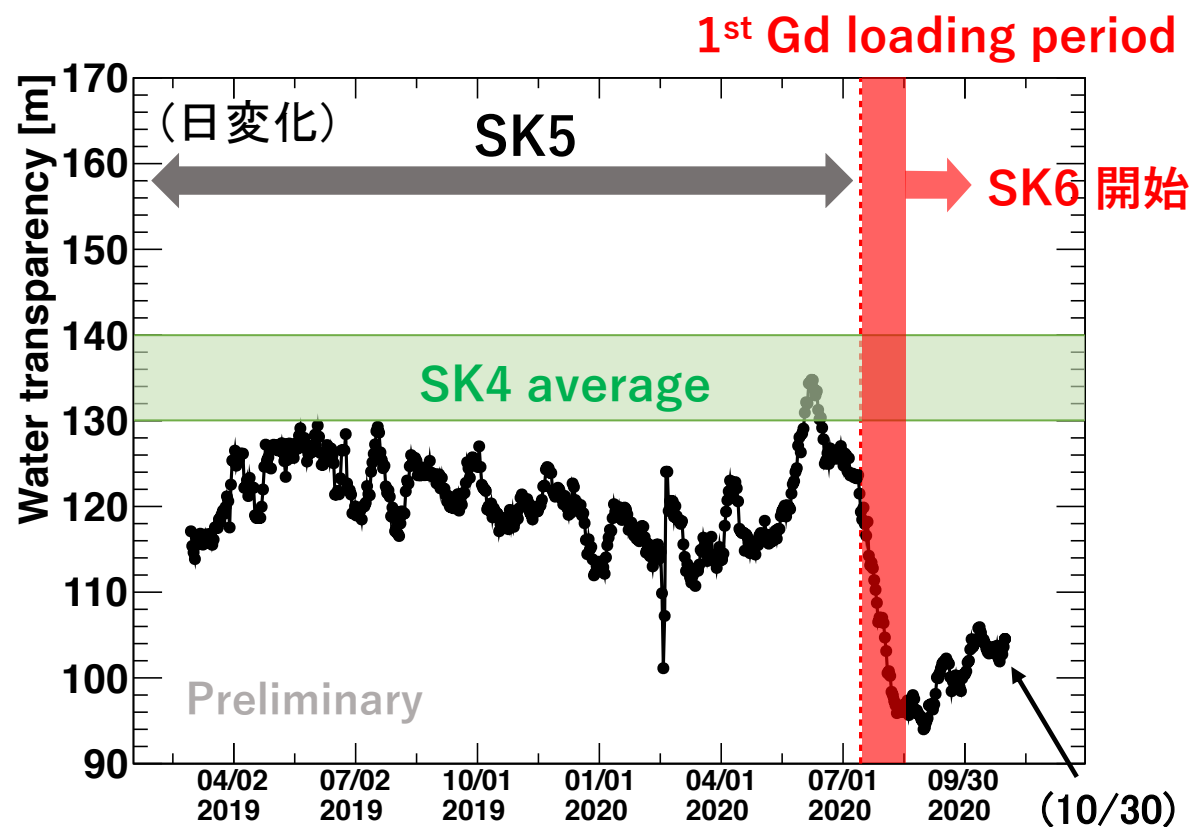
$r_i$ : 事象発生点から検出器までの距離  
 $\lambda(t)$ : 光の透過長



(参照: Y.Nakano, Doctor thesis, University of Tokyo (2016))

# 透過率の時間変動

- SK6開始後(Gd溶解後)、透過率がおよそ95mまで減少している(左図)  
⇒ ヒット数が3-4%減少している(右図)
- Gd水がタンク内で循環したことで透過率が再び上昇する(3月現在、約110 m)

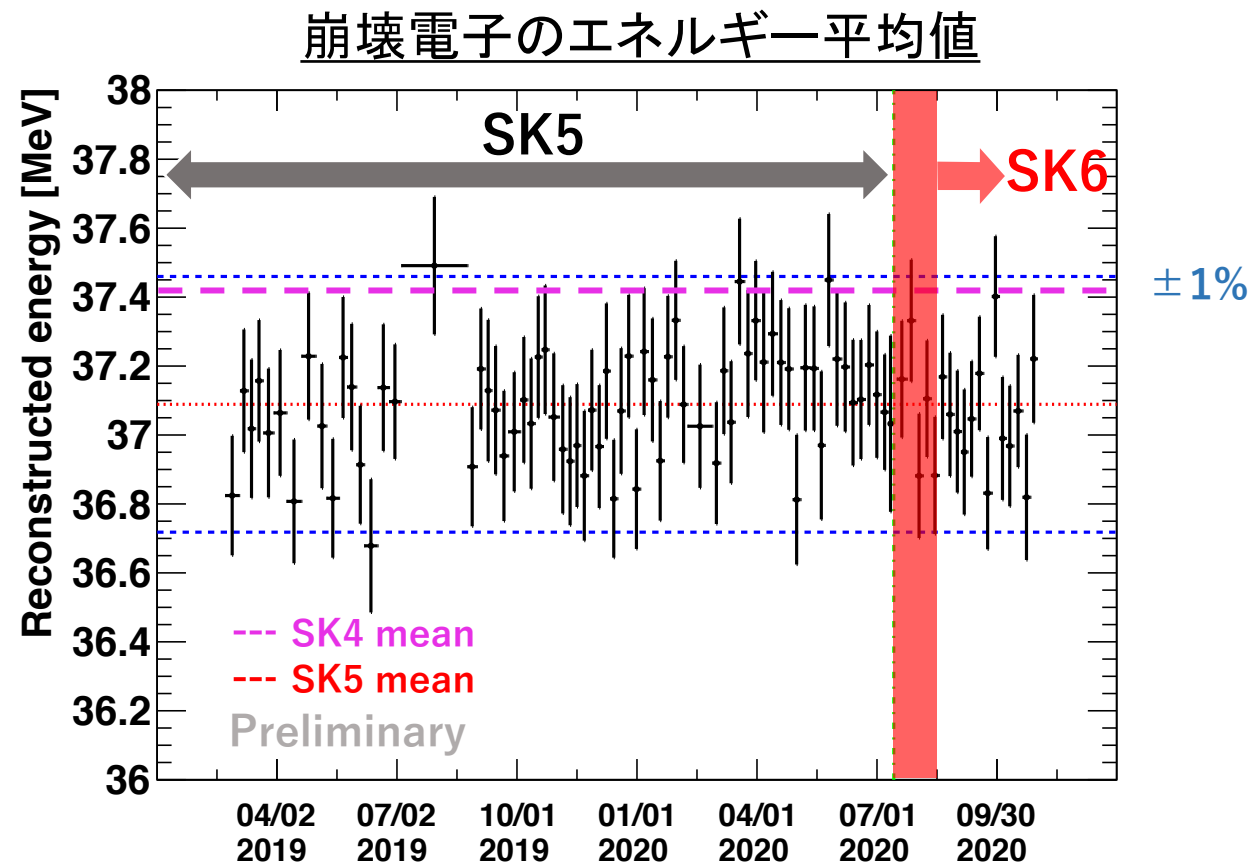
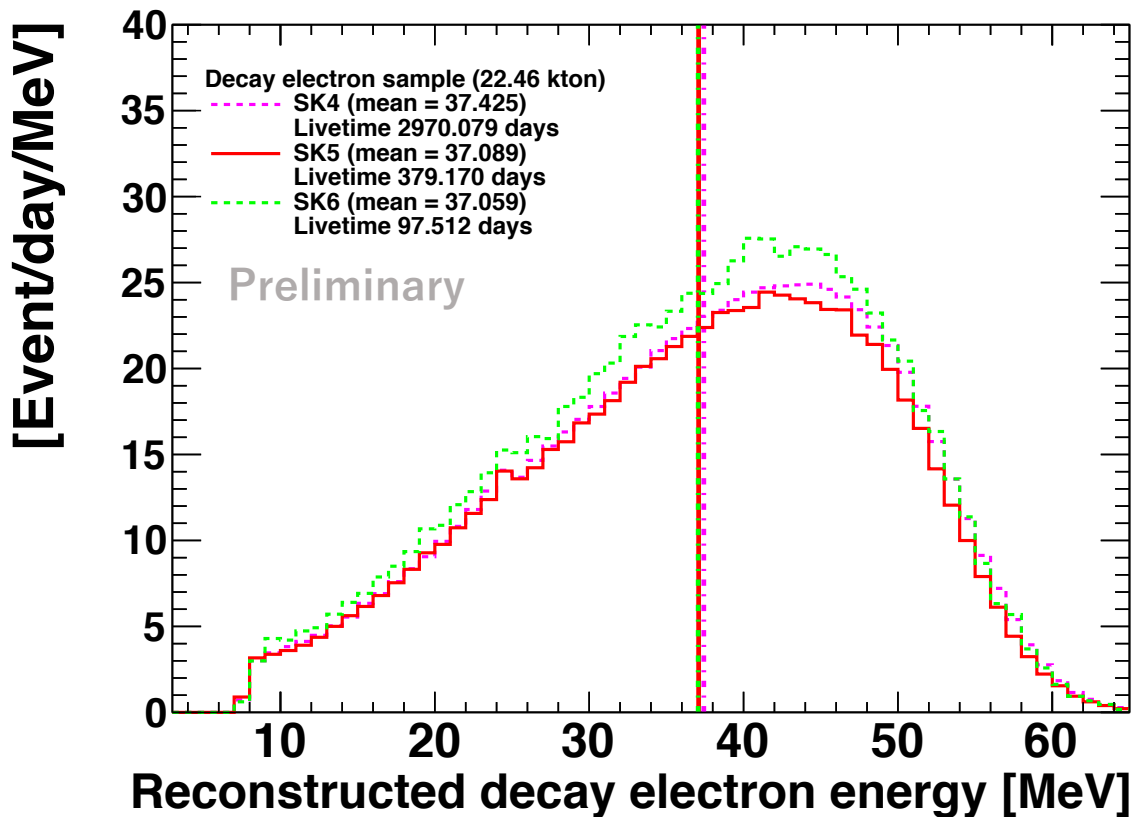


→ 透過率を考慮した補正後の有効ヒット数からエネルギー再構成を行う



# エネルギースケール安定性の評価

- 有効ヒット数 $N_{\text{eff}}$ から再構成された崩壊電子のエネルギースケールを評価する  
Gd導入後のエネルギー再構成の安定性について、  
→ エネルギー平均値は $\pm 1\%$ で過去の測定結果と誤算の範囲内で一致



# まとめ

- SK6の開始に伴い、Gd溶解前後で透過率が変動すると予想されている
  - 低エネルギー事象のエネルギー再構成には補正されたPMTヒット数が用いられている
    - 水の透過率補正など
  - 宇宙線  $\mu$  から生じるを崩壊電子を用いて、Gd溶解前後の位置分布/透過率の時間変動/エネルギー再構成について評価を行った
    - Gd溶解後、透過率が減少
    - SK6開始以降のエネルギー再構成について、崩壊電子のエネルギー平均値は $\pm 1\%$ の範囲内でGd溶解前の測定結果と一致
- ⇒ Gd溶解後のエネルギー再構成の安定性を確認