

講演番号 17aT13-9

スーパーカミオカンデにおける 光電子増倍管の量子効率の測定

酒井 聖矢 (岡山大理)

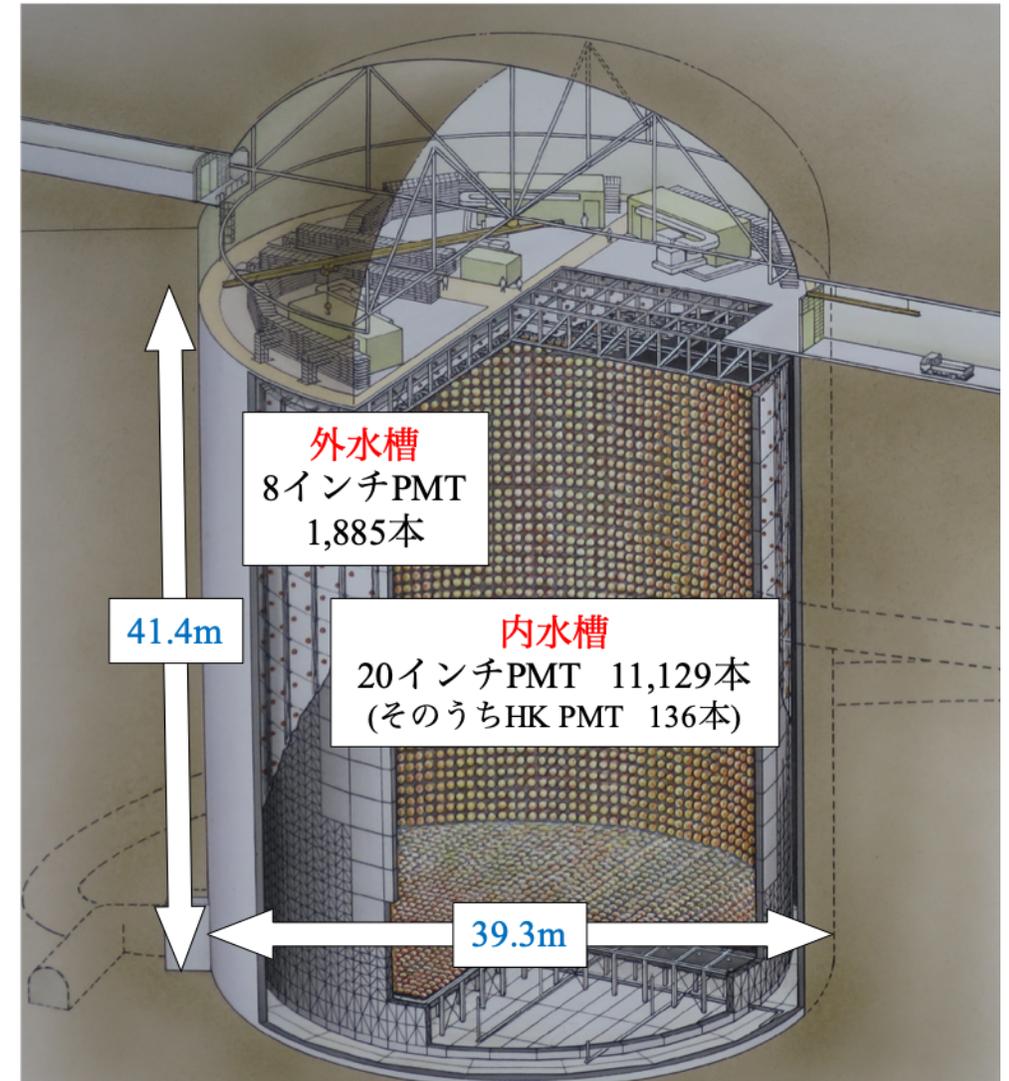
他Super-Kamiokande Collaboration

2019年9月17日 日本物理学会 2019年秋季大会

1. イントロダクション
2. 目的
3. 測定方法
4. 結果
5. まとめ

1.1 スーパーカミオカンデ (SK)

- 岐阜県飛騨市旧神岡鉱山内の地下1,000mに設置された、世界最大の水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置
- 5万トンの超純水で満たされた直径約39.3m、高さ約41.4mの円筒形水タンクと光電子増倍管 (PMT, photomultiplier tube) から構成
- 2018年5月末から2019年1月末にかけて、水タンクの大改修工事が行われた
- 2019年2月のSK-Vの始動に伴い、検出器のキャリブレーションが行われた



↑ スーパーカミオカンデの概観

1.2 PMT キャリブレーション

- 高電圧を調整
- ゲイン測定
- 相対的量子効率の測定 (QEテーブルの作成)
- 信号の大きさによる応答時間のずれの補正
- 水の透過率の測定

など

2 目的

- 量子効率 (QE, quantum efficiency) : PMTの光電面で光子を光電子に変換する確率
- 各PMTの量子効率には個体差がある

目的

QEテーブル (各PMTの相対的な量子効率) の作成

- 事象のエネルギー再構成をする際の補正係数として使用
- SK検出器に関する事象のモンテカルロ計算を行う際にPMTのパラメータとして使用

【大まかな流れ】

- 検出器内に低光量の光源を置いてデータを取得する
- 各PMTのヒット数 (信号の大きさが設定した閾値を超えた回数) に補正をかける

3.1 NiCf 線源

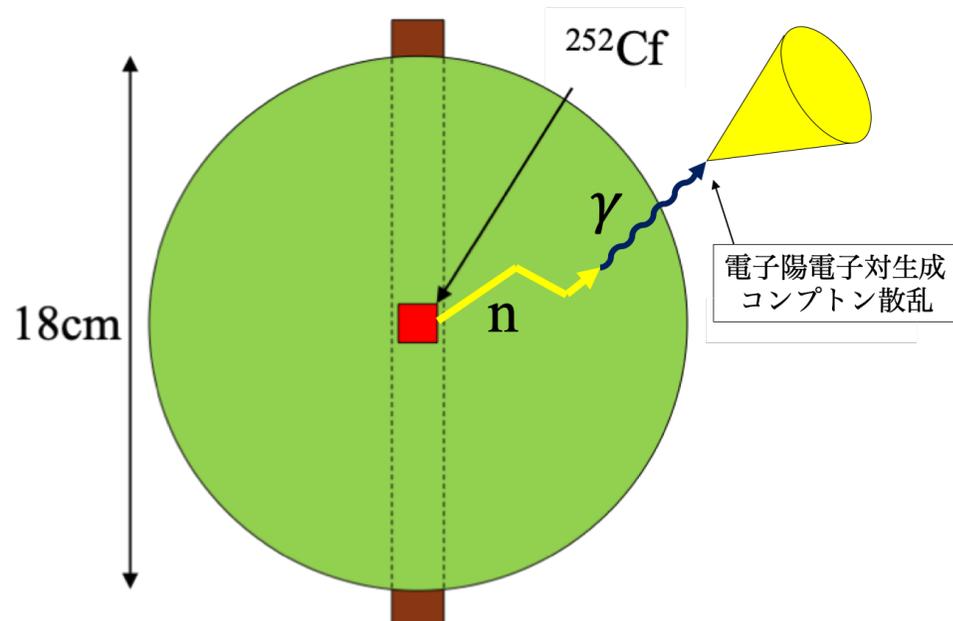
- NiCf 線源 (ニッケル原子核が熱中性子を吸収した際に放出するガンマ線) を使用
- Ni ball (酸化ニッケルとポリエチレンを球状に固めたもの) と ^{252}Cf (中性子線源)
- 全方向かつ一様に6~9MeVのガンマ線を放出



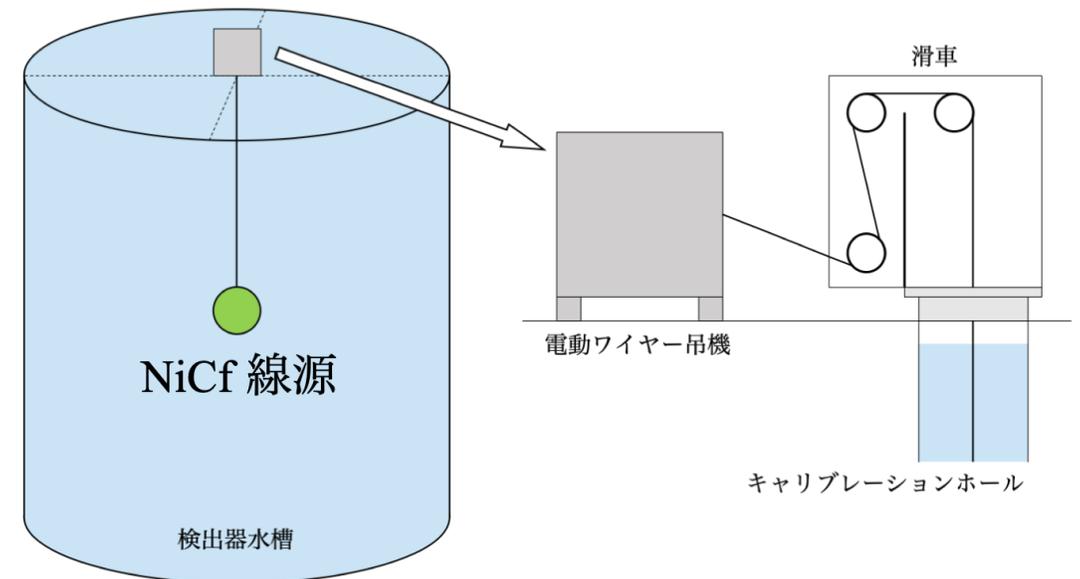
↑ Ni ball



↑ 中性子線源 ^{252}Cf



↑ NiCf 線源



↑ 量子効率測定の設定アップの模式図

3.2 解析手法

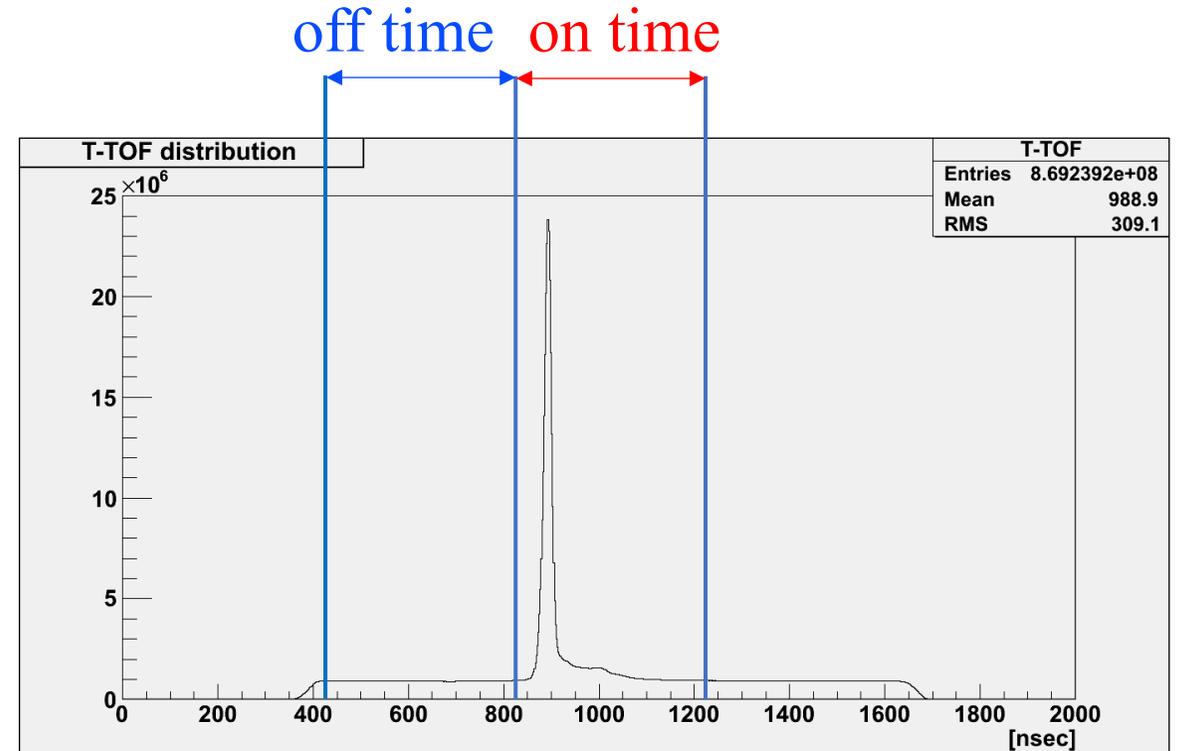
- 得られたデータから各PMTのヒット数を計算 → NiCf 線源による事象だけを選ぶ必要がある

事象選択

- NiCf 線源から遠い場所で起きた事象
- 低エネルギー事象
(放射性BG, 自発核分裂時のガンマ線,
陽子捕獲によるガンマ線など)
- 高エネルギー事象 (宇宙線ミューオンなど)



- 各PMTでヒット数の数え上げ ($N_{\text{hit}} = N_{\text{on}} - N_{\text{off}}$)
→ ダークノイズによるヒットを取り除く



↑ T-TOF分布

3.3 ヒット数の幾何学的補正

- PMTごとにNiCf線源からの距離や入射方向が異なる
→ ヒット数に幾何学的補正を加える必要がある

距離

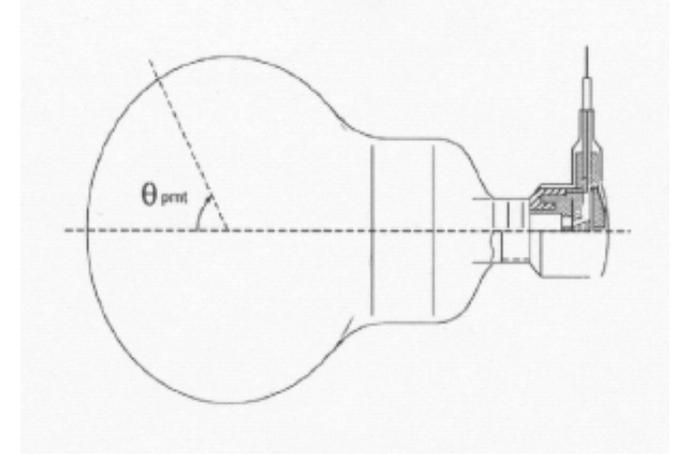
- 3次元空間のある点で発生した光は距離の二乗に比例して拡散
→ r^2 を計算し、ヒット数に掛ける

r : NiCf線源とPMTの間の距離

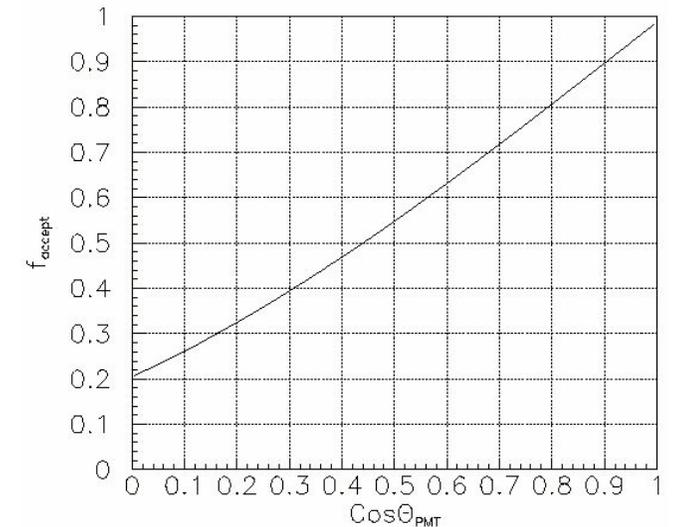
入射方向

- 入射方向 (見込み角) によって有感面積が変化
→ $F(\theta)$ を計算し、ヒット数から割る

$F(\theta)$: 見込み角 θ に依存する有感面積の関数
$$= 0.205 + 0.524 \times \cos \theta + 0.390 \times \cos^2 \theta - 0.132 \times \cos^3 \theta$$



↑ θ の定義



↑ θ に依存する有感面積の関数 $F(\theta)$

3.3 ヒット数の幾何学的補正

$r(i)$: NiCf線源とPMT(i)の間の距離

$F(\theta(i))$: 見込み角 $\theta(i)$ に依存する有感面積の関数

$$= 0.205 + 0.524 \times \cos \theta(i) + 0.390 \times \cos^2 \theta(i) - 0.132 \times \cos^3 \theta(i)$$

$N_{\text{hit}}(i)$: 事象選択後のPMT(i)のヒット数

$$= N_{\text{on}}(i) - N_{\text{off}}(i)$$

$N_{\text{corr}}(i)$: 幾何学的補正を加えた後のPMT(i)のヒット数

$$= N_{\text{hit}}(i) \cdot r(i)^2 / F(\theta(i))$$

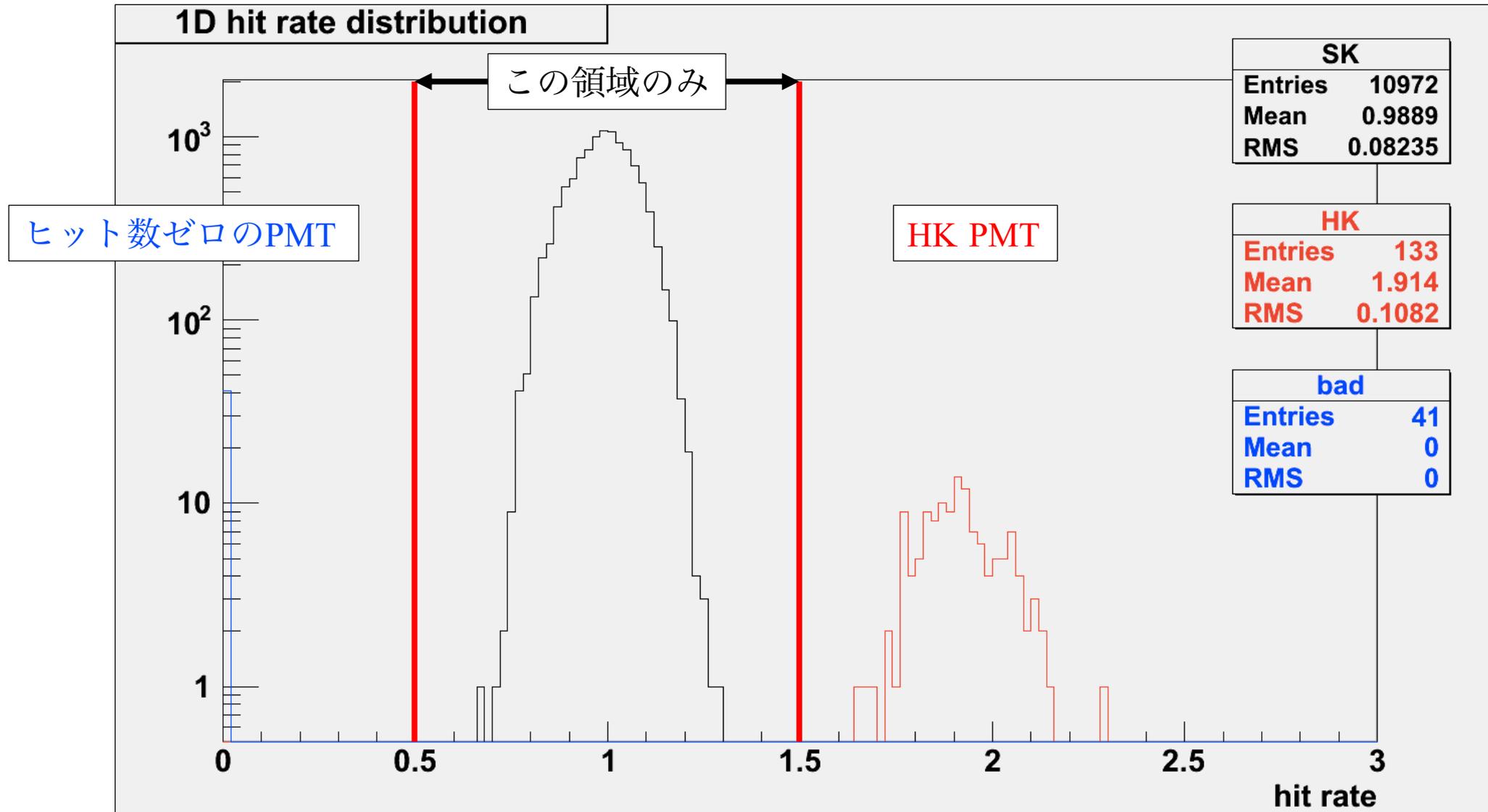
i : PMTの識別番号 ($i = 1 \sim 11,146$)

hit_rate(i) : $N_{\text{corr}}(i)$ を平均が1になるように規格化したもの

$$= N_{\text{corr}}(i) / \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{PMT}}} N_{\text{corr}}(i) / N_{\text{PMT}} \right)$$

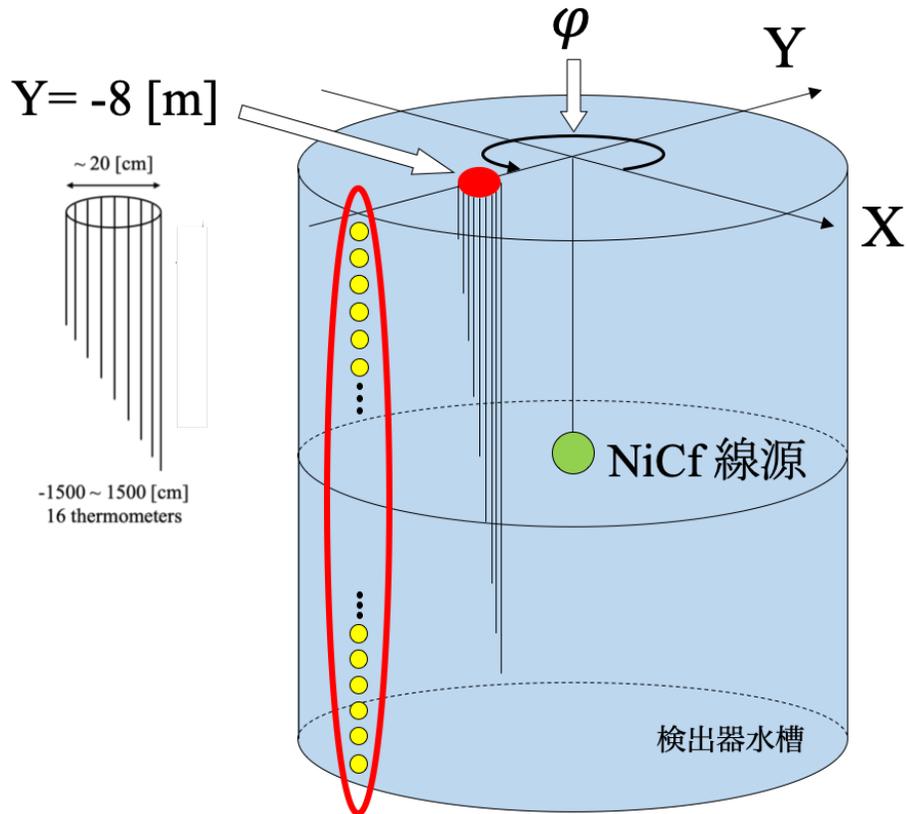
N_{PMT} : 解析に使用したPMTの数

3.4 ヒット数の少ないPMT, 多いPMT

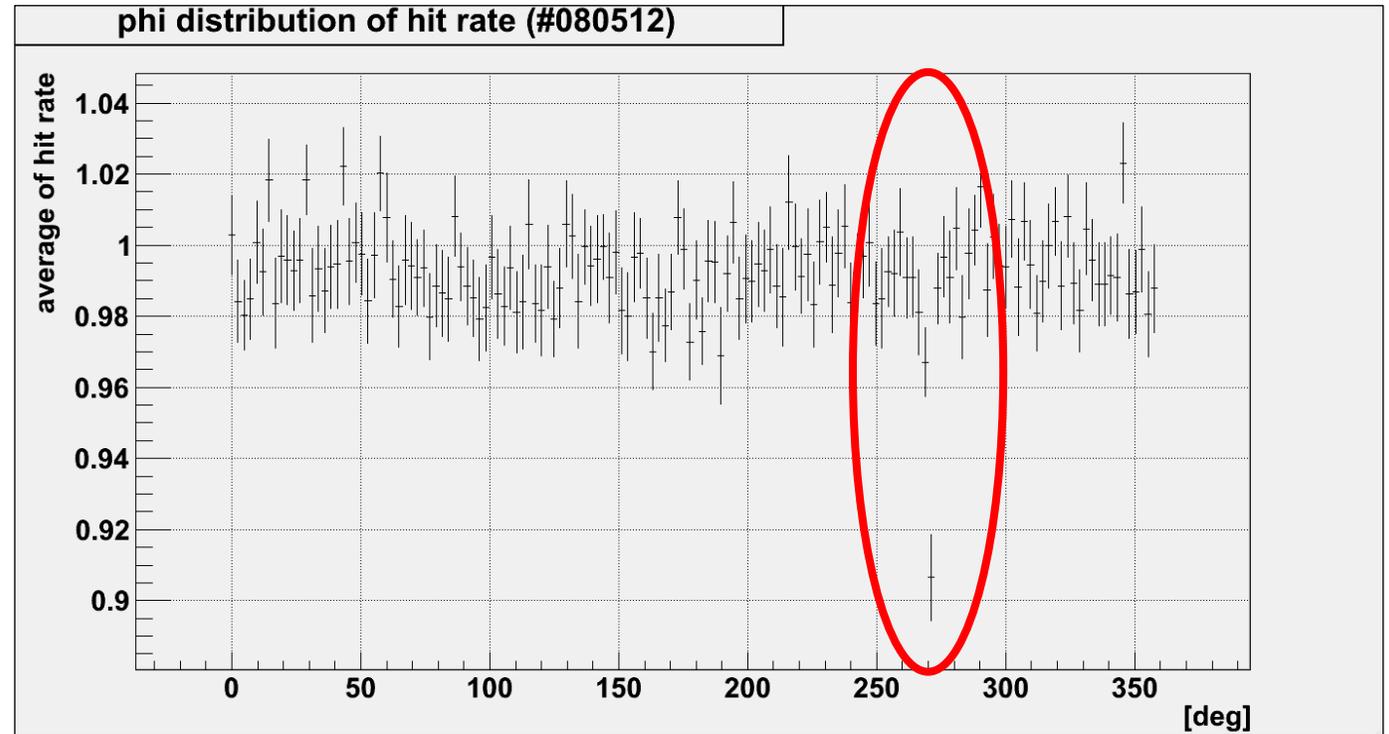


3.5 温度計による影の効果

- Y= -8 [m]の位置にあるキャリブレーションホールに16本の温度計
- 温度計の影にあたる領域 (260°~280°) のPMT → QEテーブルから除く



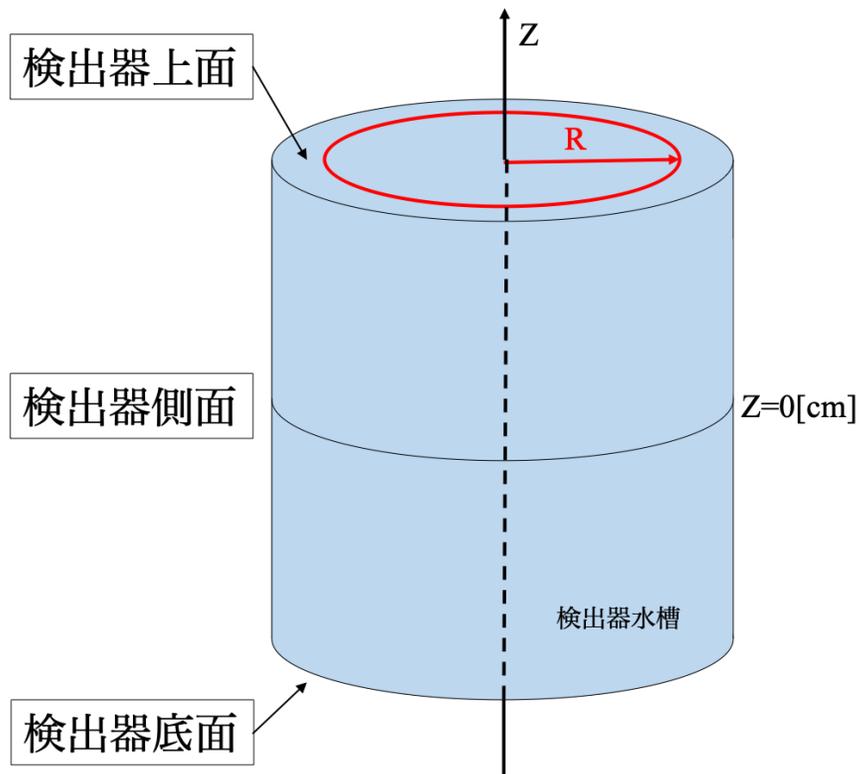
↑ NiCf線源と温度計の位置関係



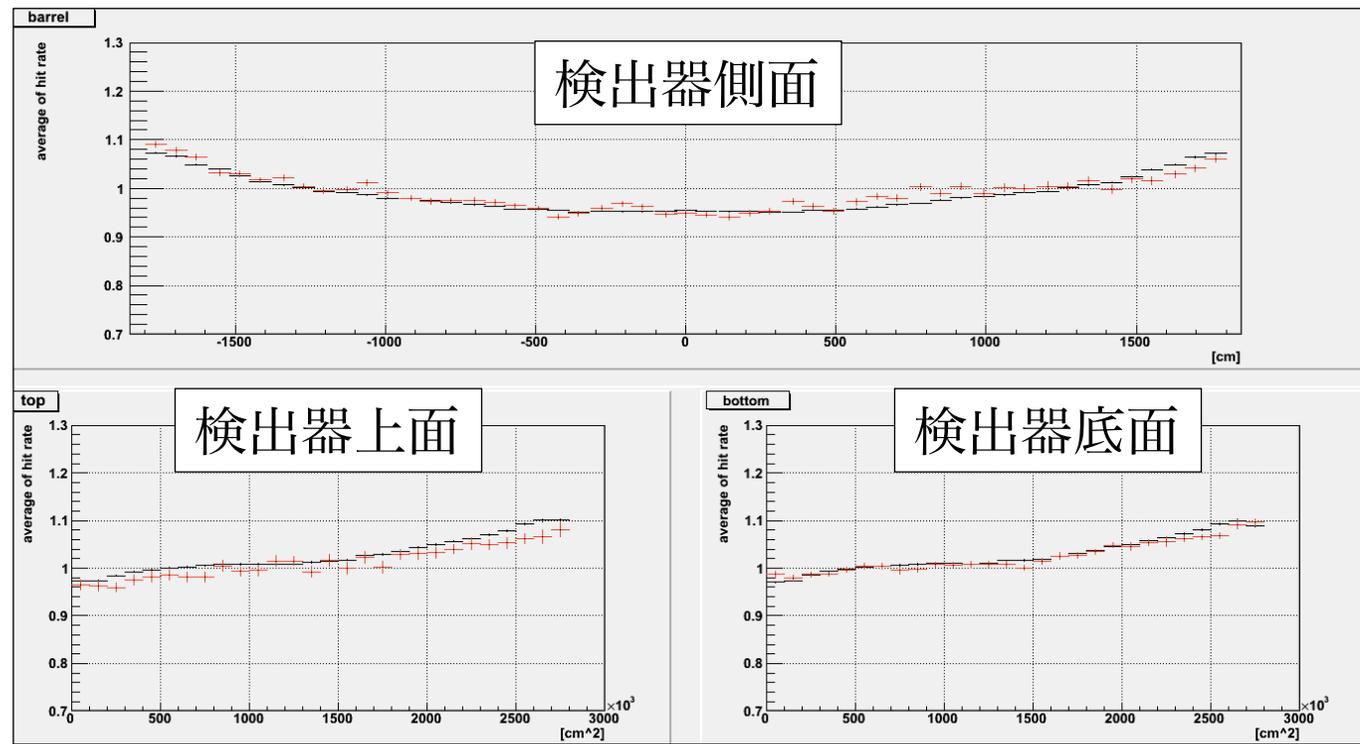
↑ 検出器側面における、各列にあるPMTのhit_rate(i)の平均値

3.6 モンテカルロでの補正

- 上記のhit_rate(i)にはまだチェレンコフ光の反射や水質の効果が含まれている
→ モンテカルロ (MC) 計算の結果を使って補正を行う
- 実データと同様の条件で事象選択し、ヒット数の数え上げをしてhit_rate(i)の値を求める。



↑ 右の図の横軸の定義



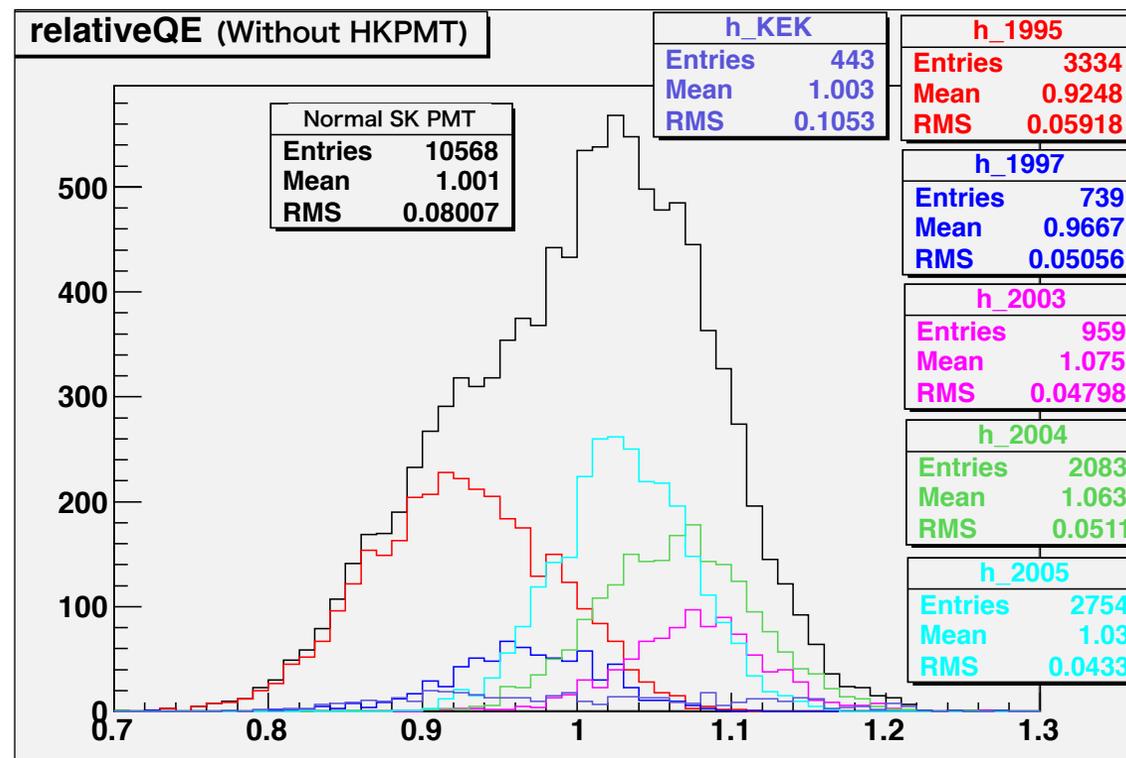
↑ 検出器側面(上)、上面(左下)、底面(右下)における、
実データ(赤)とモンテカルロ(黒)でのhit_rate(i)の値の比較

4 結果

- MCと実データでhit_rate(i)の比を取る。

$$QE(i) = \text{hit_rate}_{\text{data}}(i) / \text{hit_rate}_{\text{MC}}(i)$$

- 相対的量子効率の値を求めた。



- KEK PMT
- 1992~1995 PMT
- 1996~1997 PMT
- 2003 PMT
- 2004 PMT
- 2005 PMT

5 まとめ

- SK実験において各PMTの性質を理解しておくことは重要
 - 各PMTの相対的量子効率 (QEテーブル) を求めた。
- NiCf 線源を使って得たデータを利用し、事象の選択、幾何学的補正をしたのちにヒット数の少ないPMT、HK PMT、温度計による影の領域 ($260^{\circ}\sim 280^{\circ}$) に含まれるPMTを除き、MCデータを使ってさらに補正を加えてQEテーブルを作成

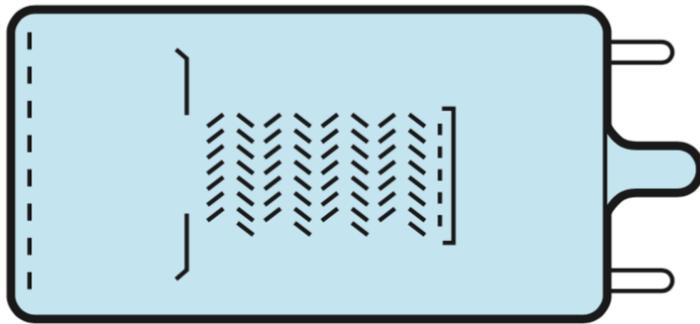
今後

- 影の領域を含むQEテーブルの作成

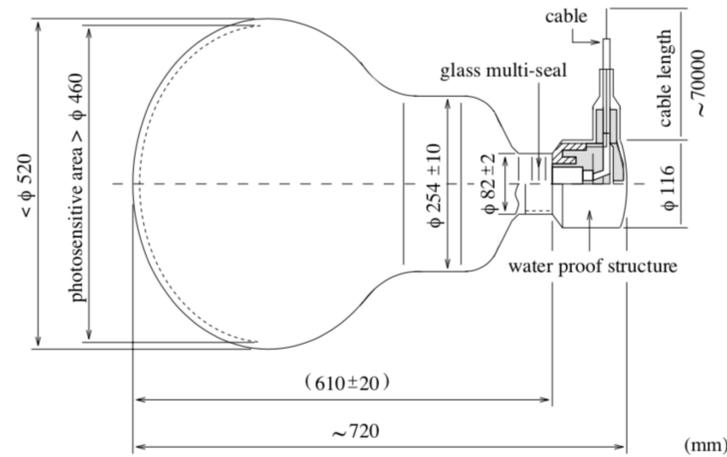
Back Up

20インチPMT

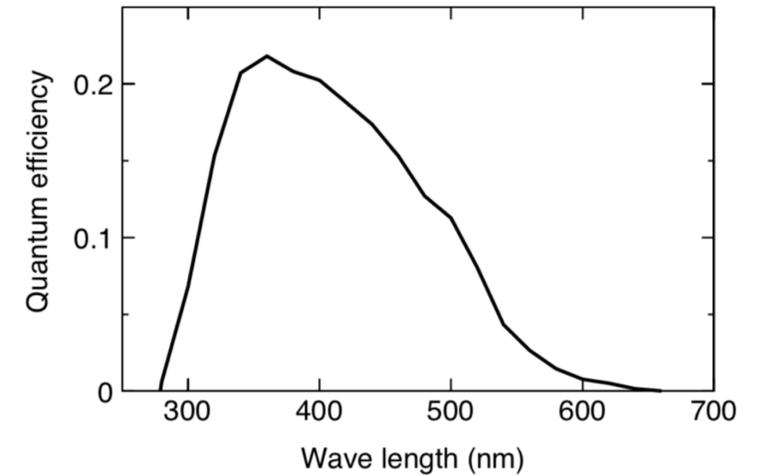
- 浜松ホトニクス社によって開発
- 20インチは光電面の直径
- 光カソードはバイアルカリ (Sb-K-Cs)
- 有感領域の波長は300-600nm
- 受光面積が広く、ベネシアンブラインド型のダイノードを使用



↑ ベネシアンブラインド型の模式図



↑ 20インチPMT



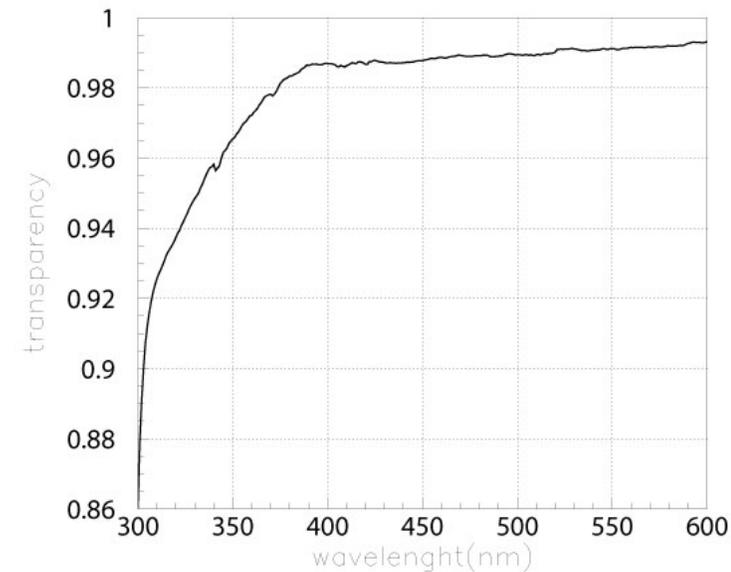
↑ 20インチPMTの量子効率

衝撃波防止ケース

- 1つのPMTが破損して生じた衝撃波により、多数のPMTが連鎖して破損するという事故が2001年に発生
- 事故の再発防止のため、すべての20インチPMTに衝撃波防止ケースが取り付けられた
- 受光面がアクリル製、後ろの部分はFRP (ガラス繊維強化プラスチック)
- 350nmの波長の光に対し、96%以上の透過率



↑ 衝撃波防止ケース



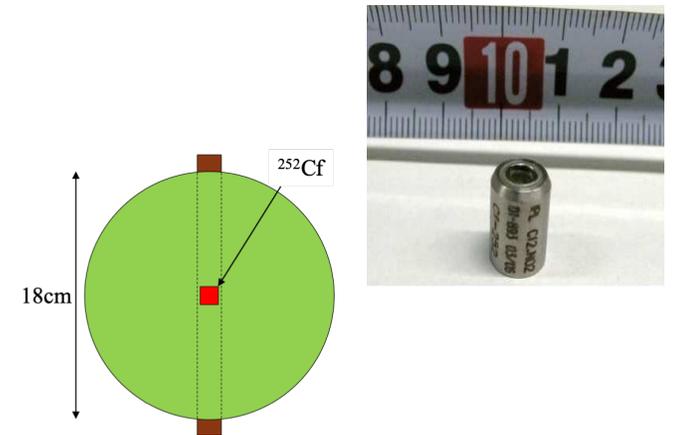
↑ アクリルカバーの光の透過率

ニッケル線源

- 6.5kgの酸化ニッケル、3.5kgのポリエチレンを直径18cmの球状に固めたものの中心に貫通するような穴を開け、 ^{252}Cf を入れて上下から真鍮の棒で蓋をする構造
- ^{252}Cf は原子番号98の超ウラン元素、半減期2.65年、崩壊モードは、97%が α 崩壊、3%が自発核分裂
- 自発核分裂の際に平均3.8個の中性子を放出
 - この中性子がポリエチレンの陽子と数マイクロ秒の間に約20回の弾性衝突を起こしながらエネルギーを失い、熱化 (周りの原子の熱運動と平衡状態になる)
- 熱化した中性子の断面積は大きくなり、やがてニッケル原子核に吸収される
 - 6~9MeVのガンマ線を放出

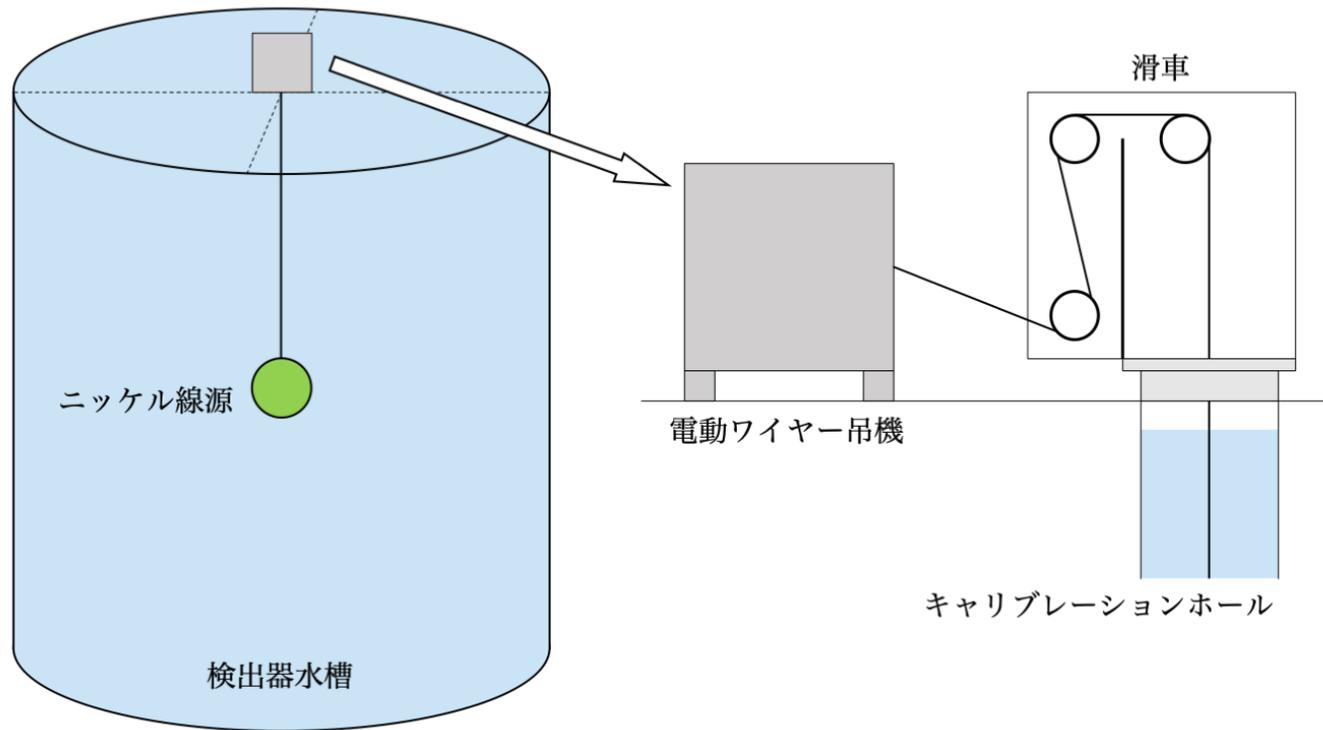


↑ ニッケル線源

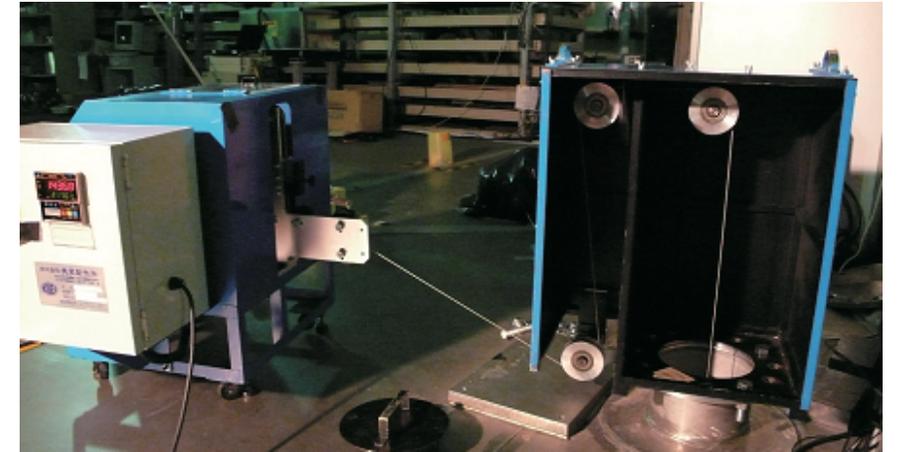


↑ ニッケル線源の断面図と
中性子線源の ^{252}Cf

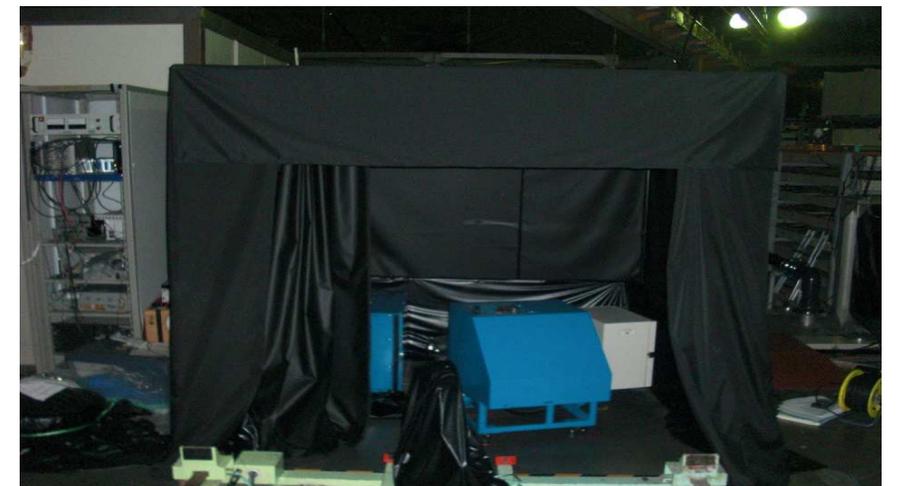
セットアップ



↑ 量子効率測定の設定アップの模式図



↑ 量子効率測定の設定アップの写真



↑ データ取得の際に使用するブラックテント