

KOTO実験($K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索実験)と 京都Kグループの活動

物理学第二教室 教室発表会

2012年3月12日

高エネルギー研究室

増田孝彦 for 京都Kグループ



- KOTO実験
- 2011年度のKOTO実験全体の進捗
 - 東日本大震災
 - CsIカロリメータ真空試験
- 2011年度京都グループの活動
 - NCC 製作状況
 - CV 製作状況

K^0 TO experiment

- K^0 TO (K^0 at TOkai)

- $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$:

長寿命中性K中間子(K_L)の稀崩壊探索実験

- $A(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \propto V_{td}^* V_{ts} - V_{ts}^* V_{td} \propto 2i\eta$
 - $\text{Br}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \propto \eta^2$
 - 元々の分岐比が小さいので、BSMの効果相対的に大きく現れる
 - 理論的不定性が小さい(1-2%)

- Milestone

- 現在の上限値

- 2.6×10^{-8} (E391a final result)

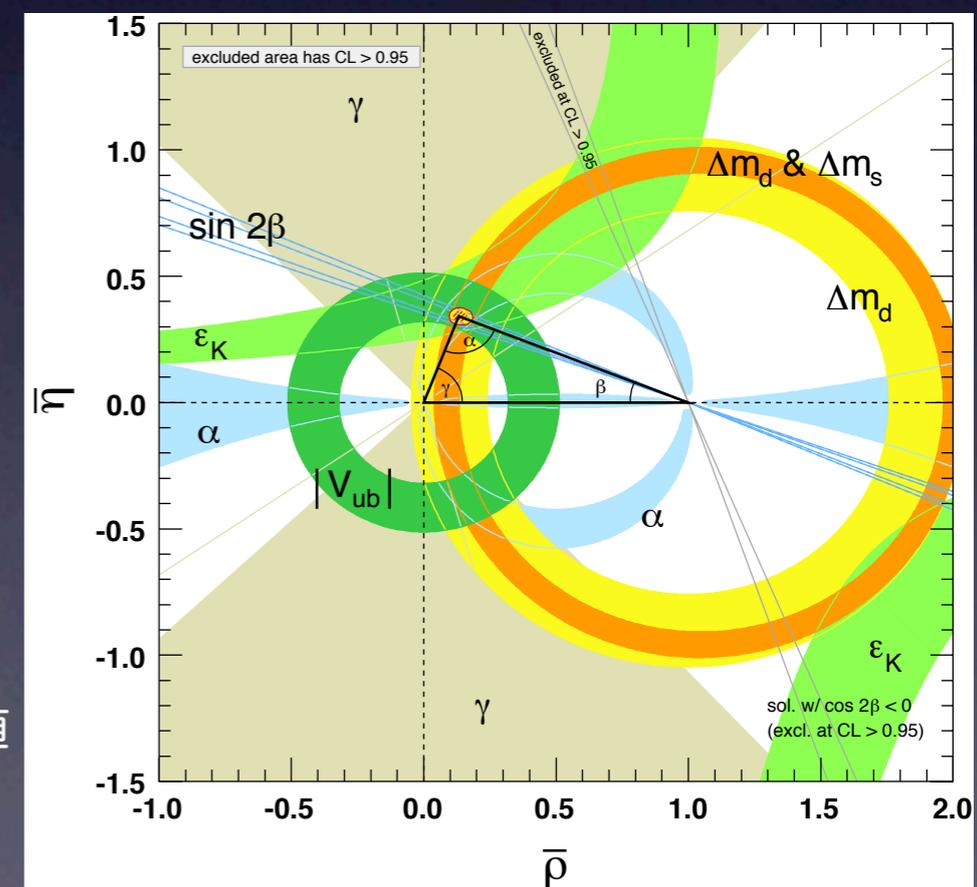
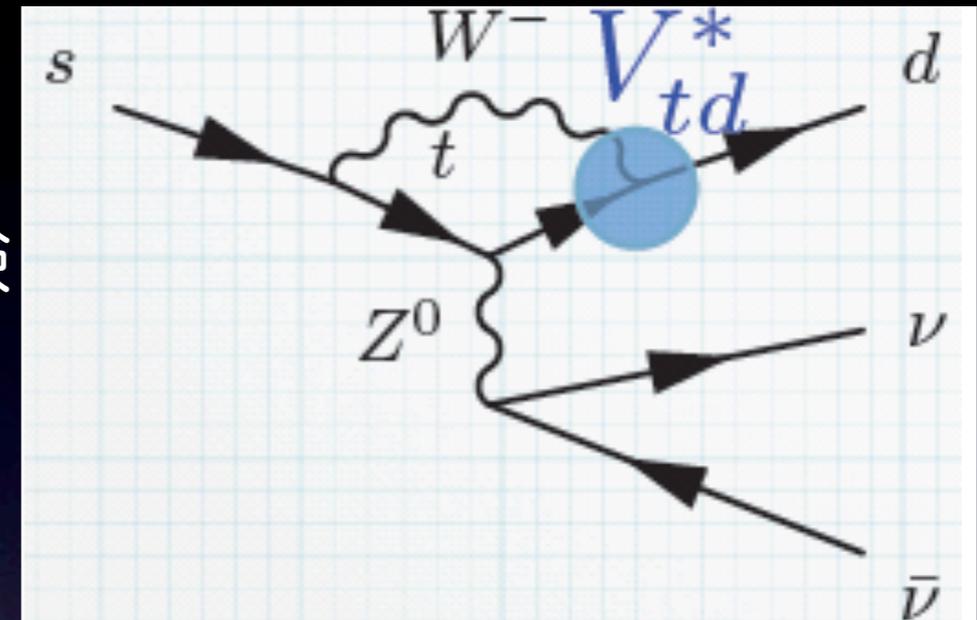
- Grossman-Nir limit

- 1.5×10^{-9} (90% CL)

- $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ の分岐比 ($1.7 \pm 1.1 \times 10^{-10}$) から決まる上限値

- Standard Model

- 2.4×10^{-11}



K. Nakamura *et al.* (Particle Data Group), *J. Phys. G* **37**, 075021 (2010)

K^0 TO experiment

- K^0 TO (K^0 at TOkai)

- $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$:

長寿命中性K中間子(K_L)の稀崩壊探索実験

- $A(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \propto V_{td}^* V_{ts} - V_{ts}^* V_{td} \propto 2i\eta$
 - $\text{Br}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \propto \eta^2$
 - 元々の分岐比が小さいので、BSMの効果が相対的に大きく現れる
 - 理論的不定性が小さい(1-2%)

- Milestone

- 現在の上限値

- 2.6×10^{-8} (E391a final result)

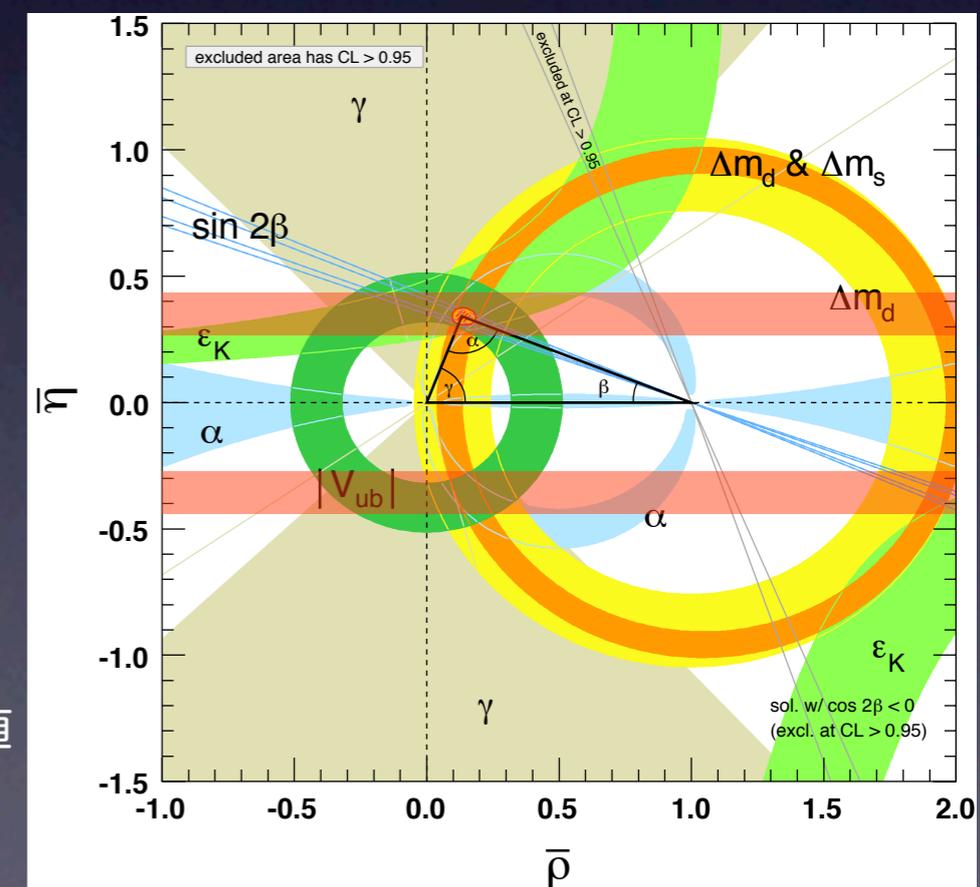
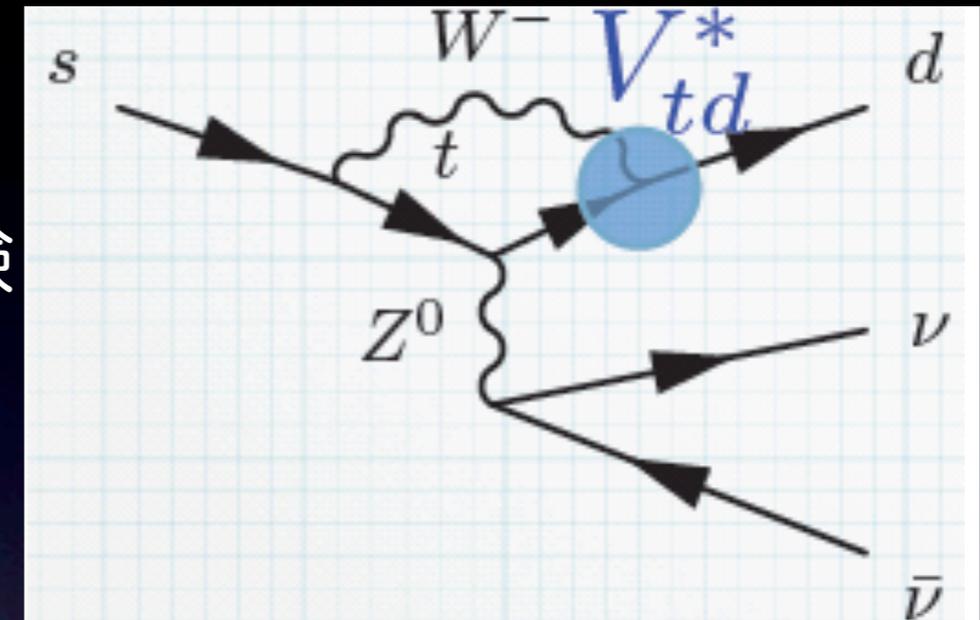
- Grossman-Nir limit

- 1.5×10^{-9} (90% CL)

- $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ の分岐比($1.7 \pm 1.1 \times 10^{-10}$)から決まる上限値

- Standard Model

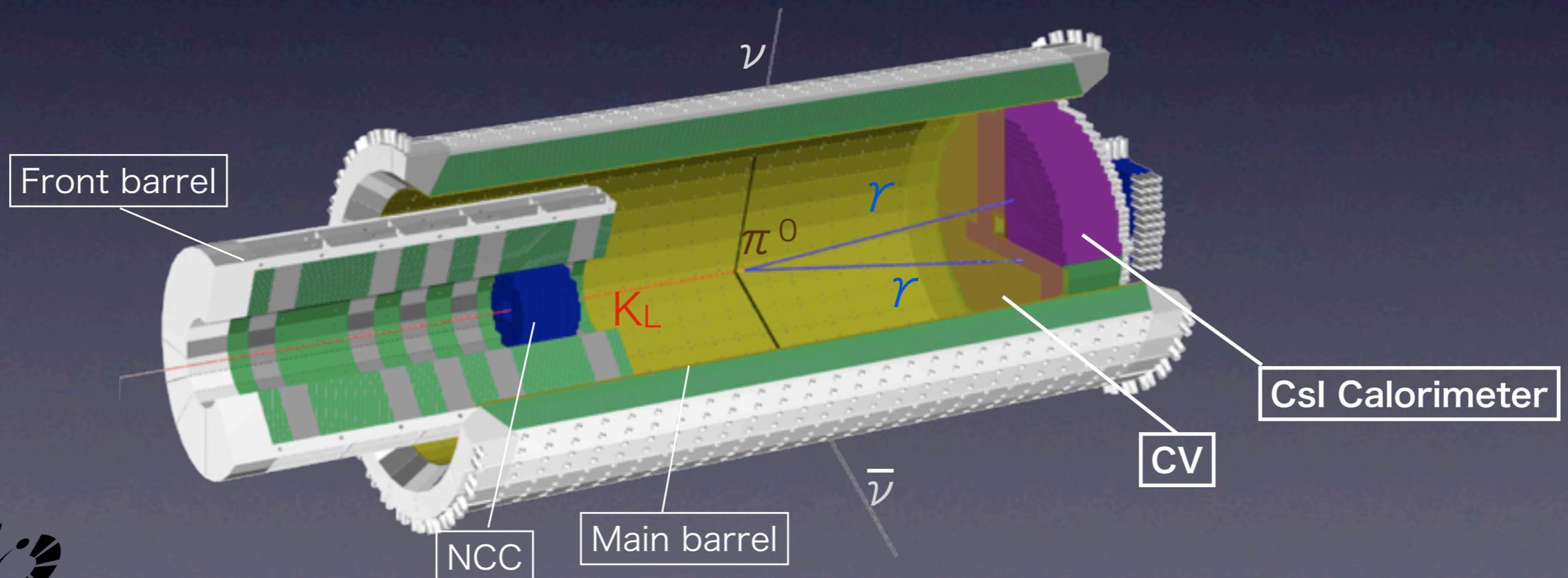
- 2.4×10^{-11}



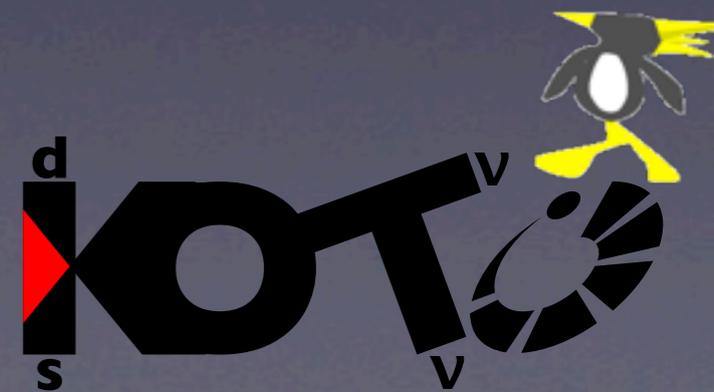
K. Nakamura *et al.* (Particle Data Group), J. Phys. G **37**, 075021 (2010)

Concept

- 信号の同定
 - ν は検出できないので、 π^0 からの崩壊粒子を見る
 - π^0 からの 2γ
- CsIカロリメータ
 - 2γ の位置・エネルギーを求め、 π^0 を再構成
- Veto counters
 - 崩壊領域前立体角を覆い、その他に何も粒子が無いことを保証

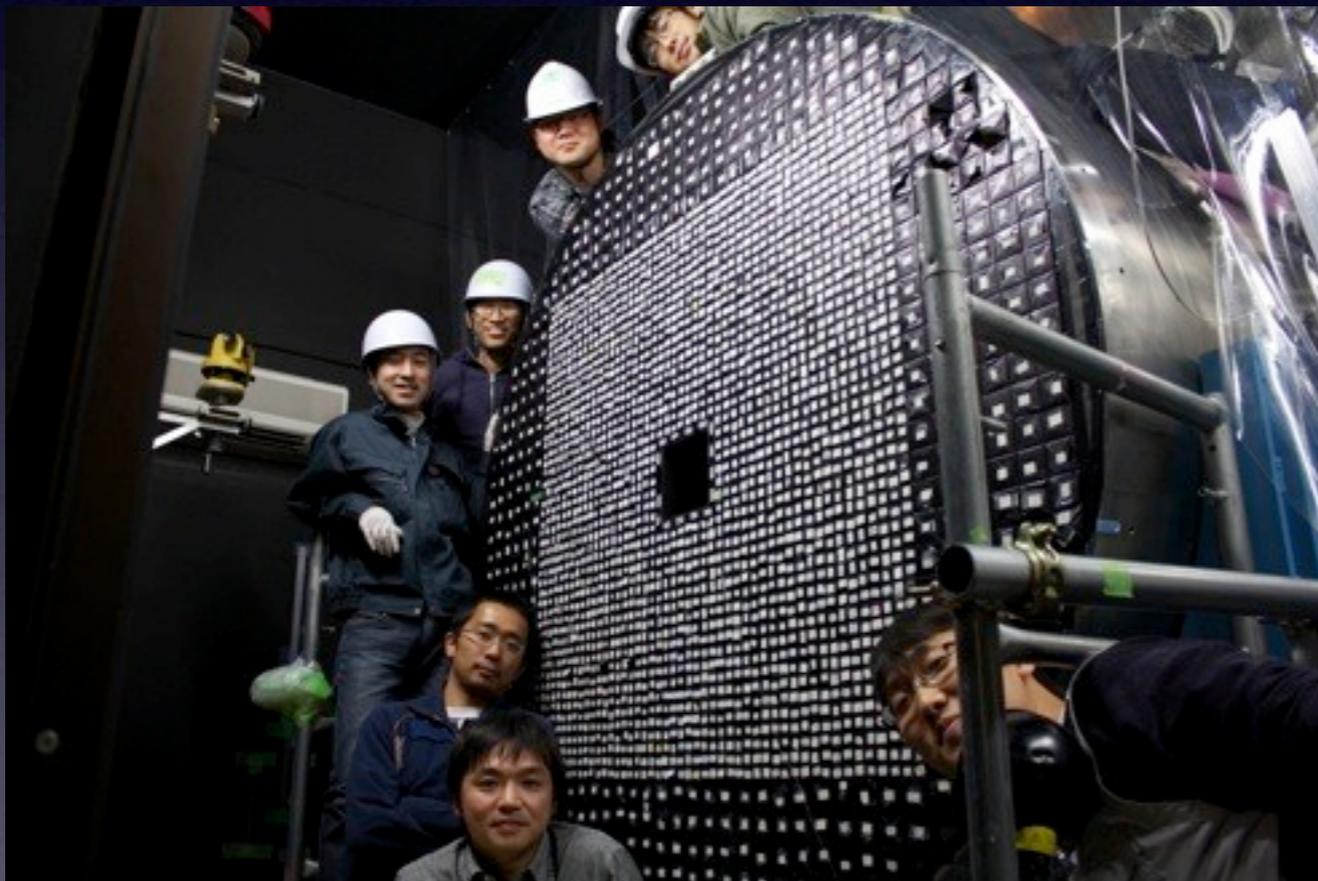


2011年度 実験現場

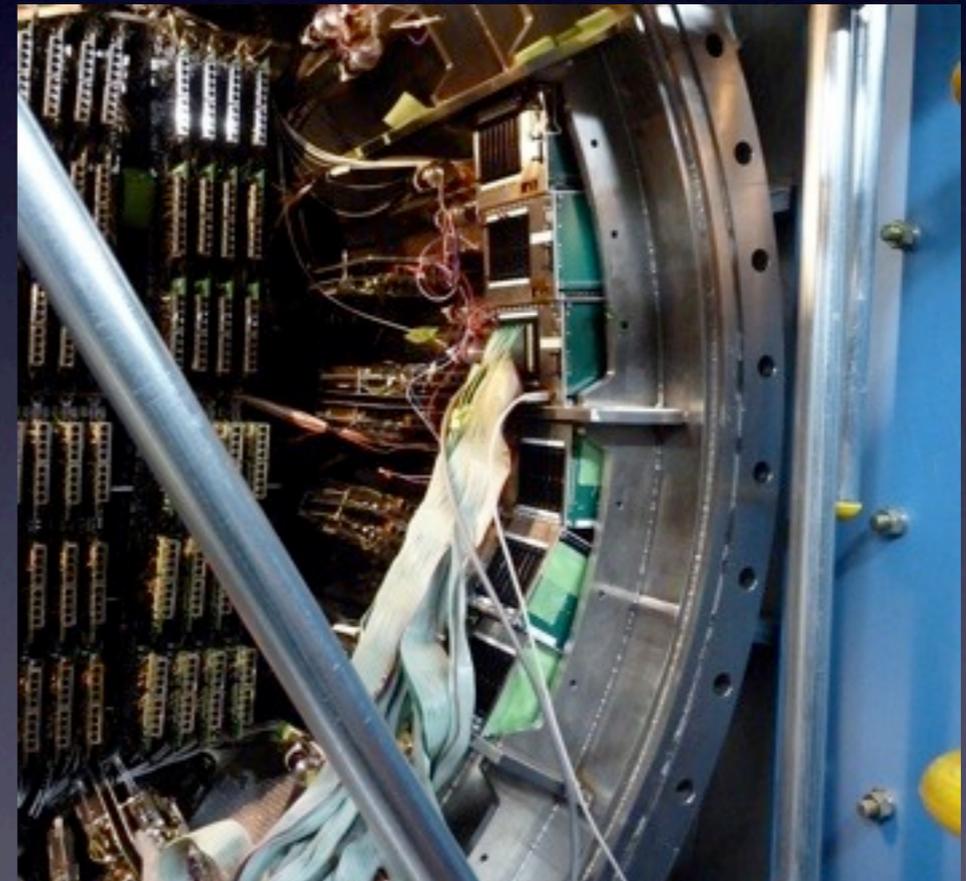


3/11前

- 2010/5/22-2011/2/9 : CsI結晶スタッキング
- ~3/11 : 4/9-5/8のビームタイムに向けた準備作業
 - PMT取り付け、信号ケーブル配線、スローコントロールシステムインテグレーション、etc, etc...



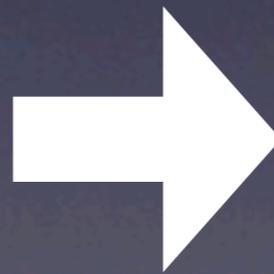
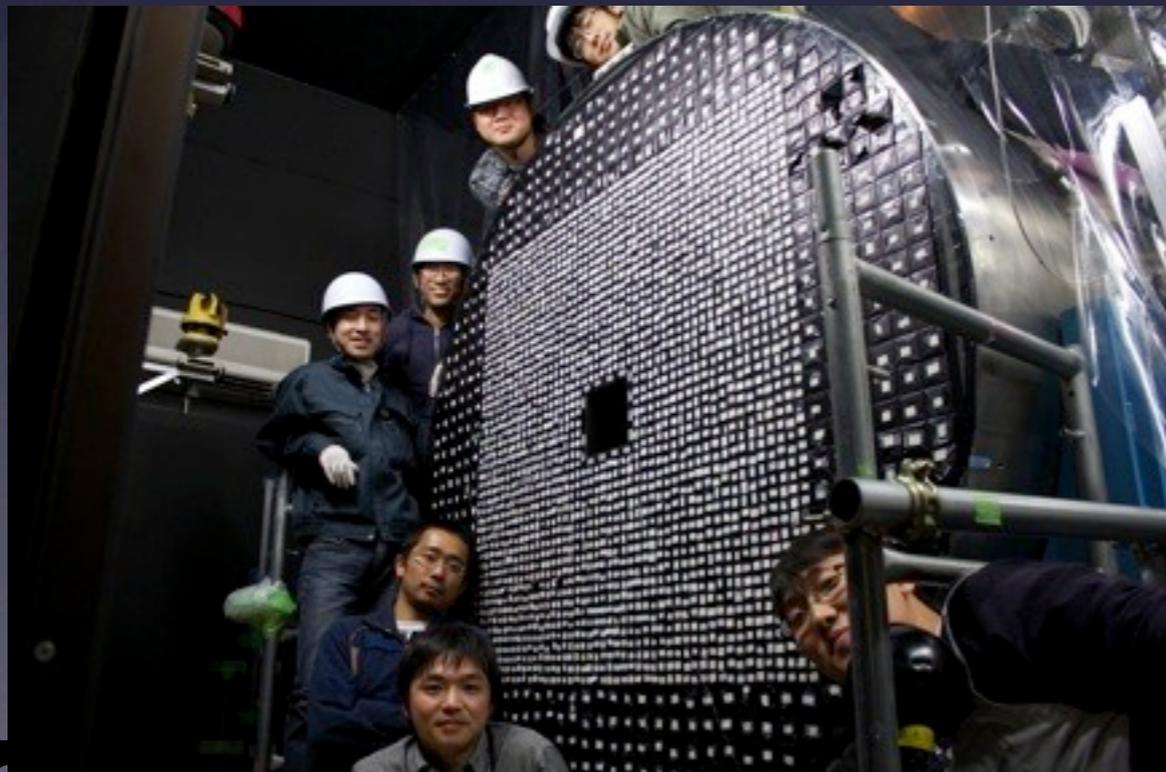
2011.3.8
記念撮影



2011.3.11
スローコントロール系組み上げ中

3/11後

- 3/11 : 地震発生。CsI乾燥室への乾燥空気吐出停止
- 3/19 : カロリメータに応急処置で除湿剤を巻いた
 - この際、結晶が脱落していないこと、カロリメータが下流に50cm近く移動し、設置レールから脱落していることを確認した
- 3/23 : CsI乾燥室への乾燥空気吐出再開
- 4/18~ : 本格的な被害状況調査開始



被害状況調査

- 懸念されたCsIカロリメータへの影響

⚠️ 湿度によるCsI結晶の劣化

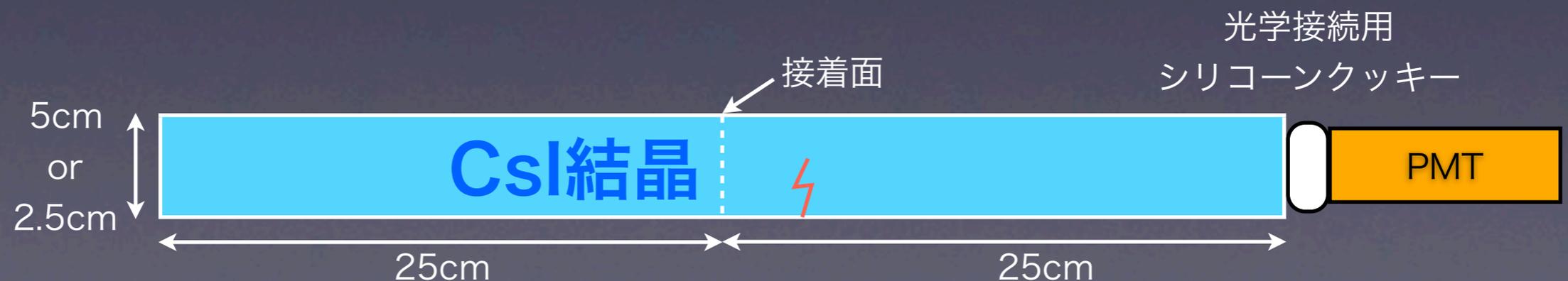
- CsIは潮解性をもっているため、湿度の高い環境では表面が磨りガラス状に白く濁る。
停電により約2週間乾燥機が停止したため、CsIカロリメータがある乾燥室の湿度が上昇していた。

- 光量低下の可能性

⚠️ 衝撃によるCsI結晶の破損

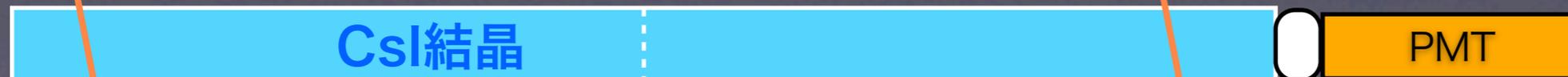
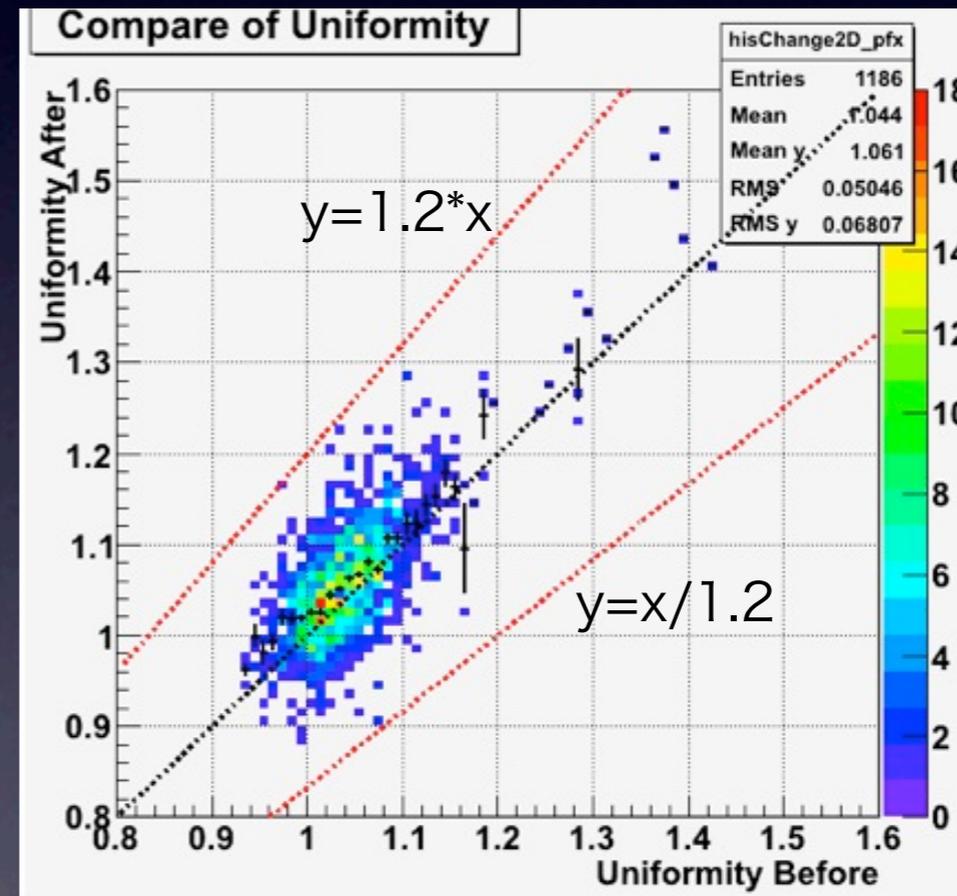
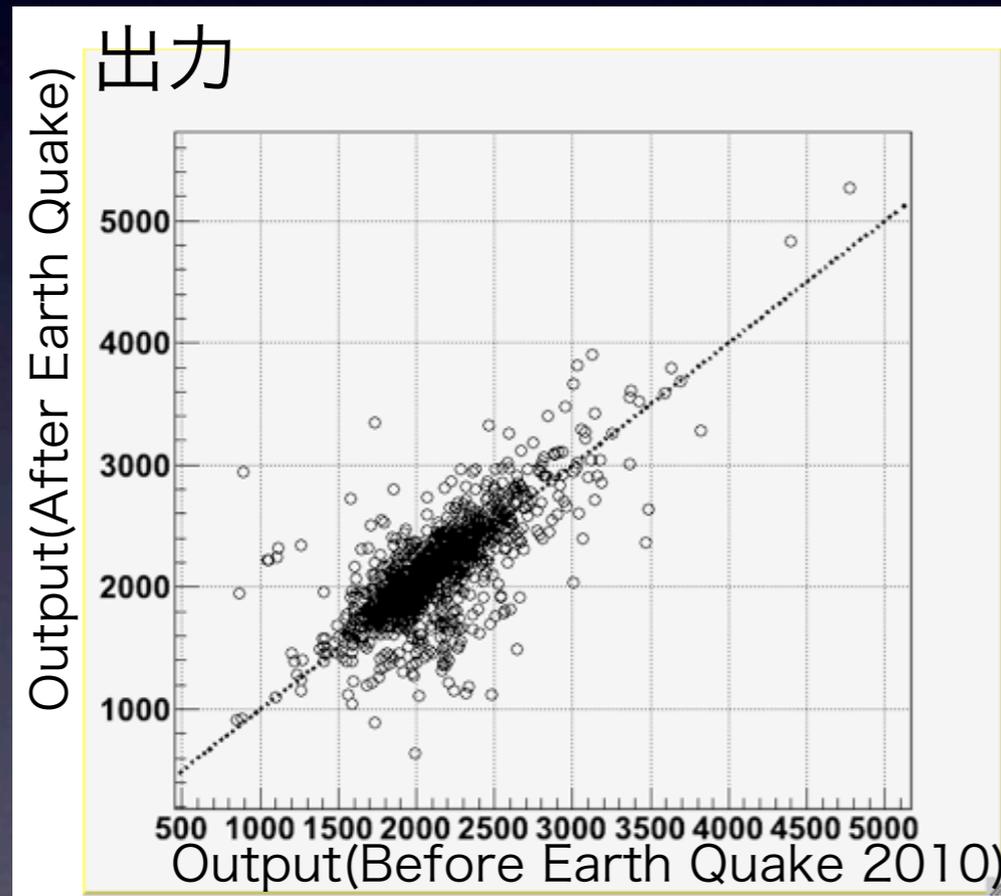
- 地震によって、カロリメータを設置していた荷台が50cm近く移動していた。
結晶に傷や割れなどの発生する危険性があった。

- 光量やUniformity悪化の可能性



Light yield, Uniformity

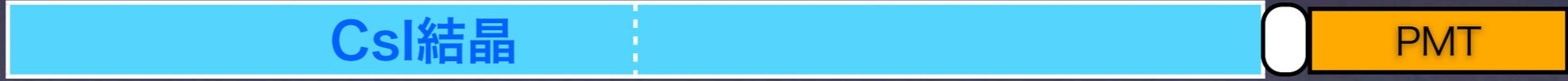
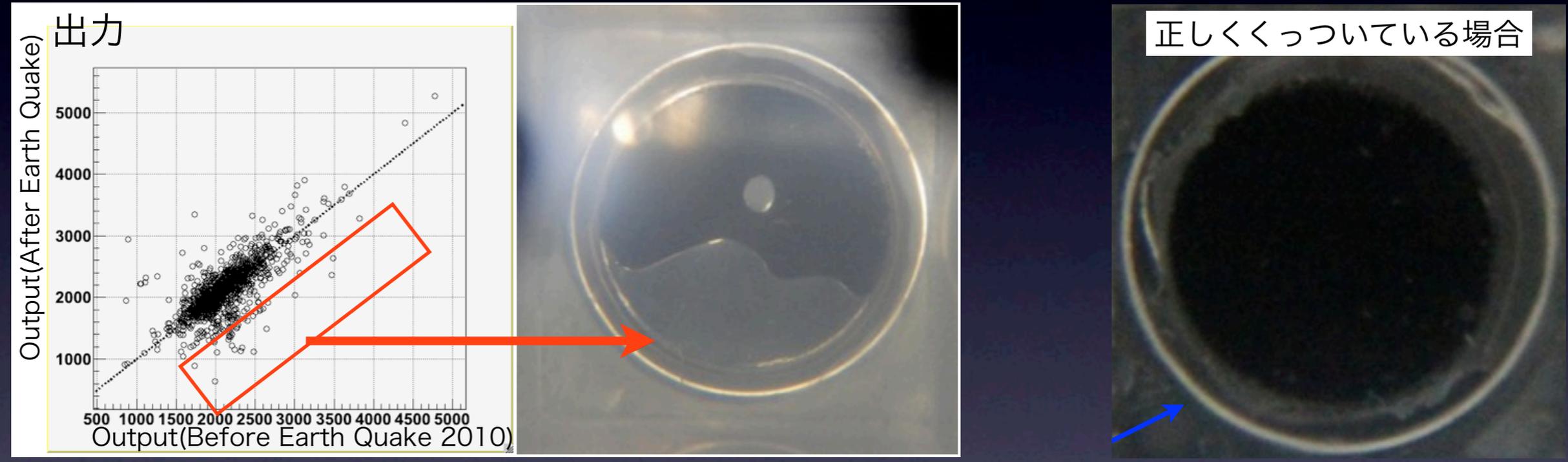
- 宇宙線の信号出力を地震前後で比較した結果
 - ✓ 多くの結晶では、出力に変化は見られない。
 - ⚠ 60ch程度が地震後30%程度出力が下がっている
 - ✓ 地震前後でのUniformityの変化量は20%未満



$$\text{Uniformity} \equiv \frac{\text{Downstream signal output}}{\text{Upstream signal output}}$$

被害状況調査結果

- Light yield
 - ✓ 目視検査の結果、光量低下の原因は「湿度によるCsI結晶の劣化」ではなく「クッキーの剥がれ」が原因であることが判明。



光学接続用
シリコンクッキー

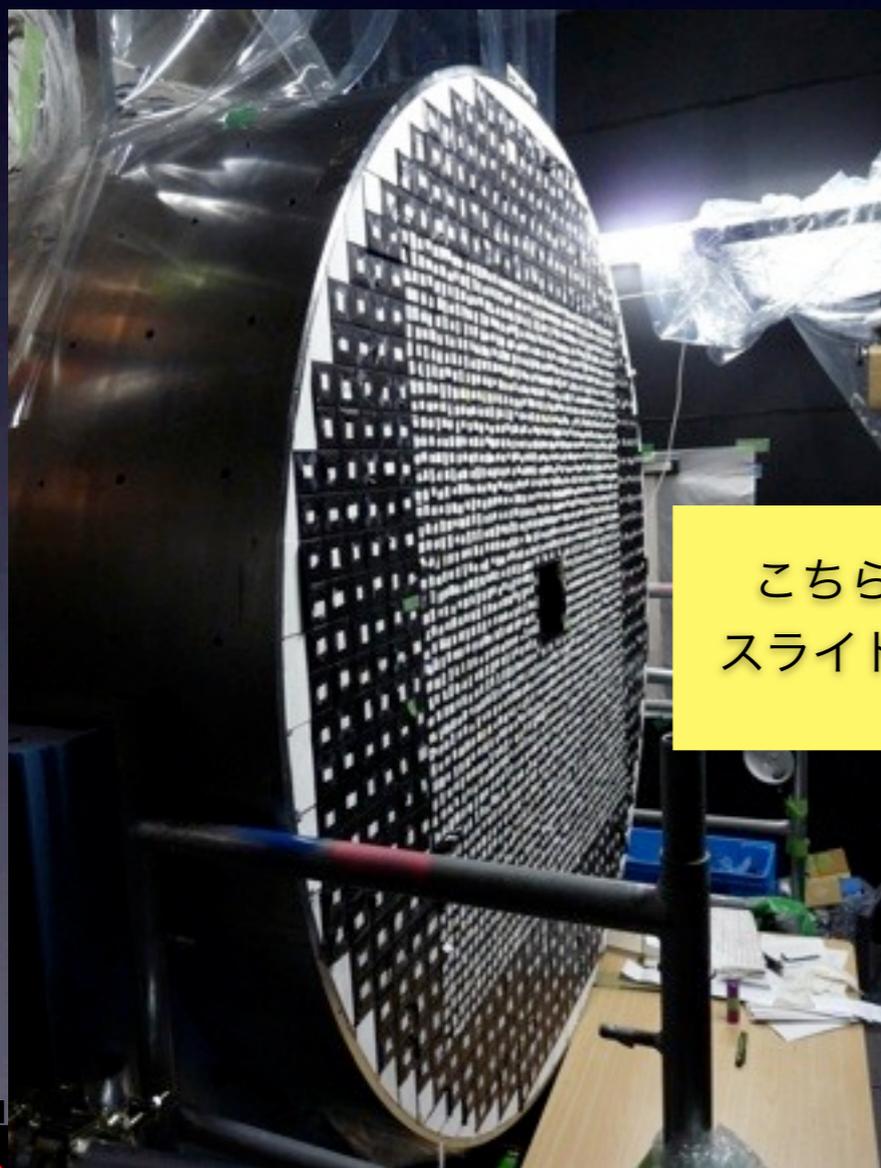
- Uniformity
 - ✓ 目視検査では、ヒビや割れ等の外傷は確認されなかった

✓ CsI結晶自体に大きな被害が無いことが確認された



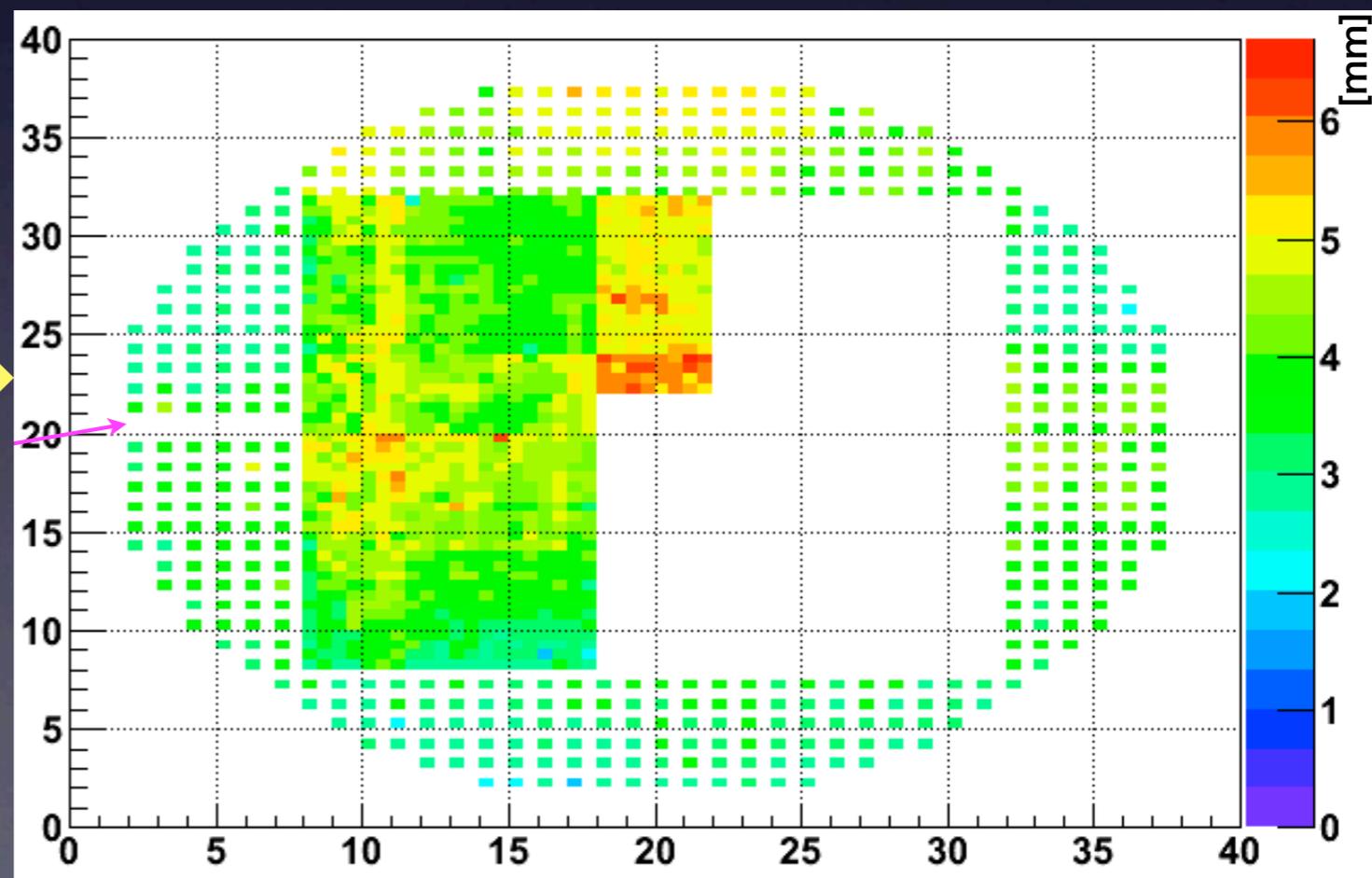
被害状況調査2

- しかし、、、
 - ❌ 測定の結果、CsI結晶が荷台上で上流側に4mm程度ずれていることが判明した



こちら向きに
スライドしている

各結晶毎のスライド量分布

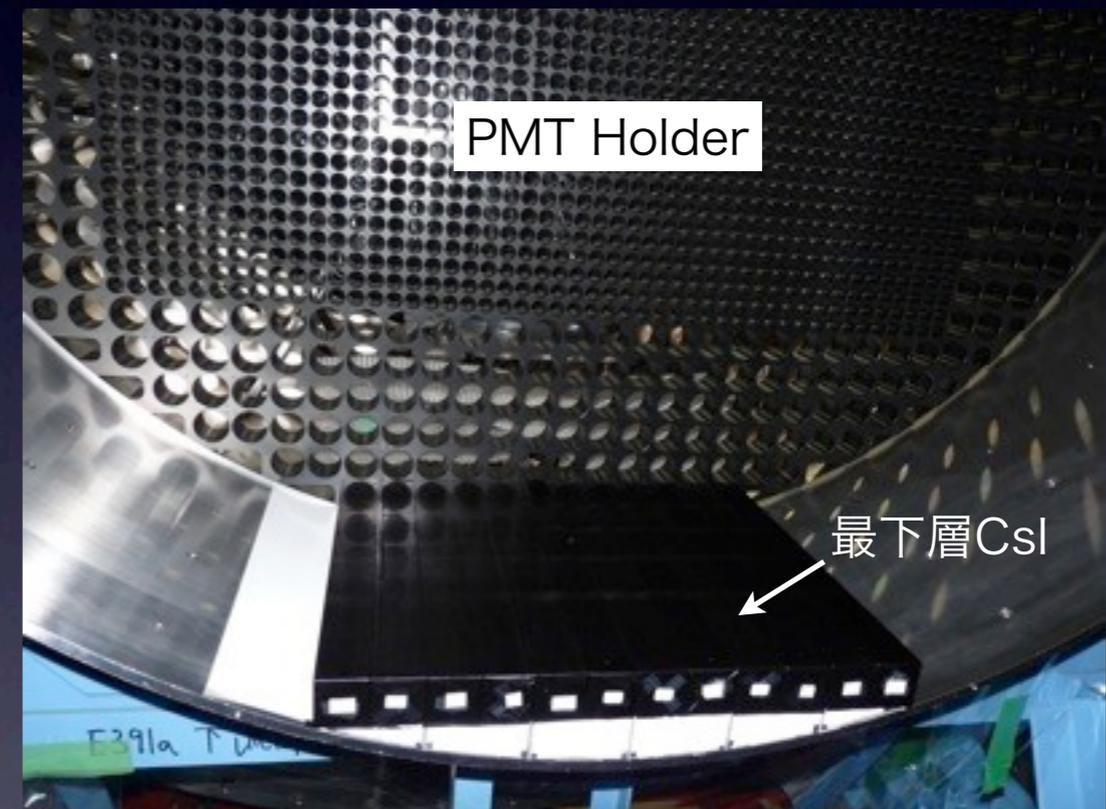


CsIずれの影響

- CsI結晶の下流端には、PMTの固定、及び結晶間の光学分離のためのholderが壁として存在している
- Holderと結晶間に5mmの隙間が空いているため、隣の結晶への**光のクロストーク(~1%)の発生**が確認された。また、余震によるCsIとHolderの衝突で今後も**CsI結晶にダメージを与える**可能性がある。

➔ 隙間は塞がなければならない

- ばらして積み直す??
 - 積むだけでも40人・月かかっている
- 隙間を埋める治具を挿入する
 - 光学分離・衝撃吸収を両立する緩衝剤を作成し、1chずつ下流に挿入していく
 - 1人・月 (==5分/ch)

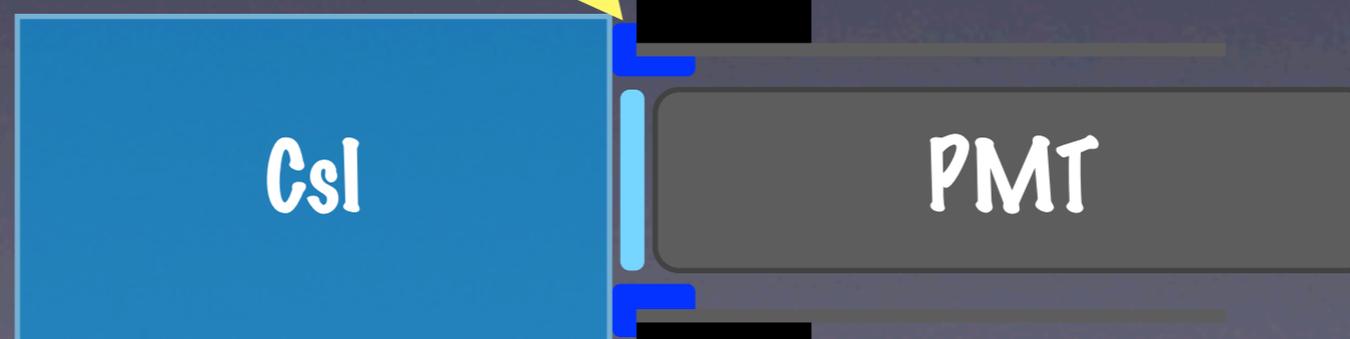
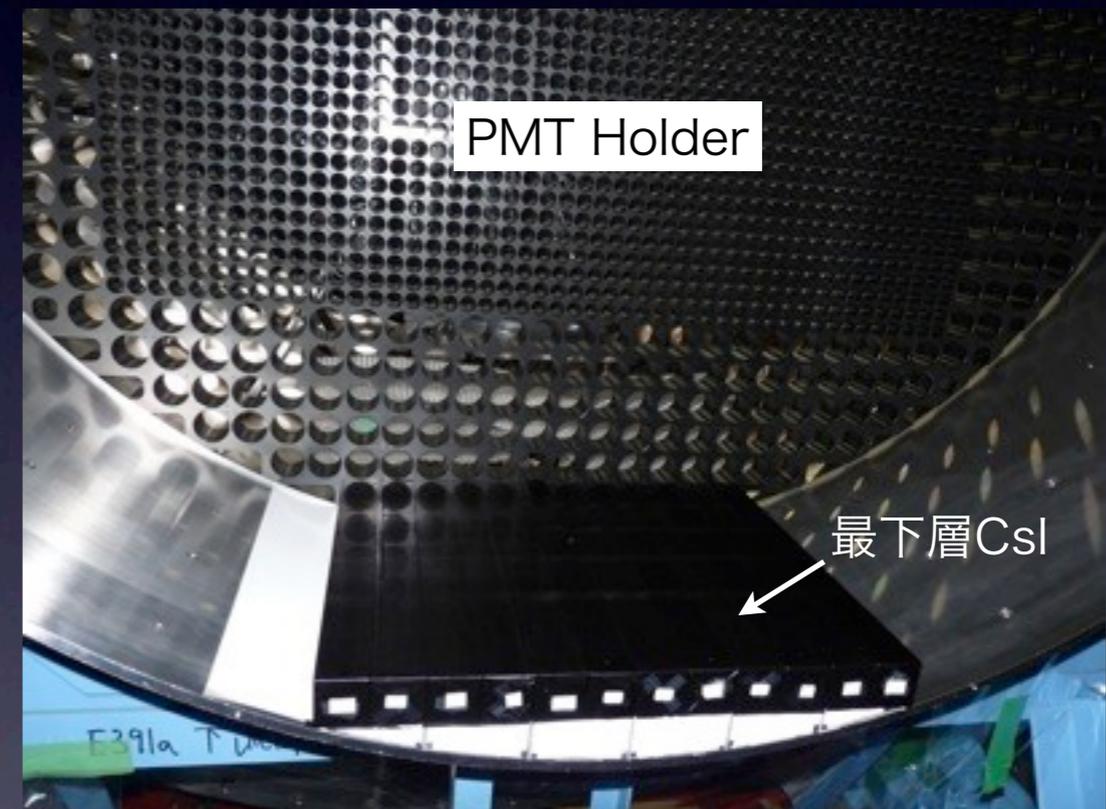


CsIずれの影響

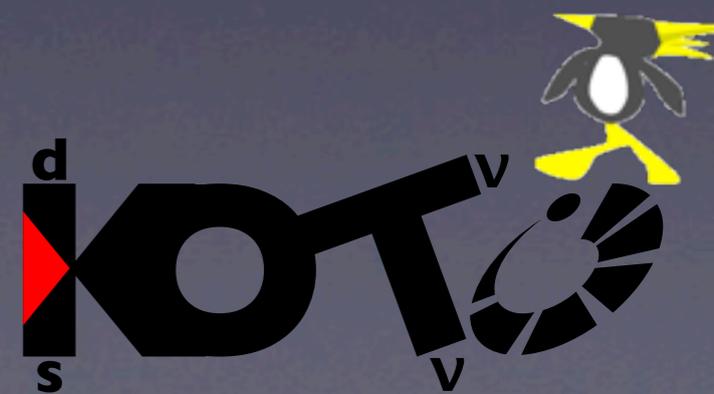
- CsI結晶の下流端には、PMTの固定、及び結晶間の光学分離のためのholderが壁として存在している
- Holderと結晶間に5mmの隙間が空いているため、隣の結晶への**光のクロストーク(~1%)の発生**が確認された。また、余震によるCsIとHolderの衝突で今後も**CsI結晶にダメージを与える**可能性がある。

➔ 隙間は塞がなければならない

- ~~ばらして積み直す??~~
 - ~~積むだけでも40人・月かかっている~~
- 隙間を埋める治具を挿入する
 - 光学分離・衝撃吸収を両立する緩衝剤を作成し、1chずつ下流に挿入していく
 - 1人・月 (==5分/ch)



Cslカロリメータ 真空試験



8-9月

- Cslカロリメータ真空試験
 - 被害修復も道半ばの8月に、カロリメータ全体を真空環境下で稼働させる試験を行った。
- 主な目的
 - 真空中での長期動作試験
 - 約2週間
 - 真空中で長期間放電し使用に耐えないchannelの洗い出し
 - 事前の100本試験で2%程度発生することがわかっていたため、本番前に全数調査し不合格品をはじく



8-9月

- Cslカロリメータ真空試験

- 被害修復も道半ばの8月に、カロリメータ全体を真空環境下で稼働させる試験を行った。

- 主な目的

- 真空環境下での稼働確認

- 真空環境

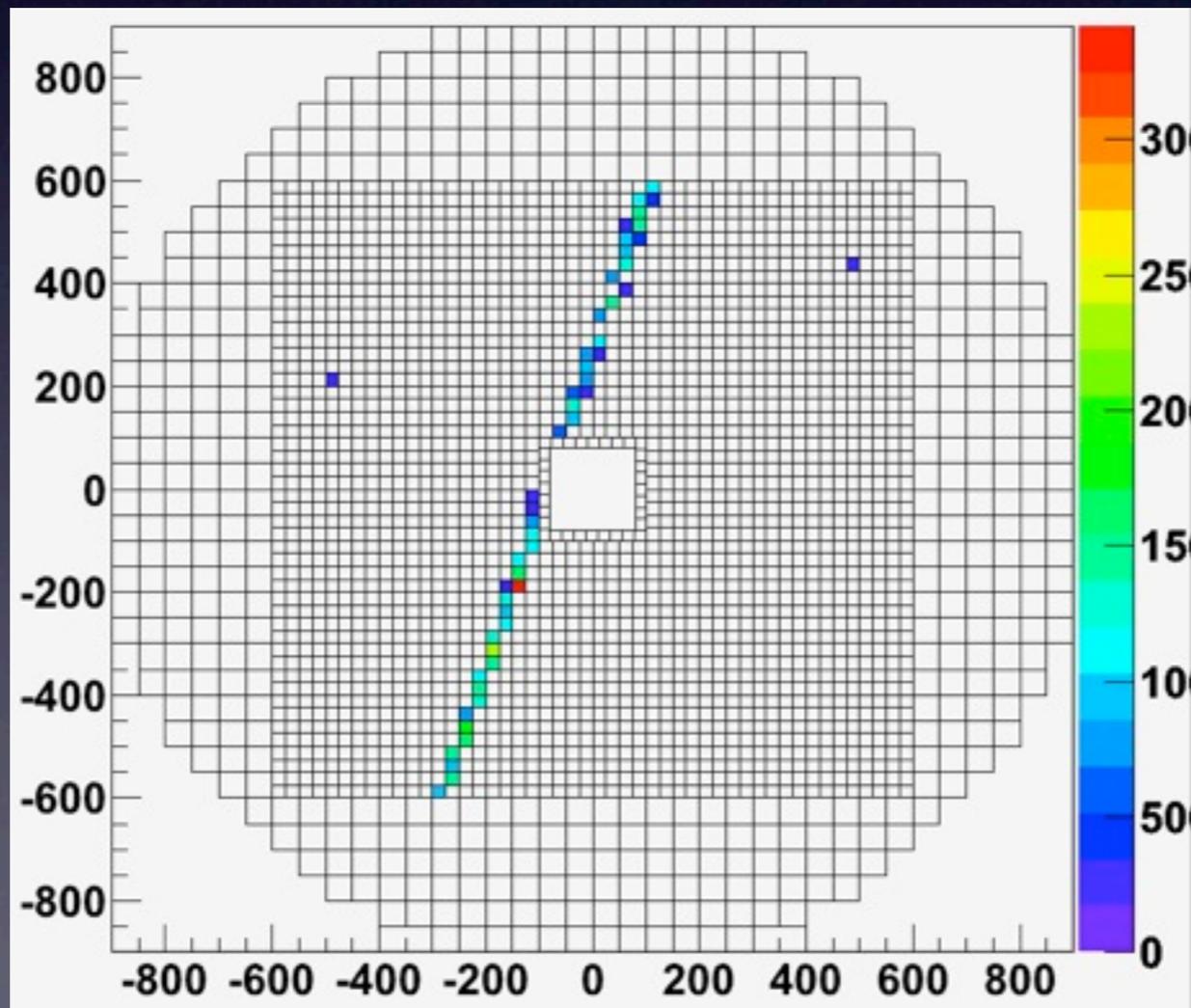
- 事前の1週間程度、本番前に全数調査し、問題を解消

様々な問題が噴出



Problem #1

- Large PMTの放電が収まらない
 - 真空引きから2週間以上経っても、Large PMTの放電が止まらず、HVを印加することが出来なかった。



真空中での宇宙線トラック

Solution #1

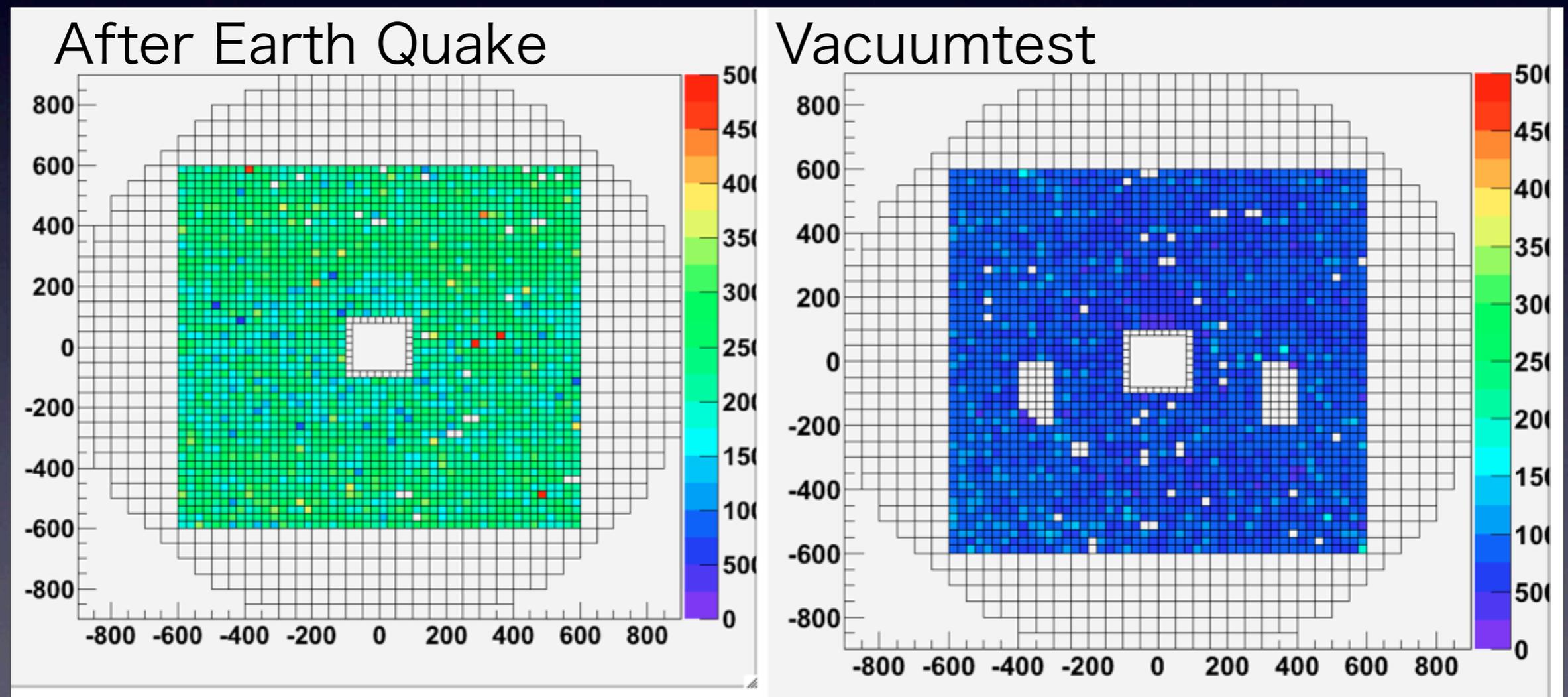
- PMT底部の空間が密閉されていることが原因であった。
密閉空間内部に高電圧のかかるむき出しの金属部があったため、
その金属間で放電が起こっていた。

➡ 全PMTにベント用の穴をあけることで対処



Problem #2

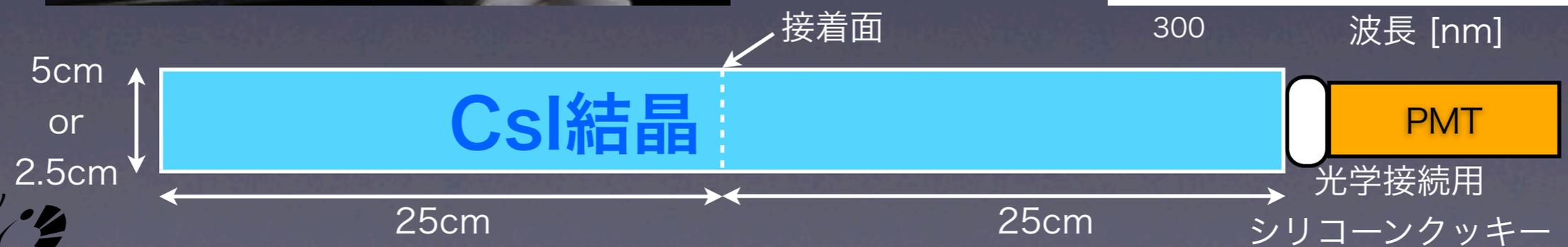
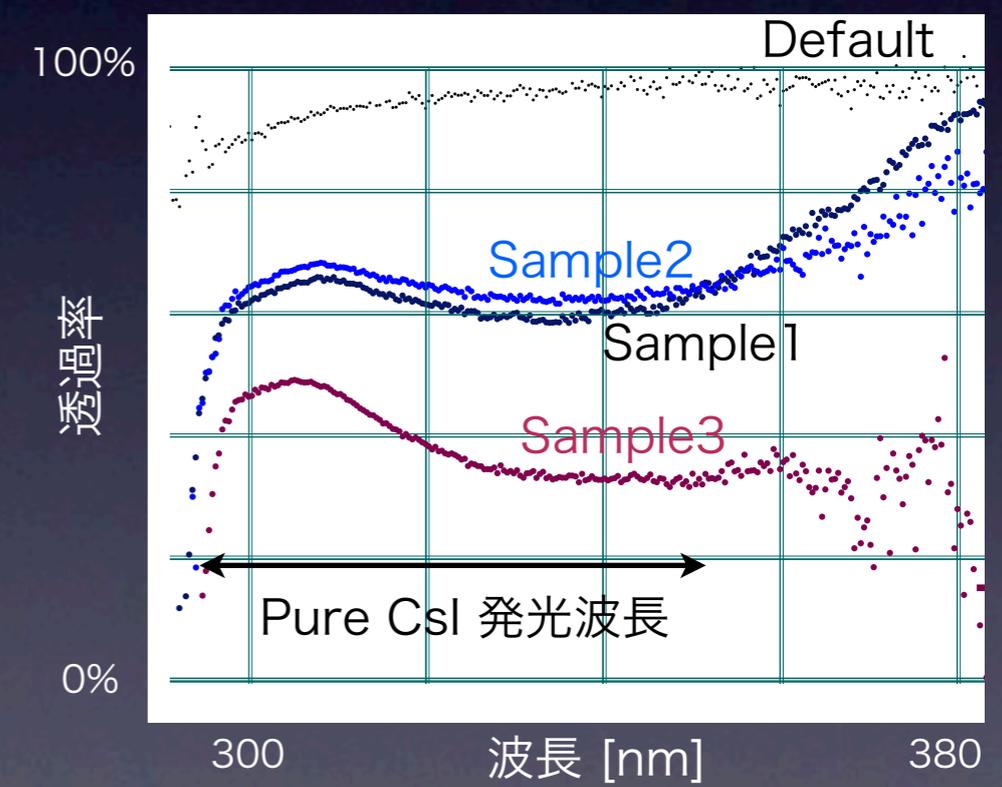
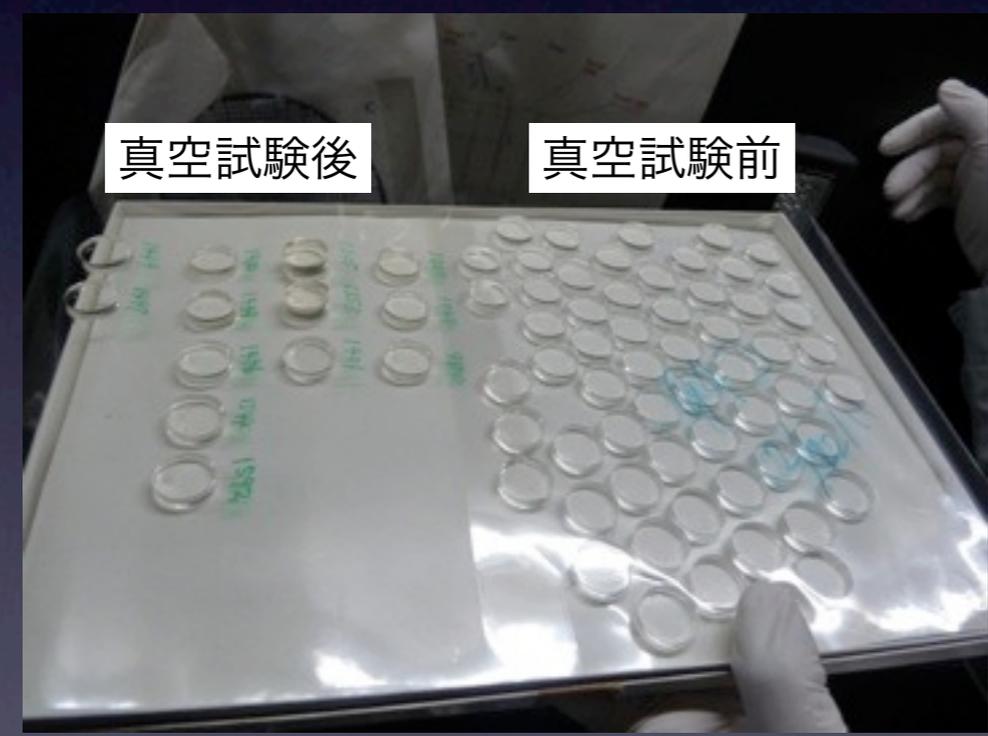
- 真空前と真空中で、信号出力が**約25%**にまで低下



Solution #2

- 光学接続のためのシリコンクッキーが、真空中での**アウトガスを吸着し、透過率が悪化**していたことが主な原因であった。

➔ 影響を与えるパーツに関しては、本番前に真空環境においておきアウトガスを抜くことで対応



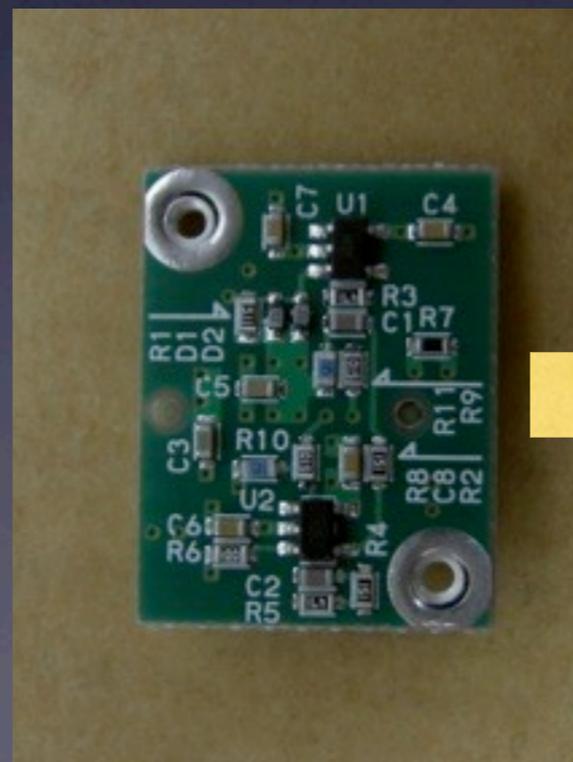
Problem/Solution #3

- 各種電子回路の破損
 - 主に放電によるもの。

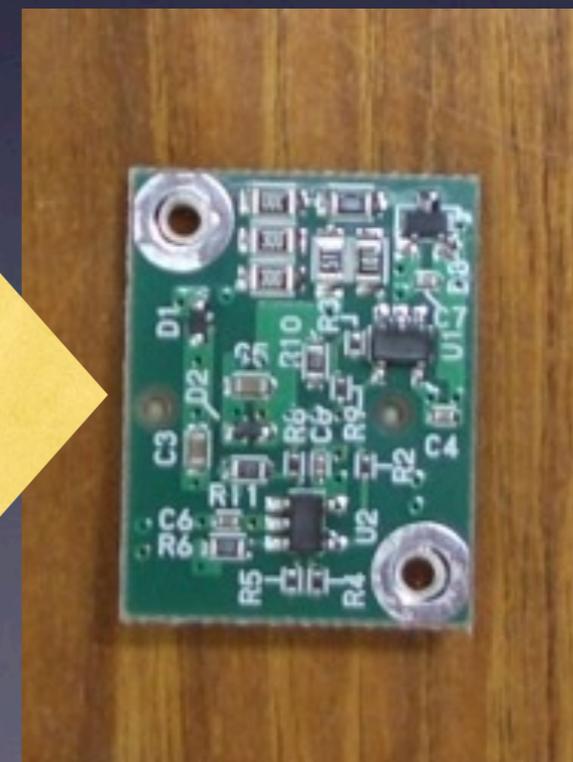
破損箇所	破損数	破損率
Preamp	18	0.8%
HV Supply用電源周り	14	0.6%
HV Supply	7	0.3%
HVモニタ周り	3	3%

➔ 放電耐性強化版を製作して対応する

放電耐性強化前



放電耐性強化後



PDCA

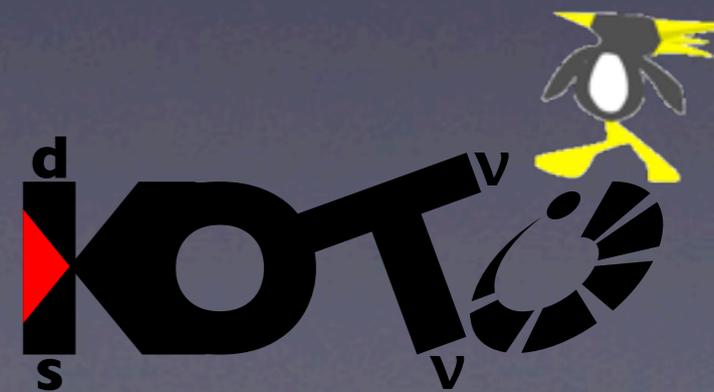
Check		Act
クロストーク	地震によりCsI結晶がスライドした	光学分離(および衝撃吸収)のための治具を挿入
Large PMTの放電	PMT下部に密閉空間が存在しその部分の真空度が悪い	全数に空気穴開け
信号出力の低下	CsI-PMT光学接続用シリコーンがアウトガスを吸着し透過率低下	事前にベーキングを行いアウトガスを取り除く
放電による回路故障	放電耐性不足	放電耐性強化版を製作

• Plan, Do

- 必要な対策案は全て出揃い、所要時間を見積もりつつ処置を進めている。
- 現行のスケジュールでは全ての処置完了を来年度10月を予定しており、来年度11月に再度真空試験を行って、最終試験とする。

その他

京都グループ活動内容

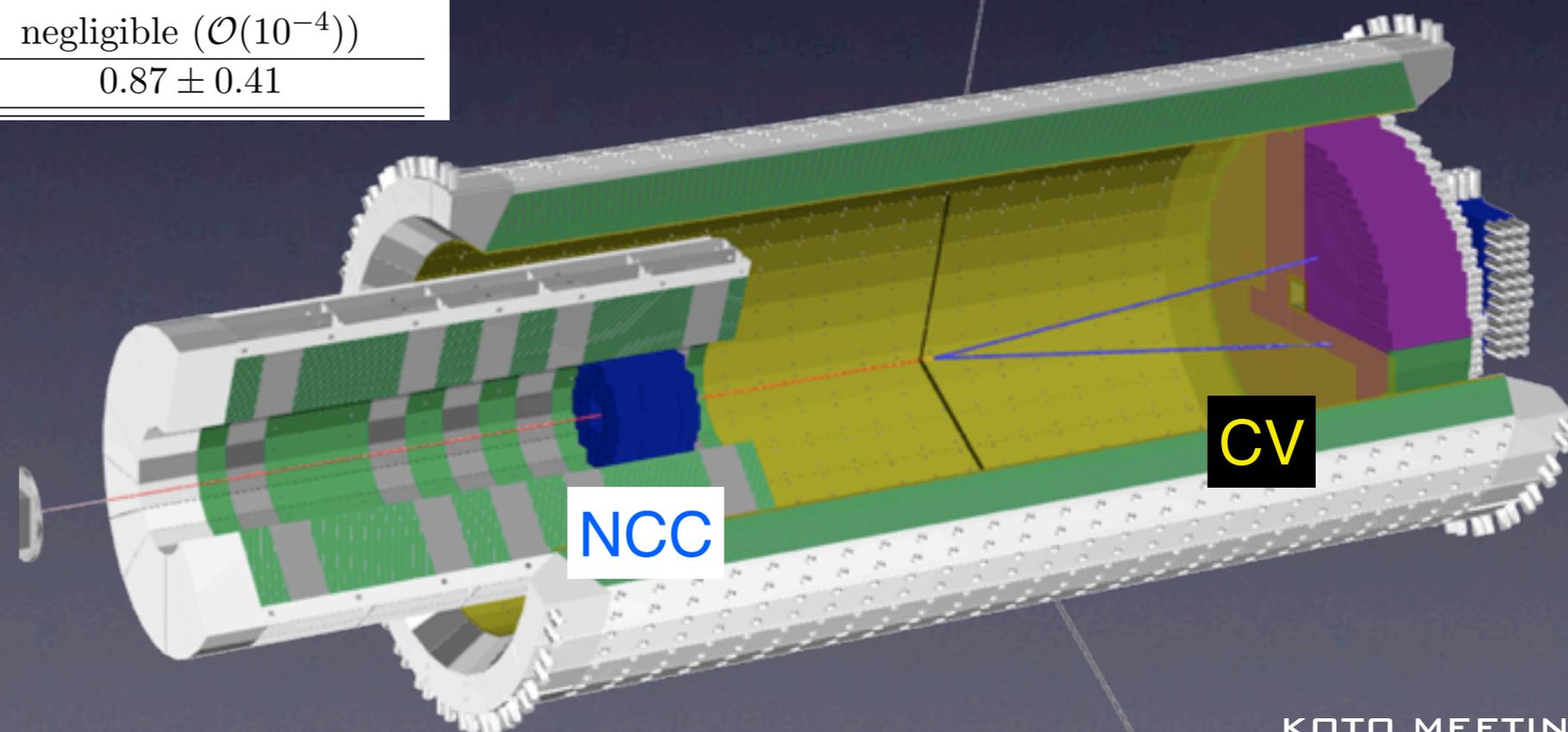


検出器R&D

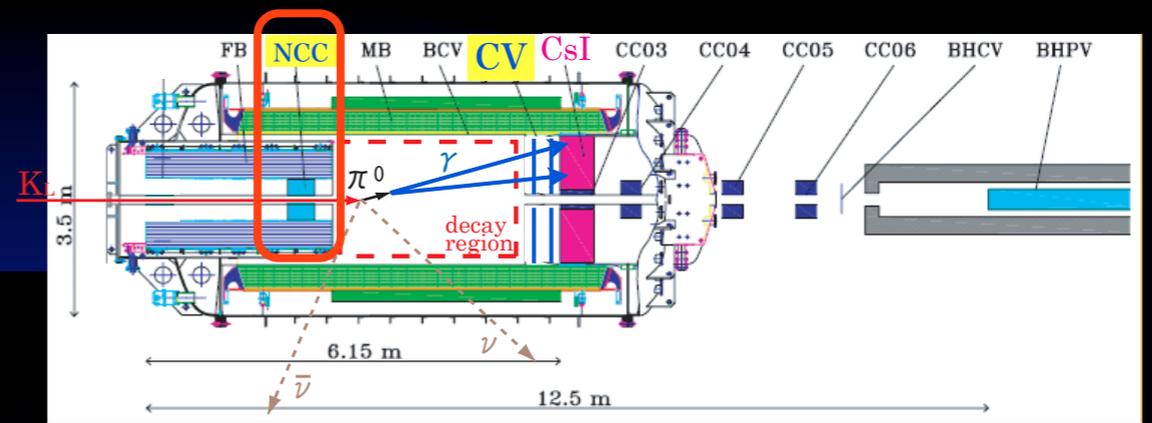
- Neutron Collar Counter (NCC)
- Charged Veto (CV)
 - 先行実験(E391a)での主要バックグラウンド源

Background source	Estimated number of BG	
Halo neutron BG 現NCC	CC02- π^0	0.66 ± 0.39
	CV- π^0	< 0.36
	CV- η	0.19 ± 0.13
K_L^0 decay BG	$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$	$(2.4 \pm 1.8) \times 10^{-2}$
	$K_L^0 \rightarrow \gamma \gamma$	negligible
	charged modes	negligible ($\mathcal{O}(10^{-4})$)
Other BG	backward π^0	< 0.05
	residual gas	negligible ($\mathcal{O}(10^{-4})$)
Total	0.87 ± 0.41	

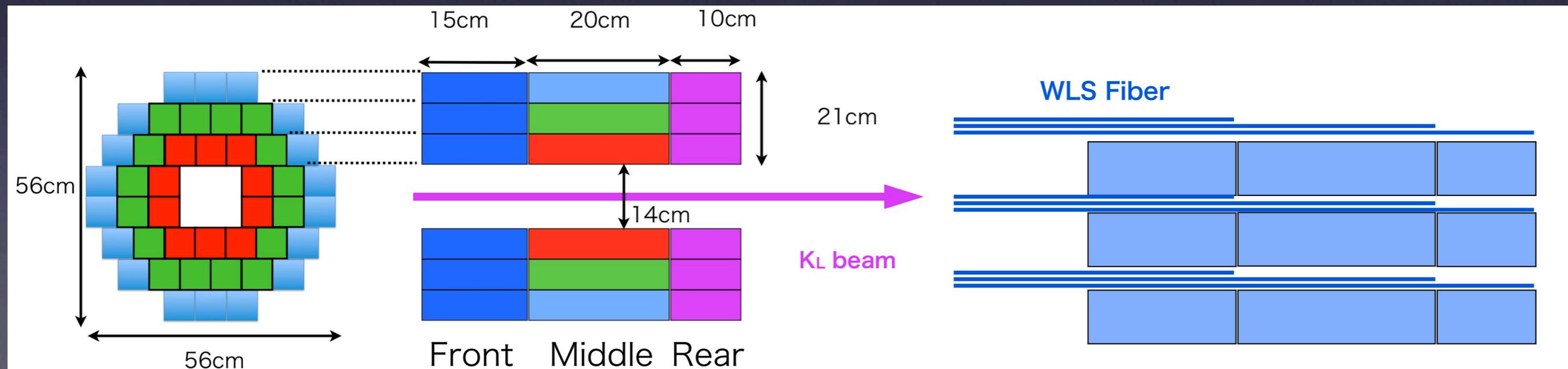
E391a B.G. summary table



NCC



- 主な役割
 - E391aに比べ、B.G.を1/1000に削減
 - ビーム周りに薄く広がるハロー中性子の測定
- 特徴
 - Pure CsI結晶をWLSF読み出し。
 - Segmentationを最適化し γ と n を弁別



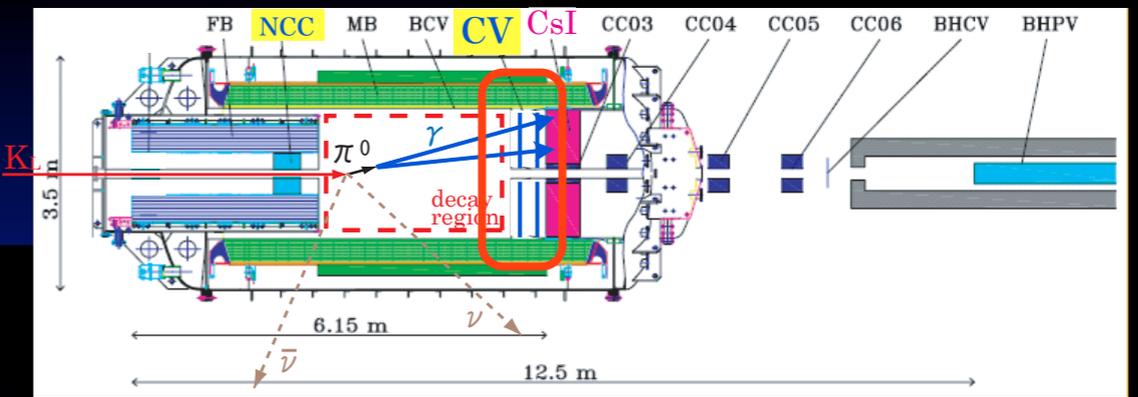
NCC製作状況

- 2012/10月インストールに向けて、鋭意量産中



組み合わせてモジュール完成

CV

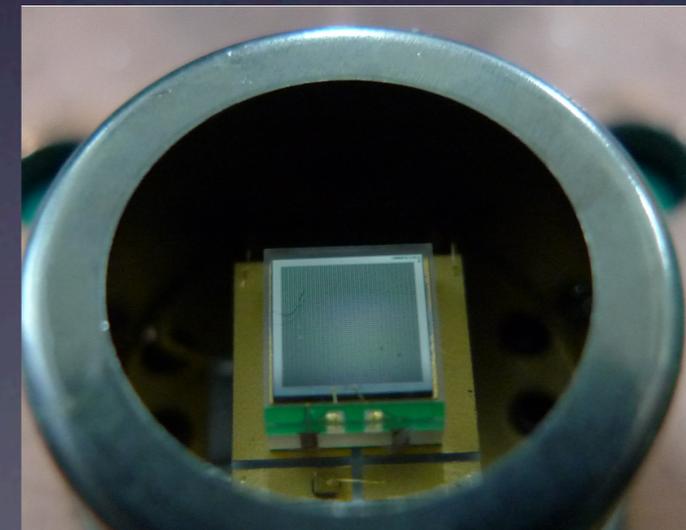
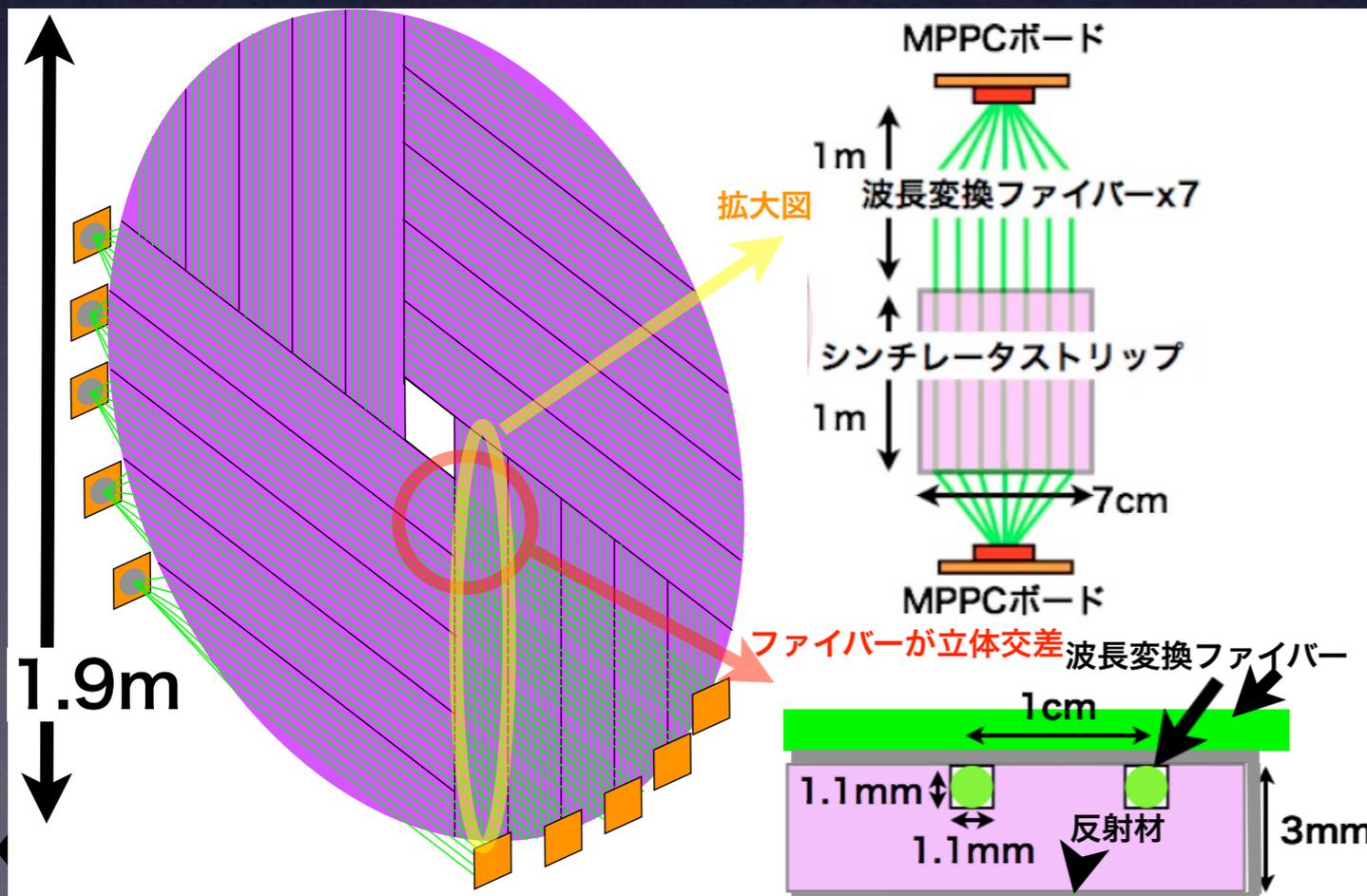


- 主な役割

- Cslカロリメータの直前に置かれ、Cslに入射した粒子が荷電粒子か中性粒子か判別する

- 特徴

- 荷電粒子を逃さずとらえる(99.99%)ための大光量
- 余計な粒子(ハロー中性子)と反応しないため、少ない物質質量

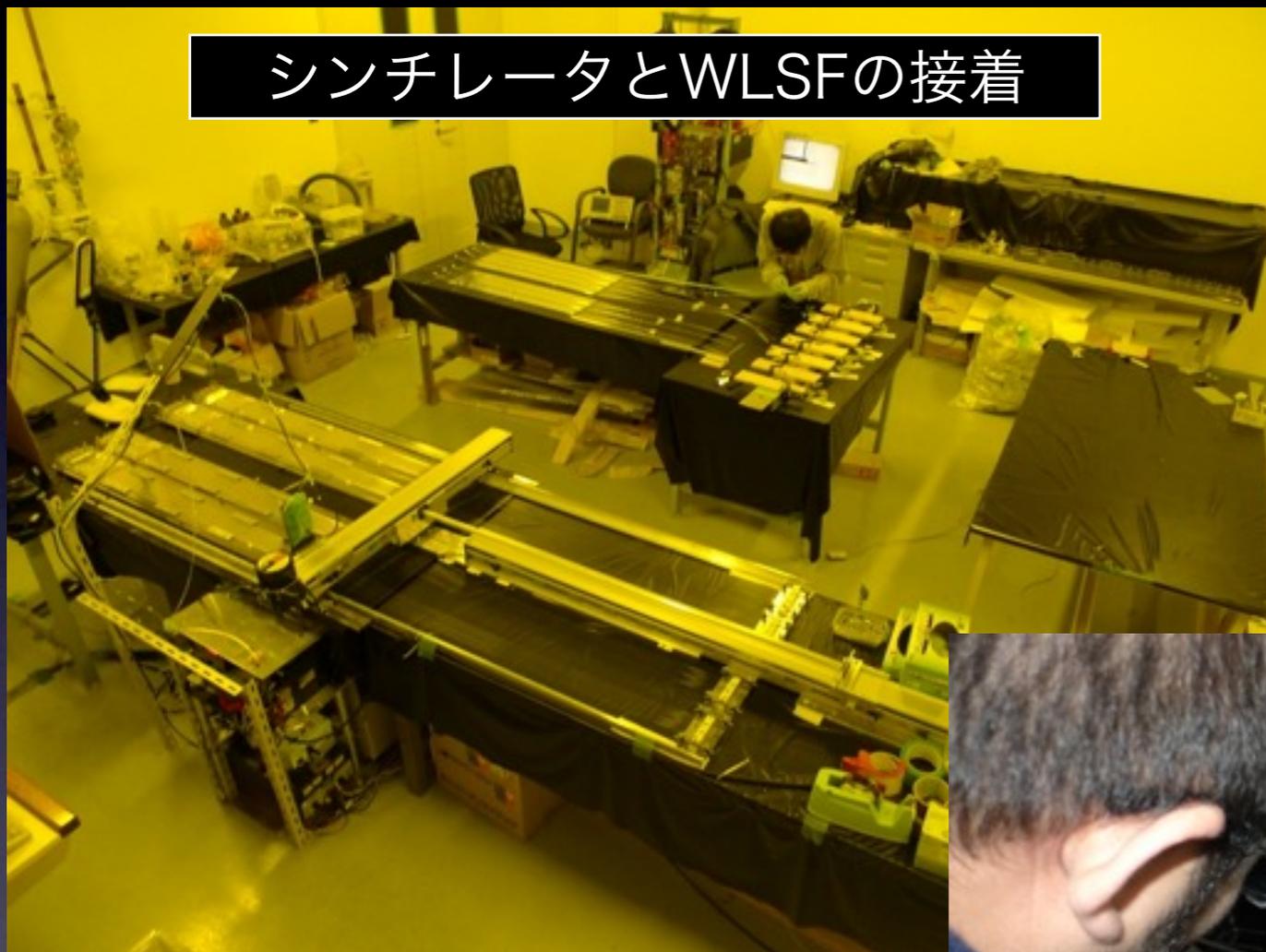


ペルチェ付きMPPC
大面積、低ノイズ、温度コントロール

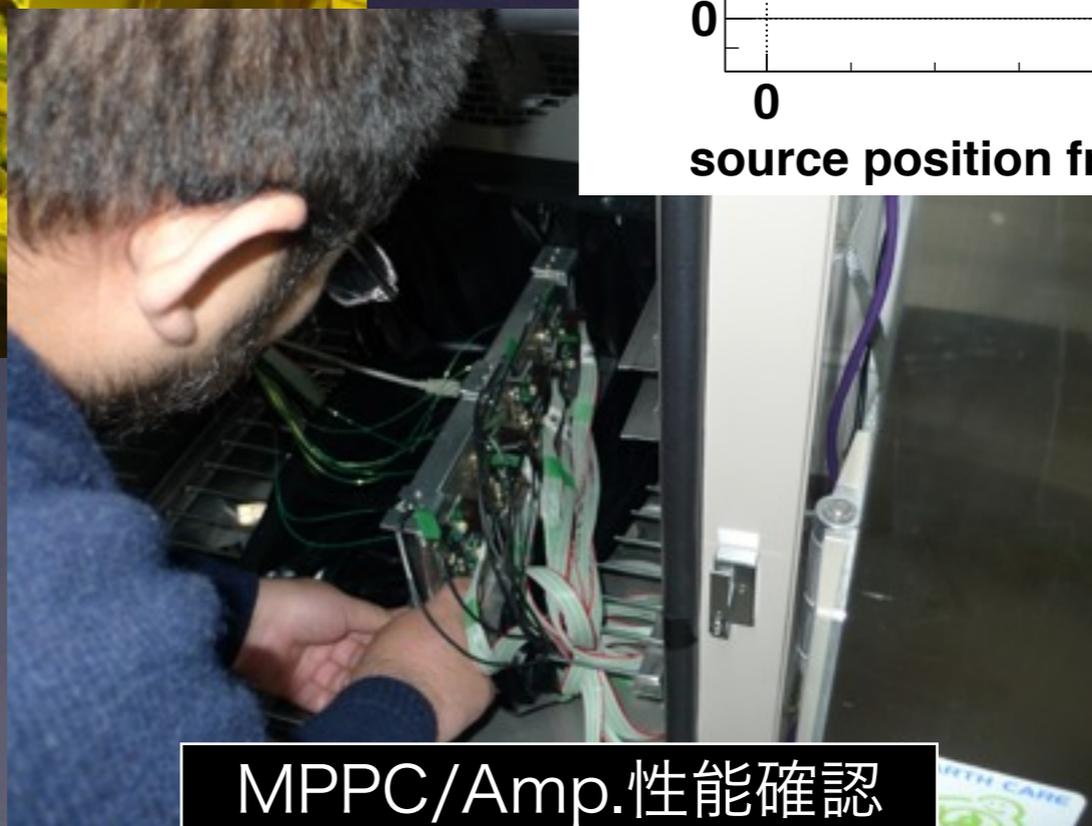
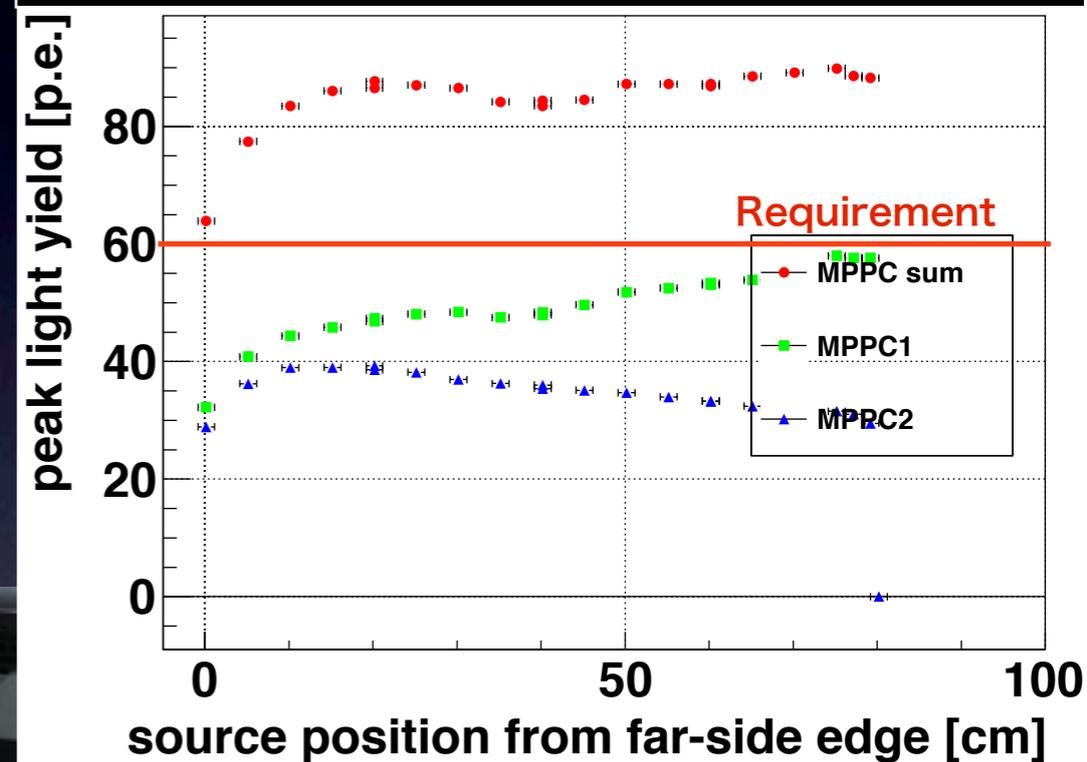
CV製作状況

- 2012/5月 インストールを目標に量産作業を進めている

シンチレータとWLSFの接着



量産品の光量分布
全域で要求を満たす光量を確認

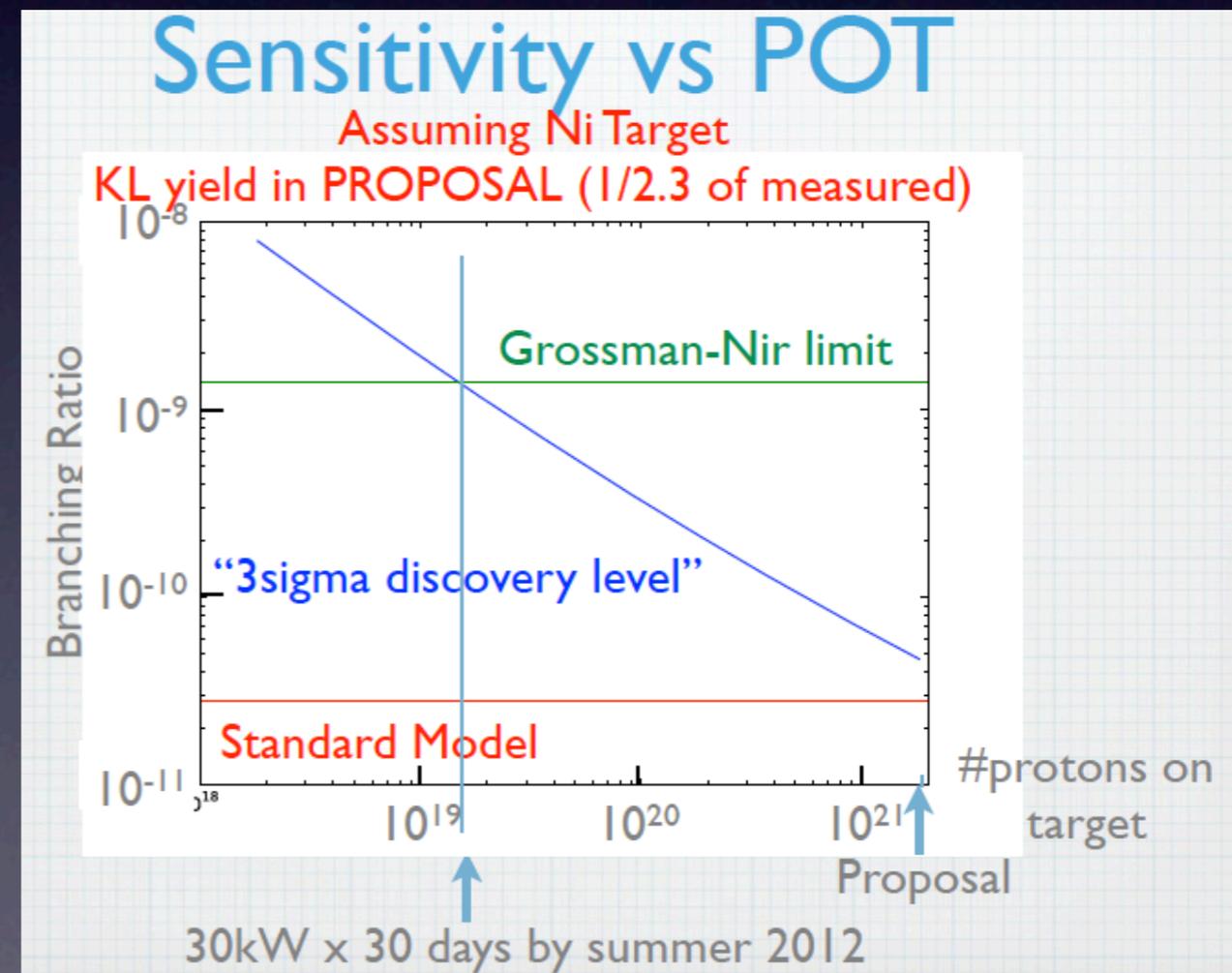


MPPC/Amp.性能確認

今後

2012/1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Beam (90% of Calorimeter, Air)	Calorimeter repairing			Beam (Full Calorimeter, Air)	Calorimeter repairing Install other detectors			2 nd Vacuum test, Engineering Run		

- 2012年内
 - 全検出器インストール
 - Engineering Run
- 2013年頭
 - Commissioning & Physics run
 - <1week Run で現在の上限値更新
- 2013/5-6
 - Physics run for the G.N. limit
 - <1month Run
- 2013年夏
 - Shut down (Linac upgrade)



Summary

- 2011年度KOTO実験進捗
 - 東日本大震災によるCsI結晶への影響は限定的であった
 - 真空試験により、多くの問題点を洗い出すことになった

	Check	Act
クロストーク	地震によりCsI結晶がスライドした	光学分離(および衝撃吸収)のための治具を挿入
Large PMTの放電	PMT下部に密閉空間が存在しその部分の真空度が悪い	全数に空気穴開け
信号出力の低下	CsI-PMT光学接続用シリコンがアウトガスを吸着し透過率低下	事前にベーキングを行いアウトガスを取り除く
放電による回路故障	放電耐性不足	放電耐性強化版を製作

- 京都Kグループ
 - 新検出器であるNCC, CVの量産中
 - 2012年内インストール予定
- 2013年夏のShut downまでに、GN Limitを超えるsensitivityでの実験を行う予定である