

原子炉由来反電子ニュートリノ 検出器の開発

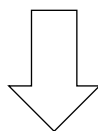
東京大学 蓑輪研究室
加藤 陽

ICEPPシンポジウム 白馬
2012/2/21

研究背景

国際原子力機関(IAEA)による査察

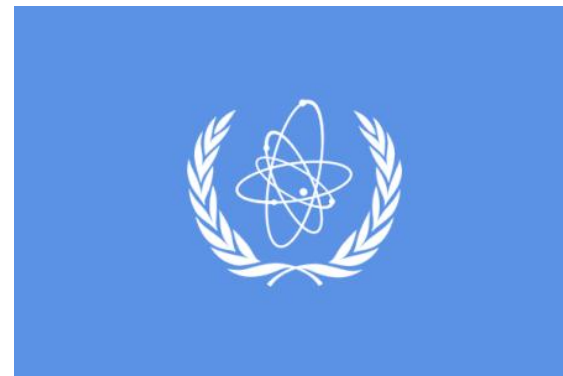
- 原子力技術の軍事目的への転用を防止する
 - 現在は侵襲的なモニタリング方法を用いている
 - ・放出される中性子のモニタリング
 - ・核物質の計量管理および分析
- 査察する側もされる側も大きな負担



IAEAの要請

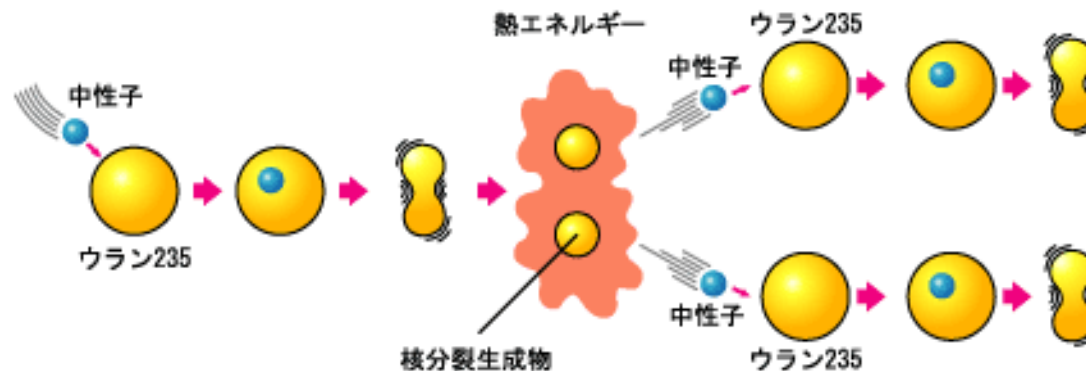
反電子ニュートリノを利用した原子炉モニタリング技術の開発

- ・ニュートリノは透過性が極めて高く遮蔽が困難
 - ・代替のニュートリノ源を用意することが困難
- 査察に非常に適している



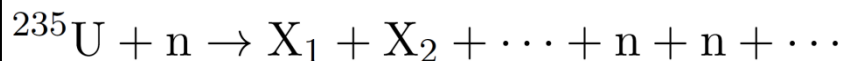
International Atomic Energy Agency

原子炉ニュートリノ：発生原理



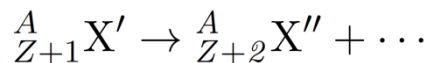
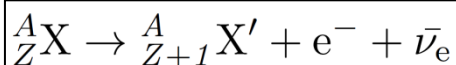
出典：中部電力ホームページ

^{235}U の核分裂反応→中性子過剰核生成



&

分裂生成物の β 崩壊→反電子ニュートリノ放出



1回の核分裂反応で

- ・6個の反電子ニュートリノ
- ・平均200MeVのエネルギーを放出

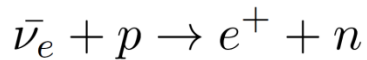
たとえば

出力3GWtの原子炉の場合

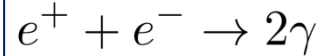
6×10^{20} 個/sのニュートリノを放出

原子炉ニュートリノ：検出原理

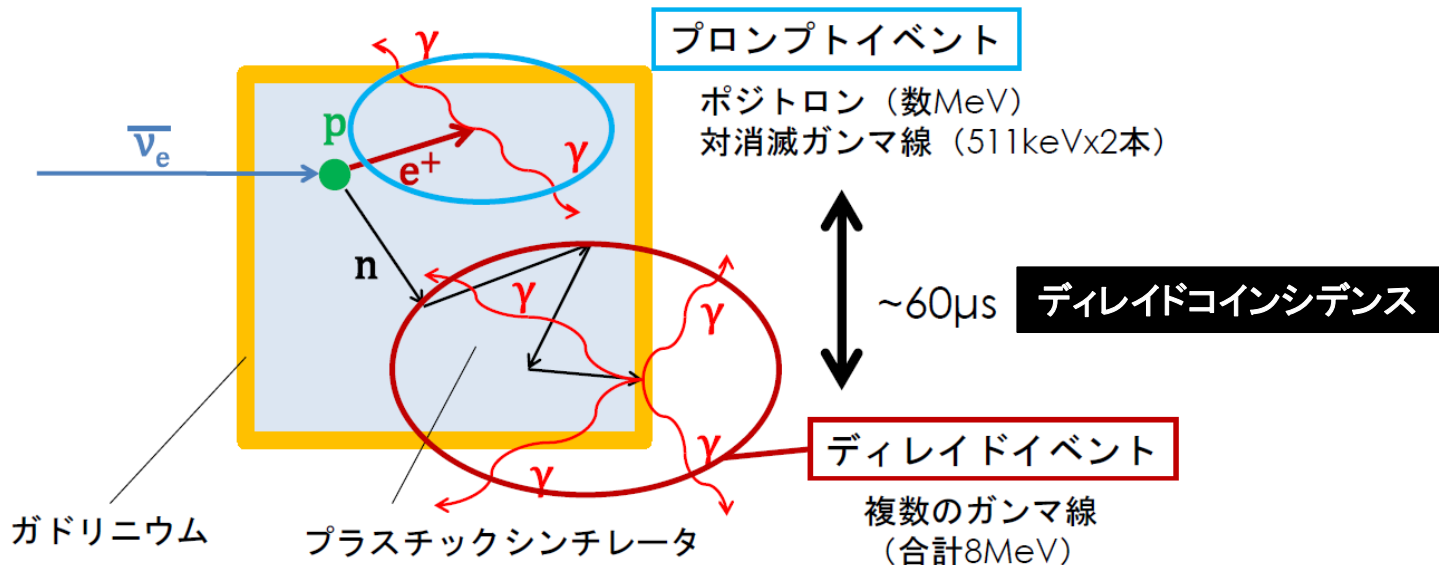
逆 β 崩壊



陽電子の対消滅



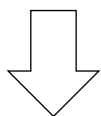
Gdによる中性子捕獲



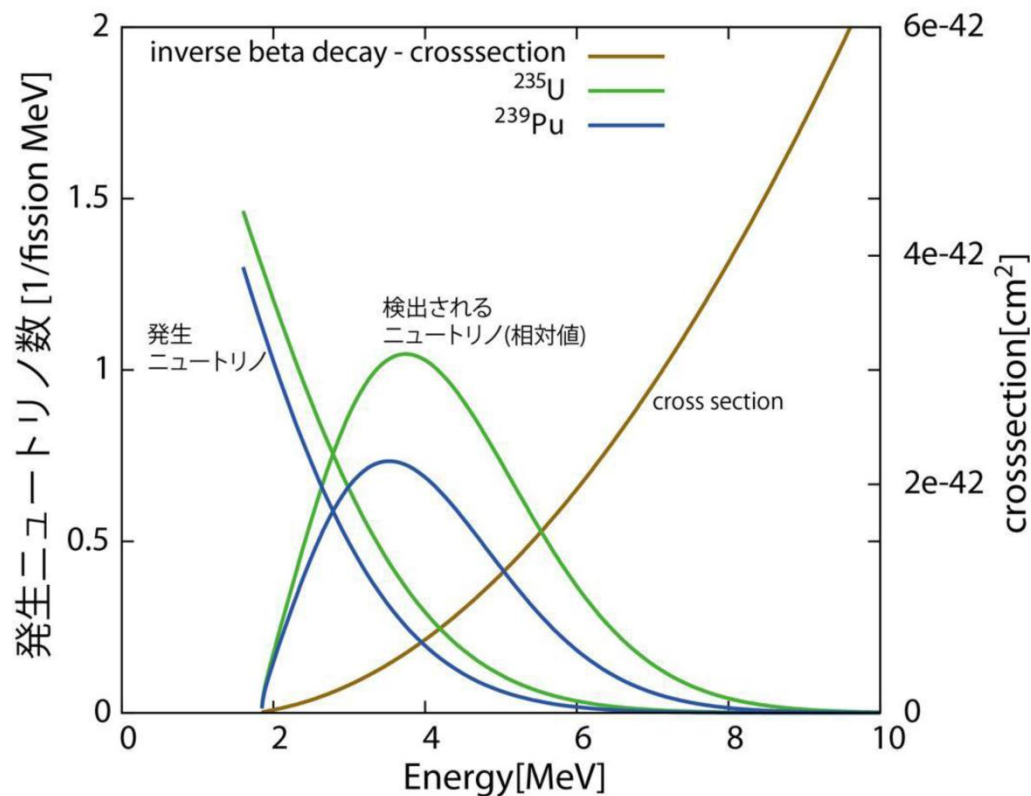
原子炉ニュートリノ: スペクトル

原子炉から放出されるニュートリノの
フラックスは低エネルギーほど大きい

反電子ニュートリノの逆 β 崩壊の反応
断面積は高エネルギーほど大きい



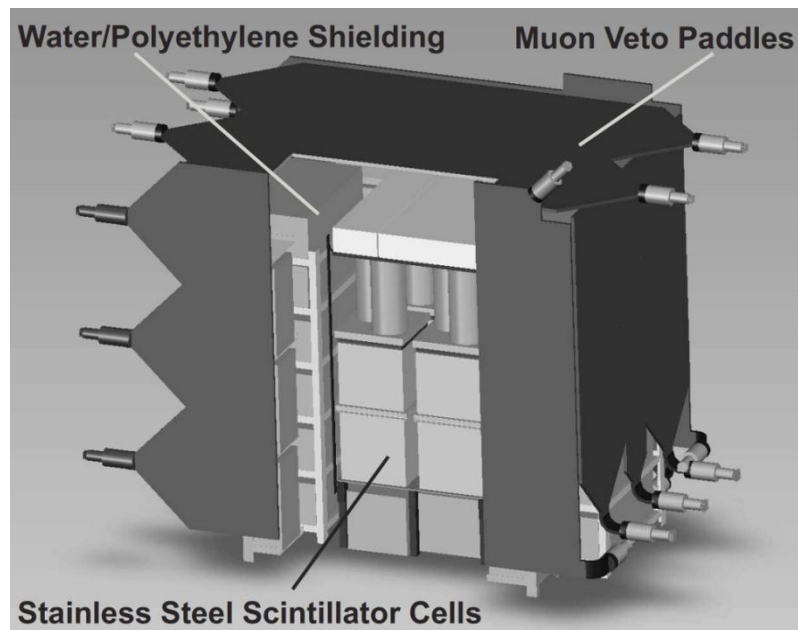
4MeV付近にピークを持つスペクトル



先行研究: SONGS実験

米San Onofre Nuclear Generating Station (SONGS) での実験(2006)

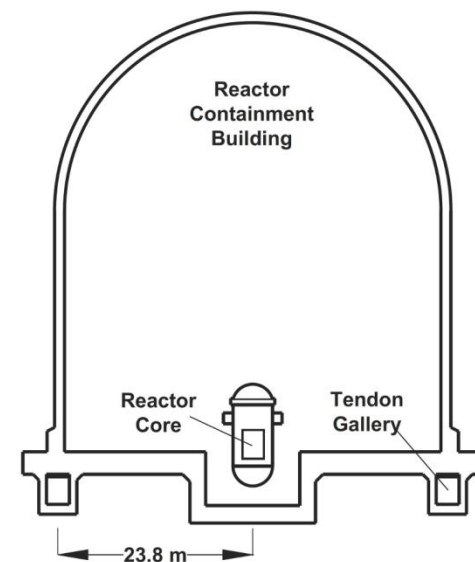
N. S. Bowden *et al.*, Nucl. Instrum.Meth. A572 (2007) 985-998.



- ・Gd含有の液体シンチレータ0.64tを使用
- ・水・ポリエチレンシールドおよびミュオンveto
- ・原子炉建屋地下のtendon galleryに設置
- ・炉心からの距離24.5m
- ・原子炉の出力は3.4GWt

原子炉のON/OFFモニタリングに成功

- ・原子炉のON/OFF変化を観測
- ・燃料組成の変化に伴うニュートリノフラックスの変化を観測



PANDAプロジェクト: 目的

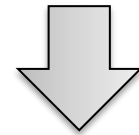
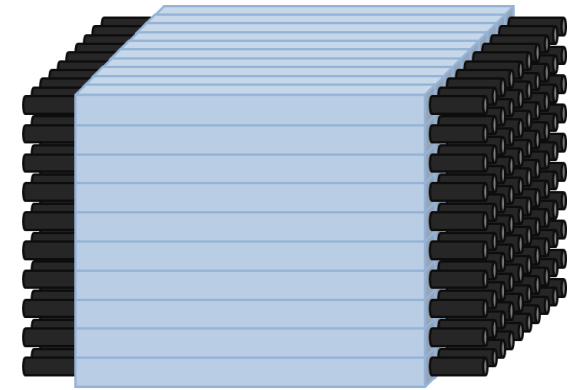
Plastic Anti-Neutrino Detector Array (2006~)

特長

- ・安全性を考慮しプラスチックシンチレータを使用
- ・棒状シンチレータ100本の間にガドリニウムを挟む
- ・トラックに積載して移動・測定が可能

目的

- ・屋外、地上に設置して原子炉モニタリング
- ・複数の原子炉でのスペクトル測定
(・reactor anomalyの検証)



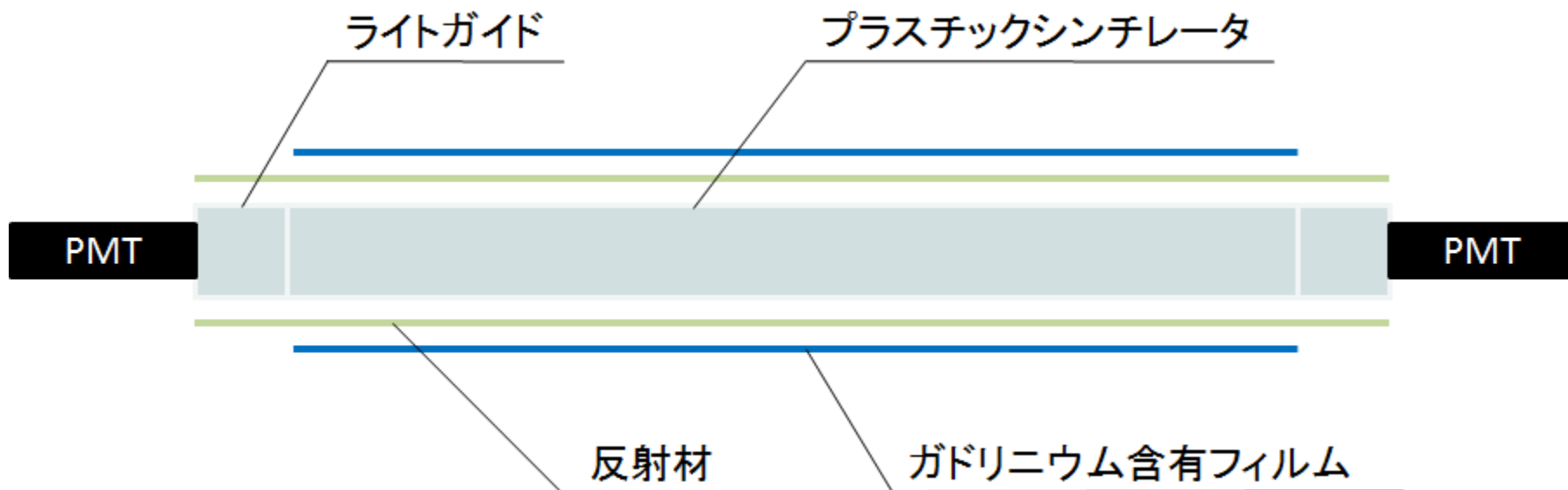
lesserPANDA

第1次プロトタイプ検出器lesserPANDA(2008～2011)



- ・プラスチックシンチレータを16本(4本×4本)使用
- ・原子炉のON/OFFモニタリングが目的

lesserPANDA: モジュール



- ・10cm × 10cm × 100cmの棒状プラスチックシンチレータ
- ・10cm × 10cm × 10cmの亚克力製ライトガイド
- ・2インチPMT
- ・アルミナイズドマイラー(反射材)
- ・酸化ガドリニウムコーティングフィルム

lesserPANDA: 検出器とトラック



- ・アルミと木材を使用
- ・車輪で移動可能
- ・2tトラックに積載
- ・中部電力浜岡原子力発電所に輸送して測定



lesserPANDA: 浜岡原発での測定



浜岡原子力発電所

- ・中部電力唯一の原子力発電所
- ・3号機出力3.29GWt
- ・沸騰水型軽水炉

3号機近傍での測定

- ・原子炉建屋の壁際に設置
- ・AC100V電源の提供
- ・基本的に無人での測定
(隔週でポータブルHDD交換)



lesserPANDA: 測定スケジュール

当初の測定スケジュール

2011年3月3日: バックグラウンド測定開始
(3号機定期検査中)



2011年4月上旬: ニュートリノ測定開始
(3号機運転再開)



2011年5月上旬: 測定終了、撤収

原子炉のON/OFFを測定

lesserPANDA: 測定スケジュール

当初の測定スケジュール

2011年3月3日: バックグラウンド測定開始
(3号機定期検査中)



2011年4月上旬: ニュートリノ測定開始
(3号機運転再開)



2011年5月上旬: 測定終了、撤収

原子炉のON/OFFを測定

実際の測定スケジュール

2011年3月11日: 東日本大震災発生



2011年5月9日: 3号機運転再開中止が決定

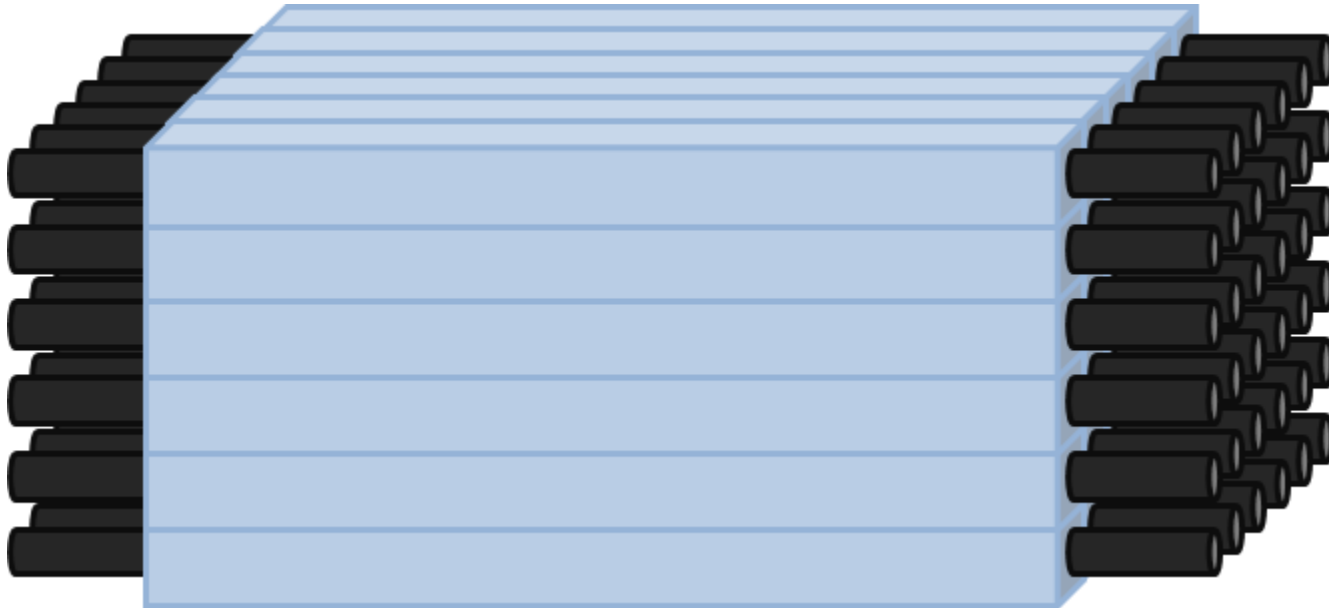


2011年5月16日: 測定終了、撤収

原子炉のOFFのみ測定

PANDA36

第2次プロトタイプ検出器PANDA36(2011～)



- ・プラスチックシンチレータを36本(6本×6本)使用
- ・lesserPADNAで実現しなかった原子炉のON/OFFモニタリングが目的

PANDA36: モジュールの接着

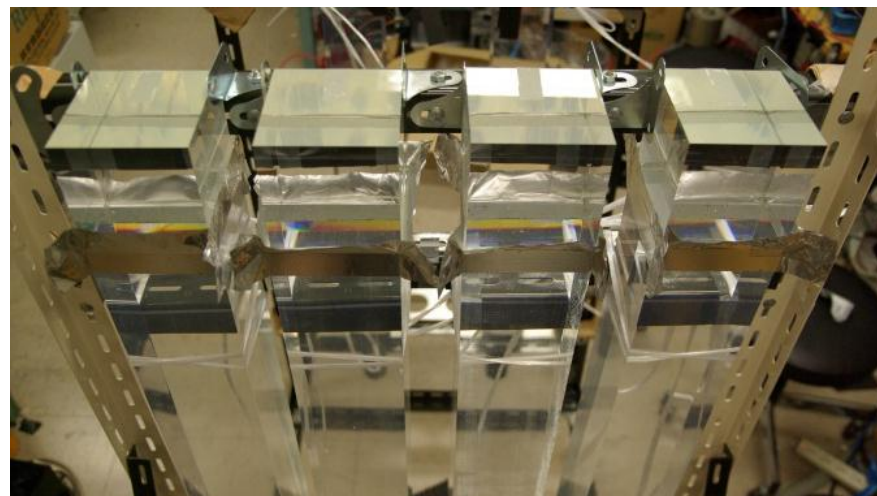
lesserPANDAからの変更点



- ・プラスチックシンチレータとライトガイドの接着: シリコンゴム→オプティカルセメント
(気泡が発生)
- ・ライトガイドとPMTの接着: オプティカルグリス→オプティカルセメント
(ばね構造が必要)



分解はできないが強度を優先

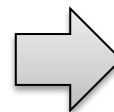
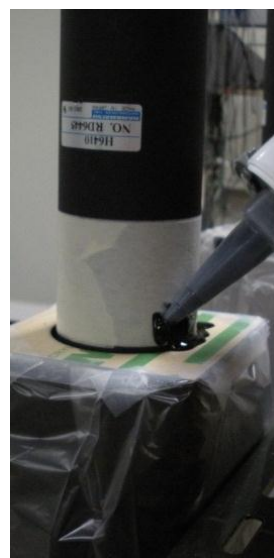
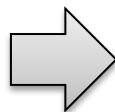
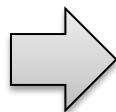
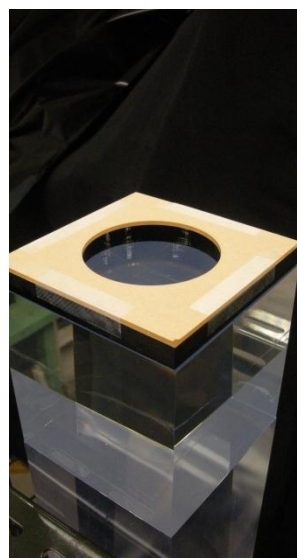


PANDA36: 遮光

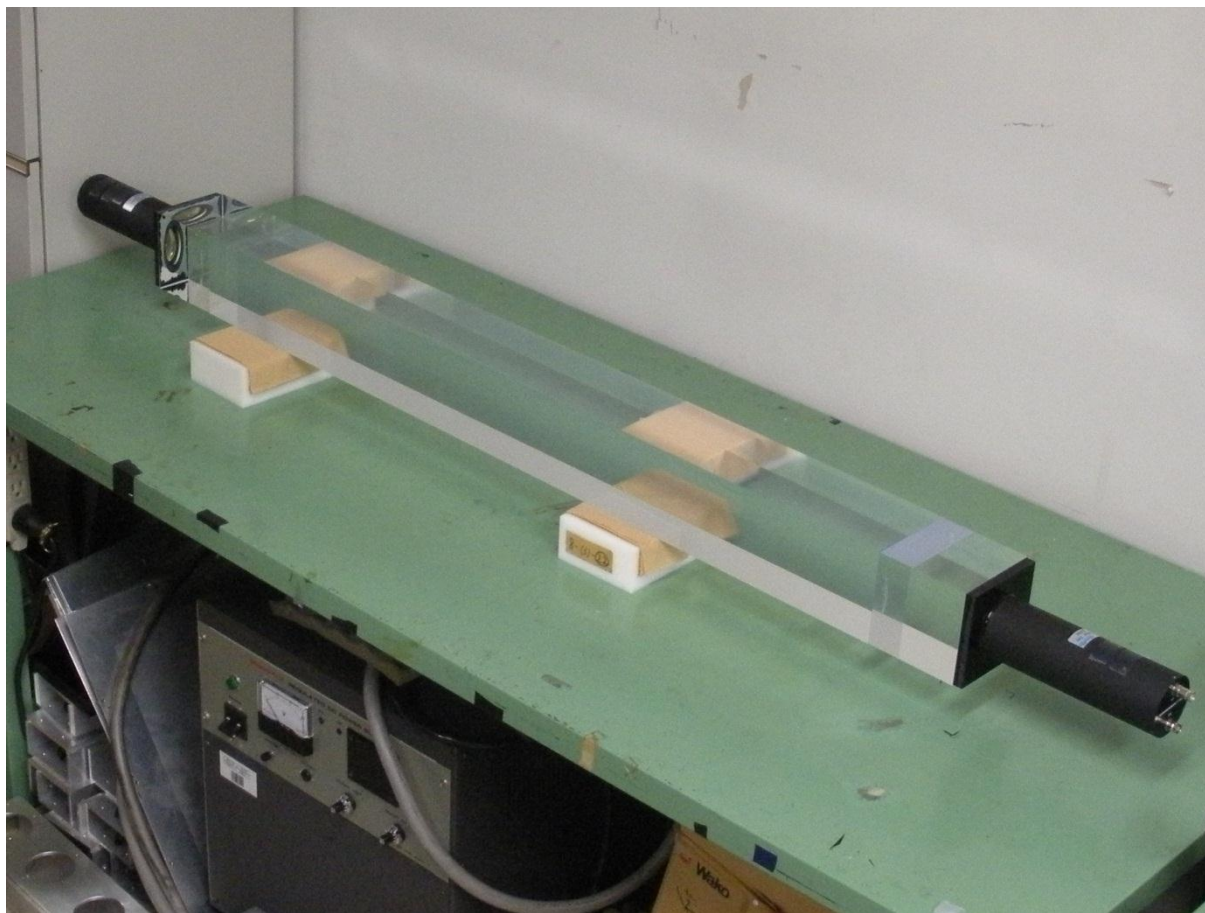
lesserPANDAからの変更点

モジュール16本をまとめて遮光→モジュールを1本ずつ遮光

- ・ケーブル部分の遮光が不要(検出器構造が簡略化)
- ・モジュールの交換・位置変更が比較的容易
- ・光漏れに対応しやすい



PANDA36: モジュール仕上げ



反射材

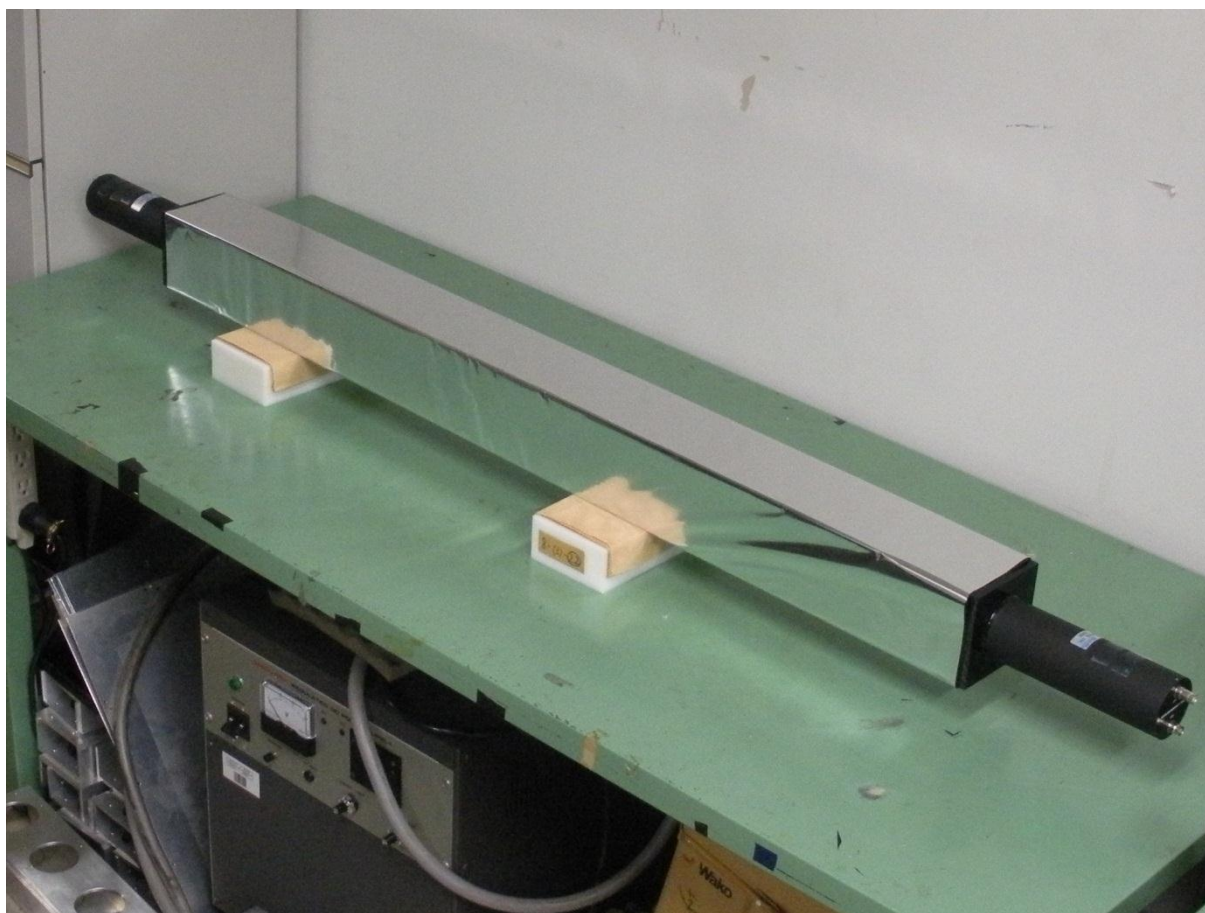


Gd含有フィルム



遮光シート

PANDA36:モジュール仕上げ



反射材

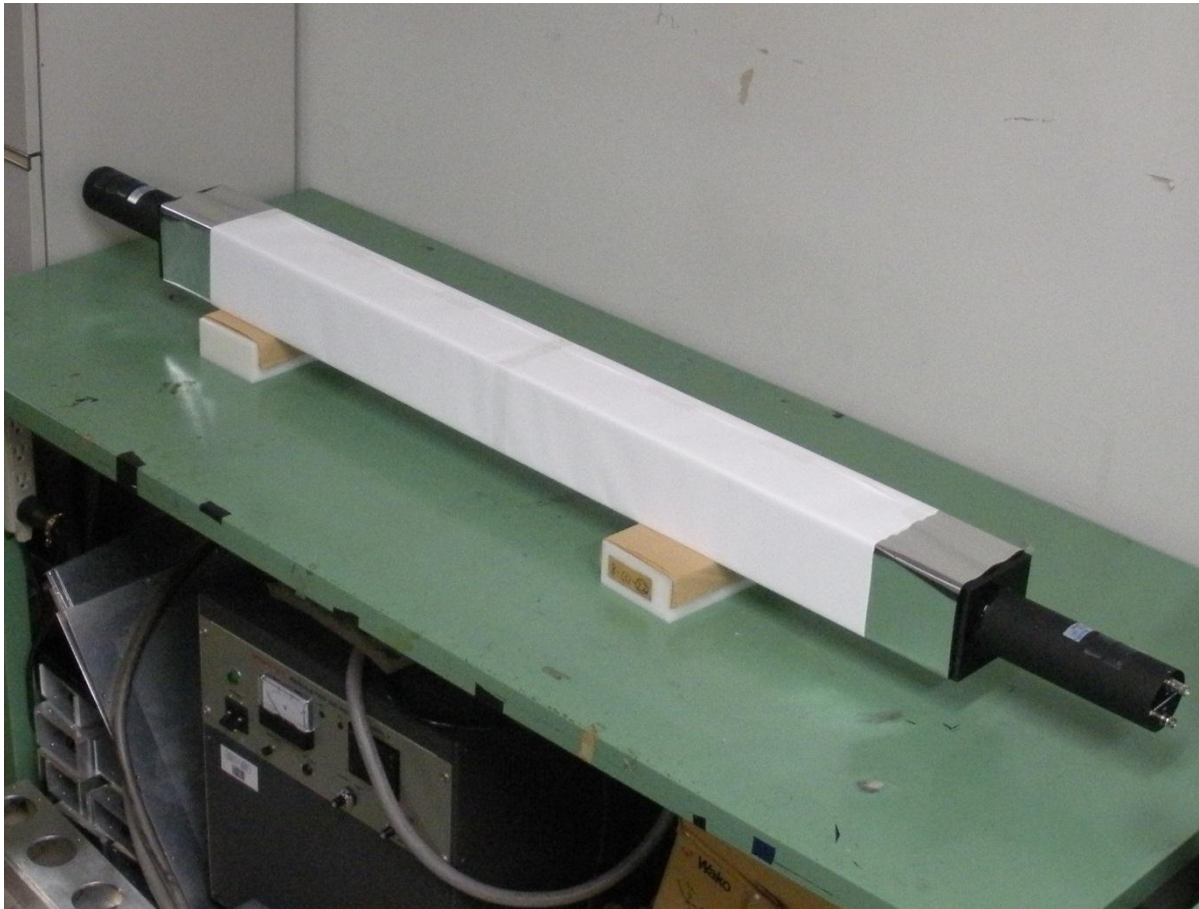


Gd含有フィルム



遮光シート

PANDA36: モジュール仕上げ



反射材

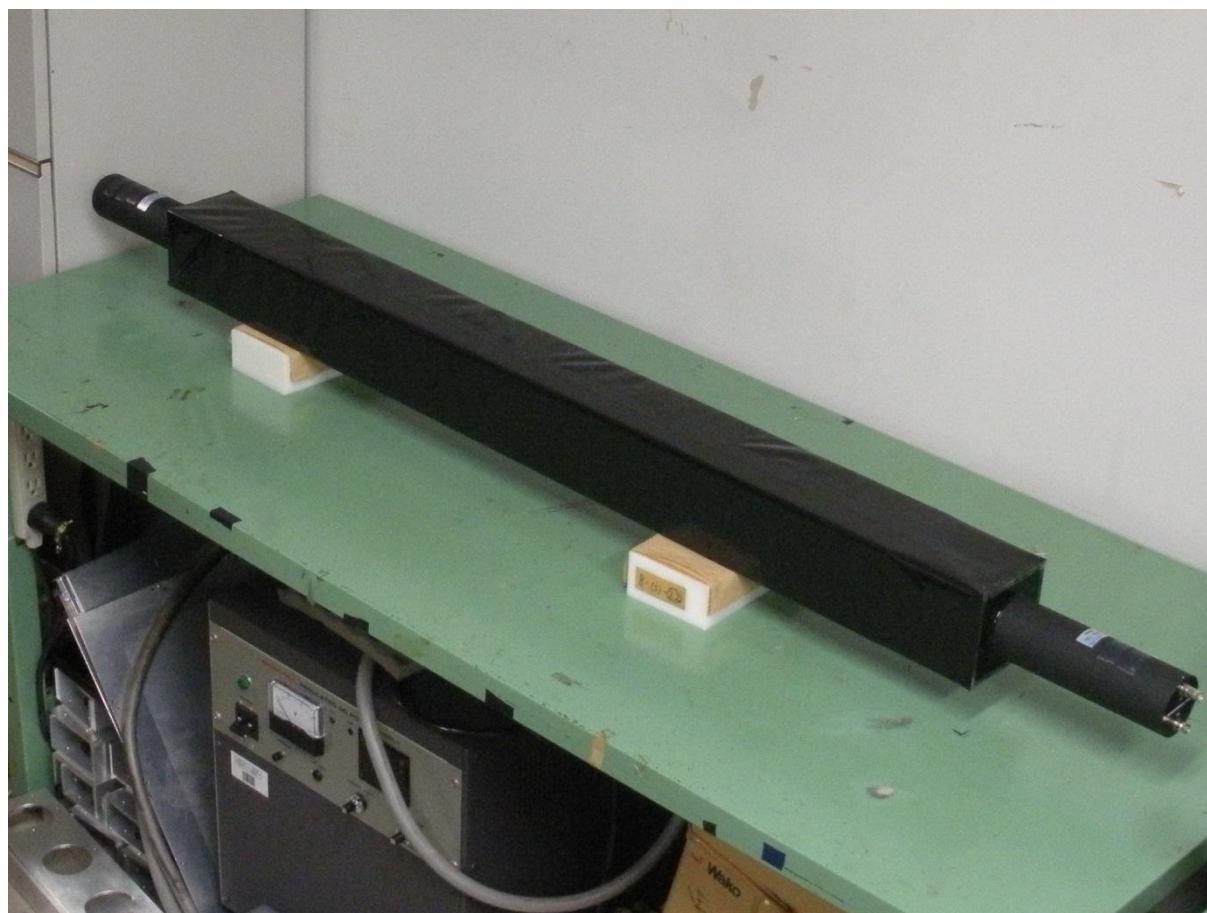


Gd含有フィルム



遮光シート

PANDA36: モジュール仕上げ



反射材



Gd含有フィルム

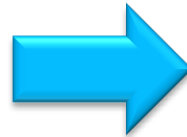
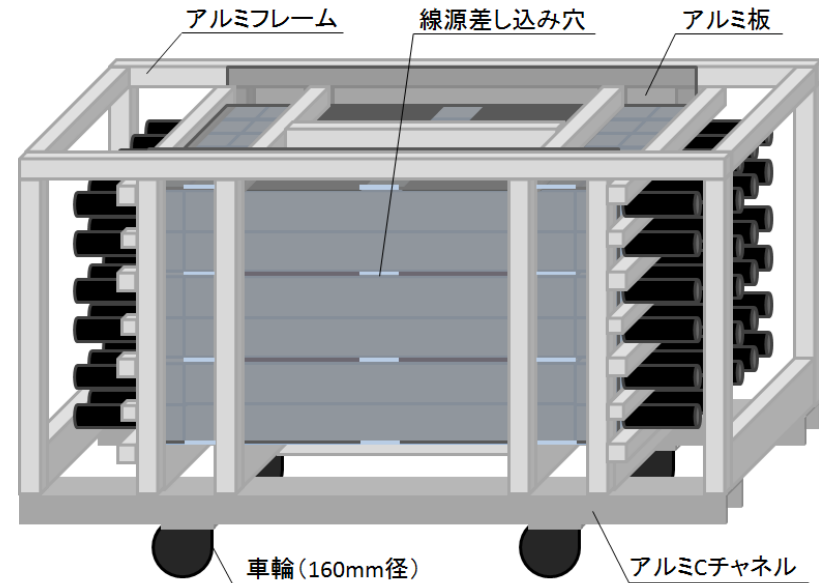


遮光シート

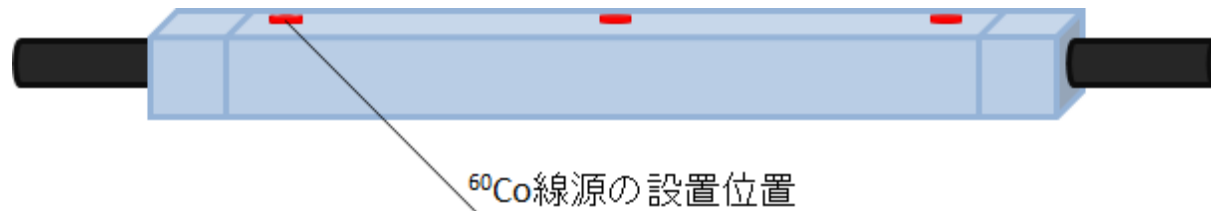
PANDA36: 検出器本体

lesserPANDAからの変更点

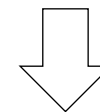
- ・遮光の必要がないためシンプルな構造
- ・骨組み: アルミCチャンネル→アルミフレーム
- ・側板: 木材→アルミ板
- ・線源差し込み用の横穴を12か所設置



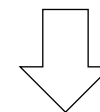
PANDA36: エネルギー較正



2段おきに3か所の横穴
(中央と左右、計12か所)



- ・すべてのモジュールに隣接
- ・検出器の中に線源を設置できる



より正確なシミュレーションが可能

PANDA36: 検出器本体の強度

lesserPANDAが受けた振動を測定

- ・トラックへの積載作業中の振動
- ・原子力発電所への輸送中の振動



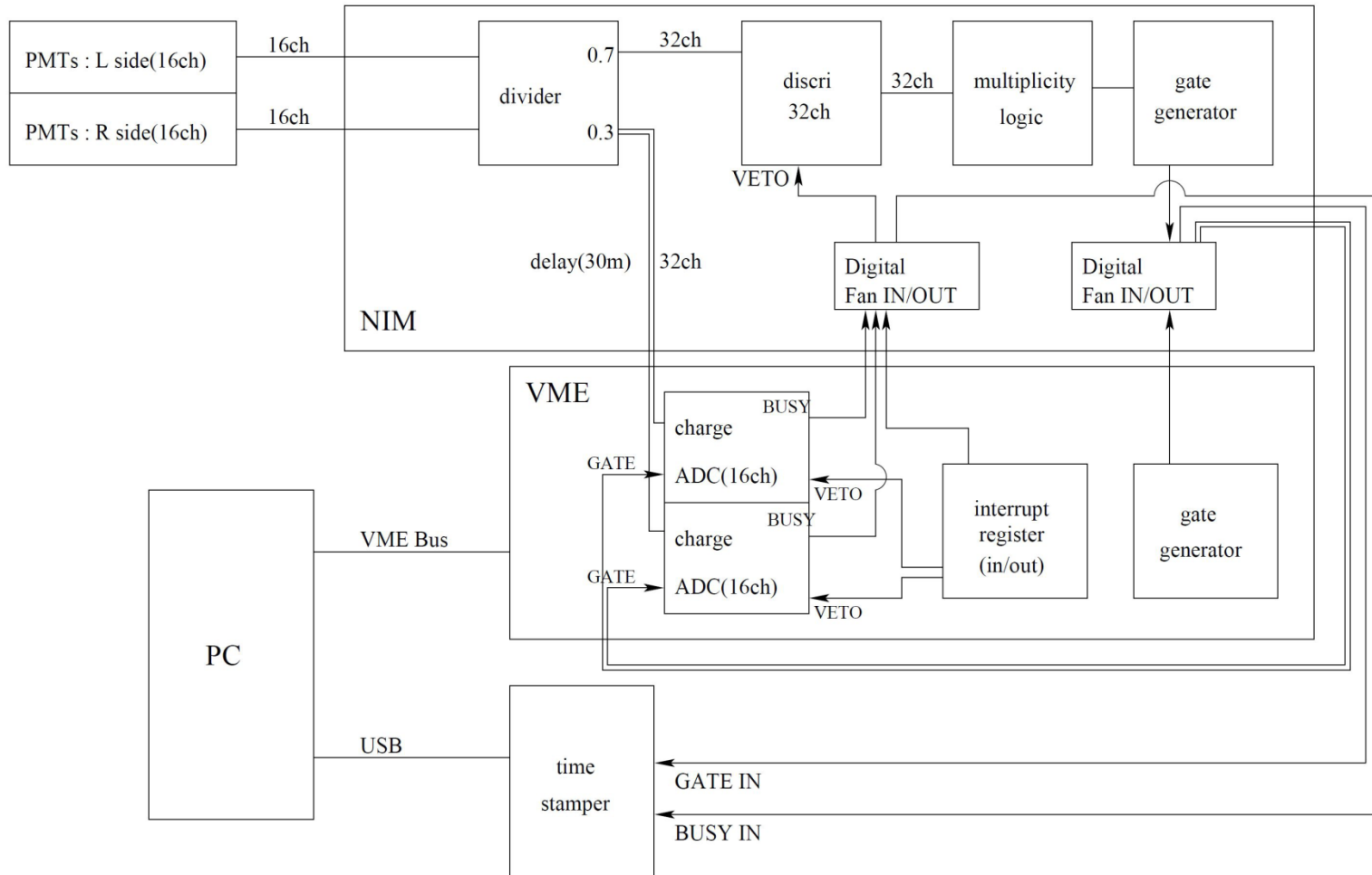
PANDA36の本体はこの結果をもとに設計



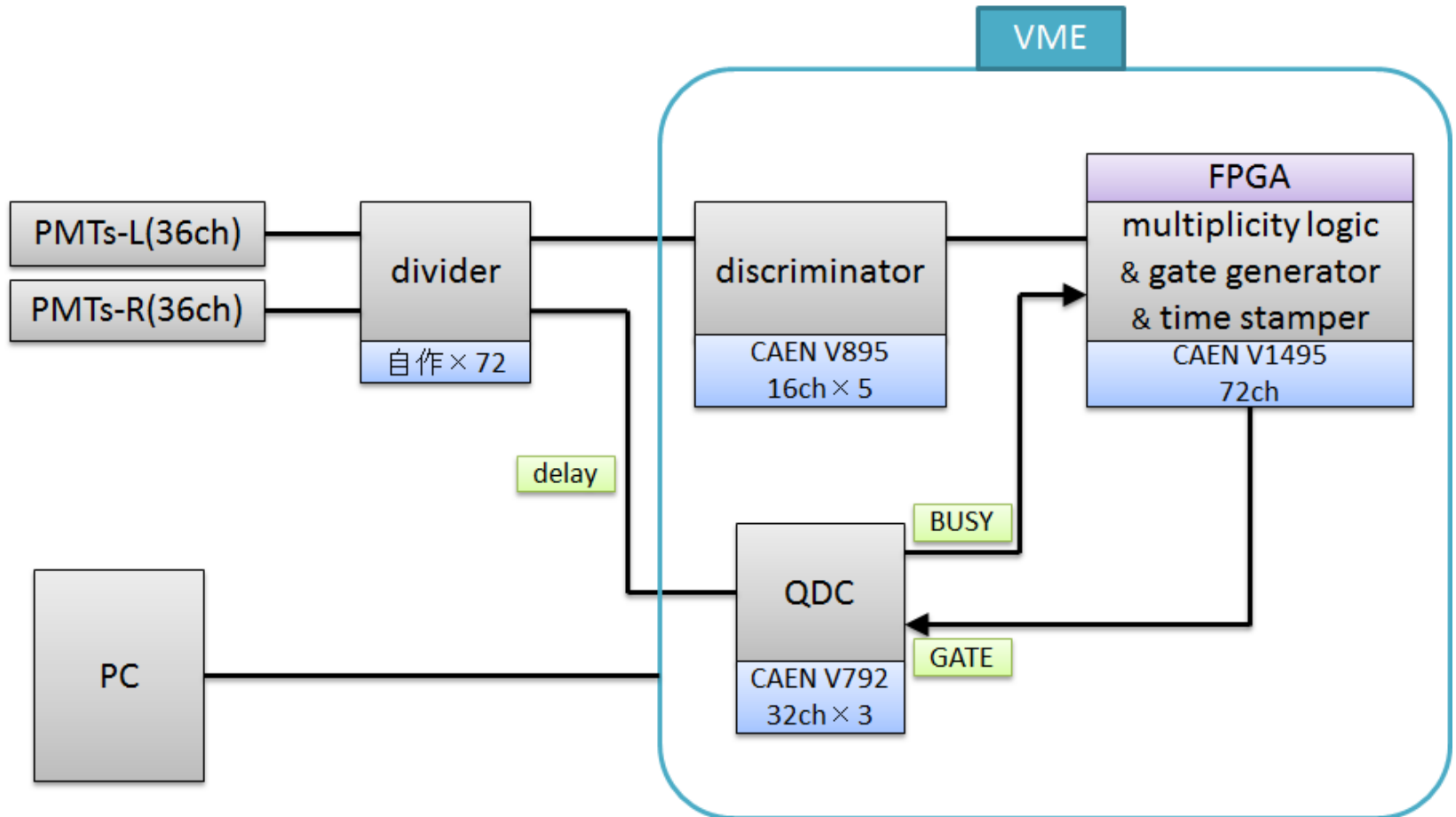
方向	積載作業中	トラック走行中
$+x$ 方向 (進行方向)	0.09G	0.38G
$-x$ 方向 (進行方向)	0.11G	0.30G
$+y$ 方向 (水平方向)	0.11G	0.37G
$-y$ 方向 (水平方向)	0.08G	0.36G
$+z$ 方向 (鉛直方向)	0.16G	0.72G
$-z$ 方向 (鉛直方向)	0.25G	0.89G



lesserPANDA: データ取得回路



PANDA36: データ取得回路



PANDA36: V1495の導入

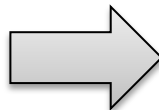
72chのmultiplicity logic入力に対応

lesserPANDA



RPN-130 (NIMモジュール)

- ・入力は32ch (lesserPANDA) まで



PANDA36



V1495 (VMEモジュール)

- ・72ch (PANDA36) の入力が可能
- ・入力は最大160chまで増やせる

PANDA36 : FPGA

2段階のコインシデンス

lesserPANDA 光ったPMTの数で判断

multiplicity logic (RPN-130)

- ①32本のPMTで非同期コインシデンス
4個以上のPMTが発光→コインシデンス信号出力(1段階)

gate generator (N014)

- ②コインシデンス信号を引き伸ばしてGATE信号出力

PANDA36 光ったモジュールの数で判断

multiplicity logic & gate generator (V1495)

- ①各モジュールのPMT-LとPMT-Rで非同期コインシデンス(1段階目)
- ②コインシデンス信号を3クロック幅に引き伸ばす
- ③36個のモジュールのコインシデンス信号で同期コインシデンス(2段階目)
- ④2個以上のモジュールが発光したらGATE信号

PANDA36 : FPGA

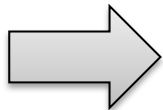
オンラインで設定値の変更

FPGAのプログラムで設定した各変数をオンラインで変更可能

- ・multiplicity logicの設定値(発光したプラスチックシンチレータの本数)
- ・1段階目のコインシデンス信号の幅
- ・出力GATE信号の幅

マスク機能

コインシデンス条件から任意のPMT(またはモジュール)を除外できる
(オンラインで設定可能)



測定条件をオンラインで自由に変えられることは、
検出器を原発敷地内で無人運転する上で重要。

PANDA36 : FPGA

time stamper機能

GATE信号とBUSY信号のON/OFF時刻を記録

→ 測定のlive timeとdead timeを計算

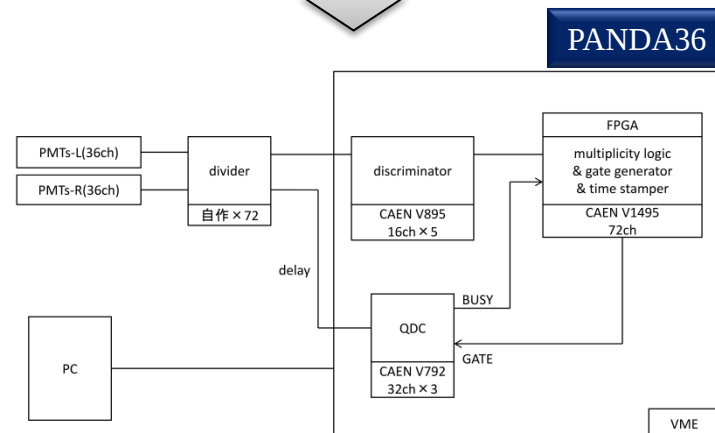
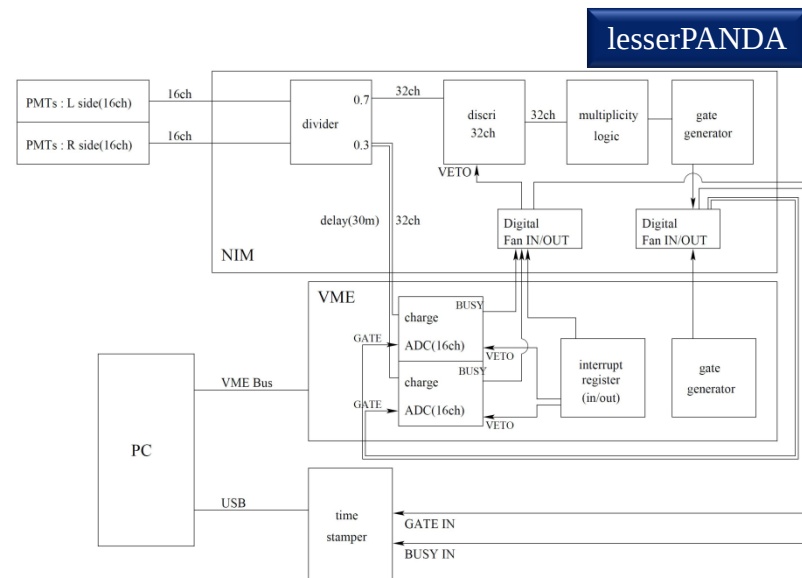
lesserPANDA

独立で設計したFPGAを使用

PANDA36

V1495内蔵の40MHzクロックを使用

機能は向上し、回路構造はシンプルに



PANDA36: 大飯発電所での測定



大飯発電所

- ・福井県にある関西電力の原子力発電所
- ・2号機出力3.42GWt
- ・加圧水型軽水炉

2号機近傍での測定

- ・原子炉建屋の壁際に設置
- ・AC100V電源の提供
- ・基本的に無人での測定
(隔週でポータブルHDD交換)



PANDA36: 測定スケジュール

測定スケジュール

2011年11月17日: ニュートリノ測定開始
(2号機運転中)



2011年12月16日: バックグラウンド測定開始
(2号機定期検査のため停止)

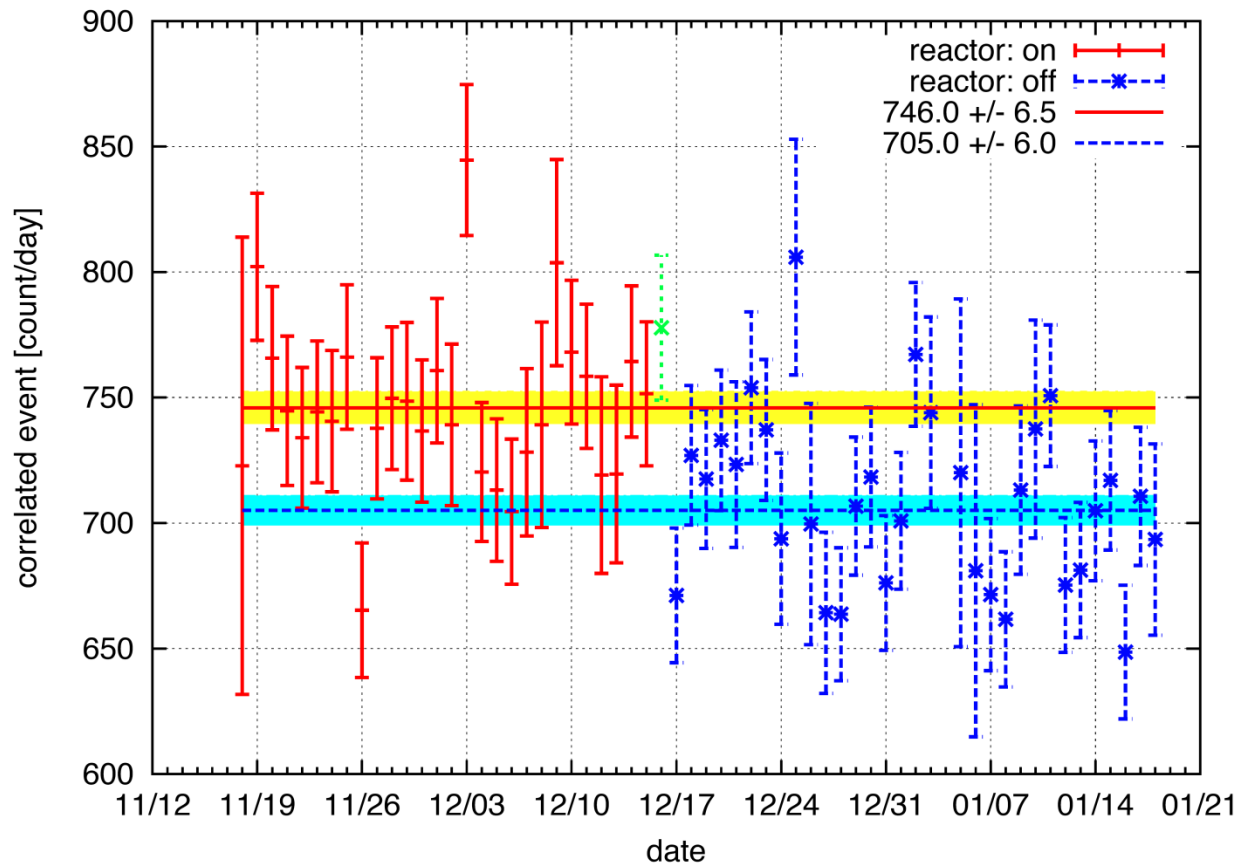


2012年1月18日: 測定終了、撤収

原子炉のON/OFFを測定



PANDA36: 測定結果



ONとOFFの差
 41.0 ± 8.8 events/day
(4.65σ)

小栗博士論文(2012)

屋外・地上から原子炉のON/OFFをモニタリングすることに成功

まとめ

反電子ニュートリノ検出器PANDAを開発中

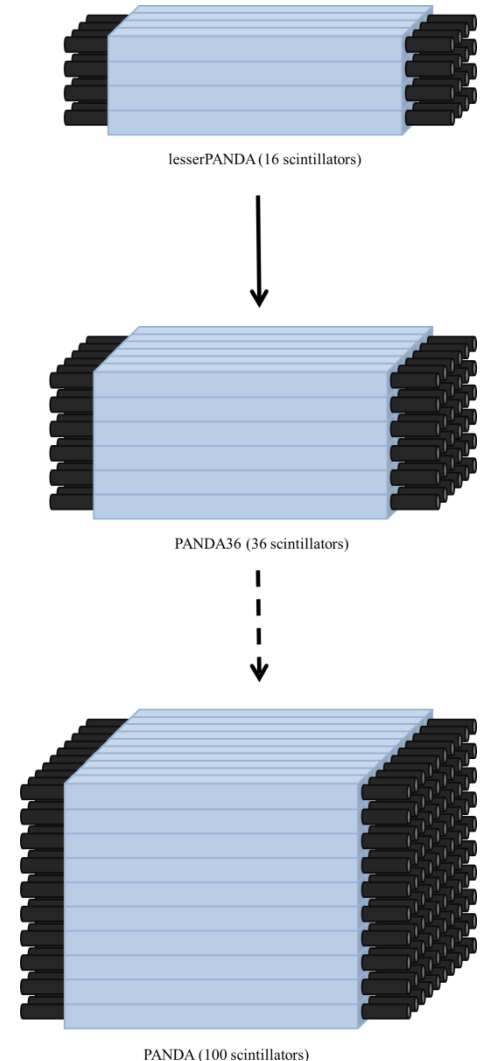
- ・プラスチックシンチレータを使用
- ・トラックに積載して輸送と測定が可能
- ・原子炉建屋外から原子炉モニタリングをおこなう

第1次プロトタイプ検出器lesserPANDAの開発

- ・プラスチックシンチレータを16本使用
- ・浜岡原子力発電所でバックグラウンド測定を実施

第2次プロトタイプ検出器PANDA36の開発

- ・プラスチックシンチレータを36本使用
- ・モジュールの作成方法(接着、遮光)を変更
- ・検出器本体の設計
- ・データ取得回路の作成
- ・大飯発電所で原子炉ON/OFFの測定に成功



今後の予定

- ・PANDA36で得られた結果の検証
 - 大飯発電所で測定したデータを解析
 - 今後の課題の洗い出し
- ・プラスチックシンチレータ64本を使用するPANDA64の開発
 - モジュール作成作業のさらなる効率化
 - 本体の設計
 - シミュレーションの改良
 - 原子炉ニュートリノのエネルギースペクトルの測定
- ・プラスチックシンチレータ100本を使用するPANDAの開発
 - 複数の原子炉に設置して燃料構成比によるエネルギースペクトルの測定
 - 原子炉との距離を変えてreactor anomalyの検討