

KamLAND報告

東北大学ニュートリノ科学研究センター
井上邦雄

第7回極低放射能技術研究会 2021年3月24日

地下宇宙研究の目標

誕生

成長

爆発

現在

宇宙物質優勢の謎

物質はどこから
来たのか？

宇宙・素粒子の大問題

暗黒物質の謎

星・銀河はどのように
作られたのか？

暗黒物質の直接探索

化学進化の謎

元素はどのように
作られたのか？

超新星(背景)
ニュートリノ観測

地球始源隕石の謎

マントル対流の謎
どう地球に行き着いたのか？

地球科学の大問題

地球ニュートリノ
観測



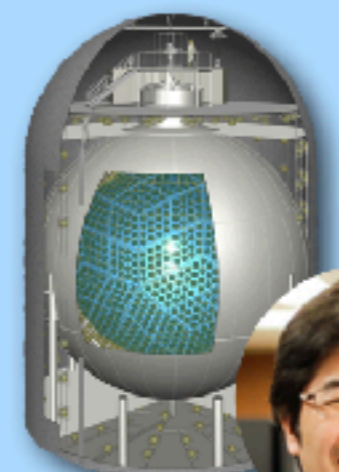
A01班



B01班



C01班



A01班

2019年新フェーズ開始

マヨラナ性の**世界初**
発見を期待

2019年観測開始

暗黒物質の**世界初**
発見を期待

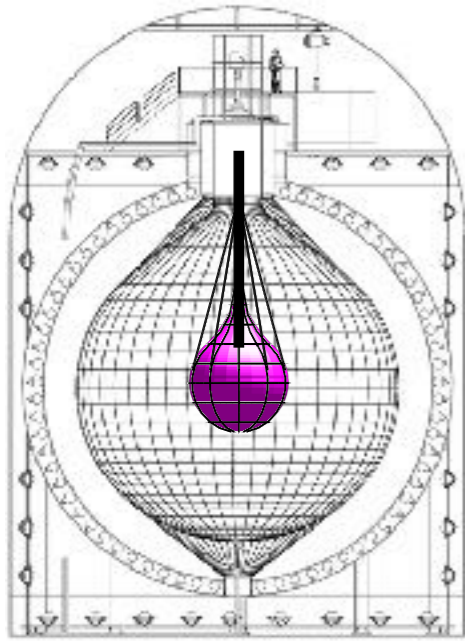
2020年観測開始

超新星背景 ν の
世界初観測

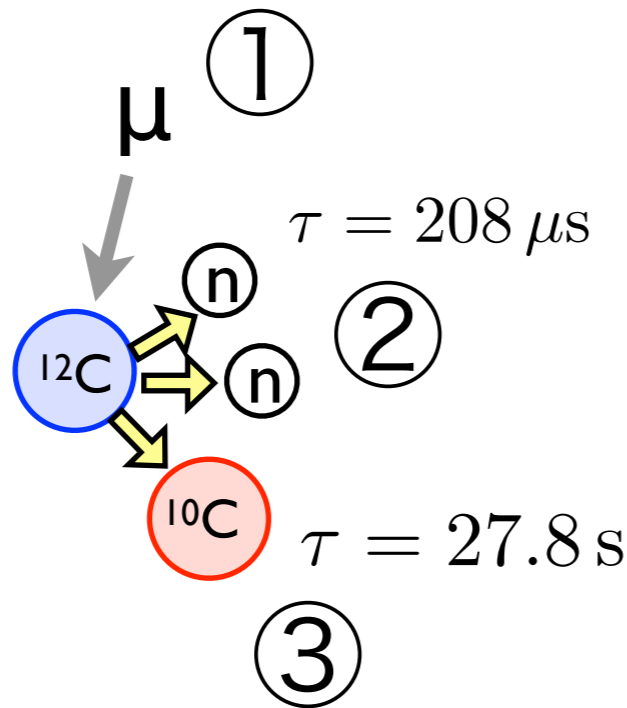
BG源の原発が停止中の
今がチャンス

地球始原隕石の
世界初特定

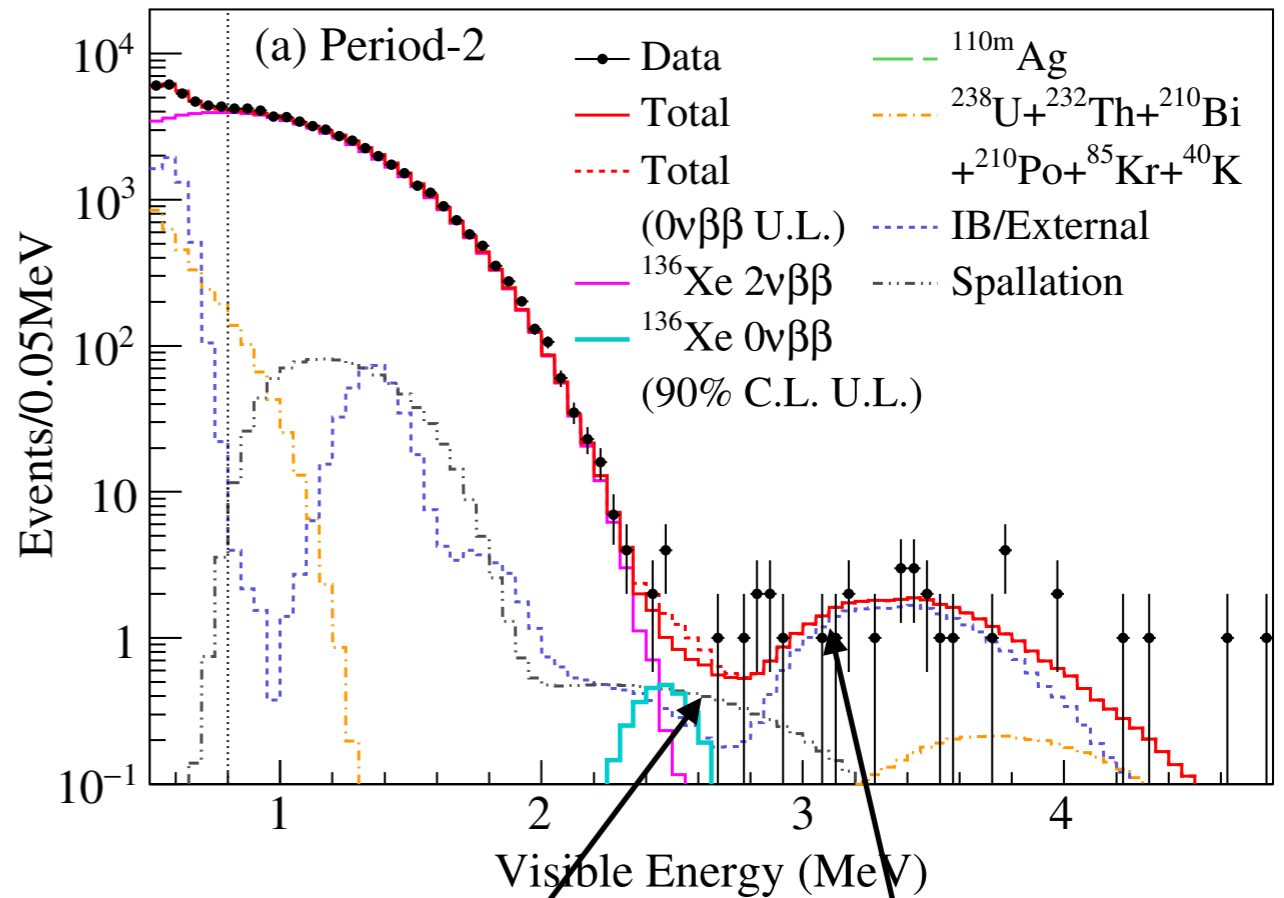
A01 ^{136}Xe 含有液体シンチレータ KamLAND-Zen 800



主要バックグラウンド



KamLAND-ZenでのBG状況

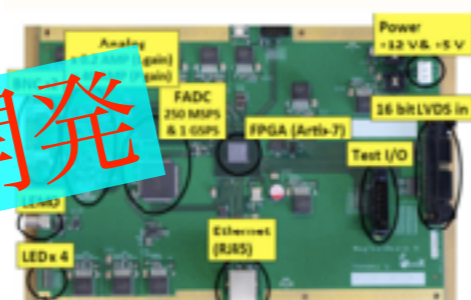


本年1月末
745kgで探索開始

^{10}C の除去 課題

1. 新型電子回路で除去率
64% → 99%
2. ニューラルネットワーク解析
50%除去

新電子回路開発



プロトタイプ電子回路

新しい電子回路で
99%除去する。

新学術での連携で
1/10に低減できた。
(これは低減前のデータ)

革新技术と基盤環境 シナジー

未来へのR&D環境整備

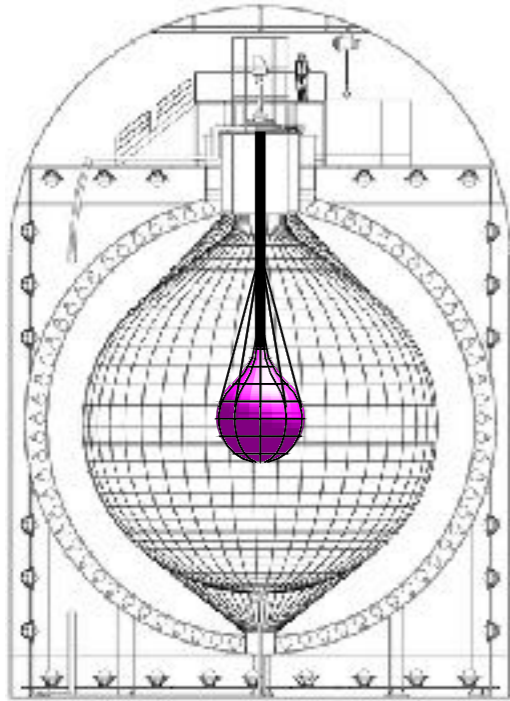
集光型、高量子効率PM管、大光量LS、低放射能スクリーニング

期間内目標

40meVを切る感度達成で理論モデル検証！
20meVを切るための開発も実施！

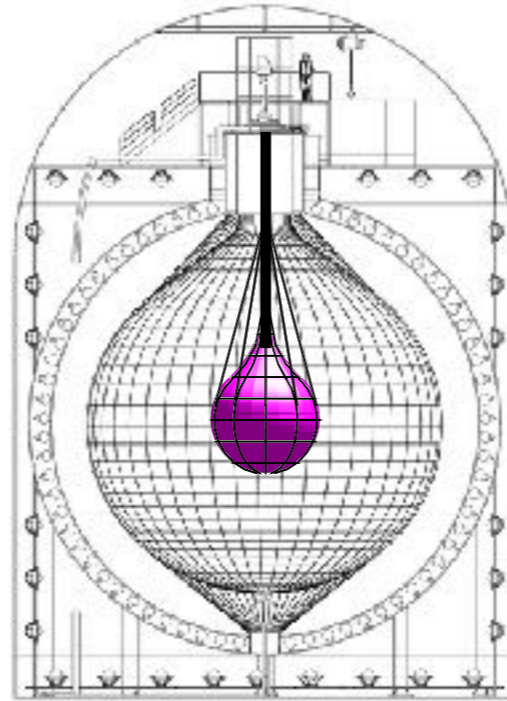
40meV到達

KamLAND-Zen 400



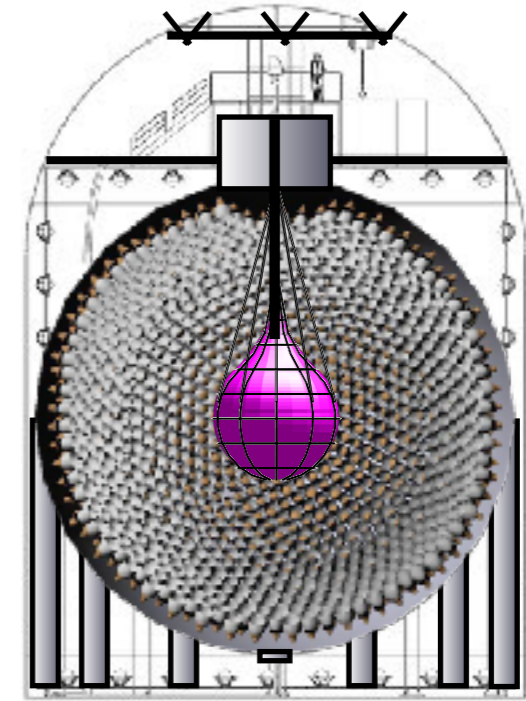
380kgを導入
世界トップの性能

KamLAND-Zen 800



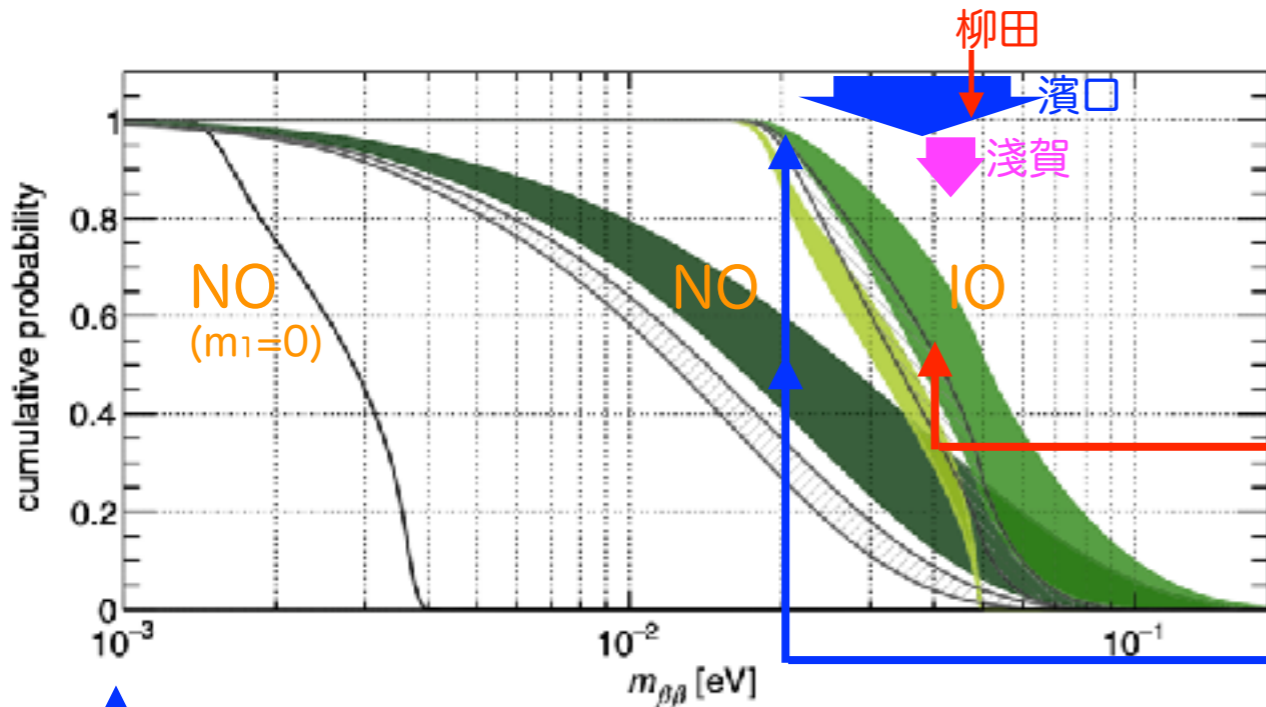
現在,745kg を導入
目標 40meV

KamLAND2-Zen



高分解能化 将来計画
目標 20meV

集光ミラー }
HQE-PMT } 5倍
新LS } 光量
蛍光ミニバルーン



パラメータ空間の探索割合

40meV 逆階層の50%

**20meV 逆階層の95%
さらに順階層の50%**

↑ 1meV
ざっくり100トン欲しい

PRD96,053001 (2017)

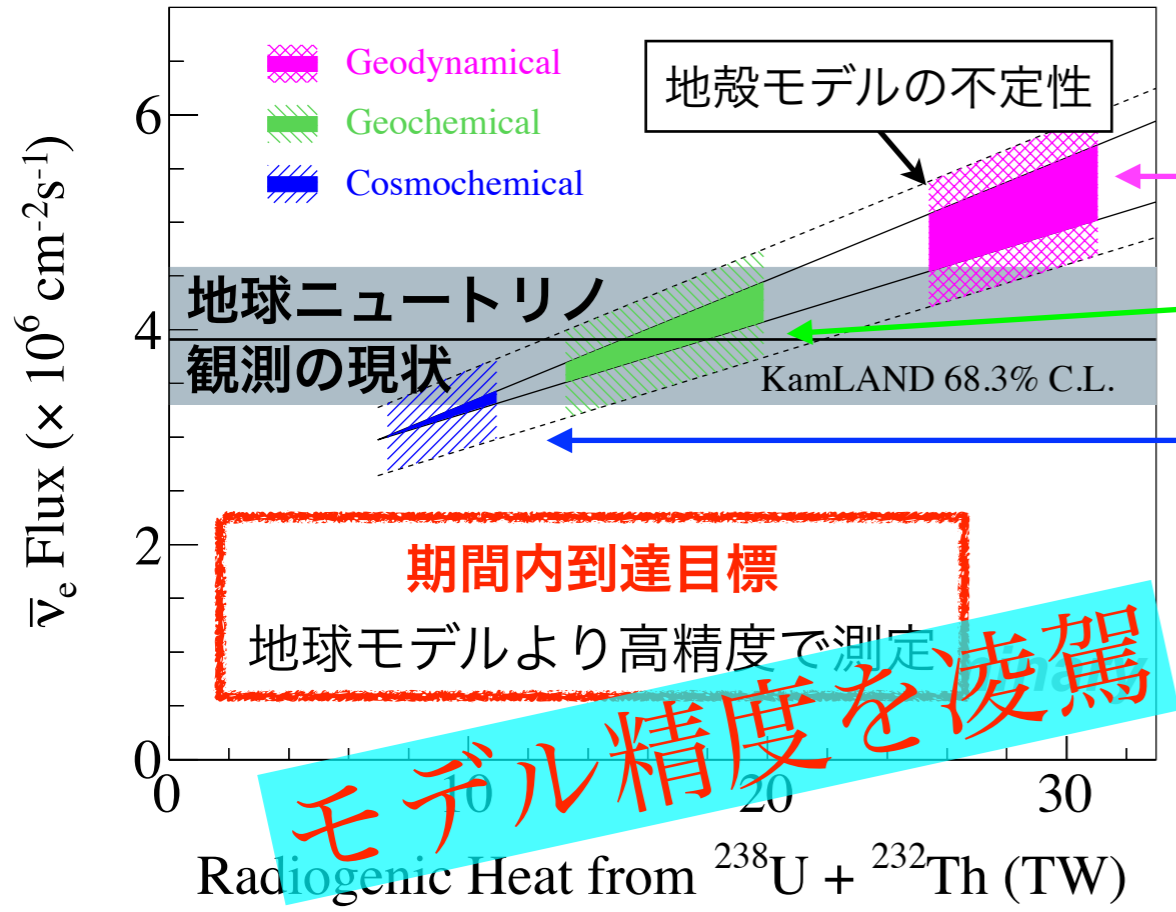
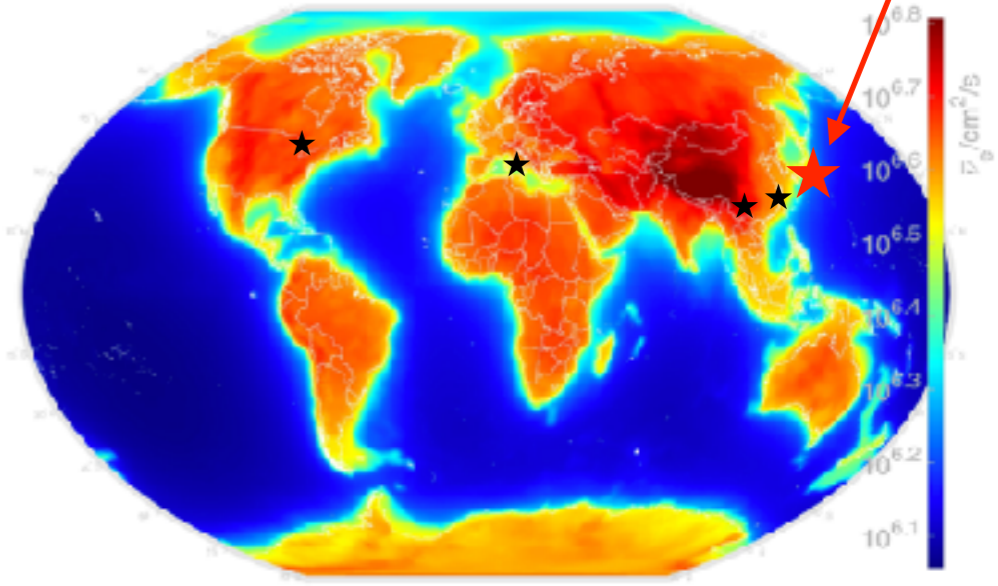
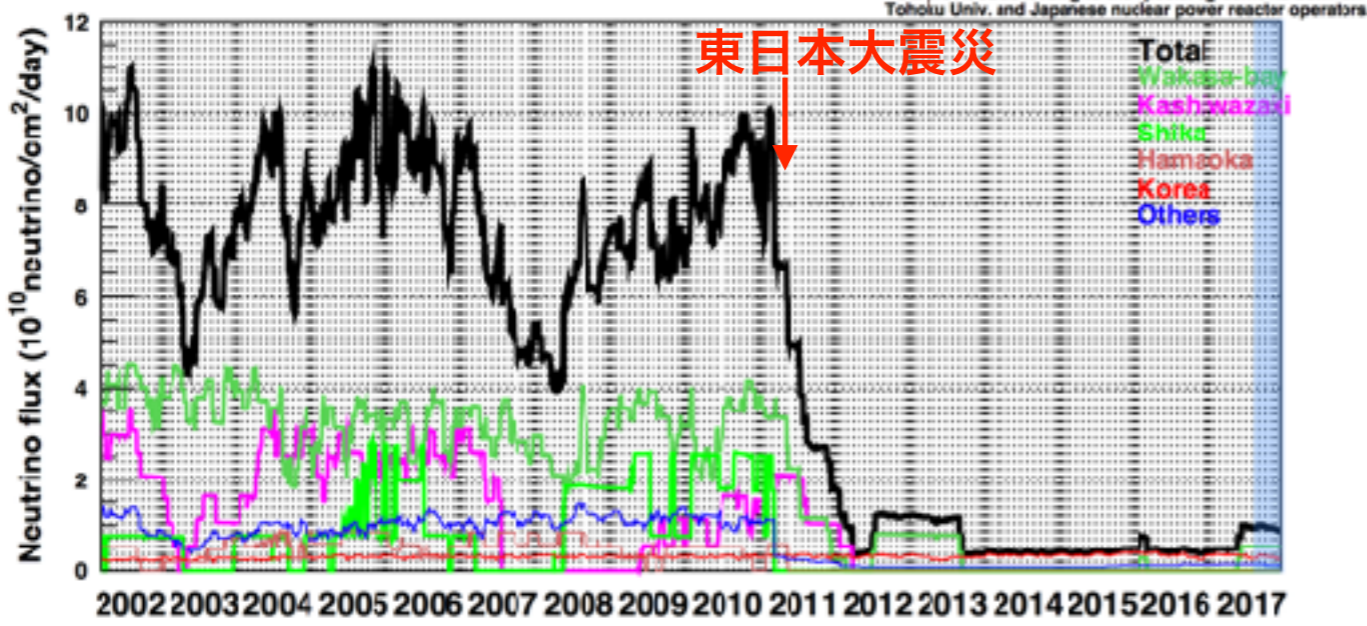
地球ニュートリノ観測

今後も 地球ニュートリノ観測ネットワークで最重要

唯一大陸プレートの端

原子炉νフラックス

BG源となる原子炉の運転状況



マントル対流の謎

地球物理モデルは
一層対流
他の地球化学モデルは
多層対流

地球始源隕石の謎

元素比の一致する
C1コンドライト
(地球化学モデル)
同位体比の一致する
エンスタタイト
コンドライト
(地球化学モデル)

長く論争の続く
地球の始源隕石やマントル対流
を地球ν観測で解明できる!!!

Backgrounds (R<157 cm)

Zen 800 ROI: $2.35 \text{ MeV} < E < 2.70 \text{ MeV}$,
 $0\nu\beta\beta$ efficiency $\sim 90\%$

(Gando @TAUP2019)

Source: $2\nu\beta\beta$
 Radioactive impurities: Xe-LS, IB and outer-LS
 Cosmogenic: muon-spallation Solar neutrino ES

$2\nu\beta\beta$ tail due to energy resolution

Most dominant & inevitable BG

$\Delta E \sim 4.5\% @ 2.45 \text{ MeV} \sim 5.1 \text{ events/ROI}$

^{214}Bi from IB film

Vertex resolution $\sim 15 \text{ cm}/\sqrt{E(\text{MeV})}$

Limit sensitive region to $0\nu\beta\beta$ decay.

$\sim 0.9 \text{ events/ROI}$

^{12}C spallation products

Significantly reduced by new analysis methods

$\sim 0.2 \text{ events/ROI}$

Solar neutrino electron scattering + C.C. (^{136}Cs)

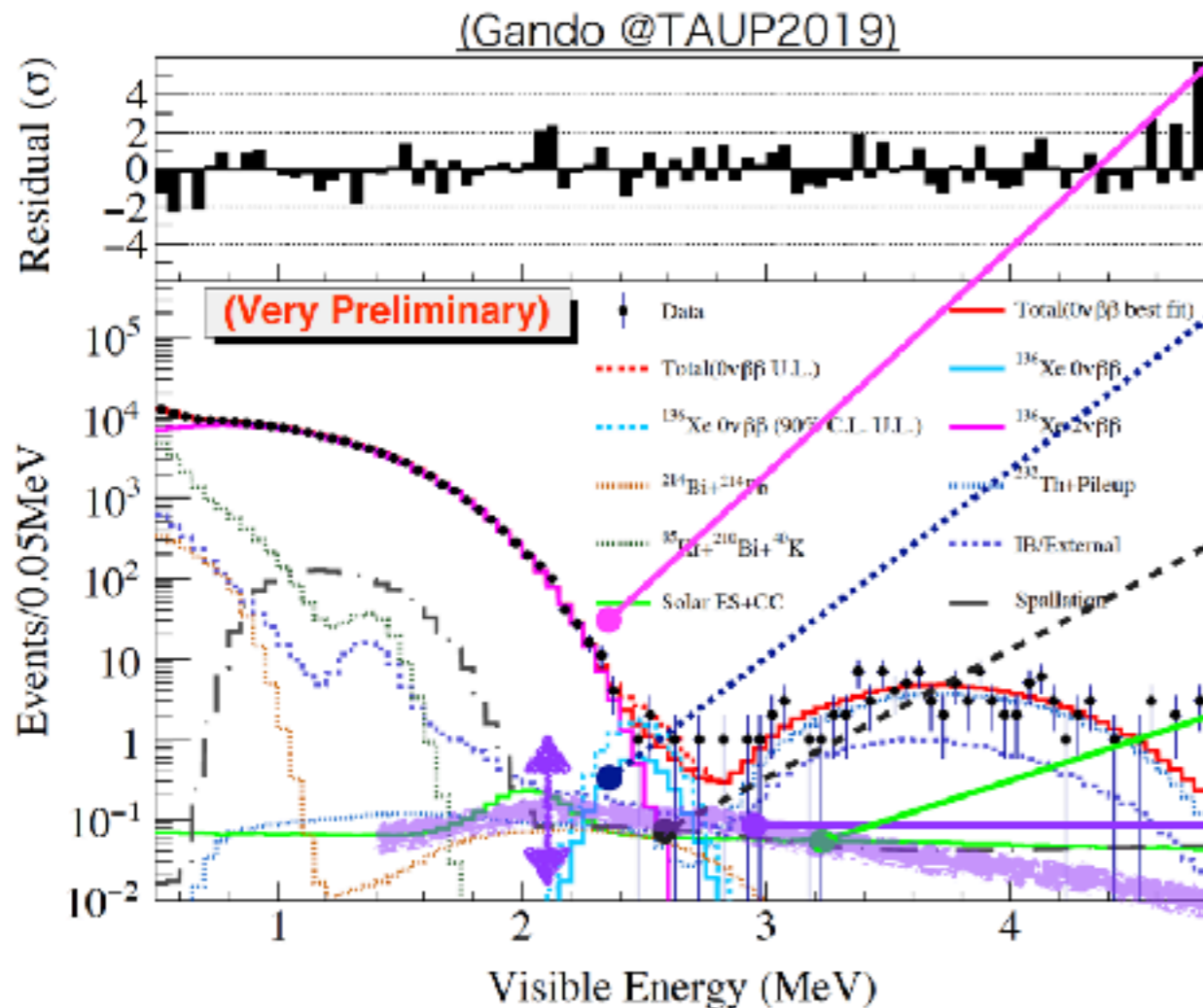
Inevitable BG

$\sim 0.4 \text{ events/ROI}$

^{136}Xe spallation products

Nuisance BG in Zen800

Hard to reject because of their long-lives



Ozaki @ Neutrino Telescope 2021

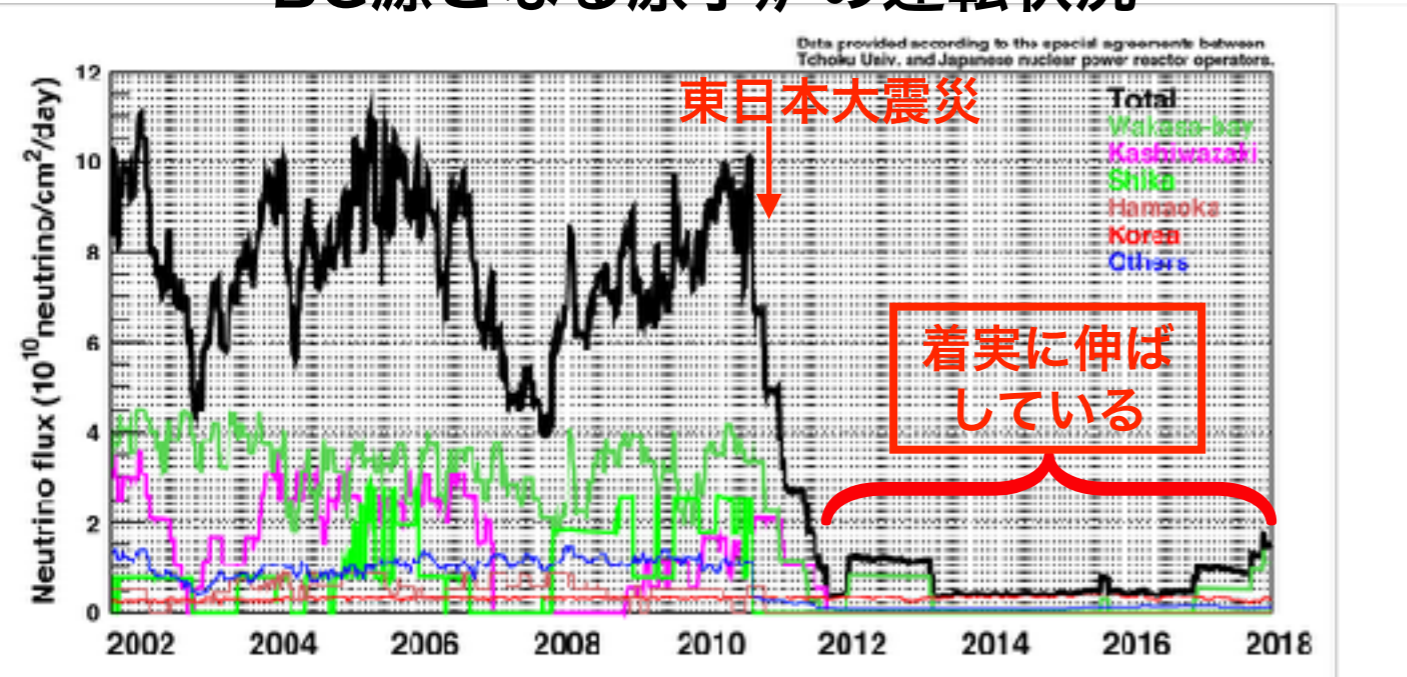
^{12}C 以外の原子核破砕の理解を進めないといけない。

PMTの故障頻度が高いため、位置・エネルギー再構成プログラムの最適化が必要。

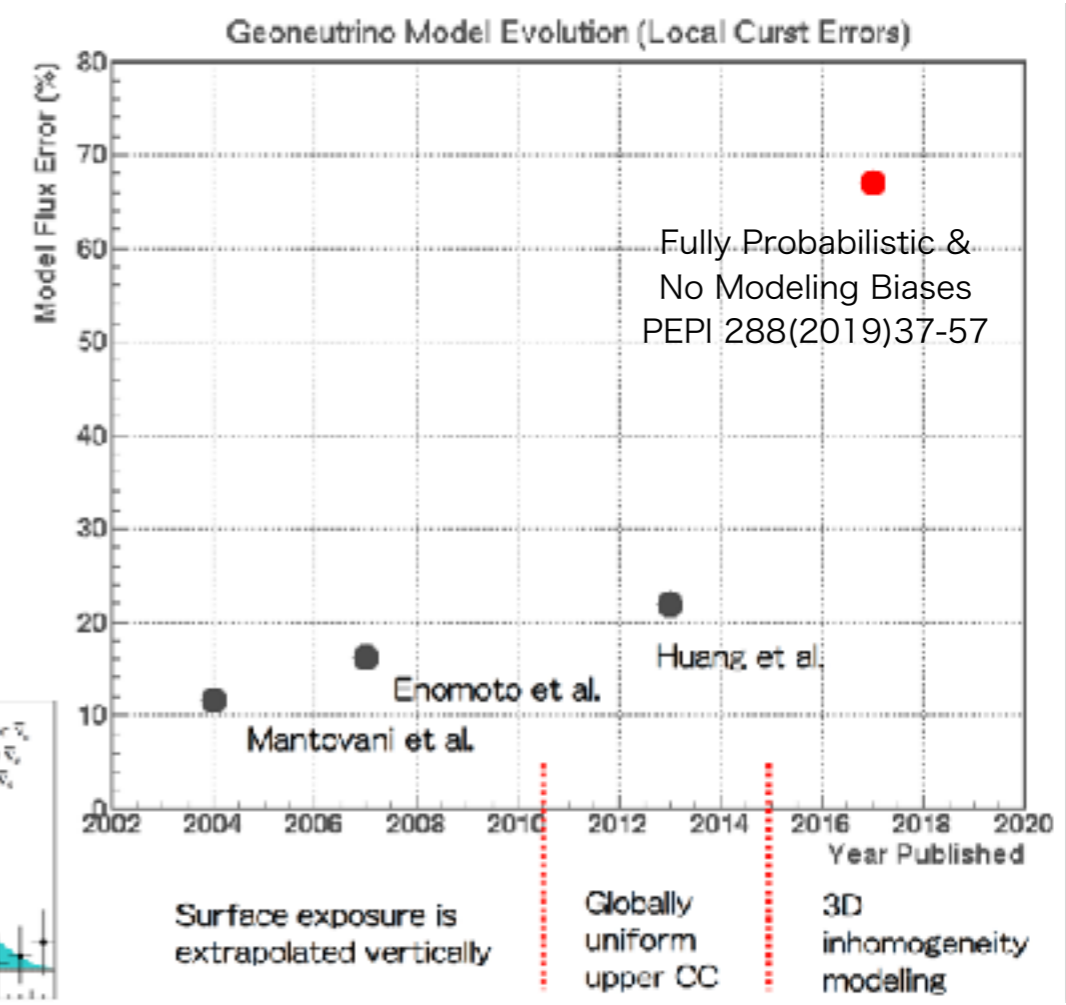
そうこうしているうちにTAUP2019の3倍超のデータが蓄積されている。

地球ニュートリノ観測

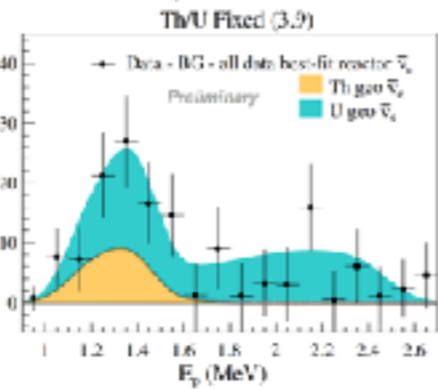
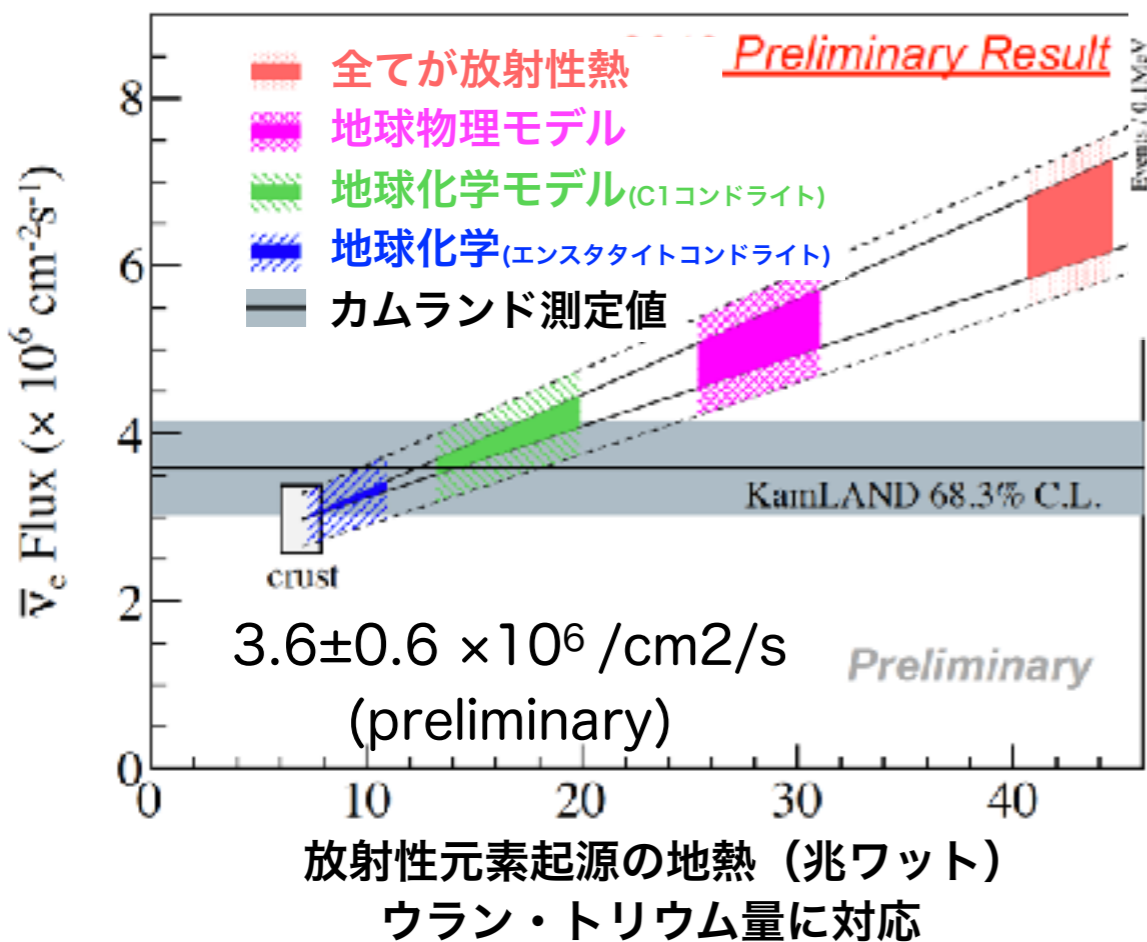
BG源となる原子炉の運転状況



モデル精度



Watanabe @Neutrino Geoscience 2019



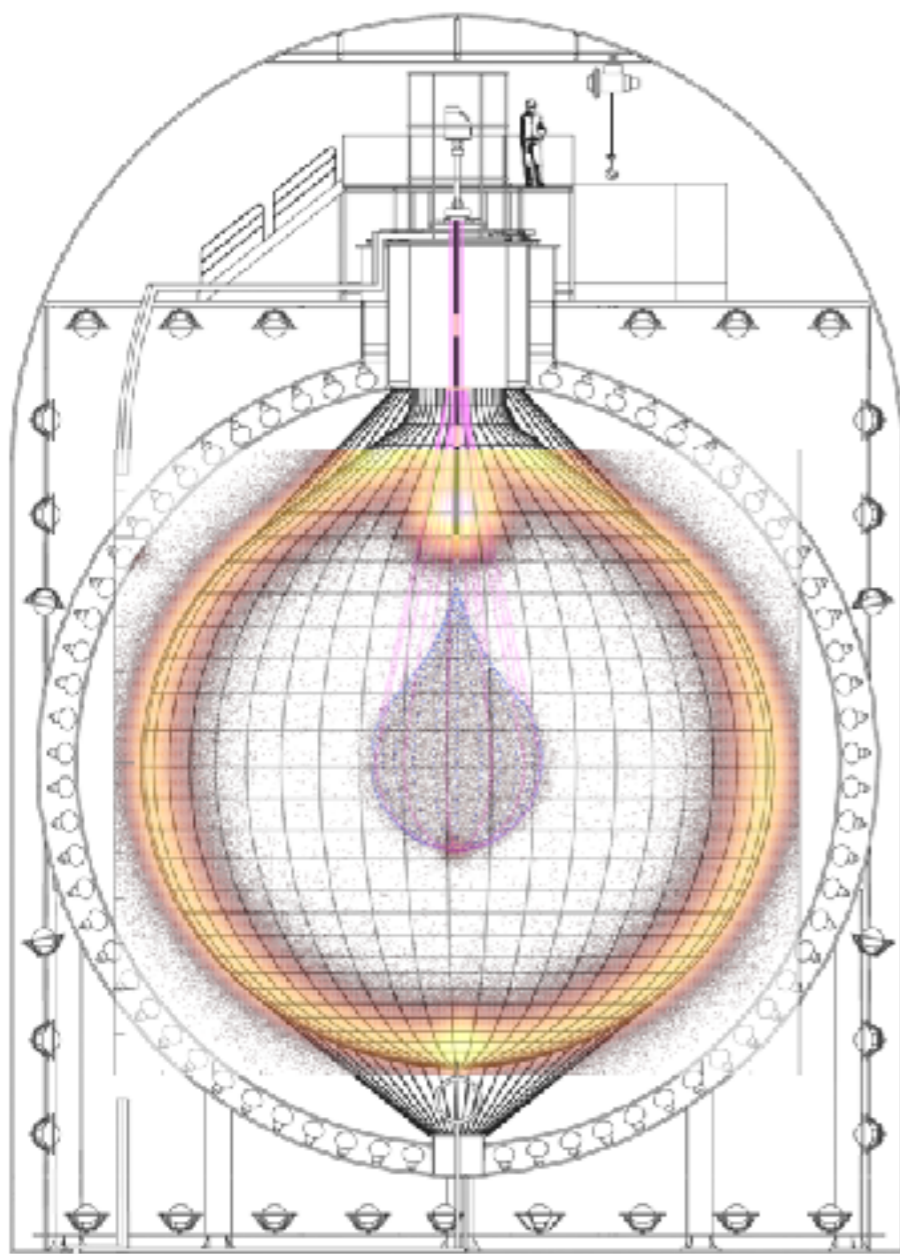
15.6%の誤差はモデル精度を凌駕
モデルの改善も必要
(目標達成)

地球内原子炉の探索
超長基線ニュートリノ振動研究も進行中

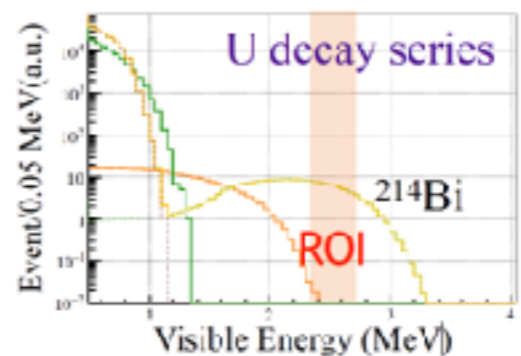
現状報告

放射性不純物

KamLAND-Zen 800
での反応点分布



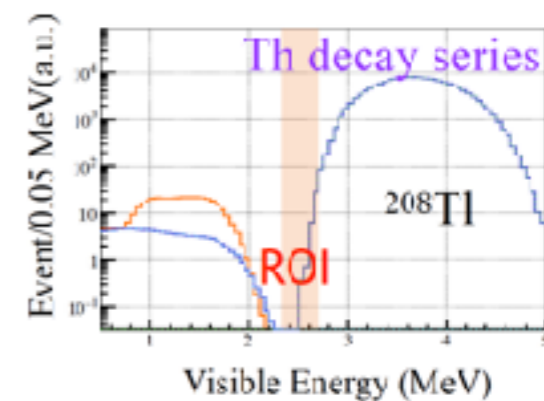
(1.0 MeV-3.0 MeV Singles)



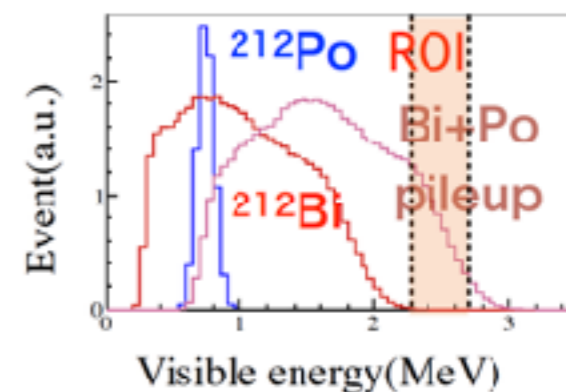
ミニバルーン以外
214Bi-214Po計測で十分低減



蛍光ミニバルーン (将来)

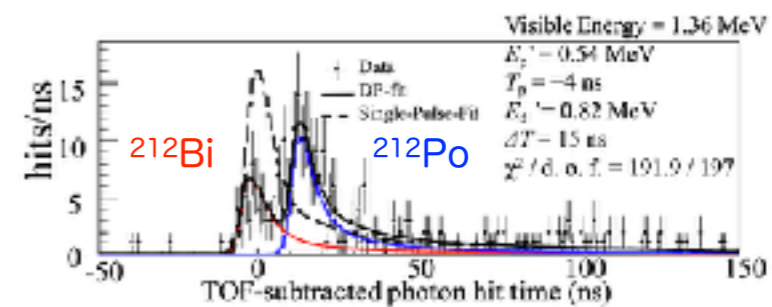
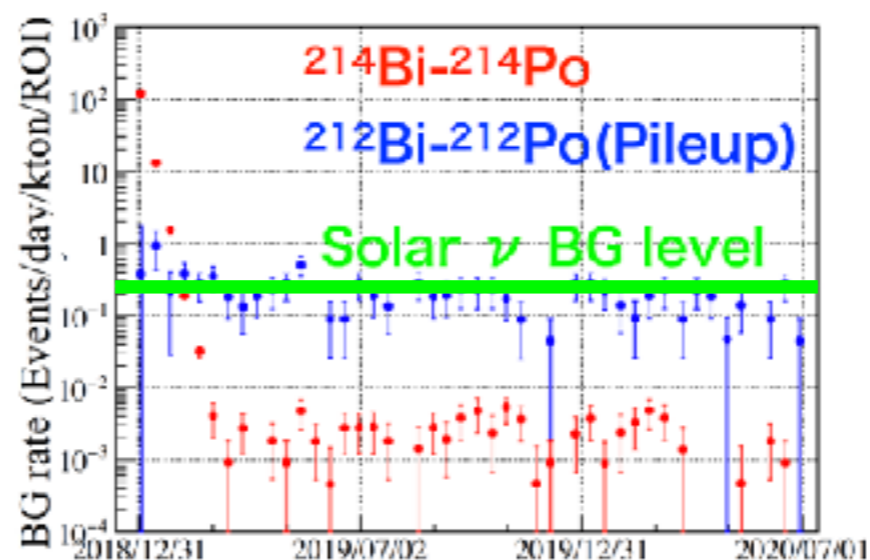


212Bi-212Poは時間差が短い



10ns以上は判別可能

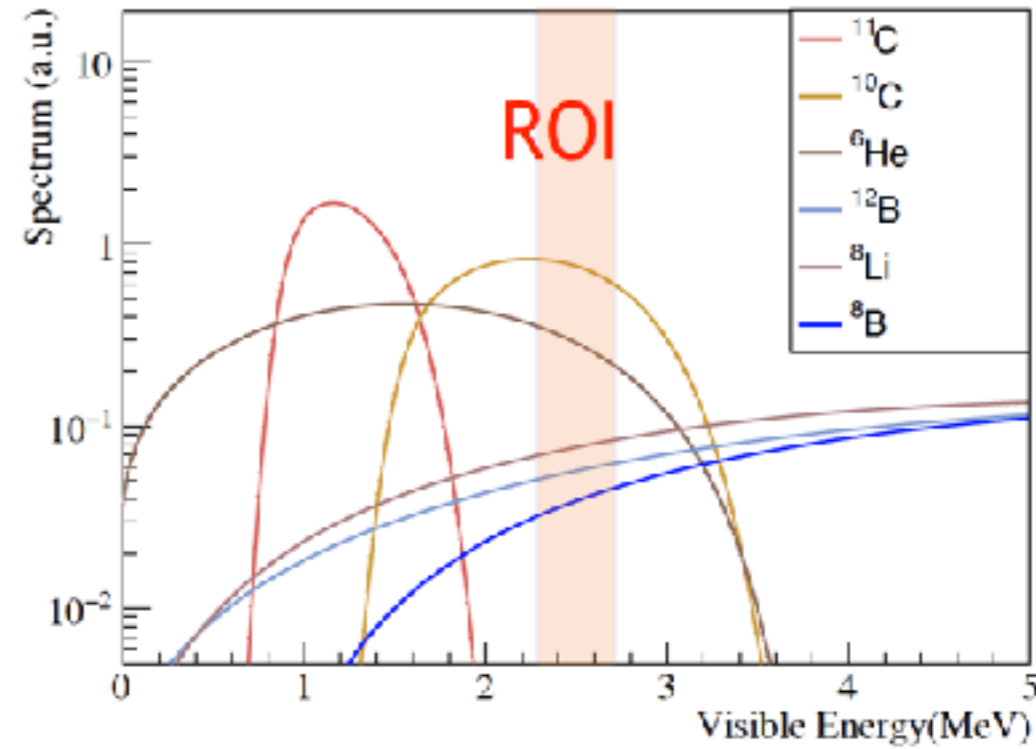
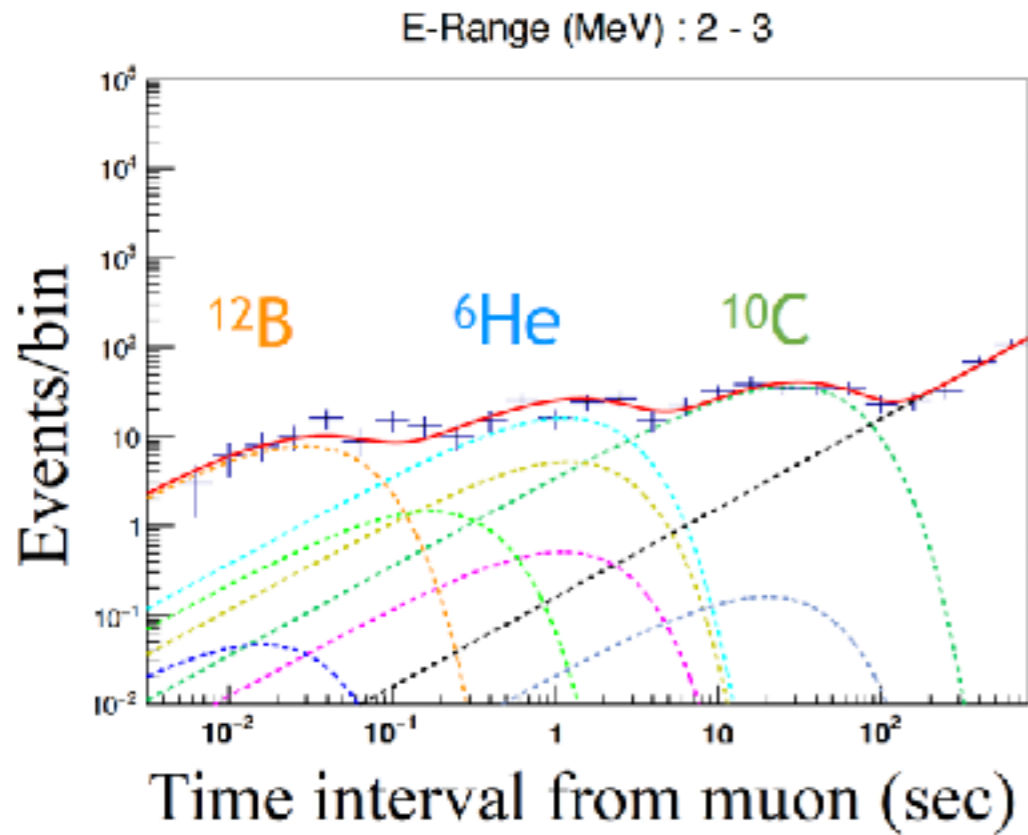
放射性不純物の影響は太陽ニュートリノ以下に抑えている



ニューラルネット (進行中)

宇宙線による原子核破碎

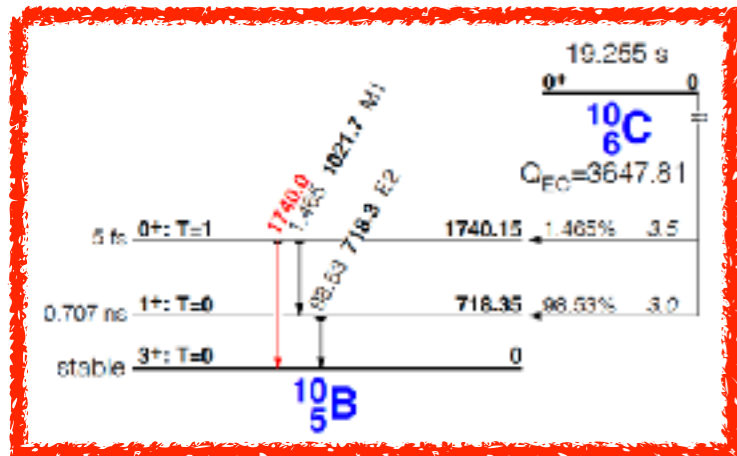
^{12}C 破碎はKamLAND全体を使って測定可能



半減期
 ^{11}C 20.39 min
 ^{10}C 19.255 s
 ^6He 806.7 ms
 ^{12}B 20.20 ms
 ^8Li 838 ms
 ^8B 770 ms

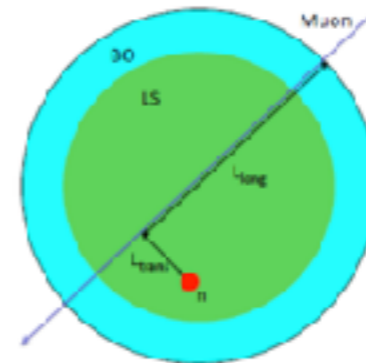
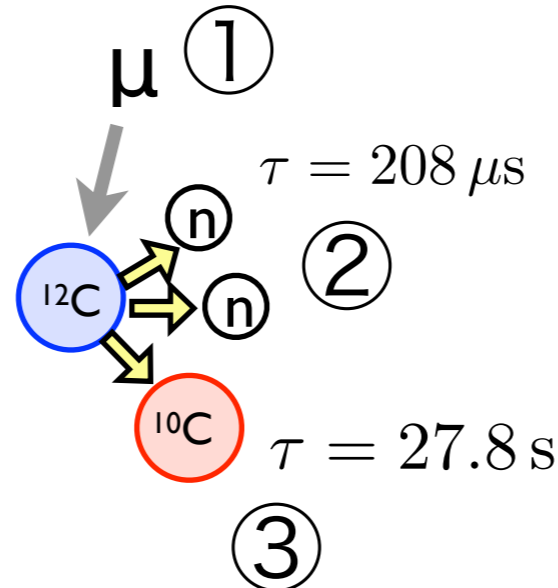
^{10}C

$T_{1/2} = 19\text{ s}$

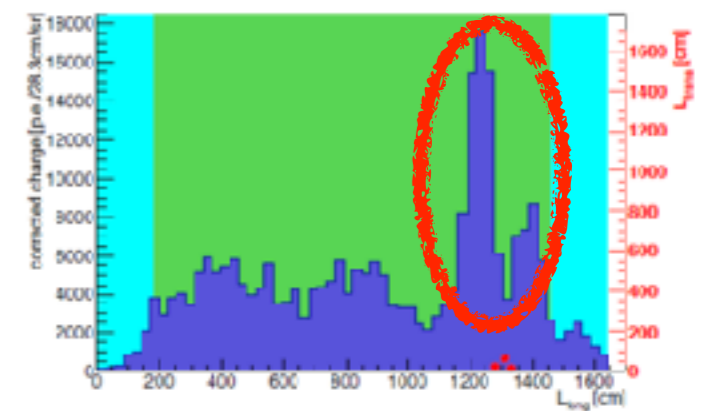


○中性子タグ

○シャワータグ (低中性子捕獲率でも可)



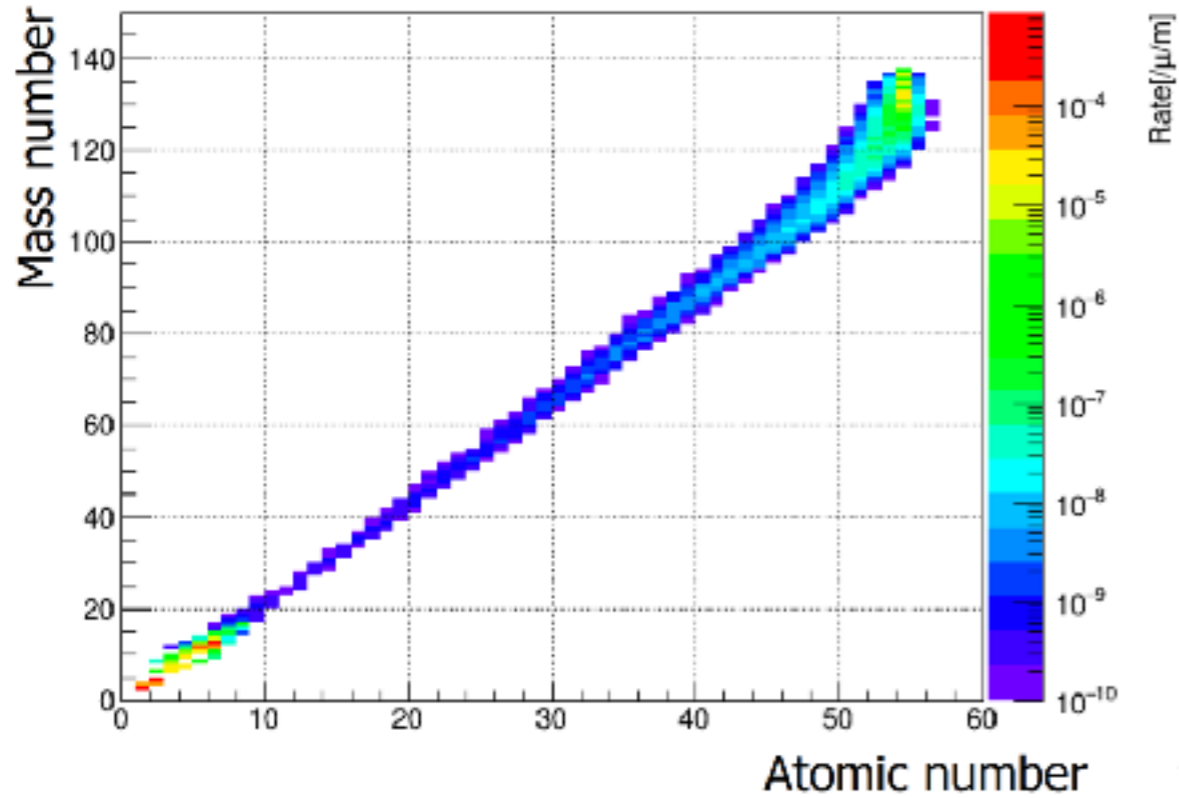
トラックに沿った発光量



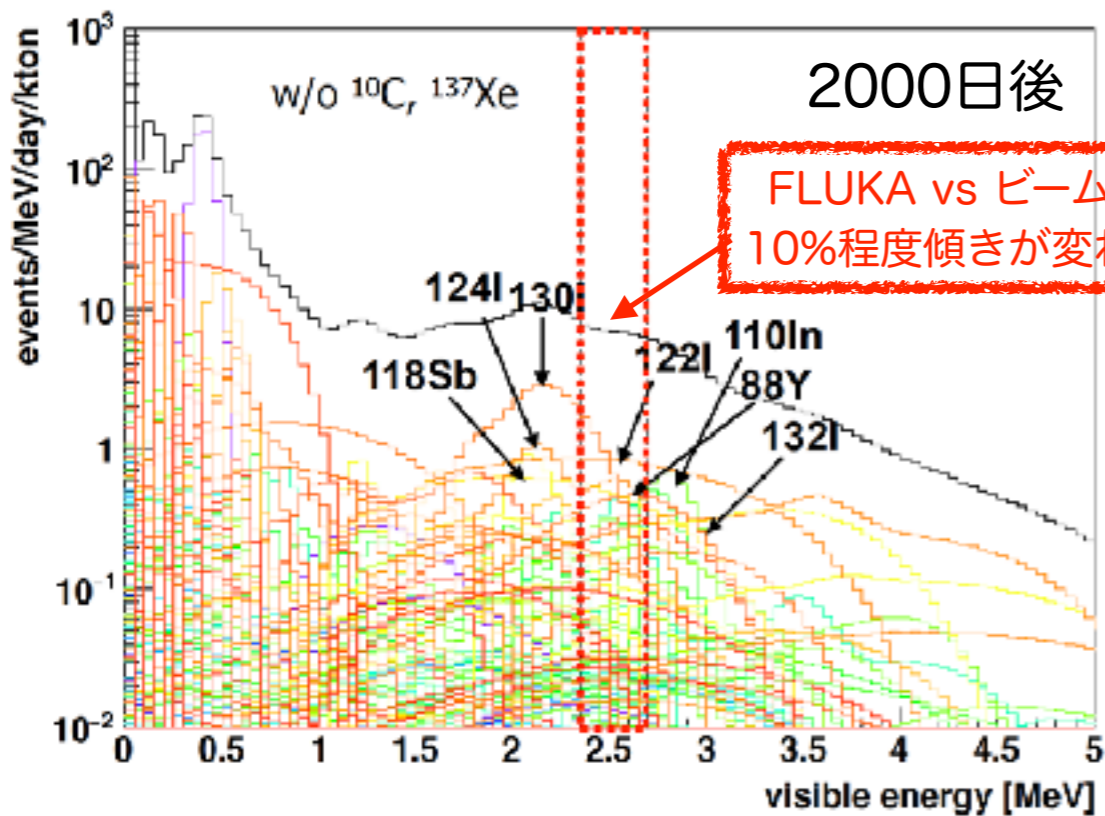
○ニューラルネット (r 全般に有効)

^{136}Xe 標的は情報不足

Xeの核破砕生成 (FLUKA)

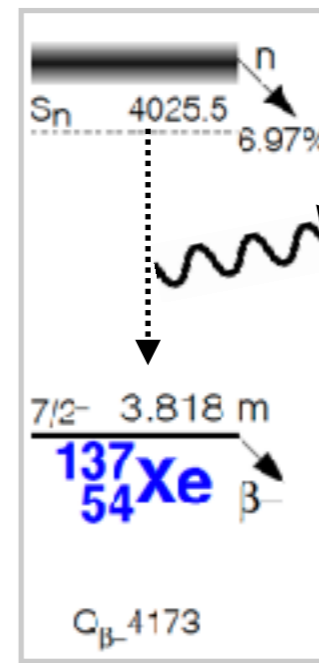


GEANT+ENSDF でシミュレーション



ほとんどは γ を伴う (ニューラルネットが有効)

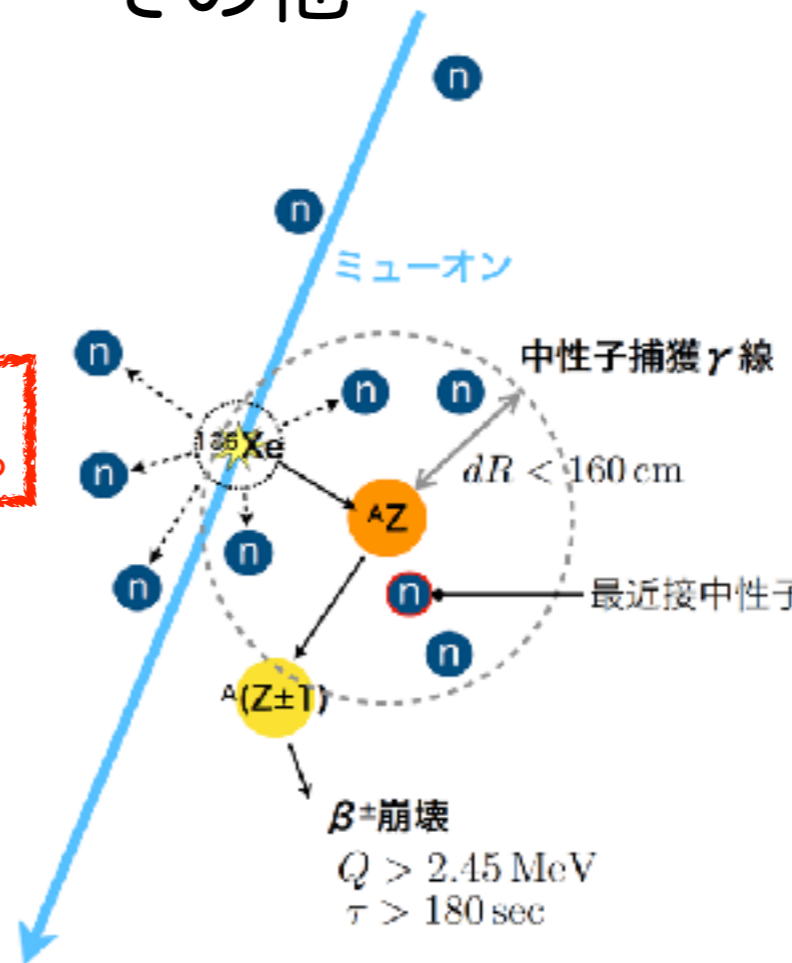
^{137}Xe



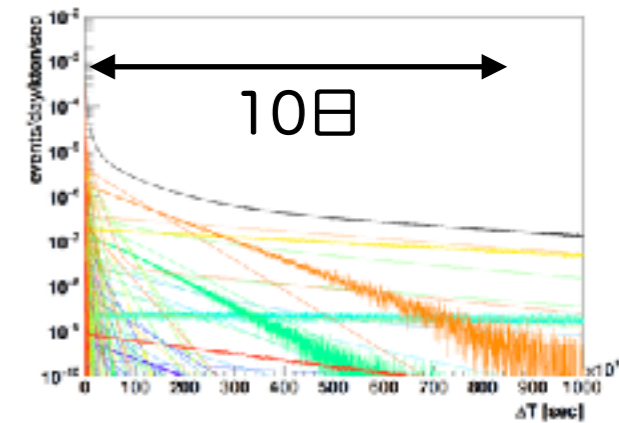
4MeVの特徴的な中性子捕獲 γ による識別

Q値4.2MeV

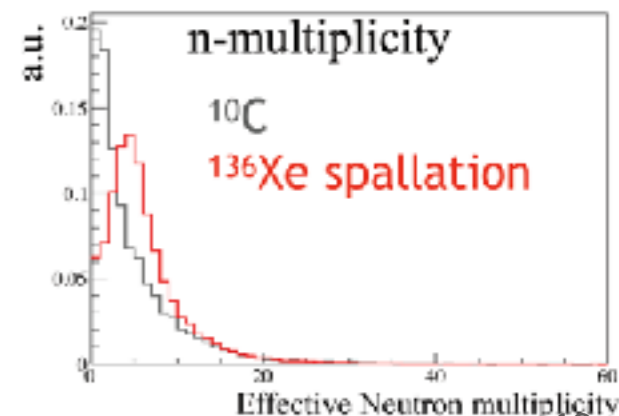
その他



寿命が長い



中性子多重度が有効



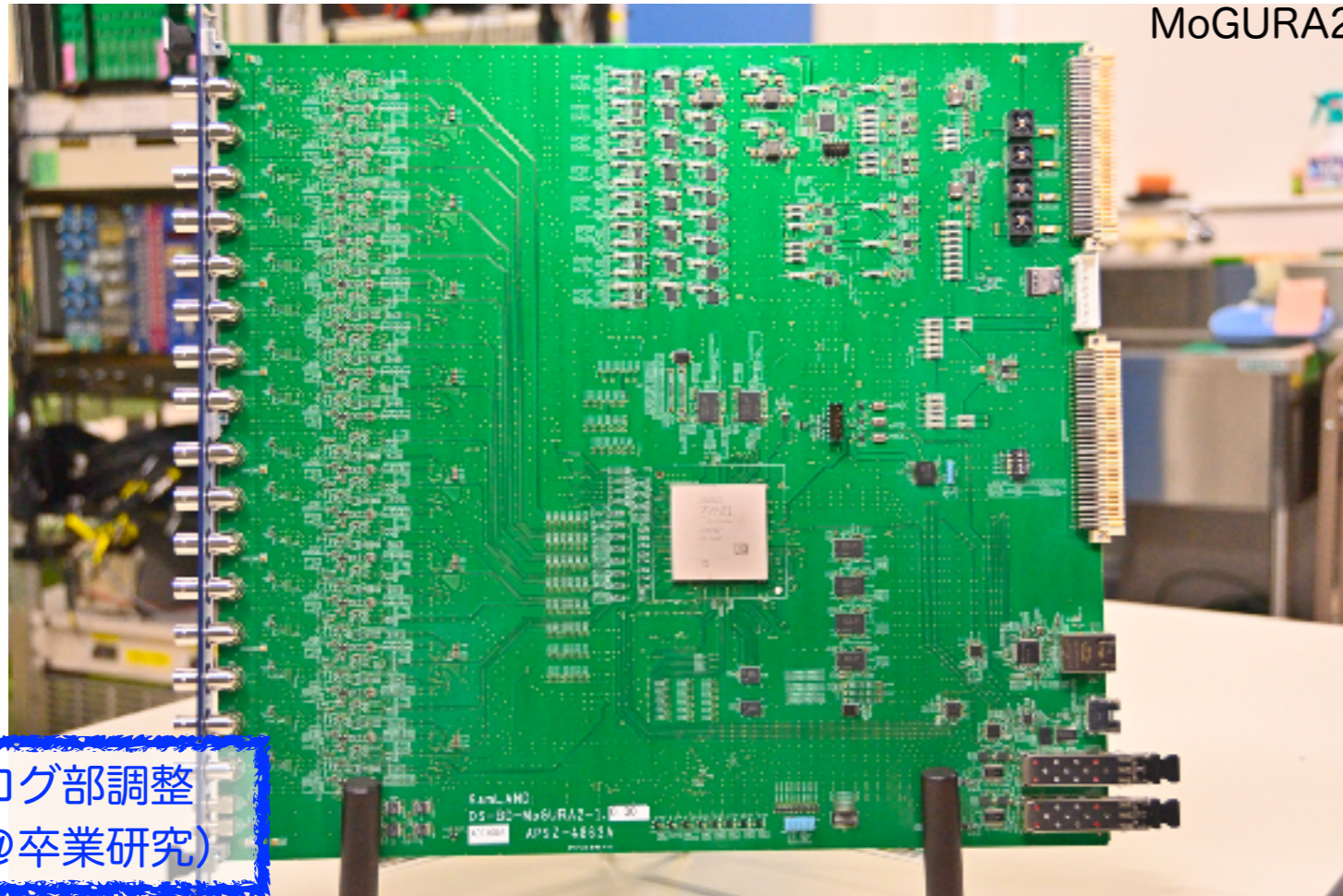
中性子捕獲率の向上 (新型電子回路の開発状況)

2002- KAMFEE



Full-size prototype delivered in September 2020

2010- MoGURA

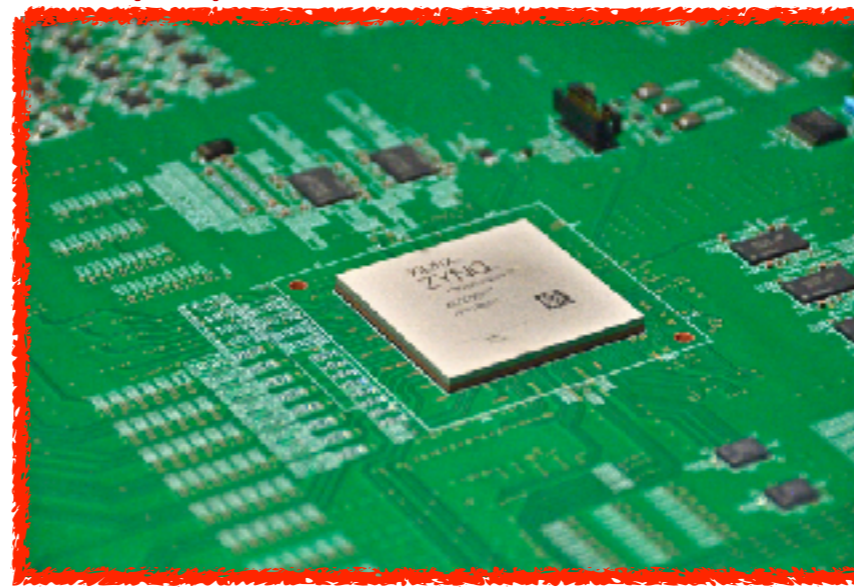


MoGURA2

アナログ部調整
(中畑@卒業研究)

- H-gain for 1p.e.
 - 1GS/s, 12bit
 - (2GS/s and averaging)
 - V_{in} : -150mV - +50mV
 - V_{noise} : <0.12mVrms
 - BW: < 65-100MHz
- L-gain for muon
 - 250MS/s, 16bit
 - V_{in} : -7.5V - +0.5V
 - V_{noise} : <1.2mVrms
 - BW: < 65-100MHz

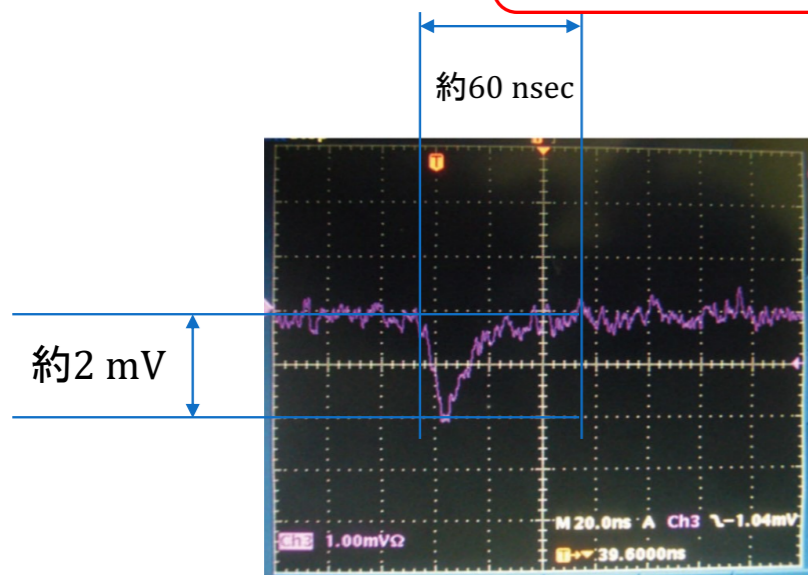
Xilinx Zynq®Ultrascale+™ RFSoc を使用



16ch×1GS/s×12bit

① “ソフトウェアトリガー”対応

25 kHz パルスの恒常取得

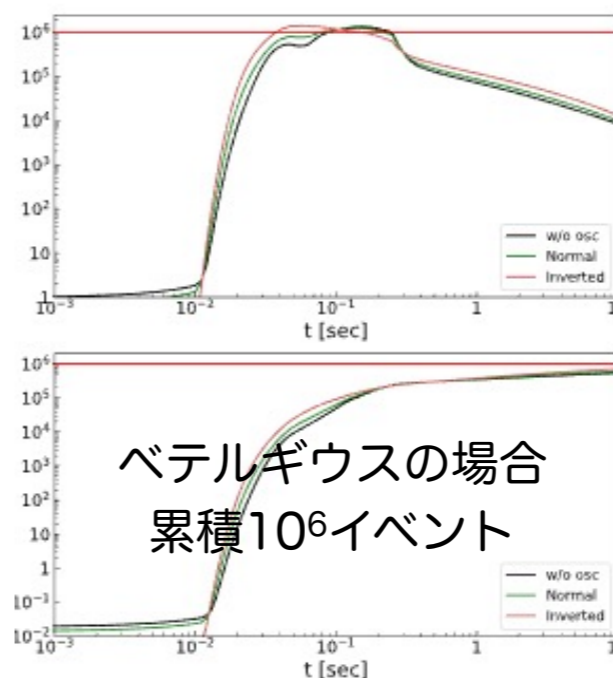


典型的な1 p.e.信号

目標の19
倍のスループ
ット

③ Nearby SN完全対応

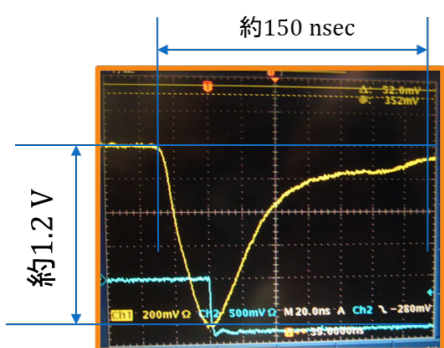
1 MHz パルスを1秒以上取得



目標の1.1倍
の記録時間

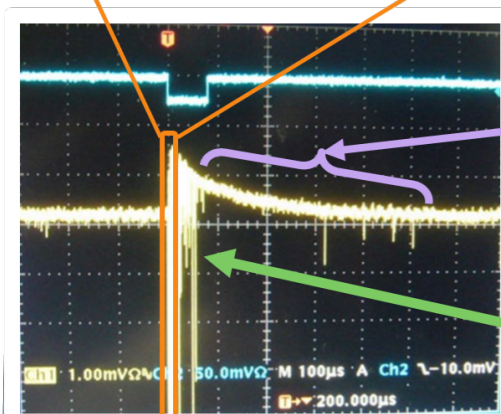
② ミューオン直後の波形記録

10 μsec以上の波形記録

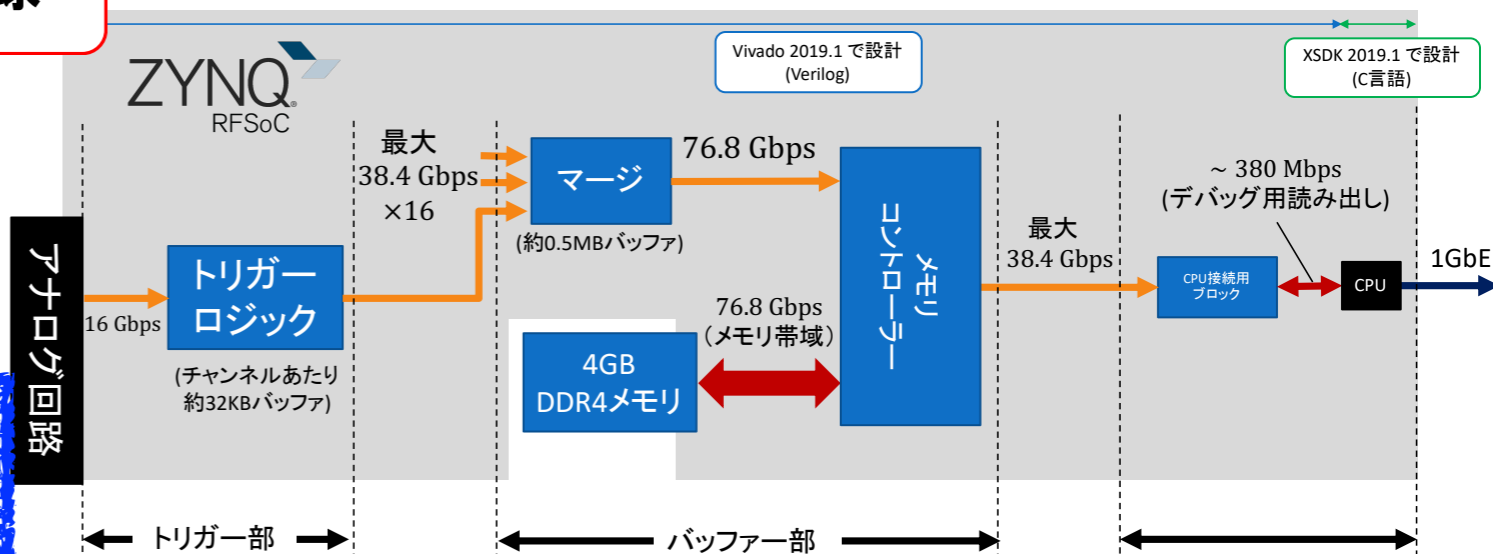


目標の3倍
の波形記録

ソフトウェアトリガー
用のDigital BLRを使っ
た高速ヒット判定
(二木@卒業研究)



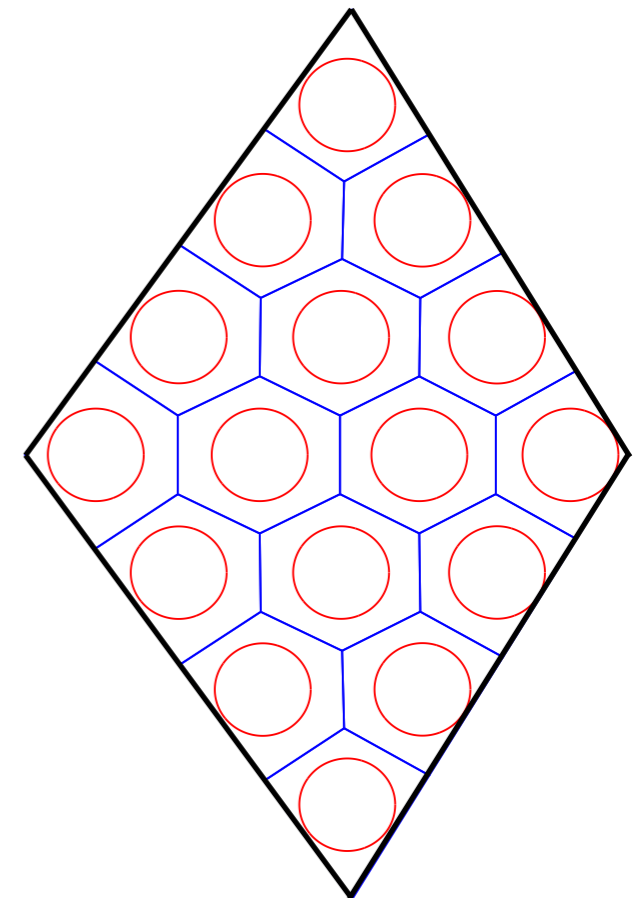
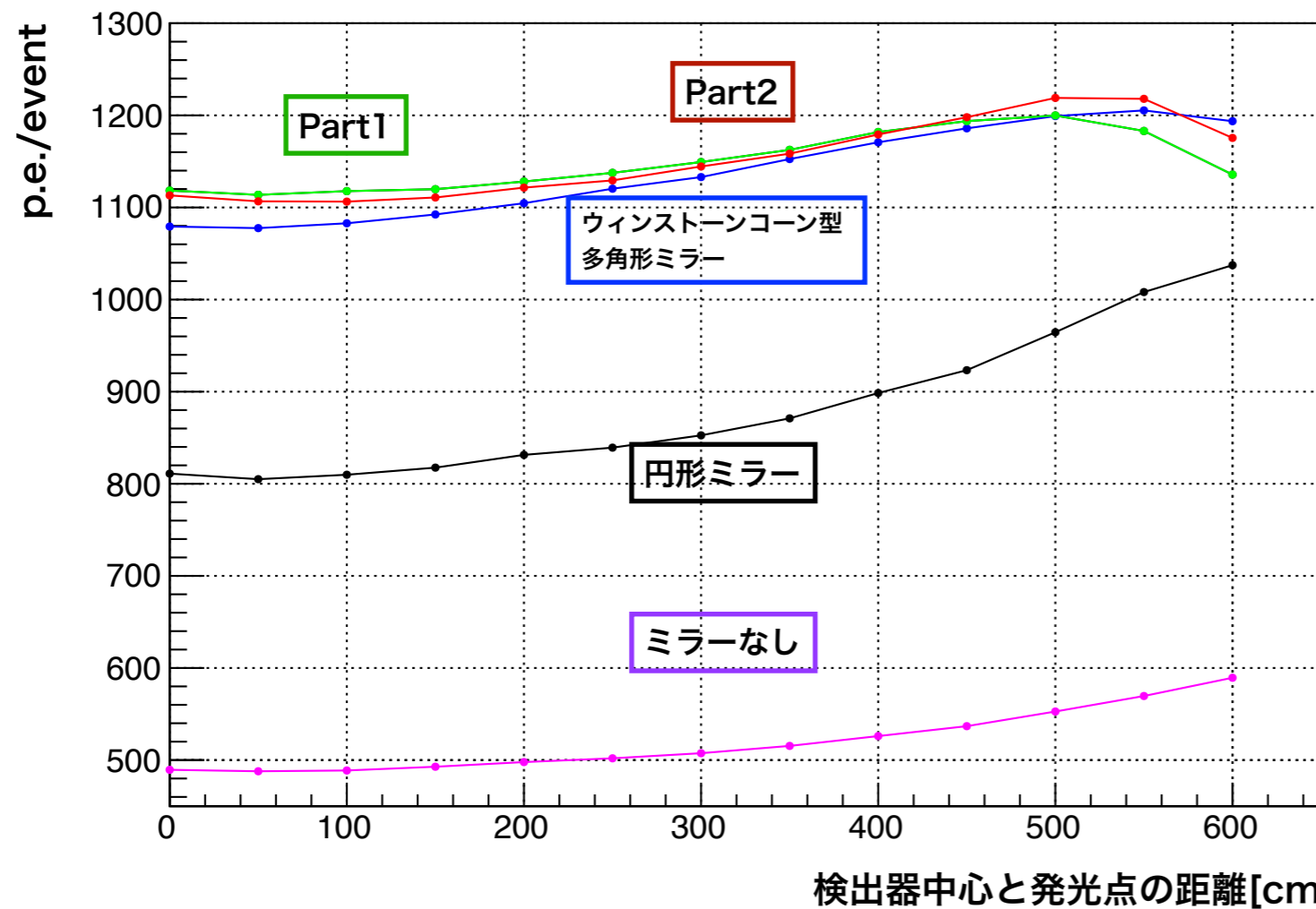
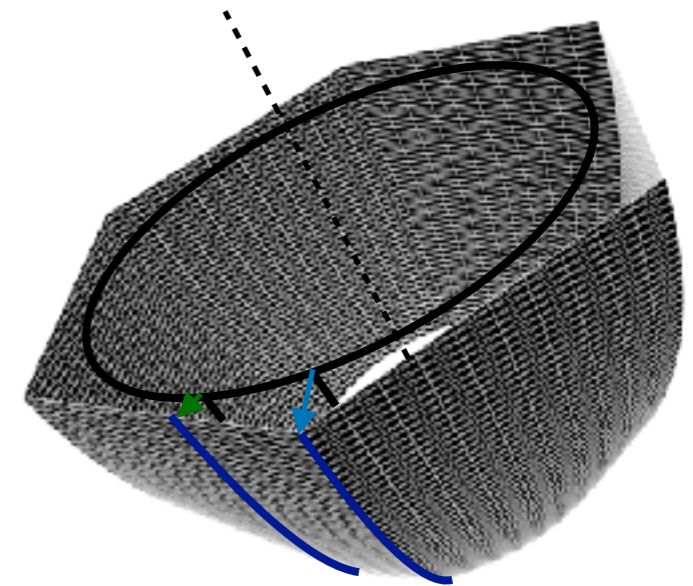
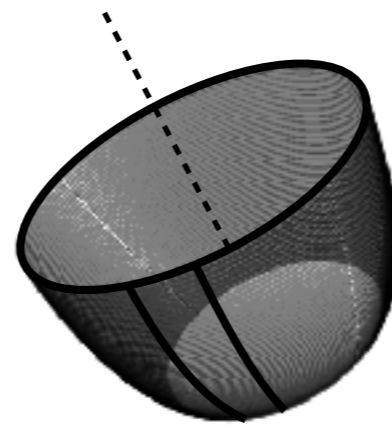
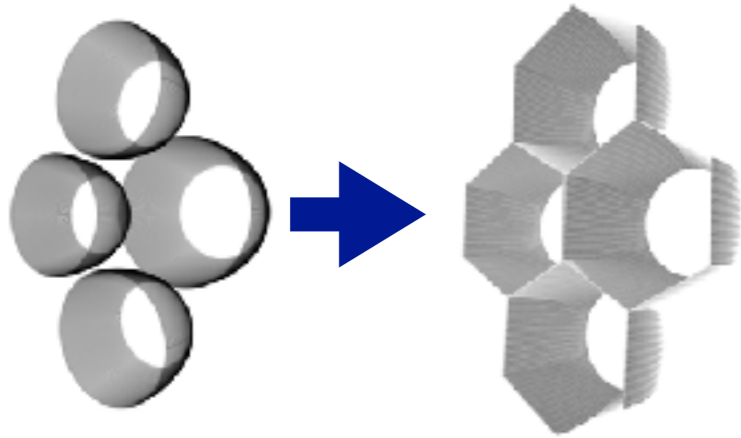
ファームウェアを作成



モジュール間はAMBA®AXI4プロトコルで接続

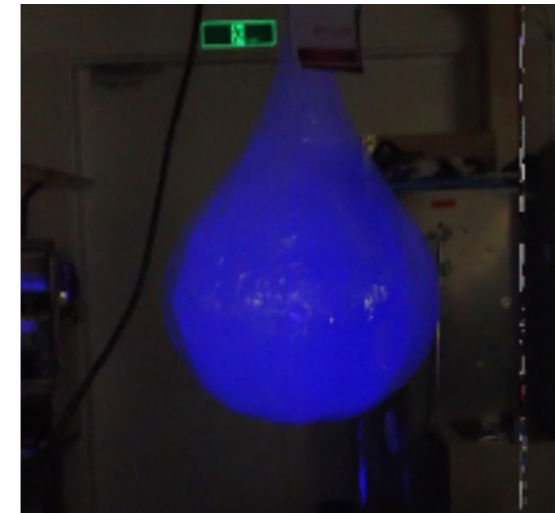
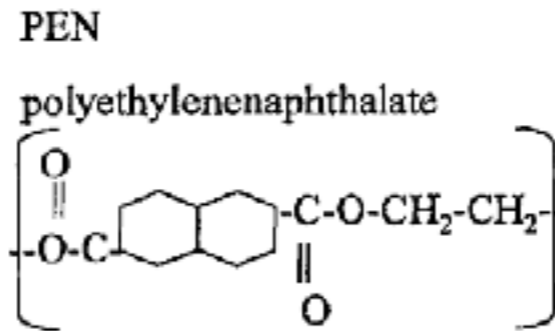
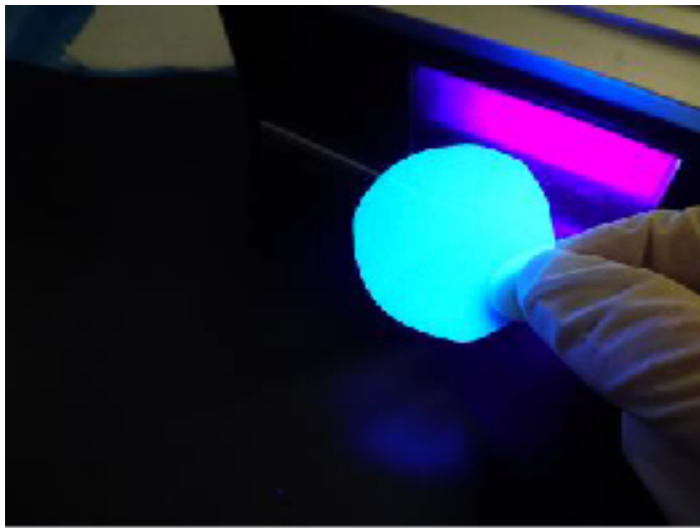
エネルギー分解能の向上 三本杉@修士論文

円形ミラーでは隙間ができるので、
多角形で最適化

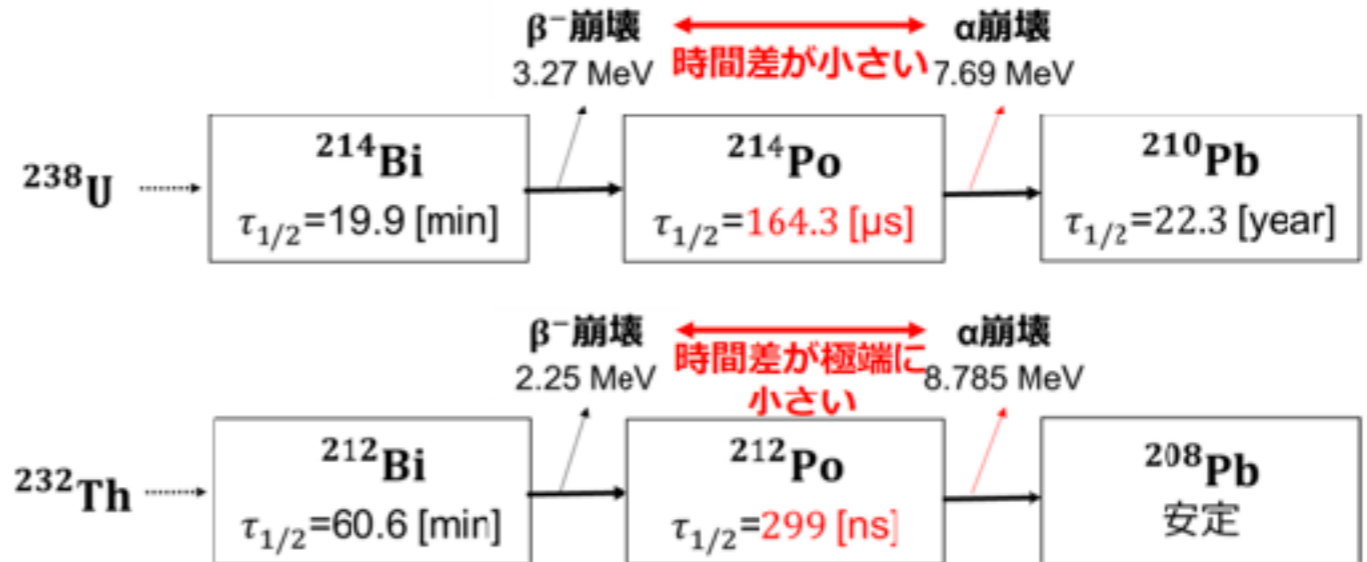
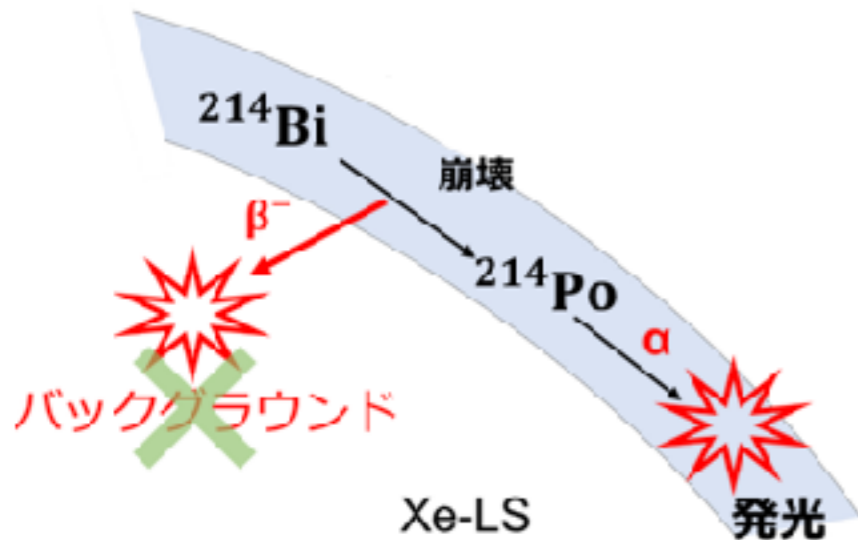


ミラーなしと比べて2.2~2.3倍の集光量

ミニバルーンの ^{214}Bi 低減 (蛍光ミニバルーン開発) 中村 (陸) @修士論文

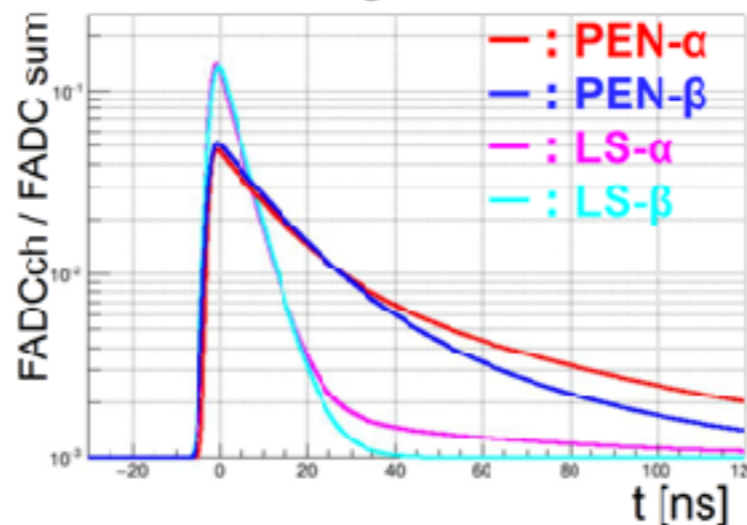
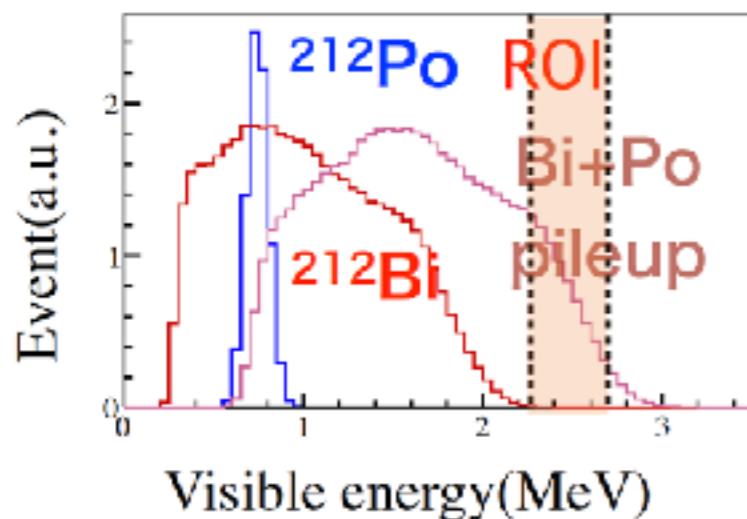


テストバルーンも作成できた

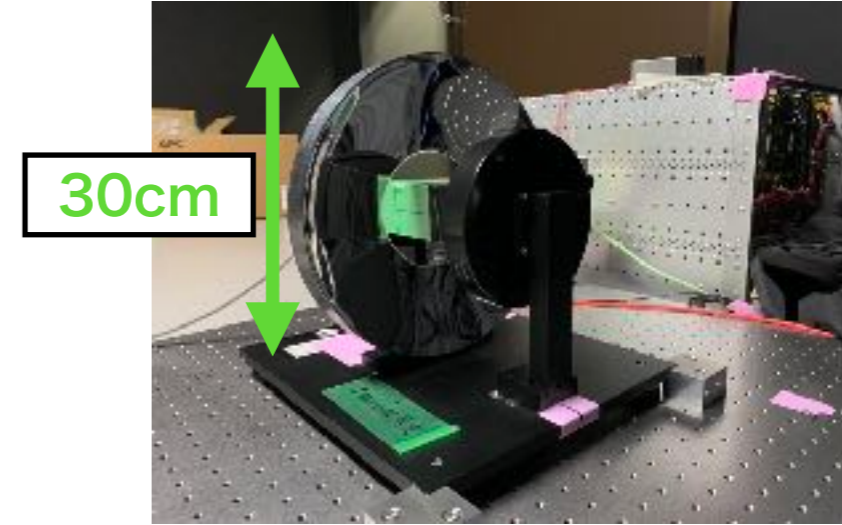


新たなBG

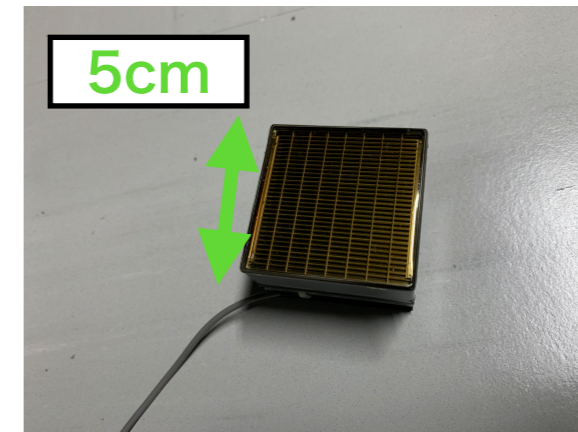
PENの発光時定数 **Log scale**



212Bi-PiパイルアップはPENの長い時定数を識別して低減できる。



2枚鏡



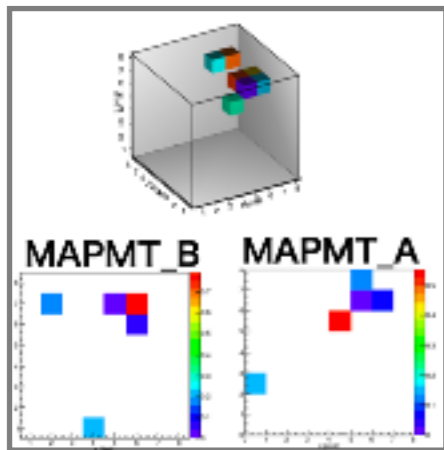
MAPMT

位置再構成1.4cm

β γ 分離 52% rejection @ 90% efficiency

@カメラ2台 (表面占有率0.4% \times 2)

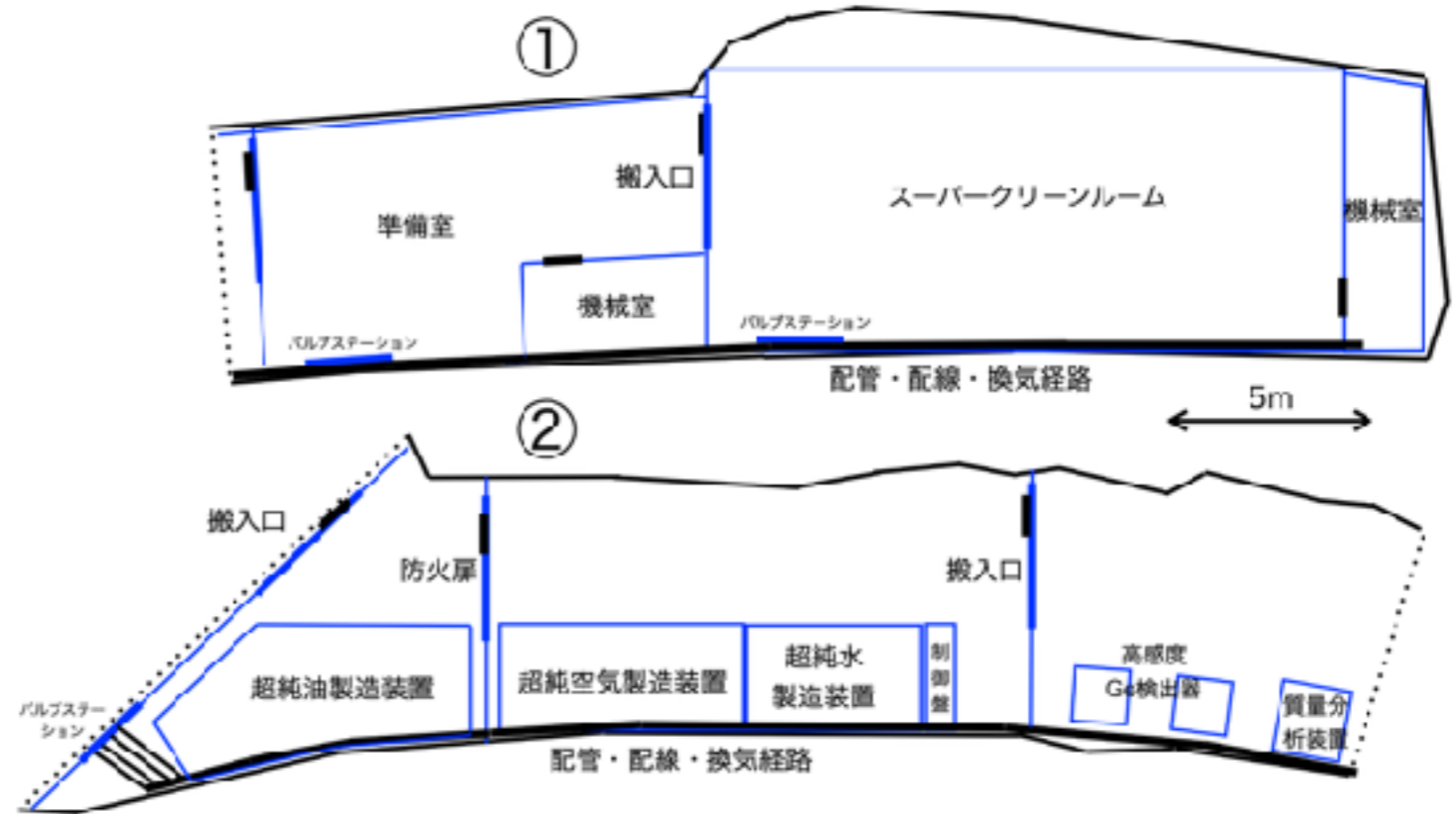
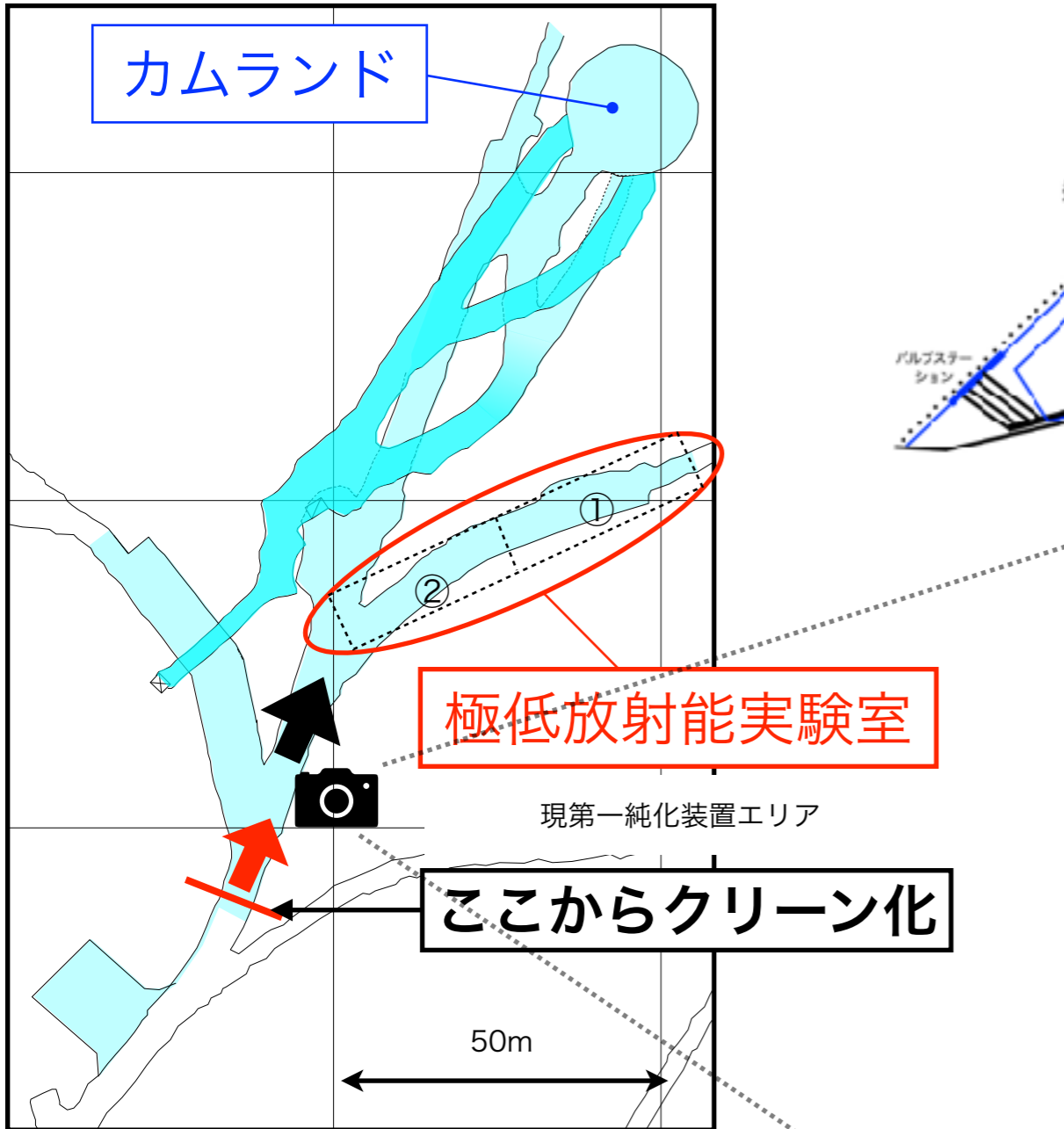
KamLAND2なら
10%は可能か?



反電子ニュートリノの方向測定を目的に開発しているが、
 γ 線の識別ができるので二重ベータ崩壊のBG低減にも有効

地下の整備状況

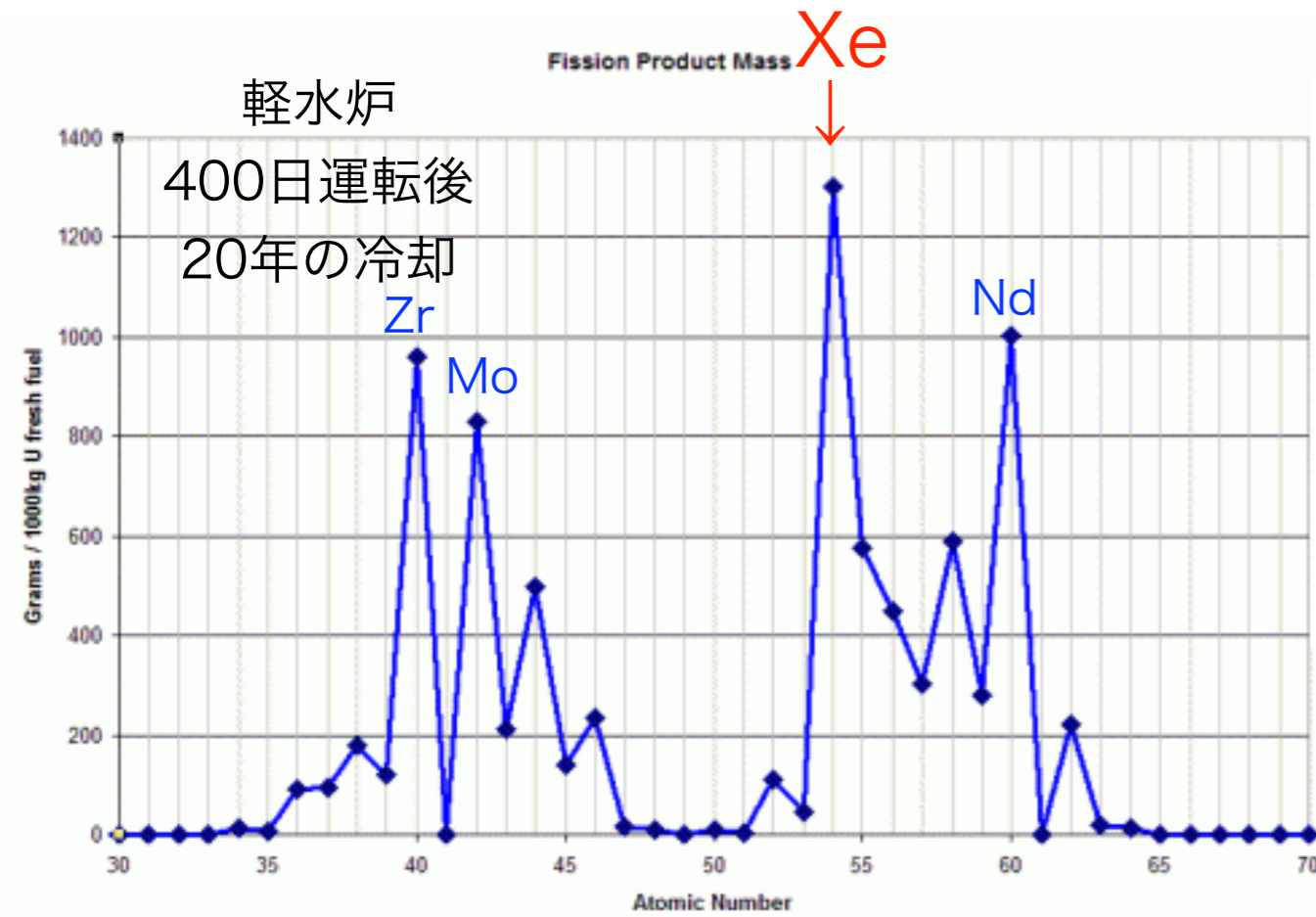
想定目標



20210308

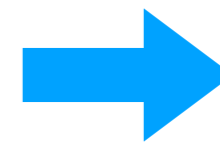
もっとキセノンを！

International Journal of Mass Spectrometry
and Ion Processes 154 (1996) 89-97



	36 months	atmospheric
$^{128}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	$2.81 \cdot 10^{-3}$	$7.13 \cdot 10^{-2}$
$^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	$4.7 \cdot 10^{-6}$	0.9832
$^{130}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	$3.32 \cdot 10^{-4}$	0.1518
$^{131}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	0.3756	0.7876
$^{134}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	1.3433	0.3883
$^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	2.1176 44%	0.3298 8.9%

燃焼度 33GWd/t
3.5% ^{235}U
3年運転



1tonのウランあたり
5.4 kg Xe生成

検証中
by 市村

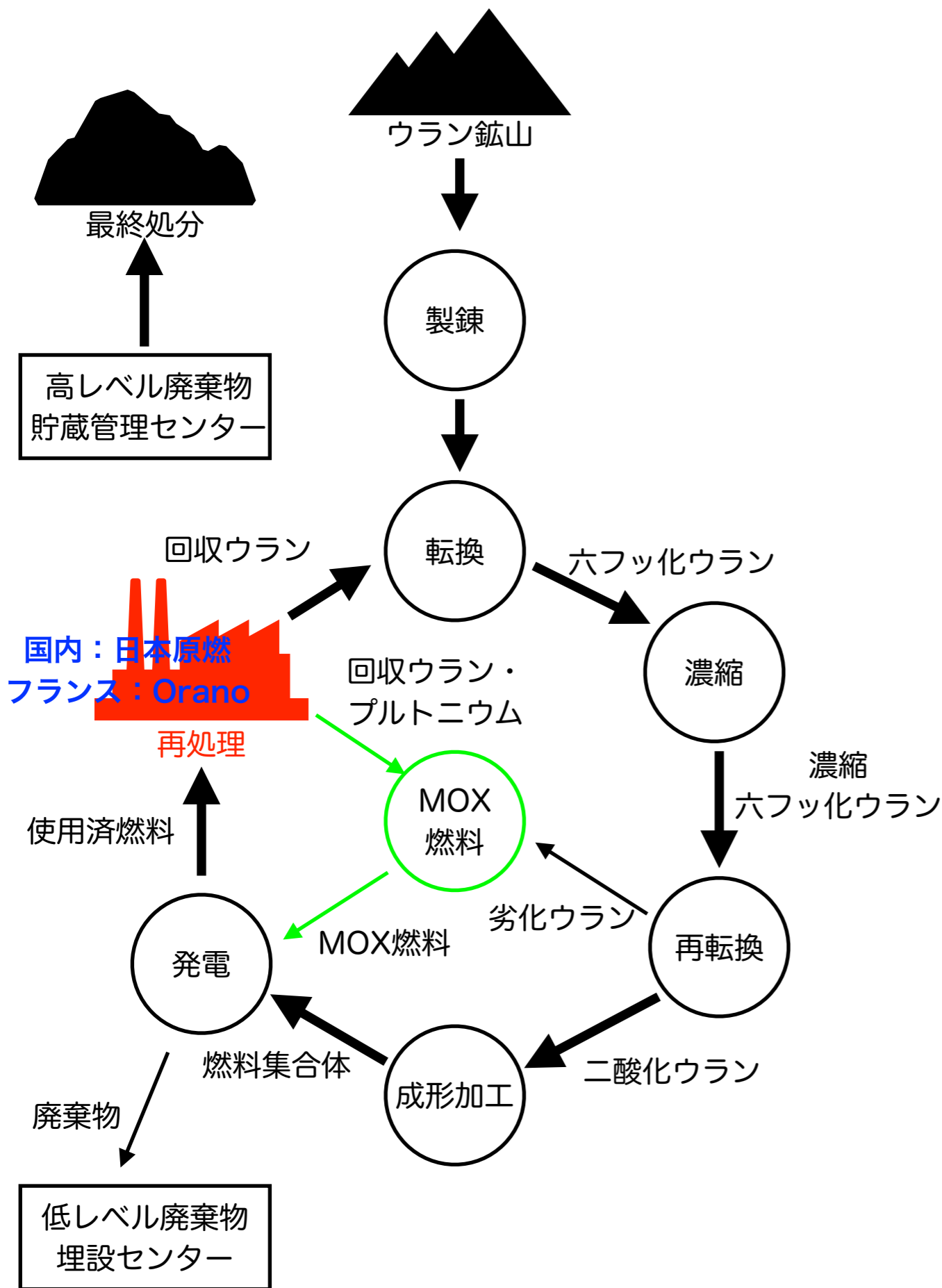
国内で150GWth×20年程度分の使用済み燃料があると仮定すると、
 ^{136}Xe 生成量は、 $150 \text{ GW} \times 20 \times 365 \text{ d} / (33\sim 45 \text{ GWd/t}) \times 5.4 \text{ kg} \times 44\% = 55 \sim 79 \text{ ton}$

使用済み燃料中に**数十トン程度!!**の ^{136}Xe が眠っている計算。

世界では数百トンが眠っている。

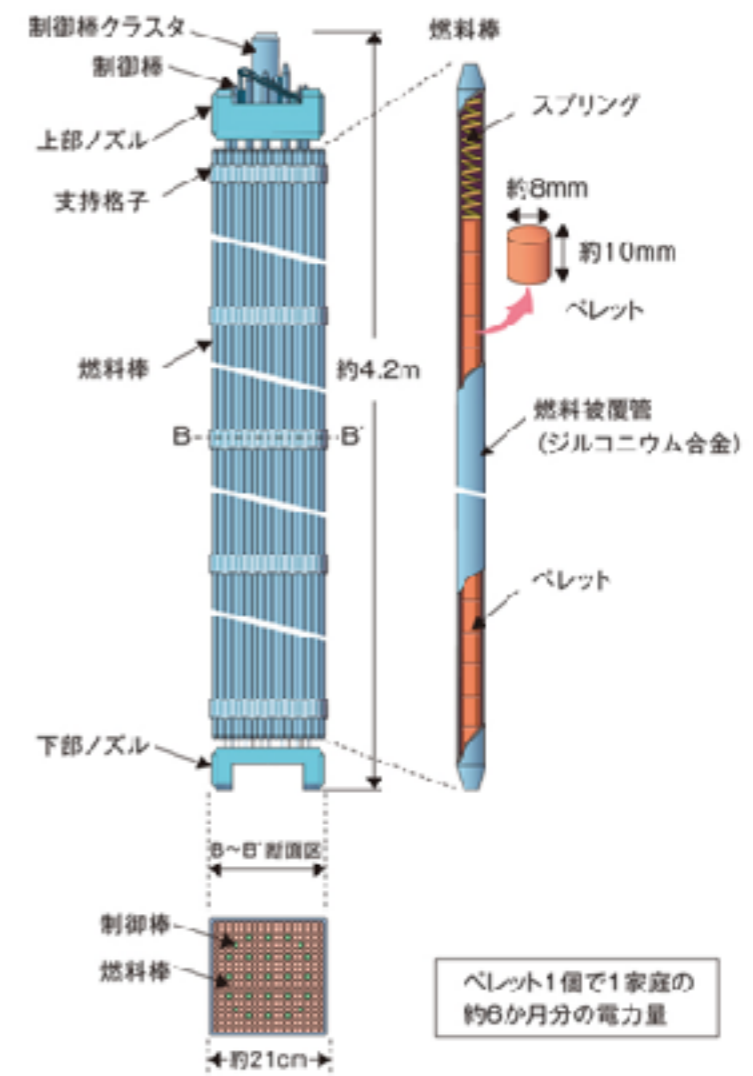
同位体濃縮も簡便あるいは不要

核燃料サイクル



PWRの燃料集合体

電気事業連合会HP



日本原燃HP



使用済み燃料剪断時のオフガスは、現状捨てるだけ。吸着・精留したい。

まとめ

- A01班は、 $0\nu 2\beta$ 探索と地球ニュートリノ観測。
- PMTの故障頻度の高さや、Xe破碎BGの評価で時間がかかっているが、もうすぐ論文にできると期待している。
- 地球ニュートリノはモデル精度を凌駕するという目標が達成できている。
- 中性子捕獲率向上が目下の目標。
プロトタイプ電子回路が納入され、開発を進めている。
- 将来技術として、集光ミラー・蛍光ミニバルーン・撮像装置の開発状況を紹介。
- 地下クリーンルーム整備の準備が進行中。
- 100トン ^{136}Xe を目指した調査も進行中。