計画研究A01:
KamLAND-Zen報告

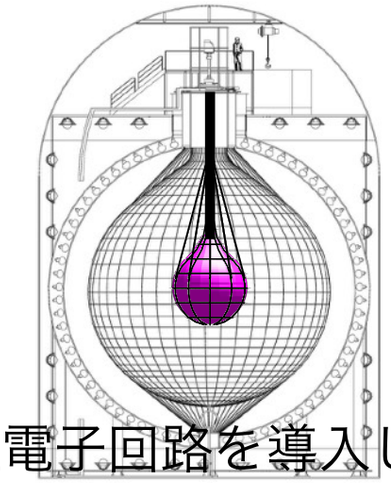
東北大学ニュートリノ科学研究センター
井上邦雄

A01:研究目的

「物質はどこから来たのか？」

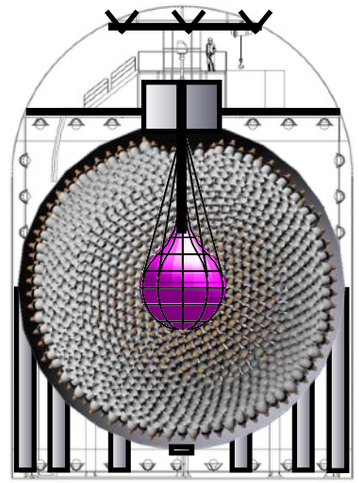
・KamLAND-Zen 800 の低バックグラウンド化

宇宙線による原子核破砕バックグラウンドを低減するための新型電子回路を導入し、
40meVの感度を目指す。



・KamLAND2-Zen に向けた準備

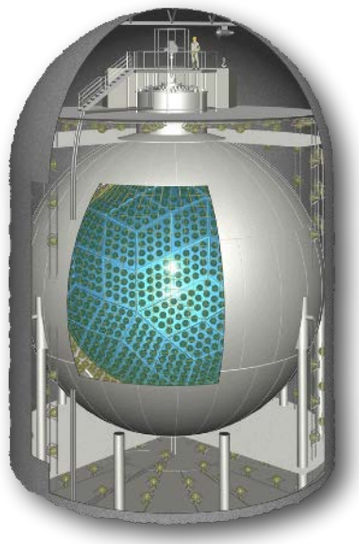
エネルギー分解能向上のための技術開発。
クリーン環境の整備。



「どう地球に行き着いたのか？」

・KamLAND での地球ニュートリノ観測

安定的な性能の維持と長期観測。



Dirac vs. Majorana

Discovery of neutrino mass requires right-handed composition.

e

LH electron (e^-_L)　　RH electron (e^-_R)

LH positron (e^+_L)　　RH positron (e^+_R)

Matter particle (Fermion) has at least 4 components.

It is naturally derived from quantum mechanics and special relativity (Dirac equation).

ν

LH ν_L

RH $\nu_R(N_R)$ not discovered

LH $\bar{\nu}_L(\bar{N}_L)$ not discovered

RH $\bar{\nu}_R$

Dirac neutrino

$\nu_L \quad \underbrace{\nu_R \quad \bar{\nu}_L}_{\text{unobservable}} \quad \bar{\nu}_R$

$\nu \neq \bar{\nu}$

Majorana neutrino

(1937)

$\nu_L \quad \bar{\nu}_R \quad \underbrace{\bar{N}_L \quad N_R}_{\text{just heavy}}$

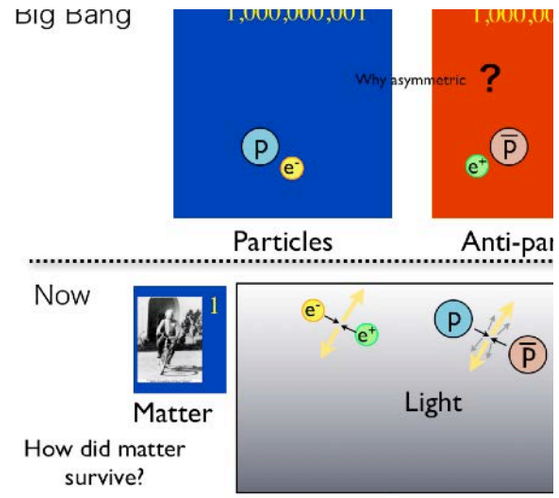
$\nu = \bar{\nu}$

Majorana neutrino violates Lepton #.

関連する宇宙・素粒子の大問題

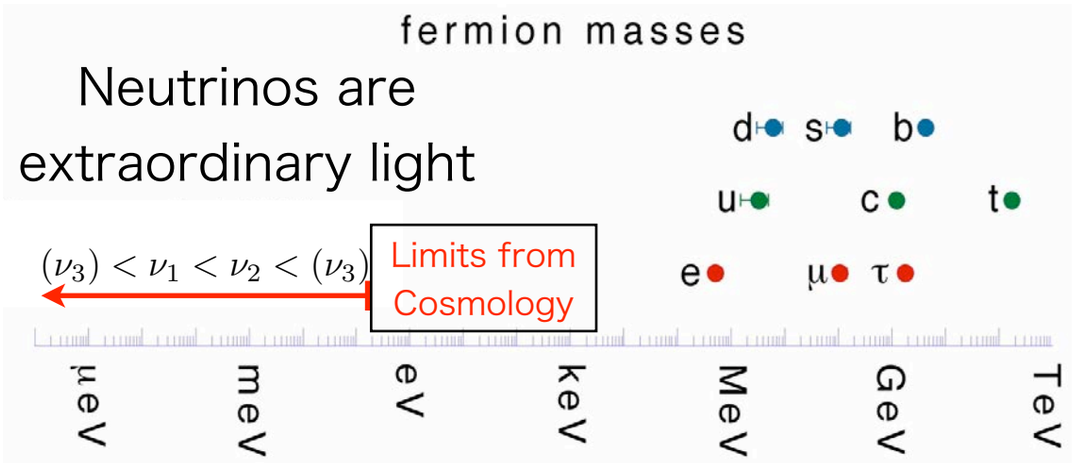
「無から生じた宇宙になぜ物質は存在するのか？」

重い右巻きニュートリノ（N_R）があれば
レプトジェネシスが可能



「なぜニュートリノだけ桁外れに軽い質量を持つのか？」

N_R があればシーソー機構が可能



「暗黒物質の起源は？」

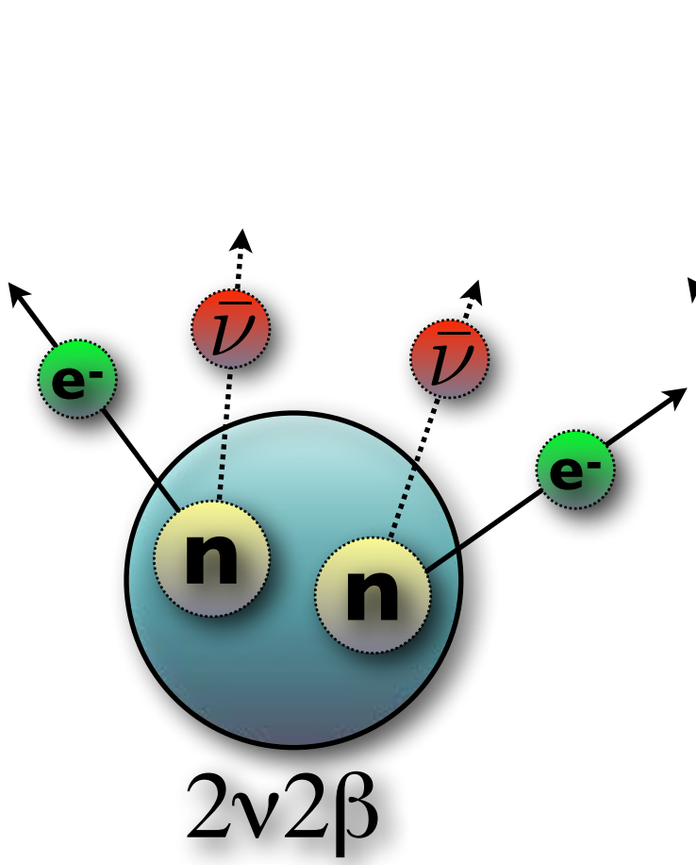
N_R があれば・・・

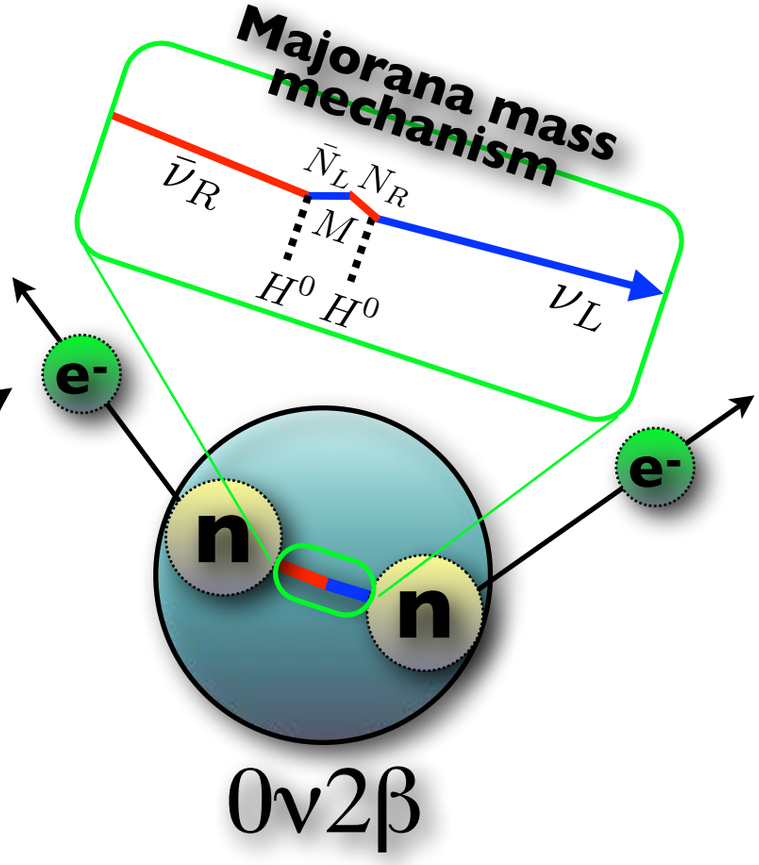
「SU(3)×SU(2)×U(1)⇒SU(5)⇒SO(10)？」

N_R があれば・・・

N_R は作れないとしても、傍証はないのか？

If neutrinos are Majorana, neutrino-less double beta decay （0ν2β） can happen.

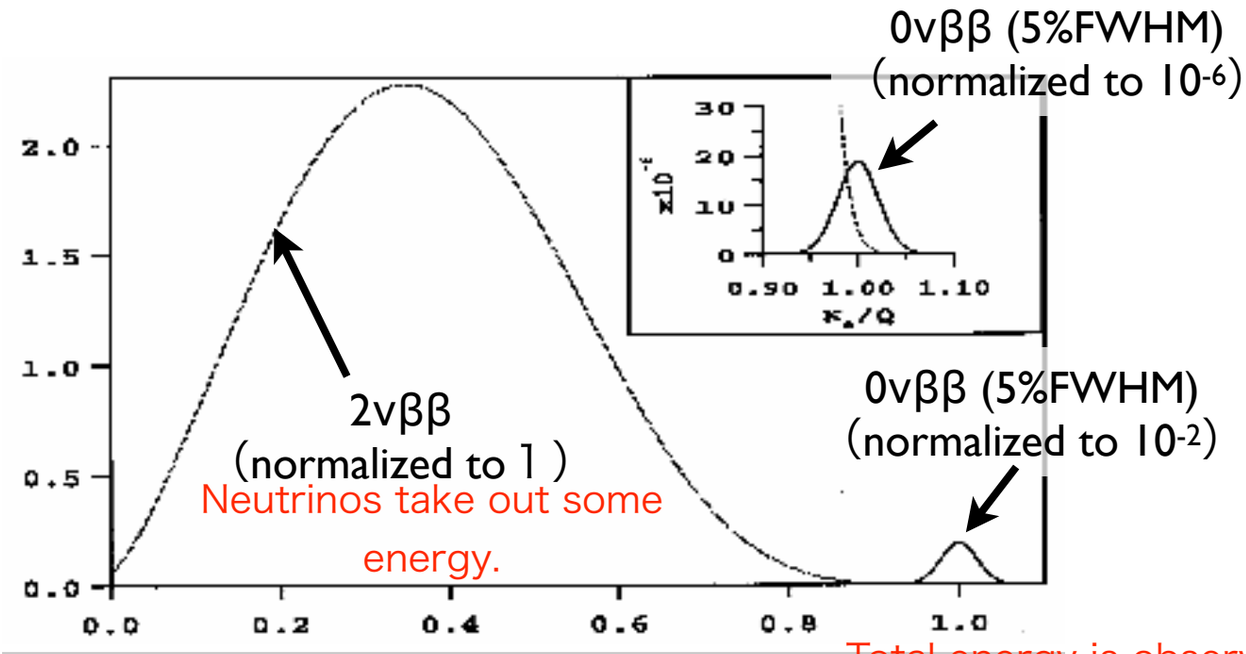




theoretical history

1930 light neutral particle (W.Pauli)
1933 β decay theory (E.Fermi)
1935 $2\nu 2\beta$ (M.Goeppert-Mayer)
1937 Majorana neutrino (E.Majorana)
1939 $0\nu 2\beta$ (W.H.Furry)

W.Pauli E.Fermi M.Goeppert-Mayer E.Majorana W.H.Furry



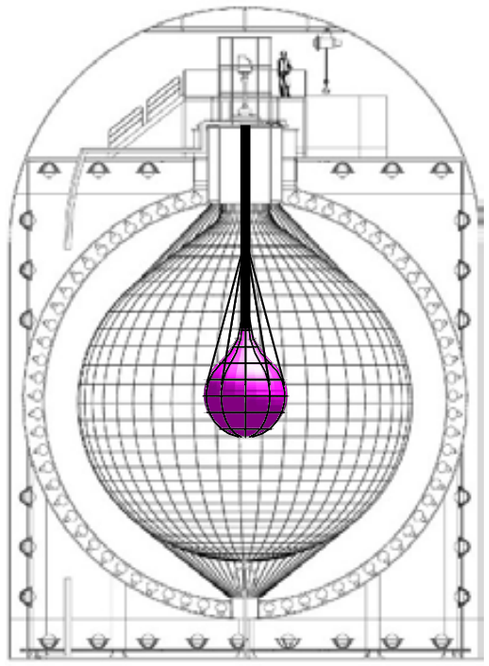
Larger the mass, easier to observe $0\nu 2\beta$

Majorana CP

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = \left| \Sigma\, m_i \, |U_{ei}|^2 \, \varepsilon_i \right|$$

$$\frac{1}{T_{1/2}} = G_{0\nu} |M_{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

KamLAND-Zen 400

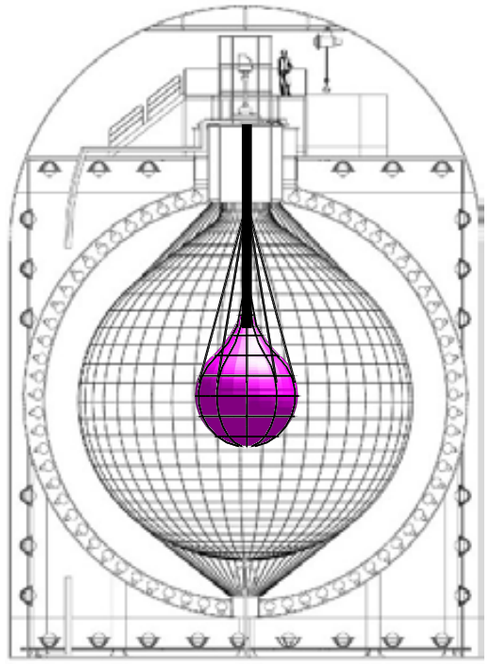


until 2015, 380kg

World best limit

$\langle m_{\beta\beta} \rangle < (61 - 165)\,\mathrm{meV}$

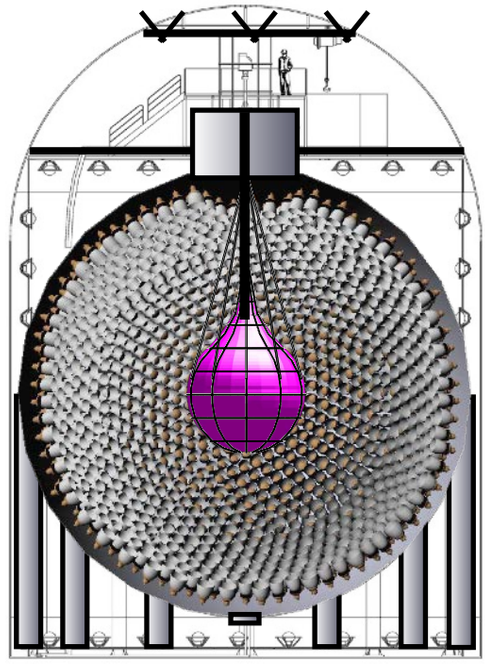
KamLAND-Zen 800



since 2019, 745kg

target 40meV

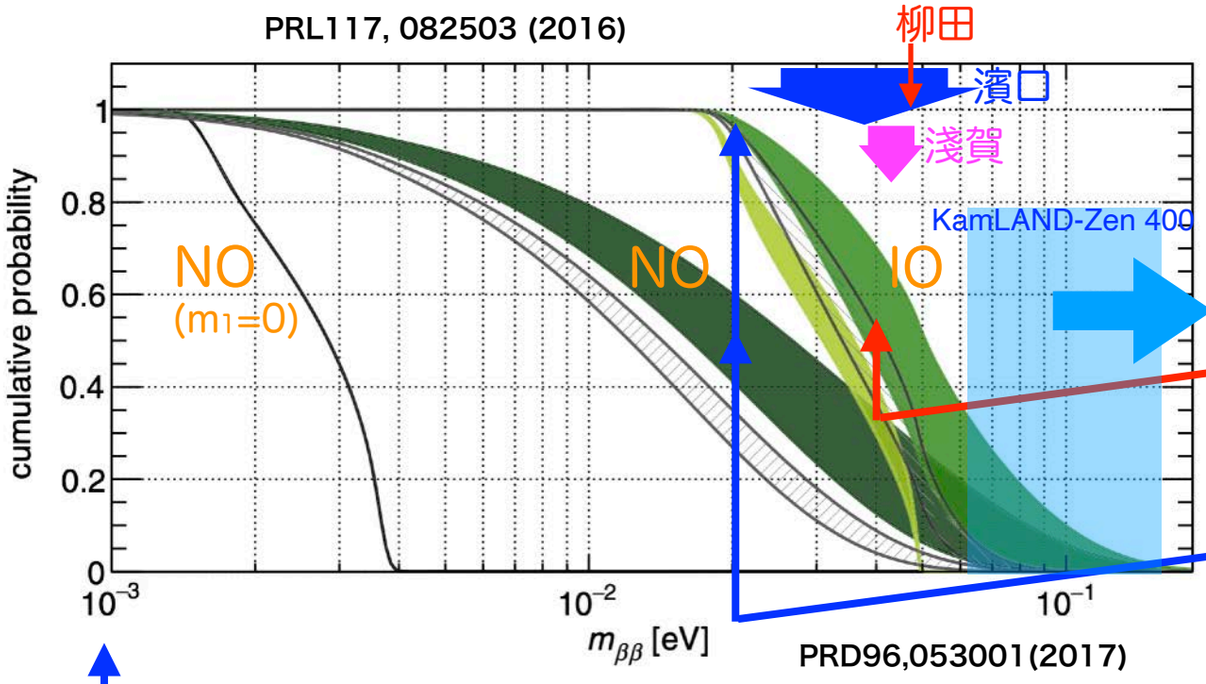
KamLAND2-Zen



集光ミラー
HQE-PMT
新LS
} 5倍光量
蛍光ミニバルーン

future high resolution plan

target 20meV



1meV

about 100 ton required

Parameter Coverage

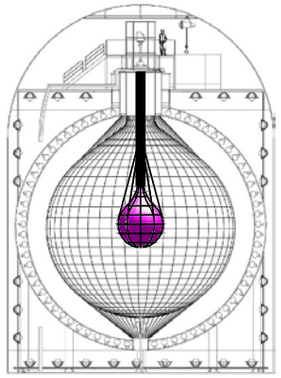
40meV 50% of IO

20meV 95% of IO
50% of NO

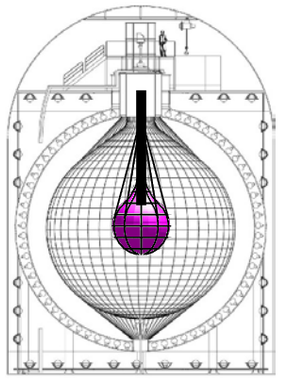
The discovery may be just around the corner.

Timeline of KamLAND-Zen

KamLAND-Zen 400



KamLAND-Zen 800



地下素核

地下宇宙

2011 MIB production

2012 400 phase1 320kg

2013 LS purification

Recovery from fire

LS purification

2014 400 phase2 380kg

2015 MIB production

2016 OD refurbishment

MIB production

2017 Welding improvement

MIB production

2018 LS purification

Xenon installation

2019 Zen 800 745kg

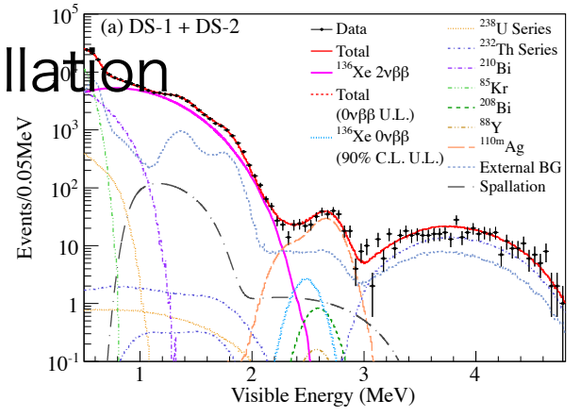
MIB installation, xenon installation

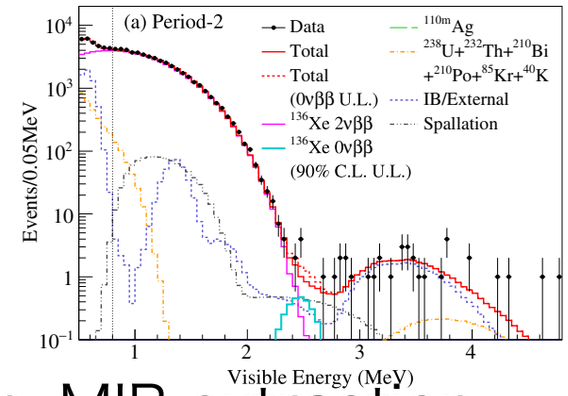
Filtration

Xenon extraction

Fire

Xenon installation





Calibration, xenon extraction, MIB extraction

MIB installation, characterization

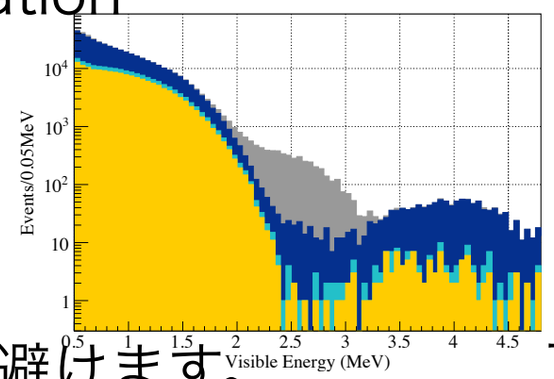
MIB extraction, hole inspection

Leak

1/10 BG

2x ^{136}Xe, 3x FV

MIB installation, characterization



TAUP2019 very preliminary results

We are here

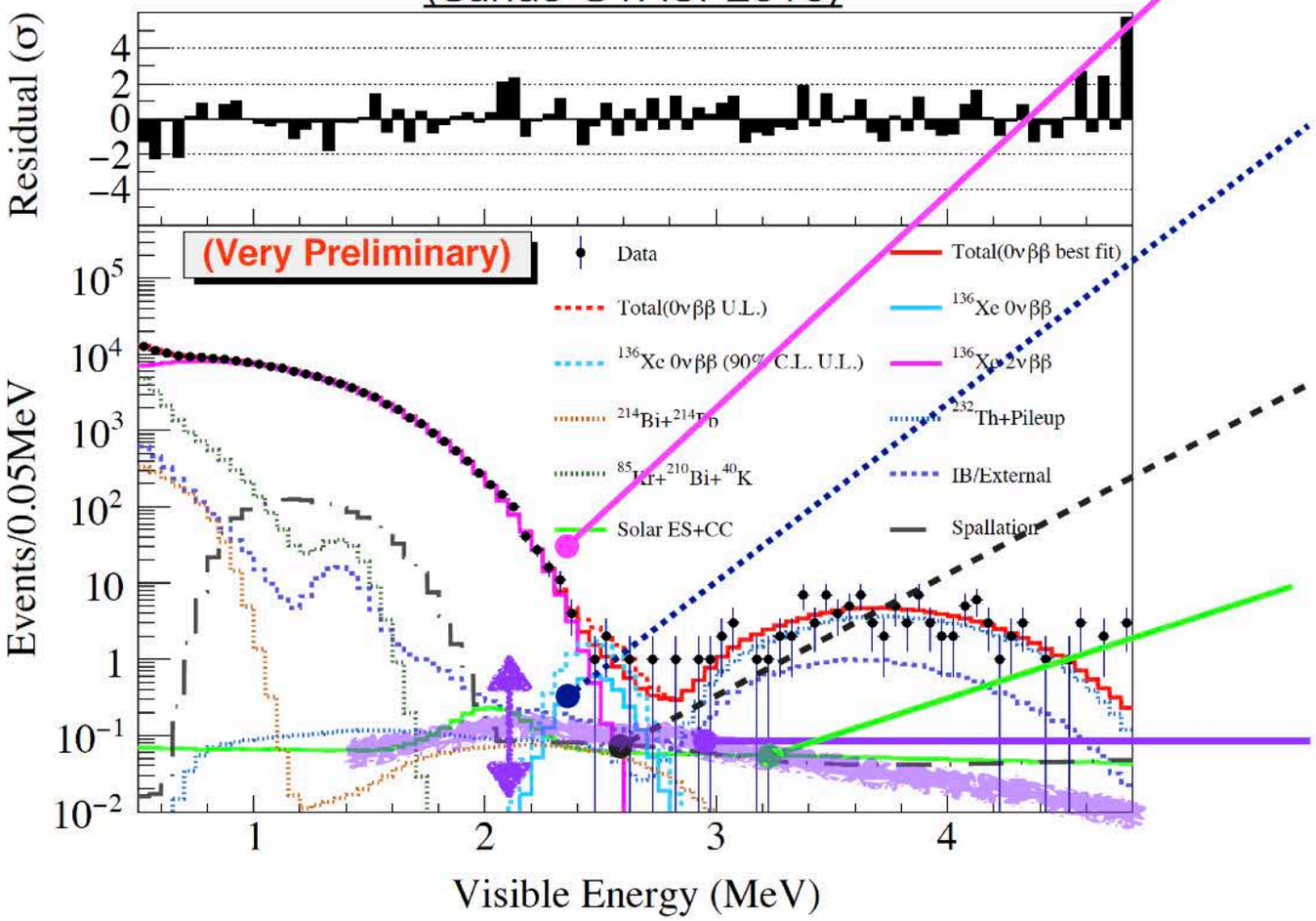
論文未投稿なので定量的な議論は避けます。

Backgrounds (R<157 cm)

Zen 800 ROI: 2.35 MeV < E < 2.70 MeV,
0νββ efficiency ~90%

Source:	2νββ
Radioactive impurities:	Xe-LS, IB and outer-LS
Cosmogenic:	muon-spallation Solar neutrino ES

(Gando @TAUP2019)



Preliminary Sensitivity 8×10^{25} yr, Limit $>4\times10^{25}$ yr

(Zen 400: 5.6×10^{25} yr, $>10\times10^{25}$ yr)

(Gando @TAUP2019)

2νββ tail due to energy resolution
Most dominant & inevitable BG
ΔE~4.5%@2.45 MeV ~ 5.1 events/ROI

^{214}Bi from IB film
Vertex resolution ~15 cm/√E(MeV)
Limit sensitive region to 0νββ decay.
~ 0.9 events/ROI

^{12}C spallation products
Significantly reduced by new analysis methods
~ 0.2 events/ROI

Solar neutrino electron scattering + C.C. (^{136}Cs)
Inevitable BG
~ 0.4 events/ROI

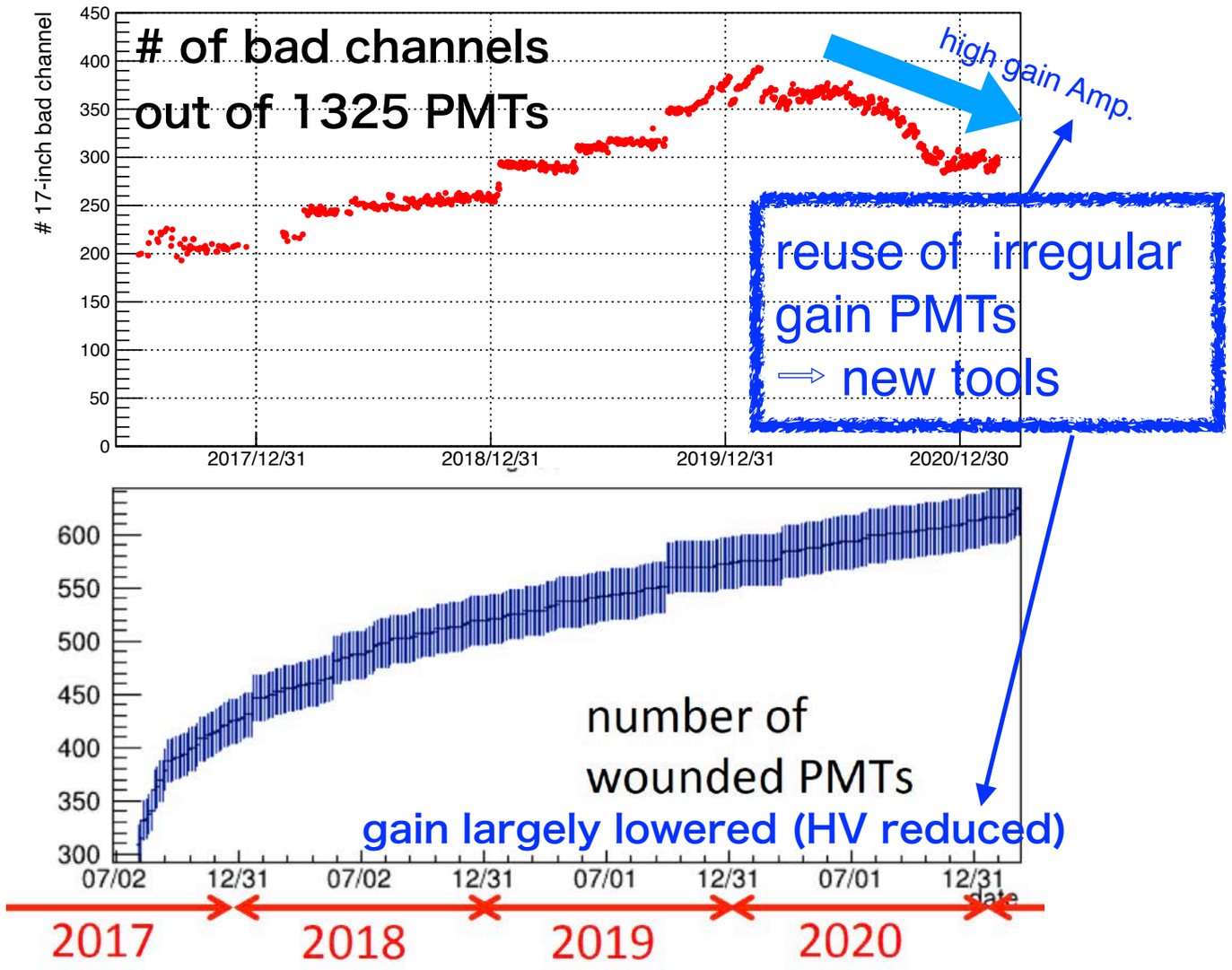
^{136}Xe spallation products
Nuisance BG in Zen800
Hard to reject because of their long-lives

Ozaki @ Neutrino Telescope 2021

very preliminary

^{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。

Rapid aging of KamLAND PMTs is serious.



Changing 2v BG should be precisely understood.

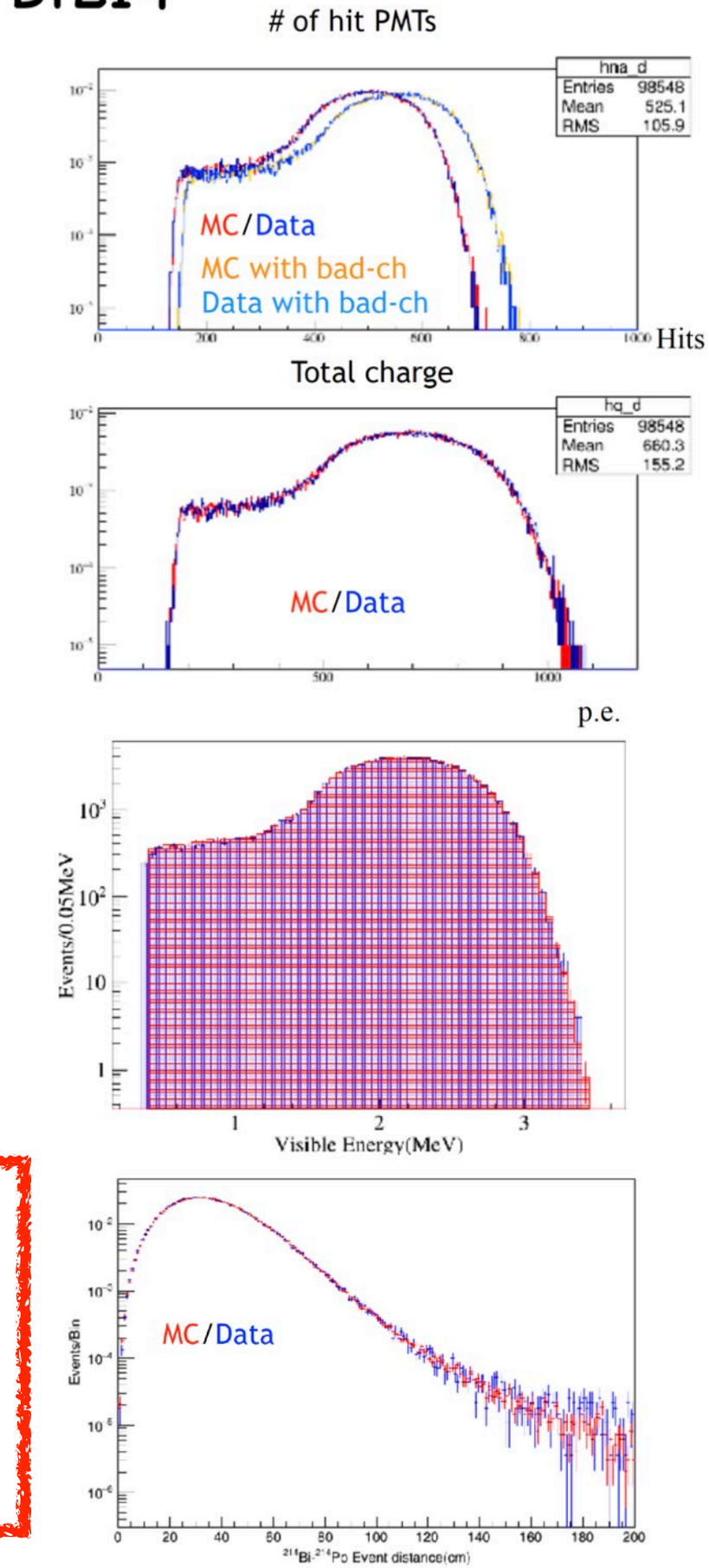
Very fine tuning of the simulation is necessary.

timing distribution
hit distribution
charge response
vertex distribution
energy scale
energy resolution
their time dependence
their position dependence
•••

These are also important for neural-net analysis.

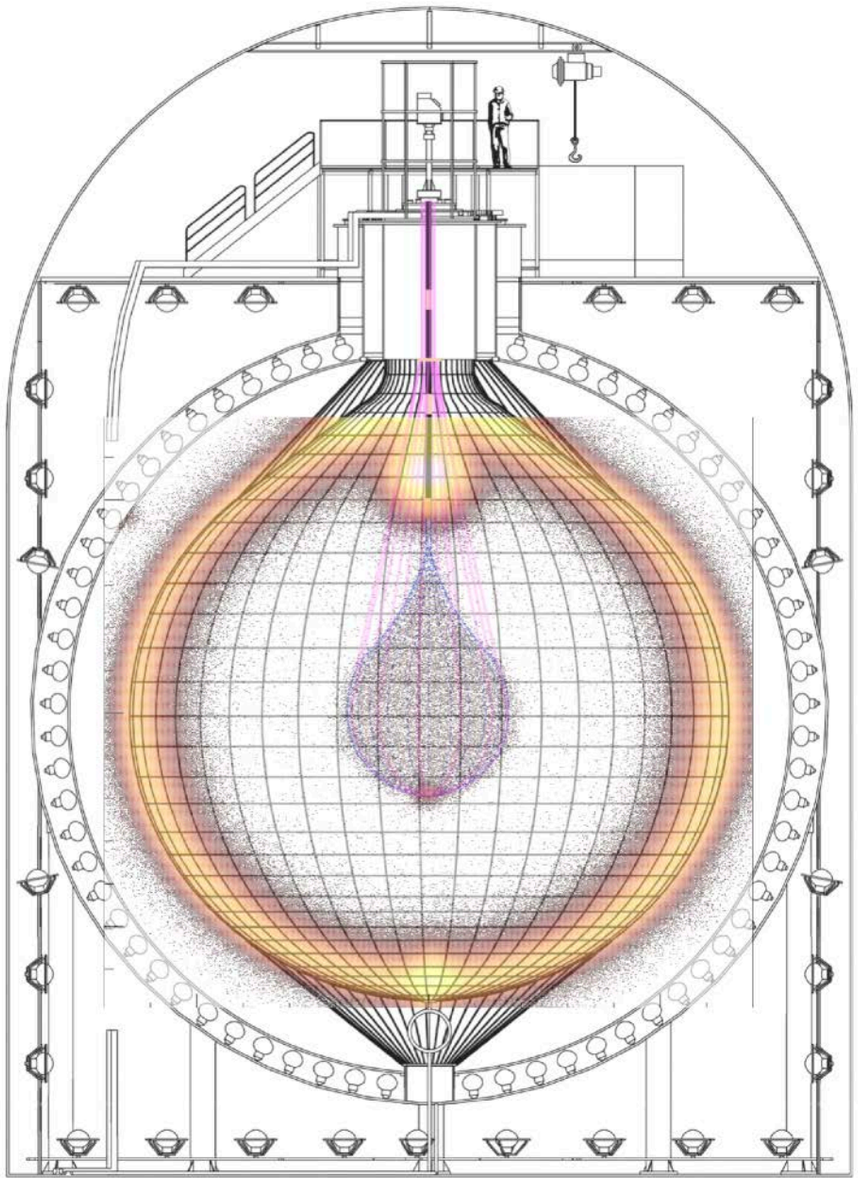
very time consuming

Sorry, this is an excuse for slow data update.



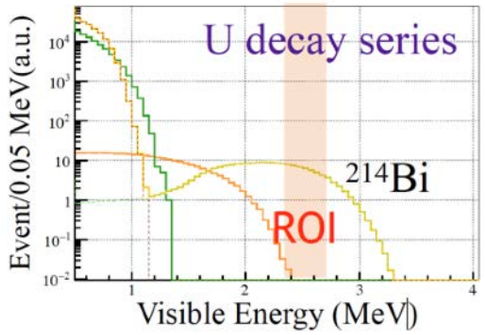
現状報告

KamLAND-Zen 800
での反応点分布

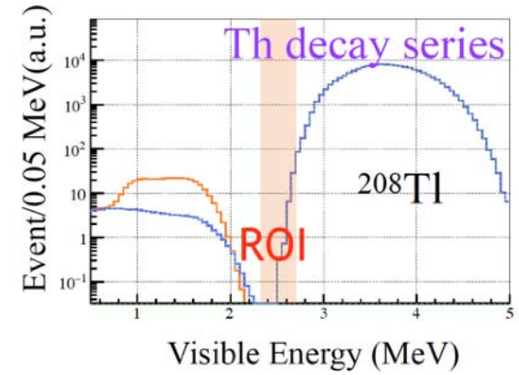


(1.0 MeV-3.0 MeV Singles)

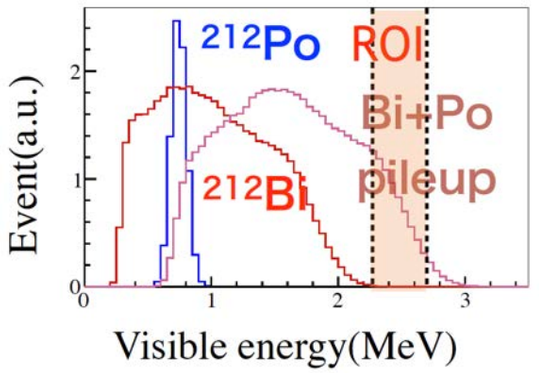
放射性不純物



ミニバルーン以外
^{214}Bi-^{214}Po計測で十分低減

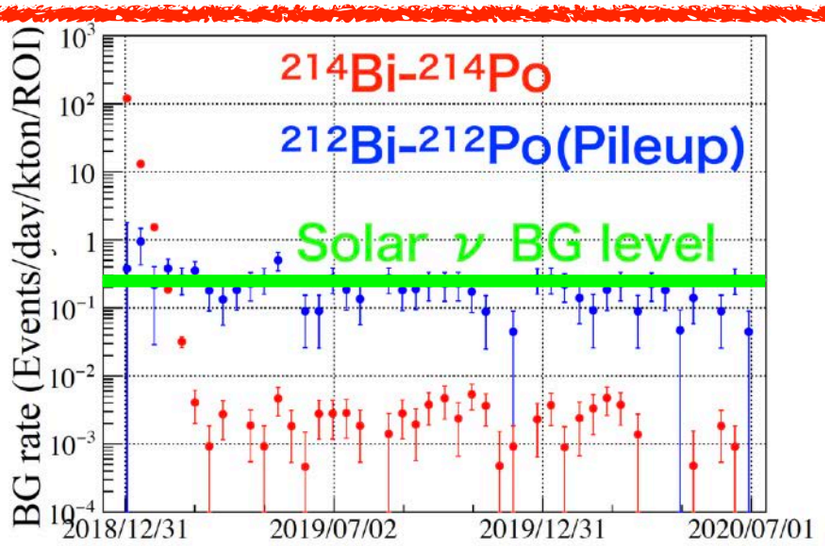


^{212}Bi-^{212}Poは時間差が短い

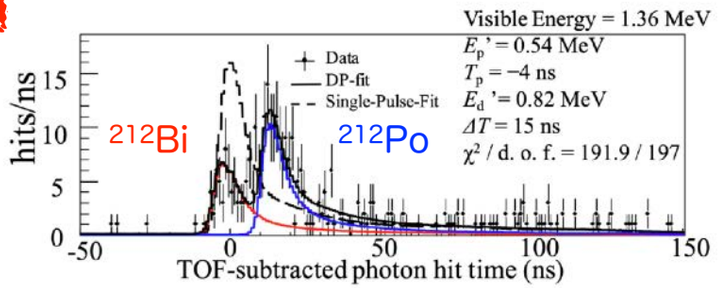


蛍光ミニバルーン（将来）

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



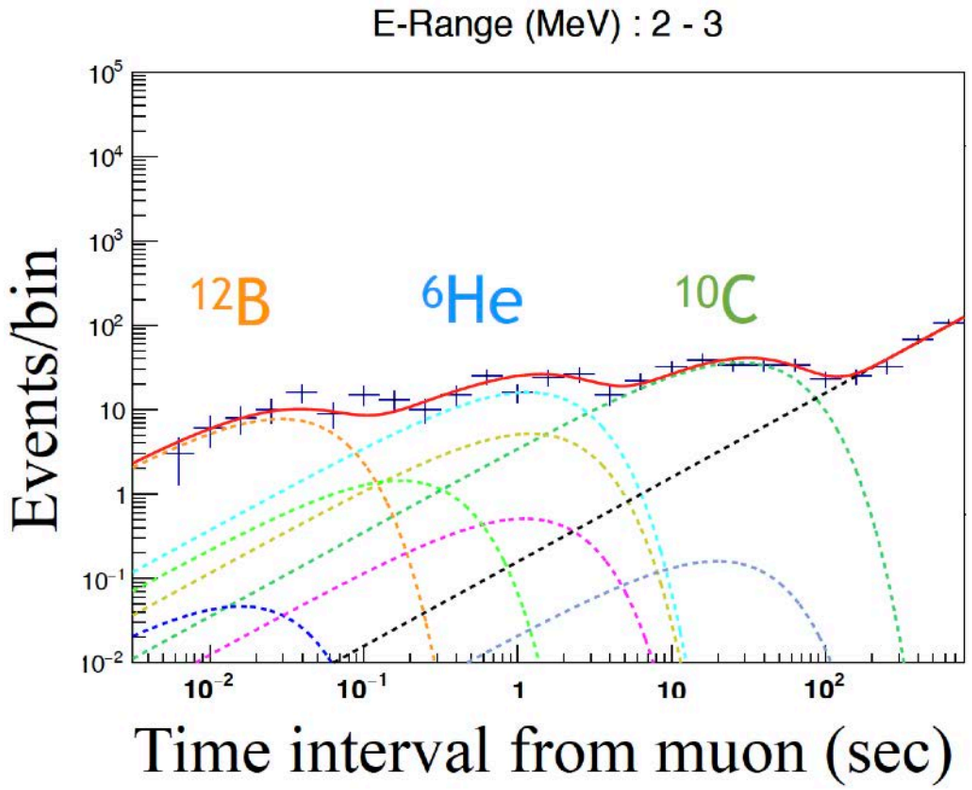
10ns以上は判別可能

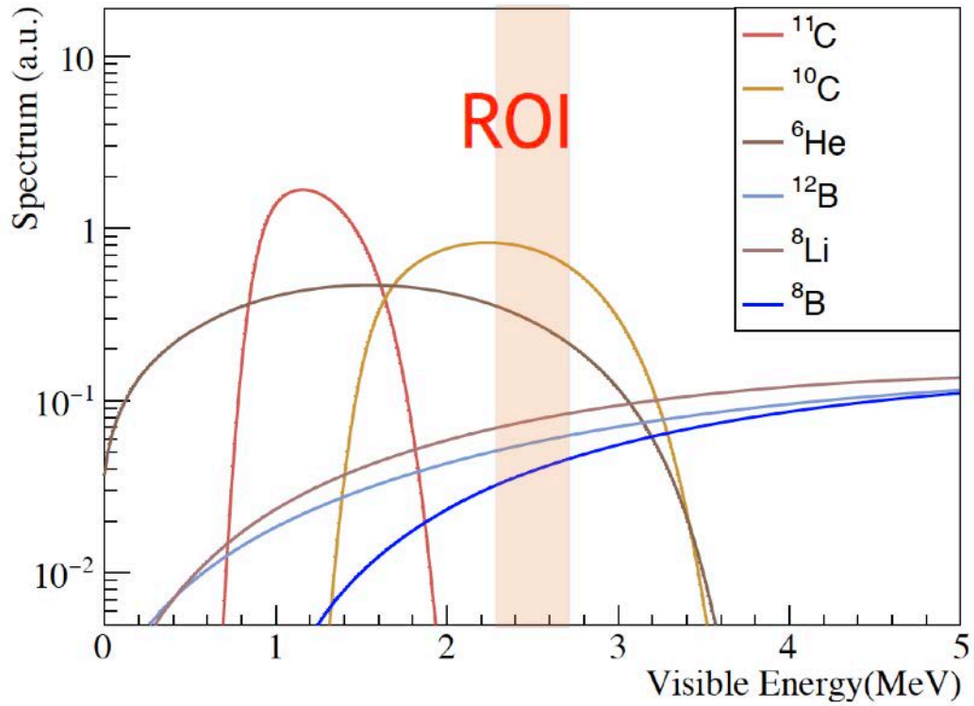


ニューラルネット（進行中）

宇宙線による原子核破砕

^{12}C破砕はKamLAND全体を使って測定可能

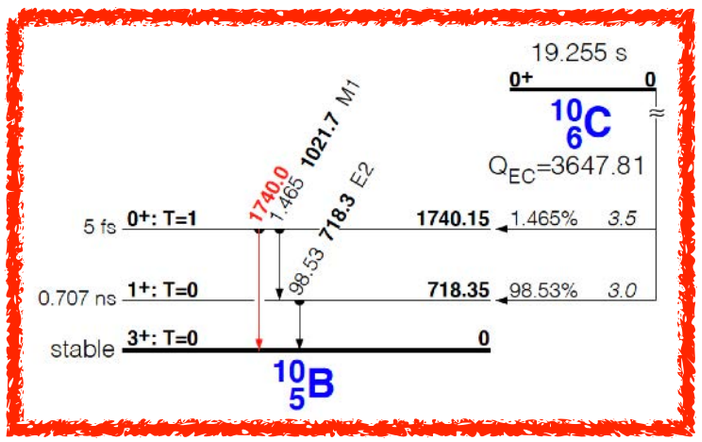




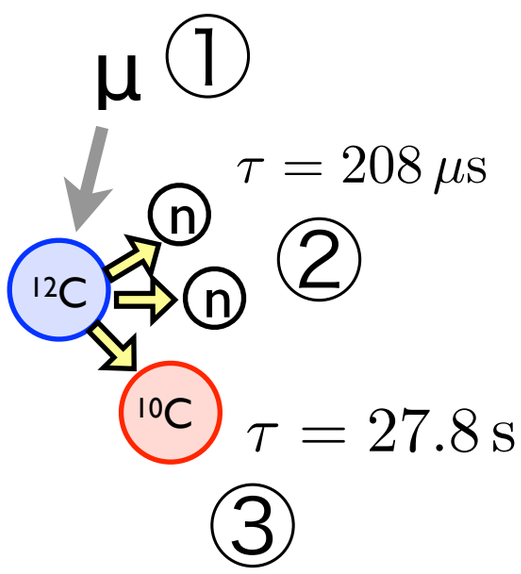
半減期

20.39 min
19.255 s
806.7 ms
20.20 ms
838 ms
770 ms

^{10}C

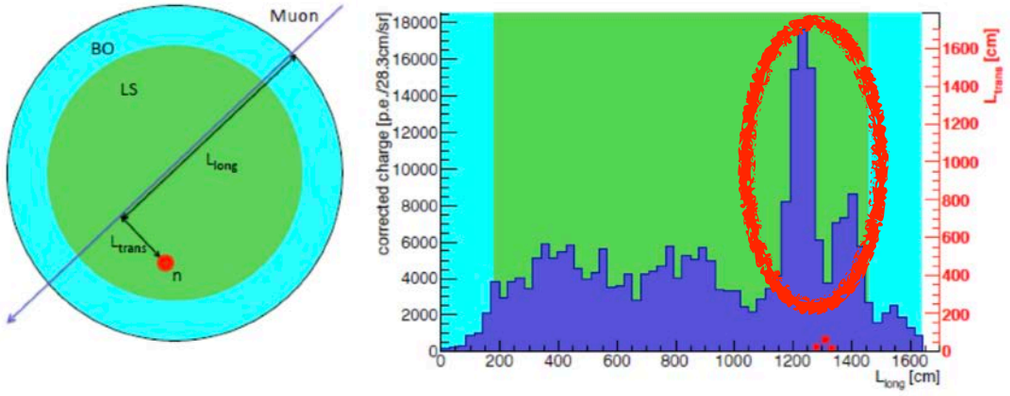


○中性子タグ



○シャワータグ（低中性子捕獲率でも可）

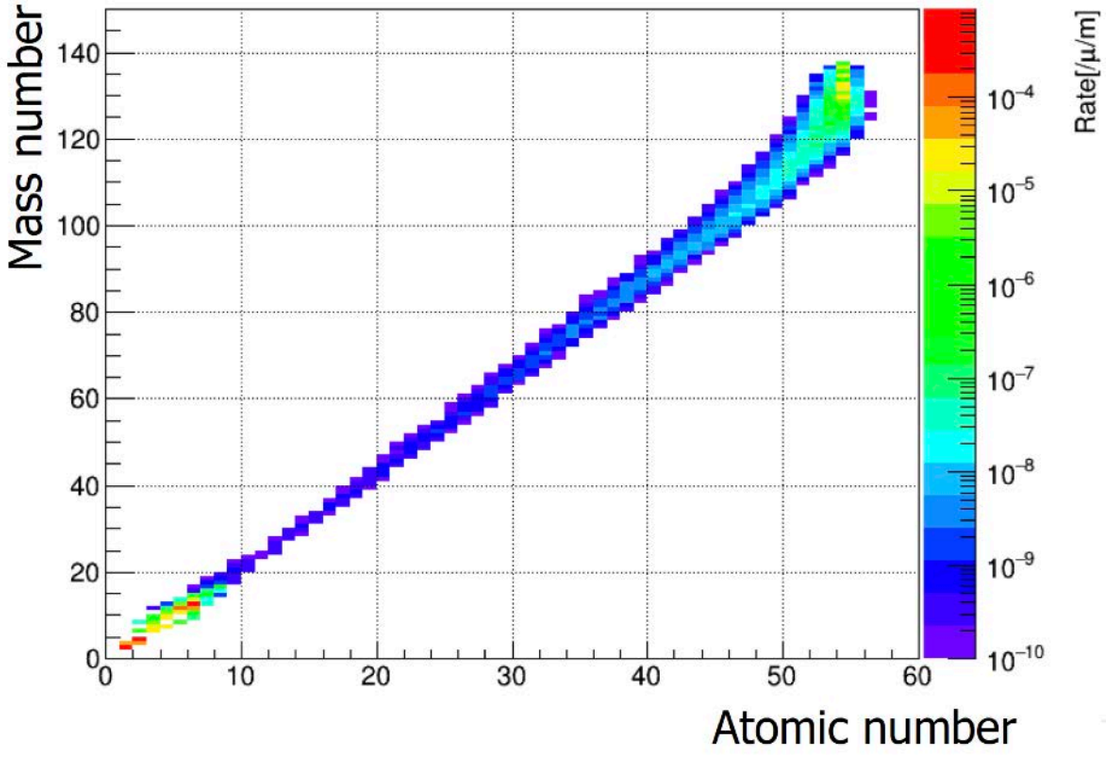
トラックに沿った発光量



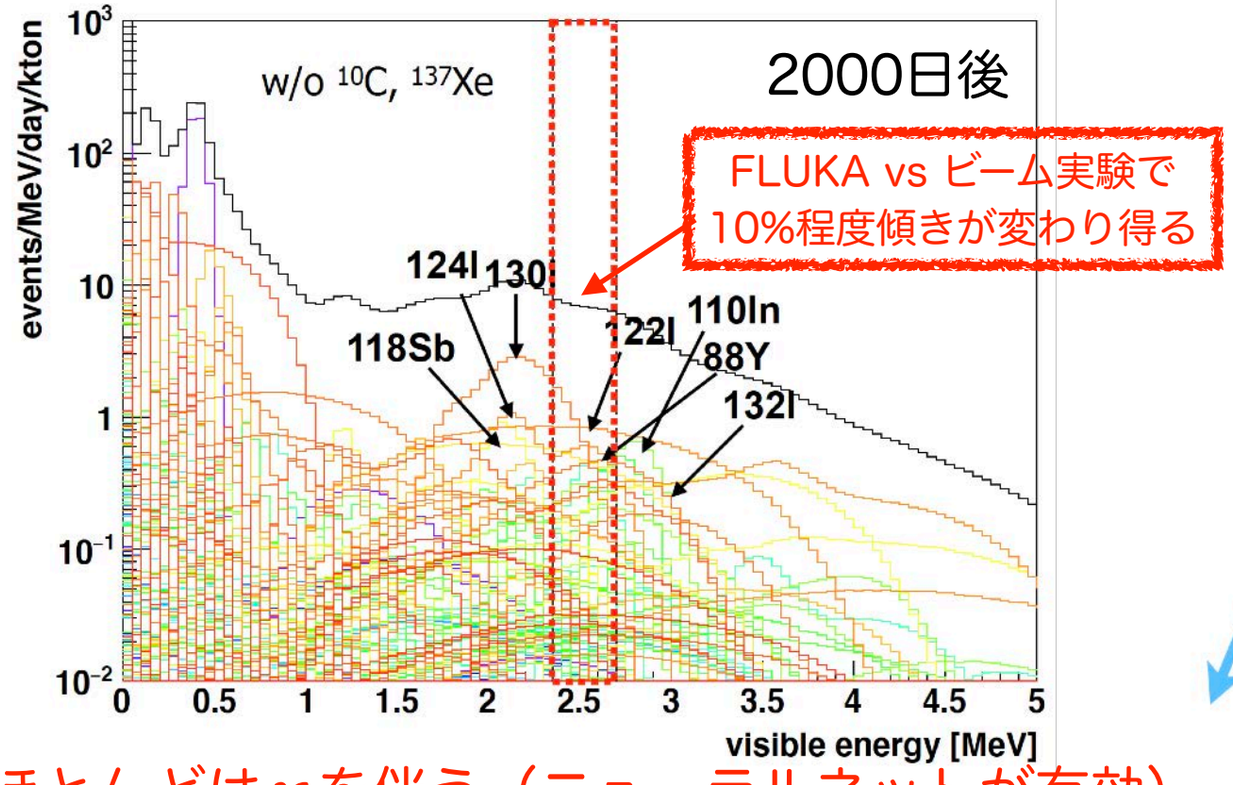
○ニューラルネット（γ全般に有効）

^{136}Xe破砕は情報不足

Xeの核破砕生成（FLUKA）

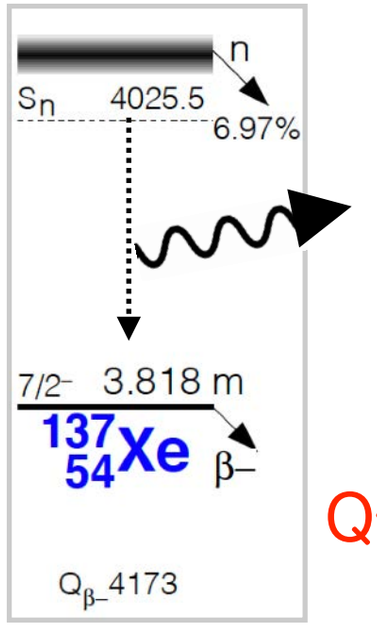


GEANT+ENSDF でシミュレーション



ほとんどはγを伴う（ニューラルネットが有効）

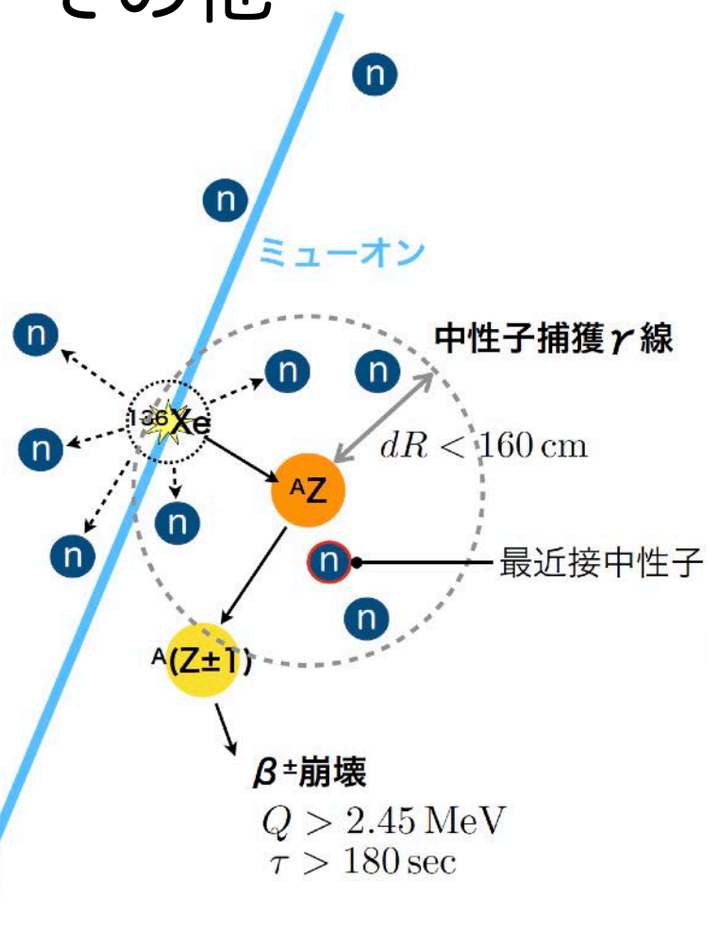
^{137}Xe



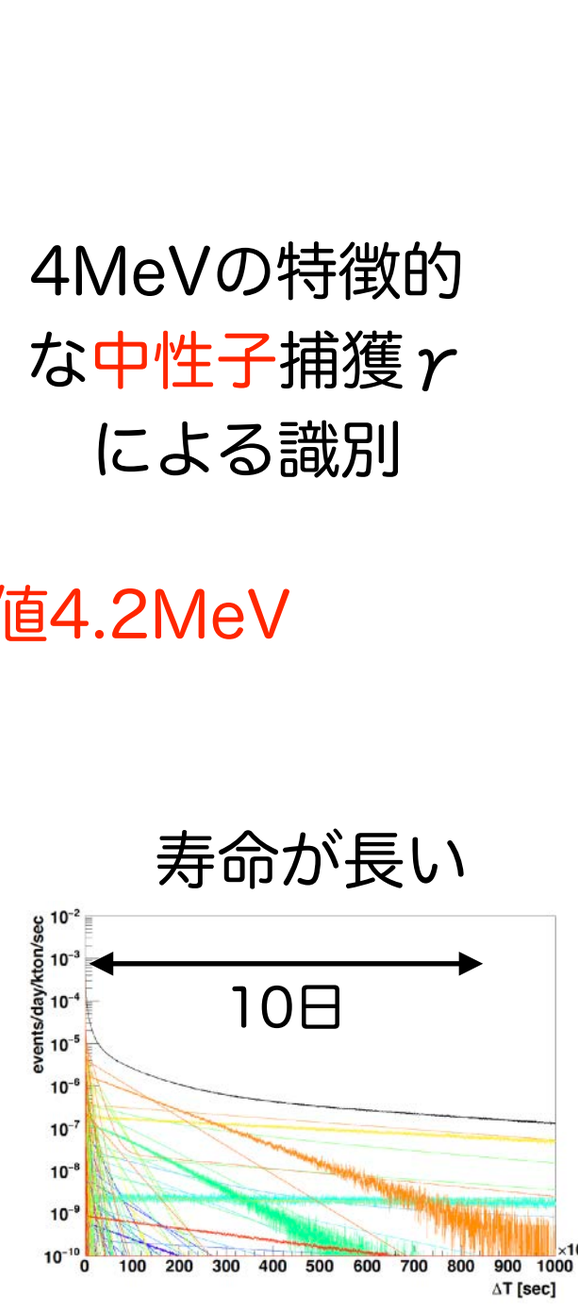
4MeVの特徴的な中性子捕獲γによる識別

Q値4.2MeV

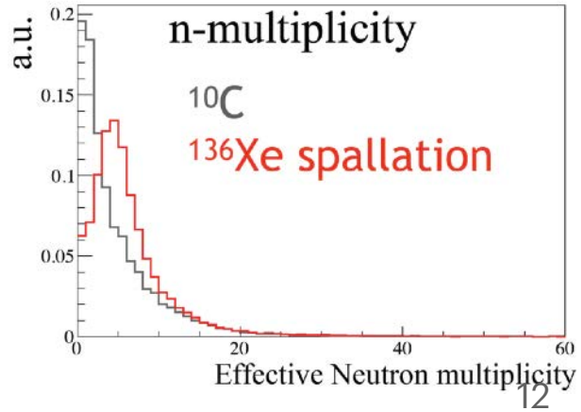
その他



寿命が長い



中性子多重度が有効



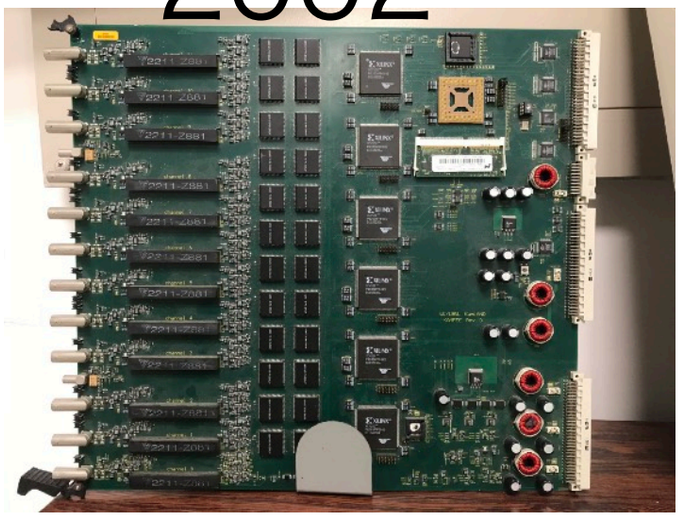
主要長寿命原子核

	nuclei	rate_all	rate_ROI	$T_{1/2}$ (s)
β^+	82Rb	0.069	0.011	7.638e+01
β^+	88Y	0.141	0.107	9.215e+06
β^+	90Nb	0.086	0.010	5.256e+04
β^+	96Tc	0.063	0.013	3.698e+05
β^+	98Rh	0.080	0.011	5.232e+02
β^+	100Rh	0.223	0.075	7.488e+04
β^+	104Ag	0.234	0.020	4.152e+03
β^+	107In	0.128	0.015	1.944e+03
β^+	108In	0.236	0.101	3.480e+03
β^+	110In	0.549	0.133	1.764e+04
β^+	109Sn	0.114	0.024	1.080e+03
β^+	113Sb	0.244	0.036	4.002e+02
β^+	114Sb	0.360	0.027	2.094e+02
β^+	115Sb	0.774	0.030	1.926e+03
β^+	116Sb	1.008	0.078	9.480e+02
β^+	118Sb	1.426	0.185	2.160e+02
$\beta^-+\gamma$	124Sb	0.045	0.014	5.201e+06
β^+	115Te	0.124	0.014	3.480e+02
β^+	117Te	0.574	0.057	3.720e+03
β^+	119I	0.504	0.048	1.146e+03
β^+	120I	0.930	0.085	4.896e+03
β^+	122I	2.374	0.343	2.178e+02
β^+	124I	1.622	0.178	3.608e+05
$\beta^-+\gamma$	130I	1.590	0.256	4.450e+04
$\beta^-+\gamma$	132I	0.427	0.146	8.262e+03
$\beta^-+\gamma$	134I	0.178	0.037	3.150e+03
$\beta^-+\gamma$	135I	0.309	0.017	2.365e+04
β^+	121Xe	0.518	0.072	2.406e+03
β^+	126Cs	0.142	0.019	9.840e+01
β^+	128Cs	0.319	0.043	2.172e+02
β^+	130Cs	0.289	0.011	1.753e+03
	Total	479.063	2.385	

寄与の小さい多核種が存在するが、β^+や$\beta^-+\gamma$には “neural net PID” が有効

中性子捕獲率の向上（新型電子回路の開発状況）

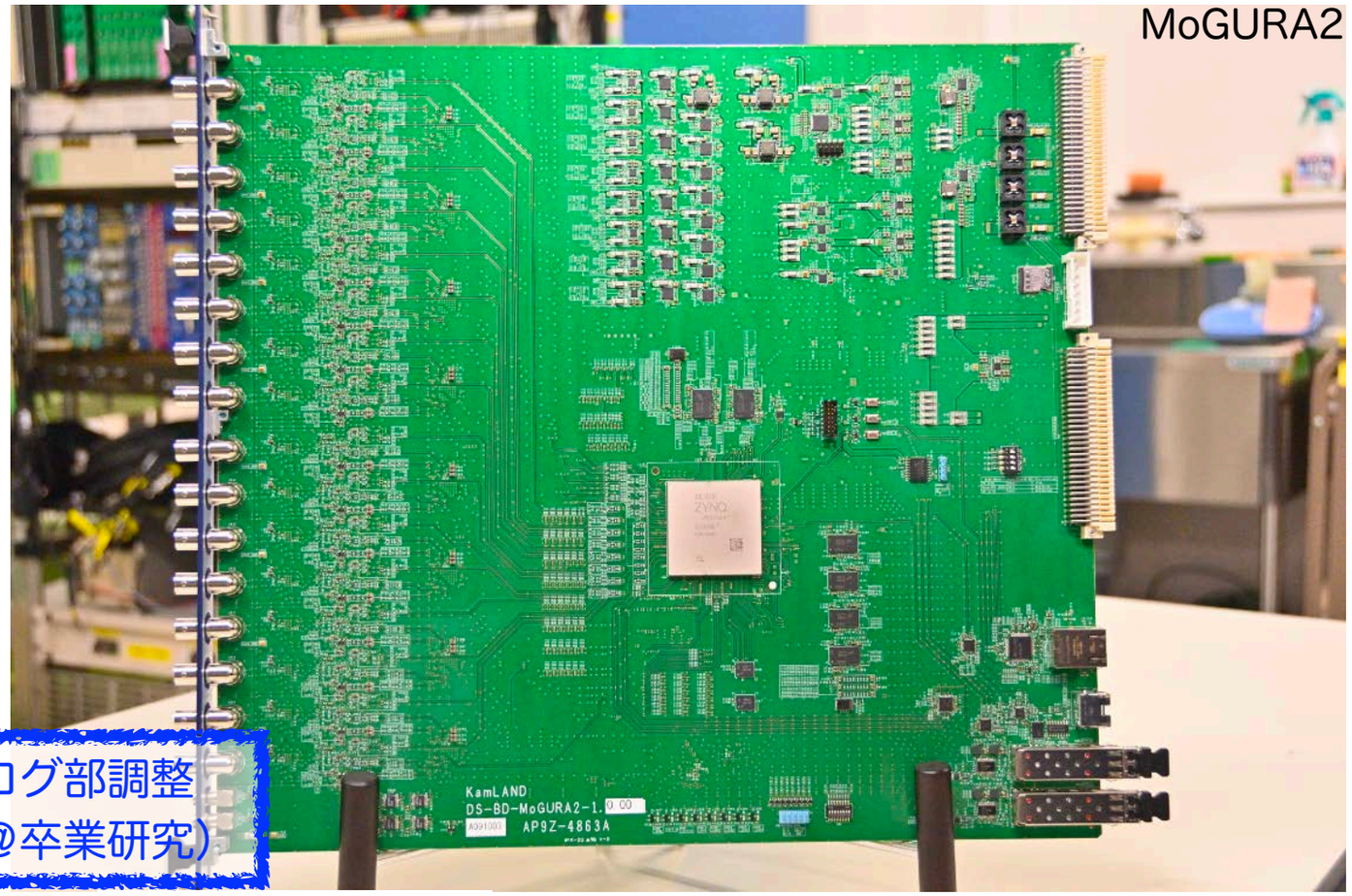
2002- KAMFEE



2010- MoGURA

Full-size prototype delivered in September 2020

MoGURA2

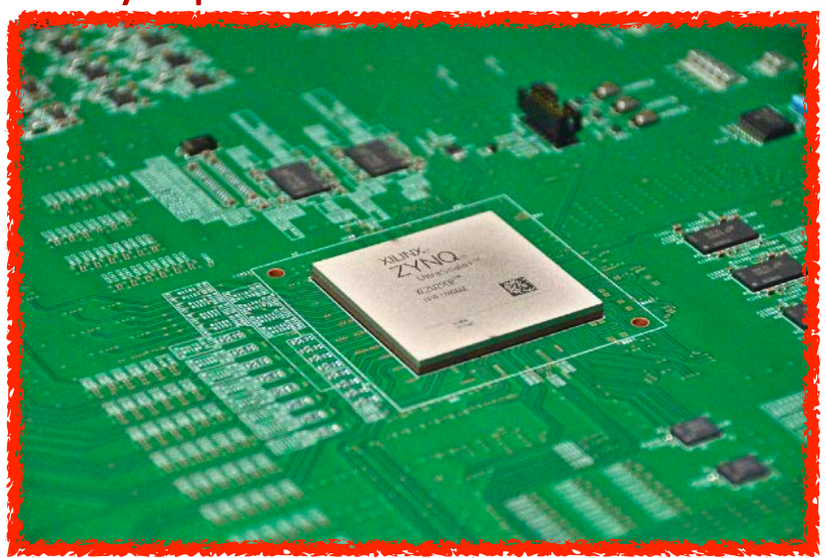


アナログ部調整
（中畑@卒業研究）

H-gain for 1p.e.
- 1GS/s, 12bit
(2GS/s and averaging)
- Vin: -150mV - +50mV
- Vnoise: <0.12mVrms
- BW: < 65-100MHz

L-gain for muon
- 250MS/s, 16bit
- Vin: -7.5V - +0.5V
- Vnoise: <1.2mVrms
- BW: < 65-100MHz

Xilinx Zynq®Ultrascale+™ RFSoC を使用

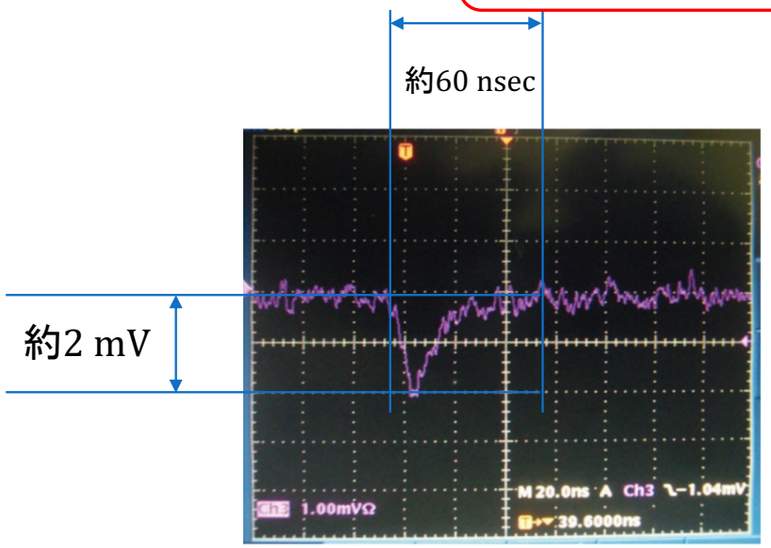


16ch×1GS/s×12bit

中村（公）@修士論文

①“ソフトウェアトリガー”対応

25 kHz パルスの恒常取得

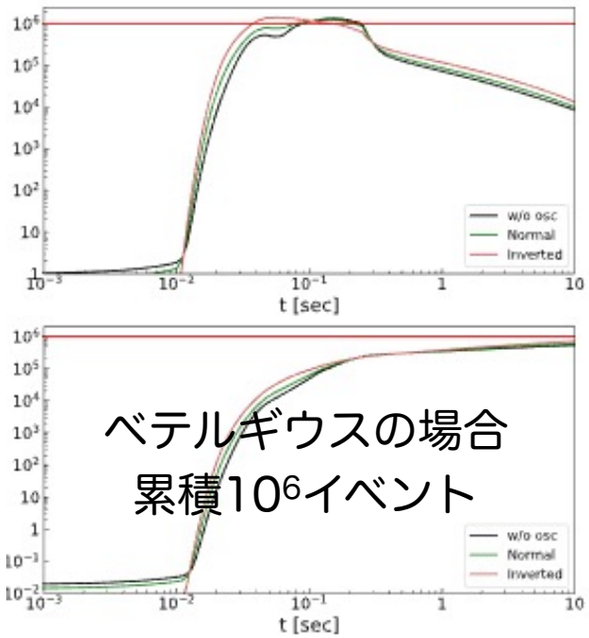


典型的な1 p.e.信号

目標の19倍のスループット

③ Nearby SN完全対応

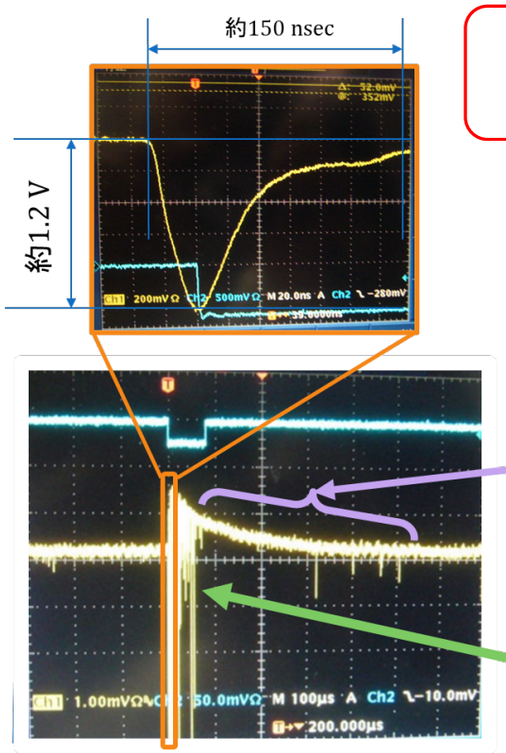
1 MHz パルスを1秒以上取得



目標の1.1倍の記録時間

②ミューオン直後の波形記録

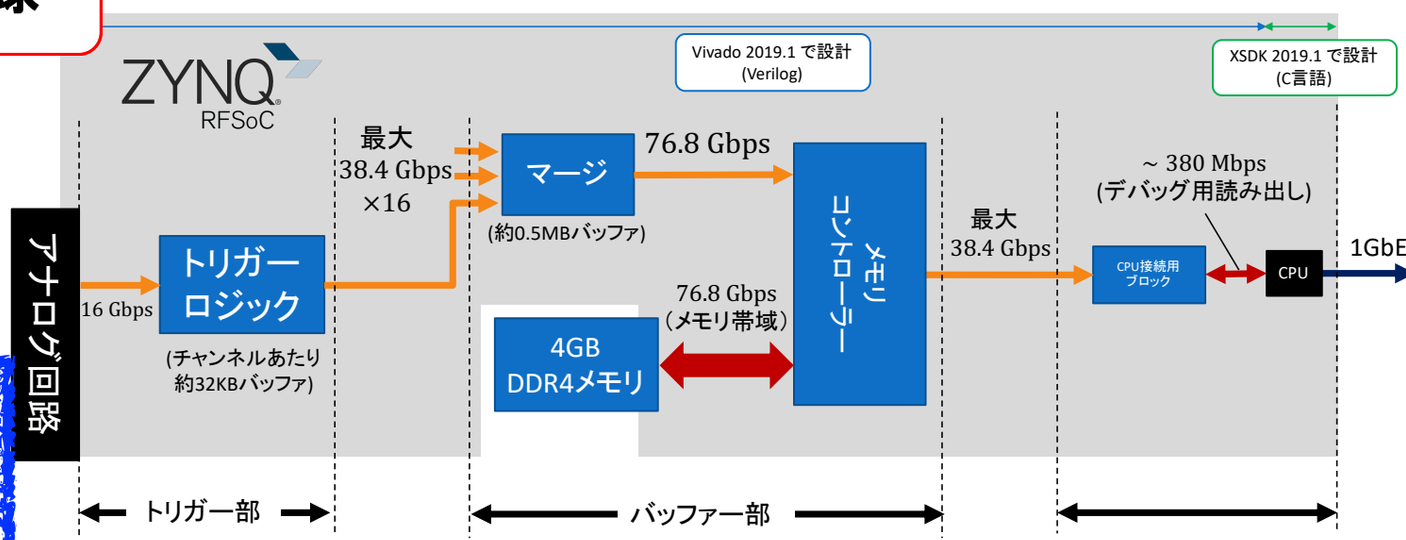
10 μsec以上の波形記録



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

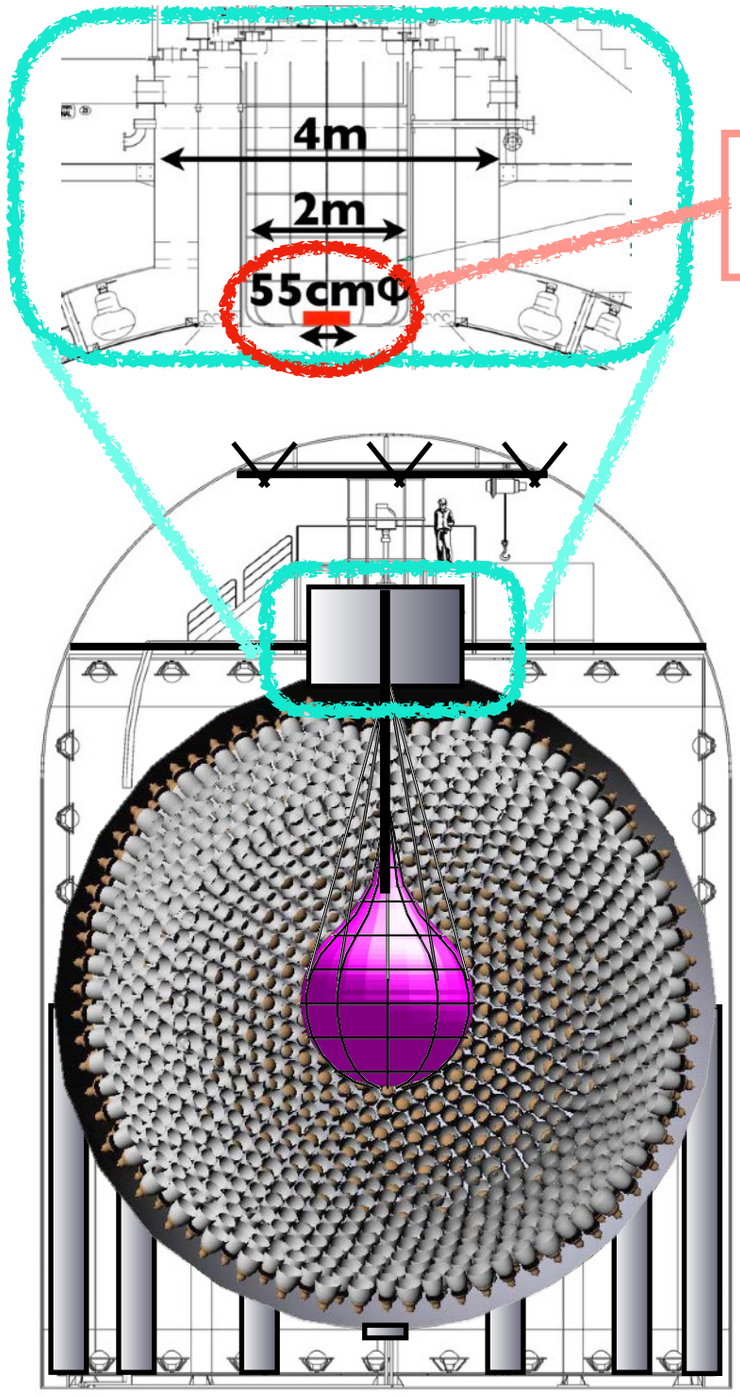


モジュール間はAMBA®AXI4プロトコルで接続

KamLAND2-Zen project

Ranked as “highest priority” in cosmic ray community

Higher energy resolution for reducing 2ν BG



1000+ kg xenon

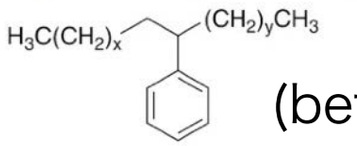
Expansion of entrance

Winston cone　light collection ×1.8

high q.e. PMT　light collection ×1.9

17”ϕ →20”ϕ　ε =22→30+%

LAB (Linear Alkylbenzene)



LAB LS　light collection ×1.4

(better transparency)

expected σ (2.6MeV)= 4% → ~2%

target sensitivity　20 meV

20meV　95% of IO
50% of NO

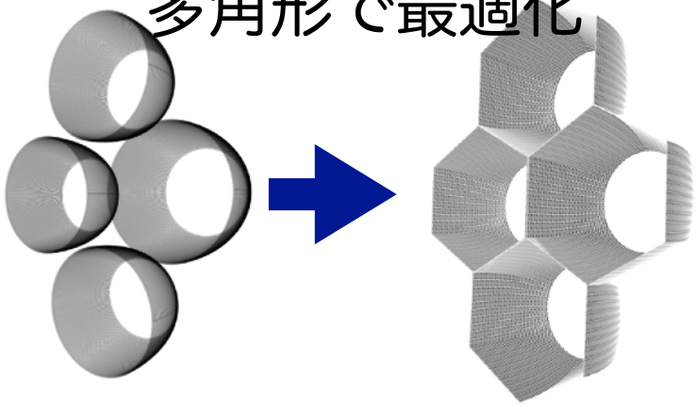
KamLAND2-Zenに向けた準備

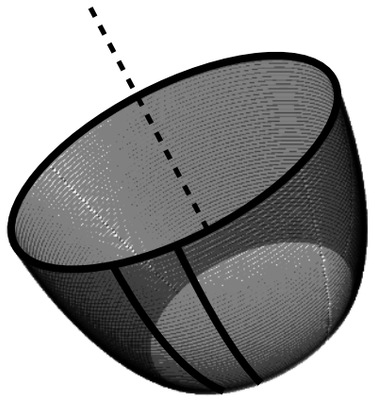
エネルギー分解能向上のための技術開発

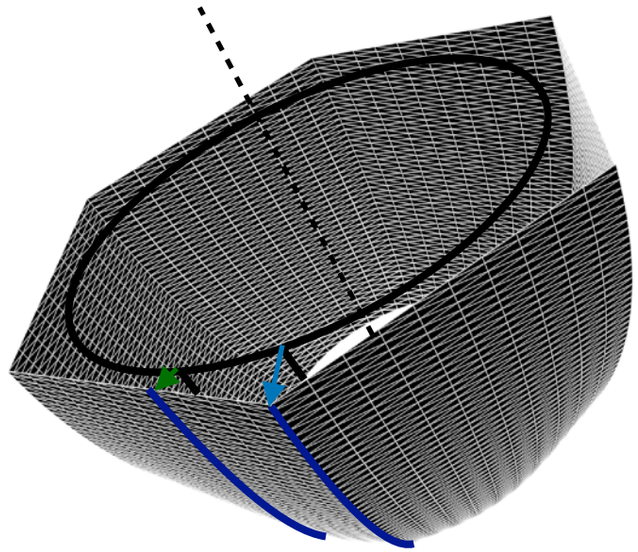
三本杉@修士論文

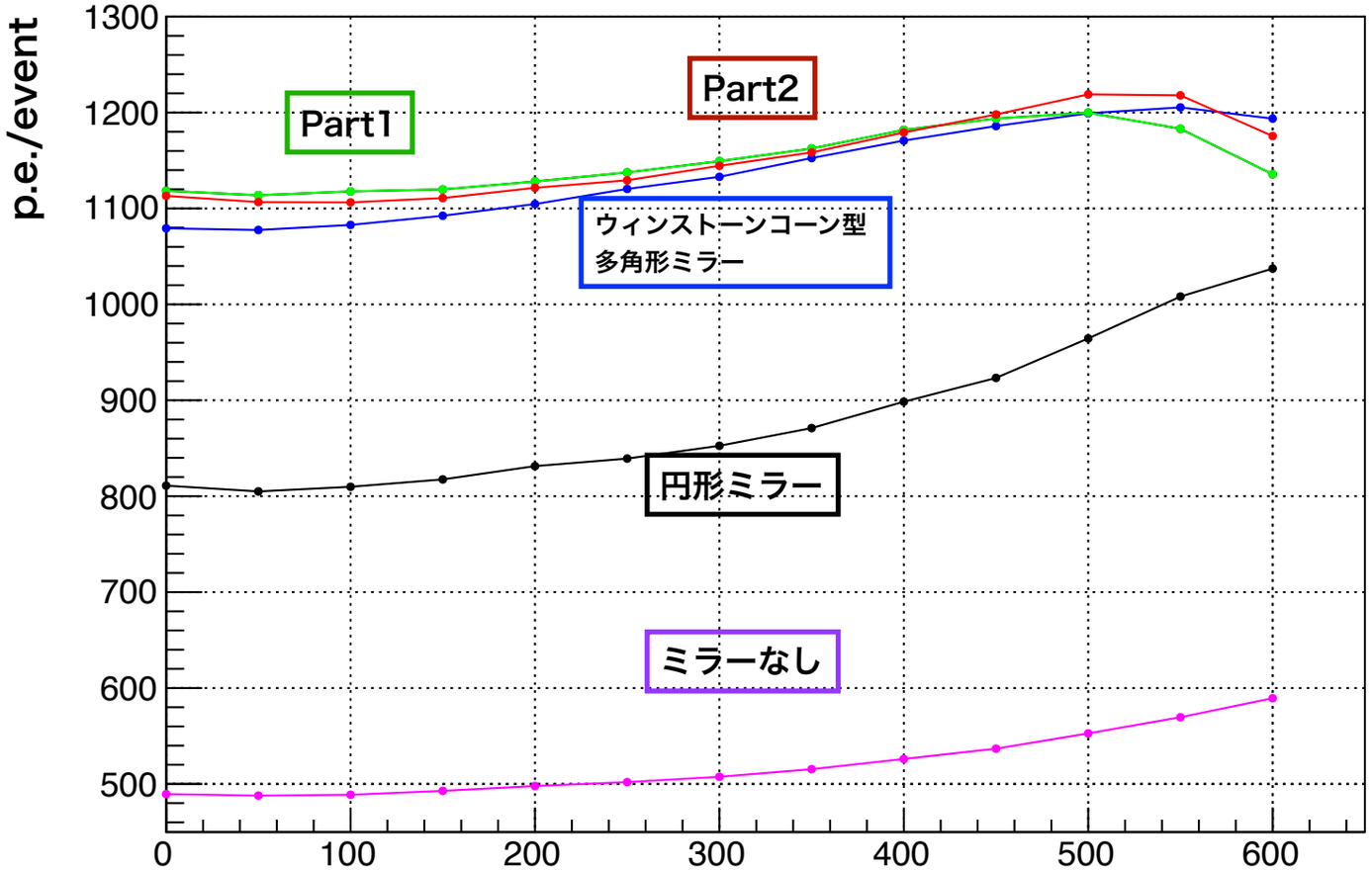
円形ミラーでは隙間ができるので、

多角形で最適化



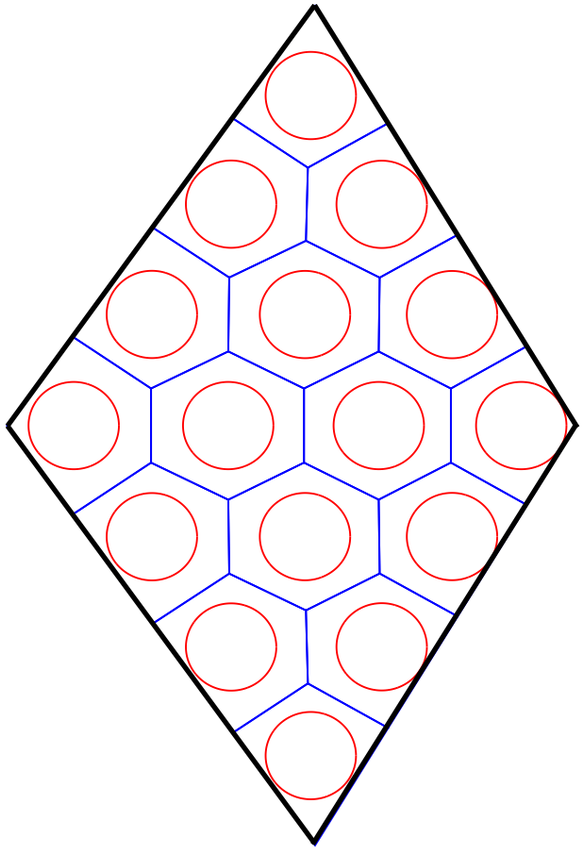






目標1.８倍に対し

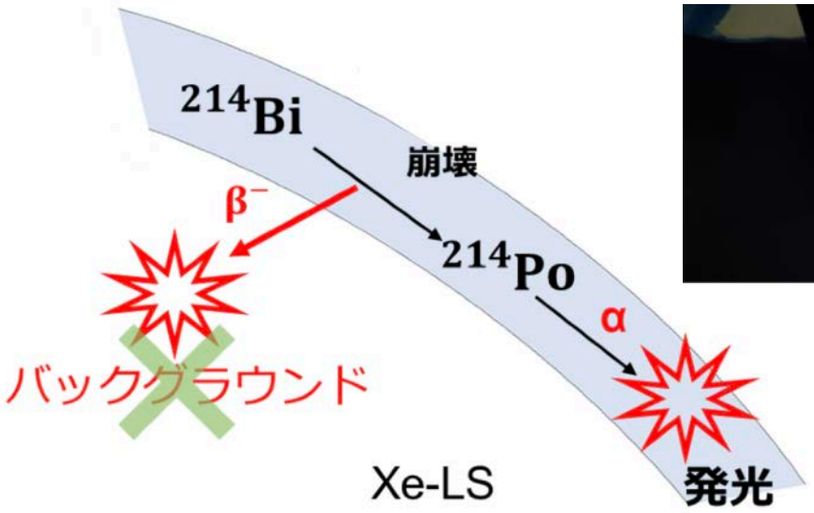
ミラーなしと比べて2.2~2.3倍の集光量

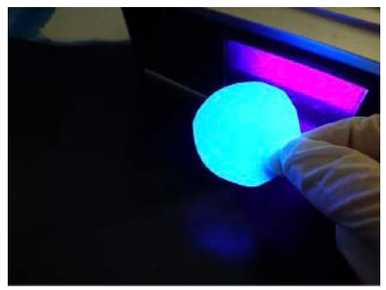


今年度テストタンクを建設して実機テストの予定

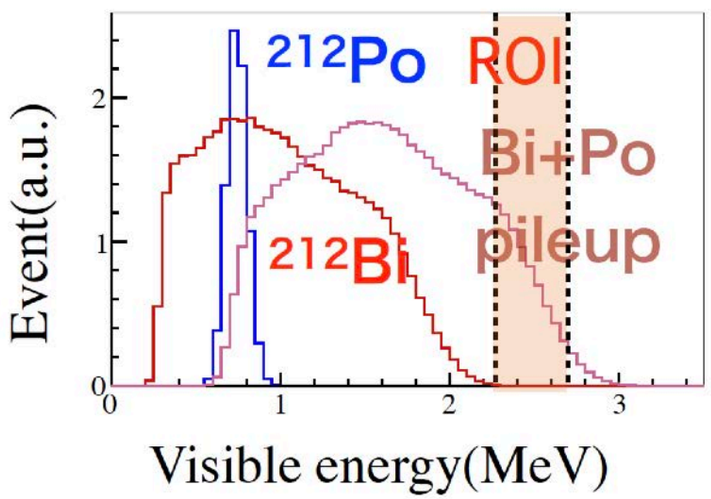
低BG化のための開発

ミニバルーンの^{214}Bi低減　中村（陸）@修士論文

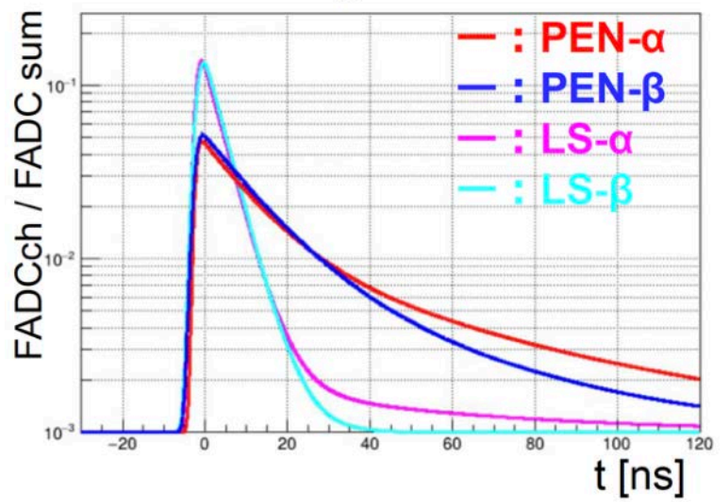




新たなBG

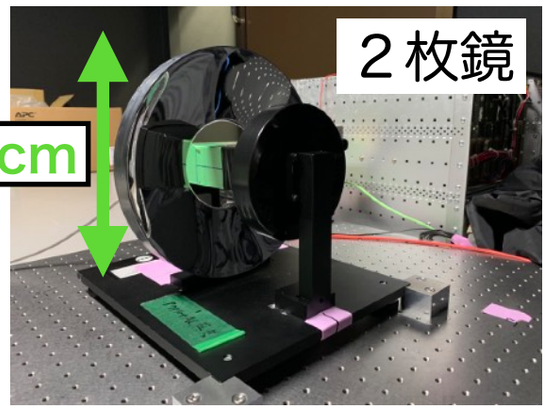


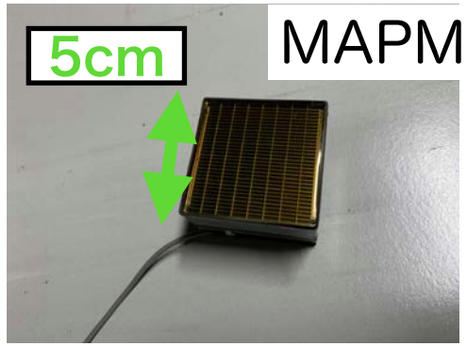
PENの発光時定数 Log scale



^{212}Bi-Poも問題にならない。

撮像によるBG低減の可能性　前村@修士論文

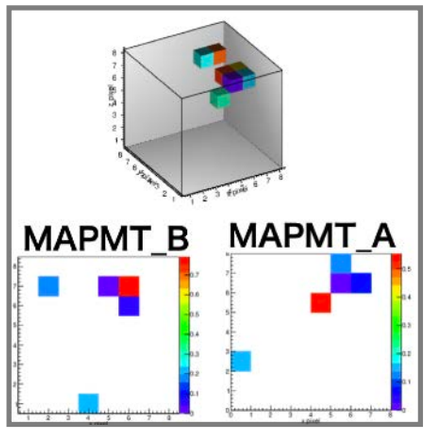




反電子ニュートリノの方向測定を目的に開発しているが、γ線の識別ができるので二重ベータ崩壊のBG低減にも有効

×２

（立体角0.4%×2）



位置再構成1.4cm

βγ分離 52% rejection @ 90% efficiency

KamLAND2なら立体角10%は可能？

日本学術会議マスタープラン2023 へ大型としてLOI提出　天文・宇宙分科会

「極低放射能環境でのニュートリノ実験」（略称：カムランド２）

これまでマスタープラン2014, 2017, 2020 に中型として掲載

○逆階層構造をカバーするニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索

○ニュートリノ地球物理の推進

○マルチメッセンジャー天文学の低エネルギーニュートリノ

（低E ν：KamLAND2, 中E ν：Hyper-K, 高E ν：IceCUBE)

○茂住地下施設での大型アクティビティの継続

○準備期間(-2024年)23億円（濃縮キセノン200kg　4億円、高量子効率PMT　5億円、高性能電子回路　3億円、クリーンルーム整備　3億円、純空気製造装置　1億円、純化装置高度化　5億円、集光ミラー　1億円、バルーン　1億円）

○建設期間(2025–26年)17億円（工事　1億円、高量子効率PMT　5億円、高光収率液体シンチレータ　11億円）

○観測期間(2027–2036)人件費、運転経費等　3.8億円(内自己資金3億円、国外0.3億円)×10年

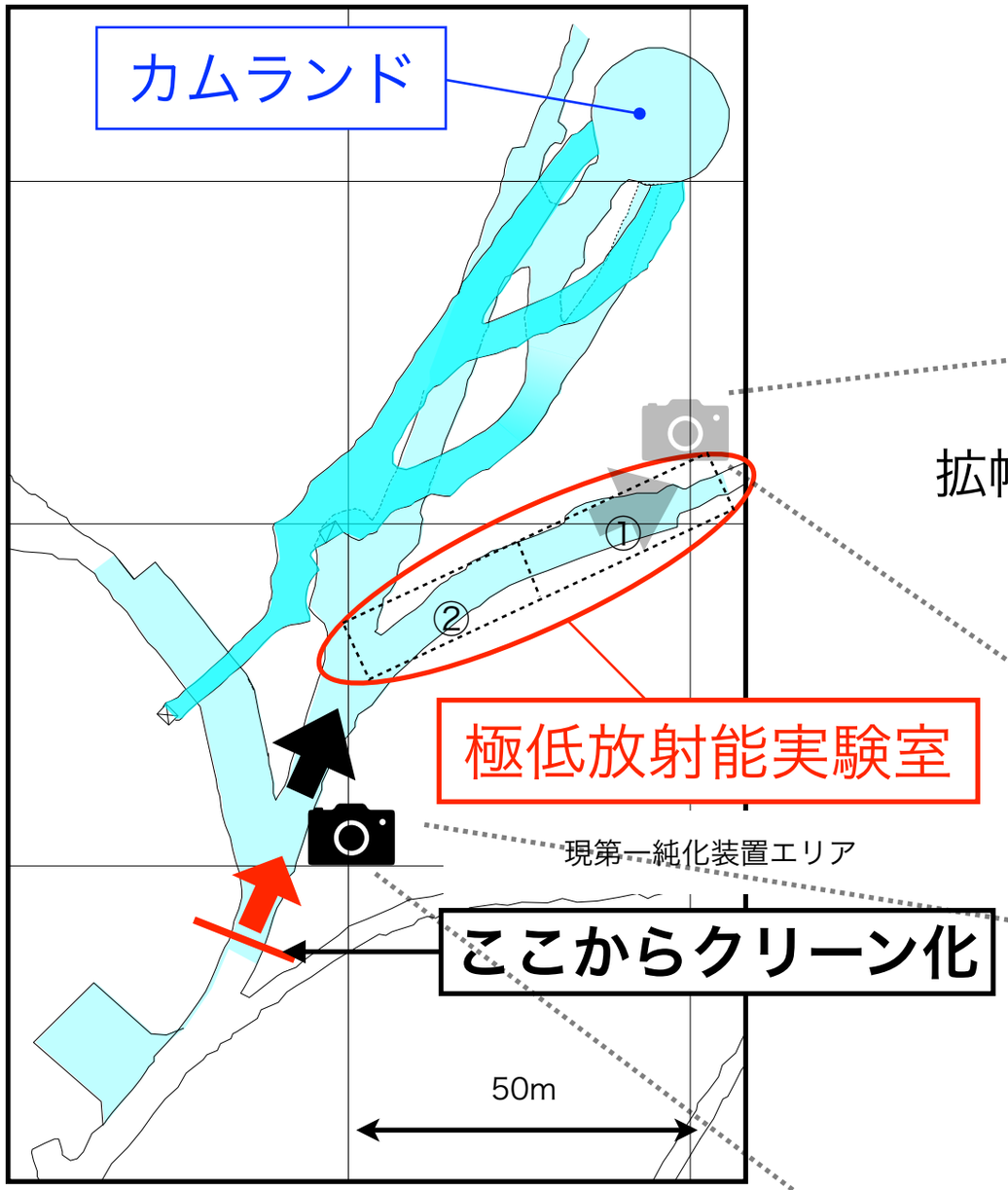
●建設費合計40億円（内国外4億円）、運転経費3.8億円（内国外0.3億円）×10年

運転経費込みで78億円（要求額は41億円）

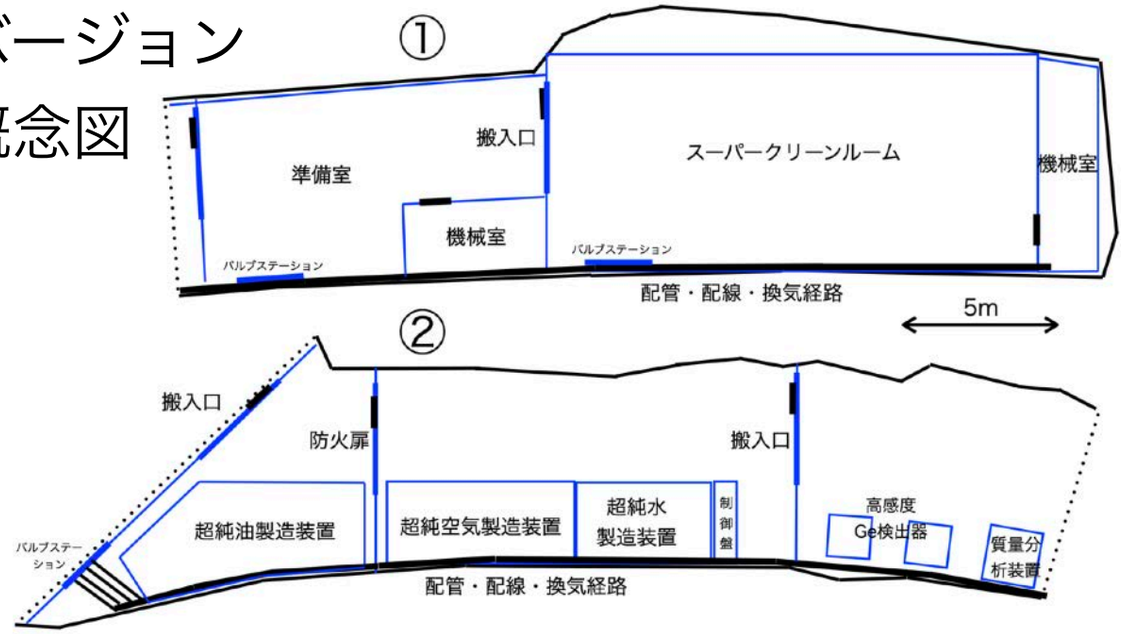
ご支援よろしくお願いします。

クリーン環境の整備状況

想定目標

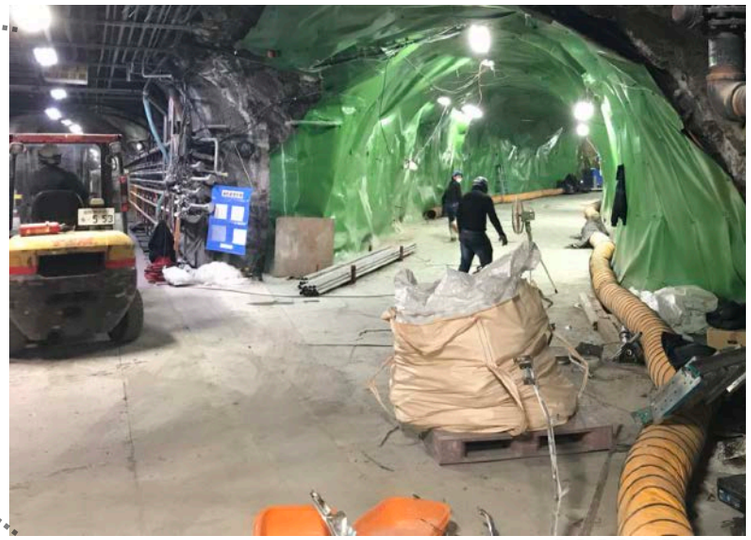


最狭バージョン 整備概念図



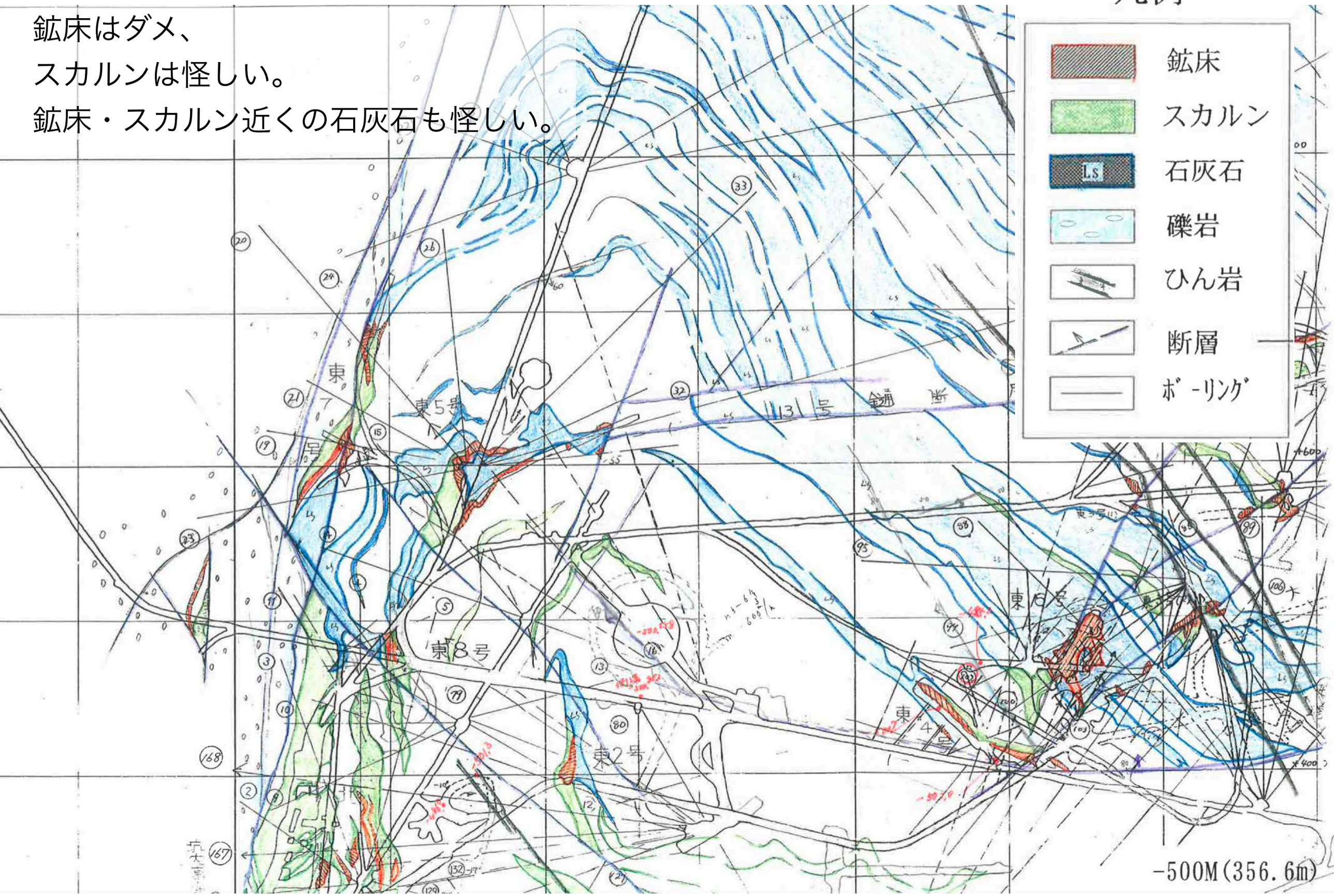
拡幅可能性調査

20210421



20210308

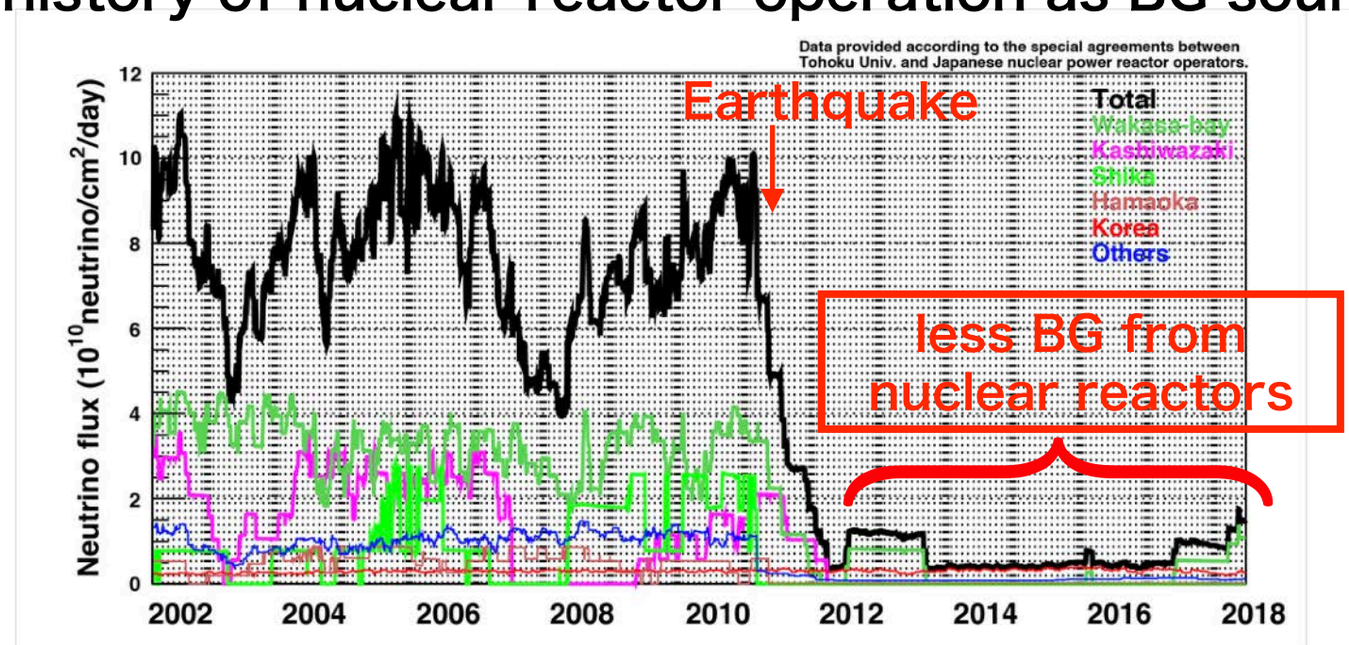
鉱床はダメ、
スカルンは怪しい。
鉱床・スカルン近くの石灰石も怪しい。



小規模の拡幅は簡単ではなさそう。ボーリング調査を検討中。

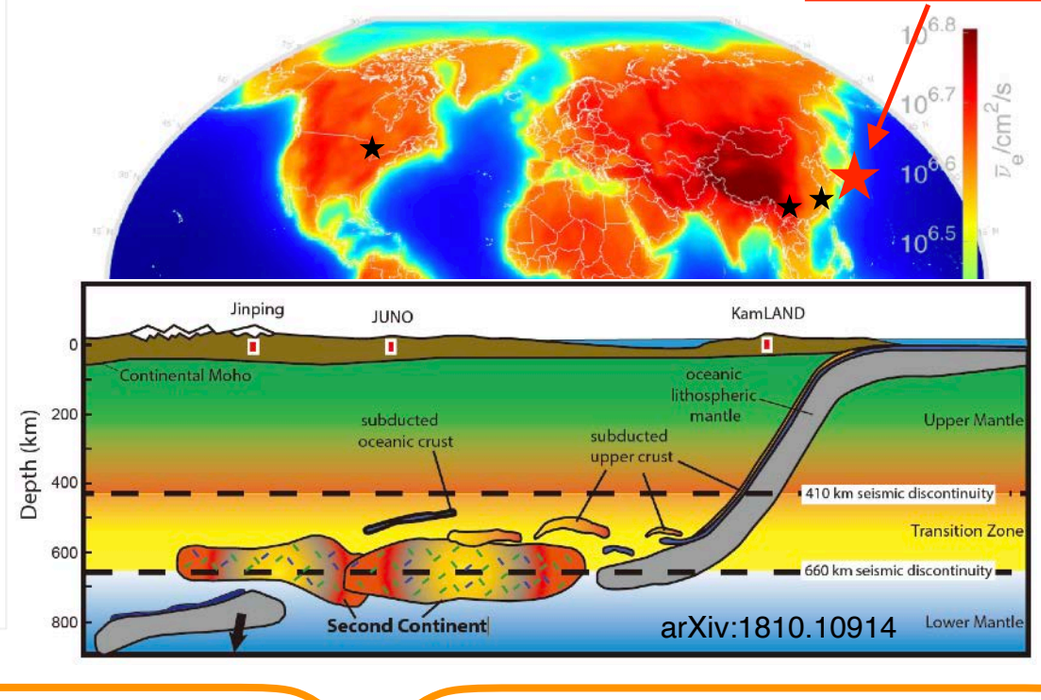
地球ニュートリノの観測状況

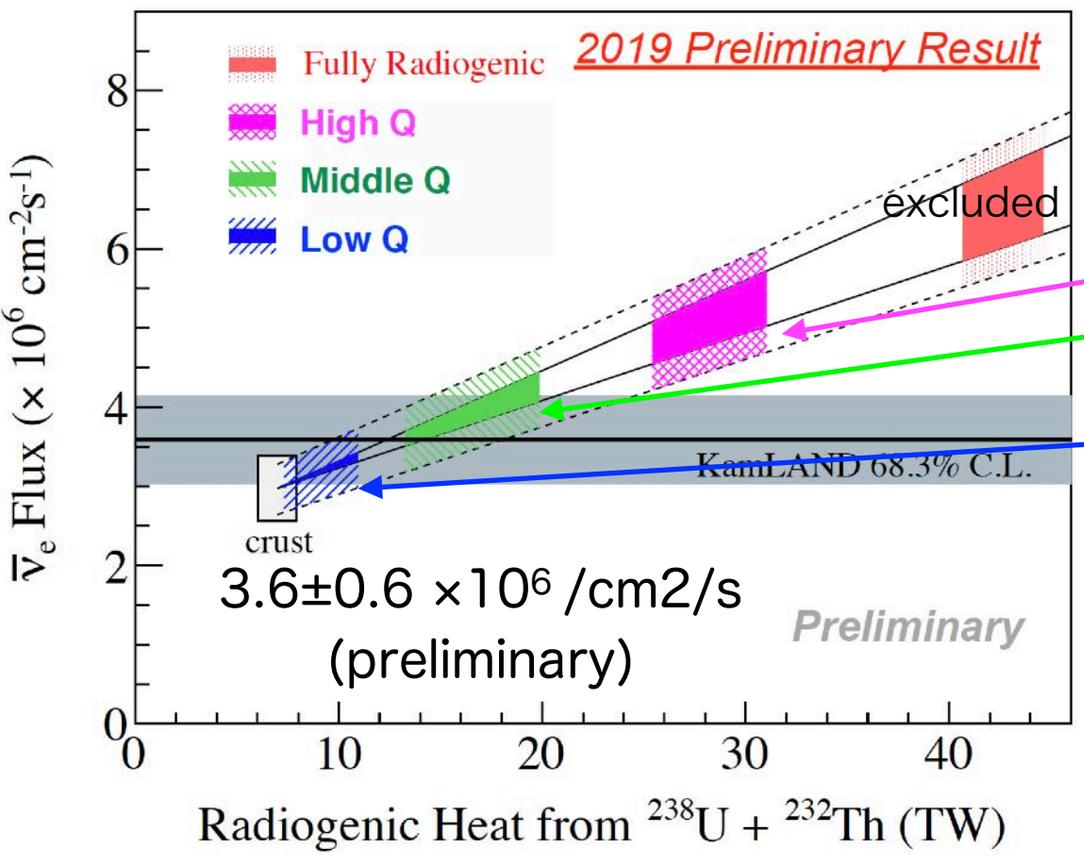
history of nuclear reactor operation as BG source



Very important in the future geo-neutrino observation network

Unique location (edge of continent)





Mantle convection

geophysical model
predicts **single convection**

geochemical model
predicts **multi-layer convection**

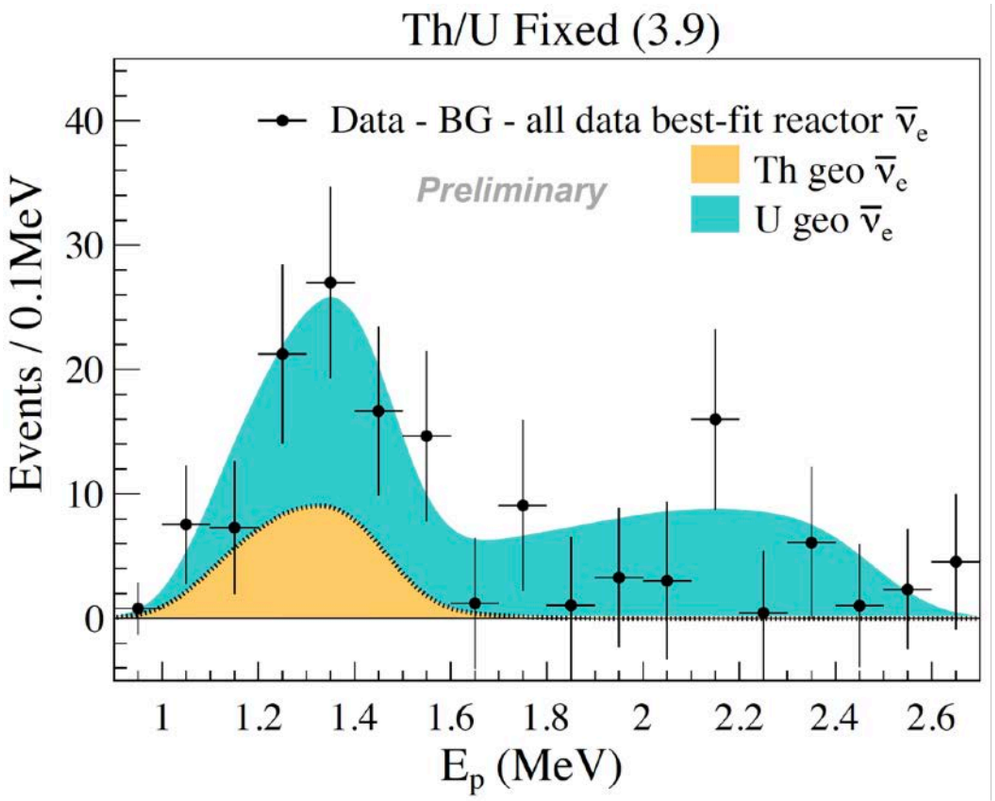
Primordial meteorite

chemical abundance implies **“C1 chondrite”** (geochemical model)

▼ U,Th amount

isotope ratio implies **“enstatite chondrite”** (geochemical model)

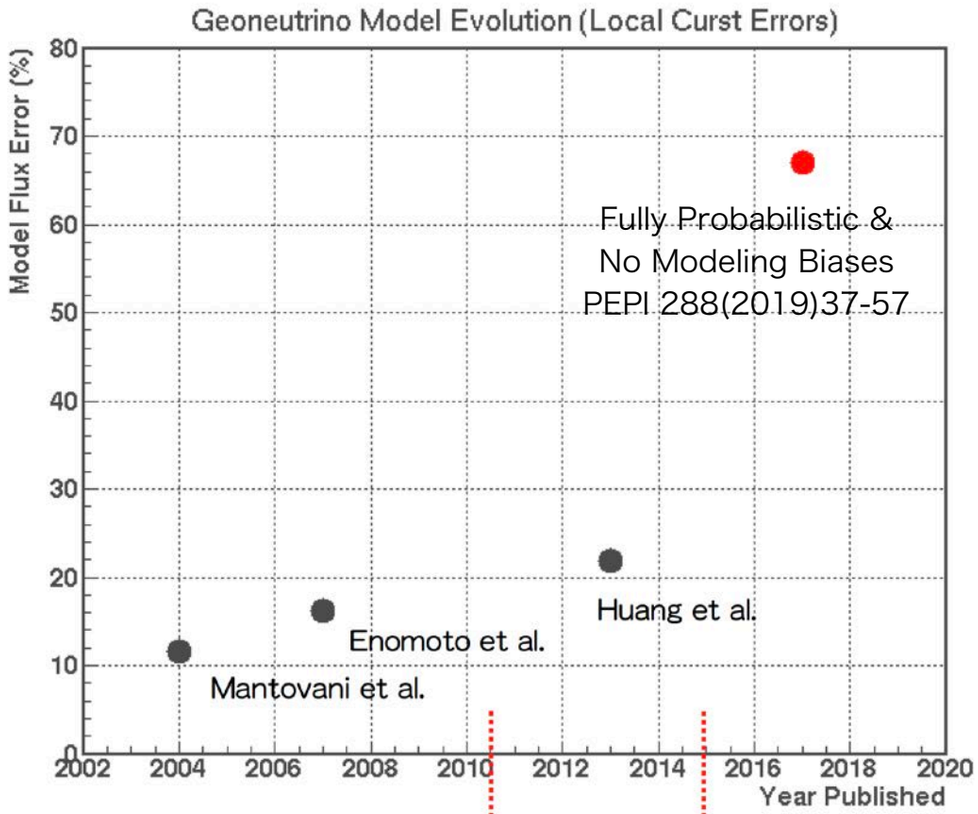
Long-standing arguments on
Primordial meteorite and
Mantle convection of the earth
can be settled by ν_{geo} observation



3.6±0.6 ×10^6 /cm^2/s
(preliminary)

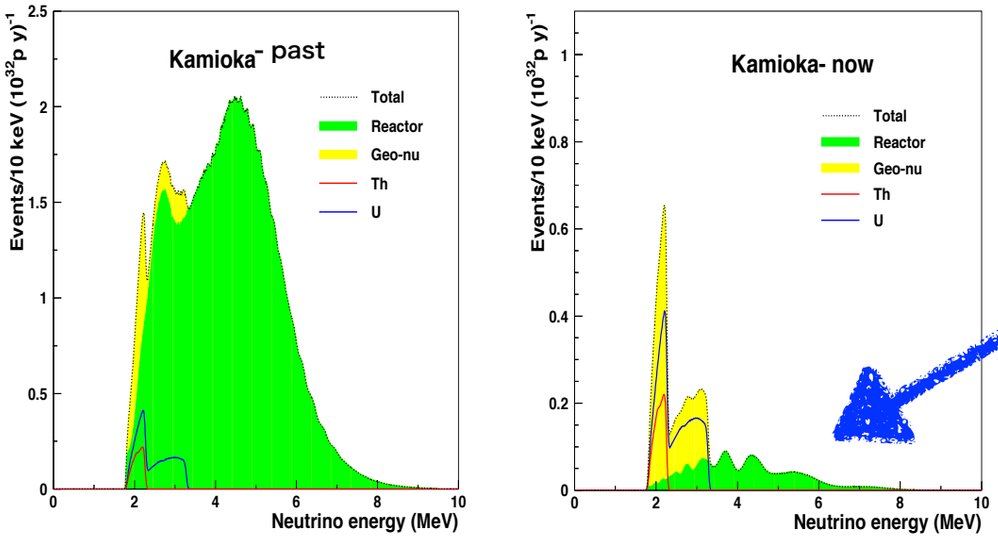
15.6% error

Earth model predictions



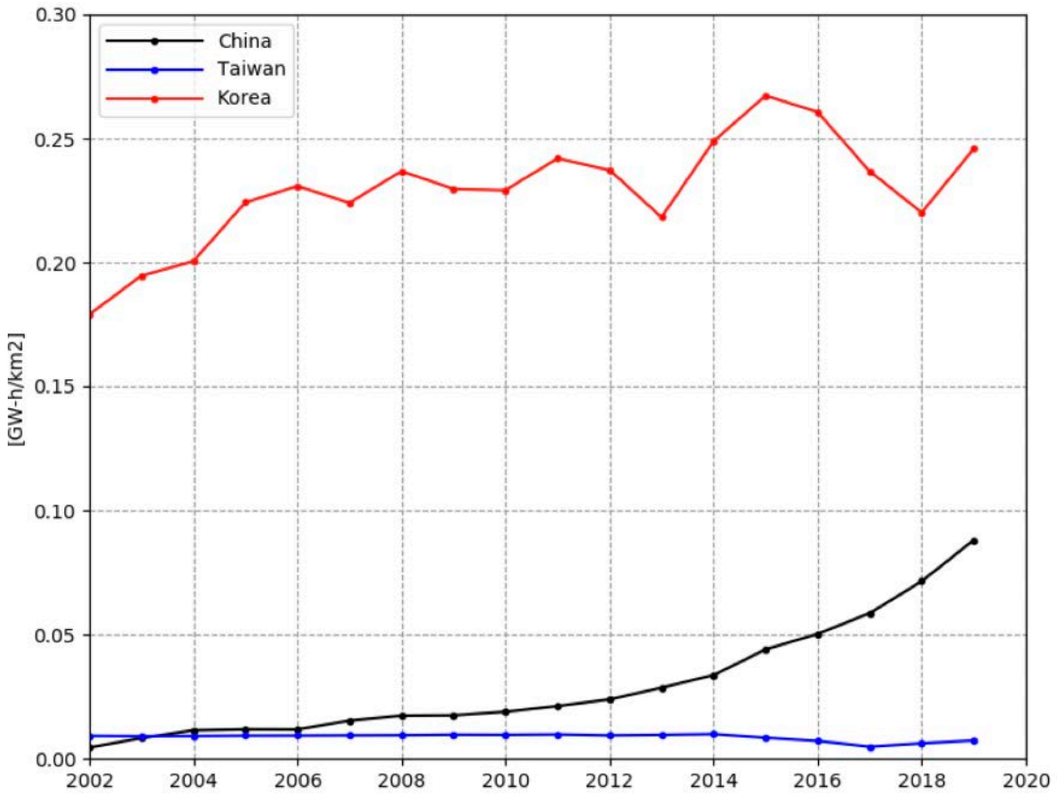
Achieved uncertainty 15.6% is already better than that of model predictions.

reactor neutrino geo-neutrino



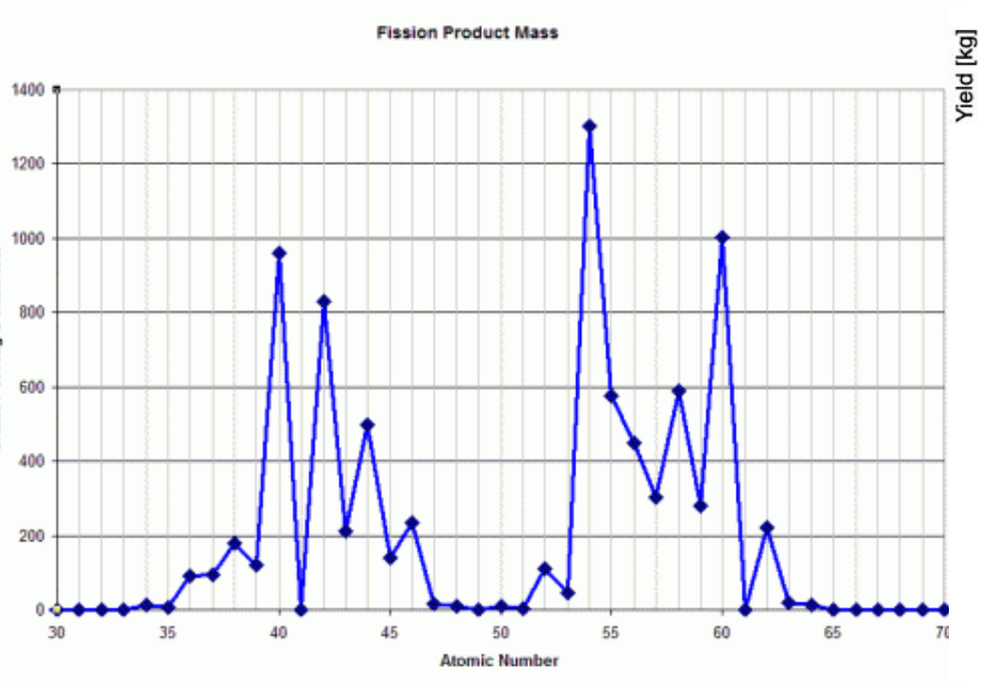
Study of very long baseline neutrino oscillation with Korean reactors is going on.

Time variation of the world reactor neutrino flux

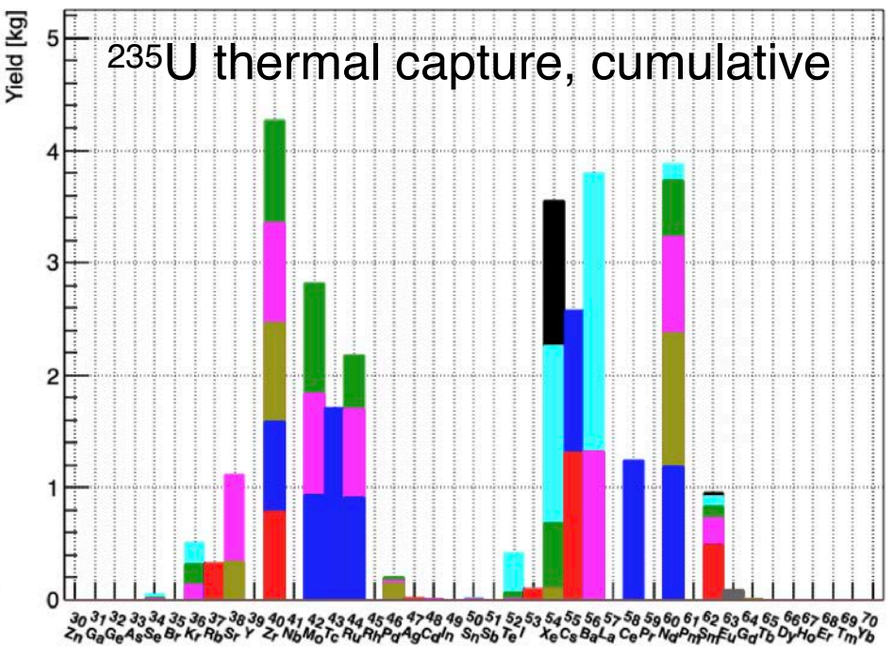


Chinese activity is rapidly increasing.
Effect is less than 10% during Japanese low reactor period.

light water reactor 400 days



ENSDF fission only



Noticeable difference implies importance of neutron simulation in nuclear reactors.

It may be a clue to understand the anomaly in reactor neutrino spectrum.

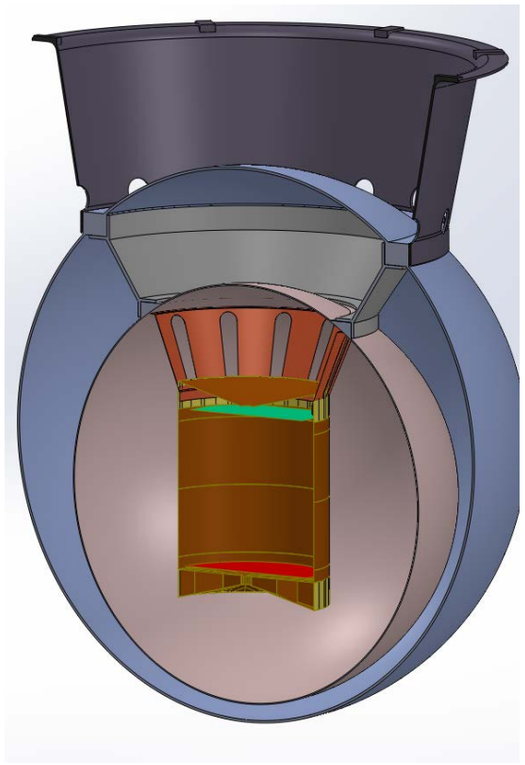
ORIGEN2+ENSDF estimation is planned.
It is also applicable to MOX fuel.

Toward 1 meV

Planned projects using ^{136}Xe

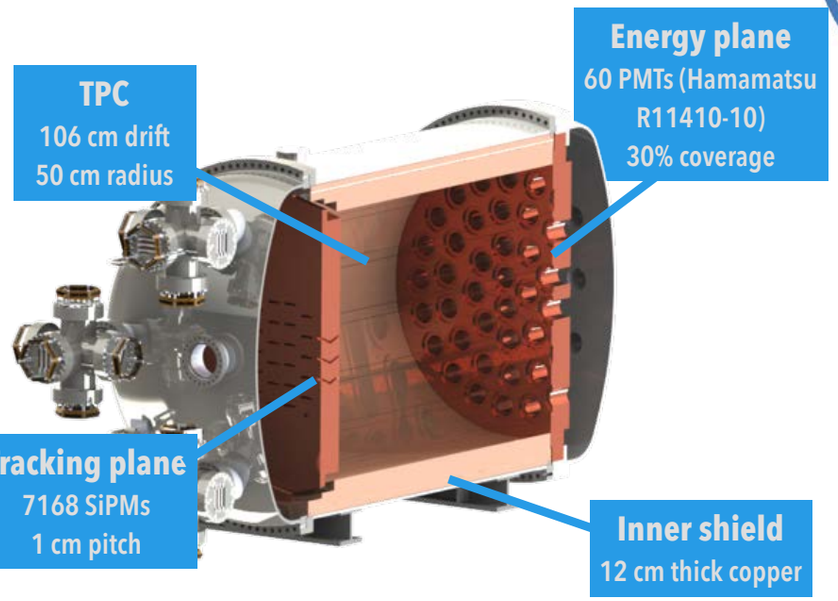
USA

nEXO 5ton



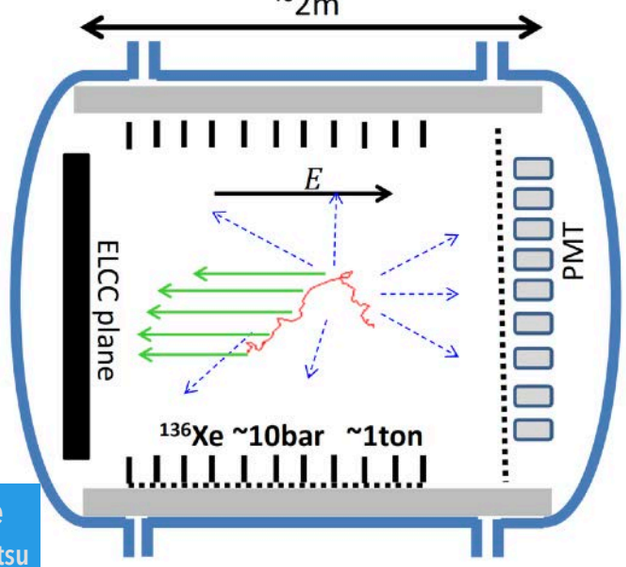
Spain

NEXT 100kg-1ton



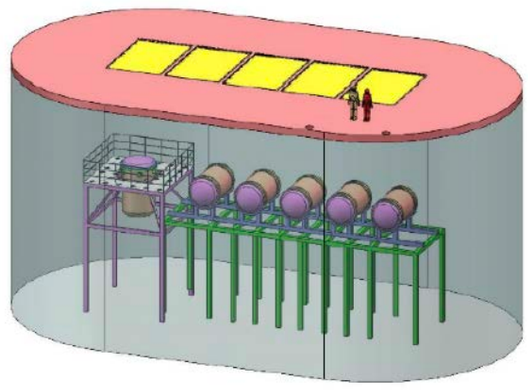
Japan

AXEL 1ton



China

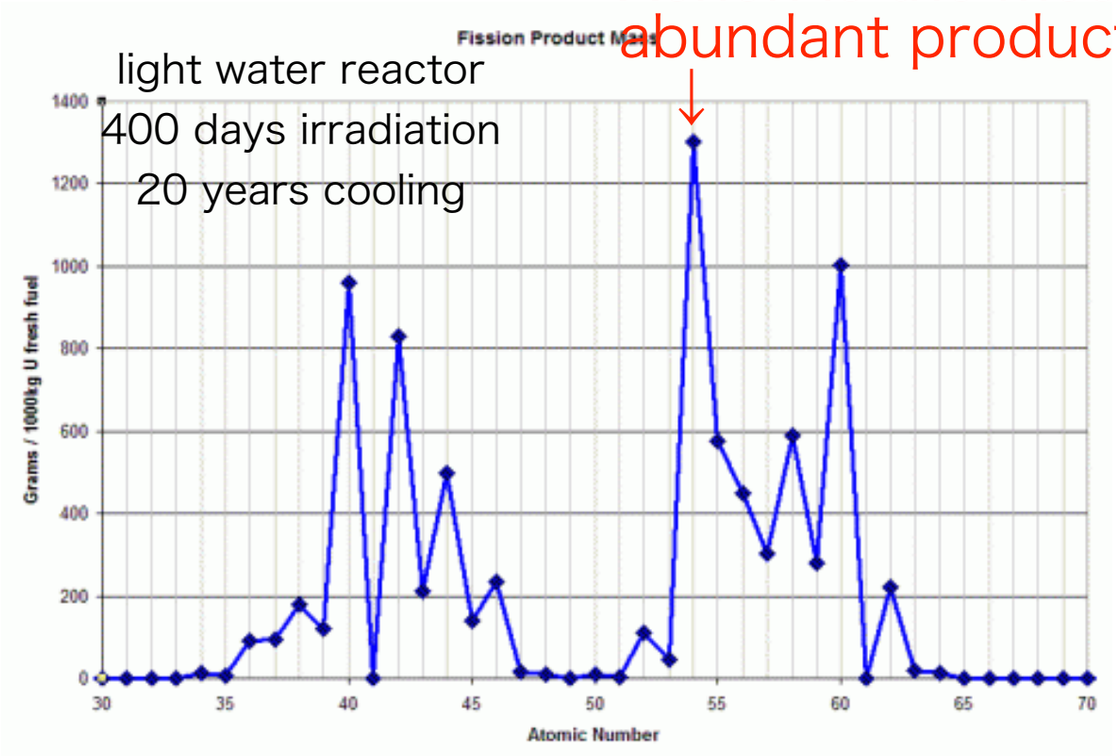
PandaX-III 1ton



Further future of these projects, a world-unified project with ~100 ton of ^{136}Xe should be prepared.

More xenon?

Xenon is the most abundant products



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

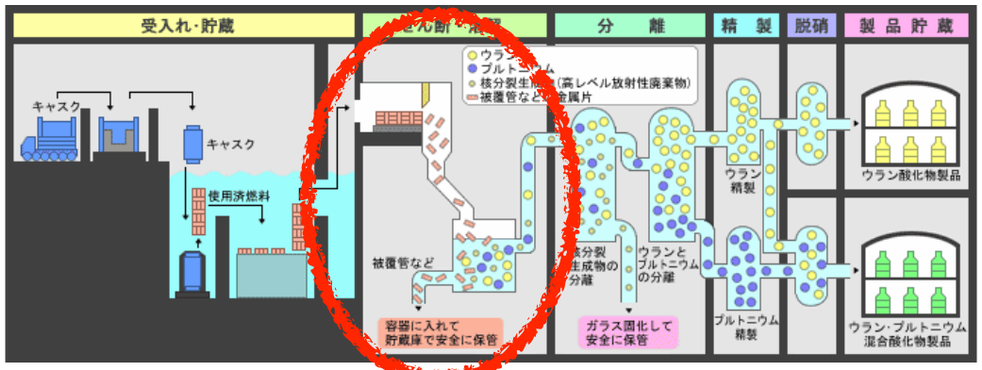
	36 months	atmospheric
$^{128}Xe/^{132}Xe$	$2.81 \cdot 10^{-3}$	$7.13 \cdot 10^{-2}$
$^{129}Xe/^{132}Xe$	$4.7 \cdot 10^{-6}$	0.9832
$^{130}Xe/^{132}Xe$	$3.32 \cdot 10^{-4}$	0.1518
$^{131}Xe/^{132}Xe$	0.3756	0.7876
$^{134}Xe/^{132}Xe$	1.3433	0.3883
$^{136}Xe/^{132}Xe$	2.1176 44%	0.3298 8.9%

Isotopic enrichment is easier or can be omitted.

burn-up 33GWd/t
3.5% ^{235}U
3 years irradiation

→ 5.4 kg Xe/1 ton U

Several tens of ^{136}Xe is remaining in Japanese spent fuel, and several hundreds of it in the world !!



Currently off-gas is just released to the atmosphere after dilution.

Collaboration with JNFL, ATOX and more for extracting useful materials including medical purposes at the recycling plant is starting.
Role of RCNS is R&D of noble gas collection from off-gas air and Xe concentration against Kr.

まとめ

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索は、マヨラナ性の検証を通して、「宇宙・素粒子の大問題」解明への糸口となる。

逆階層のバンド領域へ切り込む40meVや将来計画の20meVの感度は大きなパラメータ被覆率があり複数の理論モデルにも有感で、着実な感度向上が重要である。

長寿命の^{136}Xe破砕生成物の理解・PMTの故障への対応に手間取っているが、ゴールは近い。

BG低減に重要な中性子検出効率を改善する電子回路の開発は着実に進んでいる。（しかし、半導体の供給問題が懸念事項）

将来計画に向けた開発は順調で、効果の大きい集光ミラーは実機テストの予定。共同利用に向けたスーパークリーン環境の整備も着実に進んでいる。

地球ニュートリノ観測は理論モデルの精度を上回るゴールを達成している。データ更新は、PMTの故障への対応に合わせる。中国原子炉の急成長への対応と原子炉ニュートリノスペクトルの系統誤差縮小への取り組みも進めている。

Stay tuned!