

研究用原子炉ニュートリノを使った研究の可能性 その1

大阪大学大学院理学研究科
吉田 齊

梅原さおり、嶋達志、伏見賢一、裕隆太、小川泉

内容

- Short Baseline Anti-neutrino Anomaly
- 原子炉ニュートリノを使ったステライルニュートリノ研究
 - 福井炉での研究の優位性
 - 性能要件(低BG化、SN改善)
 - 検出器のアイデア

このTalk

-
- 原子炉ニュートリノの精密測定
 - エネルギースペクトルの精密測定
 - スペクトルの時間変化(燃料比)
 - 他の検出器Option
 - エネルギー分解能、位置分解能に優れた検出器
 - 低エネルギー原子炉ニュートリノの測定

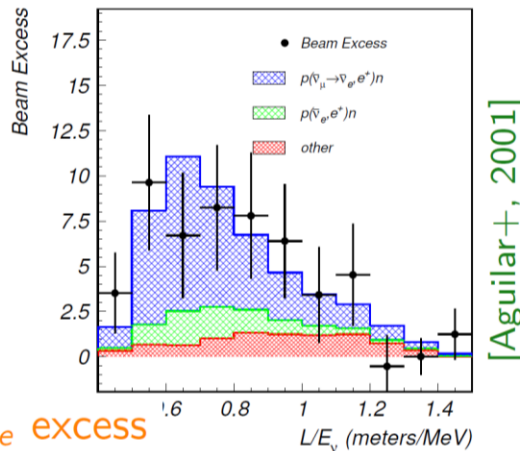
次のTalk(梅原)

Short Baseline (SBL) anomalies

- 3世代ニュートリノでは解釈できない実験結果 S. Gariazzo, Talk at TAUP2021

Do three-neutrino oscillations explain all experimental results?

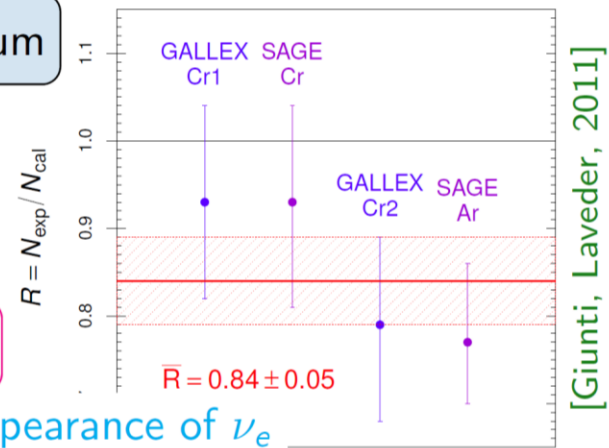
LSND



3.8σ

$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ excess

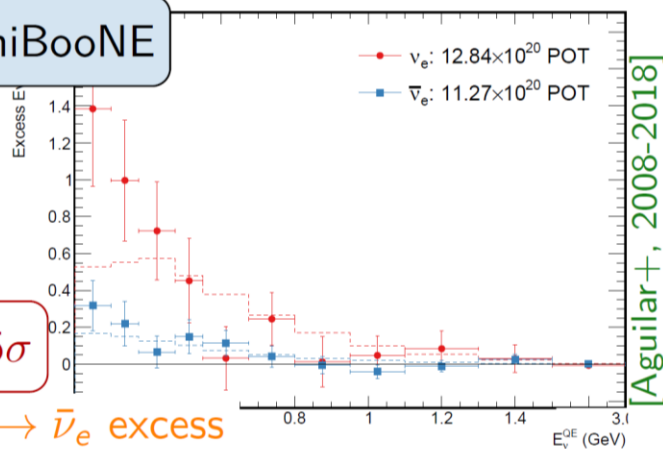
Gallium



2.7σ

disappearance of ν_e

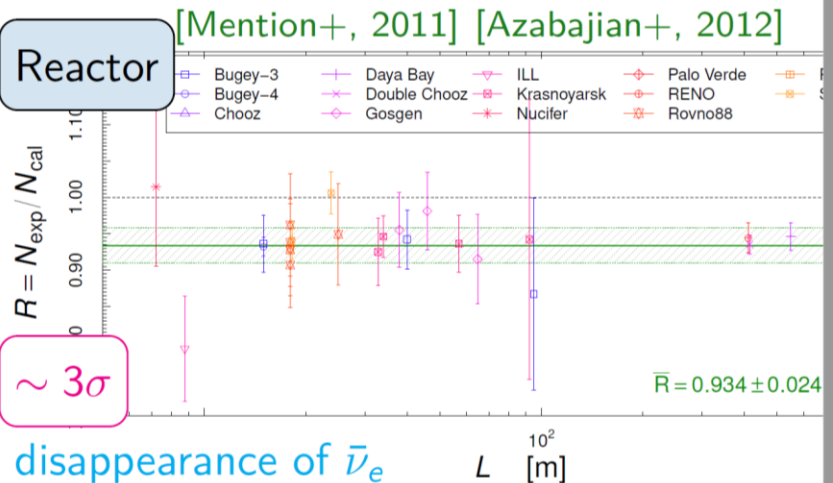
MiniBooNE



$\sim 5\sigma$

$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ excess

Reactor



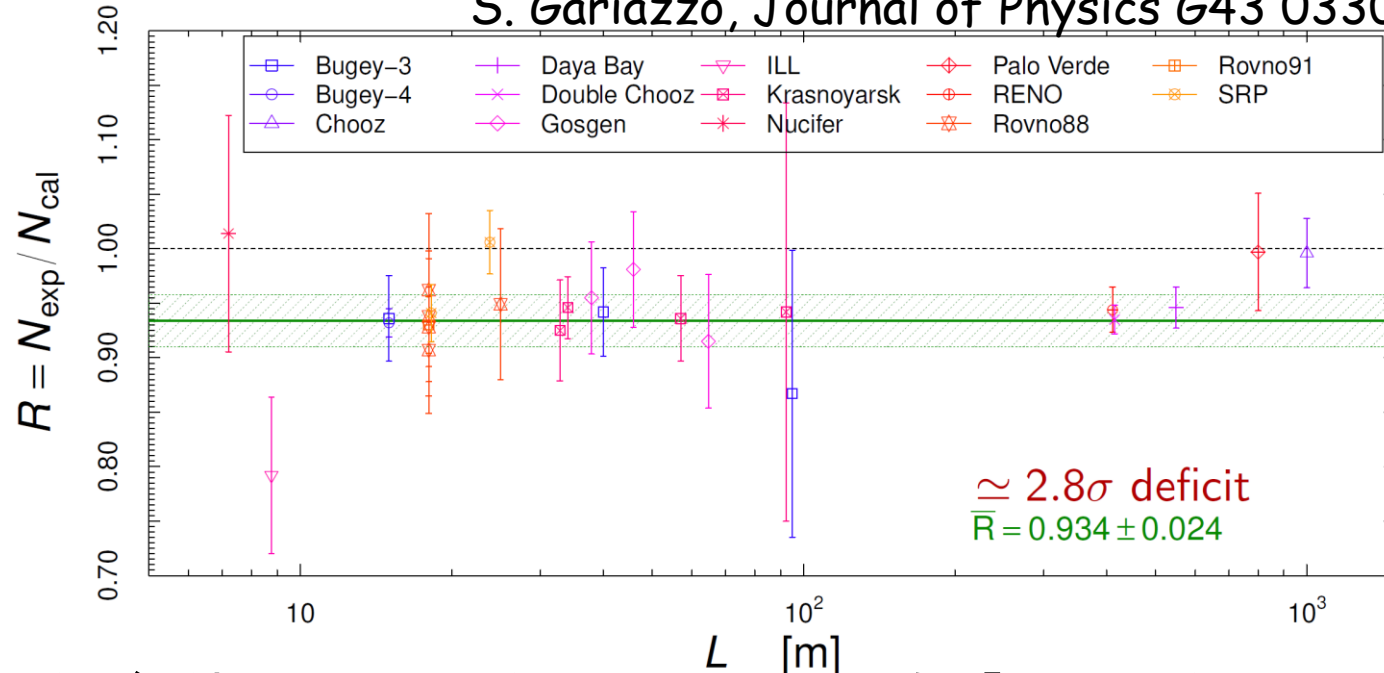
$\sim 3\sigma$

disappearance of $\bar{\nu}_e$

SBL anomalies (Reactor $\bar{\nu}$)

- Short-baseline Reactor Antineutrino Anomalies (RAA)

S. Gariazzo, Journal of Physics G43 033001 (2016)



- なぜ、統計的に十分なSignificanceでも、「発見」となっていないか？

- 当然、系統誤差(考慮されていない)があると思っている

- 検出器の性能

- 原子炉ニュートリノのエネルギースペクトル

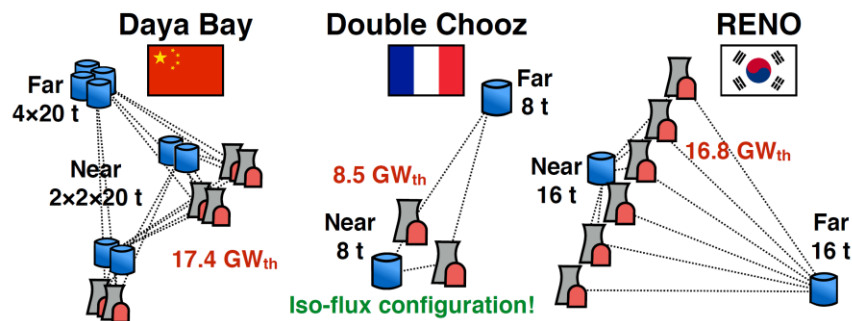
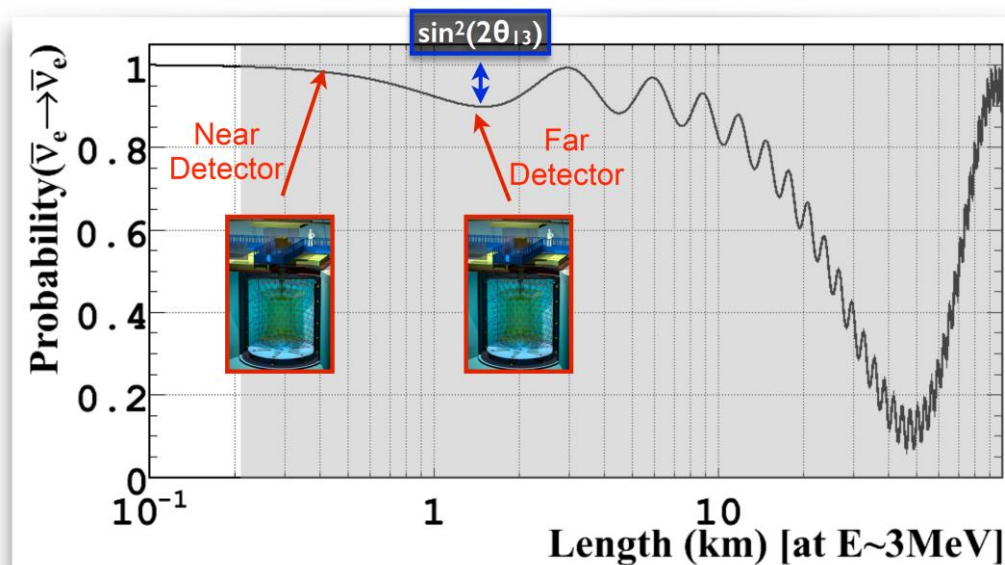
- 2011: new reactor $\bar{\nu}_e$ fluxes by Huber and Mueller (HM-Model)

- [Huber, PRC 84 (2011) 024617] [Mueller+, PRC 83 (2011) 054615]

θ_{13} measurement experiments

● θ_{13} 実験は？ → 発見 & 精密測定に成功

- Daya Bay, RENO, Double Chooz
- 何をしたか？ → Near & Far検出器の比較



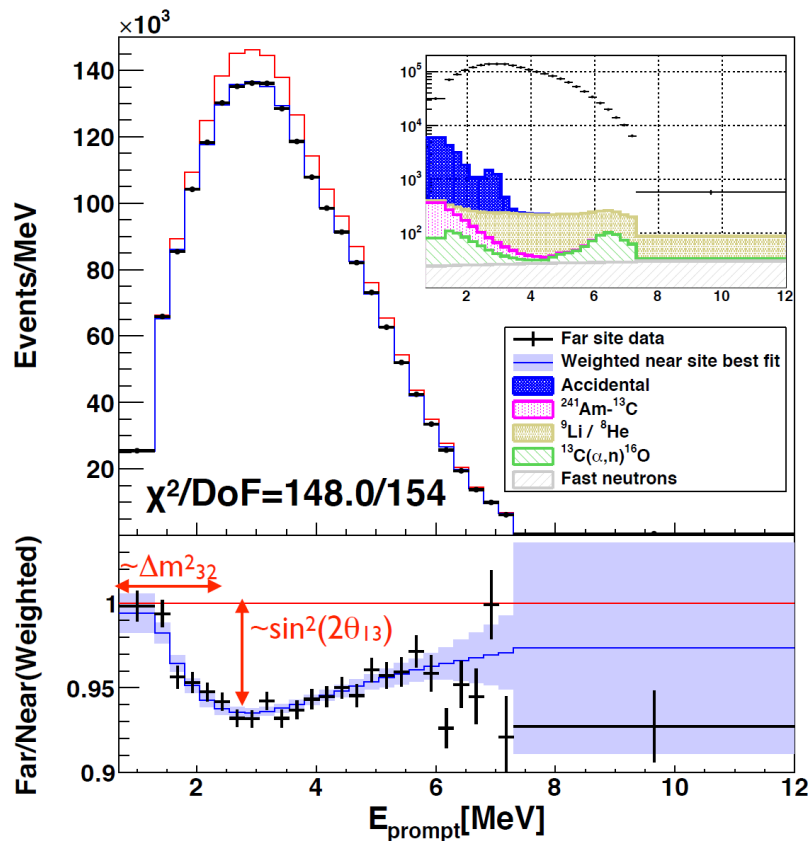
	Power [GW _{th}]	GdLS mass Near/Far [t]	Distance Near/Far [m]	Overburden [mwe]
Daya Bay	17.4	2x2x20 4x20	365,490 1650	250 860
Double Chooz	8.5	8 8	400 1050	120 300
RENO	16.8	16 16	290 1380	120 450

θ_{13} measurement experiments

- A shape distortion with respect to predicted spectrum has been observed but the 3 experiments: both at near and far site a bump at $\sim 4-6$ MeV is observed.

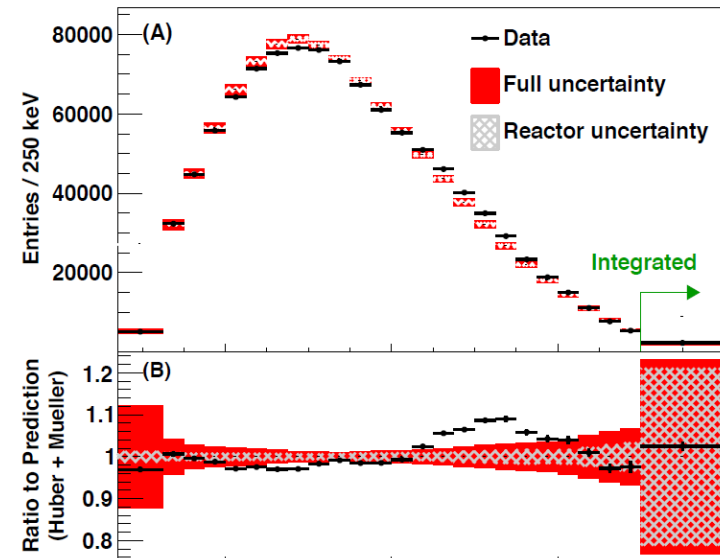
Daya Bay

Phys.Rev.Lett. 121 (2018) 24, 241805



Daya Bay

Chin.Phys.C 41 (2017) 1, 013002



Near/Farの比較で系統誤差を低減
Modelとの比較では不一致も！
← これらの知見は重要！！

「新しく建設する」研究炉での可能性

- 何が特徴(優位性)として挙げられるか？
 - どこまで近くに検出器を設置できるか？
- 設計に「ある程度」の自由度があると何ができるか？
 - SNを向上させるため、BG対策(遮蔽)
 - 設計段階で考慮してもらう必要あり
- 検出方法は？
 - 初期の検出器は有機シンチレータ+Gd, Li6
 - 研究のバラエティを確保するため、検出器交換のオプションは必要
 - ニュートリノを使って研究するので、「可能な限り近くで」

原子核・素粒子物理研究としてどのようなTopicがあるか？

- ✓ ニュートリノ振動(ステライルニュートリノ探索)
- ✓ 原子炉ニュートリノの精密測定 → 次(梅原)のTalk
- ✓ ニュートリノの磁気モーメント探索
- ✓ 原子核とのCoherent散乱、電子との弾性散乱

結局は、統計精度が必要なので「近くに！」

Very-Short Baseline実験(先行研究)

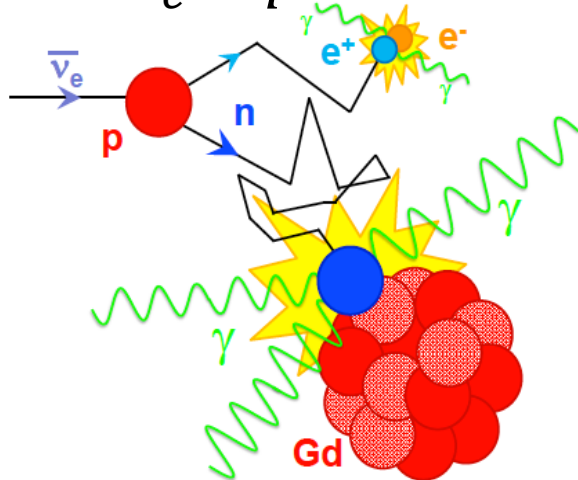
先行研究との比較・差別化

Experiment	Reactor [power in MW _{th}]	Baseline [m]	Target material and mass	Segmentation	Signal/ Background	Status
NEOS	LEU [2800]	24	GdLS ~1 m ³	No	21	2018-2020 180(46) days On(Off)
DANSS	LEU [3100]	10-12	PS (Gd layer) 1 m ³	quasi-3D	0.6	2016-2020 (~ 3M events)
Neutrino-4	HEU [100]	6-12	GdLS 1.8 ton	2D	0.3	720(417) days On(Off) data
PROSPECT	HEU [85]	7-12	⁶ LiLS 4 ton	2D	0.8	96(73) days On(Off) data
STEREO	HEU [58]	9-11	GdLS 2.4 m ³	2D	0.9	data taking finished (>300 days data)
SOLID	HEU [72]	6-9	PS (⁶ Li layer) 1.6 ton	3D	1.0 (expected)	196(146) days On(Off) data
NuLAT	any	any	⁶ LiPS 0.9 ton	3D	3 (expected)	R&D
CHANDLER	any	any	PS (⁶ Li layer) 1m ³	3D	3 (expected)	R&D

近くに検出器を設置

Reactor $\bar{\nu}_e$ 検出方法

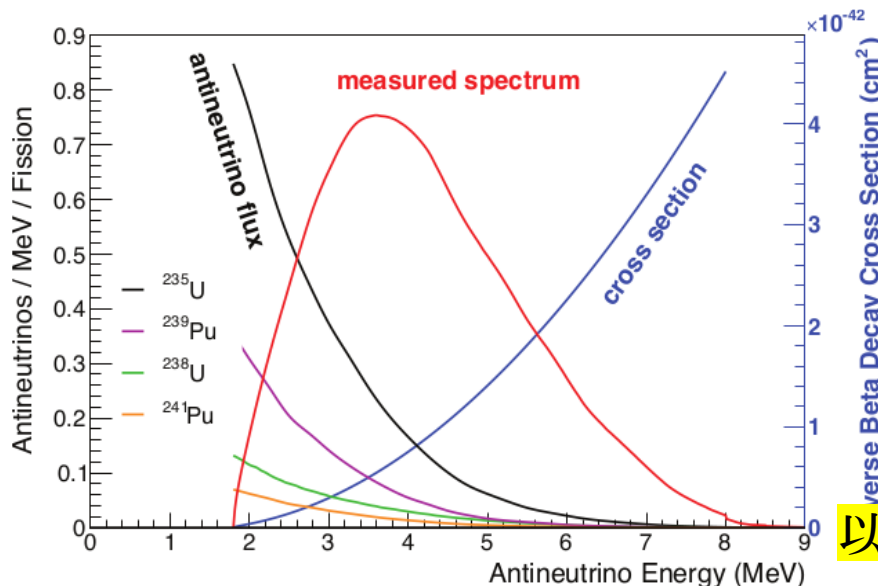
Inverse beta decay



● 信号: 遅延同時計測

- 先行信号: $e^+ + 2\gamma$ (1.02 ~ 8 MeV).
- 後発信号: 中性子捕獲 γ 線 Gd (~ 8 MeV), H (2.2 MeV), もしくは 6Li (α & β).
- 時間相関: $\Delta t \sim 30 \mu s$ (Gd) ~ 200 μs (H).
- 空間相関: $\Delta r < \sim 1 m$.

- 断面積を考えると最初はこの反応を使うべき(電子の弾性散乱は厳しい)
- 6Li は γ 線背景事象との弁別が高い
 - 質問: 濃縮、コスト、LS-solubility
- 固体よりも液体
 - 検出器性能の均一性
 - だけど、危険物施設になる!



以降、水素の逆 β 崩壊を利用することを想定

予想される事象数

- 条件

- 原子炉出力 10 MW
- 炉心から検出器の距離 (2 m ~ ??) $\rightarrow L$ [m]
- 検出器 : ~ 1 トン M [tons]、LSベース(比重1, CH比=2)
- 検出器の閾値 ($E_{th} = 1.5$ MeV)
 - ^{208}Tl のバックグラウンドをどれだけ下げられるか？
 - $E_{th} = 3.0\text{MeV}$ だと $\sim 30\%$ 減

- 事象数

$$N \sim 300 \times \frac{M}{L^2} \quad \text{events/day/ton}$$

i.e; 140 ev/day/detector @ 6.5 m of Neutrino-4 detector

1 ton@2mで実験できれば統計的には同じくらい

要検討 Gd-LSを使う場合の検出器サイズ: $(1\text{m})^3$ 以上

Background (BG) の問題

- 何が問題か？ **結局、BGをどのように抑えるか？（見積もるか？）**

- 原子炉運転に起因しないBG

- 宇宙線、自然放射線など

- 原子炉のON-OFFの観測で比較

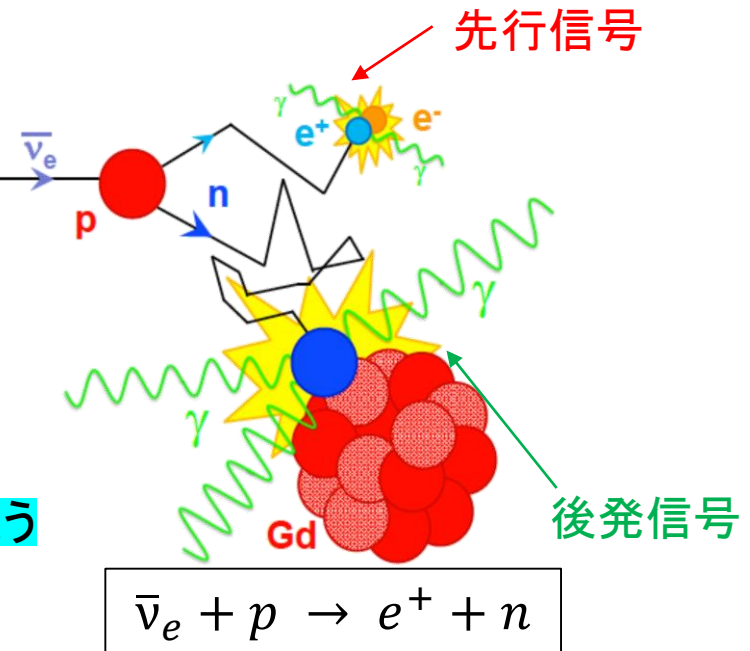
- 原子炉運転に起因するBG

- 運転（核分裂）に伴う中性子、ガンマ線など

- 中性子を捕獲後の（高エネルギー） γ 線 (n, γ)

上記の偶発的なコインシデンス事象がBGになる。

← 絶対的に計数率を落とすことが重要
(時間相関分布からBG推測)



- バックグラウンド事象の低減方法

- 遮蔽

普段の研究地検が生かせると思う

- γ 線、中性子遮蔽

- 中性子タグの識別能向上

→ ${}^6\text{Li}(n, t) \alpha \rightarrow \text{PSD}$ で γ 線背景事象と弁別（後発信号候補の低減）

- 先行事象のID → e^+ 事象と 2γ の同定（検出器の細分化）

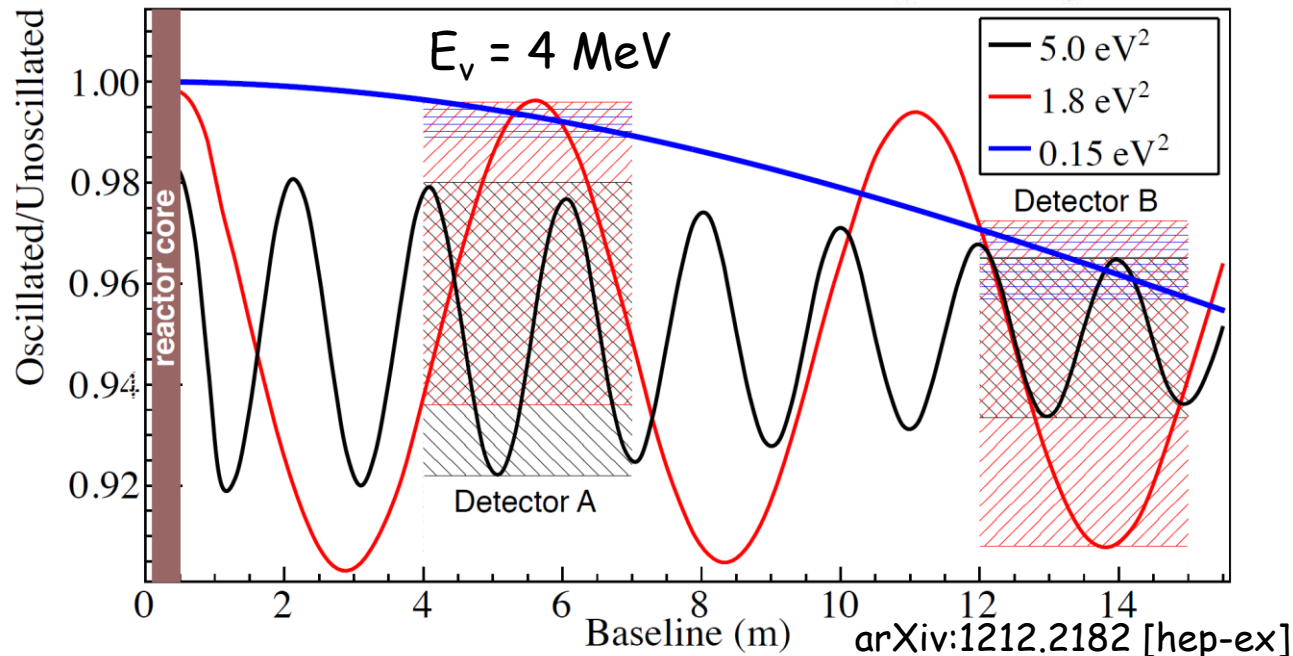
- 検出器構成要素からの γ 線低減 ←（ここまで必要になったら成功）

Sterile ν 振動パターン

- 観測として何が重要か？

- 検出器を移動して観測可能な仕組み
 - (これまでの実験でも実施)、 θ_{13} 実験でのNear & Far
 - レールに乗せて移動
- 炉心からの距離方向に長い検出器
 - 動径方向に位置分解能があれば、動かさなくても振動パターンが観測可能

$$P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e}(L, E) = 1 - \sin^2(2\theta_{ee}) \sin^2\left(\Delta m_{41}^2 \frac{L}{4E}\right)$$



ν 振動パラメーターへのImpact

- Reactorの特徴・検出器の特徴 と Parameter感度の関係
 - 炉心サイズ(小さい) → large Δm^2 の探索が可能

ステライル ν が1つとは限らない

arXiv:1212.2182 [hep-ex]

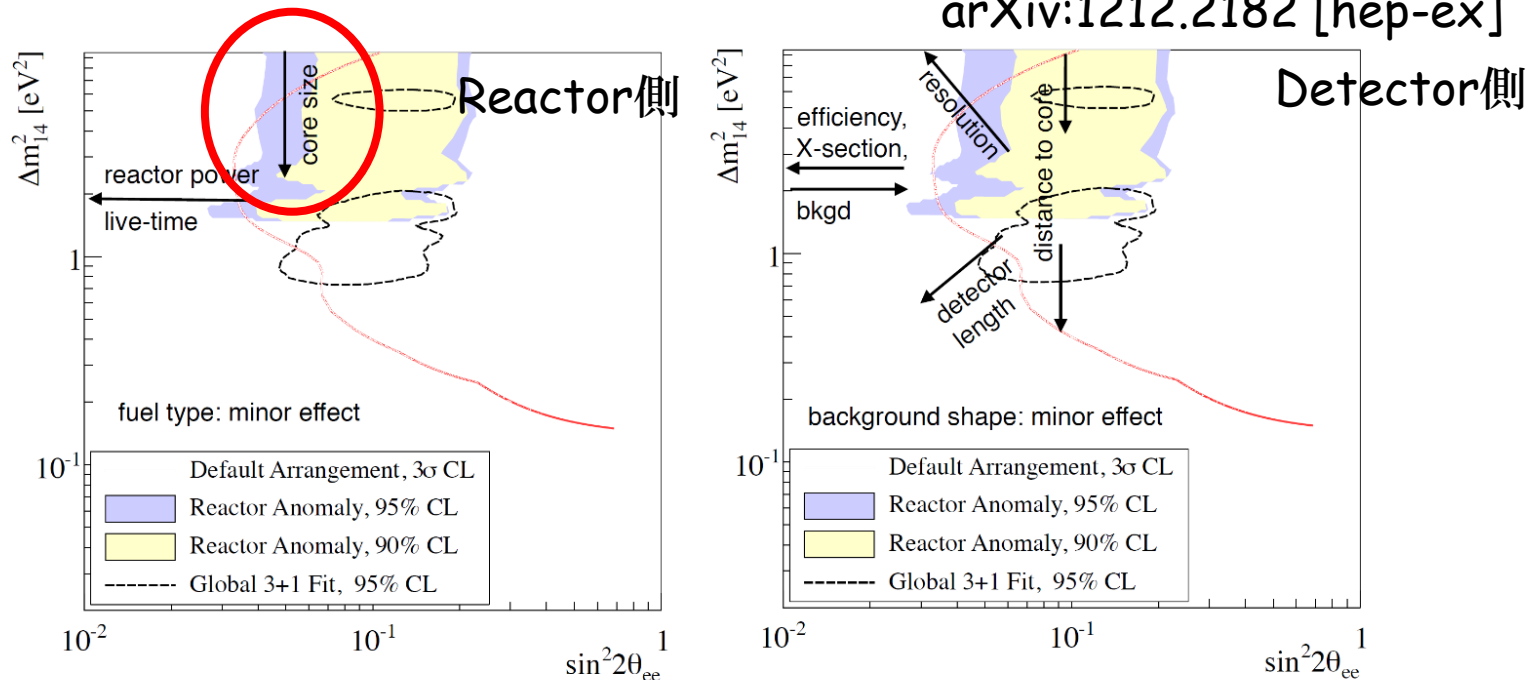
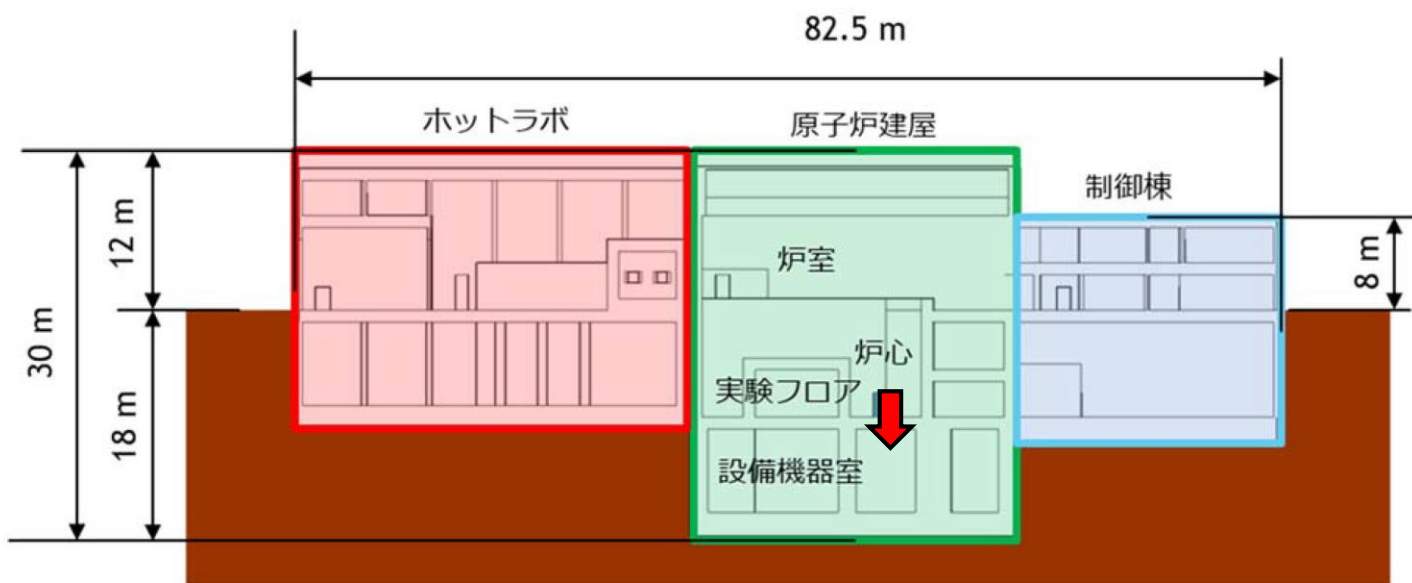


FIG. 17: Reactor and detector parameters relevant for covering the suggested parameter space. These graphs indicate the direction in which the sensitivity curve moved when reactor (left) and detector (right) parameters are improved or adjusted.

設置場所・デザイン(要件)

● 検出器設置場所・デザイン(要件)

- 炉心に限りなく近く
 - → 2 mは無理？
 - 炉心からの距離は可変 → レールで動かす？
 - 統計は増やしたい(当然) → レールで可動式ではなく、長い検出器を設置
- 場所によるBGの違いを低減 → 遮蔽は効果的に、かつ均一に
 - 宇宙線BG(Flux)の低減 → 地下に潜るのが得策 & Active Veto(Tracking)



(断面図)

図 2-11 低・中出力炉配置案

検出器性能(要件)

- 検出器性能(要件)

- 位置分解能 → 分割式の検出器
 - 炉心動径方向の15 ~ 20 cm位で分割
 - それ以上の位置情報は検出器側で(Position Sensitive検出器の導入)
 - 角度方向の細分化 → BG除去能に寄与(e^+ 信号と 2γ 信号の分離)
- 遠い検出器は立体角(有効体積)を改善
- 炉心からの距離
 - ~ 2m まで近づけられれば他と差別化可能
- 検出器の種類
 - BG耐性を考えて、初期は水素の逆 β 崩壊(先行信号) + 中性子タグ(後発信号)
 - Gd-LSや ^6Li -LS(PS)が有効
 - 炉心近くは低エネルギー領域(1.8MeV以下)のスペクトル精密測定のために入れ替えオプション有

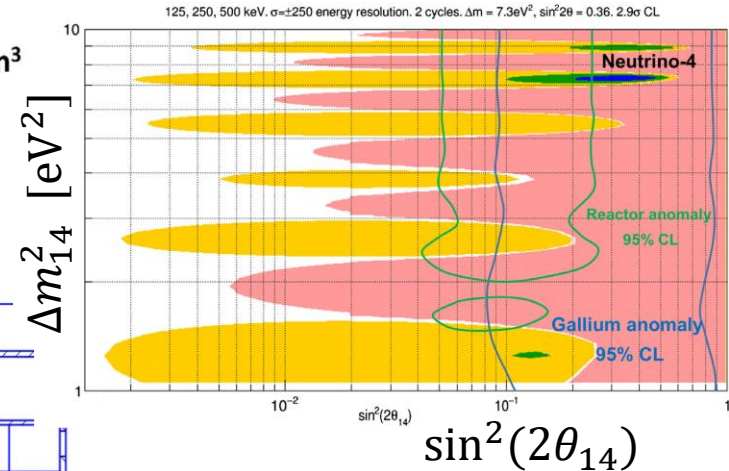
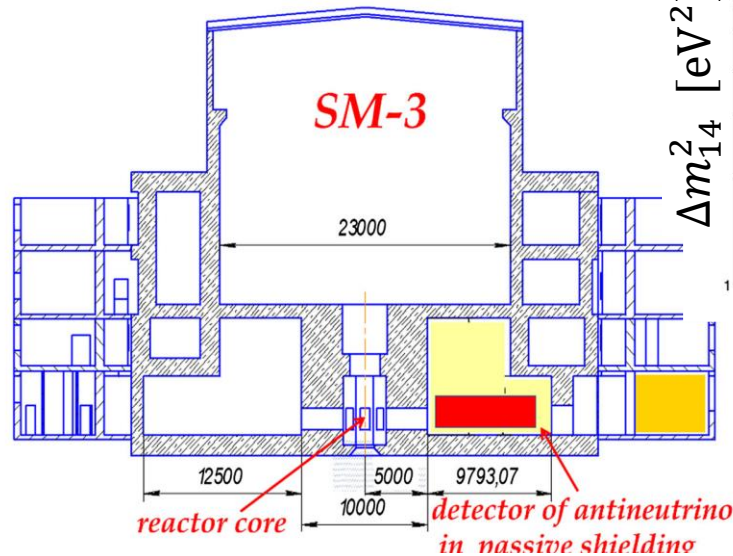
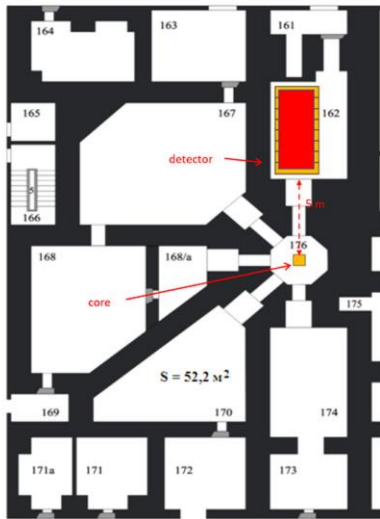
建物・原子炉の構造上、できるかどうかは考えない！！
どこで差別化が図れるか！

先行実験の例

A. P. Serebrov et al., PHYSICAL REVIEW D 104, 032003 (2021)

● Neutrino-4実験サイト・検出器

Reactor: SM-3 reactor in Dimitrovgrad (Russia): 100 MW compact core 35x42x42 cm³



考えることは、どこも同じ

- ・炉心に近く
- ・Movable (6 - 12 m)
- ・Gd-LS(1.8トン、セグメント化)
- ・遮蔽(Active+Passive)

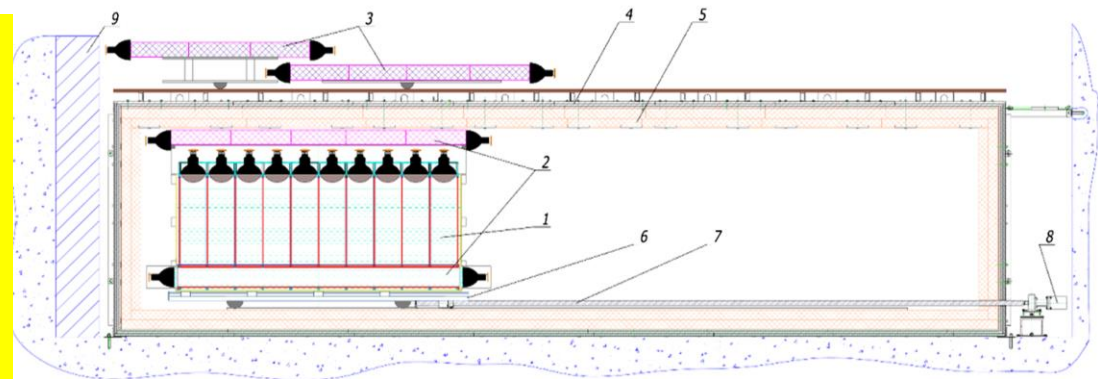
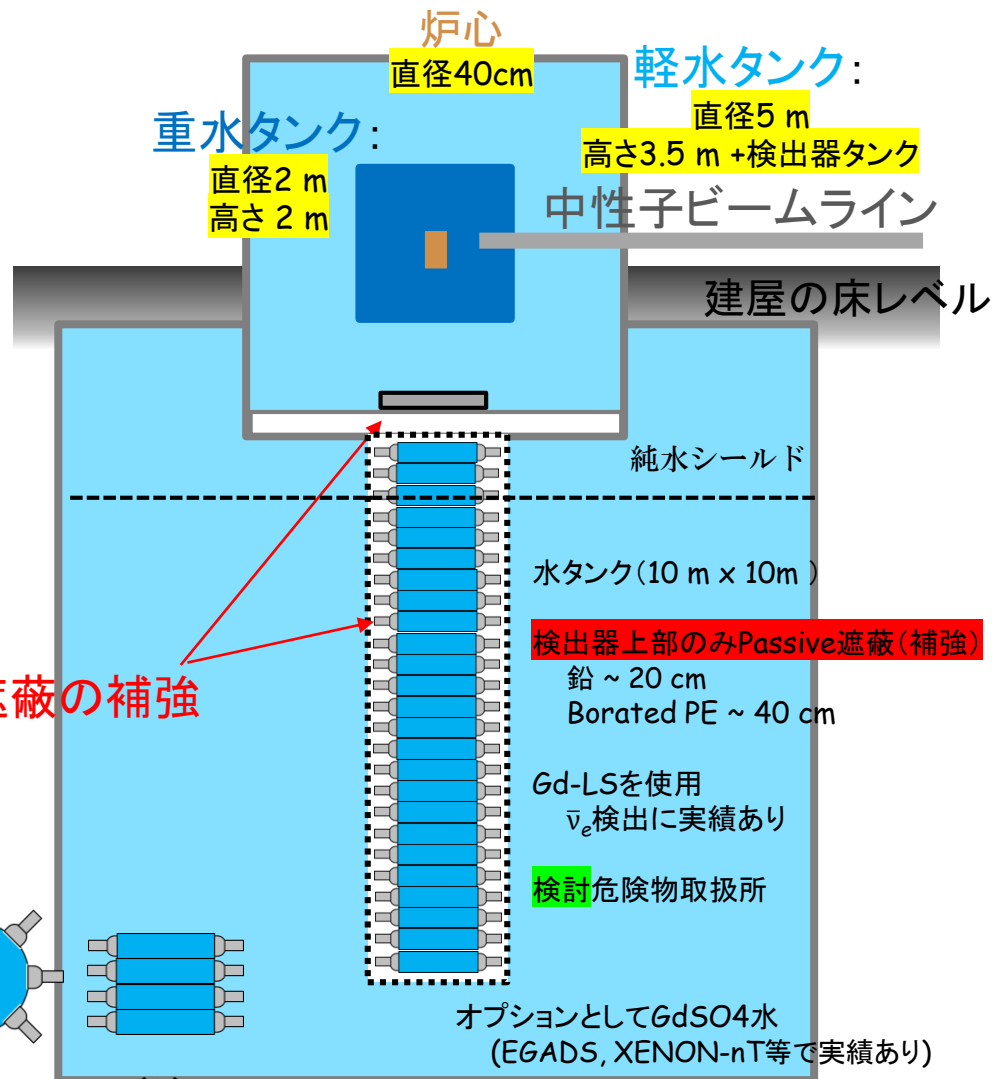
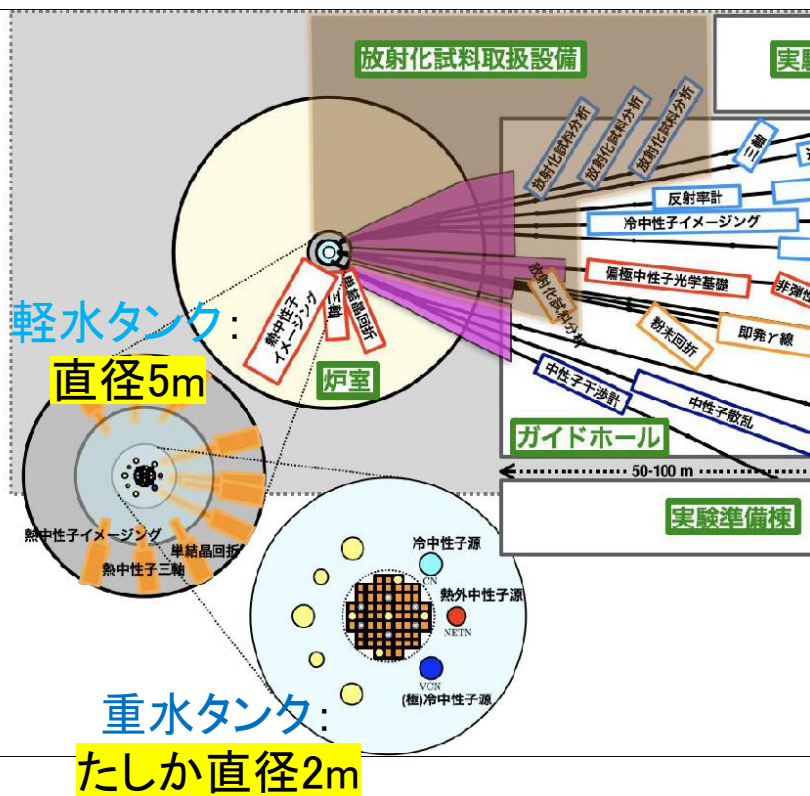
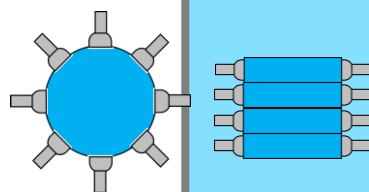


FIG. 18. General scheme of an experimental setup. 1—detector of reactor antineutrino, 2—internal active shielding, 3—external active shielding (umbrella), 4—steel and lead passive shielding, 5—borated polyethylene passive shielding, 6—moveable platform, 7—feed screw, 8—step motor, 9—shielding against fast neutrons made of iron shot.

検出器デザイン(ポンチ絵)・縦方向置き



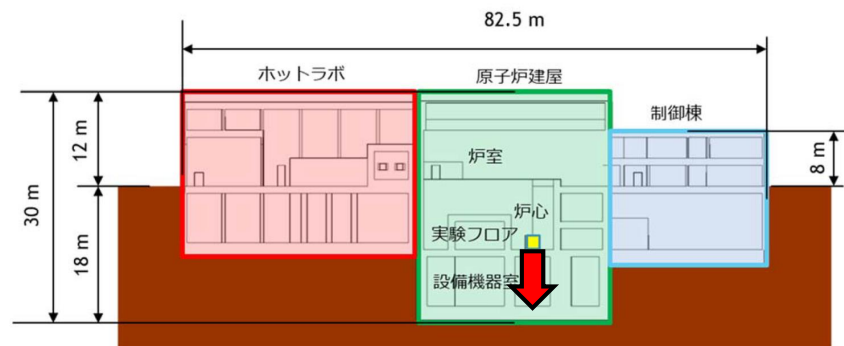
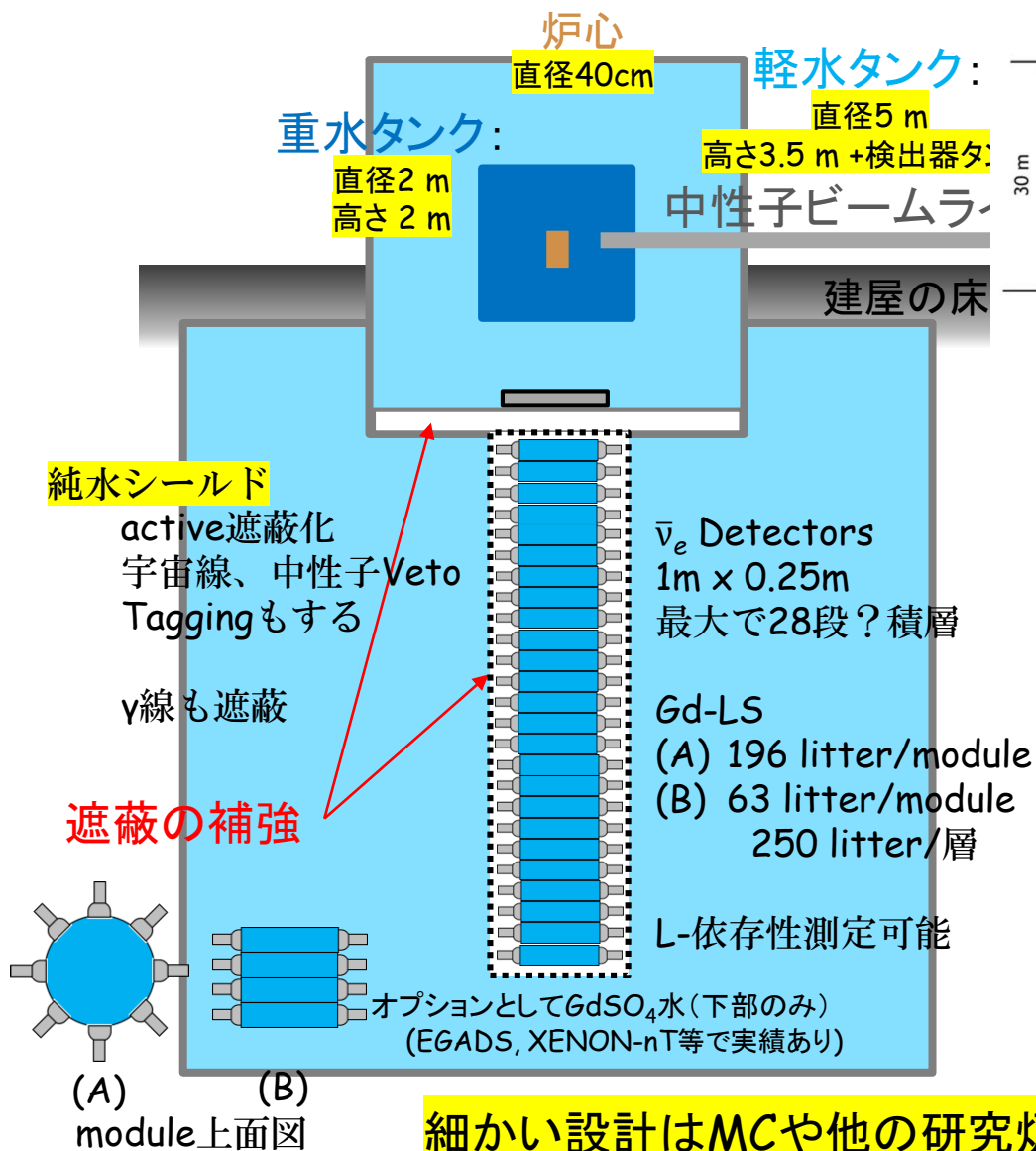
遮蔽の補強



(A)
module上面図

(B)

検出器デザイン(ポンチ絵)・縦方向置き



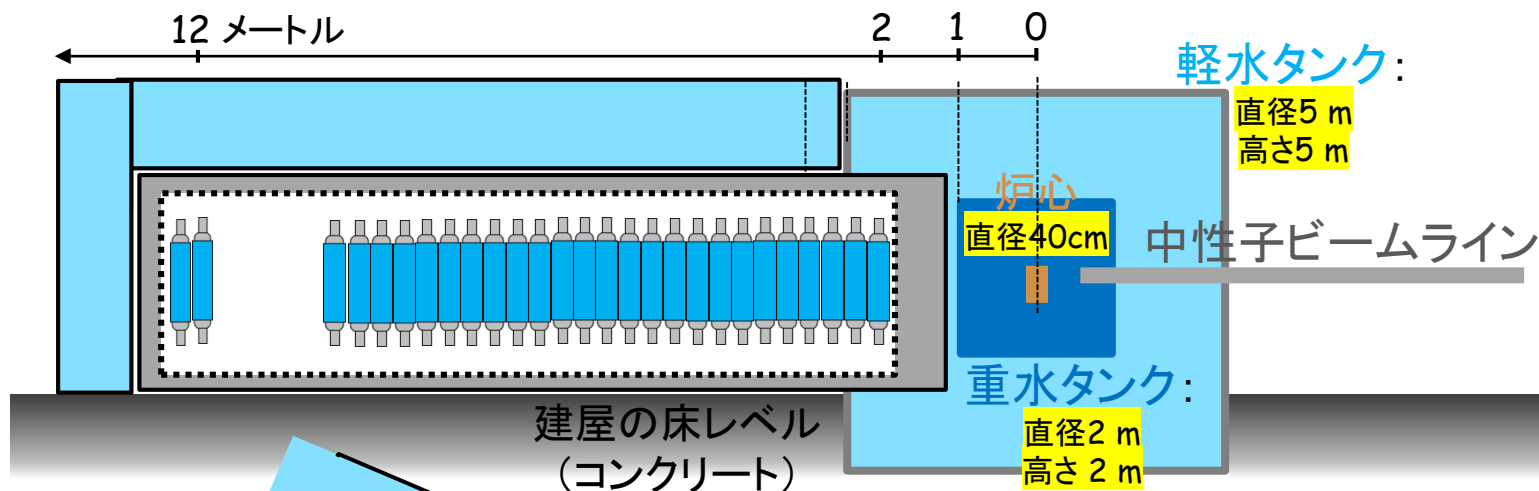
(断面図)

図 2-11 低・中出力炉配置案

- 検出器上部のみPassive遮蔽(補強)
 - Borated-PEなど
 - 中性子反射材(グラファイトなど)を置くこともオプションとして検討
 - 鉛~20cm(炉心からのγ線遮蔽)
- 200トン(Gd含有)水タンク
 - EGADS, XENON-nT等で実績あり
- Gd-LSを使用するのであれば、 $\bar{\nu}_e$ 検出に実績あり
- 検討危険物取扱所になってしまう

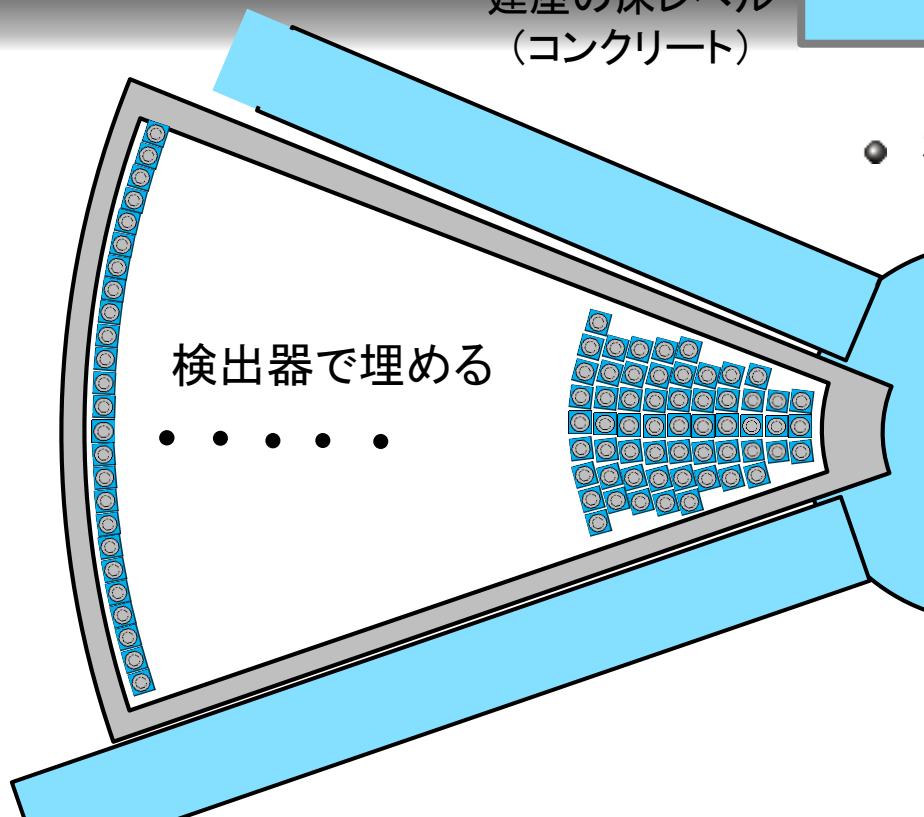
細かい設計はMCや他の研究炉での放射線測定が必要

検出器デザイン(ポンチ絵)・横方向置き



● 横方向置きの場合

- 厚さ~5mの水遮蔽は厳しい → Pbで γ 遮蔽
- γ 線遮蔽
 - 鉛: 20cm程度、炉心側は+ α
- 水タンク ~ 1 m : 中性子+宇宙線遮蔽 (Veto)
- 距離: ~2mくらいまで近づきたい



まとめ

- 多くの実験データが、Short baselineでのRAAを示唆しており、ステライルニュートリノ探索が盛んにおこなわれている
- 新しい研究炉で、ニュートリノ研究を行う意義
 - 設計に(ある程度)の自由度がある
 - どこまで近くに検出器を設置できるか？
 - ニュートリノを使って研究するので、「可能な限り近くで」
 - SNを向上させるため、BG対策(遮蔽)が重要
 - 設計段階で考慮してもらう必要あり
- 検出方法は？
 - 初期の検出器は有機シンチレータ+Gd, Li6
- 検出器(特に遮蔽システム)のデザインを決めるために、
 - γ 線や中性子Fluxの測定データからMC
- Sterile探索、振動Parameterの精密決定
 - ➔ 原子炉反ニュートリノの「発生」スペクトル精密測定にも重要