



東北大学



KamLAND2-Zen

-極低放射能環境でのニュートリノ研究-

東北大学ニュートリノ科学研究センター
井上邦雄

CRCタウンミーティング

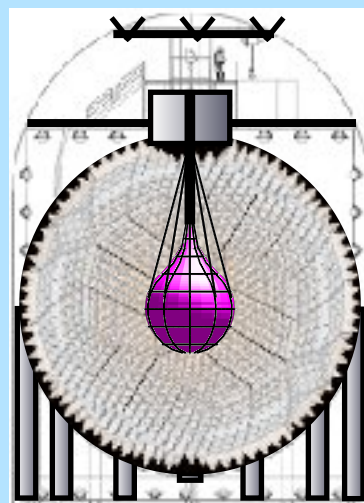
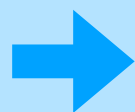
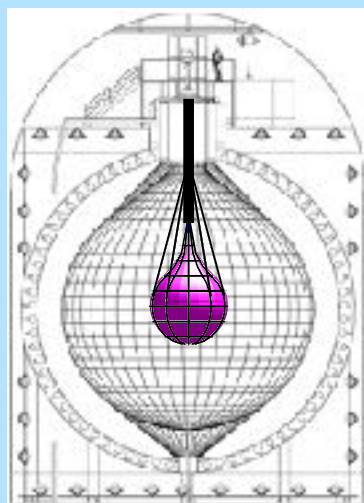
2025年3月10日

極低放射能環境でのニュートリノ研究

ニュートリノ観測装置カムランドを高性能化し、極低放射能を極めて、

1. 「宇宙物質優勢の謎」 「軽いニュートリノ質量の謎」に挑む。
2. 「地球の始源隕石」 「地球内部のダイナミクス」解明に挑む。
3. 低エネルギーニュートリノ天文学(マルチメッセンジャー天文学)
4. 神岡茂住坑での大型アクティビティ継続

カムランドからカムランド2へ



実施内容

高性能化

汎用化

極低放射能の追求

5倍光収集、蛍光バルーン、高性能電子回路

導入口拡大 (50cmφ → 2mφ)

地下スーパークリーンルーム (共同利用に)

高純度空気

液体シンチレータ純化装置、純水装置

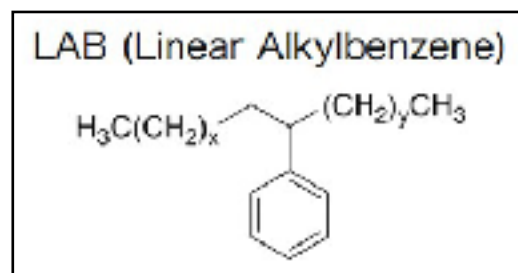
高性能化の開発は実施済み



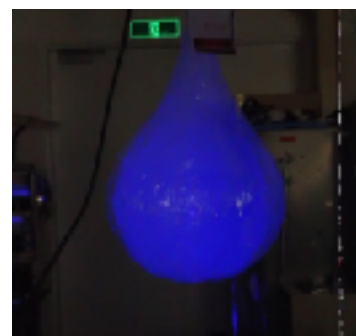
試作集光ミラー



高量子効率PMT



新型シンチレータ



試作蛍光バルーン



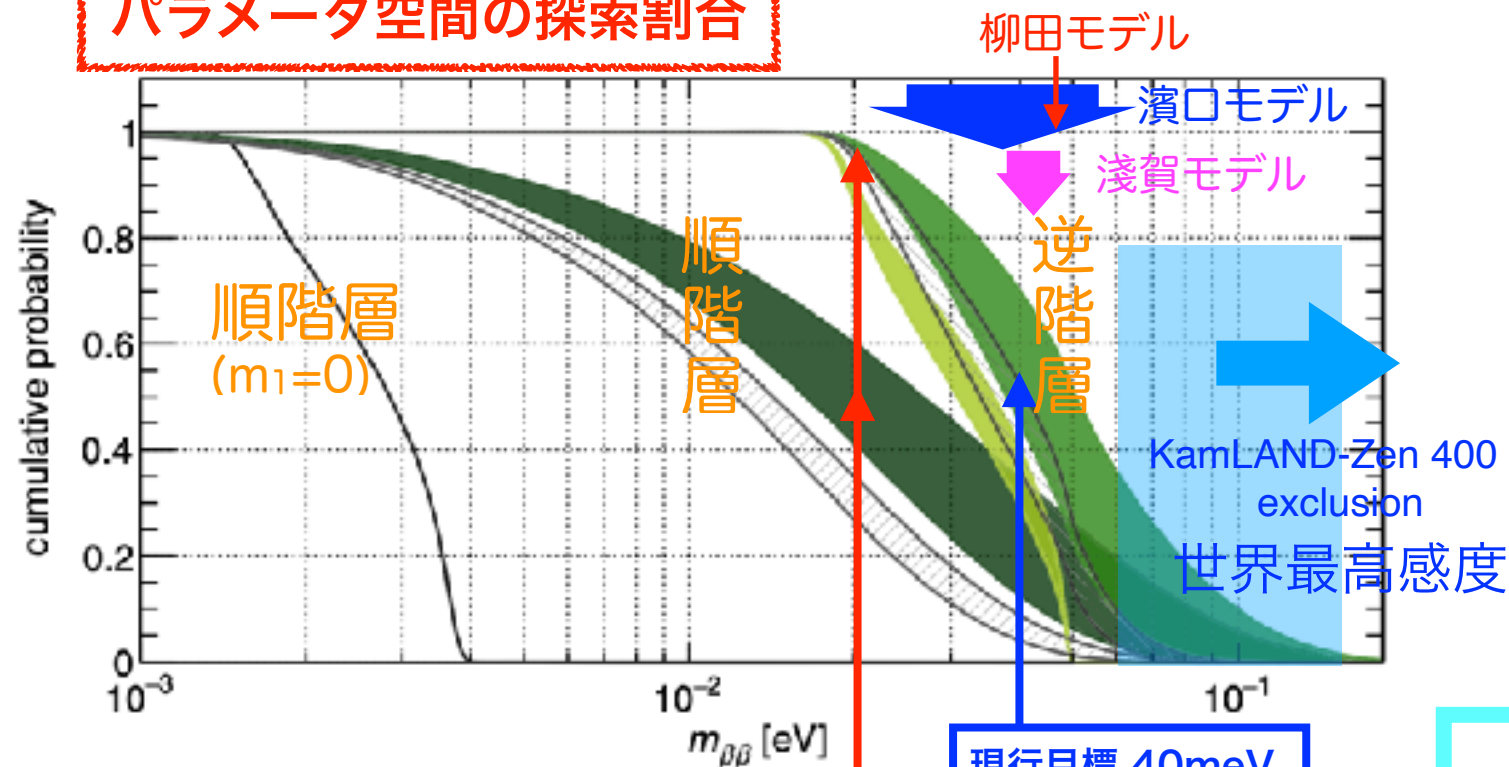
試作高性能電子回路

1. 「宇宙物質優勢の謎」「軽いニュートリノ質量の謎」に挑む。

高性能化
が重要

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索による マヨラナ性の検証

パラメータ空間の探索割合



パラメータ空間：PRD96,053001(2017)
柳田モデル：PRD86,013002(2012)
濱口モデル：Eur.Phys.J.C77 (2017) 763
浅賀モデル：Phys.Lett. B811(2020)135956

パラメータ空間の探索割合が一気に広がる
複数の理論モデルがある

大発見の可能性が一気に大きくなる)

重い右巻きニュートリノ

N

を自然に導入

「宇宙物質優勢の謎」

←レプトジェネシス理論

「軽いニュートリノ質量の謎」

←シーソー機構

「大統一理論のミッシングピース」

←SU(5)からSO(10)へ

「暗黒物質の謎」

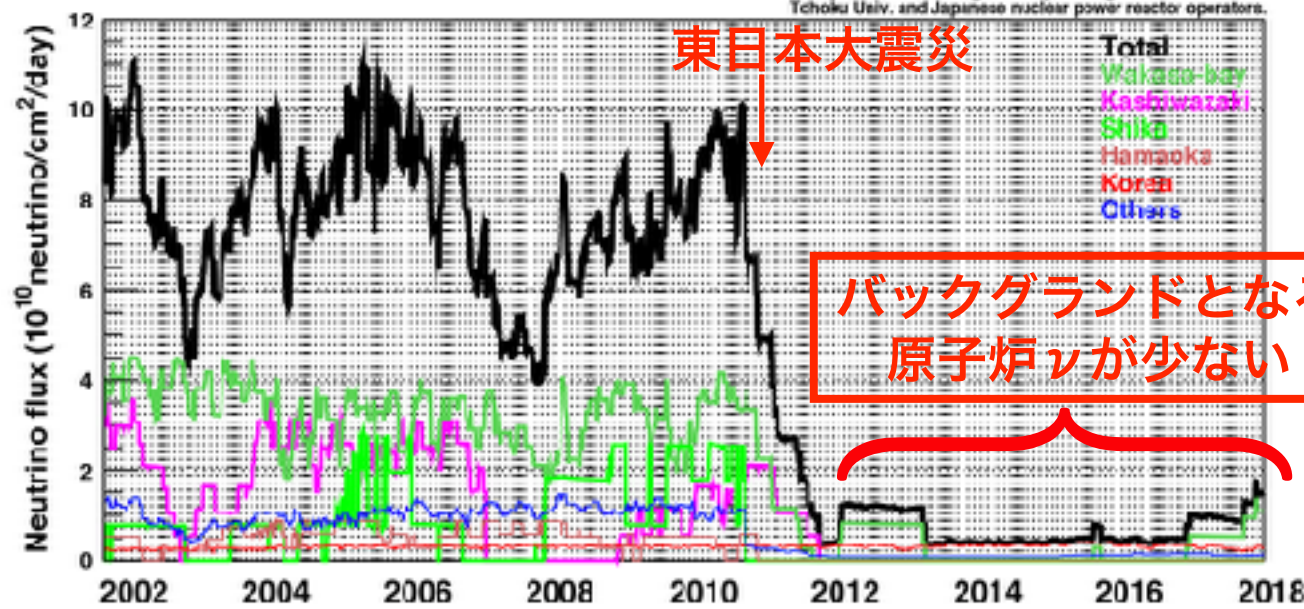
←Nが起源？

2. 「地球の始源隕石」 「地球内部のダイナミクス」 解明に挑む。

継続が
重要

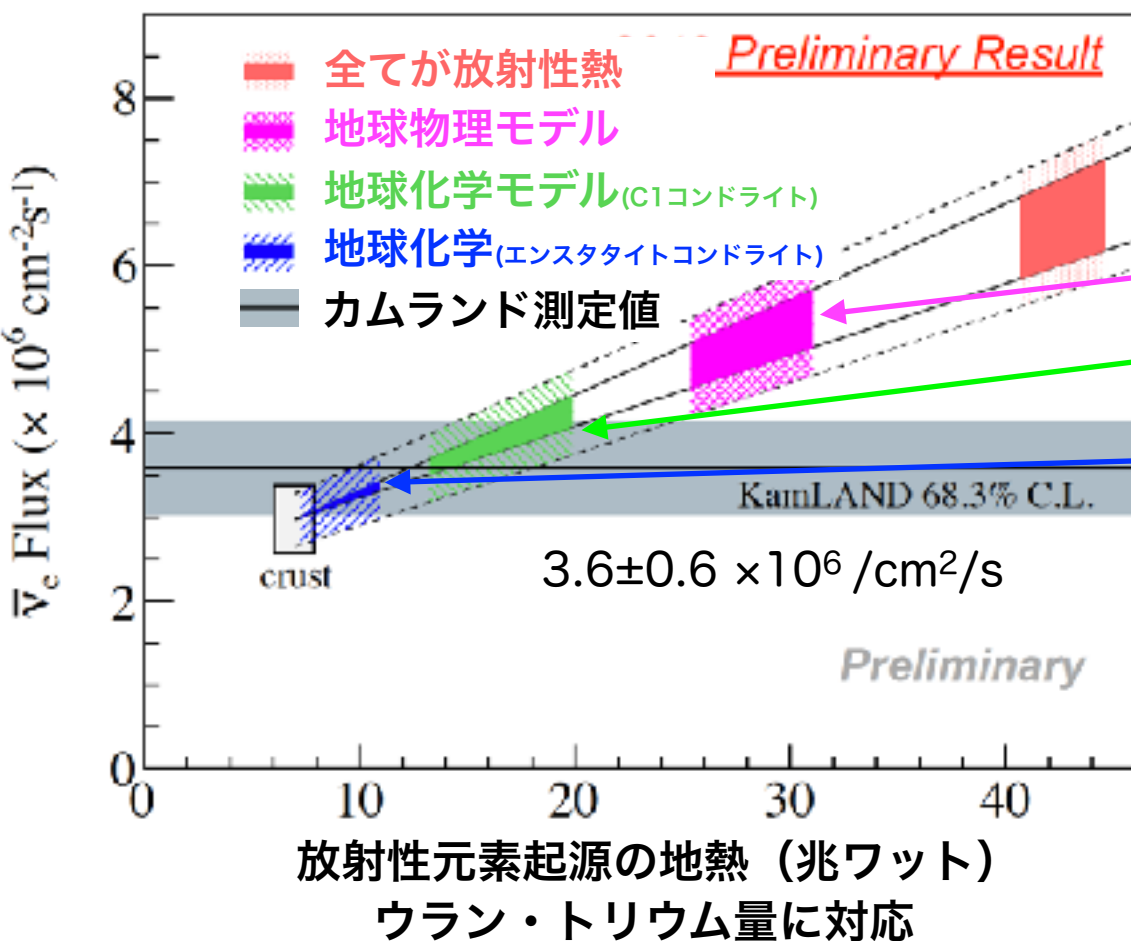
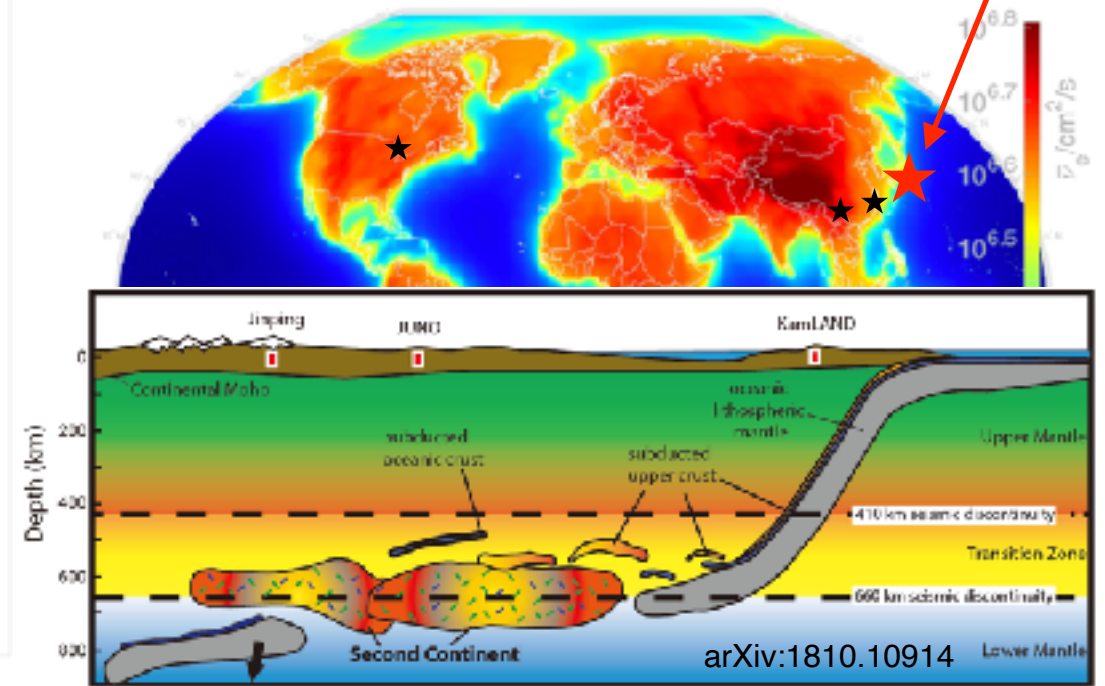
地球ニュートリノ観測

BG源となる原子炉の運転状況

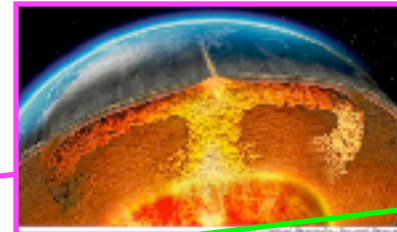


今後も 地球ニュートリノ
観測網で最重要

唯一大陸プ
レーートの端



マントル対流の謎



地球物理モデルは
一層対流 High-Q
他の地球化学モデルは
多層対流 Low, Middle-Q

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)

ウラン・
トリウム量

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)

さらにデータを蓄積して、長く論争の続く

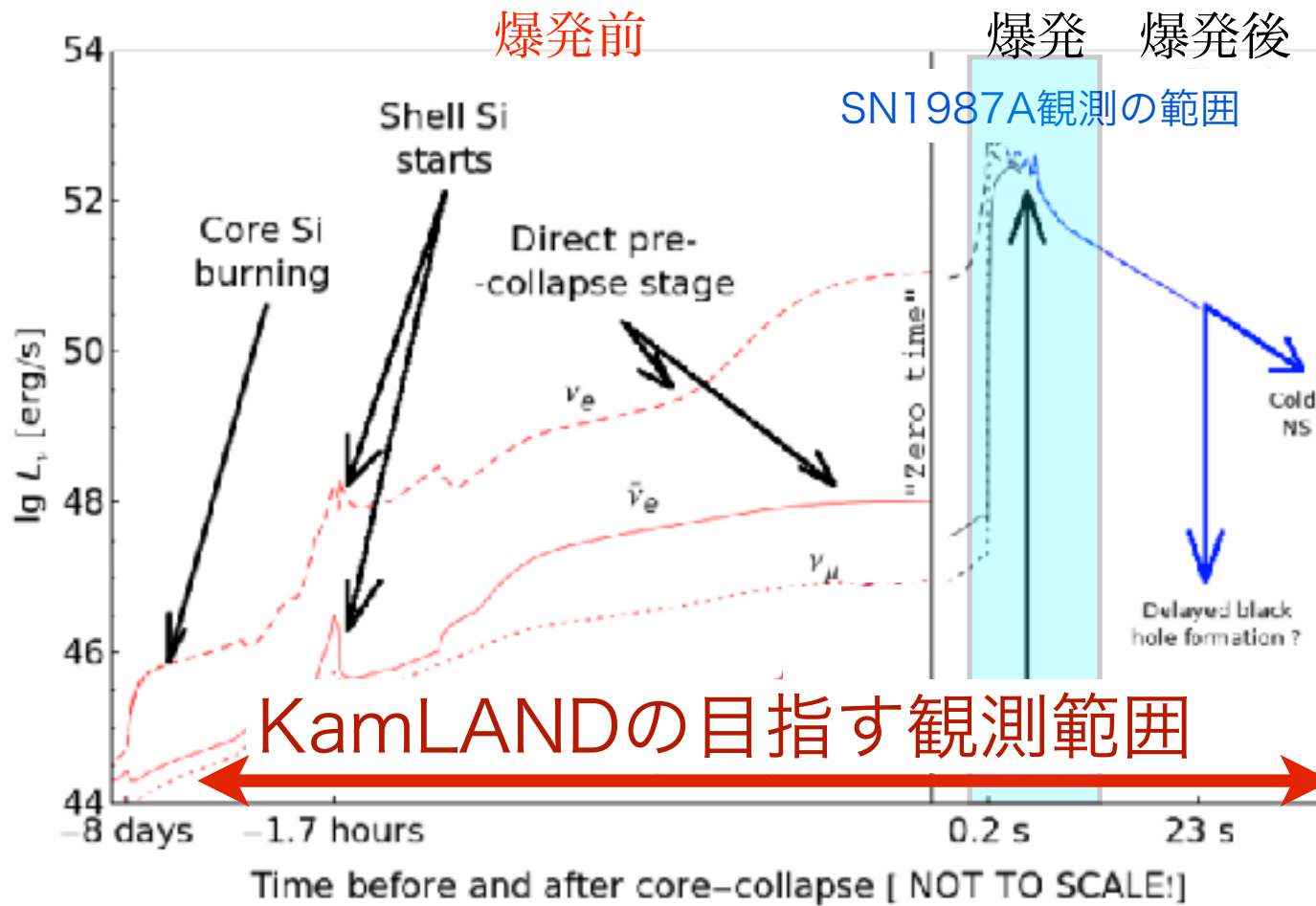
地球の始源隕石やマントル対流
を地球ν観測で解明できる!!!

(太陽系形成の理解にも貢献) 広く天文・宇宙に貢献

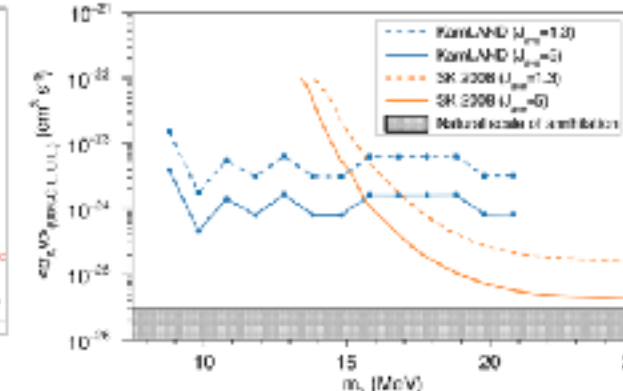
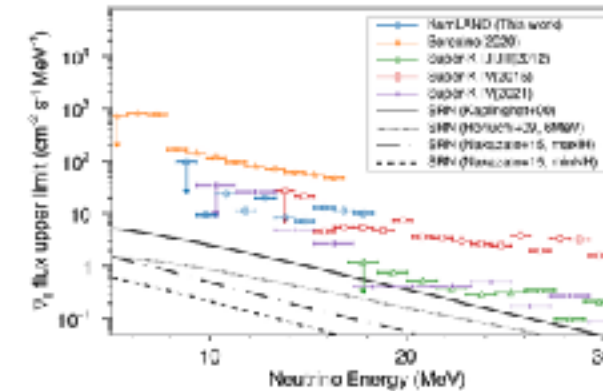
3. 低エネルギーニュートリノ天文学(マルチメッセンジャー天文学)

継続が
重要

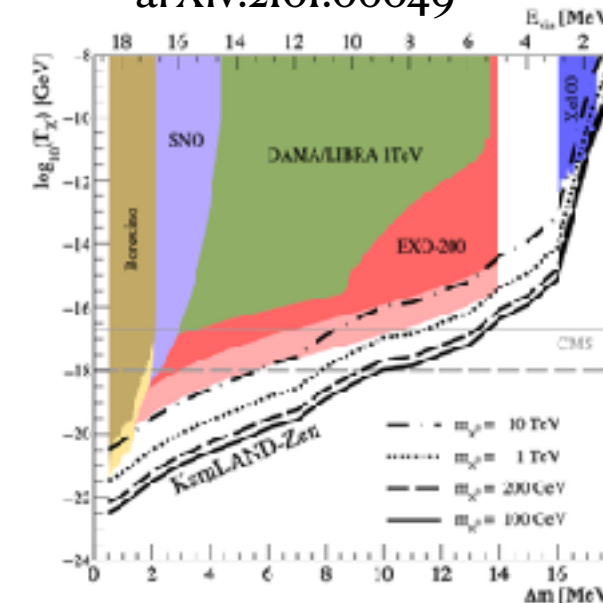
スーパーカミオカンデと比べて500倍の光量、100分の1の放射能で
特徴的な低エネルギー観測が可能



超新星背景ニュートリノ探索 軽いDMへの制限 (DM対
arXiv:2108.08527, ApJ accepted 消滅反電子ニュートリノ)



DM荷電励起の探索
arXiv:2101.06049



太陽フレアとの相関
ApJ, 924:103, 2022

重力波と $\bar{\nu}_e$ の相関
ApJ, 909:116, 2021

γ 線バーストとの相関
arXiv:2112.04918
ApJ, 806:87, 2015

^7Be 太陽ニュートリノ観測
PRC 92,055808, 2015

^8B 太陽ニュートリノ観測
PRC 84,035804, 2011

などなど

カムランドは広く
天文・宇宙に貢献する

近傍超新星爆発に対して
数日前からの超新星爆発アラーム
(重力波観測へのアラーム：運転中)

超新星爆発ニュートリノ観測でも、
中性カレント反応などで特徴的な貢献

推進体制

カムランド国際共同研究(約60+人)

日本

東北大学ニュートリノ科学研究センター (ホスト)

東北大学金属材料研究所

帯広畜産大学

大阪大学

徳島大学

米国

カリフォルニア大学バークレー校

カリフォルニア大学サンディエゴ校

テネシー大学

デューク大学

ノースカロライナ大学

トライアングル大学原子核研究所

ワシントン大学

マサチューセッツ工科大学

バージニア工科大学

ハワイ大学

ボストン大学

デラウェア大学

ペンシルバニア大学

オランダ

アムステルダム大学

スペイン

ドノスティア国際物理センター

LEGEND

CUPID

CUPID

NEXT

赤字：2021年からの増加分



ニュートリノ科学研究センターの体制強化

組織整備 「大学間連携による神岡極稀現象研究拠点の形成」 R6採択

KERNEL (**K**amioka **E**xtrremely **R**are-phenomena and **NE**utrino-research **L**aboratory)

東北大学RCNS 極稀現象研究技術開発部を新設

大阪大学RCNP 極稀現象研究基盤室を新設

東北大学RCNS極稀現象研究技術開発部の人員増

教授 1、准教授 2、助教 2、リサーチエンジニア 2、URA 1

極稀現象フロンティアでの研究推進

極低放射能技術の継承と発展

Lowbgコミュニティへの貢献・人材育成

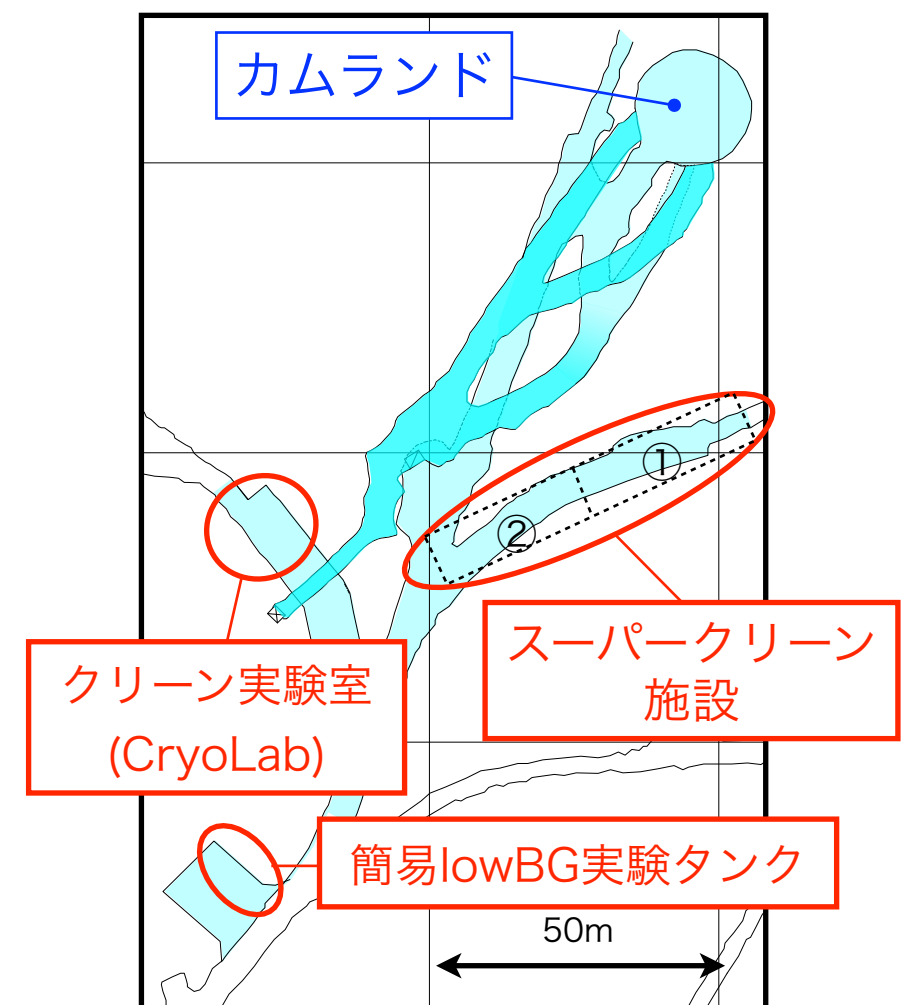
スーパークリーン施設を設置 (R6竣工)

クラス1 スーパークリーンルーム 50m²

純空気製造装置 200m³/h

純水製造装置 2m³/h

など





純空気製造装置（工場仮組時）



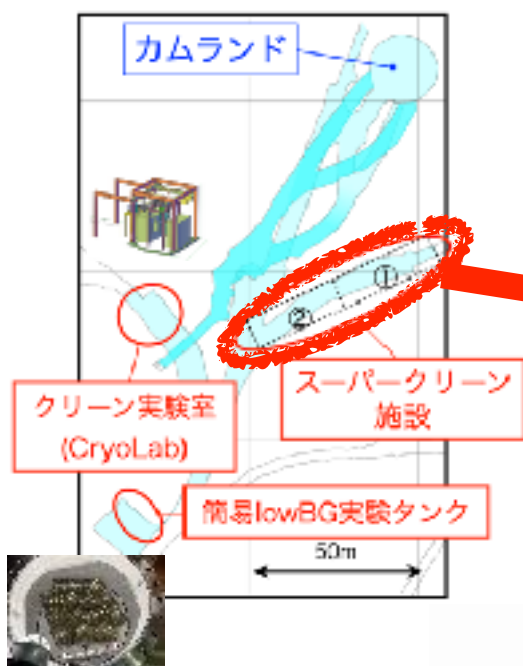
純水製造装置（搬入時）



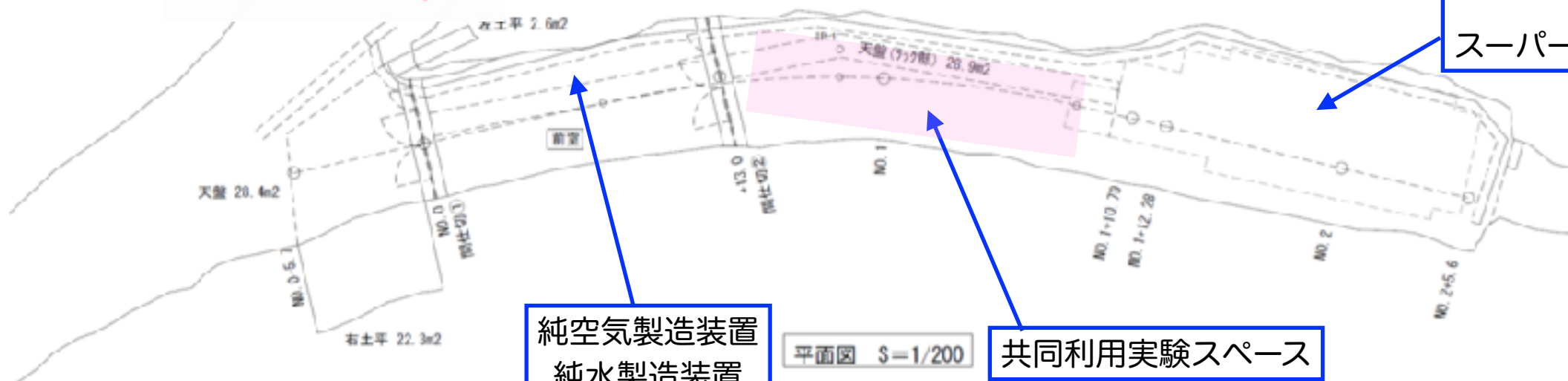
スーパークリーンルーム（クラス1 余裕で達成）

空気清浄度クラスによる測定粒径と上限濃度

清浄度クラス		上限濃度(個/m ³)					
ISO 14644-1	米国防規格 Fed. Std. 209E (対象粒径0.5μm)	測定粒径					
		0.1μm	0.2μm	0.3μm	0.5μm	1.0μm	5.0μm
Class 1		10	2				
Class 2		100	24	10	4		
Class 3	1	1,000	237	102	35	8	
Class 4	10	10,000	2,370	1,020	352	83	
Class 5	100	100,000	23,700	10,200	3,520	832	29
Class 6	1,000	1,000,000	237,000	102,000	35,200	8,320	293
Class 7	10,000				352,000	83,200	2,930
Class 8	100,000				3,520,000	832,000	29,300
Class 9					35,200,000	8,320,000	293,000



クラス1
スーパークリーンルーム



純空気製造装置
純水製造装置

共同利用実験スペース

CRC等での議論の経緯

・CRC将来計画検討小委員会2011-2012年度最終報告、最優先の計画(2018,2022に再確認)

→「最重要課題として速やかな実現を望む新規計画」の評価

- ・天文学・宇宙物理学中規模計画の展望(2013)に掲載
- ・CRC将来計画検討小委員会2013-2014年度報告書ロードマップ掲載
- ・高エネルギー物理学将来計画検討委員会答申(2012,2017)に掲載
- ・日本学術会議学術の大型研究計画に関するマスタープラン2014,2017,2020に掲載
- ・日本学術会議天文学・宇宙物理学分科会、最優先計画として推薦(2022)
- ・原子核談話会からのエンドース(2022)
- ・日本学術会議の未来の学術振興構想2023に掲載
- ・文部科学省学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想2023に採択

今後ともご支援よろしく申し上げます。

Lowbgコミュニティの形成

(<https://www.lowbg.org/>)

2013 極低バックグラウンド素粒子原子核研究懇談会

(発起人：東北大、東大、阪大)

2014-2018 新学術領域「地下素核」

(領域代表：東北大)

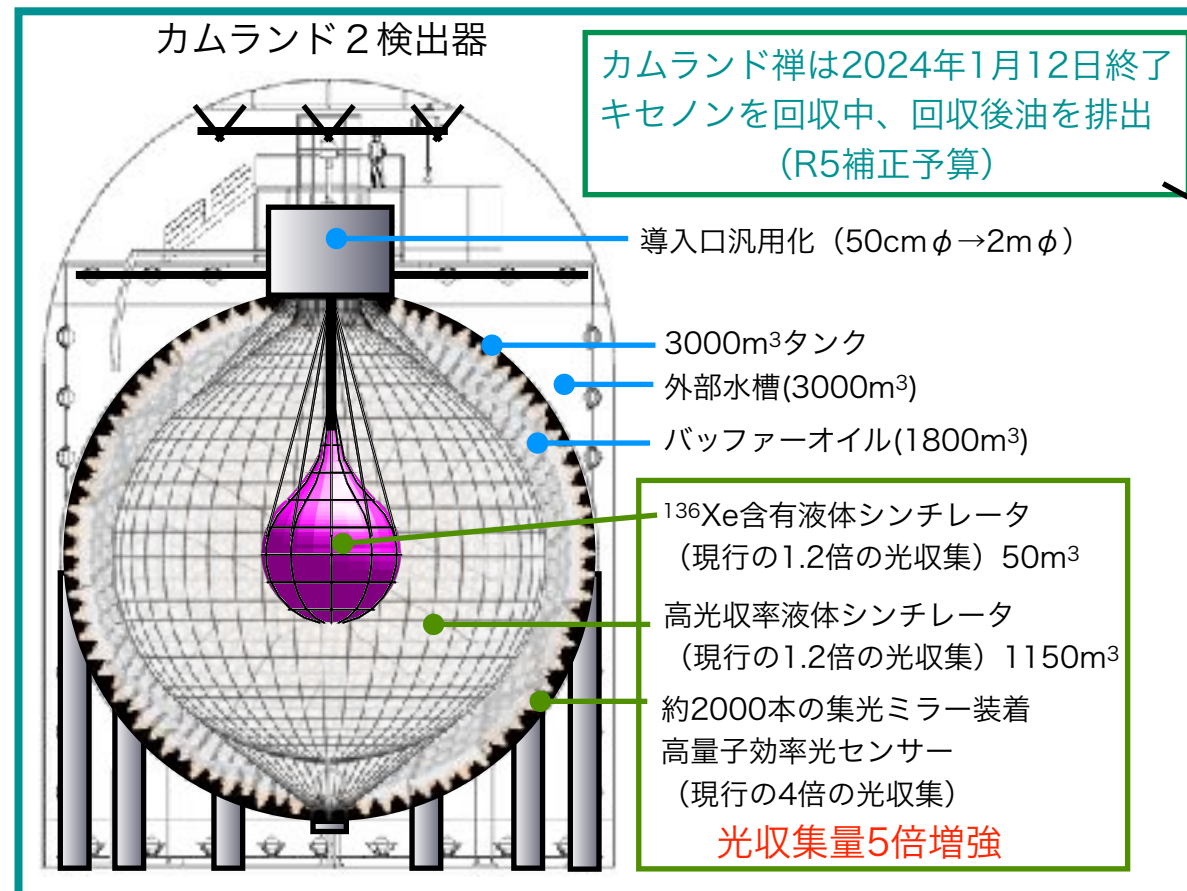
2019-2023 新学術領域「地下宇宙」

(領域代表：東北大)

2024-2028 学術変革領域「地下稀事象」

(領域代表：東北大)

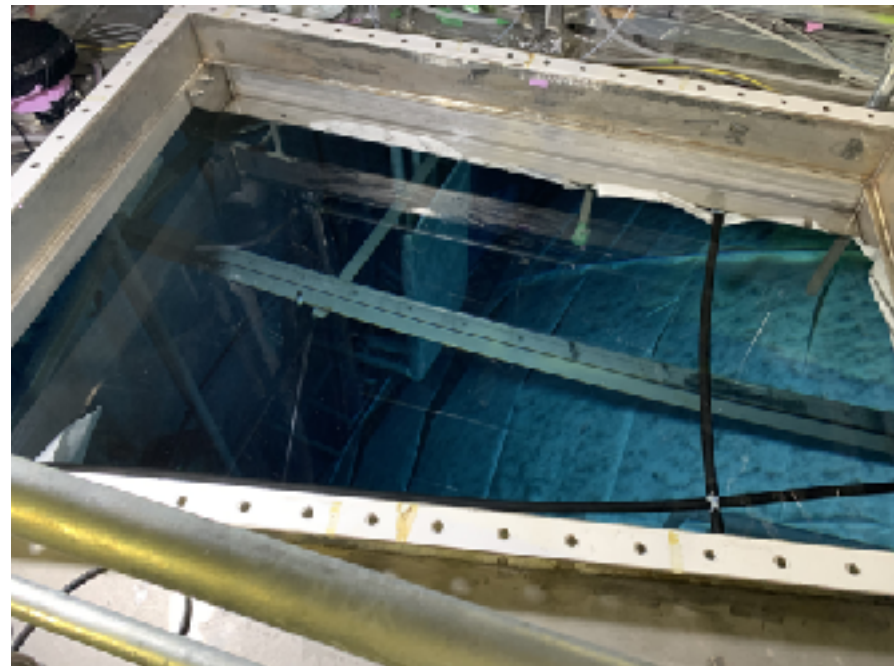
カムランド2計画の進捗状況 (2024年3月時)



R6進捗を
一部紹介

現在(2025年3月)の予算状況

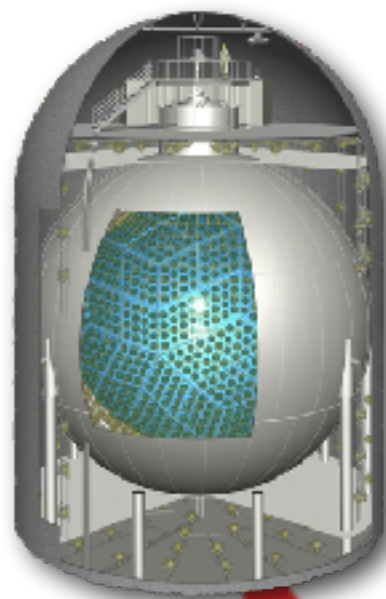
カムランド解体
外水槽・ドーム防水
集光ミラー
PMTフレーム
(R6補正予算+R7予算)



PMTを外しながら外水槽の水抜き

LS 1200m³
は蒸留でPPOを分離

BO 1800m³
はそのまま廃液



LS 800m³×2

和歌山



2024.10~2025.1

タンクローリー（約250回）で
和歌山・敦賀のオイルタンクへ



雪で苦戦も遅延は最小限



BO 2000m³

敦賀

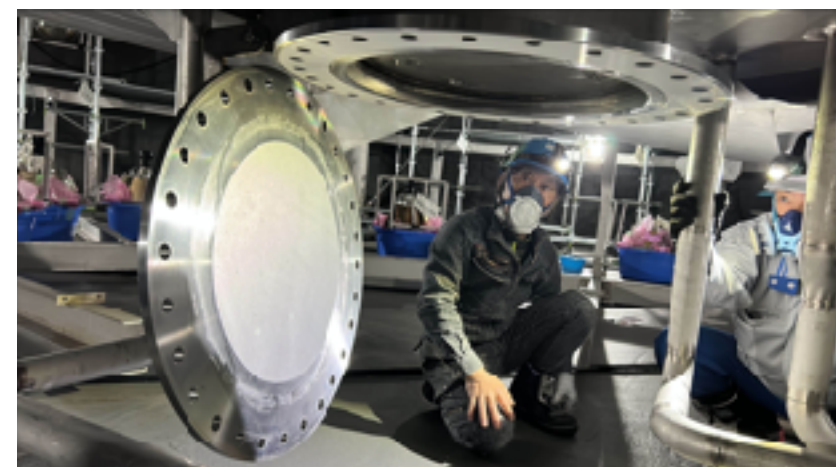
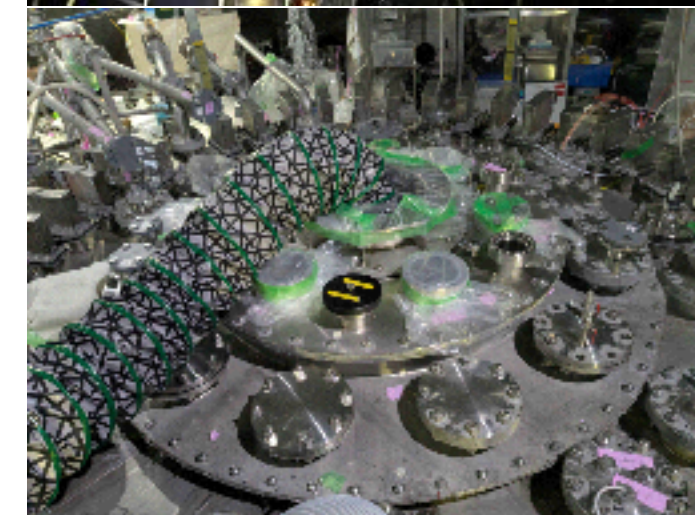
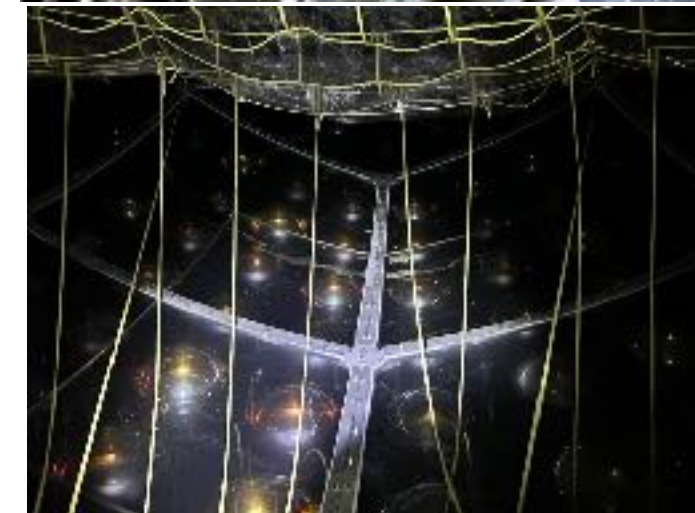


2025.1.16 LS抜き切り

2025年1月23日LS+BO廃液完了

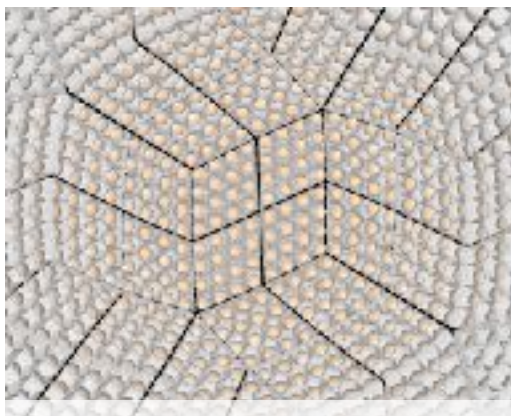
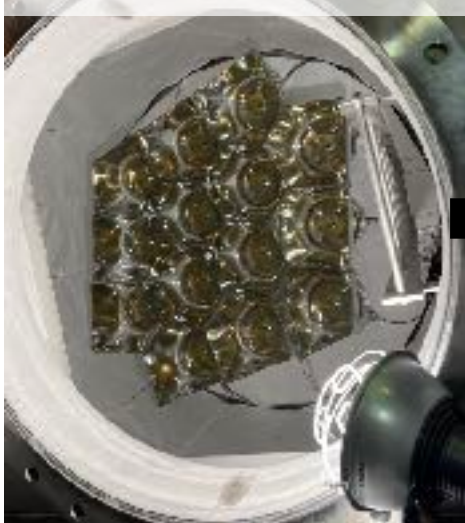


上下マンホールを開けて
2025年2月17日タンク内へ
有機ガス濃度は爆発限界の50分の1 以下
酸素濃度も問題なし

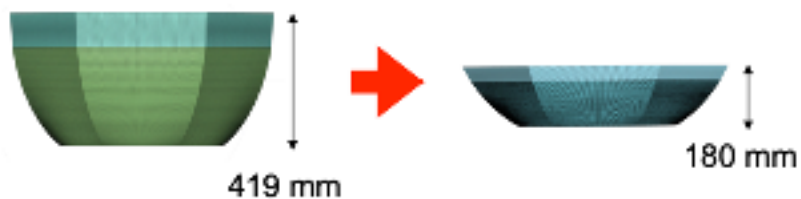


現在乾燥中

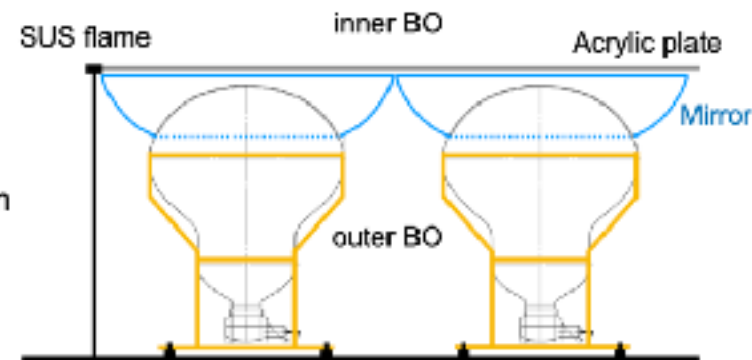
プロトタイプで14本に取付



フレーム・アクリル板・ミラー
同士の干渉回避が必要

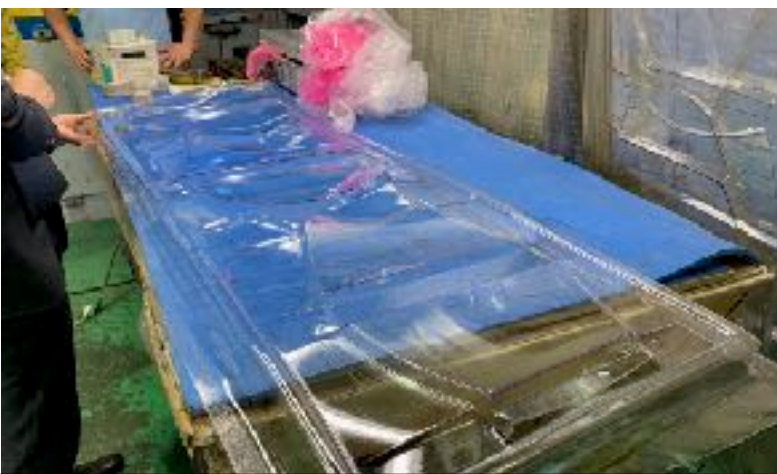


有効体積外を少し犠牲にする
が、中心は若干光量増



試作成形品
3mm(T) PET (蒸着前)

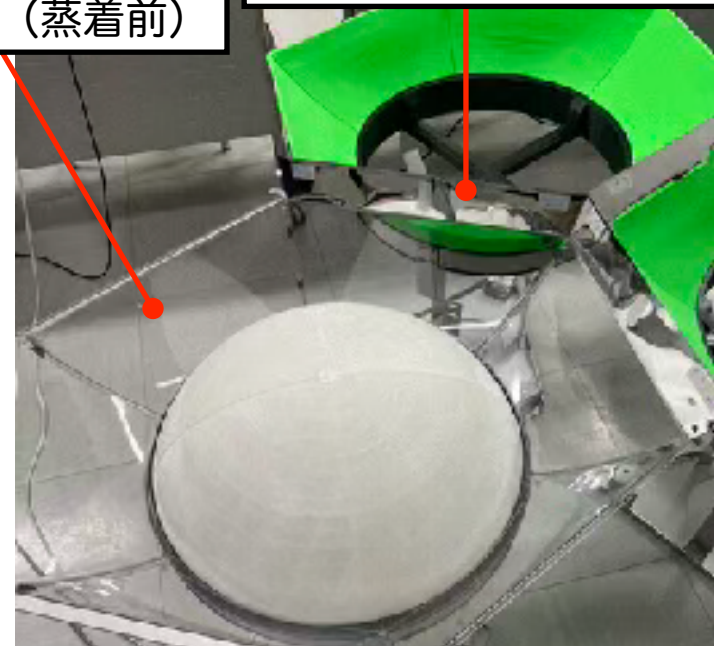
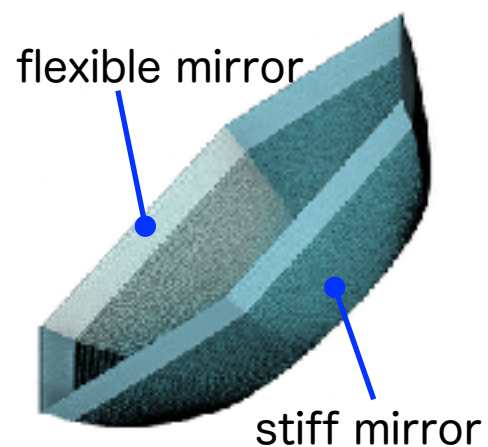
メタルミ-100 μ m(T)
(Aluminized Mylar)



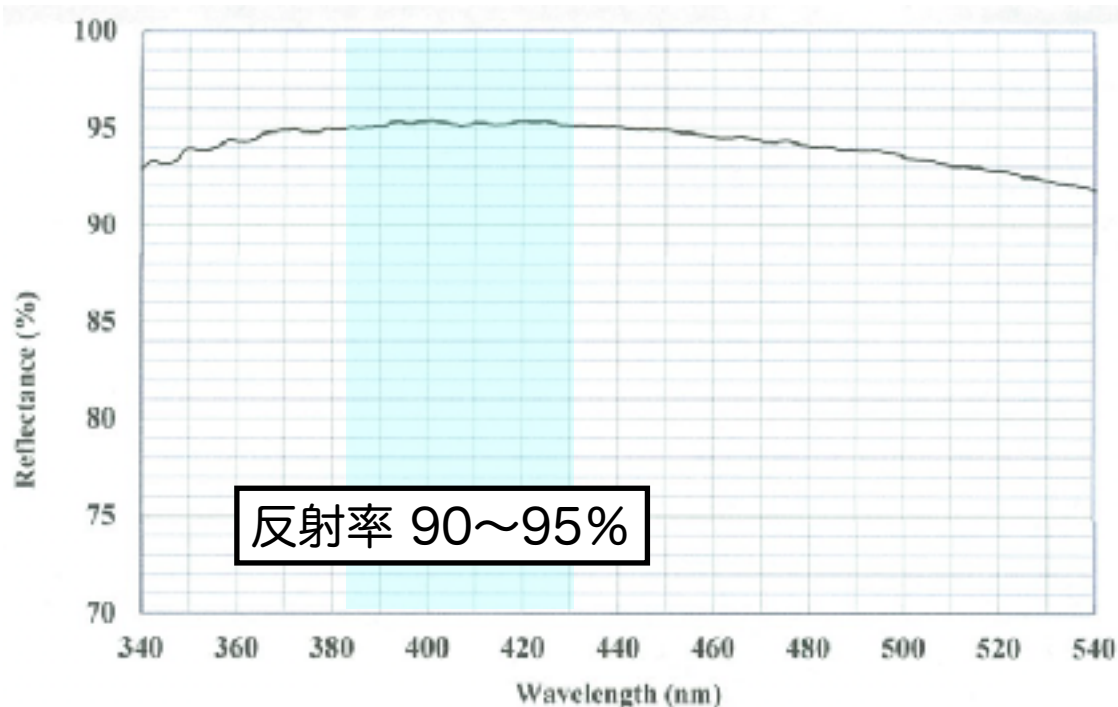
3mm(T) PET真空成形
ミラー分割で作業性向上+コストダウン



リベット+
クリップ組立

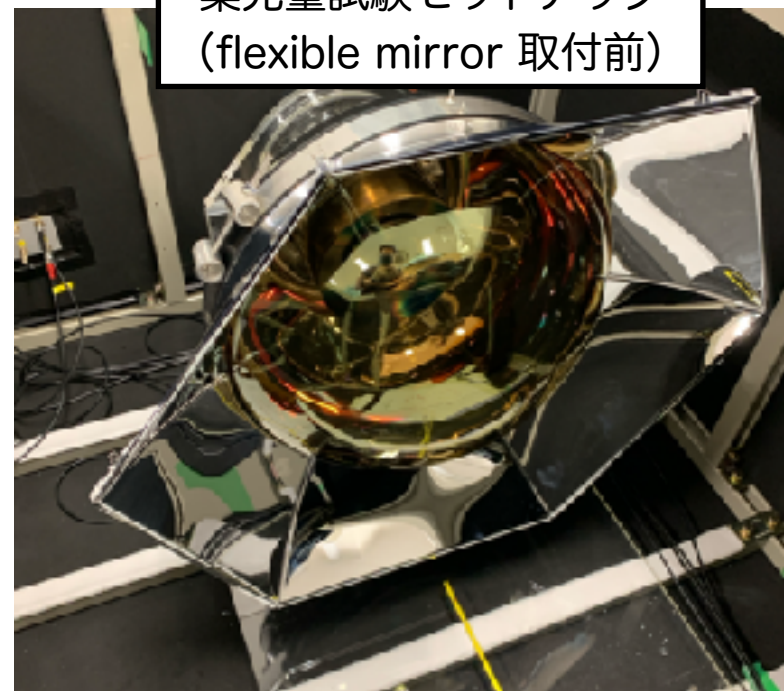


アルミ蒸着
+高反射被膜
($\text{SiO}_2 + \text{ZrO}_2 + \text{SiO}_2$)



反射率 90~95%

集光量試験セットアップ
(flexible mirror 取付前)



今後の計画

		R8 (2026)	R9 (2027)	R10 (2028)	R11 (2029)	R12 (2030)	R13 (2031)	R14 (2032)	R15 (2033)	R16 (2034)	R17 (2035)
カムランド 高性能化	日本 担当	高量子効率PMT設置 集光ミラー設置 LS純化装置改良 BO純化装置導入 電子回路JP導入	ナイロンバルーン設置 液体シンチレータ導入 発光溶質増量 第2発光溶質純化装置 導入・純化	ミニバルーン導入 Xe-LS導入							
	海外 担当	高性能電子回路導入 宇宙線veto導入	上筒部検出機導入	校正装置導入							
カムランド での研究				ニュートリノ観測	0 ν 2 β 探索					地球始原隕石・マントル対流の知見 逆階層カバー/順階層50%カバー	
神岡極稀現象 研究拠点	日本 担当	高感度Ge導入 低放射能シールド構築									
	海外 担当	希釈冷凍機導入 質量分析装置導入									
神岡極稀現象 研究拠点での 研究		極低放射能環境構築 次世代検出器の開発 共同利用での研究	低質量暗黒物質探索 アクシオン探索						次々世代0 ν 2 β 実験提案		

海外の状況

米NSAC: Long Rang Plan for Nuclear Science (2015, 2023)

0 ν 2 β 研究を最優先課題に位置づけ、トンスケールプロジェクトの強力なサポートを提言

米P5: Pathways to Innovation and Discovery in Particle Physics 2023

0 ν 2 β 研究を最重要課題に位置づけ

欧APPEC: European Astroparticle Physics Strategy 2017-2026, 2023 midterm update

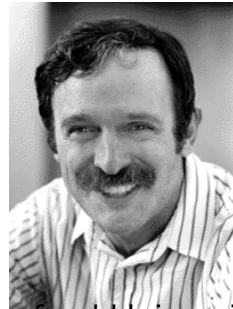
0 ν 2 β 研究を最重要課題に位置づけ、トンスケールプロジェクトの強力なサポートを提言 (CUPID, **LEGEND**, NEXT)

米DOE: CUPID, LEGEND, nEXOから**2030年頃**の稼働を目指す**LEGEND**に支援の候補を絞った。

SNO+, JUNO が、地球ニュートリノ観測にもうすぐ参入予定

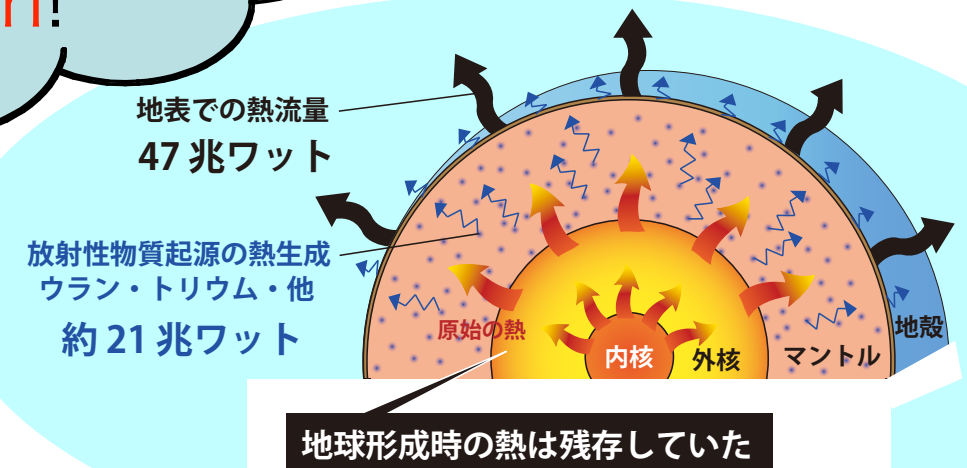
ニュートリノ地球科学の歴史はカムランドの研究の歴史

2005 地球ニュートリノの初観測
ニュートリノ地球物理学を開拓



Stanford University
Professor Norman Sleep

This is not an evolution but a **revolution!**



2011 地球が冷えていることを証明
ニュートリノ地球物理学を实践
放射性熱 < 地熱

2022 地球モデルの選別を開始
地球科学の大論争の決着へ

マントル対流への知見
(マントル組成への課題)

Geophysical Research Letters 49. 16, 28 August 2022, e2022GL099566

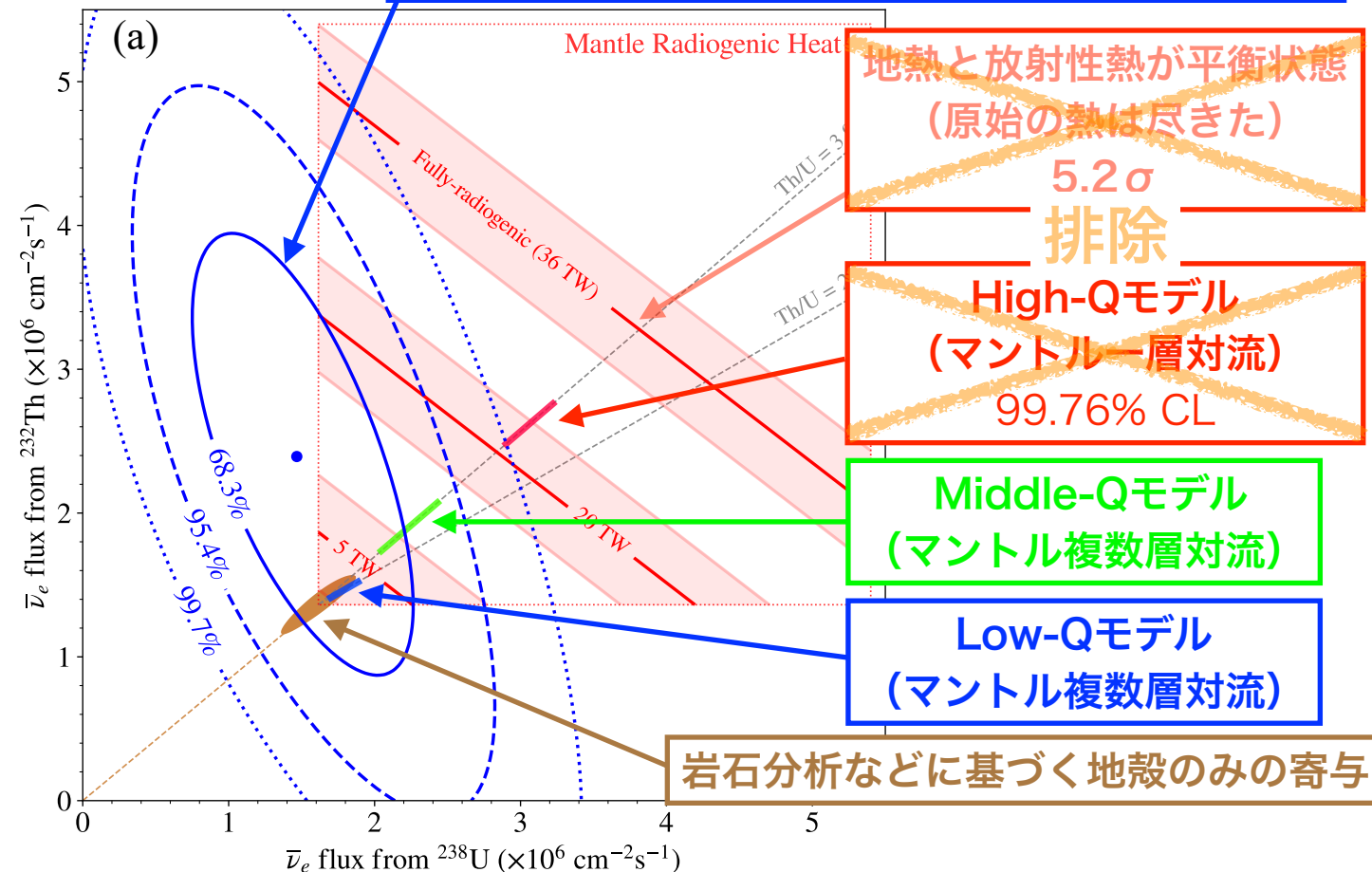
30年後のビジョン

地球ダイナミクスを解明

地球始原隕石(組成)を解明

参照地球ダイナミクスモデルの構築

カムランドの地球ニュートリノ観測による許容範囲



GBDT で 4 割偶発同時BG低減、8%信号観測効率向上

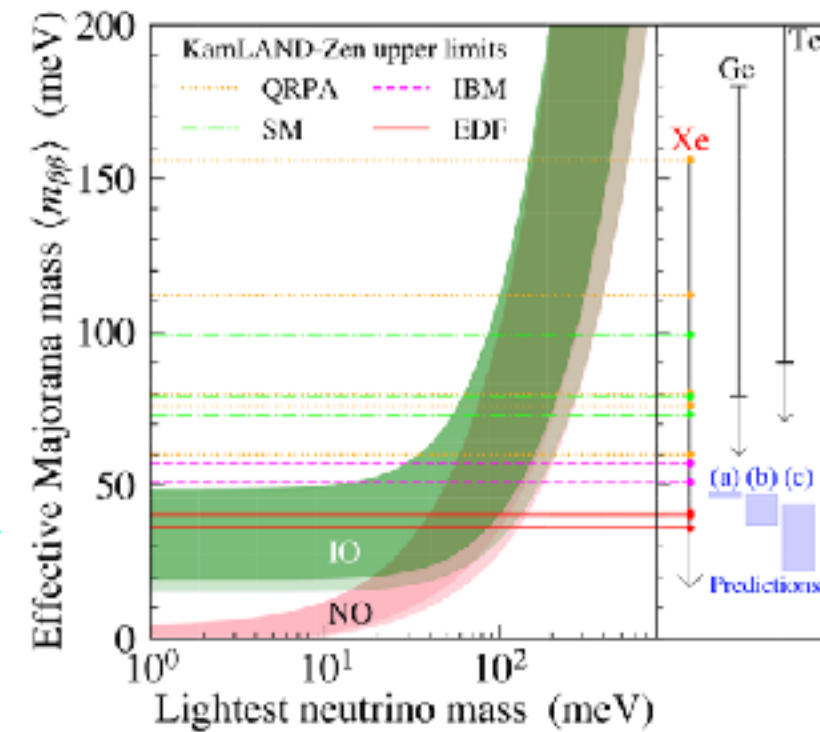
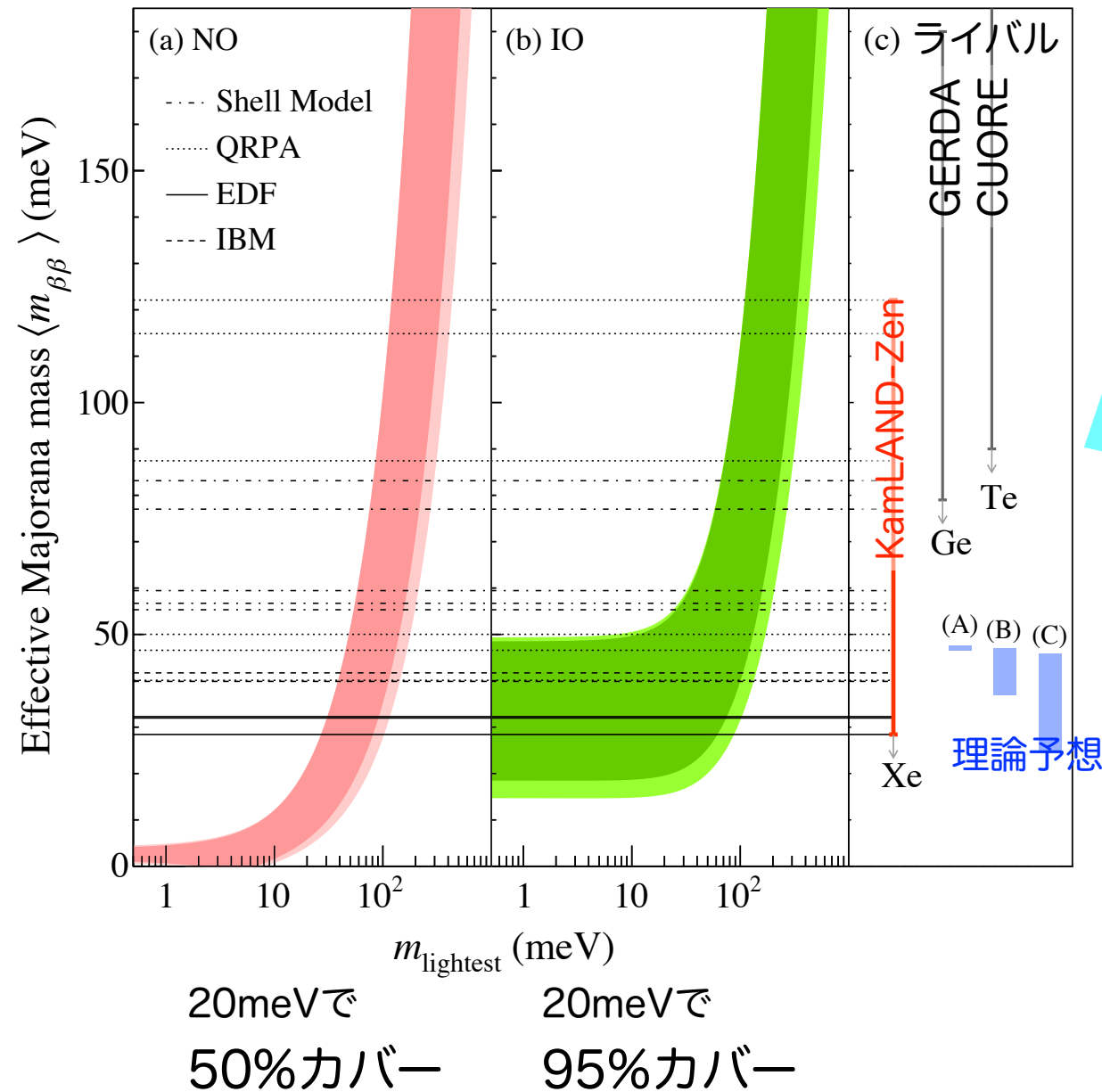
R06年1月までの全データ

KLZ400 & 800 combined

PRL 130, 051801 (2023)

Editors' suggestion, Featured in Physics (VIEWPOINT)

arXiv:2406.11438



$0\nu 2\beta$ 半減期への制限

$$2.3 \rightarrow 3.8 \times 10^{26} \text{yr}$$

マヨラナ有効質量への制限

$$36-156 \rightarrow 28-122 \text{meV}$$

複数の理論が20meVより重い領域を予想しており、大発見への期待が大きい！
20meV達成で逆階層構造（IO）の許容範囲（図の緑の部分）をほぼ全てカバーするため、質量階層構造に対して重要な知見を与える。

まとめ

KamLAND2-Zen は $0\nu 2\beta$ 研究、ニュートリノ地球ニュートリノ科学、低エネルギーニュートリノ天文学を主テーマに推進します。

「最重要課題として速やかな実現を望む新規計画」への選出ありがとうございました。文科省ロードマップ2023に掲載されました。

グループは成長しており、組織整備により強化されました。(KERNEL)

KERNELの活動場所となるスーパークリーン施設も竣工間近です。

カムランド解体は順調に進んでおり、キセノン・LS・BOの排出が終了し、現在乾燥中です。来年度にはPMTの取り外しを行います。

KamLAND2-Zen 実現に向けて、今後ともご支援をよろしくお願いします。