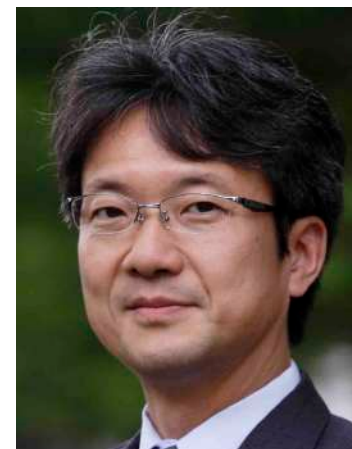


# 計画研究 B01 高感度大型装置で推進する 暗黒物質直接探索 準備状況

代表者	東京大学宇宙線研究所	森山茂栄
分担者	名古屋大学宇宙地球環境研究所	山下雅樹
	東京大学宇宙線研究所	安部 航
	名古屋大学高等研究院	風間慎吾
	横浜国立大学大学院工学研究院	中村正吾
	東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構	Kai Martens



2020年6月3日

新学術「地下宇宙」領域研究会

# 内容

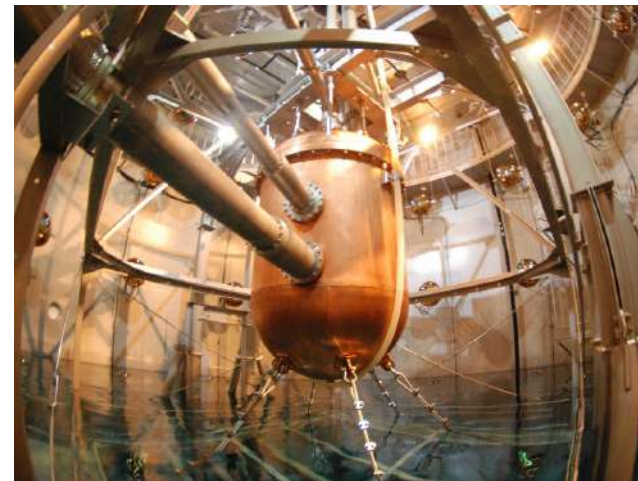
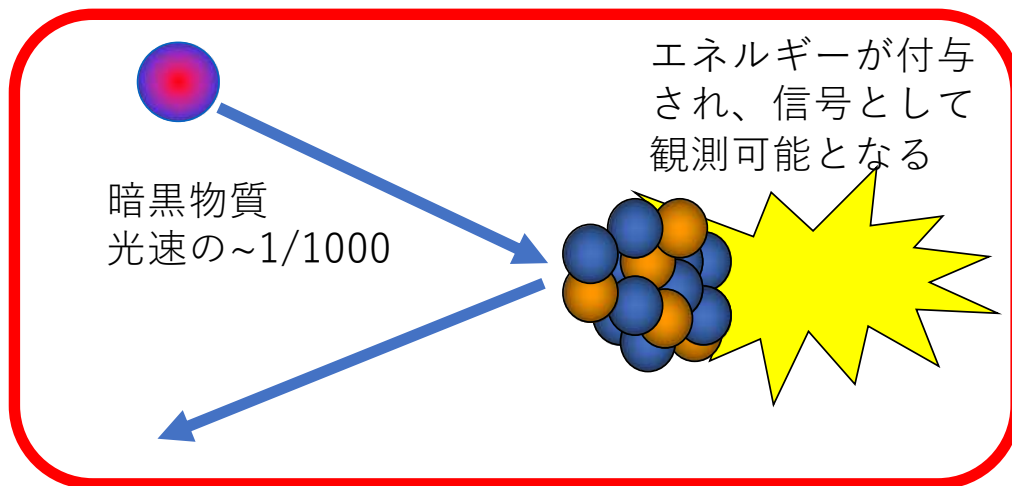
- 暗黒物質直接探索（検出）実験とは
- 本研究計画で推進する研究の状況
  - XENONnT実験の推進（硫酸ガドリニウムの調達、水透過率測定的确立）
  - XMASSのデータ解析等（XENONnT等での解析へ向けて有効）
  - 将来の暗黒物質探索・研究の高度化支援
- まとめ

# 暗黒物質直接探索（検出）実験

- 暗黒物質は宇宙初期に普通の物質と熱的に平衡状態になっていたと期待。
- その場合、ダークマターは普通の物質と相互作用＝衝突すると期待。
- ダークマターの速度は、銀河中心に落ちないし、銀河から飛び出さない  
→ 太陽の速度と同じ程度

速度 ~ 太陽の速度 270 km/s ~  $10^{-3}c$  （光速の0.1%位）

- 暗黒物質が実験室の原子核を跳ね飛ばす現象を観測し発見を目指す。



神岡の  
XMASS検出器も  
同様の原理で  
探索を行ってきた



# XENON collaborationと実験サイト

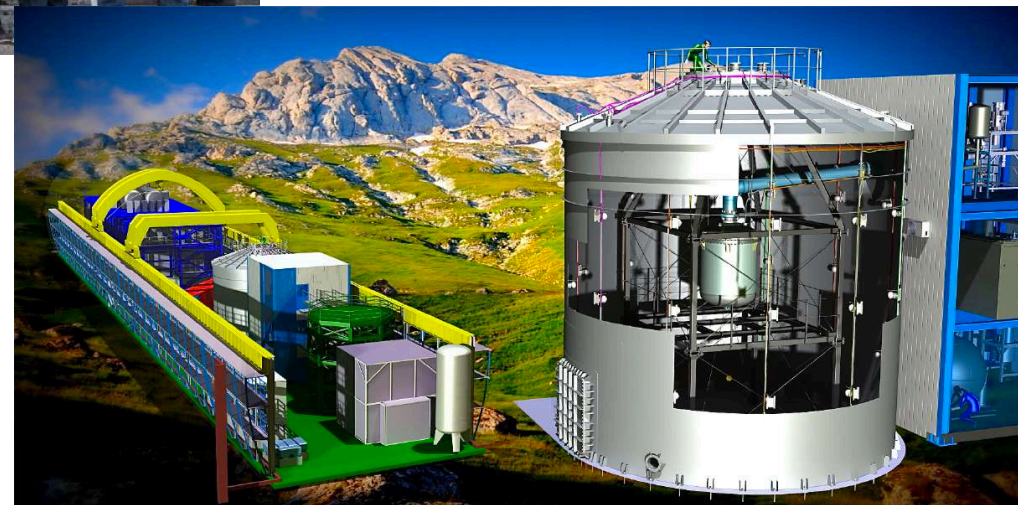
Google map



~170 collaborators  
28 institutions

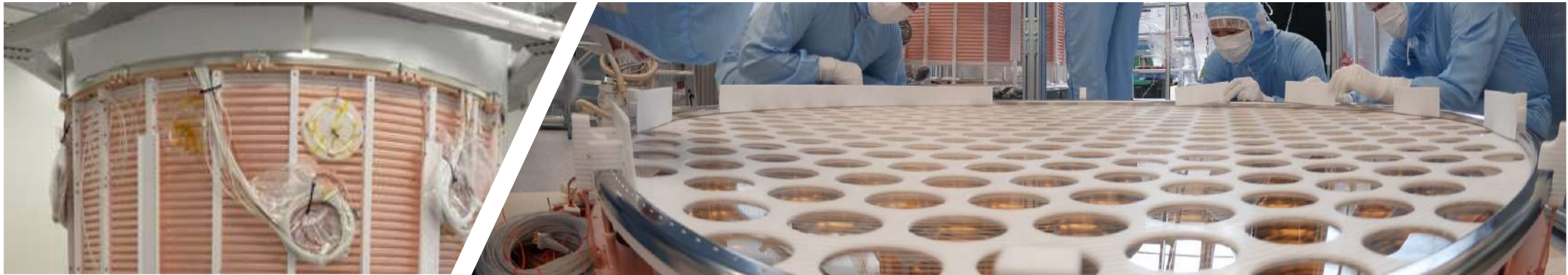
**Collaborating Institutions:**

- Columbia University
- Rensselaer Polytechnic Institute (RPI)
- Nikhef
- Werner-Heisenberg-Wasserstoff Institut (WWU) Münster
- Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
- Stockholm University
- Johannes Gutenberg University Mainz (JGU)
- Max-Planck-Institut für Kernphysik (MPIK), Heidelberg
- University of Freiburg
- University of Chicago
- University of Zurich
- University of California San Diego (UCSD)
- Rice University
- Purdue University
- 東京大学 (The University of Tokyo)
- Nagoya University
- Colmbra
- Subatech
- LPNHE (Paris Lodron Universität Salzburg)
- UC Lab (Université de Clermont-Ferrand)
- Bologna LNGS
- Torino
- Napoli
- Welzmann
- جامعة نورولنه ابو ظبي (NYU Abu Dhabi)
- NYUAD
- Kobe University



• グランサツソ@イタリア





# 進捗状況

Twitterやfacebookをフォローいただければ幸いです。

<https://www.facebook.com/XENONexperiment>

<https://twitter.com/XENONexperiment>

[https://www.instagram.com/xenon\\_experiment/](https://www.instagram.com/xenon_experiment/)

日本メンバーもmanagementに寄与開始

山下雅樹: Collaboration Board, co-chair

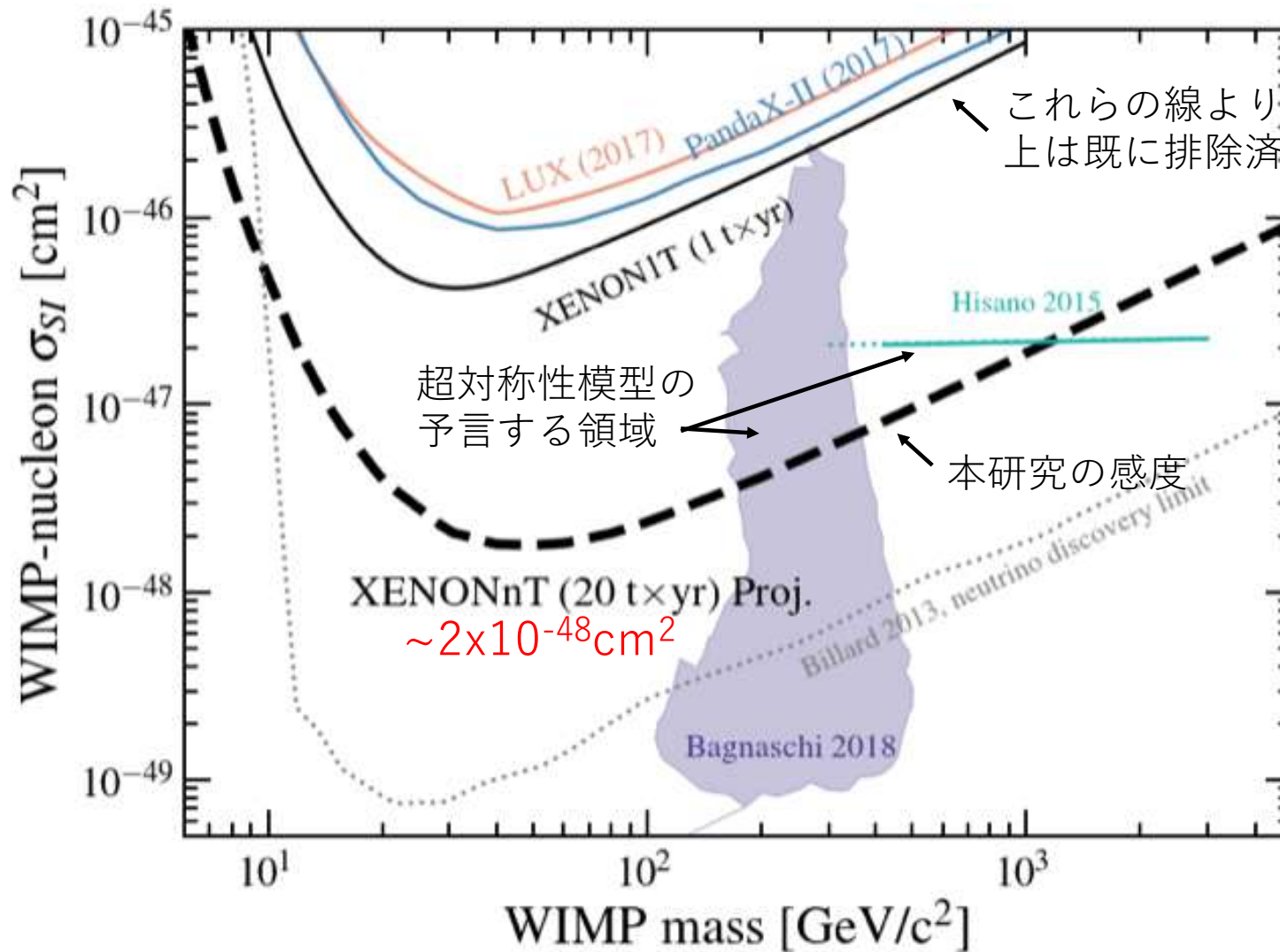
風間慎吾: Analysis coordinator

身内賢太朗: Editorial Board

Kai Martens: Editorial Board, PR team



# 本研究で狙う暗黒物質(WIMPs)と核子の散乱断面積の領域

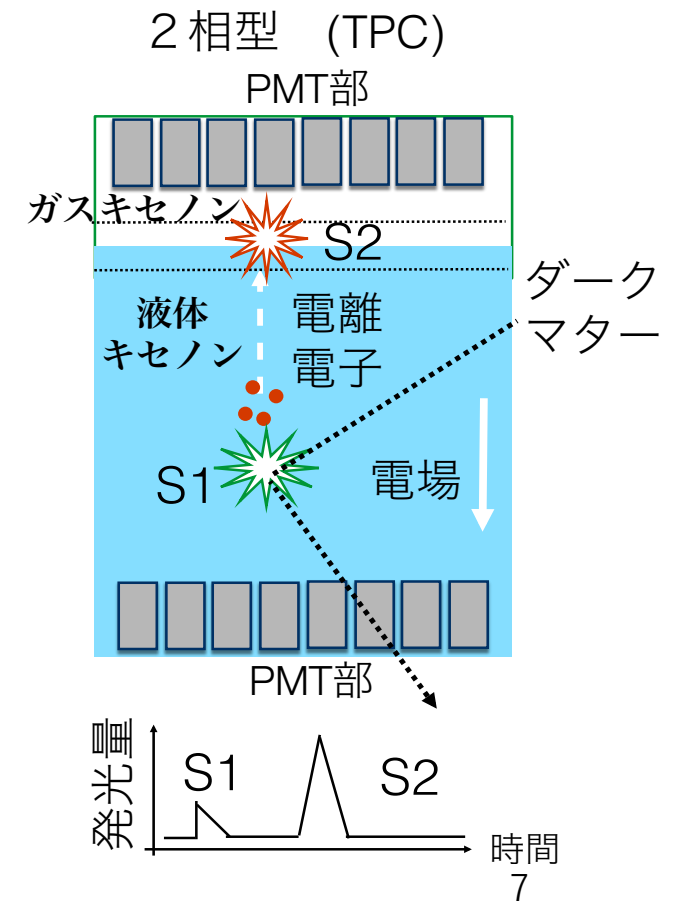


2018年まで運転してきたXENON1T検出器を大型化 (upgrade) してXENONnT検出器の運転を開始する。

本計画研究で大幅な感度の躍進を果たし、暗黒物質の発見を目指す。

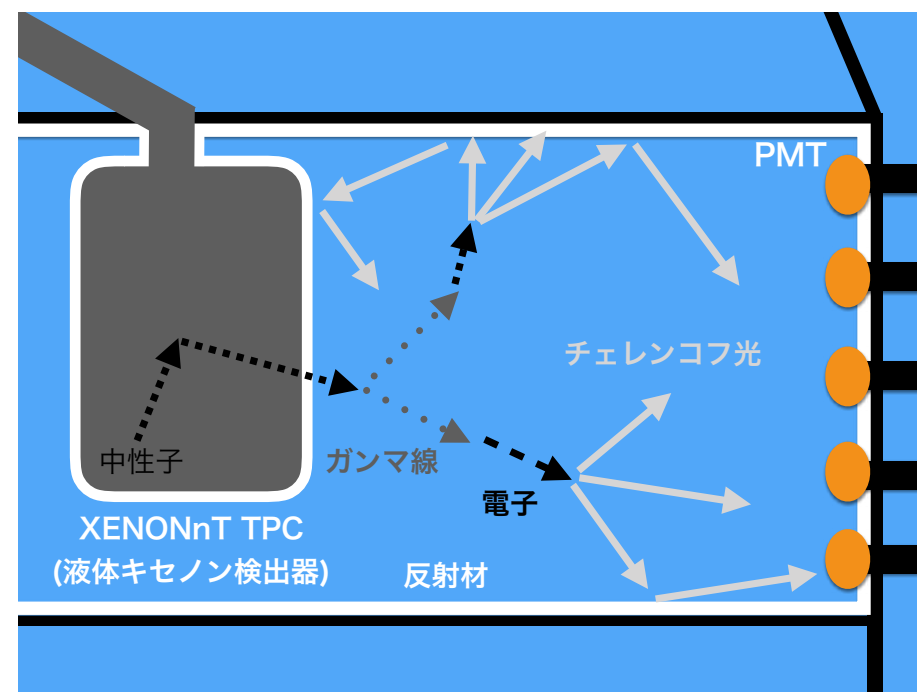
# 中性子起源のバックグラウンド

- これまでLXe 2相型TPC検出器では、S1とS2の信号の比較によってガンマ線や電子線のバックグラウンドを大きく低減することで感度を向上させてきた。
- XENONnT実験では、その感度向上の結果、極めて稀に生じる中性子起源のバックグラウンドが影響し始める。5年間の測定の間9事象近いバックグラウンドが生じることがシミュレーションによって予言されている。
  - 二重散乱等の区別が容易な事象は除いてある。
  - 中性子の起源はPMT等の構成部品。



# 中性子カウンターの設置

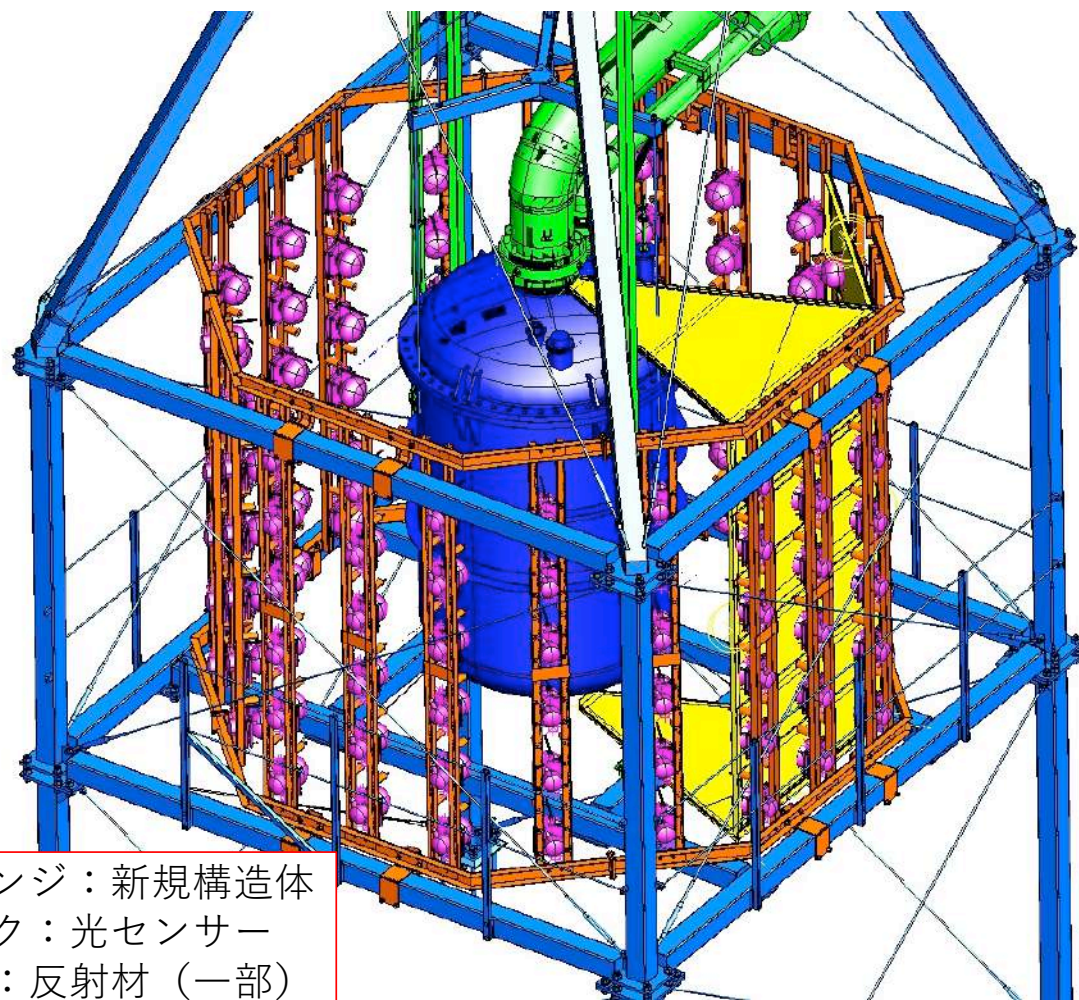
- SK-Gdで開発された、ガドリニウムを用いた中性子カウンターを実現する。
  - 本研究では硫酸ガドリニウムの調達と、ガドリニウムが溶けた水の純化システムの運転、キャリブレーション、最適化等を含む。
- 中性子の検出効率は80%以上を目指す。
- 700トンのタンクに0.2% Gdを導入予定。(SK-Gdの目標の倍の濃度)
  - C01, D01との連携による研究
- 暗黒物質探索のデータが得られ次第データを解析を開始できる準備を行う。



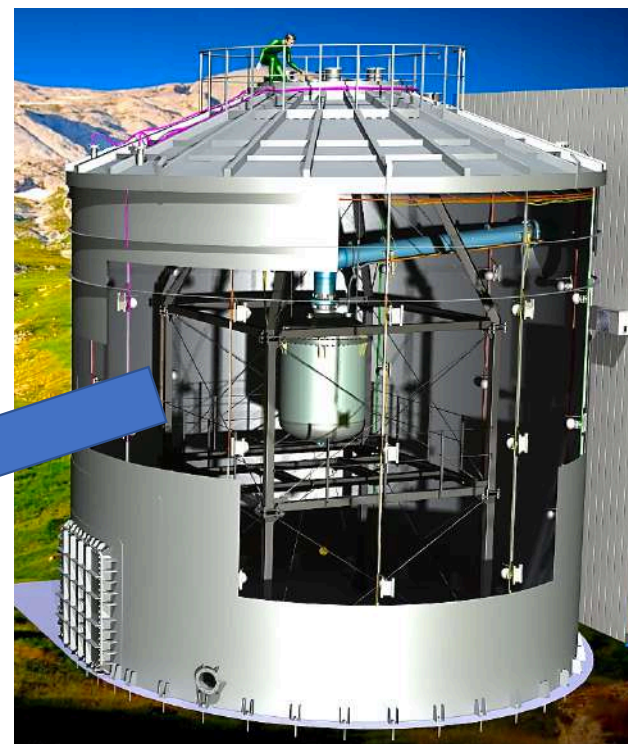


# 実際の中性子カウンター

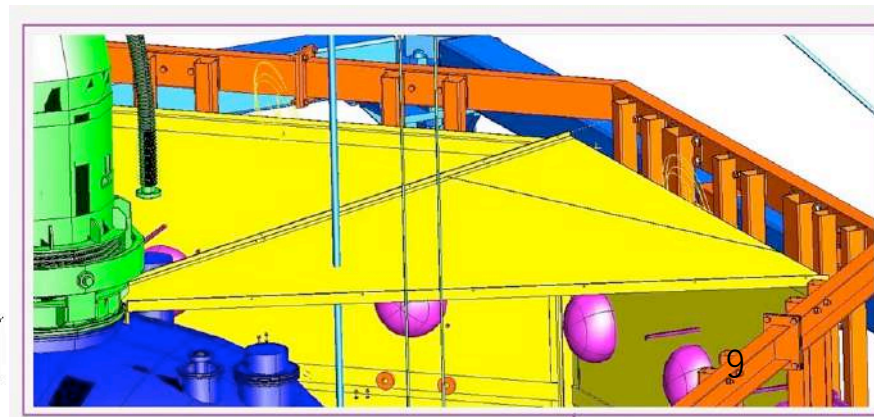
(これらはヨーロッパのグループが中心で建設)



オレンジ：新規構造体  
ピンク：光センサー  
黄色：反射材（一部）



タンク  
内部を  
改造



# 幅広い日本の貢献・超高純度硫酸ガドリニウムの調達

- 多面的寄与を行ってきている
  - 中性子カウンターのデザイン (MCシミュレーション)
  - Gd水システムのデザイン、調達への寄与
  - 後述のキャリブレーション (*in-situ*, *ex-situ* calibration)
  - DAQの立ち上げ、PMTキャリブレーション
  - ソークテスト、材料選定、サビ対策、
- 重要なものの一つ：超高純度硫酸ガドリニウム
  - SK-Gdで研究開発されてきた $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ が十分に要求を満たす。
- 3.4トンの硫酸ガドリニウムを調達。
  - 昨年度1.5トンをNYCから調達完了。  
(コロナによる移動制限：滑り込みセーフ。)





# 純度の確認（製造源、Ge@IPMU、NIMS）

NIMSの結果  
上ICP-MS  
下ICP-OES

- 我々の要求値とSK-Gdの要求値：1 - 2桁ほどゆるい
  - $^{238}\text{U}$  5 mBq/kg  $\Leftrightarrow$  U < 0.5 mBq/kg
  - $^{232}\text{Th}$  10 mBq/kg  $\Leftrightarrow$  Th < 0.05 mBq/kg
  - $^{40}\text{K}$  100 mBq/kg
  - $^{235}\text{U}$  20 mBq/kg  $\Leftrightarrow$   $^{235}\text{U}$  30mBq/kg
- 1ロット500kgなので3ロット必要
- 製造元の検査(ICPMS, GDMS)：合格
- Ge測定：十分に満足する結果
  - $^{238}\text{U}$  < 1.6-2.8 mB/kg
  - $^{232}\text{Th}$  < 2.0-2.2 mBq/kg
  - $^{223}\text{Rn}$ 以降( $\sim^{235}\text{U}$ ) < 6-7 mBq/kg
- NIMS(外注で不純物測定)
  - ICP-MS: Gdを除いて測定（製造源より高感度）
  - ICP-OES: レアアースの分析（感度低）

表1 分離分析法の結果

元素	191101 分析値	191102 分析値	191103 分析値	定量下限
Mg	<0.05 ppm	<0.05 ppm	<0.05 ppm	0.05 ppm
Al	<0.05 ppm	<0.05 ppm	<0.05ppm	0.05 ppm
Ca	<0.3 ppm	<0.3 ppm	<0.3 ppm	0.3 ppm
Cr	<0.05 ppm	<0.05 ppm	<0.05 ppm	0.05 ppm
Mn	<0.05 ppm	<0.05 ppm	<0.05 ppm	0.05 ppm
Fe	<0.1ppm	<0.1ppm	<0.1ppm	0.1 ppm
Co	<0.01 ppm	<0.01 ppm	<0.01 ppm	0.01 ppm
Ni	<0.01 ppm	<0.01 ppm	<0.01 ppm	0.01 ppm
Cu	<0.05 ppm	<0.05 ppm	<0.05 ppm	0.05 ppm
K	<0.1 ppm	<0.1 ppm	<0.1 ppm	0.1 ppm
U	<0.05 ppb	<0.05 ppb	<0.05 ppb	0.05 ppb
Th	-	-	-	0.1 ppb

単位の説明 (ppm:  $\mu\text{g/g}$ ) (ppb: ng/g)

表2 マトリックスマッチング/ICP 発光分光分析の結果

元素	191101 分析値	191102 分析値	191103 分析値	暫定 定量下限
Ce	<7ppm	<7ppm	<7ppm	7ppm
Pr	<7ppm	<7ppm	<7ppm	7ppm
Eu	<2ppm	<2ppm	<2ppm	2ppm
Sm	<10ppm	<10ppm	<10ppm	10ppm
Ge	<2ppm	<2ppm	<2ppm	2ppm
Y	<1ppm	<1ppm	<1ppm	1ppm
Tm	<1ppm	<1ppm	<1ppm	1ppm
Er	<2ppm	<2ppm	<2ppm	2ppm
Dy	<3ppm	<3ppm	<3ppm	3ppm
Tb	<7ppm	<7ppm	<7ppm	7ppm
La	<2ppm	<2ppm	<2ppm	2ppm

単位の説明 (ppm:  $\mu\text{g/g}$ )

# 透過率測定装置の確立(2019年度 ICRR陳育勤修士論文)

[http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/\\_pdf/mthesis/2019/Mthesis\\_YuchinChen\\_final.pdf](http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/_pdf/mthesis/2019/Mthesis_YuchinChen_final.pdf)

- 中性子検出器はGdの放出するガンマ線をチェレンコフ光で検出
  - PMTの数は限りがある (120本の10" PMT)
  - 反射材は高い反射率があると期待 (名古屋大から提案)
  - 当然水透過率や反射率は高く保つ必要がある。

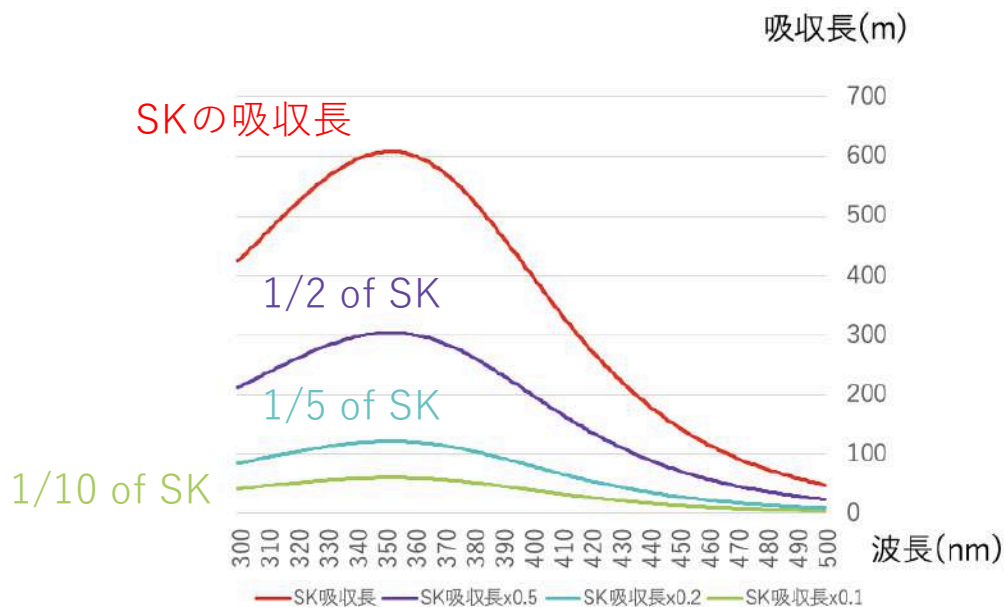


図 2.8 SK 純水の吸収長と、そのスケールした値

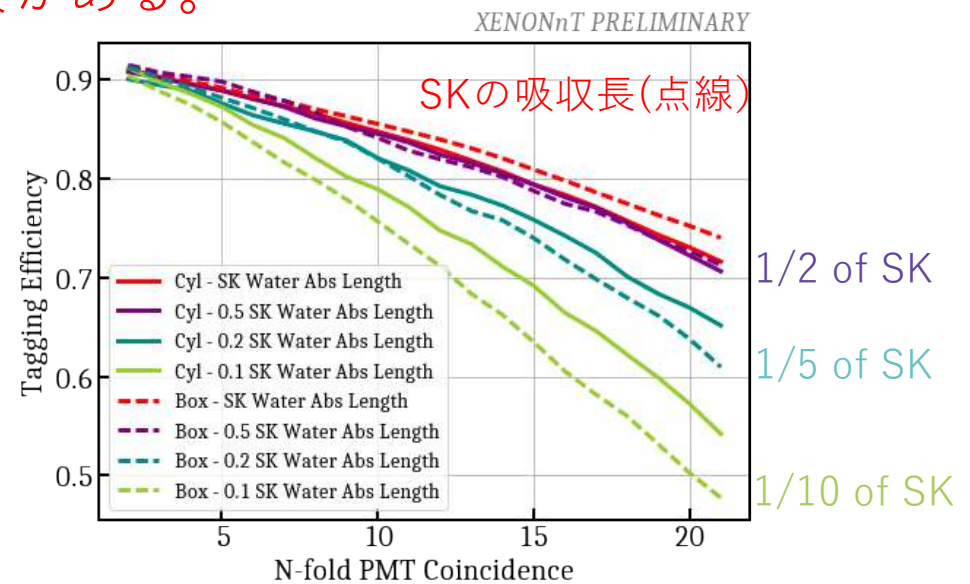


図 2.10 SK より数倍短い吸収長を仮定したときの、同時観測した PMT の個数  $N$  と中性子の検出効率との関係 [18]

10ヒットを要求すると85%  
SKの1/10の透過率だと75%へ下がる

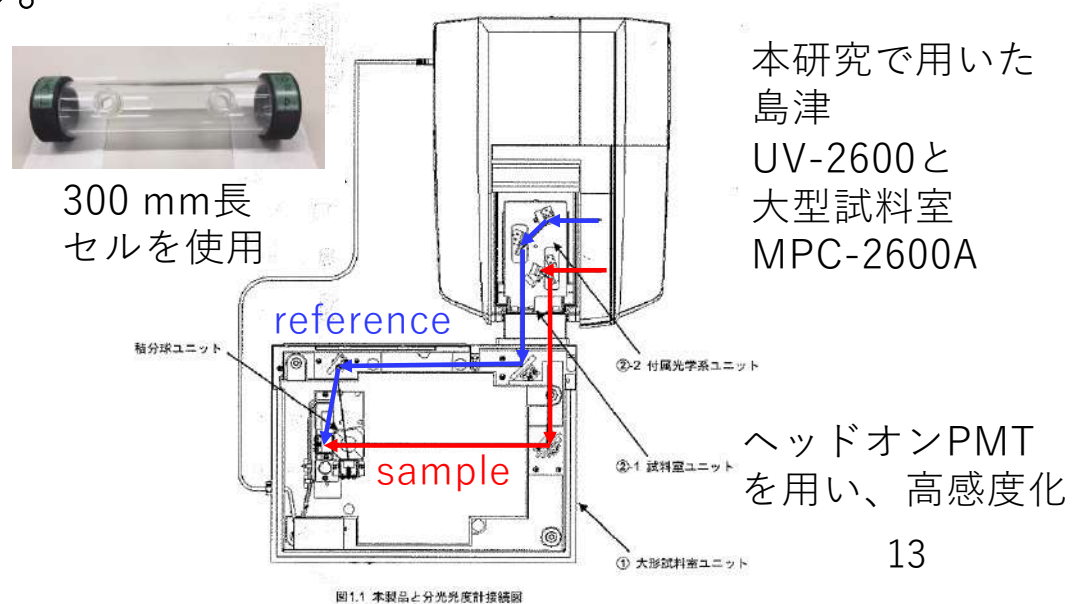
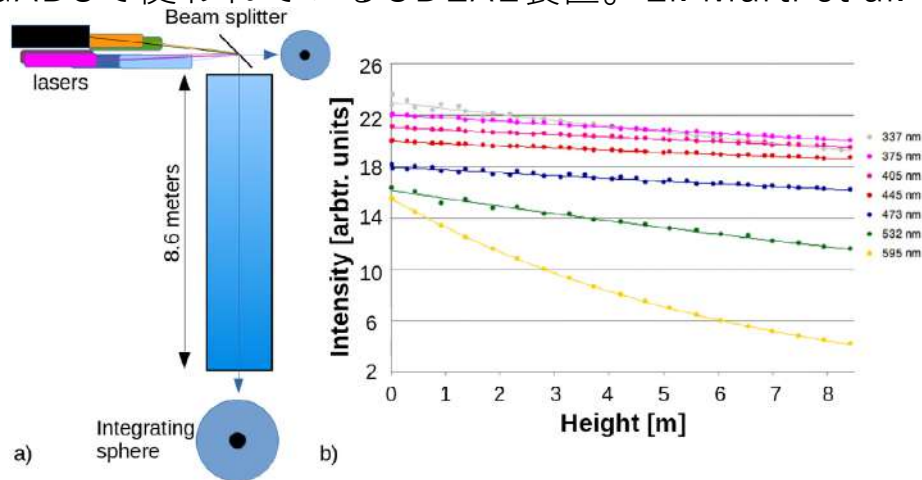


# 透過率測定装置の確立(2019年度 ICRR陳育勤修士論文)

- 実際の運用上は
  - 水透過率と反射率を分けた評価を行いたい
    - レーザーを用いたin situ測定 (神戸大:後日報告):水透過率と反射率をあわせて評価
    - 高感度分光計を用いたex situ測定 (本talk): 水透過率に特化
  - EGADSには長基線水透過率測定装置UDEALがあるが、beamの自動ステアリング等高度な開発となるため、装置は市販品を用い、保証性能を超えた精度と再現性を達成する必要がある。

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 959 (2020) 163549

EGADSで使われているUDEAL装置。Li. Marti et al.



本研究で用いた  
島津  
UV-2600と  
大型試料室  
MPC-2600A

ヘッドオンPMT  
を用い、高感度化

図1.1 本製品と分光光度計接続図

# 透過率測定装置の確立(2019年度 ICRR陳育勤修士論文)

- 絶対的透過率の決定は困難
  - 純水との相対比較で透過率を出す。純水はSKの透過率を用いる。
- 300 mmのセルで300 m以上を議論するために、再現性0.05%Tを追求
  - 神岡の古い分光計は $\pm 0.3\%T$ 、本分光計本体のカタログ値は $\pm 0.1\%T$
- まずは徹底した再現性の追求、純水の比較 (XMASS、MilliQそしてSK)
  - 系統誤差 $\pm 0.05\%T$ を達成
  - XMASS~MilliQ, SKとは300 nm以上では誤差範囲で一致

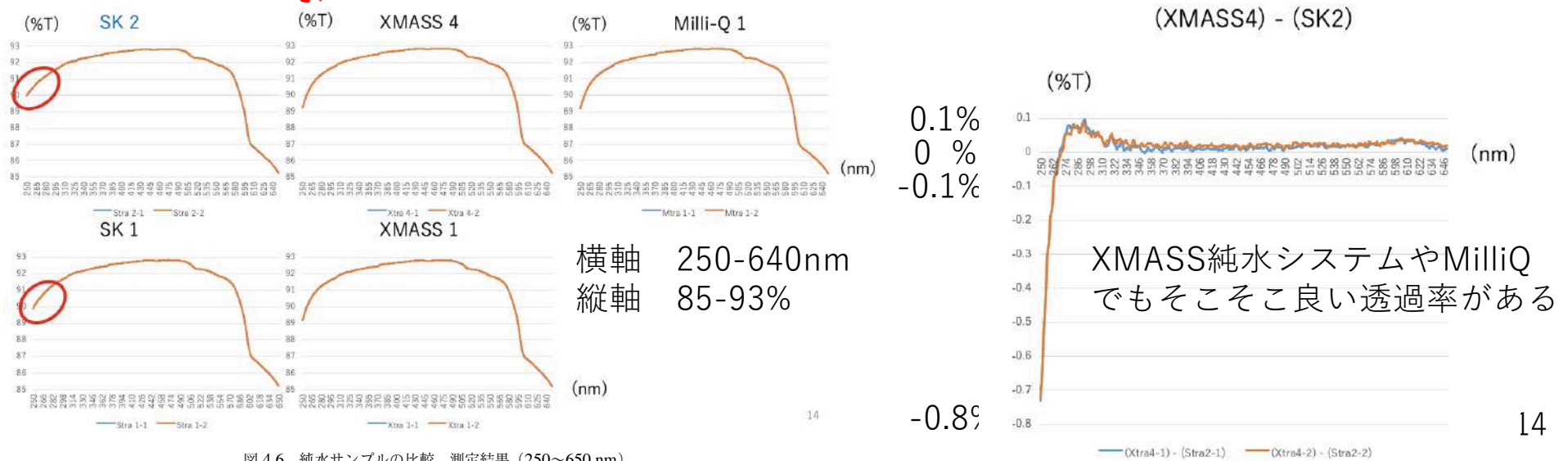
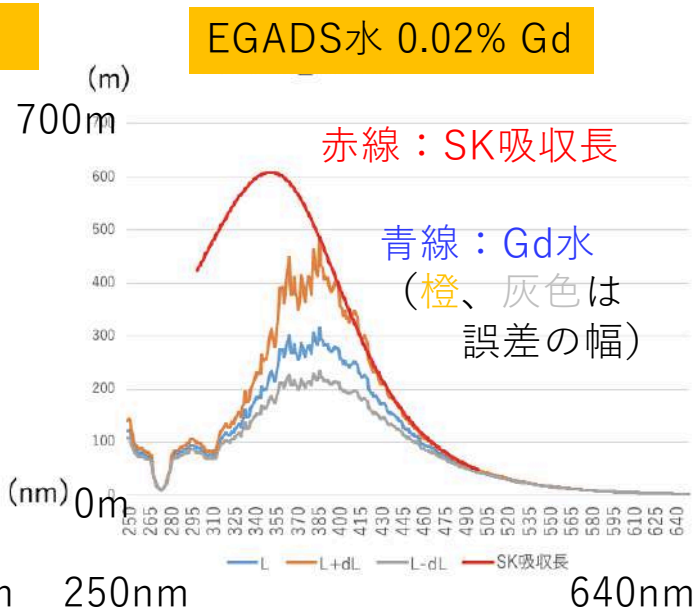
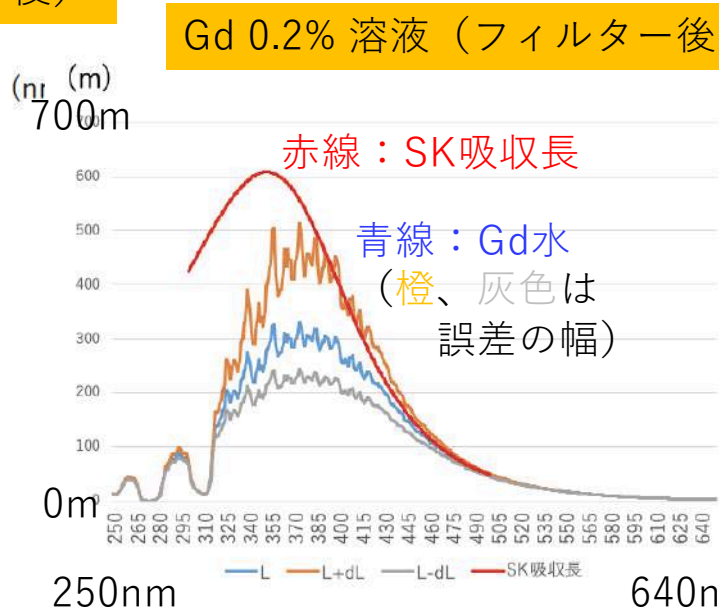
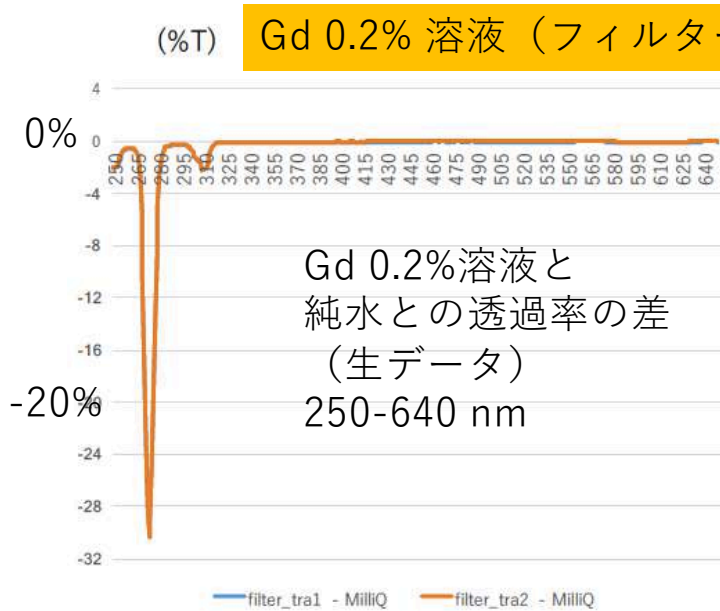


図 4.6 純水サンプルの比較 測定結果 (250~650 nm)

# 透過率測定装置の確立(2019年度 ICRR陳育勤修士論文)

- 硫酸ガドリニウムを溶解した溶液の測定：純水との差は吸収と解釈
  - 0.2  $\mu\text{m}$ フィルターを通すことが必須。
- EGADS水の測定 (preliminary) 採取点が悪いのか？UDEALと要比較
- LNGSに移設してまずは純水装置の性能評価から開始予定。



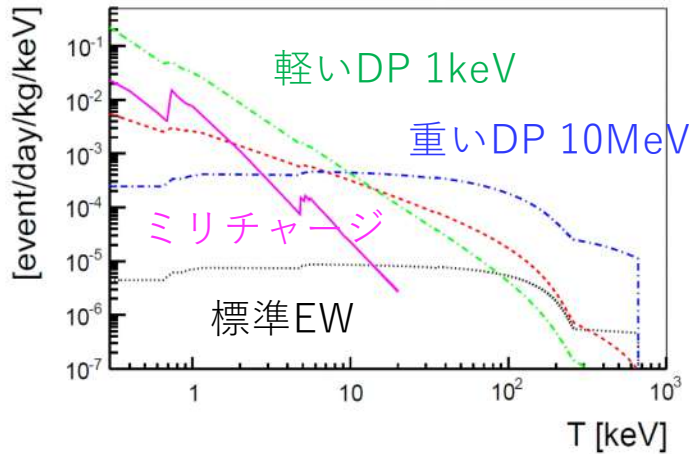
400 nm以上では純水の吸収と矛盾しない

# XMASS実験のデータ解析

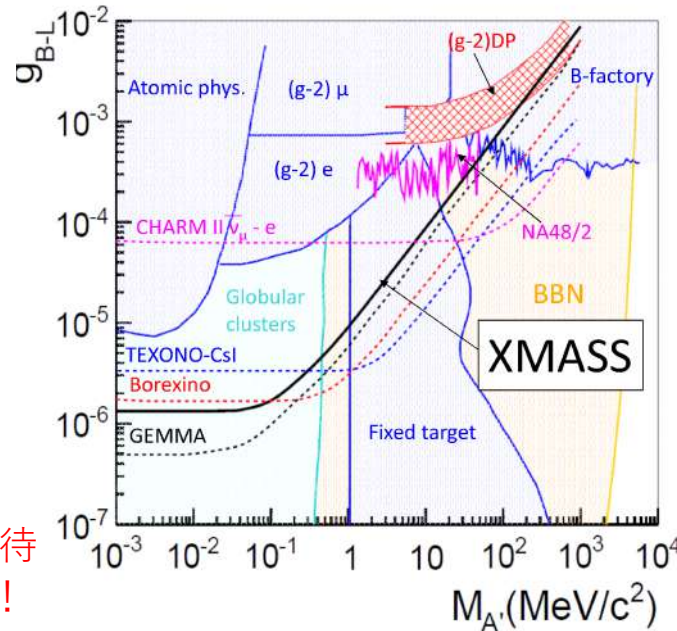
preliminary

分担者：安部他  
arXiv: 2005.11891

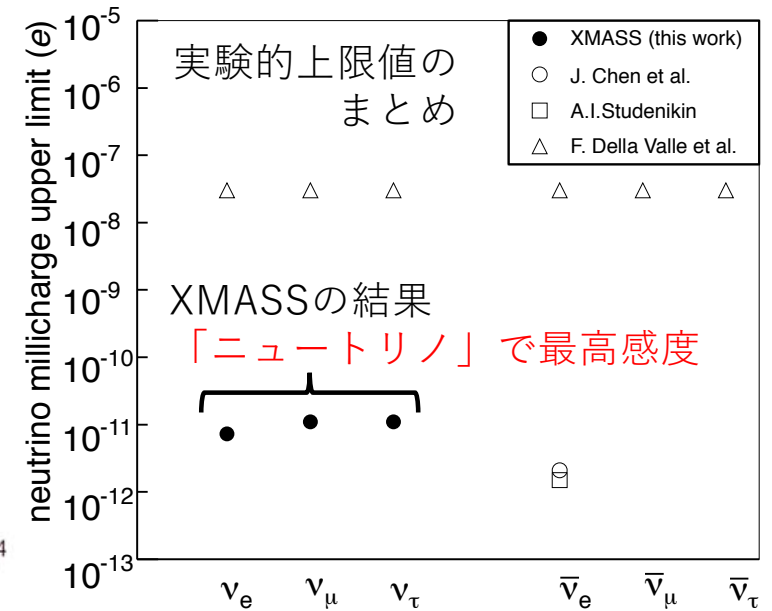
- XMASSのデータを用い、太陽ニュートリノによる信号を探索
  - ニュートリノの磁気双極子モーメント  $\rightarrow <1.8 \times 10^{-10} \mu_B$  (GEMMA  $<2.9 \times 10^{-11} \mu_B$ )
  - ニュートリノと電子がダークフォトン(DP,  $U(1)_{B-L}$ )で相互作用  $\rightarrow$  下真ん中
  - ニュートリノがミリチャージを持つ可能性( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ )  $\rightarrow$  右下



期待される電子反跳スペクトル  
低エネルギーにエンハンスメントが期待  
 $\rightarrow$  XMASSの有効体積のデータが有用！



DPでg-2を説明する領域をほぼ排除





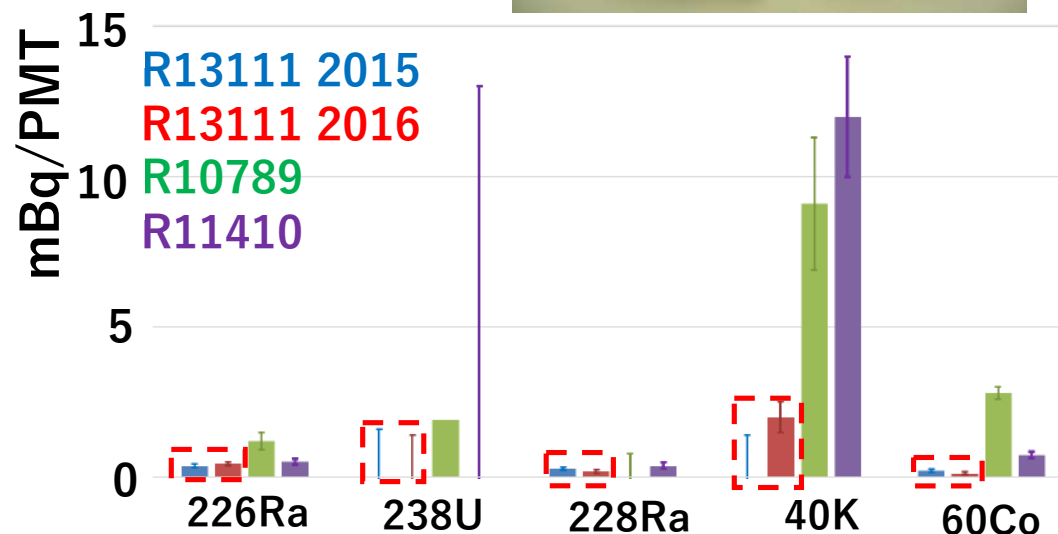
# 低BGPMT開発(XMASS)

分担者：安部他  
arXiv: 2006.00922

- 液体キセノン中で使用する低BGPMTとしてR13111を開発した
  - 3インチ、ドーム形状の光電面：single phaseで問題になる表面事象の同定
  - 低RIの実現のため特にR10789でRIが多かった部材について、大幅なRIの低減を行った。
    - フィードスルーのガラス部品 → 高純度試薬を用いた合成法を採用
    - 光電面材料 → カリウム40を1/100に低減したカリウム39ベースの試薬の採用
  - 入射窓でのβ線起因のチェレンコフ光の低減
    - 胴体のコバール
    - 胴体と窓との間のアルミシール
- 測定感度の改善も行った
- XENON、LZの玉より低RI化に成功
- ノイズ源、運用上の問題：キセノンリーク対策
  - アルミシール部が原因。変更により改善確認。



R13111



<sup>39</sup>Kで富化したクロム酸カリウム

[mBq/PMT]	226Ra	238U	228Ra	40K	60Co
R13111(2015)	0.38 ± 0.07	<1.6	0.29 ± 0.06	<1.4	0.22 ± 0.05
R13111(2016)	0.44 ± 0.06	<1.4	0.2 ± 0.06	2.0 ± 0.5	0.13 ± 0.04

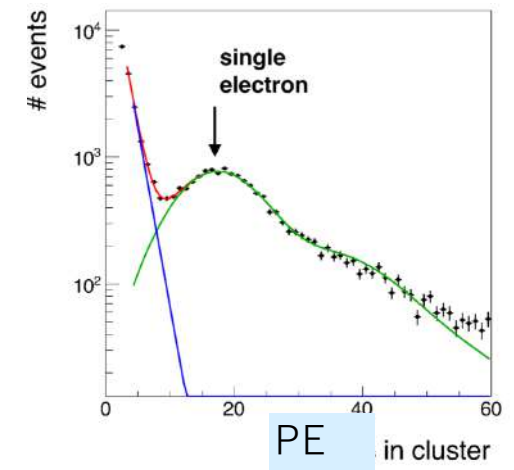
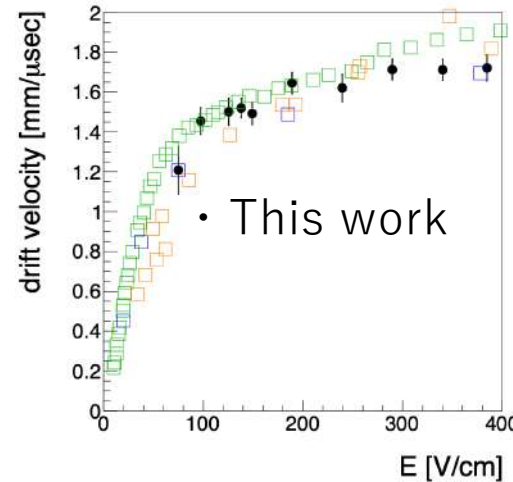
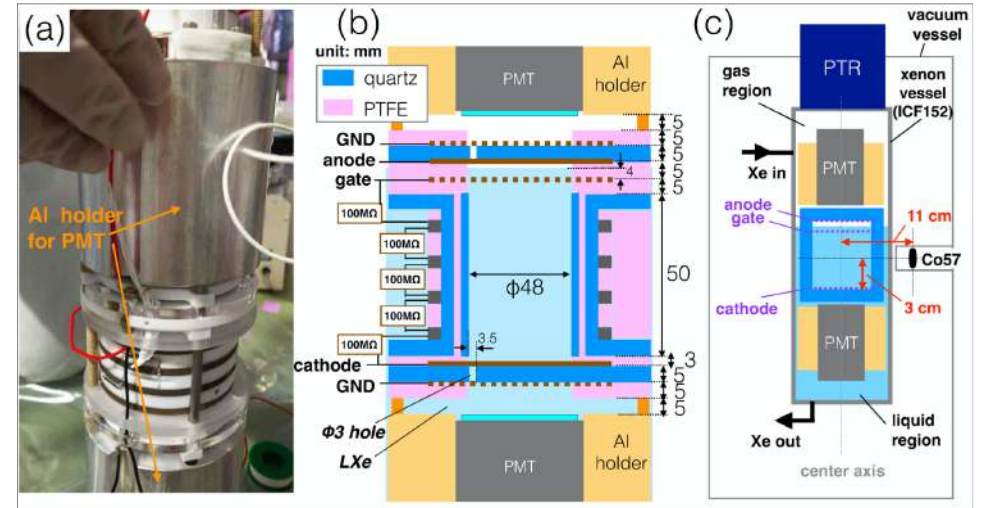
# Hermetic TPCの開発

分担者：山下他  
arXiv: 1910.13831

- DM直接検出のためのR&D
- 検出感度を上げるためには
  - 検出器内ラドン由来のBG削減 ( $\ll 1\mu\text{Bq/LXe kg}$ )
  - 電離電子を $>2\text{m}$ 以上ドリフトが必要

HermeticなTPCを開発、外部からの不純物を低減。  
今回は石英TPCがTPCとして問題なく動作することを実証するために

- drift velocity
- 1 電離電子の観測
- S1, S2信号の定量評価を行った。
  - K. Sato, M. Yamashita et al., [arXiv 1910.13831](https://arxiv.org/abs/1910.13831)
  - 今後ラドン由来のBG削減の実証や、側面からの光読み出しを勧める予定。
  - この技術は $^{136}\text{Xe } 0\nu\beta\beta$  (A班) や低バックグラウンド (D班) への連携・発展の可能性はある。

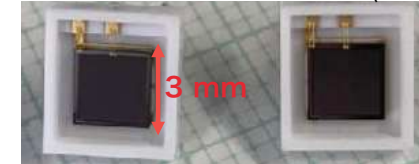


# Development of a new SiPM with lower dark-count

分担者：風間他

- SiPM has a lower radioactivity compared to PMT, thus it is a good candidate for future dark-matter experiments with LXe (and also for other low BG experiments).
- However, current SiPM has ~2 orders of magnitude higher dark-count (DC) rate compared with PMTs used in XENON1T/nT(R11410, ~0.01Hz/mm<sup>2</sup>).
- We have developed a new SiPM for lower DC rate (S12572-015C-SPL, not sensitive to VUV light) with the cooperation of Hamamatsu.

S12572-015C-SPL S12572-015C (STD)

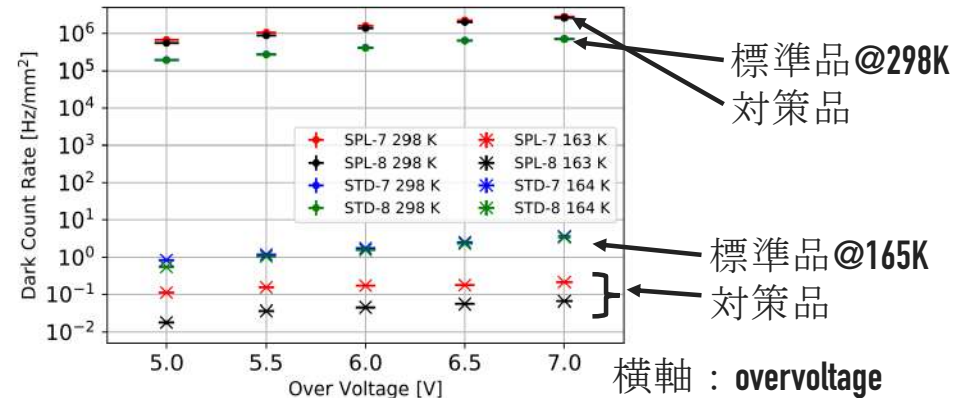
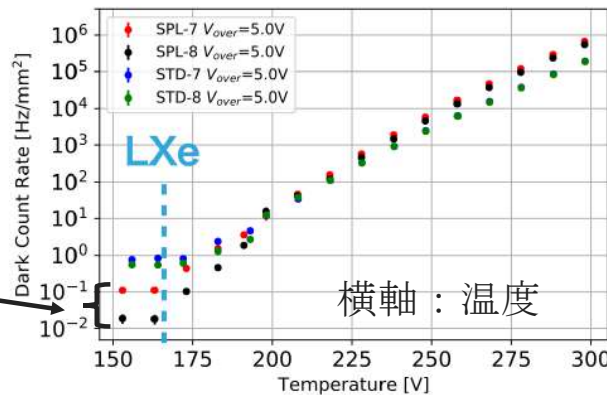


• **More than 10 times improvements in DC rate have been achieved!**

- will develop a new VUV-sensitive SiPM with the same concept
  - can be used for other low BG experiments with low temperature (ex: LAr,  $\nu$ -less double- $\beta$  decay of <sup>136</sup>Xe)
  - detector components are planned to be optimized with radio-purity measurements for ultra-low BG experiments

縦軸：ダークレート

赤、黒の対策品の方が低温では低ダークレート



**Details was presented by Ozaki-kun a3-4 (Nagoya) in the parallel session!**

# ○ 液体キセノン(LXe)の近赤外発光の研究の進捗状況

分担者：中村他

目的：近赤外(NIR)領域における発光特性を調べ、粒子弁別への応用等、様々な可能性を探る

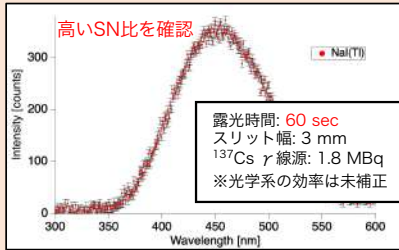
## ➤ (1) LXeのNIR発光の波長スペクトルの決定 (進行中)

測光系を構築済：分光器 (既存) + 冷却CCDカメラ (昨秋に導入)

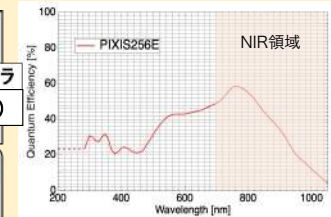
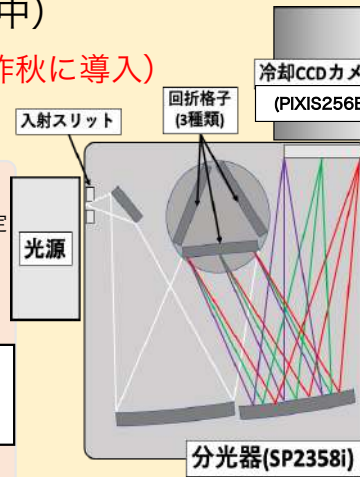
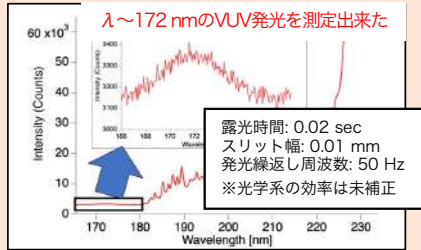
Princeton Instrments, SP2358i Princeton Instrments, PIXIS 256E  
高波長分解能 T ~ -75° 高感度で超低ノイズ

測光系を使用した試験測光を2019年度に実施

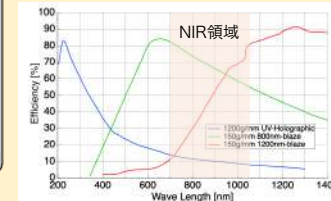
Nal(Tl)シンチレータの発光スペクトル測定



石英窓Xeフラッシュランプの発光スペクトル測定



冷却CCDカメラの量子効率  
(50%@700nm ~ 5%@1050nm)



➡ LXeを $\gamma$ 線で励起し、VUV-NIRの広い波長領域で波長スペクトルを測定する

## ➤ (2) LXeのNIR発光の時間特性の測定 (次に実施)

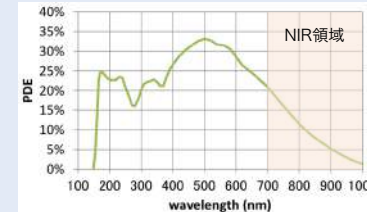
測光系の案：帯域透過フィルタ + VUV-MPPC で測定

一般的な干渉フィルタを 使用予定 HAMAMATSU, S13371-6050CQ-02 VUV-MPPC (S13371)  
LXe温度で使用

- 測定データは、5GSPで読み出せる高速デジタイザで取得予定
- ラズベリーパイを使用して系全体の制御&データ取得予定



高速デジタイザ (BBTX-112)



- 今後、励起線種を変えて上記の各測定を行ない、LXeの発光機構を考察して、粒子弁別への応用等を検討
- VUV-NIR領域の微弱光の波長&時間特性の測定技術は、光を利用するあらゆるプロジェクトで利用可能
- 放射線検出器に関する様々な発光機構を研究する上で、波長&時間特性の正確なデータは重要な情報

\* 本研究はJSPS科研費JP19H05805の他、JSPS科研費JP25287055 および一部 宇宙線研の共同利用研究の支援を受けています。



# まとめ

- XENONnTのnVetoの準備が着々と進んできた
  - 多面的な日本グループの活躍が生かされている
  - 硫酸ガドリニウムの調達: 必要な純度の調達が進んでいる
  - 水透過率測定装置の確立: 必要な感度の装置の準備が完了
- サブトピックについても成果が上がっている
  - XMASSのデータ解析: exotic neutrino相互作用探索の論文submit
  - 将来のPMT開発: 低BG PMTの開発のまとめ論文submit
  - 将来のMPPC開発: ダークノイズ低減中。これまでのMPPCより低BG化が目標。
  - 赤外線発光: NIR発光の発光スペクトル決定が進行中。発光量の定量測定が目標。