

(神岡)地下実験での技術連携: これまでの10年

神戸大学 理学研究科 竹内康雄



- 新学術「地下素核」での実験技術連携
 - 第1回～第5回
- 新学術「地下宇宙」での実験技術連携
 - 第6回～第9回
- 学変「地下稀事象」での実験技術連携
 - 第10回～

背景

- 神岡での地下実験：複数の実験グループが活動。似たようなR&Dトピックや課題があるが、実験グループごとに対応。連携は個人ベース。
- 「世界と戦える本格的な地下実験」のためには、「情報の共有」や「共同作業」が重要
 - 第1回：鈴木洋一郎氏

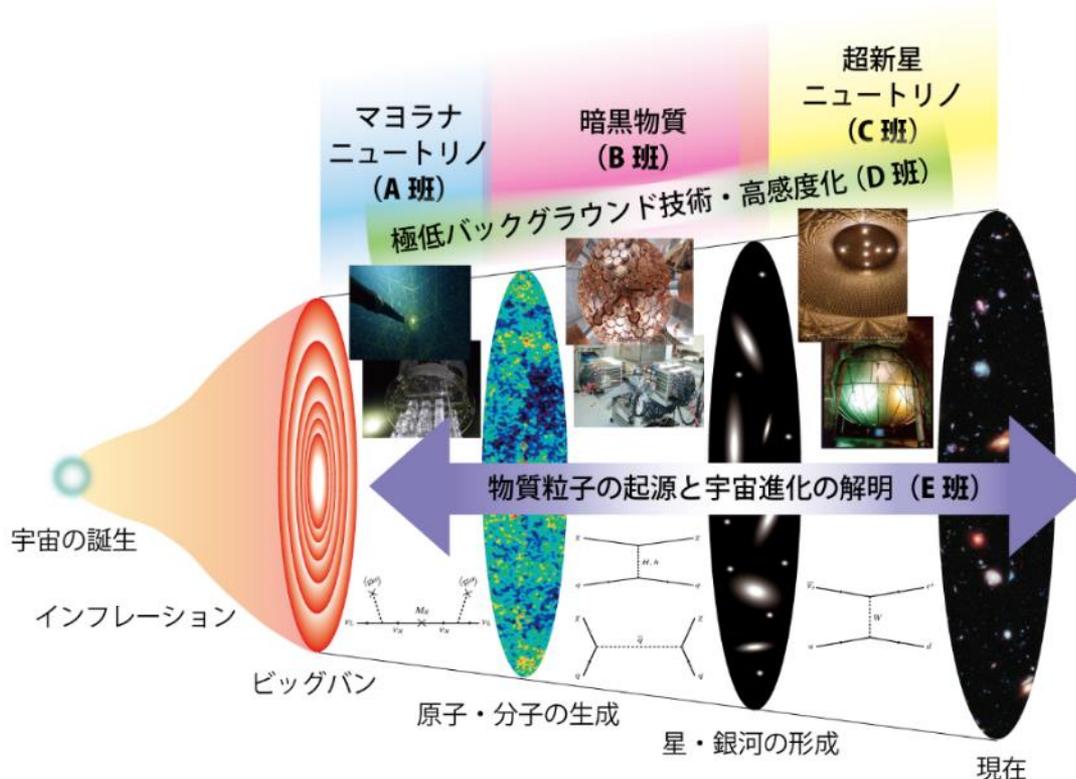
地下素核の領域計画書より (2013年)

連携の必要性：地下極低放射能素粒子原子核研究は、世界的に非常に激しい競争のなか、感度向上・高精度化のために大型化は避けられない。競争力のある大型化可能な手法に集約してさらに競争力を高めるのと同時に、将来のより詳細な背景物理の解明のためには、革新的な技術開発のための多様性も担保しなければならない。特に、極低放射能、集光ミラーや高量子効率光センサーといった共通の開発要素もあるため、広く連携しバランスのとれた舵取りをする必要がある。上記の研究会などにおいても、バランスのとれた舵取りによって世界的な競争力を格段に高めるには、新領域が必要という共通認識に至った。また、これまで神岡地下で始まっていた極低放射能技術を背骨にした連携を広く大きく発展させることが最も効率が良いと判断した。

地下素核 (2014~2018)

<https://www.lowbg.org/ugnd/>

地下素粒子原子核実験の総力を結集し、「宇宙初期の物質粒子生成」、「軽いニュートリノの謎」、「暗黒物質の謎」、「星形成の歴史」、「現在の天体活動」などを直接的に究明する。そして、各時代・各重要過程の理解を紡ぐことで、一連の宇宙の歴史をひもとく。



D01:極低放射能技術による宇宙素粒子研究の高感度化

各グループで蓄積したノウハウ+他分野の専門知識を結集

1.測定・除去

- 検出器本体及び環境中の放射性不純物の測定と除去
- 特に、ウラン系列、トリウム系列、 ^{222}Rn 、 ^{40}K 、 ^{60}Co 、...

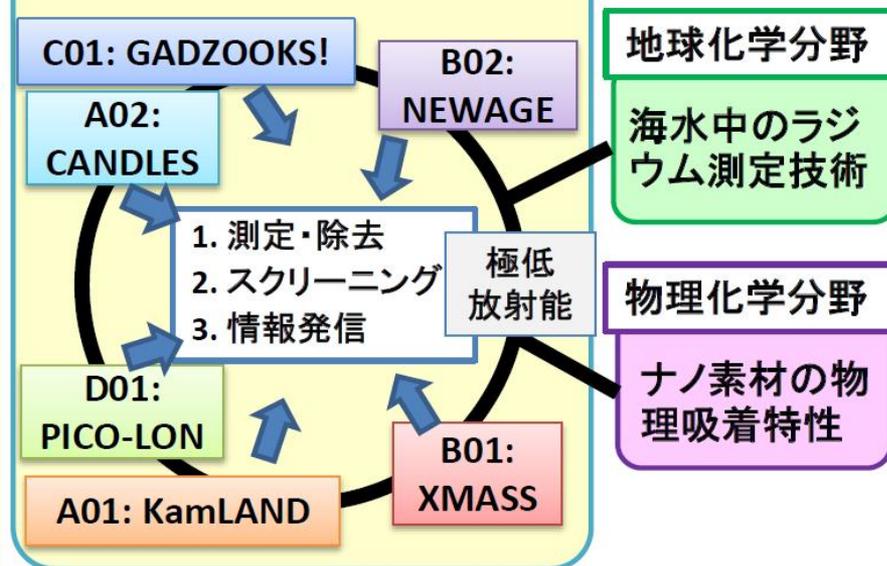
2.スクリーニング

- 放射性不純物検査装置の構築

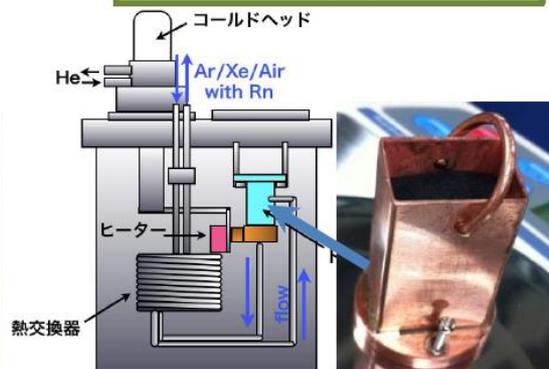
3.情報発信

- 放射性不純物測定情報の共有

地下での宇宙・素粒子・原子核研究分野



コールドトラップ装置



Shirasagi
G2X 4/6

Carboxen
-1021



水中Rn
抽出器



ガス中
Rn検出器



高純度NaI



Ge検出器
(市販品)

構成員

研究代表者:

- 竹内康雄(神戸大), データベース, Rn検出器

研究分担者: 2名

- 伏見賢一(徳島大), 放射性不純物除去(NaI)
- 関谷洋之(ICRR神岡), スクリーニングシステム

+研究員?@神岡:
1名

連携研究者: 10名

- 金子克美(信州大), ナノ素材 (物理化学)
- 井上睦夫(金沢大), 水中Ra (地球化学)
- 田阪茂樹(岐阜大), Rn検出器
- 松原正也(岐阜大), 計算機技術
- 裕隆太(大阪産業大), 液シン・Ge検出器
- 嶋達志(大阪大), 遮蔽体による高感度化
- 梅原さおり(大阪大), 放射性不純物除去(CaF₂)
- 池田晴雄(東北大), 表面α線(膜)
- Lluís Martí Magro (ICRR神岡), 水中Ra
- 小林兼好(ICRR神岡), 表面α線, 低Rn娘核環境

各プロジェクトでの低
放射能関連研究者
+ 関係分野の専門家

主な連携・成果

- 「極低放射能技術」研究会を開始(2014年度～)
 - 困っていることを相談・失敗したことを情報共有する
 - スライドは一部非公開

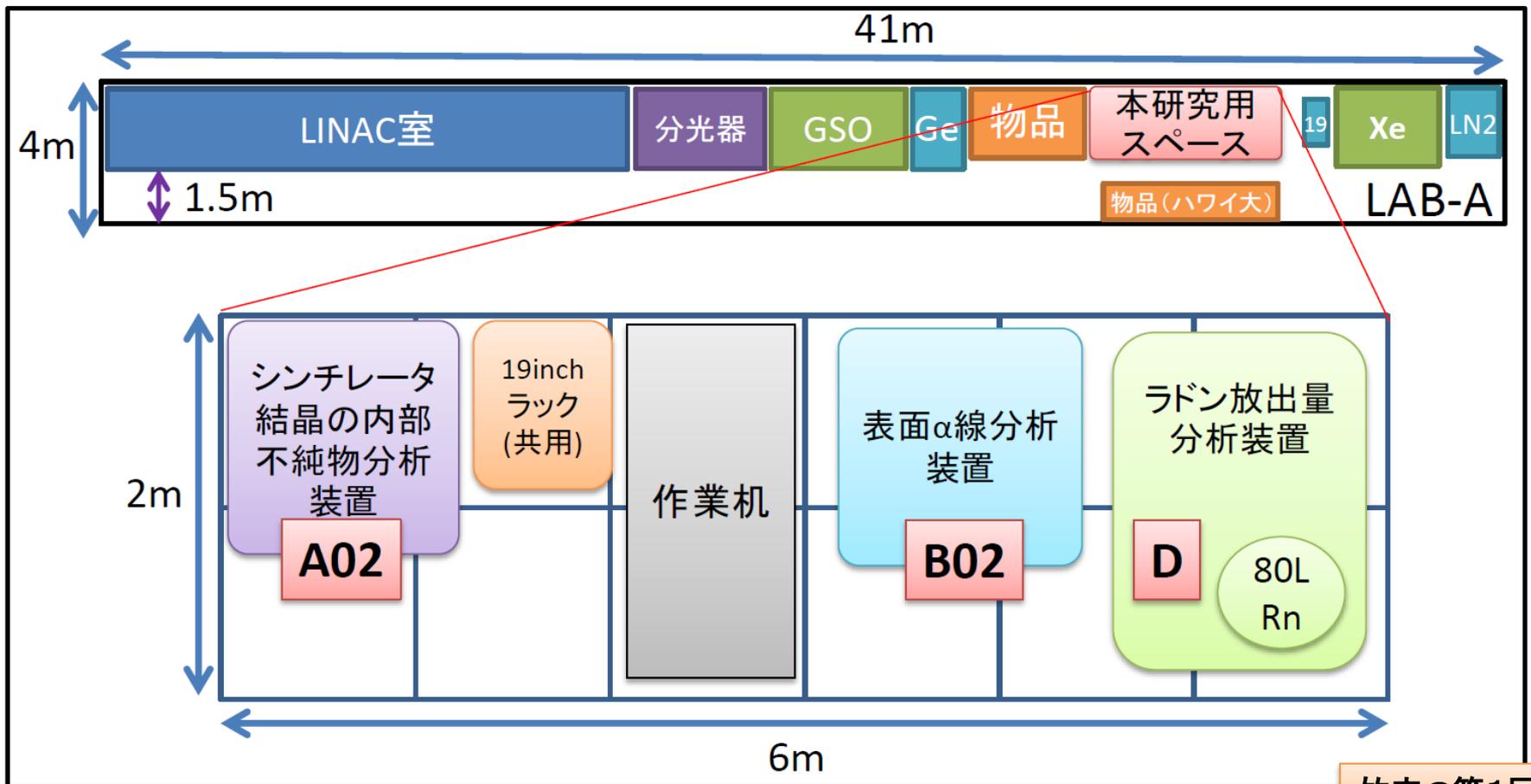
「極低放射能技術」研究会 プログラム(2015.2.13版)

第1回プログラム(抜粋)

開始時間	終了時間	セッション	場所	発表者	所属	タイトル
3月8日						
18:00	21:00	Registration & Reception	Room 304			
3月9日						
9:00	9:15	Registration	Reception Hall B			
9:15	9:30	Opening	Reception Hall B	Yoichiro Suzuki	Kavli IPMU	はじめに、趣旨説明
各実験によるBG課題説明 Reception Hall B						
9:30	9:50			Haruo Ikeda	Tohoku Univ.	KamLANDの課題
9:50	10:10			Saori Umehara	Osaka Univ.	CANDLESの課題
10:10	10:30			Yasuhiro Kishimoto	ICRR	XMASSの課題
10:30	10:50	Coffee break				
10:50	11:10			Kentaro Miuchi	Kobe Univ.	方向感度検出器の課題
11:10	11:30			Hiroyuki Sekiya	ICRR	SK-Gdの課題
11:30	11:50			Kenichi Fushimi	Tokushima Univ.	PICO-LONの課題
11:50	12:20	Discussion		Yasuo Takeuchi	Kobe Univ.	D班の立場説明、議論
12:20	13:50	Lunch				
ラドン Reception Hall B						
13:50	14:20			Shigeki Tasaka	Gifu Univ.	高感度ラドン検出器開発とその応用研究
14:20	14:35			Taku Nakamura	Gifu Univ.	水中ラドン濃度測定システムの性能評価
14:35	15:00			Yuuki Nakano	ICRR	スーパーカミオカンデにおけるラドン濃度測定
15:00	15:20			Hiroyuki Sekiya	ICRR	空気中へのラドン放出測定
15:20	15:40			Keishi Hosokawa	Kobe Univ.	希ガス中でのラドン測定
15:40	16:00	Coffee break				
16:00	16:30			Yoshihito Gando	Tohoku Univ.	カムランド禅用ミニバルーンのバックグラウンド対策
16:30	16:50			Shuhei Obara	Tohoku Univ.	バックグラウンド除去のための発光性バルーンフィルムの開発研究
16:50	17:10			Kentaro Miuchi	Kobe Univ.	NEWAGEにおけるラドンバックグラウンド
17:10	17:50	Discussion		Kentaro Miuchi		Rnに関する議論 何を知りたいか
Evening session Reception Hall B						
17:50	18:20	ポスターセッション				
18:20	21:00	Discussion with dinner				

主な連携・成果

- 地下実験室A(LAB-A)に、「地下素核」用の共同研究スペースを確保(2015年度～)



主な連携・成果

竹内@第5回

ラドン分析装置

- ラドン吸着試験 (田阪@第2回、岡田@第4回) ←
- 膜透過ラドン分析装置(空気中) (小林@第3,4回)
- 膜透過ラドン分析装置(水中) (宮辺@第4,5回) ←
- 水中ラドン測定の高感度化 (中村@第1回、中野@第1,2,3回)
- ラドン検出器の高感度化
 - LAB-A: 検出効率の改善 (岡本@第4回)
 - LAB-1、神戸大: 低BG化 ←
- ラドン放出率測定装置 (LAB-Aでは構築せず)
 - LAB-1 (関谷@第1回)
 - LAB-G (塩沢(神戸大)@第5回) ←
- 坑内ラドンモニターシステム (G. Pronost@第3回)

「極低放射能技術」研究会

主な連携・成果

- 独自の放射能データベース開発に着手

データベース開発の背景と目的

p.4

中野@第5回

■ 活動の背景

- $0\nu\beta\beta$ 崩壊が見つからない, 暗黒物質が見つからない.
要求: 実験装置の低バックグラウンド化が必須.
問題点: 実験装置の「**部材自身(表面付着物)**」由来の放射線.

実験	問題となる部材	論文
KamLAND (-Zen)	バルーン (付着物)	Nucl. Phys. A 946 (2016)171.
XMASS	PMTのシール材	Nucl. Instrum. Meth. A 716 (2013) 78.
NEWAGE	μ -PIC	PTEP (2015) 043F01
SK-Gd	Gd 粉末	PTEP (2017) 113H01, (2018) 091H01

- 各実験が「**それぞれ独自**」に測定, 対策, 評価を行ってきた.
 - (1) 測定結果が外部に公開されることは稀, **共有されにくい**.
 - (2) 特に「**～はダメだった**」という情報は外に出ない.
 - (3) 小数名しかいない実験には負担が大きい.
 - (4) 測定したいサンプル >> 実際に利用できる測定器の数.

■ 開発の目的

- 人材, 時間, 装置の無駄を削減, 情報を共有 → **データベース開発!**

主な連携・成果

- 中性子測定コンソーシアム(2015～)
 - B02若手研究会主導で結成

田中@第5回

まとめ・今後の展開

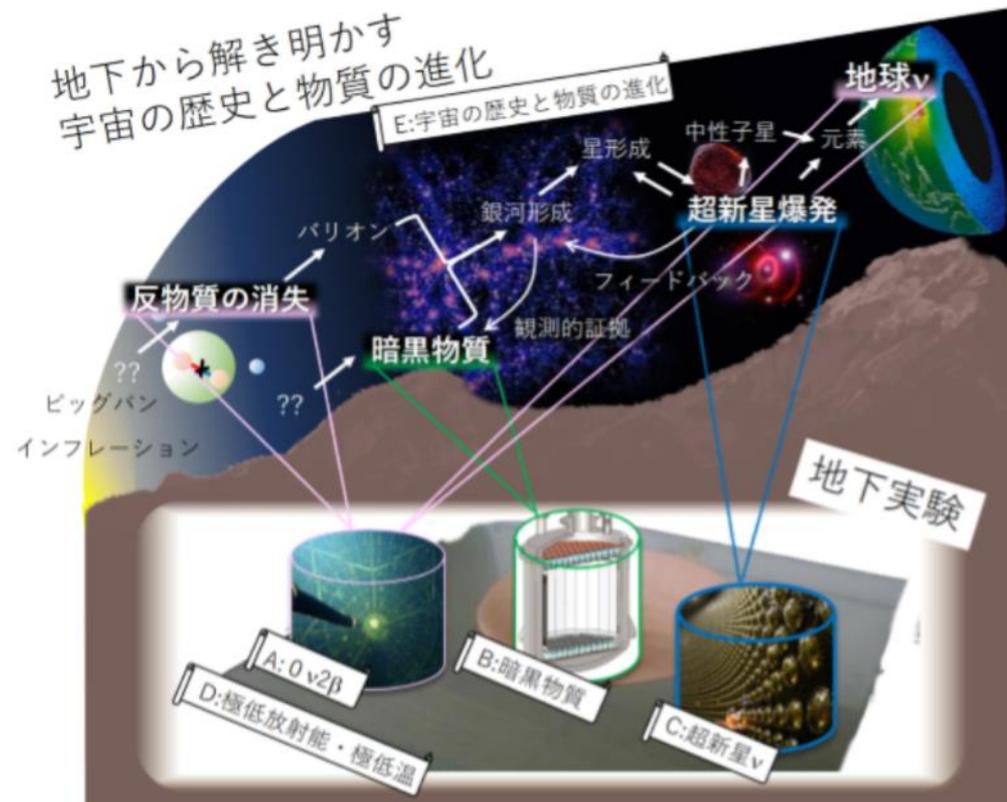
- 中性子測定コンソーシアム
 - 地下環境中性子の理解
 - 実験グループに共通の課題をグループを跨いだ協力
- 測定の現状
 - ^3He Lab-B測定結果を論文発表 → 多地点・長期測定
 - 液体シンチレータについては αBG 削減
 - 原子核乾板による飛来方向測定
 - その他検出技術やシミュレーションの模索
 - 複数の測定技術によるクロスチェック
- 次期新学術ではD01班内で正式に活動
- 宇宙線研に共同利用申請
 - 「神岡地下観測所における中性子フラックスの測定」
 - 代表 南野氏
 - 宇宙線研、東北大、神戸大、早稲田、阪大、京大

地下宇宙 (2019~2023)

<https://www.lowbg.org/ugap/>

世界トップの極低放射能技術の高度化と先進の低温検出器技術導入による技術基盤の格段の発展により、長期にわたり世界をリードする研究体制を構築する。

同時に、各時代を紡ぐ素粒子的宇宙像構築において、**核行列要素計算の高精度化・暗黒物質分布見積もり・クーリングを含む超新星理論モデル構築・化学進化への反映**、を取り込んだ理論基盤の格段の発展により、各時代の研究を有機的・相乗的に発展させ、時間スケールの長い一連の**宇宙の歴史と物質の進化を系統的に解き明かす**。



計画研究 D01 極低放射能技術の最先端宇宙素粒子研究への応用

宇宙の歴史を解き明かす様々な地下素粒子実験は、極低放射能技術に立脚している。本計画研究では、これまでに**神岡地下で培われてきた極低放射能技術を飛躍的に発展**させ、各計画研究が推進する研究に応用することで、**期間内及び次世代の研究を大きく進展**させる。

具体的には、(1)環境中性子の測定、(2)極微量放射性不純物の測定及び除去、(3)イオン発光の測定、(4)高感度スクリーニングシステムの運用、(5)データベースを用いた測定結果の国内外への発信、に取り組む。

(代表)南野彰宏, (分担)田中雅士, 池田一得, 竹田敦, 岩田圭弘, 伊藤主税, 市村晃一

計画研究 D02 極低温技術による宇宙素粒子研究の高感度化

本計画研究は、本領域で発展させる低バックグラウンド技術を利用し、計画研究 D01 と協力して、さらに新しく極低温技術を取り込んだ次世代超高感度大型検出装置実現に向けた**極低放射能・極低温・超強磁場環境を神岡地下実験室**において整備し、共通の技術的課題の解決と計測技術開発を推進する。結果として、ニュートリノマヨラナ性検証(項目 A) および暗黒物質探索(項目 B) の高感度化に寄与するとともに、**将来の次世代大型検出器計画の基礎研究と技術的提案**を目指す。

(代表)吉田斉, (分担)石徹白晃治, 岸本康宏, 美馬覚

主な連携・成果

- 高感度ゲルマニウム検出器(Ge02@LAB-C)を開発
 - 硫酸ガドリニウム $Gd_2(SO_4)_3$ のスクリーニング等に利用

Minamino@UGRP2024

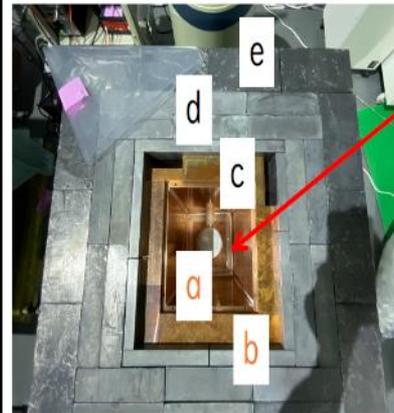
Ge02: Comparison with HPGe detectors around the world

<https://doi.org/10.1093/ptep/ptad136>

Site	Detector	Crystal mass [kg]	Relative efficiency [%]	FWHM at 1333 keV [keV]	BG rate 60–2700 keV [$kg_{Ge}^{-1} d^{-1}$]
Japan	Kamioka Ge02 (This work)	1.68	80	1.82	81.3±0.7
	Ge01 [2]	1.68	80	2.39	104.5
Italy	LNGS Gator [16]	2.2	100.5	1.98	89.0±0.7
	GeMPI [16]	2.2	98.7	2.20	24±1
UK	BUGS Belmont [2]	3.2	160	1.92	90.0
	Merrybent [2]	2.0	100	1.87	145.0
Spain	LSC GeOroel [2]	2.31	109	2.22	128.7
	Asterix [2]	2.13	95.1	1.92	171.3
	GeAnayet [2]	2.26	109	1.99	461.2
US	BHUC Maeve [17]	2.0	85	3.19	956.1
Swiss	LVdA GeMSE [16,18]	2.0	107.7	1.96	88±1

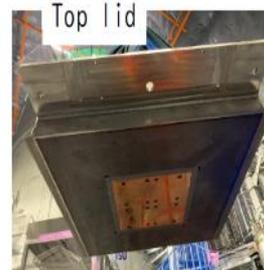
We have developed an ultra-low BG HPGe detector with the world's highest level of sensitivity.

Ge02: Radiation shield



Sample space with Rn free air: capable of measuring 0 (10 kg) of gadolinium sulfate

- a: 1 cm 6N grade CU (surface etching with HNO_3^*)
- b: 5 cm OFHC Cu
- c: 2.5 cm Pb (^{210}Pb : 5 ± 3 Bq/kg) (surface etching with HNO_3^*)
- d: 10 cm Pb (^{210}Pb : ~ 35 Bq/kg) except for the top lid
- e: 10 cm Pb (^{210}Pb : ~ 180 Bq/kg)



* Surface etching with HNO_3 : Soak in 4% HNO_3 solution for 20 min.

主な連携・成果

Minamino@UGRP2024

Summary

- Material screenings with HPGe detectors
 - An ultra-low BG HPGe detector with the world's highest level of sensitivity was developed.
- Rn assay in $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$ water
 - The required background level of $<1 \text{ mBq/m}^3$ is achieved.
- Environmental neutron measurements in the underground
 - Weak correlations with humidity in the mine-tunnel air.
 - Medium correlation with Rn rate in the mine-tunnel air.
- Laser-induced emission spectroscopy for Gd^{3+}
 - The effect on SK-Gd is small.

■ Rn-related studies in C01

■ Radon reduction in air

- With activated carbon fiber, granular activated carbon
- With silver zeolite (with B02)

地下稀事象(2024～2028)

<https://www.lowbg.org/ugrp/>

これまでの主な連携・検討

竹内@第11回

- 銀ゼオライト
 - 空气中ラドン除去(C01, A01, B03), QST(医療分野)
 - CF4ガス中ラドン除去(B03)
 - 大気中キセノン吸着(A01, B02)
 - キセノン中Ar・Kr・Rn・水分・酸素除去(B02)
 - 液シン中の水分除去(A01)
 - 銅ゼオライト含めた研究打ち合わせ
 - 海外から問い合わせ、相談、共同研究
 - 韓国、ニュージーランド(new)、オーストラリア(new)
- 質量分析 → 明日別途報告
 - BIS等(A01)、CaF2等(A02)、PTFE等(B02)
- ラドン分析
 - Gd水中(C01)、部材からのRn放出(B02)
- 表面α線
 - 業者さんとの共同研究、シンチレータ結晶内の不純物
 - 神戸大クリーンルーム整備中
- 地下ミュオン粒子
 - 神岡地下のミュオンフラックスの見積もり(A01, C01)
 - 酸素による負ミュオン吸収後の放射性物質の生成量の測定(理研)

まとめ

- D01では、他分野専門家の協力を得つつ、共通性の高い極低放射能技術・極低バックグラウンド技術の研究開発に取り組んできた
 - 物理化学、地球科学、レーザー分光、化学工学、、、
- スクリーニング装置は充実してきた
 - ラドン分析装置(検出器本体、放出、吸着、膜透過、Gd水中濃度、坑内濃度)
 - 結晶中放射能不純物分析装置
 - 表面アルファ線イメージ分析装置
 - 高感度ゲルマニウム検出器
 - 中性子測定
- 分析技術・ノウハウも蓄積しつつある
 - 放射能データベース
 - 質量分析装置