

D01班計画研究報告

極低放射能技術の 最先端宇宙素粒子研究への応用

早稲田大学 田中雅士 for D01班

2021/05/19

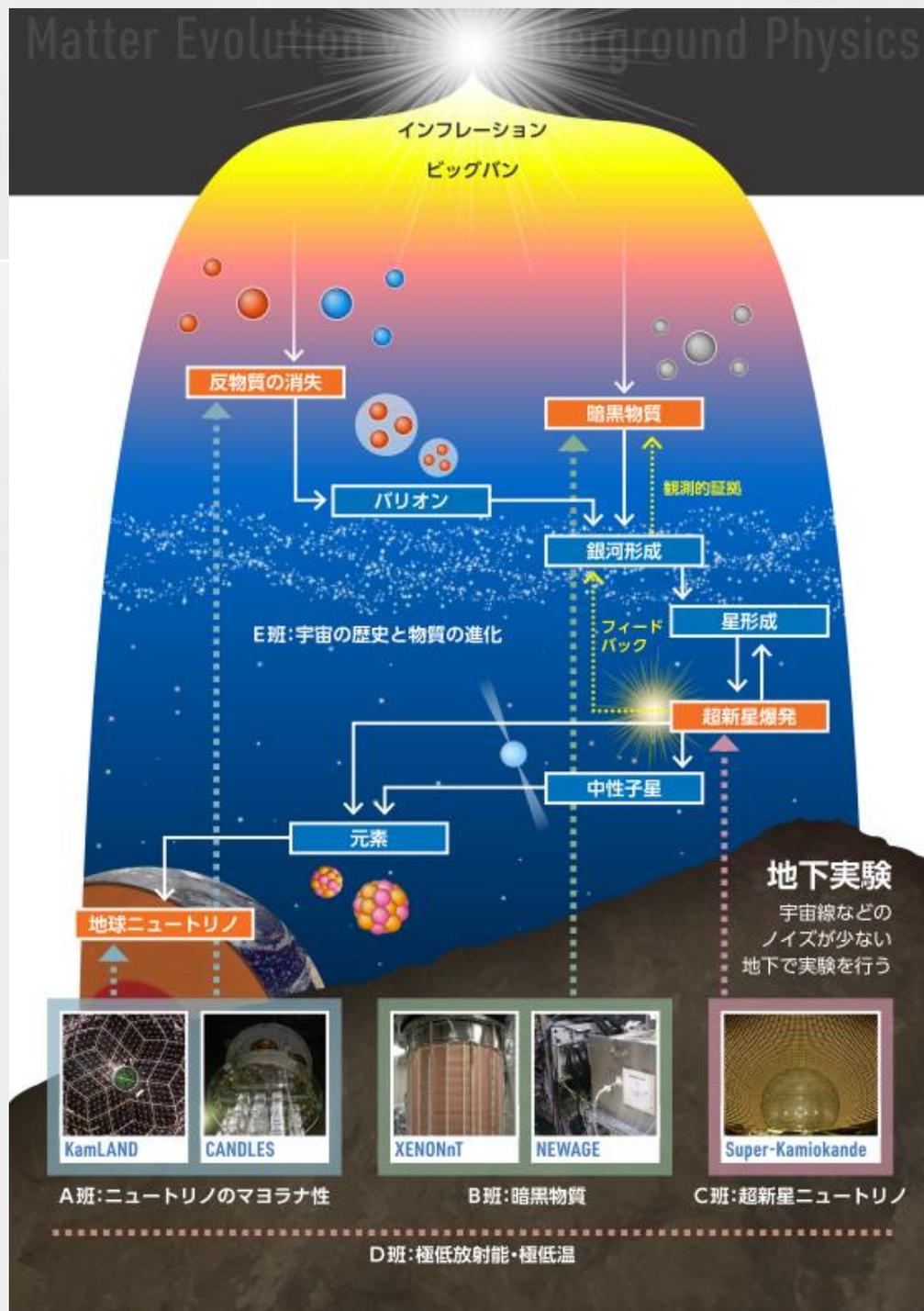
新学術「地下宇宙」2021年領域研究会

内容

- D01班紹介
- 最近(ここ1年間)の進展の紹介
 1. Ge検出器によるスクリーニング
 2. Rn検出器による水中Rn量測定
 3. 地下環境中性子測定
 4. レーザー共鳴イオン化による微量元素分離
- まとめ

D01班の目標

- 領域内の実験グループと連携しながら地下実験における主要な背景事象源となる放射性物質の理解と削減を進める
 - 極低放射能技術の確立
- 極低放射能技術の応用
- 研究成果の発信



A班: ニュートリノのマヨラナ性



B班: 暗黒物質



C班: 超新星ニュートリノ

D班: 極低放射能・極低温

D01班メンバー

● 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

	氏名	所属	専門	担当
研究代表者	南野彰宏	横浜国立大学	素粒子実験	全体の総括、中性子測定
研究分担者	田中雅士	早稲田大学	素粒子実験	中性子測定
	池田一得	東京大学	素粒子実験	ラドン測定
	竹田敦	東京大学	素粒子実験	ラドン測定
	岩田圭弘	原研	レーザー分光	クリプトン測定、Gd 発光測定
	伊藤主税	原研	レーザー分光	クリプトン測定、Gd 発光測定
	市村晃一	東北大学	素粒子実験	スクリーニングシステムの開発

● 公募研究：

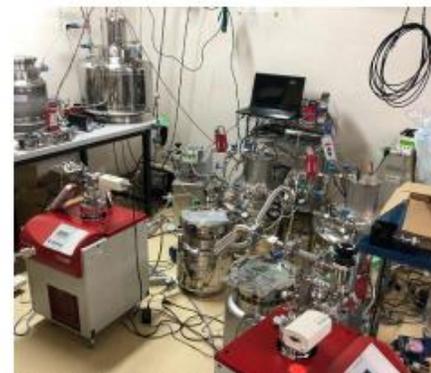
D01	伊藤博士	東京理科大学	極低放射能測定における μ -TPCを用いたアルファ線イメージ分析装置の開発
	鷺見貴生	国立天文台	落雷磁場を利用した神岡地下水分量の長期観測

D01 極低放射能技術の最先端宇宙素粒子研究への応用

研究代表者 **南野彰宏** 横浜国立大学 准教授 | 全体の総括、中性子測定

研究分担者 **田中雅士** 早稲田大学 准教授 | 中性子測定
池田一得 東京大学 助教 | ラドン測定
竹田敦 東京大学 准教授 | ラドン測定
岩田圭弘 日本原子力研究開発機構 研究員 | クリプトン測定
伊藤主税 日本原子力研究開発機構 主任研究員 | クリプトン測定
市村晃一 東北大学 助教 | 検出器材料中の放射性不純物測定

バックグラウンドとは、星空を観測する時の街の明かりのようなものです。つまり、観測対象を見にくくするノイズです。D01班の目的は、本領域研究のA01、A02、B01、B02、C01、D02班で推進する各実験におけるバックグラウンドをできるだけ小さく抑える技術を開発することです。そして開発した技術を実験グループの垣根を超えて共有することで、本領域研究から宇宙素粒子物理学の大発見が生まれることを目指します。本領域研究で推進する実験で問題になるバックグラウンドは、宇宙線と放射性不純物に大きく分類できます。このうち宇宙線とは、宇宙から地球に降ってくる目には見えない粒子です。地上では手のひらの大きさに1秒間に約1個の宇宙線が通過しています。この宇宙線によるバックグラウンドを岩盤でブロックするために、本領域の実験は地下で観測を行っています。もうひとつのバックグラウンドである放射性不純物は、実験装置中に極微量含まれるウランやトリウムなどの不安定な原子のことで、崩壊するときにバックグラウンドとなる粒子を放出します。D01班では、実験装置中の放射性不純物含有量を世界最高感度で測定し、それを低減する技術を開発します。



神岡地下実験室にある複数のラドン検出器。



クリーンスーツを着用して放射線バックグラウンド源の濃縮作業を行う代表者。



研究内容で書いたとおり、地下で実験をしているのはバックグラウンドである宇宙線を岩盤でブロックするためです。一方、ニュートリノは物質とほとんど反応しないので、岩盤なんて簡単に通り抜けてきます。ですので、地下で実験を行っても何の問題もないのです。ただ、ニュートリノは実験装置ともめったに反応しないので、観測するには巨大な装置が必要になります。

南野 彰宏

極低放射能技術研究会

- 各実験グループで問題となっているバックグラウンド源について情報を交換・共有し、将来の実験装置の高感度化に向けた低バックグラウンド技術の研究開発のアイデア等に関して話し合う。
- 2015年より毎年開催
 - 2015年3月 淡路島
 - 2016年3月 徳島大学
 - 2017年3月 飛騨 流葉山荘
 - 2018年3月 天童
 - 2019年3月 東北大 (新学術研究会と共催)
 - 2020年6月 オンライン(新学術研究会と共催)
 - 2021年3月 オンライン

「第七回極低放射能技術」研究会

日時：2021年3月24日～3月25日
 オンラインで開催 (Zoomを利用)
 新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」
 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」主催



Home Program Registration

Information

- 趣旨
- 参加方法
- プログラム
- 経費など
- 組織委員
- 連絡先

新着情報

2021/03/29 研究会は無事終了し、講演スライドをアップロードしました
 2021/03/18 プログラム更新(ポスターセッションを追加)
 2021/03/10 ポスターセッション実施方法についてPDF
 2021/03/08 プログラム公開
 2021/02/01 公開

Links

● 新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」
 ● 「第六回極低放射能技術」研究会 (2020年6月)

趣旨

新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」のD01計画研究「極低放射能技術の最先端宇宙素粒子研究への応用」では、地下で行う素粒子・原子核実験装置の高感度化を目指した極低放射能技術の研究開発に取り組んでいます。今年度も地下実験における極低放射能技術についての研究会を行います。現行の各実験グループで問題となっているバックグラウンド源について情報を交換・共有し、将来の実験装置の高感度化に向けた低バックグラウンド技術の研究開発のアイデア等に関して話し合う場としたいと考えています。

口頭発表については招待講演のみとさせていただきますが、ポスターセッションを設けており若手研究者や大学院学生の研究報告も歓迎します。優秀な発表者にはポスター賞の進呈を計画しております。



第1回



第3回

データベース

http://133.11.143.254:5984/db_test/_design/persephone/index.html : 宇宙線研サーバー : 神岡VPNへの接続が必要

https://lowbgdb.lowbg.org/couchdb/couchdb/_design/persephone/index.html : ミラーサイト@東北大

(アカデミックサーバーからで、現在はパスワードも必要 : お問い合わせ下さい)

Persephone
Material Assay Database

Search Submit Edit Settings Info Environment Login

Please read through "Info"-tag above before you use this database.
Please refer this database (and original publications) when you use some numbers in this database.
J. Phys. Conf. Ser. 888, 012211 (2017)/AIP Conf. Proc. 1921, 040002 (2018)

ALL [Download all]

Group: XMASS, KAMLAND, NEWAGE, CANDLES
Material: PMT, BOLT, SUS, Cu
検索したワード = ALL
Total results: 226

Grouping	Name	Isotope	Amount	Isotope	Amount
▶ CANDLES	Al Myler Sample A	Th-232	0.057 Bq/kg		
▶ KamiLAND	1401 30um (Toray Recycled Ny)			U	7e-11 g/g
▶ KamiLAND	1401S 30um (Toray Unrecycled Ny)			U	6e-11 g/g
▶ KamiLAND	Acrylic	Th	5e-11 g/g	U	8e-12 g/g
▶ KamiLAND	Acrylic (Black)	Th	4.7e-11 g/g	U	4.1e-11 g/g
▶ KamiLAND	AD76P1			U	1e-11 g/g
▶ KamiLAND	Aron Alpha 201 adhesives	Th	5e-12 g/g	U	5e-12 g/g
▶ KamiLAND	Aron Alpha 202 adhesives	Th	5e-12 g/g	U	5e-12 g/g
▶ KamiLAND	Balloon glue	Th	2.3e-9 g/g	U	1.4e-9 g/g
▶ KamiLAND	BHT	Th	5e-11 g/g	U	6e-12 g/g
▶ KamiLAND	bis-MSB	Th	6e-11 g/g	U	4.8e-11 g/g
▶ KamiLAND	BisMSB(Dojin)	Th	1e-10 g/g	U	2e-10 g/g
▶ KamiLAND	Black Cable guide	Th	9e-9 g/g	U	4e-9 g/g
▶ KamiLAND	Cables (teflon)	Th	5e-9 - 3e-8 g/g	U	1e-9 g/g
▶ KamiLAND	Carbon fiber	Th	7e-12 g/g	U	2.4e-9 g/g
▶ KamiLAND	Carbon fiber	Th	5e-9 g/g	U	8e-9 g/g
▶ KamiLAND	Carbon fiber	Th	4e-9 g/g	U	1.9e-8 g/g

ミラーサイト@東北大

Persephone - Mozilla Firefox

localhost:5984/test/_design/persephone/index.html

Persephone
Material Assay Database

Search Submit Edit Settings Login

Persephone v2 - Display disclaimers - Learn more...
Supported by AARM, KIT, LBNL, SMU & SJTU

Google Cloud Platform上

現在 : デバック中

HPGe検出器によるスクリーニング (市村)

- 超高純度Ge検出器を用いた(世界最)高感度スクリーニングシステムの開発
 - 各種放射性物質からの γ 線測定
 - 背景事象の連続成分 : **0(10) counts/day/kg**
- 各実験の構成要素の放射線量測定 (スクリーニング)
 - 検出器部材(すべての実験)
 - 硫酸ガドリニウム(SKGd)

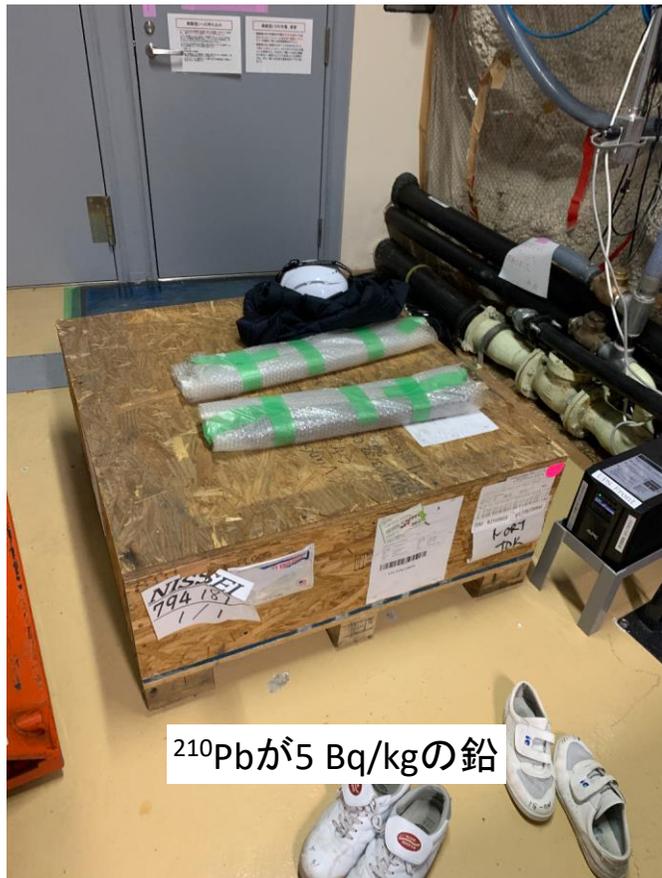
新HPGe検出器導入

相対効率測定中の写真



- 部材のスクリーニング（伊藤博士さん）
- 2021年2月末に神岡LabCにて納品
- 性能評価：分解能(FWHM: 0.81 keV @ 122 keV, 1.74 keV @ 1332 keV) ・ 相対効率(82.5%) : 仕様値よりも良い値
- 夏頃までに遮蔽体込みで稼働できるように準備中

遮蔽体などの準備状況



- 210Pbが5 Bq/kgの鉛：検出器の内側2.5cmを覆う
- 210Pbが35 Bq/kgの鉛（約90ブロック確保）：5Bq/kgの鉛の外側で検出器に近い箇所に設置予定：整形加工中
- さらに外側の鉛ブロックも準備中
- 鉛の内側で用いる銅ブロックや、データ収集系で用いるFADCなども購入済み

ラジウム吸着ディスク論文

Improved method for measuring low-concentration radium and its application to the Super-Kamiokande Gadolinium project

S. Ito^{1,*}, K. Ichimura^{2,3,4,*}, Y. Takaku⁵, K. Abe^{2,3}, M. Harada¹, M. Ikeda^{2,3}, H. Ito², Y. Kishimoto^{2,3,4}, Y. Nakajima^{2,3}, T. Okada², and H. Sekiya^{2,3}

¹Okayama University, Faculty of Science, Okayama 700-8530, Japan

²Kamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Kamioka, Gifu 506-1205, Japan

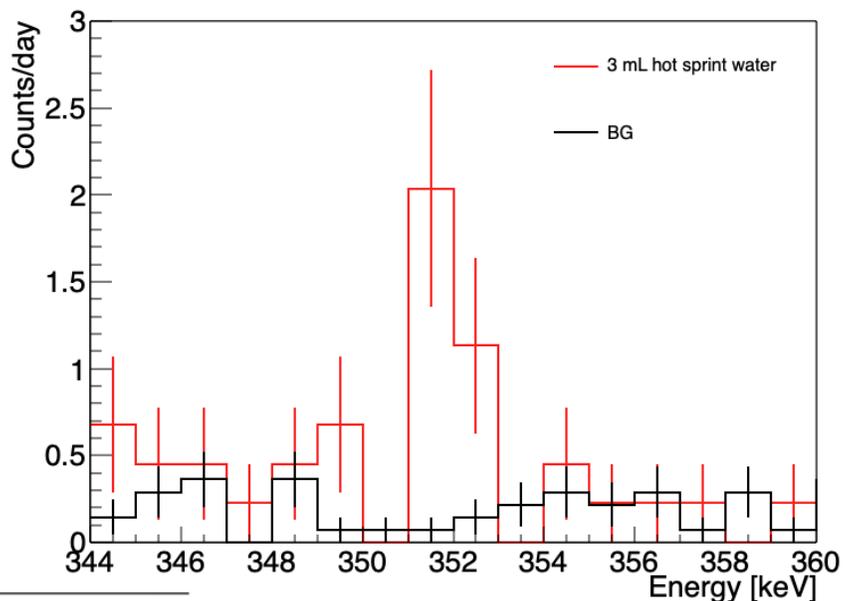
³Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (WPI), the University of Tokyo, Kashiwa, Chiba, 277-8582, Japan

⁴Present address: Research Center for Neutrino Science, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan

⁵Institute for Environmental Sciences, Department of Radioecology, Aomori, 039-3212, Japan

*E-mail: s-ito@okayama-u.ac.jp, ichimura@awa.tohoku.ac.jp

高純度硫酸ガドリニウム水溶液(濃度5%)にラジウム濃度が既知の水を3mL (0.33 mBq)加えて通液したディスクの352keV(²¹⁴Pb, B.R. 37.6%)近傍のスペクトルとRI評価結果



Hot spring water (mL)	Expected amount of ²²⁶ Ra (mBq)	Results (mBq)
3	0.33 ^{+0.10} _{-0.04}	0.4±0.2
100	11.2 ^{+3.4} _{-1.2}	11.3 ^{+3.4} _{-1.1}



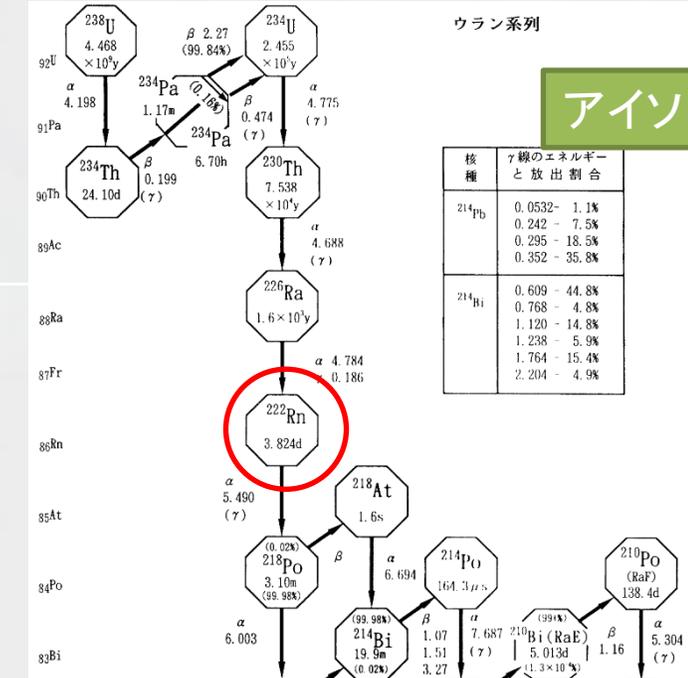
測定結果はラジウム濃度が既知の水から予測される値と一致

硫酸ガドリニウム500gを含む5Lの水溶液(=濃度5%)を通液したディスクの測定結果

Lot No.	Concentration of ²²⁶ Ra (mBq kg ⁻¹)	Measurement time (d)
1	< 0.4	6.0
2	< 0.3	11.0
3	< 0.3	8.8
4	< 0.2	9.6
5	< 0.5	8.7
6	< 0.2	13.0

- 前回研究会で報告した結果をまとめた論文がpublish <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa105>
- ラジウム吸着ディスク(~100%の回収率) + LabCのGe → < 0.5 mBq/kgの感度で硫酸ガドリニウム八水和物中の²²⁶Raを定量可能に

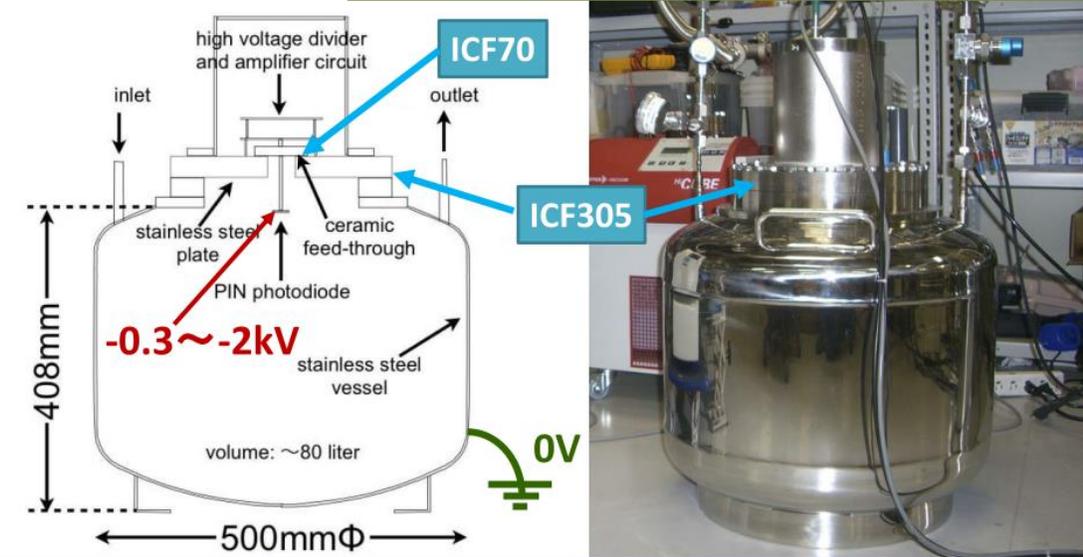
ラドン測定・除去(竹田・池田)



核種	7線のエネルギーと放出割合
^{214}Pb	0.0532 - 1.1%
	0.242 - 7.5%
	0.295 - 18.5%
^{214}Bi	0.352 - 35.8%
	0.609 - 44.8%
	0.768 - 4.8%
	1.120 - 14.8%
	1.238 - 5.9%
^{210}Po	1.764 - 15.4%
	2.204 - 4.9%

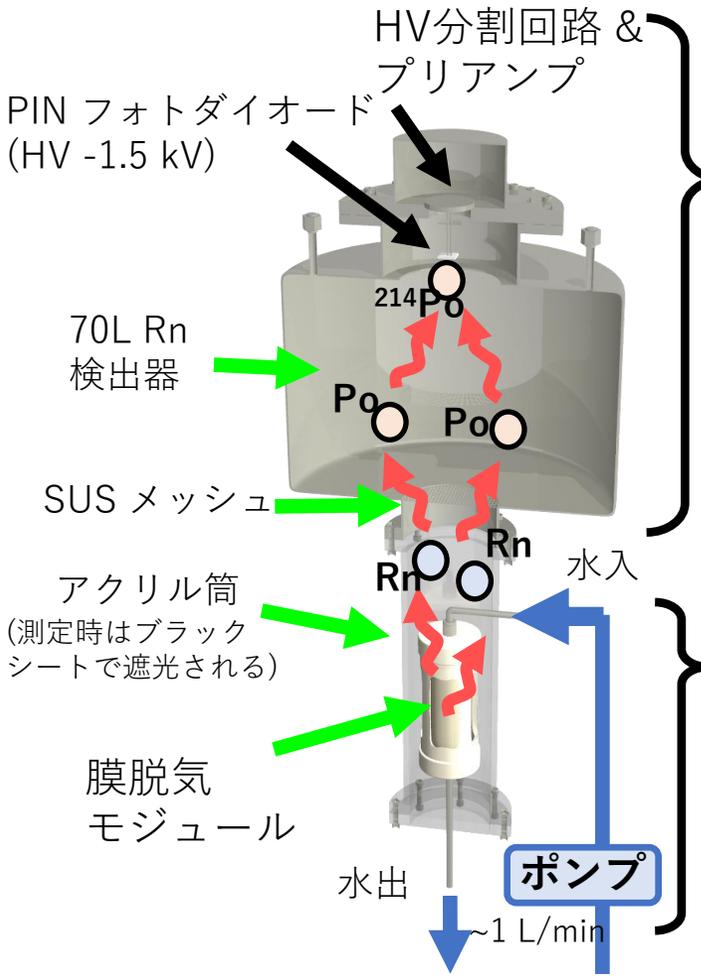
- ラドン(U/Th系列)
 - (希ガス)気体原子であるために検出器媒質内に拡散しやすい
- ラドン検出器
 - 気体中のラドン含有量を測定
 - 長年にわたる開発と性能向上
- 水中ラドン量測定
 - 1. 水中のラドンを取り出してラドン検出器で測定 (0.5 mBq/m^3)
 - 2. 水中から取り出したラドンをさらに濃縮してからラドン測定器で測定 (0.1 mBq/m^3)

Method = PIN p 竹内: 2014年第1回地下素核研究会



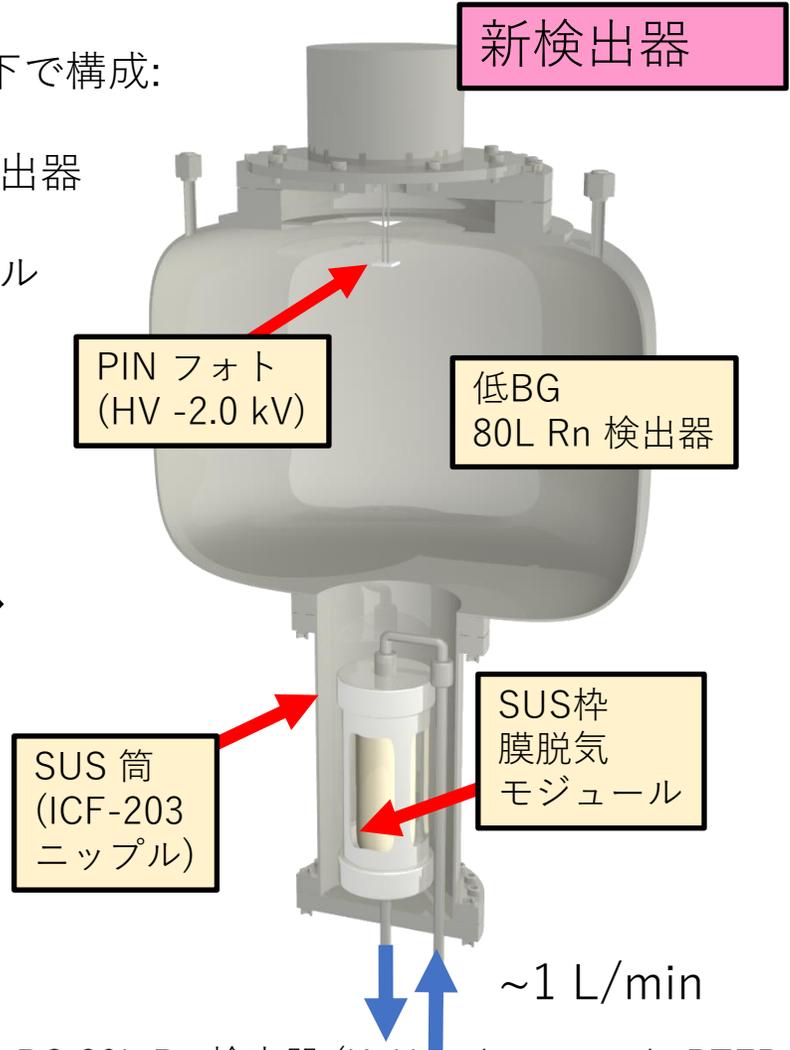
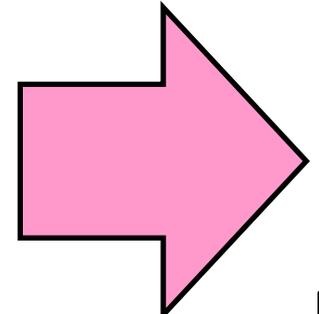
- 帯電したラドン娘核をフォトダイオード表面に静電場により捕集する
- フォトダイオード表面での α 崩壊のエネルギーを測定し、カウントする

既存の水Rn検出器の改良



水Rn検出器は、以下で構成:

- 静電捕集型Rn検出器
- Rn脱気モジュール

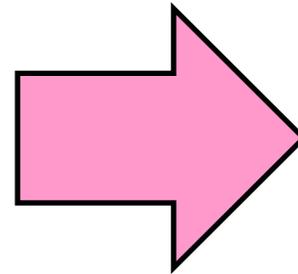
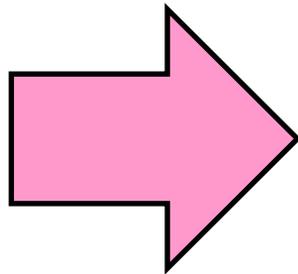


- シール性(金属ガスケット)と容器内面形状が改良された既存の低 BG 80L Rn 検出器 (K. Hosokawa et al., PTEP (2015) 933H01) を利用。
- アクリル製だった膜脱気モジュール領域の筒を、SUS製の筒と金属ガスケット (ICF規格) に交換。
- 膜脱気モジュール自体のハウジングをSUS製に改良。

膜脱気モジュールの改良

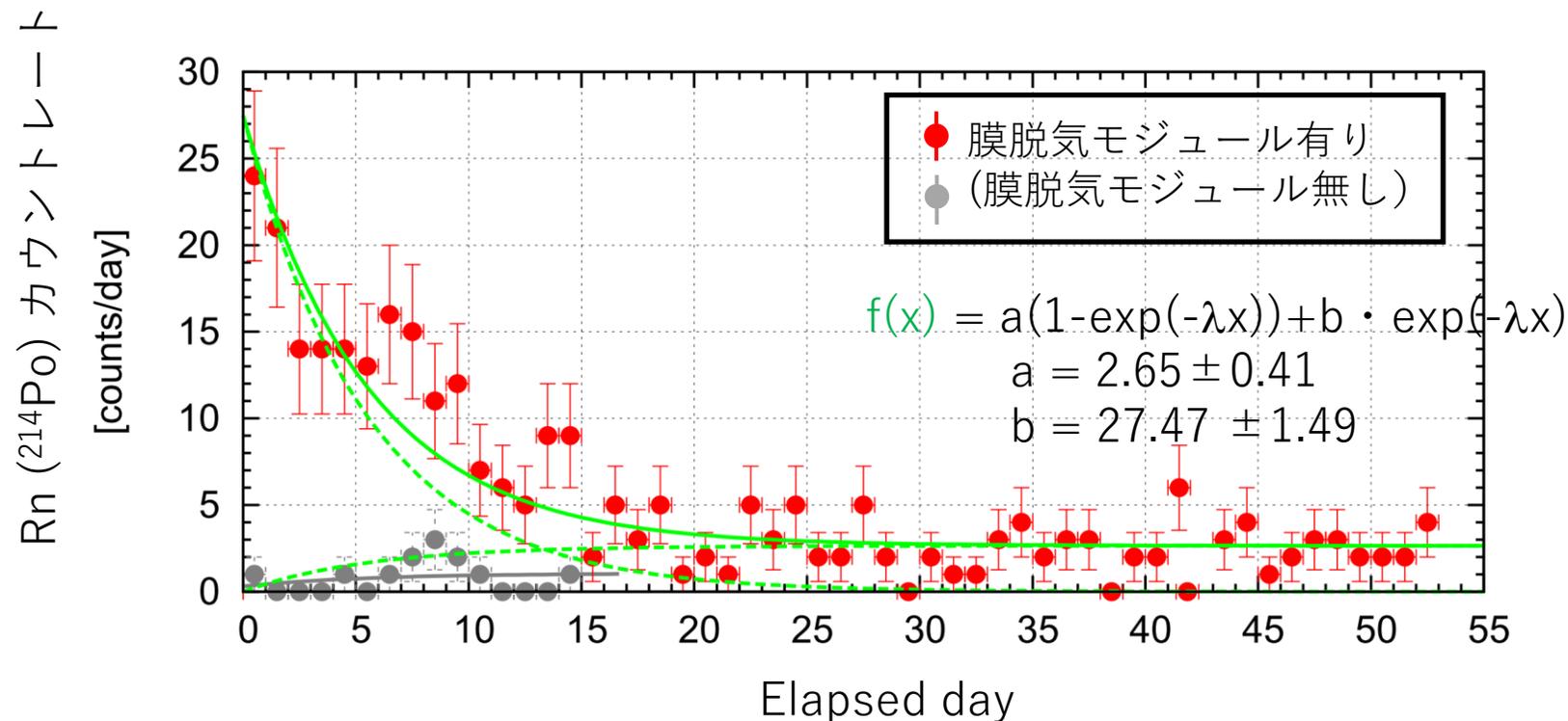
岡本、竹内、中野、山本、DIC

- ハウジング部分を段階を経て、完全にSUS化。
- 内部に残っているO-ring は、Gd耐性がありかつラドン放出量の少ないパーフロ製に変更。



改良後のBGレベル

- 装置全体(膜脱気モジュール有)のBGレベル: 2.65 ± 0.41 [counts/day] (乾燥空气中)
 → 検出効率に既存の値を仮定し、実際の測定は高湿度化で行われることを考慮すると、
 $0.4 \sim 0.9$ mBq/m³ に相当し、当初目標であった < 1 mBq/m³ を達成。
- 膜脱気モジュールを取り外した時のBGレベルに比べるとまだ高い。
 → 膜脱気モジュールの各部品をスクリーニングすることで、さらなる低BG化を目指す。



膜脱気モジュール各部品のスクリーニング

- 製造元のDIC株式会社の協力で、各部品ごとのRn放出率測定を遂行中

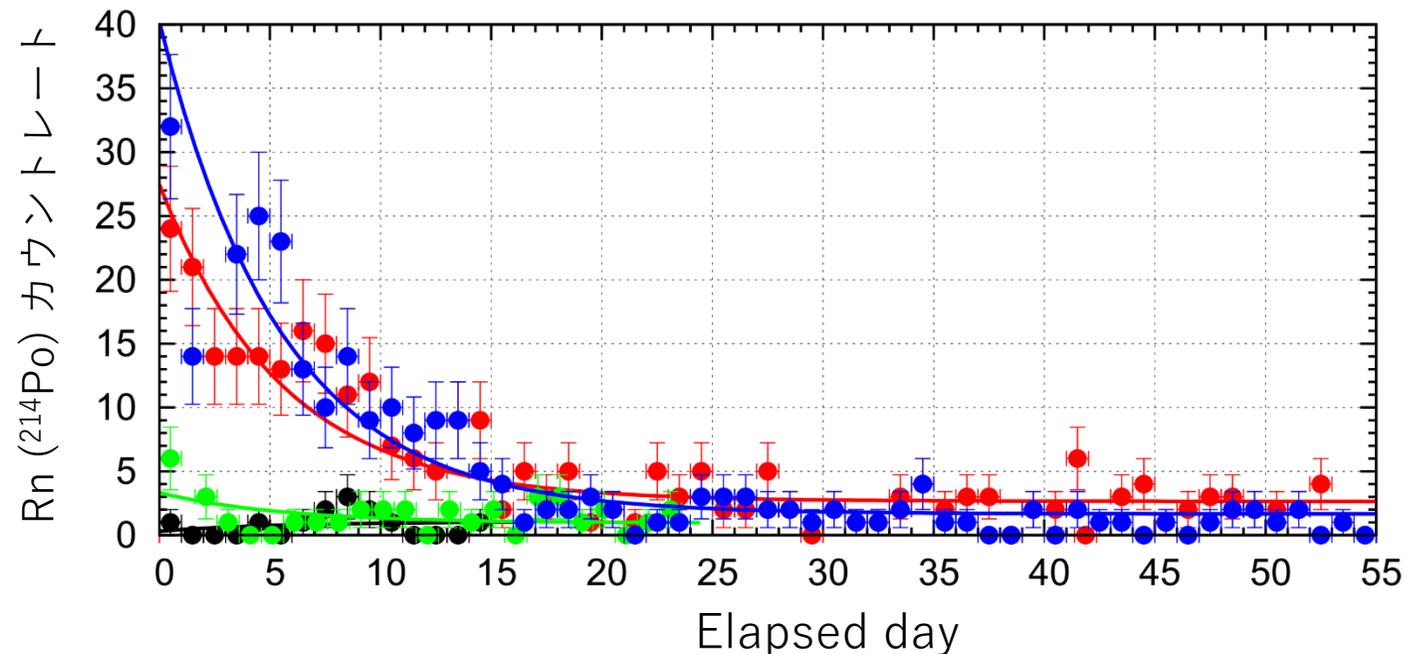


部品E

部品F

部品測定結果

- 去年の3月に測定した**検出器BG**と、去年の9月～11月にかけて測定した**膜脱気モジュール全体**の結果と比較した。
- **部品C**は、**検出器BG**よりレートが高かったが、膜脱気モジュールの全てを説明できるほどではなかった。
- **部品AとB**を合わせて測定した結果は、エラーの範囲内でBGと有意な違いは見られなかったが、統計誤差が大きいので再度長期測定が必要有り。**検出器BG**自身も統計を増やす必要がある。



項目	比	測定日	カウント/day
BG (膜脱気モジュール無し)	—	2020/3/2-16	0.95 ± 0.36
BG (膜脱気モジュール有り)	—	2020/9/25-11/16	2.65 ± 0.41
部品A + B	1	2021/2/9-3/3	1.08 ± 0.36
部品C	1.1	2021/3/11-5/5	1.67 ± 0.29

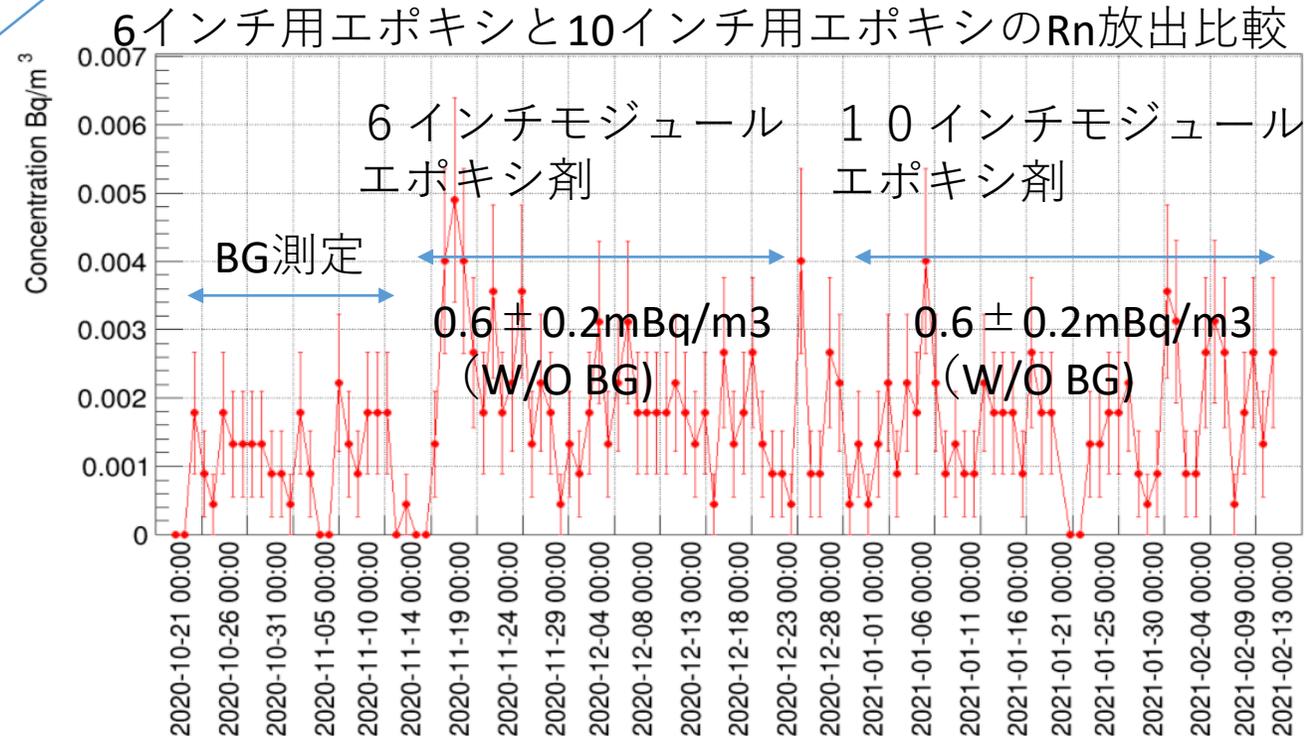
膜脱気(Rn除去)モジュールの改良

- 硫酸Gd水耐性を強化したモジュール
 - 1本を試験的にSK装置に投入した。
今のところ問題なく稼働中
- 大型10インチモジュールの検討
 - 6インチモジュールの倍以上の流量に対応
 - トータルコスト削減の可能性
 - 10インチ用部材の評価 (Rn、溶出)
 - 今後さらに大型のモジュール開発について
低BG部材の選定協力
- 壊れやすい箇所の改良
 - 樹脂製継手が割れやすい。
 - クランプする部分のみSUSにした継手を作成。
→今後試験予定



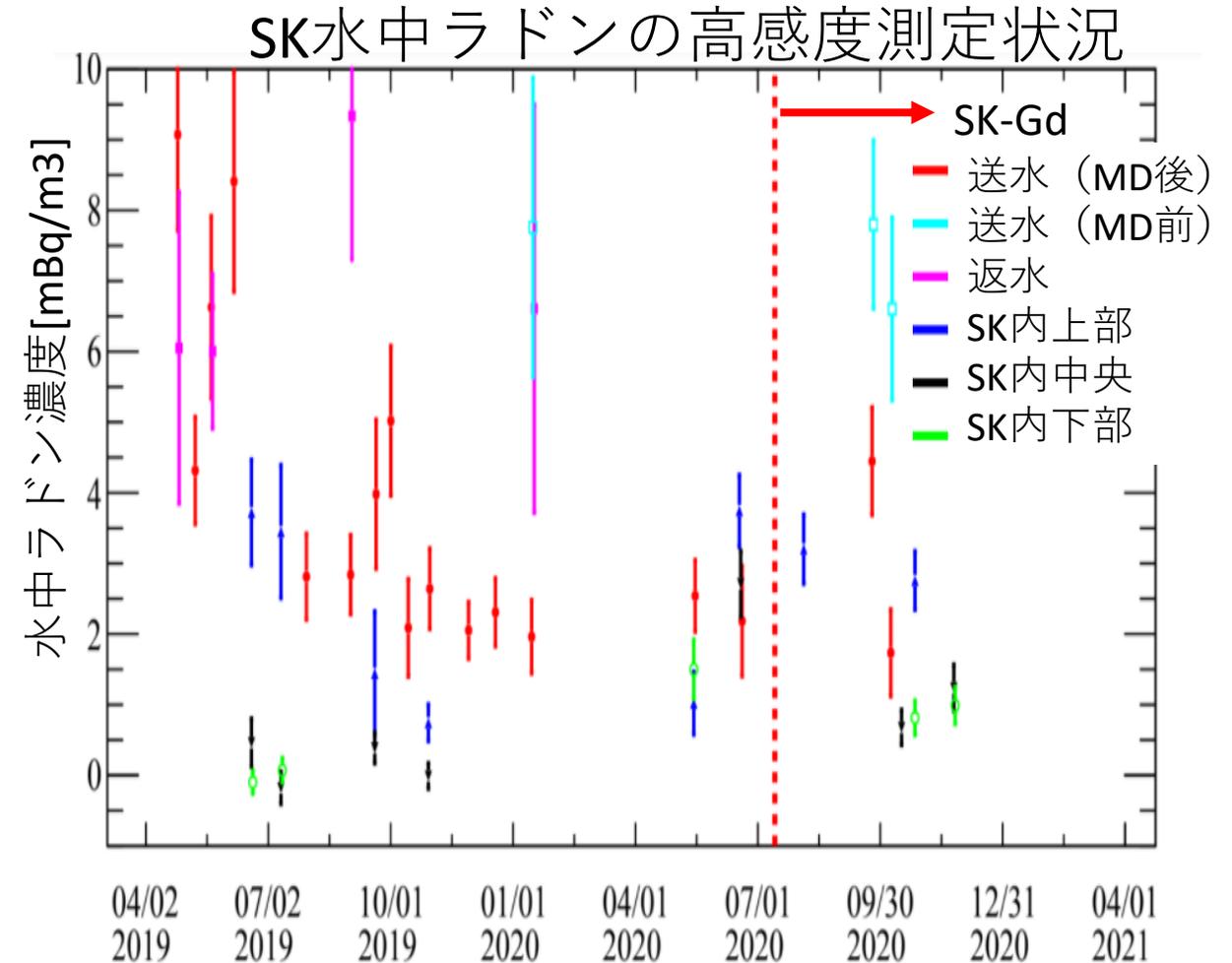
6インチモジュール
SKで60本使用中

10インチモジュール
既存する最大のもの



濃縮ラドン測定セットアップの自動化

- 濃縮ラドン測定
 - 液中ラドンの高感度測定
1mBq/m³以下の感度
 - 濃縮工程
 - 液中のラドンを分離し冷却活性炭に吸着
 - 脱離工程
 - 冷却活性炭を加熱しラドンを高感度ラドン計に導入。
- 現状は手動で工程の切り替え
 - 人手が必要
 - 月に一回程度の測定 (右図)
- 自動化して作業を簡素化。
 - 週一回コンスタントに測定を行えるようにする。
 - 手順ミスをできるだけ減らす。



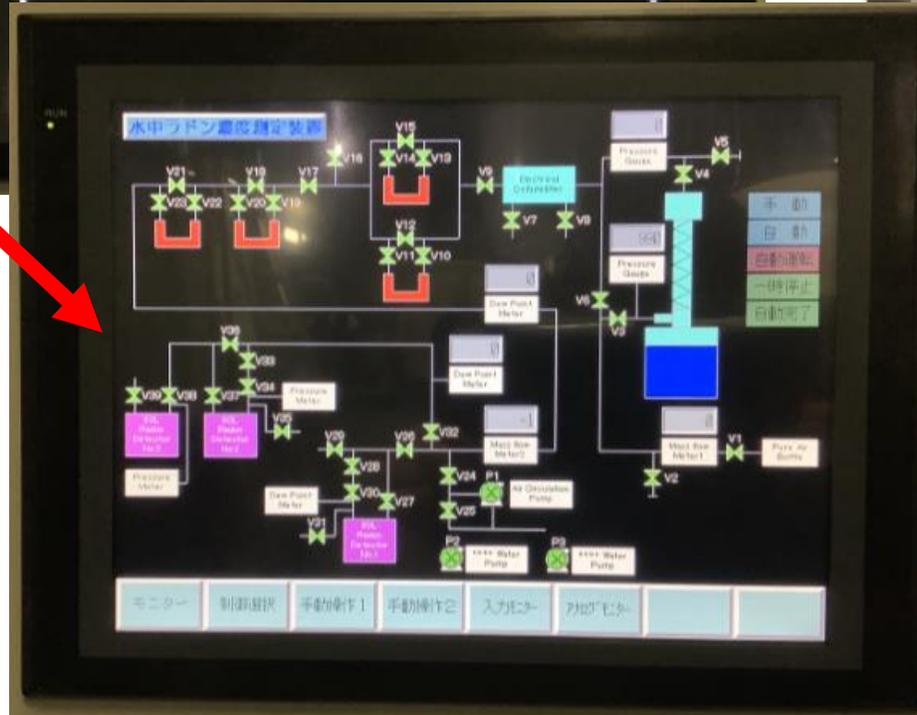
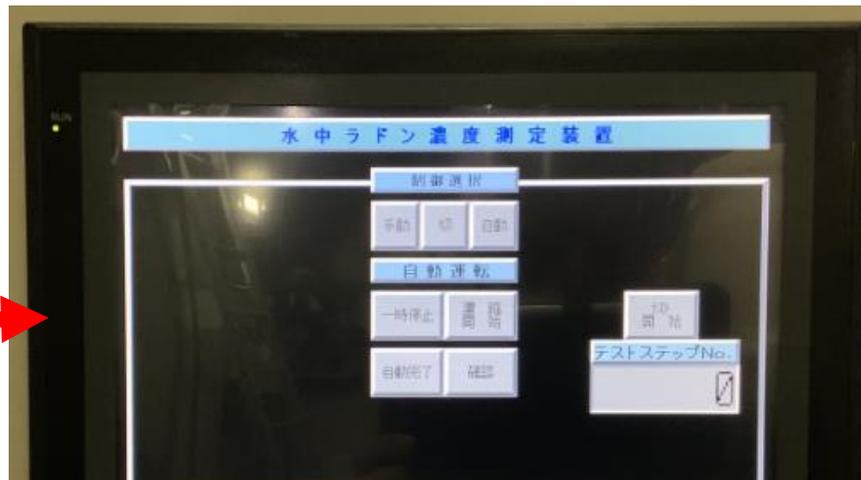
Plot by 兼村さん、岡本さん

濃縮ラドン測定セットアップの自動化

岡本、Guillaume、池田



自動測定操作盤



岡本さん

制御プログラム開発の様子

今年度：一連のプログラム作成
(右写真)

来年度：活性炭冷却・加熱の自動化
バルブ・配管接続
パラメータを調整
実際の測定開始 (秋?)

中性子測定(田中・南野)

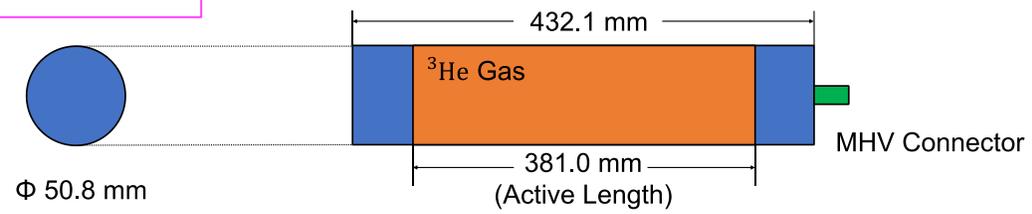
- 環境中性子：地下実験における主要な背景事象のひとつ
- 地下環境においては
 - 高エネルギー領域(>10 MeV)：宇宙線 μ 粒子による核破砕起因が主要
 - 低エネルギー領域(<10 MeV)：岩盤中の放射性物質起因が主要
 - 高速中性子(~ 1 MeV)：
 - 熱中性子：環境中で散乱を繰り返し熱化されたもの
- 熱中性子測定： ^3He 計数管
- 高速中性子測定：液体シンチレータ

神岡地下Lab-Bでの 中性子測定

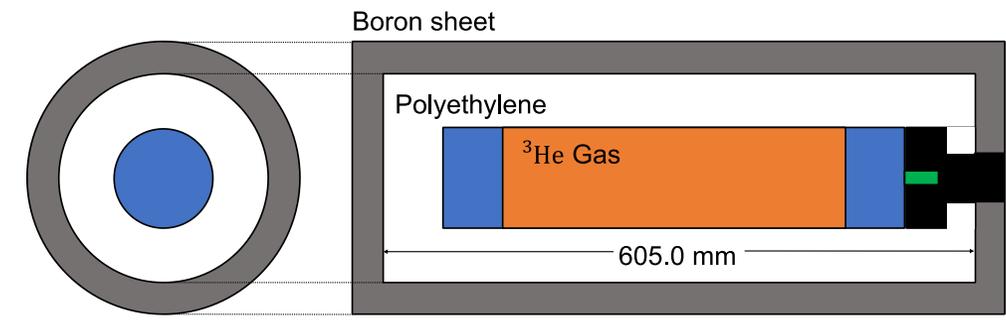
熱中性子： $<0.5\text{ eV}$
高速中性子： $>1\text{ MeV}$

佐々木 (横国大)
PTEP(2018)123C01の追試

- ^3He 比例計数管は熱中性子に高い感度を持つ
- 高速中性子の測定
→高速中性子を減速させ ^3He 比例計数管の感度領域まで運動エネルギーを落とす

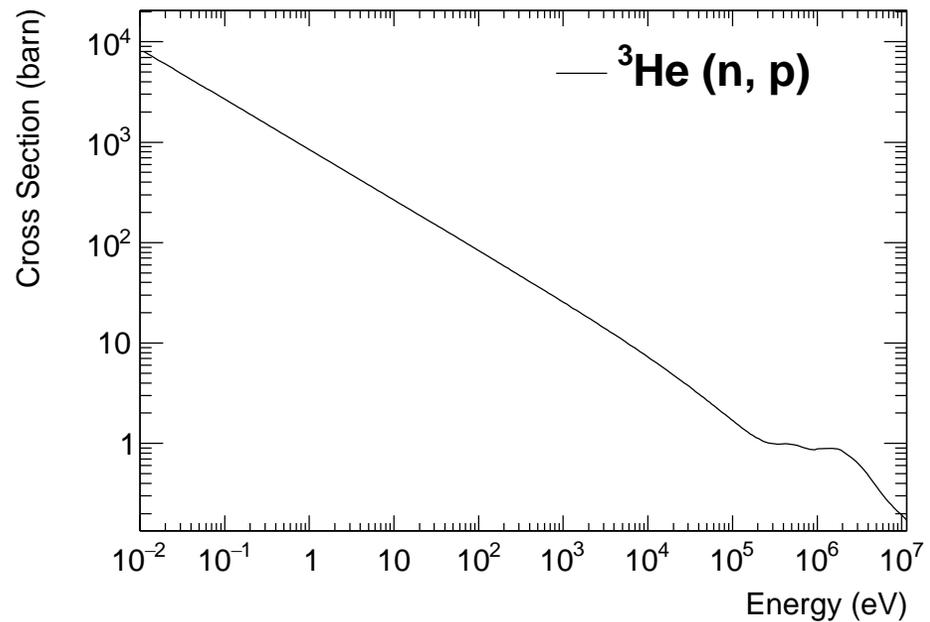


Setup A



Polyethylene : t 65 mm
Boron sheet : t 5 mm

Setup B

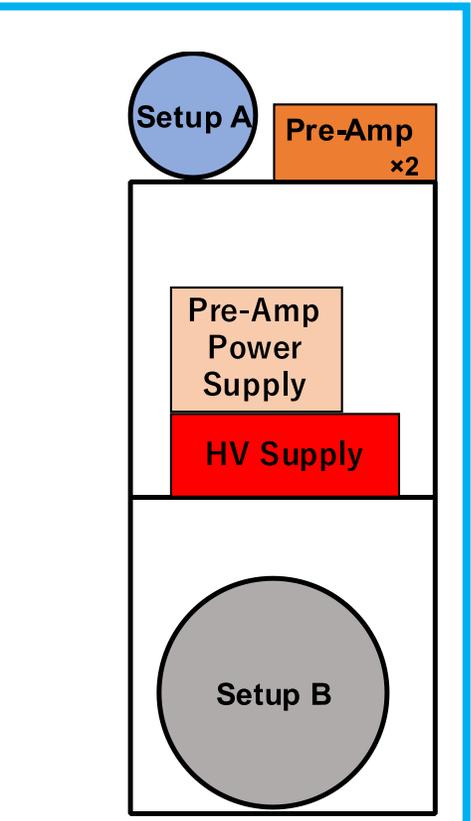
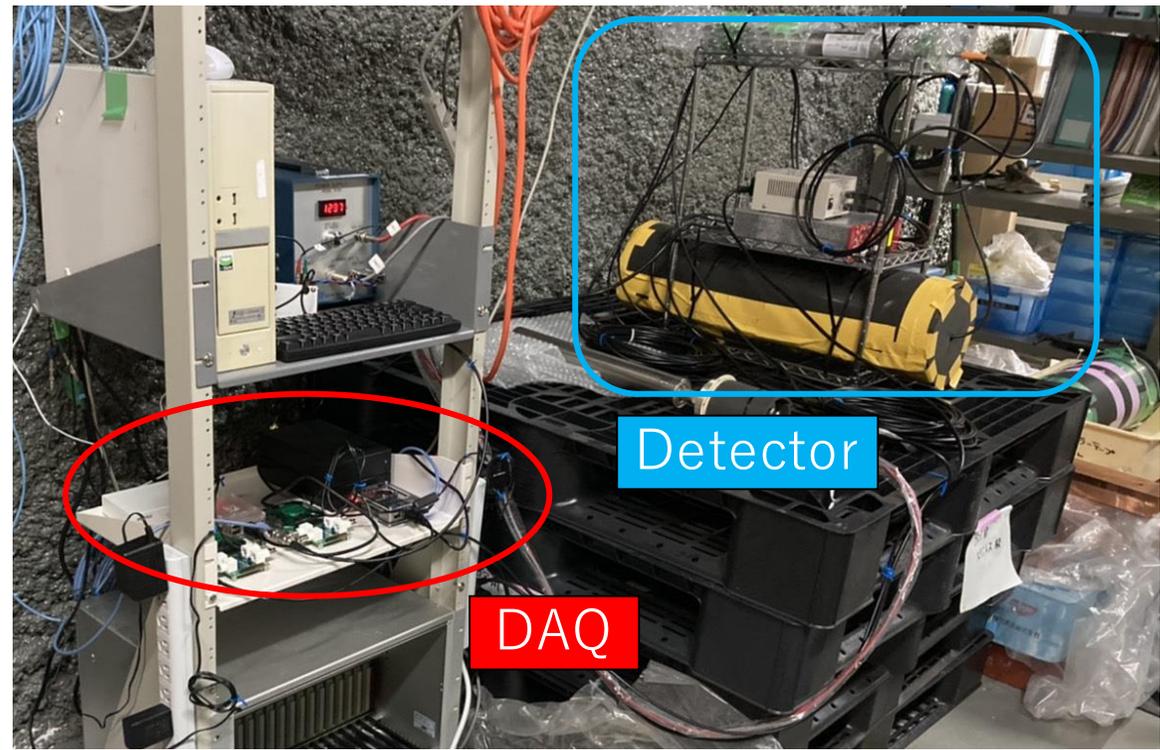
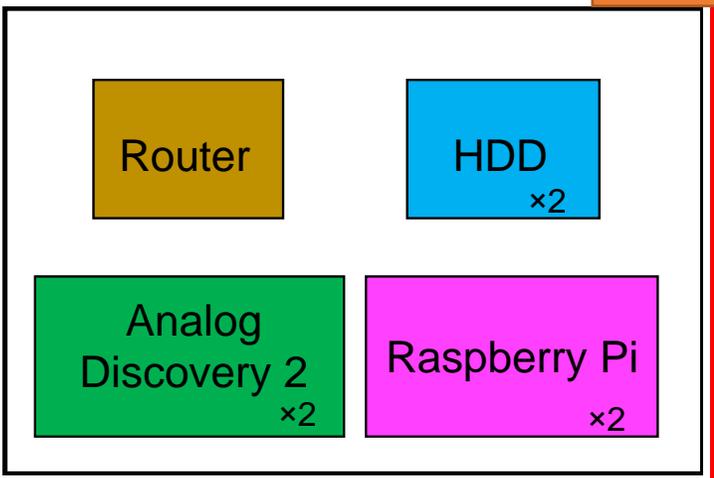


中性子のエネルギーに対する
 ^3He ガスの反応断面積[2]

- Setup A : 通常の ^3He 比例計数管
→熱中性子に高い感度を持つ
- Setup B : 厚さ6.5cmのポリエチレン容器(中性子減速材)に5mmのボロンシート(熱中性子吸収材)を巻く
→高速中性子に高い感度をもつ

Lab-Bでの測定の セットアップ

データ収集系(DAQ)を小型化
↓
様々なサイトでの測定が容易に

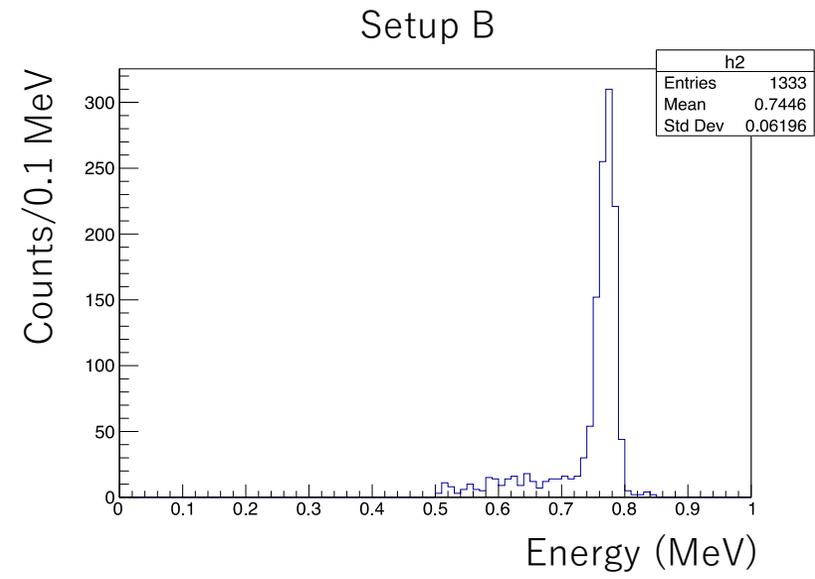
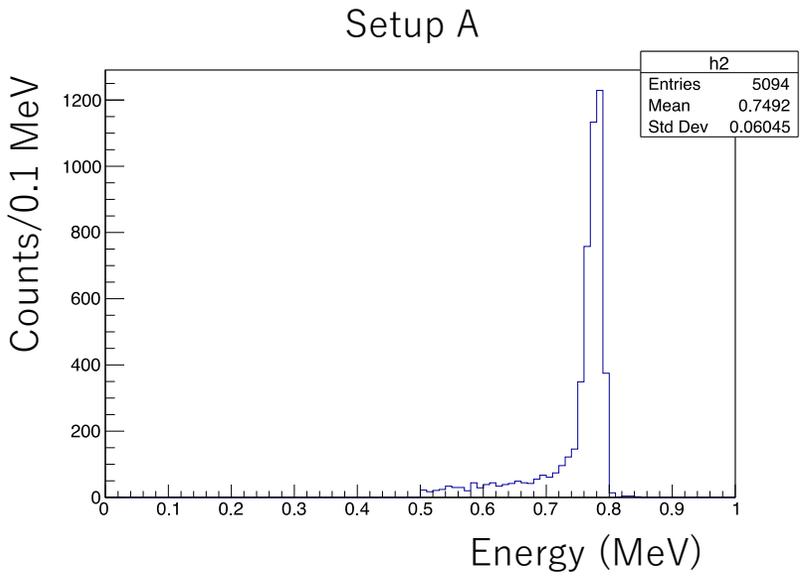


DAQ

Detector

Lab-Bでの測定結果

測定場所
→神岡地下実験室Lab-B
測定期間
→2020年10月10日～2021年1月13日

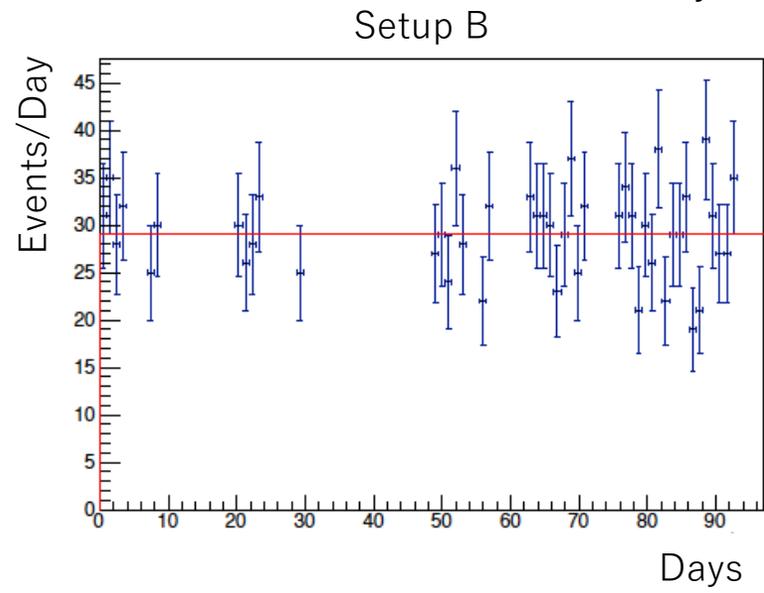
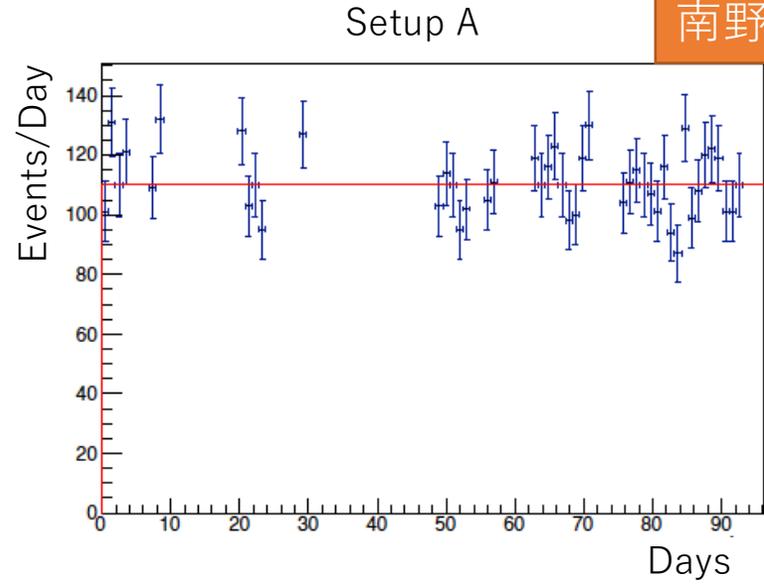


波高スペクトル

表 4.2: 各セットアップの測定情報

Setup	Live Time (day)	N (counts)	R (10 ⁻³ cps)
A	45	5094	1.546
B	45	1333	0.405

有効測定時間：45日間
→Lab-Bで中性子線源が使用された日を測定から除いた



1日あたりのイベント数

シミュレーション

地下実験室における 環境中性子の再現方法

シミュレーションツール

NeuCBOT* : (α, n)反応
Geant4 : 検出器応答

- 地下実験施設の岩盤中の放射線不純物 (ウラン、トリウム系列)
→ NeuCBOTでシミュレーション
- ^{238}U の自発核分裂反応
→ Watt Spectrumで再現
- 宇宙線ミュオンの核破砕反応
→ 今回は無視

シミュレーションの流れ

- ① ^3He 比例計数管の各運動エネルギーの中性子に対する検出感度の確認 (Geant4)
- ② 岩盤中で発生する中性子のエネルギースペクトルを導出 (NeuCBOT)
- ③ 岩盤から地下実験室に輸送された中性子のエネルギースペクトルを導出 (Geant4)
- ④ 地下実験室に輸送された中性子に対する ^3He 比例計数管の応答の確認 (Geant4)
- ⑤ 地下実験室における環境中性子のフラックスとエネルギースペクトルを導出

Lab-Bの環境中性子フラックス

表 6.1: 岩盤中の水素含有量による環境中性子フラックスの変化

	0 %	1 %	2 %	3 %
$\Phi_{<0.5\text{eV}}$	4.87	8.86	10.06	10.05
$\Phi_{0.5\text{eV}\sim 1\text{keV}}$	18.92	4.77	2.79	2.67
$\Phi_{1\text{keV}\sim 1\text{MeV}}$	25.23	7.55	5.15	4.32
$\Phi_{\geq 1\text{MeV}}$	2.53	2.20	1.53	1.07
Φ_{Total}	51.56	23.39	19.54	18.10

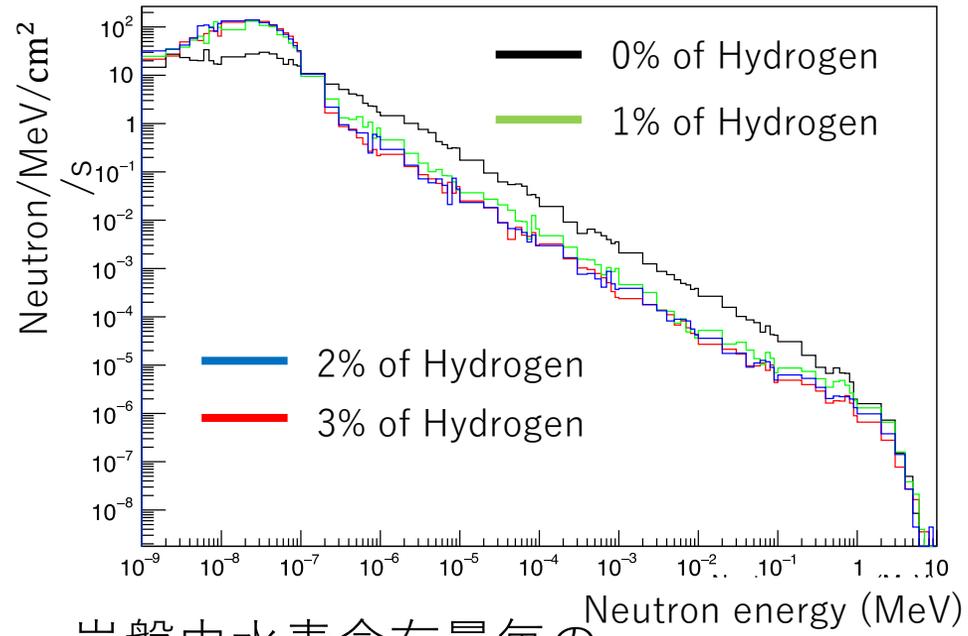
本研究の結果

表 6.2: 先行研究 [1] で求められた Lab-B における環境中性子フラックス

Energy range	Flux $\Phi(\times 10^{-6}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1})$
< 0.5 eV	7.88
0.5 eV ~ 1 keV	3.11
1 keV ~ 1 MeV	8.65
$\geq 1 \text{ MeV}$	3.88
Total	23.52

(3% of Hydrogen)

- **岩盤中の水素含有量**の増加に伴い
トータルフラックスは減少
熱中性子の占める割合は増加
- **推定されたLab-Bの岩盤中の水素含有量**
先行研究[1]は3%、本研究は2%
→岩盤中の水素含有量は測定時期によって変化
- **先行研究との比較** (表6.1の2%と表6.2)
- **今後**
岩盤中の水分量との相関を調べる (鷲見さんと)。
様々なサイトで測定し、岩盤の組成との相関を調査。

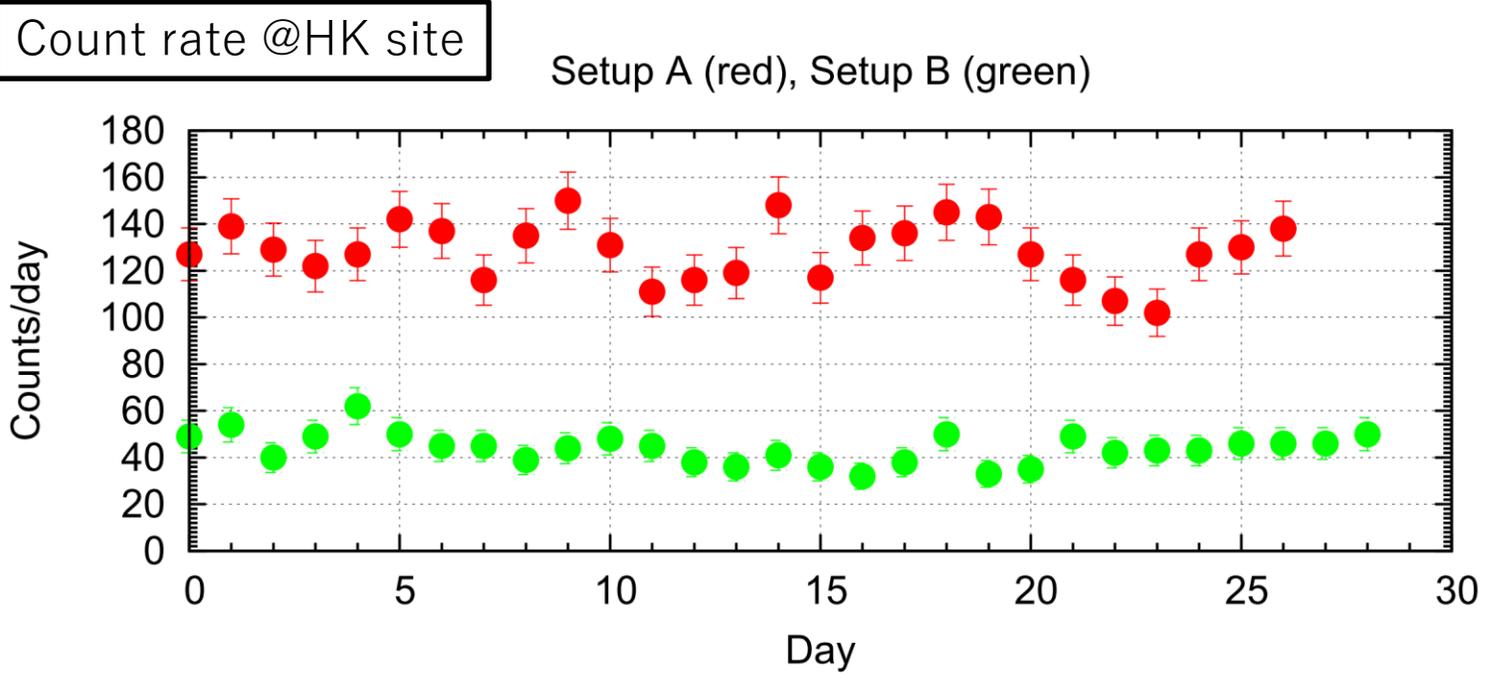


岩盤中水素含有量毎の環境中性子のエネルギースペクトル

[1] K.Mizukoshi et al.,PTEP(2018) 123C01

Results @HK site (Tochibora (-300mL))

竹田(ICRR)



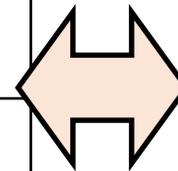
- 15% higher than that in SK site (Lab-B).
- Ratio between setup A and B is not different significantly.
- Energy spectrum may not be so much different from that in SK site.
- More detailed investigation (distribution of U/Th in the rock of HK site) needs to be continued.

Ref: Rate @SK site (Lab-B)

K. Mizukoshi et. Al., PTEP 2018 123C01

	Rate [cps]
Setup A	$(1.295 \pm 0.034^{+0.039}_{-0.033}) \times 10^{-3}$
Setup B	$(0.446 \pm 0.018^{+0.013}_{-0.011}) \times 10^{-3}$

$$R_A/R_B = 2.90 \pm 0.14^{+0.04}_{-0.03}$$



	time	counts	Rate [cps]
Setup A (2020/03/05-4/01)	2331703 sec (26.99 days)	3471	$(1.489 \pm 0.025) \times 10^{-3}$
Setup B (2020/02/05-03/05)	2504332 sec (28.99 days)	1274	$(0.509 \pm 0.014) \times 10^{-3}$

$$R_A/R_B = 2.93 \pm 0.09$$

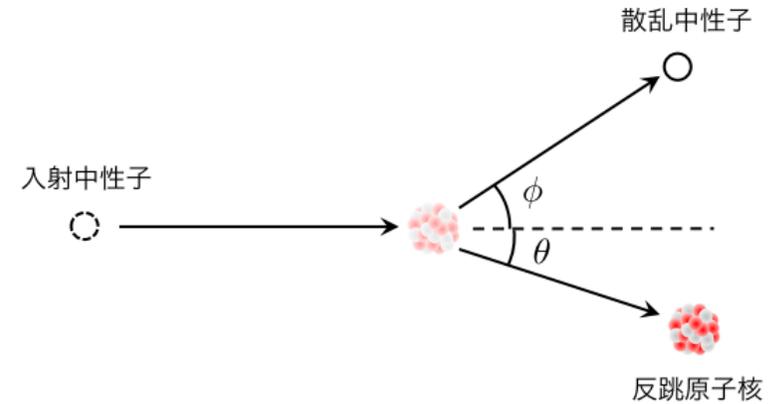
液体シンチレータを用いた環境中性子測定

▶ 液体シンチレータ(BC501A)による中性子測定 (高速中性子: > 100 keV)

- ▶ BC501A: 波形弁別による優れたn/γ分離能力
- ▶ 反跳原子核(H,C)のエネルギーから中性子のエネルギーを推定できる

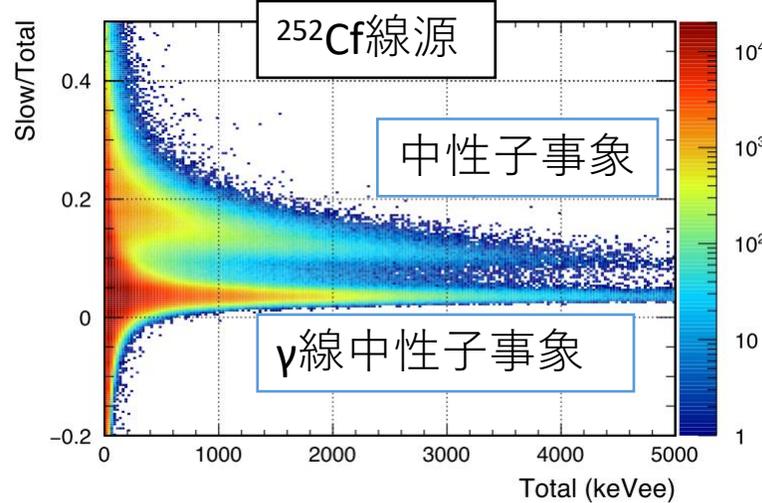
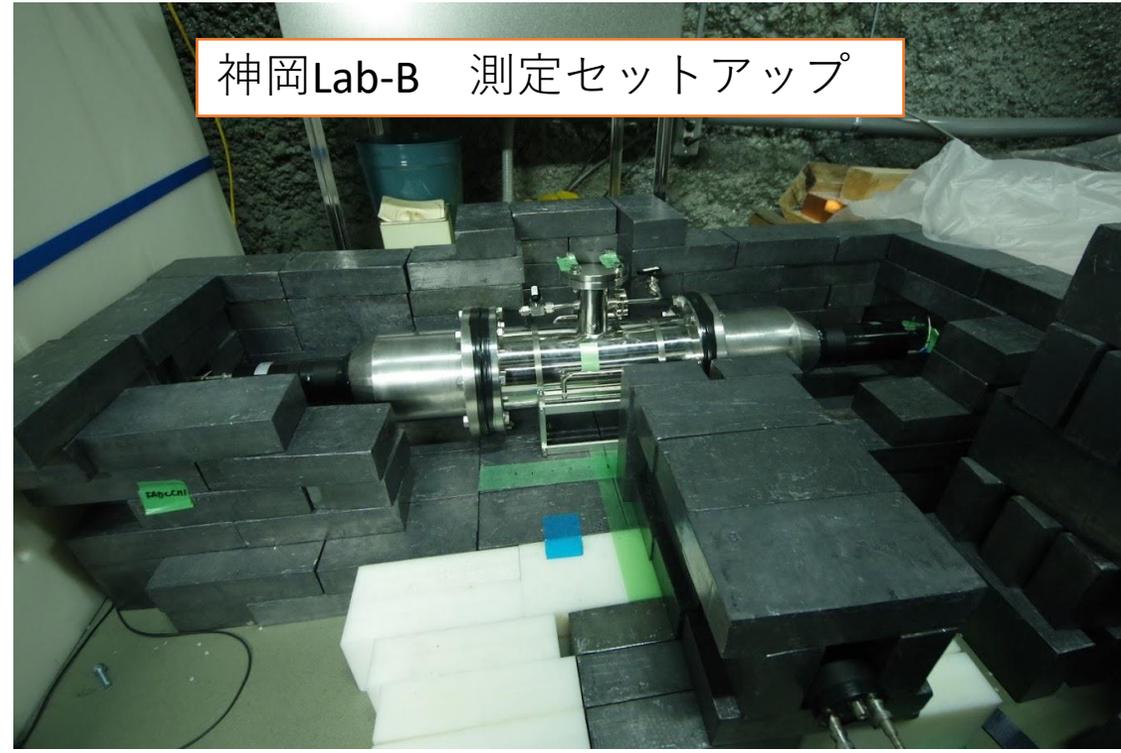
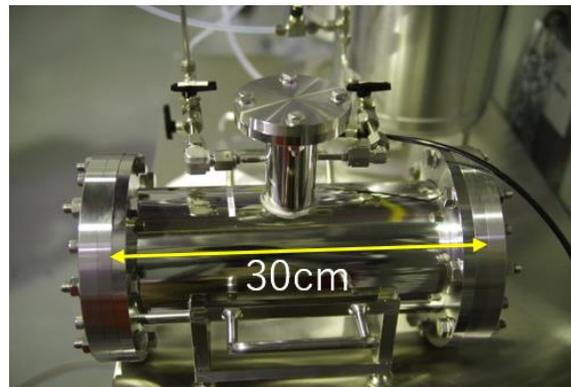
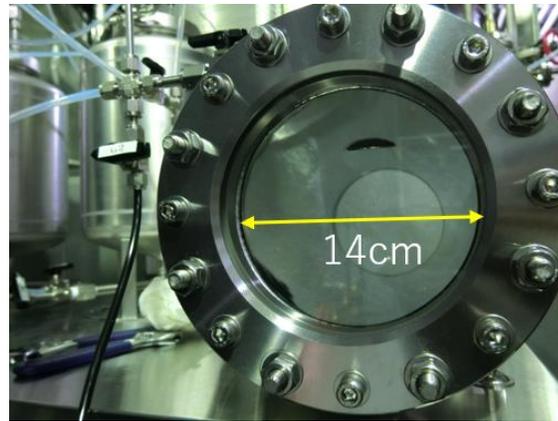
▶ 地下環境中性子測定のため、低放射性不純物な検出器開発している。

- ▶ 主要バックグラウンド: U/Th系列のα事象



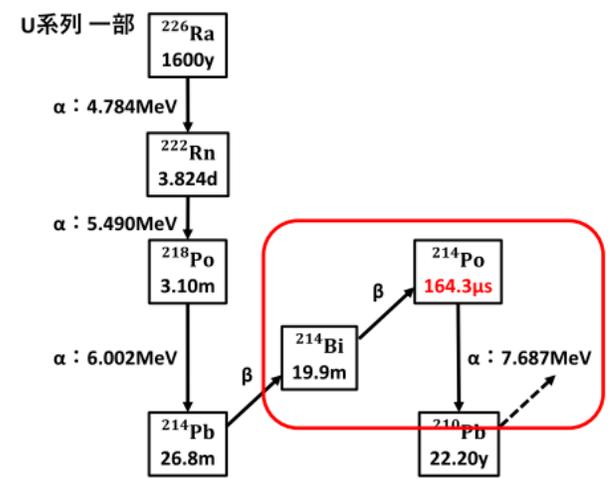
液体シンチレータ検出器

- 直径 14.0 [cm] × 長さ 30.0 [cm]
- 体積 4.60 [L]、質量 4.20 [kg]
- PMT(H6527)両読みの検出器



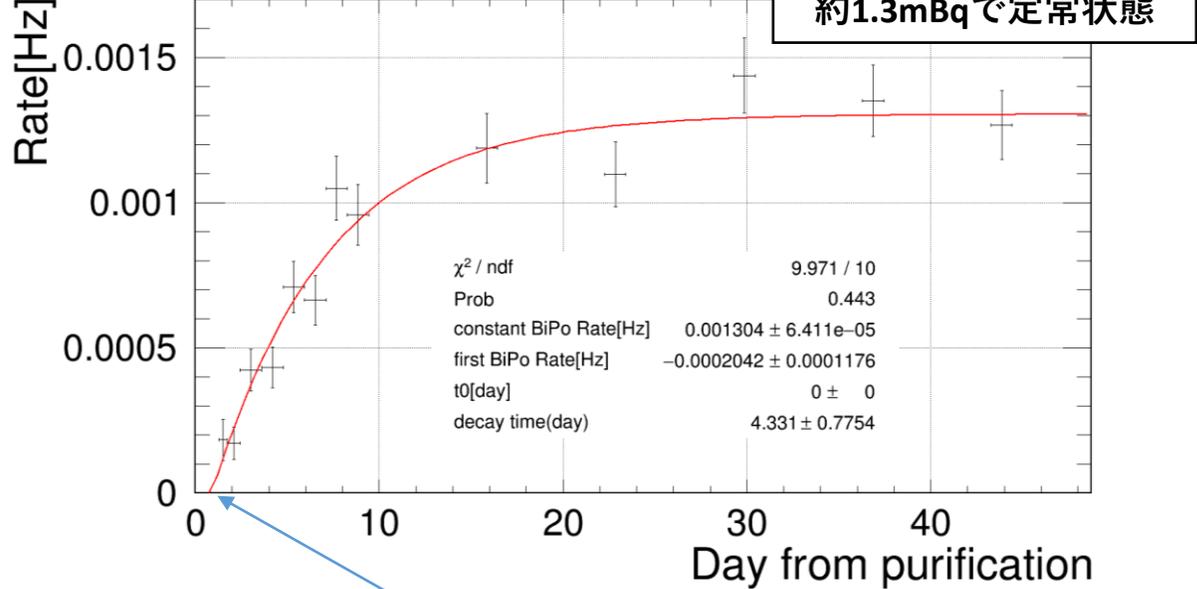
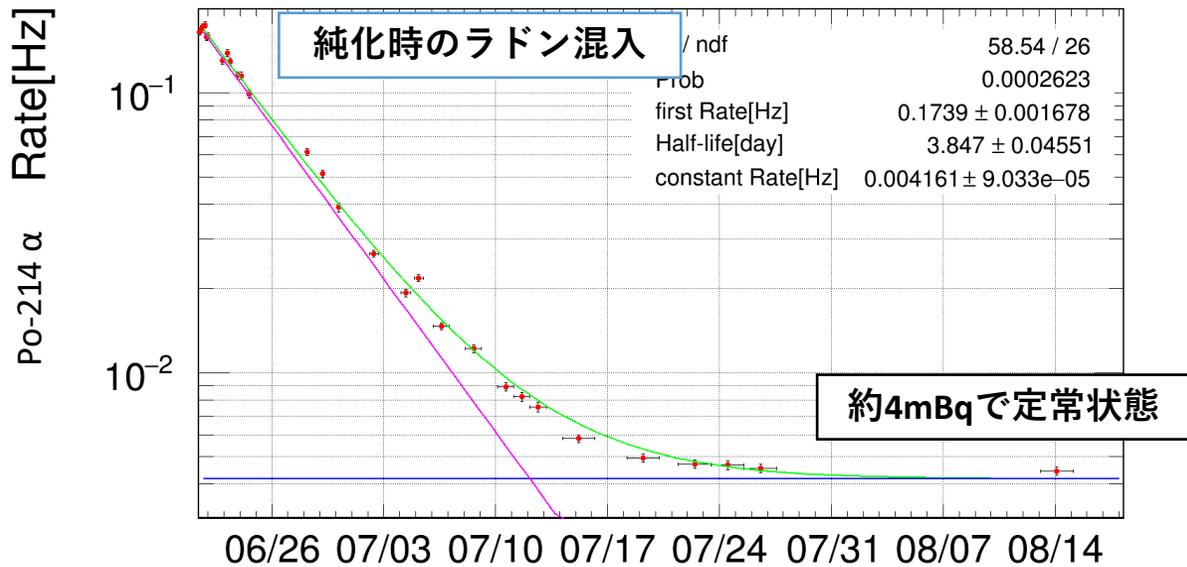
昨年度までの結果と問題点

- U系列の α 量を ^{214}Bi - ^{214}Po tagged eventにより見積もり
 - 初期 α 量：液体シンチレータ純化により改善
 - 時間経過後の定常状態での α 量：検出器部材の選定により改善
- 残ったBG源(約1.5 mBq)はステンレス容器自身からのRnのしみ出しによるものと推測



2019年10月

2020年3月



AICHAM測定,液シン解析よりBG源(ガラス窓)を特定
→部材を交換

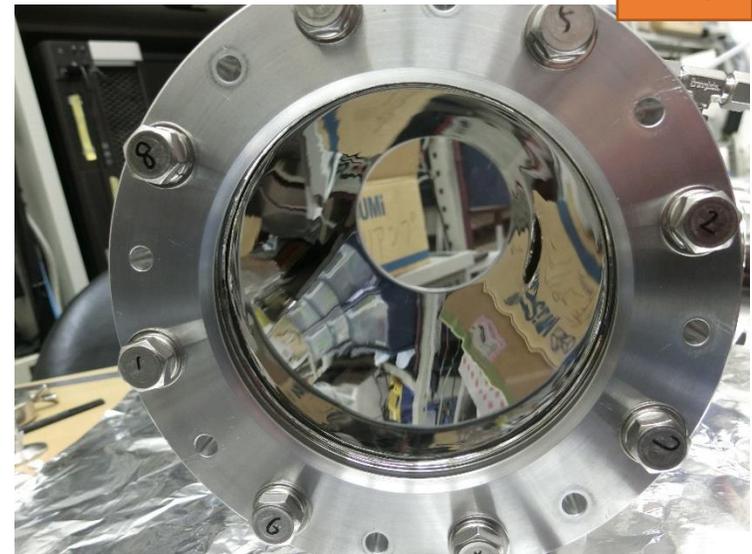
純化系改良→
初期純度改善

2020年度の進捗

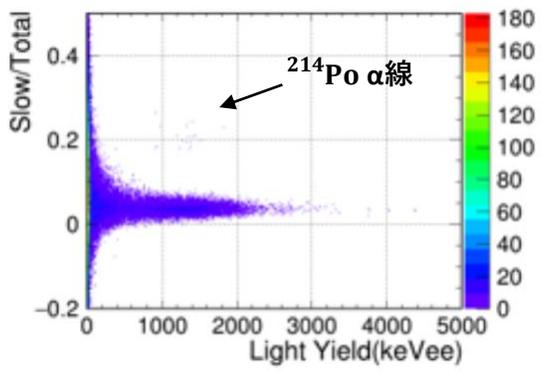
80L Rn検出器: J. of Phys. Conf. Series 469
(2013) 012007, PTEP 2015, 033H01, etc.

- 内面にRn染み出しを抑制する **電解複合研磨**を施した検出器容器を作製。
✓ **神岡ラドン検出器**で使用されている技術
- 検出器形状を前年度のものと同じにしたため、体積・質量は変わらない。

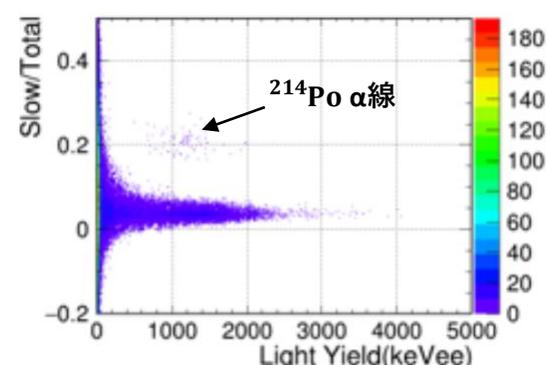
□初期測定結果(2021年3月9日より測定開始)



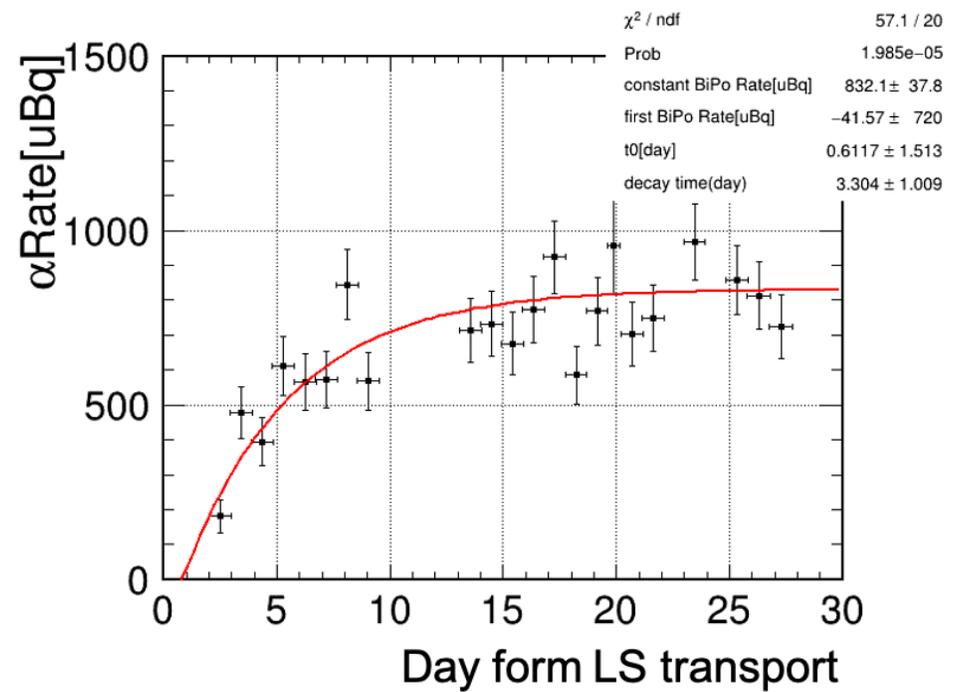
2日後の測定結果



7日後の測定結果



²¹⁴Poα線レートの時間変化(約30日分)



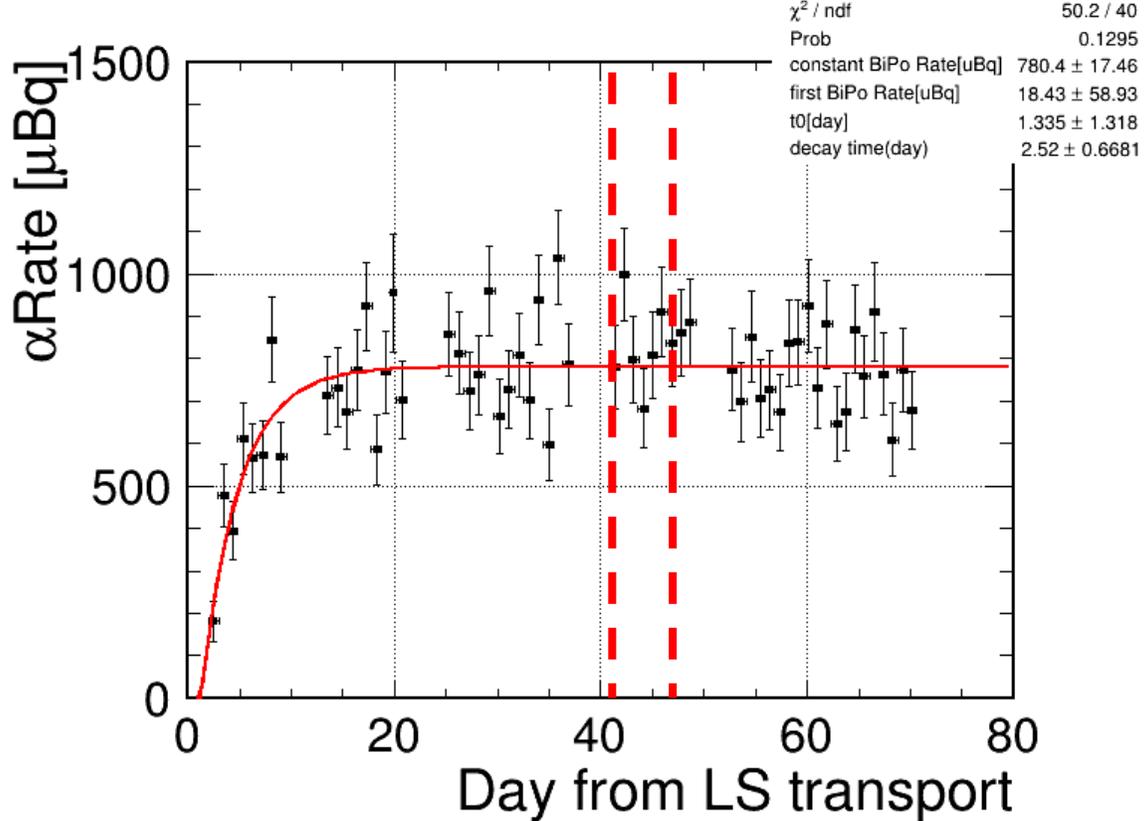
一定の改善(1.3mBq→0.8mBq)は見られたがもっと減らしたい。

溶接面は電解研磨が難しいのでそこからのしみ出しが原因？

容器フランジのシールに用いているリング(ゴム製)を、Rnが通過している？

検出器容器外からのRn侵入の検証

- EVOH(Rnを透過しにくい素材)の袋の中に検出器をいれ乾燥空気を流しながらデータ取得を行う
 - 有意な減少は見られなかった。
- 現状でもある程度の中性子測定感度はあると考えられるのでデータを解析して、まずは結果を出したい

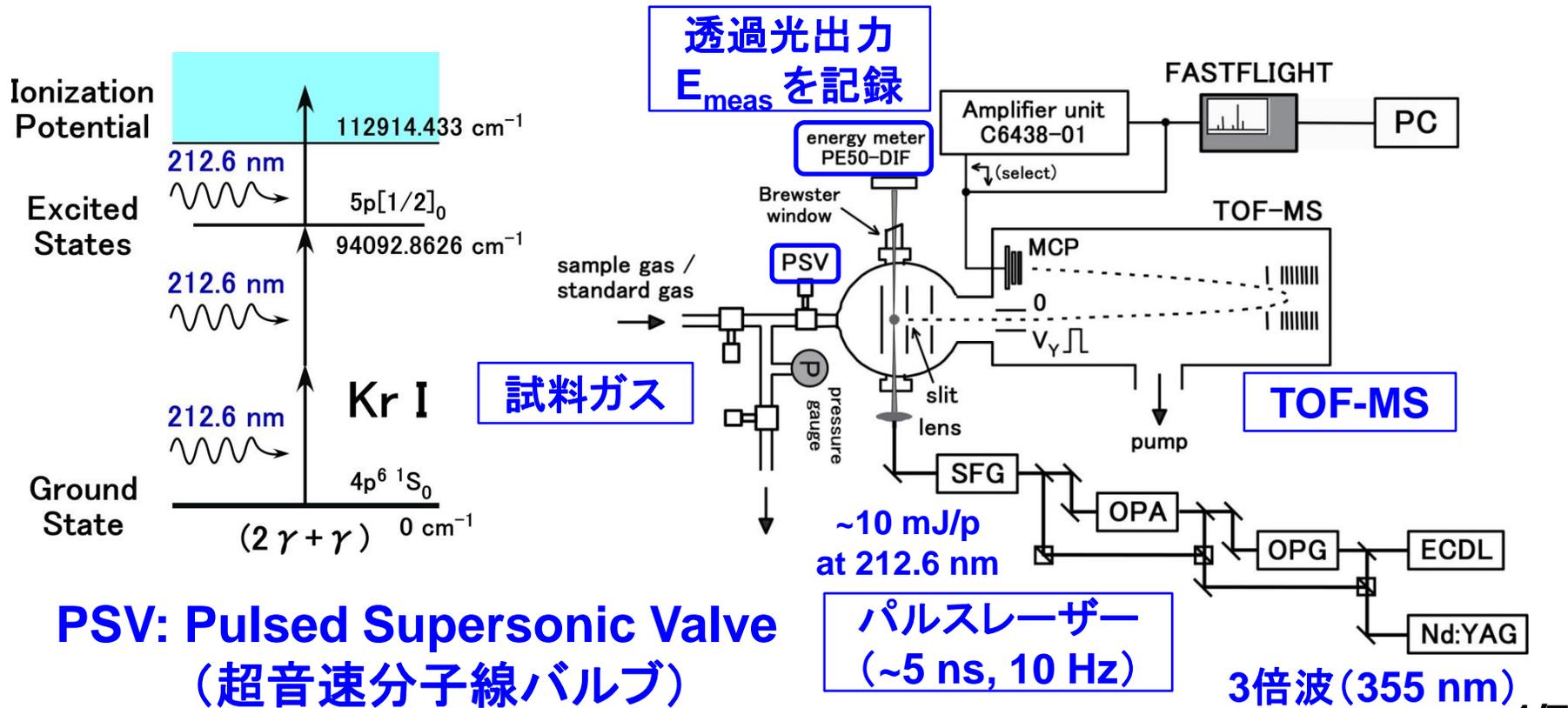


レーザー共鳴イオン化(岩田・伊藤)

- 特定の元素に特定波長のレーザーを照射することにより選択的にイオン化する。
 - 従来手法(ICP-MS)よりも超高感度での微量分析: **O(10) ppq レベル**
 - (放射性同位体除去)
- クリプトン(^{85}Kr)
 - 液体Xe/Ar暗黒物質探索における背景事象
- (ラドン)
- ガドリニウム(Gd^{3+})発光の観測
 - SKGdとの連携

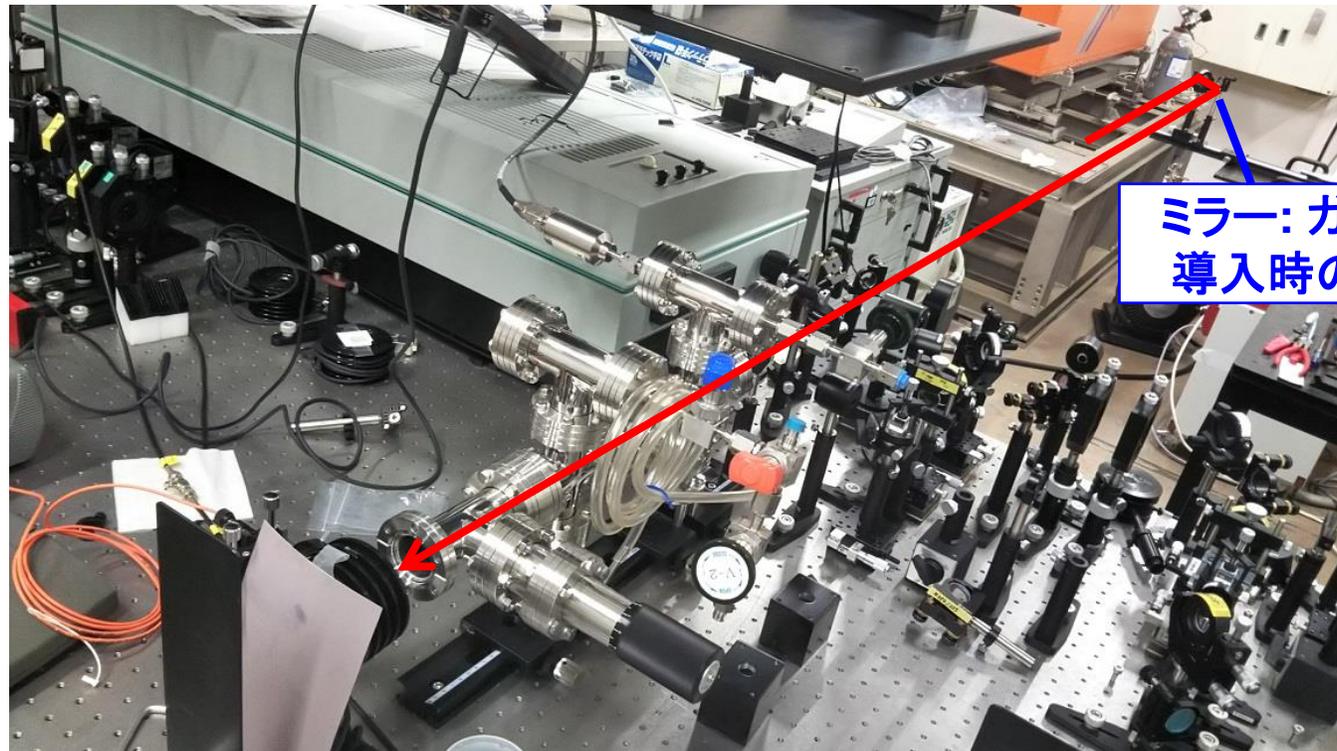
(レーザー①) Ar or Xe中のKr共鳴イオン化

- 半導体レーザー(ECDL)の波長を微調整し、212.6 nm生成
- 波長 212.6 nm パルスレーザー (~10 mJ/p, ~5 ns, 10 Hz) で Kr を $(2\gamma+\gamma)$ 共鳴イオン化 ⇒ 検出限界 ~sub-ppt 実績



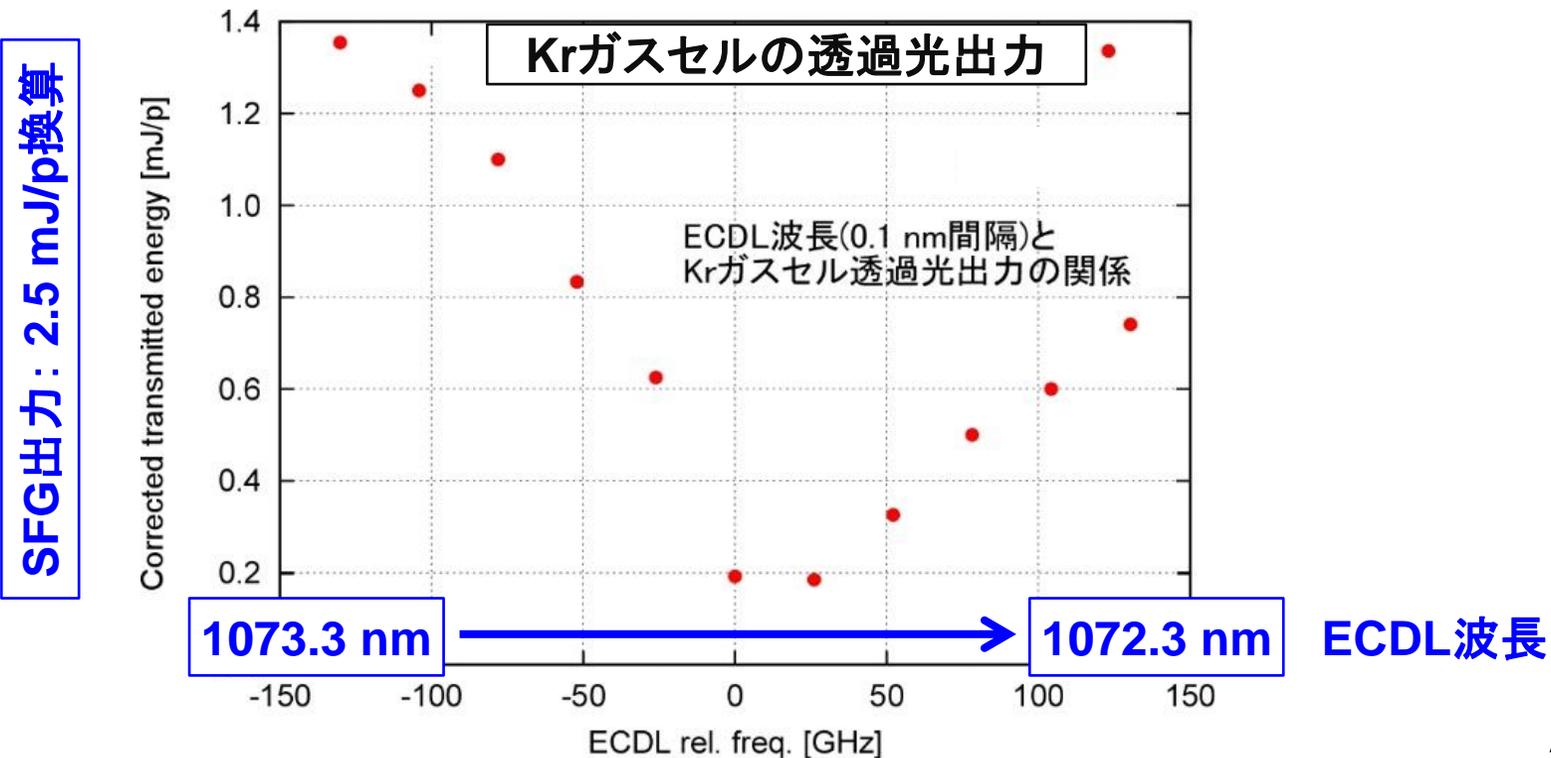
(レーザー①) Krガスセルによる吸収(1)

- 2020年1月に装置一式をJAEA大洗から東大東海キャンパスに移設後、光学系を再構築 ⇒ 現状、2-3 mJ/p at 212.6 nm
- Kr 2 γ 共鳴波長に対応するECDL波長を確認するため、まずKrガスセル(~110 kPa)による紫外光吸収を観測



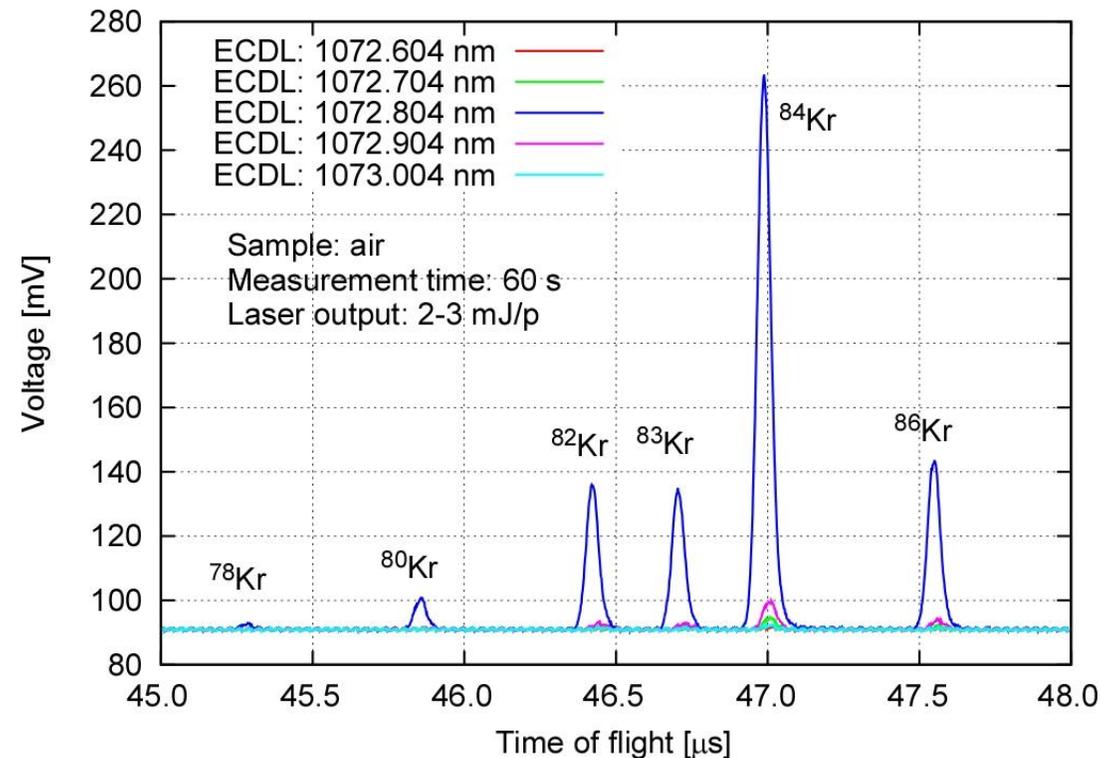
(レーザー①) Krガスセルによる吸収(2)

- Kr 2 γ 共鳴波長に相当するECDL波長の計算値: ~1072.8 nm
- ECDL波長を1073.3 nm~1072.3 nmで0.1 nm刻みで変えて212 nm出力をf = 300 mmレンズで集光・透過光出力を測定
- 計算値付近で、確かに吸収量最大を確認



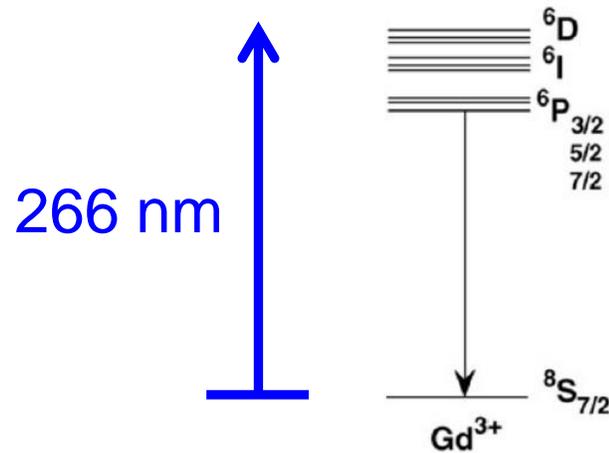
(レーザー①) 空气中KrのTOF信号観測

- ECDL波長: 1072.604 nm~1073.004 nmの5通りで比較
⇒ 計算通り、1072.804 nmでKr⁺信号が最大
- 移設前より1桁程度低い ⇒ Nd:YAGレーザーの調整を業者に依頼後、TOF電極形状の変更・Arガスラインの構築を予定



(レーザー②) 水中Gd³⁺発光事象の解明

- Gd³⁺: $^6P_{7/2} \rightarrow ^8S_{7/2}$ (312 nm)
- Nd:YAG 第4高調波 (266 nm, ~ns) 励起による発光を分光器 ⇒ PMT 検出



Nd:YAGパルスレーザー
(4倍波, 波長266 nm)

寿命の文献値はあるが、発光スペクトルで未解明な現象あり

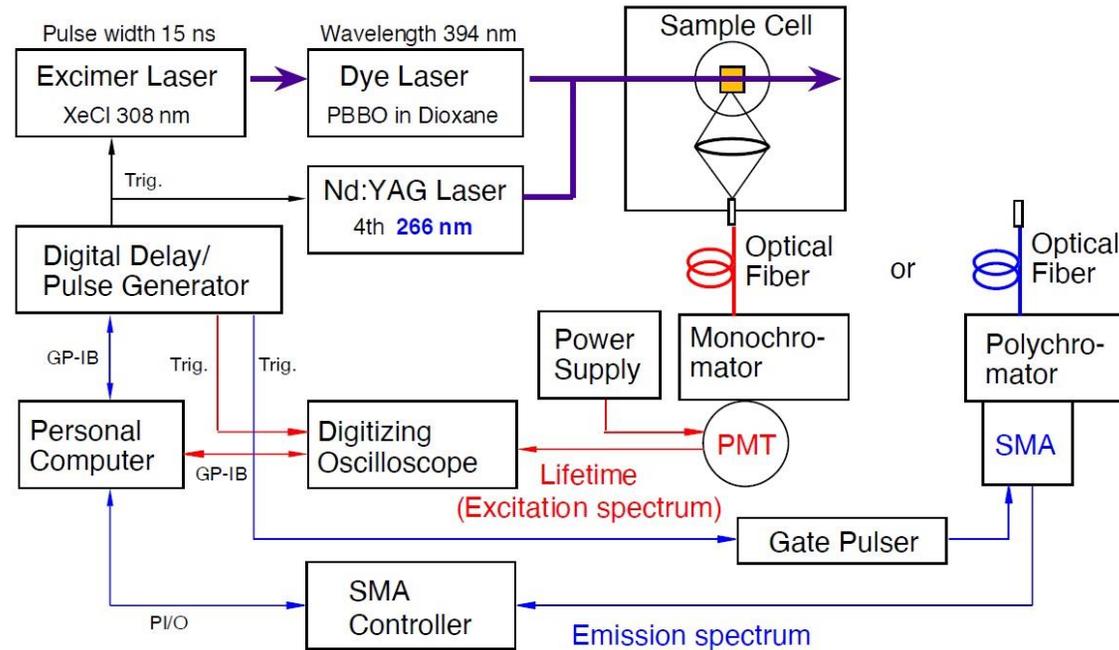
Table 2
Luminescence lifetimes (μs) of the Eu^{3+} , Gd^{3+} and Tb^{3+} ions in aqueous solution as a function of the azide ion concentration

$[\text{N}_3^-]$ (mol l^{-1})	Eu^{3+} (H_2O)	Eu^{3+} (D_2O)	Gd^{3+} (H_2O)	Tb^{3+} (H_2O)
0	112.4±0.7	4020.0±6.0	1480.0±20.0	442.0±2.0
0.00001			1380.0±14.2	
0.00005			1025.0±11.6	
0.0001		3880.0±5.0	850.0±11.2	
0.0002			548.0±9.3	
0.0004			215.0±3.2	
0.0006			170.0±2.6	
0.0008			152.0±2.1	
0.0010		911.0±3.6	136.0±1.4	
0.05		191.3±0.9		
0.01	111.4±0.6	95.4±0.7		441.0±1.8
0.02	94.1±0.4	50.3±0.6		435.4±1.8
0.04	44.8±0.4	31.5±0.3		416.7±1.4
0.06	31.6±0.2	22.0±0.2		367.7±1.5
0.08	24.1±0.2			313.8±1.1
0.10	20.5±0.1	16.0±0.1		244.2±1.2
0.15				139.7±1.4
0.20	11.6±0.1			92.0±0.0
0.30				65.2±0.6
0.40				50.0±0.6
0.50	6.34±0.06			34.7±0.5

Stefan Lis et al., Journal of Alloys and Compounds **323-324** (2001) 125-127.

(レーザー②) Gd^{3+} 発光分光セットアップの構築

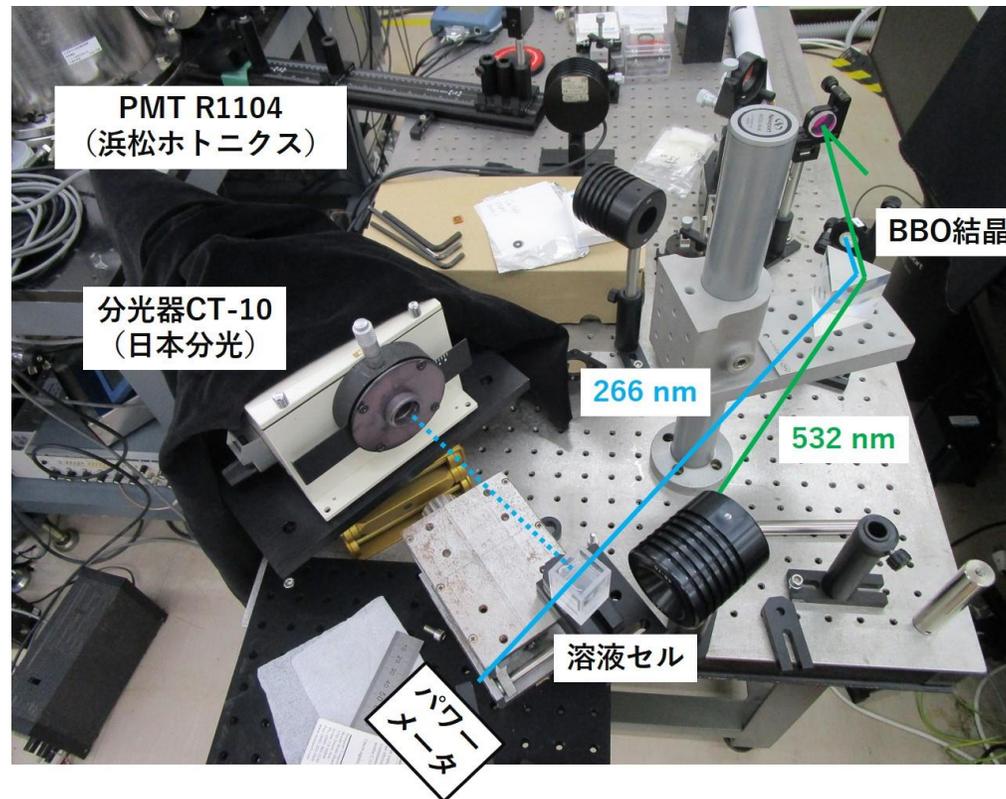
- 以前の研究会(2020年6月4日)で、JAEA木村さんの講演で説明のあったセットアップ(下図)を参考に構築中



「第六回極低放射能技術」研究会: 木村貴海「ランタノイドの発光寿命について」の発表スライドから引用

(レーザー②) Gd^{3+} 発光分光セットアップの構築

- BBO結晶で、532 nm \rightarrow 266 nm (nsパルス、10 Hz)
- Gd標準液(和光070-02481)からの散乱光をPMTで検出
- 266 nm散乱光を観測、硝酸溶液のため312 nmは見えず
- 今後、レンズ & 干渉フィルター設置、硫酸Gdで試す予定



まとめ

- D01班の目標
 - 領域内の実験グループと連携し、地下実験における主要な背景事象源となる放射性物質の理解と削減
 - 極低放射能技術の応用
 - 研究成果の発信
- 今回の報告
 - Ge検出器によるスクリーニング
 - Rn検出器による水中Rn量測定
 - 地下環境中性子測定
 - レーザー共鳴イオン化による微量元素分離