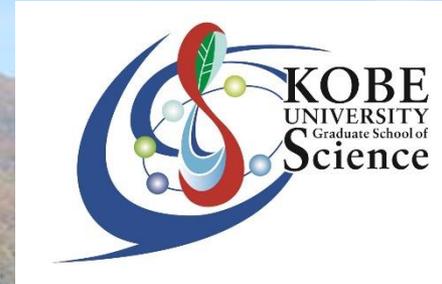


新学術での極低放射能技術の研究

神戸大学 理学研究科
竹内 康雄



- 地下素核実験におけるバックグラウンド(BG)源
- 本新学術での研究の概要
- 主な取り組みの紹介
 - 1. ラドン測定技術の高感度化
 - 2. 純水中ラジウム測定
 - 3. 検出器素材の精製
 - 4. 表面アルファ測定
 - 5. 環境中ラドン娘核の低減

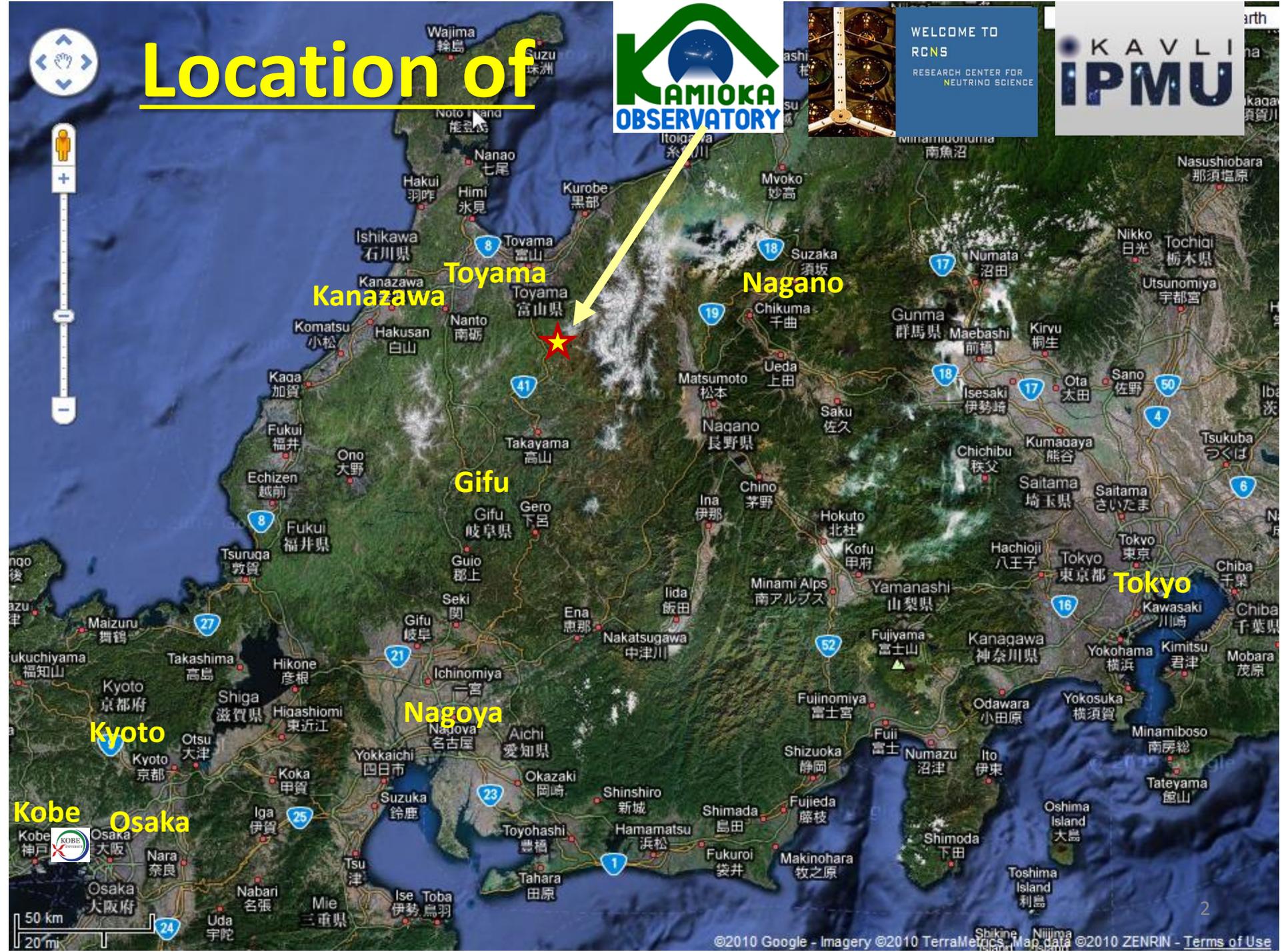


Location of



WELCOME TO
RCNS
RESEARCH CENTER FOR
NEUTRINO SCIENCE

KAVLI
IPMU



50 km
20 mi

地下で行う素核実験

■ 地下は宇宙線起源の放射線強度が非常に低い

- 電荷を持つ一次・二次宇宙線(ミュオン粒子など)は**地中で停止**
- 電荷を持たないニュートリノや暗黒物質は**通過する**

■ 発生頻度が非常に少ない現象を観測するための最先端の実験は地下で行う

- 岐阜県飛騨市神岡町の地下**1000m(水深2700m)**に実験サイト
- 宇宙線強度(ミュオン粒子): **10万分の1**
- 日本最大、世界でも有数

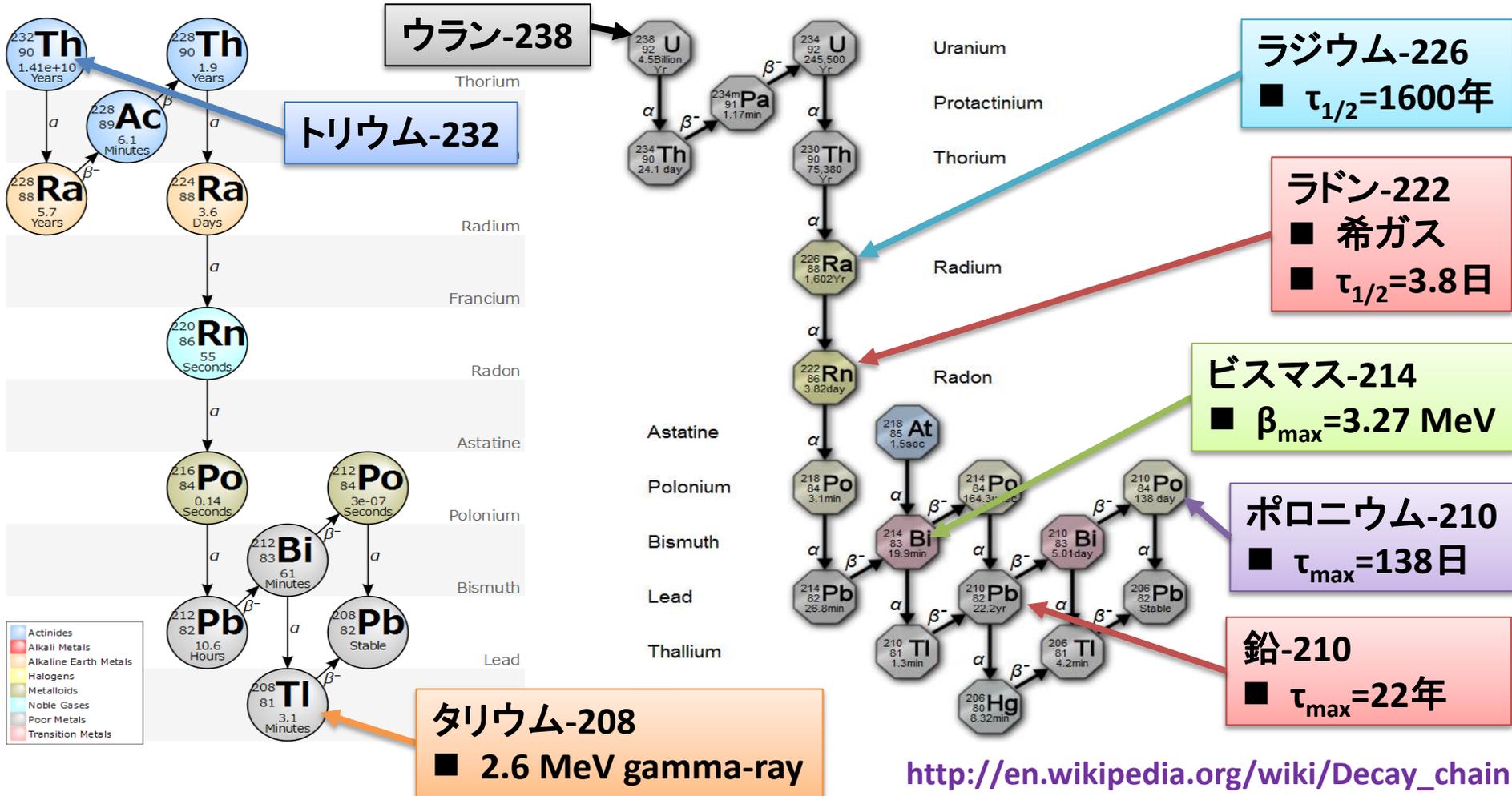
■ 他の自然放射線(keV~MeV)も低減が必要

- 天然放射性物質(ウラン系列、トリウム系列)、etc.、

トリウム系列、ウラン系列

■ 身の回り: 1~10 ppm(10^{-6})

→ 実験装置: ppb(10^{-9}), ppt(10^{-12}), ppq(10^{-15}),,,



目標とする不純物量の上限

■ KamLAND, KamLAND-Zen (A01)

- U: $\sim 1 \times 10^{-12}$ g/g, Th: $\sim 1 \times 10^{-12}$ g/g (ミニバルーン)
- U: $\sim 2 \times 10^{-19}$ g/g, Th: $\sim 2 \times 10^{-17}$ g/g, ^{210}Po : ~ 1 mBq/m³ (液シン)

■ CANDLES (A02)

- U: ~ 10 $\mu\text{Bq/kg}$, Th: ~ 1 $\mu\text{Bq/kg}$

■ XMASS (B01)

- U: $\sim 1 \times 10^{-14}$ g/g, Th: $\sim 2 \times 10^{-14}$ g/g, Kr: ~ 1 ppt(vol.), ^{222}Rn : ~ 7 $\mu\text{Bq/m}^3$ (in gas Xe)

■ NEWAGE (B02)

- U: ~ 5 ppb, Th: ~ 0.2 ppb

■ Super-Kamiokande, GADZOOKS! (C01)

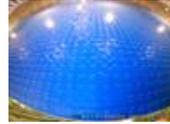
- ^{222}Rn : ~ 0.1 mBq/m³ (in water)

■ KamLAND-PICO, PICO-LON (D01)

- U: ~ 10 $\mu\text{Bq/kg}$, Th: ~ 4 $\mu\text{Bq/kg}$, ^{210}Pb : ~ 5 $\mu\text{Bq/kg}$

主要な共通のBG源

純水



- C01: 検出器
- A01, A02, B01, : 遮蔽
- A01, A02: 液シンの純化
- **連携**: C01で、技術蓄積 (Super-Kamiokandeは大容量純水で世界最高純度)

部材中の放射能



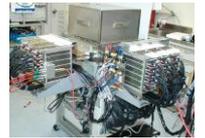
- 全てで低減が必須
- A02, B02, C01で特に重要
- **連携**: D01(PICO-LON)で技術蓄積 (世界最高純度のNaI開発目処あり)

ラドン



- 全てで低減が必須
- 検出器内、環境中
- **連携**: D01(ラドン検出器)で技術蓄積 (LSM(France), LBNE(US)にも情報提供した)

表面放射能



- A01:バルーン表面
- B01:液体Xeとの接液部分
- **連携**: B02の検出器を表面 α 線の精密測定に応用



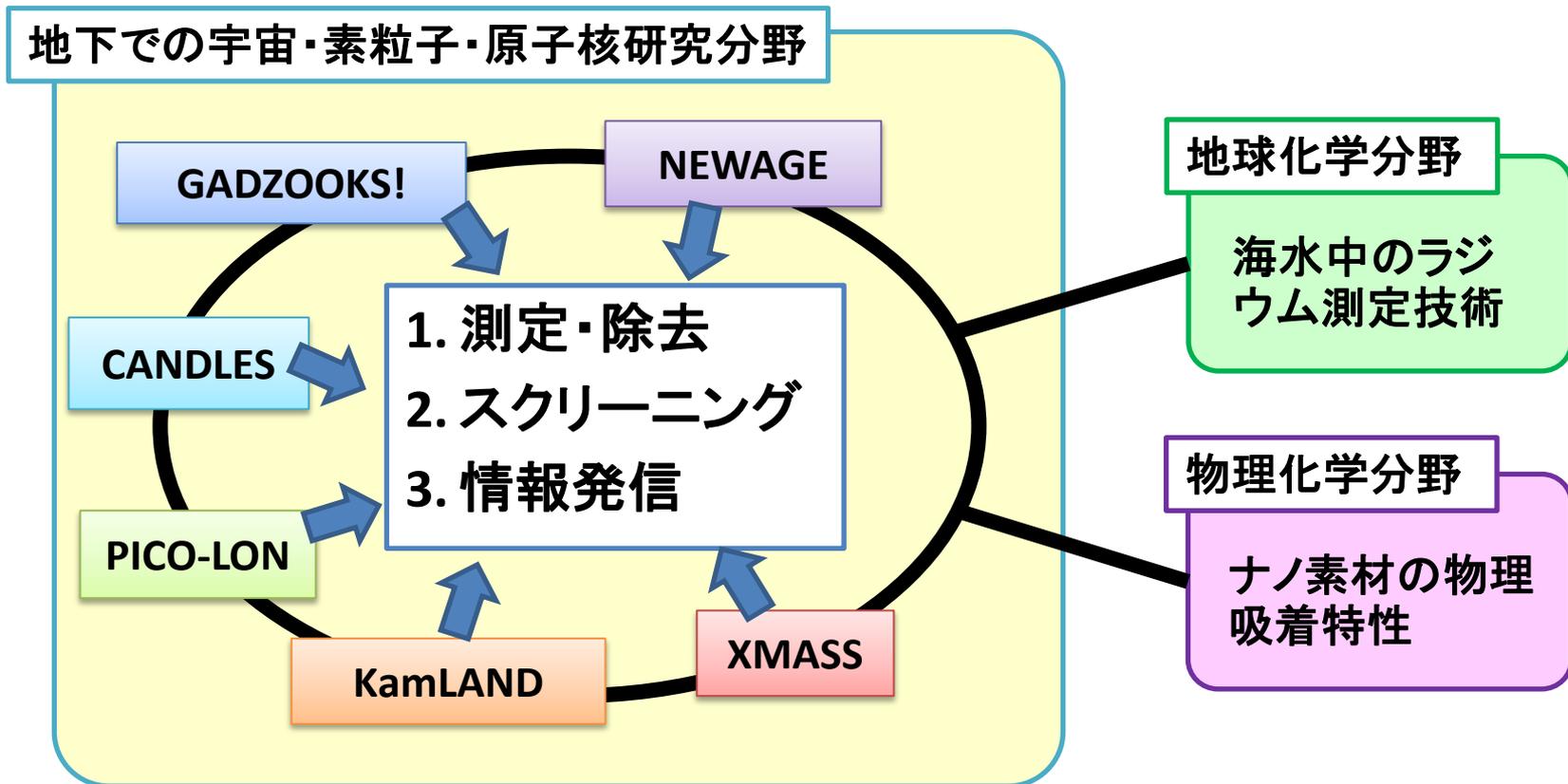
連携により、早期に極低BG化を目指す

本新学術での研究の概要

本計画研究の特徴

広い範囲の連携による研究加速の試み

- 広い範囲での連携を試み、共通の課題である極低BG技術を早期に実現することを目指す。



構成員

研究員:1名

■ 公募中

(積極的な応募
を歓迎します)

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

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

役割分担

(1) 測定の高感度化、及び除去

伏見

遮蔽体

嶋 裕

Ge検出器

シンチレー
ション検出器

水中Ra測定

関谷 Luis 井上

Rn検出器

竹内 田阪

ナノ素材
によるRn
トラップ

竹内 田阪 金子

C班

表面α線

小林 池田

検出器素材精製

伏見 梅原

環境中のラドン
娘核種除去

小林 田阪

B班

(2) スクリーニングシステム

関谷
池田

Ge検出器

Rn検出器

竹内

サンプル容
器(個体・膜)

A,B,C班に提供、測定

(3) 情報発信システム

竹内

放射性不純物
データベース

松原

A,B,C班に提供、測定

主な取り組みの紹介

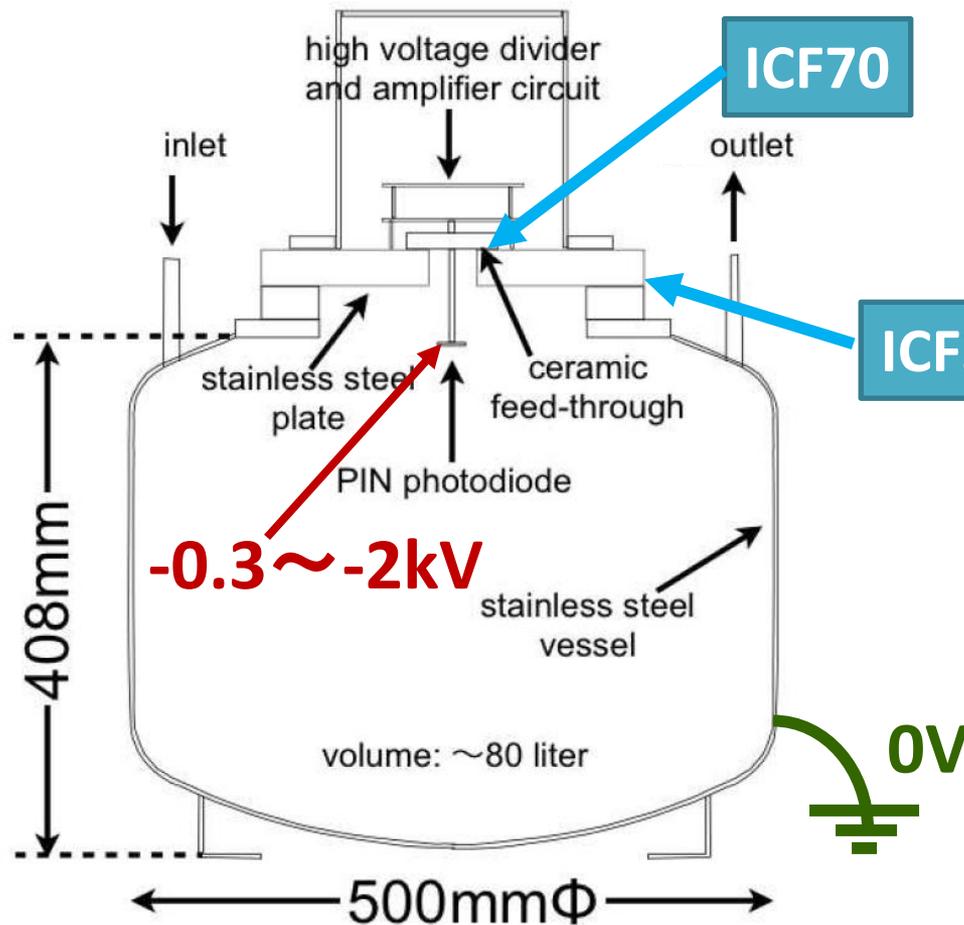
1. ラドン測定技術の高感度化

- **ラドン**は多くの地下実験で、**主要なBG源**
- **精密測定が必要**
 - 部材からのRn放出 → **スクリーニング装置**
 - 測定器製作中 → **環境中Rn娘核の低減**
 - 環境から測定器への混入
- これまで、**純空気中、純水中、純アルゴン中**のラドン濃度測定装置を開発した
 - 田阪、関谷、竹内、et al.
- **BGレベルの低減、純キセノン中の高感度Rn測定、より安価なシステムの開発等、更なる改良を試みる**
 - ナノ素材による物理吸着(金子氏の講演)の応用を試みる

80Lラドン検出器

Cf. 70Lラドン検出器
NIM A421 (1999) 334

Method = PIN photodiode + Electrostatic collection



- 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

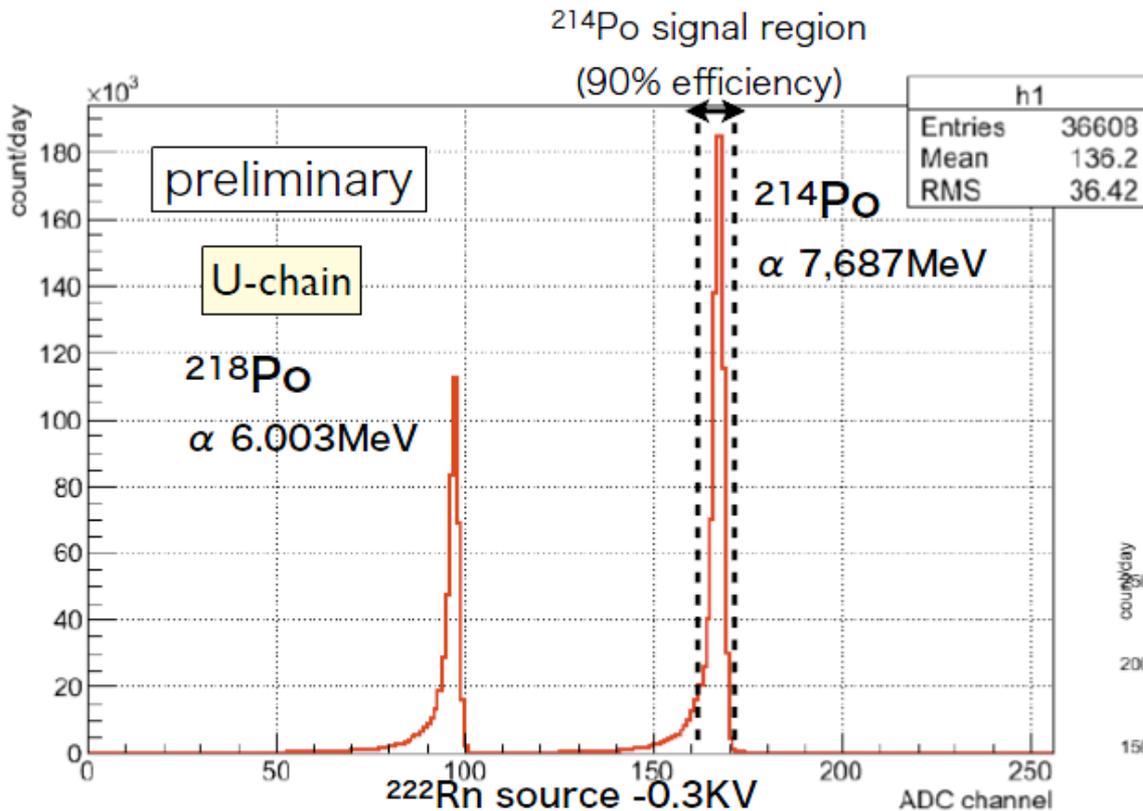
@神戸大学
2013/12/19

80L検出器
No.2

80L検出器
No.3

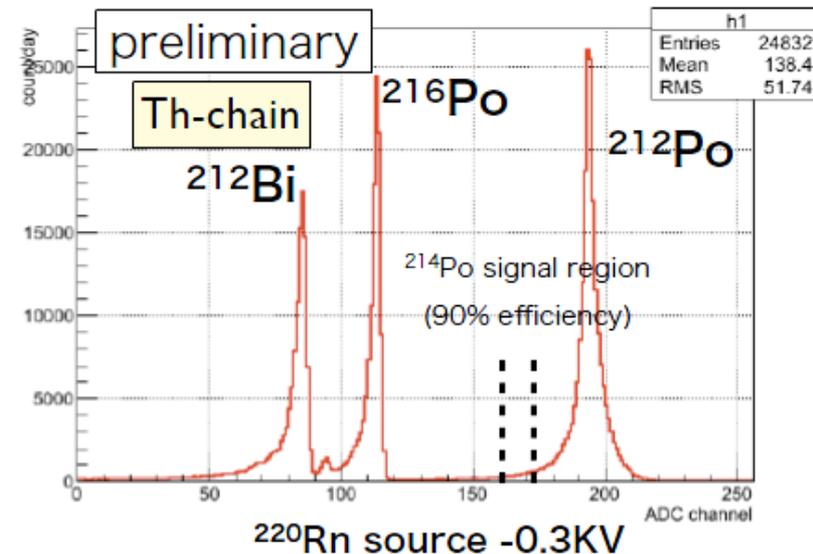
80L検出器
No.1

Energy spectrum

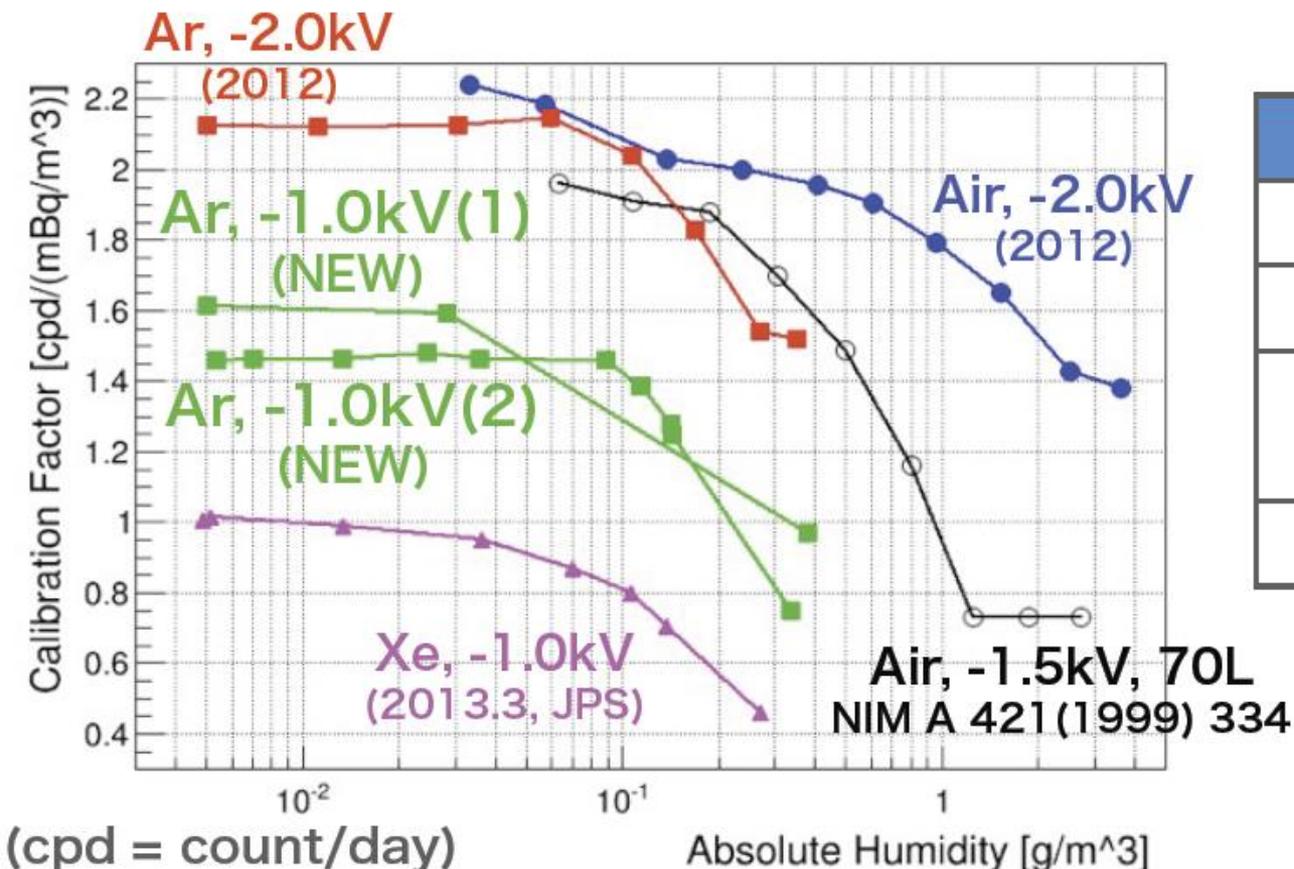


purified Ar 1atm
 ^{222}Rn source (U-Chain)
 : PYLON RNC ^{226}Ra
 ^{220}Rn source (Th-Chain)
 : Lantern mantle

- ✓ Only ^{214}Po signal region is used.
- Higher efficiency than ^{218}Po .
- Lower ^{232}Th -Chain BG in signal region.
- ^{218}Po signals overlap ^{212}Bi signal.



$$\text{Calibration Factor [(count/day)(mBq/m}^3\text{)]} = \frac{214\text{Po count rate [count/day]}}{222\text{Rn concentration [mBq/m}^3\text{]}}$$



	CF
Air, -2.0kV	~2.2
Ar, -2.0kV	~2.2
Ar, -1.0kV (NEW)	~1.5
Xe, -1.0kV	~0.9

Absolute Humidity
= 0.06g/m³

- 論文執筆中
- 更なる改良に取り組む

- ・ Ar, -1.0kVの再現性を確認中
- ・ 検出器の基本特性がほぼ得られた

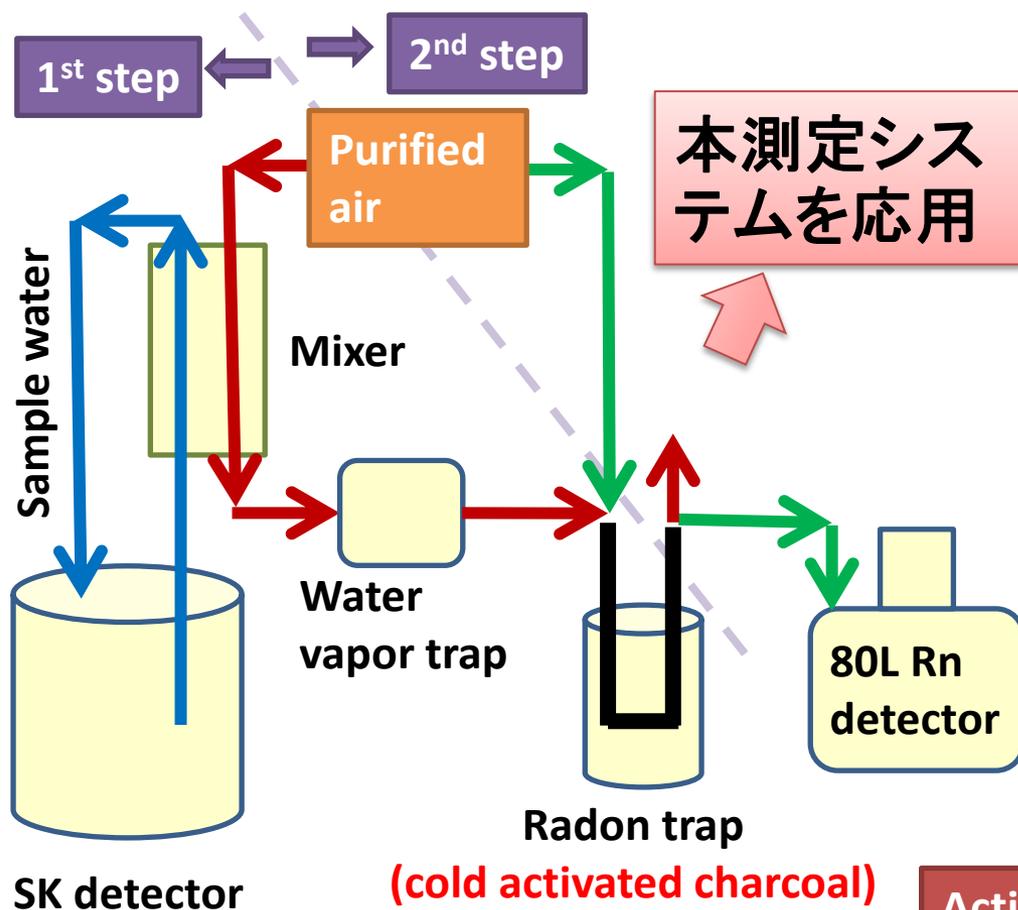
2. 純水中ラジウム測定

- 純水は多くの地下実験で必要
- 特にラジウム-226の除去・測定が重要
 - 半減期1600年
 - ラドン-222の親核種
- 本新学術では、複数の高感度測定に取り組む
 - 海水中放射能測定技術(井上氏の講演)を高感度化
 - Super-Kamiokandeでの水中ラドン濃度測定を応用
 - 関谷 et al. + C01班

Rn measurement in SK water

Developed by
S. Tasaka et al.

1. Radon in **sample water** is extracted by the Mixer into **air**. The **air** go through the Radon trap. Radon in **air** will be trapped.
2. Extract radon by baking the radon trap, then the radon will be supplied into Rn detector by **air**.



U字管に活性炭(ダイヤソープG4-5)24gを入れて、 -90°C に冷却し、ラドン濃度約 $100\text{Bq}/\text{m}^3$ 、露点温度 -55°C の空気を、流量毎分2リットルで流して、ラドン吸着率を試験した。その結果、ラドン吸着率0.99以上を36時間維持した。図6は活性炭のラドン吸着率の測定結果を示す。

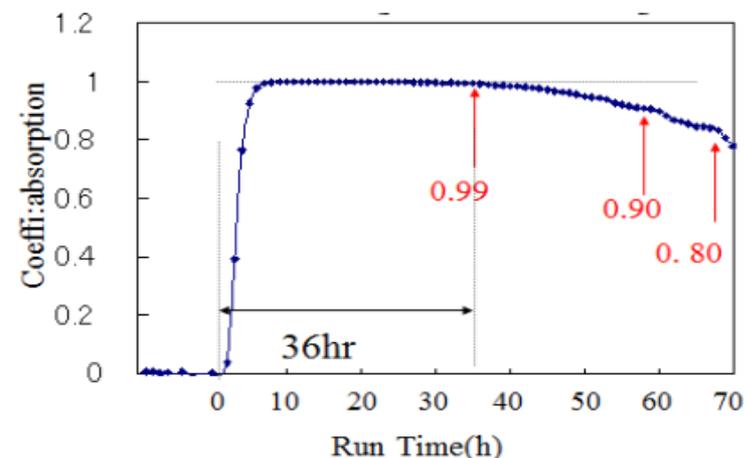


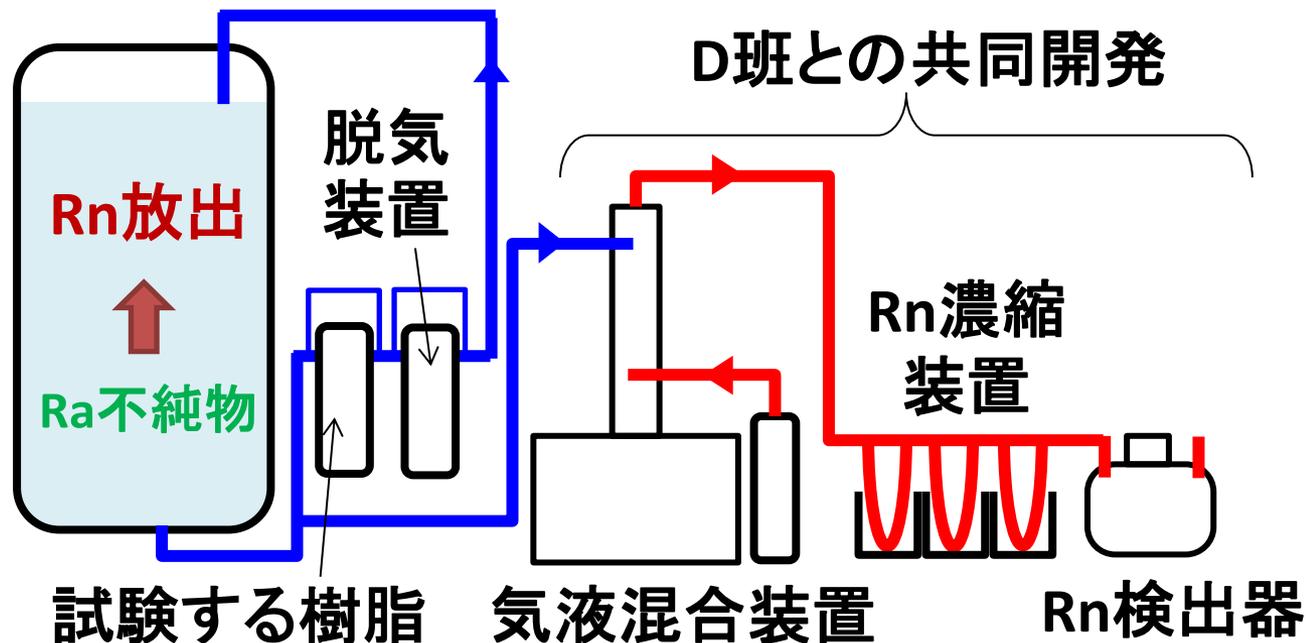
図6 活性炭のラドン吸着率の測定結果

Activated charcoal trap works well for Rn in air

低BG Gd溶液 R&Dシステム (C01班)

Gd化合物溶液
1m³タンク

— 液ライン — ガスライン



D班と共同開発する極低レベルRa検出技術:

- ・0.3mBq/kg(Gd)という低レベルRa不純物測定が可能。
- ・放射性不純物除去樹脂(企業と共同開発)の試験を行い、要求を満たす樹脂の開発を行っていく。

低BG Gd溶液 R&Dシステム (C01班)

液ライン



ガスライン



3. 検出器素材の精製

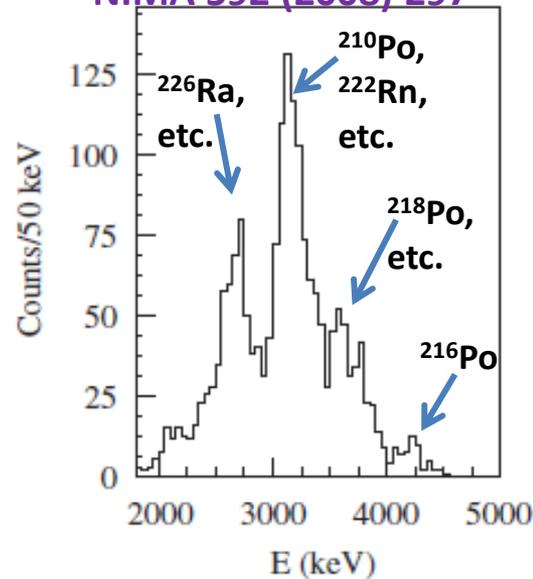
- 検出器本体の放射性不純物削減は必須
- 例: NaI(Tl)シンチレータによるWIMPsの探索
 - KamLAND-PICO, PICO-LON (伏見 et al.)
 - DAMA/LIBRAの結果を検証できるNaI(Tl)が無い
 - U, Th, Kの純度が不十分
- 日本の技術で高純度なNaI(Tl)の製作を試みる
 - U, Th, Kの除去、特に ^{210}Pb の除去
 - I.S.C. Lab.により開発
 - 原料の選別と純化、坩堝の選別、周辺環境の整備
- CANDLES実験への応用も試みる
 - CaF_2 , CaCl_2 、梅原 et al.

Present result

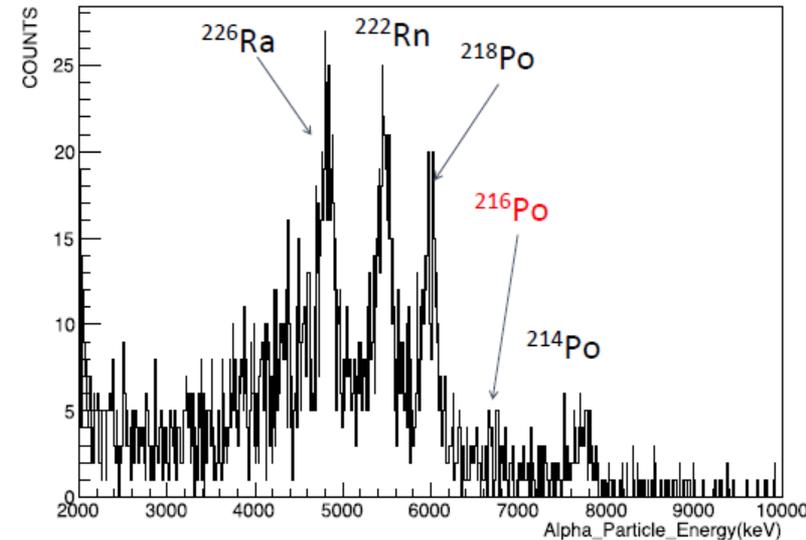
K.Fushimi et al., [arXiv:1407.3542](https://arxiv.org/abs/1407.3542) [astro-ph.IM]

	DAMA	DM-Ice	Ingot 23	Goal of PICO-LON
^{nat}K (ppb)	<20	660	Not yet	<20
^{232}Th (ppt)	0.5-0.7	2.5	3.3 ± 2.0	<1
^{238}U (ppt)	0.7-10	1.4	5.4 ± 0.9	<1
^{210}Pb ($\mu\text{Bq/kg}$)	5-30	1470	58 ± 26	<5~10

a DAMA/LIBRA: Fig. 8,
NIMA 592 (2008) 297



Ingot 23 results (26 days live time)



- U-chain:
1 ppt = 12.3 $\mu\text{Bq/kg}$
- Th-chain:
1 ppt = 4.0 $\mu\text{Bq/kg}$
- ^{210}Pb :
1 ppt = 2.5 kBq/kg

現状と今後

- 水溶液中の ^{210}Pb の除去法を確立した
- ^{226}Ra 除去処理をしたNaI(Tl)を製作中
 - 9月に完成、バックグラウンドの測定予定
 - 測定は神岡のKamLANDエリア
- 純度向上の確認後、KamLAND-PICOへ応用
 - 1トンのNaI(Tl)検出器
 - DAMA/LIBRAの検証 & WIMPsの発見

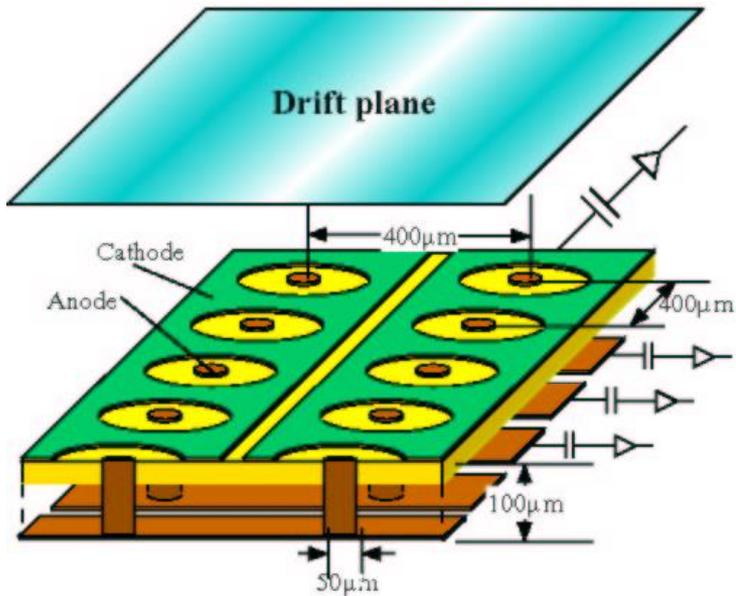
4. 表面アルファ測定

- 検出器表面でのアルファ崩壊を低減したい
 - 例: ミニバルーン用フィルム(KamLAND)、銅(XMASS)
- 高感度な測定が必要
- 本研究では、複数の測定技術開発に取り組む
 - 小林、池田、et al. (+B02班)
 - 市販品の応用・改造
 - 感度: $0.0005 \sim 0.001$ alpha/cm²/hr (~10 hours)
 - 半導体基盤用 → より厚みのある素材に対応できるか?
 - μ -PICを用いた装置
 - B02班で利用している、ガス飛跡検出技術を応用する。

表面 α

μ -PIC

Micro Pixel Chamber



市販製品



UltraLo-1800

Next Generation Alpha Particle Counter

Advanced Alpha Particle Emission Metrology

MATERIALS SCREENING
Monitor your ultra low alpha materials ($0.001 \alpha/\text{cm}^2/\text{hr}$) with accurate measurements in just one day.

QUALITY CONTROL
Ensure that your materials satisfy your design requirements by using the most sensitive instrument available.

- Dramatically reduced counting times. Count ULA samples in hours or days, not weeks or months.
- Repeatable and reliable measurement results.
- Advanced sample analysis. Energy information allows for the identification of isotopes on sample surfaces.
- Robust data management. Easily access and review both current and historical measurement data.



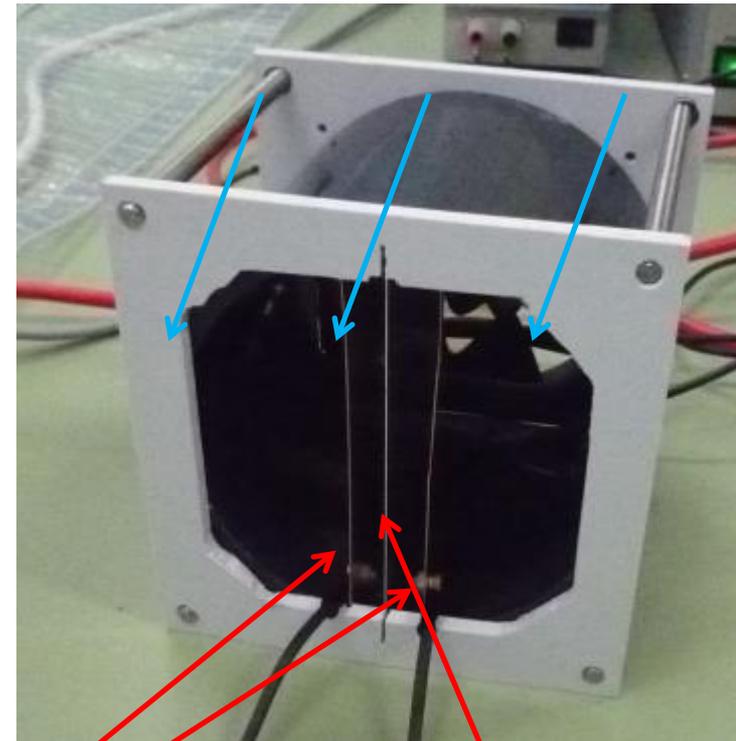
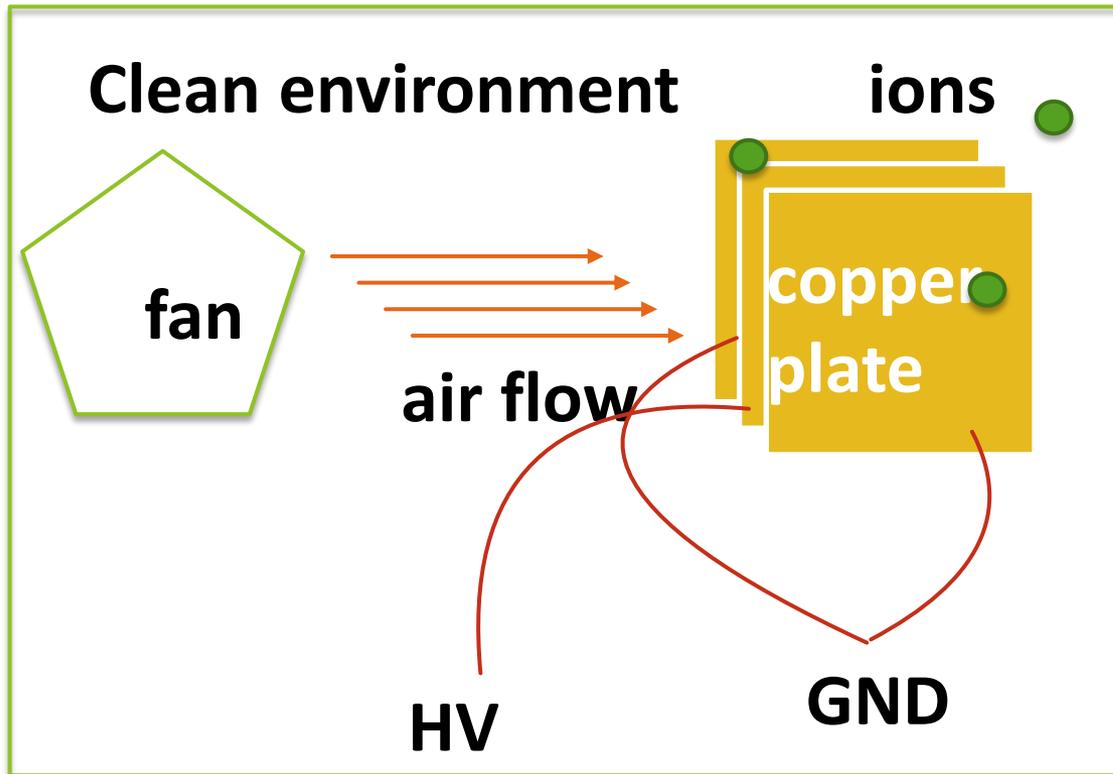
5. 環境中ラドン娘核の低減

- 検出器の組み立て中等に、検出器表面に付着するラドン娘核種を減らしたい。
 - 鉛-210 (半減期22年)

- 静電場で環境中のラドン娘核を捕集できるか？
 - 小林 et al.
 - “Mobility distribution of Rn-222 daughter small ions in laboratory air”, J. of Geophys. Research 77 (1972) 5876

試験システム

- まずは、環境中の ^{214}Po が静電場で捕集できるかどうか確認する



GND Cu
plate

voltage applied Cu
plate (^{214}Po の捕集)

まとめ

- 地下での素核実験では、共通のBG源が多い。
- これまでは個々の研究グループでの研究開発
- **BGの削減は実験感度の向上には不可欠。**
- **本新学術では、広い範囲での連携による、極低BG技術の早期実現を目指す。**

- 測定の高感度化、不純物の除去
- スクリーニングシステムの構築
- データベースの整備

